

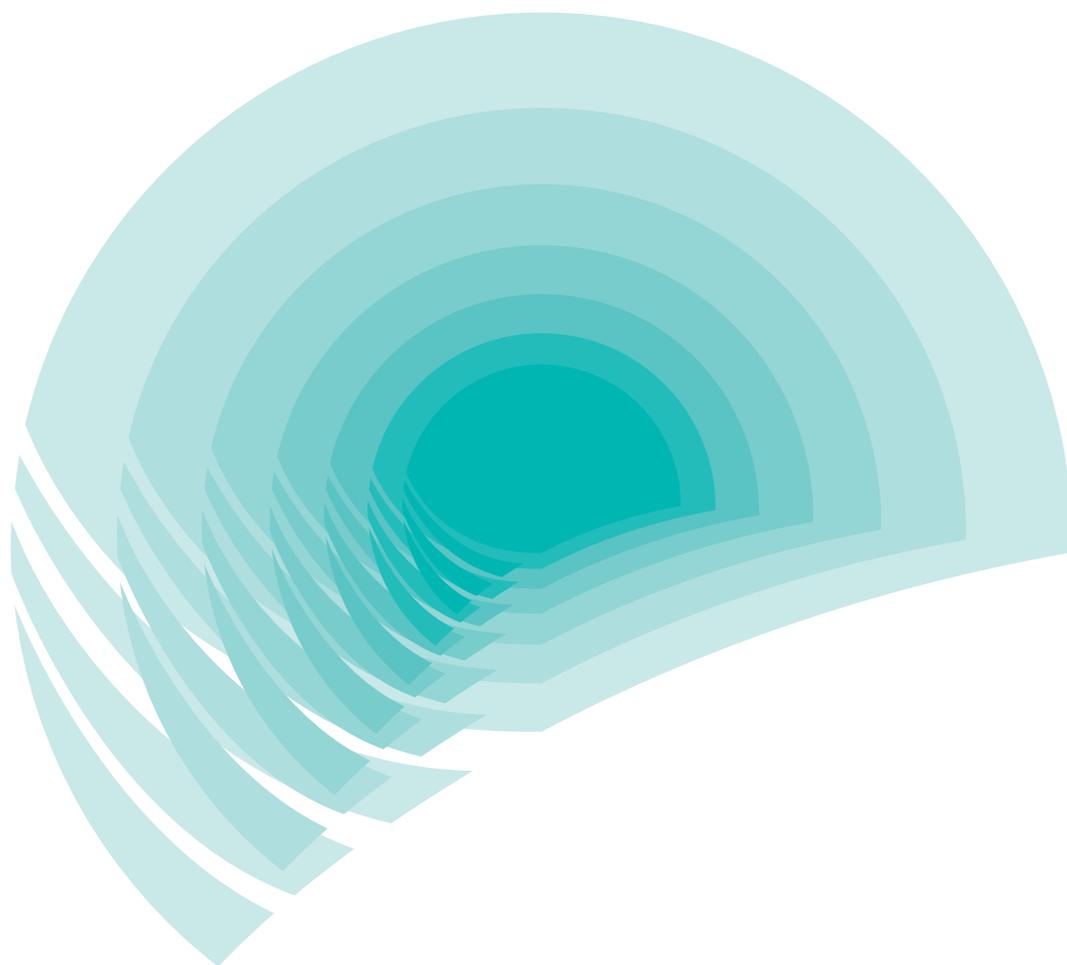
Research Report of Public Works Research Institute

ISSN 0386-4995

2015.1 January

No. 222

土木研究所報告



Copyright © (2015) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所報告第 222 号
Research Report of PWRI No.222

第 2 期中期計画
重点プロジェクト研究特集号 (その 5)

目次
Contents

	頁
1. 総合的な洪水リスクマネジメント技術による 世界の洪水災害の防止・軽減に関する研究……………	1
(Research on Prevention and Mitigation of Flood-Related Disasters in the World by Utilizing Integrated Risk Management Approaches)	
2. 水生生態系の保全・再生技術の開発……………	49
(Development of Preservation and Restoration Techniques for Aquatic Ecosystem)	

総合的な洪水リスクマネジメント技術による
世界の洪水災害の防止・軽減に関する研究

総合的な洪水リスクマネジメント技術による 世界の洪水災害の防止・軽減に関する研究

田中茂信¹⁾、寺川陽²⁾、吉谷純一³⁾、竹本典道⁴⁾、野呂智之⁵⁾、時岡利和⁶⁾、
オスティ・ラビンドラ⁷⁾、栗林大輔⁸⁾、山下英夫⁹⁾、深見和彦¹⁰⁾、猪股広典¹¹⁾、杉浦友宣¹²⁾、
ディナール・イステイアント¹³⁾、三宅且仁¹⁴⁾、工藤啓¹⁵⁾、馬籠純¹⁶⁾、小澤剛¹⁷⁾、川上貴宏¹⁸⁾、
鍋坂誠志¹⁹⁾、佐山敬洋²⁰⁾、アディカリ・ヨガナス²¹⁾、清水孝一²²⁾、渡邊康玄²³⁾、
安田浩保²⁴⁾、平井康幸²⁵⁾、吉川泰弘²⁶⁾、矢野雅昭²⁷⁾、石谷隆始²⁸⁾、阿部孝章²⁹⁾

Research on Prevention and Mitigation of Flood-Related Disasters in the World by Utilizing Integrated Risk Management Approaches

Shigenobu TANAKA, Akira TERAKAWA, Junichi YOSHITANI, Norimichi TAKEMOTO, Tomoyuki NORO, Toshikazu TOKIOKA, Osti RABINDRA, Daisuke KURIBAYASHI, Hideo YAMASHITA, Kazuhiko FUKAMI, Hironori INOMATA, Tomonobu SUGIURA, Dinar ISTIYANTO, Katsuhito MIYAKE, Kei KUDO, Jun MAGOME, Go OZAWA, Takahiro KAWAKAMI, Seishi NABESAKA, Takahiro SAYAMA, Adikari YOGANATH, Yoshikazu SHIMIZU, Yasuharu WATANABE, Hiroyasu YASUDA, Yasuyuki HIRAI, Yasuhiro YOSHIKAWA, Masaaki YANO, Takashi ISHIYA, Takaaki ABE

要旨

洪水、渇水、土砂災害、津波・高潮災害などの水関連災害は、人類にとって持続可能な開発や貧困の解消を実現する上で克服すべき主要な課題のひとつである。わが国が従来水災害の克服に向けて蓄積してきた知識や経験をもとに世界的な視野で水関連災害の防止・軽減に貢献することが ICHARM の設立を契機にいっそう求められている。本重点プロジェクト研究では、わが国と異なる自然・社会条件下にある発展途上国流域における水関連災害の防止・軽減に役立てることを念頭に、洪水災害及び津波災害に焦点をあて、災害の事前予防、予警報ならびに構造物対策および非構造物対策を含めた総合的な洪水リスク管理方策について研究を行った。

キーワード：発展途上国、人工衛星、ハザードマップ、洪水予警報、津波対策、海岸植生、統合洪水解析システム (IFAS)、衛星雨量補正、降雨流出氾濫モデル (RRI)、リスクマネジメント

Synopsis :

Water-related disasters, such as disasters caused by floods, droughts, debris flows, tsunamis or storm surges, are one of the major challenges that humans need to overcome to achieve sustainable development and the elimination of poverty. Japan has a long history of addressing such disasters and has accumulated extensive knowledge and experience in the field. Against this backdrop, the country has been increasingly expected to contribute to the prevention and mitigation of

water-related disaster damage on a global scale, especially since the establishment of the International Centre for Water Hazard and Risk Management (ICHARM). In this priority project, we studied comprehensive flood-risk management measures, including disaster prevention measures, warning and forecasting systems, and both structural and non-structural measures, with the particular focus on flood and tsunami disasters to eventually apply such measures to prevent and mitigate flood disasters in river basins of developing countries under natural and social conditions different from those of Japan.

Key Words :

developing country, satellite, hazard map, flood forecast, tsunami countermeasure, coastal forest, integrated flood analysis system (IFAS), satellite-based rainfall data correction, rainfall-runoff-inundation model (RRI), risk management

- 1) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ長
- 2) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ長
- 3) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 上席研究員
- 4) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 総括主任研究員
- 5) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 総括主任研究員
- 6) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 研究員
- 7) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 研究員
- 8) 独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 主任研究員
- 9) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 研究員
- 10) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 上席研究員
- 11) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 研究員
- 12) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 研究員
- 13) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 専門研究員
- 14) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 上席研究員
- 15) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 上席研究員
- 16) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 研究員
- 17) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 交流研究員
- 18) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 研究員
- 19) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 研究員
- 20) 独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 主任研究員
- 21) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 専門研究員
- 22) 元独立行政法人土木研究所 水災害研究グループ 総括主任研究員
- 23) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所水圏研究グループ寒地河川チーム 上席研究員
- 24) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所水圏研究グループ寒地河川チーム 研究員
- 25) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所水圏研究グループ寒地河川チーム 上席研究員
- 26) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所水圏研究グループ寒地河川チーム 研究員
- 27) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所水圏研究グループ寒地河川チーム 研究員
- 28) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所水圏研究グループ寒地河川チーム 研究員
- 29) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所水圏研究グループ寒地河川チーム 研究員

目 次

1. 序論	1
1. 1 研究の背景と目的	1
1. 2 研究の範囲と達成目標	1
1. 3 個別課題の構成	1
2. 海外における洪水被害軽減体制の強化支援に関する事例研究	2
2. 1 はじめに	2
2. 2 調査手法の流れ	2
2. 3 対象国の抽出	3
2. 4 要因分析と災害カルテの例	4
2. 5 おわりに	5
3. 発展途上国向け洪水ハザードマップに関する研究	6
3. 1 はじめに	6
3. 2 発展途上国における洪水ハザードマップ活用方策の検討	6
3. 3 FHM利活用のための研修教材の作成	6
3. 4 おわりに	9
4. 人工衛星情報等を活用した洪水予警報のための基盤システム開発に関する研究	10
4. 1 はじめに	10
4. 2 人工衛星雨量データの補正方法	10
4. 3 総合洪水解析システム(IFAS)の改良	13
4. 4 普及活動	14
4. 5 おわりに	14
5. 水文情報の乏しい地域における人工衛星雨量情報の現地利活用に関する研究	15
5. 1 はじめに	15
5. 2 衛星観測雨量の世界各国での精度・不確実性評価	15
5. 3 地上雨量と衛星雨量の合成手法の開発	17
5. 4 ケーススタディを踏まえた IFAS の改良	19
5. 5 おわりに	19

6. 発展途上国における統合洪水解析システムの開発・普及に関する研究	20
6. 1 はじめに	20
6. 2 降雨流出氾濫モデル(RRI モデル)の構成	21
6. 3 インドネシア・ソロ川流域への適用	22
6. 4 おわりに	24
7. 発展途上国における持続的な津波対策に関する研究	26
7. 1 はじめに	26
7. 2 発展途上国における持続的な津波対策に関する研究	26
7. 3 河川に侵入した津波による被害軽減手法に関する研究	27
7. 4 沿岸都市の災害リスクの評価に関する研究	29
7. 5 まとめ	30
8. 水災害リスク評価のための衛星地形データの活用手法の研究	32
8. 1 はじめに	32
8. 2 衛星地形データの地形再現精度の検証	32
8. 3 浸水計算のための最適な地形データ処理手法の開発	33
8. 4 衛星地形データを活用した水災害リスクの評価手法の開発	33
8. 5 衛星地形データ活用教材の作成	35
8. 6 おわりに	35
9. 発展途上国における総合的な洪水リスクマネジメント方策の事例研究	36
9. 1 はじめに	36
9. 2 既存リスク緩和対策	36
9. 3 シナリオ別サイクロン災害対策の分類	37
9. 4 おわりに	40
10. 結論	41

1. 序論

1.1 研究の背景と目的

洪水、渇水、土砂災害、津波・高潮災害などの水に関連する災害は、人類にとって持続可能な開発や貧困の解消を実現する上で克服すべき主要な課題のひとつであり、国際社会の力を結集して取り組むべき共通の課題であるとの認識がさまざまな国際会議の場で示されている。

この背景には、近年世界各地で激甚な水関連災害が増加傾向にあり、人口や資産の都市域への集中や産業構造の高度化に伴う資産価値の増大に伴って被害が深刻化していること、および地球温暖化に起因する気候変化が豪雨の発生頻度増大や無降雨期間の長期化をもたらす恐れが指摘されていること等がある。

こうした背景のもと、わが国がこれまで水災害の克服に向けて蓄積してきた知識や経験をベースに、世界的な視野で水関連災害の防止・軽減のための課題解決に貢献することが求められている。

本研究は、わが国と異なる自然・社会条件下にある発展途上国流域における洪水関連災害の防止・軽減に役立てることを念頭に置いて、災害の事前予防、予警報ならびに構造物対策及び非構造物対策を含めた総合的な洪水リスク管理方策について研究することを目的とする。

1.2 研究の範囲と達成目標

本重点プロジェクト研究では、水関連災害のうち、洪水災害及び津波災害に焦点をあてて、災害リスク評価手法及び災害リスクの軽減方策について具体的な提案のかたちでとりまとめるための事例研究や技術開発を行うことを研究の範囲として、以下の達成目標を設定した。

- (1) 地上水文情報が十分でない途上国に適用可能な洪水予警報システムの開発
- (2) 発展途上国の自然・社会・経済条件下における洪水ハザードマップ作成・活用ガイドラインの策定
- (3) 構造物対策と非構造物対策の組み合わせによる、リスク軽減効果評価手法の開発
- (4) 動画配信等 IT 技術を活用した人材育成用教材の開発

- (5) 海外流域を対象とした総合的な洪水リスクマネジメント方策の提案
- (6) 河川下流域における津波災害のリスク評価・管理手法の開発

1.3 個別課題の構成

本重点プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

- (1) 海外における洪水被害軽減体制の強化支援に関する研究
- (2) 発展途上国向け洪水ハザードマップに関する研究
- (3) 人工衛星情報等を活用した洪水予警報のための基盤システム開発に関する研究
- (4) 発展途上国における持続的な津波対策に関する研究
- (5) 水災害リスク評価のための衛星地形データの活用手法の研究
- (6) 発展途上国における統合洪水解析システムの開発・普及に関する研究
- (7) 水文情報の乏しい地域における人工衛星雨量情報の現地利活用に関する研究
- (8) 発展途上国における総合的な洪水リスクマネジメント方策の事例研究

それぞれの研究課題が達成目標に1対1で対応するのではなく、複数の研究テーマがいくつかの目標と関係している。

2. 海外における洪水被害軽減体制の強化支援に関する事例研究

2.1 はじめに

水災害に対する被害を軽減するためには、災害発生後の応急対応、復旧・復興、同じ規模の災害の予防・減災、事前準備の4つのフェーズからなる防災サイクルを機能させ、地域の防災力を向上させることが重要である。さらに各フェーズで一人一人が洪水時に適切な行動をとる「自助」、コミュニティを形成する人々が助け合う「共助」、行政機関が被害の予防・最小化のために行う「公助」の3者すべてが適切に行動することが必要である。このような防災力の向上は被害発生の実態把握と根本要因の分析などを元に、その地域にとって有効・適切な施策が計画・実行されて始めて防災力が強化される。

本研究は、洪水災害の状況、コミュニティの状況、住民の意識、被害軽減対策等について特に脆弱な海外の事例を対象に調査を行い、対象地域の地域防災力を最大限に発揮する方策を事例的に提案していくものである。具体的には、まず現地調査で行う一連の手法を実施フローとして整理し、そのフローや文献調査等で得られた情報を災害カルテとして一つのシートにまとめた。

2.2 調査手法の流れ

本研究では、水災害の影響を受ける対象国の地域特性や社会経済構造に適した被害軽減対策やそのために求められる支援を提示することを目的とし、水災害などの自然災害リスクが人的・物的資源に与える要因と、それらリスクに対する被害軽減対策について、過去の文献調査や現地調査などにより整理・分析し、いくつかの対象国をケーススタディとして対象国における水災害軽減対策（案）を提示する。

ここで、一連の調査手法について整理する。

要因分析は、文献や資料、インターネットによる情報・データに基づいて調査対象国の特徴や社会経済構造などを整理するとともに、顕著な水災害に関する事例を調査するものである。具体的には、対象災害における人的・物的被害の概要把握と被害拡大要因の分析であり、実施フローは図-2.1のとおりとなる。

(1) 情報・データ収集、整理

当該国の踏み込んだ基本情報や社会分析などには、研究所・大学などの研究機関による学術論文、JICA等による報告書が有益である。また、新聞記事は災害発生後の時間と被害の推移を把握する方法として、被害拡大に至る背景の状況分析に有用である。JICA図書館は比較的新しい報告書をデジタル化している。

入手した情報・データを用いた分析を容易にするため、対象国の概要、自然・社会的特性、防災体制、顕著な水災害の概要という視点で整理をする。

(2) まとめ図、要因分析図の作成

まとめ図は、災害や被害状況の全体像把握を容易にするために作成する。対象災害における被害状況や被害の拡大要因について、対策状況、対応状況、人的・物的被害状況、自然および社会的加害要因の項目別に整理し、要素ごとに簡潔にまとめる。

要因分析図は、被害状況を系統立てて理解するために作成する。整理された情報やデータをもとに被害拡大につながった要因を分析し、列挙された要因相互の関係、および要因と事象の関連性を図式化して整理する。

これら要因分析後、ケーススタディとして、対象とする地域や水災害を絞り込み、対象災害の発生要因や被害拡大要因などについて明らかにする。具体的には、対象地域に関する文献調査の追加や関係者等へのヒアリング調査をもとに被害拡大要因に関する仮説を設定し、さらに現地調査により具体的な分析や定量的評価を行い検証するものである。実施フローは図-2.2のとおりである。

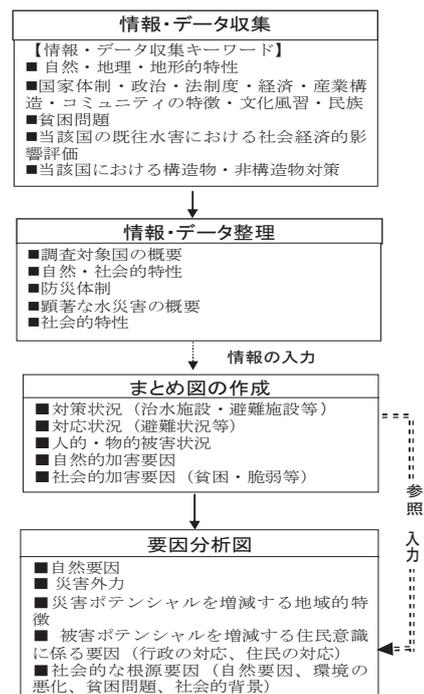


図-2.1 要因分析調査の実施フロー

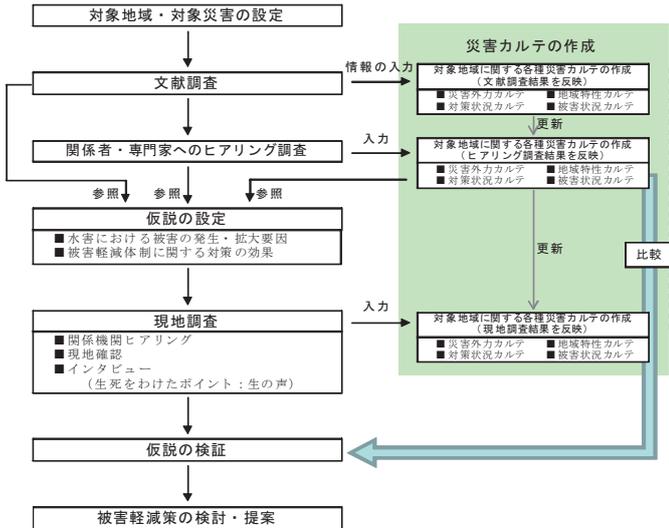


図-2.2 ケーススタディの実施フロー

(i) 対象災害、地域の選定

対象災害の選定については、既往災害データをもとに被害が顕著である水災害を抽出することを基本とする。地域の選定は、対象災害の頻度とともに災害に対する脆弱性（貧困率、コミュニティの成熟度等）にも配慮する必要がある。

(ii) 災害カルテの作成

災害カルテは、災害の発生要因、被害の拡大要因といった災害の要因連関を明らかにするツールとして位置づけられる。諸文献の整理結果や関係者等に対するヒアリング調査によって得られた情報を、「災害外力」「地域特性」「対策状況」「被害状況」に分類して整理する。災害外力の具体例としては例えばサイクロンであれば風速、降水量、潮位、浸水深などがあげられる。地域特性は地域の自然・地形・社会的特性であり、対策状況は構造物（ハード）対策と非構造物（ソフト）対策について整理する。被害状況では、人的・物的被害、直接的・間接的被害の情報を整理する。

(iii) 関係者等へのヒアリング

途上国では、行政機関のキャパシティや人材不足のため、災害が発生しても十分な調査が行われないことが比較的多い。そのため、当該国において活動を実施し現地の状況に精通している関係者等に対しヒアリングを行い、より詳細な情報収集に努める。

(iv) 仮説の設定

それまで収集した情報をもとに作成した災害カルテを活用し、「水災害における被害の発生・拡大要因」「被害軽減体制に関する対策の効果」という観点で被災状況の仮説を立てる。

(v) 現地調査

設定した仮説を検証するため、被災箇所の実地調査や現地行政機関、NGO、被災地の住民に対するヒアリングを実施する。対象地域において多数の被災者が発生した地区を明らかにするとともに、災害発生前から被災に至るまでの状況や避難の実態を時系列的に整理する。

(vi) 仮説の検証

現地調査によって入手した情報やヒアリング結果により、設定した仮説の検証を行う。

(vii) 被害軽減策の検討、提案

災害被害軽減のためには、構造物対策と非構造物対策がバランスよく継続的に進められることが重要であるとともに、当該国の地域特性や社会経済構造に配慮した防災対策が求められる。

2.3 対象国の抽出

水災害に関して公開されている災害のデータベースの例として、表-2.1のようにCREDによる

「EMDaT」やダートマス大学による「Dartmouth Flood Observatory」がある。本研究では、国連開発計画（UNDP）をはじめとする各機関における活用実績を勘案して、EMDaTをベースとして対象国及び災害リストを作成した。また、世界中の様々な災害事例を網羅しながら社会特性との関係で水災害を論じている文献として「At Risk」も参考にした。

EMDaTには1900年以降の1万件以上の災害が登録されているため、以下のような条件を設けて災害を155件に絞り込み、さらに地域性や死者数の多い災害が発生している等を考慮して、11カ国を抽出した。

(1) 自然災害

(2) 洪水、津波、暴風雨、高潮、土砂災害

(3) 以下の何れかに当てはまる災害

「2000名を超える死者数」

「50億USドルを超える被害額」

「At Riskに記載されている」

「矢野が作成したリスト²⁾に記載されている」

表-2.1 洪水関連災害のデータベース

名称	EMDaT, Center for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED)	Dartmouth Flood Observatory
URL	http://www.em-dat.net/	http://www.dartmouth.edu/~floods/index.html
対象災害	地震、地すべり、土石流、火砕流、火山、干ばつ、洪水、津波、高潮、異常高温、山火事、伝染病、凶作、害虫の発生 等	洪水
対象期間	1900～現在	1985～現在
その他	ルーベンカトリック大学（ベルギー）が登録を実施。 登録される基準は、以下の何れかに当てはまる災害。 「10人以上が死亡」 「100人以上が影響を受けた」 「緊急事態宣言が発出された」 「国際的な支援が呼びかけられた」	ダートマス大学（米国）が登録を実施。 衛星画像を元に大規模洪水が発生した位置を特定し、災害規模とともにデータベース化。

UNDPは2004年にEMDaTのデータを用いて世界各国の洪水、暴風雨災害に対する脆弱性を相対比較しており³⁾、このうち洪水について今回抽出した11カ国の位置をプロットすると図-2.3のようになる。図中の緑の点線は「洪水にさらされる人口10万人中、年平均死者数が1人」となる線を表している。ベネズエラを除く10カ国は概ねこの直線状に位置するため、それらの国の脆弱性が同程度であることを表しており、国別の要因比較がある程度可能と思われる。

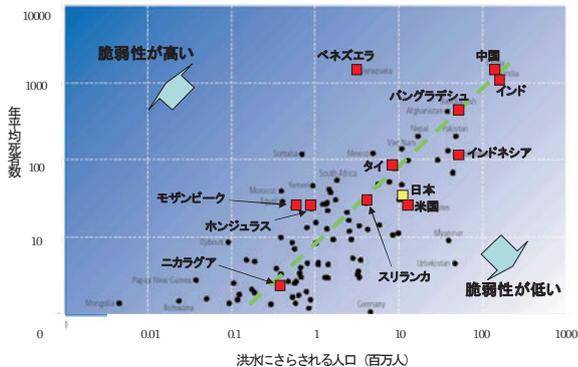


図-2.3 世界各国の脆弱性の比較

2.4 要因分析と災害カルテの例

2.3で抽出した11カ国のうち、ホンジュラス、バングラデシュ⁴⁾、スリランカ⁵⁾と近年大きな災害が発生したフィリピン⁶⁾を加えた4カ国をケーススタディとして要因分析を行った。ケーススタディでは、被害の発生・拡大要因と被害軽減体制に関する取組・対策の効果について分析し、評価を試みた。この結果は、将来他国や他地域に対して被害軽減体制に関する対策を実施する際のポイントや留意事項等の提案を行うとともに、災害カルテの作成、仮説検

証方法の一連の手順を確立する際の資料とするものである。ここではバングラデシュを対象とした災害カルテの作成事例を示す。

図-2.4に示すバングラデシュは熱帯モンスーン気候に属し、雨季(6～9月)と乾期(10～5月)に分かれ、サイクロンの襲来時期はモンスーンの前後(4～5月、10～11月)である。雨季前のサイクロンはバングラデシュ南東部沿岸地域を、雨季後のサイクロンはベンガル湾西部のインド側を通過する頻度が高い。ベンガル湾に面した沿岸地域では年間降水量が3,000mmに達するが、バングラデシュの全国平均降水量は約2,200mmであり、雨季の4ヶ月間に年間降水量の2/3が集中している。EMDaTによればバングラデシュでは毎年のようにサイクロンが来襲しており、このうち人命や家畜に被害を与え、経済的にも大きな損失をもたらしたとされる事例だけでも60年間(1941～2000年)で15にのぼっている⁴⁾。事例研究の対象としては、近年特に大きな被害をもたらした1991年のサイクロン災害を取り上げ、サイクロン高度危険区域に指定されているハティア島を対象として災害カルテを作成した。

まず、表-2.2に1991年サイクロン災害の概要を

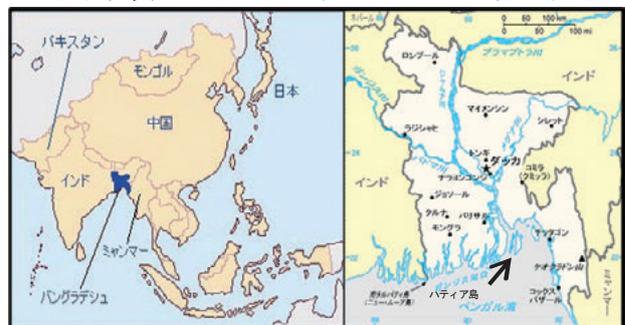


図-2.4 バングラデシュ位置図
(右図はハティア島の位置)

表-2.2 1991年サイクロン災害の概要

1991年サイクロン	
期間	4月29-30日(大潮時)
上陸時間	深夜
サイクロン規模	中心気圧938mb。最大時で平均風速260km/h、瞬間最大風速315km/h。 サイクロン風は約8時間継続。 高潮高は6m以上(最大8m)で、29日深夜から30日早朝まで継続。
被災地域	沿岸地域中央部・東部
サイクロン影響地域居住人口	サイクロン高度危険地域8,093km ² に520万人居住
死者数	約14万人
被災者(影響者)数	46万人の負傷者。 病气(一般的感染症、壊疽、下痢、呼吸器疾患)の蔓延(下痢症状25,850人(うち6,500人死亡))。 450万人(1,500万人:CRED)に影響。
被害規模	水没地域は沿岸沿い160kmに及ぶ。 全壊家屋52万2千軒、半壊家屋43万1千軒。 牛被害44万頭。樹木被害数数十万本。 破壊された堤防434km、修復の必要な堤防858km。 農作物被害6万3千ha(チッタゴンのみで5万8千ha)。 えび養殖場被害約1万6千ha。 民間・政府の全損失は20億ドル。

注：資料によってデータが異なる場合は、一部を除いて最大値を採用した。

示す。1991年サイクロンは、東部沿岸地域(チッタゴン)に上陸した後、北東に進みインドへ抜けている。6m以上(最大8m)の高潮が4月29日深夜から30日早朝まで継続した。風速は過去最大を記録し、平均風速260km/h、瞬間最大風速は315km/hに達していることから、高潮による溺死だけでなく強風ともなう飛来物による犠牲者も多かった可能性が高い。さらに、不十分な衛生管理から被災後の一般的感染症、壊疽、下痢、呼吸器疾患等による病気が蔓延し、半月後の5月半ばの時点で6,500人が下痢で死亡している⁴⁾。ただし、これら病気による犠牲者は死者数に含まれていない可能性も高い。

これらの災害外力に関する分析も含め、ハティア島の1991年サイクロン災害に関して、収集した資料や現地調査にもとづき災害カルテを試作した⁷⁾

(表-2.3)。ハティア島は、サイクロン高度危険区域に指定されており、島嶼であるため物流、通信、その他防災上の環境が整っていない状況であった。カルテで「対策状況」として整理された内容は言い換えれば今後必要とされる対策項目でもある。例え

ば、ハティア島については「サイクロンによる高波を想定した防潮堤の設置」、「住民の信頼を得るような空振りの少ない警報の発令」、「住民に避難を躊躇させないように留守宅の防犯対策」といったものが今後の対策例として挙げることが可能である。

2.5 おわりに

本研究では、洪水被害軽減に必要な体制強化策を提案するために、必要な一連の調査手法を整理し、バングラデシュなどを対象として調査手法を検証した。その結果、今回試みた手法が海外でも適用可能であることを確認した。

災害外力	1991年4月のサイクロン襲来時における対象地域の最大平均風速は176~220km/hと推定。 来襲時は満潮と重なったため、 5~6mの最高潮位 が東部地区沿岸部を襲ったと推測。
被害状況	死者数は約3,000人であり、 その大半は自宅から動かなかった貧困層が高波に飲まれて溺死 している。特に、泳いで立木や漂流物に捉まる力の弱い 女性、子供、高齢者の割合が多い 。
地域特性	人口密度：300人/km ² (当時のバングラデシュの人口密度774人/km ² より小さい) ベンガル湾のガンジス川河口に位置する島。ガンジス川の流れが直接ぶつかる 北部河岸は激しい浸食作用 に見まわれる一方、南部河岸では堆積傾向。 堆積が進む南部堤外地には土地を持たない貧困層が移住 してきていた。
対策状況	<ul style="list-style-type: none"> 島の周囲を防潮堤が(高さ4.5m)が設けられていたが、通常の高潮対策を目的としており、サイクロンによる高波に対する越水防止機能は期待できなかった。 被害軽減のためサイクロンシェルターが種々の援助機関によって建設されたが、1991年当時は島の人口に対し1割程度の収容量しかなかった。赤新月社のサイクロンシェルター利用率は52.7%との報告があるが、その多くは家屋が破壊されたために仕方なく避難してきた人々だった。 気象庁が発するサイクロン警戒信号に応じて、CPP(Cyclone Preparedness Programme)と呼ばれる警戒伝達システムがあったが、警報の空振りが多かったため住民の信頼性は低下していた。 警報に従って避難すると、留守宅の家畜や家財が盗難にあうこともあったため、逃げない人が多数であった。

表-2.3 施策した災害カルテ
(1991年ハティア島)

3. 発展途上国向け洪水ハザードマップに関する研究

表-3.1 「洪水ハザードマップ分類一覧表」作成に必要なデータ

洪水ハザードマップの分類 難易度レベル	地形図		過去の浸水範囲に基づく洪水ハザードマップ		はん濫に基づく洪水ハザードマップ		
	A	B	C	D	E	F	G
マップ	地図のみのマップ	標高のみのマップ	最大浸水実績の再現マップ	複数の浸水実績の再現マップ	難易度の高いはん濫解析による浸水実績の再現マップ	難易度の高いはん濫解析による浸水予測マップ	リアルタイムでははん濫解析を行う浸水予測マップ
洪水ハザードマップの作成に必要なデータおよび任意のデータ							
I. 地形に関するデータ							
河川の位置	必要	必要	必要	必要			
主要道路の位置	必要	必要	必要	必要			
建物や家の位置	必要	必要	必要	必要			
農地の位置	任意	任意	必要	必要			
高台の位置	任意	任意	必要	必要			
標高(等高線)		必要	必要	必要			
標高(標高点)		任意	必要	必要			
II. 洪水実績に関するデータ							
過去の洪水による浸水範囲(ヒアリング調査や現地踏査、衛星画像等による)			必要		任意	任意	任意
複数の過去の洪水時における浸水範囲(ヒアリング調査や現地踏査、衛星画像等による)				必要	任意	任意	任意
複数の過去の洪水時における河川水位、流域雨量				必要	任意	任意	任意
III. はん濫解析に関するデータ							
標高(約1 kmメッシュ)					必要	必要	必要
はん濫域の干渉利用データ					必要	必要	必要
堤上構造物や水路等の位置や規模					任意	任意	任意
河道断面のデータ					必要	必要	必要
排水ポンプの能力					任意	任意	任意
過去の洪水時における河川水位、流域雨量					必要	必要	
IV. 計画降雨に関するデータ							
過去の洪水時における河川水位、流域雨量						必要	
流出解析モデル						必要	
V. リアルタイムで行う洪水予測に関するデータ							
リアルタイムで観測するデータ(河川水位、流域雨量等)							必要
洪水ハザードマップの使用により利用可能な検討および任意の検討							
避難場所を理解できる	利用可能	利用可能	利用可能	利用可能	利用可能	利用可能	利用可能
安全な避難経路や避難方向を理解できる	任意	任意	任意	任意	任意	任意	任意
過去の浸水範囲から、効果的な避難計画を作成することができる			利用可能	利用可能	利用可能		
過去の洪水による浸水面積や河川水位(流域雨量)の関係により上流地点における河川水位(流域雨量)から洪水規模の予測が可能であり、効果的な避難計画を作成することができる				利用可能			利用可能
予想される浸水範囲から、効果的な避難計画を作成することができる						利用可能	利用可能
避難のタイミングを知ることが出来る							利用可能
はん濫による家屋の倒壊の危険性を理解できる							
洪水が発生し続ける期間を理解できる							

赤字: 更新が必要なデータ

3.1 はじめに

世界各地、特にアジアの発展途上国においては毎年洪水が頻発し、多大な被害を引き起こしている⁸⁾。被害軽減のためには堤防やダム建設などのハード対策も必要であるが、同時に早期予警報システムの整備や洪水ハザードマップ(以下、FHMと言う)の作成・配布などのソフト対策も重要である。

本研究においては、アジアの発展途上国におけるFHMの実情を把握するために、まず、土木研究所が実施した研修やセミナー参加者にヒアリングを行って各国の実情を把握し、日本での活用事例を含めたFHMの利活用方策の検討を行う。また、土木研究所が実施する研修活動を通じて、FHMの効果的な研修教材を作成する。さらに、発展途上国におけるFHM利活用のためのガイドラインをとりまとめる。

3.2 発展途上国における洪水ハザードマップ利活用方策の検討

まず、FHM作成に必要なデータや作成方法、利用方法からFHMのレベルをタイプA~Gの7段階

に分類し、「洪水ハザードマップ分類一覧表」を作成した。それぞれのタイプのマップに必要なデータを表-3.1に、それぞれのイメージ図を図-3.1に示す。

FHM分類一覧表をもとに、アジア各国におけるFHMの現状のレベルについてのヒアリング結果を表-3.2に示す。バングラデシュを除いては、既にある程度のレベルのFHMが何らかの流域で作成されている。求められるレベルについては、氾濫解析を行う必要のあるタイプFやリアルタイムで住民に情報提供するタイプGが多いものの、住民が作成可能なタイプB(標高あり、浸水深なし)や既往最大浸水深を示すのみのタイプCも必要とされていることがうかがえる結果となった。

今回のヒアリングを通じてわかったことの一つに、各国ともFHM作成に関しては、JICAなどのサポートを受けながらも一応のレベルに達していることがある。今後は、作成されたFHMをどのように活用し、洪水被害軽減に役立てていくかが課題と言える。

3.3 FHM利活用のための研修教材の作成

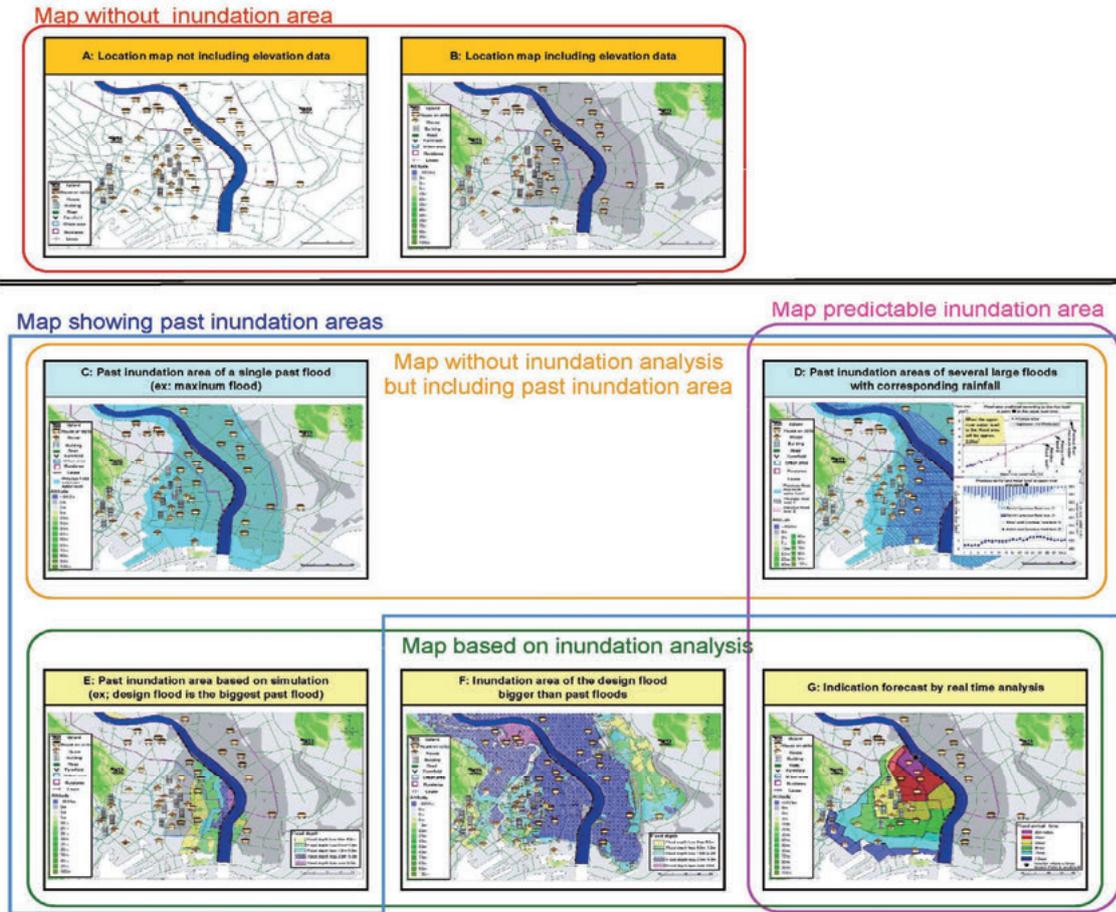


図-3.1 洪水ハザードマップ分類一覧表

土木研究所では、アジア 8 カ国の河川行政実務担当者を対象に 2004 年度から 2008 年度まで 5 ヶ年計画で毎年 1 回 JICA 研修『洪水ハザードマップ作成』を実施してきた⁹⁾。研修で使用するテキストについては毎年改善を進めてきたが、最終年度の 2008 年度研修においては、FHM の基礎から避難計画までを 1 冊にまとめたテキスト“LOCAL DISASTER MANAGEMENT AND HAZARD MAPPING”を作成し、使用した。なお、このテキストは既に ICHARM のホームページで公開されている。

前述したヒアリング結果で、FHM の「作成」に関しては、各国は一応のレベルに達していることが把握できたが、FHM の「活用」については、FHM に関してアジアの中で先進的である中国やマレーシアにおいてさえも、一般住民に対する配布は行われてお

表-3.2 各国の FHM の現状

Country	Current
Bangladesh	[Entire Country] A (Medium scale), B (Large scale)
China	[City] C, D, E, F [Reservoir] F
Indonesia	[Java, Kalimantan, Sumatra Island] C [Jakarta (Ciliwung basin)] G
Lao	F (Xebangfai Basin(done), Xedone Basin, Xekong Basin (in progress))
Malaysia	[Entire Country] A, B [Entire Country up to 2000] C [Damansara catchment ready, 5 river basins expected by end of the year] F [Klang River and Muda River end of this year or next year] G
Nepal	E & F (9 basins) 1) Kawala River Basin 2) Trijuga River Basin 3) Rupandehi River Basin 4) Rapti River Basin 5) Bagwati River Basin 6) Andhi Khola River Basin 7) Rangun River Basin 8) Kankai River Basin 9) Tinau River Basin
Philippines	[Entire Country] B [Manila, Bataang Taguig, Ilo] C [Cavite, Armock, Anhelas etc.] D [Cavite, Ormo, Camaguin, Loaog etc.] E
Thailand	[Entire Country] A, B [Past Flood Event Area] C [Lampang municipality] E [Nan municipality] F [Pasak basin] G
Viet Nam	A (communities), G (pilot project), C, E, F

らず、もっぱら行政関係者が使用するのみになっている。そもそも、FHM の作成・配布が市町村に義務づけられている日本においてさえも、必ずしもす

すべての地域において FHM が効果的に利用されているわけではなく、FHM の活用は大きな課題となっている。

しかし、コミュニティベースで FHM を作成することができれば、FHM 作成の一般的手順ともいえる ①水文・地形データ収集→②氾濫シミュレーション実施→③想定浸水図作成→④住民に配布→⑤住民に説明して住民が理解する のプロセスを経ることなく、全てをほぼ同時に行うことが出来て、住民の防災意識も格段に向上する可能性がある。フィリピンで行ったセミナーにおいては、現地視察として Metro Manila 南に位置する Cavite 県の Kawit 市を訪れ、JICA が主導して行ったコミュニティベースの FHM 作成活動について報告を受けた。

図-3.2 はここで作成された FHM である。報告においては FHM を作成するだけでなく、作成過程でタウンウォッチングを実施し、コミュニティベースで防災意識向上に努めた活動について触れられ、かつ住民の代表者がこの活動に非常に満足し感謝している様子うかがわれた。

一方、我が国においても、岩手県奥州市や三重県伊勢市などで、自治会レベルで FHM を活用して、住民の災害意識向上を行い成果を上げている地域が

ある。これらのコミュニティベースでの活動は、FHM を普及させる上で十分考慮すべき事項であり、次に述べるガイドラインにも好事例として収録し、発展途上国の行政担当者に役立つ内容としている。

既に ICHARM では、国土交通省河川局治水課作成の「洪水ハザードマップ作成の手引き」¹⁰⁾ (2005年6月)を英訳した“Flood Hazard Mapping Manual”を ICHARM ホームページ上で公開しているが、さらにそれを押し進め、過去5回実施した JICA 研修や、セミナーでのヒアリング結果も受けて、発展途上国の行政担当者などが活用出来る「洪水ハザードマップガイドライン(案)」を作成した。表-3.3 にその目次を示す。このガイドラインを作成する上で留意したポイントは以下の通りであるが、特にコミュニティベースでの FHM の利活用を目指したのが最大の特徴である。

- 1) 研修教材の利用者は、行政担当者に限定しない。地域の防災リーダー等も含め、地域の防災活動を指導するトレーナーが利用するものとする。
- 2) 住民がリスクを理解する際、リアリティが重要である。計画規模の洪水よりも、過去の浸水実績の方が理解されやすい。計画規

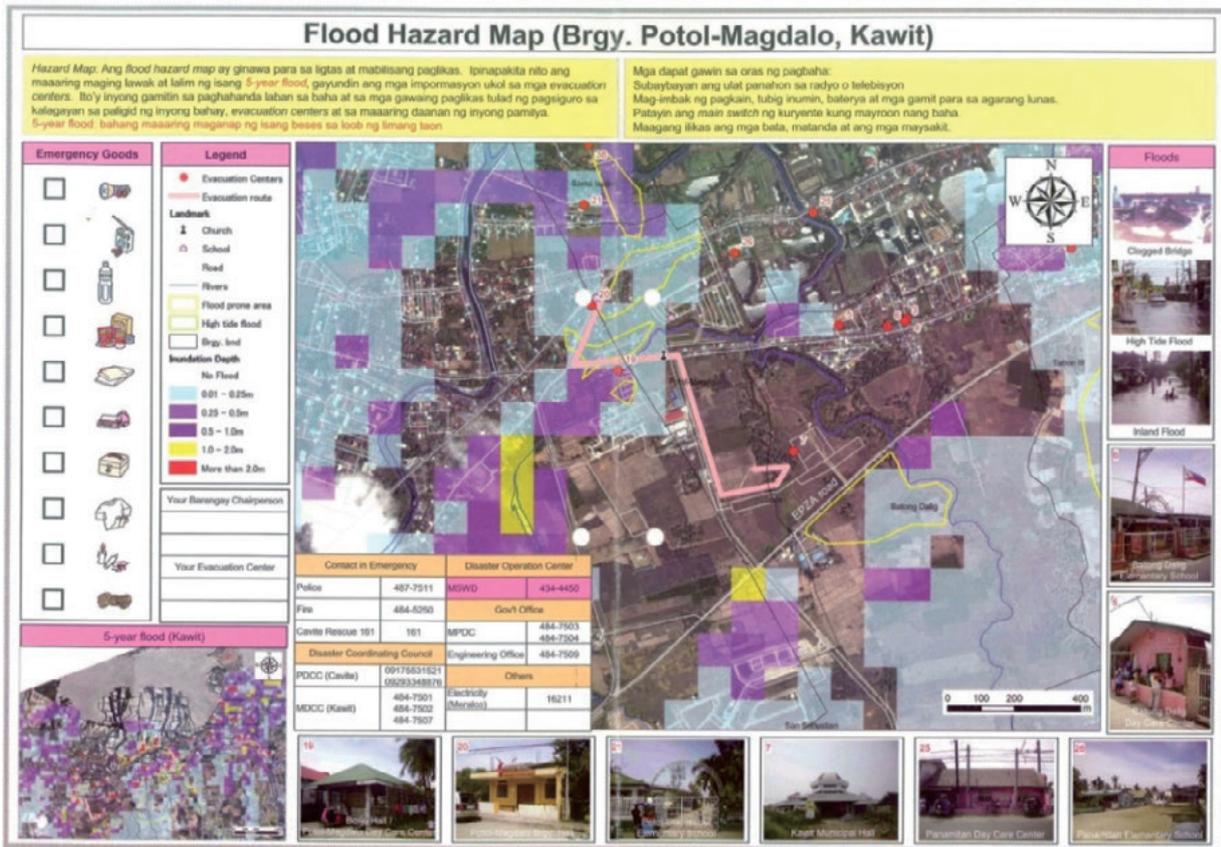


図-3.2 現地で住民とともに作成された FHM (Kawit 市 PotoI-Magdalo 地区)

表-3.3 「洪水ハザードマップガイドライン（案）」
目次

構 成	内 容
1. 基本事項	
1.1 目的	ガイドラインの目的と期待される効果
1.2 定義	「洪水ハザードマップ」と「減災」の定義
1.3 用途	ガイドラインの利用場面と利用者を記述
2. FHMを用いた減災害	
2.1 減災のプロセスとコミュニティ活動の重要性	減災対策を進めるために必要な4つのプロセスとコミュニティの関係について記述
2.2 自助・共助・公助の概念	自助・共助・公助の概念が生まれた経緯と、それぞれの内容、連携の重要性を記述
2.3 個人・地域・行政の役割	自助・共助・公助と関連させて、個人・地域・行政のそれぞれの役割を記述
2.4 FHMの役割	減災対策を進める上でのFHMの役割を記述
2.5 FHMの種類	データの整備状況に応じた7種類のFHMの分類とそれぞれの特徴・利用方法について記述
3. FHMを用いた減災の取組み（具体例を記載）	
4. FHMの作成方法	
4.1 浸水想定区域の把握方法	痕跡水位を用いた浸水想定区域図の推定方法を記述
4.2 FHMに記載する情報	FHMに記載する情報の種類と、浸水情報、避難情報、生活関連情報について留意点を記述

模の洪水は、リスクを共有した後に「仮にもっと規模が大きい場合」として提示する際に有用である。FHMは、計画規模の洪水のシミュレーションによるものだけとせず、用途に応じて、適切なマップを用いることを記述する。

- 3) コミュニティベースの取組みは、住民が自らリスクを知りたいと思い、リスクを理解し、リスクを回避、さらには周囲の人を助ける方法を考えることが重要であることを記述する。
- 4) コミュニティベースの取組は、住民だけでは進まない。適切にきっかけを作るなど行政がコミュニティの活動を活性化する支援を行うことが必要である。住民・地域・行政のそれぞれの役割を記述する。
- 5) 和歌山県串本町大水崎地区では、津波ハザードマップの結果から住民自ら津波避難路を設置し、後に町が階段を整備している¹⁾。この活動は後に『平成16年度防災功労者総

理大臣表彰』を受賞している。洪水に限らず、このような危機感が大きい他の災害のハザードマップ活用事例についても参考となる事例は掲載する。

なお、今回作成したガイドラインは、ICHARMが2009年度から実施を計画しているJICA研修「洪水ハザードマップを用いた地域防災計画」においてもテキストとして活用した。

3.4 おわりに

本研究により得られた成果は下記の通りである。

- 1) JICA研修の研修生ならびにセミナー参加者へのヒアリング調査から、各国で作成可能なFHMのレベルや目標レベルについて都市や流域ごとに異なることがわかった。
- 2) 発展途上国では（都市や流域によるが）、氾濫計算技術やGISソフトを扱う技術を要するマップレベルでも作成可能と回答をしており、これらの技術を持ち合わせていることがわかった。
- 3) また、ガイドライン改善に関する今後の課題として各国においては、流域や都市毎にデータの精度やハザードマップの必要性が異なるため、その地域のデータ整備状況や活用方法を詳細に把握した上で、ハザードマップ利活用のための具体的方策を検討し、それをガイドラインに反映する必要がある。改良したガイドラインもまだ充分であるとは考え難い。今後は、今回ヒアリング対象に含まれなかった発展途上国も対象とし、更なるヒアリング調査を行い、その結果をガイドラインへ反映する必要がある。また、研修の参加者のみに提供するだけでなく、研修生以外からも幅広く意見を反映させる必要がある。そのためには、ICHARMが事務局を務める国際洪水イニシアチブ(IFI)の繋がりなどを利用して、世界の関係者に広く情報を発信し、発展途上国の洪水対策におけるFHMのあり方について互いに意見聴取を行うことが必要である。

4. 人工衛星情報等を活用した洪水予警報のための基盤システム開発に関する研究

4.1 はじめに

近年、世界的に洪水による災害が増加しており、河川整備が十分に進んでいない発展途上国においては、その被害軽減のために、予警報システムの配備が求められている。しかしながらこれらの国々においては、洪水予測の際に必要な雨量や流量といった基礎的な水文データが不足しており、河道の整備計画の策定や洪水予警報の配備が十分には進んでいない現状にある。

このような状況の中で、近年、人工衛星から地球上の雨量を観測する技術が開発されるとともに、観測結果がインターネット等を通じて公表されつつある。本研究では、発展途上国など水文情報が乏しい地域での洪水被害軽減を目指し、洪水予警報システムの整備に関し、この人工衛星から観測された雨量データを用いた洪水予測システムの開発を行った。主な研究内容は、人工衛星で観測された雨量の精度検証やその精度向上に関する研究と、これを用いた洪水予測システムの開発である。

4.2 人工衛星雨量データの補正方法

人工衛星降雨データの中でも比較的高分解能である GSMaP_MVK+¹²⁾ (マイクロ波放射計データと赤外雲移動ベクトルを用いた時間分解能 1 時間、空間解像度 0.1 度のプロダクト、観測されたすべてのマイクロ波放射計データを用いて、雲のベクトル情報などで外挿し、カルマンフィルタで時間補正することによって降水量を推定した値を含むプロダクト) と地上雨量観測データ (以下、地上降雨) との関係性については、既往の研究¹³⁾により MVK+の方が過小評価傾向であることが報告されている。しかしその原因については不明な点が多く、かつその関係性が一律ではないことが補正を困難にしている一因ともなっている。GSMaP_MVK+は 2003～2006 年と、GSMaP_NRT (複数の衛星を利用して、世界の雨分布を準リアルタイム (観測から約 4 時間遅れ) で 1 時間ごとに作成されたプロダクト) は 2008 年 12 月以降と、存在するデータの期間が異なるため、洪水があった年で適用するデータを選択している。

GSMaP_NRT は限られた情報だけで 4 時間で提供する準リアルタイムデータであり、GSMaP_MVK+は、衛星観測情報を追加して再度作成した衛星雨量プロダクトであるため、一般的に GSMaP_MVK+の方が精度が良いと考えられるが、共通した期間のデータが存在しないため、同じ期間で精度の比較はできない。

そこでまず、MVK+データの提供期間 (2003 年 1 月～2006 年 12 月) 内である 2004 年に台風による豪雨が多く、かつ地上観測施設が比較的密に配置 (1 箇所/59km²) されている吉野川流域 (流域面積 = 3,750km²、**図-4.1**) を対象流域として MVK+と地上降雨の関係性を検討した。MVK+と地上降雨の比較方法としては、地上降雨量データが有している地形や高度の違いによる観測誤差の影響を最小限にするために、ティーセン法による流域平均雨量での検証を行うものとした。

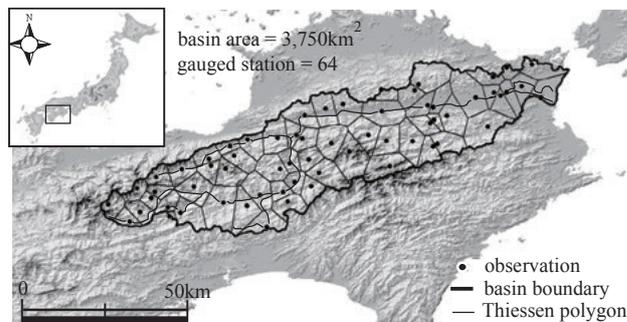


図-4.1 対象流域ティーセン分割図 (吉野川流域)

表-4.1 降雨イベント一覧表

Event No	start date (UTC+9)	max (mm/h)	total (mm)	period (h)
No.1	2003/5/30 7:00	15.0	141.2	48
No.2	2004/6/19 14:00	16.3	152.8	49
No.3	2004/7/31 0:00	18.5	188.6	24
No.4	2004/8/17 18:00	14.5	246.1	67
No.5	2004/8/30 2:00	29.7	251.7	34
No.6	2004/9/28 12:00	27.7	237.8	40
No.7	2004/10/19 0:00	45.9	392.7	51
No.8	2004/9/6 0:00	16.0	176.1	47
No.9	2004/7/31 22:00	15.6	314.4	46

表-4.1 に降雨イベント一覧表を示す。選定したイベントは 9 イベントであり、一連降雨ごとに地上降雨の最大時間雨量、総雨量、降雨継続時間を示す。

地上降雨及び MVK+ともに 1 時間単位での時間分解能を有しているが、前述した地上降雨の観測誤差や MVK+の時間分解能誤差 (マイクロ波放射計データの観測は約 3 時間ピッチ、それ以外は補間)

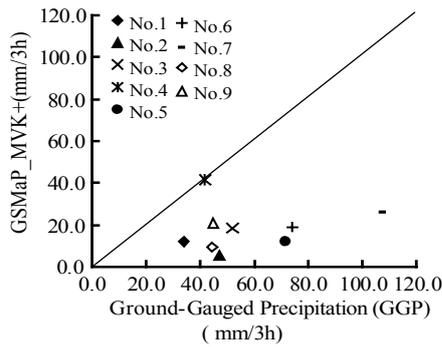


図-4.2 地上降雨-MVK+の関係 (3時間累加降雨)

を考慮し、3時間累加時間における評価を実施した。図-4.2に3時間累加降雨における比較結果を示す。図中のプロットは各降雨イベントのピーク3時間累加降雨を抽出しており、降雨量の多い場合の地上降雨とMVK+(3h)の関係性を示したものである。これによると3時間累加降雨と比較した場合でも概ね過小評価傾向であることがわかる。しかし、この中ではNo.4のように必ずしも過小評価でないイベントも存在し、そのことがMVK+の補正を困難とさせている。

その違いの要因の一つとして、前線性降雨と台風性降雨の違いが考えられる。No.4は前線性降雨であるのに対し、他のイベントは台風性降雨であった。そこで誤差率ε(式(4.1))と風速について調べた(図-4.3(a))。台風による降雨時には地形性降雨が発生している可能性がある。過小評価の要因が地形性降雨であるとする、誤差率εと風速に相关性があると考え調べた結果、誤差率εと風速は比例することがわかった。

$$\varepsilon(\%) = \frac{R_{obs}(n) - R_{sat}(n)}{R_{obs}(n)} \times 100 \quad (4.1)$$

- $R_{obs}(n)$: average basin rainfall based on GGP (mm/kh)
- $R_{sat}(n)$: average basin rainfall based on GSMaP_MVK+ (mm/kh)
- n : number of rainfall events ($n = 9$)
- k : time period (h), here, $k = 3$

また、誤差率εとMVK+(3h)の流域内における標準偏差との関係について調べた(図-4.3(b))。一般的に、台風性降雨の場合には前線性降雨の場合に比べ時間降雨量よりも日単位降雨量が強くなる傾向がある¹⁴⁾。つまり短時間降雨が卓越するような変化の著しい降雨量の変化はない。加えて降雨域の移動が著しいことから、広範囲で同等の降雨量が持続すると考えられる。グリッド単位で求められる

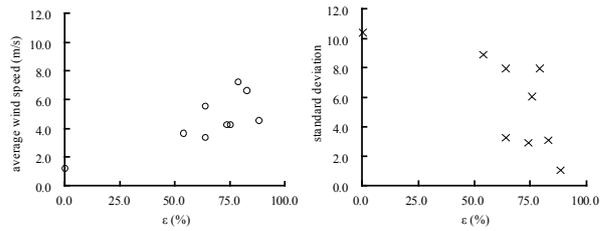


図-4.3 (a) 誤差率ε-風速関係(左), (b) 誤差率ε-標準偏差(右)

MVK+(3h)を吉野川流域に含まれる全グリッド数、35グリッドをサンプルとして標準偏差を求め、その値が小さい場合は流域内で同程度のMVK+(3h)が算定されていることから、台風性降雨である可能性が高い。その結果、図-4.3(b)に示すように誤差率εとMVK+(3h)標準偏差には反比例の関係があることがわかった。

上記を踏まえ、対象とするグリッドとその周囲のグリッドにおける累加雨量との差によって降雨量の分布を表現し、その差が大きければ雨域があまり動かない前線性降雨であり、逆の場合は雨域の移動が速い台風性降雨であることを表現できるモデルを考案した。この指標ではMVK+のみを使って、各グリッド別に台風性降雨・前線性降雨の判定を行うことができるという特徴がある。

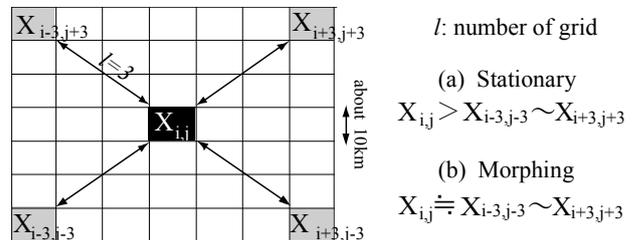


図-4.4 MVK+を用いた補正手法の概念図

このモデルによる補正手法の概念図を図-4.4に示す。式(4.2)、(4.3)に示すように累加雨量 X_{ij} をもとに周囲とのグリッド $X_{i\pm 3, j\pm 3}$ との二乗誤差をとり、平均したものを S_n^2 とした。ここで二乗誤差をとるグリッドの選定は主に低緯度及び中緯度での台風の経路を参考にし”X”パターンとした。また台風の移動速度はおよそ10~100km/hと変動幅が大きい¹⁵⁾ため、約30km/3hと仮定し、3時間で雨域が移動する距離として3メッシュ分x、y方向に離れたグリッド間で二乗誤差をとることとした。また流域平均した S_n を S_n と定義した(式(4.4))。これは雨域のスケールが10km程度の積乱雲から1,000km程度の中規模擾乱まで広がるものまで存在し、1グリッドだ

けでは雨域の移動を判別できない可能性がある理由による。

$\overline{S_n}$ については、式(4.5)に示す変数 m_j を定義し、 $\overline{S_n}$ と m_j の関係を検討した。

吉野川流域において $\overline{S_n}$ - m_j 関係を作成した (図-4.5)。No.4 のような停滞性降雨の場合には、 $\overline{S_n}$ は大きく、 m_j は小さくなる傾向がある。逆に No.3 のような移動性降雨の場合には逆の傾向を示す。その結果、 $\overline{S_n}$ - m_j 関係は一つの曲線で表現され累加時間 3 時間の時 ($k=3$ の時) に、 $\alpha=-2.7425$ 、 $\beta=6.2042$ 、 $R^2=0.848$ を示す。

$$X_{i,j} = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k x_{i,j}(t) \quad (4.2)$$

$$S_n^2 = \frac{1}{4} \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 (X_{i,j} - X_{i+6x-3,j+6y-3})^2 \quad (4.3)$$

$$\overline{S_n}(n) = \frac{1}{f} \sum_{r=1}^f S_n(f) \quad (4.4)$$

$$R_{obs}(n) = m_j \times R_{sat}(n) \quad (4.5)$$

- $x_{i,j}(t)$: GSMaP_MVK+ rainfall at time t (mm/h)
- $X_{i,j}$: k -hour total rainfall in grid $x_{i,j}$ (mm/h)
- k : time period (h), here, $k=3$
- S_n : GSMaP_MVK+ morphing index (mm/h)
- $\overline{S_n}$: average of S_n in the selected basin
- f : number of the grids in the selected basin
- m_j : correction rate of MVK+ to GDP

また、式(4.6)にて MVK+(3h)を補正した結果、図-4.6 のようになり補正前に平均誤差率が 64.8%であったのに対し、18.7%まで低減させることができた。

$$\begin{aligned} R_{cor}(n) &= R_{sat}(n) \times 8.6 & \overline{S_n}(n) &\leq 0.5 \\ R_{cor}(n) &= R_{sat}(n) \times \left[-\alpha \ln(\overline{S_n}(n)) + \beta \right] & 0.5 < \overline{S_n}(n) &\leq 6.5 \\ R_{cor}(n) &= R_{sat}(n) \times 1.0 & \overline{S_n}(n) &> 6.5 \end{aligned} \quad (4.6)$$

$R_{cor}(n)$: corrected average rainfall (mm/kh) in a selected basin

k : time period (h) here, $k=3$; $\alpha = -2.7425$, $\beta = 6.2042$

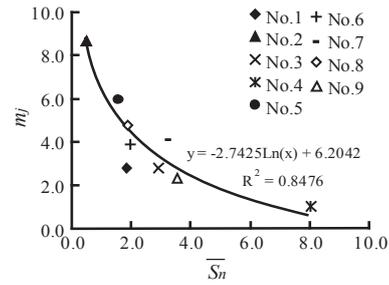


図-4.5 $\overline{S_n}$ - m_j 関係 (吉野川流域)

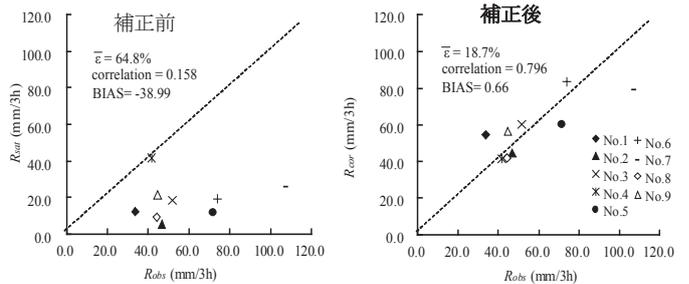


図-4.6 提案した補正式による MVK+(3h) 補正結果 (吉野川流域)

ケーススタディで算定した $\overline{S_n}$ - m_j 関係の適用性を検証した。式(4.2)～(4.6)で示される補正式は台風性降雨と前線性降雨を $\overline{S_n}$ で判別し補正を行う式であるため、台風性降雨事例として吉野川流域の 2005 年 9 月 4 日～7 日に発生した台風 14 号による 30mm/3h 以上の一連降雨 5 イベント、前線性降雨事例として川内川流域の 2004 年 9 月台風 18 号と 2006 年 7 月梅雨前線からそれぞれ 30mm/3h 以上の一連降雨 3 および 8 イベントを抽出した。

吉野川について図-4.7(a)左上に補正前の地上降雨-MVK+(3h)関係、右上に補正後の結果を示す。補正の結果、誤差率は 84.0%から 20.2%まで低減した。

川内川について図-4.7(b)左下に補正前の地上降雨-MVK+(3h)関係、右下に補正後の結果を示す。プロットは台風性降雨と前線性降雨で区分している。その結果、台風性のイベントの誤差率は平均 75.5%から補正により平均 44.3%となり過大評価傾向になったものの、誤差率の絶対値は小さくなった。また前線性のイベントの誤差率は平均 36.4%から補正により平均 10.0%まで低減した。また、台風性に比べて前線性では補正式による修正率が小さかった。これらの結果から補正式によって降雨タイプ (台風性、前線性) の違いを表すことができ、自律的に補正倍率を変化させるとともに、吉野川流域で算出し

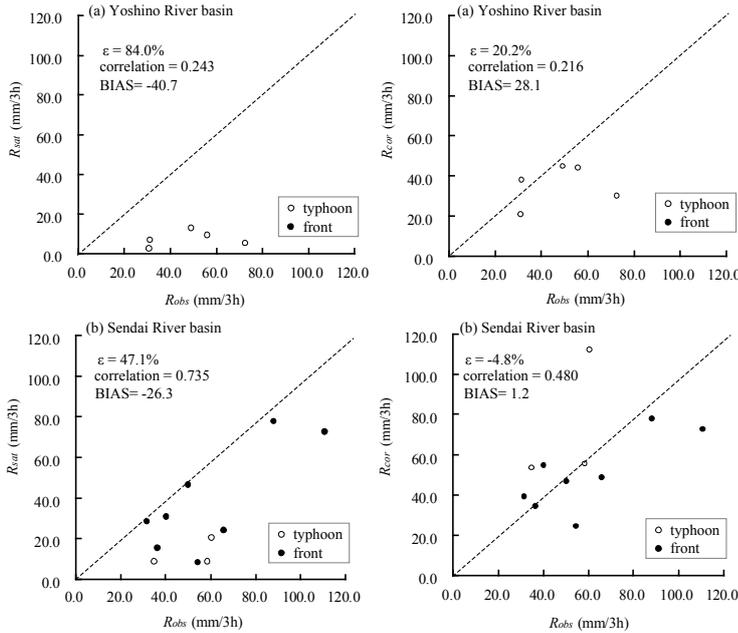


図-4.7 補正検証結果(上：吉野川流域、下：川内川流域)

た補正式及び $\alpha \cdot \beta$ の値は他の流域に適用しても誤差を小さくできることが確認できた。

4.3 総合洪水解析システム(IFAS)の改良

本研究では、水文データの乏しい地域において、迅速かつ効率的に洪水予警報システムの構築が可能となるよう、人工衛星雨量データ等を活用した総合解析システム(IFAS)の開発を行っている。当初、(社)国際建設技術協会および民間企業8社(建設技術研究所、日本工営、パシフィックコンサルタンツ、八千代エンジニアリング、建設技研インターナショナル、東京建設コンサルタント、いであ、ニュージェック、国際航業)との共同研究により、人工衛星観測雨量の取り込みから、流出解析モデルの作成、流出計算の実施、結果表示までの一連の機能を備えた Ver1 の開発を行った¹⁶⁾。これに、前述の衛星観測雨量の補正機能の実装に加えて、他の降雨プロダクトの読み込み機能の追加、流出解析エンジンの追加、汎用地理情報システムへの出力機能の追加等を行い Ver1.2 として開発した。また、発展途上国での洪水予警報システムの整備促進に直接貢献するため、途上国技術者向けに衛星観測雨量の概要や IFAS の操作に関する研修を実施した。

以下に、主な改良機能や、研修の状況について示す。

①読み込み可能な降雨プロダクトの追加

IFAS で読み込み可能な衛星観測雨量プロダクトを表-4.2 に示す。JAXA の空間解像度：0.1 度、時間解像度：1 時間、配信までの時間遅れ：4 時間という高解像度準リアルタイムデータ(GSMaP_NRT)に加え、米国 NOAA の Cmorph、Qmorph、を読み込む機能を追加した。また、衛星雨量の配信遅れに対応するため、気象庁による全球数値予報モデル(GSM)による GPV 気象予報データを衛星観測雨量とあわせて計算に利用する機能を追加した。

②補正機能の追加

GSMaP については、前述した自己補正機能を追加実装した。他のいかなる外部データを必要としないことから、雨量データを取り込む際に自動的に補正処理を行うことが可能である。

③ロード機能の追加

モデルの作成の際に必要な DEM、土地利用等のグローバル GIS データについて、インターネットを通じてダウンロードする機能の追加を行った。また衛星観測雨量についても、インターネットを通じてダウンロードおよびファイルの解凍を可能とした。

④BTOP モデルの追加

IFAS Ver1 では、デフォルトの流出解析モデルとして土木研究所で開発された「土研分布型流出解析モデル (PDHM) Ver2¹⁷⁾」のみを実装していたが、山梨大学を中心に開発された「BTOP モデル¹⁸⁾」を追加した。但し、両システムは現状では一体化していないため、ユーザーは使うエンジンに応じて IFAS-PDHM もしくは IFAS 利用するシステムを使い分ける必要がある。

⑤汎用地理情報システムへの出力機能の追加

計算結果について、利用者が認識しやすいように汎用地理情報システム(現状では Google Earth)への出力機能を実装した。出力項目については、「雨量」、

表-4.2 IFAS で読み込み可能な衛星降雨プロダクト

Product name	3B42RT	CMORPH	Q MORPH	GSMaP
Builder	NASA/GSFC	NOAA/CPC	NOAA/CPC	JAXA/EORC
Coverage	60N~60S			
Spatial resolution	0.25°	0.25°	0.25°	0.1°
Time resolution	3hours	3hours	30minutes	1hour
Delay of delivery	10hours	15hours	2.5hours	4hours
Coordinate system	WGS			
Data archive	Dec. 1997~	Dec. 2002~	Recent 2days	Dec.2007~
Data source	TRMM/TMI Aqua/AMSR-E AMSU-B DMSP/SSM/I IR	Aqua/AMSR-E AMSU-B DMSP/SSM/I TRMM/TMI IR		TRMM/TMI Aqua/AMSR-E ADEOS-II/AMSR SSM/I IR AMSU-B

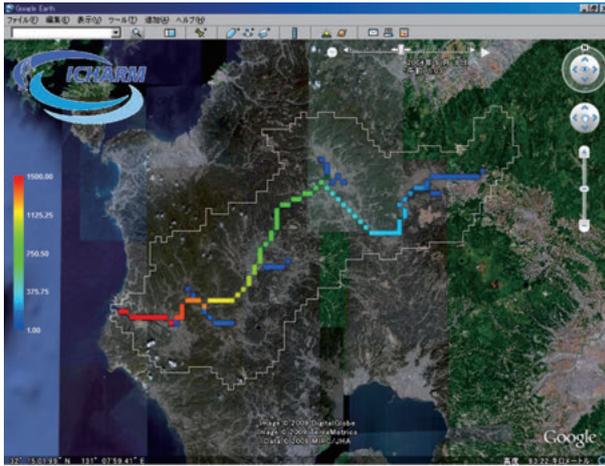


図-4.8 汎用地理情報システムへの出力例
(川内川流量)

“上段タンク水位”、“上段タンクからの流出量”、“下段タンク水位”、“上段タンクからの流出量”、“河道流量”、“上段タンクから下段タンクへの浸透量”の7項目を選択でき、KMLファイルが出力される(図-4.8)。

⑥その他の改良内容

上記の改良に加え、利用者の意見等を踏まえ以下のような改良もあわせて実施した。

- I. 対象地域選択機能の追加: 緯度経度からだけでなく、地図上から選択できる機能の追加。
- II. 処理速度の向上: 図面表示を高速化した。他にも不必要な処理や効率の悪いプログラムについての改良。
- III. 操作画面レイアウトの統一。
- IV. 衛星観測雨量の欠測および異常値を自動検出する機能や置換・補填機能の追加。
- V. HPからのダウンロード機能: 開発した実行形式プログラムとマニュアルのICHARMのHPからの無償ダウンロード。

4.4 普及活動

人工衛星観測雨量の有効性やIFASの普及を図るため、世界気象機関(WMO)の協力を得ながら国際洪水ネットワーク(IFNet)と共同で、アルゼンチン、エチオピア、キューバ、グアテマラ、ザンビア、ネパール、バングラデシュの7カ国から7名の参加者を招き2008年10月3日から8日にかけて衛星観測雨量を利用した洪水予警報システムの構築に関するトレーニングワークショップを開催した。参加者は研

修後、自国の過去の観測結果を用いて衛星観測雨量や補正方法の検証を行うとともに、IFASによる流出計算を行いその検証を行っていく予定である。

トレーニング後の参加者の評価を聞いたところ、地上観測雨量を用いずに衛星観測雨量を一次補正することで、洪水解析・予測に対する衛星雨量の利用性を高めた点や、流出解析モデル構築作業を大幅に簡便化できるGIS解析用の内部実装ツール等について、高い評価を得た。

4.5 おわりに

本研究では、水文情報が乏しい地域において洪水予警報システムの配備につながるよう、その基盤となる洪水予測システムの開発を行った。まず、洪水予測に不可欠であるリアルタイム観測雨量について、従来の地上観測雨量に代わり人工衛星によって観測された雨量データを用いるとともに、その精度検証や精度向上のための補正機能の開発を行った。またあわせて人工衛星観測雨量を利用するとともに汎用GISデータを用いて流出解析モデルの作成が可能な総合洪水解析システム(IFAS)の開発を行った。作成したシステムについては、研修等を行い、普及を図るとともにホームページからもダウンロードできるようにした。このように、人工衛星観測雨量を用いたIFASを利用することにより、インターネットに接続できるパーソナルコンピューターさえあれば流出計算を行うことが可能となり、迅速かつ効率的に洪水予警報システムを構築することができる。

本研究から得られた結果のまとめを次に示す。

- 1) 吉野川流域における3時間累加雨量(強雨イベント)でMVK+と地上降雨との比較を行い、過小評価傾向である一因が台風性降雨であることを確認した。
- 2) 台風性降雨の特性はMVK+(3h)の降雨量の分布変化に関係し、それを表現することのできる S_n という指標を開発した。
- 3) S_n (流域平均した S_n)と補正倍率 m_j との間に一義的な関係性があることから補正式を提案した。
- 4) 吉野川流域で算出した補正式を、同流域別期間及び川内川流域に適用した結果、ほぼ適用性が確認できた。

なお、この手法は強い降雨のみに適用可能であることと本格的な利用のためにGSMaP_NRT(準リアルタイムバージョン)での検証が必要である。

5. 水文情報の乏しい地域における人工衛星雨量情報の現地利活用に関する研究

5.1 はじめに

近年、世界的に洪水による災害が増加しており、河川整備が十分に進んでいない発展途上国においては、その被害軽減のために、予警報システムの配備が求められている。しかしながらこれらの国々においては、洪水予測の際に必要な雨量や流量といった基礎的な水文データが不足しており、洪水予警報の配備が十分には進んでいない現状にある。このような状況の中で近年、人工衛星から地球上の雨量を観測する技術が開発されるとともに、観測結果がインターネット等を通じて公表されつつある。

ICHARM ではこれまでに、これら水文情報が乏しい地域での洪水予警報システムの整備に向け、人工衛星観測雨量を洪水予測に用いるための補正手法¹⁹⁾や、それを実装し人工衛星観測雨量を用いた洪水予測システム構築の基盤ツールとなる総合洪水解析システム(Integrated Flood Analysis System, IFAS)を開発してきた。

本研究では、「人工衛星情報等を活用した洪水予警報のための基盤システム開発に関する研究」で開発した人工衛星観測雨量補正手法の精度向上や現地状況に応じたシステム改良を行う。インドネシア、台湾、パキスタンで地上観測雨量を収集し、人工衛星観測雨量補正手法の精度検証や精度を向上させるための新たな補正手法について検討を行った。またインドネシア国ソロ川を対象とし、IFAS 導入後の運用を現地職員が行えるようワークショップを開催し、技術力向上を図るとともに、IFAS の改良を行った。

5.2 衛星観測雨量の世界各国での精度・不確実性評価

本研究では衛星観測雨量として GSMaP を利用している。GSMaP には複数の種類のプロダクトがあり、中でも準リアルタイム版の GSMaP_NRT²⁰⁾(マイクロ波放射計データと赤外雲移動ベクトルを用いた時間分解能 1 時間、空間解像度 0.1 度の準リアルタイムプロダクト、観測後 3 時間以内に得られたマイクロ波放射計データに雲のベクトル情報などを外挿することによって降水量を推定した値を含むプロダクト)は、配信時間遅れが比較的 4 時間と短いことか

ら、雨量観測所が乏しい開発途上国河川流域における洪水予警報への適用が期待されている。

まず、日本のような台風性降雨や前線性降雨とは異なる降雨特性を持つ地域として、対流性降雨によって雨季に洪水被害が頻発しているインドネシアのジャワ島中央部に位置する、流域面積 16,000 km² のソロ川流域を選定した (図-5.1)。



図-5.1 ジャワ島中央部に位置するソロ川流域位置図

流域内には合計 129 箇所の観測所が設置されている。2007 年 12 月～2009 年 12 月の衛星雨量と地上観測雨量を流域平均雨量について比較したものを図-5.2 に示す。ソロ川は、1 時間ごとに観測された雨量データが乏しいため、日雨量データで比較している。約 20mm/day 以下の弱雨については過大～過小評価のものが混在しているが、20mm/day 以上の強雨については過小評価傾向にある。本研究は洪水をもたらす豪雨を対象にしているため、BBWS Bengawan Solo が毎年発行している洪水レポート「LAPORAN PELAKSANAAN PIKET BANJIR」を参考に、対象流域内で実際に洪水被害が生じた降雨日のデータのみ抽出し、その相関関係を用いて GSMaP 補正式を作成した (図-5.3)。補正式は、4.2 で開発された補正手法を用いているが、適用した回帰式は、日本のものより合致する式を選定している。補正前後の GSMaP_NRT と地上雨量との関係を示したものが図-5.4 である。これよりほとんどの洪水イベントについて適切に補正できたことがわかる。しかし、この補正手法は本来、地形性降雨を対象とした補正手法であり、それをここでは対象流域全体に対して適用しているため、地形性降雨が発生しない地域についても補正を行なっている状態である。そのため数百 km² スケールで評価すると意図しない補正がされている地域も想定されるが、流域平均日雨量で見れば降水量の推定が可能であるといえる。

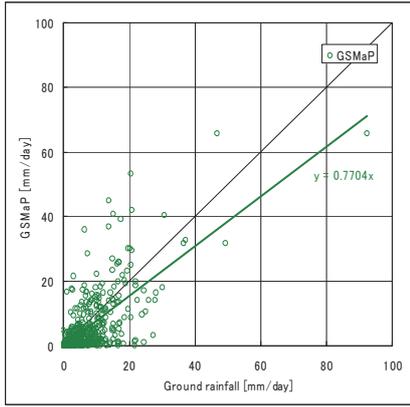


図-5.2 地上雨量と GSMaP_NRT [mm/day] の関係 (流域平均雨量)

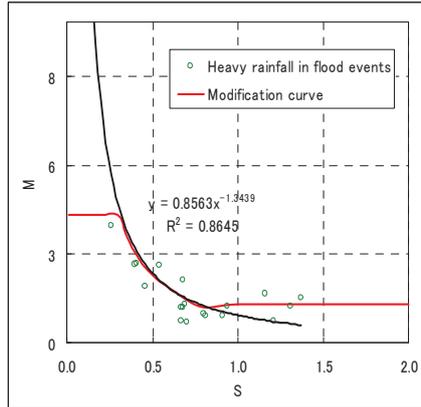


図-5.3 雨域移動指標”S”と 補正係数”M”の関係

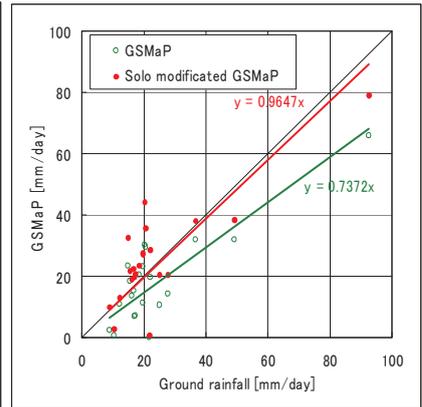


図-5.4 地上雨量と GSMaP_NRT [mm/day] の関係 (流域平均雨量)

次に台風性降雨で検討する。対象域は台湾全土(流域面積：36,180km²)で、対象降雨イベントは2009年8月に台湾で700名以上の死者・行方不明者を出した台風「Morakot」の豪雨であり、台風上陸から通過するまでの88時間分の時間雨量データである。なお、検証に利用した衛星降雨データはJAXAが配信している準リアルタイム時間雨量データ：GSMaP_NRTとした。

図-5.5に地上観測雨量、GSMaP_NRT、日本の吉野川流域の降雨データを用いて作成した補正式(以下、日本式)による補正雨量および台湾の降雨データを用いて作成した補正式(以下、台湾式)による補正雨量のハイエトグラフを示す。雨量値はすべて台湾全土について空間平均した雨量を示している。

また図中には、マイクロ波放射計による観測がされた時刻(図中黄色○)およびマイクロ波放射計による観測からの経過時間(図中緑○、緑○が長く連なればその時間数分マイクロ波放射計による観測が行なわれていないことを示す。)を併記している。図より、地上雨量に対してGSMaP_NRTは過小評価傾向にあることがわかる。また、日本式および台湾式の補正雨量は、マイクロ波放射計による観測がある程度の頻度で行なわれている期間については良好に補正されている。しかし、GSMaP_NRTは、マイクロ波放射計による観測が行なわれない期間において、赤外放射計の観測により得られる雲移動ベクトルを用いて降雨分布を移流させる補間方法をとっているため、マイクロ波放射計による観測が長時間(例えば10時間以上)行なわれない場合、それだけ実際の雨域分布状況とGSMaP_NRTの雨域分布状況の乖離が大きくなる可能性がある。その場合、図

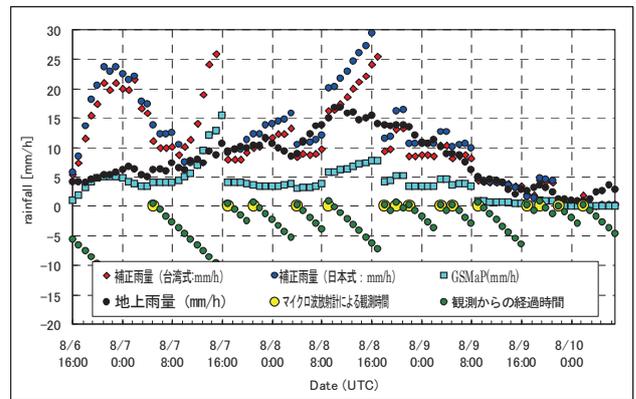


図-5.5 地上雨量、GSMaP、補正雨量(日本式、台湾式)ハイエトグラフおよびマイクロ波放射計による観測状況

図-5.5のように実際の雨域分布状況を全く反映していない雨域分布について補正を実施することで、8月6日17時～4時ごろや8月7日8時～15時ごろ、8月8日10時～17時頃のように過大な補正雨量を算定してしまう。したがって、実運用のためには、マイクロ波放射計による観測が長期間行われていない場合のGSMaP雨量値および補正手法の取り扱いについて、別途検討する必要がある。

次にインダス川支流のカブール川流域(流域面積：92,605km²) (図-5.6)で、モンスーン特有の豪雨について検討する。インダス流域では2010年7月末から8月にかけて死者数約2,000名の甚大な洪水被害が発生している。対象降雨はこの洪水期間中で最も降雨量が多かった7月27日から31日の5日間の日雨量であり、パキスタン気象局(PMD)により公開されている地上雨量計7箇所を用いた流域平均雨量値についてGSMaP_NRTと比較した。

図-5.7に示すように、GSMaP_NRTおよびその補正值は、地上雨量と比較した場合にはかなり過小



図-5.6 カブール川位置図

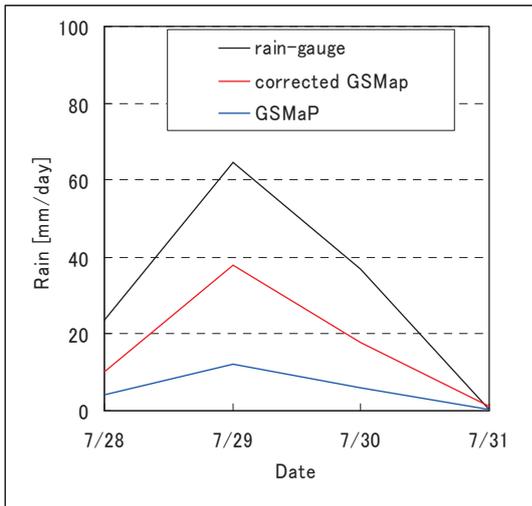


図-5.7 地上雨量、GSMap、補正 GSMap による流域平均雨量の比較

傾向にある。しかし、この検討では 92,605km²に地上雨量観測所が 7 箇所のみであるため、地上雨量値にも多くの誤差があることに留意する必要がある。

また、GSMap_NRT はインダス川上流域の広範囲において欠測域が存在していることが判明した。これは、GSMap_NRT には固体降水の変換アルゴリズムを持っていないため、雨として再現していないことに起因している。さらに、世界のデータで当該欠測についてみたところ、高標高部の降雪については欠測扱いとなっており、寒冷地域では広範囲で降水量を観測することができていないことがわかった。

5.3 地上雨量と衛星雨量の合成手法の開発

地上雨量と衛星雨量の合成（以下、衛星地上雨量合成）はレーダー雨量の地上雨量補正と同じ概念で実施できる。しかし、日雨量ごとに地上雨量を用いて衛星雨量を補正する場合、前述したようにマイクロ波放射計による観測頻度に伴う誤差が大きくなることが想定される。そのため、本研究では衛星雨量データがマイクロ波放射計により観測された時刻を対象に、地上時間雨量との合成手法について検討する。また、合成する場合、精度は地上雨量観測所の設置密度に大きく依存する。そこで、地上雨量整備をどの程度進めれば衛星雨量の精度が向上するか定量的に把握するため、地上雨量観測所の設置密度と衛星地上合成雨量の精度について検討する。

一般に衛星地上雨量合成にはレーダー雨量の地上雨量補正技術が応用できる。例えば、日本で採用されているダイナミックウィンドウ法や Cokriging 法、距離重み法（IDW: Inverse Distance Weighted interpolation）などがある。水文情報（特に地上雨量データ）の乏しい地域において地上雨量補正を実施する場合、密な地上雨量データを利用するダイナミックウィンドウ法は適用できない。また、Cokriging 法は複数の地上雨量データから空間相関を見出し、それと衛星雨量の空間相関、それらの組み合わせを用いて降雨分布を推定するが、雨量観測所数が少ないと地上雨量の空間相関が求められない場合が出てくる。一方、IDW 法は Cokriging のような空間相関を利用しないため一般的には精度は劣ると言われているが、雨量観測所数に依存せず常に補正が実施でき補正の際の制約がない。以上の理由から、本研究では IDW 法を用いて衛星地上雨量合成を実施し、その合成雨量の精度と地上雨量計の密度との関係について検討する。

地上雨量観測所密度と合成雨量の精度の関係について明らかにするためには時間雨量データが高密度

に整備されている数万 km² スケールの領域が必要であるので、台湾全土（面積：36,180 km²）を対象とする。対象とした時刻は 2009 年 8 月の台風

「Morakot」の豪雨のピーク前（8/7 21:00）、ピーク時（8/8 9:00）、ピーク後（8/9 3:00）、無降雨域を含む後期降雨時（8/9 8:00）の 4 時刻で、いずれも衛星雨量はマイクロ波放射計を用いて推定された雨量である。これら雨量データについて、地上雨量観測所密度をそれぞれ、167 km²、228 km²、400 km²、800 km²、1,000 km²、1,573 km²、2,010 km²、3,000 km²、5,143 km²、12,060 km²、18,090 km²、36,180 km² に 1 カ所となる密度に間引いたものを用意し、この地上雨量データと衛星雨量を合成させた。なお、地上観測所が疎な場合には観測所の雨量値に精度が大きく依存することが想定されるため、ここでは 1 雨量計/3,000 km² 以上に間引いたものについては 3 ケースの配置について検討した。

本研究において採用した合成手法の手順を以下に示す。

- 1) 全ての地上雨量観測所地点において、補正倍率（地上雨量／衛星雨量）を算定する。
- 2) 1)について IDW 法を適用し、対象域全域の補正倍率分布を算定する。補正倍率分布は GSMaP_NRT のメッシュサイズである 0.1 度格子ごとに算定する。
- 3) 2)で求められた補正倍率分布を衛星雨量生値に乗じて、衛星地上合成雨量を算定する。

衛星地上雨量合成は GSMaP_NRT、3B42RT、CMORPH の 3 つの衛星雨量プロダクトを対象におこなったが、ここでは、配信遅れが最も短い GSMaP_NRT の結果を示す。なお、精度検証において用いた指標は以下の 4 つである。

Error rate（相対誤差） [%] :

$$(R_{sat} - R_{obs}) / R_{obs} \times 100 \tag{5.1}$$

MAE(平均絶対誤差) :

$$\frac{\sum_{i=1}^N |R_{sat} - R_{obs}|}{N} \tag{5.2}$$

RMSE（平均二乗誤差） :

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_{sat} - R_{obs})^2}{N}} \tag{5.3}$$

Coefficient of Efficiency（有効率） :

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^N (R_{sat} - R_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{R}_{obs} - R_{obs})^2} \tag{5.4}$$

ここに、 R_{sat} : 衛星雨量または衛星地上合成雨量、 R_{obs} : グリッド化した地上雨量、 N : 対象地域全体の雨量グリッド数、 \bar{R}_{obs} : 地上雨量の平均値である

図-5.8 に GSMaP_NRT についての地上雨量観測密度と各精度指標の関係を示す。地上雨量観測密度

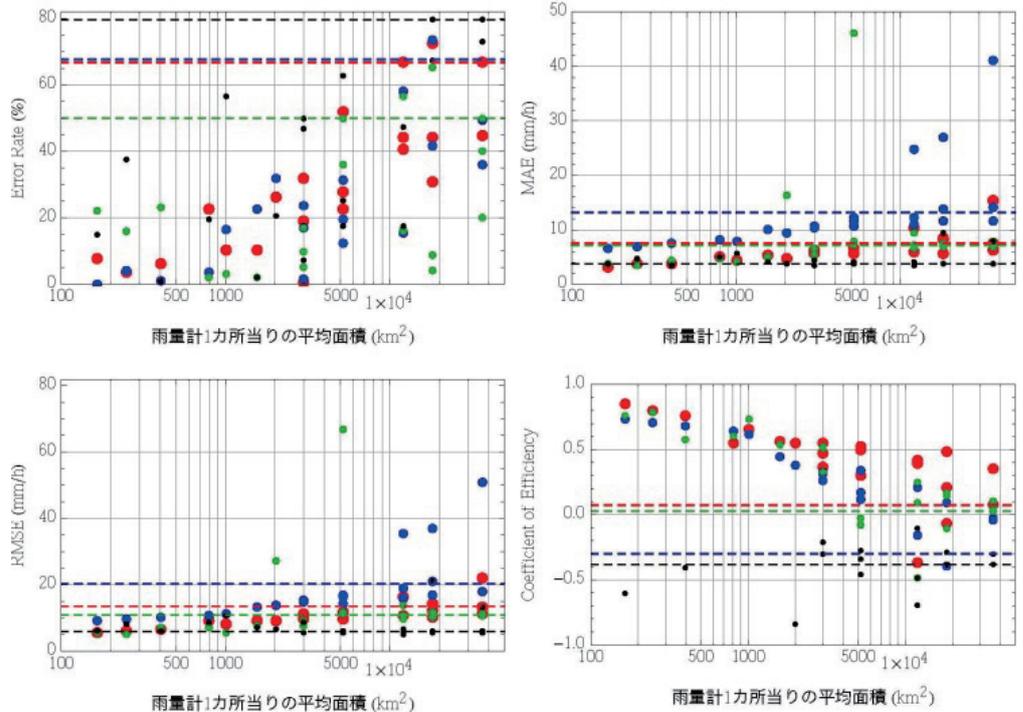


図-5.8 雨量観測密度と各精度指標の関係（GSMaP）

ごとに補正雨量値の精度がプロットされており、色の付いた破線（青、赤、緑、黒）がそれぞれ前述した 8/7 21:00、8/8 9:00、8/9 3:00、8/9 8:00 の 4 時刻に対応した衛星雨量生値の精度を示す。同じ色の線（衛星雨量生値の精度）と点（衛星地上合成雨量の精度）を比較すると、プロダクト・時刻によらず、3,000 km² に 1 ヶ所以上密に地上雨量が整備されている場合には衛星雨量生値よりも衛星地上合成雨量の精度が高いことがわかった。なお、有効率は流出予測モデルの場合、0.7 以上でモデルの再現性が良いとされるものであるが、0.7 以上確保されているのは 228 km² に 1 カ所の密度以上の部分であり、3,000 km² に 1 カ所の密度では 0.2~0.55 程度となった。

5.4 ケーススタディを踏まえた IFAS の改良

インドネシア国ソロ川について、IFAS を用いてソロ川の流出解析モデルを構築した。

このモデルで流出計算を行った結果が、**図-5.9** である。この結果から見ると、日雨量 20mm 以上を用いた改良版補正手法を用いた雨量データで流出計算を行った結果（図中青線）が、洪水の波形を的確に表現している。このことから、洪水予警報のタイミングを的確に捉えることが可能になると考えられる。全体的に流量の値が小さいため、地上雨量計データや、水位流量観測データを活用したフィードバック手法も含む補正手法を今後幅広く検討する必要がある。

ソロ川は、公共事業省ソロ川事務所が管理しており、これまで水位観測情報をもとに洪水予警報を発出している。IFAS は、無料の地形データ、土地利用データを用いて、モデル構築を行い、無料の衛星観測降雨データを用いることとしている。これらの入手のためには、インターネットからダウンロードする必要がある。これまで、無料であるのでインターネット環境さえあれば、開発途上国などの水文情報が十分でな

い流域でもモデル構築および操作が可能になると考え、IFAS の構築を進めてきたが、以下のように想定していなかった環境の制約条件があることがわかった。

- 1) 電力供給が需要に追いついておらず、頻繁に停電する。
- 2) インターネットプロバイダが突然回線を切断する。
- 3) インターネットの回線速度が遅く（ダウンロード 140k bps）、まとまったデータのダウンロードに非常に時間を要する。
- 4) 最新の計算機をそろえるだけの予算が確保できないため計算機資源が古く、IFAS を用いた計算の実行に十分な計算能力と記憶領域を有していない。

いざ、洪水の来襲が予想される段階において、上記 1)~3) の状況が発生した場合、長期間の雨量データダウンロードを一括で行うと、ダウンロードだけに長時間を要し、計算を開始したくても開始できない。このため、普段からこまめにデータをダウンロードする追加モジュール（Auto IFAS）を新たに開発し、こまめに計算をしてアラートを発出するよう改良した。

5.5 おわりに

本研究では、水文情報が乏しい地域に IFAS を導入することを念頭に置き、開発した人工衛星観測雨

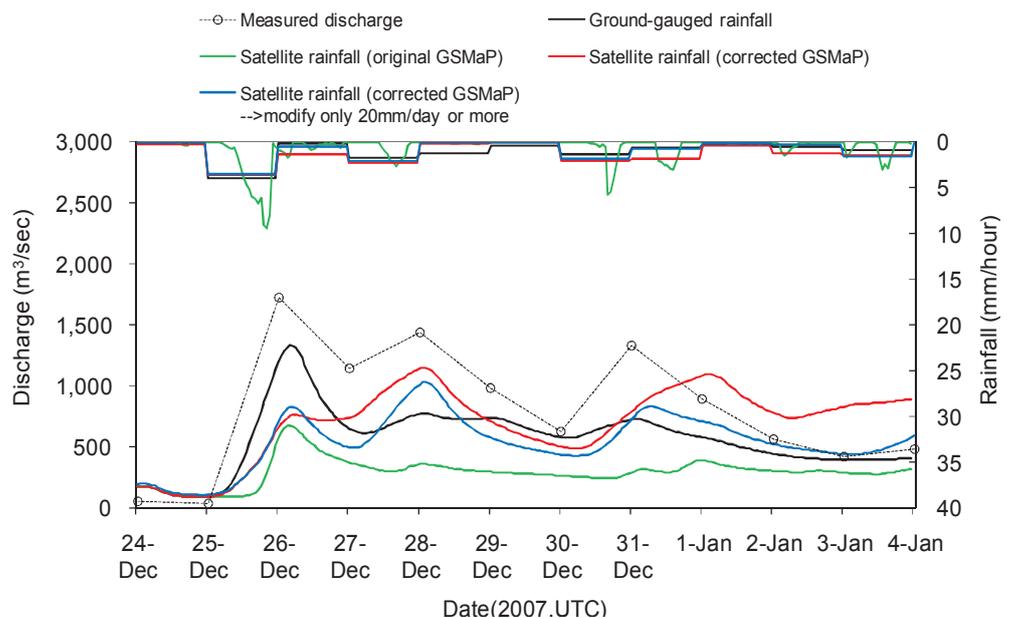


図-5.9 インドネシア国ソロ川 Jurug 地点計算結果

量補正手法の検証及び精度向上を行うとともに、地上雨量を活用した衛星地上雨量合成手法の検討、精度検討を行った。また、IFAS 導入河川としてインドネシア国ソロ川を選定し、現地でのワークショップ開催や意見交換を踏まえて、現地状況に応じたシステム改良を行った。これまでに開発した衛星観測雨量補正手法を海外の河川流域に適用し、現地の観測雨量値を利用し補正式を修正することで、世界各国の地域へ適用するため、精度を向上させた。これまで、流出解析ソフトウェアであった IFAS について、普段からこまめにデータをダウンロードする追加モジュール (Auto IFAS) を追加してデータ取得からアラート発出までに要する時間を大幅に短縮し、現場での予警報システムとしての機能を追加し、IFAS Ver1.3 プロトタイプを完成させた。IFAS Ver1.3 プロトタイプは、IFAS Ver1.2 を基に、自動計算システム、予警報システム、雨データダウンロードを新たに開発している。この予警報システムを構築する際に、既存のものでは、リアルタイム運用時にデータ取得から解析完了まで多大な時間を要し、リアルタイム運用が事実上不可能であったことから、これを可能ならしめるための改良を行ったものである。

この間に得た知見を基に、世界の水文情報が十分でない流域へ展開していきたい。

衛星観測雨量データの精度改善のための補正において、必要とされる地上雨量計のデータ密度が明らかとなったが、検討対象事例や条件 (特に時間スケール) が限定されていることから、追試が必要である。また、今後は GPM 計画等の実現によって、観測頻度は改良される見込みであることから、それに対応して、GPM 計画後の衛星観測雨量データに対応した補正手法を開発していくことが重要である。さらに中長期的視点からは、衛星観測雨量データと予測雨量情報を組み合わせた新しい降雨プロダクトについて研究を進めていくことも必要となる。

IFAS については、これまでのところ降雨-流出過程を再現する流出計算ツールのみが実装されているため、今後は、洪水氾濫などの現象の解析や、水資源管理の共通基盤とするため機能をさらに拡張・充実させていく予定である。

6. 発展途上国における統合洪水解析システムの開発・普及に関する研究

6.1 はじめに

大規模な氾濫を伴う洪水が世界の各地で発生している。2010 年以降でも、パキスタン・インダス川、オーストラリア南東部、ベトナム中部、米国ミシシッピ川など、大規模な洪水が各地で甚大な被害をもたらしている。こうした大規模洪水災害の際には、政府は限られた情報をもとに被害の全容を把握し、住民避難の指示や水工施設の管理を行う。大洪水の被災域を特定するうえで、衛星リモートセンシングによる洪水モニタリングが非常に有効であり、国連衛星利用プログラム (UNOSAT) などの国際機関は、洪水の発生直後から人工衛星による浸水想定域の情報を配信している。ただし、衛星による洪水モニタリングにも撮影頻度や空間解像度などの問題があり、浸水域の拡大傾向を時系列で把握したり、被害に直接関係する浸水深を推定したりすることは現段階では難しい。そこで、衛星による洪水モニタリングを補完する手段として、水文モデルの応用に着目し、全球任意の地域で迅速に水文モデルを展開して、河川流量から洪水氾濫域までを一体的に予測するシステムの開発を進めている²¹⁾²²⁾²³⁾。

河川流量から洪水氾濫までを一体的に解析することができれば、洪水氾濫の可能性を前提とした統合洪水リスク管理 (Integrated Flood Risk Management: IFRM)²⁴⁾ の評価分析にも応用できる。IFRM では、災害発生後の緊急対応に加えて、事前の災害リスク管理にも重点をおく。とくに、氾濫することを想定に入れたうえで、土地利用の規制やハザードマップの策定を進めることが今後ますます重要となる。さらに、各種の対策が、将来予想される気候変動の適応策としてどの程度有効かを評価するためにも、河川流量に加えて洪水被害に直接関係する洪水氾濫に着目することが大切である。

従前の総合洪水解析システムは、降雨-流出解析モデルだった。これに対して新たに、降雨流出と洪水氾濫とを一体的に解析することによって、分布型降雨流出モデルでは再現の難しかった低平地流域での河川流量予測の精度向上も期待できる。これまでの分布型降雨流出モデルでは、地形の情報をもとに流れの方向をあらかじめ決定し、降雨から流出を予測してきた。低平地を含む流域においては、流れの方

向を地形によって定めることが難しく、また、洪水氾濫の影響が河川流量にも大きく影響しているため、従来の分布型降雨流出モデルの適用性に問題があった。流れの方向と流量が各地点の水位勾配によって変化するモデリングを流域全体に展開することが出来れば、浸水の影響を考慮に入れた河川流量の推定も可能となる。

本研究の開発目標である降雨流出氾濫モデル (Rainfall- Runoff-Inundation Model: RRI Model) は、拡散波近似した2次元の浅水方程式を基調とする。ただし、山地から平野までを一体として解析することを目的としているため、降雨流出モデルとしての役割にも重点をおく。従って、従来の同様の氾濫モデル²⁵⁾では対象としなかった山地での地中部の流れや、平野での浸透の影響も考慮することが大切となる。また、大規模洪水発生時の被害状況を迅速に把握することがモデルの目的の一つであるため、モデル適用から実行までの手順が簡単であること、パラメータの数を最小限にとどめることにも留意して開発を進めた。さらに、開発したモデルをインドネシア・ソロ川流域に適用し、降雨流出氾濫現象の再現性を検証した。

6.2 降雨流出氾濫モデル(RRI モデル)の構成

モデルの概要 RRI モデルは、降雨を入力として河川流出から洪水氾濫までを一体的に解析することを目的としたモデルである。図-6.1に示すように、同モデルは対象とする流域を斜面部 (氾濫原を含む) と河道部とに分けて取り扱う。斜面部は50 m から1 km 程度のグリッドセルに分割する。河道グリッドセルにおいては、一つのグリッドセルに河道と斜面の両方が存在することを仮定する。河道はグリッドセルの中央を流れるベクトルとして表現し、上流・下流における河道の接続情報を持つ。降雨は斜面部にのみ入力し、斜面部・河道部でそれぞれ水の挙動を追跡した後に、適当な時間刻みで斜面部と河道部との水のやり取りを計算する。

RRI モデルの3つの特徴を以下に示す。

- 1) 二次元的拡散波近似解析：氾濫原の浸水拡大過程や低平地における降雨流出過程を適切に計算するため平面二次元の解析を行う。浅水方程式を拡散波近似することにより、各グリッドセルにおける流出方向とその流速を周囲グリッドセルの水位によって算定する。

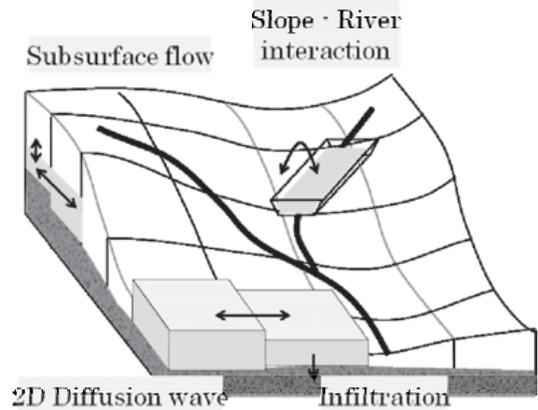


図-6.1 降雨流出氾濫モデルの構成

- 2) 側方地中流、鉛直浸透流の反映：流域からの流出量を計算するうえで、地中の水の流れを再現することが大切である。地中の水の流れは、斜面流下方向の側方地中流が卓越する場合と、鉛直方向の浸透流が卓越する場合とがある。RRI モデルでは、側方地中流については、我が国の山地流域で多くの適用実績がある中間流・表面流を反映する流量流積関係式²⁶⁾を基礎式とする。また、鉛直浸透流については、土質に応じたパラメータ範囲が推定されている Green-Ampt 式を用いる。
- 3) 河道と斜面のインタラクション：流出と氾濫とを一体的に解析するためには、河道と斜面との水のやり取りを適切に再現する必要がある。RRI モデルの河道グリッドセルでは、上下流の水位差によって、拡散波近似に基づき流量と水位を計算する。さらに、河道と斜面の水位差および堤防高に基づいて、両者間の水の流出入を計算する。河道は長方形断面を仮定して、河道幅・深さ・堤防高をパラメータとして形状を規定する。

二次元斜面部モデル RRI モデルの斜面部には、浅水方程式を拡散波近似した式を適用する。基礎となる二次元浅水方程式は以下のように表わせる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial uq_x}{\partial x} + \frac{\partial vq_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w} \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial uq_y}{\partial x} + \frac{\partial vq_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w} \quad (6.3)$$

ここに、 h : 水深、 u, v : x, y 方向の流速、 q_x, q_y : x, y 方向の流量フラックス($q_x = uh, q_y = vh$)、 H : 基準面から自由水面までの高さ、 τ_x, τ_y : x, y 方向のせん断応力、 ρ_w : 水の密度である。右辺第二項は、Manning則を用いて次のように算定する。

$$\frac{\tau_x}{\rho_w} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (6.4)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho_w} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (6.5)$$

ここに、 n : 粗度係数である。RRIモデルが仮定する拡散波近似は、(6.2)、(6.3)式の慣性項(左辺の項)を十分に小さいものとして無視する。さらに、 x 方向と y 方向とを分けることによって、つまり(6.2)、(6.3)式中の v と u をそれぞれ無視することによって以下のように書き換える。

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial x} \right] \quad (6.6)$$

$$q_y = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left[\frac{\partial H}{\partial y} \right] \quad (6.7)$$

RRIモデルはデカルト座標系に基づくグリッドセルモデルであり、(6.1)式の連続式を

$$\frac{\partial h^{i,j}}{\partial t} + \frac{q_x^{i,j-1} - q_x^{i,j}}{\Delta x} + \frac{q_y^{i-1,j} - q_y^{i,j}}{\Delta y} = r^{i,j} \quad (6.8)$$

として用いる。ここに $q_x^{i,j}$ 、 $q_y^{i,j}$ はグリッドセル (i,j) からそれぞれ x 方向、 y 方向に流出するフラックスである。同様に(6.6)、(6.7)式にも差分を適用すると流量フラックスを求めることができ、それに伴って各グリッドセルの水深を求められる。

中間流・表面流モデルによる側方地中流の再現) 上述の(6.6)、(6.7)式は地表面流について流量と動水勾配との関係を表した式である。RRIモデルは降雨流出と洪水氾濫との両方を一体的に解析することを念頭に置いているので、地表面流とあわせて支配的な地中流を簡単に再現することも大切である。高棹・椎葉²⁶⁾は、中間流・表面流を一体的に追跡するため(6.9)、(6.10)式のような流量流積関係式を提案しており、本研究でも同様の式を採用する。

$$q_x = \begin{cases} -kh \frac{\partial H}{\partial x}, & (h \leq d) \\ -\frac{1}{n} (h-d)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) - k(h-d) \frac{\partial H}{\partial x}, & (d < h) \end{cases} \quad (6.9)$$

$$q_y = \begin{cases} -kh \frac{\partial H}{\partial y}, & (h \leq d) \\ -\frac{1}{n} (h-d)^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) - k(h-d) \frac{\partial H}{\partial y}, & (d < h) \end{cases} \quad (6.10)$$

ここに、 k は側方の透水係数、 d は土層厚×有効空隙率である。なお、高棹・椎葉²⁶⁾が提案した流量流積関係式は、キネマティックウェーブを仮定しており、もとの式は上記中の水位勾配項が斜面勾配に置き換わっていることに注意する。

斜面部の鉛直浸透モデル) 透水係数の小さな土壌が斜面を覆っている場合や、斜面勾配が小さい場合には、初期の降雨は鉛直方向に浸透し、洪水の流出にはそれほど寄与しないと考えられる。RRIモデルでは、鉛直方向の浸透量をGreen-Amptモデル²⁷⁾で計算し、地下への損失として取り扱う。上述の中間流・表面流とGreen Amptモデルを組み合わせる場合には、土層の下部から基盤岩に浸透する量をGreen-Amptモデルで算定し、残りの水を中間流・表面流として側方に流すことになる。Green Amptモデルの式は、

$$f = k_v \left[1 + \frac{(\phi - \theta_i) S_f}{F} \right] \quad (6.11)$$

のように表わされ、 k_v は鉛直の飽和透水係数、 ϕ は土壌の空隙率、 θ_i は初期の土壌水分量、 S_f は浸潤前線における吸引圧、 F は浸透量の累積値である。

6.3 インドネシア・ソロ川流域への適用

広域な低平地を含む例として、インドネシア・ソロ川流域を対象にRRIモデルを適用する。ソロ川はインドネシアのジャワ島に位置し、ラウ火山を起源としてジャワ海に流出する。流域面積は16,100 km²である。流域の下流部には広大な低平地が広がり、2007年の12月には大規模な洪水が生じて上流域から下流域を含めて多くの地域で浸水被害が発生した。

本研究では、2007年12月24日から2008年1月8日を対象として、RRIモデルによる降雨流出氾濫解析を実行する。入力降雨は、流域125地点で観測された日雨量をティーセン分割したものとする(図-6.2、図-6.3)。この地域では詳細な地形データを得ることができないので、HydroSHEDS²⁸⁾のデータセットに含まれる15秒(約460m×460m)の地形情報を用いる。HydroSHEDSには最急勾配の流下方向と集水面積のデータが含まれる。これらの情報を用いて、河道幅(*Width* [m])と深さ(*Depth* [m])は以下のように各グリッドセルの集水面積(*Area* [km²])の関数として設定した。

$$Width = C_w Area^{D_w} \quad (6.12)$$

$$Depth = C_d Area^{D_d} \quad (6.13)$$

ここに、 C_w 、 D_w 、 C_d 、 D_d は河道幅・深さを決定するパラメータであり、現地の河道断面情報をもとに、次のように決定した： $C_w = 5.0$ 、 $D_w = 0.35$ 、 $C_d = 0.95$ 、 $D_d = 0.2$ 。

ソロ川流域は、火山性の土壌で覆われているため、この地域の降雨流出を再現するうえでは、鉛直方向の浸透による初期損失を考慮することが大切であると考えられる。この適用例では、流域の土地利用を三種類(森林域・農地域・その他)に分けて、森林域についてはGreen-Amptモデルによる鉛直浸透流を考慮した。土壌はClay Loamを想定し、文献27を参考にパラメータを次のように設定した： $k_v = 5.55 \times 10^{-7}$ m/s、 $(\phi - \theta_i) = 0.271$ 、 $S_r = 0.2088$ m。また、この適用例では側方地中流の影響は小さいものと仮定し、地表面流のみを考慮する計算式において、土層厚をゼロに設定した。また、粗度係数 n [m^{-1/3}s]については、水田で2.0、森林で0.6、その他で0.4、河川で0.04に設定した。

RRIモデルによる最大浸水深の計算結果を図-6.4に示す。また、比較のため衛星リモートセンシング(ALOS/PALSAR)によって推定された12月30日時点の浸水想定域を図-6.5に示す。以下では、ソロ川上流域、右支川マディウン川流域、ソロ川下流域の3つの流域に分けて計算結果を考察する。

ソロ川上流域においては、Jurug地点の下流で浸水が集中していること、またJurug地点の上流(Surakarta付近)で浸水域がまばらに分布していることが衛星画像から確認され、その浸水域をモデルは妥当に再現している。Surakarta付近の浸水は、モデルの計算結果によると20cmから50cm程度の

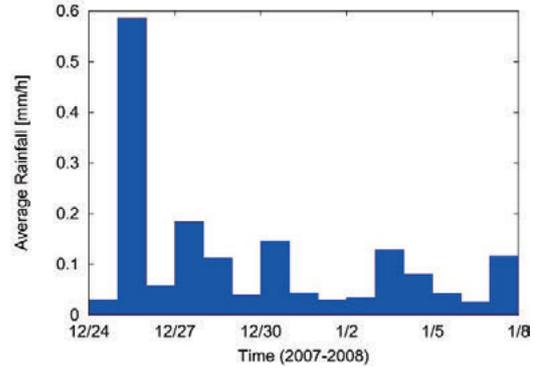


図-6.2 計算対象期間中の流域平均雨量

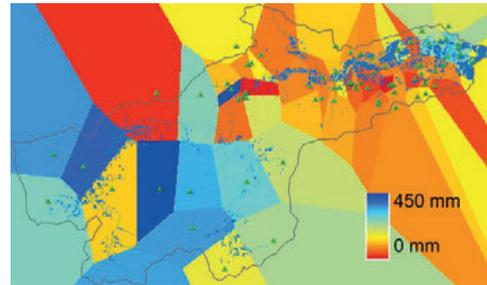


図-6.3 計算対象期間中の総雨量分布

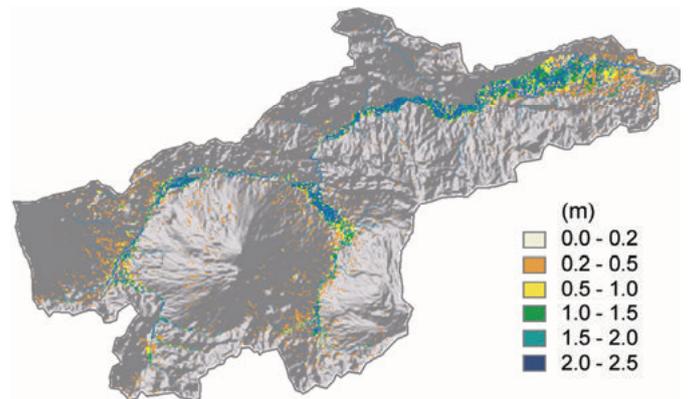


図-6.4 RRIモデルによる計算期間中の最大浸水深

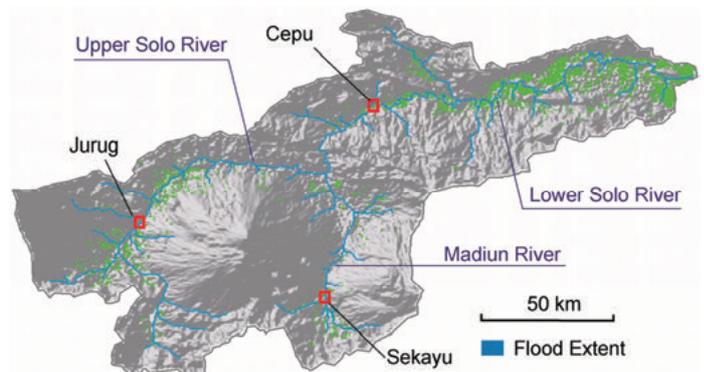


図-6.5 ALOS/PALSARによる浸水想定域

浸水場所が多く、またソロ川本川から離れた場所にも浸水域が広がっていることから、支川や内水による氾濫の影響も大きいと考えられる。

Jurug 地点の水位・流量ハイドログラフ(図-6.6(中))を見ると、赤色で示した浸水を考慮した場合の結果は、観測水位・流量に比べて時間変化が小さくなり過ぎていることが分かる。一方、緑色で示した浸水を考慮しない場合は、時間変化が大きくなり過ぎる傾向にある。赤色で示した計算結果では、氾濫の影響を過大に評価している可能性がある。また、図-6.3に示すように、Jurug 上流部を含むソロ川上流域では、下流域に比べて雨量データの観測密度が低く、入力降雨が実際よりも小さい可能性がある。

次にマディウン川流域に着目する。図-6.4の結果ではマディウン川がソロ川に合流する手前で浸水深が大きくなっている。一方、衛星による推定結果は、この地域で広域の浸水が発生していなかったことを示唆している。この原因としては、衛星の撮影日時が12月30日であり、既に浸水が低減していたことが考えられる。これは、マディウン川上流域に位置する Sekayu 地点のハイドログラフ(図-6.6(下))からも推察される。この地域では計算・観測ともに12月27日で水位・流量のピークを迎え、その後は低減している。なお、赤色で示した浸水を考慮した Sekayu 地点の計算水位は、観測水位を非常によく再現している。一方、観測流量はピーク時で計算結果の4倍程度大きくなっている。この原因は明らかではないが、水位が概ね再現できていること、洪水イベント後半の流量をよく再現できていることから、流量を推定する H-Q 式に含まれる誤差の影響の可能性も否定できない。

最後にソロ川下流域に着目する。この地域では、モデル・衛星画像ともに本川付近で広域に浸水している状況を示しており、モデルは浸水の範囲をよく捉えている。流域の最下流部ではモデルの浸水エリアが衛星画像と比較して狭くなっているが、これは潮位の影響による可能性がある。ソロ川下流域に位置する Cepu 地点の水位・流量ハイドログラフ(図-6.6(上))は、水位・流量ともに観測量をよく再現している。また、浸水を考慮しない場合の緑の計算結果では、12月26日前後の水位・流量を過大に

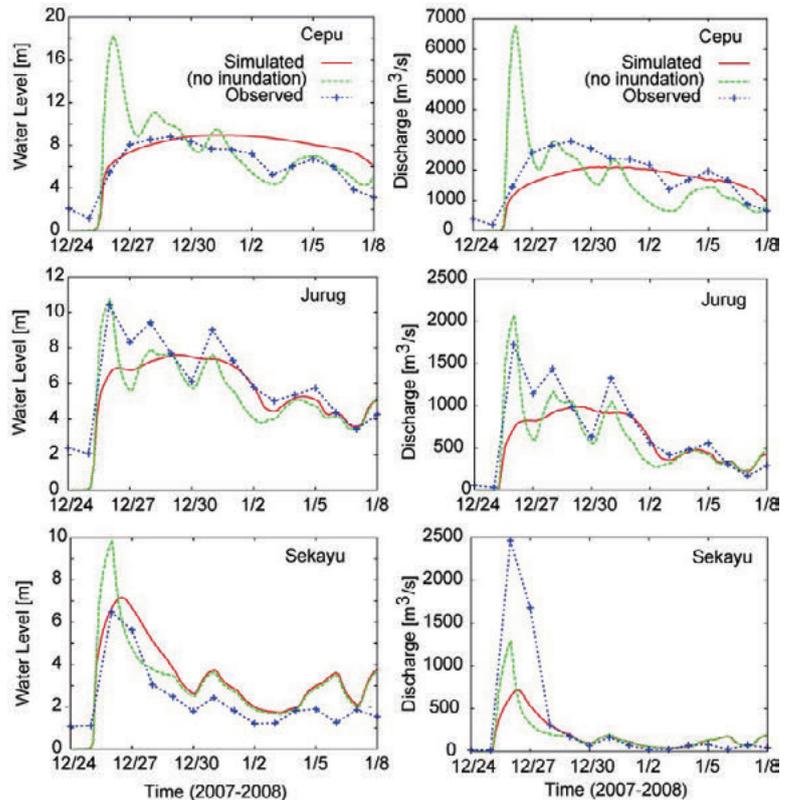


図-6.6 水位・流量ハイドログラフ
(赤：浸水を考慮した計算結果、
緑：浸水を考慮しない計算結果、青：観測)

評価しており、上流の浸水の影響を考慮することが、この地点の河川水位・流量を予測するうえでも重要であることが分かる。

ソロ川下流域の浸水を防ぐうえで、本川沿いの築堤がどの程度効果を発揮するのかを簡単なシミュレーションによって分析する。図-6.7は、ソロ川下流の本川沿いに4mの堤防があることを想定して上記と同じ計算を行った結果を示している。図-6.7(上)は最大浸水深、図-6.7(下)は堤防がある場合とない場合の最大浸水深の差を示す。この計算結果によれば、本川沿いに4mの堤防を築いても、その周囲の最大浸水深を50cm程度しか低減できないことが分かる。また、堤防の建設によって最下流部では河川の水位が上がり、その周囲の浸水深をより大きくする可能性があることを示唆している。4mの堤防があるにもかかわらず本川沿いの浸水を防げない理由は、支川からの氾濫やその地域に降った雨の内水氾濫によるところが大きいと考えられる。

6.4 おわりに

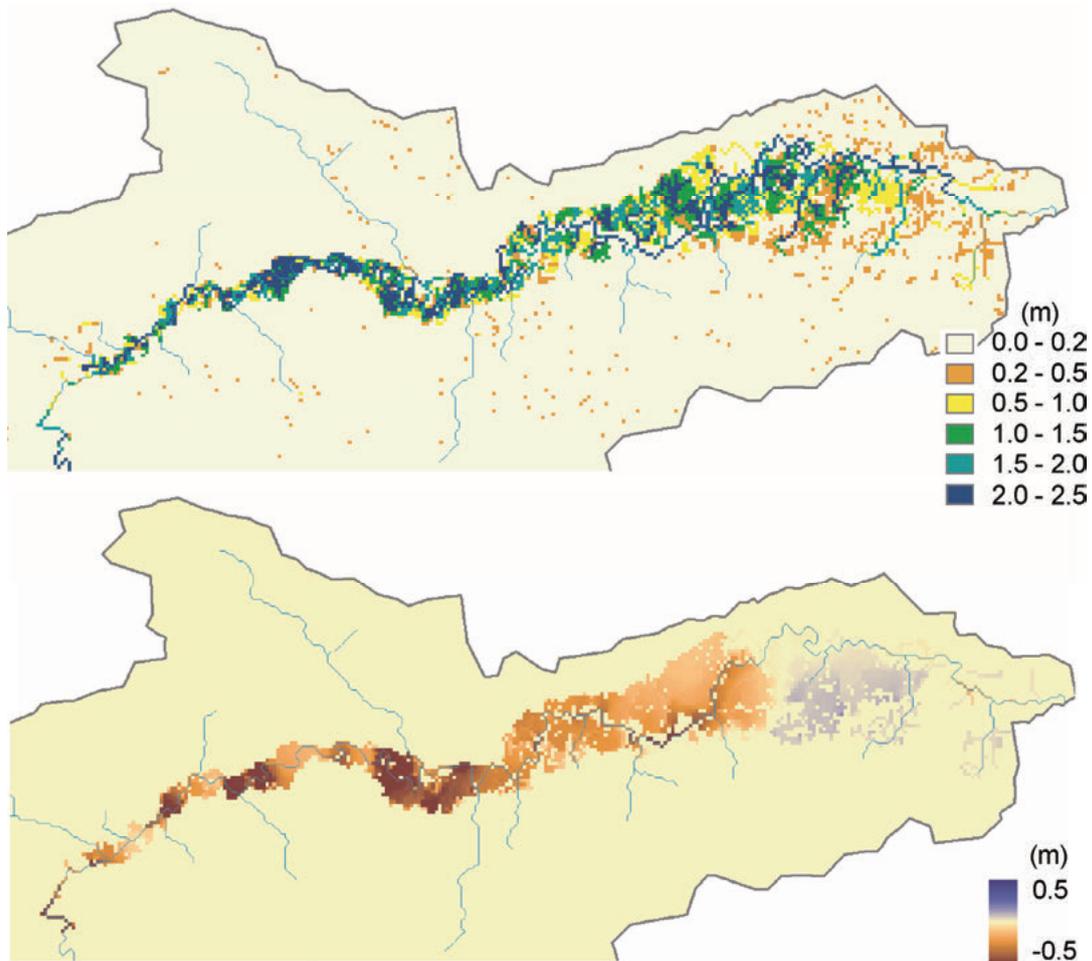


図-6.7 ソロ川本川（Cepu 地点下流）に
4mの堤防があることを想定した場合の最大浸水深(上図)、
および堤防の有無による最大浸水深の差(下図)

降雨流出から洪水氾濫までを一体として解析する降雨流出氾濫モデル（RRIモデル）を開発した。このモデルは、従来の分布型降雨流出モデルのように流れの方向を事前に決定することなく、時々刻々変化する水面の勾配をもとに流水の方向と流速を決定する。また、山地域の降雨流出を妥当に表現するため、地中部の水の流れをモデル化する。RRIモデルの構造は浸水域が広がる低平流域に特に適しており、その一例としてインドネシア・ソロ川流域を対象にした結果を紹介した。

2007年12月から1月にかけての洪水をソロ川全域でシミュレーションした結果、衛星リモートセンシングで特定された洪水氾濫域をモデルは妥当に表現できることが確認された。また、流域の下流部においては、氾濫の影響を考慮することで水位・流量

の再現性が向上することを明らかにした。また、ソロ川下流部の本川沿いに4mの堤防があった場合の仮想シミュレーションを実行した結果、本川沿いの堤防の効果は、周辺の浸水深を約50cm低減させる程度にとどまっていた、仮に堤防があった場合でも現状と同様に浸水が広がることが分かった。これは、この地域の浸水が本川からの外水氾濫だけでなく、支川からの流出やその地域に降った雨によってもたらされているためであると考えられた。洪水が頻発する低平地の氾濫水制御は難しく、ここで示したようなシミュレーションを実行することにより、流域一体として有効な対策を講じることが大切である。

7. 発展途上国における持続的な津波対策に関する研究

7.1 はじめに

本研究は、**図-7.1**のように、発展途上国における持続的な津波対策に資するための以下の3つの研究から構成され、さらにそれぞれの研究はいくつかの研究から成り立っている。

まず、2004年に発生したインド洋大津波の沿岸国において、今後どのような津波対策を行えば最も効果的かを検討するために代表的な都市をいくつか抽出し、津波災害に対する社会状況・地形特性と津波対策に関する調査を行い、データを収集した。その結果をもとに、途上国における津波対策の行政官を対象とした津波防災の教育資料の調査・開発を行い、土木研究所で実施した研修にて使用し、有効性を検証した。また、津波対策の中でも比較的安価で現地でも適用可能性が高い海岸植生の活用についてのガイドラインを作成し、現地の行政官・研究者と意見交換したうえで土木研究所資料として発行した。

並行して、河川を遡上する津波に起因する被害の軽減策検討に資するために、まず、これまであまり解明されていない河川を遡る波状段波に対する解析手法を開発した。次いで、寒冷地において多数の氷板が河川表面上に存在している場合を想定し、津波遡上に付随する氷板輸送の特性把握を試みた。さらに、津波遡上による河川構造物の被害軽減手法の一つとして遊水地設置の効果を検討した。

最後に、上記2つの研究成果を活用するべく、イン

ド洋沿岸の都市を対象として、津波・高潮外力の被害想定を行うための災害リスク評価を行った。

7.2 発展途上国における持続的な津波対策に関する研究

2004年に発生したインド洋大津波は、沿岸国に23万人を超える死者を出した。これは、各国における国家レベルから住民レベルに至る各段階での、津波に対する適切な準備不足によるところが大きい。本研究では、途上国における持続可能な津波対策に資するために、まず、潜在的な津波ハザードと既存の土地利用に基づいた総合的な津波減災策の調査を実施した。具体的には、インド洋大津波による被害を受けた国々を対象として、津波災害に対する状況と津波対策に関するデータを収集し、社会特性（都市、観光地、漁港・農村など）と地形特性（島しょ、河川氾濫原など）によって**表-7.1**のように分類した。適切な津波対策はそれぞれの分類特性に応じてなされるべきと考えられる。例えば、マレ（モルディブ）のような島しょ部における都市域では、津波避難ビルや海岸植生、避難訓練などが有効であろう。

続いて、我が国を含む津波被害を受けやすい各国で発行されている既存かつ最新の津波関連資料を収集・調査し、**表-7.2**に挙げる項目を含むテキストブックを作成した。このテキストブックは土木研究所が国連国際防災戦略（UN/ISDR）の資金を活用して2008年6月から7月にかけて実施した、インド・インドネシア・モルディブ・スリランカの行政官11名を対象とした津波防災研修に活用した。

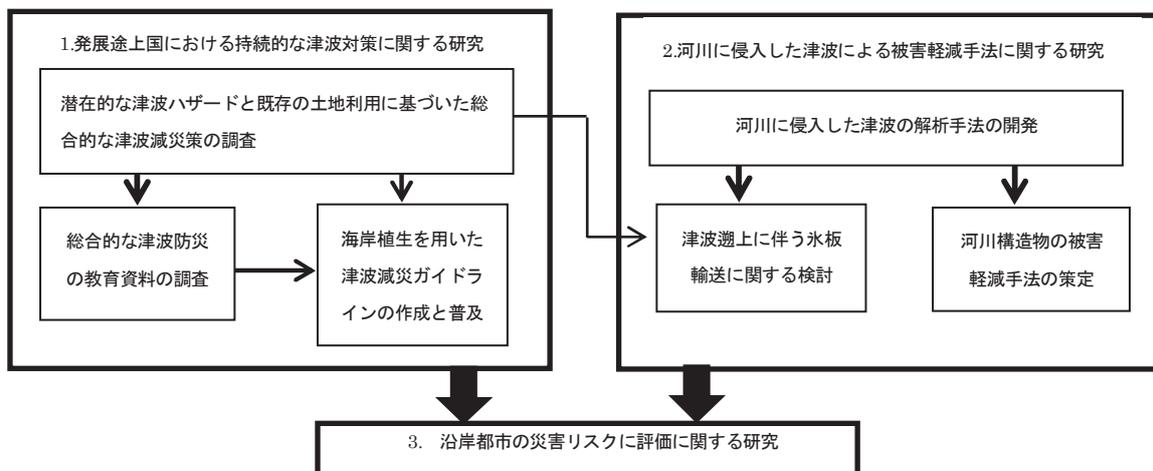


図-7.1 本研究の流れ

表-7.1 社会特性と地形特性による分類

	都市域	観光地	農村・漁港
島しょ	Male Island of the Maldives	Phiphi Island of Thailand	
河川氾濫原	Galle of Sri Lanka		
岬	Hambantota of Sri Lanka	Phuket beach and Phatton beach of Thailand	
低平地	Banda Aceh of Indonesia		MGR Titto Village of India
港	Galle and Hikkaduwa of Sri Lanka		

表-7.2 総合的な津波防災のためのテキストブックの項目

1. Key concepts for tsunami countermeasures in Japan
2. Basic laws and plans related to disasters in Japan
 - 2.1 Disaster Countermeasures Basic Act
 - 2.2 Basic Disaster Management Plan
 - 2.3 Local Disaster Management Plan
3. Tsunami countermeasures in Japan
4. Building capacity and disaster education for tsunami
 - 4.1 Transfer of knowledge and experiences in disaster mitigation
 - 4.2 Training materials for workshop
 - 4.3 Disaster mitigation education for local residents

さらに、津波防災のためのテキストブックの一環として、海岸植生に関する既往の知見²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾を活用した防護計画策定のガイドライン(案)を作成した。海岸植生は、植生の直径や植生密度にもよるが、一般的には高さ5mを下回る津波に対しては、津波の減衰や漂流物による被害の防止・軽減に寄与する可能性がある。本研究では特に、途上国のように津波対策に関するデータや予算、及び津波防災に関する行政官が不足しているも、海岸植生を用いた防護計画が作成可能となるように、簡便な形でのガイドライン(案)を作成した。本ガイドライン(案)による植栽を用いた防護計画策定のフロー図を図-7.2に示す。作成した案は、2010年3月9日にバンダ・アチェで行った国際ワークショップにおいて現地の行政官や研究者との議論を経て、土木研究所資料第4177号「Planning and Design of Tsunami-mitigative Coastal Vegetation Belts」³²⁾としてとりまとめた。

7.3 河川に侵入した津波による被害軽減手法に関する研究

2003年9月に発生した十勝沖地震、2004年12月のスマトラ島沖地震を契機として、河川を遡上する津波に対する危険性が強く認識されるようになった³³⁾。しかしながら、一般に波動理論は静水中の水平床面上において議論されることがほとんどであるため、河川を遡る波状段波に対して既存の知見を直ちに適用することは難しい。また、河川における津波防災対策としては河川堤防があるが、河道を遡上する津波に対して十分な防御効果を発揮できるかどうかは十分に検討されていない。

本研究では、河川を遡上する津波に適用可能な数値解析モデルを開発するとともに、寒冷地における氷板などの漂流物の挙動についての特性を把握した。さらにそれらの検討結果をもとに、津波被害軽減方策として遊水地を設置した場合の津波波高やエネルギーの減衰効果について検討した。

まず、単断面水路において、実現象で想定される範囲のFr数の流れ場を遡上する津波を再現するためには、鉛直方向加速度を考慮した非線形分散波理論を適用する必要があることを示して数値解析モデルを開発し、水理実験の現象を10%内外の高精度で再現できることを示した。そして、開発した数値解析モデルを実河川に適用し、観測された水位データを元にその妥当性の検討を行った。水理実験の結果、計測された波状段波の水位上昇は、浅水変形に基づくものと波数分散現象に伴う鉛直方向加速度の増大の両者が原因となっていると考えられた。このため、今後の検討の余地が残されているものの、波状性を伴う波動の解析においては少なくとも対象とする現象の波高水深比に応じた Boussinesq 系方程式が不

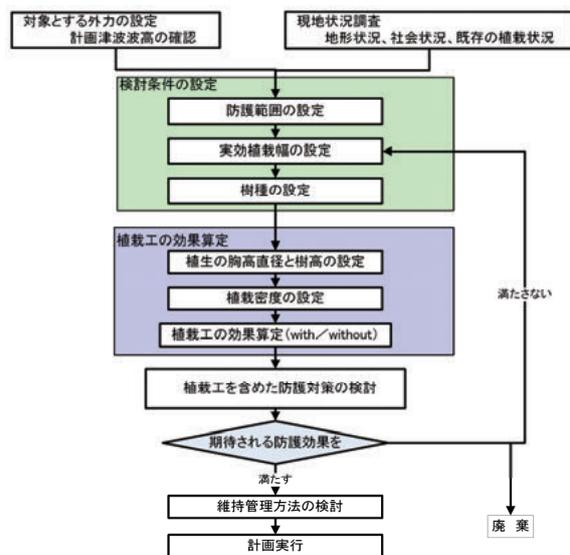


図-7.2 ガイドラインにおけるフロー図

可欠であると言える。そのため、実河川に適用可能な一般化された数値解析モデルを以下のように設定した。

連続の式は式(7.1)を、運動の方程式は式(7.2)を用いた。この式は、安田により提案されたPeregrine³⁴⁾の式を一般河道断面へ拡張した式である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial}{\partial x} (z+h) + \frac{g n^2 u^2 S}{R^{1/3}} = \frac{R^2}{3} \frac{\partial^3 Q}{\partial t \partial x^2} \quad (7.2)$$

但し、 $A[\text{m}^2]$:流積、 $Q[\text{m}^3/\text{s}]$:流量、 $t[\text{sec}]$:時間、 $x[\text{m}]$:距離、 $z[\text{m}]$:河床高、 $h[\text{m}]$:水深、 $n[\text{s}/\text{m}^{1/3}]$:マンニングの粗度係数、 $u[\text{m}/\text{s}]$:流速、 $R[\text{m}]$:径深、 $S[\text{m}]$:潤辺。

計算方法は、従属変数を空間的に千鳥状(staggered)に配置し時間的に蛙飛び(leap-frog)に進める差分式で行った。非線形分散波理論式については、2段階混合差分法³⁵⁾を適用し的に解いた。

開発した数値モデルを、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震による津波の新釧路川への遡上現象へ適用し、その妥当性の検討を行った。新釧路川KP7.6に位置する広里観測所における、1分毎の観測水位と計算水位を図-7.3に示す。図-7.3から、計算値は観測値の水位変動を良く再現していることがわかる。今回の計算水位と観測水位の絶対誤差の平均値は約5cmであった。

続いて、津波遡上に伴う氷板輸送に関する水理実験を行った。北海道の河川は冬期間の気温低下に伴って河道内に河氷が形成される。河川結氷時に津波が河川を遡上する場合には、津波が河氷の上を流れる、あるいは津波が河氷を壊し上流へと押し上げな

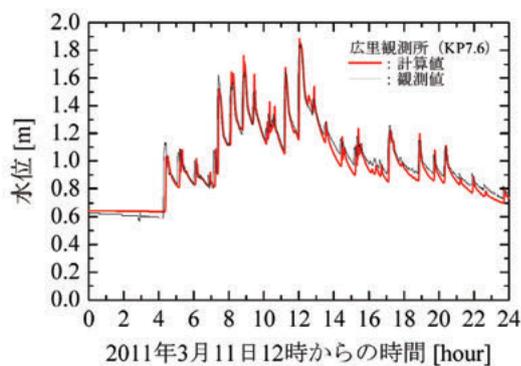


図-7.3 広里観測所における観測値と計算値の比較

がら流れるなど、開水時とは異なる現象が予想される。本研究では、多数の氷板が河川水面上に存在している場合の津波実験を実施し、津波遡上とそれに付随する氷板輸送の特性把握を試みた。また、入射波を固定して初期水深・結氷存在位置を変化させ、氷板の輸送速度や最大遡上距離に関する検討を行った。具体的には、氷板模型を設置した津波遡上実験を行い、波高計による波高分析及び撮影動画を用いた画像解析を行った。その結果、図-7.4のように、水深・波長比が小さいほど、氷板遡上距離・氷板幅比は大きくなった。すなわち、上流からの流れがない静水面条件における本実験において、水深が浅い地点に津波が来襲した場合、その地点にある氷板は、水深が深い地点に比べて、上流へと遡上される可能性が高いことを示唆する結果となった。

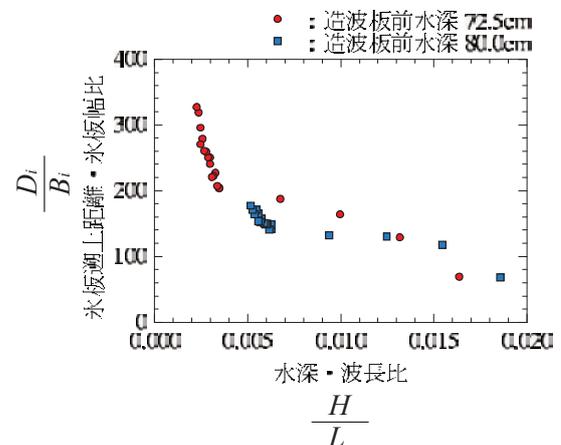


図-7.4 水深・波長比と氷板遡上距離・氷板幅比

上記の検討から、河川を遡上する津波やそれに輸送される漂流物の危険度は、遡上過程での波高増幅作用によって上昇することが明らかになった。そのため、河川横断構造物の被害軽減のための方策として、津波の最大波高及びエネルギーを減少させるための遊水地を提案し、効果についての検討を行った。具体的には、遡上過程での横越流を模擬した水理実験を実施し、遊水地が存在することによる津波本体部の波高低減効果・エネルギー減衰効果について検証を行った。実験ではスマトラ島北部の都市バンダ・アチェ東部に位置する河川を対象とし、実際の橋梁位置を基に、実験水路上での遊水地位置、水位測定地点の設定を行った。2004年スマトラ島沖地震において、バンダ・アチェに襲来した津波高は、海岸で6~12mであり、海岸から1.0~1.5km内陸の市街地で4~5m程度であったことが確認されてい

る。このため、本実験では、対象河川の KP3.9 付近の橋梁位置において、最大 5m の津波が襲来した場合を想定した。実験水路の概要を図-7.5 に示す。実験水路の縮尺は水平方向が 1/600、鉛直方向が約 1/50 であり、時間縮尺は約 1/84.9 であった。実験水路における遊水地は、水路を遡上する津波が、水路側壁に開口部がある区間を通過し、横越流させることで再現した。実験の結果、実物縮尺では、遊水地の 72m 上流で 0.55m の低減が確認された。また、この最高水位の低減率は 9% であった。最高水位の低減率は、遊水地直上流で大きく上昇し、水深が大きい条件では、同等の低減率を維持している。しかし水深が小さい条件では、低減率は約 0% となった。

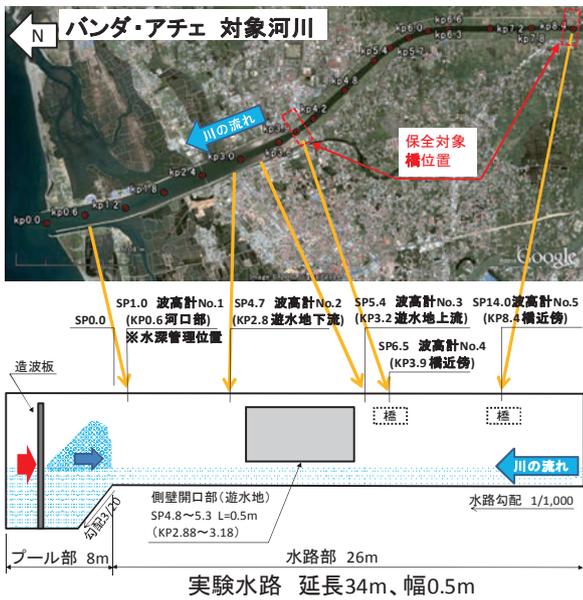


図-7.5 実験水路概要

7.4 沿岸都市の災害リスクの評価に関する研究

本研究では、インド洋沿岸に位置するバリ島（インドネシア）、チッタゴン（バングラデシュ）を対象として、津波・高潮外力の被害想定を行うための災害リスク評価を行った。以下ではその一例として、バリ島を対象として行った評価例を示す。

災害リスク評価の手法としては、まず、過去の災害事例をもとに設定した外力に基づく浸水想定、次いで被害想定（人的被害、建物被害）を行った。さらにこれらの被害結果を、地域の土地利用状況等に応じたエリア区分毎に、リスクマップとしてレーダチャートで表現した。

津波の外力は、インドネシア周辺の類似事例を参考に設定した。断層については、2006年ジャワ島南部（M7.7）で発生した津波の原因となった断層と同等のものがバリ島南部にあるものと仮定した。規模については、上記事例とともに2004年スマトラ島沖地震（M8.8）を考慮した6ケース（M7.0、7.5、

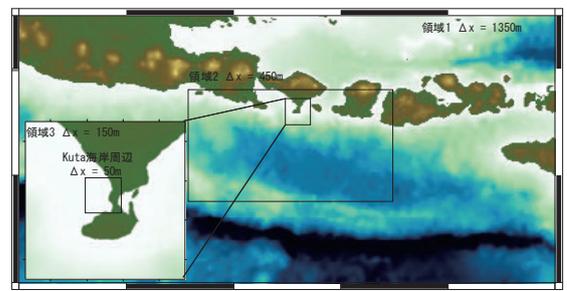


図-7.6 解析対象範囲

7.7、8.0、8.5、9.0) を設定し、図-7.6 に示す領域で浅水理論に基づくシミュレーションを行った。

バリ島において、空港から近く人口が最も集中しているクタ地区を対象とし、2004年スマトラ島沖地震を想定した M9.0 のシミュレーション結果をもとにした最大浸水深分布図を図-7.7 に示す。ホテルや

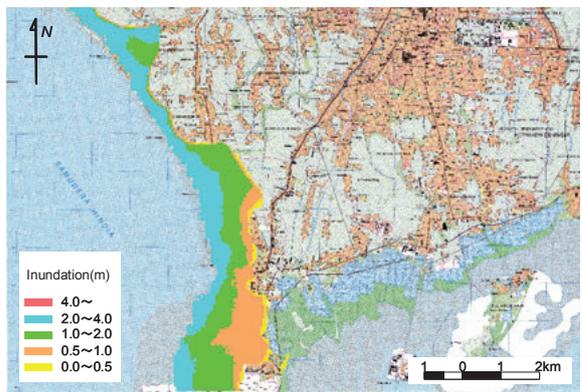


図-7.7 クタ地区の最大浸水深 (m)

ショップ等が並ぶ海岸から 1km 以内では 2~4m の浸水が発生する結果となった。

被害想定は、人的被害および建物被害（家屋、ホテル、ショップ、ビーチ）を対象に行った。被害想定の際の諸条件を表-7.3 に示す。死亡率については浸水深との相関式を使うこととし（表-7.4）、日本（中央防災会議「東南海・南海地震等に関する専門調査会」）およびスリランカ（2004年スマトラ島沖地震）の事例を用いた。さらに日本の事例では防災意識の高低によって2ケースを想定した。被害率についても浸水深との相関式を使うこととし、他研究で行ったスリランカの事例を用いた（表-7.5）。

表-7.3 被害想定の際条件

項目	想定時期		想定時間帯
シナリオ	8月		夕方
家屋種別	人数	建物価格	家財道具価格
家屋	3.9	10億ルピア (625m ² あたり)	0.75億ルピア
ホテル	16.2	125億ルピア (1階あたり)	10億ルピア
ショップ	3.9	10億ルピア	10億ルピア
ビーチ	0.1/m ²	-	-

表-7.4 死亡率 (%) の推定式

	設定	死亡率推定式	
ケース A	日本の事例	$Y = 0.0282e^{0.2328X}$	Y : 死亡率(%)
ケース B	スリランカの実例	$Y = 0.029e^{0.225X} + 0.112$	X : 浸水深(m)

表-7.5 建物被害率の推定式

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} dx$$

$P(x)$: 被害発生率(全壊および被害有り)
 x : 浸水深(m)
 μ : 全壊 : 2.7m、被害有り : 0.6m
 σ : 全壊 : 0.6m、被害有り : 0.8m

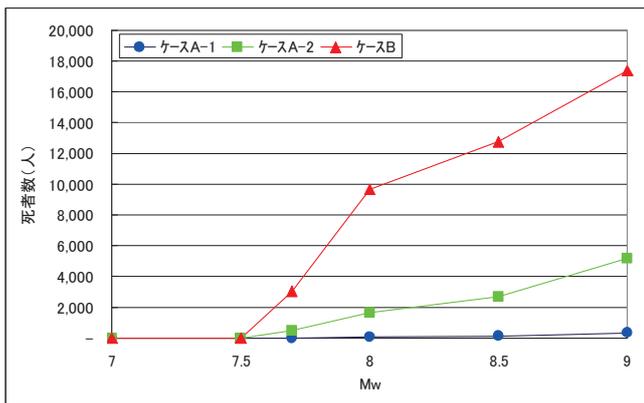


図-7.8 人的被害の想定結果

シミュレーションを行ったマグニチュード毎に死者数を整理した結果を図-7.8に示す。ケース A は日本の津波事例による死亡率で A-1 は防災意識が高い場合 (警報後直ちに避難)、A-2 は低い場合 (警報後しばらくしてから避難) である。ケース B は 2004

年スマトラ島沖地震におけるスリランカの実例であり、住民には津波の知識も避難情報もない状況で津波が来襲した場合である。M8.5 クラスの津波が来る場合には、死者数が 169~12,784 人と推定され、防災意識の啓発や予警報システムの有無によって死者数が最大 1/100 程度に軽減される可能性を示している。

続いて、クタ地区における津波災害のリスクを地図上に整理した。家屋は無いが人が集まるビーチ (エリア 1)、家屋が集中する住宅地 (エリア 5) 等の 6 エリアに分類し、地区毎に人的被害、家屋被害等をレーダチャートで表現した (図-7.9)。この図からは、ビーチにホテルが隣接しているエリア 2 のレーダチャートの面積が最も大きく、クタ地区においてももっとも対策が急がれるエリアであることが伺える。また、エリア 5 を除いて浸水道路延長率は 0.8 を超えており、被災時において道路による避難が困難となることを意味している。

7.5 まとめ

本研究の成果として、インド洋津波の沿岸国において、津波災害に対する社会状況・地形特性と津波対策に関する調査を行い、今後採りうるべき津波対策を検討した。その結果をもとに、津波防災の教育資料の調査・開発を行い、また、津波対策の中でも比較的安価で現地でも適用可能性が高い海岸植生の活用についてのガイドラインを作成した。並行して、これまであまり解明されていない河川を遡る波状段波に対する解析手法を開発し、津波遡上による河川構造物の被害軽減手法の一つとして遊水地設置の効果を検討した。

最後に、インド洋沿岸の都市を対象として、津波・高潮外力の被害想定を行うための災害リスク評価を行った。

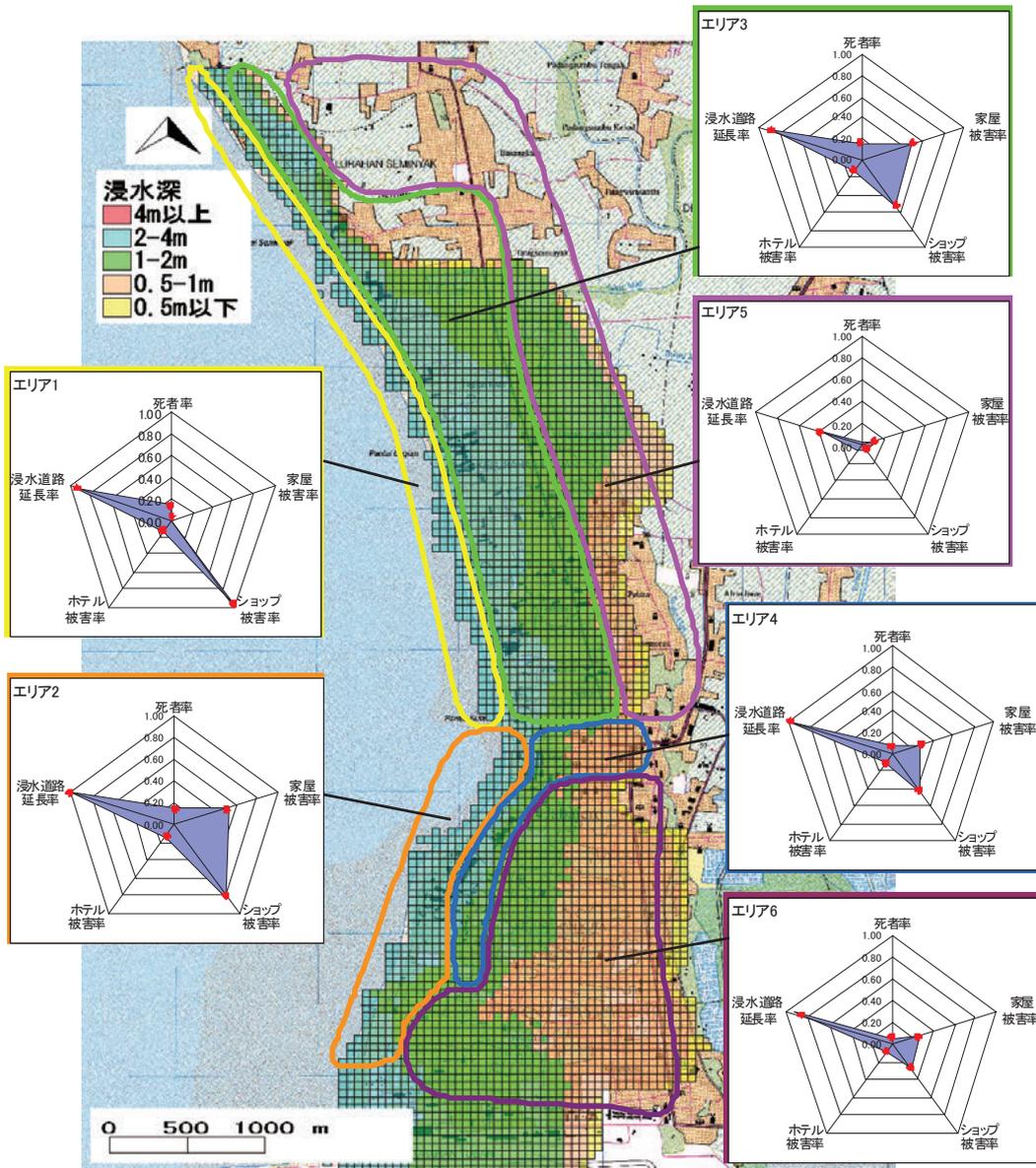


図-7.9 クタ地区における津波災害リスクマップ

8. 水災害リスク評価のための衛星地形データの活用手法の研究

8.1 はじめに

近年、東南アジア等の発展途上国を中心として洪水被害件数、規模が拡大する傾向がある³⁶⁾中で、事前対応の重要性が指摘されている。しかし、構造物対策を進めることが難しい発展途上国においては、洪水のリスク評価を行い、その結果を土地利用等の非構造物対策に反映させることが有用な手段と考えられている。洪水被害対策を立案するにあたっては、洪水氾濫特性を把握する必要があるが、洪水氾濫シミュレーションを行うために必要となる地形データが十分でない、または存在しないことが多い。

そこで本研究では、発展途上国に広く見られる低平な氾濫原において氾濫解析を行うため、1) 地形再現精度の検証、2) 浸水計算のための最適な地形データ処理手法の開発、3) 衛星地形データを活用した水災害リスクの評価手法の開発について検討を行うとともに、衛星地形データ活用教材を作成した。

8.2 衛星地形データの地形再現精度の検証

新潟県刈谷田川流域を対象として検証を行った。刈谷田川流域では2004年7月に大規模な出水が発生し、堤防の破堤により、広い範囲で洪水氾濫被害が発生している³⁶⁾³⁷⁾。この地域では、航空機によるレーザープロファイラーデータ（以下、LPデータ）が取得されており、正確で詳細な地形データの把握が可能である。そのため、これを用いて衛星地形データの再現精度検証および洪水氾濫シミュレーションへの適用性を検討することができる。

本研究で検討を行う衛星地形データとして陸域観測技術衛星「だいち」によるALOS PRISMデータ、NASAの人工衛星に搭載された経済産業省開発の高性能光学センサーによるASTERデータおよびスペースシャトルによるSRTMデータをとりあげた。地形データおよびLPデータの概要を表-8.1に示す。それぞれの標高分布図の違いを目視で確認するために、図-8.1にLPデータ、ALOS PRISM、ASTER、SRTMの標高分布図を示す。

図-8.1より、ASTERは標高値のバラつきが大きいためこの図からは実際の地形に関して情報を得ることは難しいことがわかる。SRTMについても、メ

表-8.1 LPデータおよび各人工衛星地形データの概要

	解像度	概要
LP	2m	航空機レーザー測量により観測
ALOS PRISM	10m	ALOS PRISM センサーのデータをステレオマッチング処理により作成
ASTER	15m	ASTER センサーのデータをステレオマッチング処理により作成
SRTM	90m	スペースシャトル搭載のSARセンサーのデータから作成

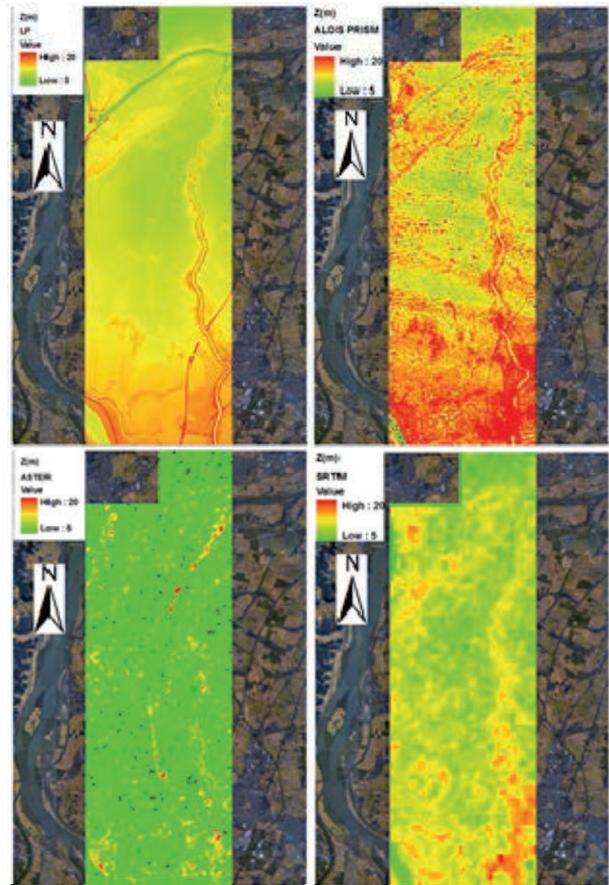


図-8.1 LPデータ(左上)、ALOS PRISM(右上) ASTER(左下)、SRTM(右下)データ

ッシュサイズが90mと他と比較して粗いため実際の地形について情報を得ることは難しい。一方でALOS PRISMの場合、標高分布図から河川の位置や堤防の存在を確認することができる。しかし同時に、図の中央付近にLPデータには見られない明確な「うねり」が存在することが確認された。

オリジナルのメッシュサイズでの比較と、100m移動平均によりメッシュサイズを100mに変換した場合の比較を行った。精度評価にあたり、LPデータを真値とした場合の鉛直方向の平均二乗誤差

表-8.2 LP データを真値とした場合の誤差

	ALOS PRISM	ASTER	SRTM
RMSE (オリジナルデータ)	3.7m	9.4m	2.6m
RSME (100m 平均)	2.6m	9.1m	2.1m

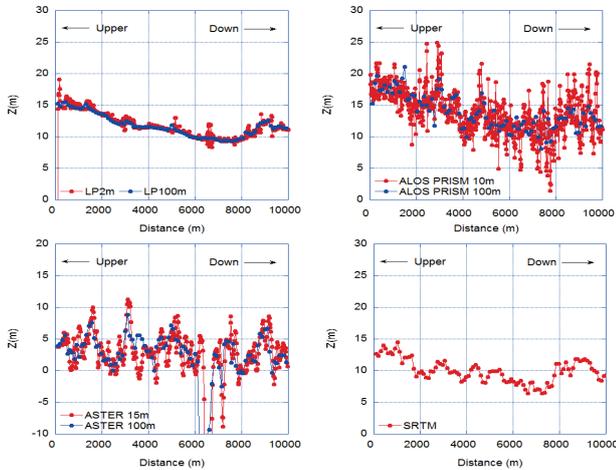


図-8.2 経度方向断面標高プロファイルの比較 (LP データ (左上)、ALOS PRISM (右上)、ASTER (左下)、SRTM (右下) データ)

(RMSE) および、経度方向断面の標高プロファイルと比較した。それらの結果を表-8.2 および図-8.2 に示す。表-8.2 より、100m 程度の平均化では地形データの乱れ成分を十分小さくできないことが分かる。ASTER は RMSE が他よりも大きく、ALOS PRISM および SRTM と比較して精度が劣ることが分かった。

図-8.2 から、ALOS PRISM、SRTM は 100m 移動平均することで、標高の乱れ成分は依然残るものの、平野部の全体的な地形特性の把握は可能であることが分かる。ASTER はオリジナルデータから標高の推移を読み取ることはできず、平均化しても誤差が減少しなかった。

比較的精度が良好な SRTM はうねり状のノイズを有している。低平地での氾濫解析に用いるためにはこのノイズを除去する必要がある。

8.3 浸水計算のための最適な地形データ処理手法の開発

スペクトル解析によりノイズ卓越周波数成分を除去してみたが除去が不十分であったため、ローパスフィルタの適用を検討した。

ローパスフィルタは高周波数成分を除去するので尾根や谷などの本質的な地形情報も失う可能性がある。

そこで、傾斜地では平地よりもフィルタ領域内の標準偏差が大きいに注目し、標準偏差によって平地と傾斜地を区別することとした。標準偏差によって平地と判断されたピクセルに平滑化フィルタを適用し、傾斜地とされたピクセルにはフィルタを適用しないことにより、傾斜地の地形を保存した。また、平地においても、標準偏差から堤防や微地形を抽出し、もとの SRTM データと置き換えた。

このように補正した SRTM ベースの地形データの有効性を検証するため、刈谷田川流域における洪水氾濫シミュレーションを行った。

図-8.3 に示すように、SRTM 補正後のシミュレーション結果は LP データによる結果とほぼ同等の氾濫区域となっている。本研究で開発した SRTM 地形データの補正手法は、数十 km² スケールといったかなり狭領域での局地的な詳細解析を含めて、低平な氾濫原における洪水氾濫解析のニーズに応えられる精度を有していると評価できることを確認した。

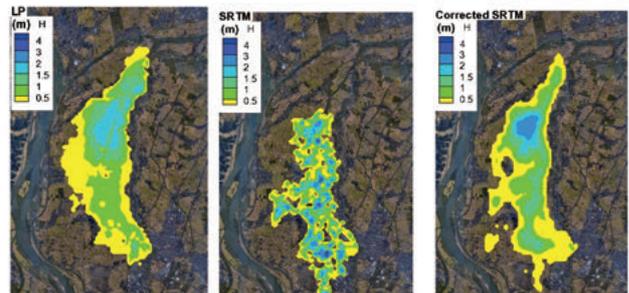


図-8.3 破堤 9 時間後の洪水氾濫シミュレーション結果 (LP データ (左)、SRTM 補正前 (中央)、SRTM 補正後 (右))

8.4 衛星地形データを活用した水災害リスクの評価手法の開発

8.3 で検証した、SRTM ベースの衛星地形データの最適な処理方法を実際の流域で検証するために、大スケールおよび中小スケールにおいて適用し、さらに洪水災害リスク評価手法を検討する。

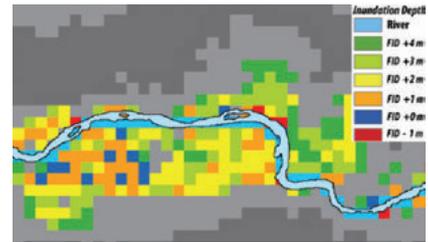
まず、大スケールとしてインダス川流域の洪水氾濫原 (約 100 万 km²) を対象に、マクロなリスクを検討するために必要となる洪水氾濫域を推定する手法を検討した。地形データとして SRTM 由来の HydroSHEDS (15 秒メッシュ) を用い、流出計算

等によって得られる河道メッシュにおける洪水ピーク流量を定常流として河道を中心とした氾濫地形に流れる場合の水位を氾濫水位と考え、浸水範囲、浸水深を推定する。図-8.4にこの方法でインダス川支流のカブール川の本川合流点付近の洪水氾濫域を評価したものと衛星画像による2010年8月5日時点の洪水氾濫領域を示す。浸水位が河川からの比高にして+3mの高さまで水が達したと想定した場合の洪水ハザード領域が、観測された氾濫領域とほぼ一致していることが分かる。また、この領域で浸水位が比高+3mまで達するのに必要な流量は、河道勾配や粗度の推定値から $3040 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と試算された。一方、2010年8月5日にカブール川最下流地点で観測された洪水流量は $3398 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、浸水位が+3mまで達するのに要する流量推定値と比較的よく一致しており、この方法で氾濫域を推定することができることがわかった。このようにして得られる氾濫域と人口分布を重ね合わせることで氾濫域内の人口を容易に推定することができる。世界の人口分布として、オークリッジ国立研究所(Oak Ridge National Laboratory)が編纂している30秒メッシュ(約1kmメッシュ)のLandScanが利用可能である。

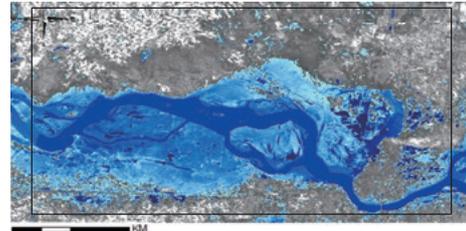
次に中小スケールの事例としてネパール西部に位置する西ラプティ川流域の下流部に位置する氾濫域を対象とした検討を行った。SRTMベースの地形情報を活用し、雨量確率規模毎に流出解析および2次元氾濫解析シミュレーションを行い、洪水ハザード(浸水深、氾濫流速、湛水時間)を算出した。氾濫シミュレーションの対象メッシュと流入流量を与える地点およびQuickBird衛星画像による対象エリアの100mメッシュ毎の土地利用、家屋数分布、農地面積を図-8.5に示す。(図-8.5の南西側の黒線はインドとネパールの国境である。)

シミュレーションで得たハザードをもとに、洪水規模毎に我が国の治水経済調査手法を適用し、建物に関する被害、農業被害額の試算を行うことで、水災害リスクを評価した。結果を表-8.3、表-8.4に示す。確率年が大きくなるにつれて、被害が大きくなる様子が確認できる。特に、30年確率と100年確率でみた場合、家屋被害額についてはおよそ2.5倍になり農業被害額については1.4倍となることが分かった。

ここで開発した被害評価手法は、被害単価をGDP比で換算することにより、我が国の手法を基本として提案し試算したものである。しかし、発展途上国

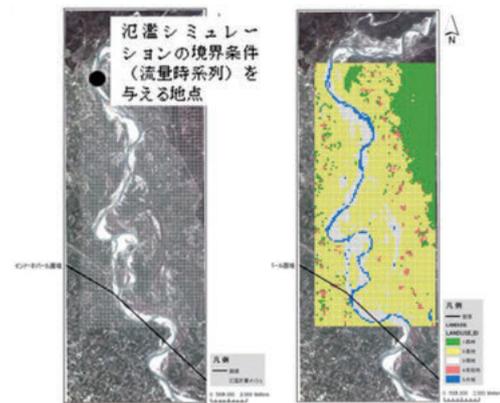


(a) 浸水ポテンシャルによる洪水氾濫エリアの評価

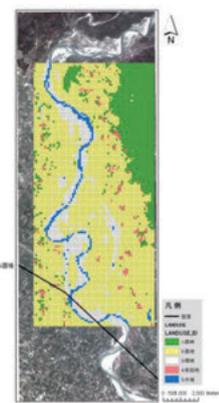


(b) 衛星画像による氾濫領域(黒枠内が(a)の表示箇所)

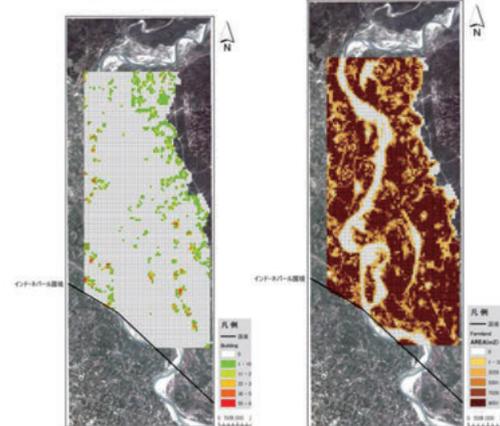
図-8.4 洪水氾濫エリア評価と衛星画像による氾濫領域



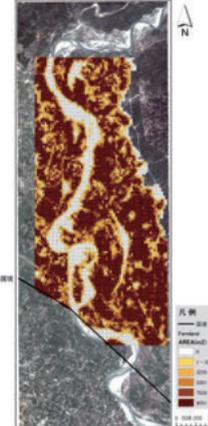
(a) 氾濫シミュレーション対象メッシュおよび境界条件(流量時系列)を与える地点



(b) 土地利用



(c) 家屋数分布



(d) 農地面積

図-8.5 氾濫シミュレーション対象メッシュとQuickBird衛星画像による100mメッシュ毎の土地利用、家屋数分布、農地面積

では、国毎に社会経済状況が大きく異なるため、例えば、今回の研究対象としたネパールの氾濫原における被害の実態を反映したものになっているかは未確認である。この点は、今後の課題である。

**表-8.3 洪水規模毎の建物に関する被害
(単位：千\$)**

	30年確率	50年確率	100年確率
家屋の倒壊	233	952	1,151
被害家屋撤去	4	16	19
家庭用品被害	2,337	4,366	4,673
家屋被害合計	2,574	5,333	5,843

**表-8.4 洪水規模毎の農業被害に関する被害
(単位：千\$)**

	30年確率	50年確率	100年確率
収穫物被害	2,478	3,200	3,305
農耕機械被害	268	501	537
農業被害合計	2,747	3,701	3,842

衛星地形データを活用した水災害リスク評価にあたり、大流域であるパキスタンのインダス川流域を対象に、衛星由来の地形データをベースとした洪水氾濫ハザードの評価を行う手法を開発し検証を行った。今後は、広大な氾濫原で実用的に用いることのできる社会経済データと組み合わせ、人的・経済的被害の算出方法を確立することが課題である。中小スケールの流域に対しては、ネパールの西ラプティ川で洪水氾濫解析の結果と我が国の治水経済調査の手法を組み合わせることで、途上国における洪水被害を評価する手法を提案した。

8.5 衛星地形データ活用教材の作成

本研究で得られた SRTM ベースの衛星地形データを氾濫解析に適した補正処理を行うための作業手順マニュアルを作成した。

8.6 おわりに

本研究では、SRTM、ALOS-PRISM、ASTER の衛星地形データについて LP データを真値として日本の平野地域で比較検証を行った。その結果、オリジナルデータではいずれも誤差が大きく、100m スケールまで平均化すれば ALOS PRISM や SRTM では地形の概要は把握できるものの、その場合でもいずれのデータも氾濫解析に必要な精度を確保できていないことを示した。

また、SRTM の周期的なノイズについて、ローパスフィルタを用いた処理手法を開発した。処理後の SRTM データを用いて、新潟県刈谷田川の 2004 年 7 月洪水における 2 次元氾濫解析を行い、その有効性を確認できた。一方、ALOS-PRISM に関しては、誤差の原因として、農地などでは地物判別が困難となり、ステレオマッチング精度が低下することにあることがわかっている。PRISM は、現在は 2.5m という極めて高い空間分解能を有していることから、その高分解能を生かした補正手法を開発することが、今後に残された大きな課題と考えている。

9. 発展途上国における総合的な洪水リスクマネジメント方策の事例研究

9.1 はじめに

洪水災害を防止・軽減するためには、災害が発生してから対応するのではなく、リスクの有無を評価してリスクのレベルや状況に応じたリスク軽減策の立案、その効果評価を経て、リスクマネジメントを実施することが求められる。本研究は、洪水予警報システムや洪水ハザードマップの導入や、その他のソフト・ハード対策による洪水リスク軽減効果の評価手法を開発するものである。洪水被害軽減体制の研究対象地域のひとつとして、度々大きなサイクロン災害を受けてきたバングラデシュを対象に、洪水リスクを最も効果的に軽減する対策群を分析し、総合的な洪水リスク軽減方策として提案するものである。

バングラデシュはほぼ10年おきに大規模なサイクロン災害を被っているが、ハード、ソフトの防災施策の進展により、ほぼ同じ規模のサイクロンの来襲に対して人命被害を低減することに成功してきた。その要因を分析し対策の組み合わせを検討すると共に、今後さらに被害を軽減するためのシナリオを提案する。

サイクロンによる災害の発生を防止することはできないが、構造物・非構造物対策を駆使して、災害の影響を相当程度緩和することは可能である。本研究は現地データ収集を行い、現地職員他から直接話をきき、サイクロン災害時の人命保護に有効なシナリオの開発を試みた。過去のサイクロン、特に2007年サイクロン・シドルやその他の調査から得られた情報をもとに、バングラデシュその他でサイクロン災害リスクを低減すべく、シナリオを開発した。

現在、推計400万人がリスクの非常に高い地域、500万人がリスクの高い地域に住んでいる。500万人のうち、30%は季節労働者、70%は土地を持たない住民である³⁸⁾。しかし、バングラデシュ国民には、以前から洪水やサイクロンとともに生活してきた歴史があり、政府も発足当時からそうしたリスクに対処してきた。堤防、サイクロンシェルターなどをつくり、早期警報システムを確立し、専門家や地元住民に教育や研修の機会を提供し、サイクロン災害リスクから生命と財産を守る意識の向上に努めてきている。

バングラデシュの水関連災害および1991年に同国を襲ったサイクロンに関して、ICHARMが実施した要因分析によれば、サイクロンによる高潮に対する構造物および非構造物対策は、死亡者数減少に絶えず貢献してきている³⁹⁾⁴⁰⁾。しかし、非常に強いサイクロンの場合、バングラデシュではいまだに非常に多くの人々が犠牲になっており、財産被害も膨大である。したがって、既存のサイクロン災害リスク緩和対策を異なるシナリオ毎に分類し、維持、強化を効率よくできるようにし、どのシナリオが生命保護という点で効果的なのかを理解することが重要となる。

9.2 既存リスク緩和対策

バングラデシュの堤防は天端高が平均海面から4～5.2mであり、この高さを超える高潮を防ぐことはできない。1970年、1991年、2007年のサイクロンによる高潮が6m以上であったので、堤防の高さをはるかに超えている⁴¹⁾。堤防の総延長は5,017kmあり、そのうちの957kmは、沿岸にあるポルダーの周囲に築堤されている(表-9.1)。957kmのうち、わずか60km分に海岸植生が併設されているにすぎない。避難所の現況は、利用可能なものが2,591、利用不可能なものが262、流されたものが88である。避難所の建設は1960年代に始まったが、収容可能人数は、いまだにリスクが高い地域の人口の50%程度である。避難所は、サイクロン襲来時に高潮洪水が発生したとき、生命保護に非常に効果的な対策であるが、制約もある。避難所が有効なのは、早期警報システム(Early Warning System : EWS)が機能している場合のみで、現時点で、EWSの効率や設置状況に関する情報は無い。

表-9.1 2011年1月現在のバングラデシュで利用されている減災対策

Countermeasures	Type	Units
Embankment	Sea-facing (Km)	957
	Total Length (Km)	5017
Polders	Sea-facing (No)	49
	Total (No)	123
Bio-shield	Sea-facing (Km)	60
Cyclone shelters	Usable (No)	2591
	Unusable (No)	262
	Washed away (No)	88
Early Warning Systems	News	?
	TV	?
	Radio	?

9.3 シナリオ別サイクロン災害対策の分類

現地調査、インタビュー、その他収集した情報からサイクロン災害対策を1) 堤防と海岸植生の組み合わせ(シナリオA)、2) サイクロンシェルターと早期警報システム(EWS)の組み合わせ(シナリオB)、3) 建築基準見直しと住宅強化(シナリオC)の三つに分類した。

1) シナリオA) 堤防と海岸植生

シナリオAは、堤防と海岸植生の組み合わせである。ポルダーは堤防により高潮から守られている。高潮がある程度の強さに達すると、越水や破堤が発生し、ポルダーが洪水被害を受ける危険性が高まる。植生による高潮減衰の仕組みはまだ研究途上にあるが、海岸植生には高潮・津波・波浪を低減する効果があるので⁴²⁾⁴³⁾、堤防と海岸植生を組み合わせることで、単独の対策とくらべてより効果的に越水や破堤を防止、あるいは小規模に止め、浸水深を抑制し、生命保護につながる。シナリオAは、生命保護とは別に、災害後の生活や堤防の防護などの利点もある。

現在、バングラデシュには、123のポルダーがあり、総延長5,017kmの堤防で周囲を囲まれている。そのうち、957kmは海岸線にある49のポルダーの周囲に築堤されている。堤防を守っている海岸林を**図-9.1**に示す。グーグル・アースで海岸線を確認すると、海岸沿いの957kmに及ぶ堤防のうち、わずか60kmほどに幅500m以上の海岸植生が堤防前面に設置され、堤防を防護しているのがわかる。

現地調査の結果、海岸植生によって、波堤や堤防の修復費用が20%から30%抑制されていると考えられている⁴²⁾⁴⁴⁾。さらに、Das⁴²⁾は、1:100mの傾斜地にある300mを超える海岸林で、速度が48.9%、浸水深が8.8%減少したと報告している。15番ポルダーの破堤地点横に位置する堤防は影響を受けておらず、現地調査の際ポルダーを取り巻くような林が見られたが、破堤地点はそうでなかったことを考えると、Dasらの報告は妥当だと考えられる。したがって、もし300mを超えるような海岸植生があったなら、Aila来襲時でも、浸水は雨水に起因するものみに留まり、15番ポルダーの生命や財産は守られたと考えられる。このようなことから、シナリオAは、越水、堤防および河岸の侵食、非常に強いサイクロン来襲時の破堤から堤防を守りつつ、人的および物的被害を防ぐのに最も適した方法であると考えられる。海岸植生は、堤防機能を強化し、耐久性を

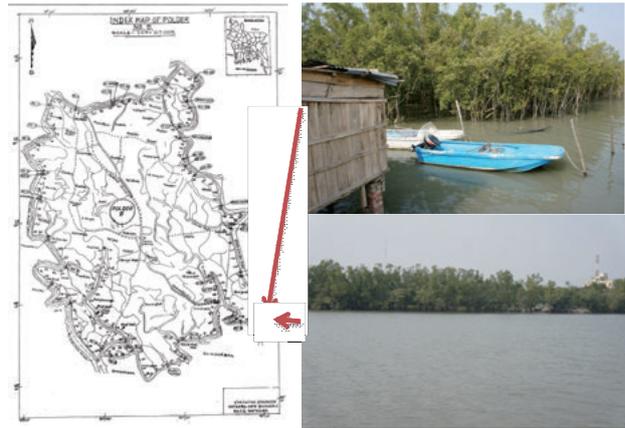


図-9.1 5番ポルダーの図と堤防を防護したマングローブ林(15番ポルダーはこの5番の対岸)

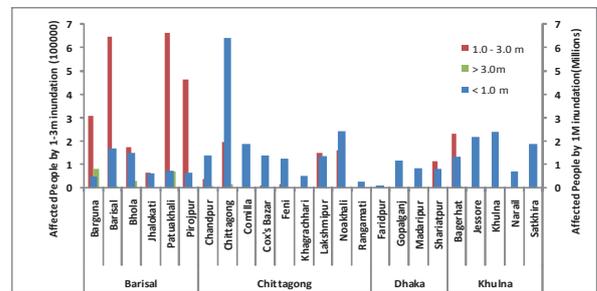


図-9.2 浸水深別サイクロン・シドル被災人口

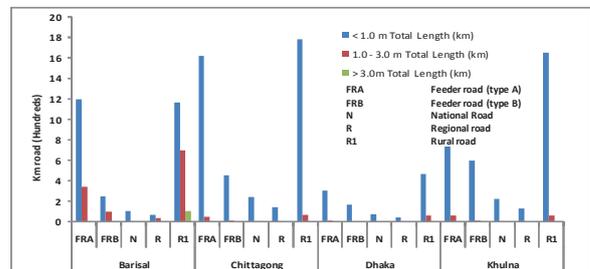


図-9.3 浸水深別サイクロン・シドル被災道路延長

高めるということからも、「最適な組み合わせ」であると言える。しかし、適切な管理や現地のニーズに合わせた制度上の配慮がない場合には、こうした試みは無駄に終わる可能性がある。

海岸植生は、環境に優しく、安価で高潮の強度や高さを低減する機能があるということで、近年ますます注目を集めている。海岸植生は、広い土地を必要とし、効果的に機能する大きさになるまで長い時間がかかる可能性があるが、その用途は非常に広い。例えば、1) 環境的な緩衝帯、2) 放牧エリア、3) 観光、4) 薪、蜂蜜他など林産物生産源、5) 森林

管理を行う地域社会の雇用機会、6) 水産養殖、7) 生薬、8) 土地改良などである。

シドルはバングラデシュ西部に位置する世界遺産であるシュンダルバンを通過し、コースの東側のポリシャル地区が最も被害を受けた。サイクロンが通過したクルナ地区よりポリシャル地区やチッタゴン地区で人的被害が大きかった(図-9.2)。同じような結果が、道路やカルバートなどインフラ施設にもみられた(図-9.3)。シュンダルバンなどで被害が比較的小さかった理由としては、通過コースの西側に位置していることと、海岸植生が高潮の高さや速度を減衰させたことにあると考えられる。

図-9.4はシドルによる被災地の全壊および半壊堤防と死亡者数、負傷者数、風速の関係を示している。サトキらはシュンダルバンに隣接している地区であり、クルナは北へ内陸に入ったところに位置する地区である。この位置関係が、この2つの地区で被害が比較的小さかった理由と考えられる。一方で、サイクロンの通過コースの東側に位置し、ベンガル湾岸沿いに近い地区は、海岸植生による防護もほとんどなく、比較的被害が大きかった。この東側では、全壊、半壊となる堤防の延長が沿岸部、例えばバルグナなどで比較的大きかった。死亡者数もこうした地域に集中しており、破堤との直接的な関係が示唆された⁴⁵⁾。

2) シナリオB) サイクロンシェルターと早期警報システム

シナリオBはサイクロンシェルターと早期警報システムの組み合わせである。人々が安全に避難するにはサイクロンシェルターと早期警報システムは相互補完的に機能することが重要である。さらに、現地住民が差し迫った災害について、その強度や予想される被害などを理解して、避難を決断する必要がある。シナリオBは、シドルのようにサイクロンの強度が非常に高い場合に有益である。この場合、強風によって茅葺き屋根が飛ばされ、樹木は根から引きぬかれ、電気は止まり、落下物や飛来物による危険もあり、浸水被害も大きいと考えられるからであ

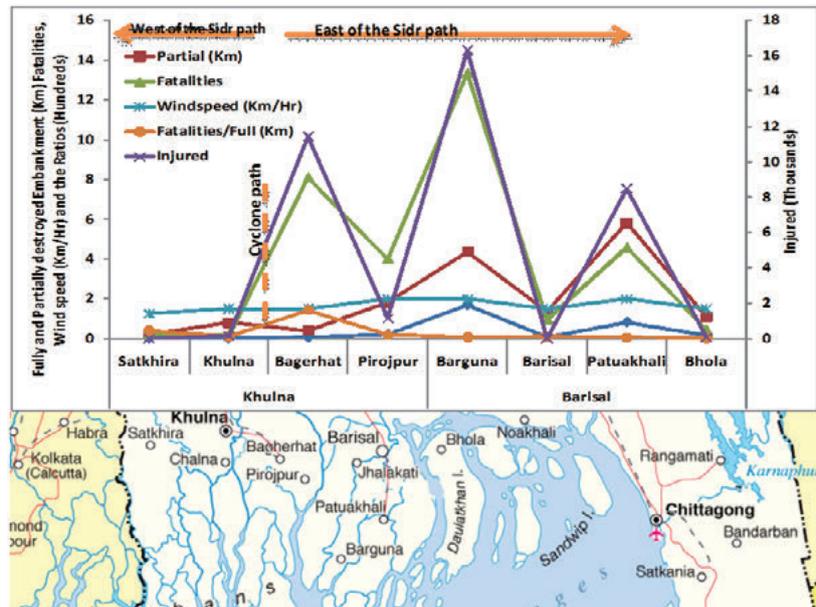


図-9.4 2007年サイクロン・シドル被災地の全壊および半壊堤防と死亡者数、負傷者数、風速の関係

り、特に子供、老人、女性は、強風や浸水を避けて安全を確保するために、シェルターに避難すべきである。避難すれば命が助かるという点で、近年、このシナリオの重要性が増している。しかし、シェルターは建設・維持に費用がかかること、また、スペースや男女別のトイレの問題や家畜を収容・保護できず財産を守ることができないという問題がある。また、シェルターまで避難すれば助かるものの、避難より、家に留まり、財産や家畜を守るほうを選ぶ人もいる。さらに、過去に誤報が相次いだ経験から、警報を信用せず、避難しない人々もいる。

前述の通り、バングラデシュの沿岸地域にあるシェルターは、利用できるものが2591基、利用できないものが262基、流されてしまったものが88基となっている。専門家および関係政府機関の一致した見解としては、2010年時点でさらに2,000から2,500基のシェルターが必要だとしている。シェルター1基の費用は、1,600人収容可能なもので、およそ214,000ドル、つまり1人当たり134ドルが必要となる。アジア開発銀行は、398基を2011年に建設する予定である。世界銀行はさらに50基、イスラム銀行は800基の建設を予定している。計画では、合計で3,839基のシェルターが利用できるようになり、現在利用できない262基を修理すれば近い将来4,101基が利用可能になる。バングラデシュ政府は2008年、被害人口の15%がシェルターに避難したと報告している。2591基には280万人を収容

可能で、これは沿岸に住むバングラデシュ国民の7.3%に当たる。

早期警報システムでは、バングラデシュ気象局が、関係諸機関と連携して、熱帯暴風雨を追跡し、サイクロンや高潮、さらにそれぞれの地域にはそれぞれ関係がある大気現象上の異常に関して警報を出している。新聞、テレビ、ラジオによって警報を周知している。警報があると、地方政府や、赤十字による地域のサイクロン事前対策プログラム（CPP）のボランティアが、避難を促す役割を果たしている。現在、バングラデシュのサイクロン事前対策プログラムは、サイクロンや高潮被害に遭いやすい51地区のうち32地区を網羅している。また、バングラデシュ政府は、地方にオペレーションセンターを設置するとともに、緊急対応を監督するために司令官を配置している。現地、地域、国の各レベルで行う救援活動は、長距離の場合高周波数、近距離の場合超高周波数をそれぞれ利用して、無線機で連絡をとって、連携を図っている。災害時には、携帯電話を使って、連絡を取り合っている。

3) シナリオ C：家屋強化と建築基準の見直し

バングラデシュ沿岸部では、わずか2.23%の家屋が、サイクロンによる被害を最小限に抑えられる、レンガとコンクリート屋根の家である。こうした家を建てることのできるのは、年間一人あたりの所得が470ドル以上ある家庭に限られる。地元ではプカハウスと呼ばれている。プカハウスは2階建てであることが多く、非常に強いサイクロンに対応するための建築基準に関する条項などを新たに加えた、修正1993年バングラデシュ建築基準に従って家屋を強化した場合、近所の人達のシェルターとして使うこともできるようになった。バングラデシュ政府は、補助金を出して、家屋を強化してもらい、シェルターとして使うということを考えているという話もある（バングラデシュ環境地理情報センター職員との非公式情報交換より）。現地調査では、沿岸部の家屋は非常に脆弱で、サイクロンを凌げる造りではなかった。さらに、通常家屋は60cmほどの高さに床を上げてあるが、サイクロンが来れば、簡単に浸水してしまう高さである。また、茅葺き屋根は簡単に吹き飛ばされてしまう。こうした状況では、強化したプカハウスはシェルターとして機能する可能性はある。プカハウスは費用対効果も高く、2階建てのもので、床面積が152m²ほどであれば、11,090ドルぐらいの費用で済む（表-9.2）。家屋の強化にさら

表-9.2 バングラデシュ沿岸のプカハウスとサイクロンシェルターの費用比較

注：非常に強いサイクロンにも耐えうるようプカハウスを強化する費用は、家一軒を新築する場合の半分と考えられる。

	Cost of a 2F house (USD)	Estimated cost of reinforcement	Total Cost (USD)	Space per person (m ²)	No of people	Cost per person (USD)
Pucca House	11090	5545	16635	1m ²	152	109.44
Cyclone Shelter	214000	0	214000	1m ²	1600	133.75

に5,545ドルほど必要であると推測されるが、これで152人を収容可能となる。一人あたりの費用を計算すると、110ドルとなり、サイクロンシェルター1基にかかる一人あたりの費用が134ドルであるから、プカハウスを強化して、シェルターとして利用するほうが安価だと言える。

洪水時の溺死から人々を救うために、プカハウスを日本の内閣府が概略説明している基準にしたがって強化するという事も考えられる。日本の基準は3つの要因を考慮して作られている。家の高さ、住人の年齢（65歳以上、65歳未満）、住人の身長である。地面と1階の床との間は60cm、それぞれの階の高さは2.7mとなっている。浸水が60cmほどであれば、誰もが歩いて近くのシェルターまで避難することは可能である。浸水がそれ以上になれば、年齢が高い者は2階に避難することになる。若い住民の場合には、さらに屋根まで避難することが可能であり、子どもや配偶者が屋根に登る際の手助けも可能である。身長分のおよそ1.2mを考慮すれば、洪水からの安全は確保できると言える。この基準で考えると、年齢が高い人の場合は、水位が4.5m

(0.60+2.7+1.2) までであれば、安全ということになる。また若い住民の場合は、水位が7.2m

(0.60+2.7+2.7+1.2) まで安全を確保できることになる。しかし、バングラデシュの場合には、屋根は通常茅葺きであり、一般の人々には2階建てを建てることはできない。したがって、安全な水位はわずか1.8m (0.6+1.2m) までということになる。家の基礎を上げて、頑丈な家を立てれば、もっと多くの人命を救うことができるということである。解決法として、1993年版バングラデシュ建築基準を見直して、サイクロンや高潮に対応するための建築基準に関する条項を加えることが考えられる。それによって、経済的に余裕のある者が頑丈な家を建て、余裕のない者は、サイクロンが来た場合、すぐにそこに避難するということが可能になる⁴⁶⁾。

表-9.3 シナリオ A、B、C の基本的機能と費用の比較

9.4 おわりに

バングラデシュ沿岸部に対する総合的なサイクロン災害対策は、シナリオ A、B、C の組み合わせが考えられる (表-9.3)。このシナリオは、サイクロン減災対策それぞれが相互補完的に機能することを念頭に開発されている。各々のシナリオの効果を定量的に評価することは、データが十分でないことから非常に難しいが、どのシナリオも独立性、重要性、独自性を備え、それぞれに長所がある。

シナリオ A は、通常レベルのサイクロンだけでなく、非常に強いサイクロンの場合でも、堤内やポルダー内の生命や財産を守るのに効果を発揮すると考えられる。シナリオ B は、破堤、越水、さらに強風が予想され、生命保護のために避難が不可欠になると考えられるシドルやポーラといった非常に強いサイクロンの場合に効果的であると考えられる。また、シナリオ C は、サイクロンシェルターに避難することが困難な場合に力を発揮すると考えられる。小さな子供、老人、障害者のいる家族、サイクロンのために、シェルターへ行くための道路が被害を受けた場合などである。シナリオ A の初期費用は最も大きく、シナリオ C は最も小さいが、機能や効果は、場所や災害強度など諸要因と相まって、常に一定ではない。したがって、どのシナリオもそれぞれに重要であることから、シナリオ同士の適切な組み合わせを考える必要がある。

バングラデシュのサイクロンによる死者数は図-9.5 に示すように 1970 年 500,000 人、1991 年 138,863 人、2007 年 3,363 人で 1970 年の 0.67% となっている。死者数は依然として多いものの、人数は劇的に減少している。堤防延長 1km あたり、平均で

Scenarios	Scenario A (Embankment & Bioshield)	Scenario B (Cyclone Shelter and EWS)	Scenario C (Housing Reinforcement Schemes)
Saves what?	Life and property	Life of evacuees	Life of evacuees
Saves how many?	Many people	1000 to 2000 people	50 to 60 people
When useful?	Normal & Extreme Cyclones	Extreme Cyclones	Normal & Extreme Cyclones
How much (US\$)?	256275/Km Embankment 168000/Km ² Bioshield	214000/unit Cyclone Shelter EWS?	16635/unit EWS?

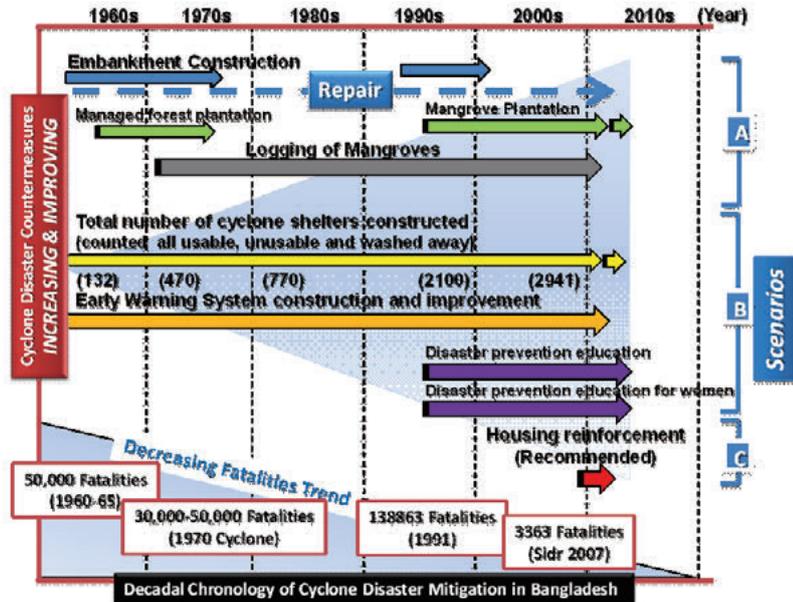


図-9.5 シナリオ別に分類したバングラデシュ政府のサイクロン災害対策と死亡者数の関係

死亡者数の 10%あるいは少なくとも 3%が、シドル来襲時に破堤がなければ、助かったと考えられている。現時点では、対策と災害の相関を示すような情報はなく、災害もいろいろなタイプのものがあり得るので、シナリオの適切な組み合わせが重要である。

10. 結論

洪水、干ばつ及び暴風雨などの水関連災害は、1900年から2009年に甚大な被害をもたらした災害約1,000件のうち88%以上を占め、20世紀で最も発生頻度が高くなっている。特に、洪水及び暴風雨による災害はここ15年で急激に増加している。

本重点プロジェクト研究では、水関連災害のうち、洪水災害及び津波災害に焦点をあてて、6つの達成目標を掲げ8課題で研究を実施した。達成目標毎の成果の概要は以下のとおりである。

- (1) 地上水文情報が十分でない途上国に適用可能な洪水予警報システムの開発：日本の技術で開発された最も高解像度の人工衛星観測雨量の補正方法を開発するとともに、インターネット環境さえあれば使える総合洪水解析(IFAS)Ver1.0をVer1.2に改良し、様々な機能追加等を行った。さらに地上雨量との合成により衛星雨量の精度を高めることのできる条件を、限定的な事例ながら明らかにするとともに、IFASを洪水予測システムとして機能させるための追加モジュール(Auto IFAS)を開発した。
- (2) 発展途上国の自然・社会・経済条件下における洪水ハザードマップ作成・活用ガイドラインの策定：東南アジアを中心とした発展途上国の実情を踏まえた洪水ハザードマップガイドライン(案)や活用事例集を作成し、JICA研修で活用した。
- (3) 構造物対策と非構造物対策の組み合わせによる、リスク軽減効果評価手法の開発：構造物対策が困難な発展途上国における津波・高潮防災に資するために、「海岸植生を用いた津波防災計画(案)」を作成した。また、複数の対策手法に対しリスク軽減効果を総合的に評価する手法を開発した。
- (4) 動画配信等IT技術を活用した人材育成用教材の開発：研修に参加しない人もIFASを活用できるようIFASのアプリケーション、マニュアルをICHARMのWEBサイトにアップロードし、海外から広く利用されてきた。また、他の教材もWEBサイトにアップロードしてきた。
- (5) 海外流域を対象とした総合的な洪水リスクマネジメント方策の提案：防災施設に対する予算確保が困難な途上国において、現地材料で安価に構築・維持できる対策工法、早期警戒避難のためのハザードマップ作成と避難地の整備、根幹的な堅牢構造物対策について、事例(バングラデシュ)

により現地の状態を踏まえたリスク低減効果の評価手法と計画案を作成した。

- (6) 河川下流域における津波災害のリスク評価・管理手法の開発：河川遡上津波の挙動を解明するとともに、緩勾配河川に侵入した津波の予測手法を開発した。また、遊水地による津波の低減効果を模型実験で定量的に示した。

これらの成果を活用し、情報ネットワーク活動により国際社会の水災害への関心を高め、国際研修やセミナー等により人材育成や組織強化に努め、さらに、UNESCOを通じた、「パキスタンにおける洪水予警報および管理能力の戦略的強化プロジェクト」やバングラデシュ、インドネシアおよびメコン川下流域を対象としたアジア開発銀行地域技術協力連携プロジェクト等を実施し対象地域の洪水災害対策に貢献してきた。今後、気候変動の影響などでますます激化が懸念されている世界の水災害への対応にこれまで以上に貢献できるように努めていく所存である。

参考文献

- 1) Ben Wisner, Piers Blaikie, Terry Cannon, Ian Davis : At Risk Second edition, p471, 2004
- 2) 矢野勝正 : 水災害の科学, 技報堂, 1971
- 3) United Nations Development Programme: Reducing Disaster Risk, A Challenge for Development, 2004
- 4) 吉谷純一, 竹本典道, タレク・メラブテン : 土木研究所資料, 第 4052 号「バングラデシュにおける水災害に関する要因分析」, 2007. 6
- 5) 吉谷純一, 竹本典道, タレク・メラブテン : 土木研究所資料, 第 4069 号「スリランカにおける水災害に関する要因分析」, 2007. 6
- 6) 吉谷純一, 竹本典道, タレク・メラブテン : 土木研究所資料, 第 4070 号「フィリピンにおける水災害に関する要因分析」, 2007. 6
- 7) 吉谷純一, 竹本典道, アディカリ・ヨガナス, チャボシアン・セイエッド・アリ : 土木研究所資料, 第 4093 号「バングラデシュ・ハティア島における 1991 年サイクロン災害要因に関する事例研究」, 2008. 2
- 8) Yoganath Adikari, Junichi Yoshitani, Norimichi Takemoto, Ali Chavoshian : Technical Note of PWRI, No.4088"Technical Report on the Trends of Global Water-related Disasters - a revised and updated version of 2005 report -", 2008. 1
- 9) 田中茂信, 栗林大輔 : 土木研究所資料, 第 4137 号「JICA 研修「洪水ハザードマップ作成」実施報告書」, 2009. 3
- 10) 国土交通省河川局治水課 : 「洪水ハザードマップ作成の手引き」, 2005. 6
- 11) 田中茂信, 栗林大輔, ディナル イスティアント : 土木研究所資料, 第 4113 号「UN/ISDR 総合津波防災研修」研修実施報告書」, 2008. 11
- 12) Ushio, T., T. Kubota, S. Shige, K. Okamoto, K. Aonashi, T. Inoue, N. Takahashi, T. Iguchi, M. Kachi, R. Oki, T. Morimoto, and Z. Kawasaki : A Kalman Filter Approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from Combined Passive Microwave and Infrared Radiometric Data, J. Meteor. Soc. Japan, in press, vol. 87A, pp137-151, 2009.
- 13) 瀬戸心太, 芳村圭, 沖大幹 : 高分解能衛星降水マップによる日本域の洪水検出能力, 水工学論文集, 第 52 巻, pp355-360, 2008
- 14) 浅井富雄, 武田喬男, 木村竜治 : 大気科学講座 2 雲や降水を伴う大気, 東京大学出版会, pp.140, 1981
- 15) 気象研究所 : 台風の構造の変化と移動に関する研究—台風 7916 の一生—, 気象研究所技術報告第 14 号, pp.85-94, 1985
- 16) 杉浦友宣 他 : 衛星雨量情報を利用した洪水予測システム(IFAS)の開発, 河川技術論文集, 第 14 巻, pp53-58, 2008
- 17) 鈴木俊明, 寺川陽, 松浦達郎 : 実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発, 土木技術資料, Vol.38-10, pp.26-31, 1996
- 18) Takeuchi, K, Hapuarachchi, H.A.P., Zhou, M.C., Ishidaira, H. & Magome, J. (2008): A BTOP model to extend TOPMODEL for distributed hydrological simulation of large basins, Hydrological Processes, vol. 22, pp. 3236-3251
- 19) 白石芳樹, 深見和彦, 猪股広典 : 雨域移動情報を活用した衛星雨量データ補正方法の提案—吉野川流域の事例解析—, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.385-390, 2009.2
- 20) JAXA/EORC: Global Rainfall Map in Near Real Time.
<http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index.htm>
- 21) 佐山敬洋, Nay Myo Lin, 深見和彦, 田中茂信, 竹内邦良 : 降雨流出氾濫モデルによるサイクロンナルギス高潮氾濫シミュレーション, 水工学論文集, 第 55 巻, S529-534, 2011
- 22) Sayama, T., Fukami, K., Tanaka, S., and Takeuchi, K.: Rainfall-Runoff-Inundation Analysis for Flood Risk Assessment at the Regional Scale, Proceedings of the 5th Conference of Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources (APHW), Hanoi Vietnam, 8-9 Nov, pp. 568 - 576, 2010
- 23) Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K.: Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of the 2010 Pakistan Flood in the Kabul River Basin, Hydrological Sciences Journal, vol.57, pp. 298-312, 2011

- 24) World Meteorological Organization (WMO), Integrated Flood Management Concept Paper, 27pp, 2009
- 25) Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S., Wilson, D. : Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review, *Geomorphology*, 90, pp. 208 – 225, 2007
- 26) 高棹琢馬, 椎葉充晴 : Kinematic Wave 法への集水効果の導入、京都大学防災研究所年報、24、B-2, pp. 159-170、1981
- 27) Raws, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L. and Shirmohammadi, A.: Infiltration and soil water movement. *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill Inc., New York: 5.1-5.51., 1992
- 28) Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A. : New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, AGU* 89(10), pp. 93–94, 2008
- 29) Shuto, N. : The Effectiveness and Limit of Tsunami Control Forest, *Coastal Eng. In Japan* 30(1), 143-153, 1987
- 30) Tanaka, N. and Sasaki, Y. : Role of coastal vegetation at 2006 Java Tsunami disaster and its breaking or bending threshold, *Proceeding of Hydraulic Engineering, Japan*, No.51, pp. 1445-1450, 2007
- 31) Tanaka, N., Takemura, T., Sasaki, Y. and Mowjood, M.I.M. : Species different of the breaking condition of coastal vegetation in Sri Lanka by tsunami and the difference of tsunami arrival time behind the vegetation, *Ann. J. of Coastal Eng., JACE (in Japanese)*, Japan, Vol.53, 281-285, 2006
- 32) 田中茂信, ディナル イスティアント, 栗林大輔 : 土木研究所資料, 第 4177 号「Planning and Design of Tsunami-mitigative Coastal Vegetation Belts」、2010. 8
- 33) 安田浩保, 渡邊康玄, 藤間功司 : 2003 年 9 月の十勝沖地震に伴い発生した津波の河川湖上, *土木学会論文集*, No.768/II-68, pp.209-218, 2004.
- 34) Peregrine, D.H. : Calculations of the development of an undular bore, *J. Fluid Mech.*, Vol.25, pp.321.330, 1966
- 35) たとえば、後藤智明 : 2 段階混合差分法を用いた線形分散波方程式の数値計算における打ち切り誤差, *津波工学研究報告*, 第 20 号, pp.13.22, 2003
- 36) 7.13 新潟豪雨洪水災害調査委員会 : 7.13 新潟豪雨洪水災害調査委員会報告書、2005
- 37) 国土地理院 : 平成 16 年 7 月新潟・福島豪雨による冠水区域図 (三条・見附・中之島地区) http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/SAIGAI/16niigata/higai-zyoukyou-niigata_suigai.html
- 38) Benson C. and Clay E., Bangladesh: disaster and public finance. Disaster risk management working paper series no. 6; Disaster Management Facility, World Bank, Washington, DC 20433, 2002
- 39) Yoshitani J., Takemoto N. and Merabtane T. : Factor analysis of water-related disaster in Bangladesh. Technical Note of PWRI No. 4068, 2007
- 40) Yoshitani J., Takemoto N., Adikari Y. and Chavoshian A. : Case study on risk factor analysis of 1991 cyclone disaster in Hatiya Island, Bangladesh. Technical Note of PWRI No. 4094, 2008
- 41) Chaudary, G.A. : Impact of Cyclone Sidr in Bangladesh. High Level Expert Panel on Water & Disasters/UNSGAB, 28 January 2008, Seoul, Korea
- 42) Das S.C., Iimura K and Tanaka N : Effects of coastal vegetation species and ground slope on storm surge disaster mitigation. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering* No. 32, 2010
- 43) Feagin R.A., Mukharjee N., Shanker K., Daird A.H., Cinner J., Kerr A.M., Koedam N., Sridhar A., Arthur R., Jayatissa L.P., Seen D.L. Menon M., Rodriguez S., Shamsuddoha Md. and Dahdouh-Guebas F. : Shelter from the storm? Use and misuse of coastal vegetation bioshields for managing natural disasters. *Conservation Letters* 3, pp. 1-11, 2010
- 44) Forbes K. and Broadhead J. : The role of coastal forests in the mitigation of tsunami impacts. Food and Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, 2007
- 45) Ministry of Food and Disaster Management : SUPER CYCLONE SIDR 2007 -Impacts and Strategies for Interventions-, Bangladesh Secretariat, Dhaka, Bangladesh, 2008

- 46) Bureau of Research Testing and Consultancy:
Upgrading of Bangladesh National Building
Code 1993. Inception Report submitted to
Housing and Building Research Institute,
2010

水生生態系の保全・再生技術の開発

水生生態系の保全・再生技術の開発

河瀬芳邦¹⁾、高柳淳二²⁾、中村敏一³⁾、末次忠司⁴⁾、岡本誠一郎⁵⁾、尾崎正明⁶⁾、山下洋正⁷⁾、新井小百合⁸⁾、三輪準二⁹⁾、天野邦彦¹⁰⁾、傳田正利¹¹⁾、中村圭吾¹²⁾、中西哲¹³⁾、大寄真弓¹⁴⁾、矢島良紀¹⁵⁾、尾嶋百合香¹⁶⁾、赤松史一¹⁷⁾、小林草平¹⁸⁾、中田和義¹⁹⁾、南山端彦²⁰⁾、鈴木讓²¹⁾、小森行也²²⁾、平山孝浩²³⁾、岡安祐司²⁴⁾、久岡夏樹²⁵⁾、萱場祐一²⁶⁾、皆川朋子²⁷⁾、大石哲也²⁸⁾、佐川志朗²⁹⁾、真田誠至³⁰⁾、片野泉³¹⁾、深見和彦³²⁾、猪股広典³³⁾、宮本守³⁴⁾、Lalith Hemanthe Rajapakse³⁵⁾

Development of preservation and restoration techniques for aquatic ecosystem

Yoshikuni KAWASE, Junji TAKAYANAGI, Toshikazu NAKAMURA, Tadashi SUETSUGI, Seiichiro OKAMOTO, Masaaki OZAKI, Hiromasa YAMASHITA, Sayuri ARAI, Junji MIWA, Kunihiko AMANO, Masatoshi DENDA, Keigo NAKAMURA, Satoru NAKANISHI, Mayumi OOOYORI, Yoshinori YAJIMA, Yurika OSHIMA, Fumikazu AKAMATSU, Souhei KOBAYASHI, Kazuyoshi NAKATA, Mizuhiko MINAMIYAMA, Yutaka SUZUKI, Koya KOMORI, Takahiro HIRAYAMA, Yuji OKAYASU, Natsuki HISAOKA, Yuichi KAYABA, Tomoko MINAGAWA, Tetsuya OOISHI, Shiro SAGAWA, Seiji SANADA, Izumi KATANO, Kazuhiko FUKAMI, Hironori INOMATA, Mamoru MIYAMOTO, Lalith Hemanthe Rajapakse

要旨

我が国の淡水域や湿地帯の水生生物は、河川や湖沼における改修工事、河川周辺農地における営農形態の変化や、流域の土地利用変化により大きな影響を受けている。このような水域環境の変化のなかで地域固有の生態系を持続的に維持するためには、河川・湖沼が本来有していた生態的機能を適正に評価し、これを保全・再生することが必要である。このため、本重点プロジェクト研究では、河川・湖沼が有する生態的機能をより適切に評価するため、必要となる空間的・時間的なデータや生息場物理情報から生物の行動や生物量を予測・推定する手法を開発した。また、水域や水際域が持つ物理的類型景観、水位流量変動特性、土砂・栄養塩類・有機物動態、河床材料などの要素の生態的機能の定量的な評価手法を開発し、河川・湖沼などの水域環境を生物・生態系の視点から良好な状態に保全・再生するための技術開発を行った。

キーワード：自然再生、水生生態系、生物調査手法、河川地形、流出モデル、土砂・栄養塩類動態、河岸処理、水際植生、

Synopsis

Aquatic ecosystems in wetlands, lakes and rivers in Japan have been greatly impacted by engineering works, farm modernization, and land use changes in watersheds. Therefore we need to develop adequate evaluation methodologies and reconstruction techniques for conservation and restoration of the ecosystem functions. In this research project, we developed the prediction and estimation methods of behavior and biomass of aquatic organisms based on the spatiotemporal data and physical factors of habitat. We also developed the quantitative evaluation methods of aquatic landscape classification, flow regime, grain size distribution, nutrients and organic matter dynamics. We examined the new restoration methodologies of aquatic ecosystems and

advanced restoration techniques by adopting both ecological and physical aspects.

- 1) 水環境研究グループ長
- 2) 元水環境研究グループ長
- 3) 元水環境研究グループ長
- 4) 前水環境研究グループ長
- 5) 前材料資源研究グループリサイクルチーム上席研究員
- 6) 元材料地盤研究グループリサイクルチーム上席研究員
- 7) 前材料地盤研究グループリサイクルチーム主任研究員
- 8) 前材料地盤研究グループリサイクルチーム研究員
- 9) 水環境研究グループ河川生態チーム上席研究員
- 10) 前水環境研究グループ河川生態チーム上席研究員
- 11) 水環境研究グループ河川生態チーム主任研究員
- 12) 元水環境研究グループ河川生態チーム主任研究員
- 13) 水環境研究グループ河川生態チーム研究員
- 14) 水環境研究グループ河川生態チーム研究員
- 15) 前水環境研究グループ河川生態チーム研究員
- 16) 元水環境研究グループ河川生態チーム研究員
- 17) 水環境研究グループ河川生態チーム専門研究員
- 18) 前水環境研究グループ河川生態チーム専門研究員
- 19) 前水環境研究グループ河川生態チーム専門研究員
- 20) 水環境研究グループ水質チーム上席研究員
- 21) 前水環境研究グループ水質チーム上席研究員
- 22) 水環境研究グループ水質チーム総括主任研究員
- 23) 水環境研究グループ水質チーム主任研究員
- 24) 前水環境研究グループ水質チーム主任研究員
- 25) 前水環境研究グループ水質チーム研究員
- 26) 水環境研究グループ自然共生研究センター上席研究員
- 27) 前水環境研究グループ自然共生研究センター主任研究員
- 28) 水環境研究グループ自然共生研究センター研究員（前水環境研究グループ河川生態チーム研究員）
- 29) 水環境研究グループ自然共生研究センター研究員
- 30) 元水環境研究グループ自然共生研究センター専門研究員
- 31) 元水環境研究グループ自然共生研究センター専門研究員
- 32) 水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ水文チーム上席研究員
- 33) 前水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ水文チーム研究員
- 34) 水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ水文チーム研究員
- 35) 前水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ水文チーム専門研究員

水生生態系の保全・再生技術の開発

目 次

1. 序論	1
1. 1 研究の背景と目的	1
1. 2 本論文の構成	1
2. 新しい水生生物調査手法の確立	2
2. 1 概説	2
2. 2 生物の分布を考慮した定量的底生生物調査手法の確立	2
2. 3 野生動物行動予測及びモニタリング手法の開発	4
3. 河川地形の生態的機能の解明	7
3. 1 概説	7
3. 2 河床における生物分布と物理環境の関係解明等と水生生物の生息環境に配慮した河川環境再生手法の提案	7
3. 3 野性動物の行動様式と物理環境条件の関係解明	11
3. 4 自然的攪乱に伴う地形変化や人的管理が植生へ与える影響と植生定量的評価に向けての提案	14
3. 5 河岸－水際タイプの生態的機能の解明と河岸処理手法等の提案	19
3. 6 流量、河床の状態、底生動物、魚類等の摂食圧の関係解明と河床環境評価手法の提案	24
4. 流域における物質動態特性の解明と流出モデルの開発	30
4. 1 概説	30
4. 2 流域規模での水・物質循環管理支援モデルの開発	30
4. 3 河川の物理環境・流況が物質動態に与える影響	40
5. 河川における物質動態と生物・生態系との関係性の解明	43
5. 1 概説	43
5. 2 物質動態と河道特性が水生生物に与える影響	43
5. 3 土砂供給量減少に伴う指標生物とその環境要因の関係の解明	47
6. 湖沼の植物群落再生による環境改善手法の開発	53
6. 1 概説	53
6. 2 沈水植物群落生育適地の抽出	53
6. 3 埋土種子を用いた再生手法	55
6. 4 霞ヶ浦における沈水植物移植生育実験	55
6. 5 生態機能に配慮した水位変動のあり方に関する提案	56
6. 6 まとめ	57
7. 結論	58

1. 序論

1.1 研究の背景と目的

我が国の淡水域や湿地帯の水生生物は、河川や湖沼における改修工事、河川周辺農地における営農形態の変化や、流域の土地利用変化により大きな影響を受けている。このような水域環境の変化のなかで地域固有の生態系を持続的に維持するためには、河川・湖沼が本来有していた生態的機能を適正に評価し、これを保全・再生すること（自然再生）が必要であり、社会的要請も大きい。

本重点プロジェクト研究では、河川・湖沼が有する生態的機能について、より適切に評価する上で必要となる空間的・時間的なデータや面的な生息場物理情報から生物の行動や生物量を予測・推定する手法を開発した。また、水域や水際域が持つ物理的類型景観、流量・水位変動特性、土砂・栄養塩類・有機物動態、河床材料などの要素が生物・生態系に影響する状況を種々の視点から抽出し、これらの生態的機能を定量的に評価すると共に、河川・湖沼などの水域環境を生物・生態系の視点から良好な状態に保全・再生するための技術開発を行うことを研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

- 1) 新しい水生生物調査手法の確立
- 2) 河川地形の生態的機能の解明
- 3) 流域における物質動態特性の解明と流出モデルの開発
- 4) 河川における物質動態と生物・生態系との関係性の解明
- 5) 湖沼の植物群落再生による環境改善手法の開発

また、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

- 1) 水生生物の生息環境の調査手法と生態的機能の解明に関する研究（平成 18～22 年度）
- 2) 河川工事等が野生動物の行動に与える影響予測及びモニタリング手法に関する研究（平成 18～22 年度）
- 3) 河川における植生管理手法の開発に関する研究（平成 17～21 年度）
- 4) 多自然川づくりにおける河岸処理手法に関する研究（平成 18～22 年度）
- 5) 河床の生態的健全性を維持するための流量設定手法に関する研究（平成 18～22 年度）

- 6) 流域規模での水・物質循環管理支援モデルに関する研究（平成 18～22 年度）
- 7) 河川を流下する栄養塩類と河川生態系の関係解明に関する研究（平成 18～22 年度）
- 8) 土砂還元によるダム下流域の生態系修復に関する研究（平成 18～21 年度）
- 9) 湖沼・湿地環境の修復技術に関する研究（平成 18～22 年度）

1.2 本論文の構成

本論文の構成を要約すると以下の通りである。

第 1 章「序論」では、本重点プロジェクト研究の背景と目的を示すとともに、本論文の構成について述べる。

また、2 章以降では、本重点プロジェクト研究を構成する達成目標毎に章立てを行い、該当する各個別課題の研究成果の概要について述べる。

また、達成目標毎の成果の要約を第 7 章結論で述べる。

2. 新しい水生生物調査手法の確立

2.1 概説

河川事業において環境や生態系に配慮した計画・設計を行うことが求められているが、そのためには、生物生息場としての物理環境とそこに棲む生物、ならびに河川が有する生態的機能を適切に評価する必要がある。これまで河川環境の調査は、環境因子と空間的・時間的に限定された生物の行動や生物データの因果関係の把握に限定される傾向があり、空間的・時間的に河川の生態系を評価することが難しかった。本研究では、より適切な河川の生態的機能の評価が可能となるよう、より多くの空間的・時間的データや生息場物理情報を面的に取得し、野性動物行動データや生物情報を重ね合わせてその行動や生物量を予測・推定する手法を開発した。

2.2 生物の分布を考慮した定量的底生生物調査手法の確立

2.2.1 概要

生態系に配慮した河川づくり考える上で、生物生息場としての河川物理環境とそこに棲む生物の関係を適切に評価することは重要である。これまでの河川環境の調査は局所的なものに限られてきたため、空間的に河川の生態系を評価することが困難であった。ここでは、底生動物の現存量や種構成は淵や礫径、河床安定性によって異なることを示し、河川における瀬淵の面積、礫径、河床安定性から底生動物の潜在的な生息量が推測可能となることを示した。また推定に当たっては、河川の広い範囲にわたって瀬淵の面積を把握することが必要なことから、航空写真等から河川区間における瀬淵を抽出する手法の開発等を行った。

2.2.2 航空写真及びレーザープロファイラによる水面標高データを用いて瀬淵を抽出する手法

河川において瀬淵構造は典型的な河床地形パターンであり、瀬か淵であるかによって底生動物の現存量や群集構造は大きく異なる。瀬や淵は通常現地において判断されるが、水面の波立ちに明瞭な違いがあることから、航空写真においても確認できることは多い。航空写真等から瀬淵を抽出でき水域面積等を測定できれば、河川の広い範囲について、また航空写真が存在する様々な年代において、瀬や淵の多さを評価することが可能となる。本

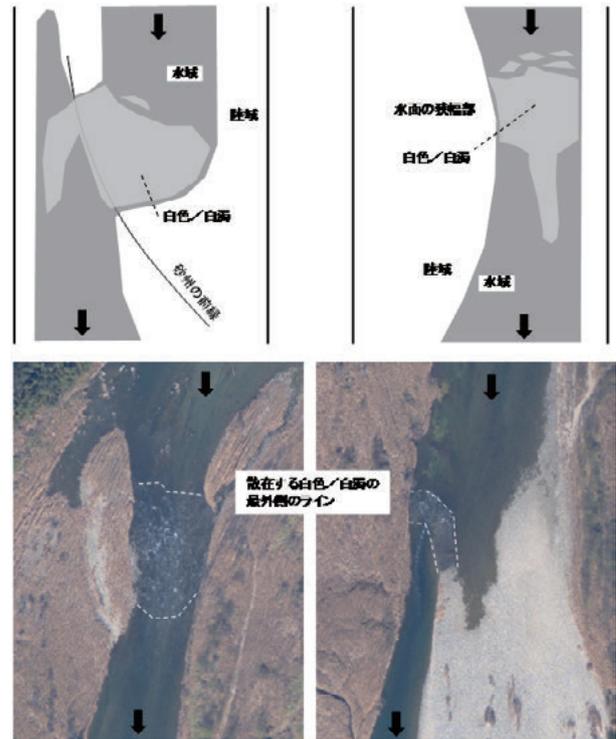


図-2.2.1 瀬の判断の模式図（上）と航空写真上の例（下）

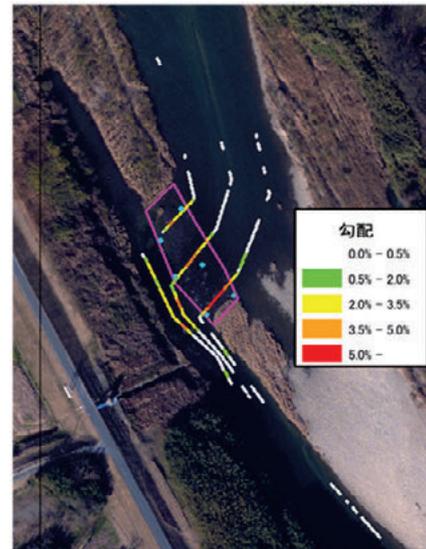


図-2.2.2 ある瀬の部分における3縦断線と水面勾配

研究では、愛知県豊川（11.6k～27.6k）を対象に、航空写真等から瀬と淵を抽出する手法を検討した。

航空写真からの瀬の抽出は、目視によるものである。はじめに、一般に瀬は砂州の前縁部に位置していることから、航空写真から前縁部の区間、さらに明瞭な砂州がなくとも水面幅が狭まっている区間を全て特定した（図-2.2.1）。つぎに、瀬（早瀬）は一般に波（白波）立つ場として認識されていることから、上記で特定した区間のうち、白波によって明らかに白く見える部分、または水

面の色に明らかに白い濁りが掛かっている部分を瀬とした(図-2.2.2)。

レーザープロファイラによる水面標高データを用いた瀬の抽出は、得られている標高データに内挿処理を行い、得られたポイントデータを元に水面勾配を求め、0.5%以上を瀬とした(図-2.2.2)。

航空写真と標高データから抽出された瀬は合わせて27箇所あり、うち23箇所は両手法で共通に抽出されたものである。検証のため、実際に現地において瀬の位置の確認を行ったところ、瀬の位置や面積には多少のずれが生じるものの、現地で特定された瀬はすべて航空写真と標高データから抽出されるものであった。現地での特定の際に、堤防など標高のやや高いところから瀬と判断されても、実際に近づくと瀬の領域が不明瞭な箇所があったことから、現場で水辺に近づいて判断するよりも遠くから広角に見た方が瀬を判断できることが多く、そのような観点から航空写真等は瀬の判断に適切なスケール情報を有しているといえる。

2.2.3 河川急流における大型土嚢を用いた生物調査手法

河川の急流部は、河床が安定していれば生物が多く重要な場であると考えられるが(3.2参照)、通常、深瀬のように流速が大きく深い場所では人が入って調査することは危険であるとともに、入れたとしても流れの力が大きく調査用のサーバーネットを構えることができない。本研究では長野県千曲川の深瀬部において、大型土嚢を用いた生物調査を行った。

大型土嚢(1トン土嚢)を採集点の3~5m上流に設置し、簡易水制とするものである。流れに対し垂直になるように並べるが、流れの強い箇所では大型土嚢が流されないよう2段重ねや流れに平行に設置した。設置から採集までを20~30分以内に行い、大型土嚢は採集後には速やかに撤去した。

これにより、従来あまり行われてこなかった深瀬での調査が可能となり、深瀬では底生動物の現存量が非常に大きくなりうることを明らかにした。

2.2.4 底生動物の生息分布把握のための微地形調査

3.2に示すように、底生動物の現存量は、瀬が淵に対して通常4~6倍であること、流れを利用する濾過食者が瀬で顕著に多いこと、また、礫間の隙間に住む底生動物は河床礫径と、固着巣を張り定住する底生動物は河床安定性に現存量が関係することが明らかになった。また、各地点の潜在的な底生動物量は瀬淵の割合、礫径、安定

性から大まかに推定できることから、底生動物の生息分布を把握するためには、瀬淵の割合が重要であり、そのための微地形調査が必要となる。

2.2.5 まとめ

河川のある区間・地点の底生動物の現存量や種組成を適切に評価する上で、瀬淵や礫径、河床安定性に基づき場所を区分し各場の面積割合と底生動物を調査する必要性を示した。航空写真やレーザープロファイラによる標高データから瀬淵を抽出し、広い河川水域を対象に瀬淵の割合を調査する手法を確立した。現地調査で従来の対象に加えて、急流部での生物調査の重要性を示し大型土嚢を利用した有効な調査手法を確立した。

2.3 野生動物行動予測及びモニタリング手法の開発

2.3.1 概要

野生動物は、必要に応じて移動し、様々な空間を利用する。野生動物の生息空間保全を有効に行うには、野生動物の生態・空間選好性を定量的に理解し、保全する必要がある。そのためには、野生動物の行動を定量的に計測し空間情報（物理環境、生息空間情報等）と結びつける必要がある。このような背景から、本研究では、その計測手法として、電波テレメトリ法（野生動物に電波発信機を装着し調査員がアンテナを持ち追跡する手法）をベースに、野生動物自動行動追跡システム（Advanced Telemetry System; ATS）を開発し、その普及化を目指し改良を行った。

また、3.3 で詳述するが、野生動物の行動様式は環境因子との因果関係が明瞭であることは一般に知られている。野生動物の行動様式と空間特性の因果関係は、統計的な解析で一定の傾向を把握することが可能になる。

しかし、野生動物行動と空間特性の関係をより正確に把握しようとする場合、一歩踏み込んだ解析が必要となる。野生動物の行動特性として、時々刻々と変化する空間特性に対応し行動を変化させる特性がある。つまり、野生動物の行動と空間特性の関係性をより深く理解するためには、空間特性（空間的不均質性）とその時間変化の関係性を同時に把握する必要がある。しかし、既往研究は、個体行動と空間特性の関係性分析、行動予測手法への発展に関して十分に検討されていないのが現状である。このような背景から、本研究では、生態系モデリング分野で用いられる個体ベースモデル（Individual Based Models; IBMs、生物の各個体の行動に着目し、生物集団の動態を表現する数理モデル）を改良し、空間特性とその時系列変化に対応する野生動物行動を再現・予測する野生動物行動予測手法（以下、行動予測手法と記述する）を開発した。

本節では、野生動物行動自動追跡システムの開発経過と普及を目指した改良の成果、また、開発した行動予測手法の概要と適用事例を報告する。

2.3.2 野生動物行動モニタリング手法の開発経過と普及を目指した改良の必要性

ATS は、複数の電波受信局と制御局で構成される。制

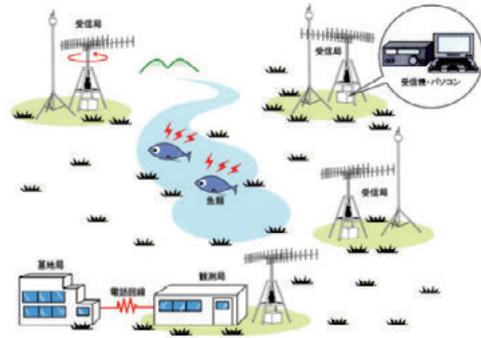


図-2.3.1 ATSの概要

御局の指令により、各受信局は、同期して指向性アンテナを回転させ電波を計測・信号分析を行い受信到来角を算出する。算出した電波到来角データを無線LANを介して制御局に送信し、三角測量の原理で野生動物の行動を5分に1回、誤差20m程度で特定するシステムである（図-2.3.1）¹⁾。

初期のATSではATS受信局を構成する機器は大きく複雑に結線され、可搬性は低く、電源設置やシステム制御・データ送信用の無線LANの設置が必要など高額な初期コストを必要とした。また、調査開始までには複雑な較正作業が必要で導入まで時間・コストも高額になるなど、普及にはATSのシステムを大きく改善する必要があった。また、調査実施時、ATSの稼働維持のための管理方法にも課題があった。ATSで継続したデータを取得するためには、ATSの観測状態監視や観測停止時の対応が必要となるが、ATSは遠隔監視が出来ず現地巡視が必要なこと、ATS受信局操作はプログラムによる設定が多いため、プログラムの扱いに慣れていない人員が必要になるなどの課題があった。

2.3.3 ATS普及化に向けた改良

上記の技術的課題点を改良するため、ATSの可搬性の向上を行い設置コストを大幅に低減した。また、データ取得を安定化させるためのデータ通信網の見直し、デー

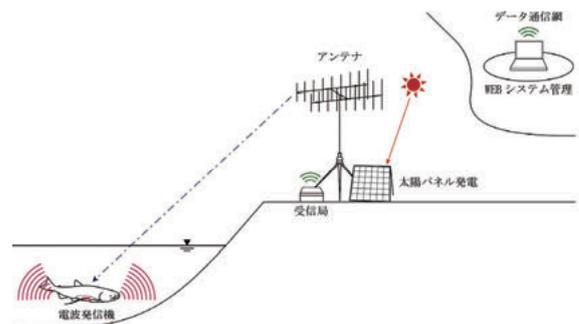


図-2.3.2 ATSの改良の概要

タ処理アルゴリズムの改良、ATS稼働停止をメールで自動通知する機能、WEBでのATSのデータ確認・可動監視する機能を加え、観測時の精度管理・保守コストを低減させた(図-2.3.2)。

ATSの可搬性の向上に関しては、改良前のATS受信局の機材をより小型の機材に置き換え、小型計測ケースに格納し可搬性を向上したこと、太陽電池パネル・バッテリーの利用により商用電源に依存しない方式とした。これらの改良により、設置場所の自由度が広がり、設置面積が大幅に縮小した。

データ通信網の見直しでは、システム監視・データ送信用の通信網として無線のインターネット網を採用した。改良前のATSでは、無線LANは主に同期計測とデータ伝送に用いていた。この機能は、各受信局が正確なシステム時刻を持つことで代用できる。各受信局がインターネットを介して定期的にシステム時刻を日本標準時に同期し、所定の時刻に計測を開始する機能とした。

付随して安定した同期計測のためには、電波計測・信号分析が次の計測までに確実に完了する必要がある。水深が深い大河川等の劣悪な電波伝搬環境では、信号処理時間が長くなる傾向があり、所定時間に達しても次の電波伝搬計測動作が出来ない問題点があった。このため、データ処理アルゴリズムの改良を行い、電波計測・信号処理の分離・並列処理方式を採用した。その結果、信号処理に時間を要していても電波計測を行うことが可能になり、電波計測・信号処理の両動作が安定し、結果として同期計測の確実性が実現した。

現地観測の維持管理費削減のためにWEB技術を活用した。改良前のATSでは制御局で行っていたデータベースと野生動物の位置特定を行うプログラムをWEBサーバ上に配置した。WEBサーバ上では、各受信局からのデータ送信状況を監視し、1時間以上データの更新がない場合には観測者に受信局の停止を知らせるメールを送付する機能を付与した。また、野生動物の位置をWEB地図(Google Map)上に自動表示する機能を付与した。

これらのWEB技術の活用により、定期的な観測巡視の必要性が少なくなり、現地観測の維持管理費は大きく削減された。

2.3.4 野生動物行動予測手法の概要

行動予測手法は、空間情報(物理環境、植物群落、餌資

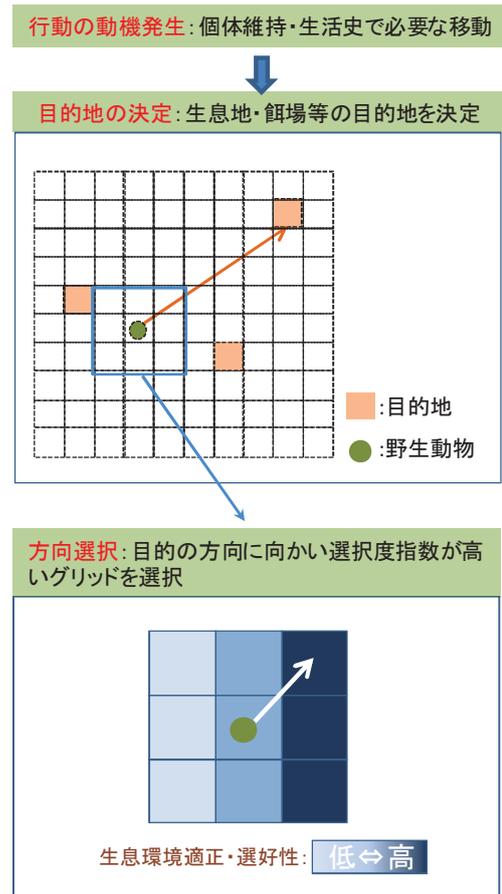


図-2.3.3 行動予測手法の概要

源等)を時系列的にモデル上に再現し、空間選好性や行動戦略等がプログラム化された仮想野生動物が仮想空間上を行動し、野生動物の生態・行動特性を再現・予測する手法である。モデルの検証は、ATSで取得した行動データとモデルの計算結果を比較して行った。比較の結果、再現精度が悪い場合には、行動予測手法のプログラム修正をし、より正確な野生動物行動の再現と予測を目指す手法である。行動予測手法は、陸上哺乳類・魚類に関して開発しているが、両動物に共通するよう抽象化して説明する。

行動予測手法では、野生動物の個体維持・生活上必要な移動の動機が発生する。中型哺乳類では、個体の維持・活動に伴う体内エネルギーの減少、すなわち空腹の認識をその動機の一つとした²⁾。魚類全般では出水に伴う周囲の流速増加とそれに伴う流下回避の避難行動、アユなどの回遊性魚類では、秋季における産卵のための降下等、様々な移動動機が設定可能である。

次に、仮想野生動物は、移動の目的地の決定を行う。方向選択に関しては、仮想野生動物は自身の位置と目的地の直線上の空間を選択するのを基本とするが、自身近傍の複数の空間選択は空間選好性を基に決定する。この

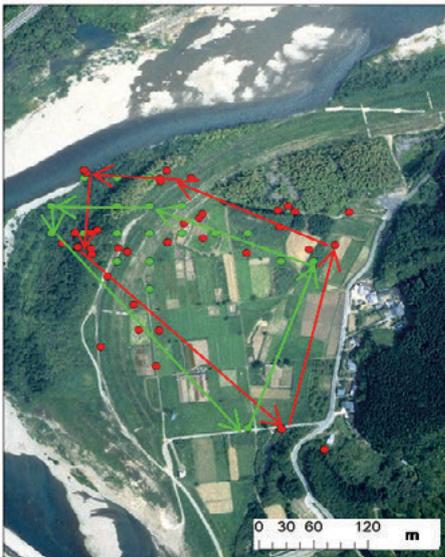
動作を繰り返しながら目的に移動する（図-2.3.3）。

2.3.5 行動予測手法の適用例

行動予測手法を陸上哺乳類、魚類に適用した事例を示す。陸上哺乳類に関しては、五ヶ瀬川水系北川のアナグマの行動再現事例を（図-2.3.4）、魚類に関しては、信濃川水系千曲川の降下期前のアユの行動再現事例を示す（図-2.3.5）。

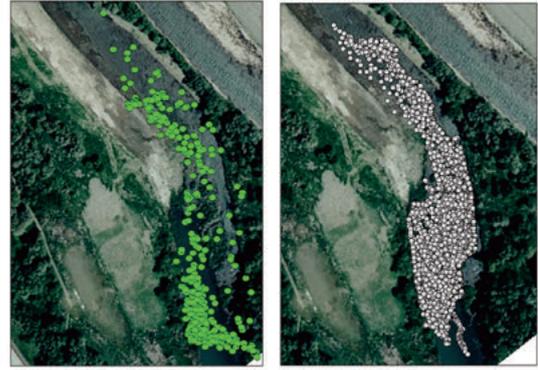
行動予測手法は、アナグマの行動特性を良好に再現した。特に、調査地周辺への山裾付近から調査地内の河川を周遊し山裾へ戻る行動の全体的傾向を良好に再現している。

同様に行動予測手法は、アユの行動圏を良好に再現した³⁾。構築したモデルが行動範囲を再現したことは、降下期前のアユが必要とする空間特性とその選択行動を定量的に模すことが出来たことを示している。



●: 実測 ●: 再現

図-2.3.4 北川のアナグマの行動再現事例



左図：実測 右：再現

図-2.3.5 千曲川のアユの行動再現事例

2.3.6 まとめ

本項では、野生動物行動予測及びモニタリング手法の開発を行った。野生動物行動モニタリング手法の開発では、野生動物自動行動追跡システム（Advanced Telemetry System: ATS）の普及化のため、ATSの小型化、設置コスト・維持コストの低減を目標として機器改良を行い、信濃川水系千曲川、魚野川、信濃川、五ヶ瀬川水系北川などで、その実用性を確認した。

中型哺乳類・魚類を対象に、生態特性を考慮した移動、空間選好性を考慮した行動経路選択などを行う行動予測手法を開発した。その結果、中型哺乳類・魚類の行動特性を良好に表現できる野生動物行動予測手法の開発に成功した。

参考文献

- 1) 傳田正利、天野邦彦、辻本哲郎：魚類自動行動追跡システムの現地実証実験と魚類行動特性の把握、土木学会論文集B、Vol. 65、No. 1、pp.1-14、2009
- 2) 土肥昭夫、岩本俊孝、三浦慎吾、池田啓：哺乳類の生態学、東京大学出版会、pp.75-120、1997.1
- 3) 傳田正利、瀧川 渉、佐藤 翔、黒川貴弘、三輪準二：野生動物自動行動追跡システムを用いた降下期のアユ行動特性の把握とそのモデルに関する基礎的検討、第66回土木学会年次学術講演会講演概要集、2011年9月

3. 河川地形の生態的機能の解明

3.1 概説

本研究では、河川を含めた周辺域や水域、水際が持つ物理的類型景観、流量・流速、河床材料、河岸-水際タイプ、土砂などの要素が付着藻類、底生動物、魚類、中型哺乳類、河川植生などの生物・生態系に与える影響等を種々の観点から抽出し、これらの生態的機能を定量的に評価した。

3.2 河床における生物分布と物理環境の関係解明等と水生生物の生息環境に配慮した河川環境再生手法の提案

3.2.1 概要

河川の物理環境がそこに棲む生物に与える影響を調べるためには、空間的広がりを考慮したうえで一つの機能群として評価する必要がある。そこで、従来定性的であった瀬淵構造と底生動物の関係について、瀬と淵との底生動物の現存量の違いや、河床材料（礫径）と底生動物群集の関係について明らかにするため、愛知県豊川及び栃木県鬼怒川等において調査検討を行った。また、瀬と淵では異なる有機物が底生動物の栄養になっていると考えられているが、瀬の調査が通常よくおこなわれている一方で、淵における底生動物群集や食物網構造は明らかにされていない。そのため、底生動物の食物における河川内有機物（付着藻類）と陸上有機物（落葉など）の重要性について、愛知県豊川において調査検討を行った。

河床の岩盤露出は、砂州構造が持つ水や有機物の滞留機能が低下し水生昆虫を始めとする底生動物や魚類の生息場が劣化し、河川生態系に負の影響を招く可能性がある。礫河床の回復には水制工の設置などの取り組みの事例があるが、山地河川などにおいては重機の使用が制限されることから、砂礫堆の回復におけるふとんかごの有効性について、栃木県鬼怒川において調査検討を行った。

3.2.2 河床の安定性と生物群集の関係(生物分布と物理環境の関係)

河川において瀬(特に早瀬)は一般に底生動物が多く、浅くて容易に近づくことから、多くの地点で底生動物群集を評価する際の基本的な調査場となっている。瀬の物理特性は河川規模、河床勾配や河道幅、砂礫の量や礫径等の河道特性によって決まるものである。本研究では、一河川の上・中・下流の異なる流程の地点での河床物理

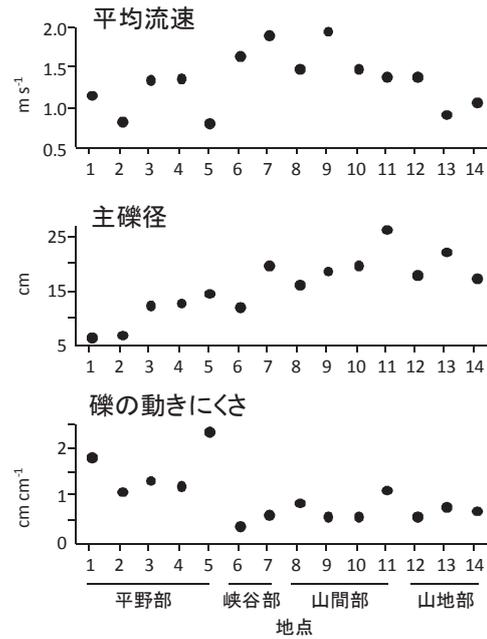


図-3.2.1 豊川における調査地点の河床物理環境

特性と底生動物群集の関係及び流れ場(早瀬、平瀬、淵)や河床材料(礫径、礫床と岩床)と底生動物群集の関係について検討を行った。

愛知県豊川を対象に、その地形から「平野部」「峡谷部」「山間部」「山地部」の4つに区分し、下流から14の調査地点を設定した。1~5が「平野部」、6及び7が「峡谷部」、8~11が「山間部」、12~14が「山地部」となる。各調査地点の流速(平水時流量とManning式から算出)、河床の礫径及び礫の動きにくさを求め、底生生物の採集を行った。なお、礫の動きにくさは、出水時(ここでは過去20年間で20番目に大きい出水ピーク流量)に作用する摩擦速度により可動な礫径に対する現存する礫径の比として評価した。

瀬の流速は流程の中間にあたる峡谷部や山間部の地点で大きく、平野部や山地部の地点で小さい傾向にあった(図-3.2.1)。平野部では瀬の水面勾配が小さく、山地部では水面幅に対して流量が少ないため流速値が相対的に小さかった。平野部と峡谷部では上流の地点ほど礫径が大きかったが、山間部と山地部ではどの地点も16cm以上で上下流の明瞭な傾向はなかった。各地点で礫の間を埋める砂・砂利の量は、特に平野部や峡谷部で多かった。礫の動きにくさは、平野部の地点は全て1以上で最大は地点5の2.4であったのに対し、峡谷部、山間部、山地部では山間部の地点11を除き0.4-0.9の範囲であった。このことは峡谷部、山間部や山地部に比べて平野部では礫が動きにくく河床が安定している可能性を示唆するものである。

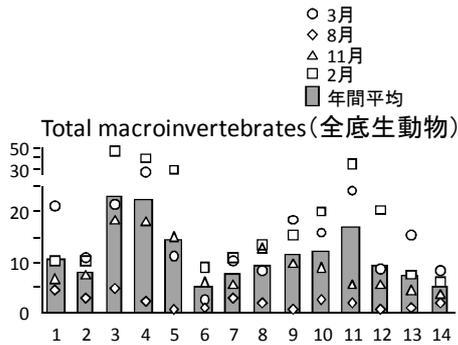


図-3.2.2 豊川における底生動物現存量

各地点において全底生動物量の現存量は夏に最小、春または冬に最大であった(図-3.2.2)。瀬の全底生動物現存量は、平野部で最も高かった。流速と河床礫がさほど大きくない平野部において、現存量を潜在的に高めているのは礫の動きにくさと考えられる。平野部で多いのは礫面-固着単型、礫下砂-固着単型、礫面-可携単型、礫下砂-潜入型であった。これらの多くは、現存量が礫の動きにくさと関係していた。

平野部に次いで山間部で現存量が大きかった。山間部において現存量を潜在的に高めている物理特性は礫の大きさと考えられる。河床礫が大きいと、礫と礫の間の空隙が増し、空隙を利用する底生動物がより多く侵入定着することが可能になるためである。山間部では礫径に加えて、その間を埋める砂・砂利の量が相対的に少ないことも、河床の空隙量を高めている。山間部で多かったのは、礫間-自由型、礫面-自由型で、これらの河床生息型の現存量は礫径と強い正の関係にあった。また、濾過食者では礫間-固着単型であるヒゲナガカワトビケラ属が優占した。流速の観点から山間部は山地部より濾過食者にとって好適な生息場と言える。

次に、流れ場及び河床材料と底生動物群集の関係については栃木県鬼怒川黒部ダム上下流における現地調査及び既往研究をもとに検討を行った。

全底生動物現存量が早瀬で最大で淵で最小である傾向はこれまでも多く報告されている^{1)~4)}。本研究で早瀬は平瀬の5倍近く、淵の9倍近くの現存量があった。既存研究における瀬淵の違いを整理すると瀬と淵でほとんど変わらない事例から、20倍を越す事例まで河川によって様々であるが、2~4倍という報告例が多く、全体の中央値は4~6倍であり、鬼怒川の結果は違いの程度としては大きい部類にあたる。

早瀬で現存量が多い理由や、早瀬の中でも小礫や中礫による底生動物の現存量や群集構造の違い、岩床部でも礫が存在する箇所と存在しない箇所での底生動物の現存

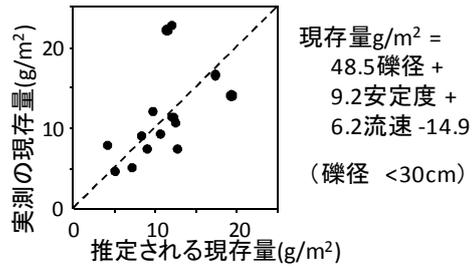


図-3.2.3 豊川の各地点(瀬)における物理量からの現存量の推定

量や群集構造の違いについて、既往の知見も踏まえて分析を行ったところ、砂礫の減少によって現存量と共に群集構造は変わりうることを確認された⁵⁾。

以上により、河床の安定性が高いほど、また空隙量が多いほど底生動物量が多く、各地点の瀬淵の割合、礫径や安定性から空間スケールで潜在的な底生動物の生息量を推定可能であることが示された(図-3.2.3)。

3.2.3 瀬淵構造等河川構造の有する生態的機能群の解明

瀬と淵では異なる有機物が底生動物の栄養になっていると考えられているが、河川の中下流の淵における底生動物群集や食物構造は明らかにされていない。そのため、愛知県豊川の下流の3km区間において瀬、淵の流心、淵の川縁に区別して底生動物の群集構造を比較するとともに、炭素安定同位体比の分析を行い、底生動物の食物における河川内有機物(付着藻類)と陸上有機物(落葉など)の重要性について検討を行った。なお、調査は2009年の1月と9月に行った。水深は淵の流心では80~140cm、瀬と淵の川縁ではほとんどで40cm以下であった。流速は瀬で50~130cm/s、淵ではほとんどで20cm/s以下であった。

全底生動物現存量は1月も9月も瀬で淵の流心や川縁よりも大きく、瀬と淵の平均ではおおよそ2倍の違いがあった(図-3.2.4)。この違いは摂食機能群の中では特に濾過食者で顕著であった。一方、1月の堆積物食者の現存量は瀬に比べて淵の流心や川縁で大きかった。淵において、河床の30%以上が砂・砂利に覆われている箇所では礫が優占する箇所に比べて現存量が全般的に小さかった。また、9月の淵において、50%以上水草に覆われている箇所では、特に付着物食者と堆積物食者の現存量が小さい傾向にあった。群集構造のパターンをNMDS(非計量多次元尺度法)による座標付けによって確かめた(図-3.2.5)。瀬と淵の群集は第1軸に沿って分かれ、瀬の群集は低い第1軸スコアを持っていた。1月は淵の流心と

川縁の群集も分かれた。また淵において、河床材料によって群集の分布が偏る傾向があり、砂/泥の群集は高い第1軸スコアを持ち瀬の群集と離れた。同座標付けにおける分類群の分布を見ると、濾過食者のヒゲナガカワトビケラ、コガタシマトビケラ属、シマトビケラ属、附着物食者のヒラタカゲロウ属、オオクマダラカゲロウは低い第1軸スコアを持ち、瀬の群集の特徴であることを示している。附着物食者のタニガワカゲロウ属、ニンギョウトビケラ属、コエグリトビケラ属、ヒラタドROMシは中間の第1軸スコアを示し、淵流心の群集を特徴づけるものであった。堆積物食者のシリナガマダラカゲロウ、モンカゲロウ、キイロカワカゲロウ、ミゾレヌマエビ、濾過食者のシジミ属は高い第1軸スコアを持ち、淵川縁の群集を特徴づけるものであった。

炭素安定同位体比 $\delta^{13}C$ は附着物食者に比べて濾過食者や堆積物食者の底生動物で低かった。このことは、濾過食者や堆積物食者が $\delta^{13}C$ の低い陸由来有機物をより多く食物としていることを示している。濾過食者は流れている有機物から、堆積物食者は河床に沈殿している有機物を食物としている。濾過食者と堆積物食者に $\delta^{13}C$ に大きな違いはなく、どちらも陸上有機物の通常の $\delta^{13}C$ 値である -28‰ よりも高い $\delta^{13}C$ であったため、陸上有機物とともに附着藻類（剥離して流下したもの、または沈殿したもの）も食物になっていると考えられる。これまでの研究では、瀬では一次生産物（附着藻類）が、淵では陸由来有機物が消費者の食物と考えられてきたが、本研究の結果は瀬でも濾過食者によって陸由来有機物の消費が、淵でも特に流心では附着物食者が多く附着藻類が消費者の食物資源となっていることが示された。

3.2.4 生息環境の保全に留意した河川改修手法

栃木県鬼怒川上流黒部ダムの上流区間では河床に砂礫が豊富に存在し大きな交互砂州が発達している一方で、下流区間では岩盤が露出した河床が散在し、砂州は小規模なものに限られている。黒部ダム上下流区間における岩盤露出度、露出箇所の特徴、河床礫の粒径特性から、ダム下流で露岩化が進行する原因として、ダム下流では中礫が少なく、中礫によって遮蔽されていた細砂礫が流出しやすくなっていること、それによって巨礫が孤立化して動きやすくなっていることが挙げられることが分かった。

環境や生態系保全の観点から、岩盤が露出してしまった区間に水制工や巨礫を設置することで、上流から流されてくる砂礫の滞留を促し、礫河床の回復を狙った取り組みが報告されている^{6)~8)}。しかし、岩盤が露出するブ

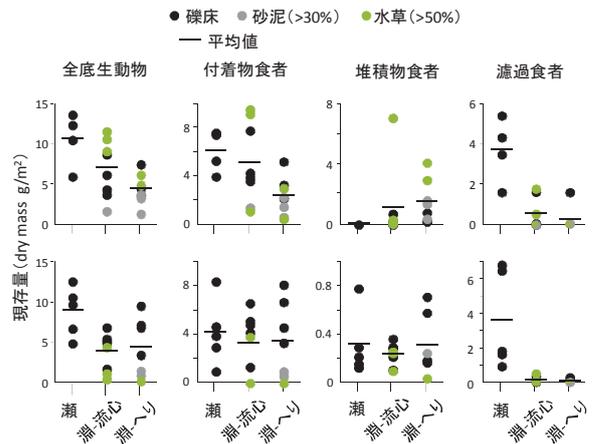


図-3.2.4 1月と9月における底生動物現存量

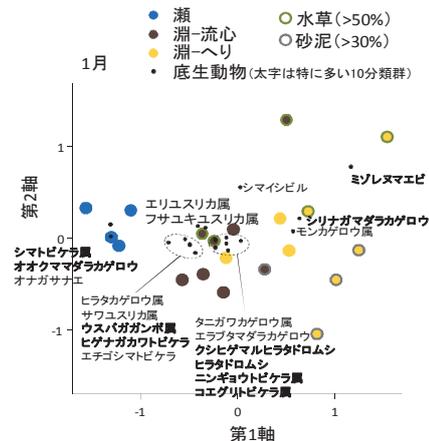


図-3.2.5 1月の底生動物群集の座標付け

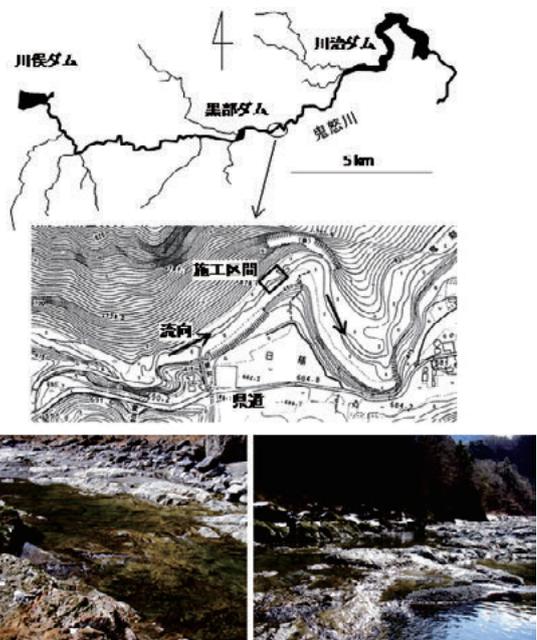


図-3.2.6 鬼怒川黒部ダム下流における施工区間

ロセスは未だ不明な部分が多く、河川内に砂礫を効果的に滞留させる手法は確立していない。砂礫の滞留を促すために河川に構造物を設置するが、大きな出水において

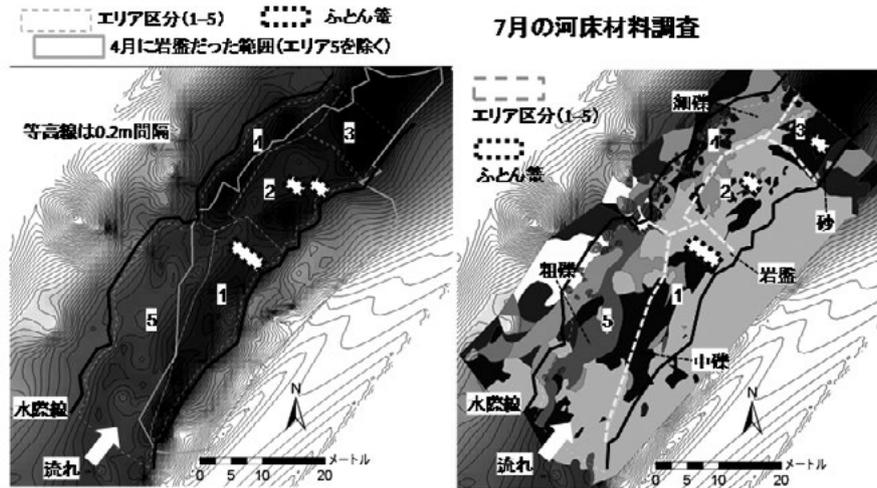


図-3.2.7 調査区間の元々の河床地形、岩盤の分布（左）と、7月調査における河床材料分布（右）

も構造物が流出しないことが前提となることから、大きな碎石や巨礫が水制としてよく用いられ、固定のために岩盤を掘削して巨礫をはめ込む場合もある⁶⁾⁸⁾。しかし、特に山地河川など斜面が急勾配だと、河川まで重機の搬入路が近辺にない場所が多く重機を必要とする方法はとれない。本研究では、岩床にふとんかごを人力のみで設置するジオテキスタイル網を用いた簡易工法を提案し、その有効性の検討を行った。

調査は鬼怒川本川の下流約1.5kmの栃木県日蔭地区で行った(図-3.2.6)。黒部ダム下流の5km区間では岩盤区間が点在しているが、いずれも近くに重機の搬入路はない。岩床の微地形を最大限に活かすため、小規模な実験水路における障害物の流出や砂の滞留の観察を踏まえ、岩盤上におけるかけ上がり(逆勾配)の個所に設置すれば効果が期待できると判断した。2010年3月に対象区間の該当箇所2地点に、人力でふとんかご(2×1×0.5m、1t)を複数設置し、砂礫滞留効果を検証した。

2010年と2011年において、100-200m³/s規模の出水が数回あり、ふとんかごの周辺に砂礫が堆積し、対象区間における砂礫の被覆率が増加した(図-3.2.7)。堆積した砂礫は<5cmが主であったが、出水中に10-20cmの礫が通過していたことは礫の移動調査から確認された。また、魚類調査により施工前(2月)には対象区間で捕獲できなかったカジカが、出水後の調査(7月)では20匹以上確認され、約100m上流にある岩盤区間(無施工区間)と比べて捕獲数が多かったことから、今回の砂礫の堆積程度でも対象区間においては底生動物や魚類を増加させる効果があったと推察される。今後は大規模な出水においても設置したふとんかごが流出しない工夫などを検討する必要がある。

3.2.5 まとめ

従来定性的であった瀬淵構造と底生動物の関係について、瀬が淵に対して通常4-6倍の現存量を持つこと、流れを利用する濾過食者が瀬で顕著に多いこと、また、礫間の隙間に住む底生動物は河床礫径と、固着巣を張り定住する底生動物は河床安定性に現存量が関係することを明らかにし、各地点の潜在的な底生動物量は瀬淵の割合、礫径、安定性から大まかに推定できることを示した。

また、魚類など河川生態系の高次捕食者の観点から、底生動物量の多い瀬は重要な食物生産の場であり、有機物消費の観点から瀬は河川内生産物(藻類)、淵は陸起源有機物の消費に貢献していること、瀬淵や瀬内の微地形に対応して流速、礫径、安定度が維持され異なる底生動物グループに生息場を提供していることなど、複数の機能が重なり河床地形に対応して存在することを示した。

底生動物量や多様な底生動物の回復において、過去から瀬が減少している状況では瀬の面積の回復と維持、河床に岩盤や土丹が露出した状況では砂礫滞留の促進、砂砂利等が多い状況で中石(15-30cm)の増加等が必要である。岩盤河床に砂礫滞留を促す1手法として、重機を利用できない地点でも施行可能で繊維性ふとんかごを用いた非固定型水制の設置についてその有効性を示した。

3.3 野生動物の行動様式と物理環境条件の関係の解明

3.3.1 概要

野生動物の生息環境保全・復元を行う場合には、野生動物の空間選好性、空間利用等の行動特性を把握する必要がある。更に、自然再生事業・多自然川づくり等の生息空間保全事業を行う場合には、野生動物行動と空間特性の関連性を定量的に行い、的確な事業効果の実現を検討するためのデータが必要となる。

しかし、生態学分野の野生動物行動のデータ取得は、行動観察、足跡等の痕跡調査、直接採捕等、調査手法が限定され定量的なデータ取得が難しい問題があった。このような課題を克服するため、土木研究所では野生動物自動行動追跡システム (Advanced Telemetry System; ATS) を開発・改良を行ってきた (2.3 参照)。本節では ATS を用いて解明した野生動物行動様式と物理環境の関係性について報告する。

3.3.2 中型哺乳類の行動様式と空間特性の関係性の解明

(1) 研究の方法

本研究では、ATS を五ヶ瀬川水系北川の野地区 (宮崎県延岡市北長井の野地先、以下、調査地と記述する) に設置し、秋期のアナグマの行動を追跡した。以下に調査方法、調査結果の概要を示す。

アナグマの行動追跡は2006年10～11月 (アナグマ1、アナグマ2) の2度にわたり実施した。追跡したアナグマは、箱罠により捕獲した。成体メス1頭を27日11:30に放逐、他の1頭を27日14:08分に放逐した。この発信機を使用した首輪の総重量は発信機装着が野生動物行動に影響を与えない範囲であった。アナグマを放逐後、両個体の電波ともに10月30日の朝までは順調に受信出来たが、アナグマ1の方が山林へ移動したと推定され位置特定が不可能になった。アナグマ2に関しては、12月中旬まで電波の受信が確認できたが中旬以降、電波受信が弱まり位置特定が困難になった。本項では、アナグマ2の10月28日から11月23日早朝までの追跡結果に着目し分析する。

(2) 結果及び考察

アナグマ2の全行動域 (86.3 ha、10月28日～11月22日、全26日分) を図-3.3.1に、また10月29日～11月22日のうちの選択された7日分の行動域を図-3.3.2

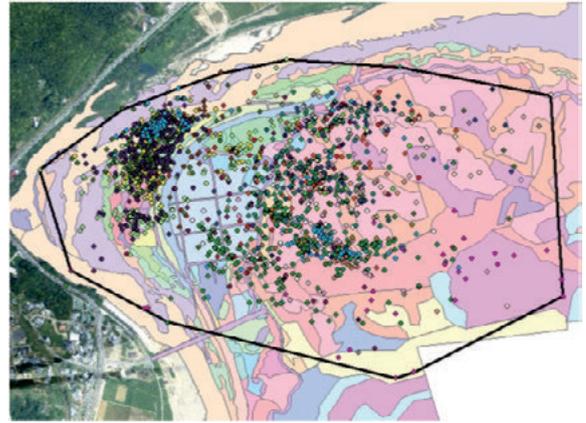


図-3.3.1 アナグマ2の全行動域

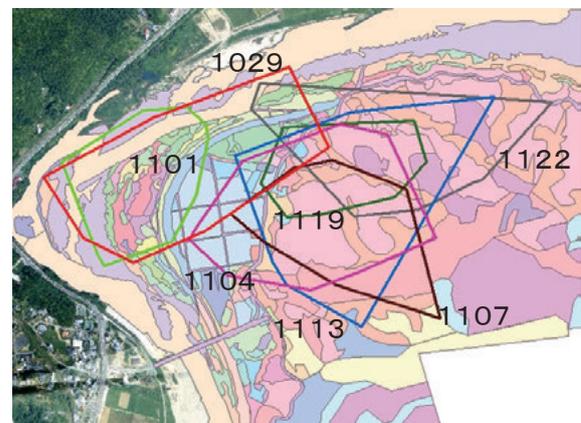


図-3.3.2 アナグマ2の7日分の行動域

に示している。追跡初期(11月2日まで)には、位置特定誤差のため、かなり多くの方探ポイントが河川水域内に落ちた。この水域内の誤差の発生は、河川水際付近の泊まり場をしばらく利用していたこととも影響している。行動圏の広さにはこの誤差が推定される行動データも含まれたが、下述する土地利用の分析では、この河川水域は除いた。

このアナグマ2は放逐 (10月27日) 以降、的野河川敷内の掘削を免れた植生内を中心として過ごしていたが、11月4日以降、的野集落の裏山を中心に活動するように行動域を変化させた。この間、山中及び的野集落前の畑・果樹園を中心に動き回った。7日間の平均の日行動域面積は15.6 ha (8.3 ha～20.0 ha) で、標準偏差は5.2 haであった。他の追跡個体よりもやや広い行動特範囲を示したが、他の個体に近い日行動域面積を示した。

これらの結果より、アナグマの平均日行動域面積は約15haであろうと推定される。また、2個体とも河川敷で捕獲されたにも関わらず、河川敷への放逐の数日後、集落裏の山中にその活動中心を移すことを考えると、彼ら

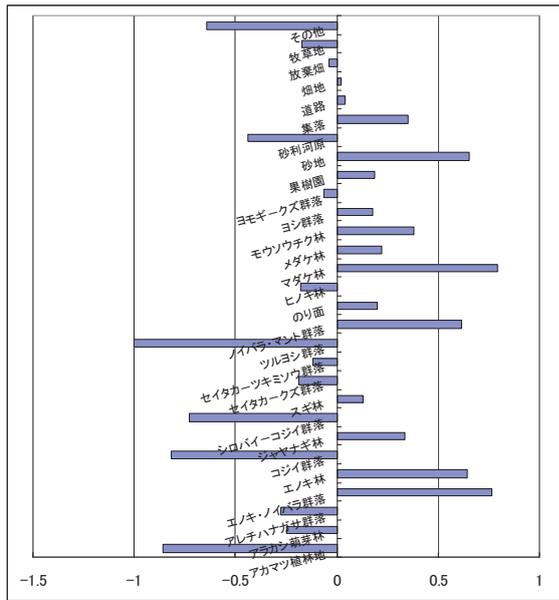


図-3.3.3 アナグマの選択度指数

にとって河川敷は、主な泊まり場としてよりは、採食場所として利用価値が高いものと思われる。

アナグマ2について、それぞれ植物群落・土地利用型の選好性について分析を行った(図-3.3.3)。なお、選好性はイブレフの指数(Ivlev's index)を下記の式により求めた³⁾。

$$I = (r_i - n_i) / (r_i + n_i)$$

ここで、 r_i 、 n_i はそれぞれ、方探ポイントが*i*番目の植生・土地利用型に落ちた割合と、方形区内の*i*番目の植生・土地利用型の面積割合をそれぞれ示す。Iは-1から+1までの値をとり、-1に近い場合は忌避していること、+1の場合は非常に選好していることを示す。図-3.3.3のアナグマ2の結果によると、砂地、モウソウチク林、マダケ林、ノイバラマント群落、エノキ林、エノキ・ノイバラ群落等の利用度が高い。逆にヨシ草原、コジイ林、アカマツ林などは忌避していたと考えられる。畑の利用はアナグマ1ほど高くなかったが、正の値を示している。

(3) 結果

本調査の結果のアナグマの土地利用分析から、アナグマは他の陸上哺乳類と比較して、人家や畑、果樹園、及び竹林を選好し、草原や密な樹林はそれほど好まない。すなわち、アナグマは、より農業などの人間活動と深い関わりの中で生活をしている可能性がある。また、河川敷の利用に関しては、行動圏の分析結果でも分かるように、巣穴を掘って恒常的に利用するというのではなく、人家の周辺に巣を持ち、河川敷まで採食に出かけてくる

という行動様式だと考えられる。

3.3.3 魚類の行動様式と物理環境の関係性の解明

(1) 研究の方法

河川中流域の魚類の行動様式に関しては、アユの行動追跡を行った。調査は、信濃川水系千曲川鼠橋地区(長野県埴科郡坂城町、以下、調査地と記述する)で行った。

調査地近傍の築場でアユ成魚1個体(以下、供試魚と記述する)を購入し調査地に運搬後、調査地内で電波発信機の装着を行った。2009年8月28日の正午に調査地の中央部へ放流し、2009年9月11日までATSにより供試魚の行動を追跡した。

行動データ取得時の流速・水深の算定を平面流計算で算定し、その後、ATSで得たアユの行動データを用いて、アユの行動圏分析、アユの利用した空間の流速・水深特性を分析した。

行動圏の特定は、最外廓法を用いて評価した。日周期ではアユが日の出前後と日の入り前後に最も活発に摂餌するという知見を参考に、アユの利用した空間の流速・水深に関しては、アユの行動が大きく変化するとされる時間帯1(5:00~17:00)、時間帯2(17:00~20:00)、時間帯3(20:00~24:00)に分け評価した。

(2) 結果

図-3.3.4に供試魚の行動圏を示す⁹⁾。供試魚の行動は2009年9月2日前後に大きく変化した。以降、2009年

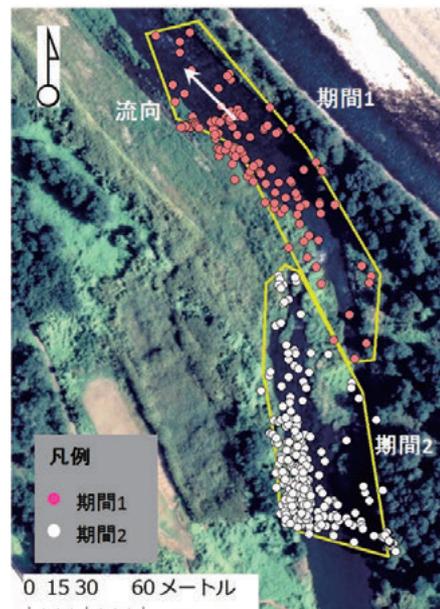


図-3.3.4 供試魚の行動圏

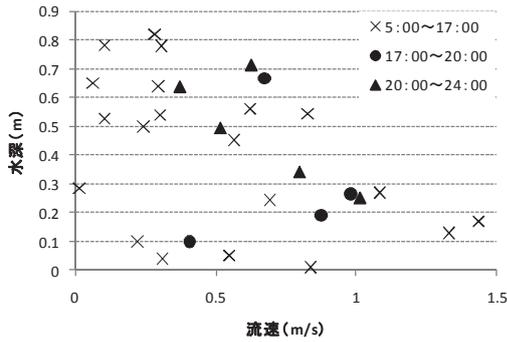


図-3.3.5 供試魚が利用した空間の流速・水深

8月28日～年9月2日を期間1、2009年9月3日～年9月11日を期間2とし記述する。期間1では、供試魚は放流地点周辺の淵で主に生息し、1リーチ(瀬と瀬の間)で生息した(図-3.3.4中の赤丸)。その行動圏1(8月29日～9月2日の行動圏)は、約6,589m²で、主に水深が深く流速が遅い箇所を利用した。2009年9月2日の12:00頃、供試魚は上流側の淵へ移動した。期間2の間、上流側の淵で供試魚は生息し、その行動圏2(8月29日～9月2日の行動圏)は約6,214m²で期間1と同程度であった(図-3.3.4中の白丸)。また、両期間ともに白波が立つ瀬よりは、河岸部の低流速域や水深が深い箇所を中心に利用した。

図-3.3.5に供試魚が利用した空間の流速・水深を示す。供試魚は、流速約1.5m/sまで、水深約0.8mまでの空間を利用した。時間帯別の空間利用特性は、時間帯1と時間帯2・時間帯3で異なる特徴があった。時間帯1では供試魚は、水深約0.1～0.8m、流速0.25～1.5m/sの空間を幅広く利用したと推定された。一方、時間帯2、時間帯3では流速が遅く水深が深い空間を利用する特徴があり、その傾向は、時間帯3で顕著であると推定された。時間帯1では、供試魚は行動圏内の様々な空間を利用しながら採餌等、様々な行動目的に合致した空間を広範囲に利用するが、時間帯2・3のように採餌や休息といった目的が限定される時間帯には、水深が浅く捕食者に狙われる可能性の高い空間や流速が早く定位するのに多くのコストを必要とする空間は積極的に利用することが少ないことを図-3.3.5は示している。データ数は限定的であるが、アユの生活様式に合わせて、流速・水深といった物理環境が自由に選択できる多様な空間が必要であると考えられる。

3.3.4 まとめ

ATSを用いて、山間地の中型哺乳類の行動様式に関し

て、アナグマを対象としその行動追跡を行い、環境因子(物理環境・植物群落・餌資源)との関係性を分析した。その結果、地形等の物理環境(地形等)に加え、植物群落が行動に大きな影響を与えており、それぞれ選好する植物群落内で生息し、河川周辺を周遊する行動をすることを明らかにした。

ATSを用いて、降下期直前のアユ1個体の行動を2週間追跡した。その結果、アユの行動圏は平均約6,000m²、主に水深が深い箇所や流速の遅い箇所を利用した。また、放流後、1週間で上流側のリーチへ移動し、アユは各時間帯で巡航速度(体長の2～3倍程度)よりも流速が遅い空間を主として利用した。昼と夜では利用する空間の流速、水深が異なる傾向が把握できた。

3.4 自然的攪乱に伴う地形変化や人的管理が植生へ与える影響と植生定量的評価に向けての提案

3.4.1 概要

この20年ほどの間に、河川特有の植物が減少するとともに、河川縦断方向にわたり樹林地帯が急激に増大してきている。これらの原因としては、流域の土地利用や管理形態の変化など、砂礫採取や河道改修の結果、砂礫が動き難くなり、扇状地での河原環境の減少、自然堤防帯での湿地環境が減少してきたことが一因として考えられる(図-3.4.1)。また、この他にも、エネルギー需要の変化や社会情勢の変化により燃料や細工利用としての樹木伐採、下草刈り、野焼きなどが減少するなど、人的作用が減少したことによる樹林地帯増大や河川植物の減少も考えられる。

国土交通省では、このように失われた河川景観を取り戻すため、自然再生事業等を通じて回復に努めてきている。とくに、砂礫河原や湿地は、減少著しい景観であり、事業中での再生事例も多い。また、再生方法検討の他に、全体論として事業が効果的であったかどうかなど、事業における説明責任も求められており、河川環境をどういった順序で復元、あるいは現況を保全してゆくべきかといった河川環境評価の方法についても議論がなされている。

以上に鑑み、本課題では、まず、河原が樹林化に至るプロセスについて、河原の消長と河川攪乱との関係から大局的な整理を行った。次に、河原になぜ植物が生えるのかについて、植物生長に係わる生育環境を主に物理的な面から把握し、再生時に考慮すべき要素について、現地調査、実験から明らかにした。また、河川の湿地的な空間を対象に、社会情勢の変化を関連付けながら、植生変化について検討を行った。最後に、河川環境評価のうち河川植生を対象とした数量的評価方法について検討を行った。

3.4.2 自然的攪乱による砂礫環境の維持機構

河川植生の動態やその更新に関わる既往研究では、流量や流砂量の増加によって植物群が流失する機構や、植物群が土砂堆積を促進させる機構を主体とした、多くの研究が行われてきた(例えば¹⁰⁾)。これらの研究では、河床に働くせん断力といった物理的指標を用いて、河川植生の動態の説明がなされてきた。多くの研究例から結論としては、河川のダイナミクスを取り戻すことが重要であることが指摘されている。本課題で検討した事例でも、大規模出水後に砂州移動が起こって裸地的空間が維持され

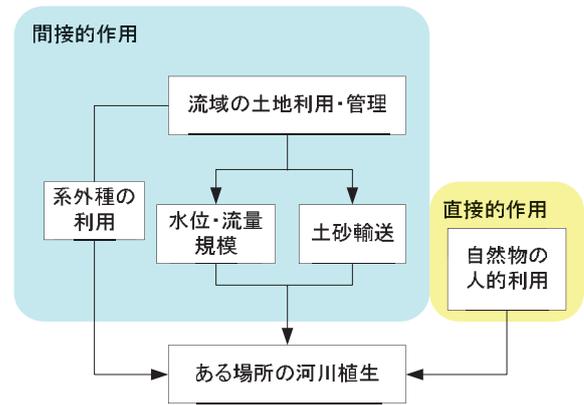


図-3.4.1 河川植生の成立に係わるインパクトレスポンス

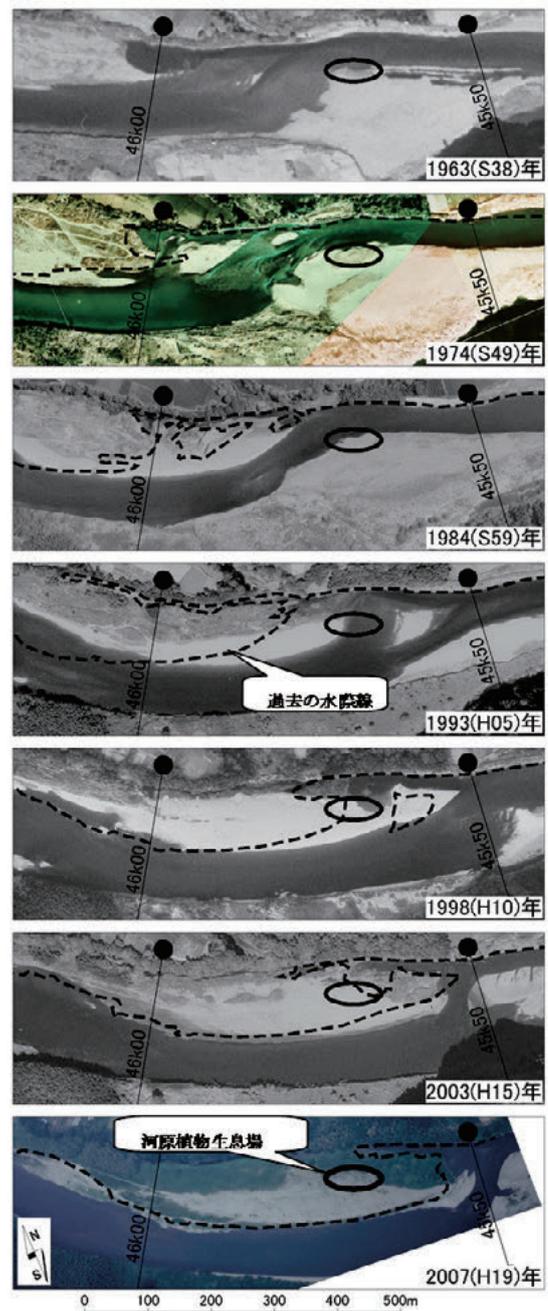


図-3.4.2 河原植物生育場の経年変化（栃木県那珂川）

ることで河原植物の生育が維持されていることを示した。また、那珂川の事例(図-3.4.2)では、砂州形状が変化する規模の出水が、10-15年に1度は生じており、これが河原を維持でき、河原植物の生育に繋がっている可能性を示した¹¹⁾。

以上のような河川のダイナミクス変化に呼応して植生が変化・更新するという考えは大局的にみると重要な要素である。しかし、同じような攪乱強度や頻度にも係わらず植物の生育状況が異なるなど、これだけでは河原になぜ植物が生育できるのかということについて、十分に説明できているとは言えない。そこで本検討では、河原でよく見られる幾何構造について、表層の砂礫量と礫層の違いにより5つのタイプに分け(図-3.4.3を参考)、現地調査と実験により、植物の生育しやすさについて検討を行った。この結果、現地調査(356 コドラート)では、表層に粗砂以上の砂礫があり、礫層が8cm以上ある場合は、植物の生育が著しく抑えられていることを明らかにした。そこで、実験では、プランターを利用し、基礎土(細砂以下の粒径)の上に、8種のたねを等量播種し、水やりの頻度を変化させ、植物の生長実験を行った(図-3.4.3)。結果として、灌水頻度によらず、礫の堆積厚が10cmになると植物の生育が大きく制限された(図-3.4.4)。本検討から、河原環境を維持するためには、砂礫が動くような大きな攪乱が10-15年に1度起きること、その際に礫厚が10cm程度の環境が保たれていることが必要であることを示した¹²⁾。

以上から河原の維持には、ダイナミクスを増大させることと、砂礫の厚さを保つことが必要であることを示した。しかしながら、砂礫の厚い箇所を考えると、河道の中でも河床攪乱が激しい箇所にあたる。このため、種子そのものの供給が少ない可能性もあり、これにより植物が生育していないことも考えられる。実際に、砂礫中に種子がどの程度含まれているかを明らかにした研究は見当たらなかった。そこで、砂州の比較的浅い部分(植物の発芽可能な層)を対象に、種子の空間分布を明らかにすることとした。図-3.4.5に示す各調査区において、まず、50cm方形区のコドラートを設定し、コドラート内のフロラ(種名)を取得した。次に、同調査区で表層から10cm内の土砂を採取し、土砂を洗い出し種子を抽出した。また、土砂については粒度分布を把握した。これらを計40地点で行い、堆積砂と種子密度、コドラート上に生育する植物(以下、地上植物)とコドラートの土砂中に存在する種子数および種類の関係について調査した。

この結果、礫の多い攪乱的な環境下での種子密度の中央値は、928 個/m²であり、砂の多い堆積的な環境下での

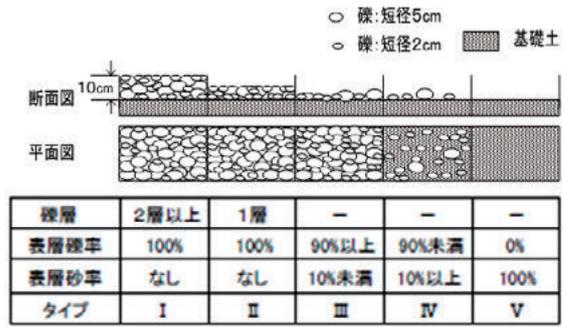


図-3.4.3 実験模式図

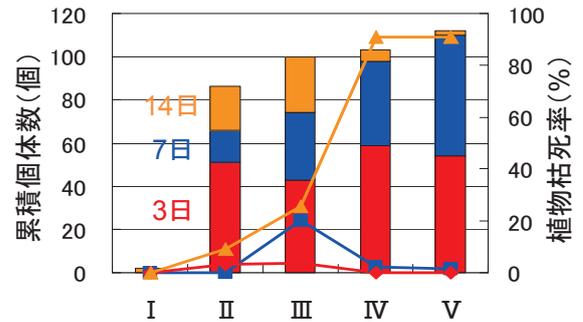


図-3.4.4 灌水頻度の違いによるタイプ別の生存個体数と植物枯死率の関係(実験終了時)

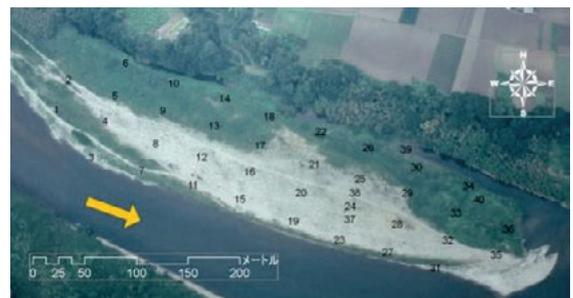


図-3.4.5 対象砂州と調査区No. (栃木県那珂川)

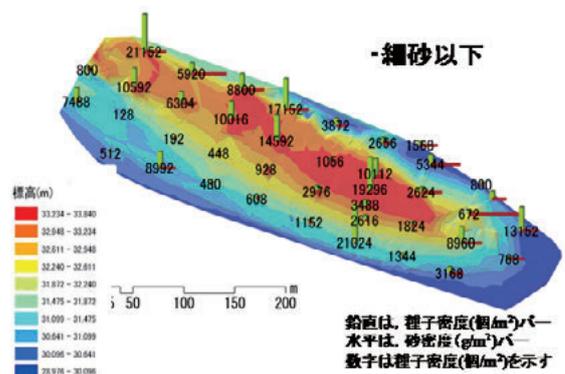


図-3.4.6 堆積砂と種子密度の関係

種子密度の中央値は、5,344 個/m²あることが分かった(図-3.4.6)¹³⁾。この結果は、森林の200~3,300 個/m²と比較しても少ない量とは言えない。さらに、種子の種

類（種子相）と地上部にある植物の種類（植物相）との類似度率は0.3であり、これまでに報告されている山地の例（0.1～0.3）と比較してもほぼ同等といえる。例えば、種子量が最も多いスベリヒユ（夏季植物）についても、植生調査時には全く見られなかった。この他、ミゾソバなどは、種子があっても生育箇所は限られていた（図-3.4.7）。結果として、種子は種類に関係なく、砂州内に広く分散していたが、全ての場所で発芽・成長に至ってはいなかった。砂州内の河川植生の成立は、種子量や種類による影響よりもむしろ、その場の物理的環境が支配的であることが示唆された。

3.4.3 人的管理の変化に伴う樹林地の増大

河川では、流れや土砂移動の影響が少ない箇所についても、草地・樹林化が進行してきている。これらは、耕作放棄や河川管理による樹木伐採の減少など、川へ関わる人的攪乱の減少により、これまで抑制されてきた樹木が成長した結果と考えられる。本課題では、空中写真やGISを用いて、過去から現在に至る植生変化の変遷について、地被状態の利用形態変化や樹高の変化などをデータ化し定量的に検討した。対象としては、関東でも在来種ならびに氾濫原を代表する植物の多い小貝川を対象とした。

地被状態の経年的な変化を見ると、1890年は迅速図を利用しており参考程度とするが、耕作地や樹林の領域が多い（図-3.4.8）。定量的に議論できるのは1947年以降で、1974年の30年間の変化に大きな違いがない。変化が大きく現れたのは1990年であり、草地が減り、樹林地が約3倍まで増えていた。次に、各年代間の変化過程について、GISにより空間解析をしたところ図-3.4.9の結果を得た。図の上部が下部よりも古い年であり、古い年を基準とし新しい年へ向かっての地被状態の変化を線で結んでいる。線内の数字は、上部から下部へ向かい同一あるいは別の地被状態へ変化した面積を示している。期間①と②については、ほぼ似たような傾向を示したが、期間③は異なっていた。期間①、②では草地と樹林地で約7ha前後の面積が入れ替わっていたものが、期間③では草地から樹林地へと変化する面積が36haと大きくなり、樹林地から草地へと変化する面積は約3haと小さくなっていった。また、樹林地のままの面積も約10haと大きくなっていった。

次に、人的管理の影響を知るため、1947年から1990年までにかけての空中写真から樹林、草地、耕作地など地被状態を区分し、さらに写真を立体視することで、地被高さの変化を読み取った（図-3.4.10）。この結果、3

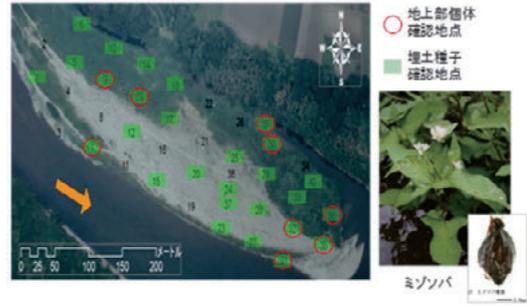


図-3.4.7 種子の偏在性と生育環境依存性

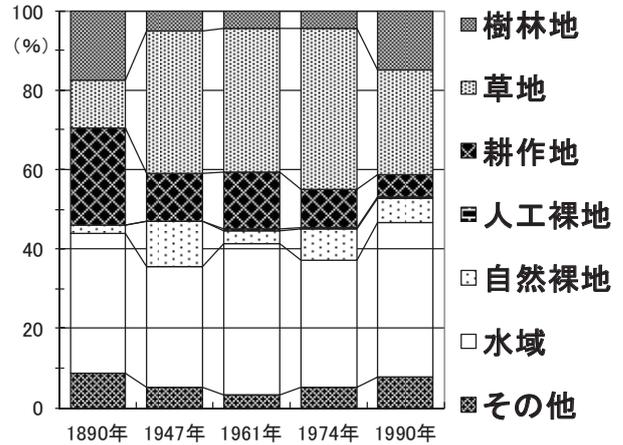


図-3.4.8 地被状態の変化

-1890年は迅速図、他は空中写真による-

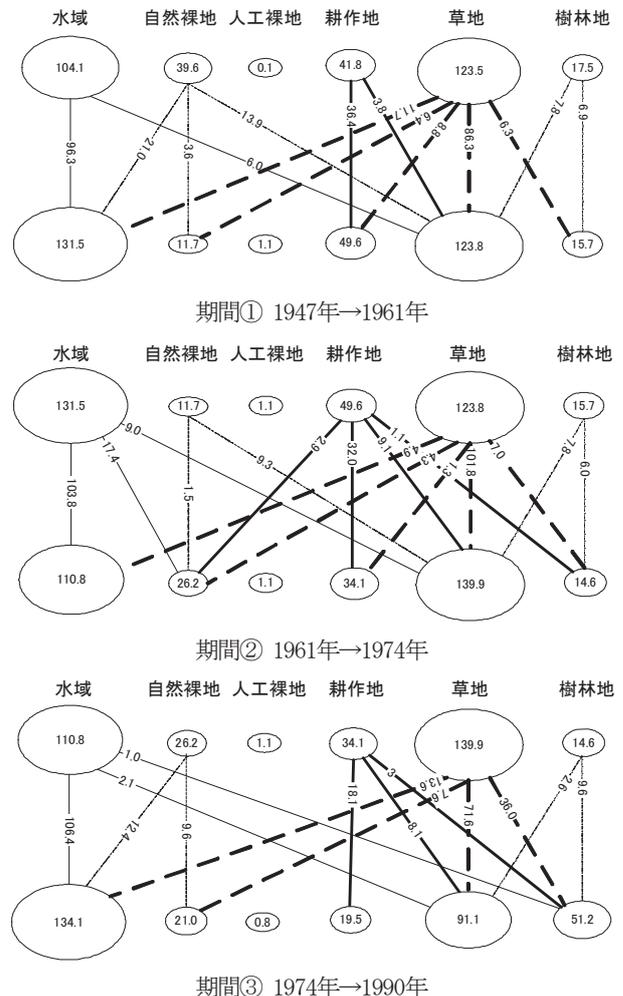


図-3.4.9 期間別にみた地被状態の変化パターン

—表中の数字は面積（ha）を示す—

つのパターンが傾向として見られた。1つ目は、草地から樹林地へと変化するもので、かつてヨシ原であった箇所が樹林に至るパターンである(図-3.4.11, a)。ヨシ原は、根葺き、垣根、よしず、あるいは燃料、肥料などに利用されていたが、現在では、その利用のための刈り取りや火入れが行われなくなり、樹林地の増加に繋がったと考えられる。本河川の場合、その傾向は早い箇所では、1974年には表れていた。2つ目は、樹林地であった箇所の樹木が高木化したり、樹林地が拡大したりするパターンである(図-3.4.11, b)。これは、マツ、クヌギ、コナラの薪炭林が利用されなくなった結果、樹木の高木化や樹林地の拡大に繋がったものと考えられる。この理由として、河川においても里山管理と同じように、15~25年に1度は薪炭林の更新のため伐採するという生活様式が消滅したことによる影響が大きいと思われる。また、1970年以降は、河川管理上、治水安全率を維持するための樹林伐採が樹木の抑制につながっていたが、これが最近減少してきた結果が表れているものと推察される。3つ目は、耕作地であった箇所が放棄された結果、草地化へと進行し、15~20年後には、樹林地への増大が懸念されるパターンである。以上の3つのパターンは、すべて生活様式の変化を反映したものである。例えば、カヤ場(ヨシ原)の減少は茅葺き屋根からトタンや瓦屋根へと変化した結果であるし、薪炭林放棄は、燃料が木炭から石油、ガスへと変化した結果である。さらに、第一次産業の衰退にともなう耕作地の減少は、近年、堤内地においても多く見られるようになってきた社会現象の一端である。このように、河川植生は、自然的な影響と同じように、社会システムの変化も合わせて影響を受けているものと思われる¹⁴⁾。

3.4.4 数量的河川植生評価手法の提案

本研究では、地域に古くから生育する個々の種の存在を重視しつつ、河川植生を群落単位ごとに面的に評価する方法について提案した。検討手順(図-3.4.12)としては、まず、植生調査を行った後に、調査データから群落区分を整理し、植生図を作成する。次に、ある植物種がその地域にどの程度の固有性があるかを基準に5段階に分けた評価指数¹⁵⁾を基に、区分された各群落を数的に評価する方法について検討し、その結果をもとに、植生図に代わる評価図(群落定着図)を作成する。さらに、これらの結果をもとに、縦断的に植生を基準とした環境評価を示す方法について検討するという流れである。なお、植生図の作成までの流れは、水辺の国勢調査でも行われており、本手法は、既存の資料を用いても評価可能



図-3.4.10 表層高の抽出に選んだ区域(抜粋:右岸23km)一口区域(約1ha)の表層高を図化機により判読一

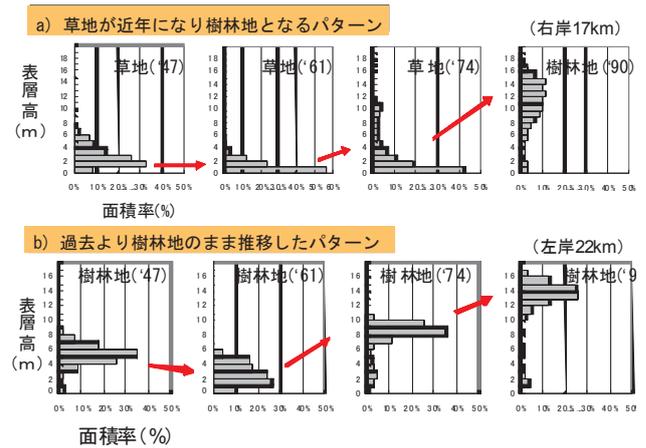


図-3.4.11 各年の地物高分布と密度との関係(例)

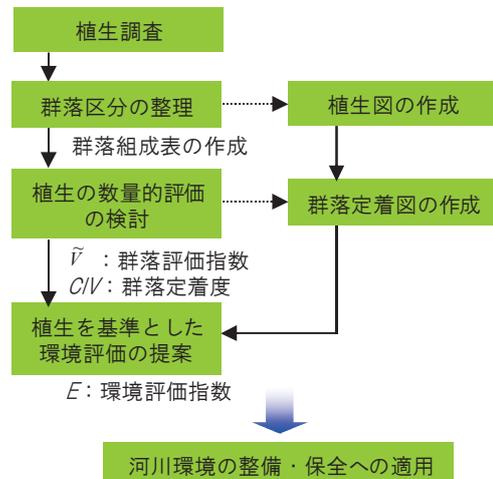


図-3.4.12 検討手順

なシステムとなっている¹⁶⁾。

本手法の適用事例として、小貝川を対象に約270の調査データの整理を行い、38の群落に区分し、各群落の評価指数を計算し、これをもとに群落定着度図を作成した(図-3.4.13)。また、本河川の場合、環境評価指数(E)は、約65~90の範囲に分布していた(図-3.4.14)。とくに、左岸側の環境評価指数は、対象区間の上流域で低い傾向にあった。これは左岸側に農地、雑草類を中心とす

る群落定着度 (CIV) の低い群落が目立っていたことや人工裸地の割合が高かったことがあげられる。

本検討で行った植生評価方法は、数量的に植生の価値を評価しているため、植生の知識を有しない技術者にも理解しやすく、例えば治水と同様に具体的な数値目標の設定が可能となると考えられる。

3.4.5 まとめ

本課題では、河原が樹林化に至るプロセスについて、河原の消長と河川攪乱との関係や、砂礫の構造特性と植物の生えやすさについて検討した。また、社会情勢の変化を関連付けながら、植生変化について検討を行った。最後に、河川環境評価のうち河川植生を対象とした数量的評価方法について検討を行った。

結果として、河原環境を維持するためには、砂礫が動くような大きな攪乱が10-15年に1度起きること、その際に礫厚が10cm程度の環境が保たれていることが重要とする結果を得た。砂州内の河川植生の成立は、種子量や種類による影響よりもむしろ、その場の物理的環境が支配的であることが示唆された。

次に、氾濫原植生を多く有する小貝川を対象に、氾濫原植生の減少や樹林化の原因が出水の影響だけでなく、地域住民の人的管理の減少が樹林面積を増加させていることを定量的に示した。また、かつての湿地的環境を取り戻すには人的管理が必要であることを示した。

最後に、河川植生の評価を行うため、種の土着性(地域固有性)から、植生を面的かつ数量的に評価する方法の提案を行なった。これまで主に個々の種を対象に議論がなされていたが、この手法により植生の知識を有しない技術者にも理解しやすく、具体的な数値目標の設定が可能となった。このような一連の変化をGIS等に入れて情報の一元管理を計る重要性についても示した(図-3.4.15)。以上の研究成果を踏まえ、土研資料として「河川植生評価の手引き(案)」¹⁷⁾、「新しい河川植生調査手法(案)」¹⁸⁾を発刊した。

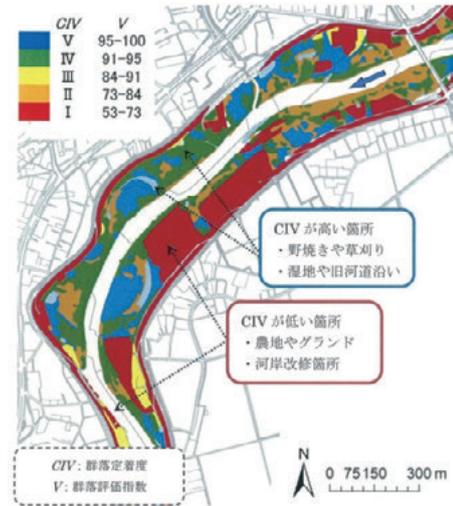


図-3.4.13 群落評価指数 (V) の値により群落定着度を5ランクに区分

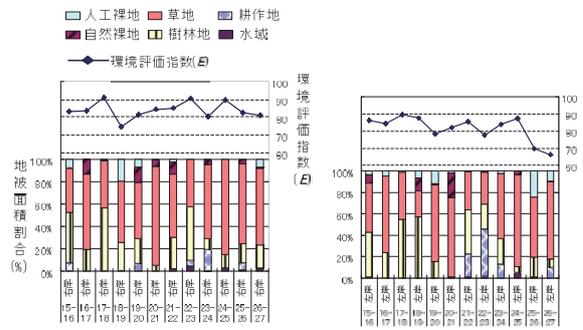


図-3.4.14 各距離区間における環境評価指数

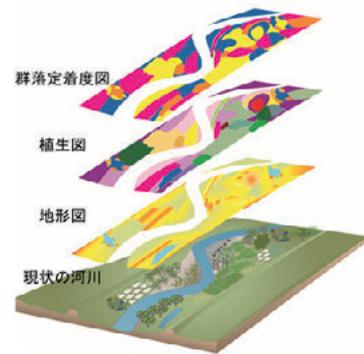


図-3.4.15 活用方法

3.5 河岸—水際タイプの生態的機能の解明と河岸処理手法等の提案

3.5.1 概要

日本の中小河川は河岸浸食を許容できないため、硬い構造物による河岸防御が不可欠である。このため、水際域が本来有する生物の生息場としての機能が消失することが懸念されている。一方、従来のコンクリート護岸に代わる護岸を水際域に設置し生態的機能を保全する試みが図られているが、その効果を適切に検証した事例は少なく、水際域の保全手法としての妥当性はコスト増となるにも拘わらず、未解明のまま放置されている。本課題研究では、水際域を水際（水中部）と河岸（陸上部）に区分し、それぞれについての生態的機能を解明し、河川中流域において水際域を保全する際の留意点を取りまとめ、効果・効率的な河岸処理および護岸の性能評価手法の開発を行うことを目的とした。本論では全体の研究成果において代表的なものを以下に記し、「まとめ」においてはプロジェクト全体で行った成果の概要を述べた。

3.5.2 水際（水中部）の生態的機能に関する研究

(1) 魚類生息場としての石の隙間（間隙）の機能

土木研究所自然共生研究センターの施設である実験河川 A（図-3.5.1）を利用して、2005年12月に巨礫（径35cm）、大礫（径20cm）および中礫（径4cm）の3種類の礫を敷き積んだ調査地（3×1.2m/調査地）を各礫につき3箇所ずつ造成した（計9調査地）。これらの調査地において、2006年6月20-22日に魚類の捕獲調査を実施した。捕獲調査は、各調査地を網で仕切りすべての礫を取り除いた上でエレクトリックショッカーを用いて行った。採集した個体は魚種ごとに全長を計測した。

調査の結果、全体で9種、中礫で5種、大礫で7種、巨礫で6種の魚類が確認された。魚類の遊泳形態区分からみた確認個体数の構成割合は、各礫とも底生魚が優占した。遊泳魚の構成割合は巨礫で48%、大礫で10%と礫が小さくなるにつれ減少し、中礫では確認されなかった。各調査地で捕獲された魚類の個体数を用いて、クラスター分析を行った結果、9調査地は大きく2つのグループに区分された（図-3.5.2）。グループAには、中礫の3調査地が該当し、シマドジョウ属およびヨシノボリ属が優占した。グループBは2つの大グループによって構成され、グループB1は大礫の2調査地が該当し、ウキゴリおよびヨシノボリ属が優占し、両調査地ともウナギが確認された。グループB2は巨礫の3調査地と大礫の1

調査地が該当し、遊泳魚のフナ属およびタモロコが多く確認された。以上より、礫により形成される水中の間隙は魚類の棲家として機能しており、礫の大きさにより棲息する種類組成が異なることが示唆された。従って、護岸に用いられる礫のサイズはその場の生息魚類相を考慮して選定する必要がある。

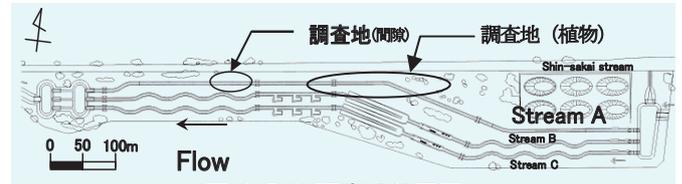


図-3.5.1 調査地位置図

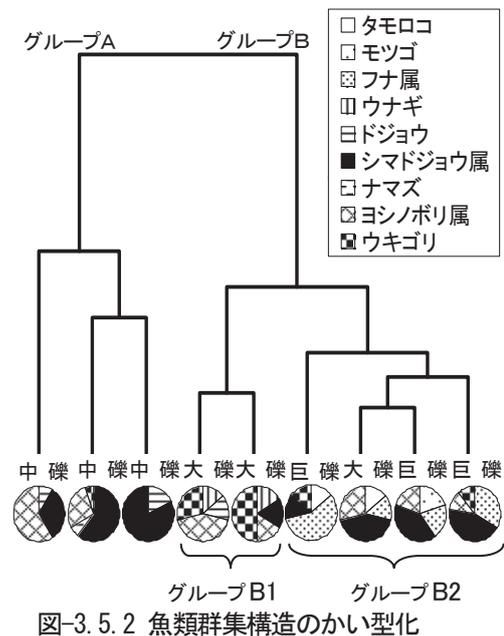


図-3.5.2 魚類群集構造のかい型化

(2) 代替木杭工法の魚類生息場所の評価

実験河川Aに、2007年6月に4ケースの調査地（縦断距離20m、横断距離2.5m）を2箇所ずつ造成した（図-3.5.3、写真-3.5.1）。木杭群は70cm×70cm四方内に直径60mm、長さ50cmの木杭が12本千鳥配置したものを基本単位とした。木杭群を配置しない調査地をケースA、木杭群を連続配置した調査地をケースDとした。また、木杭群の断続配置は1.4m間隔のものをケースB、0.7m間隔のものをケースCとした。流量は0.25m³s⁻¹（単位幅流量0.1m³s⁻¹m⁻¹）とした。2007年10月に、物理環境調査と遊泳魚類の捕獲調査を実施した。前者は各調査地に等間隔に設定した84測点において、水深、河床部と6割深度部の流速、優占河床材料（直径区分:1.泥、2.砂:<2mm、3.小礫:2-16mm、4.中礫:17-64mm、5.大礫:65-256mm）を計測した。後者は、各調査地を網で仕切りエレクトリックショッカーを用いて2回の反復採捕を行い（除去法）、各調査地の生息個体数を推定した。

確認遊泳魚類の推定個体数は、オイカワ 684、ウグイ 3、タモロコ 100、モツゴ 31、ニゴイ 16、カネヒラ 2 となり、オイカワおよびタモロコが優占種であった。各ケースの推定生息個体数は連続配置のケース D で多く (図-3.5.4)、この傾向は優占種ごとにみても同様であった。取得した物理環境から算出される環境要因と遊泳魚の生息個体数との間には木杭群面積と 6 割深度部の低流速地点が占める割合に関して有意な正の相関が認められた (表-3.5.1)。

本研究の結果から、断続配置よりも連続配置の方が木杭群および低流速域の面積が大きく、魚類の生息数も多くなることが示された。また、断続配置ではケース間の個体数の差異が小さく、杭群の面的な連続性の消失が魚類の定着を減少させている可能性がある。木杭群を断続配置させて魚類の遊泳行動を観察した結果では、木杭群内では流速の乱れが生じ魚類の定着は困難であり、断続的に配置した木杭群の前縁部 (直上流) および後部 (下流) に創出される局所的な安定した低流速部にオイカワが定着したことが報告されている¹⁹⁾。本研究では、木杭群内部における平均流速は相対的に遅く、既存研究と比較して木杭群内部の乱れが小さかった可能性がある。以上より、本研究における木杭群の存在は魚類の定位場所として機能し、面積の広い連続配置が選好された可能性がある。

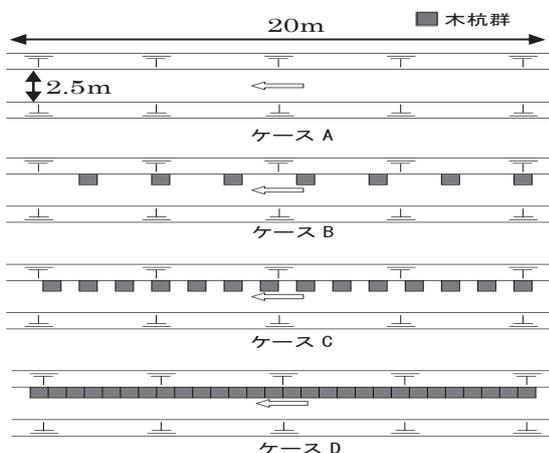


図-3.5.3 木杭群の設置ケース (平面図)

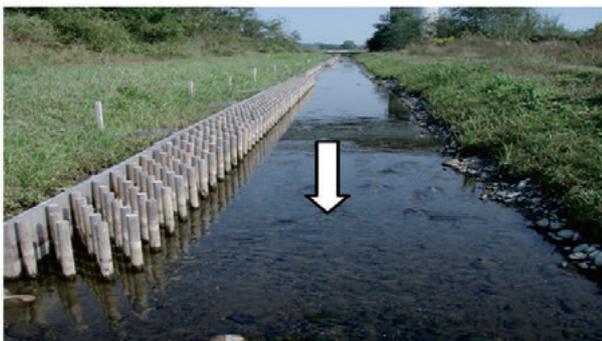


写真-3.5.1 連続配置 (ケース D)

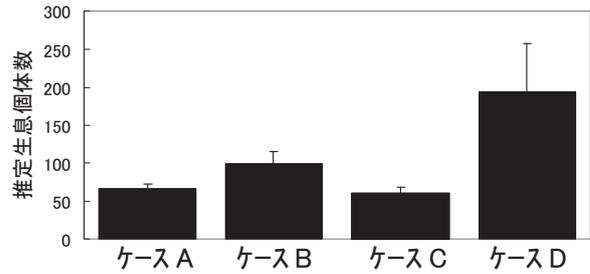


図-3.5.4 遊泳魚のケース別平均個体数 (バーは標準偏差)

表-3.5.1 遊泳魚個体数と物理環境要因の相関係数

因子	遊泳魚
平均水深	0.521
河床流速(平均)	-0.668
6割深度部流速(平均)	-0.388
河床材料(砂)	0.512
河床材料(小礫)	-0.263
河床材料(中礫)	-0.255
河床材料(大礫)	0.180
木杭群が占める面積割合	0.755 *
低流速地点が占める割合(河床流速)	0.569
低流速地点が占める割合(6割深度部流速)	0.711 *

* $P < 0.05$

3.5.3 河岸 (陸上部) の生態的機能に関する研究

本研究では、自然河川における異なる形式の河岸を対象として、物理環境特性と生物の生息状況との関連性の把握を行った。現地調査は、三重県中南部の大紀町を西へ流れ大内川に合流する 1 級河川宮川水系の 2 次支川である注連小路 (しめこうじ) 川で行った。調査区として、空積ブロックと練積ブロックの 2 タイプのコンクリート護岸と自然河岸の計 3 地区を設定した。1 調査区につき任意に 5 本設定したトランセクト (調査横断線) 上に、50cm×50cm の方形区を河岸上部と下部に設置した (写真-3.5.2)。調査は、春季 (5 月上旬) および秋季 (10 月中旬) の 2 回、生物調査と物理環境調査をそれぞれ 2 日間かけて行った。生物調査は、粘着トラップ設置による採集と見つけ採りおよび石起こし採集を併用した。採集した生物のうち、陸上を歩いて移動する非飛翔性の生物 (クモ目、エビ目、ハチ目、トビムシ目ほか) を対象とし、調査区ごとに、目区分に同定分類して個体数を計数した。物理環境として、河岸を構成する土壤材料や湿潤度 (河岸表面の湿り具合を 5 段階で評価)、緑被率 (方形区内の植物の割合を面積算出) や硬度、河岸表面の温度変動などを計測した。生物については、分類した生物構成と個体数から季節、河岸形式 (調査区) および方形区設置位置 (河岸上部・下部) 間それぞれの構造の類似性を検討した。各調査区の物理環境因子については、調査時期ごとに、河岸形式と方形区設置位置を要因とした二元配置分散分析を行い、有意差が確認された場合には

Tukey-Kramer 法の多重比較検定を行った。すべての解析の有意水準は 5%とした。

季節、河岸形式、比高差といった様々な要因を加味して解析を行った結果、河岸部の非飛翔性生物の群集構造の類似性は、河岸形式の違いが寄与していることが示唆された(図-3.5.5)。また、自然河岸とコンクリート護岸との非類似性に影響を与えている生物として、自然河岸で多数確認されたトビムシ目と自然河岸のみで確認されたサワガニがあげられた。トビムシ目は、腐植、藻類などを索餌し、他の土壤動物や地上部の動物の餌として重要である。トビムシ目の生活型は、土壌表層やリター層に分布し、餌を求めて移動力に富む表層性種と土壌中の孔隙に住み、まわりにある餌を食べる地中性種に分けられることが知られている²⁰⁾。従って、湿潤度、緑被率が高く、土壌構成材料としてシルト・粘土や砂が卓越した自然河岸が、トビムシ目の生息に適すると考えられる。一方、サワガニは、流水中の転石の下を隠れ場とする他、周囲の湿った陸域にも穴を掘る²¹⁾。本研究でも、河岸下部における法面勾配が緩く、巨礫一大礫および中礫一細礫が確認された自然河岸がサワガニの生息場として利用されていた。また、自然河岸の温度変動はコンクリート護岸より有意に小さかったが、昆虫や甲殻類等の変温動物にとっては、時間的な温度の安定化が代謝機能を正常に保つ可能性もある。以上より、湿潤度、土壌材料および温度変動等の多要因が生物生息の支配要因として重要であることが考えられる。



写真-3.5.2 調査区および調査区概要

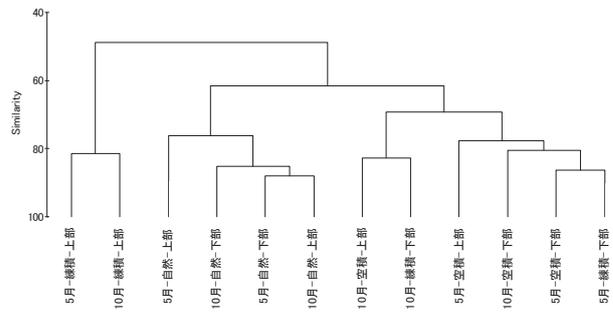


図-3.5.5 各調査区間における生物の類似度

3.5.4 砂鉄川における護岸工法の適用

北上川水系の砂鉄川は流域面積 375.1 km²を有し、流路延長 46 km の 1 級河川である。北上川合流部に近い門崎地区では、2002 年 7 月に台風 6 号による甚大な洪水被害が発生したため、砂鉄川緊急治水対策事業がすすみ、2003 年 8 月に概成した。この事業により、蛇行区間 1km (河床勾配 1/885) は直線化され、600m の新たなショートカット区間 (河床勾配 1/500) が出現した。このショートカットによる影響を把握するために 2004 年に魚類調査と物理環境調査が行われ、ショートカット区間では自然状態の保持された区間 (対照区) に比べ魚類の種数、生息密度ともに少ないことが明らかとなった²²⁾。

上述の結果を踏まえ、砂鉄川ショートカット区間の瀬およびトロの各河道区間に、水際の流速を低下させる工法および間隙を創出する工法 (復元区) を導入し、従来工法を考慮して隣接設置した 2 区間を含めた以下の 3 区間 (写真-3.5.3) について比較を行った。

- ①復元区：木杭による流速低減と、石積みによる間隙環境の創出を行った
- ②カゴ区：蛇カゴによる従来護岸
- ③カゴ+覆土区：蛇カゴの上に表土を覆土

2006 年の 8/4-7 にエレクトリックショッカーを用いて魚類の捕獲調査を行った。なお、復元区は木杭部と石積み部に 2 分して調査を行った。従って、総調査地点は 8 地点 (瀬木杭部、瀬石積み部、瀬カゴ区、瀬カゴ+覆土区、トロ木杭部、トロ石積み部、トロカゴ区、トロカゴ+覆土区) である。

調査地の優占種であるアブラハヤの個体数を比較した結果、瀬に設置した修復区の値が大きく(図-3.5.6)、導入工法の効果が確認された。しかし、トロでは調査地点間の違いはそれほどみられず、復元区の効果は河道特性の違いにより異なってくることを示唆された。トロよりも瀬で個体数が多かった理由としては、河岸域への餌供給の違いが寄与している可能性がある。

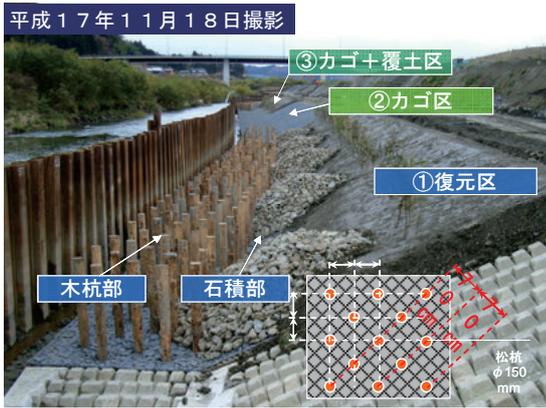


写真-3.5.3 砂鉄川の3調査区間

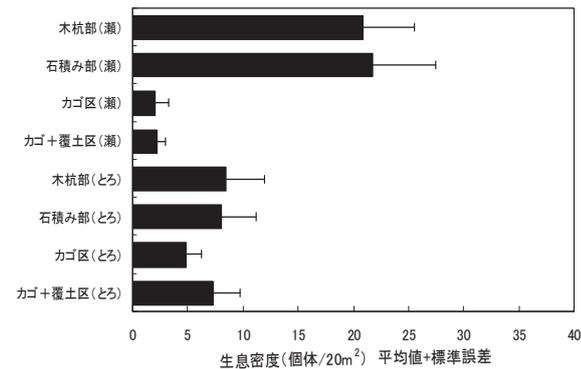


図-3.5.6 調査地点別のアブラハヤ獲個体

3.5.5 護岸工法の性能評価手法の開発

現在、護岸工法については、環境上の機能についての評価基準が明示されていないため、環境に配慮した計画・設計、工法の開発を行う上で十分な検討ができない状況にある。本研究では、今後の多自然川づくりにおける護岸工法の性能を適切に評価するための指標軸及び評価基準の設定を行った。護岸を設計する場合は治水機能の確保に加えて、河岸・水際部が本来有する環境上の機能を確保する視点が重要となり、特に「河川景観」、「自然環境」を考慮する必要がある²³⁾。本項では、中小河川に関する河道計画の技術基準²⁴⁾（平成22年8月改定）にも適用された、護岸工法の性能評価の評価軸およびその基準について提案を行った。

(1) 河川景観に関する評価手法

護岸は自然物の中に存在する人工物であるため、景観的には自然素材に近づけるような配慮が必要となる。明度（明るさ）に関しては、護岸等に使用される自然石の明度レンジは4~6程度であり、実際の護岸に対しても6以下で景観の評価が高いことが明らかとなっている（図-3.5.7, 8）。以上より、護岸が景観的に目立たないようにするためには、明度6以下の低明度の設定が好ましいと判断される。一方、彩度（鮮やかさ）については、自

然石も護岸も3以下の低彩度であるため、石材やコンクリートに着色して彩度をあげる配慮は必要ないと判断される。テクスチャー（素材の質感）については、人工的な印象緩和のために、護岸表面に肌理の粗さ（手で触った時のざらざら感）や凹凸を持たせることが好ましい（表-3.5.2）。これらの処理による陰影は、コンクリート素材の明度低下や生物の移動経路としての機能（後述）も期待できる。

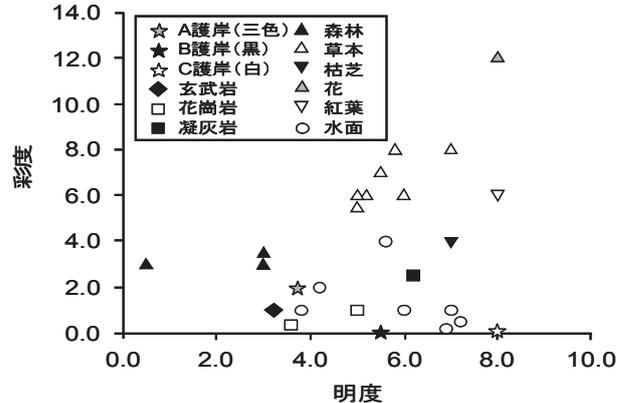


図-3.5.7 自然素材及び調査施設の明度と彩度

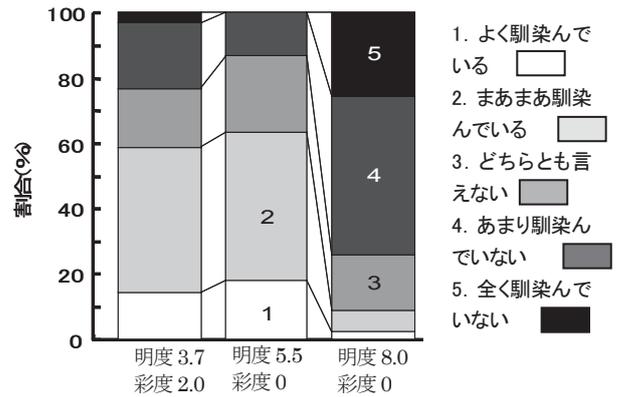


図-3.5.8 護岸景観のアンケート調査

表-3.5.2 河川景観に関する性能評価基準

評価軸	基準
明度	低明度（6以下程度）とする。
彩度	無彩色とする。
テクスチャー	肌理の粗さ（ざらざら感）、凹凸（陰影）を有する。

(2) 自然環境に関する評価手法

自然環境については、生物の生息場および移動経路について評価基準を設定した（表-3.5.3）。生息場に対しては、研究より生態的機能が確認されている植物を評価軸とすることを提案した。評価基準としては植生基盤としての土壌、土壌を保持できる空隙、土壌の保水性および透水性の有無があげられ、これらの確保が必須となる。移動経路については、法勾配よりむしろ法面材料が寄与

要素だということが示唆されており²⁵⁾、すべての実験生物群（ヌマガエル、クサガメ、サワガニ）で登坂成功が確認された表面材料である細礫（径 2.4-7.5mm）もしくは中礫（径 4.75-53.0mm）程度の法表面材料を保持できれば、生物の移動経路として良好に機能することが期待できる。

表-3.5.3 自然環境（生物）に関する性能評価基準

評価軸		基準
生息場	植物 (植生基盤)	土壌、空隙、保水性、透水性
移動軽度	法表面材料	細礫～中礫

3.5.6 まとめ

本研究は、様々な河岸－水際タイプの生態的機能を明らかにし、河川中流域において河岸－水際域を保全する際の留意点を取りまとめ、効果・効率的な河岸処理および護岸の性能評価手法の開発を行うことを目的として実施した。研究は水際と河岸の2つの部分に分かれる。

水際の研究においては、水際の生息場所としての機能評価、復元工法の機能評価について検討を行った。

生息場所としての機能評価に関する研究では、水際にある石（礫）の間隙と魚類の利用状況との関係に着目した。この結果、水際に形成される水中の間隙は魚類の棲家として機能しており、礫の大きさにより棲息する種類組成が異なることが明らかとなった。

水際の復元工法の評価では、水際に設置した木杭群の生息場所修復手法としての評価、実河川（砂鉄川）における河岸修復工法の魚類生息場所としての評価を実施した。この結果、魚類の定着には、木杭群の断続配置よりも連続配置の方が有効であることを示した。実河川における研究では、修復工法の導入により魚類の生息に効果が認められ、その効果はトロ区間よりも瀬区間の方が大きいことを示した。

河岸（水面より上の陸上域）に着目した研究では、自然河岸や練積み護岸等の異なる河岸形式に着目した。形式の違いにより生物の群集構造が異なり、特に湿潤度や温度変動などの物理環境要因が生息に寄与していることが示唆された。

護岸工法の性能評価手法については、河川景観、自然環境の2点から検討を行った。河川景観については、明度を離れた3タイプの実寸護岸を実験河川に設置し、アンケート調査と自然素材の色相との比較から、人間から見た景観評価を実施した。その結果、水辺の自然素材と同様の6以下の低明度に対して高い評価を得ることが示唆された。また、これらの結果を取りまとめ、河川景観

の評価軸および評価基準を設定した。

自然環境については、生息場と移動経路に着目した。移動経路については、河岸粗度や傾斜を操作要因とし生物の登坂実験を行い、生物種ごとに登坂条件に特異性を有することを明らかにした。具体的には、生物種の外部形態や登坂様式（跳躍、匍匐等）が寄与していることが考えられた。また、これらの成果を取りまとめ、自然環境に関する評価軸と評価基準の設定を行った。

今後は以上の成果の普及に努めるとともに、具体的な護岸工法の開発に関する研究に着手する予定である。

3.6 流量および河床の状態が底生動物・魚類等の摂食圧に及ぼす関係解明と河床環境評価手法の提案

3.6.1 概要

近年、人為的な流量制御に伴う流況の平滑化や上流からの土砂供給の減少等により、河床の健全性が損なわれていることが広く認識されるようになった。主な課題としては、①有機物やシルトなどの微細な土砂の堆積、②糸状緑藻の繁茂、③アユの餌資源としての質への影響、④底生動物群集への影響、⑤景観の悪化等があげられる。Biggs は、河川の付着藻類の発達をコントロールする要因について、藻類現存量を増加させる資源として、「栄養塩」、「光」、「水温」、減少させる要因として、「攪乱」（付着基質の不安定性、流速、懸濁物質）、及び底生動物や魚類による「摂食」をあげている（図-3.6.1）²⁶⁾。前述した課題は主に、これらの要因が人為的に改変されたことによって生じたものである。したがって、河床の健全性を修復するためには、これらの要因と関係を明らかにし、河床の健全性が維持される仕組みを整える必要がある。しかし、これまでの河床管理は、維持流量の増加、ダムからのフラッシュ放流、土砂還元等主に「攪乱」要因を修復する取り組みが中心であり、底生動物・魚類による「摂食」に関しては、ほとんど検討されてこなかった。今後は、より本質的な河川生態系の修復を図っていく上においても、その場に生息すべき生物の棲み場（空間、流量等）を整え、生物が生息でき、それによって河床付着物が「摂食」されるといった生態系の機能を加味した河床管理の考え方を提示していくことが必要であると考えられる。

そこで本研究では、生物の摂食効果により河床の健全性が維持される機能に着目し、これを加味した河床管理の考え方を提示することを目的とする。具体的には、流量・掃流砂と河床の状態、底生動物・魚類等の生息と摂食の関係に関する基礎的データを取得し、これを基に一次生産及び付着藻類を餌とする生物の物理環境生息場、摂食圧を組み込んだモデルを構築し、適切な河床環境管理手法の設定に資する。

3.6.2 流量が河床環境に及ぼす影響の評価

ダム下流区間では、シルト等の堆積や糸状緑藻の繁茂がしばしば課題となる。シルトの堆積は、付着藻類の代謝、底生動物の種組成、そして、生物間相互作用に影響を及ぼす²⁷⁾²⁸⁾。しかし、このような課題に関する定量的知見は少ない。そこで、ダム下流区間を対象に、河床付着物調査を行い、シルトの堆積や糸状緑藻の繁茂状況と

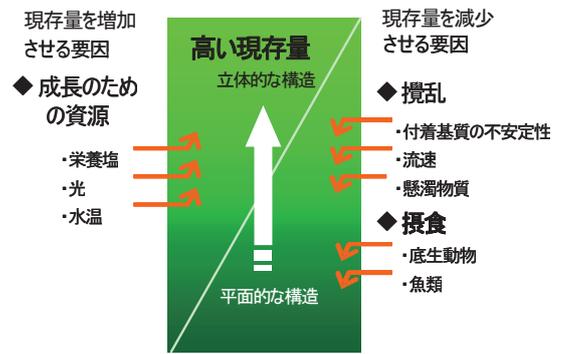
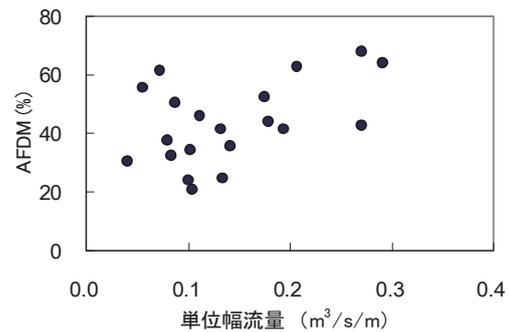
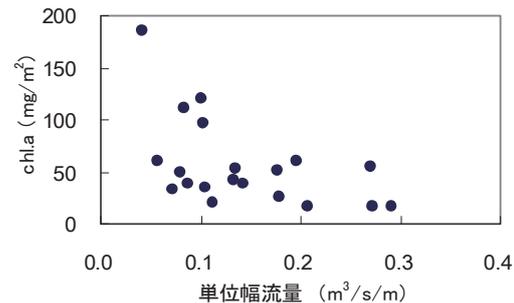


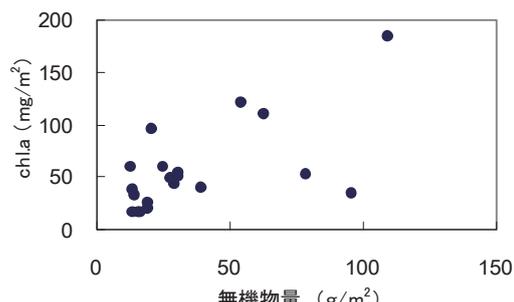
図-3.6.1 河川の付着藻類の発達をコントロールする要因、攪乱・資源・摂食の概念図²⁶⁾に加筆



①単位幅流量とAFDM(%)の関係



②単位幅流量とchl-aの関係



③無機物量とchl-a量の関係

図-3.6.2 単位幅流量と AFDM(%), chl-a 量、及び無機物量と chl-a 量の関係

単位幅流量との関係について検討した。

シルトなどの細粒土砂量や河床付着物に占める割合を示す無機物量及び AFDM(%) (Asy Free Dry Mass : 有機物量/乾燥重量×100) と、流量、流水中の懸濁物質に係わる諸量(単位幅流量、水深、流速、摩擦速度、SS、SS-VSS) との関係について、ピアソンの相関係数を見

表-3.6.1 各実験区の付着膜の状態及び最大光合成速度との相関

	付着膜の状態			ピアソンの相関係数の検定	
	アユ区	オイカワ区	対照区	相関係数	P
乾燥重量 (g/m ²)	13.7±1.2 ^a	146.0±128.0 ^b	317.7±263.5 ^b	-0.79	<0.05
強熱減量 (g/m ²)	11.9±2.0 ^a	14.9±5.1 ^a	31.1±6.2 ^b	-0.61	0.083
無機物量 (g/m ²)	1.7±1.0 ^a	131.1±123.2 ^b	286.6±257.4 ^b	-0.85	<0.01
強熱減量 (%)	87.4±8.4 ^a	14.7±7.6 ^b	13.5±7.6 ^b	-0.83	<0.01
chl.a (mg/m ²)	89.8±18.0	115.6±39.5	150.8±29.9	-0.41	0.27
AI	157±25 ^a	1017±1001 ^b	1580±1604 ^b	-0.42	0.19
生藻類比	0.89±0.03 ^a	0.79±0.05 ^b	0.77±0.02 ^b	0.88	0.01

ると、AFDM(%)については、単位幅流量との間に有意な相関関係が検出された(図-3.6.2)。また、単位幅流量と chl-a 量との間には負の相関、無機物量と chl-a 量との間には正の相関関係がみられた。今回調査を行った地点においては、主に流量が、河床付着物に占めるシルトなどの細粒土砂の割合や付着藻類現存量などに影響を与える要因となっていることが読みとれる。また、例えば、アユの餌資源としての河床付着物評価においては、AFDM(%)が40%以上であれば、肥満度に影響を与えないという指摘があり²⁹⁾、餌資源としての価値は低下しないと考えられる。今回の調査結果からは、単位幅流量が0.18m³/s/m が、これを満足する目安となる。

3.6.3 摂食が河床環境に及ぼす影響の評価

生物による河床付着膜の摂食は、河床環境の改善を図る上で、重要な役割を担っている。しかし、生物の摂食が付着藻類群集に及ぼす影響や河床付着膜を巡る生物間の関係を扱った研究は生態学の分野で比較的多く行われているが^{30)~32)}、工学的な観点から、摂食により河床の健全性が維持される機能に着目し、これを定量的に評価した研究はほとんどみられない。ここでは、比較的高い摂食圧を有するアユ、オイカワを対象として、摂食が河床付着膜に与える影響を付着膜の性状および光合成速度から対照区(魚類の摂食圧無し)との比較を通じて明らかにした。

アユの摂食は、乾燥重量、強熱減量、無機物量、AI指数を対照区と比較して有意に減少させ、生藻類比を上昇させた。一方、オイカワの摂食においては、強熱減量のみ有意な差が見られただけで、アユの付着膜の量的・質的改善効果はオイカワのそれと比較して大きいことが明らかになった。単位 chl-a 当たりの最大光合成速度については、アユが摂食した付着膜はオイカワおよび対

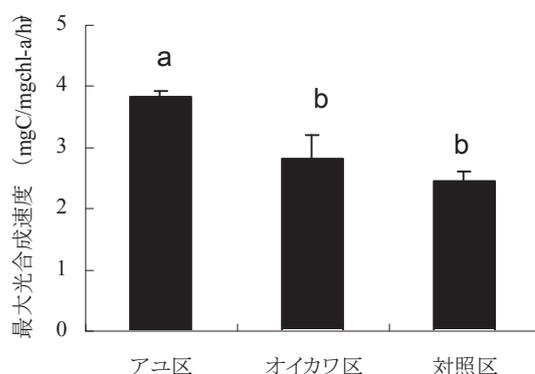


図-3.6.3 単位 chl-a 当たりの最大光合成速度

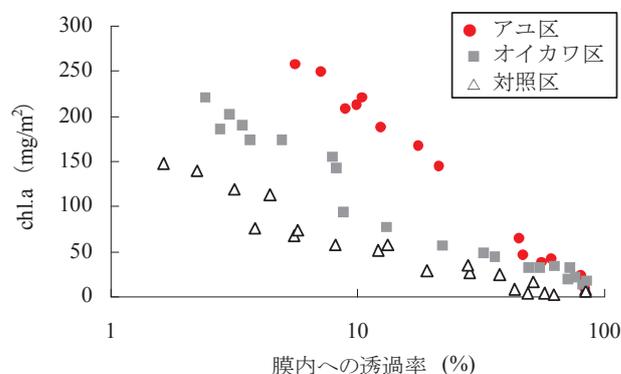


図-3.6.4 膜内への光の消散

照区と比較して有意に大きく、アユの摂食により付着膜の性状が変化するだけでなく、生産力が上昇することが明らかになった(図-3.6.3)。最大光合成速度と各項目とのピアソンの相関係数を見ると(表-3.6.1)、最大光合成速度は、乾燥重量と無機物量、強熱減量(%)との間に有意な負の相関関係が、生藻類比との間に有意な正の相関関係が認められた。図-3.6.4に、膜内への光の透過について、chl-a 量と膜内への光の透過率(%)の関係を示した。アユの摂食を受けた付着膜は光が通り透過しやすくなっている。これは、付着物内の無機物量が増加したこと

より、膜内への光が透過しにくくなったものと推測された。つまり、アユの摂食は付着膜の性状を直接的に改善するだけでなく、光合成活性を増大させることにより餌資源の供給速度の上昇に寄与していることを示している。

3.6.4 摂食が河床環境に及ぼす影響の評価

河床の健全性の評価は付着藻類の現存量だけでなく、付着藻類の活性度（単位 chl-a、単位時間当たりの光合成速度）、河床付着膜に含まれる無機物量等が関連する。しかし、付着藻類の現存量の増加に伴い、活性度が低下し、無機物量が増加する傾向が見られることから、ここでは、現存量を指標として河床の健全性を評価することを目的とし、対象場の条件に応じて付着藻類の現存量を推定する数理モデルの開発を行う。

一般に単位面積当たりの付着藻類の現存量 (chl-a) の増減は以下の式で示すことができる。

$$\frac{dB_{chl-a}}{dt} = P_n - D - G + I \quad \text{式(1)}$$

ここに、 B_{chl-a} ：底生藻の現存量、 P_n ：底生藻の単位時間当たり一次純生産量、 D ：単位時間当たりの底生藻剥離量、 G ：単位時間当たりの摂食量、 I ：単位時間当たりの移入量である。

単位時間当たりの一次純生産量 P_n は以下の式で表現される。

$$P_n = P_g - R \quad \text{式(2)}$$

ここに、 P_g ：一次総生産速度、 R ：呼吸速度である。剥離 (D) は①流水による剥離、②河床材料が衝突することによる剥離、③河床材料が転倒することによる剥離の3つに区分できる。この中で、③については、各粒径集団の限界掃流力を超えた場合に現存量をゼロとして扱うこととし、①と②だけを取り扱う。以下に①、②の考え方を示す。

①流速レンジにより剥離が始まる現存量が異なるとし、剥離率 (D_w) を定義して以下の式で与えた³³⁾。

$$D_w = Det(B_{chl-a} - B_o) \quad \text{式(3)}$$

ここに、 Det ：剥離率(=0.1)、 B_o ：剥離が始まる現存量で既往研究における流速と現存量との関係から、流速値が大きい場合は B_o が小さく、流速値が小さい場合は B_o が大きくなるよう設定した³⁴⁾。

②磨耗による剥離については、対象とする粒径集団よりも相対的に小さい集団による磨耗効果のみを対象とすることとし、磨耗剥離は北村らが提案した評価方法を採用する。本研究でも、北村らの提案に従い³⁵⁾、掃流砂が

存在する場合の剥離率 (D_b) を定量化する。

$$D_b = \alpha \gamma q_b d^{1/3} u_*^{2/3} B_{chl-a} \quad \text{式(4)}$$

ここに、 α ：砂礫の特性値(1.5×10^{-5})、 γ ：藻類の特性値(0.1×10^4)、 q_b ：流砂量、 d ：粒径、 u_* ：摩擦速度である。

単位時間当たりの摂食量 G は以下の式で与える。

$$G = G_{\max} / D \cdot (S_v \cdot S_H \cdot S_d)^{1/3} \quad \text{式(5)}$$

ここに G_{\max} ：アユの単位面積当たりの最大摂食量で既往の研究から $6.9 \text{mg-chl-a m}^2 \text{day}^{-1}$ を与える³⁶⁾。 S は流速(V)、水深(H)、底質(d)の選好曲線であり(添え字がそれぞれの選好曲線を示す)、底質 d は 10cm として一様に与え、流速と水深は計算流量から得られた値として与えた。選好曲線は摂食生物としてアユを想定し、河村らが作成したアユ(8月)における流速、水深、底質の選好曲線を与えた³⁷⁾。摂食量が現存量を上回る場合には、現存量の最低値として $5 \text{mg-chl-a}^{-1} \text{m}^2$ として一定値を与えた。摂食の効果は当面アユのみとし、したがって、この効果を取り込むのは大礫・巨礫のみとした。

開発した現存量モデルの検証を行うため、阿木川ダム上下流において本モデルの適用を図り、精度の検証を行った。検証に必要なデータの収集は2009年12月から毎月行い、以下に示す項目を調査した。

- 1) 一次生産速度 (1点法)
- 2) 光量子密度 (1箇所)
- 3) 粒径集団別付着藻類現存量 (chl-a)
一砂、小礫、中礫、大礫、巨礫別
- 4) 粒径集団別河床被度 (10箇所)
- 5) 流速・水深 (10箇所)
- 6) 掃流砂量

また、阿木川ダム管理所から以下のデータの提供を受けた。

- 1) 水位データ (毎正時)
- 2) 水質データ (月)

以上のデータを用いて、2009年11月1日～2010年8月31日の期間を対象として現存量の日変化を算出した。算出に際しては、水質値として阿木川ダム管理所で収集した月別の水温、DIN、SRP、DO、DOCを与えた。

光量子データは現地調査実施時の値しかなかったため、この値を当該月のデータとして用いた。本モデルにおいては、光飽和条件で水温 20°C の条件下における最大光合成速度を与える必要があるが、この値については阿木川ダム下流で観測した2009年12月のデータを用いた(詳細は後述)。初期現存量は $25 \text{mg-chl-a m}^{-2}$ 、計算の Δt は

600 秒である。

阿木川ダム上流と下流の現存量の予測値と実測値を示す(図-3.6.5)。ダム上流で現存量が相対的に小さいこと、また、流量が増加し、かつ、変動する3月以降に上下流で低下するといった傾向は示されたが、予測値は実測値と一致しない部分もあった。これは、今回の計算では、現地調査当日の光量子密度のデータを用いて当該月全ての現存量を推定したことが一因と考えられる。

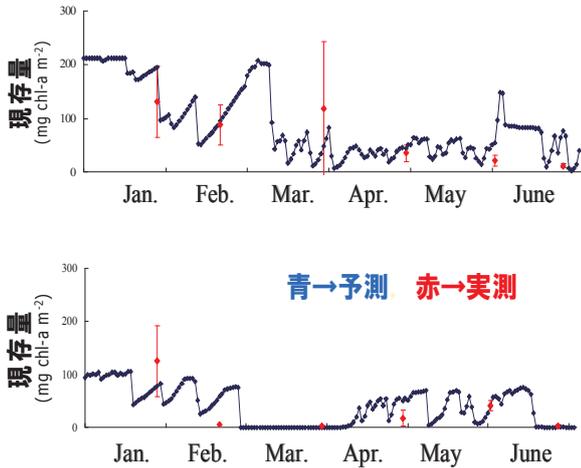


図-3.6.5 ダム下流(上)、ダム上流(下)における付着藻類現存量の予測値と実測値

次に、このモデルを用いて河床環境の良し悪しに影響を及ぼす要因を明らかにする方法を示す。底生藻の現存量は直接的には水温、水質(栄養塩濃度)、流量、掃流砂等の要因が複合的に作用して決定される。したがって、河床環境を改善するためのシナリオは各要因の幾つかの組み合わせの中から、効果が期待され、かつ、コスト等の実現性を加味して選定されることになろう。ここでは、阿木川ダム下流における河床環境を改善するための具体的な要因の組み合わせを開発した数理モデルを用いて検討し、河床環境改善シナリオを考えるための参考例として示す。

阿木川ダム下流の6月における現存量を対象として検討を行った。現存量を直接支配する要因として栄養塩、水温、流量、掃流砂量を取り上げ、アユの摂食率はこれらの要因が変化することに伴う間接要因として取り込んだ。これらの要因の変化のさせ方は無数にあるため、ここでは、ダム下流におけるこれらの要因の時間変化をベースとし、ここから個々の要因をダム上流(ダム無し)の時間変化に変更することによる改善シナリオを設定し、現存量の時間変化を算出して、各シナリオの効果を評価した。

シナリオは Case0 をダム下流とし、Case1~4 までを

表-3.6.2 のように設定した。なお、個々の要素の組み合わせの総数は 15Case が想定されるが、ここでは、検討例として示すために 4 つの Case に留めた。

各 Case の現存量の時間変化(図-3.6.6) および検討期間内における純生産、剥離量、摂食量の積算値を示した(図-3.6.7)。

表-3.6.2 各ケースの設定条件

	栄養塩	水温	流量	掃流砂量
Case0	ダム有り	ダム有り	ダム有り	ダム有り
Case1	ダム無し	ダム有り	ダム有り	ダム有り
Case2	ダム無し	ダム無し	ダム有り	ダム有り
Case3	ダム無し	ダム無し	ダム無し	ダム有り
Case4	ダム無し	ダム無し	ダム無し	ダム無し

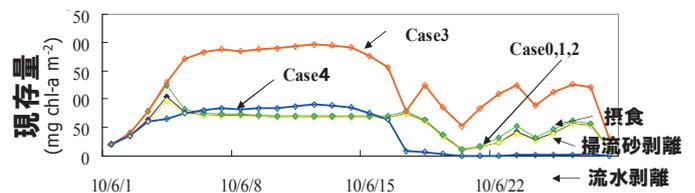


図-3.6.6 各 Case の現存量の時間変化

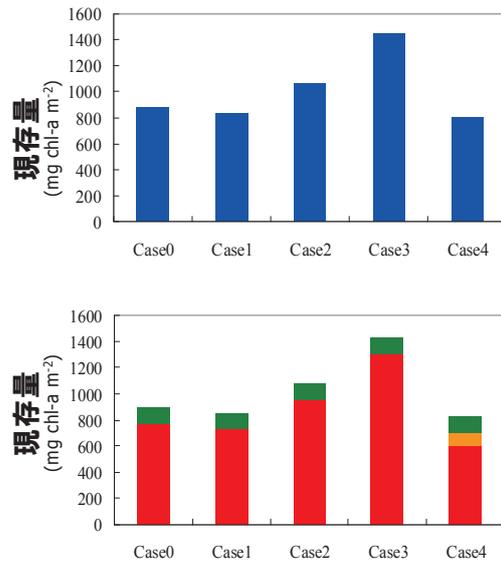


図-3.6.7 各 Case の積算生産量(上)とその内訳(下)

どの計算結果も月後半に現存量が低下する傾向が見られた。これは、計算対象とした月の前半は流量が小さくかつ時間的に安定しているが、後半になると降雨の影響により流量が大きくなり、かつ、時間的に不安定になるためである。摂食量はどの Case でも大きく変化しなかった。これは、どの Case においてもアユの生息に十分な物理環境が確保されているため、式(5)に示す G の値が変化しなかったためである。

Case1,2 の現存量変化は Case0 と大きな差異はなく、

水質、水温を変化させても河床環境は大きく変化しないことを示した。一方、流量を変化させた Case3 の場合は流量が減少したために最大現存量が増加し、結果として純生産が増加した。この場合、剥離量が大きくなり、下流に対する水質汚濁負荷が大きくなっている。一方、掃流砂を付加した Case4 は月後半に現存量が著しく低下し、この期間における現存量低減に効果があることを示した。ただし、期間内における掃流砂による総剥離量は流水のそれと比較して大きくない。これは、掃流砂による剥離が僅かな現存量の低下とそれに伴う純生産力の低下、そして更なる現存量の低下というフィードバックを引き起こした結果であると考えられた。

このように、シナリオの評価には、要因を個別に評価するだけでは不十分であり、要因の組み合わせとして効果を総合的に評価することが必要となる。今後、本モデルを実際の現場に適用し、検証を行いモデルの改善を図る予定である。

参考文献

- 西村登：円山水系（兵庫県）の水生生物群集 II：八木川の淵の底生昆虫。日本生態学雑誌 8: pp136-142, 1958.
- 水野信彦, 岩崎優, 西村正昭：奈良県吉野川での底生動物の現存量 I. 1965 年 2 月。日本生態学会誌 16, pp113-119, 1966.
- 水野信彦, 岩崎優, 西村正昭：奈良県吉野川での底生動物の現存量 II. 1965 年 4 月～5 月。日本生態学会誌 16, pp157-165, 1966.
- 西村登, 信本励, 三橋弘宗：山陰・北陸・近畿地方 16 河川における底生動物の現存量とそれに関連する要因。ホシザキグリーン財団研究報告 5, pp161-206, 2001.
- 土木研究所：水生生物の生息環境の調査手法と生態的機能の解明に関する研究。平成 22 年度重点プロジェクト研究報告書, 13. 水生生態系の保全・再生技術の開発, 2011
- 福島雅紀, 櫻井寿之, 箱石憲昭：大きな石による河床再生技術に関する実験的検討, 水工学論文集, Vol. 54, pp. 763-768, 2010.
- 石山信雄, 渡辺恵三, 永山滋也, 中村太士, 剣持浩高, 高橋浩輝, 丸岡昇, 岩瀬晴夫：河床の岩盤化が河川性魚類の生息環境に及ぼす影響と礫河床の復元に向けた現地実験の評価, 応用生態工学, Vol. 12, pp. 57-66, 2009.
- 森 僚多, 石川武彦, 長田健吾, 福岡捷二：多摩川水系浅川における河床高回復現地実験と河道管理手法, 河川技術論文集, Vol. 16, pp. 113-118, 2010.
- 傳田正利, 瀧澤 渉, 佐藤 翔, 黒川貴弘, 三輪準二：野生動物自動行動追跡システムを用いた降下期のアユ行動特性の把握, II-59 (CD-ROM), 第 38 回土木学会関東支部技術研究発表会講演集, 2011 年 2 月
- 例えば, 藤田光一, 李参熙, 渡辺 敏, 塚原隆夫, 山本晃一, 望月達也：扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション, 土木学会論文集, No. 747/II-65, pp. 41-60, 2003.
- 藤原正季, 大石哲也, 天野邦彦：洪水攪乱と周辺植物の影響に着目した希少河原植物生育地の成立および維持機構, 河川技術論文集, vol. 14, pp. 145-150, 2008.
- 大石哲也, 天野邦彦, 中村圭吾：砂礫構造の違いからみた河原植物の生育環境特性について, 河川技術論文集, vol. 12, pp. 477-482, 2006.
- Oishi Tetuya, Sumi Tetsuya, Fujiwara Masaki and Amano Kunihiko : RELATIONSHIP BETWEEN THE SOIL SEED BANK AND STANDING VEGETATION IN THE BAR OF A GRAVEL-BED RIVER, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Vol.28(1), pp. 103-116, 2010.
- 大石哲也, 天野邦彦：人的利用が河川高水敷の地べた状態変化に及ぼす影響の定量的把握方法とその考察, 水工学論文集, 土木学会, vol. 52, CD-ROM, pp. 685-690 2008.
- 大場達之：定着度指数 (ECESIS 指数) の試み, 「現代生態学の断面」, 共立出版, pp.36-40, 1983.
- 大石哲也, 天野邦彦, 角哲也：河川植生の数量的評価手法とその活用について, 河川技術論文集, 土木学会, vol. 15, pp. 19-24, 2009.
- (独) 土木研究所河川生態チーム：河川植生評価の手引き(案), 土木研究所資料第 4181 号, 2010
- (独) 土木研究所河川生態チーム：新しい河川植生調査手法(案), 土木研究所資料第 4198 号, 2011
- 青木繁幸, 佐川志朗, 秋野淳一, 萱場祐一：「木杭群設置によるオイカワの定着場所特性—実験水路を用いた個体レベル観察—」, 応用生態工学第 11 回研究発表会講演集, pp.97-99, 2007.
- 金子信博：土壤生態学入門—土壤生物の多様性と機能、東海大学出版会、2007.
- 小林哲：「河川環境におけるカニ類の分布様式と生態—生態系における役割と現状—」 応用生態工学、No.3. pp.113-130、2000.
- 萱場祐一・吉田桂治・田村秀夫・剣持浩高・高木茂知・林尚：水際における生息場所タイプと魚類の生息分布 - 砂鉄川における現地調査結果から -、河川技術論文集、第 11

- 巻、pp.31-34、2005.
- 23) (独) 土木研究所自然共生研究センター：多自然川づくりにおける河岸・水際部の捉え方、土木研究所資料第 4159 号、2010.
- 24) 国土交通省河川局：中小河川に関する河道計画の技術基準について、2010.
- 25) 上野公彦・萱場祐一・佐川志朗：異なる河岸材料粒径および河岸勾配におけるヌマガエル、クサガメおよびサワガニの登坂実験、日本陸水学会東海支部会 第 12 回研究発表会講演要旨集、pp.16-19、2009.
- 26) Biggs, B. J. F. and Close, M. E. : Periphyton biomass dynamics in gravel bed rivers: The relative effects of flows and nutrients, *Freshwater Biology*, 22, pp.209-231, 1989.
- 27) Biggs, B. J. F. and Jowe, R. L. : Responses of two trophic levels to patch enrichment along a New Zealand stream continuum, *New Zealand Journal of marine and freshwater Research*, 28, pp.119-134, 1994.
- 28) Yamada, H. and Nakamura, F. : Effect of fine sediment deposition and channel works on periphyton biomass in the MAKOMANAI RIVER, North Japan, *River Research and Applications*, 18, pp.481-493, 2002.
- 29) 村上恭祥、林譲二、加藤友久：魚を育む豊かな流れ～河川生物資源保全流量調査報告書～、pp158-209、全国内水面漁業協同組合連合会、1989.
- 30) Abe, S. , Uchida, K. , Naguma, T. , Ioriya, T. and Tanaka, J. : Effects of a grazing fish, *Plecoglossus altivelis* (Osmeridae), on the taxonomic composition of freshwater benthic algal assemblages, *Archiv für Hydrobiologie*, 150(4), pp. 581-595, 2001.
- 31) Horner, R. R. , Welch, E. B. , Seeley, M. R. and Jacoby, J.M. : Response of periphyton to change in current velocity, suspended sediment, and phosphorus concentration., *Freshwater Biology*, 24, pp.215-232, 1990.
- 32) Kuhara, N. , Nakano, S. and Miyasaka, H. : Interspecific competition between two stream insect grazers mediated by non-feeding predatory fish, *OIKOS*, 87, pp.27-35, 1999.
- 33) Biggs, J. F. , Goring, D. G. and Nikora, V. I. : Subsidy and stress of stream periphyton to gradients in water velocity as a function of community growth form., *Journal of Phycology*, 34, pp. 598-607, 1998
- 34) Bouletreau, S. , Carabetian, F. , Sauvace, S. and Sanchez-Ferez, J. : Assessing the importance of a self-generated detachment process in river biofilm models., *Freshwater Biology*, 51, pp.901-912, 2006.
- 35) 北村忠紀、加藤万貴、田代喬、辻本哲郎：砂利投入による付着藻類カワシオグサの剥離除去に関する実験的研究、河川技術に関する論文集, 6, pp.125-130, 2000.
- 36) 深見公雄、水成貴之、久保田浩、西島敏隆：高知県下の二河川における付着藻類の増殖速度およびアユによる藻類消費速度の見積り、*水産増殖*, 42(2), pp.199-206, 1994.
- 37) 河村三郎：魚類生息環境の水理学, (財)リバーフロント整備センター, 2003.

4. 流域における物質動態特性の解明と流出モデルの開発

4.1 概説

近年、河川や湖沼の水質浄化や栄養塩濃度の削減を目的として様々な対策が立案、実施されている。これらの対策は一定の効果を示すものの、さらなる水質改善へ向けての効率的な対策立案や汚濁物質の供給源に対する抜本的な対策を行うにあたっては、流域で発生する栄養塩類の流出機構を明らかにし、汚濁負荷と対象水域の水質悪化との定量的な因果関係や土地利用・営農形態の変化等の影響を総合的に把握した上で適切な対策シナリオを検討する必要がある。このため本研究では流域で発生する栄養塩類の流出機構を明らかにするために、生活系、畜産系の汚濁物質発生特性（トレーサー物質及び溶解性栄養塩類の実態）の解明を行うとともに、流域内の栄養塩（窒素、リン）の動態を定量的に明らかにする流域水・物質循環モデルの開発を行った。

また、近年、流域での開発により溶解性鉄 D-Fe（フミン鉄）や溶解性ケイ素 D-Si（シリカ）等の必須元素の河川への供給が減少し水生生態系へ影響しているとの懸念があることから、都市排水・排水由来の必須元素の負荷量の解明及び河川への影響把握と対策の可能性の検討を行った。

さらに、河川内における物質動態として、河川の物理環境と流況が物質動態に与える影響の定量化を行うとともに、物理環境と物質動態との関係を明らかにした。

4.2 流域規模での水・物質循環管理支援モデルの開発

4.2.1 概要

流域で発生する栄養塩類の閉鎖性水域への流出機構を明らかにするために、生活系、畜産系の汚濁物質発生特性（トレーサー物質及び溶解性栄養塩類の実態）の解明を行った。また、生活系、畜産系の汚濁排出量が多いと考えられる流域を対象として、晴天時、雨天時におけるこれらの物質の流達特性を把握し、トレーサー物質と溶解性栄養塩類の流出負荷量と比流量の関係を整理した。さらに、流出モデルを用いた解析や水位連続観測と綿密な水質調査に基づく比流量と流出負荷量の関係を用いて、流域からの栄養塩類の雨天時を含めた流達負荷量を計算し、これまでの原単位法による総排出負荷量と比較した。

流域開発で必須元素の河川への供給が減少し水生生態系へ影響しているとの懸念があることから、都市雨水・

排水由来の必須元素の負荷量の解明および河川への影響把握と対策の可能性の検討を目標として、河川水および都市排水の調査を行った。更に詳細な溶解性鉄(D-Fe)および溶解性ケイ素(D-Si)の化学種分析法の検討を行うため前処理方法の検討を行った。また、生物による必須元素の実際の消費特性を把握するため、藻類培養試験を行い、窒素、リン、鉄、ケイ素の消費状況を確認するとともに、各元素の消費速度を把握した。

4.2.2 発生源ごとの水質特性の解明とトレーサーの選定

発生源ごとに特徴ある物質（トレーサー）により発生源を特定する手法が考えられるが、トレーサー物質の候補として、環境中に高濃度で存在しており、測定を比較的簡易に行うことができる陽イオン (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) に注目した。陽イオンは通常陰性に帯電している土壌への吸着が考えられるが、一般に排水中のこれらの物質の濃度は $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ であるのに対して、土壌中の濃度は $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ の順に減少することが知られており¹⁾、これらの陽イオンの中では、 Na^+ や K^+ は土壌等に吸着される割合が小さいと考えられることから、 Na^+ 、 K^+ をトレーサー物質として選定した。

1) 生活系汚濁のトレーサー物質及び栄養塩類の水質特性の把握

生活排水を主に受け入れている茨城県霞ヶ浦流域下水道湖北処理場の流入下水中のトレーサー物質及び栄養塩類の実態を調査した。調査は、平成 18 年 11 月～平成 19 年 2 月にかけて、週 2 回程度の頻度で流入下水をスポットサンプリングし、トレーサー物質 (Na^+) 及び溶解性栄養塩類 (K^+ , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{D-PO}_4^{3-}\text{-P}$) の計 6 項目を測定した。ここでは、 $\text{D-N} = \text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_2^-\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{D-P} = \text{D-PO}_4^{3-}\text{-P}$ として表記した。

流入下水中のトレーサー物質 Na^+ の濃度は、平均値で 48.82mg l^{-1} であり、分布を正規分布と仮定した際の 95% 信頼区間の上限値 ($m+2\sigma$)、下限値 ($m-2\sigma$) はそれぞれ 58.68mg l^{-1} 、 38.97mg l^{-1} であった。溶解性栄養塩類の Na^+ に対する存在割合は、 K^+/Na^+ の平均値は 0.237、95% 信頼区間の上限値 ($m+2\sigma$) は 0.265、下限値 ($m-2\sigma$) は 0.209 であった。同様に $\text{D-N}/\text{Na}^+$ の各値は、0.455、0.599、0.311、 $\text{D-P}/\text{Na}^+$ の各値は、0.0333、0.0498、0.0169 であった。さらに有機性汚濁の一つの指標である溶解性有機炭素 (DOC) についても検討し、平均値、95% 信頼区間の上限値 ($m+2\sigma$)、下限値 ($m-2\sigma$) はそれぞれ 45.03mg l^{-1} 、 63.32mg l^{-1} 、 26.73mg l^{-1} であった。また、 DOC/Na^+ の平均値、95% 信頼区間の上限値 ($m+2\sigma$)、下限値 ($m-2\sigma$) の各値として、0.922、1.378、0.466

を得た。

2) 生活系汚濁の割合が大きい流域からの流出河川における晴天時水質

既往の調査²⁷⁾⁴⁾により、流域における汚濁発生量総量に占める生活系汚濁の割合が大きい流域であることが判明している利根川流域手賀沼流入河川の天津川の流域を対象に、トレーサー物質及び溶解性栄養塩類の実態調査を7箇所、3回晴天時の日中に実施した。採水日は、非灌漑期である平成19年12月～平成20年2月の間である。

観測されたNa⁺濃度は10.08～43.03mg l⁻¹の範囲で、流入下水中の濃度の平均値である48.82mg l⁻¹と比べて低く、Na⁺濃度と溶解性栄養塩類の濃度の比(K⁺/Na⁺)は、流入下水の平均値が0.237であるのに対して、天津川流域では0.027～0.219の範囲で、D-N/Na⁺では0.455から0.144～0.442で、D-P/Na⁺では0.0333から0.00029～0.041で、DOC/Na⁺では0.922から0.053～0.837であった。

3) 畜産系汚濁の割合が大きい流域からの流出河川における晴天時水質

畜産業が盛んで、流域における汚濁発生量総量に占める畜産系汚濁負荷の割合が大きいと考えられる群馬県赤城山西南麓の流域を対象に、トレーサー物質及び溶解性栄養塩類の実態調査を実施した。採水は図-4.2.1に示す46箇所、平成20年1月～平成20年2月の間、各箇所

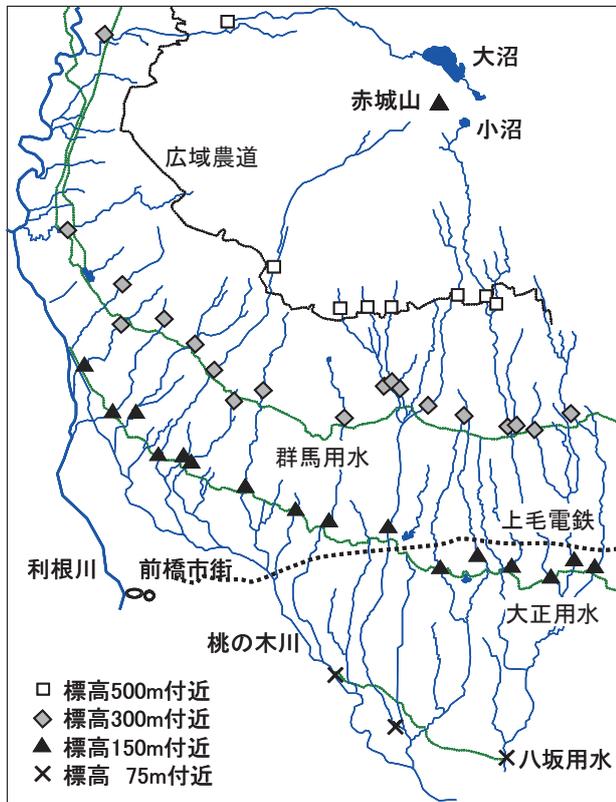


図-4.2.1 赤城山西南麓採水地点

2回晴天時の日中に実施した。

なお、調査対象とした流域の大まかな特徴は以下のとおりである。

- ・標高500m以上では、山頂に通じる2本の道路以外に主要な道路はなく、人間活動がほとんど無い地域である。
- ・前橋市街や上毛電鉄沿いの多くの人が居住する区域からやや離れた標高200m～500mの一角が畜産が盛んな地域である。
- ・標高270m程度を流れる群馬用水より低い地域では、農業集落や事業所の立地が見られる。

観測されたNa⁺濃度は3.24～74.75mg l⁻¹の範囲で、流入下水中の濃度の平均値である48.82mg l⁻¹と比べて高い場所も見られた。K⁺/Na⁺は、流入下水の平均値が0.237であるのに対して、赤城山西南麓では、0.053～2.08の範囲であり、この流域にはK⁺/Na⁺の大きい排水が混入している場所もあると考えられる。D-N/Na⁺についても、流入下水の平均値が0.455であるのに対して、0.0275～1.334、D-P/Na⁺でも0.0333であるのに対し0.00031～0.127、それぞれ流入下水の平均値に比べて大きい場所も散見された。特に、これらの場所は、畜産業が盛んな標高300m以下の場所に集中しており、関連性が考えられる。DOC/Na⁺は、最も高い地点1箇所を除くと、0.922であるのに対し0.015～0.456であった。有機性汚濁については、ある程度の除去がなされていると考えられた。

4) トレーサー濃度比と畜産系、生活系の排水の混入の実態の関係

赤城山西南麓の標高150～500m付近の畜産が盛んな地域(畜産地域)の調査結果では、生活排水が主に混入している天津川支流(市街地)と比較して、K⁺/Na⁺が大きい河川が散見された。水質チームが実施したある養豚場の排水の水質分析結果では、K⁺199.5mg/L、Na⁺155.1mg/L、K⁺/Na⁺=1.29の大きい数値が得られており、畜産系排水の混入の結果、河川水のK⁺/Na⁺が大きくなる可能性があると考えられる。

図-4.2.2、4.2.3では、K⁺/Na⁺値と栄養塩類濃度の関係について整理した。人間活動の少ない赤城山麓の標高500m付近の河川水を畜産地域の基底流(K⁺/Na⁺=0.124～0.338)と考えると、K⁺/Na⁺値の上昇とともに、D-N、D-P濃度も上昇する傾向が見られた。これは畜産排水の混入の結果、K⁺/Na⁺値、栄養塩類濃度が大きくなったものと考えられる。天津川支流では、湧水を市街地の基底流(K⁺/Na⁺=0.027～0.064)と考えると、K⁺/Na⁺値の上昇とともに、D-N、D-P濃度も上昇する傾向が見られた。これは、生活排水の混入の結果、K⁺/Na⁺値、栄養塩類濃度が大きくなったものと考えられる。

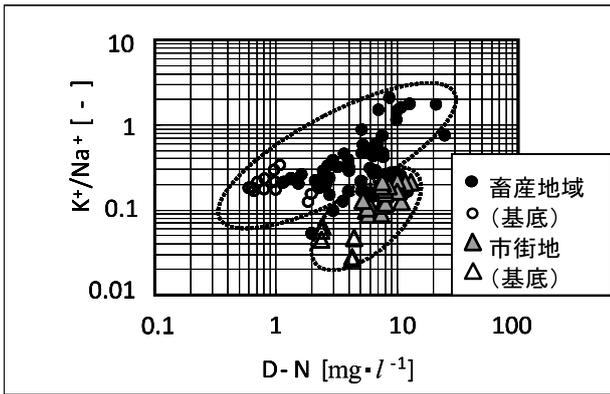
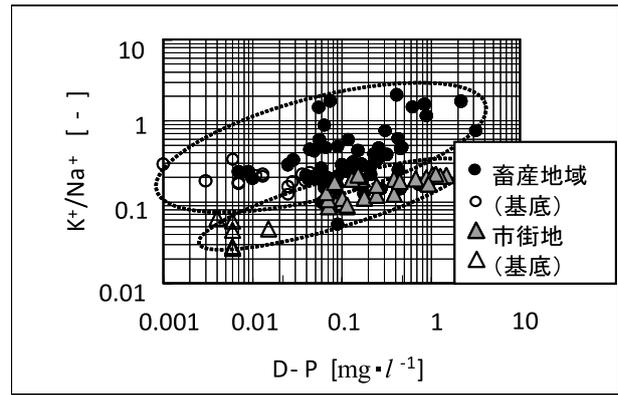
図-4.2.2 K⁺/Na⁺値と溶解性窒素濃度の関係図-4.2.3 K⁺/Na⁺値と溶解性りん濃度の関係

表-4.2.1 排出負荷量、流達負荷量、流達率の整理

推定方法	項目	単位	BOD	COD	T-N	T-P	備考
汚濁負荷流出モデル (InfoWorks CS)	① 流達負荷量	t・y ⁻¹	645	791	293	32	
	② 年間平均流達率	—	0.70	1.19	1.26	1.07	①/⑤
原単位法による 排出負荷量×流達率	③ 流達負荷量	t・y ⁻¹	138	199	—	—	⑤×④
	④ 年間平均流達率	—	0.15	0.3	—	—	T-N, T-Pは情報無し
	⑤ 排出負荷量	t・y ⁻¹	923	664	233	30	

一方、ある一定の栄養塩類濃度から、K⁺/Na⁺値を見ると、畜産排水由来の栄養塩類を多く含む河川水の場合にはK⁺/Na⁺値が大きく、生活排水由来の栄養塩類を多く含む河川水の場合にはK⁺/Na⁺値が小さくなると考えられる。以上より、ある場所における栄養塩類濃度を構成する畜産排水、生活排水の混入割合について考察するマーカーとしてK⁺/Na⁺値が有効であると考えられる。河川水の場合にはK⁺/Na⁺値が小さくなると考えられる。以上より、ある場所における栄養塩類濃度を構成する畜産排水、生活排水の混入割合について考察するマーカーとしてK⁺/Na⁺値が有効であると考えられる。

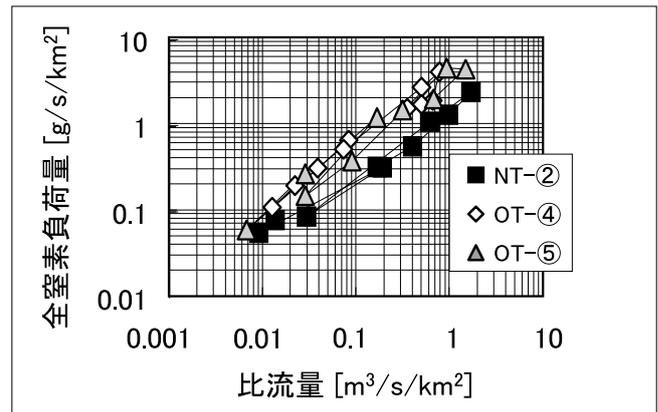


図-4.2.4 全窒素負荷量と比流量の関係

4.2.3 発生源から水域への流出機構の解明

1) 生活系汚濁の割合が大きい流域からの流出河川における雨天時水質

大津川流域を対象に、雨天時のトレーサー物質及び溶解性栄養塩類の実態調査を実施した。採水は、対象とした支流内で比較的下水道が整備されているNT-②、下水道整備が途上であるOT-④とOT-⑤の3ヶ所で、平成20年4月8日～9日の間、各箇所9回ずつ採水を実施した。なお、採水時には、採水地点の流量を合わせて測定した。

K⁺/Na⁺は流量の増加とともに一時的に0.5程度まで増加したが、時間の経過とともに減少した。全窒素負荷量と比流量の関係を図-4.2.4に示す。一定の比流量にお

ける全窒素負荷量を見ると、NT-②地点での値が、他の2地点に比べて小さかった。下水道などの対策が流出負荷量を低減していると考えられる。また、比流量の増加に伴い、流出負荷量が増加しており、晴天時と比べて、雨天時に大量の全窒素が流出している。これらは、全りん負荷量においても同様であった。

2) 生活系汚濁の割合が大きい流域での流達負荷量評価

大津川流域を対象に、雨天時を含めた長期間(1年間)にわたる汚濁物質の流出過程を、汚濁負荷流出モデル(InfoWorks CS)⑤を用いて解析した。算出された流達負荷量を、原単位法に基づく排出負荷量の総量で除して、BOD、COD、T-N、T-Pの年間平均流達率を求めた結果(表-4.2.1)、それぞれ、70%、119%、126%、107%

となった。さらに、従来から、閉鎖性水域を対象とした流域別下水道整備総合計画の策定の際に用いられている汚濁負荷流出解析手法⁸⁾との比較検討を行った。BOD、CODの年間流達率はそれぞれ、15%、30%としているが、汚濁負荷流出モデルの結果と比べて小さく、流達負荷量を過小評価している可能性があると考えられる。

3) 畜産系汚濁の割合が大きい流域からの流出河川における雨天時水質と流達負荷量評価

畜産業が盛んで、流域における汚濁発生量総量に占める畜産系汚濁負荷の割合が大きいと考えられる利根川水系鬼怒川右岸山川流域を対象に、トレーサー物質および溶解性栄養塩類の実態調査を実施した。その結果を解析したところ、この流域には生活排水以外の K^+/Na^+ と $D-N/Na^+$ の大きい排水が混入している可能性があると考えられた。

同流域を対象に水位連続観測による流量の連続把握を行うとともに、ほぼ週1回の晴天時水質調査を1年以上実施し、雨天時の流量・水質調査結果とあわせて、比流量と流出負荷量の関係を解析した。それらの結果から、流域からの栄養塩類の雨天時を含めた流達負荷量を計算し、原単位法による排出負荷量の計算結果と比較したところ、全窒素に関しては、流達負荷量が総排出負荷量を大きく上回っており、排出負荷量を過小評価している可能性が考えられる。

4.2.4 WEPモデルの改良と実流域への適用

(1) WEPモデルへの窒素およびリンの動態モジュールの追加

WEPモデルは、土木研究所で開発した分布物理型の水・物質循環モデルで、本研究を開始する前段階では、Jia et al.(2001)¹¹⁾によって開発された水循環モデルを基盤としつつ、農地におけるアンモニア態窒素(NH_4-N)、亜硝酸態窒素(NO_2-N)、硝酸態窒素(NO_3-N)をまとめて無機態窒素として考慮していた(飯泉ら(2006)⁸⁾)。このため、長期的な窒素流出負荷の変化傾向を追跡・再現す

ることは十分可能であったが、洪水時の流出負荷が比較的大きいことが明らかになりつつある中で、懸濁態が主体となることが想定される洪水時の窒素流出負荷の再現には限界があることが想定されていた。また、閉鎖性水域における物質動態を分析する上で、窒素と共に重要な役割を果たしているリンの再現ができなかった。そこで、本研究では、窒素流出・輸送モデルを改良するとともに新たにリン流出・輸送モデルを追加することで、表流水と地下水の流域規模での総合的な水・物質循環モデルとして実用性を図った。すなわち、懸濁態成分の負荷流出が大きな影響を及ぼす出水時も含めて再現すること、及び、窒素だけでなくリンについて負荷流出の再現を行うことを目標とし、図-4.2.5に示したように窒素を溶存態と懸濁態に区別して考慮した。一方、リン動態の解析モデルに関しても、窒素と同様に溶存態と懸濁態を区別した上で図-4.2.6に示した形態でWEPモデルに導入した(定式化の詳細は平成18年度土木研究所重点プロジェクト研究報告書⁹⁾を参照)。負荷供給源については、家庭排水、工業系排水、事業所系排水、畜産系排水、観光排水、下水処理場をポイントソースからの供給として境界条件で与え、ノンポイントソースからの供給は降雨、山林、農地、市街地に分けて考慮した。市街地と農地からの地表面堆積物質の流出に関しては、無降雨時の表面堆積負荷増加量 ΔS と限界掃流量 Q_c および降雨濃度 C を与えて、限界掃流量を超えた時点で無降雨時に堆積した懸濁態物質の流出が発生すると仮定して次式により算出した。

$$L = (L_u + L_r) \cdot A \cdot r \quad (1)$$

$$L_u = k \cdot S^m \cdot q^{n-1} \cdot (q - q_c) \quad (2)$$

$$L_r = C \cdot q \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dt} = \Delta S - \int L_u \quad (4)$$

ここに、 L : 発生負荷量(g/s)、 L_u : 表面流出量($g/m^2/s$)、 L_r : 降雨による負荷量($g/m^2/s$)、 A : メッシュ面積(m^2)、 r : 市

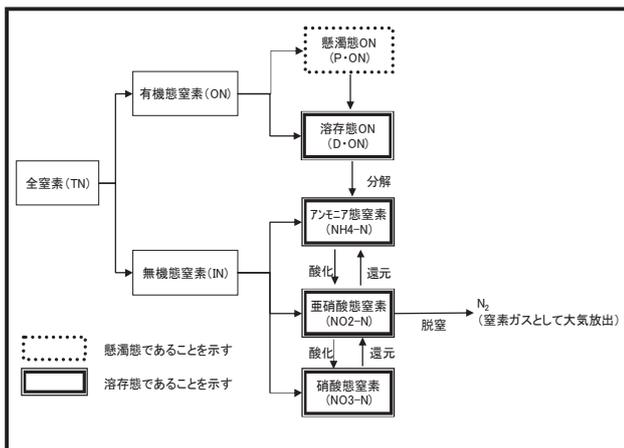


図-4.2.5 モデル化した窒素の形態

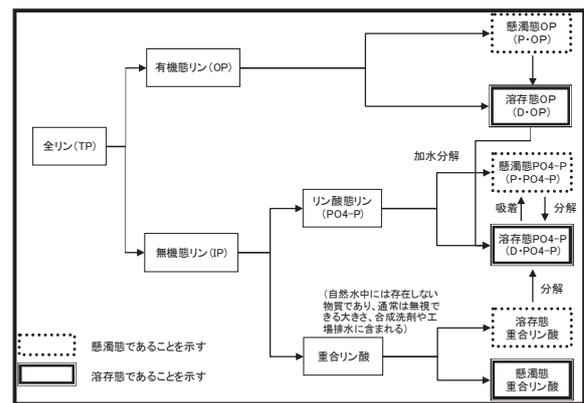


図-4.2.6 モデル化したリンの形態

街地および農地面積の割合(%), S : 表面堆積負荷量(g/s), q : 単位面積当たりの表面流出量(m/s), q_c : 限界掃流量(m/s), k, m, n : 係数, C : 降雨中の物質濃度(mg/L)である。

(2)WEP モデルへの土砂動態モデルの追加

窒素、リンの溶存態成分はいずれも WEP モデルの内部の水循環に従って動くようにモデル化した。一方、懸濁態成分については、土砂への吸着および流出を含めて考慮する必要があることから、土砂動態モデルを追加して導入した¹⁰⁾。図-4.2.7は窒素およびリンの土砂結合を考慮した汚濁負荷流出の解析過程である。土砂動態モデルでは、一つの要素(グリッドセル)からの堆積物移動は、地表面流における雨裂・インターリルの寄与、雨滴浸食分離、輸送能力およびせん断能力、次の堆積の流量依存性を各セルで推定している。各要素(グリッドセル)からの土砂の輸送は、表層の乾燥期に堆積した栄養塩が集まり、地表面流を經由して河道に運ばれる。基礎式を以下に示す。

$$\frac{dq_x}{dx} = K_r(\tau - \tau_c)(1 - \alpha q_s / D_c) + D_i \quad (5)$$

ここに、 q_x : 単位幅あたりの土砂輸送量(kg/m/s), x : 斜面方向の長さ(m), K_r : 侵食能, τ : 掃流力(N/m²), τ_c : 限界掃流力(N/m²), α : 定数, D_c : 表面流による

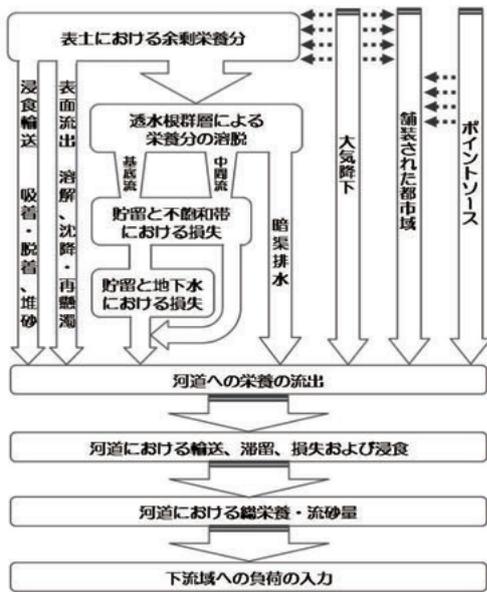


図-4.2.7 土砂結合を考慮した窒素・リンの汚濁負荷流出の解析過程

土砂最大剥離量(kg/m²/s), D_i : 表面流による土砂剥離速度(kg/m²/s)である(定式化の詳細は、平成20年度土木研究所重点プロジェクト研究報告書¹¹⁾を参照)。

(3) 2つの実流域における改良 WEP モデルの適用

改良した WEP モデルを、1) 茨城県牛久沼流域(図-4.2.8、流域面積: 166.7 km²)、2) 千葉県印旛沼に流入する高崎川流域(図-4.2.9、流域面積: 85.6 km²)に対して適用を試み、検証を行った。

適用対象期間は、2001-2002年(牛久沼流域)及び2002-2003年(高崎川流域)であり、メッシュサイズ、計算時間間隔は、いずれも100mおよび1時間である。窒素及びリンについて、農作物の市町村別作付面積、農業センサス等の農業統計データに基づいて施肥量を推定し、そこから農地への投入量を推定した¹⁰⁾。

牛久沼流域における検証データは、小白裕および堺松両地点における水位流量曲線(HQ式)による流量ならびに低水時(2週間に一回程度)の定期的な採水時および出水時(2001年8月22日及び2002年10月1日)の毎正時の採水時の水質分析データであり、分析項目は、SS、全リン(TP)、全窒素(TN)、リン酸イオン(PO₄)、アンモニア(NH₄)、二酸化窒素(NO₂)、硝酸塩(NO₃)である。高崎川における検証データは、高岡橋における千葉県に

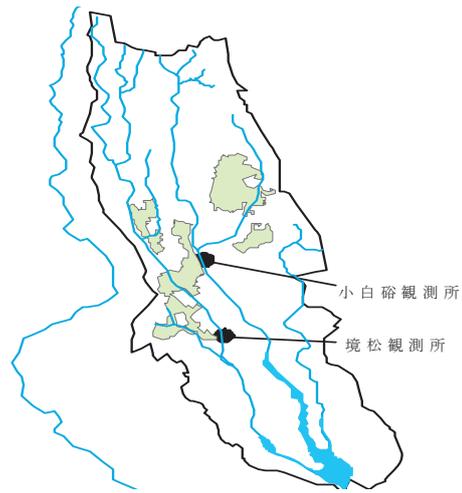


図-4.2.8 牛久沼流域および観測・モデル検証地点



図-4.2.9 高崎川流域図

よる水文・水質観測データである。高岡橋では、HQ式による流量値が利用できる。2002年には、2度の出水時に毎正時のTN、TPのデータが取得され、2005年、2008年の各年にも2度の出水時にTN、TPに加えDN(溶存

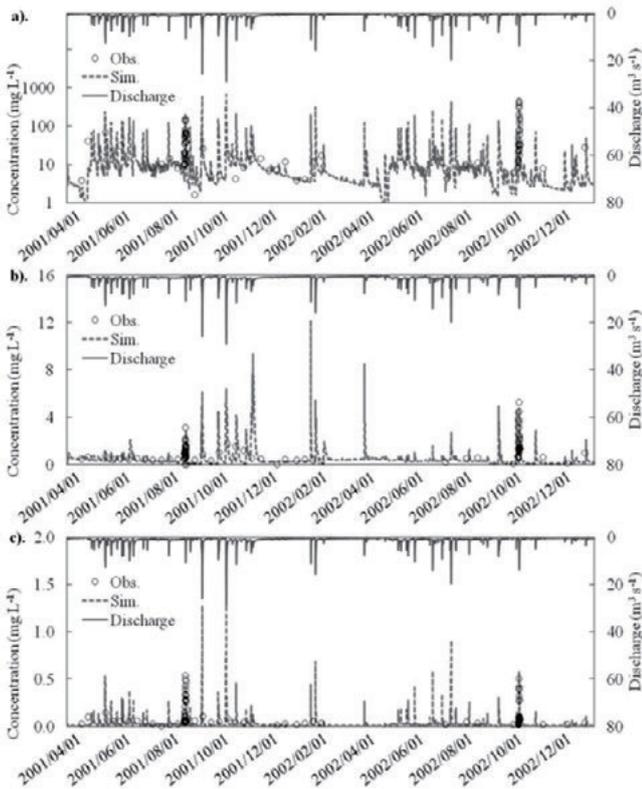


図-4.2.10 牛久沼流域小白碓地点でのSS、PNおよびPPの観測値とWEPモデル計算値の比較（上段：SS、中段：PN、下段：PP）

態窒素)、PN（懸濁態窒素）、DP（溶存態リン）、PP（懸濁態リン）が観測されている。また寺崎橋においては、約月1回実施されている公共用水域水質定期観測データ（SS、TN、DN、TP、PP）を利用した。

牛久沼流域WEPモデルのうち水循環モデルの諸定数は、Jia et al.(2001)¹¹⁾により既に検証されたものを用いた。高崎川WEPモデルの水循環モデル諸定数についても、飯泉ら(2007)¹²⁾による設定値をそのまま用いた。新たに改良した水質モデルの諸定数については、物理的にとり得る値の範囲内で、上記期間における計算値と検証データとの差異が小さくなるように設定した。

(4) 検証結果及び考察

図-4.2.10に牛久沼流域におけるSS、懸濁態窒素(PN)および懸濁態リン(PP)の計算結果を示す。SSの計算結果は、図-4.2.10上段で示すように、全体的な季節変化傾向のみならず、観測値のある2度の洪水を含めて、観測値が示すSSの変化傾向を表現できている。決定係数で評価すると、境松観測所で0.64、小白碓観測所で0.72であり、SSの動態はここでは概ね再現できていると考えられる。PNおよびPPについても、出水時に濃度が増加することを含めて、観測値と概ね同様の挙動を再現することができた。一方、溶存態窒素(DN)および溶

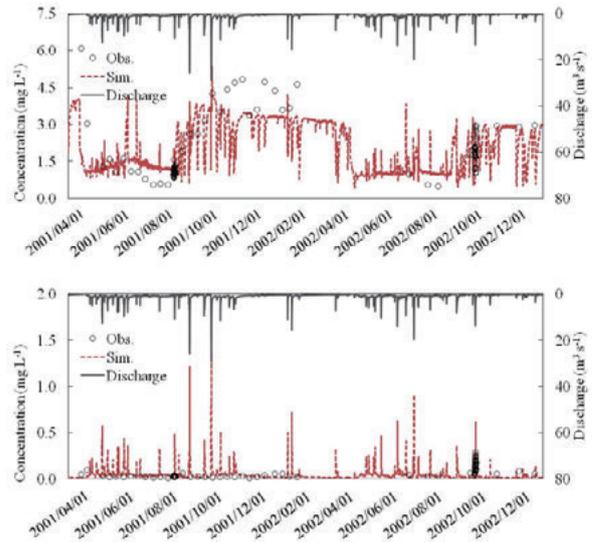


図-4.2.11 牛久沼流域小白碓地点でのDNおよびDPの観測値とWEPモデル計算値の比較果（上段：DN、下段：DP）

存態リン(DP)のWEPモデルによる計算結果を図-4.2.11に示す。DPの観測値については明確な季節的变化が見られないが、DNの観測値については、雨期の流量の増加及び牛久沼流域外からの灌漑用水の導水による希釈効果があることから乾期と比較して雨期の濃度が低い傾向が見られる。これは、雨期の流量の増加および谷田川流域外からの灌漑用水の導水による希釈効果があることの影響などが考えられる。計算においても谷田川流域外からの灌漑導水量および灌漑用水の水質を考慮しており、観測値が示す季節的な変化を概ね再現できていることが分かる。

これらの結果より、牛久沼流域では、SS、PN、DN、

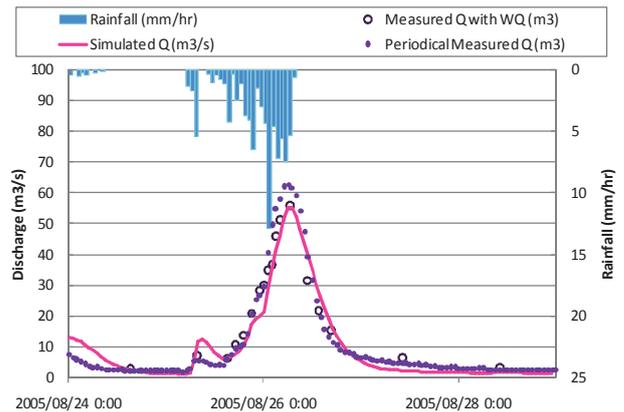


図-4.2.12 高崎川高岡橋における出水時の流量観測値とWEPモデル計算値の比較（2005年8月26日出水）

PP、DPの観測値が示す傾向を全体的に表現できていることが分かった。

次に、印旛沼に流入する高崎川にこのWEPモデルの適用を行い、同様に長期的な水量・水質の変動特性を概

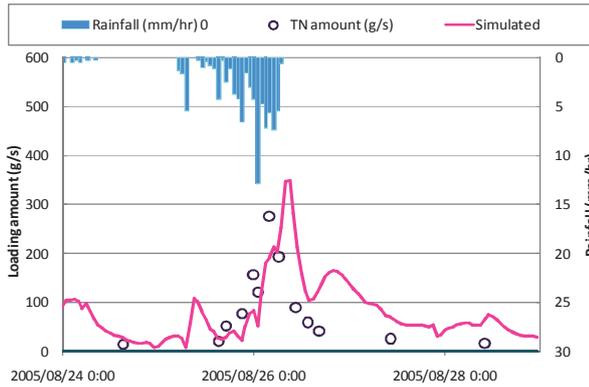


図-4.2.13 高崎川高岡橋における出水時の全窒素の観測値と WEP モデル計算値の比較
(2005 年 8 月 26 日出水)

ね再現していることを確認した上で、洪水時の負荷流出特性の再現を試みた計算結果を検証した例を図-4.2.12～16に示す。これらは、高岡橋における2005年8月26日の出水事例のものである。

図-4.2.12は、2種の流量観測値（黒点＝HQ換算値と白抜き＝水質項目測定時の実測値の2種）とWEPモデルによる計算流量との比較である。計算値は水質項目測定時の流量のピーク、波形ともに非常に精度よく再現していることが確認できる。

図-4.2.13からは、全窒素として、ピークで約300g/sのTNが流出しており、平水時は20g/s程度であることから、雨天時に非常に多くの窒素が印旛沼に流入していることがわかる。計算値もほぼ同程度の負荷流出量を再現した。但し、計算結果は、実測値に比べピーク到達時間が遅く、逶減部の負荷量が多くなっている。図-4.2.14を見ると、PNの雨天時の大きな増加をモデル再現しているものの、タイミングとして実測値より遅く流出させていることがわかり、そのことが、逶減部の負荷流出量の過大評価に結びついているものと考えられる。

図-4.2.15からは、ピーク時に30g/s程度のTPが流出していることがわかる。計算結果は、このピーク値を精度よく再現しているが、全体としてTNと同様に流出波形が遅れている。図-4.2.16からは、DPについてはピーク値については良く再現しているものの、タイミングが遅れている。PPについては、定量的に比較の実測値とよく一致しているが、同様に実測値より遅めに流出する傾向が見られた。これらは窒素と同様の結果であり、洪水時においても、負荷流出総量だけでなく負荷流出波形の再現精度向上を図るためには、面源負荷流出過程のモデリングの更なる改善が必要と考えられる。

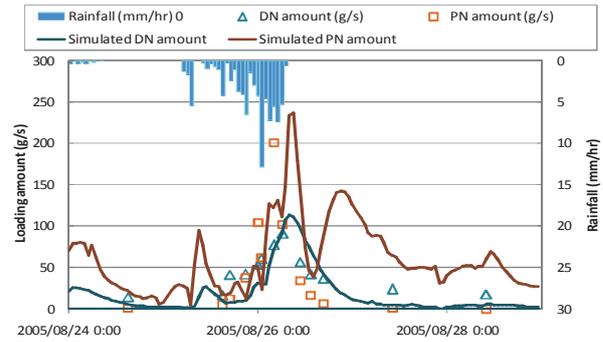


図-4.2.14 高崎川高岡橋における出水時の溶存態・懸濁態窒素の観測値と WEP モデル計算値の比較
(2005 年 8 月 26 日出水)

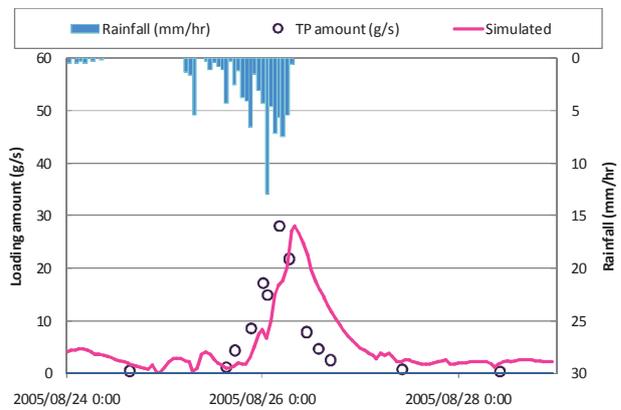


図-4.2.15 高崎川高岡橋における出水時の全リンの観測値と WEP モデル計算値の比較
(2005 年 8 月 26 日出水)

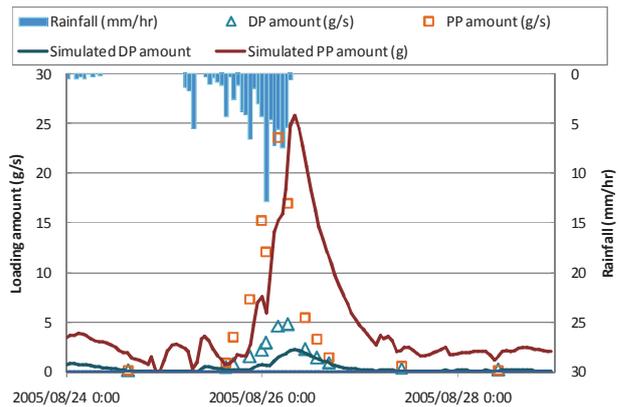


図-4.2.16 高崎川高岡橋における出水時の溶存態・懸濁態リンの観測値と WEP モデル計算値の比較
(2005 年 8 月 26 日出水)

4.2.5 溶解性鉄(D-Fe)および溶解性ケイ素(D-Si)の調査

(1) はじめに

近年、流域での開発により溶解性鉄 D-Fe (フミン鉄) や溶解性ケイ素 D-Si (シリカ) などの必須元素の河川へ

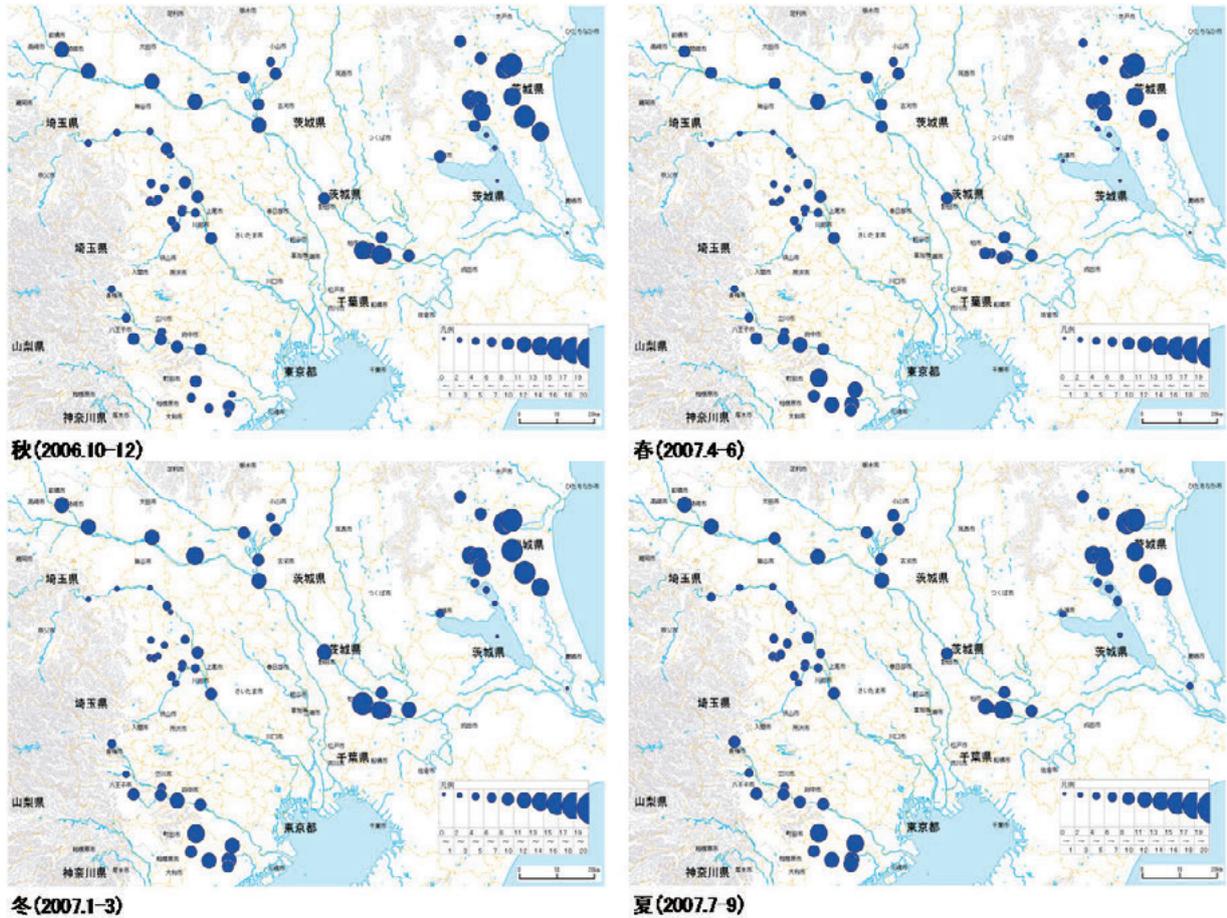


図-4.2.17 季節毎の河川水中のD-Si濃度
(2006.10～2007.9、秋・冬・春・夏、単位mg/L)

の供給が減少し、河川や海の生態系に影響を及ぼすとの報告^{13)~15)}が見られる。都市化した流域では、都市雨水・排水が必須元素の挙動に大きな影響を与える可能性があるため、その影響を明らかにすることが求められている。そこで、都市河川流域におけるD-FeおよびD-Siの挙動を把握するため、D-FeおよびD-Siの化学種分析法の開発を行うとともに、関東地方の流域において調査し、河川水を用いた生物影響試験を行った。

(2) D-Fe および D-Si の存在実態調査

a) 調査対象物質、分析方法および調査対象流域

調査対象物質は、D-Fe および D-Si とした。また、D-N および D-P についても同時に調査した。必須元素が藻類などに利用される際の比率（レッドフィールド比）は、モル比で $C:N:P:Si:Fe=106:16:1:16 \sim 50:10^3 \sim 10^4$ 程度とされており、必須元素の存在比率の変動は生物バランスに影響を与える。溶解性の定義は、5種Cろ紙（孔径1 μ m相当）を通過するものとした。ICP-MSによりD-Feおよび全鉄(TFe)を測定し、ICP-AESおよび自動比色分析（モリブデンイエロー法）によりD-Siを測定した。

河川について、鶴見川水系6地点、多摩川水系7地点、利根川水系12地点、荒川水系18地点、園部川・巴川・涸沼川・寛政川（霞ヶ浦および涸沼流域）10地点において流心付近を採水し、湖沼について、手賀沼6地点、霞ヶ浦7地点において表層水を採水して調査を行った。都市排水について、鶴見川および多摩川流域に存在する下水処理場（それぞれ5箇所および8箇所）の流入下水および放流水を季節毎（3ヶ月に1回）に調査した。

b) 調査結果

下水処理場の放流水中のD-Feの濃度は、年間平均値として、鶴見川流域の5処理場で18～66 μ g/Lであった。多摩川流域の8処理場では20～32 μ g/Lであった。年間の変動係数（各季節1回で計4回測定）はそれぞれ3.7～15%、8～21%であり、季節変動の明確な傾向は見られなかった。下水処理水中のD-Fe濃度については、濃度が高い1処理場を除き、放流水中濃度は河川中濃度の半分以下であることが多かった。鶴見川・多摩川のD-Fe濃度は冬期及び夏期にやや低下する傾向であった。この一因として、下水処理場放流水中のD-Fe濃度は晴天時の河川中濃度の平均約45～104 μ g/Lの半分以下程度の場合

合が多く、河川流量が低下して下水処理水の占める割合が増加する冬期や夏期に河川水中濃度が低下する可能性が考えられた。

D-Si 濃度は、年間平均値として、鶴見川流域の 5 処理場で 8.6~14mg/L、多摩川流域の 8 処理場で 7.5~12mg/L であった。年間の変動係数（各季節 1 回で計 4 回測定）はそれぞれ 3.8~8.3%、3.7~19%であり、季節変動の明確な傾向は見られなかった。放流水中の D-Si 濃度は河川水中濃度と同レベルであった。1 年間の調査結果より、季節ごとの河川水中の D-Si の濃度について図 4.2.17 に示す（河川については各 3 ヶ月の平均濃度）。

Fe/N および Fe/P は、全地点でそれぞれレッドフィールド比 $6.3 \times 10^5 \sim 6.3 \times 10^6$ の 5 倍以上、 1.0×10^3 の 13 倍以上であった。よって、河川・湖沼水中では、D-Fe は D-N・D-P と比較して相対的に不足する可能性は低いと考えられた。Si/N はレッドフィールド比 1~3.1 程度を下回る地点が大半であり、Si/P もレッドフィールド比 16~50 程度を下回る地点があった。河川・湖沼水中で、D-Si は D-N・D-P と比較して相対的に不足する傾向があり、特に都市排水の影響を大きく受けている鶴見川および多摩川の下流では 1 年のほとんどの期間で相対的に不足していると考えられた。この原因としては、都市排水の流入による D-N・D-P の増加が考えられた。

(3) D-Fe および D-Si の化学種分析法の開発

a) 溶解性鉄(D-Fe)

平成 20 年度は、ゲル浸透クロマトグラフィー (GPC) による分画を行い、示差屈折率検出器 (RI) および紫外分光検出器 (UV) により測定するとともに、分子量分画した試料を所定の間隔で分取し、その鉄濃度を誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS) により測定する分析方法を開発した。課題としては、RI (示差屈折率) や UV (紫外線吸光度) のピークと DOC 濃度 (フミン物質などの有機物の指標)、Fe 濃度が対応しないことが多く、ピーク位置の物質の性状が不明であったこと、また、GPC 分画後に ICP-MS による Fe 測定 (ICP-MS) を行うためには、10 回程度分取を行う必要があり、時間・労力がかかったことなどが挙げられた。

これらの課題への対応方策として、平成 21 度は、フミン物質の化学的特性 (疎水性酸) を利用したイオン交換樹脂による分画と、フミン物質の物理的特性 (分子量サイズ) を利用したメンブレンフィルターによる分画について検討した。その結果、D-Fe および有機炭素の存在割合が、方法 1 (pH2 で通液・NaOH 溶出) と方法 2 (pH7 で通液・NaOH 溶出+方法 1) とでは異なってい

た。鉄および有機炭素ともに、方法 1 では疎水性塩基 < 疎水性酸 < 親水性物質であったが、方法 2 では疎水性塩基 << 親水性物質 < 疎水性酸 1+2 であり、方法 2 では親水性物質がより少なく、疎水性酸が多くなっていた。疎水性塩基がきわめて少ないことは共通した傾向であった。

b) 溶解性ケイ素(D-Si)

平成 20 年度は、非シリカベースのイオン交換樹脂カラムを用いた固相抽出によるシリカイオンの分離濃縮の前処理と高速原子衝突質量分析 (FAB-MS) を組み合わせた、D-Si 分析方法を開発した。課題としては、FAB-MS 測定において、イオン交換樹脂からの溶出に用いる NaOH 由来のピークが、シリカイオンのピーク出現位置と同一になるため妨害となることが挙げられた。また、イオン交換樹脂の交換容量の制約により、溶出液のシリカイオン濃度に上限があり、FAB-MS 測定に適したシリカイオン濃度まで濃縮できない場合があること、シリカイオン/NaOH 濃度比を高くできないこと等が挙げられた。

これらの課題への対応方策として、平成 21 年度は、イオン交換樹脂によるシリカイオンの分離濃縮後に、さらにエバポレーターで蒸発濃縮して、シリカイオン濃度を高める方法を検討することとした。しかしこの場合、蒸発濃縮により NaOH 濃度も同様に高まってしまうことから、イオン交換樹脂からの溶出に用いる NaOH 溶液濃度を低くして、シリカイオン/NaOH 濃度比を高める方法についても検討した。具体的には、D-Si の標準試料 (試薬) を用いて、高速原子衝突質量分析法 (FAB-MS) により、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ の多量体の質量スペクトルの分析を行った。その結果、D-Si の FAB-MS 測定の前処理方法としては、濃縮・精製方法として、イオン交換樹脂による分離濃縮+エバポレーター蒸発濃縮を用い、イオン交換樹脂に保持した D-Si の溶出に用いる NaOH 溶液濃度は 0.25M 程度が適切であると考えられた。

(4) 必須元素の生物利用特性の検討

a) 実験方法

実験に用いた河川水は、小美玉市の園部川・園部大橋において採取した。採取日は平成 23 年 1 月 6 日に行った。使用した藻類は鉄を多量に吸着する藍藻類および糸状藍藻類¹⁶⁾と、シリカを多量に要求する珪藻類¹⁷⁾であり、近年霞ヶ浦流域に存在する藻類として、それぞれ 1 種類ずつ選定し、独立行政法人国立環境研究所微生物系統保存施設より分譲された藻類を数ヶ月培養し、増殖させたものを実験に用いた。

採取した河川水は、速やかにオートクレーブを用いて 121°C、15 分間の高圧蒸気滅菌を行い、放冷後、pH を測定し、pH が変動しているときは、河川水の測定値に 1mol/L 塩酸・1mol/L 水酸化ナトリウムを用いて調整した。その後、それぞれ鉄およびシリカを添加して試験水とした。1L の三角フラスコに分取し、3 種類の藻類を添加して、実験試料水とした。試験期間は 20 日間とし、0 日目、10 日目、20 日目の 3 回試料を分取した。

b) 実験結果

鉄又はシリカを添加した系には何も添加しない系に比べてクロロフィル量の増加がほぼ等しいか若干小さくなり、河川水中に含まれる以上の鉄およびシリカは藻類の増殖に必要なと考えられた。

鉄を多量に吸着することが分かっている藍藻類および糸状藍藻類と同様に珪藻類でも D-Fe が消費されていた。また、鉄を添加した系には何も添加しない系に比べて D-Fe 濃度の減少量はほぼ等しく、河川水中に含まれる以上の鉄は河川水で藻類増殖時の D-Fe 量の変化に影響を及ぼさないと考えられた。

D-Si 濃度は D-Fe、D-N など他の元素と比較すると 3 種類とも変化量は非常に小さかった。シリカを添加した系には何も添加しない系に比べて D-Si 濃度の減少量はほぼ等しく、河川水中に含まれる以上のシリカは河川水中の D-Si 量の変化に影響を及ぼさないと考えられた。

c) 藻類試験結果による元素消費量の推定

元素消費率から律速となる元素の推定を行った。

①藻類試験結果の各藻類のクロロフィル増加量に対する対象元素(D-N、D-P、D-Fe、D-Si)の減少量を算定し、元素消費率とした。なお、元素消費率は 20 日間の対象元素減少量を 20 日間のクロロフィル増加量で割った値とした。

②レッドフィールド比に対して平成 18 年～19 年の間に調査した中で D-Fe、D-Si 濃度が下回った河川を対象に、①で算出した消費率を実測した河川水の対象元素の数値に元素消費率で割って計算し、対象元素の中で最も数値の低い元素を藻類の増殖に伴って不足する元素（律速となる元素）として、D-N、D-P、D-Fe、D-Si の元素間で比較した。なお、レッドフィールド比に対して D-N、D-P 濃度が下回った河川は D-Fe では該当箇所がなく、D-Si については図-4.2.18 の青く着色された範囲を対象とした。

この結果、季節変動も含め対象となった全ての河川で、②の計算値が 1 番小さい値となったのは D-P(PO₄-P)だったと推定された。D-P(PO₄-P)の計算値は D-Fe、D-Si の計算値と比較して 10～100 のオーダーで小さかった

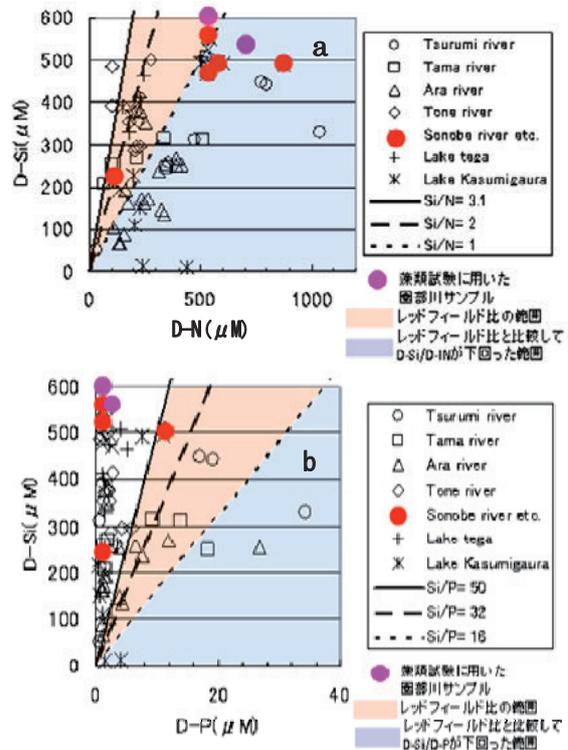


図-4.2.18 河川水中の D-Si 濃度と D-N・D-P 濃度との比率 (a:Si/N、b:Si/P)

ため、藻類増殖による河川水中の D-Fe および D-Si の不足の可能性は低いと考えられた。

霞ヶ浦に生息する淡水藻類を対象とした藻類試験による各元素の消費率から推定すると、レッドフィールド比に対して平成 18 年～19 年の間に調査した中で D-Fe、D-Si 濃度が下回った全河川で PO₄-P が最も不足傾向になりやすいと考えられる。これは、河川調査から検討した結果とも合致した。一方、この藻類試験結果では D-Si の消費率は他の元素と比べて低く、D-Si の相対的不足が発生する傾向は確認されなかった。

d)河川中の D-Fe および D-Si が不足した場合の対策
ケイ酸は降雨が地山内部にしみこむ際に供給され、この水が湧水等として流出することにより、河川へ D-Si が供給される。河川水へ供給されるケイ酸の濃度は流域を構成する岩石のケイ酸の溶け出しやすさ、降水量等様々な影響を受ける¹⁸⁾。河川中の D-Si が不足した場合、詳細な対策は、その土地の地域特性など様々な要因があるため、地域に適した対応が必要となるが、現在、浸水対策や地下水かん養などで部分的に行われている雨水浸透が有効だと考えられる。一方、鉄は落ち葉や腐葉土に微量の栄養物質として含まれる¹⁹⁾が、鉄の分析による起源地推定は困難でよくわかっていない²⁰⁾ので、D-Fe は河川水起源となる物質の特定と、河川への供給のメカニズ

ムを明らかにし、対策を考える必要がある。

4.2.6 まとめ

汚濁物質発生特性（トレーサー物質及び溶解性栄養塩類の実態）に関しては、その場所における栄養塩類濃度を構成する畜産排水、生活排水の混入割合について考察するマーカーとして K^+/Na^+ 値が有効であると考えられる。また、生活系、畜産系の汚濁排出量が多いと考えられる流域を対象として、晴天時、雨天時におけるこれらの物質の流達特性を把握し、トレーサー物質と溶解性栄養塩類の流出負荷量と比流量の関係を整理した。さらに、流出モデルを用いた解析や水位連続観測と綿密な水質調査に基づく比流量と流出負荷量の関係を用いて、流域からの栄養塩類の雨天時を含めた流達負荷量を計算した結果、これまでの原単位法による総排出負荷量と異なり、さらなる排出・流達機構の解明が必要と考えられる。

本研究では溶存態と懸濁態を区別した栄養塩類の流出過程モデルと土砂動態モデルを新たに付加した WEP モデルを開発し、牛久沼流域および印旛沼・高崎川流域において検証を行った。その結果、窒素・リンについて、長期的な季節的変化だけでなく、雨天時の出水時の負荷流出ピーク値および総量についても概ね良好に再現することができた。これらにより、雨天時の汚濁負荷流出特性を含めて、流域スケールでの水量・水質の定量的な動態情報を関係者で共有するための基盤ツールを開発することができたと評価できる。

しかしながら、今回の検証事例では、汚濁負荷流出波形の立ち上がりが遅れ、逡減部においては計算値が実測値より大きな値をとる結果となっており、水質管理において重要なファーストフラッシュ特性の再現に課題を残した。市街地および農地等からの面源負荷流出過程のさらなる改良が必要と考えられる。

河川、湖沼、下水処理場の D-Fe および D-Si 共に季節変動の明確な傾向は見られなかった。放流水中の D-Si 濃度は河川水中濃度と同レベルであった。調査結果をレッドフィールド比で検討すると、河川・湖沼水中では、窒素・リンと比較して D-Fe は相対的に不足する可能性は低いが、D-Si は D-N と比較して相対的に不足する傾向があった。しかし、霞ヶ浦に生息する淡水藻類を対象とした藻類試験による各元素の消費率から推定すると、平成 18 年～19 年の調査結果からレッドフィールド比に対して D-Fe、D-Si 濃度が下回った全ての河川水で、溶解性リン(D-P)が最も不足傾向になりやすいと推定され、D-Fe および D-Si の相対的不足が発生する可能性も低い

と考えられた。

4.3 河川の物理環境・流況が物質動態に与える影響

4.3.1 概要

付着藻類などの河川生産物は、流域から流入する栄養塩を利用してその生産量を維持するため陸域と密接な関係がある。流域からの栄養塩流入量は人間活動によって大きく変動する。流域の人間活動は水質を規定し河川生物の生息環境に影響を与えていると考えられるが定量的知見は少ない。また、河川の水質は陸域からの物質供給

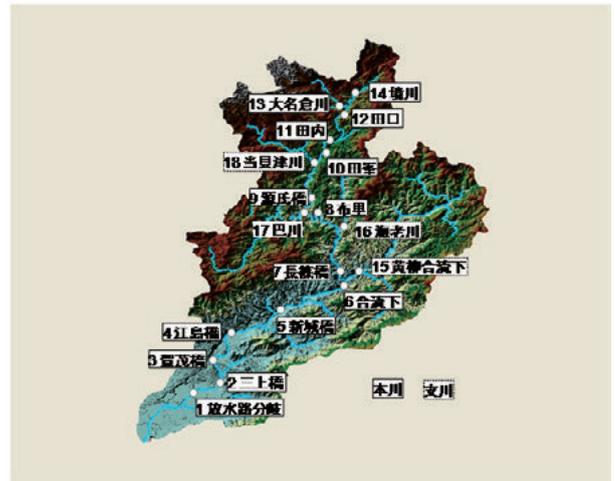


図-4.3.1 調査地点

とともに河川内の物理・化学・生物的なプロセスによって変化するものであるが、水質と生物の関係は、特に生物が水質に及ぼす影響については未解明な部分が多い。このため、河川の物理環境と流況が生物を介して物質動態に与える影響の定量化を行うとともに、物理環境と物質動態の関係を検討した。上流から下流に至る流程調査を行い、年間を通じ栄養塩および流下有機物の濃度、付着藻類、水生昆虫の生物量を調査し、河川地形との関係を検証した。これらのデータを基に、河床の底生生物量を組み込んだ河川水質変化モデルの開発を行い、生物量の違いによる下流への栄養塩・有機物流下量変化の試算を行った。

4.3.2 調査地

豊川を対象に研究を行った。豊川は、愛知県北設楽郡設楽町の段戸山（標高：1,152 m）を源流としている流域面積 724 km²、幹川流路延長 77 km、流域内人口約 21 万人の一級河川である。設楽町を源流とする寒狭川と宇連川が合流し豊川本川となり新城市、豊川市、豊橋市を通り三河湾へ流れている（図-4.3.1）。豊川の下流では江戸

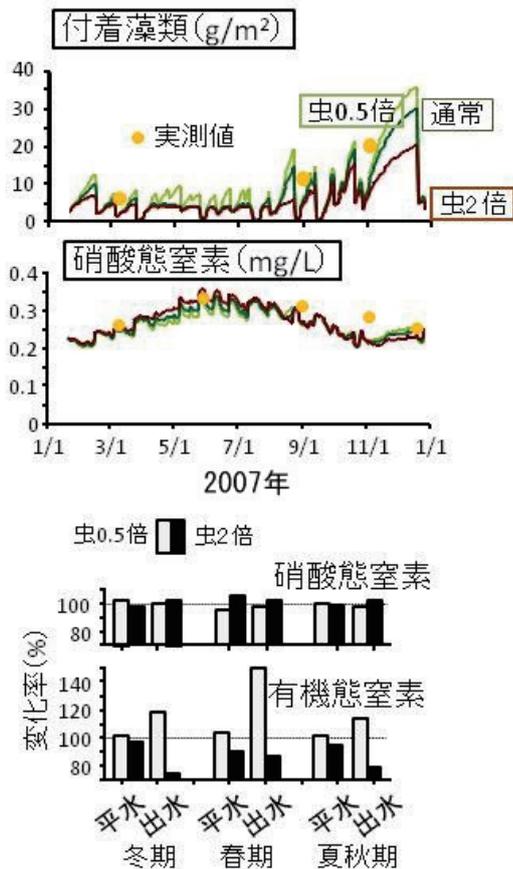


図-4.3.2 水質モデルによる付着藻類・栄養塩の動態の再現 (上), 底生動物量の影響の評価 (下)

時代から設けられている「霞堤」や昭和40年完成の「放水路」が存在する。また農地開発に伴う用水路整備のため、大野頭首工や牟呂松原頭首工からの取水は多く、水利用の多い河川である。

4.3.3 底生生物を考慮した河川水質モデルの設定

流況が河床の底生生物を介して無機態および有機態窒素・炭素変化にどの程度の影響を与えているかを評価するために、河川内の窒素および炭素に関する物質収支をモデル化し、一次元の非定常流モデル¹⁾との統合をおこなった上で、試行計算を実施した。

河道形状は、国土地理院発行の1/25,000地形図から川幅を読み取り、設定した。下流域と上流域については、豊橋河川事務所ならびに設楽ダム工事事務所が所有する河川横断測量結果を使用した。マンニングの粗度係数は、現地条件に基づく感度分析結果から0.03とした。また、豊川水系では、寒狭川頭首工、牟呂松原頭首工による取水が行われている。本モデルではこれらの取水系ネットワークを組み込んで計算を行った。

物質収支のモデル化に関しては、付着藻類の成長・剥離、底生動物(剥ぎ取り食者及び、ろ過食者)による摂

餌と排泄過程を数値化し、これらの反応に関する変数を組み込み、現地調査で得られた水温・有機態炭素量・有機態窒素量・無機態窒素量・有機態リン量および溶存態リン量等で検証を行った。

4.3.4 結果と考察

付着藻類の現存量は、平水時及び流量が安定している冬に現存量が高まる一方で、出水時の剥離によって減少し、底生動物の摂食圧が高まる春に大きく低下することが確認された。河川水中の主要な無機態窒素成分である硝酸態窒素は、付着藻類の成長に使われるため、その濃度は付着藻類の現存量が高い時期に低下していた。数値モデルにおける付着藻類の現存量及び硝酸態窒素濃度の範囲、季節変化は現地の観測値と符合しており、数値モデルで再現した付着藻類の現存量や栄養塩濃度は、概ね再現できているものと考えられる(図-4.3.2)。

次に、栄養塩や有機物濃度に対する底生動物現存量の影響を明らかにするために、底生動物現存量を変えて(観測値の0.5倍、2.0倍)感度分析を行い、モデル河道の下流端から出る硝酸態窒素、有機態窒素、有機態炭素のフラックスの変化率を季節別に、平水時・出水時別に比較を行った。その結果、底生動物現存量の影響は、硝酸態窒素に対しては限定的である一方で、有機態炭素・窒素のフラックスに対して大きく、特に、春季および出水時に顕著であることが明らかになった。

4.3.5 まとめ

流動モデルによるシミュレーションの結果、底生動物の無機態窒素動態への影響は限定的だったが、有機物動態への影響が大きいことが明らかになった。この影響は平水時よりも出水時に変化が大きく、流況変化とともに有機物動態が河床の生物活動を介して大きく変動していることが示唆された。

参考文献

- 1) Jia Yangwen, et al.: Development of WEP model and its application to an urban watershed, Hydrological Processes, 15, pp.2175-2194, 2001
- 2) Bolt G.H., Bruggenwert M.G.M., Kamphorst A. (岩田進牛, 三輪諺太郎, 井上隆弘, 陽 捷行訳): 土壌による陽イオンの吸着, 土壌の化学, pp.57-105, 学会出版センター, 1980.
- 3) 高島英二郎, 田中宏明, 中村栄一: 手賀沼流入河川における汚濁負荷量の流出特性および年間負荷量の把握, 水環境学会誌, Vol. 18, No. 4, pp.297-306, 1995

- 4) 竹歳健治, 田中宏明 : 手賀沼の水質汚濁と流入河川における流出汚濁負荷の変化, 環境技術, Vol. 29, No. 7, pp.516-522, 2000
- 5) 津森ジュン, 壬生勝泰, 田中宏明 : 下水道整備途上の流域における糞便性大腸菌群の流出調査, 第41回下水道研究発表会講演集, pp.588-590, 2004
- 6) (財)下水道新技術推進機構: 流出解析モデル利活用マニュアル(雨水対策における流出解析モデル運用の手引き), 2006.
- 7) 建設省都市局下水道部監修(社)日本下水道協会編: 流域別下水道整備総合計画調査指針と解説 平成11年度版, 1999.
- 8) 飯泉佳子, 木内豪, 深見和彦: 分布型モデルを用いた河川・地下水の水質解析, 河川技術論文集, Vol. 12, 335-340, 2006.
- 9) 土木研究所: 13.6 流域規模での水・物質循環管理支援モデルに関する研究(1), 平成18年度土木研究所重点プロジェクト研究報告書, pp.604-613, 2007.
- 10) Hemantha Rajapakse et al.: Diffuse-source Particulate Nitrogen and Phosphorus Pollution Modeling in Yata River Basin in Japan using Process based WEP model coupled with a Sediment Erosion-transport Model, Proceedings of 2009 Annual Conference, Japan Society of Hydrology and Water Resources, pp.274-275, 2009.
- 11) 土木研究所: 13.6 流域規模での水・物質循環管理支援モデルに関する研究(1), 平成20年度土木研究所重点プロジェクト研究報告書, 2009.
- 12) 飯泉佳子, 深見和彦, 木内豪: WEPモデルを用いた印旛沼・高崎川における雨水浸透対策効果のシミュレーション, 土木技術資料, vol.49, No.6, pp.64-69, 2007.
- 13) Humborg et al. : Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure, Nature, Vol. 386, No. 27, pp.385-388, 1997
- 14) 原島省, 陸水域におけるシリカ欠損と海域生態系の変質, 水環境学会誌, 26, pp.621-625, 2003
- 15) Matsunaga et al. : Riverine input of bioavailable iron supporting phytoplankton growth in Kesenuma Bay (Japan), Water Research, Vol. 32, 1998, pp. 3436-3442.
- 16) 永井孝志, 今井章雄, 松重一夫, 福島武彦: 霞ヶ浦における藍藻類の増殖に対する溶存有機物の影響の評価, 第39回日本水環境学会年会講演集(平成17年), p467, 2005
- 17) 林 到映: 河川における Si の動態と付着藻類に及ぼす影響に関する研究, 2008, 東北大学博士論文
- 18) 財団法人河川環境管理財団: 河川におけるケイ酸など無機溶存物質の流出機構に関する研究, pp2-1~2-5, 2007
- 19) 水産庁漁港漁場整備部・林野庁森林整備部・国土交通省河川局: 森・川・海のつながりを重視した豊かな漁場海域環境創出方策検討調査報告書, p138, 2004
- 20) 関幸: 森林-河川-海洋の物質循環系に関する地球化学的研究, 2006, COE21 研究成果報告書
- 21) United States Army Corps of Engineers: CE-Qual-RIVI: a dynamic, one-dimensional (longitudinal) water quality model for streams: user's manual, USACE Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1995.

5. 河川における物質動態と生物・生態系との関係性の解明

5.1 概説

河川を流れる粒状有機物（流下有機物）は河川生物の重要な餌資源であり、流域レベルで、河川生態系を支える流下有機物の由来を明らかにすることが生態系を保全する上で重要である。また、栄養塩類や有機物の増加による水質の悪化は、しばしば生物多様性の減少を招くが、逆に水質が良すぎる河川では生物生息量や多様性が低いことも珍しくない。

また、近年いくつかのダムで「土砂還元」が行われつつあるが、土砂還元の主材料となる細流土砂（砂・小礫等）の減少に伴う生物相の応答特性が明らかになっておらず、土砂還元を実施した際の効果の評価が困難となっている。

このため、河川における物質動態と生物・生態系との関係性の解明に関する以下の研究を実施した。

5.2 物質動態と河道特性が水生生物に与える影響

5.2.1 概要

河川生態系は、河川内生産物だけでなく、陸域からも物質、栄養塩、生物が流入しており、河川地形と密接な関係を持ちながら複雑な系を形成している。流域からの栄養塩負荷は、土地利用によって大きく変動するが、河川生物への影響についての定量的知見は十分ではない。河床材料や河床勾配など多様な河道特性を有する我が国の河川環境は、同じ水質でも河道特性が異なれば河川生物の反応が異なることも予想される。水質や河道特性が底生生物の現存量及び種組成にどのような影響を及ぼしているのかを、河川水辺の国勢調査で得られている広域データを使い検証を行った。また、愛知県東部を流れる豊川を対象に、栄養塩、流下有機物、付着藻類、水生昆虫を流程に沿って採集し、河川物理環境との関係を調査分析した。

5.2.2 栄養塩類と底生動物現存量及び出現種数の関係

5.2.2.1 方法

栄養塩濃度や河床材料などの河道特性が水生生物に与える影響を検討するため、関東地方の河川において河川水辺の国勢調査の3巡目調査（2001～2006年度）における冬および春の定量調査データを用いて解析を行った。

各調査地点の栄養塩濃度などの水質項目は、各調査地点から5km圏内にある国土交通省の水質観測所のデータを用い、生物化学的酸素要求量（BOD：mg/L）と全窒素濃度（TN、mg/L）について整理した。各調査地点の底生動物の情報として全底生動物現存量（湿重 g/m²）、全出現分類群数、カゲロウ・カワゲラ・トビケラ（EPT）出現分類群数を扱い、2001年から2006年に取られた全データの中央値を算出した。各地点が持つ物理データのうち、河床勾配と河床材料は地点の物理情報として使用した。河床勾配は任意に4区分（<1/1600、1/1600-1/800、1/800-1/400、>1/400）、河床材料は任意に3区分（砂・泥：<2mm、砂利・小礫：2-50mm、礫：>50mm）で行った。

5.2.2.2 結果と考察

解析の結果、全地点を対象としても、各河床勾配区分でみても、底生動物現存量はBODおよびTNと有意な関係を示さなかったことから、BODおよびTNの底生動物現存量への影響は他の要因に比べると限定的であることが示唆される（図-5.2.1）。BODは1.5mg/L、TNは3mg/L程度を上限とする範囲では、底生動物現存量に低下が見られなかった。一方で、全出現分類群数は、BODおよびTNと有意な負の相関が認められ、EPT分類群数においても同様の関係がみられた（図-5.2.2）。物理場区分ごとに全出現分類群数とBODおよびTNとの関係をみると、河床勾配では1/1600-1/800の区分において（図-5.2.1）、河床材料では礫の区分において最も強い負の相関が検出された（図-5.2.2）。河床勾配が<1/1600の緩勾配の区分においてはBODおよびTNと分類群数に明瞭な関係が見られず、物理要因が制限要因として卓越している可能性がある。緩勾配の多くの地点では、河床材料が泥・砂で構成されており、これらの地点の中でTN、BODが低い地点でも出現分類群数は少なく、泥・砂環境に適応した、限られた分類群しか生息できないためと考えられる。

以上より、TNとBODは、底生動物の現存量への影響は明瞭には認められなかったが、一方でTNとBODの上昇が底生動物の種組成の単純化を招いている可能性を明らかにした。特に勾配1/800-1600、粒径5cm以上の礫河川で出現種数への影響が相対的に大きい。河川生態系における底生動物の現存量は、栄養塩濃度よりも河床材料や流量などの物理要因に依存する部分が多いことが示唆された。水生生物を介した物質動態を理解するには、河床材料や流量などの河道の物理特性の把握が重要である。

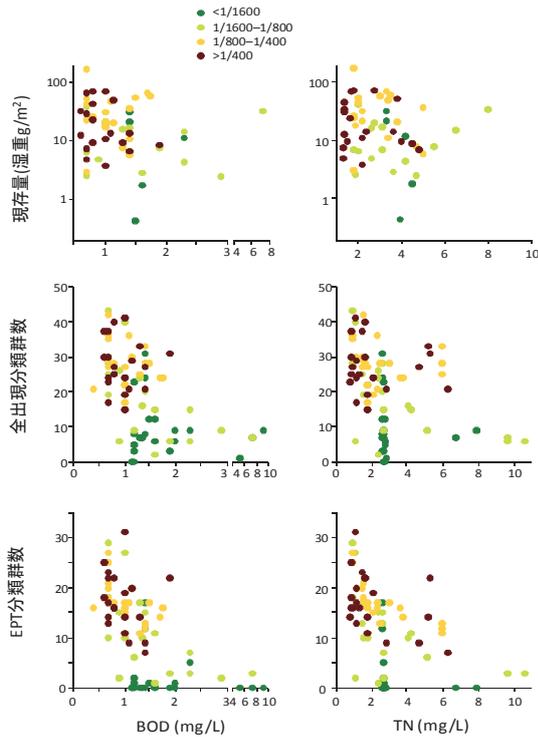


図-5.2.1 河床勾配別の水質と底生動物の関係

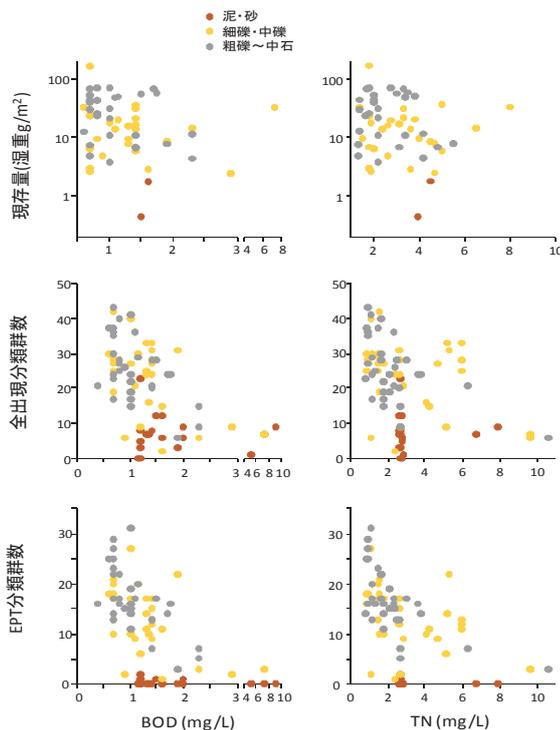


図-5.2.2 河床材料別の水質と底生動物の関係

5.2.3 河川生態系を支える栄養塩の由来及び流下過程の解明

栄養塩の由来については、原単位法による各窒素源からの負荷量の推定を行い、安定同位体比解析と組み合わせ

せて由来の推定を行った。流下有機物については、安定同位体比解析による起源物質推定およびC/N比の流程変化をもとに、流量や瀬淵割合などの河川物理環境と有機物動態の関連性について検討を行った。水生昆虫については、摂食機能群別に炭素安定同位体比解析を用いて餌資源利用を推定し、餌資源利用の流程変化と河川環境の関係を検証した。

5.2.3.1 調査・分析方法

豊川本川の上流から下流の14地点を設定し、各調査地点で年4回、出水の影響を排除するため5日間以上降雨のなかった日を選んで、河川水、流下有機物、付着藻類、水生昆虫の採集を行った。試水は、採水後、冷却して速やかに実験室に運び、ガラス繊維フィルター(Whatman, GF/C, 平均孔径 $1.2\mu\text{m}$)でろ過後、Bran Lube社 のAACS-IIIで $\text{NO}_3\text{-N}$ を決定した。窒素安定同位体比分析用に、Sakata 2001¹⁾の方法に準じて精製を行った。付着藻類は、各地点の瀬から選んだ5つの礫(粒径10—20cm)についてそれぞれ表面をブラシで擦り採集し、水生昆虫やデトリタスを除去した。流下有機物は、河川水中に5-10分間設置したプランクトンネット(孔径: 0.1mm)で捕捉された有機物を用い、篩で $100\mu\text{m}$ (FPOM: fine particulate organic matter)、 $100\text{-}250\mu\text{m}$ (MPOM: medium particulate organic matter)、 $250\text{-}1000\mu\text{m}$ (CPOM: coarse particulate organic matter)の3つの粒径区画に分け、分析に供した。水生昆虫は種レベルまで同定し、分析に供した。

各試料は、 60°C で24時間乾燥後、粉末化し、元素分析計(FlashEA 1112, Thermo Electron)を接続した安定同位体比質量分析計(Delta plus XL, Thermo Electron)で炭素・窒素安定同位体比を測定した。

5.2.3.2 人為由来窒素の食物網への伝播

地理情報システムで算出した各集水域の土地利用面積に原単位を乗じて、面源からの窒素負荷量を算出した。点源(人、牛、豚)も同様にそれぞれの集水域ごとの人口・頭数に窒素負荷量を算出した。原単位は、森林: 3.93kgN/ha/year 、畑地: 32.93kgN/ha/year 、田: 10.12kgN/ha/year 、市街地: 12.19kgN/ha/year 、人: 9gN/capita/day 、牛: 290gN/head/day 、豚: 40gN/head/day の値を用いた²⁾。

集水域の人間活動による窒素負荷量は、単位面積当たりで森林に対し農地で約11倍、市街地で約3倍高く、農地及び市街地面積の増加は、集水域の窒素負荷量増加に直結している²⁾。これらの面源から負荷される窒素量の増加に加

え、下水や畜産尿尿などの点源からの窒素負荷も加わる。原単位法で算出した総窒素負荷量に占める点源の割合は、上流から下流にかけて15%から55%に上昇し、下水由来窒素及び畜産尿尿由来窒素の負荷量の影響は下流ほど相対的に大きい。実測した河川水中の硝酸態窒素濃度も上流

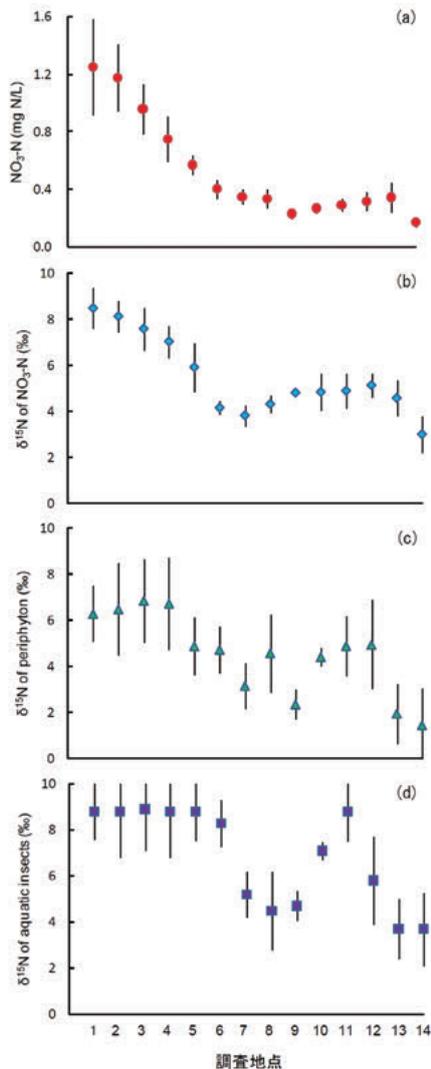


図-5.2.3 豊川における硝酸態窒素の(a)濃度と(b)窒素安定同位体比、(c)付着藻類と(d)水生昆虫の窒素安定同位体比

から下流にかけて上昇していた(図-5.2.3)。NO₃-Nの $\delta^{15}\text{N}$ は、上流から下流にかけて上昇しており、低い $\delta^{15}\text{N}$ を持つ森林由来窒素から高い $\delta^{15}\text{N}$ を持つ人為由来窒素³⁾に窒素負荷源が移行していることを示している。下流ほど人為由来窒素の負荷が大きいことが原単位から求めた窒素負荷量から示唆されたが、窒素安定同位体比解析からもこの事実が裏付けられている。河川水中のNO₃-Nの $\delta^{15}\text{N}$ の上昇に、下水由来窒素及び家畜尿尿由来窒素が大きく寄与している事実は、多くの研究で報告されている^{4), 5)}⁶⁾。また、河川の上流から下流にかけての $\delta^{15}\text{N}$ の上昇は、

硝酸態窒素だけでなく、付着藻類と水生昆虫でも起きていた。これらの $\delta^{15}\text{N}$ の上昇は、人為由来窒素が河川生態系の一次生産者である付着藻類に取り込まれ、付着藻類を餌資源として利用している水生昆虫にまで到達していること示しており、集水域の人間活動が、河川生態系内の窒素動態を自然由来から人為由来窒素へ改変させていることを示唆している(図-5.2.3)。

5.2.3.3 流下有機物の質と水生昆虫の餌資源利用の流程変化

流下有機物中の付着藻類由来物質は、河川生態系の底生動物群集にとって主要な餌資源であるが⁷⁾、中流域以降の知見が不足している。流下有機物の構成は、主に高いC/N比をもつ陸上有機物由来物質だったが、粒径が大きい区画ほど、C/N比の流程変化が大きかった(図-5.2.4)。C/N比の低下は窒素含有量が相対的に高いことを示している。一般的に、同じ有機物量であれば、粒径が小さくなるほど、表面積が増えるために細菌や菌類などの微生物の生物量が多くなる。また、低いC/N比を持つ微生物の増加がFPOMのC/N比の低下に寄与することが報告されており⁸⁾、流下有機物のC/N比の変化には、微生物も寄与している可能性がある。粒状有機物のC/N比が、低いC/N比をもつ付着藻類由来物質の低含有率にも関わらず、河川中流から下流にかけて低下する現象は、瀬淵割合や流量などの物理要因と流域からの栄養塩負荷が関与している可能性がある⁹⁾。

流下有機物のC/N比の低下は、これまで底生動物の餌資源としての価値が低いとされてきた陸上植物由来物質の価値が上昇していることを意味する。この点について、炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)を用いた端成分モデル¹⁰⁾で底生動物群集の餌資源利用を検証した。その結果、底生動物の付着藻類利用は、上流から中流にかけて上昇し、中流から下流にかけて下降していた。この流程変化はどの季節においても観察された(図-5.2.5)。特に、流下有機物を主要な餌資源としている過食者において流程変化が顕著であった。河川物理環境の流程変化を見てみると、中流から下流へかけては、流れの遅い淵の占める割合が大きく増加する。一般的に瀬では付着藻類の生産が、淵では有機物分解が卓越する。下流における淵の増加によって微生物の関与が増加することは十分に考えられる。落葉などの外来性有機物は、リグニン等難分解性物質を含みC/N比が高い。一方で付着藻類はC/N比が低く、底生動物にとって相対的に質の高い食物と考えられている¹¹⁾。しかし、外来性有機物のC/N比は、低いC/N比を持つ微生物の付着によって低下する可能性がある。下流地

点では、先述した淵の多さに加えて栄養塩濃度も高いため、有機物上の従属微生物が多い可能性があり、上流地点に比べると底生動物の食物としての価値が高まった可能性がある¹²⁾。流下有機物における付着藻類由来物質の含有率の上昇は中流以降では観察されなかった一方で、流下有機物のC/N比が低下していた。

以上、安定同位体比解析による流下有機物の起源物質推定およびC/N比の流程変化をもとに、河川地形と有機物動態の関連性について検討を行った結果、淵の割合及び栄養塩濃度が上昇するほど流下有機物のC/N比が低下した有機物のC/N比の低下は、水生昆虫の陸上植物由来物質利用を促進させている可能性があり、栄養塩の増加は底生動物を介した河川食物網の物質動態を改変している可能性がある。

5.2.4 まとめ

日本の河川水中の現状の栄養塩濃度は、底生動物などの消費者の生物量には限定的な影響しかない。しかしながら、栄養塩類の負荷量増加は、河川水中の有機物濃度と酸素消費量増加を招き、その結果、生物の多様性を低下させている可能性があることが一連の研究で明らかになった。また、栄養塩濃度の増加は、流下有機物の質の変化と底生動物の餌資源利用を変化させている可能性がある。河川食物網の物質動態にその影響が波及していることが予想される。生物多様性を維持した河川生態系保全のためには、相対的に影響が大きい礫床河川から生態系の浄化能力を超えた有機汚濁物質の除去や負荷源ごとの流出量削減など、下流域だけでなく上流域も含めた集水域全体での取り組みが必要である。

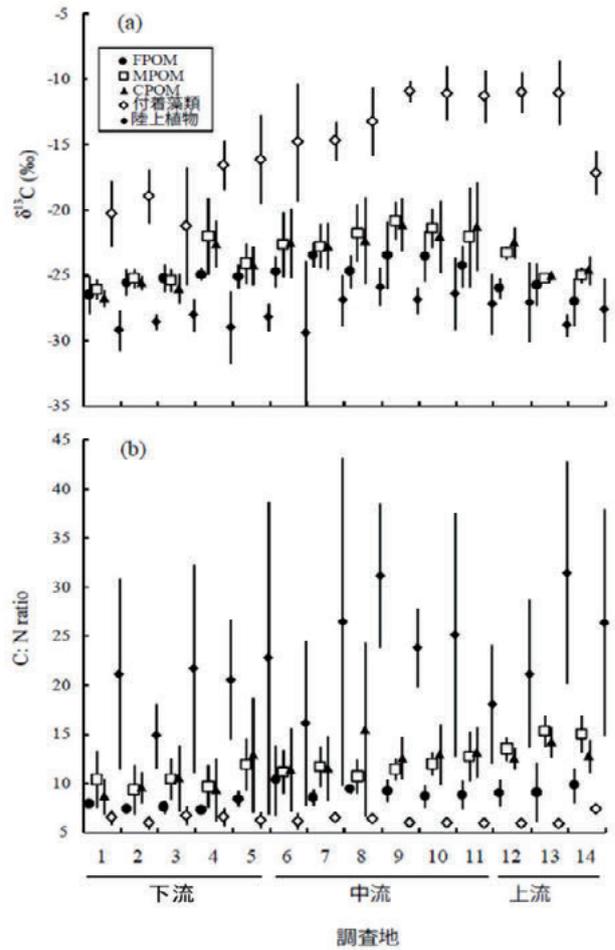


図-5.2.4 豊川における流下有機物 (FPOM: 細粒有機物、MPOM: 中粒有機物、CPOM: 粗粒有機物)、付着藻類、陸上植物の (a) 炭素安定同位体比と (b) C/N 比

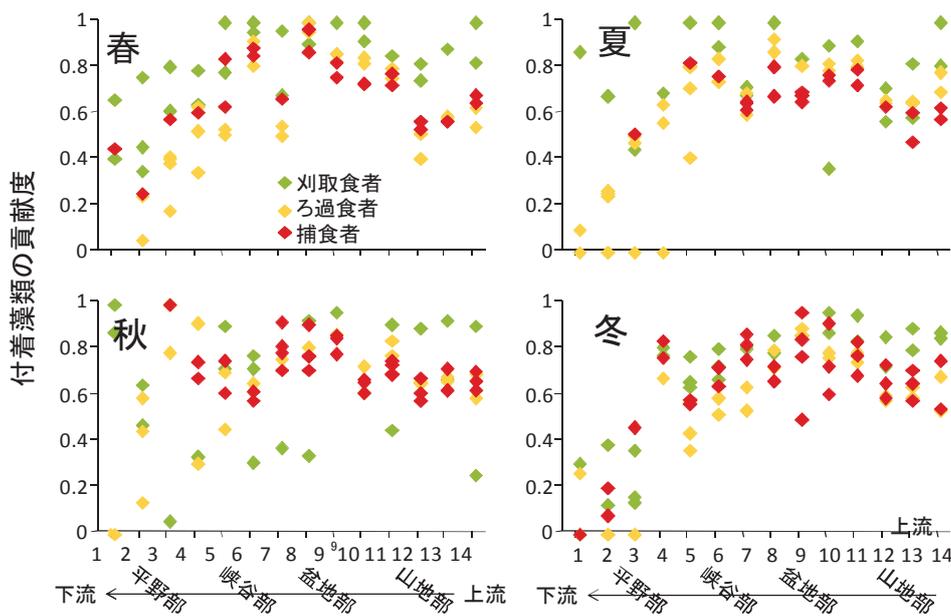


図-5.2.5 炭素安定同位体比で評価した季節ごとの底生動物への付着藻類の貢献度

5.3 土砂供給量減少に伴う指標生物とその環境要因の 関係の解明

5.3.1 概要

日本の国土には、およそ2700基のハイダム(堤高15m以上のダムと定義する)が存在し、ハイダム数では世界第4位、ハイダム密度では世界第3位である。しかし、数多くのハイダムが存在するにもかかわらず、日本のハイダム下流の物理環境や生態系機能にどのような改変が見られるのか、それを検証した研究はほとんどない⁸⁾。河川環境に対する影響をいかに低減させるかが大きな課題となっている今日、日本における貯水ダム下流域の物理環境・生態系機能の劣化状況を客観的に把握し、適当な修復手法を評価・提案することは急務であるといえる。

日本の多くの貯水ダムでは、ダム貯水池に溜まった堆積土砂対策、ダム下流における河床環境の修復を目的として浚渫した土砂をダム下流に仮置きする「土砂還元」が行われている。海外での既往研究によると、土砂の供給(例えば、ダム下流域における支川の流入や、本川の河岸崩落等による土砂供給)は、貯水ダム下流域で顕著にみられる河床粗粒化を改善し、河川生物のハビタットを改善することで、ダム下流域の生態機能を回復させる可能性があるといわれている⁹⁾。よって、近年実施されている土砂還元事業も、これに準じた河川環境修復効果を持つと予測される。しかし、前述のように日本のダム下流域の劣化状況が未解明であることから、土砂還元の生態系修復効果の評価は不十分であり、効果的な土砂還元手法もまた、未確立な状況にある。

そこで本研究では、(1)日本における貯水ダム下流域生態系の劣化状況を集中的に調査することにより、どのような生物がどのような要因により減少・増加しているかを、河川における現地調査で明らかにすること、(2)土砂供給量の減少を客観的に計測できる物理環境要因と、土砂供給量の減少を適切に反映する生物タクサを抽出し、土砂還元の指標種を選定すること、そして、(3)土砂還元を行う際の評価手法を確立すること、の3点を目的としている。

5.3.2 ダム下流域における生態の劣化状況の解明

岐阜県恵那市にある阿木川ダム(木曾川水系・阿木川)を対象としてダム下流の生態系劣化状況の解明を行った(図-5.3.1)。阿木川ダムは、1990年に竣工したロックフィルタイプの多目的ダム(用途:洪水調節、上水道

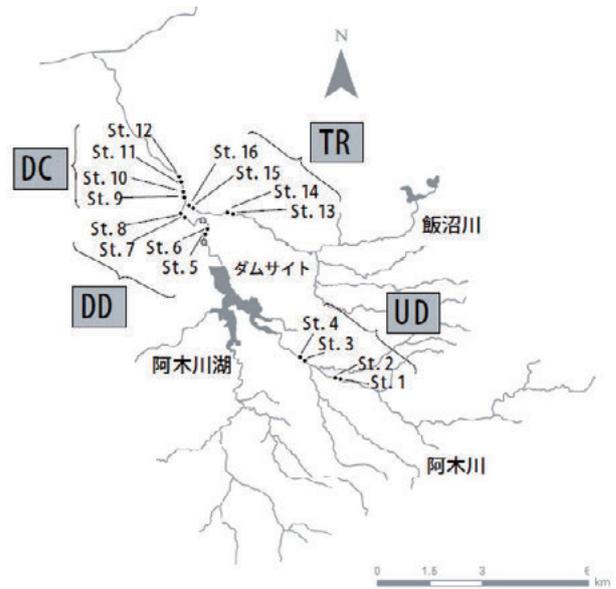


図-5.3.1 調査地地図: 数字は調査地点番号を、アルファベットは設定した4つの調査区を示す。UD:ダム上流域(Sts. 1-4)、DD:ダム下流・支川合流前(Sts. 5-8)、DC:ダム下流・支川合流後(Sts. 9-12)、TR:支川(Sts. 13-16)。灰色の●は、土砂還元地点を表す。

用水、工業用水、不特定用水)で、流域面積は約81.8km²である。阿木川ダムは、水質保全対策として選択取水等の設備が整えられている。2002年-2005年における平均的な流況を見ると、5月から10月までの期間は降雨・水需要に合わせて頻りに流量を上げるため流況は変動的であり、11月から翌年4月までは、平均流量1.3m³・s⁻¹の安定した流況を保っており、流況としては日本中部以西の典型的な貯水ダムであるといえる。

阿木川ダムから約2.8km下流地点において、支川である飯沼川が流入し、支川による土砂の再供給が予想される。

この阿木川流程に3調査区・12地点(UD:ダム上流4地点、DD:ダム下流・支川流入前4地点、DC:ダム下流・支川流入後4地点)、支川である飯沼川流程に1調査区(TR:支川4地点)を設け、流況の安定している時期に相当する3月中旬に、物理環境調査・生物(底生動物)採集を行った。物理環境調査では、各調査地点の平瀬にコドラートを設定し(50×50cm²、n=3)、可能な限り網羅した環境要因(水温、溶存酸素量、電気伝導度、水深、流速、河床材料割合、底質粗度、掃流砂量、濁度、付着藻類現存量、堆積POM(粒状有機物)量、流下POM量等)を測定した。環境要因の測定後、同コドラート内の底生動物を全て採集した。底生動物はホルマリン固定した後、実験室へ持ち帰り、同定・分類した。

各調査区間で差異が見られた要因について比較した

結果を図-5.3.2 に示す。水温はダム下流での低下は見られなかったが、細粒河床材料割合と、掃流砂量はダム下流 (DD) で顕著な減少を示した。これらの減少は支川合流後 (DC) には、ダム上流側 (UD) または支川 (TR) と同じレベルへと戻る傾向にあった。底質粗度もこの結果を反映し、支川合流後は、ダム上流側・支川と同レベルまで粗粒化が改善されていた。一方、底生動物のろ過食者にとって栄養価の高い重要な餌資源と考えられる動物プランクトン量は、ダムの下流 (DD) においてのみ顕著な増加を示したが、それ以外の調査区ではほとんど見られなかった。

各調査地点で採集された底生動物の個体数とタクサ数の結果を図-5.3.3 に示す。底生動物の個体数は、ダム下流の St.5-8 (DD) において顕著な増加を示した。しかしタクサ数は、上流から下流に向かって徐々に増加する傾向を示し、ダム下流においてはある特定のタクサのみ (複数) が顕著に優占していた。各調査区の優占種を生活型¹⁰⁾で区分してみると、ダム上流域や支川では、細粒河床材料を生息場や巣材として利用するガハヒミズ・ヤヒビケラ属などの掘潜型・携巢型のタクサが特徴的であるが、ダム下流においてはこれら掘潜型・携巢型タクサの優占は全く見られなかった。代わってダム下流で優占するのはアカガクガケトウ・ミズミズ垂科、ヤヒビケラ属などの匍匐型・造網型タクサであった。このような底生動物の変化は、環境要因の変化に対応していると考えられる。すなわち生活型の変化は、河床における細粒河床材料の割合を反映しており、摂食機能群の変化は、流下プランクトン量や付着藻類現存量など、餌資源の有無・量を反映していると考えられる。

このような底生動物群集の変化に影響を強く与えていると考えられる環境因子は、多変量解析を用いて推定することができる。この結果からは、とりわけ細粒土砂量に関する因子 (河床材料における小礫割合、底質粗度) と河川水中の流下物量 (とくにプランクトン量) に関する因子の、あわせて2因子が各調査区の底生動物群集の違いを説明するのに重要な要因であることが示唆された。

5.3.3 土砂供給量の多寡に伴う底生動物群集の変化

調査地は5.3.2と同じである。阿木川ダムでは、平成17年度を第一回目として、試験的に年1回の土砂還元事業が行われてきており、平成17年度の土砂還元量は、ダム下流2地点で合計1200m³である。土砂は、安定して河川低水位が保たれている初春 (2月末) に左岸側高水敷に設置されるが、実際に土砂が下流へと流下・還元

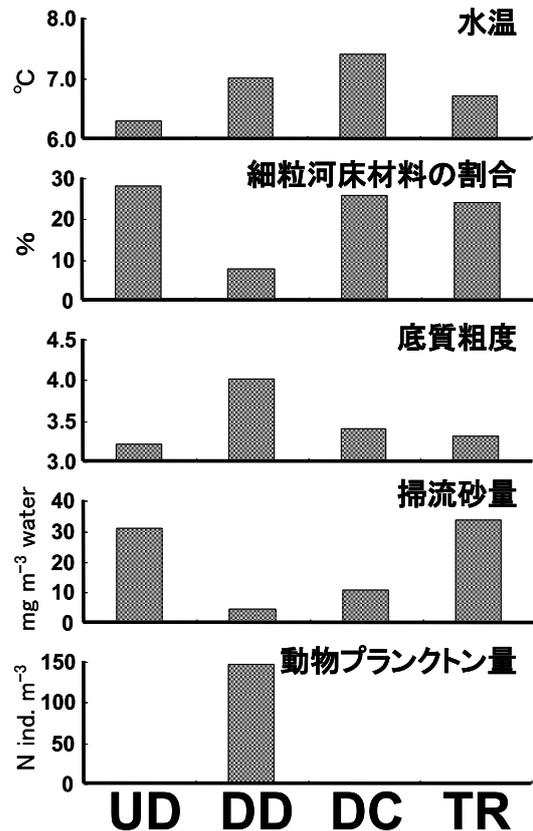


図-5.3.2 各環境因子の変動パターン：水温、細粒河床材料の割合、底質粗度、掃流砂量、動物プランクトン量についてのみ示す。

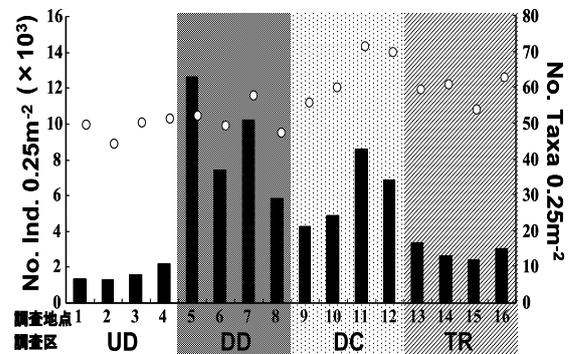


図-5.3.3 採集された底生動物の個体数とタクサ数：0.25m²コドラート内の、底生動物個体数 (黒棒) とタクサ数 (白丸) を調査地点ごとに示す。

されるのは、河川流量が増加する4月末以降を待たねばならない。還元土砂の粒度分布はD₅₀が1.4mm (極粗粒砂) であり、砂が主たる材料となっていた。

この阿木川流程に5.3.2と同様の調査区を設けた。DDには2つの土砂還元地点があり、それぞれはSt.5の約100m上流、St.7の約800m上流に位置している。これら調査区において還元土砂流下前の平成17年3月中旬 (流量1.3m³・s⁻¹・流況安定期、本研究では「土砂還元前」と定義する) と還元土砂流下後の平成17年8月下

旬 (流量 $3.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ・流況変動期、同様に「土砂還元後」と定義) に物理環境調査・生物 (底生動物) 採集を行った結果を解析し、土砂還元効果を抽出した。

まず、河床に占める砂の割合・掃流砂量の比較を行った (図-5.3.4)。その結果、土砂還元前後ともに、全河床材料に占める砂の割合 (%) は、ダム下流 (DD) において最も小さい値を示した。しかし、ダム上流 (UD)・支川合流後 (DC)・支川 (TR) では、土砂還元前後で砂の割合が減少したにもかかわらず、ダム下流においてのみ、砂割合の増加が認められた。また、DD 内調査地点間で比較すると、全地点ともに土砂還元前後で砂の割合の有意な増加が認められた。一方、掃流砂量は、調査区・DD 内調査地点の全てにおいて、土砂還元前後で有意な

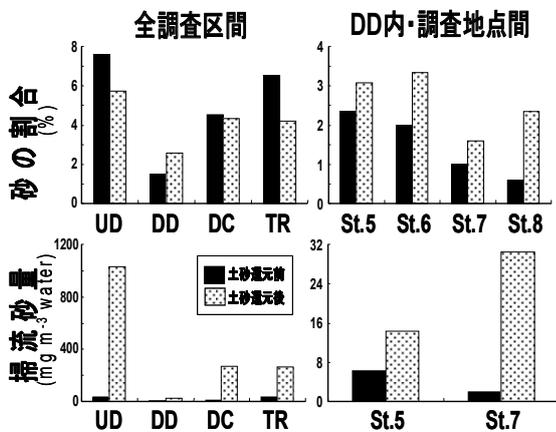


図-5.3.4 河床に占める砂の割合 (%) と掃流砂量：それぞれ、全調査区間 (UD, DD, DC, TR) での比較と、DD 内調査地点間 (Sts. 5, 6, 7, 8) での比較を示す。

増加が認められた。ただし、全ての調査区で増加が見られることから、これは土砂還元とは関係なく、両時期の流量の違いによるものと考えられる。

次に、何らかの形で細粒河床材料 (砂・小礫等) を利用するタクサ (掘潜型および携巢型¹⁰⁾) に着目する。土砂還元前後で比較すると、ダム下流以外は細粒土砂利用タクサの個体数が減少しているのに対し、土砂還元地点近傍のダム下流においてのみ個体数が増加している (図-5.3.5)。サガハコヒミズ (自由掘潜型)、ヒトビイカガウ (滑行掘潜型)、ヤトビケラ属 (携巢型) が代表的タクサである。注目すべき点は、土砂還元前のダム下流においては、細粒河床材料利用タクサは優占していなかったのに対し、土砂還元後のダム下流にはヤトビケラ属が認められ、しかも第1位の優占順位であったことである。ヤトビケラ属は、主たる巢材として極粗粒砂 (粒径 1~2mm : 片野・未発表データ) をゆるく綴った携巢を持ち、匍匐移動して付着藻類を摂食する藻類食者であり、著者らの知

る限り、ダム下流において優占したという報告はこれまでない。底生動物相の変化は、環境要因の変化に対応していると考えられ、細粒河床材料利用タクサのダム下流における個体数増加は、土砂還元による影響である可能性は大きい。更に、調査区間および DD 内調査地点間における、細粒河床材料利用タクサの合計個体数を土砂還元前後で比較した (図-5.3.5 (下))。St.5 を除く3地点で土砂還元後に細粒利用タクサが増加する傾向があり、ダム下流では土砂還元前後で細粒利用タクサ数が有意に増加するという結果が得られた。St.5 において土砂還元前後で細粒利用タクサ数が増えなかったのは、St.5 からは還元土砂が既に流失・減少しつつあった可能性が高い。実際に、河床材料に占める砂の割合をみても、St.5 は St.6 と比べわずかに減少しているが、St.7 と 8 は、上流 800m に設置された還元土砂だけでなく、St.5 の上流 100m (St.7 の 1.4km 上流にあたる) に設置され

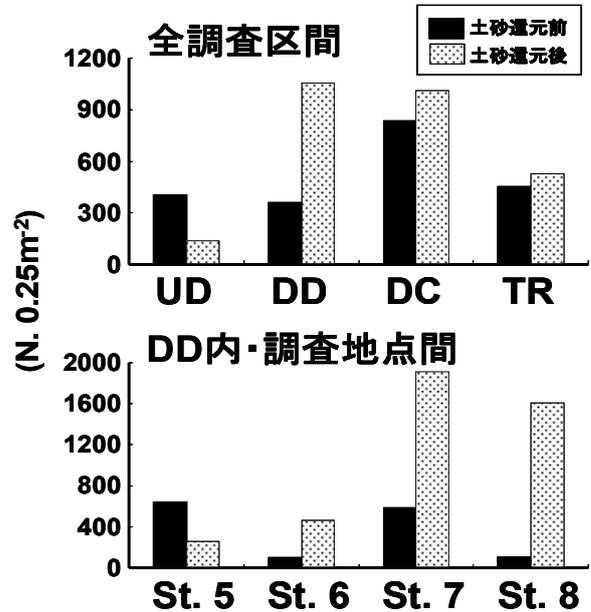


図-5.3.5 細粒河床材料利用タクサの全個体数

た還元土砂の両方の影響を受けている。

このように、阿木川における土砂還元では、掘潜型・携巢型といった細粒河床材料利用タクサ (ヤトビケラ属など) が、土砂還元後のダム下流において有意に増加し、優占種となることが明らかとなり、これらのタクサが土砂還元の効果を評価する上での指標となる可能性が示唆された。

5.3.4 細粒土砂に関する指標種の抽出

調査地として、蓮ダム、比奈知ダム、安濃ダム (三重県)、室生ダム、上津ダム (奈良県)、犬上川ダム、永源寺ダム (滋賀県) の7ダム河川を設定した。各ダム河川

は、ダム下流数キロメートル以内に流入する支川を持ち、その流入前後において河床の細粒土砂量が変化することが予測されたので、支川流入の上流地点 (UT)、支川流入の下流地点 (DT)、支川 (TR) の3つに調査地点を設定した。調査は3月末～4月中旬までの間に行い、各調査地点で河床環境測定と底生動物採集の両方を行った。25×25cm のコドラートを3箇所設定し、各コドラートでは、水深流速、河床材料割合 (巨礫・大礫・中礫・小礫・砂)、底質粗度の測定を行った。底生動物の採集・同定は前述のとおりである。

解析は、河床に存在する細粒河床材料の量に対し、生息密度が良く反応する種を抽出し、それらから土砂影響を予測できるモデルを構築することを目的とした。過去の文献などから、細粒河床材料を利用して生活していると考えられる種 (生活型が掘潜型・携巢型に分類されるもの¹⁰⁾) を目的変数に、また、底質粗度・砂被度・小礫被度 (%) を説明変数 (平均=0、SD=1 に標準化) とした一般化線形混合モデル (GLMM) を用いて、予測式を構築した。

GLMM で構築したモデルの結果、トビケラ・二枚貝・甲虫など多くの分類群の種が、土砂指標モデルとよくフィットし、指標種となる可能性があることが示唆された (図-5.3.6)。その中でも色丸で示された、小礫や砂などの中に潜って生息するジミ科、トビケラ目科、ヒメトビケラ科、また、砂を巣材として用いるヤマトビケラ科、ヒメトビケラ科、グマガトビケラ科の各種類では $R^2 > 0.7$ となり、河床に存在する細粒河床材料の量によって、その種の生息密度 (分布) をよく説明できることが明らかとなった。こ

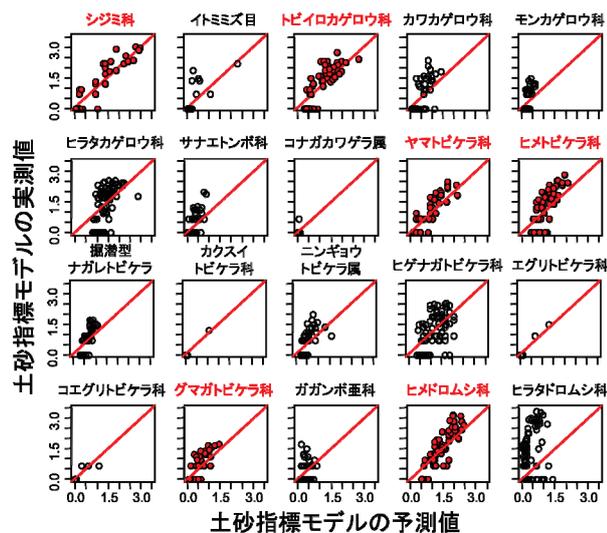


図-5.3.6 GLMM で構築された土砂指標種モデルの予測と実測値の関係：色丸で示された種は、当てはまりがよい種類を示す。

れら 6 種の底生動物は、河床に存在する細粒河床材料の指標として扱える可能性が高い。

しかしここで指標種選定の条件として「見付けやすく調査が容易であること」が重要になる。このため河床を掘り返さなければ発見できない掘潜型のジミやヒメトビケラよりも、河床表面に生息する携巢型のほうが、見つけやすいという条件をより満たしていると考えられる。また、その携巢型の中でも比較的大きなサイズの携巢を持つヤマトビケラは、礫表面に分布していることが多いため非常に見つけやすい。そのため、ヤマトビケラは細粒河床材料に関する指標種として最も適していると考えられる。

5.3.5 土砂還元効果の評価デザイン

BACI(before after control impact)デザインは自然環境に対する人為的な影響の抽出を目的とした調査デザインである。本デザインでは、インパクト区のみによる事前・事後調査に加えて、別途コントロール区を設定し、両区の前・事後調査の差異の変化からインパクトの影響を評価する。この際、時間的な変動の影響を除去するために、インパクト区とコントロール区における調査を同期させて、時間的な繰り返しが取れるようなデザインとするとよい。

コントロール区の設定はダムの影響が小さく、ダムの影響が無かった時期のインパクト区における物理特性 (河川規模、河床勾配、河床材料の粒径、河畔林の鬱閉度等)、生物群集と類似している区間に設定すると、効果の検出だけでなく、インパクト区とコントロール区の指標の乖離度 (例えば、両区の生息密度の差異) の意味を理解しやすくなる。この際のコントロール区はリフレンス区としての意味を有し、土砂還元を実施する際の基準となる。ただし、どのようにコントロール区を設定しても、インパクト区とコントロール区における生物群集は同一とはならないため、コントロール区の指標値そのものが目標とならない点に留意する必要がある。また、コントロール区の砂被度が著しく高い場合には、この状態に近づくことにより多様性指数の低下、有用魚種の減少等の問題が生じる可能性があることに留意する。

コントロール区は支川やダム上流域に設定することが多いが、同一流域内において適切なコントロール区が見つからない場合には隣接する他の流域においてコントロール区を設定する。また、土砂還元の効果は土砂還元地点からの距離によって効果が異なる可能性が高いため、一つのセグメントに複数区設定するとよい。

インパクト区、コントロール区の設定が終了したら、次に調査サイトとサンプリング地点の設定を行う。調査

サイトは瀬に設定し、一つの調査サイトに3~4のサンプリング地点を設けて空間的な繰り返しを取る。

調査は以下の要領で行う。

- 調査回数は年2回もしくは1回とし、1回の場合は冬季(12~3月)に行う。年2回調査が可能な場合には、冬季と夏季とする。ただし、夏季の調査は、台風等出水後(大規模な放流後)は避け、流況の安定している時期に実施する。
- 指標種調査では、指標種ヤマトビケの個体数を把握するため、設定したコドラート設置箇所(50cm×50cm)のコドラートを設置し、河床表層からヤマトビケの巣を見つけこれを計数する。

土砂還元の効果は時間(事前・事後)、インパクト区とコントロール区を要因とする分散分析によって行う。この場合、事前・事後で土砂還元の効果が現れるのはインパクト区のみであるが、その場合、時間的に限定された効果として現れるか(Pulse型)、比較的長い期間に渡り効果が維持されるか(Press型)によって効果の検出方法が異なる。Press型の効果が検出された場合には土砂還元に伴い供給された細粒土砂が対象区間に長期間留まったことを意味し、土砂還元が効果的であったことを示すが、Pulse型として検出される場合には、細粒土砂が洪水等によって流出し、効果が短期間しか維持されなかったことを意味する。この場合、土砂還元の量、頻度に課題があると捉え、土砂還元手法を再検討する。

(1) Pulse型の場合

土砂還元に伴い指標種の個体数等がある一時期のみ上昇する場合は、事前・事後(B)×インパクト区・コントロール区(L)の交互作用(B×L)は認められないことが多い。このため、インパクト区における事前・事後のそれぞれについて時間経過に伴う交互作用(T(Aft)×I)を算出し、土砂還元効果を検出する。この場合は、T(Aft)×Cの交互作用の有無により検出方法は2つに区分される。(1)コントロール区においてインパクト後の経過時間に関する交互作用が認められない場合には(F=V_{T(Aft)×C}/V_eが有意でない)、インパクト区における①インパクト後の経過時間に関する交互作用が認められ(F=V_{T(Aft)×I}/V_eが有意)、かつ、②インパクト前の経過時間に対する交互作用に対するインパクト後の交互作用が大きい(F=V_{T(Aft)×I}/V_{T(Bef)×I}が有意)場合に、土砂還元の効果を認めることができる(図-5.3.7(1)のケース)。一方、(2)コントロール区においてインパクト後の経過時間に関する交互作用が認められる場合には(F=V_{T(Aft)×C}/V_eが有意)、①インパクト区におけるインパクト後の経過時間に対する交互作用がコントロール区のインパクト後の

交互作用に対して大きく(F=V_{T(Aft)×I}/V_{T(Aft)×C}が有意)、②インパクト区におけるインパクト後の経過時間に対する交互作用がインパクト前の経過時間に対する交互作用大きく(F=V_{T(Aft)×I}/V_{T(Bef)×I}が有意)、③コントロール区におけるインパクト後の経過時間に対する交互作用に対するインパクト前の交互作用が大きい(F=V_{T(Aft)×C}/V_{T(Bef)×C}が有意)場合に、土砂還元の効果を認めることができる(図5.3.7(2)のケース)。

(2) Press型の場合

土砂還元の効果が長期間維持され、指標種の個体数増加が長期間安定している場合には、T(B)×L すなわちイ

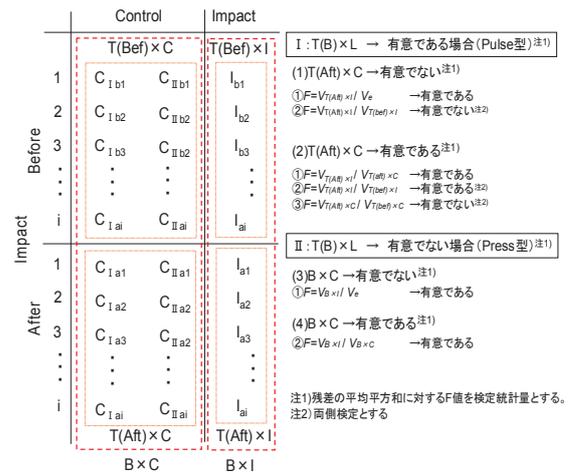


図-5.3.7 BACI デザインにおけるデータセットの例と分析の進め方

ンパクト前後における経過時間に対するコントロール区、インパクト区の交互作用は認められないことが多いため、B×Lから土砂還元の効果を検出する。この場合は、B×Cの交互作用の有無により検出方法は2つに区分される。① B×Cが有意でない(F=V_{B×C}/V_eが有意)場合にはB×Iが有意であれば(F=V_{B×I}/V_eが有意)土砂還元の効果を有意と認めることができる(図-5.3.7(3)のケース)。② B×Cが有意な場合には、B×Cに対してB×Iが大きければ(F=V_{B×I}/V_{B×C}が有意)土砂還元の効果を有意と認めることができる(図-5.3.7(4)のケース)。

5.3.6 まとめ

本研究では土砂還元の効果を定量的に評価する手法を確立することを目的として、(1)ダム下流域における生態系劣化状況を、底生動物群集を対象として明らかにした。また、底生動物群集と環境要因との関係解明に基づき(2)土砂供給量減少に伴う指標生物を抽出した。また、(3)土砂還元効果の評価デザインを提案した。

参考文献

- 1) Sakata M.: A simple and rapid method for $\delta^{15}\text{N}$ determination of ammonium and nitrate in water samples, *Geochemical Journal*, Vol.35, pp. 271-275, 2001.
- 2) 川島博之、川西琢也、安江千恵、林良茂: 食料供給に伴い環境に影響を与える窒素負荷量の推定、*システム農学*, Vol.13 pp.91-95, 1997.
- 3) Dawson T. E. and Siewolf R. T. W.: Stable isotopes as indicators of ecological change, Academic Press, 2007
- 4) McClelland, J.W., Valiela, I. and Michener, R.H.: Nitrogen-stable isotope signatures in estuarine food webs: a record of increasing urbanization in coastal watersheds, *Limnology and Oceanography*, Vol. 42, pp.930-937, 1997.
- 5) Toda H., Uemura Y., Okino T., Kawanishi T. and Kawashima H.: Use of nitrogen stable isotope ratio of periphyton for monitoring nitrogen sources in a river system, *Water Science and Technology*, Vol. 46, pp.431-435, 2002.
- 6) 永田俊、宮島利宏編: 流域環境評価と安定同位体: 水循環から生態系まで、京都大学学術出版会、2008.
- 7) Delong M.D. and Thorp J.H.: Significance of instream autotrophs in trophic dynamics of the Upper Mississippi River, *Oecologia*, Vol. 147, pp.76-85, 2006.
- 8) Gulis V. and Suberkropp K.: Leaf litter decomposition and microbial activity in nutrient-enriched and unaltered reaches of a headwater stream, *Freshwater Biology*, Vol. 48, pp.123-134, 2003.
- 9) Akamatsu F., Kobayashi S., Amano K., Nakanishi S., and Oshima Y.: Longitudinal and seasonal changes in the origin and quality of transported particulate organic matter along a gravel-bed river, *Hydrobiologia* Vol. 669, pp.183-197, 2011.
- 10) 南川雅男、吉岡崇仁: 生物地球化学、培風館、2006
- 11) Sterner R.W. and Elser J. J.: Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere, Princeton University Press, 2002.
- 12) Kobayashi S., Akamatsu F., Amano K., Nakanishi S., and Oshima Y.: Longitudinal changes in $\delta^{13}\text{C}$ of riffle macroinvertebrates from mountain to lowland sections of a gravel-bed river, *Freshwater Biology* Vol. 56, pp.1434-1446, 2011.
- 13) 谷田一三、竹門康弘: ダムが河川の底生動物へ与える影響、*応用生態工学*, 2, pp.153-164, 1999.
- 14) Ward JV, Stanford JA: The serial discontinuity concept of river ecosystems, In: Dynamics of lotic ecosystems, Fortaine TH., Bartell SM (eds.), Ann Arbor Science Publications, pp.29-42, 1983.
- 15) 竹門康弘: 底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価、*日本生態学会誌*, 55, pp.189-197, 2005.

6. 湖沼の植物群落再生による環境改善手法の開発

6.1 概説

我が国の多くの湖沼は、流域の開発に伴う水質悪化や、治水、利水目的の水位管理、湖岸堤築造等の人為的インパクトを受けてきた。このような湖沼では、沿岸植生帯が衰退した場所も見られ、特に植物体のすべての部分が水中に存在する沈水植物は、減少の度合いが著しい。

近年、下水道整備等による流入水質の改善や湖沼沿岸の植生帯の復元が進められ、一定の成果をあげている。その過程で、沈水植物が湖沼の生態系の中で重要な役割を果たすことや、底泥の巻き上げを抑制し水質改善に寄与すること、生態系に配慮した水位管理の必要性等が分かってきた。しかし、実湖沼内での沈水植物再生のための実験施工例は少なく、群落復元には未だ課題も多い。

そこで、本研究では、現在の湖沼において、沈水植物群落を再生させることを目的とし、シミュレーションを用いた沈水植物の生育可能域の抽出及び、抽出した生育可能域における沈水植物の移植実験、モニタリング調査を実施した。また、水位変動による沈水植物生育環境への影響をシミュレーション解析により実施した。これらの結果から、実湖沼における、現実に即した沈水植物群落の再生手法を提案する。

6.2 沈水植物群落生育適地の抽出

沈水植物群落を再生させるためには、まずは、沈水植物が定着できる場の条件を把握した上で、再生を検討していく必要がある。ここでは、1972年に748ha見られた沈水植物群落は、1980年代半ば以降に消失したと考えられている¹⁾霞ヶ浦を例に、過去に沈水植物群落が生育した場の条件を整理し、現在の霞ヶ浦の諸条件下での、沈水植物の生育適地を抽出した。

6.2.1 方法

沈水植物の分布を制限する要因としては、透明度(光)、底質、波浪が重要であることが指摘されている²⁾。水中光量に着目した場合、湖底部における水中光量は浅い場所ほど大きいので、現在の環境下で沈水植物が生育可能な場所を抽出すると、水深の浅い場所に分布すると予想される。しかし、水深が浅いと風波による底面攪乱が大きくなるため、沈水植物の定着には不利となる。本研究では、光量と底面せん断応力特性を沈水植物生育域規定

の主要因と考え、過去の沈水植物群落分布とこれら2つの指標特性の推定値から、霞ヶ浦における沈水植物群落の生育適性を抽出した。

抽出に際しては、昭和35(1960)年、平成2(1990)年、平成14(2002)年の3時期の地形情報及び、昭和35(1960)年の湖沼図、昭和47(1972)年、昭和53(1978)年、昭和57(1982)年に撮影された赤外線空撮写真から判読された結果を沈水植物群落の分布情報として用い、これらの情報をGISに取り込んだ。また、上記4カ年について沈水植物群落が生育していたと考えられる範囲について、水深と透明度から生育適性水深情報を整理した。

まず、地形情報と沈水植物群落分布情報から、4つの時期毎に沈水植物が生育していたと考えられる場所の水深の分布を求め、当時の透明度とこの沈水植物生育水深分布とを比較し、沈水植物の生育に適した水深を検討した。水深は、沈水植物が分布する各地点における湖底標高と水位標高との差から求めた。ただし、湖水位や透明度は変動するため、解析対象とした年の前3年間の湖水位中央値と透明度平均値とを比較した。これらの指標の比から求められる補償深度/透明度比を式(1)で求めた。

$$d_{com} / SD = d_{sbm} / SD \quad (1)$$

d_{com} : 補償深度(m)、SD: 透明度(m)、 d_{sbm} : 沈水植物が生育する最大水深(m)

湖底面に作用するせん断応力については、浅い湖の場合、風波によるものが支配的であるため、過去のデータとして昭和35年8月、現在のデータとして平成12年8月の水位変動および気象データをそれぞれ用いて、霞ヶ浦全域について、底面せん断応力を計算した。霞ヶ浦全域を50m×50mの格子に分割し、それぞれの格子位置において16方位毎に湖岸からの吹送距離を求め、この情報と風向・風速データ及び水深データを用いて、計算を実施した³⁾。計算は、昭和35年8月および平成12年8月の1ヶ月間について行った。

6.2.2 結果

・沈水植物群落分布特性

沈水植物群落の平面分布と地形との重ね合わせを行い、この情報を用いて、沈水植物群落の分布水深を4カ年について解析した結果を図-6.2.1に示す。

4カ年とも、比較的浅い部分に沈水植物群落が生育していたと考えられるが、昭和47年までは、Y.P.-2mまでの範囲でも分布が認められていたことが分かる。昭和35年においては、Y.P.0~-1mの範囲のうち約30%の場所で沈水植物群落の分布が見られた。この標高範囲では、経

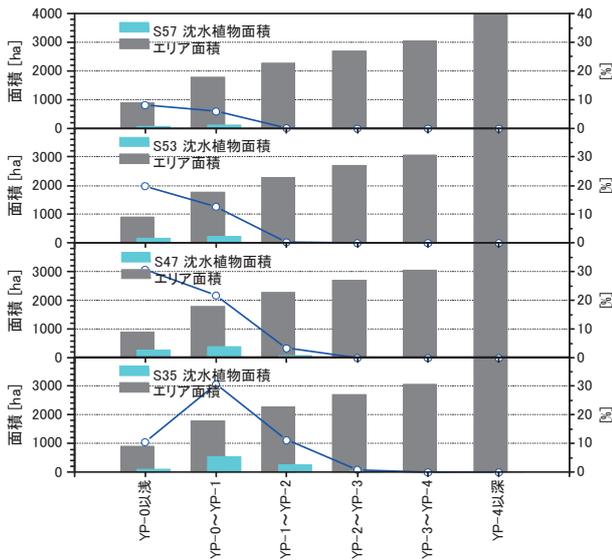


図-6.2.1 湖底標高毎の全体面積、沈水植物群落面積、及びそれらの比率（棒は面積、折れ線は比率を示す）

年的に群落面積が減少した結果となっている。これに対して、Y.P. 0m 以浅の範囲では昭和 35 年から、昭和 47 年にかけて一旦群落面積が増加した後、経年的に減少したという結果となった。この理由として、昭和 47 年以降の調査結果では沈水植物群落が多く認められる左岸側 10～18km にかけて、昭和 35 年の湖沼図では沈水植物群落が認められないことが挙げられる。しかし、沈水植物群落が多く減少した昭和 57 年においても、当該地区には沈水植物群落が比較的広範囲に認められているため、昭和 35 年当時も存在していた可能性がある。このことを考慮すると、分布域全ての水深帯で沈水植物群落面積は経年的に減少しており、その割合は水深の深い場所ほど速かったと考えられる。

・沈水植物群落分布と光量との関係

図-6.2.1 に示したように、標高毎の沈水植物群落面積分布が得られると共に沈水植物群落分布の最深地点も評価できる。これと透明度を用いて、式(1)から補償深度／透明度比を求めた。この際、全てのデータを単純に解析すると、図面からの誤差等による理由と考えられるが、非常に深い場所での沈水植物分布が検出されるために大きい補償深度／透明度比が算出される結果となった。このため、沈水植物分布総面積の 3% までについて深い場所に分布するものから削除して、残ったものが存在する最も深い場所での水深を用いて計算した結果、大塚ら⁴⁾の 2.0 という評価に近い値が得られた(表-6.2.1)。

また、各年における沈水植物群落の分布(水色)と分布が認められた最深標高より浅い範囲(オレンジ)を図

表-6.2.1 4ヶ年の補償深度／透明度比算定結果

	水位 通年中央値 [Y.P.m]	透明度 通年平均値 [Y.P.m]	透明度 係数 a
S35	0.96	1.41	1.39-2.11
S47	0.91	1.13	1.69-2.57
S53	1.02	0.96	1.06-2.10
S57	1.01	0.73	1.40-2.77

-6.2.2 に示す。昭和 35 年から 47 年にかけては、高浜入りにおける分布が減少したことや、昭和 53 年以降は、Y.P. -1m 以深での分布が見られなくなった状況が空間的に把握できる。

最新の地形情報が取得された平成 14 年を対象に、前 3 年間の平均透明度に今回得られた補償深度／透明度比の範囲(1.06～2.77)を乗じて、平成 14 年(現在の状況と考える)において光環境の観点から沈水植物群落が生育可能な最大水深の推定範囲を式(1)から逆算し、さらに前 3 年間の水位中央値との関係から、沈水植物群落生育可能な最低標高の範囲を計算したところ、Y.P. 0.66～-0.06m と推定された。この範囲は図-6.2.2 の昭和 57 年の濃いオレンジ色で着色された範囲とほぼ同様で、昭和 57 年における最大生育可能水深の分布に比べても著しく減少しており、過去の生育範囲と同様の光環境を有すると考えられる領域が、非常に限定的になっている結果となった。

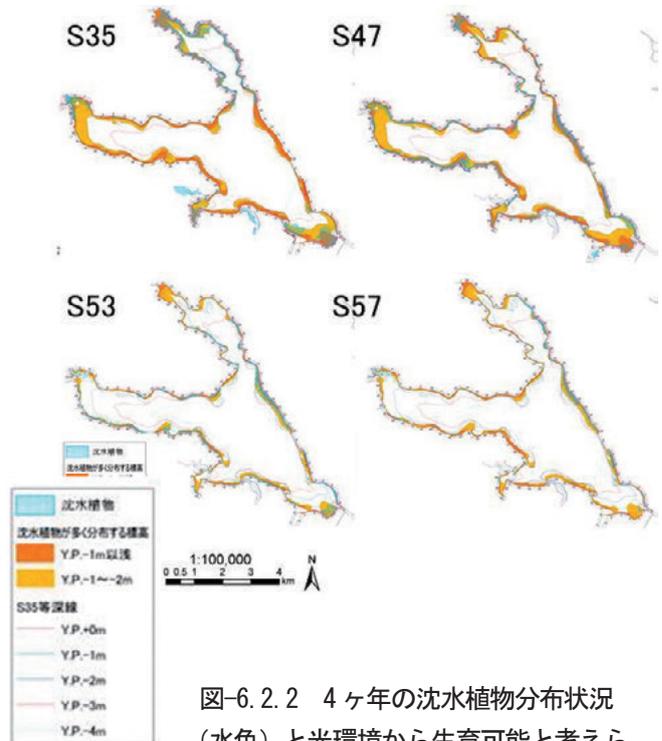


図-6.2.2 4ヶ年の沈水植物分布状況(水色)と光環境から生育可能と考えられる領域(オレンジ色)

・底面攪乱状況

昭和 35 年 8 月において沈水植物群落が存在した場所に

おける最大底面せん断応力を上回らない場所を、底面攪乱の視点から見た沈水植物群落成立のもう一つの必要条件と考え、現在の環境で光条件に加えてこの条件を満たす領域を示したのが、**図-6.2.3**である。この図中で赤色に示された部分は、平成12年8月の1ヶ月間のデータから、生育可能域の底面せん断応力と、昭和35年8月の計算で得られた底面せん断応力の分布のうち、植生が存在した計算格子中の最大値を比較し、平成12年8月の計算結果（生育可能域の中の底面せん断応力）の中で、昭和35年8月のせん断応力最大値を下回った場所の分布である。つまり、光環境、攪乱環境共に、過去に沈水植物群落が発達していた場所における条件を現在でも満たしていると考えられる場所であり、修復を考える際の候補地になると思われる。

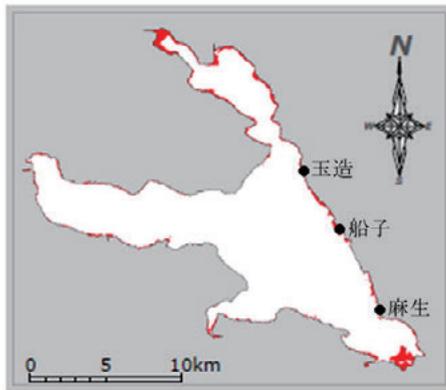


図-6.2.3 現状で沈水植物の生育可能性の高い領域（赤色）

6.2.3 考察

前述の結果からは、補償深度/透明度比がほぼ一定の値を示したこと、透明度と水位の変化により決定される湖底の光環境が霞ヶ浦における沈水植物群落分布を強く規定したと考えられる。このことから、霞ヶ浦における透明度の低下及び水位上昇傾向が沈水植物群落の減衰を招いたと推察される。

光制限の観点からは、現在の沈水植物生育可能な領域は非常に水深が浅い場所に限定される。このような場所は、波による底面攪乱が大きいことから、底面攪乱の観点からも過去に沈水植物が生育した場所と類似の場所を抽出して最終的に**図-6.2.3**に赤色で示した場所が現在でも沈水植物が生育しうる可能性が高い場所として推定された。

6.3 埋土種子を用いた再生手法

本研究では、消失した沈水植物群落を復元する手法として、埋土種子（沈水植物があった時代に散布され、底

泥中に残存している種子）に着目した。霞ヶ浦において、発芽ポテンシャルの比較的高い埋土種子を得る際には、湖岸形状が入り江状になっている箇所において、沈水植物群落が広く生育していた時代に堆積した、湖底から15 cm～90 cm程度の層を採泥することで、効率的に発芽可能性の高い種子を採取することができるとの報告がある⁵⁾。

そこで、この知見を考慮し、発芽ポテンシャルを有する種子が多く存在すると考えられる地点において柱状採泥を行った。選定した地点は、霞ヶ浦の流入河川である恋瀬川及び菱木川の合流部付近とした。底泥から採取した種子を選別した結果、恋瀬川ではガガブタやヒルムシロ属（大）の種子が多く、菱木川ではシャジクモ属、フラスコモ属、ヒルムシロ属（小）の種子が多かった。また、採取された種子の、発芽可能性の有無について選別を行ったところ、恋瀬川で採取された淡水藻113個の種子のうち、胚のある種子は9個（8.0%）、水生植物1278個のうち77個（6.2%）、菱木川で採取された淡水藻の種子1129個のうち、発芽可能性のある種子は123個（10.9%）、水生植物2311個のうち17個（0.7%）であった。また、発芽可能性のある種子を用いた発芽実験の結果、発芽したのはコウガイモとヒルムシロ属（大）の2種類の種子のみであった。コウガイモの発芽率は83.3%と非常に高かったが、ヒルムシロ属（大）の発芽率は0.5%と非常に低く、発芽率は種によって異なっていることが明らかになった。採取した埋土種子の中には、希少な水生植物の種も含まれていたことから、希少な種の復元に、埋土種子を用いた手法は有効であると考えられる。さらに、埋土種子由来等の霞ヶ浦在来の沈水植物生長体を用いて、屋内、屋外実験施設において増殖実験を行った。沈水植物は生長体からは容易に培養が可能であることから、沈水植物復元を検討する際には、埋土種子等からその湖沼在来の種の生長体を増殖し、移植する手法も有効であると考えられる。

6.4 霞ヶ浦における沈水植物移植生育実験

前述の**図-6.2.3**の赤色部分において現地踏査を行い、移植実験地を選定した。移植実験地は、波浪の影響が小さいと考えられる消波構造物の背後水域の2地点と、対照地として消波構造物のない1地点を選定した。また、沈水植物の分布限界水域が透明度のおよそ2倍の水深であることから⁶⁾、現在の霞ヶ浦の透明度を考慮し、移植地は、水深100 cm未満程度の地点とした。選定した3地点は、玉造（消波構造物が単列配置）、船子（消波構造物なし）、麻生（消波構造物が千鳥配置）である。3地点の消波構造物の設置状況を**写真-6.4.1**に示す。

沈水植物の移植は平成22年9月21日から24日にかけて行った。実験に用いた沈水植物は、かつて霞ヶ浦で出現頻度が高かったクロモ、ササバモ、ホザキノフサモ



写真-6.4.1 移植実験地の消波構造物設置状況

の3種とした。

玉造、船子、麻生の各地区に縦4m×横5.5mの区画を設置し、区画内にクロモ区、ササバモ区、ホザキノフサモ区を設けた。実験では、魚類、鳥類等による食害の影響を排除するために周囲と上部に食害防止ネットを設置した。沈水植物の定着には、底質粒径が攪乱されないことが望ましいため、土砂が持ち去られにくい生育基盤として蛇籠（縦50cm×横25cm×高さ15cmのステンレス製）を用いた。移植は3通りの方法（蛇籠に根付きの植物体を植え付け、蛇籠に根無しの植物体を植え付け、湖底に根無しの植物体を植え付け）で行った。蛇籠には、霞ヶ浦の浚渫土砂（粒径2mm程度）を充填後、根付き、根無しのそれぞれの植物体を手で植え付け、波浪による土砂の攪乱を抑制するため、表面をヤシ繊維のマットで覆った。蛇籠は、表面と湖底面との高さが同じになるよう、湖底面を掘って埋め込んだ。各地点で植え付けた沈水植物は、それぞれクロモ、ササバモ30本、ホザキノフサモ20本とした。

移植後のモニタリング調査結果を表-6.4.1に示す。この結果から、現在の霞ヶ浦の水質、波浪等の諸条件下でも、消波構造物の背後地等、波浪による底質の攪乱が少ない場所においては、蛇籠を用いた移植手法の他、湖底に直接手で植える方法でも、移植した沈水植物の生育、定着が可能であることが分かった。一方で、消波構造物のない地点においては、蛇籠を用いた移植手法を用いても、沈水植物の定着は困難であると考えられたことから、現在消波構造物のない地点では、沈水植物が定着するための場の条件を、いかに整えるかが課題となると思われる。

以上の結果から、実湖沼における沈水植物群落復元を行う際には、埋土種子等由来の生長体を、生育適地となり得る場所に大量に移植することで、沈水植物群落復元の第一段階が達成されると考えられる。

6.5 生態機能に配慮した水位変動のあり方に関する提案

水位変動による影響、効果について検証するため、湖

表-6.4.1 3地点における移植沈水植物のモニタリング結果

	移植方法	クロモ (移植時→ 2月調査時)	ササバモ (移植時→ 2月調査時)	ホザキノフ サモ (移植時→ 2月調査時)
玉造	蛇籠根付き	30→0	30→14	20→11
	蛇籠根無し	30→0	30→16	20→18
	湖底根無し	30→0	30→13	20→11
船子 (なし)	蛇籠根付き	30→0	30→0	20→0
	蛇籠根無し	30→0	30→0	20→0
	湖底根無し	30→0	30→0	20→0
麻生 (千鳥 配置)	蛇籠根付き	30→0	30→13	20→群落
	蛇籠根無し	30→0	30→21	20→群落
	湖底根無し	30→0	30→10	20→群落

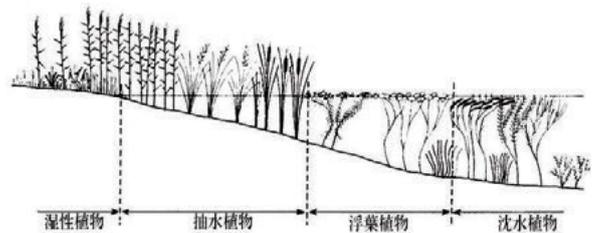


図-6.5.1 湖岸植生帯の模式図

岸植生帯に着目して検討を行った。

湖岸の植生帯には、湿性植物、抽水植物、浮葉植物、沈水植物等の様々な生活形の植物が分布する(図-6.5.1)。

湖沼の水位が変動した場合、これらの植生の生育場では、陸化、あるいは水没が起こり、場所によっては生育環境に変化が生じる可能性がある。そこで、本研究では、生育環境の変化による影響把握が困難な沈水植物に着目し、水位変動による沈水植物の生息場所の環境変化について、シミュレーション解析を実施し影響を評価した。

解析では、水位変動と沈水植物の生育適地との関係を検証した。計算は、平成12年の地形条件を用いた。2年間の非定常計算を行い、水位、流れ、濁度、底面せん断応力を求めた。次に、濁度の計算結果をSSに換算し、SSと透明度の関係式から透明度を算出した。また、透明度と水位の結果から、計算格子の生育可能水深(=透明度係数×透明度-水深)を求めた。生育可能水深が正の値となった場所における底面せん断応力を、昭和35年の植生生育場所の底面せん断応力を比較し、昭和35年の最大値を下回った場所を、水位条件Y.P0.9m、1.1m、1.3mそ

れぞれについて求め、色分けし、図化した(図-6.5.2)。なお、現在の霞ヶ浦では、Y.P1.1m から Y.P1.3m の範囲で水位管理を行っている。

図中の赤色部分は、水位 0.9m、1.1m、1.3m のいずれの水位でも生育可能なエリア、緑色は水位 1.1m、1.3m で生育可能なエリア、青色は水位 1.3m 時のみ生育可能なエリア、黄色は水位 0.9m で生育可能なエリアを示している。

解析結果から、水位が高いほど、沈水植物の生育可能なエリアが多くなり、水位が低下すると、生育可能なエリアが減少する結果となった。従って、沈水植物にとっては、地形条件によっては水位変動により底面せん断応力が大きくなる、という生育に不利な条件が生じ、水位低下が必ずしもプラスにはならない可能性があることが明らかになった。

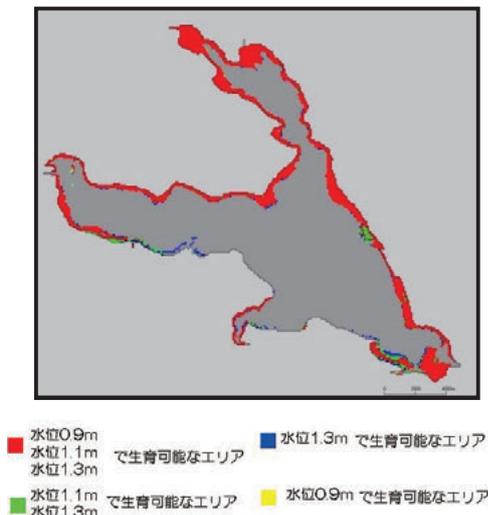


図-6.5.2 水位変動による生育可能域の面積変化

6.6 まとめ

沈水植物群落が消滅した浅い湖沼として、霞ヶ浦を事例に、沈水植物群落の復元手法の開発を行った。まずは、沈水植物群落が生育するのに必要な条件として、光、底面せん断応力に着目し、過去の植生図、湖沼図から沈水植物の生育場における光条件及び底面せん断応力を計算により求めた。さらに、この条件を満たす場所を、現在の霞ヶ浦における沈水植物の生育可能地として抽出し、現地踏査により選定した3地点において、沈水植物の移植実験を行った。沈水植物の定着には、光条件の他に、波浪による底面せん断応力により、底質が攪乱を受けにくいことが望ましいことから、移植地点は、消波構造物の背後水域2地点と、消波構造物のない1地点とした。

移植後のモニタリング調査結果から、水深、底質粒径を加味した消波構造物の背後水域等、条件が整った場所においては、現在の霞ヶ浦の諸条件下でも、移植した沈

水植物の定着、生育が可能であることが分かった。また、蛇籠を用いた植え方だけではなく、湖底に直接手で植え付ける手法でも、沈水植物の定着は可能であることが分かった。

今後は、移植実験地でのモニタリングを継続する他、消波構造物の形状と背後水域の底質環境等の関係性を把握し、別な地点において沈水植物を移植した場合でも、生育、定着が可能であるか検討し、沈水植物群落復元を面的に行っていく必要がある。また、魚類等による食害影響がある自然状態での復元を視野に入れ、実験を行う必要がある。

また、継続的な沈水植物群落の復元には、現在の霞ヶ浦においては、光環境の向上が必要であり、そのための一つの方策として、水位変動が考えられるため、本研究では、シミュレーション解析を用いて、水位変動による沈水植物の生育場への影響を評価した。その結果、地形条件によっては水位低下が沈水植物の生育にとって不利に働く場合があることが明らかになった。

さらに、沈水植物については、生育環境の変化の把握が困難なことから、水位変動による影響については、シミュレーション解析による検討を行うことが有効である。

参考文献

- 1) 天野邦彦, 大石哲也: 霞ヶ浦における沈水植物群落の消長と環境変遷の関連性解析に基づく修復候補地の抽出, 水工学論文集, 第53号, pp.1369-1374, 2009.
- 2) 浜端悦治: 沈水植物の特性, 河川環境と水辺植物(奥田重俊, 佐々木寧編), ソフトサイエンス社, 東京, 1996.
- 3) 三輪準二, 大石哲也, 大寄真弓, 矢島良紀, 湖沼・湿地環境の修復技術に関する研究, 平成22年度重点プロジェクト研究報告書, 独立行政法人土木研究所, 2011
- 4) 大塚泰介, 桑原泰典, 芳賀裕樹: 琵琶湖南湖における沈水植物群落の分布および現存量一魚群探知機を用いた推定一, 陸水学雑誌, vol.65, pp. 13-20, 2004.
- 5) 天野邦彦, 時岡利和: 沈水植物群落の再生による湖沼環境改善手法の提案, 土木技術資料, vol.49, no.6, pp. 34-39, 2007.
- 6) 生嶋功: 水界植物群落の物質生産 I, 水生植物, 生態学講座7, pp.2, 共立出版, 1972.

7. 結論

第1章で示した本重点プロジェクト研究の達成目標に対し成果を要約すると以下の通りである。

(1) 新しい水生生物調査手法の確立

- ①河川のある区間・地点の底生動物の現存量や種組成を適切に評価する上で、瀬淵や礫径、河床安定性にに基づき場所を区分し各場の面積割合と底生動物を調査する必要性を示した。
- ②航空写真やレーザープロファイラによる標高データから瀬淵を抽出し、広い河川水域を対象に瀬淵の割合を調査する手法を確立した。
- ③急流部での生物調査の重要性を示し大型土嚢を利用した有効な底生動物調査手法を確立した。
- ④野生動物自動行動追跡システム (Advanced Telemetry System; ATS) の普及化のため、ATS の小型化、設置コスト・維持コストの低減を目標として機器改良を行い、その実用性を確認した。
- ⑤中型哺乳類・魚類を対象に、生態特性・空間選好性を考慮した行動経路選択などを行う行動予測手法を開発した。

(2) 河川地形の生態的機能の解明

- ①瀬淵構造と底生動物の関係について、瀬が淵に対して通常4-6倍の現存量を持つこと等を明らかにし、各地点の潜在的な底生動物量は瀬淵の割合、礫径、安定性から大まかに推定できることを示した。
- ②魚類など河川生態系の高次捕食者や有機物消費の観点から、瀬は複数の機能が重なり河床地形に対応して存在することを示した。
- ③岩盤河床に砂礫滞留を促す1手法として、重機を利用できない地点でも施工可能で繊維性ふとんかごを用いた非固定型水制の設置についてその有効性を示した。
- ④山間地の中型哺乳類の行動様式に関して、環境因子(物理環境・植物群落・餌資源)との関係性について、地形等の物理環境(地形等)に加え、植物群落が行動に大きな影響を与えており、それぞれ選好する植物群落内で生息し、河川周辺を周遊する行動をすることを明らかにした。
- ⑤ATSを用いた降下期直前のアユの追跡調査の結果、その行動圏は平均約6,000 m²、主に水深が深い箇所や流速の遅い箇所を利用した。また、放流後、1週間で上流側のリーチへ移動し、アユは各時間帯で巡

航速度(体長の2~3倍程度)よりも流速が遅い空間を主として利用した。昼と夜では利用する空間の流速、水深が異なる傾向が把握できた。

- ⑥河原環境を維持するためには、砂礫が動くような大きな攪乱が10-20年に1度起きること、その際に礫厚が10cm程度の環境が保たれていることが重要とする結果を得た。砂州内の河川植生の成立は、種子量や種類による影響よりもむしろ、その場の物理的環境が支配的であることが示唆された。
- ⑦氾濫原植生の減少や樹林化の原因は、出水の影響だけでなく、地域住民の人的管理の減少によることを定量的に示した。
- ⑧河川植生の評価を行うため、種の土着性(地域固有性)から、植生を面的かつ数量的に評価する方法の提案を行なった。
- ⑨水際域の環境要素を「石礫」、「水辺植物」に区分して水際保全の留意点を取りまとめた。
- ⑩「石礫」について、礫により形成される水中の間隙は魚類の棲家として機能し、礫の大きさにより生息する種類組成が異なることが明らかとなった。また、魚種・昼夜間によって利用する間隙の特性が異なること、平水時および出水時の間隙内の魚類群集構造が異なることを示した。
- ⑪「水辺植物」について、水際法面の植物により、増水時でも水際部の流速が抑えられ、魚類の生息場(避難場)として機能することが確認され、その効果は植生が密であるほど大きくなることが明らかになった。
- ⑫効果的、効率的な河岸処理手法について、魚類の定着には木杭群の断続配置よりも連続配置の方が有効であること、既存護岸においては大礫-巨礫がつくる間隙が魚類の越冬場所として機能していることを示した。
- ⑬護岸工法の性能評価手法について、自然河岸や練積み護岸等の異なる河岸形式で、形式の違いにより生物の群集構造が異なり、特に湿潤度や温度変動などの物理環境要因が生息に寄与していることが示唆された。人間から見た護岸の景観評価について、水辺の自然素材と同様の6以下の低明度に対して高い評価を得ることが示唆された。以上より、護岸工法の性能評価手法について景観及び自然環境の2側面から評価軸及び評価基準の提案を行った。
- ⑭ダム下流の河床環境について、ダム下流における付着藻類と単位幅流量との関係を見ると、AFDM (Ash Free Dry Mass) (%)については、単位幅流量との間に

有意な正の相関関係が、クロロフィル a 量との間には負の相関が見られた。また、アユの餌資源としての重要性を示す AFDM (%) の閾値 40% については、単位幅流量が $0.18\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 以上であればこれを上回るケースが多かった。

- ⑮魚類等の摂食圧が河床付着膜に及ぼす影響とその相互作用について、アユ、オイカワを用いた摂食実験から、アユの摂食圧はオイカワと比較して大きく、付着藻類の現存量だけでなく、付着藻類内の無機物量も低下させ、この結果として光合成速度を上昇させることが明らかになった。
- ⑯掃流砂が付着藻類の現存量を低下させる経路としては、1) 磨耗効果と 2) 被覆効果に分けることができるが、実験河川で行った結果 2) の効果がより大きいことが明らかになった。このため、河床環境管理には 2) の効果を取り込むことの必要性が示唆された。
- ⑰⑭～⑯の知見に基づき生物に摂食を加味した流量—土砂—付着藻類現存量推定モデルの構築を行い、モデルの適用による河床環境評価手法の提案を行った。

(3) 流域における物質動態特性の解明と流出モデルの開発

- ①汚濁物質発生特性（トレーサー物質及び溶解性栄養塩類の実態）に関しては、その場所における栄養塩類濃度を構成する畜産排水、生活排水の混入割合について考察するマーカーとして K^+/Na^+ 値が有効であると考えられた。
- ②生活系、畜産系の汚濁排出量が多いと考えられる流域を対象として、晴天時、雨天時におけるこれらの物質の流達特性を把握し、トレーサー物質と溶解性栄養塩類の流出負荷量と比流量の関係を整理した。
- ③流出モデルを用いた解析や水位連続観測と綿密な水質調査に基づく比流量と流出負荷量の間を用いて、流域からの栄養塩類の雨天時を含めた流達負荷量を計算した結果、これまでの原単位法による総排出負荷量と異なり、さらなる排出・流達機構の解明が必要と考えられた。都市や農地を主体とした河川流域規模での総合的な水循環解析モデルとして定評のある WEP モデルについて、溶存態及び懸濁態の栄養塩（窒素・リン）の負荷流出特性を含めて総合的な水・物質循環モデルとするための改良を行い、長期流出特性と短期流出の総量を概ね再現できることを確認した。これらにより、雨天時の汚濁負荷流出特性を含めて、流域スケールでの水量・水質の定量的な動

態情報を関係者で共有するための基盤ツールを開発することができたと評価できる。しかしながら、負荷流出の波形の適合性の向上には課題が残された。

- ④河川、湖沼、下水処理場の D-Fe および D-Si 共に季節変動の明確な傾向は見られなかった。放流水中の D-Si 濃度は河川水中濃度と同レベルであった。
- ⑤レッドフィールド比で検討すると、河川・湖沼水中では、窒素・リンと比較して D-Fe は相対的に不足する可能性は低いが、D-Si は D-N と比較して相対的に不足する傾向があった。
- ⑥霞ヶ浦に生息する淡水藻類を対象とした藻類試験による各元素の消費率から推定すると、レッドフィールド比に対して D-Fe、D-Si 濃度が下回った全ての河川水で、溶解性リン(D-P)が最も不足傾向になりやすいと推定され、D-Fe および D-Si の相対的不足が発生する可能性も低いと考えられた。
- ⑦流動モデルによるシミュレーションの結果、底生動物の無機態窒素動態への影響は限定的だったが、有機物動態への影響が大きいことが明らかになった。この影響は平水時よりも出水時に変化が大きく、流況変化とともに有機物動態が河床の生物活動を介して大きく変動していることが示唆された。

(4) 物質動態と河道特性が水生生物に与える影響

- ①日本の河川水中の現状の栄養塩濃度は、底生動物などの消費者の生物量には限定的な影響しかない。しかしながら、栄養塩類の負荷量増加は、河川水中の有機物濃度と酸素消費量増加を招き、その結果、生物の多様性を低下させている可能性があることが明らかになった。
- ②生物多様性を維持した河川生態系保全のためには、相対的に影響が大きい礫床河川から生態系の浄化能力を超えた有機汚濁物質の除去や負荷源ごとの流出量削減など、下流域だけでなく上流域も含めた集水域全体での取り組みが必要である。
- ③土砂還元効果を定量的に評価する手法を確立することを目的として、ダム下流域における生態系劣化状況を、底生動物群集を対象として明らかにした。また、底生動物群集と環境要因との関係解明に基づき、土砂供給量減少に伴う指標生物としてヤマトビケラを抽出した。最終的に BASIC デザインに基づく土砂還元効果の評価デザインを提案した。

(5) 湖沼の植物群落再生による環境改善手法の開発

- ①沈水植物群落が消失した浅い湖沼として、霞ヶ浦を

事例に移植実験を行った結果、水深、底質粒径を加味した消波構造物の背後水域等、条件が整った場所においては、現在の霞ヶ浦の諸条件下でも、移植した沈水植物の定着、生育が可能であることが分かった。

- ②光環境の向上に寄与する湖沼の水位変動について、シミュレーション解析を用いて水位変動による沈水植物の生育場への影響を評価した結果、地形条件によっては水位低下が沈水植物の生育にとって不利に働く場合があることが明らかになった。
- ③沈水植物については、生育環境の変化の把握が困難なことから、水位変動による影響については、シミュレーション解析による検討を行うことが有効であることを示した。

以上の研究成果の一部は、「河川砂防技術基準(調査編)」の改訂(H24.6)、「流域別下水道総合整備計画調査指針と解説」の改訂(H20.9)、「中小河川に関する河道計画の技術基準について」(H22.8)、「千葉県海老川流域水循環系再生第3次行動計画」(H23.3)、「自然の浄化力を活用した新たな水質改善手法に関する資料集(案)」(H22.3)、「多自然川づくりポイントブックⅠ・Ⅱ・Ⅲ」に反映された。また WEP モデルについてはマニュアルを整備した。

研究成果の普及を図るため、土木研究所資料として、「河川植生評価の手引き(案)」、「新しい河川植生調査手法(案)」、「ダムと下流河川の物理環境との関係についての捉え方ー下流河川の生物・生態系との関係把握に向けてー」、「多自然川づくりにおける河岸・水際部の捉え方」を発刊した。

今後さらに、「水生生物調査手法」、「水域の自然環境再生手法」、「ATSを用いた野性動物調査手法」、「湖沼・湿地における植物群落再生」に関して土木研究所資料として取りまとめる予定である。

独立行政法人土木研究所

沿革

大正 10 年（1921）5 月 内務省土木局道路材料試験所 設置
大正 11 年（1922）9 月 内務省土木研究所 創立
昭和 23 年（1948）1 月 総理府建設院第一技術研究所と改称
昭和 23 年（1948）7 月 建設省土木研究所と改称
平成 13 年（2001）1 月 国土交通省土木研究所と改称
平成 13 年（2001）4 月 独立行政法人土木研究所 発足

土木研究所報告

編集委員長：研究調整監

編集委員：地質監 企画部長 技術推進本部長

研究企画課長 業務課長

事務局：企画部研究企画課研究評価・国際室

土木研究所報告は、大正 14 年（1925）3 月以来、土木研究所が発行する報告論文誌であった。

平成 13 年（2001）4 月、土木研究所を引き継ぐ形で独立行政法人土木研究所が設立され、同時に、本刊行物も独立行政法人土木研究所に引き継がれることになった。

なお、土木研究所の発行による土木研究所報告は、No.198 をもって終了している。

新しく独立行政法人土木研究所が発行する土木研究所報告は、報告論文誌であった従来から性質を改め、論文集として、定期的に発行を行うことになった。

土木研究所報告

第 222 号

平成 27 年 1 月 発行

編集兼

発行者 独立行政法人土木研究所

〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6



PWRI 土木研究所報告

Research Report of PWRI No. 222 January 2015

編集・発行 — © 独立行政法人土木研究所

■ 本資料の転載・複写の問い合わせ

〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6

1-6, Minamihara, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8516 Japan

独立行政法人土木研究所 企画部研究企画課研究評価・国際室

Incorporated Administrative Agency

Public Works Research Institute

Planning and Research Administration Department

Planning and Management Division

Research Evaluation and International Section

TEL 029-879-6700 (代)

URL <http://www.pwri.go.jp/>

e-mail www@pwri.go.jp