

平成 21 年 3 月 26 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760334
 研究課題名 (和文) 2次流と河岸水際の移動を考慮した、新しい準構造格子による
 河川流解析法の開発
 研究課題名 (英文) Numerical solver of river flows with secondary currents using new
 class of semi-structured mesh with waterline capturing technique
 研究代表者
 吉田 圭介 (YOSHIDA KEISUKE)
 東京工業大学・大学院総合理工学研究科・産学官連携研究員
 研究者番号：50436721

研究成果の概要：

河川実務に供する低負荷かつ高精度な計算モデルを構築し、併せて航空写真解析を行って、その実流動への適用性を検討した。主な成果は、(1)形状が不規則な実河川の広域流動を簡易に解析可能とした点、(2)二次流の効果を準三次元計算である程度表現した点、(3)少ない格子で高精度計算を実現するため、“斜め CIP-Soroban 法”を創出した点である。また、航空写真解析では実体視と相関法を併用して高精度化と省力化を図った点も成果として挙げられる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1, 300, 000 円	0 円	1, 300, 000 円
2008 年度	1, 100, 000 円	330, 000 円	1, 430, 000 円
年度			
年度			
年度			
総計	2, 400, 000 円	330, 000 円	2, 730, 000 円

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：河川流の計算，2次流，河岸の水際移動，CIP-Soroban 法，円筒座標

1. 研究開始当初の背景

河川法の改正に伴い、全国的に河川整備計画が策定されつつある。その結果として河道形状の見直しが行われる河川も多いと思われる。河道形状の設計にあたり、現代では、利水施設の配置・機能、自然環境の保全、親水性を含めた高水敷の利用など、多様な要素を考慮しなければならない。一方で、河道形状の骨格は、大出水を滑らかに且つ安全に流下させるものでなければならない。したがって、上に述べた常時の河川機能を踏まえ、洪水流の挙動を適切に把握するためのシミュ

レーション手法の開発が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では常時の河川機能を踏まえて、河川長区間における洪水流の挙動を適切に予測できる新たなシュミレーションモデルの開発を行う。その場合、従来の河川実務で多用されてきた、低負荷な1次元不定流解析や2次元浅水流解析のみではなく、いわゆる2次流の挙動を適切にモデルに取り込む。なぜならば、河川における流動や物質輸送などの問題に対して2次流は大きな影響を及ぼすからである。また、河川実務では短時間で簡易

に、屈曲した広範囲の河道内の流動及び物質輸送を予測する必要がある。そこで、本研究では河川流に特化した新たな計算法(斜め CIP-Soroban 法)とそれに適した計算格子(斜め Soroban 格子)を創出し、実務で容易に利用可能な汎用性の高い計算法の確立を目指す。

一方、洪水の研究で問題となるのは現地流動情報の取得である。その理由としては、(1) 人員導入による洪水時の観測は危険を伴い、(2) 高価な計測装置を用いた観測では機材の紛失の可能性が高く、(3) 広域の洪水観測には莫大な費用が必要となり、(4) 洪水は稀な現象であり、時期を得た観測が必要である点などが挙げられる。そのため、洪水対策に供する学術的成果はなかなか得られにくいことが知られている。一方、洪水時の河川流況の観察や調査において、遠隔地からの間接的なデータ取得を行っている研究例がある。具体的には、小型航空機やヘリコプターなどの飛行体から撮影された写真(航空写真)の解析や、高層ビルの上階から撮影されたビデオ画像の解析などが挙げられる。この中で、航空写真は洪水時に広範囲に渡る流況や災害時の被害状況を定性的に把握するために取得され、主要な河川の管理事務所で保管されている。しかし、こうした貴重な資料は広域の河川管理上取得される傾向が強く、現地の情報として活かされているとは言い難い。そこで、本研究ではこの航空写真を学術目的で活用することを考える。つまり、航空写真を画像解析して現地の流況を定量的に把握し、先に挙げた数値シミュレーションモデルの検証に役立てる考えである。

3. 研究の方法

本解析モデルの特徴は3点ある。1点目は平面2次元モデルに対して Galerkin 水深積分により準3次元化を行い、河道湾曲に伴う第1種2次流を2次元の枠組みで考慮できる点である。一般に、河川の平面的な流れの偏りを適切に評価するには浅水流方程式では不十分であり、これは湾曲河道内の流れが2次流により3次元的となるためである。しかし、実務上、数十km以上にわたる長区間洪水流の3次元計算は負荷が大きいので、2次元の枠組みで構成される準3次元モデルは有利である。さらに、準3次元計算では水表面流速を直接算定できるため、航空写真解析結果との比較が容易である。

2点目は Soroban 格子と呼ばれる適合格子を用い、CIP法を併用して高精度な移流計算を実現したことである。一般に、矩形格子による長区間の湾曲河道の計算は困難であり、また境界適合座標法(BFC法)では移流計算を行う上で数値拡散に注意する必要がある。そこで、本研究では移流計算では Soroban 格子



写真-1 実体鏡、視差桿と2枚1組のアナログ航空写真



写真-2 実体鏡とデジタル化航空写真

上でCIP法を適用した。ただし、デカルト座標系での適用は河道が屈曲する場合の適用性に問題があるため、本研究では直交曲線座標への拡張を図った。

3 点目に河川流の計算では第一に流量と水位の予測と再現が重要であり、数値計算では連続式を解く際に保存性を考慮する必要がある。通常の Soroban 格子系では、物理量は Soroban の点に存在し、保存性には特別の工夫を施す必要がある。そこで、本モデルでは Soroban 格子と従来の BFC を併用し、有限体積法の考えを導入することで保存性の向上を図った。

一方、開発した計算法の検証としては、利根川下流部(取手から河口まで約 86km 区間)において洪水時に撮影された航空写真を解析し、洪水流表面流況のデータとの比較によって本計算法の適用性と問題点を検討する。ここで、計算モデルの適用性が良好であれば、河床近傍流速の予測も良好であることが期待され、これが河床変動予測に活かされる。

4. 研究成果

(1) 洪水航空写真解析

本研究の計画当初、航空写真解析では画像相関解析で良好な流速値を算定できると予想していたが、実際の解析では人間が誤データを除去する必要があることがわかった。そこで、本研究ではカメラン効果に基づく目視による実体視法とコンピュータによる相関解析法をうまく組み合わせ、航空写真解析の精度を向上させることとした。

簡易な地形測量用の実体鏡は、標準の測量用航空写真(23cm×23cm)を水平横に2枚並べて置いて利用する(写真-1 参照)。左右

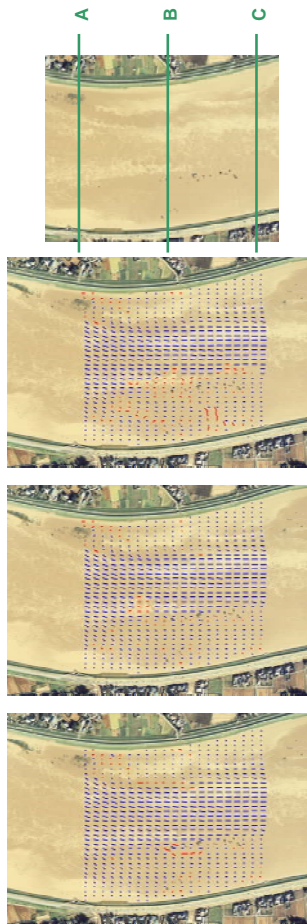


図-1 参照データ（最適推定値）の与え方の相違による解析結果の違い（上から、各々測線 A, B 及び C での値を初期参照データとして利用した場合の結果．青矢印は実体視により正しいと判断されたベクトル，赤矢印は誤りと判断されたベクトルである．）

視点の中心距離は 30cm 前後である．本研究では，縦横サイズが概ね一致する PC 用ワイドモニタ（Dell 社製 24 型 TFT 液晶 2405FPW，画面サイズ：横 518.4mm，縦 324.0mm，解像度：1920×1200）を机上に水平に置き，その上に実体鏡（測器社製，反射実体鏡 MS-27）を設置できるようにした（写真-2 参照）．

本研究での相関解析では通常の相関解析に対して以下の 2 点を注意した．1 つ目は固定物（高水敷の樹木や浚渫船）の取り扱いである．相関窓内に固定物が存在する場合には，その影響により流速はほぼゼロとなる．そこで，固定物周辺の流況を解析する際には，固定物とそれ以外の水域を 2 値化により区分して解析を行った．2 つ目は探査領域の設定である．洪水時の水表面には似通った泡や濃淡模様が存在し，計算機は錯誤を犯す場合がある．そこで，探査領域の設定では次のように行う．既に実体視を介して精度良く流速ベク

トル（“最適推定値”と名付ける）が得られた領域の周囲では，流速ベクトルがこの領域の“最適推定値”と大きく異なることはないという仮定の下，探査領域の範囲を設定する．無論，この 2 つの領域間は大きく離れていないという前提条件は必要である．その結果，探査領域は流れの場（流線と流速値）に従って自動的に調整されることになる．

図-1 にはある洪水河道の 3 測線 A, B 及び C において初期データ（上述の“最適推定値”）を作成し，それを基にして，測線 A-C 間において順々に相関法で水表面流速場を得た結果を示す．図中，青矢印は実体視により正しいと判断されたベクトル，赤矢印は誤りと判断されたベクトルである．結果より初期測線の位置が異なると，異なる結果が得られることがわかる．一方，この領域で実体視による解析を行った結果，3 つの結果が同じである場合には，相関解析で求めた流速ベクトルと実体視で求めた流速ベクトルは解析最小誤差のオーダー（1 画素に対応）でほぼ合致することがわかった．そのため，人間の労力を削減するために，図-1 において 3 つの相関解析の結果が異なる解析点のみ，実体視を行うこととなる．このとき，結果が異なる解析点での実体視は以下のように行う．相関解析で得られた流速ベクトルから，このベクトルに対応する 2 点を各デジタル画像（ステレオ画像）上へ配置する．そして，この 2 点を実体視して立体像を作成する．その結果，この立体像と背景画像の実体視の高低感が同じ場合にはこの 2 点，つまりこの相関解析結果は尤もらしい結果であり，高低感が異なる場合には誤りであると判断できる．

(2) CIP-Soroban 法による準 3 次元流動解析

河道線形は低水路・高水敷ともに曲がっていることが通常であり，本計算では基礎方程式で用いる座標として直交曲線座標 (s, n, z) を採用する． s 軸は流路に沿って流下方向にとり， n 軸は s 軸と直交するように配置し，右岸から左岸向きを正とする．このとき，必ずしも s 軸は河道中央上にはない点に注意する．つまり，本計算法では河道に沿った非直交格子と，直交座標で記述した支配方程式との間の不一致による斜交性の問題を考慮する必要がない．

座標 (s, n, z) 上の非圧縮性流体に関する 3 次元基礎方程式に対して静水圧を仮定し，Reynolds 平均操作と水深方向の Galerkin 積分操作を施すと，Leibnitz rule および水面と底面における運動学的条件式から，次に示す 3 つの残差方程式が得られる．

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{N^*} \frac{\partial}{\partial s} \int u + \frac{1}{N^*} \frac{\partial}{\partial n} \left(N^* \int v \right) = 0$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int pu + \frac{1}{N^*} \frac{\partial}{\partial s} \int pu^2 + \frac{\partial}{\partial n} \int puv + \frac{2\sigma}{N^*} \int puv \\ & = -\frac{g}{N^*} \frac{\partial H}{\partial s} \int p + \int u \frac{Dp}{Dt} + \int p \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \int p \text{Rey}_s \\ & \frac{\partial}{\partial t} \int pv + \frac{1}{N^*} \frac{\partial}{\partial s} \int puv + \frac{\partial}{\partial n} \int pv^2 - \frac{\sigma}{N} \int p(u^2 - v^2) \\ & = -g \frac{\partial H}{\partial n} \int p + \int v \frac{Dp}{Dt} + \int p \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \int p \text{Rey}_n \end{aligned}$$

$$\text{ただし, } \frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{N^*} \frac{\partial}{\partial s} + v \frac{\partial}{\partial n} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

ここで、 t は時間、 h は水深、 H は水位、 z_o は河床位、 (u, v, w) はそれぞれ (s, n, z) 方向の Reynolds 平均流速、 $N^* \equiv 1 + \sigma n$ は規格化座標、 $\sigma (= 1/r_o)$ は河道の局所曲率、 g は重力加速度、 ε_v は水深方向の渦粘性係数、 p は Galerkin 積分における重み付け関数、積分記号は底面 z_o から水面 H までの水深積分を示す。さらに、 Rey_s 及び Rey_n は (s, n) 方向の Reynolds 応力である。本研究では低負荷な計算を実現するため、水平流速の鉛直分布を線形と仮定して上式に代入する、解くべき 5 方程式が得られる。(計算法の詳細に関しては、発表論文を参照されたい。)

(3) 平成 10 年 9 月利根川洪水への適用

本解析モデルを利根川下流約 20km 区間 (76kp~58kp) における洪水流 (平成 10 年 9 月) へ適用した結果を示す。本解析ではこの区間で洪水航空写真が撮影された 9 月 17 日午前 8 時の上流端流量 (布川観測所, 76kp) と下流端水位 (新川観測所, 58kp) を境界条件として定常計算を行い、航空写真解析結果と数値シミュレーション結果を比較し、洪水現象の考察を行った。ただし、考察の過程で、上流端流量と高水敷の粗度要素の値が共に不確定であることが判明したため、航空写真解析の結果を用いて、これらの量を試行錯誤的に推定した。以下の結果では表面流況に関する考察結果を示す。

図-2 (a)~(f) には 75kp 付近のシミュレーション結果 (5 分間隔の時系列) を示した。図中、ベクトルは水表面流速 [m/s]、コンターは水表面流速から算定した渦度 Ω [1/s] を示す。水表面には大規模な平面渦 (組織的な流体運動) が間欠的に生成し、それが下流へと移流している様子が観察される。なお、本計算では上流端で人工的な擾乱を付加しておらず、これらの大規模乱れ現象はせん断不安定作用により自発的に生成している。

写真-3, 4 と図-3, 4 には 69kp 付近と 60kp 付近で撮影された航空写真と、水表面の渦度に関する瞬間のシミュレーション結果を示した。渦度の凡例は図-2 と同様である。両地点では、航空写真、計算結果ともに右岸寄りの低水路河岸において大規模な平面渦のよ

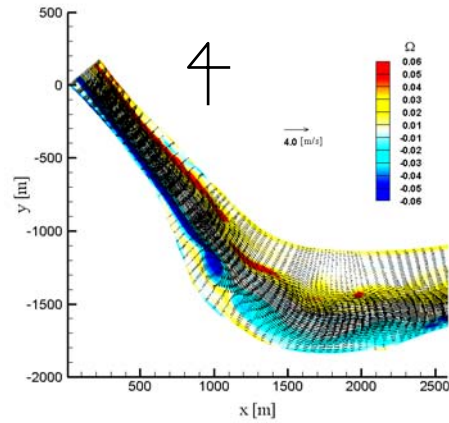


図-2 (a) 計算結果(75kp 地点、水表面における瞬間の流速ベクトルと渦度分布 [1/s].)

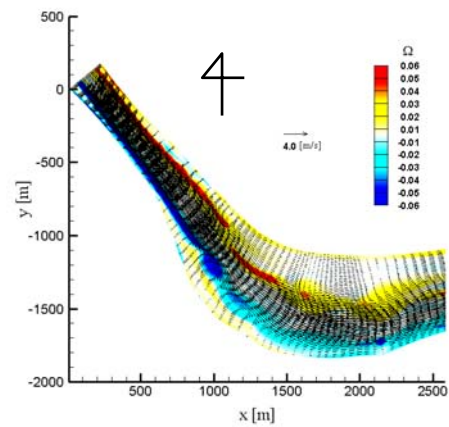


図-2 (b) 計算結果

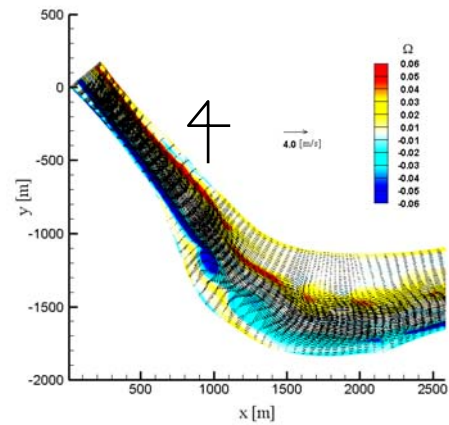


図-2 (c) 計算結果

うなものが観察される。これらの渦の空間スケールは航空写真において約 300m である。また、シミュレーション結果からはこうした渦が間欠的に放出されている様子が再現された。一方、シミュレーションで求めた平均的な渦の空間スケールは 300m 程度であった。さらに、図-5 にはこのシミュレーションで求めた水表面の流速ベクトルを示す。流速ベクトルの凡例は図-2 と同じである。このベクト

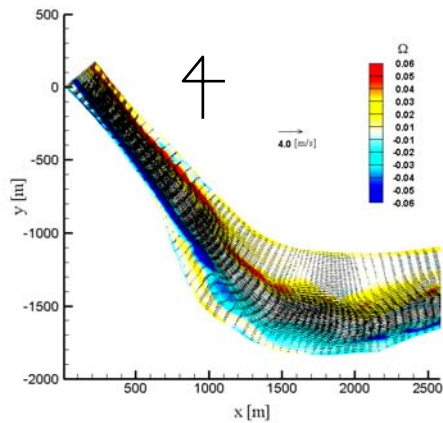


図-2 (d) 計算結果

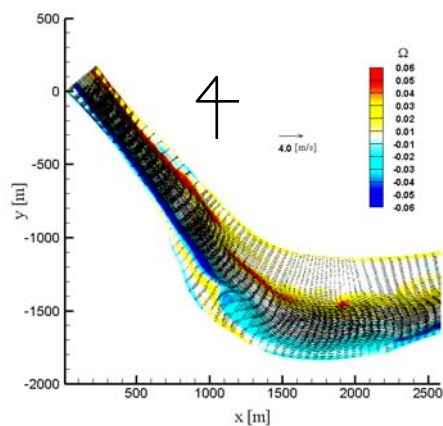


図-2 (e) 計算結果

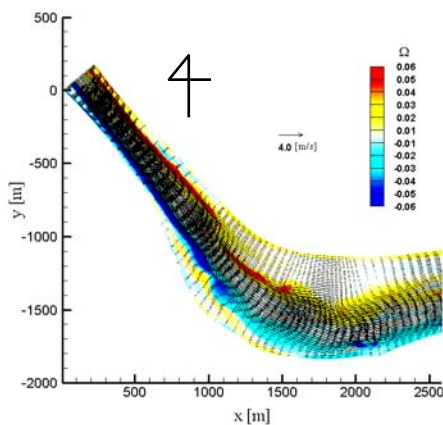


図-2 (f) 計算結果

ル図は図-4 の渦度に対応する。同図からは、間欠的な渦度の分布に対応して、流速ベクトルが低水路河岸において縦断方向に周期的に変化している様子が観察される。例えば、図-4 と図-5 において、白矢印の箇所では対応する平面渦の中心とその流速ベクトルが示されている。

ここで、一般的にはシミュレーションで算定した渦度と、航空写真で観察される輝度濃

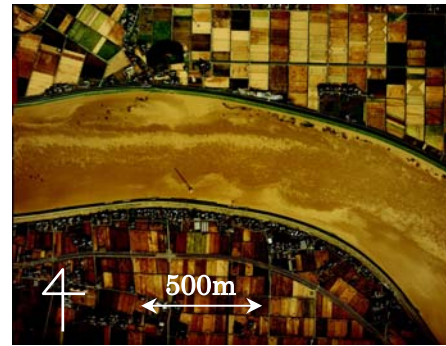


写真-3 航空写真(69kp 地点)

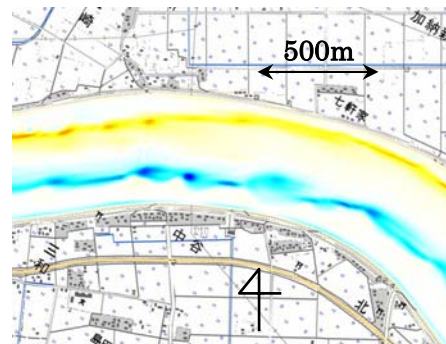


図-3 計算結果(69kp 地点, 水表面における瞬間の渦度分布[1/s].)

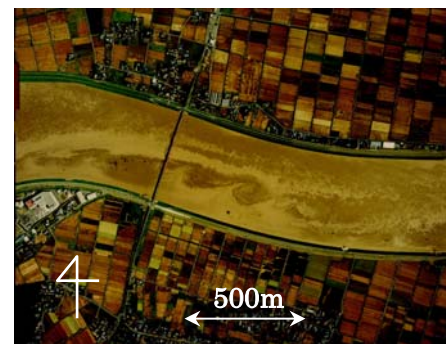


写真-4 航空写真(60kp 地点)

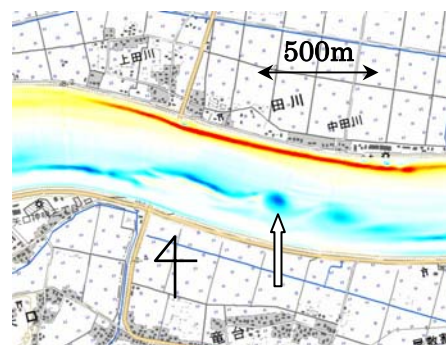


図-4 計算結果(60kp 地点, 水表面における瞬間の渦度分布[1/s].)

淡の周期的なパターンとの間には相関関係はないが、(1) 図-5 からはシミュレーションで求めた間欠的な渦度の構造は平面渦によるものであり、(2) 利根川洪水に関する過去

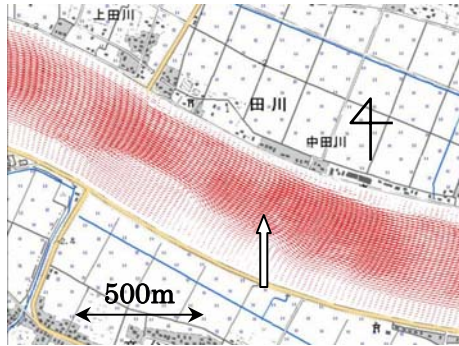


図-5 計算で求めた水表面における瞬間の流速ベクトル (図-4に対応する)

の研究からは、航空写真で観察される輝度濃淡パターンは水表面での土砂の濃度を意味するため、低水路河岸で発生した組織的な平面渦の挙動に従って水表面の高濃度土砂が下流へと輸送されている様子が航空写真で撮影されたものと推察される。

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 4 件)

① 吉田圭介・石川忠晴・箕浦靖久: 準3次元 CIP-Soroban モデルによる利根川洪水流の大規模数値計算, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.877-882, 2009, 査読有.

② 箕浦靖久・石川忠晴・吉田圭介: 実体視と画像相関解析を併用した洪水航空写真解析手法の構築と検証, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.997-1002, 2009, 査読有.

③ 吉田圭介・石川忠晴, 円筒座標 CIP-Soroban 法と境界適合座標法を組み合わせた蛇行河川の準3次元計算法, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.997-1002, 2008, 査読有.

④ Yoshida, K. and Ishikawa, T.: Depth-averaged numerical solver of meandering river flows by CIP-Soroban grids in cylindrical coordinate system, *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.26, No.1, May, pp.11-28, 2008, 査読有.

[学会発表] (計 2 件)

① Yoshida, K. and Ishikawa, T.: Quasi-3D

solver of meandering river flows by CIP-Soroban scheme in cylindrical coordinates with support of boundary fitted coordinate method, *Proc. 16th APD-IAHR Congress*, 中国・南京市, 2008.10.20

② Minoura, Y., Ishikawa, T. and Yoshida, K.: Flood flow analysis on aerial photos by image correlation method with support of stereo visualization, *Proc. 16th APD-IAHR Congress*, 中国・南京市, 2008.10.20

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉田 圭介 (YOSHIDA KEISUKE)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・産学官連携研究員
研究者番号: 5 0 4 3 6 7 2 1

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし