

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月24日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20360224

研究課題名（和文）洪水時における中規模河床波の変形に着目した流路形成機構に関する研究

研究課題名（英文）Study on Channel Formation Process focused on changing of bar form during flood

研究代表者

渡邊康玄（Watanabe Yasuharu）

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：00344424

研究成果の概要（和文）：平成22年および23年に発生した実際の洪水時の河岸侵食を伴う流路変動について理論解析及び新たに開発した河床変動と河岸変動を同時に計算出来る数値計算モデルを解析し、中規模河床形態およびそれに基づく水みちと被災原因との関係を定量評価するとともに、河岸侵食を伴う新たな流路の形成過程について検討を行った。また、新たに開発を行った座標軸非依存型の河道変形モデルを用いて、中規模河床形態の維持機構の解明を行った。

研究成果の概要（英文）：The channel shift with bank erosion at the time of the actual flood in 2010 and 2011 was analyzed using the theoretical analysis and newly developed numerical computation model which can calculate bed deformation and bank erosion. The quantitative evaluation of the relation between bar formation, the channel which is formed on bars and the disaster was carried out. And the formation process of the new channel with bank erosion was examined. Moreover, the continuation mechanism of bed forms was elucidated using the numerical model for bed deformation with new boundary fitting method based on the Cartesian coordinate system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：河川工学

1. 研究開始当初の背景

砂州に代表される中規模河床形波に関する既往の研究では、その発達形成の時間スケールが洪水のそれに比べて十分に長いと考えられてきたこと及び、河床形状が低水路満杯程度の流量で規定されるとの判断から、平坦河床を初期条件とした定常流れのもとで水理実験や解析が重ねられてきた。これらの考え方は、文字通り低水路内に限定された中

規模河床形波の動態を取り扱っているだけにすぎない。しかし、現実的には災害時の河道の変化を詳細に解析し、数百年から千年程度の連続した時間軸を導入して河川がこの期間内に経験する洪水をも含めて議論するべきであることが明らかとなってきた。すなわち、河川地形のうち流路形状は過去の洪水履歴と密接に関与していると言え、特に谷底低地から自然堤防が卓越する中流域の河道

の形成過程の大部分は中規模河床形波の知見を通して理解できる。このことは、一方で、従来までの中規模河床形波の研究はその性質の一部だけを対象として行われていたことを意味し、流路形成機構の全体像に迫るためには時間の尺度や流量規模の拡張が不可欠であるとの考え方が必要であることを示してきている。このように、学術的知見の蓄積や社会的要請の観点から言っても、中規模河床波の形成を規定する流量の非定常性に着目した詳細な検証を行うべき時期に達している状況にある。

2. 研究の目的

中規模河床形波における流量規模の履歴効果について、水理実験、理論解析、数値解析、さらには実河川からの実証を駆使した検討を行い、従来までの土砂水理学が教える中規模河床形波の知見を補完する新たな理論体系の確立を目指す。特に、非定常の条件下における流量の通水継続時間と最大流量規模の両者の相互作用が中規模河床形波に与える影響をも記述しうる中規模河床形波の理論体系を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、流量の非定常性を導入した中規模河床形波の形成機構の理論体系の構築のために行うもので、図-1 に示すように、河川流量の非定常性の各時間ステージごとの中規模河床波の発達特性を解明することを目的とした[要素研究-1] から[要素研究-3]、これらを結びつける流量に応じた川幅の決定機構の理論解析、これらに加え河岸侵食などの大規模な河岸変動をも包括しうる座標軸非依存型の計算法に基づく河道変形の予測モデルの開発を行う。

4. 研究成果

(1)洪水減水期に形成される水みちの発達過程および洪水減水期に形成された水みちが平水流量から受ける影響の解明[要素研究 1 および要素研究 2]

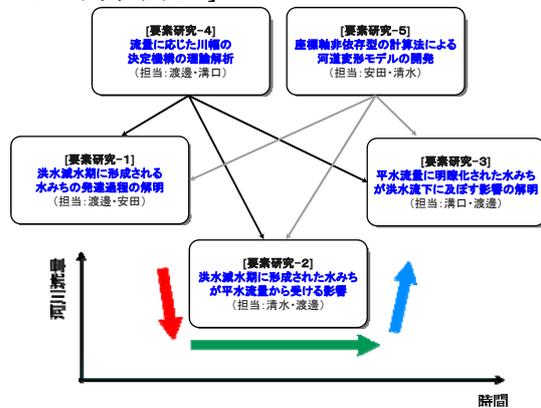


図-1 研究のフロー

要素研究 I 及び 2 では、洪水時の減水期間内での流量の減水方法や減水速度に着目し、洪水時に形成される砂州と平常時に存在する水みちとの因果関係について、水理模型実験を実施し、検討を行った。

実験は、洪水減水期のハイドロ形状が、十分に発達した交互砂州地形における水みち形成に与える影響を調べるため、次の三段階で行った。第一段階は、洪水期に形成される交互砂州を形成させるため、十分に発達した交互砂州が形成される流量（以下大流量と呼ぶ）を一定時間定流で通水する。第二段階は、第一段階で形成した交互砂州を初期河床として、流量を後述するハイドロ形状で減少させていき、水みちを形成させる。第三段階は、第二段階で形成した水みち地形を初期河床として、第二段階で減少させた最終の流量（以下小流量と呼ぶ）を 40 分間通水し、水みちの変化を観察する。なお、上流の河床低下を抑制し流砂の動的平衡状態とするために、大流量時のみ乾燥砂を上流端から常時供給した。実験に用いたハイドロ形状は減水期間を 40 分と固定し、減水速度を時間的に一定にした場合 Case1 と減水速度が時間的に異なる場合（流量の時間変化が下に凸の形状を持つ）Case2 の実験を行った。実験では、水みち形成への流量の遞減勾配（以下減水速度とする）の影響を把握するため、平常時の流量が異なる場合として、Case1 においては小流量が大流量の 1/10 (Case1-1), 1/6 (Case1-2), 1/4 (Case1-3), 1/2.5 (Case1-4) とした条件と Case2 においては、小流量が大流量の 1/10 (Case2-1), 1/6 (Case2-2), 1/4 (Case2-3), 1/2.5 (Case2-4) とした条件で実験を行った。

第二段階で最も水みちの形状が明瞭であった Case2-2 の水みち形成流量と減水速度で、全ての通水ケースの第二段階での流量と減水速度をそれぞれ無次元化したものを図-2 にまとめた。水みちが明瞭に形成されている

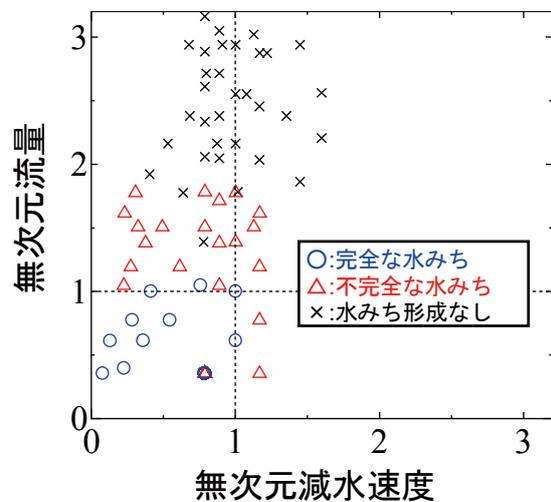


図-2 流量と減水速度の違いによる水みちの形成状況

状態を○とし、水みちが一本に収束せずに分岐する場合や、河床の明瞭な浸食を伴わず表面流のみが一筋の流水となった場合等不完全な水みちを△とし、水みち状のものが全く形成されていない場合を×とした。その結果、減水後期の減水勾配が緩い場合でかつ減水過程で水みち形成流量を経験する場合にのみ明瞭な水みちが形成されることが明らかとなった。また、河岸の流砂の安定から導かれた池田の理論川幅と実験で得られた水みち幅を比較した結果、水みち形成流量で形成される水みち幅と最終的な水みち幅は、理論川幅を用いることによって、推定可能であることを示した。

第二段階の洪水減水期に形成された水みちのうち、明瞭に形成された水みちは、第三段階での小流量では、水みちの蛇行した形状が下流側へ移動する傾向は認められたものの、大きく変化しなかった。また、水みちが明瞭に形成されなかったケースについても、第三段階では新たに水みちが形成されることはなかった。このように、減水期での明確な水みちの形成の有無により、その後の平常時における河道の応答が異なることが明らかとなった。

(2) 流量に応じた川幅の決定機構の理論解析

川幅と水理量との関係については、我が国の河川においても従来から検討が行われてきており、レジーム則の係数は概ね 4~5 程度の値をとるといわれている。要素研究 4 では、出水の期間が比較的長く河道の形状を支配するといわれている融雪出水の存在する北海道の一級河川データを用いて、川幅と流量との関係を確認した結果、図-3 に示すように、河道の勾配すなわち、水理量にも大きく依存することを明らかとした。

水理量と川幅との関係を明確にするため、河道の横断的な形状の安定という視点から捉え、これらの形成機構について線形安定理論を適用して解明することを試みた。

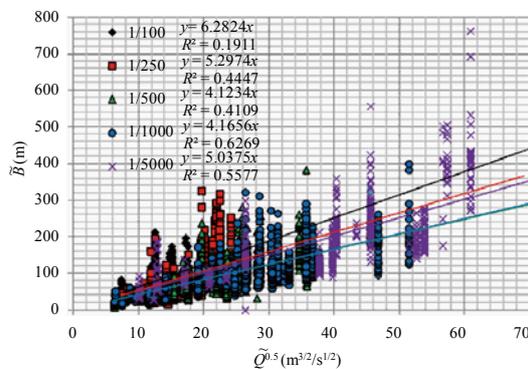


図-3 北海道の一級河川における河道勾配をパラメータとした流量と川幅の関係

基礎式に2次元浅水流式と連続の式および掃流砂を対象とした流砂連続式を用い、河床の微小攪乱として式(1)を与えた。

$$(U_1, V_1, H_1, D_1) = (C_1 u_1, S_1 v_1, C_1 h_1, C_1 d_1) E_1 \quad (1)$$

ここで、

$$(S_1, C_1, E_1) = (\sin(\lambda y), \cos(\lambda y), \exp(rx + \omega t))$$

なお、 x, y, t は縦横断方向の座標及び時間軸であり、 U_1, V_1, H_1, D_1 は、等流から変化する微小攪乱を表しそれぞれ無次元のx軸方向流速、y軸方向流速、水位、水深である。 u_1, v_1, h_1, d_1 は、それぞれの微小攪乱振幅である。また、 λ は、微小攪乱の横断方向波数である。 (ω, r) は、摂動量の時間及び縦断方向に関する増幅率である。

安定解析は、特定の波数を持つ微小攪乱が時間的に増幅するかどうかを見るものであり、式(1)で表される微小攪乱を基礎式に代入して解析するものであり、最終的に、式(2)が得られる。式(2)を用いて、ある水理量の条件下において、最大の増幅率となる波数を求めることが可能となる。

$$F(\lambda, \omega, \vartheta_0, d_s) = 0 \quad (2)$$

ここで、 ϑ_0 は、等流状態の無次元掃流力であ

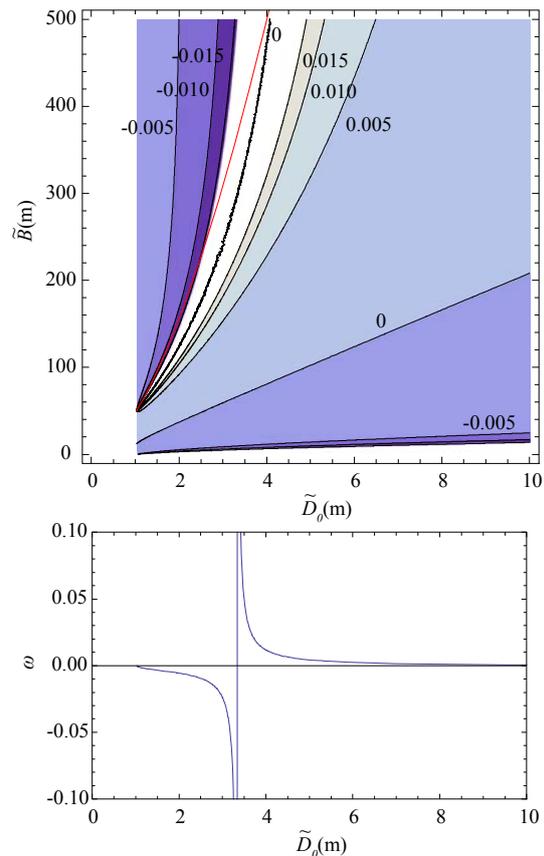


図-4 等流水深と基本川幅の関係 ($d_s = 5\text{cm}$, $I = 1/250$, $r = 0.20$)

上図：時間増幅率 ω のコンター図

下図： $B = 300(\text{m})$ の ω の値

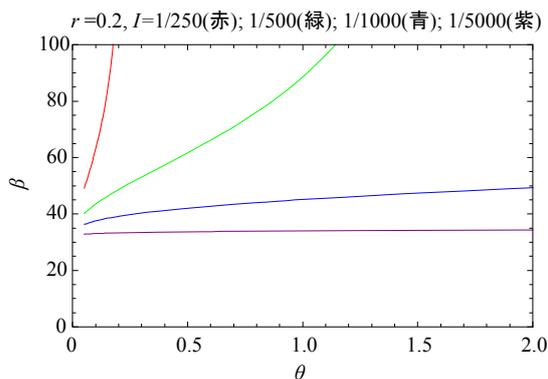


図-5 基本川幅と水深との比と無次元掃流力との関係

り、 d_s は、水深で無次元化された粒径である。本解析では、増幅率について特異点を持ち、この値が既往のレジーム則と一致する結果を得た。波数を波長（基本川幅）に変換した結果の一例を図-4に示す。

河床勾配をパラメータにとり、基本川幅と水深との比 β と無次元掃流力との関係を見たものが図-5である。河床勾配がゆるやかな場合は無次元掃流力によらず基本川幅水深比はほぼ一定の値を示すが河床勾配が大きくなるに従って無次元掃流力の増加とともに基本川幅水深比が大きくなる特徴を示す。このように、北海道の1級河川における川幅と流量の関係における河床勾配によってその傾向が変化するということも理論的に説明できることを示した。

(3) 平水流量に明確化された水みちが洪水流下に及ぼす影響の解明

一般に、中規模河床形態が生じる河川においては、治水安全度向上のため直線化等の河道整が実施されても、時間の経過とともに水みちが蛇行していくことが知られている。この蛇行した水みちが出水時に形成される中規模河床形態に基づくことを、第1章で明らかにした。ここでは、出水後期に形成された蛇行した水みちが洪水流に及ぼす影響について、実際の河道の変化を基に検討を行うこととした。

2011年8月に、北海道の十勝川水系音更川において、低水路の河岸侵食に伴う破堤が生じた。破堤箇所近傍観測所でのピーク流量は $548\text{m}^3/\text{s}$ であり既往第3位の出水規模であった。既往第一位および第二位の出水は2003年および1981年に生起しているが、これらの出水時には規模の大きな河岸侵食等は生じていなかった。1981年の出水における出水では、直前に河道整正が行われており、水みちも形成されていないと推定された。また、2003年の出水では、低水路の若干の変遷は認められるものの、大規模な侵食は発生していないことが確認されている。2011年の出水直前

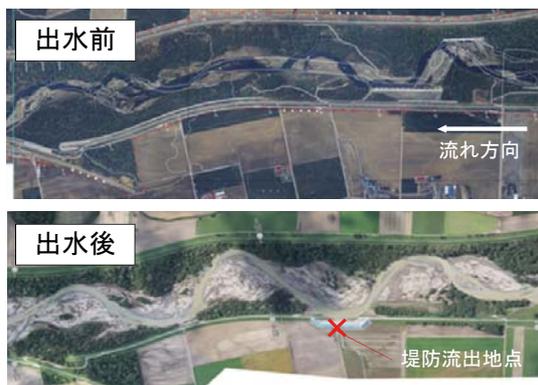


図-6 2011年音更川出水における破堤箇所近傍の状況

と2003年の出水後の水みちの形状を比較したところ、その間の融雪出水等により、水みちの蛇行の振幅が増すとともにやや下流へ移動していた。このように、2011年の出水直前の水みちは、他の2つの出水時に比べ水みちは、明瞭に形成されているとともに振幅が大きい蛇行形状を示していた。図-6に示される2011年の出水前後の地形を波数解析した結果、水みちに対応する複列砂州状の地形が出水に伴って形成されていることが確認され、この形状が出水減水期に発生した河岸侵食の一因となっていることが判明した。このように、明瞭に形成された水みちは、出水時に形成される中規模河床形態の形状を規定するとともに、出水減水期の水みちの形成をも強める場合があり、河道管理上その挙動を解明することは極めて重要な事項であることが明らかとなった。

(4) 座標軸非依存型の計算法による河道変形モデルの開発

河道の幾何学形状は単純な数学関数により記述することは容易ではないため、柔軟かつ効率的にその形状を数値計算に取り込むために一般座標が広く用いられている。しかし、一般座標による境界適合では格子構成の歪曲が大きい場合では座標変換に伴う打ち切り誤差が顕在化して計算が不安定となる欠点がある。具体的には、複雑な流路形状の格子を自動的に生成することは事実上困難なため、適用可能な形状が限定される。例えば、分岐・合流を有するような河道の格子生成は演算時間を大きく上回る作業時間が必要になるうえ不安定の回避のために計算時間の分割間隔を極めて短くしない限り適当な解析結果を得ることが難しい。このような実情を踏まえ、(1)境界適合の自由度の確保と格子構成の作業負担の軽減、(2)格子依存性誤差の影響を受けない解析法の二つの要件を両立する四分木構造格子を導入した新しい境界適合法の開発に取り組んだ。

四分木構造格子を導入し境界適合法は、既往の一般座標などに基づく境界適合法とは

発想の根本を全く異にするもので、様々な大きさの矩形格子を複合的に組合せてあらゆる幾何学形状の境界適合を自由自在に実現し、矩形格子を基本とするために格子の歪曲に伴う計算精度の低下が一切発生しない特徴を有する。しかも、格子構成は一意に決定されるために短時間のうちに自動生成できる上、局所的に解像度を増減させた効率的な格子構成が実現されるために演算時間は従来手法と比して最大で 10 倍程度まで高速化される。この境界適合法が開発されたことで、従来までに解析が極めて困難とされた河川の分岐点や合流点の流況解析が容易に実現され、今後、研究と実務の両者において幅広く重用されることが期待される。さらに、研究の進展に伴いこの解析法は河道と氾濫原の一体解析に対しても極めて有効であることが見出された。これまで河道と氾濫原の一体的な解析は格子構成の制限や不効率性から水理学的厳密性の保持が困難であった。その結果、複数の破堤点や縦断的に連続した破堤区間を有する氾濫現象では、流況を適切に把握することは難しいとされていた。これに対して、四分木構造格子では河道内を細分化された格子、氾濫原を粗い格子とすることで、格子数の増加を抑制しつつも河道内の流れと氾濫水の挙動を忠実に再現できることが確認された。

この結果を受け、従来の直線水路における中規模河床形態に関する知見を本手法を用いて検討することとした。既往の砂州のモード減少を指摘する研究は直線水路で行われたものがほとんどである。これに対し、直線流路が縦断的に連続する実河川は稀である。両者の相違への注目はごく単純な着想といえるものの、過去に流路の平面形と複列砂州の関連性を調べた研究はほとんど行われていない。そこで、複列砂州を維持する実河川の平面形を調べたところ、斐伊川をはじめ、鬼怒川、札内川などいずれの河川とも周期的に拡縮を繰り返す共通した平面形状であることが判明した。sine-generated curve で構成される拡縮流路および顕著な拡縮形状の自然河川において複列砂州の形成条件を与える数値実験を行った。いずれの拡縮流路でも既往の知見に反して縦断的に連続した複列砂州が長時間にわたり維持されることが明らかになった。これらの一連の結果は、複列砂州のモード減少は自由砂州成分が卓越する直線水路に特有の現象であり、これとは対照に拡縮水路では流路形状が誘発する強制砂州成分と自由砂州成分とが混合するために結果的に多モード保持、すなわち複列砂州が維持されると総合できる。つまり、少なくとも実河川において横断方向波数が 2~3 の複列砂州形態が安定的に維持されるか否かの把握には、従来から用いられてきた川幅水

深比に基づく領域区分の概念と流路の平面形状の組み合わせが不可欠であるとの結論に至った。これらの成果は既往研究が固定壁の直線水路で行われたばかりに見過ごされてきた中規模河床波の基本的性質と言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

- 1) 益本孝彦・渡邊康玄・佐々木章允：洪水減水期における水みち形成に関する実験，土木学会河川技術に関する論文集 15 巻，pp225-230, 2009 (査読有)
- 2) 永多朋紀・安田浩保・渡邊康玄：標津川の蛇行試験区間の河道変遷とその維持機構の物理的な解釈，河川技術論文集 15 巻，pp255-260, 2009 (査読有)
- 3) 渡邊康玄，早川博，清治真人：安定解析に基づく川幅の自律形成機構，土木学会水工学論文集 53 巻，pp739-744, 2009 (査読有)
- 4) 近藤祐介・清水康行・木村一郎・Gary PARKER：Slump block と内岸の陸地化の影響を考慮した自由蛇行の形成過程に関する数値解析，土木学会水工学論文集 53 巻，pp769-774, 2009 (査読有)
- 5) 溝口敦子：低水護岸を有する矢田川低水路における交互砂州の変動特性，河川技術論文集 16 巻，pp107-112, 2010 (査読有)
- 6) 益本孝彦・渡邊康玄：洪水減水期における水みちの形成，水工学論文集 55 巻，pp799-804, 2011 (査読有)
- 7) 佐々木章允・渡邊康玄：常呂川における地形と植生による土砂輸送への影響，水工学論文集 55 巻，pp889-894, 2011 (査読有)
- 8) 木村祐輔・渡邊康玄・小泉健太・永多朋紀・赤堀良介：洪水時での流木流下特性と流水型ダム貯水地内における流木集積状況，土木学会河川技術論文集 17 巻，pp341-346, 2011 (査読有)
- 9) 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，土木学会 応用力学論文集 14 巻，pp693-702, 2011 (査読有)
- 10) 高橋 玄・安田 浩保：流路の平面形状が中規模河床波の形成過程に及ぼす影響，土木学会 応用力学論文集 14 巻，pp653-660, 2011 (査読有)
- 11) 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，土木学会河川技術論文集 17 巻，pp325-328, 2011 (査読有)
- 12) 岩崎理樹・渡部靖憲・奥寺亮太・清水康行・木村一郎：感潮湿原に形成される水路網の形状特性，土木学会論文集 B2(海岸工 学)2 巻，pp944-951, 2011 (査読有)

- 13) 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法，土木学会論文集 68 巻，pp853-858,2012(査読有)
- 14) 高橋 玄・安田浩保：複列砂州の維持条件に関する一考察，土木学会論文集 68 巻，pp961-966,2012(査読有)
- 15) 岩崎理樹・清水康行・木村一郎：浸透流を考慮した Tidal Creek の発達過程に関する数値解析，土木学会論文集 B1(水工学)68 巻，pp979-984,2012(査読有)

〔学会発表〕(計 17 件)

- 1)A.Mizoguchi and T.Tsujimoto : Influece of Sediment-Supply Condition on Bar Morphology, River,Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM2006 volume2 2 巻，pp751-758, 2009
- 2)Y.Watanabe & T.Masumoto : Experimental study on channel formation in low flow conditions on bars created in high flow conditions , Proceedings of the 6th IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM2009), Universidad Nacional Del Litoral, Santa Fe, Argentina, 21-25, September, 2009.
- 3)G.Parker, E.C.Eke and Y.Shimizu : Steady, uniform bend flow over an erodible bed with transverse bedload flux: A window to the process of meander migration, Proceedings of the 6th IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM2009), Universidad Nacional Del Litoral, Santa Fe, Argentina, 21-25, September, 2009.
- 4)Y.Shimizu : Numerical modeling of bedforms and channel geometry under unsteady discharge with uniform and non-uniform sediment transport, Proceedings of the 6th IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM2009), Universidad Nacional Del Litoral, Santa Fe, Argentina, 21-25, September, 2009.
- 5)T. Nagata, H. Yasuda, Y. Watanabe : A Study onFlowDistributionforMaintaining Two-way Channel in an Alluvial Plain, 6th International Symposium on Environmental Hydraulics, IAHR, 2010
- 6)安田 浩保, 星野 剛：四分木構造格子を導入した浅水流方程式の数値解析法，土木学会関東支部発表会 2011
- 7)青木一展・溝口敦子：低水路幅の違いが及ぼす砂州変動特性への影響，土木学会中部支部研究発表会 2011
- 8) 赤堀良介・渡邊康玄：複断面蛇行流路における流木の挙動に対する面的計測，土木学会年次学術講演会講演会 2011
- 9) 高橋玄・安田浩保：流路の平面形状が中規模河床波の形成過程に及ぼす影響，土木学会年次学術講演会講演会，2011

- 10) 高橋玄・安田浩保：複列砂州の維持条件に関する一考察，土木学会関東支部新潟会技術研究発表会 2011
- 11) 星野剛・安田浩保・永田朋紀：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法，土木学会関東支部新潟会技術研究発表会 2011
- 12) Iwasaki, T., Y. Shimizu, & I. Kimura : Experimental and numerical studies on development of tidal creek network, Proceedings of International Symposium on River, RCEM 2011
- 13) Kazutaka ASAH, Yasuyuki SHIMIZU, Gary PARKER, Jonathan NELSON : Development of Numerical Simulation of Free Meandering with Natural Cutoff Rivers, RCEM2011
- 14) 木村祐輔・渡邊康玄・福岡将太：流水型ダムの土砂移動に関する水理模型実験，平成 23 年度土木学会北海道支部年次報告会 2012
- 15) 島絵梨子・渡邊康玄・福岡将太：流路網形成過程に関する基礎的水理模型実験，平成 23 年度土木学会北海道支部年次報告会 2012
- 16) 福岡将太・渡邊康玄：2011 年 9 月音更川出水における砂州の発達と河岸浸食，平成 23 年度土木学会北海道支部年次報告会 2012
- 17) T. Iwasaki, Y. Shimizu & I. Kimura : Numerical simulation of bed evolution and channel migration in rivers, Proceedings of River Flow2012

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況(計 0 件)
- 取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

北見工業大学 社会環境工学科
(渡邊康玄)
研究者番号：00344424

(2)研究分担者

北海道大学大学院・公共政策学連携研究部
(清水康行)
研究者番号：20261331
新潟大学・災害復興科学センター
(安田浩保)
研究者番号：00399354

(3)連携研究者

なし