

平成21年3月31日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760341
 研究課題名（和文） 複雑な地物情報の評価を可能とする新しい氾濫流解析モデルと氾濫被害軽減に関する研究
 研究課題名（英文） Study on a numerical model for an inundation flow with complex geometries and flood damage reduction
 研究代表者
 内田 龍彦（UCHIDA TATSUHIKO）
 中央大学・研究開発機構・機構准教授
 研究者番号：00379900

研究成果の概要：

本研究では、洪水流や氾濫流の挙動を知ることのできる信頼性、実用性の高い洪水氾濫解析法の構築のために、解析データ整備が容易なデカルト座標系を用いて市街地の複雑な地物情報を評価できる氾濫流解析法を開発した。非定常大型水理実験により詳細な水位、流体力時系列データを取得し、本解析モデルの妥当性を検証した。また、精度の高い解析データの取得、整備方法と本解析モデルの現地への適用性が検討された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	0	2,400,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	270,000	3,570,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学、水理学

キーワード：氾濫流解析，デカルト座標系，破堤氾濫実験，流体力測定，建物群の評価法

1. 研究開始当初の背景

近年の一連の水災害により、現存の水防災施設の課題や氾濫地域の社会的脆弱性等が明らかとなり、ハード対策とソフト対策の連携をより一層強め、被害の最小化を図ることが望まれている。このためには、洪水氾濫流の特徴を十分に理解した上で、それがもたらす被害を検討しなくてはならず、より信頼性、実用性の高い洪水氾濫解析法が求められている。

洪水氾濫解析技術の主要な課題には、

(a) 安定した解析が困難な流れの解析（破堤部周辺では常・射流が混在する流れでか

つドライベットの判定が必要である）、
 (b) 複雑な地物情報による境界条件の評価（氾濫域内の地形情報、幹線道路網、建物群など）、
 (c) 精度の良い地盤高データの整備、
 (d) 破堤氾濫流量の評価（境界条件の不明確さ）、
 (e) 解析モデルの比較検証データの取得、などが挙げられる。課題(b)は市街地など氾濫流の場合には支配的な境界条件となるが、ハザードマップ作成等でよく用いられているデカルト座標系モデル¹⁾では、図-1に示すように建物群や道路網は表現できないため、

現在でもモデル開発が進められている。我が国において代表的な研究例では、一般座標系モデル²⁾、非構造格子モデル³⁾などの境界適合座標系モデルや、市街地氾濫流が道路網を流れることに着目した街路ネットワークモデル⁴⁾がある。しかし、これらのモデルは建物群や道路網に合わせて計算格子を生成することが要求されるため、デカルト座標系モデルに比べて、計算格子の生成には水理学的な考察と経験が必要となる上、計算データの整備の負荷が格段に大きい課題がある。課題(c)は近年のレーザープロファイラ計測技術の発達により、氾濫域や河道内の精度よいデータが高密度・高精度で取得できるようになってきている。このようなデータに対して、一般に境界適合座標系は、計算データ整備の負荷が大きいと考えられる。さらに、氾濫流解析では、解析に必要な国土数値情報や統計データがデカルト座標系で整備されていることから、デカルト座標系において氾濫域の様々な情報を適切に評価できる氾濫解析法は切望されつつも、国外の研究事例を見ても、現在までにこのようなモデルは提案されていない。

一方、従来家屋に作用する流体力は、主として広域の氾濫流解析における建物群の抵抗評価のために検討されてきた。甚大な被害を引き起こす破堤氾濫流に対して、家屋の危険度を評価するために、破堤点近傍の家屋群周辺の複雑な流れと流体力を解析することが求められてきている。このためには、破堤点近傍の流れと家屋に作用する流体力特性を明らかにする必要があるが、未だ十分でない。特に流体力に関しては、定常流下での検討²⁾はいくつかあるものの、非定常特性を検討したものはほとんどない。このため、破堤部近傍の破堤氾濫流と家屋に作用する流体力特性を明らかにし、家屋群の流体力の評価方法を構築することが求められている。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所 河川部都市河川研究室：氾濫シミュレーション・マニュアル(案)-シミュレーションの手引き及び新モデルの検証-，土木研究所資料第 3400 号，1996.
- 2) 福岡捷二，川島幹雄，横山洋，水口雅教：密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究，土木学会論文集 No. 600，pp23-36，1998.
- 3) 重枝未玲，秋山壽一郎，浦勝，有田由高：非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面二次元洪水流数値モデル，水工学論文集，第 45 巻，pp. 895-900，2001.
- 4) 川池健司，井上和也，林秀樹，戸田圭一：都市域の氾濫解析モデルの開発，土木学会

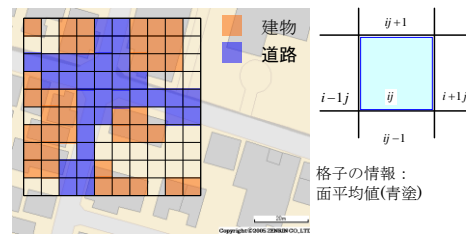


図-1 従来のデカルト座標系

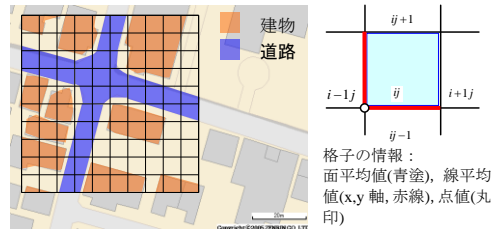


図-2 本解析法

論文集，No. 698/II-58，pp. 1-10，2002.

2. 研究の目的

本研究では、実用性と信頼性に優れた氾濫解析モデルを構築するために、複雑な都市構造を評価できるデカルト座標系の新しい河川流と氾濫流の連成解法を開発する。また、非定常大型水理実験により、詳細な水位・流体力の時系列データを取得するとともに、破堤点近傍の流れと流体力特性を明らかにし、流体力の評価方法を構築する。さらに、河道・氾濫解析データの取得・整理方法と本解析モデルの現地への適用性を検討する。

3. 研究の方法

(1) 複雑な都市構造を評価するためのデカルト座標系解析モデル

図-2 のように計算格子が複数種の情報をもつようにすれば、計算格子の形とは異なる形が表現でき、従来のひとつの情報で表現する場合に比べて格段に改善される。このような計算を行うため、近年開発された CIP 法⁵⁾を応用する。CIP 法は計算格子内の流れ場の分布を解くことによって、安定かつ高精度な移流解法を可能とし、前述の課題(a)を改善する。本研究では、CIP 法を境界条件の評価を含めるように拡張することで課題(b)，(c)を合わせて解決する。さらに、デカルト座標系において様々な境界条件を評価するために、FAVOR 法⁶⁾を応用する。

(2) 破堤氾濫流に関する大型水理実験

本実験では基礎的な実験として、湛水している氾濫域に破堤による氾濫流が広がる場合を想定し、図-3 に示す実験水路を作成した。実験水路は貯水槽部と氾濫部より構成され、

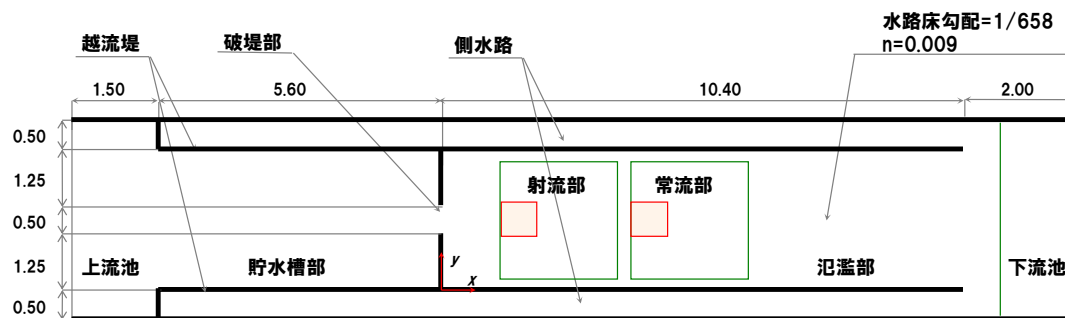


図-3 破堤氾濫実験水路

水路勾配は 1/658 である。底面のマンニングの粗度係数は $n=0.009$ である。破堤部中央に幅 0.5m のアクリル製ゲートを設置している。また、貯水槽両側に高さ 0.091m の越流堤を設け、非定常実験において貯水槽内の水位がゲート開放時に大きく変化しないようにしている。破堤部のゲートを瞬間的に開放することにより、ダムブレイク流れを発生させ、水位と流体力をサーボ式波高計、分力計によって連続的に計測した。実験結果の信頼性を高めるために、同一計測点において 3 回計測し、そのアンサンブル平均をその点における実験データとしている。空間的に密なデータを取得するために、同一条件の計測を繰り返し行った。このとき、ゲートを開放するタイミングは毎回ずれるため、貯水槽部中央の点 0 に設置した波高計のデータを用いて、時間軸を調整した。

(3) 任意の箇所での流体力の測定方法

本実験で用いた流体力計測装置を図-4 に示す。模型の前背面のそれぞれ 3 点で水位を計測する。この方法の特長は、分力計を水路床に固定するのではなく水路上方から吊るし、任意の箇所において模型に作用する流体力を計測できるようにした点にある。一方、この計測方法で注意すべき点は、模型の底部と水路床との隙間内の水と建物模型の前面の水との間で生じる圧力差を無視するために、その隙間をゼロに近づけることと、計測する流体力ベクトルを水路の軸と一致させることである。このために、精度検証実験を行い、定常状態において計測した流体力と建物模型前背面の静水圧差を比較した結果、これらの計測誤差は 1% 未満であり、本方法によって任意の箇所の流体力を正確に計測できることが分かった。

(4) 河道・氾濫域のデータ取得とその整備方法の検討

津波、高潮、洪水氾濫流や河川洪水流等の広域の解析データの整備に航空レーザ測量データが広く活用されるようになってきた。レーザ測量には、航空レーザ測量と地上レー

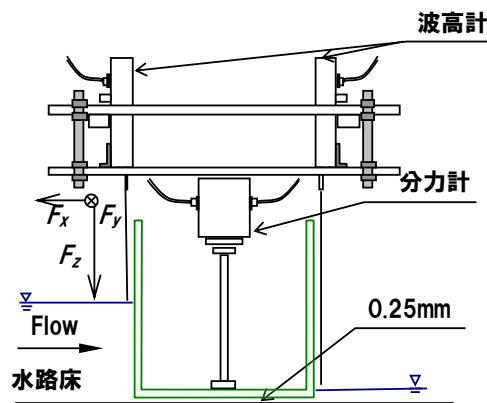


図-4 流体力の測定方法

ザ測量があり、これらにはメリットとデメリットがある。しかし、航空レーザ測量と地上レーザ測量の特徴を整理し、解析データの整備方法の検討は十分とは言い難い。そこで、現地河川の地上レーザ測量と直接測量を行い、河川における地上レーザ測量データの特徴を航空レーザ測量との対比により検討するとともに、地上レーザ測量データの自動被覆分類法と地盤高の取得技術を開発する。解析の際の底面粗度係数の決定に重要な植生高と河床材料粒径の評価手法を検討している。一方、レーザ測量の主要な課題の一つである水面下の河床データの取得が困難であることについては、レーザスキャナから取得される水際的水位を用いて、水面下の河床形状を推定する方法を検討した。検証を行うために河川の詳細な三次元データを取得することは困難であるため、本研究では移動床水理実験によって生成された河床形状を検証データに用いることにした。河床形状は、幅 1.5 m の直線水路において、縦断方向に 10 m の区間に一様粒径 $d_0=0.8$ mm の砂を水路中央部がやや低くなるように敷詰め、側岸際の河床が非水没の状態を通水を行った後、河床を市販のセメダインを用いて固化して作成している。生成した河床形状は固定式のレーザプロファイラ（ライカジオシステムズ社製）を用いて測定する。移動床実験によって生成された河床形状に一定流量を通水した際の

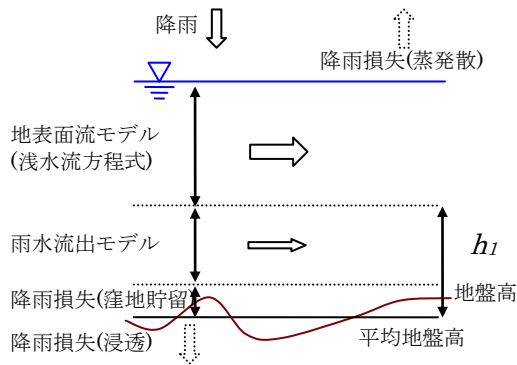


図-5 本モデルにおける地表面流と降雨流出の考え方

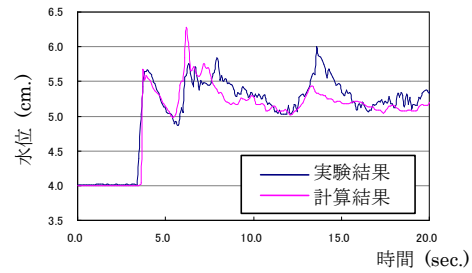
水面形データと陸域の河床形状データから二次元数値解析を介した水面下データの力学的な補間法を構築し、その妥当性を検証した。

(5) 構築した解析モデルの実績氾濫流解析への適用

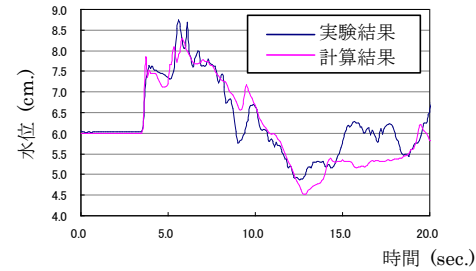
構築した解析手法を応用し、2004年の台風16号による沿岸市街地の高潮氾濫に適用し、本解析法の検証を行った。市街地氾濫流では、地表面流を支配する建物群や道路網などの構造物に加え、下水道網等を直接表現した解析手法の開発が必要であるため、(1)で構築した地表面解析モデルと、雨水流出や下水道管内流を取り扱うモデルを合わせた統合氾濫解析モデルを構築した。流出解析モデルにはメッシュ法⁷⁾を適用し、各メッシュの雨量は最も近いノードへ流れるようにする。図-5に地表面流成分と降雨流出成分の考え方を示す。ある領域において、水量が少ない場合、水は雨水排水路を流れるため、水流は表面流モデルで記述できないと考えられるため、地表面流と降雨流出を分離する水深 h_1 を設け、 h_1 より上の流れを地表面流モデルで、 h_1 より下の流れを降雨流出解析モデルで解く。下水道管路網はマンホール(ノード)と直線の下水道管(リンク)で表現する。管内流の解析には下水道管内の圧力伝播を、管頂に取り付けた微小幅の仮想のスロット内の自由表面を伝播する重力波のそれに置き換えるスロットモデル⁸⁾を適用する。地表面と下水道の連成解析法には、ノードを含むメッシュにおいて下水道管内流の連続式(地表面への流出時)と段落ち公式(下水道への流入時)を用いる。計算格子間隔は甲斐関領域の主要道路幅に合わせ、 $dx=dy=12.5\text{m}$ とする。

参考文献

- 5) T. Nakamura, R. Tanaka, T. Yabe, and K. Takizawa: Exactly Conservative Semi-Lagrangian Scheme for Multi-dimensional Hyperbolic Equations with Directional Splitting Technique,



Case A (氾濫域の水深低, 4.0cm)



Case B (氾濫域の水深高, 6.0cm)

図-6 異なる水深の氾濫域における水位時系列の実験結果と解析結果の比較(家屋群のない場合)

Journal of Computational Physics 174, 171-207, 2001.

- 6) Hirt, C. W.: Volume-fraction techniques: powerful tools for wind engineering, Journal of Wind engineering, Vol. 52, pp. 333-344, 1992.
 7) 市川新: 新しい雨水流出モデル-メッシュ法の提案-, 京都防災研究所年報, 第 29 号 B-2, 1986.
 8) 渡辺政広, 江藤剛治, 室田明: 取付管の調圧効果を考慮した下水管網内の遷移流計算法, 土木学会論文集, No. 411/II-12, pp. 81 - 90, 1989.

4. 研究成果

(1) 複雑な都市構造を評価するためのデカルト座標系解析モデル

各計算格子の点値, 線・面平均値を同時に解くことができる二次元浅水流の保存型の陽解法を提案した。流体占有率の格子内分布を表現することにより, デカルト座標系においても街路網などの氾濫域の複雑な地物情報を捉えることができることを明らかにした。数値実験による検証から, 市街地氾濫流を扱う場合, 主要道路幅の格子スケールであれば, 氾濫水の挙動を計算できることが分かった。さらに, 土砂輸送計算のために流れの三次元性を取り込んだ解析モデルを構築し, その妥当性を示した。

(2) 破堤氾濫流に関する水理実験と解析モデルの検証

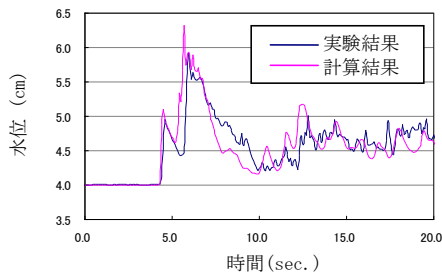


図-7 氾濫域における水位時系列の実験結果と解析結果の比較(家屋群がある場合)

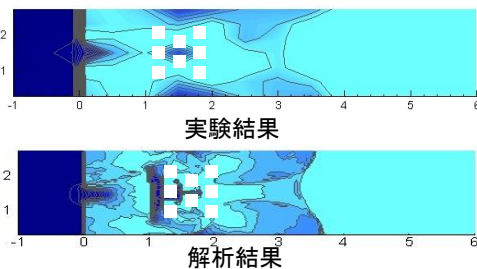


図-8 破堤後(5秒後)の瞬間水面形の比較

本研究では大型水理実験水路を用いた破堤氾濫流に関する基礎的な実験を行い、非定常流を二次元的に捉える事ができる精度の高い水位時系列データを得た。実験結果より、初期水深によって段波の伝達速度や段波通過後の水位の変動特性が大きく異なることを示し、本解析法によりこれらが良好に再現されることを示した(図-6)。また、破堤部に家屋が配置される条件において、実験結果と計算結果を比較し、計算結果は常射流混在場に建物などの障害物が存在する場においても、時空間的に信頼できることを示した(図-7, 8)。

(3) 家屋に作用する流体力の非定常特性とその評価方法

分力計を取り付けた流体力計測模型を上方から吊るす方法により、建物模型に作用する流体力を高精度した。図-9はその一例である。フロント到達後、再び流体力が上昇しているのは、これは家屋群の上流部における跳水によって水位上昇が著しくなったためである。このような複雑な流体力時系列も前後の水深を用いて計算する従来の静水圧モデルで概ね再現できることが分かった。

建物群を個別に評価すれば、本解析手法によって家屋に作用する流体力時系列を概ね再現できる(図-10)ことを明らかにした。また、抗力係数モデルは氾濫域の水位を大局的に検討する場合に適用可能であり、提案した建物占有率補正法は、それに加えて流体力のフロント衝突時の瞬間値やその変動、フロント速度について概ね再現できる事を示した。

(4) 河道・氾濫域のデータ取得とその整備方

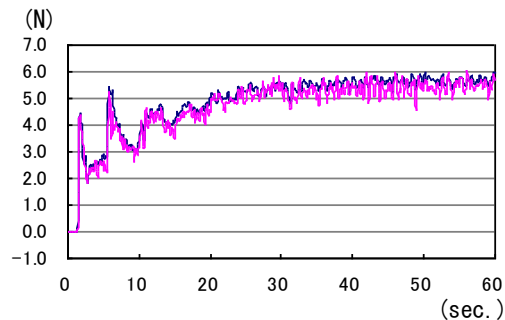


図-9 最前列家屋に作用する流体力時系列の実測値と静水圧モデルの計算結果

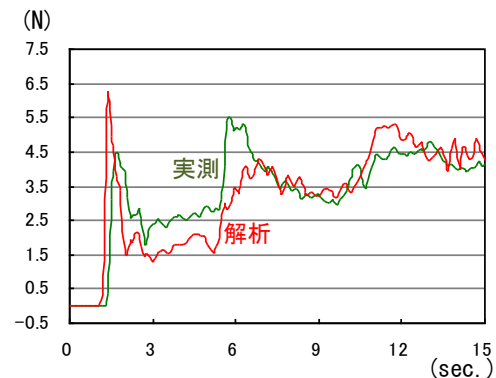


図-10 最前列家屋に作用する流体力時系列の実測値と解析結果の比較

法の検討

受光強度とRGBデータを用いた自動被覆分類法と水面形取得手法を用いた水面虚像データの除去法と被覆分類の自動修正法を提案した。横断測量結果との比較により、本手法の妥当性を明らかにした。また、河川レーザ計測の大きな課題の一つである水面下河床高データの欠損について、レーザ計測により得られる水面形に着目し、運動方程式を介した水面下河床高の力学的内挿法を提案し、本手法の妥当性を示した。

(5) 構築した解析モデルの実績氾濫流解析への適用

沿岸部都市域において高潮による水害の発生防止から被害の軽減、迅速な復旧までを検討するために、地表面流、下水道流、地表流出を同時に考慮できる統合解析手法を構築した。本統合解析手法を2004年台風16号による沿岸市街地の高潮氾濫に適用し、本手法の妥当性を示すとともに、高潮氾濫解析における統合氾濫解析の必要性を示した。

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7件)

- 1) 内田龍彦, 福岡捷二: 浅水流方程式と渦

- 度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1081-1086, 2009, 査読有.
- 2) 河原能久, 伊藤 康, 内田龍彦, 家藤憲司: 非定常流中の建物に作用する流体力の直接測定, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.979-984, 2009, 査読有.
 - 3) 岩苔和宏, 河原能久, 森下祐, 内田龍彦: 多点水位ハイドログラフを用いた新しい流量推定法の水内川への適用, 応用力学論文集, Vol.11, pp.689-698, 2008, 査読有.
 - 4) 内田龍彦, 河原能久, 押田さやか, 一宮梢, 森山学, 木村成弘: 地上レーザ計測による河川の物理環境データの取得, 河川技術論文集, 第 14 巻, pp.301-306, 2008, 査読有.
 - 5) 内田龍彦, 河原能久, 吉田晋, 森山学: 河川レーザ測量のための水面下河床高の力学的内挿補間法, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.1057-1062, 2008, 査読有.
 - 6) 河原能久, 内田龍彦, 木梨行宏: 沿岸都市域における氾濫統合解析手法の開発, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.1331-1335, 2007, 査読有.
 - 7) 内田龍彦, 伊藤康, 戎忠則, 河原能久: 破堤氾濫流に関する基礎的実験とその二次元数値解析, 応用力学論文集, Vol.10, 911-919, 2007, 査読有.

[学会発表] (計 14 件)

- 1) Tatsuhiko UCHIDA, Yoshihisa KAWAHARA: Optimal Interpolation of Submerged River Bed for Laser Scanning Survey Using a Two-Dimensional Numerical Model, Advances in Hydro-Science and Engineering, Vol.8, CD-ROM, 2008.9.9, Nagoya.
- 2) 岩苔和広, 河原能久, 内田龍彦, 森山学, 木村成弘: 水内川における低水時の流れの二次元数値解析, 第 60 回土木学会中国支部研究発表会, II-3, CD-ROM, 2008.5.31, 広島大学.
- 3) 伊藤 康, 内田龍彦, 河原能久, 家藤憲司: 破堤氾濫流の高精度二次元解析と流体力の推定, 第 60 回土木学会中国支部研究発表会, II-3, CD-ROM, 2008.5.31, 広島大学.
- 4) 森下 祐, 河原能久, 内田龍彦: 多点水位観測結果を用いた流量ハイドログラフの推定法, 第 60 回土木学会中国支部研究発表会, II-8, CD-ROM, 2008.5.31, 広島大学.
- 5) 一宮 梢, 森山学, 木村成弘, 河原能久, 内田龍彦, 押田さやか: 地上レーザ計測による河川物理環境データの取得法, 第 60 回土木学会中国支部研究発表会, II-64,

- CD-ROM, 2008.5.31, 広島大学.
- 6) 押田さやか, 内田龍彦, 河原能久, 一宮梢, 森山学, 木村成弘: 地上レーザ計測による礫の地表面粒度分布の算定法, 第 60 回土木学会中国支部研究発表会, II-65, CD-ROM, 2008.5.31, 広島大学.
 - 7) Yoshihisa KAWAHARA, Tatsuhiko UCHIDA: Integrated modeling for inundation flows in urban areas, US-China Workshop on Advanced Computational Modeling/EWRI2008, 2008.5.13, Honolulu, U.S.A.
 - 8) 山水綾, 内田龍彦, 河原能久, 渡辺豊, 森山学: 高精度 3D レーザスキャナの河川の物理環境調査への適用性の検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, CD-ROM, II-119, 2007.9.12, 広島大学.
 - 9) 木梨行宏, 内田龍彦, 河原能久 (2007.9): 都市域における氾濫統合解析手法の開発, 土木学会第 62 回年次学術講演会, CD-ROM, II-155, 2007.9.12, 広島大学.
 - 10) 伊藤康, 戎忠則, 内田龍彦, 河原能久: 破堤実験への適用による氾濫解析モデルの検証, 土木学会第 62 回年次学術講演会, CD-ROM, II-156, 2007.9.12, 広島大学.
 - 11) Tatsuhiko UCHIDA, Yoshihisa KAWAHARA, Yasshi ITO: Modeling of inundation flow in urbanized area using a high-resolution method with Cartesian mesh, 32nd Congress of IAHR, the International Association of Hydraulic Engineering and Research, Proceedings, CD-ROM, 2007.7.3, Venice, Italy.
 - 12) 木梨行宏, 内田龍彦, 河原能久: 都市域における氾濫統合解析手法の開発, 第 59 回土木学会中国支部研究発表会, 67-68, 2007.6.2, 山口大学.
 - 13) 伊藤康, 内田龍彦, 河原能久, 戎忠則: 非定常水理実験による二次元氾濫シミュレータの検証, 第 59 回土木学会中国支部研究発表会, 69-70, 2007.6.2, 山口大学.
 - 14) 戎忠則, 内田龍彦, 河原能久, 伊藤康: 破堤による氾濫水の挙動に関する基礎的実験, 第 59 回土木学会中国支部研究発表会, 99-100, 2007.6.2, 山口大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 龍彦 (UCHIDA TATSUHIKO)
中央大学・研究開発機構・機構准教授
研究者番号: 00379900