

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20560478

研究課題名（和文）：津波・洪水氾濫流による物体変形と輸送に関する3次元マルチフェイズ数値解法

研究課題名（英文）：Multiphase Computational method to predict the interaction between flooded flows and deformation or transportation of solid bodies

研究代表者：

牛島 省 (Ushijima Satoru)

京都大学・学術情報メディアセンター・教授

研究者番号：70324655

研究成果の概要（和文）：本研究では、出水時の大粒径砂礫の輸送、水流を伴う土石流における巨大礫の移動、また津波による船舶や車両、家屋部材の流送など、流体力による大スケールの物体輸送を高精度に評価できる数値解法を開発する。このために、物体を含む流動場を適切に扱う3次元マルチフェイズモデルを構築するとともに、実現象へ適用するための高速数値解法を開発し、基礎実験結果を用いてその検証を行った。特に、1) マルチフェイズモデルの3次元化および並列処理の導入による高速化、2) 3次元物体輸送現象を把握する基礎実験の実施と解法の検証、の2項目を集中して実施した。

研究成果の概要（英文）：A computational method has been developed to predict the transportation of large-scale objects, such as rocks, ships and debris of buildings, due to the 3D free-surface flows caused by flood and Tsunami. For this purpose, a new multiphase model was proposed to deal with gas, liquid and solid phases. In addition, the proposed model was implemented in a computational scheme based on high-performance computing algorithms and the method was verified by the comparisons with experimental results. In particular, 1) the development of 3D models and the introduction of some parallel computation methods were performed, and 2) multiple experiments were conducted regarding the transportation of solid objects by free surface flows.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

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：水理学

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、非圧縮性流体中に含まれる剛体の運動を数値的に予測するマルチフェイズモデルである、MICS (Multiphase Incompressible flow

solver with Collocated grid System) という解法を提案した(土木学会論文集, 2003)。この解法の特徴は、1) 物体領域を物性値の異なる非圧縮性流体と考え、2) その混相流場全体にコロケート格子上で

提案された非圧縮性流体解法を適用して数値解を求め、3)物体に作用する流体力を流体の運動方程式の解析結果から評価する、という原理にある。このため、従来の解法で用いられる「抗力係数」などの流体力評価のための経験定数等をいっさい必要とせず、物体背後の後流渦や、複数の移動物体により生ずる複雑な流れの中の流体力を適切に評価できる。さらに、この解法の原理は水と空気という混相流場にも適用できるので、自由水面流れにおける物体輸送も評価でき、物体間の接触力は個別要素法モデルにより扱うことが可能である。しかし、この解法は2次元場における基礎的な検証を終えたばかりの段階にあり、冒頭で述べた実用的な問題に用いるためには解法の3次元化とそれに伴う詳細な検証が必要となっている。

2. 研究の目的

本研究では、出水時の大粒径砂礫の輸送、水流を伴う土石流における巨大礫の移動、また津波による船舶や車両、家屋部材の流送など、流体力による大スケールの物体輸送を高精度に評価できる数値解法を開発する。このために、物体を含む流動場を適切に扱う3次元マルチフェイズモデルを構築するとともに、実現象へ適用するための高速数値解法を開発し、基礎実験結果を用いてその検証を行う。期間内に、1)マルチフェイズモデルの3次元化および並列処理の導入による高速化、2)3次元物体輸送現象を把握する基礎実験の実施と解法の検証、の2項目を集中して実施する。

3. 研究の方法

下記の項目を実施する。

- 1) 3次元物体初期移動過程における周囲流と流体力の同時計測法の開発
- 2) 並列計算システムの導入とハイブリッド並列化の検討
- 3) 自由水面流れにおける物体運動に関する基礎実験
- 4) MICS の3次元化と非圧縮性流体計算法の導入
- 5) 実験結果に対する3次元 MICS の適用性の確認

4. 研究成果

○2008年度

(1) 有限要素法モデルの導入

2008年度は、物体を弾性体と仮定して、その3次元動的問題を四面体2次要素に基づく有限要素法で扱う解法を MICS に導

入した。動的問題の外力は、多相場の運動方程式の圧力項と粘性項から計算されるものとする。具体的には、まず物体を構成する四面体要素部分が流体計算セルに含まれる体積占有率を四面体サブセル法により求める。そして、その流体計算セルの圧力項と粘性項から算定される流体力に体積占有率を用いて、四面体要素部分に作用する流体力を定める。この演算をすべての四面体要素に関して行い、四面体要素に作用する流体力を節点に配分して、物体の動的問題の基礎式の外力とした。

(2) 汜濫流の流体力計測実験

数値解法の適用性を検証するため、流体力を計測する水理実験を実施した。小型造波水槽(既設)に、剛体および弾性体モデルを設置し、汜濫流を試験体に作用させたときの流体力を計測した。実験では、物体周辺の流れや自由水面形状を把握するとともに、流体力の時間的な変化も合わせて把握した。以上のようにして得られた実験データを用いて、計算手法の検証を行った。以上の結果をとりまとめて、学会論文等として成果を報告した。

○2009年度

(1) 固体の大変形を Euler 的に扱う流体・固体連成計算法の構築

流れ場に存在する線形弾性体の有限変形を扱うことを目的として、固体の大変形を Euler 的に扱う流体・固体連成計算法を構築した。このために、Euler 型の固体の運動方程式と構成則を導出し、これまで開発してきた多相場の解法 (MICS) に導入した。この解法により、従来の Lagrange 解法ではメッシュ破綻のおそれがある固体の大変形問題を扱えるようになった。比較的取り扱いが容易な速度形の応力増分型を利用して、内力の計算を行うモデルを導入し、片持ばりの大変形問題や振動応答、また2次元および3次元場における可逆性など、基本的な問題に適用して、その妥当性を確認した。さらに、3次元流体中の複雑形状物体の有限変形を本手法で計算できることを示した。

(2) 捕捉された流木群の流水抵抗を評価する数値計算法の構築

洪水時・河川増水時において流木の被害が、多々報告されている。例えば、流木が橋梁に集積し倒壊させたり、取水堰などに流木が詰まり取水・放水機能を低下させたといった事例が報告されている。これらの流木災害は、流木の発生、運搬、堆積といった過程で生じる。本年度は、捕捉された流木群の流れ場に与える流水抵抗や堰上げ効果に着目し、これを数値的に評価する手法を構築した。この解法では、多相場の解法である MICS をベースとして、流木を四面体要素から構成されるも

のとし、流木と構造物の衝突判定には、個別要素法で用いられる接触判定球を利用して、これらの接触判定処理を並列化することで計算速度の向上を図った。独立行政法人土木研究所が実施した水理実験を対象に、本計算手法を適用した結果、流木群の上流側の水深が増加する堰上げ効果や、流水抵抗が良好に再現されることが確認された。

○2010年度

(1) 浸透流計算手法の開発：微細な構造物や、粗い土砂粒子のような多数の物体間を浸透して流下する自由水面流れの3次元数値解法を構築した。既往の浸透流計算手法と異なり、多数の物体間の流れを直接計算することが可能である。特に、大規模な演算が行えるように、MPI (メッセージ・パッシング・インターフェイス) を利用する並列計算プログラムを新たに作成した。この結果、物体よりも詳細な計算格子を配置する大規模な計算をスーパーコンピュータ (大規模分散メモリシステム) 上で実行することが可能となった。

(2) 移動床計算手法の開発：水面上に突出した土砂面周辺の流れや、土砂の堆積により移動床面が水面上に現れる過程など、大規模な移動床現象を扱える解法を開発した。移動床面に作用するせん断力は、多相場の解法に基づいて、圧力と粘性力から算出するものとした。この数値解法も、上記(1)と同様に、MPIを利用するプログラムとした。このため、大規模計算が可能である。

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24件)

1. 藤岡 奨, 牛島 省:
VOF 関数の移流計算における数値拡散抑制手法の検討：
計算工学会論文集，査読有，Vol. 2010 (2010)，No. 20100020，2010.
2. 藤岡 奨, 牛島 省:
気液混相流計算のためのスカラー交換型非拡散フィルタの開発：
応用力学論文集，査読有，vol. 13，pp. 271-280，2010.
3. 中村 元太, 牛島 省, 黒田 望, 永井 克明：
流木群の集積による流水抵抗の3次元数値計算：
水工学論文集，査読有，第54巻，pp. 1183-1188，2010.
4. 黒田 望, 牛島 省:
柔軟な構造物を有するダクト流れの数値計算：

- 水工学論文集，査読有，第54巻，pp. 1165-1170，2010.
5. S. Ushijima, N. Kuroda and G. Nakamura：
Numerical prediction for movements of a floating object with non-uniform density in free surface flows：
Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, JSCE，査読有，vol. 28, No. 2, pp. 49-64，2010.
 6. S. Ushijima, N. Yoshikawa and G. Nakamura：
Numerical prediction method for multiphase fields to predict fluid forces acting on multiple rigid cylinders：
Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, JSCE，査読有，vol. 28, No. 2, pp. 37-47，2010.
 7. K. Nagai and S. Ushijima：
ALE finite volume method for free-surface Bingham plastic fluids with general curvilinear coordinates：
Journal of Applied Mechanics, JSCE，査読有，vol. 13, pp. 745-752，2010.
 8. 黒田 望, 牛島 省：
流体と線形弾性体の有限変形に対する連成解析手法：
応用力学論文集，査読有，vol. 12, pp. 117-125，2009.
 9. 中村元太, 牛島 省：
弾性体群に作用する波動流れの流体力に関する3次元数値解析：
応用力学論文集，査読有，vol. 12, pp. 691-699，2009.
 10. S. Ushijima and N. Kuroda：
Numerical method to predict interactions between free-surface flows and elastic bodies：
Proc. of Conf. on Modelling Fluid Flow (CMFF09)，査読有，pp. 380-385，2009.
 11. S. Ushijima, O. Makino and N. Yoshikawa：
3D Numerical prediction for transportation and entrapment of driftwood with T-type solid model：
Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering，査読有，Vol. 27, No. 1, May, pp. 11-21，2009.
 12. S. Ushijima, N. Yoshikawa and N. Yoneyama：
Numerical prediction for fluid forces acting on 3D complicated-shaped objects in free-surface flows：
Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering，査読有，Vol. 27, No. 1,

- May, pp.23-35, 2009.
13. S. Ushijima and N. Kuroda :
3D Numerical prediction for interaction between free-surface flows and elastic bodies with MICS and finite element method :
Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 査読有, Vol.27, No.1, May, pp.37-48, 2009.
 14. S. Ushijima and N. Kuroda :
Multiphase modeling to predict finite deformations of elastic objects in free surface flows :
Fluid Structure Interaction V, WIT Press, 査読有, pp. 35-45, 2009.
 15. 吉川 教正, 牛島 省, 中村元太 :
円柱群に作用する波動流れの流体力に関する数値解析 :
水工学論文集, 査読有, 第 53 巻, pp. 1039-1044, 2009.
 16. 牛島 省, 黒田 望, 中村元太, 木村真緒 :
自由水面流中を運動する密度が不均一な円柱浮体の数値解析 :
水工学論文集, 査読有, 第 53 巻, pp. 1033-1038, 2009.
 17. 黒田 望, 牛島 省, 牧野 統師 :
剛体と弾性体に作用する流体力の数値計算 :
水工学論文集, 査読有, 第 53 巻, pp.1045-1050, 2009.
 18. S. Ushijima and N. Kuroda :
Numerical prediction of shielding effects on fluid-forces acting on complicated-shaped object :
Journal of Applied Mechanics, JSCE, 査読有, vol. 11, pp. 769-778, 2008.
 19. 黒田 望, 牛島 省 :
自由水面流中の変形を伴う物体に作用する流体力の数値計算 :
応用力学論文集, 査読有, 第 11 巻, pp. 799-806, 2008.
 20. 牛島 省, 福谷 彰, 牧野 統師 :
3次元自由水面流中の接触を伴う任意形状物体運動に対する数値解法 :
土木学会論文集, 査読有, B, Vol.64, No.2, pp.128-138, 2008.
 21. 牛島 省, 吉川 教正, 米山 望, 禰津家久 :
自由水面流中の3次元複雑形状物体に作用する流体力の数値解析 :
水工学論文集, 査読有, 第 52 巻, pp.955-960, (CDROM), 2008.
 22. 吉川 教正, 牛島 省, 牧野 統師, 禰津家久 :
多相場の数値解法による複雑形状ブロックの水中投入の数値計算 :
水工学論文集, 査読有, 第 52 巻, pp.961-966, (CDROM), 2008.
 23. 牧野 統師, 牛島 省, 吉川 教正, 禰津家久 :
流木の流送と集積に関する T 型固体モデルによる3次元数値計算 :
水工学論文集, 査読有, 第 52 巻, pp.991-996, (CDROM), 2008.
 24. 牛島 省, 黒田 望, 禰津家久 :
MICS と有限要素法による自由水面流と弾性体の連成運動に対する3次元数値計算 :
水工学論文集, 査読有, 第 52 巻, pp.1033-1038, (CDROM), 2008 (黒田君, 水工学論文奨励賞受賞).
- [学会発表] (計 15 件)
1. S. Ushijima, K. Nagai and H. Yamashita :
Multiphase computational method for free-surface flows over deformable bottom surfaces :
24th CFD symposium, 東京, E9-1, 2010.
 2. 藤岡 奨, 牛島 省 :
非数値拡散フィルタの気液混相流数値計算への適用性の検討 :
24th CFD symposium, 東京, E10-5, 2010.
 3. S. Ushijima, A. Fukutani, O. Makino and N. Kuroda :
3D numerical prediction method for floating objects in free-surface flows :
Proceedings of 17th Congress IAHR-APD, Auckland, New Zealand, 1a029, 2010.
 4. N. Kuroda and S. Ushijima :
Numerical prediction of finite deformation of elastic bodies in the three dimensional fluid flows :
Abstracts of WCCM/APCOM 2010 Sydney, Australia.
 5. 黒田 望, 牛島 省 :
大変形する弾性体を含む3次元流れ場の数値計算法 :
京都大学防災研究所年報, 京都, 第 52 号 B, pp. 747-752, 2009.
 6. 牛島 省, S. A. Kantoush, 角 哲也, A. J. Schleiss :
浅いダム内における流れの不安定性の数値計算 :
第 23 回数値流体力学シンポジウム, 仙台, G9-4, 2009.
 7. 中村 元太, 牛島 省, 黒田 望, 永井 克明 :
流木群に関する流水抵抗の数値計算 :
第 23 回数値流体力学シンポジウム, 仙台, G9-3, 2009.

8. 黒田 望, 牛島 省, 永井 克明:
柔軟構造体の抵抗則に関する弾性の影響:
第 23 回数値流体力学シンポジウム, 仙台, G9-2, 2009.
9. 牛島 省:
流体分野における数値シミュレーションの現状と課題:
土木学会全国大会研究討論会, 福岡, 2009.
10. N. Kuroda and S. Ushijima :
Computational method for
fluid-forces acting on rigid and
elastic objects :
Proceedings of 9th Int. Offshore and
Polar Eng. Conf., 大阪, pp.376-382,
2009.
11. 黒田望, 牛島 省 :
3 次元流体中における柔軟物体の数値
解析 :
第 58 回理論応用力学講演会 講演論文
集, NCTAM2009, 東京, pp. 227-228,
2009.
12. 黒田望, 牛島 省 :
多相場の解法を用いる流体と柔軟構造
物の連成解法 :
計算工学講演会論文集, 東京, Vol.14,
pp. 753-756, 2009.
13. N. Kuroda and S. Ushijima :
Computational method for
arbitrarily-shaped elastic objects
in free-surface flows :
Advances in Hydro -Science and
Engineering, IAHR, 名古屋, vol. III,
pp. 65-66, 2008.
14. N. Kuroda and S. Ushijima :
Numerical prediction of interactions
between wave flows and flexible
structures with 3D MICS :
Proc. 18th Int. Offshore and Polar Eng.
Conf., ISOPE, Vancouver, Canada,
pp.108-115, 2008.
15. S. Ushijima :
Multiphase-model to predict
arbitrarily-shaped objects moving in
free surface flows :
Proc. 18th Int. Offshore and Polar Eng.
Conf., ISOPE, Vancouver, Canada,
pp.621-628, 2008.

[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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牛島 省 (Ushijima Satoru)
京都大学・学術情報メディアセンター・教授

研究者番号 : 70324655

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し