

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 若手研究(B)  
 研究期間： 2008 ～ 2009  
 課題番号： 20760326  
 研究課題名(和文) IB法の数値波動水槽への導入と任意形状可動物体と波の連成解析モデルの構築  
 研究課題名(英文) Development of a numerical wave tank based on IB method for the simulation of interactions between moving objects and waves  
 研究代表者  
 李 光浩 (KWANG-HO LEE)  
 名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：00447830

研究成果の概要(和文)：本研究ではデカルト格子上的計算領域内の任意形状物体の周りの波動場の解析が可能なIB法を自由水面の変化を精度よく追跡できるVOF法とリンクさせた新たな数値解析手法を構築した。そして本手法を、水平円柱周りの波動場および浮体の波浪応答解析へ適用した。その結果、本手法は曲面を持つ構造物周りの波動場を効率的にデカルト格子上で計算でき、構造物周りの波動場や作用波力および浮体の運動振幅を良好に再現可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new numerical wave tank (NWT) model was proposed, which is combined a direct-forcing immersed boundary (IB) method to handling interface problems with complex geometry on a standard regular Cartesian grid and the volume of fluid (VOF) method to track the free water surface. The developed NWT model was applied in several case studies, including the wave force on a horizontal cylinder and dynamic behavior of tension-leg floating body. The methodology developed in this study serves as a good tool for solving many practical problems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：数値波動水槽, IB法, VOF法, 任意形状物体, 波の連成解析モデル

## 1. 研究開始当初の背景

計算機の性能向上と相まって、海岸構造物の耐波性能や越波および沿岸漂砂などの海岸工学上の様々な工学的問題を解明するために数多くの高精度な数値計算手法が開発されている。特に、数値波動水槽 (Numerical

Wave Tank; NWT) の概念に基づく計算手法は、様々な水理現象に対して水理実験とほぼ同様な条件での数値シミュレーションが可能であり、水理実験では困難だった諸々の詳細なデータを提供しうるものである。しかし、既往のNWTを用いた手法は一般的にデカル

ト座標系を用いて離散化されており、曲面や任意形状への適用には構造物形状の入力のわずらわしさや境界条件の取り扱いなどに大きな課題が残されているために、従来使用される計算システム上の海岸構造物は、主に単純な形式のものに限られてきた。このような状況の中で、心臓内の血液の流れを解析するために提案された **Immersed Boundary (IB)** 法は、任意形状の不透過境界を有する物体と流体の連成解析が可能な初の数値計算手法として高く評価できる。この **IB** 法に基づいた新たな数値計算モデルは、既存の数値手法では極めて困難であった海岸工学上の様々な物理現象に適用でき、問題を解明できる有用なツールとなり得ることが期待される。

## 2. 研究の目的

これまで困難であった防災や海岸事業に関連する様々な海岸工学上の問題をより短時間・高精度で解析できる **IB** 法を用いた新たな汎用数値モデルを構築し、国内外でもトップレベルの新たな汎用数値モデルを開発し、数値計算手法をより一層発展させることを目的とする。

## 3. 研究の方法

**IB** 法では計算領域内部の解析対象構造物による境界条件を満足させるため、流体の運動方程式に外力項を取り込んで計算を行うことに特徴がある。このような外力項をどのように評価するかによって様々な **IB** 法が存在する。具体的な研究手順を以下に示す。

(1) **IB** 法に基づいた新たな流体構造物連成解析モデルの構築

- ① デカルト格子幅の影響や構造物境界面で配置したラグランジュメッシュ間隔の影響に対してデータベースを作成する。
- ② 水面付近で設置された構造物に対する **IB** 法の解析能力を検討する。
- ③ 停止状態の複雑な構造物に対する適用性を検討する。
- ④ 運動する物体へ解析対象を拡張し、その解析能力を検討する。
- ⑤ 物体の運動に対する追跡が困難である場合、**IB** 法の改良を行う。

(2) 水理実験の実施と、構築した流体構造物連成解析モデルの検証

## 4. 研究成果

(1) 本研究で構築した **IB** 法の特性検討

本研究ではデカルト格子内の計算領域内の任意形状物体の周りの波動場の解析が可能な **IB** 法を **VOF** 法とリンクさせた新たな数値解析手法を構築した。

① ラグランジュ力

本研究で採用した **IB** 法は、構造物境界面の

ラグランジュメッシュでの力のつり合いを考慮することで境界面でのノンスリップを満足するものである。このラグランジュメッシュでの力は局所加速力、対流慣性力、粘性力及び圧力項で構成される。まず、**IB** 法に基づいたモデルにより求めたラグランジュ力の特性を考察するため、水平円柱表面の任意点におけるラグランジュ力の検討を行った。図1は、図中に示したラグランジュ点において、各方向のラグランジュ力の時間変化を表したものであり、ラグランジュ力の各項は、振幅は異なるが波の周期で振動していることが確認される。特に、局所加速力は振幅が大きいのみならず、位相もラグランジュ力とほぼ同様であり、ラグランジュ力を算定することにおいて重要な項である。なお、対流慣性力や粘性力はラグランジュ力に大きな影響

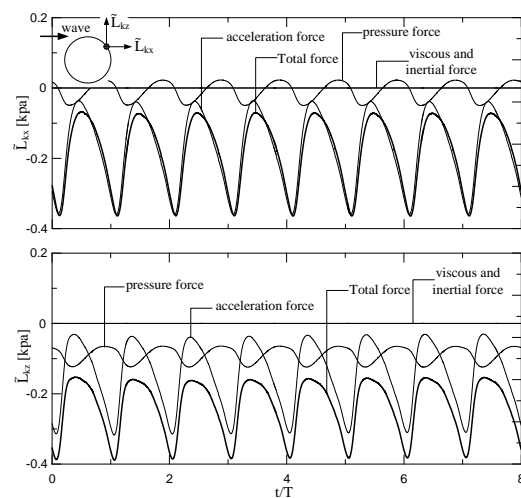
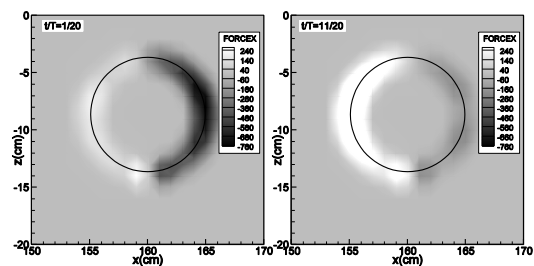
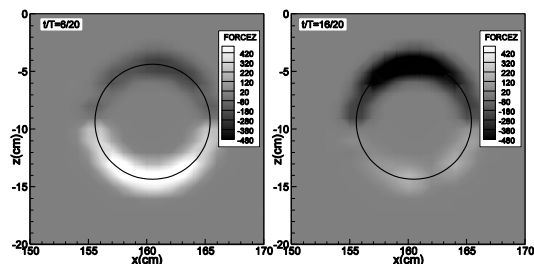


図1 水平円柱に作用する波力の比較



(a) x方向のオイラー力



(b) z方向のオイラー力

図1 デカルト格子上的オイラー力

をおよぼさないことが分かった。

## ②オイラーカ

ラグランジュメッシュで求めたラグランジュ力は構造物表面における不透過条件を満足させるため、運動方程式のソース項として作用させる。しかし、ラグランジュ力の定義位置は、スタガード格子での物理量の位置と異なるため、次の時間ステップの流速や圧力の計算を行う前に、ラグランジュ力をデカルト格子に補間する必要がある。図2は分布関数を用いてデカルト格子に分布させたオイラーカの空間分布を示す。図から分かるように、デカルト格子上のラグランジュ力は半周期ごとに各方向の最大・最小値が発生し、水平円柱に作用する波力の特性を良く再現していることが明らかになった。

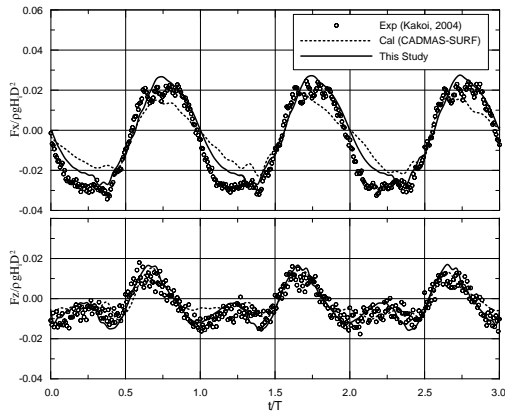


図3 水平円柱に作用する波力の比較

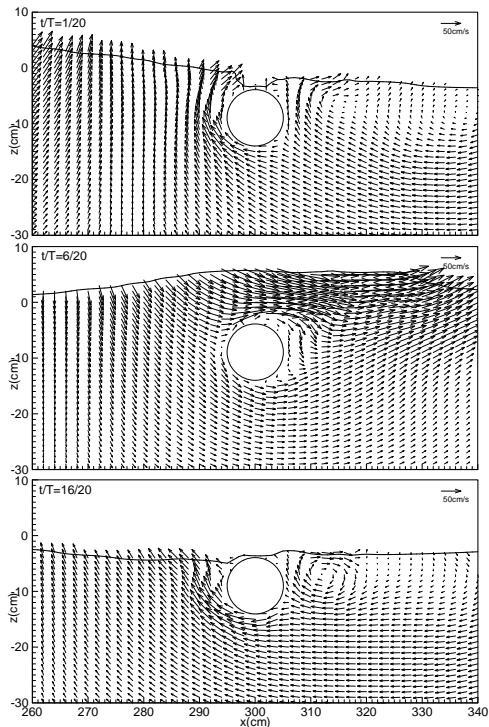


図4 水平円柱周辺の流速ベクトル

## (2) 水平円柱に作用する波力と流速場

IB法に基づき、新たに構築した数値波動水槽の妥当性を検証するため、波浪場におかれた水平円柱に作用する波力に対して、計算結果を実験結果およびCADMAS-SURFによる計算結果と比較した。その結果、図3に示すように、CADMAS-SURFによる計算結果は実験値を全般的に若干過小していることが認められるが、本モデルによる計算値は波力の絶対値や位相がCADMAS-SURFより実験値を良く再現しているのが認められる。図4は、水平円柱周辺の代表的な流速分布を示したものである。図より、時間経過に従って水平円柱の設置による水面変動の影響が確認される。特に、 $t/T=6/20$ から、一様流におかれた円柱と同様な円柱沖側 $z=-10\text{ cm}$ 付近で流れの分離が、 $t/T=16/20$ では、円柱背後で時計まわりの渦が確認できる。

## (3) 移動構造物への適用

本手法を停止問題のみならず、IB法を浮体の波浪応答解析に拡張適用した。

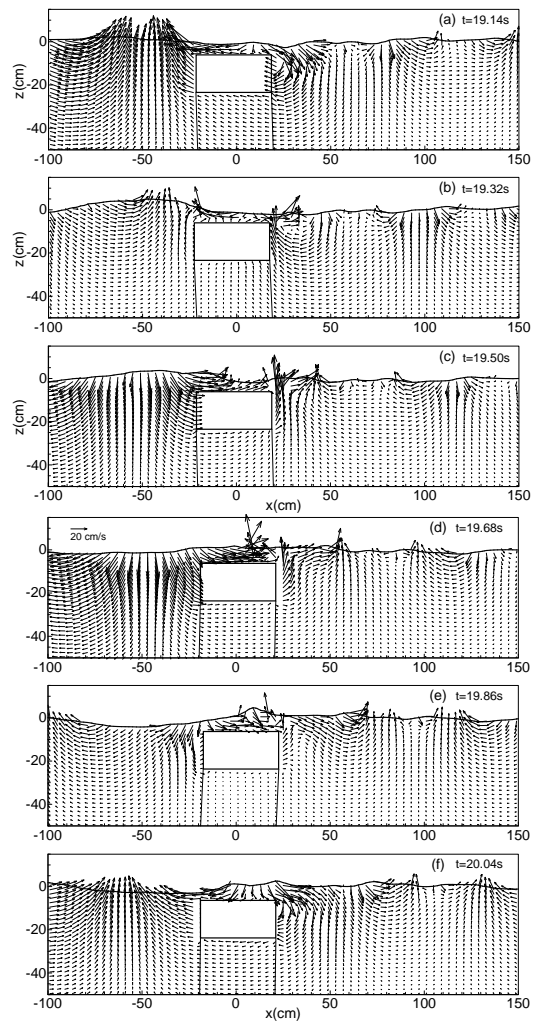


図5 移動浮体周辺の流速ベクトル

①移動浮体周辺の流速ベクトル分布

図5は、本研究で構築した数値解析モデルにより計算した移動浮体周辺の代表的な流速ベクトル分布を波一周期間の6つの位相に対して示したものである。また、VOF関数から得られた空間水面変動も同時に示している。同図から、時間の経過に伴って浮体は、波峰が入射してくると岸側に押され、波谷が入射してくると沖側に戻されるといった浮体の波浪応答の特性や、それによる水面変動および浮体天端上での砕波の様子などが確認できる。また、砕波後に発生する天端上での大きな流速成分により、浮体背後において時計周りの渦の形成が認められる。

②浮体の波浪応答

図6は、浮体前後の水面変動に関して、本数値解析モデルによる計算結果と既往の水理模型実験結果とを比較したものである。浮体前面である図6(a)における水面変動は、ほぼ上下対称な正弦波形を示しているが、より浮体に近い図6(b)の水面変動は、浮体の動揺と入射波および浮体による反射波の非線形干渉によって非対称性を帯びていることが分かる。ただし、水理模型実験による浮体前面での水面変動には2次波峰が認められるが、数値計算では現れない。これは、後述する浮体の動揺変位に実験と計算結果の若干の差があることが一因であると考えられるが、詳細については、今後、更なる検討が必要である。図6(c)および(d)に示す浮体背後の水面変動は、浮体の天端上で砕波した波が再生している領域であることから、波峰の分裂による高周波成分が発達しているといえる。以上より浮体に近い位置では若干の位相差は認められるが、全般的に数値解析結果と

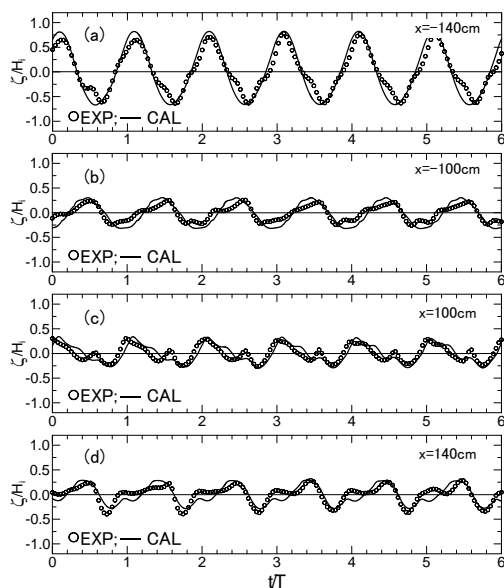


図6 浮体前後の水面変動の比較

水理模型実験結果との対応は良好と判断できる。

図7は、本数値解析モデルから得られた浮体の水平運動振幅および鉛直運動振幅の時間変化をFV法による数値解析結果とともに水理模型実験結果と比較した例である。図から、FV法ではswayおよびheaveともに、浮体の運動振幅を過大評価していることが認められる。特に、heaveに関しては水理模型実験の結果と大きな差が見られる場合があり、全般的にばらつきが確認できる。これに対して、IB法による本数値解析モデルでは、heaveに関して水理模型実験結果とわずかなずれが見られるものの、FV法に比べて浮体の波浪動揺を適切に再現していると判断できる。このことは、オイラーメッシュに基づいて構造物に作用する外力を算定するFV法に対して、IB法では、構造物の境界面で設けたラグランジュ点において浮体と波の相互作用を考慮することができるためであると考えられる。したがって、IB法による本数値解析手法は浮体の波浪応答を適切に解析できるとともに、海岸工学分野において学術的にも工学的にも極めて大きな成果が期待できる。

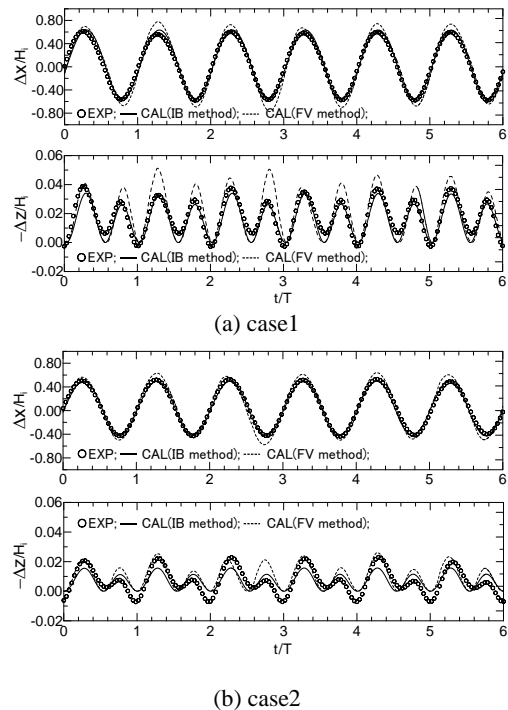


図7 浮体の水平運動振幅 ( $\Delta X/H_i$ ) と鉛直運動振幅 ( $-\Delta Z/H_i$ ),

Case1: 入射波周期  $T=1.3$  s, 入射波高  $H_i=0.074$  m, 静水深  $h=0.65$  m, 吃水  $d=0.03$  m, 波形勾配  $H_i/L=0.03$ , Case2:  $T=1.1$  s,  $H_i=0.056$  m,  $h=0.68$  m,

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2件)

- ① Lee, K.-H., Mizutani, N., A Numerical Wave Tank Using Direct-Forcing Immersed Boundary Method And Its Application To Wave Force on a Horizontal Cylinder, Coastal Engineering Journal, Vol. 51(1), pp.27-48, (2009), 査読有り
- ② 李光浩, 水谷法美, 後藤政雄, I B法による緊張係留浮体の波浪応答に関する有限変位解析, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 891-895, (2008), 査読有り

[学会発表] (計1件)

- ① 李光浩, 水谷法美, 簡便な Immersed Boundary 法による数値波動水路の構築に関する研究, 平成 21 年度土木学会中部支部研究発表会, 平成 21 年度 3 月 1 日, 金沢工業大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

李 光浩 (KWANG-HO LEE)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：00447830

(2)研究分担者

(3)連携研究者

水谷法美 (NORIMI MIZUTANI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：10209760