

## 16 食料供給力強化に貢献する積雪寒冷地の農業生産基盤の整備・保安全管理に関する研究

研究期間：平成 28 年度～令和 3 年度

プログラムリーダー：寒地農業基盤研究グループ長 川口清美

研究担当グループ：寒地農業基盤研究グループ（資源保全チーム、水利基盤チーム）

### 1. 研究の必要性

世界人口の増加、食生活の変化、異常気象の頻発等により世界の食料需給関係は今後逼迫する方向にある。日本の食料自給率は現状カロリーベースで 37%（令和 2 年度）と先進国中最低であり、新たな「食料・農業・農村基本計画（令和 2 年 3 月 31 日閣議決定）」では令和 12 年度までに 45%へ向上させることが目標であるが、食料生産の担い手の減少と高齢化、耕作放棄地の発生などにより国内の食料供給力の低下が懸念されている。このような状況のもと、イノベーションによる農業の振興（新技術を活用した生産基盤の整備）が急務となっており、国内の重要な食料生産地である北海道においても大規模な営農や積雪寒冷地といった地域条件とその変化に適合する農業生産基盤の整備・保安全管理技術の開発が求められている。

### 2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、近年、北海道で進められている圃場の大区画化やこれに伴う灌漑排水施設の整備に必要な整備土工技術や灌漑排水技術、積雪寒冷地にある農業水利施設の長寿命化や大規模災害時の防災・減災を目的とした農業水利施設の管理技術、大規模な酪農地帯や水田地帯における周辺環境との調和に配慮した灌漑排水技術を開発することを研究の範囲として、以下の達成目標を設定した。

- (1) 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発
- (2) 営農の変化と気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発
- (3) 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

これら(1)、(2)、(3)について、令和 3 年度までに実施した。

### 3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、第 4 期中長期期間中（平成 28 年度～令和 3 年度）に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

#### (1) 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

##### 1) 積雪寒冷地における大区画圃場の整備技術に関する研究

圃場の大区画化整備において、作物生産に適する土壌物理性が施工に伴い悪化することを抑制する技術を開発するため、国営事業実施地区において、施工時の土壌水分状態と施工前後の土壌物理性の変化を調査・分析した。圃場の表土は軽埴土であり、下層土は低位泥炭土及び軽埴土である。

調査の結果、施工後に作物生産に適した土壌物理性を確保するための指標として表土の飽和透水係数に着目し、これを満足する pF 値が 2.0 以上（粘土分が少ない圃場）、2.7 以上（粘土分が多い圃場）となるまで土壌を乾燥させてから施工を行うことが好ましいことを示した。また、pF 値と現地での地耐力の関係から、工事現場で地耐力を測定し簡易に施工開始の判断を行う方法を開発した。

##### 2) 大区画水田圃場における地下水位制御システムの高度利用に関する研究

地下水位制御システムが整備された大区画圃場において、転作物栽培における給排水ムラの実態把握と要因の解明を行い、地下灌漑の実施を可能とする圃場条件を検討するとともに効果的な利用技術を提案した。硬盤層を有し地下水位が上昇しにくい圃場の作土への給水には、有材心土破碎の施工が有効であることを確認した。また、水稻移植栽培圃場において、地下灌漑による水稻への水分供給と農業用機械に必要な地耐力の確保が両立できることを確認した。併せて、地下灌漑によるメタン及び一酸化二窒素の排出量の変化について評価した。

### 3) 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究（このうち、大区画水田の高精度な水管理技術の開発と用水量の解明）

水田圃場の大区画化整備の進捗に伴い、地下水水位制御システムの導入、圃場規模や水路形式の変化、水稻直播栽培の拡大が進み、灌漑用水量の変化や水管理への影響の解明とその対応が求められる。このため、整備前後で営農条件が変化した圃場における用水量及び水管理の特性を調査・分析し、用水需要の変化に対応した水管理技術を提案した。

整備後に乾田直播栽培を行った圃場では、供給水量の大幅な増加が見られたが、泥炭を基盤とする圃場においては、栽培方式にかかわらず取水量に大きな差は見られなかった。また、用水路がパイプライン化された圃場では、取水時間帯が集中するなど、整備による取水管理の変化が見られた。施設管理者が配水管理を行う際は、これらの変化について十分留意する必要がある。

## (2) 営農の変化や気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発

### 1) 積雪寒冷地における農業水利施設の長寿命化に関する研究

積雪寒冷地における農業水利施設の長寿命化に関する研究は、①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発を目的とした。

①では、コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明、非破壊及び微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発を行った。積雪寒冷地において長期間供用されたコンクリート施設では圧縮強度や相対動弾性係数などの力学的特性の低下を伴う著しい劣化を生じる場合があること、表面近傍における凍害とカルシウム成分の溶脱を伴う摩耗とが複合的に発生する可能性があることを明らかにした。また、開水路において、超音波伝播速度と静弾性係数との関係を整理し、超音波法、機械インピーダンス法の適用性について考察するとともに、金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜試験を行い、最大引抜荷重と超音波伝播速度との関係性を明らかにした。

②では、農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価、凍害・摩耗の複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強工法および再補修・高耐久化技術ならびに積雪寒冷地における農業水利施設の維持管理技術の開発を行った。補修後の開水路を対象とした含水率の調査および同位置から採取したコアの凍結融解試験等から、母材コンクリートの健全性や含水状態を把握することが重要であることを明らかにするとともに、表面保護工法適用の留意点をまとめた。モルタル材および無機系表面被覆材に凍結融解を作用させ、その後に促進摩耗試験を行い、凍結融解作用が無機系材料の耐摩耗性に影響を与えるメカニズムについて考察したところ、凍結融解作用は、スケーリングを生じさせ、またひび割れを蓄積させることにより、耐摩耗性の低下を促すことが確認された。一方、複合劣化に対して高耐久性を有する「超高耐久性断面修復・表面被覆技術」を開発し、その耐久性を評価するため凍結融解試験を行った結果、優れた耐凍害性を有していること、耐用年数は予定供用期間を大きく上回ることを確認した。また、今後は補修された農業水利施設がさらに増加し、維持管理、ストックマネジメントの対象の多くが補修された施設になることを踏まえ、補修工事後の施設マネジメントサイクルについて考察した。

### 2) 大規模災害時における長大な農業水利施設の災害対応計画策定技術の開発

大規模地震災害時には、長大な農業用水路における正確な被害情報が得られない場合がある。そのような場合でも、施設管理者が取水ゲートを閉鎖すべきか否かを適切に判断できる意思決定方法を期待値原理に基づき検証した。その結果、大規模地震災害時の不確実な被害情報を判断基準とせず、幹線水路での被害の発生に対応可能な管理体制が、その時点で構築できるか否かを判断基準とすれば良いことがわかった。

また、平成28年度から3カ年で行った、大規模災害に備えた災害対応計画策定技術の研究の結果を、農業水利施設管理者のための災害対応計画策定マニュアル案としてとりまとめた。

引き続き、土地改良区（施設管理者）による災害対応計画の策定あるいは見直し作業に活用されるよう、普及を進める。

## (3) 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

### 1) 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究（このうち、周辺水文環境と調和した灌

### 概排水技術の構築

水田圃場の大区画化やパイプライン化等に伴って、農区やこれより広域な灌漑区域における流出機構が変化し、地域の水循環や水文環境に影響が生じることが予想された。そのため、圃場の整備前後における灌漑区域の水収支及び水質の変化を明らかにし、水田地帯における周辺水文環境と調和した新たな灌漑排水技術を提案した。

圃場整備により小用水路が開水路からパイプラインに変更された農区では、配水管理用水が減少し、圃場排水が希釈されずに負荷物質が高濃度のまま流下するおそれがある。調査地区を対象に水質タンクモデルを作成し、パイプライン化や用水系統の再編が行われた場合における幹線排水路の流量および水質濃度への影響をシミュレートした結果、集水域への流入水量が約 3 割減少し、灌漑初期では幹線排水路の水質濃度が上昇する結果となった。圃場整備後も排水路や河跡湖等の水質を保全するためには、希釈水の確保およびその通水施設の設置等の対策が必要と考えられた。

### 2) 大規模酪農地帯における効率的なふん尿スラリー調整技術の開発に関する研究

家畜ふん尿を好気性発酵により腐熟させる肥培灌漑施設の効率的な運転管理方法を明らかにすることを目的に、室内試験及び肥培灌漑施設の現地調査を行った。

現地調査では、曝気を行う調整槽の形状と容量が異なる 5 カ所の肥培灌漑施設で運転状況を比較した。曝気ポンプ稼働時間、ふん尿スラリーの水理的滞留日数等、運転方法は施設によって大きく異なっていた。調整槽の固形物単位量当たりの総曝気量が大きいほど調整液の pH は高いが、総曝気量が大きい施設でも腐熟の簡易判定目安である pH7.8~8.5 の下限値程度までしか到達しておらず、曝気量不足が示唆された。その理由の一つが調整槽開口部から地上部への泡の溢流を防止するためであることがわかった。調整槽内の泡発生状況、溢流状況を調査した結果、消泡機停止時に液面が上昇すると液面上の泡も大きく上昇し、調整層内天端に達した泡が開口部方向に押し出されるためと考えられた。室内実験においては、液温が高い方が有機物分解量が大きくなることを確認した。また、酸化還元電位 (ORP) でふん尿スラリーの腐熟を評価する連続投入試験の結果、今回使用した実験装置では、液温 30℃ で単位易分解性有機物量当たりの日曝気量が  $30\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  程度以上あれば ORP をプラスに維持できることが明らかとなった。一方、臭気指数を用いて腐熟を評価した結果、ORP をプラスに維持できなくても臭気が低下するまで腐熟することが示唆された。また、曝気時間が同じ場合は、間欠曝気より連続曝気が臭気の低減効果が大きいことがわかった。以上の研究成果を基に現地の肥培灌漑施設で検証を行い、泡溢流を防止しながら施設を運転するための設定手順のフロー図を作成するなど、肥培灌漑施設を効率的に運転する方法を提示した。

### 3) 大規模酪農地帯の水質環境評価技術に関する研究

北海道東部の大規模酪農地帯では、国営環境保全型かんがい排水事業が実施され、事業実施状況が流域の水質環境に与える影響を定量化することが求められている。そのため、SWAT (Soil and Water Assessment Tool) による水質解析により、大規模酪農地帯の水質環境改善手法を提案することを目的とした。

現地観測により、A・B 川流域における河川水質と土地利用・営農状況の関係、支川流域における河川水質状況を明らかにするとともに、SWAT による水質解析により、観測値を再現するモデルパラメータを設定し、過去、現在、近未来の三時期の営農状況の変化に伴う河川水質への影響をシミュレーションした。

河川水質の連続観測から、酪農の営農状況が異なる支川流域の水質変動特性を明らかにし、SWAT のモデルパラメータの同定・検証に利用するデータセットを取得した。SWAT による水質解析では、牧草地および飼料用トウモロコシの作付、施肥、収穫などの管理スケジュールを設定した。作物生長過程を推定し、単収の実測値を再現することにより、地表および土壌面における水・栄養塩物質の流出過程が経時的に表現され、支川下流地点での窒素負荷量の変動を良好に再現した。過去、現在、近未来の三時期の営農状況を想定したシミュレーションの結果、牧草地から飼料用トウモロコシへの転作により、窒素負荷量の表面流出が増加することが示され、転作農地とその周辺に肥培かんがいによるスラリー状の液肥散布、緩衝帯としての土砂かん止林、沈砂池としての排水調整池を配置することで表面流出、側方流出、地下流出が減少することが示された。

## RESEARCH ON DEVELOPMENT AND CONSERVATION MANAGEMENT OF AGRICULTURAL PRODUCTION INFRASTRUCTURE IN SNOWY AND COLD REGIONS THAT CONTRIBUTES TO STRENGTHENING FOOD SUPPLY

**Research Period** : FY2016-2021

**Program Leader** : Director of Cold-Region Agricultural Development Research Group  
KAWAGUCHI Kiyomi

**Research Group** : Cold-Region Agricultural Development Research Group (Rural Resources Conservation, Irrigation and Drainage Facilities )

**Abstract** : The tight balance between global supply and demand of food is expected to continue. In Japan, there is concern over a decline in food supply capability resulted from decrease in and aging of core-farmers. In Hokkaido, a major food-producing region of Japan, there is a need for the development of agricultural infrastructure and of conservation and management technologies that suit the local conditions, such as a large-scale farming and a cold, snowy climate. Each objective, and major findings of the surveys were implemented by FY2021.

**Objective (1)** : The development of technologies for the efficient consolidation and advanced management of large-scale fields to respond to the expansion of management scale

In order to develop a technology to control the deterioration of soil physical properties suitable for crop production in the construction of large plots, we investigated and analyzed the soil moisture conditions at the time of construction and the changes in soil physical properties before and after construction. The results of the investigation focused on the saturated hydraulic conductivity of the topsoil as an indicator for ensuring soil physical properties after construction, and indicated that it is preferable to dry the soil until the pF satisfying this index is 2.0 or higher (in fields with low clay content) or 2.7 or higher (in fields with high clay content) before construction.

In a large paddy field with a groundwater control system, we investigated the actual conditions and factors of uneven water supply and drainage in shifting crop cultivation, and proposed effective utilization techniques for underground irrigation. We confirmed that the use of subsoil breaking with rice husk filler is effective in supplying water to crop soil in fields with hard tillage layers where the groundwater table does not easily rise. In addition, changes in methane and dinitrogen monoxide emissions due to subsurface irrigation were evaluated.

With the progress in the development of large paddy field plots, the introduction of groundwater level control systems, changes in field size and canal type, and the expansion of direct seeding of rice paddies, changes in irrigation water quantity and its effects on water management need to be clarified and addressed. To this end, we investigated and analyzed the characteristics of irrigation water quantity and water management in fields where farming conditions changed before and after maintenance, and proposed water management techniques that respond to changes in demand for irrigation water.

**Objective (2)** : The development of technologies for the maintenance and renewal of agricultural irrigation facilities considering changes in farming and climate

The objectives of this research on extending the service life of agricultural water facilities in snowy and cold regions are ① to develop diagnostic and evaluation methods for the combined deterioration of agricultural water facilities and ② to develop repair and reinforcement methods and evaluation methods for agricultural water facilities in snowy and cold regions. In ①, we clarified the combined deterioration mechanisms of frost damage and abrasion in concrete and abrasion and corrosion in steel members, and



developed a combined deterioration diagnosis technique using nondestructive and microdestructive investigation methods. It was found that concrete facilities used for long periods of time in snowy and cold regions may experience significant deterioration with a decrease in mechanical properties such as compressive strength and relative dynamic modulus of elasticity, and that frost damage near the surface and abrasion with dissolution of calcium components may occur in combination. In ②, we evaluated the durability of repair and reinforcement methods for agricultural water facilities, and developed repair and reinforcement methods with high durability against combined deterioration caused by frost damage and abrasion, as well as technologies for rehabilitation and high durability, and maintenance management of agricultural water facilities in snowy and cold regions.

At a large-scale irrigation canal, an appropriate decision-making method for the facility administrator to close the water intake gate during a large-scale earthquake disaster was investigated based on the expected value principle. We created a draft of a manual for formulating disaster-response planning for administrators of irrigation facilities.

Objective (3) : The development of irrigation and drainage technologies that are in harmony with the environment in large-scale farming areas

As paddy fields were developed into large plots and pipelined, the runoff mechanism in agricultural districts and large irrigated areas changed, which was expected to affect the local water cycle and the hydrological environment. Therefore, we clarified the changes in water balance and water quality in irrigated areas before and after field development, and proposed a new irrigation and drainage technology in harmony with the surrounding hydrological environment in paddy field areas. It was considered necessary to take measures such as securing dilution water and installing facilities for its passage in order to conserve water quality in the drainage canals and river trace lakes even after field improvement.

A laboratory test and a field survey of slurry irrigation facilities were conducted to clarify efficient operation and management methods for slurry irrigation facilities where livestock manure is allowed to rot by aerobic fermentation. In the field survey, the operating conditions of five slurry irrigation facilities with different shapes and capacities of aeration tanks were compared. The higher the total aeration volume per unit volume of solids in the control tank, the higher the pH of the control solution. However, All facilities suggested a lack of aeration. One of the reasons for this was found to be to prevent foam from overflowing from the opening of the aeration tank to the ground, and countermeasures were studied. In laboratory tests, the liquid temperature and amount of aeration that can maintain positive ORP values were shown, as well as the relationship with odor.

In a large dairy farming area in Hokkaido, an environmentally friendly irrigation and drainage project is being implemented, and there is a need to quantify the impact of the project on the water quality environment in the watershed. Therefore, we proposed a method to improve the water quality environment through the project by analyzing the water quality using SWAT (Soil and Water Assessment Tool). The simulation results, which assumed past, present, and near-future farming conditions, indicated that the surface runoff of nitrogen load would increase due to the conversion of pastureland to forage corn. The results showed that the surface runoff, lateral runoff, and subsurface runoff were reduced by the placement of slurry fertilizer application in and around shifting cropland, sediment control ponds as sedimentation basins, and sedimentation zones.

Key words: large-scale fields, soil physical properties, sub-irrigation, direct seeding culture of paddy rice, technologies for maintenance and renewal, complex deterioration, irrigation canal, disaster response plan, slurry irrigation, aerobic fermentation, water quality preservation

## 16.1 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

### 16.1.1 積雪寒冷地における大区画圃場の整備技術に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（資源保全チーム）

研究担当者：桑原淳、松田俊之、横濱充宏、中山博敬、清水真理子  
横川仁伸、大友秀文、新津由紀

#### 【要旨】

圃場の大区画化整備において、作物生産に適する土壌物理性が施工に伴い悪化することを抑制する技術を開発するために、施工時の土壌水分状態と施工前後の土壌物理性の変化を調査した。調査は、下層が低位泥炭土である美唄圃場と粘性土である美唄茶志内圃場で行った。表土（0～15cm（以下括弧書きの cm 表示はすべて地表面下を示す））について、美唄圃場では、土壌物理性の悪化を抑制するためには、土壌水分張力（以下、pF）が 2.0 以上まで乾燥した状態で施工する必要があることを明らかにした。pF2.0 に対応する表土（0～15cm）の地耐力は 0.6MPa であったため、降雨後に表土（0～15cm）の地耐力が 0.6MPa 以上まで回復したことを確認してから施工を開始する必要があると考えられる。美唄茶志内圃場では、土壌物理性の悪化を抑制するためには、pF が 2.7 以上まで乾燥した状態で施工する必要があることを明らかにした。pF2.7 に対応する表土（0～15cm）の地耐力は 0.8MPa であったため、降雨後に表土（0～15cm）の地耐力が 0.8MPa 以上まで回復してから施工を開始する必要があると考えられる。このように美唄茶志内圃場では、施工に伴う土壌物理性の悪化を抑制するためには、美唄圃場と比較してより表土が乾燥した時に施工する必要があることが分かった。これは、美唄茶志内圃場の表土は、粘土分の多い細粒な土壌であるため、練り返しを受け土壌構造が破壊された時に表土の物理性悪化が生じやすいためと考えられる。よって、施工開始の判断基準は粘土の重量割合別に設定する必要がある。得られた施工開始の判断基準と降雨後の表土（0～15cm）の水分調査結果から、施工開始までの日数の目安を検証した。美唄圃場では、表土（0～15cm）が pF2.0 まで乾燥するには、降雨量が 5～10mm の場合は降雨後 1 日半から 2 日程度、降雨量 30mm 程度の場合は降雨後 4 日から 5 日程度であった。美唄茶志内圃場では、表土（0～15cm）が pF2.7 まで乾燥するには、降雨量が 10～20mm の場合は降雨後 4 日、降雨量 30mm 程度の場合は降雨後 5 日程度であった。また、下層が泥炭土である美唄圃場では、下層土の切盛り直後の地耐力は、泥炭土が湿潤な箇所（pF1.8 未満）で超湿地ブルドーザの走行に必要な 0.20MPa を下回る場合があった。このことから、下層土の切盛り後に湿潤な泥炭土（pF1.8 未満）が表面に出現する箇所では、整地作業に使用する施工機械は超湿地ブルドーザよりさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザの使用が望ましいと考えられる。

キーワード：大区画圃場、土壌物理性、土壌水分、地耐力、施工機械

#### 1. はじめに

北海道の水田地帯では、農家戸数の減少に伴い、戸当たり経営面積が拡大している<sup>1)</sup>。農作業の効率化、省力化のため、大型農業機械の利点を活かせる農業基盤の整備が必要となっており、圃場を大区画化する事業が進められている。整備前の各圃場の基盤標高は異なっていることが多いため、複数の区画を合わせて 1 区画にするためには、図-1 のように、表土をはぎ、異なる標高の下層土を切土、盛土により均平にし、表土を戻すという一連の作業を行う必要がある。

北海道の水田では、下層が泥炭土である割合は 19%程度であり、また排水不良の土壌に分類される灰色台地土

とグライ台地土である割合は 10%程度である<sup>2)</sup>。下層がこうした土壌である施工現場では、下層土の上面が降雨により湿潤になることで、施工工程に制約が発生することや、施工機械による攪拌、練り返しによる土壌物理性の悪化が生じる恐れがある。このため、天候の急変によって、はいだ表土やむき出しになった下層土の上面が降雨にさらされることのないよう、表土はぎから表土戻しまでの作業をその日のうちに終わらせる大きさに区域を分割して施工する対策や、超湿地ブルドーザを使用し接地圧を小さくして土壌の練り返しを抑制する対策が行われている。

土壌物理性として、施工前後における表土の排水性の

変化に着目し、排水性に関わる固相率および飽和透水係数を主に検証した。転作田では、土壌の水はけが良いことが作物の生育に必要な条件であり、土壌の排水性を良好に保持しながら施工する技術は、今後さらに重要になるものと考えられる。しかし、現場では降雨後の土壌の状態を経験的に判断し施工を開始した結果、土壌が過度に湿潤な状態であることもある。このため、施工開始を判断する定量的な基準が必要と考えられるが、こうした報告事例（北川ら<sup>3)</sup>）は少ない。

本研究は、施工に伴う土壌物理性の悪化を抑制するために必要な土壌診断の項目と基準値を明らかにすることを目的とする。このため、下層が泥炭土である8筆の大区画圃場（美唄圃場）と下層が粘性土である6筆の大区画圃場（美唄茶志内圃場）において、表土と下層土の施工前後の土壌物理性の変化について調査を行った。

## 2. 方法

### 2.1 調査地の概要

調査は、表-1に示す14筆の大区画圃場で行った。各圃場ともに施工前は数筆の小区画であったものが、施工により1.2ha程度の1筆の大区画になっている。

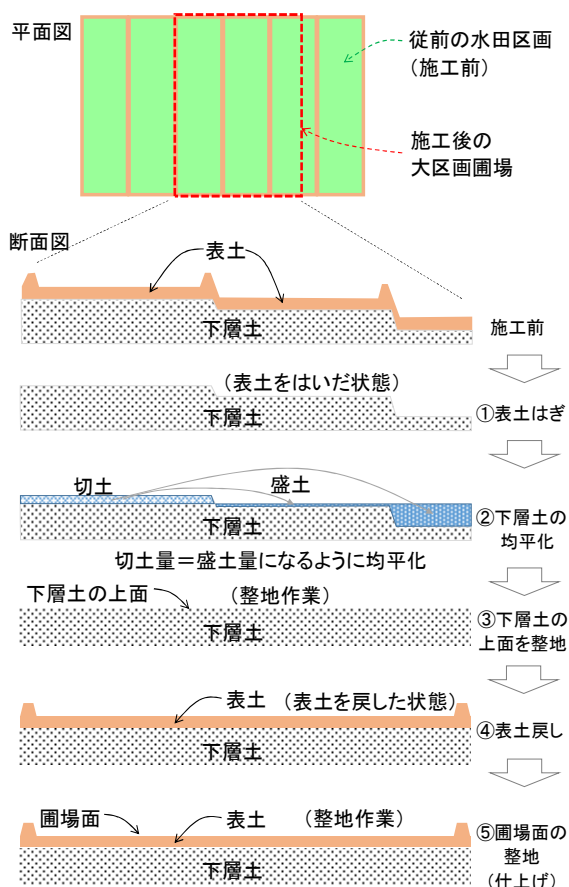


図-1 水田の大区画化施工のイメージ

いずれの圃場も、表土は約25~30cm厚さの鈹質土である。土壌断面調査を行った結果、施工前の表土(0~15cm)は作土層であり、表土(15~30cm)はやや締め固まった耕盤層であった。下層は、A~Hの8圃場ではヨシを主体とした低位泥炭土であり、I~Nの6圃場では粘性土であった。美唄市では、農耕地の土壌が泥炭土である圃場の内、低位泥炭土に分類される圃場は47%を占め、面積にすると3,000ha程度になる<sup>4)</sup>。A~H圃場の下層土もこの地域に広くみられる泥炭土であった。施工は、1)表土はぎ、2)切盛りによる下層土上面の均平化、3)表土戻しの順に行われた。施工は、6月~8月の夏期に行われた。

### 2.2 調査内容

調査内容は、土壌調査、施工時の土壌水分調査および降雨後の土壌水分調査である。土壌調査および施工時の土壌水分調査は、美唄圃場のA~G圃場、美唄茶志内圃場のI~N圃場で各圃場6~8地点で行った。降雨後の土壌水分調査は、美唄圃場のC、H圃場、美唄茶志内圃場のL、M圃場で各圃場6~15地点で行った。

土壌調査は土壌分析、土壌硬度および地耐力の測定であり、施工前(表土はぎ前)、施工中(切盛土後)、施工後(表土戻し後)および施工1年後の計4回行った。土壌分析(表-2)に供する試料について、圃場面下75cmまでをおよそ15cm刻みで5層に分けて、各層から攪乱試料を1試料採取し、非破壊試料を100cc採土管で3試料採取した。施工中(切盛土後)調査時には、表土はぎが

表-1 調査圃場の概要

圃場名	土性または土壌分類		施工年月
	表土	基盤	
美唄圃場			
A	シルト質埴土	泥炭土	2016年6月
B	軽埴土	泥炭土	2017年6月
C	軽埴土	泥炭土	2017年7月
D	軽埴土	泥炭土	2018年7月
E	軽埴土	泥炭土	2018年8月
F	軽埴土	泥炭土	2019年6月
G	軽埴土	泥炭土	2019年7月
H	軽埴土	泥炭土	2020年7月
美唄茶志内圃場			
I	軽埴土	軽埴土	2017年7月
J	軽埴土	軽埴土	2019年8月
K	軽埴土	軽埴土	2020年6月
L	軽埴土	軽埴土	2020年6月
M	軽埴土	軽埴土	2020年6月
N	軽埴土	軽埴土	2020年6月

施工され下層土が地表面に露出していることから、露出した下層土表面を 0cm として深さ 30cm までの下層土を 10cm 刻みで 3 層に分けて採取した。地耐力の測定は、土壌試料の採取地点近傍で深さ 1m までをコーンペネトrometerにより 3 反復で行った。

施工時の土壌水分調査は以下の通り行った。施工前日に圃場面下 45cm までを 15cm 刻みで 3 層に分けて表土および下層土を採取した。採取した土壌試料の含水比を分析し、施工前の調査時に作成した水分特性曲線から施工時の pF を算出した。なお、施工前日に試料採取ができなかった圃場では、施工後の調査を表土戻し直後に行い、採取した表土および下層土の含水比を測定してから、得られた含水比と施工前の調査時に作成した水分特性曲線から施工時の pF を算出した。

降雨後の土壌水分調査は、施工前に降雨 1 日後から降雨 2~5 日後までの間、土壌試料を表土 (0~15cm) から毎日採取し、室内で含水比を計測した。降雨後の表土の pF は、各圃場の調査箇所の含水比の平均値と事前の調査で作成した水分特性曲線から算出した。日降雨量のデータは、気象庁<sup>5)</sup>の美唄観測所におけるアメダスデータから得た。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 施工前後の表土の物理性の変化

各圃場の施工前における表土 (0~30cm) の粒度分布を表-3 に示す。古木らは、圃場整備後の透水性の経年変化について、水稻 1 作目に回復した場合と水稻 3 作目でも回復しない場合など、土性の違いで差がみられたと報告している<sup>6)</sup>。このことから、表土の物理性の変化は土性によって異なることが考えられるため、各圃場の粒度分布を検証した。

美唄圃場の土性は、表-1 に示したように A 圃場のみシルト質粘土であり、他の圃場では軽粘土に該当した。これは、A 圃場ではシルトの重量割合が 45%を超えたためであるが、表-3 に示すように他の圃場と比較して粒度分布に大きな違いはなく、調査圃場の表土 (0~30cm) はすべて似たような土粒子径の分布状態である。このため、

表-2 土壌分析項目

分析項目	分析手法
含水比	通風乾燥法
容積重	通風乾燥法
三相比	実容積測定装置法
飽和透水係数	変水位法
pF試験	砂柱法および遠心法
土の粒度試験	沈降法

後述する表土の物理性については、A~G 圃場の各調査地点の結果を同一の図に示し、考察した。

美唄茶志内圃場の土性は、表-1 に示すように軽粘土に該当し、美唄圃場の B~E 圃場と同じであった。ただし、美唄茶志内圃場の表土中の粘土の重量割合は、美唄圃場の 1.2 倍程度 (表-3) であり、美唄茶志内圃場の方がより粘土質な土壌である。同様に I~N 圃場の各調査地点の結果を同一の図に示し、考察した。

作土層である表土 (0~15cm) に対しては土壌診断基準値<sup>6)</sup>があるため、土壌診断基準値を用いて施工前後の土壌物理性を判断した。

美唄圃場における施工前後の表土 (0~15cm) の固相率と施工時の pF との関係を図-2 に、施工前後の表土 (0~15cm) の飽和透水係数と施工時の pF との関係を図-3 に示す。両図ともに施工前後で土壌物理性の値に変化がなければ、y=x 線上にプロットされる。なお、pF の値が小さいほど施工時の調査地点の表土 (0~15cm) が湿潤状態にあることを表す。土壌診断基準値は、固相率が 30~40%であり、飽和透水係数が  $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  である<sup>7)</sup>。

施工前後を比較すると、全調査地点の内、41%の地点で固相率が増大し、57%の地点で飽和透水係数が低下した。その結果、施工後は全調査地点の内、固相率で 57%、飽和透水係数で 41%が土壌診断基準値を満たさなかった。施工時の表土 (0~15cm) の pF が重力水に相当する 1.8

表-3 施工前の表土 (0~30cm) の粒度分布

圃場名	粘土 (%)	シルト (%)	砂 (%)
美唄圃場			
A	31.7	45.7	22.6
B	33.7	44.4	21.8
C	32.6	42.9	24.2
D	33.4	42.9	23.6
E	34.1	43.4	22.3
F	34.2	43.2	22.6
G	34.1	44.7	21.2
平均	33.9	43.1	23.0
美唄茶志内圃場			
I	40.8	38.0	21.2
J	43.0	37.4	19.6
K	42.1	35.0	22.9
L	38.9	34.8	26.3
M	42.6	36.7	20.7
N	37.0	43.5	19.5
平均	42.3	38.4	19.3

を下回る地点に限ると、土壌診断基準値を満たしていない地点は、施工前には固相率で56%、飽和透水係数で38%であったのに対し、施工後には固相率で100%、飽和透水係数で88%に増加した。一方、施工時の表土(0~15cm)がpF1.8以上の地点では、施工前に土壌診断基準値を満たしていない地点は、固相率で63%、飽和透水係数で42%であったのに対し、施工後は固相率で39%、飽和透水係数で21%に減少した。

美唄茶志内圃場における施工前後の表土(0~15cm)の固相率と施工時のpFとの関係を図-4に、施工前後の表土(0~15cm)の飽和透水係数と施工時のpFとの関係を図-5に示す。施工前後を比較すると、全調査地点の内、82%の地点で固相率が増大し、87%の地点で飽和透水係数が低下した。施工前と比較して、多くの地点で施工に伴い表土(0~15cm)の物理性は悪化しており、美唄圃場と比較するとその割合は多い。粘土質な土壌である美唄茶志内圃場の方が、表土の物理性悪化が顕著であった。

土壌診断基準値との比較では、施工後の表土(0~15cm)の固相率で95%、飽和透水係数で53%が土壌診断基準値を満たさなかった(図-4、5)。施工時の表土(0~15cm)

のpFが重力水に相当する1.8を下回る地点(図-4の黒丸)に限ると、施工後には75%の地点で固相率が50%以上にまで増加した。飽和透水係数は、施工時の表土(0~15cm)がpF1.8未満であった地点(図-5の黒丸)では、88%の地点で土壌診断基準値の $1.0 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 未満まで低下した。

このように美唄圃場、美唄茶志内圃場ともに表土(0~15cm)がpF1.8未満の湿潤な状態の時に施工すると施工後の土壌物理性が顕著に悪化した。

### 3.2 表土の施工時のpFと施工後の物理性

図-6、7に全調査圃場における表土(0~15cm)の施工時のpFと施工後の飽和透水係数および固相率との関係を示す。両図ともに黒色が美唄圃場、オレンジ色が美唄茶志内圃場での調査地点の値を示している。図の網掛け部分は、土壌診断基準値<sup>7)</sup>である。

施工後の表土(0~15cm)は、飽和透水係数が土壌診断基準値を下回っている地点、固相率が土壌診断基準値を上回っている地点が多数みられた。特に、施工時のpFが小さい地点ほど、その傾向は顕著であった。これは、施工時の表土(0~15cm)が過度な湿潤状態であったこと

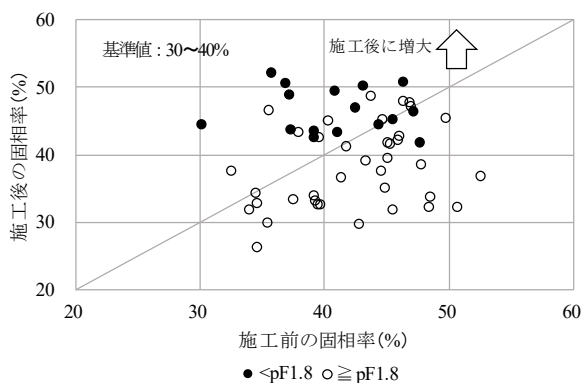


図-2 施工前後の表土(0~15cm)の固相率と施工時のpF(美唄圃場)

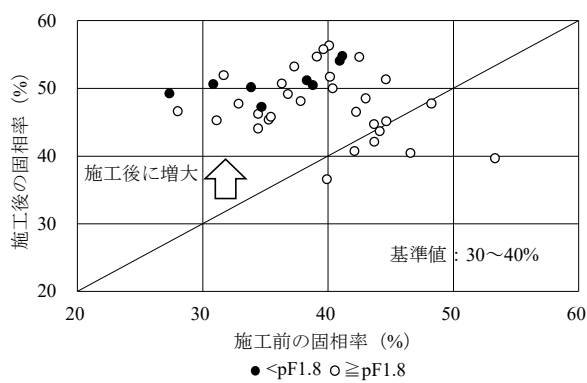


図-4 施工前後の表土(0~15cm)の固相率と施工時のpF(美唄茶志内圃場)

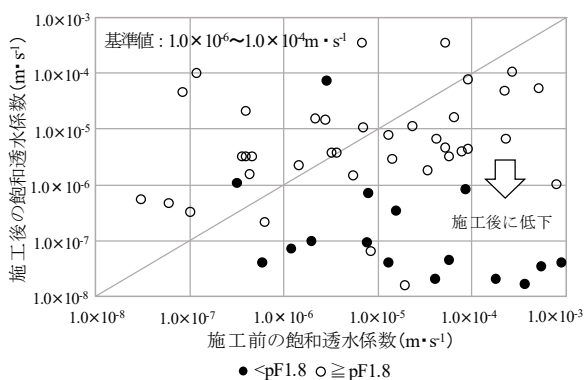


図-3 施工前後の表土(0~15cm)の飽和透水係数と施工時のpF(美唄圃場)

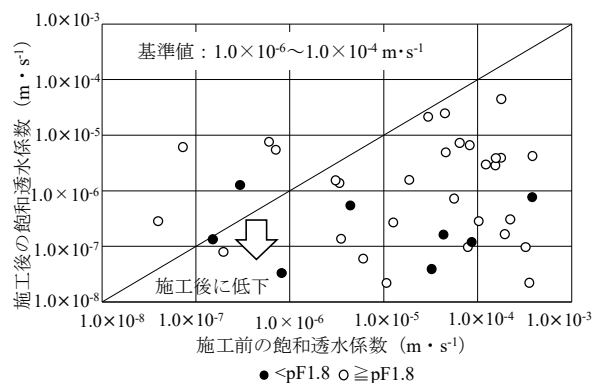


図-5 施工前後の表土(0~15cm)の飽和透水係数と施工時のpF(美唄茶志内圃場)

から、施工機械での繰り返しの影響を受け、物理性が悪化したためと考えられた。

飽和透水係数では、施工時の表土 (0~15cm) の pF が、美唄圃場では 2.0、美唄茶志内圃場では 2.7 まで乾燥すると施工後には土壤診断基準値内となった (図-6)。ただし、これらの pF では施工後の固相率が土壤診断基準値に収まらなかった (図-7)。施工後の固相率は、美唄圃場では施工時の pF が 2.0 の時は、土壤診断基準値を 5% 上回り、美唄茶志内圃場では施工時の pF が 2.7 の時は、土壤診断基準値を 20% 上回る。特に美唄茶志内圃場では、どの水分条件でも施工後の固相率は、土壤診断基準値を満たさなかった (図-7)。これは、粘土質な土壤である美唄茶志内圃場では、土壤が乾燥した時の施工は、施工機械の走行で土壤が締め固められ、固相率が増大しやすかったためと推察された。

しかし、飽和透水係数は土壤表面に供給された水が浸入する速度に関係し<sup>8)</sup>、土壤の排水性の直接的な指標となる。このことから、ここでは表土 (0~15cm) の飽和透水係数が土壤診断基準値内に収まる pF の値を施工開始の土壤水分状態とした。表土 (0~15cm) の飽和透水係数を土壤診断基準値内に収めるためには、美唄圃場では pF が 2.0、

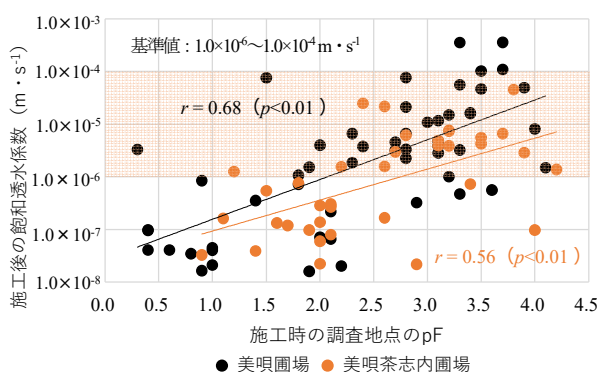


図-6 表土 (0~15cm) の施工後の飽和透水係数と施工時の pF

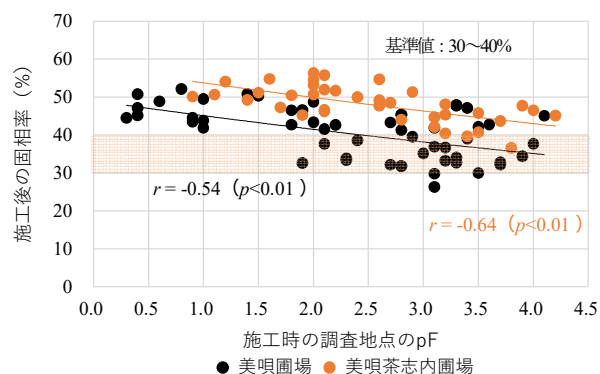


図-7 表土 (0~15cm) の施工後の固相率と施工時の pF

美唄茶志内圃場では pF が 2.7 以上まで乾燥した時に施工する必要がある。

このように美唄茶志内圃場の施工開始の判断基準値は、美唄圃場とは異なる設定が必要であると考えられる。粘土分の多い美唄茶志内圃場の土壤では、施工に伴う表土 (0~15cm) の飽和透水係数を土壤診断基準値に収めるためには、美唄圃場と比較して表土が乾燥した時に施工する必要があることが分かった。

### 3.3 表土 (15~30cm) の施工後の物理性

調査圃場の表土厚さは約 30cm であることから、表土 (15~30cm) の施工時の pF と施工後の物理性との関係を検証した。図-8 には施工に伴う表土 (15~30cm) の固相率の変化率を示す。固相率の変化率は、調査地点での施工後の固相率から施工前の固相率を引いた値を施工前の固相率で除し、百分率で示した値である。なお、飽和透水係数は指数表記であり、変化率で評価するのは難しいため、固相率の変化率のみを示す。

表土 (15~30cm) の固相率の変化率は、施工時の表土 (15~30cm) が pF 2.0 未満の地点でも増加しておらず、逆に減少している調査地点もみられた (図-8)。これは、表土 (15~30cm) が湿潤な状態で施工しても、施工後の

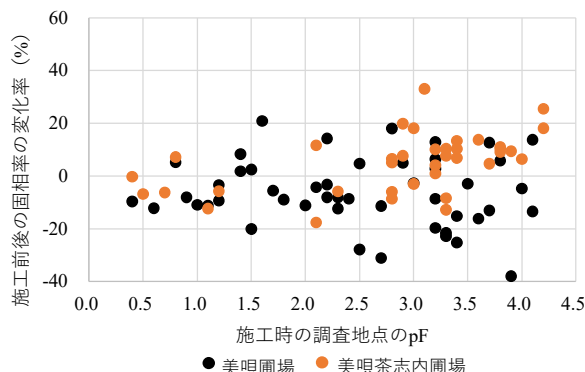


図-8 表土 (15~30cm) の固相率の変化率と施工時の pF

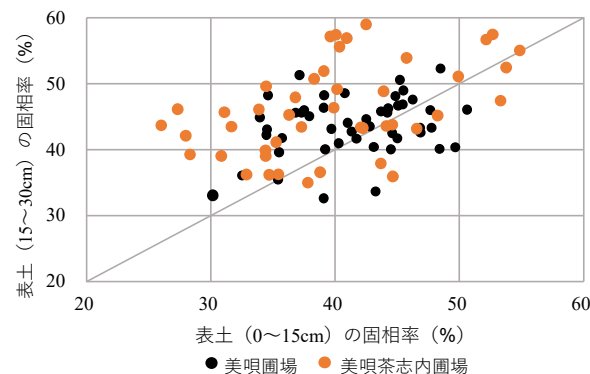


図-9 施工前の表土 (0~15cm) と表土 (15~30cm) の固相率



固相率は施工前と比較して必ずしも悪化しないことを示している。このような結果となった要因として、施工前の表土（15～30cm）が、前述した通り耕盤層といった締め固まった不透水性の土層が形成されており、施工前の時点で固相率が高い状態にあったためと考えられる（図-9）。図-9 から、美唄圃場では73%の地点で、美唄茶志内圃場では77%の地点で表土（15～30cm）の固相率が表土（0～15cm）と比較して大きかった。施工前の時点で表土（15～30cm）の固相率は高く、施工後には表土はぎの過程で耕盤層は破壊されるため、施工時の表土（15～30cm）がpF2.0未満の地点であっても、固相率の変化率は増加しなかったと考えられる。

このように、表土（15～30cm）の固相率の変化率とpFとの間に明確な関係はなく、表土（0～15cm）の固相率および飽和透水係数とpFとの間には有意な関係があったことから、表土（0～15cm）の物理性を優先すべきであるといえる。

### 3.4 施工開始の簡易な判定手法

施工現場では、表土のpFを容易に測定することはできない。このため、現場で簡易にpFを推定する方法として、地耐力をpFに置き換えることで、降雨後の施工開始を判定できるか検証した。

図-10 に施工前の表土（0～15cm）の地耐力（地表面から10cmの値）とpFとの関係を示す。表土のpFと地耐力には相関関係があることから、地耐力が降雨後の施工開始の判断基準の1つになる。図-10 から、表土（0～15cm）について、美唄圃場ではpF2.0に対応する地耐力は0.6MPa、美唄茶志内圃場ではpF2.7に対応する地耐力は0.8MPaであった。

このため美唄圃場では、降雨後に表土（0～15cm）地耐力が0.6MPa以上に、美唄茶志内圃場では、表土（0～15cm）地耐力が0.8MPa以上に回復してから施工すれば、表土の物理性悪化は抑制されると考えられる。

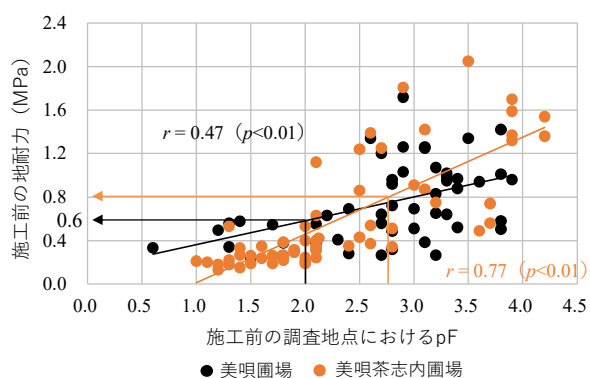


図-10 施工前の表土（0～15cm）の地耐力とpF

### 3.5 施工1年後の表土の物理性

本調査圃場において、区画整備後の営農作業が、土壌物理性に与える影響を検証するために、施工前と施工1年後の表土（0～15cm）の物理性を比較した。施工1年後には、美唄圃場の2圃場、美唄茶志内圃場の1圃場が畑作として利用されており、残りの圃場は水田として利用されていた。

美唄圃場では、表土戻しの施工後に圃場外から運び込まれた粘性土を表土の上に5cmの厚さで敷き均す客土が施工された。客土の土性は重埴土であった。5cm厚さの客土は、施工1年後には耕起などの営農作業によって表土（0～30cm）にすき込まれていた。本研究の施工後調査は、客土前に行っているため客土の影響はないが、施工1年後調査には影響はある。このため、施工後調査と施工1年後調査について、同一地点での表土の物理性の値を単純に比較することはできない。ここでは、施工前と施工1年後の表土（0～15cm）の固相率および飽和透水係数について、土壌診断基準値<sup>7)</sup>内に収まっている地点数の割合で営農作業による表土（0～15cm）の物理性への影響を評価した。

図-11、12には施工前と施工1年後の表土（0～15cm）の固相率および飽和透水係数の関係を示す。美唄圃場で

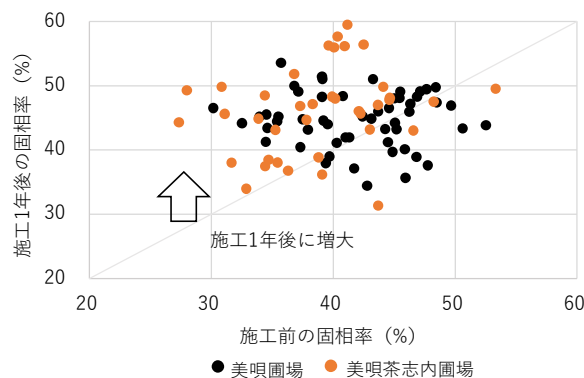


図-11 施工前と施工1年後の表土（0～15cm）の固相率

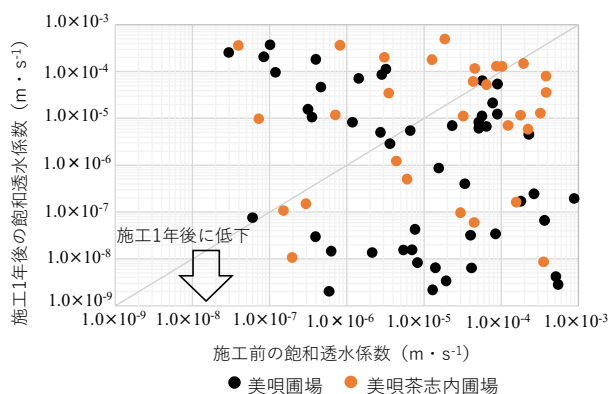


図-12 施工前と施工1年後の表土（0～15cm）の飽和透水係数

は、施工1年後の表土(0~15cm)が土壌診断基準値内に収まった地点は、固相率で26%、飽和透水係数で36%であった。施工前では、土壌診断基準値内に収まっていた地点は、固相率で39%、飽和透水係数で59%であった。

美唄茶志内圃場では、施工1年後の表土(0~15cm)が土壌診断基準値内に収まった地点は、固相率で24%、飽和透水係数で39%であった。施工前では、土壌診断基準値内に収まっていた地点は、固相率で50%、飽和透水係数で43%であった。

以上の結果から表土(0~15cm)では、土壌診断基準値内に収まっている地点数の割合は、1年間の営農作業によって施工前の状態まで戻っていなかった。このため、施工に伴う表土の物理性の悪化を極力抑制することが重要であると考えられる。

### 3.6 降雨後の土壌水分の経時変化

表土の物理性悪化を抑制するためには、美唄圃場では表土(0~15cm)がpF2.0以上まで乾燥した状態の時に、美唄茶志内圃場では、表土(0~15cm)がpF2.7以上まで乾燥した状態の時に施工する必要があると考えられた。このことから、降雨後の表土の水分の日変化を調査することで、表土の物理性悪化を抑制する水分まで表土が乾燥する日数を検討した。

表-4に調査した4圃場の降雨後における表土(0~15cm)のpFを示す。CおよびG圃場は美唄圃場であり、LおよびM圃場は美唄茶志内圃場である。

C圃場では、降雨量7mmを観測した1日後に表土(0~15cm)はpF1.3となり、2日後にはpF2.1まで大きくなった。このため、施工に伴う表土の物理性の悪化が生じないためには、降雨後1日半から2日程度待つ必要があったと考えられる。

降雨量30mm程度では、CおよびG圃場ともに降雨1日後にはpF0.5未満まで小さくなっていった。両圃場の表土では、降雨後の土壌水分の日変化は似た傾向を示した。これは、表土が同じ土性であるためと考えられた。表土がpF2.0まで大きくなったのは、C圃場では降雨4日後であ

た。また、G圃場では降雨5日後程度と推察された。

これらの結果から、美唄圃場では、降雨量が5~10mmの場合は降雨後1日半から2日程度、降雨量30mm程度の場合は降雨後4日から5日程度が施工開始の目安であると考えられる。

美唄茶志内圃場の表土(0~15cm)がpF2.7まで乾燥したのは、降雨量が17mmであったM圃場では降雨から4日後であり、降雨量が29mmであったL圃場では降雨から5日程度と推察された。美唄茶志内圃場では、降雨量が10~20mmの場合は降雨後4日、降雨量30mm程度の場合は降雨後5日程度が施工開始の目安であった。

実際の施工現場では、今回示した目安より半日から1日程度早く施工を開始している事例がみられたが、大きな離れはなかった。

### 3.7 下層土の切盛り直後の地耐力と施工機械の選定

施工が下層土表層の物理性に与える影響を検証するために、下層土の切盛り直後の地耐力とその地点の水分状態を調査した。施工に伴う切盛りの影響として、盛土区域では土壌水分が湿潤な状態の時に地表面の地耐力が0.10MPa以下にまで低下した事例が報告されている<sup>9)</sup>。切土区域では相対的に地下水水位が施工前より高くなることで、地表面が湿地状になる場合が報告されている<sup>10)</sup>。建設機械の走行に必要な地耐力は、超湿地ブルドーザで0.20MPa以上、湿地ブルドーザで0.30MPa以上である<sup>11)</sup>。調査圃場では、切盛り直後の泥炭土表層で施工機械の繰り返しにより、地耐力が低下する事例がみられたことから、泥炭土の整地作業で使用する施工機械の選定について検討した。

このように下層土の整地作業で使用する施工機械の選定に着目する理由は、下層土の均平は田面均平の精度(±3.5cm)以上の丁寧な施工が求められる<sup>12)</sup>反面、表土戻し後の手直しができないからである。下層土の均平の不良は、表土の厚さむらなど地力差の発生につながる可能性が指摘されている<sup>12)</sup>。それゆえ、均平を図る整地作業に用いる最適な施工機械の選定は、精度の高い施工

表-4 各圃場の降雨後における表土(0~15cm)のpF

調査時期	美唄圃場		美唄茶志内圃場		
	C圃場 (n=6)		G圃場 (n=15)	L圃場 (n=15)	M圃場 (n=15)
	降雨量 7mm	降雨量 29mm	降雨量 33mm	降雨量 29mm	降雨量 17mm
降雨1日後	1.3	0.5 未満	0.5 未満	2.2	—
降雨2日後	2.1	0.8	0.6	2.2	—
降雨3日後	—	—	1.1	2.4	2.4
降雨4日後	—	2.0	1.8	2.6	2.7
降雨5日後	—	—	—	—	2.8



を行う上で重要である。

表-5に切盛り直後の泥炭土 (B~G) および粘性土 (I~K) の地耐力とその地点の水分状態を示す。表-5に示した測定深さは、表土はぎ後に露出した下層土上面を0cmとした時の値である。また、調査地点の切盛り厚さを平均値で示した。切盛り厚さは、切土厚さおよび盛土厚さともに正の値とした時の調査地点6ヶ所の平均値である。地耐力およびpFは切土箇所、盛土箇所の各3ヶ所の平均値である。

調査圃場の施工では、下層土の切土作業、切土した盛土材を運ぶ運土作業、及び盛土作業には、C圃場の一部区域を除き湿地ブルドーザが使用された。切盛り直後に下層土表層の均平化を目的に行う整地作業には、超湿地ブルドーザが使用された。

最初に下層土が泥炭土であったB~G圃場の結果について述べる。施工前の同一地点、同一深度近傍の泥炭土(B~G)の地耐力は、0.5MPa程度であったが、切盛り直

後の泥炭土表層の地耐力は、0.5MPa未満まで低下した(表-5)。切盛り厚さが5~11cmと小さいBおよびC圃場では、B圃場の泥炭土表層15cmまでの地耐力は、切土箇所0.31~0.40MPa、盛土箇所0.16~0.36MPaであった。特に盛土箇所の表層5cmでは、地耐力が超湿地ブルドーザの走行に必要な0.20MPa以下まで低下した。一方でC圃場では、泥炭土表層15cmまでの地耐力は0.24~0.29MPaであり、0.20MPa以下までは低下しなかった。

これら圃場の地耐力の違いは、施工時の泥炭土の水分状態と関係していると考えられる。B圃場の盛土箇所の泥炭土表層5cmのpFは1.5と湿潤な状態であり、この時の地耐力は0.20MPa以下にまで低下した。C圃場の盛土箇所における泥炭土表層5cmのpFは3.3と乾燥した状態であった。C圃場の盛土箇所の泥炭土は、表土はぎ前の排水路整備で発生した掘削残土を排水路沿いに1ヶ月程度仮置きした盛土材である。結果として、C圃場の盛土箇所では乾燥した泥炭土が盛土されたため、地耐力が

表-5 下層土の切盛り直後の地耐力

圃場名	測定深さ	切盛り直後				調査地点の 平均切盛り厚さ
		地耐力 (MPa)		pF		
		切土箇所	盛土箇所	切土箇所	盛土箇所	
B	5cm	0.31	0.16	2.2	1.5	11cm
	15cm	0.40	0.36	2.1	2.4	
C	5cm	0.24	0.24	2.1	3.3	5cm
	15cm	0.29	0.24	0.5	3.0	
D	5cm	0.24	0.42	2.4	1.7	18cm
	15cm	0.35	0.47	1.9	2.2	
E	5cm	0.20	0.37	0.9	2.9	22cm
	15cm	0.22	0.46	1.5	2.5	
	25cm	0.40	0.41	1.7	3.0	
F	5cm	0.17	0.25	1.2	2.3	23cm
	15cm	0.22	0.31	0.5	2.7	
	25cm	0.32	0.32	0.7	2.0	
G	5cm	0.18	0.23	0.6	2.1	20cm
	15cm	0.27	0.31	1.4	2.7	
	25cm	0.29	0.34	0.5	1.7	
I	5cm	1.25	0.96	4.2	3.9	35cm
	15cm	1.06	1.17	4.1	3.8	
J	5cm	0.81	0.89	2.5	2.7	20cm
	15cm	0.93	1.03	4.1	4.2	
K	5cm	1.17	1.00	3.2	1.9	18cm
	15cm	1.50	1.16	3.9	3.5	

0.20MPa 以下までは低下しなかったと考えられる。

また、切盛り厚さが20cm以上ある圃場（E～G）では、地耐力は盛土箇所より切土箇所で低く、特にFおよびG圃場の表層5cmの切土区域の地耐力は、それぞれ0.17、0.18MPaと0.20MPa以下まで低下した。この時の切土箇所の表層5cmのpFは、それぞれ1.2、0.6であった。低地の湿地帯に堆積する泥炭土では、平常時の地下水位が高い場合が多い。このため、切盛り厚さが20cm以上ある圃場の切土区域では、施工前に深い場所に堆積していた湿潤な泥炭土が表層に露出し、その上を湿地ブルドーザが走行することで泥炭土が練り返され、地耐力が0.20MPa以下まで低下したと考えられる。

このように調査圃場では、湿潤な泥炭土を盛土した盛土箇所と泥炭土の切盛り厚さが20cm以上ある圃場の切土箇所、超湿地ブルドーザの走行に必要な0.20MPaを下回る事例がみられた。この時の泥炭土表層のpFは、重力水に相当する1.8未満であった。このような圃場では、切盛り直後の整地作業に使用する施工機械は、超湿地ブルドーザよりさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザを選定することが望ましい。

下層土が粘性土である圃場（I～K）では、施工前の同一地点、同一深度近傍の地耐力は、0.8～1.2MPaであり、切盛り直後の地耐力は大きく変化しなかった。切盛り直後の地耐力が最も低かったのは、J圃場の切土区域であり、5cm深さで0.81MPaであった。この地耐力は、超湿地ブルドーザの走行に支障が生じる値ではなく、整地作業に使用する施工機械は、超湿地ブルドーザで問題ない。また、IおよびJ圃場では切盛り厚さが20cm以上であったが、EおよびF圃場のように切土箇所でも湿潤な下層土が露出することはなかった。IおよびJ圃場の切土箇所はpF2.5以上であり、施工前に深い場所に堆積していた粘性土であっても比較的乾燥した状態であった。

pF1.8未満の湿潤な泥炭土の施工に伴う表層への露出は、設計業務の段階で予測できると考えられる。事前の土壌調査において、固定ピストン式シンウォールサンプラーによる試料採取などで切土厚さまでの泥炭土の水分状態を把握し、圃場の切盛り厚さと照合することで、整地作業に最適な施工機械を事前に選定できると推察される。施工工区の中で施工中にpF1.8未満の湿潤な泥炭土の露出が想定される場合は、整地作業で使用する機械を超々湿地ブルドーザで設計する必要があると考えられた。

#### 4. まとめ

圃場の大区画整備において、施工に伴う土壌物理性の

悪化を抑制する技術を開発することを目的に、施工時の土壌水分状態と施工前後の土壌物理性の変化を調査した。土壌物理性では、表土の排水性の変化に着目し、排水性に関わる固相率および飽和透水係数を主に検証した。下層が泥炭土である美唄圃場7筆、粘性土である美唄茶志内圃場6筆の調査結果は以下の通りである。

- 1) 施工前の表土（0～15cm）は作土層であり、表土（15～30cm）は耕盤層であった。施工後の表土（15～30cm）の物理性と施工時のpFとの間には関係はなかった。表土（0～15cm）の物理性と施工時のpFには関係があったことから、表土（0～15cm）に着目して施工開始の判断指標が示せることが分かった。
- 2) 表土（0～15cm）の物理性悪化を抑制するためには、美唄圃場では、表土（0～15cm）がpF2.0以上、美唄茶志内圃場では、表土（0～15cm）がpF2.7以上まで乾燥した状態で施工する必要があることを明らかにし、これを施工開始の判断基準と考えた。
- 3) 美唄圃場のpF2.0に対応する表土の地耐力は0.6MPa、美唄茶志内圃場のpF2.7に対応する表土の地耐力は0.8MPaであった。このため、降雨後に表土の地耐力が、美唄圃場では0.6MPa以上、美唄茶志内圃場では0.8MPa以上まで回復したことを現場で確認してから施工を行えば、表土（0～15cm）の物理性の悪化は抑制されることが考えられる。
- 4) 美唄茶志内圃場の施工開始の判断基準値は、美唄圃場とは異なる結果となった。粘土分の多い美唄茶志内圃場の土壌では、施工後の表土（0～15cm）の物理性の悪化を抑制するためには、粘土分の少ない美唄圃場と比較して表土が乾燥した時に施工する必要があることが分かった。
- 5) 表土の粘土重量割合の違いによって、物理性を悪化させる水分量に違いがあるため、施工開始の判断基準は粘土の重量割合別に設定する必要がある。
- 6) 1年間の営農作業後に表土（0～15cm）の物理性が土壌診断基準値内に収まっている地点数の割合は、施工前の状態まで戻っていなかった。このため、施工に伴う表土の物理性悪化を抑制することが重要であると考えられる。
- 7) 美唄圃場では、降雨量が5～10mmの場合は降雨後1日半から2日程度、降雨量30mm程度の場合は降雨後4日から5日程度が施工開始の目安であった。美唄茶志内圃場では、降雨量が10～20mmの場合は降雨後4日、降雨量30mm程度の場合は降雨後5日程度が施工開始の目安であった。

- 8) 下層土の施工において、切盛り後に湿潤な泥炭土（pF1.8 未満）が切盛り表面に出現する箇所では、地耐力が超湿地ブルドーザの走行に必要な0.20MPaを下回る事例があった。このような箇所の整地作業には、超湿地ブルドーザよりさらに接地圧の小さい超々湿地ブルドーザの使用が望ましい。

### 参考文献

- 1) 北海道農政部：北海道農業・農村の概要、2017.
- 2) 北海道農政部、道総研農業研究本部、ホクレン農業協同組合連合会、社団法人北海道米麦改良協会：北海道の米づくり、pp.52-61、2011.
- 3) 北川巖、塚本康貴、竹内晴信：基盤整備圃場の適切な生産性を確保する土壌物理性管理指標、農業農村工学会誌、vol.83 (5)、pp.363-366、2015.
- 4) 北海道開発局農業水産部農業計画課：石狩川水系の土壌図農牧地および農牧適地、216-217、1987.
- 5) 国土交通省気象庁：各種データ・資料 <https://www.jma.go.jp/jma/index.html>. (令和3年4月14日確認)
- 6) 古木敏也、多田 敦、林 直幹、上村道子：ホ場整備に伴う透水条件の変化について、農業土木試験場報告、pp.129-160、1970.
- 7) 北海道農政部：北海道施肥ガイド2020、p.18、2020.
- 8) Daniel, H.：土壌物理学概論—土と水の科学—、養賢堂、pp.150-151、1993.
- 9) 竹中 肇、安富六郎、堤 聰、足立忠司、吉田裕一、長堀金造、佐藤晃一、丸山利輔：施工機械の運行より見た農地基盤の特徴—傾斜地水田における農地基盤の基礎的研究（V）—、農土論集、50、1-8、1974.
- 10) 渋井 亨：工事の施工管理について（I）—水田ホ場整備—、農土誌、45(12)、50-55、1977.
- 11) 社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、p.391、2009.
- 12) 農林水産省農村振興局：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「ホ場整備（水田）」、204-209、2013.

## 16.1 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

### 16.1.2 大区画水田圃場における地下水位制御システムの高度利用に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（資源保全チーム）

研究担当者：清水真理子、松田俊之、中山博敬、長竹新、奥田涼太、横川仁伸、山本弘樹、新津由紀

#### 【要旨】

泥炭を基盤とする転作作物栽培圃場で、乾燥時に地下灌漑を実施し、地下水位の変動を調査した。国営緊急農地再編整備事業で整備された美唄地区と今金南地区の大区画転作圃場では、給排水ムラの程度は圃場間で異なり、作土下層に透水性の小さい硬盤層が存在すると、地下灌漑時に地下水位が上昇しないことを明らかにした。多雨年における調査では、美唄地区と今金南地区の両方の大豆圃場における収量は、地下水位よりも、15、25 cm 深の土壤水分が圃場容水量より少ない日数と強い相関を示した。高い収量を得るためには、地下水位を低下させるだけでなく、作土における土壤マトリックスから余剰水を排水することが重要であると考えられた。水みちの発達した美唄地区の圃場では、地下灌漑時に暗渠間でもムラなく地下水位が速やかに上昇し、作土の土壤水分も地下水位の上昇とともに上昇した。一方、作土直下に硬盤層を有する今金南地区の圃場では、地下灌漑時に暗渠間の地下水位上昇幅はわずかである上、美唄地区の圃場と比べてムラも大きく、作土の土壤水分も変化しなかった。今金南地区の圃場で暗渠に直交するよう有材心土破碎を施工したところ、施工地点では、地下灌漑時に暗渠間であっても埋設された疎水材を通して作土へ給水され、作土の土壤水分は増加した。このことから、硬盤層を有する圃場では、地下灌漑による作土への給水には、有材心土破碎の施工が有効であることを確認した。美唄地区の水稻移植圃場で落水期に地下灌漑の状況を調査した結果、水稻への水分供給と農業用機械に必要な地耐力の確保が両立できることを確認した。一方で、落水期における地下灌漑はメタン排出量を増大させる傾向があった。さらに、転作田における播種後の地表付近までの地下灌漑では、メタンおよび一酸化二窒素の排出が促進されると評価した。以上の結果を取りまとめ、給排水ムラを抑制するとともに、水稻への水分供給と農業用機械に必要な地耐力の確保を両立した地下水位制御システムの利用技術を提案した。

キーワード：大区画水田、地下灌漑、地下水位、土壤水分、給排水ムラ

#### 1. はじめに

北海道の大規模水田地帯では、食料生産の体質強化のため、担い手への農地集積や農地の大区画化・汎用化が推進されている<sup>1)2)</sup>。また、暗渠排水施設を利用した地下水位制御システムの導入も進められている。

地下水位制御システムは、水稻直播栽培の実現、転作作物の湿害や干ばつ害の回避、水管理の省力化等に有効である。北海道の転作作物栽培における地下灌漑において、土壤の乾燥時に地下水位制御システムを利用することが提案されている。その際、土壤に乾湿のムラが生じると作物の生育にもムラが生じる。その解消には、圃場全体に速やかでムラなく給排水できる地下水位や土壤水分の制御技術が必要である。

水田では、一般に、登熟期に間断灌漑を実施する。その目的は土壤の過度な乾燥を防ぎ根の活性を高く維持することにあるが、間断灌漑には多くの水や労力を必要と

する。そこで、地下水位制御システムを利用し水位を田面下の一定の深さで維持することにより、登熟期後半(水稻落水期)まで地表から根に酸素を供給しつつ、地下から生育に必要な水を供給することが可能となる。同時に、地表面付近の土壤を乾燥させることで、収穫のためのコンバイン走行に必要な地耐力も確保することができる。これらは、地下水位制御システムの新たな利用方法の一つと考えられる。

地下灌漑に伴う土壤水分・養分の変動は、温室効果ガスの排出や窒素流出等にも影響し、環境に負荷を与えることが予想される。

以上のことから、本研究では、大区画水田圃場における給排水ムラ対策技術の開発と地下水位制御システムの高度利用技術の提案を目的とし、下記の項目を実施した。

- ① 転作作物栽培時の給排水ムラの実態把握と要因解明
- ② 水稻落水期の水分供給と地耐力向上を両立した地下

水位制御技術の検証

- ③ 地下灌漑の実施を可能とする圃場条件の体系化
- ④ 地下灌漑の利用が環境負荷に与える影響の評価
- ⑤ 大区画水田圃場における給排水ムラ対策技術の開発と地下水水位制御システムの高度利用技術の提案

## 2. 転作物栽培における給排水ムラの実態把握と要因解明

### 2.1 調査地と方法

#### 2.1.1 調査地

美唄市の転作物圃場（B圃場）では、2015年度に国営緊急農地再編整備事業美唄地区で区画整理工事が実施された（図-1）。B圃場は長辺約170m、短辺約70mで集中管理孔を備えており、暗渠管（埋設深度0.7~1.0m）の設置間隔は10mを基本としている。整備前には、取水樹から50m地点付近に作業道路が存在した。作業道路の西側は2013年まで6年以上転作畑として利用され、東側は2013年まで水田として利用されていた。また、地表から32~60cmより下が泥炭層である。調査開始時における作土層36cmの土性は、砂23~34%、シルト35~40%、粘土31~37%であった。2016年から2019年まで大豆が作付けられた。5月下旬に大豆を播種し、10月上旬に収穫が

行われた。2017年7月10日から11日まで水位調整型水閘を地下水位-30cmに設定し生育促進のため地下灌漑を行った後、7月13日に水閘を解放した。2018年は6月7日と9日に水閘を全閉し発芽促進のため地下灌漑を行ったが、降雨のため短時間で水閘を開放した。

瀬棚郡今金町の転作物圃場（I圃場）では、2014年度に国営緊急農地再編整備事業今金南地区で区画整理工事が実施された（図-2）。I圃場は長辺約250m、短辺約65mで地下水水位制御システム（FOEAS）を備えており、暗渠管（埋設深度1.0m）の設置間隔は10mを基本としている。地表から35~75cmより下が泥炭層である。調査開始時における圃場中央の作土層28cmの土性は、砂44~59%、シルト27~37%、粘土19~25%で、その下の基盤高調整の盛土層の土性は、砂70%、シルト18%、粘土12%であった。2017年は秋撒き小麦（きたほなみ）を、2018年は大豆（とよまさり）を作付けした。2017年5月25日から29日、6月30日から7月5日の2回、-40cmの水位設定としてFOEASにより取水を制御した。各灌漑期間の最終日に水閘を解放した。2018年は降雨が十分であったため、地下灌漑を実施しなかった。2017年12月から3月までの冬期間は、泥炭沈

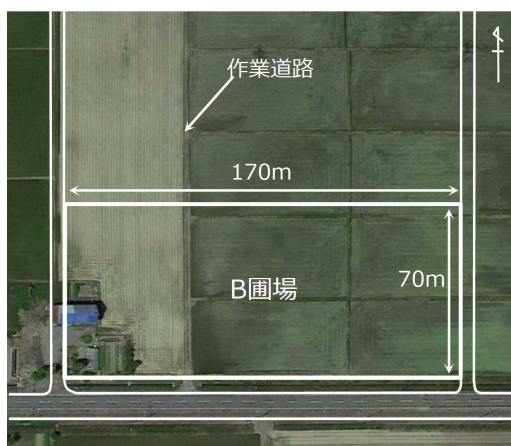


図-1 B圃場の整備前の状況写真と観測地点位置図  
（地下水水位観測地点および土壌採取地点は白抜き赤丸で示す。塗りつぶしの赤丸は土壌水分も測定した地点を示す。）

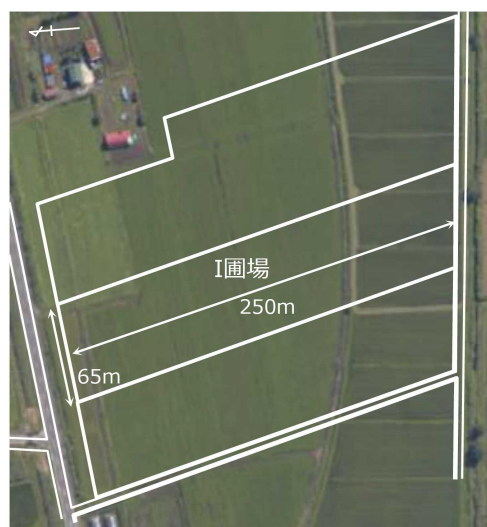


図-2 I圃場の整備前の状況写真と観測地点位置図  
（地下水水位観測地点および土壌採取地点は白抜き赤丸の赤丸で示す。塗りつぶしの赤丸は土壌水分も測定した地点を示す。）

下抑制のため水閘を-40 cmの水位設定とした。

## 2. 1. 2 方法

降水量は、B 圃場および I 圃場の近傍で転倒マス式雨量計により計測した。

B 圃場の地下灌漑取水量は、10 分間隔で測定した取水柵内水位を HQ 式に代入して求めた。HQ 式は、同一ブロック内の圃場で測定した取水柵水位と、電磁流量計により測定した取水量の関係から作成した。I 圃場の地下灌漑取水量は、電磁流量計により 1 箇所計測し、他 2 箇所の取水量も同じであると仮定した。両圃場の暗渠排水量は、スリット堰により 2~10 分間隔で測定した。

地下水位は、圃場内暗渠間 21 地点で測定した。渠間のライン 1~3 (それぞれ L1, L2, L3) において、取水柵から 30 もしくは 40 m 間隔の 21 地点を基本とし、2018 年は B 圃場においてライン 0 (L0) の 30, 90, 150 m 地点の 3 地点を追加して測定した (図-1, 2)。また、暗渠から 50cm 離れた地下水位は、B 圃場において L1 の 30, 90, 150 m 地点で、I 圃場において L2 の 40, 130, 220 m 地点で測定した。地下水位は、絶対圧式水位計を有孔塩ビ管に格納し埋設し、30 分間隔で測定した。

それぞれの圃場内の 21 地点 (図-1, 2) において、2017 年の収穫後に泥炭層より上の土壌を採取し、透水係数、乾燥密度、三相分布を測定した。

土壌水分は、2018 年は B, I 圃場それぞれ 3 地点で測定した。測定点は、B 圃場では L0 の 30, 90, 150 m 地点、I 圃場では L2 の 40, 130, 220 m 地点である (図-1, 2)。土壌水分ポテンシャルは、テンシオメータにより各地点 3 深度 (15, 25, 35 cm 深)、4 反復で測定し、30 分間隔で記録した。

収量は、2018 年に各圃場の地下水位測定地点で調査した (図-1, 2)。各地点において平均的な株数を含む条の 1 m を刈り取り、着莢数、精子実重を測定した。

## 2. 2 転作田における地下水位の変動

### 2. 2. 1 気象と水管理

B 圃場における 6 月から 9 月までの積算降水量は、2017 年、2018 年それぞれ 667, 668 mm であった。6 月から 9 月までの月降水量は、2017 年の 147, 145, 129, 247 mm に対し、2018 年は 131, 235, 275, 29 mm で、2017 年と比較すると 7 月、8 月の降水量が大きく、9 月の降水量が小さかった。

2017 年は、6 月 25 日の 36 mm の降水後、7 月 16 日まで 10 mm を超える降水はなく、7 月 10 日 10 時から 11 日 16 時まで地下灌漑を行った。この 30 時間での地下灌漑取水量は 36 mm、暗渠排水量は 12 mm であった。

I 圃場における 6 月から 9 月までの積算降水量は、2017 年、2018 年それぞれ 541, 661 mm であった。6 月~9 月までの月降水量は、2017 年の 129, 121, 83, 211 mm に

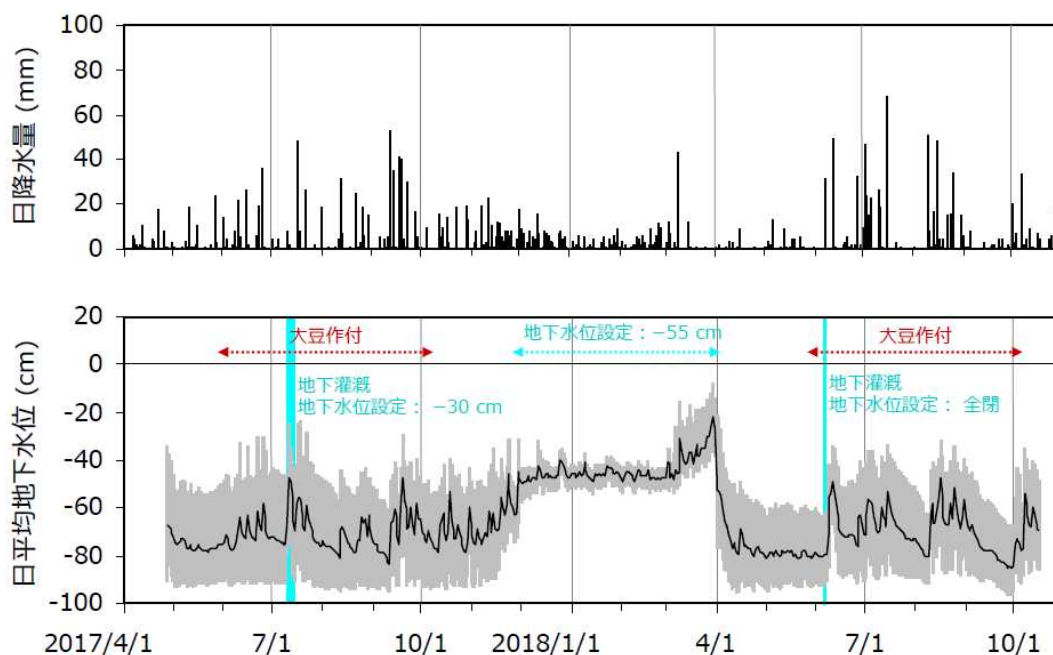


図-3 B 圃場における降水量と日平均地下水位の平均値 (n = 21) の季節変化 (地下水位のエラーバーは、最大最小を示す。)



対し、2018年は134、191、223、132 mmで、2017年と比較するとB圃場と同様に7月、8月の降水量が大きかった。2017年5月は降水量が小さく、5月25日から4日間地下灌漑を実施した。この時の取水量は24 mmで、灌漑期間中に合計15 mmの降水があった。FOEASの設定水位の調整に時間を要したことも影響し、暗渠排水量は32 mmと大きかった。また、6月30日から7月5日までの5日間に2回目の地下灌漑を実施した。この時、地下灌漑取水量は18 mmで、灌漑期間中に合計15 mmの降水があったが、暗渠排水量は1 mmに過ぎなかった。

### 2. 2. 2 営農期間における地下水位の変動

B圃場における6月から9月の日平均地下水位を21地点の平均でみると、2017年が-84~-47 cm、2018年が-85~-47 cmの範囲で変動した(図-3)。地下水位は、降水と地下灌漑の実施に応じて上昇し、2017年6月から9月では7月11日の地下灌漑時に最高値を示した。地下水位が最も低下したのは、2017年が9月11日、2018年が9月29日であった。21地点の標準偏差は2017年が7~18 cm、2018年が7~15 cmの範囲で推移した。

I圃場における6月から9月の日平均地下水位の21地点の平均は、2017年が-64~-19 cm、2018年が-60~-20 cmの範囲で変動した(図-4)。B圃場より地下水位は高く、降水に応じて地下水位は上昇したが、地下灌漑時に明らかな地下水位の変化は見られなかった。21地点

の標準偏差は2017年が8~16 cm、2018年が11~17 cmの範囲で、B圃場と同程度であった。

### 2. 2. 3 地下灌漑時における地下水位変動

B圃場とI圃場の取水側、中央、排水側における地下灌漑時の暗渠脇0.5 m離れと渠間の地下水位変動を図-5に示す。B圃場では、取水側を除いて水閘水位の上昇とともに速やかに上昇し、特に暗渠脇で顕著であった。取水停止後、地下水位は緩やかに低下し、水閘開放後は特に暗渠脇で低下した。一方、I圃場では、取水時に明らかに地下水位が上昇した地点は、暗渠脇0.5 m離れの1地点のみであった。

2017年の地下灌漑時における渠間の地下水位分布を、地下灌漑実施直前、取水終了直後、水閘解放半日後について図-6に示す。

B圃場では、地下灌漑実施直前の水位は-75 ± 14 cmで、取水柵から30~50 m地点で高い傾向にあった(図-6a)。取水終了直後には、-45 ± 14 cmと30cm程度水位が上昇し、特に70~90 m地点で-23~-34 cmと水位が高かった(図-6b)。水閘解放半日後には-63 ± 12 cmまで低下した(図-6c)。B圃場の地下水位は、30~50 m地点で高く維持され、地下灌漑時の変動も小さかった。50 m付近には整備前に作業道路が存在し(図-1)、この作業道路を挟んだ両側の圃場の、整備前からの土壌物理性の違いが地下水位分布に影響したと考えられた。

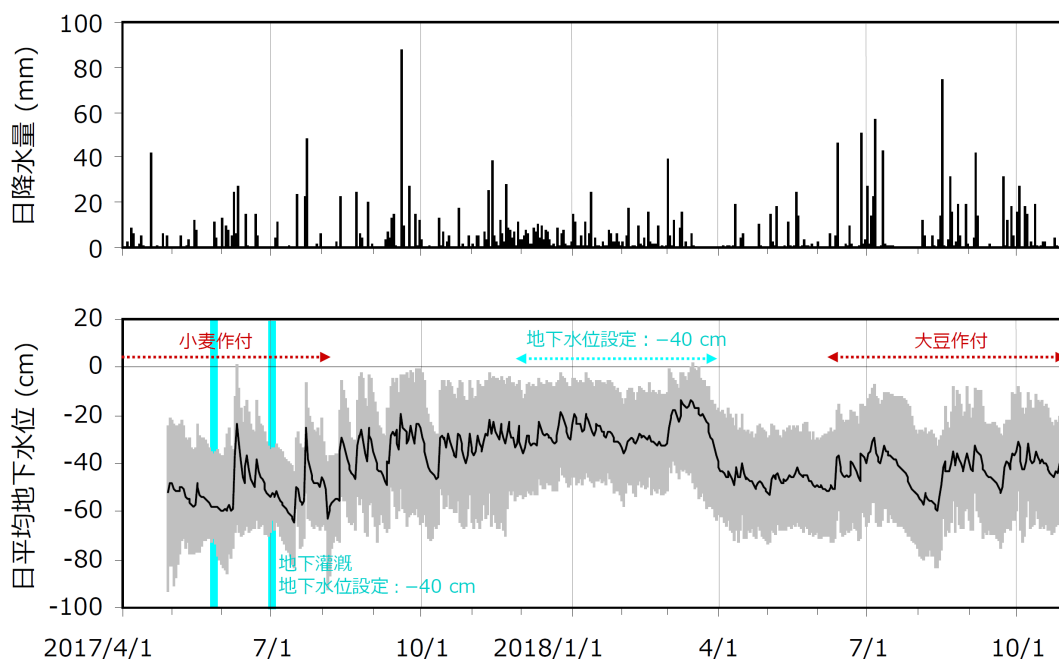


図-4 I圃場における降水量と日平均地下水位の平均値 (n = 21) の季節変化 (地下水位のエラーバーは、最大最小を示す。)

I圃場では、地下水位は地下灌漑実施直前に $-53 \pm 12$  cm、取水終了直後に $-51 \pm 13$  cm、水閘解放半日後に $-52 \pm 14$  cmで、地下水位の変動は非常に小さく、また圃場内の分布も変化しなかった(図-6d、e、f)。I圃場の2回目の地下灌漑時においても、同様の傾向であった。

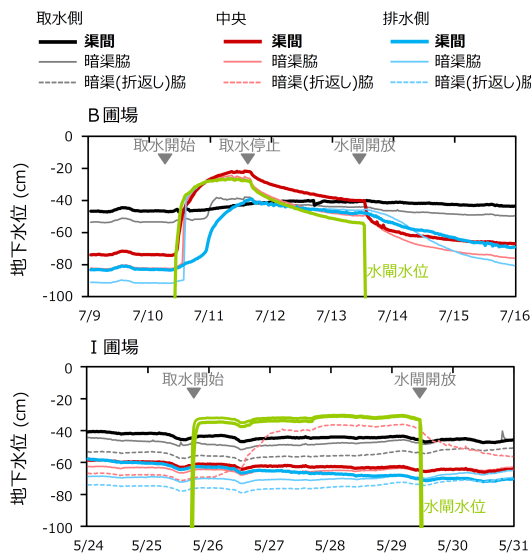


図-5 B圃場およびI圃場における地下灌漑時の暗渠脇0.5 m離れと渠間の地下水位変動 (取水側、中央、排水側はB圃場でそれぞれ30、90、150 m、I圃場でそれぞれ40、130、220 m地点を示す。暗渠(折返し)は、I圃場のみである。)

### 2.3 地下水位変動に影響を与える要因の解析

泥炭が出現する上端はB圃場で $41 \pm 7$  cm、I圃場で $53 \pm 10$  cmであった。B圃場では、全地点において泥炭層までを3層に分けて採取した。それぞれの平均深度は0~9、9~22、22~41 cmであった。飽和透水係数の中央値は、北海道施肥ガイドで推奨される基準値( $10^{-3} \sim 10^{-4}$  cm/s)と比較すると、1層目は同程度であったが、2層目と3層目で大きく下回った(図-7)。一方、固相率の中央値は、1~3層それぞれ41.5、41.5、36.7%で、基準値(40%以下)を上回るものがあるものの大きくは逸脱しなかった(図-7)。B圃場では、地下水位の高い30~50 m地点で3層目の固相率が大きく、透水係数が小さい傾向にあった。整備前の土地利用の状態が、土壌物理性と地下水位に影響を与えたことが示唆された。

I圃場では、10地点で作土層の下に盛土層が確認されたため、泥炭層までを3層に分けて採取し、11地点で2層に分けて採取した。それぞれ平均深度は、0~23、23~41、41~53 cmであった。飽和透水係数の中央値は、基準値と同程度であったが、固相率の中央値は、1~3層それぞれ48.1、44.6、39.8%で、3層目を除き基準値を大きく上回った。

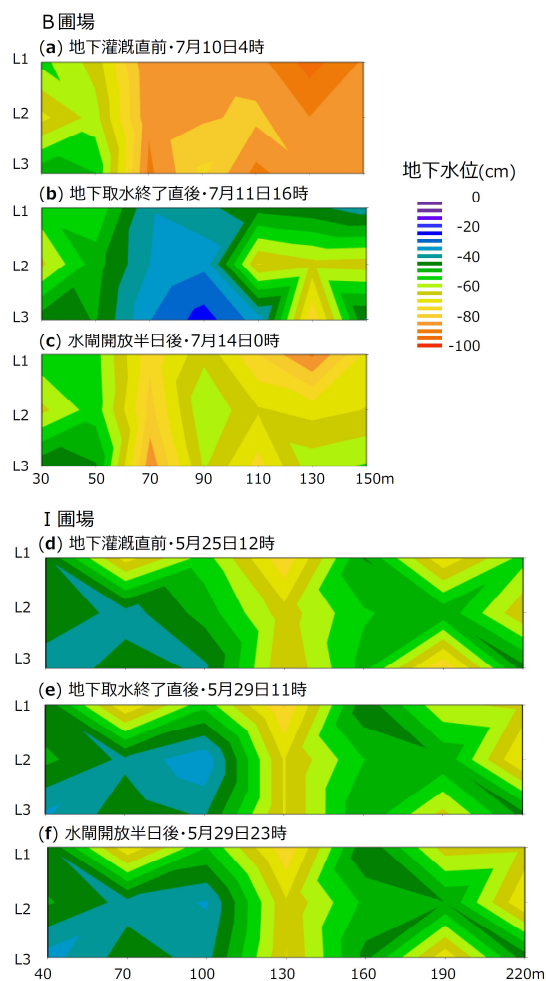


図-6 B圃場およびI圃場における地下灌漑時の地下水位分布 (地下水位は渠間で測定した値を用いた。暗渠周辺の地下水位は含まれない。)

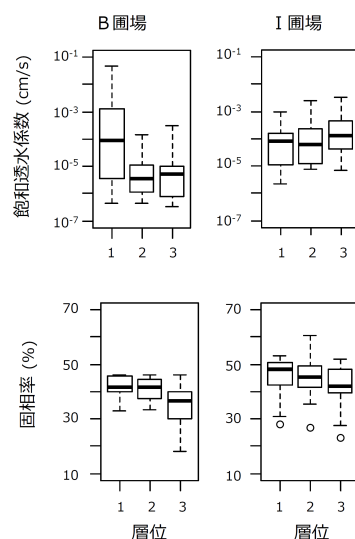


図-7 B圃場とI圃場における飽和透水係数と固相率 (飽和透水係数の統計量算出には対数変換値を用いた。)



た(図-7)。

## 2.4 地下水位と土壌水分の変動が大豆生育に与える影響

B 圃場の地下水位は、給水側で高く推移し、中央と排水側で同程度であった(図-8)。2018年7月16日から8月8日と8月31日から9月30日までの期間では日降水量が10mmを超えるまとまった降雨がなく、地下水位は給水側でも-75cm程度まで低下し、これらの期間では土壌水分ポテンシャルも大きく低下し、土壌の乾燥が促進した。

I 圃場の地下水位は、B 圃場と同様に給水側で高く推移した(図-9)。中央と排水側では同程度であったが、降雨の少ない7月中旬から8月中旬までの期間では、排水側で地下水位が-80cmまで低下したのに対し、給水側では-30cm、中央では-55cmまでの低下であった。8月4日から5日までの合計18mmの降雨では、15cm深、25cm深ともに、給水側と排水側では土壌水分ポテンシャルは速やかに-30kPaまで上昇したのに対し、中央では

ともにわずかに上昇しただけで-50kPaを下回っていた。この時、地下水位の上昇幅は中央で10cmと最も大きく、中央では給水側、排水側よりも下層までの水みちが発達していたと考えられた。

2018年6月から9月までの各地点の最低地下水位と精子実重の関係を図-10に示す。最低地下水位と精子実重には弱い負の相関( $r = -0.65, p < 0.01$ )があり、地下水位が高いと収量が低下することが示された。しかし、I 圃場では地下水位が-80~-60cmでも精子実重が非常に小さい地点が確認された。

7月から9月までの期間において、土壌水分が圃場容水量(土壌水分ポテンシャル=-6kPa;  $pF = 1.8$ )より乾燥した日数と精子実重の関係を図-10に示す。この日数はB 圃場でI 圃場よりも大きく、精子実重と正の相関を示した(15cm深;  $r = 0.97$ )。このことは、作土の土壌マトリックスから余剰水が排水された期間の長いことが収量に影響を与えることを示唆すると考えられた。

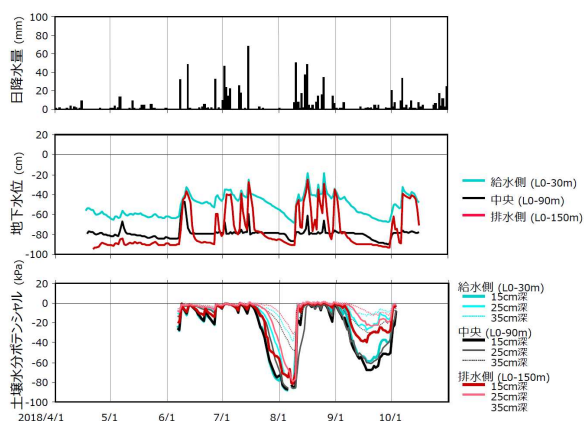


図-8 B 圃場における2018年の降水量、地下水位および土壌水分ポテンシャルの季節変化

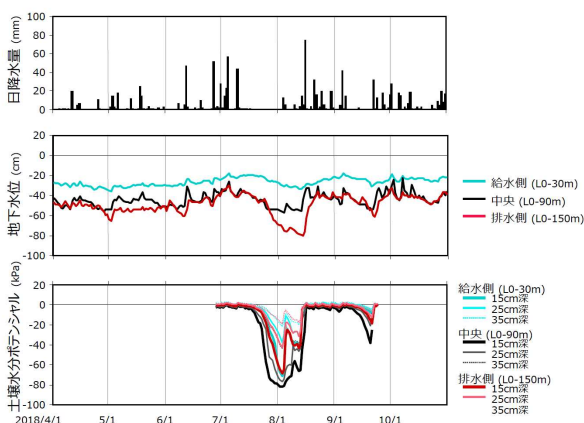


図-9 I 圃場における2018年の降水量、地下水位および土壌水分ポテンシャルの季節変化

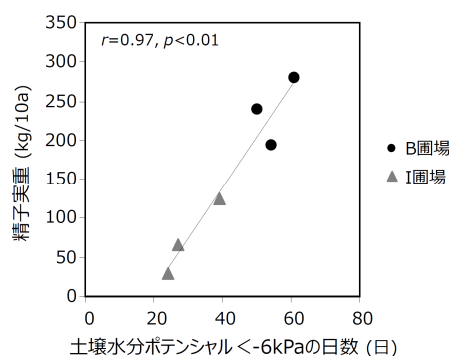
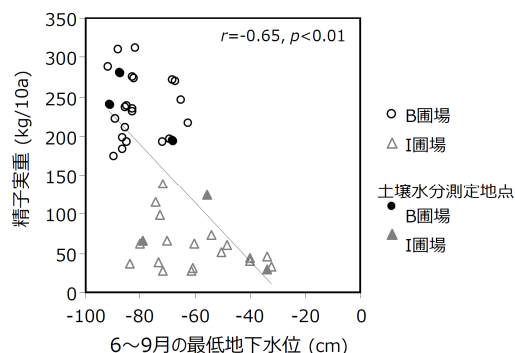


図-10 2018年6月~9月の最低値地下水位と大豆精子実重との関係および2018年7月~9月において土壌水分が圃場容水量より乾燥した日数と大豆精子実重との関係(圃場容水量は土壌水分ポテンシャル=-6kPaとした。)

### 3. 水稻落水期の水分供給と地耐力向上を両立した地下水位制御技術の検証

#### 3.1 調査地と方法

##### 3.1.1 調査地

調査は、2015年度に国営緊急農地再編整備事業美唄地区で区画整理工事が実施された美唄市の隣接する2つの水田圃場で行った(図-11)。圃場は、1区画が長辺約170m、短辺約70mに整備され、地下水位制御システムが導入されている。暗渠管は、基本10m間隔で、0.70m~1.00mの深さにある。

対照圃場と試験圃場では、2017年、2018年とも水稻(ななつぼし)の移植栽培を行った。5月下旬に苗を移植、9月下旬に収穫を行った。試験圃場では、2017年は8月8日から22日、2018年は8月6日から23日までの間、田面から10cm下に地下水位を設定して地下灌漑を行った後、9月20日まで水閘の設定を-10cmに維持した。対照圃場では、8月中旬から収穫まで水閘の設定を-40cmに維持し、この期間に給水は行わなかった。

##### 3.1.2 方法

降水量は、同一農区内で調査圃場から約450m離れた地点で計測した。

地下水位、土壤水分、水稻出液速度の調査は、各圃場暗渠から5m離れた3地点(取水桝から長辺方向に30、90、150m離れた地点)で行った。地下水位は、絶対圧式水位計を有孔塩ビ管に格納、埋設し、30分間隔で測定した。土壤水分ポテンシャルは、15cm深に設置したテンシオメータにより30分間隔で測定した。昼間は、気温の急激な変動等によりテンシオメータの圧力センサーの出力値が安定しないため、夜間の21時から3時にかけて測定した出力値の平均を用いた。

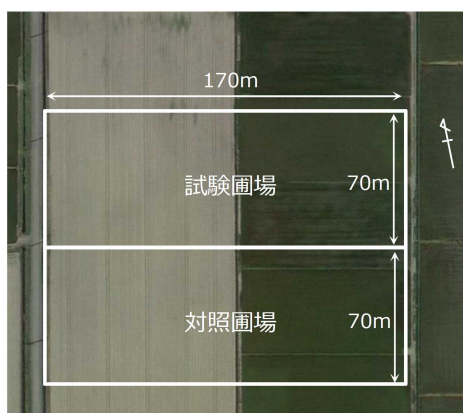


図-11 水田試験圃場と対照圃場整備前の状況写真

水稻出液速度は、2017年8月31日および2018年9月4日に各地点2~3反復で測定した。また、地耐力は、収穫を半月後に控えた9月8日に、各圃場42地点で、デジタル貫入式土壌硬度計により測定した。

##### 3.2 地下水位と土壤水分の変動

地下水位の季節変動を図-12に示す。2017年は、登熟期に地下灌漑を開始した8月8日以降、試験圃場の地下水位は-10cm付近で維持された。一方、対照圃場の地下水位は緩やかに低下し、8月27日には-30cmを下回った。試験圃場の地下水位は、給水停止後で降雨のない8月29日以降に緩やかに低下し、9月10日には対照圃場と同程度となった。登熟期の地下灌漑実施期間中の土壤水分は、圃場間で差は認められなかった。しかし、9月10日の対照圃場の土壤水分は、試験圃場よりも減少した。

2018年も、登熟期の地下灌漑実施期間中に試験圃場の地下水位は-10cm付近で維持された。また、対照圃場の地下水位は-40~-30cmで維持された。しかし、この期間は断続的に降雨があったため、土壤水分ポテンシャルは0kPa付近で推移し、圃場間で明らかな差は認められなかった。

##### 3.3 水稻登熟期の地下灌漑が作物生育と地耐力に与える影響

水稻出液速度は、両年とも試験圃場が対照圃場より大きい傾向にあり、2018年は有意な差が認められた(図-13)。ただし、両年とも出液速度測定時の土壤水分は両圃場間に差が認められなかった(図-12)。土壤水分は15cm深で測定したため、水稻根へ供給される土壤水分の深度と異なる可能性が考えられた。また、収量は両年とも圃場間で差は認められず、登熟期の地下灌漑は収量に影響を及ぼすものではなかった(図-13)。0~15cmの地耐力は、2018年のみ圃場間で有意な差が認められ、試験圃場が対照圃場より小さかった。しかし、2018年の試験圃場でコンバイン走行に必要とされる地耐力(0.25MPa以上<sup>3)</sup>)を下回ったのは42地点中1地点のみであり、平均値は0.49MPaであったことから、登熟期に地下灌漑を実施しても、収穫期に必要な地耐力を十分確保できると考えられた(図-13)。

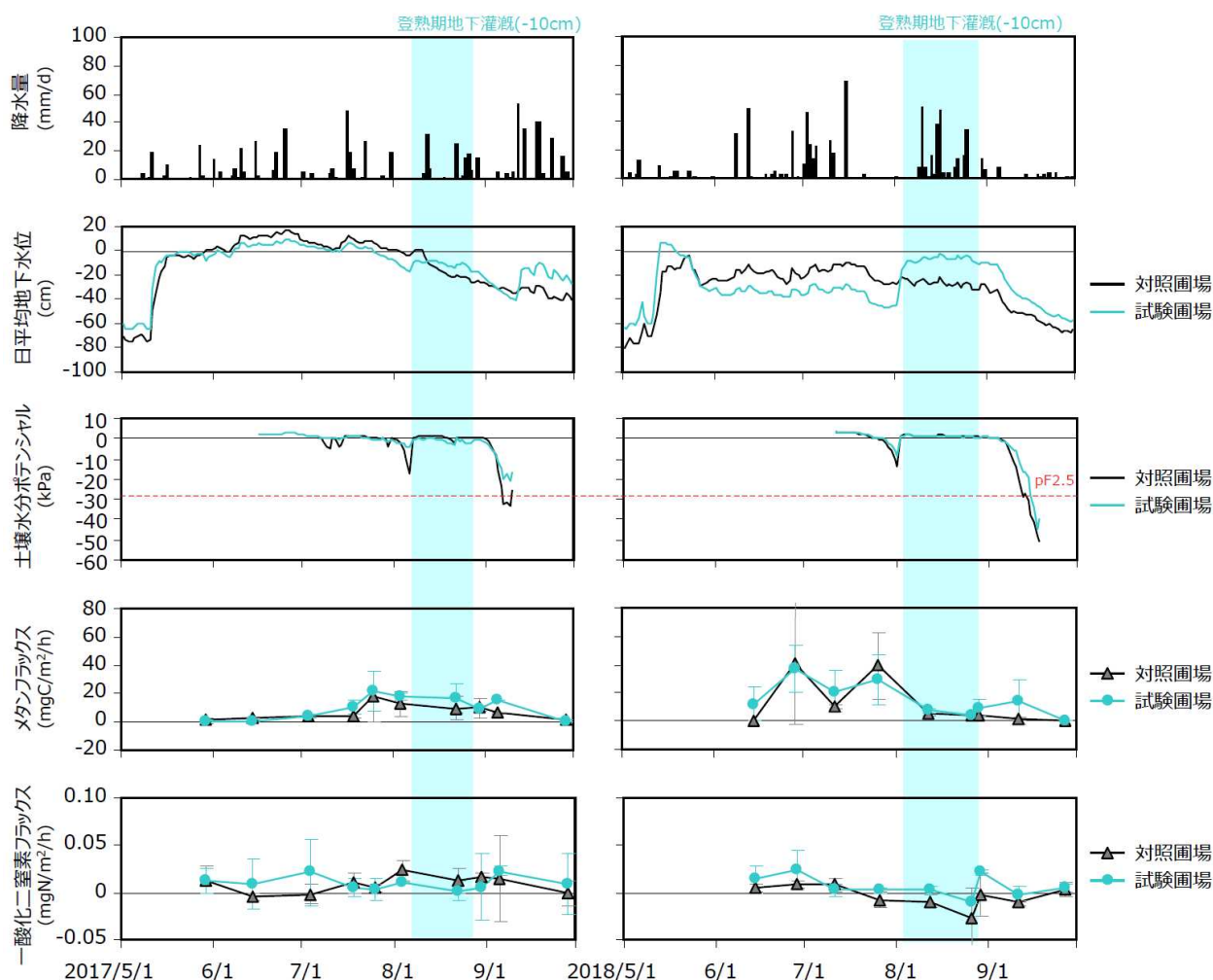


図-12 水田試験圃場と対照圃場における降水量、土壌水分ポテンシャル、メタンフラックス、一酸化二窒素フラックスの季節変化

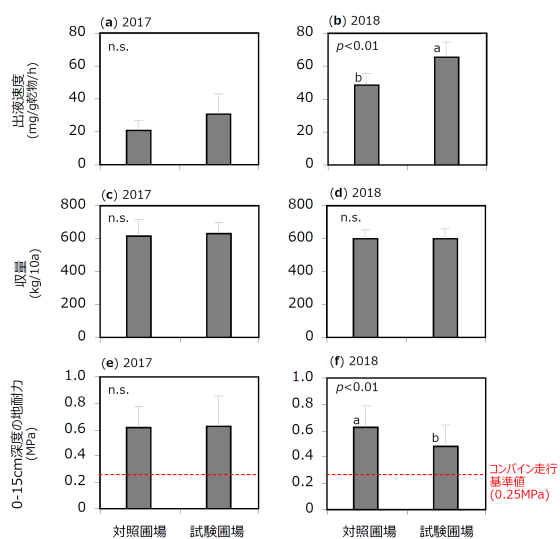


図-13 2017年と2018年の水田試験圃場および対照圃場における水稻出液速度 (a、b)、水稻収量 (c、d)、地耐力 (e、f)

#### 4. 地下灌漑の実施を可能とする圃場条件の体系化

##### 4.1 調査地と方法

###### 4.1.1 調査地

調査は、美唄地区のB圃場で2019年に、今金南地区のI圃場で2020年に行った。B圃場、I圃場は、2.1.1で述べた圃場と同一である。B圃場では、2019年の大豆栽培時に水閘を全閉して地下灌漑を2回実施した。1回目は発芽促進を目的とし2019年6月10日から12日まで、2回目は発芽後の生育促進を目的とし2019年7月8日から10日までとした。I圃場では、2020年の小麦収穫後に地下灌漑を1回実施した。2020年8月21日から24日とし、最初の24時間は水閘水位を地表下30cmに設定し、その後は終了まで全閉した。

### 4. 1. 2 方法

地下灌漑取水量、暗渠排水量および地下水位の測定方法は2.1.2で述べたとおりである。B圃場では、土壌水分ポテンシャルを渠間のライン1(L1)の取水柵から30m地点で(図-1)、I圃場では渠間のライン2(L2)の取水柵から70m地点で測定した(図-2)。土壌水分ポテンシャルは、テンシオメータにより4深度(5、15、25、35cm深)、4反復で測定し、30分間隔で記録した。テンシオメータのポーラスカップの長さは6cmであり、その中心部が測定深になるように埋設した。

### 4. 2 地下灌漑時における地下水位変動

B圃場の1回目の地下灌漑は、2019年6月10日11時から12日16時までの53時間で取水し、取水量は78mmであった。暗渠排水量は、取水中で2mm、その後水閘を全開してからの24時間で23mmであった。2回目の地下灌漑は、7月8日17時から10日19時までの50時間取水し、取水量は75mmであった。暗渠排水量は、取水中で3mm、その後水閘を全開してからの24時間で15mmであった。

B圃場の2回の地下灌漑時における取水開始直前、12時間後、24時間後、取水終了直前の地下水位を図-14に示す。1回目の地下灌漑時では、地下水位は21地点の中央値で-81cmから-10cmまで上昇した。取水開始直前での地下水位の四分位範囲は16cmで、21地点の地下水位は-90~-59cmの範囲にあった。一方、取水終了直前での四分位範囲は6cmで、1地点の外れ値を除くと、20地点の地下水位は-16~-3cmの範囲にあった。2回目の地下灌漑時では、地下水位は21地点の中央値で-78cmから-13cmまで上昇した。取水開始直前での地下水位の四分位範囲は20cmで、21地点の地下水位は-90~-53cmの範囲にあった。しかし、取水終了直前での四分位範囲は5cmで、1地点の外れ値を除くと、20地点の

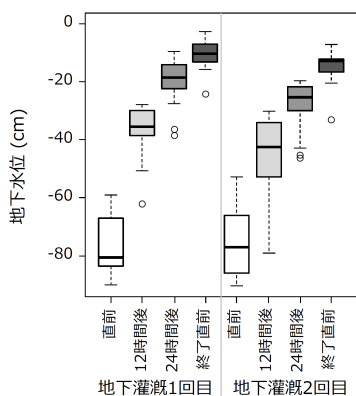


図-14 B圃場における地下灌漑時の地下水位

地下水位は-20~-7cmの範囲にあった。

I圃場では2020年8月21日16時から24日9時までの53時間で取水し、取水量は31mmであった。暗渠排水量は、取水中で0.3mm、その後水閘を全開してからの24時間で4mmであった。

I圃場の地下灌漑時における取水開始直前、水閘全開直前、12時間後、24時間後、取水終了直前の地下水位を図-15に示す。地下水位は21地点の中央値で-49cmから-26cmまで上昇した。取水開始直前での地下水位の四分位範囲は18cmで、21地点の地下水位は-73~-30cmの範囲にあった。取水終了直前での四分位範囲は13cmで、1地点の外れ値を除いても、20地点の地下水位は-53~-18cmの範囲にあり、B圃場とくらべてムラは大きかった。

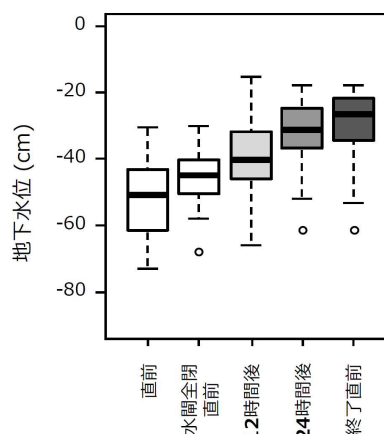


図-15 I圃場における地下灌漑時の地下水位

### 4. 3 地下灌漑時における土壌水分変動

B圃場の1回目と2回目の地下灌漑時における地下水位と土壌水分の変動をそれぞれ図-16、図-17に示す。1回目の地下灌漑では、地下水位の上昇とともに35、25、15、5cm深の順で土壌水分は増加した。5cm深の土壌水分ポテンシャルは、6月11日11時半に-15kPa(pF2.2)を、6月11日12時に-2.4kPa(pF1.4)を示し、取水を開始してから約25時間後に圃場容水量(-6kPa;pF1.8)を上回る土壌水分となった。この時の同一地点の地下水位は10cmであった。6月12日16時に水閘を全開した後、土壌水分は減少し15日13時に-10kPa(pF2.0)になった。

既往研究では、大豆種子の水分が発芽に必要な水分に達する日数は、土壌水分ポテンシャルを-10kPaで維持した時に0.7~1.1日(22℃の室温条件下)であることが報告されている<sup>4)</sup>。土壌水分の測定は5cm深で、播種深



度(おおよそ2~3 cm)の下ではあるが、1回目の灌漑では、大豆種子に必要な水分が供給されたと考えられた。2回目の地下灌漑でも地下水位の上昇とともに土壌水分は増加した。しかし、5 cm 深の土壌水分ポテンシャルは、取水終了時に-70 kPa (pF 2.8) で、この時の地下水位は-12 cm であった。水閘を全開した後、5 cm 深の土壌水

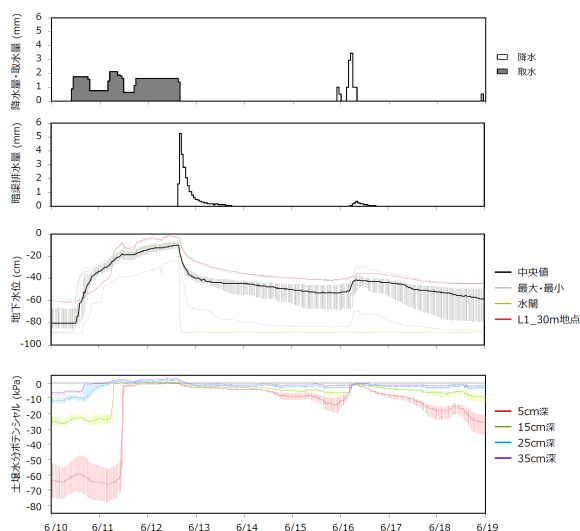


図-16 B 圃場の地下灌漑1回目における降水量・地下灌漑取水量と暗渠排水量、地下水位、L1\_30m 地点の土壌水分ポテンシャルの経時変化  
(地下水位は21 地点の中央値で、エラーバーは四分位範囲を示す。土壌水分ポテンシャルは4 反復の中央値でエラーバーは最大最小を示す。)

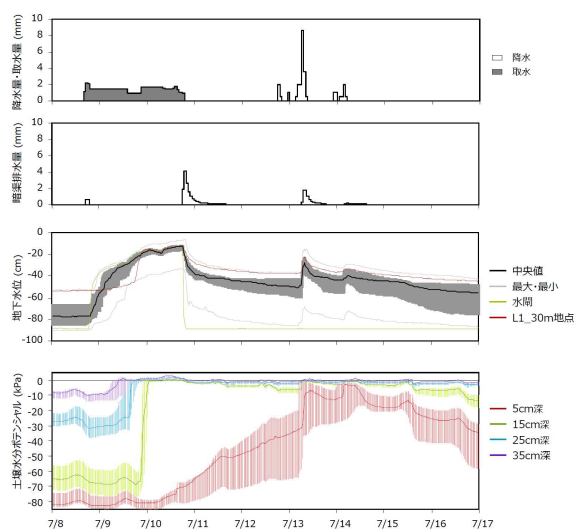


図-17 B 圃場の地下灌漑2回目における降水量・地下灌漑取水量と暗渠排水量、地下水位、L1\_30m 地点の土壌水分ポテンシャルの経時変化  
(地下水位は21 地点の中央値で、エラーバーは四分位範囲を示す。土壌水分ポテンシャルは4 反復の中央値でエラーバーは最大最小を示す。)

分は緩やかに増加し、7月13日の降水の直前には土壌水分ポテンシャルは-35 kPa (pF 2.5) であった。この間、降水がなかったため、取水終了後に暗渠から排水してもなお下層から水分が供給されたと考えられた。地下灌漑時における地下水位と土壌水分ポテンシャルとの関係を図-18に示す。35 cm 深の土壌水分ポテンシャルは、地下水位-60~-50 cm の時に-6 kPa (pF 1.8) に達した。25 cm 深の土壌水分ポテンシャルも、地下水位-50 cm 程度で-6 kPa (pF 1.8) に達した。本地点は、地表から約30 cm より下が泥炭層であり、泥炭層およびその直上5cm 程度までは、地下灌漑により速やかに水分が供給されたと考えられた。一方、5、15 cm 深の土壌水分は、地下水位が測定深度直下まで上昇してから増加した。このことから、播種後やその直後の根が十分伸長していない時の地下灌漑では、水分を供給したい深度の直下まで地下水位を上昇させてから水を落とすことが重要であるといえる。

I 圃場の地下灌漑時における地下水位と土壌水分の変動を図-19に示す。I 圃場では地下灌漑時に地下水位は変動せず、5、15、25、35 cm 深の土壌水分は地下灌漑実施中も緩やかに減少した。

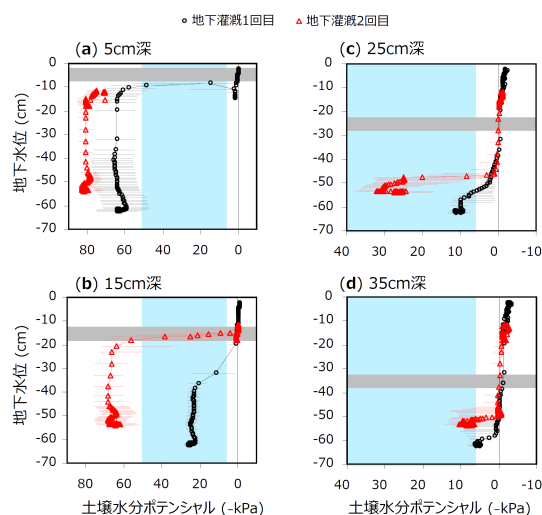


図-18 B 圃場の地下灌漑時における地下水位と土壌水分ポテンシャルとの関係  
(土壌水分ポテンシャルは4 反復の中央値で、エラーバーは最大最小を示す。灰色はテンシオメータのポーラスカップの埋設位置を示す。水色は易有効水分として圃場容水量(-6 kPa ; pF 1.8) から毛管連絡切断含水量 (-50 kPa ; pF 2.7) までの水分を示す。)

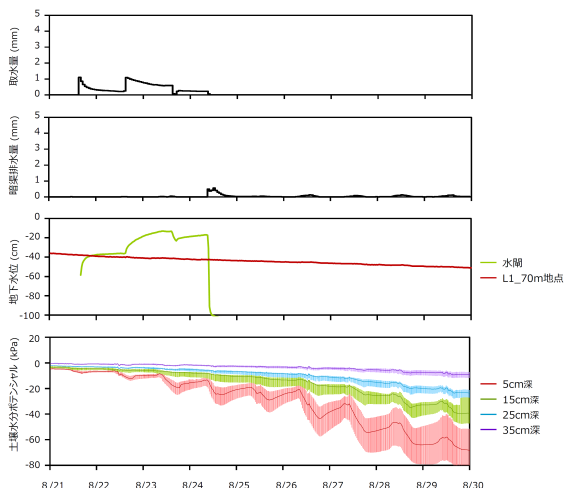


図-19 I 圃場の地下灌漑時における降水量・地下灌漑取水量と暗渠排水量、地下水位、L2\_70m 地点の土壤水分ポテンシャルの経時変化 (土壤水分ポテンシャルは4 反復の中央値でエラーバーは最大最小を示す。)

#### 4. 4 地下灌漑時の土壌物理性

B 圃場と I 圃場の飽和透水係数を図-20 に示す。圃場間と層位を 2 要因として二元配置の分散分析を行った結果、圃場と層位に交互作用は認められず、飽和透水係数は B 圃場で I 圃場より有意に大きかった ( $p < 0.01$ )。また、2 層目 (Ap2 層) の飽和透水係数が最も小さく、1 層目 (Ap1 層)、3 層目より有意に大きかった ( $p < 0.01$ )。2 層目の飽和透水係数は、B 圃場で  $1.5 \times 10^{-3}$ 、I 圃場で  $5.9 \times 10^{-5}$  であった。

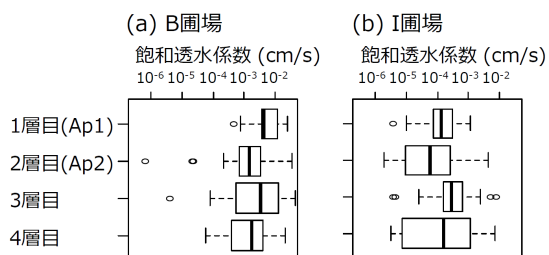


図-20 B 圃場と I 圃場における飽和透水係数 (飽和透水係数の統計量算出には対数変換値を用いた。)

#### 4. 5 地下灌漑時における水分移動の数値シミュレーション

B 圃場と I 圃場を対象に地下灌漑時の水分移動をシミュレーションした。水分移動の計算にはリチャーズ式と van Genuchten 式を用いた。van Genuchten 式のパラメータは現地採取した土壌サンプルから得られた土中水圧力  $h$

と体積含水率  $\theta$  の関係から決定した。サンプルの採取は、B 圃場では L1-30 地点、I 圃場では L2-40 地点で行った。数値計算には HYDRUS-2D を用いた。HYDRUS 上で  $x$  軸 (水平) 方向に 500 cm、 $z$  軸 (鉛直) 方向に 100 cm の長方形を計算領域とし、85 cm 深に直径 10 cm の暗渠を想定して半円をくり抜いた。断面調査と図面から土層を設定した。暗渠疎水材は 25 ~ 90 cm 深に設定した。初期土中水圧力  $h_{init}$  の設定のために事前計算を行った。事前計算の条件は、上下端の土中水圧力をそれぞれ -1000、40 cm、左右端の水分フラックスを  $0 \text{ cm d}^{-1}$ 、暗渠周りを浸出面 (水分フラックスを暗渠疎水材の飽和透水係数  $K_s = 4.3 \times 10^4 \text{ cm d}^{-1}$ ) とした。この時の水理学的平衡条件を初期土中水圧力  $h_{init}$  の条件とした。初期土中水圧力  $h_{init}$  はどちらの圃場でも上端の  $h = -1000 \text{ cm}$  から下端に向かうにつれ大きくなり、下端では  $h = 40 \text{ cm}$  になる分布であった。地下水位は両圃場で異なり、暗渠から最も遠い  $x = 500 \text{ cm}$  地点では、B 圃場と I 圃場でそれぞれ約 60、70 cm 深と I 圃場の方が 10 cm 前後深くなった。本計算の境界条件として、下端の土中水圧力を 40 cm、上・左右端の水分フラックスを  $0 \text{ cm d}^{-1}$ 、暗渠周りの土中水圧力を 70 cm とした。以上の条件で 1 日間の土中水フラックスを計算した。

計算では暗渠管から水が供給され、計算土層全体の土中水圧力  $h$  がすみやかに上昇した。B 圃場では 0.4 日目、I 圃場では 0.8 日目で降は  $h$  がほぼ変化がなくなり定常状態となった。この時の上端の  $h$  は B、I 圃場ともに約 -60 cm であった。地下灌漑開始から 0.2 日目の土中水フラックスの分布図を図-21 に示す。図中の白矢印は主な水分移動の方向を、矢印近くの数字は土中水フラックスの大きさを表している。B 圃場では、疎水材から主に 20~40 cm 深の土層を通して水が上・右端まで到達していた。I 圃場では 40~60 cm の土層を通り水が右方向へと移動した。

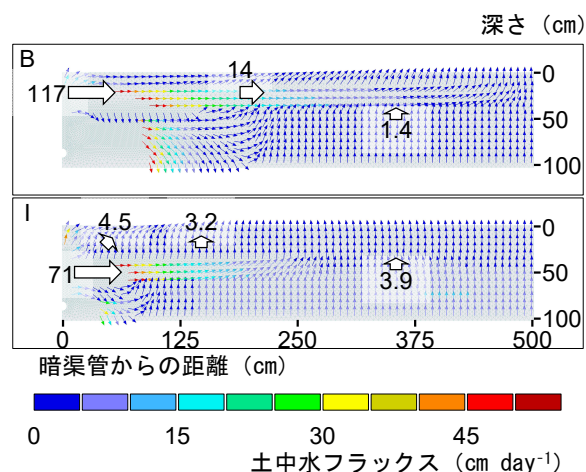


図-21 地下灌漑開始から 0.2 日目 (4.8 時間) における B 圃場と I 圃場の土中水フラックス分布

しかし、上方向への移動は20~40 cm 深の層の飽和透水係数  $K_s$  が 3.2 cm と小さかったため、上端への移動が B 圃場と比較すると遅れた。地表面近傍への速やかな水の供給のためには、暗渠疎水材が埋設されている 25 cm 深前後の土の透水性が重要であることが示唆された。

## 5. 地下灌漑の利用が環境負荷に与える影響の評価

### 5.1 調査地と方法

#### 5.1.1 調査地

調査は、美唄市の美唄地区の大豆畑と水田で行った。

大豆畑は、2019 年に地下灌漑を実施した試験圃場と実施しない対照圃場で調査した。試験圃場は、2.1.1 で述べた B 圃場と同一である。対照圃場は、同一農区内の圃場で、地下灌漑による取水を除いて試験圃場と同様の営農管理が行われた。

水田は、2017 年と 2018 年の登熟期に地下灌漑を実施した試験圃場と実施しない対照圃場で調査した。試験圃場と対照圃場は、3.1.1 で述べた圃場と同一である。

#### 5.1.2 方法

土壌表面からの温室効果ガスフラックスをクローズドチャンバー法で測定した。常設した架台にチャンバーを設置した後、0、5、10、15、20 分後にチャンバー内のヘッドスペースガスを 10mL 容の真空バイアル瓶に採取した。測定は、暗渠から 5.0m 地点において 3 反復で行った。測定頻度は 2~3 週間に 1 度程度とした。

ガス試料のメタン濃度は FID 付きガスクロマトグラフ、一酸化二窒素濃度は ECD 付きガスクロマトグラフで測定した。温室効果ガスフラックス測定時に、気温、5cm 深地温、5cm 深の酸化還元電位 (Eh) を測定した。

### 5.2 転作田における温室効果ガス排出

大豆畑のメタンフラックスは、6月11日の試験圃場を除いて、両圃場  $-0.03 \sim 0.05 \text{ mgC/m}^2/\text{h}$  の範囲で変動した (図-22)。地下灌漑実施中であった6月11日の試験圃場では、 $1.8 \pm 1.0 \text{ mgC/m}^2/\text{h}$  の大きなメタン排出が観測されたが、地下灌漑終了の2日後には  $-0.004 \pm 0.1 \text{ mgC/m}^2/\text{h}$  と対照圃場と同程度まで低下した (図-22)。

一酸化二窒素フラックスは、地下灌漑実施中の6月11日には試験圃場と対照圃場ともに  $0.1 \pm 0.2 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$  と差は認められなかったが、6月14日に試験圃場で  $0.8 \pm 0.3 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$  と対照圃場 ( $0.2 \pm 0.2 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$ ) より有意に大きかった (図-22)。また、2回目の地下灌漑終了の2日後でも、試験圃場における一酸化二窒素フラックスは  $1.1 \pm 0.3 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$  で、対照圃場 ( $0.1 \pm 0.1 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$ )

より有意に大きかった (図-19)。ただし、6月26日の一酸化二窒素フラックスは試験圃場、対照圃場それぞれ  $0.4 \pm 0.4$ 、 $1.3 \pm 1.4 \text{ mgN/m}^2/\text{h}$  で、対照圃場で大きな排出が観測された。これは6月22日の20mmの降雨によって土壌水分が上昇した影響によると考えられた。

以上のことから、大豆の発芽期の地下灌漑による土壌水分の上昇により、メタンと一酸化二窒素の排出が促進される可能性を示唆している。

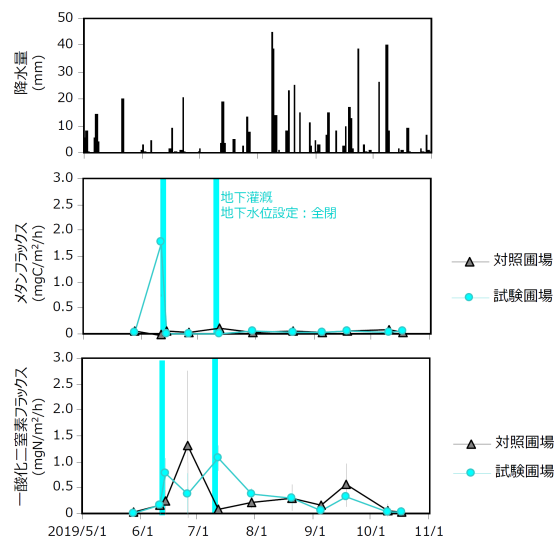


図-22 大豆畑の試験圃場と対照圃場におけるメタンフラックスと一酸化二窒素フラックスの季節変動 (エラーバーは標準偏差 (n=3) を示す。)

### 5.3 水田における温室効果ガス排出

水田のメタン排出量は、登熟期から収穫までの地下灌漑実施期間において、対照圃場と比べて試験圃場で大きい傾向があった。しかし、圃場内のばらつきが大きく、対照圃場との間に有意な差は認められなかった (図-23)。試験圃場では、登熟期の地下灌漑によって地下水位を高く維持することで、メタン排出が促進された可能性が考えられた。今後、水稻の登熟に留意しメタン排出を抑制する地下水位の最適な設定等の検討が必要である。

水田の一酸化二窒素排出量は、メタン排出量と比較し非常に小さかった (図-23)。また、圃場内のばらつきが大きく、試験圃場と対照圃場で有意な差は認められなかった。

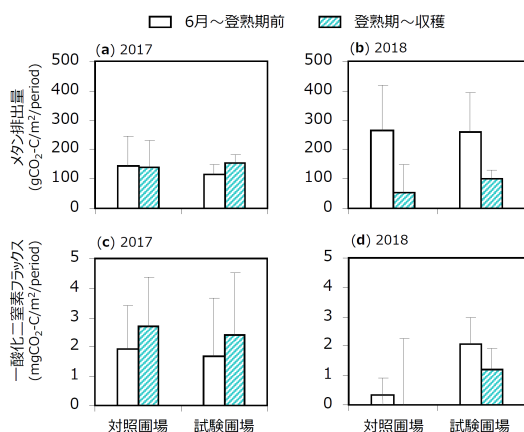


図-23 2017年と2018年の水田の試験圃場および対照圃場におけるメタン排出量と一酸化二窒素排出量 (エラーバーは標準偏差 (n=3) を示す。)

## 6. 大区画水田圃場における給排水ムラ対策技術の開発と地下水位制御システムの高度利用技術の提案

### 6.1 調査地と方法

#### 6.1.1 調査地

調査は、今金南地区のI圃場で2020年に行った。I圃場は、2.1.1で述べた圃場と同一である。2019年の馬鈴薯収穫後8月下旬に、取水樹から40m地点付近に暗渠に直交して約5m間隔で有材心土破碎を施工した(図-24)。モミサブロー(スガノ農機)を用い、疎水材は靱殻とした。その後、秋撒き小麦を栽培した。

地下灌漑は小麦収穫後の2020年8月21日から24日まで実施した。最初の24時間は水閘水位を地表下30cmの設定とし、その後は終了まで全閉した。

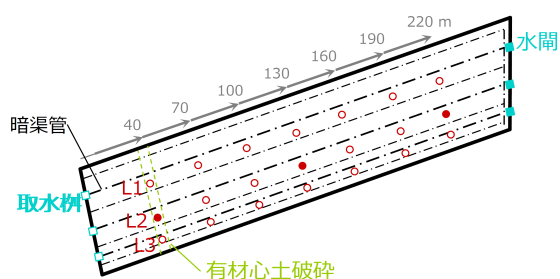


図-24 I圃場の有材心土破碎施工位置と観測地点位置図 (地下水位観測地点は白抜き赤丸で示す。塗りつぶしの赤丸は土壌水分も測定した地点を示す。)

### 6.1.2 方法

地下灌漑取水量、暗渠排水量および地下水位の測定方法は2.1.2で述べたとおりである。土壌水分は、有材心土破碎を施工した地点で、渠間のライン2(L2)の取水樹から40mの暗渠脇0.5m離れと暗渠間で、有材心土破碎を施工していない地点でL2の70m地点の暗渠間で測定した(図-2)。土壌水分ポテンシャルは、テンシオメータにより4深度(5、15、25、35cm深)、4反復で測定し、30分間隔で記録した。テンシオメータのポーラスカップの長さは6cmであり、中心部が測定深になるように埋設した。

### 6.2 有材心土破碎が地下灌漑時の地下水位と土壌水分変動に与える影響

有材心土破碎を施工した地点では、地下灌漑時に暗渠脇の水位は水閘水位の上昇とともに-12cmまで上昇したが、暗渠間の水位は取水から48時間以上経過後緩やかに上昇し、地下灌漑終了時は-35cmであった(図-25(a))。一方、有材心土破碎を施工していない地点の暗渠間では、地下灌漑時に地下水位は上昇しなかった(図-25(a))。

暗渠脇では、8月22日17時頃から地下水位の上昇に伴い35、25、15、5cmの順で土壌水分は上昇した(図-25(a)(c))。一方で、有材心土破碎を施工した暗渠間では地下水位-35cmまでの上昇にもかかわらず作土の土壌水分が上昇し、地下灌漑終了時の土壌水分ポテンシャルは15cm深で-0.5kPa、5cm深で-2kPaであった(図-25(b)(d))。暗渠間では、有材心土破碎により埋設された疎水材を通して作土へ給水されたと考えられた。そのため、地下灌漑による作土への給水には有材心土破碎の施工が有効であるといえた。

## 7. まとめ

泥炭を基盤とする転作作物栽培圃場で乾燥時に地下灌漑を実施し、地下水位の変動を調査した。圃場間で給排水ムラの程度は異なり、その発生要因は硬盤層の透水性にあると評価した。また、作物生育の湿害を防ぐためには、地下水位の低下だけでなく、作土からの余剰水の排除が重要であることを明らかにした。



水みちの発達した美唄地区の圃場では、地下灌漑時に暗渠間でもムラなく地下水位が速やかに上昇し、作土の土壤水分も地下水位の上昇とともに上昇した。一方、硬盤層を有する今金南地区の圃場では、地下灌漑時に暗渠間の地下水位上昇幅はわずかである上、美唄地区の圃場と比べてムラも大きく、作土の土壤水分も変化しなかった。このように地下水位制御システムによる地下水位の制御や土壤への水分供給には、飽和透水係数の大きさや

バラツキに影響を受けることを検証した。

今金南地区の転作圃場では、穀殻を疎水材とした有材心土破碎を暗渠に直交するよう施工して地下灌漑を実施した。有材心土破碎を施工していない地点の暗渠間では、地下灌漑時に地下水位は上昇せず作土の土壤水分も増加しなかった。しかし、有材心土破碎を施工した地点では、地下灌漑時に埋設された疎水材を通して作土へ給水され作土の土壤水分は増加した。地下灌漑による作土への給

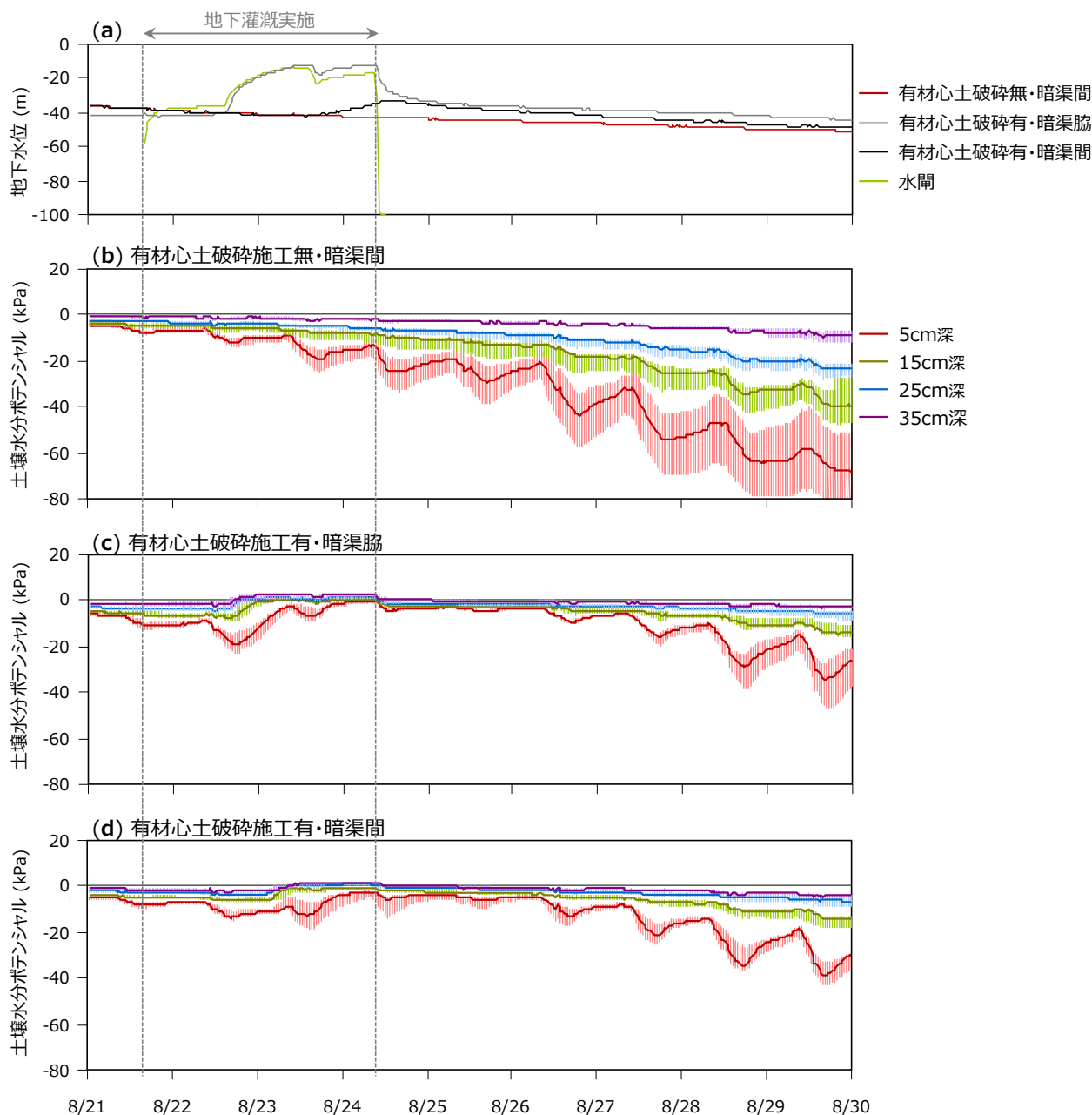


図-25 I 圃場の地下灌漑時における地下水位 (a) と有材心土破碎施工無・暗渠間 (b)、有材心土破碎施工有・暗渠脇0.5m 離れ (c)、有材心土破碎施工有・暗渠間 (d) の土壤水分ポテンシャルの経時変化 (土壤水分ポテンシャルは4 反復の中央値でエラーバーは最大最小を示す。)

水には、有材心土破碎の施工が有効であることを確認した。

泥炭を基盤とする水稻移植圃場で、落水期に地下灌漑を実施し、水稻への水分供給と地耐力への影響を調査した。落水期の水稲出液速度は、試験圃場で対照圃場より大きかった。しかし、これは収量に影響を及ぼすものではなかった。地耐力は、試験圃場で対照圃場よりも小さかったが、両圃場ともその平均値はコンバイン走行に必要なとされる値を満たしており、落水期の水稲への水分供給と収穫期に必要な地耐力の確保が両立できることを確認した。

地下灌漑に伴う環境負荷への影響については、大豆畑で温室効果ガス排出を測定した結果、地下灌漑時またはその直後にメタンと一酸化二窒素の大きな排出が観測さ

れた。また、水稻落水期には、地下灌漑によりメタン排出量が増大する傾向があった。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：北海道総合開発計画、2016
- 2) 農林水産省：土地改良長期計画、2021
- 3) 北海道農政部：北海道施肥ガイド2020
- 4) 高橋智紀、細川寿、松崎守夫：重粘質転換畑における土壌鎮圧によるダイズ種子の吸水促進効果、日本土壤肥料学会誌、79 (1)、pp. 1~7、2008

## 16.1 経営規模の拡大に対応した大区画圃場の効率的な整備技術と高度な管理技術の開発

### 16.1.3 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究

#### (このうち、大区画水田の高精度な水管理技術の開発と用水量の解明)

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ(水利基盤チーム)

技術開発調整監(寒地技術推進室)

研究担当者：大久保天、越山直子、大津武士、岩永将史、  
成田徳昌、南恭子

#### 【要旨】

北海道の水田地帯では、農作業の効率化をめざして、圃場の大区画化や用水路のパイプライン化、地下水位制御システム等の整備が進められている。こうした地域では、小用水路形式や圃場の区画規模の変化、直播栽培面積の拡大が生じることから、水管理や用水量への影響の解明が求められる。本研究では、大区画化圃場整備が行われた水田における水管理および用水量の特性を解明することを目的として、調査を行った。その研究成果は以下のとおりである。

- 1) 泥炭を基盤とする大区画圃場において、栽培方式ごと(移植栽培、湛水直播栽培、乾田直播栽培)の用水量特性の違いを明らかにするために、水管理および用水量の調査を行った。その結果、栽培方式が異なっても、圃場取水量に大きな差は見られなかった。この理由については、泥炭圃場では地下水位が高いことから、代かきの有無に関わらず、圃場浸透量はいずれの栽培方式においても小さかったことが考えられた。そのため、圃場取水量の差は、栽培方式とは関係なく、強制落水や深水灌漑等の栽培管理の違いにより生じたといえる。
- 2) 圃場整備により、小用水路の形式が開水路からパイプラインへ変化した圃場において、整備前後における移植栽培および乾田直播栽培の用水量変化を調査した。その結果、整備済みの乾田直播栽培圃場では、供給水量が大幅に増加した。その要因として、圃場浸透量の増加に加え、整備に伴う取水管理の変化が影響していると考えられた。
- 3) 整備済み圃場を対象に、小用水路形式や栽培方式と水管理操作との関係を分析した。その結果、小用水路形式がパイプラインである場合は、開水路である場合と比べて、取水時間帯が比較的集中する傾向が確認された。また、圃場整備後の時間経過に伴う影響については、供給水量に大きな変化はなかったが、圃場の浸透量が微増する傾向や、農家の習熟に伴う取水開始時刻の変化がみられた。これらのことから、施設管理者が分水操作等の配水管理を行う際は、これらの変化による影響について留意すべきであると考えられた。
- 4) 栽培方式ごとの生育時期や栽培管理の違いに着目して、将来の直播栽培面積の拡大に対応できる用水計画手法を提案した。この手法により、「移植栽培が主流となっている現況」および「直播栽培面積が拡大した将来」における用水計画のイメージを比較し、将来の用水需要における留意点を抽出した。さらに、これを圃場群に適用を拡大して、将来の圃場群ピーク用水量を予測し、灌漑区域内の配水管理において、特に注意が必要な時期や用水需要の変化による影響について考察した。

キーワード：大区画、水田、圃場整備、直播栽培、用水需要

#### 1. はじめに

食料・農業・農村基本計画では、農地の大区画化や汎用化等の基盤整備が重要な施策として位置付けられている。北海道は、全国の4分の1を占める耕地面積を有しており、大規模で専門的な農業が展開されている。そ

の一方で、農業者の高齢化等に伴う農家戸数の減少により、担い手への農地集積が急速に進んでおり、農業経営の大規模化への対応が喫緊の課題となっている。大規模水田地帯では、その対応策として、圃場の大区画化や水管理の省力化を目的とした地下水位制御システムの整備

が行われている。これらの整備が実施された地域の中には、水稲直播栽培を導入し、育苗作業に関わる労働時間の削減と農作業時期の分散により、さらなる労働生産性の向上を図っているところもある。こうした整備に伴い、灌漑方式や水稲栽培方式の多様化が進展すると、圃場単位における水管理や取水量が変化する<sup>2)</sup>が、地下水位が比較的高い地域では、水管理が変化しても、移植栽培と直播栽培における圃場への供給水量の差が大きく変わらない例もある<sup>3)</sup>。将来にわたり、農業用水を安定的、効率的に利用するためには、整備済み地区における圃場水管理や用水量の事例を調査し、圃場や農区における水収支特性を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、圃場整備が行われた地域において、安定的に農業用水を利用するための水管理技術を構築することを目的として、圃場整備後における移植栽培および直播栽培における水管理および水収支、パイプライン化前後の用水量についての調査を実施した。本稿の構成は、以下のとおりである。第1章で本研究の目的を述べた後、2章では水稲の栽培方式ごとの用水量、3章では圃場整備前後における用水量の変化、4章では整備済み圃場における水管理操作の特性、5章では将来の農業用水需要の予測手法について述べる。

が整備された。各圃場の面積は1.1~1.2haである。

農業用水は、支線用水路（開水路）から小用水路（開水路）を経由し、各圃場へ取水される。一筆の圃場への用水供給は、地表灌漑2ヶ所、地下灌漑1ヶ所から行える。圃場排水は、地表排水と地下排水で行える。地表排水の数は1圃場当たり2ヶ所である。圃場内には、暗渠管（φ60~125mm、勾配1/500）が田面から0.70m~1.00mの深さに10m間隔で埋設されている。疎水材は砂利であ

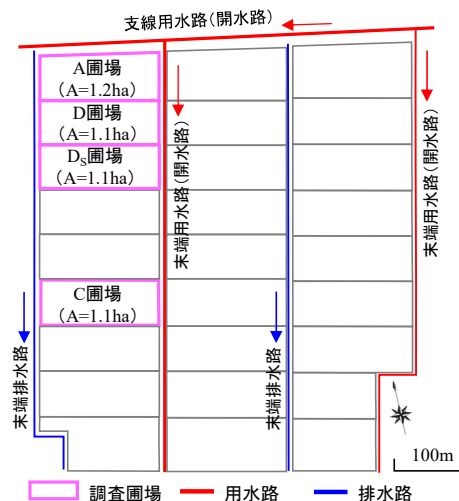


図-1 調査圃場の位置図

## 2. 水稲栽培方式ごとの用水量の解明

整備済みの水田圃場における用水量を解明するために、移植栽培、湛水直播栽培、乾田直播栽培の水管理および用水量について調査を行った。その結果を以下に述べる。

### 2.1 地区概要

美唄市に位置する4筆の圃場（図-1）を対象として、平成28年から平成30年までの3年間、調査を行った。各圃場の水稲栽培方式を表-1に示す。これらの圃場は、平成27年に圃場整備が実施され、地下水位制御システム

表-1 各調査圃場の栽培方式

圃場名	平成28年度	平成29年度	平成30年度
A	乾田直播栽培 (代かきなし)	乾田直播栽培 (代かきなし)	移植栽培 (代かきあり)
D	湛水直播栽培 (代かきあり)	湛水直播栽培 (代かきあり)	湛水直播栽培 (代かきあり)
C	移植栽培 (代かきあり)	移植栽培 (代かきあり)	移植栽培 (代かきあり)
Ds	湛水直播栽培 (代かきあり)	乾田直播栽培 (代かきなし)	乾田直播栽培 (代かきなし)

※着色した箇所では、調査未実施である。

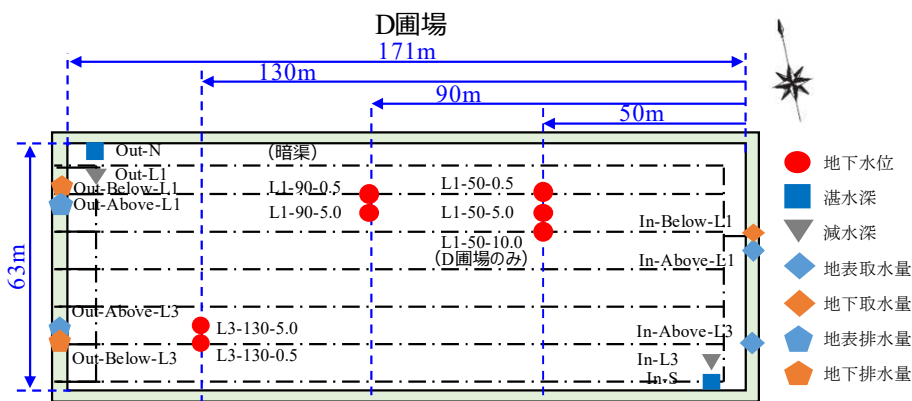


図-2 観測地点の位置 (D圃場の例)

る。暗渠水閘の数は、1 圃場当たり 2 ヶ所である。調査圃場の水管理は、すべて同一の農家により行われた。A および D 圃場については、平成 28 年のみ、JA による水管理の指導が行われた。

## 2. 2 調査方法

D 圃場を例として、各圃場における観測地点の位置を図-2 に示す。各圃場の水収支を把握するために、電磁流量計により地表取水量、地下取水量、地下排水量を観測した。ただし、地下取水量を観測する電磁流量計は、平成 28 年度は所有台数が 2 台であったため、A および D 圃場にだけ設置し、C 圃場には設置しなかった。平成 29 年度では地下取水量を観測する電磁流量計を A、D、C 圃場に、平成 30 年度では Ds、D、C 圃場に設置した。なお、取水量に欠測が生じた期間については、湛水位および地下水位の変化量を基にした圃場の水収支計算により、取水量を推定した<sup>4)</sup>。この推定は、考察に用いるには十分な精度で行えた。各圃場の地表排水量については、直角三角堰を排水口近傍に設置し、観測した。さらに、塩ビ管に格納した絶対圧式水位計を田面から 1.3m の深さに埋設し、各圃場内の地下水位を観測した。地下水位観測地点名は、暗渠ライン名 (L1 または L3) - 取水桝からの距離(m)-暗渠ラインからの距離(m)を表している。湛水位は、水圧式水位計を各圃場の 2 ヶ所に設置し観測した。各圃場において湛水があり、かつ取水、排水、降雨がないときに N 型減水深計を各圃場内の 2 点に設置し、減水深を観測した。気象については、A 圃場の近傍に気象観測機器を設置し、雨量、気温、風向・風速、日射量、相対湿度、大気圧を観測した。

観測期間は基本的に 5 月から 8 月までであるが、地下水位は 9 月下旬までである。測定間隔は 10 分とした。

なお、蒸発散量については、ペンマン法<sup>5)</sup>により推定した。土壌については、各圃場の 1 地点において深さ 100cm までの土壌断面調査を行うとともに、採取した試料で土壌物理性試験を行った。各圃場の営農管理については、農家への聞き取り調査を行った。

## 2. 3 気象状況および圃場条件

### 2.3.1 調査年における気象状況

灌漑期間中 (5~8 月) における降水量の合計値は、平成 28 年度では 772.0mm、平成 29 年度では 485.5mm、平成 30 年度では 685.5mm であり、気象庁データの平年値と比べると、平成 28 年度は約 1.2 倍、平成 29 年度は約 0.8 倍、平成 30 年度は約 1.1 倍であった。降水量について、月ごとの値と平年値を比べると、6 月はいずれの年とも平年値の 2.2~2.7 倍、平成 28 年 8 月は台風の影響に

より平年値の 2.3 倍であった。気温については、いずれの年においても平年並みであった。

### 2.3.2 各圃場の土壌

A 圃場の土壌は、地表から-32cm までが作土であり、-32cm から厚さ 13cm の泥炭層がある。泥炭層以外の土性はシルト質埴土である。D 圃場では、地表から-18cm までが作土である。-37cm から厚さ 30cm の泥炭層がある。泥炭層以外の土性は軽埴土である。C 圃場では、地表から-25cm までが作土である。-35cm 以深は泥炭層であり、それ以外の土性は軽埴土である。いずれも、室内飽和透水試験による透水係数 (cm/s) のオーダーは、作土層で  $10^6 \sim 10^7$ 、泥炭土で  $10^4 \sim 10^5$  である。

### 2.3.3 各圃場の浸透量

3 年間に行われた減水深調査における減水深の値から、それぞれの蒸発散量を差し引き、浸透量を算定した。この結果、各圃場における日浸透量の 3 ヶ年の正の値の平均値 (括弧内は最小値および最大値を示す) は、乾田直播栽培 (A および Ds 圃場) : 2.8mm (-3.1~15.8mm)、湛水直播栽培 (D 圃場) : 2.2mm (-1.0~5.7mm)、移植栽培 (C 圃場) : 2.2mm (-3.1~17.4mm) であった。周辺の地下水位が低い圃場では、代かきが行われない場合、浸透量が増加する例がある<sup>6)</sup>が、調査圃場ではいずれも浸透量の値は概ね小さかった。その理由として、調査地区は泥炭地域であり、圃場の地下水位が比較的高いことから、代かきの有無による差が小さくなったためと考えられる。

## 2. 4 各栽培方式における圃場の水管理

各調査年度における各圃場の湛水位および地下水位の経時変化と水管理状況を、それぞれ図-3~図-5 に示す。ここで、図中における各年および各圃場のデータは、平成 28 年の A 圃場は「28A (乾田直播)」というように、和暦、圃場名 (括弧内は栽培方式) の組合せにより表している。また、図中の湛水位は 2 地点の平均値を、地下水位は 4 地点 (L1-50-0.5、L1-50-5.0、L3-130-5.0、L3-130-0.5) の平均値を標高換算した値を示した。ここで、直播栽培において行われる「浅水管理」とは、田面を湿润状態にさせ、地表面が乾いたら再び湿润にする水管理をいう。浅水管理期間の判定は、水稻の生育や取水時期、地下水位変化により行った。各圃場の水管理は、以下のとおりである。

### 2.4.1 A および Ds 圃場 (乾田直播栽培) の水管理

図-3 に示すように 28A では、播種 (5 月 10 日) の翌日に初期取水が行われた後、浅水管理が行われた。浅水管理期間は主に地表灌漑と地下灌漑の併用により取水され、浅水管理後は主に地下灌漑が行われた。7 月中旬に

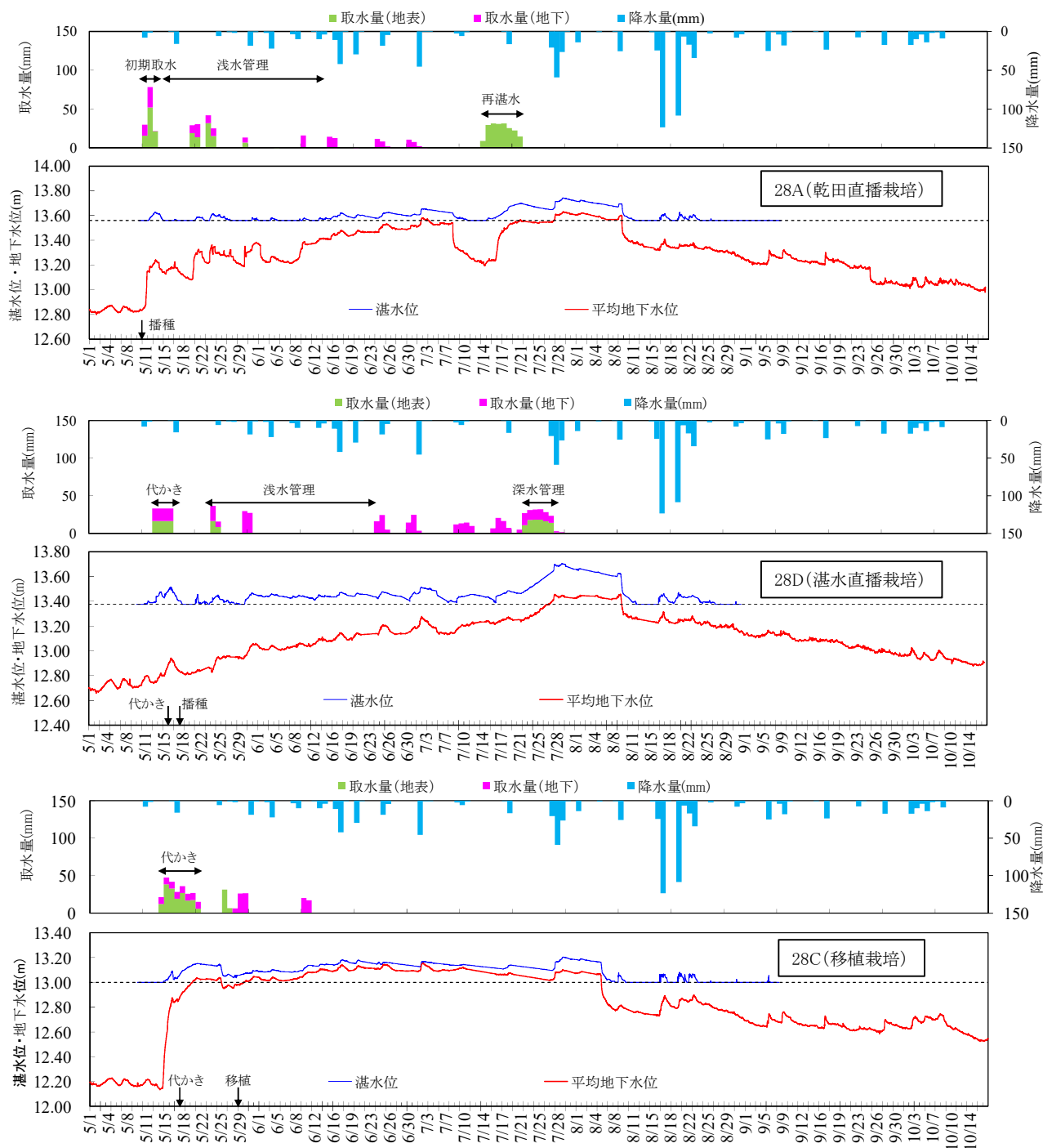


図-3 各圃場における湛水位および地下水位の経時変化（平成28年）

除草材散布のため一時的に落水されており、再湛水時にまとまった取水が行われた。

図-4に示すように29Aでは、播種（5月10日）を行った日の夕方に初期取水が行われた後、3週間程度、浅水管理が地下水により行われた。8月7日から8月26日までの地表取水については、農家への聞き取りによると、取水停止の操作が遅れたことから、意図していたよりも取水期間が長くなった。このため、この期間の取水量は

ゼロとし、排水量は水収支により推定した。

図-5に示すように30Dsでは、播種（5月10日）を行った後に地表灌漑と地下灌漑の併用により初期取水が行われ、その2週間後に地表灌漑と地下灌漑の併用または地表灌漑により浅水管理が行われた。7月中旬には落水され、除草剤が散布された後に再湛水された。

#### 2.4.2 D圃場（湛水直播栽培）の水管理

図-3に示すように、28Dでは、代かき（5月15日）の

2 日後に播種が行われ、播種後から苗立ちが安定するまでの期間に浅水管理が地下灌漑と地表灌漑の併用または地下灌漑により行われた。浅水管理期後は、主に地下灌漑が行われ、7 月下旬以降は地下灌漑と地表灌漑の併用により取水された。7 月下旬から 8 月上旬までの期間、深水灌漑が行われた。

図-4 に示すように、29D では、代かき (5 月 13 日) の 2 日後に播種が行われ、播種後から苗立ちが安定するまでの期間に浅水管理が地下灌漑により行われた。6 月中

旬以降、湛水管理が行われた。農家への聞き取りによると、例年は 8 月中旬に落水するが、農家による落水操作が遅れ、9 月初めに落水が行われた。

図-5 に示すように、30D では、6 月中旬以降は灌水されず、圃場への供給は降雨のみであった。

### 2.4.3 C 圃場 (移植栽培) における水管理

図-3 に示すように、28C では、5 月 14 日に地表取水と地下取水との併用により初期取水が行われ、代かき (5 月 17 日) を行った後、湛水状態で管理された。移植後は

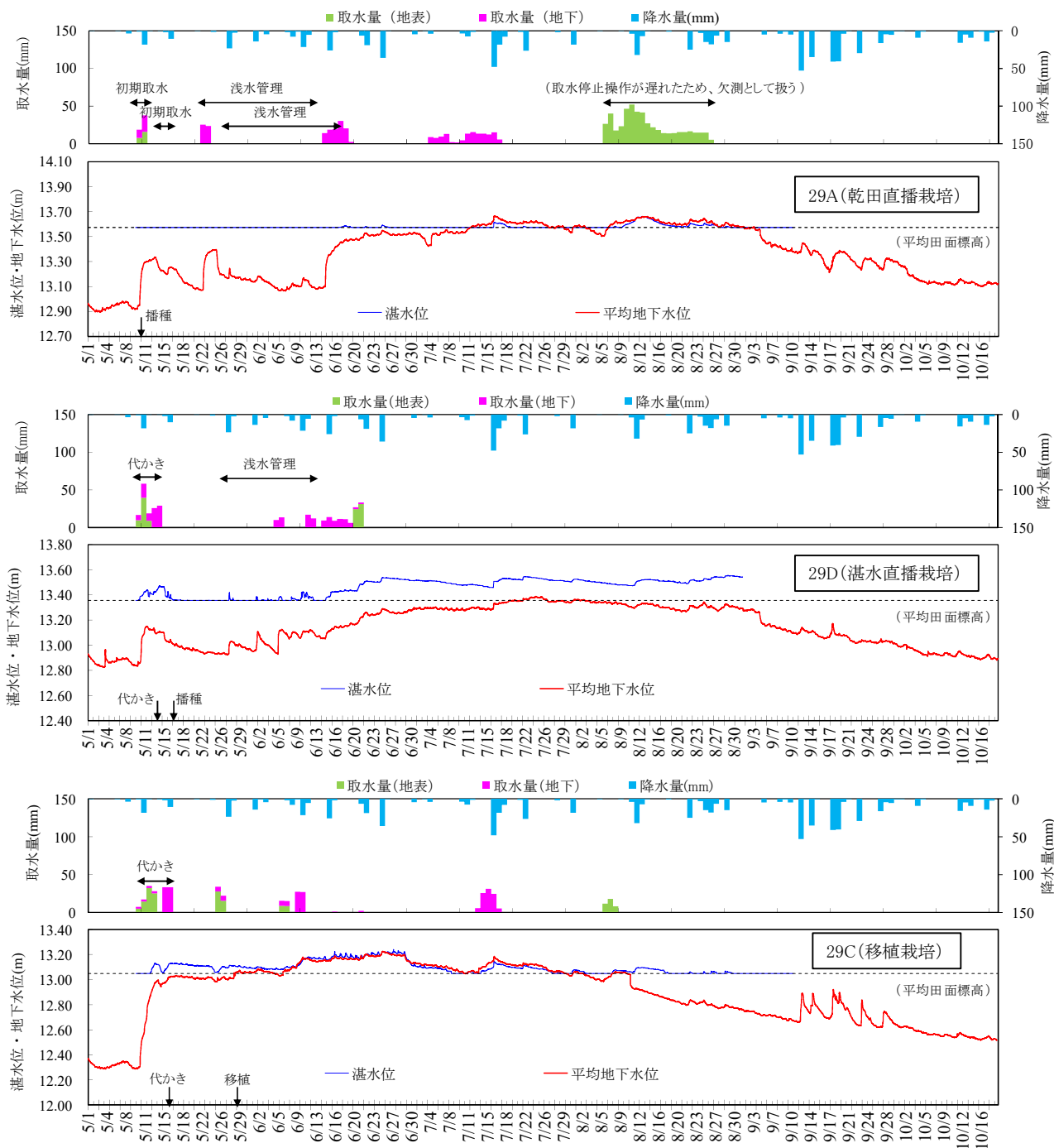


図-4 各圃場における湛水位および地下水位の経時変化 (平成 29 年)



地下灌漑が行われた。降雨量が多かったことから、6月中旬以降は取水が行われなかった。湛水位および地下水位の経時変化については、移植栽培では、地表灌漑と地下灌漑の併用による代かき取水に伴い、地下水深が-0.80mから-0.10m程度まで急速に上昇した。湛水期間中における圃場の地下水位は、8月初めまでほぼ湛水位と一体的に変動していた。C圃場における水管理の特徴としては、代かき用水があったこと、中干しが行われなかったために再湛水時の栽培管理用水量がなかったことが挙げられる。

げられる。

図-4に示すように、29Cでは、初期取水が5月10日に行われ、代かきが5月15日に行われた。その13日後に移植が行われ、その後は湛水状態で管理された。

図-5に示すように、30Cでは、初期取水が5月11日に行われ、5月19日～20日に代かきが、5月24日に移植が行われた。代かき期間では、地表灌漑と地下灌漑の併用であったが、移植後に地下灌漑が行われた。6月中旬以降は灌水されず、圃場への供給は降雨のみであった。

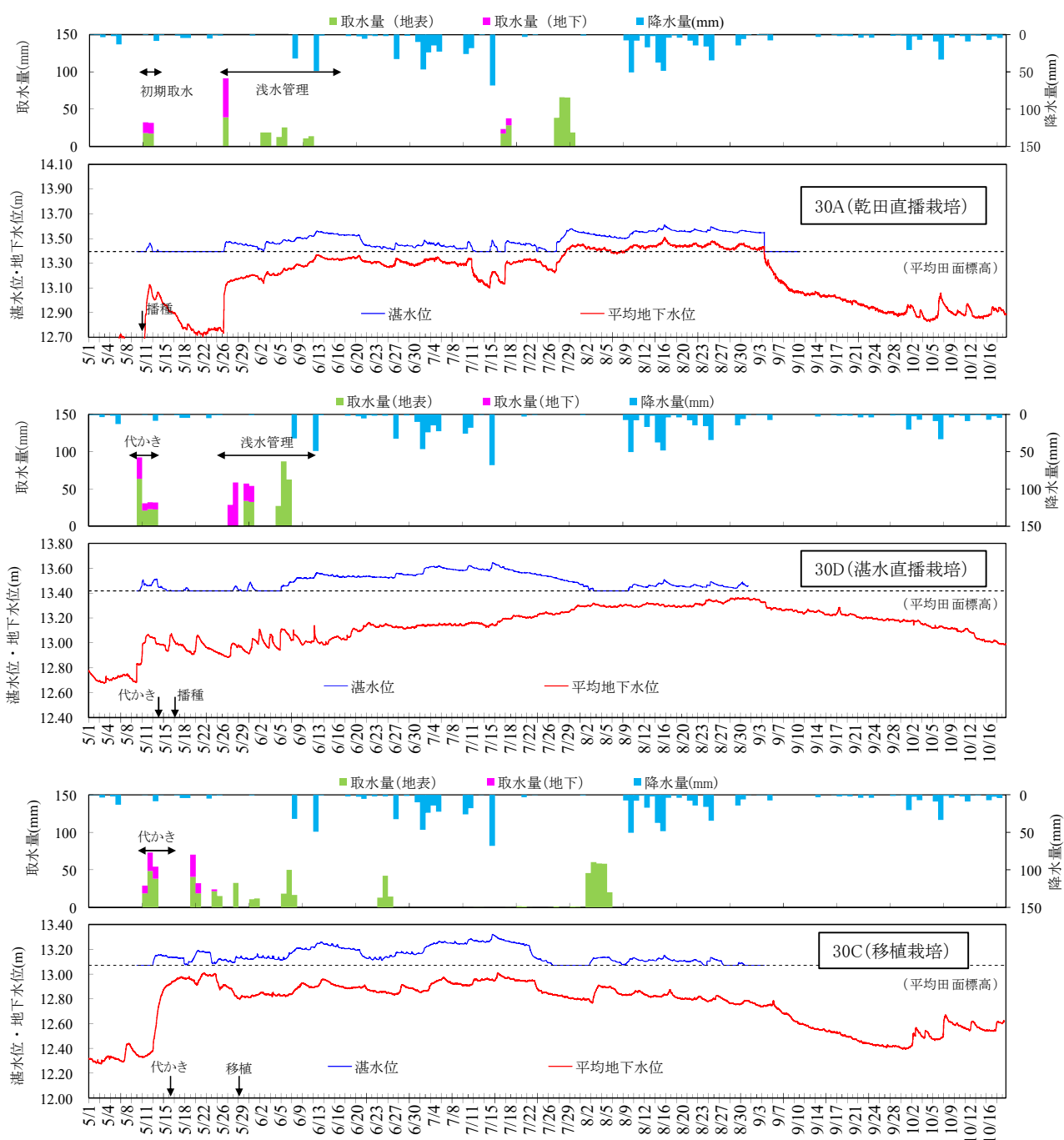


図-5 各圃場における湛水位および地下水位の経時変化（平成30年）



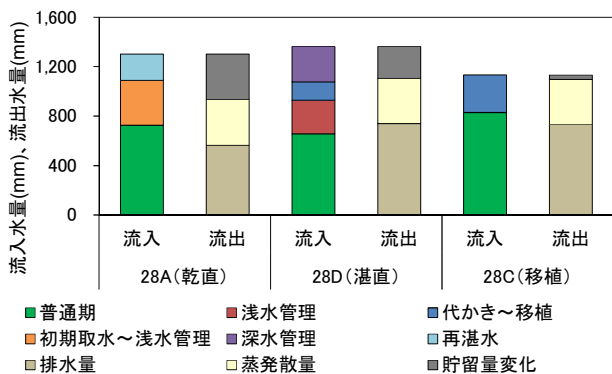


図-6 圃場水収支の比較 (平成28年)

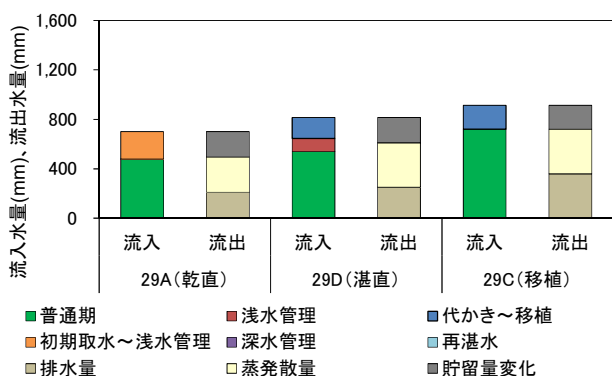


図-7 圃場水収支の比較 (平成29年)

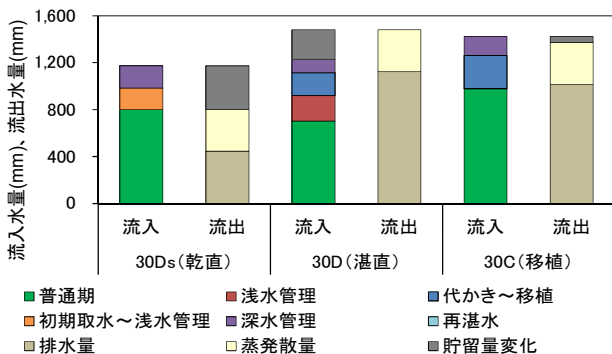


図-8 圃場水収支の比較 (平成30年)

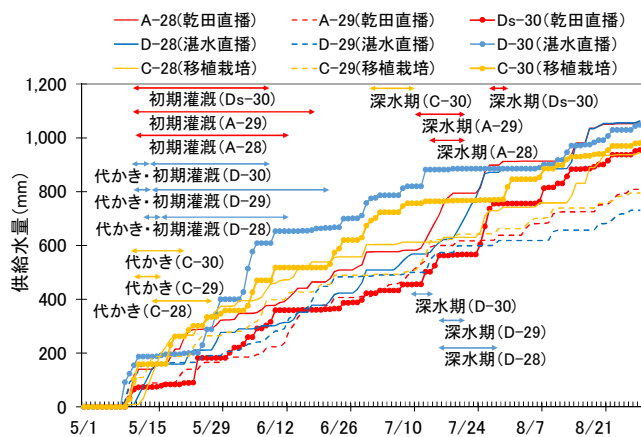


図-9 各圃場における累加供給水量

## 2. 5 各栽培方式における圃場の水収支の特性

灌漑期における水収支特性をみるために、平成28年から平成30年までにおける各圃場の水収支を比較した(図-6～図-8)。ここでは、取水量および降水量を流入とし、排水量および蒸発散量を流出とした。水収支の算定対象期間は、平成28年8月後半に大雨があったことを考慮し、兩年とも、代かき取水または初期取水から8月中旬までとした。ただし、前述のとおり、29Aについては、意図しない取水量が含まれていたため、8月上旬までの期間を対象とした。

各圃場における流入量および流出量の大小関係は、30Dsでは流入が流出を下回っていたが、その他の圃場では流出が流入を上回っていた。前者の理由としては、縦浸透および横浸透による圃場外への流出や圃場内への貯留が生じたこと、後者の理由としては、縦浸透および横浸透による圃場への流入が生じたことが考えられる。

各年における圃場への流入量を比べると、平成29年は他の年よりも値が小さかった。この理由として、平成28年では、8月に大雨があったこと、A圃場の除草剤散布のために落水した後の再湛水量(195mm、地表灌漑)、D圃場の深水用水量(184mm、地表灌漑および地下灌漑の併用)が、また平成30年度ではDs圃場の除草剤散布のために落水した後の再湛水量(61mm、地表灌漑および地下灌漑の併用)があったことが考えられる。

## 2. 6 各栽培方式における特徴的な水管理

各栽培方式における特徴的な水管理を経時的に把握するために、灌漑期間における各圃場への供給水量(取水量と有効雨量の和)を算定し、累加供給水量を比較した(図-9)。有効雨量については、地表排水量を栽培管理用水量(圃場へ供給された用水のうち落水口等から表面流去する水量)と無効雨量とに分離する方法により算定した。なお、平成29年のA圃場では、8月上旬以降は、農家による取水停止操作が遅れたため欠測扱いとし、累加供給水量の計算対象とはしなかった。

各栽培方式における8月末時点の累加供給水量をみると、平成28年では、28Aおよび28Dの値は28Cより25%程度多く、平成29年では、いずれも値は同程度であり、平成30年では、30Dsおよび30Cは30Dよりも20%程度多い値であった。栽培方式ごとの水管理をみると、28Aおよび30Dsでは7月中旬に除草剤散布のための落水に伴う再湛水が行われ、28Dでは深水灌漑が行われた。栽培管理に伴う主な水管理は、栽培方式に関わらず、以下に述べる状況下において行われた。農家への聞き取りによれば、28Aの除草剤散布に伴う落水・再湛水は、栽培

方式とは関係なく、水稻の生育状況、雑草の種類や繁茂状況に応じて実施された。28Dの深水灌漑については、水稻の生育状況と気象条件に応じて必要とされた。異なる栽培方式では、それぞれ的水稻の生育にずれが生じるため、別の時期に低温が到来していれば、他の圃場でも深水灌漑が行われたはずである。

前述したように、各栽培方式の圃場浸透量は、代かきの有無に関わらず、いずれも小さい値であった。それゆえ、各栽培方式の用水量の差は、除草剤散布に伴う落水および再灌水や深水灌漑の有無により生じた。これらの栽培管理は、特定の栽培方式だけで必要とされるようなものではなく、気象の推移によっては、いずれの栽培方式でも必要になる可能性のあるものであった。3種の栽培方式を比べれば同じ日に同じ生育ステージであるとは限らないため、3圃場が同じ気象条件におかれたとしても、必ずしも同じ防除作業が行われるわけではない。また、ある年にある栽培方式に対して行われた栽培管理が、別の年には別の栽培方式で実施されることもある。このように3カ年の調査では、ある栽培方式に固有で、用水計画上で見込まなければならない栽培管理用水量は発生

していなかったと考えられる。

### 3. 圃場整備後における用水量の変化

圃場整備前後における用水量の変化を解明するために、未整備圃場および整備済み圃場を対象として、移植栽培および乾田直播栽培における用水量および水管理について調査を行った。その結果を以下に述べる。

#### 3.1 地区概要

調査対象は、空知郡中富良野町に位置するM農区内の延べ5圃場およびI農区内の延べ5圃場である。M農区では平成30年に、I農区では平成22年にそれぞれ国営農地再編整備事業により圃場整備が実施され、大区画化およびパイプライン化、地下水水位制御システムの整備が行われた。水管理調査については、M農区では、平成26年および平成27年に整備前の圃場(以下、未整備圃場)、令和元年に整備後の圃場(以下、整備済み圃場)において行った(図-10、図-11)。I農区では、整備後である平成25年、平成26年、平成27年、令和元年、令和2年において、圃場内の水管理調査を行った(図-12)。

調査圃場の栽培方式は、移植栽培および乾田直播栽培である。各圃場の概要を表-2に示す。乾田直播栽培では、前年度に移植栽培を行うとその年において雑草抑制が期待できることから、基本的に前年度に移植栽培が行われている。

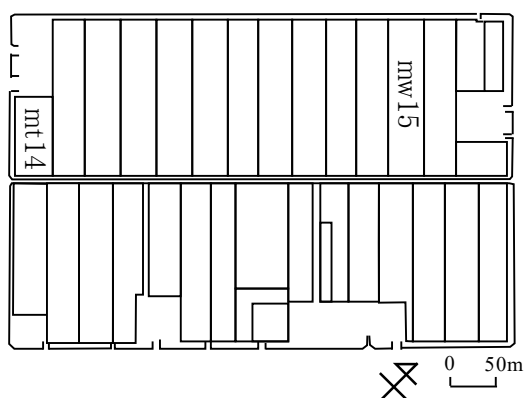


図-10 調査圃場の位置 (M農区、圃場整備前)

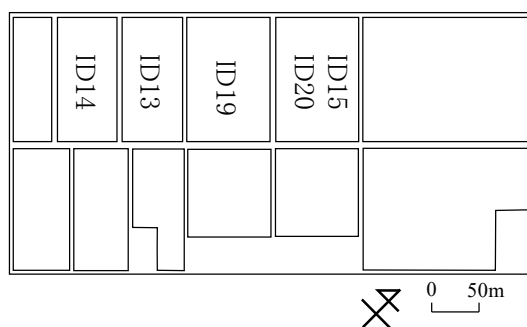


図-12 調査圃場の位置 (I農区、圃場整備後)

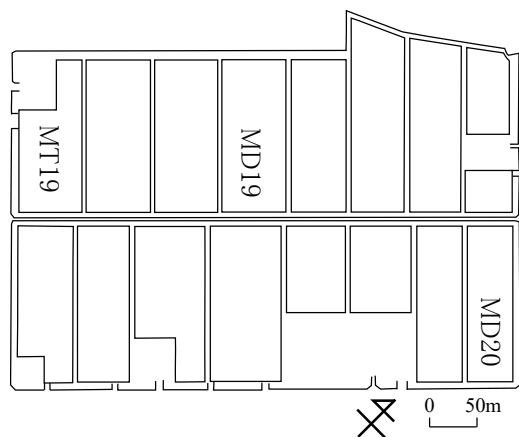


図-11 調査圃場の位置 (M農区、圃場整備後)

表-2 調査圃場の概要

圃場名	栽培方式	面積(m <sup>2</sup> )	圃場整備年	調査年
mt14	移植	4,116	未整備	平成26年
md15	乾田直播	5,910	未整備	平成27年
MT19	移植	10,649	平成30年	令和元年
MD19	乾田直播	11,971	平成30年	令和元年
MD20	乾田直播	11,971	平成30年	令和2年
ID13	乾田直播	8,802	平成22年	平成25年
ID14	乾田直播	8,784	平成22年	平成26年
ID15	乾田直播	11,730	平成22年	平成27年
ID19	乾田直播	11,684	平成22年	令和元年
ID20	乾田直播	11,730	平成22年	令和2年

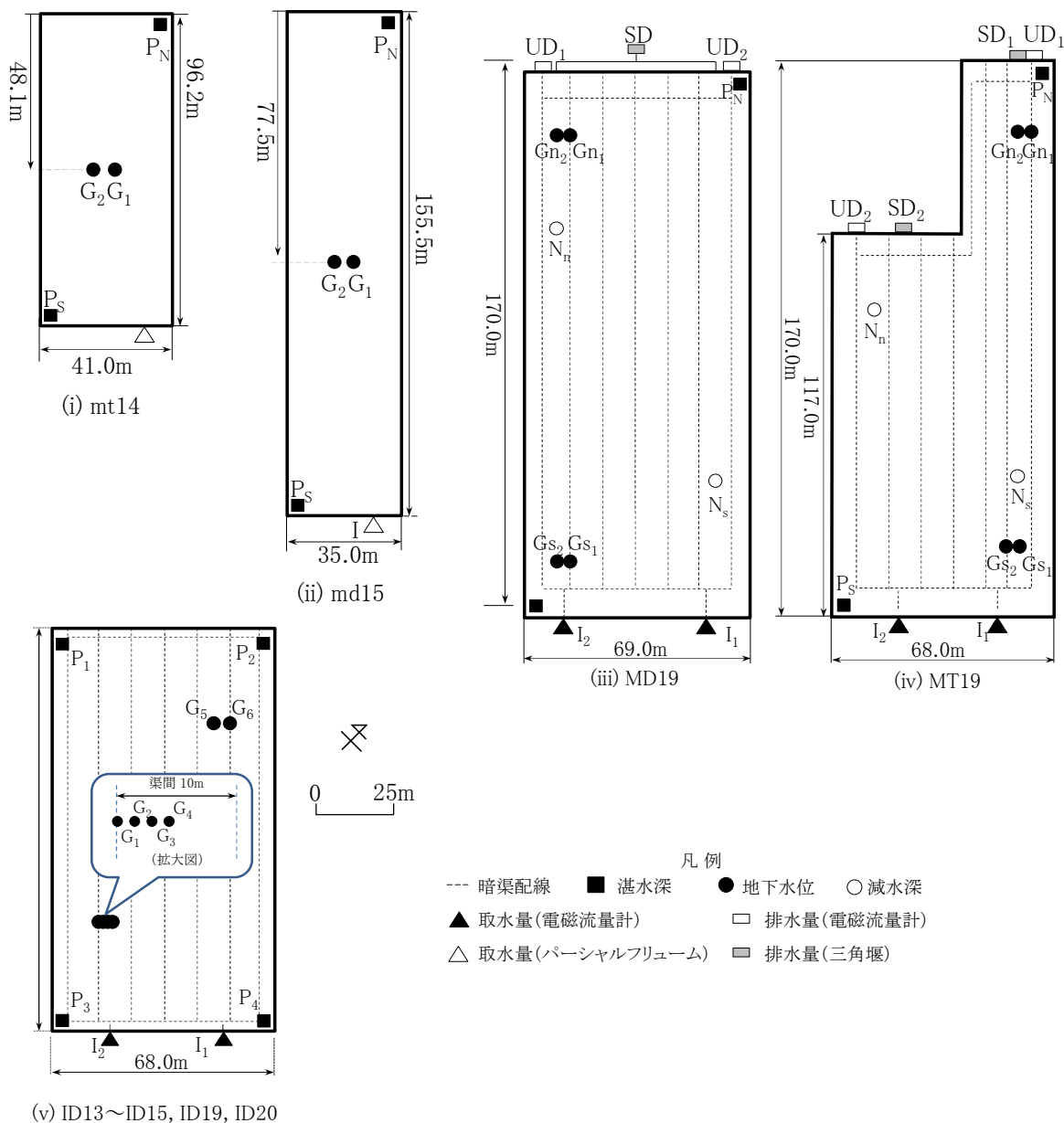


図-13 調査圃場における観測機器の位置



写真-1 パーシャルフリューム

圃場整備前では、農業用水は、支線用水路から小用水路を経由し、各圃場へ取水される。どちらも開水路形式である。各圃場への用水供給は、地表灌漑1ヶ所から行える。各圃場の排水は、地表排水1ヶ所、暗渠排水口1ヶ所から行える。暗渠排水は整備されているが、その配線は不明である。

整備済み圃場では、それぞれ集中管理孔が整備されたことから、地表または地下、あるいはその併用による用水供給が可能となっている。各圃場への用水供給は、地表灌漑2ヶ所、地下灌漑1ヶ所から行える。各圃場の排水は、地表排水2ヶ所、暗渠排水2ヶ所から行える。圃場内には、暗渠管(φ80~90mm、勾配1/1,000)が田面か

ら0.80m～1.00mの深さに約10m間隔で埋設されている。疎水材は木材チップである。

調査圃場における耕作および水管理は、M農区ではM氏、I農区ではI氏の判断によりそれぞれ行われた。両者とも、平成25年から乾田直播栽培に取り組んでいる。

### 3.2 調査方法

各圃場における観測地点の位置を図-13に示す。未整備圃場(mt14、md15)では、パーシャルフリューム(写真-1)により、地表取水量を観測した。整備済み圃場では、電磁流量計により地表取水量および地下取水量を観測した。MT19、MD19、MD20については、直角三角堰を排水口近傍に設置して地表排水量を観測し、電磁流量計により地下排水量を観測した。圃場の湛水深については、平成25年～平成27年の調査では、水圧式水位計を各圃場の4ヶ所に、令和元年および令和2年の調査では各圃場2箇所に、それぞれ設置して観測した。各圃場内の地下水位は、有孔塩ビ管に格納した絶対圧式水位計を田面から1.3mの深さに埋設し、観測した。この観測値は、厳密には、水位計センサー一部の圧力水頭であるが、本報ではこれを参考にして、地下水位の動きを考察した。地下水位の観測地点については、未整備圃場では、圃場中央部2地点(各地点間の距離は5m程度)とした。整備済み圃場では、給水側および排水側において、それぞれ暗渠付近および暗渠間の中央を観測地点とした。各圃場の浸透量については、取水、排水、降雨がない日を対象として、各圃場の湛水位の変動より一筆減水深を算定し、この値からペンマン法<sup>5)</sup>で推定した蒸発散量を差し引いたものを、一筆浸透量として算定した。令和元年および令和2年では、圃場整備後における日減水深について、各圃場において湛水があり、かつ取水、排水、降雨がないときにN型減水深計を各圃場内の2点に設置し、灌漑期間中に2回観測した。気象については、平成26年および平成27年では、雨量計をmt14圃場の近傍に設置した。ペンマン法による蒸発散量の推定に必要な項目については、アメダス(上富良野)のデータを使用した。令和元年および令和2年では、MT19圃場の近傍に気象観測機器を設置し、雨量、気温、風向・風速、日照時間、相対湿度、大気圧を観測した。観測期間については、取水量、湛水深、減水深は5月から8月までとし、その他の調査項目については、5月から9月までとした。測定間隔は10分である。

各圃場における圃場整備前の土壌断面については、北海道開発局旭川開発建設部から資料提供を受けた。圃場の水管理については、農業者への聞き取りを行い、地表

取水および地下取水の判別については、農業者の水管理日誌を参考にした。また、平年の営農作業時期については、中富良野町農業センターへの聞き取りを行った。

### 3.3 圃場整備前後における移植栽培および乾田直播栽培の水管理の比較

#### 3.3.1 M農区内の調査圃場における水管理

ここでは、中富良野地区における圃場整備前後における圃場水管理の調査結果について述べる。平成26年および平成27年における、各圃場における湛水深および地下水位の経時変化を図-14に示す。また、令和元年および令和2年における、各圃場における湛水深および地下水位の経時変化を図-15に示す。図中の湛水深および地下水位は、各地点の田面高をゼロとしている。聞き取りによると、移植栽培における平年の営農作業時期は、代かき期が5月10日～5月15日、移植日が5月18日～5月28日であった。乾田直播栽培における平年の播種日は、5月5日～5月10日であった。各圃場における水管理状況を以下に述べる。

##### ①未整備移植(mt14)

圃場への取水は、すべて地表灌漑により行われた。圃場は、代かき後から湛水状態で管理された。地下水位は、代かき取水に伴い、-0.85mから田面近くまで急速に上昇したが、湛水期間中では-0.0m程度で推移した。湛水深は、7月後半から8月上旬にかけて、その他の時期よりも深い水深で管理された。6月中旬以降から7月中旬までは、取水が行われなかった。灌漑期間において、中干しのような栽培管理に伴う強制落水や掛け流しは行われなかったため、栽培管理用水量は生じなかった。

##### ②整備済み移植栽培(MT19)

この圃場では地下灌漑が可能であるが、聞き取りによれば、移植栽培時における圃場への取水は、すべて地表灌漑により行われた。代かき取水では、掛け流し状態となることがあった。地表排水が行われた後に、田植えが行われた。田植え後は、湛水状態で管理された。湛水期間中、強制落水や掛け流し灌漑は行われなかったため、栽培管理用水量は生じなかった。

##### ③未整備乾田直播栽培(md15)

圃場への取水は、すべて地表灌漑により行われた。播種の翌日に初期取水が行われた後、約3週間にわたり、浅水管理が行われた。この浅水管理とは、種籾の芽立ちが安定するまでの期間、間断的に圃場面を湿潤状態にするものである。本報では、水稻の生育や取水時期、地下水位変化により、浅水管理の期間を判定した。湛水期間における地下水位は、比較的田面近くで推移していた。

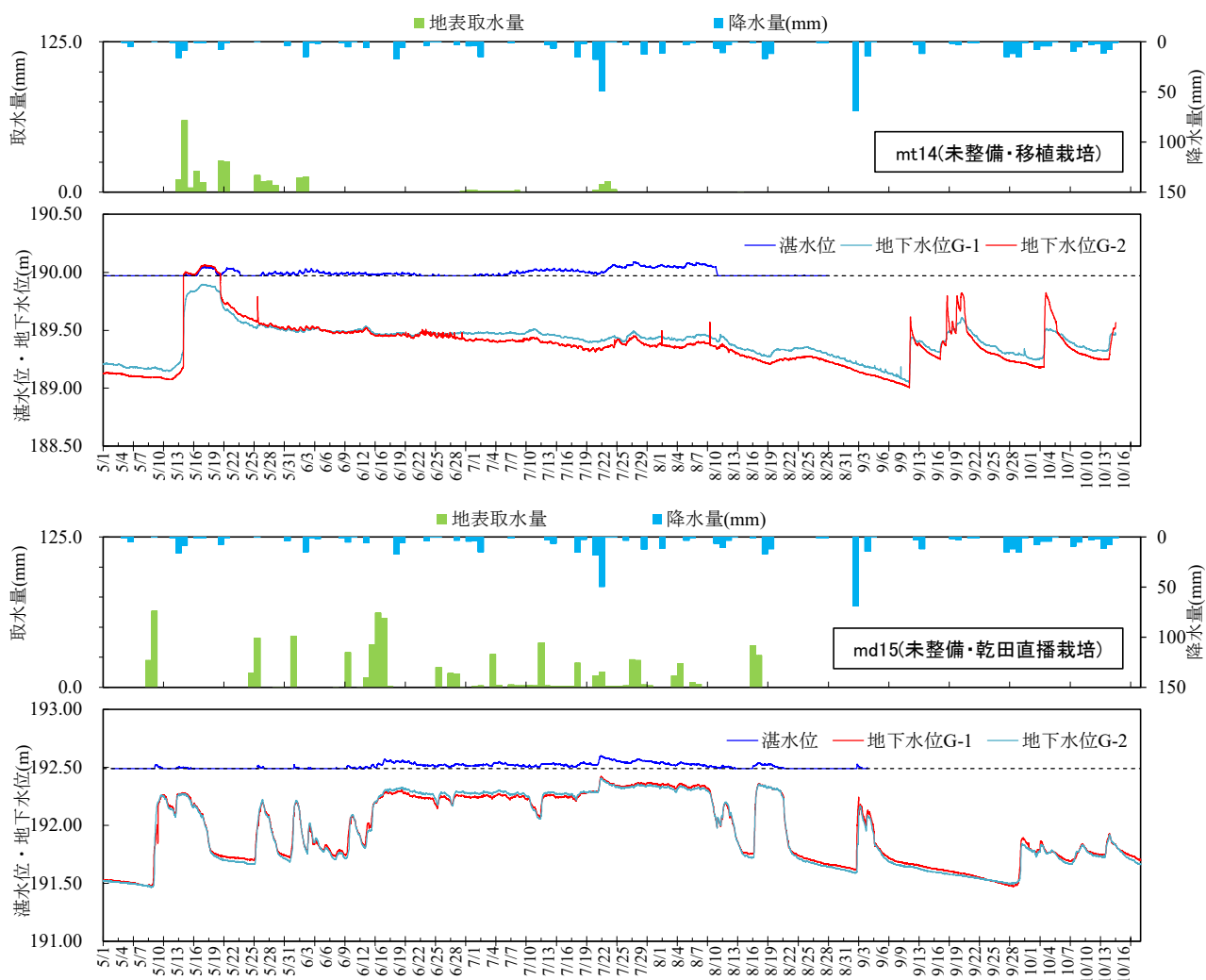


図-14 未整備圃場における取水量、湛水深、地下水位の経時変化

代かきが行われていないため、地表灌漑による供給水が田面からの地下へ浸透しやすくなったと考えられる。8月中旬に強制落水された後、再湛水が行われた。

#### ④整備済み乾田直播栽培 (MD19 および MD20)

MD19 では、播種後に初期取水が行われた。その後、6月初めまでの約3週間、浅水管理が行われた。浅水管理の期間の判定は、md15 と同様に行った。灌漑方式についてみると、初期取水、浅水管理の前半および強制落水後の再湛水において、地下灌漑が行われた。浅水管理期の後半および普通期の初めでは、地表灌漑と地下灌漑が併用され、その他は地表灌漑が行われた。湛水期間中、掛け流し状態になっていることがあった。7月末に強制落水が行われた後、再湛水された。8月中旬に落水された。

MD20 では、灌漑初期については、主に地下灌漑が行われた。普通期では、6月半ばに地下灌漑が行われたが、

それ以降は地表灌漑が行われた。8月下旬に強制落水が行われたが、高温および無降雨が続いたことから、渇水対策として再び湛水状態にした後に落水が行われた。

#### 3.3.2 取水強度

圃場整備後の水管理の違いとして、整備後では、地表灌漑に加えて、地下灌漑を行えることが挙げられる。そこで、灌漑方式による取水強度を比較することとした。各圃場における主な水管理時期の取水強度を図-16に示す。この取水強度については、取水1回あたりの取水量 (mm) をその取水時間 (h) で除して算定した。この結果、初期取水、浅水管理、再湛水では、灌漑方式による取水強度の差は小さかった。普通期の地表灌漑時では、他の圃場と比べて、MD19およびMD20の値が大きくなった。

#### 3.3.3 土性

mt14では、地表から-27cmまでが作土であり、田面か



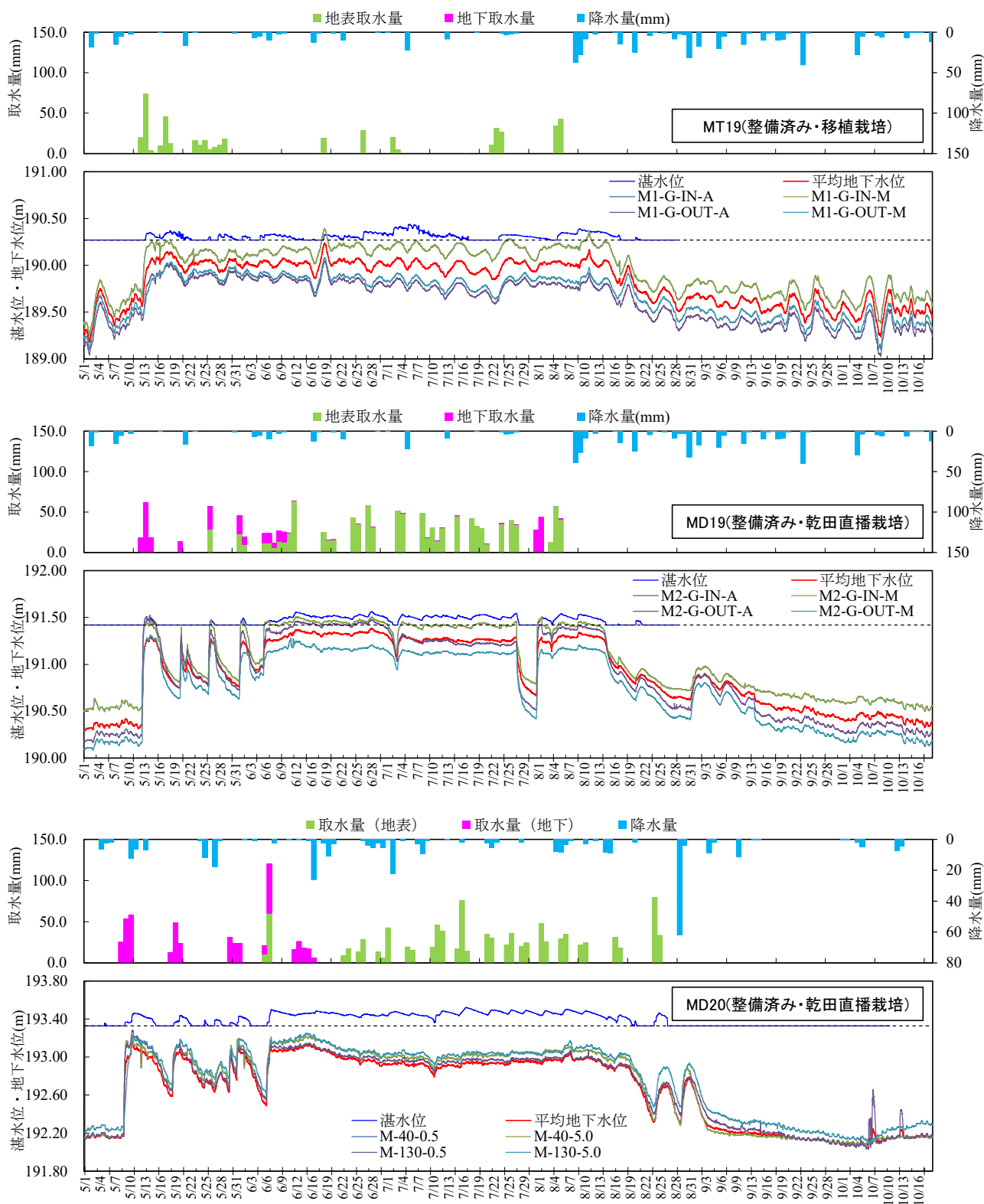


図-15 整備済み圃場における取水量、湛水深、地下水位の経時変化

ら-59cm以深に泥炭層がある。泥炭層以外の土性は埴壤土である。透水係数 (cm/s) は、作土層で $4.8 \times 10^{-6}$ 、埴壤土で $2.6 \times 10^{-6}$ 、泥炭土で $1.0 \times 10^{-5}$ である。md15では、地表から-27cmまでが作土であり、-85cm以深に厚さ15cmの泥

炭層がある。透水係数 (cm/s) は、作土層で $4.0 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ 、軽埴土で $5.9 \times 10^{-5}$ 、重埴土で $1.9 \times 10^{-5}$ である。

### 3.3.4 浸透量

各圃場における一筆浸透量および降下浸透量を図-17

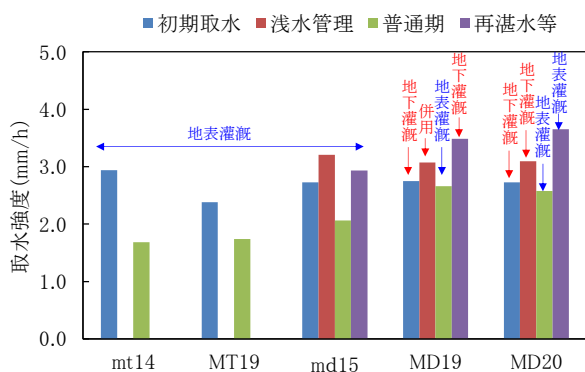


図-16 各圃場における取水強度

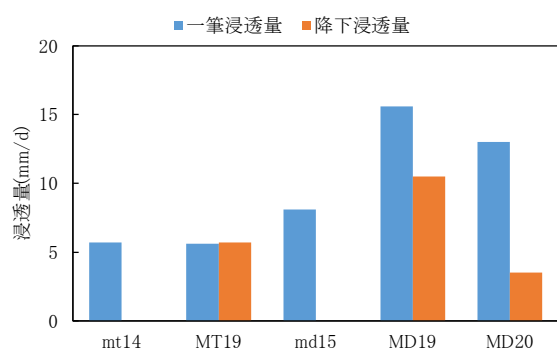


図-17 各圃場の浸透量

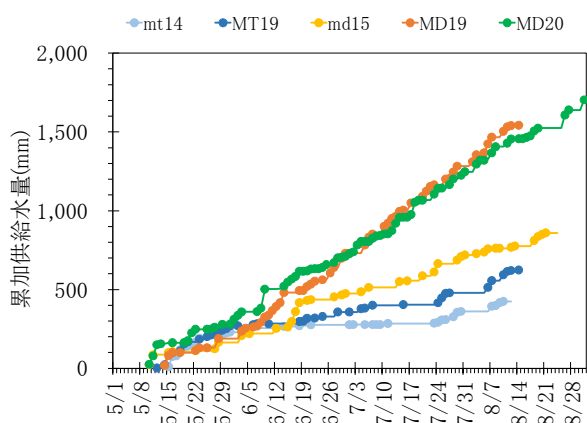


図-18 累加供給水量 (M農区)

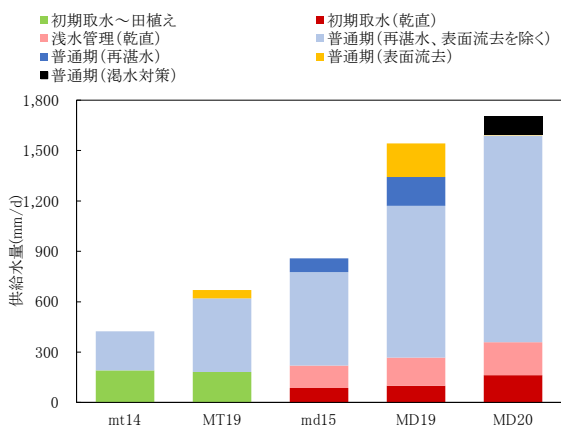


図-19 各圃場の区別供給水量 (M農区)

に示す。浸透量の値は、移植栽培より乾田直播栽培にお

いて大きくなる傾向が見られた。調査対象の圃場では、土性の違いに加えて、代かきの有無の影響により、浸透量に差が生じたと考えられる。ただし、MD19およびMD20では、降下浸透量に対して一筆浸透量が大きくなる傾向が見られたが、圃場間における降下浸透量の値の差の原因は不明であった。

### 3.3.5 各圃場への累加供給水量

各圃場における累加供給水量を図-18に示す。各圃場の供給水量は、日取水量および有効雨量の和を計算し、日ごとの値を累加した。未整備圃場 (mt14 および md15) については、農業用水 (水田) の計画基準<sup>8)</sup>を参考に、5mm/d 以上から 80mm/d の降雨を対象とし、その 80%を有効雨量とした。MT19、MD19、MD20 については、渡辺ら<sup>7)</sup>の方法を参考に有効雨量を算定した。

各圃場における累加供給水量の値を比べると、6 月上旬まではほぼ同程度であったが、その後、特に MD19 で顕著な増加がみられた。初期取水から落水までの総供給水量を比べると、mt14 の値に対して、MT19 では 1.5 倍、md15 では 1.8 倍、MD19 では 3.6 倍、MD20 では 3.8 倍となった。

### 3.4 各圃場における水管理時期区分ごとの供給水量

各圃場における水管理時期区分別の供給水量を図-19に示す。ここでは、初期取水から落水までの合計供給水量を、主な水管理に応じて、①初期取水から田植えまで (移植栽培)、②初期取水 (乾田直播栽培)、③浅水管理 (乾田直播栽培)、④普通期に区分した。さらに、④の普通期における供給水量を、⑤再湛水、⑥表面流去、⑦その他に分けた。ここで、表面流去とは、たとえば掛け流し状態による地表流出のように、浸透および蒸発散として圃場から出るのではなく、圃場の落水口から流出した水量である。ただし、未整備圃場 (mt14、md15) では、地表排水量データがないことから、表面流去の区分は行っていない。

圃場整備前後の供給水量を比較した結果、移植栽培では、圃場整備の前後における浸透量の値の差が小さかったことから、供給水量の差も小さくなった。乾田直播栽培では、整備前後とも、普通期に強制落水に伴う再湛水が行われた。農業者への聞き取りによると、中干しは基本的には行わないが、除草剤散布のための落水と中干しが重なる場合があるとのことだった。また、聞き取りによれば、MT19 および MD19 の表面流去は、農業者が意図的に行ったものではなかった。圃場整備後における普通期の供給水量の値は、圃場整備前に対して、移植栽培では 1.3 倍、乾田直播栽培では 1.4 倍となった。乾田直播

栽培において、圃場整備の前後で灌漑期間の総供給水量が増加した要因として、一筆浸透量の違い、強制落水による再湛水、表面流去の発生の影響が考えられる。一筆浸透量については、整備済み移植栽培 (MT19) と比べて乾田直播栽培 (MD19、MD20) の値が大きいことから、普通期 (再湛水および表面流去を除く) の供給水量の増加につながったと考えられる。

### 3. 5 表面流去の発生要因

ここで、整備済み圃場においてみられた表面流去の発生要因について分析する。各圃場における取水開始時刻

および取水時間を図-20に示す。未整備移植圃場 (mt14) 整備乾田直播圃場 (md15)、整備済み移植圃場 (MT19) では、午前中または夕方に取水が開始される傾向がみられ、取水継続時間については、大部分が数時間から36時間程度の範囲であった。整備済み乾田直播栽培圃場の取水開始時刻については、MD19では午前中の頻度が多かったのに対し、MD20で午前中よりも午後によく行われる傾向がみられた。取水時間は、一部が72~108時間となったほかは、大部分が6~48時間程度であった。こうした取水開始時刻の変化は、小水路のパイプライン化により取水操作の自由度が高まった結果として生じたと考えられる。

また、図-20 (b)に示すように、MD19では、取水時における表面流去の発生が頻繁にみられた。これは、大区画化後1年目であるMD19では、取水継続時間の変化により、圃場への供給水量が減水深を上回ったことにより、余剰水が表面流去したと考えられる。しかし、MD20では、表面流去がほとんど見られなくなっており、農業者が大区画圃場の水管理の習熟過程にあることから、試行錯誤により水管理操作が変化したと推察される。よって、圃場整備直後では、農業者の水管理操作が習熟過程にあることから、配水管理の際は、水管理操作時間帯が変化する必要があることに注意する必要があると考えられる。

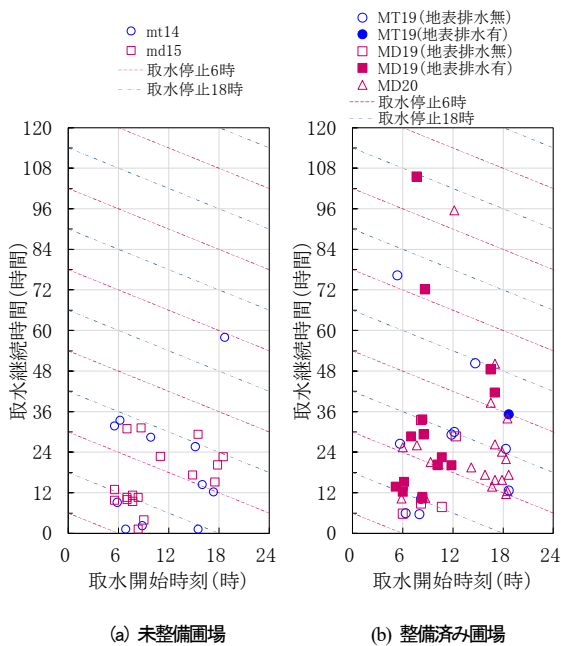


図-20 圃場整備前後における水管理操作時間 (M農区)

### 4. 整備済み圃場における水管理操作特性の分析

ここでは、整備済み圃場における水管理操作特性を明らかにするために、美唄地区および中富良野地区の整備

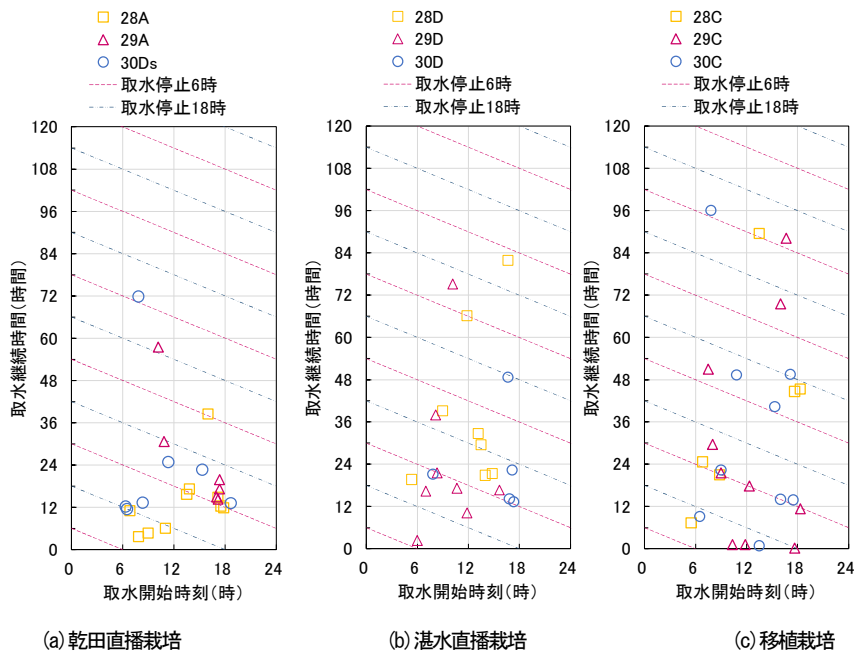


図-21 取水開始時刻および取水継続時間 (美唄地区)

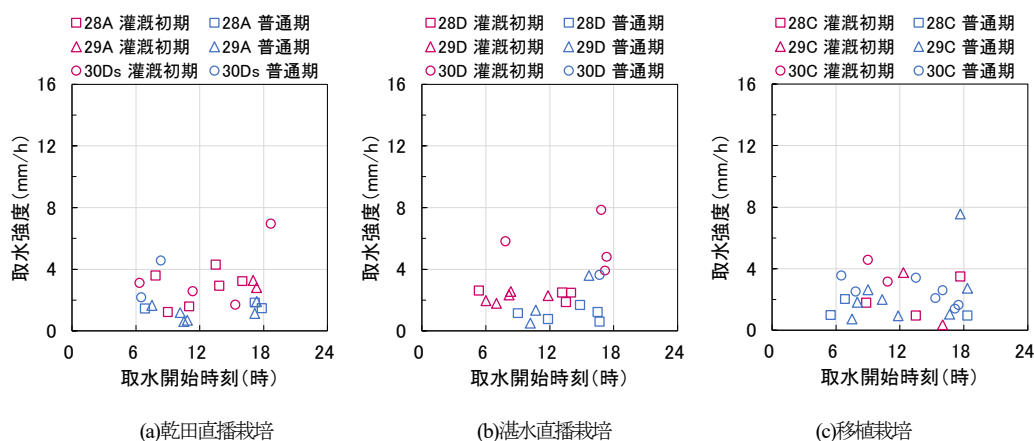


図-22 取水開始時刻および取水強度（美唄地区）

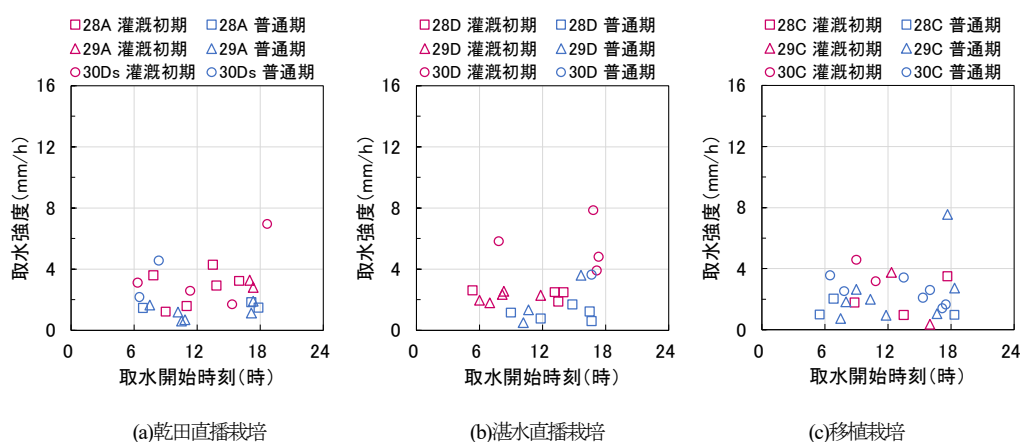


図-23 取水継続時間および取水強度（美唄地区）

済み圃場、過年度に調査を行った妹背牛地区の整備済み圃場を対象に、水稻栽培方式や小用水路形式の違い、圃場整備後からの時間経過が水管理操作に与える影響について分析した。以下にその結果を述べる。

#### 4. 1 開水路地区・3とおりの栽培方式

開水路地区の圃場の事例として、美唄地区における栽培方式ごと（乾田直播栽培、湛水直播栽培、移植栽培）の取水開始時刻、取水継続時間、取水強度の関係を図-21～図-23に示す。取水開始時刻および取水継続時間については、いずれの栽培方式においても4時30分から19時までの時間帯に行われており、取水継続時間は数時間程度から最大で96時間であった。取水強度については、概ね1～4mm/hrに集中しており、灌漑初期において、代かき用水や直播における初期取水および朝水管理のための取水を行うために値が大きくなる傾向がみられた。また、取水継続時間と取水強度との関係については、各栽培方式とも明確な傾向は捉えられなかった。これらのように開水路地区では、同一の小用水路掛かりの圃場の取

水状況により、取水操作の自由度が制約されることから、いずれの栽培方式においても取水開始時刻にばらつきが大きく、習熟に伴う影響はあまりみられなかった。

#### 4. 2 パイプライン地区・3とおりの栽培方式

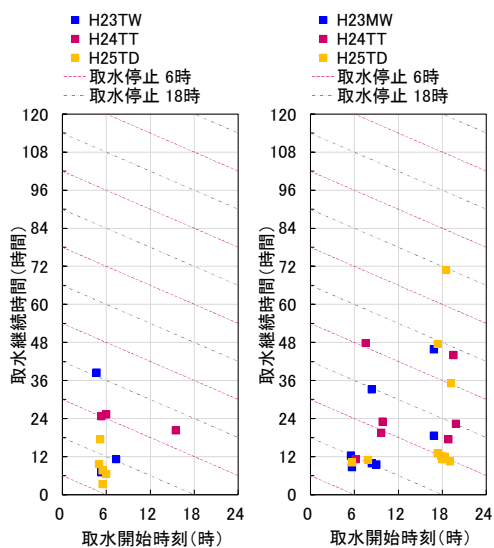
パイプライン地区の事例として、過年度調査（平成23年～平成25年）における妹背牛地区の圃場データ<sup>2)</sup>を用いて栽培方式ごと（乾田直播栽培、湛水直播栽培、移植栽培）の取水開始時刻、取水継続時間、取水強度の関係を整理した。その結果を図-24～図-26に示す。これらの図中の凡例は圃場名を示しており、それぞれの栽培方式については、「H23TW」は湛水直播栽培、「H24TT」は移植栽培、「H25TD」は乾田直播栽培を示している。各圃場の灌漑方式については、いずれも地下灌漑が用いられた。

取水開始時刻および取水継続時間についてみると、灌漑初期では、朝方に取水が開始されており、取水継続時間は6～36時間程度の範囲であった。普通期では、取水開始時刻は朝方と夕方に行われており、取水継続時間については、朝方では9～72時間程度、夕方では10～72時間



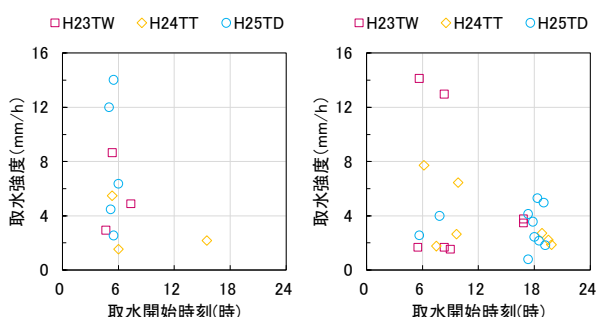
の範囲であった。取水強度については、灌漑初期では大部分が2~14mm/hの範囲であり、特に乾田直播栽培において浅水管理を行うときに値が大きくなるがあった。また、普通期では、朝方において4~14mm/hの範囲となり、湛水直播において湛水管理に移行するときおよび強

制落水後の再湛水するとき値が大きくなったが、夕方においては1~5mm/h程度であった。直播栽培の取水継続時間および取水強度については、灌漑初期では取水継続時間が短いときに取水強度が大きく、普通期ではそれよりも取水継続時間が長く、取水強度も比較的小さくなる傾向がみられた。これに対して移植栽培では、直播栽培と比べて灌漑初期、普通期とも全体的に取水強度が小さくなる傾向がみられた。これらの違いは、直播栽培では、灌漑初期に浅水管理を行うとき、比較的短時間のうちに地下水水位を田面付近まで上昇させるのに対して、移植栽培では、必要な湛水深を確保するのに急激な水位上昇を求めていなかったことが考えられる。よって、灌漑初期では、乾田直播栽培の取水強度の方が移植栽培よりも値が大きいくこと、取水開始時刻が朝に集中することにより、乾田直播栽培面積の増加により用水不足につながる可能性が考えられる。



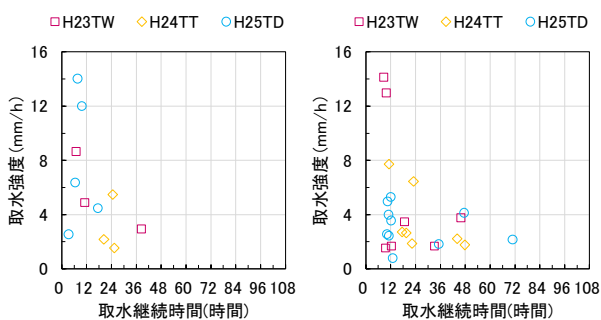
(a) 灌漑初期 (b) 普通期

図-24 取水開始時刻および取水強度 (妹背牛地区)



(a) 灌漑初期 (b) 普通期

図-25 取水開始時刻および取水強度 (妹背牛地区)



(a) 灌漑初期 (b) 普通期

図-26 取水継続時間および取水強度 (妹背牛地区)

#### 4.3 パイプライン地区における圃場整備後の時間経過に伴う変化の事例

圃場整備が行われた地区において、農業用水を適正に配分するためには、圃場整備後の時間経過に伴う圃場水管理の変化や用水量への影響を把握する必要がある。ここでは、圃場整備から3~5年、9~10年を経過した乾田直播栽培圃場(図-12に示すID13、ID14、ID15、ID19、ID20)における水管理および供給水量の調査結果について述べる。

##### 4.3.1 浸透量

調査圃場における普通期の一筆浸透量の値は、ID13、ID14、ID15では8mm/d程度、ID19およびID20では11mm/d程度であった。調査圃場が位置する農区内には泥炭層があり、圃場の地下水水位が比較的高いことから、浸透量はやや小さい値であった。また、整備後からの時間経過をみると、わずかではあるが浸透量の値が増加する傾向がみられた。これは、圃場整備において、大型機械による転圧等が行われたために浸透量が小さくなったが、時間の経過に伴い土壌中の亀裂が発達したことにより、その値が大きくなったためと考えられる<sup>9)</sup>。

##### 4.3.2 灌漑方式と取水強度

ID13、ID14、ID15では灌漑期間を通して地下灌漑が行われた。ID19、ID20では灌漑初期に地下灌漑が、普通期に地表灌漑が行われた。普通期の平均取水強度は、ID13、ID14、ID15では2.8~3.7mm/h、ID19、ID20では2.3~3.0mm/hであり、灌漑方式による差はほとんどみられなかった。

##### 4.3.3 取水開始時刻、水管理操作時間、取水強度



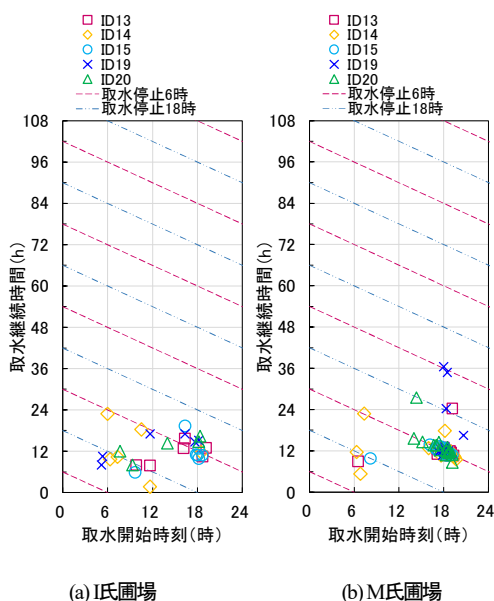


図-27 取水開始時刻および取水継続時間 (中富良野地区)

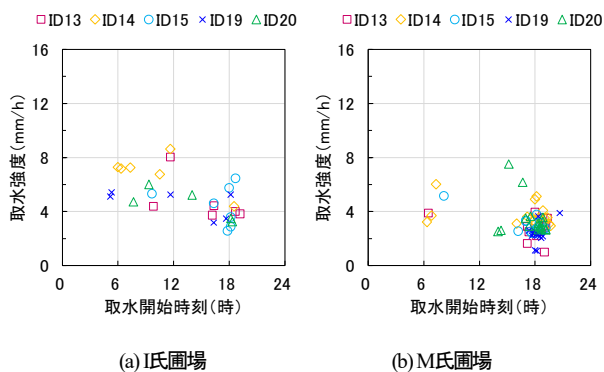


図-28 取水開始時刻および取水強度 (中富良野地区)

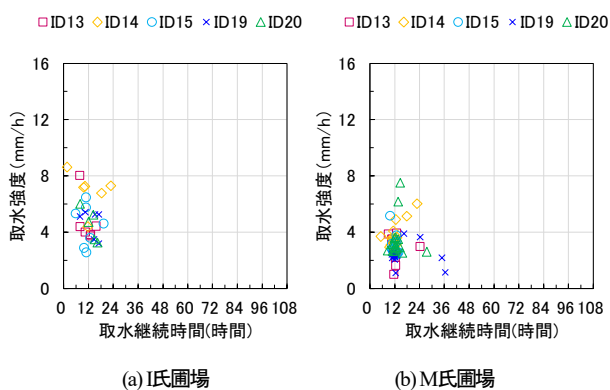


図-29 取水継続時間および取水強度 (中富良野地区)

各圃場における取水開始時刻、取水継続時間、取水強度の関係を図-27～図-29に示す。取水継続時間は概ね6～36時間の範囲内であった。取水開始時刻については、灌漑初期では全体的に、普通期ではID13、ID14が朝夕に分散していたが、ID15、ID19、ID20では夕方に集中する

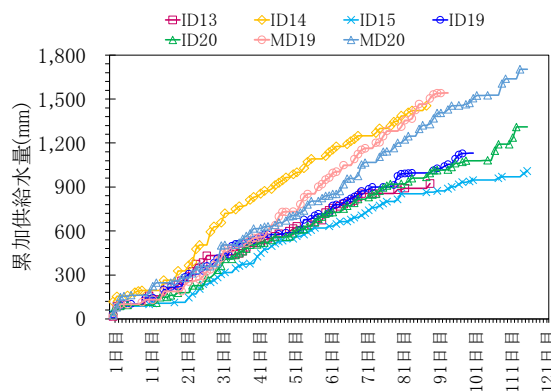


図-30 整備済み圃場における累加供給水量の比較 (中富良野地区)

傾向がみられた。取水強度については、午前中に取水強度が大きく、夕方に小さくなる傾向がみられた。その理由として、非湛水状態から湛水状態に移行する場合等、比較的多量の取水量が必要な際、湛水状況を目視により確認できる日中に取水および停止の操作を行ったこと、夜間から朝方までは見回りができないことから、取水量が過剰にならないように調整したため夕方に取水強度が比較的小さくなったことが考えられる。ただし、普通期の一部では、I-20のように8月下旬に晴天日および高温日が続いたことから、渇水対策として取水を行い、非湛水状態から湛水状態に移行したため、取水強度の値が大きくなる場合があった。こうした例外的なものを除けば、農業者による水管理は、圃場整備後において試行錯誤を重ねた結果により、経年的に変化したと思われる。

#### 4.3.4 供給水量

取水開始日から落水日前日までの累加供給水量を図-30に示す。圃場間の浸透量の差に対して、ID14の供給水量の値が大きくなったが、ID15、ID19、ID20では供給水量の累加傾向に大きな差はみられなかった。これは、どの年においても水稻の生育に合わせた水管理が行われたと考えられる。こうした地域では、灌漑期間中における総供給水量に変化は小さくても、直播栽培の導入による用水需要の変化と合わせて、農業者による水管理の習熟に伴う取水時間帯や取水強度の変化に注意する必要がある。これらの影響により用水需要が集中する時間帯が生じた場合には、その情報を地域で共有し、取水時間帯を調整したり、取水強度を抑えたりすることにより、集中を緩和させる対策が考えられる。

#### 5. 将来における農業用水需要の予測手法の提案

これまで述べたように、栽培方式の違いによって、生育時期や各生育時期における水管理および必要水量が異

なる。今後も直播栽培面積は拡大すると見込まれていることから、移植栽培を前提とした従来の水利用パターンがどのように変化するかを想定し、用水供給に支障が生じないような用水計画を検討する必要がある。また、用水需要が高まる時期に用水路の通水容量が不足することがないかを確認することも必要である。本章では、将来における灌漑期の用水需要パターンの予測手法および将来における圃場群のピーク用水量の予測結果について、以下に述べる。

### 5.1 水稲直播栽培面積が拡大する場合の水利用パターンの予測手法

水利用パターンのイメージ作成のフローを図-31に示す。各水管理時期における圃場流入量は、圃場への取水量および有効雨量の合計値とした。各栽培方式における水管理の時期および期間は、調査圃場における実績および農業協同組合の栽培暦（以下、「JA 栽培暦」）を参考に設定した。このJA 栽培暦によれば、乾田直播栽培の播種適期は5月1日からの10日間であり、湛水直播栽培での代かき適期は5月11日からの10日間である。乾田直播栽培を例にとれば、想定する地区内の直播栽培圃場が、播種適期の10日間に均等に播種および取水量管理をするとして、これらの圃場の合計の用水量を計算する。図-32は、美唄市の大区画圃場での用水量調査結果（平成28年度～30年度）を用いて作成した水利用パターンである。

実際の灌漑施設では、図-32のように頻繁な取水量調

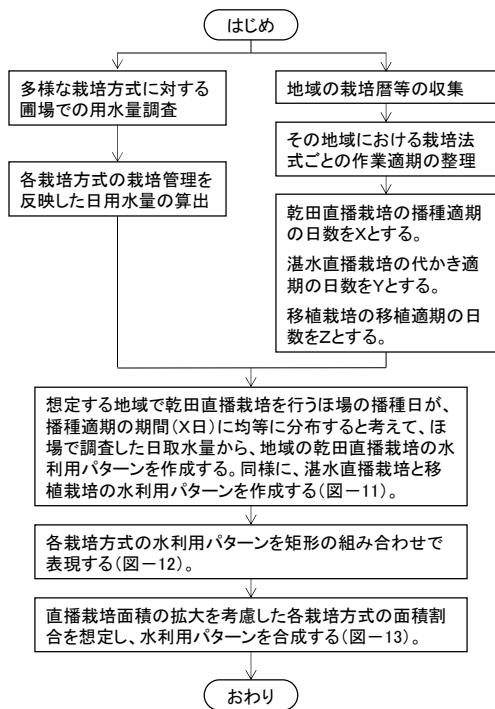


図-31 水利用パターンの予測手順

整が困難であるから、期別水利権量の示し方としては、矩形を組み合わせた水利用パターンが一般的である。図-33は、図-32を基にして、栽培方式ごとに矩形の組み合わせで表現した水利用パターンである。

図-34は、乾田直播栽培や湛水直播栽培の面積が拡大した場合の水利用パターンを想定した事例である。これらは、図-32の水利用パターンを用いて、作付面積比率を移植栽培：乾田直播栽培：湛水直播栽培=6：2：2と仮定したものである。直播栽培面積が拡大すると、灌漑初期のピーク用水量が減少するとともに、直播栽培における初期の水管理により、従来と比べてピーク用水量の必要期間が延びる。また、各栽培方式における生育のずれにより、深水期が分散されることから、深水用水は従

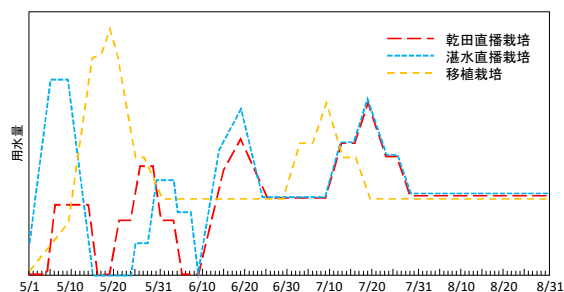


図-32 圃場日用水量と栽培適期から作成した水利用パターン（イメージ図のため縦軸に数値を記していない）

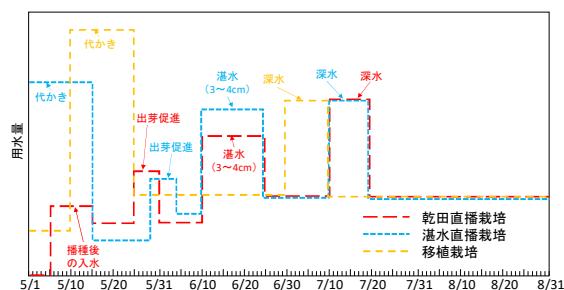


図-33 矩形の組み合わせにした水利用パターン（イメージ図のため縦軸に数値を記していない）

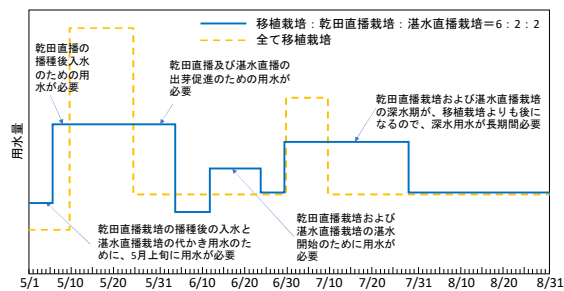


図-34 移植栽培：乾田直播栽培：湛水直播栽培=6:2:2の場合の水利用パターン

（イメージ図のため縦軸に数値を記していない）

来よりも長期間必要となる。

### 5.2 圃場群におけるピーク用水量の予測事例

将来、直播栽培面積が増加すると見込まれる場合、圃場群のピーク用水量がその施設容量を上回らないかをあらかじめ確認する必要がある。そこで、前述した水利用パターンの予測手法を圃場群規模に適用を拡大し、圃場群のピーク用水量の予測を行った結果を以下に述べる。

#### 5.2.1 美唄地区

各栽培方式におけるピーク用水量を算定するために、美唄地区における3通りの栽培方式の3年間の観測データを基に、渡辺ら<sup>7)</sup>の方法で有効雨量を算出し、これと実測の圃場取水量を合計した値を日当たり用水量とした。

計算対象期間は、5月1日から8月31日までとした。灌漑期のうち、圃場が湛水状態である期間については、実測減水深の平均値（移植栽培：5.5mm/d、乾田直播栽培

培：7.3mm/d、湛水直播栽培：6.0mm/d）を日当たり必要水量とした。その他については、①移植栽培および湛水直播栽培の代かき期、②乾田直播栽培の播種後水管理、③乾田直播栽培および湛水直播栽培の普通期開始期、④乾田直播栽培および湛水直播栽培の浅水管理期に区分し、当該期間の実測取水量および有効雨量の合計値を必要水量とした。

各栽培方式における水管理期間については、当該地域の「JA栽培暦」による生育適期の幅（日数）を参考に設定した。各栽培方式における計算方法は、以下のとおりである。現況の用水計画における移植栽培の代かき期間は5月11日から25日までの15日間であることから、移植栽培では、15枚の圃場群を想定し、各圃場の取水開始日を1日ずつずらし、各日の用水量を合計して算出した。乾田直播栽培では、播種適期が5月1日から5日10日までの10日間であることから、10枚の圃場群を想定して算定した。湛水直播栽培では代かき取水開始から代かき作業終了までの期間が5月1日から5月15日までの15日間であることから、15枚の圃場群を想定して算出した。

各栽培方式の圃場群用水量について、3年間のうちで最もピーク用水量が大きくなった年のデータを抽出したものを図-35に示す。ピーク用水量をみると、灌漑初期については、移植栽培では21.1mm/d、乾田直播栽培では18.5mm/d、湛水直播栽培では27.2mm/d、普通期については、移植栽培では25.5mm/d、乾田直播栽培では22.2mm/d、湛水直播栽培では13.9mm/dであった。この結果を用いて、3種の水稲栽培方式の面積割合を移植栽培：乾田直播栽培：湛水直播栽培＝ $a:b:c$ として、直播栽培面積が拡大した場合の圃場群の用水量 $H$ (mm/d)を(1)式により推定した。

$$H = \frac{H_i a + H_k b + H_l c}{a + b + c} \quad (1)$$

ここで、 $H_i$ 、 $H_k$ 、 $H_l$ は、当該月日の移植栽培、乾田直播栽培、湛水直播栽培の用水量（mm/d）である。

表-3に示す作付想定面積により、将来における圃場群用水量 $H$ を計算した結果を図-36に示す。Case1～Case3の値は、移植栽培100%におけるピーク用水量よりも小さい値であった。これは、栽培方式が異なることから、取水期間が分散されたためである。これらの結果より、圃場群における栽培方式の半分が移植栽培であれば、その他の栽培方式が乾田直播栽培または湛水直播栽培になっても、ピーク用水量は移植栽培の値を越えないと予測された。

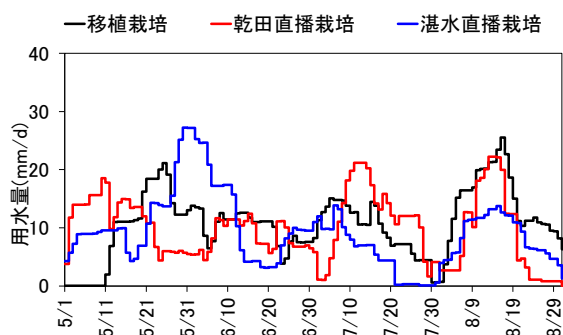


図-35 各栽培方式の圃場群用水量のパターン（美唄地区）

表-3 将来における水稲栽培方式の想定面積割合（美唄地区）

	a:b:c		
	a (移植)	b (乾田直播)	c (湛水直播)
Case 1	50%	25%	25%
Case 2	50%	50%	0%
Case 3	50%	0%	50%

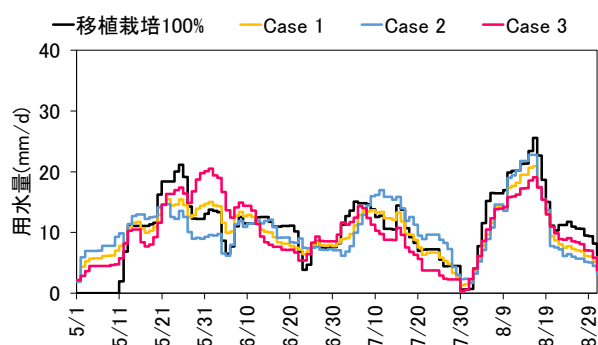


図-36 想定面積割合により推定した圃場群用水量（美唄地区）

### 5.2.2 中富良野地区

同様に、乾田直播栽培および移植栽培について、各調査年のうち、最もピーク用水量の値が大きくなった圃場を抽出した結果を図-37に示す。ピーク用水量の値をみると、灌漑初期については、移植栽培では14.6mm/d、乾田直播栽培では21.7mm/d、普通期については、移植栽培では11.0mm/d、乾田直播栽培では26.4mm/dであった。これらを用いて、中富良野町における各栽培方式の面積割合を表4のように想定し、各ケースにおける圃場群用水量を算定した結果を図-38に示す。この結果、移植栽培100%、Case4、Case5のそれぞれのピーク用水量の値はほぼ同程度であった。よって、水稻作付面積の半分程度を乾田直播栽培が占めても、現況の農業水利施設の規模を越えるようなピーク用水量は生じないと考えられる。ただし、中富良野町の圃場群用水量のパターンの圃場

データには、乾田直播栽培において、深水灌漑の水管理が観測されなかったことため、深水灌漑における用水量の増加が考慮されていない点に注意が必要である。

Case5におけるピーク用水量は普通期に発生しており、同時期の移植栽培100%よりも圃場群用水量の値が大きくなった。このことから、乾田直播栽培面積が増える地域では、現在の水利権における普通期用水量に対して、用水量の不足が生じることが考えられる。

ここで、美唄地区と中富良野地区を比べると、特に中富良野地区では、灌漑期間の大半において、乾田直播栽培の日毎の用水量が移植栽培よりも大きくなった。その理由としては、美唄地区における各栽培方式の浸透量の平均値が、乾田直播栽培では7.5mm/d、湛水直播栽培では6.2mm/d、移植栽培では5.4mm/dであったのに対し、中富良野地区では乾田直播栽培では13.3mm/d、移植栽培では5.6mm/dであり、各地区における栽培方式間の浸透量の差が異なっていたことが要因であると考えられる。このように、移植栽培と直播栽培とで圃場浸透量の差が大きい地域では、直播栽培面積の増加による用水量不足や配水管理への影響について留意する必要がある。

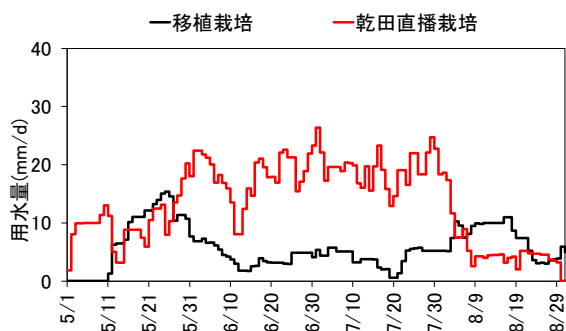


図-37 各栽培方式の圃場群用水量のパターン(中富良野地区)

表-4 将来における水稻栽培方式の想定面積割合  
(中富良野地区)

	a:b	
	a (移植)	b (乾田直播)
Case4	75%	25%
Case5	50%	50%

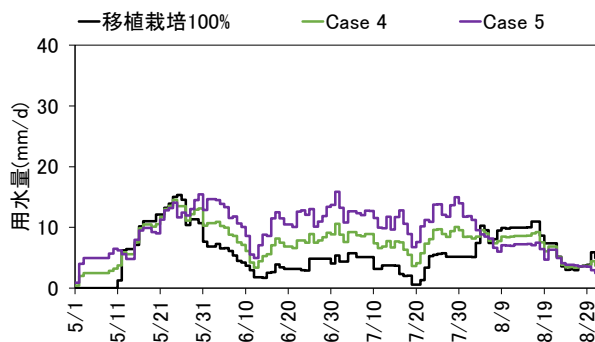


図-38 想定面積割合により推定した圃場群用水量  
(中富良野地区)

### 6. まとめ

北海道の水田地帯では、農作業の効率化をめざして、圃場の大区画化や用水路のパイプライン化、地下水水位制御システム等の整備が進められている。こうした地域では、小用水路形式や圃場の区画規模の変化、直播栽培面積の拡大が生じることから、水管理や用水量への影響の解明が求められる。本研究では、大区画化圃場整備が行われた水田における水管理および用水量の特性を解明することを目的として、調査を行った。その研究成果は以下のとおりである。

- 1) 泥炭を基盤とする大区画圃場において、栽培方式ごと(移植栽培、湛水直播栽培、乾田直播栽培)の用水量特性の違いを明らかにするために、水管理および用水量の調査を行った。その結果、栽培方式が異なっても、圃場取水量に大きな差は見られなかった。この理由については、泥炭圃場では地下水位が高いことから、代かきの有無に関わらず、圃場浸透量はいずれの栽培方式においても小さかったことが考えられた。そのため、圃場取水量の差は、栽培方式とは関係なく、強制落水や深水灌漑等の栽培管理の違いにより生じたといえる。
- 2) 圃場整備により、小用水路の形式が開水路からパイプラインへ変化した圃場において、整備前後におけ



る移植栽培および乾田直播栽培の用水量変化を調査した。その結果、整備済みの乾田直播栽培圃場では、供給水量が大幅に増加した。その要因として、圃場浸透量の増加に加え、整備に伴う取水管理の変化が影響していると考えられた。

- 3) 整備済み圃場を対象に、小水路形式や栽培方式と水管理操作との関係を分析した。その結果、小水路形式がパイプラインである場合は、開水路である場合と比べて、取水時間帯が比較的集中する傾向が確認された。また、圃場整備後の時間経過に伴う影響については、供給水量に大きな変化はなかったが、圃場の浸透量が微増する傾向や、農家の習熟に伴う取水開始時刻の変化がみられた。これらのことから、施設管理者が分水操作等の配水管理を行う際は、これらの変化による影響について留意すべきであると考えられた。
- 4) 栽培方式ごとの生育時期や栽培管理の違いに着目して、将来の直播栽培面積の拡大に対応できる用水計画手法を提案した。この手法により、「移植栽培が主流となっている現況」および「直播栽培面積が拡大した将来」における用水計画のイメージを比較し、将来の用水需要における留意点を抽出した。さらに、これを圃場群に適用を拡大して、将来の圃場群ピーク用水量を予測し、灌漑区域内の配水管理において、特に注意が必要な時期や用水需要の変化による影響について考察した。

最後に、本研究を進めるにあたり、調査へご協力いただいた農業者、美唄市土地改良センター、北海土地改良

区美唄事業所、中富良野町農業センター、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部、国土交通省北海道開発局旭川開発建設部の関係各位に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 農林水産省：食料・農業・農村基本計画、2015
- 2) 古檜山雅之、中村和正、鶴木啓二、石田哲也：地下灌漑が可能な大区画水田における圃場水管理、農業農村工学会論文集、290、pp.23-32、2014
- 3) 越山直子、酒井美樹、伊藤暢男、中村和正：大区画水田における移植栽培と直播栽培の用水量の比較、農業農村工学会論文集、304(85-1)、pp. I\_7- I\_14、2017
- 4) 越山直子、大津武士、中村和正：大区画水田における圃場水収支に基づいた取水量の推定、寒地土木技術研究、780、pp.8-12、2018
- 5) (社)北海道土地改良設計技術協会：農業土木技術書翻訳シリーズ1、FAO 灌漑排水技術書、pp.34-54、1986
- 6) 坂田賢、堀野治彦、三野徹：直播水田における圃場単位の水利用に関する事例的研究、農業土木学会論文集、212、pp.17-22、2001
- 7) 渡辺紹裕、丸山利輔、三野徹：水田圃場における栽培管理用水量の発生形態、農業土木学会論文集、124、pp.11-18、1986
- 8) 農林水産省農村振興局監修：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「農業用水（水田）」、p. 69、2014
- 9) 前川俊清、三野徹、丸山利輔：圃場整備に伴う浸透量の変化、農業土木学会誌、51(10)、pp.69-75、1983



## 16.2 営農の変化や気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発

### 16.2.1 積雪寒冷地における農業水利施設の長寿命化に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（水利基盤チーム）、技術開発調整監（寒地技術推進室）

研究担当者：大久保天、石神暁郎、西田真弓、長島繁男、中村和正、川口清美、松田俊之、山田章、南恭子

#### 【要旨】

本研究では、①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発を目的としている。①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築では、コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明、非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発を行った。前者では、北海道内に位置する複数の開水路および頭首工を構成するコンクリートにおいて主に水に曝される部位を対象とした劣化状態の詳細調査を行い、積雪寒冷地において長期間供用されたコンクリート施設では圧縮強度や相対動弾性係数などの力学的特性の低下を伴う著しい劣化を生じる場合があること、表面近傍における凍害とカルシウム成分の溶脱を伴う摩耗とが複合的に発生する可能性があることを明らかにした。また、北海道内に造成された鋼矢板排水路を対象とした鋼矢板の腐食診断を行い、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構について考察するとともに、積雪寒冷地における性能低下の特徴と機能保全における今後の課題を整理した。一方、後者では、開水路において、超音波伝播速度と静弾性係数との関係を整理し、超音波法、機械インピーダンス法の適用性について考察するとともに、金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜試験を行い、最大引抜荷重と超音波伝播速度との関係性を明らかにした。②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発では、農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価、凍害・摩耗の複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強工法および再補修・高耐久化技術ならびに積雪寒冷地における農業水利施設の維持管理技術の開発を行った。前者では、補修後の開水路を対象とした含水率の調査を行い、電気抵抗式水分測定法の有効性を確認した。また、同位置より採取したコアの凍結融解試験を行い、母材コンクリートの健全性や含水状態を把握することが重要であることを明らかにするとともに、表面保護工法の適用に際する提案を行った。さらに、モルタル材および無機系表面被覆材に凍結融解を作用させ、その後に促進摩耗試験を行い、凍結融解の作用が無機系材料の耐摩耗性に影響を与えるメカニズムについて考察した。その結果、凍結融解の作用は、スケーリングを生じさせ、またひび割れを蓄積させることにより、耐摩耗性の低下を促すことが確認された。一方、後者では、複合劣化に対して高耐久性を有する「超高耐久性断面修復・表面被覆技術」の開発と、その耐久性を評価するためのモニタリング調査を行った。断面修復・表面被覆材の凍結融解試験を行った結果、凍結融解サイクル数は1,500サイクルを超え、優れた耐凍害性を有していること、また、その耐用年数は予定供用期間を大きく上回ることを確認した。また、今後は補修された農業水利施設がさらに増加し、維持管理、ストックマネジメントの対象の多くが補修された施設になることを踏まえ、補修工事後の施設マネジメントサイクルについて考察した。

キーワード：コンクリート、鋼製部材、凍害、摩耗、腐食、複合劣化、非破壊・微破壊調査手法、表面保護工法、凍結融解試験、耐凍害性、耐摩耗性、超高耐久性断面修復・表面被覆技術、耐用年数、施設マネジメントサイクル

#### 1. はじめに

食料・農業・農村基本計画<sup>1)</sup>、土地改良長期計画<sup>2)</sup>や北

海道総合開発計画<sup>3)</sup>では、農業水利施設の適切な保全管理、戦略的な維持管理が重要な施策として位置づけられてい

る。その中で、積雪寒冷地に位置する農業水利施設には、温暖な地域とは異なる様々な変状が確認されている。施設には、コンクリートに生じる凍害だけでなく、摩耗や種々の外的作用が生じており、多くの場合、それら劣化外力は複合的に作用している。結果、施設の使用性だけでなく、構造的安定性、第三者（歩行者等への）影響度に関する性能の低下もみられている。

農業水利施設の要求性能を満足させ、その長寿命化を達成していくためには、開水路や頭首工を構成するコンクリート、ゲートや鋼矢板などの鋼製部材において、複合劣化を対象とした診断・評価方法に関する技術開発が必要不可欠となる。一方で、寒冷地に位置する農業水利施設の規模は大きく、例えば、国内の用水路の中で寒冷地に位置するものは約4割にも及ぶ。寒冷条件の厳しい北海道内での研究成果は、北海道内だけでなく他の寒冷地に位置する農業水利施設の長寿命化、保安全管理にも活用することができる。

本研究では、積雪寒冷地に位置する社会基盤を構成する施設群の一つである農業水利施設の長寿命化を図るため、①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発を行い、積雪寒冷地における農業水利施設の維持管理方法を提案することを目的とする。

①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築では、コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明、非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発を行った。また、②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発では、農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価、凍害・摩耗の複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強工法および再補修・高耐久化技術の開発、ならびに積雪寒冷地における農業水利施設の維持管理技術の開発を行った。

## 2. コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明

### 2.1 開水路および頭首工における凍害・摩耗診断<sup>4), 5), 6)</sup>

#### 2.1.1 目的

農業水利施設の主要な建設材料であるコンクリートは、時間の経過とともに劣化が進行する。特に北海道を始めとする積雪寒冷地では、農業にとって欠かすことのできない存在である水が劣化因子となる凍害が発生する。凍害は、コンクリート中の水分が凍結する際の体積膨張と、融解す

際の水分供給という凍結融解作用を繰り返すことにより、コンクリートが表面から徐々に劣化する現象である<sup>7)</sup>。その初期には微細ひび割れを生じ、スケーリング、骨材の露出・剥落、あるいは内部ひび割れ、層状ひび割れへと進展して、弾性係数の低下を生じさせ、ひいては強度低下に至らせる。終局的には躯体の断面欠損や鉄筋の露出・腐食を生じて、部材や構造物としての耐荷力や剛性を低下させる<sup>8)</sup>。

一方、農業水利施設に特有の劣化としては摩耗が挙げられる。摩耗は、流水中の土砂による研磨作用や落差による衝撃力などが組み合わさり、コンクリートの表面が欠損していく現象である。また、水と接することでセメント水和物中のカルシウムイオンなどが溶出し、組織が粗になる溶脱現象が発生して、摩耗の進行が促進される<sup>9)</sup>。その初期には表面のセメントペーストの消失による骨材の露出を生じ、骨材の剥落、骨材を支えるセメントモルタルの欠損へと進展する。終局的には躯体の断面欠損や鉄筋の露出・腐食を生じて、部材の耐久性を低下させる要因となる。凍害が発生したコンクリートでは、内部ひび割れや層状ひび割れなどによりその健全性が著しく損なわれることが明らかになっている<sup>10), 11), 12)</sup>。そのため、水利施設に特有の摩耗との併発により、施設としての性能低下が加速される可能性も考えられる。農業水利施設の機能保全の手引き<sup>13)</sup>によれば、北海道や北東北などの寒冷地においては、施設の健全度の低下速度は他の地域に比べ大きくなることが示されている。

積雪寒冷地におけるコンクリート施設では、近年、これら凍害や摩耗を対象とした調査・診断、ならびに劣化により低下した性能の回復・向上を目的とした補修・補強が行われている。凍害や摩耗は、いずれも水に起因する劣化であり、躯体表面より発生、進展する。一方、補修・補強では、躯体表面を介し、躯体に対して補修材料や補強材料を一体化させることにより、その効果を得ようとする場合が多い<sup>14)</sup>。そのため、従来の更新だけではなく、補修・補強を前提とした凍害や摩耗の調査・診断では、施設を構成するコンクリートの表面近傍における劣化状態の把握が重要となる。

農業水利施設を構成するコンクリートの表面近傍における劣化状態に関しては、近年、いくつかの調査結果が報告されている。凍害を主たる対象とした劣化状態に関しては、例えば、緒方ら<sup>15)</sup>は、RC開水路に生じた凍害劣化ひび割れや表面から深さ方向の超音波伝播速度の測定結果の事例を示し、RC開水路に発生する特徴的な凍害のメカニズムについて考察している。また、緒方ら<sup>16)</sup>は、北海道

において建設後 40 年以上が経過した開水路の側壁から採取したコア試験体の分析結果を示し、側壁内部におけるひび割れの発生形態を明らかにするとともに、側壁の内部変状に対して考察を加えている。さらに、石神ら<sup>17)</sup>は、北海道内に位置する供用後 40 年以上が経過した 2 つの開水路の 3 区間 29 測点における凍害劣化深さの推定結果を示し、超音波を用いた診断手法の適用性と実務上の課題について整理している。

一方、摩耗を主たる対象とした劣化状態に関しては、例えば、石神ら<sup>18)</sup>は、四国、中部地方において施工後約 40 年が経過した開水路の底版、側壁から採取したコア試験体の EPMA による面分析および線分析結果を示し、摩耗が進行したコンクリートの通水表面付近におけるカルシウム濃度の減少を確認している。また、森ら<sup>19)</sup>は、東海、関東、四国地方に位置する建設後 40 年以上が経過した、摩耗が著しく進行した開水路の底版および側壁から採取したコア試験体の EPMA による化学組成分析結果を示し、通水表面におけるカルシウム成分の溶脱とカルシウム未溶脱領域での硫黄成分の濃縮を確認しており、こうしたコンクリートの変質が表層の脆弱化や摩耗の素因となっている可能性を示唆している。さらに、渡嘉敷<sup>20)</sup>は、東北、関東、東海、中国の各地方に位置する建設後 30~51 年が経過した開水路および頭首工における摩耗形状計測および EPMA 分析の結果を示し、水路側壁では水路底版に近くなるほど表面が粗くなる傾向にあること、溶脱フロント付近のカルシウム濃度は 18~30 mass % 程度であること、カルシウム濃度と溶脱進行速度との間には負の関係があることなどを明らかにしている。しかしながら、これらの調査では凍害あるいは摩耗のいずれかを対象としており、凍害と摩耗の 2 つを対象とした劣化状態に関しては、その調査・診断の事例は極めて少ないのが現状である。

そこで本研究では、北海道内に位置する複数の開水路および頭首工を構成するコンクリートにおいて、主に水に曝される部位を対象としたコア試験体の採取を行い、凍害および摩耗を主たる対象とした劣化状態の詳細調査を行った。ここでは、その結果を示すとともに、凍害と摩耗との関係について考察し、補修・補強を行うための対策工法の適用に際する留意点を述べる。

### 2.1.2 方法

#### (1) コンクリート施設の概要

本研究において詳細調査の対象としたコンクリート施設の概要を表-1 に、現況を図-1 に示す。いずれの施設も、国営かんがい排水事業などの国営事業により造成された基幹水利施設であり、北海道内の積雪寒冷地において長期

表-1 詳細調査の対象としたコンクリート施設の概要

工種	名称	建設年度	対象部位
開水路	N 用水路	1962~1972 年	側壁 水中部 底版
	T 用水路	1970~1974 年	側壁 水中部 底版
	K 用水路	1986 年	側壁 気中部 側壁 水中部 底版
頭首工	S 頭首工	1955~1957 年	固定堰・堰体 上流側 可動堰・エプロン 上流側 可動堰・エプロン 下流側
	T 頭首工	1960~1962 年	可動堰・導流壁 天端面
			可動堰・導流壁 側面気中部
			可動堰・導流壁 側面干満部
Y 頭首工	1967~1969 年	可動堰・エプロン 下流側	



図-1 詳細調査の対象としたコンクリート施設の現況

間供用されてきている。

#### 1) 開水路

調査の対象とした開水路は、北海道空知地方に位置する N 用水路、上川地方に位置する T 用水路、ならびに空知地方に位置する K 用水路である。N 用水路は 1962~1972 年に、T 用水路は 1970~1974 年に、K 用水路は 1986 年に建設されており、調査時における経過年数はそれぞれ 44 年、43 年、32 年である。構造型式はいずれも現場打ちフリーム水路であり、側壁は左右岸ともに土中に埋設されている。いずれの開水路においても、主に大気に曝され

る部位は寒暖差の大きい凍結融解環境下に置かれており、外観上からは微細ひび割れやスケーリングなどの凍害に特有の劣化が確認される。また、主に水に曝される部位では骨材の露出や鉄筋の露出・腐食といった摩耗に特有の劣化が確認されている。

調査の対象とした部位は、N 用水路、T 用水路では側壁水中部（最多頻度水位の下側）および底版の計 2 箇所とし、K 用水路ではこれらの部位に側壁気中部（最多頻度水位の上側）を加えた計 3 箇所とした。

## 2) 頭首工

調査の対象とした頭首工は、上川地方に位置する S 頭首工、石狩地方に位置する T 頭首工、ならびに上川地方に位置する Y 頭首工である。S 頭首工は 1955～1957 年に、T 頭首工は 1960～1962 年に、Y 頭首工は 1967～1969 年に建設されており、調査時における経過年数はそれぞれ 58 年、51 年、47 年である。S 頭首工の取水堰の形態は、左岸側に固定堰、右岸側に可動堰を配置する複合堰である。一方、T 頭首工の形態は全可動堰である。また、Y 頭首工の形態は、左岸側に可動堰、右岸側に固定堰を配置する複合堰となっている。いずれの頭首工においても、主に大気に曝される堰柱などの部位では微細ひび割れなどの凍害に特有の劣化が確認される。さらに、主に水に曝される堰体やエプロンといった部位では断面欠損に至る著しい摩耗が確認されている。

調査の対象とした部位は、S 頭首工では、摩耗が比較的軽微な固定堰・堰体の上流側および可動堰・エプロンの上流側と、摩耗が甚大な可動堰・エプロンの下流側の計 3 箇所とした。一方、T 頭首工では、摩耗は比較的軽微であるものの凍害は甚大であると予想される可動堰・導流壁の下流側において、導流壁の天端面、側面気中部（最多頻度水位の上側）、側面干満部（最多頻度水位の近傍）の計 3 箇所とした。また、Y 頭首工では可動堰・エプロンの下流側

の 1 箇所としている。

## (2) 調査方法の概要

本研究における調査の流れを図-2 に示す。本研究では、凍害あるいは摩耗を主たる対象とした劣化状態の調査の事例を参考に、圧縮強度および静弾性係数、表面からの深さ毎の相対動弾性係数および細孔径分布、ならびに元素濃度分布の測定を行った。まず、調査の対象とした部位毎に 2 体のコア試験体の採取を行い、その内 1 体において圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。また、もう 1 体においてコンクリート躯体表面からの深さ毎の相対動弾性係数の測定を行い、さらに、表面からの深さ毎の細孔径分布、元素濃度分布の測定を行った。本研究では、各コア試験体の最も突出した部分をコンクリート躯体表面とみなし、これを表面と定めた。なお、各コア試験体の寸法は直径 100 mm × 高さ 200 mm である。

### 1) 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度および静弾性係数の測定は、JISA1107（コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法）および JIS A 1149（コンクリートの静弾性係数試験方法）に準拠して行った。

### 2) 表面からの深さ毎の相対動弾性係数

表面からの深さ毎の相対動弾性係数の測定では、まず、超音波法により、深さ毎のコア試験体の直径方向の超音波伝播速度を測定した。超音波法では、発振子および受振子を相対する 2 つの表面（コア試験体の側面）に配置して測定する透過法を適用し、伝播速度を 10 mm 間隔で深さ 5 ～ 145 mm の位置において測定した。伝播速度は水平方向および鉛直方向の 2 方向で測定し、その平均値を深さ毎の（深さ  $n$  における）伝播速度  $V_n$  km/s とした。なお、伝播速度は超音波試験機（プロセック社製 TICO 型）を用いて測定した。測定周波数は 54 kHz、発振電圧は 1 kV、発振子および受振子の直径は 50 mm である。

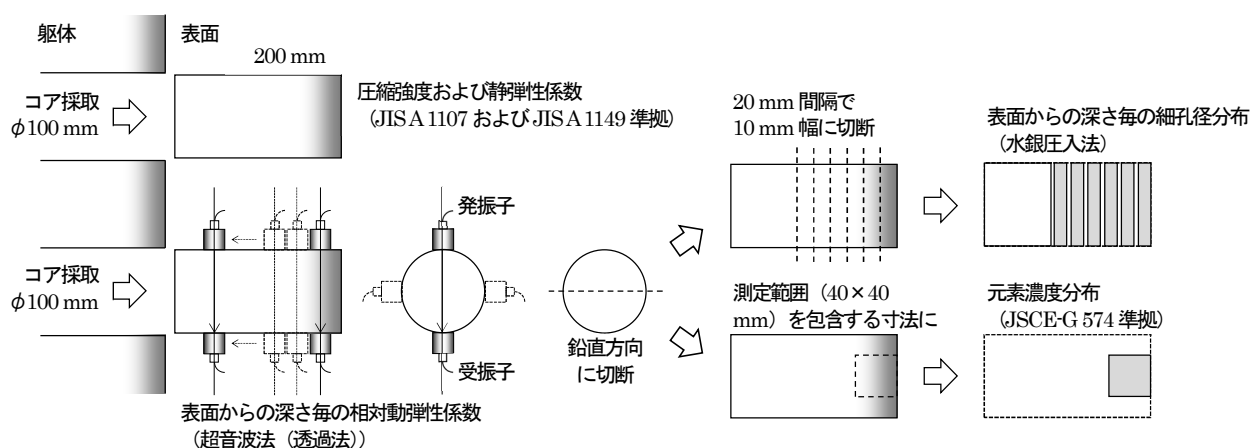


図-2 調査の流れ



次に、得られた伝播速度  $V_n$  km/s を緒方らの研究結果<sup>21)</sup>から導き出されている式 (1) に代入して深さ毎の動弾性係数  $E_{dn}$  GPa を求め、式 (2) により深さ毎の相対動弾性係数を算出した。なお、 $E_{d0}$  は当該施設において健全とみなせる動弾性係数である。本研究では、 $E_{d0}$  は施設毎に得られた動弾性係数の最大値とした。

$$E_{dn} = 4.0387V_n^2 - 14.438V_n + 20.708 \dots \dots (1)$$

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = E_{dn} / E_{d0} \times 100 \dots \dots (2)$$

### 3) 表面からの深さ毎の細孔径分布

表面からの深さ毎の細孔径分布の測定では、水銀圧入法により、深さ毎に採取した試料における細孔径毎の細孔容積を測定した。水銀圧入法では、水銀の表面張力 (0.483 N/m)、試料との接触角 (130°)、ならびに試料に対する圧入圧から試料の細孔径を求め、細孔径分布、即ち細孔径毎の細孔容積を測定する<sup>22)</sup>。本研究では、先に超音波法 (透過法) を適用したコア試験体を鉛直方向に切断し、その内一方を 20 mm 間隔で 10 mm 幅に切断した。0~10 mm、20~30 mm、40~50 mm、60~70 mm、80~90 mm、100~110 mm の深さ毎に試料を採取し、深さ毎の細孔径分布を測定した。試料は、粗骨材を取り除いた後、モルタルを 2.5~5.0 mm 程度の粒状に粉碎して採取した。なお、細孔径分布は水銀圧入式ポロシメータ (マイクロメリティックス社製オートポア IV9500 型) を用いて測定した。測定圧力範囲は 0~228 MPa (細孔径で約 500~0.0055 μm) である。

### 4) 元素濃度分布

元素濃度分布の測定は、JSCE-G 574 (EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法) に準拠して行った。EPMA 法では、電子線照射により発生する特性 X 線の波長による元素の判別と、その特性 X 線の強度による元素の濃度情報の取得を行う。元素の面分析では、電子プローブを分析面全体に順次照射し、目的とする元素の特性 X 線の波長に対応した X 線の強度を測定する<sup>23)</sup>。本研究では、先に超音波法 (透過法) を適用したコア試験体を鉛直方向に切断した後、細孔径分布の測定に供しないもう一方から試料を採取し、表面からの元素濃度分布を測定した。試料は、測定範囲である表面からの深さ 40 mm × 幅 40 mm の範囲を包含する寸法に切断して採取した。試料の調製 (切断、研磨、洗浄、乾燥、導電性材料の蒸着) は、JSCE-G 574 に準拠して実施した。EPMA 法の測定元素および分析条件を表-2 に示す。プローブ径は 50 μm、ピクセルサイズは 100 μm × 100 μm であり、測定範囲毎のピクセル数は 400 × 400 = 160,000 ピクセルである。この全てのピクセルに対して電子プローブを順次照射し、特性 X 線

表-2 EPMA 法の測定元素および分析条件

項目	測定元素および分析条件
装置名称	日本電子社製 JXA-8200 型
加速電圧	15 kV
照射電流	200 nA
プローブ径	50 μm
ピクセルサイズ	100 μm × 100 μm
ピクセル数	400 × 400
測定範囲	40 mm × 40 mm
単位測定時間	40 ms
測定元素	Ca, Si, S
定量方法	比例法
蒸着材料	金

表-3 比例法に用いた標準試料

元素	標準試料	含有量 (mass %)	仮定する各元素の酸化物
Ca	CaSiO <sub>3</sub>	48.0	CaO
Si	CaSiO <sub>3</sub>	50.9	SiO <sub>2</sub>
S	CaSO <sub>4</sub>	58.8	SO <sub>3</sub>

の波長から元素を特定して強度からその濃度を測定した。測定元素は、カルシウム (Ca)、けい素 (Si)、硫黄 (S) である。

なお、X 線の強度からの濃度への定量方法は比例法とした。比例法に用いた標準試料を表-3 に示す。比例法により測定される各元素の濃度は、各元素が表中に示される酸化物として存在するものと仮定した場合の濃度 (mass %) で示される。

### 2.1.3 結果および考察

#### (1) 調査結果および考察

##### 1) 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度および静弾性係数の測定結果を表-4 に、圧縮強度と静弾性係数との関係を図-3 に示す。測定の対象とした部位は開水路 6 箇所、頭首工 7 箇所の計 13 箇所であり、N 用水路の底版では測定を行っていない。図中の淡灰色の着色範囲は、道路橋示方書・同解説<sup>24)</sup>に示されるコンクリートの最低設計基準強度 18 N/mm<sup>2</sup> を下回る範囲を明示したものである。また、黒色の実線は道路橋示方書・同解説およびコンクリート標準示方書 [設計編]<sup>25)</sup>に示されている圧縮強度による静弾性係数の設計値である。この設計値は全国の調査結果の平均値であり、測定値がこの値よりも小さい値となる場合には凍害などの劣化が進行している可能性が考えられる<sup>9)</sup>。

開水路では、圧縮強度の測定値はいずれも最低設計基準強度に比べ大きい値となったが、静弾性係数の測定値は N 用水路、K 用水路において圧縮強度による設計値よりも小さい値となった。一方、頭首工では、圧縮強度の測定値は S 頭首工の固定堰・堰体の上流側および可動堰・エプロンの上流側において最低設計基準強度を下回る値となった。また、静弾性係数の測定値は特に S 頭首工および Y 頭首



表-4 圧縮強度および静弾性係数の測定結果

工種	名称	対象部位	測定結果					
			圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>1</sub> * <sup>1</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	S <sub>2</sub> * <sup>2</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	ε <sub>1</sub> * <sup>3</sup> (×10 <sup>6</sup> )	ε <sub>2</sub> * <sup>4</sup> (×10 <sup>6</sup> )	静弾性係数 E <sub>c</sub> * <sup>5</sup> (kN/mm <sup>2</sup> )
開水路	N 用水路	側壁 水中部	41.2	13.72	0.70	643	50	21.9
		底版	—	—	—	—	—	—
	T 用水路	側壁 水中部	28.2	9.50	1.40	298	50	32.6
		底版	27.1	9.23	1.60	324	50	27.8
	K 用水路	側壁 気中部	33.0	11.00	1.26	474	50	23.0
		側壁 水中部	28.0	9.32	1.24	430	50	21.3
		底版	28.6	9.52	1.13	397	50	24.2
頭首工	S 頭首工	固定堰・堰体 上流側	13.3	4.42	0.52	549	50	7.8
		可動堰・エプロン 上流側	16.4	5.46	0.89	432	50	12.0
		可動堰・エプロン 下流側	24.4	8.13	0.85	437	50	18.8
	T 頭首工	可動堰・導流壁 天端面	21.5	7.18	1.16	326	50	21.8
		可動堰・導流壁 側面気中部	19.0	6.35	1.68	283	50	20.0
			可動堰・導流壁 側面干満部	21.1	7.02	0.98	316	50
Y 頭首工	可動堰・エプロン 下流側	25.5	8.50	0.72	476	50	18.3	

\*1: 最大荷重の 1/3 に相当する応力      \*2: 縦ひずみ 50×10<sup>-6</sup> のときの応力      \*3: S<sub>1</sub> の応力によって生じる縦ひずみ

\*4: 縦ひずみ 50×10<sup>-6</sup>      \*5: E<sub>c</sub> = (S<sub>1</sub>-S<sub>2</sub>) / (ε<sub>1</sub>-ε<sub>2</sub>) × 10<sup>3</sup>

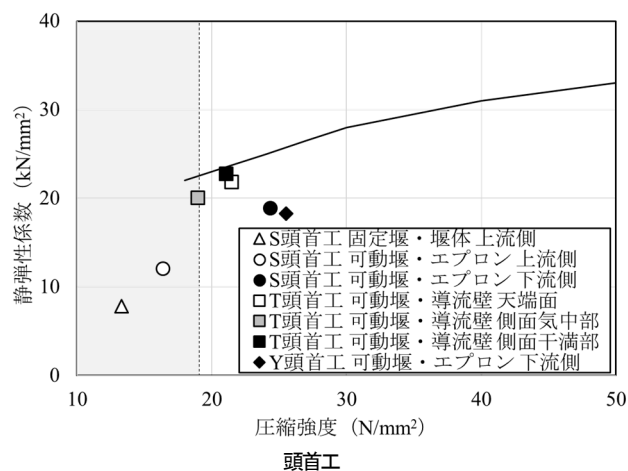
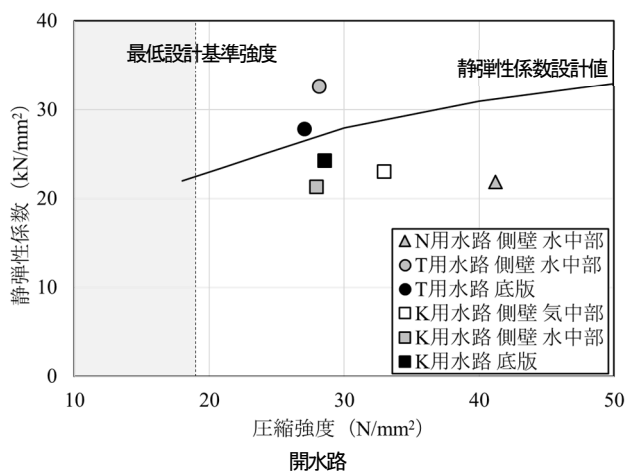


図-3 圧縮強度と静弾性係数との関係

工の可動堰・エプロンの下流側において圧縮強度による設計値よりも小さい値となった。

圧縮強度および静弾性係数は、力学的特性の変化とその発生要因を調べることを目的として測定している。本研究では、測定の対象とした計 13 箇所内の内、S 頭首工の 2 箇所において、圧縮強度の測定値は最低設計基準強度を下回る値となり、また、この 2 箇所と T 用水路の 2 箇所を除く 9 箇所の部位において、静弾性係数の測定値は圧縮強度による設計値よりも小さい値となった。この静弾性係数の測定値が圧縮強度による設計値よりも小さい値となった要因としては、コンクリートに凍害が発生していた可能性が考えられる。凍結融解作用を受けたコンクリートでは、微細ひび割れなどが生じることにより、静弾性係数は圧縮強度に比べると顕著に低下することが知られている<sup>26), 27), 28), 8)</sup>。本研究で対象とした部位はいずれも



図-4 S 頭首工および Y 頭首工の可動堰・エプロンの状況

寒暖差の大きい凍結融解環境下に置かれており、そのため凍害が発生して静弾性係数の低下に至った可能性が高いといえる。

一方、S 頭首工および Y 頭首工では、凍害に加え、カルシウム成分の溶脱を伴う摩耗が発生していた可能性が考えられる。S 頭首工および Y 頭首工の可動堰・エプロンの下流側の状況を図-4 に示す。固定堰・堰体の上流側およ

び可動堰・エプロンの上流側では断面は比較的健全に保持されているものの、可動堰・エプロンの下流側ではすりへり作用による著しい断面欠損が確認されている。このことから、固定堰・堰体の上流側および可動堰・エプロンの上流側では凍害およびカルシウム成分の溶脱により圧縮強度の低下にまで至ったコンクリートが残存したが、可動堰・エプロンの下流側では既に消失していた可能性が高い。

## 2) 表面からの深さ毎の相対動弾性係数

表面からの深さ毎の相対動弾性係数の測定結果を図-5に示す。測定の対象とした部位は開水路7箇所、頭首工7箇所の計14箇所である。図中では、コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>29)</sup>に規定される数値を参考に、相対動弾性係数85%未満60%以上の範囲を淡灰色に、60%未満の範囲を濃灰色に着色して示している。

開水路では、相対動弾性係数は総じてコンクリート躯体表面に近いほど低くなる傾向がみられた。N用水路では、表面からの深さ60mm程度まで低下しており、側壁と底版とで大きな差は認められなかった。また、底版では深さ60mmよりも奥側において背面に近いほど低くなる傾向が確認された。T用水路では、低下は深さ20mm程度までに留まっており、その奥側において低下はほぼ認められなかった。K用水路では、表面に近いほど低くなる傾向が試験体のほぼ全体において認められた。また、側壁気中部、側壁水中部、底版の間で大差は確認されなかった。一方、頭首工では、相対動弾性係数は総じて低く、表面に近いほど、水による影響を受け易い部位ほど、温度変化の著しい

部位ほど、低くなる傾向がみられた。S頭首工では、固定堰・堰体の上流側および可動堰・エプロンの上流側で、可動堰・エプロンの下流側に比べ全体的に大きく低下していた。T頭首工では、表面からの深さ80mm程度まで大きく低下しており、表面に近いほど、水に曝される割合が大きい部位ほど、寒暖差の大きい部位ほど、低くなる傾向が認められた。Y頭首工では、可動堰・エプロンの下流側で、S頭首工の可動堰・エプロンの下流側と同様に、概ね表面に近いほど低くなる傾向が認められた。

表面からの深さ毎の相対動弾性係数は、表面近傍における力学的特性の変化とその発生要因を調べることを目的として測定している。本研究では、測定の対象とした計14箇所の全ての部位において、相対動弾性係数は表面に近いほど低くなる傾向がみられた。凍害が発生したコンクリートでは、その動弾性係数は低下することが知られており、超音波伝播速度から算出される相対動弾性係数もコンクリートの劣化状態に応じて低下する<sup>21), 15), 17)</sup>。本研究で得られた相対動弾性係数の測定結果からは、測定の対象とした部位において凍害が発生していた可能性が高いといえる。また、圧縮強度や静弾性係数の測定結果からは必ずしも劣化が明確にはみられなかった部位においても、表面近傍では劣化が発生していた可能性が高い。これらの結果は、測定の対象とした部位が力学的特性の低下を伴う著しい劣化環境下に置かれていることを裏付けるものであり、さらに、水や温度変化に起因する劣化が表面から発生、進展したことを示している。

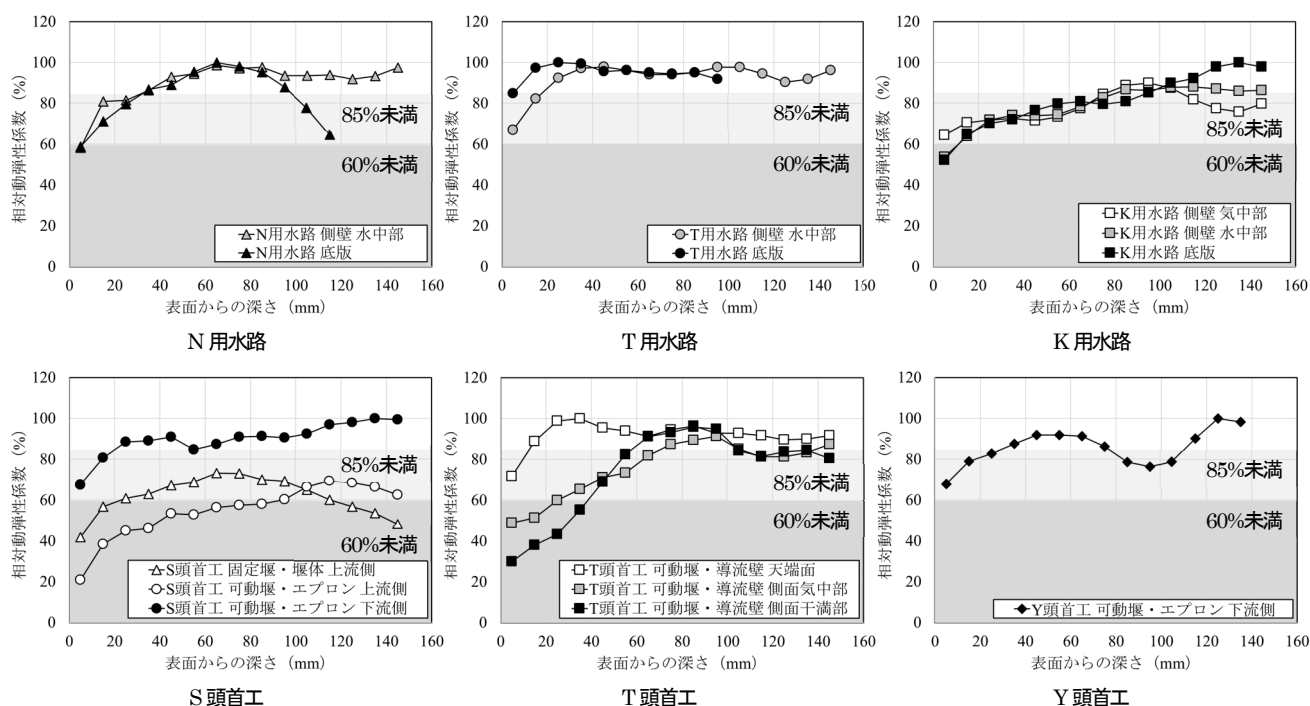


図-5 表面からの深さ毎の相対動弾性係数の測定結果

### 3) 表面からの深さ毎の細孔径分布

表面からの深さ毎の細孔径分布の測定結果を図-6に示す。水銀圧入法の適用に際しては、先ず、水銀の圧入圧毎の圧入量から細孔直径と積算細孔容積との関係を求めた。次に、積算細孔容積の変化を明確に捉えるため、細孔直径とlog微分細孔容積との関係を整理した。各図では、横軸は細孔直径を、縦軸はlog微分細孔容積を表している。ここでは、この細孔直径を細孔径、log微分細孔容積を細孔量と呼ぶ。なお、測定の対象とした部位は開水路7箇所、

頭首工5箇所の計12箇所であり、T頭首工の可動堰・導流壁の天端面および側面干満部では測定を行っていない。

開水路では、細孔量は総じてコンクリート躯体表面に近いほど多くなる傾向がみられ、表面に近いほど粗な細孔構造になっていることが認められた。また、表面に近いほど細孔径約0.01~0.05μm付近の細孔量が、最表面において約0.01~1.0μm付近の細孔量が多くなる傾向が確認された。さらに、側壁気中部、側壁水中部、底版の間で傾向は異なり、概ね側壁気中部>側壁水中部>底版の順で約

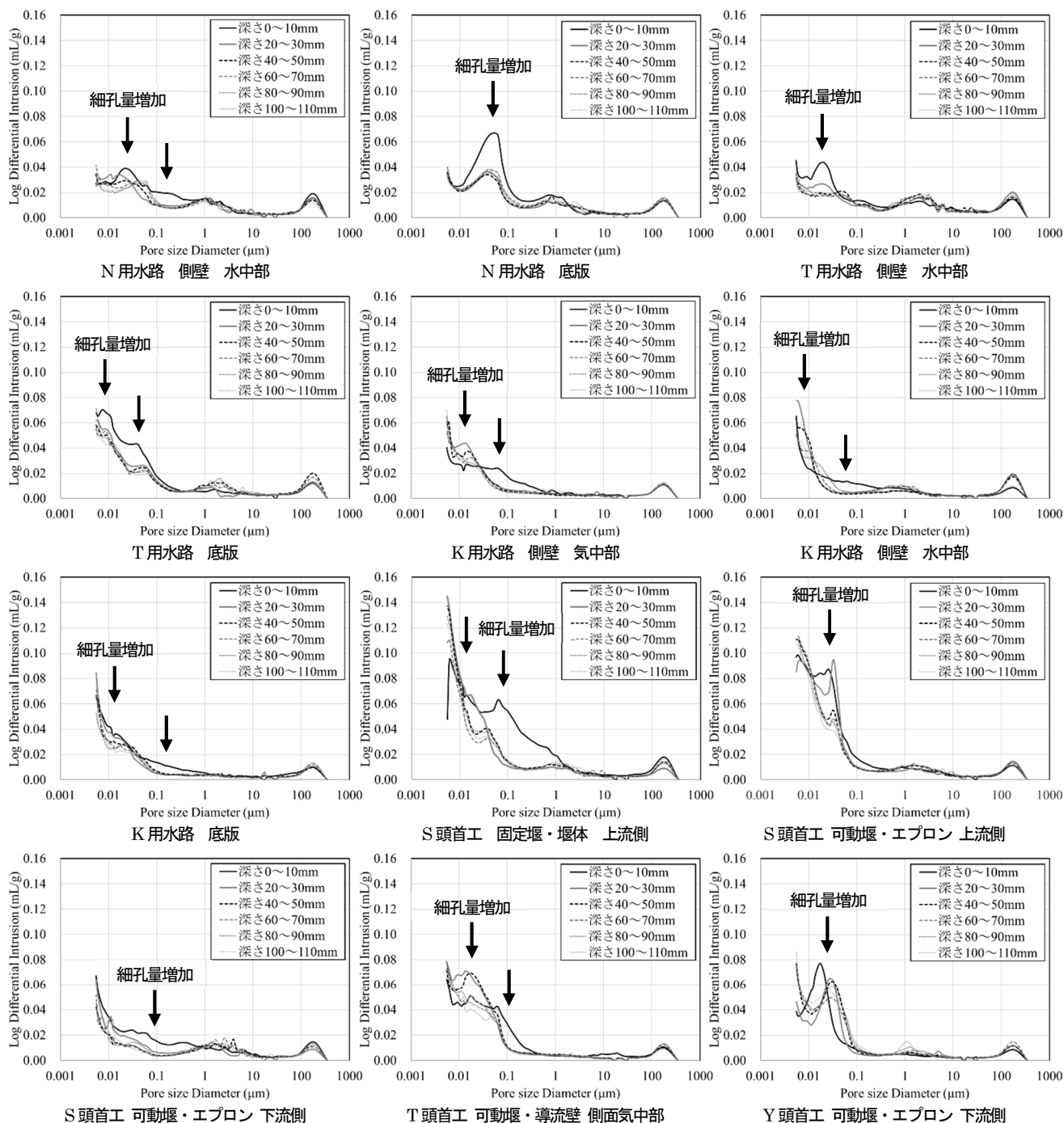


図-6 表面からの深さ毎の細孔径分布の測定結果

0.05~1.0  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が、底版>側壁水中部>側壁気中部の順で約 0.01~0.05  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が多くなる傾向が確認されている。一方、頭首工では、細孔量は総じて多く、表面に近いほど、水による影響を受け易い部位ほど、流水の流速が小さい部位ほど、温度変化の著しい部位ほど、多くなる傾向がみられ、粗な細孔構造になっていることが認められた。S 頭首工では、固定堰・堰体の上流側で、概ね建設当初のコンクリートとみなせる表面からの深さ 100~110 mm から採取した試料に比べ、深さ 0~10 mm から採取した試料において約 0.01~1.0  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が、深さ 20~30 mm から採取した試料において約 0.01~0.05  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が多くなる傾向が確認された。また、可動堰・エプロンの上流側で、表面に近いほど約 0.01~0.05  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が多くなる傾向が確認された。さらに、可動堰・エプロンの下流側で、深さ 0~10 mm から採取した試料において約 0.01~1.0  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が多くなる傾向が確認されている。T 頭首工では、可動堰・導流壁の側面気中部で、深さ 0~10 mm から採取した試料において約 0.01~1.0  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が、深さ 20~30 mm および 40~50 mm から採取した試料において約 0.01~0.05  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が多くなっていることが確認された。Y 頭首工では、可動堰・エプロンの下流側で、深さ 0~10 mm から採取した試料において約 0.01~0.05  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が、深さ 20~30 mm および 40~50 mm から採取した試料において約 0.01~0.1  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が多くなっていることが確認されている。

表面からの深さ毎の細孔径分布は、表面近傍における細孔構造の変化とその発生要因を調べることを目的として測定している。本研究では、測定の対象とした計 12 箇所全ての部位において、細孔量は表面に近いほど多くなる傾向がみられた。この要因としては、コンクリートに凍害およびカルシウム成分の溶脱を伴う摩耗が発生していた可能性が考えられる。凍結融解作用を受けたコンクリートでは、微視的な破壊が累積することにより、凍結の及んだ範囲の細孔構造は粗大化することが知られている<sup>29), 30), 22)</sup>。また、凍結融解の影響がみられる最小の細孔径は最低の凍結温度に依存し、小さい細孔に存在する水ほどその凍結温度は低くなる。岡本・魚本<sup>30)</sup>が行ったモルタル試験体を用いた凍結融解試験では、凍結融解作用を受けることで特に約 0.1~1.0  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が増加する傾向が確認されており、凍結温度を $-20^{\circ}\text{C}$ とした試験では約 0.05  $\mu\text{m}$  以下の細孔に存在する水は凍結しないことが明らかとなっている。さらに、コンクリート試験体を用いた試験では約 0.05~0.5  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が増加する傾向が確認されて

いる<sup>32)</sup>。これらのことから、約 0.05~1.0  $\mu\text{m}$  付近の細孔量の増加の主たる要因は凍結融解作用によるものと考えられ、この範囲の細孔量が多くなっていた部位では凍害が発生していた可能性が高いといえる。

一方、カルシウム成分の溶脱が発生したコンクリートにおいても、溶脱の及んだ範囲の細孔構造は粗大化するとされている<sup>33), 34), 35)</sup>。橋本ら<sup>36)</sup>が行った 70 年以上供用されたダムコンクリートの岩着面近傍から採取した試料を用いた調査では、カルシウム成分の溶脱が認められた範囲で約 0.003~2.0  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が増加していることが確認されている。また、人見ら<sup>36)</sup>が行ったモルタル試験体を用いた電気化学的劣化促進試験では、カルシウム成分である CH (水酸化カルシウム) の溶出により約 0.03~2.0  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が、C-S-H (けい酸カルシウム水和物) の溶脱により約 0.006~0.3  $\mu\text{m}$  付近の細孔量が増加する傾向が確認されている。これらのことから、約 0.05~1.0  $\mu\text{m}$  付近の細孔量の増加の要因には凍結融解作用に加えカルシウム成分の溶脱も含まれ、また約 0.01~0.05  $\mu\text{m}$  付近の細孔量の増加の主たる要因はカルシウム成分の溶脱によるものと考えられる。これらの範囲の細孔量が多くなっていた部位では、カルシウム成分の溶脱を伴う摩耗が発生していた可能性が高いといえる。

本研究で得られた細孔径分布の測定結果からは、測定の対象とした部位において凍害およびカルシウム成分の溶脱を伴う摩耗が併発していた可能性が高いといえる。開水路では、表面に近いほどカルシウム成分の溶脱の程度が大きく、また最表面では凍害が発生していた可能性が高い。概ね側壁気中部>側壁水中部>底版の順で凍害が発生し易く、底版>側壁水中部>側壁気中部の順で溶脱が発生し易いといえる。一方、頭首工では、表面に近いほど、水による影響を受け易い部位ほど、流水の流速が小さい部位ほど、溶脱の程度が大きく、また温度変化の著しい部位ほど、凍害の程度が大きい可能性が高い。このことから、S 頭首工の固定堰・堰体の上流側および可動堰・エプロンの上流側では主に溶脱が発生していた可能性が高く、また固定堰・堰体の上流側の最表面では凍害と溶脱が併発していた可能性が高い。また、S 頭首工および Y 頭首工の可動堰・エプロンの下流側ではすりへり作用による著しい断面欠損が確認されており(図-4)、S 頭首工の可動堰・エプロンの下流側では溶脱が発生したコンクリートが、また Y 頭首工の可動堰・エプロンの下流側では最表面において凍害が発生したコンクリートが既に消失していた可能性が高い。さらに、T 頭首工の可動堰・導流壁の側面気中部では、深さ約 10~50 mm の位置にひび割れが確認されており、

約 0.01~0.05  $\mu\text{m}$  付近の細孔量の増加はこのひび割れに影響を受けていることが考えられる。ひび割れを侵入経路として入ってきた水によりカルシウム成分の溶脱が発生し、この範囲の細孔量が多くなった可能性が高い<sup>37)</sup>。なお、このひび割れは内部ひび割れであり、凍結融解作用により生じたものと推察される。

#### 4) 元素濃度分布

元素濃度分布の測定結果を図-7に示す。EPMA法の適用に際しては、まず、元素の面分析を行い、各元素の濃度の画像データを得た。各画像データでは、測定範囲の濃度の分布は色尺度により示されており、右側にあるカラーバーの通り、濃度は暖色ほど高く、寒色ほど低く表示されている。次に、コンクリート躯体表面を基点とした深さ 0.1 mm (=100  $\mu\text{m}$ 、1ピクセル当たりの長さ) 毎の濃度の平均値(骨材の濃度を除く)の分布を求めた。ここでは、カルシウム(Ca)の濃度の画像データを示し、各元素(カルシウム(Ca)、けい素(Si)、硫黄(S))の濃度の分布を併せて示している。なお、測定の対象とした部位は開水路7箇所、頭首工5箇所の計12箇所である。S頭首工の固定堰・堰体の上流側および可動堰・エプロンの上流側では測定を表面からの深さ 60 mm×幅 40 mm (ピクセル数で 600×400=240,000ピクセル)の範囲で行っており、T頭首工の可動堰・導流壁の天端面および側面干満部では測定を行っていない。

開水路では、コンクリート躯体表面近傍におけるカルシウム濃度の減少がみられた。側壁気中部、側壁水中部、底板の間でその傾向は異なり、概ね底板>側壁水中部>側壁気中部の順で減少範囲が大きくなる傾向が認められた。その範囲は底板で表面からの深さ約 0~13 mm 程度、側壁水中部で深さ約 0~12 mm 程度であり、側壁気中部においても深さ約 0~2 mm 程度の範囲で減少が確認されている。また、最表面近傍におけるけい素濃度の減少が確認され、深さ約 5~12 mm 程度の位置において硫黄濃度の上昇が確認されている。一方、頭首工では、カルシウム濃度の減少の程度は総じて大きく、表面に近いほど、水による影響を受け易い部位ほど、流水の流速が小さい部位ほど、大きくなる傾向がみられた。S頭首工では、固定堰・堰体の上流側および可動堰・エプロンの上流側で、カルシウム濃度は表面に近いほど減少する傾向が認められ、特に深さ約 0~25 mm 程度の範囲で減少は顕著であった。また、可動堰・エプロンの下流側で、ごく最表面近傍における減少が確認されている。T頭首工では、可動堰・導流壁の側面気中部で、表面に加え、ひび割れ近傍における減少が確認された。Y頭首工では、可動堰・エプロンの下流側で、

表面近傍における減少が確認されている。また、最表面およびひび割れ近傍においてけい素濃度の減少が確認されたが、開水路で確認されていた硫黄濃度の上昇は明確には確認されなかった。

元素濃度分布は、各元素の濃度の変化とその発生要因を調べることを目的として測定している。本研究では、測定の対象とした計12箇所の全ての部位において、表面近傍におけるカルシウム濃度の減少、ならびに最表面近傍におけるけい素濃度の減少がみられた。この要因としては、コンクリートにカルシウム成分の溶脱を伴う摩耗が発生していた可能性が考えられる。淡水である農業用水に長期間曝され、カルシウム成分の溶脱が発生したコンクリートでは、Ca/Siモル比(CaO/SiO<sub>2</sub>濃度比)、あるいはカルシウム濃度が減少することが知られている<sup>18),19),20)</sup>。森ら<sup>19)</sup>は、農業用水に長期間曝されたコンクリートにおけるカルシウム成分の溶脱を伴う摩耗のメカニズムについて考察しており、本研究で対象とした部位においても同様の現象が生じていた可能性が考えられる。まず、①流水に曝されることによりコンクリートの細孔溶液中に存在するCH(主にカルシウムイオン(Ca<sup>2+</sup>))が溶出する。次に、②細孔溶液中のCHと流水中のCHとの濃度差を緩和するようにカルシウムイオン(Ca<sup>2+</sup>)および水酸化物イオン(OH<sup>-</sup>)が表面近傍に移動し、個体として存在するCHが細孔溶液中に溶出してカルシウムイオン(Ca<sup>2+</sup>)を供給する。さらに、③溶出が進むことによりC-S-H中の酸化カルシウム(CaO)が細孔溶液中にカルシウムイオン(Ca<sup>2+</sup>)および水酸化物イオン(OH<sup>-</sup>)として溶脱する。そして、④流水に接する表面からCHが溶出し、C-S-Hが溶脱することにより強度が低下する。ひいては、⑤すりへり作用に対する耐性を失うレベルにまで強度が低下し、摩耗が促進される。このように、表面近傍におけるカルシウム濃度の減少、ならびに最表面近傍におけるけい素濃度の減少の要因はカルシウム成分の溶脱によるものと考えられ、これらの濃度の減少がみられた部位では摩耗が促進されていた可能性が高いといえる。

一方、測定の対象とした部位の内、開水路では深さ約 5~12 mm 程度の位置において硫黄濃度の上昇が確認されている。また図からは、硫黄濃度の上昇が確認されている位置はカルシウム成分の溶脱フロント付近であることが判別できる。この硫黄濃度の上昇の要因としては、炭酸化フロント付近において硫黄成分の濃縮が発生していた可能性が考えられる。炭酸化を受けたコンクリートでは、硫黄化合物が分解し移動することにより、非炭酸化領域の炭酸化領域近傍において硫黄成分の濃縮が発生することが



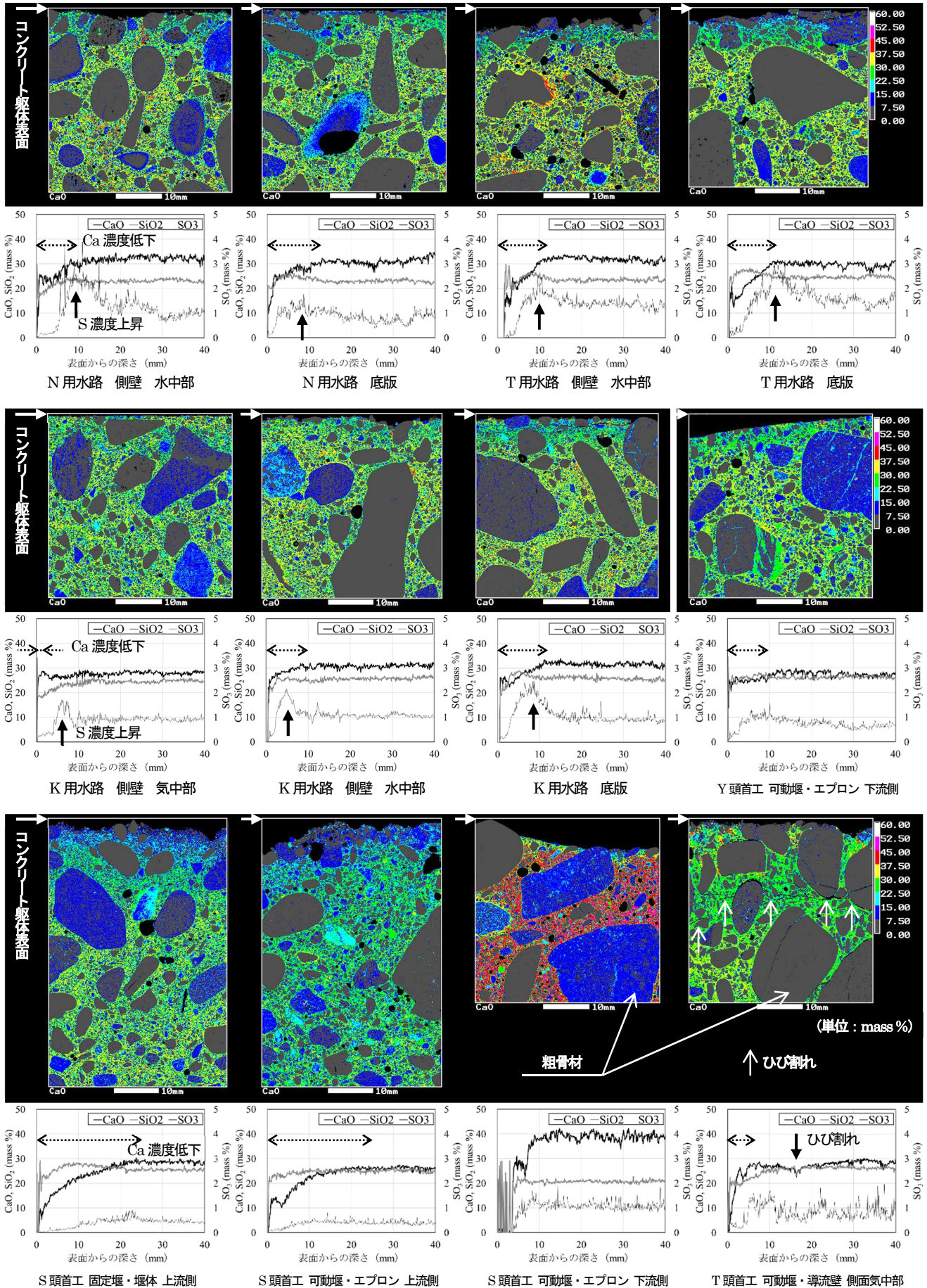


図-7 元素濃度分布の測定結果

知られている<sup>38)</sup>。また、農業用水に長期間曝されたコンクリートにおいても同様の現象が生じることが明らかとなっている<sup>19)</sup>。コンクリートの細孔内に侵入した二酸化炭素は細孔溶液中に溶解し、炭酸イオンもしくは炭酸水素イオンとなる。これらのイオンと各種セメント水和物との反応が炭酸化である<sup>39)</sup>。本研究で対象とした開水路では、流水に曝されカルシウム成分の溶脱が発生したコンクリートを二酸化炭素が透過し、透過した二酸化炭素が溶脱フロント付近の細孔溶液中に溶解し炭酸化が発生して、炭酸化フロント付近において硫酸成分の濃縮に至ったものと考えられる。さらに、二酸化炭素は流水中にも溶解するため、二酸化炭素が溶解した流水が透過し、炭酸化に繋がった可能性も考えられる。開水路ではコンクリートは非灌漑期に大気中の二酸化炭素に曝されるのに対し、頭首工では必ずしも二酸化炭素に曝されない。加えて、頭首工では流水の流速が大きく硫酸成分の濃縮が発生し難いことも考えられる。そのため、硫酸濃度の上昇は開水路で確認され、頭首工においては明確には確認されなかったものと考えられる。

本研究で得られた元素濃度分布の測定結果からは、測定の対象とした部位においてカルシウム成分の溶脱を伴う摩耗が発生していた可能性が高いといえる。開水路では、表面近傍でカルシウム成分の溶脱が発生していた可能性が高い。概ね底版>側壁水中部>側壁気中部の順で溶脱が発生し易いといえる。この結果は、細孔径分布の測定結果とよく符合する。一方、頭首工では、表面に近いほど、水による影響を受け易い部位ほど、流水の流速が小さい部位

ほど、溶脱の程度が大きい可能性が高いといえる。このことから、S頭首工の固定堰・堰体の上流側および可動堰・エプロンの上流側では溶脱が発生していた可能性が高い。また、S頭首工およびY頭首工の可動堰・エプロンの下流側ではすりへり作用による著しい断面欠損が確認されているが(図-4)、S頭首工の可動堰・エプロンの下流側では溶脱が発生したコンクリートが既に消失し、Y頭首工の可動堰・エプロンの下流側では未だ残存していた可能性が高い。さらに、T頭首工の可動堰・導流壁の側面気中部では、溶脱はひび割れに影響を受けていることが考えられる。これらの結果も、細孔径分布の測定結果、ならびに圧縮強度および静弾性係数の測定結果とよく符合している。

**(2) 凍害と摩耗との関係に対する考察**

本研究において得られた調査結果を比較した結果を表-5に示す。コンクリート躯体表面近傍において相対動弾性係数が低下した範囲、細孔量が増加した範囲、カルシウム濃度が減少した範囲は各々よく符合しており、凍害と摩耗は相互に影響を与え合う関係であることが考えられる。凍害と摩耗との関係について図-8に示す。

凍害は、前述のように、その初期には細孔構造の粗大化、微細ひび割れなどのマイクロな変状を生じ、スケーリング、ポップアウト、骨材の露出・剥落、あるいは表面ひび割れ、内部ひび割れ、層状ひび割れなどのマクロな変状へと進展して、弾性係数の低下を生じさせ、ひいては強度低下に至らせる。一方、摩耗は、水と接することでセメント水和物中のCHの溶出、C-S-Hの溶脱、細孔構造の粗大化などのマイクロな変状を生じ、組織が粗になり強度低下に至らせ

表-5 調査結果の比較結果

工種	名称	対象部位	調査結果				
			圧縮強度・静弾性係数		相対動弾性係数	細孔径分布	元素濃度分布
			圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	相対動弾性係数低下範囲 (mm)	細孔量増加範囲 (mm)	カルシウム濃度減少範囲 (mm)
開水路	N用水路	側壁 水中部	41.2	21.9	0 ~ 65	0 ~ 50	0 ~ 10
		底版	—	—	0 ~ 65	0 ~ 70	0 ~ 13
	T用水路	側壁 水中部	28.2	32.6	0 ~ 25	0 ~ 30	0 ~ 12
		底版	27.1	27.8	0 ~ 15	0 ~ 30	0 ~ 12
	K用水路	側壁 気中部	33.0	23.0	0 ~ 140*1	0 ~ 70	0 ~ 2
		側壁 水中部	28.0	21.3	0 ~ 140*1	0 ~ 70	0 ~ 10
		底版	28.6	24.2	0 ~ 140*1	0 ~ 70	0 ~ 12
頭首工	S頭首工	固定堰・堰体 上流側	13.3	7.8	0 ~ 140*1	0 ~ 110*2	0 ~ 25
		可動堰・エプロン 上流側	16.4	12.0	0 ~ 140*1	0 ~ 110*2	0 ~ 25
		可動堰・エプロン 下流側	24.4	18.8	0 ~ 140*1	0 ~ 110*2	0 ~ 4
	T頭首工	可動堰・導流壁 天端面	21.5	21.8	0 ~ 35	—	—
		可動堰・導流壁 側面気中部	19.0	20.0	0 ~ 95	0 ~ 90	0 ~ 7
		可動堰・導流壁 側面干満部	21.1	22.7	0 ~ 85	—	—
Y頭首工	可動堰・エプロン 下流側	25.5	18.3	0 ~ 125	0 ~ 110*2	0 ~ 10	

\*1: 相対動弾性係数の全ての測定範囲

\*2: 細孔径分布の全ての測定範囲



る。同時に以後の耐摩耗性の低下を生じさせて、骨材の露出・剥落、モルタルの欠損といったマクロな変状へと進展させていく。

このように凍害と摩耗が進行する過程において、凍害が摩耗に与える影響としては、まず、凍結融解作用がカルシウム成分の溶脱を促進させる可能性が考えられる。凍結融解作用による細孔構造の粗大化、微細ひび割れなどのミクロな変状がカルシウム成分の溶脱による CH の溶出、C-S-H の溶脱、細孔構造の粗大化などに影響を与え、また、表面ひび割れ、内部ひび割れ、層状ひび割れなどのマクロな変状が水の侵入経路となることで同様の影響を与える可能性は高いといえる。緒方ら<sup>37)</sup>は、凍結融解作用により生じたひび割れの周囲において、ひび割れを侵入経路として入ってきた水によるカルシウム成分の溶脱が発生し得ることを報告している。本研究で得られた調査結果においても、T 頭首工の可動堰・導流壁の側面気中部で、ひび割れ近傍におけるカルシウム成分の溶脱が確認されている。

また、凍結融解作用がすりへり作用を促進させる可能性も考えられる。凍結融解作用によるスケーリング、ポップアウト、骨材の露出・剥落、崩壊といった外観上から判別し易い変状は元より、弾性係数の低下や強度低下といった判別し難い変状であっても、変状発生以後のすりへり作用に影響を与える可能性は高いといえる。石神ら<sup>40)</sup>は、凍結融解作用を受けたモルタル試験体において、以後の耐摩耗性が低下し得ることを報告している。本研究で得られた調査結果においても、Y 頭首工の可動堰・エプロンの下流側で、最表面において凍害が発生したコンクリートの消失が確認されている。

一方、摩耗が凍害に与える影響としては、カルシウム成分の溶脱が凍結融解作用を促進させる可能性が考えられる。カルシウム成分の溶脱による CH の溶出、C-S-H の溶脱、細孔構造の粗大化などのミクロな変状が凍結融解作用による細孔構造の粗大化、微細ひび割れなどに影響を与える可能性は高いといえる。鎌田ら<sup>41)</sup>は、コンクリートの耐凍害性は細孔構造に依存し、細孔径約 0.04~2.0 μm 付近の細孔量が多くなる場合は耐凍害性の低下を生じることを示している。本研究で得られた調査結果においても、測定の対象とした多くの部位で、細孔径約 0.01~1.0 μm 付近の細孔量の増加が確認されており、変状発生以後の耐凍害性の低下が懸念される状況にある。

凍害では、従来、アルカリシリカ反応や塩害との複合劣化が問題視されてきた<sup>42), 43), 9)</sup>。凍害とアルカリシリカ反応との複合劣化では、ひび割れの発生と水分の供給における相乗作用が懸念され、凍害と塩害との複合劣化では、凍

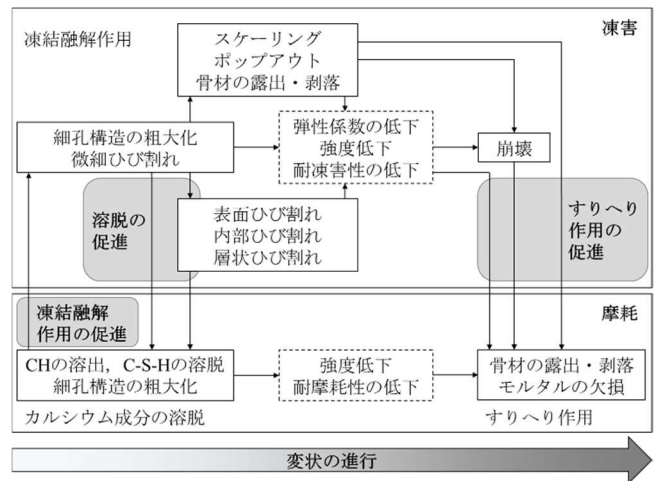


図-8 凍害と摩耗との関係

害が塩害に与える影響としては塩分の侵入の促進が、塩害が凍害に与える影響としては浸透圧の増加によるスケーリングの促進が取り沙汰されてきている。本研究で得られた調査結果からは、積雪寒冷地において長期間供用されたコンクリート施設では、表面近傍における凍害とカルシウム成分の溶脱を伴う摩耗とが複合的に発生する可能性があることが明らかとなった。

#### 2.1.4 補修・補強を行うための対策工法の適用に際す 留意点

積雪寒冷地において長期間供用され、凍害および摩耗が発生したコンクリート施設では、補修・補強を行うための対策工法の適用に際して、以下の点に留意する必要がある。農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)<sup>14)</sup>に示されている対策工法の内、凍害や摩耗に対して適用され得る代表的な対策工法の概要を図-9に示す。

一つは、凍害および摩耗により生じた劣化部の特定と処理である。本研究で得られた調査結果からも明らかのように、凍害および摩耗が発生したコンクリートでは、圧縮強度や相対動弾性係数といった力学的特性が表面からある一定の深さまで低下している。この劣化部が適切に特定され、処理されなければ、対策工法による補修・補強効果を持続的に得ることは難しいといえる。例えば、表面被覆工法では、表面被覆材の多くは躯体表面を介して、躯体に対して表面被覆材を付着、一体化させることによりその効果を得ようとする場合が多く、躯体表面における適切な下地処理が肝要となる。細孔量が増加した範囲、カルシウム濃度が減少した範囲を適切に処理することが望ましく、脆弱化が生じている部分を除去すること、あるいは改質することが必要となる。また、パネル工法では、パネル材の多く

はアンカーを介して、躯体に対してパネル材を固定させることによりその効果を得ようとする場合が多く、劣化部とその奥側に存在する健全部との境界の特定が重要である。相対動弾性係数が低下した範囲の奥側にまでアンカーを到達させ、パネル材を固定することが必要となる。さらに、断面修復工法では、健全部に対して断面修復材を一体化させることによりその効果を得ようとする場合が多く、劣化部除去、即ち相対動弾性係数が低下した範囲を適切に除去することが必要となる。これら劣化部の特定と処理が困難な場合は、劣化部を含む部材の全体或部分を除去し、コンクリートを打ち換えること（打換え工法）も検討しなければならない。

もう一つは、対策工法に対する耐凍害性および耐摩耗性の要求である。本研究で得られた調査結果からも明らかのように、積雪寒冷地におけるコンクリート施設の多くは著しい劣化環境下に置かれている。そのため、新たに適用される対策工法に対しても、この劣化環境に耐え得るより高度な性能を要求していくことが必要となる。例えば、表面被覆工法や断面修復工法では、表面被覆材、断面修復材の耐凍害性および耐摩耗性の評価において、付着性を判定指標とした凍結融解試験<sup>44)</sup>、あるいは耐摩耗性を判定指標とした凍結融解試験<sup>40)</sup>を行い、凍結融解作用を受けた後の付着性、あるいは耐摩耗性を要求していくことも重要であると考えられる。

### 2.1.5 課題

本研究では、北海道内に位置する複数の開水路および頭首工を構成するコンクリートにおいて、主に水に曝される部位を対象とした劣化状態の詳細調査を行った。その結果、積雪寒冷地において長期間供用されたコンクリート施設では、圧縮強度や相対動弾性係数などの力学的特性の低下を伴う著しい劣化を生じる場合があること、また、表面近傍における凍害とカルシウム成分の溶脱を伴う摩耗とが複合的に発生する可能性があることが明らかとなった。今後は、積雪寒冷地において種々の劣化環境下に供用されているコンクリート施設における調査結果の蓄積とその分析を継続的に行うとともに、凍害と摩耗とが複合的に発生した場合の劣化予測手法、ならびに補修・補強を行うための対策工法の性能照査手法などを確立するべく、さらなる検討を加える予定である。

## 2.2 鋼矢板排水路における腐食診断<sup>45), 46), 47), 48), 49)</sup>

### 2.2.1 目的

積雪寒冷地であり、かつ、泥炭土、火山灰土、重粘土などの特殊土壌が広く分布する北海道では、排水改良は極めて重要な農業生産基盤整備の一つである<sup>50)</sup>。北海道にお

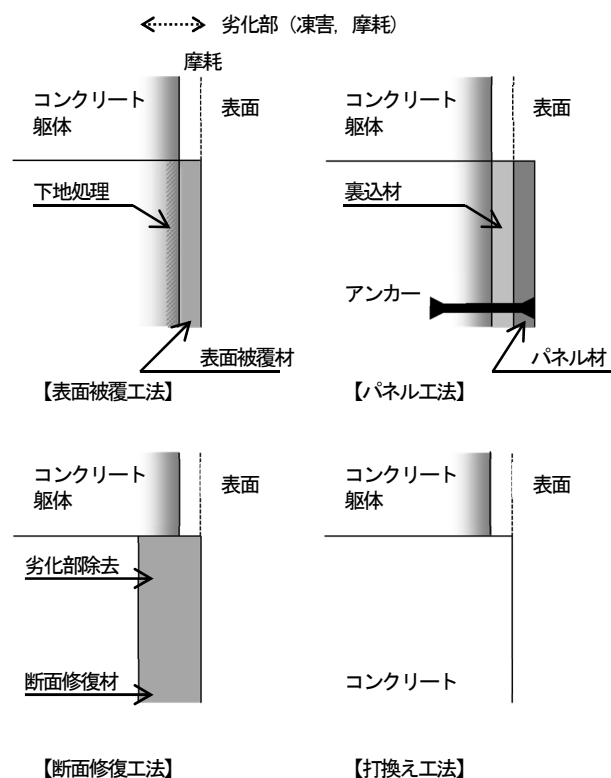


図-9 補修・補強を行うための代表的な対策工法の概要

ける排水改良を担う明渠排水路は、連節ブロックや積ブロック、コンクリート柵渠など、様々な部材により構成されている。その中で鋼矢板は、特に軟弱地盤、泥炭地盤に造成される排水路の構成部材として適用されてきている<sup>51), 52), 53)</sup>。鋼矢板排水路の延長は、北海道内の国営事業により造成された排水路だけでも約100kmに及ぶ。

近年、排水路を構成する鋼矢板の腐食が全国的に問題となっている。例えば、新潟県内の低平排水不良地域に敷設された鋼矢板では、水位変動域である干満帯付近における局部的な腐食の進行が確認されている<sup>54), 55), 56)</sup>。一方、積雪寒冷地である北海道内に敷設された鋼矢板では、腐食が進行して倒壊に至る場合もあり、周辺地盤の陥没など、社会的安全性に影響を及ぼす事例も散見されている(図-10)。排水改良において重要な役割を担い、かつ、長延長を有する鋼矢板排水路において、鋼矢板の腐食と排水路としての性能低下を如何に診断し評価していくのが喫緊の課題となっている。

本研究では、北海道内に造成された鋼矢板排水路を対象とした、鋼矢板の腐食・倒壊の発生要因、ならびに排水路の性能低下要因の究明のための検討を行っている。ここでは、鋼矢板の腐食診断結果の事例を示し、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構について考察するとともに、性能低下の特徴と機能保全における今後の課題について整理する。





図-10 北海道内における農業用排水路を構成する鋼矢板の腐食

## 2.2.2 鋼矢板の腐食診断

### (1) 腐食の現況と診断方法の選定

診断対象とした鋼矢板排水路は、北海道空知地方に位置するA～N排水路（14路線、42測点）である。排水路の多くは泥炭性軟弱地盤に造成されており、また、積雪量も比較的多い地域に位置している。排水路を構成する鋼矢板の種別は、一部の普通鋼矢板（C排水路1測点（板厚10.5mm）、G排水路2測点（同8.0mm）、J排水路2測点（同8.0mm）、L排水路2測点（同10.5mm）、N排水路2測点（同8.0mm））を除き、ほぼ全て軽量鋼矢板（同5.0mm）である。いずれの排水路においても、供用後17～36年が経過しており、腐食は総じて著しい状況にある（図-11）。

鋼矢板の腐食の代表的な現況を図-12に示す。鋼矢板の表面側では、腐食は干満帯付近の中でも最多頻度水位近傍において特に著しく、直上の気中部、即ち干満帯上部において開孔し、断面欠損へと進展している場合が多い。一方、直下の水中部、即ち干満帯下部においても、腐食・断面欠損が進展している場合も見受けられる。また背面側では、開孔して排水が流入している場合は表面側と同様に腐食が進展し、断面欠損が拡大する傾向にある。また、倒壊に至った鋼矢板では、そのほぼ全てにおいて断面欠損が確認されている。次に、鋼矢板の切断面の拡大写真を図-13に示す。開孔していない普通鋼矢板では腐食は表面側にのみ発生しているのに対し、開孔した軽量鋼矢板では腐食は表面側に加え背面側にも発生している。

これら腐食の現況から、その発生要因は排水路内を流下する排水にあると考え、腐食状況の定量化を行うとともに、排水について水質に関する各種計測を行った。本診断では、測点毎に、気中部、干満帯上部、干満帯下部の3部位において残存する板厚の計測を行い、敷設当初の板厚（設計板厚+腐食代）から各計測値を差し引いた値を腐食量（mm）として求めた。板厚の計測は、鋼矢板の表層の錆を除去した後、超音波厚さ計を用いて行った。また、水質に関する計測では、灌漑期間中、腐食位置に水位が最も近付く夏期

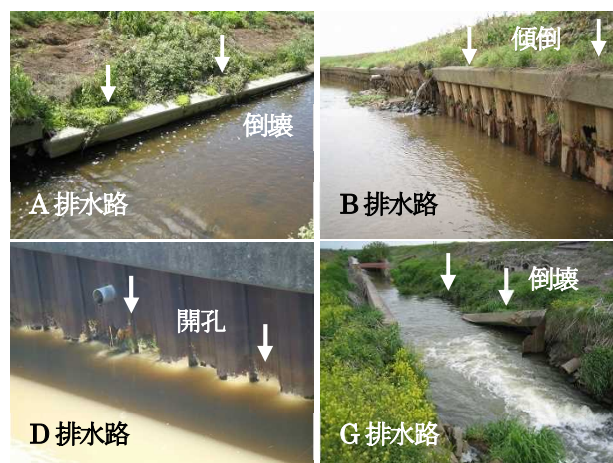


図-11 診断対象とした排水路の鋼矢板の現況



図-12 鋼矢板の腐食の代表的な現況

において、腐食に影響を及ぼすと予想される溶存酸素濃度、pH、導電率、塩化物イオン濃度の計測を行った。



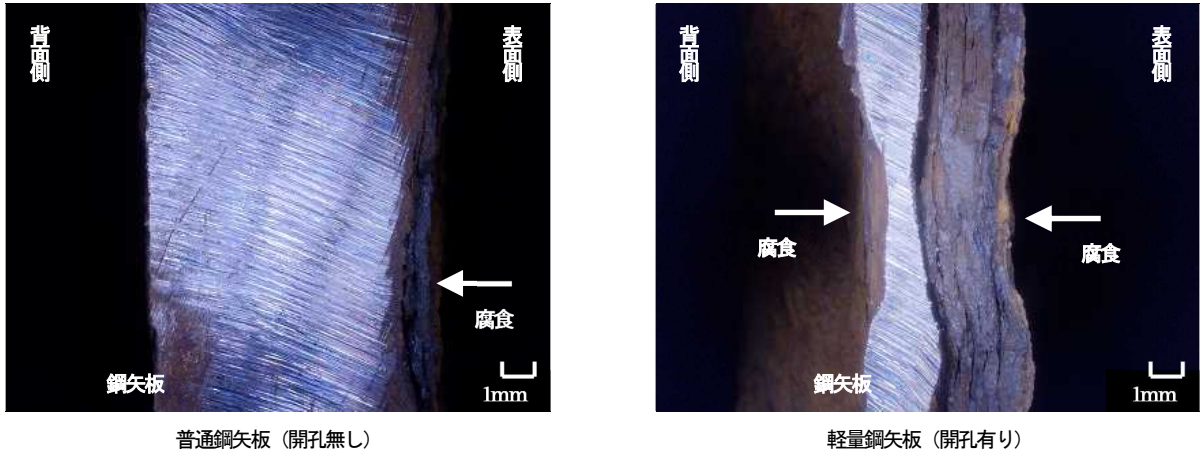


図-13 鋼矢板の切断面の拡大写真

(2) 診断結果および考察

腐食量の測定結果を図-14に示す。図中では、測点を経過年数順に並べるとともに、測点毎の敷設当初の板厚を淡灰色に着色して示している。なお、各測点において該当する部位が存在しない場合はその結果を記していない。いずれの部位においても、腐食量は、経過年数が長くなるほど、増加する傾向にあった。一方で、H排水路の4測点など、局所的に増加している測点もあることが分かった。また、腐食量は概ね干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、干満帯上部の多くでは敷設当初の板厚に到達(貫通)していた。

経過年数と腐食量との関係を図-15に示す。部位毎に示される近似式の傾きは、それぞれ部位毎の腐食速度(1年当たりの腐食量: mm/y)を表している。腐食速度は干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、また、ばらつきも大きいことが分かった。このことから、経過年数以外の要因に影響を受けていることが推察される。さらに、通常は排水に曝されている干満帯下部においても、腐食速度は干満帯上部に準ずる程度に大きいこと、また、普通鋼矢板に比べ、軽量鋼矢板の腐食速度は大きくなる傾向にあることが分かった。

排水の溶存酸素濃度と腐食速度との関係を図-16に示す。溶存酸素濃度は総じて高く、ほぼ飽和状態にあった。また、濃度が高くなるほど、腐食速度も大きくなる傾向が見て取れた。一方、pHは6.95~7.92、導電率は11.18~13.57(mS/m)、塩化物イオン濃度は5.94~11.01(mg/L)となり、pHが低いほど、導電率が高いほど、塩化物イオン濃度が高いほど、腐食速度は大きくなる傾向が見られたが、いずれも腐食が進みやすい範囲には推移しなかった。このことから、水質に関しては溶存酸素濃度の影響が最も大きいと考えられる。

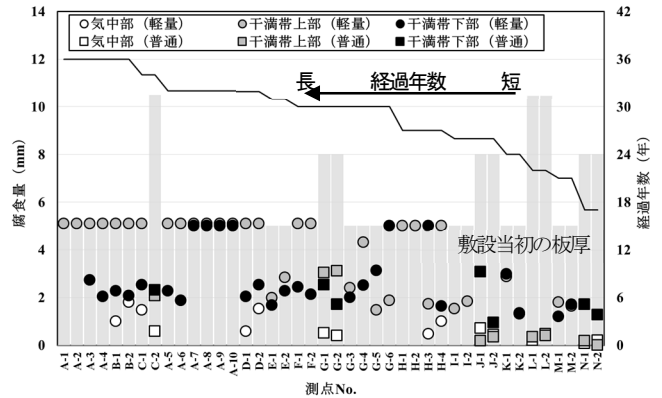


図-14 腐食量の測定結果

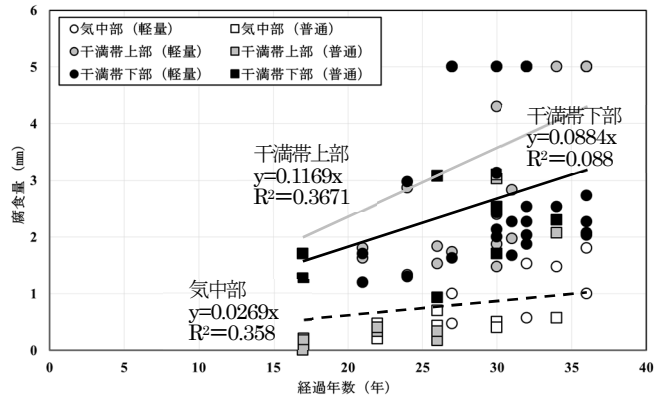


図-15 経過年数と腐食量との関係

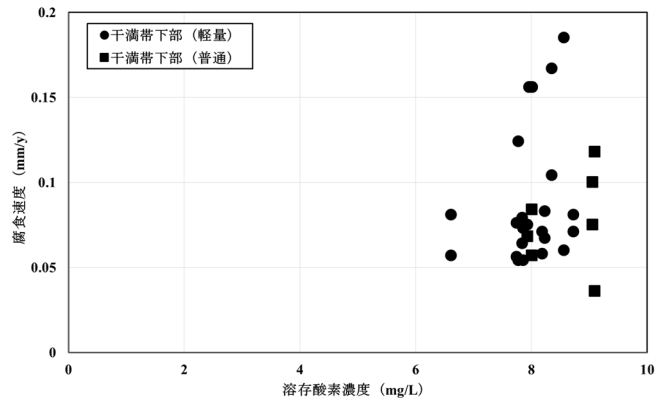


図-16 排水の溶存酸素濃度と腐食速度との関係

### 2.2.3 鋼矢板排水路の性能低下特性

#### (1) 鋼矢板排水路の構造性能の低下機構

鋼矢板の腐食の現況および診断結果から、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構は以下の通りであると推察される(図-17)。まず、①鋼矢板の表面側では、気中部や干満帯上部において、水および酸素の供給による湿食が発生する(大気中の腐食)。流下する排水中には多量の溶存酸素が含まれるため、この湿食は干満帯下部や水中部においても発生する(淡水中の腐食)。また同時に、干満帯上部をカソード部(+極)、干満帯下部をアノード部(-極)とするマクロセル腐食電池が形成され(局所的な腐食)、②干満帯上部および干満帯下部においてそれぞれ腐食が進み、浮き錆へと進展する。また、③残存する板厚が小さくなった際に荷重が作用した場合は、鋼矢板は破断し、割れや湧水といった変状を生じるようになる。その後、④干満帯上部および干満帯下部ではさらに湿食が進み、開孔・断面欠損へと進展する。開孔・断面欠損を生じた箇所では排水が背面側にも流入するため、背面側からの腐食も発生する。実際には、これらの過程に、気中部における乾湿繰り返し、水中部におけるエロージョン(摩耗)、表面の付着物に起因する通気差腐食などが複合的に作用しているものと推測される。⑤開孔・断面欠損が拡大した箇所では、背面土が吸い出され、また、構造的安定性が失われて、荷重が作用した際に⑥傾倒・倒壊に至るものと考えられる<sup>57)</sup>。

積雪寒冷地に特有の泥炭地盤に造成された排水路では、泥炭土の圧密、圧縮、分解などにより、鋼矢板の背面側が露出している事例がよく見受けられる。主に鋼矢板の表面側で発生・進展する腐食・断面欠損は、背面側が露出して水および酸素の供給を受け、背面側からの腐食が発生・進展することにより加速される。また、積雪寒冷地に特有の荷重には積雪、雪庇、凍上などが挙げられ、断面欠損が拡大した鋼矢板に対して、傾倒・倒壊を発生させる直接的な要因になっていることが考えられる(図-17 破線部分、図-18)。

#### (2) 性能低下の特徴と機能保全における課題

積雪寒冷地において鋼矢板の腐食が発生した排水路では、その特有の要因により、構造性能は著しく低下する傾向にある。また、傾倒・倒壊が発生した排水路では、周辺地盤の陥没により歩行者や車両の通行が妨げられるなど、社会的安定性能も低下する場合がある。一方、傾倒・倒壊は積雪などの荷重の作用により最多頻度水位近傍にある腐食位置を基点に発生するため、背面土圧による曲げモーメントが卓越する位置にまで影響を及ぼすことは少なく、排水路の通水断面の阻害に至るまでの背面土の崩壊はほ

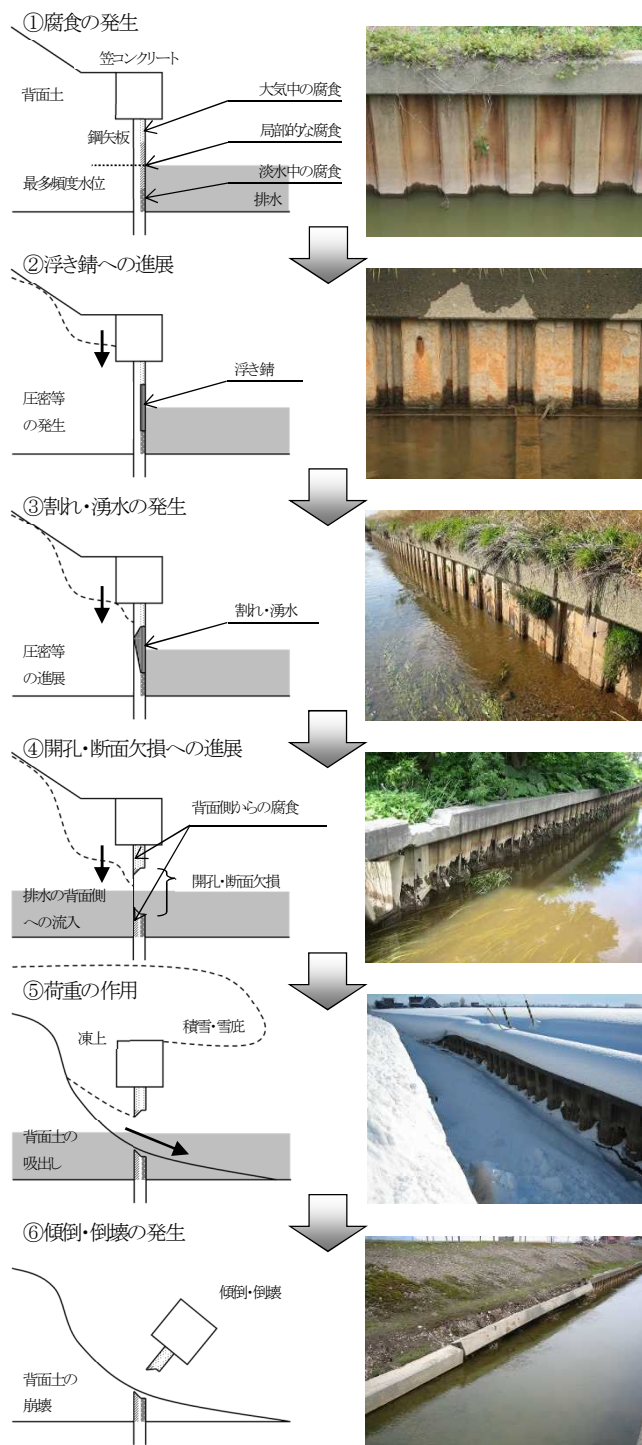


図-17 鋼矢板排水路の構造性能の低下機構

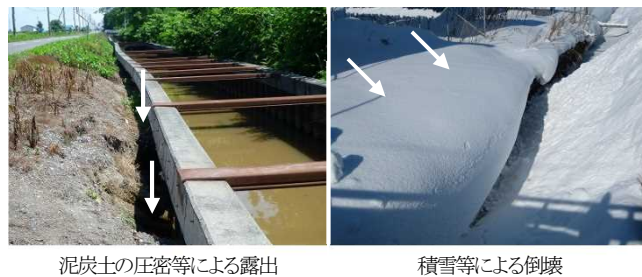


図-18 積雪寒冷地に特有の性能低下要因

とんど見られない。このため、通水性や排水性といった水理性能は必ずしも低下していない場合が多い。

これら性能低下の特徴を踏まえ、積雪寒冷地に造成された鋼矢板排水路での機能保全における課題を二つ示す。一つは、補修、補強、改築時において構成部材に要求される性能の明確化である。現在、全国各地で排水路を構成する鋼矢板の補修、補強が行われており、今後、補修・補強材料に要求される性能の明確化(品質規格化)が期待される。一方、積雪寒冷地では倒壊に至る場合も少なくはなく、改築を想定した構成部材の性能の向上も必要である。そのため、供用後の鋼矢板の腐食状況の定量化と、腐食に影響を及ぼす環境要因の精査が必要不可欠となる。もう一つは、構造性能と水理性能の関係性の解明である。用水路では、構造性能が水理性能や水利用性能を下支える性能であり、構造性能の低下は水理性能、水利用性能の低下に直結する場合が多い。一方、排水路では構造性能の低下が直ちに水理性能の低下を招くとは限らない。構造性能の低下がどの構成部材の劣化に起因するもので、どのような機構で水理性能の低下に結び付くのかを見極めていく必要がある。

#### 2.2.4 課題

ここでは、北海道内に造成された鋼矢板排水路を対象とした鋼矢板の腐食診断結果の事例を示し、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構について考察するとともに、その性能低下の特徴と機能保全における今後の課題を整理した。鋼矢板の腐食診断結果からは、腐食速度は、干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、また、経過年数以外の要因に影響を受けることが推察された。さらに、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構の考察では、積雪寒冷地に特有の性能低下要因を示し、それらが鋼矢板の腐食・断面欠損を加速させること、また、傾倒・倒壊を発生させる直接的な要因になっていることを示した。今後は、鋼矢板の腐食状況の定量化を進めるとともに、腐食に影響を及ぼす環境要因の精査を行い、また、鋼矢板排水路の構造性能と水理性能の関係性の解明などについて検討を加える予定である。

### 3. 非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発

#### 3.1 寒冷地の劣化特性に対応したコンクリート施設機能診断手法<sup>8),58)</sup>

##### 3.1.1 目的

土地改良長期計画では、老朽化が進行する農業水利施設の機能を将来にわたって安定的に発揮させるため、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図る戦略的な

保安全管理が求められている<sup>2)</sup>。寒冷地に位置する施設においてこのような保安全管理を行うためには、コンクリートの凍害劣化に着目する必要がある。凍害劣化を生じたコンクリート施設では、躯体内部に発生する層状ひび割れなどによりその健全性が著しく損なわれることが明らかになっており<sup>10),12)</sup>、それら劣化状態を踏まえた保安全管理技術を構築する必要がある。農業農村整備に関する技術開発計画では、地域特性に応じた技術開発の必要性が示されている<sup>59)</sup>。

農業水利施設の保安全管理では、適時・適切な機能診断を実施することが肝要となる。この機能診断では、「農業水利施設の機能保全の手引き」<sup>60)</sup>に基づく機能診断調査が行われており、以後の劣化予測や対策工法の検討に必要な情報を得るための、施設の性能低下状態やその要因に対する定量的な調査が行われている。その中で鉄筋コンクリート開水路の施設状態評価では、反発強度法、即ちリバウンドハンマ法による圧縮強度の調査が実施されている。リバウンドハンマ法は、JISにも規定される汎用化された調査手法であるが、コンクリート表面における反発度から強度を推定する手法であるため、この反発度に影響を及ぼす含水率、材齢、劣化状態などに対して補正を行わなければならない<sup>61)</sup>。しかし、この補正には影響要因毎の強度推定式が必要となり、結果、層状ひび割れなどの内部変状が存在する場合の強度を的確に捉えられない可能性がある。そのため、これら寒冷地の劣化特性に対応した、施設状態を定量的に調査し評価することができる機能診断技術の構築が必要となる。

本研究では、これまでに、北海道内の複数のコンクリート開水路において、コア採取を含む詳細調査を行い、寒冷地における劣化特性について整理・分析するとともに、開水路の凍害診断技術、ならびに維持管理技術の開発を進めてきている。ここでは、寒冷地の劣化特性に対応した機能診断手法の必要性について述べるとともに、非破壊調査手法である超音波法、機械インピーダンス法の適用性について考察する。

#### 3.1.2 寒冷地の劣化特性に対応した機能診断手法の必要性

本研究では、これまでに、北海道内(空知、石狩、後志、日高、檜山、上川、留萌、十勝の各地方)に位置するコンクリート開水路延べ36路線の446測点において、採取したコア試験体における試験を含む劣化状態の詳細調査を行っている。調査対象とした開水路は、最も古い水路は昭和30年代、新しい水路は平成20年代に建設されており、調査時における供用期間は2~56年である。水路型式は、



1 路線の 5 測点を除き、ほぼ全て鉄筋コンクリート開水路である。

開水路に発生した凍害劣化による代表的な変状を図-19 に示す。凍害劣化は、その初期には微細ひび割れを発生し、スケーリング、骨材の露出・剥落、あるいは内部ひび割れ、層状ひび割れへと進展して、弾性係数の低下を生じさせ、ひいては強度低下に至らせる。最終的には躯体の断面欠損や鉄筋の露出・腐食へと進展し、構造体としての耐荷力や剛性を低下させる。

圧縮強度および静弾性係数の測定結果を図-20 に示す。圧縮強度および静弾性係数は、JISA 1107 (コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法) および JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法) に準拠して測定した。測点数は、全 446 測点の内、両試験を実施した 77 測点である。なお、図中では、供用期間が 20 年未満の水路の測定値を白丸、20 年以上 40 年未満の水路の測定値を灰丸、40 年以上の水路の測定値を黒丸で示している。また、図中の黒色の実線は、土木学会「コンクリート標準示方書 [設計編]」<sup>29)</sup> および日本道路協会「道路橋示方書・同解説」<sup>29)</sup> に示される圧縮強度による静弾性係数の設計値である。さらに、淡灰色の着色範囲は、後者の文献に示されているコンクリートの最低設計基準強度を下回る範囲を明示したものである。圧縮強度、静弾性係数ともに建設当初の測定値は不明であるが、供用期間が 20 年未満の水路では、圧縮強度、静弾性係数ともに測定値は概ね設計値と同程度であるのに対し、20 年以上の水路では、圧縮強度は設計基準強度を満たすものの、静弾性係数の測定値は多くの水路で設計値を下回っていることが分かる。このことは、強度低下の段階にまでは至っていないものの、その兆候として弾性係数の低下を生じている水路が数多く存在することを示している。そのため、凍害劣化を生じた開水路に対しては、強度低下だけでなく、弾性係数の低下を捉えられる機能診断手法の適用が必要であると考えられる。

3.1.3 超音波法、機械インピーダンス法の適用性

寒冷地に位置する開水路における凍害劣化の発生形態、ならびに内部変状の発生により生じる弾性係数の低下の実態を踏まえ、これら寒冷地の劣化特性に対応させることが期待できる機能診断手法として、非破壊調査手法である超音波法、機械インピーダンス法の適用性を検証した。

(1) 機能診断手法および適用性検証方法の概要

超音波法は、20kHz 以上の超音波域の周波数帯を使用し、発振子から接触媒質を介してコンクリート中に発射された弾性波を受振子で測定する手法である。一般に、劣化

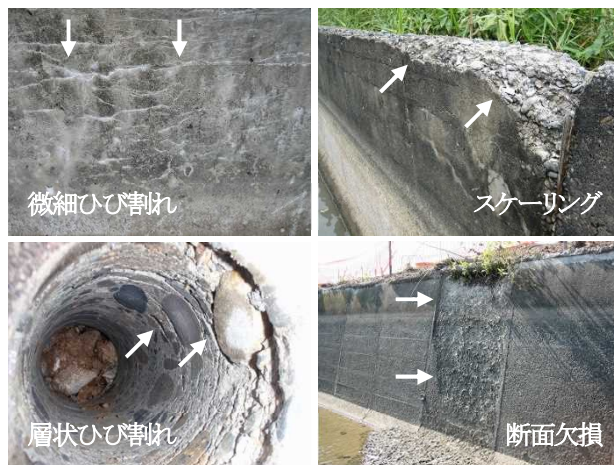


図-19 開水路に発生した凍害劣化による代表的な変状

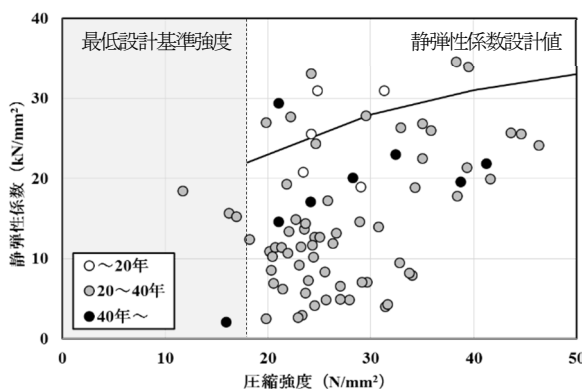


図-20 圧縮強度および静弾性係数の測定結果

したコンクリートにおける超音波の伝播速度は健全なコンクリートの伝播速度に比べ小さくなるため、この速度の差異からコンクリートの品質の差異を調べることができる<sup>62)</sup>。コンクリートの超音波伝播速度は、弾性係数、密度、ポアソン比により定まるため<sup>61)</sup>、本法により超音波伝播速度を測定することで、弾性係数を精度よく調査することが期待できる。

機械インピーダンス法は、図-21 に示す加速度計が内蔵されたハンマでコンクリート表面を打撃し、得られた打撃力波形から打撃対象物の機械インピーダンスを測定して、コンクリートの表面近傍の強度を推定する手法である<sup>63)</sup>。本法で得られる打撃力波形を図-22 に示す。機械インピーダンス  $Z_R$  は、打撃力の最大値  $F_{max}$  およびハンマが反発を受ける際の速度  $V_R$  から式 (3) により算出され、推定強度  $STR$  は、 $Z_R$  から式 (4) により算出される<sup>64)</sup>。一方、 $F_{max}$  は、フックの法則より、コンクリートの弾性係数と変位量の最大値により定まるため、本法により推定強度を測定することで、弾性係数の変化を捉えることが期待できる。

$$Z_R = F_{max} / V_R^{1.2} \dots\dots\dots (3)$$

$$STR = a \times Z_R^3 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $a$ は較正值 (12.73) である。

本検証では、上述の圧縮強度および静弾性係数に加え、超音波法により部材厚方向の超音波伝播速度を測定し、さらに、リバウンドハンマ法および機械インピーダンス法によりそれぞれ推定強度を測定して、それらの関係を調べた。

## (2) 適用性検証結果および考察

超音波伝播速度と静弾性係数との関係を図-23 に示す。超音波伝播速度は、透過法により、部材厚方向において測定した。測点数は、上述の圧縮強度および静弾性係数を測定した 77 測点である。なお、超音波伝播速度と弾性係数との関係は二次式により表わすことができるため<sup>65)</sup>、図中では二次多項式による近似曲線を併記している。超音波伝播速度は、元より弾性係数などにより理論的に定まるものであるが、本検証において得られた結果からも、一定の相関性が認められた。このことから、弾性係数の調査における超音波法の有用性が確認された。

リバウンドハンマ法による推定強度と超音波伝播速度との関係を図-24 に、機械インピーダンス法による推定強度と超音波伝播速度との関係を図-25 に示す。リバウンドハンマ法による推定強度は、JISA 1155 (コンクリートの反発度の測定方法) に準拠して測定した。一方、機械インピーダンス法による推定強度は、1 測点当たり 30 回の打撃を行い測定した。測点数は、超音波伝播速度を測定した測点の内、両法をともに適用した 143 測点である。リバウンドハンマ法による推定強度と超音波伝播速度との関係からは、正の関係が認められたが、その相関性は低いことが分かった。一方、機械インピーダンス法による推定強度と超音波伝播速度との関係からは、正の関係が認められることに加え、相応の相関性があることが分かった。リバウンドハンマ法は、コンクリート表面における反発度から強度を推定する手法であるため、その推定強度は、表面の劣化状態の影響を多大に受けるものの、内部の劣化状態の



図-21 機械インピーダンス法による測定状況<sup>64)</sup>

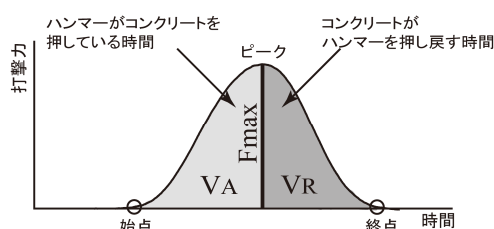


図-22 機械インピーダンス法による打撃力波形<sup>64)</sup>

影響は受け難いことが予想される。一方、機械インピーダンス法は、コンクリートの弾性係数により強度を推定する手法であり、推定強度は、表面の劣化状態だけでなく、内

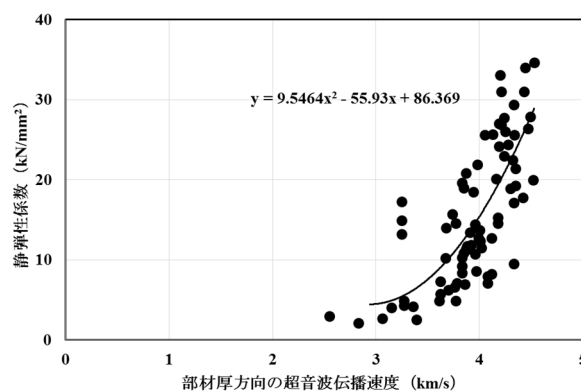


図-23 超音波伝播速度と静弾性係数との関係

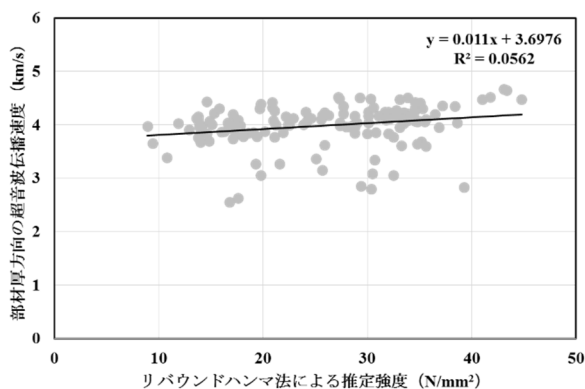


図-24 リバウンドハンマ法による推定強度と超音波伝播速度との関係

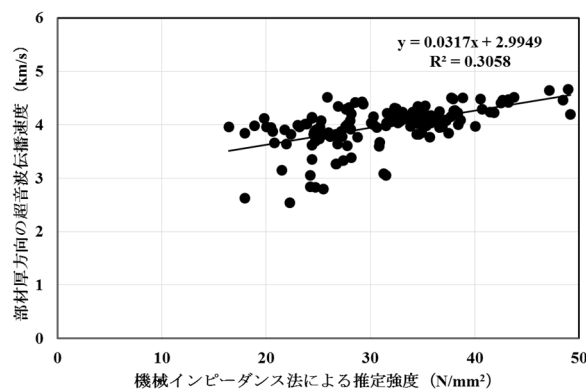


図-25 機械インピーダンス法による推定強度と超音波伝播速度との関係



部の劣化状態の影響も反映しているものと考えられる。このことから、寒冷地における機能診断手法としてのリバウンドハンマ法の問題点、ならびに機械インピーダンス法の有用性が示された。

圧縮強度とリバウンドハンマ法および機械インピーダンス法による推定強度との関係を図-26に示す。測点数は、リバウンドハンマ法では59測点、機械インピーダンス法では58測点である。なお、図中では、リバウンドハンマ法における測定値を灰丸、機械インピーダンス法における測定値を黒丸で示している。また、±0%、±15%、±30%の誤差範囲を、それぞれ黒色の実線、灰色の破線、黒色の破線で併記している。リバウンドハンマ法では、±15%の範囲には測点の約3割、±30%の範囲には測点の約5割の測定値が入るのに対し、機械インピーダンス法では、±15%の範囲には測点の約5割、±30%の範囲には測点の約6割の測定値が入る。この結果からも、機械インピーダンス法による推定強度は、リバウンドハンマ法による推定強度に比べ、内部の劣化状態の影響をより反映していることが推測される。このことから、機能診断手法としての機械インピーダンス法の有用性が確認され、また、リバウンドハンマ法からの代替の可能性が示された。

### 3.1.4 課題

ここでは、寒冷地の劣化特性に対応したコンクリート施設の機能診断手法の必要性について述べるとともに、非破壊調査手法である超音波法、機械インピーダンス法の機能診断手法としての適用性について考察した。寒冷地に位置するコンクリート開水路のように、圧縮強度や弾性係数などの強度特性が健全に保持されない環境下にある施設では、その機能診断において施設状態を如何に定量的に調査し評価していくのが重要となる。今後は、より精度よく調査・評価することができる機能診断技術の開発・適用が期待される。

## 3.2 アンカー引抜試験によるコンクリート開水路側壁の凍害劣化診断手法<sup>66), 67)</sup>

### 3.2.1 目的

凍害劣化が生じているコンクリート構造物の診断手法としては、非破壊試験として超音波法や共鳴振動法などがあり、局部破壊試験として改良プルオフ試験などがある。ただし、これらの手法では、表層近傍のコンクリートの劣化状況は評価できるものの、コンクリート内部の深さ方向の劣化程度を評価することは難しい。そこで本研究では、任意の深さ位置の劣化程度を評価するための手法として、芯棒打込み式金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜試験によるコンクリート構造物の凍害劣化診断に関する研

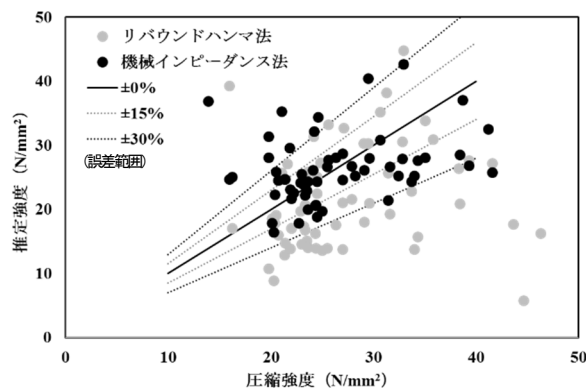


図-26 圧縮強度と推定強度との関係

究に取り組んでいる<sup>68)</sup>。

ここでは、異なる6箇所<sup>69)</sup>のRC現場打ちフリーームの側壁でアンカー引抜試験を実施し、最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係について考察を加える。

### 3.2.2 アンカー引抜試験の概要

アンカー引抜試験には、接着・付着力引張試験器（サンコーテクノ社製テクノテスターRT-3000LDII型）を用いた。この試験器では、最大荷重30kN、最大変位量10mm（分解能0.01mm）までの測定を行うことができる。また、試験に用いるアンカーは、全長100mm、アンカー本体直径8mmの芯棒打込み式金属拡張アンカー（サンコーテクノ社製SY-810K型）である。アンカーの埋込深さの調整は、1cm刻みの専用の長さ調整具を用いて行い、この長さ調整具を用いることで任意の深さ位置での試験が可能である。

### 3.2.3 現地試験の概要

現地試験を実施した既設のRC現場打ちフリーームの側壁は6箇所であり、I水路（北海道美唄市）、II水路（岩手県奥州市）、III水路・IV水路（北海道美唄市、I水路とは異なる）、V水路（北海道岩内郡）、VI水路（北海道瀬棚郡）である。

アンカー引抜試験におけるアンカー埋込深さ（測定深さ）、測定箇所数および番号は表-6に示す通りである。また、各測定箇所の近傍からφ10cmのコアをそれぞれ1

表-6 アンカー引抜試験の概要

水路名称	I水路	II水路	III水路	IV水路	V水路	VI水路
測定深さ(cm)	2, 4, 5, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8	2, 4, 6, 8
測定箇所数	3	3	1	1	1	1
番号	No. 1-1 ~1-3	No. 2-1 ~2-3	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6

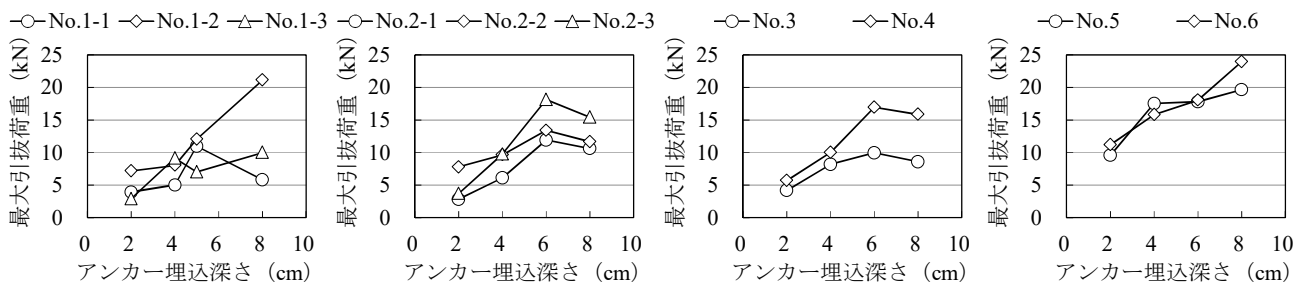


図-27 各埋込深さの最大引抜荷重

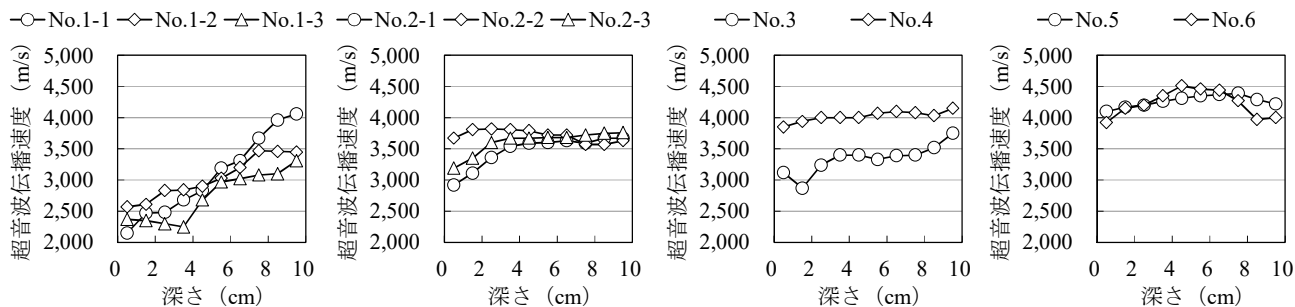


図-28 コアの深さ方向の超音波伝播速度（上下方向）

本採取し、採取したコアに対しては、表面から深さ方向のコア横断面における超音波伝播速度を側壁における水平方向と上下方向の2方向で測定した。

3.2.4 最大引抜荷重と超音波伝播速度との関係

アンカー引抜試験における各埋込深さの最大引抜荷重を図-27に示し、コアの深さ方向の超音波伝播速度（上下方向）を図-28に示す。また、測定深さが対応する位置の最大引抜荷重と上下方向の超音波伝播速度の関係を図-29に示す。ただし、8cm深さは、アンカーの拡張部にすべりが生じている可能性があることから除外している。図からは、アンカー埋込深さ6cmまでの範囲において、超音波伝播速度と最大引抜荷重の間には正の線形関係があることが示唆されるが、関係式は水路によりそれぞれ異なることがわかる。これは、各水路における凍害劣化の状態（コンクリート組織の緩みやひび割れの発生状態）および程度が異なることが影響していると考えられる。

アンカー引抜試験における破壊形態が図-30に示すようなコンクリート躯体のコーン状破壊である場合、金属拡張アンカーの許容引張荷重は、式(5)で求められる<sup>69)</sup>。

$$P_{a2} = \phi_2 \times \alpha_c \times c_{\sigma t} \times A_c \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $P_{a2}$ : コーン状破壊の許容引張力 (N)、 $\phi_2$ : 低減係数（長期荷重用：1/3、短期荷重用：2/3）、 $\alpha_c$ : 施工のばらつきを考慮した低減係数 (0.75)、 $c_{\sigma t}$ : コーン状破壊に対するコンクリートの割裂強度 (N/mm<sup>2</sup>) ( $c_{\sigma t} = 0.31 \sqrt{F_c}$ )、 $F_c$ : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $A_c$ : コーン状破壊面の有効水平投影面積 (mm<sup>2</sup>)、である。 $A_c$ は式

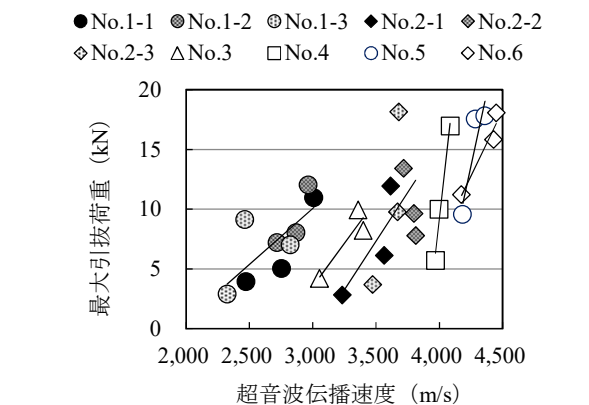


図-29 測定深さが対応する位置の最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係

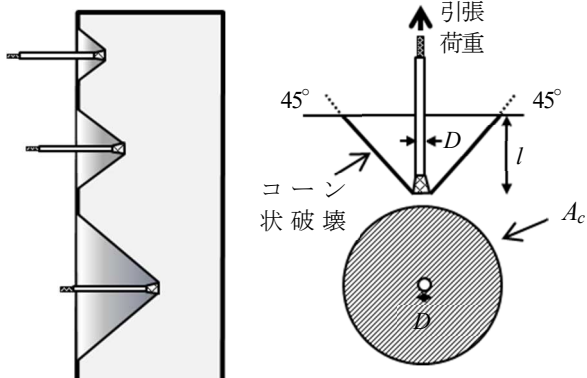


図-30 金属拡張アンカーのコーン状破壊における有効水平投影面積

(6) で求められる。

$$A_c = \pi \cdot l_{\sigma} (l_{\sigma} + D) \dots\dots\dots (6)$$

( $l < 4D$ の場合は  $l_{ce} = l$ 、 $l \geq 4D$ の場合は  $l_{ce} = 4l$ )  
 ここに、 $l_{ce}$  : アンカーボルトの強度算定用埋込み深さ (mm)、 $l$  : アンカーボルトの埋込み長さ (mm)、 $D$  : アンカーボルト軸部の直径 (mm)、である。

この式からコンクリートの割裂強度は、引張力(ここでは最大引抜荷重)をコーン状破壊面の有効水平投影面積で除することで求められ、アンカー引抜試験の各測定深さにおける有効水平投影面積が最大引抜荷重の測定値に影響を及ぼしていることがわかる。つまり、最大引抜荷重に影響を及ぼすのは、アンカー拡張部の局所的なコンクリートの状態だけでなく、表面からアンカー拡張部までの範囲のコンクリートの状態の 2 要素であり、前者がアンカー埋込位置における超音波伝播速度であるならば、後者は表面からアンカー埋込深さの範囲における超音波伝播速度の積算値ということになる。

そこで、図-28 に示した超音波伝播速度を二次多項式で近似し、表面からの各アンカー埋込深さの範囲における超音波伝播速度の積算値を求め、この積算超音波伝播速度と最大引抜荷重の関係を考察することにした。両者の関係を図-31 に示す。また、関係式を式 (7) に示す。

$$P_{\max.x} = 0.065 V_{a.x} + 1.3452 \quad (R^2 = 0.75) \quad (7)$$

ここに、 $P_{\max.x}$  : アンカー埋込深さ  $x$  m における最大引抜荷重 (kN)、 $V_{a.x}$  : 表面から  $x$  m までの積算超音波伝播速度 ( $m^2/s$ )、である。

各水路における凍害劣化の状態は異なるにも関わらず、最大引抜荷重は表面からのアンカー埋込深さの範囲における超音波伝播速度の積算値と線形の関係にあることがわかる。

### 3.2.5 課題

ここでは、異なる 6 箇所の RC 現場打ちフリユームの側壁でアンカー引抜試験を実施し、各アンカー埋込位置における最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係について考察を加え、最大引抜荷重と積算超音波伝播速度の間に線形関係があることを明らかにした。今後は、アンカー埋込深さが小さい範囲 (2cm 以下) での検証を、また、補修後の側壁における検証を行う予定である。

## 4. 農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価

### 4.1 積雪寒冷地における表面保護工法の現状

コンクリート開水路に施工された表面保護工法には、凍結融解の作用によるものと推定される様々な変状がみられる。その中で代表的な変状としては、表面被覆工法のはく離、膨れ、断面修復工法のはく離および微細ひび割れが挙げられる。断面修復工法の中には表面含浸工法を併用す

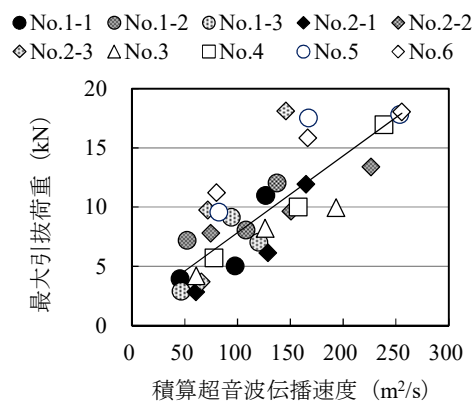


図-31 測定深さが対応する位置の最大引抜荷重と積算超音波伝播速度の関係

る工法も存在するが、そうした工法であってもはく離やひび割れを生じる場合がある (図-32 参照)。

特に積雪寒冷地に位置するコンクリート開水路では、灌漑期において水路内の流水に曝されるだけでなく、非灌漑期においても融雪水などに曝されることが考えられ、コンクリート躯体は常に高い含水状態に保持されていることが予想される (図-33 参照)。そのため、その撥水効果によ

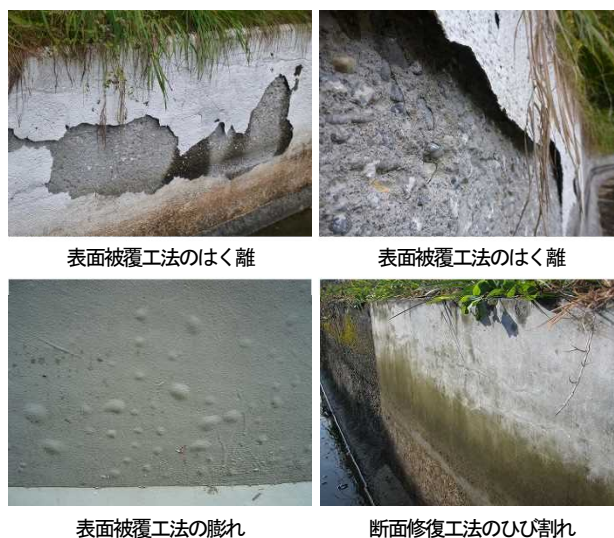


図-32 表面保護工法に作用する凍結融解による変状



図-33 積雪寒冷地に位置するコンクリート開水路の非灌漑期の状況



り表面付近の水分を低減させる表面含浸工法や、その大きな塗布厚により凍結深をコンクリート躯体にまで到達させ難くする断面修復工法であっても、凍結融解の作用とそれに伴う変状の発生は避けられない可能性が考えられる。

#### 4.2 補修後の開水路を対象とした補修効果の検証<sup>70), 71), 72), 73)</sup>

##### 4.2.1 目的

寒冷地に位置するコンクリート開水路では、凍害劣化を対象とした補修が進められており、この補修では、劣化要因である水分の侵入抑制を期待できる表面保護工法が適用される場合が多い。表面保護工法は、補修後の新たな水分の侵入を抑制し、母材コンクリートを保護することで、施設としての耐久性を維持しなければならず、表面保護工法により補修されたコンクリート開水路は、供用開始時の性能に回復されなければならない<sup>74)</sup>。

しかし、農業用のコンクリート開水路では、側壁の背面が土中に置かれることが多いという設置環境から、表面保護工法は、主としてコンクリート開水路の内面のみに施工されることが多い。そのため、母材コンクリートへの背面からの水分の侵入を抑制することはできず、コンクリート開水路内からの水分（灌漑期間）だけではなく、天端や背面からの降雨や地下水の供給による影響も避けられない。

近年、過去に表面保護工法が施工されたコンクリート開水路において、はく離・ひび割れ等の変状が確認されている。表面保護工法適用後のモニタリング調査では、表面保護工法の耐久性は、外観目視等により調査されることが多い。そのため、母材コンクリートへの水分の侵入抑制効果の有無は、表面保護工法の外観の変状から得られる情報により、推測せざるを得ない<sup>74)</sup>。表面保護工法に外観上の変状が生じた時点では、母材コンクリートの劣化が再補修での性能回復ができないほど進んでいることも多く、維持管理を行う上で、母材コンクリートの健全性に関する評価や、再補修の適正時期の見極めは困難な状態にある。

そこで本研究では、補修効果の有効性やその持続性を検証するためのモニタリング調査手法、ならびにそれらの性能を判定指標とした表面保護工法の評価に関する検討を行った。寒冷地において表面保護工法が施工されて10年が経過した、供用中のコンクリート開水路を対象に、表面保護工法の種別による含水率の調査を試行した。また、この含水率調査を行った同位置から採取したコアの凍結融解試験を行い、表面保護工法の種別による凍結融解試験サイクル数毎の相対動弾性係数の推移、および内面からの深さ毎の含水率と超音波伝播速度の推移から、寒冷地のコンクリート開水路における表面保護工法適用後の補修効果

を検証した。

##### 4.2.2 対象施設の概要

対象施設は、北海道上川地方に位置する農業用のコンクリート開水路であるK幹線水路、C幹線水路である。構造形式はいずれもRC現場打ちフリーム水路である。コア採取時の供用期間は、K幹線水路では47年、C幹線水路では50年である。

表面保護工法の断面図を図-34、対象施設の状況を図-35に示す。K幹線水路では、無機系被覆工法K-IO、有機系被覆工法K-OR、母材コンクリートと表面被覆材であるFRPM板の間に緩衝材を使用したパネル工法K-PAが適用され、補修後の経過年数は13年である。C幹線水路では、表面含浸工法C-IM、無機系被覆工法C-IO-1が適用され、さらに、補修時に新設コンクリートに打換えを行

K-IO 無機系被覆工法	K-OR 有機系被覆工法	K-PA パネル工法
<p>既設コンクリート 母材コンクリート 断面修復材 無機系被覆材 (セメント系)</p>	<p>既設コンクリート 母材コンクリート 断面修復材 有機系被覆材 (ポリウレタン樹脂系)</p>	<p>既設コンクリート 母材コンクリート 緩衝材 パネル材 (FRPM板)</p>
C-IM 表面含浸工法	C-IO-1 無機系被覆工法	K-N,C-N 無補修
<p>既設コンクリート 母材コンクリート 表面含浸材 (けい酸塩系)</p>	<p>既設コンクリート 母材コンクリート 無機系被覆材 (ポリマーセメント系)</p>	<p>既設コンクリート 母材コンクリート</p>
C-IO-2 無機系被覆工法	C-IO-3 無機系被覆工法	C-OR 有機系被覆工法
<p>新設コンクリート 母材コンクリート プライマー 無機系被覆材 (セメント系)</p>	<p>新設コンクリート 母材コンクリート 無機系被覆材 (高弾性繊維補強セメント系)</p>	<p>新設コンクリート 母材コンクリート プライマー 有機系被覆材 (樹脂モルタル)</p>

図-34 表面保護工法の断面図



K 幹線水路

C 幹線水路

図-35 対象施設の状況

い、これに無機系被覆工法 C-IO-2 および C-IO-3、有機系被覆工法 C-OR が適用され、補修後の経過年数は 10 年である。いずれも補修する材料・工法の耐用年数 20 年<sup>76)</sup>の概ね半分が経過した状況にある。本研究では、これに無補修の K-N、C-N を加えて検証を行った。なお、K 幹線用水路は、内幅 6.0m、内高 2.0m、側壁の部材厚は 200～250mm であり、C 幹線用水路は、内幅 2.0m、内高 1.5m、側壁の部材厚は 200mm である。

#### 4.2.3 検証方法の概要

本研究では、現地における表面保護工法の種別による含水率の違いが、以後の耐凍害性に及ぼす影響について検証するため、含水率調査と凍結融解試験を実施した。現地にて含水率調査を行い、これと同位置で各 2 本コアを採取し、1 本は炉乾法による含水率測定、1 本は凍結融解試験に供した。コア採取は JISA 1107 に準拠して行っている。コアの採取位置は、各コンクリート開水路の凍結融解の程度が著しい、南側の日当たり面である水路右岸側の気中部（最多頻度水位の上側）及び水中部（最多頻度水位の下側）とし、表面保護工法の浮きやはく離など外観上の変状が軽微な箇所を選定した（図-36 参照）。

##### (1) 含水率調査

表面保護工法適用後の母材コンクリートにおいて、現地でする微破壊調査手法である電気抵抗式水分測定法と、採取したコアを用いた炉乾法により、含水率を測定した。図-37 に調査概要図を示す。電気抵抗式水分測定法は、電気抵抗式水分計（K 社製 HI-800 型）を用い、コア採取箇所の左右いずれか一方から水平方向 30mm の位置に、φ6mm の孔を 30mm 間隔で 2 つ設け、内面からの深さ 10、30、50、70、90、110、130mm の計 7 点の孔間において測定した。炉乾法では、内面からの深さ 0～140mm の範囲を 20mm 間隔で計 7 試料に切断し、JISA 1476 に準拠して炉乾燥前後の質量より含水率を求めた。

##### (2) 凍結融解試験

既往の研究<sup>76), 77), 78)</sup>では、凍結融解試験を促進劣化試験として活用し、以後の劣化予測や耐久性評価を行っている。本研究でも、実施されている表面保護工法適用後の種別による耐久性評価を行うため、現地より採取したコア（φ100×200～250mm）を用いて、JIS A 1148 に準拠し、凍結融解試験を実施した。実暴露環境での水分の侵入を想定し、コアへの水分供給は、コンクリート開水路の内面と背面のみとするため、表面保護工法を含めた側面をエポキシ樹脂によりシールした（図-38 参照）。また、採取したコアの形状は円柱形のため、供試体容器は角柱形ではなく円柱形を用いた。供試体容器に入れるコア 2 本の合計

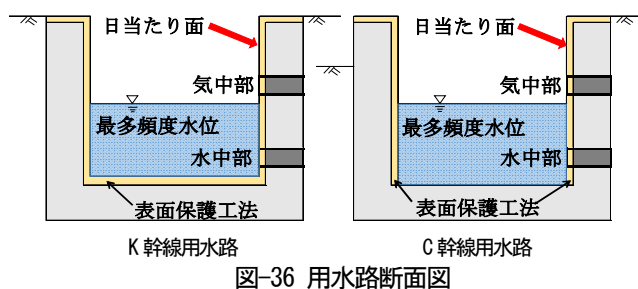


図-36 用水路断面図

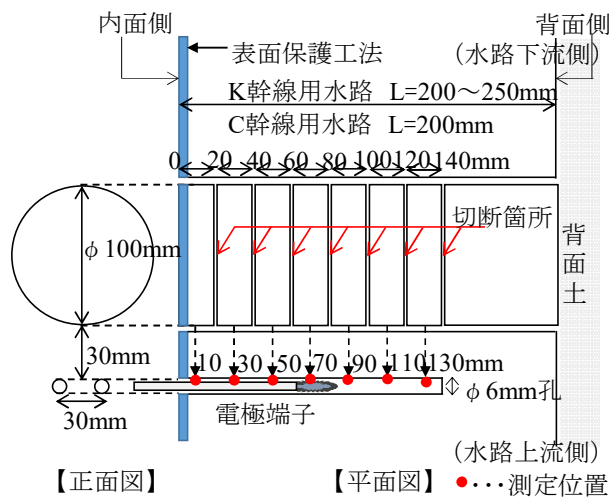


図-37 含水率の調査概要図

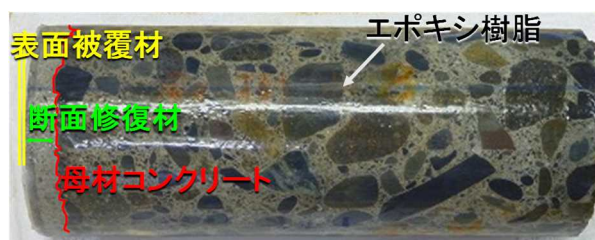


図-38 コアシール状況（例：K-IO）

の高さは、JIS A 1148 の供試体の寸法である 400mm を目安としてコアを配置した。凍結融解温度の管理については、φ100×400mm の管理用供試体中心部の温度によって行った。以上の条件により凍結融解試験を行った結果、凍結融解温度の履歴は、最高温度 5±2℃及び最低温度 -18±2℃の範囲内で推移し、凍結融解 1 サイクルに要する時間は、3 時間以上、4 時間以内に収まっていた。また、凍結融解試験の終了は、JISA 1148 では、300 サイクルであるが、遮水性を有する表面保護工法を施工したコアを対象としているため、900 サイクル終了時とした。ただし、各凍結融解試験サイクル終了時、供試体の劣化の進行に伴い、シールのひび割れや崩壊等により供試体容器に供試体が収まらなくなった段階で試験終了とした。

JIS A 1148 による凍結融解試験では、一次共鳴振動数



が測定項目とされている。しかし、供用中のコンクリート開水路から採取したコアでは、凍結融解試験実施後、一次共鳴振動数の測定は難しく、凍結融解試験サイクル数が増加するに伴い、正確な測定がさらに困難となる。そこで、既往の研究<sup>7)</sup>において、超音波伝播速度による動弾性係数の結果が活用されていることから、本研究では超音波法(透過法)を実施し、超音波伝播速度とこれをもとに相対動弾性係数を算出し、判定指標とした。また、超音波法(透過法)により、コンクリート開水路内面からの深さ毎の含水率の測定範囲と、同じ範囲で超音波伝播速度の測定が可能となった。

超音波法(透過法)では、凍結融解試験の各サイクル終了後、超音波試験機(P社製 TICO型)を用いて、深さ方向に10mm間隔で、発・受端子の距離が直径に相当するよう伝播速度を測定した(図-39参照)。表面保護工法の種別によるコア全体の評価は、式(8)により、各々の測点の伝播距離(端子間距離(mm))の合計 $\Sigma L$ (mm)と超音波伝播時間の合計 $\Sigma T$ ( $\mu\text{sec}$ )から、平均となる超音波伝播速度 $V$ (m/s)を算出し、これを用いた。

$$V = \Sigma L / \Sigma T \dots\dots\dots (8)$$

次に、所定凍結融解サイクル数経過後の超音波伝播速度 $V$ (m/s)から、式(9)により動弾性係数 $E_d$ (GPa)を算出し、式(10)により相対動弾性係数を算出した。 $E_{dn}$ は凍結融解サイクル数 $n$ サイクル後の動弾性係数、 $E_{d0}$ は凍結融解試験開始時の動弾性係数である。

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{相対動弾性係数}(\%) = E_{dn} / E_{d0} \times 100 \dots\dots\dots (10)$$

4.2.4 調査結果および考察

(1) 表面保護工法の種別による含水率

炉乾法により求めた深さ毎の含水率のうち、気中部の結果を図-40に示す。ここで、K-IO、K-OR、C-IO-1、C-IO-2、C-IO-3、C-ORの表面から10mmの含水率は、補修材(5~15mm)とコンクリートからなる結果となっており、K-PAはコンクリートが含まれないため測定していない。

既設母材コンクリートでは、同一環境下のコンクリート側壁でも、工法間で含水率に差異が生じていた。一方、打換母材コンクリートでは工法間の含水率の差は小さかった。K幹線用水路では、K-NよりもK-IO、K-ORの含水率は高く、K-PAは同程度となった。C幹線用水路では、C-NよりもC-IM、C-IO-2、C-IO-3、C-ORの含水率は低く、C-IO-1は同程度となった。C-Nの含水率は8%程度とほぼ飽水状態にある<sup>8)</sup>にも関わらず、C-IM、C-IO-2、C-IO-3、C-ORの含水率は低く保たれていることから、これらの工法は水分の侵入抑制効果が発揮されていると推

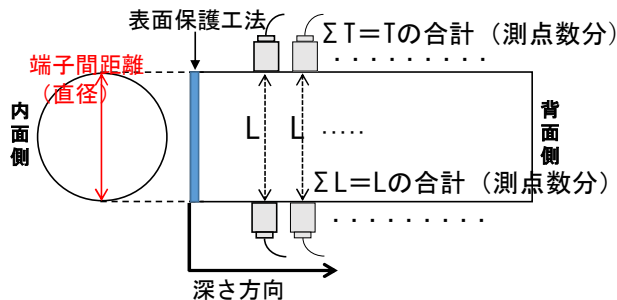


図-39 超音波法(透過法)測定概要

測される。また、K-PA、K-IO以外の工法では、含水率は表面に近いほど低くなる傾向が見られ、水分が表面付近に極端に滞留することはなかった。

(2) 電気抵抗式水分測定法の試行結果

炉乾法と電気抵抗式水分測定法による含水率の測定結果を図-41に示す。C幹線用水路(打換母材)では、炉乾法と電気抵抗式水分測定法の測定結果はほぼ同程度で、ばらつきは±30%に収まっていた。一方、母材の供用年数が

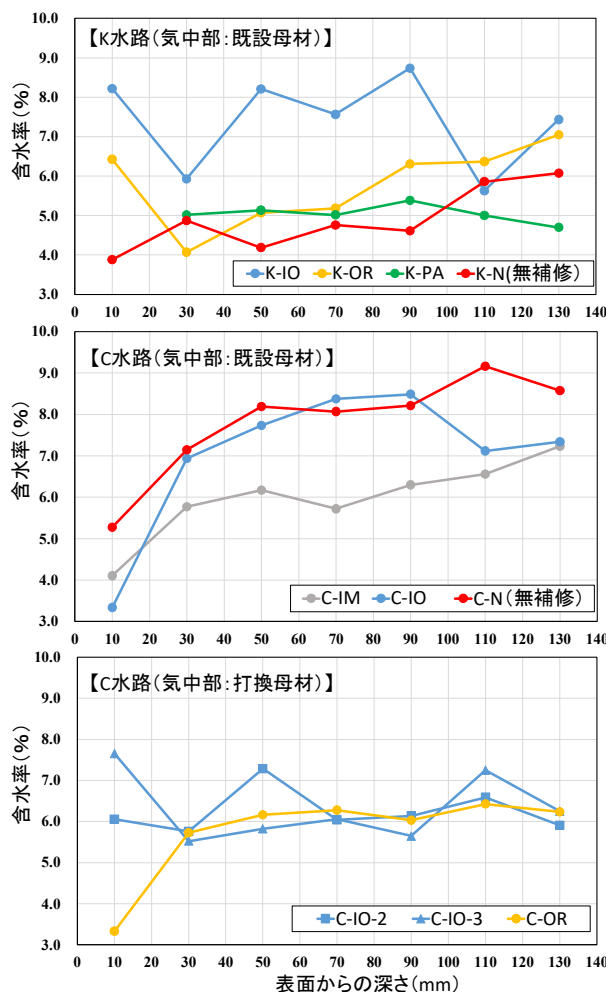


図-40 深さ毎の含水率(炉乾法)

長いK幹線用水路（既設母材）とC幹線用水路（既設母材）では、ともに、炉乾法よりも電気抵抗式水分測定法による含水率が低く測定されてしまう。しかし、炉乾法による含水率が高くなるほど電気抵抗式水分測定法の含水率も高くなることから、電気抵抗式水分計による測定は、含水率そのものを求めることは難しいが、コンクリート内部の水分を把握するための尺度として扱うことは有効であると考えられる。

**(3) 表面保護工法の種別による相対動弾性係数の推移**

K幹線用水路、C幹線用水路における凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係をそれぞれ図-42、図-43に示す。凍結融解試験終了サイクル数は、K幹線用水路では最大756サイクル、C幹線用水路では最大648サイクルで試験終了となった。凍結融解サイクル数の増加に伴い、無補修および既設コンクリートに表面保護工法が施工された供試体では相対動弾性係数が低下し、その種別により低下の傾向に違いがあることが分かった。両図では、凍結融解サイクル数300サイクル時における相対動弾性係数60%以下のグループ1、60~100%のグループ2、100%以上のグループ3の3つのグループに分けることができる。グループ1は、K-N-気中および水中、C-N-気中および水中に加えて、表面保護工法が施工されているK-IO-気中、C-IM-気中および水中、C-IO-1-気中である。これら供試体では、無補修と同様の相対動弾性係数の低下が見られることから、補修効果はほぼ得られていないと判断できる。また、表面保護工法が施工されていたにもかかわらず、無補修よりも相対動弾性係数が低下した工法も存在した。グループ2は、K-IO-水中、K-PA-気中および水中、K-OR-気中および水中、C-IO-1-水中である。表面保護工法を施工することで、劣化要因である水分の侵入が抑制された結果、相対動弾性係数の低下が緩やかになったと推測され、補修効果が得られていると判断できる。グループ3は、新設コンクリートに表面保護工法が施工されたC-IO-2-気中、C-IO-3-気中、C-OR-気中であり、900サイクル終了時において相対動弾性係数の大きな低下は確認されなかった。

補修の対象である母材コンクリートの耐凍害性については、これを補修する材料・工法に委ねられている<sup>75)</sup>。この材料・工法を選ぶ際の性能の照査指標が品質規格であり、マニュアル<sup>75)</sup>では無機系被覆工法、断面修復工法の耐凍害性の要求性能は凍結融解試験において300サイクル終了時の相対動弾性係数85%以上を満足しなければならないと規定されている。一方で、材料・工法を母材コンクリートに施工した複合体としての品質規格はなく、材料・工法

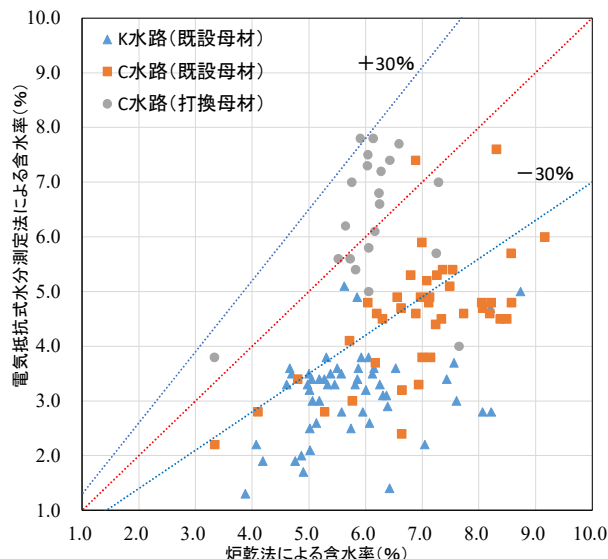


図-41 炉乾法と電気抵抗式水分測定法による含水率

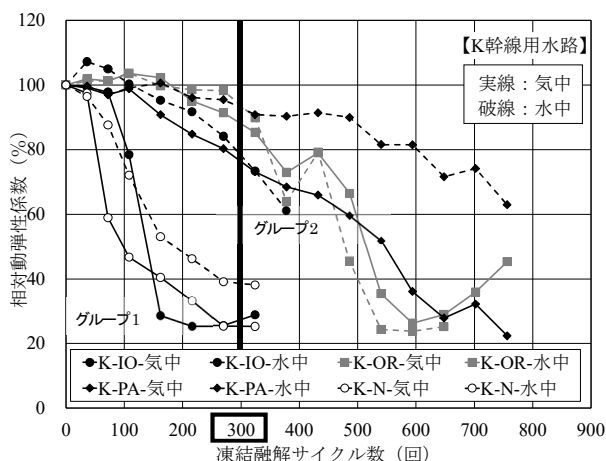


図-42 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数 (K幹線用水路)

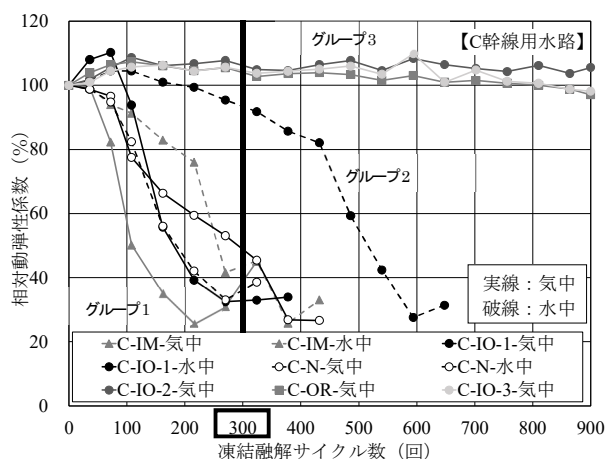


図-43 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数 (C幹線用水路)

のみの相対動弾性係数だけでは、コンクリート開水路とし

での凍結融解抵抗性を満足するか否かは不明である。そこで、表面保護工法が施工された現地から採取したコアを用いて凍結融解試験を実施することで、材料・工法および母材コンクリート、ならびにそれらの複合体の凍結融解後の状態が直接視認でき、また表面保護工法相互間の比較評価も可能となる。このため、表面保護工法が施工されたコンクリートの凍結融解試験を実施することは、コンクリート開水路の補修後の凍結融解抵抗性を評価する上で極めて有用であるといえる。

#### (4) 内面からの深さ毎の含水率と超音波伝播速度の推移

気中部の内面からの深さ 0~140mm における、表面保護工法の深さ毎の含水率と超音波伝播速度の推移(気中部)を図-44 に示す。図中の含水率は、現地で電気抵抗式水分測定法により測定した結果、および炉乾法により算出した結果である。本研究で用いたコアの母材コンクリートでは、試験開始時点の超音波伝播速度は、3,800~4,500m/s に収まっていた。

表面被覆材である内面からの深さ 5、15mm において、K-OR では 648 サイクルまで、K-PA では試験終了となる 756 サイクルまで、超音波伝播速度の低下がないことから、表面被覆材の劣化は生じにくいことが分かった。しかし、その母材コンクリートの超音波伝播速度は、一様に内面からの深さ 140mm に至るまで、サイクル数が増えるにしたがって、低下していることが分かる。これは、K-OR、K-PA の表面保護工法の遮水性により、コアから水分が排出されず、背面から供給された水分がコアの内部に滞留し、母材コンクリート全体の劣化に影響していると推測される。また、コンクリート開水路の内面に限った表面保護工法の対策では、K-OR、K-PA のように、背面からの水分供給を回避できず、遮水することで、母材コンクリートの劣化を助長し、かつ表面から不可視部である母材コンクリートの劣化状況の確認を困難にする可能性があることが分かった。一方、K-IO や K-N は表面保護工法の遮水性の低下により、内面から水分が供給され劣化が進むことで、試験の継続ができなかった。このため、K-IO、K-N では、内面からの深さ 0~100mm の範囲で超音波伝播速度の低下が生じている。また、内面からの深さ 100~140mm の範囲では、324 サイクル終了時点まで、超音波伝播速度の大きな低下は見られなかった。

C-IM、C-IO-1、C-N では、内面からの深さ 0~100mm において、超音波伝播速度の低下が進んでいる。C-IM では、216 サイクルで、内面からの深さ 0~140mm の全ての測点において低下している。C-IO-1 では、378 サイクルで超音波伝播速度が低下し始めるまで、内面からの深さ

140mm 付近での超音波伝播速度の低下は見られなかった。一方、C-N については、432 サイクルまで凍結融解サイクル数が増加しても、内面からの深さ 140mm 付近での超音波伝播速度の低下は見られなかった。このことから、C 幹線用水路では、表面保護工法を施工することで母材コンクリートの耐凍害性の低下に影響を与えられられる。

また、各表面保護工法における内面からの深さ毎の含水率と超音波伝播速度について、含水率の変動に超音波伝播速度が多少影響されている測点はあったものの、明確な関係性は得られなかった。ただし、コア採取時点で、高含水率の表面保護工法では、凍結融解試験を行った結果、凍結融解試験終了サイクル数が少なくなり、早期に劣化状態になっていることから、母材コンクリートの含水率の大小は、劣化に影響があると推察される。

#### (5) 凍結融解試験終了後の微細ひび割れの発生状況

凍結融解試験終了後の微細ひび割れの発生状況を図-45 に示す。図中では、グループ毎の代表的な微細ひび割れの発生状況を示している。ここでは、蛍光剤を含浸した供試体の断面を紫外線照射下で写真撮影し、マクロに評価する方法<sup>80)</sup>を用いた。本法では、凍結融解試験終了後の供試体を縦割り切断し、蛍光エポキシ樹脂を含浸させると、微細ひび割れが図中の白く着色された部分として可視化される。K-IO-気中、C-IO-1-気中では、無機系被覆材および断面修復材の剥離・剥落、表面および背面近傍における微細ひび割れの発生が確認された。K-OR-気中では、有機系被覆材と断面修復材との界面における剥離、骨材に沿って供試体全体に進展するひび割れの発生が確認されている。K-PA-気中では、パネル材には変状は見られないものの、表面保護工法の内側にある母材コンクリートには微細ひび割れが確認できる。新設コンクリートに表面保護工法が施工された C-IO-3-気中では、無機系被覆材に微細ひび割れが確認された。

凍結融解試験後の供試体からは、凍結融解が材料・工法に作用し、ひび割れや剥離・剥落などの変状を発生させ、それがさらに母材コンクリートに影響を与えていることが推測される。この劣化過程からは、凍結融解が材料・工法に作用した場合、相対動弾性係数などの力学的特性に加え、遮水性や付着性の低下をも引き起こしていることが考えられる。そのため、凍害を対象とした表面保護工法では、材料・工法の要求性能として凍結融解試験後の相対動弾性係数に加え、品質規格として凍結融解試験後の遮水性や付着性も定めることが望ましいといえる。

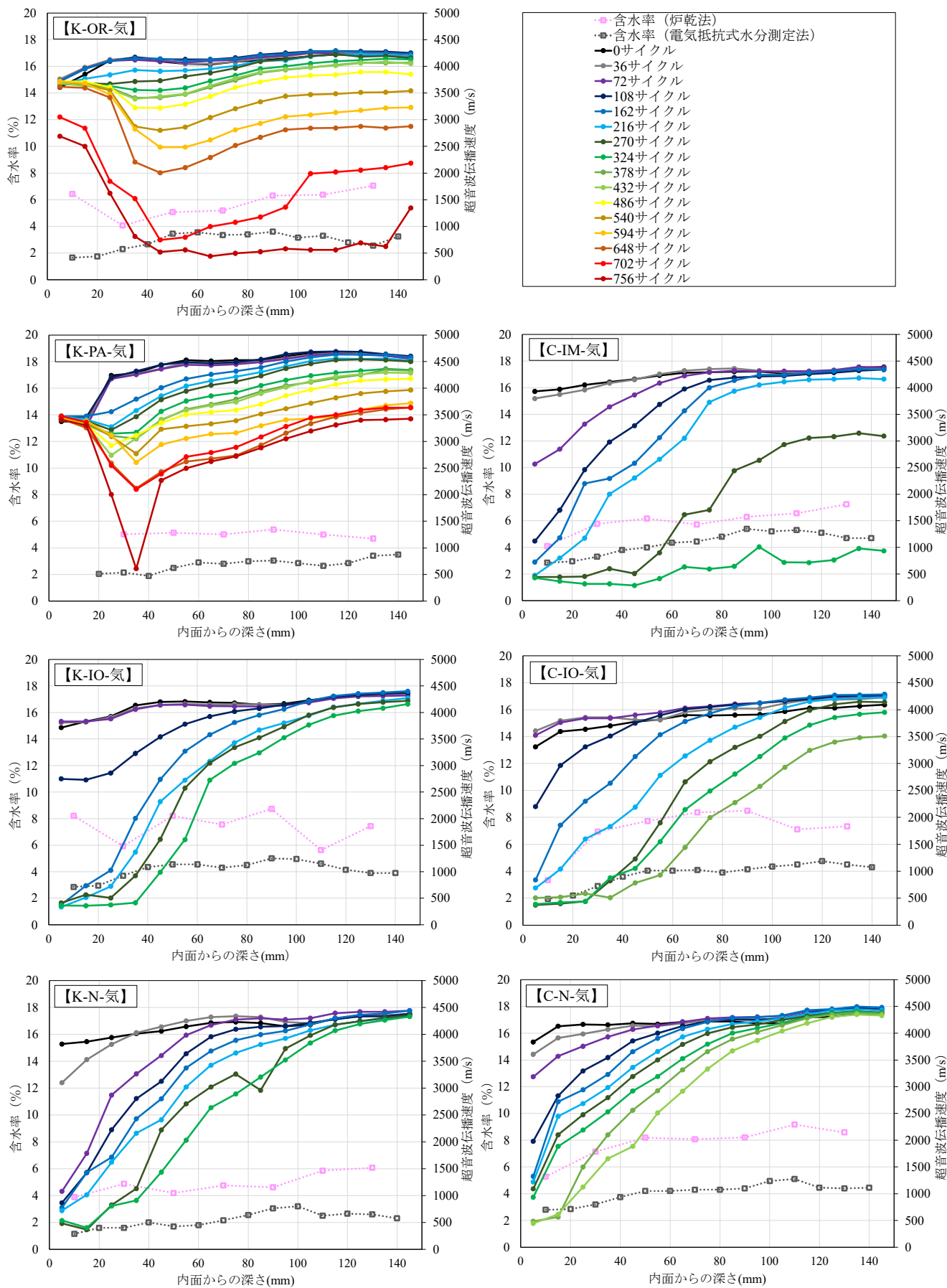


図-44 内面からの深さ毎の含水率と超音波伝播速度の推移（気中部）

**(6) 含水率と凍結融解試験終了サイクル数との関係**

含水率と凍結融解試験終了サイクル数との関係を図-46に示す。含水率は、供用環境や表面保護工法の種別により異なり、表面保護工法が施工されていたにもかかわらず、含水率が高い箇所が存在する。また、C-Nでは一般に飽水状態とされる含水率8%<sup>81)</sup>に近い値となっている。図からは、含水率が高い表面保護工法ほど凍結融解試験の終了は早く、含水率が低い表面保護工法ほど凍結融解試験の終了は遅くなる傾向が見て取れる。このことは、含水率が高く保たれているか否かにより、表面保護工法が施工されたコンクリート開水路の補修後の凍結融解抵抗性を推し量ることができることを示唆している。そのため、モニタリング調査により供用中のコンクリート開水路において母材コンクリートの含水率を把握することは、母材コンクリートへの水分の侵入の抑制効果の発現や再劣化の進行を把握する上で有用であることが考えられる。また、再補修を行う際の表面保護工法の選定や、水分の侵入を抑制するための現地での対策の検討において参考になるものと考えられる。

**4.2.5 課題**

ここでは、表面保護工法の種別による母材コンクリートへの影響は大きく、母材コンクリートの健全性や含水状態を把握することの重要性が示された。今後は、表面保護工法が施工された供用中のコンクリート開水路における調査結果の蓄積とその分析を継続するとともに、検証された補修効果が現地において持続的に発現しているか、また再劣化が進行しているかを把握することが重要となる。

**4. 3 無機系材料の耐摩耗性に与える凍結融解の影響** <sup>40), 82), 83)</sup>

**4.3.1 目的**

農業水利施設は摩耗を受ける<sup>84), 18), 20)</sup>。摩耗は施設の水利性能や構造性能を低下させることから、施設を構成するコンクリート、あるいはコンクリートを補修する材料・工法にはその摩耗に対して抵抗する性能が求められる。「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)」では、表面被覆工法や断面修復工法における要求性能項目として耐摩耗性が提示されている<sup>85)</sup>。

コンクリートおよびその補修材料・工法の耐摩耗性は、様々な要因に影響を受ける<sup>86)</sup>。その要因は、内的要因と外的要因に大別することができる。内的要因には配合や養生などの材料・施工に関する要因が挙げられ、外的要因には水質や流速などの通常の使用環境に関する要因の他、中性化や化学的侵食といった種々の劣化外力もこれに含まれると考えられる。

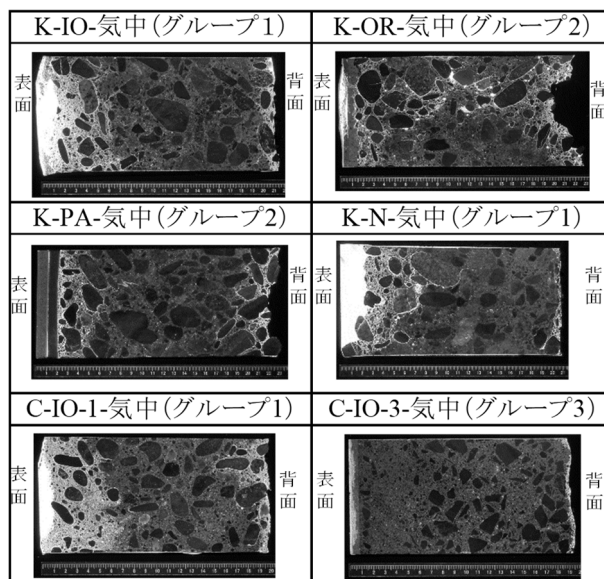


図-45 凍結融解試験終了後の微細ひび割れの発生状況

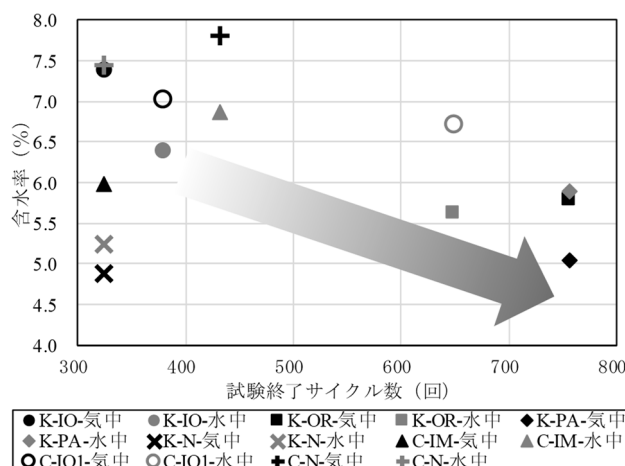


図-46 含水率と凍結融解試験終了サイクル数

積雪寒冷地に位置するコンクリート開水路では、摩耗に加え、凍結融解の作用に起因する凍害を受ける可能性が高い<sup>6)</sup>。凍害を受けたコンクリート開水路では、特に日射の影響を受ける南側に面する側壁においてひび割れやスケールリングなどの変状を生じるが、底板においては摩耗と凍害が併発して断面欠損にまで至る場合も多い(図-47)。また、補修材料・工法の中で、無機系表面被覆材などの無機系材料においては、摩耗が促進され、母材であるコンクリートの露出にまで至る事例も確認されている(図-48)。

本研究では、コンクリートなど無機系材料における凍害が摩耗に与える影響を確認するための検討を進めてきている<sup>6), 40), 82), 83), 87)</sup>。ここでは、配合の異なるモルタル材および種別の異なる無機系表面被覆材において、凍結融解を作用させ、その後に促進摩耗試験を行った結果について示



すとともに、凍結融解の作用が無機系材料の耐摩耗性に影響を与えるメカニズムについて考察する。

### 4.3.2 凍結融解を作用させたモルタル材および無機系表面被覆材の促進摩耗試験

#### (1) 試験方法

本試験に用いるモルタル材は、JIS 標準砂を使用した AE モルタルとした。セメントは普通ポルトランドセメント、混和剤は AE 剤を使用した（目標空気量 6.0%）。水セメント比 W/C はコンクリートにおいて一般に適用される比率を参考に 45、55、65%とし、砂セメント比 S/C は 3.0 に統一した。一方、無機系表面被覆材は、北海道内の国営事業において適用実績を有する材料より PCM（ポリマーセメントモルタル）1 種類、HPFRCC（複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料）1 種類をそれぞれ選定した。いずれの材料も高炉スラグ系混和材が配合されており、上述のマニュアルにおける耐摩耗性および耐凍害性を含む各品質規格に適合している。

試験体の作製では、材料毎に 100mm×100mm×400mm の角柱試験体を打設し、20℃で 28 日間の水中養生を行った。養生期間経過後、試験体を 100mm×100mm×200mm の寸法に分割し、これに凍結融解を作用させた。その後、試験体をさらに幅 70mm×高さ 50mm×長さ 100mm の寸法に切り出し、これを用いて促進摩耗試験を行った。

凍結融解は、凍結融解試験を行うことにより作用させた。凍結融解試験は、JIS A 1148 の A 法（水中凍結融解試験方法）に準拠して行った（図-49 左）。凍結融解サイクル数は 100、200、300、400、500、600 サイクルである。判定指標は相対動弾性係数、質量減少率、ならびに打設面からの深さ毎（5～95mm、10mm 間隔）の超音波伝播速度（測定周波数 54kHz）とした。また、促進摩耗試験は、水流摩耗試験方法<sup>20)</sup>により行った（図-49 右）。吐出圧力は 11Mpa、試験時間は 10 時間である。判定指標は平均摩耗深さとした。

#### (2) 試験結果および考察

凍結融解試験における相対動弾性係数および質量減少率の推移を図-50 に示す。相対動弾性係数は、W/C 65 では試験開始直後に、W/C 55 では 200 サイクル経過後に、W/C 45 では 600 サイクル経過後に、85%程度まで低下したが、PCM および HPFRCC では試験終了に至るまで 95%以上を保持し、低下はほぼ見られなかった。一方、質量減少率は、W/C 45、55、65 では凍結融解サイクル数に比例した上昇が確認された。

凍結融解試験における超音波伝播速度の分布と水流摩



図-47 コンクリート開水路の摩耗と凍害

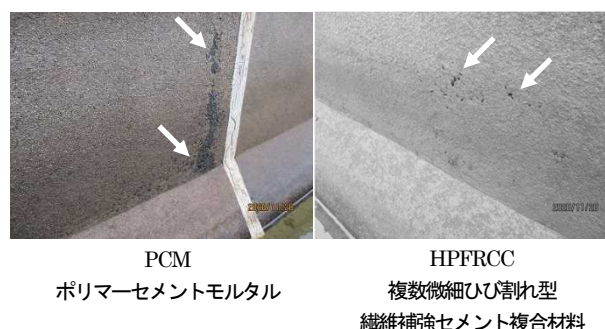


図-48 コンクリート（粗骨材）の露出に至った無機系表面被覆材の摩耗



図-49 試験状況

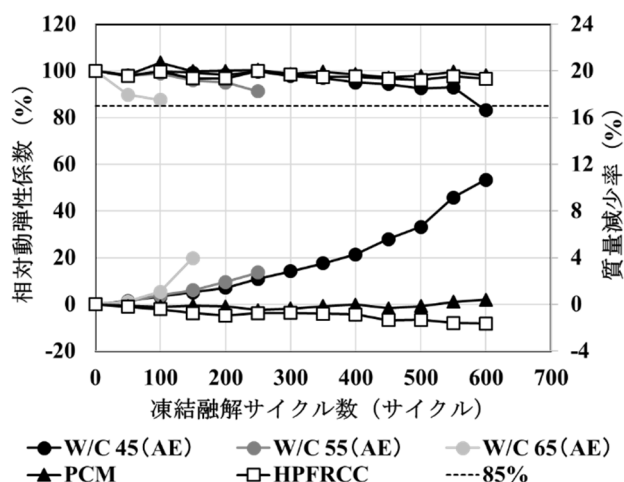


図-50 凍結融解試験における相対動弾性係数および質量減少率の推移

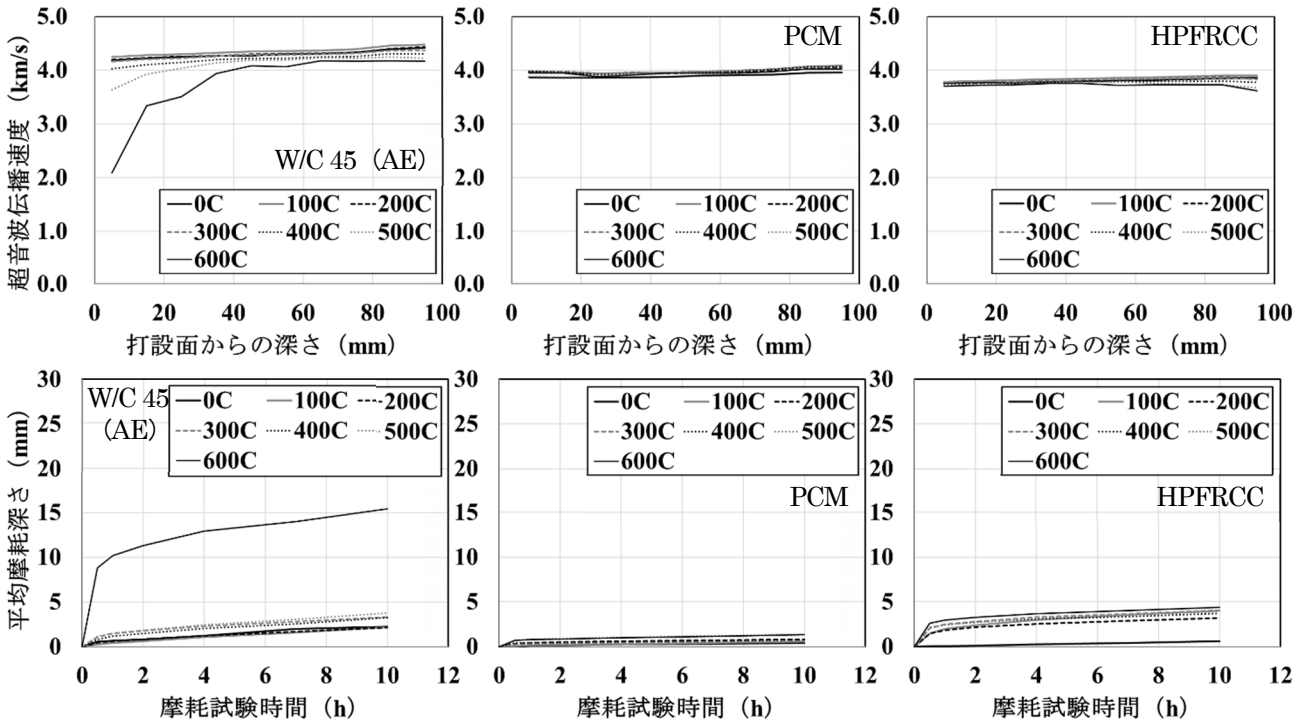


図-51 凍結融解試験における超音波伝播速度の分布（上）と水流摩耗試験における平均摩耗深さの推移（下）

耗試験における平均摩耗深さの推移を図-51 に併せて示す。凍結融解試験における超音波伝播速度は、総じて打設面に近いほど低くなる傾向が見られ、凍結融解サイクル数が多くなるほどその傾向は顕著になった。一方、水流摩耗試験における平均摩耗深さは、超音波伝播速度の低下が見られた深さまでに推移し、凍結融解サイクル数が多くなるほどその増加は大きくなった。凍結融解の作用により耐摩耗性の差異がより明確になったものと考えられる。また、凍結融解試験における超音波伝播速度に低下がほぼ見られなかった PCM および HPMFRCC においても、平均摩耗深さは 600 サイクルでは 0 サイクルに比べ約 3~7 倍程度の増加が確認された。このことから、凍結融解の作用が耐摩耗性に影響を与える可能性は高いといえる。なお、凍結融解の作用が耐摩耗性の低下を促す結果は既往の舗装コンクリートの結果<sup>88)</sup>とも符合する。

相対動弾性係数と平均摩耗深さ（試験体毎の水流摩耗試験 10 時間後の平均摩耗深さ）との関係を図-52 に示す。相対動弾性係数と平均摩耗深さの間には、負の相関が認められることが分かる。この結果は、著者らの先行研究<sup>87)</sup>の結果とも合致している。

超音波伝播速度（試験体毎の全ての深さの平均の超音波伝播速度）と摩耗速度（試験体毎の平均摩耗深さを水流摩耗試験 10 時間で除した摩耗速度）との関係を図-53 に示す。図中に示す曲線は、W/C 45、55、65 における結果の

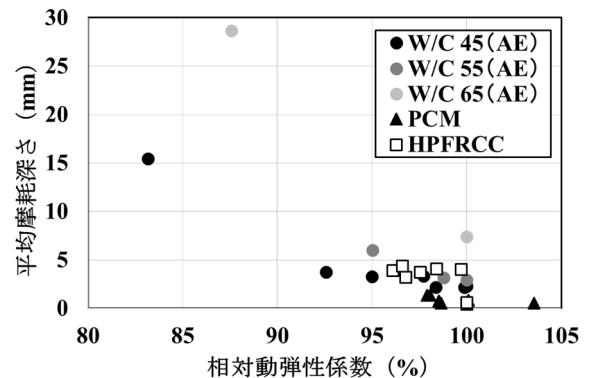


図-52 相対動弾性係数と平均摩耗深さとの関係

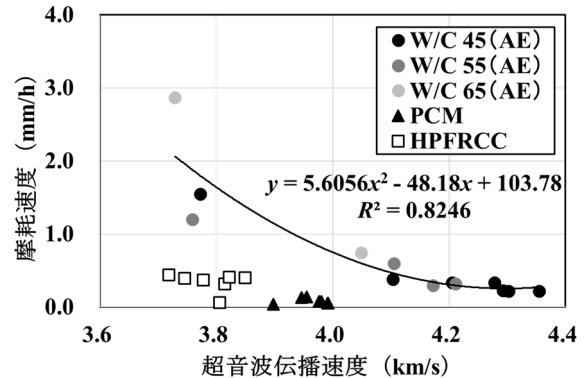


図-53 超音波伝播速度と摩耗速度との関係

二次多項式による近似曲線である。超音波伝播速度と摩耗速度の間には負の相関性が認められ、AE モルタルにおいては超音波伝播速度から摩耗速度を推定できる可能性

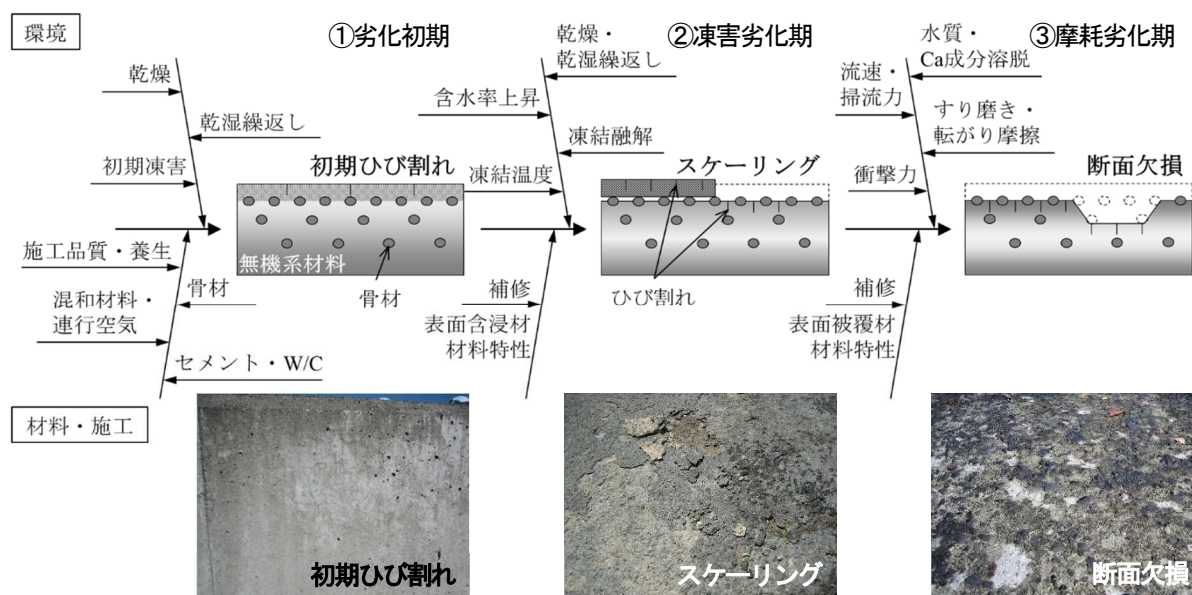


図-54 無機系材料における凍害および摩耗の進行と耐摩耗性に影響を与える要因

があることが分かる。一方、PCM および HPFRCC においてはこの相関性からの乖離が認められ、その耐摩耗性は材料が有する個々の特性に大きく影響を受けていることが伺える。ここでは、高炉スラグ系混和材による緻密化、補強短繊維による架橋効果などが耐凍害性もしくは耐摩耗性、またはその両方を向上させている可能性が考えられる。なお、PCM と HPFRCC との耐摩耗性の差異は衝撃摩耗の作用に対する抵抗性の差異がその要因であると推察される<sup>89)</sup>。

#### 4.3.3 無機系材料の耐摩耗性に与える凍結融解の影響

無機系材料における凍害および摩耗の進行と、各進行過程において耐摩耗性に影響を与える要因について、図-54 に整理して示す。なお、図中の写真はコンクリートにおける事例である。凍結融解の作用が無機系材料の耐摩耗性に影響を与えるメカニズムは、以下の通りであると推察される<sup>86), 6), 90)</sup>。

まず、①劣化初期では、セメントの種類および水セメント比、混和材料により連行される空気量および質（エントレインドエアであるか否か）、骨材の種類および量、養生を含む施工品質など、材料・施工に関する要因に影響を受ける。またこの過程では、乾燥、乾湿繰返し、初期凍害といった環境に関する要因にも影響を受けると考えられ、表面にはこれらの要因により初期ひび割れなどを生じることもしばしばある。その後、②凍害劣化期では、含水率の上昇、凍結融解の作用により、凍害が発生する。表面にはスケーリングを生じ、表面および内部にはひび割れを生じてそれが蓄積されていく。スケーリングは質量減少を伴い

直接的に摩耗に結び付き、また、ひび割れの蓄積は相対動弾性係数や超音波伝播速度の低下とともに耐摩耗性の低下を促す。そして、③摩耗劣化期では、水質に起因するカルシウム成分の溶脱、流速に起因する掃流力、すり磨きおよび転がり摩擦、衝撃力などの作用により、摩耗が発生・進展する。この摩耗は、凍害による変状の影響を受けているため、断面欠損にまで至る可能性が高くなる。一方、①劣化初期において生じた初期ひび割れ、あるいは②凍害劣化期において生じたスケーリングやひび割れに対して補修が行われる場合は、耐摩耗性はその補修材の特性に応じた影響を受けることとなる。なお、実構造物では摩耗による変状が凍害に影響を与える可能性も考えられる<sup>9)</sup>。

#### 4.3.4 課題

ここでは、配合の異なるモルタル材および種別の異なる無機系表面被覆材に凍結融解を作用させ、その後に促進摩耗試験を行った結果を示し、凍結融解の作用が無機系材料の耐摩耗性に影響を与えるメカニズムについて考察した。その結果、凍結融解の作用は、スケーリングを生じさせ、またひび割れを蓄積させることにより、耐摩耗性の低下を促すことが確認された。今後は、無機系表面被覆材における凍害・摩耗劣化のメカニズムについてその解明を試みるとともに、耐摩耗性を判定指標とした耐凍害性の評価手法について検討を加える予定である。

### 5. 凍害・摩耗の複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強工法および再補修・高耐久化技術の開発

#### 5.1 複合劣化に対して高耐久性を有する「超高耐久性断



**面修復・表面被覆技術」の開発** <sup>91), 92), 93), 94), 95), 96), 97), 98)</sup>

**5.1.1 目的**

寒冷地における農業水利施設の補修・補強では、コンクリートの凍害(図-55 上)に対してその効果を持続することが求められる。そのため、補修・補強においては「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)」<sup>14)</sup>の各品質規格に適合する工法が選ばれ、その中でも特に寒冷地における個別的な性能である耐凍害性を満足する材料が用いられている。

本マニュアルでは、下地処理や養生も含め、所要の品質を得るための施工方法が定められている。しかしながら、施工後早期にひび割れや浮き・剥離といった変状(図-55 下)を生じることも少なくなく、恒久的な長寿命化対策にはなり得ていないのが現状である。この要因には、材料上の要因として「材料自体の耐久性が十分ではないこと」、施工上の要因として「材料が予定した硬化物になっていないこと」が挙げられる。著しい凍害環境下に置かれている農業水利施設において、長寿命化とライフサイクルコストの低減を図るためには、これら材料上および施工上の課題を解決すること、即ち、より高耐久性を有する材料と品質の確保・向上が図られる施工方法からなる新たな補修・補強技術を開発することが必要となる。

本研究では、農林水産省官民連携新技術研究開発事業において、凍結融解の作用に対して高耐久性を有する高炉スラグ系材料を使用した補修・補強工法と、多種多様な形状を有する農業水利施設においても施工品質の確保・向上が期待できる機械化施工技術および養生技術から構成される、「超高耐久性断面修復・表面被覆技術」の開発を進めてきている<sup>91), 92), 93), 94), 95), 96), 97), 98)</sup>(図-56)。ここでは、超高耐久性断面修復・表面被覆技術の概要を示し、その根幹となる本技術の耐凍害性について報告するとともに、本技術の適用後の耐用年数について考察する。

**5.1.2 超高耐久性断面修復・表面被覆技術の概要**

**(1) 高炉スラグ系材料の概要**

本技術で使用する高炉スラグ系材料には、高炉スラグ微粉末、高炉スラグ細骨材などが挙げられる。溶鉱炉において銑鉄時の副産物として生成される高炉スラグは、ポルトランドセメントの水和に際して遊離する水酸化カルシウムを刺激材として硬化する性質(潜在水硬性)を有しており、スラグ自体が硬化することで緻密な組織を形成する。水和硬化による長期強度の増進が大きく、また水密性も高いため、水利施設に適した材料であるといえる。塩化物の浸透抵抗性や化学抵抗性に加え、凍結融解の作用に対して



図-55 コンクリートの凍害と補修材の早期劣化

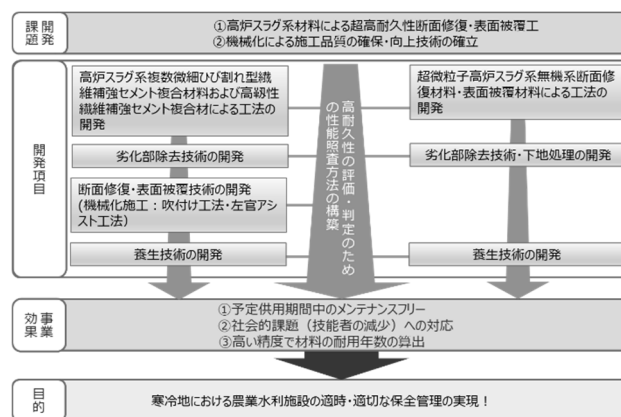


図-56 研究開発フロー

も優れた耐久性(耐凍害性)を示すことから、寒冷地(に則した材料であるともいえる<sup>95), 99)</sup>。高炉スラグによる緻密な組織の形成は、断面修復・表面被覆材料の耐凍害性だけでなく、耐摩耗性の向上にも寄与する<sup>83)</sup>。

また、高炉スラグ系材料の製造においては石灰石を焼成し粉砕する工程を要しないため、普通セメントをこれに代えることで、二酸化炭素など温室効果ガスの排出量の削減、カーボンニュートラルへの貢献が期待できる<sup>99)</sup>。副産物の利用の促進、長寿命化によるライフサイクルコストの低減と併せ、これら環境負荷の低減の効果は、持続可能な開発目標(SDGs)の達成に直接的あるいは間接的に結びつくものと考えられる。

**(2) 超高耐久性断面修復・表面被覆技術の概要**

本研究では、超高耐久性断面修復・表面被覆技術として、高炉スラグ系複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料・高靱性繊維補強セメント複合材料(以下、HPFRCC



Type と呼ぶ)、ならびに超微粒子高炉スラグ系無機系断面修復材料・表面被覆材料 (以下、PCM Type と呼ぶ) を用いた 2 タイプの工法の開発を進めてきている。いずれの工法も、開水路の通水表面などに高炉スラグ系無機系断面修復・表面被覆材料を吹付け・塗布することにより一体化させ、開水路などの構造、水理、水利用の各性能の回復・向上を図る。

HPFRCC Type は、①ウォータージェット工法などにより表面近傍の脆弱部を除去し、②吹付け工法、左官アシスト工法<sup>100</sup>などにより断面修復・表面被覆材料を敷設する工法である (図-57 左)。材料の付着性の低下要因となる表面近傍の脆弱部を除去することで、躯体との一体性における耐久性を確保することができる。同時に、吹付け工法、左官アシスト工法などの機械化施工技術を適用することにより、施工品質の向上が図られる。一方、PCM Type は、①超高压洗浄などにより表面の下地処理を行い、その際に②表面改質剤を施し、③プライマーを塗布した後、左官工法などにより断面修復・表面被覆材料を敷設する工法である (図-57 右)。下地処理において除去し切れなかった脆弱部を改質することで、同様に躯体との一体性における耐久性を確保することが期待できる。2 タイプの工法ともに、給熱し材料の養生温度を保つ、被膜養生剤を塗布し表面からの急激な乾燥を防ぐ、といった養生技術を適用することにより、施工品質の確保・向上が図られ、予定供用期間中のメンテナンスフリーを実現することが期待できる。なお、両工法ともに前述のマニュアルの各品質規格に適合している。

### 5.1.3 超高耐久性断面修復・表面被覆技術の耐凍害性と耐用年数

#### (1) 耐凍害性

本技術で用いる断面修復・表面被覆材料の耐凍害性を評価するため、各材料の凍結融解試験を行った。相対動弾性係数および質量減少率の推移を図-58 に示す。凍結融解試験は、JIS A 1148 の A 法 (水中凍結融解試験方法) に準拠して行った。凍結融解 50 サイクル毎にたわみ振動の一次共鳴振動数および質量の測定を行い、測定が困難となるか相対動弾性係数が 90% に到達した時点で試験を終了した。なお、図中では、比較のため、試製セメントモルタル (CM) 3 種類および市販ポリマーセメントモルタル (PCM) 2 種類の試験結果を併記している。HPFRCC Type、PCM Type とともに、凍結融解サイクル数は 1,500 サイクルを超え、優れた耐凍害性を有していることが分かる。

次に、断面修復・表面被覆材料の躯体との一体性におけ

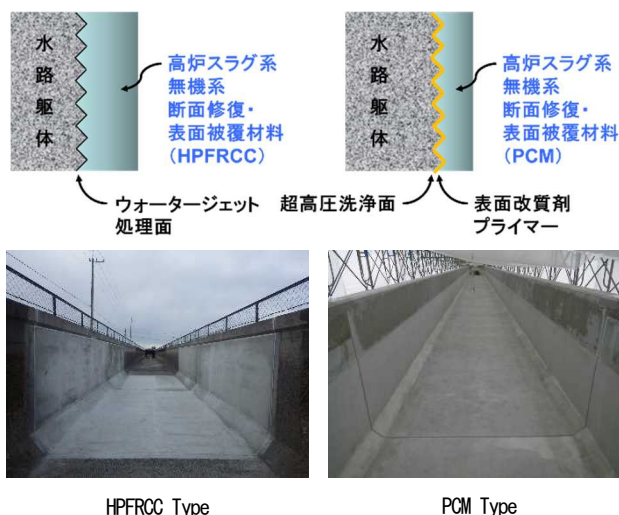


図-57 超高耐久性断面修復・表面被覆技術の概要

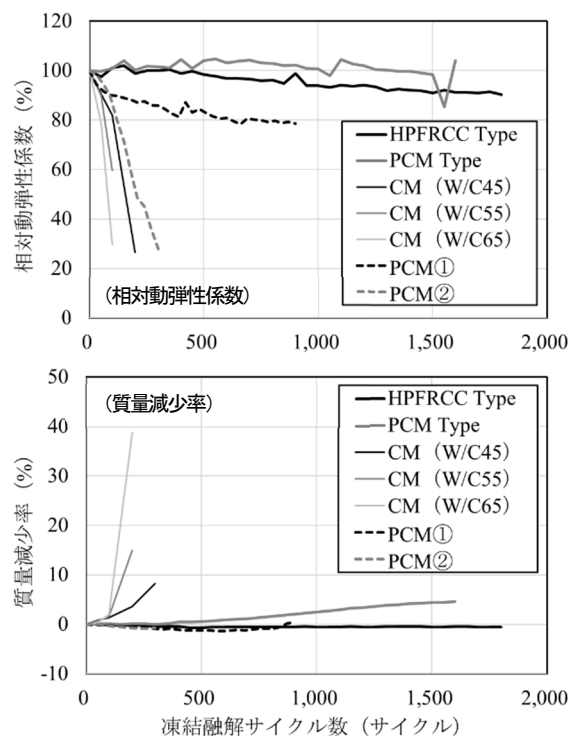


図-58 断面修復・表面被覆材料の凍結融解試験における相対動弾性係数および質量減少率の推移

る耐久性を評価するため、一次共鳴振動数に加え単軸引張強度を測定項目とした凍結融解試験を行った。本試験では、HPFRCC Type、PCM Type、被着体であるコンクリート (Co) とともに、被着体に各材料を打設した試験体 (Co + HPFRCC Type 10mm、Co + PCM Type 10mm : 90 × 100 × 400mm のコンクリートに厚さ 10mm で各材料を打設) の試験を行っている。Co の水セメント比 W/C は 55%、空気量は 4.3% である。HPFRCC Type、PCM Type、Co では凍結融解 0 および 300 サイクルまで、Co +

HPFRCC Type 10mm、Co+PCM Type 10mm では凍結融解 500 サイクルまで試験を行った。凍結融解試験時の相対動弾性係数および質量減少率の推移を図-59 に示す。相対動弾性係数は 85%以上を維持し、大きな低下は認められなかった。凍結融解試験後の引張強度試験の状況を図-60 に、結果を図-61 に示す。引張強度試験は、JSCE-K 561 の 5.8 (付着強度) に準拠して行った。試験体数は種別毎に 3 体、鋼製付着治具の寸法はφ50mm、試験時の載荷速度は 0.2mm/min である。なお、図中では、引張強度の平均値に加え、最大値および最小値をエラーバーで示している。Co+HPFRCC Type 10mm、Co+PCM Type 10mm では、300 サイクルにおいていずれも前述のマニュアルに示されている 1.0 ないし 1.5N/mm<sup>2</sup> 以上の品質規格値を満足しており、また、被着体の強度を上回っていることが分かる。さらに、500 サイクルにおいても概ね 1.0N/mm<sup>2</sup> 程度を維持しており、高い耐久性を有していることが伺える。

引張強度を測定項目とした凍結融解試験における相対引張強度の推移を図-62 に示す。ここで相対引張強度とは、凍結融解 0 サイクルの引張強度に対する当該サイクルの引張強度の比率を表している。Co+HPFRCC Type 10mm、Co+PCM Type 10mm では、300 サイクルにおいて 70~80%程度を維持したが、500 サイクルにおいては 20~40%程度にまで低下した。強度そのものは一定の水準を維持しているものの、長期的には低下が速まる可能性があることが分かった。

ここで、HPFRCC Type、PCM Type、Co における相対動弾性係数と相対引張強度との関係を図-63 に整理する。両者には一定の相関性が認められ、相対動弾性係数から相対引張強度を推定できると考えられる。

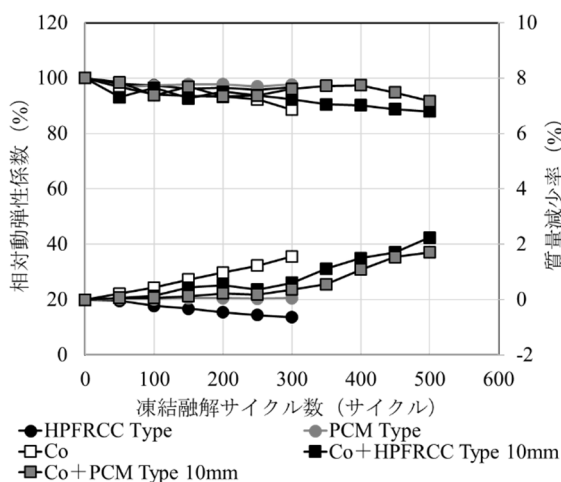


図-59 引張強度を測定項目とした凍結融解試験における相対動弾性係数および質量減少率の推移



図-60 引張強度試験の状況

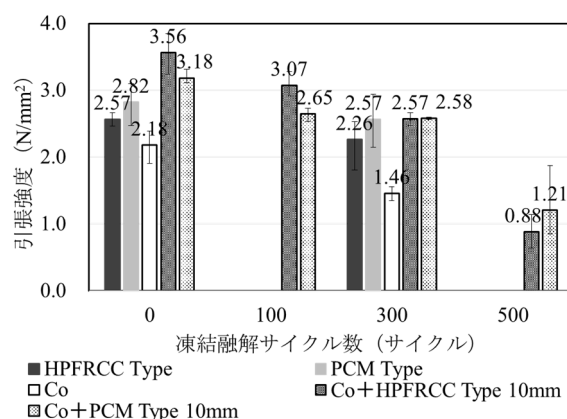


図-61 凍結融解試験後の引張強度試験の結果

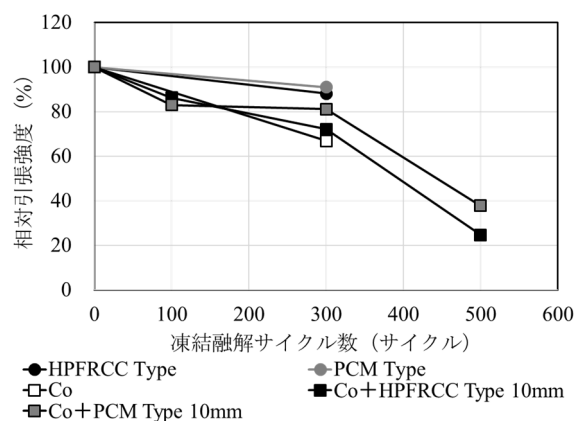


図-62 引張強度を測定項目とした凍結融解試験における相対引張強度の推移

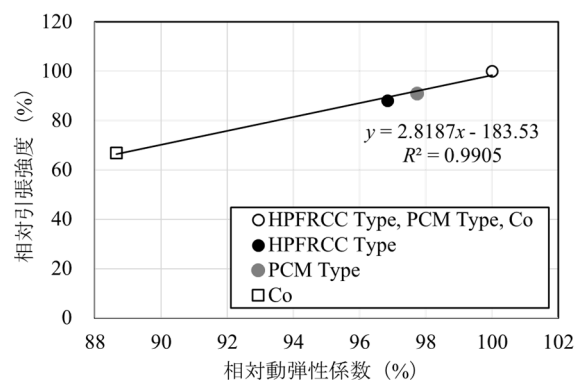


図-63 相対動弾性係数と相対引張強度との関係

(2) 耐用年数

本研究では、気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測手法である「ASTM 相当サイクル数」<sup>101)</sup>を用いて、HPFRCC および PCM の試験施工を実施した地点（美唄（N 幹線用水路）、長沼（K 幹線用水路））毎、ならびに実証試験を実施した地点（滝川（S 幹線用水路））の耐用年数を試算した。

ASTM 相当サイクル数は、ある地域の気象条件下で、コンクリートが 1 年間に受ける凍結融解作用を、ASTM C-666 A 法（JISA 1148 A 法の基礎である試験方法）の標準条件の凍結最低温度である -18℃を基準とした ASTM 相当サイクル数として表す実験式 (11) により算出し、耐用年数を推定する方法である<sup>102)</sup>。

$$\begin{aligned}
 Cy_{ASTM-SP} &= C \times F \times \Sigma (-ts/18) \beta \\
 &= C \times F \times R_{sp} \\
 &= C \times F \times s \times p \times Ra_{90} \dots \dots \dots (11)
 \end{aligned}$$

ここに、

Cy<sub>ASTM-SP</sub> : ASTM 相当サイクル数 (回/年)

β : 定数

ts : 凍結最低温度 (℃)

Ra<sub>90</sub> : 気温による ASTM 相当サイクル数 (回/年)

C : 養生条件に関する係数

F : 凍結融解条件に関する係数

s : 日射条件に関する係数

p : 劣化過程係数

C および F はそれぞれ構造物の条件を表す係数（部材係数）であり、C は凍結融解作用を受けるまで、即ち夏の乾燥の影響を表し、F は凍結融解時のコンクリート周囲の水分状態を表すものである。これらの係数は ASTM C-666 法 A 法による試験体データから重回帰分析により定量化されたものである。一方、s は日射条件（方位）を表す係数であり、また、p は劣化過程を表す係数であり「劣化の兆候」および「明確な劣化」はそれぞれ相対動弾性係数が 90 および 60%の状態に相当し、全国 26 地点の気象データから回帰分析により定量化されたものである。ASTM 相当サイクル数算定式の諸係数を表-7 に示す<sup>102)</sup>。

耐用年数の試算の対象とする HPFRCC および PCM は、図-58 に示す通り、凍害を発生してもその劣化は軽微であり、凍害劣化の過程においては「明確な劣化」は生じず「劣化の兆候」に留まることが予想される。また、部材係数において、日射条件は水路の部材の面する方位により「北面」または「水平・南面」を、養生・乾燥条件は「気中」を、凍結融解条件は「気中凍結水中融解」をそれぞれ選択することが妥当であると考えられる。このことから、以後の試

表-7 ASTM 相当サイクル数算定式の諸係数<sup>102)</sup>

ASTM 相当サイクル数算定式 $Cy_{ASTM-SP} = C \times F \times s \times p \times Ra_{90}$		凍害劣化の過程		
		劣化の兆候	明確な劣化	
劣化過程係数 p		1.00	1.64	
部材係数	日射条件 s	北面	1.00	1.00
		水平・南面	1.45	1.45
	養生・乾燥条件 C	水中	1.00	1.00
		気中	0.66	1.41
		20℃乾燥	0.26	0.80
		30℃乾燥	0.14	0.45
	凍結融解条件 F	水中凍結 水中融解	1.00	1.00
気中凍結 水中融解		0.21	0.23	

算では、劣化過程係数 p は 1.00 を、日射条件 s は 1.00 または 1.45 を、養生・乾燥条件 C は 0.66 を、凍結融解条件 F は 0.21 をそれぞれ用いることとした（表中の太字部分）。

ここで、既往の研究結果<sup>101)</sup>からは、上記の気温による ASTM 相当サイクル数 Ra<sub>90</sub> は「地域係数」との相関性があることが明らかになっており、この地域係数から算出することができる。地域係数 T は式 (12) により算出され、ASTM 相当サイクル数 Ra<sub>90</sub> は式 (13) により算出される。

$$T = -ta_{min} (1 - Df/Dw) \dots \dots \dots (12)$$

$$Ra_{90} = 4.2T - 5.4 \dots \dots \dots (13)$$

ここに、

ta<sub>min</sub> : 日最低気温の年間極値 (℃)

Dw : 凍結融解総日数 (日)

Df : 凍結持続日数 (日)

ここでは、たわみ振動の一次共鳴振動数の測定が困難になったサイクル数または相対動弾性係数が 90%に到達したサイクル数を耐用年数に到達するサイクル数 N<sub>90</sub> (回) とし、式 (14) および (15) により ASTM 相当サイクル数 Cy<sub>ASTM-S90</sub> (回/年) および耐用年数 X<sub>90</sub> (年) を算出した。

$$Cy_{ASTM-S90} = C \times F \times s \times p \times Ra_{90} \dots \dots \dots (14)$$

$$X_{90} = N_{90} / Cy_{ASTM-S90} \dots \dots \dots (15)$$

ここで、図-58 より、HPFRCC においては 1,800 サイクル経過後に、PCM においては 1,600 サイクル経過後に、それぞれ試験を終了している。そこで、本研究における「たわみ振動の一次共鳴振動数の測定が困難になったサイク





図-64 耐用年数の試算のイメージ（機能監視結果（現地温度データ）を用いた試算精度の向上）

ル数または相対動弾性係数が 90%に到達したサイクル数を耐用年数に到達するサイクル数  $N_{90}$  (回)」は一律「1,600 (回)」として、地点毎の耐用年数を試算することとした。

1) 耐用年数の試算

本研究では、耐用年数の試算は Step 1 および Step 2 の 2 段階にて行うこととした。Step 1 では、気象庁のホームページにおいて提供されるアメダスデータ<sup>103)</sup>を用いて、試験施工を実施した地点（美唄（N 幹線用水路）、長沼（K 幹線用水路））毎、ならびに実証試験を実施した地点（滝川（S 幹線用水路））の耐用年数を試算した。美唄（N 幹線用水路）における耐用年数は「観測点：美唄」の、長沼（K 幹線用水路）における耐用年数は「観測点：長沼」の、滝川（S 幹線用水路）における耐用年数は「観測点：滝川」のデータを用いることとした。また、Step 2 では、現地水路における機能監視結果（現地温度データ）を用いて、Step 1 と同様に試験施工を実施した地点毎、ならびに実証試験を実施した地点の耐用年数を試算することとし、耐用年数の試算精度の向上を図ることとした。耐用年数の試算のイメージを図-64 に示す。

2) Step 1 により試算した耐用年数（気象庁アメダスデータを用いた耐用年数の試算）

美唄（N 幹線用水路）、長沼（K 幹線用水路）、空知（S 幹線用水路）における地域係数 T、気温による ASTM 相

表-8 地域係数 T、気温による ASTM 相当サイクル数  $R_{a90}$  (回/年)、ASTM 相当サイクル数  $C_{yASTM-S90}$  (回/年)、耐用年数  $X_{90}$  (年) の算出結果

試験施工・実証試験 実施地点	美唄 N 幹線 用水路	長沼 K 幹線 用水路	滝川 S 幹線 用水路
ta min (°C)	-12.6	-12.8	-12.9
Dw (日)	145	140	149
Df (日)	76	66	86
地域係数 T	6.0	6.8	5.5
$R_{a90}$ (回/年)	19.78	23.02	17.51
$C_{yASTM-S90}$ (回/年)	3.98	4.63	3.52
$N_{90}$ (回)	1,600		
$X_{90}$ (年)	402	346	455

当サイクル数  $R_{a90}$  (回/年)、ASTM 相当サイクル数  $C_{yASTM-S90}$  (回/年)、耐用年数  $X_{90}$  (年) の算出結果を表-8 に示す。美唄（N 幹線用水路）では 402 年、長沼（K 幹線用水路）では 346 年、滝川（S 幹線用水路）では 455 年とそれぞれ算出され、「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)」<sup>14)</sup>において耐用年数とされている「20 年」を大きく上回る結果となった。



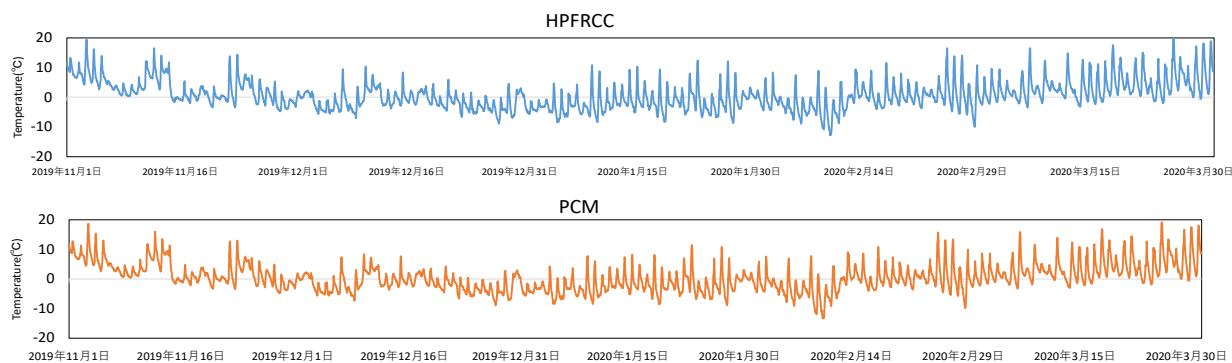


図-65 (1) 美唄 (N 幹線用水路) の表面温度の観測結果

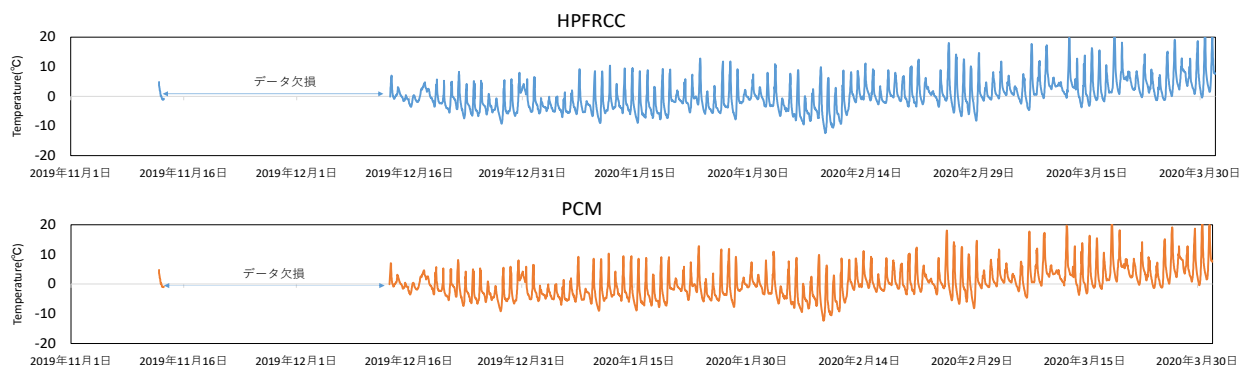


図-65 (2) 長沼 (K 幹線用水路) の表面温度の観測結果

図-65 美唄 (N 幹線用水路)、長沼 (K 幹線用水路) の2019年11月から2020年3月における観測結果の例

3) Step 2により試算した耐用年数 (現地観測データを用いた耐用年数の試算)

試験施工後、ならびに実証試験後の開水路では、モニタリングのためにコンクリート躯体に温度センサ (熱電対) を設置し、躯体の温度を測定している。美唄 (N 幹線用水路)、長沼 (K 幹線用水路) の2019年11月から2020年3月における観測結果の例を図-65 (図-65 (1) ~ (2)) に示す。Step 2では、耐用年数の試算精度の向上を図るため、現地観測データを用いて耐用年数の試算を行っている。耐用年数の試算は、上述の式 (11) および式 (15) により次の方法で算出した。

- ①11月1日~3月31日における1時間毎の温度データから、 $-1.0^{\circ}\text{C}$ 以下で凍結、 $0^{\circ}\text{C}$ 以上で融解となるまでを1回凍結融解として各測点の凍結融解回数を求める。
- ②凍結融解回数が最大となる測点を耐用年数算出箇所として、式 (11) の  $C_{y\text{ASTM-SP}} = C \times F \times \Sigma (-t_s / 18) \beta$  に代入する (ここで  $t_s$  は、1回の凍結最低温度、 $C=0.66$ 、 $F=0.21$ 、 $\beta=1.15$ )。
- ③式 (15) により、耐用年数  $X_{90}$  を算出する。

美唄 (N 幹線用水路)、長沼 (K 幹線用水路) における現地観測データを用いた ASTM 相当サイクル数  $C_{y\text{ASTM-S90}}$  (回/年) および耐用年数  $X_{90}$  (年) の算出結果を表-9に示す。美唄 (N 幹線用水路) では639年

表-9 現地観測データを用いた ASTM 相当サイクル数  $C_{y\text{ASTM-S90}}$  (回/年)、耐用年数  $X_{90}$  (年) の算出結果

試験施工 実証試験 実施地点	美唄 N 幹線 用水路		長沼 K 幹線 用水路	
	HPFRCC	PCM	HPFRCC	PCM
$C_{y\text{ASTM-S90}}$ (回/年)	2.50	2.44	2.49	2.74
$N_{90}$ (回)	1,600			
$X_{90}$ (年)	639	655	642	583

(HPFRCC)、655年 (PCM)、長沼 (K 幹線用水路) では642年 (HPFRCC)、583年 (PCM) とそれぞれ算出され、同様に「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)」<sup>14)</sup>において耐用年数とされている「20年」を大きく上回る結果となっている。

4) 躯体との一体性を判定指標として試算した耐用年数

ここで、断面修復・表面被覆材料の躯体との一体性を判定指標とした耐用年数を試算した。図-63より、相対動弾性係数90%に相当する相対引張強度は概ね70%であり、また図-62より、相対引張強度が70%に到達したサイクル数は300サイクル経過後であることから、「相対動弾性

係数 90%に相当する相対引張強度に到達したサイクル数  $N_{90}$  (回) は一律「300 (回)」であるとして、地点毎の耐用年数を試算することとした。その結果、美唄 (N 幹線用水路) では 75 年、長沼 (K 幹線用水路) では 65 年、滝川 (S 幹線用水路) では 85 年とそれぞれ算出され、これらの耐用年数も「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)」<sup>14)</sup>において耐用年数とされている「20 年」を大きく上回る結果となった。

施設を管理する上で用いる耐用年数は、一律に定まるものではなく、施設の置かれた環境や適用される工法・材料により異なるはずである。精度高く耐用年数を求め、これを補修・補強後の施設の管理に活かすことは、ライフサイクルコストの低減と、より効率的かつ効果的な長寿命化に繋がっていくものと考ええる。

#### 5.1.4 課題

これまでに実施した試験施工の状況を図-66 に、現場実証試験の状況を図-67 に示す。施工後 1~3 年程度と短い期間ではあるが、HPFRCC Type、PCM Type とともに、施工完了時の状態を維持している。本研究において得られた結果からは、2 タイプともに、極めて優れた耐凍害性を有しており、凍結融解の作用によっては性能低下を生じない水準に達していることが伺える。今後は、現地水路に適用された両工法のモニタリングを継続実施し、得られた結果との比較により、本技術の耐凍害性と耐用年数の試算結果の妥当性を検証する予定である。



図-66 試験施工現場の状況



図-67 実証試験現場の状況

## 6. 積雪寒冷地における農業水利施設の維持管理技術の開発<sup>104)</sup>

### 6. 1 補修された農業水利施設のマネジメントサイクルと機能診断

地域の営農の動脈、静脈となる農業水利システムは、システムの構成要素となる複数の農業水利施設がそれぞれの役割を果たすことで機能する。農業水利システムが機能するためには、個々の農業水利施設に要求される機能の保全が必要となり、その状態を把握するために機能診断が行われる。そして、施設の長寿命化を図るために、機能診断結果に基づいた機能保全計画の立案、必要に応じて対策工事が行われる。2007 年 3 月に「農業水利施設の機能保全の手引き (以下、機能保全の手引きと呼ぶ)」<sup>60)</sup>が策定されて以降、全国でこの取り組みが「農業水利施設のストックマネジメント」として、図-68 に示すサイクル<sup>60)</sup>に基づいて実施されてきた。

2007 年以降、機能保全の手引きの各工種編、農業水利施設の長寿命化のための手引き (以下、長寿命化のための

手引きと呼ぶ)、農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル (案) (以下、補修補強マニュアルと呼ぶ) の各工種編が策定され、数多くの施設で機能診断、対策工事が実施されている。その結果、これまでに更新された施設数、補強された施設数は定かではないが、全国の施設で補修が行われていることは周知の事実である。ここで、表-10 に示す要求性能に応じた対策の水準と種類<sup>105)</sup>から、農業水利施設における補修の内容を確認しておく、補修には、構造機能に関わるものだけでなく、水理機能、水利用機能に関わるものもあり、補強に比べて対応する種目が多いことがわかる。特に水利用機能、水理機能、構造機能に関わる施設表面の状態を改善するための表面被覆工法による補修は多く行われている。

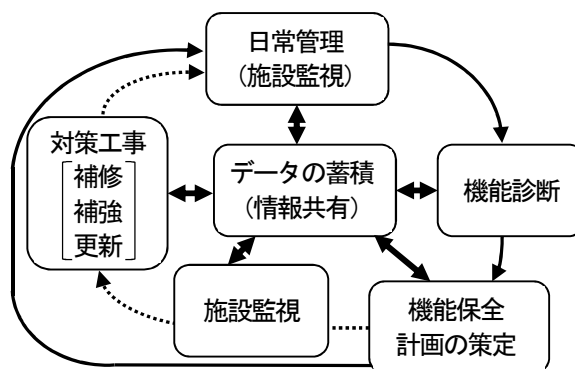


図-68 スtockマネジメントのサイクル<sup>60)</sup>

表-10 要求性能に応じた対策の水準と種類<sup>105)</sup>

要求性能		対策の水準と種類		
		①建設時の水準以上	②建設時の水準	③建設時の水準以下
構造機能	安定性 耐久性	補修 (注1)	補修	補修
	力学的安全性	補強	補強	—
水理機能		—	補修	—
水利用機能		—	補修	—
社会的機能		補強	—	—

(注1) 建設時より高い性能水準を設定しても、力学的安全性の回復につながらない場合は補修とみなす。補修と補強の違いは、力学的安全性の回復を目的としているか否かにあるので、安定性、耐久性能の回復を目指した補修工法が、結果的に力学的安全性を向上させることもあり得るが、本項ではこれも補修として扱うことにする。

この状況の下、現在顕在化していることの一つに、補修後の農業水利施設の機能保全を図るにあたってのマネジメントサイクルが十分に浸透しておらず機能していないことがある。また、補修後の施設マネジメントサイクルのキーとなるモニタリングおよび機能診断の方法が十分に確立しておらず実施されていないことがある。特に、補修後の農業水利施設の機能診断は、補修材料および躯体の状態把握、補修工事が実施された施設における再対策の要否の判定、再対策工事の方法を検討するにあたり重要な情報をもたらすことから、早急に整えておかなければならない。

ここでは、今後、補修された農業水利施設が更に増加し、ストックマネジメントの対象の多くが補修された施設になることを踏まえ、補修工事後の施設マネジメントサイクルについて考察を加える。

## 6.2 補修工事後の施設マネジメントサイクル

ストックマネジメントのサイクルは、図-68のように示されるが、これは大枠を示したものであり、対策工事後の施設に限定したマネジメントサイクルとしては、図-69のようになると考える。この図は、長寿命化のための手引きで示されているモニタリング調査フロー図<sup>106)</sup>をもとに作成したものである。ここでは、モニタリングは継続調査、機能診断はモニタリングにより異常を検知した場合、あるいは定期的実施する調査に区分し、補修工事が実施された農業水利施設を対象にして施設マネジメントサイクルを考察する。

このサイクルで留意しなければならない事項は、三つある。

### 6.2.1 モニタリング

留意事項の一つ目は、補修の効果を継続的に調べるため

のモニタリングである。

ストックマネジメントサイクルでは、定性的な日常管理とされていたが、性能規定化の下、策定された補修補強マニュアルに基づいて実施された補修後の施設に対しては、品質規格値を満足した補修材料や工法が適用されていることから、補修後の初期値からの変化を調査するためにも、原則として定量的なモニタリングを行う必要がある。

では実際に、補修後の施設に対して定量的なモニタリングが行われているかという点、施設管理者に任せられているのが現状であり、測定方法と体制を整えてモニタリングを実施している施設数が多いとは思われない。長寿命化のための手引き<sup>106)</sup>では、長寿命化対策後の施設のモニタリングとして基本調査、詳細調査、再対策の要否の判定の行い方が示され、モニタリングの実施に必要な基本は記載されている。長寿命化のための手引きは総論的なものであるのに対して、補修補強マニュアルは各補修工法の実体である。この補修補強マニュアル<sup>14)</sup>では、補修のモニタリング

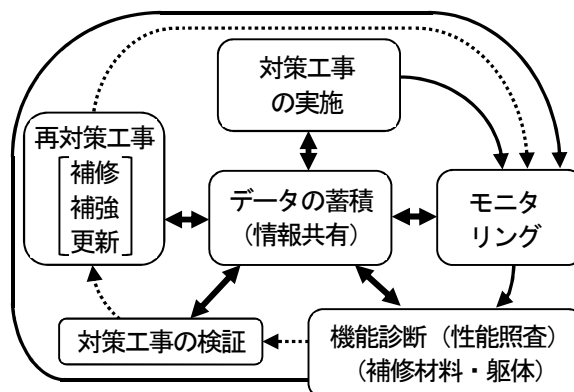


図-69 補修工事後の施設マネジメントサイクル

は1ページにも満たない記載であることから、まずは、補修補強マニュアルと長寿命化のための手引きが有機的に連携するような業務参考資料を整えるとともに、補修された施設のモニタリングをサイクルとして回すためのシステムを整える必要がある。如何なるモニタリングシステムを整えることができるかが、補修工事後の施設マネジメントサイクルを機能させる上で重要となる。開水路における対策工法のモニタリング、その対策工法が施された躯体のモニタリングについては、意見を既報<sup>107</sup>で述べているので一読していただきたい。

一方、モニタリングにより得られる情報の評価は、原則として定量化されていなければならないが、現実的に全ての性能を測定などにより定量化できないこともある。また、農業水利施設は、その建造目的を果たすためにも、利用者の視点からの評価が不可欠であり、利用者の視点からは定量化された基準よりも、定性的な基準の方が取り扱いやすく、管理がしやすいこともある。農業水利施設の評価・管理基準は、管理者の視点と利用者の視点の両者から要求される機能を満足するようなものでなければならず、性能に基づく定量的基準だけに止めず、定性的基準もあつてしかるべきである<sup>108</sup>。補修された施設においては、この視点も忘れることなく、モニタリングにより得られる情報の評価基準を整えておく必要がある。

研究機関の立場からは、コンサルタント会社には施設管理者に対する補修後の施設モニタリング方法ならびに体制の提案、メーカー等の開発企業には補修材料や補修工法のモニタリング方法の積極的な提案を要望したい。

### 6.2.2 機能診断

留意事項の二つ目は、補修後の施設を対象にした機能診断である。

補修前の機能診断と補修後の機能診断の大きな違いは、補修前では、露わになっている躯体を対象に診断を行うことができたが、補修後は補修材料で被覆された躯体が対象になり、補修材料の影響、経年的な補修材料の劣化を考慮した躯体診断を行う必要があるということである。ただし、表面被覆工法には、無機系被覆工法、有機系被覆工法、パネル工法、シート工法があり、補修後の躯体診断の難易は補修材料の種類により異なる。

ここで、2007年以降の機能診断に関わった者が思い返さなければならないことは、補修前の診断では対象のほとんどが長年供用されてきた躯体の診断であり、その中心が変状箇所の特定および変状程度の把握であったことである。それに対して、補修後の機能診断では、対象が補修材料に加えて、補修材料で被覆された躯体になるということ

である。加えて、躯体は、機能診断の際にコアが採取され、部分的に断面修復材が充填されていたり、補修工事の際に下地処理により劣化部が除去されていたり、補修前後で躯体の状況は異なっている。ストックマネジメントのサイクルに則り、診断時のデータが共有できれば、非常に有効な情報となるが、いずれにしても補修材料で被覆された躯体を確実に診断する手法を整えておく必要がある。

補修材料により診断手法の難易は異なるが、コンサルタント会社、診断会社には、補修材料で被覆された躯体の診断手法の積極的な提案を要望したい。上述のモニタリング手法と連携した診断手法であれば、性能の時間変化も含めた評価も行えることから更に望ましいと考える。

### 6.2.3 対策工事の検証と再対策工事の判定

留意事項の三つ目は、対策工事の検証ならびに再対策工事（補修、補強、更新）の判定である。

対策工事の検証は、機能診断の結果を踏まえた補修材料および躯体材料の性能低下に基づく物理的評価、施設機能の性能低下に基づく機能的評価（要求される施設機能の向上に対する評価も含む）、ライフサイクルコストに基づく経済的評価により行うことが基本になる。ただし、この基本に加えて、補修工事の目的である施設の長寿命化を図るための施設マネジメントサイクルを確実に機能させるための評価も忘れてはならない。具体的には、施設マネジメントサイクルが成立し得るかの評価であり、モニタリングの実行性、機能診断の実行性、農業水利施設の建造目的を果たすための利用者視点の利便性、管理者視点の維持管理性を総合的に評価して対策工事の検証を行うことが求められる。つまりは、施設マネジメントサイクルを回し続けることができるかの適合性による評価を含めることが必要であると考えられる。

次に、補修後の農業水利施設に対する再対策工事の判定は、施設があくまでも水利システムを構成する要素であることを踏まえ、水利システムの長寿命化を図ることを前提に行うべきである。もちろん、歴史的施設は存続させるべきであると考えられるが、高齢化した施設を無理に長寿命化するのではなく、新たな材料と工法で更新すること、あるいは水利システムの利便性、維持管理性を踏まえて減築することも視野に入れて再対策工事の判定を行うことが必要である。新たな土地改良長期計画においても、更新費の低減に資する施設の集約や再編、統廃合等によるストックの適正化を推進<sup>109</sup>とあり、このことも含めて判定すべきだと考える。

いずれにしても、対策工事の検証と再対策工事の判定については、一過性ではなく施設マネジメントサイクルを継



続することができるかの適合性から行うこと、農業水利施設の長寿命化ではなく水利システムの長寿命化を図ることを前提にした方針を含めることを、行政を含めた施設所有者に要望したい。

## 7. まとめ

本研究では、積雪寒冷地に位置する社会基盤を構成する施設群の一つである農業水利施設の長寿命化を図るため、①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築、ならびに②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発を行うことを達成目標としており、これにより、積雪寒冷地における農業水利施設の維持管理方法を提案することを最終的な研究目的としている。

①農業水利施設の複合劣化を対象とした診断・評価方法の構築では、コンクリートにおける凍害・摩耗および鋼製部材における摩耗・腐食を対象とした複合劣化機構の解明、非破壊および微破壊調査手法による複合劣化診断技術の開発を行った。また、②積雪寒冷地における農業水利施設の補修・補強方法とその評価方法の開発では、農業水利施設の補修・補強工法の耐久性評価、凍害・摩耗の複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強工法および再補修・高耐久化技術の開発、ならびに積雪寒冷地における農業水利施設の維持管理技術の開発を行った。

以下に、実施した主な検討内容と得られた結果の概要を整理する。

- (1) 北海道内に位置する複数の開水路および頭首工を構成するコンクリートにおいて、主に水に曝される部位を対象とした劣化状態の詳細調査を行った。その結果、積雪寒冷地において長期間供用されたコンクリート施設では、圧縮強度や相対動弾性係数などの力学的特性の低下を伴う著しい劣化を生じる場合があること、また、表面近傍における凍害とカルシウム成分の溶脱を伴う摩耗とが複合的に発生する可能性があることが明らかとなった。
- (2) 北海道空知地方に位置する供用後 17～36 年が経過した鋼矢板排水路において、鋼矢板の腐食診断を行い、経過年数、腐食量、水質の関係を整理・分析することにより、その構造性能の低下機構について考察した。鋼矢板の腐食診断では、腐食速度は、干満帯上部>干満帯下部>気中部の順で大きく、また、経過年数以外の要因に影響を受けることが推察された。さらに、鋼矢板排水路の構造性能の低下機構の考察では、積雪寒冷地に特有の性能低下要因を示し、それらが鋼矢板の

腐食・断面欠損を加速させること、また、傾倒・倒壊を発生させる直接的な要因になっていることを示した。

- (3) 北海道内に位置する開水路延べ 36 路線の 446 測点において、コア採取を含む劣化状態の詳細調査を行った。凍害劣化の発生形態を整理し、内部変状の発生により生じる弾性係数の低下の実態を明らかにして、寒冷地の劣化特性に対応した機能診断手法の必要性を示した。また、超音波伝播速度と静弾性係数との関係を整理し、超音波法の有用性を確認した。さらに、リバウンドハンマ法の問題点について考察するとともに、機械インピーダンス法の有用性を示した。
- (4) 北海道内および岩手県内に位置する 6 箇所 RC 現場打ち開水路のコンクリート側壁でアンカー引抜試験を実施し、各アンカー埋込位置における最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係について考察を加え、最大引抜荷重と積算超音波伝播速度の間に線形関係があること、また、この関係を利用して部材内部の凍害劣化診断が可能であることを明らかにした。
- (5) 北海道上川地方に位置する供用後約 50 年で、表面保護工法適用後約 10 年が経過したコンクリート開水路側壁において、表面保護工法の種別による含水率調査と同位置から採取したコアを用いて凍結融解試験を行った。含水率調査の結果から、同一環境下のコンクリートでも、工法間で含水率に差異が生じることが分かった。加えて、含水率の測定に微破壊調査手法である電気抵抗式水分測定法を試行した結果、含水率そのものを求めることは難しいものの、コンクリート内部の水分を把握するための尺度として扱うことの有効性が示された。また、凍結融解試験の結果から、表面保護工法の種別による母材コンクリートへの影響は大きく、母材コンクリートの健全性や含水状態を把握することの重要性を確認した。
- (6) モルタル材および無機系表面被覆材に凍結融解を作用させ、その後に促進摩耗試験を行い、凍結融解の作用が無機系材料の耐摩耗性に影響を与えるメカニズムについて考察した。その結果、凍結融解の作用は、スケールを生じさせ、またひび割れを蓄積させることにより、耐摩耗性の低下を促すことが確認された。
- (7) 凍害・摩耗の複合劣化に対して高耐久性を有する補修・補強工法および再補修・高耐久化技術として、「超高耐久性断面修復・表面被覆技術」の開発と、その耐久性を評価するためのモニタリング調査を行った。断面修復・表面被覆材の凍結融解試験を行った結果、凍

結融解サイクル数は1,500サイクルを超え、優れた耐凍害性を有すること、また、その耐用年数は予定供用期間を大きく上回ることを確認した。

- (8) 積雪寒冷地における農業水利施設の維持管理技術として、補修された農業水利施設のマネジメントサイクルと機能診断について検討した。今後は補修された農業水利施設がさらに増加し、維持管理、ストックマネジメントの対象の多くが補修された施設になることを踏まえ、補修工事後の施設マネジメントサイクルについて考察を加えた。

## 参考文献

- 1) 農林水産省：食料・農業・農村基本計画、pp.44-45、2015
- 2) 農林水産省：土地改良長期計画、pp.28-32、2016
- 3) 国土交通省：北海道総合開発計画、pp.48-49、2016
- 4) 石神暁郎・蒔苗英孝・池下貴之・春田恵太・森充広：頭首工を構成するコンクリート施設の凍害・摩耗診断、水土の知、第86巻、3号、pp.33-37、2018
- 5) 石神暁郎・西田真弓・森充広：積雪寒冷地におけるコンクリート施設の凍害・摩耗診断、平成30年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.568-569、2018
- 6) 石神暁郎・西田真弓・浅野勇・川上昭彦・川邊翔平・森充広：積雪寒冷地において長期間供用されたコンクリート施設の表面近傍における凍害・摩耗劣化、農業農村工学会論文集、No.312、pp.I\_37-I\_51、2021
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕、pp.153-166、2018
- 8) 石神暁郎・西田真弓・蒔苗英孝・佐藤智・周藤将司・緒方英彦：寒冷地の劣化特性に対応したコンクリート施設機能診断手法、水土の知、第86巻、6号、pp.27-30、2018
- 9) 農林水産省農村振興局整備部設計課：農業水利施設の長寿命化のための手引き、pp.3-14-3-38、pp.4-10-4-11、pp.参①-10-参①-21、pp.参②-9-参②-14、2015
- 10) 緒方英彦・高田龍一・鈴木哲也・山崎大輔・佐藤周之：RC開水路の側壁内部における凍害ひび割れの発生形態、水土の知、第78巻、5号、pp.29-33、2010
- 11) 佐藤智・金田敏和・石神暁郎・周藤将司・緒方英彦：RC開水路の目視による凍害診断の留意点、水土の知、第81巻、2号、pp.31-34、2013
- 12) 石神暁郎・佐藤智・周藤将司・緒方英彦：コンクリート開水路の凍害劣化の発生形態とその診断手法、水土の知、第83巻、10号、pp.27-30、2015
- 13) 食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会：農業水利施設の機能保全の手引き、p.67、2015
- 14) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室：農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)、2015
- 15) 緒方英彦・高田龍一・野中資博・服部九二雄：RC開水路の凍害、水土の知、第76巻、9号、pp.31-34、2008
- 16) 緒方英彦・鈴木哲也・山崎大輔・濱幸雄：壁状構造物であるコンクリート製開水路の側壁内部の凍害劣化、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.1、pp.833-838、2010
- 17) 石神暁郎・金田敏和・佐藤智・周藤将司・緒方英彦：超音波を用いたコンクリート開水路の凍害劣化深さの推定、農業農村工学会論文集、No.283、pp.87-98、2013
- 18) 石神暁郎・森充広・渡嘉敷勝・増川晋：農業用水路コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.805-810、2005
- 19) 森充広・渡嘉敷勝・山崎大輔・加藤智丈：長期供用された農業用水路のコンクリート通水表面の変質、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.919-924、2009
- 20) 渡嘉敷勝：農業用コンクリート水路における摩耗機構および促進摩耗試験に関する研究、農工研報、No.52、pp.1-57、2013
- 21) 緒方英彦・野中資博・藤原貴央・高田龍一・服部九二雄：超音波法によるコンクリート製水路の凍害診断、コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集、pp.63-70、2006
- 22) 魚本健人：コンクリート構造物のマテリアルデザイン、オーム社、p.65、pp.158-175、2007
- 23) 土木学会：コンクリート標準示方書〔規準編〕、pp.418-431、2018
- 24) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、I共通編、pp.148-162、IIIコンクリート橋・コンクリート部材編、pp.42-53、2017
- 25) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、pp.35-53、pp.148-168、2018
- 26) 高柴保明・塚孝司・熊谷守晃：凍害およびアルカリ骨材反応を受けたコンクリートの力学特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.1、pp.221-226、1998
- 27) 濱幸雄：凍害の診断方法の現状と課題、コンクリート工学、Vol.48、No.5、pp.66-69、2010
- 28) 嶋田久俊・野々村佳哲・水田真紀・島多昭典：凍結融解を受けたコンクリートの各種特性、寒地土木研究所月報、No.742、pp.28-32、2015
- 29) 堀宗朗・多田浩治・斎藤裕・三浦尚：細孔構造の変化に着目したコンクリートの低温劣化の診断法の基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.1、pp.723-728、1991
- 30) 高橋丞二・塚孝司・山下英俊：北海道におけるコンクリート

- 構造物の凍害、開発土木研究所月報、No.502、pp.29-35、1995
- 31) 岡本修一・魚本健人：細孔構造からみた凍結融解による劣化機構に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、pp.901-906、1997
- 32) 岡本修一・魚本健人：凍結融解による劣化への初期ひび割れの影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.2、pp.913-918、1998
- 33) 出口朗・増田良一・斉藤裕司：約80年間水と接していたコンクリートの変質状態、セメント・コンクリート論文集、No.54、pp.174-179、2000
- 34) 久田真・河野広隆：溶脱したコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性に関する考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.25、No.1、pp.749-754、2003
- 35) 橋本淳・谷智之・池谷貞右・内田善久・蓮本清二：70年以上供用したコンクリート構造物における溶脱劣化調査について、コンクリートの化学的侵食・溶脱に関するシンポジウム論文集、pp.185-190、2003
- 36) 人見尚・竹田宣典・中野靖・白土博・稗田茂樹・玉井猛：カルシウム溶脱によるモルタル中の細孔径分布の変化、土木学会第62回年次学術講演会講演概要集CS、pp.259-260、2007
- 37) 緒方英彦・兵頭正浩・石神暁郎・新大軌：EPMA分析に基づく積雪寒冷地で長期供用された開水路のコンクリートの変質に関する一考察、コンクリート工学論文集、No.30、pp.53-63、2019
- 38) 小林一輔・白木亮司・河合研至：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物、硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮、コンクリート工学論文集、Vol.1、No.2、pp.69-82、1990
- 39) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'17 [基礎編]、pp.30-36、2017
- 40) 石神暁郎・西田真弓・浅野勇・川邊翔平・川上昭彦・森充広：凍結融解を作用させたモルタル試験体の摩耗促進試験、2019年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.464-465、2019
- 41) 鎌田英治・千歩修・田畑雅幸・田中宏和：コンクリートの耐凍害性におよぼす細孔構造の役割についての統計的解析、日本建築学会構造系論文集、No.487、pp.1-9、1996
- 42) 宮川豊章・榎田佳寛・野口貴文・出村克宣・守分教郎・濱田秀則：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.23、No.1、pp.1-10、2001
- 43) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書、pp.143-155、2008
- 44) 石神暁郎・佐藤智・中村和正：積雪寒冷地におけるコンクリート開水路の表面保護工法の付着性とその評価、農業農村工学会論文集、No.297、pp.I\_49-I\_61、2015
- 45) 石神暁郎・星野香織・工藤吉弘：積雪寒冷地における排水路鋼矢板の腐食診断、平成29年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.560-561、2017
- 46) 石神暁郎・星野香織・工藤吉弘：積雪寒冷地における鋼矢板排水路の性能低下特性、水土の知、第86巻、5号、pp.43-46、2018
- 47) 石神暁郎：北海道における鋼矢板腐食実態と排水路性能低下の特徴、鋼矢板水路の腐食実態と補修・補強対策論文集、pp.11-16、2017
- 48) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室：農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【鋼矢板水路腐食対策（補修）編】（案）、2019
- 49) 鈴木哲也・浅野勇・石神暁郎：農業用鋼矢板水路の腐食実態と長寿命化対策—補修・補強・更新への性能設計—、養賢堂、2019
- 50) 北海道開発局農業水産部農業水利課：北海道の明渠排水、pp.3-9、pp.32-46、pp.47-249、1989
- 51) 日置綾人・鈴木一衛・畑中諭・渡辺欣哉：軟弱地盤地帯の明渠排水路施工について、第25回（昭和56年度）北海道開発局技術研究発表会論文集、pp.1099-1106、1982
- 52) 杉山幸男・奥井宏・斉藤晴保・鈴木達也：泥炭地排水路工法について、第32回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集、pp.107-112、1983
- 53) 新井貞夫・仁平勝行・山内勝彦・河合裕志・横山一男・本間公康：泥炭地における排水路の設計例について、第33回農業土木学会北海道支部研究発表会講演要旨集、pp.5-8、1984
- 54) 峰村雅臣・土田一也・羽田卓也・原齊・森井俊廣・鈴木哲也：新潟県における鋼矢板リサイクルの取り組み、平成24年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.872-873、2012
- 55) 原齊・峰村雅臣・萩原太郎・森井俊廣・鈴木哲也：鋼矢板排水路の腐食実態に関する実証的研究、平成26年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.698-699、2014
- 56) 板垣知也・松木俊郎・江口英弘・長崎文博・鈴木哲也：新潟地域における産官学連携による腐食鋼矢板水路の補修工法の開発、平成28年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2016
- 57) 石神暁郎：農業用排水路の材料劣化に着目した機能診断手法、平成26年度北海道開発局技術開発委員会農業検討部会技術研修分科会（施設保全研修会）講演資料、2014
- 58) 石神暁郎・西田真弓・蒔苗英孝・佐藤智・周藤将司・緒方英彦：コンクリート施設の凍害劣化特性に対応した機能診断手法、平成30年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2018

- 59) 農林水産省農村振興局:農業農村整備に関する技術開発計画、pp.5-8、2017
- 60) 食料・農業・農村政策審議会 農業農村整備部会 技術小委員会:農業水利施設の機能保全の手引き、2015
- 61) 西林新蔵・小柳冷・渡邊史夫・宮川豊章:コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp.516-530、2009
- 62) 石神暁郎・金田敏和・蒔苗英孝・会沢義徳・西田真弓・佐藤智:超音波伝播速度の測定によるコンクリート開水路の凍害診断、水土の知、第80巻、6号、pp.13-16、2012
- 63) 久保元樹・井上真澄・佐藤智・石神暁郎:機械インピーダンス法を用いたコンクリート開水路の凍害診断手法の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、No.1、pp.2110-2115、2014
- 64) 佐藤智・石神暁郎・加藤太吾・安田俊一・大杉周作・蒔苗英孝:機械インピーダンス法によるコンクリート開水路側壁の内部変状の検出、平成26年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.658-659、2014
- 65) 緒方英彦・服部九二雄・高田龍一・野中資博:超音波法によるコンクリートの凍結融解特性の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1563-1568、2002
- 66) 緒方英彦・清水邦宏・石神暁郎・田場一矢:凍害劣化したコンクリートのアンカー引抜試験における最大引抜荷重と超音波伝播速度の関係、平成28年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2016
- 67) 緒方英彦・清水邦宏・石神暁郎・田場一矢:アンカー引抜試験における最大引抜荷重を利用したコンクリート側壁の凍害劣化診断、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、2016
- 68) 緒方英彦・清水邦宏・石神暁郎・田場一矢:芯棒打込み式金属拡張アンカーを用いたアンカー引抜き試験によるコンクリート構造物の凍害劣化診断、日本非破壊検査協会コンクリート構造物の非破壊検査論文集、Vol.5、pp.77-84、2015
- 69) 日本建築学会:各種合成構造設計指針・同解説(第2版)、pp.321-322、2013
- 70) 西田真弓・石神暁郎・山田章・緒方英彦:寒冷地における表面保護工法適用後のコンクリート開水路側壁の含水率、平成30年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2018
- 71) 西田真弓・石神暁郎・緒方英彦:寒冷地におけるRC開水路の表面保護工法による母材コンクリートへの影響、2019年度農業農村工学会大会講演会概要集、2019
- 72) 西田真弓・石神暁郎・緒方英彦:寒冷地のコンクリート開水路における表面保護工法適用後の補修効果の検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.41、No.1、pp.833-838、2019
- 73) 西田真弓・石神暁郎・緒方英彦:寒冷地の開水路における表面保護工法適用に際する一提案、水土の知、第88巻、6号、pp.23-26、2020
- 74) 農林水産省農村振興局整備部設計課:農業水利施設の長寿命化のための手引き、pp.2-13-2-14、pp.6-1-6-25、2015
- 75) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室:農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)、pp.49-127、2015
- 76) 熊谷守晃・星俊彦・佐伯昇・太田利隆:50年経過したコンクリートの物理、化学的特性と耐久性、土木学会論文集、No.686/VI-52、pp.41-54、2001
- 77) 小野寺康浩・秀島好昭・高谷智文・奥井宏・館野健悦・田鹿秀則:表面塗覆装した経年水路コンクリートの凍結融解耐久性試験、第50回農業土木学会北海道支部研究発表会講演集、pp.80-83、2001
- 78) 佐藤英隆:金山ダムにおける堤体コンクリート表面の劣化予測、Docon Report、Vol.201、pp.12-17、2016
- 79) 緒方英彦・高田龍一・服部九二雄:コンクリート製開水路の非凍結期の供用環境が凍害に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.1159-1164、2009
- 80) 手塚喜勝・朝倉啓仁・中村真一・佐々木元茂:蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサンプルの微細ひび割れの可視化法、平成16年度土木学会北海道支部論文報告集、第61号、V-10、2004
- 81) 湯浅昇・笠井芳夫:非破壊による構造体コンクリートの水分測定方法、コンクリート工学、Vol.32、No.9、pp.49~54、1994
- 82) 石神暁郎・西田真弓・浅野勇・川邊翔平・川上昭彦・森充広:凍結融解を作用させた無機系表面被覆材の耐摩耗性、2021年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、2021
- 83) 石神暁郎・西田真弓・浅野勇・川邊翔平・川上昭彦・森充広:無機系材料の耐摩耗性に与える凍結融解の影響、水土の知、第90巻、4号、pp.25-28、2022
- 84) 森充広・渡嘉敷勝・長束勇・石村英明・樽屋啓之・石神暁郎:高圧水流によるコンクリート摩耗試験機の開発、平成16年度農業土木学会大会講演会講演要旨集、pp.230-231、2004
- 85) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室:農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)、pp.49-125、2015
- 86) 農林水産省農村振興局整備部設計課:農業水利施設の長寿命化のための手引き、pp.3-14-3-21、2015
- 87) 浅野勇・石神暁郎・森充広・川上昭彦・川邊翔平:凍結融解作用がモルタル材料の耐摩耗性に及ぼす影響、農業農村工学会論文集、No.311、pp.II\_35-II\_47、2020
- 88) 犬塚雅生・堀口敬・原田勝男:凍結融解作用を受ける舗装コンクリートの摩耗抵抗に関する研究、土木学会北海道支部論



- 文報告集、pp.219-222、1975
- 89) 長束勇・上野和広・渡嘉敷勝・石井将幸：水砂噴流摩耗試験機の試作とその性能評価、農業農村工学会論文集、No.266、pp.25-31、2010
- 90) 戸川一夫・中本純次：モルタル、コンクリートの摩耗特性と配合要因との関係、土木学会年次学術講演会講演概要集、第5部、Vol.29巻、pp.130-131、1974
- 91) 石神暁郎・西田真弓・南真樹・金沢智彦・緒方英彦・濱幸雄：超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発（その1）—予定供用期間中のメンテナンスフリーを目指した工法—、2020年度農業農村工学会大会講演会概要集、pp.99-100、2020
- 92) 南真樹・西谷内龍司・石神暁郎・緒方英彦・濱幸雄：超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発（その2）—繊維補強型セメント複合材料における検討—、2020年度農業農村工学会大会講演会概要集、pp.539-540、2020
- 93) 西谷内龍司・南真樹・石神暁郎・緒方英彦・濱幸雄：超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発（その3）—機械化施工「左官アシスト工法」における検討—、2020年度農業農村工学会大会講演会概要集、pp.541-542、2020
- 94) 山口健輔・金沢智彦・石神暁郎・緒方英彦・濱幸雄：超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発（その4）—凍害劣化コンクリートに対する表面改質剤の効果と修復材との一体性の評価—、2020年度農業農村工学会大会講演会概要集、pp.545-546、2020
- 95) 農林水産省：官民連携新技術研究開発事業、高炉スラグ系材料及び機械化施工による超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発、研究成果報告書（参照日 2022/3/25）、[https://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/kanmin/attach/pdf/R31011\\_minamigumi\\_houkoku1~3.pdf](https://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/kanmin/attach/pdf/R31011_minamigumi_houkoku1~3.pdf)、2021
- 96) 南真樹・西谷内龍司・金沢智彦・山口健輔・石神暁郎・長島繁男・緒方英彦・濱幸雄：高炉スラグ系材料及び機械化施工による超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発、ARIC 情報、第143号、pp.16-25、2021
- 97) 石神暁郎・南真樹・金沢智彦・緒方英彦・濱幸雄：高炉スラグ系材料による超高耐久性断面修復・表面被覆技術、水士の知（投稿中）
- 98) 石神暁郎・長島繁男・南真樹・金沢智彦・緒方英彦・濱幸雄：超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発（その5）—付着性を判定指標とした耐凍害性の評価—、2022年度農業農村工学会大会講演会概要集（投稿中）
- 99) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの活用（2021年版）、2021
- 100) 南真樹・西谷内龍司：「左官アシスト」を用いたコンクリート補修工法の導入、2019年度農業農村工学会大会講演会概要集、pp.50-51、2019
- 101) 浜幸雄・松村光太郎・田畑雅幸・富坂崇・鎌田英治：気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測、日本建築学会構造系論文集、64巻、523号、pp.9-16、1999
- 102) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書、p.39、2008
- 103) 気象庁（参照日：2020/8/1）：過去の気象データ検索 <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 104) 緒方英彦・兵頭正浩・新井みのり・石神暁郎・長島繁男：補修された農業水利施設のマネジメントサイクルと機能診断、JAGREE、No.101、pp.48-55、2021
- 105) 農林水産省農村振興局整備部設計課：農業水利施設の長寿命化のための手引き、pp.5-9、2015
- 106) 農林水産省農村振興局整備部設計課：農業水利施設の長寿命化のための手引き、pp.6-1-6-25、2015
- 107) 緒方英彦・石神暁郎・田場一矢：将来的なモニタリングが可能な開水路の対策工法、水士の知、第83巻、10号、pp.19-22、2015
- 108) 緒方英彦：開水路底版における無機系被覆工法の付着性の評価・管理基準に関する提案、2019年度農業農村工学会大会講演会概要集、pp.454-455、2019
- 109) 農林水産省：土地改良長期計画（参照日：2022/5/30）、[https://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/totikai/h28\\_choukei.html](https://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/totikai/h28_choukei.html)、2021

## 16.2 営農の変化や気候変動を考慮した農業水利施設の維持管理・更新技術の開発

### 16.2.2 大規模災害時における長大な農業水利施設の災害対応計画策定技術の開発

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ  
(水利基盤チーム)

研究担当者：川口清美、大久保天、南雲 人  
今泉祐治、寺田健司、中村和正

#### 【要旨】

本研究の目的は、基幹的な農業水利施設における大規模災害時に備えた災害対応計画の策定技術を開発することである。そのため、本研究で取り組む課題は、(1)大規模災害時における災害対応の遂行を阻害する被害発生を抑制する対策を検討する方法を開発すること、および(2)大規模災害発生時において迅速かつ適切に現場対応が可能な施設管理体制を提案することである。

(1)の課題に関して、大規模地震対策の検討方法として FTA (Fault Tree Analysis) の適用を検証した。北海道内最大級規模の農業用水路における災害対応を対象に、FTA を用いて、大規模災害時における災害対応が遂行不能になる原因事象を特定しその対策を検討した。その結果、FTA を用いた対策検討の有効性は確認されたものの、原因事象を詳細に追及すれば、FT 図が肥大化して対策検討の作業効率が低下するという実用面における課題が明らかになった。この課題を解消するため、FT 図作成において一定の具体的な原因事象が特定された段階で対策の検討に切り替えるという実用 FTA を案出した。そして、実際の施設管理者による実用 FTA を用いた対策検討の実践を通して、実用 FTA の有効性を検証した。その結果、実用 FTA を用いて従来の FTA と同数かそれ以上の対策を短時間で引き出すことができ、実用 FTA は有効かつ施設管理者自らの手で実施可能な対策検討方法であることを確認した。

(2)の課題に関して、大規模地震発生時には即座に複数名の施設管理者が予め割り当てられた各ゲート設備に急行して対応にあたるという現場管理体制を提案し、その現場管理体制における各ゲート設備への施設管理者の割当人数を最適化する方法を構築した。また、施設管理者の意思決定方法として、現場管理体制構築の可否を、取水ゲートを閉鎖するか否かの判断基準とする方法を提案した。この意思決定方法の導入および FTA により挙げられた対策の実施によって、現行の災害対応が遂行不能になる確率は、震度 6 強において約 60%低減、震度 7 において約 35%低減すると予測された。また、平成 28 年 8 月の台風第 10 号による大雨災害時において実施された農業用ダムの管理の実態を検証して、ダム管理において防災行動計画が有効であることを示した。

以上の研究成果を取りまとめて、農業水利施設管理者のための災害対応計画策定マニュアル案を作成した。

キーワード：大規模地震災害、大雨災害、農業水利施設、災害対応、FTA、意思決定

#### 1. はじめに

基幹的な農業水利施設が大規模な地震や突発的な豪雨により被害を受ければ、広範囲にわたる営農への影響が懸念されるばかりでなく、その被災箇所から流出する多量の水が新たな被害リスクとなって、地域住民の人命や財産に関わる甚大な二次災害を引き起こすことが考えられる。東北地方太平洋沖地震や北海道胆振東部地震をはじめ過去の大規模な地震災害では、多くの農業水利施設が被災した<sup>1)</sup>。また、平成 28 年 8 月には、北海道および東北地方に上陸した台風によって集中豪雨が発生して、農業水利施設が壊滅的な被害を受けた<sup>3)</sup>。

このような大規模災害に対応するためには、万一施設が被災しても、その後の災害対応により被害拡大を最小限に抑止する減災対策が重要になる。しかし、大規模災害時には、その災害対応に必要な資源である人、情報通信、設備機器、インフラもまた被災して、その機能を喪失してしまうおそれがある。それゆえ、大規模災害時に起こり得る多種多様な被害想定を考慮した災害対応計画を策定しておく必要がある。

そこで、筆者らは、信頼性工学におけるリスク解析手法のひとつである FTA (Fault Tree Analysis) を用いて、大規模地震災害時における農業水利施設管理者の災害対応行

動を阻害するリスクを網羅的に特定するとともに、そのリスクへの対策の効果を定量的に評価した<sup>4)5)</sup>。この既往の研究成果を受けて、本研究では、基幹的な農業水利施設における災害対応力を強化するための災害対応計画策定技術の開発を目的として、次のような課題に取り組んだ。

課題①：FTA を用いたリスク解析および対策検討方法の有効性の検証および体系化

課題②：大規模災害発生時における施設管理者の適切な判断と迅速な対応行動を可能にする災害対応体制の提案

以下、本報告では、2章、3章、4章において、平成29年度までの研究成果を述べ、5章、6章、7章において、平成30年度における研究成果を述べる。

2章では、課題①に関して、国内最大級の灌漑水路システムにおける地震時の災害対応を対象に実施した FTA を用いたリスク解析および対策検討を実施して、FTA の適用性を確認するとともに、その実用面における課題を解決するため、従来の FTA を改良した FTA (実用 FTA) を提案する。

3章では、課題②に関して、地震災害発生後、複数名の施設管理者が取水ゲートなどの各施設に急行して災害対応に当たる現場管理体制の構築を提案し、その現場管理体制の最適化手法の開発および施設管理者の意思決定方法の改善策の検討を行う。

4章では、大雨災害時に実施されたダム管理の実態を記すとともに、FTA を用いたリスク解析から、ダム管理における防災行動計画(タイムライン)の有効性を示す。

5章では、課題①に関して、実用 FTA の手順を一般化するとともに、実際の水路システムを管理する施設管理者による実用 FTA を用いた対策検討の実践を通して、実用 FTA の有効性を確認する。

6章では、課題②に関して、地震発生直後の水路における安全確保を必要条件とする施設管理者の意思決定方法を、基本的な意思決定理論である期待値原理に基づいて検討し、その結果より、現場管理体制が構築できるか否かを判断基準に、取水ゲートを閉鎖するか否かを決定する意思決定方法を提案する。

7章では、本研究成果を取りまとめて作成した「農業水利施設管理者のための災害対応計画策定マニュアル案」の概要を紹介する。

8章では、以上の結果をまとめる。

## 2. FTA を用いた対策検討方法の改良

### 2.1 FTA によるリスク特定および対策検討方法

#### 2.1.1 FTA の概要

FTA とは、解析対象とする望ましくない事象(頂上事象)を出発点にして、その発生原因となる事象(中間事象)を FT 図と呼ばれる樹形状の図に整理していくことで、根本的な原因となる事象(基本事象)を網羅的に特定し、頂上事象の発生を低減する対策を明らかにする方法である<sup>6)</sup>。FTA は、機械設備の故障からヒューマンエラーまで、特性の異なる事象を統一的に解析することができるので、人や情報通信、インフラなど多種多様な資源が関連する大規模災害時の災害対応過程を解析する手法として適当である。FTA は、①解析対象の把握、②FT 図の作成、③対策の検討の手順で実施する。

#### 2.1.2 解析対象の把握

FTA の第一段階は、解析対象とする災害対応の流れを把握することである。本研究では、基幹的な幹線用水路施設を管理する土地改良区職員(以下、「施設管理者」)に聞き取り調査を実施して、大規模地震災害時に幹線用水路施設において起こり得る被害状況を整理するとともに、その被害状況に対応する施設管理者の災害対応行動の流れを把握した。

#### 2.1.3 FT 図の作成

FT 図は表-1 に示す記号を用いて作成する。FT 図の例を図-1 に示す。最初に解析対象とする事象 F を頂上事象として設定する。次に、頂上事象 F が起こる直接的な原因となる事象を挙げて、それを頂上事象 F の下位に並べて書き出す。この場合は中間事象 A および基本事象 D である。このとき、頂上事象 F の直下の OR ゲートは、中間事象 A および基本事象 D のいずれかひとつが生じた場合

表-1 FT 図に使用される記号

記号	名称	内容
□	頂上事象 中間事象	頂上事象: 解析対象とする事象 中間事象: 上位事象の原因となる事象
○	基本事象	根本的な原因となる事象
∩	ORゲート	下位事象のひとつ以上が発生すれば上位事象が発生
∩	ANDゲート	下位事象のすべてが発生する場合に上位事象が発生

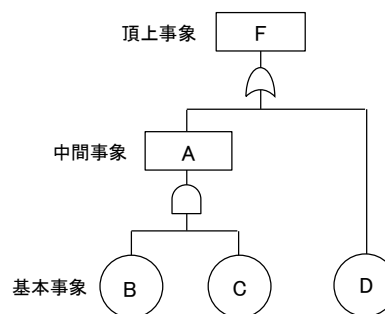


図-1 FT 図の例

に、頂上事象 F が発生することを意味する。中間事象 A が生じる原因は、基本事象 B および C である。この場合は、AND ゲートで結合されているので、基本事象 B と基本事象 C がともに生じた場合に中間事象 A が発生することを意味する。

本研究では、以上のような規則と手順に従って FT 図を作成することで、大規模地震発生直後における災害対応が遂行不能になる根本的な原因事象、すなわち、基本事象を特定した。なお、発想の公平性や一般性を確保するため、FT 図の作成作業は複数名で行うことが望ましい。本研究では、調査対象の施設管理者、災害に関する知見を有する技術者および筆者らを含めた 6 名または 7 名によって FT 図を作成した。

### 2.1.4 対策の検討

FT 図に示される基本事象に対して適切な対策を施せば、頂上事象の発生を抑制することができる。ただし、ひとつの基本事象に対して複数の対策が考えられる場合がある。その場合には、対策をさらに樹形状の図に整理する「対策検討 FT 図」を作成することが有効である<sup>7)</sup>。対策検討 FT 図については、2.4 節および 2.5 節において説明する。

## 2.2 FTA によるリスク特定および対策検討の実例

### 2.2.1 解析対象とした災害対応

#### (1) 対象施設

本研究において解析対象とする灌漑用水路施設は、北海道の水田地帯にある頭首工と開水路からなる H 幹線用水路である。図-2 にその外観を示す。H 幹線用水路の施設規模は、延長約 80km、最大通水量約 42m<sup>3</sup>/s であり、国内最大級の灌漑用水路である。H 幹線用水路を管理する施設管理者の協力を得て、同施設管理者が想定している大規模地震災害時の災害対応を対象に、FTA による被害リスクの特定および対策の検討を実施した。

#### (2) 大規模地震発生直後における災害対応

大規模地震災害によって長大な幹線用水路が被害を受けて、万一にも決壊あるいは溢水という事態となれば、その被害箇所周辺の地域に甚大な二次災害が生じることが懸念される。そのため、H 幹線用水路の施設管理者は、地震発生後、即座に水管理システムのデータを確認して、用水路内の水位に異常があれば直ちに取水ゲートを閉鎖して、溢水や決壊による二次災害の発生を防止することを想定している (図-3)。

#### (3) 頂上事象の設定

以上のように、大規模地震発生直後に施設管理者が直ちに行う災害対応は、取水ゲートを閉鎖して被害拡大を防止することである。そのため、本研究では、取水ゲートが閉



図-2 灌漑期におけるH幹線用水路の外観

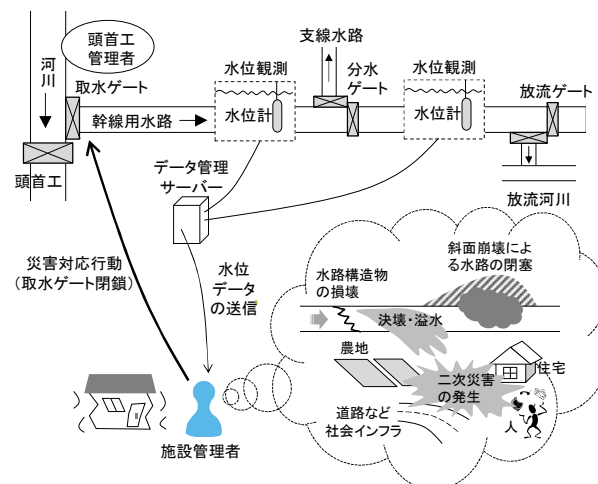


図-3 大規模地震発生直後において想定される災害対応

鎖できないという状況、すなわち、「取水ゲートの閉鎖不能」を FT 図の頂上事象として設定した。

### 2.2.2 FT 図の作成と対策の検討

H 幹線用水路における「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とした FT 図の一部を図-4 に示す。頂上事象の下位に災害対応の各工程が遂行不能となる事象が列挙される。それらの各事象が発現する原因事象を連鎖的に挙げていき、根本的な発生原因となる基本事象を特定した。図中の△の記号は他の FT 図が連結すること、すなわち FT 図がさらに継続することを意味する。それゆえ、基本事象「系統電力の停電」以外の事象にはさらに FT 図が続くことになる。ここでは、「系統電力の停電」を基本事象としているが、その発生原因は、配電設備、送電設備、発電所と遡っていけば、どこまでも詳細に挙げられるということになる。しかし、配電設備以降の原因事象に対して、施設管理者が対応できるものではない。このように、原因事象の追究をさらに進めることができたとしても、施設管理者による対策実施が不可能であることが確認された時点で原因事象の追究を止め、その事象を基本事象とした。

このようにして挙げられた基本事象に対して、対策を検討した。ただし、頂上事象からの原因経路が異なるものの、



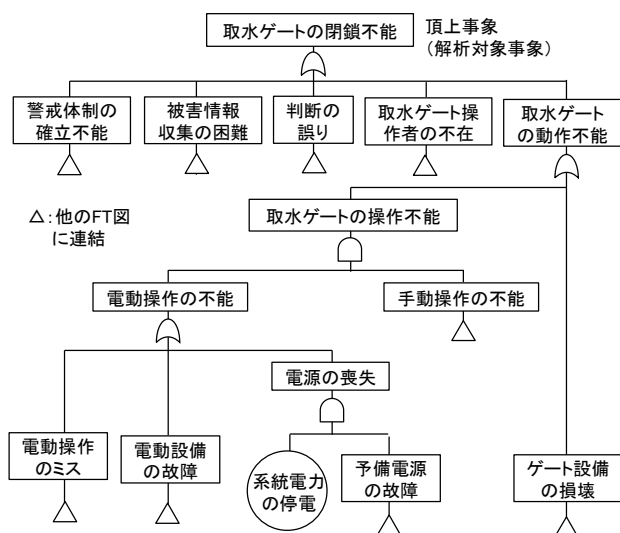


図-4 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とした FT 図の一部

同じ内容の基本事象が重複して得られる場合がある。それらの再整理を行って、最終的に 50 をこえる基本事象と対策が得られた。

### 2.3 FT 図作成における課題

前節では、H 幹線用水路を対象に、大規模地震災害時における「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする FT 図を作成し、その発生原因となる基本事象を特定した。これにより、大規模地震の発生に備えて対策すべき内容を明らかにした。しかし、その一方で、こうした FTA を用いた一連の対策検討作業を、土地改良区の実務において適切に実施できるだろうかという疑問の声も、実際に筆者らと FT 図を作成した H 幹線用水路の施設管理者からあがった。

FTA は根本的な原因と考えられる基本事象を明らかにしたうえで、その各基本事象に対する対策を検討していくという手順で行われる。しかし、その基本事象を決定するための客観的な基準は定められていない。それゆえ、無制限に原因事象を挙げていけば、FT 図は極端に肥大化してしまう場合がある。このことは、2.2.2 項で「系統電力の停電」の原因事象に関して述べたとおりである。FT 図が肥大化すれば、言うまでもなくその作成と対策検討に係る時間と労力は増大する。さらに、そこで得られた対策を分類して、対策導入の適否を評価する作業にかかる時間も増大する。また、FT 図が肥大化すれば、その全体像が捉えにくいものとなり、FT 図が有する「頂上事象が発生する原因経路をひと目で把握でき、机上シミュレーションに役立てられる」という利点も損なわれてしまう。

FTA では、基本事象を詳細に追究するほど、その対象を具体化することができる。しかし、そのために FT 図が極端に肥大化してしまうことは、逆に対策の検討を困難にし

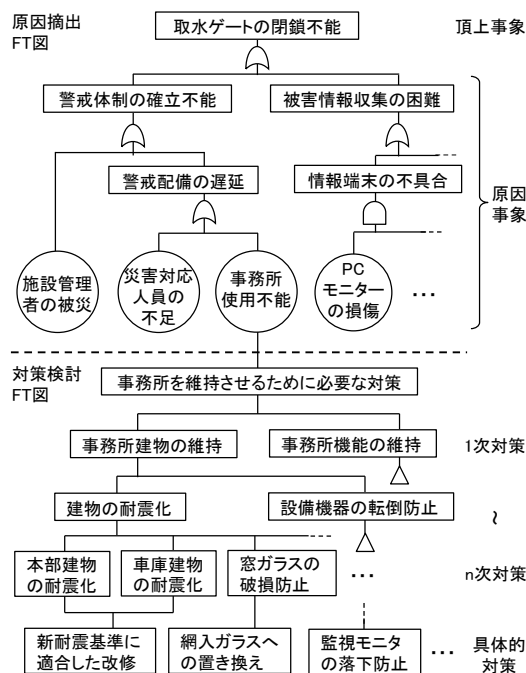


図-5 改良 FT 図の一例

てしまうおそれがある。このことが、FTA を用いて対策検討を行う際の課題である。

### 2.4 FTA の改良

以上に述べた課題に対する対応策として、筆者らは、FT 図作成において一定の原因事象が特定された段階で、対策の検討に切り替えるという方法（以下、「実用 FT 図」）を案出した。この方法によって、FT 図の肥大化を抑制し、対策を直接的に議論することで、その検討作業の効率化を図ることがねらいである。施設管理者が自らの手で FTA を実施できるような実用性を目指すものである。実用 FT 図の一例を図-5 に示す。この方法では、FT 図による頂上事象の発生原因の追究を、対策を実施する具体的な対象が明確になった時点で休止して、その後は各基本事象に対して対策の検討を進めていく。例えば、基本事象「事務所の使用不能」は、「事務所を維持させるために必要な対策は何か」という観点に切り替えて、対策案を挙げていく。そのとき、多種多様な対策の議論に漏れが生じないように、対策を具体化していく過程を樹形図の図に整理する。

以上に述べた実用 FT 図による方法を、H 幹線用水路の災害対応における大規模地震対策の検討において試行した。その結果、ねらい通りに、従来の FT 図により挙げられた対策とほぼ同等かそれ以上の対策を効率よく引き出すことができた。このことから、実用 FT 図による対策検討方法の実用性は高いことが示唆された。本報告では、以下、改良 FT 図における頂上事象から基本事象まで部分を「原因抽出 FT 図」、基本事象から具体的な対策までの部

分を「対策検討FT図」と呼ぶ。

## 2.5 対策検討FT図の具体例

H幹線用水路を対象に試行した実用FTAにおいて特定した基本事象「施設管理者の被災」に対する対策検討FT図を図-6に示す。基本事象「施設管理者の被災」に対する対策を、「施設管理者の被災による災害対応の遂行不能を防止するためには」という観点に切り替えて検討した。まずは一次対策として、「地震の揺れによる被災の防止対策」、「災害対応時の事故防止対策」、「代替要員の確保」、「日常の健康管理」が挙げられた。それらの各対策を自由に議論して、最終的に14の具体的な対策が得られた。その内容は、個人の地震対策から現場対応時における対策、人材育成や職場環境に関する対策まで多岐にわたった。この「施設管理者の被災」に対する対策検討では、従来のFT図により得られた対策よりも、むしろ多数の対策を挙げることができた。

また、他の基本事象についても、実用FT図によって得られた対策は、従来のFT図によって得られた対策とほぼ同数かつほぼ同内容であった。本研究におけるFTAを用いた対策検討の目標は、これまで認識不足であったリスクや想定していなかったリスクを洗い出して、そのリスクに対する対策を明らかにすることである。この目標達成にアプローチする方法として、実用FT図を用いた対策検討方法は、従来のFT図を用いた方法に比べて遜色のないものであることが、今回の調査結果によって示唆された。

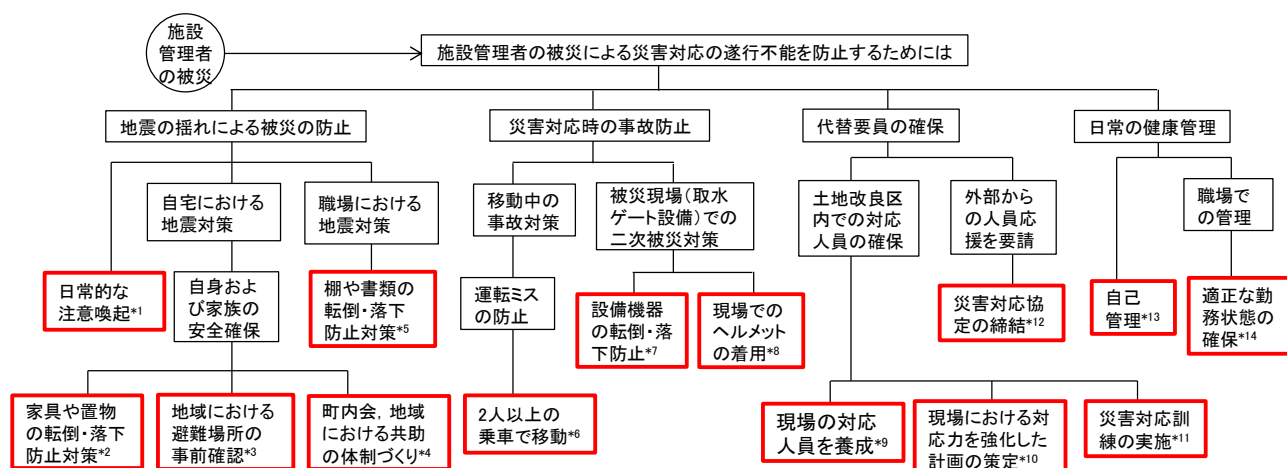
## 2.6 実用FT図による対策検討の妥当性の考察

実用FT図による対策検討が妥当であることの根拠を、人間の認識や行動に関する体系的な知見から考察するこ

とは、今後の課題である。しかし、実用FT図の妥当性は、次のように推察されよう。

我々は日常的にリスクと対策をほぼ同時に考えている。例えば、「明日は重要な試験日である」という場合、その試験をベストな状態で受験できるように、その前日から入念な対策を考えるであろう。すなわち、「寝坊しないように、目覚まし時計をセットする」、「わすれものをしないように、今晚のうちに持ち物の確認をする」、「万一の食あたりを避けるため、今晚は生ものの摂取を控える」などである。すなわち、我々は日常的にリスクと同時に対策を考えている。対策検討FT図における対策の検討作業は、この人間の思考過程を活かして、リスクと対策を一気に議論してしまおうとするものである。ただし、こうしたリスクと対策がほぼ同時に考えられるのは、対策を講じる対象が限定されていて、想定される具体的なリスクを次々と挙げることができる場合である。それが漠然として明確でないときには、むしろ、従来のFT図に従って、リスク事象の探索から始めるほうが得策である。例えば、「現場における事故の防止」を考える場合、まずは現場においてどのような事故が考えられるのか、それを具体化するところから始める必要があるであろう。

以上の考察から、FT図の肥大化と対策検討の非効率化を招いた原因は、FT図の作成が対策を検討できる段階であったにも関わらず、どこまでもFTAの定石に従おうとしたためであると考えられる。すなわち、頂上事象の発生原因を原因抽出FT図の作成によって探索し、その原因事象がある程度絞り込まれて具体化した時点で、対策検討FT図に切り替えるという対策の検討方法は、従来のFT図



<sup>1</sup>施設管理者個人の地震に対する警戒意識の喚起、<sup>2</sup>施設管理者の自宅における地震対策、<sup>3</sup>自宅のある地域における家族の避難場所などの確認、<sup>4</sup>地域における地震時の共助体制づくりへの参加（施設管理者自身は用水路の災害対応に向かうことを家族、地域コミュニティにおいて周知）、<sup>5</sup>職場における地震対策、<sup>6</sup>パニックやトラブルを想定して単独による自動車の運転をできる限り回避、<sup>7</sup>首工管理所およびゲート設備における地震対策、<sup>8</sup>対応時における施設管理者の安全確保、<sup>9</sup>現場の設備機器に熟知して、緊急的な災害対応を実施できる人員の養成、<sup>10</sup>災害現場において即座に急応対できる災害対応計画の策定、<sup>11</sup>新たに養成された災害対応人員と新たな災害対応計画に基づいた訓練の実施、<sup>12</sup>災害協定を締結して外部からも災害対応の応援者を要請、<sup>13</sup>自己の日常的な健康管理、<sup>14</sup>職場における職員の健康管理

図-6 基本事象「施設管理者の被災」の対策を検討する対策検討FT図

よる方法よりも、人間の日常的な思考過程を反映した方法であるといえよう。それゆえ、この実用 FT 図による対策検討方法は、現場の実務において、施設管理者が自らの手で災害対応計画を策定する際に、実用的かつ有効に活用されるものと期待できる。

### 3. 現行の災害対応計画の改善

#### 3.1 現行の災害対応計画の内容と評価

##### 3.1.1 既往研究の概要

筆者らは、大久保ら<sup>3)</sup>において、FTA を用いて、大規模地震発生直後における施設管理者の災害対応行動を阻害する原因の特定および対策の検討を行うとともに、その対策導入の効果を算定した。3.1 節では、その研究結果を概説する。

##### 3.1.2 解析対象とした緊急対応

###### (1) 対象施設

本研究の解析対象とした施設は、北海道の水田地域に灌漑用水を供給する S 幹線用水路である。S 幹線用水路は、延長約 29km、最大計画通水量 21m<sup>3</sup>/s を有するコンクリートフリーダム水路である。同用水路を管理する S 土地改良区では、十数名の職員（施設管理者）が勤務し、そのうちの 7 名が技術系の施設管理者である。さらに、その施設管理者のひとり（以下、「A 施設管理者」）が頭首工および幹線用水路各施設の現場（以下、単に「現場」）における実務的な施設管理を担当している。灌漑期における日常的な現場の監視および点検作業は、A 施設管理者の監督のもと数名の委託業者によって行われている。A 施設管理者は各種設備機器の配置や操作に熟知しており、災害時には、現場において緊急的な災害対応を実施する。

###### (2) 大規模地震災害時に想定される災害対応

S 土地改良区では、災害時における職員間の連絡網や関連機関への連絡先、技術部長など責任者からの指示系統などを示した災害対応体制が決められている。これは災害発生後、職員が土地改良区本部へ速やかに参集して、施設の点検や応急処置を適切に実施することを目的とした計画である。しかし、突発的に発生する地震災害の場合、万一にも水路構造物が被害を受けて決壊や溢水といった事態となれば、水路から流出する多量の水によって、農地のみならず近隣の住宅地や道路交通などに対しても甚大な二次災害が及ぶおそれがある。そこで、地震災害時には、まず、A 施設管理者が現場において取水ゲートの閉鎖に向けた対応行動を起こすことになっている。すなわち、実際には、図-7 に示すような 2 段階の災害対応過程が考えられている。第 1 段階の対応は、A 施設管理者によって地震発

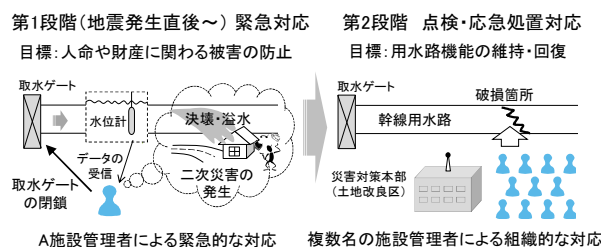


図-7 大規模地震災害時における災害対応過程

生直後から開始される。地震発生後、A 施設管理者は水管理システムにおける水位データを自身が所有する携帯端末によって確認する。そこで水位に異常があれば、直ちに頭首工に向かい取水ゲートを閉鎖して、二次災害の拡大を防止する（以下、「緊急対応」）。その後の第 2 段階の災害対応では、しだいに土地改良区本部へ参集してきた職員らによって、組織的に施設の点検や被災箇所での応急処置を行う（以下、「点検・応急処置対応」）。

###### (3) 緊急対応の計画策定の必要性

大規模地震災害時の災害対応を強化するための方策として、事業継続計画（BCP : Business Continuity Plan 以下、「BCP」）の策定が考えられる。BCP とは、大規模な災害時においても最重要業務の継続を図るため、それに必要な対策、方針、体制、手順を示した計画のことである。土地改良施設を対象にした BCP 策定マニュアル<sup>8)</sup>も作成されており、その啓発・普及が進められているところである。しかし、BCP が主に対象とするのは、点検・応急処置対応であり、緊急対応に相当する内容はほとんど含まれない。なぜならば、BCP は、やや事後の対応に重点がおかれた計画であり、組織的な対応を強化するための体制整備を主な目的とした内容となっているからである。そのため、BCP の策定とは別途に、緊急対応に関する具体的かつ実践的な行動計画を策定することが必要である。

そこで、大久保ら<sup>4)</sup>では、大規模地震発生直後における「緊急対応」を対象にして解析を行った。

##### 3.1.3 FT 図の作成と対策の検討

緊急対応の目標は、施設被災による二次災害の発生または拡大を防止するため、的確に取水ゲートを閉鎖することである。そこで、大久保ら<sup>5)</sup>では、A 施設管理者による緊急対応において、「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする FT 図の作成を行った。その FT 図の一部を図-8 に示す。頂上事象が発現する中間事象を連鎖的に挙げていき、根本的な原因となる基本事象を特定した。この基本事象に対する対策を講じれば、頂上事象の発生を抑制することができる。しかし、対策実施に投入できる費用や労力には制約がある。そのため、施設管理者が実際に実施できる対策

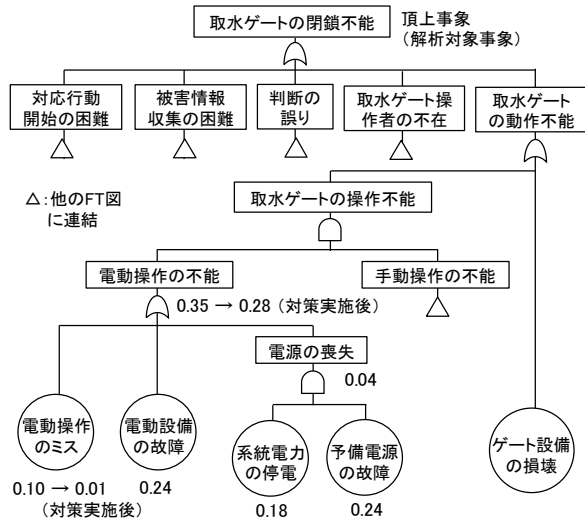


図-8 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とするFT図の実例の一部と震度6強における発生確率の算出例(大久保ら<sup>5)</sup>より作成)

表-2 施設管理において実施可能な対策(大久保ら<sup>5)</sup>より作成)

基本事象	対策	内容
電話機の使用不能 防災無線の使用不能 電動操作のミス 手動操作のミス	ヒューマンエラー対策	携帯電話や防災無線の日常管理における確認 ゲート操作方法の日常管理における確認 ゲート操作方法の簡略化 ゲート操作方法の見える化
監視モニターの損傷 観測機器の不具合	観測機器の破損防止対策	監視用パソコンなどの転倒防止対策 観測機器の転倒防止対策 観測機器の振動による破損に対する対策
水位データの誤表示 水位データの不足	水管理システムの強化	振動や故障による水位データの誤表示を確認 水位観測地点の妥当性の確認 水位計の増設

は限られたものになろう。そこで、各基本事象に対する対策の中から、現状の施設管理において実施可能な対策のみを抽出した。その対策を表-2に示す。設備機器の操作ミスなどに対するヒューマンエラー対策や設備機器の転倒防止対策などが挙げられた。

### 3.1.4 対策効果の定量評価

FTAでは、基本事象に発生確率を与えると、その上位の事象の発生確率を算出することができる。FT図における任意の事象の発生確率 $P$ は、その直下位の $N$ 個の事象の発生確率 $P_1, P_2, \dots, P_N$ を用いて、ANDゲートでは(1)式により、ORゲートでは(2)式により算出される。

$$P = \prod_{n=1}^N P_n \quad (1)$$

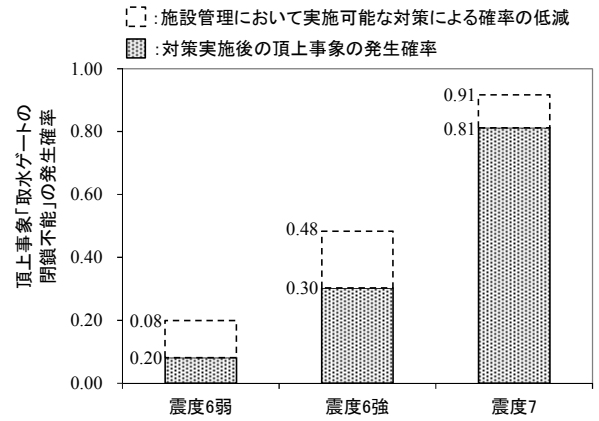


図-9 対策実施前後における各震度階級の頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率(大久保ら<sup>5)</sup>より作成)

$$P = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_n) \quad (2)$$

すなわち、各基本事象の発生確率を設定できれば、(1)式および(2)式を用いて、その上位事象の発生確率を順次計算していくことにより、最終的に頂上事象の発生確率を算出することができる。図-8のFT図中に記した数値は、震度6強における発生確率の算出例である。この場合、「電動操作の不能」の発生確率は0.35と計算できる。このとき、基本事象「電動操作のミス」に対する対策を実施して、その発生確率が対策実施前の1/10に低減できたと仮定した場合、「電動操作の不能」の発生確率は0.28に低減すると評価される。

このようなFTAの定量評価方法を用いて、対策実施前と対策実施後における頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率を算出した結果を図-9に示す。対策を実施していない現状では、震度6強以上の震災となれば、頂上事象の発生確率はおおむね0.5以上となり、取水ゲートを閉鎖できないおそれがあることが示された。しかし、対策を講じることによって、震度6強における頂上事象の発生確率は0.3となり、一定の対策効果が期待できることが分かった。しかし、震度7の震災となれば、対策実施による効果はほとんど得られないことが示唆された。

以上が大久保ら<sup>5)</sup>において示された主要な結果である。

## 3.2 緊急対応時の人員配置の最適化

### 3.2.1 既往の緊急対応みなおしの着眼点

大久保ら<sup>3)</sup>における結果から、現状の災害対応計画では、震度7の震災となれば、取水ゲートを閉鎖する緊急対応が実施できない確率が高い。そこで、本節では、緊急対応過



程を根本からみなおして、緊急対応時に取水ゲートが閉鎖不能になる確率を可能な限り低減することを目指す。そのために筆者らが着目したのは、震災直後に現場において緊急対応を行う施設管理者の増員である。

### 3.2.2 緊急対応を行う施設管理者の増員

現在、S 幹線水路の施設管理者が想定している災害対応では、地震発生後、真っ先に現場において緊急対応を行うのは、実質的に A 施設管理者のみである。それゆえ、A 施設管理者が被災して対応行動を起こすことが不能となれば、緊急対応の遂行は大幅に遅延することになる。そのため、A 施設管理者と同様な緊急対応を行うことができる施設管理者を養成することが必要である。3.1.2 項で述べたように、現行の災害対応計画では、地震発生後、土地改良区職員は土地改良区本部へ参集することになっている。しかし、図-10 に示すように、施設管理者の何人かを、土地改良区本部への参集ではなく、直接現場に向かうように割り当てることによって、A 施設管理者を含めた複数名の施設管理者らによる現場における管理体制（以下、「現場管理体制」）が構築できるものと考えられる。

また、複数名によって現場管理体制が構築可能であるとすれば、取水ゲート操作だけでなく、放流ゲート操作による減災効果も期待できる。そこで、各ゲートへの施設管理者の割り当て人数をどのようにすれば最も減災効果が高められるのか、という現場管理体制の最適化の問題が生じる。筆者らは、S 幹線水路を対象にして、大規模地震発生時に幹線水路からの放流量を最大化する各ゲートへの施設管理者の割り当て人数を試算した。ただし、ここでの放流量には、取水ゲート閉鎖により止められる取水量も含む。

### 3.2.3 方法

#### (1) 緊急対応時における人員配置の最適化手法

各ゲート設備への施設管理者の配置モデルを図-11 に示す。ゲート1を取水ゲートとし、ゲート2からゲート $m$ までを放流ゲートとする。 $n_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) は、 $k$  番目のゲートにおける緊急対応を割り当てられる施設管理者数である。 $P(n_k)$  はゲート $k$  の操作が実行（取水ゲートの閉鎖あるいは放流ゲートの開放）される確率である。 $Q_1$  は取水ゲート閉鎖による通水停止流量であり、 $Q_k$  ( $k=2 \sim m$ ) はゲート $k$  からの放流量である。震災時における幹線水路からの全放流量は、確率  $P(n_k)$  を用いて(3)式のように、放流量の期待値  $E$  で表される。本研究では、地震発生後、直接的に幹線水路のゲート設備に急行できる施設管理者の総数  $N$  を制約条件 ((4)式) として、放流量の期待値  $E$  を最大とする各ゲートへの施設管理者の配置数  $n_1, n_2, \dots$ ,

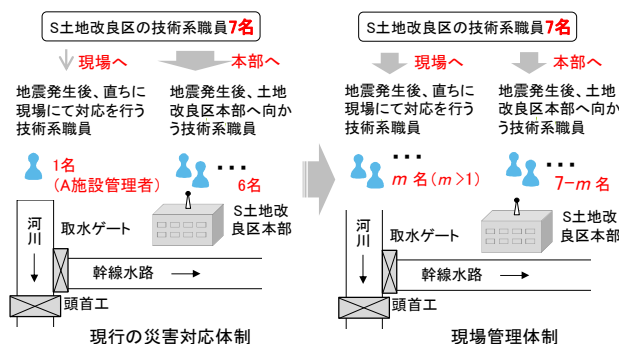


図-10 地震発生後の施設管理者の土地改良区本部と現場（ゲート設備など）への割り当て

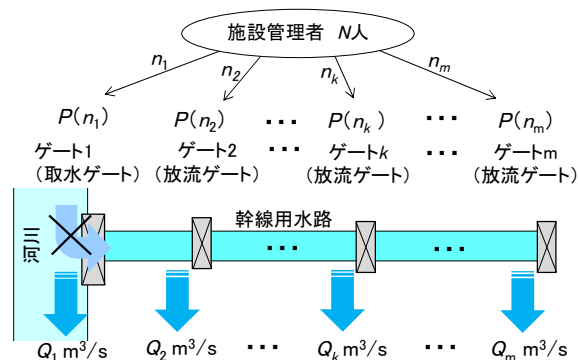


図-11 各ゲート設備への人員の配置モデル

$n_m$  を求める。

$$E = \sum_{k=1}^m P(n_k) \cdot Q_k \tag{3}$$

$$\sum_{k=1}^m n_k = N \tag{4}$$

#### (2) ゲート $k$ の操作可能確率 $P(n_k)$ の算出

$P(n_k)$  は、図-12 に示すような FT 図をもとにして求められる。図中における  $P_h$  は施設管理者がゲート設備に到着できない確率、 $P_d$  はゲート設備が動作不能になる確率である。「施設管理者の到着不能」の下位には、地震発生後のゲート操作を割り当てられた各施設管理者が到着不能となる事象が並列され、それらは上位の「施設管理者の到着不能」と AND ゲートで結合される。このことは、ゲート $k$  への割り当て人数  $n_k$  が多いほど、ゲート $k$  にだれも到着しないという確率、すなわち、「施設管理者の到着不能」が生じる確率が低下することを示す。ただし、本研究では、各施設管理者 1~ $N$  の到着不能となる確率はすべて等しく  $P_h$  であるとした。すなわち、「施設管理者のゲート $k$  設備への到着不能」の発生確率は、 $P_h$  の  $n_k$  乗と表される。一方、「ゲート $k$  の動作不能」とは、地震動によるゲート設

備の破損や不具合などである。そのため、「ゲート  $k$  の動作不能」の発生確率  $P_d$  は、施設管理者数  $n_k$  には関係しない。以上のことから、 $P(n_k)$  は「ゲート  $k$  の動作不能」が生じる確率の余事象となり、次の(5)式により求められる。

$$P(n_k) = 1 - \left[ P_h^{n_k} + P_d - P_h^{n_k} \cdot P_d \right] \quad (5)$$

(3) ゲート  $k$  における放流量  $Q_k$  の算定

$Q_1$  は最大計画通水量とした。 $Q_k$  ( $k=2\sim m$ ) は各放流工の施工図面に基づいて算定した。

(4) 最適解の算出

減災効果を最大化する各ゲート設備への人員配置数を決定する問題は、以上の(3)式、(4)式、(5)式により数理計画問題として定式化される。この問題形式は、例えば、ある資源を  $N$  個の工場に配分することを考えて、 $i$  番目の工場に  $x_i$  の資源を配分して  $f(x_i)$  の利得が得られるとき、総利得  $f(x_1)+f(x_2)+\dots+f(x_N)$  を最大化する資源の配分  $x_1, x_2, \dots, x_N$  ( $\sum x_i=M$ ) を決定するといった配分問題にあたる。この種の問題には、一般に動的計画法による解法が知られている<sup>9)</sup>。しかし、以上の例において総資源量  $M$  が離散的でごく小さければ、単純に資源配分のすべての組み合わせに対する総利得をしらみつぶしに調べるという方法が最も簡便である。ほとんどの土地改良区では、職員数の制約から現場における緊急対応可能な職員数が 10 名を上回ることは考えにくい。それゆえ、(4)式を満たすすべての組み合わせに対する(3)式の解を比較することで最適解を求める方法が、この場合、実用的で分かり易いものと考えられる。

3.2.4 試算事例および考察

(1) 試算対象とする幹線水路施設の概要

S幹線水路には、取水ゲートのほか6箇所の放流ゲートがある。取水ゲートの操作には電動と手動があるが、本研究では、その取水ゲート操作を電動のみで行うものとした。なぜならば、手動による操作には膨大な時間と労力を要することから、緊急的な対応にはなり得ないからである。取水ゲート設備は停電時に作動する予備電源を備えている。また、放流ゲートの開閉はすべて手動による機側操作のみである。

(2) ゲート操作不能のFT図

図-12のFT図に従って作成した、S幹線水路における「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とするFT図を図-13に、また、「放流ゲートの開放不能」を頂上事象とするFT図を図-14に示す。施設管理者は、大規模地震発生後、水管理システムなどによる現地の正確な被害情報を待たず、

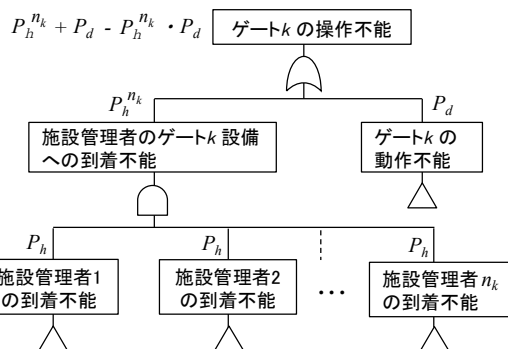


図-12 ゲート  $k$  の操作不能を頂上事象とする FT 図

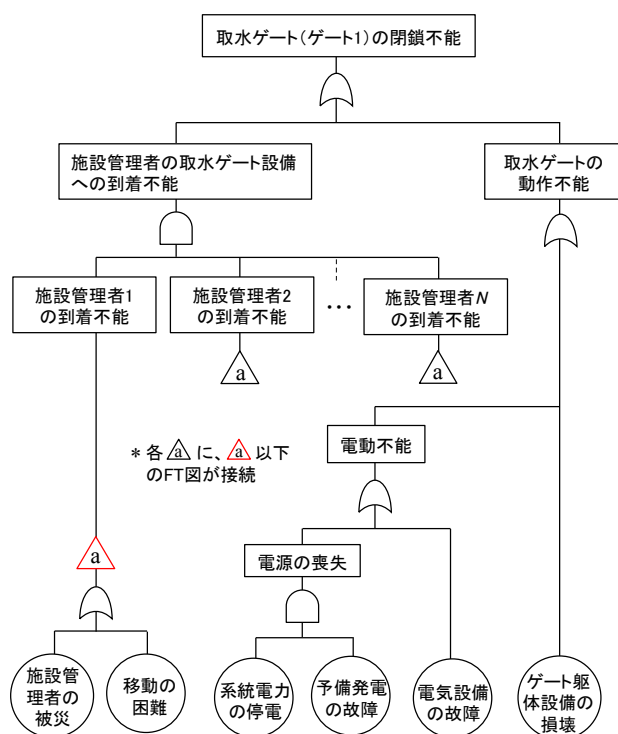


図-13 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする FT 図

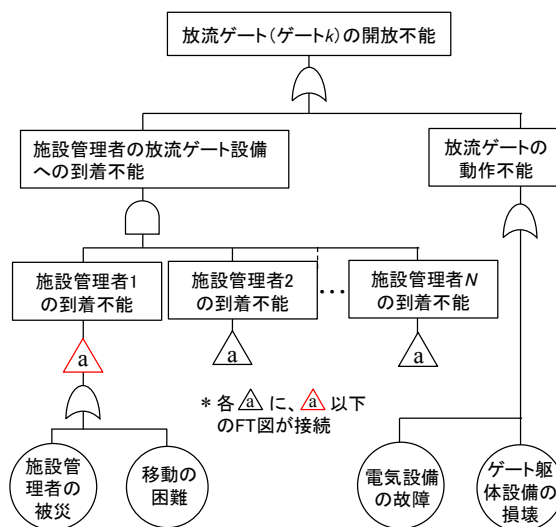


図-14 「放流ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする FT 図

表-3 基本事象の発生確率の設定

基本事象	震度7において想定される発生確率	基本事象の発生確率の設定根拠
施設管理者の被災	0.350	震災時における木造住宅の全壊率 <sup>10)</sup> を適用
移動の困難	0.150	震災時における道路のリンク閉塞率 <sup>10)</sup> より推定
動力設備の故障	0.100	震災時における鉄筋コンクリート建物の全壊率 <sup>10)</sup> を適用
系統電力の停電	0.900	系統電力の停電率は電柱折損率および建物の全壊率に比例するとして、震度6強における停電率18% <sup>11)</sup> と震度6強における木造住宅の全壊率 <sup>10)</sup> から、各震度階級の停電率を設定
予備電源の故障	0.100	震災時における鉄筋コンクリート建物の全壊率 <sup>10)</sup> を適用
電気設備の故障	0.400	建物の倒壊率より大きく、設備機器の転倒率より小さいとして、鉄筋コンクリート建物の倒壊率 <sup>10)</sup> と家具等の移動・転倒率 <sup>11)</sup> の平均値を適用
ゲート駆体設備の損壊	0.100	震災時における鉄筋コンクリート建物の全壊率 <sup>10)</sup> を適用

表-4 試算に用いたデータ (震度7の場合)

ゲート名	$P_h$	$P_d$	$Q_k$ m <sup>3</sup> /s
ゲート1(取水)	0.448	0.509	20
ゲート2(放流)	0.448	0.190	3
ゲート3(放流)	0.448	0.190	2
ゲート4(放流)	0.448	0.190	1.5
ゲート5(放流)	0.448	0.190	1
ゲート6(放流)	0.448	0.190	1
ゲート7(放流)	0.448	0.190	0.5

直ちに担当するゲート設備へ向かうものとした。なぜならば、現地の正確な被害情報待ちをしている間に適切な対応の実施時機を逸してしまうこともあり得るからである。そこで、本研究では、「施設管理者の到着不能」の原因となる基本事象として、「施設管理者の被災」と「移動手段的喪失」の2事象のみを挙げた。

(3) 試算に用いたデータの決定

図-13と図-14に記す基本事象の発生確率を表-3のように設定して、「施設管理者の到着不能」の発生確率 $P_h$ と「取水ゲートの動作不能」の発生確率 $P_d$ を求めた。ただし、表-3に挙げた値は震度7の震災時の例である。試算に用いた $P_h$ 、 $P_d$ および $Q_k$ を表-4に示す。

(4) 最適化の試算結果

表-4に示したデータを(3)式、(4)式、(5)式に代入して、最適解を求めた。S幹線水路を管理する土地改良区では、7名の技師のうち、本部にて対応する2名を除いた5名までが震災時に施設管理者として現場のゲート設備において対応可能である。そこで、施設管理者数を1人~5人までの5通りに仮定した。その各人数において最大となる放流量の期待値を図-15に示す。施設管理者総数 $N$ が1人または2人のときは、取水ゲートのみに対応行動を集中させることが最も効果的となった。このことは、施設被災時には直ちに取水ゲートを閉鎖する従来の対応行動の妥当性を示すものである。 $N$ が3人であれば、取水ゲートだけで

■ : ゲート1(取水ゲート)による放流量  
 ■ : ゲート2(放流ゲート)による放流量  
 ■ : ゲート3(放流ゲート)による放流量

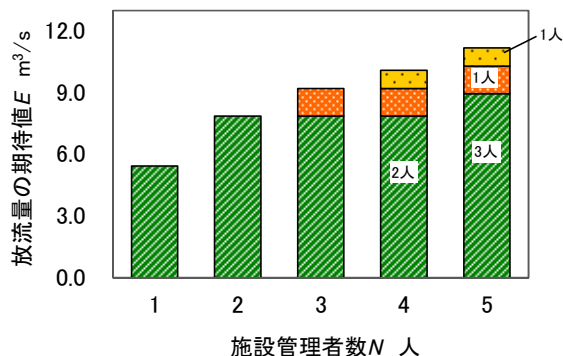


図-15 施設管理者数に対する放流量の期待値

なく、ゲート2の放流ゲートへも施設管理者を1人割り当てたほうが減災効果を高められるという結果となった。 $N$ が4人であれば、さらにゲート3へ人員を配置することで最も放流量が大きくなった。また、 $N$ を5人にできれば、取水ゲートへ3名、ゲート2とゲート3の放流ゲートへそれぞれ1名ずつ配置する体制が最適解として得られた。この場合 ( $N=5$ ) は、単独の施設管理者 ( $A$  施設管理者、 $N=1$ ) によって緊急対応を行う現行の場合よりも約2倍の減災効果が期待できることが示唆された。ただし、施設管理者数が増えるほど、1名増員に対する放流量の期待値の増加量が減少する。すなわち、現場へ割り当てる施設管理者を増員し続けることが、必ずしも適切であるとは限らない。このことから、現場の緊急対応への割り当て人数は、全体の土地改良区職員数と他の災害対応業務のバランスを考慮して決定する必要がある。

3.3 緊急対応時の意思決定方法の改善

3.3.1 現行の意思決定のみなおし

現行の災害対応では、水管理システムによって得られる被害情報をもとに、施設管理者は意思決定を行う。その意思決定における適切な判断を阻害する事象は、図-8のFT図において、「被害情報収集の困難」および「判断の誤り」に発する一連の中間事象および基本事象である。本節では、この現行の意思決定方法を根本からみなおして改善することで、意思決定におけるリスクの回避を目指す。そのため、まずは大規模地震災害時に想定される現行の意思決定方法の課題を明確にする。次に、その課題の解決策として新たな意思決定方法を提案し、その有効性を検討する。

3.3.2 現行の緊急対応における意思決定方法の課題

(1) 大規模地震時の不確実な状況下において想定される意思決定場面

長大な幹線水路は公共性が非常に高いため、その取水

ゲートを閉鎖するか否かの意思決定は、災害対応上の最重要課題である。3.1.2 項で述べた既往の意思決定方法が有効に機能するためには、水管理システムの水位データから得られた情報によって、幹線用水路における決壊や溢水などの二次災害発生の有無が確実に把握できなければならない。しかし、大規模地震災害は極めて強大で、不確実性の高い現象である。それゆえ、水管理システムにより被害状況を把握するという前提もまた不確実になるものと想定される。そのため、大規模地震災害時には、次のように、A 施設管理者の意思決定が困難になる場面が考えられる。

まず、A 施設管理者は水管理システムにより用水路内の水位を確認する。しかし、強大な地震動によって、水位観測設備や通信設備が破損して、その機能を喪失してしまうおそれがある。水管理システムが機能不全を起せば、それに頼る A 施設管理者は、幹線用水路に関する被害情報を得られないことになる。また、大規模地震災害時には、たとえ水管理システムにおける水位データが確認できたとしても、意思決定を行う当事者（この場合 A 施設管理者）の心理的な面において、次のような問題が生じることも考えられる。

気象庁の震度階級<sup>12)</sup>によれば、震災規模が震度 6 強以上であれば、A 施設管理者の周囲では、全壊する建物が現れ、さらに震度 7 となれば周囲のいたるところで甚大な被害が生じている事態となる。こうした被害状況を目の当たりにして、A 施設管理者は、たとえ水管理システムの水位データに異常がみられないからといって、「幹線用水路に被害はない」と即断できるものであろうか。おそらく、A 施設管理者は、その判断に躊躇することであろう。なぜならば、A 施設管理者の中で、水位データが正常値を示している、それがもはや幹線水路の安全性を保障するものがあるという確信が持てないからである。それゆえ、この場合、A 施設管理者は現行の意思決定方法に従って取水ゲートを閉鎖しないか、あるいは万一の被害発生に備えて念のため取水ゲートを閉鎖するか、両者の何れかを選択することに窮することになる。

しかし、いかに被害情報が不確実であったとしても、A 施設管理者はそこで確実な情報待ちをして、災害対応の遂行を停滞させてしまうわけにはいかない。それゆえ、A 施設管理者は何らかの判断基準をもって自らの対応行動を決定しなければならない。

## (2) 基幹的な灌漑用水路施設の災害対応に求められる意思決定

以上に述べた課題への解決策として、安全性を重視して、大規模地震発生時には（例えば、震度 5 強以上の地震発生

時には）、とにかく取水ゲートを閉鎖してしまうという考え方もあろう。しかし、幹線用水路が被害を受けて二次災害を引き起こす確率は極めて小さいと考えられる。それゆえ、被害がないにも関わらず取水ゲートを閉鎖してしまう、つまり、「空振り」になる確率が非常に高い。また、基幹的な灌漑用水路は公共性が非常に高いことから、その機能が停止した際、すなわち、取水ゲートを閉鎖して、それが「空振り」となった際の損失は決して小さくないものと考えられる。また、震災後における営農の速やかな復帰や被災地域の早期復旧を考慮すれば、結果的に「空振り」となる対応行動は、施設管理者としてもできる限り避けたいところである。それゆえ、大規模地震発生後にとにかく取水ゲートを閉鎖してしまうという対応は、必ずしも得策であるとはいえない。すなわち、この場合、震災時の被害状況に応じて、「取水ゲートを閉鎖しない」という選択もあり得るような意思決定方法が求められよう。

### 3.3.3 現場管理体制の構築を判断基準とした意思決定方法の提案

これまでの考察から、大規模地震災害時における現行の意思決定方法（以下、「意思決定方法 1」）には、次のような 3 つの課題がある。①大規模地震災害時には、判断基準となる被害状況の有無を確実に把握することは困難である。そのため、②二次災害が発生しているにも関わらず、「取水ゲートを閉鎖しない」と判断してしまうおそれがある。しかし、その一方で、③被害が発生していないのに取水ゲートを閉鎖してしまう事態、すなわち、「空振り」をしてしまうおそれがある。

こうした大規模地震災害時における意思決定上の課題を解消するための方策として、筆者らは、3.2.2 項で述べた現場管理体制が構築できるか否かを判断基準とした意思決定方法（以下、「意思決定方法 2」）を提案する。すなわち、現場管理体制が構築できれば、取水ゲートを閉鎖しない、現場管理体制が構築できなければ、取水ゲートを閉鎖する。ここでの現場管理体制とは、A 施設管理者を含む施設管理者が取水ゲート設備をはじめとする幹線用水路の各要所へ速やかに移動して、いつ何時、幹線用水路において二次災害が発生しても、即座にそれに対する対応、すなわち、取水ゲートの閉鎖や被害箇所の応急処置を実施できる体制である。現場管理体制のイメージを図-16 に示す。このような現場管理体制の構築が計画の中に入れば、取水ゲートを閉鎖するか否かの意思決定を行う主体は、A 施設管理者だけではなく取水ゲートにおける対応を割り当てられた施設管理者各々ということになる。大規模地震発生後、現場管理体制が支障なく構築できれば、施設管理者ら



自らが現場において用水路の安全を保障することになるので、取水ゲートを閉鎖せずに、(取水ゲートを閉鎖しないと判断して) そのまま幹線用水路の監視を継続する。しかし、図-17に示すように、地震発生後、施設管理者どうし連絡がとれない、施設管理者の何人かが被災して現場へ向かえない、水管理システムがダウンして水位の状況が把握できないなど、満足な現場管理体制が構築できなければ、万一の二次災害発生に対応できないことから、そのときは、取水ゲートへ急行できる施設管理者が「取水ゲートを閉鎖する」と判断して、その対応行動を開始する。この場合、施設管理者は、たとえ単独であっても、自らの判断で取水ゲートを閉鎖できるものとする。

この意思決定方法2に従えば、施設管理者の意思決定は図-18のようになる。水管理システムの水位データが確認できない状況は、それ自身が現場管理体制の重要部分の欠落であるので、直ちに取水ゲートを閉鎖する。水位データが確認できて、その水位に異常があれば即座に取水ゲートを閉鎖する。水位に異常がないときは、現場管理体制が構築できなければ、取水ゲートを閉鎖し、現場管理体制が構築できれば、取水ゲートを閉鎖しないとする。

以上のように、意思決定方法2では、安全性を確保した上で、「取水ゲートを閉鎖しない」という対応行動の選択が可能である。この場合、速やかに現場管理体制が構築できるのであれば、取水ゲートを閉鎖しないので、「空振り」にはならない。しかし、現場管理体制が構築できない場合は、取水ゲートを閉鎖するので、「空振り」となる場合もあり得る。ただし、「空振り」であったとしても、そもそも施設を管理できない状況では、通水を継続することはできないという考えもある。さらに、大規模地震発生後しばらくは余震の発生が懸念されることから、管理できない状態で通水したまま用水路を放置するわけにはいかないだろう。従って、現場管理体制が構築できない場合には、取水ゲートを閉鎖することが妥当であるといえる。

また、「現場管理体制が構築できない」という状況とは、「施設管理者の被災」、「電話連絡の不通」、「水位データの通信遮断」、「停電」などが起きた場合である。こうした被害の有無は、施設管理者が直接的に把握可能な事象である。その事象の有無を正確に把握することは、従来のように水管理システムの水位データによって、用水路のどこかで起こり得る被害の有無を把握することよりもはるかに容易である。それゆえ、施設管理者は、現場管理体制の構築の可否をほとんど迷うことなく判断することができる。

以上のことから、意思決定方法2に従えば、意思決定方

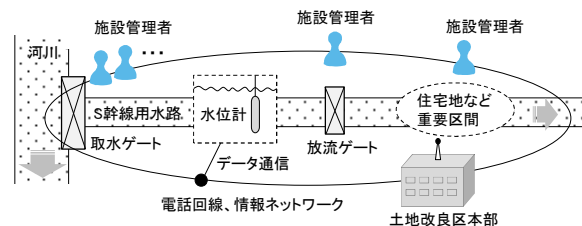


図-16 現場管理体制のイメージ

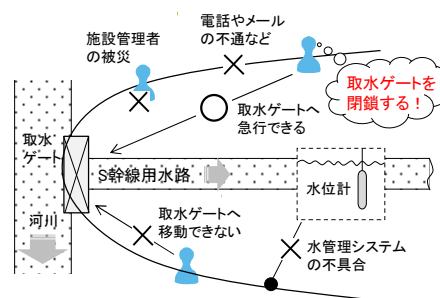


図-17 取水ゲートを閉鎖する意思決定場面の例

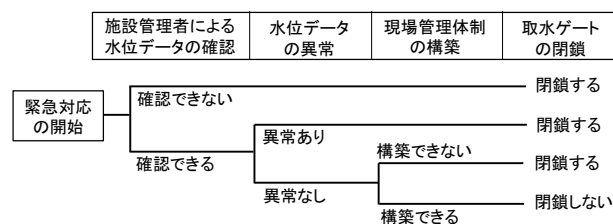


図-18 現場管理体制の構築を判断基準とした意思決定

法1における課題をおおむね解決することができる。

### 3.4 現行の災害対応計画の改善策の評価

S土地改良区では、地震発生直後における現地のゲート操作に5名の施設管理者を割り当て可能であり、その場合、図-19に示すように、取水ゲートへ3名、放流量が1番目と2番目に大きい放流ゲートへそれぞれ1名ずつ配置する体制が最適解として得られた。この結果に基づいて、地震発生後、直ちに3名の施設管理者が取水ゲートへ急行すると仮定して、「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率を試算した。取水ゲートの閉鎖は施設管理者が1名でも実施可能である。その1名の施設管理者が地震時に被災して取水ゲートまで到達できない確率を $P$ とすれば、3名の施設管理者が誰も取水ゲートに到達できない確率は $P^3$ となる。

また、既往の災害対応では、水管理システムによって被害情報を得て意思決定を行う。しかし、現場管理体制の構築を判断基準とすることで、各施設管理者は水管理システムが被害を受けることやそのために判断を誤ることに関

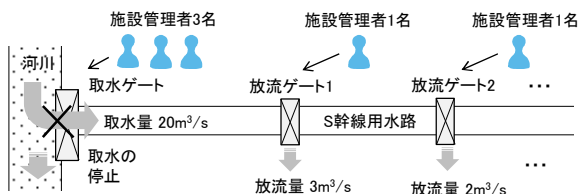


図-19 各ゲートへの人員の配置計画の事例 (S 幹線水路施設の場合)

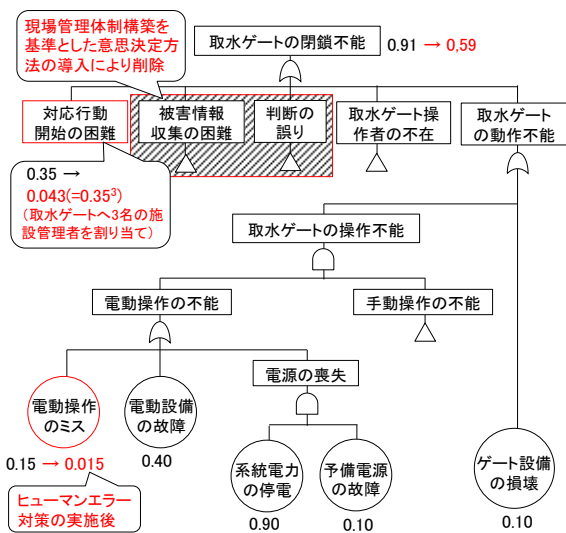


図-20 施設管理者の増員、意思決定方法の改善および対策の実施箇所を記した FT 図

わらず意思決定を行うことができる。それゆえ、FT 図から「被害情報収集の困難」および「判断の誤り」に関する事象を除外した。

図-8 に示した FT 図に、以上に述べた修正を記載した FT 図を図-20 に示す。各事象に添えた数字は、震度 6 強における発生確率であり、黒字は当初の無対策における発生確率、赤字は 3.1.3 項で述べた対策および本節で述べた改善策実施後の発生確率である。この FT 図に基づいて、各震度階級における頂上事象の発生確率を試算した結果を図-21 に示す。震度 6 強における頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率は約 0.2 となり、現行の発生確率から約 60%の低減、震度 7 におけるそれは約 0.6 となり、現行の発生確率から約 35%の低減となった。改善策および対策の実施によって、一定の減災効果が期待できることが分かった。また、この試算は取水ゲートの閉鎖のみを対象としたものであるため、実際には、放流ゲートの開放による効果はこれに加わり、全体の減災効果は、さらに向上することになる。

### 3.5 緊急対応の強化対策の提案

本章では、S 幹線水路施設を対象として、震災時にお

緊急対応を行う施設管理者の増員、意思決定過程の改善および施設管理において実施可能な対策による確率の低減  
 対策実施後の頂上事象の発生確率

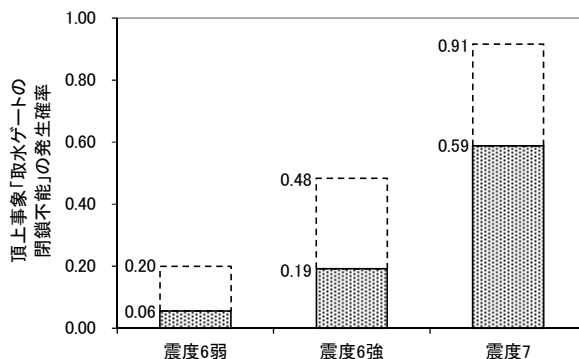


図-21 緊急対応を行う施設管理者の増員、意思決定方法の改善、対策の実施前後における各震度階級の頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率

ける施設管理者の緊急対応行動の阻害要因に対する対策や現地において緊急対応を行う施設管理者の増員、水管理システムに頼る現行の意思決定方法の改善を検討した。その結果、それら対策の実施によって、一定の減災効果が期待できることを確認した。このことにより、本研究では、緊急対応の強化対策として、表-2 に示す対策の実施と図-18 に示す意思決定方法の改善、図-19 に例示する現場管理体制の構築を提案する。

しかし、震度 7 の震災時には、以上のような緊急対応の強化対策の効果に限界があることも示唆された。震度 7 の震災では、緊急対応が遂行不能となり、ある程度の被害発生を許容せざるを得ない。そのときにこそ、BCP の策定が必要になる。被害が生じてしまった場合を想定して、何を優先して対処するのか明確に検討して、早期復旧に向けた事後処理の準備をしておく必要がある。

## 4. 大雨災害時のダム管理における防災行動計画に関する考察

### 4.1 研究の目的

平成 28 年 8 月の台風第 10 号の北海道接近に伴い発生した大雨災害（以下、「台風第 10 号大雨災害」）では、農業水利施設や農地が甚大な被害を受けた。寒地土木研究所と公益社団法人農業農村工学会北海道支部は、合同で十勝地域の農業水利施設を主な対象として被害調査を実施した。その被害は、農業用水路の法面がほぼ全沿線にわたり破壊されて、場所によっては隣接する農地の土壌が地表面から深さ 1m 以上も侵食されて消失するといった状況であった<sup>13)</sup>。

こうした大規模な豪雨災害の発生を完全に防止するこ

とは困難である。しかし、その被害から人命や個人の財産を第一に守るための災害対応は確実に実施されなければならない。実際に台風第10号大雨災害時において、防災担当者や施設管理者は災害対応に奔走していたものと考えられる。しかし、そうした災害対応がどのような計画によるものであり、どのように実施されたのか、その実態を把握して有効性を評価する試みや課題解決に向けた方策を探究する試みはほとんど行われていない。そこで、本研究では、台風第10号大雨災害において実際に行われたダム管理の実態を検証して、その評価および課題の抽出を行った。さらに、今後の対応策として防災行動計画（タイムライン）の観点からダム管理をみなおし、防災行動計画策定の有効性を示した。

## 4.2 大雨時におけるダム管理の評価

### 4.2.1 台風第10号大雨災害時のダム管理の検証

#### (1) ダム管理者への聞き取り調査

本研究では、北海道の畑作地帯に灌漑用水を供給する農業用ダム（以下、「Aダム」）を管理するB町役場職員のダム主任技術者から、台風第10号大雨災害時におけるダム管理について聞き取りを行った。その結果をもとに、大雨災害に備えて計画されている現行のダム管理の流れ、および北海道大雨災害時において実際に行われたダム管理の経過について、次のとおり整理した。

#### (2) 大雨災害時のダム管理の流れ

Aダムの管理は、ダム管理主任技術者1名とその補助者4名の計5名（以下、「ダム管理者」）で行われている。通常時、ダム管理者はダム中央管理センターに勤務している。また、ダムサイトにあるダム管理棟には、ダム堤体の管理を委託された2名の業者（以下、「委託管理者」）が8:00から17:00まで勤務し、ダム管理主任技術者の指示のもとにダム管理の実務補助を行っている。通常時、ダム管理者は、ダム中央管理センターにおいて、ダム管理棟から送信されるAダムの流入量や水位、ダム地点の降水量などのデータ（以下、「ダムデータ」）を監視している（図-22）。そこで、地震や大雨などの異常事態となれば、直ちにダム管理者はダムサイトへ移動して、ダムを直接点検する。

大雨時におけるダム管理者の災害対応フローを図-23に示す。大雨警報が発生された場合、ダム管理主任技術者は警戒体制をとり、ダムデータにおけるダムへの流入量とダム地点の降水量、および気象庁が発表する降水量に注視する。そして、そのいずれかの値がAダムの管理規程に定められた基準を超えれば、ダム管理者のうち2名がダムサイトへ急行して、ダム管理棟においてダム堤体を直接監視する。

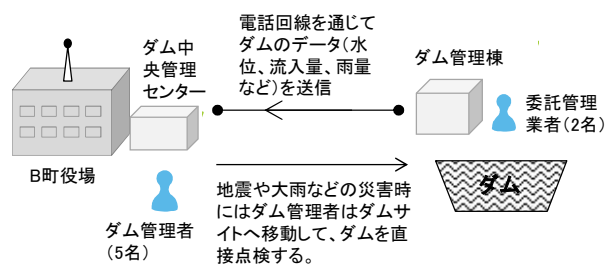


図-22 通常時のダム管理

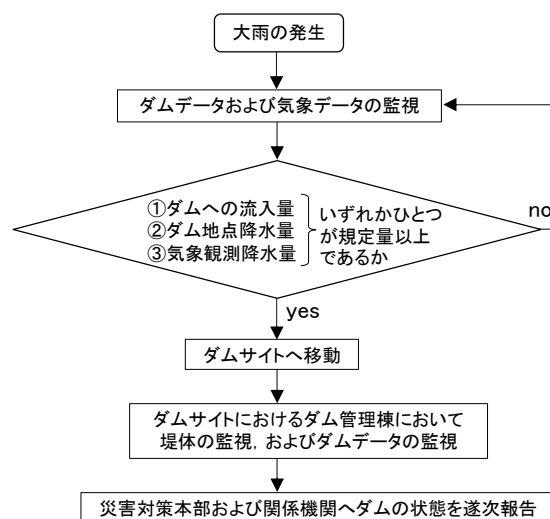


図-23 大雨時におけるダム管理者の対応行動

#### (3) 台風第10号大雨災害時におけるダム管理の経過

台風第10号による大雨時およびその前後期間（平成28年8月28日から9月2日まで）におけるAダムへの流入量、ダムサイトにおける時間雨量、およびダム管理者の対応行動を図-24に示す。29日の正午頃から時間雨量が増加して、それに伴いダムへの流入量も徐々に増加した。30日の6時にダム流入量が基準の流入量をこえたことから、ダム管理者2名はダムサイトに向けて移動した。ダム管理者は30日午前にはダム堤体の点検および確認を行った。そして、その日の午後には、下流河川の氾濫によって農業用水路が被災したため、ダムサイトを一時離れてその対応を行った。30日の夜（21:00～22:00頃）に再度ダムサイトへ向かったものの、ダムサイトへ向かう山中の管理用道路が土砂崩れのため通行不能となり、ダム管理者はダムサイトへ行くことを断念せざるをえなかった。このとき、ダムサイトには2名の委託管理者が在勤しており、ダムサイトにおける直接監視は委託管理者が行い、その結果をダム管理者へ報告することとした。その後、降雨量は急増して、30日23時から31日1時にかけてダムへの流入量は最大となった。この最大の流入量は設計洪水量のほぼ90%に達した。さらにその夜半には、ダムサイトにおけるダム管理



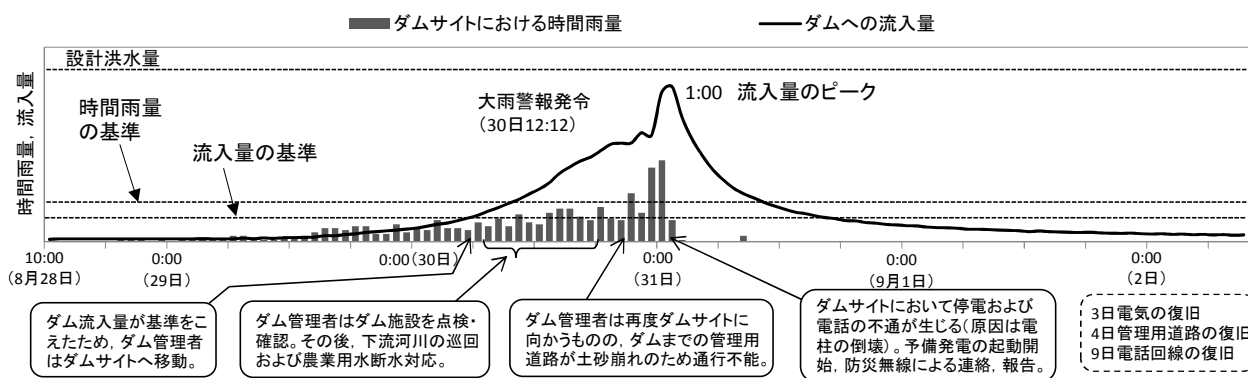


図-24 北海道大雨災害時におけるダム管理の経過

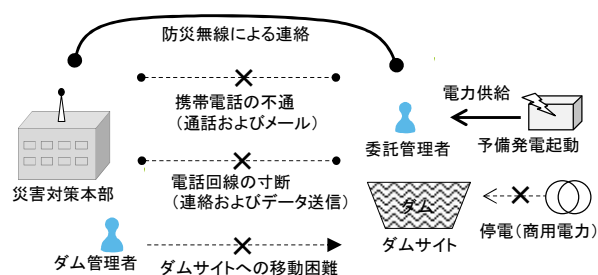


図-25 北海道大雨災害時におけるダム管理の状態

棟の停電および電話の不通が起こった。その原因はダムへつながる電線および電話回線が電柱の倒壊により寸断されたためであった。即座に委託管理者は予備発電を起動してダムサイトにおける電力を確保した。この時点から、ダムサイトの委託管理者とダム管理者の連絡は防災無線のみを通じて行われることになった。その後、幸いにも降雨は収まり、ダムへの流入量は急速に減少していった。商用電力の復旧は9月3日、管理用道路の復旧は9月4日、電話回線の復旧は9月9日となった。

#### 4.2.2 大雨災害時におけるダム管理体制の評価

以上のダム管理の経過にみられるように、Aダムのダム管理が台風第10号大雨災害時に順調に実施されたとはいえない。図-25に示すように、ダム管理者はダムサイトへ移動できず、ダムサイトとの連絡は最終的に防災無線のみとなり、電力は予備発電を起動することになった。しかし、Aダムのダム管理が途絶えることなく継続的に実施されたことは、バックアップ機能を備えた現行ダム管理体制が功を奏したためであると評価するべきであろう。すなわち、ダム管理者、電話通信、商用電力の代替として委託管理者、防災無線、予備発電がそれぞれの確に機能したことで、極めて甚大な大雨災害時においてもダム管理を継続的に実施することができたものと考えられる。このことは、Aダムにおける現行のダム管理体制が有効であることを示すものである。

しかしながら、ダム管理の状態をできる限り健全に行えるように対策を強化する努力は今後も必要である。そこで、本研究では、Aダムの管理体制および災害対応をさらに強化する方策を明らかにするため、FTAを用いて、大雨災害時におけるダム管理者の対応行動を阻害する原因事象を特定して、その原因事象の発生を低減あるいは回避する対策を検討した。

### 4.3 大雨災害時におけるダム管理の強化対策と防災行動計画に関する考察

#### 4.3.1 ダム管理の遂行を阻害する原因特定と対策検討

「ダム管理の遂行不能」を頂上事象として展開したFT図を図-26に示す。ダム管理が大雨災害時の被害によって遂行不能となる原因事象を挙げていき、23の基本事象を特定した。これらの基本事象に対して適切な対策を施せば、頂上事象の発生確率を低減することができる。筆者らは、まず「基本事象の発生を低減する」という観点から考えられる対策（以下、「対策1」）を検討した。次に、大雨災害の発生は、天気予報によって予測できる場合が多いことから、「大雨災害が事前に予測される」という前提条件のもと、「基本事象の発生を回避する」という観点から考えられる対策（以下、「対策2」）を検討した。

対策1および対策2の検討結果を表-5に示す。まず、対策が同種となる基本事象をまとめて整理した上で、現状においてダム管理者が実施可能な対策と社会インフラなどの対策が中心となるためダム管理者単独による対策の実施は困難である対策（表-5中の網掛け部分）に仕分けた。対策1では、「操作方法の忘却」や「燃料切れ」など単純ミスに対する「ヒューマンエラー対策」や設備機器の「定期的な点検」などが、ダム管理者が実施可能な対策として考えられる。対策2の場合では、台風予報などに基づいて対応の準備が早期に可能である。すなわち、ダム管理者は、道路の不通で車両が走行不能になる事態を回避するため、大雨災害の発生前にダムサイトへの移動を完了する。



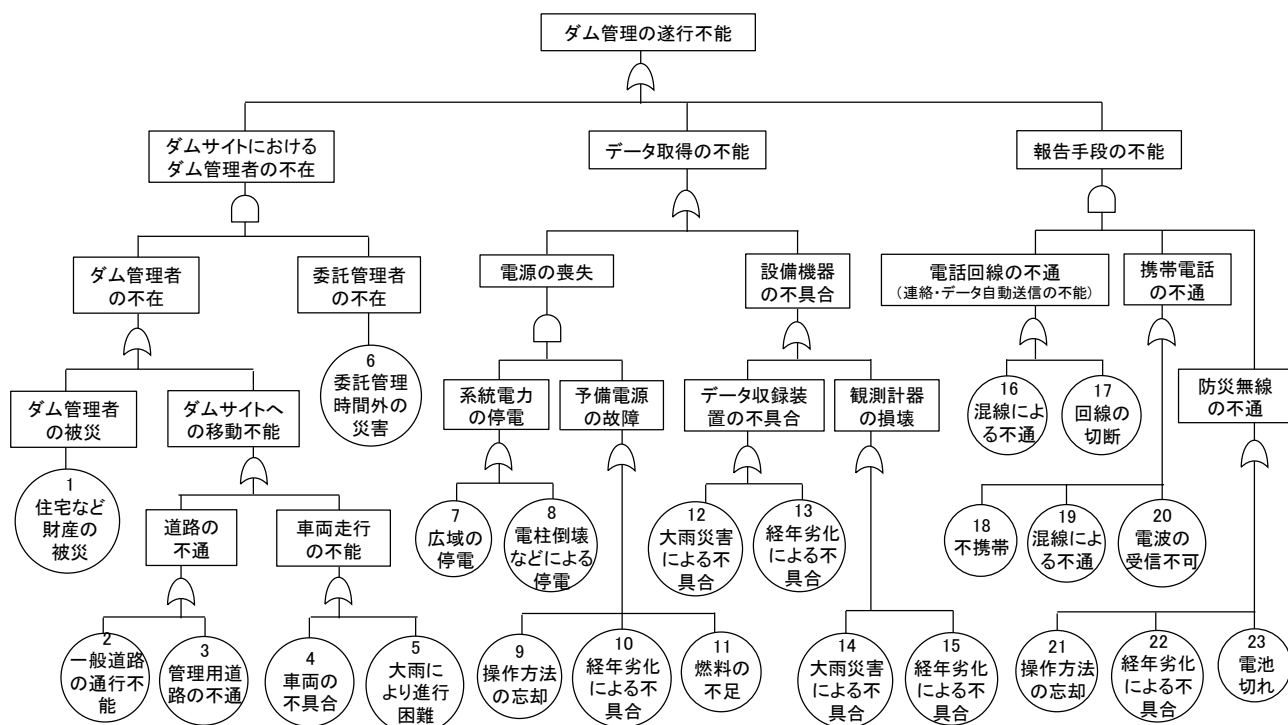


図-26 「ダム管理の遂行不能」を頂上事象とするFT図

表-5 基本事象に対する対策

No.	基本事象	対策1	対策2 (防災行動計画)
9, 21	操作方法の忘却		
11	燃料の不足	ヒューマンエラー対策	
18	不携帯		大雨による災害発生前に確認・点検
23	電池切れ		
4	車両の不具合		
10, 13, 15, 22	経年劣化などによる不具合	定期的な点検	
2	一般道路の通行不能	道路の防災対策の強化	大雨による災害発生前にダムサイトへ移動完了
3	管理用道路の不通		
5	大雨による進行困難	(対策困難)	
6	委託管理時間外の災害発生		
1	住宅など重要財産の被災	住宅や社会インフラの防災対策の強化	住宅や社会インフラの防災対策の強化
7	広域の停電		
8	電柱倒壊などによる停電		
16, 19	混線による不通		
17	回線の切断		
20	電波受信不可		
12, 14	大雨災害による不具合	(対策困難)	(対策困難)

そして、本格的な大雨の発生前にダム管理に必要な設備機器の点検や動作確認を行う。また、それらの作業に時間的かつ精神的な余裕をもってあたることにより、ヒューマンエラーの発生を回避することもできよう。

しかし、対策2が対策1をカバーするものではない。なぜならば、対策1と対策2の具体的な対策内容が異なるからである。例えば、対策1では緊急時のパニック状態など厳しい状況を想定した対策を含むが、対策2はそのパニック状態を回避するため早めの対応を行うものである。そのため、ダム管理者は対策1と対策2のいずれの場合も検討して、その双方の具体的な対策を実施することが望まれる。

#### 4.3.2 防災行動計画の観点から想定される大雨災害時におけるダム管理体制

表-5に示す対策2のとおり、大雨による災害のおそれを予測して早期に対応行動を行うことができれば、FT図によって挙げられた23の基本事象のうち14の基本事象の発生を回避することができる。このことから、事前の対応行動に重点をおく防災行動計画がダム管理において非常に有効であるものと示唆される。防災行動計画は、近年注目される新しい水害対策である。現在、国や自治体を中心にその普及が進められている。防災行動計画はタイムラインとも呼ばれ、国土交通省<sup>19)</sup>によれば、その定義は「災害の発生を前提に、防災関係機関が連携して災害時に想定される状況を共有した上で、「いつ」、「誰が」、「何を」を時間軸に沿って整理した計画」とされる。

表-6 防災行動計画の観点から想定される大雨災害時のダム管理

時間	ダム中央管理センター	ダム管理棟(ダムサイト)
台風接近 降雨発生	台風・大雨情報に注視 ダムデータを監視	委託管理者による ダムの監視
○時間前	車両の点検	
○時間前	ダム管理者(2名)の ダムサイトへの出発	移動 → ダム管理者の到着
○時間前	ダムデータ データ取得の点検	ダムデータ 観測計器の点検 データ送信の点検
○時間前	防災無線 設備機器の点検 操作方法、通話の確認	防災無線 設備機器の点検 操作方法、通話の確認
○時間前		予備発電機 操作方法の確認 設備機器の点検 燃料の確認
○時間前	報告書の作成 災害対策本部ほか 各関係機関へ報告	ダムの監視 データの送信 ダムの状況報告
ゼロ・アワー (大雨発生)		
○時間後	⋮	⋮

本研究では、FTA を用いて、A ダムの防災行動計画における「何をやる」に該当する対応行動を明らかにした。その結果に基づけば、防災行動計画の観点から、表-6 に示すような大雨災害時のダム管理が考えられる。まず、台風の接近に伴い災害対応体制が発動される。ダム管理者は台風や大雨の情報、ダムデータに注視するとともに、ダムサイトへ移動するための車両の点検・整備を行う。そして、ダム管理者は甚大な被害が起こる前の段階でダムサイトへ移動する。ダムサイトに到着したダム管理者は、堤体監視に必要な準備やダムデータを取得するための観測機器の点検およびデータ送信の確認を行う。また、万一の被災時に必要な防災無線や予備発電機の点検や動作確認を行う。このような事前の対応行動をすべて完了して、台風や大雨災害のピークに備える。

こうした早めの対応行動によって、災害時のダム管理における多くのリスクを回避することができよう。しかし、さらに実践的な防災行動計画とするためには、各対応行動を実施する具体的な時間を設定することが重要である。防災行動計画では、一般に主要な災害の発生時点を「ゼロ・アワー」と定めて、そこから時間を遡って個々の対応行動を実施する時刻（○hour, ○時間前, ○日前など）を設定する。このような対応行動の実施時間を記す防災行動計画は、ダム管理者が的確に災害対応を遂行していくための

基本的な指針となるとともに、その対応行動に漏れがないかを確認するためのチェックリストとして用いられる。

また、防災行動計画では、一般に台風の到来などを「ゼロ・アワー」として定める。しかし、台風第10号による大雨は正確に予測されていたものではなかった。また、4.1.2 で述べたとおり、ダム管理者はダムサイトへ向かったにも関わらず、そのときすでにダムサイトに至る管理用道路が土砂崩れのため通行不能になっていた。こうした台風第10号大雨災害の経験と教訓、地域特有の気象と災害過程の分析を踏まえて、防災行動計画における「ゼロ・アワー」の設定やダム管理者の対応行動の判断基準およびタイミング（時刻）を決定することが、今後の課題である。

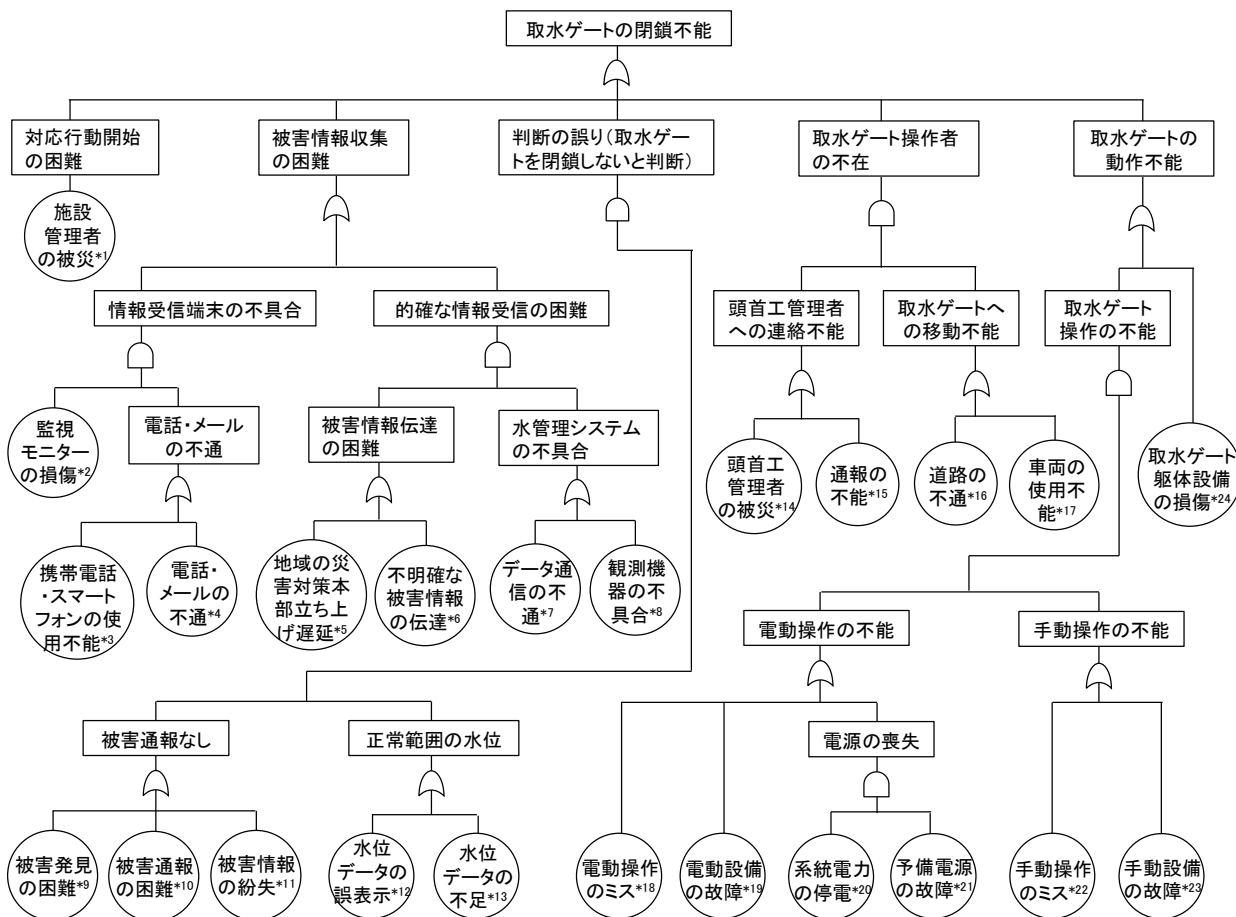
## 5. FTA を用いた災害対策検討方法の提案と実証

### 5.1 実用 FTA の提案

#### 5.1.1 実用 FTA の課題と解決策

2章、3章および4章では、FTA を用いて、実際の農業水利施設管理における大規模地震対策を検討した。その結果、FTA は、農業水利施設の災害対応力強化を図るための対策検討方法として有効な方法であることが実証された。しかし、2章で述べたように、FTA の手順に従えば、FT 図は著しく肥大化してしまう場合がある。その肥大化した FT 図は、対策検討の作業効率を低下させる。このことが、現場の施設管理者が自らの手で FTA を用いて対策を検討する際の課題であった。この課題の解決策として、筆者らは、FT 図作成において一定の具体的な原因事象が特定された段階で、それを基本事象とし、対策の検討に切り替えるという実用 FTA を提案した<sup>15)</sup>。平成29年度の調査では、実用 FTA を用いた対策検討を、実際の施設管理者の協力を得て試行的に実施して、実用 FTA を用いて従来の FTA と同程度の対策を挙げることができることを確認した。しかし、実際に施設管理者が実務において対策検討を行う際に、FT 図（原因抽出 FT 図）を白紙から作成することのハードルの高さや原因抽出 FT 図から対策検討 FTA への切り替えのタイミングをどのように考えればよいかなどの課題が指摘された。

頭首工と開水路からなる水路システムでは、地震発生後、水路に被害が生じれば直ちに取水ゲートを閉鎖するという災害対応が一般的である。そこで、筆者らは、これまでの研究成果をもとに、標準的な原因抽出 FT 図のモデル(以下、「標準モデル」)を作成して、その標準モデルを実用 FTA における原因抽出 FT 図作成のガイドラインとすることを提案した<sup>16)</sup>。この提案は、対象施設の特徴や管理方法に応じて標準モデルを改良することで、施設管理者が自らの手



\*1施設管理者本人、家族、自宅、近隣の被災（自助、共助）、\*2データ監視用パソコンの転倒などによる損傷、\*3携帯電話の充電切れや電話機の不携帯などによる不通、\*4固定電話および携帯電話の回線の切断および混雑などによる不通、\*5災害対策拠点となる本部庁舎および事務所の倒壊、\*6被害通報が不明確で状況が把握不能、\*7水管理システムにおける水位データの通信不能、\*8地震動による現地の観測機器の損傷、\*9夜間や人気が少ない場所における被害発生など、\*10被害発見者が被災していることによる被害通報の困難、\*11震災時の混乱による被害情報の紛失、\*12水位観測機器の故障により誤表示される状況、\*13被害の有無を的確に捉えるためには水位観測地点数が不足している状況、\*14頭首工管理者およびその家族などの被災、\*15施設管理者と頭首工管理者の連絡が不能、\*16頭首工までの道路の不通、\*17車庫の倒壊、車両の不足、\*18電動操作手順の忘却や操作のミス、\*19地震動による電動設備の故障、\*20系統電力の停電、\*21予備電源設備の故障、\*22電動操作手順の忘却や操作のミス、\*23地震動による手動設備の故障、\*24取水ゲートの躯体設備の損傷

図-27 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とする原因抽出 FT 図

で原因抽出 FT 図を容易に作成することを意図したものである。標準モデルに基づく原因抽出 FT 図の作成によって、施設管理者による FTA 実施のハードルが大幅に低減できると考えられる。

5.1.2 実用 FTA の流れ

頭首工と開水路からなる水路システムにおける地震発生直後の災害対応を対象とした原因抽出 FT 図の標準モデルを図-27 に示す。頂上事象は、2 章で述べたとおり、「取水ゲートの閉鎖不能」である。その下位の事象には、各災害対応過程が遂行不能となる事象が記載される。概ね 2 段階から 4 段階の中間事象を経たところで基本事象としている。これらの基本事象は、筆者らによる既往の調査において、具体的な対策検討が実施可能（対策検討 FTA に移行可能）であると判断されたものである。この標準モデル利用を含めた実用 FTA の流れを図-28 に示す。施設管理者は、先ず、検討対象とする水路システムの特徴や施設管

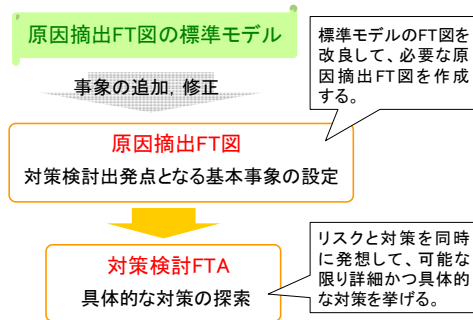


図-28 実用 FTA の流れ

理の状況に応じて、標準モデルに不足の事象があれば、それを標準モデルに追加する、あるいは標準モデルに不必要な事象があれば、それを標準モデルから除外するなどして、検討対象に見合った原因抽出 FT 図を作成する。次に、その原因抽出 FTA の各基本事象に対して対策の検討を行う。施設管理者らは対策を自由に発想して可能な限り挙げて

いく。この場合は、ひとつの基本事象に対して多数の対策が挙げられることになる。そのため、対策検討の議論が煩雑化しないように、対策を具体化していく過程を樹形状の図（対策検討FT図）に整理しながら検討を進める。

## 5.2 実用FTAによる対策検討の実施例

### 5.2.1 検討対象

実用FTAの有効性を検証するため、施設管理者を主体とした実用FTAによる地震対策の検討作業を実施した。検討対象は、北海道の水田地帯にあるS幹線水路における地震発生直後の災害対応である。S幹線水路の規模は、延長約20km、最大通水量約21m<sup>3</sup>/sである。

### 5.2.2 原因抽出FT図の作成

施設管理者は、標準モデルを用いて、S幹線水路の震災時災害対応において起こり得る被害リスクを検討した。その結果、施設管理者は、標準モデルの「手動操作不能」の原因事象に、基本事象「手動操作の人員不足」を追加する必要がある（図-28）という結論を得た。

S幹線水路では、手動による取水ゲートの開閉は可能であるものの、扉体の自重で閉鎖するような仕組みではない。そのため、手動による取水ゲートの閉鎖には非常に多くの時間と労力を要するので、施設管理者がひとりで取水ゲートを手動操作することは非常に困難である。それゆえ、緊急時の手動操作には作業人員の不足が懸念されることから、標準モデルに「手動操作の人員不足」を基本事象として追加した。

### 5.2.3 対策検討FTAの例

原因抽出FT図の各基本事象に対して対策を検討する。「手動操作の不能」の原因事象（基本事象）である「手動操作のミス」、「手動設備の故障」、「手動操作人員の不足」に対して、施設管理者が対策を検討した結果を、それぞれ図-29、図-30、図-31に示す。これらの対策検討FT図の作成過程は、次のとおりである。

最初に、施設管理者は各基本事象に関して想起される対策（2.6節に記したとおり実際に想起されるのはリスクと対策のセット）をできるだけ多く挙げた。その対策が出尽くしたところで、それらの対策を分類して対策検討FT図を作成した。図-29に記す「手動操作のミス」の場合では、「誤操作の防止」、「操作方法の忘却防止」、「安全な操作環境の確保」に対策を分類した。さらに、その対策検討FT図をみながら、再度対策を挙げていき、それらを対策検討FT図に追加した。そうして挙げられた対策において、同様な対策はひとつにまとめ、場合分けが必要な対策は分離するなど整理して、最終的な対策検討FT図を作成した。

今回実施した実用FTAでは、過年度にS幹線水路を

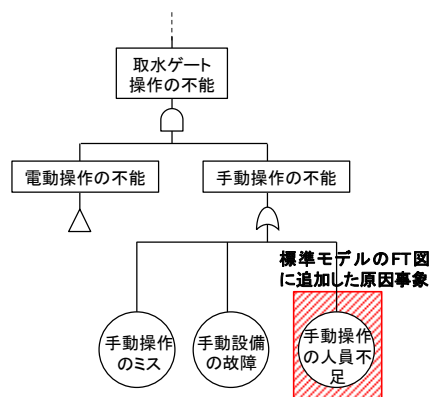


図-28 標準モデルに追加した基本事象の例

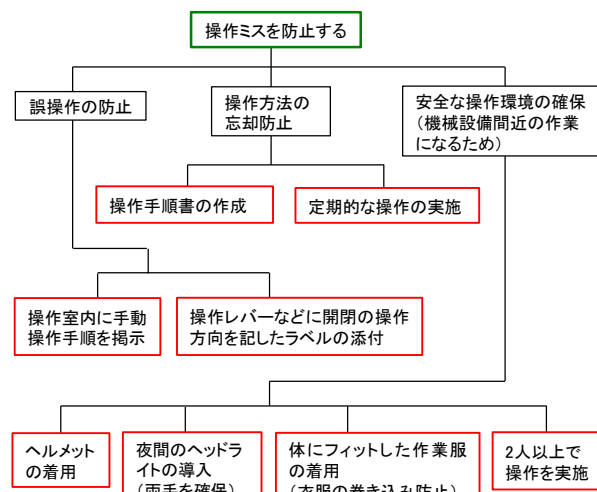


図-29 「手動操作のミス」の対策検討例

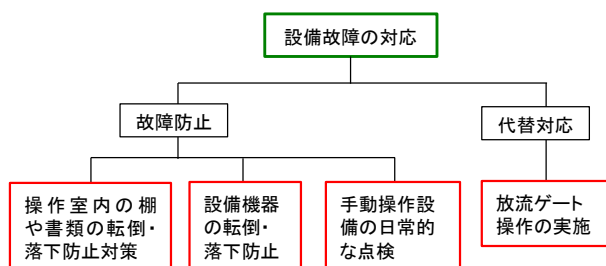


図-30 「手動設備の故障」の対策検討例

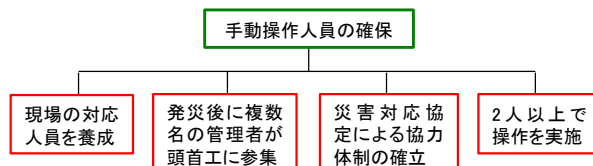


図-31 「手動操作人員の不足」の対策検討例

対象に実施した従来のFTA（これ以上原因を細分化できないという段階まで基本事象を追及する方法）で挙げられ



表-7 「手動操作不能」の対策

事前対策	操作手順書の作成
	定期的な操作の実施
	操作室内に手動操作手順を啓示
	操作レバーなどに開閉の操作方向を記したラベルの添付
	操作室内の棚や設備機器の転倒・落下防止対策
	手動操作設備の日常的な点検
事後対策	夜間のヘッドライトの導入
	ヘルメットの着用
	体にフィットした作業服の着用 (衣服の巻き込み防止)
	2人以上での操作の実施
	放流ゲート操作の実施
	現場の対応人員を養成
	発災後直ちに複数名の管理者が頭首工に参集
	災害時協定による協力体制の確立

た対策とほぼ同様な対策が得られた。また、対策検討 FTA では、「夜間のヘッドライトの導入」や「体にフィットした作業服の着用」など現場における知見や経験により得られたユニークな対策が加えられた。さらに、実用 FTA では、従来の FTA より短時間で効率よく対策を検討できた。このような実証結果から、実用 FTA は、現場の施設管理者が自らの手で対策検討を行うことができる方法として有効であることが示された。

### 5.3 対策の整理と実施

対策の整理方法に定められたものはないが、その一例として、「手動操作の不能」の対策を「事前対策（被害の未然防止対策）」と「事後対策（被害発生時の対応に資する対策）」に分けて整理した場合を表-7 に示す。何れの対策も現在の施設管理の範疇において概ね実施可能であると考えられる。次のステップとして、対策各々に関して、さらに詳細な議論を重ねて具体的な実施内容を検討していくということになる。例えば、緊急時でも分かりやすい操作手順書の内容検討や転倒・落下防止の実施箇所の検討などである。また、事後対策に分類した対策は、現行の災害対応計画に新たに追加する内容である。災害時における人員の配置など災害対応計画の基本的な見直しが求められる。さらに、日常の施設管理、防災訓練、人材育成など、

中長期的な計画に関わる対策の実施も必要である。一時的な議論で終わらず、防災意識、知見と技術を継承していくことが望まれる。

## 6. 地震災害時災害対応における意思決定方法の改善

### 6.1 目的

3章において述べたとおり、筆者らは、現場管理体制を構築できるか否かを判断基準として、取水ゲートを閉鎖するか否かを決定する意思決定方法（意思決定方法2）を提案した。しかし、その意思決定方法2の妥当性をあらためて詳細に説明しようとするならば、文章表現のみで厳密に議論するには限界がある。そこで、本研究では、施設管理者の意思決定を数理モデルによって表現し、その推論から意思決定方法1の課題および意思決定方法2の妥当性を示すことを目的とする。筆者らは、その数理モデルとして、損失の期待値を最小化する対応行動を選択するという期待値原理に着目し、その観点からあらためて震災時の意思決定方法を検証した。

### 6.2 方法

#### 6.2.1 損失を最小化する対応行動の選択

林<sup>17)</sup>によれば、合理的な意思決定とは、「人は自己利益の最大化を目標として行動する」という原則に基づいて行われる意思決定である。ただし、本研究のような災害対応を対象とする場合は、その基本原則を「施設管理者は損失を最小化する対応行動を選択する」と読み替える。本研究では、この基本原則に基づいて、施設管理者の意思決定過程を数理モデル（以下、「意思決定モデル」）によって表現する。具体的には、損失の期待値がもっとも小さい対応行動を選択するという「期待値原理」に基づく意思決定モデルを作成する。そして、その意思決定モデルから得られる結果の意味するところを現実の具体的な事象に当てはめて解釈することによって、震災時における意思決定方法を考察する。

#### 6.2.2 地震災害時における災害対応の損失表

施設管理者の意思決定過程を明確にするためには、最初に施設管理者の各対応行動に対する損失を明示する必要がある。ある状態において選択した行動の結果として生じる損失を示した表を損失表という。地震災害時における意思決定を数理モデル化するためには、まず損失表の作成が必要である。

施設管理者の災害対応時の意思決定を表現する損失表を表-8に示す。地震災害時の状態は「被害あり」と「被害なし」である。水路が被害を受けて決壊や溢水が生じている状態を「被害あり」、水路が無被害である状態を「被害

表-8 本研究で用いる損失表

対応行動	状態	
	被害あり	被害なし
取水ゲートを閉鎖する	$D_1$	$D_2$
取水ゲートを閉鎖しない	$D_3$	$D_4$

なし」とする。また、選択肢となる対応行動として、通水を停止するために取水ゲートを閉鎖する場合、すなわち、「取水ゲートを閉鎖する」と、通水をそのまま継続する場合、すなわち、「取水ゲートを閉鎖しない」を想定する。こうした震災時の状態と対応行動の各組合せにおいて、 $D_1 \sim D_4$ の4通りの損失が考えられる。

### 6.2.3 損失表を用いた対応行動の決定方法

施設管理者の意思決定過程には、表-8における「被害あり」と「被害なし」の状態を施設管理者が確実に把握できるとした場合（以下、「確実性下」と不確実にしか把握できないとした場合（以下、「不確実性下」）がある。その「確実性下」と「不確実性下」では、基本原則に基づく施設管理者の意思決定方法が異なる。

#### (1) 確実性下における意思決定

確実性下における意思決定の場合には、表-8における「被害あり」と「被害なし」の各状態において損失を比較して、損失が小さい方の対応行動を選択する。この場合、「被害あり」であれば $D_1$ と $D_3$ を比較し、「被害なし」であれば $D_2$ と $D_4$ を比較して、損失が小さい方の対応行動を選択する。

#### (2) 不確実性下における意思決定

不確実性下における意思決定の場合には、「被害あり」と「被害なし」の各状態は、確率として捉えられる。「被害あり」の発生確率を $P$ とすれば、「被害なし」の発生確率はその余事象 $1-P$ となる。このとき、「取水ゲートを閉鎖する」、「取水ゲートを閉鎖しない」の各対応行動の損失 $E_1$ および $E_2$ は、確率 $P$ を用いて、それぞれ(6)式と(7)式のように期待値（以下、「期待損失」）として表現される。

$$E_1 = PD_1 + (1 - P)D_2 \quad (6)$$

$$E_2 = PD_3 + (1 - P)D_4 \quad (7)$$

この期待損失 $E_1$ と $E_2$ を比較して、その小さい方の対応行動を選択することによって、不確実性下における対応行動が決定される。この意思決定方法が期待値原理である<sup>18)</sup>。

また、意思決定には、次に述べるような2つがある。現実に施設管理者が知り得るのは、施設管理者自身の主観的な感覚で捉える損失（以下、「主観的損失」と被害発生確率（以下、「主観的確率」）である。施設管理者が行うのは、主観的損失や主観的確率に基づいた期待値原理に従う意思決定（以下、「主観的意思決定」）である。それに対して、客観的に見積もられる損失（以下、「客観的損失」と実際の被害発生確率（以下、「客観的確率」）を用いた期待値原理に従う意思決定（以下、「客観的意思決定」）がある。すなわち、期待値原理による意思決定には、主観的意思決定と客観的意思決定がある。主観的意思決定は、施設管理者がどのような意思決定を行うのかを示し、客観的意思決定は、施設管理者がどのような意思決定を行うべきか、すなわち最適な意思決定を示す。意思決定方法において、その両者が乖離していれば、施設管理者の実施する意思決定（主観的意思決定）は、必ずしも最適な意思決定（客観的意思決定）にならない。すなわち、意思決定方法が妥当であるためには、主観的意思決定と客観的意思決定が合致する必要がある。

そこで、本研究では、先ず任意の損失と確率を用いた期待値原理に従う意思決定方法を導く。そして、その意思決定方法を主観的意思決定と客観的意思決定の両面から捉えて、両者が合致するか否かを検証する。

## 6.3 現行の意思決定方法の検討

### 6.3.1 現行の意思決定方法

現行の意思決定方法は、地震災害時であっても、水管理システムが健全に機能して、施設管理者が、その水位データの挙動から、水路における被害発生の有無を確実に把握できるということを大前提としている。現行の意思決定方法をあらためて記せば、「水位に異常な変化がある場合、「被害あり」とみなして取水ゲートを閉鎖し、水位に異常がない場合、「被害なし」とみなして取水ゲートを閉鎖しない」である。先ずは、現行の意思決定方法に関して検討を進める。

### 6.3.2 現行の意思決定における損失表

現行の意思決定における損失表を表-9に示す。ただし、表中の記号は、 $a$ ：水路の被災に起因して発生する二次災害による損失、 $m$ ：取水ゲートを閉鎖することにより損失 $a$ が低減される割合（ $0 < m < 1$ ）、 $b$ ：水路の通水が停止されることによって発生する損失である。

水管理システムの水位データに異常な変化が確認された後、直ちに取水ゲートを閉鎖したとしても、被害の拡大はある程度進行する。そのため、「被害あり」の状態では、たとえ「取水ゲートを閉鎖する」が選択されても、損失 $a$

表-9 現行の意思決定における損失表

対応行動	状態	
	被害あり	被害なし
取水ゲートを閉鎖する	$ma+b$	$b$
取水ゲートを閉鎖しない	$a+b$	$0$

は0にならない。そこで、「被害あり」の場合でも損失  $ma$  が発生するとした。また、 $b$  は農業用水が供給されないことによる受益者の営農上の損失などである。水路への水供給が停止される状況には、施設管理者が取水ゲートを閉鎖して通水を停止する場合と水路が被害を受けて通水不能になる場合がある。したがって、「取水ゲートを閉鎖する」の行と「被害あり」の列における損失には  $b$  が加えられる。また、「被害なし」の状態で、「取水ゲートを閉鎖しない」という場合は何事も起こらず、損失は0である。

### 6.3.3 現行の意思決定方法の適正検証

以上の損失表を用いて、まず主観的意思決定を検討して、現行の意思決定方法がそれに従うのか検証する。現行の意思決定方法では、「被害あり」と「被害なし」の状態を確実に把握できることが前提であるので、確実性下の意思決定である。表-9における「被害あり」の状態における各対応行動の損失を比較すれば、 $ma+b < a+b$  である ( $\because 0 < m < 1$ )。従って、この場合の対応行動は、「取水ゲートを閉鎖する」となる。一方、「被害なし」の状態における対応行動の損失を比較すれば  $b > 0$  である。従って、その対応行動は「取水ゲートを閉鎖しない」となる。

以上の結果は、現行の意思決定方法に合致するとともに、 $m, a, b$  が主観的損失と客観的損失の何れの場合であっても成立する。それゆえ、現行の意思決定方法は、主観的意思決定と客観的意思決定が合致した適正な意思決定方法である。

## 6.4 大規模地震災害時における現行の意思決定方法の考察

### 6.4.1 大規模地震災害時における現行の意思決定

大規模地震災害時には、水管理システム自体が機能を喪失するおそれがあるほか、たとえ水管理システムが健全であり、その水位データに異常がみられなくとも、施設管理者は、想定し得ない不確実な被害が起こることを懸念して、確信をもって「被害なし」と即断することができないと考えられる。それゆえ、施設管理者は、大規模地震災害時における被害の発生状況を、「被害が発生しているかもしれない」という「確からしさ」によって捉えざるをえない。

すなわち、大規模地震災害時における現行の意思決定方法（意思決定方法1）は、被害の発生確率が高ければ、取水ゲートを閉鎖する、被害の発生確率が低ければ、取水ゲートを閉鎖しないとなる。

### 6.4.2 期待損失の算出

意思決定方法1における被害発生の確からしさは確率  $P$  で表され、意思決定方法1は不確実性下の意思決定となる。それゆえ、取水ゲートを閉鎖するか否かの選択は、(6)式および(7)式を用いて算出される期待損失の比較によって決定される。「取水ゲートを閉鎖する」と「取水ゲートを閉鎖しない」の各対応行動の期待損失をそれぞれ  $E_1, E_2$  とすると、その期待損失は、表-9の損失表から次のように計算される。

$$E_1 = P(ma + b) + (1 - P)b = maP + b \quad (8)$$

$$E_2 = P(a + b) + (1 - P) \cdot 0 = (a + b)P \quad (9)$$

このときの期待損失  $E_1, E_2$  の大小関係を視覚的に把握するため、(8)式および(9)式を、それぞれ  $P$  を変数とする関数であると捉えて、そのグラフを図-32に示す。 $E_1$  と  $E_2$  の傾きを比較すると、 $ma < a+b$  であるため、交点  $G$  が必ず存在する。その交点  $G$  の  $P$  座標成分  $P_c$  は、

$$P_c = \frac{b}{(1 - m)a + b} \quad (10)$$

である。(10)式において、 $0 < b < (1 - m)a + b$  であることから、 $0 < P_c < 1$  となり、 $P_c$  は必ず  $P$  の定義域 ( $0 < P < 1$ ) 内に存在する。それゆえ、 $P_c$  を境にして、 $E_1$  と  $E_2$  の大きさが逆転する。期待値原理に従えば、 $E_1 > E_2$  ならば、取水ゲートを閉鎖し、 $E_1 < E_2$  ならば、取水ゲートを閉鎖しないということになる。すなわち、このとき、「被害の発生確率が高ければ ( $P > P_c$ )、取水ゲートを閉鎖し、被害の発生確率が低ければ ( $P < P_c$ )、取水ゲートを閉鎖しない」という意思決定方法1となる。

### 6.4.3 意思決定方法1の課題

以上の意思決定モデルから、意思決定方法1の課題を明らかにする。その課題として、次に述べる「主観的意思決定と客観的意思決定の相違」、「意思決定基準の不確実性」および「水路における危険の放置」が考えられる。

#### (1) 主観的意思決定と客観的意思決定の相違

意思決定方法1では、主観的意思決定と客観的意思決定が必ずしも合致しない。なぜならば、 $a, b, m$  の主観的損

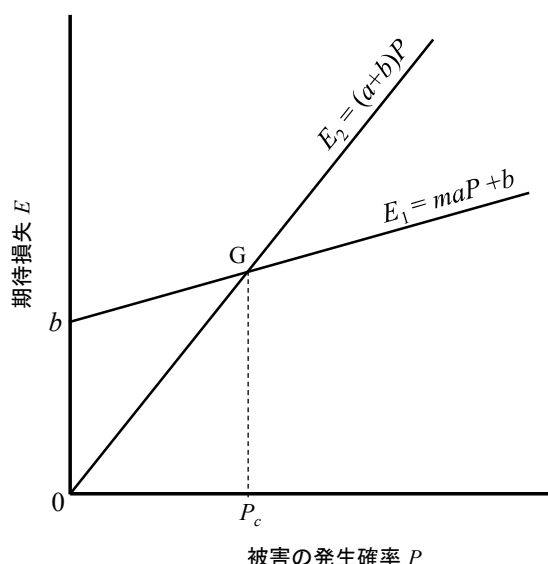


図-32 意思決定方法1の大規模地震災害時における被害の発生確率と期待損失の関係

失と客観的損失が異なれば  $P_c$  が異なり、さらに、発生確率  $P$  の主観的損失と客観的損失が異なれば、 $P$  と  $P_c$  との大小比較の評価が異なるからである。すなわち、施設管理者は意思決定方法1に基づいて意思決定を行うとしても、それは最適な意思決定であるとは限らない。

### (2) 意思決定基準の不確実性

大規模地震災害時には、施設管理者は自らが主観的に評価する  $P$  と  $P_c$  のみを頼りにして意思決定を行わざるを得ない。意思決定モデルにおいて、 $P$  と  $P_c$  が接近した状態は意思決定が困難な状況である。例えば、施設管理者は、被害の発生確率  $P$  を  $P_c$  より高く評価して、取水ゲートを閉鎖しようと考えたとする。しかし、その一方で、施設管理者は取水ゲートを閉鎖した場合の営農への影響を重くみて、 $b$  もまた高く評価したとする。このとき、 $b$  が増大すれば、 $P_c$  も増大する（ $\because$  (5)式より、 $P_c$  は  $b$  の単調増加関数）ことから、図-32において、 $P_c$  は  $P$  に接近する方向へ移動する。その結果、 $P$  と  $P_c$  は近接して、施設管理者は、取水ゲートを閉鎖すべきか否か、その対応行動の選択に困惑することになる。

### (3) 水路における危険の放置

大規模地震時の意思決定では、 $E_1 > E_2$  の場合、現地の水路における被害の発生如何に関わらず「取水ゲートを閉鎖しない」という選択があり得る。このような選択を行うことは、結果的に水路において起こり得る危険を放置することになる。大規模な用水路における決壊や溢水による二次災害は、人命や財産の喪失に関わる深刻な被害を引き起こすおそれがある。それだけに対応行動の意思決定には慎重を期すべきである。

大規模地震災害時における意思決定方法1には、以上のような課題がある。大規模地震災害時に、施設管理者自らも混乱している状況の中で、明確な指標もなく主観的な感覚のみで、その後の被害損失の大きさと災害対応の行方を左右する重大な意思決定を行わなければならないことは、施設管理者にとってたいへんな負担である。

## 6.5 課題の解決に向けた新たな意思決定方法の検討

### 6.5.1 災害対応の目的

大規模地震発生直後における災害対応の目的は、第一に被害から人命や財産を守ることであり、ところが前項で述べたとおり、意思決定方法1では必ずしもその目的を果たすことができない。そこで、本章では、大規模地震災害時の安全確保を前提条件に課した新たな意思決定方法を検討する。その結果を先に述べると、この検討から意思決定方法2が導かれ、意思決定方法2は意思決定方法1の課題を解消する。

### 6.5.2 安全を実現する前提条件

危険源である水路の通水が継続されていても、決壊や溢水などによる被害の発生を防止できる対応策が備えられていれば、水路およびその沿線域の安全は確保される。ここでは、その「被害の発生を防止する対応策」として、3章で述べた「現場管理体制」の構築を考える。現場管理体制とは、地震発生後、複数名の施設管理者が水路の各要所に急行して水路全域の監視を行い、そこでも被害の発生が確認されれば、直ちに取水ゲートを閉鎖するなどの対応行動を実施するという管理体制である。大規模地震災害時において、施設管理者は、水路において被害が生じていないことの確証を得ることは難しい。さらに、余震の発生が懸念される間は、被害が生じないという保証はない。このような地震発生後の不確実な状況下において、取水ゲートを閉鎖せずに通水したまま水路およびその沿線域の安全を確保するためには、現場管理体制が構築できていることが必要条件（以下、「安全条件」）である。

### 6.5.3 新たな意思決定方法の想定

上述の安全条件から、「現場管理体制が構築できる場合は、取水ゲートを閉鎖しない。現場管理体制が構築できない場合は、取水ゲートを閉鎖する。」という意思決定方法が考えられる。これは、3章において提案した意思決定方法2である。次に、意思決定モデルから意思決定方法2の妥当性を検証する。

### 6.5.4 損失表の作成

安全条件を前提とした損失表を表-10に示す。同表中の記号は、 $a$ ：水路の被災に起因して発生する二次災害による損失、 $m$ ：取水ゲートの閉鎖により損失  $a$  が低減される



表-10 安全条件を前提とする損失表

対応行動	状態	
	被害あり	被害なし
取水ゲートを閉鎖する	$ma+b$	$b$
取水ゲートを閉鎖しない	$ma+b+c$	$c$

割合 ( $0 < m < 1$ )、 $b$  : 水路の通水が停止されることによって発生する損失、 $c$  : 現場管理体制の構築に必要な費用 (損失) である。 $c$  とは、現場管理体制の構築に必要な資源が被害を受けて不具合や不足を生じた場合に、直ちにそれを修復、補完して完全な現場管理体制を構築するための費用である。すなわち、地震発生直後に現場管理体制が完全に構築できれば  $c=0$  であり、現場管理体制の構築が不完全な場合には  $c > 0$  となる。また、対応行動「取水ゲートを閉鎖しない」を選択する場合には、現場管理体制が構築できていることが前提であることから、「取水ゲートを閉鎖しない」という場合の損失には、「被害あり」、「被害なし」の状態に関わらず  $c$  が加えられる。さらに、「被害あり」の状態において、「取水ゲートを閉鎖しない」が選択されたとしても、このとき、現場管理体制が構築されていることから、結局のところ、その被害が発生に対して取水ゲートを閉鎖することになるので、その被害の損失は  $ma$  に抑えられる。

### 6.5.5 期待損失の比較

表-10 の損失表において、対応行動「取水ゲートを閉鎖する」を選択した場合の期待損失  $E'_1$  と対応行動「取水ゲートを閉鎖しない」を選択した場合の期待損失  $E'_2$  は、それぞれ (6) 式および (7) 式を用いて、次のように計算される。

$$E'_1 = P(ma + b) + (1 - P)b = maP + b \quad (11)$$

$$E'_2 = P(ma + b + c) + (1 - P)c = (ma + b)P + c \quad (12)$$

この  $E'_1$  と  $E'_2$  の大小関係を視覚化するため、(11) 式および (12) 式を、被害の発生確率  $P$  を変数とする関数であると捉えて、 $P$  に対する  $E'_1$  と  $E'_2$  のグラフを図-33 に示す。 $b$  は水路の被害状況に関わらない一定値である。それに対して、 $c$  は現場管理体制の構築度合いを示すものであるから、その評価値は直面している震災状況によって異なる。すなわち、 $E'_2$  の切片  $c$  の大きさによって、 $E'_1$  と  $E'_2$  の大小関係は異なる。そこで、図-33 では、 $c=0$ 、 $0 < c < b$ 、 $c > b$  の3

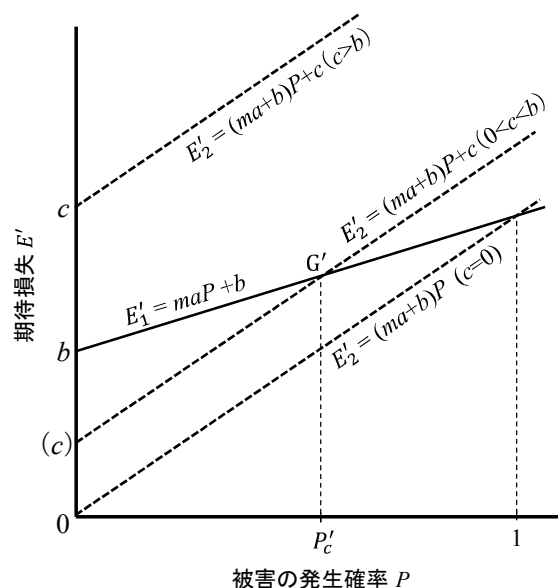


図-33 安全条件を前提とする場合における被害の発生確率と期待損失の関係

ケースに対する  $E'_2$  を破線によって記した。

$c=0$  のとき、 $E'_1$  と  $E'_2$  の交点の  $P$  座標は 1 である。それゆえ、この場合は  $P$  に関わらず、 $E'_1 > E'_2$  となり、対応行動として、「取水ゲートを閉鎖しない」を選択することが適当である。 $0 < c < b$  のとき、 $E'_1$  と  $E'_2$  は  $0 < P < 1$  の変域内において必ず交差する。それゆえ、 $E'_1$  と  $E'_2$  の大小関係は、 $P$  の大きさと  $E'_1$  および  $E'_2$  の交点  $G'$  の  $P$  座標である  $P'_c$  との比較によって異なる。 $c > b$  のときには、 $P$  に関わらず  $E'_1 < E'_2$  となり、この場合は、「取水ゲートを閉鎖する」を選択することが適当である。つまり、 $c$  の費用 (損失) をかけて現場管理体制を構築できたとしても、 $c > b$  であれば、取水ゲートを閉鎖したほうが得策ということになる。

### 6.5.6 意思決定方法 2 の導出

$c=0$  とは、現場管理体制を構築するための費用がかからない、すなわち、現場管理体制を支障なく構築できることを意味する。例えば、施設管理者の勤務時間中に地震が発生し、そのとき、幸いにも現場管理体制に必要な資源が被害を受けなかった場合などがこれに相当する。

それに対して、 $c > 0$  場合は、現場管理体制を構築するために費用  $c$  がかかる場合である。しかし、現実の問題として、地震発生直後に、水管理システムの不具合、電話連絡の不通、対応人員の不足などのように、現場管理体制の構築に必要な資源が致命的な被害を受けた場合には、そこでいくら費用を投入したところで、直ちに現場管理体制を構築できるものではない。すなわち、地震発生直後において、現場管理体制が明らかに構築できない状況であるとき、それを即座に修復・補完して現場管理体制を構築しようとする

ることは、いわば、不可能を可能にしようすることであり、そのために必要な費用  $c$  とは、上限が定められない莫大な金額になると評価されよう。これに対して、 $b$  は上限がある有限な値である。それゆえ、現場管理体制が構築できないという状況では、 $c$  は  $b$  をはるかにこえる値、すなわち  $c > b$  であるとみなせる。

以上の考察から、「現場管理体制が構築できる場合は、 $c=0$ 、 $E'_1 > E'_2$  であるから、取水ゲートを閉鎖しない。現場管理体制が構築できない場合は、 $c > b$ 、 $E'_1 < E'_2$  であるから、取水ゲートを閉鎖する」となり、意思決定方法 2 が導かれた。ただし、 $0 < c < b$  に相当する現場管理体制が構築できるか否か明確ではない場合については、6.5.8 項において検討する。

### 6.5.7 意思決定方法 2 の適正検証

意思決定方法 2 における主観的意思決定と客観的意思決定が合致するのか、次に検証する。

$c=0$  のとき、 $E'_1 > E'_2$  となる関係、および、 $c > b$  のとき、 $E'_1 < E'_2$  となる関係は、 $a$ 、 $b$ 、 $m$  が主観的損失と客観的損失の何れかであっても関わりなく成立する。また、この場合の  $c$  の評価は、現場管理体制を構築できる ( $c=0$ ) か否 ( $c > b$ ) かの二択ということになる。施設管理者は、その  $c$  の評価を、水管理システムを確認できるか否か、施設管理者どうし連絡ができるか否か、施設管理者が現場へ急行できるか否かなど、現実の事象を客観的に捉えて決定する。それゆえ、 $c$  の主観的損失と客観的損失はほぼ同値である。

従って、意思決定方法 2 は、施設管理者が実際に行い得る意思決定方法であり、同時に損失を最小化する適切な方法である。

### 6.5.8 現場管理体制の計画策定

意思決定モデルにおける  $0 < c < b$  の場合には、現場管理体制が構築できるか否か微妙な場面であり、すなわち、現場管理体制の機能はほとんど損なわれないまでも、その一部が被害を受けた場合である。このとき、意思決定は、 $P$  と  $P'_c$  の大小関係によって異なり、施設管理者の  $P$  と  $P'_c$  の評価に委ねられるということになる。

しかし、この場合には、電話やメールによる連絡が可能である（不可能であれば  $c > b$  となる）。それゆえ、実際には、施設管理者が個々に不確実性の中で意思決定を行うのではなく、施設管理者間で互いに連絡を取り合いながら、現場管理体制の構築状況を確認して、その構築度合いに応じて適当な意思決定が行われることになろう。すなわち、この場合は、意思決定方法 1 のような主観的意思決定と客観的意思決定の差異が生じる状況ではなく、その両者がほぼ合致した現実的な意思決定が可能である。

また、この場合を想定して、どの程度の被害までを許容して、「取水ゲートを閉鎖しない」と判断するのか、あらかじめ具体的な条件を施設管理者の間で取り決めておくことが重要である。その計画が策定されていれば、各施設管理者は困惑することなく速やかに意思決定を行うことができると考えられる。

### 6.5.9 意思決定方法 2 による課題解決

大規模地震災害時における現行の意思決定方法である意思決定方法 1 の課題は、6.4.3 項で述べたとおり、①主観的意思決定と客観的意思決定の相違、②意思決定基準の不確実性、③水路における危険の放置である。意思決定方法 2 では、これらの課題が解消される。①の課題に関しては、6.5.7 項に述べたとおり、意思決定方法 2 では主観的意思決定と客観的意思決定は合致する。②の課題に関して、意思決定方法 2 では、「現場管理体制を構築できない」という状況（具体的に「施設管理者の被災」、「電話連絡の不通」、「水位データの通信遮断」、「停電」など）は、施設管理者が直接的に認識可能であり、その有無の判断に迷う不確実な要素は少ないものと考えられる。また、③の課題に関して、意思決定方法 2 は 6.5.2 項で述べた安全条件を前提としているので、水路およびその沿線域の安全性は確保されている。このことから、大規模地震災害時の意思決定方法として、意思決定方法 2 は有効であると考えられる。

### 6.6 大規模地震災害に備えた施設管理計画の提案

3 章では、地震発生後の取水ゲートを閉鎖する確度を高めるため、発災後直ちに複数名の施設管理者が幹線水路の各要所に急行する現場管理体制の構築および意思決定方法 2 を提案した。本章では、現行の意思決定方法の課題解決という側面から推論して、意思決定方法 2 の導入とそのために必要な現場管理体制の構築を理論付けた。このことから、筆者らは、大規模地震に備えて、発災後直ちに現場管理体制を構築する計画と意思決定方法 2 を導入した災害対応計画を策定することを提案する。

## 7. 災害対応計画策定マニュアル案の作成

本研究の成果を取りまとめて、農業水利施設管理者のための災害対応計画策定マニュアル案を作成した。図-34 にそのマニュアル案に記した災害対応計画の策定計画のフローを示す。本マニュアル案では、地震発生直後における初動開始から取水ゲートの閉鎖までの災害対応を対象とし、その災害対応の遂行を阻害するリスクの特定および対策検討を、3 章および 5 章に記した実用 FTA によって実施する方法を解説した。今後は、同マニュアル案に基づく災害対応計画策定の普及に努めていく方針である。



図-34 災害対応計画策定マニュアル案に記した災害対応計画の策定作業のフロー

## 8. まとめ

平成 28 年度～平成 30 年度に実施した研究の主要な結果は、次のとおりである。

- (1) 頂上事象の発生原因を原因抽出 FT 図の作成によって探索し、その原因事象がある程度具体的に絞り込まれた時点で、対策検討 FT 図に切り替えるという実用 FTA により対策検討を行う方法を提案した。また、実際の施設管理者による実用 FTA を用いた大規模地震対策検討の実践を通して、実用 FTA は施設管理者自らの手で実施可能であり、かつ有効な対策検討方法であることを確認した。
- (2) 大規模地震発生後、直ちに複数名の施設管理者が幹線用水路のゲート設備に向かい対応にあたる現場管理体制の構築を提案した。また、その現場管理体制における各ゲート設備への施設管理者の割当人数を最適化する方法を構築するとともに、その現場管理体制の構築可否を、取水ゲートを閉鎖するか否かの判断基準とする意思決定方法を提案した。また、この意思決定方法の妥当性を期待値原理に基づいて確認した。
- (3) 大雨災害時のダム管理の事例から、現行の管理体制におけるバックアップ機能の重要性が評価された。さらにダム管理の災害対応力を強化するために、防災行動計画(タイムライン)の策定が有効であることが示唆された。

- (4) 本研究成果を取りまとめて、災害対応計画策定マニュアル案を作成した。

謝辞：本研究の実施にあたり、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部農業整備課および帯広開発建設部農業整備課には、調査地の調整や資料の提供などにおいて多大な支援をいただいた。FTA の検証調査および聞き取り調査にご協力いただいた施設管理者には、災害対応の現状や震災時に想定される被害リスクなどについてご教示をいただいた。ここに記して関係者各位に深く感謝申し上げる。

## 参考文献

- 1) 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所：研究者からみた東日本大震災と復旧・復興、pp.6-50、2016。
- 2) 農業農村工学会北海道支部：平成 30 年北海道胆振東部地震による農地・農業水利施設の被害、水土の知 87(5)、口絵、2019。
- 3) 農業農村工学会北海道支部：平成 28 年 8 月北海道豪雨による農業用排水路および農地の被害、(オンライン)、入手先<[http://www.agr.hokudai.ac.jp/nougyoudoboku/hokkaidoshibu/TO\\_P.html](http://www.agr.hokudai.ac.jp/nougyoudoboku/hokkaidoshibu/TO_P.html)> (参照 2019.6.9)
- 4) 大久保 天、本村由紀央、中村和正、小野寺康浩：大規模地震時における災害対応の遂行を阻害するリスク源の特定—幹線用水路施設を対象としたリスクマネジメント—、農業農村工学会論文集、290、pp.33-42、2014。
- 5) 大久保 天、本村由紀央、中村和正：基幹的な灌漑用水路における大規模地震災害に備えた災害対応力強化対策の評価、農業農村工学会論文集、302、pp.121-130、2016。
- 6) 塩見 弘、島岡 淳、石山敬幸：FMEA、FTA の活用(日科技連信頼性工学シリーズ第 7 巻)、日科技連、pp.12-16、2005。
- 7) 小野寺勝重：国際標準化時代の実践 FTA 手法 信頼性、保全性、安全性解析と品質保証、日科技連、pp.115-131、2007。
- 8) 農林水産省農村振興局整備部防災課災害対策室：土地改良施設管理者のための業務継続計画(BCP)策定マニュアル、2016。
- 9) 小和田 正、沢木勝茂、加藤 豊：OR 入門 意思決定の基礎、pp.45-58、2013。
- 10) 横田 崇、川上徹人、尾崎友亮、下山利浩、近藤さや、岡部来、吉田知央、坂本誠一、能勢 努、辻村晃一、下坪善浩：震度に関する検討について、験震時報、75、pp.61-105、2011。
- 11) 東京都：首都直下地震等による東京の被害想定、第 3 部被害想定手法、(オンライン)、入手先<<http://www.busai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html>> (参照 2017.8.22)
- 12) 気象庁：気象庁震度階級関連解説表、(オンライン)、入手先<<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/shindo/kaisetsu>>。

Html> (参照 2017.10.7)

- 13) 大久保 天、立石信次、山口 健、桑原 淳、辻 修、宗岡寿美、木村賢人、山崎由里：2016年8～9月の北海道における豪雨災害に関する報告 6 農地・農業用施設の被害について、寒地土木研究所月報、No.771、pp.41-47、2017.
- 14) 国土交通省水災害に関する防災・減災対策本部防災行動計画ワーキング・グループ：タイムライン（防災行動計画）策定、活用指針（初版）、pp.4-5、2016.
- 15) 大久保 天、立石信次、今泉祐治：大規模地震災害に備えた対策の検討方法の提案、平成 30 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.220-221、2018.
- 16) 大久保 天、今泉祐治、寺田健司、川口清美、中村和正：農業用水路における大規模地震災害に備えた災害対応力強化対策の検討方法、令和元年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.306-308、2019.
- 17) 林 春男：災害対応の意思決定モデル、京都大学防災研究所年報、第 39 号、B-2、pp.117-130、1996.
- 18) 石倉智樹、横松宗太：土木・環境コアテキストシリーズ 公共事業評価のための経済学、コロナ社、pp.125-129、2013.



## 16.3 大規模農業地域における環境との調和した灌漑排水技術の開発

### 16.3.1 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術に関する研究

#### (このうち、周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築)

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ(水利基盤チーム)

技術開発調整監(寒地技術推進室)

研究担当者：大久保天、越山直子、大津武士、岩永将史、  
成田徳昌、南恭子

#### 【要旨】

北海道の水田地帯では、農作業の効率化をめざして、圃場の大区画化やパイプライン化等の整備が進められている。こうした整備に伴い、農区および灌漑区域における流出機構が変化し、地域の水循環や水文環境に影響が生じることが予想される。本研究では、水田地帯の周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築をめざして、圃場整備中の地区において、広域レベルおよび農区レベルの水収支および水質の調査を行った。その研究成果は、次のとおりである。

- 1) 圃場整備に伴う水循環および水文環境の影響を把握するために、圃場整備中の地区における幹線用水路、幹線排水路、河跡湖の水量、水質濃度について調査を行った。圃場整備に伴う用排水系統の再編により、流入水路がなくなった河跡湖もあったが、幹線用水路、排水路、河跡湖出口の流量および水質濃度については、圃場整備に伴う大きな変化は見られなかった。
- 2) 農区レベルにおける水循環構造の変化とその影響を明らかにするために、小用水路形式が開水路およびパイプラインである農区において、水収支および周辺水質の調査を行った。その結果、両農区の大きな相違点は配水管理用水量の有無であり、小用水路のパイプライン化で配水管理用水量がゼロになった。開水路形式の農区における配水管理用水率は、未整備農区、整備済み農区とも同程度であった。小排水路の水質濃度(T-N、T-P、SS)は、小用水路の形式に関わらず、代かき・田植え期において高い値を示したが、開水路地区を有する幹線排水路では、低濃度である配水管理用水が小排水路の水質濃度を希釈していた。このことから、用水路形式が開水路からパイプラインへ変わる地域において、排水路の水質を保全するためには希釈水の確保が必要と考えられた。
- 3) 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術を構築するために、排水路や河跡湖の流量変化に伴う水質濃度への影響を検討した。幹線排水路については、水質タンクモデルを用いて流量および水質濃度を推定した結果、パイプライン化により流量が約3割減少し、特に灌漑初期において水質濃度が上昇すると予測された。河跡湖についても、実測の流量および水質データを用いて試算した結果、現況よりも水質濃度が上昇すると推定された。これらの結果を基に、地区内において求められる水質保全対策を整理した。
- 4) 地域条件に適合した灌漑排水施設の計画手法を開発するために、圃場整備における灌漑排水施設の計画に関わる要素を整理し、既往文献等から灌漑排水施設の機能や数、規模を分析した。その結果を基に、北海道の大区画化水田地帯における営農形態等の地域条件に応じた合理的な施設配置のためのフローを作成し、圃場の維持管理に投入する労力を大幅に削減する施設配置例を示した。

キーワード：圃場整備、水田、河跡湖、水収支、水質

#### 1. はじめに

北海道の大規模水田地帯では、農業者の高齢化等に伴う農家戸数の減少により、担い手への農地集積が急速に進行しており、経営の大規模化にむけた対応が喫緊の課

題となっている。近年では、その対応策として、圃場の大区画化や用水路のパイプライン化等の整備が実施されている。こうした地域では、圃場整備に伴い、農区や灌漑区域における流出機構や地域内の水文環境の変化が予

想される。たとえば、パイプライン化前では、送水損失水量等を含む用水量が小用水路に供給され、圃場に取り水されなかった用水の残水が小用水路末端から排水路に流入していたのに対して、パイプライン化後では、灌漑区域に流入するのは圃場へ取水される水量だけとなる。その結果、排水路流量の減少とともに、地域の河跡湖や沼への供給水量も減少し、湖沼の水位や水質、湖沼周辺の地下水位に影響を及ぼす可能性がある。さらに、排水路の水位低下により、排水路法面の乾燥が進み、農地付近の亀裂の発生を誘引するなど、水文環境だけではなく、農地環境にも影響を及ぼす可能性がある。

一方、農業用水は、国内の水資源利用量の3分の2を占めており<sup>1)</sup>、農業地域の水循環の大部分を占めるとともに、営農目的だけではなく、景観や水質等の水環境の保全や地下水の涵養等、多面的かつ公益的な機能を果たしている<sup>2)</sup>。圃場整備後においても地域の水環境保全と安定的、効率的な農業用水の利用を両立するためには、圃場整備による水収支および水文環境への影響を明らかにし、適切な保全対策を実施する必要がある。現在の圃場整備では、区画規模等は多少異なるものの、多様な営農方針に対応可能な施設配置となっている。しかし、地域条件や地域の営農方針ごとに施設密度や施設形式等を選択し、合理的な施設配置にすれば、営農や維持管理に関わる労力やコストをさらに低減できる可能性がある。

そこで、本研究では、平成28年度から令和3年度までの6年間、水田地帯における周辺水文環境と調和した灌

漑排水技術の構築をめざして、農区レベルおよび広域レベルの水文環境の調査を実施した。ここでは、圃場整備中の灌漑区域における広域水収支、農区水収支および水文環境を把握するとともに、水田地帯における水文環境保全に配慮した灌漑排水技術および地域条件に適合した灌漑排水計画手法について検討した結果について述べる。

## 2. 河跡湖を有する水田地帯における広域の水収支および水文環境の現況把握

### 2.1 地区概要

河跡湖を有する水田地帯の水収支および水文環境を把握するために、美唄市に位置する灌漑区域を対象として、広域調査を実施した。観測地点の位置を図-1に示す。調査対象の灌漑区域では、平成25年度より圃場整備が進められている。広域調査の対象地区面積は約1,100haであり、そのうち農地面積は約800haである。調査期間における調査対象地区内の圃場整備面積および圃場整備率を図-2に示す。地元への聞き取りによると、整備事業地区内における1戸当たりの平均経営面積（水稻、転作を含む）は約11haである。調査対象地区内における令和2年度の水稲作付面積は約380haであり、各栽培方式の面積率は、移植栽培では86%、湛水直播栽培では2%、乾田直播栽培では11%であった。

地区内の農業用水は、主に沼貝幹線用水路および大富揚水機場から供給される。大富揚水機場の取水量は、大富幹線用水路と山形幹線用水路に分水され、このうち、

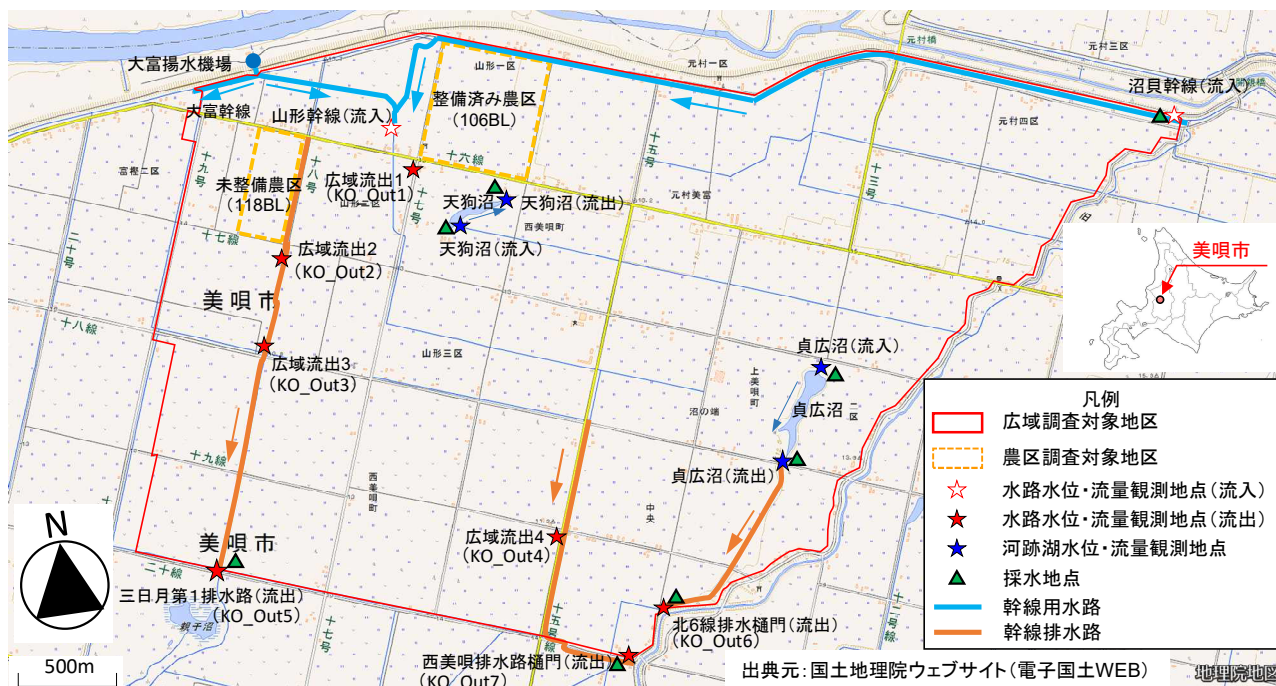


図-1 調査対象とした灌漑区域における観測地点の位置

山形幹線用水路への分水量が対象灌漑区域へ流入する。

農地からの排水は中小の排水路を経由し、三日月第一排水路、北6線排水樋門、西美唄排水樋門等から地区外へ流出する。洪水時には、樋門の操作により流域変更が行われるが、平常時における流出経路はこれらの3地点が主な地点である。

地区内には、天狗沼（水面積：約8ha）と貞広沼（水面積：約20ha）の二つの河跡湖がある。どちらも周辺の土地利用は農地が主体である。天狗沼への流入については、小排水路のほか、圃場排水が直接流入していたが、令和元年度に圃場整備工事が行われたことから、小排水路および圃場からの流入がなくなった。天狗沼からの流出口は、圃場整備前後とも変わらず、支線排水路に接続している。この接続先の排水路では、灌漑期間に堰上げが行われている。貞広沼では、排水路からの流入箇所は1つであり、下流口は排水路に接続している。

## 2.2 調査方法

対象地区内における水収支を把握するために、広域流入地点1箇所および広域流出地点3箇所に水位計を設置するとともに、定期観測として、流量観測（月1回程度）を実施した。この流量観測結果を用いてH-Q曲線を作成し、水位の観測データから灌漑期間における各地点の流量を推定した。さらに、対象区域内の水質状況を把握するため、これらの地点において、流量観測時に採水を行った。採水した試料については、室内でSS、T-N、T-P等の水質分析を行った。流量および水質の調査は、平成28年度から令和3年度まで（令和元年度を除く）に行った。大富揚水機場から山形幹線用水路への分水量については、平成29年度から令和3年度に流量観測を行った。沼貝幹線用水路から沼貝幹線放水路への流出量については、令和3年度に流量観測を行った。

河跡湖の水文環境を把握するため、二つの河跡湖の流入口および流出口の付近に水位計を設置し、湖面水位を観測するとともに、流量観測を月1回程度行った。この流量観測結果を用いてH-Q曲線を作成し、水位観測データから灌漑期間における各地点の流量を推定した。さらに、各河跡湖の流入口および流出口において、流量観測時に採水を行った。採水した試料については、室内でSS、T-N、T-P、CODなどの水質分析を行った。これらの流量および水質の調査は、平成28年度から令和3年度までに行った。ただし、天狗沼流入口については、令和元年度に沼周辺の小排水路の流路が変更されたことから、平成元年度以降は流量観測および採水を行わなかった。

気象については、平成28年度から令和3年度まで、整

備済み農区内（図-1）に気象観測機器を設置し、雨量、気温、風向・風速、日射量、相対湿度、大気圧を観測した。蒸発散量は、ペンマン法<sup>3)</sup>により推定した。観測期間は5月から11月までである。測定間隔は20分とした。

## 2.3 幹線用水路および幹線排水路の流量

調査対象の灌漑区域内の水収支の例として、令和2年度の月別水収支を図-3に示す。ここでは、沼貝幹線用水路の流量および大富揚水機場から山形幹線用水路への分水量の合計流量を「流入量」、三日月第一排水路、北6線排水樋門、西美唄排水路樋門の合計値を「流出量」とした。灌漑期における流入量に対する流出量の割合は、約7割であった。調査対象地区内の整備済みである3圃場（水田）の圃場浸透量の平均値は1.4~2.8mm/dであったことから、調査対象地区内における下方および横方向への浸透による流出量は小さいと考えられる。このことから、流入量と流出量との差は、圃場における貯留変化、蒸発散量の推定誤差および地区外への浸透による流出により生じたと推察される。一方、非灌漑期では、農業用水が供給されないことから、流出水量の値はきわめて小さかった。よって、調査対象地区内の水収支は、幹線用水路からの農業用水の取水量や、圃場や用水路および排

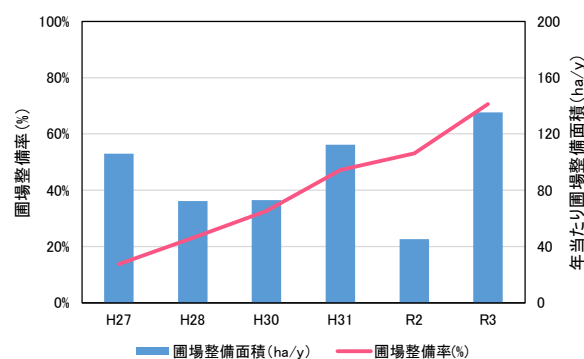


図-2 西美唄地区における圃場整備率および圃場整備面積の推移

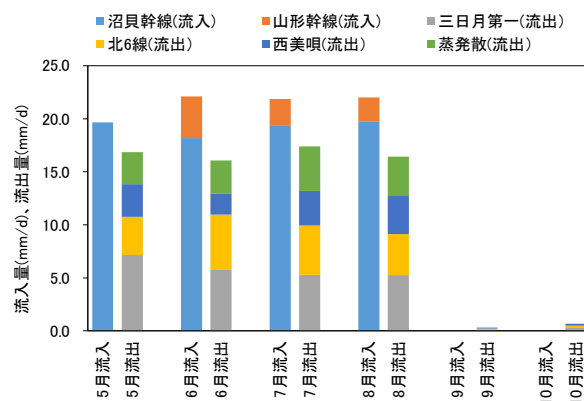


図-3 観測日における広域水収支（令和2年度）



水路を經由した水量が大部分を占めたと考えられる。

また、沼貝幹線用水路および各幹線排水路のそれぞれの灌漑期間合計流量と、各年の圃場整備面積を図-4に示す。図中では、沼貝幹線用水路を「沼貝」、三日月第一排水路を「三日月」、北6線排水樋門を「北6線」、西美唄排水路を「西美唄」としている。沼貝幹線用水路では、調査期間中において、合計流量の値に大きな変化は見られなかった。幹線排水路については、圃場整備が行われた年度であっても流量の増減があり、明らかな傾向は捉えられなかった。

### 2.3 幹線用水路および幹線排水路の水質

調査期間における灌漑区域内の幹線用水路および幹線排水路の水質濃度（SS、T-N、T-P）をそれぞれ図-5～図-16に示す。SS濃度については、幹線用水路では、概ね10～86mg/Lの範囲で推移していたが、大雨により取水源である石狩川が濁っていたことにより、200～600mg/L程度まで値が上昇することがあった。幹線排水路では、灌漑期については、代かきが行われる5月において、または沼貝幹線用水路の高濃度になったときに値が上昇したが、そういったときを除けば、灌漑期間は10～100mg/L程度、非灌漑期では概ね数mg/L～40mg/L程度の範囲で推移していた。T-N濃度については、沼貝幹線用水路の平均値は0.77mg/Lであり、大きな変動は概ね見られなかった。これに対して幹線排水路では、7～8月では0.5～1.6mg/L程度、5～6月では0.5～5.0mg/L程度、非灌漑期では1.6～7.0mg/L程度と、排水路によって多少の差はみられたものの、いずれも非灌漑期において値が上昇する傾向がみられた。T-P濃度については、SS濃度の上昇に伴い値が上昇していたが、概ね0.05～0.16mg/Lの範囲で推移していた。

### 2.4 河跡湖における流入水量および流出水量

調査期間における天狗沼および貞広沼の流入水量および流出水量を図-17および図-18に示す。また、天狗沼および貞広沼における湖面水位（流出口付近）の経時変化を図-19および図-20に示す。

天狗沼については、H29およびH30では、転作田（大豆）からの浸透水が排水路へ滲みだしており、その流量は0.5～3.0L/s程度であった。令和元年度に圃場整備が行われると、周辺の用排水系統が変更され、天狗沼への流入水路がなくなった。そのため、天狗沼の出口地点の流量の値は小さくなり、天狗沼の下流側に接続する支線排水路の推移状況によっては、沼内の上流方向への逆流が生じるようになった。

天狗沼水位についてみると、非灌漑期よりも灌漑期の

方が高く、両期間の平均水位の差は0.24～0.47mであった（図-19）。灌漑期および非灌漑期における水位差の要

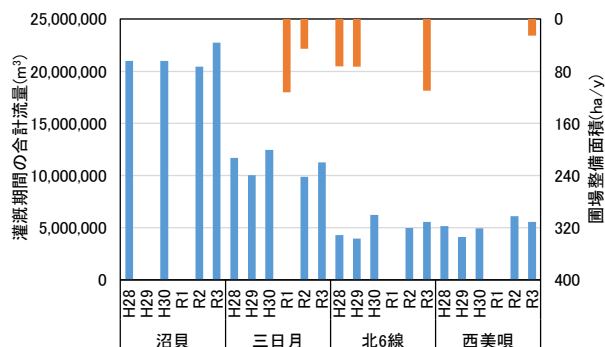


図-4 各地点における灌漑期の合計流量

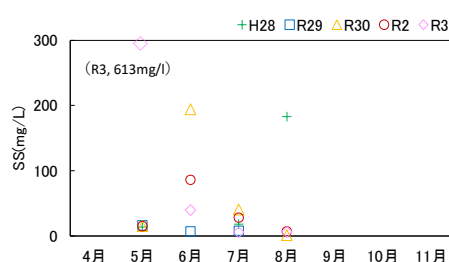


図-5 沼貝幹線用水路の水質濃度 (SS)

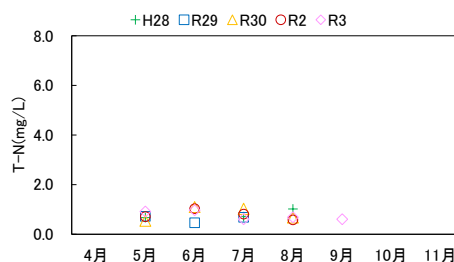


図-6 沼貝幹線用水路の水質濃度 (T-N)

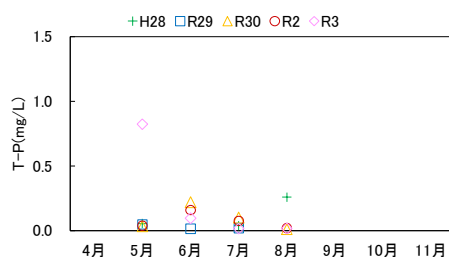


図-7 沼貝幹線用水路の水質濃度 (T-P)

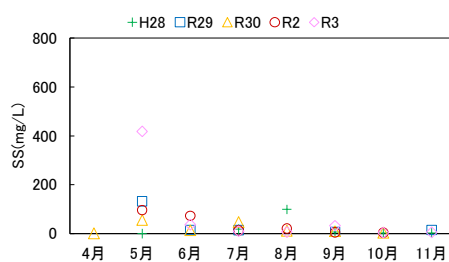


図-8 三日月第一排水路の水質濃度 (SS)



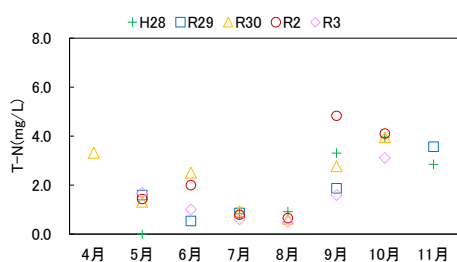


図-9 三日月第一排水路の水質濃度 (T-N)

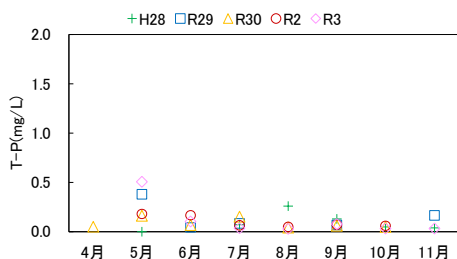


図-10 三日月第一排水路の水質濃度 (T-P)

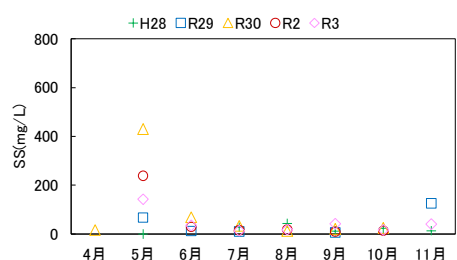


図-11 北6線排水路の水質濃度 (SS)

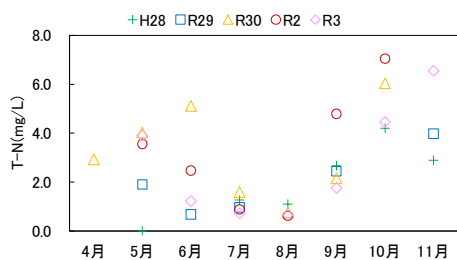


図-12 北6線排水路の水質濃度 (T-N)

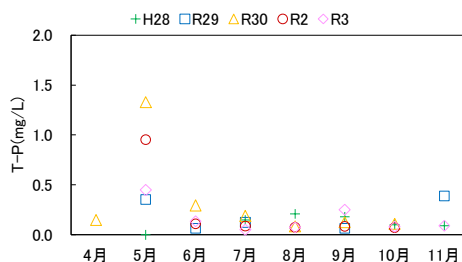


図-13 北6線排水路の水質濃度 (T-P)

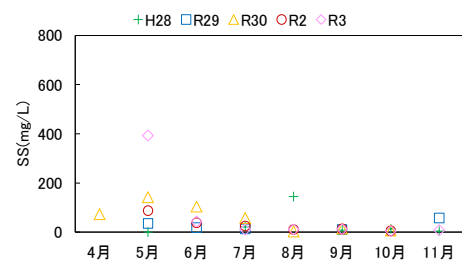


図-14 西美唄排水路の水質濃度 (SS)

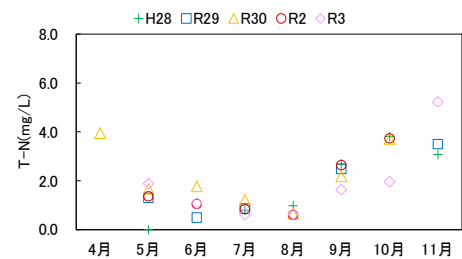


図-15 西美唄排水路の水質濃度 (T-N)

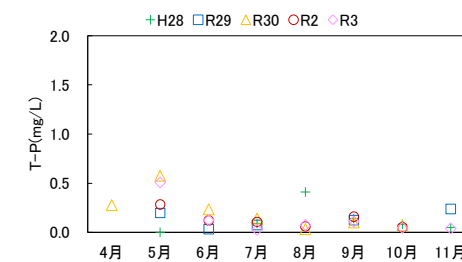


図-16 西美唄排水路の水質濃度 (T-P)

因は、農業者によって、灌漑期間中、沼出口と接続する支線排水路の下流側に堰板が設置されていたためである。ただし、灌漑期における平均水位については、H28、H29、H30では11.75～11.93m、R1、R2、R3では11.67～11.74mと、調査期間の後半において値が小さくなった。地元農家によると、平成元年に沼周辺で圃場整備が行われた後では、年度によって堰板の高さを変えていたことから、その影響による可能性がある。

貞広沼における灌漑期の流量は、概ね0.3～0.9m<sup>3</sup>/s程度の範囲であり、流入水量と流出水量の値はほぼ等し

かった(図-18)。非灌漑期では、降雨後を除くと、流量の値は0～0.2m<sup>3</sup>/s程度であった。平成28年度および平成30年度では貞広沼より上流部において、令和3年度では貞広沼周辺において圃場整備が行われたが、流入量および流出量について、顕著な変化は見られなかった。貞広沼の水位についても、灌漑期の方が高く、各期間における平均水位の差は0.19～0.38mであった。R1～R3では、平均水位が高くなる傾向がみられたが、明確な理由とは不明であった(図-20)。

調査期間中における沼の流出量、水位については、ど

ちらの沼についても、顕著な変化はみられなかった。圃場整備に伴う影響を明確に捉えるには、より長期間にわたる調査が必要であると考えられる。

## 2. 5 河跡湖における水質

天狗沼および貞広沼の流入地点および流出地点における水質濃度 (SS、T-N、T-P) を図-21～図-26 に示す。天狗沼の流入については、H29 の値のみをプロットしている。SS 濃度についてみると、天狗沼では、9 月 (R1、R3) において 155～731mg/L と値が著しく上昇することがあった他は、概ね数 mg/L～80mg/L の範囲であった。T-N 濃度については、H29 および H30 において、入口の値が 9mg/L 以上に達することがあったが、出口については概ね 0.7～2.4mg/L の範囲であった。T-P 濃度については、SS 濃度と類似した傾向がみられた。流入水路がないことから、いずれの水質項目についても、水質濃度の変動幅は小さく、水質濃度も比較的良好であった。ただし、沼の水深が比較的浅く、水生植物も繁茂していることから、枯死した植物の堆積により水面積が縮小するおそれがある。将来、沼の利活用を考える場合は、適切な維持管理が必要と考えられる。

貞広沼では、5 月において流入、流出ともに 400～750mg/L まで上昇したが、その他については 1～62mg/L の範囲であった。T-N 濃度では、5 月、9 月、10 月において、貞広沼の値が 3.9～7.7mg/L と値が上昇したが、そ

の他の月については、0.6～2.4mg/L の範囲であった。T-P 濃度では、5 月に 1.0～1.2mg/L となった他は、0.05～0.12mg/L の範囲で推移しており、大きな変動は見られなかった。

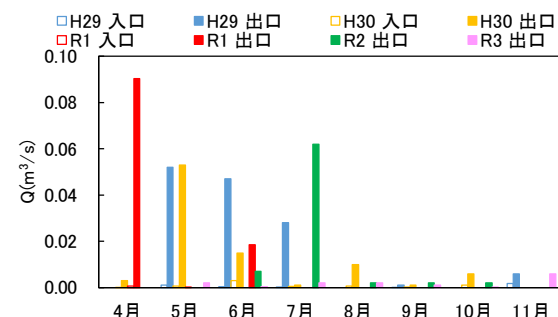


図-17 河跡湖における流入水量および流出水量 (天狗沼)

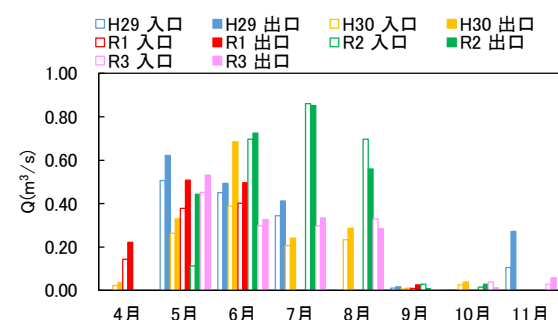


図-18 河跡湖における流入水量および流出水量 (貞広沼)

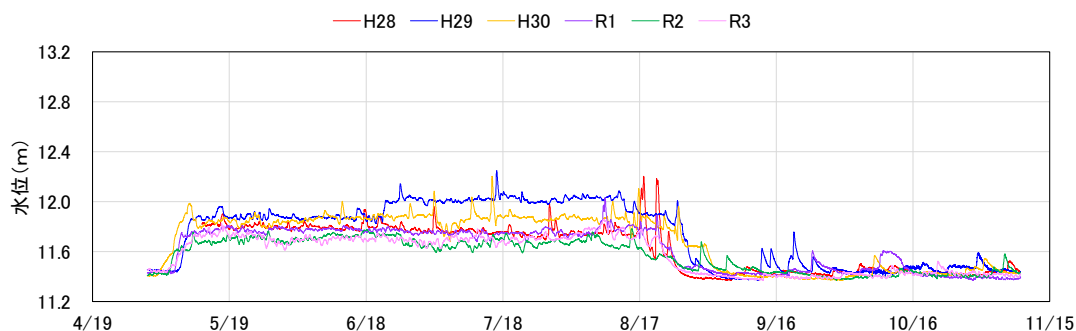


図-19 河跡湖における湖面水位の変化 (天狗沼)

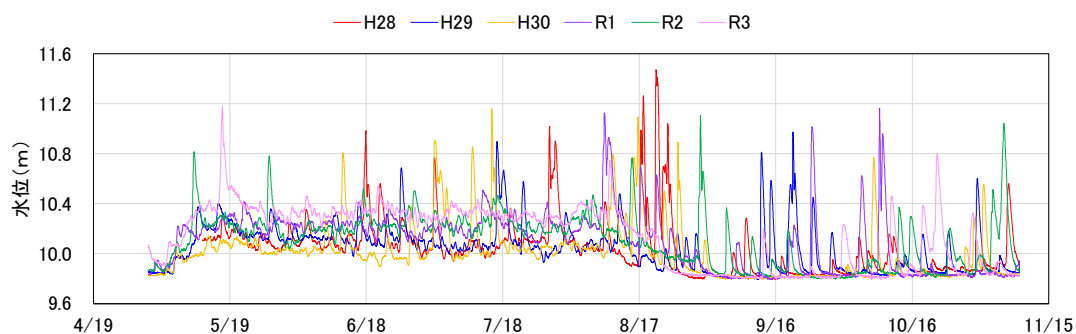


図-20 河跡湖における湖面水位の変化 (貞広沼)

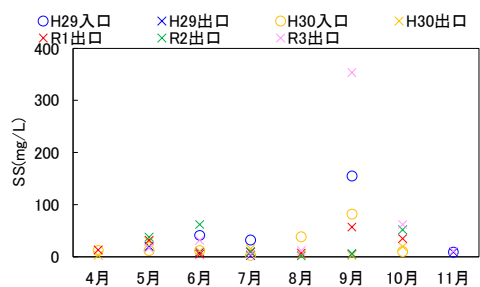


図-21 天狗沼の水質濃度 (SS)

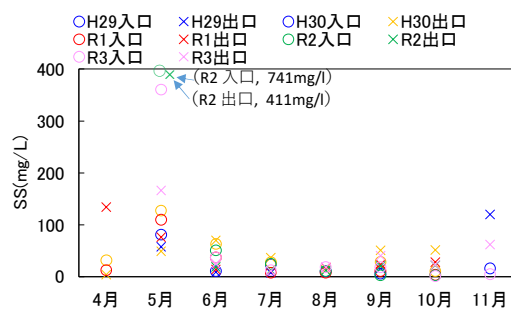


図-24 貞広沼の水質濃度 (SS)

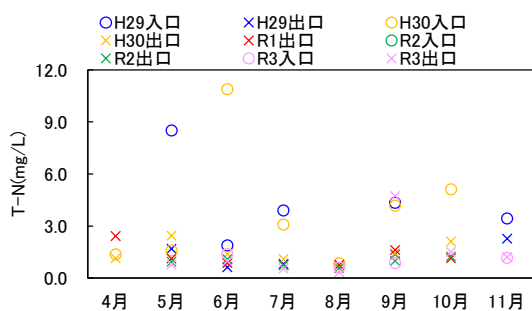


図-22 天狗沼の水質濃度 (T-N)

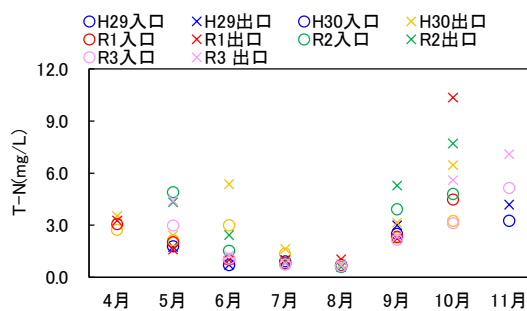


図-25 貞広沼の水質濃度 (T-N)

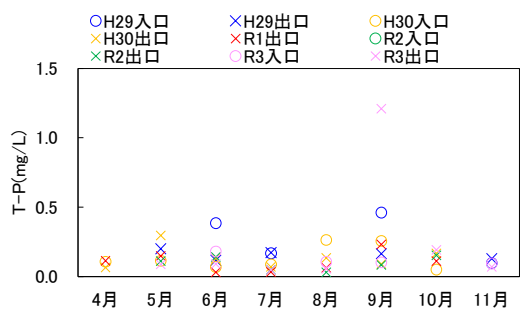


図-23 天狗沼の水質濃度 (T-P)

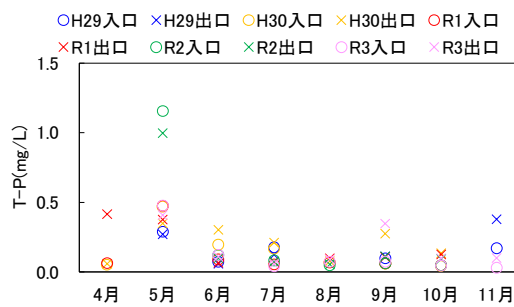


図-26 貞広沼の水質濃度 (T-P)

### 3. 農区レベルにおける水収支および水文環境の把握

農区レベルの水収支及び水文環境を把握するために、小用水路形式の異なる農区を対象として、水収支および水質の調査を行った。ここでは、その結果および配水管理用水による水質希釈効果について述べる。

#### 3. 1 美唄地区における調査概要

##### 3. 1. 1 地区概要

美唄市に位置する農区 A および農区 B を対象として、調査を実施した (図-27)。これらの農区は、前章の広域調査対象とした灌漑区域内にある。農区 A では、平成 27 年に圃場整備が実施され、大区画化および地下水位制御システムの整備が行われている。以下、農区 A を「整備済み農区 A」と呼ぶ。圃場 1 枚当たりの平均面積は 1.1ha であり、農区面積は約 30ha (27 筆) である。農業用水は、沼貝幹線用水路から、農区内の西側と東側に位置する用水路へ分水される。用水路は開水路形式であり、圃場へ取水されなかった残水 (配水管理用水) は農区外へ流出

する。この配水管理用水とは、用水路で一定の水位を確保し、分水や取水を可能にしたり、需要量の変化に即応したりなど、灌漑用水を供給するために必要なものである<sup>4)</sup>。圃場を通過した水は、農区内の西側と東側に位置する排水路を通じて、農区外へ流出する。

農区 B では、平成 30 年に圃場整備が行われている。圃場整備前の農区 B では、農区内の北側および西側は水田であり、その他は畑地 (小麦、大豆) となっていた。水田一筆の面積は 0.3ha 程度である。水収支調査は、農区内の北側の圃場群 (面積は約 12ha) を対象とした。以下、圃場整備前の農区 B における対象圃場群を「未整備農区 B」と呼ぶ。農業用水の大部分は、支線用水路 (開水路) から小用水路 (開水路) を経由し、水田圃場へ取水される。小用水路の残水は、農区内の土水路を経由して、支線排水路へ流出する。この土水路では、小用水路の残水の流入地点より上流側において圃場からの浸透水

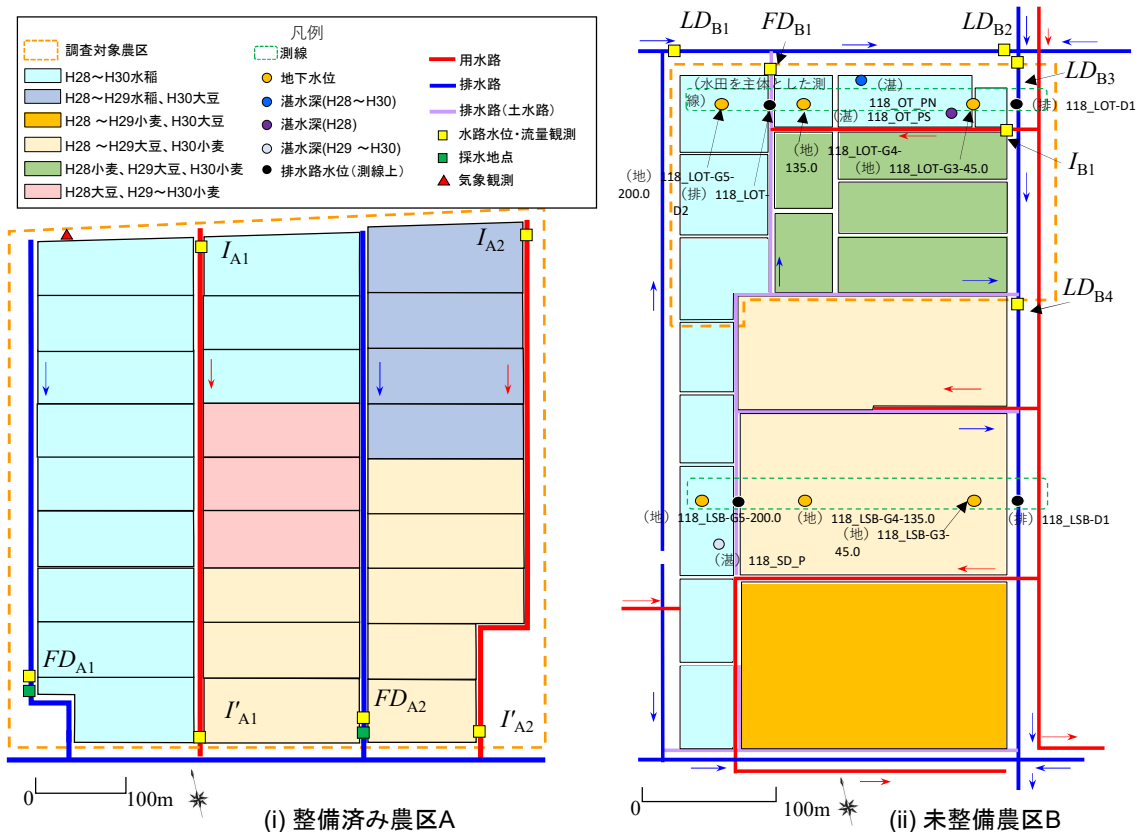


図-27 観測地点の位置（整備済み農区A、未整備農区B）

が流れているが、その流量は残水量よりも極めて小さいことから、土水路末端における流量は小用水路末端からの残水量にはほぼ等しいと考えた。また、未整備農区Bでは、農業用水の一部が揚水機により供給されていることから、ポンプの運転費用を抑制するために過剰な取水は行われないと考え、小用水路末端からの流出水量をすべて配水管理用水とみなした。農区内の一部の水田では、田越し灌漑が行われている。暗渠排水は、水閘の故障により開放されたままとなっており、集水渠から地下排水が0.7L/s程度流出している（バケツを用いた流量測定による）。農区内の耕作数人は3人であり、そのうち2人が水田圃場の耕作をしている。圃場の水管理操作は、各耕作者の判断により行われた。

圃場整備後の農区B（以下、「圃場整備済み農区B」と呼ぶ。）では、小用水路はパイプライン形式になり、圃場1筆の面積は1.4ha、合計8筆に整備されている（図-28）。農家への聞き取りによれば、用水路末端部の排泥工は、灌漑期間中は基本的に閉じられている。

### 3.1.2 調査方法

図-27 および図-28 に示す観測地点において、整備済み農区Aでは平成28年度から平成30年度までに、未整備農区Bでは平成28年度から平成29年度までに、整備済

み農区Bでは令和元年度から令和2年度までに、水収支調査を行った。用水路および排水路の流量は、各年度の5月から11月までの期間に月1回程度の定期調査を行い計測した。各流量観測地点においてH-Q曲線を作成し、10分間隔で観測した水位データを用いて、調査期間における流量をそれぞれ推定した。

整備済み農区Aにおける流入量および流出量については、各観測データを用いて、整備済み農区A内への流入量 $FI_A$ 、整備済み農区A内の圃場取水量 $I_A$ 、整備済み農区A内の小用水路末端からの流出量 $I'_A$ 、整備済み農区A内の圃場排水量 $DA$ を図-27に示す記号を用いて、それぞれ(1)~(4)式により算定した。

$$FI_A = I_{A1} + I_{A2} \tag{1}$$

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} - (I'_{A1} + I'_{A2}) \tag{2}$$

$$I'_A = I'_{A1} + I'_{A2} \tag{3}$$

$$D_A = FD_{A1} + FD_{A2} \tag{4}$$

ここで、 $I_A$ 、 $I'_A$ ：整備済み農区A内の各小用水路上流



端の流量、 $I'_{A1}$ 、 $I'_{A2}$ ：整備済み農区 A 内の各小水路末端の流量、 $FD_{A1}$ 、 $FD_{A2}$ ：整備済み農区 A 内の各小排水路の支線排水路合流前の流量である。

同様に、未整備農区 B への流入量  $FI_B$ 、未整備農区 B 内の圃場取水量  $I_B$ 、未整備農区 B からの小水路末端からの流出量  $I'_B$ 、未整備農区内 B の圃場排水量  $D_B$  は、それぞれ(5)~(8)式により算定した。

$$FI_B = I_{B1} \tag{5}$$

$$I_B = I_{B1} - I'_{B1} \tag{6}$$

$$I'_B = I'_{B1} \tag{7}$$

$$D_B = LD_{B2} - LD_{B1} + LD_{B4} - LD_{B3} - I'_{B1} \tag{8}$$

ここで、 $LD_{B1}$ 、 $LD_{B2}$ 、 $LD_{B3}$ 、 $LD_{B4}$ ：未整備農区 B の排水が流入する各支線排水路の流量、 $I_{B1}$ ：未整備農区 B 内の小水路の流量、 $I'_{B1}$ ：未整備農区 B 内の土水路末端部の流量である。

各農区への流入水量のうち、配水管利用水が占める割合（以下、「配水管利用水率」という）を  $R_A$  および  $R_B$  として、それぞれ(9)式および(10)式により算定した。

$$R_A = \frac{I'_{A1} + I'_{A2}}{FI_A} \tag{9}$$

$$R_B = \frac{I'_{B1}}{FI_B} \tag{10}$$

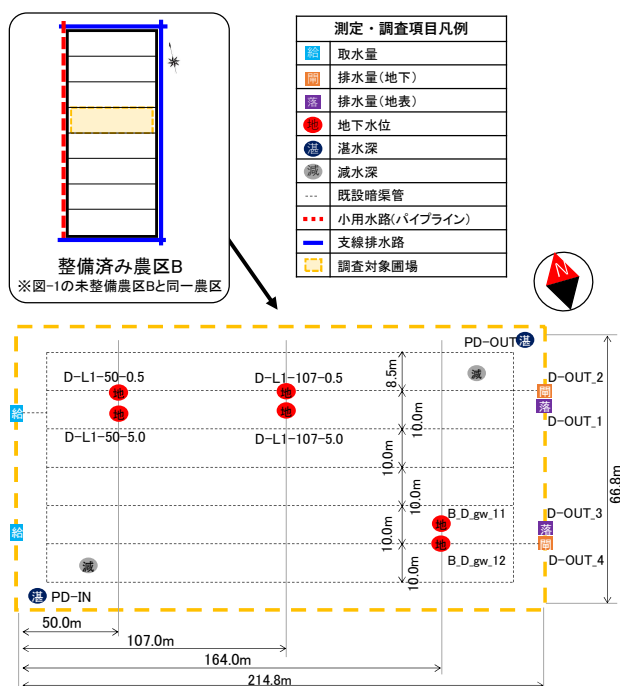


図-28 観測地点の位置（整備済み農区B）

圃場内の地下水位の観測方法については、塩ビ管に格納した絶対圧式水位計を田面から 1.3m の深さに埋設した。気象観測は、整備済み農区 A 内において、水収支調査期間中に実施した。蒸発散量は、観測データを用いてペンマン法により推定し、作物係数を乗じて求めた。水稻の作物係数については、文献値から  $K_c=1.05\sim 1.1$  を用いた<sup>3)</sup>。

未整備農区 B の水田および畑地を主体とするそれぞれの測線において、平成 28 年度 5 月から平成 29 年度 10 月まで、圃場の地下水位、土水路の水位、排水路水位を観測した。整備済み農区 B では、令和元年度 5 月から令和 2 年度 10 月までの期間において、水田圃場および排水路水位を行った。地下水位の観測方法については、塩ビ管に格納した絶対圧式水位計を田面から 1.3m の深さに埋設し、観測した。水位の測定頻度は 10 分間隔である。

また、未整備農区 B の支線排水路 4 箇所および整備済み農区の小排水路 2 箇所において、流量観測と同日に採水を行った。採水した試料については、室内で SS、T-N、T-P、COD などの水質分析を行った。

このほか、集中観測として、平成 28 年度の代かき・田植え期間（5 月 13 日～6 月 20 日）において、整備済み農区の西側の小排水路下流部に自動採水器を設置し、6 時間間隔で連続採水を行った。採水した試料については、室内で SS、T-N、T-P の分析を行った。

### 3. 2 中富良野地区における調査概要

#### 3.2.1 地区概要

空知郡中富良野町に位置する、圃場整備済みのパイプライン系農区を対象として、調査を実施した（図-29）。以下、この農区を「整備済み農区 C」と呼ぶ。農区面積は約 17ha であり、16 筆の圃場を有する。圃場 1 枚当たりの平均面積は 1.1ha である。この農区では平成 30 年度に、大区画化およびパイプライン化、地下水位制御システムの整備が行われた。各圃場への用水供給は、地表灌漑 2 ヶ所、地下灌漑 1 ヶ所から行える。各圃場では、集中管理孔により、地表または地下、あるいはその併用による用水供給が可能である。各圃場の排水は、地表排水 2 ヶ所、暗渠排水 2 ヶ所から行える。圃場内には、暗渠管（φ80～90mm、勾配 1/1,000）が田面から 0.80m～1.00m の深さに約 10m 間隔で埋設されている。疎水材は木材チップである。農区内の各圃場における耕作および水管理は、一人の農業者の判断により行われた。

### 3.2.2 調査方法

令和元年度および令和2年度において、整備済み農区Cの水収支調査を行った。農区内の観測地点の位置を図-29に示す。用水路および排水路の流量は、5月から11月までの期間に月1回程度の定期調査を行い、計測した。各流量観測地点においてH-Q曲線を作成し、10分間隔で観測した水位データを用いて、調査期間における流量をそれぞれ推定した。気象観測は、農区内において、水収支調査期間中に実施した。蒸発散量は、3.1.2と同様、ペンマン法により推定した。

各観測データを用いて、整備済み農区内への流入量FI、整備済み農区内の圃場排水量Dを図-29に示す記号を用いて、それぞれ(11)および(12)式により算定した。

$$FI = I_1 A_1 + I_2 A_d \quad (11)$$

$$D = FD_1 + FD_2 \quad (12)$$

ここで、 $I_1$ ：移植栽培圃場の取水量、 $I_2$ ：乾田直播栽培圃場の取水量、 $A_1$ ：農区内の移植栽培面積、 $A_d$ ：農区内の乾田直播栽培圃場面積、 $FD_1$ 、 $FD_2$ ：農区内の各小排水路の流量である。

また、農区内の小排水路2箇所および圃場取水口1箇所において、流量観測と同日に採水を行った。このほか、集中観測として、令和元年度の5月12日～6月3日において、整備済み農区の西側の小排水路下流部に自動採水

器を設置し、6時間間隔で連続採水を行った。いずれも採水した試料については、室内でSS、T-N、T-Pの分析を行った。

### 3.3 開水路系農区およびパイプライン系農区における水収支

小用水路が開水路形式である整備済み農区A、未整備農区Bのそれぞれの水収支の例を図-30に示す。整備済み農区A内の各水量については、流量観測地点の下流において堰上げが行われていない観測日のデータをそれぞれ平均して算出した。未整備農区Bでは、現地調査で観察した際、田越し灌漑が行われている圃場のうち、最下流に位置する圃場の落口から常に排水が生じていた。これは、水管理を省力化すると同時に、各圃場へ不足なく灌漑するために掛け流しが行われていたと考えられる。これに対して、整備済み農区Aでは各圃場の水管理が独立したものとなることから、落口からの常時の排水はみられなかった。このように、整備済み農区Aでは、圃場ごとの水管理が容易になり、田越し灌漑に伴う掛け流しが行われなくなることから、未整備農区Bと比べて取水量が減少したと考えられる。各農区における配水管理用水率は、平成28年度は整備済み農区Aでは62%、未整備農区では66%であり、平成29年度は整備済み農区では37%、未整備農区Bでは43%であり、どちらもほぼ同程度であった。年による配水管理用水率の差は、降雨状況の違いにより生じたと考えられる。

小用水路形式がパイプラインである整備済み農区Cの

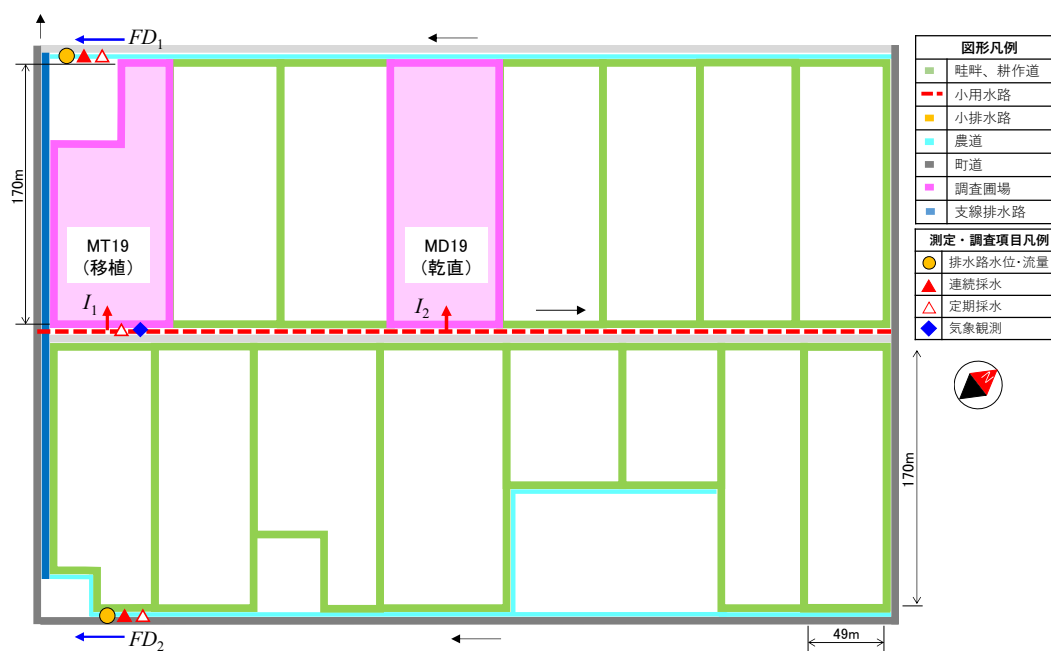


図-29 観測地点の位置 (整備済み農区C)

水収支の例を図-31に示す。農区内の各水量については、6～7月における圃場水収支を基に算出した。パイプライン系農区の水収支では、配水管理用水量が含まれないことから、農区流入量は圃場取水量のみとなり、農区からの流出量は圃場排水量のみとなる。そのため、圃場整備によって、小用水路形式が開水路からパイプラインへと変わる地域では、農区水収支において配水管理用水量がなくなることから、支線排水路への流出量が減少する可能性があると考えられる。

### 3. 4 農区内における地下水位の経時変化

圃場整備の前後における農区レベルの流出機構の変化要因として、パイプライン化や用排水系統の変化のほか、転作田の土壌は、水田と比べて乾燥し、亀裂が発達することから、水田と転作では、圃場内の地下水位が異なる。このため、作付け品目が変わることにより、農区から周辺排水路への浸透量や農区内の貯留量などが変化し、流出機構に影響することが考えられる。今後も、同一農区内においてすべて水稲作が行われるケースの他、水稲作と転作が混在するケースや、水稲作から転作に変わるケースが想定される。こうした圃場整備前後における流出機構の違いを比較するには、水稲作および転作における圃場地下水位や、農区内の地下水位分布を把握する必要がある。そこで、農区内における水田または畑地を主体とした測線について、平成30年度における測線上の地下水位および水路水位の経時変化をそれぞれ図-32および図-33に示す。図中の地盤高は、それぞれの圃場東側端から200mまでの平均値である。圃場湛水位については、2地点の平均値を用いた。

水田を主体とした測線についてみると、地下水位は、未整備農区Bの西側に位置する118\_LOT\_G5\_200.0と118\_LOT\_G4\_135.0で概ね同様となり、118\_LOT\_G3\_45.0が低く、排水路との距離が近くなるにつれて値が低くなった(図-32)。一方、畑地を主体とした測線における畑地の地下水位の値は、水田主体の測線における地下水位と比べて、降雨に対して敏感に反応する傾向がみられた(図-33)。水田主体の測線における3地点の地下水位では、灌漑期および非灌漑期の平均値の差は0.03～0.11mの範囲にあった。これに対して、畑地主体の測線における3地点の地下水位では、灌漑期および非灌漑期の平均値の差は0.11～0.38mの範囲にあり、水田部分の地下水位の差が最も大きく、畑地部分における時期ごとの差はほとんどなかった。両測線の田面の標高値は、西側から排水路方向に低くなっており、その低下幅は畑地を主体とした測線の方が大きかった。田面からの地下水位の深

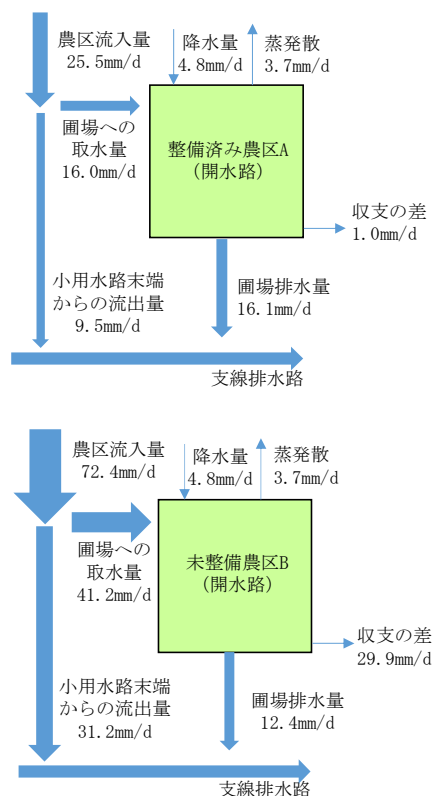


図-30 開水路系農区における水収支 (平成29年度)

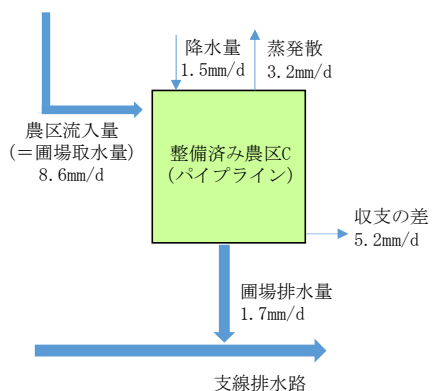


図-31 パイプライン系農区における水収支 (令和元年度)

さは、水田を主体とした測線と比較すると、畑地を主体とした測線の方が、灌漑期、非灌漑期とも排水路方向に低下する傾向がみられた。畑地では、土壌の亀裂が発達していると考えられる。これらの未整備農区内における地下水位の傾向は、調査を行った3年間とも同様にみられた。

同一の農区における、圃場整備後の水田側線上の地下水位および下流側の排水路水位を図-34に示す。圃場整

備後は、灌漑期間中でも暗渠水閘の開度調整により、圃の地下水位制御が可能となった。また、未整備圃場場における田越し灌漑とは異なり、圃場単位での給排水管理も可能となった。こうした水管理の変化により、農区水収支における流入量および流出量の増加につながるこ

が考えられる。

### 3. 5 配水管理用水による支線排水路の水質希釈効果

整備済み農区A内では、小水路末端からの流出水 ( $I'_{A1}$ ,  $I'_{A2}$ ) と小排水路からの排水 ( $FD_{A1}$ ,  $FD_{A2}$ ) は、支線排水路で混合する。開水路形式の農区における配水

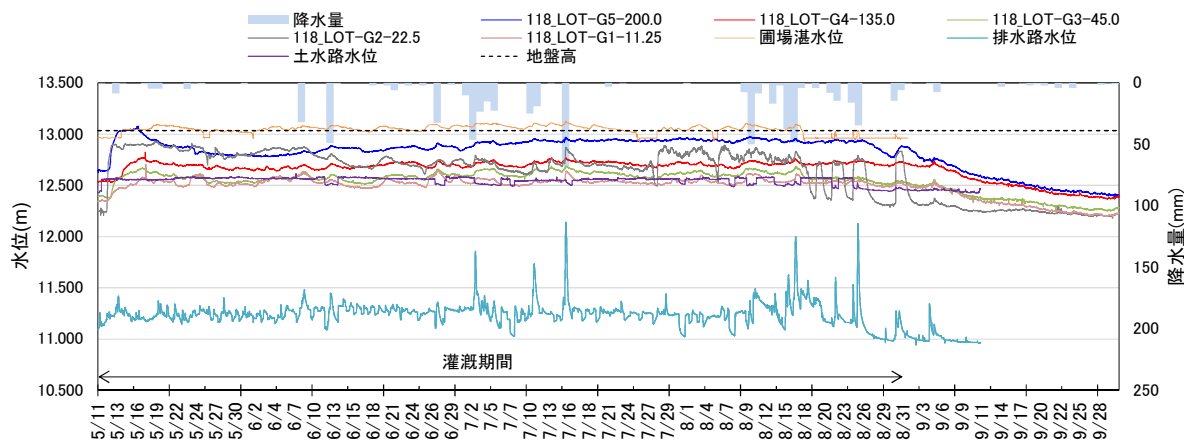


図-32 測線における地下水位および水路水位の経時変化 (平成30年度、未整備農区B、水田主体)

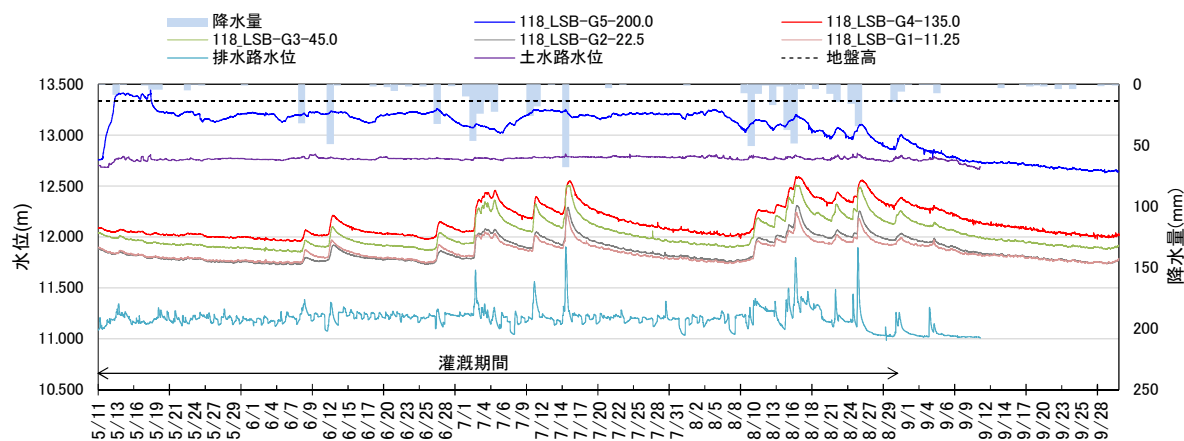


図-33 測線における地下水位および水路水位の経時変化 (平成30年度、未整備農区B、畑地主体)

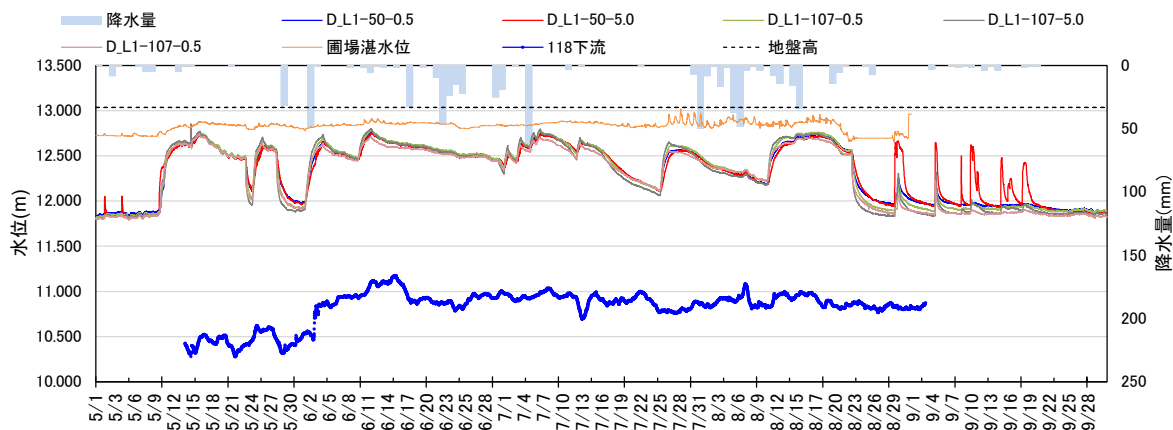


図-34 農区内における地下水位および水路水位の経時変化 (令和2年度、整備済み農区B)



管理用水の水質保全機能を評価するため、農区内および前章の灌漑区域内の水質および流量について、以下に述べる。

### 3.5.1 圃場整備済み農区における小排水路の水質濃度

平成 30 年度における定期流量観測と同日における整備済み農区 A 内の小排水路の水質濃度 (SS、T-N、T-P) を図-35~図-37 に示す。SS 濃度では、 $FD_{A1}$  地点、 $FD_{A2}$  地点とも、1~22 mg/L の範囲で推移した。T-N 濃度については、 $FD_{A1}$  地点では 0.6~3.5mg/L、 $FD_{A2}$  地点では 2.4~7.6 mg/L の範囲で推移しており、畑地面積が比較的多い  $FD_{A2}$  地点で値が大きくなった。T-P 濃度については、両地点とも 0.02~0.16 mg/L の範囲で推移しており、大きな差は見られなかった。

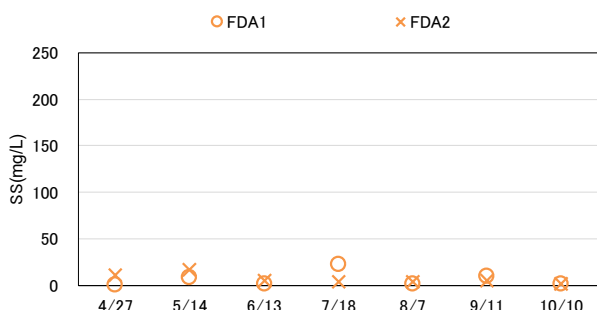


図-35 整備済み農区 A 内の小排水路における SS 濃度 (平成 30 年度)

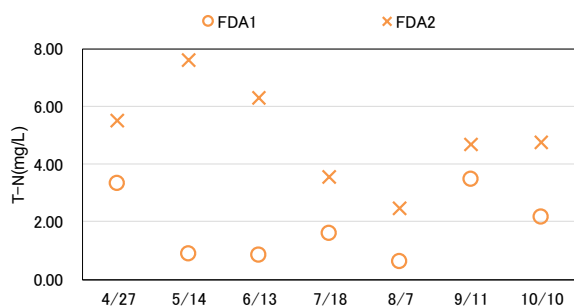


図-36 整備済み農区 A 内の小排水路における T-N 濃度 (平成 30 年度)

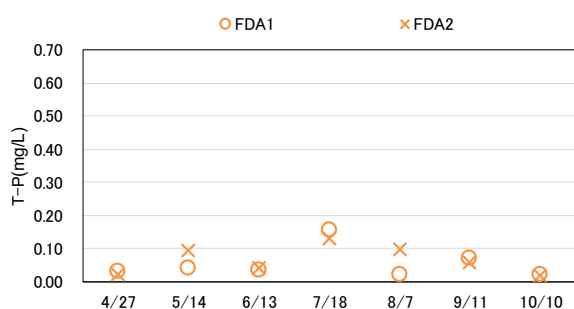


図-37 整備済み農区 A 内の小排水路における T-P 濃度 (平成 30 年度)

### 3.5.2 灌漑期初期における小排水路の水質濃度

ここでは、主に圃場排水が流入する小排水路における灌漑初期の水質濃度の変化について述べる。平成 28 年度の灌漑期初期における、整備済み農区内の小排水路 ( $FD_{A1}$ ) の T-N、T-P、SS の各水質濃度の推移を図-38 に示す。5 月 13 日から 5 月 30 日までの期間における平均濃度は、それぞれ 3.5mg/L、1.8mg/L、759mg/L であった。同農区内の栽培管理をみると、移植栽培では、5 月 14 日に代かき取水が行われた後、5 月 17 日に代かき、5 月 28 日に田植えが行われた。湛水直播栽培では、5 月 13 日に代かき取水、5 月 15 日に代かき、5 月 17 日に播種が行われ、乾田直播栽培では、5 月 10 日に播種および初期取水が行われた。図-38 では、5 月 16~20 日と 5 月 25~28 日において、すべての水質項目について濃度上昇のピークがみられた。これらは、代かきおよび田植え時の水管理により生じたと考えられる。代かき・田植え後の約 3 週間 (5 月 29 日~6 月 20 日) における平均濃度は、それぞれ 1.3mg/L、0.08mg/L、31mg/L まで低下した。

令和元年度における整備済み農区 C 内の小排水路 ( $FD_1$  および  $FD_2$  の観測地点) の T-N 濃度、T-P 濃度、

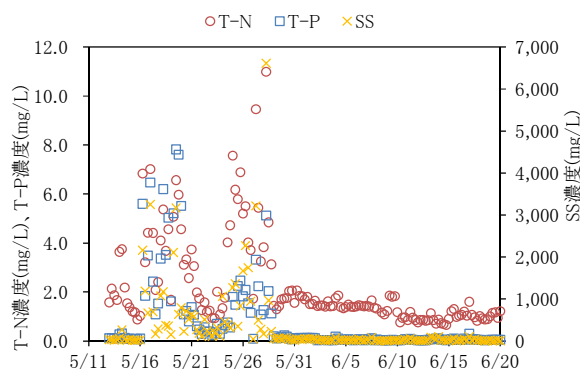


図-38 灌漑期初期における小排水路の水質濃度変化 (平成 28 年度、整備済み農区 A)

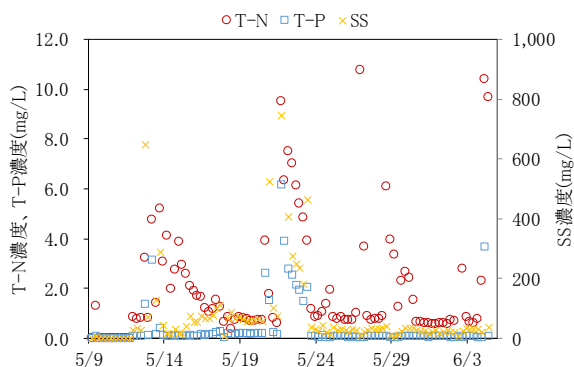


図-39 灌漑期初期における小排水路の水質濃度 (令和元年度、整備済み農区 C)

SS 濃度を図-39 に示す。代かき・田植えが行われる灌漑初期 (5月12日～5月25日) における平均濃度は、それぞれ 2.4mg/L、0.72mg/L、187mg/L であった。農区内の水田では、5月14日～5月17日頃に代かきが、5月24日頃に田植えが行われたときに、水質濃度が上昇した。代かき・田植え後の5月25日～6月3日における平均濃度は、それぞれ 2.1mg/L、0.07mg/L、25mg/L まで低下した。

両農区の小排水路について、代かき・田植え時における水質濃度の上昇を確認した。しかし、これらの農区では、圃場条件や小用水路の形式の相違により、取水および配水の特性が異なる可能性がある。このことから、今後、各農区における小排水路の負荷量特性について、さらに分析する必要がある。

### 3.5.3 灌漑期間における灌漑区域内の水質濃度

灌漑区域内の平成29年度における幹線用水路および幹線排水路、小排水路 (FD<sub>A1</sub> および FD<sub>A2</sub> の観測地点) の T-N 濃度、T-P 濃度、SS 濃度を図-40～図-42 に示す。灌漑区域内の用水路はコンクリート製であることから、調査農区の小用水路における水質濃度は、幹線用水路における値と同程度であると考えられる。

小排水路および幹線排水路における水質濃度を比べると、T-N では、調査期間を通じて、小排水路の方が幹線排水路よりも値が高くなる傾向が見られた。T-P および SS では、T-N と同様の傾向が5月に見られたが、その他については、両者とも同程度となる傾向が見られた。代かきに伴い圃場排水が高濃度となる5月では、いずれの水質項目についても、幹線排水路の値の方が低かった。このことから、灌漑区域内の用水路末端からの流出水 (配水管理用水) が圃場排水を希釈し、水質保全に寄与していたと推察される。

### 3.5.4 配水管理用水による圃場排水の希釈効果

配水管理用水による圃場排水の希釈効果を評価するために、平成29年5月18日の定期採水時の流量および水質のデータを用いて、T-N、T-P、SS のそれぞれについて、整備済み農区内の小排水路の排水 (FD<sub>A1</sub>) と小用水路の残水 (I'<sub>A1</sub>) が混合した後の支線排水路における水質濃度 C<sub>L</sub> を(13)式により推定した。

$$C_L = \frac{C_I I'_{A1} + C_{A1} FD_{A1}}{I'_{A1} + FD_{A1}} \quad (13)$$

ここで、C<sub>I</sub> ; 農業用水の水質濃度、C<sub>A1</sub> ; 小排水路での水質濃度、I'<sub>A1</sub> ; 小用水路の残水量、FD<sub>A1</sub> ; 小排水路の流量である。

各水質濃度の推定結果を図-43 に示す。灌漑期初期において、開水路系における用水路末端から流出する配水管理用水は、小排水路における代かき・田植え期間の高濃度の圃場排水を希釈し、8割から9割程度、これらの水質濃度を低下させていることがわかった。これらの推定値



図-40 幹線水路および小排水路の T-N 濃度 (平成 29 年度)



図-41 幹線水路および小排水路の T-P 濃度 (平成 29 年度)

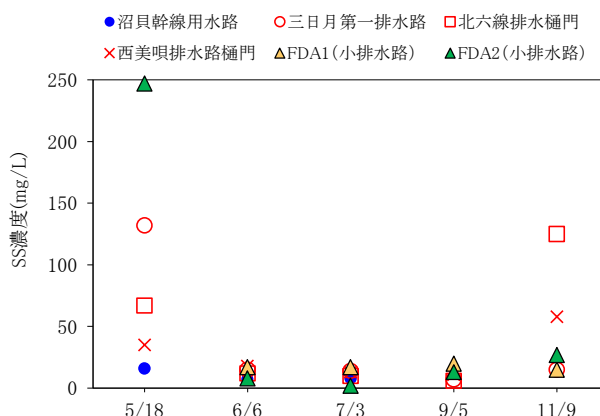


図-42 幹線水路および小排水路の SS 濃度 (平成 29 年度)

は、**図-40**～**図-42**に示す平成29年5月18日の幹線排水路の値に近いことから、計算結果は妥当であり、実態を反映していると考えられた。

このように、用水路形式が開水路系からパイプライン系へ変わる地域では、配水管理用水が不要となることから、圃場排水が希釈されることなくそのまま流下するおそれがある。将来、パイプライン形式で整備された後も水質保全機能を保持するためには、地域条件に応じて適切な対策を検討することが望ましいと考えられる。

### 3.5.5 河跡湖における水文環境保全方法の検討

圃場整備の進展に伴い、水田地帯に位置する河跡湖では、配水管理用水量の減少、流入水の減少による河跡湖内の滞留時間の増加等が水質に影響を及ぼすと予想される。ここでは、3.3で得られた配水管理用水率を用いて、パイプライン化の進展により配水管理用水量が変化したときの、代かき・田植え時期における河跡湖流入水の水質濃度  $C_F$  を(14)式により推定した。

$$C_F = \frac{C_D Q_D + C_i Q_M}{Q_D + Q_M} \quad (14)$$

ここで、 $Q_D$ ：集水域からの流出水の流量、 $C_D$ ：集水域からの流出水の水質濃度、 $Q$ ：河跡湖流入における現況

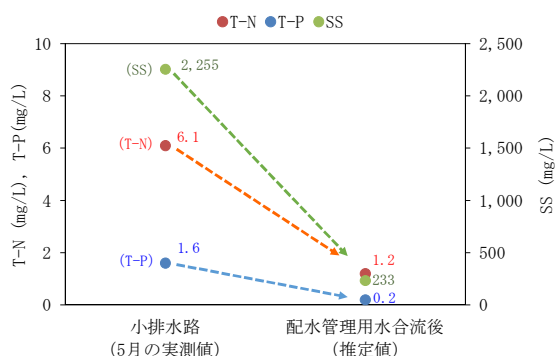


図-43 配水管理用水の混合後における水質濃度の推定結果 (平成29年度)

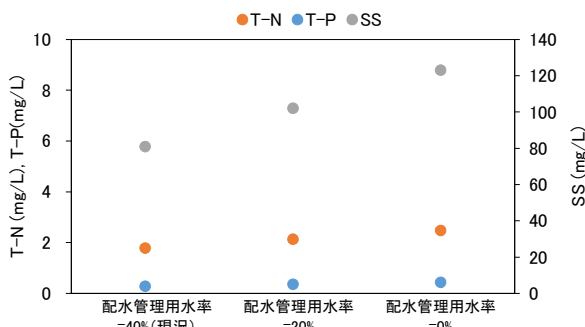


図-44 配水管理用水率の変化に伴う貞広沼入口の水質濃度予測結果の例 (代かき・田植え期)

の流量、 $C$ ：河跡湖流入における現況の水質濃度、 $C_i$ ：農業用水（沼貝幹線）の水質濃度、 $Q_M$ ：配水管理用水量である。

各水質濃度の推定結果を**図-44**示す。現況の配水管理用水率は40%であるが、これが20%、0%に減少した場合、各水質項目の値は、現況よりも1.2～1.5倍に上昇すると推定された。圃場整備後も水質濃度を良好に保つためには、配水管理用水またはそれに代わる希釈水の確保することが望ましいと考えられる。また、希釈水を利用するためには、排泥工のような既存施設の利用や新たな通水施設の設置を検討する必要があると思われる。今後、河跡湖への流入量および河跡湖内の水質変化との関連性に留意し、より詳細な水質対策案を検討する必要がある。

## 4. 水田地帯の周辺水文環境に配慮した灌漑排水技術の検討

ここでは、集水域における土地利用や、各地目における流出水の水質濃度等のちがいを表現できるものとして、水質タンクモデルを用いて幹線排水路の流量および水質濃度を推定し、その結果を基に、圃場整備後における水質保全対策を検討することを目的とした。

### 4.1 水田地帯の水循環および負荷流出機構のモデル化

ここでは、幹線排水路の集水域を対象として流出水量を計算するために、**図-45**に示すタンクモデルを作成した。菅原のタンクモデル<sup>5)</sup>は、簡単な構造であり、長期流出解析にも広く利用されている。このモデルで推定する水質項目については、肥料分などの流出が問題とされやすい窒素濃度を対象とした。モデルを作成する上で留意した点は、以下のとおりである。

- ① 土地利用ごとの流出機構および水質濃度を表現できるように、「水田タンク」および「畑地タンク」、農地以外の宅地、道路等を含む「その他タンク」を設定した。
- ② 農業用水については、幹線用水路および支線用水路

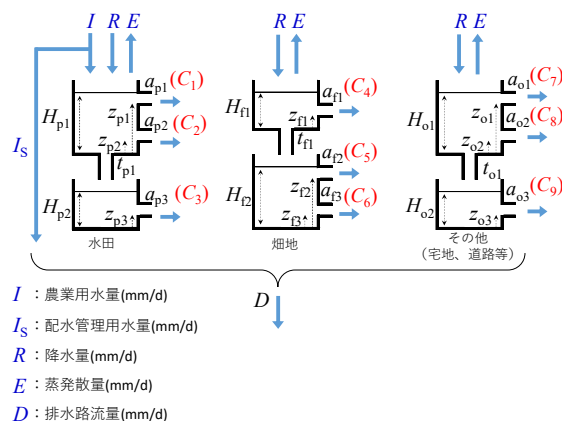


図-45 タンクモデルの構造

の配水管理用水量を考慮するために、配水管理用水率をそれぞれ設定した。幹線水路における配水管理用水率については、沼貝幹線水路末端部からの放水量および沼貝幹線水路の上流部の流量の実測値により算定した。幹線水路からの配水管理用水量については、放水路の接続先である三日月第一排水路に流出することとした。また、支線水路の配水管理用水率については、3.3の結果より40%とした。計算対象とする幹線排水路には、小用水路が開水路形式である圃場面積に応じて、支線水路からの配水管理用水量が直接流出することとした。

- ③ 水田については、圃場が湛水状態である期間と非湛水状態である期間では浸透機構が異なるため、時期ごとに浸透孔の係数を設定した。
- ④ 水田タンクの水質濃度係数については、灌漑初期および普通期についてそれぞれ設定した。また、水稻栽培方式ごとに灌漑初期の水質濃度特性が異なることから、代かきを行う水田圃場（移植栽培、湛水直播栽培）と代かきを行わない水田圃場（乾田直播栽培）について、水質濃度係数を設定した。

#### 4.2 幹線排水路流量の推定方法

ここでは、5月から9月までを対象として、集水域内の幹線排水路の流量および汚濁負荷量の計算を日単位で行った。「水田タンク」の計算式は以下のとおりである。

$$H_{p1}(i) = H'_{p1}(i) + P(i) - E(i) \quad (15)$$

$$H_{p1}(i) = H_{p1}(i) - a_{p1}\{H_{p1}(i) - z_{p1}\} - a_{p2}\{H_{p1}(i) - z_{p2}\} - g_{p1}H_{p1}(i) \quad (16)$$

$$H_{p2}(i) = H'_{p2}(i) + g_{p1}H_{p1}(i) \quad (17)$$

$$H'_{p2}(i) = H_{p2}(i) - a_{p3}H_{p2}(i) \quad (18)$$

$$Q_p(i) = a_{p1}\{H_{p1}(i) - z_{p1}\} + a_{p2}\{H_{p1}(i) - z_{p2}\} + a_{p3}H_{p2}(i) \quad (19)$$

ここで、 $i$ ：灌漑期初日からの日数、 $H_{p1}(i)$ 、 $H_{p2}(i)$ ：タンク貯留水量、 $P(i)$ ：降水量、 $E(i)$ ：蒸発散量、 $z_{p1}$ 、 $z_{p2}$ 、 $z_{p3}$ ：流出孔の高さ、 $a_{p1}$ 、 $a_{p2}$ 、 $a_{p3}$ ：流出孔係数、 $g_{p1}(i)$ ：浸透孔係数、 $H'_{p1}(i)$ 、 $H'_{p2}(i)$ ：前日のタンク貯留量、 $Q_p(i)$ ：「水田タンク」からの流出量である。畑地タンクの計算式は以下のとおりである。

$$H_n(i) = H'_n(i) + P(i) - E(i) \quad (20)$$

$$H'_n(i) = H_n(i) - a_{f1}\{H_n(i) - z_{f1}\} - g_{f1}H_n(i) \quad (21)$$

$$H_{r2}(i) = H'_{r2}(i) + g_{f1}H_n(i) \quad (22)$$

$$H'_{r2}(i) = H_{r2}(i) - a_{f2}H_{r2}(i) - a_{f3}H_{r2}(i) \quad (23)$$

$$Q_f(i) = a_{f1}\{H_n(i) - z_{f1}\} + a_{f2}\{H_{r2}(i) - z_{r2}\} + a_{f3}\{H_{r2}(i) - z_{r3}\} \quad (24)$$

ここで、 $H_n(i)$ 、 $H_{r2}(i)$ ：タンク貯留水量、 $z_{f1}$ 、 $z_{r2}$ 、 $z_{r3}$ ：流出孔の高さ、 $a_{f1}$ 、 $a_{f2}$ 、 $a_{f3}$ ：流出孔係数、 $g_{f1}(i)$ ：浸透孔係数、 $H'_n(i)$ 、 $H'_{r2}(i)$ ：前日のタンク貯留量、 $Q_f(i)$ ：畑地からの流出量である。

「その他タンク」の計算式は以下のとおりである。

$$H_{o1}(i) = H'_{o1}(i) + P(i) - E(i) \quad (25)$$

$$H_{o1}(i) = H_{o1}(i) - a_{o1}\{H_{o1}(i) - z_{o1}\} - a_{o2}\{H_{o1}(i) - z_{o2}\} - g_{o1}H_{o1}(i) \quad (26)$$

$$H_{o2}(i) = H'_{o2}(i) + g_{o1}H_{o1}(i) \quad (27)$$

$$H'_{o2}(i) = H_{o2}(i) - a_{o3}H_{o2}(i) \quad (28)$$

$$Q_o(i) = a_{o1}\{H_{o1}(i) - z_{o1}\} + a_{o2}\{H_{o1}(i) - z_{o2}\} + a_{o3}H_{o2}(i) \quad (29)$$

ここで、 $H_{o1}(i)$ 、 $H_{o2}(i)$ ：タンク貯留水量、 $z_{o1}$ 、 $z_{o2}$ 、 $z_{o3}$ ：流出孔の高さ、 $a_{o1}$ 、 $a_{o2}$ 、 $a_{o3}$ ：流出孔係数、 $g_{o1}(i)$ ：浸透孔係数、 $H'_{o1}(i)$ 、 $H'_{o2}(i)$ ：前日のタンク貯留量、 $Q_o(i)$ ：「その他タンク」からの流出量、である。

集水域からの流出量の計算式は以下のとおりである。

$$I_s(i) = I(i)M(1 - R) \quad (30)$$

$$D(i) = Q_p(i) + Q_2(i) + Q_1(i) + I_s(i) \quad (31)$$

ここで、 $I_s(i)$ ：配水管理用水量、 $I(i)$ ：集水域における農業用水量、 $M$ ：配水管理用水率、 $R(i)$ ：パイプライン整備率である。

入力データについては、降水量および沼貝幹線用水量の実測値、ペンマン法で算出した蒸発散量を用いた。各地目の面積については土地改良センターより聞き取った値を使用した。タンクモデルの各パラメータについては、既往文献の値を参考にするとともに、漏水時や挺水寺における流量、降雨に対するピーク流量、ハイドログラフ



の波形などを考慮しながら、(32)式に示す誤差率  $P$  が小さくなるよう試行錯誤的に決定した。

$$P = \frac{1}{n} \sum \frac{|X_o - X_c|}{X_c} \quad (32)$$

ここで、 $n$ : データ个数、 $X_o$ : 実測値、 $X_c$ : 計算値である。

2016年のデータを用いて決定したパラメータを表-1に示す。キャリブレーションを行った結果、推定値と実測値との平均誤差率は30%程度となり、概ね良好な結果が得られた(図-46)。

### 4.3 幹線排水路の水質濃度の推定方法

水質タンクモデルによる負荷量の推定方法には、LQ式による方法<sup>6)</sup>や各タンクに汚濁体積物質量を負荷する方法<sup>7)</sup>などがあるが、ここでは、パラメータ数がより少ないこと、実測データに基づきパラメータを決定できることから、濃度係数法<sup>8)</sup>を採用した。

集水域内の幹線排水路の水質濃度については、幹線排水路流量と平行して、以下の式により日単位で計算した。

$$L_{p1}(i) = C_1 a_{p1} \{H_{p1}(i) - z_{p1}\} + C_2 a_{p2} \{H_{p1}(i) - z_{p2}\} + C_3 a_{p3} H_{p2}(i) \quad (33)$$

$$L_f(i) = C_4 a_{f1} \{H_{f1}(i) - z_{f1}\} + C_5 a_{f2} \{H_{f2}(i) - z_{f2}\} + C_6 a_{f3} \{H_{f2}(i) - z_{f3}\} \quad (34)$$

$$L_o(i) = C_7 a_{o1} \{H_{o1}(i) - z_{o1}\} + C_8 a_{o2} \{H_{o1}(i) - z_{o2}\} + C_9 a_{o3} H_{o2}(i) \quad (35)$$

$$C(i) = \frac{L_p(i) + L_f(i) + L_o(i) + C_{10} I_s(i)}{Q_p(i) + Q_2(i) + Q_1(i) + I_s(i)} \quad (36)$$

ここで  $C(i)$ : 幹線排水路の水質濃度、 $L_p(i)$ : 「水田タンク」からの流出負荷量、 $L_f(i)$ : 畑地からの流出負荷量、 $L_o(i)$ : 「その他タンク」からの流出負荷量、 $C_1 \sim C_{10}$ : 濃度係数である。

水質濃度に関するパラメータを表-2に示す。これらの値については、農地排水の実測データを参考にしながら、2016年のデータを用いて試行錯誤的に決定した。水質濃度については、実測データ数が少なかつたものの、概ね傾向を捉えることができた(図-46)。

### 4.4 シミュレーション計算結果

集水域内における水循環および水質濃度の影響について検討するために、2018年のデータを用いて予測計算を行った。予測シナリオについては、①パイプライン化された場合(移植: 湛水直播: 乾田直播=87:11:2)、②パイ

プライン化後、直播栽培面積率が増加変化した場合(移植: 湛水直播: 乾田直播=3:3:4)の2とおりである。

集水域内における排水路流量および水質濃度を推定した結果を図-47に示す。①のシナリオでは、灌漑初期では、パイプライン化により配水管理用水量が減少した結果、灌漑初期において幹線排水路のT-N濃度が著しく上昇すると予測された。②では、移植栽培における代かき時の負荷量を抑制することにより、パイプライン化による濃度上昇期間が短縮されると予測された。

表-1 タンクモデルの係数

流出口係数	流出孔高さ	浸透孔係数
$a_{p1}$	2.00	$z_{p1}$ 95 $t_{p1}$ 0.10
$a_{p2}$	0.01	$z_{p2}$ 44 $t_{f1}$ 0.74
$a_{p3}$	0.04	$z_{p3}$ 62 $t_{o1}$ 0.01
$a_{f1}$	0.12	$z_{f1}$ 20 $H_{o1}(0)$ 0.8
$a_{f2}$	0.70	$z_{f2}$ 50 $H_{o2}(0)$ 0.7
$a_{f3}$	0.07	$z_{f3}$ 30 $H_{f1}(0)$ 9.0
$a_{o1}$	0.80	$z_{o1}$ 20 $H_{o2}(0)$ 14.0
$a_{o2}$	0.05	$z_{o2}$ 20 $H_{o1}(0)$ 5.3
$a_{o3}$	0.01	$z_{o3}$ 130 $H_{o2}(0)$ 6.0

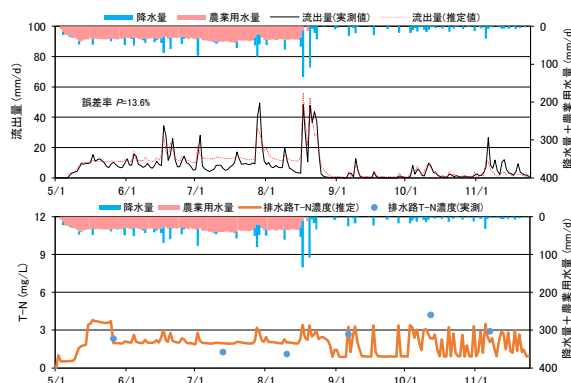


図-46 キャリブレーション結果(北6線排水路)

表-2 水質濃度に関する係数

濃度係数								
$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$
1.8	1.1	0.8	5.0	3.9	0.6	2.9	0.5	2.0

※代かき期の $C_1=6.0$   
農業用水(平常時) $C=0.5$

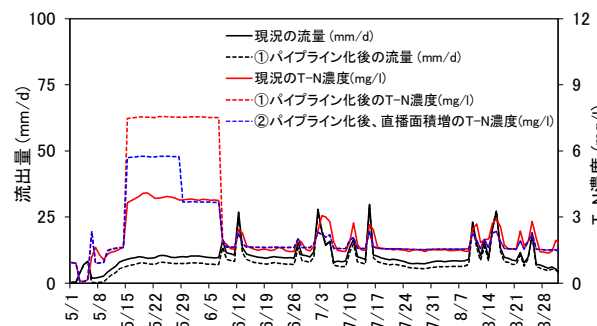


図-47 シミュレーション結果(北6線排水路)

以上のように、圃場整備の進展に伴い、幹線排水路の流量が3割程度減少し、特に灌漑初期において水質濃度が上昇するが、水稻の直播栽培面積率を増加させることにより、幹線排水路の水質濃度を低下させ、高濃度である期間を短縮できることが分かった。ただし、普通期においては、水田排水の水質濃度は図-40～図-42のように、幹線排水路の水質濃度と同程度になっていることから、配水管理用水量が減少しても、水質濃度は変化しないと考えられる。

#### 4.5 水田地帯における周辺水文環境に配慮した灌漑排水技術の検討

圃場整備に伴う配水管理用水量の減少により、幹線排水路流量の減少および水質濃度の上昇するほか、用排水系統の再編による河跡湖の水収支構造の変化等が生じることが分かった。そこで、こうした影響を軽減し、水田地帯において周辺水文環境に配慮した灌漑排水を行う際に留意すべき点や環境保全策を整理した。これらを示したマップを図-48に示す。

配水管理用水量の減少については、対象地区内における循環水量の変化により、影響について注意が必要である。一般に、圃場整備は約10年にわたり実施されることから、短期間で生じる影響および長期間経過後に生じる影響が懸念される。後者について、今後も注意する必要があると考えられる。

### 5. 地域条件に適合した灌漑排水施設の計画手法

圃場の大区画化により営農作業をより効率的に行うた

めには、大区画圃場における水管理の利便性を評価するとともに、地域条件に応じて、適正な圃場規模や用水路や排水路等の施設の適切な配置を検討する必要がある。ここでは、圃場整備における灌漑排水施設の計画に関わる要素を整理し、既往文献等や過年度のデータから灌漑排水施設の機能や数、規模を分析し、地域条件に適合した灌漑排水施設の計画手法を開発することを目的とした。

#### 5.1 北海道における圃場の大区画化

圃場の大区画化とは、複数の圃場を統合し、一枚の圃場に整備することをいう。北海道では、殖民区画(540m×540m)が基本になっていることから、圃場の大きさもこれに基づいた区割りにより決定されている。殖民区画を基にした区割りの例を図-49に示す。土地改良計画基準では、1ha規模が大区画とされているが、北海道では、標準区画が2.2ha以上の地区もあり、圃場の標準的な大きさは地区によって異なる。

#### 5.2 圃場の区画拡大によるメリット・デメリット

##### 5.2.1 メリット

圃場が大区画化されると、作業効率が高まることから、生産コストの低減<sup>9)</sup>が期待されている。圃場の長辺長が長いと、田植えや直播栽培の播種、稲刈り等の作業において、農業機械による旋回回数、苗の積み込みや収穫物の積み卸し回数を減らすことができる。

水管理操作に関しては、複数の圃場を1枚に統合させることから、面積当たりの給水口数が少なくなり、水管理時間が削減できる。また、長辺長が長くなると、末端の小用水路や排水路の施設密度を減少できることから、

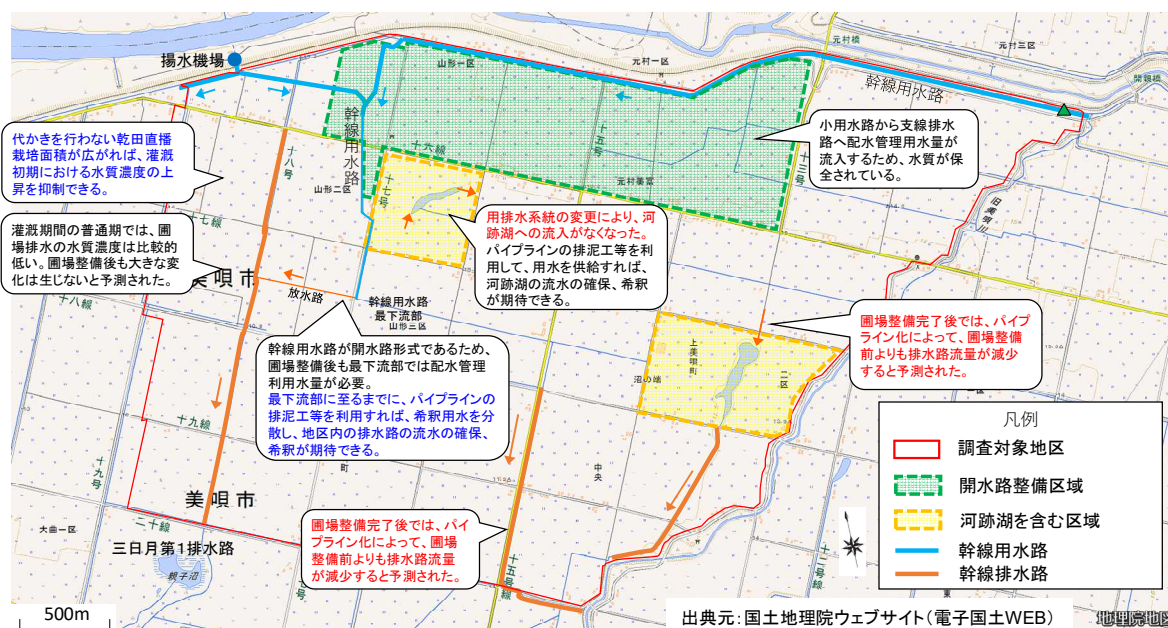


図-48 圃場整備後の水文環境保全に配慮した対策マップ

整備費や補修等の維持管理費の節減、草刈り等の維持管理労力の削減が可能である。

### 5.2.2 デメリット

長辺長が長くなる場合、排水や給水により多くの時間を要するなど、迅速な水管理への影響が懸念される。また、給水については、圃場の片側から地表取水を行う場合、水口から水尻へ至るまでの間に、水口付近で浸透ロスが発生することにより、取水が過剰になるおそれがある。また、石狩平野のような泥炭地域では、時間の経過に伴い沈下が生じやすいことから、大区画化圃場における不陸の発生が懸念されている。

## 5.3 整備済み圃場における灌漑排水施設の性能評価

### 5.3.1 給水に関わる性能

北海道では気候が冷涼であるため、府県と比べて、水稲の栽培適期が短い。このことから、できるだけ迅速に圃場へ灌漑用水を行き渡らせられることが望ましい。そこで、過年度の調査データ<sup>10),11)</sup>を用いて、圃場面積と灌漑方式ごとの最大取水強度をプロットした。圃場面積と最大取水強度との関係を図-50に示す。開水路地区およびパイプライン地区の給水栓1箇所当たりの圃場面積が同程度であっても、取水強度の値は開水路の方が小さくなる傾向がみられた。

### 5.3.2 排水に関わる性能

圃場の排水機能を確認するために、整備から3~5年後を経過した大区画化圃場を対象に、降雨から72時間後の地下水位変化を比較した。この結果、図-51に示すように、いずれも基準値を満たしており、十分な排水性を有すること確認された。ここで検討した程度の面積規模では、圃場の排水性能に概ね支障はないと考えられる。

## 5.4 圃場面積の適正規模の検討

農業機械の性能を基に、長辺長をどこまで長くできるかを検討するために、田植機に搭載可能な苗箱数を基に、1回の積み込みで作業できる最大距離を計算した。ここでは、一般的な田植機の植え付け条数を6条、苗箱搭載数を46枚、苗箱1枚当たりのポット数448株、株間を23cmとしたところ、最大距離の値は789mとなった。苗箱の補充を行う際は、圃場の片側に作業員を置き、長辺長を往復できる苗箱数を搭載するのが合理的である。往復するための最大長辺長は394mとなるが、北海道の殖民区画を基にした区割りでは、長辺長は250mまたは170mが適合する。泥炭が分布する地域では、不安定な泥炭地では長辺長を130mまたは170m、安定な地盤では170mまたは250mにすることが望ましいといわれている<sup>12)</sup>。北海道における実際の区画規模は1~2ha程度が主であるが、さらに面

積を拡大するためには、短辺長を長くする必要がある。

一方、低コスト化を積極的に進めるものとして、オーストラリアにおける稲作経営を基にした、巨大区画<sup>13)</sup>と

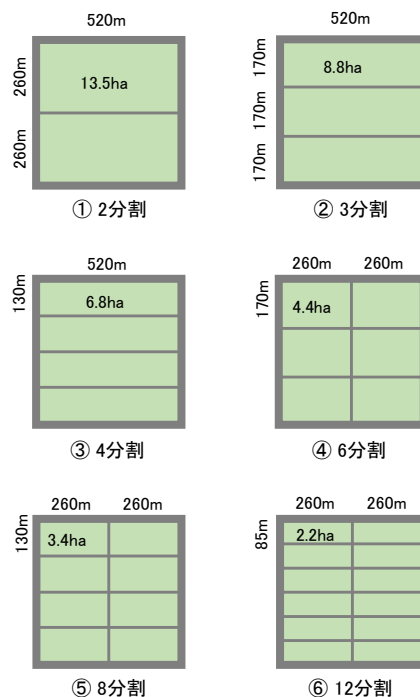


図-49 殖民区画を基にした区割り例

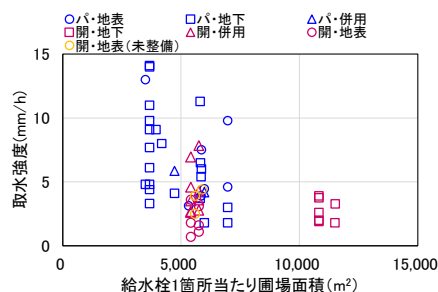
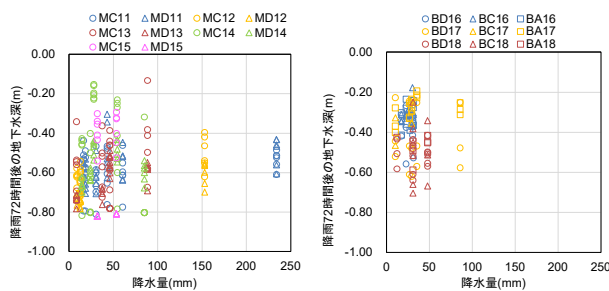


図-50 給水栓1箇所当たり圃場面積および取水強度の関係



(a) 圃場整備から1~5年後 (b) 圃場整備から1~3年後

図-51 降雨後72時間後の地下水深

いう考え方も提案されている。国内では実践には至って



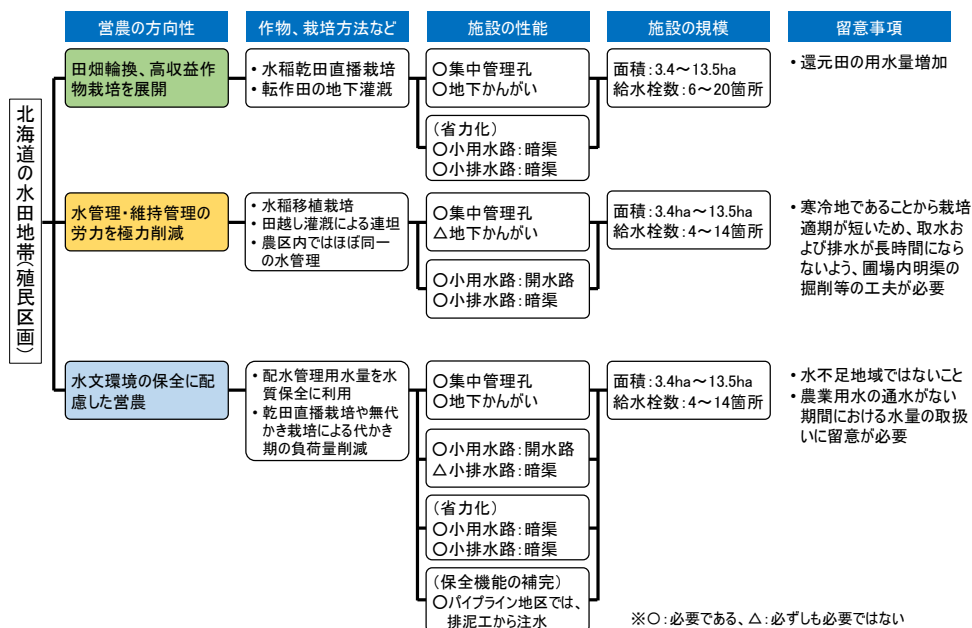


図-52 地域条件に適合した灌漑排水施設の計画フロー

いないが、将来的にはこのような姿も選択肢の一つになると考えられる。

5.5 大区画化における合理的な施設配置計画手法

大区画化は、生産性向上を目的として行われるが、その整備計画は、その地域の地形条件や地元農家がめざす営農の方向性を考慮して、圃場規模や灌漑排水施設の配置を決定することが望ましい。そこで、圃場の水管理や水路の維持管理に投入する労働力削減を最優先目的として、地域ごとの条件に基づき、合理的な施設配置を行うためのフローを作成した(図-52)。このフローは、現在多く行われている大区画化整備の方向性を、(a)より省力的な水稲栽培が可能な圃場、(b)田畑輪換が可能な圃場、(c)③周辺環境に配慮した施設配置の圃場の3とおりに分類し、それぞれの目的に適う施設配置を選択できる。

このフローに基づき、施設配置を検討した例を図-53に示す。(a)については、営農に関わる労力をできる限り省略するために、施設配置密度をより小さくするものである。品種および栽培方式を統一し、掛け流し灌漑により隣接した圃場の水管理を連担する方法が考えられる。ただし、北海道のような寒冷地域では、水稲の栽培期間が都府県と比べて短いことから、掛け流し灌漑の実施については、水稲の生育に応じた水管理ができるかどうかを確認する必要がある。(b)については、圃場ごとの水管理が独立した水稲栽培を行い、多様な品種および作物を含む田畑輪換が可能である。維持管理労力を節減するためには、水管理の面ではパイプライン水路が有利であるが、泥炭沈下が生じる可能性や補修時の費用等の問題がある。将来の維持管理のあり方に関する地域の合意形

成が必要である。(c)については、農地周辺の水文環境保全に配慮した施設配置である。下流側に河跡湖や水生生物の生息空間がある場合、このような配置が望ましい。ただし、代かきを行う移植栽培や湛水直播栽培では、代かき・田植え時期における濁水により、水域の水質濃度の上昇が懸念される。また、流入水に含まれる懸濁成分が河跡湖において沈殿し、結果として水質の浄化に寄与する可能性もあるが、持続的に河跡湖を利用するためには、堆積物等を適切に浚渫する等の維持管理も必要になると考えられる。

6. まとめ

本研究では、水田地帯の周辺水文環境と調和した灌漑排水技術の構築をめざして、圃場整備中の地区において、広域レベルおよび農区レベルの水収支および水質の調査を行った。その研究成果は、次のとおりである。

- 1) 圃場整備に伴う水循環および水文環境の影響を把握するために、圃場整備中の地区における幹線用水路、

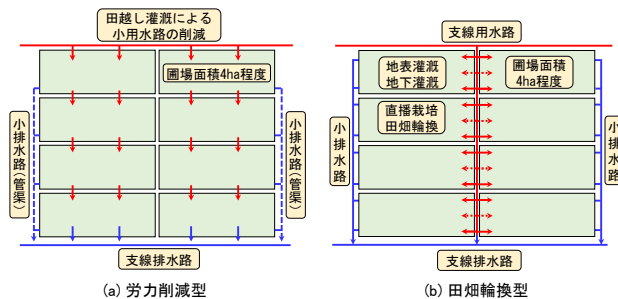


図-53 フローにより作成した区画の例



幹線排水路、河跡湖の水量、水質濃度について調査した。圃場整備に伴う用排水系統の再編により、流入水路がなくなった河跡湖もあったが、幹線用水路、排水路、河跡湖出口の流量および水質濃度については、圃場整備に伴う大きな変化は見られなかった。

- 2) 農区レベルにおける水循環構造の変化とその影響を明らかにするために、小用水路形式が開水路またはパイプラインである農区において、水収支および周辺水質の調査を行った。その結果、両農区の大きな相違点は配水管理用水量の有無であり、開水路形式の農区における配水管理用水率は、未整備農区および整備済み農区とも同程度であった。小排水路の水質濃度（T-N、T-P、SS）は、小用水路の形式に関わらず、代かき・田植え期において高い値を示したが、開水路地区を有する幹線排水路では、低濃度である配水管理用水が小排水路の水質濃度を希釈していた。このことから、用水路形式が開水路からパイプラインへ変わる地域において、排水路の水質を保全するためには希釈水の確保が必要と考えられた。
- 3) 水田地帯の水文環境保全に配慮した灌漑排水技術を構築するために、排水路や河跡湖の流量変化に伴う水質濃度への影響を検討した。幹線排水路については、水質タンクモデルを用いて流量および水質濃度を推定した結果、パイプライン化により流量が約3割減少し、特に灌漑初期において水質濃度が上昇すると予測された。河跡湖についても、実測の流量および水質データを用いて試算した結果、現況よりも水質濃度が上昇すると推定された。これらの結果を基に、地区内において求められる水質保全対策を整理した。
- 4) 地域条件に適合した灌漑排水施設の計画手法を開発するために、圃場整備における灌漑排水施設の計画に関わる要素を整理し、既往文献等から灌漑排水施設の機能や数、規模を分析した。その結果を基に、北海道の水田地帯における営農の方向性等の地域条件に応じた大区画化における合理的な施設配置のためのフローを作成し、圃場の維持管理に投入する労力の削減、田畑輪換、環境保全等、施設配置例を示

した。

最後に、本研究を進めるにあたり、調査へご協力いただいた農業者、美唄市土地改良センター、北海土地改良区美唄事業所、中富良野町農業センター、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部岩見沢農業事務所、国土交通省北海道開発局旭川開発建設部富良野農業事務所の関係各位に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：平成30年版 日本の水資源の現況、p.6
- 2) 丸山利輔、中村良太、水谷正一、渡辺紹裕、黒田正治、豊田勝、荻野芳彦、中曾根英雄、三野徹：水利環境工学、朝倉書店、p.20、1998
- 3) 北海道土地改良設計技術協会：農業土木技術書翻訳シリーズ1、FAO 灌漑排水技術書、p.71、1986
- 4) （公社）農業農村工学会編：改定6版農業農村工学標準用語事典、p.60、2019
- 5) 菅原正巳：流出解析法、共立出版、pp.121-140、1972
- 6) 海老瀬潜一、宗宮功、平野良雄：タンクモデルを用いた降雨時流出負荷量解析、用水と廃水、21(12)、pp.1422-1432、1979
- 7) 中曾根 英雄、黒田 久雄、加藤 亮：集水域からの窒素流出モデルの開発、農業土木学会論文集、205、pp.95-100、2000
- 8) 黒田久雄、田淵俊雄：森林地区のNO<sub>3</sub>-N日流出負荷量の推定、農業土木学会論文集、168、pp.31-36、1993
- 9) 川崎健、笹倉修司、中山正義、小林恭：大区画水田と超省力機械化作業の展望、農業技術、45巻10号、pp.433-438、1990
- 10) 越山直子、酒井美樹、伊藤暢男、中村和正：大区画水田における移植栽培と直播栽培の用水量の比較、農業農村工学会論文集、85巻1号 p.17-14、2017
- 11) 越山直子、酒井美樹、伊藤暢男、中村和正：地下灌漑が可能な大区画水田における乾田直播栽培時の用水量特性—富良野盆地地区の事例—、農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集64、pp.30-35、2015
- 12) 北川巖：泥炭分布地域における大区画圃場の適正規模と農業的意義、農業農村工学会誌、81(1)、pp.23-26、2013
- 13) 石井敦：国際化に対応した低コスト大規模稲作経営実現のための圃場整備、農業農村工学会誌、81(10)、pp.21-24、2013

## 16.3 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

### 16.3.2 大規模酪農地帯における効率的なふん尿スラリー調整技術の開発に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ

(資源保全チーム)

研究担当者：中山博敬、松田俊之、横濱充宏、中谷壮範、

酒井美樹、桑原淳、横川仁伸、大友秀文、田中稔

#### 【要旨】

家畜ふん尿を好気性発酵により腐熟させる肥培灌漑施設では、施設を利用する農家ごとに曝気時間などの運転方法が異なる。本研究は、国営事業で整備された肥培灌漑施設の運転状況調査、室内実験、現地施設での検証を行い、効率的な運転管理方法を明らかにすることを目的とした。

曝気を行う調整槽の形状と容量が異なる5カ所の肥培灌漑施設で運転状況を比較したところ、曝気ポンプ稼働時間の最大値と最小値の比は約4、ふん尿スラリーの水理的滞留日数の最大値と最小値の比は約2.5であり、施設によって運転方法が大きく異なっていた。調整槽の固形物単位量当たりの総曝気量が大きいほど調整液のpHは高いが、総曝気量が大きい施設でもふん尿スラリーのpHは、腐熟の簡易判定目安であるpH7.8~8.5の下限値程度までしか到達しておらず、曝気量不足が示唆された。一部の施設では1日当たりの曝気時間を短く設定しており、その理由の一つは調整槽開口部から地上部への泡溢流を防止するためであることがわかった。2カ所の肥培灌漑施設で泡溢流とフロアポンプによる曝気時間の関係を日中の写真撮影により調査した結果から、フロアポンプを含むすべての機器が稼働していても泡が溢流することがわかった。調整槽内の泡発生状況を調査した結果、消泡機停止時に液面が上昇すると液面上の泡が大きく上昇し、泡が溢流することがわかった。その要因は、調整槽内の泡上面の高さは消泡機周辺では低くなるが、消泡機から離れた位置では高く、液面上昇に伴って調整層内天端に達した泡が開口部方向に押し出されるためと考えられた。

室内実験においては、ふん尿スラリーを20℃および30℃に設定したバッチ試験の結果から、液温の高い方が有機物分解量が大きくなることを確認した。また、酸化還元電位(ORP)でふん尿スラリーの腐熟を評価する連続投入試験の結果、今回使用した実験装置では、液温30℃で単位易分解性有機物量当たりの日曝気量が $30\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 程度以上あればORPをプラスに維持できることが明らかとなった。一方、臭気指数を用いて腐熟を評価した結果、ORPをプラスに維持できなくても臭気が低下するまで腐熟することが示唆された。また、曝気時間が同じ場合は、間欠曝気より連続曝気が臭気の低減効果が大きいことがわかった。

以上の研究成果を基に現地の肥培灌漑施設で検証を行い、泡溢流を防止しながら施設を運転するための設定手順のフロー図を作成するなど、肥培灌漑施設を効率的に運転する方法を提示した。

キーワード：肥培灌漑、好気性発酵、曝気、pH、有機物分解量、酸化還元電位(ORP)、泡溢流

#### 1. はじめに

北海道東部の大規模酪農地帯では、家畜ふん尿の有効活用と地域の環境保全を目的とした国営環境保全型かんがい排水事業が実施されている。この事業で整備される施設の一つに肥培灌漑施設がある(図-1)。この施設では、ふん尿スラリーを管路移送するため家畜ふん尿に水を加えて流動性を高める。また、ふん尿スラリーを腐熟させるため空気を送り込み(以下、曝気と表記)、攪拌する。配水調整槽に貯留された調整液(曝気処理されたふ

ん尿スラリー)は肥料として圃場へ散布される。

曝気時間や腐熟の目安は国土交通省北海道開発局が取りまとめた報告書(謝辞参照)に示されているが、実

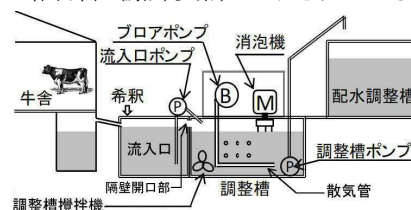


図-1 肥培灌漑施設の概要

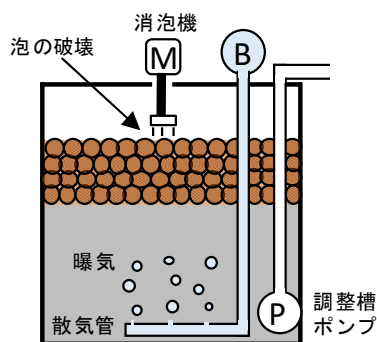


図-2 調整槽内での消泡のイメージ



図-3 稼働中の消泡機

実際の運転状況は多様である。その背景には、酪農業では生乳の冷却、畜舎換気、ふん尿処理など、多くの電力を消費しており、近年の電力価格上昇などにより経営収支が悪化する中、酪農家が経費削減のため好気性発酵に費やす電力を節約していることがある。また、肥培灌漑施設には消泡機が設置されており、曝気と同時に稼働するよう設定されているが（図-2、3）、発酵時に発生する泡が調整槽開口部から地上へ溢流することがあり、それを防止するため曝気時間を過度に短くするなどの対策を行うことがある。このため、調整液の腐熟が進まず臭気が低下しないことから、周辺環境への影響が懸念される。

そこで本研究では施設運転方法およびシステムについて検討し、泡溢流を抑制しながら効率的にふん尿スラリーを腐熟する方法を提示するため、下記の項目を実施した。

- ①肥培灌漑施設の形状別運転状況と調整液性状の関係解明
- ②室内試験装置を用いた効率的なふん尿調整条件の解明
- ③肥培灌漑施設からの泡流出抑制技術の開発
- ④現地施設を用いた効率的なふん尿調整方法の検証
- ⑤省エネルギー型ふん尿スラリー調整システムの提案

## 2. 肥培灌漑施設の形状別運転状況と調整液性状の関係解明

### 2.1 目的

近年整備される肥培灌漑施設は、調整槽の形状が四角

形または八角形である。そこで、本章では、肥培灌漑施設の形状別運転状況を明らかにし、各施設におけるふん尿スラリーの腐熟状況を確認するため、単位固形物量当たりの総曝気量と pH の関係を検討する。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 調査対象施設の概要

表-1 に調査対象施設の概要を示す。調整槽の形状は八角形が2施設、四角形が3施設である。施設E、Fは調整槽容量が大きいため、曝気ポンプはそれぞれ2台設置されている。調査期間中の調整液貯留量は、調整液移送ポンプの稼働開始設定水位から算出した。

#### 2.2.2 曝気ポンプ流量測定および稼働時間算出

曝気ポンプの流量測定は、曝気ポンプ吸い込み口にエア一用超音波流量計（TRZ100B、愛知時計電機）を取り付けて行った（図-4）。超音波流量計1台を5箇所の施設に順次取り付け、短いところで約10分、長いところで約3時間データを取得した。この測定を2018年1～2月に実施した。計測データは、小型データロガーに10秒インターバルで記録した。データから得られた平均流量は標準状態（0℃、1気圧）に換算した（表-2）。曝気ポンプの稼働時間は、タイマーで設定されている稼働開始および終了時間から算出した（表-3）。

#### 2.2.3 ふん尿スラリー投入量および調整液性状測定

調整槽へのふん尿スラリー投入量は、1分ごとに測定した調整槽水位を用いて計算した水位上昇速度から推定した。計算に用いた水位データは、2017年3月～2018年2月に計測し、各施設の運転が安定している複数日を

表-1 調査対象施設の概要

施設記号	調整槽形状	調整液貯留量 (m <sup>3</sup> )	曝気ポンプ数 (台)
A	八角形	346	1
B	八角形	251	1
D	四角形	206	1
E	四角形	543	2
F	四角形	670	2

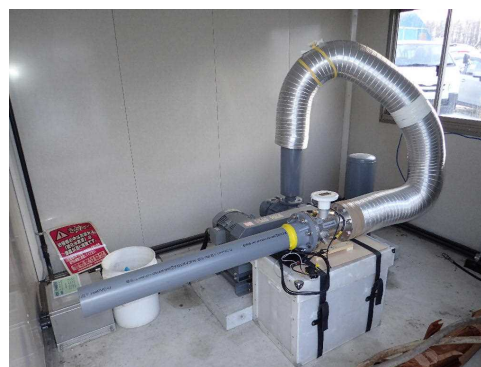


図-4 曝気ポンプの流量測定

抽出した。抽出日数は、最も少ない施設で14日、最も多い施設で30日である。調整液は2017年8月～2018年3月に月1回サンプリングを行い、pH（ガラス電極法）および固形物含有量（105℃、24時間乾燥）を測定した。

### 2.3 結果および考察

表-2 に曝気ポンプの運転時流量およびふん尿スラリー1m<sup>3</sup>当たりの曝気運転時流量を示す。調整液貯留量の違いにより曝気ポンプの能力および台数は異なるが、ふん尿スラリー1m<sup>3</sup>当たりの曝気運転時流量は最大と最小の比が約1.3であり、大差はなかった。

表-3 に曝気ポンプ稼働時間およびふん尿スラリーの水理的滞留日数を示す。曝気ポンプは間断運転している。ここで示す曝気ポンプ稼働時間は、1日の運転時間の合計である。曝気ポンプ稼働時間は最も長い施設Bで8.25h・d<sup>-1</sup>、最も短い施設Aで2.00h・d<sup>-1</sup>であり、最大と最小の比が約4であった。ふん尿スラリー投入量と調整液貯留量から求めたふん尿スラリーの水理的滞留日数は、最も長い施設Aで37.2日、最も短い施設Bで14.7日であり最大と最小の比が約2.5であった。このように、施設によって運転方法が大きく異なることが明らかとなった。

次に、調整槽中にある単位固形物量当たりの総曝気量とpHの関係を図-5に示す。単位固形物量当たりの総曝気量とは、日当たり曝気量(m<sup>3</sup>・d<sup>-1</sup>)に水理的滞留日数(d)を乗じ、調整槽中の固形物量で除した値である。施設B、Eでは調整槽の攪拌に不具合が生じていたため、両施設のデータは除外した。好気性発酵では、腐熟が進行す

表-2 曝気ポンプの運転時流量

施設 記号	曝気ポンプ 運転時流量(m <sup>3</sup> ・h <sup>-1</sup> )	ふん尿スラリー1m <sup>3</sup> 当たり 曝気運転時流量(m <sup>3</sup> ・m <sup>-3</sup> ・h <sup>-1</sup> )
A	213	0.62
B	149	0.59
D	157	0.76
E	176(No.1) 171(No.2)	0.64
F	261(No.1) 259(No.2)	0.78

表-3 曝気ポンプ稼働時間およびふん尿スラリーの水理的滞留日数

施設 記号	日当たり曝気 ポンプ稼働時間 (h・d <sup>-1</sup> )	日当たり曝気 積算流量 (m <sup>3</sup> ・d <sup>-1</sup> )	日当たりふん尿 スラリー投入量 (m <sup>3</sup> ・d <sup>-1</sup> )	水理的 滞留日数 (d)
A	2.00	426	9.3	37.2
B	8.25	1229	17.1	14.7
D	3.25	510	11.6	17.8
E	2.75(No.1) 2.25(No.2)	869	17.0	31.9
F	3.00(No.1) 3.00(No.2)	1560	23.8	28.2

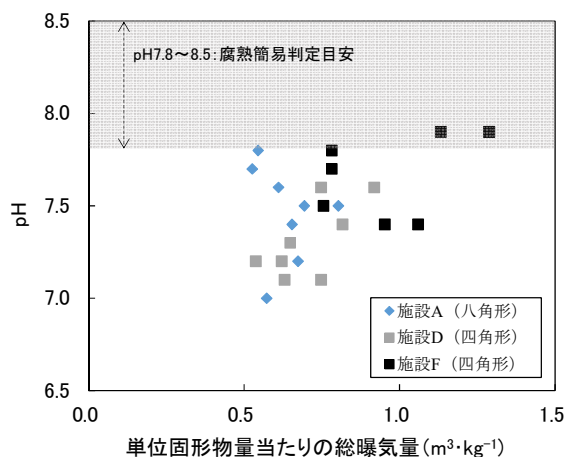


図-5 単位固形物量当たりの総曝気量とpHの関係

ると、有機物の分解により生成されるNH<sub>3</sub>によってpHが上昇すると考えられる<sup>1)</sup>。図-5では、単位固形物量当たりの総曝気量が大いほどpHは高いが、最もpHが高い調整液でも、腐熟の簡易判定目安であるpH7.8~8.5の下限値付近にとどまっており、曝気量不足が示唆された。

なお、曝気量と有機物の分解の関係を見るのであれば、投入スラリーと調整液の固形物含有量の差を曝気量で除すという方法があるが、流入口から採取したふん尿スラリー固形物含有量は採取日によって変動が大きく、有機物分解量の誤差が大きくなると考え、その方法を採らなかった。流入口のふん尿スラリー固形物含有量が変動する要因の一つは、流入口での希釈水の投入操作が手動であることから、希釈水量が日々一定ではないためと考えられる。

## 3. 室内試験装置を用いた効率的なふん尿調整条件の解明

### 3.1 バッチ試験

#### 3.1.1 目的

肥培灌漑施設では、ふん尿スラリーを好気性発酵で処理する場合、曝気量、曝気時間、ふん尿スラリー中の固形物濃度などを調整することができる。また、好気性発酵は発熱が伴うため、発熱による液温の変化により微生物の活動に影響を与えると考えられる。本章では、基礎的実験として、ふん尿スラリーバッチ試験装置を用いた室内実験を行い、液温とふん尿スラリー固形物濃度の違いがふん尿スラリー中の有機物分解に及ぼす影響を検討する。

#### 3.1.2 方法

図-6に室内実験装置の概要を、図-7に実験状況を、表-4に設定条件を示す。使用した未曝気ふん尿スラ



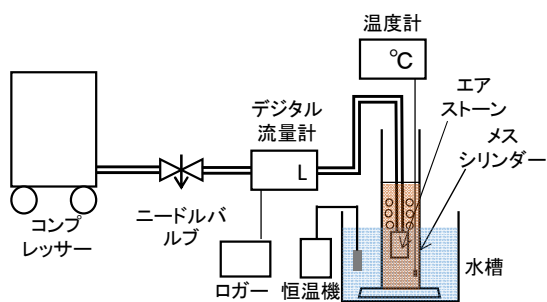


図-6 室内実験装置

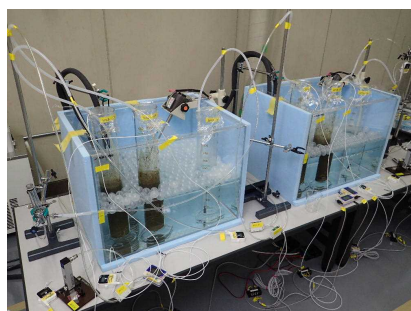


図-7 実験状況

表-4 設定条件

試験区名	液温 (°C)	TS濃度 (%)	曝気流量 (L・min <sup>-1</sup> )	曝気時間 (h・d <sup>-1</sup> )	ふん尿スラリー量(ml)
20TS4_24h	20	4	0.12	24	1,000
20TS7_24h		7			
30TS4_24h	30	4			
30TS7_24h		7			

りーは、肥培灌漑施設の流入口から2017年9月26日に採取した。全固形物(TS)濃度は7.0%であった。実験に供した未曝気ふん尿スラリーの濃度は7%と4%である。4%への希釈には蒸留水を用いた。ふん尿スラリーの希釈倍率とTS濃度との関係は、既往文献<sup>2)</sup>によると2倍希釈でTS濃度が約6%、3倍希釈で約4%とされており、これを参考に上記のTS濃度を決定した。実験では、ふん尿スラリー1000mlを2000mlメスシリンダーに投入し、このメスシリンダーを水温20°Cおよび30°Cに制御した水槽内に静置した。メスシリンダーを水槽に静置した理由は、発酵熱による液温変化を抑えることでふん尿スラリーの温度を一定に保持するとともに、液温を2通りに設定することで、有機物の分解と液温との関係を検討するためである。なお、微生物の活動に必要な温度は中温菌の場合15~40°C(至適温度は30~37°C)である<sup>8)</sup>。曝気は、メスシリンダー内に配置した観賞魚用エアストーンからの送気により常時行った。曝気流量は、メスシリンダーから泡が吹きこぼれない程度の約0.12L・min<sup>-1</sup>とした。曝気流量はデジタル流量計で測定し、1分毎に小型データロガーで記録して、それを標準状態(0°C、1気圧)に換

算した(表-5)。液温は5分毎にロガー付き温度計で記録した。実験期間は2017年10月5日~21日の17日間である。

曝気開始時および曝気終了時にふん尿スラリー中のTS量と有機物含量を測定した。TS量はスラリーを105°Cで24時間乾燥した後に測定した。また、このTSをさらに550°Cで5時間燃焼して強熱減量(VS)を求め、この値を有機物量とした。実験期間中は1日1回、臭気センサー(畜環研式ニオイセンサ、東京デオドラント(株))で臭気指数を測定した後、一時的に送気を停止し、ガラス棒でメスシリンダー内のふん尿スラリーを攪拌し、水素イオン指数(pH)、酸化還元電位(ORP)、電気伝導度(EC)を測定した。

### 3.1.3 結果

#### (1) 曝気流量および液温

表-5に曝気流量および液温を示す。各試験区とも曝気流量は安定しており、試験期間中の曝気量合計は2600~2700L程度となった。

ふん尿スラリーの液温は概ね設定した温度で推移した。

#### (2) ORP、pH、EC

図-8にORPの推移を示す。ORPは溶液の酸化力、還元力の強さを表す値で好氣的状態では電位が高く、嫌氣的状態では電位が低い<sup>3)</sup>。TS4%の両区では曝気開始後3日目までORPが低下し、その後-400mV程度で推移した後9~10日目から上昇し始め、30TS4\_24h区では13日目以降に20TS4\_24h区よりも大きく上昇した。一方TS7%の両区

表-5 曝気流量および液温

試験区名	曝気流量 <sup>(※)</sup> (L・min <sup>-1</sup> )	曝気量合計 (L)	液温 <sup>(※)</sup> (°C)
20TS4_24h	0.12±0.02	2699	19.8±0.1
20TS7_24h	0.12±0.03	2717	19.9±0.1
30TS4_24h	0.12±0.02	2650	30.3±0.1
30TS7_24h	0.12±0.02	2641	30.3±0.1

※: 平均値±標準偏差

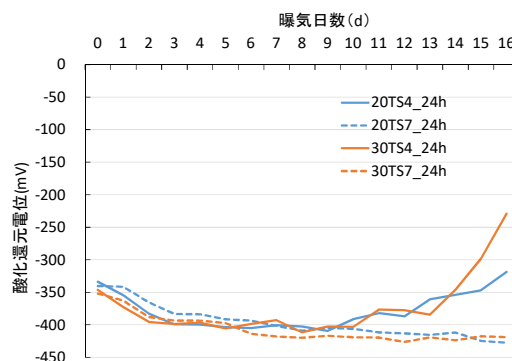


図-8 酸化還元電位 (ORP) の推移

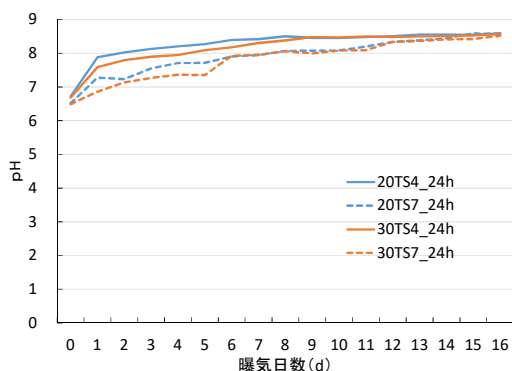


図-9 pHの推移

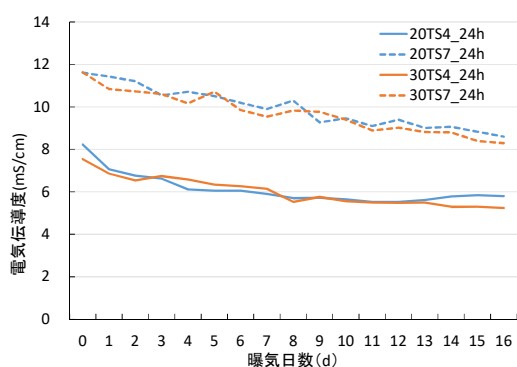


図-10 電気伝導度 (EC) の推移

では試験開始終了時まで、ORPは緩やかに低下し続けた。

図-9にpHの推移を示す。試験開始時のpHはTS4%の両区で6.7、TS7%の両区で6.5であり、曝気開始後にはすべての試験区でpHが上昇し、曝気開始後8~9日目にはTS4%の両区でpHが約8.5に達した後、概ね一定の値で推移した。TS7%の両区ではTS4%の両区より緩やかに上昇し、曝気開始15~16日目にTS4%区と同様に約8.5となった。

図-10にECの推移を示す。ECは溶液中の電解質の総量を表す指標であり<sup>3)</sup>、ECと乾物率から肥料成分含有率を推定できる<sup>4)</sup>ため、肥料成分の変化の目安として計測した。TS4%の30℃区では試験終了時まで低下したが、20℃区では曝気開始13日目以降にやや上昇した。またTS7%の両区では試験終了時まで値は低下し続けた。

### (3) TS量および有機物含量

表-6にTS量、有機物含量、有機物減少量を示す。有機物減少量が $0.4\text{g}\cdot 100\text{gFM}^{-1}$ と最も大きかったのは30TS4\_24h区で、逆に $0.1\text{g}\cdot 100\text{gFM}^{-1}$ と最も小さかったのは20TS7\_24h区であった。温度の影響を見るため、20TS4\_24h区と30TS4\_24h区、20TS7\_24h区と30TS7\_24h区をそれぞれ比較すると、温度が高い試験区での有機物

表-6 TS量および有機物含量

試験区名	TS量( $\text{g}\cdot 100\text{gFM}^{-1}$ )		有機物含量( $\text{g}\cdot 100\text{gFM}^{-1}$ )		有機物減少量( $\text{g}\cdot 100\text{gFM}^{-1}$ )
	開始時 (曝気0日目)	終了時 (曝気16日目)	開始時 (曝気0日目)	終了時 (曝気16日目)	
20TS4_24h	3.9	3.7	3.3	3.1	0.2
20TS7_24h	6.7	6.6	5.6	5.5	0.1
30TS4_24h	3.9	3.5	3.3	2.9	0.4
30TS7_24h	6.7	6.5	5.6	5.3	0.3

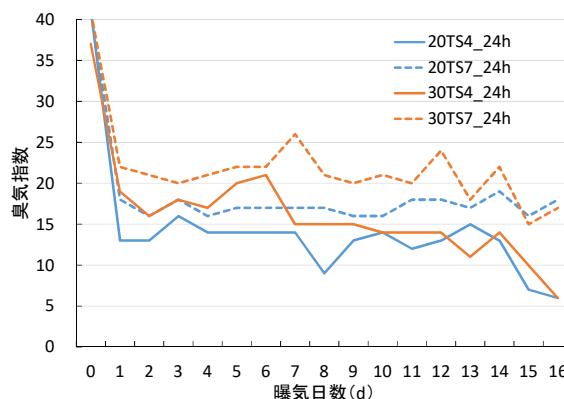


図-11 臭気指数の推移

表-7 臭気強度と臭気指数の関係

臭気強度	内容	臭気指数
0	無臭	—
1	やっと感知できるにおい(検知閾値濃度)	—
2	何のにおいかわかる弱いにおい(認知閾値濃度)	—
(2.5)	(2と3の間)	11
3	楽に感知できるにおい	16
(3.5)	(3と4の間)	20
4	強いにおい	—
5	強烈なにおい	—

減少量が大きかった。また、ふん尿スラリーの濃度の影響を見るため、20TS4\_24h区と20TS7\_24h区、30TS4\_24h区と30TS7\_24h区をそれぞれ比較すると、TSが小さい試験区での有機物減少量が大きかった。

### (4) 臭気指数

図-11に臭気指数の推移を示す。なお、測定に用いた臭気センサーの測定上限は臭気指数40までであり、曝気開始時の一部の試験区では臭気指数が40を超え測定できなかった。臭気指数規制ガイドライン<sup>5)</sup>によると、6段階臭気強度表示法による臭気強度と畜産業(牛)における臭気指数の関係は表-7のとおりである。曝気開始前のふん尿スラリーはすべての試験区において臭気指数が35以上となっていた。曝気開始後1日目には臭気指数が大きく低下したものの30TS7\_24h区では臭気指数が22を示し「強いにおい」であった。次いで30TS4\_24h区で19、20TS7\_24h区で18を示し、「楽に感知できるにおい」であった。なお、20TS7\_24h区では臭気指数が16以上で推移したが、30TS4\_24h区では徐々に低下し、試験終了

時には臭気指数が6となり、においが大きく低下した。また 20TS4\_24h 区は曝気開始後1日目の臭気指数が13で、その後も16以下で推移し、試験終了時には臭気指数が6となった。

### 3.1.4 考察

ORPは、TS7%の両区では試験終了まで緩やかに低下し続けたが、TS4%の両区では曝気開始後10日目以降に上昇に転じた。すなわち、TS4%の両区では9~10日目までに好氣的分解がある程度まで進み、その後、酸素の供給量が消費量よりも多くなったと考えられる。

pHはTS4%の両区において、曝気開始後8~9日目までに徐々に上昇した後、概ね一定の値で推移した。これは上述のとおり、好氣的分解がある程度すすんだことでpHが安定したものと考えられる。ECはTS4%20℃区以外で曝気後8~9日目以降も低下した。TS4%20℃区では13日目以降にやや上昇したが、曝気との関係はわからなかった。

実験開始時と終了時の測定結果から求めた有機物減少量は、試験開始時のTSが同じ場合、温度が高い試験区で大きいことが明らかとなった。すなわち、温度を高くすることで腐熟が早く進むことが確認された。また、2つの温度条件ともに、TSの小さい区の有機物減少量が多くなっており、希釈することで微生物分解への負荷が軽減されたと考えられる。臭気指数は、TSの小さいふん尿スラリーで低い値を示し、曝気日数の経過に伴いにおいの低下が顕著である。これは、上述のとおりTSの小さい区の方が有機物の分解が進み、臭気物質も少なくなるためと考えられる。

## 3.2 連続投入試験

### 3.2.1 目的

乳牛が日々排泄するふん尿は、肥培灌漑施設の流入口に移送され希釈された後、調整槽に流入して曝気される。調整槽内の調整液は、液面が設定上限値の水位を超えると調整液移送ポンプが稼働して配水調整槽へ汲み出される。本章では、この調整槽を模した室内実験装置(図-12, 13)を用い、ふん尿スラリーの腐熟に必要な曝気条件を明らかにするため、ORP または臭気を腐熟の判定指標とした実験を行う。

### 3.2.2 方法

#### (1) ORP を指標とする腐熟判定

表-8 に設定条件を示す。実験開始時のステンレス容器内のふん尿スラリーは28Lとした。このふん尿スラリーは、図-12の実験装置を用いて4つのステンレス容器内で20日以上曝気を行い、ORPが160~205mVに達したもののすべてを混合した後、4つのステンレス容器に均

等に分けたものである。実験開始時のTS濃度は2.8%である。ステンレス容器への未曝気ふん尿スラリー投入手順は、1日1回、ステンレス容器内のふん尿スラリーを2L汲み出した後、TS4%に調整した未曝気ふん尿スラリーを2L投入することとした。試験区は、曝気量を0.2、0.8、1.4、2.0L・min<sup>-1</sup>に設定した4区とした。曝気時間はいずれの試験区も24h・d<sup>-1</sup>とした。液温は常に30℃を保持するようにした。使用したふん尿スラリーは、すべて同一の肥培灌漑施設の流入口から採取したものである。実験期間は2019年1月22日~2月20日の30日間である。

ステンレス容器内のふん尿スラリーの性状を確認するため、pHおよびORPの計測を、毎日、未曝気ふん尿スラリーの投入前後に実施した。これは、ふん尿スラリーの腐熟過程で生成されるNH<sub>3</sub>によってpHが上昇すると考えられること<sup>1)</sup>、ORPが好氣的状態では電位が高くなること<sup>3)</sup>からである。

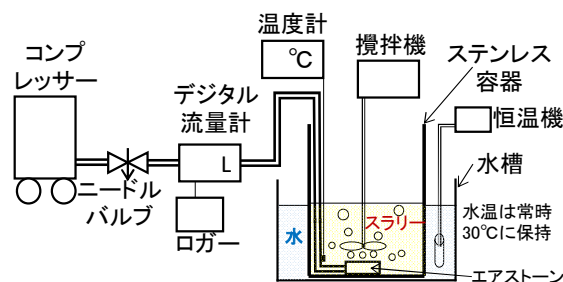


図-12 連続投入実験装置の概要

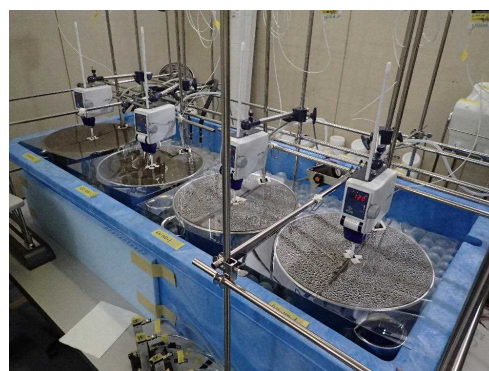


図-13 実験状況

表-8 設定条件

試験区名	曝気強度 (L・min <sup>-1</sup> )	曝気時間 (h・d <sup>-1</sup> )	液温 (°C)	スラリー量 (L)	汲み出し・投入量 (L・d <sup>-1</sup> )
R30_200ml	0.2	24	30	28	2
R30_800ml	0.8				
R30_1400ml	1.4				
R30_2000ml	2.0				



(2) 臭気指数を指標とする腐熟判定 (連続曝気)

実験に使用した未曝気ふん尿スラリーは、現地施設から採取したふん尿スラリーに蒸留水を加えて TS4%に希釈したものである。実験開始時のステンレス容器内には、事前に3.0L・min<sup>-1</sup>の通気強度で約25日間連続曝気したふん尿スラリー28L を投入した。実験中のふん尿スラリーくみ出し、投入は、1日1回、ステンレス容器から曝気済ふん尿スラリーを2L くみ出した後、未曝気ふん尿スラリー2L を投入する手順とした。曝気によるふん尿スラリーの変化を把握するため、ふん尿スラリーくみ出し前の曝気中に、ORP を測定した。表-9 に試験区毎の設定条件を示す。R30\_No1 区は曝気を行わず、他の試験区では曝気強度を 3.0 L・min<sup>-1</sup>とし、試験区毎に1日当たり2、4、8h・d<sup>-1</sup>の連続曝気を行う設定とした。

臭気の測定は5日毎に実施した。測定状況を図-14 に示す。水温を 20~25℃程度に保った水槽内に静置した容量 5L のガラス容器に臭気センサー(畜環研式ニオイセンサ)、外気吸気用のチューブ、温度計を接続している。畜産研式ニオイセンサは、(財)畜産環境整備機構畜産環境技術研究所が市販のニオイセンサを改良し畜産臭の臭気指数を測定できるようにしたものである<sup>6)</sup>。測定手順は以下の通りである。測定日に汲み出したふん尿スラリー2L の一部および投入用ふん尿スラリーを 20℃に設定した恒温器内で約3時間保温する。その後、測定直前にふん尿スラリー50g をプラスチック容器に移してガラス容器内に静置し、速やかにガラス容器の蓋を閉め、5分後の臭気指数を測定した。実験期間は2019年11月19日~12月29日の40日間である。

表-9 曝気実験の設定条件 (連続曝気)

試験区名	液温 (°C)	曝気強度 (L・min <sup>-1</sup> )	曝気時間 (h・d <sup>-1</sup> )	攪拌時間 (h・d <sup>-1</sup> )	スラリー量 (L)	汲み出し・投入量 (L・d <sup>-1</sup> )	投入スラリーのTS (%)
R30_No1	30	0.0	0.0	8.0	28	2	4
R30_No2		3.0	2.0				
R30_No3		3.0	4.0				
R30_No4		3.0	8.0				

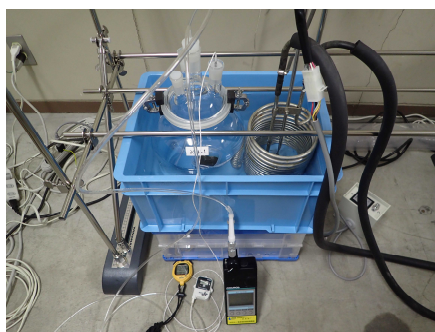


図-14 臭気の測定状況

(3) 臭気指数を指標とする腐熟判定 (間欠曝気)

ふん尿スラリーのくみ出し、投入、ORP 測定、臭気測定方法は3.2.2(2)と同じである。ただし、曝気試験開始後30日目以降に投入した未曝気ふん尿スラリーは、肥培灌漑施設流入口から採取した試料のTS濃度が3.3~3.5%であったため、希釈せずに投入試料として使用した。表-10 に試験区毎の曝気条件を示す。4h連続区および6h連続区では、それぞれ連続3.0L・min<sup>-1</sup>の通気強度で曝気を行った。間欠区では、30分曝気、15分曝気停止を繰り返して、それぞれの区の日合計が4時間および6時間となるように曝気した。実験期間は2020年2月18日~3月29日の40日間である。

表-10 曝気実験の設定条件 (間欠曝気)

試験区名	液温 (°C)	曝気強度 (L・min <sup>-1</sup> )	日合計曝気時間 (h・d <sup>-1</sup> )	曝気間隔
4h連続区	30	3.0	4.0	連続通気
4h間欠区				30分通気、15分停止を8回繰り返し
6h連続区			6.0	連続通気
6h間欠区				30分通気、15分停止を12回繰り返し

3.2.3 結果および考察

(1) ORP を指標とする腐熟判定

図-15、16 に実験期間中における pH および ORP の推移を示す。各試験区の pH は、いずれも投入した未曝気ふん尿スラリーより高く、曝気開始直後に大きく上昇した後10日目頃までは緩やかに低下し、曝気強度が大きい試験区ほど高い値を示した。R30\_1400ml 区と R30\_2000ml 区は、その後ほぼ一定の範囲で推移したが、R30\_800ml 区ではやや低下する傾向にあり、R30\_200ml 区では一旦低下した後上昇した。曝気開始直後の pH の上昇は、試験開始前の曝気によって分解しやすい有機物が減少している各試験区に、未分解のふん尿スラリーが投入されたことで有機物の分解が急速に進んだためと考えられる。曝気強度が大きい試験区ほど pH が高く推移したことは、

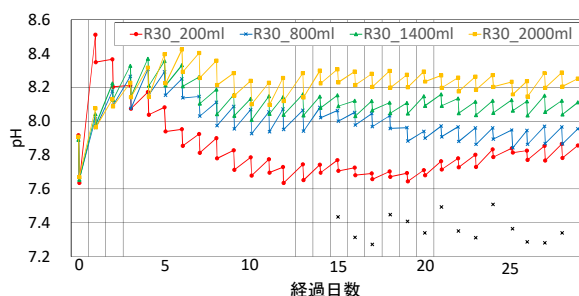


図-15 連続投入試験での pH の推移

(×は投入スラリーの pH を示す。0~14 日目は計測なし)



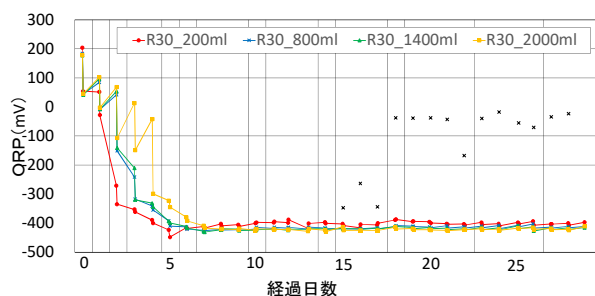


図-16 連続投入試験での ORP の推移

(×は投入スラリーの ORP を示す。0～14 日目は計測なし)

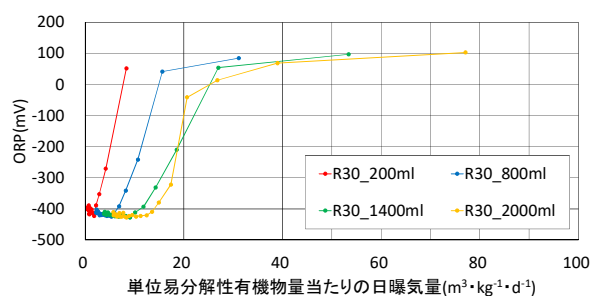


図-17 単位易分解性有機物量当たりの日曝気量と ORP の関係

分解により  $\text{NH}_3$  が多く生成されたためと推察される。ORP は 4 日目以降にいずれの試験区もマイナス、6 日目以降には  $-400\text{mV}$  前後で、好气的条件とはなっておらず、曝気量不足の可能性はある。そこで、ORP の値をプラスに維持しながら未曝気ふん尿スラリーを投入し続けることの可否を検討する。ここでは、連続投入試験すべてのデータを用いて、ふん尿スラリー中の単位易分解性有機物量当たりの曝気量と ORP の関係を求めた (図-17)。なお、今回の室内実験ではステンレス容器内のふん尿スラリーおよび投入する未曝気ふん尿スラリーの易分解性有機物量を測定していないため、以下の方法で計算を行った。

- 1) 毎日投入する未曝気ふん尿スラリー中の易分解性有機物量は、同じ施設から 2018 年 6 月から 2019 年 2 月までの隔月に採取し分析した易分解性有機物濃度の平均値から算出する。
- 2) 実験開始時のステンレス容器内のふん尿スラリーは、事前に 20 日以上曝気され ORP がプラスになっていることから、本計算ではこのふん尿スラリー中の易分解性有機物量はゼロとして扱う。
- 3) 実験中の易分解性有機物の分解量は考慮しない。

図-17 から、今回使用した実験装置で液温  $30^\circ\text{C}$  の条件下においては、単位易分解性有機物量当たりの日曝気量が  $30\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  程度以上であれば、ORP をプラスに維持できることが明らかとなった。すなわち、曝気量の設定によってふん尿スラリーの好气的条件を維持できると考えられた。

## (2) 臭気指数を指標とする腐熟判定 (連続曝気)

図-18 に臭気指数の推移を示す。ここでは、悪臭防止法により規制を設ける場合の目安である臭気指数 20 を基準とし<sup>5)</sup>、これより臭気指数が低下すれば腐熟したと判断した。試験開始時の各試験区の臭気指数は 10 以下を示した。投入用ふん尿スラリーの臭気指数は、実験期間中を通して 19~28 の範囲であった。

臭気指数は、実験開始後 5 日目には各試験区ともに 17~22 に上昇した。R30\_No1、2、3 区は 10 日目以降も上昇を続け、40 日目には 26~29 の値となった。R30\_No4 区は 25 日目まで横ばい推移した後、30 日目から大きく低下し 10~13 の値を示した。曝気時間が長いことで腐熟が進み、臭気が低減したと考えられる。

図-19 に ORP の推移を示す。実験開始時には  $110\sim 132\text{mV}$  の値を示していたが、ふん尿スラリーの投入開始に伴い、実験開始 1 日目には急激に低下し、その後も一部バラツキはあるが概ね  $-300\text{mV}$  以下で推移した。R30\_No4 区については臭気指数の低下が見られた 30 日目から値が上昇し、33 日目には  $-38\text{mV}$  となった。臭気指数が 10 を示した 35 日目には  $-199\text{mV}$  まで下がり、38 日目には再び  $-400\text{mV}$  まで低下した。ORP の低下後の 40 日目の臭気指数は 13 であり、ORP の上昇している期間と大きな違いはなかった。

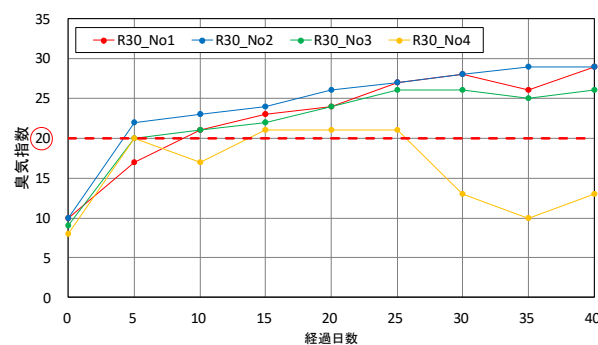


図-18 臭気指数の推移 (連続曝気)

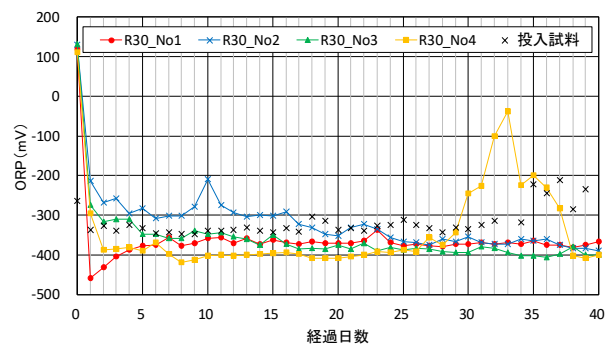


図-19 酸化還元電位の推移 (連続曝気)

3.2.3(1)では、腐熟を促進するために、好氣的条件の指標であるORPをプラスに維持するための曝気量の検討を行ったが、本実験により、ORPをプラスに維持できなくても、臭気が低下するまで腐熟することが示唆された。また、本実験装置の条件であれば、 $8\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ の連続曝気で臭気低減効果が期待できることが確認された。

### (3) 臭気指数を指標とする腐熟判定 (間欠曝気)

図-20に臭気指数の推移を示す。ここでは、悪臭防止法により規制を設ける場合の目安である臭気指数20を基準とし<sup>5)</sup>、これよりも臭気指数が低下すれば腐熟したと判断した。投入原料の臭気指数は22~27の範囲で推移した。投入した未曝気ふん尿スラリーのTS濃度が4%の30日目までは、曝気時間が $4\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ では連続区および間欠区とも臭気指数が20よりも大きかった。曝気時間が $6\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ では連続区で20~25日目に臭気指数が20以下となったが、間欠区では30日目までは20より大きい値で推移した。投入する未曝気スラリーのTS濃度が3.3~3.5%であった35および40日目の臭気指数は、6h連続区が最も小さく、6h間欠区、4h連続区、4h間欠区の順に値が大きくなった。40日目の臭気指数は、4h間欠区が21であり、その他の区は7~12と大きく低下した。

図-21にORPの推移を示す。試験開始後、未曝気ふん尿スラリーの投入に伴い各試験区のORPは低下し、7日目以降には $-400\sim-350\text{mV}$ を示した。18日目から6h連続

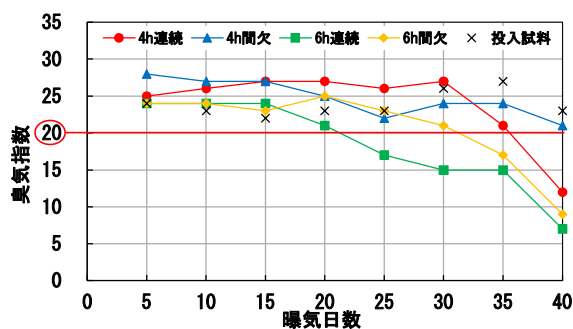


図-20 臭気指数の推移 (間欠曝気)

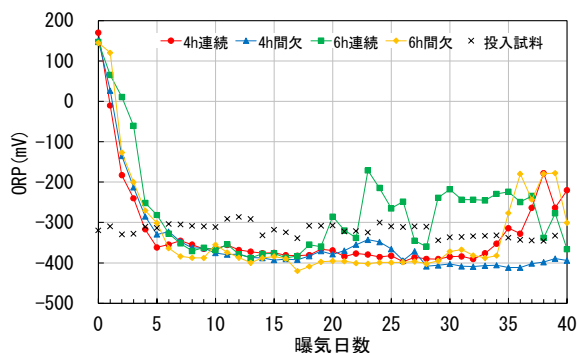


図-21 酸化還元電位の推移 (間欠曝気)

区の値がやや上昇し、23日目に $-170\text{mV}$ まで上昇した。このとき、6h連続区の臭気指数は前述の通り20~25日目以降に20以下となった。また、35日目頃から6h間欠区および4h連続区のORPが上昇しており、このときの両区の臭気指数は前述の通り大きく低下した。前項3.2.3(2)では、4時間の連続曝気で臭気の低下とORPの上昇が認められず、8時間の連続曝気で臭気が20以下となり、その前後にORPの上昇が観測された。

松田ら<sup>7)</sup>は、現地施設で行った実験で間欠曝気時に溶存酸素(DO)とORPを測定しており、曝気を停止するとDOは短時間に消失し、ORPも低下したと述べている。本実験では、同じ曝気時間であれば間欠曝気が連続曝気よりも臭気指数の低下が遅かった。また、ORPは3日目以降、いずれの区もマイナスで推移した。すなわち、間欠曝気時に曝気が停止するとふん尿スラリーが嫌気状態となり好気性菌の活動が低下するため、曝気を再開してもすぐには元の活動状態には戻らないことから、間欠曝気での臭気低下が連続曝気よりも遅かったと推察される。

以上のことから、今回使用した実験装置およびふん尿スラリーの条件では、連続曝気の場合は6時間以上の曝気で腐熟することがわかった。また、一日当たりの曝気時間が同じ場合は、曝気時間を複数回に分ける間欠曝気より連続曝気臭気低減させる効果が大きいことがわかった。

## 4. 肥培灌漑施設からの泡流出抑制技術の開発

### 4.1 目的

前述の「2. 肥培灌漑施設の形状別運転状況と調整液性状の関係解明」では、稼働中の肥培灌漑施設での調査から、曝気量不足が示唆された。一部の施設では、施設稼働開始時に設定された曝気時間を変更し、曝気時間を短くしている事例が見られた。施設利用者への聞き取りにより、曝気時間短縮の理由の一つは、調整槽天端開口部から地上部への泡溢流を防止するためであることがわかった。しかし、曝気時間を短くするとふん尿スラリーの腐熟が不十分となり、臭気低減などの効果を十分に発揮できない。そのため、調整槽開口部における泡溢流の原因を解明し、泡溢流防止策を提案する必要がある。本章では、調整槽開口部からの泡溢流の要因を明らかにし、その抑制技術を提案する。

### 4.2 方法

#### 4.2.1 調整槽開口部での泡溢流時の施設稼働状況調査

##### (1) 調査対象施設の概要

表-11に調査対象施設の曝気状況を示す。調整槽の形

状は施設Bが八角形、施設Iが六角形である。両施設とも底面から槽内天端までの高さは4mである。調整槽内へ空気を送るブローポンプは1台設置されている。調整槽内にはふん尿スラリーを攪拌するための調整槽攪拌機、空気を拡散するための散気管、調整槽から配水調整槽へふん尿スラリーを移送するための調整槽ポンプがそれぞれ1台設置されている。調整槽上部には、これらの機器を調整槽へ出し入れするための天端開口部が2カ所ある。点検時以外は、天端開口部は金属製の蓋で覆われている。この蓋は複数に分割されており、そのうち1枚には消泡機が固定されている。また、蓋の一部にはポンプをつり下げるワイヤーを通すために切り込みが入っている。各機器の稼働時間は電源タイマーで制御している。

表-11 調査対象施設の曝気状況

施設記号	調整槽形状	調整槽容量(m <sup>3</sup> )	曝気時間日合計(h・d <sup>-1</sup> )	ブローポンプ稼働時間帯	調査日
B	八角形	251	7.33	0:12~0:53 13:11~13:25 1:56~2:37 13:27~13:52 3:41~4:22 15:56~16:37 6:25~6:53 18:41~19:08 8:41~9:22 19:56~20:53 10:40~11:22 22:26~23:08	2018/9/4
I	六角形	290	4.58	0:08~1:06 4:38~5:06 1:38~2:36 5:38~6:06 3:07~4:06 13:52~14:36	2018/9/2

## (2) 機器稼働状況の判別および泡のモニタリング

各種機器の稼働状況は、クランプロガー (LR5051、日置電機(株)) を機器の電力ケーブルに設置して電流値を1分ごとに計測し、その経時変化を基に判別した。調整槽開口部からの泡溢流の有無は、インターバルカメラ (TLC200Pro、Brinno) で開口部を1分ごとに撮影した映像を、目視で確認して判別した。ただし、用いたインターバルカメラでは夜間の撮影ができないため、日中の泡溢流のみを調査対象とした。

施設Bでの調査日は2018年9月4日で、施設Iでの調査日は2018年9月2日である。

### 4.2.2 調整槽内部での泡の上昇要因調査

#### (1) 調査対象施設の概要

表-12に調査対象施設の曝気状況を示す。調整槽形状は八角形で、2018年度末に稼働を開始した。槽内高さおよび槽内設備は4.2.1(1)の施設BおよびIと同様である。この施設の流入口内の底面積は10.2m<sup>2</sup>、調整槽内の底面積は135.6m<sup>2</sup>、天端開口部の面積は散気管設置部分が5.72m<sup>2</sup>で、調整槽ポンプ設置部分が2.0m<sup>2</sup>である。なお、蓋から調整槽内天端までの深さは0.4mである。

各機器の稼働時間は電源タイマーで制御している。ただし、調整槽ポンプの起動には、水位計コントローラー

からの信号発信と調整槽ポンプの電源タイマーON 両方の条件が必要である。なお、水位による調整槽ポンプ制御条件は以下の通りである。調整槽水位が3.1m以上になると水位計コントローラーから調整槽ポンプを動かすための信号が発信され、水位が3.0m以下になるとその信号が停止する。

流入口ポンプは流入口の水位によって三方弁が切り替わり、流入口内のふん尿スラリーを攪拌するか、流入口から調整槽へ移送するかを制御している。なお、三方弁が切り替わる流入口の水位条件は未確認である。

表-12 調査対象施設の曝気状況

施設記号	調整槽形状	調整槽容量(m <sup>3</sup> )	曝気時間日合計(h・d <sup>-1</sup> )	ブローポンプ稼働時間帯	調査日
L	八角形	420	2.43	0:05~0:07 3:05~3:35 0:20~0:34 4:05~4:07 1:05~1:34 4:20~4:34 2:05~2:07 5:05~5:34 2:20~2:35	2019/8/21
			6.48	0:00~1:11 4:21~5:35 0:21~2:11 22:37~23:51 2:22~4:10 23:53~23:59	2020/8/27

#### (2) 機器の稼働状況の判別および水位測定

機器の稼働状況は、4.2.1(2)と同様に判別した。調整槽水位は、施設に設置されている圧力式水位計のアナログ出力値を小型ロガー (LR5031、日置電機(株)) にて1分間隔で記録した。

#### (3) 調整層内の泡発生状況のモニタリング

調整槽内の泡発生状況のモニタリングは、インターバルカメラ (HCLT4G、(株)ハイク) で行った。このカメラは赤外線フラッシュにより暗部での撮影ができる。そこで図-22のように調整槽天端開口部の蓋を一部撤去して木製の覆いを被せ、インターバルカメラを斜め下方に向けて取り付け、消泡機周辺の調整槽内部を撮影した。撮影した写真は携帯電話のLTE(4G)回線経由でメール送信して、泡の状態を遠隔地から監視できるようにした。写真撮影間隔は1分である。また、設置機材の状況を監

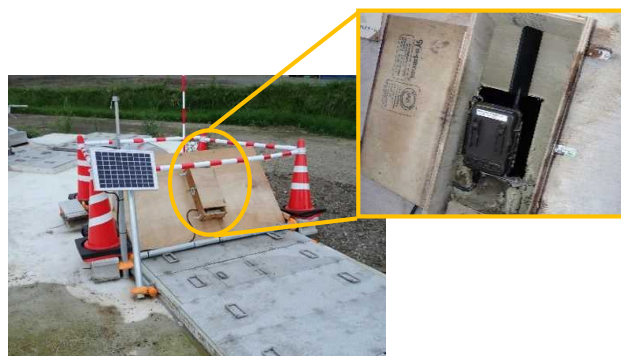


図-22 インターバルカメラ設置状況



視するため、開口部近くの地上にインターバルカメラ (HCLT4G、(株) ハイク) を1台設置した。調査日は2019年8月21日、2020年8月27日である。両日も泡の上昇を観察するため、手動設定により、消泡機が一定時間起動しないようにした。この時間は、消泡機停止中の泡の状態を常に監視でき、また、泡が上昇した場合に溢流しないように対処できる日中に設定した。

### 4.3 結果および考察

#### 4.3.1 調整槽開口部での泡溢流時の施設稼働状況調査

図-23、24に施設Bの泡溢流前後の状況を示す。なお、図-23の泡の痕跡は、インターバルカメラで撮影できなかった9月3日夕方~9月4日早朝の溢流によるものである。図-25に、泡が溢流する前から停止するまでの時間帯における、各種機器の稼働状況を示す。「ON」の表示は機器が稼働した時刻を示す。図-25に示すように、泡が溢流している時間帯にはブローポンプを含め、いずれの機器も稼働していなかった。泡の溢流が停止したのは、調整槽攪拌機が稼働した1分後であった。

図-26、27に施設Iの泡溢流前後の状況を、図-28に、泡が溢流する前から停止するまでの時間帯における、各種機器の稼働状況を示す。図-28に示すように、泡が溢流している時間帯にはいずれの機器も稼働していなかった。泡の溢流が停止したのは、消泡機が稼働した時刻であった。

施設BおよびIのいずれも、泡が溢流している時間帯にはブローポンプを含むいずれの機器も稼働していないことがわかった。また、施設Iでは、消泡機が稼働したことで泡の溢流が停止しているが、施設Bでは、調整槽攪拌機稼働1分後に泡の溢流が停止した。すなわち、今回の調査では、調整液が攪拌されずに静かに貯留されている時間帯に泡が溢流していた。なお、施設Bの調整槽液温は9月4日12時で33℃、施設Iの調整槽液温は9月2日11時で40℃であった。



図-23 施設Bでの泡溢流開始直前の状況 (2018/9/4 12:32)



図-24 施設Bでの泡溢流停止直後の状況 (2018/9/4 12:59)

泡の溢流			開始	停止
			12:32	12:59
ブローポンプ	ON	OFF		
	10:40	11:22		
調整槽攪拌機	ON	OFF		ON
	10:43	11:24		12:58
調整槽ポンプ				
流入口ポンプ		ON	OFF	
		11:54	12:07	
消泡機	OFF			
	10:10			

図-25 泡溢流時の施設B稼働状況 (2018/9/4)



図-26 施設Iでの泡溢流開始直前の状況 (2018/9/2 10:51)

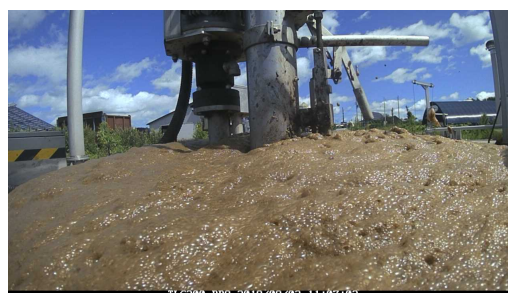


図-27 施設Iでの泡溢流停止直後の状況 (2018/9/2 11:07)

泡の溢流			開始	停止
			10:51	11:07
ブローポンプ				
調整槽攪拌機				
調整槽ポンプ				
流入口ポンプ				
消泡機	ON	OFF	ON	OFF
	9:07	9:21	10:07	10:21
			ON	OFF
			11:07	11:21

図-28 泡溢流時の施設I稼働状況 (2018/9/2)



### 4.3.2 調整槽内部での泡の上昇要因調査

図-29に2019年8月21日の施設稼働状況と調整槽水位を示す。図下段の横線は各機器が稼働していた時間帯を示す。手動による消泡機 (No. 1, 2) の停止時間帯は9時32分から15時47分であった。調整槽水位は10分程度の周期で数 cm の上下動を繰り返していた。後述する2020年の水位データでも一定周期の上下動の繰り返しが観測されていた。

そこで、2020年夏に別途、圧力式水位計を調整槽内に設置して既設水位計との同時計測を行った。新たに設置した圧力式水位計では一定周期の上下動は観測されなかったが、調整槽ポンプ稼働による水位低下やその後の水位上昇は既設水位計と同様の傾向を示した。そのため、既設水位計の出力値には一定周期での電氣的な乱れが生じていたと判断した。そこで、以下では瞬時値と9分間の移動平均値を併記する。図-30、31は消泡機停止時間

内での調整槽内部の泡の様子である。中央の機器が消泡機である。その右側は、この調査のために設置した、0.1m刻みの木製目盛である。9時32分から13時32分までの4時間で泡の上面は約0.15m上昇していることがわかった。この間の調整槽水位は瞬時値で3.02m (移動平均値3.02m) から3.05m (同3.06m) まで0.03m (同0.04m) 上昇していた。すなわち、数 cm の水位上昇でも泡は十数 cm 上昇することがわかった。その理由として、調整槽内の泡の厚さが均一ではないことが考えられる。図-32は調整槽内部の様子を断面方向から見た泡の想像図である。開口部周辺は、消泡機で泡が破壊され、泡の上面は下がっている。しかし、消泡機から離れた位置では調整槽内に泡が充満していることが考えられる。この場合、水位が上昇すると調整槽内天端に達した泡は横方向 (開口部方向) に押し出されると考えられる。

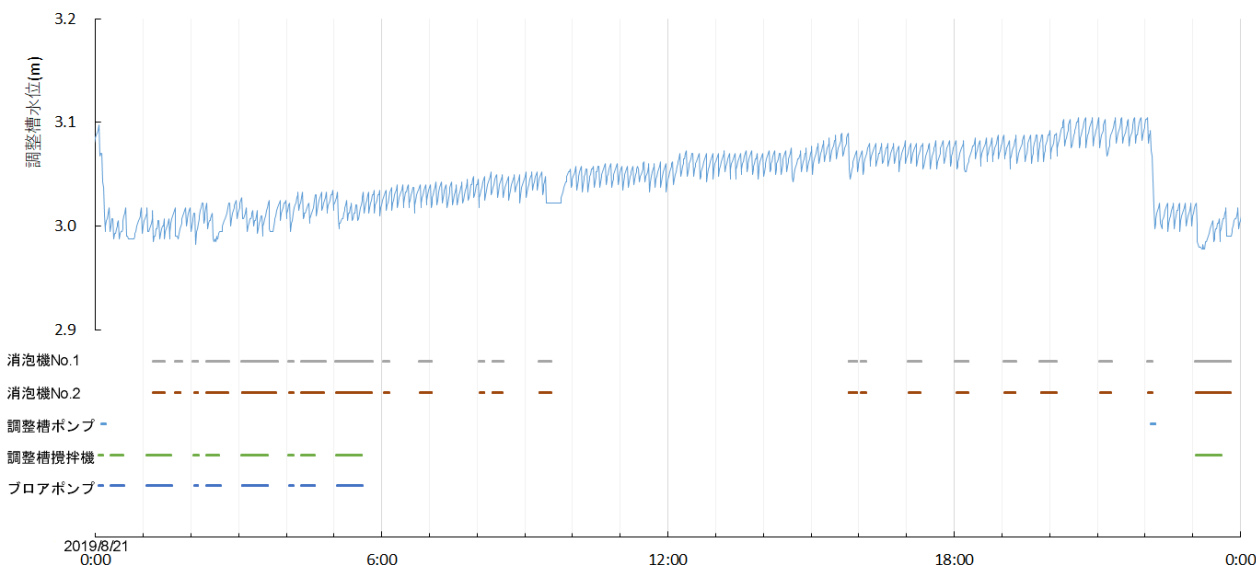


図-29 施設稼働状況と調整槽水位 (2019年8月21日)

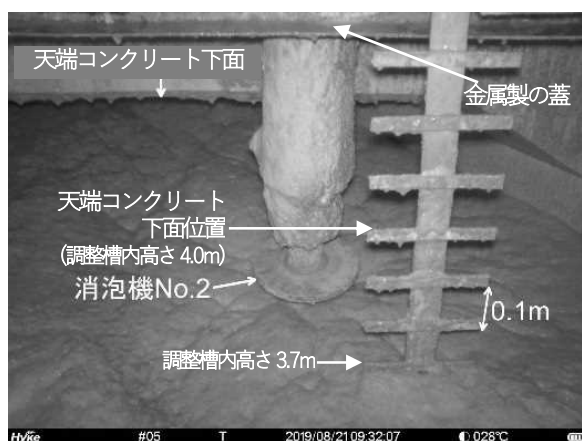


図-30 調整槽内部(2019/8/21 9:32)



図-31 調整槽内部(2019/8/21 13:32)

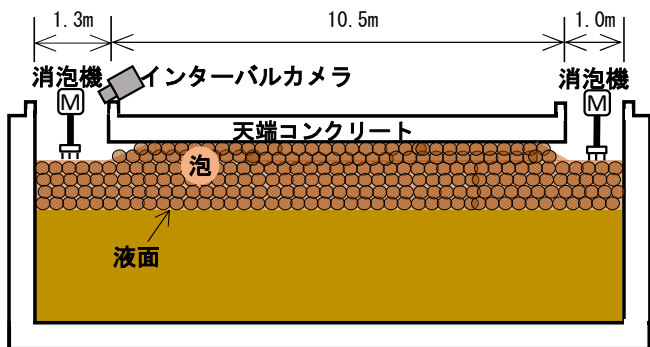


図-32 調査対象施設調整槽内部の泡の想像図（断面図）



図-34 消泡機が設置されていない開口部（点検口）  
（調査対象施設近隣の肥培灌漑施設）



図-33 消泡機が設置されている開口部  
（調査対象施設近隣の肥培灌漑施設）

図-33、34 は調査対象施設と別の肥培灌漑施設調整槽で撮影した開口部の写真である。図-33 手前側の開口部は散気管や調整槽攪拌機を出し入れする場所で、前述の本研究調査対象施設と同様に消泡機が設置されている。

図-33 奥側の開口部（図-34 開口部）は調整槽内部の点検口であり、通常は蓋で密閉されており、消泡機は設置されていない。両開口部は約 9.5m 離れている。図-33 のように消泡機が稼働することで泡の上面は調整槽内天端より低くなるが、消泡機から離れた位置では、図-34 のように泡が調整槽内に充満している。このように、調整槽内の泡上面の高さは、消泡機周辺では低くなるが、消泡機から離れた位置では高い。

図-35 に 2020 年 8 月 27 日の施設稼働状況と調整槽水位を示す。消泡機 No. 2 の停止時間帯は 9 時 21 分から 16 時 9 分であった。調整槽水位は 30 分程度の周期で数 cm の上下動を繰り返しており、以下では瞬時値と 29 分間の移動平均値を併記する。図-36、37 は消泡機停止時間内の調整槽内部の泡の様子である。11 時 30 分から 13 時 20

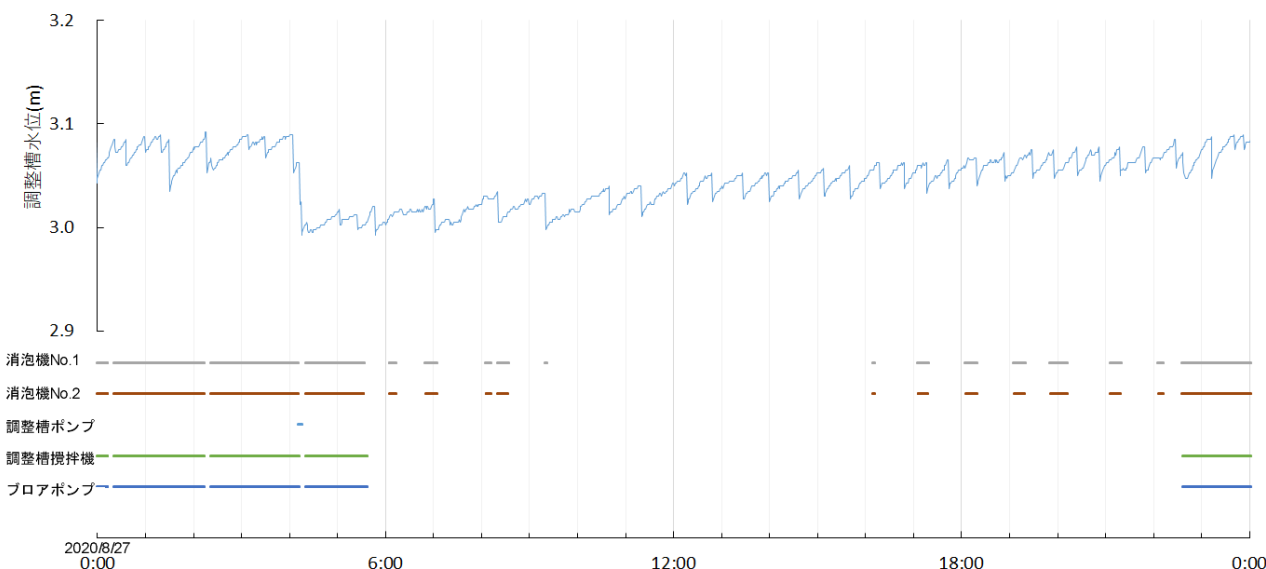


図-35 施設稼働状況と調整槽水位（2020年8月27日）

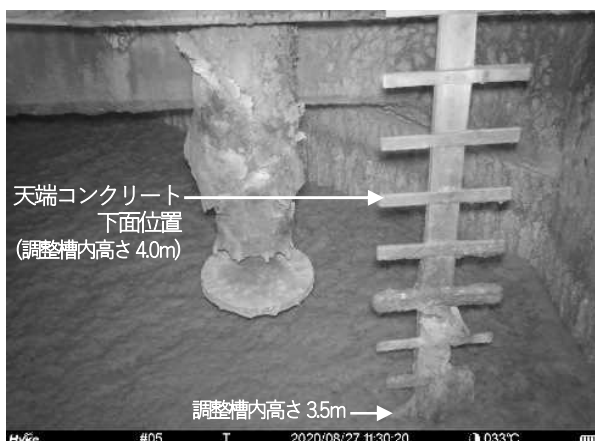


図-36 調整槽内部 (2020/8/27 11:30)



図-37 調整槽内部 (2020/8/27 13:20)

分までの1時間50分で泡上面は約0.2m上昇していることがわかった。この間の調整槽水位は瞬時値で3.02m(移動平均値3.03m)から3.05m(同3.04m)まで0.03m(同0.01m)上昇していた。前述の2019年の調査結果と同様、水位上昇量より泡の上昇量が大きいことがわかった。ただし、泡上面の高さは、2019年8月21日9時32分には約3.7m(図-30)であったが、2020年8月27日11時30分には約3.5m(図-36)であった。両日の水位の瞬時値は3.02mで同じであり、移動平均値は3.02mと3.03mでその差はわずかであることから、2019年と比較して2020年では泡の層が薄くなっている可能性がある。この施設では、2020年1月29日から曝気時間を長くしており、このことでふん尿スラリーの腐熟がさらに進み、それに伴い泡の層が薄くなった可能性がある。

#### 4.3.3 泡溢流防止対策

これまでの調査結果からは、曝気が終わり消泡機の停止中に泡溢流がみられること、消泡機の稼働が、調整槽内の泡上昇を抑制することがわかった。したがって、泡溢流を防止するためには、曝気を行っていない時間帯にも消泡機を短い間隔で運転することが重要である。

## 5. 現地施設を用いた効率的なふん尿調整方法の検証

### 5.1 目的

前述「3. 室内試験装置を用いた効率的なふん尿調整条件の解明」で示したとおり、間欠曝気よりも連続曝気の臭気低減効果が大きいことが明らかとなった。そこで、連続曝気による調整液の臭気低減効果について、現地で稼働中の肥培灌溉施設を用いて検証する。また、肥培灌溉施設の調整槽液温は夏期には30℃以上に上昇するが、冬期には液温が低下する。液温が低下すると腐熟の進行が遅くなるため、冬期の時間延長による液温上昇を検証する。

### 5.2 方法

#### 5.2.1 調査施設の概要と曝気時間

調査対象施設(施設L)の詳細は、前述の4.2.2(1)に記述したとおりである。曝気時間の変更履歴は表-14のとおりである。なお、曝気時間中に調整槽ポンプまたは流入ポンプが稼働した場合には、電力消費のピーク上昇を防ぐため、ブローポンプが一時的に停止する場合がある。

表-14 曝気時間の変更履歴(施設L)

期間	曝気時間日合計 (h・d <sup>-1</sup> )	ブローポンプ稼働時間帯
2019/7/1~ 2020/1/29	3.5	23:04~23:34 0:05~0:35 1:05~1:35 2:05~2:35 3:05~3:35 4:04~4:34 5:04~5:34
2020/1/30~ 2020/12/18	7.0	22:34~5:34
2020/12/19~	8.0	21:36~5:36

#### 5.2.2 液温測定

液温は、流入口および調整槽それぞれにおいて、底面から上方へ2mの位置で測定した。図-38に温度センサー

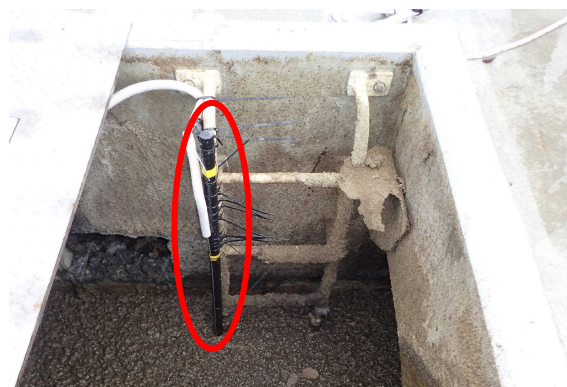


図-38 温度センサーの設置状況(赤丸部分)



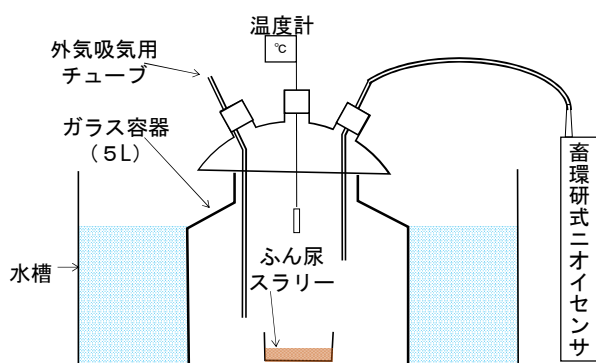


図-39 臭気測定装置の概要

の設置状況を示す。肥培灌漑施設ではセンサーやケーブルの劣化が著しいため、園芸用支柱にステンレス保護管付き Pt100 センサーを取り付け、定期的にセンサーを交換することとした。測定値は、地上部に設置した小型防水データロガー (TR-55i-Pt、ティアンドデイ) に記録した。また、施設近傍で外気温を測定した。液温および気温測定間隔は5分である。

### 5.2.3 ふん尿スラリー性状モニタリング

2020年8月から約1ヶ月毎に、流入口および調整槽のふん尿スラリーおよび調整液を採取してpHを測定した。また、2021年春期、夏期には配水調整槽の調整液を採取

した。採取した液は、1Lポリビンに保存して冷蔵状態で寒地土木研究所に輸送し、採取翌日に全固形物(TS)濃度および臭気を測定した。

臭気の測定には、図-39に示す約20℃の水槽内に静置した装置を用いた。臭気の測定手順は、以下の通りである。ポリビン入りのふん尿スラリーおよび調整液を約20℃の恒温槽内に2時間以上静置する。その後、臭気測定直前にスラリー50gをプラスチック容器に入れてガラス容器内に静置し、速やかにガラス容器の蓋を閉め、5分後の臭気指数を記録する。

## 5.3 結果および考察

### 5.3.1 外気温および液温

図-40に施設Lの曝気時間の設定状況と調整槽液温、流入口液温および外気温の推移を示す。2020年1月30日に曝気時間を変更するまでの調整槽液温は、2019年9月中～下旬に最も高い約35℃を記録した後、外気温および流入口液温の低下に伴い、調整槽液温は低下し続けた。2020年1月29日には約20℃を記録した。2020年1月30日に曝気時間を連続7時間に変更した後に、調整槽液温は上昇に転じ、2020年夏には約42℃を記録した。また、2020年12月中旬の平均気温が前年同期より約5℃低くなったため、2020年12月19日に曝気時間を連続8時間に変更した。その後も調整槽液温が流入口液温よりも高

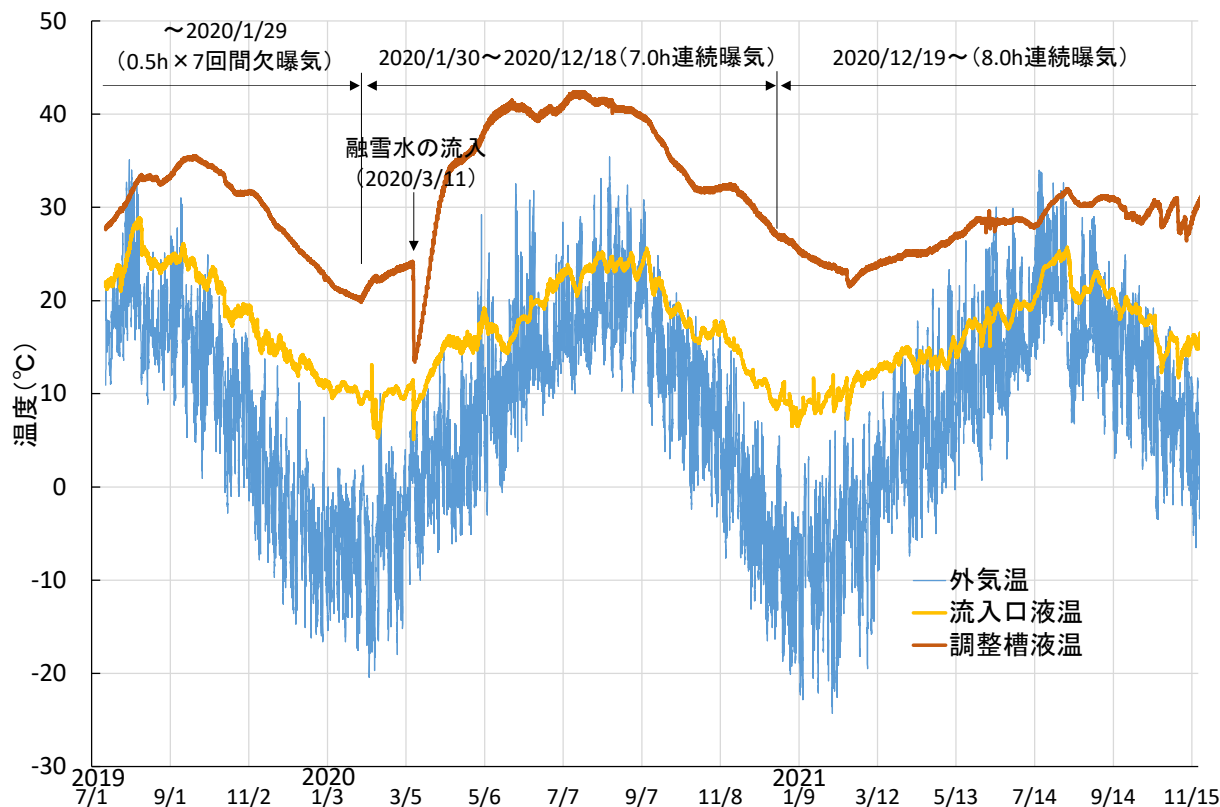


図-40 曝気時間設定状況と温度推移 (施設L)



く推移したが、2021年8月の調整槽液温は32°Cが最高で、流入口液温との差は約6°Cと小さくなった。この要因は、後述するように2021年夏期には2020年夏期と比較して調整液の腐熟が進んでおり、好気性発酵による発熱が小さくなったためと考えられる。なお、2020年3月11日に調整槽液温が約10°C低下しているのは、降雨による融雪水が調整槽に流入したためである。

微生物の活動に必要な温度は中温菌の場合 15~40°C (至適温度は30~37°C) である<sup>8)</sup>。現地施設での検証では、曝気時間を連続 7~8 時間に延長することで液温を20°C程度に保つことができた。したがって、冬期の曝気時間延長による液温低下抑制は、微生物活動を維持するためには有効な対策と考えられる。

### 5.3.2 ふん尿スラリーおよび調整液の pH の推移

図-41 に流入口ふん尿スラリー、調整槽調整液および配水調整槽調整液の pH の推移を示す。流入口ふん尿スラリーの pH は、2020年10月および2021年1月から5月を除き、6.8~7.2 で推移した。調整槽調整液は調査期間を通して7.6~7.8 で推移した。好気性発酵では、ふん尿スラリーの腐熟の過程で生成されるNH<sub>3</sub>によって pH が上昇すると考えられる<sup>1)</sup>とされており、今回の調査でも pH が上昇していることから調整槽での曝気によって腐熟が進んでいることが確認された。2020年10月および2021年1月から5月の流入口ふん尿スラリーは、他の期間と比較して pH が高い値を示した。牛舎では殺菌消毒のために消石灰を散布することがあり、pH が高い値を示したふん尿スラリーには消石灰が混入していた可能性がある。配水調整槽の pH は、7.2~7.5 を示した。

### 5.3.3 ふん尿スラリーおよび調整液の TS 濃度の推移

図-42 に流入口ふん尿スラリー、調整槽調整液および配水調整槽調整液の現物(Fresh Matter) 当たり TS 濃度の推移を示す。流入口ふん尿スラリーの TS 濃度は、2021年2月17日を除き、7.3~8.3%FM で推移した。2021年2月17日の TS 濃度は6.2%FM と低下しているが、これは2月15~16日に30.5mmの降雨を観測しており、融雪水が流入口に流れ込んだためである。調整槽調整液の TS 濃度は、2021年10月25日、11月30日を除き、5.8~6.4%FM で推移した。調整槽調整液の TS 濃度が流入口ふん尿スラリーよりも低下していることから、曝気によって有機物が分解したものと推察される。なお、牛舎増設工事に伴って2021年10月以降の雨水が調査対象施設へ流入したことが、酪農家への聞き取りで判明した。そのため、2021年10~11月の調整槽調整液の TS 濃度が低下したと考えられる。2021年12月には新牛舎の屋根が完成したため、

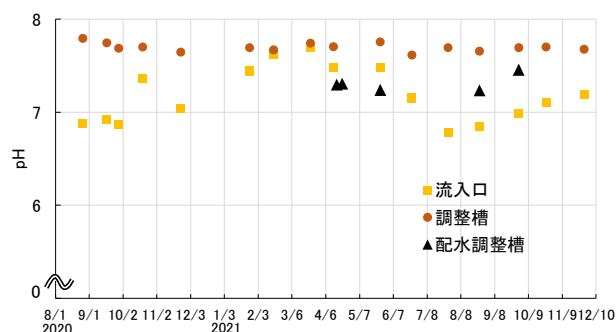


図-41 ふん尿スラリーおよび調整液の pH

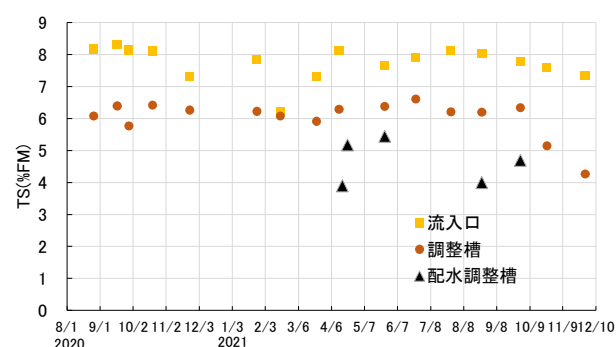


図-42 ふん尿スラリーおよび調整液の全固形物濃度

今後、雨水流入は解消されると思われる。配水調整槽調整液の TS 濃度は3.9~5.4%FM で、調整槽調整液よりも低かった。配水調整槽には蓋がないため、雨水の混入による影響と考えられる。

### 5.3.4 ふん尿スラリーおよび調整液の臭気指数の推移

図-43 に流入口ふん尿スラリー、調整槽調整液および配水調整槽調整液の臭気指数の推移を示す。なお、測定に用いた臭気センサー(畜環研式ニオイセンサ)の測定上限値は臭気指数40であり、40を超えると“over”と表示される。2020年の流入口ふん尿スラリーの臭気指数は37~40を、調整槽調整液の臭気指数は29~30を示しており、曝気により臭気が低減している。2021年1~4月は流入口ふん尿スラリーと調整槽調整液の臭気指数に

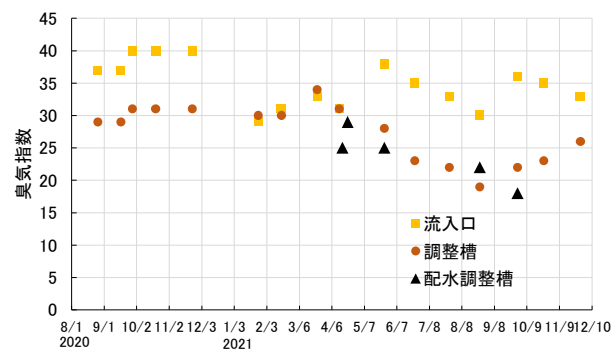


図-43 ふん尿スラリーおよび調整液の臭気指数

大差はなく 29～34 で推移した。これは、流入口ふん尿スラリーの臭気指数が低下したためであり、冬期の気温低下に伴いふん尿スラリーの液温も低下したことが影響したと考えられる。2021 年 5～8 月の流入口ふん尿スラリーの臭気指数は 38 から 30 まで低下を続け、調整槽調整液の臭気指数も 28 から 19 まで低下した。流入口ふん尿スラリーの臭気低下要因は判然としないが、調整槽調整液の臭気指数は流入口ふん尿スラリーよりも 10 程度低い値で推移しており、曝気による臭気低減効果が認められる。その後、2021 年 9 月に流入口ふん尿スラリーの臭気指数が 36 まで上昇すると、調整槽調整液の臭気指数も上昇した。配水調整槽調整液の臭気指数は、2021 年春期が 25～29 で、調整槽調整液より低い値を示した。2021 年夏期の臭気指数は 18～22 で、2021 年春期より低い値を示した。これは、2021 年春期から夏期の調整槽調整液の臭気指数低下の影響と考えられる。

悪臭防止法では臭気指数 20 が規制を設ける場合の目安となっている<sup>5)</sup>。ここで、臭気指数 20 以下を腐熟の目安とすると、2021 年夏期の配水調整槽調整液は概ね腐熟していると判断できる。一方、2021 年春期の配水調整槽調整液は臭気指数が 25 以上であり、やや腐熟が不足していると考えられるが、圃場へ散布された後の調整液は速やかに土中へ浸透するため、圃場散布後の臭気は低下する可能性が高い。

### 5.3.5 ふん尿スラリー流入量と曝気量との関係

前述の通り、現地試験での曝気時間は 1 日当たり 7～8 時間の連続に設定した。「肥培かんがい施設設計マニュアル」(釧路開発建設部)によると、腐熟に必要な総曝気量は、ふん尿スラリー 1m<sup>3</sup>に対して 14 日間で 100～150m<sup>3</sup>とされている。なお、14 日とは調整槽での滞留日数を示す。また、ふん尿スラリー 1m<sup>3</sup>に対する 1 時間当たりの空気量である曝気強度は、0.5～1.5m<sup>3</sup>/h が目安とされている。現地施設でのふん尿スラリー流入量と曝気量との関係を整理すると以下ようになる。なお、調整槽に流入するふん尿スラリー量は、調整槽の水位上昇速度から推定した。

- 調整槽の貯留量

調整槽底面積 135.6m<sup>2</sup> × 設定水位 3.1m ≒ 420m<sup>3</sup>

- 1 日当たりのふん尿投入量

16.0m<sup>3</sup>/d (2020～2021 年の平均)

- 調整槽の滞留日数

420m<sup>3</sup> ÷ 16.0m<sup>3</sup>/d ≒ 26.3d

- ブローポンプの空気流量

245m<sup>3</sup>air/h (実測値)

- 曝気時間 8 時間の場合の日当たり曝気量

245m<sup>3</sup>/h × 8h = 1960m<sup>3</sup>/d

- ふん尿スラリー 1m<sup>3</sup>に対する 1 時間当たりの曝気強度

245m<sup>3</sup>/h ÷ 420m<sup>3</sup> ≒ 0.58m<sup>3</sup>air/m<sup>3</sup>slurry/h

- ふん尿スラリー 1m<sup>3</sup>当たりの総曝気量

$$\frac{1960\text{m}^3 \times 26.3\text{d}}{16.0\text{m}^3 \times 26.3\text{d}} = 122.5\text{m}^3\text{air/m}^3\text{slurry}$$

このように、現地試験での曝気強度および総曝気量は、「肥培かんがい施設設計マニュアル」で示されている目安を満たしているが、調整槽での滞留日数が、設計値よりも実測値が長い日数であった。施設容量は将来の飼養頭数なども考慮して設計されるため、施設の稼働開始直後や経営環境が変化する場合には、滞留日数が設計と実際では異なることが想定される。そのため、貯留槽の水位上昇速度からふん尿スラリー流入量を確認する必要がある。

## 6. 省エネルギー型ふん尿スラリー調整システムの提案

これまで述べたように、安定した施設の運転を実現するには、泡の地上部への溢流を防止しなければならない。そこで、泡の溢流への対処フローを図-44 に示す。曝気停止中の消泡機の運転方法は、15 分運転、45 分停止の繰り返しを基本とし、それでも泡が溢流する場合には、対処フローに従って設定変更を試みる。また、水位センサーに関するトラブルも泡の溢流原因になる。図-45 は水位センサー保護管がスラッジに埋没した事例である。水位センサー保護管開口部がスラッジに埋没していなければ、水位センサー保護管内の水面と調整槽全体の水面は同じになるが、水位センサー保護管開口部がスラッジに埋没してしまうと、調整槽の水位が上昇しても、開口部から水位センサー保護管内にふん尿スラリーが入らず、正しい水位が計測できない。なお、本報告書では肥培灌漑施設のトラブルの原因についても述べたが、調整槽内部は硫化水素等の有毒ガスの滞留や引火爆発の懸念のあるメタンガス等が発生している場合があることから、点検、清掃、修理作業等は専門業者に依頼していただきたい。

以上のように、泡溢流を防止しながら肥培灌漑施設を安定して効率的に運転するためには、①曝気停止中にも一定時間毎に消泡機を運転する、②調整槽に流入するふん尿スラリー量を確認して曝気時間を決定する、の 2 点が重要である。

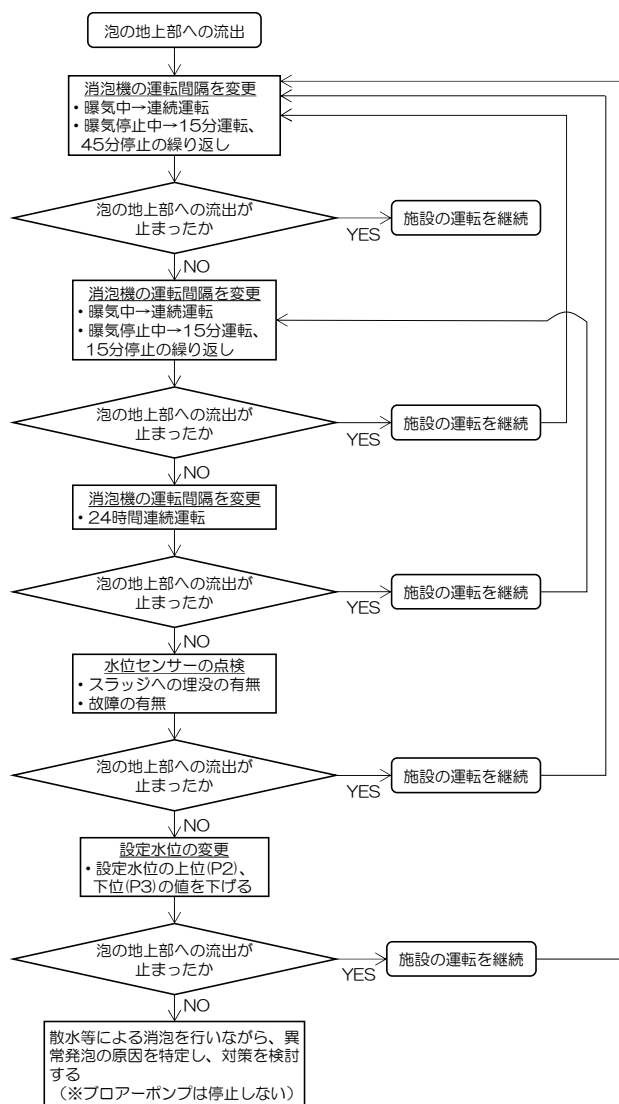


図-44 泡流出時の対処フロー

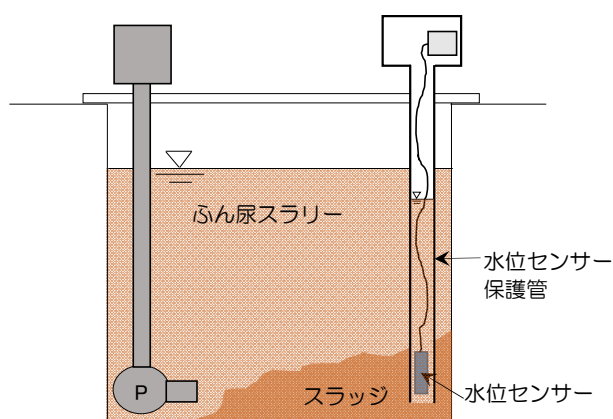


図-45 水位センサー保護管がスラッジに埋没した事例

## 7. まとめ

家畜ふん尿を好気性発酵により腐熟させる肥培灌漑施設では、酪農家ごとに曝気時間などの運転方法が異なる。

その背景には、酪農家が経費削減のために好気性発酵に費やす電力を節約していることがある。本研究は、国営事業で整備された肥培灌漑施設の効率的な運転管理方法を明らかにすることを目的に、以下の①～⑤を実施した。

①肥培灌漑施設の形状別運転状況と調整液性状の関係解明

5カ所の肥培灌漑施設の運転状況を比較した結果、曝気ポンプ稼働時間およびふん尿スラリーの水理的滞留日数は施設によって大きく異なっており、施設形状と運転方法および調整液性状との関係は特に認められなかった。なお、調整液の性状は、単位固形物量当たりの総曝気量が多いほど pH が高いことが明らかとなったが、最も pH が高い調整液でも、腐熟の簡易判定目安である pH7.8～8.5 の下限値付近にとどまっており、いずれの施設においても曝気量不足が示唆された。

②室内試験装置を用いた効率的なふん尿調整条件の解明

ふん尿スラリーを 20℃および 30℃に設定したバッチ試験では、液温が高い区の有機物分解量が大きく、腐熟に有利であることが確認された。また、臭気指数に着目した連続投入試験では、ORP をプラスに維持できなくても、臭気が低下するまで腐熟することが示唆された。さらに曝気時間が同じ場合は、間欠曝気より連続曝気が臭気を低減させる効果の大きいことがわかった。これらの結果から、今回実施した複数の条件の中で最も効率的なふん尿調整条件は、液温 30℃で連続 6 時間の曝気であった。

③肥培灌漑施設からの泡流出抑制技術の開発

調整槽内部の泡の発生状況を調査した結果、消泡機停止時に液面が上昇すると液面上の泡が大きく上昇し、これが泡溢流の要因であった。この結果から、曝気を行っていない時間帯にも消泡機を短い間隔で運転すれば泡溢流を防止できることを明らかにした。

④現地施設を用いた効率的なふん尿調整方法の検証

実際に流入するふん尿スラリー量を水位上昇速度から推定して曝気時間を決定することによって、効率的な肥培灌漑施設の運転が可能となることを明らかにした。

⑤省エネルギー型ふん尿スラリー調整システムの提案

①～④の研究成果を基に、泡の溢流を防止しながら施設を運転するための設定手順をフロー図で示すなど、肥培灌漑施設を効率的に運転する方法を提案した。

## 謝辞

調整液腐熟の簡易判定目安は、国土交通省北海道開発局広域開発建設部「平成 9 年度十勝地域環境保全型農業

高度化検討委員会報告書」を参考とした。また、調査対象施設の酪農経営者には、調査機材の設置を快諾いただいた。ここに記して感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 樋元淳一、岩淵和則、松田従三：液状家畜ふん尿の好気性発酵による堆肥化 I. 実験装置の試作、北海道大学農学部邦文紀要、15(3)、p. 261、1987
- 2) 村上功、西脇康善：環境保全型かんがい排水事業における肥培施設整備前後の効果検証—第九報—、第 59 回（平成 27 年度）北海道開発技術研究発表会、2016
- 3) 社団法人農業土木学会：農業土木標準用語辞典、改訂五版、2003
- 4) 北海道農業・畜産試験場編：家畜ふん尿処理・利用の手引き 2004、p. 58、2004
- 5) 環境省環境管理局：臭気指数規制ガイドライン、pp. 5-22、2001
- 6) 山本朱美、古谷修、小堤恭平、小川雄比古、吉栄康城：畜産臭気における臭気指数と市販ニオイセンサ指示値との関係、日本畜産学会報、79(2)、pp. 235-238、2008
- 7) 松田従三、樋元淳一：大型発酵槽における牛糞尿スラリーの曝気処理、農業機械学会誌、55(Supplement)、pp. 407-408、1993
- 8) 押田敏雄、柿市徳英、羽賀清典：新編畜産環境保全論、養賢堂、p. 57、2012



## 16.3 大規模農業地域における環境との調和に配慮した灌漑排水技術の開発

### 16.3.3 大規模酪農地帯の水質環境評価技術に関する研究

担当チーム：寒地農業基盤グループ（水利基盤チーム）  
技術開発調整監（寒地技術推進室）

研究担当者：中村和正、川口清美、鶴木啓二、田中健二、  
村上 功、前川和義、大山武士

#### 【要旨】

北海道東部の大規模酪農地帯では、気候変動に伴う転作や国営環境保全型かんがい排水事業の実施により営農状況が変化している。そのため、水質汚濁物質の流出経路（表面流出、側方流出、地下流出）の変化やそれに伴う動態変化が予想され、流域規模での水質環境への影響を定量化することが求められている。本研究では、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)による水質解析により、大規模酪農地帯の水質環境改善手法を提案することを目的とし、現地観測により、A川流域とB川流域における河川水質と土地利用・営農状況の関係、支川流域における河川水質状況を明らかにした。また、SWATによる水質解析により、観測値を再現するモデルパラメータを設定し、過去、現在、近未来の三時期の営農状況の変化に伴う河川水質への影響をシミュレーションした。

本川流域における河川水質と土地利用・営農状況の関係では、平時の採水調査により流域広域にわたる河川水質状況を把握し、土地利用図と農業統計値により集水域ごとに乳用牛頭数を集計した。その結果、窒素濃度の平均値と流域面積あたりの乳用牛頭数密度には、高い相関関係が得られたこと、近似線から外れるプロットは事業の実施状況との関係性が考えられることなどを明らかにした。支川流域における河川水質状況では、A川支川を対象流域に選定し、自動採水器により河川水質の連続観測を実施した。酪農の営農状況が異なる支川流域の水質変動特性を明らかにし、SWATのモデルパラメータの同定・検証に利用するデータセットを取得した。SWATによる水質解析では、牧草地および飼料用トウモロコシの作付、施肥、収穫などの管理スケジュールを設定した。生育期間における葉の生育や根の伸長などの作物生長過程を推定し、単収の実測値を再現することにより、地表および土壌面における水・栄養塩物質の流出過程が経時的に表現され、支川下流地点での窒素負荷量の変動を良好に再現した。過去、現在、近未来の三時期の営農状況を想定したシミュレーションの結果、牧草地から飼料用トウモロコシへの転作により、窒素負荷量の表面流出が増加することが示され、転作農地とその周辺に肥培かんがいによるスラリー状の液肥散布、緩衝帯としての土砂かん止林、沈砂池としての排水調整池を配置することで表面流出、側方流出、地下流出が減少することが示された。

キーワード：水質；酪農；土地利用；SWAT

#### 1. はじめに

北海道は、広大な土地と夏の冷涼な気候風土により酪農に適した地域であり、1950年代の草地拡大や灌漑排水施設などのインフラ整備を契機に酪農産業が発展してきた。現在では、国内生乳生産量のうち北海道が占めるシェアは50%を超え、安定的な生乳・乳製品の供給地としての役割を果たしている。特に北海道東部は、広大な草地を活用した大規模酪農地帯として知られている。一方で、大規模経営による多頭化に伴い、家畜ふん尿量の増加、河畔域までの草地化による緩衝帯の減少により、河川への過剰な水質汚濁物質の流出が懸念された。そこで、

釧路・根室地域では、家畜ふん尿の効率的な農地還元により自然環境と調和した資源循環型農業を展開することを目的に、国営環境保全型かんがい排水事業（以下、環境かん排事業）が実施されている。環境かん排事業では、家畜ふん尿を集積しスラリー状の液肥にする肥培かんがい施設、土砂かん止林や水質浄化池などの浄化型排水施設の整備をしている（写真-1）。特に、肥培かんがい施設の整備により、従来の固形堆肥や尿（以下、堆肥）からスラリーに置き換わることで、有機質肥料の適期、適量散布が可能になったこと、化学肥料削減効果があったことなどが報告されている<sup>1)</sup>。そのため、環境かん排事業の実施



写真-1 環境かん排事業施設：(a)肥培かんがい施設, (b)土砂かん止林, (c)排水調整池

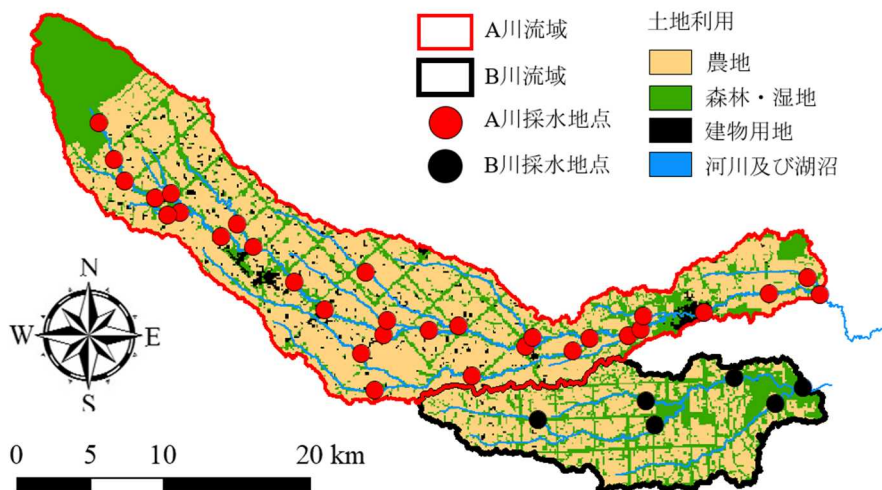


図-1 研究対象流域

により、水質汚濁物質の流出経路の変化やそれに伴う動態変化が予測される。一方で、気候変動により2011年から2020年の世界平均気温は、1850年から1900年の気温に比べ1.09℃上昇しており<sup>2)</sup>、今後も上昇することが予想されている。農地では、気温上昇に伴い収穫量の増減、栽培適地・時期が変化し、北海道の酪農地域でも飼料用トウモロコシの作付面積が徐々に増加している<sup>3)</sup>。地域全体において、転作に伴い地表の被覆状態が変化することで水・物質循環の変化が予想される。今後、これらの地域の水質環境を適切に管理していくためには、営農状況の変化が流域の水質環境に及ぼす影響を定量的に評価することが必要である。

流域規模で水質環境を評価する技術としてモデル解析が有効であり、代表的なものとして米国農務省農業研究局が開発したSWAT (Soil and Water Assessment Tool) がある。SWATのモデルパラメータは米国のものであるため日本での適用事例は少ないが、酪農地域に適用した事例として、施肥方法が水質環境に与える影響を評価したもの<sup>4)</sup>、浮遊土砂物質、懸濁態窒素、リンの予測値と実測値を適合させたもの<sup>5)</sup>などが挙げられる。また、SWATは水質汚濁の緩和を試みる際の評価に利用可能であり、域管理計画の有効なツールとして期待されている<sup>6)</sup>。

本研究では、水質環境評価技術であるSWATを用いた水質解析により、大規模酪農地帯の水質環境改善手法を提案することを目的としている。そこで、本川流域における河川水質状況の把握、支川流域における河川水質状況の把握、SWATによる水質解析を実施した。本川流域における河川水質状況の把握では、観測地点の集水域ごとに水質濃度と土地利用・営農状況を集計し、その関係性を調べた。支川流域における河川水質状況の把握では、支川小流域を選定し、水質の変動特性を調べた。SWATによる水質解析では、農地の営農管理スケジュールを設定し、支川小流域に適用した。また、過去、現在、近未来の三時期の営農状況の変化に伴う河川水質への影響をシミュレーションした。

## 2. 本川流域における河川水質状況の把握

### 2.1 研究対象地

本章の対象流域は、北海道東部の大規模酪農地帯であるA川流域とB川流域である(図-1)。A川の流域面積は41,602haであり、約70kmの本川の間には主要な支川が12本存在している。B川の流域面積15,670haであり、約30kmの本川の間には主要な支川が2本存在している。本川と支川の位置関係を表す河川概要図を図-2に示す。両流域

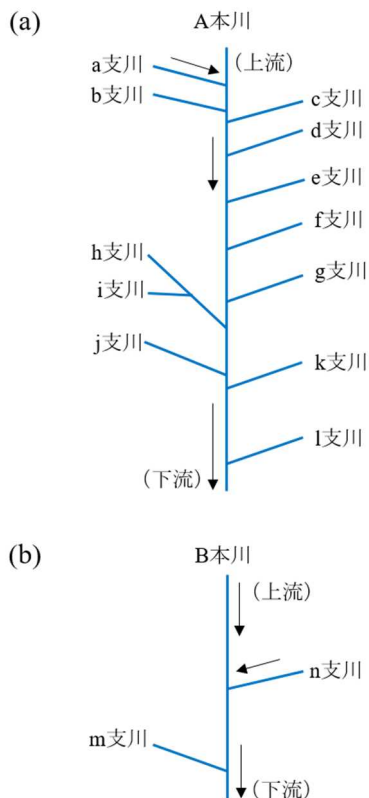


図-2 河川概要図：(a) A川、(b) B川

とも、国営環境保全型かんがい排水事業地区に大部分が含まれ、A川流域は事業完了地区と継続地区が含まれ、B川流域は事業完了地区に含まれる。使用したデータは、地形データ、土地利用データ、乳用牛頭数データであり、それぞれ、基盤地図情報より数値標高モデルの平成26年版、国土数値情報より土地利用細分メッシュの平成26年版、2015年農林業センサスより農業集落カードを入手した。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 流域を対象とした平水時の水質観測

対象流域の水質状況を把握するために、平水時における採水調査を実施した。A川の採水地点は、本川16点、支川15点の計31点設定し、B川の採水地点は、本川3点、支川3点、計6点設定した(図-1)。本川の採水地点は、支川が合流した下流に設定し、さらに地点の距離間隔が等しくなるように設定した。支川の採水地点は、本川との合流点付近に設定し、大きな支川の場合は採水地点を複数点設定した。2017年は4月から11月までに15回、2018年は5月から11月までに14回実施した。採水した河川水は100 mLのポリ瓶にて密閉保冷状態で室内に運搬し、水質分析に供した。水質分析項目はT-N濃度、NO<sub>3</sub>-N濃度、NH<sub>4</sub>-N濃度、T-P濃度であり、分析方法はJISに準拠した。

### 2.2.2 土地利用・酪農の営農状況の集計

対象流域における土地利用・営農状況をGIS (Geographic Information System)ソフトであるArc GISを用いて集計した。土地利用状況を集計する範囲は、採水調査地点の受け持つ集水域であり、A川は31流域、B川は6流域である。なお、下流の集水域は、それより上流の集水域を内包しており、下流の集水域(採水調査地点が受け持つ集水域)ごとに土地利用・営農状況を集計した。

土地利用の諸元として流域草地率と河畔草地率を集計した。流域草地率は集水域ごとに集計し、河畔草地率は河川両岸100 mを河畔として抽出し、集水域ごとに集計した。乳用牛頭数は、集落ごとに公開されているため、面積按分により集水域で集計した。面積按分の方法は、集落ごとに草地面積あたりの乳用牛頭数密度を計算し、それに重なる草地面積を乗じ、集水域ごとに乳用牛頭数を足し合わせた。その際、2歳未満の乳用牛1頭は、ふん尿量を考慮して成牛0.42頭に相当する<sup>7)</sup>として換算した。

A川およびB川の集水域の流域草地率・河畔草地率・乳用牛頭数の結果を、表-1、表-2に示す。A川本川とB川本川の流域草地率は60%以上、河畔草地率は50%以上であり同程度であった。流域全体の乳用牛頭数は、A川流域がB川流域より多かったが、流域面積あたりの乳用牛頭数は、A川流域が0.89 head/ha、B川流域が0.91 head/haであり同程度であった。一方で、A川の集水域では、草地率と乳用牛頭数が流域ごとにばらばらだったが、B川の集水域では、同程度の値であった。

### 2.2.3 河川水質と土地利用・営農状況の関係

本章では、河川の採水調査結果と酪農の営農状況の関係性を調べた。採水調査で得られた水質濃度は自然浄化作用を受けた濃度(排出濃度と定義)であるため、自然浄化作用を受けていない発生源の濃度(発生濃度と定義)を式(1)(2)より推定した。発生濃度の推定にあたり、前提条件として、ふん尿が草地に全量還元されている、草地から流出した負荷量は河畔の林地で浄化される、とした。

$$C_p = \frac{C_e}{a} \quad (1)$$

$$a = Lu_g \cdot b \quad (2)$$

ここで、 $C_p$ は発生濃度 [mg/L]、 $C_e$ は排出濃度 [mg/L]、 $a$ は排出率 [-]、 $Lu_g$ は河畔草地率 [-]、 $b$ は補正係数 [-]である。本研究では、 $a$ は河畔草地率により定められるとした。つまり、河畔草地率が高いと河畔林や湿地での浄化作用を受けていないことを意味し、発生濃度と排出濃度は同程度になる。逆に、河畔草地率が低いと自然浄化

表-1 A本川および主要支川の諸元

水系	流域面積(ha)	流域草地率(%)	河畔草地率(%)	乳用牛頭数(head)
本川 A	41,602	65	50	36,930
支川 a	858	61	48	416
b	831	80	65	710
c	2,787	42	42	1,364
d	4,387	59	50	4,230
e	1,179	80	69	1,132
f	4,144	74	62	4,870
g	3,718	75	55	4,765
h	7,668	80	61	6,542
i	1,342	83	62	1,290
j	828	77	72	501
k	832	63	41	728
l	2,551	70	62	2,712

表-2 B本川および主要支川の諸元

水系	流域面積(ha)	流域草地率(%)	河畔草地率(%)	乳用牛頭数(head)
本川 B	15,670	62	52	14,225
支川 n	3,402	63	56	2,053
m	2,427	69	58	2,485

作用を受けていることを意味し、発生濃度は排出濃度と比べ高い値になる。また、*b*は1.0とし流域内で変化しないものとしたが、実際の排出率は明らかでない。そのため、草地からの流出水（暗渠からの流出水など）を採水し、草地からの発生濃度に合うように*b*を決定する必要がある、今後の検討課題である。

### 2.3 結果・考察

A川流域およびB川流域における集水域ごとのNO<sub>3</sub>-N濃度分布を図-3に、流域面積あたりの飼料牛頭数分布を図-4に示す。これまでの酪農地域の水質環境を評価する研究<sup>8)</sup>において、NO<sub>3</sub>-N濃度が指標として利用されているため、本研究でもNO<sub>3</sub>-N濃度を水質項目の代表として用いた。NO<sub>3</sub>-N濃度は、A川流域の中流左岸域で高く、上流域で低い傾向がみられ、B川流域は全体的に低濃度であり、集水域ごとの差が小さかった。流域面積あたりの乳用牛頭数密度は、A川流域の中流左岸域で高く、上流域で低い傾向がみられ、B川流域は中程度で集水域ごとの差が小さかった。以上から、NO<sub>3</sub>-N濃度と乳用牛頭数密度が高い集水域と低い集水域の位置関係が一致しており、空間的に対応した関係が得られた。

集水域ごとのNO<sub>3</sub>-N濃度の平均値と流域面積あたりの乳用牛頭数密度の関係を図-5に示す。A川流域では、NO<sub>3</sub>-N排出濃度と乳用牛頭数密度との関係には正の相関関係が得られたが、同程度の流域面積あたりの乳用牛頭数密度の場合でも、NO<sub>3</sub>-N排出濃度にばらつきがみられた(図-5(a))。その要因として、発生源からの排出率の違いが考えられる。そこで、排出率を考慮したNO<sub>3</sub>-N発生濃度と乳用牛頭数密度の関係は、前述のNO<sub>3</sub>-N排出濃度との

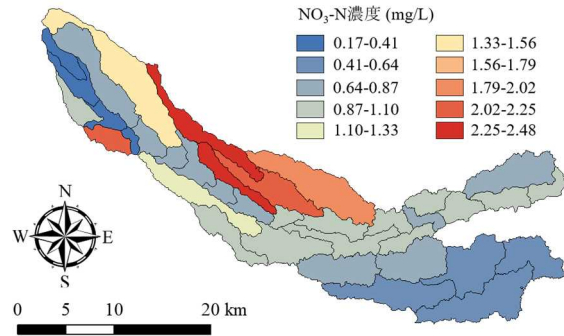


図-3 NO<sub>3</sub>-N濃度分布

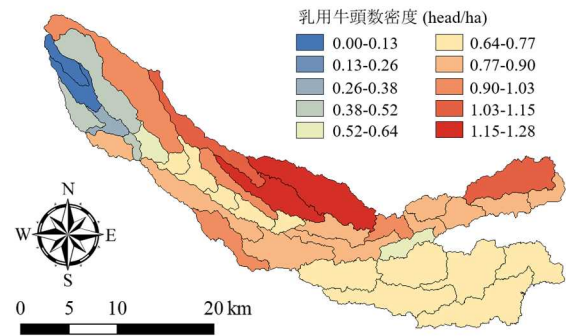


図-4 流域面積あたりの乳用牛頭数密度分布

関係と比較すると、西別川流域では相関係数が0.73から0.77へ僅かであるが高くなった(図-5(a)、(b))。一方で、B川流域では、NO<sub>3</sub>-N排出濃度と乳用牛頭数密度との関係には正の相関関係が得られ、排出濃度と発生濃度共に、相関係数が0.87であった(図-5(c)、(d))。A川流域では、流域の本川および支川の集水域のプロットは、近似直線付近に分布しているが、h川、i川、j川、l川の集水域は近似直線より下部に、b川、e川、f川の集水域は近似直



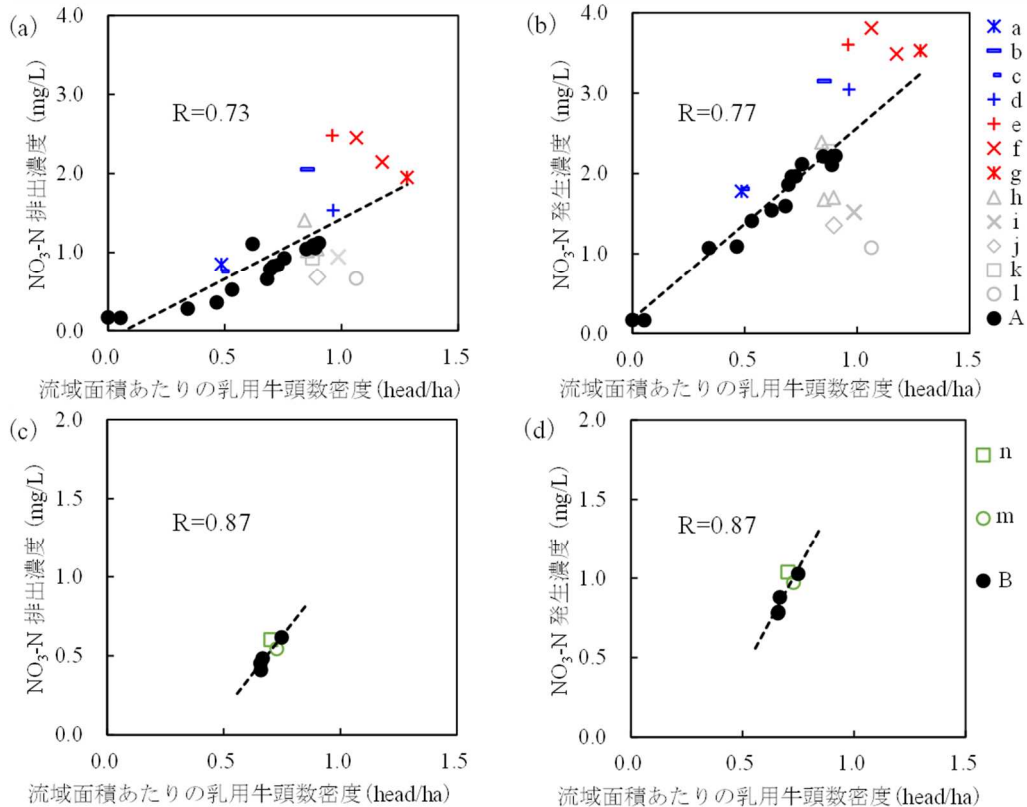


図-5 NO<sub>3</sub>-N 濃度と流域面積あたりの乳用牛頭数密度の関係：(a) A 川の排出濃度、(b) A 川の発生濃度、(c) B 川の排出濃度、(d) B 川の発生濃度

線より上部に分布し、同程度の乳用牛頭数密度であっても濃度にばらつきがみられた。その原因の一つとして、国営環境保全型かんがい排水事業の実施状況が考えられる。低濃度であった集水域は、事業の完了した地区に含まれ、高濃度であった集水域は、事業が未完了地区に含まれた。このことは、肥培灌漑施設の整備によるふん尿の農地還元の適正化や、水質浄化池や土砂かん止林の整備による草地から河川への排出過程における負荷抑制の可能性を示している。発生濃度を推定し、負荷を抑制する河岸林や湿地を定性的に表現することで、河川水質と土地利用・営農状況の関係性が示されたが、水質浄化池・土砂かん止林の位置関係や物質の浄化メカニズムについては考慮できていない。地形連鎖やそれに伴う物質の動態変化を定量的に表現するためには、物理プロセスを踏まえた水質解析モデルの適用が必要である。

### 3. 支川流域における河川水質状況の把握

#### 3.1 研究対象地

本章の対象とした支川小流域は、西別川の支川である e 川と i 川である(図-6)。先述したように、e 川と i 川は、流域面積あたりの乳用牛頭数密度が同程度であるにもかかわらず、水質濃度の年平均値に差がみられた小流域であるため、本章の対象地に選定した。e 川の流域面積は 1、

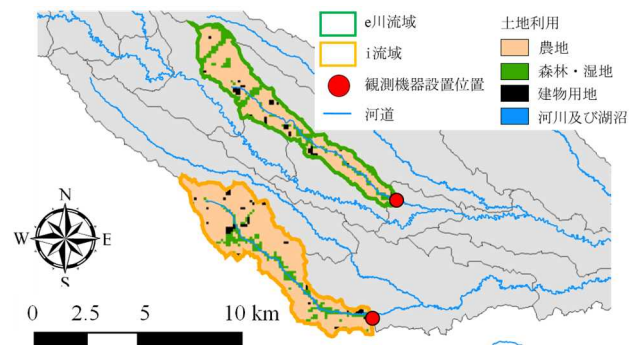


図-6 e 川流域と i 川流域

179 ha、土地利用割合は草地 80%、森林 14%、その他用地 6%であり、乳用牛頭数は 1,132 頭である。i 川の流域面積は 1,530 ha、土地利用割合は草地 83%、森林 7%、その他用地 10%であり、乳用牛頭数は 1,509 頭である。

#### 3.2 研究方法

流域を対象とした平時の水質調査は月 2 回の頻度で実施したため、流域の水質特性を十分に把握できなかった。そこで、本章では、水質濃度の日変化を把握すること、両小流域の水質濃度に差が生じた要因を明らかにすること、水質解析モデルに適用すること、などを目的に水質連続観測を実施した。観測期間は 2018 年 9 月から 2019 年 11 月までであり、冬期は、夜間に河道が凍結す

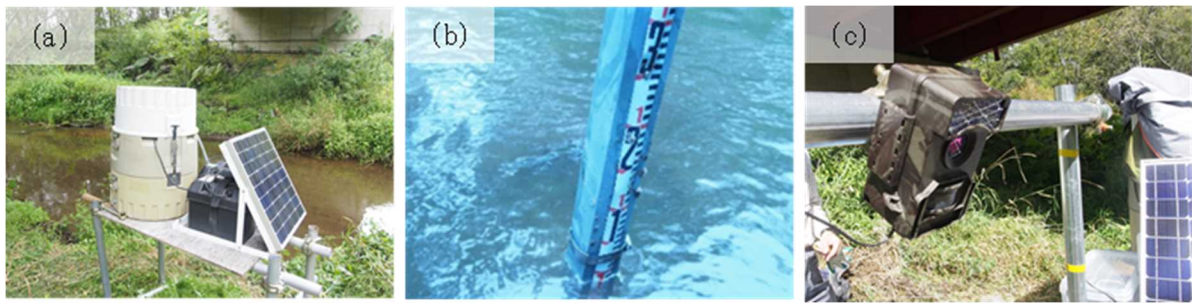


写真-2 観測機器の設置状況：(a) 自動採水器、(b) 水位計・量水標、(c) インターバルカメラ

ることから連続観測を実施していない。それぞれの支川に、自動採水器、画像式流速計、水位計を設置した(写真-2)。自動採水器による採水は、1日あたり1本のポリ瓶に複数の試料を採取するコンポジット採水とした。コンポジット採水は0時から開始し2時間間隔で行い、計12回採水する。採水量は1回あたり80 mL、1日あたり960 mLである。これにより、当該日の平均的な水質試料を採水することが可能である。採水した試料は、密閉保冷状態で室内に運搬し、水質分析に供した。水質分析項目は、SS濃度、T-N濃度、NO<sub>3</sub>-N濃度、NO<sub>2</sub>-N濃度、NH<sub>4</sub>-N濃度、T-P濃度であり、分析方法はJISに準拠した。画像式流速計は、インターバルカメラを河道が写るように設置し、撮影された動画から瞬間流速を計算する手法である<sup>9)</sup>。画像式流速計は10分間隔で撮影しており、出水時における流量を観測することが可能である。水位計は、河道内に設置し、10分間隔で水位を連続観測した。観測した流速と水位から出水時を含めた水位流量曲線を作成し、河川流量の連続データを計算した。

### 3.3 結果・考察

採水試料の水質濃度の経時変化を図-7に示す。

SS濃度は、日降水量が20 mm/d以上の降雨に対応して濃度が高くなり、2日程度で下降する変動がみられた(図-7)。また、一部の出水を除き、i川のほうが全体的に高い傾向がみられ、要因として河川形状と河床の状態の違いが考えられた。e川の河川形状は直線で、河床は礫が多い状態であるのに対して、i川の河川形状は蛇行を繰り返す、河床の土砂が堆積している状態である。そのため、出水時のSS濃度に差が生じたと考えられた。

T-N濃度とNO<sub>3</sub>-N濃度の経時変化を図-7に示す。なお、NO<sub>2</sub>-N濃度とNH<sub>4</sub>-N濃度は微量の値が検出されたが、分析機器の測定限界以下の濃度であったため、ここでは考察から除外した。観測期間を通してT-N濃度の大部分はNO<sub>3</sub>-N濃度であることがわかる。観測期間におけるNO<sub>3</sub>-N濃度の平均値は、e川が2.87 mg/L、i川が1.31 mg/Lであり、平水時の採水調査結果(図-5(a))と同様に、

e川のほうが高い傾向を示した。また、出水時のNO<sub>3</sub>-N濃度は、e川では減少するのに対して、i川では上昇する傾向がみられた。その濃度変動が生じた要因の一つとして流域形状の違いが考えられる。e川は流域形状が細長く、草地と河道が近いため、出水時には表面流出が基底流出よりも卓越することで希釈が生じ濃度が低下したと考えられる。一方でi川は流域形状が広がっており、表面流出が少なく基底流出によって窒素成分が流出するため濃度が上昇したと考えられる。その他にも、濃度差が生じた要因として、事業の整備状況の違いや小流域内の事業地区の位置関係や事業の複合的な効果、地形連鎖による効果などが河川水質に与える影響なども考えられる。

T-P濃度は、SS濃度の変動とよく対応している(図-7)。その要因として、リン酸が土粒子に吸着して流出していることが考えられる。SS濃度と同様に、e川よりi川のほうがT-P濃度が高い傾向にある。

以上より、水質濃度の経時変化から支川小流域の水質特性を明らかにした。同程度の乳用牛頭数密度にもかかわらず濃度差が生じた要因について明らかにするためには、小流域内の事業の実施状況や畜舎などの発生源の位置関係の情報を調べる必要がある。それらの情報をSWATモデルに反映させることが課題である。

## 4. SWATによる水質解析

### 4.1 研究対象地

本章では、SWATによる水質解析を実施した。適用流域は、検証データとなる流量と水質データの実測値が長期間揃っていることからA川流域とした(図-8)。はじめに、SWATをA川本川の中流地点の受け持つ小流域に適用した結果、水質データが不定期に採水した瞬時値のデータであったため、検証に課題が残った。そこで、A川支川のi川の観測地点が受け持つ小流域に適用した。SWATモデルの適用期間は、第3章の水質連続観測を実施している期間に合わせ、2018年と2020年の3年間とした。SWATモデルの入力値である気象データは、気象

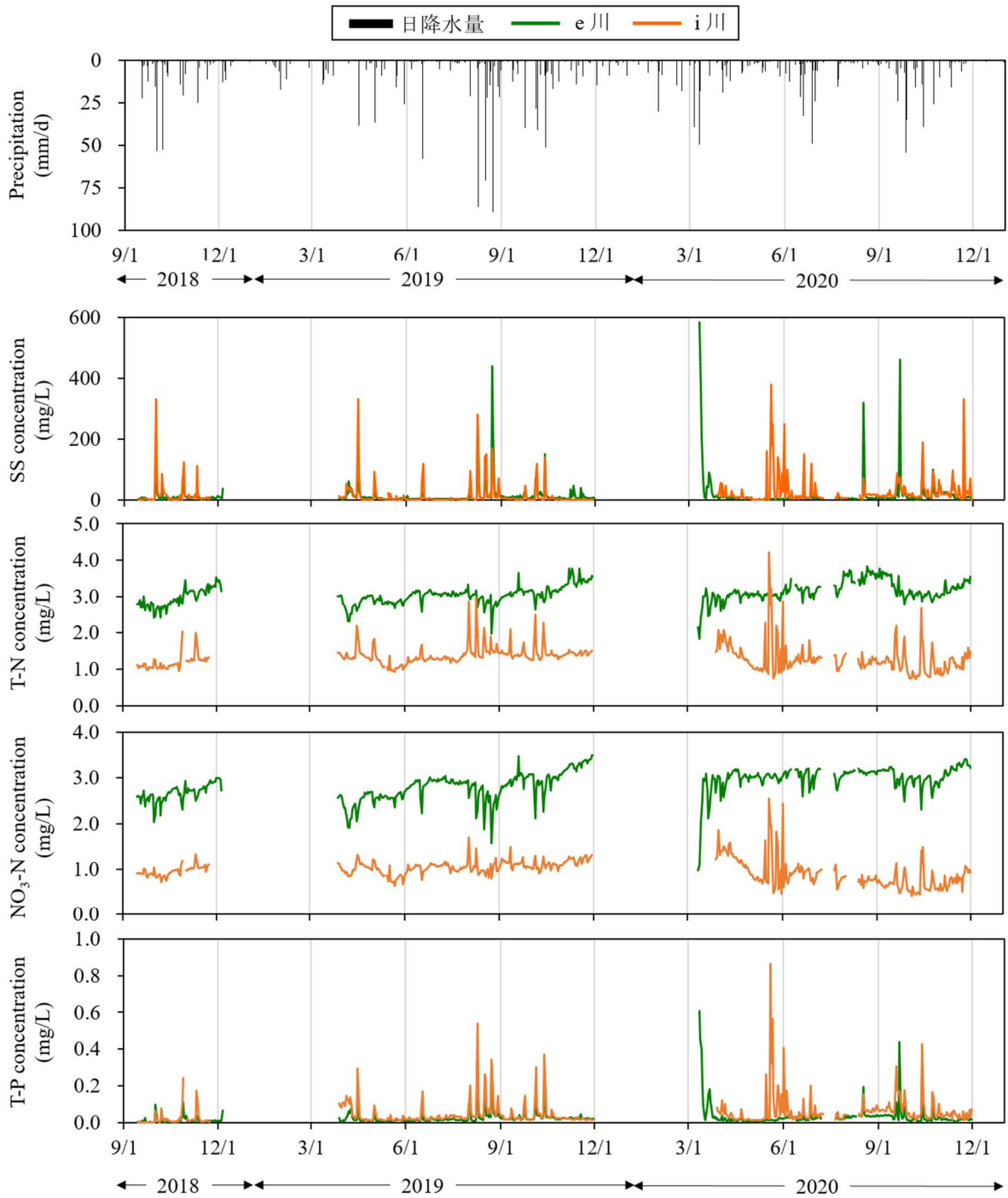


図-7 e川とi川における水質の経時変化

庁アメダス<sup>10)</sup>から別海、弟子屈、根室観測所の降水量、気温、相対湿度、風速、日照時間を入手した。なお日射量は、観測値が存在しなかったため日照時間から全天日射量の日平均値を推定する実験式<sup>11)</sup>を用いて換算した。

## 4. 2 研究方法

### 4. 2. 1 SWATの概要

SWATは、米国農務省農業研究局によって開発された準分布型流出モデルであり、物理的なプロセスモデルで

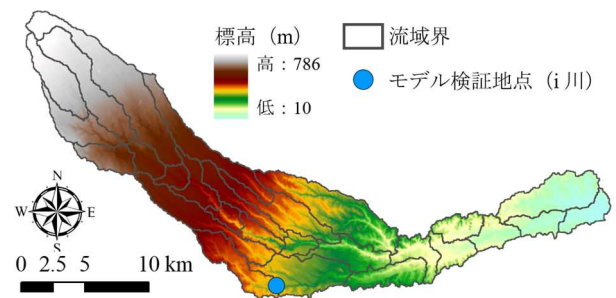


図-8 SWAT適用流域

ある。SWAT は、流域において気象、地形、土壌、土地利用、営農管理といった要素により影響を受ける水・物質動態を同時に扱うことができる (図-9)。十分な精度の結果が得られることや効率的な解析を可能とする GIS インターフェイスやサブソフト群が無償で提供されていることから、世界各地で適用されている。

SWAT の入力データは、気象データ、空間情報データである。気象データは降水量、日最高気温、日最低気温、相対湿度、風速、日照時間であり日単位の値を入力する。また、土壌侵食量の計算や気象値の欠測を補間するため、気象観測点ごとに月単位の気象統計値をデータベースとして入力する。本研究では、各観測所における過去 20 年分の気象統計値を集計した。空間情報データは、地形データ、土地利用データ、土壌分類データである。地形データは、基盤地図情報から数値標高モデル<sup>12)</sup>を入手した。SWAT では、地形データから流域界を作成し、河道上にポイントデータを設定することで任意の小流域に分割することができる。本研究ではポイントデータとして水質観測地点を入力することで、A 川流域を 31 の小流域に分割した。また、SWAT では、地形データから、任意の標高幅で分類された傾斜データが作成される。土地利用データは、国土数値情報から土地利用細分メッシュを<sup>13)</sup>入手し、土地利用種類ごとに SWAT のデータベースにある該当する土地利用を選択した。しかし農地は、“田”と“その他の農用地”の二種類であり、牧草地や飼料用作物は分類されていないため、農地内の分類方法は次節の土地利用状況の設定で後述する。土壌分類データは、国土調査から土壌類図<sup>14)</sup>を入手し、土壌種類ごとに SWAT のデータベースにある該当する土壌種類を選択した。なお、データベースにない場合は、土壌厚、透水係数、粒径組成などを既往の文献<sup>5)</sup>や日本土壌協会の地力保全土壌図<sup>15)</sup>を参考に新規に設定する。

SWAT は HRU (Hydrological Response Unit) と呼ばれる、土地利用、土壌、傾斜の組み合わせによって細かく分類されたグリッドの集合体によって流域を表現してい

る。それぞれの HRU 内において、水収支・物質収支により流出量、土砂流出量、栄養塩負荷量が計算され、小流域で集計された後、河道や池、貯水池を通り、流域末端へ流出量が計算される。流出量の計算は、表面流出の計算に SCS-Curve Number 法、蒸発散量の計算に Penman-Monteith 法、側方浸透量の計算に Kinematic Wave 法、河道追跡の計算に Muskingum River Routing 法を採用している。SCS-Curve Number 法は、米国農務省土壌保全局によって開発された長期間の降水量と流出量データから得られた関係式である。Curve Number は流域曲線番号であり、土地利用や土壌の浸透能、作物の被覆条件などの流域の特徴を表すパラメータである。そのため、異なる土地利用や土壌タイプでも流出量を推定することが可能であり、実測値の少ない流域や様々な土地利用を持つ流域での流出解析に有効である<sup>16)</sup>。一方で、土砂流出量の計算は、Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)法が採用され、表面流出量やピーク流出量の関数などで表現される。窒素およびリンの栄養塩流出は、施肥などの栄養塩の投入および土壌内の形態変化などの物質循環により計算され、表面流出、側方流出、地下流出により下流に運ばれる。しかし、地下流出に関しては、SWAT では地下水中の硝酸態窒素負荷は賦存量が大きいと仮定され、地下水濃度が一定値で与えられ、流量に応じた負荷量の流出が計算される。

SWAT の設定項目のうち、土地利用管理は、陸域の水文過程を表現するために重要な設定項目の一つである。土地利用管理では、土地利用が農地の場合に作付、耕起、施肥、収穫などのオペレーションの項目があり、本研究では、各項目のスケジュールは文献<sup>17)</sup>を基に設定した。牧草地では、4月20日に作付、5月1日に有機質肥料の施肥、5月5日に化学肥料の施肥、7月10日に一番草の収穫、7月15日に化学肥料の施肥、9月10日に二番草の収穫、10月5日に有機質肥料の施肥を設定した。なお、耕起と草地更新は十数年の頻度で行われるため、次年度以降は作付を設定せずに、その他の営農管理スケジュー

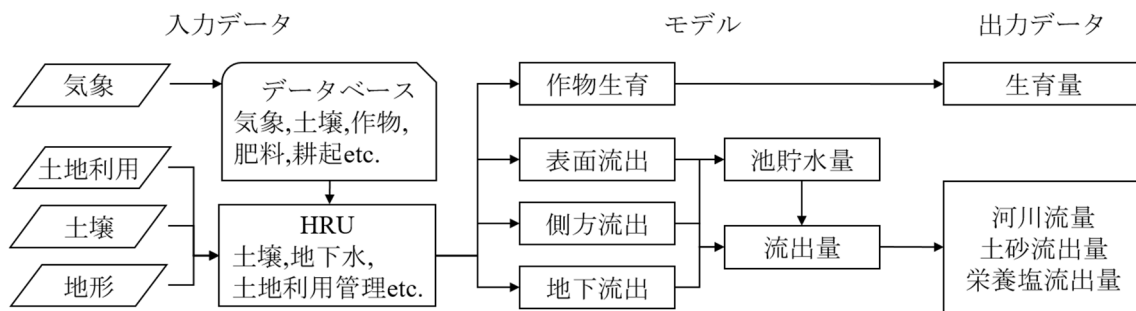


図-9 SWAT の入力値および出力値



ルを繰り返し設定し実態を再現した。飼料用トウモロコシでは、5月5日に有機質肥料、5月10日に耕起、5月15日に作付および化学肥料の施肥（基肥）、6月15日に化学肥料の施肥（追肥）、10月1日に収穫を設定した。営農管理スケジュールは、気象条件によって年ごと、農地ごとで異なり、また、草地更新のタイミングも農地ごとで異なるが、本研究では一律に設定した。より精緻に解析するためには、衛星画像などにより営農管理スケジュールを定め、年ごと農地ごとに設定することが必要である。施肥の項目では、酪農地域の有機物施用に伴う施肥対応<sup>18)</sup>に基づき、施肥種類（化学肥料、有機質肥料）と施肥量を設定した。土地利用管理を適切に設定することで、農地の営農状況が再現される。

#### 4.2.2 土地利用状況の設定

SWAT に入力する農地の土地利用を、牧草地と飼料用トウモロコシの2種類、堆肥施用農地とスラリー施用農地の2種類、計4種類を設定した（牧草地堆肥、牧草地スラリー、トウモロコシ堆肥、トウモロコシスラリー）。

牧草地と飼料用トウモロコシの判別は、衛星画像から得られる生育指標を用いた。利用した衛星画像は光学画像である Sentinel-2（空間分解能 10 m、回帰日数 10 日）と Landsat-8（空間分解能 30 m、回帰日数 16 日）である。4月から11月までの約 200 日間で撮影された衛星画像は両者を合わせると約 30 シーンと多くなるが、光学画像は雲の影響を受けるため、雲の被覆率が低い画像を選定する必要があり、作期を通して 10 シーン程度利用可能であった。計算した植生指標は、正規化植生指数（以下、NDVI）と拡張植生指数（以下、EVI）であり、各衛星画像の波長帯の反射率を用いて以下の式により計算した。

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (4)$$

$$EVI = 2.5 \cdot \frac{NIR-RED}{NIR+6.0 \cdot RED-7.5 \cdot BLUE+1.0} \quad (5)$$

ここで、NIR は近赤外波長の反射率、RED は赤波長の反射率、BLUE は青波長の反射率である。なお、Sentinel-2 と Landsat-8 が同日に撮影されたシーンが複数あり、NDVI、EVI が概ね同じであることを確認している。牧草地と飼料用トウモロコシの判別は、作物の生育に特徴が現れる 2 時期の画像を用いることが多いが、先述したように必ずしもその時期に衛星画像を入手することができない場合もあり、さらに、牧草地は収穫が 2 回あり、正確な時期の選定が困難である。本研究では、EVI と NDVI の時系列の変化から、牧草地と飼料用トウモロコシを判

別した。牧草地と飼料用トウモロコシの EVI の変動を図-10 に示す。牧草地の EVI は 4 月下旬から 5 月上旬あたりから上昇し、7 月下旬の一番草の収穫の時期に大きく下がり、再び上昇し、9 月上旬の二番草の収穫の時期に再び下がる。飼料用トウモロコシの EVI は 6 月上旬あたりから徐々に大きくなり、9 月下旬の収穫の時期に大きさがかる。また、牧草地の収穫はすべてを刈り取らずに表面は牧草に覆われている状態である。一方、飼料用トウモロコシは収穫後の表面に株が残り大半で土壌が露出している状態か、耕起した場合は完全に土壌が露出している状態であり、EVI は低く変化がない。これらの特徴から牧草地と飼料用トウモロコシの判別を行った。草地更新の場合や牧草地から飼料用トウモロコシへの転作の場合などで判別に課題があったが、判別の整合性は現地踏査により確認している。

SWAT では同じ土地利用でも施肥の種類が異なる場合は、土地利用を分けて入力する必要がある。そのため、牧草地と飼料用トウモロコシのそれぞれで堆肥施用農地とスラリー施用農地を分けて設定した。堆肥施用農地は従来型の農地であり、スラリー施用農地は肥培灌漑施設が整備された農地である。肥培灌漑施設は、大型の排水調整層（円形または四角形）があり、衛星写真から判別可能である。肥培灌漑施設が設置された農家の農地をスラリー施用農地として扱い、それ以外を堆肥施用農地として扱った。

#### 4.2.3 環境かん排事業の表現

SWAT において、環境かん排事業で整備された肥培かんがい施設、土砂かん止林、排水調整池を表現するため、土地利用管理と貯留池の項目を設定する。

肥培かんがい施設は、家畜ふん尿をスラリーにする施設であり、配水調整池と呼ばれるスラリー貯留施設が設置されている。この周辺の農地をスラリー施用農地として、その他の農地を堆肥施用農地として扱った。本研究では、スラリー施用農地を土地利用管理の施肥の項目で

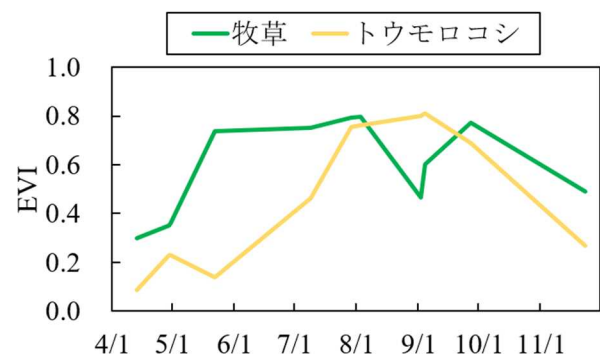


図-10 作期における拡張植生指数の変動

表現した。スラリーに含まれる窒素、リンの肥料成分量は、既往の文献<sup>19)</sup>を参考に設定し、新たにデータベースを作成した。スラリーの施肥量を、すべての農地で把握し SWAT に反映させることは困難である。そのため、本研究では、各農家で生産された有機質肥料は各農家の農地に還元されることを前提として次式によりスラリーの施肥量を決定した。

$$FRT_{slurry} = Ma \cdot CD \cdot Day \cdot c \quad (6)$$

ここで、 $FRT_{slurry}$ はスラリー施肥量 (kg/ha)、 $Ma$ は乳用牛一頭一日あたりのふん尿量 (kg/head/d)、 $CD$ は農地面積あたりの乳用牛頭数密度 (head/ha)、 $Day$ は施肥間隔の日数 (d)、 $c$ は希釈倍率である。 $Ma$ は既往の文献<sup>20)</sup>を参考に 64.4 kg/d、 $CD$ は A 流域で集計した値 1.02 head/ha、 $c$ は既往の文献<sup>20)</sup>を基に 3.0 とした。

土砂かん止林は、土地利用管理のなかのフィルタストリップを設定することで表現する。SWAT で表現されるフィルタストリップは、排出源からの土砂流出や栄養塩流出を遮断して、それをろ過するための配置された細長い密集した植生帯である。本研究では、土砂かん止林に隣接する農地の HRU にフィルタストリップの幅を設定した。その幅は、GIS により計測し、平均的な値である 20 m に設定した。フィルタストリップの遮断効率は植生帯の幅の関数で表現される。以上により、農地と河川の間に緩衝帯としての土砂かん止林を表現した。

排水調整池は、小流域の末端に池を設定することで表現した。SWAT で表現される池は、陸域と水域の間に設置され、小流域内の HRU から表面流出、側方流出、地下流出が流入する。流量、土砂量、栄養塩に関する水収支・物質収支と経験的なモデル式で栄養塩の沈降量が計算され、池からの流出量が計算される。本研究では、実際の池の位置で小流域を区切り、池の表面積と貯水量などの諸元を設定し、沈降速度に関するパラメータはデフォルト値を利用した。以上により、浄化型排水施設としての排水調整池を表現した。

#### 4. 3 結果・考察

##### 4. 3. 1 モデルの再現精度の検証

モデルの適用期間は、流量と水質の連続データを取得した 2018 年から 2020 年の 3 年間とした。モデルの同定期間を 2018 年から 2019 年とし、検証期間を 2020 年とした。河川流出量、土砂流出量、栄養塩流出量に関するパラメータは、実測値に合うように同定した。パラメータの最適化は、SWAT に付与されている自動キャリブレーション機能である SWAT CUP を用いて、繰り返し計算し

パラメータの感度分析により実行した。本研究では観測値と計算値の適合度を表す指標である Nash Sutcliffe Efficiency<sup>22)</sup>を用いて再現性を評価した。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - X_{cal})_i^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (7)$$

ここで、NS は Nash Sutcliffe Efficiency、 $X_i$ は i 時点の河川流量または負荷量、 $\bar{X}_{obs}$ は河川流量または負荷量の平均値である。添え字の obs は観測値、cal はモデルの計算値である。モデルの同定期間、検証期間の NS の値を表-3 に示す。NS は負の無限大から 1 までの値をとるように二乗誤差を無次元化したものであり、1 の値が最も精度良く誤差が小さいことを表す。同定期間における NS の値は、すべての項目で 0.6 を超えた。検証期間における NS の値は、河川流量と全窒素負荷量で 0.5 を超えたが、浮遊物質負荷量と全リン負荷量で 0.5 を下回った。懸濁物質の再現性に課題は残るものの溶存物質の再現性は十分得られたといえる。

モデルの検証期間である 2020 年の観測値とモデル計算値の経日変化を比較した。積算バイオマス量、単位収穫量、河川流量、土砂流出負荷量、全窒素負荷量、全リン負荷量を図-11 に示す。積算バイオマス量は、葉の生育や根の伸長などの作物生長を表し、牧草地は一番草と二番草の 2 回、飼料用トウモロコシは 1 回の作期を通して増加する変化を示した。牧草地の単位収穫量は、一番草が 3.9 t/ha、二番草が 2.6 t/ha、飼料用トウモロコシの単位収穫量は 14.1 t/ha と推定され、根釧地域の観測値<sup>17)</sup>と同程度であった。以上から、牧草地およびの飼料用トウモロコシの生育状況を再現したことにより、作期を通じた地表の被覆状態が再現されたと考えられる。河川流量は、平水時と出水時ともに観測値を良好に再現した。また、土砂流出負荷量、全窒素負荷量、全リン負荷量は、一時期を除き、平水時、出水時ともに観測値を概ね再現した。これらは、農地の水文水質過程が表現されていることにより、出水時の流出過程と減衰過程が再現されたといえる。一方で、土砂流出負荷量、全窒素負荷量、全リン負荷量

表-3 SWAT 解析結果の NS の値

	同定期間	検証期間
河川流量	0.74	0.73
浮遊物質負荷量	0.62	0.40
全窒素負荷量	0.65	0.53
全リン負荷量	0.72	0.49

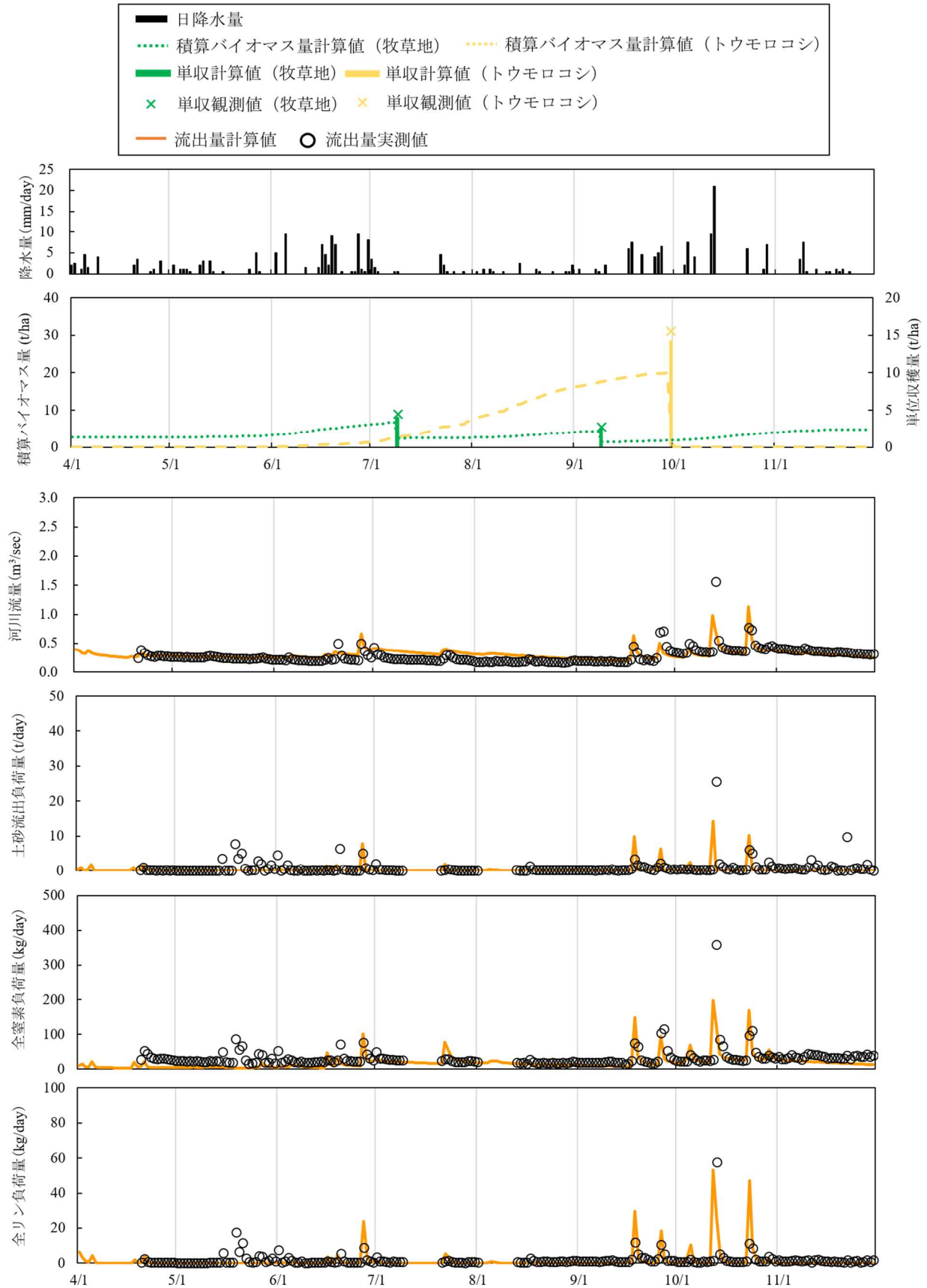


図-11 SWAT 解析結果 (2020年4月~11月)

は、5月に過小推定する傾向がみられた。この時期の降水量は少なく、河川流量の変動も大きくない時期であるが、土砂流出負荷量の変動が大きく、全窒素負荷量、全リン負荷量も大きくなった。観測地点の状況を確認したところ、河岸の土が崩れ、河床に土砂が堆積しており、河道内の土砂移動が大きかったと考えられ、SWATで十分に再現できなかったといえる。また、全窒素負荷量は、11月に過小推定する傾向がみられた。その原因は、硝酸態窒素の地下流出に関してSWATの計算方法に課題があると考えられる。SWATでは、地下水中の硝酸態窒素濃度を一定値で与え、流量に応じた負荷量の流出が計算されているため、冬期に地下水中の濃度が高くなるような季節変動が大きい流域では過小評価する可能性が指摘されている<sup>6,23)</sup>。地下水の窒素輸送に対して他のモデルとの様々な組み合わせが検討されており、以降の開発が望まれる。以上から、SWATで現在の営農状況を表現し、河川流量、全窒素負荷量の観測値を十分に再現した結果が得られた。

#### 4.3.2 気候変動に伴う土地利用変化に対するシミュレーション

近年の気候変動により平均気温が上昇し、北海道東部地域の内陸部では牧草地から飼料用トウモロコシへの転作が徐々に増え、土地利用が変化している。この傾向は、将来も進むことが予想される。一方で、環境かん排事業により肥培かんがい施設の整備が進むことで、有機質肥料が従来の堆肥からスラリーに変化しており、今後もスラリー施用農地が増えることが予想される。また、環境かん排事業により土砂かん止林や排水調整池などの整備も進んでいる。以上より、過去から現在、さらに将来にかけて転作が進むことと環境かん排事業の整備が進むことで農地の営農状況が変化し、流域の水質環境に影響が及ぶと考えられる。そこで本研究では、農地の営農状況の変化による河川水質への影響を、SWATを用いてシミュレーションし、過去、現在、近未来の三時期を比較する。シミュレーションの条件を表-4に示す。各項目の値は、i流域の農地面積に対する百分率である。過去シナリオの条件は、転作が進んでいなく環境かん排事業が実施され

表-4 シミュレーション条件

項目	過去シナリオ	現在	近未来シナリオ1	近未来シナリオ2
作付				
トウモロコシ	0%	5%	20%	20%
牧草	100%	95%	80%	80%
施肥				
堆肥	100%	50%	50%	32%
スラリー	0%	50%	50%	68%
土砂かん止林農地	0%	3%	3%	21%
排水調整池の集水域農地	0%	10%	10%	15%

る以前の営農状況を想定し、牧草地を100%、堆肥施用農地を100%とした。現在の条件は、転作が進みはじめ環境かん排事業が実施中の営農状況を想定し、飼料用トウモロコシを5%、スラリー施用農地を50%、土砂かん止林農地を3%、排水調整池の集水域農地を10%とした。近未来の条件は、2つのシナリオを設定した。近未来シナリオ1は、気候変動により転作が進んだ営農状況を想定し、現在の条件から作付のみを変化させ、飼料用トウモロコシを20%とした。近未来シナリオ2は、転作した農地に事業施設を整備した営農状況を想定し、飼料用トウモロコシを20%、スラリー施用農地を68%、土砂かん止林農地を21%、排水調整池の集水域農地を15%とした。なお、このシミュレーションは、入力する気象値やモデルパラメータは現在と同じ条件で、営農状況のみが異なる条件で解析するものである。すなわち、過去シナリオと現在の比較では、主に環境かん排事業の現在までの進捗効果を分析するものであり、現在と近未来の比較では、気候変動と環境かん排事業の進捗による河川水質への影響をシナリオごとに分析するものである。

農地からの各流出成分（表面流出、側方流出、地下流出）の窒素流出量を図-12に示す。各流出成分のうち地下流出が最も大きい割合を占め、側方流出と表面流出はシミュレーション条件ごとに異なる結果であった。

過去シナリオと現在の比較では、年間窒素流出比負荷量のうち表面流出成分は0.07 kg/ha/yから0.27 kg/ha/yに増加、側方流出成分は0.96 kg/ha/yから0.58 kg/ha/yに減少、地下流出成分は7.17 kg/ha/yから3.87 kg/ha/yに減少した。過去シナリオの条件に比べ現在の条件では、飼料用トウモロコシへの転作農地が5%とまだ少ないため、表面流出成分が微増にとどまった。一方で、環境かん排事業の進捗によって、有機質肥料が堆肥からスラリーに置き換わり化学肥料削減に伴う施肥総量が減少したこと、

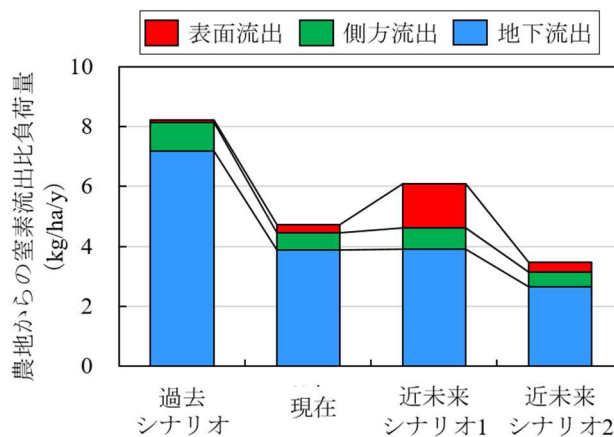


図-12 農地からの年間窒素負荷量のシミュレーション結果



土砂かん止林によりろ過機能が働くこと、排水調整池により沈砂することにより、側方流出成分と地下流出成分が大きく減少した。

現在と近未来シナリオ1の比較では、年間窒素流出比負荷量のうち表面流出成分は0.27 kg/ha/yから1.46 kg/ha/yに増加、側方流出成分は0.58 kg/ha/yから0.72 kg/ha/yに増加、地下流出成分は3.87 kg/ha/yから3.91 kg/ha/yに増加した。現在の条件に比べ近未来シナリオ1の条件では、牧草地から飼料用トウモロコシへの転作農地が5%から20%に増えることによって、土壌表面が露出しやすい営農条件のため、表面流出成分が大きく増加した。一方で、牧草地と飼料用トウモロコシの側方流出成分と地下流出成分は同程度であり、転作による大きな影響は無かった。近未来シナリオ1とシナリオ2の比較では、年間窒素流出比負荷量のうち表面流出成分は1.46 kg/ha/yから0.33 kg/ha/yに減少、側方流出成分は0.72 kg/ha/yから0.47 kg/ha/yに減少、地下流出成分は3.91 kg/ha/yから2.67 kg/ha/yに減少した。飼料用トウモロコシへの転作農地とその周辺に肥培かんがい施設、土砂かん止林、排水調整池を配置することで、各流出成分が減少したシミュレーション結果となった。特に、転作により増加した表面流出成分、流出成分の中で最も割合が大きい地下水流出成分が大きく減少した。

以上より、SWATにより想定した営農状況に対して河川水質をシミュレーションし、各流出成分の内訳を分析することで、必要な施設の配置や規模を選定することが可能となる。

## 5. まとめ

北海道東部の大規模酪農地帯を対象として、SWATを用いた水質解析により、水質環境改善手法を提案することを目的とした。本研究では、1) 平水時の河川水質と土地利用・営農状況との関係を明らかにし、2) 支川における水質連続観測により水質変動特性を明らかにし、3) SWATの水質解析では、A川のi支川流域を対象として、農地の営農管理スケジュールを設定し、河川流量、土砂流出量、栄養塩流出量に関してパラメータの同定を行った。さらに、SWATを用いて、過去、現在、近未来の営農状況を想定し、河川環境への影響をシミュレーションした。主要な成果は以下にまとめられる。

1) 窒素成分の主成分であるNO<sub>3</sub>-N排出濃度と流域面積あたり乳用牛頭数密度との関係性を調べた結果、正の相関関係が得られた。また、河畔林や湿地の浄化作用の効果を検討するため、河畔土地利用の草地率を用いて排出濃度から発生濃度への変換を行い、

流域面積あたりの乳用牛頭数密度との関係を調べると、相関係数が向上した。近似直線から外れる小流域が存在し、流域規模において、事業の実施により負荷を抑制している可能性が示された。

- 2) e川とi川のSS濃度とTP濃度は、出水時に濃度が高くなり、i川のほうが、濃度が高くなる傾向がみられ、その要因として河川形状による河床の土砂堆積の状態の違いが考えられた。一方で、e川とi川のTN濃度は差が大きく、その大部分がNO<sub>3</sub>-N濃度であることがわかった。NO<sub>3</sub>-N濃度に差が生じた要因として、事業の整備状況の違いや小流域内の事業地区の位置関係や事業の複合的な効果、地形連鎖による効果などが河川水質に与える影響が考えられる。また、出水時の濃度変動に違いが生じた要因として、流域形状が異なるため、流出特性に違いが生じたと考えられる。今後は、小流域内の事業の実施状況や畜舎などの発生源の位置関係の情報を調べる必要があり、それらの情報をSWATに反映させることが課題である。
- 3) SWATによる水質解析では、作物の生育状態と流出量を計算し実測値と検証した。牧草地と飼料用トウモロコシの作物生長が作期を通して表現され、単位収穫量の実測値を再現した。河川流量は、平水時、出水時ともに実測値を再現し、土砂流出量と栄養塩流出負荷量は、平水時の実測値を再現した。一部の出水で課題がみられるものの、農地の水文水質過程が表現されていることにより、土砂と栄養塩の流出過程と減衰過程が再現されたといえる。SWATを用いた三時期の営農状況を想定した河川水質シミュレーションでは、農地からの表面流出、側方流出、地下流出成分の内訳を分析し、牧草地から飼料用トウモロコシへの転作により表面流出成分が増加することが示され、対策として肥培かんがい施設、土砂かん止林、排水調整池を転作農地とその周辺に配置することで各流出成分が減少することが示された。以上により、流域管理計画ツールとしてのSWATの有効性が示された。

## 参考文献

- 1) 広木栄一, 今井敬典, 鈴木将英: 環境保全型かんがい排水事業における肥培灌漑施設整備の効果, 農業農村工学会誌, 75(12), pp.1118-1119, 2007.
- 2) IPCC: Climate Change 2021 The Physical Science Basis Summary For Policymakers, Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.

- al Panel on Climate Change, pp.1-31 2021.
- 3) 菅野 勉：飼料用トウモロコシ栽培の今後の展望，農業食料工学会誌，76(5)，pp.353-359，2014.
  - 4) 酒井 治，三枝俊哉：草地酪農地帯の養分収支に基づく河川水質の予測 2.SWAT による河川水質予測値の適合性改善，日本土壌肥料学会講演要旨集，54，p.254，2008.
  - 5) Chunying WANG：Using SWAT model to predict water flow, sediment and nutrients loads in Shibetsu river watershed, eastern Hokkaido, Japan, 北海道大学博士論文，2014.
  - 6) 加藤 亮，渡邊裕純，Julien Boulange，江口定夫，坂口敦，宗村広昭：SWAT モデルの水田を含む流域への適用の問題点と改善に向けて，農業農村工学会誌，81(12)，pp.983-987，2013.
  - 7) 農林水産技術協会：「環境保全と新しい畜産」，p.20，1997
  - 8) 志村もと子，田淵俊雄：養牛流域における畜産と河川水窒素濃度との関係—畜産主体の集水域における窒素流出に関する研究 (IV) —，農業土木学会論文集，189，pp.45-50，1997.
  - 9) 国立研究開発法人土木研究所水工研究グループ水文チーム：流量観測の高度化マニュアル(高水流量観測編)Ver1.2，2016.
  - 10) 気象庁 過去の気象データ検索，<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php> (2021/1/20)
  - 11) 近藤純正 編著：「水環境の気象学」，1994
  - 12) 国土地理院 基盤地図情報サイト，<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> (2018/3/1)
  - 13) 国土交通省 国土数値情報ダウンロード，<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html> (2018/3/1)
  - 14) 国土交通省 国土調査(土地分類調査・水調査)，<https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/download.html> (2018/3/1)
  - 15) 日本土壌協会 地力保全土壌図，CD-ROM，2008.
  - 16) 清水裕太，小野寺真一：郊外農業流域での栄養塩流出に及ぼす気候変動の影響，陸水学雑誌，73，pp.235-254，2012.
  - 17) 北海道農政部：北海道農業生産技術体系第5版，北海道農業改良普及協会，2019.
  - 18) 北海道農政部：北海道施肥ガイド2015，地方独立行政法人北海道立総合研究機構，pp.216-221，2015.
  - 19) 松中照夫：新版土壌学の基礎 生成・機能・肥沃度環境，農山漁村文化協会，p.151，2018.
  - 20) 根釧農業試験場：乳牛の糞尿量および糞尿窒素量の低減，酪農研究通信，7，1997.
  - 21) 寒地土木研究所：肥培かんがいシステムに関する参考資料(案)，pp.47-49，2003.
  - 22) Nash J.E., Sutcliffe J.V.: River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, Journal of Hydrology, 10(3), pp.282-290, 1970.
  - 23) 清水裕太，小野寺真一，松森聖治：水文流出モデルを用いた流域からの窒素流出量推定—現状と課題—，日本水文学会誌，44(4)，pp.207-223，2014.