

直交矩形格子を用いた移動物体周りの流れの数値計算

A numerical study for flow fields around moving bodies using the rectangular Euler grid system

細山田 得三*, 津田朗宏**

Tokuzo Hosoyamada, Akihiro Tsuda

*工博, 長岡技術科学大学助教授, 環境・建設系 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

** 工修, 長岡技術科学大学大学院 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

In late years, Computational Fluid Dynamics has been advanced by improvement of computational technology. Almost all of the numerical studies for fluid flows are done just for around the body at rest. It is very difficult to calculate flows around a moving body even if the curvilinear coordinate is adopted. In the field of civil engineering, examples of the motion of obstacles affected by flow field surrounding the body are 1) moving body in a field such as human body or woods, 2) a bridge affected by the aerodynamic drag. Numerical scheme that can treats interaction between a moving body and flows are of great use for civil engineers who concern such problems. In this study, numerical codes that can calculate interaction between body and flow fields are suggested newly. A series of numerical experiments which are 1) body at rest, 2) rotating body, 3) moving body affected by hydrodynamic force, are carried out. The calculated flow field for a body at rest shows flow pattern at low Reynolds number, which agree well with the previous study. Flow fields around a moving body and moving body affected by flows are quite reasonable

Key Words: Numerical simulation, CFD, Moving Body, HSMAC method

1. はじめに

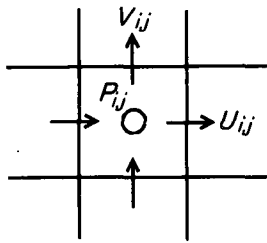
数値流体力学(CFD)は近年の計算機能力の向上によってめざましく進歩しており、土木・建設工学の分野でも必要不可欠な研究・設計の手法としてその地位を確立しつつある。例えば、海岸工学の分野においては波動運動の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式を水表面の移動や碎波による水面の分離を考慮した境界条件とともに解く手法が進展し、海岸構造物の設計の高度化が進んでいる。風工学の分野では流体力学の歴史的な研究対象でもあった流れと構造物の干渉に関する研究において数値流体力学的な手法が主流であると言える。

流れと構造物の干渉問題の中で数値流体力学が取り扱う対象としては従来、静止している円柱・角柱であることが多く、それらのまわりのカルマン渦や流体力などといった流体力学の古典的な問題が長年研究者の興味の対象であった。また、風車やプロペラのような定常状態で回転運動している物体を考える場合、座標系を物体と共に回転させ、その代わりにコリオリ力や遠心力を方程式に付加して計算する方法がある。この方法は相対的な静止状態を計算していることになり、回転運動が不規則な

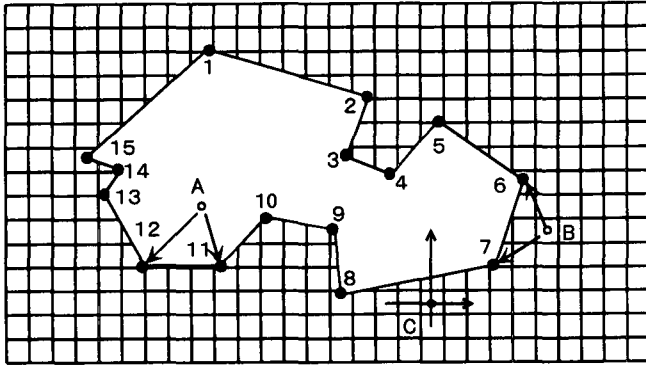
加速度運動をするような場合は計算が困難となる。今後の CFD の発展としては空間内を自由に、あるいは時々刻々変化する流体力に依存しながら運動する物体と流体運動自体との相互作用に関する研究が考えられる。

流体中に設置された物体が移動する問題は、橋梁に対する風による空力弾性や高潮や津波の流れによって移動する流木など広い応用が考えられる⁶⁾。物体が流体の力によって移動する場合、流体と物体の相互干渉により静止した物体周辺の流れとは異なった流れ構造が生じ、きわめて複雑な現象が生じる。しかしながら、流体運動と物体との相互物体が空間内を移動していく問題は佐藤¹⁾により新世紀の流体力学上の問題として提示されている。

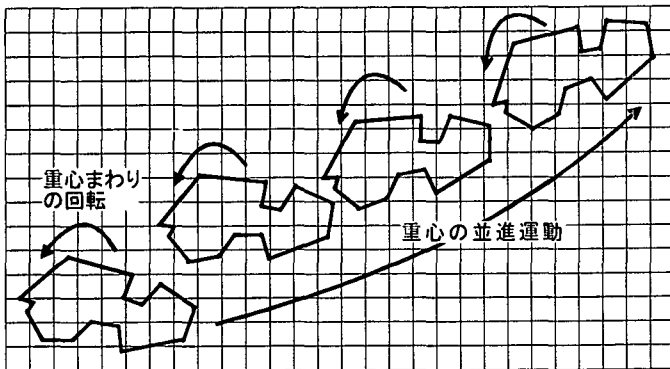
数値計算の手法としては複雑な形状の構造物を考える場合、境界の形状に格子を適合させた境界適合格子(BFC)が採用されることが多く、この方面の研究も進展している。BFC法では計算空間での座標点に物理空間での座標情報を割り当て、物理空間での微分作用素を計算空間での微分作用素で表現することで方程式を書き換える。この方法は物体の形状を滑らかに表現できるものの計量情報を計算するため誤差が混入し計算精度が悪化する場合がある。また物体が時間的に移動する問題に適用した場合、計算空間に座標情報を割り当てる作業を各時



図一1 格子内の変数配置



図一2 静止直交格子と物体の表現



図一3 計算領域を移動する物体の模式図

回転と並進による移動の和が物体の変位となる。

間ステップで行う必要があることや構造物が大きく回転するような場合、計算空間の座標への物理空間の座標値の割り当てが困難になるという問題がある。

一方、静止直交座標では基礎方程式の取り扱いが極めて容易となるが、格子線が直交しているため移動している物体の滑らかな形状を評価することが困難であるという問題がある。このため物体周辺の境界層の発達などが強い影響を持つ流れ場には対しては十分な精度をもつことは期待できない。しかしながらこの問題は座標が格子サイズを十分小さくしかつ格子数を十分大きく取れば近似の度合いや精度は向上されると思われる。

小野²⁾は、直交格子によって複雑な形状をした物体を評価する方法を系統的に分類しており、直交格子だけで複雑な物体の形状を表現する方法を近似レベル0と分類している。近似レベル1は、近年 Volume of Fluid 法 (VOF 法) として移動境界問題に適用されている方法を挙げて

いる。近似レベル2ではさらに精度を上げるため、物体の境界線が通過する格子について格子を通過する物体の境界線を直線として流体部と構造部とを分離して(カットセル)、流体部について有限体積的に質量や運動量収支を計算する。近似レベル0の方法は、近似度が最も低いが、格子の生成が極めて容易であり、方程式の誤差の混入が少なく安定的に計算することが可能である。

本研究では流体中を移動する物体と流体の相互干渉を表現するために物体の形状を近似レベル0で取り扱う2次元の静止直交座標系での流体数値計算コードを作成した。本稿ではその手法の説明を行い、静止物体、強制的に回転する物体、流体力を受けて移動する物体の3ケースに対してアルゴリズムを適用した例について報告する。

2. 数値計算法

2.1 格子形状と変数の配置

計算格子として最も取り扱いが容易な静止直交格子を用いた。変数の配置としては、図一1に示すスタッガード格子を採用する。ベクトル変数である流速は格子の各辺の中央で定義し、スカラー変数である圧力は各格子の中心において定義されている。

図一2には静止直交系で被覆された計算空間内に設置された物体の形状の模式図を示す。物体の形状は番号を付けられた黒い外周点(この例では総数15)の座標とそれを連結する直線によって決定される。直線は閉曲線を構成しており内側が物体内部である。なお、移動物体は剛体と考えているため、各節点の相対的変位はなく、すなわち物体自体の変形はない。本研究では、計算領域内での物体の配置情報から格子空間内に物体の形状を表現するアルゴリズムを導入した。そして流れ場の圧力を外力として移動する物体と流れ場との相互干渉を計算できるプログラムを作成した。

2.2 流れの場の基礎方程式

流体は2次元の非圧縮性を仮定し、基礎方程式は基礎式(1)とナビエ・ストークスの方程式(2)、(3)となる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

ここで u, v, g, P, ρ, ν はそれぞれ水平方向の流速、鉛直方向の流速、重力加速度、圧力、流体の密度、動粘性係数である。非圧縮性流体の仮定より密度 ρ は一定とする。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としては今回、HSMAC 法 (SOLA 法) を用いた。この方法ではナビエ・ストークス方程式によって変数の時間発展を直接計算し、連続式を利用してニュートン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。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。

2.3 静止直交格子によって複雑な図形を表現する方法

物体部と流体部の判定には通称巻き付き判定法と呼ばれるものを用いた。この方法の概略を図-2によって示す。先にも述べたように図-2の中の黒丸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。移動物体の形状が曲線であった場合、黒丸で示す外周点の個数が多いほど形状が正確に近くなる。静止直交座標は矩形状をしているが、その中心点（例えば点C）が閉曲線の内側か外側かによってその矩形状の格子が物体の内側か外側かを判定する。従って、物体の形状は格子点の辺によって構成されることになり、ギザギザとなる。このことを行うためには様々な方法があるが、その1つに巻きつき判定法と呼ばれる方法がある。この方法では、まず黒丸で示した連続した2つの外周点（例えばここでは7, 8）と格子点（例えばC）の相対的な位置関係を調べる。2つの外周点を結ぶ線分と格子点Cを原点と見たY軸（図中ではC点から上下方へ向かう線）が交差しかつ、交点がCより上方で交差方向が右から左の場合、変数を1増加させ逆に左から右に向かう場合、変数を1減じる。これとは正反対に交点がC点よりも下方でかつ線分が左から右に通過する場合、変数を1増加させ、線分が左から右に通過する場合、変数を1減じる。このことを閉曲線を構成する点すべてに適用させる。なお連続する2点の取り方として、最終点（図-2では15番）は第1点（図-2では1番）と組み合わせる。この結果変数の値が+2あるいは-2の場合その点は閉曲線の外点であり、変数の値が0の場合内点となる。この判定法は、考えている格子点に糸の端部を結びつけ、もう一方の端部を物体の境界線にそって移動した場合、糸が物体に巻きつく（外点）かどうかの判定に対応しているため巻きつき判定法と呼ばれる。この方法を矩形計算格子の中心点全部に対して適用し、格子が構造物の内側か外側かを全点で判定する。この結果は格子の属性として整数型の2次元配列のデータとして格納され、流体計算を行う際に各格子点が構造物の外か内かの判定や物体と流体との境界線の抽出に利用される。

なお、構造物が外側に凸であると分かっている場合、格子点と外周点(i, i+1)の外積をとり（例えば、図中のA点（内点）と外周点(11, 12)、あるいはB点（外点）と外周点(5, 6)）、iが外周点を一巡する間に外積の符号が逆転するかしないかによって外点か内点かを判定する簡易的な方法もある。前者の方法は構造物の形状が任意であっても対応できることから、本研究では巻きつき判定法を採用することとした。

(1) 物体の並進と回転

流れの中に設置された物体は剛体と仮定したのでその運動は物体の重心周りの回転運動と重心の並進運動とに分解できる。回転と並進による座標変換は、1. 物体の外周点の重心から見た相対座標 $(x_i, y_i, i=1 \sim N, N$ は構造物の外周の外周点数) を求め、2. 式(4)に示すような回転角 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、というプロセスになる。このようにして移動後の構造物外周点の座標 $(X'_i, Y'_i, i=1 \sim N)$ が確定する。次いでこれらの点について巻き付き判定法によって構造物の形状を計算領域内に表現する。

$$\begin{pmatrix} X'_i \\ Y'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \end{pmatrix} \quad (4)$$

図3には、静止直交座標によって被覆された計算領域内部を重心周りに回転しながら移動していく物体の様子の模式図を示す。

(2) 流れの作用による物体の移動

物体の運動を流れとは無関係に強制的に移動させる場合には、初期の物体の外周点の位置座標と重心の並進距離および回転角が分かればよい。一方、物体が流れの力により移動する場合、2次元で考えるとその移動は水平、鉛直の並進運動と回転運動を組み合わせたものと考えることが出来る。これらはそれぞれの運動方程式を解くことによって求めることができる。物体に作用する外力はxy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であり、運動方程式に適用することにより物体の回転角 θ 、xy方向の重心の並進距離 X_G, Y_G を求める。

f_x, f_y を求める方法は、全格子点を調べ、流体格子と物体格子の境界面を判定して各方向の圧力成分を境界の面積で積分して求めた。Mも同様に境界面を判定してその面に作用する圧力の作用線の延長線と重心からの距離によって微小部分の外力のモーメントを求め、これを全境界面で積分することにより求めた。実際には、重心から圧力の作用点までの方向ベクトルと圧力のベクトルの外積を計算すれば符号について場合わけなどを行わずに処理が自動化できる。

式(5),(6)は水平、鉛直の運動方程式、式(7)は回転の運動方程式を示しており、これらから求めた移動量 (X_G, Y_G, θ) を用いて、物体の流れによる移動を求める。流体力、モーメントに懸かる力は物体に隣接する流体格子の圧力の合計から求める。なお m, I はそれぞれ物体の質量および重心まわりの慣性モーメントであり、物体は剛体としているため一定値である。複雑な形状を有する物体の場合は、 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。また式(5),(6),(7)を時間積分する方法は、新しい変数を導入して微分回数を減らす方法を採用した。すなわち重心の並進移動量 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回微分が角速度 ω となるため、これらの変数を導入して2回微分を1回微分とし、式を新たに3つ導入して6本の1回微分方程式を陽的に解いた。

$$m \frac{d^2 X_G}{dt^2} = f_x \quad (5)$$

$$m \frac{d^2 Y_G}{dt^2} = f_y \quad (6)$$

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = M \quad (7)$$

(3) 境界条件

図-4には移動物体の表面での移動速度の計算方法の模式図を示す。物体が計算領域内を移動する場合、物体の表面では、運

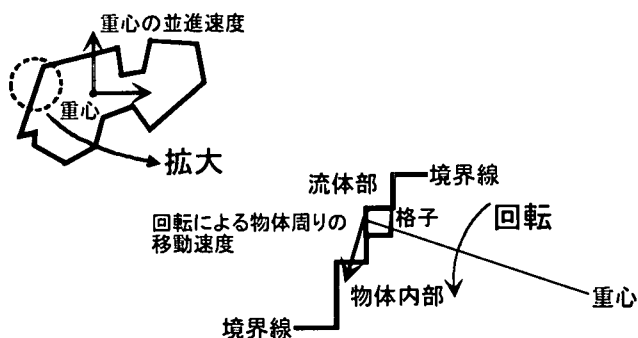


図-4 移動物体の表面での運動学的境界条件

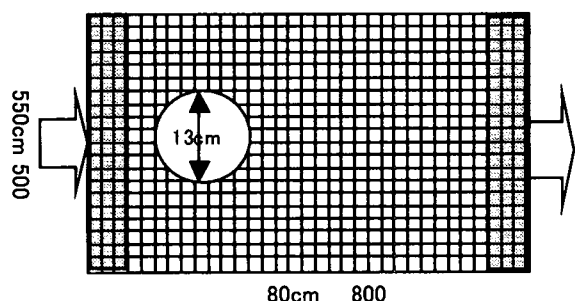


図-5 2次元計算領域の概略
例：円を設置した場合

動学的境界条件として物体の移動速度と流速は、一致しなくてはならない。物体の移動速度は2方向の重心の並進速度（図-4左上）と物体の重心まわりの回転による速度（図-4右下）の各成分の和となる。物体の移動速度は、物体が回転していない場合、物体の表面や内部の至るところで重心の並進速度と同一となる。物体内のある点における重心周りの回転による移動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る。従って回転による移動速度は角度に応じて x, y 方向に分解され、重心の移動速度との和によって物体の移動速度とした。本計算では、物体と流体の境界は格子の辺として表現されるため図-4に示すようにギザギザとなっている。従って流体運動を計算する式に対する流速の境界条件は格子点の辺に垂直な成分のみを与えている。この境界条件を与えることによって物体が移動することによって流体を押し回ることが計算できるようになる。また、実際は境界上での接線方向の条件、すなわち粘性力を考慮する必要があるが、今回の計算では圧力、すなわち法線方向の条件のみしか考慮されていない。

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、圧力の境界条件について十分配慮する必要がある。今回用いたHSMAC (SOLA 法) では圧力の変動は流速の発散値の正負に応じて調整されるのみであり、圧力の境界条件を利用しておらず、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-5には2次元の計算領域に円を設置した場合の概略を示している。計算領域の左端では流体の流入、右端では流体の流出の境界条件が課せられる。流入条件として一様な流速分布を与えた。流出条件としては、境界において速度勾配がゼロになるよう

に設定することが多いが、本計算では流入条件と同様に一様な流速分布とした。ただし流入流出境界条件として一様な流速分布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。ここでは両端境界から数格子分だけ（図-5中で示した計算領域の左右端の灰色で示した部分）運動方程式に以下の項を付加した。

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

これらの項は、運動方程式の右边に付加することにより、変数の値を誘導する効果がある。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。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は水平流速 u は一様な流速 U_i に、鉛直流速 w はゼロになるように誘導され、計算が安定化し収束が速まることが期待される。このような技法は地球物理系の数値実験において観測値と計算値の乖離を補正する4次元データ同化におけるナツ

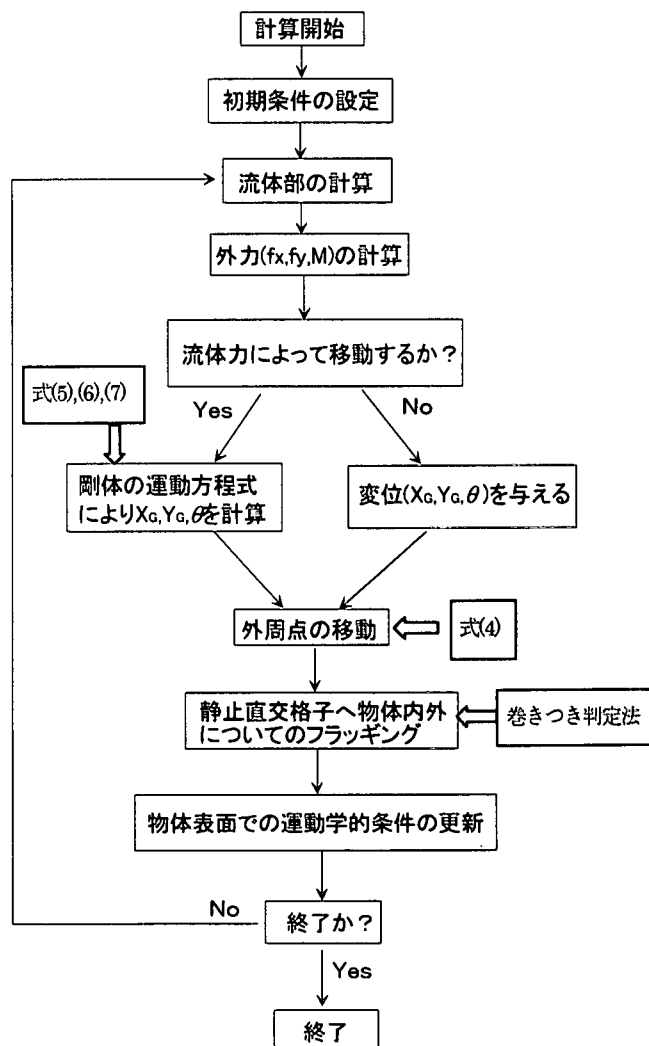


図-6 移動物体周りの流体数値計算のフローチャート

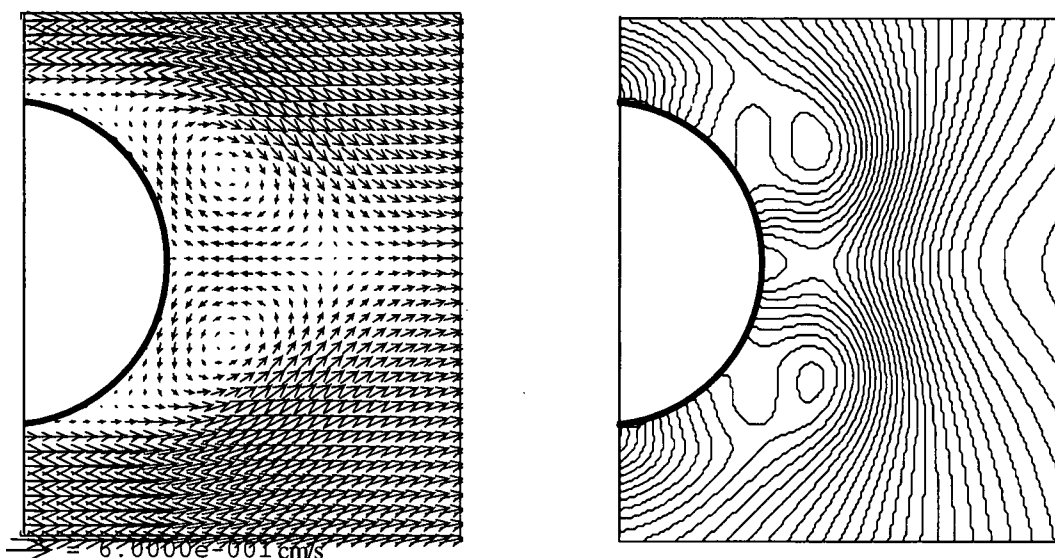


図-7 静止している円の周りの流速ベクトルと圧力場

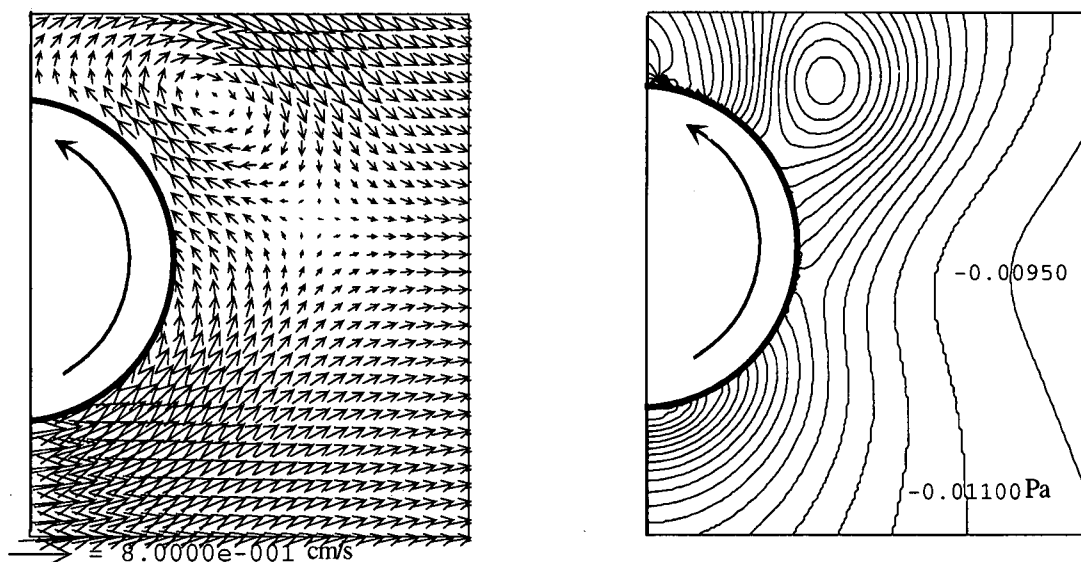


図-8 反時計周りに回転している円の周りの流速ベクトルと圧力場

ジグ(nudging)と同様のものである。また大気物理系の数値モデルでは密度成層による重力波が発生するが、これを計算境界を通して放射するために同様の手法が用いられている。

図-6には前述した方法によって流体と移動物体を計算するフローチャートを示す。このフローチャートにおいて変位(X_G, Y_G, θ)をそれぞれゼロに指定しておけば、静止物体周りの流体計算を行うことになる。なお、本フローチャートにおいては流体運動の計算を行う部分は“流体部の計算”としてのみ表示されており、この中にHSMAC法によって計算される流速・圧力同時緩和計算などのアルゴリズムが含まれている。このアルゴリズムによって、流体による外力を受けながら2次元空間を移動していく物体の運動と流体の相互干渉が計算可能となる。

計算に先立ち、静止した矩形物体に対してこの計算方法を適用してその妥当性について検証を行った。静止した矩形物体では格

子作成上の誤差が十分緩和され、抵抗係数 C_D のレイノルズ数に対する依存性が小さいため検証に用いることができる。ここでは詳細については述べないが、 C_D は圧力動揺による変動はあるものの3~1.5程度となり、従来の研究成果である2.2程度を包含している。これにより本計算の妥当性が概ね確認できたと考える。

3. 数値計算結果

数値計算を適用した物体条件は、

- 1) 静止している円
 - 2) 強制的に回転している円
 - 3) 流体力に応じて自由に移動・回転する矩形物体
- の3ケースを対象とした。まず条件1)と2)の相違は前者は

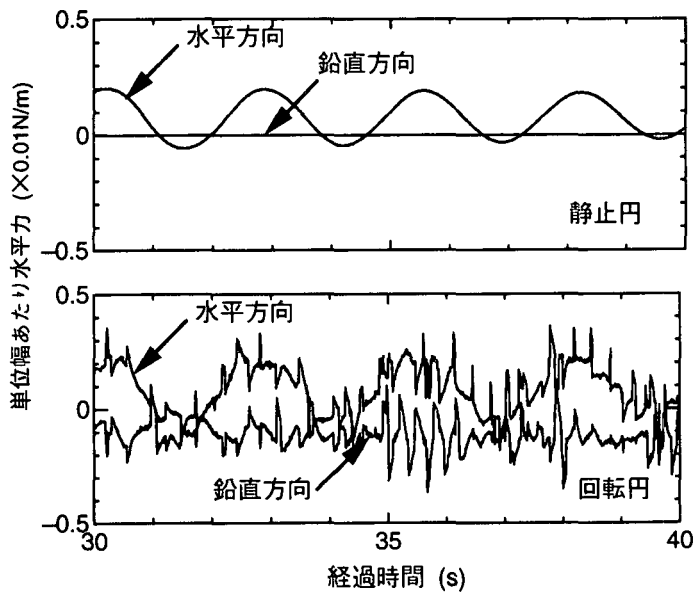


図-9 静止および回転している円回りの水平・鉛直力

円が静止しているが後者は回転しているという違いのみであり、その他の条件は同一となっている。条件3)は、矩形物体に作用する流体力とそれに応じた物体の変位を時々刻々追跡したものである。

これら3ケースを計算した領域はすべて図-5に示すよう縦横の格子数がそれぞれ500×800、1つの格子の縦横の大きさおよび形状は0.1cmの正方格子である。この領域の格子点(220、250)の位置に直径13cmの円を与え、この円を静止させた場合と角速度3.0deg/sを与えて反時計回りに回転させた場合を比較した(実際の円は格子で作られるため図-5のように物体の外形となる実線は格子線を通過することはない)。作業流体は水としている。ケース1)、2)では領域の左側から右側に向かって初期流速0.3cm/sを与え、経過時間による流速、圧力変化を計算した。なお、この条件のときレイノルズ数は260程度である。一方、ケース3)では流入流速5.0cm/sとした。設置された物体は5cm×15cmの矩形であり、物体の密度は24g/cm³としている。これらの条件から物体の属性値である、重心の座標、質量 M 、慣性モーメント I を算出した。

3.1 静止している円と反時計回りに回転する円との比較

図-7、8にはそれぞれ静止している円の周辺の流速ベクトル場と圧力分布を示す。流速ベクトルの大きさおよび圧力分布の等高線の間隔はそれぞれの図中に示されている。静止円筒回りの流れ構造は流体力学では十分古くから可視化実験によって調べられており、本研究でのレイノルズ数260程度では双子渦という対称となる渦が発生することが知られている⁵⁾。図-7に示されているように、円の周囲の流れの速い領域から円の遮蔽領域へ向かう循環流が明瞭に現れており、これは上下対象の双子渦を形成している。一方、図8に示した反時計回りに回転している円筒の周辺では図7(静止円)に見られるような対称な渦は発生しておらず、円の動きに引きずられるような流れが円の周辺に発生している。例えば円の下部では主流の向きと円の回転方向が一致して流れが加速されている。これに伴い圧力が低下している。円の上端では主流の向きと円の回転が逆向きとなり、流速は減速されてい

る。このことによる圧力の逆勾配、すなわち流下方向に圧力が増加する領域が形成され、この流れが強い渦を円の右上半面に形成していることが分かる。

このような流れ構造のパターンは円に対して外力の変動として作用する図-9には円に作用する流体力の水平成分と鉛直成分の時刻歴を示す。静止している円の場合、流体による外力は流れに対して直角方向の力(図中で鉛直方向と表示)は、全く作用しておらず、流下方向の力(図中で水兵方向と表示)は規則的に振動している。一方、回転している円では水平力は静止している円の流下方向の力(水平方向と表示)の変動にさらに周波数の高い振動が重畳していることがわかる。流れに垂直方向の力(垂直方向と表示)は、流下方向の力の変動と全く同じ位相で生じていることが分かる。これらは同様の変動要因によって発生していると考えられる。流下方向に垂直な力は変動によってしばしば正の値を取ることがあるが、概ねゼロを下回っており、図に対して下向き方向に流体力が作用していることが分かる。これは野球において投手が投げるボールの変化球と同じの方向の力でありいわゆるマグヌス効果と一致する。図-10には図-8よりも広い範囲の回転円の周辺の圧力場と流速ベクトル場の時間変化を示す。ただしこの時点ではそれぞれの場の発達が十分でなく、時間的に変化している。これによると、円の下面での流れは比較的落ち着いたが上面での圧力のパターンが揺らいでいることが分かる。円の上面では流れ方向と円の回転が逆向きになっており、一種のせん断不安定のような流れの変動が発生しており、それが流体力の変動となって時刻歴にあらわれたと推測される。

3.2 流体力を受けて並進および回転する物体周りの流れ

図-11には流体力と矩形の物体がお互いに影響を与えあうことによって流速場と圧力場がそれぞれ変化していく様子を示す。初期の状態近くでは、圧力分布は矩形物体の上端部から発生した変動が見られ、流速分布も物体近傍で主流と逆方向に流れている部分がある。しかしながら両者とも上下対称となっている。このため物体に作用する力は流下方向に対して直角方向の流体力は十分小さいことが分かる。従って矩形物体は初期には流下方向に移動するのみである。このことは流れをアニメーションによって可視化表示することで確認した。この変動は時間とともに発達するが、次第に上下が非対称となる。図-11の上段から3段目では強い非対称性が発現し、物体が流れに垂直な方向に移動し始める。物体が上下方向に移動すれば周囲流体の場の非対称性を助長しさらに物体に作用する非対称の流体力が増加する。このように上下に非対称性は流体および物体の運動に正のフィードバックを与えるため場に強い不安定を生じることが容易に推察される。図-12には矩形の移動物体に作用した流下方向の外力と流下方向に垂直な外力の時刻歴の一部を示す。比較的初期の状態では波形には細かな変動があるものの全体的には落ち着いた波形となっており、また流下方向に垂直な方向の力は十分ゼロに近い。このため運動は水平的である。その後、変動が次第に激しくなり、物体に作用する紙面に下方向の垂直方向の力が強くなると、時刻28s程度で激しく変動している。このような変動が現象の正しい情報を与えているか、あるいは物体を矩形格子として表現したことによる誤差であるかは現時点では判断できない。

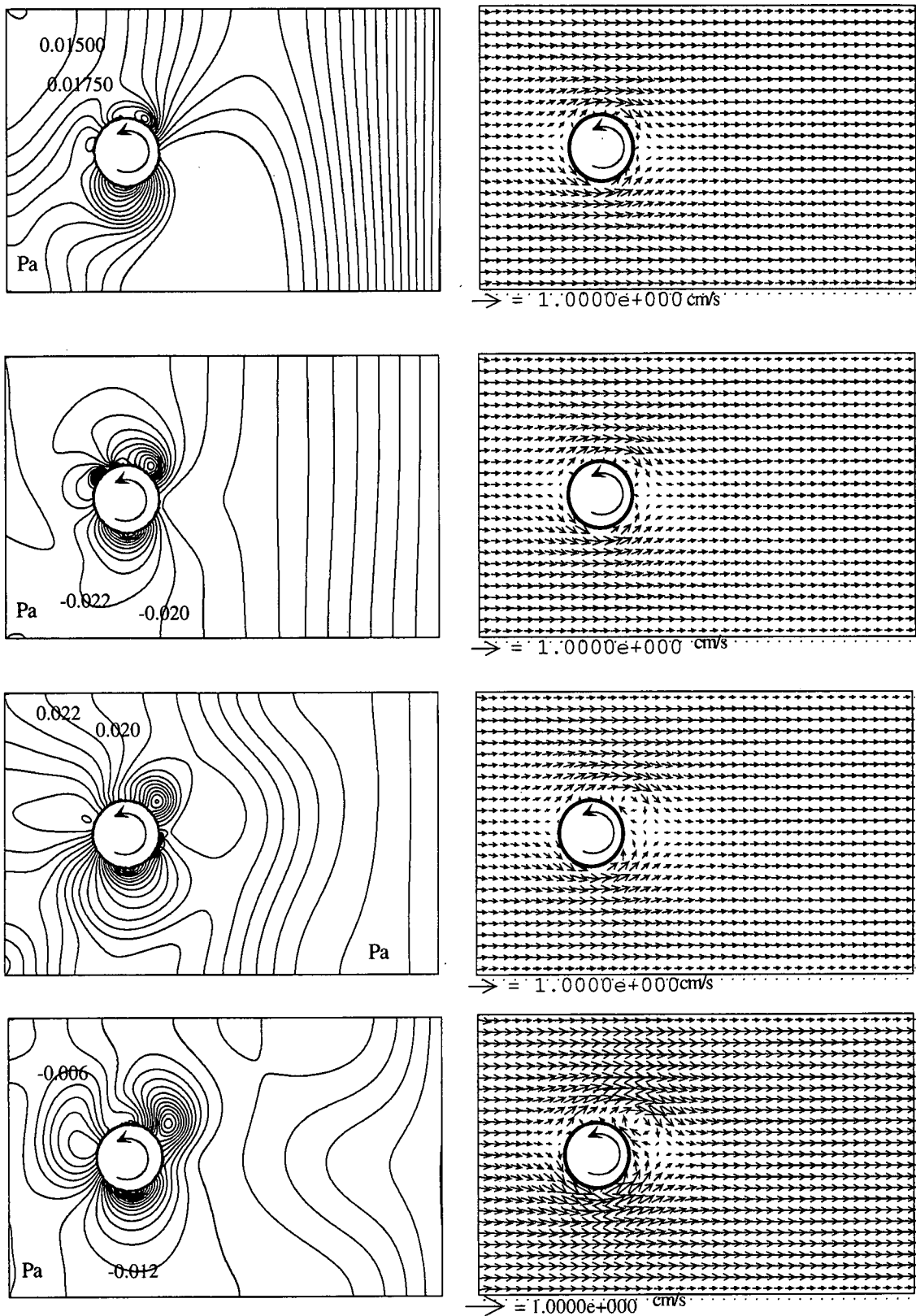


図-10 反時計回りに回転している円の周辺の圧力場と流速ベクトル(全体領域)
(上段より計算開始からの経過時間は 12s, 24s, 36s, 48s)

4. 結論

流れ場と構造物の相互作用に関するシミュレーションにおいて巻き付き判定法の導入により2次元の計算領域に自由な形状で

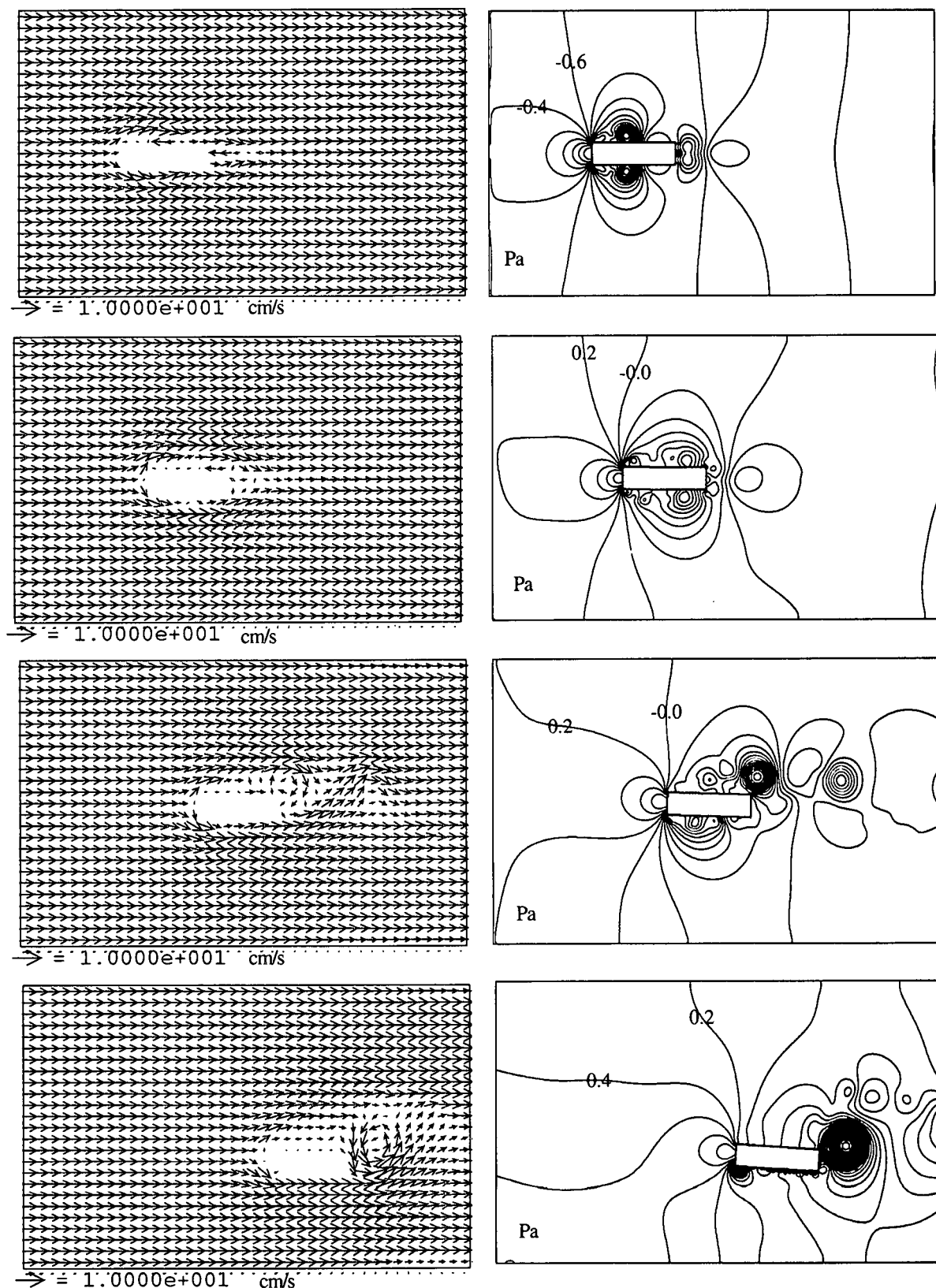


図-11 流体力を受けながら移動する矩形物体周辺の流速ベクトルと圧力場
(上段より計算開始からの経過時間：15s, 35s, 55s, 75s)

かつ時間的に移動していく物体を表現できた。今回の計算で求めた円筒の静止、回転の数値計算結果は従来室内実験で得られた流れの現象に近い結果であり、固定直交格子を用いて流体計算を行っても定性的にはある程度正確な現象を表現することが出来るこ

とがわかった。流体力の作用を受けて移動する物体の運動は物体の並進および回転の運動方程式と流体数値計算法を組み合わせることにより静止直交格子を用いても物体移動の表現が可能であることが示された。この計算法の実現象への応用として例えば

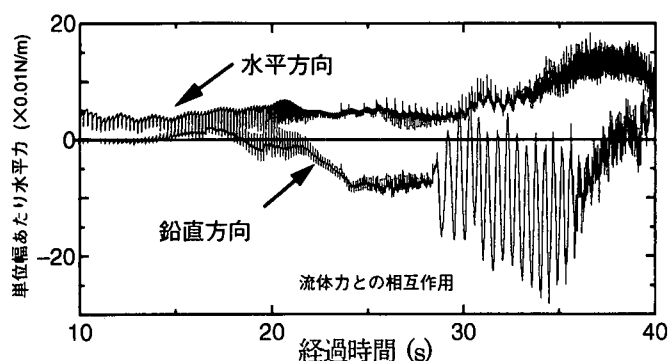


図-1 2 流体力と物体の相互作用による矩形物体に作用する
水平・鉛直力

波動場における移動物体（津波作用時における流木の挙動や越波時の防波堤の上での人間の挙動など）が挙げられる。

今後の検討課題として以下に列挙した項目について取り組んでいく必要がある。

- 3次元の流れ場への拡張。
- 乱流モデルを導入して実スケール規模の高レイノルズ数の現象への適用。
- 圧力分布に関する妥当性の検討。
- BFC 法との比較検討
- 正方格子による物体の近似度を下げた場合どの程度の誤差が生じるか。
- 物体の移動における流体力の変動の発生原因の究明

特に 3 次元物体への本計算計算方法の拡張は、今回提案した 2 次元の巻きつき判定法に相当する格子属性の判定法が確立すれば容易である。その方法としては例えば物体を貫通する一本の線を想定し、それに対して垂直な平面で物体をスライスして平面 2 次元データを作成する。

これに対して巻きつき判定法を適用するという方法が考えられる。しかしながら、複雑な形状に対応することはできない。この問題については計算コードのアルゴリズムを開発する以前の数学的な問題と位置付けられ、今後その理論的な整備が望まれる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、宮崎大学工学部の小園茂平助教授には既往研究に関する文献の紹介を頂き、有益な情報を提供して頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 佐藤浩：新世紀の流体力学は何をなすべきか、日本流体力学会誌“ながれ”，20, pp.445-452, 2002.
- 2) 小野謙二：設計における直交格子法の利用，日本流体力学会誌“ながれ”，21, pp.16-25, 2002.
- 3) 林他：非圧縮粘性流れの直交格子解法，日本流体力学会誌“ながれ”，19, pp.37-46, 2000.
- 4) 津田朗宏：静止直交格子を用いた移動物体周辺の流れ解析、長岡技術科学大学修士論文, pp.76, 2002.
- 5) An Album of Fluid Motion (edited by M. Van Dyke): The Parabolic Press, pp.176, 1982.
- 6) 中川一：河川氾濫，日本流体力学会誌“ながれ”，19, pp.88-95, 2000.

(2002 年 4 月 19 日 受付)