

流体中を移動する物体と周囲流体との連成計算法の新提案

田 安 正 茂*・細山田 得 三**

本報では、流体中を移動する物体と流体の相互干渉を 2 次元静止直交座標系で表現するこれまでにない方法を新たに提案する。本方法は、計算領域内の各セルが流体か物体かを逐次判定することにより直交格子座標中の物体位置を判断し、流体運動と物体の運動を連成させながら計算するものである。一様流中に回転する円形物体を設置した計算では、流れの向きと物体の回転方向が逆向きとなる場所で流速が減速されており、物体の運動が流体に影響を与えていることを確認した。また、流体力を受けて移動する物体の計算では、一様流および振動流ともに流れの向きに応じて物体が移動している様子を確認した。

1. はじめに

波動場における流体運動と波動場中を移動する物体との相互作用に関する問題は、波の作用によって滑動するケーソンや波によって誘起される被覆ブロック・消波ブロックの移動、海中や海面を浮遊する船舶などの浮体構造物、越波による構造物上の人間の運動など、海岸工学の随所に実務的な面で現れる。このような問題を数値的に解く方法は、大きく分けて 2 つに分類できると考えられる。1 つは、時々刻々変化する流体や物体の境界形状の情報を使って計算領域の格子を生成する方法 (BFC 法) であり、例えば礪山 (2002) が可撓性の構造物に対して適用した。もう 1 つの方法は、固体・液体・気体を数値的に取り扱う上で明瞭な区別をつけず、それぞれの境界形状がぼやけることがない CIP 法によって流体および固体の運動を計算するものであり、川崎ら (2001) が海岸工学への適用を推進している。しかし、回転しながら大きく移動する物体と流体の連成計算を行う場合、前者の方法では物体の回転に伴い格子形状が著しく変形するため計算が困難となる。また、後者の方法では質量の保存性を厳密に満たす保証がないため長時間の計算に不向きであり、その問題を克服するために CIP-CSL 法を導入するなどの工夫が必要となる。

本研究では、流体中を移動する物体と周囲流体の連成計算におけるこれらの問題に対して、2 次元の非圧縮性流体を対象に静止直交格子で計算する新たな方法を提案するものである。ここでは、そのアルゴリズムを紹介するとともに、その基本的な特徴を把握するため、簡単な流れ場である一様流および振動流に適用し、物体と流体の相互干渉について計算を行った。

2. 数値計算法

(1) 静止直交格子によって物体を表現する方法

直交格子上で移動物体を計算する手法は、境界条件の

処理が困難になるものの基礎方程式の取り扱いが容易で精度も高いと考えられる。例えば中川 (2000) が洪水氾濫による流木の移動に対して適用しており、小野 (2002)、朴・黒田 (2000) に紹介されているように、今後は設計などに用いられていく可能性が高い方法と言える。

a) 流体と物体の判定

流体と物体の判別には、巻き付き判定法と呼ばれる方法を用いた。この方法は、細山田・津田 (2002) によって初めて流体計算の中に導入されたものである。図-1 に巻き付き判定法の概略を示す。図-1 の中で番号付きの黒丸によって示した点は、移動物体の外形を構成する点であり、物体はそれらを結ぶ閉曲線の内側となる。

巻き付き判定法では、まず物体外周点座標を静止直交座標の各セルの中心点 (例えば A 点, B 点) を原点とする座標に変換する。次に、物体外周点を結ぶ線分に変数を与え、外周点を結ぶ線分の変数の総和を求める。線分に与える変数は以下に示した 5 つの法則に従う。

- ① X の値が正から負に移り Y 軸との交点が正の時: -1
- ② X の値が負から正に移り Y 軸との交点が正の時: +1
- ③ X の値が正から負に移り Y 軸との交点が負の時: +1
- ④ X の値が負から正に移り Y 軸との交点が負の時: -1
- ⑤ Y 軸と交差ししない: 0

変数の総和が +2 あるいは -2 の場合、そのセルは閉曲線の内点であり物体部と判定され、変数の総和が 0 の場合は閉曲線の外点であり流体部と判定される。従って、

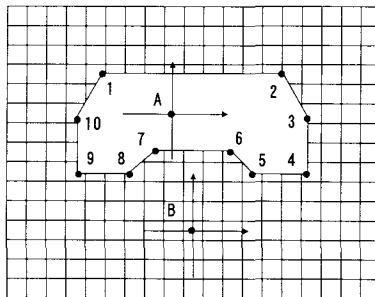


図-1 巻き付き判定法の概略図

* 正会員 工修 福井工業高等専門学校助手 環境都市工学科

** 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系

図一1のA点では外周点1から2の線分の変数が+1, 外周点6から7の線分の変数が+1, その他の線分の変数が0, 変数の総和が+2となり物体部と判定される。一方, B点では外周点1から2の線分の変数が+1, 外周点6から7の線分の変数が-1, その他の線分の変数が0, 変数の総和が0となり流体部と判定される。

なお, 巻き付き判定法では, セル毎に流体部または物体部の判定を行うため, 流体と物体の境界は格子点を結ぶ辺によって構成されることになり, 物体はセルの集合体として表現される。

b) 流体力による物体の移動

流れの中にある物体の運動は, 重心周りの回転運動と重心の並進運動の和で表すことができる。すなわち, 物体の回転角と並進距離が算出できれば, 物体の外周点を重心周りに回転, 並進させることで移動する物体を表現することが可能となる。

物体外周点の座標移動は, 以下の手順で行った。

①物体外周点の重心から見た初期の相対座標 $(x_i, y_i, i=1 \sim N, N$ は構造物の外周点数) を求める。

②式(1)に示す回転角 θ の回転に関する1次変換と重心の並進距離 (X_G, Y_G) との和 $(X'_i, Y'_i, i=1 \sim N)$ を計算する。

③物体の外周点を移動させた後, これらの点について巻き付き判定法を行い移動後の物体形状を計算領域内に表現する。

$$\begin{pmatrix} X'_i \\ Y'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \end{pmatrix} \quad \dots\dots (1)$$

本計算で x, y 方向の重心の並進距離 X_G, Y_G , 物体の回転角 θ は, 物体に作用する外力である x, y 方向の流体力 f_x, f_y , 流体力による重心まわりのモーメント M をそれぞれ式(2)~(4)の運動方程式に適用することにより求めた。

$$m \frac{d^2 X_G}{dt^2} = f_x \quad \dots\dots (2)$$

$$m \frac{d^2 Y_G}{dt^2} = f_y \quad \dots\dots (3)$$

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = M \quad \dots\dots (4)$$

ここで, m は物体の質量, I は物体の重心まわりの慣性モーメントであり, 物体を剛体と仮定しているため一定値である。ただし, 複雑な形状を有する物体の場合の m と I は, 初期の外周点情報から巻きつき判定法によって判定された格子情報を用いて計算した。

流体力 f_x, f_y は, 流体セルと物体セルの境界面に作用する各方向の圧力成分を境界上で総和を取ることで求めた。流体力による重心まわりのモーメント M は, 境界上の微小部分に作用する圧力と物体重心からの距離

によって算出される微小部分の外力のモーメントを全境界上で総和を取ることで求めた。

式(2)~(4)の3つの2階常微分方程式は, 重心の並進移動量 X_G, Y_G の1回時間微分が物体の並進移動速度 V_X, V_Y , 角度 θ の1回時間微分が角速度 ω となるため, これらの変数を導入し, 2回微分を1回微分の式に変換することができる。本計算では, これら6本の1回微分方程式を陽的に時間積分することによって各量の時間発展を算出した。

c) 境界条件

物体が流体内を移動する場合, 物体の表面では, 運動学的境界条件として物体の移動速度と流体の速度が一致しなければならない。つまり, 物体表面の境界条件は物体の移動速度を与えればよいことになる。

物体の移動速度は, 物体の並進速度と重心まわりの回転による速度の各成分の和である。物体の回転速度は, 重心からその点までの距離に角速度を乗じたものであり, 回転方向を向いている。従って, 物体表面の移動速度は, 回転速度を角度に応じて x, y 方向に分解した速度と, 並進速度の和となる。本計算では, 物体と流体の境界にこの境界条件を与えることで, 物体が移動する際に流体を押しのける現象が計算できるようになる。

(2) 基礎方程式

基礎方程式は, 以下に示す2次元非圧縮性流体に対する連続式(5)とNavier-Stokes方程式(6), (7)を用いる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots (7)$$

ここで, u, v : 流速の水平, 鉛直方向の成分, p : 圧力, ρ : 流体の密度, ν : 動粘性係数である。なお, 非圧縮性流体の仮定より密度 ρ は一定となる。これらの式で未知数は, 速度 u, v , 圧力 p である。

非圧縮性流体運動の解法には, HSMAC法(SOLA法)を用いた。この方法は, Navier-Stokes方程式によって変数の時間発展を直接計算し, 連続式を利用してNewton法による流速と圧力の緩和計算を行い, 圧力と流速の更新値を求めるものである。計算格子にはスタッガード格子を採用し, 移流項の計算については風上差分と中心差分の重み付き平均を使用した。

非圧縮性流体の一般的な解法であるMAC法では, 圧力のポアソン方程式を解くプロセスがあり, 圧力の境界

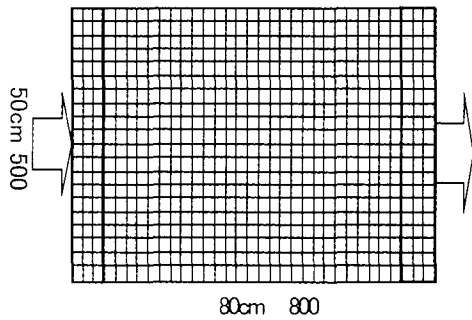


図-2 2次元計算領域概略図

条件について十分配慮する必要がある。今回用いた HSMAC 法 (SOLA 法) は、圧力の変動が流速の発散値の正負に応じて調整されるのみであり、圧力の境界条件を陽的には利用していないため、複雑な形状を持った物体でも容易に計算することが可能である。

図-2 は、2 次元の計算領域の概略を示している。計算領域の左右端で流体の流入の境界条件を与えている。ただし、流入の境界条件を強制的に与えることは計算が不安定化したり、境界上での圧力の反射などが発生する場合があるため、ここでは両端境界から数格子分だけ (図-2 中で示した計算領域の左右端の灰色で示した部分) 運動方程式に式 (8) の項を付加した。

$$\text{各項右辺} + \begin{cases} -\gamma(u - U_i); & \text{水平運動方程式} \\ -\gamma(v - 0); & \text{鉛直運動方程式} \end{cases} \quad \dots (8)$$

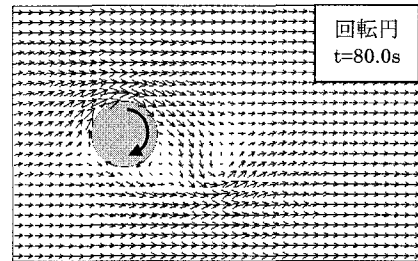
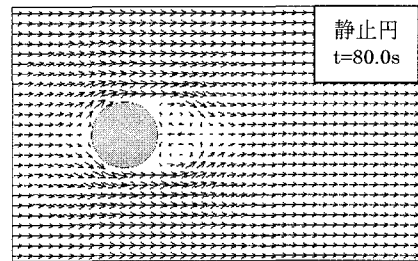
ここで、 U_i, γ は両端境界での流入・流出流速および係数である。式 (8) は運動方程式の右辺に付加することにより、変数の値を誘導する効果があり、係数 γ を空間的に分布させることによって、誘引する効果の強弱をつけることができる。本計算では両端境界から数格子分だけこの項が付加されているが、境界からの距離に対して線形的に γ の値は小さくなっている。この条件により両端の境界近くで水平流速 u は一様な流速 U_i に、鉛直流速 v はゼロになるよう誘導され、計算が安定化し収束が速まることが期待される。

3. 数値計算結果

(1) 一様流による計算結果

計算領域は図-2 に示すとおり、縦の格子数を 500、横の格子数を 800、格子間隔を縦横ともに 0.1 cm とした。

図-3 は一様流中に静止状態の円 (静止円) およびその場で回転する円 (回転円) を設置した場合の周囲流体の流速ベクトルを表している。ここでは、計算領域の格子点 (220, 250) の位置に直径 13 cm の円を設置し、回転円においては時計回りに角速度 3.0 度/s を与えた。流体には領域の左側から右側に向かって初期流速 0.3 cm/s を与えている。この条件で Reynolds 数は 260 となる。



→ = 1.5 cm/s

図-3 静止円および回転円周りの流速ベクトル

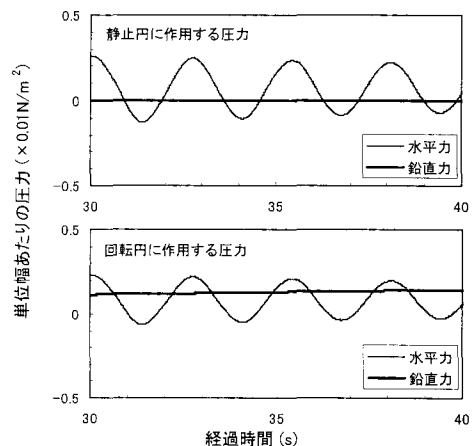
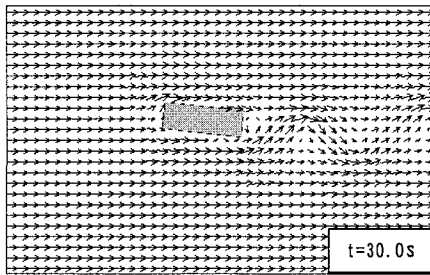
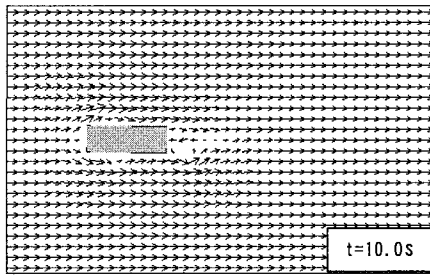


図-4 静止円および回転円に作用する圧力

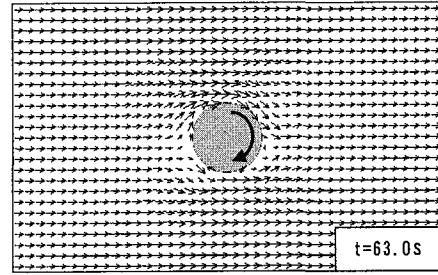
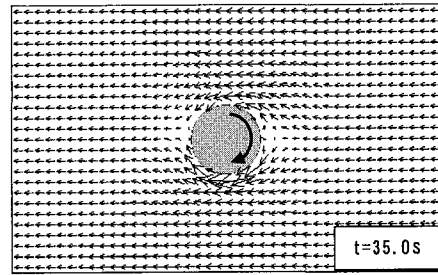
図-3 上段に示した静止円周りの流れでは、円の遮蔽領域で上下対称の双子渦が形成されており、従来の室内実験で得られた流れの現象が再現されている。一方、図-3 下段に示した時計回りに回転する円の周りでは、流体が円の回転に引きずられ、流れ方向と回転方向が一致する回転円の上部で流れが加速され、流れ方向と回転方向が逆向きとなる回転円の下部で流速は減速されている。

図-4 は静止円および回転円に作用する圧力の時刻歴の一部を示している。静止円に作用する圧力は、鉛直方向には作用せず、水平方向にのみ周期的に作用していることが分かる。一方、回転円では水平方向に周期的な圧力が作用するとともに、鉛直方向に正の圧力が作用しており、図に対して上向きの力が作用していることが分か



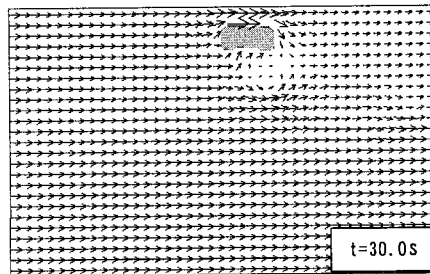
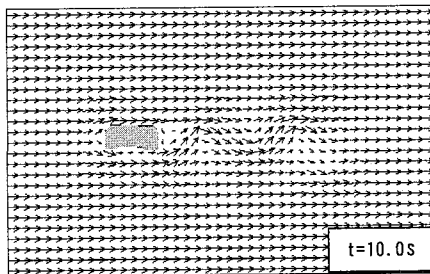
→ = 15.0 cm/s

図-5 矩形物体の移動と流速ベクトル



→ = 1.5 cm/s

図-7 振動流中の回転円周りの流速ベクトル



→ = 15.0 cm/s

図-6 被覆ブロックの移動と流速ベクトル

る。ただし、水平力に比べて鉛直力に顕著な波動成分は見られない。この現象はマグヌス効果と呼ばれ、野球において投手が投げた変化球の球に作用する力として一般的に知られている。

図-5、図-6は流体力を受けて矩形物体および被覆ブロックが流体中を移動する様子を示している。なお、これら2つのケースでは初期流速を5.0 cm/sとして計算した。図-5の矩形物体では、物体後部に生じた渦の影響

により物体がわずかながら回転し、流下方向に移動する様子が確認できる。一方、図-6の被覆ブロックでは下部の形状が凹型であるため物体の下部で渦が生じ、上方に移動しながら流下方向に移動する様子が確認できる。

(2) 振動流による計算結果

振動流による計算では、計算領域左右端において周期50 sの同位相の正弦振動流を与えた。計算領域は一様流と同様とし、物体の設置位置を計算領域の中央とした。

図-7は、振動流中に回転円を設置した場合の周囲流体の流速ベクトルを表している。この計算では、振動流の最大流速を0.3 cm/s、回転円には時計回りに角速度3.0度/sを与えた。図-7の上段に示した計算開始から35秒後では、流体が右から左に約0.3 cm/sで流れており、回転円の下部で流速が加速されている。一方、下段に示した63秒後では、流体が左から右に約0.3 cm/sで流れており、回転円の上部で流速が速くなっている。しかし、35秒後に比べ63秒後の流速は小さく、流れの向きの変化とともに流速場の状態も上下が逆になるものの、加速された流速の大きさは非対称となった。図-8は振動流中において時計回りおよび反時計回りで回転する円に作用する鉛直圧力の時系列の一部を示している。この図から、時計回りに回転する円の鉛直圧力は負の振幅が大きく、相対的に下向きの圧力が大きいと言える。図-7に示した流速場が非対称であることと一致する。一方、反時計回りに回転する円の鉛直圧力は正の振幅が大きく、相対的に上向きの圧力が大きいと言える。また、両者の圧力の変化は圧力ゼロの線を挟んで対称であり、振

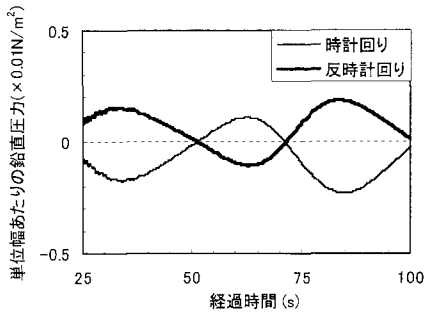


図-8 振動流中の回転円に作用する鉛直圧力

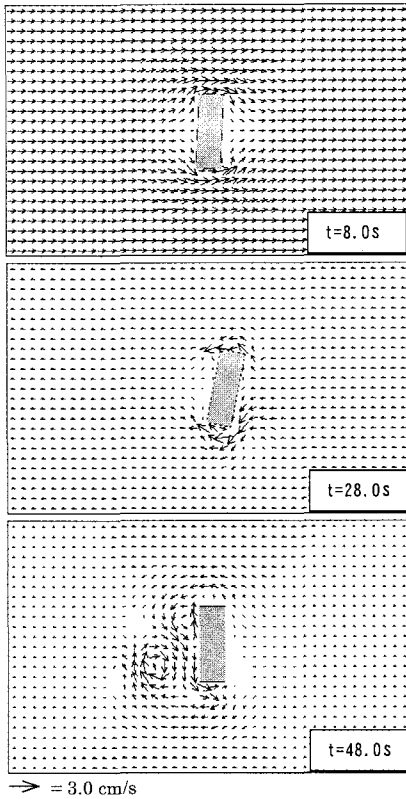


図-9 振動流中の矩形物体の移動と流速ベクトル

動流中においては回転の向きによって相対的な圧力の向きが決定されることが確認できる。

図-9は振動流中に矩形物体を設置した場合の物体の移動と周囲流体の流速ベクトルを表している。ここでは振動流の最大流速を1.0 cm/sとし、振動流の周期を50秒として計算を行った。従って、流れの向きは25秒ごとに変化している。この図から、矩形物体が流れの向きに応じて移動している様子が確認できる。また、図の中段および下段に示した計算開始から28秒後、48秒後では、

流れの向きが変化する際に物体の慣性力によって流体が押しのけられる様子が確認できる。しかし、図の上段に示した8秒後の結果からも分かるように、流体に与えた初期条件が鉛直断面で様な流速であるにもかかわらず、矩形物体の運動は上下非対称になっている。このように矩形物体で回転運動が生じる原因は、現時点で明らかにするには至っていない。

4. おわりに

本研究では、流体中を移動する物体と流体の相互作用について巻き付き判定法を導入することにより、2次元静止直交格子座標系で任意形状の物体の移動を表現する手法を構築した。構築した手法の特性を把握するために行った検討では、一様流中の静止円および回転円の計算で従来の室内実験で得られた流れの現象に近い結果となった。また、流体中を移動する物体の計算では、一様流中において流体力を受けて物体が移動する様子を確認することができた。さらに、振動流による計算では、移動する物体の慣性力によって流体が押しのけられる様子を確認した。しかしながら、計算領域に矩形物体を設置した場合に非対称な運動が発生する原因は明らかになっていない。その理由の1つとして、移動物体を対象とした実験が十分に行われていないという背景がある。このため PIV などの可視化技術を利用した実験データの蓄積が必要である。

今後は、重力の影響や自由表面の取り扱いなどにより、現実的な波動場へ適用することを目指して検討を進めていく予定である。なお、今回の研究では単一の物体に対しての表現となったが、複数の物体を取り扱える手法の開発も必要である。

参考文献

- 小野謙二 (2002): 設計における直交格子法の利用, 日本流体力学学会誌 “ながれ”, 21, pp. 16-25.
- 川崎浩司・大谷知樹・中辻啓二 (2001): 固気液多相共存場に対する統一数値解法の構築と複雑水理現象への応用, 第48海工論文集, 巻, pp. 1026-1030.
- 榑山 勉 (2002): 波と弾性はりとの連成運動に関する数値解析, 海工論文集, 第49巻, pp. 696-700.
- 津田朗宏 (2002): 静止直交格子を用いた移動物体周囲の流れ解析, 長岡技術科学大学修士論文, 76 p.
- 中川 一 (2000): 河川氾濫, 日本流体力学学会誌 “ながれ”, 19, pp. 88-95.
- 朴 炳湖・黒田成昭 (2000): 非圧縮粘性流れの直交格子解法, 日本流体力学学会誌 “ながれ”, 19, pp. 37-46.
- 細山田得三・津田朗宏 (2002): 直交矩形格子を用いた移動物体周りの流れの数値解析, 応用力学論文集, Vol. 5, pp. 699-707.