

博 士 論 文

旭川における礫河原再生後の物理環境の変化
及び分流部における植生管理に関する研究

平成 29 年 3 月

平 井 康 隆

岡山大学大学院 環境生命科学研究科

旭川における礫河原再生後の物理環境の変化 及び分流部における植生管理に関する研究

目 次

1. 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的と既往研究との関わり	2
1.3 論文の構成	5
2. 礫河原再生後の物理環境変化に関する研究	8
2.1 はじめに	8
2.2 対象河道の変遷	9
2.2.1 礫河原再生事業（祇園地区）	9
2.2.2 河道特性の変遷	10
2.2.3 アユの生息状況	13
2.2.4 流況観測	18
2.3 礫河原再生後の物理環境変化の検証	34
2.3.1 解析モデルの概要	34
2.3.2 解析条件	48
2.3.3 解析モデルの妥当性確認	50
2.3.4 河床変動及び植生繁茂による評価	51
2.4 アユを対象とした生息場変化の検証	55
2.4.1 生息環境評価モデルの概要	55
2.4.2 PHABSIM を用いた生息場変化の検証	57
2.5 まとめ	59
3. 経年変化を考慮した礫河原再生効果に関する研究	79
3.1 はじめに	79
3.2 解析の概要	80
3.2.1 対象区間	81
3.2.2 対象洪水	81
3.2.3 解析条件	83
3.2.4 解析ケース	86

3.3 施工による樹林抑制効果の検討	88
3.3.1 植生伐採の効果の検討	88
3.3.2 切り下げ、埋戻し効果の検討	91
3.4 まとめ	100
4. 分流部における植生管理に関する研究	117
4.1 はじめに	117
4.2 対象河道の概要	118
4.2.1 対象河道	118
4.2.2 百間川分流部の改築 2)	118
4.3 解析モデルの概要	121
4.3.1 流況解析モデル	121
4.3.2 解析条件	121
4.4 植生管理方策の検討	124
4.4.1 再現計算	124
4.4.2 管理ゾーン区分の設定	125
4.4.3 感度分析	126
4.4.4 植生管理の方策	129
4.5 まとめ	130
5. 結論	142
5.1 本論文の結論	142
5.2 今後の課題と展望	144

1. 序論

1.1 研究の背景

近年、全国の河川で、河道内の樹林化が大きな課題となっている。河道に樹木が繁茂する姿は、環境上、景観上、好ましいと思われがちであるが、洪水時には河道内に繁茂した樹木によって流れが阻害され、水位が上昇し、最悪の場合は堤防の決壊につながるなど、治水上大きな問題となっている。また、流木による構造物への被害や、本来河川が持つ礫河原が減少することによって、低水路床は低下し、高水敷との比高差が拡大する二極化により、中小洪水時に低水路に流れが集中し、局所洗堀や堤防の破堤に至るといった被害が懸念されている。

これらの問題に対して、樹林化のプロセスや樹林化が周辺に及ぼす影響を明らかにするため、植生の繁茂状況の再現や、将来的な予測を行うことのできるモデルの開発が多くの研究者によって行われている。例えば、井上ら¹⁾は、流水と土砂の作用による立地条件変化に着目した植生消長の簡易的計算手法を開発し、利守ら²⁾や黒田ら³⁾は、植生消長において物理的な要因に加えて、日射量やバイオマス量など生物的要因も取り入れてモデルの予測性能の向上を試みている。また、清水ら⁴⁾は、複列砂州形成条件の中で砂州の植生が及ぼす濤筋の形成過程を明らかにするため、植生域がトリガーとなってその下流側で発達する砂州・濤筋の形態についての考察や、砂州上の河床上昇に応じて植生の侵入、河床低下による植生の流失を取り込んだ河床変動解析により流路形態の変化の検討を行っている。

本研究では、こうした河道内の樹林化によって影響を及ぼす事項について、岡山市を流下する一級河川旭川をフィールドとして、今後の河道管理の効率化を図ることを目的に検討を行うものである。

対象とする旭川は、かつて礫河原が多く存在する河川であった。しかしながら、1954年に旭川ダム、1955年に湯原ダムが建設され洪水規模が縮小したことによる土砂供給量の減少や、1960年代前半の土砂採取などにより、河道内において河床の攪乱作用が低下し、砂州の樹林化がかなり進行している。その結果、河川本来の姿である礫河原が減少するとともに、川の多様性が失われ、河川固有の生態系が変化している。

また、岡山市街の洪水防御のため建造された旭川放水路である百間川では、分流部の改築が計画されており、旭川本川の計画流量 $6,000\text{m}^3/\text{s}$ に対して、百間川への分流量を $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 分流する改修が行われている。旭川では、河道の樹林化が治水上の問題として挙げられており、分流部周辺において樹林化が進行すると、河道条件が変化し、計画どおりに河川改修事業を行っても、洪水時に適正な分流が行われない可能性がある。

このように、旭川では、河道内の樹林化による課題を抱えており、本研究では、礫河原の再生による再現及びその対策方法、適正な分流量を維持させるための植生管理方法について、植生消長モデル等を取り入れた水理解析モデルを用いて、これらの現象・課題に対しての分析及び評価を行うとともに、対策案等の提案を行うものとする。

1.2 本研究の目的と既往研究との関わり

研究の背景に示したとおり、対象とする旭川における植生に関する課題について解決するため、水理解析モデル等を用いて、礫河原再生事業の効果の検証、効果的な対策方法を検証するとともに、百間川分流部における適正な分流量維持のための植生管理方策についての研究を行うものである。

以下に、各研究項目について内容及び既往研究との関わりについて示す。

(1) 礫河原再生後の物理環境変化の検証

本研究で対象とする旭川では、前野ら⁵⁾、渡辺ら⁶⁾、眞田ら^{7),8)}によって、礫河原再生に向けた取り組みとして、樹林化が著しい大原地区及び祇園地区を対象に現地試験を実施している。まず、2002年～2003年に計画準備段階として、礫河原再生に向けた調査・検討を行った。その後、2004年に大原地区において一次現地試験を実施し、試験後のモニタリング結果を踏まえ、2005年に祇園地区を対象に二次現地試験を実施した。大原地区では、試験区の一部で植生が再定着したが、祇園地区では、2011年以降、再繁茂の傾向はあるが、大原試験区で得られた経験が活かされ、砂州の切り下げや周辺の樹木伐採によって、数年間、その後の中小規模の洪水で、礫河原の維持及び拡大が図れることを示した。

近年、このような砂州や高水敷の切り下げ等による礫河原再生に向けた取り組みは、全国の河川で行われている。増子ら⁹⁾は、鬼怒川中流部を対象に試験施工を行い、一時的に礫河原を再生・復元できたが、シナダレスズメガヤの再繁茂が懸念されることを示している。また、松田ら¹⁰⁾、仲村ら¹¹⁾、田中ら¹²⁾は、渡良瀬川、阿賀川、荒川を対象に礫河原再生に向けた試験施工等を行っており、その効果や課題を示している。しかしながら、これらの研究では、対策後の効果検証やモニタリングを行っているものの、数年の時間経過による礫河原の維持・持続性についての評価・検証までには至っていない。

以上の背景から、本研究では、現地試験後に中小規模洪水の発生によって礫河原が維持・拡大した旭川の祇園地区を対象に、まず、二次元河床変動解析及び植生消長計算により数年間の河道形状変化の再現を試み、砂州の切り下げを行わなかった場合の解析結果と比較する。次に、アユの産卵場としての変化をPHABSIMにより評価することにより、2005年に実施した礫河原再生に向けた現地試験による効果を検証する。

(2) 礫河原再生効果の検証

樹林化の抑制に対しては、様々な面から研究が進められている。例えば、田屋ら¹³⁾は、植生種ごとに環状剥皮や再伐採などの伐採後の処置を行い、萌芽再生抑制効果について検証し、萌芽再生状況の調査によって処置の有効性を示した。伊木ら¹⁴⁾は、ヤナギ類に3パターンの樹皮剥皮を行うことで、ほぼ確実に萌芽が起らない剥皮のパターンを実証した。このように、伐採後の樹木に対して直接的に処置を行うことで樹林化を抑制する研究が行われている一方で、河床攪乱規模・頻度を増加させるための施工を行い、洪水の自然営力によって、樹林化抑制を検討する研究も行われている。例えば、阿河ら¹⁵⁾は、高水敷の切り下げと間伐を組み合わせることにより、洪水による樹木の倒伏率を定量的に示すことで、樹林化抑制に対

する施工の組み合わせの有効性を確認した。長田ら¹⁶⁾は、植生が繁茂しないための断面形状や河道条件で解析を行い、切り下げと埋戻しに加えて高水敷を設けた断面形状が、最も植生繁茂軽減に効果的であることを示した。八木澤ら¹⁷⁾は、切り下げと埋戻しを組み合わせた複数のケースで植生動態解析を実施し、砂州の切り下げのみを行ったケースが最も樹林化期待値を下げることを示した。

本研究で対象としている旭川も、1980年代以降、砂州の樹林化が進行し、礫河原が減少しており、その対策として、2004年3月に大原地区、2005年3月に祇園地区で、試験的に砂州上の植生伐採と砂州の切り下げが実施された。その後、大原地区では2~3年程度で植生の再繁茂が確認された。一方祇園地区では、数年は礫河原が維持されたが、その後大きな洪水がなく、2015年現在、植生が再繁茂している。同じように、鬼怒川でも砂州の試験的な切り下げが実施されたが、その後の増子ら⁹⁾の調査によって、植生の再繁茂が確認された。このように植生が再繁茂した原因として、切り下げ箇所により再び土砂が堆積したことで、洪水による河床の攪乱頻度が減少し、植生の生育基盤が安定したことが挙げられる。

以上のような樹林化に対する研究の現状について、宮本ら¹⁸⁾によって述べられており、この中で、樹林化の要因となりうる物理現象の1つとして土砂動態が挙げられている。砂州の切り下げのように、河道の断面形状を変化させ、砂州上の河床攪乱規模・頻度を増加させることで樹林化を抑制する方法は、洪水による土砂移動によって再び断面形状が変化することで、樹林化の抑制効果が低減する可能性も十分に考えられる。実際に、前述した旭川や鬼怒川と同様に、切り下げを実施した数年後に、植生の再繁茂が確認される事例は多い。再び樹林化が進行した箇所では、伐採等の人為的な管理が必要となるが、これを繰り返し行うには多大な労力と費用を要してしまう。効率的に河川を管理するためには一度の施工によって自律的に礫河原が再生・維持され、樹林化が抑制されることが望ましい。そのためには、河床の経年的な変化を把握し、施工の持続的な効果を検討する必要がある。しかし、これまでの研究では経年的な変化までは検討されていないのが現状である。

そこで本研究では、祇園地区を含む中州を対象に、植生伐採と砂州の切り下げ、低水路の埋戻しを組み合わせた8つのケースを設定し、平面二次元河床変動モデルと植生消長モデルを用いて5年間の解析を行う。過去の洪水履歴を参考に、2つの規模の洪水を用いて解析を行い、左岸側滞筋部への集中した流れの緩和の効果、切り下げ箇所の河床の攪乱に及ぼす影響の確認を行うとともに、樹林化抑制に対する効果とその持続性について検討する。

(3) 分流部における植生管理方策の提案

近年の旭川では、河道の樹林化が治水上の問題として挙げられている。分流部周辺において樹林化が進行すると、河道条件が変化し、計画どおりに改修事業を行っても、洪水時に適正な分流が行われない可能性がある。河道を長期に渡って安全に管理するためには、どの箇所の植生が分流にどの程度影響を与えているのかを把握し、あらかじめ管理すべき基準を確立しておく必要がある。

このような中、本研究で対象とする旭川では、前野ら⁵⁾によって植物特性値を考慮した水理解析モデルが提案されており、吉田ら¹⁹⁾はこのモデルを用いて、植生分布の変化による百間川への分流量の影響を定量的に評価している。

他河川では、永多ら²⁰⁾が標津川を対象に直線化された河道に河跡湖として残る旧河道を再び接続させるため、平面二次元流況解析により分流堰高の検討を行っている。また、川津ら⁵⁾は斐伊川放水路分流部周辺において平面二次元河床変動解析を行い、可動堰による適切な分流管理に向け、分流に伴って生じる水理現象の実態を評価し、重枝ら²¹⁾は本川の水位及び横断面形状の変化が分流点周辺の流況・河床変動特性、分流量及び流砂量へ及ぼす影響について実験的に検討するとともに、準三次元洪水流・河床変動モデルへの適用性を検証している。しかしながら、既往の研究においては、分流に関する研究は行われているものの、適正な分流量を維持するために固定堰周辺に繁茂する植生管理の方策を検討した事例はほとんどみられない。

以上のことから、本研究では、分流に影響を与える固定堰周辺の植生について、計画流量規模の洪水が発生した場合においても適正に分流が維持できるよう、植生管理の方策を検討することを目的とする。そのために、まず百間川分流部周辺を対象に、平面二次元流況解析により計画流量が分流できるよう植生伐採範囲を設定し、管理すべきゾーンの区分を行う。そのうえで、各管理ゾーンの植生が生長した場合を想定した流況解析を実施し、その影響量について評価し、植生管理の方策を検討する。

1.3 論文の構成

本論文の構成は、以下のとおりである。

「1. 序論」では、本研究が必要となった背景と目的、内容について述べるとともに、既往研究との関わりについて整理する。

「2. 礫河原再生後の物理環境変化に関する研究」では、2005年に実施した礫河原再生試験後に中小規模洪水の発生によって礫河原が維持・拡大した旭川の祇園地区を対象に、河道状況の現地調査を行うとともに、二次元河床変動解析及び植生消長計算により数年間の河道形状や植生繁茂の変化と、PHABSIMによりアユの産卵場としての変化を評価し、礫河原再生に向けた現地試験による効果を示す。

「3. 経年変化を考慮した礫河原再生効果に関する研究」では、2.と同じ祇園地区をフィールドとして、植生消長モデルを用いた河床変動解析モデルにより、今後も継続的に礫河原再生箇所において礫河原の維持・拡大が図れる方策を示す。

「4. 分流部における植生管理に関する研究」では、建設が進められている百間川分流部において、計画流量規模の洪水が発生した際、植生が生長した場合の分流に与える影響を評価するとともに、適正に分流が維持できるための植生管理の方策を提案する。

「5. 結論」では、本研究で得られた成果を整理するとともに、課題と今後の展望について述べる。

【参考文献】

- 1) 井上優, 大沼克弘, 藤田光一: 流水と土砂の作用による立地条件変化に着目した植生消長の簡易計算手法の開発, 河川技術論文集, 第 12 巻, pp31-36, 2006.
- 2) 利守伸彦, 宮本仁志, 木村諒, 阿河一穂, 道奥康治: 河道内の植生消長シミュレーションモデルにおける樹木の成長・死亡・新規参入, 土木学会論文集, vol.69, No.4, pp1363-1368, 2013.
- 3) 黒田直樹, 西村達也, 関根秀明, 浅枝隆, 石井豊昭: 荒川熊谷地区を対象とした河道内の樹林化予測モデルの開発, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1243-1248, 2010.
- 4) 清水義彦, 岩見収二: 河道内樹林化による複列砂州の固定化とみお筋の形成過程に関する考察, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1153-I_1158, 2013.
- 5) 前野詩朗, 渡辺敏, 藤塚佳晃: 簡易に得られる植物特性値を考慮した数値解析モデルの精度向上の提案, 土木学会論文集, No.803/II-73, pp.91-104, 2005.
- 6) 渡辺敏, 前野詩朗, 藤塚佳晃, 宮崎貢, 眞田淳二: 旭川における礫河原再生と樹林化抑制に関する現地試験による検証, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.1201-1206, 2006.
- 7) 眞田淳二, 浦上将人, 渡辺敏, 前野詩朗, 藤塚佳晃: 旭川下流部における礫河原の自律的回復に向けた実証的研究, 河川技術論文集, 第 12 巻, pp.409-414, 2006.
- 8) 眞田淳二, 浦上将人, 前野詩朗, 渡辺敏: 2006 年 7 月出水を経験した旭川下流部礫河原再生箇所モニタリング結果と考察, 河川技術論文集, 第 13 巻, pp.129-134, 2007.
- 9) 増子輝明, 前村良雄, 森川陽一, 後藤勝洋: 鬼怒川中流部における礫河原再生について, リバーフロント研究所報告, 第 21 号, pp.9-18, 2010.
- 10) 松田浩一, 内堀寿美男, 清水義彦, 石原正義, 藤堂正樹: 固定化砂州での掘削路開削による洪水攪乱の誘発と樹林化抑制対策に関する研究, 河川技術論文集, 第 16 巻, pp.235-240, 2010.
- 11) 仲村学, 増田孝幸, 高橋昭一, 山邊満, 渡辺国昭, 澤井雄介: 阿賀川における礫河原再生に向けた河道整備, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.489-494, 2013.
- 12) 田中規夫, 八木澤順治, 大塚翔平, 廣野太志, 竹島睦: 堆積土砂の再移動を考慮した切り下げ直後の砂礫州の再樹林化評価に関する研究, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.387-392, 2013.
- 13) 田屋祐樹, 槇島みどり, 赤松史一, 三輪準二, 萱場祐一: 河道内樹林の効率的な管理に向けた伐採後の萌芽再生抑制方法の検証, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.459-464, 2013.
- 14) 伊木千絵美, 矢部浩規, 中津川誠: 樹皮剥皮による河道内樹林管理手法の提案, 北海道開発土木研究所月報, No.622 号, pp.39-44, 2005.
- 15) 阿河一穂, 道奥康治, 神田佳一, 魚谷拓矢: 河道の経年変化から見た樹林化の要因分析と持続的な河川管理のための方策, 土木学会論文集 B1, vol.68, No.4, pp.I_745-I_750, 2012.
- 16) 長田健吾, 濱井宣明, 青木朋也, 藤本雅信, 嘉田功, 川田健人: 交互砂州河道における効率的な植生管理策に関する研究, 河川技術論文集, 第 20 巻, pp.181-186, 2014.

- 17) 八木澤順治, 田中規夫: 砂礫州切り下げ後の長期植生動態解析に基づく樹林化抑制効果の確率論的検討, 河川技術論文集, 第 21 巻, pp.319-24, 2015.
- 18) 宮本仁志, 赤松良久, 戸田祐嗣: 河川の樹林化課題に対する研究の現状と将来展望, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.441-446, 2013.
- 19) 吉田圭介, 前野詩朗, 藤田駿佑, 松山悟, 岩城智大, 平井康隆: 旭川における植生分布の経年変化を考慮した洪水流の数値解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.71, No.4, pp. I_1039-I_1044, 2015.
- 20) 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分流堰高に関する検討, 河川技術論文集, 第 17 巻, pp.323-328, 2011.
- 21) 川津幸治, 西林健一郎, 砂川真太朗, 樋田祥久: 斐伊川放水路分流部周辺の水理現象の解析, (一社)建設コンサルタンツ協会近畿支部第 47 回研究発表会論集, 一般論文 No.322, 2014.
- 22) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本洋, 新谷恭平: 河川分流点周辺の流れと河床変動特性に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.I_985-I_990, 2013.

2. 礫河原再生後の物理環境変化に関する研究

2.1 はじめに

岡山市を流れる一級河川旭川は、かつて礫河原が多く存在する河川であった。しかしながら、1954年に旭川ダム、1955年に湯原ダムが建設され洪水規模が縮小したことによる土砂供給量の減少や、1960年代前半の土砂採取などにより、河道内において河床の攪乱作用が低下し、砂州の樹林化がかなり進行している。その結果、河川本来の姿である礫河原が減少するとともに、川の多様性が失われ、河川固有の生態系が変化している。

このような中、本研究で対象とする旭川では、前野ら¹⁾、渡辺ら²⁾、眞田ら^{3,4)}によって、礫河原再生に向けた取り組みとして、樹林化が著しい大原地区及び祇園地区（図 2.1 参照）を対象に現地試験を実施している。祇園地区では、2011 年以降、再繁茂の傾向はあるが、砂州の切り下げや周辺の樹木伐採によって、数年間、その後の中小規模の洪水で、礫河原の維持及び拡大が図れることを示した。

本研究では、現地試験後に中小規模洪水の発生によって礫河原が維持・拡大した旭川の祇園地区を対象に、まず、二次元河床変動解析及び植生消長計算により数年間の河道形状変化の再現を試み、砂州の切り下げを行わなかった場合の解析結果と比較した。次に、アユの産卵場としての変化を PHABSIM により評価することにより、2005 年に実施した礫河原再生に向けた現地試験による効果を検証した。

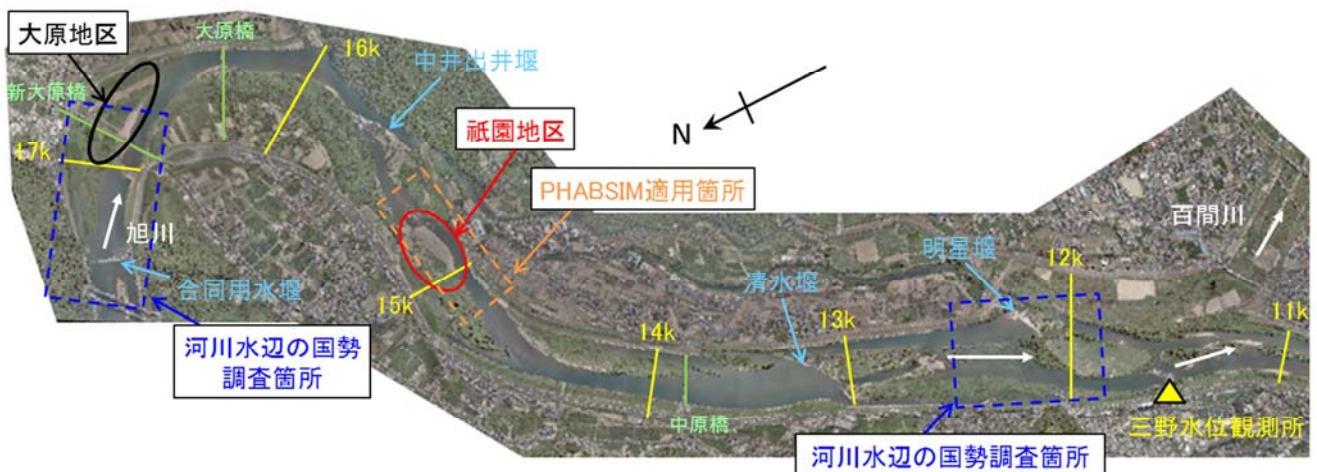


図 2.1 対象河道の航空写真

2.2 対象河道の変遷

2.2.1 礫河原再生事業（祇園地区）

祇園地区では、1970年代まで礫河原であったが、植生の発達、土砂の堆積により河原が縮小していた。事前の植生は、シナダレスズメガヤ、ツルヨシ、ノイバラが優占し、アカメヤナギ、ジャヤナギが水際を主体に樹林を形成していた。礫河原を再生するため、図 2.2 に示すように 15.0km～15.3km 付近の低水路側で砂州を 1～2m 切り下げるとともに、15.0km～15.4km において樹木を伐採することにより、洪水の作用、頻度を増大させる計画とし、2005 年 3 月に現地試験を開始した。



図 2.2 祇園試験区における礫河原の人工整備⁵⁾

2.2.2 河道特性の変遷

祇園地区における河道の変遷を図 2.4 及び図 2.5 に、下牧観測所（19.0km）における年最大ピーク流量を図 2.3 及び表 2.1 に示す。対象地区では、中井出井堰より流下した洪水の主流は、14.8km～15.2km 付近の左岸側へ張り出した砂州によって、左岸側の堤防沿いに寄せられ、その結果 15.0km で著しい河床低下がみられる（図 2.4 上から 1 段目、図 2.5 上から 2 段目破線部）。2005 年には礫河原再生を目的とした砂州の切り下げが行われ、その後発生した 2005 年 9 月洪水（1,003m³/s）、2006 年 7 月洪水（2,733m³/s）では、切り下げた砂州が維持されるとともに、15.2km～15.4km 右岸側の植生が流出し、15.4km 右岸側において 2004 年から 2009 年の間に河床低下が生じている（図 2.4 上から 2 及び 3 段目赤破線部、図 2.5 下段破線部）ことから、洪水時には右岸側にも多くの流量が流れたものと推測できる。また、礫河原再生前に 15.4km 付近で主流となっていた箇所では、砂州や瀬が創出され、単調であった河道から変化に富んだ流れ場が形成された（図 2.4 上から 2 段目青破線部）。2007 年から 2010 年には大きな洪水はなかったが、2011 年 9 月に 3,232m³/s を記録する洪水が発生し、15.2km～15.4km 右岸側で多くの流量が流れ、その後、平水時においても水が流れるようになった（図 2.4 下から 2 段目赤破線部）。また、切り下げ箇所の水際部である 15.0km～15.2km 付近や 15.4km 付近に形成された砂州には植生が発達している（図 2.4 下から 2 段目青破線部）。その後、2016 年には、切り下げ箇所の植生は発達するとともに、15.4km 付近の砂州は縮小し、洪水時の主流は再び左岸側に寄る傾向が見受けられるが、変化に富んだ流れ場が維持できている（図 2.4 下から 1 段目青破線部）。

以上より、砂州の切り下げによって、整備箇所だけでなく、その周辺や上流側でも、その後の中小規模の洪水によって、礫河原が維持・拡大しており、祇園地区は自律的礫河原再生の成功例といえる。

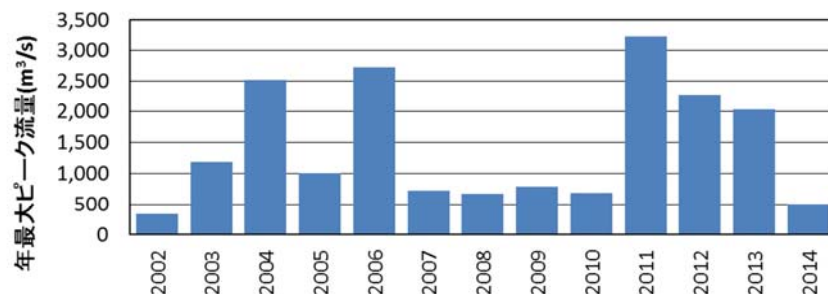


図 2.3 下牧地点年最大ピーク流量（2002 年～2014 年）⁶⁾

表 2.1 下牧地点年最大ピーク流量（2002 年～2014 年）⁶⁾

年	洪水名	ピーク流量(m ³ /s)
2002	H14.05.11	340
2003	H15.07.13	1,178
2004	H16.10.20	2,527
2005	H17.09.07	1,003
2006	H18.07.19	2,733
2007	H19.07.15	721
2008	H20.03.20	672
2009	H21.07.20	787
2010	H22.07.14	681
2011	H23.09.03	3,232
2012	H24.07.07	2,274
2013	H25.09.04	2,034
2014	H26.10.13	495

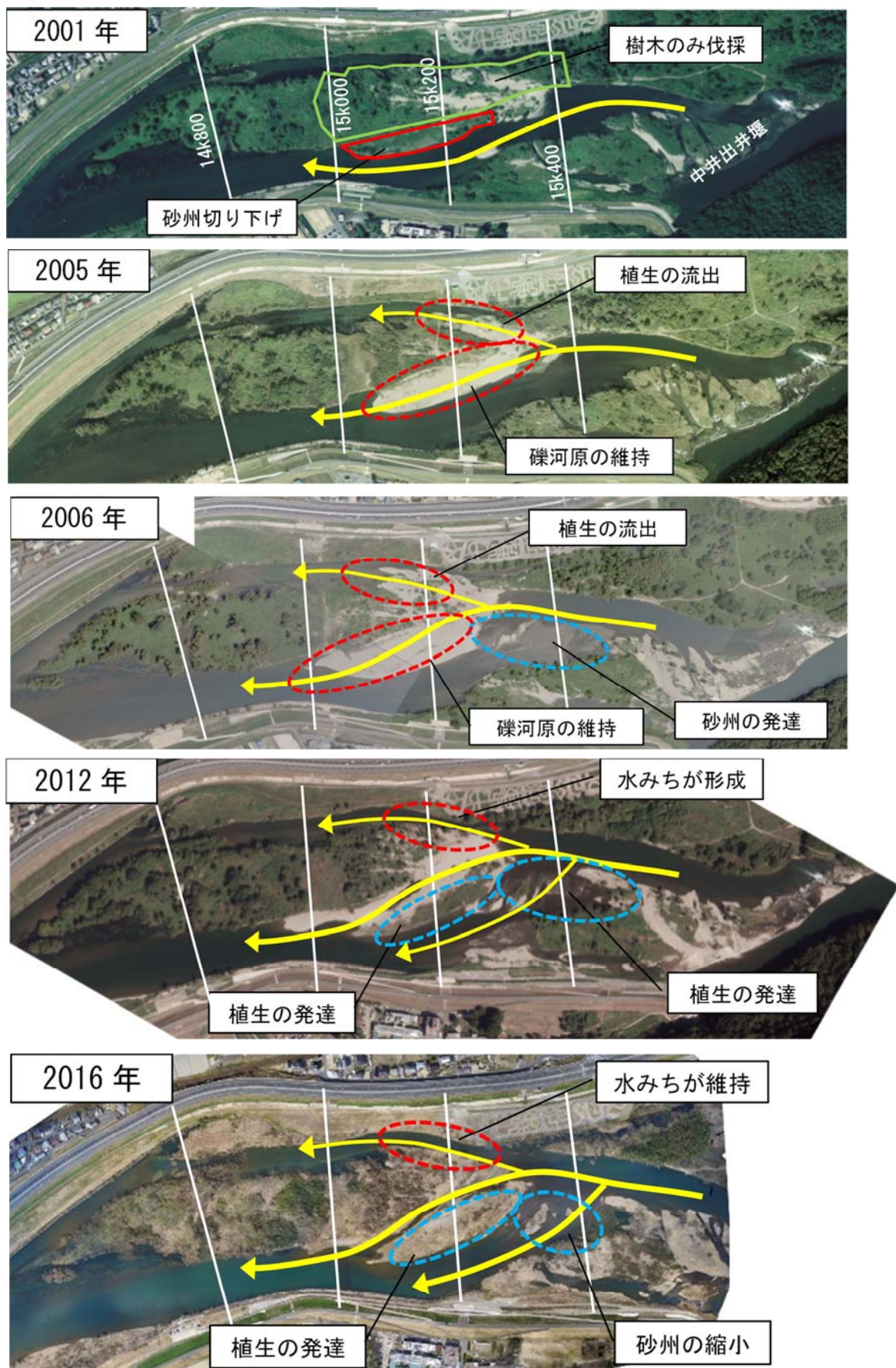


図 2.4 祇園地区における河道の変遷（2001～2016 年）

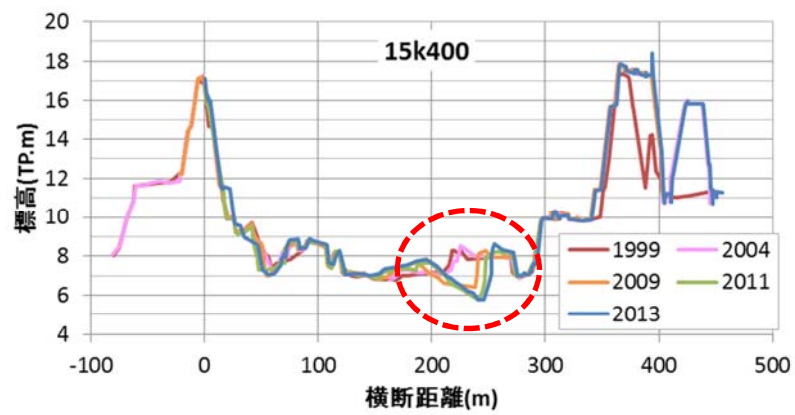
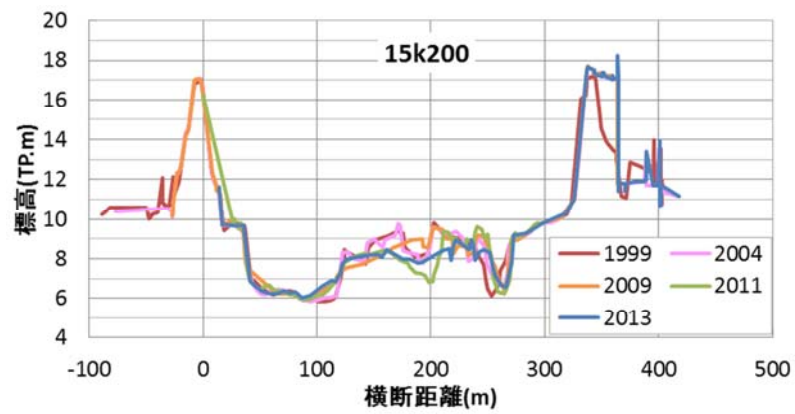
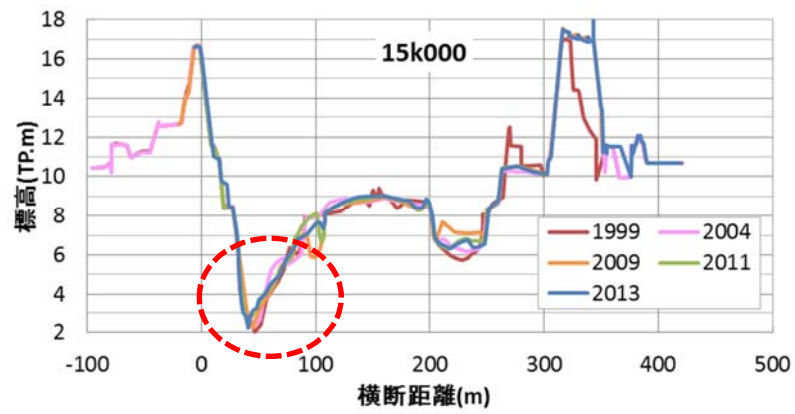
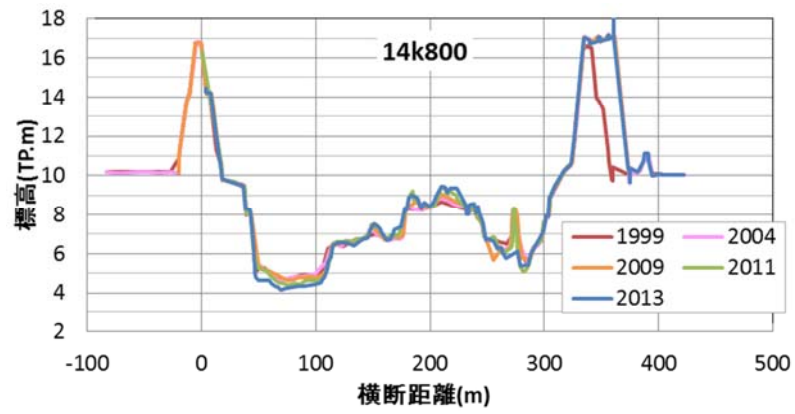


図 2.5 横断の経年変化図 (1999～2013 年)

2.2.3 アユの生息状況

岡山県及び旭川におけるアユの生息状況を把握するため、農林水産省による内水面漁業生産統計調査、国土交通省による河川水辺の国勢調査、岡山県水産研究所の調査結果、地元漁協へのヒアリングをもとに整理した。

(1) 漁獲量調査結果

農林水産省による内水面漁業生産統計調査⁷⁾では、漁獲量の調査を都道府県別で整理されている。なお、主要河川別でも整理されているが、旭川のデータは公表されていない。

中国地方におけるアユの漁獲量の変遷を図 2.6 及び表 2.2 に示す。岡山県におけるアユの漁獲量は、データを入手できた 2003 年以降でみると、2005 年に 76t の漁獲量であったが、2015 年には 15t まで激減している。他の県においても、同様の傾向がみられる。

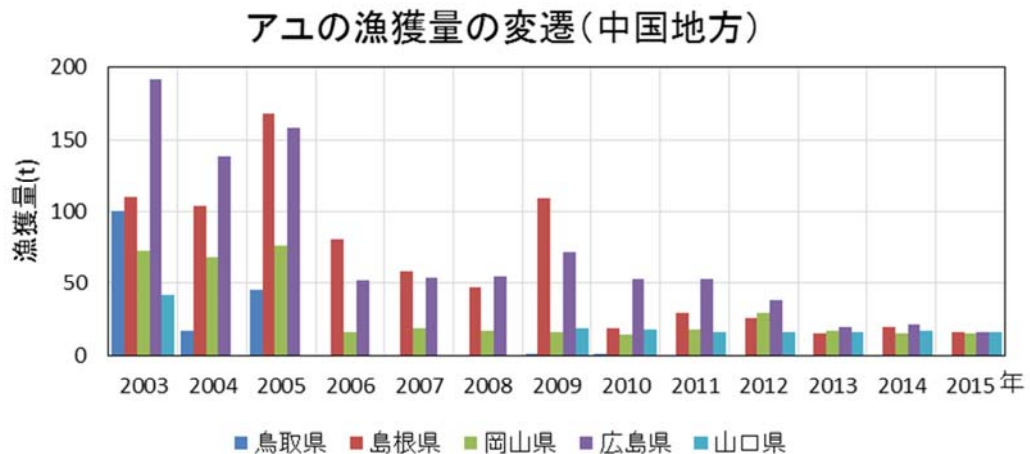


図 2.6 中国地方におけるアユの漁獲量の変遷

表 2.2 中国地方におけるアユの漁獲量の変遷

単位: t

年	鳥取県	島根県	岡山県	広島県	山口県
2003	100	110	73	192	42
2004	17	104	68	139	－
2005	45	168	76	158	－
2006	x	81	16	52	－
2007	x	59	19	54	－
2008	x	47	17	55	－
2009	1	109	16	72	19
2010	1	19	14	53	18
2011	0	29	18	53	16
2012	0	26	29	38	16
2013	0	15	17	20	16
2014	0	20	15	21	17
2015	0	16	15	16	16

－: 漁獲量なし, 0: 1t未満, x: 秘匿措置

2015年の漁獲量は、概数値である

(2) 河川水辺の国勢調査結果

国土交通省岡山河川事務所において、旭川直轄区間で定期的に行われている河川水辺の国勢調査（魚類）⁸⁾をもとに、アユの調査結果（個体数）を整理した。

本研究で対象とする祇園地区周辺では、図 2.7 に示すように、「旭旭岡 2（明星堰）」及び「旭旭岡 3（大原）」で調査が実施されている。2009 年度及び 2014 年度の調査結果を表 2.3 に示すが、いずれの箇所においてもアユの生息が確認されており、2014 年度の「旭旭岡 2（明星堰）」での調査では、個体数は 30 にも及ぶ。

このことから、大原地区と明星堰でアユを確認できているため、アユは祇園地区を遡上していることがわかる。

また、「旭旭岡 2（明星堰）」では 1995 年から 5 回調査が行われており、アユの個体数を整理すると、図 2.11 に示すとおりである。2000 年及び 2005 年には 35、40 個体数が確認されたが、2009 年には減少し、その後 2014 年には 30 個体まで回復している。



図 2.7 調査位置図

表 2.3 河川水辺の国勢調査によるアユの個体数（2009 年度及び 2014 年度）

調査箇所	2009年度調査			2014年度調査		
	夏季	秋季	合計	夏季	秋季	合計
旭旭岡2(明星堰)	7	4	11	27	3	30
旭旭岡3(大原)	3	4	7	12	2	14

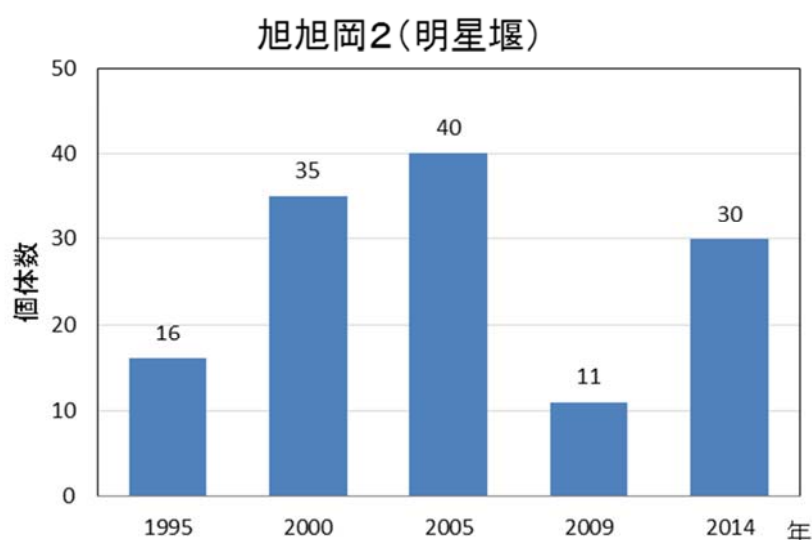


図 2.8 アユの個体数（明星堰）

(3) 岡山県水産研究所の調査結果

岡山県農林水産総合センター水産研究所では、2016年4月に岡山県アユ資源調査報告書⁹⁾を公表している。この報告書によると、2010年～2014年に、旭川、吉井川及び高梁川で産卵場調査、流下仔魚調査、採捕調査、魚道における遡上実態調査、アユ漁獲実態調査を実施している。

産卵場調査では、既往の文献、地元内水面漁業協同組合の組合員への聞き取りにより、図2.9に示す調査箇所を選定している。この調査箇所には、本研究で対象とする祇園地区の瀬(中井堰の瀬)も選定されている。

その結果、旭川では、2013年11月14日に山陽本線鉄橋下(河口から約10km)でアユの産着卵を確認している。しかしながら、本研究で対象とする祇園地区では、産着卵の確認はできていない。また、流下仔魚については、合同堰・クラレ堰下流(2013年10月23日)、合同堰(2013年11月15日)、三野浄水場前(2013年11月19日)で採捕を試みたが、採取できなかったと報告されている。

また、報告書にも記載しているが、各産卵場において、水温、川幅、水深、流速、河床状態を調査しており、祇園地区の瀬(中井堰の瀬)はアユの産卵場に適していると考えられる。



(a) 旭川牟佐井堰(河口から約18km)



(b) 旭川中井堰の瀬(祇園地区)(河口から約16km)



(c) 旭川江川の瀬(河口から約12km)



(d) 山陽本線鉄橋下の瀬(河口から約10km)

※赤丸は、アユの産着卵が確認された箇所

出典：岡山県アユ資源調査報告書 岡山県農林水産総合センター研究所

図 2.9 旭川におけるアユの産卵場

(4) 水質環境特性

大塚ら¹⁰⁾によると、アユの生息に必要な水質環境特性として、次の条件が挙げられている。

BOD : 約 3mg/l 以下

T-N (総窒素) : 約 4mg/l 以下

T-P (総リン) : 約 0.2mg/l 以下

祇園地区周辺（河口から 15km 付近）では、国土交通省岡山河川事務所により、合同堰（河口から 17.4km）において水質観測が行われている⁶⁾。年間で最も水質が悪かった最大値の経年変化をみると、いずれの水質項目も基準値を満たしており、アユの生息に対して良好な水質を維持していることがわかる。

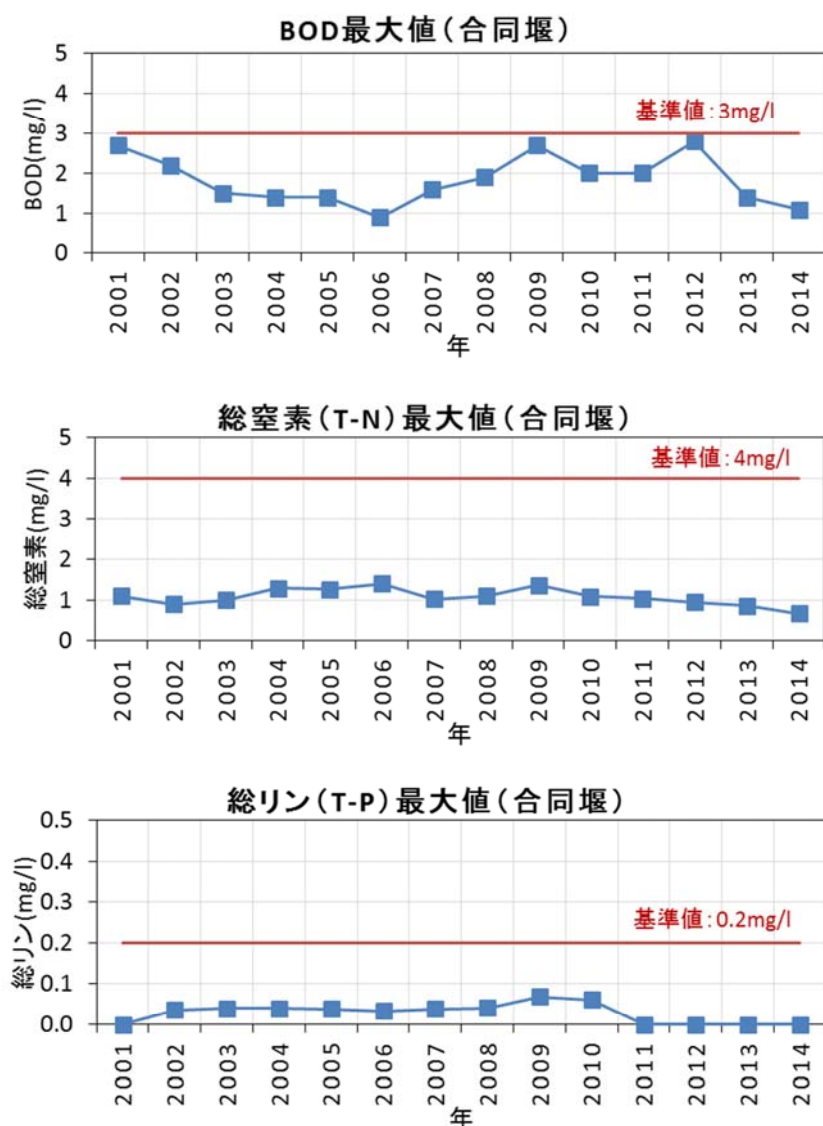


図 2.10 合同堰における水質経年変化（最大値）

(5) 地元水産関係者ヒアリング

祇園地区のアユの生息・産卵状況について確認するため、2015 年 11 月に地元の内水面漁業協同組合の関係者にヒアリングを行った。

ヒアリングによると、祇園地区の切り下げ箇所周辺ではかつてアユの産卵場であったが、滞筋部の河床低下などにより流れが単調になったことから、その機能を徐々に失っていた。しかし、2004 年に実施された砂州の切り下げにより、洪水中に低水路への流れの集中が緩和され、砂州や瀬が創出されたことにより、以前のようなアユの産卵場に適した状態に回復してきている。しかしながら、水産関係者によると、アユの産卵場に適した状態に回復しているものの、アユの数はむしろ減っているという。これは、砂州の切り下げにより右岸側にも水みちができ、全体的に水深が浅くなったことから釣り人が入りやすくなり、産卵期にも関わらず網を使って漁を行い、産卵場を荒らしていること、また、瀬が創出されたことにより水深が浅くなり、カワウに狙われやすくなったことが原因として挙げられている。特に、カワウに関しては、樹林化の進行により、その棲み処が増え、より被害が増加した可能性も考えられる。

ヒアリングの結果から、祇園地区ではアユの生息数は減少しているものの、以前のような産卵場として適した環境が回復していることは事実であるといえる。

2.2.4 流況観測

(1) 調査概要

祇園地区を対象に、平常時の流況（流速、水深）及び河床材料を調査した。調査位置は図 2.11 に示すとおりである。

1) 流況調査

流況調査は右岸側の水みちに 1 測線、左岸側の瀬に縦断方向に 3 測線で実施し、横断方向には概ね 5m ピッチで流速、水深を計測した。当初、右岸側にも 3 測線で調査の実施を試みたが、流速が大きいため川の中に入り調査するには困難なため、1 測線のみとした。また、水際部及び中州中央等の地盤の高さをトータルステーションで計測した。

調査は 2014 年 11 月 27 日、2015 年 7 月 29 日及び 2016 年 5 月 31 日の流量が平水～豊水程度の時期に実施した。表 2.4 に調査日における日水位、日流量及び日水温を示す。なお、水位及び流量は国土交通省水文水質データベースから下牧地点のデータを、水温は岡山県水産研究所 HP¹⁾からクラレ堰の観測データをダウンロードした。

下牧地点における流況及び位況⁶⁾を表 2.5 及び表 2.6 に示すが、近年のデータからみると概ね平水位程度であることがわかる。

参考のために、調査年の日流量及び日水位を図 2.12 (2) に、日平均水温を図 2.13 に示す。

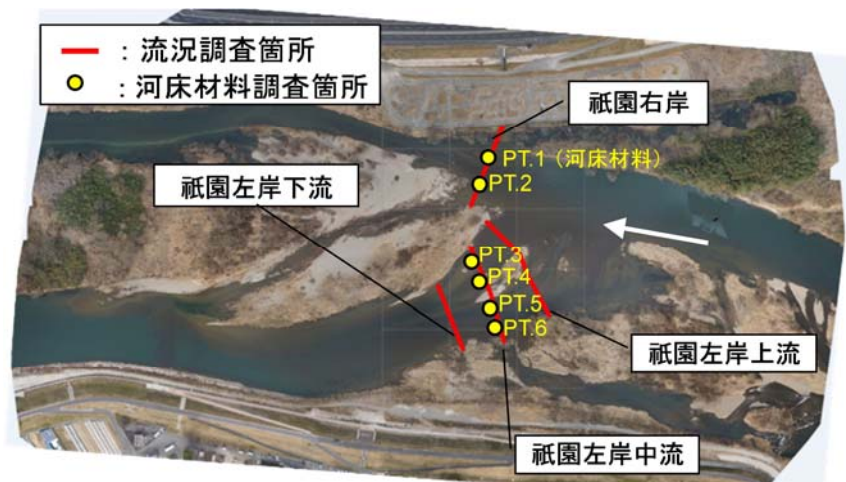


図 2.11 現地調査位置図



写真 2.1 現地調査の様子

表 2.4 調査時の流況及び水温

調査日	日水位(m)	日流量(m ³ /s)	日水温(℃)
2014年11月27日	1.91	34.26	12.6
2015年7月29日	2.12	41.00	26.5
2016年5月31日	1.93	—	—

※日流量及び日水位は下牧地点(国土交通省)、水温はクラレ堰(岡山県水産研究所)の値である
2016年の日流量、日水温は公表されていない

表 2.5 下牧地点における流況表(2002年～2014年)

年	最大流量		豊水 流量	平水 流量	低水 流量	渇水 流量	最小流量		平均 流量
	流量	生起日時					流量	生起日時	
2002	339.92	05月11日 06:00	48.03	36.47	22.82	10.62	0.08	10月05日 04:00	40.09
2003	1,177.70	07月13日 22:00	72.67	46.35	29.01	18.60	15.32	09月07日 16:00	62.43
2004	2,527.40	10月20日 21:00	377.38	302.70	224.27	145.29	120.40	01月06日 01:00	307.49
2005	1,002.97	09月07日 08:00	223.43	207.58	153.49	113.21	109.79	06月07日 14:00	197.06
2006	2,733.47	07月19日 10:00	100.00	73.93	26.98	8.58	6.86	01月25日 06:00	78.79
2007	720.81	07月15日 02:00	61.49	14.97	10.39	4.26	2.59	04月29日 02:00	37.87
2008	671.65	03月20日 07:00	70.50	53.57	10.75	5.79	3.79	01月08日 13:00	48.96
2009	786.87	07月20日 09:00	77.37	56.15	25.90	10.25	4.80	05月20日 18:00	60.92
2010	1,181.30	07月14日 17:00	30.45	14.47	4.06	0.13	0.00	05月19日 12:00	31.86
2011	3,232.32	09月03日 22:00	66.27	41.94	34.66	18.63	15.96	12月20日 11:00	69.29
2012	2,274.40	07月07日 07:00	52.96	33.86	22.24	10.01	6.61	11月14日 21:00	48.22
2013	2,033.91	09月04日 15:00	44.94	34.29	28.67	18.37	13.68	01月29日 14:00	53.23
2014	495.01	10月13日 24:00	53.72	37.53	29.73	17.18	11.33	11月20日 20:00	51.05

※2015年は公表されていない

出典：国土交通省 水文水質データベース

表 2.6 下牧地点における位況表(2002年～2015年)

年	最高水位		豊水位	平水位	低水位	渇水位	最低水位		平均 水位
	水位	生起日時					水位	生起日時	
2002	2.960	05月11日 06:00	2.000	1.940	1.530	1.200	1.160	11月11日 21:00	1.810
2003	4.600	07月13日 22:00	2.150	1.960	1.590	1.370	1.300	11月08日 17:00	1.920
2004	6.400	10月20日 21:00	2.200	1.980	1.710	1.410	1.290	01月06日 01:00	1.990
2005	4.280	09月07日 08:00	2.000	1.930	1.650	1.410	1.390	06月07日 14:00	1.860
2006	7.210	07月19日 10:00	2.200	2.030	1.630	1.370	1.330	01月25日 06:00	1.980
2007	4.240	07月15日 02:00	2.000	1.530	1.450	1.310	1.260	04月29日 02:00	1.700
2008	4.130	03月20日 07:00	2.060	1.930	1.460	1.350	1.300	01月08日 13:00	1.820
2009	4.370	07月20日 09:00	2.080	1.930	1.640	1.420	1.300	05月20日 18:00	1.910
2010	4.110	07月14日 17:00	2.130	1.990	1.610	1.540	1.430	12月02日 15:00	1.970
2011	7.920	09月03日 22:00	2.130	2.020	1.930	1.580	1.510	12月20日 16:00	2.070
2012	6.580	07月07日 07:00	2.080	1.960	1.730	1.470	1.380	11月14日 24:00	1.940
2013	6.220	09月04日 15:00	2.040	1.940	1.830	1.580	1.480	01月29日 11:00	1.980
2014	3.540	10月14日 01:00	2.090	1.980	1.830	1.570	1.450	11月20日 20:00	1.990
2015	3.830	07月17日 15:00	2.190	2.080	1.970	1.580	1.480	11月01日 22:00	2.080

出典：国土交通省 水文水質データベース



出典：国土交通省 水文水質データベース

図 2.12 (1) 下牧地点における日流量及び日水位



出典：国土交通省 水文水質データベース

図 2.12 (2) 下牧地点における日流量及び日水位



出典：岡山県水産研究所 HP

図 2.13 クラレ堰における日平均水温

(2) 調査結果

1) 流況調査

流況調査では、図 2.11 に示す横断測線上を概ね 5m ピッチで、流速と水深を計測した。流速は、電磁流速計を用い、6 割水深程度の位置で計測した。水際及び中州中央等については、トータルステーションにより標高を計測した。

計測結果を図 2.14～図 2.16 及び表 2.7～表 2.9 に示す。

① 2014 年 11 月 29 日（日平均流量 34.26m³/s、日平均水位 1.91m）

右岸側の濤筋では流速は最大 80～90cm/s 程度であり、水深は深いところで 80～90cm 程度となっている。

左岸側の濤筋（上流及び中流）では、左岸側と河道中央寄りの大きく 2 箇所流れ場を形成している。主流は左岸側であり、流速は 100～140cm/s となる箇所もみられ、河道中央寄りの流れ場でも流速が 100cm/s を超える箇所がみられる。水深は左岸側で深く、最大水深 80～90cm 程度であるが、河道中央寄りには最大水深 40～50cm 程度である。また、下流部は 2 箇所の流れ場が合流し、流速は最大 120～130cm/s、水深は最大 100cm を超える。

② 2015 年 7 月 29 日（日平均流量 40.00m³/s、日平均水位 2.12m）

右岸側の濤筋では流速は最大 60～70cm/s 程度であり、水深は深いところで 80～90cm 程度となっている。

左岸側の濤筋（上流及び中流）では、左岸側が主流となっており、流速は最大 160cm/s を超える箇所もみられ、河道中央寄りの流れ場でも流速が 100cm/s を超える箇所がみられる。水深は左岸側で深く、最大水深 80～90cm 程度であるが、河道中央寄りには最大水深 50～60cm 程度である。また、下流部では流速は最大 120～130cm/s、水深は最大 100cm を超える。

③ 2016 年 5 月 31 日（日平均水位 1.93m）

右岸側の濤筋では流速は最大 80～90cm/s 程度であり、水深は深いところで 80～90cm 程度となっている。

左岸側の濤筋（上流及び中流）では、左岸側が主流となっており、一部、流速計の故障により計測できなかったものの、流速は最大 160cm/s 程度となる箇所もみられ、河道中央寄りの流れ場でも流速が最大 130～140cm/s 程度となる箇所がみられる。水深は左岸側で深く、最大水深 70～80cm 程度であるが、河道中央寄りには最大水深 40～50cm 程度である。また、下流部では、水深は最大 100cm を超える。

2.4.1 に後述するが、大塚ら¹⁰⁾が設定したアユの産卵場に適した流速は、60～100cm/s で選好値 1.0 としている。祇園地区においては、左岸側の主流部で 100cm/s を超過する箇所がみられるものの、平水時の流速の観点からみれば、アユの産卵場に適した箇所であることがわかる。

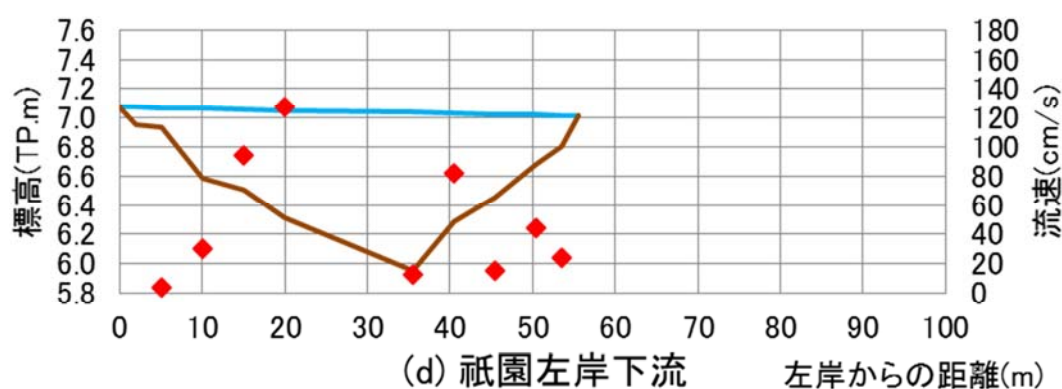
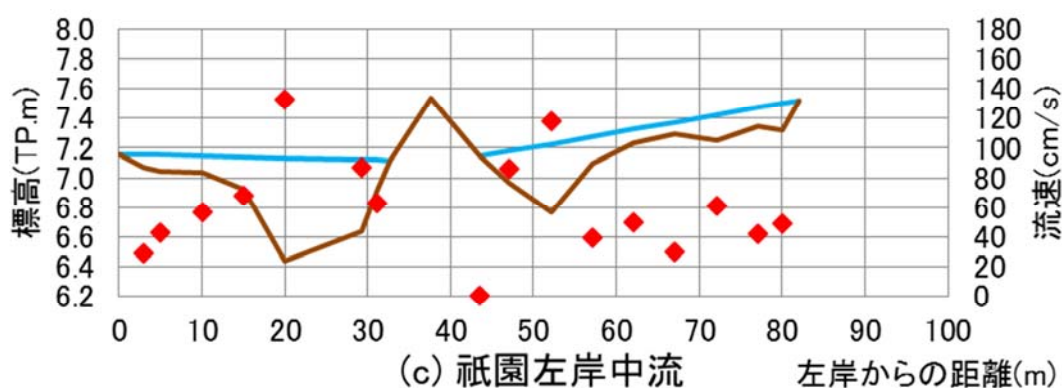
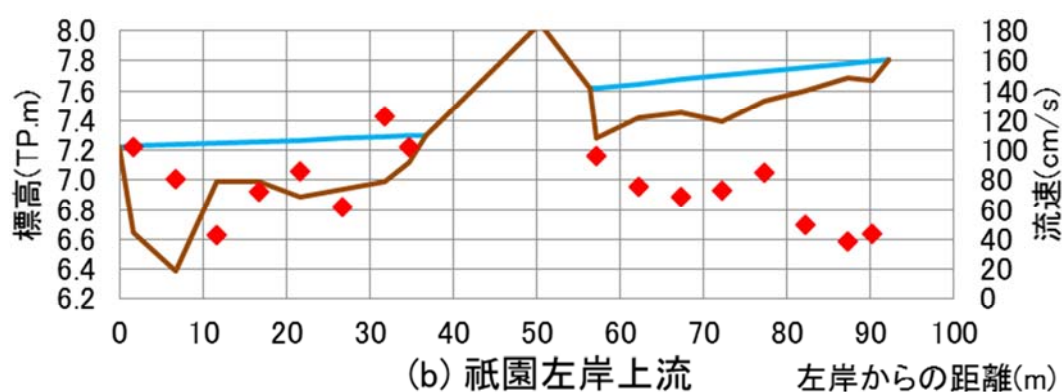
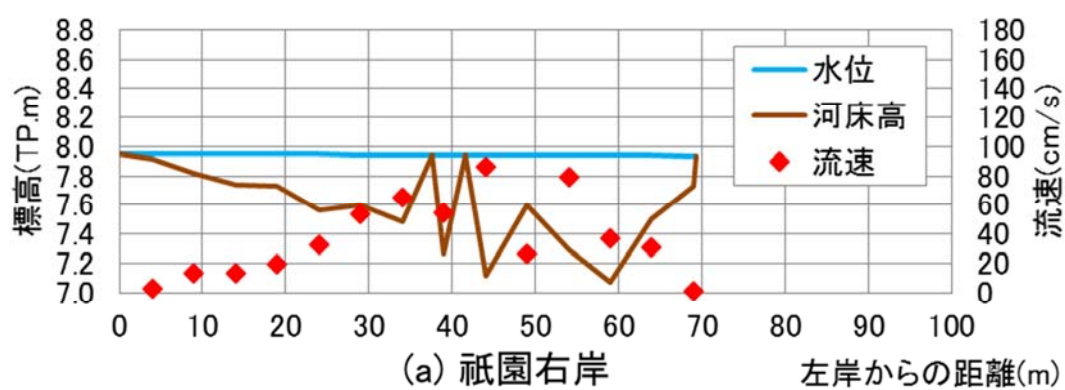


図 2.14 流況調査結果 (2014 年 11 月 27 日)

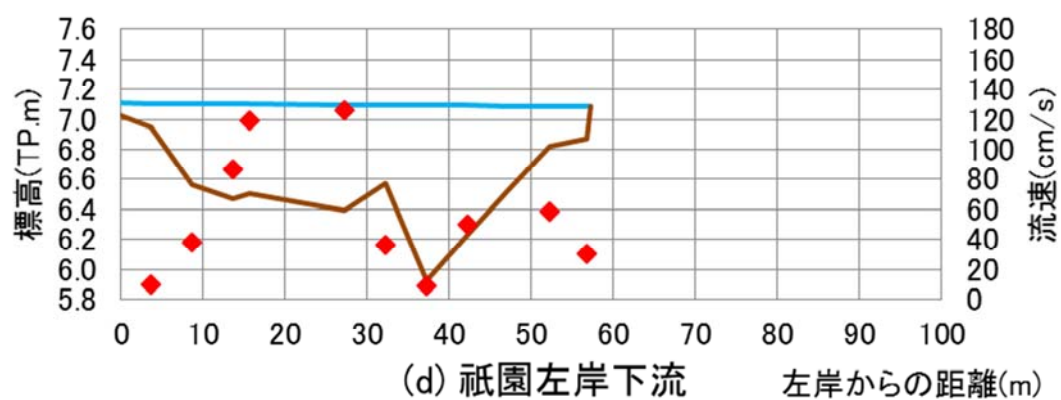
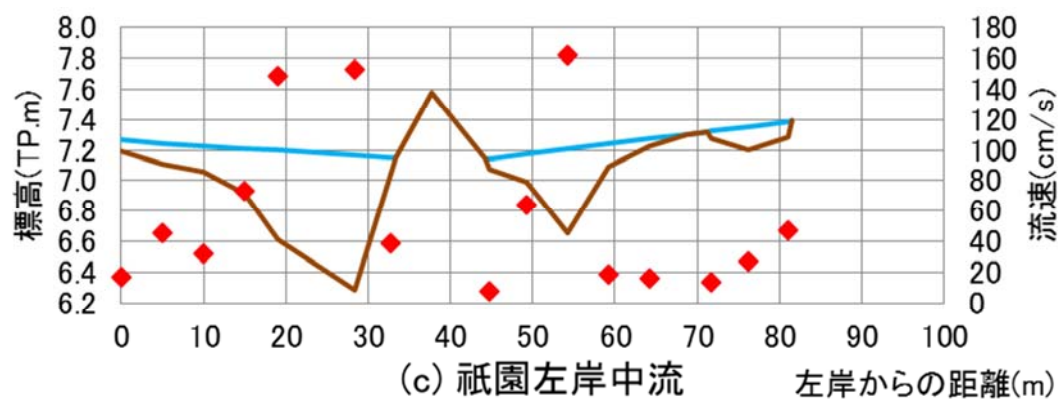
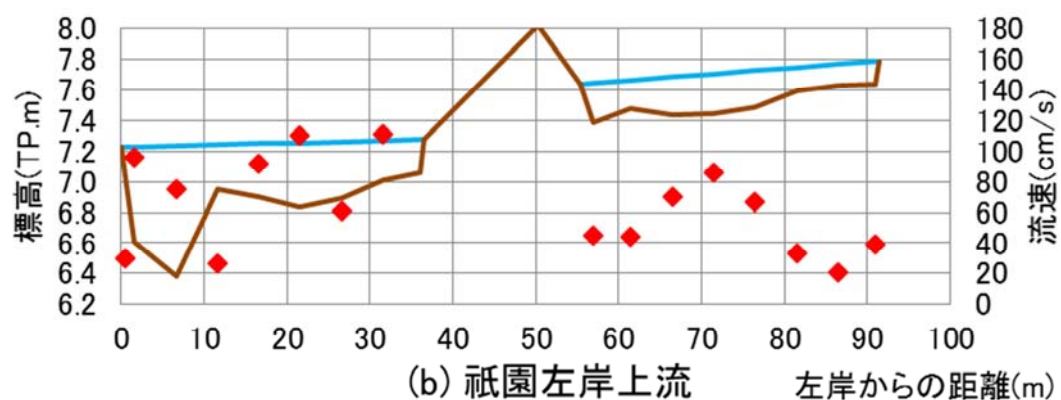
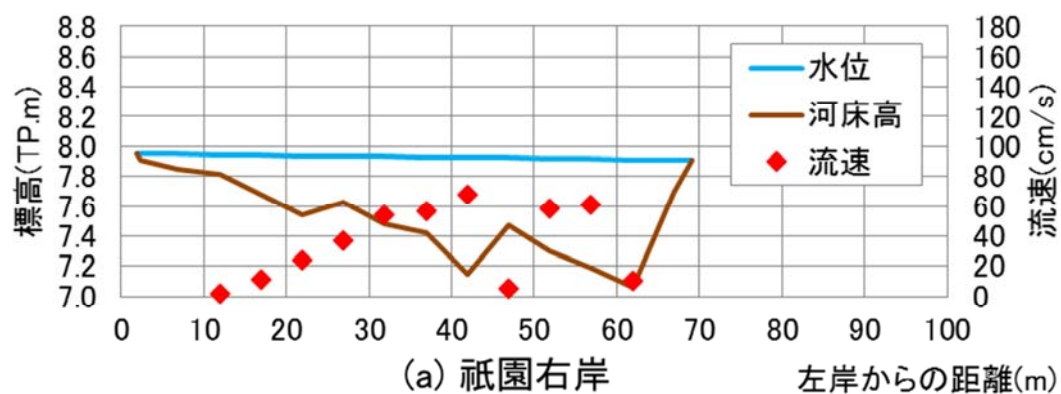


図 2.15 流況調査結果 (2015 年 7 月 29 日)

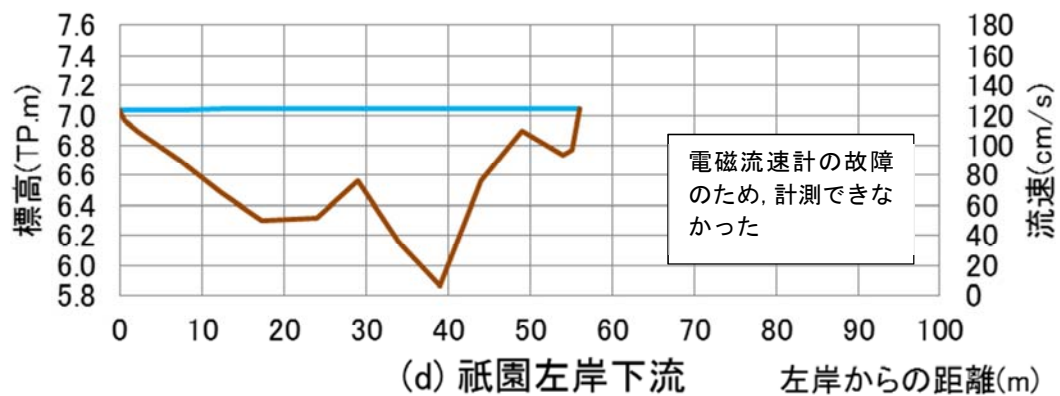
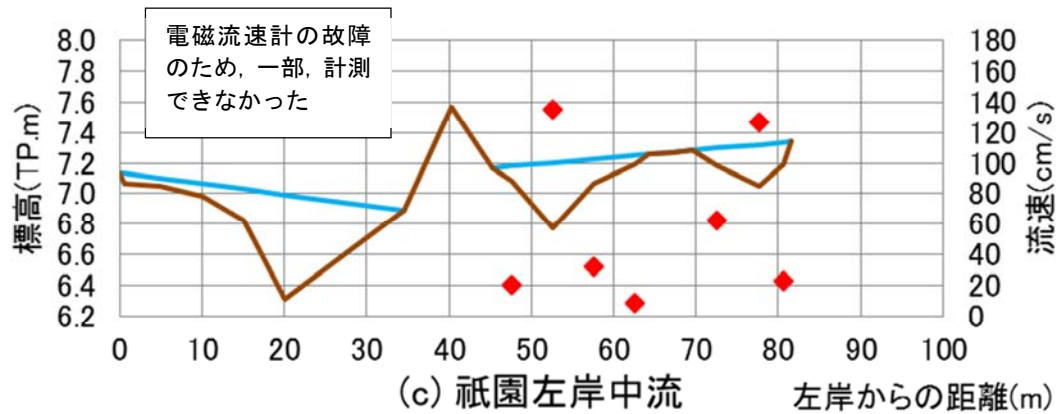
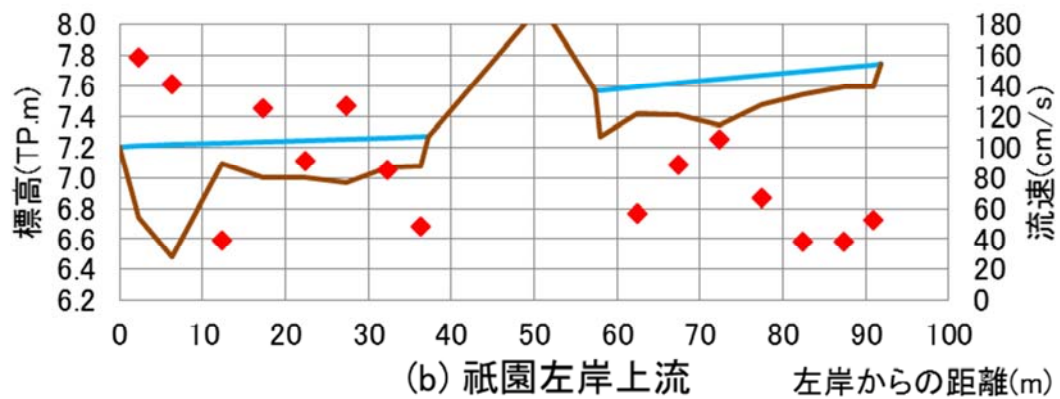
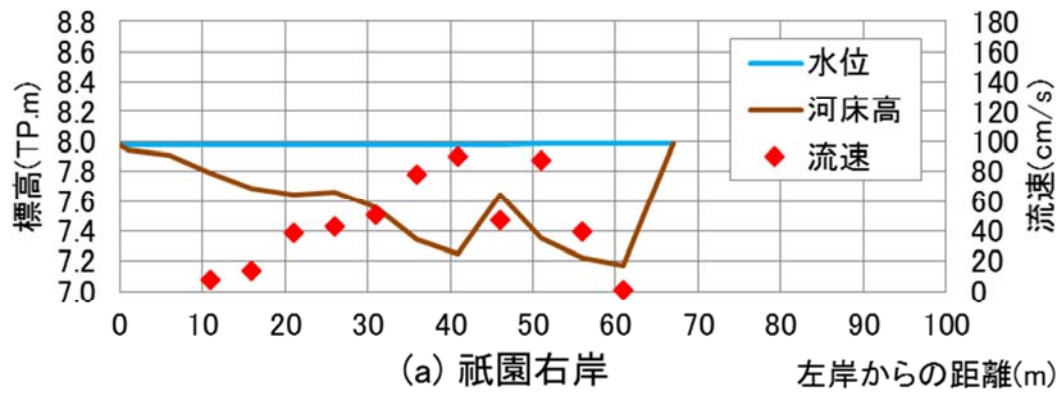


図 2.16 流況調査結果 (2016 年 5 月 31 日)

表 2.7 (1) 流況調査結果 (2014 年 11 月 27 日)

(a) 祇園右岸

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
0.0	0.000	7.953	7.953				
4.0	0.040	7.952	7.912	2.6	2.6	2.0	2.40
9.0	0.130	7.951	7.821	12.3	13.1	15.6	13.67
14.0	0.210	7.950	7.740	12.4	12.8	13.5	12.90
19.0	0.220	7.949	7.729	20.6	19.0	18.1	19.23
24.0	0.380	7.947	7.567	33.7	31.9	30.9	32.17
29.0	0.350	7.946	7.596	55.6	52.4	53.8	53.93
34.0	0.460	7.945	7.485	66.4	64.5	65.7	65.53
37.6	0.000	7.944	7.944				
39.0	0.680	7.944	7.264	52.2	57.2	53.5	54.30
41.6	0.000	7.943	7.943				
44.0	0.830	7.943	7.113	84.8	87.5	86.5	86.27
49.0	0.340	7.942	7.602	27.5	25.8	24.8	26.03
54.0	0.650	7.941	7.291	79.5	77.9	80.8	79.40
59.0	0.870	7.939	7.069	36.4	38.4	37.3	37.37
64.0	0.440	7.938	7.498	30.3	30.9	31.3	30.83
69.0	0.210	7.937	7.727	1.1	1.2	1.0	1.10
69.3	0.000	7.937	7.937				

(b) 祇園左岸上流

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
0.0	0.000	7.225	7.225				
1.7	0.580	7.228	6.648	109.3	99.2	97.7	102.07
6.7	0.850	7.239	6.389	82.7	81.5	77.3	80.50
11.7	0.260	7.249	6.989	36.2	46.0	46.6	42.93
16.7	0.270	7.259	6.989	75.6	62.8	76.9	71.77
21.7	0.380	7.269	6.889	88.7	85.0	83.5	85.73
26.7	0.340	7.280	6.940	61.1	63.2	62.1	62.13
31.7	0.300	7.290	6.990	123.3	122.3	122.0	122.53
34.7	0.175	7.296	7.121	101.1	104.2	100.6	101.97
36.7	0.000	7.300	7.300				
50.3			8.048				
56.3	0.000	7.615	7.615				
57.2	0.335	7.620	7.285	96.9	97.6	93.9	96.13
62.2	0.225	7.647	7.422	77.6	73.8	74.8	75.40
67.2	0.220	7.675	7.455	71.5	66.6	68.6	68.90
72.2	0.305	7.702	7.397	74.2	71.5	74.3	73.33
77.2	0.195	7.729	7.534	84.2	84.9	86.4	85.17
82.2	0.155	7.756	7.601	50.7	51.1	47.8	49.87
87.2	0.095	7.784	7.689	38.1	38.0	39.0	38.37
90.2	0.135	7.800	7.665	42.1	43.8	45.8	43.90
92.2	0.000	7.811	7.811				

表 2.7 (2) 流況調査結果 (2014 年 11 月 27 日)

(c) 祇園左岸中流

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
0.0	0.000	7.160	7.160				
3.0	0.090	7.156	7.066	28.3	29.7	30.2	29.40
5.0	0.105	7.153	7.048	48.3	40.6	41.1	43.33
10.0	0.115	7.147	7.032	57.0	56.8	56.5	56.77
15.0	0.220	7.140	6.920	66.4	69.1	68.2	67.90
20.0	0.690	7.134	6.444	130.7	135.0	133.5	133.07
29.2	0.480	7.121	6.641	83.9	91.0	85.9	86.93
31.2	0.205	7.119	6.914	61.2	62.1	65.2	62.83
32.6	0.000	7.117	7.117				
37.7			7.539				
43.5	0.065	7.145	7.145	0.6	0.5	0.5	0.53
47.1	0.215	7.180	6.965	86.6	86.5	84.7	85.93
52.1	0.460	7.229	6.769	114.0	121.6	119.2	118.27
57.1	0.180	7.278	7.098	40.5	37.6	39.5	39.20
62.1	0.095	7.327	7.232	48.0	49.0	51.5	49.50
67.1	0.085	7.376	7.291	27.4	30.8	32.0	30.07
72.1	0.175	7.425	7.250	58.7	59.0	66.2	61.30
77.1	0.130	7.474	7.344	44.0	39.6	43.0	42.20
80.1	0.185	7.503	7.318	50.7	49.5	46.2	48.80
82.1	0.000	7.523	7.523				

(d) 祇園左岸下流

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
0.0	0.000	7.076	7.076				
2.0	0.120	7.074	6.954	-0.9	-0.8	-1.3	-1.00
5.0	0.135	7.070	6.935	4.8	4.0	3.9	4.23
10.0	0.480	7.065	6.585	29.1	29.3	31.0	29.80
15.0	0.555	7.059	6.504	93.2	92.7	96.1	94.00
20.0	0.740	7.054	6.314	133.4	132.7	116.2	127.43
35.5	1.080	7.036	5.956	15.9	11.0	10.1	12.33
40.5	0.740	7.031	6.291	82.8	80.8	82.7	82.10
45.5	0.570	7.025	6.455	13.4	17.1	15.7	15.40
50.5	0.335	7.020	6.685	46.9	42.5	44.0	44.47
53.5	0.215	7.016	6.801	25.0	23.7	24.2	24.30
55.5	0.000	7.014	7.014				

表 2.8 (1) 流況調査結果 (2015 年 7 月 29 日)

(a) 祇園右岸

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
1.9	0.000	7.951	7.951				
2.4	0.040	7.951	7.911	0.0	0.0	0.0	
6.9	0.100	7.948	7.848	-8.1	-9.3	-9.6	-9.00
11.9	0.130	7.944	7.814	1.2	1.2	2.0	1.47
16.9	0.260	7.941	7.681	10.8	10.7	10.8	10.77
21.9	0.400	7.938	7.538	24.6	21.5	25.5	23.87
26.9	0.310	7.935	7.625	36.3	37.5	37.3	37.03
31.9	0.450	7.931	7.481	52.7	54.5	53.8	53.67
36.9	0.510	7.928	7.418	58.7	55.1	57.0	56.93
41.9	0.780	7.925	7.145	68.6	67.4	67.9	67.97
46.9	0.450	7.922	7.472	6.1	4.6	5.5	5.40
51.9	0.620	7.918	7.298	56.7	59.6	58.6	58.30
56.9	0.730	7.915	7.185	60.6	62.4	59.0	60.67
61.9	0.850	7.912	7.062	11.2	10.6	10.3	10.70
66.9	0.210	7.908	7.698	0.0	0.0	0.0	
69.1	0.000	7.907	7.907				

(b) 祇園左岸上流

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
0.0	0.000	7.225	7.225				
0.5	0.190	7.226	7.036	27.8	26.3	35.1	29.73
1.6	0.620	7.227	6.607	96.8	95.1	96.6	96.17
6.6	0.850	7.234	6.384	70.2	77.6	78.1	75.30
11.6	0.290	7.241	6.951	26.4	27.6	27	27.00
16.6	0.350	7.249	6.899	91.4	92	91.4	91.60
21.6	0.420	7.256	6.836	106.2	108.5	115.3	110.00
26.6	0.370	7.263	6.893	61.3	60.4	62.2	61.30
31.6	0.260	7.270	7.010	120.5	110	101.9	110.80
36.1	0.220	7.276	7.056				
36.6	0.000	7.277	7.277				
50.3			8.018				
55.4	0.000	7.640	7.640				
57.0	0.260	7.647	7.387	45.1	42	47.3	44.80
61.5	0.190	7.665	7.475	44.8	47	41.2	44.33
66.5	0.250	7.686	7.436	67.8	71.3	71.7	70.27
71.5	0.260	7.706	7.446	86.9	88.2	82	85.70
76.5	0.240	7.727	7.487	67.1	64.3	68.4	66.60
81.5	0.150	7.748	7.598	35.3	32	33	33.43
86.5	0.140	7.768	7.628	21.5	18.4	23.3	21.07
91.0	0.150	7.787	7.637	40.5	37.9	38.9	39.10
91.5	0.000	7.789	7.789				

表 2.8 (2) 流況調査結果 (2015 年 7 月 29 日)

(c) 祇園左岸中流

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
0.0	0.070	7.264	7.194	17.9	16.4	15.1	16.47
5.0	0.140	7.247	7.107	47.3	45.7	44.3	45.77
10.0	0.170	7.230	7.060	31.2	32.3	33.5	32.33
15.0	0.300	7.213	6.913	74.5	70.7	75.4	73.53
19.0	0.590	7.199	6.609	157.4	143.8	144.8	148.67
28.3	0.880	7.167	6.287	146.7	156.5	156.6	153.27
32.8	0.110	7.152	7.042	35.9	37.3	42.2	38.47
33.3	0.000	7.150	7.150				
37.7			7.581				
44.2	0.000	7.138	7.138				
44.7	0.070	7.141	7.071	6.6	7.3	8.7	7.53
49.2	0.180	7.172	6.992	65.7	61.4	64.0	63.70
54.2	0.550	7.206	6.656	165.0	166.8	154.5	162.10
59.2	0.150	7.239	7.089	20.2	18.5	17.4	18.70
64.2	0.050	7.273	7.223	15.9	15.5	15.6	15.67
68.7	0.000	7.304	7.304				
71.2	0.000	7.320	7.320				
71.7	0.050	7.324	7.274	14.3	13.3	12.9	13.50
76.2	0.150	7.354	7.204	25.2	24.3	30.9	26.80
81.0	0.100	7.387	7.287	46.7	45.7	48.8	47.07
81.5	0.000	7.390	7.390				

(d) 祇園左岸下流

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
-1.4	0.000	7.109	7.109				
-0.9	0.070	7.109	7.039				
3.6	0.160	7.107	6.947	10.4	9.7	9.2	9.77
8.6	0.540	7.105	6.565	37.6	39.9	38.2	38.57
13.6	0.630	7.103	6.473	88.9	81.8	89.6	86.77
15.6	0.600	7.102	6.502	119.1	121.1	118.1	119.43
27.2	0.700	7.097	6.397	126.9	131.5	119.0	125.80
32.2	0.520	7.095	6.575	39.9	33.6	36.2	36.57
37.2	1.170	7.093	5.923	10.6	7.1	9.7	9.13
42.2	0.860	7.091	6.231	52.8	47.2	50.3	50.10
47.2	0.560	7.089	6.529	-3.2	1.0	-0.2	-0.80
52.2	0.270	7.087	6.817	57.1	58.9	58.8	58.27
56.7	0.210	7.085	6.875	30.0	29.6	31.7	30.43
57.2	0.000	7.085	7.085				

(a) 祇園右岸 表 2.9 (1) 流況調査結果 (2016 年 5 月 31 日)

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
0.0	0.000	7.977	7.977				
1.0	0.035	7.977	7.942				
6.0	0.065	7.978	7.913				
11.0	0.190	7.978	7.788	8.0	7.1	7.7	7.60
16.0	0.290	7.978	7.688	14.5	13.5	13.6	13.87
21.0	0.335	7.979	7.644	44.0	39.5	32.8	38.77
26.0	0.320	7.979	7.659	43.7	41.7	43.2	42.87
31.0	0.425	7.980	7.555	54.3	51.0	45.7	50.33
36.0	0.640	7.980	7.340	79.3	76.7	77.7	77.90
41.0	0.735	7.981	7.246	90.8	89.0	89.9	89.90
46.0	0.335	7.981	7.646	47.2	45.8	48.2	47.07
51.0	0.630	7.982	7.352	89.0	89.9	83.7	87.53
56.0	0.755	7.982	7.227	40.5	37.1	39.6	39.07
61.0	0.815	7.982	7.167	0.8	0.5	1.8	1.03
67.0	0.000	7.983	7.983				

(b) 祇園左岸上流

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
0.0	0.000	7.206	7.206				
2.3	0.470	7.210	6.740	158.6	160.3	156.3	158.40
6.3	0.730	7.216	6.486	128.1	149.2	147.1	141.47
12.3	0.130	7.226	7.096	39.2	42.0	37.4	39.53
17.3	0.230	7.234	7.004	125.5	127.3	123.2	125.33
22.3	0.240	7.242	7.002	96.3	96.9	81.1	91.43
27.3	0.280	7.251	6.971	127.6	126.2	127.8	127.20
32.3	0.190	7.259	7.069	82.2	84.3	87.9	84.80
36.3	0.190	7.265	7.075	49.0	48.6	48.5	48.70
37.3	0.000	7.267	7.267				
50.8			8.127				
57.4	0.000	7.566	7.566				
57.9	0.220	7.569	7.267				
62.4	0.170	7.592	7.422	59.3	57.4	53.6	56.77
67.4	0.210	7.617	7.407	91.7	86.7	86.3	88.23
72.4	0.300	7.643	7.343	103.7	110.1	101.3	105.03
77.4	0.190	7.669	7.479	66.5	68.1	64.8	66.47
82.4	0.150	7.694	7.544	36.6	40.8	36.4	37.93
87.4	0.125	7.720	7.595	39.2	38.8	37.3	38.43
90.9	0.140	7.738	7.598	52.4	51.4	54.6	52.80
91.9	0.060	7.743	7.743				

表 2.9 (2) 流況調査結果 (2016 年 5 月 31 日)

(c) 祇園左岸中流

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
0.0	0.000	7.134	7.134				
0.5	0.065	7.130	7.065				
5.0	0.050	7.099	7.049				
10.0	0.080	7.064	6.984				
15.0	0.210	7.029	6.819				
20.0	0.680	6.994	6.314				
34.6	0.000	6.892	6.892				
40.3			7.570				
45.2	0.000	7.169	7.169				
47.6	0.100	7.180	7.080	21.4	18.1	21.8	20.43
52.6	0.430	7.204	6.774	135.9	138.9	130.2	135.00
57.6	0.160	7.227	7.067	31.0	29.5	35.0	31.83
62.6	0.055	7.251	7.196	8.7	8.9	7.1	8.23
64.3	0.000	7.259	7.259				
67.0		7.271	7.271				
69.6	0.000	7.284	7.284				
72.6	0.110	7.298	7.188	65.2	59.2	63.6	62.67
77.6	0.270	7.321	7.051	129.9	130.8	119.2	126.63
80.6	0.145	7.335	7.190	22.0	23.4	23.3	22.90
81.6	0.000	7.340	7.340				

電磁流速計の故障のため、一部、計測できなかった

(d) 祇園左岸下流

左岸からの 横断距離 (m)	観測結果						
	水深 (m)	水位 (TP.m)	河床高 (TP.m)	流速(cm/s)			
				1回	2回	3回	平均
0.0	0.000	7.037	7.037				
0.5	0.075	7.037	6.962				
2.3	0.145	7.037	6.892				
7.3	0.340	7.038	6.698				
12.3	0.550	7.039	6.489				
17.3	0.740	7.040	6.300				
24.0	0.720	7.041	6.321				
29.0	0.480	7.042	6.562				
34.0	0.890	7.042	6.152				
39.0	1.175	7.043	5.868				
44.0	0.480	7.044	6.564				
49.0	0.145	7.045	6.900				
54.0	0.310	7.046	6.736				
55.1	0.280	7.046	6.766				
56.1	0.000	7.046	7.046				

電磁流速計の故障のため、計測できなかった

2) 河床変動調査

2014年11月27日、2015年7月29日及び2016年5月31日に調査した河床高（横断面図）について比較したものを図 2.17 に示す。

横断面図は、流速観測中に計測した水深から河床高を推定し作成している。その際、水際についてはトータルステーションにより位置及び高さを特定し、左岸及び右岸で特定した水際の高さを直線で結んだラインを水面としている。横断面図作成にあつての精度の問題はあるが、一部、河床変動がみられるものの、2014年11月から2016年5月にかけて大きな出水がなかったことから、滞筋の位置が変化するほどの大きな河床変動はみられない。

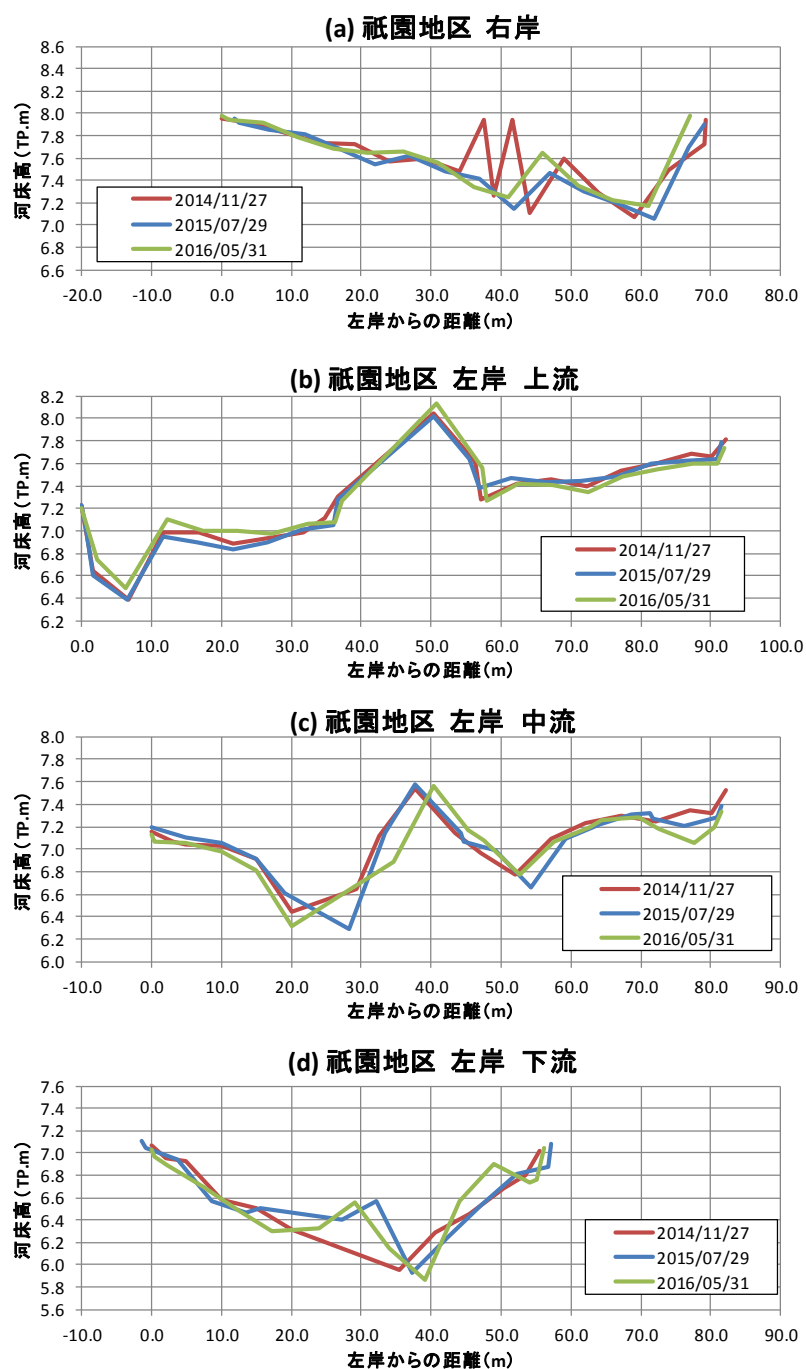


図 2.17 横断面図の比較

3) 河床材料調査

2015年7月29日の流況調査後、図 2.11 に示す PT.1～PT.6 で河床材料を採取し、ふるい分け試験により粒度分布を作成し、図 2.18 に示した。

これより、いずれの調査箇所も $d_{60}=50\sim100\text{mm}$ 程度であるが、右岸側の PT.1 では、他と比べて粒径は非常に小さく、 d_{60} は 1mm 以下となっている。図 2.5 の下段破線部に示したように、この箇所は河床低下が顕著にみられる箇所であるが、砂州切り下げ後に洪水時の流れが変化したことのほか、粒径が小さいことも河床低下を引き起こした原因であると考えられる。河床変動解析の際には、再現性向上のため、PT.1 での河床材料調査結果を反映することが望ましい。

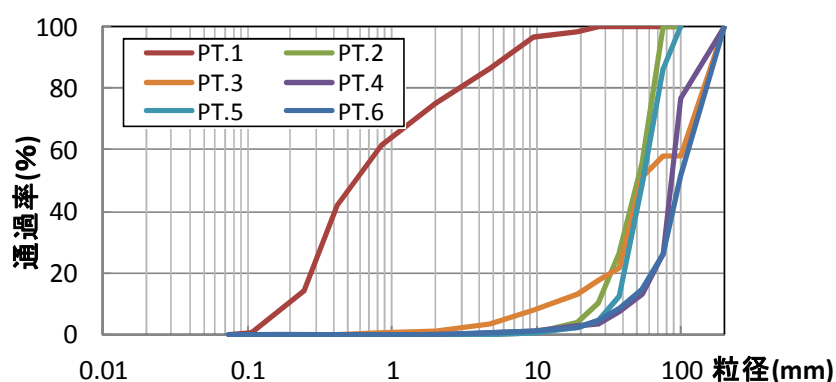


図 2.18 河床材料調査結果

表 2.10 河床材料調査結果（通過質量百分率）

単位：%

通過粒径 (mm)	PT.1	PT.2	PT.3	PT.4	PT.5	PT.6
200	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
100	100.0	100.0	58.1	76.7	100.0	52.0
75	100.0	100.0	58.1	26.1	86.6	26.1
53.5	100.0	55.8	51.4	12.7	48.6	14.8
37.5	100.0	26.7	21.8	7.1	12.2	8.3
26.5	100.0	10.1	17.7	3.5	4.4	4.6
19	98.6	4.2	13.1	2.9	2.3	2.0
9.5	96.5	0.7	7.6	0.9	0.4	1.1
4.75	86.4	0.1	3.6	0.2	0.1	0.5
2	74.9	0.0	1.3	0.0	0.0	0.2
0.85	61.4	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
0.425	42.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
0.25	14.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.106	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.075	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.075以下	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

2.3 礫河原再生後の物理環境変化の検証

2.3.1 解析モデルの概要

本研究では、2005 年 3 月に行われた祇園地区での砂州の切下げによる効果を検証するため、切下げを行った場合と行わなかった場合を想定して解析を行い、河道形状の変化、植生繁茂状況、アユの産卵場としての適性面積について比較する。解析の概要としては、まず、平面二次元流況解析モデルを用いて年最大洪水に対して流況解析を行う。その結果を踏まえ、前野ら¹²⁾の植生消長モデルを用いて洪水時の植生の流失・倒伏、洪水後 1 年間の植生の生長・入植の計算を行う。得られた地形データは翌年の初期データとし、この計算を繰り返し行う。

ここでは、それぞれのモデルの概要について示す。なお、流況解析には河川の流れ・河床変動解析ソフトウェアである iRIC に含まれる平面二次元ソルバー Nays2DH¹³⁾を使用した。ソルバー内で用いた式を次項より示す。

(1) 流れの基礎式

本研究で用いた基礎式（平面二次元流れの連続式と運動方程式）を一般座標系表示すると以下ようになる。

【連続式】

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{hu^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{hu^\eta}{J} \right) = 0 \quad (2.1)$$

【運動方程式】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u^\xi}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta = \\ & -g \left[(\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ & - \left(C_f + \frac{1}{2} C_D a_s h_v \right) \frac{u^\xi}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\xi \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_5 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta = \\ & -g \left[(\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ & - \left(C_f + \frac{1}{2} C_D a_s h_v \right) \frac{u^\eta}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\eta \end{aligned} \quad (2.3)$$

ただし、

$$\alpha_1 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_2 = 2 \left(\xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_3 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2},$$

$$\alpha_4 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_5 = 2 \left(\eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_6 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2}$$

$$D^\xi = \left(\xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_t \left(\xi_x \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_t \left(\xi_y \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \right]$$

$$D^\eta = \left(\xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_t \left(\xi_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_t \left(\xi_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right]$$

ここに、 t ：時間、 h ：水深、 H ：水位、 J ：座標変換のヤコビアン（式(2.4)参照）、 ξ, η ：一般座標、 u^ξ, u^η ：流速ベクトルの反変成分（式(4.5)参照）、 x, y ：直交座標（デカルト座標系）、 g ：重力加速度、 ρ ：水の密度、 C_f ：河床せん断係数（式(2.6)参照）、 C_D ：植生の抵抗係数、 λ_{veg} ：植生の密生度、 h_v ：植生高 l と水深 h の小さい方、 v_t ：渦動粘性係数である。

座標変換のヤコビアン J 、流速ベクトルの反変成分 u^ξ, u^η は、以下のように定義される。また、下付き添え字の ξ, η, x, y は偏微分を表している。

$$J = 1/(x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi) \quad (2.4)$$

$$u^\xi = \xi_x u + \xi_y v, \quad u^\eta = \eta_x u + \eta_y v \quad (2.5)$$

河床のせん断係数は以下の式で定義される。

$$C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (2.6)$$

渦動粘性係数 v_t は、ゼロ方程式モデルを用いて以下のように表される。

$$v_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (2.7)$$

ここに、 κ ：カルマン定数（=0.4）、 u_* ：摩擦速度である。

(2) 植生の影響

運動方程式での植生による形状抵抗は、水深と植生の高さにより次式のように定義される。

$$F_x = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho C_D \lambda_{veg} \frac{l}{h} h u \sqrt{u^2 + v^2} & (h > l) \\ \frac{1}{2} \rho C_D \lambda_{veg} h u \sqrt{u^2 + v^2} & (h < l) \end{cases} \quad (2.8)$$

$$F_y = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho C_D \lambda_{veg} \frac{l}{h} h v \sqrt{u^2 + v^2} & (h > l) \\ \frac{1}{2} \rho C_D \lambda_{veg} h v \sqrt{u^2 + v^2} & (h < l) \end{cases} \quad (2.9)$$

ここに、 l ：植生の高さ、 C_D ：植生要素の抗力係数、 λ_{veg} ：植生の密生度である。

また、 F^ξ 、 F^η は以下の式で表される。

$$F^\xi = \xi_x F_x + \xi_y F_y, \quad F^\eta = \eta_x F_x + \eta_y F_y \quad (2.10)$$

(3) 植生パラメータの選定

抵抗特性の違いの観点から植生を大きく類型区分することにした。最初に、倒伏しやすい植生群落と倒伏しにくい植生群落を区分し、さらに、木本群落については、生活形態によって明らかな密生度の違いをもつ竹林とその他の木本群落に区分した。竹林以外の木本群落は、単木状の高木林と、萌芽再生の株状で河床に近い位置から枝葉の多い低木林に区分した。また、草本類については、その曲げ剛性の違いの観点から、堅いか柔らかいかを定性的に区別した。以上の結果、植生は大きく5種類に分類された。それぞれの密生度 λ_{veg} の値の決定方法については次節で具体的に示す。

1) 植生密生度の設定

植物群落は、前述のように木本類（高木林）、木本類（低木林）、竹林、および草本類の4つに分類して、以下に示す方法により密生度 λ_{veg} を与えた。

a) 木本類

木本類（高木林）と竹林の密生度については、渡辺ら²⁾が設定した値を用い、木本類（高木林）を $\lambda_{veg} = 0.013\text{m}^{-1}$ 、竹林を $\lambda_{veg} = 0.286\text{m}^{-1}$ とした。

また、旭川の現地では、ヤナギ群落について、低木林と判断できる群落も存在した。これら低木林（いわゆる萌芽林）は、洪水または伐採管理後の月日が十分に経っていないため、幹の低い位置からの枝葉が多く、それが抵抗として働くため、生長した木本類（高木林）よりも抵抗が大きい。清水ら¹⁵⁾の解析においても同様な取り扱いをしており、本研究でも木本類の低木林の密生度は、清水らの値を参考にして $\lambda_{veg} = 0.023\text{m}^{-1}$ （伐採経験のある樹木林）とした。

b) 草本類

草本類の密生度については、実河川の経験的現象から得られた既存の逆算合成粗度値を基準にして、以下のような手順で設定した。まず、縦断方向1kmの直線水路を想定し、0.5mの植生が一様に分布し、水深が5m、等流状態であると仮定する。河道計画検討の手引き¹⁶⁾における水深草丈比-粗度係数の関係（ $n-h/h_v$ の関係、図2.19）により、植生が直立状態における粗度係数は $n=0.045\text{m}^{-1/3}/s$ となることわかる。ここで対象とする植生は直立状態と仮定されており、流れに対する植生の倒伏の影響は無視して考えることができる。次節に示すように、植生は、摩擦速度 u_* が7cm/sである場合には直立状態と仮定できるため、摩擦速度の算定式 $u_* = \sqrt{ghi}$ より、その時の水面勾配 i （等流状態を仮定しているため、河床勾配と一致する）を求めた。以上の点を考慮して、マンニングの平均流速公式より流量 Q を求め、それにより水面形を求めた。それとは別に、抗力係数 $C_D = 1.0$ として、密生度 λ_{veg} の値を変化させて、数値解析により流量 Q のもとで水面形を求め、前者の水面形と一致させることにより密生度を推定した。計算の結果、図2.20及び図2.21に示すように草本類の密生度が $\lambda_{veg} = 0.031\text{m}^{-1}$ の時に水面形の相関が最も高くなった。この結果はある一定条件での解析によるものではあるが、本モデルではこの値を用いることにした。

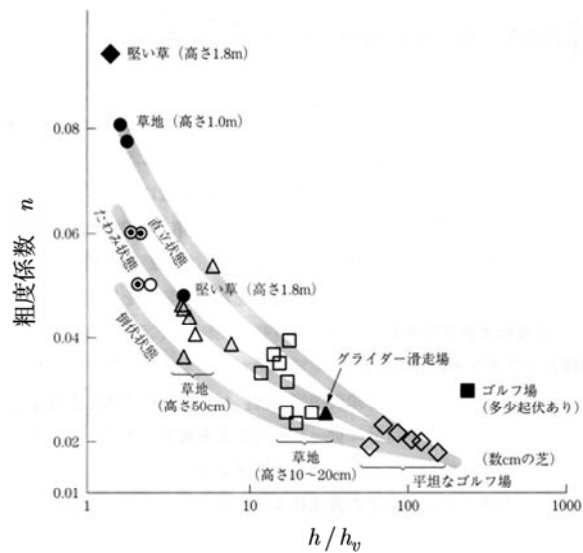


図 2.19 $n-h/h_v$ の関係式

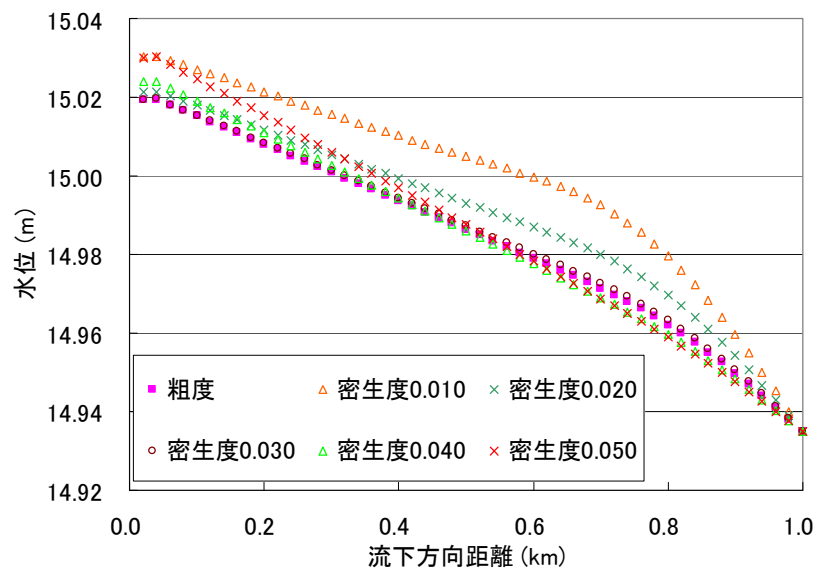


図 2.20 各密生度で求めた水面形と粗度係数より求めた水面形の比較

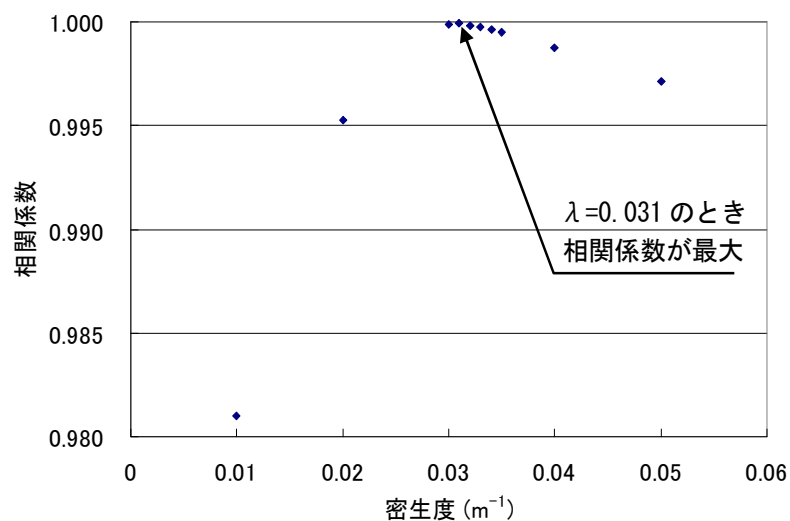


図 2.21 各密生度で求めた水面形と粗度係数より求めた水面形の相関

(4) 倒伏度合いによる植生高さと抗力係数の設定

以下のように植生の倒伏を考慮した。河道計画検討の手引き¹⁶⁾と同様に、洪水時における植生の倒伏状態は、直立している状態（直立状態）、流向に沿って倒伏している状態（倒伏状態）、それらの中間的な状態（たわみ状態）の3つに区分した。また、それぞれの植生の倒伏状態は、草本の曲げ剛性（堅いか柔らかいか）によって異なり、各メッシュで算出される摩擦速度によって倒伏度合いが変化すると考え、以下のように区分した。

【堅い草】

$$\begin{cases} u_* \leq 12 \text{ cm/s} & \rightarrow \text{直立状態} \\ 12 \text{ cm/s} < u_* \leq 22 \text{ cm/s} & \rightarrow \text{たわみ状態} \\ 22 \text{ cm/s} < u_* & \rightarrow \text{倒伏状態} \end{cases}$$

【柔らかい草】

$$\begin{cases} u_* \leq 7 \text{ cm/s} & \rightarrow \text{直立状態} \\ 7 \text{ cm/s} < u_* \leq 15 \text{ cm/s} & \rightarrow \text{たわみ状態} \\ 15 \text{ cm/s} < u_* & \rightarrow \text{倒伏状態} \end{cases}$$

植生が倒伏すれば、流れを遮断する植生高 l が低くなるため、本研究においては、図 2.22 に示すように、植生の高さが、たわみ状態で $l/2$ 、倒伏状態で $l/4$ となるものとした。

また、植生が倒伏することによって、流水抵抗が減少することが予測され、抗力係数 C_D の値も小さくなると考えられる。図 2.22 に示すように、植生が直立している状態の場合、任意の高さにおける茎の断面は円形状である。しかし、植生が倒伏すると、その茎の断面は楕円形状になり、流れに対する抵抗力は図 2.22 の関係図に示されるように円柱より抵抗力が小さくなると考えられる。本研究では、図 2.23 に示す $R_e - C_D$ の関係図を用いて、楕円断面の縦横比率に基づく C_D を求めた。すなわち、直立状態（断面縦横比 1:1）の場合 $C_D = 1.0$ 、倒伏状態（同 1:4）の場合 $C_D = 0.3$ とした。また、機械工学便覧より、たわみ状態（同 1:2）の時には $C_D = 0.6$ とした。なお、レイノルズ数 R_e を求める際の d は植生の直径を与え、旭川の平均流速より求めたレイノルズ数は $R_e = 1.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$ の範囲である。

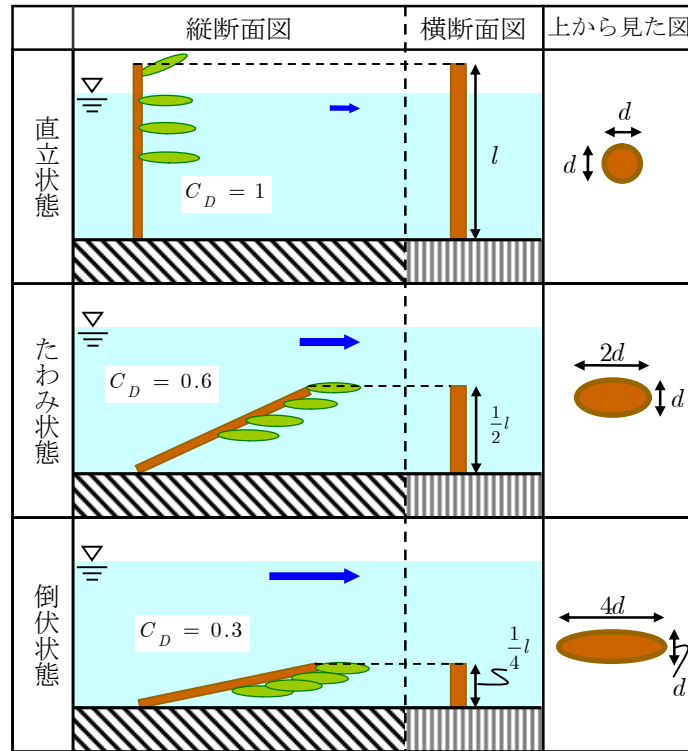


図 2.22 植生の倒伏の考え方

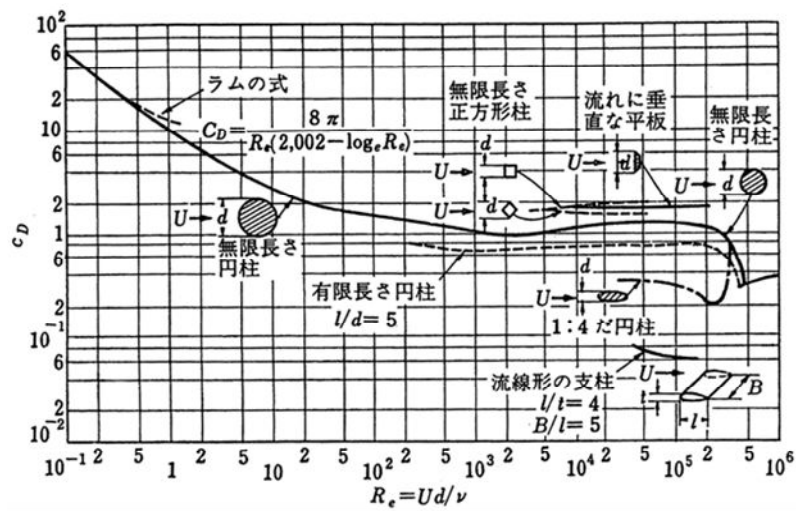


図 2.23 $R_e - C_D$ の関係図

(5) 河床変動解析モデル

1) 掃流砂の連続式

一般座標系における流砂の連続式を以下に示す.

$$\frac{\partial(c_b E_b)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\sum_k q_{bk}^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\sum_k q_{bk}^\eta}{J} \right) \right\} = 0 \quad (2.11)$$

ここに、 z : 河床高, 下付き添え字は k 階層の粒径階の物理量であることを意味し, q_{bk}^ξ, q_{bk}^η : ξ, η 方向の掃流砂量, λ : 河床砂の間隙率, c_b : 交換層内の土砂濃度, E_b : 交換層厚である.

2) 掃流砂量

芦田・道上の式より, 掃流砂量を求める式は,

$$q_{bk} = 17 p_{bk} \tau_{*ek}^{1.5} \left(1 - K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}} \right) \sqrt{sgd_k^3 r_b} \quad (2.12)$$

ここに、 p_{bk} : 交換層における k 階層粒子の占有率, τ_{*k} : 粒径別無次元掃流力, τ_{*ck} : 粒径別無次元限界掃流力, τ_{*ek} : 粒径別有効無次元掃流力, s : 砂の水中比重 ($=(\rho_s - \rho)/\rho = 1.65$), r_b : 交換層厚に関する関数 (式(2.19)参照). また, 粒径別有効無次元掃流力は次式により求める.

$$u_{*cm}^2 = \frac{V^2}{\left\{ 6 + 2.5 \ln \frac{h}{d_m (1 + 2\tau_{*m})} \right\}^2}, \tau_{*ek} = \frac{u_{*em}^2}{sgd_k} \quad (2.13)$$

ここに、下付き添え字 m は平均粒径に対する物理量であることを意味する.

また、各粒径の無次元掃流力の算定には、遮蔽効果を考慮する必要がある、ここでは、Egiazaroff の式を修正した以下に示す浅田の式を用いる.

$$\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*cm}} = \left\{ \frac{\log_{10} 23}{\log_{10} (21(d_k/d_m) + 2)} \right\}^2 \quad (2.14)$$

ここに、 d_m : 河床材料の中央粒径 ($= \sum_i d_i p_i$), τ_{*cm} : 中央粒径の無次元限界掃流力で

あり、 $\tau_{*cm} (= u_{*cm}^2 / sgd_m)$ は、以下に示す岩垣公式より求める.

$$\begin{aligned} 0.3030\text{cm} \leq d & \quad ; \quad u_{*c}^2 = 80.9d \\ 0.1180\text{cm} \leq d \leq 0.3030\text{cm} & \quad ; \quad u_{*c}^2 = 134.6d^{31/22} \\ 0.0565\text{cm} \leq d \leq 0.1180\text{cm} & \quad ; \quad u_{*c}^2 = 55.0d \\ 0.0065\text{cm} \leq d \leq 0.0565\text{cm} & \quad ; \quad u_{*c}^2 = 8.41d^{11/32} \\ d \leq 0.0065\text{cm} & \quad ; \quad u_{*c}^2 = 226d \end{aligned} \quad (2.15)$$

河床勾配の影響度合いを表す補正係数 K_c は以下のように求める.

$$K_c = 1 + \frac{1}{\mu_s} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} + 1 \right) \cos \alpha \tan \theta_x + \sin \alpha \tan \theta_y \right] \quad (2.16)$$

ここに, α は以下に示すように, x 軸 からの河床近傍流速 v_b, u_b の偏差角である.

$$\alpha = \arctan(v_b / u_b) \quad (2.17)$$

μ_s は静止摩擦係数, θ_x と θ_y は x と y 方向における局所河床勾配である. これらの勾配は次式で計算される.

$$\theta_x = \arctan \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right), \quad \theta_y = \arctan \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial z}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) \quad (2.18)$$

r_b は交換層厚さに関する関数であり, 以下のように表される.

$$\begin{aligned} r_b &= 1 \quad \dots \dots E_{sd} \geq E_b \\ r_b &= E_{sd} / E_b \quad \dots \dots E_{sd} \leq E_b \end{aligned} \quad (2.19)$$

ここに, E_{sd} : 全移動層厚である.

3) 掃流砂ベクトル

以上の式により求めた全掃流砂量を流線曲率による二次流と河床勾配の影響を考慮して ξ, η 方向に変換する. 変換する際には, 以下に示す渡邊の式を用いる.

$$q_b^\xi = q_b \left[\frac{u_b^\xi}{V_b} - \gamma \left(\frac{\partial z}{\partial \xi} + \cos \theta \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) \right], \quad q_b^\eta = q_b \left[\frac{u_b^\eta}{V_b} - \gamma \left(\frac{\partial z}{\partial \eta} + \cos \theta \frac{\partial z}{\partial \xi} \right) \right] \quad (2.20)$$

ここで, u_b^ξ および u_b^η はそれぞれ ξ, η 方向の河床近傍の流速, V_b は河床近傍の合成流速, ξ および η は一般座標系での実距離, θ は ξ 軸と η 軸のなす角である. γ は斜面勾配による流砂の補正係数であり, 長谷川によれば次式で与えられる.

$$\gamma = \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \quad (2.21)$$

μ_s, μ_k はそれぞれ河床材料の静止摩擦係数, 動摩擦係数である.

4) 河床近傍流速の算定

河床近傍の流速は以下の関係式から求められる.

$$u_b^s = V \frac{\chi}{\chi_1} \quad (2.22)$$

$$u_b^n = A_n \frac{\chi}{\alpha^2 \chi_1^2} \left(\frac{2}{45} \chi + \frac{4}{315} \right) \quad (2.21)$$

ここに, v は水深平均の合成流速, A_n は二次流強度であり, 下付き添え字 b 底面の値を意味し, 上付き添え字 s, n はそれぞれ主流方向, 主流と直交方向の軸を示している. そのほかの係数は以下のとおりである.

$$\chi_1 = \alpha V / u_* , \quad \chi = \chi_1^{-1/3} , \quad \alpha = \kappa / 6 \quad (2.23)$$

一般に、流線が曲がっている場合には二次流（螺旋流）が発生する。しかし、波長が短い流線湾曲の場合、二次流は十分に発達することができない。この場合、平衡状態の二次流を仮定して計算を行うと、その影響を過大評価してしまうことになる。そこで、流下方向の渦度の輸送を水深平均渦度方程式から解き、二次流強度 A_n の時間変化の評価を行うことで、二次流の発達・減衰を掃流砂の移動方向に表現する。水深平均渦度方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\lambda_v \frac{A_n}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(u_s^\xi \frac{u_s^n}{J} - u_b^\xi \frac{u_b^n}{J} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(u_s^\eta \frac{u_s^n}{J} - u_b^\eta \frac{u_b^n}{J} \right) + \frac{1}{r_s} \{ (u_s^s)^2 - (u_b^s)^2 \} = \frac{A_n}{J} \frac{V}{\chi_1^3 h} \left(\chi^2 + \frac{7}{12} \chi + \frac{1}{12} \right) \end{aligned} \quad (2.24)$$

ここに、下付き添え字 s はそれぞれ水面の値を意味する。また、

$$\lambda_v = -\frac{1}{\alpha \chi_1^3} \frac{V}{u_*} \left(\frac{1}{12} \chi^2 + \frac{11}{360} \chi + \frac{1}{540} \right) \quad (2.25)$$

$$u_s^s = V \frac{\chi + 1/2}{\chi_1} \quad (2.26)$$

$$u_s^n = -A_n \frac{1}{\alpha^2 \chi_1^2} \left(\frac{7}{180} \chi^2 + \frac{1}{56} \chi + \frac{1}{504} \right) \quad (2.27)$$

以上の式より求めた二次流流速を用いて、流砂移動方向を補正する。式(2.18)中の V_b は

$$V_b = \sqrt{u_b^{s^2} + u_b^{n^2}} \approx u_b^s \quad (2.28)$$

となる。上式の近似は、一般に u_b^n は u_b^s より 1 オーダー小さい値となるためである。 u_b^ξ 及び u_b^η は以下の変換により求められる。

$$\begin{aligned} u_b^\xi &= \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial s} u_b^s + \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial n} u_b^n \\ &= \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial y} \right) u_b^s + \left(\frac{\partial x}{\partial n} \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial n} \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial y} \right) u_b^n \\ &= (\cos \theta_s \tilde{\xi}_x + \sin \theta_s \tilde{\xi}_y) u_b^s + (-\sin \theta_s \tilde{\xi}_x + \cos \theta_s \tilde{\xi}_y) u_b^n \\ &= \frac{1}{\tilde{\xi}_r} \left\{ (\cos \theta_s \tilde{\xi}_x + \sin \theta_s \tilde{\xi}_y) u_b^s + (-\sin \theta_s \tilde{\xi}_x + \cos \theta_s \tilde{\xi}_y) u_b^n \right\} \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} u_b^\eta &= \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial s} u_b^s + \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial n} u_b^n \\ &= \left(\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial y} \right) u_b^s + \left(\frac{\partial x}{\partial n} \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial n} \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial y} \right) u_b^n \\ &= (\cos \theta_s \tilde{\eta}_x + \sin \theta_s \tilde{\eta}_y) u_b^s + (-\sin \theta_s \tilde{\eta}_x + \cos \theta_s \tilde{\eta}_y) u_b^n \\ &= \frac{1}{\tilde{\eta}_r} \left\{ (\cos \theta_s \tilde{\eta}_x + \sin \theta_s \tilde{\eta}_y) u_b^s + (-\sin \theta_s \tilde{\eta}_x + \cos \theta_s \tilde{\eta}_y) u_b^n \right\} \end{aligned} \quad (2.30)$$

ただし、流線と x 軸のなす角度を θ_s として、以下のように表すことができる。

$$\frac{\partial x}{\partial n} = -\frac{v}{V} = -\sin \theta_s, \quad \frac{\partial y}{\partial n} = \frac{u}{V} = \cos \theta_s \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{u}{V} = \cos \theta_s, \quad \frac{\partial y}{\partial s} = \frac{v}{V} = \sin \theta_s \quad (2.32)$$

また、 ξ_r は一般座標上の局所的な格子サイズと、実距離の比を表すもので、以下のよう
に表される。

$$\xi_r = \frac{\Delta \xi}{\Delta \tilde{\xi}}, \quad \eta_r = \frac{\Delta \eta}{\Delta \tilde{\eta}} \quad (2.33)$$

5) 流線の曲率

流線の曲率は次式から求められる。

$$\frac{1}{r_s} = \frac{\partial \theta_s}{\partial s} \quad (2.34)$$

θ_s は x 軸と s 方向の角度であるため、

$$\theta_s = \tan^{-1}(v/u) \quad (2.35)$$

したがって、

$$\frac{1}{r_s} = \frac{\partial}{\partial s} [\tan^{-1}(T)] = \frac{\partial}{\partial T} [\tan^{-1}(T)] \frac{\partial T}{\partial s} = \frac{1}{1+T^2} \frac{\partial T}{\partial s} \quad (2.36)$$

ただし、 $T = v/u$ である。ここで、

$$\frac{1}{1+T^2} = \frac{u^2}{V^2} \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial T}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v}{u} \right) = \frac{u \frac{\partial v}{\partial s} - v \frac{\partial u}{\partial s}}{u^2} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial s} &= \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial}{\partial y} = \frac{u}{V} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{v}{V} \frac{\partial}{\partial y} \\ &= \frac{u}{V} \left(\xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) + \frac{v}{V} \left(\xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (2.39)$$

よって、曲率 $1/r_s$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_s} &= \frac{1}{V^3} \left[u^2 \left(\xi_x \frac{\partial v}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial v}{\partial \eta} \right) + uv \left(\xi_y \frac{\partial v}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial v}{\partial \eta} \right) \right. \\ &\quad \left. - uv \left(\xi_x \frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) - v^2 \left(\xi_y \frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.40)$$

6) 粒度連続式

混合粒径河床での分級現象を再現するため、芦田・江頭・劉らが提唱した多層モデルの
概念を導入する。これは、河床を図 2.24 のように河床を交換層、遷移層及び堆積層に分
割するものである。この時、交換層における粒度分布の時間変化は次式で計算される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{c_b E_b p_{bk}}{J} \right) + (1-\lambda) P_{bk} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z}{J} \right) + \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_{bk}^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_{bk}^\eta}{J} \right) \right] = 0 \quad (2.41)$$

$$P_{bk} = p_{tk} \cdot \cdot \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \leq 0, \quad P_{bk} = p_{bk} \cdot \cdot \cdot \frac{\partial z}{\partial t} > 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{E_{d1} p_{d1k}}{J} \right) - P_{dk} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{E_{d1}}{J} \right) = 0 \quad (2.42)$$

$$P_{dk} = 0 \cdot \cdot \cdot \frac{\partial z}{\partial t} < 0, \quad P_{dk} = p_{bk} \cdot \cdot \cdot \frac{\partial z}{\partial t} > 0$$

ここに、 p_{dnk} は交換層底面から n 盤目の堆積層内の粒径階層 k の存在率である。

数値計算上では、侵食・堆積だけでなく、変動量によっても扱いを変える必要がある。すなわち、堆積が生じる場合で、1 ステップの河床変動量によって遷移層厚が堆積層厚を上回った場合、新たに堆積層を設け、残りの部分を遷移層とする。また、反対に侵食が生じた場合では、河床変動によって遷移層がなくなった場合は遷移層直下の堆積層を新たな遷移層とする。

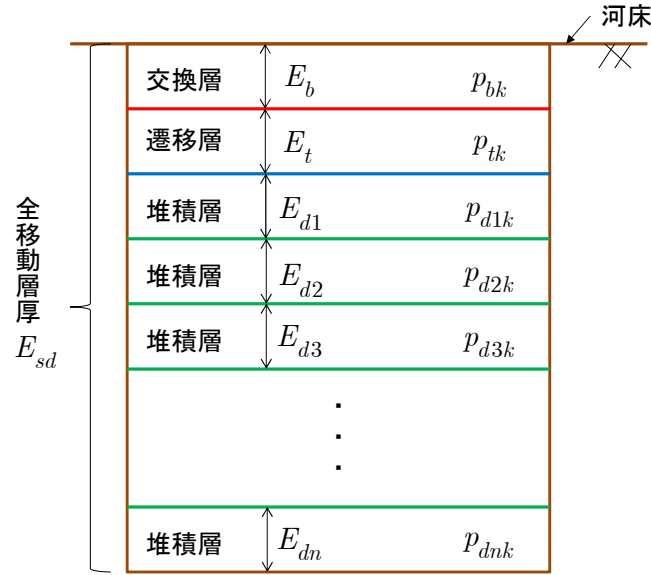


図 2.24 多層モデルの概念図

(6) 植生消長シミュレーションモデル

本研究で用いる植生消長シミュレーションモデルの概要を図 2.25 に示した。このモデルは、流況計算によって得られた流速、河床変動量等の結果を用いて植生の洪水時の流失や倒伏、平水時の生長や裸地への入植を予測できるものである。また、簡易的なモデルとするため、バイオマスなどの生物的な要因については扱っていない。詳細な条件等を次節以降で説明する。

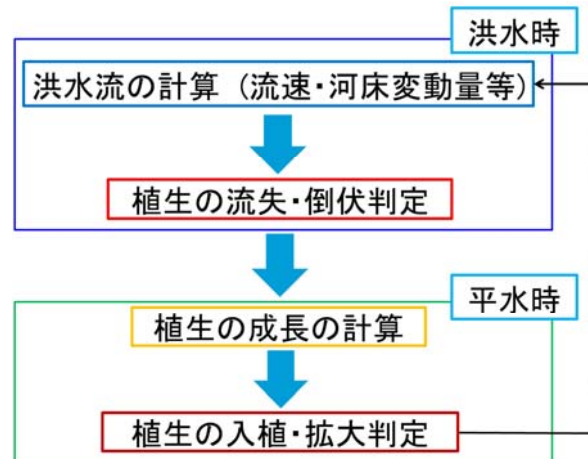


図 2.25 植生消長モデルの概要

1) 植生の倒伏・消失・生長

植生消長シミュレーションモデルにおける、河床変動での植生の消失等の条件を表 2.11 に示す。植生の消失の判定は、前野ら¹⁷⁾の結果から、85%粒径における無次元掃流力が無次元限界掃流力を上回ったと同時に、表 2.11 の条件で判定した。この条件は主に現地調査の結果を基に作成しており、河床が堆積されるよりも洗掘される方が消失しやすい条件とした。また、植生高の低い植生は、高いものに比べて消失しやすい条件とした。

現地調査の結果、河床変動が発生していない場所でも植生の倒伏がみられたことから、表 2.11 とは別に各植生に作用する抗力モーメントによる倒伏も考慮した。抗力モーメントを求める際には田中ら¹⁸⁾を参考とし、これが倒伏限界モーメントを超えるか否かで植生の倒伏を判断した。以下に植生に作用する抗力、抗力モーメントの式をそれぞれ以下に示す。

表 2.11 植生の流失条件（ $\tau_{*85} \geq \tau_{*c85}$ を満たしている場合）

L:植生高 (m)	BD:河床変動量 (m)						
	$BD \leq -1.0$	$-1 < BD \leq 0.5$	$-0.5 < BD \leq -0.1$	$-0.1 < BD < 0.1$	$0.1 \leq BD < 0.5$	$0.5 \leq BD < 1$	$1.0 \leq BD$
$0 < L \leq 2.0$	消失	消失	消失	入植2年以内の 草本類のみ消失	消失	消失	消失
$2.0 < L \leq 5.0$	消失	消失	消失	残存	倒伏	消失	消失
$5.0 < L \leq 10.0$	消失	消失	残存	残存	残存	倒伏	倒伏
$10.0 < L$	消失	残存	残存	残存	残存	残存	残存

$$\begin{aligned}
F &= \int_0^h \frac{1}{2} C_d(z) \rho u(z)^2 dz \\
&= \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} U^2 \int_0^h \frac{d(z)}{d_{BH}} \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} dz = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} U^2 \int_0^h \alpha(z) \beta(z) dz
\end{aligned} \tag{2.43}$$

$$\alpha(z) = \frac{d(z)}{d_{BH}}, \quad \beta(z) = \frac{C_d(z)}{C_{d-ref}} \tag{2.44}$$

$$M = \frac{1}{2} \rho C_{d-ref} d_{BH} U^2 \int_0^h z \alpha(z) \beta(z) dz \tag{2.45}$$

ここに、 $C_d(z)$ 、 $u(z)$ ：それぞれ、高さ z における抗力係数と流速(m/s)、 U ：断面平均流速(m/s)、 C_{d-ref} ：主幹を円柱と仮定した場合の抗力係数、 d_{BH} ：胸高直径(m)、 h ：水深(m)、 ρ ：水の密度(kg/m³)、 $\alpha(z)$ ：樹形（幹・枝）の相違（幹・枝の総和を胸高直径で基準化した比）を表す付加係数、 $\beta(z)$ ：葉層による付加係数を表す抗力係数である。 d_{BH} は現地調査で得られた結果を基に樹高と胸高直径の関係を関数化して使用し、 $\alpha(z)$ 、 $\beta(z)$ は田中ら¹⁸⁾を参考に値を決定した。積分を行う際には、 dz を0.5m刻みとして求めた。

一般に、引き倒し試験から倒伏限界モーメントの式は $M_c = X d_{BH}^2$ で与えられることが指摘されている。ただし、ここでの胸高直径の単位はcmとして用いており、 X は係数である。係数 X の値は、河川における樹木管理の手引き¹⁹⁾では $M_c = 24.5 d_{BH}^2$ 、油川ら²⁰⁾は、 $M_c = 120 d_{BH}^2$ として使用している。また、引き倒し試験は一般的に高水敷で行われており、砂州への適応には十分な検討が必要である。そこで、本研究では2011年洪水（最大流量3,403m³/s）では倒伏が起き、2012年洪水（最大流量2,238m³/s）では倒伏が起きていないという現地調査の結果を踏まえ、2011年洪水で大原地区の樹木に作用する抗力モーメントを解析し、倒伏限界モーメント M_c の式を以下のように与えた。

$$M_c = 210 d_{BH}^2 \tag{2.46}$$

2) 植生の生長、裸地への入植

植生の生長速度については、基本的に現地調査の結果を参考に植生ごとに設定した。詳細を表2.12に示す。

植生が繁茂していない裸地への入植条件に関しては、2008年から2015年まで行ってきた現地調査の結果と、末次ら²¹⁾、渡辺ら²⁾の知見を基に、河床の攪乱と比高で判定した。河床の攪乱は河床変動が10cm以上発生した場合に河床の攪乱が発生したとし、河床が何年攪乱されず維持されたかで判定した。図2.26に詳細を示す。

①河床の維持年数：1年

- 裸地への植生の入植はない。

②河床の維持年数：2年

- 比高2m以内の水際部にヤナギ（樹高1.5m、密生度0.023m⁻¹）が入植し、1.0m/年の生長速度で生長する。
- 比高が2mより大きい裸地への植生の入植はない。

③河床の維持年数：4 年

- 比高 2m 以下の箇所にツルヨシ（植生高 1.5m，密生度 0.011m^{-1} ）が入植し，最大で植生高 2.0m，密生度 0.031m^{-1} まで生長する．
- 比高 2m より大きい箇所にシナダレスズメガヤ（植生高 1.0m，密生度 0.011m^{-1} ）が入植し，最大で植生高 1.5m，密生度 0.031m^{-1} まで生長する．

④河床の維持年数：6 年

- ヤナギは樹高が 5.0m を超えたら，密生度は 0.013m^{-1} になる．樹高が 10m を超えたら生長速度は $0.5\text{m}/\text{年}$ になり，最大 15m まで生長する．
- 比高差が 2m より大きい箇所では，ヤナギの入植はなく，シナダレスズメガヤが繁茂を続ける．

表 2.12 植生の生長条件

	樹高 成長速度	密生度 成長速度	最大樹高		最大密生度
			比高2m以下	比高2m以上	
ツルヨシ	0.5m/年	$0.01\text{m}^{-1}/\text{年}$	2m	-	0.031m^{-1}
シナダレスズメガヤ	0.5m/年		-	1.5m	0.031m^{-1}
ヤナギ (低木: 5m以下)	1.0m/年		15m	-	0.023m^{-1}
ヤナギ (高木: 5m以上10m未満)	1.0m/年				0.013m^{-1}
ヤナギ (高木: 10m以上)	0.5m/年				0.013m^{-1}

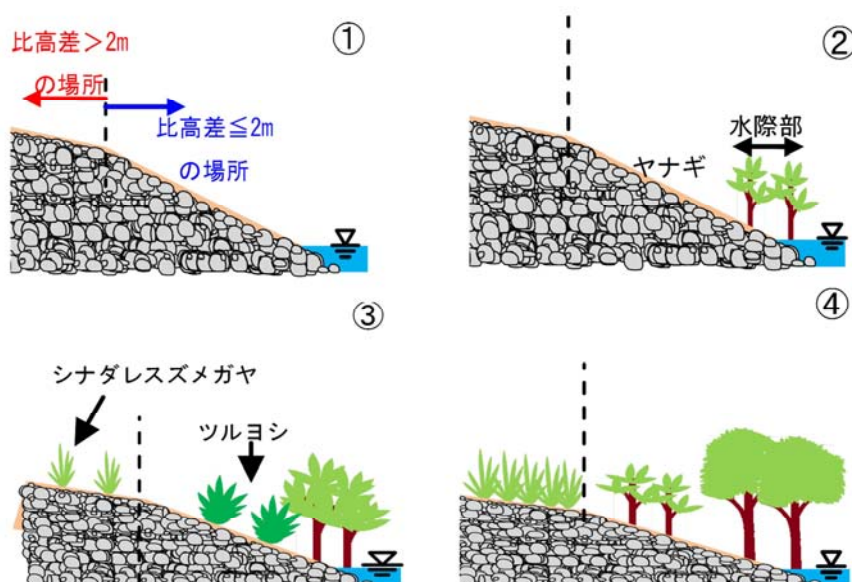


図 2.26 植生の入植条件

2.3.2 解析条件

本研究では、祇園地区における砂州の切り下げによって、その後の地形変化を検証するため、図 2.27 に示すように旭川河口から 14.3km～16.3km の区間で解析を行うものとした。なお、上流端及び下流端の位置は、評価箇所に影響のないよう、なるべく直線部となる箇所とした。解析格子は、格子幅が概ね 10m となるよう、縦断方向に 189、横断方向に 57 分割した。地形データについては、表 2.13 に示したようなデータがあるが、この内、2004 年の定期横断測量、砂州切り下げの際の施工図面をもとに設定した。また、植生高、密生度等の設定に関しては、既往の現地結果²⁾をもとに設定した。

境界条件については、上流端流量は、下牧観測所（河口から 19km）における年最大洪水とし、 $500\text{m}^3/\text{s}$ 程度を基準として洪水の立ち上がりから減衰までの時刻データを与えた（図 2.28）これは、解析の結果、 $500\text{m}^3/\text{s}$ 程度以下では河床変動にほとんど影響がなかったためである。供給土砂量は平行流砂式により算定した。下流端水位は、三野水位観測所（河口から 11.6km）の水位データをもとに別途構築した流況解析モデルにより得られた 14.3km 地点（解析対象区間の下流端）の計算水位を与えた。ただし、2011 年、2013 年に関しては 14.3km 地点に設置された水位計により計測されたデータを用いた。

河床の粗度係数は、既往の解析結果²⁾から高水敷 $0.026\text{m}^{-1/3}/\text{s}$ 、低水路 $0.028\text{m}^{-1/3}/\text{s}$ とした。交換層厚は、研究者によって様々な値が用いられているが、本研究では、関根の研究²²⁾を参考に d_{90} の 3 倍程度の値を用いた。河床材料は、高水敷と低水路に分けて、混合粒径（高水敷 $d_{50}=34\text{mm}$ 、低水路 $d_{50}=58\text{mm}$ ）を与えた。ただし、2015 年 7 月に実施した祇園地区での河床材料調査の結果（図 2.18）によると、いずれの調査箇所も d_{60} は約 50～100mm であるが、右岸側の PT.1 では、他と比べて粒径は非常に小さく、 d_{60} は 1mm 以下となっている。そのため、図 2.27 の赤色で塗りつぶした範囲については、右岸側の調査箇所である PT.1 と PT.2（図 2.11 参照）の粒度分布の平均値を与えるものとした。ここで、Nays2DH では河床材料を均一粒径とした場合のみ側岸侵食を考慮できるモデルであるため、本研究では側岸侵食については考慮していない。

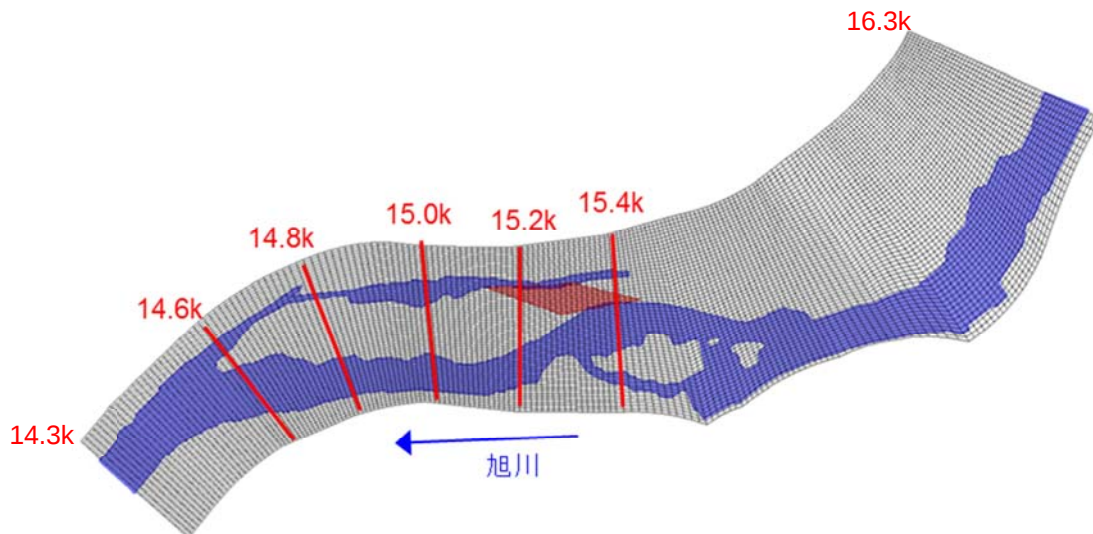
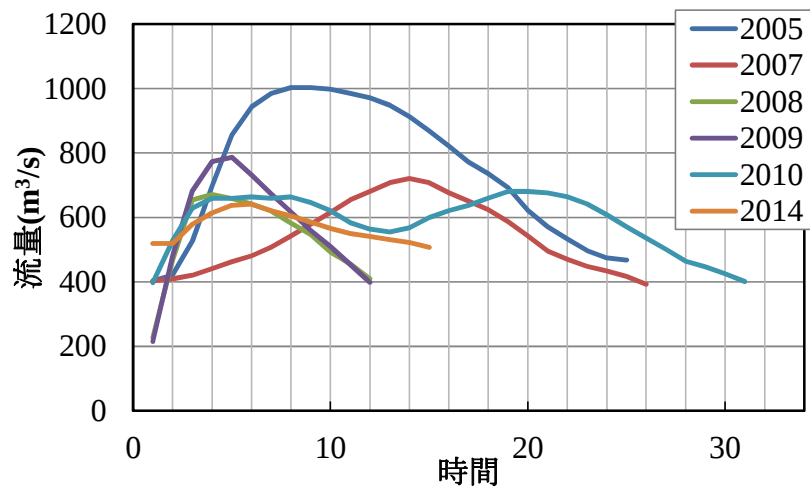


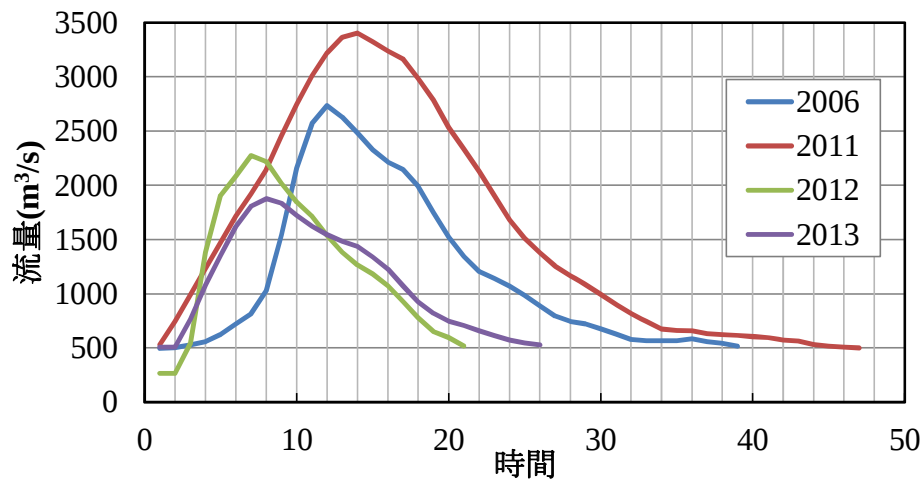
図 2.27 解析メッシュ図

表 2.13 解析対象期間での主な出来事と地形データ

西暦	人為的な事業	地形データ
2004	-	定期横断測量
2005	祇園地区の砂州の切下げ	切下げ砂州上のみレーザー測量
2006	-	対象区間全域で航空レーザー測量
2008	玉柏地区の植生伐採	-
2009	-	定期横断測量
2011	-	定期横断測量
2013	-	定期横断測量



(a) ピーク流量 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 以下



(b) ピーク流量 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 以上

図 2.28 各年の流量ハイドログラフ

2.3.3 解析モデルの妥当性確認

2005年に砂州を切り下げた後、2005年9月に1,003m³/sの洪水が発生し、眞田ら³⁾は洪水後の河床変動状況を調査している。本研究での河床変動解析結果と比較すると、図2.29に示すとおり、砂州の切り下げ箇所において、河床変動量は少ないが、堆積及び洗掘箇所の傾向は概ね表現できていることがわかる。

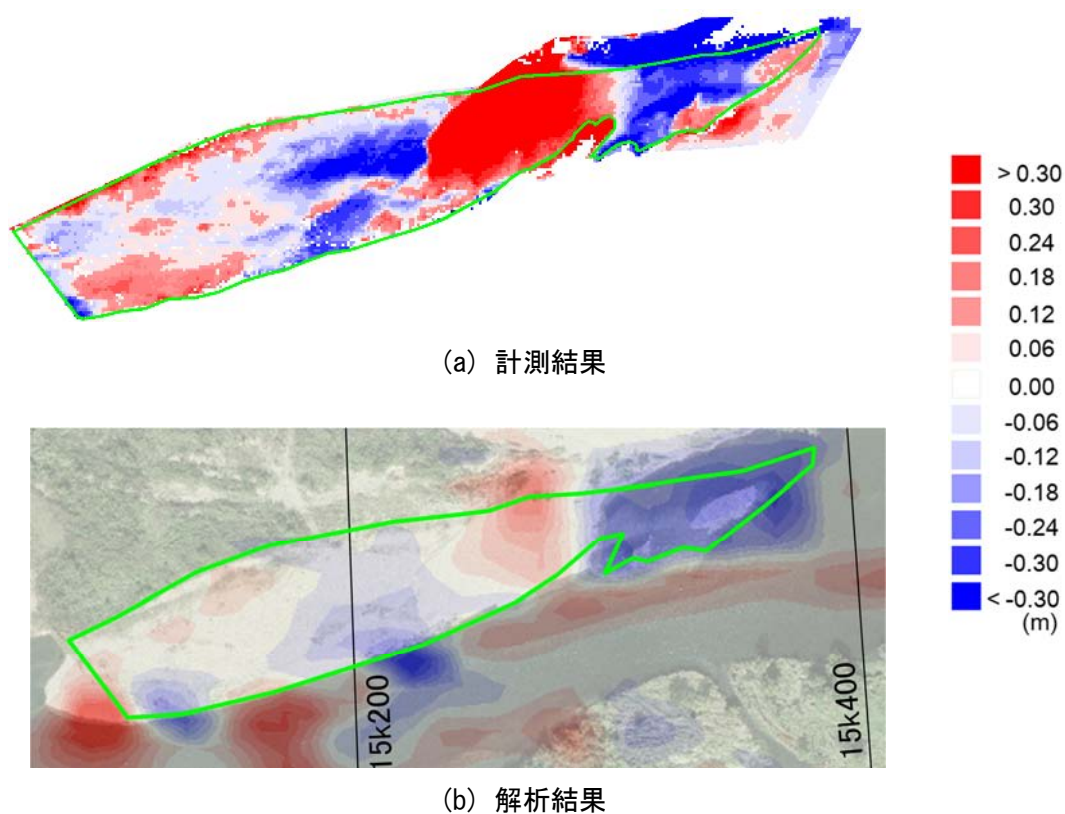


図 2.29 2005 年洪水後の河床高

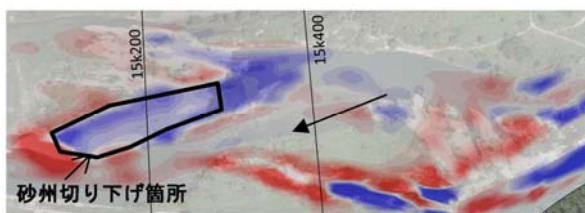
2.3.4 河床変動及び植生繁茂による評価

(1) 河床変動解析結果

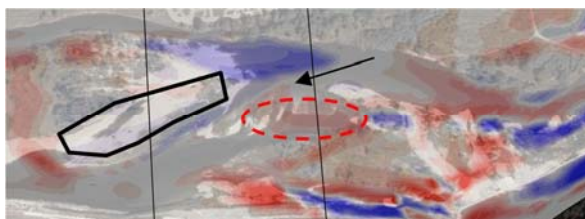
洪水規模の大きな年（2006，2011，2013）の洪水後の河床変動量の平面図を図 2.30 及び図 2.31 に，また，15.2km，15.4km での河床の横断面図を図 2.32 及び図 2.33 に示す．

まず，砂州の切下げを実施した場合では，2006 年洪水後では，洪水時の主流が右岸側に寄ったことから（図 2.4），施工箇所及びその上流で河床低下が著しい．また，礫河原再生前に主流であった箇所では堆積傾向にあり，砂州や瀬の創出が表現できている．2011 年洪水後では，植生の繁茂により変動量は少なくなるものの，河床変動の傾向は同様となっている．しかしながら，実際に測量された 15.4km の横断面図（図 2.33(a)）をみると，2004 年以降に側岸侵食とみられる著しい河床低下が生じているが，河床変動解析結果の横断形状では，河床低下があまりみられない（図 2.33 (b)）．これは，本モデルでは側岸侵食を考慮できていないことが原因であると考えられる．

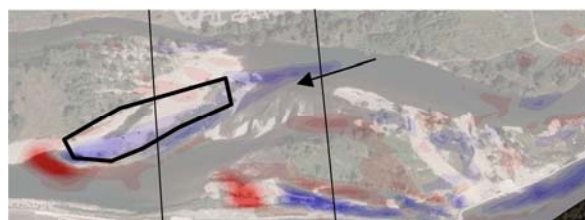
次に，砂州の切下げを実施しなかった場合では，切下げ箇所の左岸側で河床低下が著しい（図 2.32 (c)）．これは，左岸側へ張り出した固定砂州によって，この箇所で低水路に流れが集中したためである．



(a) 2006 年洪水後

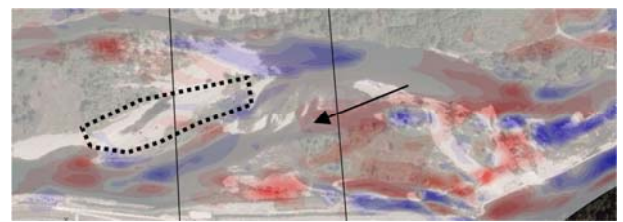


(b) 2011 年洪水後

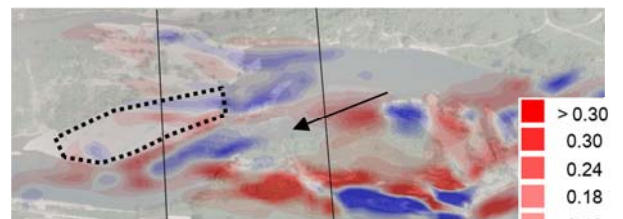


(c) 2013 年洪水後

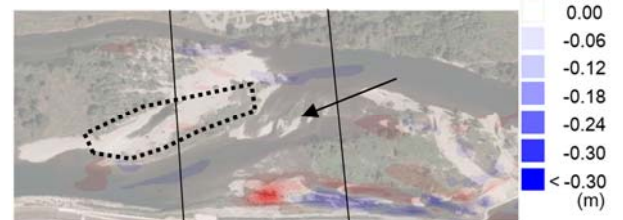
図 2.30 河床変動量（切下げあり）



(a) 2006 年洪水後

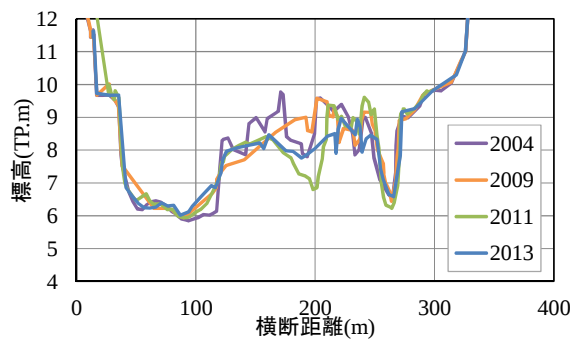


(b) 2011 年洪水後

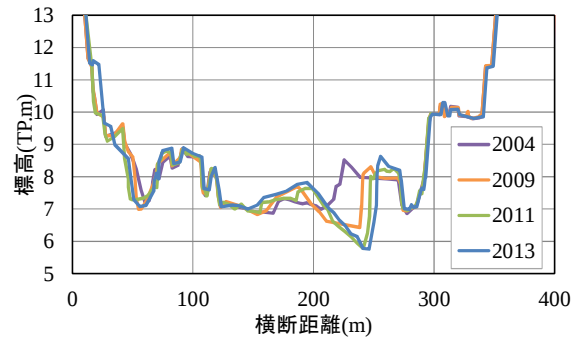


(c) 2013 年洪水後

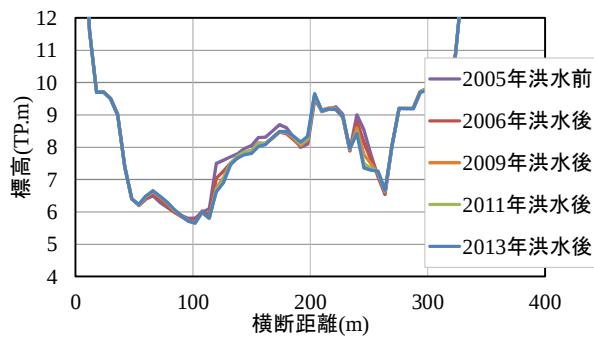
図 2.31 河床変動量（切り下げなし）



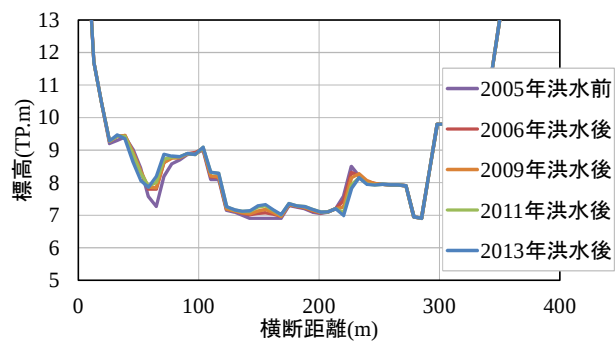
(a) 定期横断測量結果



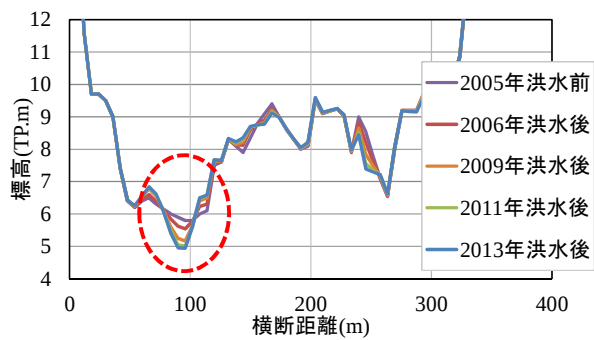
(a) 定期横断測量結果



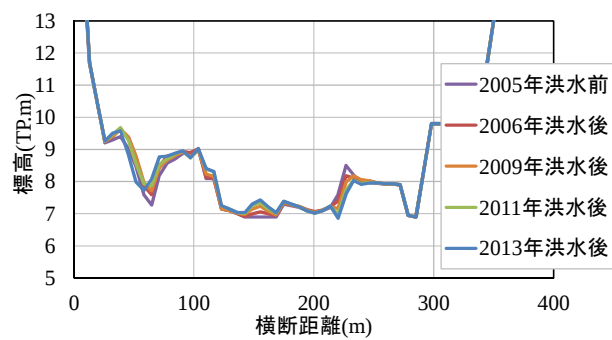
(b) 切下げあり



(b) 切下げあり



(c) 切下げなし



(c) 切下げなし

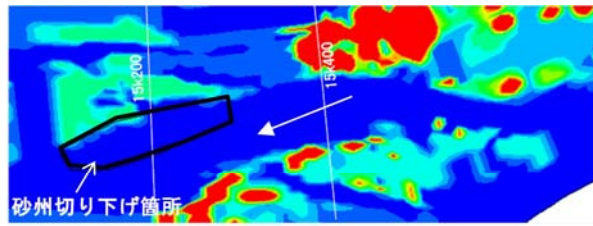
図 2.32 横断測線 15k200 上の河床高

図 2.33 横断測線 15k400 上の河床高

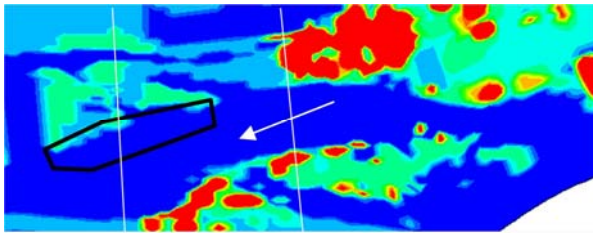
(2) 植生消長結果

植生消長モデルによる洪水後の植生高の解析結果を図 2.34 及び図 2.35 に示す。まず、切下げを実施した場合では、2011 年洪水により切下げ砂州上（図 2.34(d) 黒線内）で一部植生の流失がみられた。植生の流失箇所については、航空写真（図 2.4）と比較しても、概ね一致していることがわかる。また、図 2.34(e)の切下げ砂州上の水際に繁茂する木本類に注目すると、その樹高は 3～5m であり、現地調査の結果と比較して一部高い値を示している箇所があるものの、概ね再現できていると判断される。

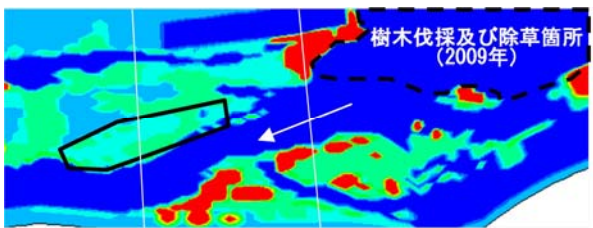
一方、切下げを実施しなかった場合についてみると、植生の流失は特にみられず、生長するのみであることがわかる。



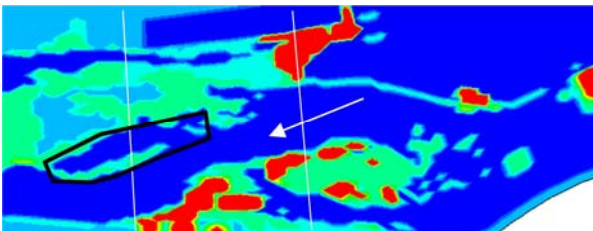
(a) 2005 年洪水前



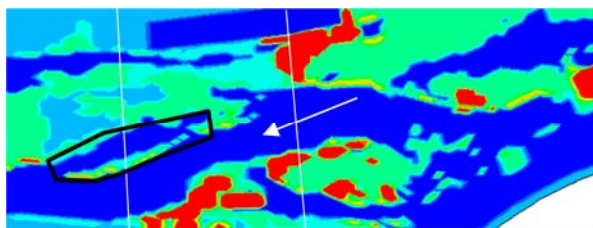
(b) 2006 年洪水後



(c) 2010 年洪水前

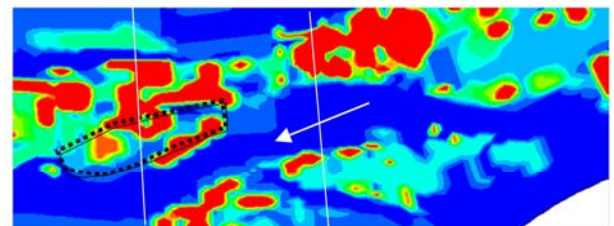


(d) 2011 年洪水後

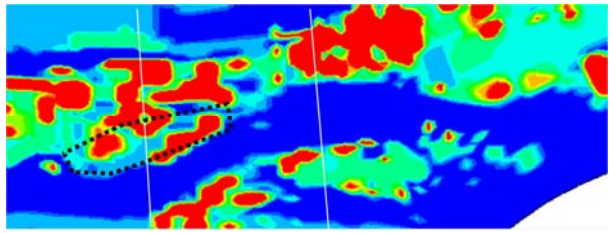


(e) 2014 年洪水後

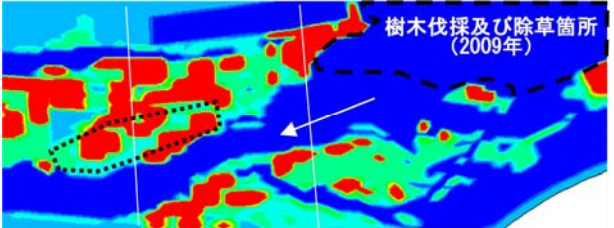
図 2.34 植生高 (切下げあり)



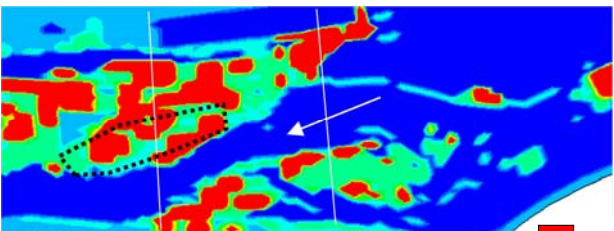
(a) 2005 年洪水前



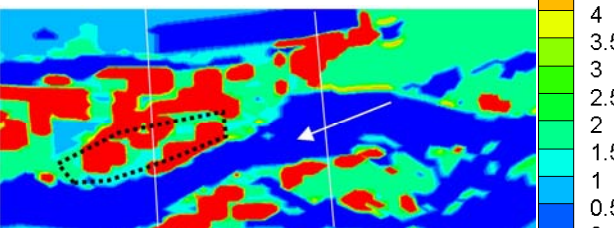
(b) 2006 年洪水後



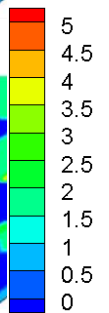
(c) 2010 年洪水前



(d) 2011 年洪水後



(e) 2014 年洪水後



(m)

図 2.35 植生高 (切下げなし)

2.4 アユを対象とした生息場変化の検証

2.4.1 生息環境評価モデルの概要

祇園地区においては、かつてアユの産卵が確認されていることから、アユの産卵場としての生息環境評価を行うものとした。検討にあたっては、PHABSIM モデルを採用し、アユの選好曲線は、大塚ら¹⁰⁾、永矢ら²³⁾が検討した式を用いた。アユの産卵適性値は次式で与えられる。

$$CSI = SI(h) \times SI(v) \times SI(s) \quad (2.47)$$

ここに、 $SI(h)$, $SI(v)$, $SI(s)$ は、それぞれ水深、流速及び底質に対する選好値である。この式は、複数の河川での調査から一般的な値として検討されたものであり、次式及び図 2.36 に示すとおりである。

$$\begin{aligned} SI(h) &= 33.3h & (0 \leq h(\text{m}) < 0.03) \\ SI(h) &= 1 & (0.03 \leq h(\text{m})) \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} SI(v) &= 0 & (0 \leq v(\text{m/s}) < 0.3) \\ SI(v) &= 3.3v - 1 & (0.3 \leq v(\text{m/s}) < 0.6) \\ SI(v) &= 1 & (0.6 \leq v(\text{m/s}) < 1.0) \\ SI(v) &= -1.4v + 2.4 & (1.0 \leq v(\text{m/s}) < 1.7) \\ SI(v) &= 0 & (1.7 \leq v(\text{m/s})) \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} SI(s) &= 0 & (0 \leq u_* (\text{m/s}) < 0.05) \\ SI(s) &= 1 & (0.05 \leq u_* (\text{m/s}) < 0.12) \\ SI(s) &= 0 & (0.12 \leq u_* (\text{m/s})) \end{aligned} \quad (2.50)$$

検討にあたっては、河床変動解析及び植生消長計算後の河道・植生状況をもとに、下牧観測所の平水流量 $40\text{m}^3/\text{s}$ （解析期間の平均値）で流況解析を行い、その水理量から適性値を算出した。また、PHABSIM を適用した箇所については、図 2.1 に橙破線で示した。

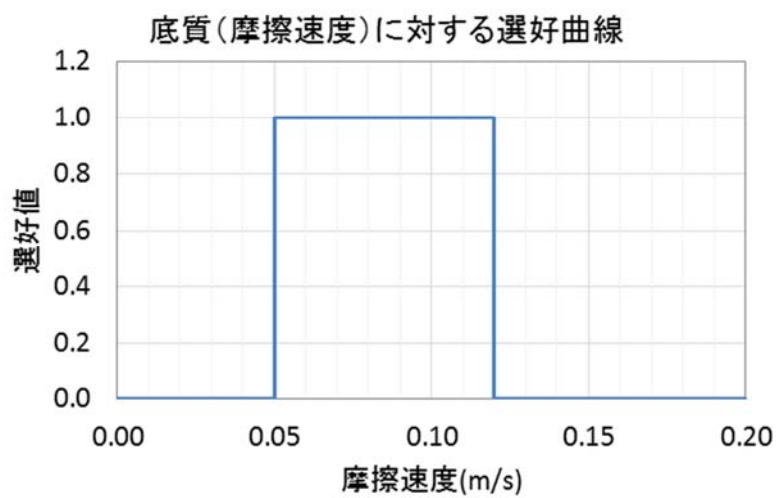
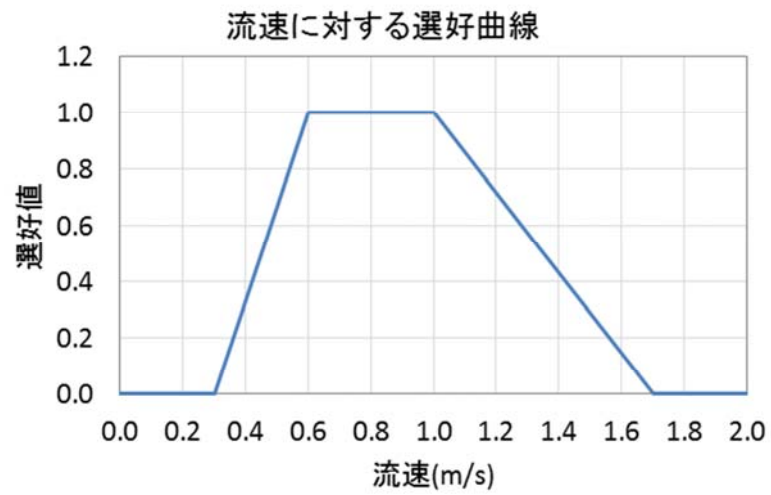
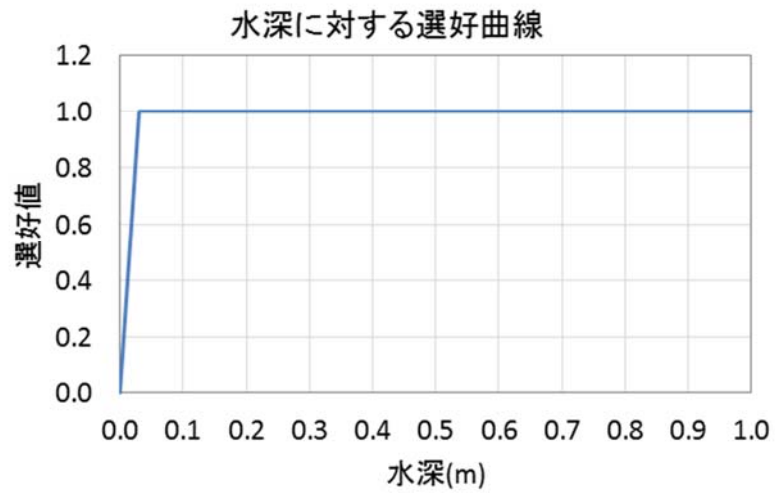


図 2.36 アユの産卵場における選好曲線

2.4.2 PHABSIM を用いた生息場変化の検証

アユ産卵場の適性については、適性値 CSI が 0.8 以上となる解析格子の面積で評価すると、図 2.37 に示したとおり、砂州の切下げを実施した場合の方が、切下げを実施しなかった場合と比べ、適性面積が大きくなっていることがわかる。特に、2010 年洪水後では 2,000m²もの差がみられる。また、各ケースの経年的な変化について着目すると、切下げを実施しなかった場合には、面積 6,000m²程度から、2007 年には 5,200m²程度に減少し、その後も同程度の値で推移している。これは、図 2.32 (c)の赤色破線部に示したような、低水路の河床低下によりその箇所での水深が増大し（図 2.38 (b)赤破線）、平水時に冠水する面積の減少や流速が低下する箇所が現れたためである。切下げを実施した場合には、瀬の形成に伴い 2010 年まで適性面積は増加傾向を示したが、2011 年洪水後に 600m²程度減少した。これは、2011 年洪水により、図 2.30 (b)破線部に示した箇所での堆積により一部で早瀬が形成され、図 2.38 破線部に示した箇所で流速が増大したためである。

以上より、一部、河床変動解析の再現結果が十分でない箇所はあるものの、砂州の切下げによって、新たに瀬が形成され、アユの産卵場の創出につながることもわかった。また、2.2.3 (5) で述べたように、地元水産関係者へのヒアリング調査からも、アユの産卵数こそ戻ってはいないものの、産卵場として適した物理環境の回復が確認されており、この解析結果の妥当性が示された。

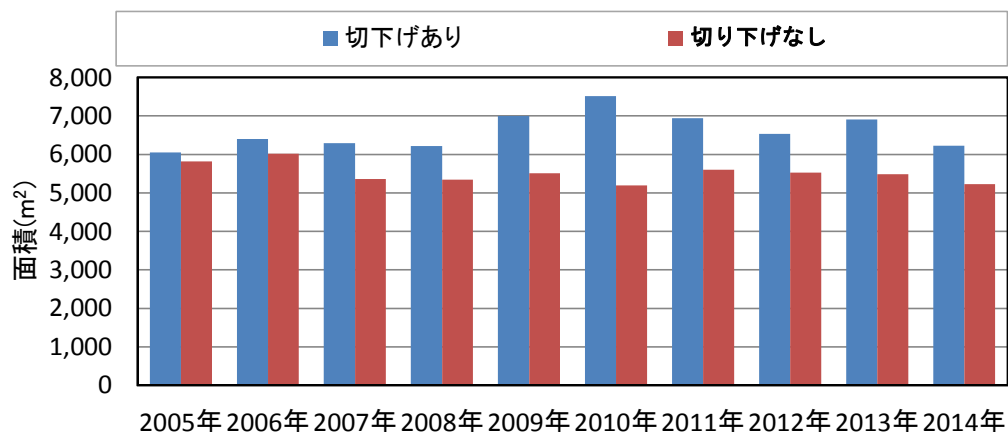


図 2.37 アユの産卵場適性面積 (CSI ≥ 0.8)

また、図 2.39 (b) に示す流速分布と、2.2.4 で実施した流況観測の結果を比較すると、右岸側では、観測値が最大 60~90cm/s であるのに対し、解析値は 20cm/s 程度となっている。これは、河床変動解析によって右岸側の水みちの再現ができていないことが原因である。

左岸側では、観測値が最大 100~160cm/s であるのに対し、解析値は 160cm/s を超過する箇所が多くみられる。これは、右岸側の河床変動解析の再現性が十分でなく、本来右岸側に分も左岸側に集中して流れたことが原因であると考えられる。

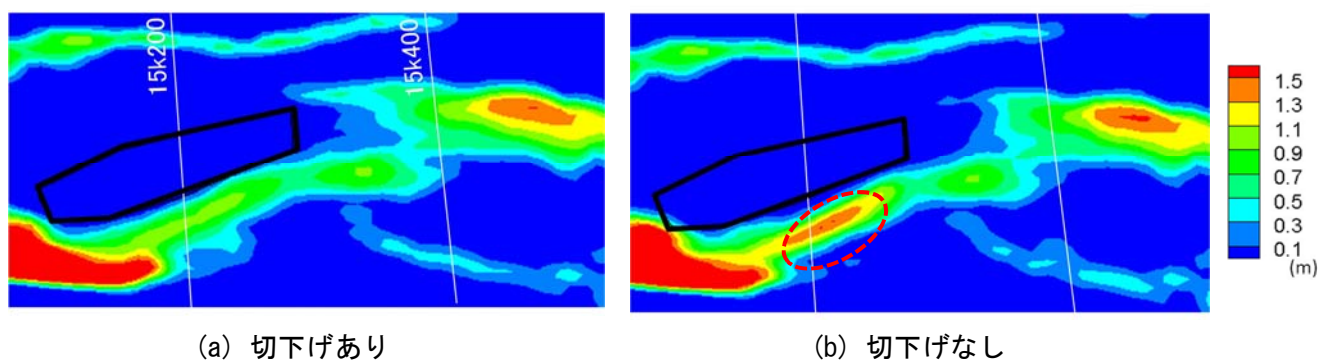


図 2.38 平水時の水深（2010 年洪水後）

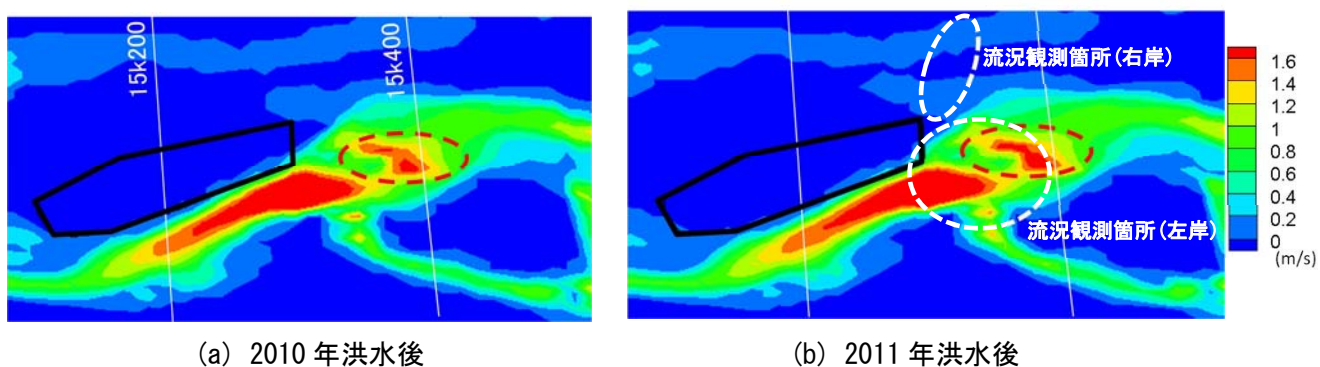


図 2.39 平水時の流速（切下げあり）

2.5 まとめ

本研究では、2005 年に旭川祇園地区で行われた砂州の切下げがその後の河道の治水や生物環境へ与える効果を検討するために、現地の流量観測やアユの生息状況等を調査するとともに、砂州を切下げた場合と切下げなかった場合を想定して解析を行い、河道形状、植生繁茂状況、生物生息場としての物理環境の変化に与えた影響を議論した。得られた結果と今後の課題を以下に示す。

- 2014 年から 2016 年にかけて、祇園地区の礫河原再生箇所において、平水時における現地の流速、水深の調査を行い、水理的な流れ場としては、アユの産卵場にとって適していることがわかった。また、地元水産関係者へのヒアリングや国土交通省及び岡山県水産研究所の調査結果等からも、アユの産卵場に適していることがいえる。
- iRIC の Nays2DH ソルバーを用い、河床変動解析を実施した結果、砂州切下げ箇所における河床変動や、瀬・砂州の創出が表現できた。しかしながら、15.2km 地点の横断距離 200m 付近のような再現性が低い箇所もあるため、粒度分布の設定の見直しや、側岸侵食を考慮するなどの改良が必要である。また、植生消長シミュレーションモデルにより、切下げ箇所の植生繁茂状況を概ね再現することができた。ただし、一部で木本類の植生高が現地調査の結果と比べ少し高い値を示したため、今後も調査を重ね、生長速度の見直し等を検討する必要がある。
- 河床変動解析結果から、砂州を切下げた効果として、礫河原の維持、拡大が図られたことが明らかになった。また、15.2km 左岸付近の流れが集中する箇所では、砂州の切下げによって、深掘れ箇所の河床低下が緩和されることがわかった。
- 植生消長計算結果から、砂州の切下げによって、砂州の攪乱が起きようになった。しかし、河床が攪乱されるような大きな洪水が数年間発生しなかった場合は、植生の入植、拡大により、砂州を切下げる前の状態に戻ってしまうことが懸念される。
- 生物生息場評価 (PHABSIM) の結果、砂州の切下げの効果として、新たに瀬が形成され、流速が増大し、アユの産卵場に適した物理環境が増加することが示された。また、切下げを行わなかった場合は、低水路の河床低下に伴い、その箇所での水深が増大し、平水時に冠水する面積の減少や流速が低下する箇所が現れ、適性面積が減少した。

【参考資料】

次ページ以降に、参考資料として、砂州の切り下げを実施した場合と、実施しなかった場合について、2005 年～2014 年の洪水後の各年の、河床変動量、植生高及びアユ産卵場の適正值の平面図を示す。

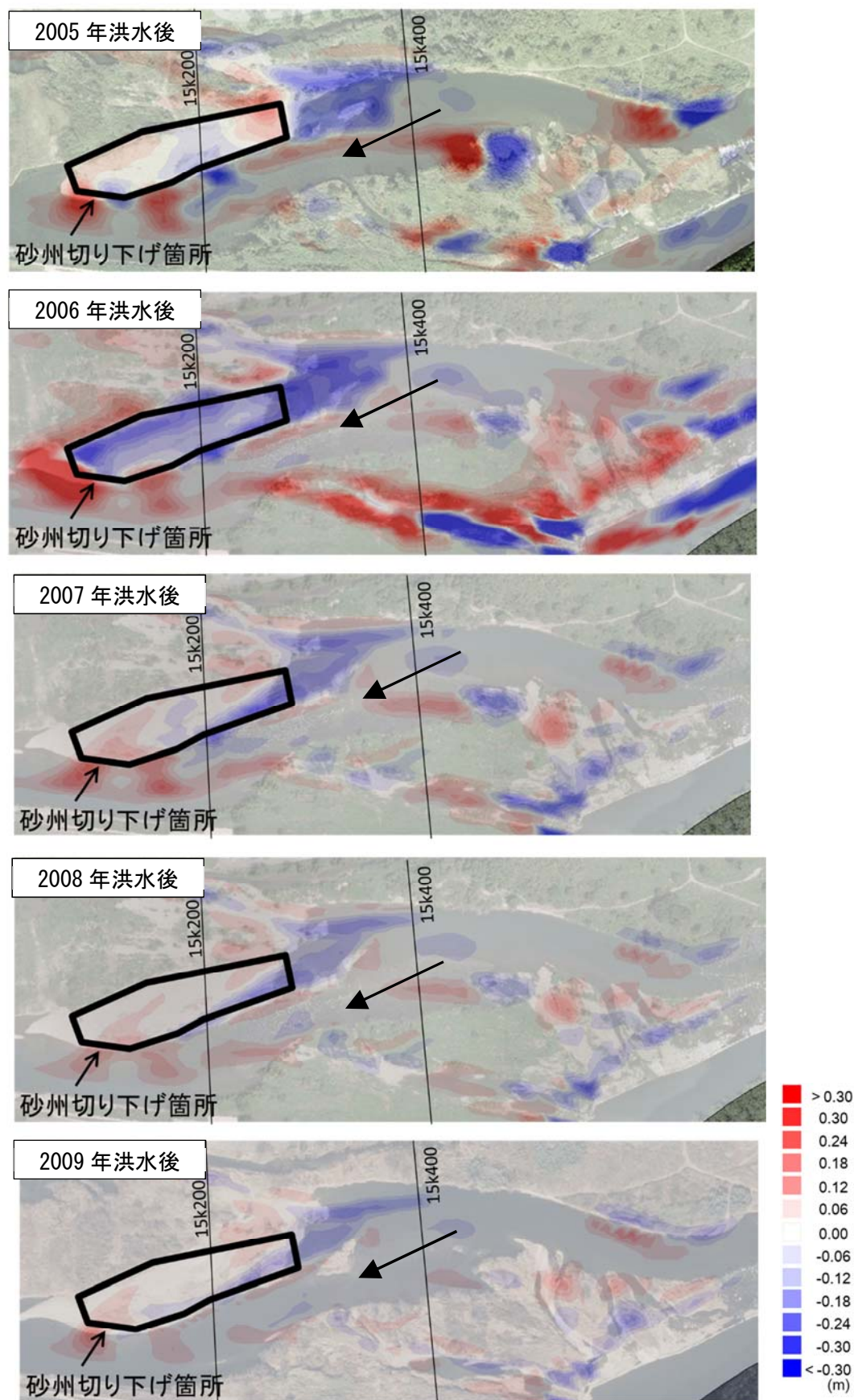


図 2.40 (1) 河床変動量（切り下げあり，毎年洪水後）

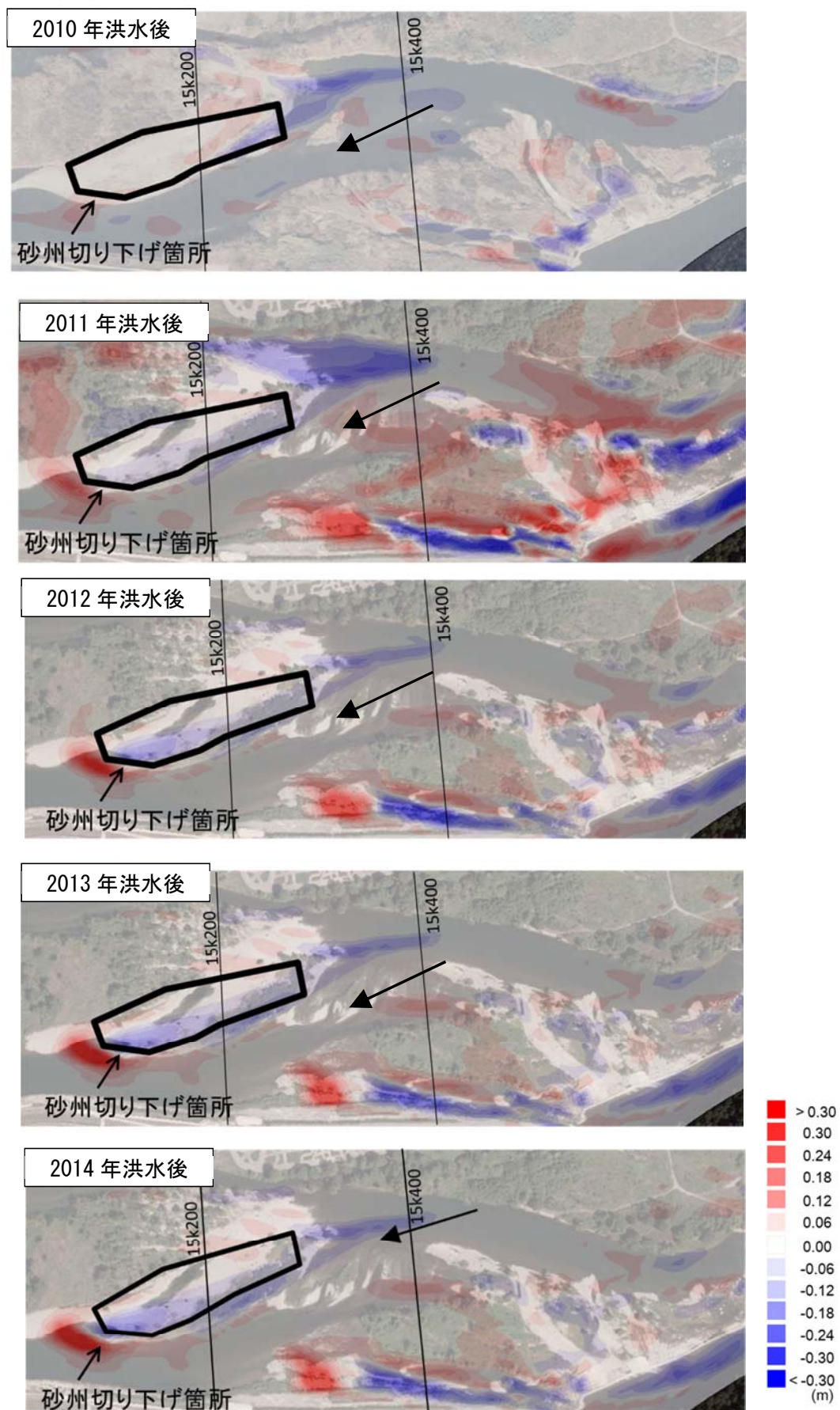


図 2.40 (2) 河床変動量（切り下げあり，毎年洪水後）

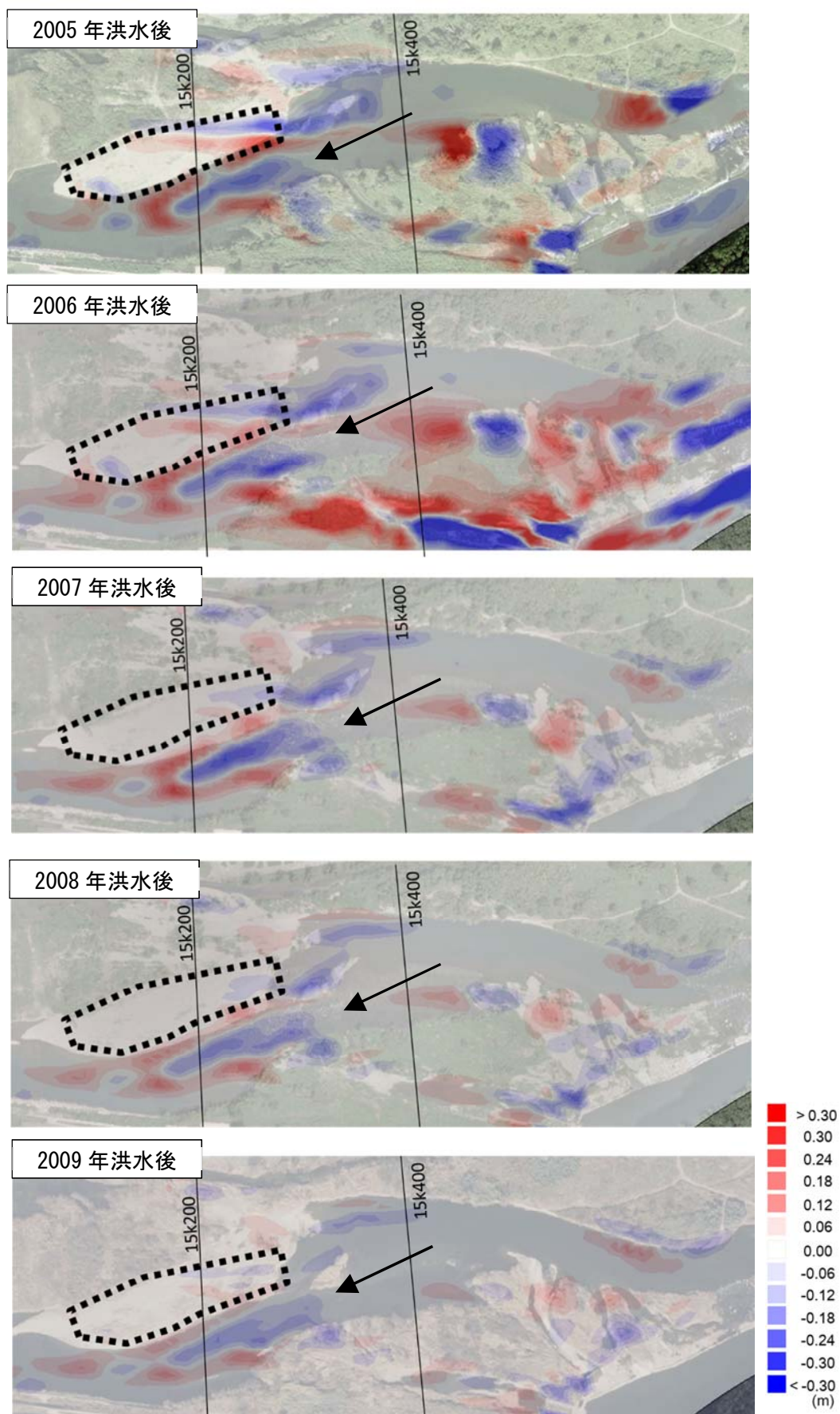


図 2.41 (1) 河床変動量（切り下げなし，毎年洪水後）

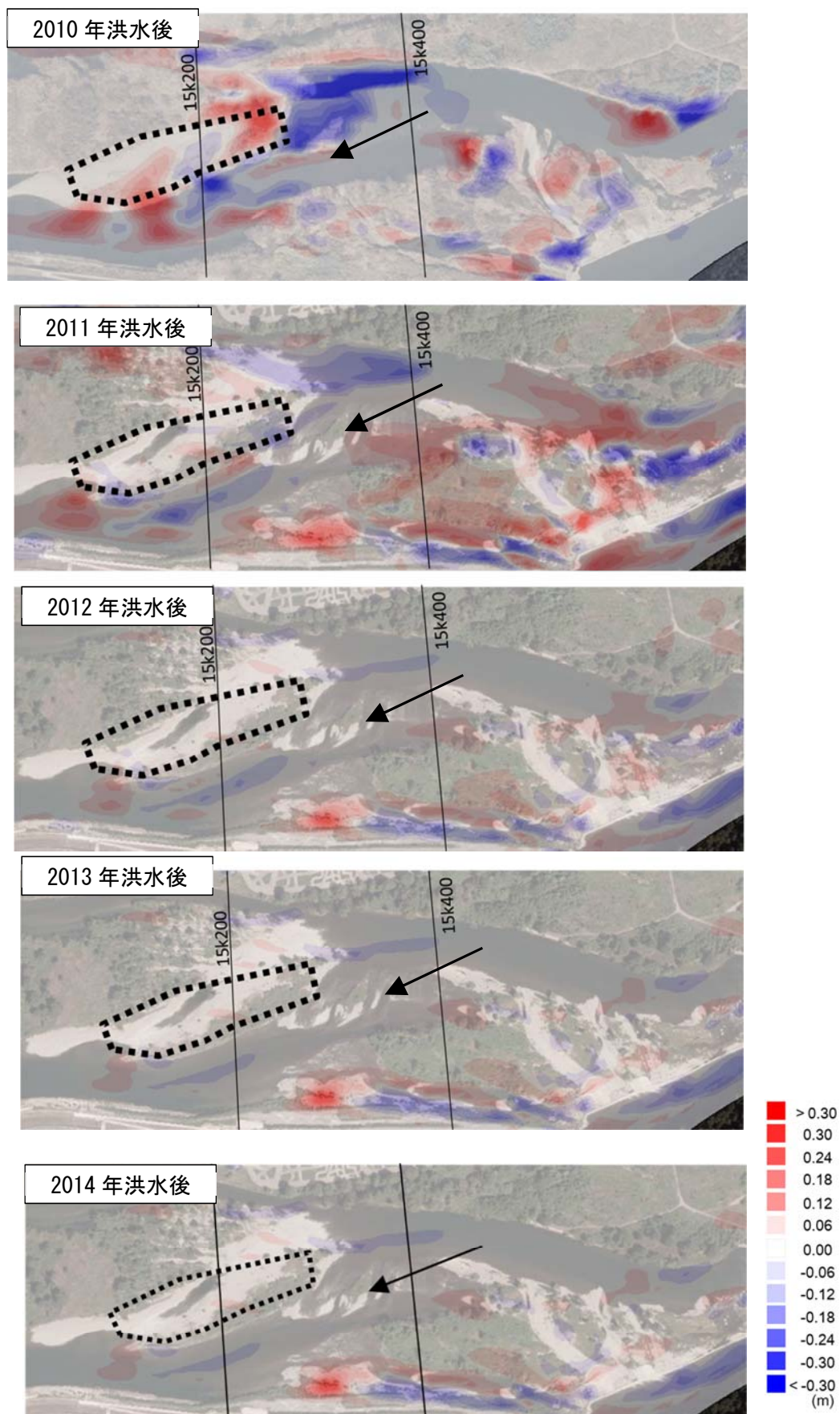


図 2.41 (2) 河床変動量（切り下げなし，毎年洪水後）

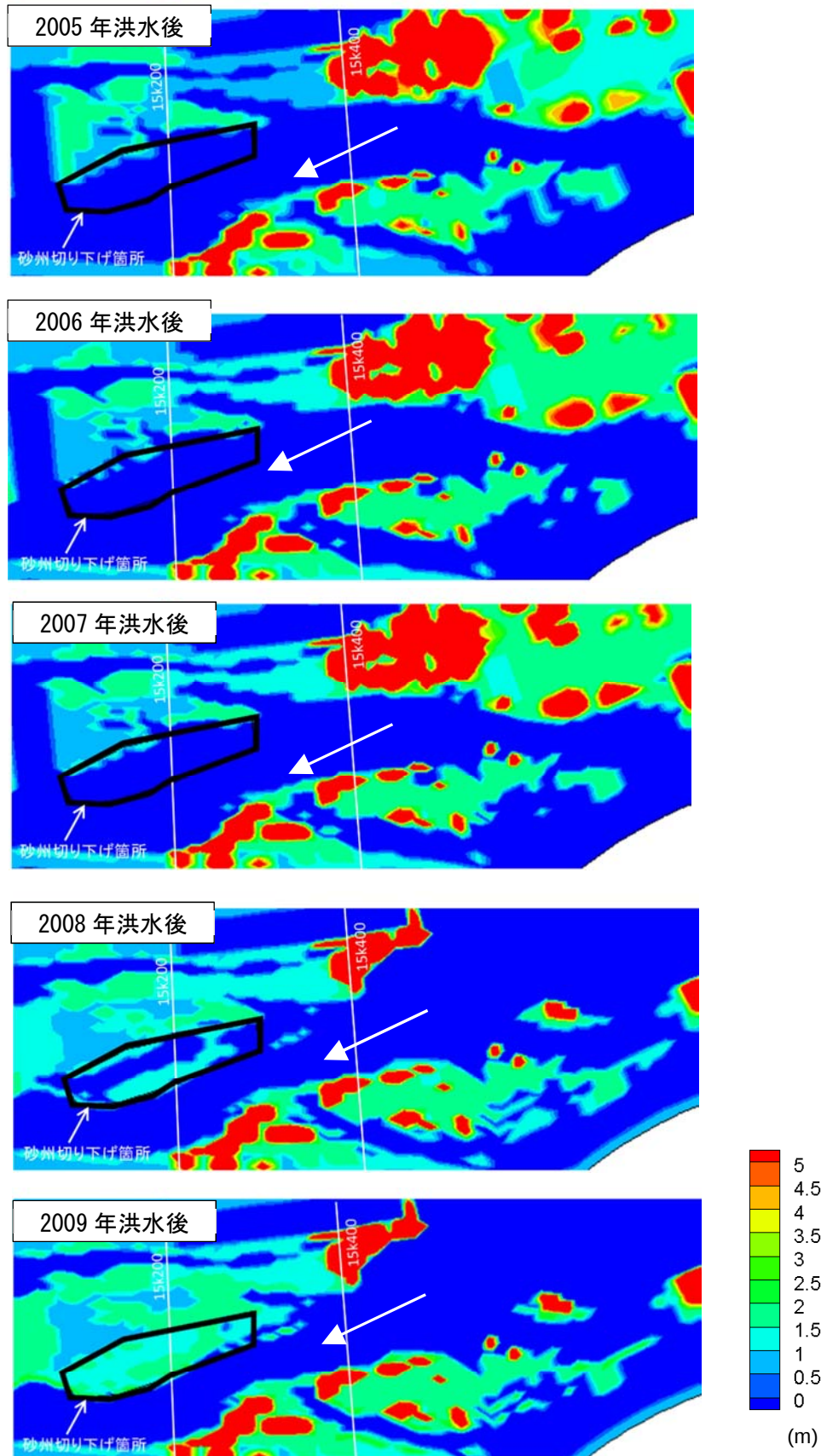


図 2.42 (1) 植生高（切り下げあり，毎年洪水後）

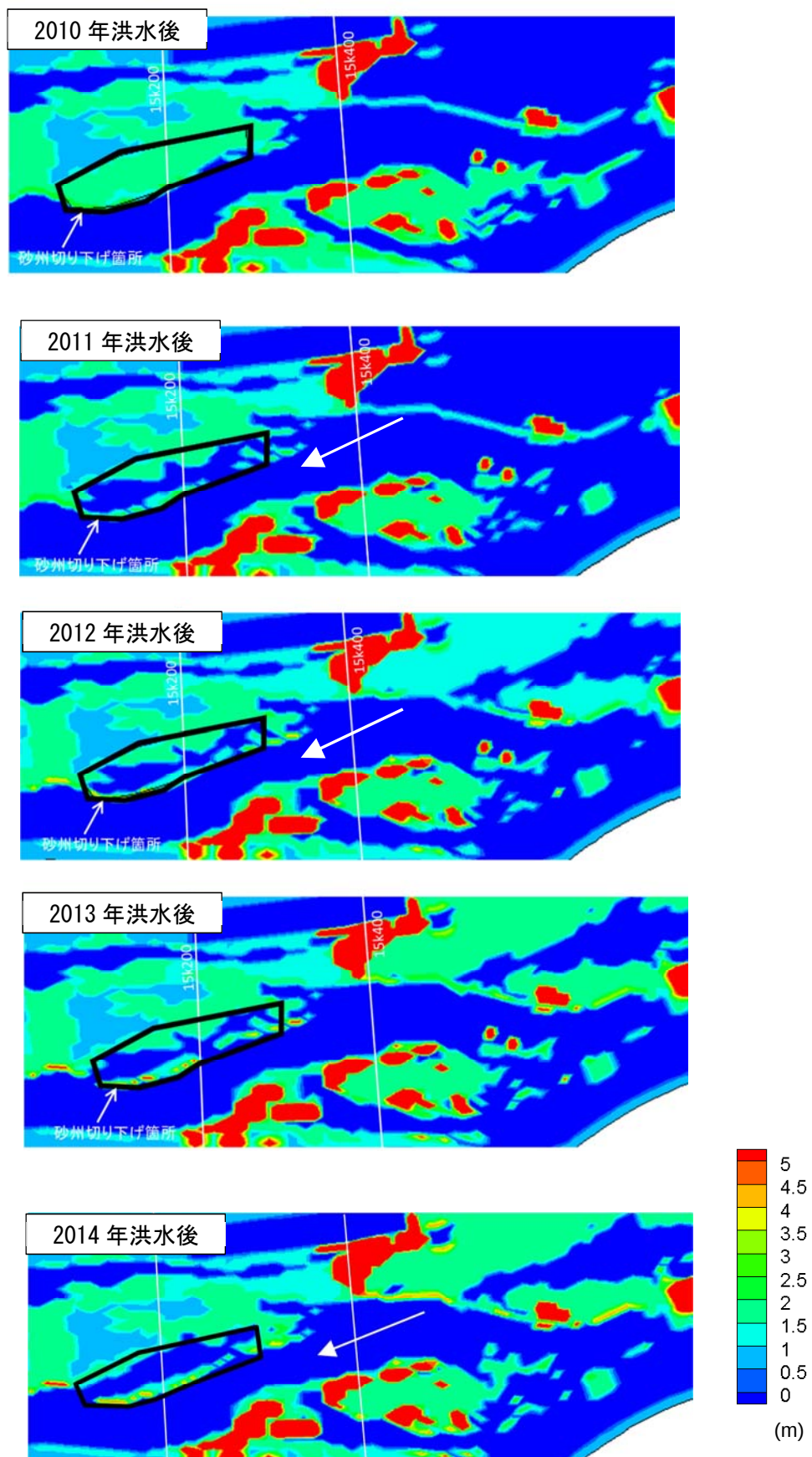


図 2.42 (2) 植生高（切り下げあり，毎年洪水後）

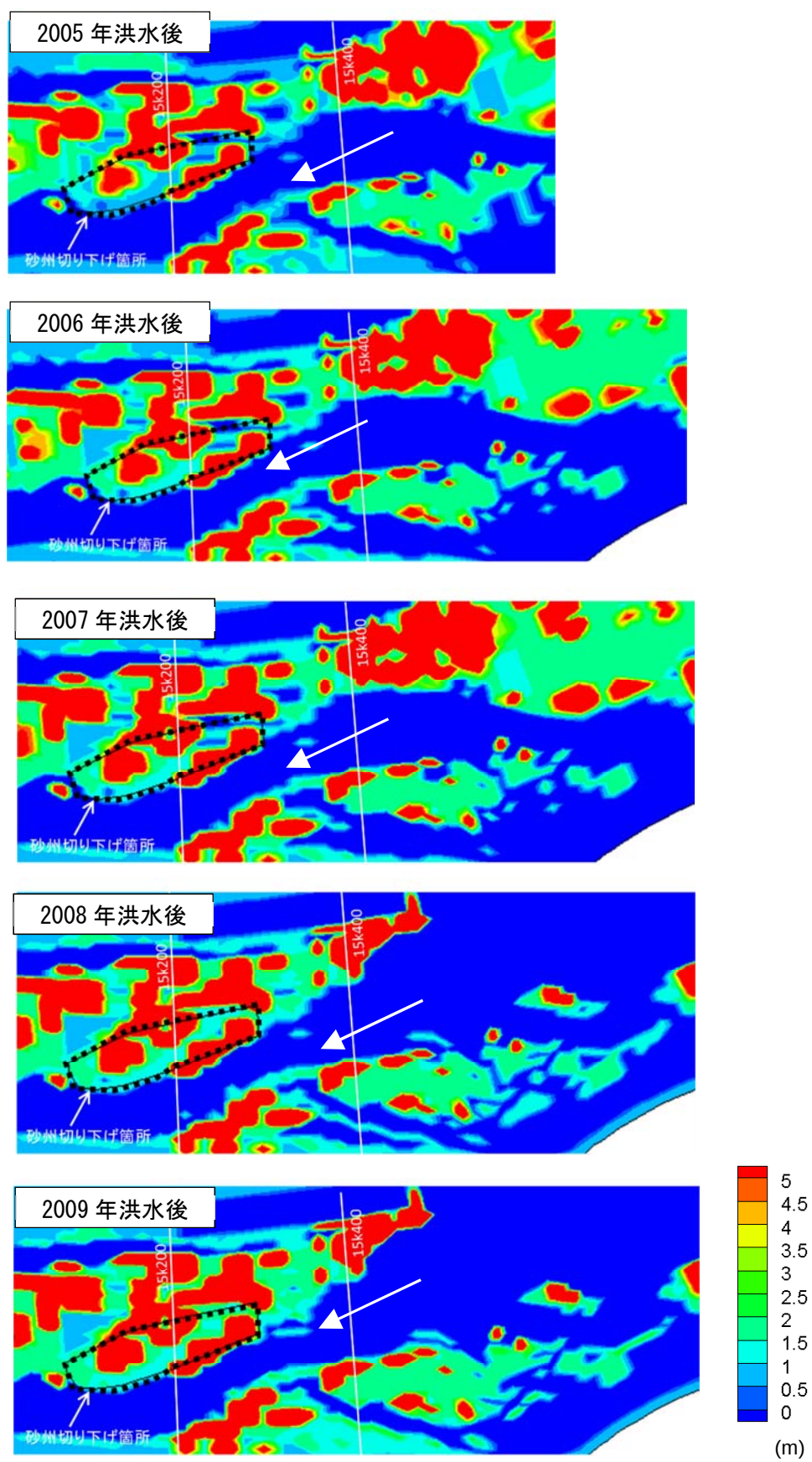


図 2.43 (1) 植生高（切り下げなし，毎年洪水後）

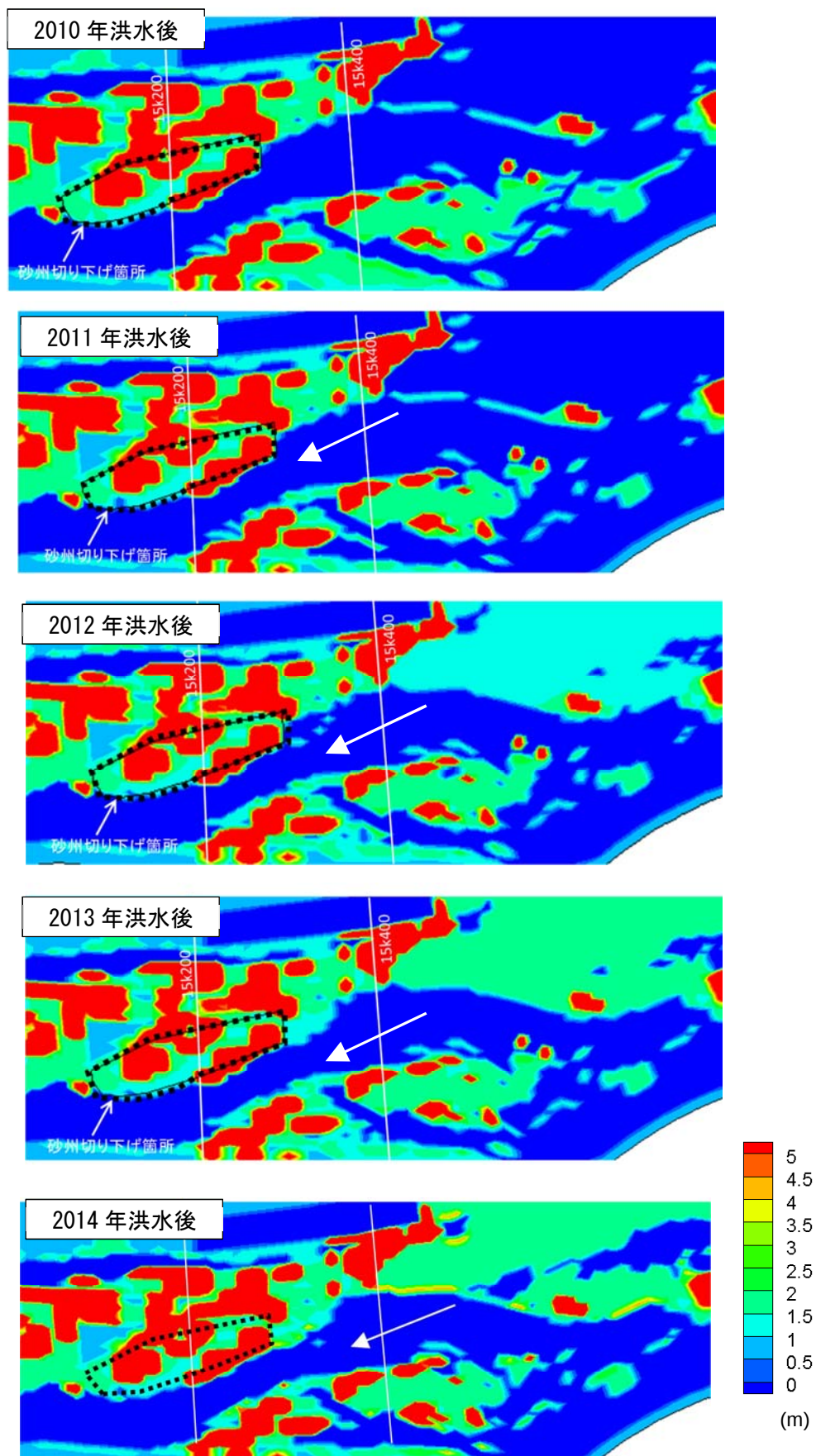


図 2.43 (2) 植生高（切り下げなし，毎年洪水後）

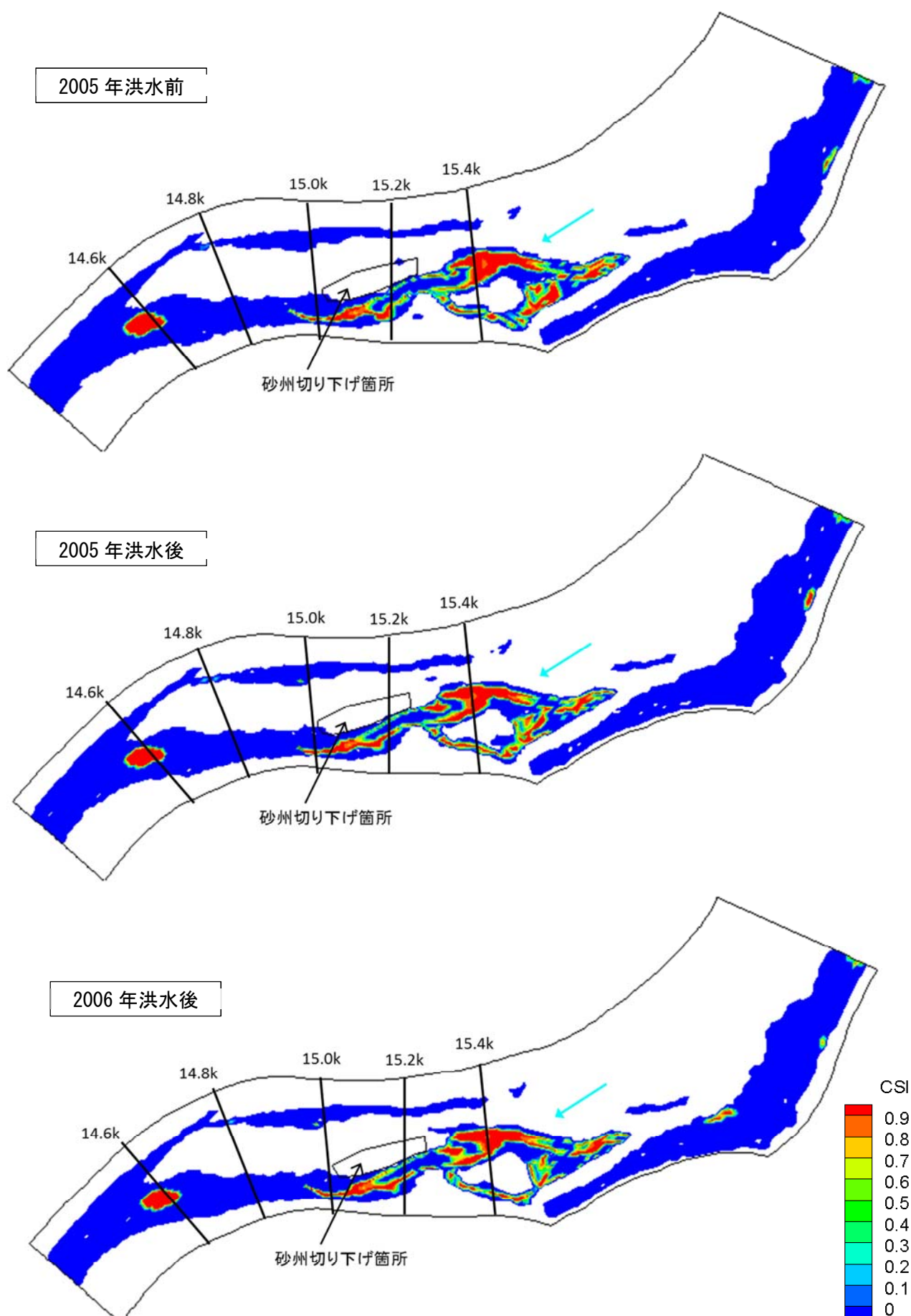


図 2.44 (1) アユ産卵場の適正值 (砂州切り下げあり)

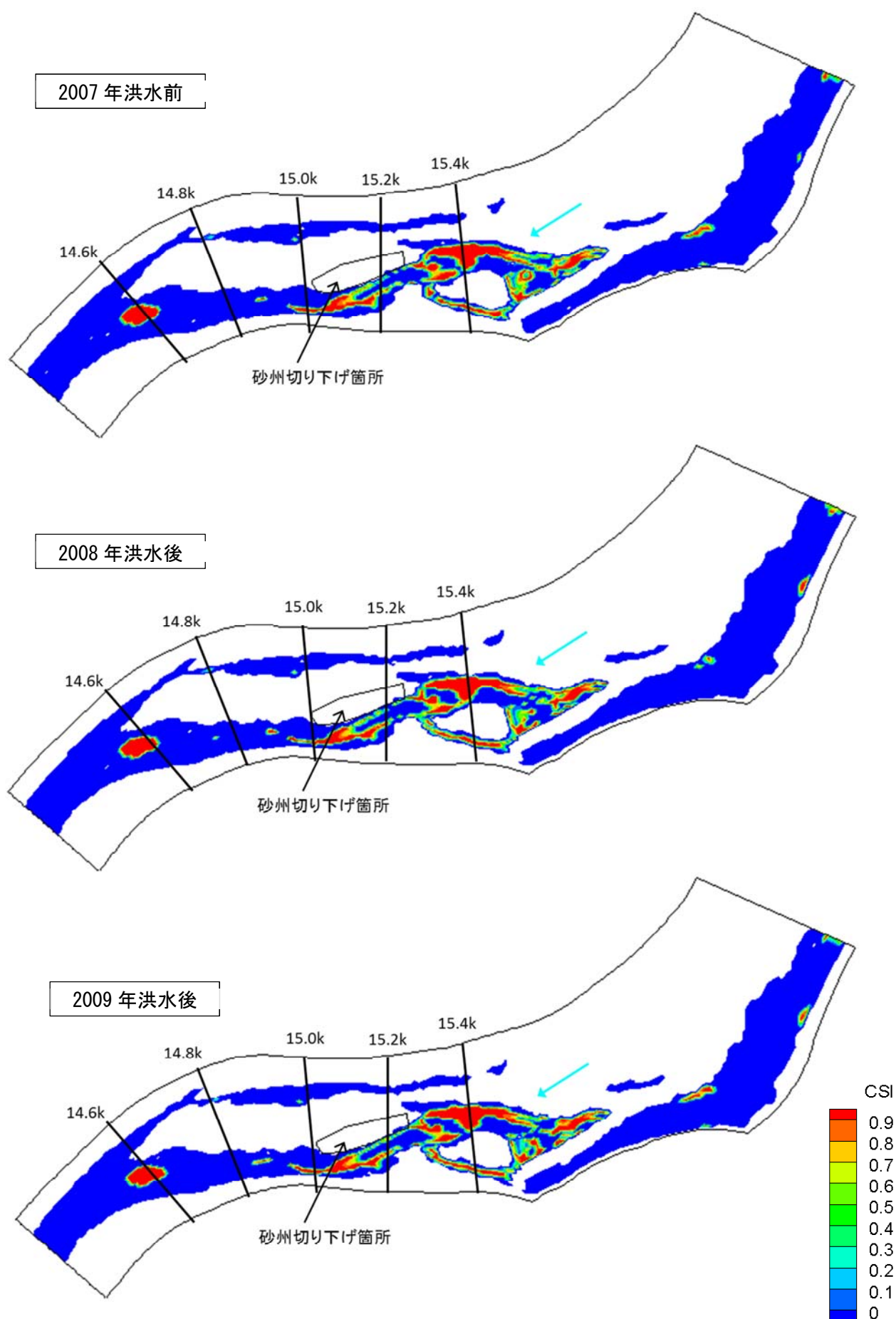


図 2.44 (2) アユ産卵場の適正值 (砂州切り下げあり)

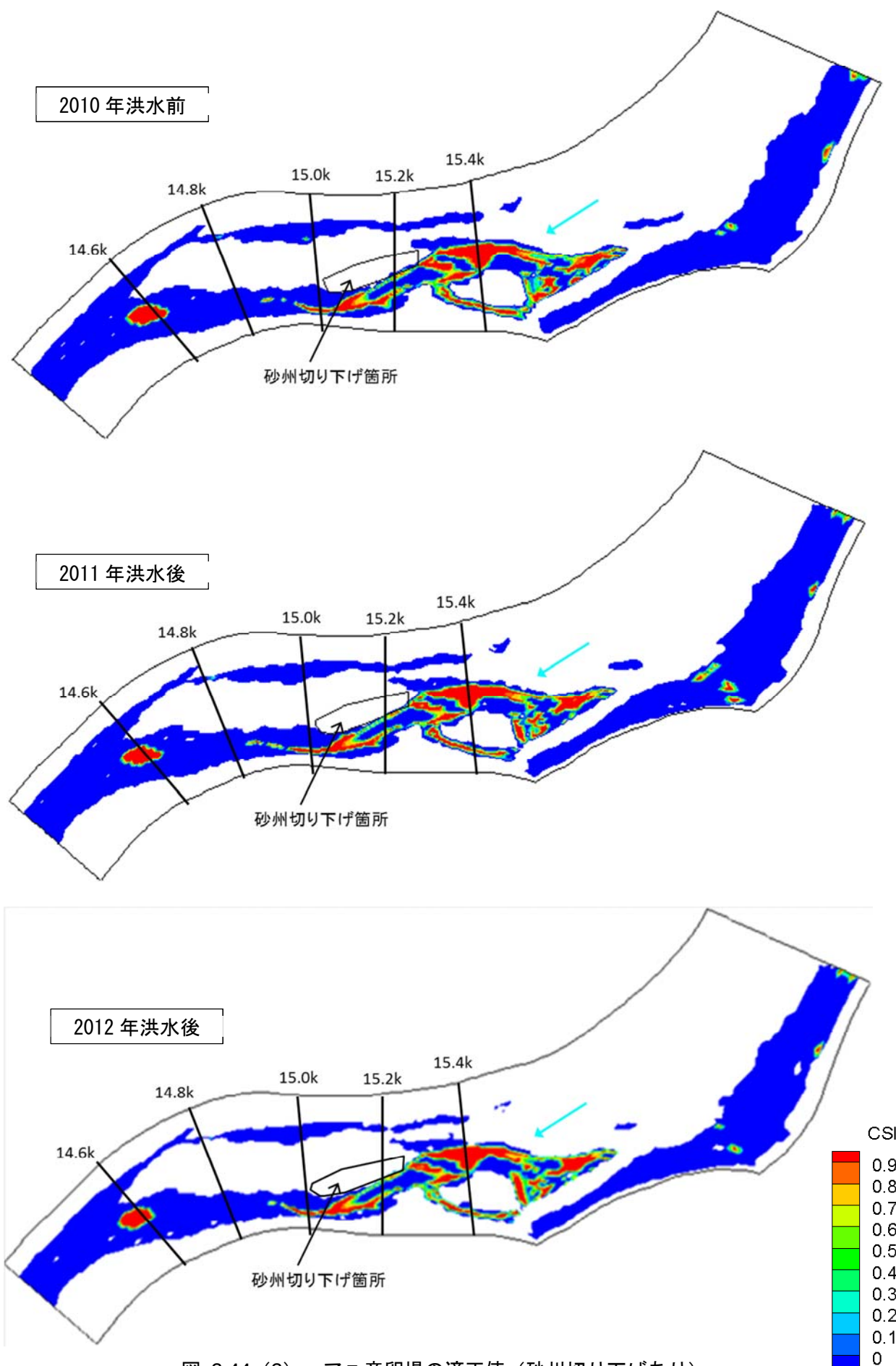


図 2.44 (3) アユ産卵場の適正值 (砂州切り下げあり)

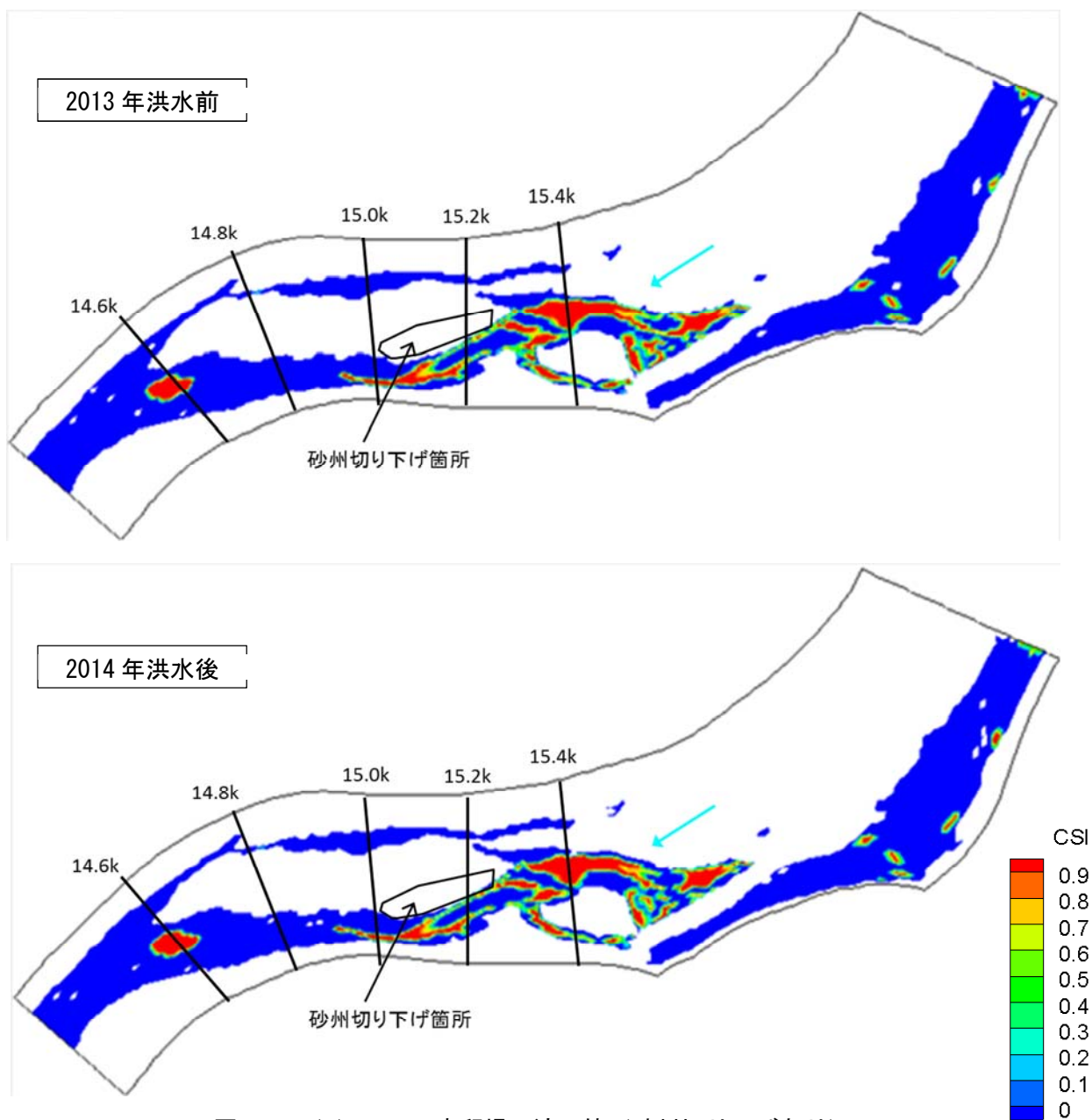


図 2.44 (4) アユ産卵場の適正值 (砂州切り下げあり)

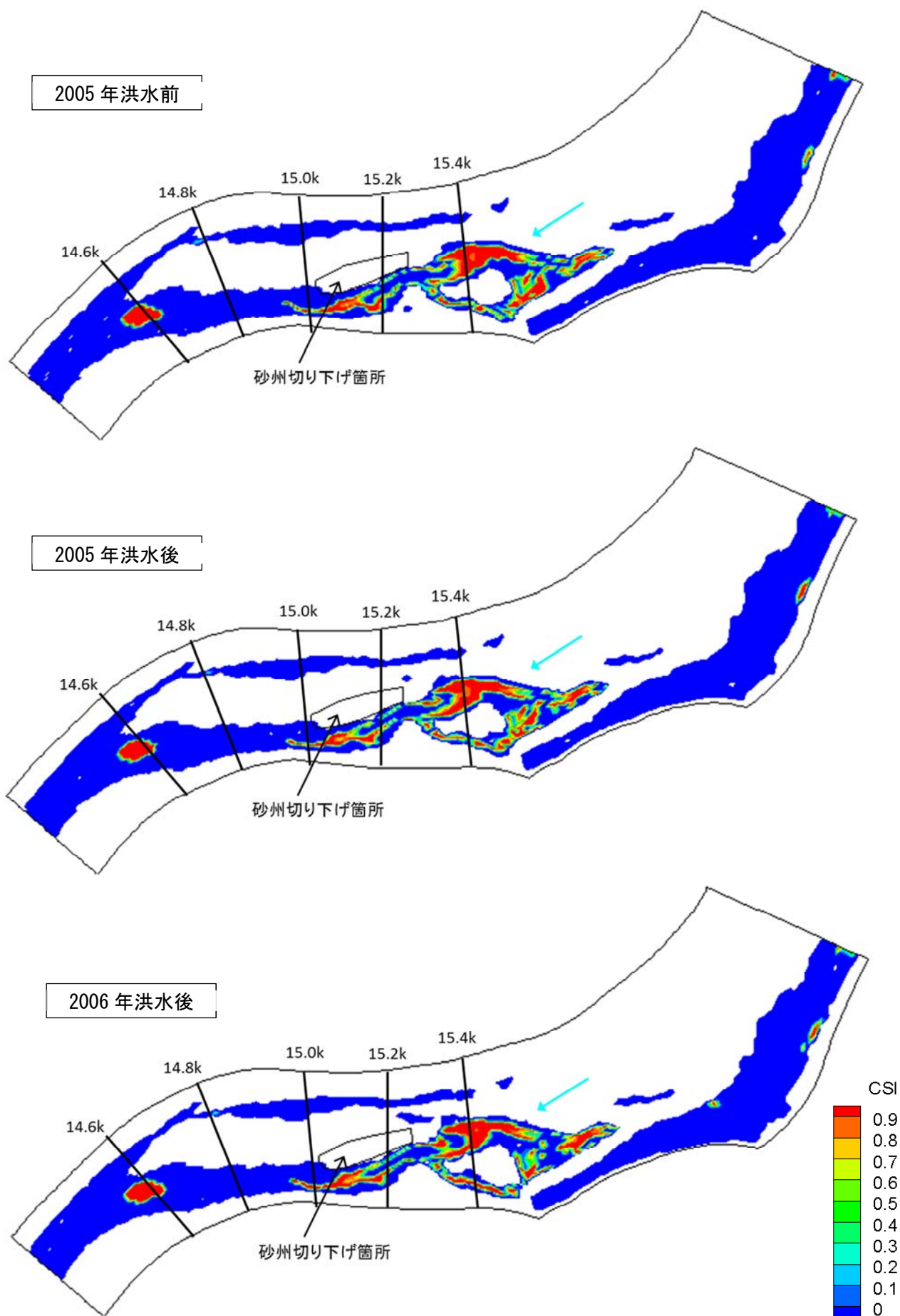


図 2.45 (1) アユ産卵場の適正值 (砂州切り下げなし)

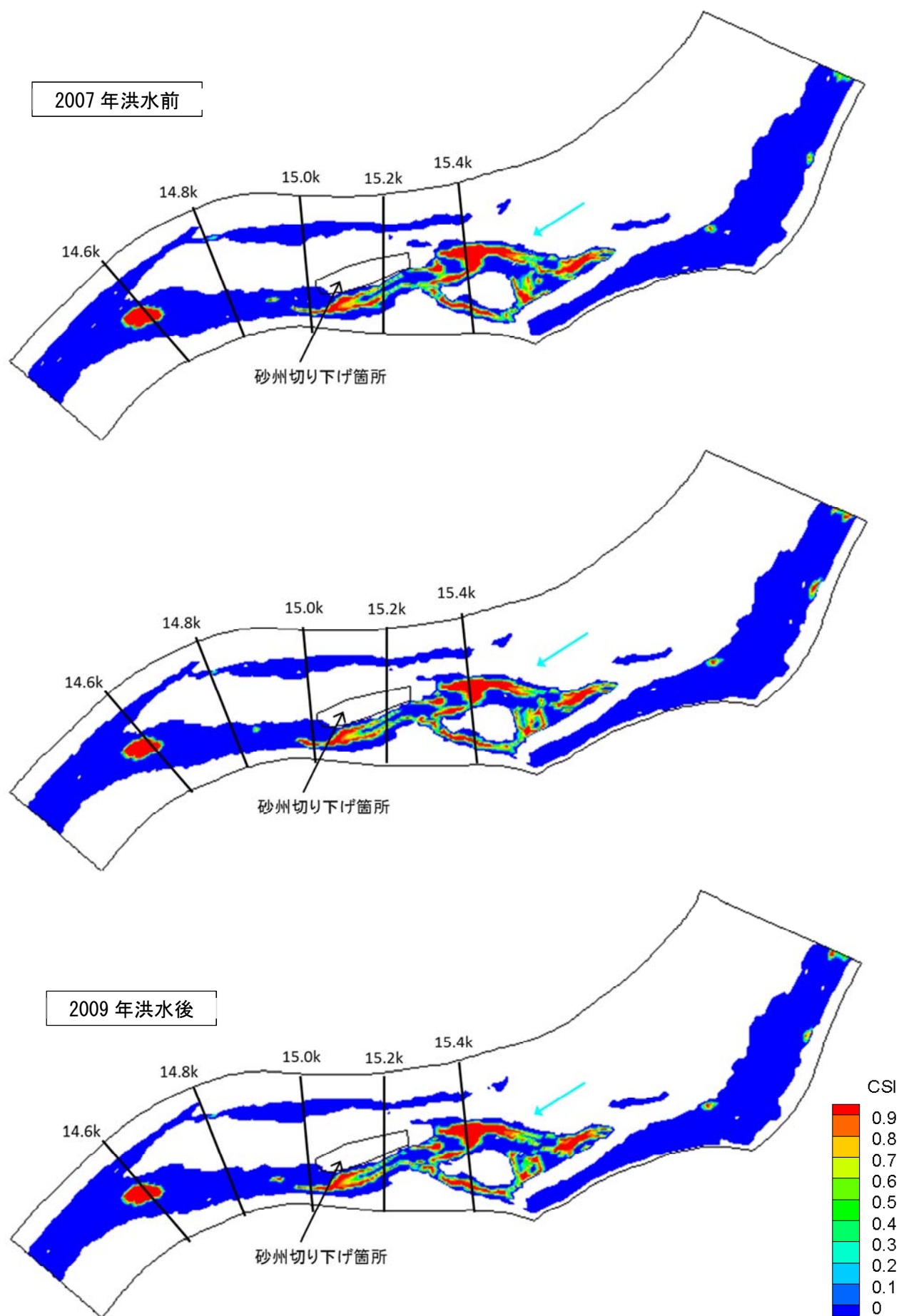


図 2.45 (2) アユ産卵場の適正值 (砂州切り下げなし)

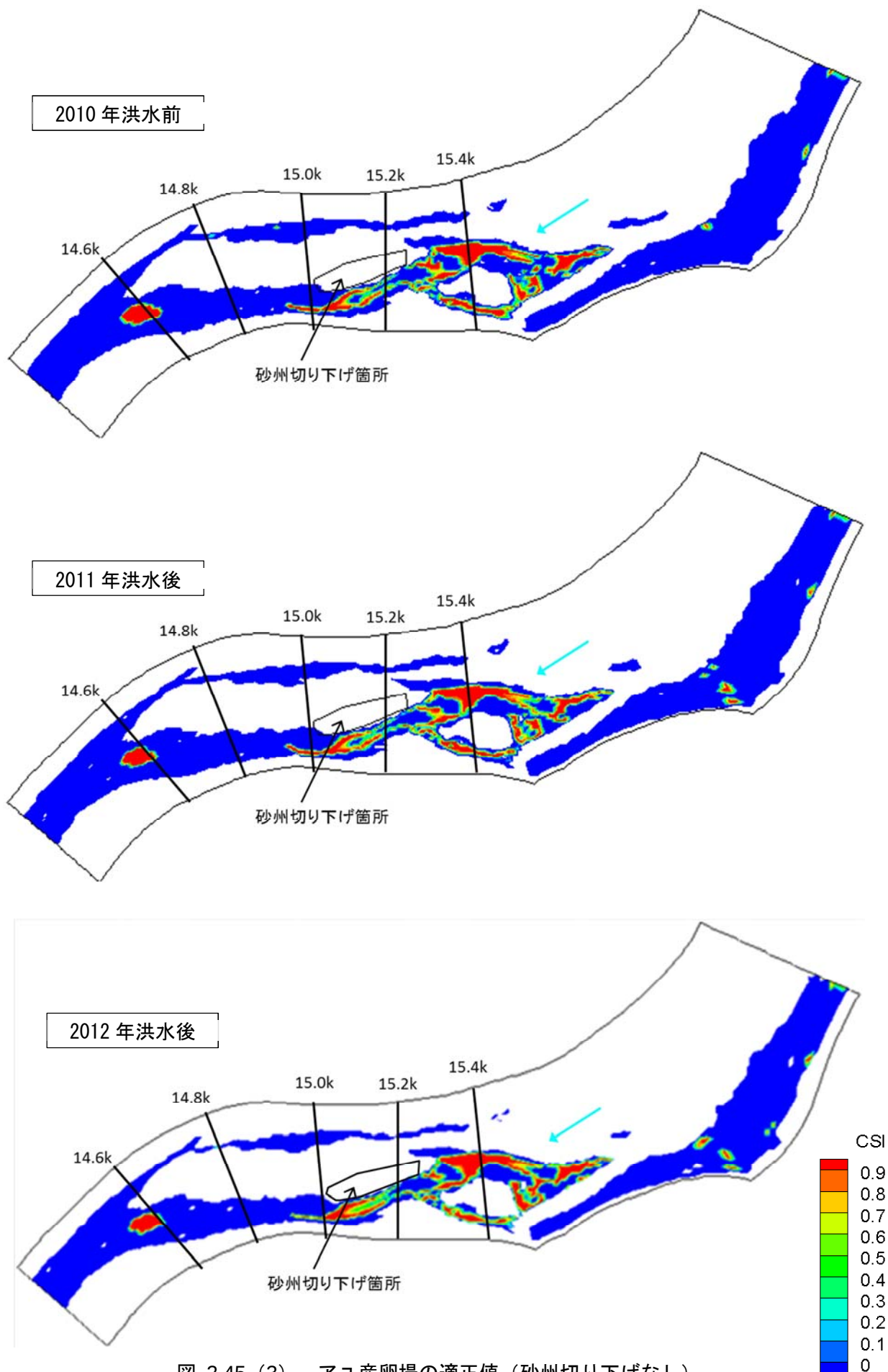


図 2.45 (3) アユ産卵場の適正值 (砂州切り下げなし)

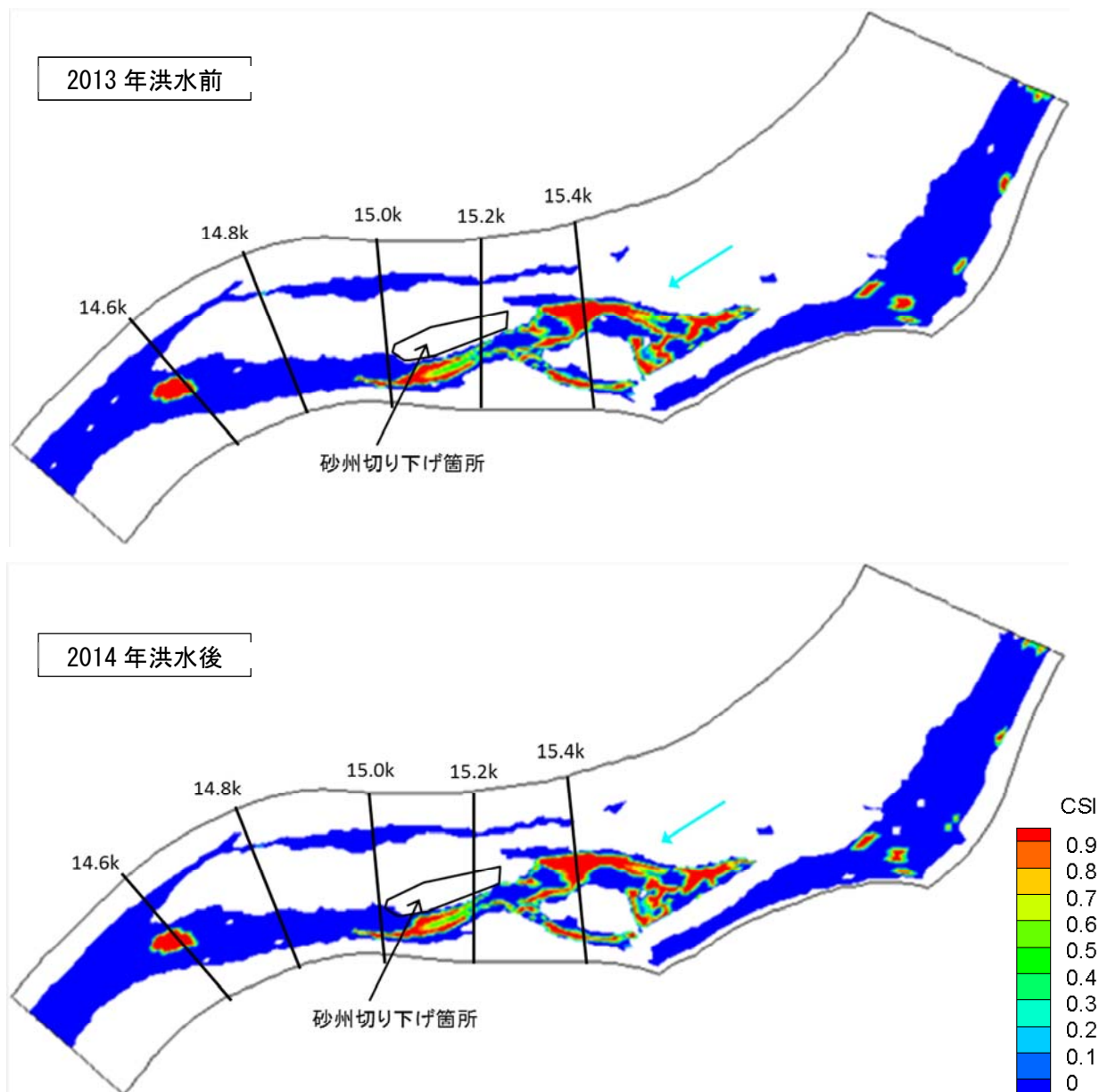


図 2.45 (4) アユ産卵場の適正值 (砂州切り下げなし)

【参考文献】

- 1) 前野詩朗, 渡辺敏, 藤塚佳晃: 簡易に得られる植物特性値を考慮した数値解析モデルの精度向上の提案, 土木学会論文集, No.803/Ⅱ-73, pp.91-104, 2005.
- 2) 渡辺敏, 前野詩朗, 藤塚佳晃, 宮崎貢, 眞田淳二: 旭川における礫河原再生と樹林化抑制に関する現地試験による検証, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.1201-1206, 2006.
- 3) 眞田淳二, 浦上将人, 渡辺敏, 前野詩朗, 藤塚佳晃: 旭川下流部における礫河原の自律的回復に向けた実証的研究, 河川技術論文集, 第 12 巻, pp.409-414, 2006.
- 4) 眞田淳二, 浦上将人, 前野詩朗, 渡辺敏: 2006 年 7 月出水を経験した旭川下流部礫河原再生箇所モニタリング結果と考察, 河川技術論文集, 第 13 巻, pp.129-134, 2007.
- 5) 旭川植生管理方針検討委員会・国土交通省岡山河川事務所: 河道内植生管理のとりくみ～旭川における礫河原再生と樹木管理の実践例を通じて～, 2010.
- 6) 国土交通省: 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>
- 7) 農林水産省: 内水面漁業生産統計調査, http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/naisui_gyosei/index.html
- 8) 国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所: 河川水辺の国勢調査(魚類)
- 9) 岡山県農林水産総合センター水産研究所: 岡山県アユ資源調査報告書, 2016.
<http://www.pref.okayama.jp/uploaded/attachment/209925.pdf>
- 10) 大塚法晴, 鬼束幸樹, 東野誠, 高見徹, 永矢貴之: アユの産卵床と物理環境に関する研究～五ヶ瀬川, 特に派川大瀬川をフィールドとして～共同研究最終報告, 2005.
- 11) 岡山県農林水産総合センター水産研究所: 岡山県の河川水温, <http://www.pref.okayama.jp/page/391217.html>
- 12) 前野詩朗, 吉田圭介, 松山悟, 藤田駿佑: 旭川大原試験区における植生消長シミュレーションモデルの構築と検証, 土木学会論文集, B1 Vol.70, No.4, pp.I_1369-I_1374, 2014.
- 13) 北海道河川財団: iRIC, <http://i-ric.org/ja/>
- 15) 清水義彦, 小葉竹重機, 新船隆行: 樹林化河道の洪水流況と浮遊砂輸送に関する数値計算, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.819-824, 2000.
- 16) 国土技術研究センター編, 河道計画検討の手引き, 山海堂, 2003.
- 17) 前野詩朗, 吉田圭介, 三島望, 松山悟: 旭川の大原箇所における植生の生長と洪水時の植生消失条件の検討, 土木学会論文集 B1 Vol.69, No.4, I_727-I_732, 2013.
- 18) 田中規夫, 八木澤順治, 青木信哉, 福岡捷二: 河道内樹木の洪水攪乱規模と樹齢による破壊限界変化, 河川技術論文集, 第 13 巻, pp.177-182, 2007.
- 19) リバーフロント整備センター編: 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, pp.154-171, 1999.
- 20) 油川曜佑, 渡邊康玄, 阿部修也: 沙流川 2003 年 8 月洪水における樹木の倒伏状況から算定される流速, 水工学論文集, 第 49 巻, pp.583-588, 2005.

- 21) 末次忠司，藤田光一，服部敦，瀬崎智之，伊藤政彦，榎本真二：礫床河川に繁茂する植生の洪水攪乱に対する応答，遷移および群落拡大の特性多摩川と千曲川の礫河原を対象として，国土技術政策総合研究所資料，第 161 号，2004b.
- 22) 関根正人：移動流れの水理学，共立出版，pp.153-184，2005.
- 23) 永矢貴之，筈瀬明日香，白石芳樹，鬼束幸樹，東野誠，高見徹，東均，秋山壽一郎：アユ産卵場の保全と創出を目指した河道掘削断面の選択手法の提案，河川技術論文集，第 15 巻，pp.79-84，2009.

3. 経年変化を考慮した礫河原再生効果に関する研究

3.1 はじめに

近年、全国の多くの河川で砂州の急速な樹林化が問題となっている。本研究で対象としている旭川も、1980年代以降、砂州の樹林化が著しく進行し、礫河原が減少している。そのため、旭川を管理する国土交通省は2004年3月に大原試験区、2005年3月に祇園試験区で、試験的に砂州上の植生伐採と砂州の切り下げを実施した（図3.1参照）。その後、大原試験区では渡辺ら¹⁾によって、整備後の調査、分析が行われており、その結果、切り下げ箇所では2～3年程度で植生の再繁茂が確認された。一方祇園試験区では、数年にわたって動的な礫河原が維持されたが、その後に大きな洪水がなかったため、2015年現在、両試験区ともに砂州の河岸沿いで植生が再繁茂している（図3.1参照）。

本研究では、祇園地区を含む中州を対象に、植生伐採と砂州の切り下げ、低水路の埋戻しを組み合わせた8つのケースを設定し、平面二次元河床変動モデルと植生消長モデルを用いて5年間の解析を行った。過去の洪水履歴を参考に、2つの規模の洪水を用いて解析を行い、以下に示す目的のもと、解析結果について検討した。

- 低水路の埋戻しを行うことによる、左岸側滞筋部への集中した流れの緩和の効果について検討する。
- 埋戻しによって、切り下げ箇所上に洪水流をより乗り上げやすくし、河床の攪乱に及ぼす影響を確認する。
- 5年間の解析を行い、中州や切り下げ箇所上の河床変動と植生動態の経年的な変化を確認する。
- 施工の組み合わせによる樹林化抑制に対する効果とその持続性を検討する。

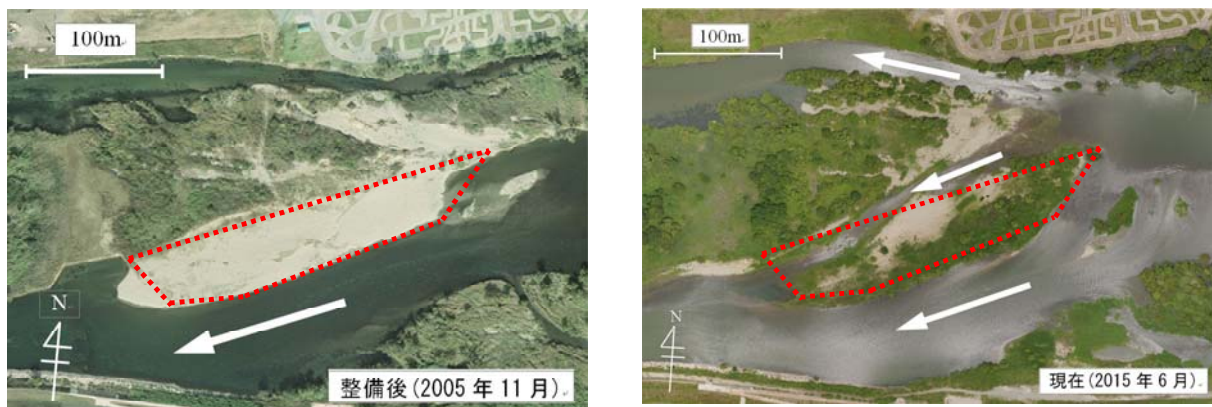


図 3.1 祇園試験区の整備後と現在の様子（赤破線：植生伐採・切り下げ実施箇所）

3.2 解析の概要

本研究では、前章で説明した Nays2DH²⁾と前野ら³⁾の植生消長モデルを用いて、切り下げ・埋戻しによる樹林化抑制効果について検討した。解析では 2013 年の地形を初期地形としている。解析の流れは図 3.2 に示す。まず、Nays2DH を用いて、洪水時の河床変動解析を行う。次に、河床変動後の地形で平水時の流況解析を行う。それぞれの解析から得られた、河床変動量、流速、水位等の結果を用いて、植生消長モデルで植生の流失・倒伏、成長、入植・拡大の判定を行い、洪水後 1 年間の植生繁茂状況を再現する。得られた結果を翌年の地形の初期条件とし、5 年間の解析を行った。河床変動量や植生状況の結果から、植生伐採と切り下げ、埋戻しの組み合わせによる、砂州上の河床の攪乱、植生の抑制効果について検討した。

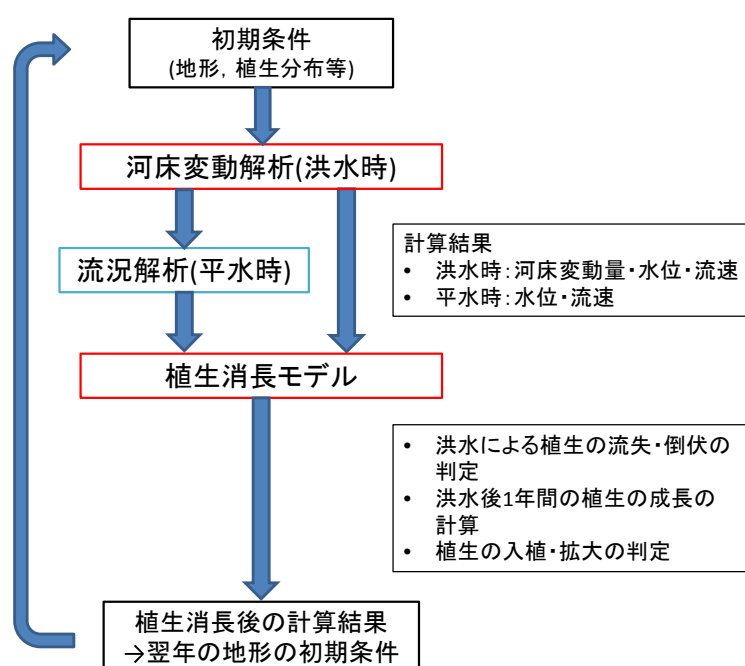


図 3.2 解析の流れ

3.2.1 対象区間

本研究では、図 3.3 に示すように、旭川河口から 14.3km～16.3km の区間で解析を行った。対象とした中州は河口から約 14.6km～15.4km 区間に位置する（図 3.3 の黒枠で囲んだ箇所。以下、中州と呼ぶ）。この区間の河道幅は約 300m，平均河床勾配は 1/670，河床材料の平均粒径は 30mm である。

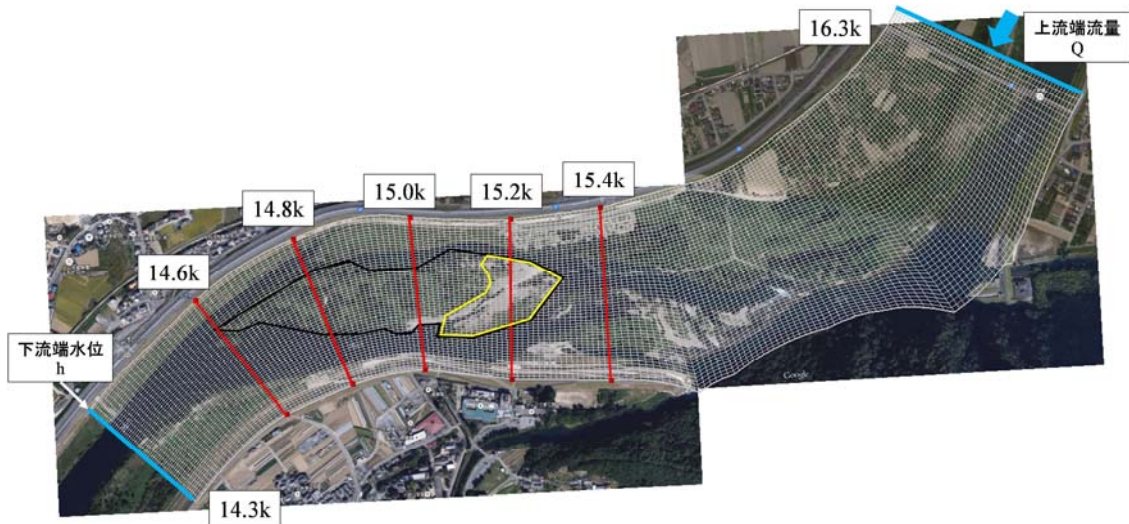


図 3.3 対象区間（黒枠：対象とした中州，黄枠：祇園地区）

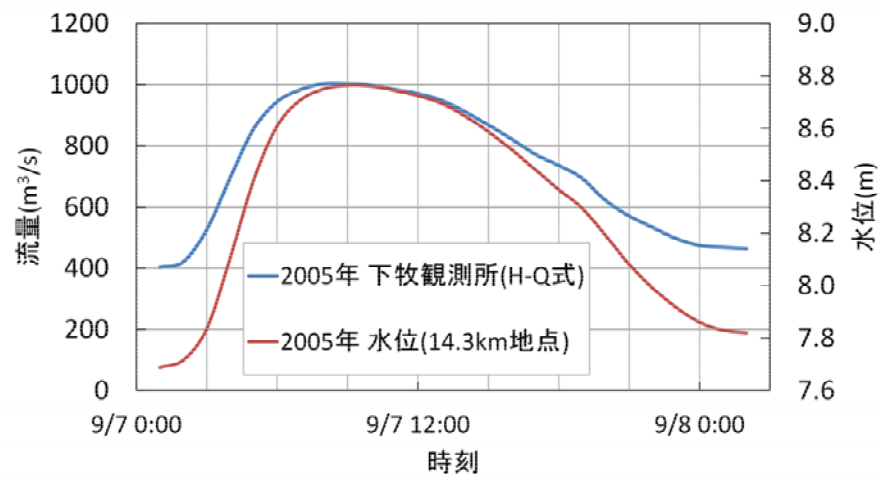
3.2.2 対象洪水

表 3.1 に 2001 年から 2014 年までの洪水の履歴を示す。表からわかるように、旭川では、小規模な洪水が数年間続いた後、 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 規模、 $3,000\text{m}^3/\text{s}$ 規模の洪水が発生している。そこで本研究では、履歴のような規模・頻度で洪水が発生するとし、平均年最大流量 $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 規模の洪水と、 $3,000\text{m}^3/\text{s}$ 規模の大きな洪水を対象とした。ここで、平均年最大流量は、2001 年から 2014 年の間で $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の洪水を除いた平均の値である。解析では、近年旭川で発生した洪水の中で、対象洪水規模に近い 2005 年の洪水（ピーク流量 $1,003\text{m}^3/\text{s}$ ）、2011 年の洪水（ピーク流量 $3,403\text{m}^3/\text{s}$ ）のハイドログラフデータを用いた。解析対象時間は、2005 年洪水は 25 時間、2011 年洪水は 40 時間である。それぞれの水位と流量ハイドログラフを図 3.4 に示す。

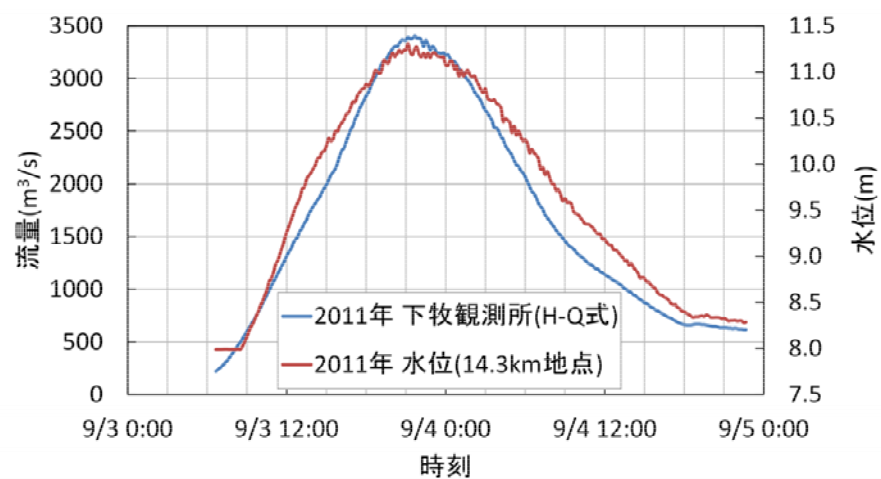
ここで、平均年最大流量規模の洪水で樹林化を抑制する程度の河床変動が生じれば、施工の樹林化抑制に対する効果を評価できると考え、植生の入植条件も踏まえて 1～4 年目に 2005 年の洪水を与えた。また、大規模な洪水が発生した場合の、中州上の河床変動と植生状況について検討するため、5 年目に 2011 年の洪水を与えた。

表 3.1 旭川における 2001 年から 2014 年までの洪水履歴

年	最大流量(m^3/s)	年	最大流量(m^3/s)
2001	1640.17	2008	671.65
2002	339.92	2009	786.87
2003	1177.7	2010	680.87
2004	2527.4	2011	3402.56
2005	1003.01	2012	2237.75
2006	2733.47	2013	1884.73
2007	720.81	2014	641.21



(a) 2005 年



(b) 2011 年

図 3.4 水位と流量ハイドログラフ

3.2.3 解析条件

表 3.2 に本解析に用いたデータを示す．各データについては以下に詳細を述べる．

表 3.2 解析に用いたデータ

地形データ	2013定期横断+航空写真(2014年1月)	
対象洪水	2005年ハイドロ(ピーク流量:1003m ³ /s):25時間	
	2011年ハイドロ(ピーク流量:3403m ³ /s):40時間	
粒度分布	高水敷	2013年, 2015年現地調査
	低水路	2013年国交省15.2k地点左岸
粗度	高水敷	0.026m ^{-1/3} s
	低水路	0.028m ^{-1/3} s(埋戻し箇所は0.03m ^{-1/3} s)
植生データ	2013年植生データ+航空写真(2014年1月)	

(1) 解析格子

解析には、図 3.2 に示した境界適合格子を用いた．メッシュの節点数は流下方向に 189，横断方向に 57 である．メッシュの格子間隔は約 10m である．

(2) 境界条件

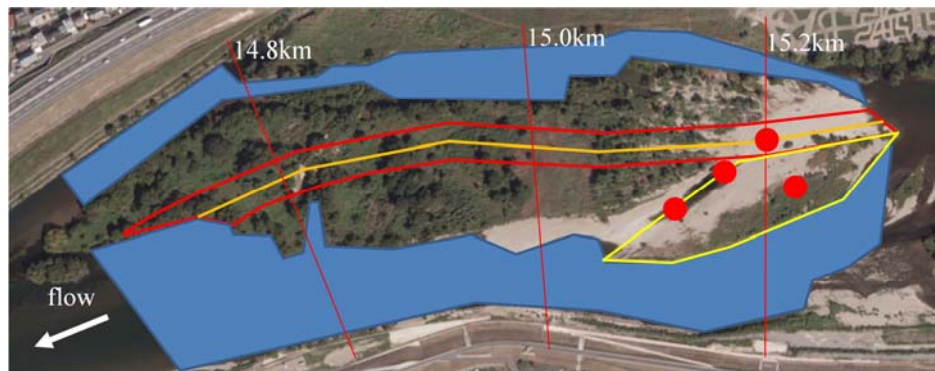
上流端流量は、下牧観測所（河口から 19.0km 地点）での前述の流量ハイドログラフを用いた．また、解析範囲下流端の水位のデータがなかったため、別途、河口から 11.6km～17.5km の区間で解析を行い、14.3km 地点の水位を得た．具体的には、三野観測所（河口から 11.6km 地点）の観測値を下流端水位 に与え、2005 年、2011 年の洪水で解析を行い、解析から得られた 14.3km 地点の水位を下流端水位として与えた．

(3) 河床高

河床高は 2013 年に行われた縦断 200m 間隔の定期横断測量データを内挿し、さらに祇園地区については、2014 年 1 月に実施したドローンによる写真測量データを用いて砂州の地形を修正した．

(4) 河床粒径

解析に使用する粒度分布は、低水路では、2013 年に行われた国土交通省岡山河川事務所の河床材料調査結果を用いた．高水敷では、現地調査で採取した河床材料をふるい分けし、その結果を用いた．河床材料の採取箇所は図 3.5 の赤丸に示した箇所である．また、年度により河床材料の粒度分布にばらつきがみられたため、河床変動や植生動態に、粒度がどの程度影響を及ぼすかを把握するために 2015 年の粒度分布でも解析を行った．2013 年及び 2015 年の高水敷、低水路の粒度分布は図 3.6 に示す．また、埋戻し後、洪水によって再び低水路の河床が洗掘しないよう、埋戻し箇所には低水路の最大粒径（125mm）を一様に与えた．



(赤：切り下げ箇所，青：埋戻し箇所)
 (橙ライン：切り下げ箇所縦断ライン)
 (黄枠：植生伐採，切り下げ(河床高 8.0m まで))
 (赤点：河床材料採取箇所)

図 3.5 切り下げ・埋戻し，河床材料採取箇所

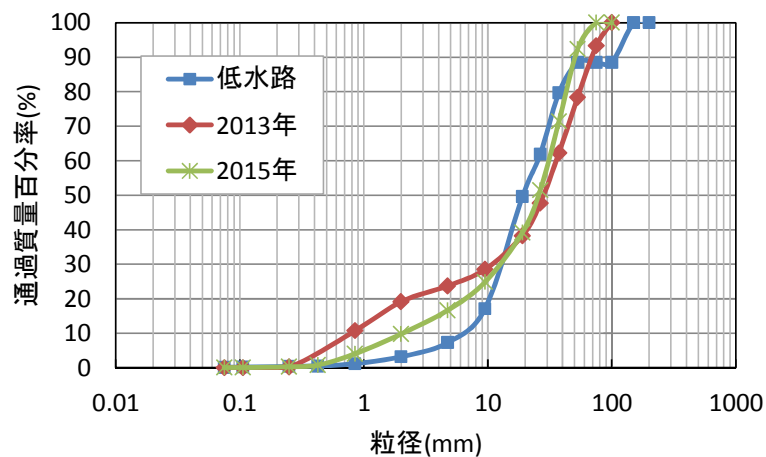


図 3.6 粒度分布

(5) 地被抵抗（マンニングの粗度係数）

地被抵抗はマンニング式で扱い，低水路のマンニング係数の値を $0.028\text{m}^{-1/3}\text{s}$ ，高水敷のそれを $0.026\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とした．これらの値は前野ら⁴⁾の研究例を参考にした．また，埋戻し箇所では，粒径を低水路の最大粒径（125mm）に設定したため，以下に示す Manning-Strickler の式より， $0.030\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とした．

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}} \quad (3.1)$$

ここで， k_s は相対粗度高さで河床材料粒径の 1～3 倍程度， g は重力加速度である．

低水路のマンニング係数を n に与えて得られた k_s と，低水路の 10%，50%，85%粒径のそれぞれの値から，各粒径ごとに k_s との比を求めた．これより，85%粒径の比が 1.2 となり，1～3 倍の間であり，最も適当であると考え，本研究では k_s に 125mm の 1.2 倍の値を与えて，埋戻し箇所の粗度係数を設定した．

(6) 植生データ

本研究では、吉田ら⁵⁾が植生消長モデルを用いて得た 2013 年の植生高、密生度のデータをもとに、2014 年 1 月に撮影された航空写真データと比較し、植生が生えていない箇所を修正した。得られた植生データについては現地で確認した結果、概ね植生高や植生密度が一致していた。図 3.7 に 2013 年の植生分布を示す。

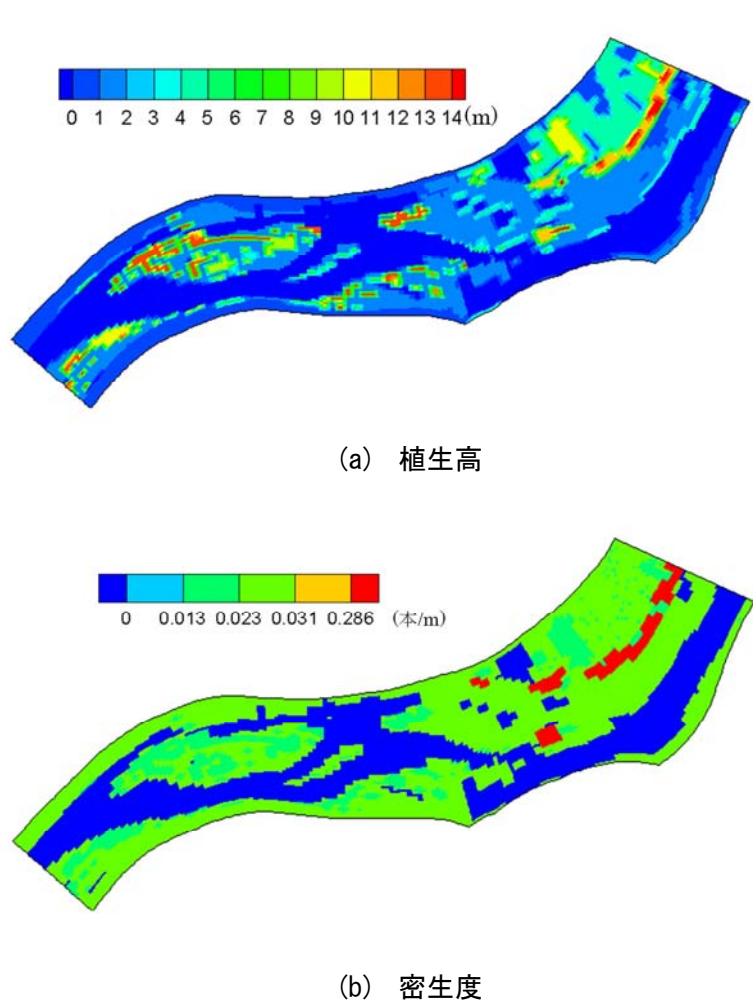


図 3.7 2013 年の植生データ

3.2.4 解析ケース

(1) 切り下げ，埋戻しの方針

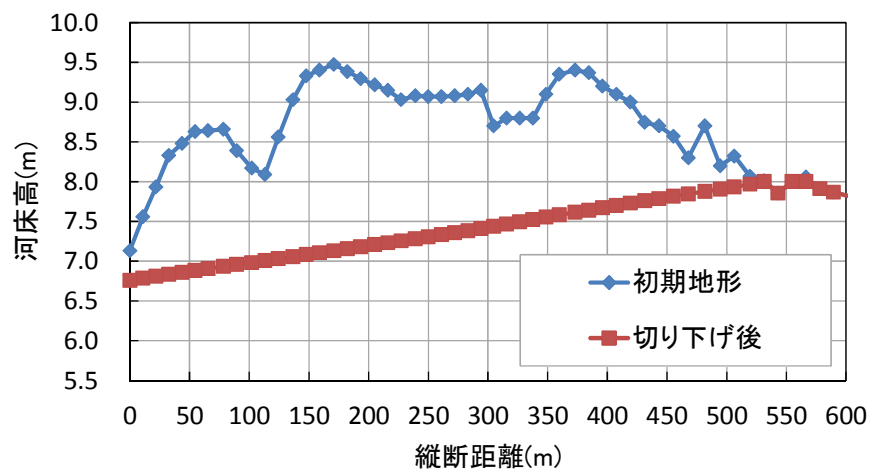
本研究では，以下 3 つの方針を基に，切り下げ量，埋戻し量を設定した．①埋戻しを行う場合，河積は増減しないようにする．②埋戻し後，洪水によって低水路の河床低下が生じないように，埋戻し箇所には最大粒径を与える．③切り下げ直後は平水時に切り下げ箇所が冠水しないようにする．

(2) 解析ケースの設定

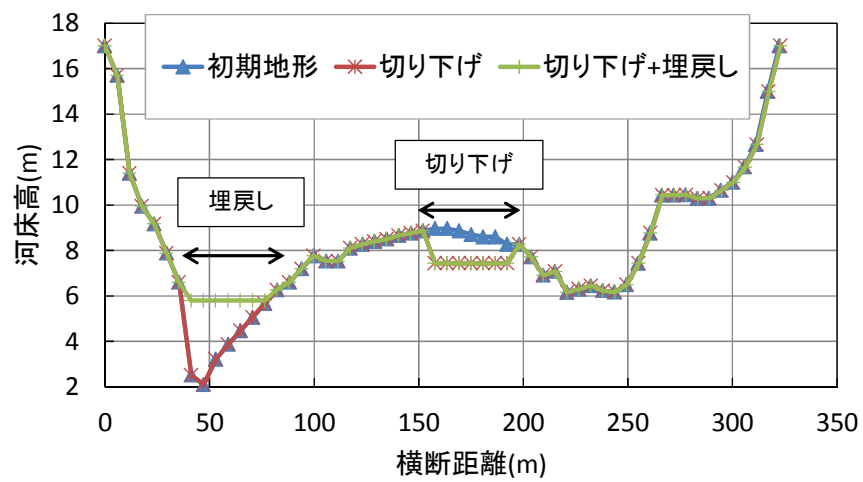
表 3.3 に示すように，植生伐採，切り下げ，埋戻しを組み合わせ，粒度分布を変更した 8 つのケースを設定した．Case1 は植生伐採の有無と粒度分布を変更したケースである．Case2 と Case3 は，それぞれ 2013 年と 2015 年の粒度分布を用いて植生伐採と切り下げ，埋戻しを組み合わせたケースである．切り下げ箇所と埋戻し箇所は図 3.5 に，切り下げ，埋戻し直後の縦横断図をそれぞれ図 3.8 に示す．ここで，切り下げ箇所の縦断ラインは図 3.5 に示す赤枠内の橙色のラインである．また，切り下げ箇所に洪水流が入りやすくなるように，図 3.5 の黄線で囲まれた部分は植生伐採と河床高 8.0m までの切り下げを行った（以下，上流側砂州と呼ぶ）．

表 3.3 解析ケース

	切り下げ	埋戻し	植生伐採	粒度分布
Case1-1	×	×	×	2013年
Case1-2	×	×	○	2013年
Case1-3	×	×	×	2015年
Case1-4	×	×	○	2015年
Case2-1	○	×	○	2013年
Case2-2	○	○	○	2013年
Case3-1	○	×	○	2015年
Case3-2	○	○	○	2015年



(a) 切り下げ箇所縦断図 (0m 地点が下流側)



(b) 切り下げ・埋戻し箇所横断図 (15.0k 横断ライン) (0m 地点が左岸)

図 3.8 切り下げ, 埋め戻し縦横断図

3.3 施工による樹林抑制効果の検討

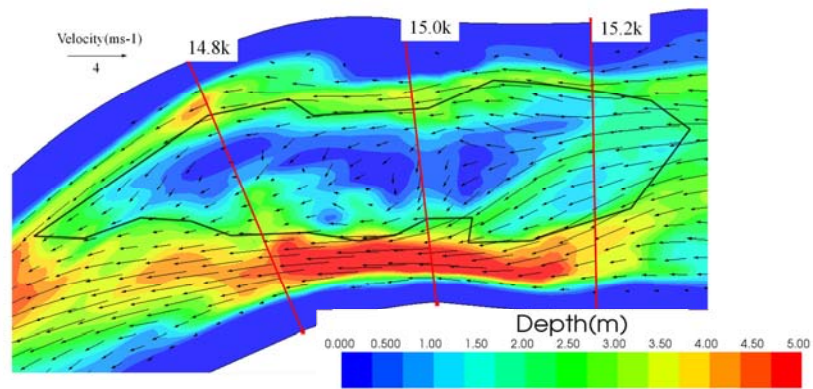
3.3.1 植生伐採の効果の検討

図 3.9 に Case1-1 の 1 年目洪水ピーク時における流速と水深の結果を示す。図からわかるように、砂州の左岸側に流れが集中していることで、洪水のピーク時でも中州上の水深は小さく、流速も小さい。1 年目の洪水ピーク時には、上流側砂州上での流速は、中州の他の箇所よりも比較的大きいが、この箇所は洪水によって徐々に土砂が堆積していくため、4 年目になると水深はさらに小さくなり、流速も低減する。粒度分布を変更した Case1-3 でも同じような結果となった。このことから、何も施工を行わない場合、平均年最大流量規模の洪水では、中州上で河床の攪乱は期待できず、植生が繁茂し続けると考える。

次に、図 3.5 の赤枠の部分で植生伐採のみを行った Case1-2 の結果を示す。図 3.10 に示すように、植生伐採を行っただけでは、ピーク時の流速と水深は、植生伐採を行っていない場合とほとんど変わらないことがわかる。また、図 3.11 に示すように、植生を伐採した箇所での河床変動も 4 年目までほとんど起きていない。ここで、ケース名の後の文字は何年目の洪水後かを指す（例えば、1y=1 年目の洪水後）。

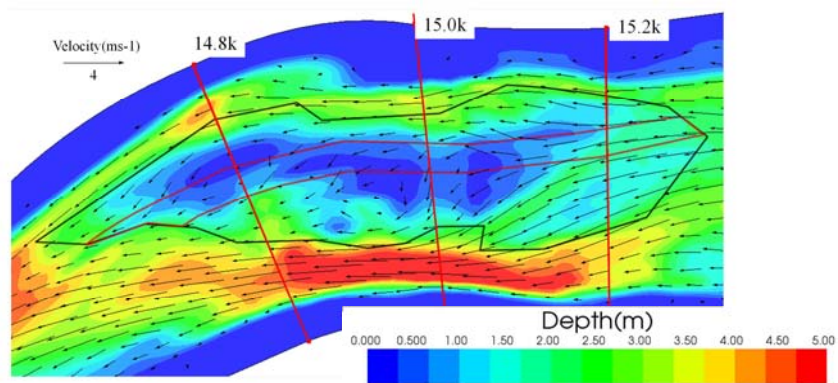
また、図 3.12 に 5 年目と 6 年目の洪水発生前の植生高を示す。伐採箇所に入植した植生は、5 年目の洪水によって、上流側は流失するが、下流側では残存している。粒度分布を変更した Case1-4 でも同じ傾向である。図 3.11 からわかるように、平均年最大流量規模の洪水では河床変動はほとんど生じないことから、残存した植生の流失は難しく、再び繁茂してしまうことが懸念される。

以上のことから、植生伐採のみでは河床の攪乱規模の増加や樹林化抑制には、それほど効果がないと考えられる。



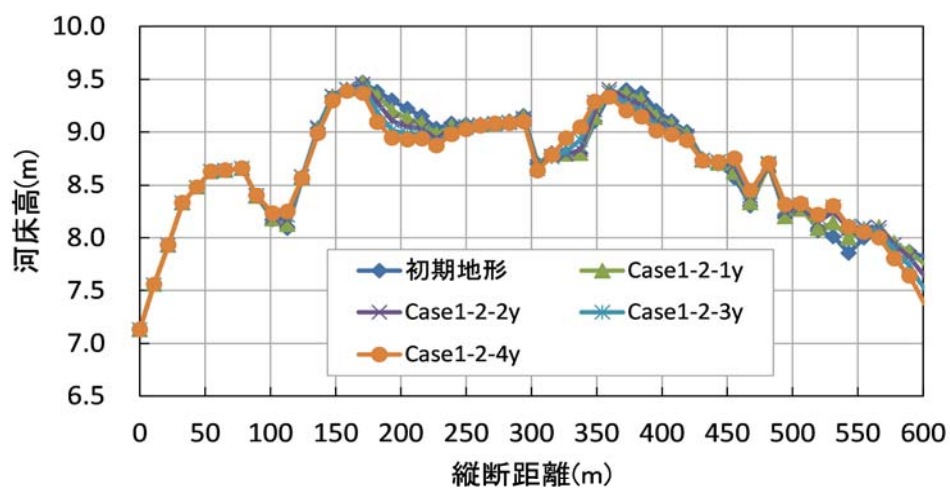
(黒枠：中州)

図 3.9 流速ベクトルと水深コンター (Case1-1)



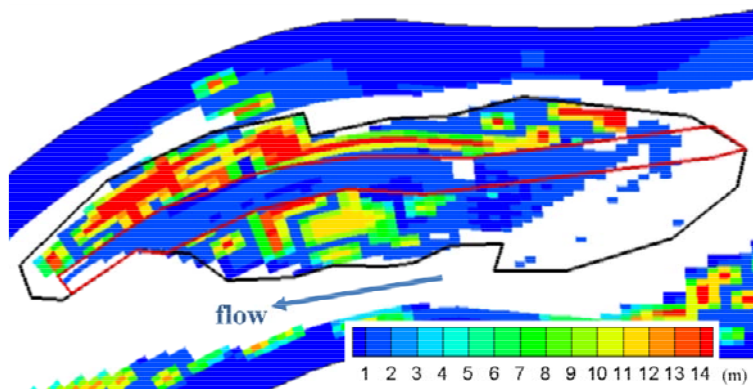
(赤枠：植生伐採箇所)

図 3.10 流速ベクトルと水深コンター (Case1-2)

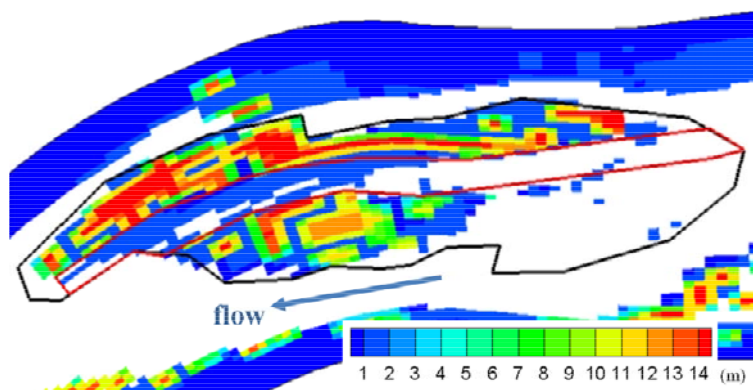


(植生伐採箇所縦断ライン)

図 3.11 河床高の経年変化 (Case1-2)



(a) 5 年目



(b) 6 年目

(黒枠：中州，赤枠：切り下げ箇所)

図 3.12 植生高 (Case1-2)

3.3.2 切り下げ，埋戻し効果の検討

(1) 洪水後の平水時の流速

図 3.13 に，Case1-1 及び Case 2-1，Case2-2 の 1 年目の平水時（1y）の流速，Case2-1 及び Case 2-2 の 4 年目の平水時（4y）の流速を示す．1 年目は，Case2-2 の切り下げ箇所上で流速が発生している箇所を除けば，Case2-1 と Case2-2 にそれほど違いはみられず，どちらも左岸側の流速が低下している．しかし，Case2-1 の 4 年目の平水時では，左岸側の流速にほとんど変化はないが，横断距離 250m 付近の流速が上昇している．これは，図 3.14 の黄破線に示すように，洪水によって，中州上流側で徐々に洗掘が起きたことにより，中州の右岸側に水が流れやすくなったことが原因と考える．一方で Case2-2 では，切り下げ箇所上に，より水が流れるようになり，左岸側の流速がさらに低下している．粒度分布を変更した Case3 でも同じような傾向がみられた．

以上のことから，埋戻しを行うことで，左岸側に集中していた流れをより緩和することができた．

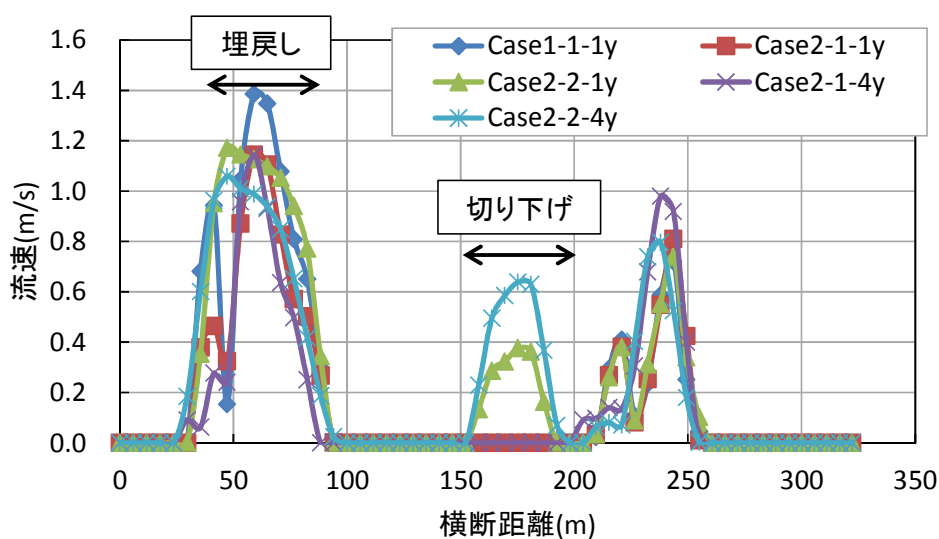
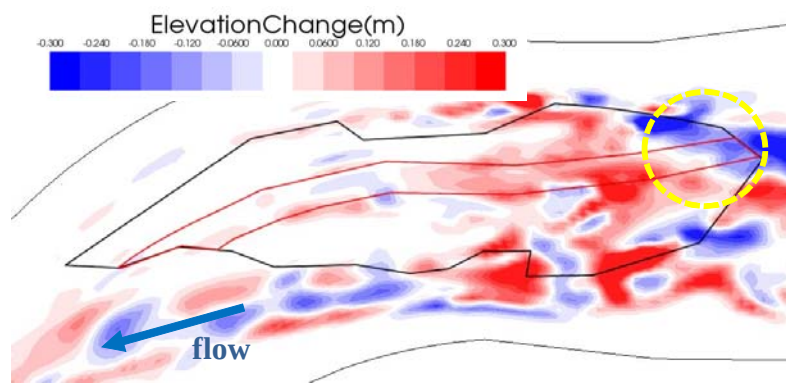
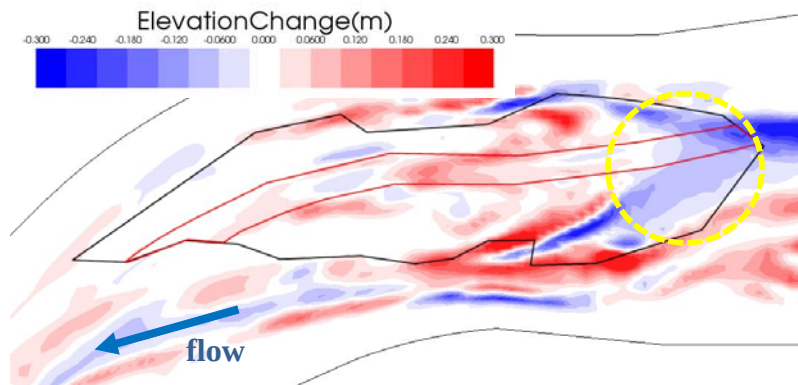


図 3.13 平水時の流速（15.0k 横断ライン）



(a) 1 年目洪水後



(b) 4 年目洪水後

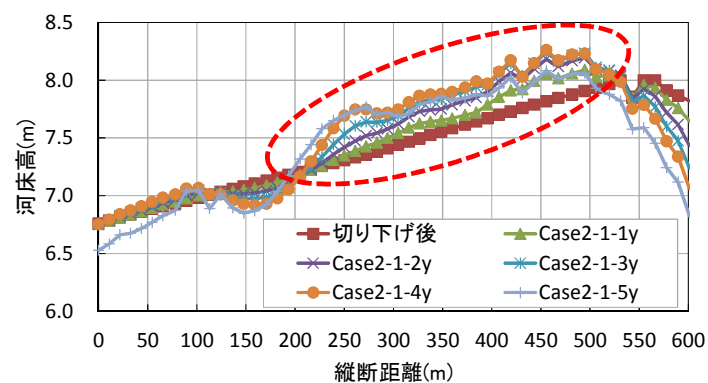
(黒枠：中州，赤枠：切り下げ箇所)

図 3.14 河床変動量コンター図 (Case2-1)

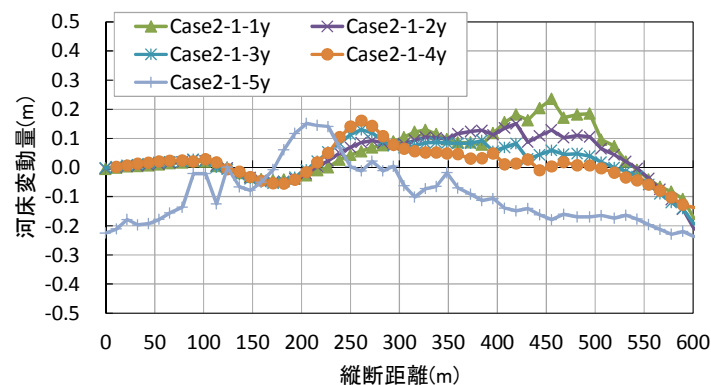
(2) 河床高の経年変化

図 3.15 及び図 3.16 に Case2-1 及び Case2-2 の切り下げ箇所縦断ラインにおける、各年の洪水後の河床高と河床変動量を示す。Case2-1 では、赤破線で囲んだ部分に示すように、切り下げ箇所上流側で堆積傾向にある。一方、埋戻しをした Case2-2 では縦断ライン上全体で洗掘傾向にある。これは埋戻しによって、切り下げ箇所により水が流入するようになり、土砂が流されやすくなったことが原因と考える。また、5 年目の洪水後、Case2-1 では、200m 付近以外では洗掘が起きているものの、4 年目までに上流側で堆積した箇所にほとんど変化はない。Case2-2 では、5 年目も縦断ライン上全体で洗掘が起きており、若干堆積していた箇所も、切り下げ直後の河床高程度までに戻っている。埋戻しの有無により、切り下げ箇所上で、一方では堆積傾向、一方では洗掘傾向という真逆の傾向がみられた。また、Case2-2 では、ライン上全体で洗掘が生じたことで、1 年目の洪水後以降、平水時にも切り下げ箇所上に水が流れるようになる。以上のことから、埋戻しを行うことにより、土砂が堆積しにくくなり、かつ、平水時でも水が流れるようになったことで、植生の種子の定着を防ぐことができ、入植を抑制できると考える。

また、粒度分布を変更した Case3 では、洗掘・堆積の傾向は変わらないが、変動量は Case2 よりも大きくなった。2015 年よりも 2013 年の方が 10mm 以下の細かい粒径が多く分布しているが、一方で、10mm 以上の分布をみると 2013 年の方がより粗い粒径が存在する。このことから、河床変動量の違いには細かい粒径だけでなく、粗い粒径の分布も影響を及ぼすと考えられる。解析に用いる粒度分布については、今後検討が必要である。

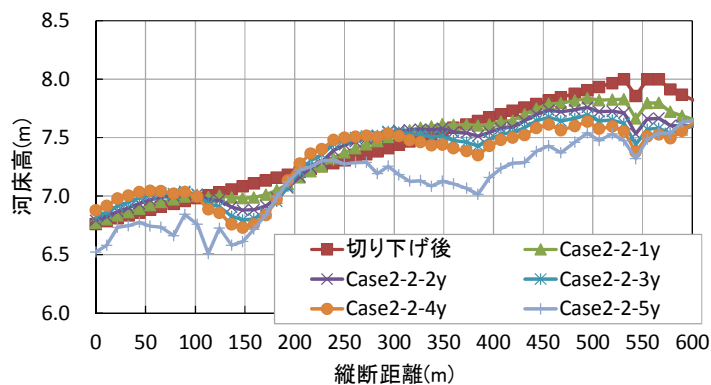


(a) 河床高の経年変化

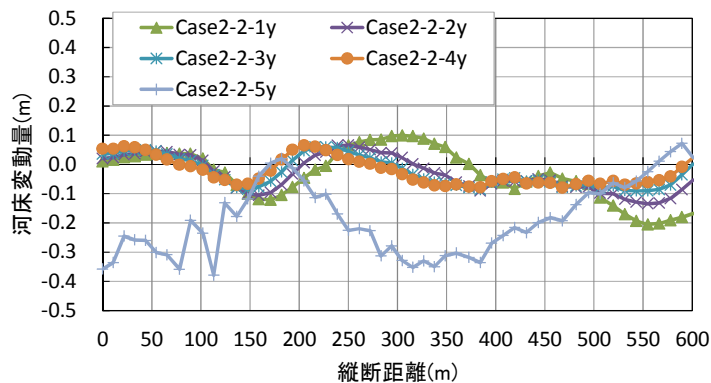


(b) 河床変動量の経年変化

図 3.15 河床高, 河床変動量 (Case2-1) (切り下げ箇所縦断ライン)



(a) 河床高の経年変化



(b) 河床変動量の経年変化

図 3.16 河床高, 河床変動量 (Case2-2) (切り下げ箇所縦断ライン)

(3) 砂州上の植生状況の変化

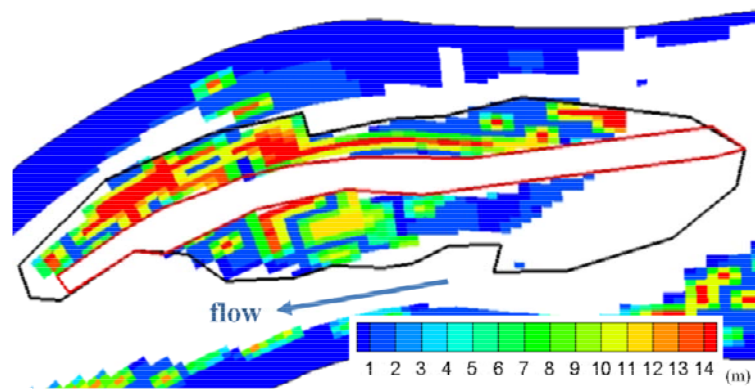
図 3.17 及び図 3.18 に Case2-1, Case2-2 の各年の洪水発生前の植生高を示す。Case2-1 では、5 年目で切り下げ箇所の下流部分で植生が入植がみられる(図 3.17 (b)の赤破線箇所)。一方、Case2-2 では、切り下げ箇所上での植生が入植はほとんどみられない。これは、平水時に水深が 10cm 以上の場所には植生が入植しないという条件のために生じた違いである。しかし、Case2-1 よりも上流側砂州で、広範囲の植生が入植がみられる(図 3.18 (b)の赤破線箇所)。これは、埋戻しを行った場合、切り下げ箇所に水がより流入するようになったことで、切り下げのみの場合よりも上流側砂州上の流速が落ち、河床変動が起きにくくなったことが原因と考えられる。

また、5 年目の洪水(3,400m³/s 規模)によって、Case2-1 では切り下げ箇所上、上流側砂州上で植生が流失する。一方、Case2-2 ではほとんど植生の流失がみられない。また、Case2-2 の 5 年目の洪水ピーク時の 85%粒径の無次元掃流力を図 3.20 に示す。植生が流失しなかった上流側砂州上では、無次元限界掃流力を超えていないことがわかる。これは、4 年目までと同様、今まで中州左岸側に集中していた洪水流が、切り下げ箇所に流入するようになったことで、上流側砂州上の流速が低減したことが原因であると考えられる。

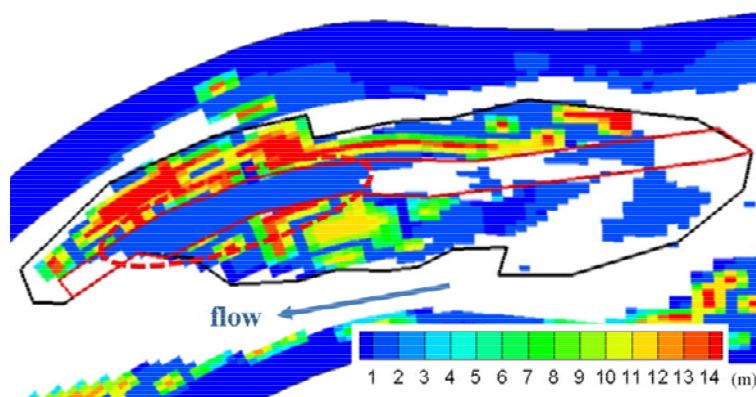
次に、粒度分布を変更した Case3-2 の植生高を図 3.19 に示す。5 年目をみると、Case2-2 と同様に上流側砂州で植生が入植している。しかし、Case3-2 では 5 年目の洪水により、図 3.19(b)の赤破線で囲んだ箇所で植生が流失している。図 3.21 に示す、5 年目洪水ピーク時の 85%粒径の無次元掃流力をみても、上流側砂州上で無次元限界掃流力を超えており、Case2-2 と大きな違いが生じた。このことから、粒度分布の違いは無次元掃流力にも影響を及ぼし、植生の流失の様子が大きく異なることがわかる。

最後に、各年の初期地形での、中州上の植生面積の割合(＝中州上の植生の面積／中州の面積)を図 3.22 に示す。図からわかるように、Case2, Case3 どちらの場合でも、5 年目では、埋戻しを行った場合の方が植生面積の割合は小さい。これは、埋戻しを行った場合、どちらのケースも切り下げ箇所に植生が入植しなかったことによるものである。しかし、Case2 では、5 年目の洪水で植生が流失した Case2-1の方が 6 年目の植生面積の割合は小さくなる。一方、Case3 でも若干ではあるが Case3-1の方が割合は小さくなり、切り下げのみの場合の方が、植生の流失には効果的であった。

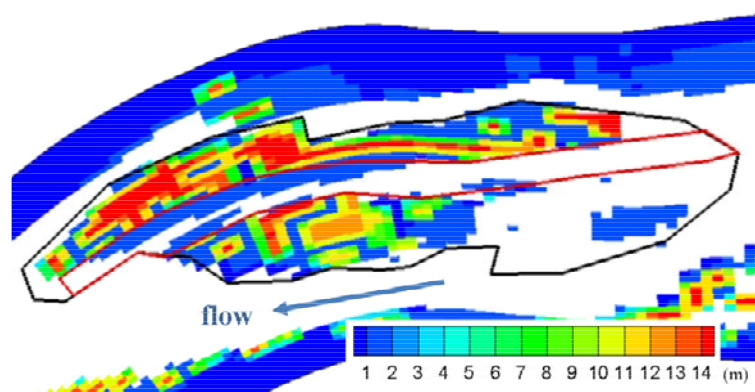
ただ、切り下げ箇所上のみをみると、Case2-2 及び Case3-2 では植生はほとんどみられない。一方、Case2-1 及び Case 3-1 は 5 年目の洪水後でも切り下げ箇所下流側に植生が一部残存している。Case2-1 及び Case 3-1 では今後、この箇所での土砂の堆積、植生の再繁茂が懸念される。このことから、切り下げ箇所上においては、埋戻しを行った Case2-2 及び Case3-2 が植生が入植に対して抑制効果があったといえる。



(a) 4 年目



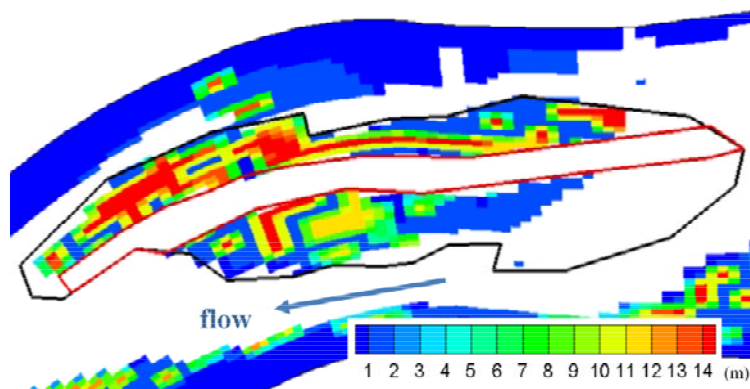
(b) 5 年目



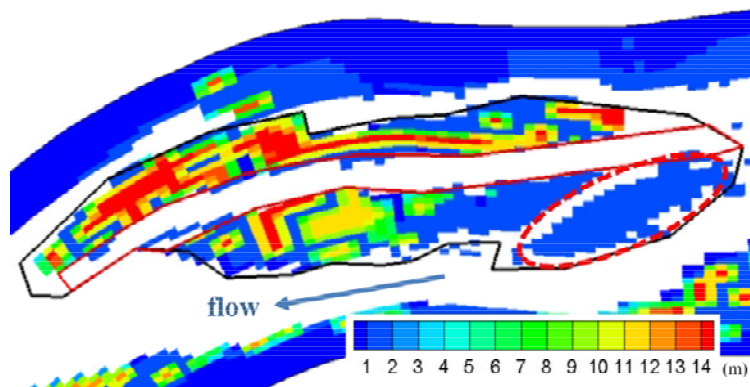
(c) 6 年目

(黒枠：中州，赤枠：切り下げ箇所)

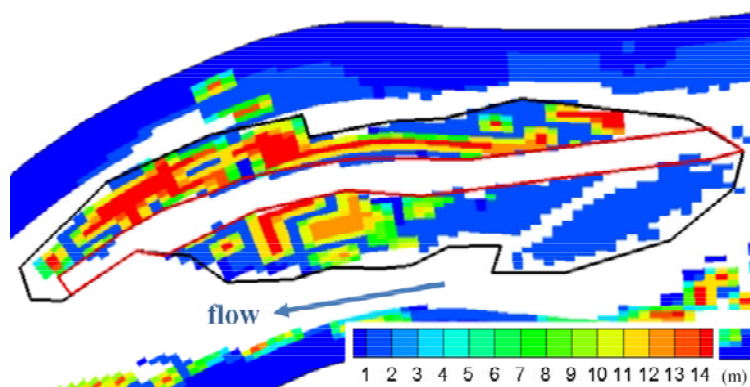
図 3.17 植生高 (Case2-1)



(a) 4 年目



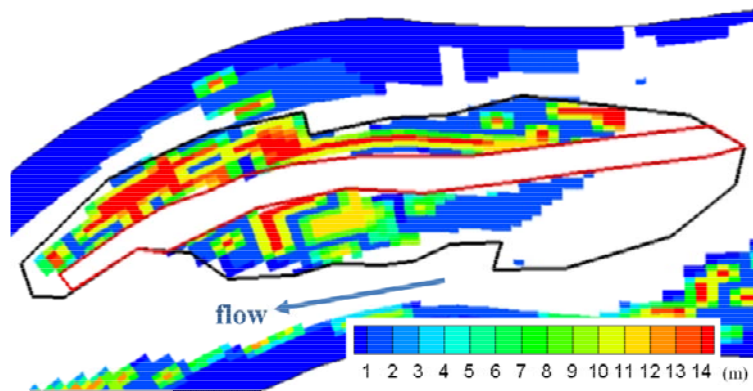
(b) 5 年目



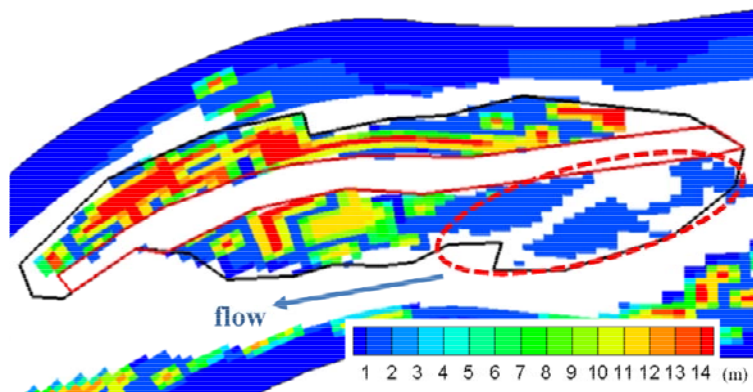
(c) 6 年目

(黒枠：中州，赤枠：切り下げ箇所)

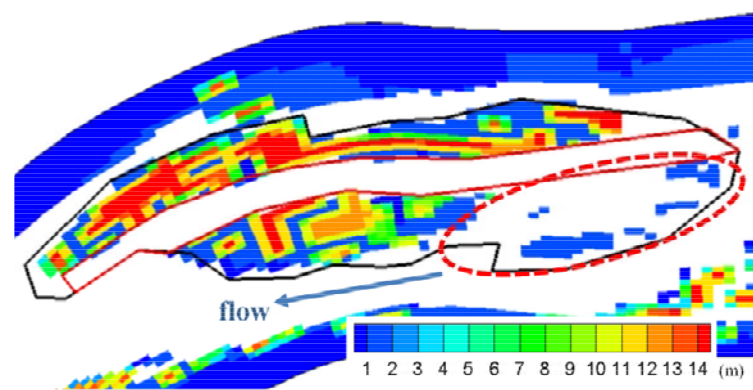
図 3.18 植生高 (Case2-2)



(a) 4 年目



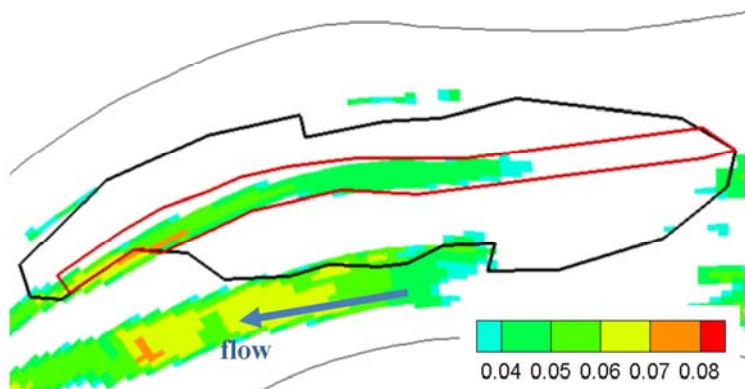
(b) 5 年目



(c) 6 年目

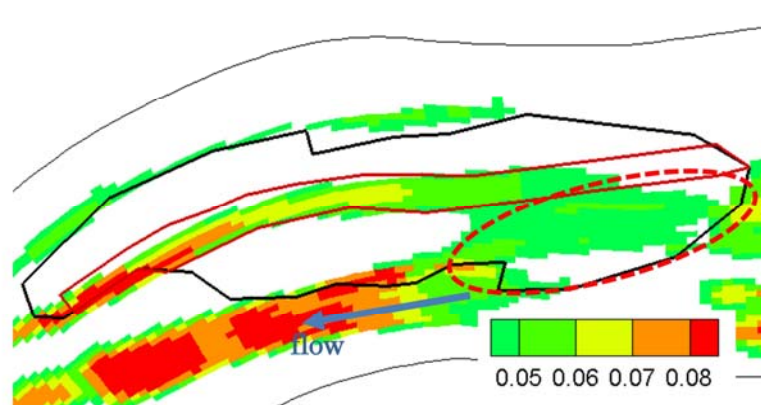
(黒枠：中州，赤枠：切り下げ箇所)

図 3.19 植生高 (Case3-2)



(5 年目洪水ピーク時)
(85%粒径の無次元限界掃流力(0.038) 未満は白抜き)

図 3.20 85%粒径の無次元掃流力 (Case2-2)



(5 年目洪水ピーク時)
(85%粒径の無次元限界掃流力(0.041) 未満は白抜き)

図 3.21 85%粒径の無次元掃流力 (Case 3-2)

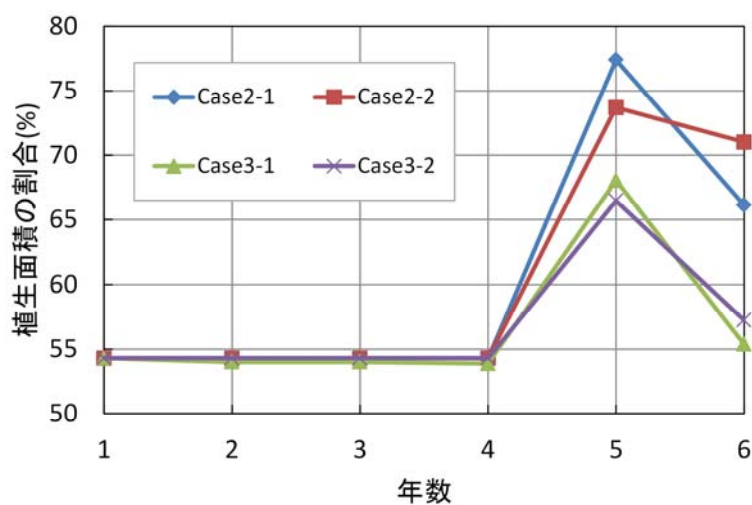


図 3.22 中州上の植生面積の割合

3.4 まとめ

本研究では、旭川祇園地区を対象に、2つの規模の洪水を用いて5年間の解析を行い、施工の組み合わせによる樹林化抑制の効果と持続性について検討した。得られた結論を以下に示す。

- 砂州の切り下げに加えて埋戻しをすることで、平水時にも切り下げ箇所上に水が流れるようになり、左岸側へ集中していた流れを緩和することができた。
- 切り下げのみを行ったケースでは、切り下げ箇所の縦断ライン上で堆積傾向にある一方、埋戻しを行ったケースでは、ライン上のほとんどの箇所で洗掘傾向にある。これにより、平水時に切り下げ箇所に水が流入するようになる。埋戻しを行った場合、土砂が堆積しにくいこと、平水時に切り下げ箇所上が冠水するようになったことで、植生の生育基盤の安定化を防ぎ、切り下げ箇所上で植生の入植を抑制できた。
- 解析に用いる粒度分布により、河床変動量の規模や植生の流失の様子が異なる結果となった。粒度分布の違いで結果が大きく異なるため、用いるデータは今後検討が必要である。
- 植生面積の割合をみると、切り下げのみのケースの方が6年目の割合が小さくなり、植生の流失にはより効果的であった。ただし、切り下げ箇所内においては、埋戻しを行ったケースの方が植生の入植を抑制する効果があった。
- 切り下げ箇所上に焦点を置くと、ほとんど土砂の堆積がないこと、また、植生の入植が抑制されていることから、埋戻しを行ったケースの方が施工の持続性に対して効果があったといえる。

また、今回の解析により、粒度の違いで結果が大きく異なることが明らかとなった。用いるデータで結果が左右されないよう、今後、現地調査での河床材料の採取については採取場所や方法等の検討が必要である。

【参考資料】

次ページ以降に、参考資料として、各ケースの 1 年目洪水ピーク時の流速ベクトルと水深コンター図，河床変動平面図を示す．

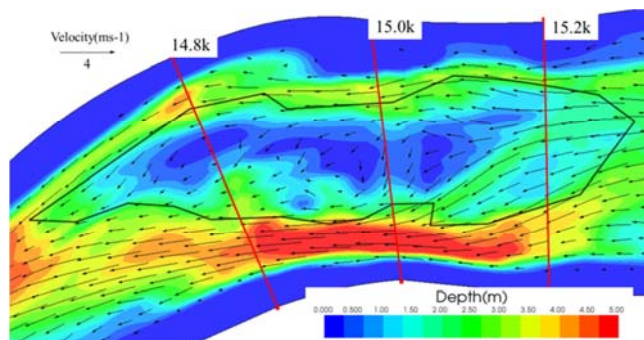


図 3.23 (1) 流速ベクトルと水深コンター図 (1 年目洪水ピーク時) 【Case1-1】

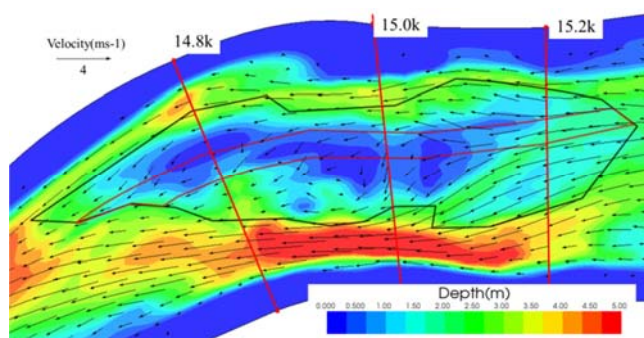


図 3.23 (2) 流速ベクトルと水深コンター図 (1 年目洪水ピーク時) 【Case1-2】

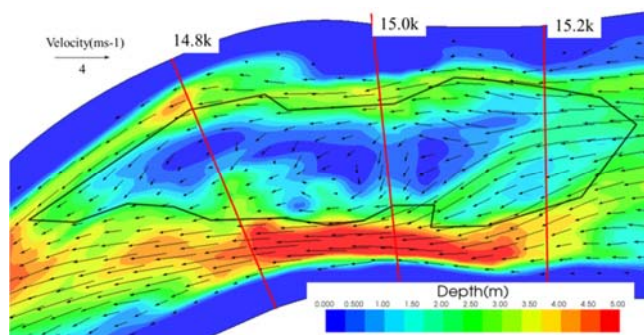


図 3.23 (3) 流速ベクトルと水深コンター図 (1 年目洪水ピーク時) 【Case1-3】

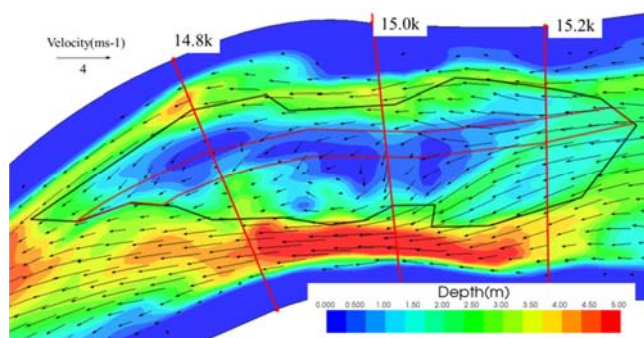


図 3.23 (4) 流速ベクトルと水深コンター図 (1 年目洪水ピーク時) 【Case1-4】

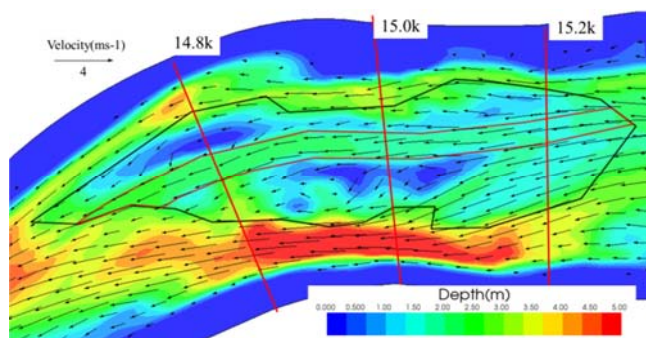


図 3.23 (5) 流速ベクトルと水深コンター図 (1 年目洪水ピーク時) 【Case2-1】

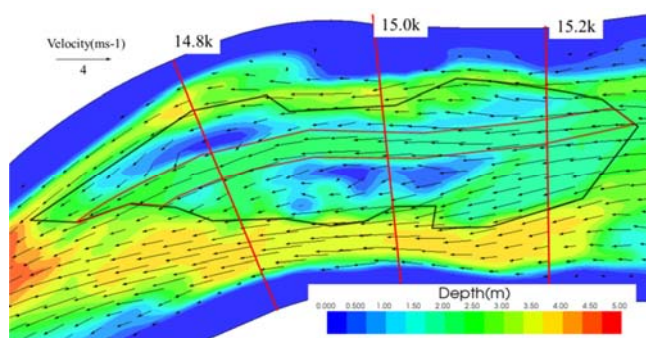


図 3.23 (6) 流速ベクトルと水深コンター図 (1 年目洪水ピーク時) 【Case2-2】

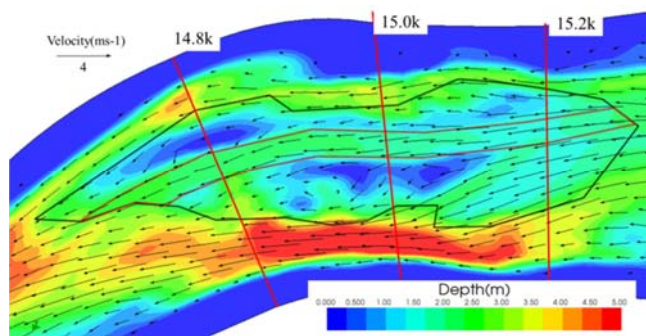


図 3.23 (7) 流速ベクトルと水深コンター図 (1 年目洪水ピーク時) 【Case3-1】

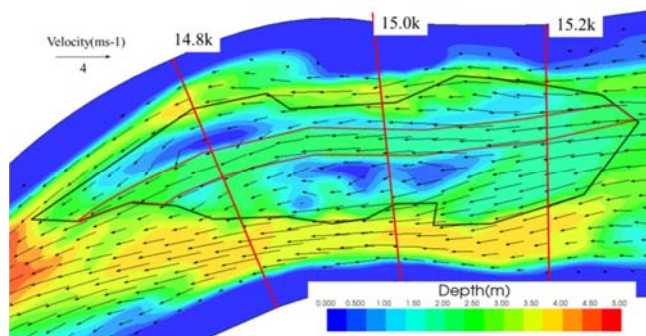
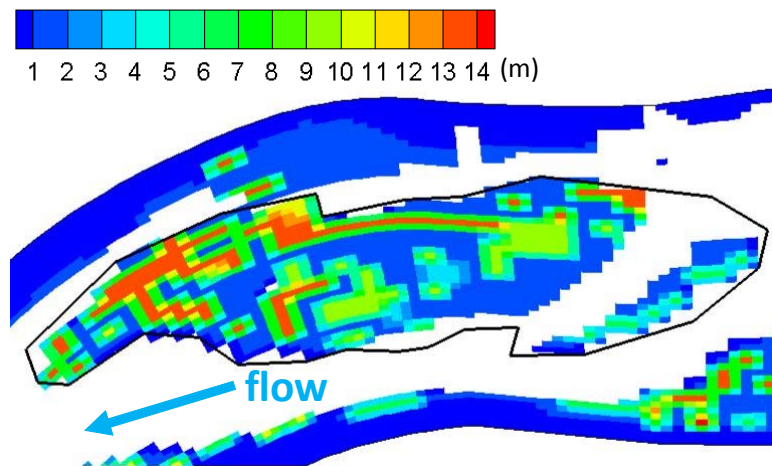
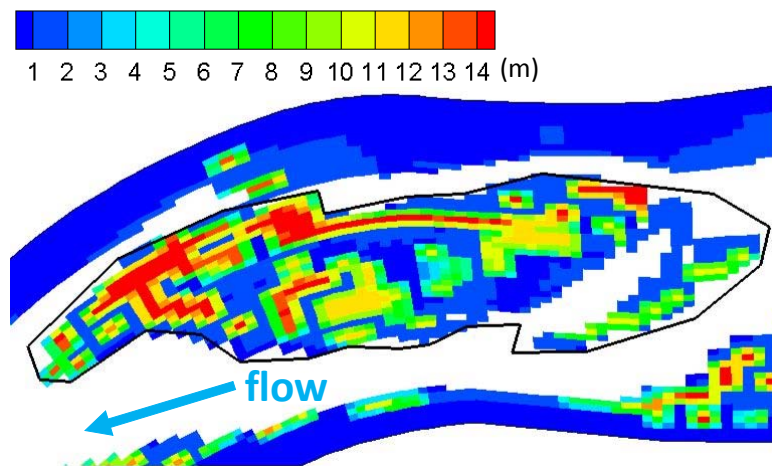


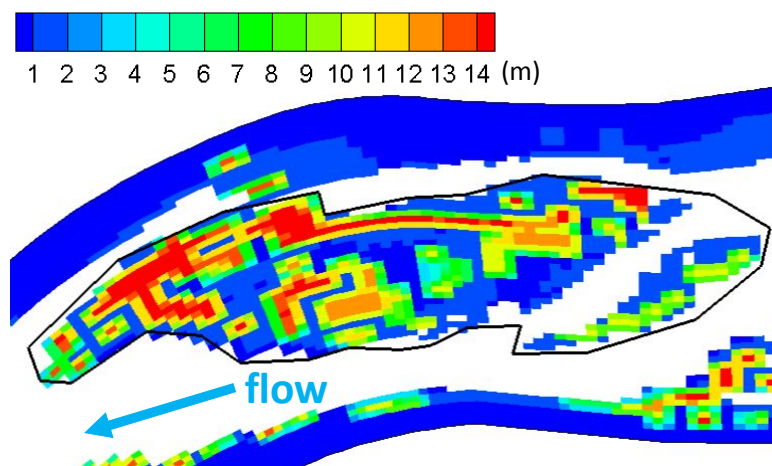
図 3.23 (8) 流速ベクトルと水深コンター図 (1 年目洪水ピーク時) 【Case3-2】



(a) 初期

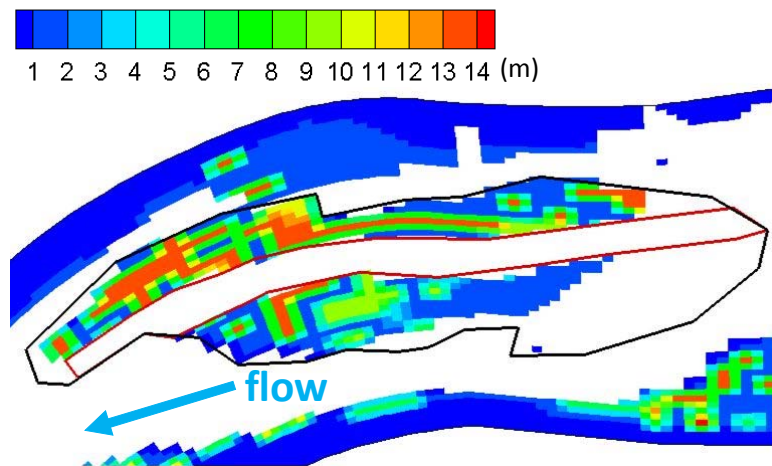


(c) 5 年目

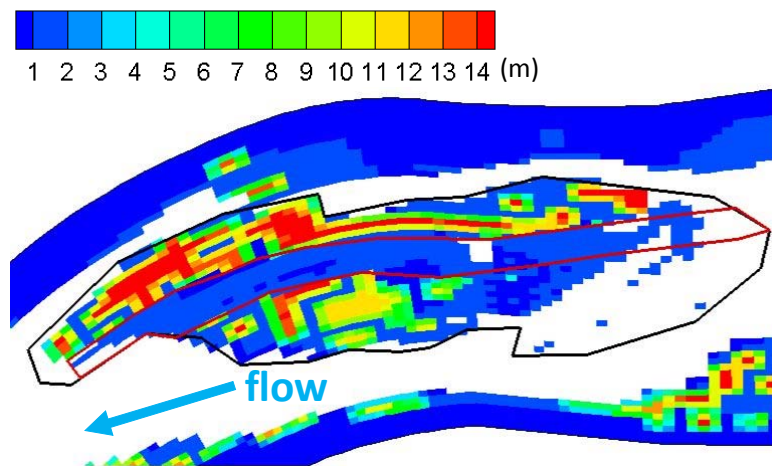


(c) 6 年目

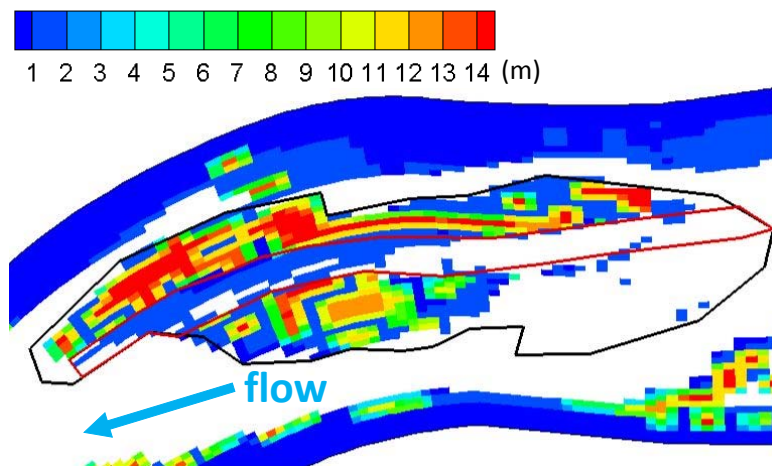
图 3.24 (1) 植生高【Case1-1】



(a) 初期

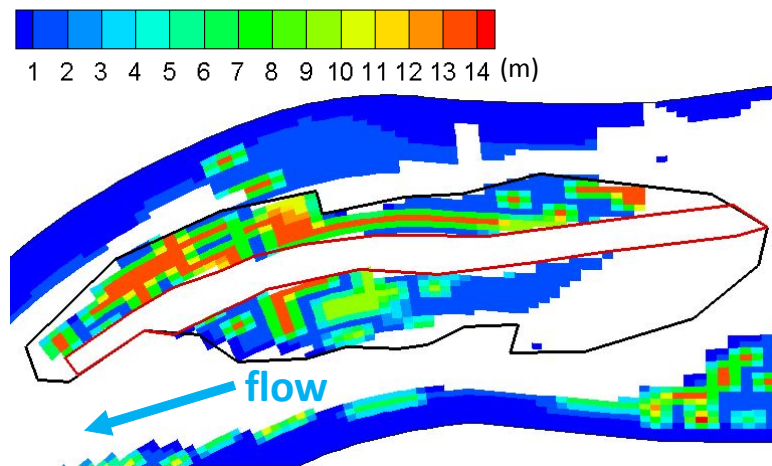


(c) 5 年目

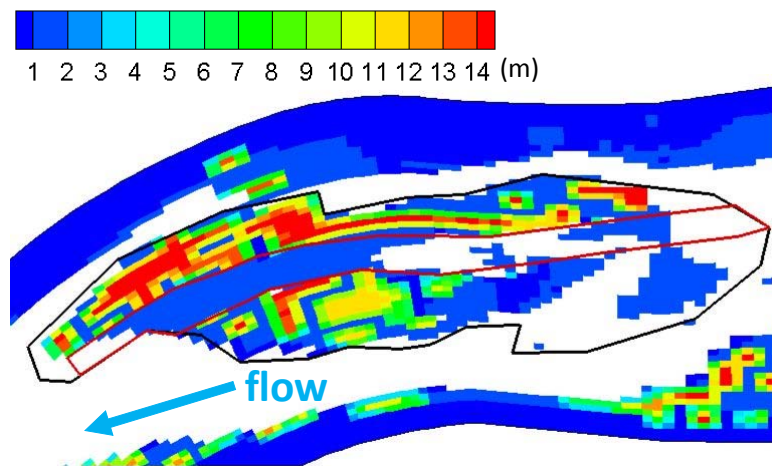


(c) 6 年目

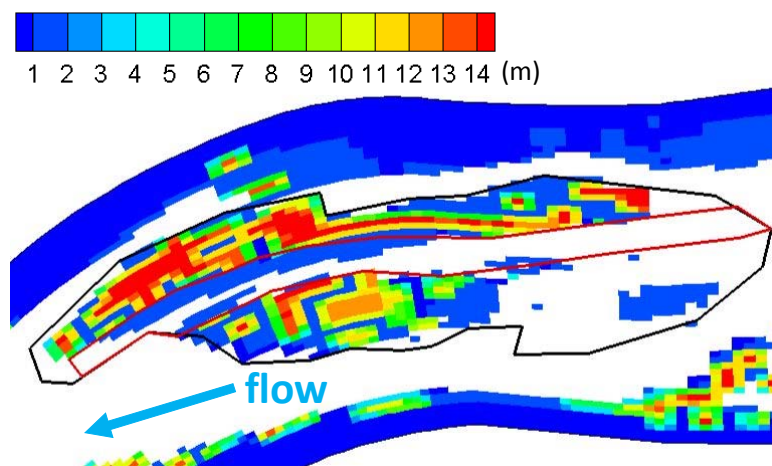
图 3.24 (2) 植生高【Case1-2】



(a) 初期

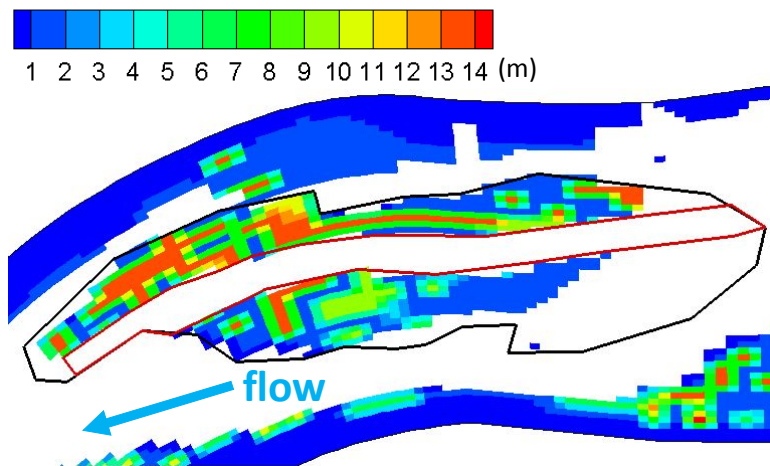


(c) 5 年目

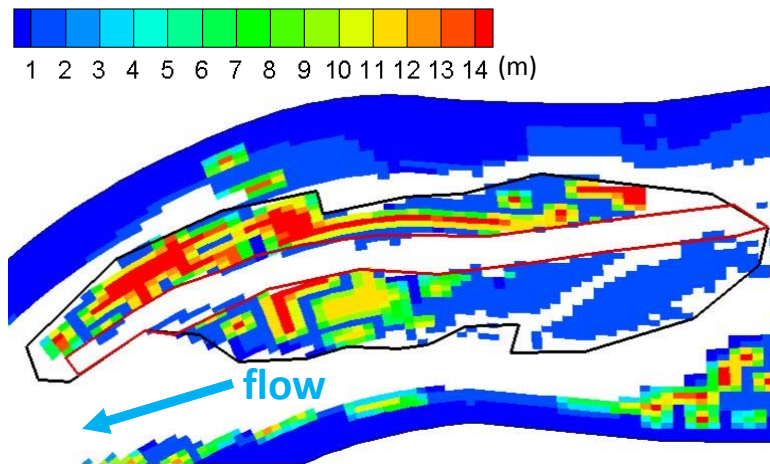


(c) 6 年目

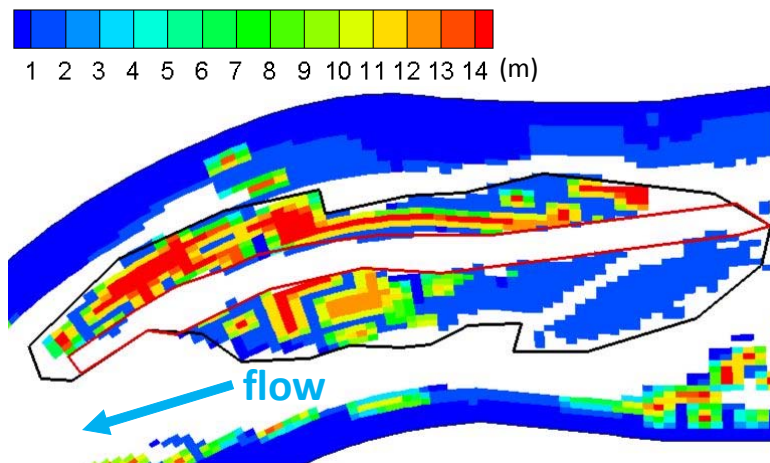
图 3.24 (3) 植生高【Case2-1】



(a) 初期

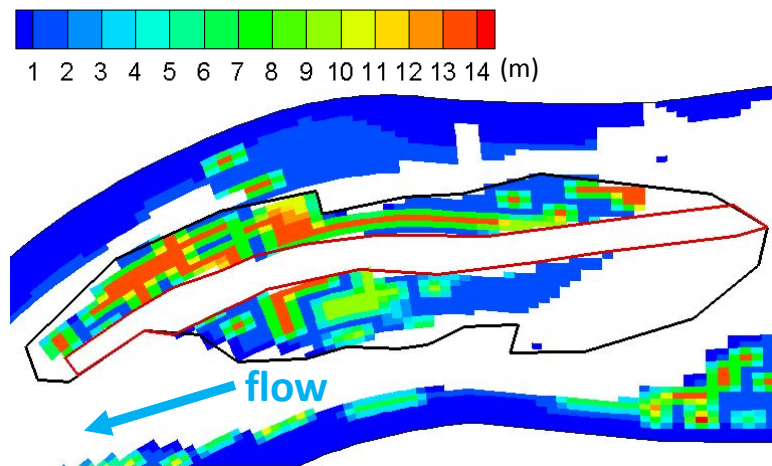


(c) 5 年目

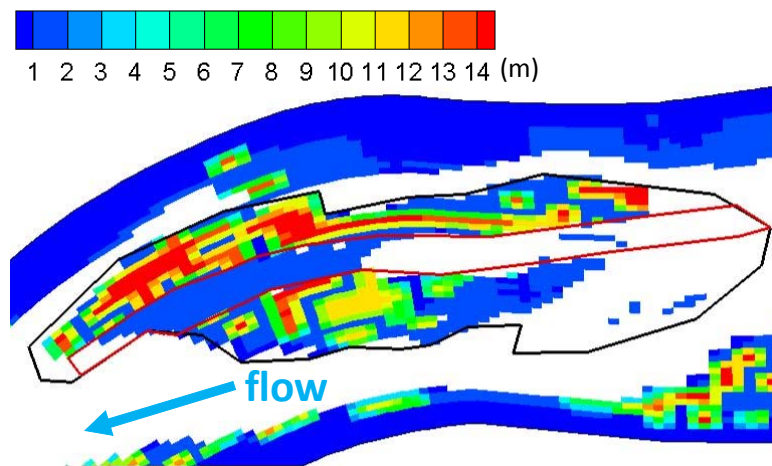


(c) 6 年目

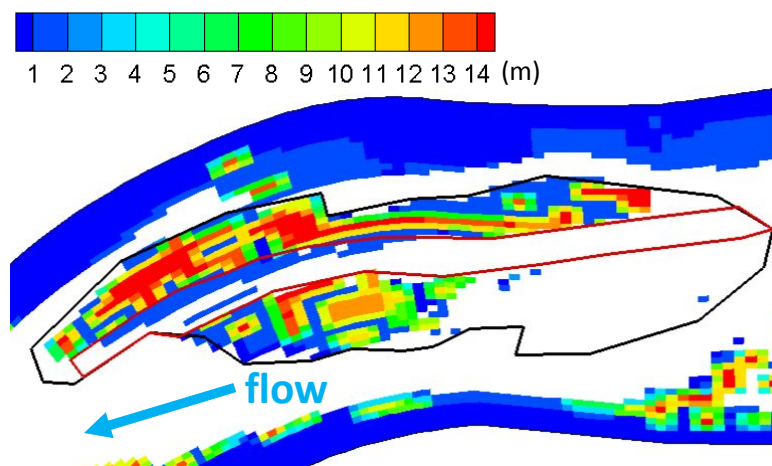
图 3.24 (4) 植生高【Case2-2】



(a) 初期

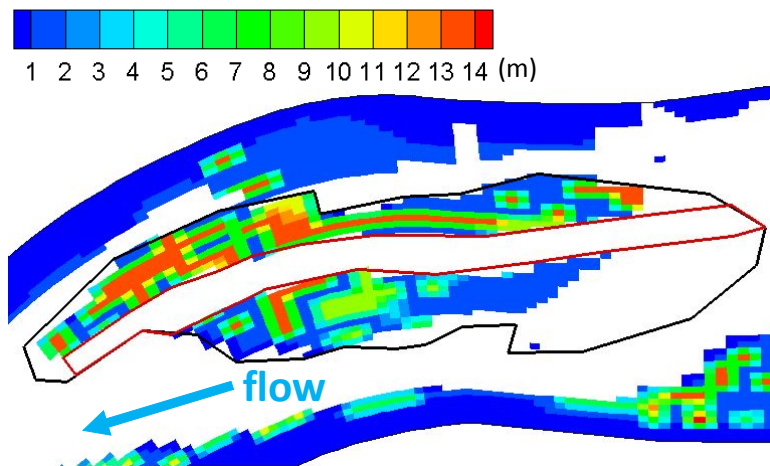


(c) 5 年目

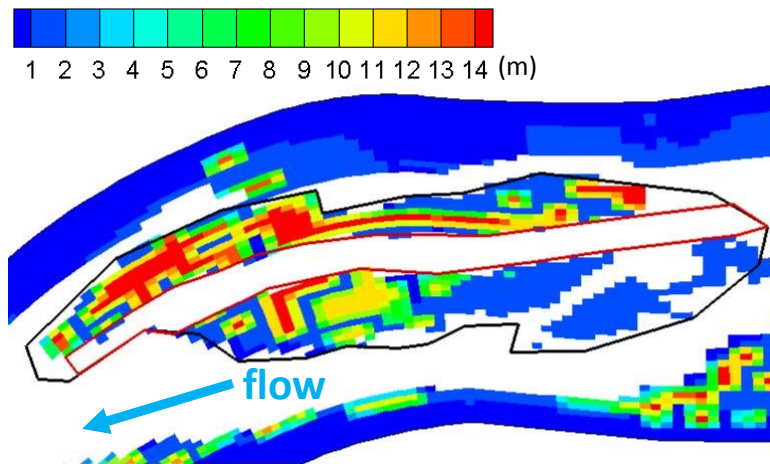


(c) 6 年目

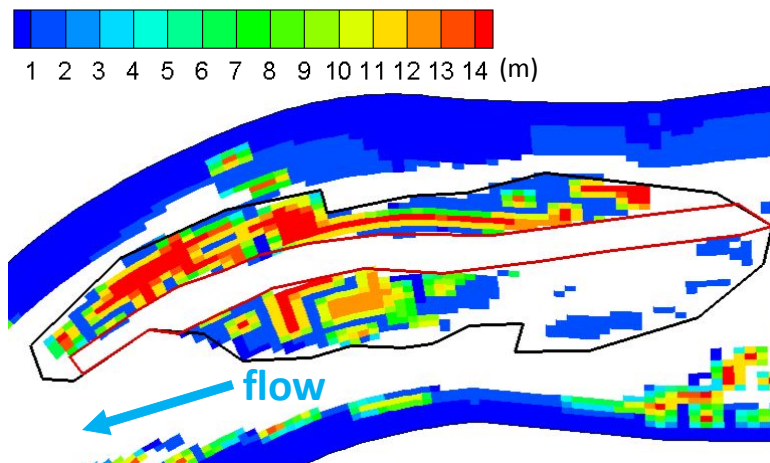
图 3.24 (5) 植生高【Case3-1】



(a) 初期



(c) 5 年目



(c) 6 年目

图 3.24 (6) 植生高【Case3-2】

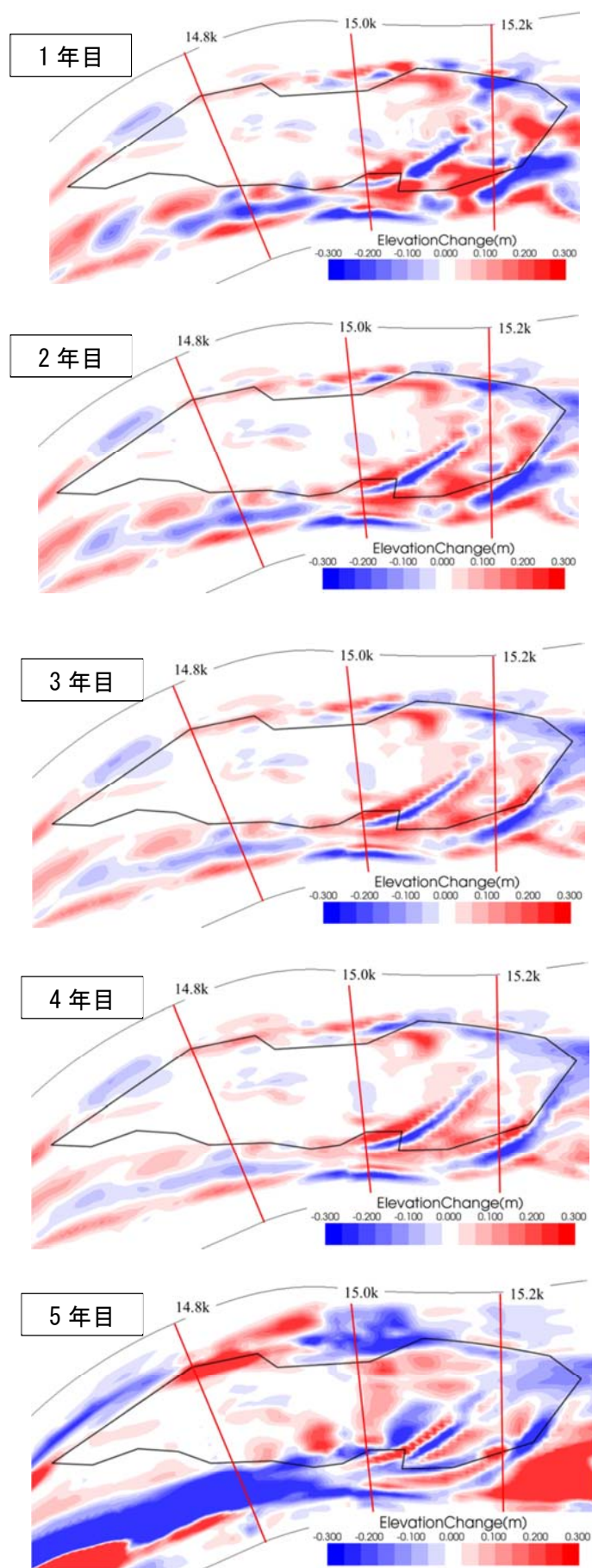


図 3.25 (1) 河床変動平面図【Case1-1】

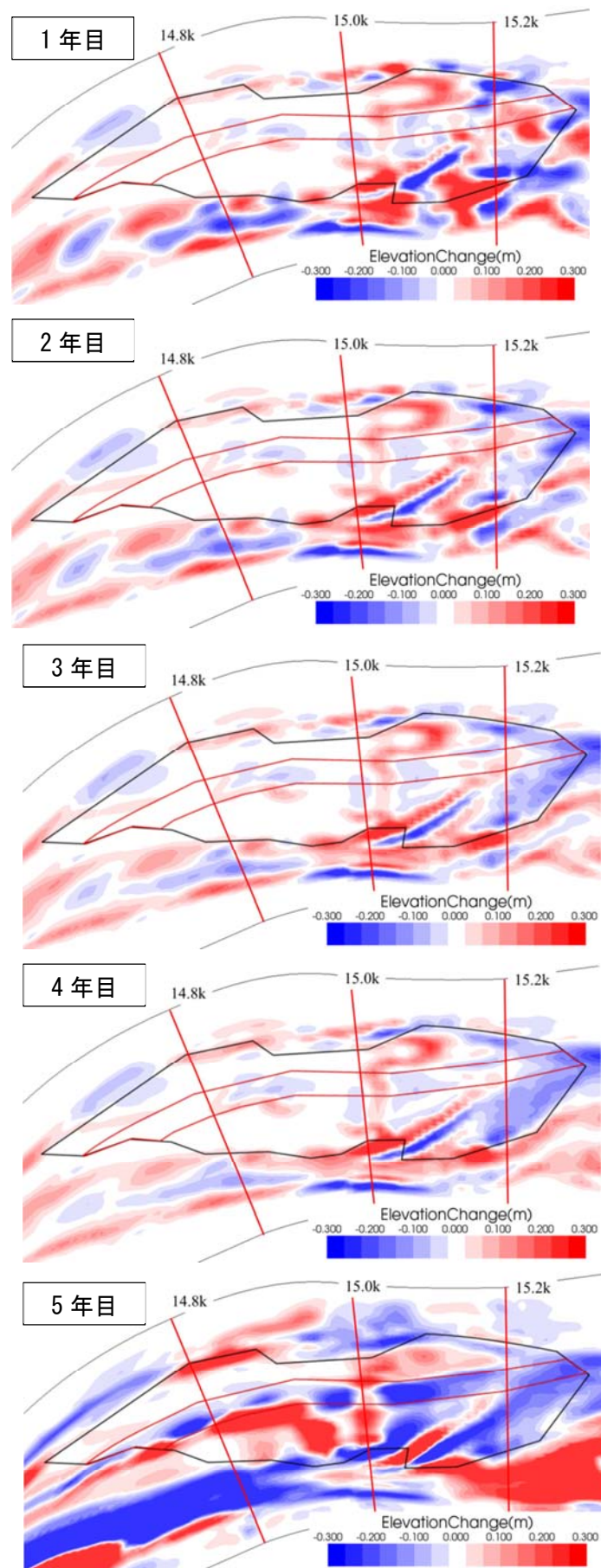


図 3.25 (2) 河床変動平面図【Case1-2】

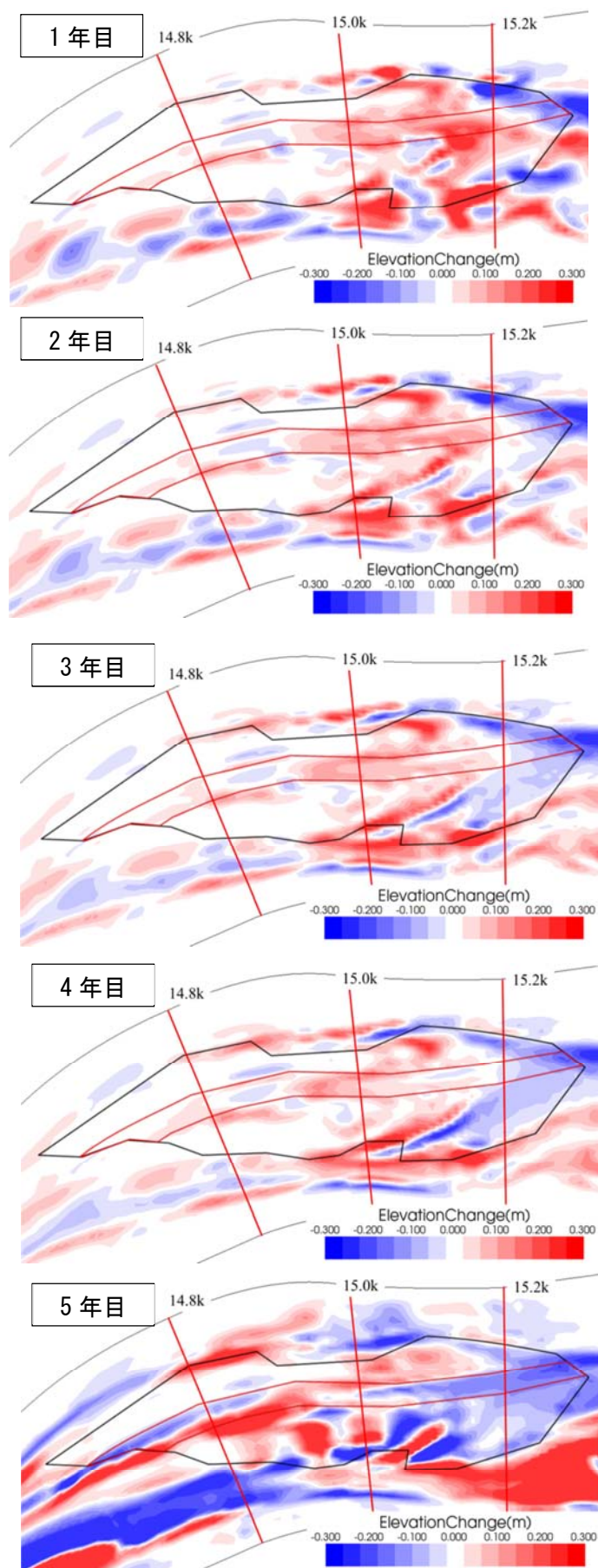


図 3.25 (3) 河床変動平面図【Case2-1】

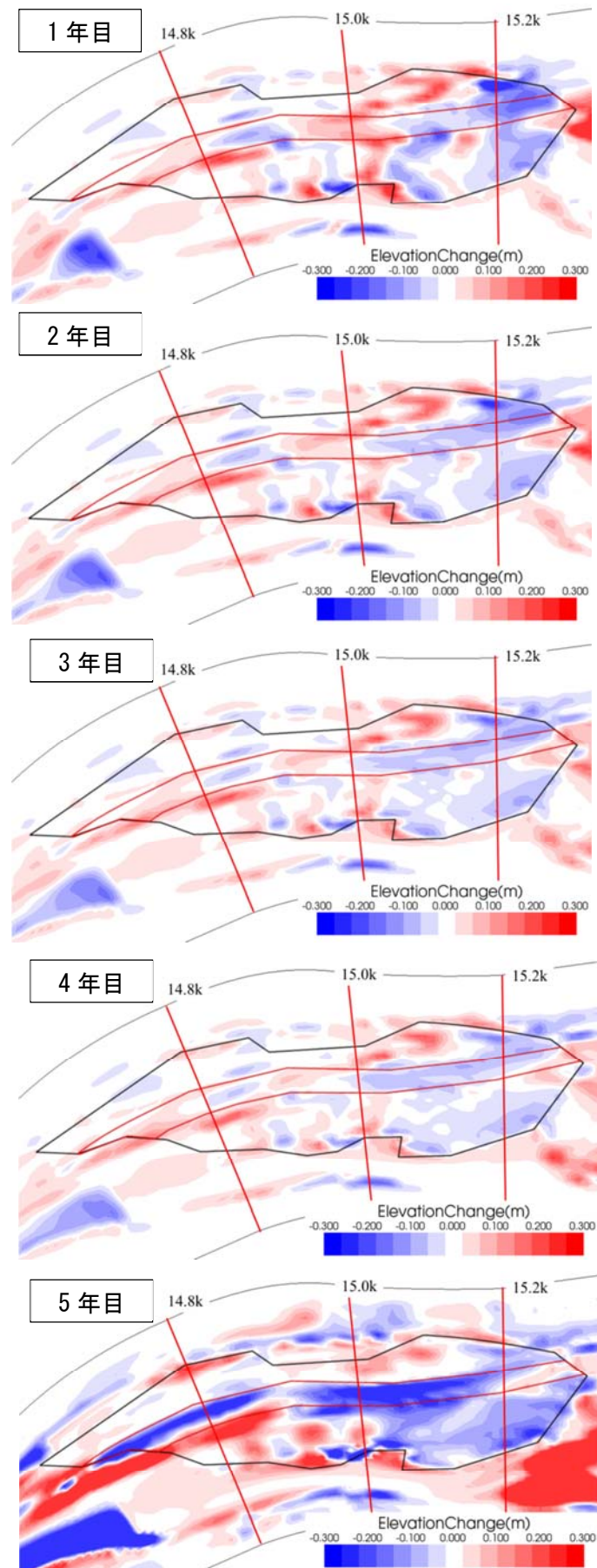


図 3.25 (4) 河床変動平面図【Case2-2】

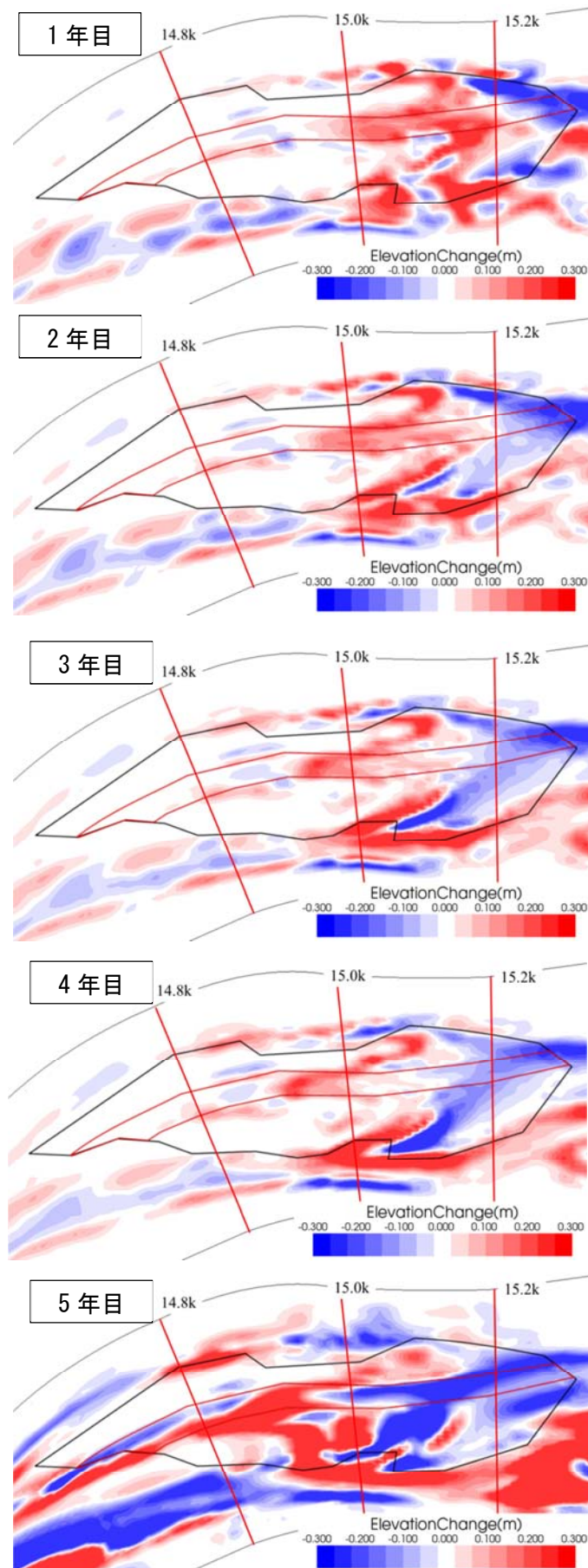


図 3.25 (5) 河床変動平面図【Case3-1】

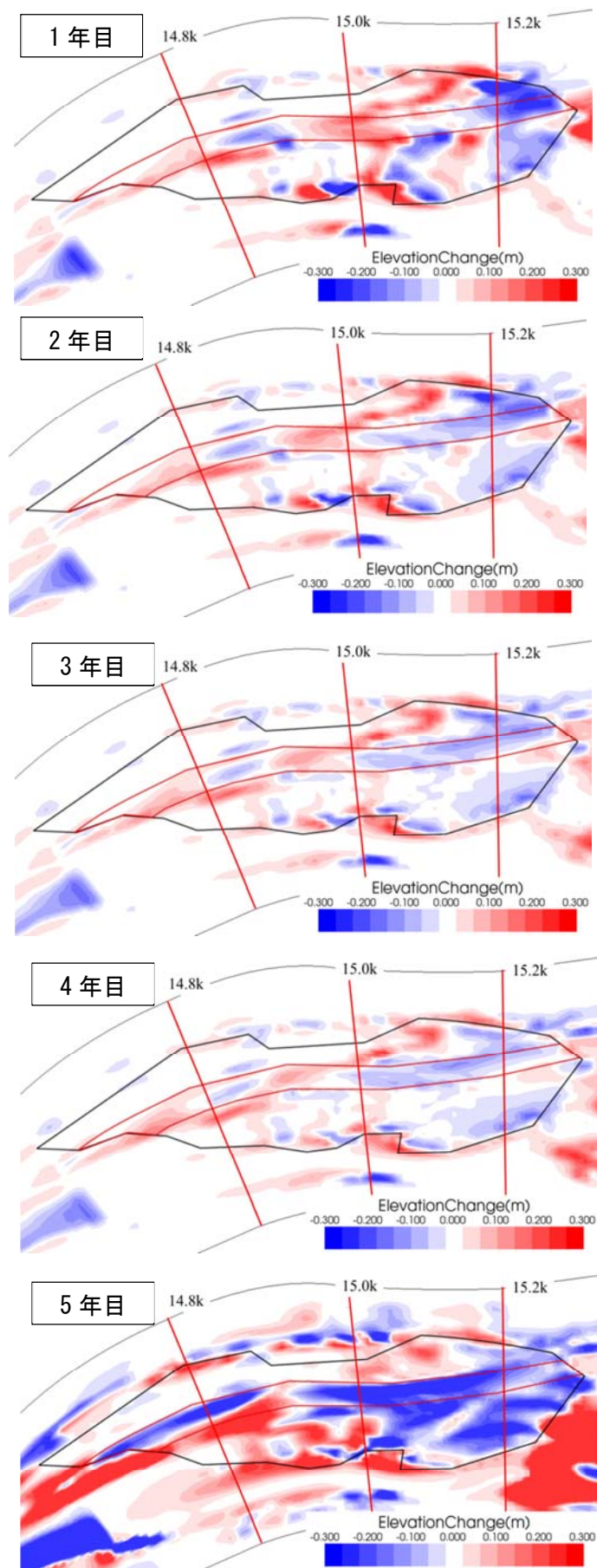


図 3.25 (6) 河床変動平面図【Case3-2】

【参考文献】

- 1) 渡辺敏, 前野詩朗, 藤塚佳晃, 宮崎貢, 眞田淳二: 旭川における礫河原再生と樹林化抑制に関する現地試験による検証, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.1201-1206, 2006.
- 2) 北海道河川財団: iRIC, <http://i-ric.org/ja/>
- 3) 前野詩朗, 吉田圭介, 松山悟, 藤田駿佑: 旭川大原試験区における植生消長シミュレーションモデルの構築と検証, 土木学会論文集, B1 Vol.70, No.4, pp.I_1369-I_1374, 2014.
- 4) 前野詩朗, 渡辺敏, 藤塚佳晃: 簡易に得られる植物特性値を考慮した数値解析モデルの精度向上の提案, 土木学会論文集, No.803/II-73, pp.91-104, 2005.
- 5) 吉田圭介, 前野詩朗, 藤田駿佑, 松山悟, 岩城智大, 平井康隆: 旭川における植生分布の経年変化を考慮した洪水流の数値解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.71, No.4, pp.I_1039-I_1044, 2015.

4. 分流部における植生管理に関する研究

4.1 はじめに

岡山市を流れる百間川は、岡山城下の水害を軽減するために、江戸時代初期に建造された旭川の放水路である。昭和年代には、台風に起因して旭川本川では大規模な洪水を幾度か経験したが、その度に百間川は旭川本川の水位低減に寄与してきた。その後、旭川流域の経済的發展に伴う氾濫域への資産集中等を鑑み、計画流量を旭川本川で $6,000\text{m}^3/\text{s}$ とし、このうち百間川への分流量を $2,000\text{m}^3/\text{s}$ とする計画とした。これに伴い、百間川では河口水門の建設や分流部の固定堰の改修が実施されることとなった¹⁾。

一方、近年の旭川では、河道の樹林化が治水上の問題として挙げられている。分流部周辺において樹林化が進行すると、河道条件が変化し、計画どおりに改修事業を行っても、洪水時に適正な分流が行われない可能性がある。河道を長期に渡って安全に管理するためには、どの箇所の植生が分流にどの程度影響を与えているのかを把握し、あらかじめ管理すべき基準を確立しておく必要がある。

本研究では、分流に影響を与える固定堰周辺の植生について、計画流量規模の洪水が発生した場合においても適正に分流が維持できるよう、植生管理の方策を検討することを目的とする。そのために、まず百間川分流部周辺を対象に、平面二次元流況解析により計画流量が分流できるよう植生伐採範囲を設定し、管理すべきゾーンの区分を行う。そのうえで、各管理ゾーンの植生が生長した場合を想定した流況解析を実施し、その影響量について評価し、植生管理の方策を検討した。

4.2 対象河道の概要

4.2.1 対象河道

本研究の対象河道は、図 4.1 に示すとおり、旭川の河口から 10.6km～13.8km と、百間川 12.0 km 付近までの区間である。旭川のこの区間は、河道幅は約 300m、平均河床勾配は 1/670、河床材料の平均粒径は 30mm 程度である。旭川の 12.2km 付近には固定堰があり、ここで百間川へと分派する。河道内には農業用水を目的とする堰が複数存在し、水面形は縦断方向にやや複雑に変化する。

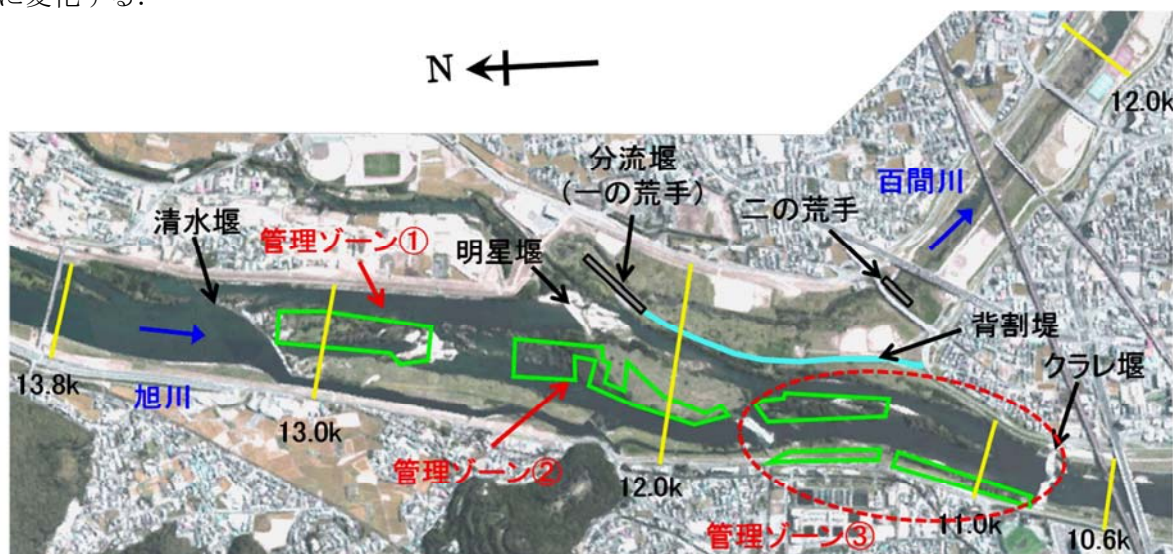


図 4.1 対象河道の概要

4.2.2 百間川分流部の改築²⁾

百間川は、旭川で度々発生する洪水による被害を軽減するために、熊沢蕃山が越流堤と放水路を組み合わせた「川除け法」を考案し、その後、1986年に津田永忠によって建造された放水路である。百間川分流部は、江戸時代初期に岡山城下を洪水から守るために、旭川の水を荒手堤を越えて百間川へ流出させ、三段の荒手によって水勢を弱めながら、旭川の氾濫を下流に越流・放水させたものである。三の荒手は1892年の洪水によって流出したものの、一の荒手（分流堰）及び二の荒手は現在も治水機能を有している。

今後実施する旭川の河道改修は、分流部の歴史的な遺構を可能な限り残しながら保全を行い、計画流量に対して適正な分流ができるよう、分流堰の切り下げと補強、背割堤の築堤、二の荒手の補強、旭川の植生伐採等を実施する計画となっている。

以下に、改修概要について述べる。



写真 4.1 一の荒手

(1) 一の荒手

一の荒手の巻き石部分である通称「亀の甲」は、一の荒手の背割堤端部に位置し、現在でも治水上重要な施設である。そのため、亀の甲は、補強したうえで保全が計画されている。また、越流堤部は洪水時において現在も活用されている。なお、越流部は約 1～2m 程度切り下げる計画となっている。

(2) 二の荒手

二の荒手は、建造当時の三段方式の荒手の一部として、現在でも洪水時の減勢や土砂の貯留を行っている。二の荒手の高水敷は現状保存し、左岸導流堤は補強する。低水路部は現状の石材を使用し、練石張とする計画となっている。

(3) 背割堤

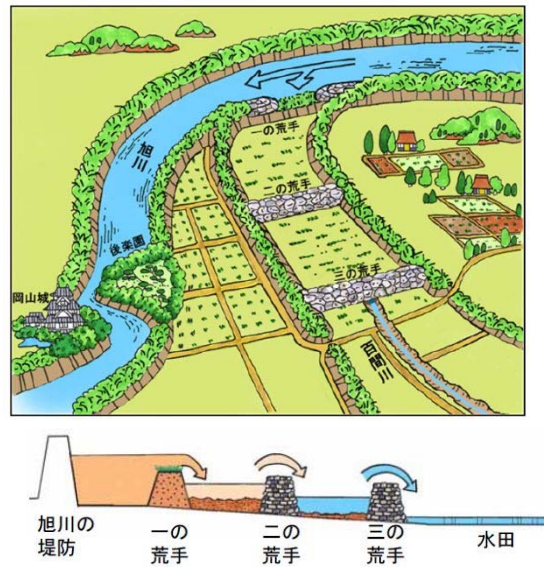
改修前後の背割堤の横断図を図 4.4 に示す。背割堤は、現況の場合、旭川の流量が計画高水流量である $6,000\text{m}^3/\text{s}$ の洪水では、背割堤を概ね全区間において超えてしまう。そのため、現況の高さから約 2.5～3.0m 程度の嵩上げを行い、現在の背割堤本体は土中に保存を行う。

(4) 暗渠

暗渠とは地中に埋設された水路のことであり、背割堤下流端付近に設置されている。かつては旭川の増水時に暗渠を通じ百間川に流れ込んだ水が、一の荒手越流時の減勢池として用いられたと推測されているが、現在は仮閉塞されており、機能していない。しかし、概ね当時の石材・形状を保っていると推察されるため、土中保存が検討されている。

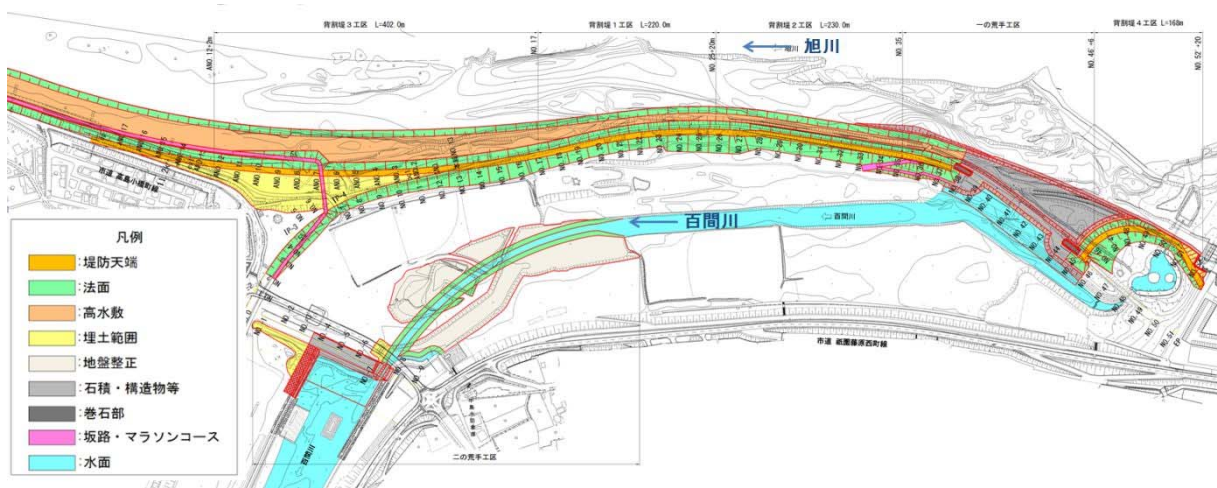
(5) 水制状石積み

水制状石積みは、かつて旭川洪水流の減勢機能を有していたと推測されるが、現在も洪水流の減勢機能を有しているかは不明であり、背割堤嵩上げ後は治水施設としては必要なくなるため、土中保存が検討されている。



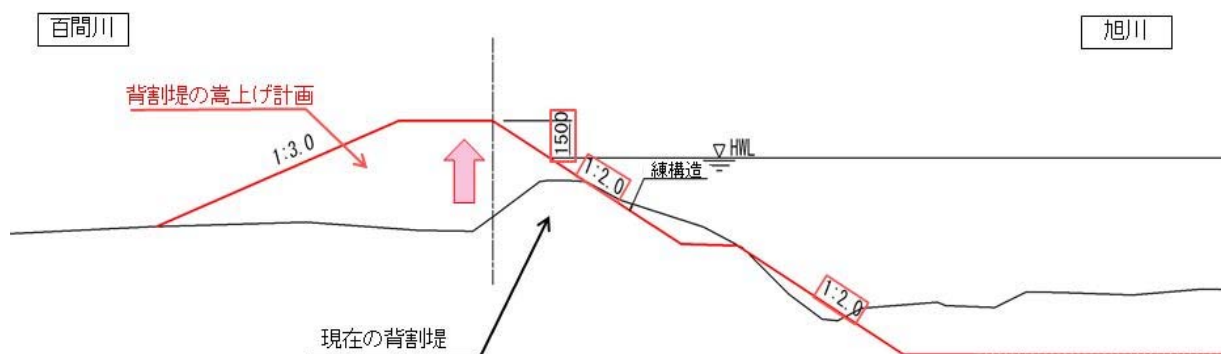
出典：国土交通省岡山河川事務所

図 4.2 三段の荒手仕組み



出典：国土交通省岡山河川事務所

図 4.3 改修後の平面図（イメージ）



出典：国土交通省岡山河川事務所

図 4.4 背割堤標準断面図（赤線は改修後）

4.3 解析モデルの概要

4.3.1 流況解析モデル

基礎方程式は一般座標系の浅水流方程式³⁾であり，河道内の植生群落の流水抵抗は形状抵抗として評価した．草本類は倒伏時の抵抗低減効果を考慮した⁴⁾．吉田ら⁵⁾はこのモデルを用い，百間川分流部での再現性を確認している．

流況解析モデル及び植生パラメータ等の説明については，2.3.1 に示したとおりである．なお，本研究では，河川の流れの解析のみを対象としており，河床変動解析は行っていない．

4.3.2 解析条件

(1) 解析格子

旭川河道では縦断方向に 305，横断方向に 57 分割し，百間川河道では縦断方向に 275，横断方向に 39 分割した（図 4.5 参照）．その結果，平均的な格子幅は約 10m となった．

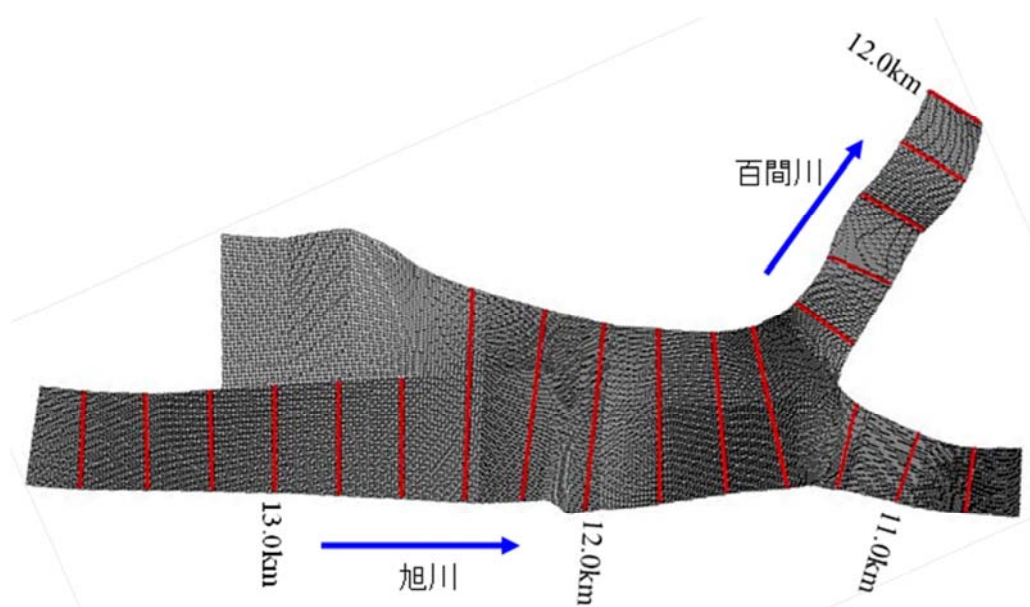


図 4.5 解析メッシュ図

(2) 境界条件

旭川の上流端流量は、計画流量の 6,000 m³/s を定常流で与えた。また、下流端水位は、ケース毎に分流量が異なるため、下流端から 30 メッシュ上流の計算流量をもとに、表 4.1 に示す現況河道及び計画河道での H-Q 関係から、内挿により設定した。

表 4.1 下流端水位の設定 (H-Q 関係)

【旭川10.6k】			【百間川12.0k】		
流量 (m ³ /s)	水位 (T.P.m)		流量 (m ³ /s)	水位 (T.P.m)	
	現況河道	計画河道		現況河道	計画河道
2500	6.71	6.71	1000	6.47	6.47
3000	7.33	7.33	1200	6.79	6.79
3500	7.82	7.83	1500	7.25	7.25
4000	8.35	8.36	1800	7.67	7.67
4500	9.03	9.04	2000	7.95	7.95
5000	9.40	9.41	2200	8.21	8.21
6000	10.39	10.40	2400	8.45	8.45

※現況河道と計画河道のH-Q関係は同じ

(3) 河床高

河床高は、吉田らが設定したデータ⁵⁾をもとにした。これは、高水敷では 2006 年 8 月の航空レーザー測量データ、低水路では 2009 年の定期横断測量のデータを内挿し、現地調査を踏まえ適宜修正したものである。本研究では、分流堰完成後の分流量を評価するため、改修後の分流堰及び背割堤となるよう地盤高を修正した。また、分流部周辺の旭川 10.8km～12.0 km 左岸では高水敷の整備が計画されていることから、整備後の地盤高に修正した。図 4.6 に高水敷整備範囲と設定した地盤高を示す。

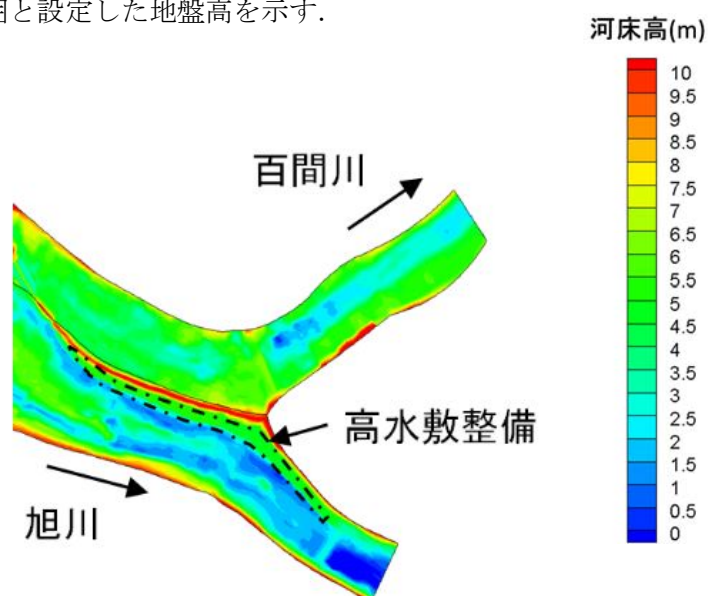


図 4.6 高水敷整備箇所及び設定した地盤高

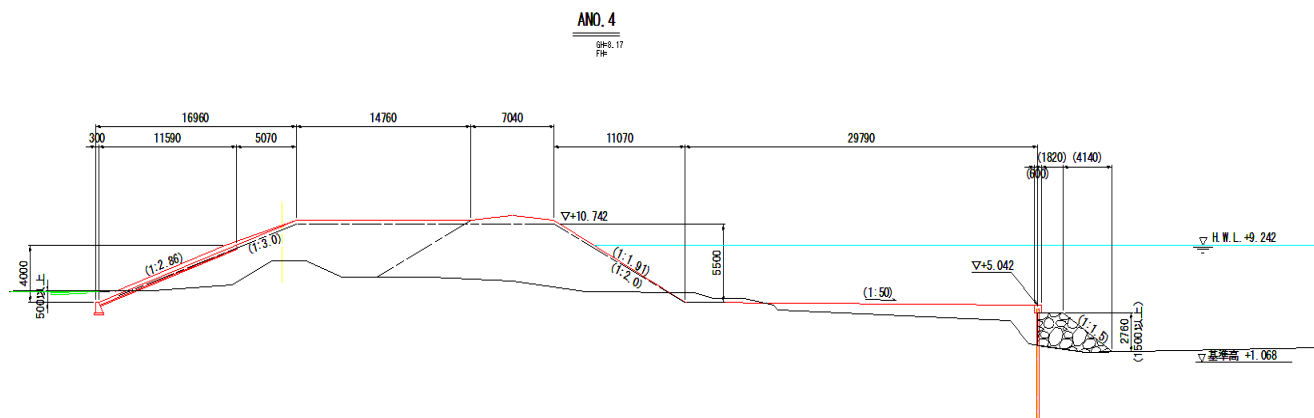


図 4.7 高水敷整備箇所の横断面図（赤線：整備後断面）

(4) 地被抵抗及び植生抵抗

地被抵抗は、マニング式で扱い、低水路のマニング係数の値を $0.028\text{m}^{-1/3}/\text{s}$ 、高水敷のそれを $0.026\text{m}^{-1/3}/\text{s}$ とした。これらの値は前野らの研究例⁴⁾を参考にした。

植生抵抗は、既往調査結果⁴⁾から、植生高及び密生度により設定した。密生度については、表 4.2 に示すとおり竹林、木本類（低木・高木）、草本類に分類した。ここに、植生分布については、2013 年時点の状況とし、吉田らが設定したデータ³⁾を用いた。

表 4.2 樹高と密生度の関係

植生の分類	木本類		草本類		竹林
	低木	高木	柔	硬	
旭川における 優先種	ヤナギ類		シナダレ スズメガヤ	ツルヨシ	マダケ
l : 樹高(m)	$0 < l \leq 5$	$5 < l \leq 15$	$0 < l \leq 1.5$	$0 < l \leq 2$	$0 < l \leq 12$
λ : 密生度(本/m)	0.023	0.013	0.031		0.286

4.4 植生管理方策の検討

4.4.1 再現計算

図 4.9(a),(b)は現況の植生状況と分流堰完成時に計画されている植生伐採を実施した状況を示している。まず、これらの両者の植生分布状況下において適正な分流がなされるかどうかを検討する。なお、分流堰は固定堰であることから、人工的な分流操作が行えないため、植生の繁茂状況によって分流量が異なる。したがって、本研究では分流堰による適正な分流量は、許容範囲を計画分流量の5%（分流量 1,900~2,100m³/s）として検討するものとした。

植生伐採前後における河道中央の水位縦断面図を図 4.8 に示す。現況の植生状況での分流量は 2,011 m³/s で、想定した許容範囲に収まっているが、計算水位をみると 11.2km 付近から上流で計画高水位を超過しており、特に管理ゾーンに設定した箇所（4.4.2 及び図 4.9 参照）の上流側での水位上昇が著しい。これは現況の植生状況は水位管理の点から適切でなく、伐採管理が必要となることを示している。次に、植生伐採後では、計算水位は計画高水位以下となっており、分流量も 2,014m³/s となり、計画どおり分流できることがわかる。しかし、河道に入植する樹木は数年で大きく生長するため、今後の河道管理の効率化を考えると、毎年全ての植生を伐採することは困難であるため、許容範囲のもとで植生を管理する方策を提示することが重要となる。本川と百間川の両者の植生を管理することは困難であるため、以下では植生伐採管理が容易な百間川については伐採後の状況を維持することとして検討する。

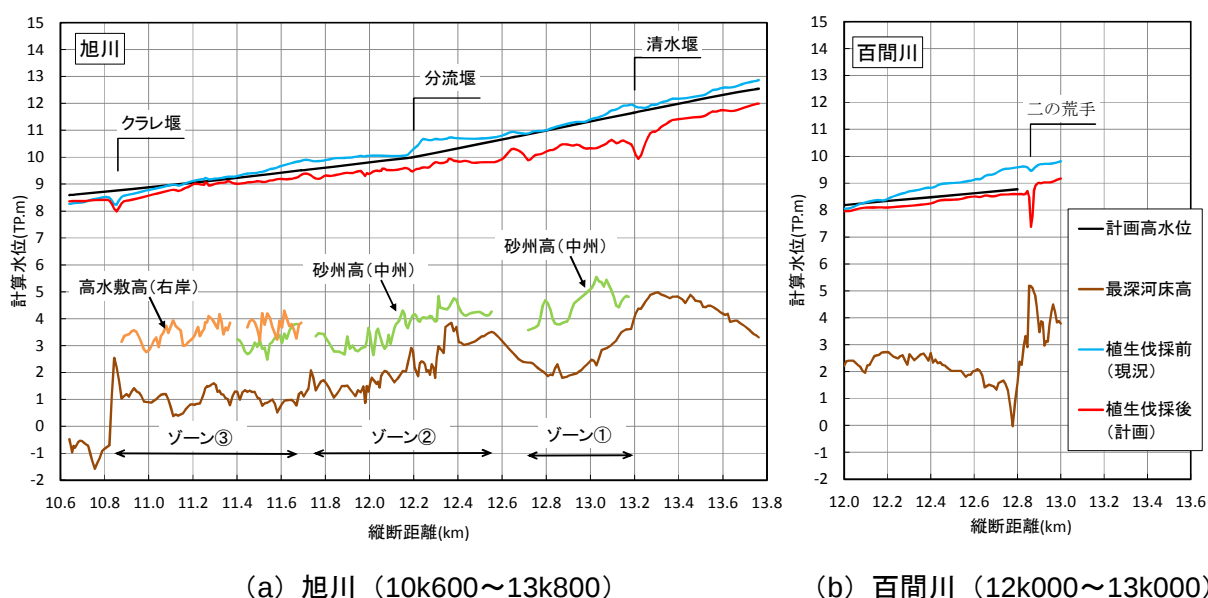


図 4.8 旭川及び百間川における計算水位縦断面図（植生伐採前後）

4.4.2 管理ゾーン区分の設定

実務上の植生管理の容易さを考えると、管理ゾーンを決めて管理するのが好ましい。本研究では、クラレ堰から清水堰の範囲を対象とし、分流に影響を与える植生群を、図 4.9 に示すように、直接的に影響が大きい分流堰周辺 (②)、水位上昇による影響が大きい下流部 (③)、その他上流部 (①) に区分し、国土交通省の伐採計画範囲をもとに、本研究で用いた水理解析モデルによって、計画流量が流下した場合、計算水位が計画高水位以下になり、計画の分流量になるように範囲設定を行った。なお、各管理ゾーンは、概ね同じ面積とし、なるべく人が入りやすい箇所を対象とした。なお、管理ゾーン以外で植生を伐採する箇所 (図 4.9(b)破線部) については、伐採後の状況を維持していくものと仮定し、解析を行うものとした。特に百間川においては、分流部周辺での水位を低下させる必要があることから、植生の管理が重要である。

ここに、植生伐採については、すぐに再生しないように伐根により行うものとした。伐採後の植生の生長については、植生が最も面的に広がることを想定し、管理ゾーンの範囲全てで一律に繁茂するものとした。また、植生伐採の判断は、容易に管理ができるよう、植生高で行うものとした。

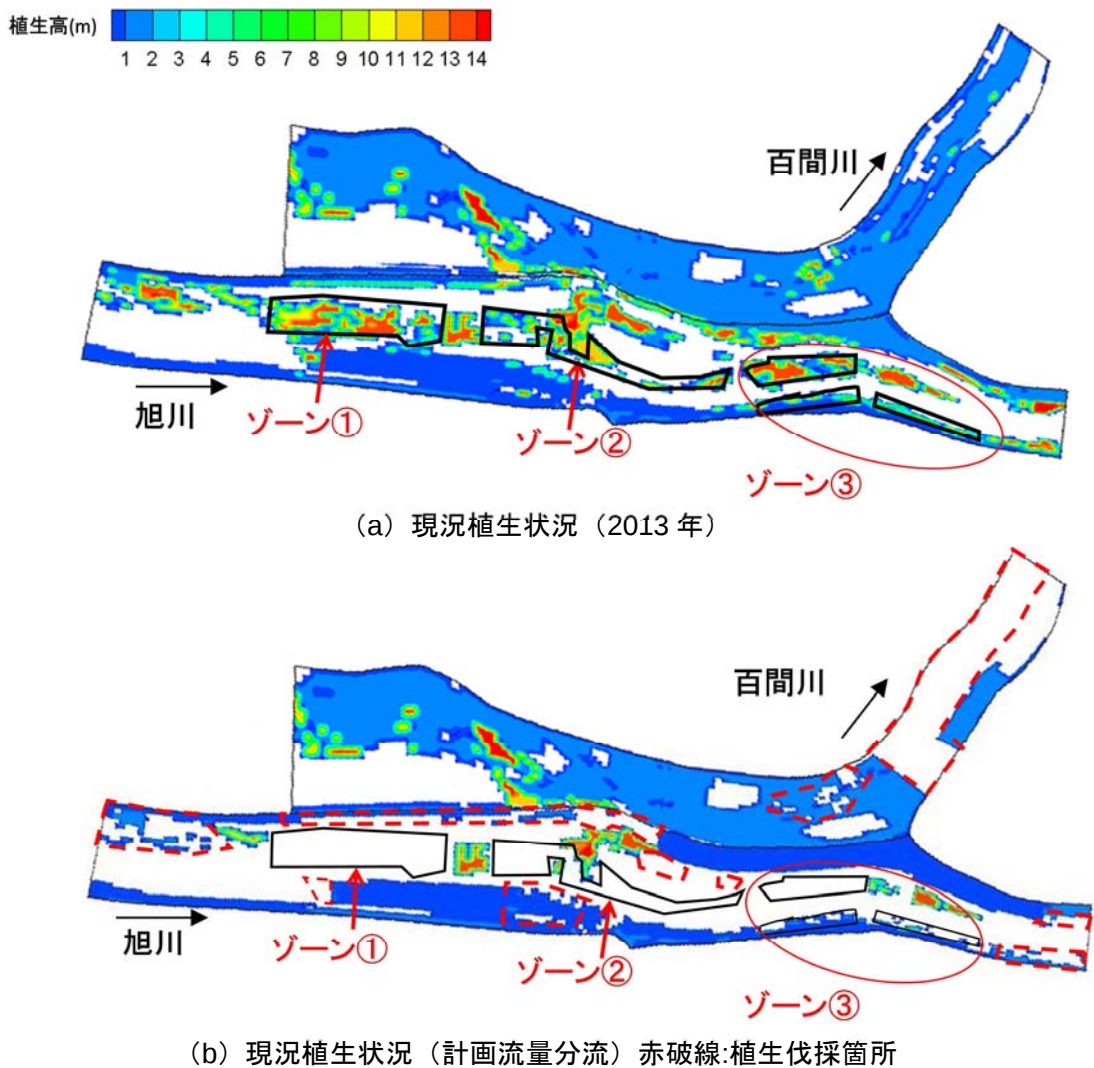


図 4.9 植生高及び管理ゾーン区分

4.4.3 感度分析

植生管理の方策を検討するにあたって、設定した管理ゾーンのそれぞれについて、解析モデルにより植生の生長による分流量への影響を把握するものとした。

解析ケース及び結果について、表 4.3 に示す。感度分析は、計画の分流量が行えるケース (Case0) を基本とし、全ての管理ゾーンで植生高が一律 2m, 5m, 10m に生長した場合を想定した (Case1-1~Case1-3)。図 4.11 に水位縦断面図を示す。結果は、植生が一律 2m に生長した Case1-1 を除き、分流量は 5 % の許容範囲を超過し、旭川及び百間川の計算水位も計画高水位を超過する。これは、旭川の植生が生長したことにより、旭川の水位が上昇し分流量が増加したことから、百間川の水位も計画高水位を超過した。このことから、管理ゾーン全てが植生高 5m 以上となった場合、計画規模の洪水が発生した際に、適正に分流できないことがわかる。なお、管理ゾーン全ての植生高が 10m (高木) となった場合は、植生高 5 m (低木) よりも影響量が小さくなっているが、これは、表 4.2 に示すように植生高 10m の方が高木になったことにより、密生度が小さくなり、洪水時の抵抗が小さくなったためである。

次に、各管理ゾーンの植生について伐採後の生長による影響を把握するため、Case2-1~Case4-2 に示すケースで解析を行った。これは、対象とする 1 つの管理ゾーンの植生高を 0m, 2m と変化させ、他の管理ゾーンの植生高を一律 5m としたケースである。結果は、いずれも分流量は 5 % の許容範囲を超過し、計算水位も計画高水位を超過する。このことから、3 つの管理ゾーンのうち、2 つの管理ゾーンについて植生高を 5m 以下で管理すべきであることがわかる。各管理ゾーンの計画分流量 2,000m³/s に対する超過分流量を整理すると、図 4.10 に示すように、管理ゾーンのうち、最も分流量に影響を与えるのはゾーン③で、ほとんど影響のないのはゾーン①である。これは、下流側にあるゾーン③での植生の生長によって、分流部周辺の水位が高くなるため、分流堰の近くにあるゾーン②よりも、分流量に与える影響が大きくなった。

さらに、2 つの管理ゾーンの植生について伐採後の生長による影響を把握するため、Case5-1~Case7-2 に示すケースで解析を行った。これは、対象とする 2 つの管理ゾーンの植生高を 0m, 2m と変化させ、他の管理ゾーンの植生高を 5m としたケースである。結果は、適正な分流ができ、計算水位が計画高水位を下回るのは、Case6-1, Case7-1 及び Case7-2 である。図 4.12 に管理ゾーン②及び③を変化させたケースの水位縦断面図を示す。

管理ゾーン①について分流量への影響が小さいことから、ゾーン①を一律 5m とし、ゾーン②と③を 3m もしくは 2m にしたケース (Case8-1~Case8-3) を実施した。結果は、いずれのケースも分流量の許容範囲を超過することから、ゾーン②もしくはゾーン③において植生高を 2m 以下で管理する必要がある。

管理ゾーン③について分流量への影響が大きいことから、追加ケースとして Case9-1~Case9-3 を実施した。これは、影響の小さいゾーン①を一律 5m、影響の大きいゾーン③を一律 0m、ゾーン②を 2m, 3m, 4m に変化させたケースである。図 4.13 に水位縦断面図を示す。この結果から、Case9-1 及び Case9-2 で分流量が許容範囲内に収まり、計算水位も計画高水位を下回る結果となる。

表 4.3 感度分析の解析条件及び結果

ケース	植生高(m)			解析結果		
	ゾーン ①	ゾーン ②	ゾーン ③	分流量 (m ³ /s)	計算水位	
					旭川	百間川
Case0	0	0	0	2,014 ○	○	○
Case1-1	2	2	2	2,075 ○	○	○
Case1-2	5	5	5	2,266 ×	×	×
Case1-3	10	10	10	2,212 ×	×	×
Case2-1	0	5	5	2,246 ×	×	×
Case2-2	2	5	5	2,252 ×	×	×
Case3-1	5	0	5	2,207 ×	×	×
Case3-2	5	2	5	2,235 ×	×	×
Case4-1	5	5	0	2,117 ×	×	×
Case4-2	5	5	2	2,149 ×	×	×
Case5-1	0	0	5	2,186 ×	×	×
Case5-2	2	2	5	2,211 ×	×	×
Case6-1	0	5	0	2,096 ○	○	○
Case6-2	2	5	2	2,134 ×	○	×
Case7-1	5	0	0	2,024 ○	○	○
Case7-2	5	2	2	2,093 ○	○	○
Case8-1	5	3	3	2,115 ×	○	×
Case8-2	5	3	2	2,103 ×	○	○
Case8-3	5	2	3	2,114 ×	○	×
Case9-1	5	2	0	2,060 ○	○	○
Case9-2	5	3	0	2,062 ○	○	○
Case9-3	5	4	0	2,110 ×	×	○

分流量について、○：分流量が5%以内、×：5%を超過

計算水位について、○：計画高水位以下、×：計画高水位を超過

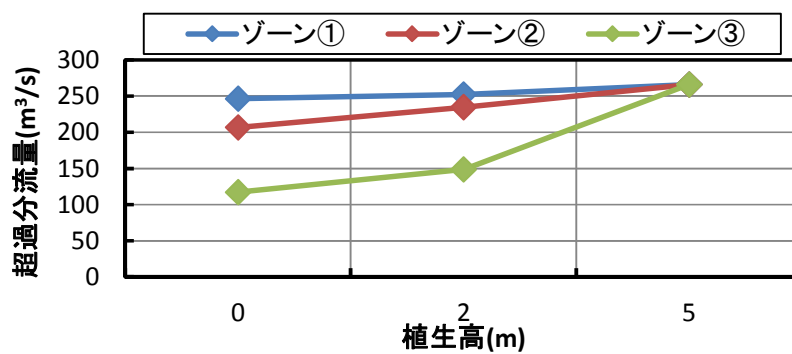
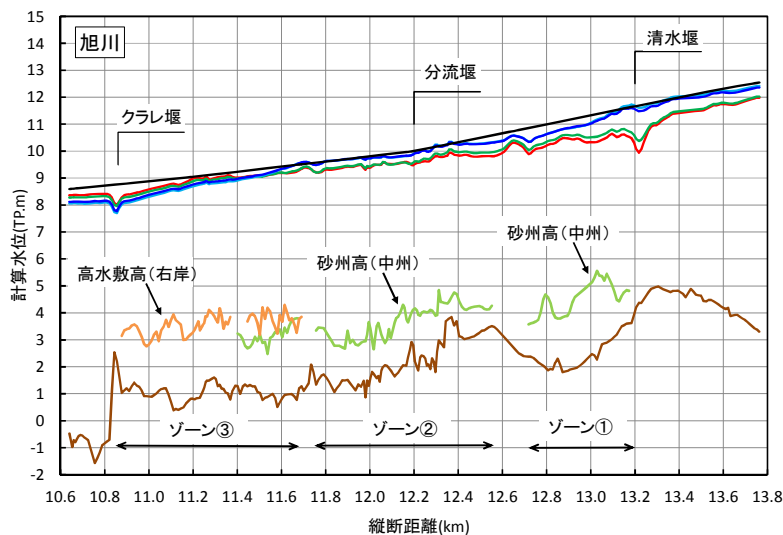
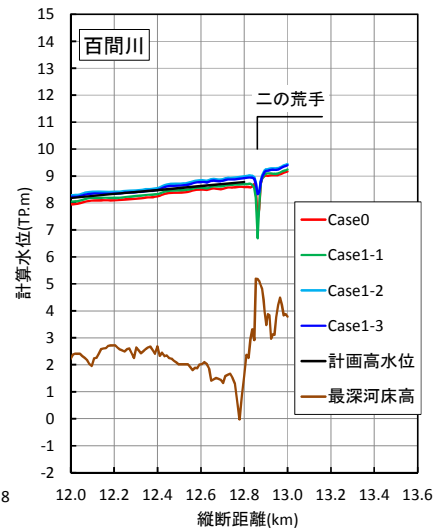


図 4.10 分流量への影響

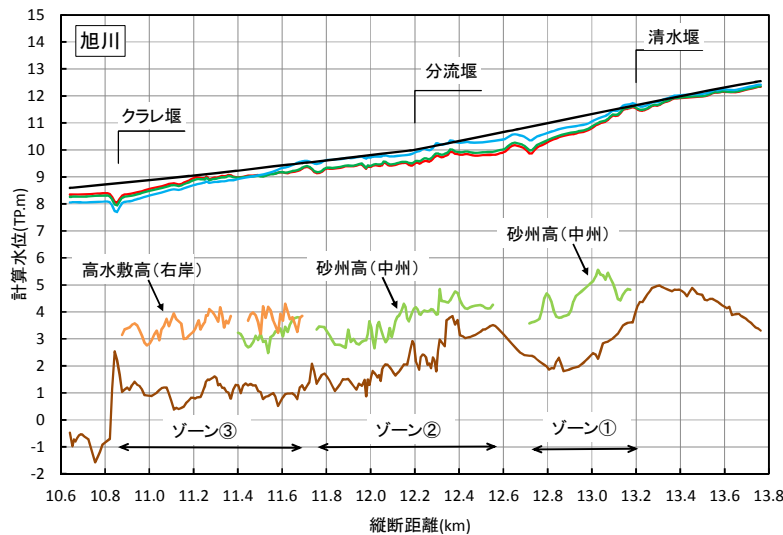


(a) 旭川 (10k600~13k800)

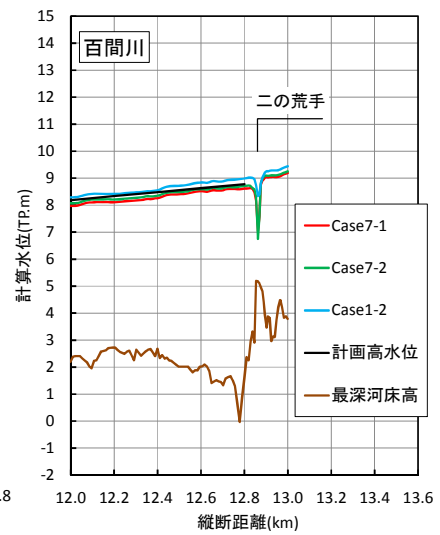


(b) 百間川 (12k000~13k000)

図 4.11 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (全ての管理ゾーンの植生を一律に変化)

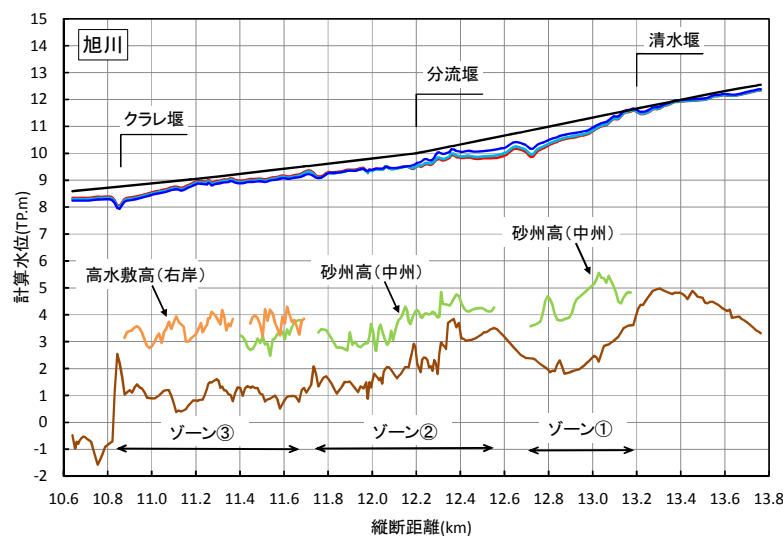


(a) 旭川 (10k600~13k800)

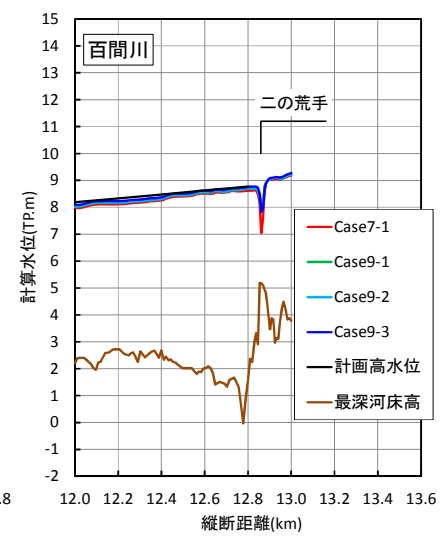


(b) 百間川 (12k000~13k000)

図 4.12 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (管理ゾーン②・③の植生を変化)



(a) 旭川 (10k600~13k800)



(b) 百間川 (12k000~13k000)

図 4.13 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (管理ゾーン②の植生を変化)

4.4.4 植生管理の方策

感度分析による結果から、表 4.4 に示すような植生管理基準（案）を提案する。管理ゾーン①は分流堰より上流にあり百間川への分流量の影響は小さいため、下流の管理ゾーン②及び③を適切に管理すれば、積極的な管理を行う必要はないと考える。管理ゾーン③は分流量の影響が大きいため、ヤナギが入植した段階で伐採し、管理ゾーン②は Case9-3 の結果からヤナギ（低木）の樹高が 4m に達した段階で管理していくものとした。

前野らが旭川の現地調査の結果等により設定した植生の入植条件⁹⁾から推算すると、河床が維持し平水位からの比高差が 2m 以内であれば、植生伐採後、管理ゾーン②で概ね 5 年、管理ゾーン③で概ね 2 年で植生を管理することとなる。

表 4.4 分流部周辺における植生管理基準

管理 ゾーン	植生管理基準	伐採後の 経過年
①	分流量への影響が小さいため、積極的な管理は行わない	—
②	ヤナギの樹高が4mに達した段階で、植生を伐採する	概ね5年
③	ヤナギが入植した段階で、植生を伐採する	概ね2年

4.5 まとめ

本研究では、百間川分流部において適正な分流量を維持するための植生管理の方策について検討を行った。本研究で得られた結果等を以下に示す。

- 平面二次元流況解析結果から、計画規模の洪水を適正に分流させるために、管理ゾーン①～③の植生管理を行う必要があることを示した。
- 計画の分流量を許容範囲内で維持するためには、管理ゾーン②では植生高 4 m、管理ゾーン③ではヤナギが入植した段階で管理を行い、管理ゾーン①では積極的な管理を行わなくてよいことを示した。
- 旭川における植生の生長からみると、管理ゾーン②では植生伐採から概ね 5 年後、管理ゾーン③では概ね 2 年後に植生管理を行う必要がある。
- 流れの抵抗には植生の高さだけでなく、密生度も大きな要因となるため、管理すべき箇所に応じた密生度を設定し、解析モデルの精度を高めていく必要がある。

【参考資料】

次ページ以降に、参考資料として、感度分析の全ケースの水位縦断面図及び、現況河道、Case0、Case9-3 の流速ベクトル図を示す。なお、水位縦断面図については、本編では河道中央の水位を示しているが、ここでは河道中央のほか、左岸側及び右岸側の水位縦断面を示す。

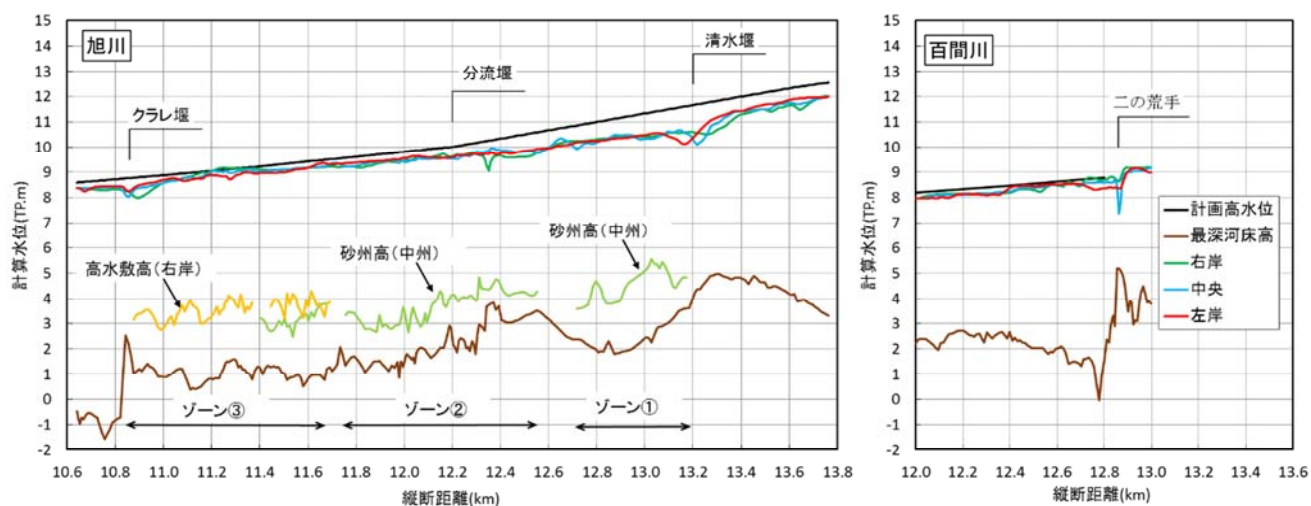


図 4.14 (1) 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (Case0)

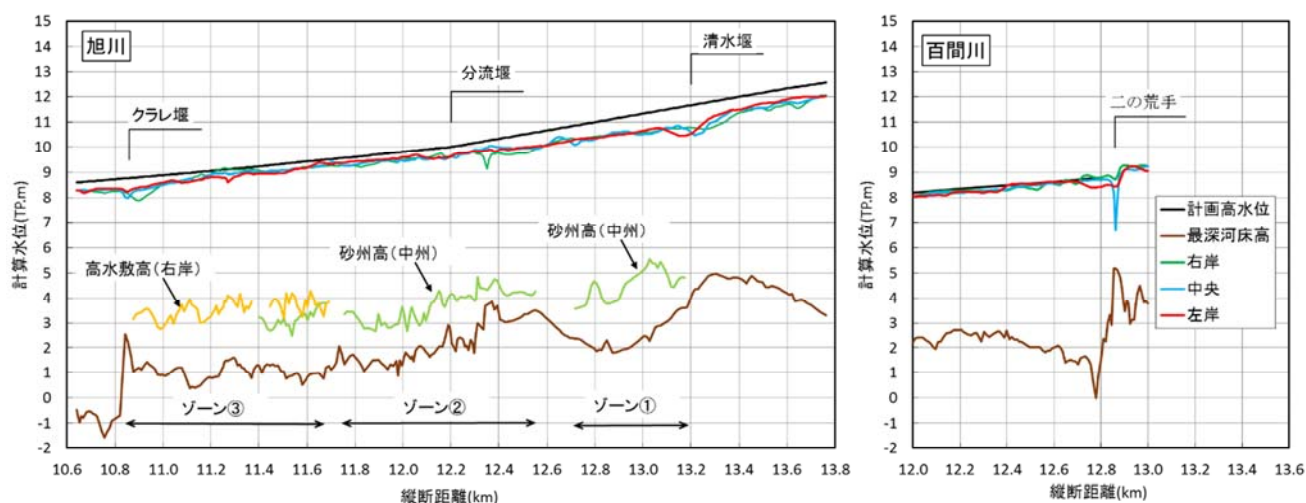


図 4.14 (2) 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (Case1-1)

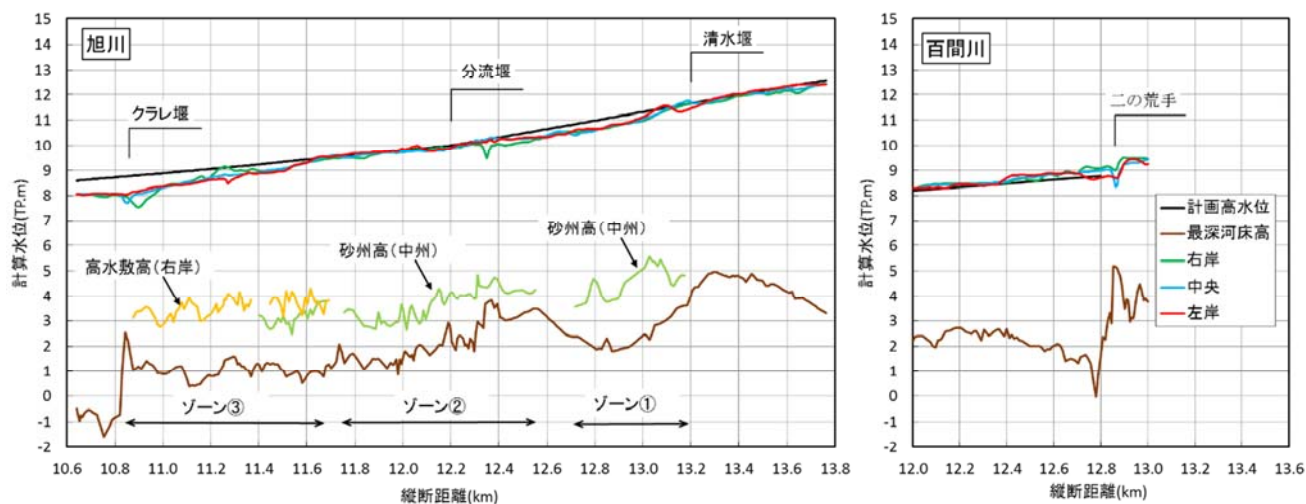


図 4.14 (3) 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (Case1-2)

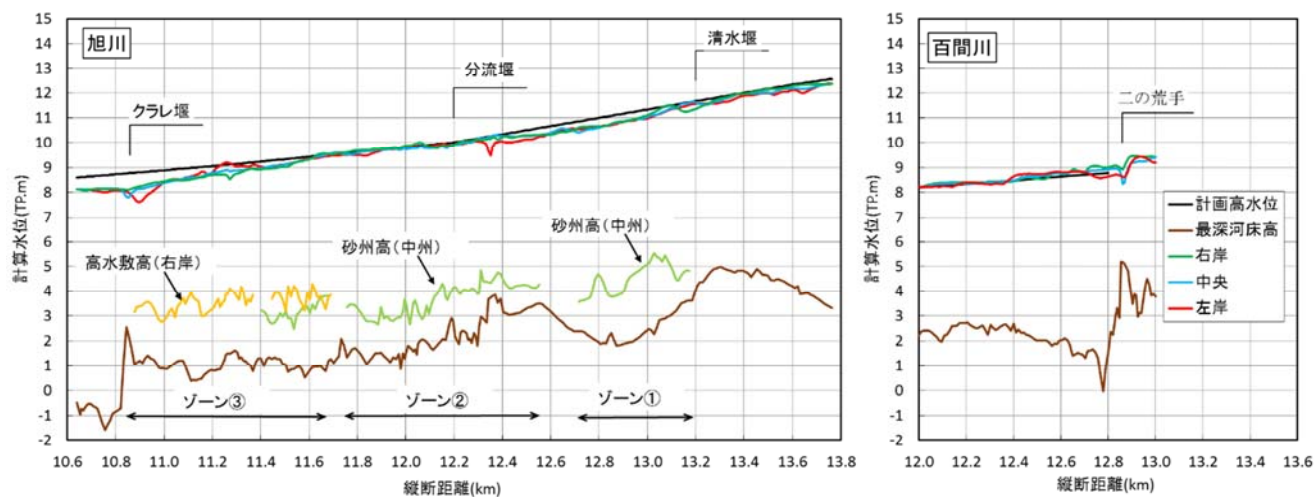


図 4.14 (4) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case1-3)

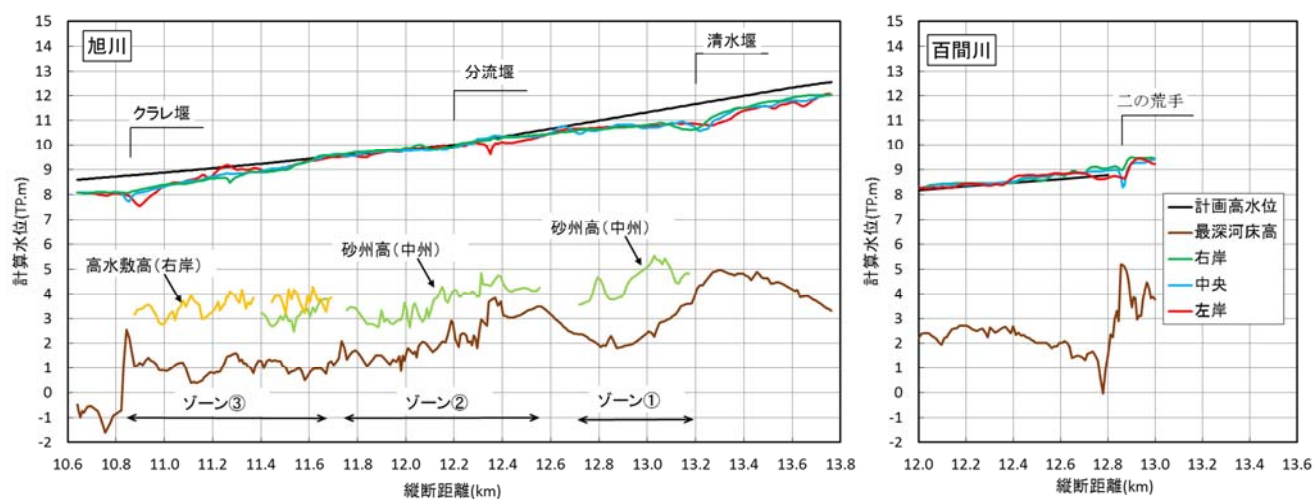


図 4.14 (5) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case2-1)

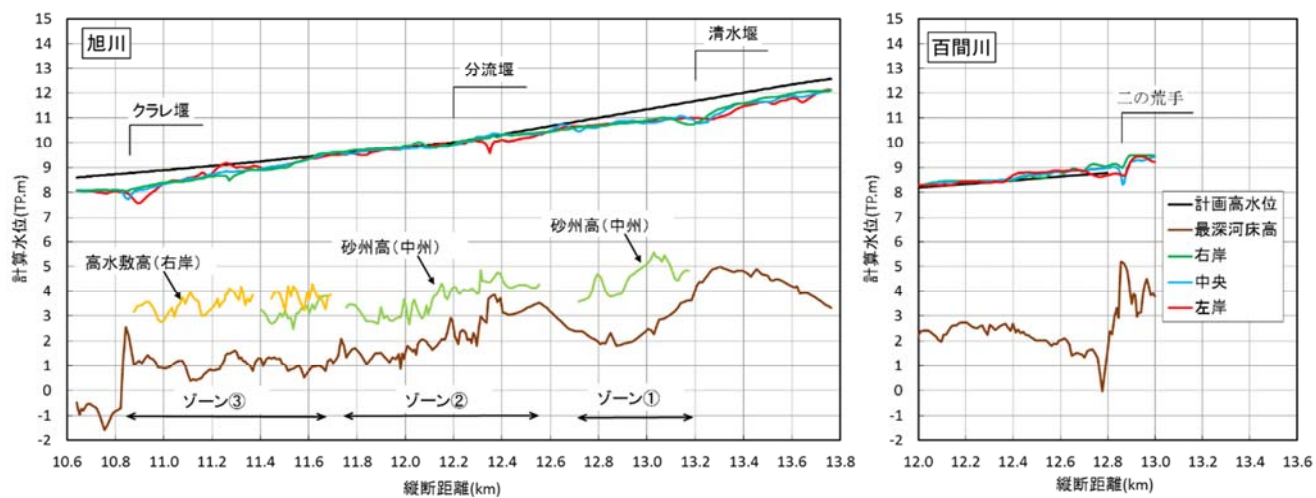


図 4.14 (6) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case2-2)

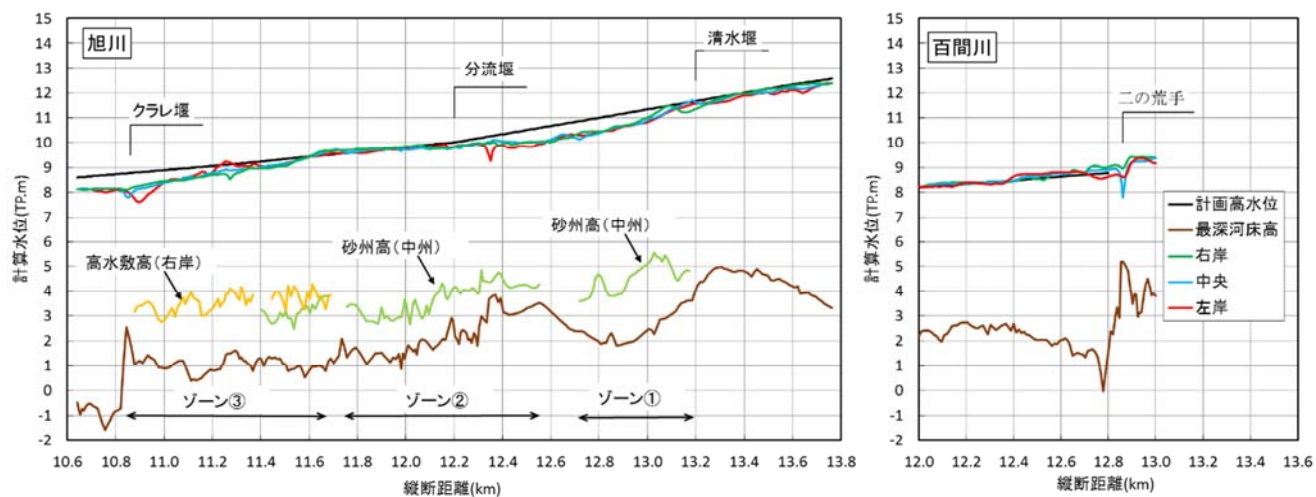


図 4.14 (7) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case3-1)

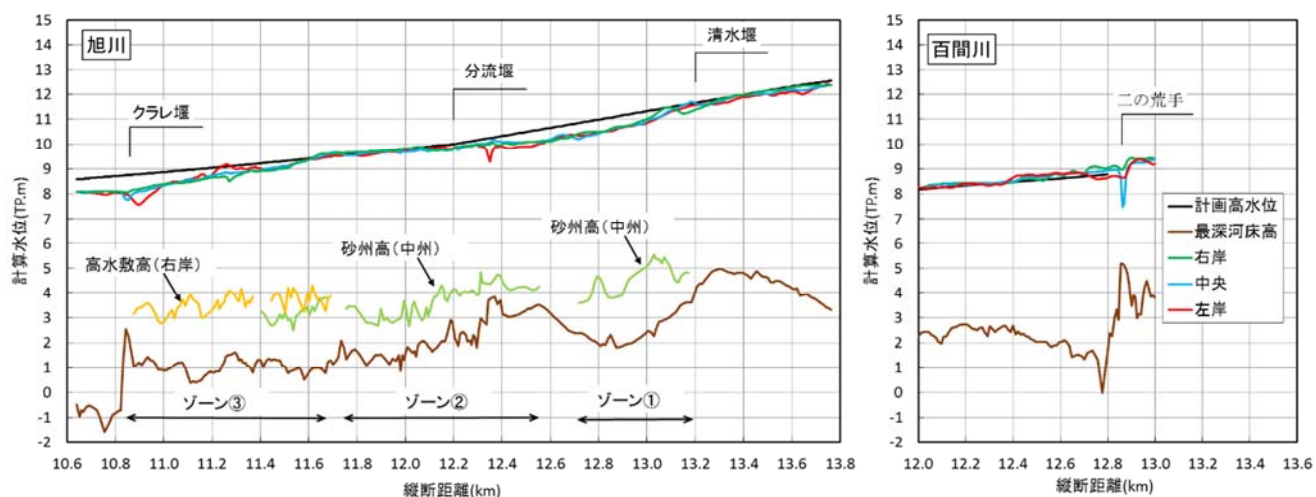


図 4.14 (8) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case3-2)

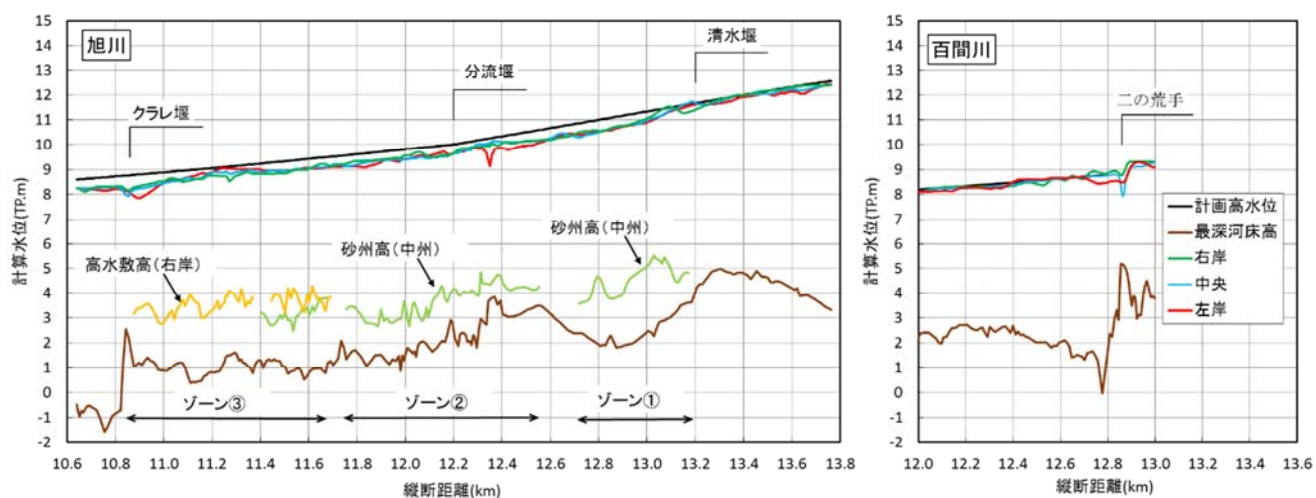


図 4.14 (9) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case4-1)

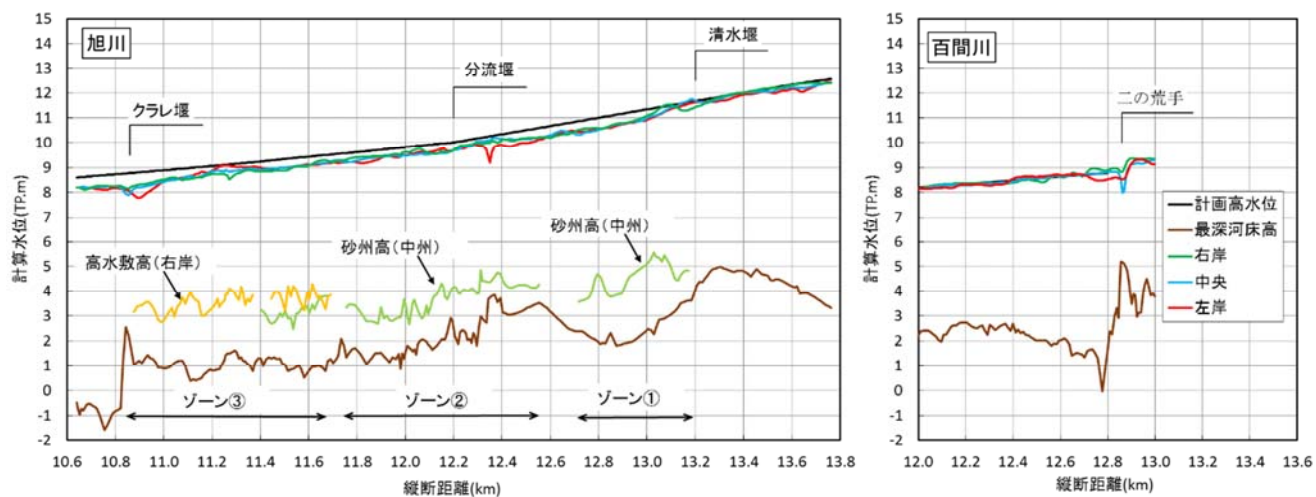


図 4.14 (10) 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (Case4-2)

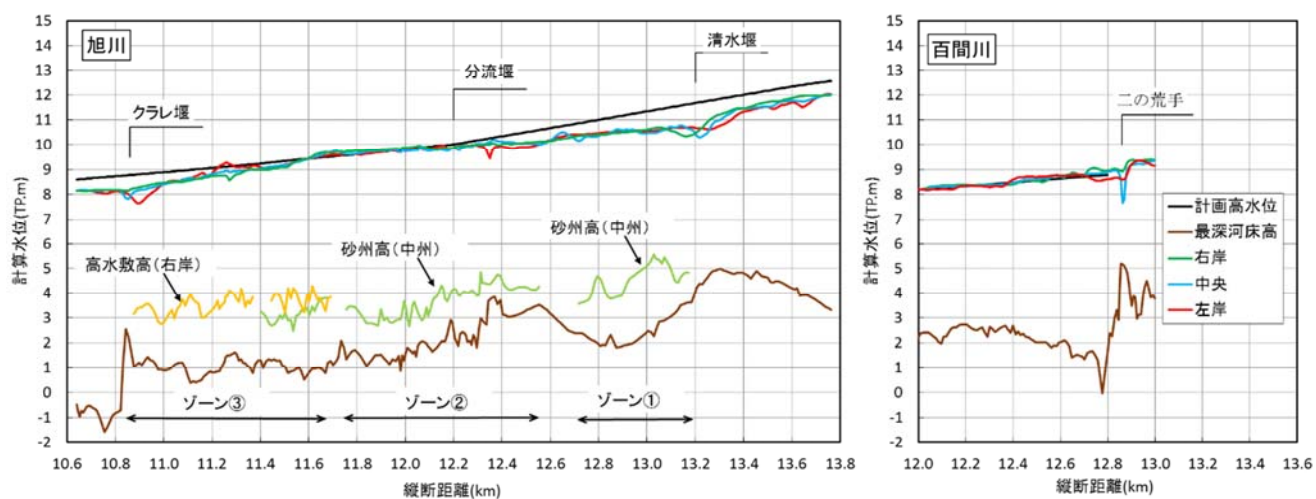


図 4.14 (11) 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (Case5-1)

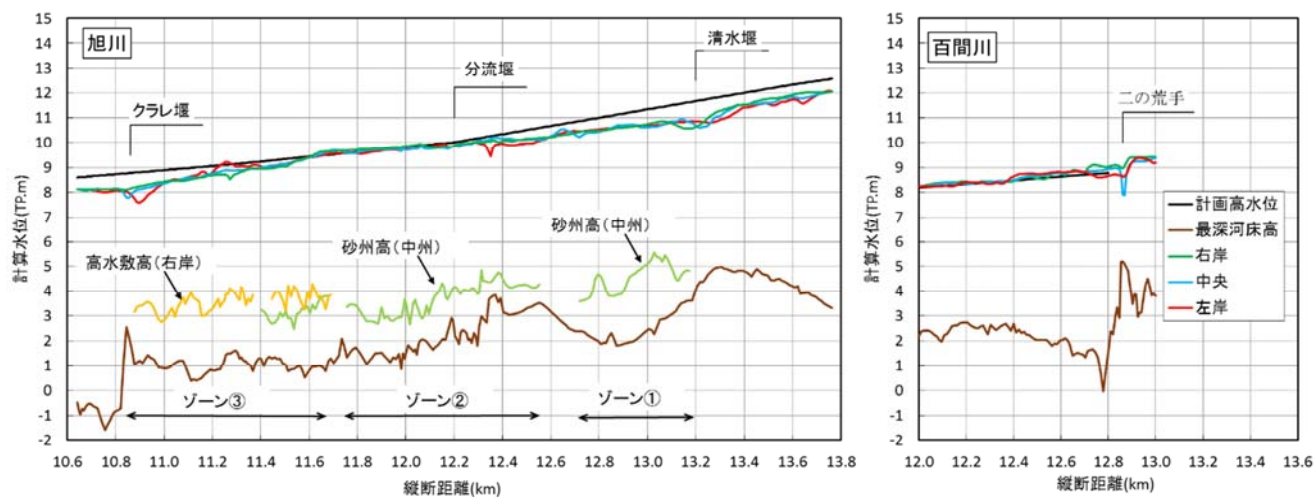


図 4.14 (12) 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (Case5-2)

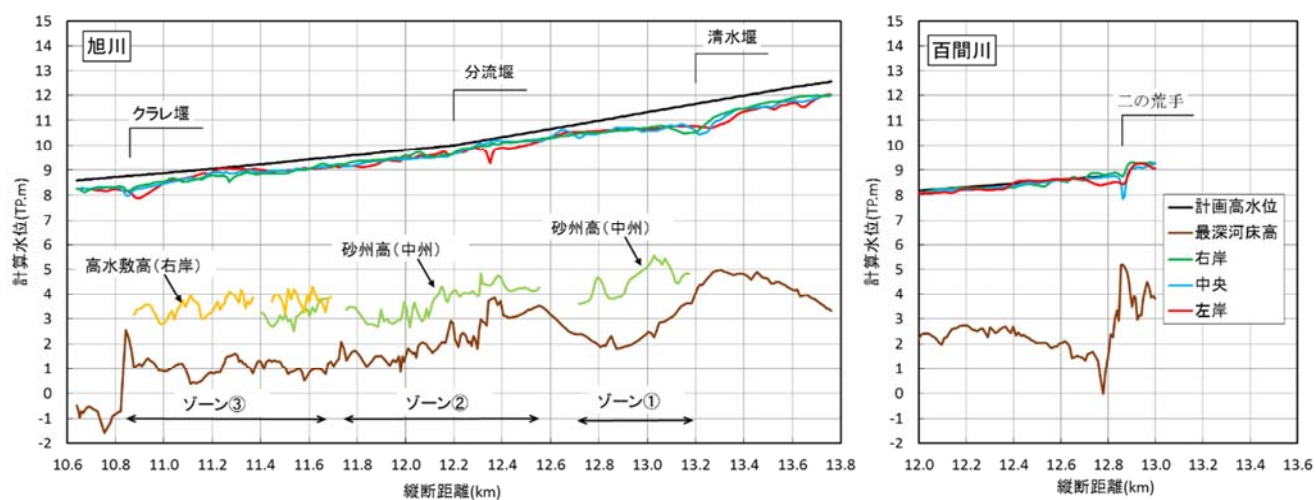


図 4.14 (13) 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (Case6-1)

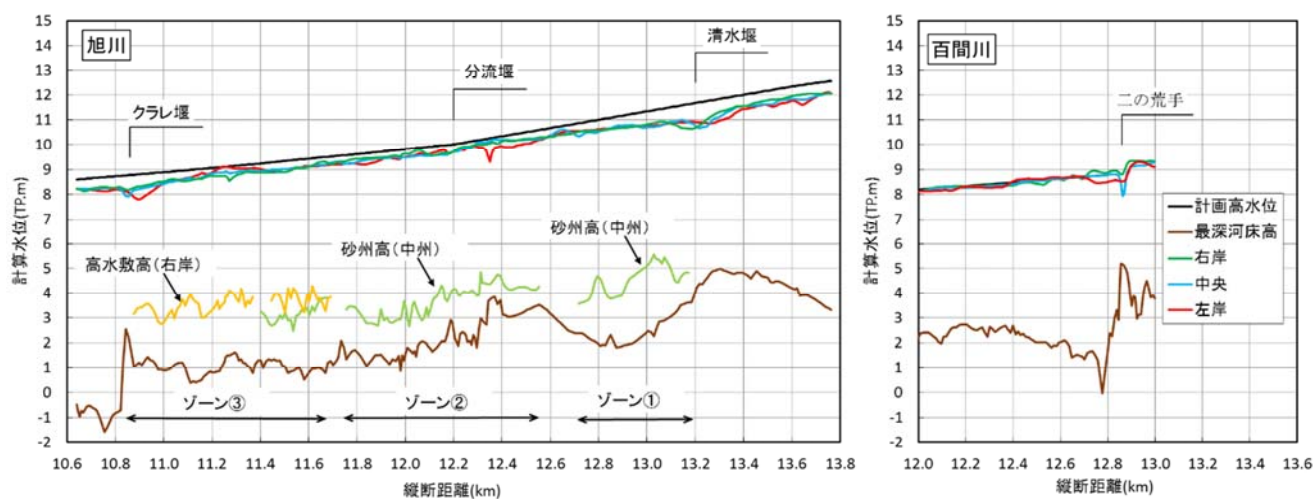


図 4.14 (14) 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (Case6-2)

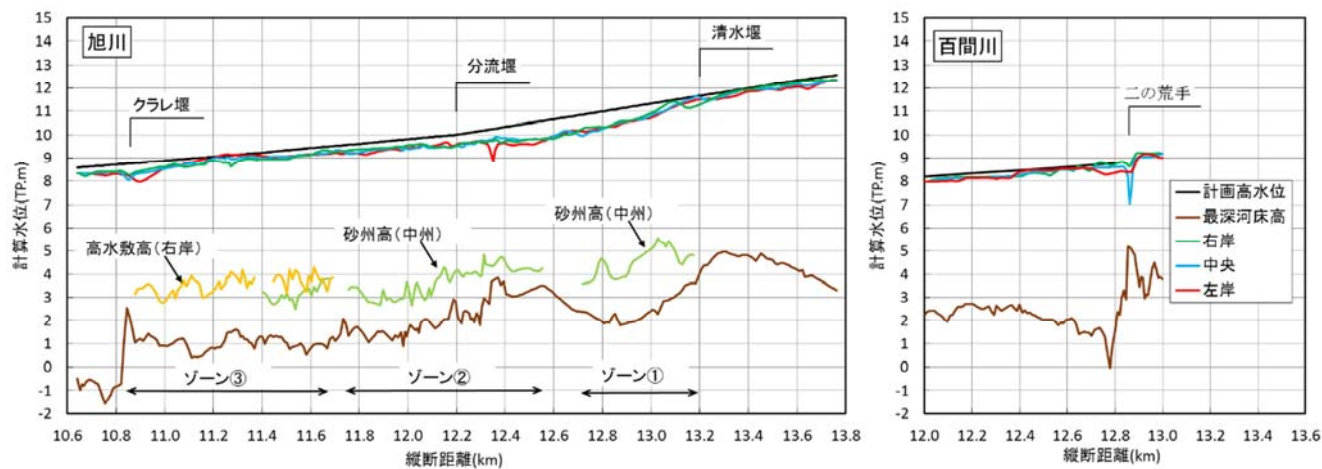


図 4.14 (15) 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (Case7-1)

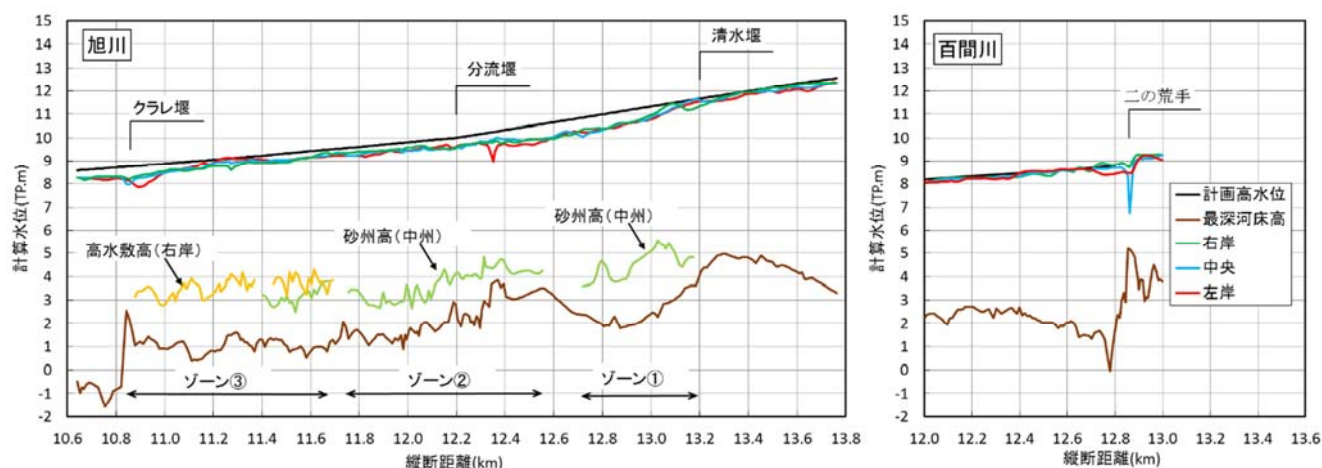


図 4.14 (16) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case7-2)

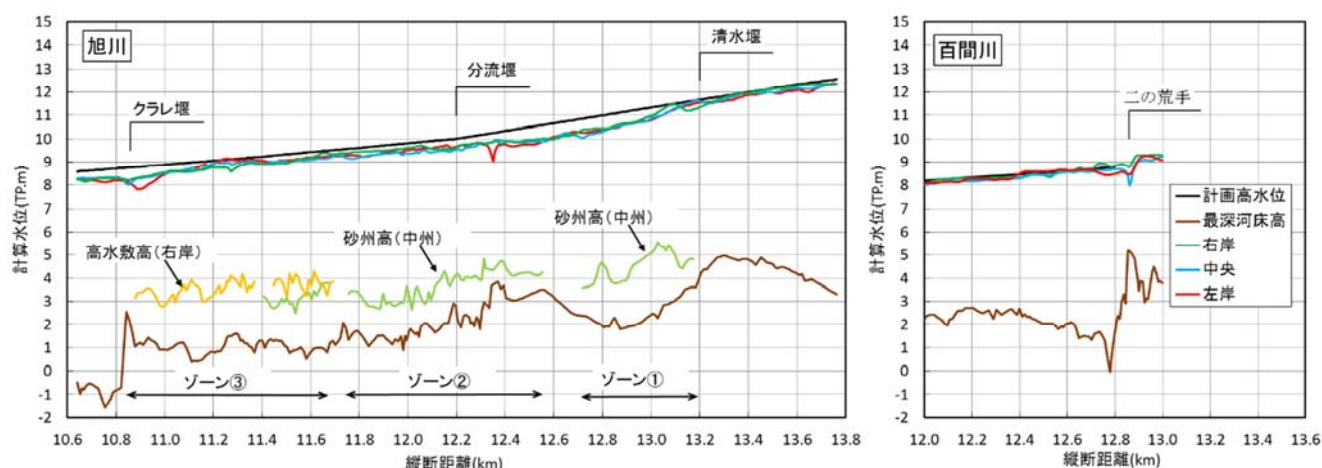


図 4.14 (17) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case8-1)

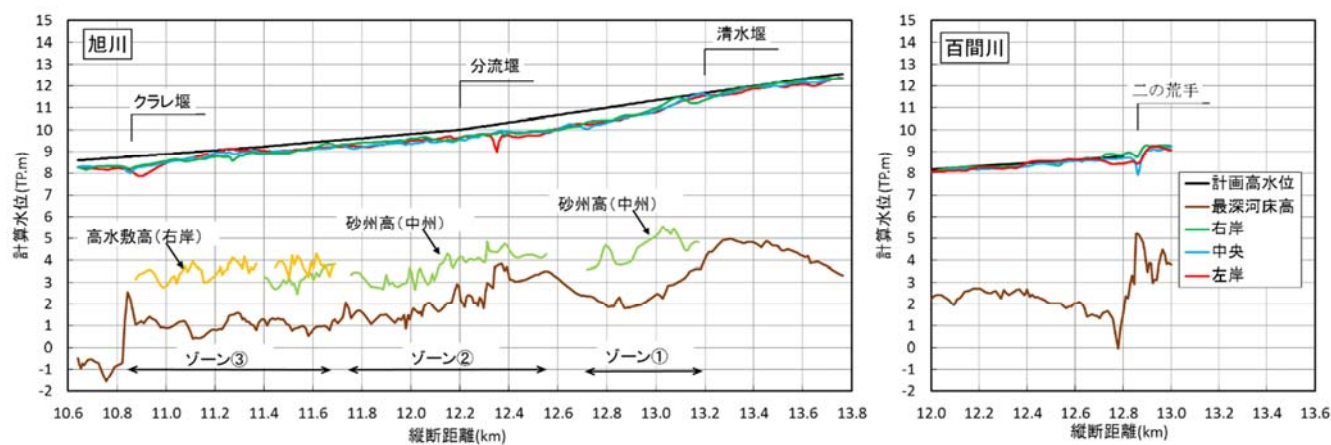


図 4.14 (18) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case8-2)

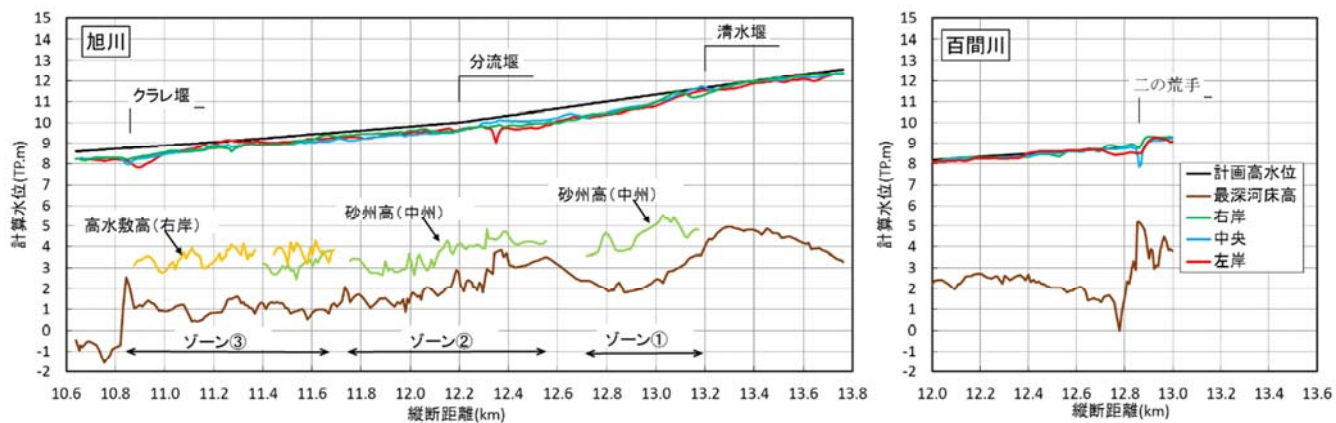


図 4.14 (19) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case8-3)

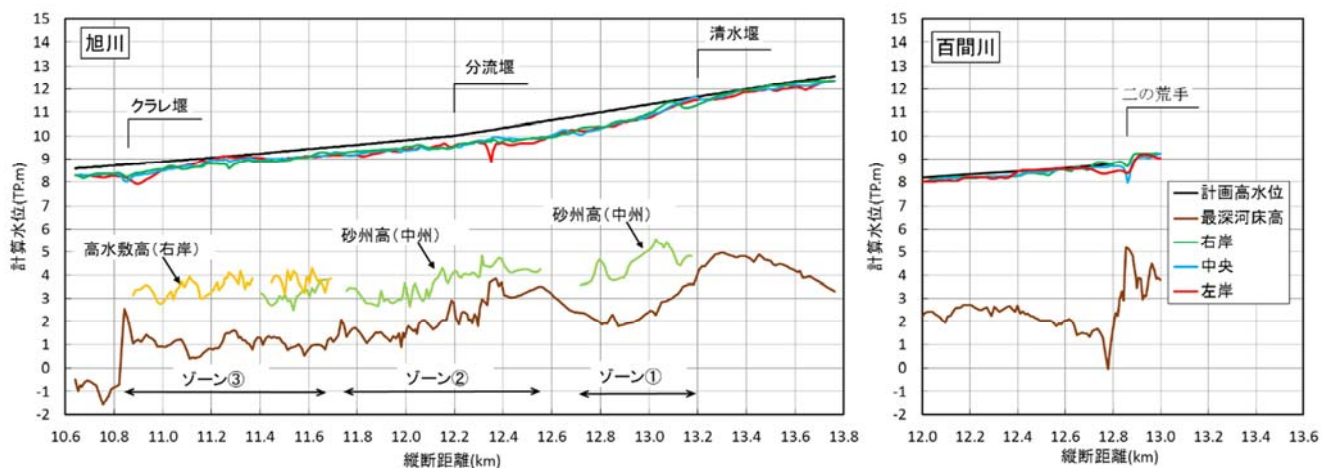


図 4.14 (20) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case9-1)

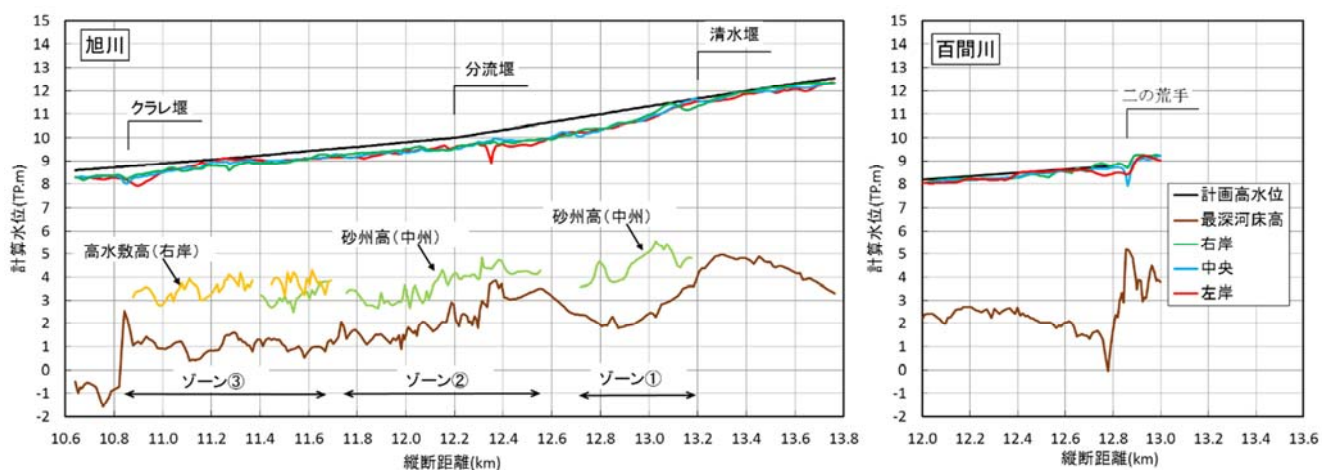


図 4.14 (21) 旭川及び百間川における計算水位縦断面図 (Case9-2)

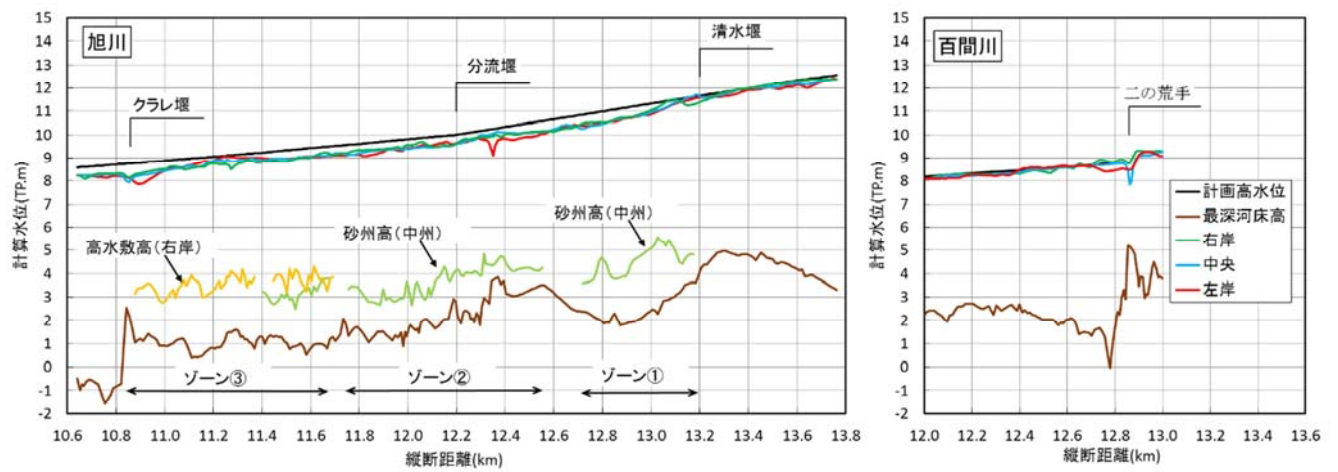


図 4.14 (22) 旭川及び百間川における計算水位縦断図 (Case9-3)

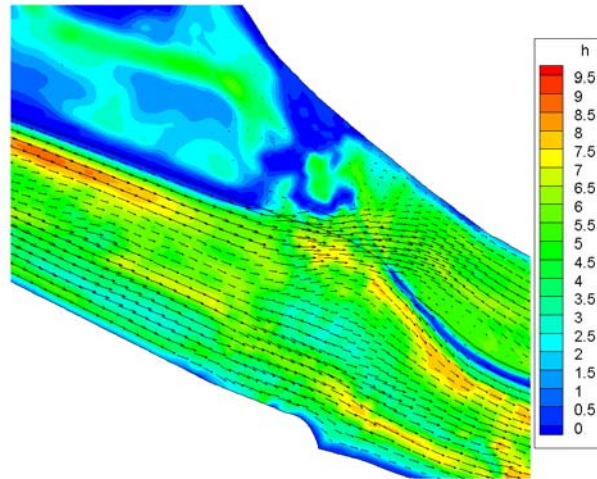


図 4.15 (1) 旭川及び百間川における流速ベクトル図及び水深分布図（現況河道）

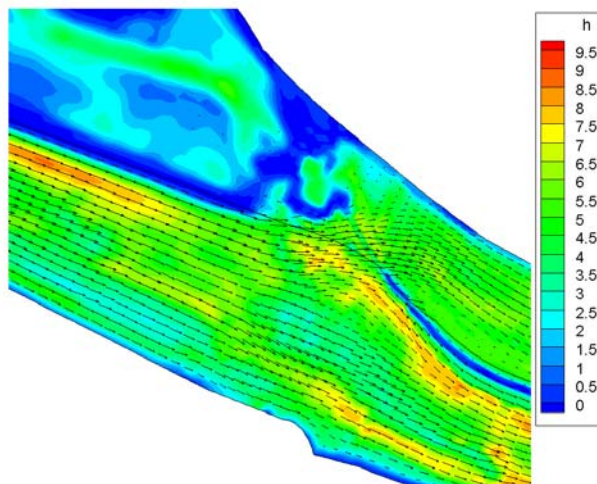


図 4.15 (2) 旭川及び百間川における流速ベクトル図及び水深分布図（Case0）

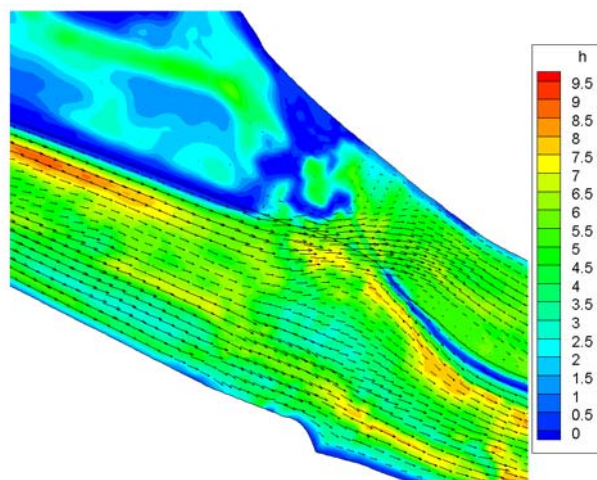


図 4.15 (3) 旭川及び百間川における流速ベクトル図及び水深分布図（Case9-3）

【参考文献】

- 1) 国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所：旭川水系河川整備計画【国管理区間】，<http://www.cgr.mlit.go.jp/okakawa/kouhou/seibi/asahi/asahi/asahomepe.html>，2013.
- 2) 国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所：旭川分流部の改築に向けて，<http://www.cgr.mlit.go.jp/okakawa/kouhou/hyakenkaitiku/index.html>.
- 3) 土木学会：水理公式集例題プログラム集，例題 2-8，2001.
- 4) 前野詩朗，渡辺敏，藤塚佳晃：簡易に得られる植物特性値を考慮した数値解析モデルの精度向上の提案，土木学会論文集，No.803／Ⅱ-73，pp.91-104，2005.
- 5) 吉田圭介，前野詩朗，藤田駿佑，松山悟，岩城智大，平井康隆：旭川における植生分布の経年変化を考慮した洪水流の数値解析，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.71，No.4，pp.I_1039-I_1044，2015.
- 6) 前野詩朗，吉田圭介，松山悟，藤田駿佑：旭川大原試験区における植生消長シミュレーションモデルの構築と検証，土木学会論文集，B1 Vol.70，No.4，pp.I_1369-I_1374，2014.

5. 結論

5.1 本論文の結論

本論文では、2005 年に旭川祇園地区で行われた砂州の切下げがその後の河道の治水や生物環境へ与える効果を検討するために、現地の流量観測やアユの生息状況等を調査するとともに、砂州を切下げた場合と切下げなかった場合を想定して解析を行い、河道形状、植生繁茂状況、生物生息場としての物理環境の変化に与えた影響を議論した。また、祇園地区の礫河原再生箇所において、今後も継続的に礫河原の維持・拡大が図れるよう、2 つの規模の洪水を用いて 5 年間の解析を行い、施工の組み合わせによる樹林化抑制の効果と持続性について検討した。

さらに、百間川分流部において、水理解析により適正な分流量を維持するための植生管理の方策について検討を行った。

以下に、各章での検討内容、数値解析等から得られた知見を要約し、本論文の結論とする。

「1. 序論」では、本研究が必要となった背景、内容及び既往研究との関わりについて整理し、本研究の必要性と目的を述べた。

「2. 礫河原再生後の物理環境変化に関する研究」では、2005 年に実施した礫河原再生試験後に中小規模洪水の発生によって礫河原が維持・拡大した旭川の祇園地区を対象に、河道状況の現地調査を行うとともに、二次元河床変動解析及び植生消長計算により数年間の河道形状や植生繁茂の変化と、PHABSIM によりアユの産卵場としての変化を評価し、礫河原再生に向けた現地試験による効果を示した。

- 2014 年から 2016 年にかけて、祇園地区の礫河原再生箇所において、平水時における現地の流速、水深の調査を行い、水理的な流れ場としては、アユの産卵場にとって適していることがわかった。また、地元水産関係者へのヒアリングや国土交通省及び岡山県水産研究所の調査結果等からも、アユの産卵場に適していることがいえる。
- iRIC の Nays2DH ソルバーを用い、河床変動解析を実施した結果、砂州切下げ箇所における河床変動や、瀬・砂州の創出が表現できた。しかしながら、15.2km 地点の横断距離 200m 付近のような再現性が低い箇所もあるため、粒度分布の設定の見直しや、側岸侵食を考慮するなどの改良が必要である。また、植生消長シミュレーションモデルにより、切下げ箇所の植生繁茂状況を概ね再現することができた。ただし、一部で木本類の植生高が現地調査の結果と比べ少し高い値を示したため、今後も調査を重ね、生長速度の見直し等を検討する必要がある。
- 河床変動解析結果から、砂州を切下げた効果として、礫河原の維持、拡大が図られたことが明らかになった。また、15.2km 左岸付近の流れが集中する箇所では、砂州の切下げによって、深掘れ箇所の河床低下が緩和されることがわかった。

- 植生消長計算結果から、砂州の切下げによって、砂州の攪乱が起きようになった。しかし、河床が攪乱されるような大きな洪水が数年間発生しなかった場合は、植生の入植、拡大により、砂州を切下げる前の状態に戻ってしまうことが懸念される。
- 生物生息場評価 (PHABSIM) の結果、砂州の切下げの効果として、新たに瀬が形成され、流速が増大し、アユの産卵場に適した物理環境が増加することが示された。また、切下げを行わなかった場合は、低水路の河床低下に伴い、その箇所での水深が増大し、平水時に冠水する面積の減少や流速が低下する箇所が現れ、適性面積が減少した。

「3. 経年変化を考慮した礫河原再生効果に関する研究」では、2. と同じ祇園地区をフィールドとして、植生消長モデルを用いた河床変動解析モデルにより、今後も継続的に礫河原再生箇所において礫河原の維持・拡大が図れる方策を示した。

- 砂州の切り下げに加えて埋戻しをすることで、平水時にも切り下げ箇所上に水が流れるようになり、左岸側へ集中していた流れを緩和することができた。
- 切り下げのみを行ったケースでは、切り下げ箇所の縦断ライン上で堆積傾向にある一方、埋戻しを行ったケースでは、ライン上のほとんどの箇所で洗掘傾向にある。これにより、平水時に切り下げ箇所内に水が流入するようになる。埋戻しを行った場合、土砂が堆積しにくいこと、平水時に切り下げ箇所上が冠水するようになったことで、植生の生育基盤の安定化を防ぎ、切り下げ箇所上で植生の入植を抑制できた。
- 解析に用いる粒度分布により、河床変動量の規模や植生の流失の様子が異なる結果となった。粒度分布の違いで結果が大きく異なるため、用いるデータは今後検討が必要である。
- 植生面積の割合をみると、切り下げのみのケースの方が6年目の割合が小さくなり、植生の流失にはより効果的であった。ただし、切り下げ箇所内においては、埋戻しを行ったケースの方が植生の入植を抑制する効果があった。
- 切り下げ箇所上に焦点を置くと、ほとんど土砂の堆積がないこと、また、植生の入植が抑制されていることから、埋戻しを行ったケースの方が施工の持続性に対して効果があったといえる。

「4. 分流部における植生管理に関する研究」では、建設が進められている百間川分流部において、計画流量規模の洪水が発生した際、植生が生長した場合の分流に与える影響を整理するとともに、適正に分流が維持できるための植生管理の方策を提案した。

- 平面二次元流況解析結果から、計画規模の洪水を適正に分流させるために、管理ゾーン①～③の植生管理を行う必要があることを示した。
- 計画の分流量を許容範囲内で維持するためには、管理ゾーン②では植生高4 m、管理ゾーン③ではヤナギが入植した段階で管理を行い、管理ゾーン①では積極的な管理を行わずによいことを示した。
- 旭川における植生の生長からみると、管理ゾーン②では植生伐採から概ね5年後、管理ゾーン③では概ね2年後に植生管理を行う必要がある。
- 流れの抵抗には植生の高さだけでなく、密生度も大きな要因となるため、管理すべき箇所に応じた密生度を設定し、解析モデルの精度を高めていく必要がある。

5.2 今後の課題と展望

本論文では、旭川の植生という観点から、大きく2つのテーマで述べた。1つは祇園地区における礫河原の再生後の評価とさらなる改善のための方策であり、もう1つは百間川分流部において、計画流量規模の洪水が発生した場合に、計画どおり適正に分流させるための植生管理方策である。本論文では、これらの研究の目的を達成するためには、十分に追及できなかった課題が残されている。

以下に、これらの課題について整理するとともに、今後の展望について述べる。

(1) アユの生息・産卵場に関する調査について

「2. 礫河原再生後の物理環境変化に関する研究」において、旭川祇園地区を対象に、礫河原再生の効果として PHABSIM による評価手法を用いて、アユの産卵場の適正について検討した。本研究では、水理解析や流況調査、水質データ、ヒアリング等からはアユの産卵場として適正であることを示したが、あくまで机上での研究であり、実際、自分たちの目で現場をみてアユの生息等を調査したわけではない。

今後は、対象地区において、礫の大きさや河床の状態、付着藻類の調査を行い本当にアユにとって適正な場所なのか、アユの産着卵や流下仔魚の調査により実際にアユが生息しているのかを、直接的なアプローチによりアユの生息状況を把握することが必要と考える。

これらの調査結果を蓄積することによって、本研究で使用したアユの選好曲線についても、旭川で適用性の評価を行い、修正していく必要がある。

(2) 河道の状態に関する調査について

河川は、洪水の発生によって、その形状が変化していくものである。旭川の当該地区においては、既往の研究から、継続的に植生の状態を現地により計測し、その情報を蓄積しているが、河道変化の把握や解析技術の向上のため、今後も引き続き、調査を行う必要がある。しかしながら、これらの調査は人的資源が必要であることから、限られた箇所でのみの調査となってしまう。より精度の高い解析モデルを構築するには、より広範囲で河道の状況をきめ細かに把握する必要があることから、UAV 等を活用して、河床高、植生高や密度等の情報を取得していくことが望まれる。

「4. 分流部における植生管理に関する研究」においては、管理ゾーンの区分を行うことによって植生の管理方策を提案したが、植生の情報は旭川の平均的な値として解析モデルにより評価している。流れの抵抗は、植生の密度が大きく関わってくることから、実際の現場に即した現地観測結果を解析モデルに与えることによって、管理基準設定の精度向上につながる事となる。

(3) 解析技術の向上について

「2. 礫河原再生後の物理環境変化に関する研究」では、祇園地区の礫河原再生箇所において、その後の中小洪水による河道の変化について、平面二次元河床変動解析モデルを用いて、

その再現を試みた。しかしながら、15.4km 右岸付近において側岸侵食とみられる著しい河床変動の再現ができなかった。この原因としては、本研究で使用したモデルでは側岸侵食を考慮しなかったことや、解析条件として与えた初期の河床材料が適正でなかったことが考えられる。今後は、よりきめ細かな現地調査結果も考慮したうえで、河床変動解析モデルの精度向上を図り、今後の礫河原再生による効果検証や河道管理に活用していくことが望まれる。

(4) 百間川分流部にける河道管理の方策について

「4. 分流部における植生管理に関する研究」においては、近年、分流部において河道形状の変化がほとんどみられなかったことから、流れの解析のみで植生管理の方策を提案した。しかしながら、計画規模の洪水が発生した際には、その流れのエネルギーが強大で、樹木のみならず、河床形状も大きく変動するものと推測される。今後は河床変動解析モデルにより、本研究で提案した管理手法の妥当性を検証していく必要がある。

また、洪水発生後には土砂の堆積や洗堀といった河床の変状や植生の状況を現地調査等によって把握し、解析モデルの精度向上に努めるとともに、本研究で提案した管理方策を検証し、必要に応じて管理方策の見直しを行っていく必要がある。

謝 辞

本論文は、岡山大学環境学研究科教授 前野詩朗先生及び同准教授 吉田圭介先生のご指導のもと実施してきた研究成果をとりまとめたものです。仕事が忙しいからという半ば言い訳的なところで、なかなか研究が進捗しない中、研究室の先生方、20 ほども歳の離れた学生達のご協力のもと、無事に 3 年間でまとめることができました。感謝の言葉が尽きません。ありがとうございました。

私の社会人大学院入学のきっかけは、前野先生からお誘いを受けたことから始まります。私は、前野先生の研究室の出身で、平成 9 年 3 月に修士課程を修了後、建設コンサルタントである株式会社建設技術研究所に就職し、長年河川計画の業務に携わってきました。大学卒業後も、前野先生の研究と同様のことを実際の業務で行っていたことから、毎年東京で開催される学会でもお会いでき、また食事にも連れて行ってもらったものです。確か、はじめて社会人大学院の話を受けたのは、平成 20 年頃だったと思います。その後、九州支社に異動となり、先生からのお誘いの決断をできないままにいたところ、先生も業を煮やされたのか、私の会社の会長に、私を社会人大学院に入れるよう勧めていただきました。さすがにこの時は、腹をくくって社会人大学院への入学を決意せざるを得ませんでした。

入学後、1 年目は、私が結婚したこともあり、プライベートで忙しく、ほとんど研究らしいことはできず、先生方、学生達に大変ご迷惑をおかけしたと思っています。そのような中、前野先生からは、「今が大事なときだから、落ち着いてからしっかり研究に取り組みなさい」と優しいお言葉をいただきました。当時は、大学院を辞めるべきなのかと悩んでもいましたが、このお言葉で少し肩の荷がおりたと思います。

研究の方では、主に、水工論文の提出に向けて、春から秋にかけて重点的に行き、ゼミ等を通じて、前野先生、吉田先生、助教の赤穂良輔先生から多大な助言をいただきました。このゼミによって、提出まできちんとした論文が作成でき、無事、査読審査に通すことができました。特に、前野先生、吉田先生からは、研究の本質的なところから、過去の経緯、研究の方向性、他の研究事例も紹介していただきながら、ご指導をいただきました。心から、感謝の意を表します。

また、平成 28 年 7 月には、吉田先生のお計らいで、学部生の講義の中で、建設コンサルタントの実務紹介として、私に時間を割いていただきました。講義のような形で話す機会のない私にとって、学生にわかりやすく、言いたいことを十分には伝えられなかったと思いますが、大変貴重な機会をつくっていただきました。話を聞いた学生の中から、今後、河川の仕事に携わり、ご活躍される方が出てくることを楽しみにしております。

本研究を成し得たのは、国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所から、航空写真や横断測量成果、河川水辺の国勢調査、旭川の整備計画等に関わる多大な資料をいただいたことに尽きます。特に、調査設計課長の千野貴彦氏、係長の赤松光氏からは、百間川分流部の計画についてご教授いただきました。また、内水面漁業協同組合の横原氏、岡山県水産研究所内水面研究室室長の

増成伸文氏，専門研究員の杉野博之氏には，旭川のアユの生息や産卵場の状況について，大変貴重な助言をいただきました．ここに記して心から謝意を表します．

もちろん，私の研究成果は，研究室の学生たちの協力があってこそのもです．旭川研究グループの松山悟君（現，姫路市），藤田駿佑君（現，株式会社ニュージェック），岩城智大君（M2），山口華穂さん（M1），小川修平君（B4）には，現地調査の段取りや実施，水理解析やその結果のとりまとめなど，多岐にわたり多大なる助力をいただきました．特に，岩城智大君には，私の在籍期間と同じ3年間をともにし，私と先生や学生の間立って，調整役となっていました．また，現地調査では，夏の暑い中，晩秋の寒い中，川の中に入って流速の観測をするなど，旭川グループ以外の学生にも手伝っていただきました．若い学生達と一緒に現地調査を行って，若者のパワーを分けてもらったような気がします．ここに記して心から謝意を表すとともに，社会人になってのご活躍を期待しています．

私が社会人大学院の在籍中に，大学卒業20周年を迎えました．社会人になってなかなか同期で会うことができなかったのですが，岡山大学准教授の小松満先生をはじめ，岡山県職員の松尾雄一郎氏，島本則雄氏，小田剛氏，大山貴史氏らのお計らいで，同期会を開催することができました．ここに記して心から謝意を表します．今後も継続して同期との交流を深めていければと思っています．楽しかったです．

株式会社建設技術研究所には，私の社会人大学院入学にあたって，いろいろと支援をいただきました．前九州支社長の山本雅史顧問には，私が前野先生からのお誘いの回答に悩んでいるときに，力強くプッシュしていただきました．「うらやましいな．私だったら，喜んで返事するよ．」というお言葉をいただき，私自身，社会人大学院入学を決意した次第です．また，私の所属する九州支社河川部には，中島隆信部長をはじめ，部員のみなさんにフォローしていただきました．特に，水工論文提出前の9月頃には，会社を不在することが多く，業務の遂行等に変惑をおかけしました．ここに記して心から謝意を表します．

プライベートな面では，岡山にいる両親や妻には感謝が尽きません．私が泊りがけで大学に向いているときに，父には毎朝，車で大学まで送っていただき，母には料理を作ってください，実家に滞在する時間は短く，親孝行をすることもなかったのですが，いつも優しく接してくれました．また，妻には，平日は仕事で帰りが遅く，休みの日には論文作成と，気が滅入っているときに，いつも心の支えとなってくれました．この論文の提出が終わり，仕事の方も繁忙期が終わったら，一緒に温泉にでも行ってゆっくりしたいものです．本当にありがとうございました．

最後に，私の至らぬことが多い中，無事に論文を提出できたことは，前野先生，吉田先生をはじめとする研究室の皆様方，株式会社建設技術研究所の皆様方，その他大勢の方々のおかげです．ここに感謝の意を込めて，心から御礼申し上げます．