計算流体力学における領域分割法のオブジェクト化に関する研究

Object based approach of DDM in CFD

籠島　高(発表者)　　　　坪井一洋(指導教官)

1.　はじめに

我々の周りには水や空気などの様々な流れが存在する．このような流れの計算機シミュレーションは計算流体力学(Computational Fluid Dynamics : CFD)と呼ばれ，近年あらゆる産業分野においてその重要性が増してきている．しかし，流れ場が異なるたびにプログラムを一から作り直すのは現実的ではなく，解析領域の形状の複雑さが増すにつれ，プログラムもより複雑になる．したがって，計算流体力学の知識がない人でも，簡単に流れのシミュレーションが行える手法が求められている．

複雑な解析領域形状を扱う方法として，すでにいくつかの方法が提案されているが，ここでは領域分割法(Domain Decomposition Method : DDM)に注目する．領域分割法で分割された各部分領域の持つ役割は，すべてに共通した処理である差分化された方程式の計算と，境界条件などの各部分領域に固有の処理からなる．したがって，各部分領域をオブジェクトとして扱うことで，容易に領域分割法の構成ができ，様々な流れの数値シミュレーションが簡単に行えると考えられる．

以下では，部分領域の一つの例として 2 次元 Cavity 流れを考え，擬似圧縮法によるナヴィエ・ストークス方程式(以下 NS 方程式)と連続の式を用いたシミュレーション・プログラムを作成した．

2.　背景

現在，計算流体力学では離散化の方法として有限差分法が用いられる[1]．差分法は対象とする流れ場を四角い網の目に分割し，それぞれの格子上で差分化された流れの方程式から流れ場を求める方法である[2]．したがって，差分法では基本的に解析領域を矩形とする必要がある．解析領域が矩形と異なるような複雑な形状になった場合，差分法では Fig.1 に示すようないくつかの方法が用いられる．

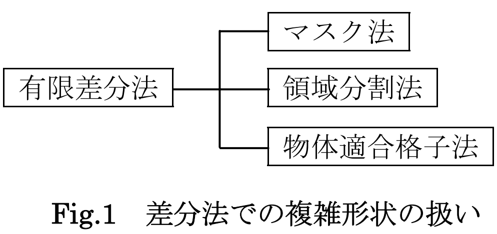

Fig.1　差分法での複雑形状の扱い

簡単な例として Fig.2 に示す Block のある流れを考える．

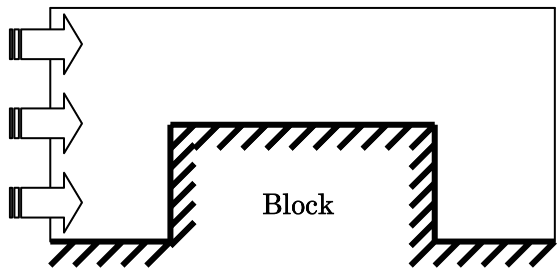

Fig.2　Block のある流れ

マスク法によるこの問題の取り扱いを Fig.3 に示す．マスク法ではもともと流れのない物体内部(例題の Block)にも格子を設ける必要がある．したがって，形状の複雑さが増すにつれ，必要のない格子が増え，計算効率が低下する．

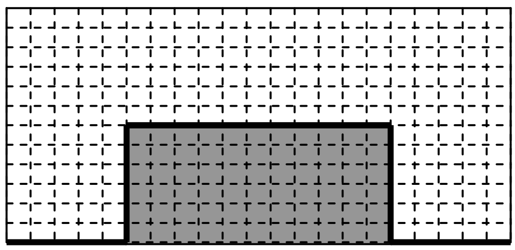

Fig.3　マスク法の概念

一方，領域分割法は，Fig.4 のように領域を 5 個に分割し，それぞれの領域について計算を行う方法である．

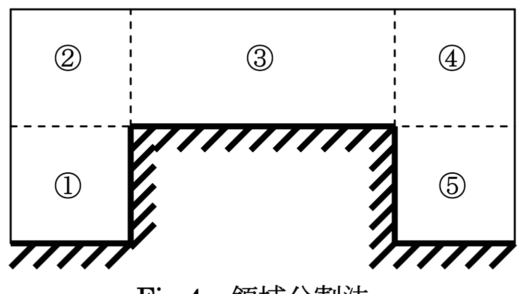

Fig.4　領域分割法

この方法では物体内部の格子は必要ないが，物理的には存在しない新たな境界(図中の点線)がいくつか発生する．差分法で計算する場合，計算点に隣接した格子上での物理量が必要になるので，これらの境界上の点では両側の領域のデータが必要になる．

いずれの方法を用いても，プログラムは個々の流れ場の状況に依存することが多く，境界条件をデータとして一般的に与えられる有限要素法と比べて汎用性が低い．差分法でも境界条件や境界形状をすべてデータとして与え，プログラムを変更しなくてもすむようにすることも可能ではあるが，プログラムが複雑になってしまう[2].

ところで，領域分割法において分割された領域を考えると各々の部分領域は，流速ベクトルや圧力および境界条件といった各領域固有のデータと，差分化された方程式の計算というすべての領域に共通した処理を持つことになる．このことから分割された各部分領域が「情報と手続きをひとつにしたもの」というオブジェクトの定義[3]と一致することがわかる．すなわち，Fig.5 に示すように領域をオブジェクト化することにより領域分割法の構成が容易になり，効率的な流れの数値シミュレーションが可能になると考えられる．

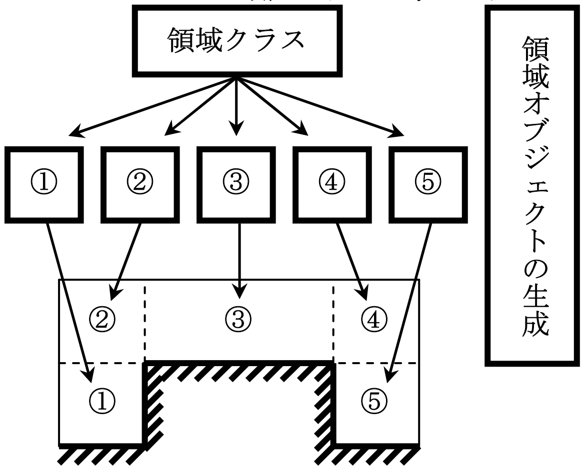

Fig.5　領域のオブジェクト化

3.　Cavity 流れのシミュレーション

ここでは，単一の矩形領域で計算できる 2 次元 Cavity 流れ(正方溝内部の流れ)を考える．この問題を例題として領域のオブジェクト化を行うことにより，境界条件などの各領域に固有の情報を与えることで，容易に領域分割法を構成できる．すなわち，ここでオブジェクト化された矩形領域が Fig.5 で示す部分領域①～⑤に相当する．

擬似圧縮法による NS 方程式と連続の式はそれぞれ次のようになる[4].

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial \mathrm{t}} = -(\boldsymbol{u} \cdot grad)\boldsymbol{u} - gradP + \frac{1}{Re}\Delta \boldsymbol{u} \qquad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -div\, \boldsymbol{u} \qquad (2)$$

ここで，$\boldsymbol{u}$ は流速ベクトル，P は圧力，Re はレイノルズ数である．

なお，文献[4]では位置決め制御系の凹凸部を正方溝でモデル化し，これらの式を用いて，正方溝上部を空気が流れるときの溝内部での流れの可制御性について 4×4 の格子を用いて考察を行っている．

式(1)，(2)において空間微分項を 2 次精度の中心差分により近似し，時間微分項には 4 次精度のルンゲ･クッタ法を用いてプログラムを作成した．Fig.6 に 25×25 の格子点によるシミュレーション結果を示す．流速ベクトル表示から正方溝内に１つの大きな渦が形成されており，可視化実験等と同じ結果[4，5]が再現されている．

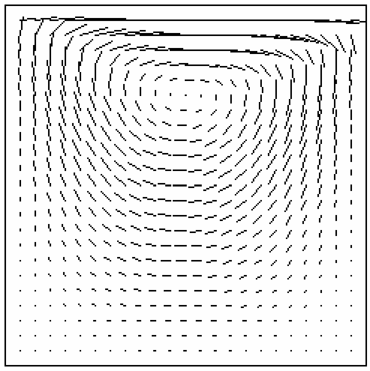

Fig.6　計算結果($\boldsymbol{Re}$ =1.0)

4.　まとめと今後の予定

効率的な流れの数値シミュレーションを行うために，分割された部分領域が情報と手続きを持つことに着目して，領域をオブジェクトとして扱うという考え方を示した．領域をオブジェクト化する際には境界条件などの情報と差分化された方程式の計算という手続きが必要になる．

ここでは，2 次元 Cavity 流れを考え，情報として溝の境界条件を与え，擬似圧縮法による NS 方程式と連続の式の計算をするプログラムを作成した．また，シミュレーション結果が可視化実験の結果と一致することを確認した．

今後の予定としては，オブジェクトの概念を理解し，領域クラスの設計を行い，オブジェクト指向言語である Java 言語による実装を試みる．

参考文献

[1] 棚橋隆彦：非圧縮粘性流体の過渡流れ(1)･(2), 機械の研究･第 37 巻･第 3 号および第 4 号, (1985).

[2] 水野明哲：流れの数値解析入門，朝倉書店，(1990).

[3] 有我成城ほか：Java 入門，翔泳社，(1996)

[4] 柴田友和：層流における空気の流れの可制御性，平成 8 年度茨城大学工学部システム工学科卒業論文，(1997).

[5] Milton Van Dyke : *An Album of Fluid Motion*, THE PARABOＬIC PRESS, (1982).