

寒地河川をフィールドとする環境と共存する流域、河道設計技術の開発

許士 裕恭¹⁾ 吉井 厚志²⁾ 石田 享平³⁾ 平井 康幸⁴⁾ 村上 泰啓⁵⁾ 吉川 泰弘⁶⁾
永多 朋紀⁷⁾ 赤堀良介⁸⁾ 唐澤 圭⁸⁾ 渡辺 康玄⁹⁾ 高橋 一浩¹⁰⁾ 阿部 修也¹¹⁾
安田 浩保¹²⁾ 浜本 聡¹³⁾ 矢部 浩規¹⁴⁾ 林田 寿文¹⁵⁾ 矢野 雅昭¹⁵⁾ 山下 彰司¹⁶⁾
桑原 誠¹⁷⁾ 新目 竜一¹⁸⁾ 森田 茂雄¹⁹⁾ 赤岩 孝志¹⁹⁾ 山本 潤²⁰⁾ 佐藤 仁²¹⁾
渡辺 光弘²²⁾ 牧田 佳巳²³⁾ 横濱 充宏²⁴⁾ 中山 博敬²⁵⁾ 大久保 天²⁶⁾ 中村 和正²⁷⁾
鶴木 啓二²⁸⁾ 小檜山 雅之²⁸⁾ 多田 大嗣²⁹⁾ 石谷 隆始³⁰⁾ 佐藤徳人³¹⁾ 畠 秀樹³¹⁾
丸山 政浩³¹⁾ 村瀬 竜也³¹⁾ 佐藤 嘉昭³¹⁾ 平野 正則³²⁾ 山田 孝治³²⁾
渋谷 直生³³⁾ 尾形 寿³⁴⁾ 出合 寿勇³⁵⁾ 野村 栄正³⁵⁾ 前田 優³⁵⁾ 川合正幸³⁶⁾
加藤 道生³⁷⁾ 煤孫 英雄³⁸⁾ 稲垣 達弘³⁹⁾ 市原 哲也³⁹⁾ 牧野 昌史³⁹⁾ 齊藤 勉³⁹⁾
幸田 勝³⁹⁾ 西山章彦³⁹⁾

Development of Design Techniques for Environmentally Sound River Basins and Channels in Cold Regions

KYOSHI Hiroyasu, YOSHII Atsushi, ISHIDA Kyouhei, HIRAI Yasuyuki, MURAKAMI Yasuhiro,
YOSIKAWA Yasuhiro, NAGATA Tomonori, AKAHORI Ryouyusuke, KARASAWA Kei,
WATANABE Yasuhiro, TAKAHASHI Kazuhiro, ABE Syuuya, YASUDA Hiroyasu, HAMAMOTO Satoshi,
YABE Hiroki, HAYASHIDA Kazuhumi, YANO Masaaki, YAMASHITA Syouzi,
KUWAHARA Makoto, SHINME Ryuichi, MORITA Shigeo, AKAIWA Takashi,
YAMAMOTO Jyun, SATO Zin, WATANABE Mituhiro, MAKITA Yoshimi,
YOKOHAMA Mitsuhiro, NAKAYAMA Hiroyuki, OOKUBO Takashi, NAKAMURA Kazumasa,
UNOKI Keizi, KOHIYAMA Masayuki, TADA Hirotsugu, HIRANO Masanori,
SHIBUYA Sunao, MARUYAMA Masahiro, INAGAKI Tatsuhiko, KOUUDA Masaru,
SATO Yoshiaki, YAMADA Koji, KAWAI Masayuki, KATO Michio, OGATA Hisashi,
ISHIYA Takashi, SUSUMAGO Hideo, NISHIYAMA Akihiko, SATO Norito, HATA Hideki,
ITIHARA Tetuya, DEAI Toshio, NOMURA Hidemasa, MURASE Tatsuya, MAEDA Yu,
SAITO Tutomu, MAKINO Masashi

要旨

積雪寒冷地である北海道においては、年間降水量の約半分を降雪が占めており、融雪時の流出機構や結氷現象が河川環境に与える影響は大きい。本研究では、積雪寒冷地の河川における国民の安全と流域の土地利用を踏まえた良好な河川環境を創出するために次に示すような研究を行った。(1) 治水安全度を向上させつつ、河川環境の再生を試みる技術の開発を行った。(2) 魚類の生活史を通じた生息環境における物理環境を定量的に評価する技術開発を行った。(3) 河川下流域の生態系を支配する塩水遡上の結氷時における挙動を解明した。(4) 大規模農地を中心とする流域から流出する環境負荷の抑制技術を検討した。(5) 河道の形成機構の解明と、出水時に橋梁部等で発生する流木の堆積による河道閉塞を検討した。

キーワード：積雪寒冷地、融雪流出、結氷、河川環境、治水安全度、魚類生息環境、塩水遡上、大規模農地、環境負荷抑制、流木、河道閉塞

Synopsis

In Hokkaido, where cold snowy weather is common, snowfall accounts for approximately 50 percent of all annual precipitation. As a result, river environments are significantly influenced by the snowmelt runoff mechanism and freezing phenomena. The present study focused on the following research topics to support the development of favorable river environments in cold snowy regions with the aim of ensuring the safety of residents in consideration of land use in basin areas: 1) development of technology to restore river environments while improving flood-control safety; 2) development of technology to quantitatively assess the physical surroundings of habitats throughout fish life history; 3) clarification of the behavior of saltwater intrusion, which influences ecosystems in the lower reaches of rivers during the freezing season; 4) study of a technology to control environmental loads generated mainly from large-scale farmland areas; and 5) clarification of the mechanism of river channel formation and study of river channel blockages caused by woody debris accumulating at bridges during periods of flooding.

Key Words: cold snowy regions, snowmelt runoff, freezing, river environments, flood control safety, fish habitat, saltwater intrusion, large-scale farmland, environmental load control, woody debris, river channel blockage

- 1) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ長
- 2) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ長
- 3) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ長
- 4) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム 上席研究員
- 5) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム 主任研究員
- 6) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム 研究員
- 7) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム 研究員
- 8) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム 研究員
- 9) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム 上席研究員
- 10) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム 総括主任研究員
- 11) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム 主任研究員
- 12) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム 研究員
- 13) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水環境保全チーム 上席研究員
- 14) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水環境保全チーム 総括主任研究員
- 15) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水環境保全チーム 研究員
- 16) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水環境保全チーム 上席研究員
- 17) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水環境保全チーム 総括主任研究員
- 18) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水環境保全チーム 主任研究員
- 19) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水環境保全チーム 研究員
- 20) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水産土木チーム 上席研究員
- 21) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水産土木チーム 研究員
- 22) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水産土木チーム 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 寒地水圏研究グループ 水産土木チーム 主任研究員
- 24) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ 資源保全チーム 上席研究員
- 25) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ 資源保全チーム 主任研究員
- 26) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ 資源保全チーム 研究員
- 27) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ 水利基盤チーム 上席研究員
- 28) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ 水利基盤チーム 研究員
- 29) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ 水利基盤チーム 研究員
- 30) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 技術開発調整監付寒地技術推進室 道央支所 主任研究員
- 31) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 技術開発調整監付寒地技術推進室 道央支所 研究員

- 3 2) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 技術開発調整監付 寒地技術推進室 道南支所 支所長
- 3 3) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 技術開発調整監付 寒地技術推進室 道北支所 副支所長
- 3 4) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 技術開発調整監付 寒地技術推進室 道北支所 副支所長
- 3 5) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 技術開発調整監付 寒地技術推進室 道北支所 研究員
- 3 6) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 技術開発調整監付 寒地技術推進室 道東支所 支所長
- 3 7) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 技術開発調整監付 寒地技術推進室 道東支所 副支所長
- 3 8) 元独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 技術開発調整監付 寒地技術推進室 道東支所 主任研究員
- 3 9) 前独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 技術開発調整監付 寒地技術推進室 道東支所 研究員

寒地河川をフィールドとする環境と共存する流域、河道設計技術の開発

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. 蛇行復元等による多様性に富んだ河川環境の創出と維持の手法の開発	2
2. 1 研究目的	2
2. 2 蛇行復元試験地の追跡調査	2
2. 3 蛇行区間の土砂堆積に関する検討	4
2. 4 分流堰高に関する検討	5
2. 5 まとめ	9
3. 冷水性魚類の自然再生産のための良好な河道設計技術の開発	10
3. 1 研究目的	10
3. 2 サクラマス産卵環境	10
3. 3 サクラマスの越冬環境について	12
3. 4 巨礫を用いたサクラマスの越冬環境修復手法	13
3. 5 堰堤上流魚道入口の閉塞対策について	14
3. 6 堰堤落下時の損傷対策	16
3. 7 まとめ	18
4. 結氷時の塩水遡上の現象解明と流量観測手法の開発	19
4. 1 研究目的	19
4. 2 河川感潮域における流量観測手法	19
4. 3 河川結氷時における新たな流量推定手法	22
4. 4 まとめ	26
5. 大規模農地から河川への環境負荷流出抑制技術の開発	27
5. 1 研究目的	27
5. 2 調査フィールド	27
5. 3 水質負荷の流出抑制のための圃場管理方法の検討	27
5. 4 農業流域における水質保全対策手法の開発と機能評価	29
5. 5 風蓮湖における水質負荷低減効果の評価	32
5. 6 まとめ	34
6. 河道形成機構の解明と流木による橋梁閉塞対策等への応用に関する研究	36
6. 1 研究目的	36
6. 2 橋梁周辺における流木の挙動監視調査	36

6. 3	流木の堆積と河道形状に関する模型実験	38
6. 4	谷底平野の地形特性と現在の地形の成り立ち	41
6. 5	洪水減水期ハイドログラフと砂州および水みち形成の関連に対する検討	42
6. 6	まとめ	43
7.	結論	44

1. 序論

1.1 研究の背景と目的

寒冷地域である北海道は年間降水量の半分程度を降雪が占めており、融雪時の流出機構や結氷現象が河川環境に与える影響は大きく、旧川河道が多く残されている等の固有の河川環境を有する。また、北海道は日本の食糧基地であり、他県に類を見ない広大な農地等の土地利用形態も有している。さらに、近年北海道の主要な産業として北海道の自然環境を生かした観光が注目を集めており、自然環境の一端を形成する良好な河川及びその周辺環境の多様性の確保やそれらの保持、再生と農業の持続的発展との共存が重要な課題となっている。以上を踏まえ、国民の安全と流域の土地利用を踏まえた良好な河川環境創出のための河道設計技術の開発が望まれている。このような状況に鑑み、本研究は、以下のような内容を目的として実施した。

- 1) 治水安全度の向上と河川環境の再生の両立を目指した技術を開発する。
- 2) 魚類がその一生を通じて生息するための物理環境を評価するための技術を開発する。
- 3) 河川の下流域における塩水遡上の結氷時における挙動を解明し、生態系を含めた河川環境の改善を目指す。
- 4) 大規模農地からの環境負荷の流出を抑制するための技術の確立を目指す。
- 5) 河道の形成機構を解明するとともに、河道内での流木による河道閉塞対策技術の確立を目指す。

1.2 本論文の構成

本論文の構成を要約すれば以下ようになる。

第1章「序論」では、本研究の背景として積雪寒冷地の河川における様々な問題点、課題等を踏まえた研究目的と全体構成を述べる。

第2章「蛇行復元等による多様性に富んだ河川環境の創出と維持の手法の開発」では、道東の標津川を実際のフィールドとして、分流堰を備えた2way河道の課題と対策について検討を行った。数回の大規模な出水時における分流堰の効果について検証され、現地への適応についての重要な方向性を示した。

第3章「冷水性魚類の自然再生産のための良好な河道設計技術の開発」では、河川環境に配慮した河道整備手法の検討のため、冷水性魚類の代表であるサクラマスを対象魚として、産卵・越冬・移動に着目し検証した。これにより新たな越冬環境の創出が可能となり、魚道の閉塞防止対策工を提案することができた。

第4章「結氷時の塩水遡上の現象解明と流量観測手法の開発」では、河川結氷時での流量推定手法について新たな手法を開発するとともに、塩水遡上の影響を踏まえた流量観測手法についても検証を加えた。

第5章「大規模農地から河川への環境負荷流出抑制技術の開発」では、風蓮湖の流域をモデルとして、圃場等における水質保全対策の効果について検証し、シミュレーション等を使い、視覚的・定量的に効果を示すことができた。

第6章「河道形成機構の解明と流木による橋梁閉塞対策等への応用に関する研究」では、流木の河川内の挙動監視調査を通して、洪水時の流出傾向についての知見が得られた。流木の堆積と河畔林の密度の関係について模型実験を行い、伐採等の管理上の留意事項について知見が得られた。

2. 蛇行復元等による多様性に富んだ河川環境の創出と維持の手法の開発

2.1 研究目的

標津川は、標津岳にその源を發し支川の武佐川等を合わせオホーツク海へと注ぐ、流路延長 77.9km、流域面積 671km²の二級河川である。標津川の戦前までの姿は図 - 2.1 に示すように、幾多の蛇行を繰り返す原始河川の様相を呈しており、上流側の山地は自然林、下流側は未開の大規模な原野及び湿地帯が広がっていた。改修工事は 1932 年から開始され、1953 年には蛇行河道を直線化させるショートカット工事が本格化した。1980 年代後半には下流域の湿地帯のほとんどが農地になるとともに、治水安全度も飛躍的に向上することとなる。しかし、時代の変化とともに標津川を取り巻く状況も変わり、地域の主力産業である漁業（サケ・マス）と農業を結ぶ自然に配慮した河川環境の創出が地域の要望として高まってきた。この様な社会的背景の中、1997 年の河川法改正が契機となり、2000 年から「自然復元型川づくり」がここ標津川で全国初のケースとして進められることとなった。

自然復元事業の実施にあたり、技術的な課題の把握とその解決に向け、標津川上流 KP8.5km 付近において実際の河跡湖（旧蛇行河道）を利用した 2way 河道が試験的に整備され、2002 年 3 月 18 日に通水が開始された。本研究¹⁾²⁾では、この試験施工箇所における通水後の追跡調査とそれから得られたデータの解析を実施し、このような 2way 河道を自律的に維持してくために求められる河道設計手法の開発に向けた各種検討を行った。

2.2 蛇行復元試験地の追跡調査

2.2.1 蛇行復元試験地の概要

当試験地は、蛇行復元工事が開始された時点で、右岸側に河跡湖として残されていた旧蛇行河道を、河川改修によって直線化された現在の河道へと接続することで整備がなされた。このような 2way 河道では、直線河道が洪水期の治水安全性を担保し、新たに整備された蛇行河道が、平常時の豊かな生物生息環境の創出を担うものとして期待されている。

両河道の接続に伴い、流量が分配される分岐点周辺では、掃流力が低下することによって土砂堆積が

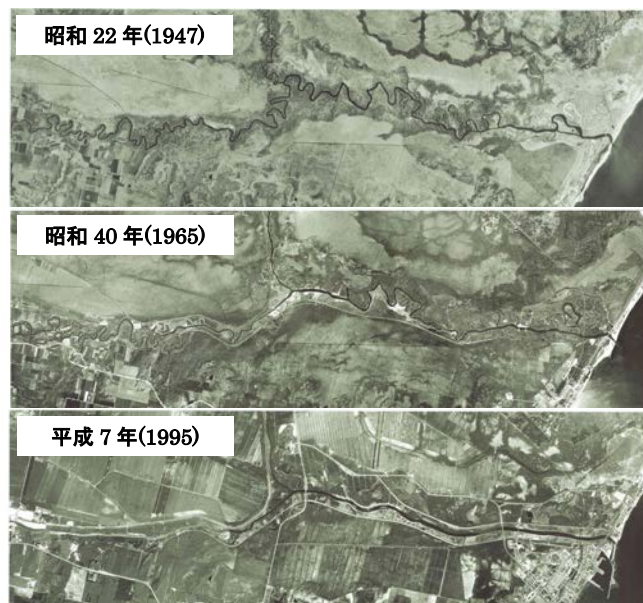


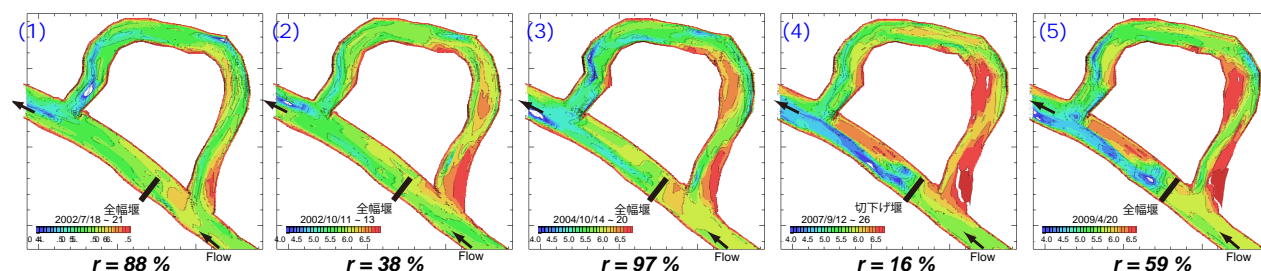
図 - 2.1 標津川流域の河道変遷

誘発され、いずれは蛇行河道が埋没してしまう可能性がある」と危惧されていた。このため、実際の施工にあたっては、十分な掃流力を確保するため、平常時流量の多くを蛇行河道側へと分配できるよう、直線河道と蛇行河道の分岐点から約 30m 下流に越流型の分流堰が設置された。この分流堰は、自然環境との調和に配慮し、化学繊維製の網状の袋材に平均粒径 20cm の自然石を詰めたものを 2 段に積み重ねることで構成された透水性構造物である。堰天端の標高は豊水流量時に越流する高さで設定された。

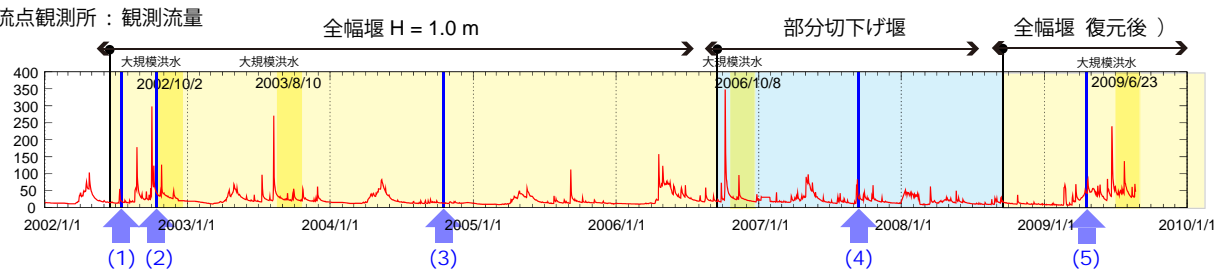
2.2.2 調査結果

当試験地では 2002 年の春から現在に至るまで、約 9 年という長期に亘る定期的な測量調査が行われてきた。その観測結果について、流量と土砂堆積との関係から述べる。図 - 2.2 中段は標津川と武佐川の合流点下流 KP5.4km に位置する合流点水位流量観測所の流量変化で、図中の番号は上段の河床高平面図が計測された時期を示す。さらに、同図下段に示す 3 つのグラフは、上から、蛇行区間に分配された流量の本川総流量に対する割合（以降、流量配分比）と、蛇行区間の平均河床高の縦断平均値および平均河床勾配を示す。これらの図から、大規模洪水に代表される流量変化と分流堰の形状の違いが、蛇行区間の流量配分比および河道形状に与えた影響は以下に示すようなものであったと推測された。

河床高平面図



観測流量



蛇行区間：河道変遷

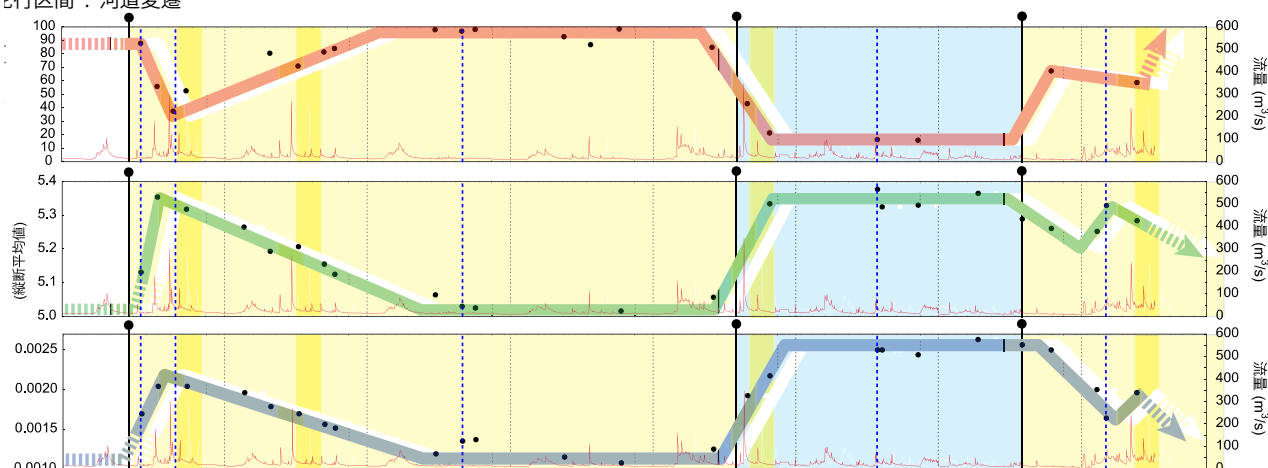


図 - 2.2 河道変遷（上段：河床高平面図、中段：観測流量、
下段：蛇行区間の流量配分比・平均河床高・縦断河床勾配）

- 大規模な洪水（ $250\text{m}^3/\text{s}$ 程度以上）を受けると、堰の形状に関わらず蛇行区間において大幅な土砂堆積が生じ、河床高は流入口から下流へ向かって逡減する形で大きく上昇する。さらに、これに起因して流量配分比は大きく低下する。
- 堰の形状が全幅堰である場合、平水流量が1年以上継続することで、蛇行区間に堆積した土砂は徐々に下流へと輸送され、やがて大規模洪水前の流量配分比および河道状況にまで回復する。
- 一方、堰の高さが部分的に切り下げられた状態では、同じく大規模洪水後に堆積した土砂は、平水流量が1年以上継続した場合でも下流へ輸送されることはなく、河床高は高いまま維持され流量配分比も回復しない。

これらのことから、もし2006年10月の大規模洪水以降、堰の形状が全幅堰に復元されない状態のまま再度大規模な洪水を受けていた場合、蛇行区間は完全に埋没していた可能性があったと推測される。

また、図 - 2.2 下段の3つのグラフの変遷を対比した時、流量配分比と蛇行区間の河道形状は非常に良い逆相関の関係にあり、これは、蛇行区間の河道形状はその分配流量によって決定されることを示唆している。さらに、堰高の違いにより、大規模洪水後の河道形状の変化に大きな違いが生じたことは、堰高もしくは堰高を起因として形成された分岐部の河道形状が、流量配分比に対して大きな影響を持つことを意味している。

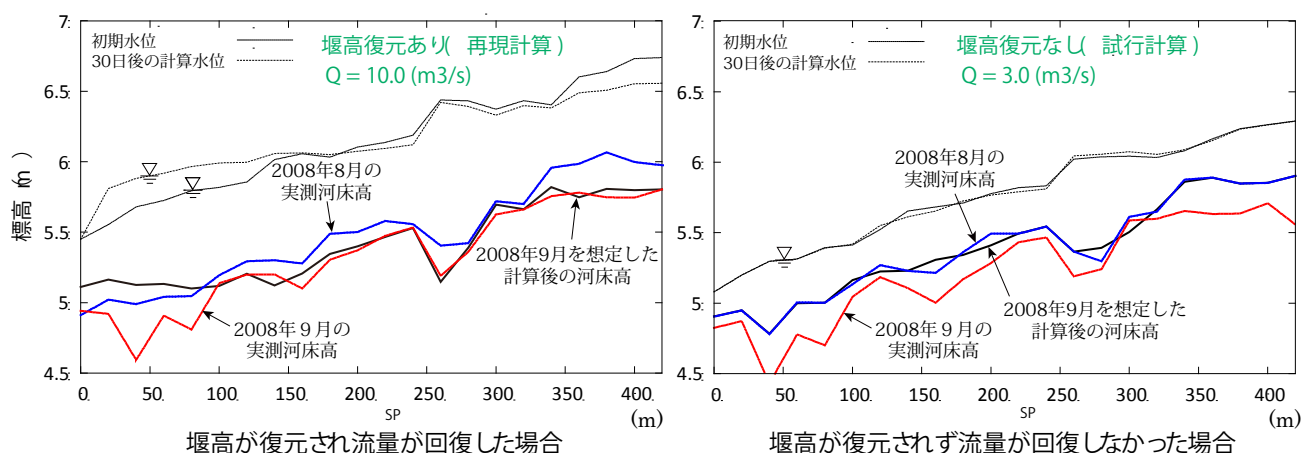


図 - 2.3 1次元河床変動計算結果（再現計算： $Q=10.0\text{m}^3/\text{s}$ 、試算計算： $Q=3.0\text{m}^3/\text{s}$ ）

2.3 蛇行区間の土砂堆積に関する検討

2.3.1 1次元河床変動計算

蛇行区間でみられた平均河床高の変動は、分配流量に応じた掃流力の大きさと密接に関係するものと考えられることから、1次元河床変動計算を用いて、土砂水理的な見地から蛇行区間河床高の流量変動に対する応答特性の検証を行った。なお、流砂量の算出は Meyer-Peter & Muller の式、限界摩擦速度には岩垣の式を用いた。

計算対象区間は蛇行区間の下流端から上流端までの総延長 420m で、縦断方向の計算格子は 20m 間隔で設けられている横断測線と一致させた。また、初期条件として与えた河道形状は、2008 年 5 月に計測された堰高復元前の直近の横断測量データから算出した平均河床高を使用した。堰高復元前の河床高は概ね平衡状態に達していたと考えられることから、2008 年 5 月の河床形状を同年 8 月に見立て、堰形状の復元が行われたこの 8 月から、その 30 日後の 9 月までを計算対象期間とした。

上流端の境界条件となる流量には以下の 2 つの条件を与える。(1)再現計算として、堰形状の復元に伴う蛇行区間への流入量増加を想定した条件では $Q=10.0\text{m}^3/\text{s}$ を与え、(2)試算計算として、切欠きが維持され、流量が増加しなかった場合を想定した条件では $Q=3.0\text{m}^3/\text{s}$ を与えた。なお、今回行った計算は単一粒径一様砂礫河床を前提とした掃流砂のみを対象としており、平均粒径には試算計算の結果、最も実測値に近い解析結果が得られた $d=0.60\text{cm}$ を使用した。以上の条件のもとで 30 日間通水した結果を図 - 2.3 に示す。

2.3.2 計算結果

図 - 2.3 の左図の下段に示す青線は、堰高復元直後の 8 月を想定した計算開始時点の実測平均河床高で、赤線は復元後 1 ヶ月が経過した 9 月の実測平均河床高を示し、上段の太破線と細破線がそれぞれの計算水位を示している。下段黒線が流量 $10.0\text{m}^3/\text{s}$ を 30 日間通水させることで得られた計算河床高で、堰高復元後の 9 月の実測河床高を非常によく再現していることがわかる。特に蛇行区間上流域に堆積した土砂が流失している様子がよく再現されていることがわかる。測量結果のみから推測した前節までの結論と同様に、堰高の復元に伴う蛇行区間への流入量の増加が掃流力を上昇させ、蛇行区間内に堆積した土砂を下流へと流掃したことがこの計算結果からも示された。

一方で、流量のみを $3.0\text{m}^3/\text{s}$ に変え、それ以外は同じ条件で計算を行った結果を図 - 2.3 右図に示す。図中の線種および彩色は $10\text{m}^3/\text{s}$ と同様である。この図から、黒線で示す計算河床高と、青線で示す初期河床高が縦断的にほぼ一致しており、河床高にはほとんど変化が起きなかったことがわかる。

これらの結果から、2008 年 8 月に分流堰の堰高復元が実施されなかった場合、蛇行区間への分配流量は回復せず、十分な掃流力が確保されないため、流入口付近に堆積した土砂を下流へと掃流することができない状態のままとなることが示された。つまり、蛇行区間の流量配分比の減少とそれに伴う流入口付近での土砂堆積が連鎖的に繰り返されることが予見され、再び大規模洪水によるインパクトを受けたとき、蛇行区間が完全に閉塞してしまう可能性があることがこの計算結果によっても裏付けられた。

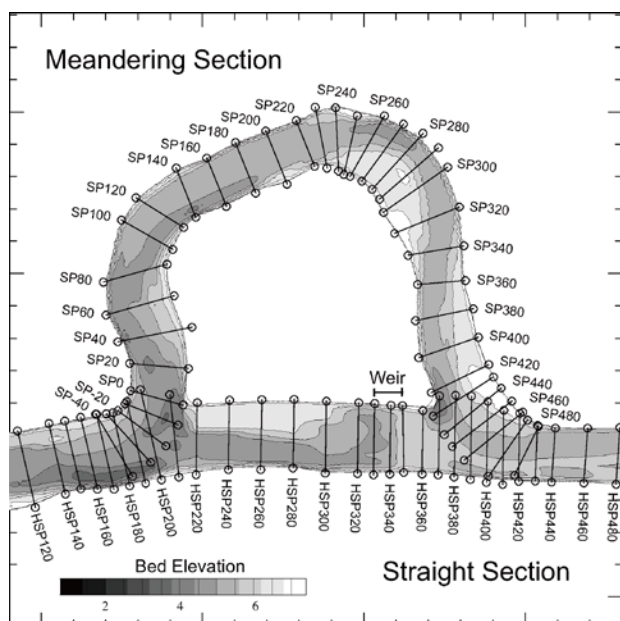


図 - 2.4 測線配置、河床高平面図

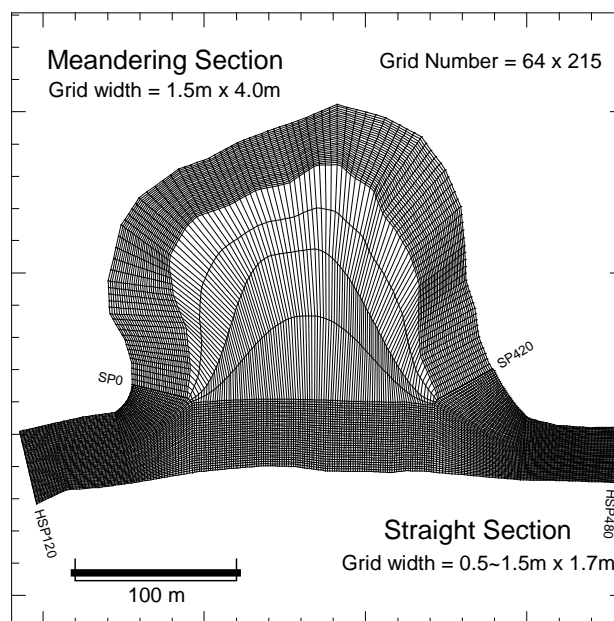


図 - 2.5 測線配置、河床高平面図

2.4 分流堰高に関する検討

2.4.1 平面2次元水理解析

以上より、蛇行河道へ分配される流量とそれを規定する分流堰高が河道の自然復元力に大きな影響を持つことがわかった。つまり、この両者の応答関係を解明することで、十分な自然復元力を保持した河道の適正な維持管理が可能になると言える。

これまで、このような二重流路を包括的に解析し、非定常流量下における水量と分流堰高との関係を明らかにするための様々な試みが行われてきた。しかし、蛇行河道維持の鍵となる分流堰周辺および分岐合流部における複雑な流況の把握には、煩雑な計算格子構成作業が伴うため、実用に耐えうる解析は行われてこなかった。

当節では、まず、このような2way河道における平面2次元解析を可能にする計算格子構成手法を提案する。また、当手法を用いた水理解析を行い、現地観測データとの比較から解析結果の精度検証を行うとともに、この解析モデルを用いて2way河道の自律的維持を可能にする適切な分流堰高に関する検討を行った。

2.4.2 計算格子作成

2way河道における河道断面の計測は、作業効率上、蛇行・直線両区間をそれぞれ別々に実施するため、

図 - 2.4 に示すように、分岐合流部で各区間の測線が交差し合う形となる。これは、2way河道を扱う上での大きな特徴であるとともに、解析を行う際の障害ともなっている。

ここでは、このように与えられた河床データをもとに、計算に供する任意の一般座標系格子を作成するため、次のような手順でデータの処理を行った。

まず、データの分布密度を高めるため、等分割した横断測線間を線形補間する。次に、データの平面的な偏りを解消するため、直交座標系格子(1m x 1m)を作成し、最近傍法(Nearest Neighbors)と逆距離加算法(Inverse Distance Weighted)を用いた補間を行い、各格子点上の標高値を取得する。さらにこれらを三角平面状に分割することで、三角平面の集合体としてモデル化された河床形状が得られる。図 - 2.4 に示す河床高平面図はこの結果を図化したものであるが、分岐合流部の局所洗掘状況や砂州前縁線を明瞭に表現し得ることがわかる。

最後に、図 - 2.5 に示すような任意の一般座標系格子(X, Y)を作成し、この各格子点を、先に作成した河床形状を構成する三角平面上へと投影し、各点の標高値が得られる。以上より、平面的な偏在性を有する標高データをもとにしながらも、任意の一般座標系計算格子が作成可能となる。

2.4.3 境界条件(水位・流量)

ここで、解析結果の検証に用いる水位・流量の現

地観測状況について述べる。

図 - 2.6 は、2010 年の年間最大流量を記録した 12 月 3 日 23:00 前後の試験地総流量（蛇行部・直線部の合計）の時刻変化と時間降雨量を示している。図中の□は、降雨開始時、流量ピーク時、流量低減時のそれぞれのタイミングで実施された高水流量観測の結果で、この値と水位計のデータから得られた H-Q 式をもとに、図に示す流量曲線を算出した。水位観測は、水圧式自記水位計を 80m 間隔で現地に据付け、10 分間隔の連続観測を行っている。以下、この 12 月 3 日 12:00 からの二日間を対象に水理解析を行い、観測水位・流量との比較検証を行う。

2.4.4 計算モデル

水理解析に供する計算格子は、2010 年 11 月の横断測量データをもとに、前述の手法により作成した一般座標系格子（図 - 2.5）を用いる。

水理量の解析は、北海道河川財団より無償配布さ

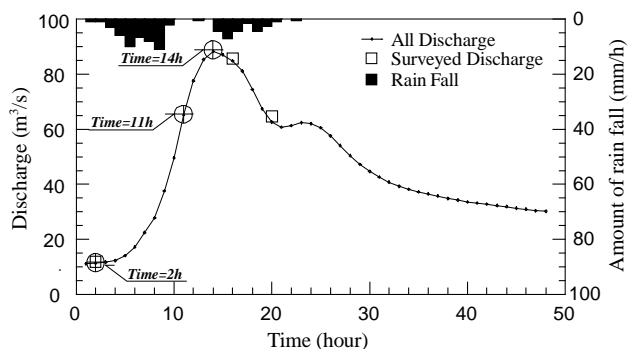


図 - 2.6 流量変化 (12/3 12:00-2/5 12:00)

れている「RIC-Nays」およびその解析プログラム「2d_solver⁶⁾」を使用した。当プログラムが扱う流れの支配方程式は、平面二次元の非定常浅水方程式と連続の式である。実際の計算は、これらを一般座標系に変換し、移流項を CIP 法によって差分化した式が用いられるが、詳細についてはここでは省略する。また、本研究は短期間の非定常な流れのみを解析対象としており、河床変動や河岸浸食による河道の形状変化は考慮しない。なお、粗度係数には Manning-Strickler による平坦河床の抵抗則を使用し、河床材料の粒径には現地観測によって得られた $d_{60}=0.48\text{mm}$ を用いた。また、本解析では簡単のため、河道内樹木による流水抵抗は無視することとした。

2.4.5 計算モデルの適合性検討

図 - 2.7、図 - 2.8 はそれぞれ、図 - 2.6 の○で示した各時刻における流速・水位の計算結果と観測水位で、左平面図中の各測線は、蛇行・直線両区間の上下流端および水位計の設置箇所を示し、右縦断面図中の□は各測点の水位観測値、実線が計算水位の横断方向平均値、破線が最深河床高、□で囲った×印は分岐合流点における蛇行区間側の計算水位を示している。また、図 - 2.9 は総流量に対する、両区間の平均流速の変化を示したものである。

1) 降雨開始時 : Time=2h

図 - 2.7 は降雨開始時にあたる 12 月 3 日 14:00 の計算結果で、この時の総流量 $11.3\text{m}^3/\text{s}$ に対し、蛇行区間の流量配分比率は 75.6%であった。これは後ほど示す流量観測値と比べると若干低い値ではあるが、

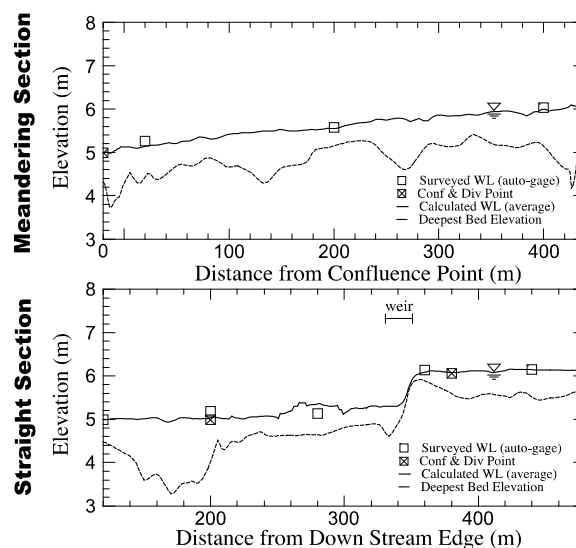
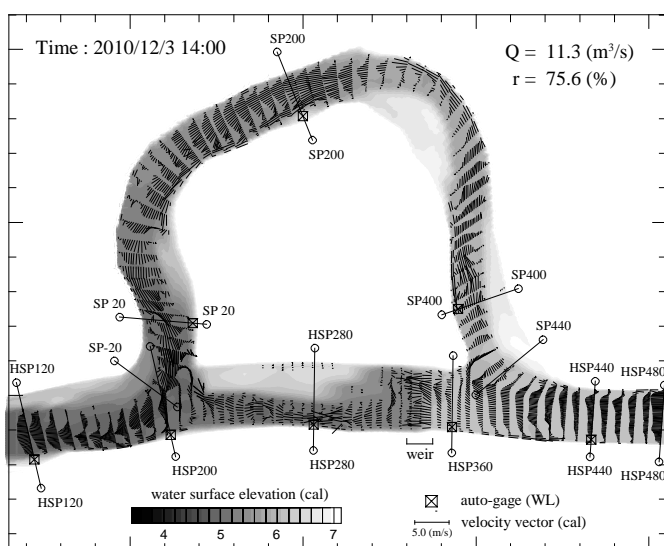


図 - 2.7 [Time=2h] 流速ベクトル・水位標高平面図 (左)、蛇行区間縦断面図 (右上)、直線区間縦断面図 (右下)

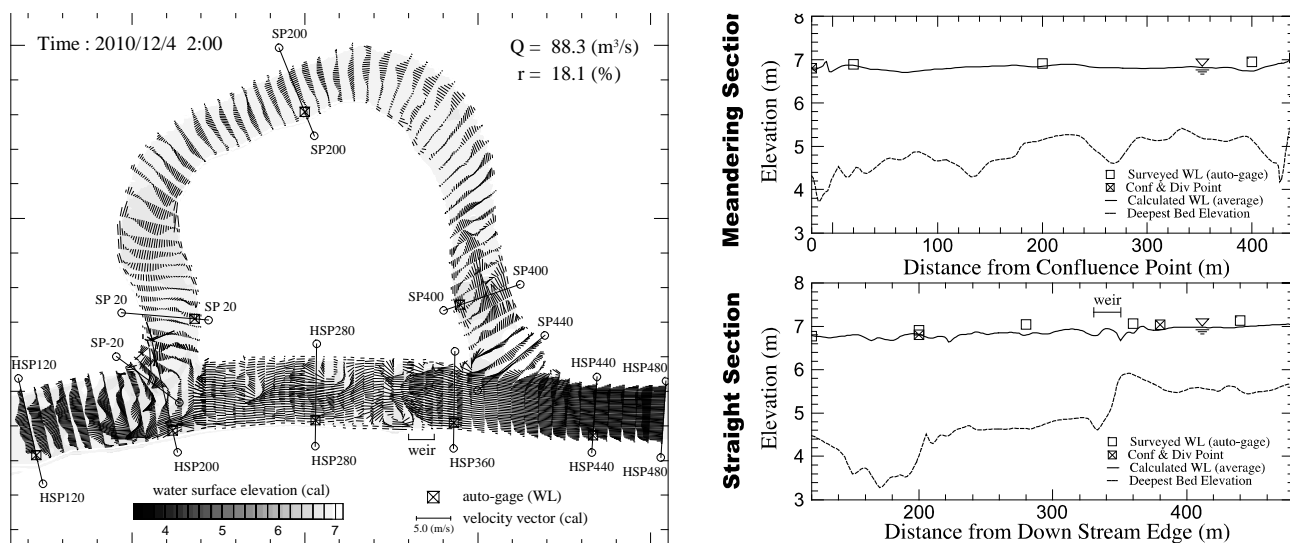


図 - 2.8 [Time=14h] 流速ベクトル・水位標高平面図 (左)、蛇行区間縦断面図 (右上)、直線区間縦断面図 (右下)

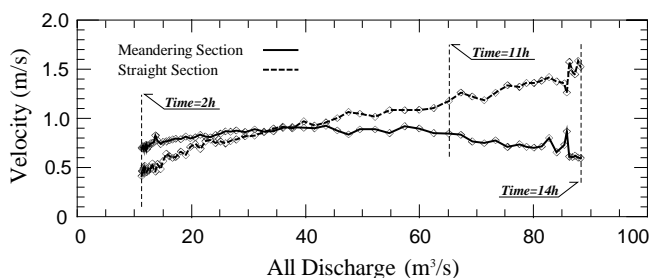


図 - 2.9 平均流速の変化

平常時は蛇行区間側を主流とした流れが形成されることを裏付ける結果である。また、左図からもわかるように、流速は蛇行区間側で相対的に高く、直線区間は堰直下から合流点の間で停滞した状態となる。図 - 2.9 に示す平均流速で比較すると、両区間には約 1.8 倍の開きがあった。

直線区間の縦断面図からは、分流堰の上下流は非常に緩やかな水面勾配を成し、堰を完全越流した流れはその上下流で堰高相当 (1m 程度) の水位差をもたらすことがわかる。これにより、蛇行区間の流れは、右上図のように、分岐合流点を直線的に結ぶ水面形となり、堰上下流の水位差に応じた急峻な水面勾配を成すことがわかる。また、水位の実測値と計算値の整合性は高く、流量変化に対しても高い追従性が認められた。

2) 出水ピーク時 : Time=14h

図 - 2.7 の 12 時間後にあたる出水ピーク時の流況を図 - 2.8 に示す。この時、総流量は $88.3 \text{ m}^3\text{/s}$ に増加する一方、蛇行区間の流量配分比率は 18% まで低下することがわかった。左図からも明らかなように、

主流は完全に直線区間側へと移っており、蛇行区間の平均流速は、図 - 2.9 に示すように、平常時の 0.7 m/s を下回る期間最低値 (0.6 m/s) を記録する。また、蛇行・直線両区間の流量および平均流速の差はこの時最大となる。

縦断面図から、分流堰を越える流れが潜り越流状態にあることがわかる。このような越流状態では、分流堰の効果はほとんど失われ、平常時とは逆に洪水流の多くが直線区間を流下するようになるため、蛇行区間の流れは著しく停滞した状態になったものと推察される。これは、2009 年 6 月の洪水時、著者が現地で実際に観測した流況とも符合する結果である。

このように、流量の増加に伴って逆に流速が著しく低下する領域が、比較的広範囲に渡って創出されるという現象は、2way 河道特有のものであり、洪水時、この蛇行区間が水生生物にとっての貴重な退避・休息場となり得ることを示唆するものであった。

水位の再現精度に関しては、両区間とも計算値が実測値よりやや低い値を示す結果となった。これは、本解析では河道内樹木による流水抵抗を考慮していないことに起因すると考えられる。当該試験地では、砂州上に平均樹高 2m 程度のヤナギが繁茂した状態にあり、砂州標高を越える流れでは、これらの影響によって最大 20cm 程度の水位上昇が生じていたものと推察される。

2.4.6 流量配分比の検証

過去の流量観測値と蛇行区間流量との関係を、解析結果と併せて図 - 2.10 に示す。図中の実線は、今

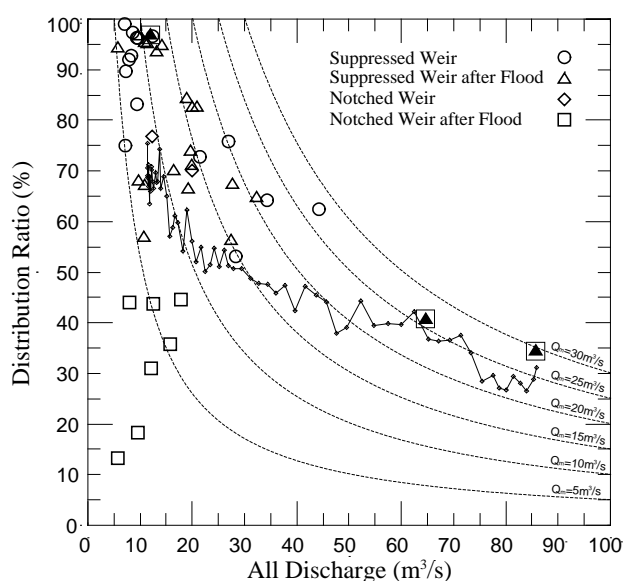


図 - 2.10 流量配分比の計算値・実測値

回の解析によって得られた流量配分比の変化で、低流量時を除けば、▲で示す観測値とも概ね一致しており、本解析手法の適合性の高さを裏付ける結果であった。

図中の破線は、蛇行区間流量を $5\text{m}^3/\text{s}$ 間隔で示したもので、埋没傾向を高めた切下堰の期間は $10\text{m}^3/\text{s}$ を大きく下回る流量であったことがわかる。

前節で示した一次元河床変動計算の結果から、蛇行区間に $10\text{m}^3/\text{s}$ の流量が常時分配される状態であれば、一カ月程度の期間を経て、河道に堆積した土砂は徐々に排出される一方で、 $3\text{m}^3/\text{s}$ の場合は、ほとんど河床に変化が見られないことがわかっている。すなわち、切下堰の期間に埋没傾向が一向に解消されなかった原因は、分配流量の減少に伴う掃流力の低下であったと推察される。

よって、本項では、蛇行区間の埋没を回避するために求められる条件は「蛇行区間へ分配される流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ 程度確保され、且つ、その状態が年間を通して少なくとも一カ月程度維持されるような分流堰高となっていること」と定義した。

当試験地の総流量は、年間日数の約 90% が $30\text{m}^3/\text{s}$ 以下の範囲にあることから、次項ではこの範囲内の流量を対象に検討を行った。

2.4.7 分流堰高の検討

以上の解析手法を用いて、堰高のみを変えた場合の試行計算を行い、その結果から、最適な分流堰高

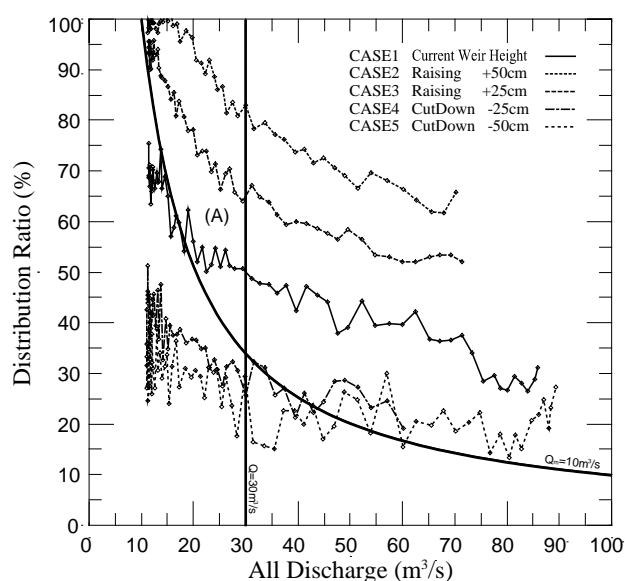


図 - 2.11 堰高の違いと流量配分比（計算値）

の検討を行った。試行計算に用いた堰形状は、先の解析で使用した堰天端の高さを基準に、高さ方向 $\pm 50\text{cm}$ の範囲を 25cm 間隔で、横断方向に対して平行に増減させた 4 つのケースを想定し、それぞれ計算を行った。図 - 2.11 は、先の解析結果を含めた計 5 つ堰高条件から求められた計算結果をまとめたものである。

前項の定義より、蛇行区間流量 $Q_m=10\text{m}^3/\text{s}$ と総流量 $Q=30\text{m}^3/\text{s}$ を示す線で囲まれた領域(図中 A)と、得られた計算結果との位置関係から、各堰高条件下の河道の自然復元力をある程度推定することができる。

図から、現在の堰高がもたらす流量配分は、自律復元の成否を分ける境界 ($Q_m=10\text{m}^3/\text{s}$) 付近からこの領域内を通る線形を成しており、十分な自然復元力を有していると推察される。これより 25cm 以上低い堰高では、当領域から大きく外れ、河道埋没の可能性が急激に高まることがわかる。一方、堰高を上げた場合は、上げ幅に応じた間隔で安全側へと遷移するが、これは同時に、直線区間への分配流量が大きく低下することを意味しており、水質の悪化や河道内植生の樹林化に伴う流下断面積の縮小といった懸念が高まることとなる。

以上より、2way 河道に求められる適切な流量配分は、河道の埋没を回避可能な最低限の流量を蛇行区間へ分配するような状態にあることが望ましく、現在の堰高・形状は、その意味で、非常に適切な状態にあるといえる。

2.4.8 結論

本節では、2way 河道の平面二次元解析を可能にする計算格子構成手法を提案し、当解析モデルの現地適合性を検証した。その結果、非定常流量下における 2way 河道の水理量を十分な精度で再現可能であることが確認された。また、同モデルに基づく分流堰高の検討を行い、現在の堰高および形状が妥当であることを明示的に示した。

2.5 まとめ

以上が、蛇行復元試験地をフィールドとした追跡調査をもとに、2way 河道の持つ課題とその対策について検討を行った結果である。調査開始からこれまでに、4 度の大規模洪水と 2 度の分流堰の形状変化を経験し、これに対して鋭敏に応答する蛇行・直線両河道の変化を継続的に観測できたことは、いわば実スケールの模型実験とも言えるもので、今後予定されている 2way 河道の本格実施に向けて、非常に貴重且つ有益な知見が得られた。

当試験地では、2008 年 8 月に堰高が復元されて以降、2009 年 7 月に大規模な洪水を 1 度経験することとなるが、これが河道に埋没傾向をもたらすようなことはなく、現在も、緩やかではあるが徐々に堰高切下げ前の河道状況へと復元されつつあることが確認されており、現時点において、この 2way 河道は長期的にも自律維持されていくものと推測される。

当研究から得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 通水初期、旧蛇行河道を接続するために新たに掘削を行う区間では、大規模な河岸浸食が発生することとなるが、分岐点の水衝部となる箇所に護岸を敷設することで 2way 河道の分流機能は十分維持されるとともに、通水後 2~3 年程度の期間を経て徐々に河道は安定状態となり、河岸浸食の速度も時間経過とともに緩やかになることがわかった。
- 2) 蛇行河道と直線河道の分岐点下流（直線河道側）に分流堰を設置することで、蛇行河道へ分配する流量を適切にコントロールすることができることがわかった。
- 3) 大規模な洪水を受けると、分流堰の高さに関わらず、蛇行区間では大幅な土砂堆積が生じ、一時的な河道埋没傾向を示すこととなるが、分流堰の高さが適切であれば、その後、平水・融雪出水等の通水が 1 年以上継続することで、堆積

した土砂は徐々に蛇行区間から排出され、やがて元の河道状態へと復元されることがわかった。

- 4) 蛇行河道へ分配される流量と河床高との応答関係を明らかにし、蛇行河道の埋没は、分配流量（流量配分比）を適切に設定することで回避可能であることがわかった。また、非定常流量下における、2way 河道の水理量を平面 2 次的に解析可能な計算格子の作成手法を開発し、この手法を用いた解析によって、蛇行河道に適切な流量配分をもたらす分流堰高の設計・管理基準（工法）を明示的に示すことが可能となった。
- 5) 洪水時、2way 河道の蛇行区間では、総流量が 40~60m³/s（当試験地の場合）を超えた時点を境に、流量・流速はともに急速に低下し始め、出水ピーク時には非常に緩やかな流れが形成されることがわかった。これは、2way 河道の蛇行区間が、洪水時、水生生物にとっての貴重な退避・休息場となり得ることを示唆するものであり、同時に、当河道方式が豊かな生物生息環境の創出に適した河道設計手法であることを示す特徴の一つであると考えられる。

3. 冷水性魚類の自然再生産のための良好な河道設計技術の開発

3.1 研究目的

寒冷地に生息するサケ科魚類のサクラマスは、回遊性で、通常3年間の生涯のうちの約2年間を淡水域で過ごし、河川環境との関わりがきわめて強い⁷⁾。このため、サクラマスが健全に生息できる河川であることは、良好な河川環境である一つの指標と考えられる。一方、河川改修などがサクラマスの減少の原因となっていることも指摘されており⁸⁾、サクラマスの健全な生息を可能とする河川改修のあり方が望まれる。

本研究では、サクラマスを対象とし、その物理的生息環境の評価手法を確立し、良好な河川環境の創出・復元のための河道設計技術の開発を行うことを目的とするものである。なお、本研究では、サクラマスにとって重要な河川環境として、①産卵環境、②越冬環境、③堰堤上下流での河川の連続性、に着目した。①産卵環境が良好であることは、個体群を健全に保つために必要不可欠である。②越冬環境については、越冬期間のサクラマス幼魚の生存率が52%⁷⁾、9~17%⁹⁾と推定され、越冬の困難さが伺え、越冬環境の重要性が示唆される。一方、越冬環境は減少しつつあるとの指摘があり¹⁰⁾、この保全・創出はサクラマスの個体群を健全に保つために重要である。③堰堤上下流での河川の連続性については、サクラマスが産卵床として利用する河川上流域まで遡上するのに必要である。また、稚魚、スモルトが河川下流域に移動する際や、海に降下する際に、堰堤からの落下による魚体への損傷が、最小限であることも重要である。本章では、これらの点に着目した研究成果について、個々に述べていく。

3.2 サクラマスの産卵環境

サクラマスは、産卵床として河床材料が粒径2mmの通過質量百分率で20%以下の場所を選択的に利用するとされ^{11) 12)}、また、視覚的に見た淵尻地形の部分に産卵床が多く分布することが知られている¹³⁾。しかし、砂州などの河床地形が、産卵床形成に与える影響については知見が不足している。本節では、河床地形と産卵床の関係を調査し、河床地形が産卵環境に及ぼす影響について明らかにすることを目的とする。

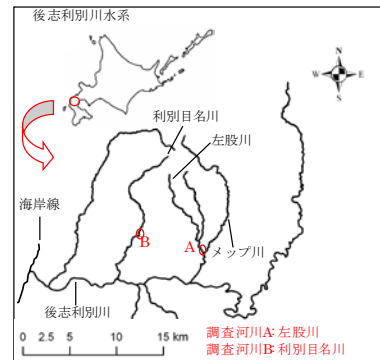


図-3.1 調査地点位置図

表-3.1 調査地点概要

調査河川	左股川				利別目名川			
調査区間 累計延長(m)	350				350			
調査区間の 河床勾配	1/91				1/128			
河床の状態	浮き石状態				沈み石状態			
平均河床勾配 i_a	1/83		1/105		1/100		1/182	
砂州の区分	固定 砂州	非砂州 地形	交互 砂州	非砂州 地形	固定 砂州	非砂州 地形	交互 砂州	非砂州 地形
調査地点	H1	H3	H2	H4	T1	T3	T2	T4
調査区間(起点か らの距離 : m)	287.5 -362.5	200 -275	462.5 -562.5	362.5 -462.5	200 -287.5	287.5 -362.5	362.5 -450	450 -550
調査地点延長(m)	75	75	100	100	87.5	75	87.5	100
川幅(m)	7	5	15	7	7	8	18	8

3.2.1 研究手法

(1) 調査地点

調査は、道南の後志利別川の支川の左股川と利別目名川の2河川で行った(図-3.1)。左股川は、後志利別川水系の2次支川であり、保護水面に指定され、すべての水産動植物の採捕が禁止されている。このため、サクラマスの産卵床が高密度に分布する河川である。左股川での調査区間は、後志利別川水系の1次支川であるメップ川との合流点上流200mを起点とし、区間延長350m、河床勾配1/91である(表-3.1)。もう一つの調査河川の利別目名川は、後志利別川水系の1次支川であり、後志利別川との合流点より上流約7kmに頭首工が建設されているが、魚道が整備されているためサクラマスの遡上は毎年確認されている。利別目名川での調査区間は、この頭首工の上流200mを起点とし、区間延長350m、河床勾配1/128である(表-3.1)。

(2) 調査手法

急流の礫河川における瀬淵構造などの地形的特長は、川幅程度の縦断間隔データを用いることで概ね区分できることが知られている¹⁴⁾。そのため、本研究では、横断測量を川幅程度の12.5m毎に実施した(図-3.2)。さらに、調査区間に中心線を設定し、横断測量線を左右岸均等に区分し方形区を設定した(図-3.2)。横断測量は、サクラマスの産卵後にあたる2008年10月2

日～10月30日に実施した。また、産卵床調査は、サクラマスの産卵時期にあたる2008年9月24日～25日に実施した。

(3) 分析手法

サクラマスが産卵場所として選択的に利用する場所の河床勾配は、その周辺の河床勾配と対比することにより概ね把握でき、その場所は平均河床勾配より緩い場所であることが知られている¹⁵⁾。このため、各方形区における河床勾配 i を算出し、各調査河川における平均河床勾配 i_a (表-3.1) と対比した相対河床勾配 i/i_a を算出した。また、確認された産卵床を砂州地形と非砂州地形に区分して分析した。なお、各方形区の河床勾配 i は、方形区の上流端の平均河床高より、左右岸毎に算出した (図-3.2)。

サクラマスがその環境を、選択的に利用し産卵しているかを、Manly の選択性指数(3.1)式により分析した。

$$\alpha_n = (S_n / R_n) / \sum_{n=1}^m (S_n / R_n) \quad n=1,2,\dots,m \quad (3.1)$$

ここで、 α_n は階級 n (ここでは i/i_a) に対する選択性指数、 S_n は階級 n に属する産卵床数が、全ての地点で確認された産卵床数に占める割合、 R_n は階級 n に属する調査箇所数が、全調査箇所数に占める割合、 m は産卵床が確認された階級数 (ここでは $m=4$ 、図-3.3 参照) を示している。一般的に、 $\alpha > 1/m$ のとき選択性があり、 $\alpha < 1/m$ のとき回避性があると判断される。

3.2.2 結果と考察

(1) 河床勾配とサクラマスの産卵床との関係

産卵床調査の結果、左股川および利別目名川でそれぞれ7床と6床の産卵床が確認された。全体の産卵床を砂州地形と非砂州地形に区分し i/i_a で整理した結果、砂州地形において確認された産卵床 (12床) のうち、 $i/i_a < 1.0$ の階級に産卵床の約83% (10床) が集中した (図-3.3)。また、選択性指数で整理すると、 $i/i_a < 1.0$ の階級で選択性が示された (図-3.3)。一方、非砂州地形においては、確認された産卵床数も少なく全ての階級において選択性は示されなかった。次に、産卵床確認方形区の i/i_a と産卵床が確認された方形区の下流方形区の i/i_a について検討した。産卵床が確認された方形区の大部分は $i/i_a < 1.0$ であった。一方、その下流の方形区については大部分が $i/i_a > 1.0$ であった (図-3.4)。このような地形は淵尻にあたり、河床勾配が相対的に緩やかで、下流部に河床勾配が相対的に急な瀬が隣接する。そのため、淵尻では、洪水時や平水時に、下流

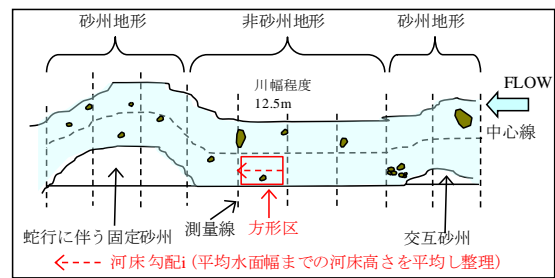


図-3.2 調査手法概略図

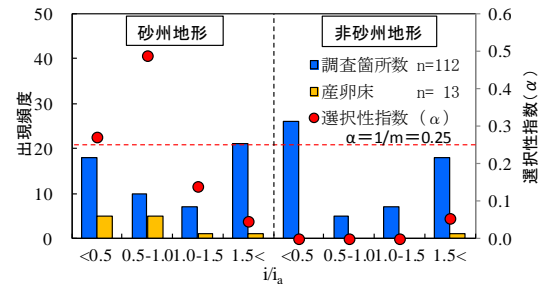


図-3.3 階級別産卵床出現頻度および選択性指数

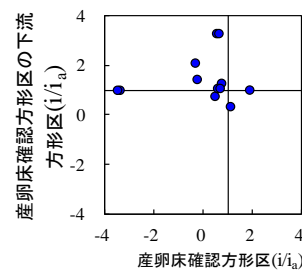


図-3.4 産卵床確認方形区とその下流方形区の i/i_a

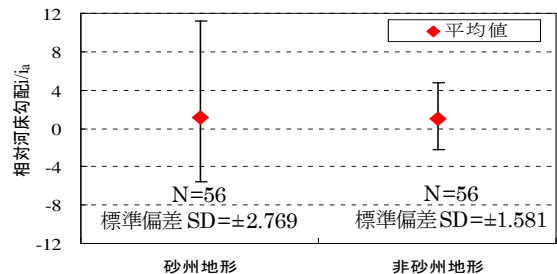


図-3.5 砂州地形および非砂州地形における i/i_a 散布図

の瀬に砂分が流出すると考えられる。

次に、砂州地形と非砂州地形における i/i_a の分布状況を整理した。砂州地形と非砂州地形の i/i_a の分布状況は大きく異なり、砂州地形における i/i_a の分布範囲は、非砂州地形より広範囲であった (図-3.5)。この結果は砂州地形が非砂州地形に比べ河床の凹凸が大きいことを示していると考えられる。このことから、砂州地形が形成されると河床地形は起伏に富み、これに伴い形成される局所的に緩勾配のエリア (ここでは $i/i_a < 1.0$) に産卵床が集中したと考えられる。また、非砂州地形については砂州地形に比べ河床の凹凸が少な

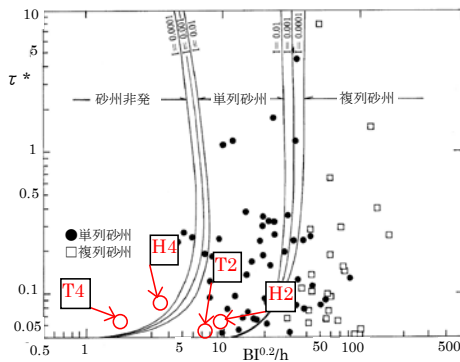


図-3.6 調査区間の河床形態区分 (文献 16 に加筆)

く (図-3.5)、それが産卵の制限要因になっていると考えられる。

3.2.3 産卵環境の保全・創出のための河川整備手法に向けて

現地調査の結果から、砂州地形の河床は起伏に富み、サクラマス産卵環境として選択的に利用されていることが考えられた。このことから、砂州地形を保全・創出することにより、産卵環境が保全・創出されることが考えられる。調査地点で交互砂州地形が確認された箇所 (H2、T2; 表-3.1 参照) と、非砂州地形の箇所 (H4、T4; 表-3.1 参照) を、川幅、水深、河床材料粒径等の物理量から、交互砂州の形成領域区分図¹⁶⁾ に示して比較した。その結果、調査地点の H4、T4 は砂州非発生領域に区分され (図-3.6)、調査地点の H2、T2 は単列砂州領域に区分された (図-3.6)。交互砂州の形成領域区分は川幅を一つのパラメータとしており、川幅を広くすることにより、砂州非発生から交互砂州に移行することが考えられる。このことから、川幅を広くし、交互砂州の形成領域区分図の砂州領域とする手法は、サクラマスの産卵環境を保全・創出する上で有効であると考えられる。

3.3 サクラマスの越冬環境について

サクラマスの越冬環境に関して、中里ら¹⁷⁾ は、流速が 10cm/s 以下と遅くカバーが形成されている微環境に加え、フルード数の小さい領域が越冬環境として重要であることを示している。さらに、渡辺ら¹⁸⁾ は、微環境のような小さな空間単位の環境特性は、より大きな空間単位の環境特性から影響を受けるといった河川の階層構造に着目した。そして、河岸部に広がるフルード数が 0.125 以下の領域内で、特に流速の遅い微環境が越冬にとって重要であることを示している。し

表-3.2 調査地点の概要

調査区域	渓流域内 下流区間		渓流域内 中流区間		渓流域内 上流区間	
	D-1	D-2	M-1	M-2	U-1	U-2
平均水面幅 (m)	10		11		8	
平均河床勾配	1/100		1/50		1/22	
河川形態	Bb型		Aa-Bb移行型		Aa型	
調査地点	D-1	D-2	M-1	M-2	U-1	U-2
調査地点延長 (m)	75	75	75	75	75	75

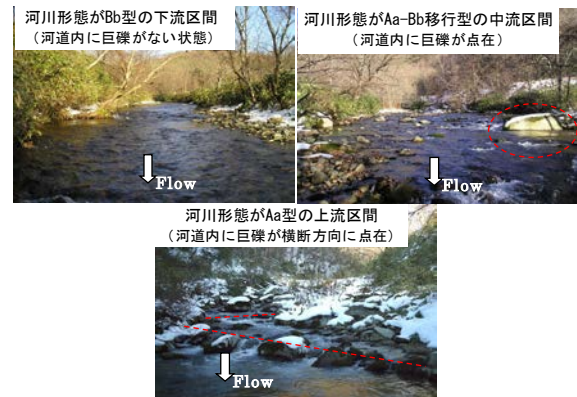


写真-3.1 各区間の様子

かし、河川形態や越冬時期の違いによる越冬場の知見は不足しており⁷⁾、越冬場を保全する方法についても十分明らかでない。本節では、河川形態の違いによる越冬場の特徴を把握することを目的に調査を実施した。

3.3.1 研究手法

(1) 調査地点

調査は、後志利別川水系の 2 次支川にあたる左股川の河川形態型¹⁹⁾が異なる 3 区間 (Bb 型、Aa-Bb 移行型、Aa 型) を併せ持つ範囲とし、河川形態毎に 2 箇所調査地点を設定した (表-3.2、写真-3.1)。なお、河床形態型¹⁹⁾の A、B は、それぞれ 1 蛇行の中に瀬淵が複数あるもの、瀬淵が一つだけのもの、a、b は落ち込み型早瀬と、それより水面形が緩い白瀬を示す。現地における各調査区間の特徴として、溪流下流域の Bb 型の区間では流れが一様な平瀬状の流れ、溪流中流域の Aa-Bb 移行型の区間では河道内に巨礫 (礫径 25.6cm 以上) が点在し、部分的に流れが落ち込んでおり、溪流上流域の Aa 型の区間では河道内に巨礫が横断方向に点在し、流れがステップ&プール状である。

(2) 調査手法

各調査地点の全エリアにおいて、サクラマスの越冬時期にあたる 2007 年 12 月 1 日から 12 月 5 日にかけて採捕調査を行い、サクラマスが確認された箇所を越冬場であると判断した。そして、各調査地点において

河道幅を横断方向に3等分し、河川形態の違いによる越冬場の特性を整理した。

3.3.2 調査結果および考察

(1) 河川形態の違いによる越冬場の特徴

河川形態が Bb 型の区間（渓流域での下流区間）においては、調査面積 100m² あたりの越冬場数は他の区間と比べ低い値を示した（図-3.7）。これは河道内に巨礫が点在しないため（写真-3.1 左上）、流心部において越冬場が形成されず、倒木の背後や護岸下流端の淀んだ部分のみが越冬場であったためと考えられる。河川形態が Aa-Bb 移行型の区間（渓流域での中流区間）においては、調査面積 100m² あたりの越冬場数は上流区間ほどではないが高い値を示した（図-3.7）。これは河道内に点在した巨礫が（写真-3.1 右上）、流心部においても越冬場として機能したためと考えられる。河川形態が Aa 型の区間（渓流域での上流区間）においては、調査面積 100m² あたりの越冬場数は高い値を示した（図-3.7）。これは河道内に点在した巨礫が（写真-3.1 下）、流心部においても越冬場として機能したためと考えられる。以上のことより、河道内の巨礫の存在は、渓流域において良好な越冬場の創出にとって重要であると考えられる。

3.4 巨礫を用いたサクラマスの越冬環境修復手法

越冬環境に乏しい渓流域下流の改修された区間の改善手法として、巨礫設置による対策の効果を評価した。また、出水後の巨礫の状態についても評価した。

3.4.1 研究手法

(1) 試験箇所

試験を実施した河川は、後志利別川水系の2次支川の左股川で（図-3.1）、試験箇所は、河岸の一部に護岸工が施工され、河道内に巨礫がほとんどない区間（以降、護岸区間）とした。また、護岸区間と対比するため、巨礫が数多く点在し、河岸が植生で覆われているなど、良好な越冬環境を保持してある区間（以降、自然区間）においても調査を行った。それぞれの調査区間の概要は、表-3.3に示すとおりである。なお、調査延長は瀬と淵構造を複数含むことを基準とした。

(2) 現地調査

a) 巨礫設置

巨礫の設置は、サクラマスの越冬前にあたる2009年11月5日に行い、礫径25cm以上の材料を複数組み合わせ

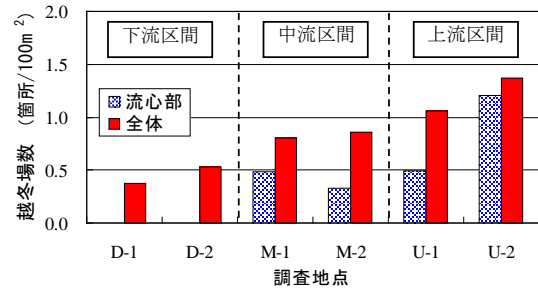
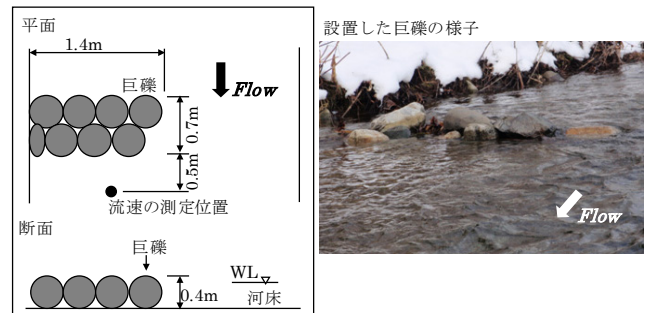


図-3.7 河道内における越冬場密度 (2007年12月調査)

表-3.3 調査地の概要

	護岸区間 (巨礫設置試験区)	自然区間 (目標区)
調査区間延長	62.5 m	75.0 m
調査区間 (SP0:メツ川との合流点)	SP112.5-175	SP375-450
平均河床勾配	1/93	1/85
平均水面幅	8 m (4.5-12.0m)	7 m (5.0-11.5m)
河道内の状況	SP150-175の河岸部には護岸工が施工されている。また、河道内には巨礫があまり見られない。	河道内には巨礫が数多く点在することに加え河岸は植生で覆われている。



巨礫の設置箇所
 St.1: SP162.5で護岸工の対岸側に位置
 St.2: SP150で護岸工の対岸側に位置(護岸工の起点)
 St.3: SP135で護岸工と同じ側に位置(護岸工下流15m)
 St.4: SP125で護岸工の対岸側に位置(護岸工下流25m)

図-3.8 巨礫設置状況と流速の測定位置

せ護岸工の対岸側に3箇所、護岸工側に1箇所の合計4箇所に設置した。巨礫の配置は、1箇所あたり縦断流方向に2個、横断方向に4個の巨礫を使用した（図-3.8）。

b) 物理環境調査

4箇所の巨礫設置箇所において、巨礫の設置前後で流速、フルード数がどのように変化するかを把握するため水深、流速の測定を2009年11月5日（巨礫設置の前後）と2010年2月16日（採捕調査時）に行った。流速の測定は巨礫設置箇所の下流50cmとし6割水深で行った（図-3.8）。

c) 採捕調査

護岸区間と自然区間におけるサクラマスの生息数を把握するため、越冬時期の2010年2月16日から2

月 17 日にかけて採捕調査を行った。採捕はサデ網、タモ網、エレクトリックフィッシャー (YUASA 社製: NP4) を用い、下流から上流に向かって行った。

d) 出水後における巨礫の構造調査

出水後における巨礫の状態を評価するため、2010 年 8 月 11 日降雨出水後の 2010 年 9 月 10 日に、全ての巨礫設置箇所、目視による巨礫の状態確認調査を行った。また、護岸工下流地点に位置する巨礫設置箇所 St.1 と護岸工施工区間に位置する St.4 においては、横断測量、洪水痕跡水位調査をあわせて行った。

3.4.2 結果と考察

(1) 巨礫設置箇所における物理環境

巨礫設置箇所において巨礫設置前に水深、流速を測定した結果、すべての箇所で流速は 10cm/s 以下の低い値であり、フルード数も 0.125 以下の低い値であった (表-3.4)。また、巨礫設置後および採捕調査時に水深、流速を測定した結果、流速、フルード数ともに巨礫設置前と同程度の低い値であった (図-3.9)。

(2) 巨礫設置が越冬環境に及ぼす影響

護岸区間と自然区間の生息数を比較した結果、護岸区間では巨礫を設置したことに伴い生息数が増加し、自然区間と同程度の生息密度となった (図-3.10)。このことから、護岸区間において巨礫を設置することによる越冬環境修復の効果が示された。

(3) 出水に対する巨礫構造の評価

巨礫設置箇所における出水後の状態を調査した結果、設置した巨礫構造 4 箇所の内 3 箇所 (St.1-3) は出水により掃流した。一方、St.4 については先端部の一部に掃流が確認されたものの、延長の約 7 割程度は元の状態を保持していた。また、その掃流しなかった巨礫は粒径が 40cm 程度の大きなものであった。

出水後も状態を保持していた St.4 の巨礫の安定性を、出水の痕跡水位と横断図を用い「護岸の力学設計法: 掃流(一体性が弱い) ²⁰⁾」の式(3.2)により評価した。

$$D_m = \frac{V_o^2}{E_1^2 2g[(\rho_s/\rho_w)-1]} \quad (3.2)$$

なお、 D_m : 流体により掃流される石の粒径 (m)、 E_1 : 乱れの強さを示す実験係数 ($E_1=0.86$)、 V_o : 代表流速 (m/s)、 ρ_s : 石の密度 (kg/m^3)、 ρ_w : 水の密度 (kg/m^3) である。

評価の結果、今回の出水は St.4 において、粒径 30cm 以下の巨礫を掃流する規模であり、出水後における

表-3.4 サクラマスの生息数と越冬場における物理環境

	護岸区間		自然区間
	巨礫設置箇所	巨礫設置箇所以外	
越冬場数 (箇所)	4	4	7
水深 (cm)	10-18 (13.8)	20-53 (31.3)	15-36 (23.0)
流速 (cm/s)	0-7.9 (2.6)	0-6.1 (2.8)	0-18.2 (4.2)
フルード数 (F)	0-0.06 (0.02)	0-0.04 (0.02)	0-0.15 (0.04)
生息数 (尾)	7	7	14
越冬場1箇所あたりの生息数 (尾/箇所)	1.8	1.8	2
生息密度 (尾/100m ²)	2.9		2.6

※ () は平均値

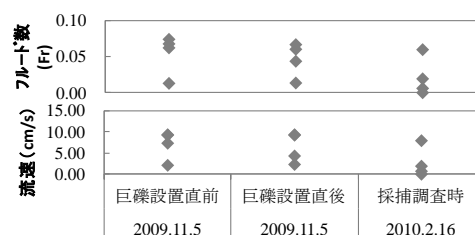


図-3.9 巨石設置箇所における流速とフルード数

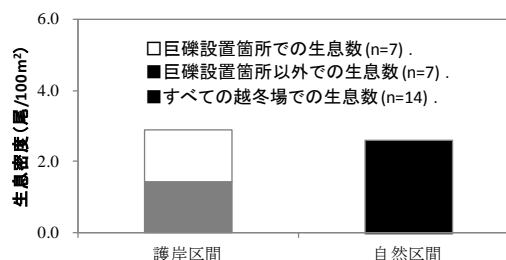


図-3.10 サクラマスの生息密度

St.4 の現地の状況 (掃流されなかった巨礫は粒径が 40cm 程度) を反映していた。このことより、河道内の巨礫を用いた越冬環境修復工法の構造を検討する際、護岸力学設計法により設置する巨礫の粒径を決める手法は有効であると考えられる。

3.5 堰堤上流魚道入口の閉塞対策について

溪流河川の堰堤工作物に設置された魚道が、洪水時に砂礫や流木により、魚道上流入口に堆積し、機能を失う場合がある。現在の対策としては魚道上流入口に護岸工を設置することや、柵やスクリーンを設置するなどされているが、逆に堆積を促進させてしまう場合がある (写真-3.2)。本節では、堰堤工作物袖部に設置された魚道を対象に、水制工による魚道上流入口への土砂や流木の堆積を軽減する対策を検討した。

3.5.1 検討手法

実験は、長さ 24.0m、幅 1.0m の直線水路を用い、半断面の堰堤工作物模型を設置した移動床実験を実施

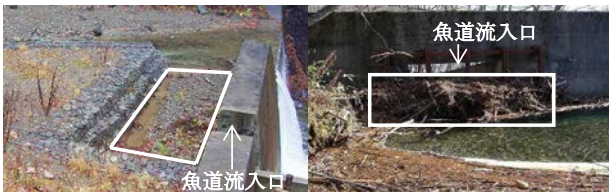


写真-3.2 堰堤魚道上流入り口の閉塞状況

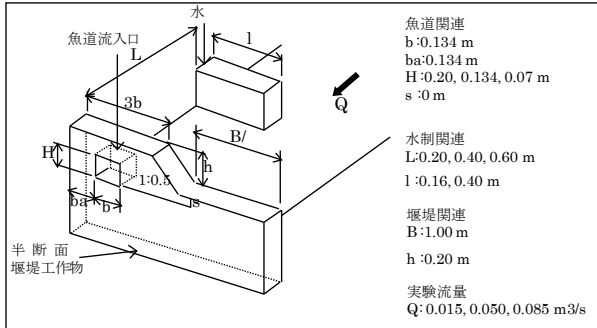


図-3.11 判断面の堰堤工作物模型とその条件

した(図-3.11)。模型実験(1/15縮尺)は溪流河川の下流域における堰堤工作物を想定しており、河床勾配1/150でフルードの相似則を満足するものである。

実験流量については非定常とし、式(3.3)で表される無次元水深ハイドログラフ(図-3.12)であり²¹⁾、ハイドログラフの継続時間は6時間である。なお、無次元水深ハイドログラフは、河川溪流域での流量波形(ここでは札内川ダムで2006年10月7日に観測された計画流量の80%程度の出水の流入量波形)を参考とした。

$$D_o = \left\{ \frac{\delta(\tau + \alpha)^2}{\tau^2 + \beta} - \gamma \right\}^{3/2} \quad (3.3)$$

なお、 D_o : 初期水深 h_0 で無次元化した水深、 τ : ハイドログラフの継続時間 T で無次元化した時間 ($\tau = t/T$)、 $\alpha = 0.522$ 、 $\beta = 0.131$ 、 $\gamma = 1.15$ 、 $\delta = 1.796$ 、 $T = 6h$ である。

魚道直上流部での砂礫の堆積の大部分は粒径20mm以下であり、河床材料については平均粒径1.46mmの均一な珪砂(実スケールでは21.9mm)を使用した。実験ケースは、水制設置位置2ケース、水制長2ケースを組み合わせた合計4ケースにおいて(表-3.5)、ハイドログラフに対応した流量を流下させた。その後、河床コンター図を作成し検討した。河床コンター図の作成にあたってはレーザー砂面計を用いた。

流木の流下状況については、出水時に流出する流木の大部分は出水のピーク流量時より約1~2時間前に最大となることが知られている²²⁾。このことより、魚道流入口上流部での流木の流下状況については、ハイ

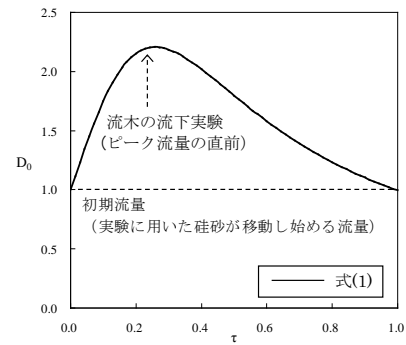


図-3.12 本床実験で用いた無次元水深ハイドログラフ

表-3.5 本実験の実験条件

魚道流入口構造			水制工 設置位置	水制長
(H-s)/h	s/h	b/B	L/b	(l-ba)/b
1	0	0.134	1.5	0.2
			4.5	2

ドログラフにおけるピーク流量直前に流木の流下実験を実施した。また魚道直上流部での流木の堆積を検討する場合、魚道流入口幅 b (図-3.11) より寸法が大きい流木に視点を置くことが重要と考える。よって、流下させた流木模型は、ポリプロピレン性の材料(直径5mm、長さ200mm、比重0.89)を使用した。流木模型は、水制先端部の上流約2mの箇所より3本流下させ、魚道流入口に接近する状態について整理した。また、表面流況についても発泡スチロール球をトレーサーとして用い合わせて整理した。

3.5.2 本実験結果と考察

(1) 魚道流入口上流部での砂礫の移動形態

水制設置位置 L/b 、長さ $(l-ba)/b$ の違いによる魚道流入口上流部での砂礫の移動形態について検討を行った。非定常ハイドロを流下させた後の魚道流入口上流部での河床コンターを図-3.13に示す。 $(l-ba)/b = 2.0$ の場合(図-3.13a, b)、 $L/b = 1.5$ と $L/b = 4.5$ を比較すると、 $L/b = 4.5$ (図-13a)では、魚道流入口上流部で大きな堆砂が生じた。一方、 $L/b = 1.5$ (図-3.13b)では、魚道流入口上流部で大きな堆砂が生じなかった。非越流を条件とした水制の既往研究において²³⁾、水制間隔と水制長の比(ここでは L/l)を1.0以上とし、河床から4割水深で流速測定を実施したとき、水制間に形成される滞留域内において明瞭な循環流が形成されることが報告されている。本実験の $L/b = 4.5$ (図-3.13a; L/l については1.5)の場合においても、このような循環流が形成され、循環流により形成される滞留域に土砂が

供給されやすくなったと考えられる。また、水制設置位置が魚道流入口から離れていたため、魚道流入口より土砂が良好に排出されず、魚道直上流部に土砂が堆積したと考えられる。一方、 $L/b=1.5$ (図-13b ; L/l については 0.5) では、循環流の形成も小さく、水制設置位置が魚道流入口に近いため、土砂が良好に排出され、魚道直上流部に土砂が堆積しなかったと考えられる。なお、 $(l-ba)/b=0.2$ の場合 (図-3.13c, d) においても $L/b=1.5$ と $L/b=4.5$ を比較した際、同様の結果が確認された。このことより、水制と堰堤袖部の間隔を小さくすることにより ($L/b=1.5$ 程度)、土砂堆積が抑制されると考えられる。

(2) 魚道流入口上流部での流木の流下状況

水制設置位置 L/b 、長さ $(l-ba)/b$ の違いによる、魚道流入口上流部での流況および接近する流木模型の状態について検討を行った。非定常ハイドロのピーク流量直前時における表面流速および流木模型の流下状況を図-3.14 に示す。 $(l-ba)/b=2.0$ の場合、 $L/b=1.5$ と $L/b=4.5$ を比較すると (図-3.14a, b)、 $L/b=4.5$ (図-3.14a) では、水制先端で剥離した水流は、水制が堰堤袖部から遠いため、魚道流入口側に回り込む。これに伴い、流下する流木模型の一部は、魚道流入口から排出された。一方、 $L/b=1.5$ (図-3.14b) では、水制先端で剥離した水流は、水制が堰堤袖部に接近しているため、直接堰堤水通し部に向かう。これに伴い流下する流木模型は、すべて堰堤水通し部から排出された。また、 $(l-ba)/b=0.2$ の場合 (図-3.14c, d)、 $L/b=1.5$ においても (図-3.14d)、流木模型の一部は魚道流入口から排出された。これは水制先端が魚道流入口の上流部に位置したことに加え、ピーク流量直前時に水制先端で河床が洗掘され、水制先端から魚道流入口に直接向かう流れが生じたことによると考えられる。このことより、水制設置位置を堰堤袖部に接近させ ($L/b=1.5$ 程度)、水制先端を堰堤構造物袖部の先端と同一線上に配置することにより ($(l-ba)/b=2.0$ 程度)、魚道流入口上流部において流木の接近が抑制されることが考えられる。

3.6 堰堤落下時の損傷対策

孵化したサクラマス幼魚は、約1年間以上河川生活を送り、春先にスモルト化 (海洋生活に備え生態が変化) し降下する。しかし、渓流域での降下の実態として、堰堤工作物がある場合、水通し部より排出され落下するものが大部分である。既往の魚類落下に関する

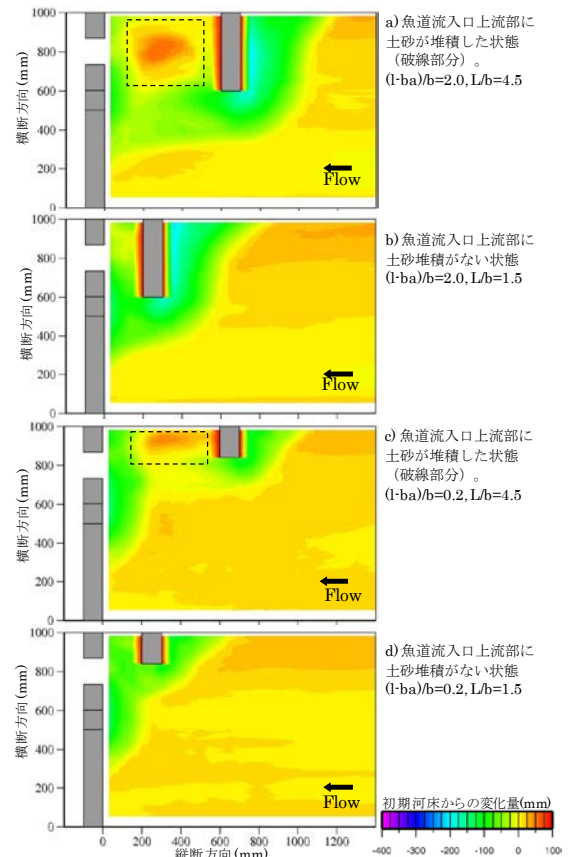


図-3.13 移動床実験後における河床コンター図

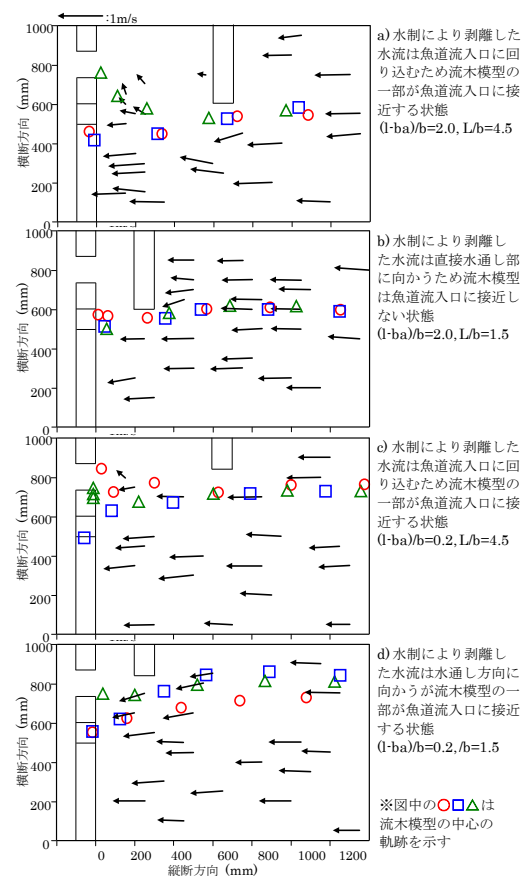


図-3.14 非定常ハイドロのピーク流量直前における表面流速ベクトルと流木模型の流下軌跡

研究は、ニジマスを高さ 55m から滝壺に落下させた試験を Shirahata²⁴⁾ が実施しており、採捕後 1 週間累計死亡率は 40%以下であると述べている。また、土居ら^{25),26),27)} はイワナを用いた落下試験で、堰堤の高さが 8.0m 以下の場合、下流プール水深を 50cm 以上確保すると、死亡率を最小限に抑えることができると述べている。このことから、サクラマスにおいても堰堤工作物のプール水深を適切に設定することにより、堰堤からの落下時の損傷を軽減することができると思われる。本節は、サクラマスの堰堤工作物からの落下時の速度と、プール水深、魚体への影響の関係を、現地実験により明らかにすることを目的とする。

3.6.1 現地実験手法

(1) 実験手法

実験魚は、北海道の一級水系天塩川流域で飼育されたサクラマスのスマルトを用いた。また、スマルトまで飼育した個体の尾叉長は 12cm~15cm 程度となることから²⁸⁾、尾叉長 15cm 以下のものを用いた。

落下が実験魚の生態に及ぼす影響としては、水面・水叩きへの衝突による物理的な損傷、落下の衝撃を受けた後の病原細菌による二次的な損傷等が考えられる²⁵⁾。このため、実験魚落下後に飼育観察を 14 日間実施した。また、比較対照用として落下実験を実施しない非落下魚についても、同条件で飼育観察を実施した。落下実験に使用した尾数については、実験魚へのストレスを減らすため接触を極力控え、養魚場内で素早く採捕したため一定ではない。また、落下高さが高い場合 (20m, 25m) については、仮設プール内への落下が減少すると考え、他のケースと比較し落下が尾数を増加させた。ただし、実験魚 1 尾あたりの飼育スペースは、既存の実験²⁶⁾²⁷⁾で実施された飼育スペースの広さと同程度の約 40尾を確保した。

(2) 実験設備

実験魚落下及び後述する落下速度の測定は、3.0m×3.0m の仮設プールを設置し、高所作業車を用いて実施した (図-3.15)。

現地実験は、輸送等による実験魚へのストレスを排除するため、飼育施設近郊の岩尾内ダム下流広場で実施した。現地実験場所から飼育場所までの距離は約 2.0km 程度である。現地実験の時期は、実験魚がスマルト化する時期にあたる 2008 年 6 月 12 日から 13 日にかけて実施した。

(3) 落下速度の測定

落下速度の測定は、比重 1.0g/cm³、長さ 15cm、幅 2cm、厚さ 1cm のポリプロピレン製の板をトレーサー

表-3.6 現地実験の条件

プール水深(m):3ケース	0.4	0.7	1.0			
落下高さ (m):6ケース	3.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0

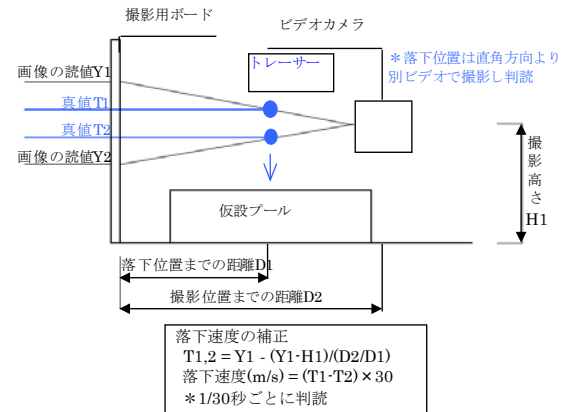


図-3.15 落下速度測定概略図

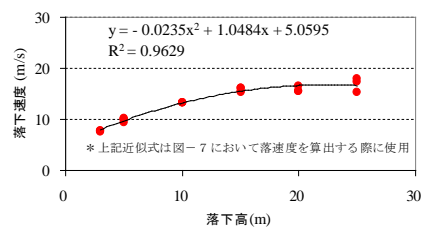


図-3.16 落下高さと落下速度の関係

として用い、表-3.6 に示される落下高さごとに、それぞれ 5 回実施した。また、落下速度は、ビデオカメラを用いて 2 方向より撮影し、1/30 秒ごとに判読・補正することにより算出した (図-3.15)。

3.6.2 現地実験結果及び考察

(1) 落下速度の測定

落下高さが 15m 程度以上になると落下速度は限界速度に達し、落下高さが増加しても落下速度はほとんど変化しなかった。このときの限界速度は 16m/s 程度であり (図-3.16)、本実験の範囲でこのような状態が確認された。これは既往の文献²⁹⁾での魚が自由落下する場合の限界速度とほぼ等しく、落下高さに対応する落下速度は、魚が自由落下する場合の落下速度を再現していると考えられる。

(2) 落下速度・プール水深が魚に及ぼす影響

各ケースにおける飼育観察終了時の実験魚の生存率を落下速度とプール水深の関係で整理した (図-3.17)。なお、落下魚の生存率については、各ケースにおける飼育尾数が異なるため、非落下魚の生存率 Ph と落下魚の生存率 Ps を用いて相対値で検討した。プール水深が 1.0m の場合、落下速度が増加しても Ps/Ph の値はほとんど変化しない (図-3.17)。これは水面へ

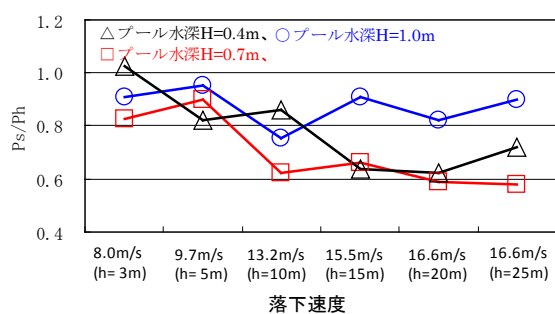


図-3.17 落下速度・プール水深と実験魚の生存率

の衝突速度が増加しても実験魚の生存率はほとんど変化しないことを意味している。落下速度が 10m/s 程度以下の場合、プール水深が 0.4m 以上のものは、他のケースと比較し Ps/Ph の値が大きい (図-3.17)。これは落下速度に対してプール水深が十分に確保されているため、魚体への損傷が軽減されたためと考えられる。

落下速度が 15m/s 程度以上の場合、プール水深が 1.0m の場合とプール水深が 0.7m 以下の場合を比較すると Ps/Ph の値は大きく異なる (図-3.17)。これはプール水深を 1.0m とすることで、落下速度に対してプール水深が十分に確保されているために生じていると考えられる。

3.7 まとめ

河川環境に配慮した河道整備手法の検討のため、サクラマスを対象魚として、①産卵環境、②越冬環境、③堰堤上下流の連続性、特に魚道上流部入り口の閉塞対策および堰堤落下時の損傷対策に着目し、調査・検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

①産卵環境として、相対河床勾配が 1.0 以下で砂州地形の箇所を選択性が確認された。この要因として、砂州地形は非砂州地形よりも、相対河床勾配にバラツキがあり、起伏に富んでいることが考えられた。

②渓流域で越冬環境の調査を行った結果、越冬環境として巨礫の重要性が確認された。また、越冬環境に乏しい箇所の改善手法として、巨礫設置試験を実施した。その結果、越冬環境に乏しい河川改修区間の越冬環境数が、自然区間と同程度まで向上がみられた。また、巨礫の出水による流出の有無を、「護岸の力学設計法」により評価できることを確認した。

③模型実験により、渓流部の堰堤工作物に設置されている魚道上流部入り口の閉塞対策として、水制工を、図-3.11 の $L/b=1.5$ 、 $(l-ba)/b=2.0$ の条件で設置することが有効であることが確認された。また、サクラマス

幼魚の堰堤落下時の損傷対策として、現地実験により、堰堤下流のプール水深を 1.0m 以上確保することが有効であることが確認された。

4. 結氷時の塩水遡上の現象解明と流量観測手法の開発

4.1 研究目的

本研究は、結氷時と開水時の塩水遡上の現象を踏まえた流量観測手法および河川結氷時の流量推定手法の開発を目的としている。

河川感潮域における現地観測を行い、どの程度の測定時間であれば精度が確保されるのか、潮汐により水位が変動する流況の中でいつ観測を行えばよいのかについて、結氷時と開水時の観測結果を基にして検討を行った。

河川結氷時において詳細な現地観測を実施し、これらの観測データを検討資料として、コスト低減の観点から、追加観測なしに現行の観測資料のみを用いる流量推定手法を開発した。本手法の現場への適用を念頭に置き、本手法と従来手法の推定流量の精度比較を行い、本手法の利点と欠点を明確にした。

4.2 河川感潮域における流量観測手法

河川流量は、水資源計画を策定する際や合理的な治水計画を立案するための資料となる。近年では、渇水による利水障害の発生や局所的豪雨による洪水の発生が起こっており、また、良好な河川環境の保全および創出が社会的に求められている。このような背景から、以前にも増して、河川の基礎データである流量を把握することは重要となっている。

河川河口域は、感潮デルタによって平野となっており、漁業や貿易等により人口が集中する地域が多い。また、河川内では潮汐の影響により栄養塩類を含んだ海水が河川を遡上して淡水と混じり合うため、豊かな河川環境が形成されている。一方で、感潮域の流量を観測することは、水位が時々刻々と変動しているため非感潮域に比べて困難である。感潮域における流量観測の主な注意点³⁰⁾として、「水位・流速の変動があるから、通常の流量観測よりは手早く行わなければならない」、「満潮・干潮など潮汐をよく考慮して観測計画をたてなければならない」とあるが、具体的手法については、現在、十分には検討されていない。また、冬期間に結氷する河川では、時間短縮のために測定機器を船に乗せて行う曳航観測は、河水が存在するため不可能であり、結氷河川における感潮域の流量観測は、時間がかかる徒歩観測に限定される。

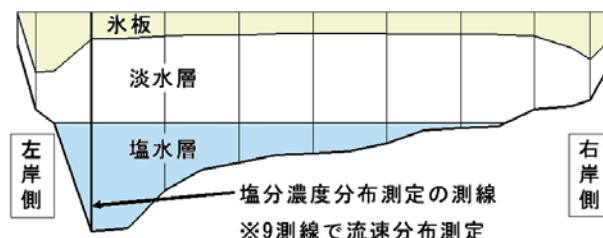


図-4.1 現地観測の概念図（結氷時の横断面図）

本節は、河川感潮域の流量観測において、どの程度の測定時間であれば精度が確保されるのか、潮汐により水位が変動する流況の中でいつ観測を行えばよいのかについて、結氷時と開水時の観測結果を基にして検討を行った。

4.2.1 現地観測

現地観測の場所は、塩水の河川遡上があり、冬期間に完全結氷する場所として、北海道東部に位置する常呂川の河口から約1.1kmの地点とした。結氷時の観測期間は潮位差1.00mの大潮時で2005年2月22日09:00から25日11:50として計18回の観測を実施し、開水時の観測期間は潮位差1.33mの大潮時で2005年8月18日04:40から8月21日07:30として計18回の観測を実施した。

現地観測の概念図を図-4.1に示す。横断面を9測線に分け各測線で ADCP (RD Instruments、WorkHorse Sentinel 1200kHz Zed-Hed) および可搬式流速計 (三映測量機器株、三映式 I 型・II 型流速計) で流速を測定した。また、滞筋の1測線において、アレックメモリー STD (アレック電子株、ATU100-PK) を用いて塩分濃度、自記水位計 (光進電気工業株、MC-1100WA) を用いて水位を測定した。

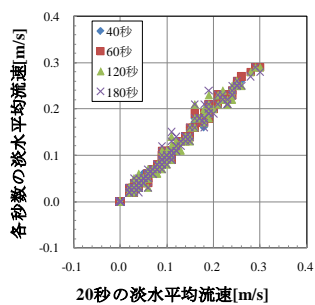
4.2.2 感潮域の流量観測手法

結氷時と開水時における感潮域の流量観測結果を基にして、測定時間および観測時期に関する検討を行った。なお、本検討で対象とした流量は、河川上流からの淡水の流量とした。淡水と塩水は塩分濃度10psuを基準にして区分した。

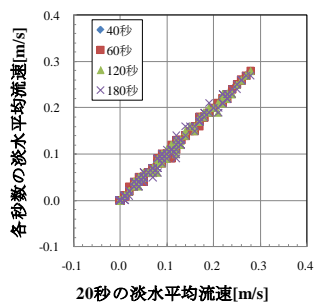
(1) 測定時間に関する検討

河川感潮域は潮汐の影響により流況が時々刻々と変動するため、流量観測は手早く行う必要がある。

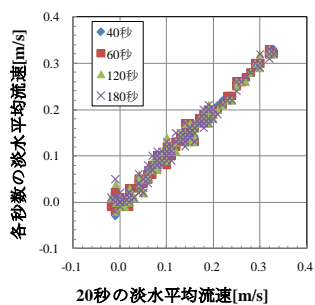
本検討では、流速の測定時間は少なくとも20秒以上³⁰⁾としていることから、測定時間を20秒、40秒、60秒、120秒、180秒とした場合の平均流速を検討資料とした。



a) 2点法による測定データ



b) 精密法による測定データ



c) ADCPによる測定データ

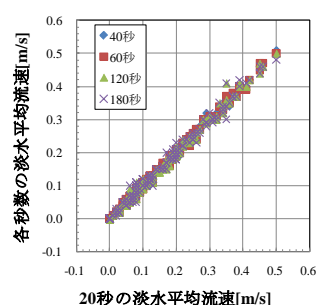
図-4.2 結氷時における測定時間の違いによる淡水平均流速

表-4.1 結氷時の各手法における20秒データとの相関係数

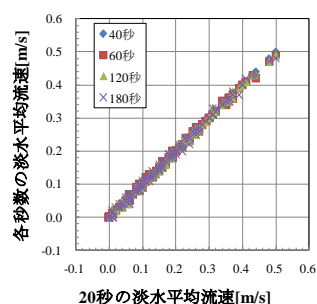
20秒データとの相関係数	40秒	60秒	120秒	180秒
2点法	0.998	0.997	0.992	0.991
精密法	0.999	0.998	0.996	0.995
ADCP	0.997	0.996	0.991	0.989

測定手法に関しては、通常の流量観測で実施されている2点法、測定の間隔を密に行う精密法、水面近傍に機器を入れるだけで鉛直流速分布が測定できるADCPの3つの手法について検討を行った。

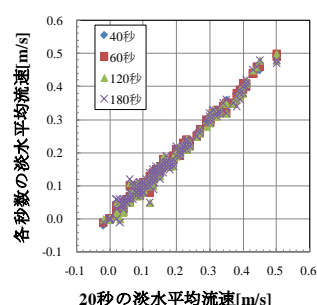
3つの手法において、各測線における20秒の淡水平均流速を横軸に、各測線における各秒数の淡水平均流速



a) 2点法による測定データ



b) 精密法による測定データ



c) ADCPによる測定データ

図-4.3 開氷時における測定時間の違いによる淡水平均流速

表-4.2 開氷時の各手法における20秒データとの相関係数

20秒データとの相関係数	40秒	60秒	120秒	180秒
2点法	0.999	0.998	0.997	0.995
精密法	0.999	0.999	0.999	0.998
ADCP	0.998	0.997	0.994	0.991

を縦軸にとり、結氷時を図-4.2に開氷時を図-4.3に示す。

結氷時の図-4.2より、どの手法においても20秒の淡水平均流速と各秒数の淡水平均流速は正の相関がある。表-4.1に20秒の淡水平均流速と各秒数の淡水平均流速の相関係数を示す。表-4.1より、20秒の淡水平均流速

との相関係数は、測定秒数が長いほど値は小さく、2点法は精密法に比べて値は小さい。相対的にみると、どの手法も20秒の淡水平均流速と各秒数の淡水平均流速の相関係数は0.9以上である。

開水時の図-4.3より、どの手法においても20秒の淡水平均流速と各秒数の淡水平均流速は正の相関がある。表-4.2の20秒の淡水平均流速と各秒数の淡水平均流速の相関係数より、20秒の淡水平均流速との相関係数は、測定秒数が長いほど値は小さく、2点法は精密法に比べて値は小さい。相対的にみると、どの手法も20秒の淡水平均流速と各秒数の淡水平均流速の相関係数は0.9以上である。

表-4.1、4.2から、結氷時と開水時における20秒の淡水平均流速と各秒数の淡水平均流速の相関係数をみると、開水時の方が相関係数が高くなっているが、どの手法も20秒の淡水平均流速と各秒数の淡水平均流速の相関係数は0.9以上で相関が高いことから、今回の結氷時および開水時の現地観測結果から、長い時間測定した淡水平均流速と比べて、測定時間を20秒としてもその測定精度は確保されると推定できる。

(2) 観測時期に関する検討

流量観測は、原則として月に3回実施されている。感潮域の淡水流量について、上げ潮時は海水が河川を遡上するため、淡水は流れづらくなり上流で一時貯留され淡水流量は小さくなり、下げ潮時は海水が流下するため、上流で一時貯留されていた淡水が一気に流れ淡水流量は大きくなる。このため、月3回の観測を実施する日時は重要な観測条件となり、通年の流量の変化を知る場合においては、その観測期間の平均値を観測することが望ましいと考えられる。なお、本検討で言う上げ潮時、下げ潮時とは図-4.4に示す水位が上昇する時期と下降する時期である。

本検討では、観測期間中の淡水流量を推定し、この期間の平均流量と推定した流量との差を求め、いつ、この差が小さくなるかについての検討を行った。また、2点法および精密法による淡水平均流速とADCPの淡水平均流速との差を求めて、同様に検討を行った。

感潮域の淡水流量を連続的に推定する手法は、観測水位データのみで流量を推定することが出来る手法³¹⁾を用いた。この手法は、水位と流量の位相差を考慮して、鉛直方向の水位変動速度m/hから流量を推定する手法であり、開水時の現象より導かれたものである。水位変動速度m/hとは、単位時間の中に水位が上昇または下降した場合の鉛直方向の移動距離であり、本検討では鉛直上向き方向を正とした。淡水流量と1時間前、

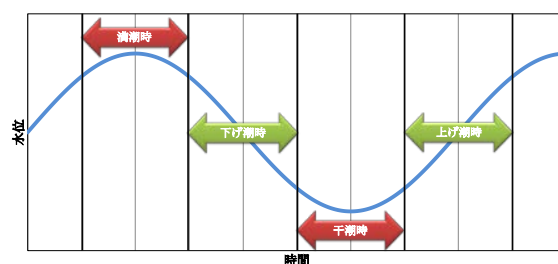


図-4.4 水位変動と用語の概念図

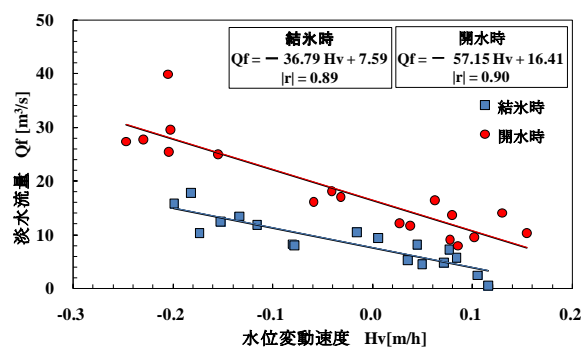


図-4.5 水位変動速度と淡水流量の相関図

2時間前、3時間前の水位変動速度との相関係数を算出した結果、結氷時、開水時ともに1時間前の水位変動速度を用いた場合に相関係数が一番高くなったため、本観測所における水位変動速度と淡水流量の位相差は1時間とした。

水位変動速度と淡水流量の相関図を図-4.5に示し、結氷時の相関式を式(4.1)に開水時の相関式を式(4.2)に記す。

$$\text{結氷時)} \quad Q_f = -36.79H_v + 7.59 \quad (4.1)$$

$$\text{開水時)} \quad Q_f = -57.15H_v + 16.41 \quad (4.2)$$

ここで、 Q_f [m³/s]：淡水の流量、 H_v [m/h]：1時間当たりの水位変動速度である。

図-4.5の相関係数の絶対値について、結氷時は0.89、開水時は0.90でありともに高い相関がある。また、流量推定式は通年で一本とされていたが、今回の観測により流量推定式の係数は結氷時と開水時で異なる事が明確となり、この要因として、河氷底面粗度の影響や上流の流量の違いが考えられる。

横軸に日時、縦軸に水位を黒、淡水流量を赤、平均淡水流量との絶対誤差を青、ADCPに対する2点法および精密法の絶対誤差をとり、結氷時を図-4.6に開水時を図-4.7に示す。平均淡水流量は、観測期間中の推定した淡水流量の平均値であり、結氷時7.41m³/s、開水時16.81m³/sである。

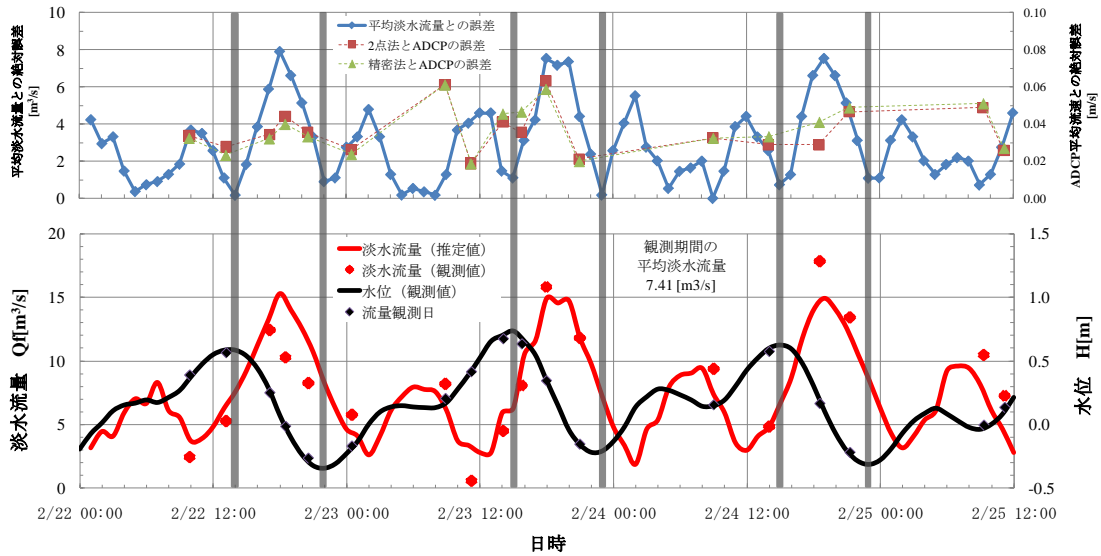


図-4.6 結氷時における淡水流量の経時変化と平均淡水流量との誤差

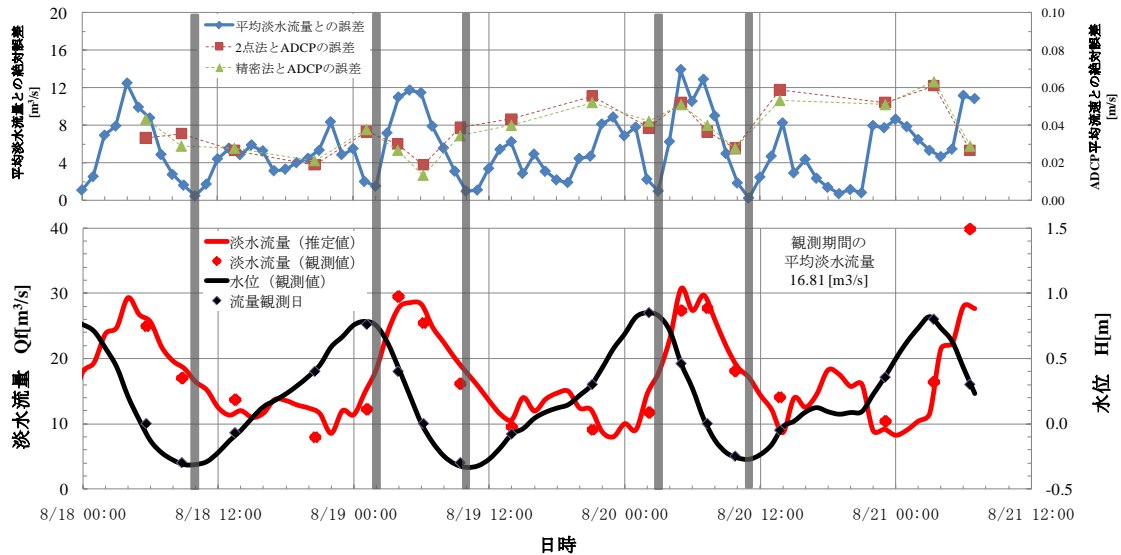


図-4.7 開氷時における淡水流量の経時変化と平均淡水流量との誤差

結氷時の図-4.6および開氷時の図-4.7において、水位が上昇すると淡水流量は小さくなり、水位が下降すると淡水流量が大きくなることから、観測期間中の平均淡水流量に対する推定流量の絶対誤差をみると、結氷時および開氷時ともに、図中の灰色で示した満潮時と干潮時において、その誤差は最小となる。また、ADCPの平均流速に対する2点法と精密法の平均流速の絶対誤差をみると、結氷時および開氷時ともに上げ潮と下げ潮において、その誤差は大きくなっている。

今回の観測結果より、結氷時および開氷時の感潮域におけるある期間の平均的な淡水流量を観測する場合

には、満潮時または干潮時に流量観測を実施することが望ましいことが推定された。

4.3 河川結氷時における新たな流量推定手法

寒冷地の河川は、冬期間の気温の低下によって結氷する。この結氷期間は、北海道では12月下旬から4月上旬の約100日である。河川結氷時の流量は、年間を通した水資源計画における正常流量（流水の正常な機能を維持するために必要な流量）を決定するための重要な基礎資料となる。また、今後、気候変動により冬期間の流量が

増減する場合には、今よりも増して河川結氷時の流量を精度よく推定することが望まれている。

しかし、河川結氷時は図-4.8に示すように河氷の影響によって開水時で得られる水位と流量の関係(HQ式)は成り立たず、一方で、河氷が流水へ与える影響については十分には解明されていない。このため、河川結氷時の流量を連続的に推定する手法は、河氷が流水へ与える影響を考慮していない従来の手法はあるものの推定精度が低く、現在、現場への適用には至っていない。

本節は、河川結氷時における流量推定手法の開発を目的として、河川結氷時において詳細な現地観測を実施し、これらの観測データを検討資料として、コスト低減の観点から、追加観測なしに現行の観測資料のみを用いる流量推定手法を開発した。さらに、本手法の現場への適用を念頭に置き、本手法と従来手法の推定流量の精度比較を行い、本手法の利点と欠点を明確にした。

4.3.1 現地観測

北海道北部に位置する天塩川(流路延長256km、流域面積5,590km²)を対象に、観測期間を2008年1月から3月として、円山(まるやま)観測所 KP30.00、天塩川の基準地点である誉平(ぼんびら)観測所 KP58.93、恩根内(おんねない)観測所 KP111.70の3地点で水位と流量の現地観測を実施した。観測期間中の3地点の結氷状況は、河川水面が全て河氷で覆われる完全結氷であった。なお、恩根内は、円山および誉平に比べて晶氷が多く滞留する地点である。本研究では、結氷河川における河氷を、硬い氷板(Ice Sheet)と水面および氷板下に存在する軟らかい晶氷(Frazil、Frazil Slush)に大別して検討しており、KPとはキロポストの略で河口からの距離 kmである。なお、晶氷とはシャーベット状の水であり、現場においてモロミと呼称されている。

現地観測から得られた観測流量 Q [m³/s]、流水面積 A_o [m²]、氷板面積 A_i [m²]、晶氷面積 A_f [m²]およびManningの粗度係数 n [s/m^{1/3}]を図-4.9に示す。図-4.9より、氷板面積 A_i は各地点で時間経過に伴い増加しているが、晶氷面積 A_f は地点により時間的な変動が異なる。Manningの粗度係数について、円山では0.012から0.038の範囲で推移しているのに対して、誉平では0.026から0.083の範囲で時間経過に伴い小さくなっている。恩根内は0.042から0.126の範囲であり、その変動は誉平同様に時間経過に伴い小さくなっているが、誉平に比べて上下に値が変動している。今回の詳細な現地観測結果から、地点によって結氷状

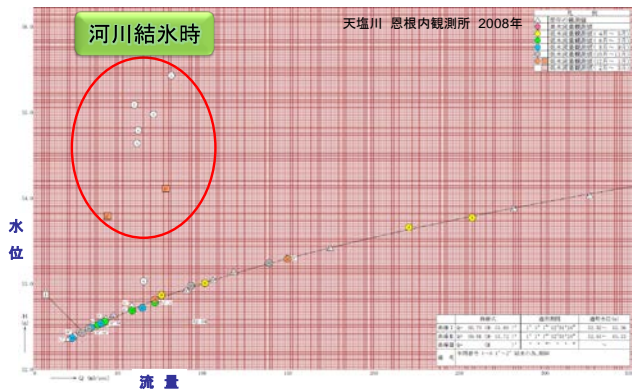


図-4.8 寒冷地河川における水位と流量の関係
(提供：北海道開発局)

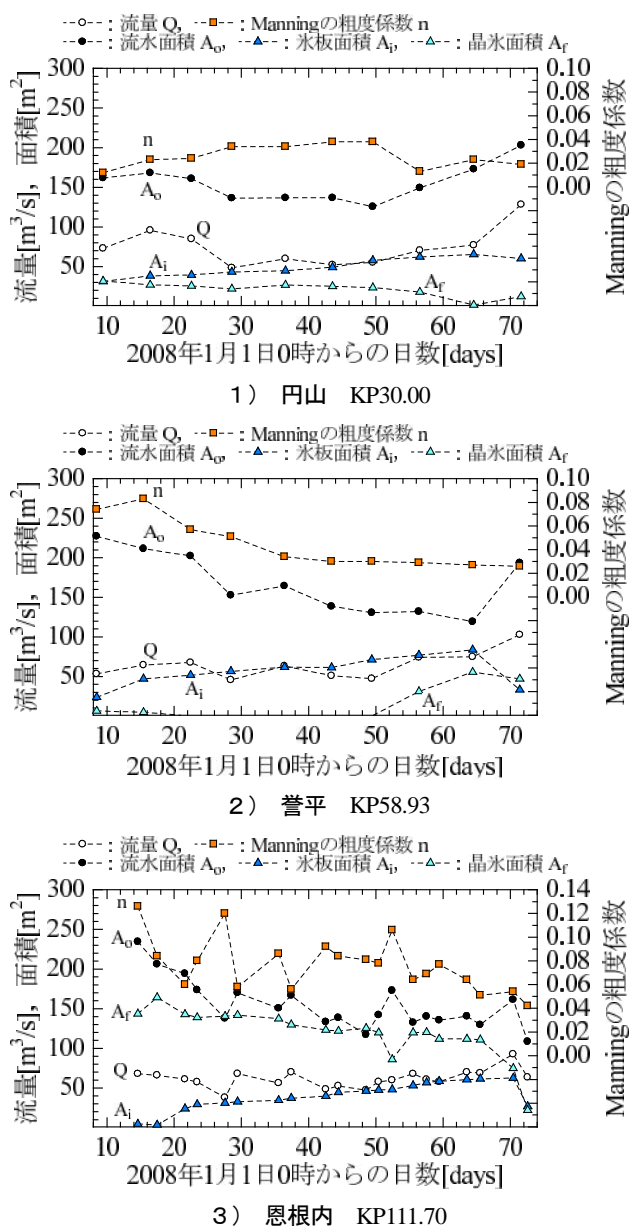


図-4.9 流量、流水面積、氷板面積、晶氷面積、Manningの粗度係数の経時変化

況および水理現象が異なることが分かる。

4.3.2 河川結氷時の流量推定式の開発

現地観測結果より、河川結氷時の流量は複合的な影響を受けて一義的に決まらないことを受けて、これらの影響を過不足なく考慮した河川結氷時の流量推定式を開発した。この式を式(4.3)に示す。この式の導出過程については既往研究³²⁾を参照して頂き、本論文では本推定式の具体的な意味について述べる。

$$Q = C B_w^{-\frac{1}{4}} A_o^{\frac{5}{4}} \quad (4.3)$$

流量 Q [m^3/s]、 C [$\text{m}^{3/4}/\text{s}$]、川幅 B_w [m]、流水面積 A_o [m^2]である。河川結氷時の横断概念図を図-4.10に示す。図中において、積雪面積 A_s [m^2]、水位 H [m]、喫水 d [m]である。

(1) C 値

C 値の物理的意味は、河氷底面が流水により融解されて、滑らかになることによる粗度の減少の程度を表している。なお、本推定式は、河床の変動は無視し河床の粗度は一定と考えて、その影響は C 値に織り込まれていると仮定している。 C 値は、小さいほど河氷の影響によって流れづらく流量は小さくなる。

(2) 川幅 B_w

本推定式の川幅 B_w は、定期流量観測で得られる流量測定図における区間距離の合計であり、横断面内において河川水が存在する左岸側の測線から右岸側の測線までの距離である。

(3) 流水面積 A_o

本推定式の流水面積 A_o は、流量測定図における区分断面面積の合計であり、河川水が流れる面積である。なお、晶氷面積 A_f [m^2]は、流量測定図のモロミ面積の合計であり、氷板面積 A_i [m^2]は、流量測定図の水面上氷面積と水面下氷面積の合計であり、積雪面積 A_s [m^2]は、流量測定図の雪面積の合計である。

4.3.3 推定流量の精度比較

河川結氷時の流量推定手法の現場への適用を念頭に、従来手法の ΔH を用いる手法、従来手法の K 値を用いる手法³³⁾、本手法の C 値を用いる手法の3つの手法において、現行の観測資料のみのデータを用いて流量を推定し、真値を本研究で得られた観測流量として、各手法における推定流量と観測流量の精度比較を行った。

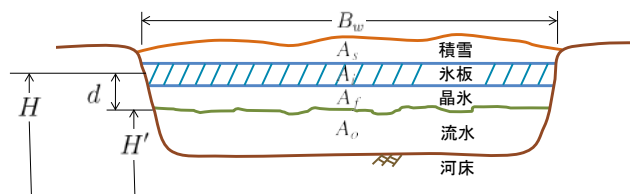


図-4.10 河川結氷時の横断概念図

流量推定に必要な入力データは、月3回の間隔で定期的実施されている流量観測から得られる流量、積雪面積、氷板面積、晶氷面積、川幅、水位とし、連続的な水位データは、国土交通省の水文水質データベースから得られる1時間毎のデータとした。

(1) 推定流量と観測流量

各地点において、各手法の推定流量、推定に用いた各値、観測流量を図-4.11、4.12、4.13に示す。推定に用いた観測データの観測日は、図中の四角黒塗りで示した。図-4.11、4.12、4.13より、観測期間中の B_w の経時変化は小さく、 d 、 ΔH 、 C 、 K の経時変化は各地点毎に異なる。また、3手法の推定流量は、観測流量の経時変化を定性的に良く再現していることが分かる。なお、流量の日変動は上流の岩尾内ダムの放流量の影響である。

推定流量の観測流量に対する誤差ヒストグラムを図-4.14に示す。誤差評価に用いた観測データは、本研究で得られた観測流量の全40データの内、定期的な流量観測で河川が結氷している期間内として36データとした。

図-4.14の $\pm 5\%$ の誤差内で見ると、 ΔH を用いる手法 (ΔH 法) は全36データの内33%の12データが入り、 K 値を用いる手法 (K 値法) は全36データの内36%の13データが入り、 C 値を用いる手法 (C 値法) は全36データの内36%の13データが入り、どの手法も同程度の精度で流量を推定している。

図-4.14の $\pm 10\%$ の誤差内で見ると、 ΔH 法は全36データの内58%の21データが入り、 K 値法は全36データの内50%の18データが入り、 C 値法は全36データの内58%の21データが入る。 ΔH 法と C 値法は、 K 値法と比べて推定精度が高い。

図-4.14の $\pm 20\%$ の誤差内で見ると、 ΔH 法は全36データの内81%の29データが入り、 K 値法は全36データの内81%の29データが入り、 C 値法は全36データの内92%の33データが入る。 C 値法は他の手法と比べて推定精度が高い。

本研究の新たな流量推定手法 (C 値法) は、上記の

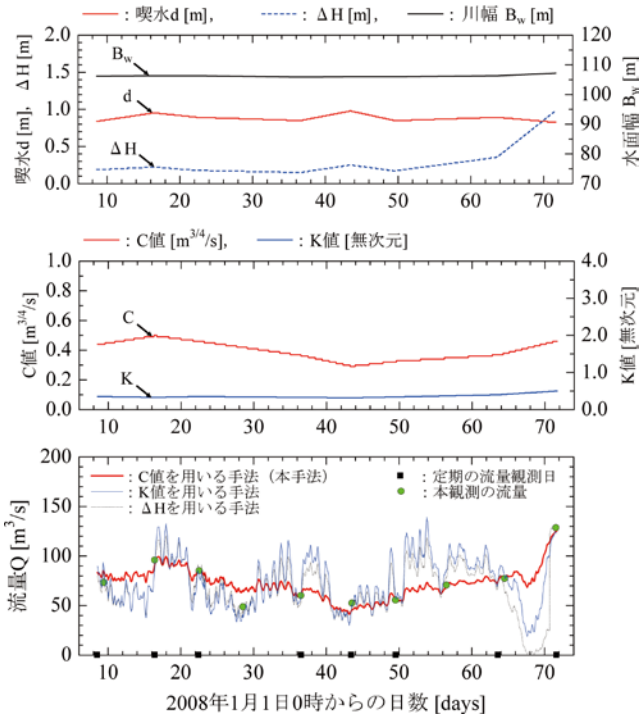


図-4.11 円山 (KP30.00) における
本手法と従来手法の推定流量と観測流量

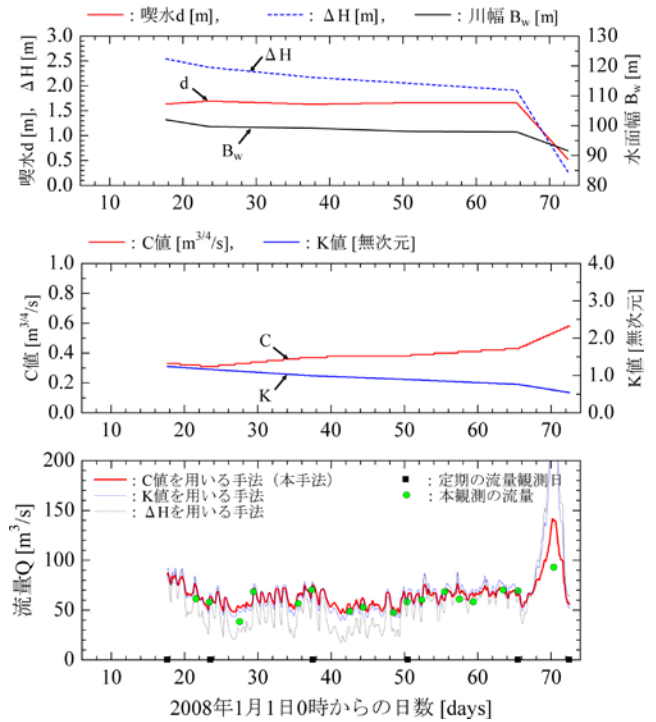


図-4.13 恩根内 (KP111.70) における
本手法と従来手法の推定流量と観測流量

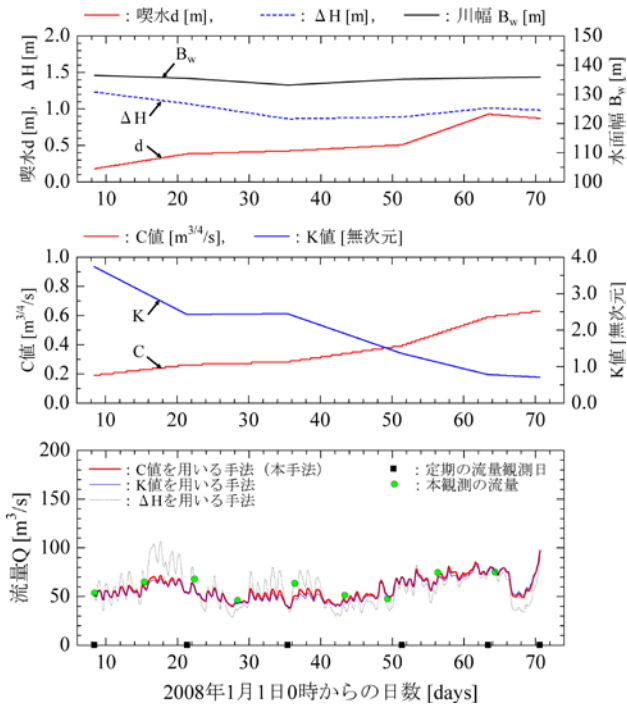


図-4.12 誉平 (KP58.93) における
本手法と従来手法の推定流量と観測流量

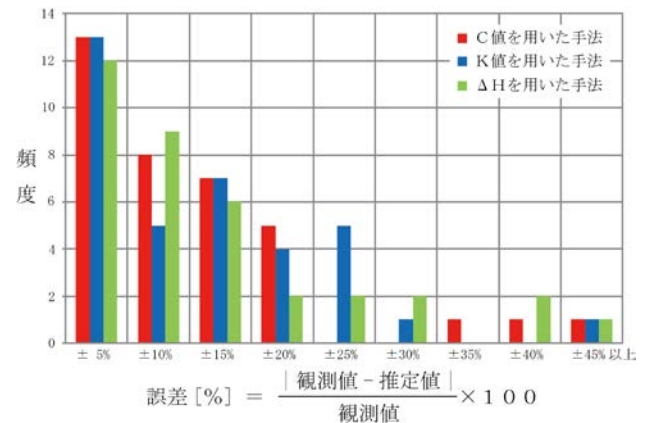


図-4.14 推定流量の誤差ヒストグラム(全36データ)

精度で観測流量を推定することが可能であり、今回の検討においては、本手法は従来手法よりも推定精度が高い。本研究の流量推定式の精度は、測定した連続水位データ、喫水 d の推定式、 HA 式の精度に影響を

受ける。また、 d 、 C 、 B_w の値を線形補完して与える期間において、河水量の変化、河氷の構成材料の変化、晶氷の滞留および掃流、水温変化が起こる場合には、推定流量はその影響を受ける。

本手法の利点として、例えば、 K 値は開水時の粗度係数、エネルギー勾配の関数であり、結氷以外の影響を受けるため、その変動要因を特定するのが困難であるが、本手法は結氷時のみの観測データを用いており、流量の推定手法が明確となっているため、推定流量と観測流量が一致しない場合においては、その原因についての考察が可能であることである。

本手法の欠点としては、河床変動を考慮していないため、その影響を見積れないこと、喫水 d を算出する際の積雪密度、氷板密度、晶氷密度は、本研究では定数として与えているが、地点および時間によって、その値が異なることが予見されるため、各値の与え方については検討が必要であることである。

本研究は、河川結氷時を対象としているため、開水時から結氷時の初期結氷期間 (Freeze-up period)、結氷時から解氷時の解氷期間 (Break-up period) の流量を推定するためには、さらに検討を要する。この課題の解決のためには、新たな現地観測および観測データの解析を行う必要がある。また、本検討は、1 河川、1 シーズンを対象としているため、本手法の汎用性、有効性、適用条件を明らかにするためには、本手法を広く他の現場へ適用し検討を重ねる必要がある。

4.4 まとめ

本研究により以下の成果が得られた。

結氷時と開水時の塩水遡上の現象を踏まえた流量観測手法については、結氷時および開水時のどちらの場合においても、2点法、精密法、ADCPによる流速測定の測定時間は、水文観測において示されている最小測定時間の20秒としてもその精度は確保される。感潮域における平均淡水流量を観測する場合には、満潮時または干潮時に流量観測を実施することが望ましいことが分かった。

河川結氷時の流量推定手法については、河川結氷時の流量を流水面積 A_0 、水面幅 B_w 、 C 値から連続的に推定する新たな手法を開発した。この手法は、開水時の HQ 式に依らず晶氷が滞留している地点においても適用可能であり、現行の観測資料のみで流量を推定することが可能である。今回の検討において、本手法は従来手法に比べて推定精度が高く、 $\pm 20\%$ 誤差内に全36データの内、92%が入ることを示した。

本手法は河川結氷時のみを対象としているものの、渇水等による被害のない持続的発展が可能な水活用社会の実現に向けた社会的ニーズに応えた技術であり、コスト低減を考慮して現行の観測資料のみで流量を推定することが可能であり、かつ従来手法と比べて推定精度が高いため、今後の汎用性が期待される。

5. 大規模農地から河川への環境負荷流出抑制技術の開発

5.1 研究目的

近年、大規模な酪農地帯を抱える釧路・根室地域では水質汚濁が顕在化しており、良好な河川・沿岸環境の保持・再生と農業の持続的な発展の両立が重要な課題となっている。

酪農由来の水質汚濁の防止策を、点源と面源に分けて簡単に考えると、次のようになる。点源については、家畜ふん尿を雨ざらしにしないなどの適切な管理が必要である。平成11年11月に「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」が施行されたこともあり、近年は点源の対策が進んだ。一方、面源については、草地に対して過剰な施肥を行わないこと、草地に施用した肥料を水系に流出させないことなどが考えられる。さらに、点源や面源から排水路に流入した肥料分や土粒子については、沈砂や浄化を目的とする池によって、下流への流出を抑制することが考えられる。水質保全に向けた取り組みは、このように圃場管理から排水路での対策までを総合的に行うことが必要である。

釧路・根室地域では、後述するように環境保全型かんがい排水事業などによる水質保全の取り組みが始まっている。しかし、水質保全のための各種施設の設計方法は確立されておらず、また効果についても不明な点が多い。このような背景から、本個別課題では、酪農に起因する水質負荷物質の流出抑制に向けた圃場管理技術や、水質保全対策技術の設計手法とその効果、さらにそれらの対策が河川や下流湖沼の水質環境に与える影響の評価に関する研究を行った。

5.2 調査フィールド

調査フィールドは、北海道東部に位置する風蓮湖の流

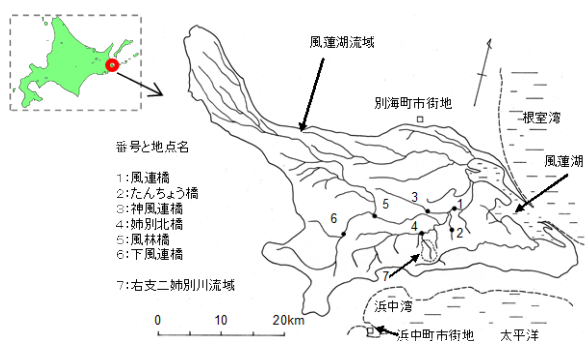


図-5.1 調査フィールド（風蓮湖流域）

域である（図-5.1）。風蓮湖への主な流入河川は、風蓮川・別当賀川・ヤウシュベツ川である。風蓮湖は、国内第14位の湖水面積（57.5km²）を持つ汽水湖であり、野付風蓮道立自然公園に含まれ、2005年にはラムサール条約登録湿地になった。この湖では、陸域からの過剰な栄養塩類等の流入による水質悪化が懸念されている³⁵⁾。

風蓮湖の流域の大部分は、根室市、浜中町、別海町に含まれる。この地域の酪農の特徴をこれらの市町の統計で見ると、平成17年現在で酪農家1戸当たりの草地面積は約70ha、同じく飼養頭数は約120頭である。

5.3. 水質負荷の流出抑制のための圃場管理方法の検討

5.3.1 目的

近年、この地域では、牧草地表面の浸入能が数mm/h程度と小さい圃場が多く見られる。これは、農業機械の大型化に伴う土壌の堅密化が一因であると考えられる。それゆえ傾斜草地では、降雨時に表面流出が発生し汚濁負荷が生じる。ふん尿スラリー散布に伴う圃場面からの肥料成分流出を抑制する対策として、散布したふん尿スラリーを速やかに土壌に浸入させることや、草地表面の浸入能を増すことで表面流出水を低減させることが考えられる。そこで、現地の傾斜草地において、ふん尿スラリーを表面散布する試験区と切り込みを入れてふん尿スラリーを表面散布する試験区を設け、人工的に散水する現地試験を実施した³⁶⁾。

5.3.2 方法

(1) 傾斜草地における試験区の設置

図-5.2に傾斜草地（傾斜約4.6度）に設けた試験区の概要を示す。試験区は地表面に手を加えない対照区と、地表面に切り込みを入れた処理区を1セットとし、3反復の実験を行った。各試験区では幅0.35m、長さ1.1m、深さ約0.1mのステンレス製の枠を打ち込み、試験区内外の土壌中および草地表面の水の移動を防いだ。また、傾斜方向下端の一辺は開放状態とし、表面流出水を採水

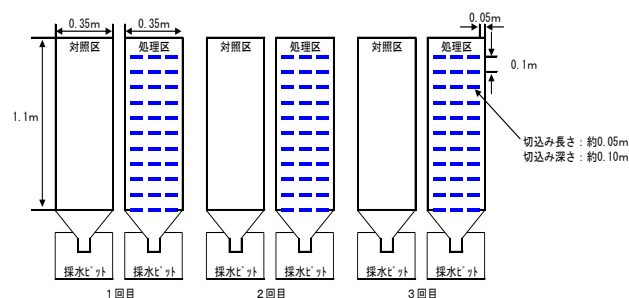


図-5.2 試験区の概要

するために、牧草のルートマットと土壌との境界付近に採水用の受け板を差し込んだ。

(2) 散水およびふん尿散布

ステンレス枠の直上には人工降雨装置を設置した。散水量は降雨量換算で約 47mm/h とした。この降雨量は、現地調査圃場近傍のアメダスで観測された過去 31 年間における日最大 1 時間降水量とほぼ同じ値である。

ふん尿の散布量は、各試験区とも 1,000g (約 26.0t/ha に相当) とした。この量は、過去に道東の K 牧場で実施したスラリー散布実験時に得られた値³⁾を参考とした。ふん尿スラリー散布後、散水開始までの静置日数は 2 日間とした。表面流出水は、試験開始直後から 4 時間後まで、1 時間ずつ継続して採取した。

5.3.3 結果および考察

図-5.3 に表面流出水量、浸入量および表面流出割合の平均値を示す。0~1 時間目については、t 検定の結果、処理区の表面流出量が対照区と比較して 5%水準で有意に少ない値となった。また、いずれの時間帯も、処理区の表面流出量が対照区と比較して少ない傾向を示した。すなわち、傾斜草地では草地表面に切り込みを入れることで、降雨をすみやかに土中へ浸入させ、表面流出を抑制できることが明らかとなった。

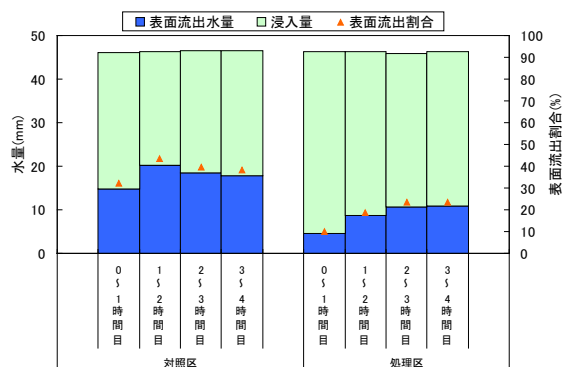


図-5.3 人工降雨の表面流出水量と浸入量の分配

表-5.1 に降雨開始から表面流出水が発生するまでの時間と降雨量を示す。切り込みを入れることで表面流出水発生開始までの時間が長くなった。表面流出水が発生するまでの降雨量から考えると、0~1 時間目の処理区の表面流出水量が有意に少ないのは、切り込み処理により降雨初期に土壌中へ浸入する水量が多くなったためである。図-5.3 の 1~2 時間目以降を見ると、表面流出は両区ともそれぞれほぼ一定となっており、表面流出割合は対照区では平均 41%、処理区では平均 22%であった。

表-5.1 表面流出水発生までの時間と降雨量

	降雨開始から表面流出発生までの時間(分)	表面流出が始まるまでの降雨量(mm)
対照区	13	10
処理区	32	25

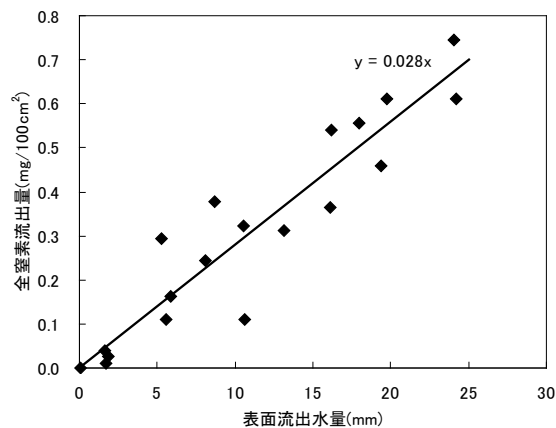


図-5.4 表面流出水量と全窒素流出量

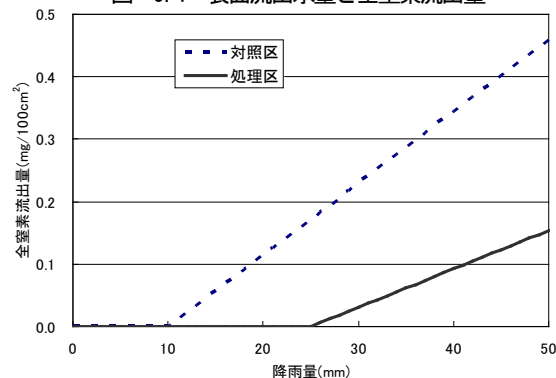


図-5.5 降雨量(R)と全窒素流出量(TN)の関係

図-5.4 に表面流出水量と全窒素流出量の関係を示す。この図から、表面流出水量の大小にかかわらず、全窒素濃度が一定とみなせることがわかる。

これらの結果より、今回の試験条件のような強い雨の場合の降雨量と全窒素流出量の関係は、図-5.5 のようにまとめられる。降雨が 10mm までは両区とも表面流出が発生しないため、全窒素流出量はゼロである。降雨が 10mm を超えると、対照区で表面流出水が発生し、25mm を超えると処理区でも発生が始まる。図-5.5 を用いることで、降雨量の大きさに応じて、切り込みの有無による全窒素流出量の違いを推定できる。

スラリーを地中に施用するためにはインジェクターと呼ばれる特殊なスラリー散布装置が必要となる。しかしながら、草地表面に切り込みを入れるだけであれば、写真-5.1 に示すような既存の装置(スパイクエアレータ)をトラクターで牽引することで対応できるため、取り組みやすい対策と考えられる。



写真-5.1 スパイクエアレーター

5.4 農業流域における水質保全対策手法の開発と機能評価³⁸⁾

5.4.1 目的

北海道東部で実施されている国営環境保全型かんがい排水事業では、農業生産性の向上と環境保全型農業を目指して、肥培灌漑施設と浄化型排水路の整備を進めている(図-5.6)。しかし、浄化型排水路として整備している水質浄化池や土砂緩止林の設計方法は確立されておらず、また効果についても不明な点が多い。計画・設計手法の高度化のためには適正な機能評価が必要となる。ここでは、まず土砂緩止林の水質浄化効果の実験結果を述べ、さらに肥培灌漑施設および浄化型排水路の整備が流域の水質に与える効果の調査結果を述べる。



図-5.6 環境保全型かんがい排水事業で整備される各種施設 (北海道開発局釧路開発建設部のホームページから引用)³⁴⁾

5.4.2 土砂緩止林の水質浄化効果³⁹⁾

(1) 調査方法

土砂緩止林は、排水路沿いに帯状に整備される林帯で、一般に緩衝林帯と呼称される施設である。排水路への土砂流入を防止するとともに、農地からの表面水の地下浸

透を促進し、排水路へ流入する汚濁負荷物質を捕捉・吸収するために設置されている。ここでは、土砂緩止林の機能調査として、ライシメータを設置して水質浄化機能を評価した。

緩衝林帯の水質浄化機能は、土壌の役割が重要とされていることから、事業実施地区の河畔において整備された緩衝林帯と同等の土壌条件とするため、整備された緩衝林帯に近い現地において、土壌を乱さないように緩衝林帯を模したライシメータを設置した(図-5.7)。調査は、実際の降雨時に草地表面を流下する汚濁水を想定し、河川水に牛ふん尿スラリーを溶かした人工濁水を濃度・流量を変化させて注水した。人工濁水は、T-N 濃度で 5mg/L、10mg/L、20mg/L、流量は 3~15L/min の範囲で 6 段階に設定し、合計 18 条件で注水した。T-N 濃度 20mg/L は、既往の文献における施肥直後および堆肥施用後の表面流出水養分の平均値を参考に決定した。また流量設定の 15L/min は、ライシメータ上部に延長 200m の草地があると仮定し、そこに 100mm/d 程度の降雨があった場合、草地での浸入等を考慮して緩衝林帯に流入する最大流量と想定した。

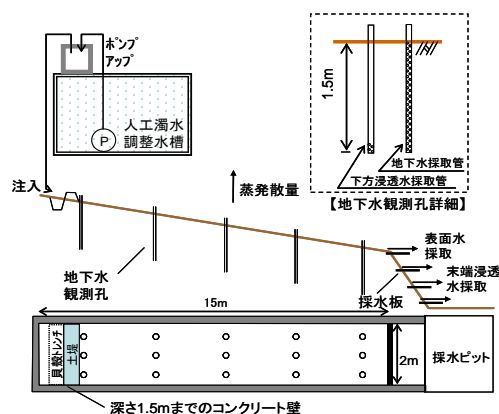
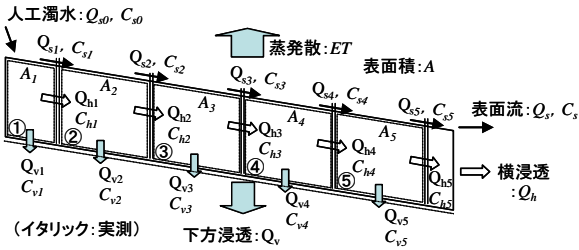


図-5.7 ライシメータの概要

本調査では物質収支を把握するため、注水流量、末端流出流量および蒸発散量の現地観測を行った(図-5.7)。また、人工濁水注水後の地下水、下方浸透水および末端流出水を採水して水質分析を行った。検討対象とした水質項目は全窒素(T-N)および全リン(T-P)である。現地観測および水質分析結果から、ライシメータ末端まで表面水が達していた場合、図-5.8 に示す方法によってライシメータ内の物質収支を求めた。

(2) 調査結果

末端流出負荷量及び下方浸透負荷量を、投入負荷量を 100 とした場合の割合に換算し、投入負荷割合から末端流出負荷割合と下方浸透負荷割合を差引いたものを削減



土壤が飽和状態で表面流が発生していると仮定
 $Q_{h1} = Q_{h2} = Q_{h3} = Q_{h4} = Q_{h5} = Q_h$ (単位面積当り)
 $Q_{v1} = Q_{v2} = Q_{v3} = Q_{v4} = Q_{v5} = Q_v$ (単位面積当り)
 $Q_v = Q_{s0} - Q_s - Q_h - ET$
 $Q_{s,i} = Q_{s,i-1} - Q_h - Q_v \cdot A_i - ET \cdot A_i$
 $C_{s,i} = C_{s0} - \frac{C_{s0} - C_s}{15} \times \text{上端からの距離}$

図-5.8 物質収支の計算方法

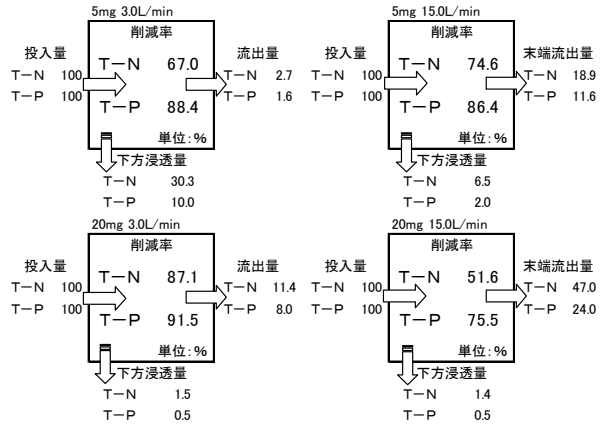


図-5.9 物質収支の事例

率と定義した。この結果を試験条件毎にフロー化して整理した。代表的な事例として4パターンをフローを図-5.9に示す。この結果から、投入負荷量と削減率の関係を投入濃度(T-N)別に整理した(図-5.10)。低流量(3L/min)の条件(図中各濃度の左側の点)で比較した場合、高濃度(20mg/L)の削減率が高くなっていた。低流量の場合は表面流出が末端まで達していないことから、高濃度の人工濁水が土中の浸透過程で土壌の吸着・濾過により大幅に濃度低下したためと考えられる。また、高濃度(20mg/L)の条件で比較した場合、負荷量が増加、すなわち流量が増加するに従って削減率が低くなる傾向があった。高流量の場合は高濃度の人工濁水が末端まで表面流出することから、削減率が低くなったと考えられる。

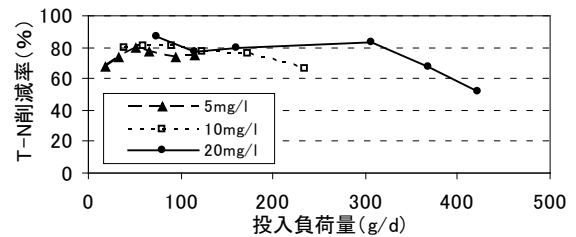


図-5.10 投入負荷量とT-N削減率

次に、今回の試験で最大負荷量を与えた条件(20mg/L・15L/min)における物質収支を図-5.8に基づき求め、上端からの距離毎での削減率を算出した。このとき、末端15m地点での表面水は流量が7.3L/min、T-N濃度が12.0mg/Lとなっており、7.5L/min・10mg/Lの注水試験における上端の条件に近似していた。そこで、20mg/L・15L/minの注水試験における15m地点以降の水質負荷の低下条件に7.5L/min・10mg/Lの注水試験の結果を適用させて30m地点までの削減率を推測した(図-5.11)。この結果から水質浄化に必要な緩衝林帯幅を決定できる。例えば、負荷削減目標を50%に設定した場合は10~15m程度、80%に設定した場合は20m程度となる。また、25m程度で削減率の変化はほとんどなくなることから、緩衝林帯の幅は最大で25m程度で十分と判断できる。

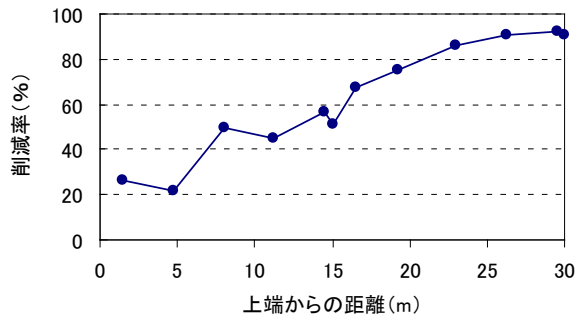


図-5.11 上端からの距離とT-N負荷削減率 (20mg/L・15L/min)

ており、これを緩衝林帯に流入する計画負荷量とすることが妥当といえる。すなわち、本検討によって、当該地域において緩衝林帯を整備するにあたり、目標とする削減率を設定すると、必要な緩衝林帯の幅を決定することが可能となった。

5.4.3 水質保全方策の流域水質環境への効果⁴⁰⁾

(1) 調査方法

ここでは、環境保全型かんがい排水事業で整備した肥培かんがい施設と浄化型排水路が流域の水質環境を改善する効果について総合的に検討した。

調査は、国営環境保全型かんがい排水事業はまなか地区の右支二姉別川流域(図-5.1参照)で行った。流域に、酪農家が多数存在する「点源流域」、酪農家が存在せ

ず草地と林地のみの「面源流域」、そして流域全体の「最下流域」を設定した(図-5.12)。事業では、肥培灌溉施設が2003年から2009年に、浄化型排水路(河道整備と附帯施設(土砂緩止林、遊水池等)は、おもに2005年度の冬期から2006年度にかけて整備された。

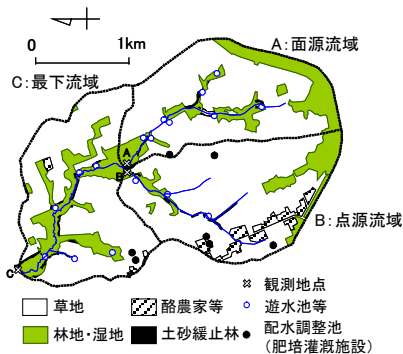


図-5.12 流域図

現地調査では、夏期平水時として2001~2009年の6~11月に月1~2回程度で採水を行った。また、2004~2009年の降雨出水時に自動採水器を用いて連続採水を行った。水質分析項目はT-N、T-P、SSである。さらに、2003年から本流域内に圃場を所有する農家に対して、窒素とリン酸の施肥量調査を実施した。この期間、飼養牛頭数は増加傾向にあった。

(2) 平水時の水質改善状況

2001~2009年の事業の進行状況、肥料施用量、平水時における排水路のT-N、T-P濃度の平均値を図-5.13に示す。水質濃度は事業の進行に伴い経年的に減少し、2006年以降は低濃度で安定した。とくに、点源流域において、ふん尿成分に多く含まれ表面流出によって流出しやすいT-P濃度が大きく減少したことは、肥培灌溉施設

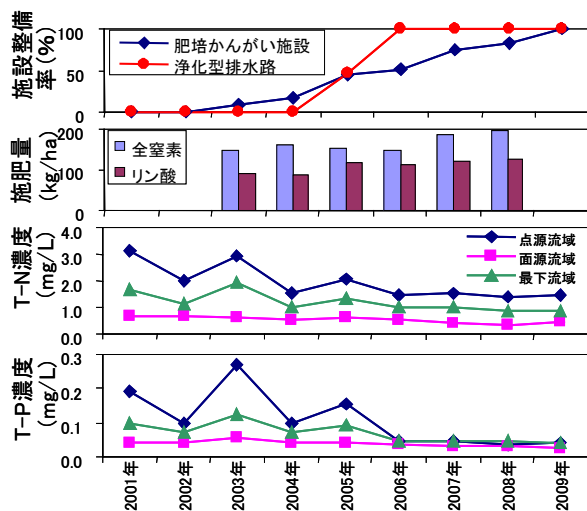


図-5.13 平水時の平均水質濃度の経年変化

の整備によって、ふん尿成分の直接的な河川への流出が抑制された効果と考えられる。また、流域内に酪農施設のない面源流域で、浄化型排水路の整備が完了した2007年以降にT-N濃度が低下した。圃場への施肥量は若干増加傾向にあることから、水質濃度が低下したということは土砂緩止林や遊水池等の附帯施設の効果が現れたものと考えられる。

(3) 降雨出水時の水質改善状況

2004年~2009年の最下流域における降雨出水時の比流量とT-N比負荷量の関係($l-q$ 式)を図-5.14に示す。事業の進捗と平水時水質の経年変化から、2004~2005年を事業効果発現前、2007~2009年を効果発現後と位置づけて整理した(2006年は河道整備中のため除外)。効果発現後は効果発現前より、同程度の流出状況のときに流出負荷量が減少していた。これは、平水時の水質濃度と同様に、事業による肥培灌溉施設や土砂緩止林、遊水池等の整備の効果によるものと考えられる。同様の結果がT-PとSSでも確認された。

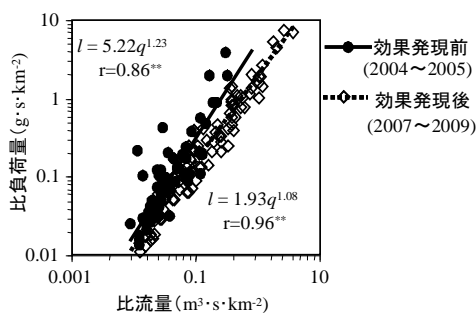


図-5.14 事業効果発現前後の $l-q$ 式

(4) 夏期降雨期の水質負荷削減量

図-5.14に示した効果発現前の $l-q$ 式に2004~2005年の比流量データを、効果発現後の $l-q$ 式に2007~2009年の比流量データを代入して流下比負荷量を算出し、期間降雨量との関係求めた(図-5.15)。算出期間は各年とも5~11月である。データは少ないが、高い相関関係

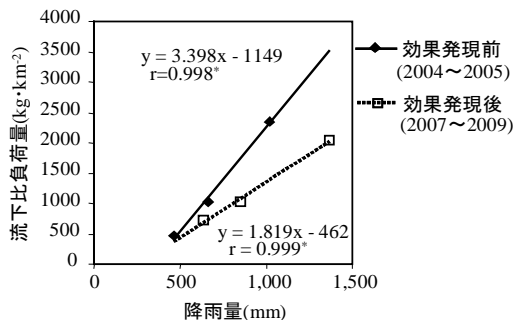


図-5.15 事業効果発現前後の降雨量と流下比負荷量の関係

を示しており、降雨量で流下比負荷量が推定可能と判断された。そこで、当該流域の5～11月の平均降雨量(860mm)を代入して事業効果発現前後の平均的な流下比負荷量を推定し、流下比負荷の減少割合を算出すると表-5.2の結果が得られた。これが当該流域における事業による夏期降雨期の負荷削減効果と考えることができる。

表-5.2 事業による夏期降雨期の負荷削減効果

	T-N(kg・km ⁻²)	T-P(kg・km ⁻²)	SS(t・km ⁻²)
効果発現前	1,776	260	37
効果発現後	1,104	142	24
減少割合(%)	38	45	36

減少割合(%) = (効果発現前 - 効果発現後) ÷ 効果発現前 × 100

5.4.4 対策の普及後を想定した場合の風蓮湖への流入負荷量

風蓮湖の流域では、国営環境保全型かんがい排水事業が完了1地区、実施中3地区、計画中2地区あり、流域の草地酪農地帯の大部分がこれら地区内に含まれる。事業地区により整備レベルは異なるものの、いずれも肥培灌漑施設と浄化型排水路が整備(計画地区においては計画)されており、風蓮湖の流域全体での負荷削減が期待されている。

図-5.1に番号を付して示した7地点における流量・水質調査結果と流域の土地利用などから土地利用ごとの面源負荷の原単位を推定し、これをもとに風蓮橋と右支二姉別川流域における土地利用別の発生負荷量の割合を推定した。その結果、風蓮橋と右支二姉別川流域では、推定される負荷の発生源の土地利用割合が類似のものとなった(図-5.16、17)。このことから、上記の国営環境保全型かんがい排水事業による各種整備が進むと、風蓮湖の流域全体でも5.4.3で示した右支二姉別川流域と同程度の水質負荷削減効果が出るのが予想される。

5.4.3で述べたように、水質保全対策が先行的に進んだ右支二姉別川流域において、栄養塩類(主として全窒素)の流出抑制対策(沈砂池、緩衝林帯整備)を行った時期の前後の $l-q$ 式($l=aq^n$ の形式)を比較すると、図-5.14に示されたように、 n は各年度であまり変化がないが、 a は整備前(2004～2005年)の5.22から整備後(2007～2009年)は1.93に低減している。

次節では、流出抑制対策が風蓮川全域で行われた場合を仮定して風蓮湖での水質の変化を検討するが、その水質解析に用いる風蓮湖への流入負荷量の条件として、 $l-q$ 式で表現される水質負荷流入量を低減させて与えることとした。

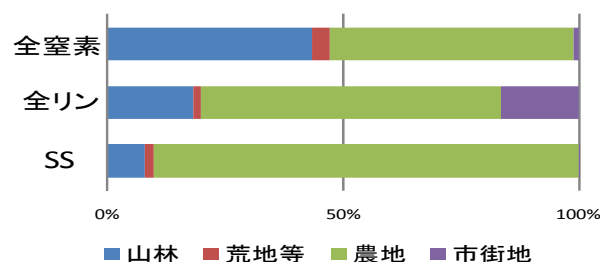


図-5.16 発生負荷量割合(風蓮橋)

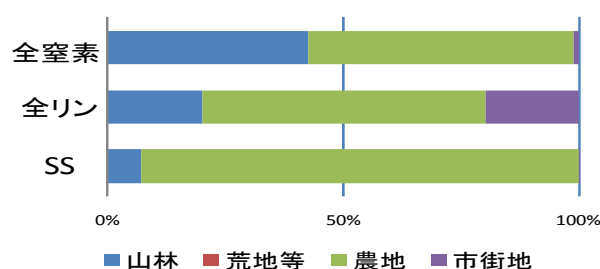


図-5.17 発生負荷量割合(右支二姉別川流域)

5.5 風蓮湖における水質負荷量低減効果の評価

5.5.1 目的

風蓮川の末端に位置する風蓮湖では、陸域からの過剰な栄養塩類等の流入による水質・底質の悪化が懸念されており³⁵⁾、流入負荷を抑制する対策が検討されている。今後、それらの施策を推進するためには、対象とする水域において現地観測を行い、現在生じている流動・水質変動機構を解明した上で、将来の事業効果を事前に予測し、評価しておく必要がある。

著者らは2006年より風蓮湖において水質・底質・流動等の現地観測を行い、それらを再現する数値モデルを構築した。また、現地において植物プランクトンの培養実験を行い、水域の基礎生産量を見積もるために必要な各種生物パラメーターを得た。これを用いて低次生態系計算を行い、モデルの再現性を向上させた。これにより、陸域からの汚濁負荷を低減する対策を講じた場合の水質変動を予測し、現況との比較から、対策の効果を評価した。以下、現地観測および数値計算に基づく検討の概要を示す。

5.5.2 現地観測

現地観測は2006、2007年の夏から秋にかけて風蓮湖において実施した。図-5.18に示す風蓮川からの陸水が風蓮湖を經由して根室湾に出る経路上に水質等の観測地点を設定し、流況、水質、底質、動植物プランクトン分

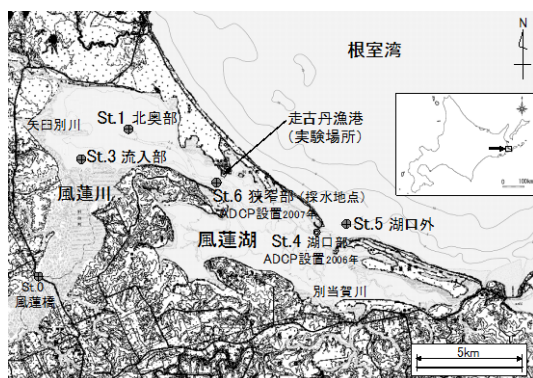


図-5.18 現況調査位置図

類、植物プランクトンの現地培養実験等を行った。2010年には融雪期に同様の調査を行った。紙面の都合上、観測結果の詳細は省略したので、別報^{41),42)}等を参照されたい。

観測結果では、風蓮湖の湖口付近は清浄な外海水との海水交換によって水質が良好に保たれるが、奥部では外海水の影響が届かず、陸域から流入する水質負荷によって水質悪化を引き起こしている可能性が示唆された。このような風蓮湖の水質の状況は、窒素・リン等の負荷の高い陸水と清浄な外海水との割合として、塩分を用いて概ね説明することが可能である。

一方、閉鎖性海域の水質変動を高度に再現・予測する手法として、3次元の密度流モデルに加え、低次生態系をモデル化した計算が広く用いられている。この中で使用される生物パラメータは実際に現地に生息している低温域を好む生物に合わせて適切に設定し直す必要がある。しかし、パラメータ数が多い上にその検証は困難であり、一般に使用されている値をそのまま用いる例が多い。著者らは、生態系の中で基礎生産を担っている植物プランクトンの培養実験を現地において行い、細胞内に取り込んだ安定同位体¹³Cの分析結果からその成長式を算定した。これを用いて計算したところ、従来より良好な再現結果を得た。

5.5.3 水質負荷低減対策の効果予測の方法

陸水と外海水の混合に加え、湖内での植物プランクトンによる消費等を考慮した計算を行い、風蓮湖の水質の現況再現、出水時の状況予測、対策を講じた場合の効果予測を行った。風蓮湖を水平方向50m×50m、鉛直方向1mの格子に切り、マルチレベルモデルで現象を再現した。基本方程式として、N.S.の運動方程式は水平方向のみを陽解法で解き、鉛直方向は静水圧近似とし、鉛直流速は連続式より求めた。潮位は根室港における推算値を沖側の開境界に逐次入力した。水温、塩分は、それぞれ

の移流拡散式で解いた。表層熱収支は各ステップ毎に算出し、その効果を取り入れた。あらかじめ再現計算開始日時の予備計算を実施し、安定した時点における水温、塩分、流速等を本計算の初期値として用いた。計算方法の詳細は山本ら^{41),42),43),44)}等を参照されたい。

計算は表-5.3のように①平水時の現況を現地観測結果に基づいて再現したもの(平水時現況再現)、②平水時の現況において流量を出水時のものに変更したもの(出水時対策なし)、③出水時において栄養塩類等の負荷量を低減する対策を行ったもの(出水時対策あり)、の3ケースについて実施した。平水時現況再現および出水時の流量を図-5.19に示す。

表-5.3 計算ケース(平水時と出水時)

計算ケース	対象期間	最大流量	負荷量低減率
①平水時現況再現	2007.09.18~ 09.22	32.41m ³ /s	1.0
②出水時対策なし	2007.09.07~ 09.15	132.91m ³ /s	1.0
③出水時対策あり			0.5

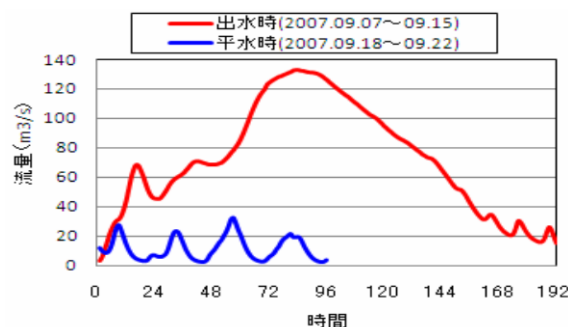


図-5.19 河川流量変化図

ケース①では、2007年9月20日に水質調査と現地培養実験を行ったため、それに合わせて再現計算期間をその前後の2007年9月18日正午から9月22日正午まで(4日間)とした。各種栄養塩負荷はその時の観測値を用いた。ケース②③では、出水時として①と同時期で降水量が多い9月7日正午から9月15日正午までの8日間の河川流量を使用した。河川からの流入負荷量は、前章の $l-q$ 式にこれらの流量を代入して算出し、 $l-q$ 式の無い水質項目については、観測結果の統計量から得られる比率を用いて配分し、上流側の境界に与えた。ケース③では、出水時の河川流量を用いたまま、河川からの流入負荷量を低減させることとした。5.4.3および5.4.4で述べた整備前後の $l-q$ 式の切片の低下量から0.5を用いた。

5.5.4 水質負荷低減対策の効果予測

平水時における風蓮湖内の塩分と硝酸態窒素の平面分布(表層)の現況再現結果(ケース①)を図-5.20と図-5.21に示す。塩分の高い風蓮湖の湖口付近は清浄な外海水との海水交換によって硝酸態窒素は低い値を示し、塩分の低い奥部では外海水の影響が届かず、硝酸態窒素が高い値を示している。塩分と硝酸態窒素は負の相関が高く、このような風蓮湖の水質の状況は窒素・リン等の負荷の高い陸水と清浄な外海水との割合として概ね説明することが可能である。

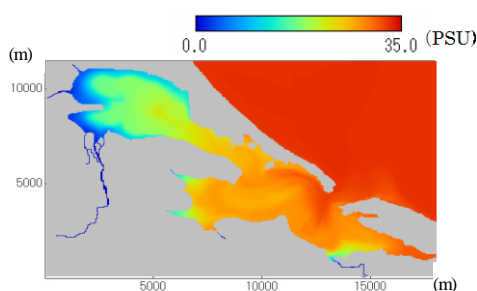


図-5.20 塩分濃度平面分布図(平水時現況再現)
(計算開始 24 時間後 9 月 19 日 11:00)

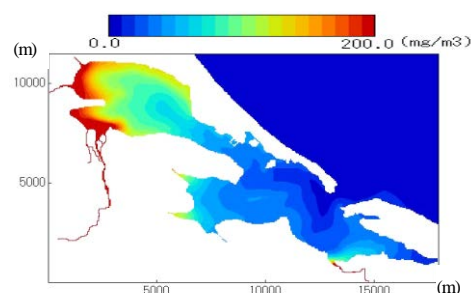
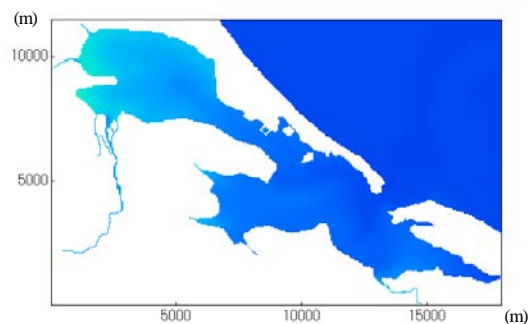


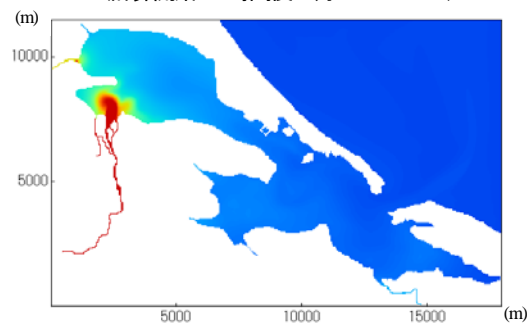
図-5.21 NO₃濃度平面分布図(平水時現況再現)
(計算開始 24 時間後 9 月 19 日 11:00)

次に、風蓮湖内の COD について、現況の再現(ケース①)、および出水時における対策の有無(ケース②③)の計算結果を比較する。図-5.22 に平面分布(表層)、図-5.23 には湖内各地点の経時変化を示す。①と②を比較すると、風蓮湖の水質の悪化傾向は出水時に見られ、河川流入付近の St.3 ではその影響を特に強く受け、当水域の環境基準値 5mg/l を大幅に上回っていることがわかる。また、図-5.23 において、St.3 では河川流量の経時変化と同様の変動傾向を示しているのに対し、その他の地点は時間的に周期的な変動を示し、河川流よりも潮流の影響を強く受けていることがわかる。

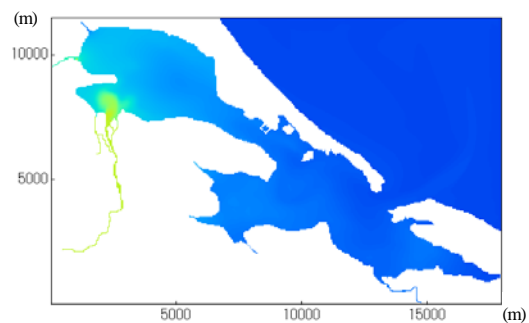
一方、②と③を比較すると、特に St.3 において COD の大幅な低下が見られ、また、出水の最大流量時にその差が最大となっており、対策の効果が顕著に現れている



① 平水時現況再現
(計算開始 24 時間後 9 月 19 日 11:00)



② 出水時(最大流量時)・対策なし
(計算開始 84 時間後 9 月 10 日 23:00)



③ 出水時(最大流量時)・対策あり
(計算開始 84 時間後 9 月 10 日 23:00)



図-5.22 COD 平面分布図

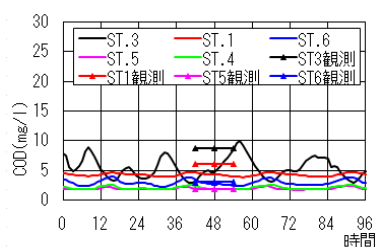
ことがわかる。

5.6 まとめ

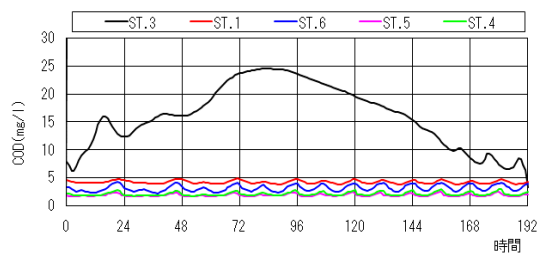
第5章では、風蓮湖の流域をフィールドとする現地調査や室内試験、水質解析などの結果を述べた。その内容は、次のようにまとめられる。

牧草地の圃場管理を想定した現地試験では、草地表面に切り込みを入れることで降雨時の水質負荷物質の表面流出を抑制できることが示唆された。

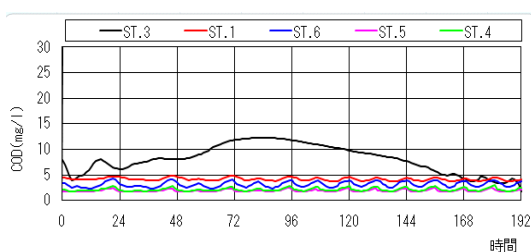
水質の保全を目的として酪農小流域において整備される各種施設の効果については、まず、水質浄化池の効果



① 平水時(H19.09.18~H19.09.22)



② 出水時対策なし(H19.09.07~H19.09.15)



③ 出水時対策あり(H19.09.07~H19.09.15)

図-5.23 COD 経時変化

の定量的評価結果を定量的に示した。さらに新規に造成される緩衝帯の水質浄化効果に関するライシメータ試験の結果から浄化機能と林帯幅の関係を示した。

農業農村整備事業による水質保全対策が流域の水質に与える影響については、次のような検討結果を述べた。水質保全対策が実施された小流域(7.2km²)では、平成13年から平成20年にかけて経年的に水質汚濁が低下した。この小流域と風蓮川流域で土地利用や流出負荷量を解析したところ、小流域と同様の水質保全対策が風蓮川流域全体の草地で実施された場合には、風蓮湖への水質負荷物質の流入量が大きく低減すると想定できた。この想定を用いて、水質保全対策が進捗した場合の風蓮湖の水質を予測したところ、河川流入部付近の降雨流出時および融雪期の水質が大幅に低下するというシミュレーション結果が得られた。このシミュレーションにあたっては、水理学的モデルの構築や低次生態系モデルのパラメータ設定に現地観測や実験データでの検証をあわせて行った。今後も現地データを多く取得して、精度向上を図っていく必要がある。

6. 河道形成機構の解明と流木による橋梁閉鎖対策等への応用に関する研究

6.1 研究目的

河川区域には多くの樹木が存在している。これら樹木は、これまで洪水の流下を阻害し、流木化して洪水被害を拡大させるなどとして治水上問題視されてきたが、一方で近年では生態的機能、景観的機能の有効性からその存在意義が見直されている。また、河畔林による流木の捕捉機能や、超過洪水対応としての水防林など、治水上の機能の有効性も示唆されている⁴⁵⁾。

洪水時の流木被害については、河道内構造物に堆積することにより河道を閉塞させ、流下能力の低減を招くことなどがあげられる。図-6.1は胆振日高地方で2003年8月に起きた洪水で二風谷ダムに流入し集積した流木の様子である。この時発生した流木によりダム上流域では多くの橋梁が被災した⁴⁶⁾。図-6.2は2003年8月洪水後の沙流川の支川額平川の貫気別橋の被災状況である。河畔林の機能を活用しながら、上記の災害に対処するための流木管理を行うには、まず洪水時の流木の挙動や構造物周辺および砂州・高水敷上への流木堆積状況を把握することが重要である。本研究では、橋脚への流木集積機構を解明することを目的に、橋脚に監視カメラを設置し、出水時の橋脚周辺への流木集積状況の調査を行った。また、流木を効率よく処理するためには、堆積箇所を特定することが必要である。そこで、砂州や高水敷上に堆積した流木に着目し、流木を捕捉しやすい河道形状や植生分布について検討した。

さらに、流木災害と水災害に対する効率的対策を考慮する際には、流木の挙動に大きく影響を与える河道の成り立ちについて、その形成機構を把握する必要がある。たとえば、近年多発する局地的な豪雨により日本の各地の谷底平地内を流れる河川で狭い谷底面全体を水没させるような状況が各地で起きている。谷底平地を流れる中小河川の多くは、治水計画が大河川と比較して遅れている。そのため治水対策、減災対策（土地利用対策など）を効果的に推進するためにも、地形形成のプロセスやメカニズムを明確にすることが求められる。またこれに関連し、流木の発生と堆積に大きく影響を与える河道内の樹林化については、水みちと砂州や高水敷との比高差が生じることにより進行することが示されているが⁴⁵⁾、その要因となる水みちの形成過程そのものに関



図-6.1 2003年8月沙流川出水時の二風谷ダム



図-6.2 2003年8月沙流川出水時における額平川貫気別橋

しては未解明な部分が多い。このため洪水ピークからの減水期のハイドログラフを水理実験により複数パターンで模擬することで、水みちの固定化が進行する状況の把握を試みた。

以上より、本研究の目的を以下にまとめる。

(1) 流木の発生・流下・堆積のメカニズムを把握し、河道内構造物のあり方や堆積防止策などの河道内構造物の管理手法を検討する。また、河畔林の流失防止・河畔林による流木捕捉など、流木災害対策のための河畔林のあり方について検討する。特に、積雪寒冷地における河畔林立地の特性を考慮して、河畔林の流木化の機構解明と防止策案の検討を行う。以上を踏まえて、現地への適用性を検討する。

(2) 既往の土砂水理学の知見を用いて、地形的成因や潜在的な水害の危険性などの研究を行い、現在の地形の成り立ちと洪水時におけるその地形の特性を把握する手法を検討する。

6.2 橋梁周辺における流木の挙動監視調査

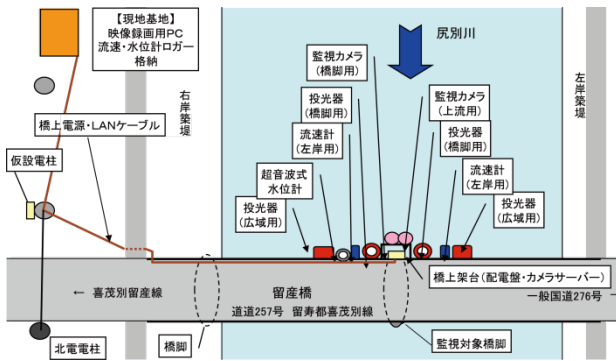


図 - 6.3 尻別川留産橋におけるインターネット型 常時観測システムの機器設置状況

6.2.1 調査概要

観測地点は、中小規模河川で橋脚が河道中央部に位置しており、過去の洪水で流木集積の実績がある箇所とした。調査はH17～H19 鵜川水系パンケシュル川更生橋、H19～H21 沙流川平和橋、H21～H22 尻別川留産橋、H22 額平川のアブシトエナイ橋で行った。現地観測機器は、パンケシュル川更生橋、沙流川平和橋、尻別川留産橋の観測において、図-6.3 に示す現地観測基地（監視カメラ、投光器、流速計、水位計）と遠隔監視用の札幌基地を、インターネットを介してネットワーク化している。アブシトエナイ橋に関しては商用電源の確保が困難であるなど、同システムの構築が困難であったため、上述のシステムを簡略化した可搬型の観測システムを新たに構築した。また、後述する2010年8月の出水に関しては、可搬型システムの準備期間であったため、便宜的に民生品のビデオカメラを利用した機器配置で観測を行った。

6.2.2 調査結果

出水時の流木流下状況については、監視カメラで撮影された画像から目視により10分間ごとの流木本数を観測した。

H19年9月出水の沙流川平和橋における流木流下本数と水位の経時変化を図-6.4に示す。当地点の水位はH19年9月16日9時にピークを示したが、流木流下本数のピークはその前のH19年9月16日5時であることがわかる。これは、他の調査でも同様の傾向を示している⁴⁷⁾。H19年5月のパンケシュル川更生橋の融雪出水時においても、水位がH19年5月2日16時にピークを示しているが、流木流下本数はその前のH19年5月2日13時に最も多くなっている(図-6.5)。

H21年度に関しては、平和橋観測地点において7

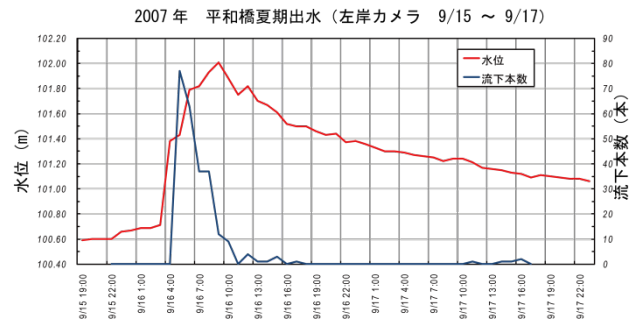


図 - 6.4 2007年9月出水時の平和橋における 水位変化及び流木流下数変化

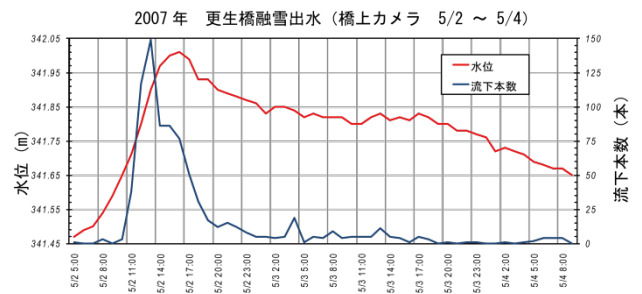


図 - 6.5 2007年5月出水時の更生橋における 水位変化及び流木流下数変化

表-6.1 2009年7月出水時の平和橋観測地点における橋脚への流木集積状況(単位:m)

No.	位置	流木長	胸高周囲長	樹径	備考
①	ピア前面水平	12.2	1.20	0.45	根無倒木
②	ピア左岸側	4.7	0.33	0.11	根無倒木
③	ピア左岸側	3.5	0.12	0.04	根無倒木
④	ピア右岸側	1.3	-	0.04	根無倒木
⑤	ピア右岸側	1.6	-	0.10	根付き
⑥	ピア右岸側	1.4	-	0.02	折枝

月20日0時前後をピークとする出水が確認されている。この際、対象橋梁で若干の流木の集積があったことが確認されたことから、現地での流木集積状況の事後調査を8月10日に実施した(表-6.1)。出水時の流木流下数については、監視カメラで撮影された画像から目視により流下する流木の本数、長さ、位置などを計測した。H21年7月出水の沙流川平和橋における流木流下本数と水位の経時変化を図-6.6に示す。当地点の水位はH21年7月20日0時前後にピークを示したが、流木流下本数のピークはその数時間前に到達していることがわかる。このことから、流木は洪水初期に最も多く発生する傾向があると考えられる。これらの流木は、河岸周辺に堆積していたものが水位上昇に伴って洪水初期に再移動したものと考えられる。

H22年度に関して、図-6.7と図-6.8は、留産橋

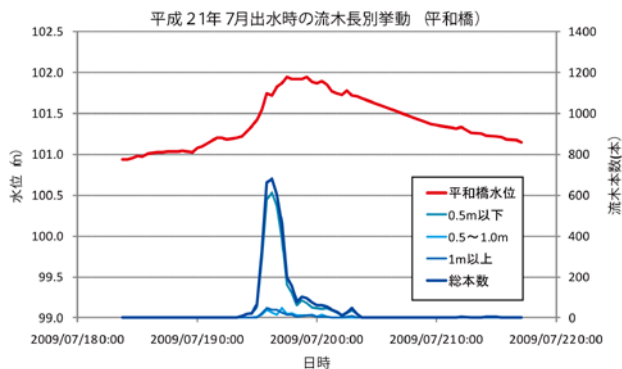


図 - 6.6 2009年7月出水時の平和橋観測地点における水位変化及び流木流下数変化

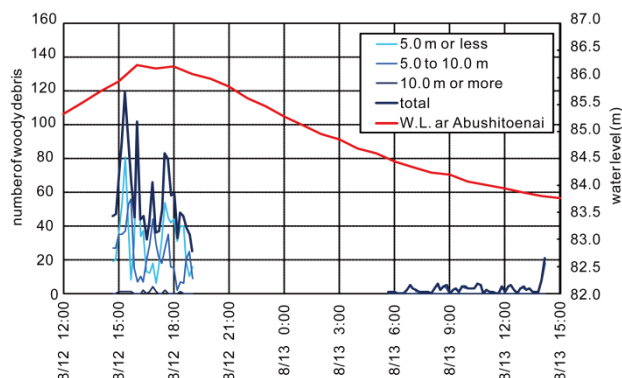


図 - 6.9 2010年8月出水時のアブシトエナイ橋観測地点における水位変化及び流木流下数変化

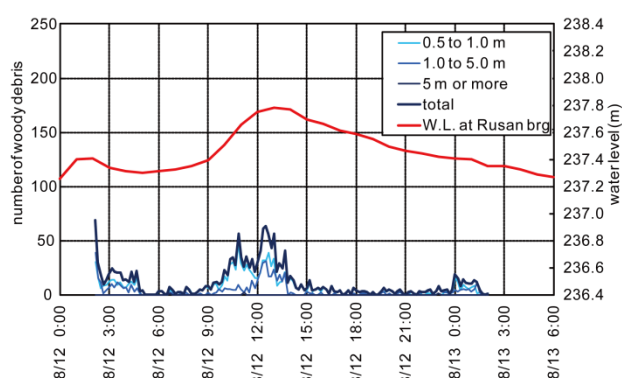


図 - 6.7 2010年8月出水時の留産橋観測地点における水位変化及び流木流下数変化

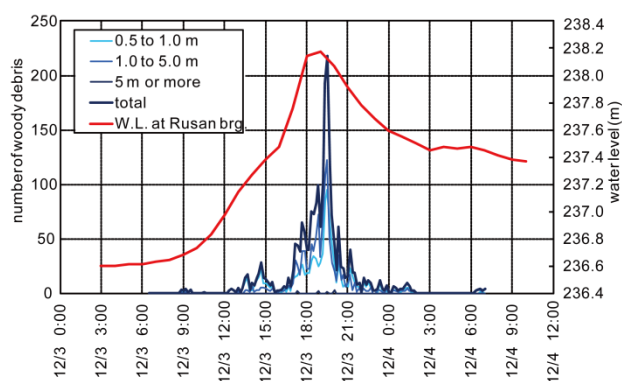


図 - 6.8 2010年12月出水時の留産橋観測地点における水位変化及び流木流下数変化

観測地点での8月と12月の観測時における流木流下数の時間帯による変化を示したものの、図 - 6.9 はアブシトエナイ橋観測地点での8月の観測時における流木流下数変化を示したものである。図 - 6.9 に関してはハンドィのビデオカメラによる緊急の撮影のため昼間部の結果のみ示している。図 - 6.7 と図 - 6.9 の結果に関しては、水位のピークが到達する以

前に流木流下数のピークが生じていることが確認された。また、図 - 6.8 では流下数のピークは水位のピークの到達にわずかに遅れるが、水位ピーク到達以前に、期間中の流木数の大半が既に流下しているという点ではこれまでの結果と同様の傾向を示している。しかしながら、例えば図 - 6.7 において、0.5-1.0mの長さを有する流木が先に流下数ピークを迎え、1.0-5.0mの長さを有する流木のピークがその後を追うといった傾向が見られるのに対し、図 - 6.8 では12月3日18:00から21:00の間にどちらの長さの流木も急激に最大値を迎えるといった相違が見られる。河道内流木の再移動に関しては、その移動限界が流木の直径と水深に依存すると考えられ⁴⁸⁾、移動限界の低い小型の流木が水位の上昇に応じて先行して移動すると考えられる。一方、図 - 6.8 内のピーク時間帯の傾向はそれとは異なり、洪水履歴の影響等も考慮の必要があると考えられる⁴⁹⁾。

6.3 流木の堆積と河道形状に関する模型実験

6.3.1 河畔林植生密度と流木捕捉の関連に対する検討

(1) 実験概要

流木流下実験は、既往実験である砂州形成実験で形成した河道(固定化)を使用し、河畔林の樹林密度の違いによる流木堆積を比較する目的で行った。砂州形成実験は河道内の流路形成における砂州の影響を把握することを目的に行われた実験であり、水路スケールに応じた単列砂州の形成に成功している。

実験水路は延長50m、水路幅0.9mの直線水路である。砂州形成実験と同様に時間～流量～バルブの関係から、スルースバルブを開閉し1分間隔で流量制御を行った。砂州形成実験で形成された河床に河畔

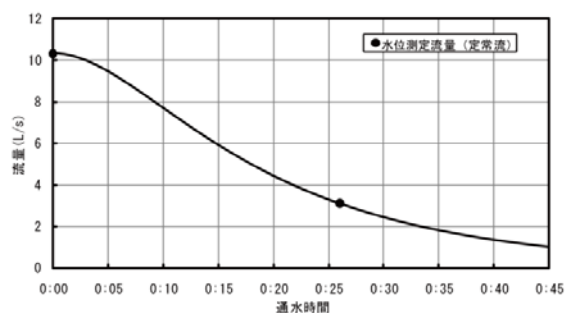


図 - 6.10 実験時減水期ハイドログラフ

林を設置し流木実験河道を製作した。

流木長や河畔林密度は、平成 15 年 8 月台風 10 号災害の厚別川流域での調査結果から、比重が約 0.9 の材料を使用し、長さ 40 mm、 ϕ 1 mm に整形したものをを用いた。調査河川の河道形状および実験水路形状から縮尺を 1/125 と想定した。河畔林密度は調査結果から 1 本/8.3m² であり、流木長を勘案し樹林間隔を 24mm とした。樹林間隔 24mm を密な河畔林とし、流木長より広い樹林間隔 48mm を疎な河畔林、および河畔林がない場合の 3 ケースで実験を行った。河畔林は太さ 2mm の針金により必要量製作し固化した河床に穴を開け設置した。併せて、流木判読の視認性を高くするため河床を墨汁により塗装した。流木実験ハイドロは、先行する砂州形成実験で用いた減水期ハイドロ Case 1 (図 - 6.10) を適用した。砂州や河畔林での流木が堆積する過程を把握するため、60 本/分の間隔で流木を流芯から投入し、ビデオカメラを用いて対象とする砂州 1 波長で流木流下状況を撮影した。

(2) 実験結果

図 - 6.11 に流木流下実験の流木堆積状況を示す。図の上から河畔林なし、河畔林有(密)、河畔林有(粗)の流木の集積状況を示す。流下本数に占める堆積本数の割合は以下の通りである。

- ・河畔林なし : 6 / 2700 本 (0.2%)
- ・河畔林 (密) : 342 / 2700 本 (12.7%)
- ・河畔林 (疎) : 28 / 2700 本 (1.0%)

以上の結果より、河畔林による流木補足効果が、密度に応じて高くなる傾向が定量的に示された。

6.3.2 河道内の流れ場の構造と流木集積機構の関連に対する検討

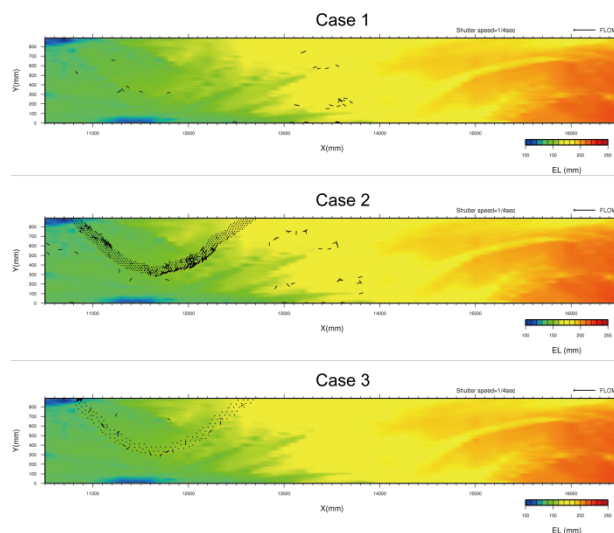


図 - 6.11 実験結果：河畔林植生密度の違いによる流木捕捉状況の差 (上：河畔林なし、中：河畔林植生密、下：河畔林植生粗)

(1) 実験概要

流木の輸送状況は流れの構造と密接に関連していることが推測される。ここでは面的計測により定量的に得られた流れ場の情報と流木の集積状況を比較し、両者の関連性について検討を行った。

実験水路は可傾斜台上に設置された、長さ 30m、幅 1m の直線水路である。まず準備として河床に粒径 0.76mm の砂を敷き詰めて蛇行した低水路を事前に形成した。この水路に低水路満杯流量での予備通水 (単列砂州の形成を目的とし既往実験の値を参照し、直線部勾配 1/150 に設定) によって河床に砂州を形成させた。この河床表面をセメントにより硬化させ固定床とし、本実験を行った。低水路からの初期河岸高は 15mm、低水路幅は 0.35m とし、平面形状に関しては波長 6m、振幅 0.5m の sin-curve としている。また、いくつかのケースにおいて、高水敷の低水路前縁に直径 1mm の模擬植生を 24mm 間隔で千鳥状に設置した (表-6.2)。植生帯の横断方向幅は 0.16m 程度である。この際ケースごとに植生の設置位置を変えており、前縁全体にわたり植生を設置するケース (case2-1、case2-2)、上流側のみ設置するケース (case3-1)、下流側のみ設置するケース (case4-1) としている。計測範囲は下流端から 12.7m - 15.7m の半波長の範囲としている。流況および流木流下状況の解析には PTV⁵⁰⁾を用いた。水面流況を代表させる追跡粒子としては直径 3mm の発泡スチロール球を用い、流木の模型としては直径 1mm の木材を 40mm の長さで切り揃えたものを用いた。粒子と流木模型

表-6.2 実験ケース

Case No.	Vegetation	Discharge (l/s)
1-1	Non	2.50
1-2	Non	1.88
1-3	Non	1.33
2-1	Full	2.50
2-2	Full	1.88
3-1	Upper-half	2.50
4-1	Lower-half	2.50

表-6.3 植生設置位置の違いによる流木捕捉状況

Case	Catchment reg.		Outflow
	Vegetated	Non-vege.	
1-1	-	70	930
2-1	20	18	962
3-1	19	40	932
4-1	63	68	869

は観測区間の直上流からランダムに散布した。

実験は計 16 ケースを行った。ここでは Froude 数の大きいケース (Fr: 約 0.8、直線水路全体の傾き: 1/230) の水理量等の設定を表-6.2 に示す。流量が最小のときに低水路満杯となり、最大の時に高水敷上に 10mm 程度越流する。

PTV 解析には市販のアプリケーション (Ditect 社製、Dipp-Flow) を用いており、解析アルゴリズムとしては 2 値化相関解析を用いた。

(2) 実験結果

流木の補足状況、流木の移動時の濃度 (本論文では流木の単位面積あたりの本数)、平均流速の分布から得られた渦度の分布を、それぞれ表-6.3、図 - 6.12、図 - 6.13 に示す。

図 - 6.12 と図 - 6.13 の比較から、流木の濃度が高い領域は、渦度の大きい領域と排他的に存在しており、流木はせん断の強い領域を避けるように流路内で集中化していることが推測される。実際に、上流側の植生のために高水敷で一層の流速低下が生じ、主流域と強いせん断が生じている Case2-1 では、前縁上流部の植生による水刃の影響を受けない領域でも流木が低水路内に集中することで高水敷上にほとんど流下しておらず、流木の捕捉を目的とした植生の存在が、却って流木を捕捉域から遠ざける要因となっているように見受けられる。

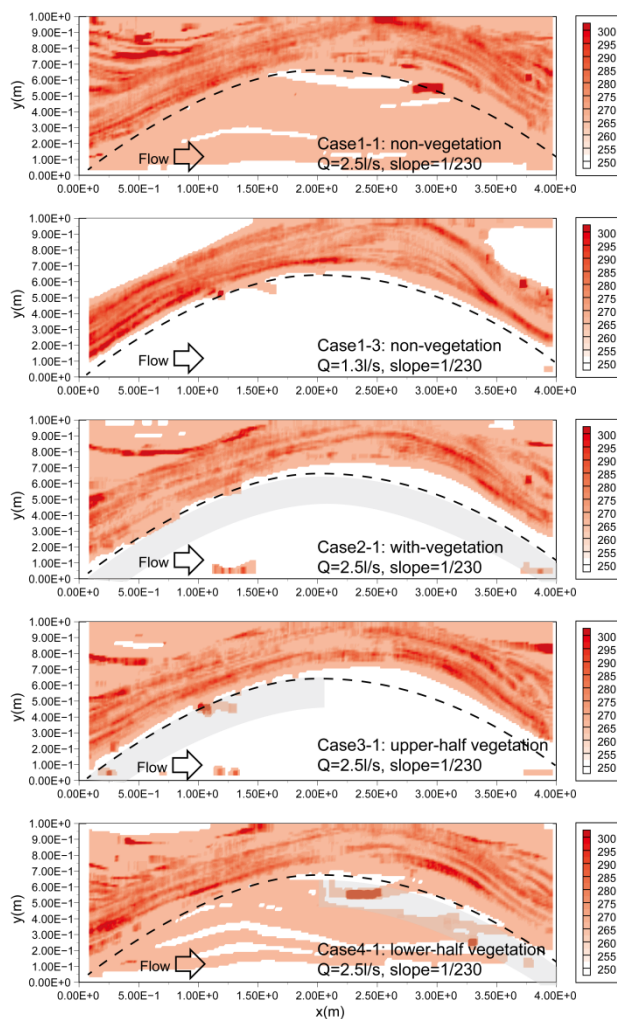


図 - 6.12 実験結果：流木流下時の濃度 (本/m²: 格子状に区切った矩形要素内の流木密度の瞬間値を、流木が存在する要素内のみ積算し、積算回数のカウントで除して平均したもの)、灰色部分は植生設置箇所を示す

表-6.3 に示す流木の捕捉数で比較した場合も、植生が存在せず高水敷の地形的要因のみに捕捉効果を依存している Case1-1 の捕捉数に対し、植生を有する Case2-1 での捕捉数が同程度か寧ろ悪化していることがわかる。

6.3.3 実河川をモデルとした模型河道を対象とした高水敷上での流木流下に対する検討

(1) 実験概要

流木災害に際して砂州による流木の補足が被害拡大を抑制する上で重要な役割を果たすことが期待される。その効果を最大にするための河道改修のあり方について、実際に流木災害に見舞われた実河川を基とした模型を作製し通水実験を行うことで、河道

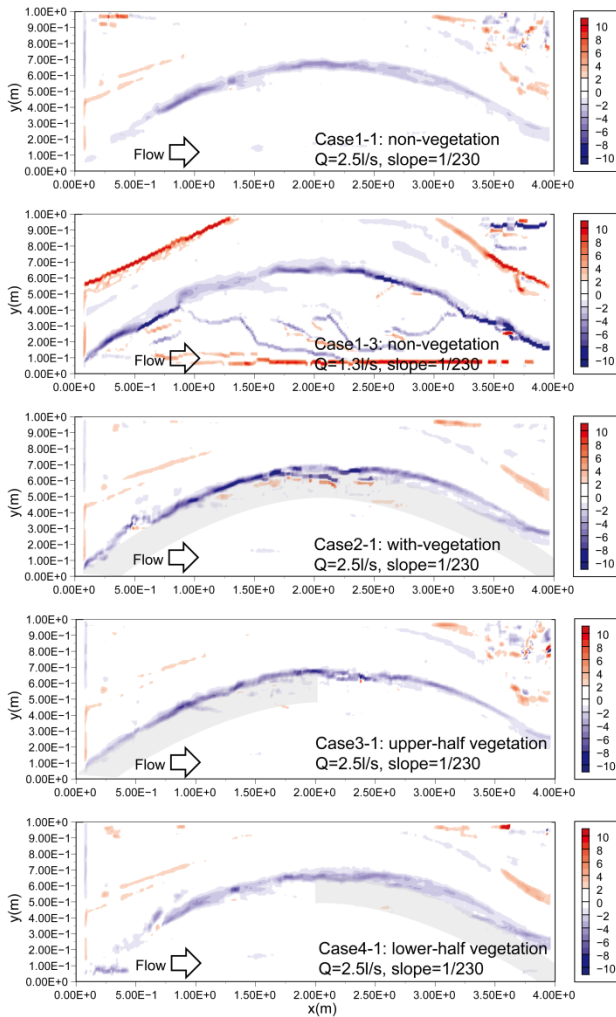


図 - 6.13 実験結果：追跡粒子による PTV 計測結果から得られた z 軸まわり渦度の分布、灰色部分は植生設置箇所を示す

改修案に対する流木集積の状況の違いを把握することを目的に実験を行った。

ここでは、渚滑川の 1/175 模型を作製し、流木流下実験の対象とした。模型は実験室内の可傾斜水路に作製し、実際の洪水時のハイドログラフを模擬した流量の非定常流量を通水する。河道改修案は図 - 6.14 に示した 3 案とし、蛇行部内岸の砂州に対し、標高や勾配を変化させるものとする。

実験時の流木流下状況は、水路上空に設置されたカメラにより動画として撮影された。これを後処理することで流木群の軌跡を可視化し、上記項目に対する定性的な検討を試みた。

(2) 実験結果

流木群の軌跡から、以下の結果を得た。

現況河道では砂州を越流する流れの右岸近傍で流木の速度低下が著しいほか、低水路左岸での流速低

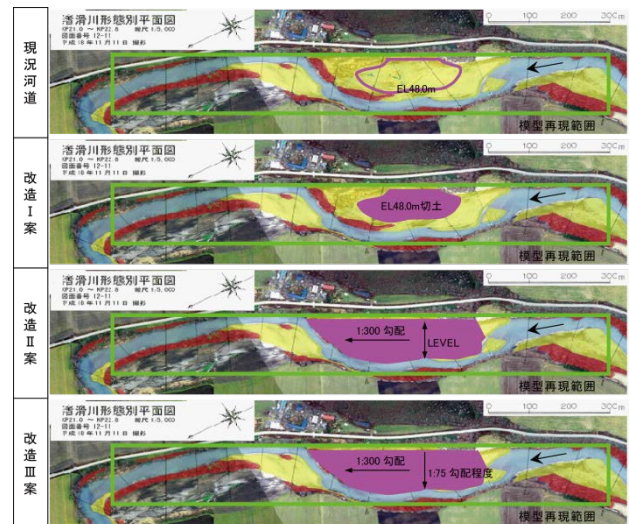


図 - 6.14 渚滑川に対する内岸砂州側での土地改修案



図 - 6.15 2003 年出水時の厚別川での流況

下も確認される。砂州標高を全体に切り下げる改造 I 案では流木はスムーズに流下する代わりに、捕捉の効果も期待できない。砂州部分で河床勾配と同程度の 1/300 の勾配をつけた改造 II 案では、砂州上での流れそのものよりも、流木の流下状況に影響を与えている。砂州部分の横断方向に勾配を与えた改造 III 案では、砂州部分に越流し流入する流木の本数が制限される傾向に見受けられる。

6.4 谷底平野の地形特性と現在の地形の成り立ち

6.4.1 研究概要

河道の形成機構は流木の流下機構や治水計画に大きく影響を与える。ここでは治水対策の遅れている中小河川を含有する谷底平野に着目し、流路固定を引き起こす水道の形成機構を解明することを目的に、波数解析的手法を適用して検討を行った。

北海道の厚別川は、流域面積 291km²、河道長 45km で、2003 年 8 月の豪雨により、既往最大規模の約

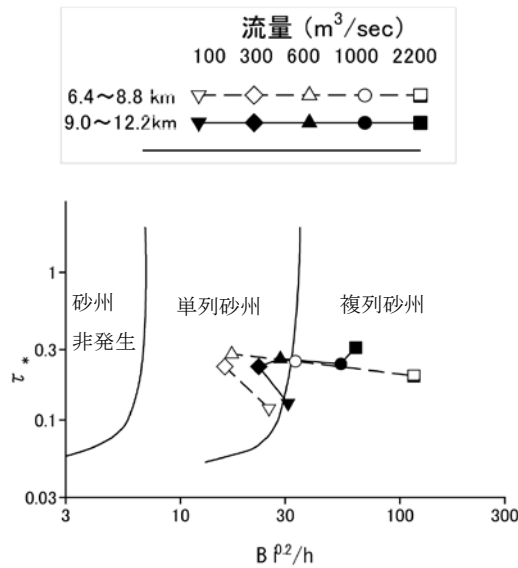


図 - 6.16 厚別川における砂州形状領域区分図の変遷

2200m³/s という河道の流下能力 1000m³/s を大幅に超える出水が生起し、洪水流は谷幅全体を覆うように流れた (図 - 6.15)。

この厚別川における洪水氾濫と地形の特徴について 2重フーリエ解析を用いた検討を行う。

6.4.2 研究結果

堤内地も含めた谷地形を対象とした各流量の中規模河床形態⁵¹⁾を表すと図 - 6.16 となる。図 - 6.16 から 1000m³/s 程度までは単列砂州領域にあり、1000m³/s を超えると単列砂州領域から複列砂州領域へ遷移すると判断される。洪水時のピーク流量は、2200m³/s であることから、その時の氾濫流の水利条件は複列砂州領域になっていたことがわかる。

谷全体が過去に繰り返された洪水流により形成された地形であるとの仮説のもと、2重フーリエ解析を用いて、谷地形の形状解析を行った⁵²⁾。つまり谷全体の氾濫現象において谷壁を流路側壁と考えた場合の形状特性について、実河川を対象とした検討を行うものである。図 - 6.17 にその結果を示す。

横断方向、縦断方向の相対的な波数を示す α_{ij} に関し、厚別川の α_{22}/α_{11} は 0.5~1.4 であり、単列砂州や自由蛇行による地形と複列砂州の中間的な値をとることがわかる。以上から、厚別川の谷底平地の地形は谷幅を基準として単列と複列の2つの砂州成分から成り、過去における幾度かの谷幅全幅を覆い尽くす大規模出水によって形成された単列砂州成分を持つ複列砂州によって形作られていると判断される。

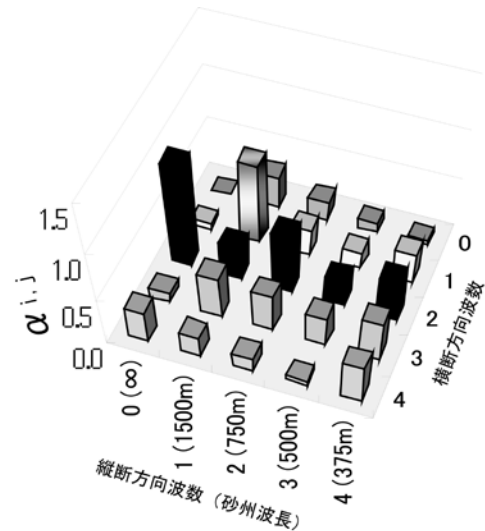


図 - 6.17 厚別川周辺の谷底平野を河道と仮定した場合に対する2重フーリエ解析結果

6.5 洪水減水期ハイドログラフと砂州および水みち形成の関連に対する検討

6.5.1 実験概要

河道内の樹林化については、水みちと砂州や高水敷との比高差が生じることにより進行することが示されている⁵³⁾。本研究では水みち形成機構の解明を目的とし、砂州が形成された河道において、洪水減水期にどの様に水みちが形成されるのか、ハイドロ波形及び減水時間の違いに着目した水理実験を行い、水みちの発達状況について検討した。

実験は、延長 50m、幅 0.9m の直線水路を使用して行った。河床勾配は 1/80 とし、河床材料は 4号硅砂 ($d=0.764$ mm) と 7号硅砂 ($d=0.154$ mm) の割合を 5:1 とした混合砂を用いた。

実験に用いた流量を図 - 6.18 に示す。通水を開始してから安定した単列交互砂州が形成された段階 (t_1) で減水を開始した。減水終了後の小流量 ($\min Q$) は、初期流量の 1/25 程度とした。減水期のハイドロ波形は以下の3ケースとし、減水時間は 45 分間 ($t_1 \sim t_2$) とした。

- case-1; 低流量の通水時間が比較的長い
- case-2; 直線的に大流量から小流量に減水
- case-3; 大流量の通水時間が比較的長い

6.5.2 実験結果

図 - 6.19 は通水後の河床形状のコンター図を示している。減水開始初期河床では砂州前縁に深掘れ部が交互に見られ、単列交互砂州が形成されている

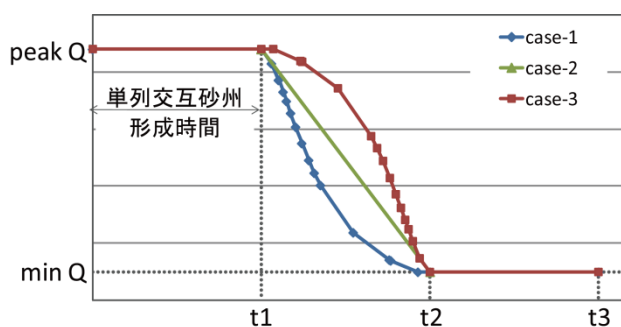


図 - 6.18 実験での各ケースのハイドログラフ

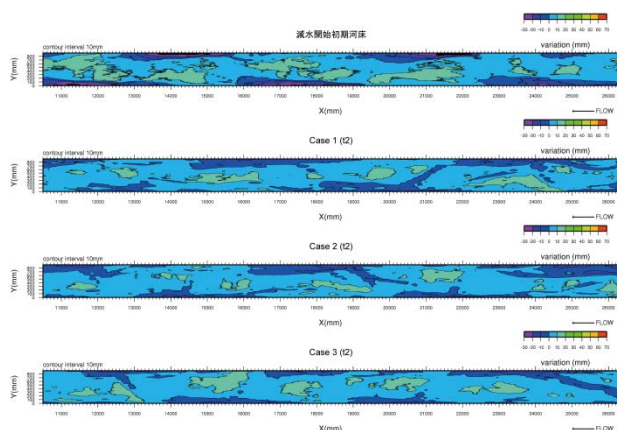


図 - 6.19 実験結果：時刻 (t2) における水路床形状を示すコンター図

が明確な水みちは見られない。これに対し、case-1 及び case-2 では、深掘れ部は浅くなっているが、砂州の前縁に沿って深掘れ部と深掘れ部の間に水みちが形成されていることがわかる。水みちの形成状況については case-1 と case-2 で大きな差異は見受けられなかった。

今回の実験では、case-3 は case-1、case-2 と同様砂州前縁部の深掘れ部は浅くなっているが、水みちの形成がほとんど見られなかった。case-3 では比較的、大流量の通水時間が長く、小流量の通水時間が短い波形であることから、水みちの形成に影響をおよぼす小流量の通水が十分ではなかったことによると推察される。

6.6 まとめ

橋梁周辺における流木の挙動監視調査の結果、洪水時に流下する流木は水位がピークに達する前の洪水初期に最も多くなる傾向をみることができた。橋脚への堆積機構の直接的な観測は、実施期間中に結果が得られなかったが、観測に際してのノウハウの

蓄積が得られたことから、今後の効率や精度の向上も期待され、継続してモニタリングを行うことが望ましいと考えられる。

流木の堆積と河畔林に関する模型実験の結果、河畔林が密な場合に最も流木を捕捉し、流下本数の10%強を捕捉した。一方、河畔林が粗の場合は1%程度であり、河畔林の粗密による流木捕捉効果が明らかとなった。また河畔林設置位置の違いによる流木への影響に関しては、植生の存在が流れ場の渦度を強くする場合に、流下中の流木がそこから離れる挙動を示すことが確認された。これらの結果から、河畔林の伐採等の対策に関しては、流木が捕捉域となる砂州や植生上にスムーズに導入されるように、分布や密度に注意して行う必要があることが示唆される。

厚別川を例とした谷底平野の地形の成り立ちに関する解析結果からは、谷底平野とそこに有する河川に関して、谷全体に広がる大規模な出水と、通常の出水量との両方の影響を受けた地形が存在することが示された。これは大規模出水時の河川が、通常の流路と大きく異なる流路を取り得ることを示すものであり、洪水対策に対する重要な知見となる。

流路の固定化をもたらす要因の一つである水みちの形成過程に関しては、水理実験の結果から、洪水時の減衰過程におけるハイドログラフの形状が重要な影響をもたらし、小流量での通水時間が長い場合に水みちの形成が見られることが確認された。このことから、流路の固定化の対策に当たっては、上流側治水施設での出水時のオペレーションが重要な役割を果たすことが示唆される。

7. 結論

国民の安全・安心と、流域の土地利用を踏まえた良好な河川環境を創出するための河道設計技術の開発について、以下のような研究成果が得られた。

- (1) 道東の標津川をフィールドとして 2way 河道の本格実施にむけての研究を行った。現地における研究では、本川の分岐点下流に設置した分流堰による流量のコントロールと、分岐点水衝部を護岸等で保護することで、分流機能は十分維持できることが検証された。研究では、2way 河道の水理量を解析可能な計算格子の作成手法を開発し、河道維持に必要な堰高の設計・管理基準を示すことができた。また、2way 方式における生物生息環境の創出への可能性も示唆された。
- (2) サクラマスを対象とした河川環境に配慮した河道整備手法の検討では、産卵環境における相対河床勾配の関係を確認できた。また、巨礫による越冬環境の創出の効果を確認した上で、出水による巨礫の流出の関係を護岸の力学設計法で評価することができた。
- (3) 魚道の閉塞防止については、魚道上流入口に水制工を適切な位置で設置することの有効性が確認された。さらに、魚類の堰堤降下時の損傷対策については、堰堤下流のプール水深を適切に確保することの効果が確認された。
- (4) 塩水遡上の現象を踏まえた流量観測手法の確立においては、結氷時も含めて最小測定時間での水文観測においても精度が確保できることが検証された。感潮域における平均淡水流量の観測は、満潮または干潮時の実施が有効であることを確認した。
- (5) 結氷時の流量を連続的に推定する手法を開発した。また、開発した手法の精度の高さを確認することができ、今後の河川維持管理におけるコスト低減と精度向上に伝えることが可能となった。
- (6) 農地等の流域からの濁質流出では、降雨時の表面流出抑制技術の有効性を確認した。また、水質浄化池や緩衝帯の水質浄化効果を定量的に評価するとともに、農業農村整備事業による水質保全対策の下流への効果について、構築した水理学的モデルと、現地観測、実験での検証を組み入れたシミュレーションにより検証された。
- (7) 出水時における橋梁への流木堆積対策等の安全な維持管理手法にむけて、流木の挙動について現地調査を実施した結果、流下本数のピークと水位のピーク

との関係が確認された。さらに、河畔林と流木の堆積の関係を実験した結果、伐採等の河畔林管理時においては、河畔林の分布や密度が重要であることが示唆された。

- (8) 谷底平野の地形の成り立ちの解析から、流路の固定化に影響する要因の一つである水みちの形成には、減水過程における小流量のハイドロが重要な影響があることが確認され、上流域のダム等の治水施設での洪水管理の重要性が確認された。

参考文献

- 1) 永多朋紀、安田浩保、渡邊康玄：2Way 河道の自律的な維持を可能にする適切な流量配分比の推定手法の提案、河川技術論文集、第 16 巻、pp.143-148、2010
- 2) 永多朋紀、安田浩保、渡邊康玄、長谷川和義：標津川の蛇行試験区間の河道変遷とその維持機構の物理的な解釈、河川技術論文集、第 15 巻、pp.255-260、2009
- 3) 長谷川和義、藤田将輝、渡邊康玄、桑村貴志：標津川旧蛇行通水時の堰をともなう分岐流量配分比に関する研究、水工学論文集 第 47 巻、pp.529-534、2003
- 4) 岸力、黒木幹男：移動床流における河床形状と流体抵抗 (I)、北海道大学工学部研究報告、第 67 号、pp.1-23、1973
- 5) 第 14 回標津川技術検討委員会資料、北海道開発局釧路開発建設部、2008
- 6) RIC-Nays：一般財団法人 北海道河川財団、<http://i-ric.org/nays/ja/index.html>、2011
- 7) 真山紘：サクラマス *Oncorhynchus masou* (Brevoort) の淡水域の生活および資源培養に関する研究、北海道さけ・ますふ化場研究報告、46、pp.1-156、1992
- 8) 真山紘：サクラマスのスモルト放流に関する生態学的検討—河川の自然環境とサクラマス資源—、北海道さけ・ますふ化場 魚と卵、162、pp.9-18、1993
- 9) 宮腰靖之：北海道におけるサクラマスの放流効果および資源評価に関する研究、北海道立水産孵化場研究報告、第 60 号、pp.1-64、2006
- 10) 真山紘：越冬時サクラマス幼魚の生活と河川環境、北海道さけ・ますふ化場 魚と卵、164、pp.33-40、1995
- 11) 卜部浩一、村上泰啓、中津川誠：サクラマスの産卵環境特性の評価、北海道開発土木研究所月報、No.613、pp.32-44、2004

- 12) 矢部浩規、卜部浩一、村上泰啓：サクラマス産卵環境特性の評価に関する研究、北海道開発局技術研究発表会発表論文集、48、CD-ROM 環-43、2005
- 13) 杉若圭一、竹内勝巳、鈴木研一、永田光博、宮本真人、川村洋司：厚田川におけるサクラマス産卵床の分布と構造、北海道立水産孵化場研究報告、53、pp.11-28、1999
- 14) 野上毅、渡辺康玄、長谷川和義：急流河川における生息場としての河床地形区分、水工学論文集、第46巻、pp.1127-1132、2002
- 15) 森田茂雄、桑原誠、山下彰司、永山滋也：河川流域におけるサクラマスの産卵場所に関する研究、河川技術論文集、Vol.15、pp.85-90、2009
- 16) 黒木幹男、岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究、土木学会論文報告集、第342号、土木学会、pp.87-96、1984
- 17) 中里享史、巻口範人、渡辺康玄：越冬期におけるサクラマス幼魚の好適物理環境条件、河川技術論文、10、pp.441-446、2004
- 18) 渡辺恵三、中村太士、小林美樹、柳井清治、米田隆夫、渡辺康玄、丸岡昇、北谷啓幸：河川の階層構造に着目したサクラマス幼魚の越冬環境、応用生態工学、9(2)、pp.151-165、2006
- 19) 可児藤吉：溪流棲昆虫の生態学、昆虫 上巻、pp.171-317、1944
- 20) 国土技術研究センター：護岸の力学設計法・改訂、p.72、山海堂、2007
- 21) 渡辺康玄、M. Tubino、G. Zolezzi：掃流砂により形成される交互砂州の非定常流下での挙動、北海道開発土木研究所月報、No.576、pp.4-12、2001
- 22) 佐藤徳人、渡辺康玄、白井博彰：橋脚周辺における流木の挙動監視調査、河川技術論文集、Vol.13、pp.409-414、2007
- 23) 池田俊介、吉池智明、杉本高：不透水制群を有する流れ構造に関する実験的研究、水工学論文集、Vol.43、pp.281-286、1999
- 24) Shirahata S.: Survival of trout dropped from a water fall, Bulletin of Freshwater Fisheries Research Laboratory, 20, pp.93-100, 1970
- 25) 土居隆秀、中村智幸：在来水産資源生態調査研究－イワナの堰堤落下試験（平成11年度）－、栃木県水産試験場研究報告、44、pp.73-75、2001
- 26) 土居隆秀、福富則夫、久保田仁志、阿久津正浩：在来水産資源生態調査研究－イワナの堰堤落下試験（平成11年度～平成12年）－、栃木県水産試験場研究報告、45、pp.95-98、2002
- 27) 土居隆秀、福富則夫、沢田守伸、久保田仁志：イワナ等溪流魚適正増殖手法開発事業－イワナの堰堤落下試験（平成11年度～平成13年）－、栃木県水産試験場研究報告、46、pp.108-111、2003
- 28) 真山紘：サクラマス生態ノート パート2、さけ・ます資源管理センター技術情報、171、pp.1-13、2005
- 29) C.Gosset、M.Larinier、J.P.Porcher、F.Travade(中村俊六、東信行監修)：魚道及び降下対策の知識と設計、財団法人リバーフロント整備センター、1996
- 30) 国土交通省河川局監修、土木研究所編著：水文観測-平成14年度版-、全日本建設技術協会、pp.122-205、2002
- 31) 佐藤嘉昭、山下彰司、中津川誠：超音波式流速計を用いた感潮域の流量推定手法、北海道開発土木研究所月報、No.632、pp.2-11、2006
- 32) 吉川泰弘、渡邊康玄、早川博、平井康幸：河川結氷時の観測流量影響要因と新たな流量推定手法、土木学会、水工学論文集、第54巻、pp.1075-1080、2010
- 33) 平山健一：結氷した河川の流れと流量測定(その2)、北海道広域利水調査会、利水評論、第27号、pp.27-55、1983
- 34) 釧路開発建設部：地区別事業概要「はまなか地区」
<http://www.ks.hkd.mlit.go.jp/nougyou/tikubetsu/hamanaka.html>
- 35) 北海道環境科学研究センター：北海道の湖沼（改訂版）、pp.46-51、2005
- 36) 中山博敬、大久保天、横濱充宏：傾斜草地圃場における肥料成分表面流出抑制の検討、平成23年度農業農村工学会大会講演会、pp.762-763、2011
- 37) 中山博敬、中村和正、秀島好昭、多久和浩：牧草地における乳牛スラリー散布時のアンモニア揮散量、第50回農業土木学会北海道支部研究発表会講演集、pp.58-61、2001
- 38) 鶴木啓二、多田大嗣、鳥海昌彦、竹部健司：草地酪農流域における水質浄化池の効果、平成21年度農業農村工学会大会講演会、pp.312-313、2009
- 39) 鶴木啓二、多田大嗣、鳥海昌彦、鈴木信也：ライシメータによる緩衝林帯の水質浄化機能の検討、平成22年度農業農村工学会大会講演会、pp.554-555、2010
- 40) 児玉正俊、南光人、鳥海昌彦、鈴木信也、鶴木啓二、中村和正、多田大嗣：国営環境保全型かんがい排水事業「はまなか地区」における排水路の水質改善状況、第58回農業農村工学会北海道支部研究発表会、pp.66-69、2009

- 41) 山本潤、牧田佳巳、山下彰司、田中仁：風蓮湖に陸域からの汚濁負荷が及ぼす影響に関する現地観測、海岸工学論文集、第 54 巻、pp.1006-1010、2007
- 42) 山本潤、林田健志、峰寛明、牧田佳巳、山下彰司、田中仁：北方の閉鎖性海域に適した低次生態系モデル構築に向けた現地実験、海岸工学論文集、第 55 巻、pp.1196-1200、2008
- 43) Jun Yamamoto and H. Tanaka: Internal tides and autumn slack water in Nomi Bay, Japan. Coastal Engineering Journal, Vol.48, No. 3, pp.257-278, 2006
- 44) Jun Yamamoto, Mitsuhiro Watanabe, Shoji Yamashita, Kenji Hayashida, Hiroaki Mine and Hitoshi Tanaka: Study on Applicability of an Ecosystem Model in Cold Region Enclosed Sea, Proceedings of 3rd International Conference on Estuaries and Coasts, 2009
- 45) 財団法人 河川環境管理財団：河川整備基金自主研究事業 流木災害軽減対策と河川樹木管理に関する総合的研究、2008.11
- 46) 阿部修也、渡邊康玄、長谷川和義：2003 年台風 10 号出水における沙流川での橋梁被害、河川技術論文集、第 11 巻、pp.109-114、2005.6
- 47) 佐藤徳人、渡邊康玄、白井博彰：橋梁周辺における流木の挙動監視調査、河川技術論文集、第 13 巻、pp.409-414、2007.6
- 48) Braudrick, C. A., Grant, G.E.: When do logs move in rivers?, Water Resources Research, Vol.36, No.2, pp.571-583, 2000
- 49) Haga, H., Kumagai, T., Otsuki, K., Ogawa, S.: Transport and retention of coarse woody debris in mountain streams: An in situ field experiment of log transport and a field survey of coarse woody debris distribution, Water Resources Research, Vol.38, No.8, doi:10.1029/2001WR001123, 2002
- 50) 植村知正、山本富士夫、幸川光雄：2 値化相関法—粒子追跡法の高速度画像解析アルゴリズム—、可視化情報、Vol.10、No.38、pp.58-64、1990
- 51) 黒木幹男、岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究、土木学会論文報告集、342 号、pp.87-96、1984
- 52) 渡邊康玄、野上毅、安田浩保、長谷川和義：谷底平野における氾濫流の挙動を規定する地形の成因、土木学会、河川技術論文集、第 12 巻、pp.49-54、2006
- 53) 清水義彦、小葉竹重機、岡田理志：ハリエンジュによる動的河道内樹林化について、水工学論文集、第 45 巻、pp.1099-1104、2001