

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red の重合格子機能

小川 哲司*

Overset meshes in Advance/FrontFlow/red

Tetsuji Ogawa *

本稿では Advance/FrontFlow/red の重合格子機能について、その実装手法や検証例を紹介する。

Key word: 流体解析、重合格子

1. はじめに

Advance/FrontFlow/redは有限体積法によって非構造格子を扱うことができる流体計算パッケージである。有限体積法では解析領域をコントロールボリュームに分割して、各コントロールボリュームに積分形の保存式を適用して流れの計算を行う。

通常単一の格子系によって解析領域を空間分割しこの格子からコントロールボリュームを作成する。それに対して、解析領域の一部を全体格子とは別に格子を作成しこれら複数の格子系を重ね合わせることで解析形状を表す重合格子法がある。重合格子法では複数の格子系の間で格子点の位置を一致させる必要がないことから格子作成がより容易になり、また形状の一部を変更する場合に変更を含む格子系のみを再作成するだけでよく全体格子を再作成する必要がないなどの利点がある。

重合格子法ではある格子系の境界に相当するコントロールボリュームの物理量をそのコントロールボリュームを取り囲む他の格子系から内挿して決める。複数の格子系に対して流れを解くとき境界のコントロールボリュームにおける物理量の値を固定して格子系ごとに独立して流れの計算を行うと格子間の接続部分で滑らかに物理量が接続されるまで繰り返し計算が必要となることに加え、その途中で接続部分に不自然な物理量の勾配が現れるなど計算の不安定性が生じやすい。そのため格子系ごとの独立した計算ではなく複数の格子系を一体として流

れ計算を行うような計算法が求められる。

ここでは Advance/FrontFlow/red における重合格子の手法について説明し検証例を紹介する。

2. 重合格子の手法

(1) 格子間のデータ交換

重合格子法では空間的に重なりを持った複数の格子系を利用し、これらの格子間で物理量のデータ交換を行うことで解析領域内の流れ計算を行う。そのためにはまず、ある格子系のコントロールボリュームのうち他の格子系からデータを受け取る境界コントロールボリュームがどれであるのかを決定し、その境界コントロールボリュームが他の格子のどのコントロールボリュームからデータを受け取るのかを決定する。

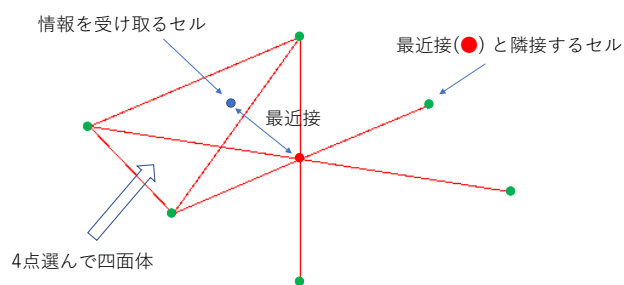


図1 データの受け取り相手とその重み探索

データは他格子系の複数のコントロールボリュームの値を内挿して受け取ることになるが、そのコントロールボリュームの選択とその重みづけは次のように決める。図1のようにコントロールボリュームの中心座標に注目し、他格子系のうち中心座標

*アドバンスソフト株式会社 第3事業部

間の距離が一番近いコントロールボリュームを探索しそのコントロールボリュームとそれに近接するコントロールボリュームをリストアップする。その中の4つの中心座標による四面体の中にデータを受け取るコントロールボリュームの中心座標が含まれていれば、それら4つのコントロールボリュームの値を内挿して受け取ることとする。内挿するときの重みとして四面体一次要素の形状関数(L_1, L_2, L_3, L_4)を採用し、

$$\phi = L_1\phi_1 + L_2\phi_2 + L_3\phi_3 + L_4\phi_4$$

のように一次関数で補間した値を他格子から受け取る。どの四面体にも含まれない場合は他格子系からデータを受け取らないコントロールボリュームと判定する。

(2) 計算領域とデータ受け渡し領域の決定

Advance/FrontFlow/redでは解析領域全体の形状を定めるバックグラウンド格子と **overset** 境界条件を含む内部格子との組み合わせによる重合格子を前提としている。内部格子では **overset** 境界面を含むコントロールボリュームを他格子からデータを受け取り、それ以外のコントロールボリュームは通常の計算を行う。バックグラウンド格子では、内部格子との重なりのないコントロールボリュームを通常の計算を行うとともに、内部格子に対してデータを渡すコントロールボリュームも通常の計算を行う。内部格子と重なっている残りのコントロールボリュームは計算対象ではなくなり内部格子からデータを受け取る。このようにコントロールボリュームの種類を区別することで、通常の計算を行う領域が複数格子間で一部重複するものの、その重複領域を最小化して、かつ相互にデータを受け渡しあうコントロールボリュームの組み合わせが生じないようにすることができる。

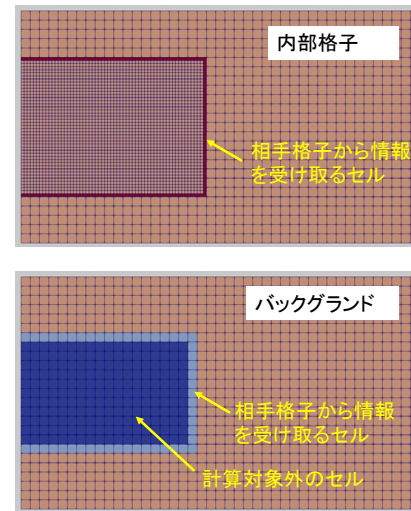


図2 重合格子の計算領域とデータ受け渡し領域

(3) 格子系全体の一体化

複数格子系を対象として保存式を解く場合、格子系ごとに他格子から受け取った値を固定してそれ以外の領域の計算を他格子と独立して行うこともありうる。しかし、この方法では計算領域全体の解に収束するまで多くの繰り返しが必要となるだけでなくその途中で非物理的な勾配が生じて計算の不安定性の原因となることが考えられる。そのため各格子系を独立に計算するのではなく、複数格子系を一体として同時に解くことが望ましい。

Advance/FrontFlow/redが扱える複数格子系としては空間固定の領域と回転する領域とをスライディング境界条件によって接続する回転系のように接続面で格子点座標が一致しない不連続系がある。この不連続系では、スライディング境界条件の境界セルに相手格子系の2つのコントロールボリュームから内挿した値を設定する。

$$\phi_{SLD} = w\phi_1 + (1-w)\phi_2$$

保存式を解くとき、離散化した線型方程式

$$A_p\phi_p + \sum_{nb} A_{nb}\phi_{nb} = S_p$$

においてスライディング境界セルが含まれている場合、

$$A_p\phi_p + \sum_{nb \neq SLD} A_{nb}\phi_{nb} + A_{SLD}(w\phi_1 + (1-w)\phi_2) = S_p$$

と置き換えることにより格子系の間のカップリングを導入し、全体を一体として流れを解くことを行っている。

重合格子においても回転系と同様に、離散化した線型方程式においてデータを受け取るコントロールボリュームの項を一次関数の内挿式に置き換えることで格子系の間のカップリングを導入して全格子系を一体として線型方程式を解くように実装を行った。

(4) 並列計算対応

Advance/FrontFlow/red は計算領域を並列数に合わせて分割しそれぞれを各並列プロセスが担当することで並列計算を行っている。重合格子において空間的に重なっている内部格子とバックグラウンド格子の部分を実別の並列プロセスが担当することが考えられる。その場合プロセス間のデータ通信が追加で必要になる。

まずデータ受け取りの内挿式を決定するとき、一つのプロセス内で計算ができるように一時的にコントロールボリュームの中心座標を集める。そして内挿式が求められた時点で、どのプロセスからどのプロセスへデータ通信を行うかの重合格子計算用の通信テーブルを作成し受け取り側のプロセスではそれらの値を受け取る配列を用意する。この配列の値を最新の値に更新するため、通常のプロセス間通信を行うとき重合格子計算用の通信テーブルによる通信を追加で行う。内挿した値を求めるときはこの配列の値を使うことで、一つのプロセス内で完結する処理となる。

3. 検証例

まず不連続格子と重合格子の計算を比較する。不連続格子は空間的に重ならない複数格子系で接続面の格子形状が一致していない場合も扱える。この不連続格子形状に対応した重合格子を用意し計算結果を比較した。

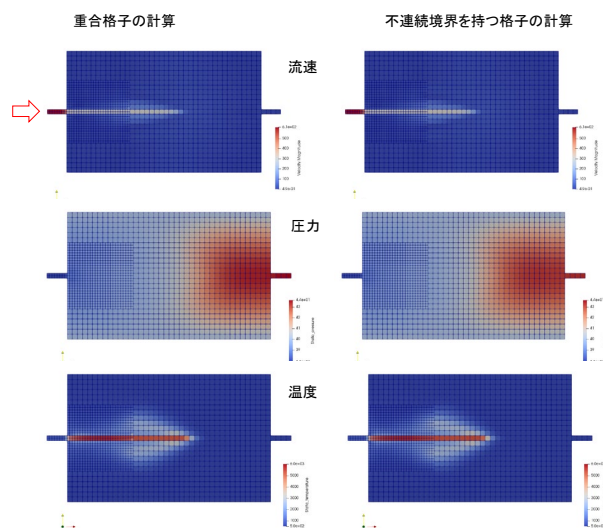


図3 不連続格子と重合格子の計算結果例

図3は不連続格子とそれに対応した重合格子の計算結果例である。左側から気体を流入させた計算で流入側の格子幅を小さくしており、重合格子は全体均一間隔のバックグラウンド格子に格子幅の小さな内部格子を重ねている。圧力・速度以外の物理量の様子も見たいため仮想的な化学種と反応を設定した。不連続格子と重合格子とを比較すると同等の計算結果が得られている。ある断面上での物理量のグラフを図4に示す。これらグラフでも不連続格子と重合格子とが数値的にも同等の結果となっていることが分かる。次に重合格子計算における流量保存性について簡単な形状で調べた。

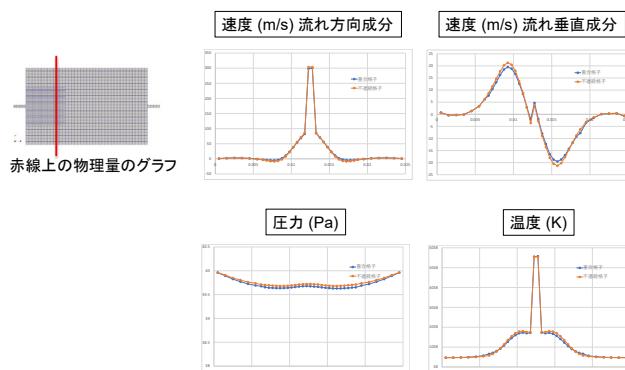


図4 断面における物理量の比較

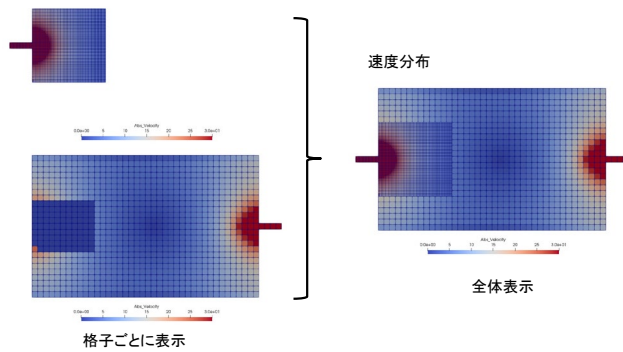


図 5 重合格子計算の例

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイル（カラー版）がダウンロードできます。（ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。）

図5の重合格子の計算で重なる内部格子の3次元全方向の格子幅(格子分割数)を変更して、左右両側の流入境界から流入する流量と、上下の流出境界から流出する流量を比較した。図6に示したようにいろいろな格子幅の内部格子を用いても流入と流出の流量が誤差数%の範囲内で保存していることが確認できた。また、重なる部分の格子の大きさは2つの格子系の間で同程度であるほうが流量の誤差が小さくなることが示唆される。

	流入量	流出量	誤差(%)
格子一致	6.0000E-04	5.9999E-04	0.00
2分割	6.0000E-04	5.9945E-04	0.09
3分割	6.0000E-04	5.9225E-04	1.29
4分割	6.0000E-04	5.9676E-04	0.54

図 6 重合格子計算の流量の比較

4. まとめ

Advance/FrontFlow/red の重合格子機能についてその実装手法と簡単な検証例を紹介した。重合格子では、解析領域全体を表すバックグラウンド格子に内部格子を重ねることを前提として格子間のデータ受け渡しを行う。物理量の保存式を解くときには格子間のカップリングを考慮して全体を一体として同時に解く方法を採用している。簡単な検証計算によって流れが適切に計算でき、複数格子をまたがるときの流量についても適切に保存されていることが確認できた。