

博士論文

河岸浸食を含む河床変動解析の高度化のための
最適計算格子サイズと動的計算格子の適用に関する研究

令和2年9月

田 中 龍 二

岡山大学大学院

環境生命科学研究科

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的と既往研究との関係	6
1.3 論文構成	8
第2章 河床変動に関する予備実験	10
2.1 はじめに	10
2.2 水路模型の概要と実験条件	12
2.3 実験結果及び考察	16
2.4 まとめ	21
第3章 河床変動の計算精度の検証と最適計算格子幅の検討	22
3.1 はじめに	22
3.2 解析の概要と計算条件	23
3.2.2 基礎式	26
3.2.3 河床変動解析モデル	28
3.3 計算結果と考察	33
3.4 まとめ	42
第4章 三角形計算格子を用いた最適計算格子幅の検討	44
4.1 はじめに	44
4.2 三角形計算格子による河床変動計算の概要.....	45
4.3 まとめ	56

第5章 動的計算格子を用いた河床変動計算の高精度化	57
5.1 はじめに	57
5.2 動的な格子サイズによる河床変動計算の概要	58
5.3 計算結果と考察	60
5.4 まとめ	67
第6章 結論	68
6.1 本論文の結論	68
6.2 今後の課題と展望	70

第1章 序論

1.1 研究背景

(1) 洪水災害と河川管理

近年、集中豪雨や台風による浸水被害が全国的に多発しており、岡山県においても、2018年7月に発生した豪雨により倉敷市真備町を代表とする多くの氾濫原が浸水した。この要因として、まだ不明な点も多いが、温暖化による気候変動が考えられており、温暖化が進めば、強い熱帯低気圧の発生数は増加し(熱帯低気圧自体の発生頻度は減少)、今まで経験してきた規模以上の出水が発生する可能性がある。特に、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)¹⁾では、100年間の気温上昇シナリオを提示しており、0.3~4.8℃の気温上昇を予測している(図 1.1.1)。

河川管理において、大きな出水に対して十分な流下能力を確保し、決壊等が生じないように堤防や河川構造物等の設置や管理、補修が必要となる。ただし、堤防の整備には数年~十数年もの時間を要するため、現況河道の維持管理やソフト対策が目下の課題となる。例えば、河道内の樹林化による河積阻害や流木被害、基礎工や根固工周辺の河床洗堀等による耐性低下などが代表的な問題で、河道内樹林の伐採や土砂の掘削・盛土などが既に全国的に実施されている。

岡山市を流下する一級河川旭川では河道内の樹林化が深刻である。河道内に草木が繁茂することで河積阻害や粗度上昇による水位の上昇が発生し、堤防からの越水や破堤氾濫が生じる可能性がある。また、流木被害も懸念されており、2013年7月に発生した豪雨では山口・島根の中上流域で大きな浸水被害が発生した際、橋梁の橋脚や欄干に流木などを集積し、橋梁の破損や塞き上げによる氾濫が確認された(図 1.1.2)。さらに、旭川においては、旭川の放水路である百間川への分流部は固定堰であり、水位上昇とともに分流が開始される自然分流が行われるため、植生の繁茂状態によっては計画通り分流が行えず、旭川の下流にある岡山市市街地での洪水氾濫リスクが高まる恐れがある。

このように、大きな出水に対して十分な河積を確保すること、流木による塞き上げや河川構造物等への被害を軽減することなど、河道内の植生を管理することは重要といえる。ただし、毎年のように繁茂する草木を伐採することは作業量やコストにおいて困難であることから、伐採するタイミングや範囲を限定して行わなければならない。

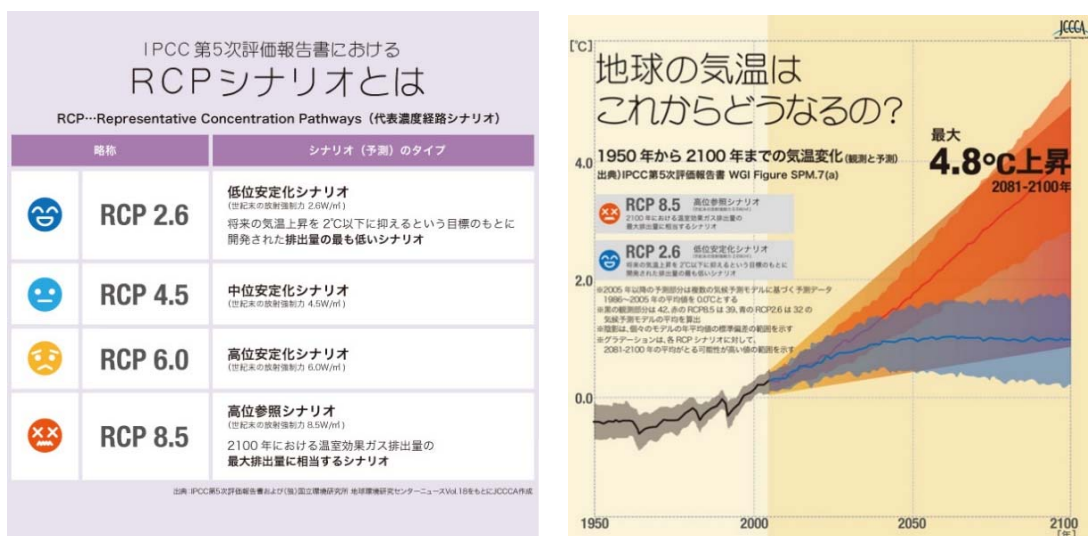


図 1.1.1 IPCC(第5次評価報告書(2013年))による気温予測



図 1.1.2 2013年7月28日未明から発生した豪雨による山口・島根の流木被害
(山口県阿武川阿東徳佐鍋倉付近)

(2) 既往研究の課題

前述の問題に対し、前野ら²⁾や平井ら³⁾は、岡山県旭川を対象とした河床変動や植生消長を考慮したシミュレーションを実施し、植生管理や植生による旭川放水路である百間川への分流量への影響などについて検討を行った。礫河原再生や樹木管理に関する提案を行うことを目的とした、河床変動や植生消長モデルの計算精度が向上することで、将来の洗堀・堆積や植生繁茂状況を踏まえた水位上昇の予測、樹木伐採や浚渫等を行う適切なタイミングや範囲を見極めることができるようになり、河川管理に有効な指標を示すことができる。なお、旭川は1950年代までは礫河原が多く存在していたが、建設された旭川ダム(1954年～)、湯原ダム(1955年～)による土砂供給量が減少し、さらに1960年代の土砂採取による河床の攪乱作用の低下で河道内の樹林化が進行していることが指摘されている⁴⁾。

平井らの研究によると、平水時に冠水しない砂州上の洗堀・堆積を良好に表現しているが、河岸浸食の進行や移動土砂量の再現ができていない課題を示している。再現性が確保できていない範囲は、図 1.1.3 に示した旭川祇園地区の砂州(15k4 右岸、赤破線周辺)で、湾曲する滯筋の外岸側に位置しており、河岸浸食と出水時の河床洗堀により2012年には砂州を横断する水路(橙矢印)が生成された箇所である。再現性が確保できない要因として、河岸浸食範囲に対して数値解析の対象範囲が広域で、計算機資源の都合上、計算格子幅を小さく出来なかったことに加え、出水による河岸浸食箇所の冠水の有無が解析の再現性に影響したことが考えられる。特に、既往研究で報告されている河床変動や斜面崩落モデルを当該範囲に適用する際に、どの程度の解像度であれば再現性が確保できるかについて明瞭な基準が示されていない。

一方、既往研究の河床変動については、河岸浸食に関する実験・数値解析や、動的な計算格子による計算負荷の低減を行った成果が報告されている。河岸浸食に関する研究では、置土や複断面水路の河岸浸食を実験的に明らかにし、また数値解析では斜面崩落モデルを構築することで水際の浸食を再現している。ただし、旭川でみられた砂州上の浸食・洗堀のように、洪水時に砂州の冠水有無が変化する状態における検討はみられないため、同条件下の河岸浸食特性を明らかにする必要がある。また、計算負荷の低減については、河床勾配が急な斜面に対して動的に格子分割する KMR-MB(Kinematic Mesh Reconstruction - Movable Bed)法によって、河床変動計算の計算精度向上を示しているが、具体的な指標は示されていない。そのため、再現性を確保するために必要な格子幅や格子を細分する範囲を明らかにする必要がある。また、KMR法は四角形計算格子を細分する手法であるが、現地適用を想定すると橋脚や水制など局地的な地形を再現しやすい三角形計算格子を用いたほうが都合がよい。そのため、航空機周辺の乱流計算や沖から海岸までを対象とした津波解析などに適用事例のある三角形計算格子を動的に格子分割する AMR(Adaptive Mesh Refinement)法を適用する。なお、AMR法を河床変動計算へ適用した事例はみられない。

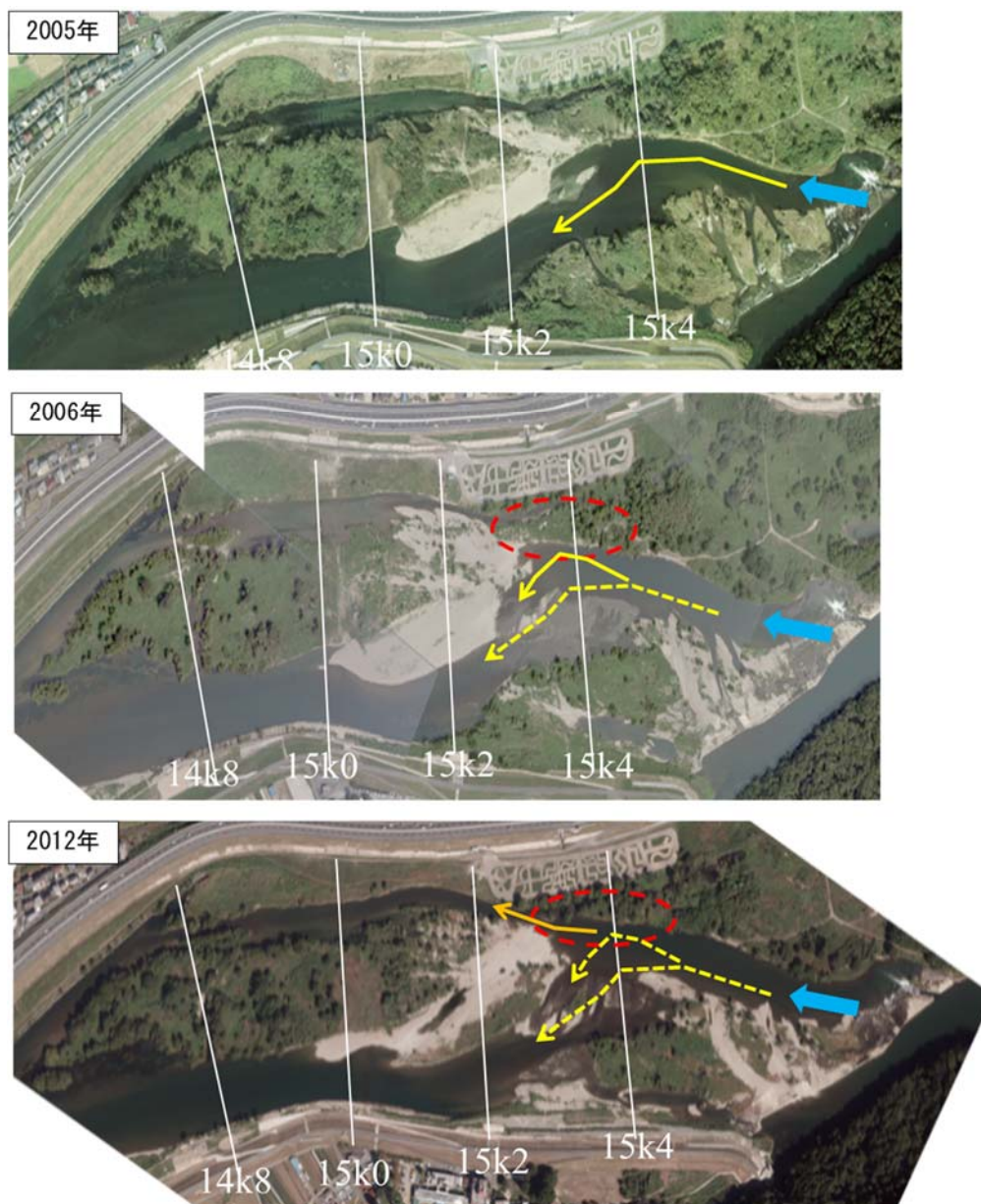


図 1.1.3 旭川祇園地区における航空写真(2005年～2012年)

(3) 研究方針の概要

植生消長を考慮した将来予測を行うには、まず流れの再現性を向上させる必要がある。また、河床変動を考慮した数値解析では、流れの再現だけでなく、出水によって変動する河床地形を精度良く再現する必要があるが、砂州の河岸浸食や計算格子幅に前述のような再現性の制約がある。以上を踏まえ、下記に研究方針の概要を示し、詳細は「1.3 論文構成」に記述した。

本研究では、第1段階として浸食箇所の冠水の有無が河岸浸食速度や浸食量に及ぼす影響を実験的に明らかにするとともに、河岸浸食に必要な計算格子幅の検討を行った。特に、砂州において、水位の低いときは河岸浸食のみ、水位の高いときは洗堀・堆積により浸食されているため、その特徴を模型実験と数値解析により整理した。

さらに、出水量の変動とともに河岸浸食が生じる範囲が移動することを踏まえ、河岸浸食範囲を追跡できる動的な計算格子について数値解析モデルを構築し、検討を行った。動的な計算格子は、航空力学や海岸工学(津波の伝播計算)で適用事例のあるAMR(Adaptive Mesh Refinement)法を適用した。これより、三角形非構造格子を動的かつ局所的に分割することで、計算精度が確保できる格子幅・格子数でありながら、計算時間がより短縮できる計算効率が高い、河岸浸食に求められる最適な計算格子を検討し、その有効性を示した。

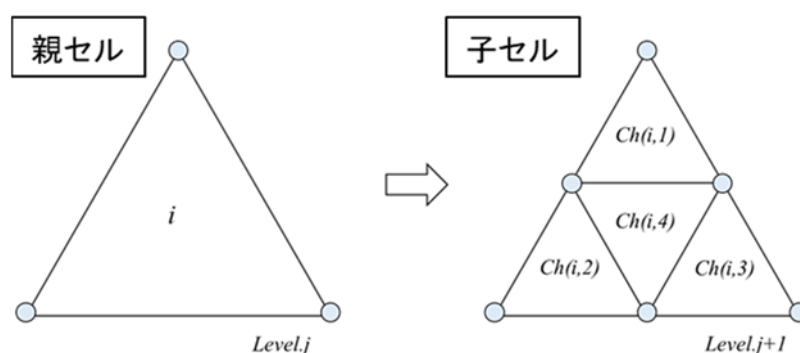


図 1.1.4 AMR 法による格子分割のイメージ

1.2 研究目的と既往研究との関係

河床変動計算においては多くの既往研究が報告されており、その中の、河岸浸食に関する研究についても実験や数値解析による研究が数多く確認される。櫻井ら⁵⁾は、ダム下流河道における置土の浸食過程について模型実験と現地観測により、置土の浸食状況や浸食過程を明らかにした。なお、置土は水深に対して十分に高いため、高水敷(置土の天端)は冠水しない条件である。また、前嶋ら⁶⁾は、現地スケールの河床材料を用いた現地実験を行い、複断面河床で生じる河床変動特性について言及している。ケースごとに定常流量を変化させ低水路のみと高水敷も冠水する流れを再現しているが、低水路のみを流れるケースでは河床変動量が小さいため、低水路側岸の河岸浸食に関する知見としては十分ではない。数値解析では、長谷川⁷⁾、長田ら⁸⁾、関根⁹⁾は河床変動解析に河岸浸食を組み込んだモデル(以降、斜面崩落モデル)を提案しており、河岸浸食幅より小さい解析格子を用いて再現性を確認した。河岸浸食は様々な側面から考察されているが、基本的に水域と陸域は区別されており、水位変動によって時々刻々と浸食箇所が冠水していく状況を考慮した研究は見られない。以上より、旭川の砂州上の水路は、平水時には陸域で斜面崩落による浸食、出水時には砂州が冠水することによる河床変動を考慮する必要があるため、河岸浸食と斜面崩落の再現性を確保できる計算格子幅については検討が必要である。

従来の現地を対象とした数値解析では、計算機への負荷を考慮して、河床材料のスケールに対して十分大きな計算格子幅を設定することがある。計算格子幅が大きくなることで、例えば、河床変動に必要な解像度が得られない、計算格子幅以下の局所的な勾配を考慮できない、側岸勾配が緩勾配となり斜面崩落による河岸浸食が生じなくなるなどにより、河床変動計算の再現性低下を招く。対策として、並列計算や高性能な計算機を使用するハード対策が考えられるが、本質的な解決方法ではない。また、コスト面の制約により一般的な計算機を用いる場合、GPU(Graphics Processing Unit)を用いた並列計算技術^{10),11),12)}を使うこともあるが、解析の対象範囲が大きくなればそれに比例して計算時間がかかってしまう。ソフト対策としては、局所的に計算格子を細分し、計算格子数を節約する手法が挙げられる。例えば、河道の分合流部や津波解析の海岸沿いなどを細分し、直線水路区間や沖合に大きな計算格子幅を設定することで、計算負荷を軽減しながら、計算が複雑な場所や着目したい場所の計算精度を向上させることができる。星野ら^{13),14)}は水理学的に複雑な処理が必要となる計算格子境界部の接続のある水路分岐や、適用範囲のスケールに対して表現しにくい河道湾曲部や海岸沿いに対して、計算精度向上のために四分木構造格子を適用し、局所的な流況を再現できる有効性を示している。また、上野ら¹⁵⁾は、津波の遡上波先端部におけるダム崩壊流れの水理実験と数値解析を実施し、特に、フルード数1前後が混在する常流・射流域において不連続は面が発生する場に四分木構造格子を適用し、流況特性を定性的・定量的に再現・評価できることを示した。四分木構造格子は、基本となる四角形計算格子をさらに2×2の4分割し、計算精度が確保できるのに必要なサイズまで分割することができる。ただし、護岸等の壁沿いや湾曲部の滯筋などように対象範囲が固定されている必要がある。旭川の河床変動計算のように、砂州水際の出水に合わせて冠水範囲が移動する場合は、分割する計算格子の範囲が広大となるため、計算機資源が不足すると懸念される。

このように、固定計算格子では極端な空間スケールの変化に対応させるのは困難である。これ

らの課題に対して、時間的に計算格子を変更する検討も行われており、曾ら¹⁶⁾は、非構造三角形格子及び動的に計算格子幅を変動させる AMR(Adaptive Mesh Refinement)法を用いて、津波の再現計算の高精度化と AMR 法を適用した際の有効性について、津波伝播の検証計算を行い、水位が大きく変動する範囲を追跡することで計算負荷と計算誤差を抑制したことを確認している。このように、計算格子幅を動的に変動させ、流れの計算ではあるが再現性を向上させた事例がいくつも確認できる。さらに、木村ら¹⁷⁾は動的マルチレベル格子法(KMR-MB(Kinematic Mesh Reconstruction - Movable Bed)法)による河床変動計算モデルを構築し、直線水路の交互砂州に関する模型実験の再現計算を実施した。河床の凹凸を平均曲率で定義して格子分割基準パラメータとして設定し、砂州の峰や谷部分で洗堀が進行するにつれて計算格子が分割されていくことを確認した。また、交互砂州の周期が KMR 法と細かい固定格子と概ね一致していることを示した。ただし、本研究ではデカルト座標系の四角形計算格子を用いていることから、実河川のような複雑な地形や河川構造物周辺を再現するためには、オリジナルの計算格子を初期段階から細かくする必要があり、計算効率が低下する恐れがある。また、実験的な流れ場での基礎的な検証に留まっていることから、現地適用を想定した局所的な洗堀・浸食や砂州の冠水有無が発生する場合などへの適用性の検証が必要である。

1.3 論文構成

本論文の構成について、以下の内容について整理した。

(1) 第1章「序論」

本研究の目的と背景，既往研究との関係について整理する．要点を以下に示した。

- ・平井らの研究では，岡山県旭川における数値解析による再現計算において，出水後の河床変動が十分に再現できない箇所がある．特に，水位上昇で砂州が冠水する過程での河岸浸食過程に関する知見が少なく，課題を解消するために検証が必要である．
- ・動的な計算格子を用いた河床変動計算の既往研究は確認できるが，デカルト座標系(四角形計算格子)を用いているため，実河川のような複雑な地形に対しては計算効率が低下する．
- ・三角形計算格子の動的な計算格子を用いた計算は，津波解析で用いられているが，河床変動解析に適用した研究は見られない．なお，三角形計算格子を用いることで，複雑な地形や河川構造物周辺を柔軟に表現することができる．

(2) 第2章「河床変動に関する予備実験」

旭川の対象区間を想定した模型実験を行い，砂州(高水敷)の冠水の有無による以下の河岸浸食特性について検証する．

- ・横断方向の浸食幅
- ・低水路側岸斜面の勾配の変化
- ・水制形状(湾曲部の形状)による浸食過程の差異

(3) 第3章「河床変動の計算精度の検証と最適計算格子幅の検討」

第2章の模型実験の再現計算を行い，計算格子幅が河床変動や河岸浸食に与える影響について検証する．また，再現性を確保するために必要な計算格子幅や，細かい計算格子幅が必要とされる範囲についても検証する．

(4) 第4章「三角形計算格子を用いた最適計算格子幅の検討」

第3章で得られた知見をもとに，まずは固定格子を用いて，計算格子を分割する範囲を限定し，計算精度を維持したまま計算効率を上げることが可能かについて検討する．特に，後述の動的な計算格子を適用させることの有効性について整理する．

(5) 第5章「動的計算格子を用いた河床変動計算の高精度化」

第3章および第4章の知見に基づき、動的な計算格子を用いた河床変動計算を実施する。ここでは、水制や高水敷等を柔軟に表現できる三角形計算格子を用いることとし、AMR法によって格子を分割させる。格子分割パラメータとして河床勾配を設定し、河床変動計算の再現性について検証した。特に、実河川に本モデルを適用することを想定して、本モデルの砂州(高水敷)の冠水の有無による河岸浸食過程とその適用性および有効性について考察する。

(6) 第6章「結論」

本研究で得られた成果を整理し、課題と今後の展望について述べる。

第2章 河床変動に関する予備実験

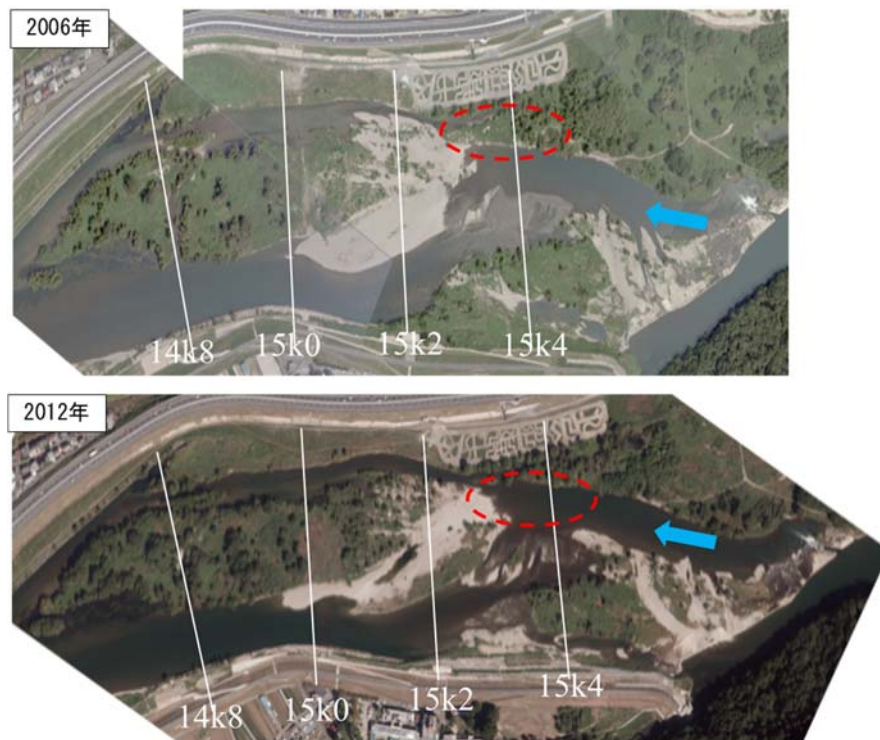
2.1 はじめに

岡山市を流下する旭川では、1950年代に湯原ダム、旭川ダムの建設、1960年代以降には砂利採取により河床材料の攪乱が大きく減少したため、旭川で見られていた礫河原が消失し、砂州の固定化と樹林化が進行した。その後、 $1,000\sim 3,000\text{m}^3/\text{s}$ 規模の出水を受けて、河床変動及び河岸浸食により滯筋や砂州の形状が徐々に変化している。2009年の定期横断測量時には、旭川祇園地区において砂州を横断する水路が出現した。

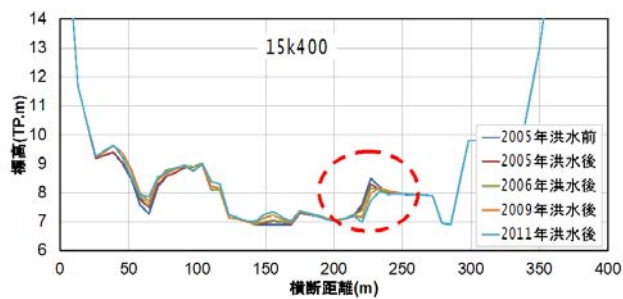
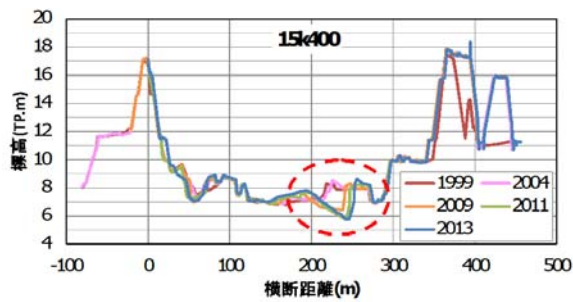
河床変動を考慮した数値解析では、砂州を横断する水路を再現させるために、①砂州が冠水していない状態での低水路側岸の斜面崩落(河岸浸食)、②水位が上昇し砂州が冠水している状態での河床変動を考慮する必要がある。まず、平水時には砂州は冠水していないため、斜面崩落による河岸浸食により砂州が浸食される。数値解析の斜面崩落モデルでは、側岸方向に隣り合う計算格子の河床勾配が河床材料の安息角を超えた場合に斜面崩落が発生するため、計算格子幅が大きい場合は計算格子幅以下の局所的な急勾配が表現できず、また、計算格子間隔の緩勾配となり、斜面崩落が生じにくくなる。次に、水位上昇に伴い砂州が冠水した場合、砂州の浸食は低水路等に適用される河床変動計算が行われる。河床変動計算は、河床材料の粒形ごとに算出される掃流力が限界掃流力を超過する場合に、掃流砂量式に準じ土砂輸送が行われ、河岸浸食が進行していれば、砂州の中ほどまで滯筋が拡大しているため、より洗掘されやすい環境となる。斜面崩落同様に、計算格子幅が大きいと局所的な地形を再現できないため、地形自体が平滑化されており、砂州上に発生する水路のような地形を再現することが難しい。

平井ら³⁾は、当該地区を含む河床変動計算を実施し、砂州上の洗掘・堆積の傾向をある程度まで表現したが、砂州を横断する水路周辺で移動土砂量が十分に再現できていない(図 2.1.1)。その要因として、再現性を確保できるほどの計算格子幅を設定できなかったことが考えられる。特に、対象範囲が当該地区周辺で川幅 300m 程度、河道延長が数 km と広域であることや、1度の出水に1日程度継続(長期化)することなど、数値解析の現地適用には多くの時間を要する。また、既往研究において砂州冠水の変化に伴う河岸侵食特性が示されていないことも、再現性を確保できない一因であると考えられる。

以上を踏まえ、本章では、砂州を模した低水路側岸の浸食過程に着目した、模型実験を行うこととした。旭川を模した模型水路において、低水路のみを通水するケースと、高水敷が冠水するケースを設定し、砂州(高水敷)の冠水の有無による河岸浸食特性を明らかにすることとした。なお、最適な計算格子幅の検討については、後続の第3章に記述した。



(a) 砂州を横断する水路(旭川祇園地区)



(b) 定期横断測量結果

(c) 解析結果

図 2.1.1 低水路側岸における河岸浸食の再現性の問題箇所³⁾

(赤丸：再現性が確保できない箇所)

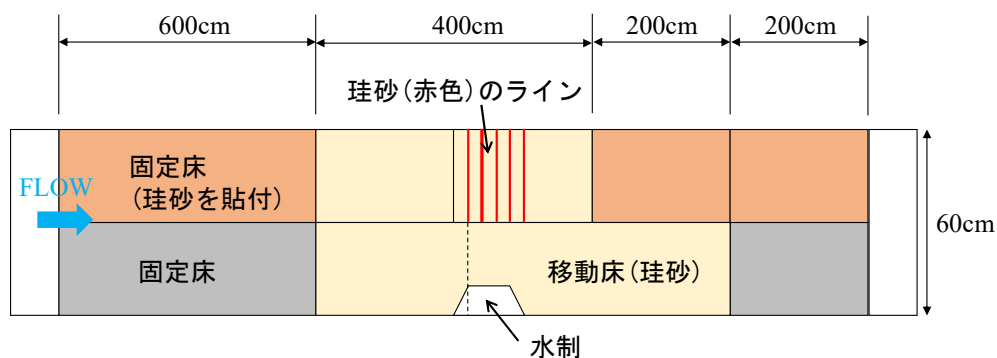
2.2 水路模型の概要と実験条件

(1) 水路模型

実験水路は、図 2.2.1 に示すように幅 0.6m、長さ 14m、勾配 1/500 の矩形断面の直線水路を用いた。水路は、上流端から 6m 下流に位置する 4m 区間を移動床、その上下流を固定床とした。右岸側 20cm を低水路、左岸側 40cm を高水敷及び低水路側岸斜面(高低差 3.8cm、側岸方向の勾配 30°)とした(図 2.2.2)。

移動床は平均粒形 $d_m=0.88\text{mm}$ 、比重 2.6 の 4 号珪砂を敷き詰めた。なお、固定床はペンキで塗装した木材を基本とするが、固定床から移動床に切り替わる区間、特に高水敷のある左岸側で大きく洗堀することを防ぐために、図 2.2.3 のように固定床の表面に珪砂を張り付け、区間の境界で粗度が大きく変化しないようにした。また、側岸浸食が生じる範囲よりさらに 2m 上流まで移動床としたため、給砂は行わない。なお、通水中の浸食過程を確認するために、図 2.2.1 に示した計測位置に、赤色で着色した珪砂を幅 1cm、深さ 3cm、20cm 間隔で配置した。

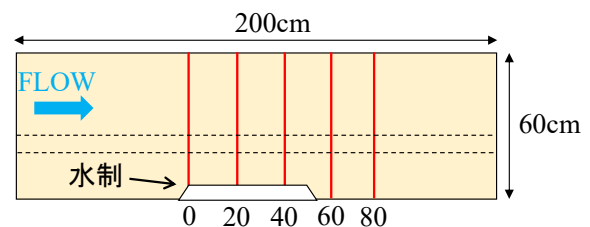
蛇行部の河岸を再現するために、上流端から 8.5m 位置の右岸側に、非越流水制を設置した。水制は、図 2.2.4 に示した幅 7.5cm、長さ 50cm、右岸側壁から角度 30° と 60° の 2 種類を設定し、左岸側の低水路側岸に向く流れ(河道の湾曲)を再現した。



(a) 実験水路の概略図



(b) 実験風景



(c) 浸食過程確認用の赤色珪砂

図 2.2.1 実験水路

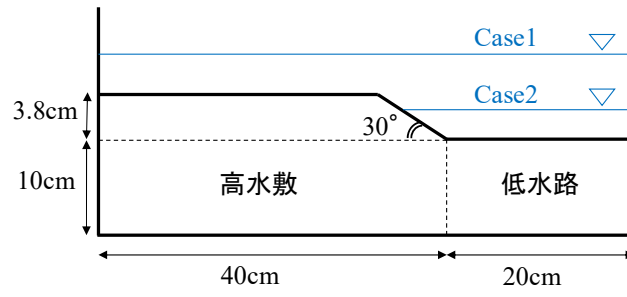


図 2.2.2 横断形状

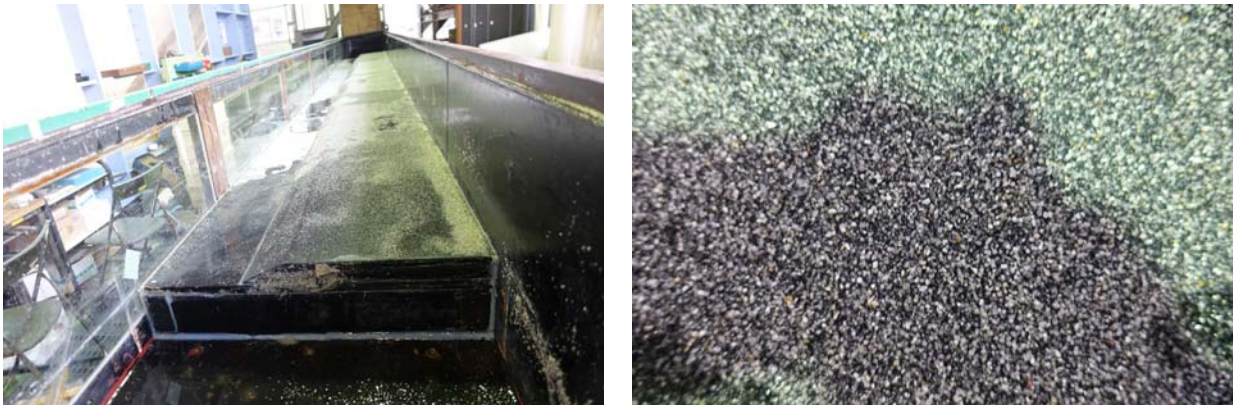


図 2.2.3 固定床に河床材料を張り付けた様子

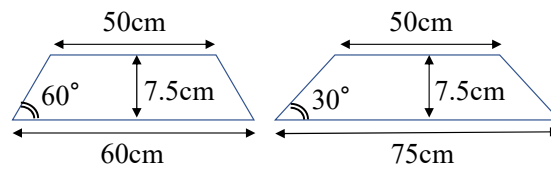


図 2.2.4 水制の形状

(2) 実験ケース

模型実験ケースは表 2.2.1 に示したように、2 種類の水制に対し、2 種類の流量を上流端に与えた計 4 ケースとした。流量を変更することによって、Case1 は出水時を想定した高水敷も流下する流況、Case2 は平水時を想定した低水路のみを流下する流況を再現している。

実験時間として、1 ケースごとに河岸浸食が概ね収束する 15 分間通水させた。なお、実験の再現性を確認するために、それぞれのケース 2 回ずつ実施した。

表 2.2.1 模型実験ケース

Case	流量 (L/s)	水制角度 (°)	河床勾配	水面幅 (m)	等流水深 (m)
1-1	6.0	30	1/500	60.0	0.059
1-2		60			
2-1	1.5	30		25.0	0.029
2-2		60			

(3) 計測方法

通水後の河床変動量の面的な分布を計測するために、排水後に写真測量およびポイントゲージによる河床高の横断分布を測量した。

写真測量は、初期低水路河床高から 75cm の位置に設置したカメラで、縦横断方向にオーバーラップ率が 80%以上となるように、10cm ずつずらした画像を複数枚撮影(図 2.2.5)し、Agisoft 社の PhotoScan(現 MetaShape)を用いて、水平方向分解能約 1.0mm の DSM(Digital Surface Model)を作成した。撮影範囲は、水制を中心とした 2m 区間とした。

図 2.2.1 に示した 5 断面(水制上流端より 0cm~80cm 区間に 20cm 間隔で配置)についてポイントゲージによる測量を実施した。各断面の横断方向の測点分解能は約 1cm を基本とするが、低水路のみを通水する Case2 であれば高水敷の地盤高は変動しないため、高水敷である左岸側の計測箇所を間引いた。ポイントゲージによる測量により、20cm 間隔の横断図を計算するほか、面的に計測した写真測量の計測誤差の精度検証にも用いた。なお、PhotoScan による地形計測は、ドローン等を用いた現地形への適用事例は報告されている^{18),19)}が、模型実験スケールへの適用は見られなかったため、精度検証を行った上で使用することとした。

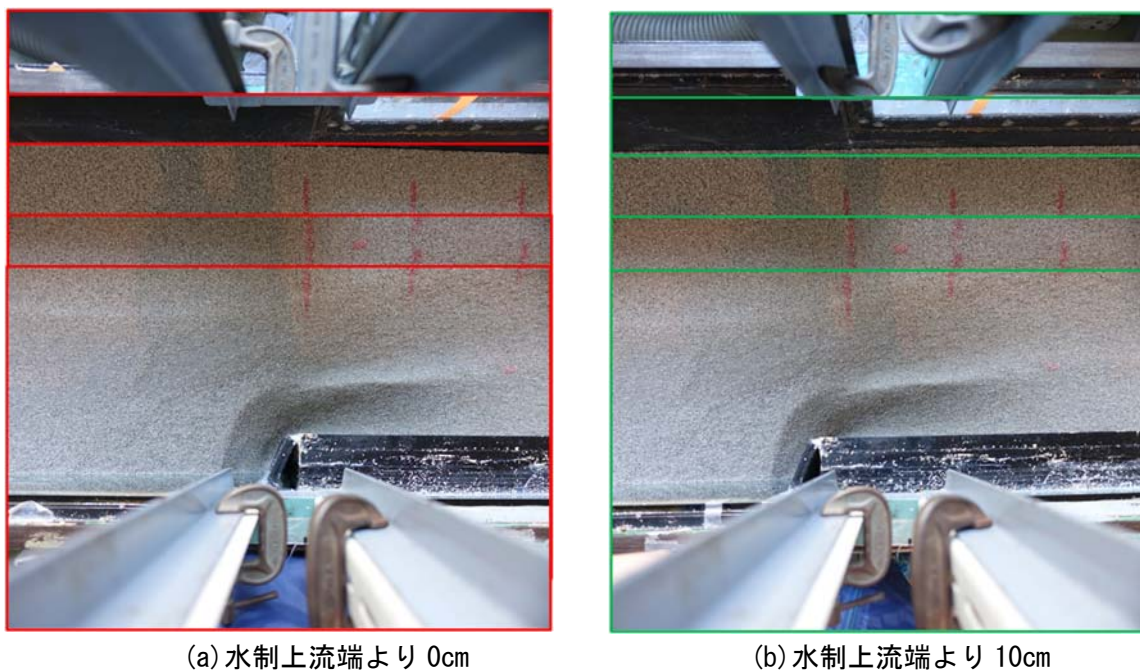


図 2.2.5 PhotoScan 用の写真撮影イメージ

(横断方向に、右岸から 10cm~50cm の 5 枚を撮影し、オーバーラップさせる。
さらに、縦断方向 10cm ごとに撮影し、河床地盤高を作成する)

2.3 実験結果及び考察

(1) 通水後の河床状態

図 2.3.1 に各ケースの通水後の河床状態を示した。Case1 は高水敷(写真上面)も冠水するため、高水敷を含めて赤色の着色砂が大きく流動しており、高水敷の半分程度(右岸から 45cm 程度)まで河岸浸食が達していることが分かる。一方、低水路のみを流下する Case2 の場合の浸食範囲は Case1 よりも小さいが、水制による変流の影響を受けて河岸が浸食している。浸食の横断幅は数 cm 程度以内で、河岸浸食は安息角を保つように洗堀・崩落を繰り返しながら進行すると考えられる。なお、水制周辺で大きく洗堀しているが、本研究において、水制はあくまで河道の湾曲部を表現するために設置したものであるため、ここでは言及しない。

水制角度が 60° の Case○-2 は、高水敷に向かう流れがより強く、各ケースともより顕著に左岸側に浸食していることが分かる。ただし、Case2 と比較して Case1 の浸食はより顕著であることから分かるように、水制角度の影響よりは高水敷の冠水有無による影響の方が大きい。

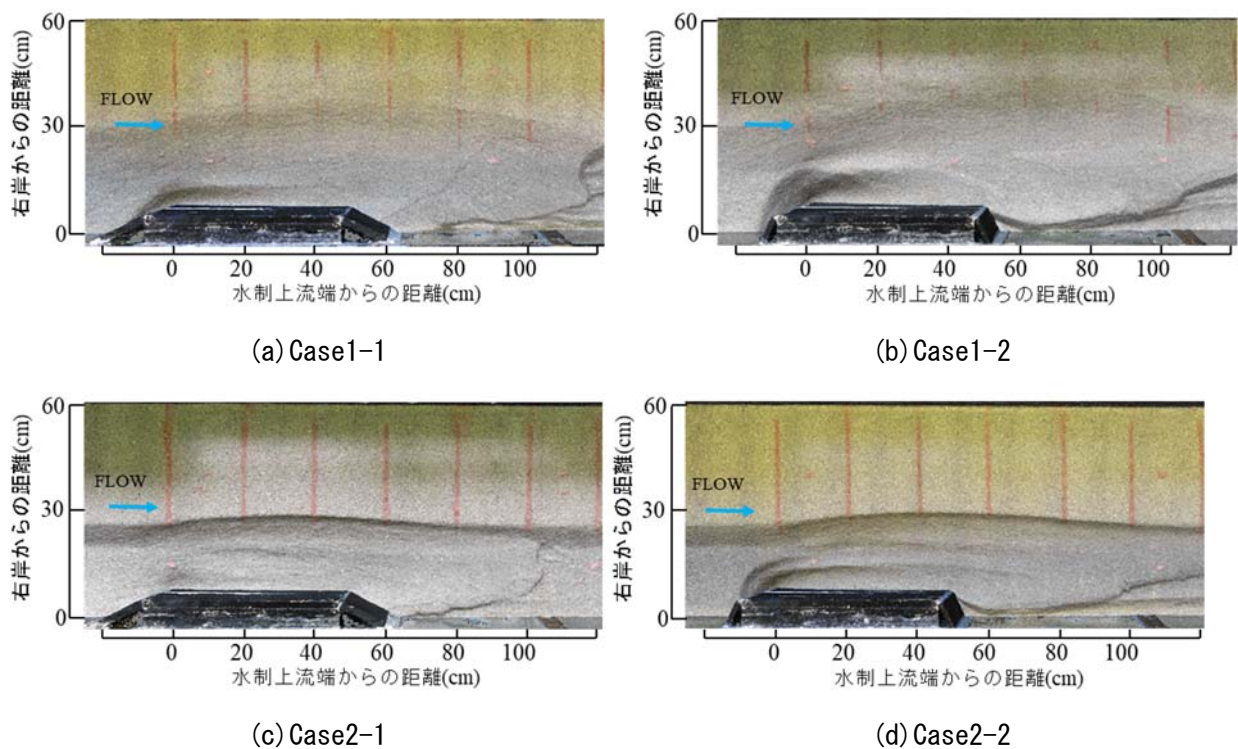


図 2.3.1 通水後の河床状態

(Case1 : 高水敷も冠水, Case2 : 低水路のみ通水)

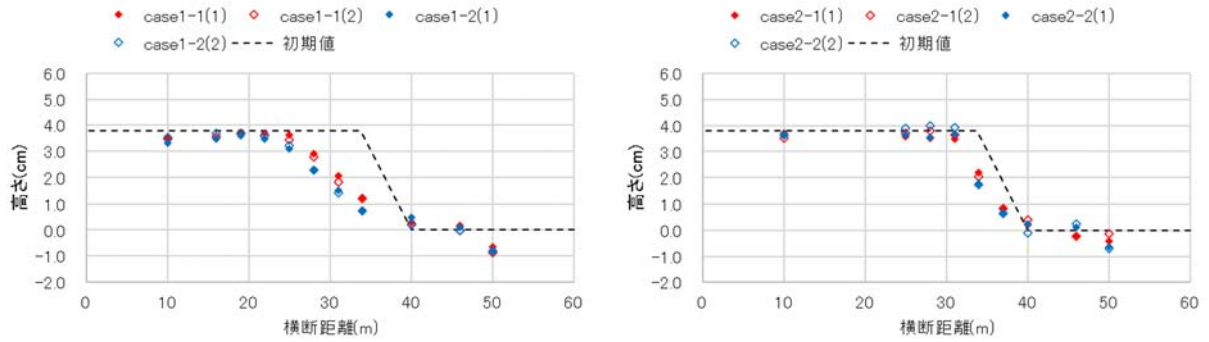
(2) 横断形状

図 2.3.2 に水制上流端より縦断方向に 20cm, 40cm, 60cm, 80cm の横断面図を示した。破線は初期地形を示しており、ケース名の括弧の数字は実験回数である。①横断方向の浸食幅、②低水路側岸の勾配、③水制形状の違い、に着目し、浸食箇所の冠水の有無が河岸浸食速度や浸食量に及ぼす影響について検討した。

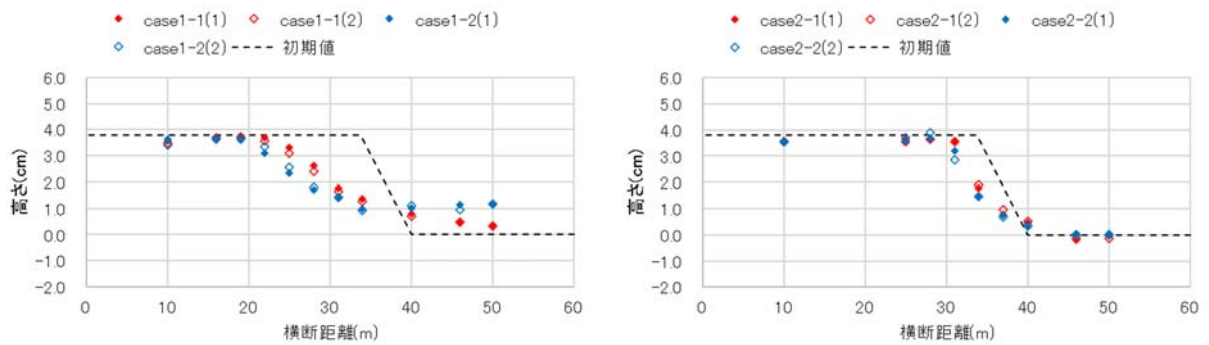
横断方向の浸食幅について、低水路のみを通水する Case2 と比較して、高水敷が冠水する Case1 は浸食幅が 10cm 程度左岸側に広がり、高水敷の半分まで浸食が達していることがわかる。また、Case1 では斜面崩落だけではなく河床変動が生じていることから、より幅広く高水敷(低水路側岸)を浸食しているのに加え、浸食・洗堀された土砂が低水路に最大 2cm 程度堆積している。

低水路側岸の勾配は、Case1 で約 1/5, Case2 は約 2/5 となっている。低水路のみ通水する Case2 は、低水路側岸周辺が洗堀されることで、河床材料の安息角を超え、側岸斜面が崩落している。そのため、側岸の勾配は概ね河床材料の安息角程度を維持するように浸食される。一方、Case1 は低水路側岸の斜面崩落の他に、安息角より緩勾配の状態でも、冠水した側岸斜面が流速方向に土砂輸送している。

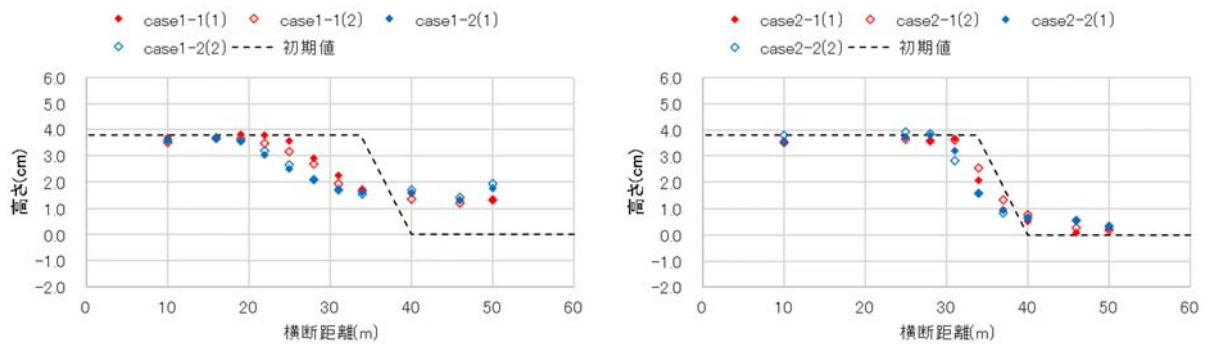
水制形状の違いは、水制角度 60° の方が高水敷に向かう流れとなり浸食幅も大きい。Case1 で地盤高が最大 5cm 程度の差異となるが、Case2 では最大 1 cm 程度となり Case1 ほどの浸食幅は見られなかった。なお、高水敷に向かう流れにより、低水路側岸の浸食が促進されているが、本実験では水制角度を 2 種類設定しただけで、与条件が十分ではない。より詳細な影響を検証するには、水路幅と水制幅の比や、高水敷と低水路の水深の比を変えた実験を行い検討する必要があると考える。



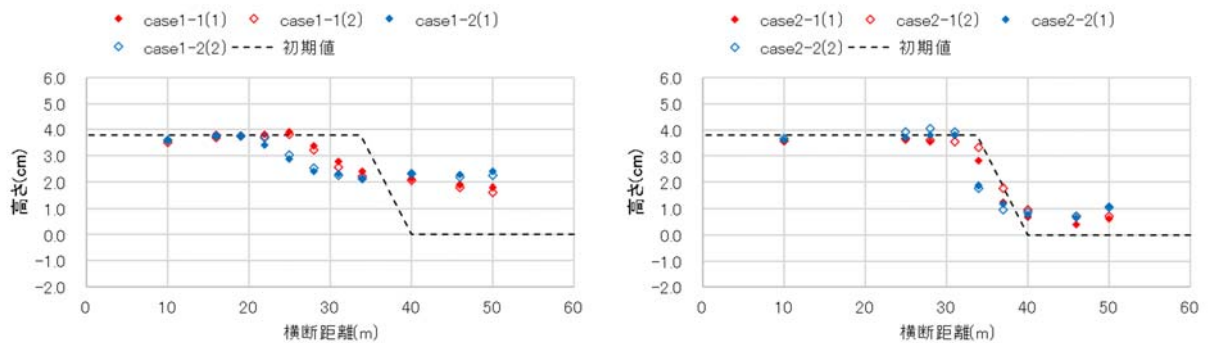
(d) 縦断距離 20cm



(d) 縦断距離 40cm



(d) 縦断距離 60cm



(d) 縦断距離 80cm

図 2.3.2 横断形状

(左図 : Case1, 右図 : Case2) (括弧 : 実験の回数)

(3) 写真測量の精度検証

表 2.3.1 に各ケース・各断面の実測値と写真測量値の平均誤差, 図 2.3.3 に実測値と写真測量値の相関図を示した. また, 図 2.3.4 に縦断距離 40cm と 80cm の横断形状について, ポイントゲージによって計測した実測値と写真測量から作成した横断を重ねて示した.

水制上流端からの距離が 0cm の右岸側は水制の影響で大きく深掘れしたためか, 比較的誤差が大きく, 20cm~80cm に比べて平均誤差が 4~7cm 大きくなっている. なお, Case1 に比べて Case2 の平均誤差が大きくなっているが, 特徴的な傾向がみられないため, 本実験の条件下で判断するのは困難である. ただし, 実測値と写真測量の全体的な平均誤差は 0.077cm であり, 十分な計測精度を有しており, 横断形状からも, 実測値(プロット塗りつぶし)と写真測量の値(プロット白抜き)はほとんど一致している. このように, 上流端の流量や水制形状など, 流況が異なるケースごとの計測において計測精度に大きな誤差が生じていないことから, 本研究における写真測量の正確性が示された.

以上より, 後述する数値解析値との比較では, 写真測量による地盤高を実験の真値として使用することとした(以降, 写真測量値も“実験値”と表記する).

表 2.3.1 各ケース・各断面の平均誤差(実測値と写真測量の差) [単位: cm]

		水制上流端からの距離					
		0cm	20cm	40cm	60cm	80cm	平均
ケース名	実験回数						
Case1-1	1	0.053	0.038	0.069	0.061	0.081	0.059
	2	0.076	0.042	0.048	0.068	0.053	
Case1-2	1	0.163	0.067	0.089	0.073	0.046	0.074
	2	0.158	0.041	0.037	0.032	0.035	
Case2-1	1	0.136	0.066	0.052	0.068	0.050	0.082
	2	0.119	0.105	0.118	0.063	0.039	
Case2-2	1	0.116	0.121	0.079	0.111	0.056	0.100
	2	0.135	0.121	0.105	0.084	0.070	
平均		0.119	0.072	0.073	0.069	0.054	0.077

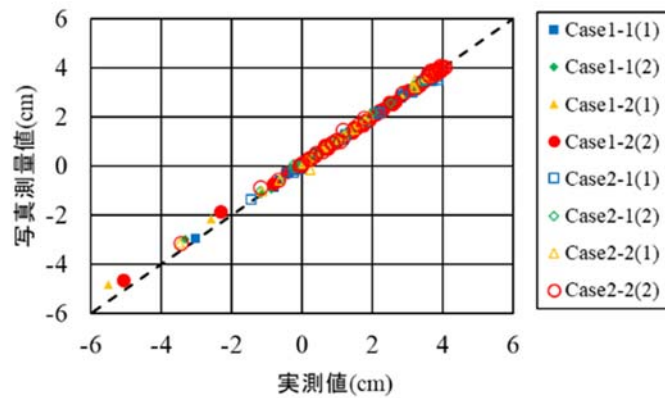


図 2.3.3 実測値と写真測量の相関関係(括弧：実験の回数)

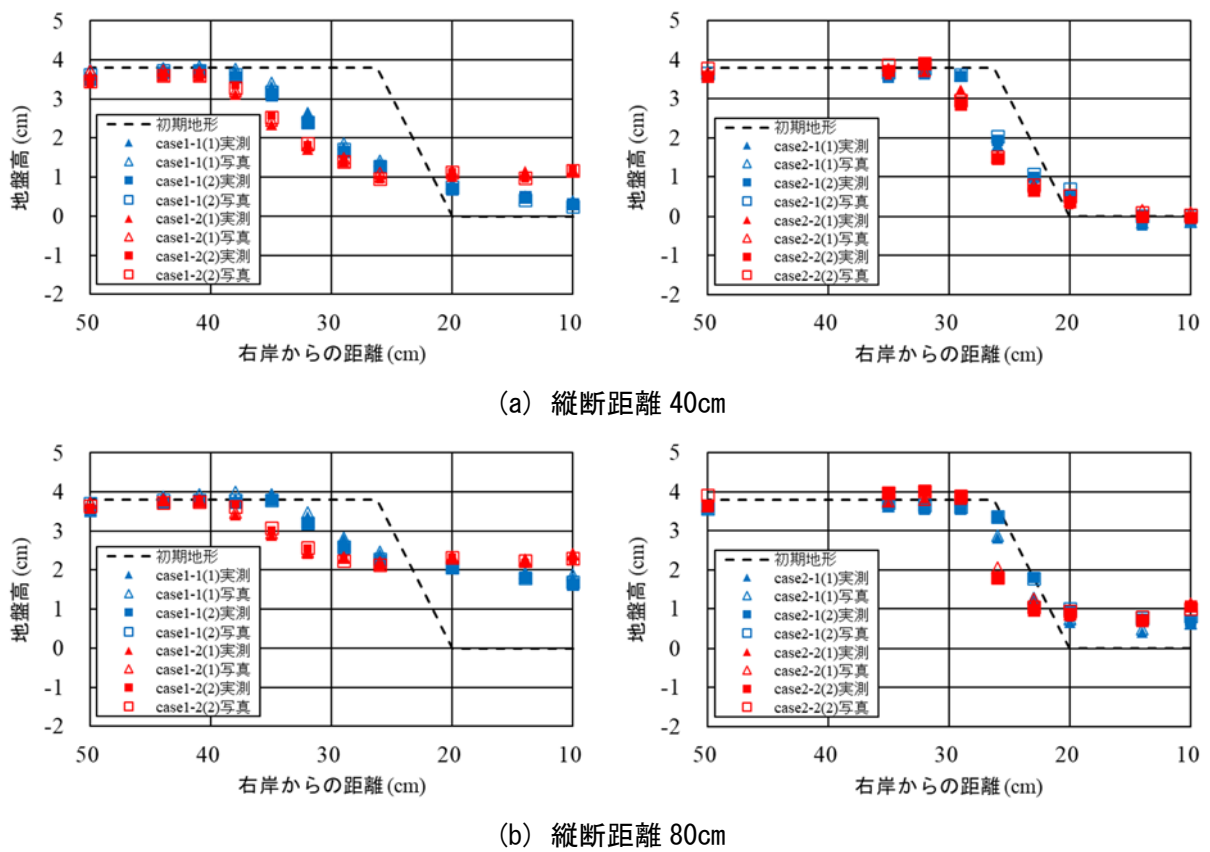


図 2.3.4 実測値と写真測量を比較した横断形状
(左図：Case1, 右図：Case2) (括弧：実験の回数)

2.4 まとめ

本章では、高水敷の冠水有無による低水路側岸の河岸浸食特性を明らかにするため、模型実験を行った。模型実験では、水路幅 60cm の低水路と高水敷のある複断面直線水路とし、水制を設置することによって高水敷に流れが向くような湾曲部を表現した。実験ケースは、高水敷が冠水する Case1 と低水路のみを通水する Case2 とした。

- ・低水路のみを通水する Case2 と比較して、高水敷が冠水する Case1 は浸食幅が 10cm 程度左岸側に広がり、高水敷の半分程度まで浸食が拡大した。Case1 では斜面崩落だけではなく河床変動が生じているため、より低水路側岸を浸食しており、浸食・洗掘された土砂は低水路に最大 2cm 程度堆積した。
- ・低水路側岸の勾配は、Case1 で約 1/5、Case2 は約 2/5 となった。低水路のみ通水する Case2 は、低水路側岸周辺が洗掘されることで、河床材料の安息角を超え、側岸斜面が崩落するため、側岸の勾配は概ね河床材料の安息角程度を維持するように浸食された。一方、Case1 は低水路側岸の斜面崩落の他に、安息角より緩勾配の状態でも、冠水した側岸斜面が流速方向に土砂輸送した。
- ・水制形状の違いは、水制角度 60° の方が高水敷に向かう流れとなり浸食幅も大きい。Case1 で地盤高が最大 5cm 程度の差となるが、Case2 では最大 1cm 程度となり Case1 ほどの浸食幅は見られなかった。なお、高水敷に向かう流れにより、低水路側岸の浸食が促進されているが、本実験では水制角度を 2 種類設定しただけで、与条件が十分ではない。より詳細な影響を検証するには、水路幅と水制幅の比や、高水敷と低水路の水深の比を変えた実験を行い検討する必要がある。

第3章 河床変動の計算精度の検証と最適計算格子幅の検討

3.1 はじめに

平井ら³⁾の研究では、砂州上に生成される水路が十分に再現できていない。第2章の浸食特性の他に、①計算機資源の制約で計算格子幅を大きくしたこと、②砂州上の洗堀・浸食の計算精度を確保できる計算格子幅に関する知見がなかったことが要因として挙げられる。




①の計算機資源の制約は、コスト面の都合上、一般的な計算機を用いていたため実務上問題のない程度の計算時間となる計算格子幅を使用していた。そのため、砂州上に生成された水路が1格子またはそれ以下のサイズとなるため、水路を再現するのに必要な計算格子幅の確保ができていない。

②については、既往研究においても、河床洗堀と斜面崩落による洗堀・浸食が時々刻々と入れ替わる場において、再現性を確保するのに必要な計算格子幅について言及しているものがない。局所的に計算格子幅を小さくするような手法を用いる場合に、具体的にどの程度計算格子幅を細分すれば良いか分からない課題がある。


本章では、第2章の模型実験の再現計算を行い、計算格子幅が河床変動や河岸浸食に与える影響について検証した。また、低水路側岸部に着目した河床変動計算において、再現に必要な計算格子幅や、細かい計算格子幅が必要とされる範囲についても検証を行った。

3.2 解析の概要と計算条件

数値解析には、平面二次元河床変動解析ソフトウェアである iRIC²⁰⁾の Nays2DH を用いて、模型実験の再現計算を実施した。河床変動解析モデルには、実験で用いた 4 号珪砂(平均粒形 0.88mm)の粒形が細かいことから、土砂輸送として掃流砂及び浮遊砂モデルを用い、掃流砂量式は芦田・道上の式、浮遊砂量式は板倉・岸の式をそれぞれに適用した。移動床の河床材料は、模型実験に準じ、0.88mm の均一粒形、マニング粗度係数を $0.025 \text{ m}^{-1/3} / \text{s}$ とした。また、側岸の斜面崩落を考慮するために、安息角 30° の斜面崩落モデルを適用した。

計算領域は、水路延長 14m の実験水路全域とし、上下流端の境界条件には、模型実験で与えた流量及び水位の定常値を与えた。計算格子は、 3.2.1 や  3.2.2 に示すように、初期の低水路と高水敷間の側岸斜面を概ね 1,2,4 格子で表現することができる、5.0cm, 2.5cm, 1.25cm の 3 種類を作成し、計算格子幅が縦横断方向に等間隔となるように設定した。ただし、水制が設置されている区間において、水制形状に従い計算格子を変形させると横断方向に幅が狭くなることが考えられるため、水制区間では河岸浸食が生じる低水路と高水敷間周辺では縦横断格子幅を等間隔にし、側岸浸食の影響が及ばない左岸壁面周辺に計算格子を寄せるように配置した。また、 3.2.3 のように制水路側岸斜面の法尻と法肩に計算格子の境界が位置するように調整している。

計算ケースは、模型実験と同じ 4 ケースを実施した(表 3.2.1)。初期条件として、水深及び流速は、河床を固定床として準定常流となるまで助走計算を行ない、設定した。

本研究では、① 3.2.4 に示す河岸浸食の頂点(初期形状からの河床変動が生じている領域で、最も左岸に近い点)の横断位置の時間変化と、②通水後の河床変動量分布について、数値解析結果と実験値の比較を行い、計算格子サイズによる再現性の検討を行った。

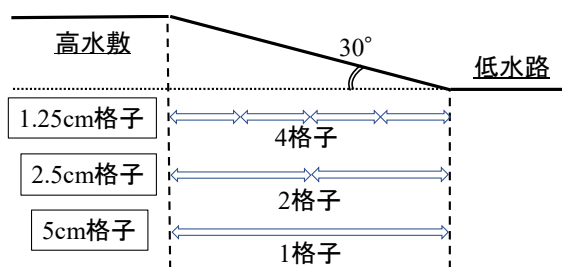
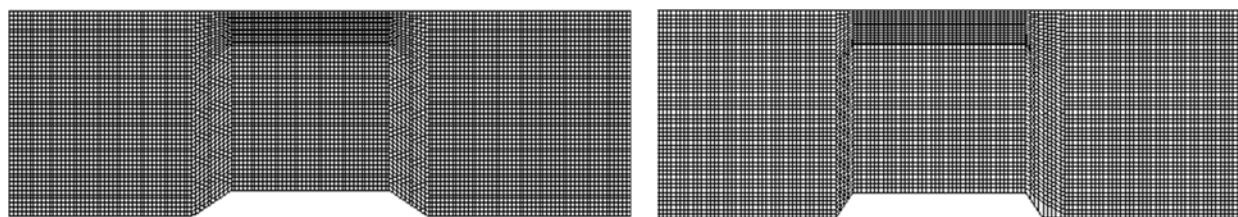


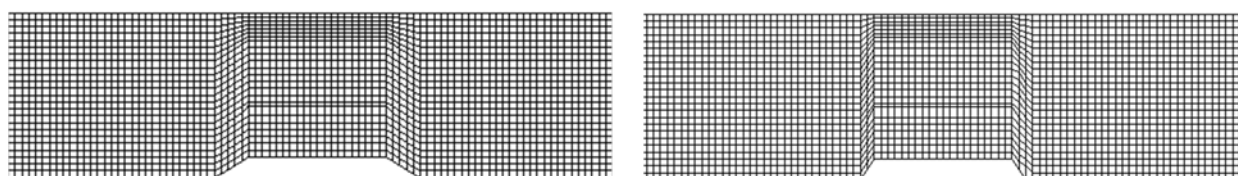
図 3.2.1 低水路側岸斜面と格子幅の関係

表 3.2.1 模型実験ケース(再掲)

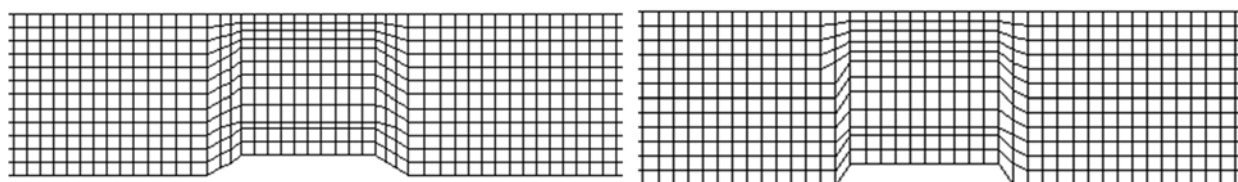
Case	流量 (L/s)	水制角度(°)	河床勾配	水面幅 (m)	等流水深 (m)
1-1	6.0	30	1/500	60.0	0.059
1-2		60			
2-1	1.5	30		25.0	0.029
2-2		60			



(a) 格子幅 1.25cm



(b) 格子幅 2.5cm



(c) 格子幅 5.0cm

図 3.2.2 各ケースの計算格子(左:水制 30°, 右:水制 60°)

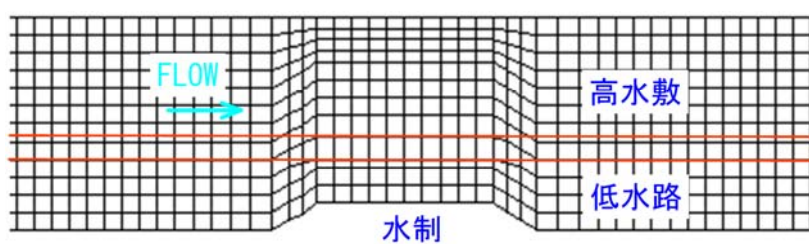


図 3.2.3 水制区間近傍の計算格子(格子幅 5.0cm)

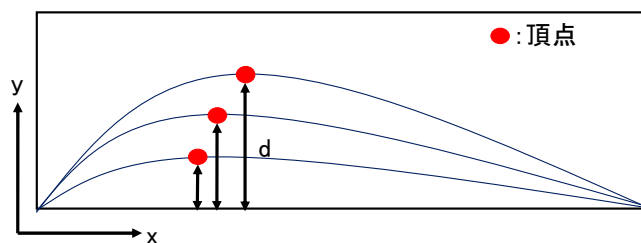


図 3.2.4 側岸浸食の頂点位置 d の概念図

(1) 数値解析モデル

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 Nays2DH²⁰⁾ を使用した。以下に示した基礎式や各種計算式は、「iRIC Nays2DH ソルバーマニュアル」より引用，整理した。

3.2.2 基礎式

以下に示す保存則に基づき，計算格子を河道の形状に合わせて変形する一般座標系の形式で示した。

【連続式】

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{hu^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{hu^\eta}{J} \right) = 0 \quad (3.1)$$

【運動方程式】

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\xi}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial x} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial y} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta = \\ -g \left[(\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ - \left(C_f + \frac{1}{2} C_D \lambda_{veg} h_v \right) \frac{u^\xi}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\xi \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial x} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial y} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_5 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta = \\ -g \left[(\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ - \left(C_f + \frac{1}{2} C_D \lambda_{veg} h_v \right) \frac{u^\eta}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\eta \end{aligned} \quad (3.3)$$

ただし,

$$\alpha_1 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_2 = 2 \left(\xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_3 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \quad (3.4)$$

$$\alpha_4 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_5 = 2 \left(\eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_6 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \quad (3.5)$$

$$D^\xi = \left(\xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_i \left(\xi_x \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_i \left(\xi_y \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \right] \quad (3.6)$$

$$D^\eta = \left(\xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_i \left(\xi_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[v_i \left(\xi_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right] \quad (3.7)$$

ここに, t : 時間, h : 水深, J : 座標変換のヤコビアン, ξ, η : 一般座標, u^ξ, u^η : 流速ベクトルの反変成分, 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 : 河床摩擦係数, C_D : 植生の抗力係数, 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.

$$J = \frac{1}{x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi} \quad (3.4)$$

$$u^\xi = \xi_x u + \xi_y v, \quad u^\eta = \eta_x u + \eta_y v \quad (3.5)$$

また, 河床摩擦係数 C_f , およびゼロ方程式モデルによる渦動粘性係数 v_t は, 以下のように求められる.

$$C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (3.6)$$

$$v_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (3.7)$$

ここで, n : マニングの粗度係数, κ : カルマン係数 (=0.4), u_* : 摩擦速度である.

3.2.3 河床変動解析モデル

1) 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した。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\sum_k q_{bk}^{\xi}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\sum_k q_{bk}^{\eta}}{J} \right) \right\} = 0 \quad (3.8)$$

ここで、 z : 河床高, q_b^{ξ} , q_b^{η} : ξ , η 方向の掃流砂量, λ : 河床材料の空隙率である。

2) 掃流砂量

芦田・道上の式より, 粒径別の掃流砂量 q_{bk} を求める式は,

$$q_b = 17 p_b \tau_{*e}^{1.5} \left(1 - K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \sqrt{sgd^3} r_b \quad (3.9)$$

ここで、 p_b : 占有率, τ_* : 無次元掃流力, τ_{*c} : 無次元限界掃流力, τ_{*e} : 有効無次元掃流力, s : 砂の水中比重(= $(\rho_s - \rho)/\rho = 1.65$), r_b : 交換層厚さに関する比である。また, 無次元掃流力 τ_* , 無次元限界掃流力 τ_{*c} , 有効無次元掃流力 τ_{*e} は次式により求める。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd}, \quad \tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{sgd} \quad (3.10)$$

$$u_{*em}^2 = \frac{V^2}{\left(6 + 2.5 \ln \frac{h}{d_m (1 + 2\tau_{*m})} \right)^2} \quad (3.11)$$

$$\tau_{*e} = \frac{u_{*em}^2}{sgd} \quad (3.12)$$

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。

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る。 τ_{*cm} ($= u_{*cm}^2 / sgd_m$)は以下に示す岩垣公式¹⁴⁾より求める。

$$\begin{aligned}
 0.3030\text{cm} \leq d & & u_{*c}^2 &= 80.9d \\
 0.1180\text{cm} \leq d \leq 0.3030\text{cm} & & u_{*c}^2 &= 134.6d^{31/22} \\
 0.0565\text{cm} \leq d \leq 0.1180\text{cm} & & u_{*c}^2 &= 55.0d \\
 0.0065\text{cm} \leq d \leq 0.0565\text{cm} & & u_{*c}^2 &= 8.41d^{11/32} \\
 d \leq 0.0065\text{cm} & & u_{*c}^2 &= 226d
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

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。

$$K_c = 1 + \frac{1}{\mu_s} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} + 1 \right) \cos \alpha \tan \theta_x + \sin \alpha \tan \theta_y \right] \tag{3.14}$$

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

$$\alpha = \arctan(v_b/u_b) \tag{3.15}$$

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。

$$\theta_x = \arctan \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right), \quad \theta_y = \arctan \left(\frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial z}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) \tag{3.16}$$

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。

$$\begin{aligned}
 r_b &= 1 & E_{sd} &\geq E_b \\
 r_b &= E_{sd}/E_b & E_{sd} &\geq E_b
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

ここに、 E_{sd} : 全移動層厚、 E_b : 交換層厚である。

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。

$$\begin{aligned}\tilde{q}_b^\xi &= q_b \left[\frac{\tilde{u}_b^\xi}{V_b} - \gamma \left(\frac{\partial z}{\partial \xi} + \cos \theta \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) \right] \\ \tilde{q}_b^\eta &= q_b \left[\frac{\tilde{u}_b^\eta}{V_b} - \gamma \left(\frac{\partial z}{\partial \eta} + \cos \theta \frac{\partial z}{\partial \xi} \right) \right]\end{aligned}\quad (3.18)$$

ここで、主流方向とこれに直行する方向からなる座標系で定義される量にはチルダを付けて表す。また、 \tilde{u}_b^ξ および \tilde{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、 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。

$$\gamma = \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}}\quad (3.19)$$

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) 流線の曲率

流線の曲率 $1/r_s$ は次式から求められる.

$$\frac{1}{r_s} = \frac{\partial \theta_s}{\partial s} \quad (3.20)$$

θ_s は x 軸と s 方向の角度であるため,

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

したがって,

$$\frac{1}{r_s} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\tan^{-1}(T) \right] = \frac{\partial}{\partial T} \left[\tan^{-1}(T) \right] \frac{\partial T}{\partial s} = \frac{1}{1+T^2} \frac{\partial T}{\partial s} \quad (3.21)$$

ただし, $T=v/u$ である. ここで,

$$\frac{1}{1+T^2} = \frac{u^2}{V^2} \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial T}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v}{u} \right) = \frac{u \frac{\partial v}{\partial s} - v \frac{\partial u}{\partial s}}{u^2} \quad (3.22)$$

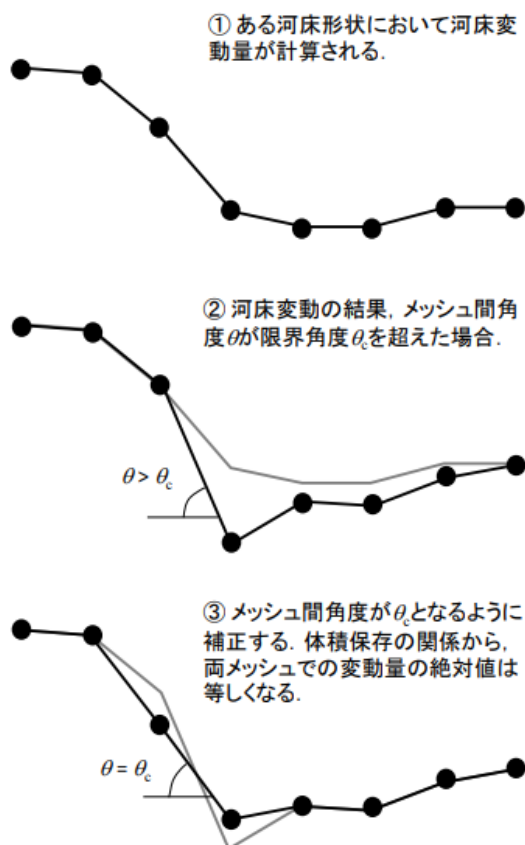
$$\frac{\partial}{\partial s} = \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial}{\partial y} = \frac{u}{V} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{v}{V} \frac{\partial}{\partial y} = \frac{u}{V} \left(\xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) + \frac{v}{V} \left(\xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \quad (3.23)$$

よって, 曲率 $1/r_s$ は次式で表される.

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_s} = \frac{1}{V^3} & \left[u^2 \left(\xi_x \frac{\partial v}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial v}{\partial \eta} \right) + uv \left(\xi_y \frac{\partial v}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial v}{\partial \eta} \right) \right. \\ & \left. - uv \left(\xi_x \frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) - v^2 \left(\xi_y \frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.24)$$

5) 斜面崩落モデル

洗堀を繰り返すことで河床勾配が河床材料の安息角以上の急勾配となる。一般的に河床材料が安息角を超えると斜面が崩れるため、本解析でもそのモデルを適用した。具体的には、計算格子間の勾配が安息角を超えたとき、隣り合う計算格子の地盤高を昇降させ、安息角となるように調整を行う。なお、地盤高の変動量は保存するようにしている。



出典：「iRIC Nays2DH ソルバーマニュアル」 p. 26

3.3 計算結果と考察

(1) 頂点位置の時間変化

図 3.3.2 に頂点位置の時間経過を示した。なお、模型実験の頂点位置は、動画から目視で読み取りを行っているため、測定者に依存した不定誤差を許容している。実測値と計算値の比較は、水制上流端より 20cm, 40cm 位置の断面で行った。なお、高水敷が冠水する Case1 において、水制上流端より 40cm 以上下流側の断面では頂点位置の判断が困難だったため、Case1 の縦断距離 40cm については計算値のみ示した。

高水敷が冠水する Case1 では、経過時間が 200s~800s 区間において、実測値に比べて計算値の左岸側への移動は遅いが、最終的な段階(経過時間 1,000s)では同程度の浸食幅となっている。なお、縦断距離 20cm において、計算格子幅が大きいほど頂点位置の移動が遅れており、最終的な頂点位置も右岸側に留まる傾向である。一方、低水路のみを通水する Case2 では、実測値の浸食幅が最大でも 3cm 程度であり、計算格子幅が大きいほど頂点位置が左岸側に移動している。計算格子幅 5.0cm では浸食幅 3cm 以下の再現はできないが、計算格子幅 1.25cm ではどの断面位置においても、頂点の移動時刻および位置が良好に再現できていることが分かる。

以上の結果より、局所的な河床勾配の再現性は、計算格子幅に依存していることが確認された。これについて、図 3.3.1 に局所的な河床勾配と計算格子幅の関係を示したように、計算格子幅が小さい(青線)と左側の急勾配を表現できるが、計算格子幅が大きい(赤線)と実際よりも緩勾配となる。頂点位置周辺をはじめ低水路側岸は局所的に急勾配になりやすく、河床変動計算や斜面崩落の再現性を確保するためには小さい計算格子幅を設定する必要がある。Case1 では、計算格子幅が小さいほど局所的勾配が再現でき、頂点付近における掃流砂量の平面的な差異が生じやすく、浸食が進行した。Case2 では高水敷が冠水しないため斜面崩落によってのみ浸食が生じ、より浸食幅が計算格子幅に依存している。計算格子幅 5.0cm のケースでは、実際の浸食幅より計算格子幅が大きいため、計算格子間が緩勾配で斜面崩落しにくく、一度斜面崩落すると 5cm 程度浸食されるため計算精度が低下したと考えられる。

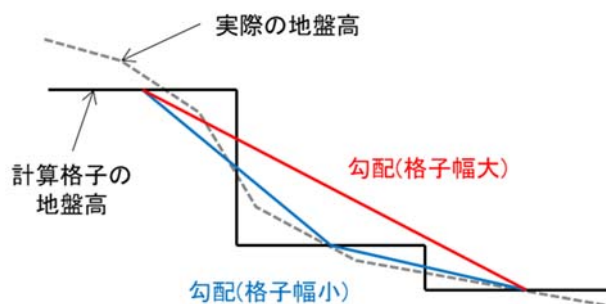
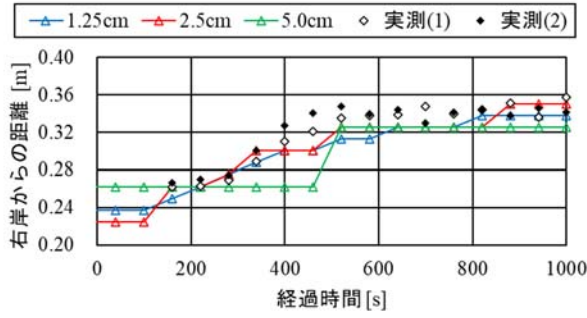
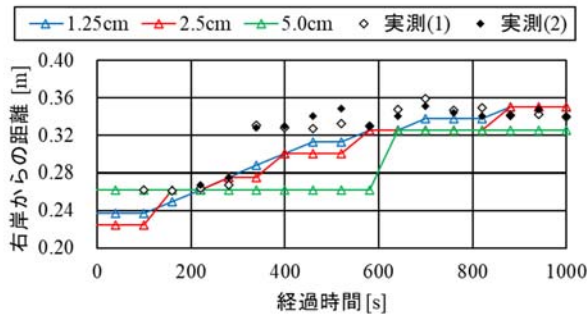
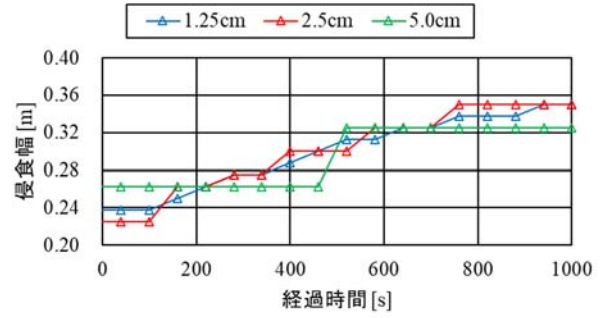


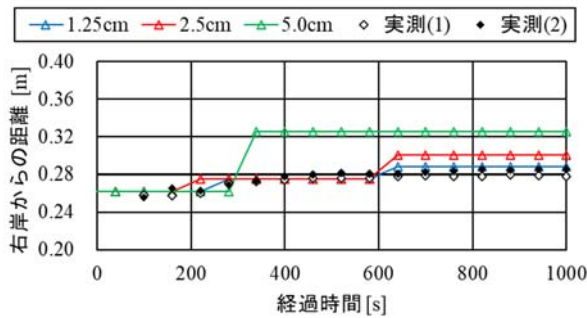
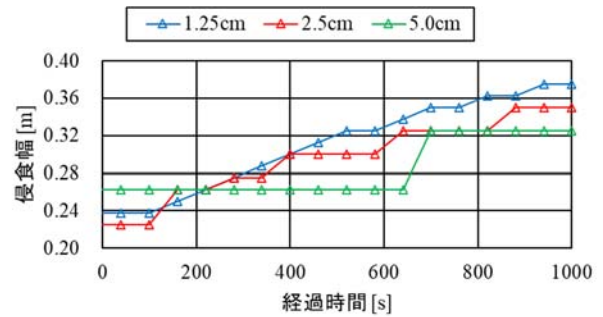
図 3.3.1 局所的な河床勾配と計算格子幅の影響イメージ



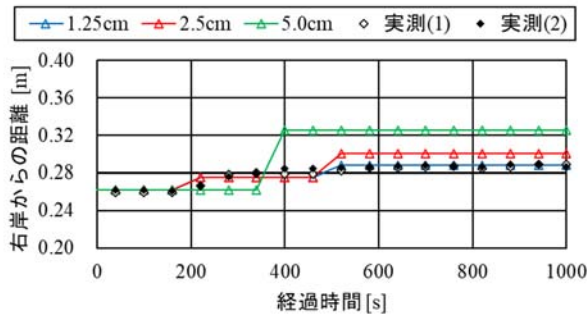
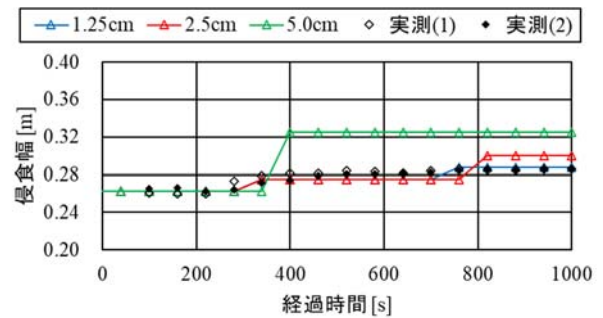
(a) Case1-1 (高水敷が冠水, 水制角度 30°)



(b) Case1-2 (高水敷が冠水, 水制角度 60°)



(c) Case2-1 (低水路のみ通水, 水制角度 30°)



(c) Case2-2 (低水路のみ通水, 水制角度 60°)

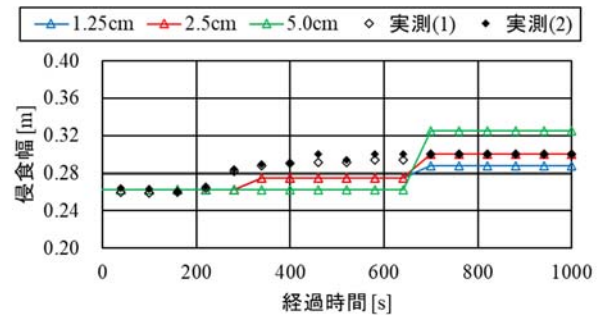


図 3.3.2 経過時間ごとの頂点位置

(左図：縦断距離 20cm, 右図：縦断距離 40cm (Case1 の実測値は計測不能))

(2) 河床変動量

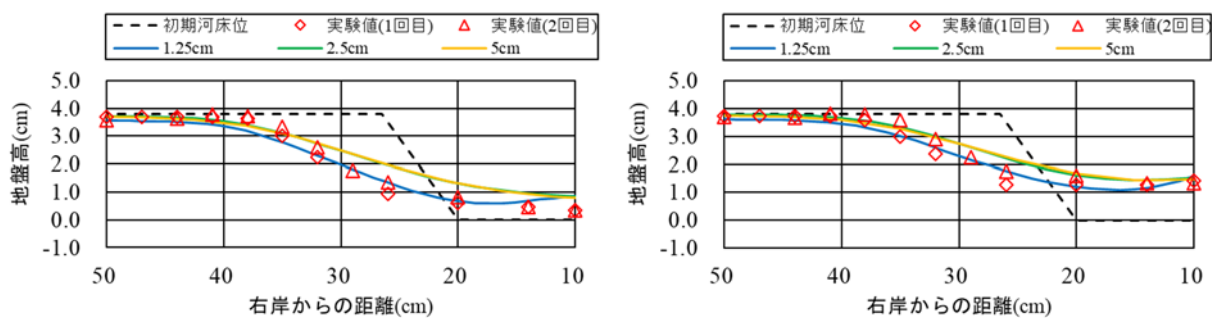
図 3.3.3 に浸食幅が大きい水制上流端からの縦断距離 40cm と 60cm の横断形状を示した。Case2 の縦断距離 60cm を除いたケース・断面において、計算格子幅 1.25cm では実験値との差が 0.5cm 未満となった。特に、Case1 では計算格子幅が 1.25cm のケースのみ実測値と同程度となっている。なお、Case2 の縦断距離 60cm では、左岸側への浸食が小さく、地盤高が最大で 1.3cm 程度の計算誤差が生じているが、低水路側岸の勾配は概ね再現できている。一方、計算格子幅 5.0cm のケースでは横断形状が緩勾配となっており、Case2 ではその影響が顕著である。計算格子幅が大きいと格子幅に対して側岸の高低差が緩勾配となり、斜面崩落が生じにくくなったと考えられる。

また、図 3.3.4、図 3.3.5 に河床変動量の平面分布図を示した。河床変動量(洗掘・堆積)が±2cm 程度の濃い色の範囲は、計算格子幅が小さいほど実験値に近い。一方、どちらのケースにおいても、計算格子幅 5.0cm のケースでは低水路側岸を中心に河床変動量が小さく、再現性が十分に確保できていないことが分かる。

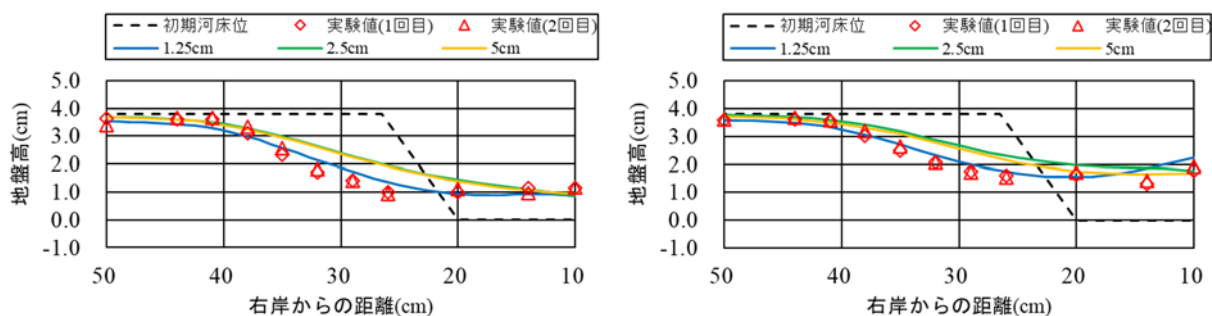
Case1 の河床変動量について、実験では横断方向に右岸から 30cm～40cm、縦断方向に水制上流端から 70cm 程度まで-2.0cm 程度の範囲(濃い青色)が広がっている。格子幅 1.25cm の 2 ケースと、格子幅 2.5cm かつ水制角度 30° の計 3 ケースは概ね一致しているが、それ以外の 3 ケースは河床変動量が小さい。再現性に差が生じた要因として、格子幅 5.0cm のケースのように、計算格子幅が大きい場合に低水路側岸のような局所的な地形で再現性を確保できていないこと、また格子幅 2.5cm の水制角度 60° のケースが水制角度 30° よりも再現性が低いため、高水敷のある左岸側向きの流れが強くなることによる流況・土砂輸送の複雑さによっても変化していることが分かる。

Case2 の河床変動量は Case1 と傾向は同じだが、格子幅 1.25cm においても水制上流端から 50cm より下流の低水路側岸の浸食が小さい。Case2 は斜面崩落のみにより浸食が進行するため、ある程度低水路側の河床洗掘が浸食し、かつ計算格子間の勾配が河床材料の安息角を超えるまでは河岸浸食しない。前述の図 3.3.1 のように、計算格子幅以下の斜面を考慮することができないため、幅の狭い浸食が生じた水制上流端から 50cm より下流の低水路側岸の再現性が低下したものと考えられる。

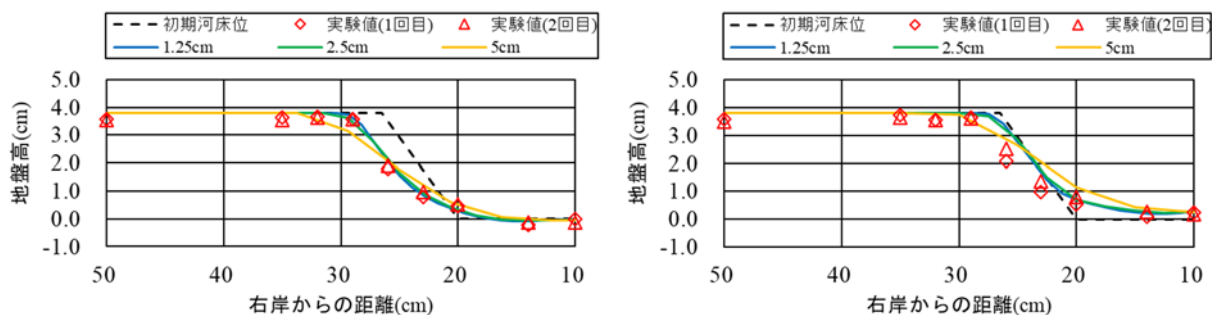
なお、Case1 と Case2 の格子幅 2.5cm のケースにおいて、水制角度の違いによって再現精度が逆転していることが分かる。このことから、本実験の条件下において低水路側岸斜面を 2 メッシュ程度で表現する格子幅 2.5cm は、河床変動量の再現性を確保する最低限の格子幅であり、より計算精度を向上させるためには格子幅を 2.5cm 以下にする必要がある。



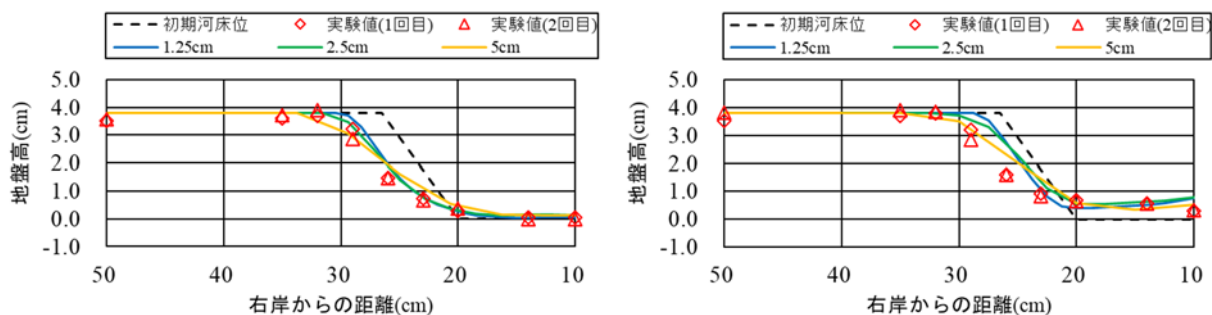
(a) Case1-1



(b) Case1-2

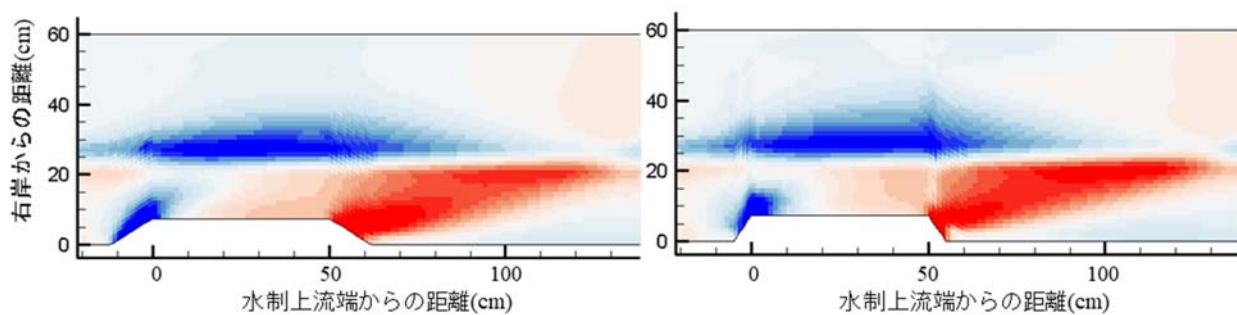


(c) Case2-1

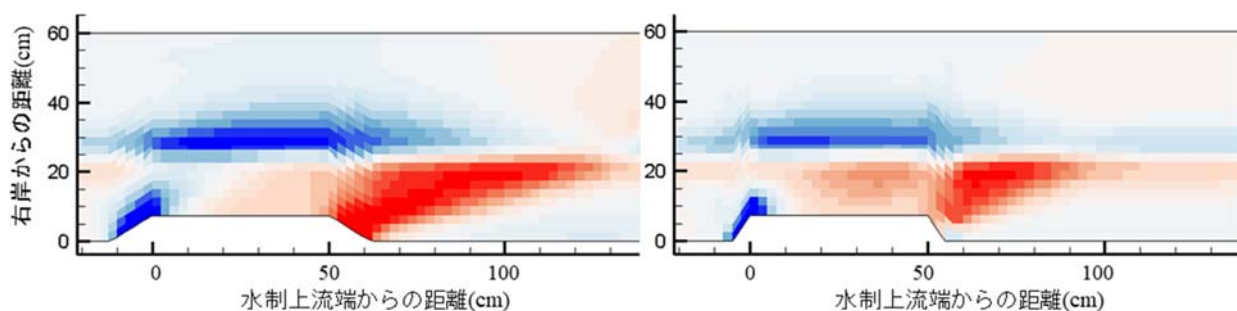


(d) Case2-2

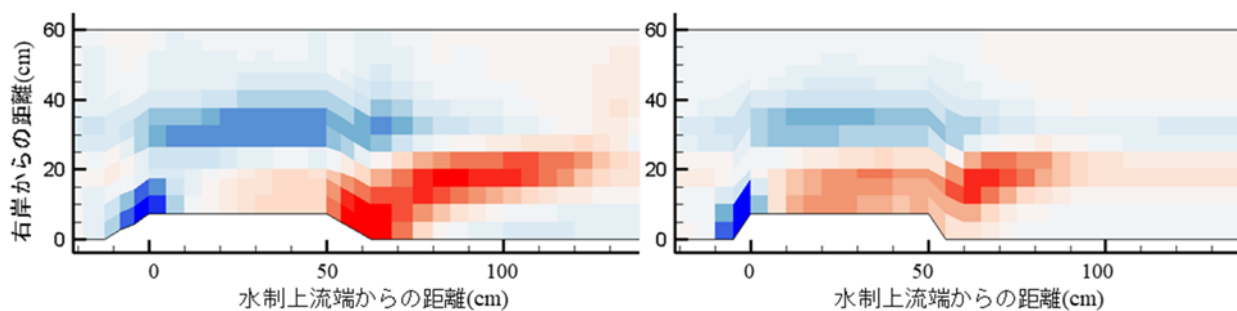
図 3.3.3 通水後の横断形状 (左図 : 40cm, 右図 : 60cm)



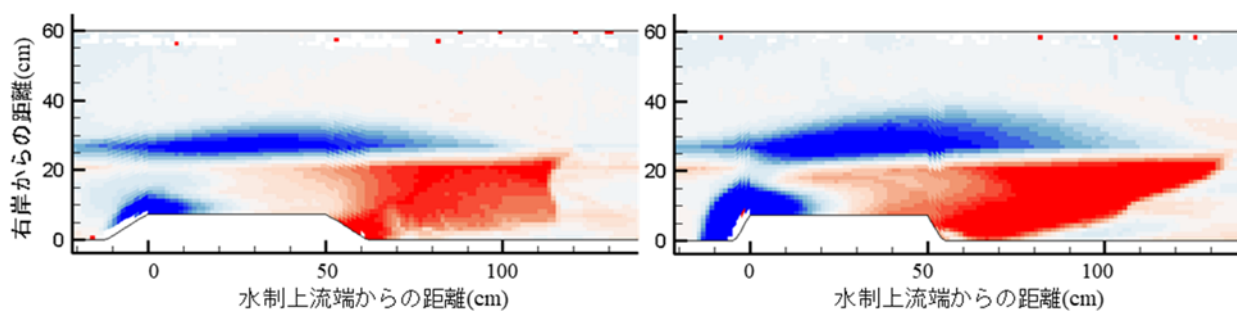
(a) 計算格子幅 1.25cm (左図：水制角度 30°，右図：水制角度 60°)



(b) 計算格子幅 2.5cm (左図：水制角度 30°，右図：水制角度 60°)



(c) 計算格子幅 5.0cm (左図：水制角度 30°，右図：水制角度 60°)



(d) 実験値 (左図：水制角度 30°，右図：水制角度 60°)

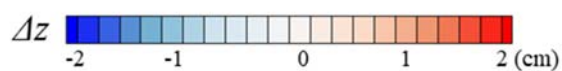
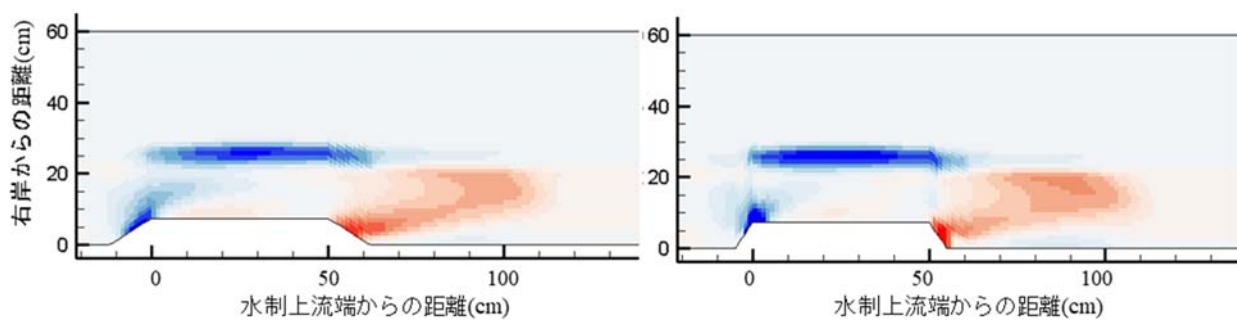
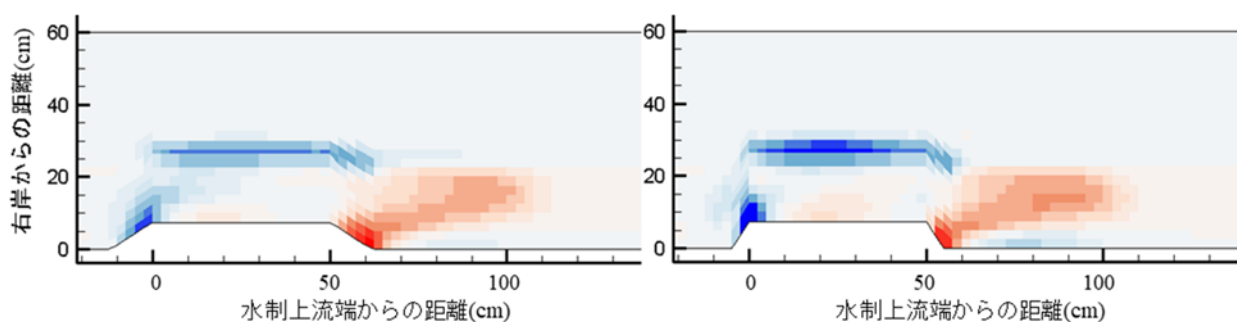


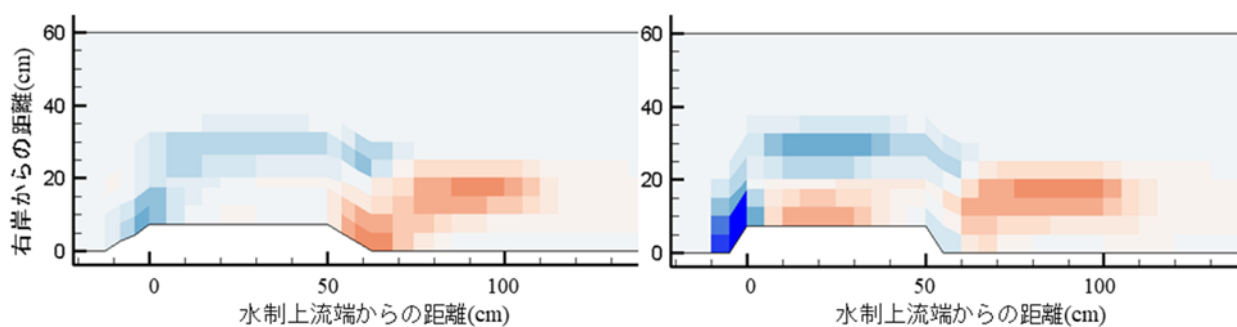
図 3.3.4 河床変動量 (Case1, 高水敷が冠水)



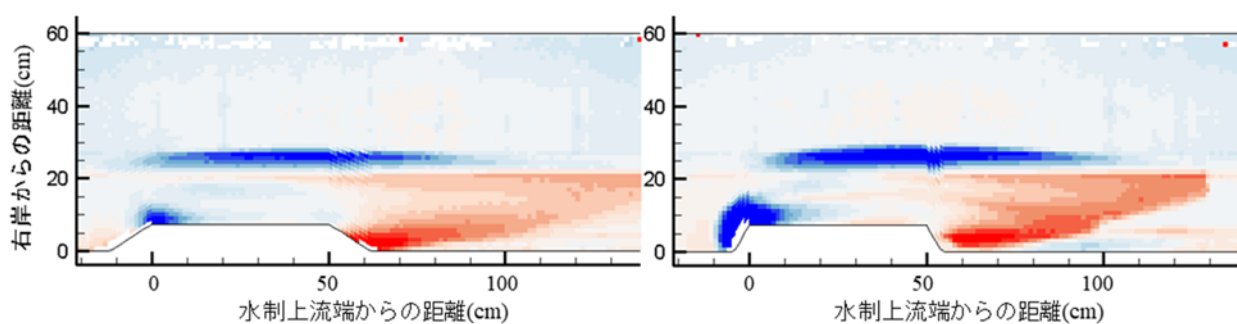
(a) 計算格子幅 1.25cm (左図：水制角度 30°，右図：水制角度 60°)



(b) 計算格子幅 2.5cm (左図：水制角度 30°，右図：水制角度 60°)



(c) 計算格子幅 5.0cm (左図：水制角度 30°，右図：水制角度 60°)



(d) 実験値 (左図：水制角度 30°，右図：水制角度 60°)



図 3.3.5 河床変動量 (Case2, 低水路のみ通水)

図 3.3.6 に、解析値 z_{cal} と実験値 z_{exp} の差を低水路と高水敷の初期高低差 z_{ini} で割った無次元化量 $\Delta z_{dn} = (z_{cal} - z_{exp})/z_{ini}$ の空間分布を示した。正の値(赤色)であるほど解析値の浸食が小さいことを表している。また、実験値の最大洗堀深の 35%領域を黒枠で示した。なお、低水路側岸の河岸浸食に着目するため、低水路領域を除いた範囲を示している。各ケースにおいて、計算格子幅が大きいほど濃い着色に変化しており、実測値と数値解析値の差が大きいことがわかる。特に、計算格子幅 5.0cm において浸食が顕著に確認された黒枠内において 0.2 以上の赤色が占めており、誤差が水路高低差の 2 割以上となり再現性が確保できていない。

水制角度が 30° (Case○-1)では格子幅 2.5cm の場合でも ± 0.2 が見られないのに対して、水制角度が 60° (Case○-2)の格子幅 2.5cm では 0.2 以上の値が見られる。水制角度が大きいほど高水敷に向かう流れが強く、河岸浸食が顕著になると考えられる。特に、低水路のみを通水し、水制角度が 60° の Case2-2 において格子幅 2.5cm でも解像度が不十分となり、差が大きくなった。

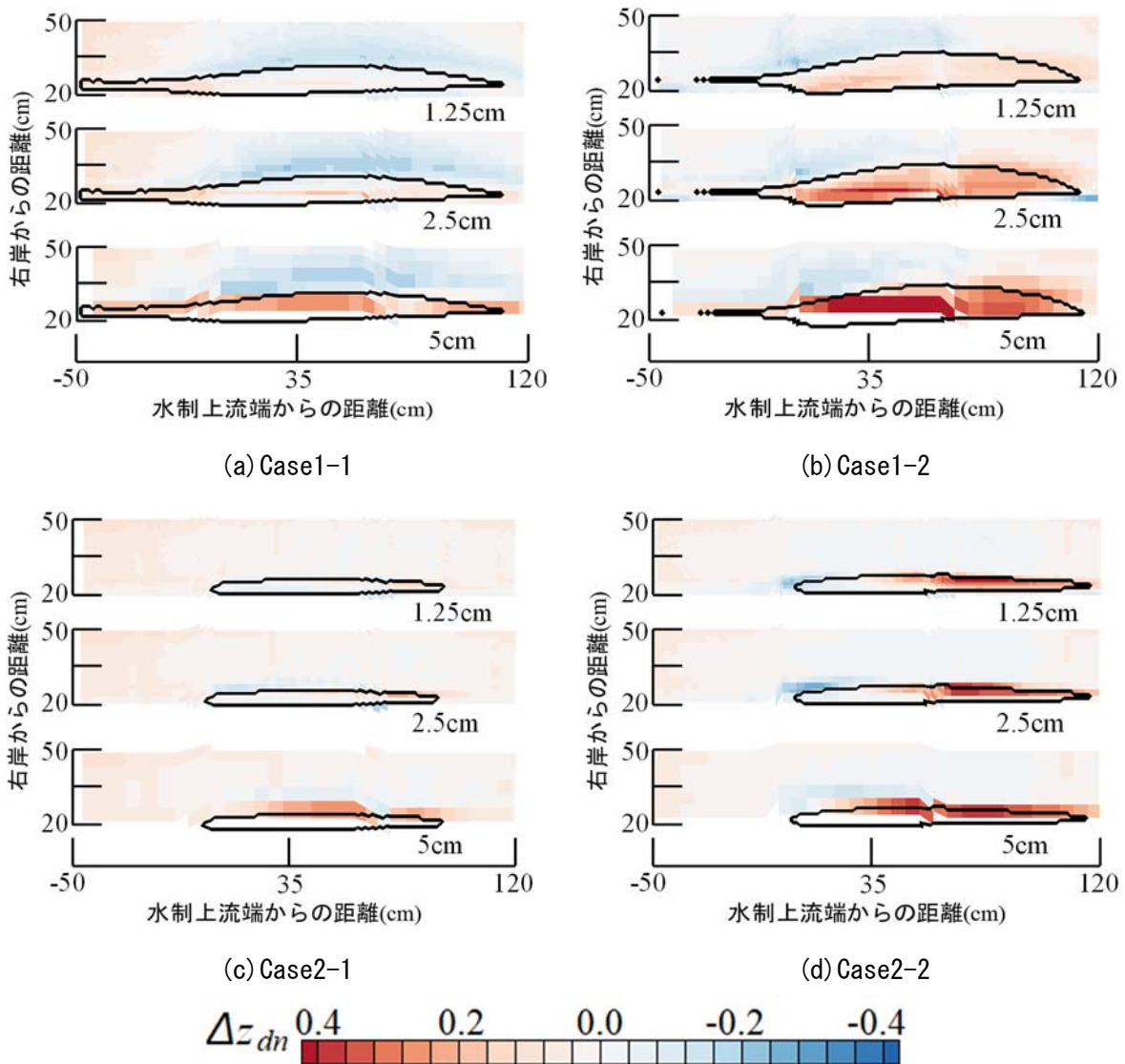


図 3.3.6 無次元化した河床高の差(解析値-実験値)の分布 (黒枠：実験の最大洗堀深の 35%領域)

(3) 最適計算格子幅の検討

各計算格子における河床勾配の大きさ dz を次式より算出し、河床勾配分布の時間変化を求めた。

$$dz = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}$$

図 3.3.7 に実験値を概ね再現できる計算格子幅 1.25cm のケースにおける河床勾配分布の時間変化を示した。Case1 では低水路側岸を中心に、低水路から高水敷の半分程度まで dz が 0.2 程度(緑色)の緩勾配に変化している。また、計算開始から 900s 後には、0.4 以上の範囲がほとんどなくなっている。一方、Case2 では低水路河岸の 0.4 程度(赤色)の急勾配の範囲は、浸食が進行するにつれて左岸側に移動している。

本解析において再現性を確保するためには、河床変動及び斜面崩落が生じる範囲で計算格子幅が 1.25cm 程度である必要がある。Case1 では、水制設置区間の低水路、低水路側岸、一部の高水敷で河床勾配が変化しているため、それ以外の範囲(主に河床勾配がゼロの青色)では計算格子幅 1.25cm まで分割する必要はない。Case2 ではその範囲はさらに狭く低水路側岸より右岸の水制周辺のみである。また、計算開始から終了まで、計算格子幅 1.25cm が必要な領域は、全計算領域に対し局所的であり、本領域が時間的に遷移することが定量的に確認された。

本研究で示した計算格子サイズと河岸勾配の関係を用いることで、動的に計算格子サイズを変化させる計算モデル構築の基礎資料となりうることが示された。

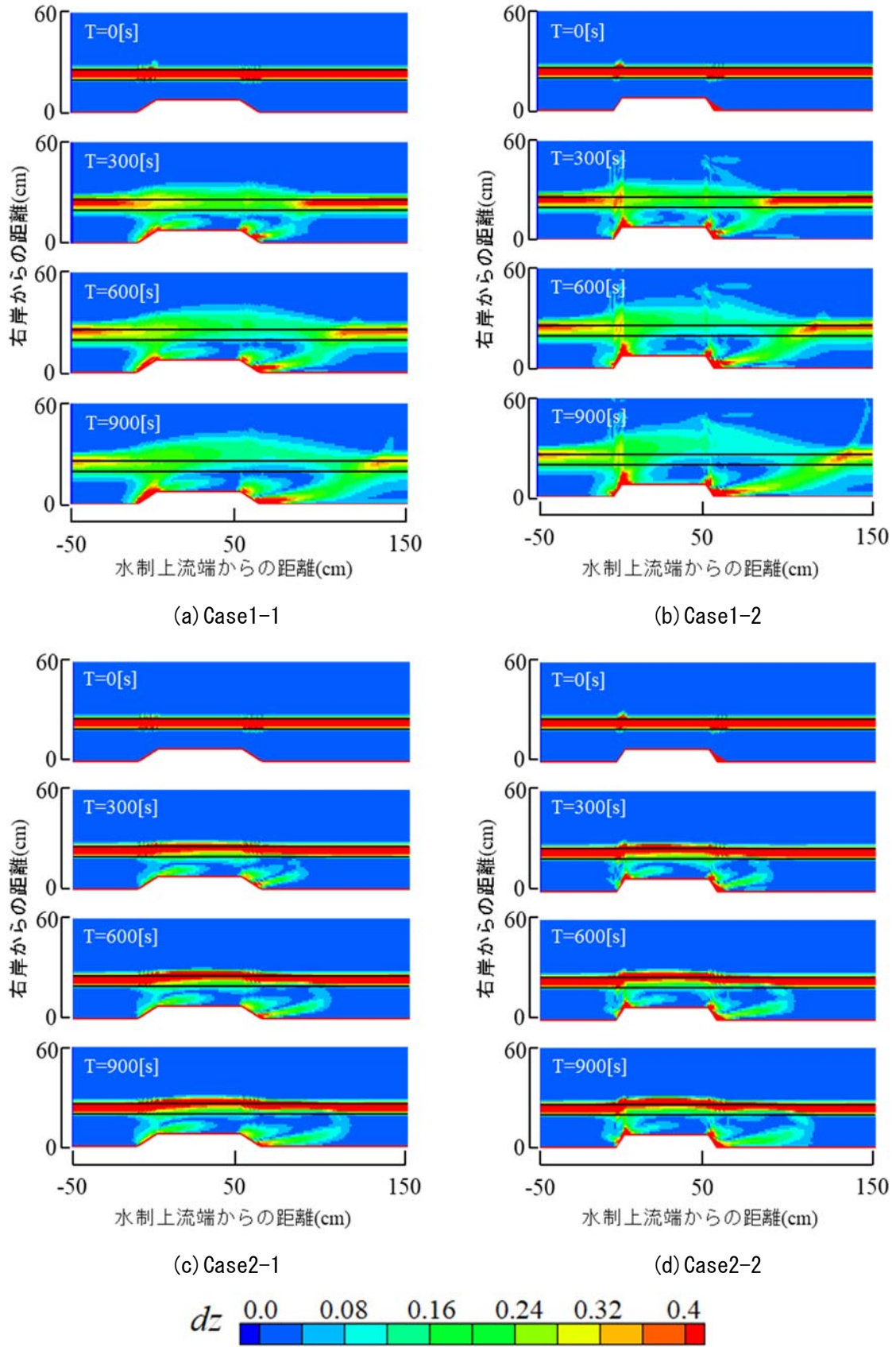


図 3.3.7 河床勾配分布の時間変化 (格子幅 1.25cm)

3.4 まとめ

計算精度の検証と最適計算格子幅の検討のために、模型実験の再現計算を行った。計算格子は、低水路側岸の格子数が、1,2,4 個程度で表現できる 3 ケースとした。

(1) 頂点位置の時間変化

- ・高水敷が冠水する Case1 では、経過時間が 200s~800s 区間において、実測値に比べて計算値の左岸側への移動は遅い傾向ではあるが、最終的な段階(経過時間 1,000s)では同程度の浸食幅となった。なお、Case1 の縦断距離 20cm において、計算格子幅が大きいほど頂点位置の移動が遅れており、最終的な頂点位置も右岸側に留まる傾向を示した。
- ・低水路のみを通水する Case2 では、実測値の浸食幅が最大でも 3cm 程度であり、計算格子幅が大きいほど頂点位置が左岸側に移動している。計算格子幅 5.0cm では浸食幅 3cm 以下の再現はできないが、計算格子幅 1.25cm ではどの断面位置においても、頂点の移動時刻および位置が良好に再現された。なお、計算格子幅 5.0cm のケースでは、実際の浸食幅より計算格子幅が大きいと、計算格子間が緩勾配で斜面崩落しにくく、一度斜面崩落すると 5cm 程度浸食されるため計算精度が低下した。

(2) 河床変動量

- ・Case2 の縦断距離 60cm を除いたケース・断面において、計算格子幅 1.25cm では実験値との差が 0.5cm 未満となった。特に、Case1 では計算格子幅が 1.25cm のケースのみ実測値と同程度となった。なお、計算格子幅 5.0cm のケースでは横断形状が緩勾配となっており、Case2 ではその影響が顕著である。計算格子幅が大きいと格子幅に対して側岸の高低差が緩勾配となり、斜面崩落が生じにくくなったと考えられる。
- ・Case1 の河床変動量について、格子幅 1.25cm の水制角度による 2 ケースと、格子幅 2.5cm かつ水制角度 30° の計 3 ケースは概ね一致しているが、それ以外の 3 ケースは河床変動量が小さい。計算格子幅が大きい場合に低水路側岸のような局所的な地形で再現性を確保できず、高水敷のある左岸側向きの流れが強くなることによる流況・土砂輸送の複雑さによって再現性が変動することが示された。なお、本実験の条件下においては、低水路側岸斜面を 2 メッシュ程度で表現する格子幅 2.5cm は、河床変動量の再現性を確保する最低限の格子幅であり、より計算精度を向上させるためには格子幅を 2.5cm 以下にする必要がある。
- ・Case2 は斜面崩落のみにより浸食が進行するため、ある程度低水路側の河床洗堀が浸食し、かつ計算格子間の勾配が河床材料の安息角を超えるまでは河岸浸食しない。特に、計算格子幅以下の浸食が生じた区間で低水路側岸の再現性が低下した。

(3) 最適計算格子幅の検討

- ・本解析において再現性を確保するためには、河床変動及び斜面崩落が生じる範囲で計算格子幅が 1.25cm 程度である必要がある。Case1 では、水制設置区間の低水路、低水路側岸、一部の高水敷で河床勾配が変化しているが、それ以外の範囲(主に河床勾配がゼロの青色)では計算格子幅 1.25cm まで分割する必要はない。Case2 ではその範囲はさらに狭く低水路側岸より右岸の水制周辺のみである。
- ・Case1 では低水路側岸を中心に、低水路から高水敷の半分程度まで河床勾配 dz が 0.2 程度(緑色)の緩勾配に変化した。また、計算開始から 900s 後には、0.4 以上の範囲がほとんどなくなっている。一方、Case2 では低水路河岸の 0.4 程度(赤色)の急勾配の範囲は、浸食が進行するにつれて左岸側に移動した。
- ・計算開始から終了まで、計算格子幅 1.25cm が必要な領域は、全計算領域に対し局所的であり、本領域が時間的に遷移することが定量的に確認された。

以上より、本研究で示した計算格子サイズと河岸勾配の関係をを用いることで、動的に計算格子サイズを変化させる計算モデル構築の基礎資料となりうることが示された。

第4章 三角形計算格子を用いた最適計算格子幅の検討

4.1 はじめに

動的計算格子を導入する前に、第3章までに得られた知見を基に任意の範囲で分割した計算格子を作成し、その有効性について検討した。なお、四角形計算格子では、実河川の複雑な地形や河川構造物周辺などを表現することが難しくなるため、将来的な利用を想定して三角形計算格子を用いることとした。

まず、全域で格子幅が均等となる3ケースの計算格子を用いて再現計算を行い、三角形計算格子が第3章と同じ傾向を示すかどうかを確認した。なお、三角形計算格子は四角形計算格子に比べて分解能が高く、同じ格子幅であっても第3章と同じ結果にならないため、第3章の格子幅と比較は行わない。

低水路側岸の河岸浸食の再現性が低下する範囲の計算格子を分割した計算格子を作成した。本章では計算格子は固定し、動的に計算格子を変動させないため、①初期状態での急勾配箇所と、②計算終了時に河岸浸食が生じた範囲を分割する計算格子を作成した。なお、高水敷の冠水の有無によって再現性が確保できる計算格子幅は異なるため、ケースごとに検討を行った。

①初期状態の急勾配箇所の計算格子を分割するケースでは、計算開始直後の側岸斜面の浸食範囲を分割するが、計算が進むにつれて浸食範囲が分割した計算格子からはずれ再現性の確保ができなくなると考えられたため、分割格子が浸食箇所を追跡すべき必要性を検証した。


②計算終了時に河岸浸食が発生した範囲を分割するケースでは、河岸浸食を追跡する動的な計算格子を想定し、河岸浸食が発生した範囲の計算格子を事前に分割し、分割格子を必要とする範囲のみの計算精度を向上させることで、全域で格子幅を細かく均等にしたケースと同等の計算精度が確保できるかどうかについて検証した。

4.2 三角形計算格子による河床変動計算の概要

(1) 計算条件

本検討においても、第2章の模型実験の再現計算を行った。なお、高水敷の冠水有無(水路内の水位)と比較して、水制角度の影響が大きくなかったことから、水制角度 30° のケースのみを対象とした。

数値解析には、第3章に準じ、土砂輸送と斜面崩落を考慮した三角形非構造格子を用いた平面2次元モデルを構築し、模型実験の再現計算を実施した。河床変動解析モデルには、実験で用いた4号珪砂を想定し、掃流砂量式は芦田・道上の式、浮遊砂量式は板倉・岸の式をそれぞれに適用した。移動床の河床材料は、模型実験に準じ、0.88mmの均一粒形とした。また、安息角 30° の斜面崩落モデルを適用した。

計算領域は、移動床の6m区間のみとし、上下流端の境界条件には、模型実験で与えた流量及び水位の定常値を与えた。計算格子は、 4.2.1 に示すように、低水路側岸斜面の法尻と法肩に計算格子の境界が位置するように調整し、この側岸斜面を1格子幅(2分割)の5.0cmと3格子幅(6分割)の2.5cm、さらに、5.0cmの斜面区間以外の格子幅を大きくした10cmの3種類を作成した。なお、第3章とは分解能が異なるため、同じ計算格子幅でも再現性は異なる。



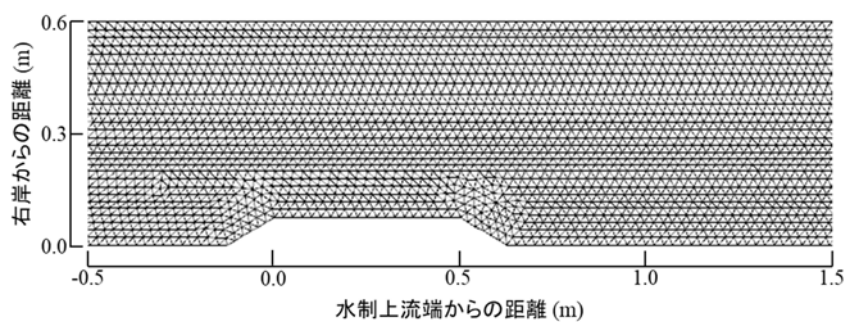
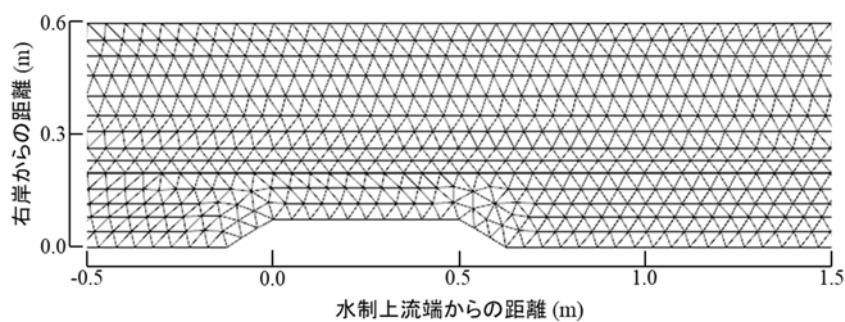
計算ケースは、 4.2.1 の高水敷の冠水有無による2ケース、計算格子は上記の3種類であることから、計6ケースを実施した。次段階として、再現性が確保できなかった計算格子に対して、任意の範囲をさらに分割した計算格子を作成し( 4.2.2), その効果について検証した。詳細については、後述する。

表 4.2.1 計算ケース

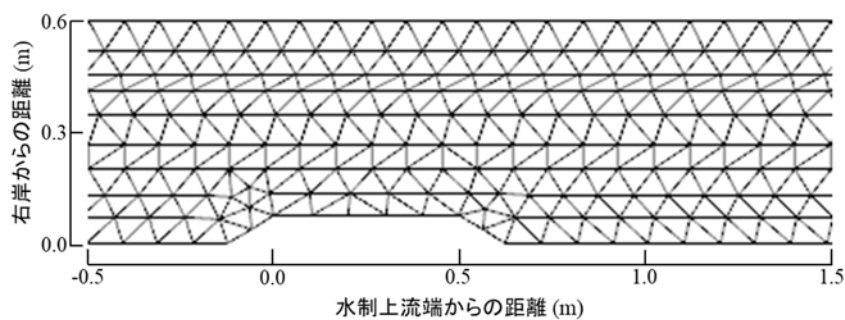
Case	流量 (L/s)	水制角度 (°)	河床勾配	等流水深 (m)
1	6.0	30	1/500	0.059
2	1.5	30		0.029



(a) 2.5cm 格子

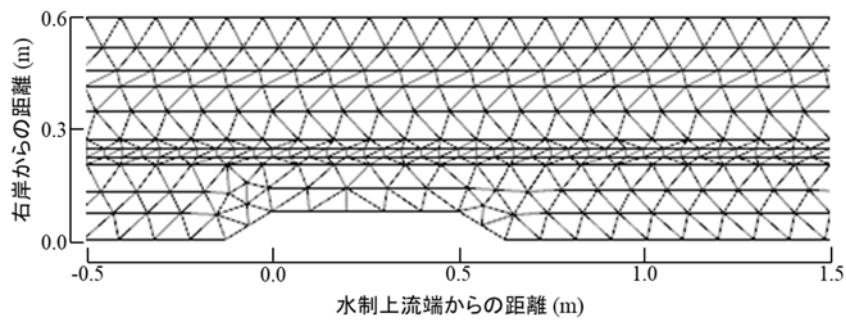


(b) 5.0cm 格子

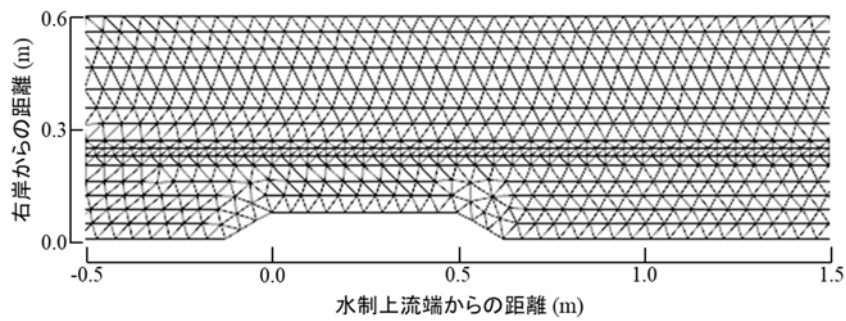


(c) 10.0cm 格子

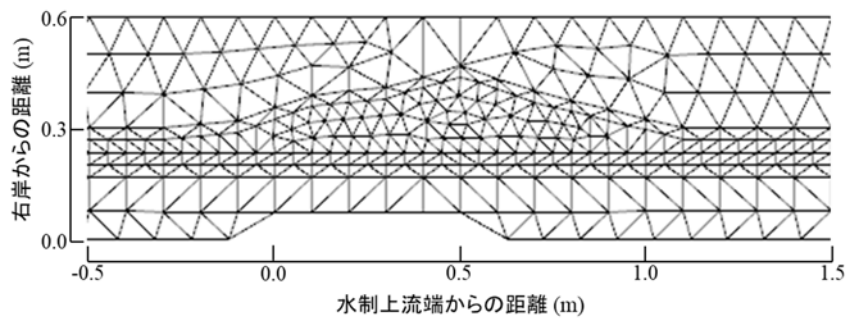
図 4.2.1 水制付近の均一格子幅の計算格子 (計算格子の一部抜粋)



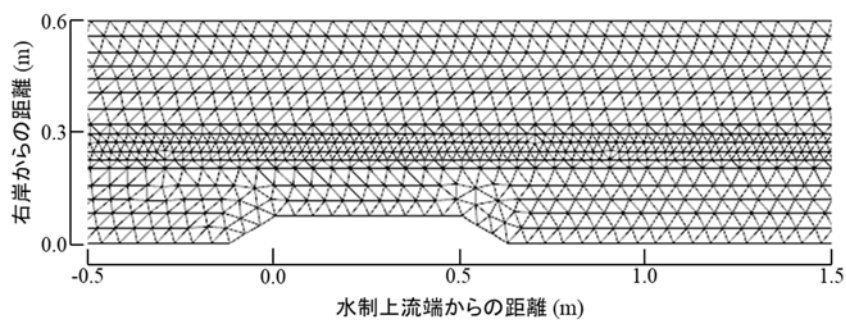
(a) 10cm 格子+初期の側岸斜面のみ 5.0cm 程度に細分



(b) 5.0cm 格子+初期の側岸斜面のみ 2.5cm 程度に細分



(c) 10cm 格子+河床勾配 $dz > 0.10$ 程度の急勾配箇所を 5.0cm 程度に細分



(d) 5.0cm 格子+河床勾配 $dz > 0.10$ の範囲を 2.5cm 程度に細分

図 4.2.2 水制付近の一部を分割した計算格子

(2) 支配方程式

本検討では、iRIC Nays2DH と同じ条件とするため準3次元モデルを使用した。なお、本モデルでは、水深方向流速分布を簡易的に線形で表現し、水深方向に Galerkin 積分することで導出される準三次元モデルを採用した。

$$u_i(x, y, z) = U_i(x, y) + u'_i(x, y) \cdot f_i(\zeta) \quad (4.1)$$

ここで、 z : 鉛直方向の座標、 u_i : 流速、 U_i, u'_i : 流速の水深平均成分および水深平均成分からの偏差成分である。また h : 水深、 z_b : 河床高とした場合、 $\zeta = (z - z_b)/h$ は無次元水深である。流速分布関数は、 $f_i(\zeta) = \zeta - 1/2$ より与えた。

具体的な支配方程式は、二次元浅水流方程式に二次流モードについての運動方程式を加えた5方程式から構成されており、保存変数 q 、流束 $F(q)$ 、 $G(q)$ 、河床勾配項 S_b 、Source 項 S とおくと、次式より示される。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial F(q)}{\partial x} + \frac{\partial G(q)}{\partial y} = S_b + S \quad (4.2)$$

$$q = \begin{bmatrix} h \\ hU \\ hV \\ hu' \\ hv' \end{bmatrix}, \quad F(q) = \begin{bmatrix} hU \\ hU^2 + \frac{gh^2}{2} \\ hVU \\ hu'U \\ hv'U \end{bmatrix}, \quad G(q) = \begin{bmatrix} hV \\ hUV \\ hV^2 + \frac{gh^2}{2} \\ hu'V \\ hv'V \end{bmatrix}, \quad S(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (hu'^2) + \frac{\partial}{\partial y} (hu'v') \right\} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial (h\tau_{uu})}{\partial x} + \frac{\partial (h\tau_{uv})}{\partial y} \\ \gamma \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (hu'v') + \frac{\partial}{\partial y} (hv'^2) \right\} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial (h\tau_{uv})}{\partial x} + \frac{\partial (h\tau_{vv})}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} (hu'U) + \frac{\partial}{\partial y} (hv'U) + \frac{1}{\gamma} \left\{ \tau_{f,u} + g_u + \frac{\partial (h\tau_{f,uu})}{\partial x} + \frac{\partial (h\tau_{f,uv})}{\partial y} \right\} \\ \frac{\partial}{\partial x} (hu'V) + \frac{\partial}{\partial y} (hv'V) + \frac{1}{\gamma} \left\{ \tau_{f,v} + g_v + \frac{\partial (h\tau_{f,uv})}{\partial x} + \frac{\partial (h\tau_{f,vv})}{\partial y} \right\} \end{bmatrix}$$

ここで、 hU, hV, hu', hv' は水深平均線流量および偏差線流量である。また g : 重力加速度、 ρ : 水の密度、 γ : 偏差成分の鉛直分布に関わる関数(本モデルでは $\gamma = 1/12$) である。 g_i は、水深変化に伴う二次流の強度変化を表す項で、次式より与えられる。

$$g_i = \gamma U_i \left(u' \frac{\partial h}{\partial x} + v' \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial m}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial y} \right) - \frac{\gamma u'_i}{2} \left(u' \frac{\partial H}{\partial x} + u' \frac{\partial z_b}{\partial x} + v' \frac{\partial H}{\partial y} + v' \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \quad (4.3)$$

また、 H : 水位、 τ_i : 底面せん断応力、 $\tau_{f,i}$: 偏差流による付加的せん断応力である。 τ_{uu} 、 τ_{uv} 、 τ_{vv} は、平均流に対し水深平均したレイノルズ応力、 $\tau_{f,uu}$ 、 $\tau_{f,uv}$ 、 $\tau_{f,vv}$ は偏差流に対し水深平均したレイノルズ応力を表している。

$$\tau_i = \frac{g \rho n_*^2}{h^3} U_i \sqrt{U^2 + V^2}, \tau_{f,i} = \frac{\tau_i}{2\rho} - \frac{\varepsilon_V}{h} u'_i \quad (4.4)$$

$$\tau_{uu} = 2\varepsilon_h \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3}k, \tau_{f,uu} = 2\gamma\varepsilon_h \frac{\partial u'}{\partial x} \quad (4.5)$$

$$\tau_{uv} = \varepsilon_h \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right), \tau_{f,uv} = \gamma\varepsilon_h \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) \quad (4.6)$$

$$\tau_{vv} = 2\varepsilon_h \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2}{3}k, \tau_{f,vv} = 2\gamma\varepsilon_h \frac{\partial v'}{\partial y} \quad (4.7)$$

ここで、 n_* はマンニングの粗度係数、 ε_V 、 ε_h はそれぞれ水深方向、水平方向の渦度粘性係数、 k は水深平均乱れエネルギーである。

(3) 河床変動解析モデル

河床変動解析モデルも同様に iRIC Nays2DH に準じ設定した。粒径別の掃流砂量式は、河床勾配の影響度合いを表す補正係数 K_c を考慮した芦田・道上の式を適用し、河床材料が安息角を超えると崩れるため、本解析でも斜面崩落モデルを適用した。なお、河床変動解析に関する諸式は、第3章を参照すること。

(4) 三角形計算格子による再現計算

図 4.2.3 に各ケースの通水後の横断形状を示した。横断形状の位置は、水制上流端より 40cm と 60cm とした。Case1 では、2.5cm 格子と 5.0cm 格子が概ね一致し、また、実験値との差が最大 5mm 程度となる。10cm 格子は低水路や右岸から 40cm 以上離れた区間で、その他のケースと概ね一致するが、急勾配である低水路側岸区間で 3mm 程度の誤差が生じる。一方、Case2 では、2.5cm 格子が実験値程度となっているが、5.0cm 格子と 10cm 格子は局所的な勾配を表現できていない。

これは、先述したように、Case2 は急斜面が斜面崩落を起こし浸食していくため、局所的な急勾配を表現できる 2.5cm 格子が適している。一方、Case1 は土砂輸送の影響で緩勾配になりやすく、Case2 ほど格子分割の必要がないため、2.5cm 格子と 5.0cm 格子で大きな差が生じなかったと考えられる。

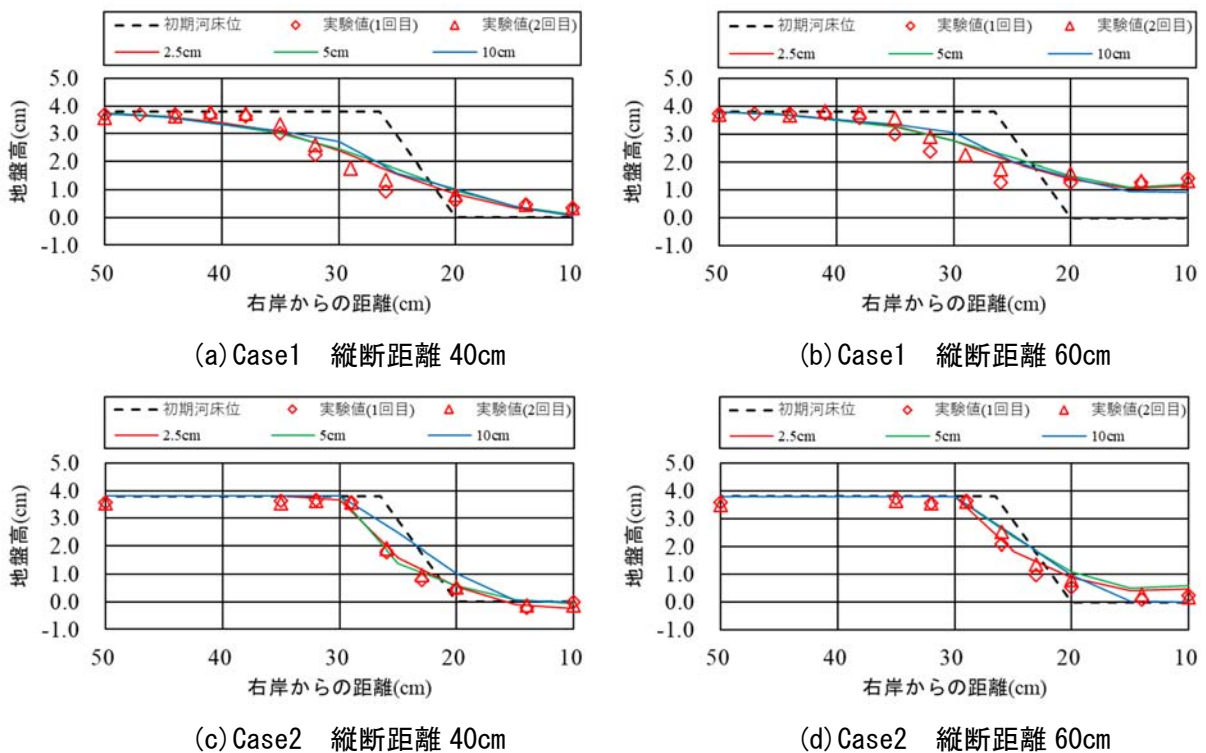


図 4.2.3 通水後の横断形状

(5) 動的計算格子の有効性 (Case1)

Case1 は 5.0cm 格子と 2.5cm 格子が同等の再現性となるため、5.0cm 格子と、10cm 格子の一部を分割した計算格子で比較を行った。10cm 格子の分割ケースは、①初期状態の側岸斜面のみを半分の格子幅である 5.0cm 程度に分割したケース(初期斜面 5.0cm 格子と省略)、②第3章の河床勾配分布(図 3.3.7)における $dz > 0.10$ 程度の範囲(緑色～赤色)を分割したケース(急勾配 5.0cm 格子と省略)、の2ケースとした。

図 4.2.4 に 5.0cm 格子と 10cm 格子の一部を分割した2ケースの横断形状を示した。横断図は水制上流端から 40cm と 60cm とした。初期斜面 5.0cm 格子は、右岸から 25cm 周辺で下がり、30cm 周辺で上がるような形状となっている。25cm 周辺は計算格子が分割された範囲であるが、30cm 周辺は 10cm 程度の1段階粗い格子幅のため、浸食や洗堀が低減されたと考えられる。一方、急斜面 5.0cm 格子は、計算格子が分割されていない低水路箇所を除き、概ね 5.0cm 計算格子程度となっている。そのため、低水路側岸を着目する時は、側岸から低水路に土砂輸送が発生することを想定し、低水路範囲の計算格子を分割させる必要がある。

図 4.2.5 に 5.0cm 格子と 10cm 格子の一部を分割した2ケースの無次元化した河床高の差(解析値-実験値)の分布を示した。まず、(a)の 5.0cm 格子は水制の位置する水制上流端から約 1m 区間は、解析値と実験値の河床高の差が小さい(淡色)ため、面的にも精度よく再現できていることが分かる。(b)の初期斜面 5.0cm 格子は分割した区間は河床高の差が小さいが、側岸斜面の左岸側で $dn=0.2$ 程度(河床高の差で 8mm 程度)の赤色が帯状にあり、計算精度が低下している事が分かる。このように、急勾配の範囲を分割するだけでは再現性が確保できないため、動的な計算格子を用いるか、広域に細かい計算格子を設定する必要がある。(c)の急勾配 5.0cm 格子は水制上流端から 0.5m、右岸から 0.3m 周辺にやや大きめの河床高の差が見られるが、それ以外は概ね (a)5.0cm 格子程度の差に収まっている。

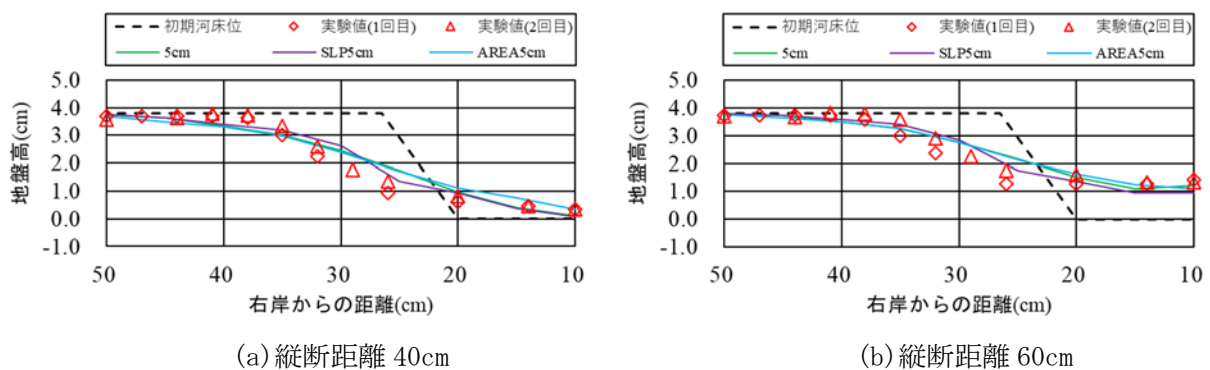


図 4.2.4 通水後の横断形状 (Case1)

(SLP5cm : 初期斜面のみ分割, AREA5cm: 河床勾配 $dz > 0.10$ 程度を分割)

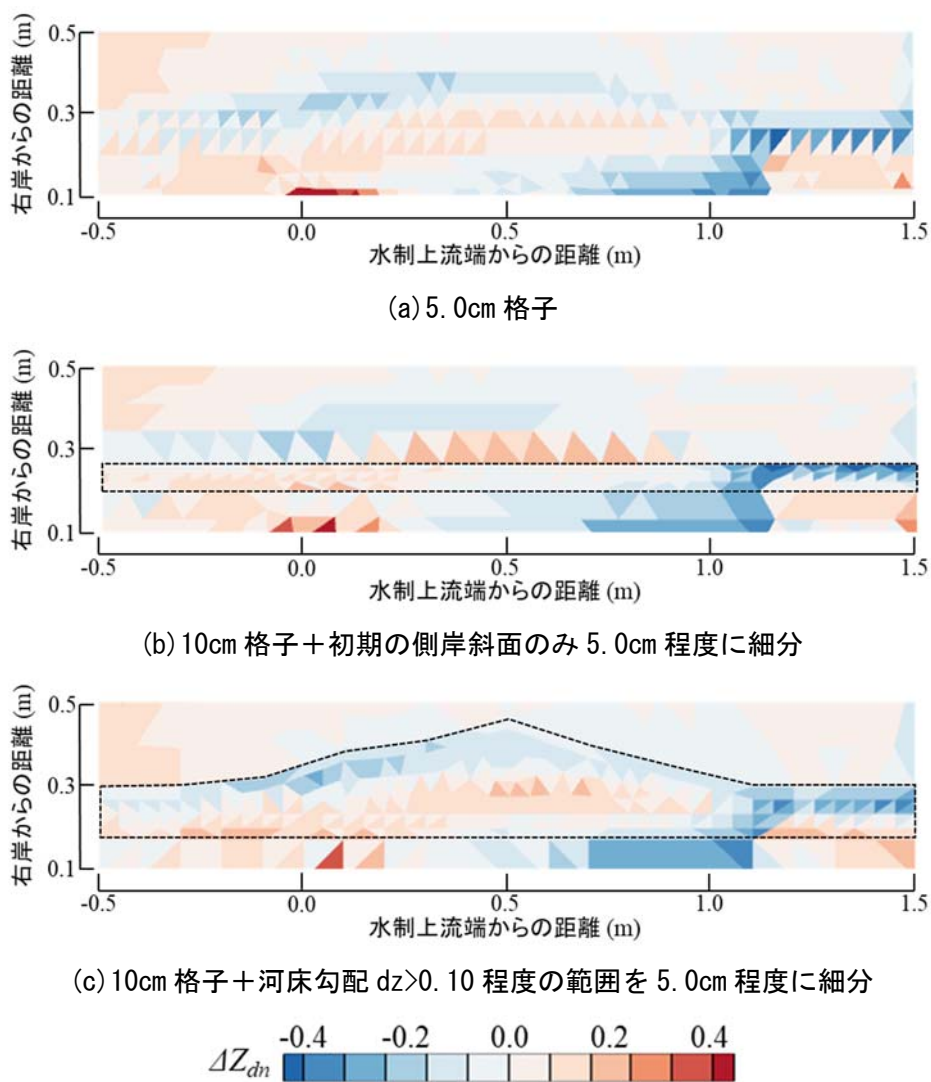


図 4.2.5 無次元化した河床高の差(解析値-実験値)の分布 (Case1)
(破線：計算格子の細分対象範囲)

(6) 動的計算格子の有効性 (Case2)

Case2 は 2.5cm 格子で再現性が確保できたため、2.5cm 格子と、5.0cm 格子の一部を分割した計算格子について比較を行った。5.0cm 格子の分割手法については、Case1 に準じた(初期斜面 2.5cm 格子、急勾配 2.5cm 格子と省略)。

図 4.2.6 に 2.5cm 格子と 5.0cm 格子の一部を分割した 2 ケースの横断形状を示した。横断面は水制上流端から 40cm と 60cm とした。初期斜面 2.5cm 格子は、縦断距離 60cm の右岸から 20cm で大きめに堆積していることを除いて概ね 2.5cm 格子と一致している。急勾配 2.5cm 格子は全体的に大きめとなっており、2.5cm 格子との高低差が最大で 4mm 程度である。

図 4.2.7 に 2.5cm 格子と 5.0cm 格子の一部を分割した 2 ケースの無次元化した河床高の差(解析値-実験値)の分布を示した。まず、(a)の 2.5cm 格子は全体的に淡色となっており、実験値との河床高の差が小さい。一方、(b)の初期斜面 2.5cm 格子は横断面上では確認できなかったが、斜面の左岸側で $dn=-0.3$ 以下(河床高の差で 11mm 以上)の青色が帯状にあり、実験値より浸食が進行している。(c)の急勾配 2.5cm 格子は、縦断距離 0.5m より下流、右岸から 20cm 周辺で堆積(濃い赤色)傾向となっているが、主に河岸浸食が進行する水制周辺の縦断距離 0.0m~0.5m 区間は淡色である。

以上の(5)(6)動的計算格子の有効性より、動的な計算格子を設定する場合、分割格子は河岸侵食が生じる範囲を網羅した上で、河床勾配を格子分割パラメータとして分割することにより、計算精度が確保されることが示された。

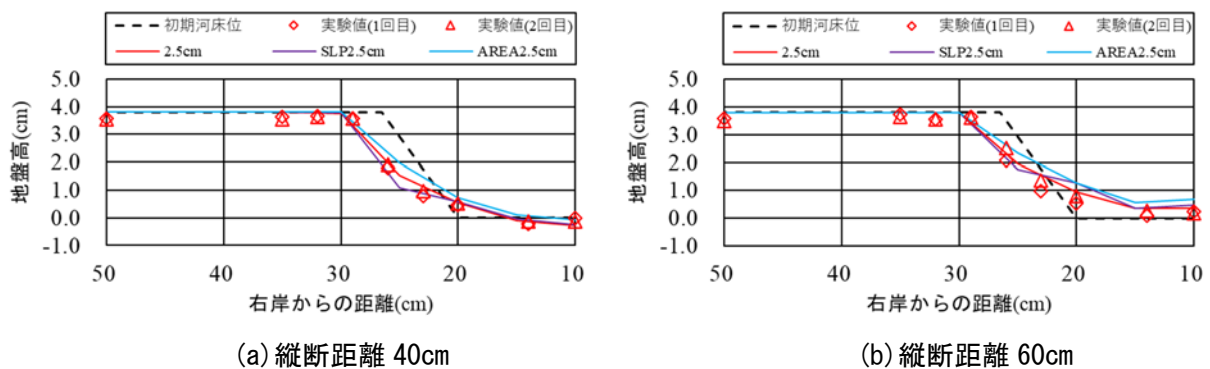


図 4.2.6 通水後の横断形状 (Case2)

(SLP2.5cm : 初期斜面のみ分割, AREA2.5cm:河床勾配 $dz>0.10$ を分割)

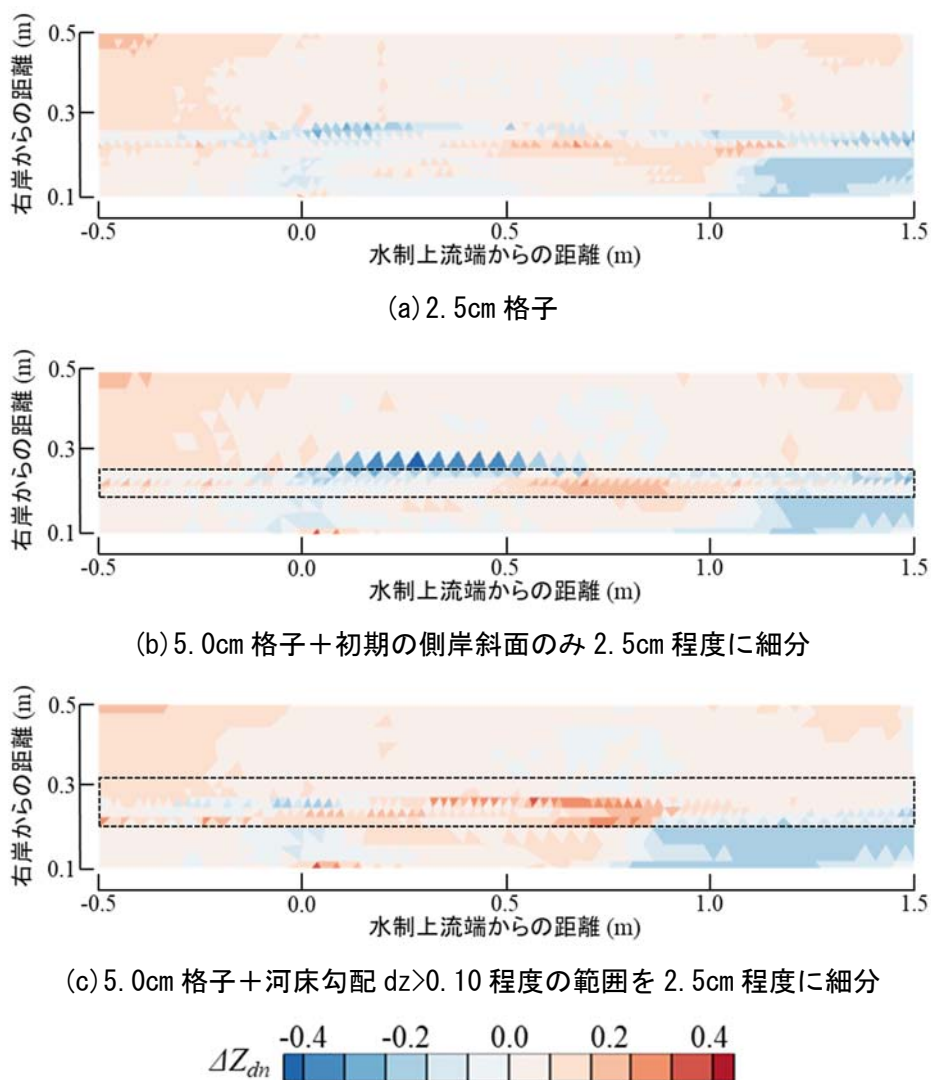


図 4.2.7 無次元化した河床高の差(解析値-実験値)の分布 (Case2)
(破線：計算格子の細分対象範囲)

(7) 計算時間と計算効率

表 4.2.2 と表 4.2.3 に数値解析に要した実時間を整理した。

Case1 は 5.0cm 計算格子で再現性が確保され、部分的に分割した計算格子ケースで増加率が 70%であり、計算時間が 30%短縮された。なお、2.5cm 計算格子で実施すると 5.0cm 計算格子の 2.5 倍の時間を必要とする。

Case2 は 2.5cm 計算格子で再現性が確保され、部分的に分割したケースは増加率が 40%~45%、計算時間が 50%以上短縮された。特に、2.5cm 計算格子は 5.0cm 計算格子の約 4 倍の格子数を必要とするが、部分的に計算格子を分割することで、5.0cm 計算格子と同程度の計算時間で計算することが可能になる。

表 4.2.2 Case1 の実計算時間

	実時間(s)	時間増加率※(%)	格子数
2.5cm 格子(参考)	185.4	250.2	12,756
5.0cm 格子	74.1	-	3,122
初期斜面 5.0cm 格子	53.6	72.3	1,591
急斜面 5.0cm 格子	50.4	68.1	1,500

※増加率：実計算時間÷5.0cm 格子の実計算時間

表 4.2.3 Case2 の実計算時間

	実時間(s)	時間増加率※(%)	格子数
2.5cm 格子	181.0	-	12,756
5.0cm 格子(参考)	72.3	40.0	3,122
初期斜面 2.5cm 格子	79.7	44.1	4,082
急斜面 2.5cm 格子	76.2	42.1	5,020

※増加率：実計算時間÷2.5cm 格子の実計算時間

4.3 まとめ

第3章で得られた計算格子幅と河岸勾配の関係をもとに、三角形計算格子の再現性が低下する範囲を分割した計算格子を作成し、動的な計算格子の適用を想定した予備計算を実施した。なお、高水敷の冠水有無の影響に対して水制角度の影響が小さかったため、水制角度 30° のみのケースで行った。

(1) 動的計算格子の有効性 (Case1)

- ・5.0cm 格子は、水制の位置する水制上流端から約 1m 区間は、解析値と実験値の河床高の差が小さいため、面的にも精度よく再現された。
- ・初期斜面のみを細分した 10cm 格子は、分割した区間は河床高の差が小さいが、側岸斜面の左岸側で $dn=0.2$ 程度(河床高の差で 8mm 程度)が帯状にあり、計算精度が低下している事が分かる。このように、急勾配の範囲を分割するだけでは再現性が確保できないため、動的な計算格子を用いるか、広域に細かい計算格子を設定する必要がある。
- ・最終形状の急勾配範囲を細分した 10cm 格子は、水制上流端から 0.5m、右岸から 0.3m 周辺にやや大きめの河床高の差が見られるが、それ以外は概ね 5.0cm 格子程度の差となった。

(2) 動的計算格子の有効性 (Case2)

- ・2.5cm 格子は全体的に実験値との河床高の差が小さく、面的にも精度よく再現された。
- ・初期斜面のみを細分した 5.0cm 格子は、横断面図上では確認できなかったが、斜面の左岸側で $dn=-0.3$ 以下(河床高の差で 11mm 以上)が帯状にあり、実験値より浸食が進行した。
- ・最終形状の急勾配範囲を細分した 5.0cm 格子は、縦断距離 0.5m より下流、右岸から 20cm 周辺で堆積傾向となっているが、主に河岸浸食が進行する水制周辺の縦断距離 0.0m~0.5m 区間は精度よく再現された。

(3) 計算時間と計算効率

- ・Case1 は、部分的に分割した計算格子で 30%計算効率が向上した。なお、2.5cm 計算格子で実施すると 5.0cm 計算格子の 2.5 倍の時間を必要とする。
- ・Case2 は 2.5cm 計算格子で再現性が確保され、部分的に分割したケースは 50%以上計算効率が向上した。特に、2.5cm 計算格子は 5.0cm 計算格子の約 4 倍の格子数を必要とするが、部分的に計算格子を分割することで、5.0cm 計算格子と同程度の計算時間で計算することが可能になる。

以上より、動的な計算格子を設定する場合、河床勾配を格子分割のパラメータとすることで、計算精度を確保でき、計算時間も Case1 で 30%、Case2 で 50%以上、計算時間が短縮された。

第5章 動的計算格子を用いた河床変動計算の高精度化

5.1 はじめに

ここまでの検討より、低水路側岸斜面を数格子で再現することで、河床変動計算の再現性が向上することが示された。ただし、初期状態の勾配のみ計算格子を細分すると、浸食が進行する段階で実測値と乖離するため、浸食箇所を追跡する動的な計算格子が必要となる。

動的な計算格子については、各時刻において格子を分割・結合させる手法を用いる。ここでは、三角形計算格子をベースとして計算格子を作成し、三角形計算格子に適用事例のある Adaptive Mesh Refinement(AMR)法を採用した。例えば、曾ら¹⁶⁾による津波数値解析の計算誤差に関する研究で用いられており、外洋域から伝播する津波波形を追跡することで、計算負荷と計算誤差を抑制するなど AMR 法の有効性を示している。

動的な計算格子を河床変動計算に用いた事例として、木村らのデカルト座標系の四角形計算格子で Kinematic Mesh Refinement(KMR)法が適用されている。この研究では、直線水路における交互砂州の模型実験を再現したもので、砂州の生成周期などが精度良く再現されているほか、計算効率の向上も確認している。ただし、デカルト座標系の計算格子では、河道の湾曲や河川構造物周辺も四角形格子で表現する必要があるため実河川での適用性は低く、また複雑な地形での再現性向上に関する知見は得られていない。

本研究では、岡山県の旭川への適用を想定し、第2章～第4章で検討した模型実験水路の再現計算を実施し、AMR法を河床変動計算に適用する有効性について検証した。格子分割パラメータは、木村らの研究に準じ、河床勾配を採用した。なお、木村らは砂州の起伏を表現するために河床勾配の凹凸を曲率で定義していたが、対象とする実験水路は高水敷から低水路に向かって低下する単純な斜面であるため、隣り合う格子間の勾配を格子分割パラメータとした。

5.2 動的な格子サイズによる河床変動計算の概要

第2章の模型実験に対し、AMR法を適用し、河床勾配によって動的に計算格子を変動させる有効性について検証した。

(1) AMR法の概要

本検討では、誤差の大きい要素の計算格子を細分化させることのできるAMR法を適用した。元々、AMR法は航空機の翼などの流体力学等に用いられており、大気中の流体が翼表面の曲線を表現できるように多段階(親セル, 子セル, 孫セル...)で分割することが可能であるため、河川分野においても砂州の急勾配箇所や河川構造物周辺の局所的な地形変化を表現できる。この手法は、初期の最も粗い計算格子(親セル)の形状に依存してしまうが、三角形非構造格子であれば格子形状に規則性がないため、濬筋や河川構造物に格子境界を沿わせることができるなど柔軟に設定できる。

三角形格子に適用する場合、図5.2.1に示すように誤差の大きい要素を含む三角形各辺の中点を結び、4つの三角形に分割・結合する手法が一般的であり、本研究もこれに準じた。この手法では、親セル(Level,j)と子セル(Level,j+1)の格子境界面で3つの格子で計算されるため、数値流束を基本とする有限体積法の2つの格子で共有する場合よりも扱いが複雑となる。ここでは、セルと子セルの格子境界面の各辺を中点で分割したため、親セルから子セルの場合は数値流束を2分割して子セルに与え、子セルから親セルの場合は子セルの数値流束を加算した。

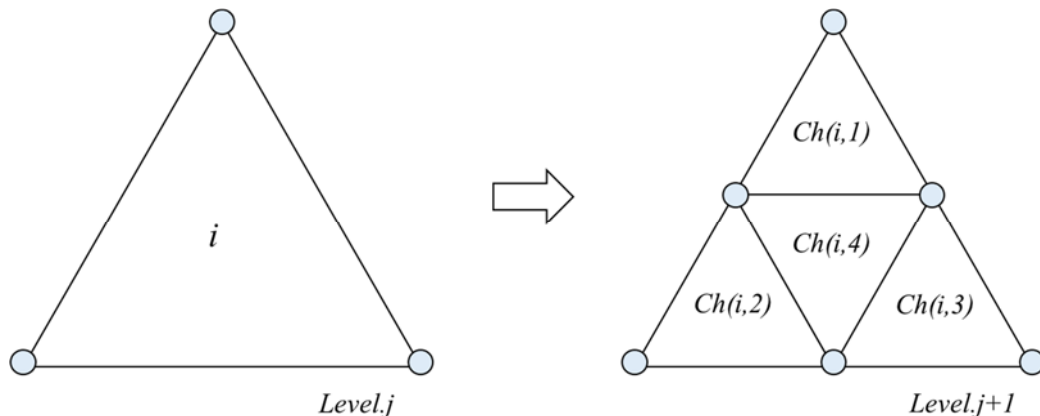


図 5.2.1 AMR法による計算格子の分割イメージ

(左：親セル, 右：子セル(各辺の中点を結び, 4つの格子に分割))

(2) 計算格子の分割・結合指標

計算格子を分割・結合する指標として掃流砂量の大小や水際境界・滞筋中央からの距離などが考えられるが、本検討では、木村らの既往研究成果や第4章の検討で得られた知見をもとに、河床勾配を格子分割パラメータとして設定し、計算精度の向上を検討した。なお、計算効率という観点では検討していないため、ここでは言及しない。

AMR法による格子分割の場合、求められる計算精度に応じて親セルを複数レベル(子セル、孫セル…)で分割することは可能であるが、模型実験の再現計算では再現性が確保できる格子幅とその1レベル荒い格子のみで表現できるため、親セルと子セルの2段階のみで格子分割と結合を行った。

図5.2.2に第3章で示した15分間の通水終了後の河床勾配分布を示した。Case1は高水敷が冠水するため低水路側岸の急勾配(赤色)箇所が平滑化し、全体的にある程度の勾配が広がっている。Case2は斜面崩落により河岸浸食が発生するため、急勾配(赤色)箇所がそのまま左岸側に移動している。第4章で示した河床勾配の大きさ $dz=0.10$ 程度(緑色)より急勾配となる範囲の計算格子を分割することで、全域で細かい計算格子を用いたケースと概ね一致したことから、 $dz=0.08$ (4.6°)、 $dz=0.10$ (5.7°)、 $dz=0.12$ (6.8°)の3パターンを設定し、河床勾配の閾値が再現性に与える影響についても検証した。なお、河床勾配は、各計算格子における河床勾配の大きさ dz を次式より算出した。

$$dz = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \tag{5.1}$$

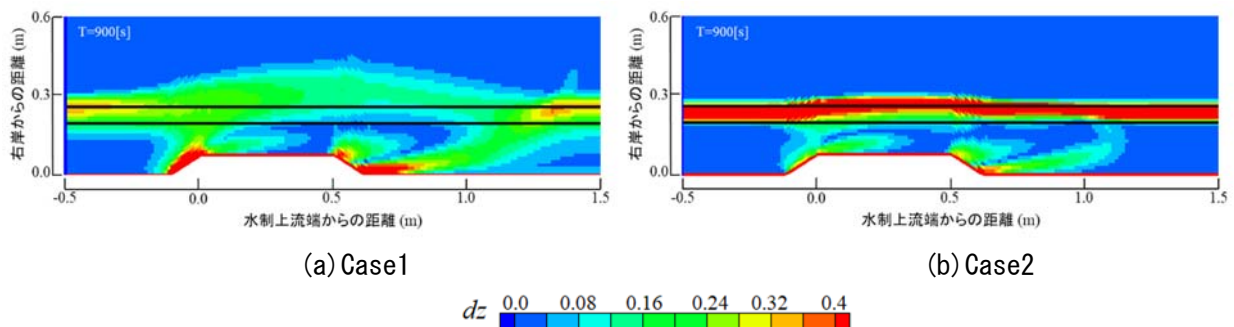


図 5.2.2 15分間の通水終了後の河床勾配分布 (第3章より再掲)

5.3 計算結果と考察

(1) 格子分割パラメータについて

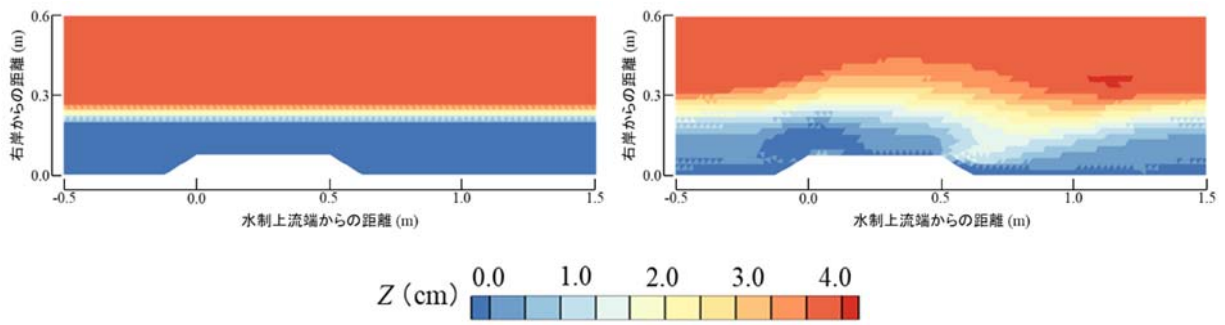
図 5.3.1 に格子分割パラメータの違いによる Case1 の実験開始時(0min)と終了後(15min)の細分格子を示した。なお、Case2 は側岸斜面が 30° が維持され、河岸浸食範囲における浸食幅が格子分割パラメータに大きく依存しないため、Case1 のみとした。

計算開始時は、河床勾配 $dz \doteq 0.58$ (30°) の低水路側岸斜面以外はフラットとなっているため、各パターンとも同じ格子分割となる。一方、実験終了後は広域に勾配が広がるため、閾値によって分割される範囲が異なる。特に(d) $dz=0.12$ では、元々低水路側岸があった範囲や水制周辺の局所洗堀がみられた範囲周辺のみが分割されており、水制上流端から 0.5m より下流の緩やかな勾配範囲では分割されない。(c) $dz=0.10$ は、(b) $dz=0.08$ に比べて細分格子範囲が小さいが、河岸浸食が発生している範囲は網羅されている。ただし、格子分割パラメータ dz は、緩勾配であるほど河岸浸食範囲で分割されるが、格子数が増加するため計算効率が低下する恐れがある。

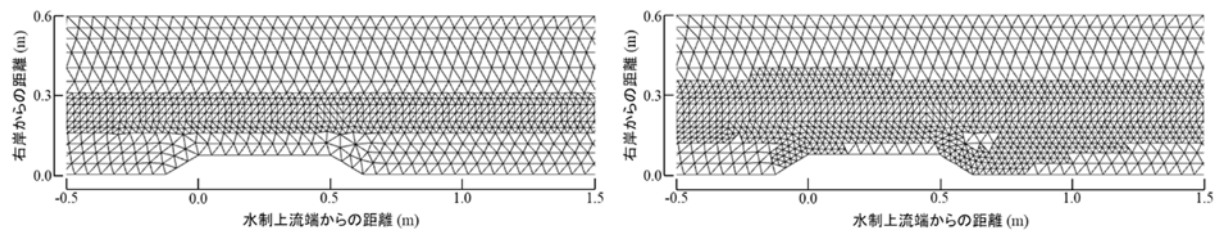
(2) 河岸浸食を追跡する格子分割

図 5.3.2 と図 5.3.3 に Case1 と Case2 における 5 分ごとの格子分割例を示した。計算ケースは、河床変動量が十分に再現された Case1 の 10cm 格子、Case2 の 5.0cm 格子を河床勾配の閾値 $dz=0.10$ で分割・結合するケースとした。

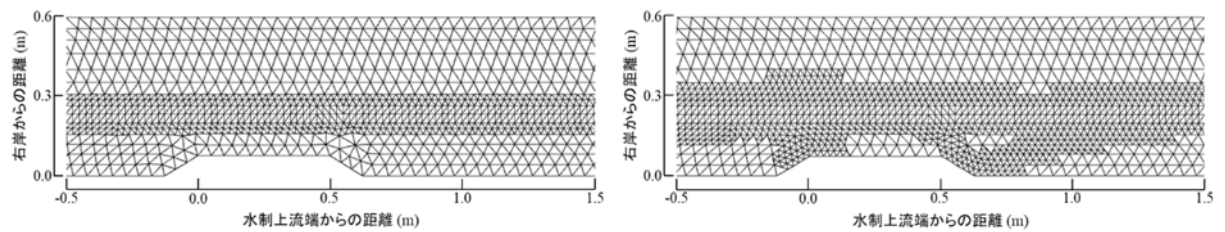
(a)の実験開始時は低水路側岸のみ河床勾配 $dz > 0.10$ のため、どちらのケースにおいても側岸斜面に平行に細分格子が位置している。Case1 では、(b) の 5 分経過後には水制による偏流が側岸斜面にぶつかる 0.0m~0.5m 区間で左岸側に細分格子が拡大した。それ以降の(c)(d)では、河岸浸食の頂点位置が下流側に移動したことに伴い、細分格子も下流側に進行している。また、側岸斜面が全体的に低水路側に土砂輸送したため、全体的に横断方向に細分格子が拡大している。一方、Case2 では水制付近を除いて、側岸斜面は斜面崩落により河岸浸食が進行するため、どの時間帯においても概ね側岸斜面に沿った格子分割が維持される。ただし、水制のある区間(0.0m~0.5m)で側岸浸食に伴い、格子分割が左岸側に広がっているため、河岸浸食を精度よく追跡していることが分かる。このように、AMR 法を用いることで、河床変動計算による河床勾配の変化を追跡し、計算格子を分割・結合することが可能である。



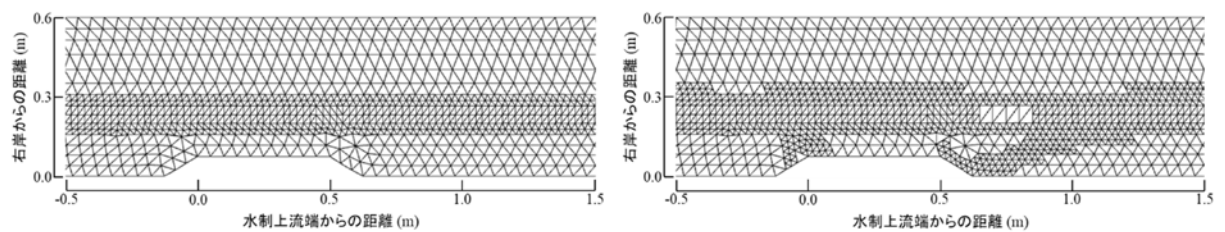
(a)地盤高



(b)河床勾配 $dz=0.08$



(c)河床勾配 $dz=0.10$



(d)河床勾配 $dz=0.12$

図 5.3.1 格子分割パラメータの違いによる細分格子 (Case1)

(左図 : 実験開始時 0min, 右図 : 実験終了後 15min)

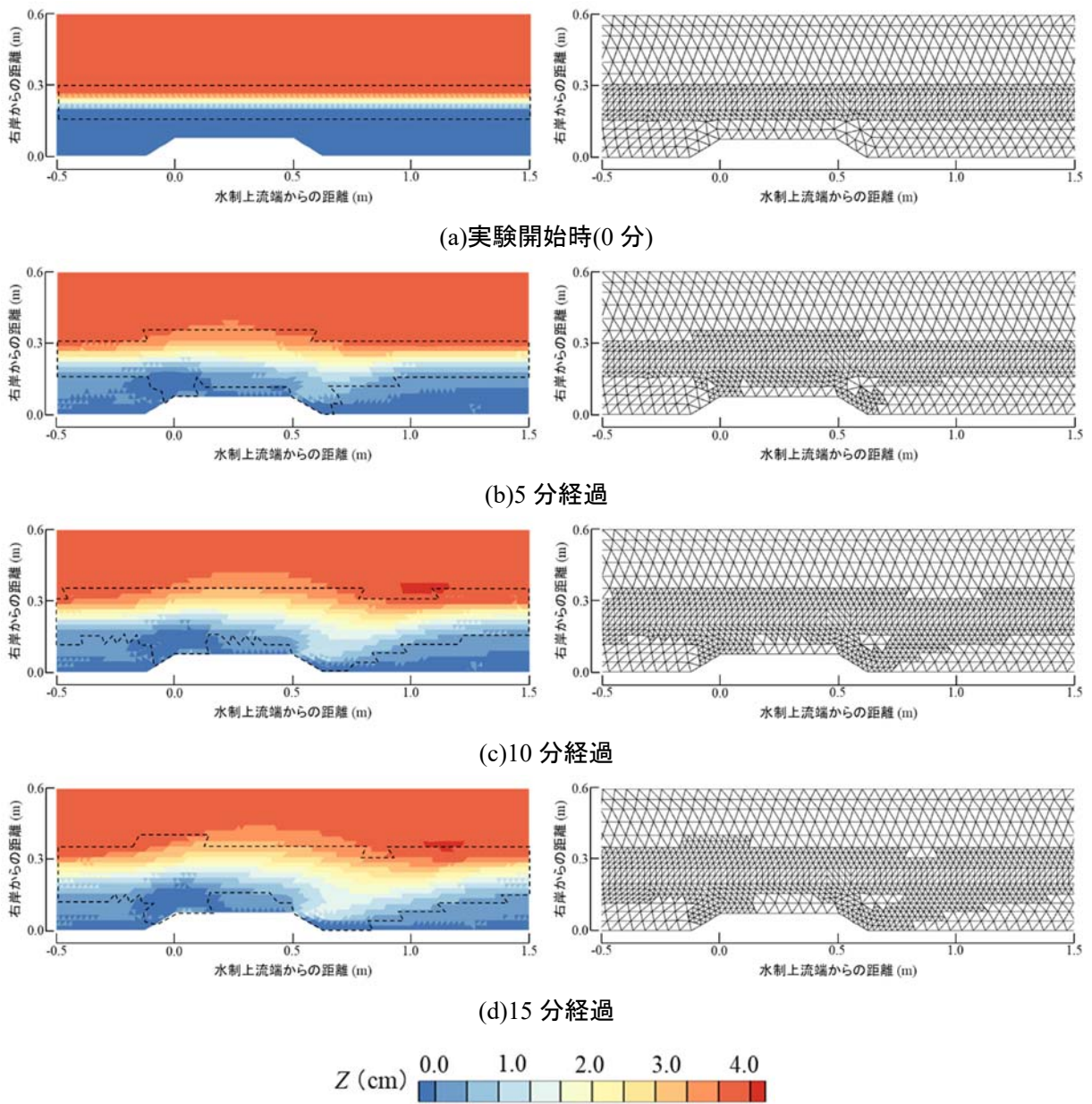


図 5.3.2 10cm 格子の格子分割の時系列変化 (Case1, dz=0.10)
 (左図: 河床高分布図(黒破線は細分格子範囲), 右図: 計算格子)

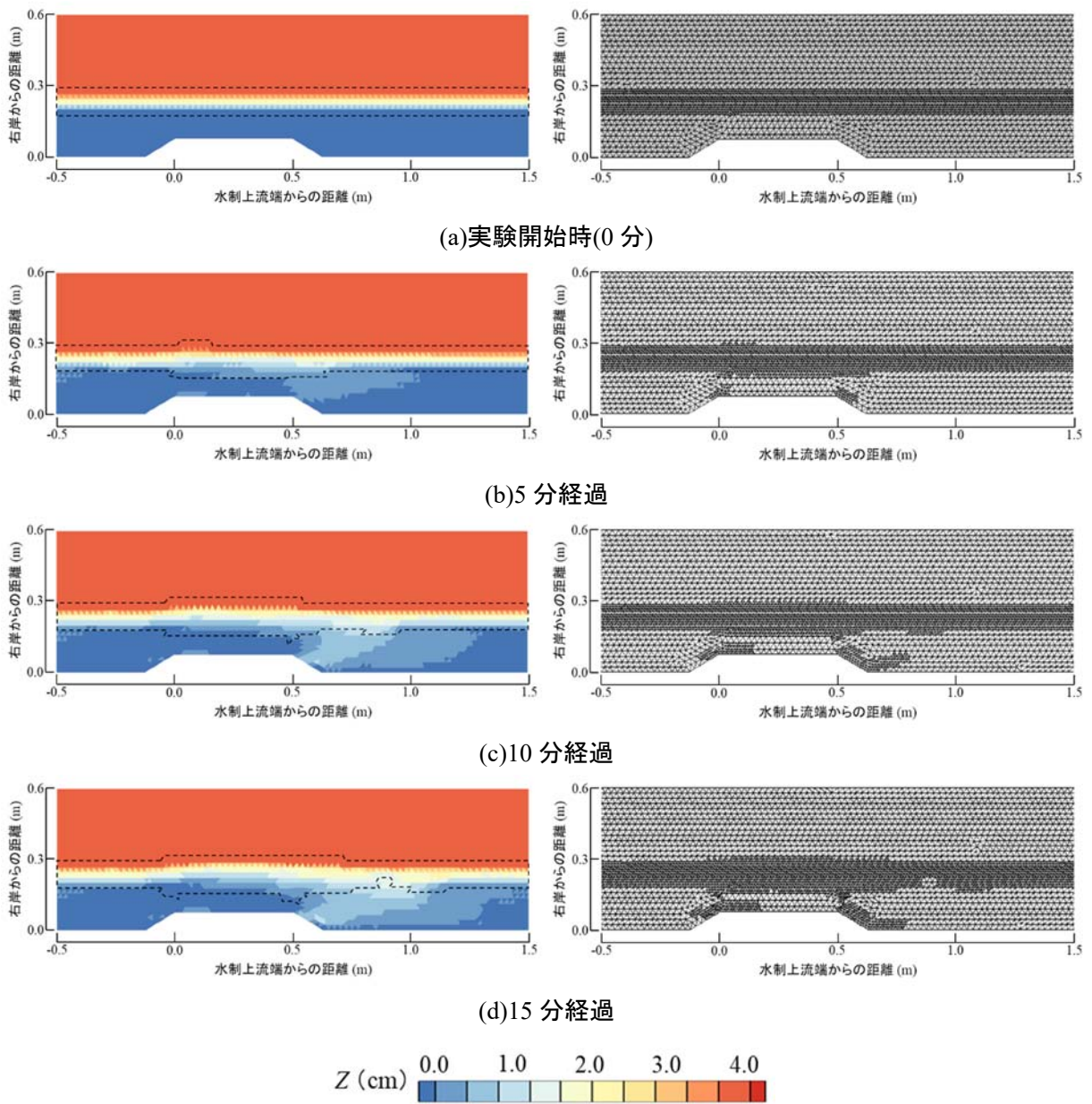


図 5.3.3 5.0cm 格子の格子分割の時系列変化 (Case2, dz=0.10)
 (左図: 河床高分布図(黒破線は細分格子範囲), 右図: 計算格子)

(3) 計算精度の比較

図 5.3.4 と図 5.3.5 に AMR 法による計算精度の比較を比較するための各ケースにおける横断形状の比較図を示した。計算格子は、①再現性の高い細かい計算格子、②再現性の低い1レベル粗い計算格子、③②の AMR 法による細分格子の3 ケースとした。なお、Case1 と Case2 で①と②の格子幅が異なるため、ケースごとに変更した。

Case1 では右岸から 30cm 周辺で、10cm 格子の地盤高が 0.5cm 程度高く再現性が低下しているが、AMR 法により河床勾配のある範囲を細分することで5cm 格子程度の地盤高となった。また、Case2 の横断 60cm 断面では右岸から 15cm~30cm の間で 5.0cm 格子の地盤高が 0.5cm 程度高いが、5.0cm 格子の AMR 法による細分格子により概ね 2.5cm 格子程度の地盤高となった。

以上より、AMR 法を用いることで、再現性に必要な計算格子より1レベル粗い計算格子を用いても同等の再現精度が確保されたことが示された。

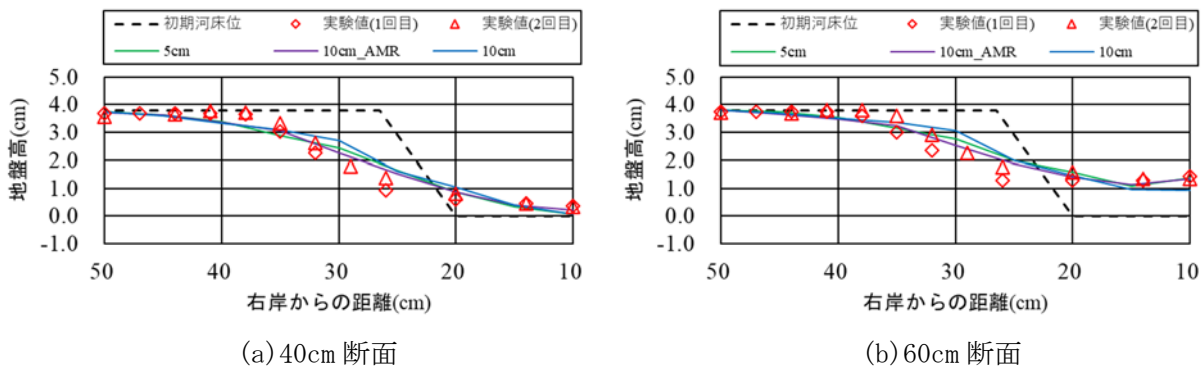


図 5.3.4 横断形状の比較 (Case1)

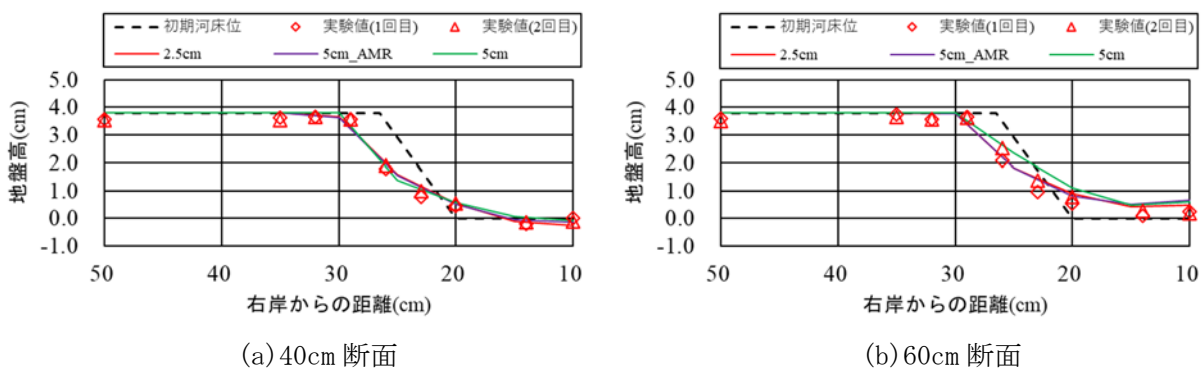


図 5.3.5 横断形状の比較 (Case2)

(4) 計算効率の比較

図 5.3.6 と表 5.3.1 に、Case1 におけるセル境界数とセル数の合計値の時系列データを示した。セル境界数とセル数の合計値は、数値解析の1ステップで複数回反復計算される数を簡易的に示したもので、計算負荷の指標として整理した(以降、合計値と省略)。なお、Case1 は浸食範囲が徐々に拡大するケースのため、時間の進行とともに計算格子の分割数が増加すると考えられる。計算格子は、本検討で最も合計値(計算負荷)の大きかった①2.5cm 格子に加え、②5.0cm 格子、③AMR 法を適用した 5.0cm 格子の3ケースで比較を行った。

河岸浸食が進行するにつれて勾配のある範囲が拡大するため、それに合わせて合計値が増加した。特に、 $dz=0.08, 0.10, 0.12$ の順に合計値が増加していることから、格子分割パラメータが小さいほど計算効率が低下することを示している。ただし、全域が細かい計算格子となっている 2.5cm 格子と分割格子の3ケースを比較すると 50%程度の負荷増加率となっており、計算効率の向上が確認された。特に、格子分割の3ケースでは3~5%程度ごとに変化しているが、実質的な計算負荷において大きな差ではない。

表 5.3.2 に Case1 におけるセル境界数とセル数と時間増加率を示した。この時間増加率は、データの受け渡しや条件分岐等に要する時間も含めた実際の計算効率を考慮した値である。表 5.3.1 の負荷増加率が 2.5cm 格子の 50%程度であったの対し、時間増加率は 80%となる。これは、本検討の計算格子数では、セル境界数とセル数の反復計算に対して、それ以外の処理時間がある程度の割合で発生しており、計算格子数に比例して計算効率に変化しなかった。なお、セル境界数とセル数の合計値がさらに大きくなる場合は、反復計算の割合が大きくなるため、負荷増加率 \approx 時間増加率となると考えられる。

2.5cm 格子と 5.0cm 格子の一部を分割した格子では、負荷増加率が 50%、実際に計算に要する時間増加率は 80%程度まで軽減することができるため、AMR 法による計算精度の向上が確認された。

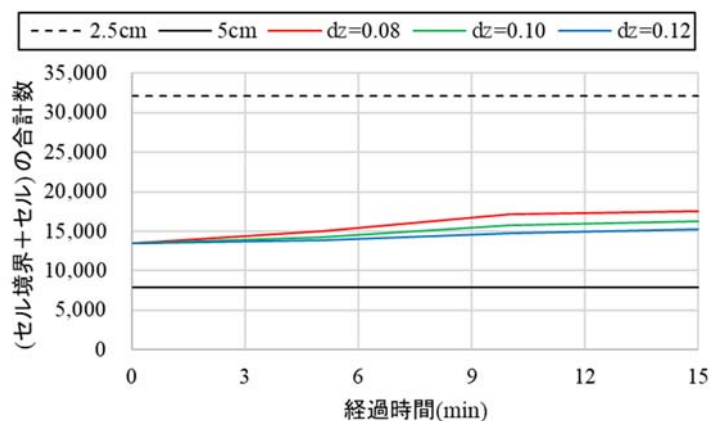


図 5.3.6 セル境界数とセル数の時系列データ (Case1)

表 5.3.1 セル境界数とセル数の遷移と負荷増加率 (Case1)

Time(min)	ケースごとのセル境界数とセル数の合計値				
	2.5cm 格子	5.0cm 格子	dz=0.08	dz=0.10	dz=0.12
0	32,155	7,938	13,501	13,501	13,501
5	32,155	7,938	14,948	14,266	13,909
10	32,155	7,938	17,151	15,800	14,738
15	32,155	7,938	17,529	16,309	15,279
負荷増加率(%)	2.5cm 格子		54.5	50.7	47.5
	5.0cm 格子		220.8	205.5	192.5

表 5.3.2 セル境界数とセル数と時間増加率 (Case1)

項目	2.5cm 格子	5.0cm 格子	dz=0.08	dz=0.10	dz=0.12
合計値※	32,155	7,938	13,501	13,501	13,501
経過時間(s)	185.4	74.1	157.7	149.1	142.8
時間増加率(%)	2.5cm 格子		85.1	80.4	77.0
	5.0cm 格子		212.9	201.3	192.7

※合計値：セル境界数とセル数

5.4 まとめ

河床勾配を格子分割パラメータとした AMR 法を適用した。AMR 法では、誤差の大きい要素を含む三角形各辺の中点を結び、4 つの三角形に分割する手法である。ここでは、AMR 法の適用性と計算効率の観点から、河床変動計算の再現性向上について検討した。

(1) 河岸浸食を追跡する格子分割

- ・水制のある区間(水制位置から 0.0m~0.5m)周辺の側岸浸食に伴い、格子分割が左岸側に広がる過程について、AMR 法を用いることで、河床変動計算による河床勾配の変化を追跡し、計算格子を分割・結合することが可能である。

(2) 計算精度の比較

- ・Case1 では右岸から 30cm 周辺で、10cm 格子の地盤高が 0.5cm 程度高く再現性が低下しているが、AMR 法により河床勾配のある範囲を細分することで 5cm 格子程度の地盤高となった。
- ・Case2 の横断 60cm 断面では右岸から 15cm~30cm の間で 5.0cm 格子の地盤高が 0.5cm 程度高いが、5.0cm 格子の AMR 法による細分格子により概ね 2.5cm 格子程度の地盤高となった。

(3) 計算効率の比較

- ・河床勾配 $dz=0.08, 0.10, 0.12$ の順に合計値が増加していることから、格子分割パラメータが小さいほど計算効率が低下したが、全域が細かい計算格子となっている 2.5cm 格子と分割格子の 3 ケースを比較すると 50%程度の負荷増加率となった。特に、格子分割の 3 ケースでは 3~5%程度ごとに変化しているが、実質的な計算負荷において大きな差ではない。
- ・データの受け渡しや条件分岐等に要する時間も含めた実際の計算効率を考慮した場合、負荷増加率が 50%程度であったの対し、時間増加率は 80%となる。これは、本検討の計算格子数では、セル境界数とセル数の反復計算に対して、それ以外の処理時間がある程度の割合で発生しており、計算格子数に比例して計算効率に変化しなかったためである。なお、セル境界数とセル数の合計値がさらに大きくなる場合は、反復計算の割合が大きくなるため、負荷増加率 \div 時間増加率となると考えられる。

以上より、AMR 法を用いることで、再現性に必要な計算格子より 1 レベル粗い計算格子を用いても同等の再現精度が確保され、また、負荷増加率が 50%、実際に計算に要する時間増加率は 80%程度まで軽減されたことから、AMR 法による計算精度・計算効率の向上が示された。

第6章 結論

6.1 本論文の結論

本論文では、低水路側岸斜面における河岸浸食特性を明らかにするために、旭川の流況を模した模型水路を設定し、複断面水路の高水敷の冠水有無による土砂輸送の動態を計測した。また、模型実験を数値解析で再現し、再現性が確保できる最適格子幅の検討と、分割した格子が必要となる箇所について検討を行った。

以下に、第2章以降での検討内容から得られた知見を要約した。

(1) 第2章 河床変動に関する予備実験

高水敷の冠水有無による低水路側岸の河岸浸食特性を明らかにするため、模型実験を行った。模型実験では、水路幅が60cmの低水路と高水敷のある複断面直線水路とし、水制を設置することによって高水敷に流れが向くような湾曲部を表現した。実験ケースは、高水敷が冠水するCase1と低水路のみを通水するCase2とした。

- ・Case1はCase2と比較して、横断方向の浸食幅が10cm程度広がり、浸食・洗堀された土砂は浸食箇所付近の低水路に最大2cm程度堆積した。
- ・低水路側岸の勾配は、Case2において、低水路側岸周辺が洗堀されることで、河床材料の安息角を超え、側岸斜面が崩落し、側岸の勾配は概ね河床材料の安息角程度を維持するように浸食された。一方、Case1では低水路側岸の斜面崩落の他に河床変動が生じ、安息角より緩勾配の状態でも流速に準じて土砂輸送が行われるため、緩勾配・広範囲に浸食が確認された。

(2) 第3章 河床変動の計算精度の検証と最適計算格子幅の検討

計算精度の検証と最適計算格子幅の検討のために、模型実験の再現計算を行った。計算格子は、低水路側岸の格子数が、1,2,4個程度で表現できる3ケースとした。

- ・格子幅が大きくなると、実験値と数値解析値に低水路と高水敷高低差の2~4割程度の誤差が生じた。また、同程度の流量であっても、高水敷に向かう流れなどの流況の変化が生じる場合、再現に必要な計算格子幅が変化することを明らかにした。
- ・計算開始から終了まで、細分化された計算格子幅が必要な領域は、全計算領域に対し局所的であり、本領域が時間的に遷移することが定量的に確認された。
- ・本研究で示した計算格子幅と河岸勾配の関係をを用いることで、動的に計算格子幅を変化させる計算モデル構築の基礎資料となりうることが示された。

(3) 第4章 三角形計算格子を用いた最適計算格子幅の検討

第3章で得られた計算格子幅と河岸勾配の関係をもとに、三角形計算格子の再現性が低下する範囲を分割した計算格子を作成し、動的な計算格子の適用を想定した予備計算を実施した。なお、高水敷の冠水有無の影響に対して水制角度の影響が小さかったため、水制角度 30° のみのケースで行った。

- ・第3章の四角形計算格子の特徴と同じく、計算格子をある程度まで分割することで実験値との差異が小さくなる。
- ・初期状態の低水路側岸の斜面に該当する計算格子のみを分割するケースでは、分割した領域で実験値との差異は小さいが、浸食箇所が左岸側に移動することで、分割していない領域で比較的大きな差異が生じた。そのため、格子分割は浸食箇所を追跡させる必要がある。
- ・実験終了時(15 min)での河床勾配の大きさ $dn > 0.10$ 程度の範囲を分割したケースでは、計算精度が確保されている細分格子と同程度の再現性を示した。動的な計算格子を適用する際、浸食や洗堀が生じない緩勾配箇所を比較的大きな計算格子としても、対象とする河岸浸食は精度よく計算できることが示された。

(4) 第5章 動的計算格子を用いた河床変動計算の高精度化

河床勾配を格子分割パラメータとした AMR 法を適用した。AMR 法では、誤差の大きい要素を含む三角形各辺の中点を結び、4つの三角形に分割する手法である。ここでは、AMR 法の適用性と計算効率の観点から、河床変動計算の再現性向上について検討した。

- ・格子分割パラメータとして河床勾配 dz を設定し、 $dz=0.10$ において河岸浸食が発生している範囲は概ね網羅され、計算精度を確保しながらと計算負荷を低減させることができる。
- ・AMR 法を用いることで、Case1 では 5.0cm 格子と AMR 法による 10cm 格子、Case2 では 2.5cm 格子と AMR 法による 5.0cm 格子の地盤高が一致しており、再現性に必要な計算格子より 1 レベル粗い計算格子を用いても同等の再現精度が確保できることが確認された。
- ・高水敷が冠水する Case1 の 2.5cm 格子と 5.0cm 格子の一部を分割した格子を比較すると、2.5cm 格子と比較して、セル境界数とセル数の合計値は 50%程度まで計算負荷を低減させることができるため、AMR 法による計算効率の向上が確認された。なお、反復計算以外の計算を考慮した実際の計算時間増加率は 80%程度となるが、計算格子数が増えると反復計算の割合が増加するため、前述の 50%程度まで低減することができる。

6.2 今後の課題と展望

本論文では、低水路側岸の河岸浸食の特性を明らかにするとともに、模型実験レベルでの AMR 法の適用することによって、計算精度と計算効率という観点から AMR 法の有効性が示された。今後の課題と展望として以下に述べる。

(1) 旭川現地への適用

現時点では模型実験レベルの検討しかできていないため、旭川を対象とした現地適用を行う。模型実験と現地地形の差異として、模型実験の低水路側岸程度の勾配が滯筋を中心に広範囲に分布していることが挙げられる。例えば、滯筋は流速が速くなる箇所、計算格子を分割することで滯筋の河床洗堀の計算精度が向上すると考えられるが、河床勾配のみを AMR 法の細分パラメータとする場合、広域で計算格子が細分され、計算効率が低下する恐れがある。そのような場合、河床勾配だけでなく、流速や水深を用いて範囲を限定するような検討が必要となる。

また、流況が非常に複雑なため、模型実験の再現計算のように計算精度が確保できるかを確認する必要がある。特に旭川で見られた砂州を横断する水路は、平水時には砂州は低水路に平行であるが、水位が上昇する洪水時には砂州を横切る水路は低水路に対して垂直方向となる。このような流況に対し、河床変動の観点から設定した計算格子の細分による分解能で再現できるのか検証しなければならない。

(2) AMR 法による河床変動計算の計算精度向上とその波及効果

平井らの課題として挙げられていた砂州を横切る水路等の再現性が向上した場合、その影響が植生消長にどのように影響するかを検証する必要がある。特に、従来、計算格子を大きくせざるを得なかったために植生分布が平滑化されており、植生消長が大局的な現象としてとらえられていた可能性があるため、細分された計算格子によるモデルの妥当性について検証する。

ちなみに、植生消長の計算精度が向上することで、河道内の草木の成長がある程度予測できるようになり、河道内樹林の管理計画への指標として有効である。正しい樹木管理により、河積が確保され、大きな洪水時への対策となる。また、旭川には旭川の放水路である百間川があり、百間川の分流部は固定堰による分流が行われるため、堰周辺に草木が繁茂すると正しく分流されない恐れがある。分流量によっては、旭川下流に位置する岡山市街地への洪水氾濫リスクが上昇することになる。

【参考文献】

- 1) IPCC(気候変動に関する政府間パネル) , <<https://www.ipcc.ch/>>. (アクセス日 : 2020 年 2 月)
- 2) 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(水工学), Vol. 70, No. 4, pp. 1369-1374, 2014.
- 3) 平井康隆, 前野詩朗, 吉田圭介, 藤田駿佑, 赤穂良輔 : 植生消長モデルを用いた礫河原再生後の物理環境変化の検証, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol. 72, No. 4, pp. 1063-1068, 2016.
- 4) 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.
- 5) 櫻井寿之, 福島雅紀, 箱石憲昭 : 置土浸食過程の実験及び現地観測による考察, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol. 67, No. 4, pp. 805-810, 2011.
- 6) 前嶋達也, 岩佐将之, 長田健吾, 福岡捷二 : 石礫複断面直線-蛇行河道の河床変動および河床材料分布に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol. 67, No. 4, pp. 769-774, 2011.
- 7) 長谷川和義 : 非平衡性を考慮した側岸浸食量式に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 318 号, pp. 37-49, 1981.
- 8) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, Md. Munsum Rahman : 移動一般座標系による側岸浸食を伴う河道変動の数値解析, 水工学論文集, 第 40 巻, pp. 927-932, 1996.
- 9) 関根正人 : 斜面崩落モデルを用いた網状流路の形成過程シミュレーション, 水工学論文集, 第 47 巻, pp. 637-642, 2003.
- 10) 後藤仁志, 堀智恵美, 五十里洋行, Abba KHAYYER : GPU による粒子法半陰解法アルゴリズムの高速化, 土木学会論文集 B, Vol. 66, No. 2, pp. 217-222, 2010.
- 11) 曾新翔, 赤穂良輔, 石川忠晴, 中村恭志 : 非構造三角格子に基づく津波数値解析の GPGPU による高速化, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 69, No. 4, pp. 619-624, 2013.
- 12) 吉田 圭介, 田中 龍二, 前野 詩朗 : GPU による分流を含む洪水流計算の高速化, 土木学会論文報告集 B1(水工学), Vol. 71, No. 4, pp. 589-594, 2015.
- 13) 安田浩保, 星野剛 : 四分木構造格子による局所的な高解像度格子を導入した浅水流方程式の数値解析法, 河川流量観測の新時代, 第 2 巻, 2011.
- 14) 星野剛, 安田浩保, 永多朋紀 : 四分木構造格子を導入した自然河川における分岐点と合流点の数値解析法, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol. 68, No. 4, pp. 853-858, 2012.
- 15) 上野卓也, 由比政年, 天方匡純, 榎田真也, 斎藤武久, 四分木格子を適用した有限堆積法に基づく数値モデルの構築と透過性防波柵周辺の津波浸水流解析への適用, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. 25-30, 2016.
- 16) 曾新翔, 中村恭志, 赤穂良輔, 石川忠晴 : 非構造三角形格子と有限体積法に基づく津波数値解析における計算誤差と AMR 法の有効性に関する検討, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 70, No. 4, pp. 793-798, 2014.

- 17) 木村一郎, 山蔦涼, 岩崎理樹, 清水康行: 地形空間スケールを考慮した動的マルチレベル格子法 (KMR-MB 法) による河床変動計算, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 69, No. 4, pp. 643-648, 2013.
- 18) 大槻順朗, 伊豫岡宏樹, 二瓶泰雄, 吉森祐介, 中村俊介, 鬼倉徳雄: 荒瀬ダム撤去後の堆積土砂の流出・堆積状況, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 72, No. 4, pp. 853-858, 2016.
- 19) 斉藤翔吾, 齋藤佳彦, 西村浩一, 木村一郎: 北海道ニセコ町における大規模人工雪崩実験とその粒子法による数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 72, No. 4, pp. 853-858, 2016.
- 20) iRIC Software, <<http://i-ric.org/ja/>>. (アクセス日: 2018 年 3 月)

謝 辞

本論文は、岡山大学大学院環境生命科学研究科教授 前野詩朗先生(現, 特任教授), 同准教授 赤穂良輔先生のご指導の下, 実施してきた成果をまとめたものです。ここに深謝の意を表します。

前野先生には、2013年に研究室配属してから7年もの間、指導教員として多くのご助言をいただきました。大学院博士後期課程に在籍していた2017年に家庭の事情で就職する道を選択したとき、私の身勝手な選択ではありましたが、将来的により良い選択となるようご配慮いただきましたこと、大変感謝しております。なお、前野先生が指導教員である間に本論文を仕上げるができなかったことは心残りです。申し訳ありませんでした。

赤穂先生には、博士後期課程での研究で熱心なご指導をいただきました。博士後期課程の学生として勉強が足りず、色々ご迷惑をおかけしました。終始丁寧なご指導とご助力いただきましたこと、大変感謝しております。

岡山大学大学院環境生命科学研究科准教授 吉田圭介先生には、学部と博士前期課程の研究でご指導いただきました。吉田先生には、夜遅くまで研究を見ていただき、親身になって相談にのってくださいました。今も楽しかった記憶とともに覚えており、感謝しております。

研究においては、先生方をはじめ、多くの水工デザイン学研究室に所属していた仲間たちに支えられてきました。特に、本論文を仕上げるにあたり、高橋巧武君、中山彰人君、中岡強君、永田貴美久君には、多くの時間を割いて協力していただいたこと、感謝しております。また、本研究を遂行するにあたり、旭川をフィールドとした研究で得られた成果の提供をいただきました。平井康隆氏、松山悟氏、藤田駿佑君、岩城智大君、山口華穂さん、小川修平君をはじめ、関係された皆様に感謝申し上げます。

株式会社ウエスコには、博士後期課程在籍中の就職でありましたが快く受け入れていただき、松原利直社長をはじめ、多くのウエスコの皆様を支えていただけたこと、大変感謝しております。また、高橋邦治氏、植木真生課長には、入社1年目から仕事と学業を両立する難しさについてご理解いただき、ご助力いただきました。渡辺敏氏には、入社1年目に退学を考えていた折に、前野先生との間に立って相談に乗っていただけたことは大変ありがたく、感謝しております。これから先、皆様方の力となれるよう、研鑽してまいります。

最後に、本論文を提出できたことは、前野先生や赤穂先生をはじめ、家族や友人、そして多くの人に支えられてきたおかげです。ここに感謝の意を表し、結びとさせていただきます。