

5

汎用マルチブロック・コードによる複雑形状物体まわり流れの計算

児玉 良明、平田 信行

Computation of Flows around Bodies with Complex Geometry
Using a General-Purposed Multiblock Code

by

Yoshiaki Kodama and Nobuyuki Hirata

Ship Research Institute

Abstract

An NS solver for general-purposed multiblock computation has been developed for incompressible flows. With the combination of a general-purposed multiblock grid generator, it can compute flows made up of arbitrary number of blocks with arbitrary size. The based computational scheme is the pseudo-compressibility method with the finite-volume discretization and the MUSCL-type third-order upwinding differencing. The validity of the solver was demonstrated by computing the flow around a shaft bracket, and the flow around a body with more complex geometry.

1. はじめに

造船・海洋の分野において、他の分野と同様に、複雑形状物体まわりの流れの計算の需要は大きい。最近の船舶特に高速性をねらったものは、船体の外に水中翼やストラットをもち、複雑な形状をしている。また、海洋構造物は数多くの円柱を組み合わせた、更に複雑な形状である。これらの物体まわりの流れを計算できるようにすることが、本研究の最終目標である。

複雑形状物体まわりの流れの計算には、大別して2つの方法がある。1つは構造格子ブロックを複数組み合わせさせて複雑なトポロジーを表現するマルチ・ブロック法であり、もう1つは4面体等の要素を不規則的に組み合わせる非構造格子法である。後者の非構造格子法は、形状表現の自由度が非常に高い点の特徴であり、高い汎用性をもっているが、反面、計算結果に振動が出易いことや計算効率が低いなどの問題点をもっている。前者のマルチ・ブロック法は、その逆の特徴をもっている。すなわち、格子点分布の規則性を生かした高効率の計算が可能であり、計算結果の信頼性も高いが、形状表現の自由度がやや低く、また格子生成に際して、ブロック構成を人が指定しなければならない等の手間がかかる。結局、両者のいずれかが絶対的に優れているということではなく、ユーザーは、計算する流れ場の形状の複雑さや、計算の目的すなわち流れの何を計算によって知りたいのか、に応じて両者を使い分けるのが得策である。また、研究者は、それぞれの手法の長所そのままに、短所を減らす努力をすべきである。

本研究は、マルチ・ブロック法に関するものであり、そのねらいは汎用マルチブロック・NSコードの開発にある。マルチ・ブロック法の煩わしさは、計算領域のブロック構成の変化に応じて計算コードを改造する必要がある点にあるが、本手法では単一の計算コードで、任意のブロック数、ブロック・サイズ、ブロック間の接続関係等が扱え、計算コード自体の改造の必要が無い。

また、計算コードに対応して、汎用マルチブロックの格子生成コード及び後処理コードを作成した。これらのコードにより、任意のブロックの組み合わせのマルチ・ブロック計算が可能となった。

2. 計算法

2.1 NS ソルバー

ベースとなるNSソルバー^[1]は、以下の特徴をもっている。

疑似圧縮法を用いた非圧縮 NS 計算
Cell-centered 配列を使用
有限体積法による離散化
移流項には前処理 (MUSCL) 型 3 次風上差分を使用
IAF 法
グローバルな保存性をもつ
現在のところ乱流モデルは入っていない (層流)

2.2 NS ソルバーのマルチ・ブロック化

マルチブロックの例として、3.1 節に上げるシャフト・ブラケットまわりの流れの計算時のブロック構成を図 1 に示す。シャフト・ブラケットとは、船の船尾に突き出たプロペラ軸を支持する台のことである。図中に灰色で示されたブラケットは、説明の都合上、通常とは上下が逆になっているが、船底から突き出た 2 本の翼状のストラットと、プロペラ軸を取り囲むボス部からなる。計算領域は 6 つのブロックから構成されている。

各ブロックの境界面では、ブロック間の接続関係や一樣流等の各種の境界条件が与えられる。NS ソルバーは、境界面において境界条件の種類に応じた番号を与えるだけで境界条件が指定できるように改造された。サポートされている境界条件の種類は下記の 9 種類で

ある。

- (1) 他のブロックと接続
- (2) (u,v,w,p) =一様流の値
- (3) (u,v,w) =一様流の値, p =ゼロ外挿
- (4) (u,v,w) =ゼロ外挿, p =一様流の値
- (5) (u,v,w,p) =ゼロ外挿
- (6) x-symmetry
- (7) y-symmetry
- (8) z-symmetry
- (9) 固体壁

これらの境界条件番号をブロックの各境界面を構成する各セル面と与えることによって、境界条件が指定される。(1)の場合には、さらに、接続されるブロック番号と対応する点の番号、例えば $k=\text{constant}$ 面の場合 (i,j) 、が与えられる。一例として、図1に示したブロック1のbottom面の境界条件情報を図2に示す。境界面はブロック2、3、4、5のtop面と接しており、中央部では固体壁すなわちブラケットのボス部の頂部に接している。これらの5種類の境界条件は、 (i,j) 番号でその位置と広がり指定される。

ソルバーは、これらの境界条件情報を基にブロックを接続し、IAF法の ξ 、 η 、 ζ の各sweepを構成する。現バージョンでは、境界面で格子はすべて一対一対応するものとし、ずれは許されない。このような制限の下では、cell-centered配置においては、境界面を横切って接続する相手は一意に定まり、コーディングは容易となる。

2.3 格子生成

格子生成はImplicit Geometrical Method[2](以下IGM)によって行った。そこでは、ある初期格子から出発して、直交性、滑らかさ、集中化(clustering)の要請を適度に満たすように格子が反復修正される。格子生成もマルチブロック化され、ブロックの境界面を横切っても格子線が滑らかに接続され、集中化も複数のブロックを繋げて行われる。集中化は、固体壁と指定された面から出発する格子線に対して、与えられた最小格子間隔を満たすように自動的に行われる。

3. 計算例

3.1 シャフト・ブラケットまわりの流れ

図3にシャフト・ブラケット及び底面の表面格子を示す。ボス部は円柱状である。この格子はテスト計算用であるため、格子点総数が15,000と粗い格子となっている。流れは左手前から右奥へと流れる。図4に表面格子及び左右対称面上の初期格子を示す。初期格子は物体表面格子点と外側境界面上の格子点を直線で結んで生成した。太線はブロックの境界を示す。ブロック構成は既に図1に示されている。図5にIGMによって反復修正された格子を示す。格子点は、固体壁である円柱側面及び前後の切断面に向けてclusteringされている。また、ブロックを横切って滑らかに接続している。なお、物体表面上の格子点は固定である。図6に同じく左右対称面上の流れの速度ベクトルを示す。レイノ

ルズ数は 10^3 である。計算の数値安定性は単一ブロックのそれと変わらず、無次元時間刻み $\Delta t = 0.05$ で計算した。計算結果はブロック間で滑らかに接続されている。物体表面及び底面上の線は、ブロックの境界を示す。

3.2 より複雑な形状の物体("凱旋門")まわりの流れ

本ソルバーの特徴である汎用性を示すため、海洋構造物をイメージした、より複雑な形状の物体("凱旋門"とよぶことにする)の計算例を示す。図7にその物体の表面格子を示す。図8に計算領域のブロック構成を示す。ブロック数は11である。図9に左右対称面上の速度ベクトルを、図10に圧力分布を示す。レイノルズ数は 10^3 である。約1日あれば、この程度の複雑さのブロック構成のデータの準備が完了する。

4. おわりに

複雑形状物体まわりの流れを計算するため、汎用のマルチ・ブロックNSソルバーを、汎用マルチ・ブロック格子生成コードも含めて、開発し、2種類の物体まわりの流れに適用し、有効性を確認した。今後は、乱流モデルの導入と自由表面波のサポートを行い、高速船や海洋構造物の計算を行う予定である。

最後に、任意のブロック構成を扱える汎用化を得るための犠牲について言及する。 nb をブロック番号、 (i,j,k) を格子点番号とすると、アルゴリズムとしては、点を (i,j,k,nb) の配列のイメージで参照する必要があるが、流場及び格子データは計算コードの内部では1次元配列として格納されており、参照するときは文関数による番号の翻訳を行った。このオーバーヘッド及び複数のブロックを繋げて計算のsweepを準備するオーバーヘッドのため、単一ブロック・ソルバーに比べて計算時間が約2倍になった。勿論、最大のブロックに合わせて配列を切れば、 (i,j,k,nb) の形式で参照が可能であるが、メモリーサイズの犠牲が大きい。もし様々な大きさのブロックをメモリーの隙間無く配置してくれるFortranコンパイラがあれば、計算時間の犠牲の大部分は解消されるのであるが。

参考文献

- [1] Kodama, Y.: "Computation of Ship's Resistance Using an NS Solver with Global Conservation — Flat Plate and Series 60 ($C_B=0.6$) Hull —", 日本造船学会論文集第172号、1992年秋。
- [2] 児玉良明: "Implicit Geometrical Methodによる実用船型まわりの格子生成", 日本造船学会論文集第170号、1991年秋。

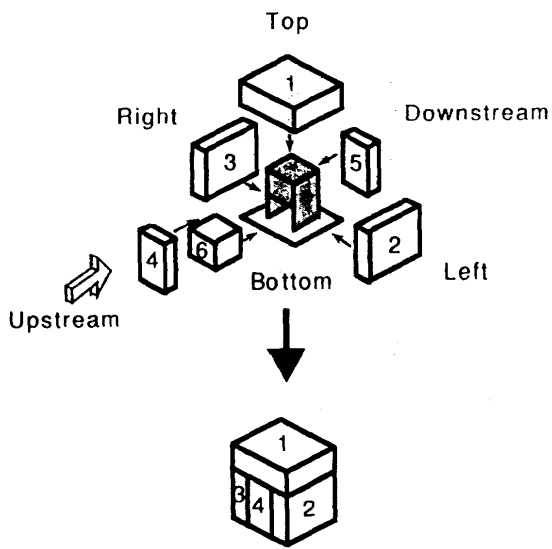


図1 シャフト・ブラケットまわり流れのブロック構成

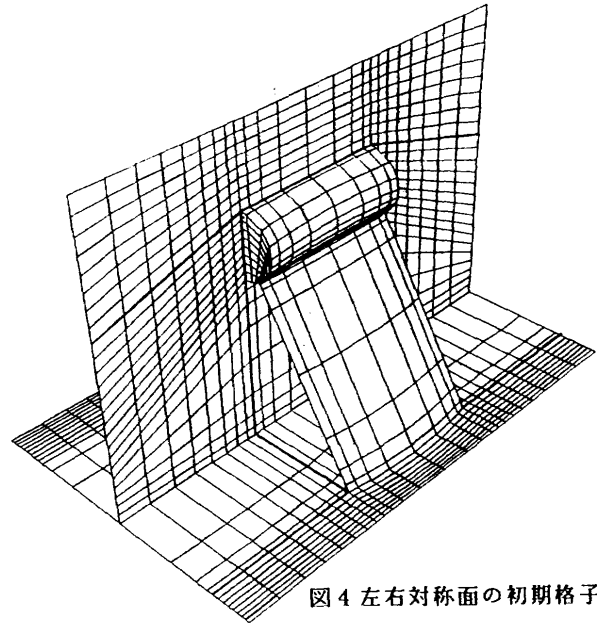


図4 左右対称面の初期格子

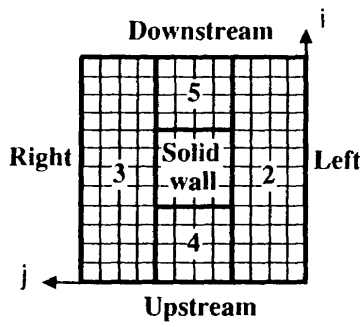


図2 シャフト・ブラケットまわりのブロック1のbottom面の境界条件情報

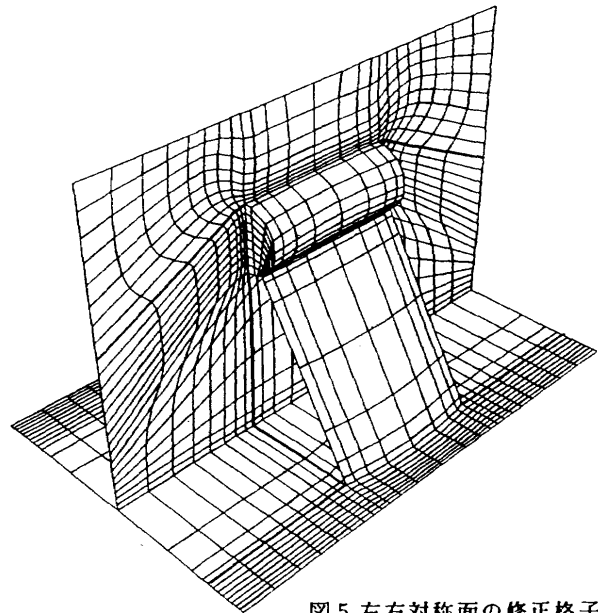


図5 左右対称面の修正格子

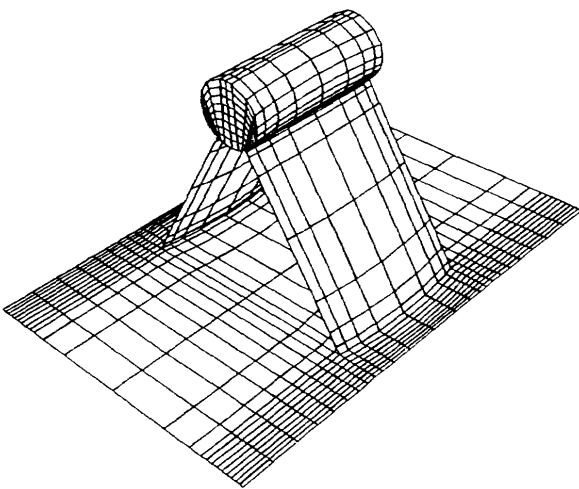


図3 シャフト・ブラケットと底面の表面格子

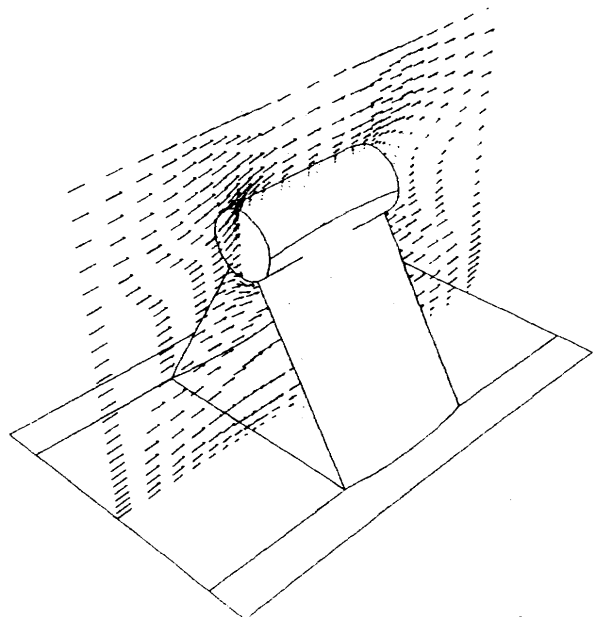


図6 左右対称面の速度ベクトル

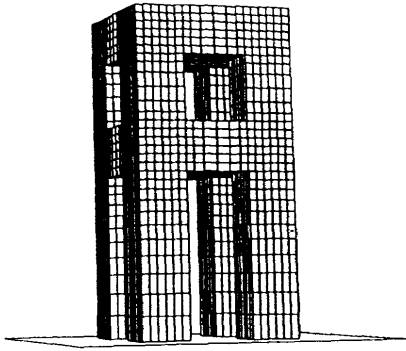


図7 "凱旋門"の表面格子

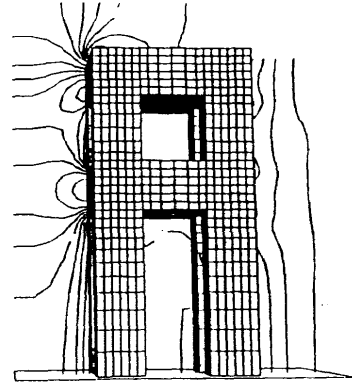


図10 "凱旋門"まわり流れの圧力分布

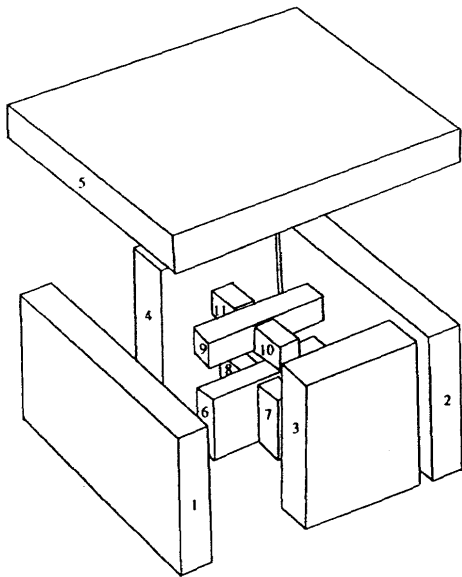


図8 "凱旋門"まわり流れのブロック構成

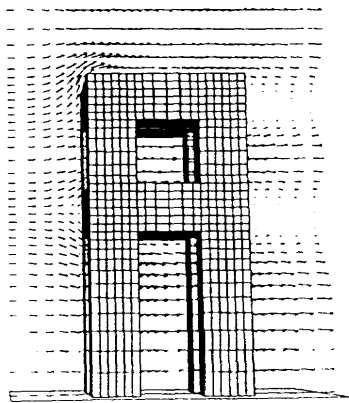


図9 "凱旋門"まわり流れの速度ベクトル