

## Advance/Frontflow/red のスライディング格子機能

大友 洋

アドバンスソフト株式会社 技術第3部

## The introduction to sliding mesh simulation using Advance/Frontflow/red

Hiroshi Otomo

3<sup>rd</sup> Technical Division in AdvanceSoft Corporation

## 1. はじめに

今日、船舶や航空、ポンプ、石油、化学業界等、幅広い分野で、スライディング格子<sup>(注)</sup>を使用した解析が行われている。例えばタービンや攪拌槽、熱冷却装置内に存在する回転機器がその解析の対象となる。

回転系の解析方法として、回転力を羽根の表面に流体力として加え、回転流れを表現する手法もあるが、この方法では羽根の周りの幾何形状が周方向に対称でなければならないこと、常に一定の流体力しか与えない場合は定常解析のみしか適用できないことなどかなりの制限がかかる。これらの理由からスライディング格子を使用しダイナミックにある領域の格子を回転するという手法が採られる。

本文ではプログラム上での具体的なスライディング格子の処理方法や、スライディング格子のいくつかの適用事例について紹介する。

(注) 本文を通し、スライディング格子とは格子の形状は常に一定な移動格子の中で、回転系のものを示す。

## 2. 概要

本章では Advance/FrontFlow/red でのスライディング格子機能の概要について述べる。

---

\*アドバンスソフト株式会社 技術第3部

AdvanceSoft Corporation

## 2.1. スライディング面での処理方法

Advance/FrontFlow/red ではスライディング格子を使用する場合、解析領域を回転領域とそれ以外の領域に分割する。前者については回転座標系のナビエ-ストークス方程式を解き、後者については静止座標系のナビエ-ストークス方程式を解く。

回転角速度  $\omega$  での回転座標系で、ナビエ-ストークス方程式は以下ようになる。

$$\rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + 2(\omega \times v)_i + (\omega \times (\omega \times r))_i \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + F_i \quad (1)$$

左辺最後の2項は回転座標系特有のものであり、それぞれコリオリ力と遠心力を表す。ここでは回転角速度は加速しないとしている。ちなみに連続の式は座標系が変わっても変化を受けない。実際の計算では回転系か静止系かの領域分けをするために、格子を作成する際にマテリアル番号を各領域に割り当てる(たとえ物性が同じでも分ける)。

Advance/Frontflow/red は、回転系と静止系の境界に自動でダミーセルを作成し、計算中にそれぞれのセルの情報(圧力、速度、速度勾配等)を同期化する(図1)。もしプログラムを構築するのなら、この境界上での領域間の情報のやりとりには注意が必要である。なぜならば、上記のようにそれぞれの領域(静止系と回転系)で解いている

方程式が異なり、速度絶対値も回転速度分だけ異なるからである。

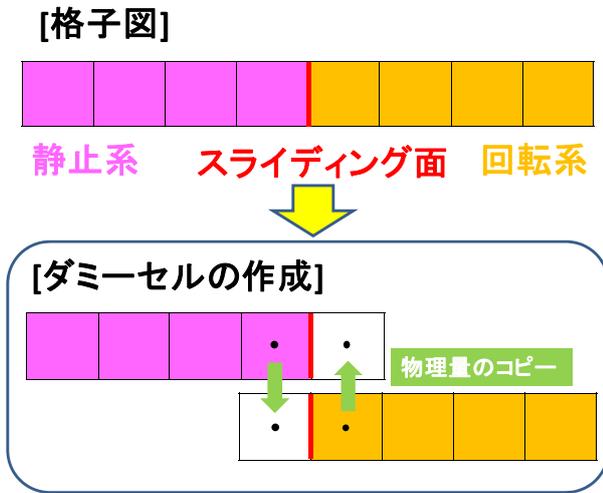


図1 ダミーセルについての説明図

具体的にスライディング面を隔てた格子間での変換を以下で示す。

- ・ (速度以外の) ベクトル量  $x'_i = R_{ij} x_j$   
 $x'_i$  : 変換後の物理量  
 $x_i$  : 変換前の物理量  
 $R_{ij}$  : 回転変換のテンソル  
*(i, j* は 1 ~ 3 までの添え字、勾配についても添え字が逆の同様な変換をする)
- ・ 速度  $v'_i = R_{ij} v_j + R'_{ij} x_j$   
 $v'_i$  : 変換後の速度  
 $v_i$  : 変換前の速度  
 $R'_{ij}$  : 回転変換のテンソルの時間微分
- ・ 速度勾配  

$$\frac{\partial v'_i}{\partial x_j} = R_{kj} \frac{\partial v'_i}{\partial x_k} = R_{kj} R_{im} \frac{\partial v_m}{\partial x_k} + R_{kj} R'_{in} \delta_{nk}$$
 $\delta$  : クロネッカーのデルタ

図1でダミーセルへの物理量の補間について示したが、3次元空間で粗密の異なる格子がスライディングしている場合、必ずしも実格子とダミーセルを1対1で対応させるのは精度的にも安定性としてもよくない。そこでダミーセルに最も近い2

つの実格子を選びだし、それらからダミーセルに線形補間する(図2)。

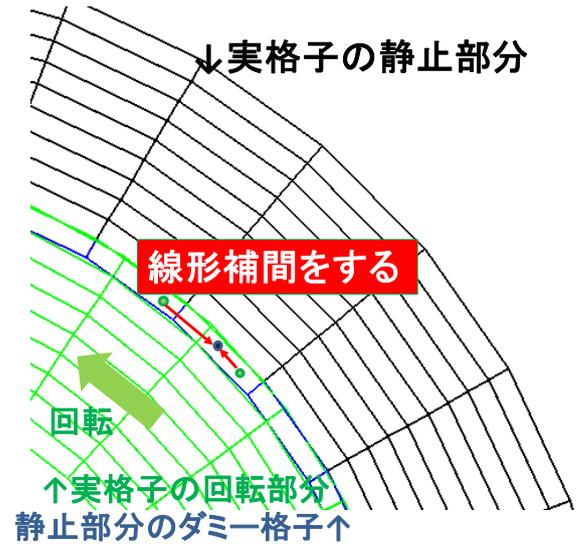


図2 スライディング面での補間方法の説明図

## 2.2. 並列処理

本節では並列計算をする際のスライディング格子の取り扱いについて説明する。

解析領域を各CPUで分け、並列処理する場合、気にしなければならないのはスライディング面での取り扱いである。始めに各CPUが処理する領域を適当に分割し、回転を始めてしばらく経過したときに、スライディング面を隔てた向こう側が他のCPUに割り当てられており、情報がない、ということになってしまっは問題である。このことを回避するため、並列処理時にはCPUの領域が少しでもスライディング面にかかるとしたら、そのCPUでスライディングする面に隣接する格子を全て持つとする。そしてこれら格子上の物理量を逐一同期化する。この手法は無駄な格子が増えてかなり並列効率が落ちそうに思えるが、あくまでスライディング面上にある格子のみなのでそこまで大幅に(半分程度に)並列化効率を落とすことはない。

## 3. 解析事例

本章ではスライディング格子の機能を使用した2つの事例を紹介する。

### 3.1. 回転角柱周りの圧力脈動解析\*(1)

回転角柱の流れ解析は、回転系の基礎事例という位置づけで、実験や数値解析でしばしば取り上げられる。ここではスライディング格子を利用して図3のような系を解析し、円柱後方のある点でプローブした圧力脈動を実験値と比較する。

解析対象（図3）は入口が横11m、縦26m、高さ2mの系で、一様な流れを2.47m/sで流入させる。円柱は底面積1m×1m、高さ2mである。この解析では上下対称境界で、高さ2mとして3次元解析されるので、高さ方向には渦の大きさが制限されることに注意が必要である。

前章で説明されたように回転領域を定義するためマテリアルを円柱周りの半径3.5mより内側とそれ以外の部分に分ける。そして円柱内側の部分をスライディング領域（回転系）とし、それ以外の領域を静止系とする。

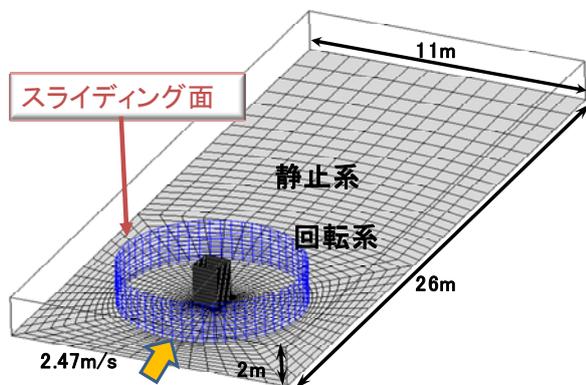


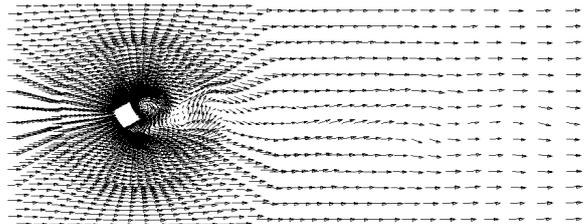
図3 回転角柱の解析系

本解析では回転数175.8rpm、220.8rpm、270rpmの3ケースを解析する。流体は非圧縮流体として、時間積分スキームはオイラー陰解法、移流スキームは2次中心差分を用いる。

解析結果を以下で示す。図4は、220.8rpmでの速度と静圧の瞬時値である（非圧縮流体のため静圧は出口を基準とした差圧を表示している）。スラ

イディング面はあくまで仮想的な面なので物理量がそこを境に大きく変ってはいけない。実際、速度はスライディング面で引きずられることはなく上流側ではほとんど流れが乱されない。圧力も後流の低压部分がスライディング面を通してスムーズにつながっている様子がわかる。

#### 速度分布(220.8rpm)



#### 静圧分布(220.8rpm)

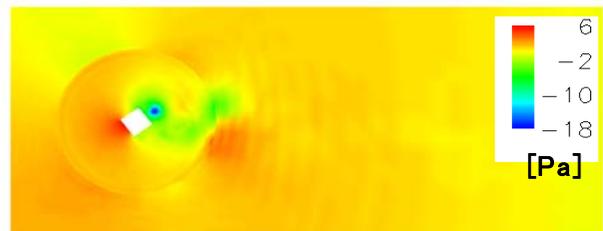


図4 解析結果

さらに円柱後方の特定位置（円柱の中心を原点とし、入口から出口にかけ座標値が正になるとして横に0.0305m、縦に0.122mの位置）で圧力の時系列データを採取し、それをフーリエ変換し、周波数解析を行う。その結果、共鳴点の中で一番低い周波数を $f$ とし、ストローハル数 $St$ を以下の式から算出する。

$$St = \frac{Df}{U}$$

$D$ ：典型的な長さ（角柱の一辺）

$U$ ：流入流速

さらにスピンパラメータ

$$S = \frac{\pi D f'}{U}$$

$f'$  : 角柱の回転周期  
との関係を解析する。

実験値、理論値と比較すると図 5 のようになる。

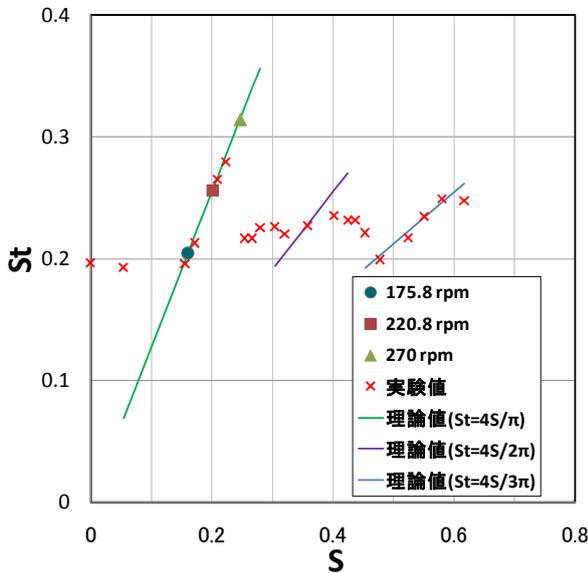


図 5 スピンパラメータ (S) とストローハル数(St) の関係

解析結果は理論値と非常によい整合性を示している。実験では 270 rpm の場合で非周期性を生じるため、理論値との一致があまりよくない。実際図 6 のように周波数解析では 2 山のピークができており(図 5 では 18[Hz]を採用)どちらを St の算出に使用するかで結果が異なる。

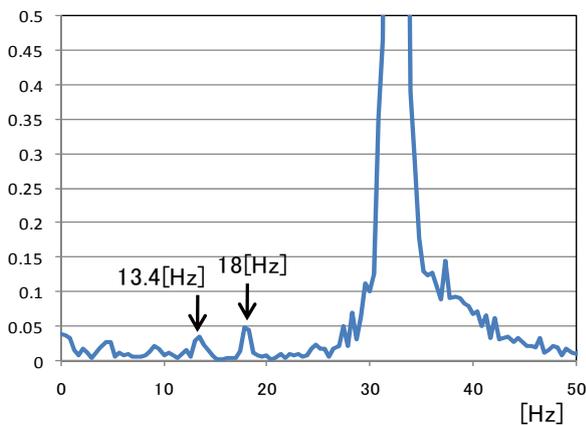


図 6 スペクトルの周波数分布 (270rpm)

総じて本解析ではスライディング格子機能が上

手く機能しており、解析結果は理論値、実験値とも整合性のあるものが得られた。

### 3.2. 遠心圧縮機

今日、遠心圧縮機は石油精製プラントやガスパイプラインなど様々な産業分野で活用されており、機器の信頼性、高性能性を追求する上で、騒音低減が強く求められている。本解析では圧縮機内部(図 7) の圧力振動を解析することで共鳴現象の解明とその予測を目的とする。

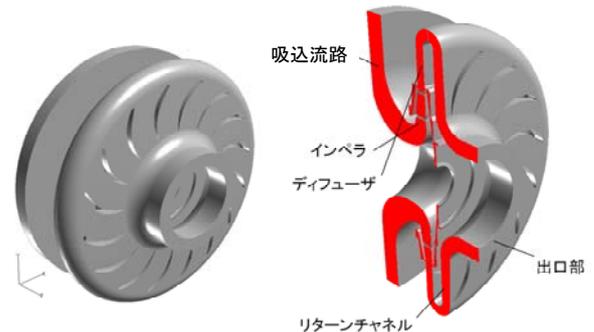


図 7 単段圧縮機 (左: 解析領域全体図、右: 断面形状) \*(2)

本解析では格子数要素 90 万要素と 400 万要素と粗密をつけた 2 種類の格子で解析を行い、それらの違いによる剥離流れの差異などに着目する。乱流モデルはラージ・エディ・シミュレーション (LES) を用い、圧縮性流体 (空気) とする。回転数 9240 [ $\text{min}^{-1}$ ] の場合 (共鳴点) と、騒音の小さい回転数 11400 [ $\text{min}^{-1}$ ] の場合 (非共鳴点) で計算を実施する (詳細情報を表 1 でまとめる)。時間積分法は、粗い格子ではアダムス・バッシュフォース法、詳細格子についてはオイラー陰解法を使用、移流スキームは 2 次中心差分を使用した。

表 1 圧縮機主要諸元\*(2)

インペラ直径 [mm]	300
流量係数 [-]	0.07
回転数 [ $\text{min}^{-1}$ ]	9240、11400
レイノルズ数 [-]	$10^5$

以下で解析結果を示す。11400 [ $\text{min}^{-1}$ ] での羽根

周りの速度分布と圧力分布の結果は以下である  
 (図 8、図 9)。明らかに格子の解像度の違いにより剥離流れの様子が違うことがわかる。格子が細かいほうが後方流れまでしっかり解けている。これは一般的によく知られているように格子が粗い格子の場合、詳細渦が捉えきれずよりスケールの大きな渦で散逸するため、それだけエネルギーの消散が高まることから説明できる。

圧力分布も、450 万要素の方がより詳細な分布になっていることがわかる。

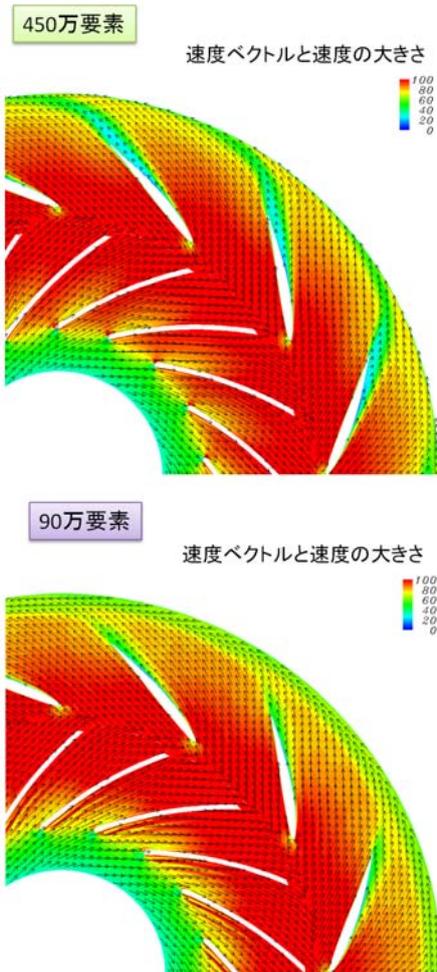


図 8 インペラ-ディフューザ間の速度分布 (回転数 11400[ $\text{min}^{-1}$ ]の場合) 上 : 450 万要素、下 : 90 万要素\*(2)

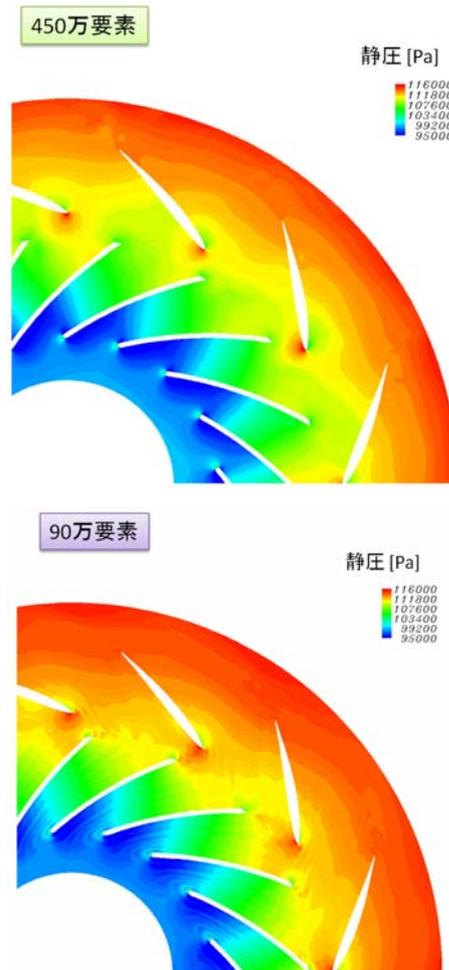


図 9 インペラ-ディフューザ間の静圧分布 (回転数 11400[ $\text{min}^{-1}$ ]の場合) 上 : 450 万要素、下 : 90 万要素\*(2)

さらに本解析では共鳴点 (9240 [ $\text{min}^{-1}$ ]) で支配的な周波数成分 (翼通過周波数(BPF)) に着目する。具体的にはディフューザ流路内のいくつかの点で圧力変動の時系列データを記録し、周波数解析を実施した。測定位置各点で、圧力スペクトルを求め、BPF 成分の振幅の大きさをまとめた結果が図 10、図 11 である (それぞれ流路内の流れに沿って M 列、P 列、S 列としている)。

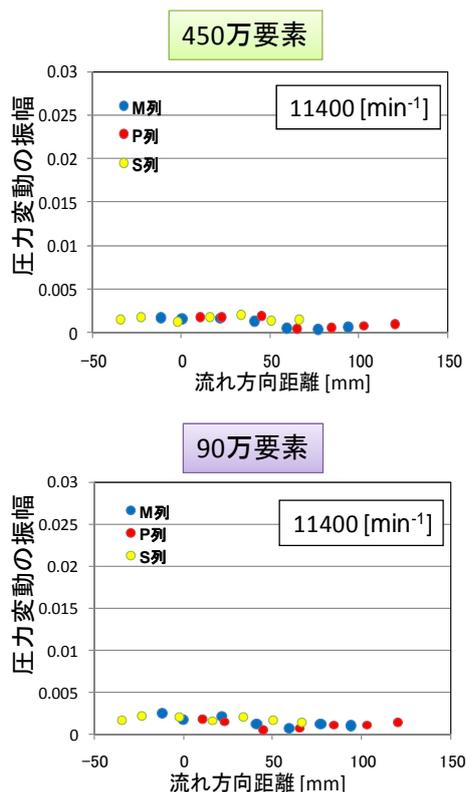


図 10: ディフューザ流路内の BPF 成分の振幅の分布、上: 450 万要素、下: 90 万要素 (11400 [min<sup>-1</sup>])\*<sup>(2)</sup>

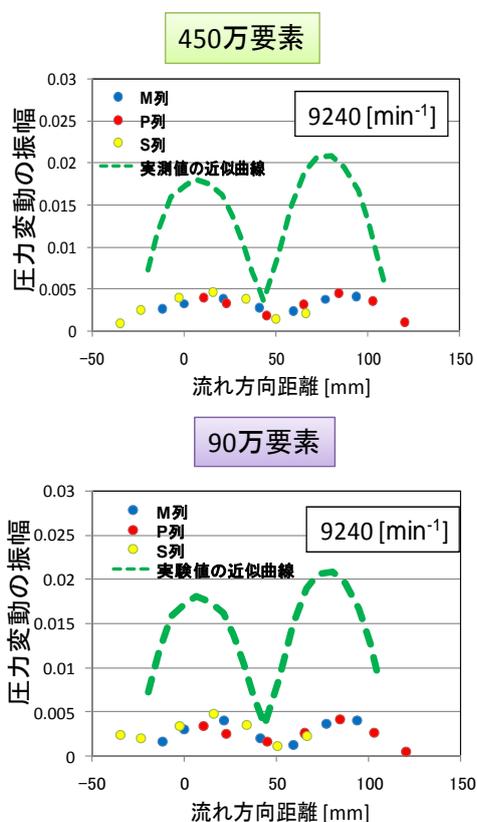


図 11: ディフューザ流路内の BPF 成分の振幅の分布、上: 450 万要素、下: 90 万要素 (9240 [min<sup>-1</sup>])\*<sup>(2)</sup>

90 万要素、450 万要素いずれも、9240 min<sup>-1</sup> の共鳴点で圧力変動の振幅に 2 つのピークがでていいる。11400 min<sup>-1</sup> の非共鳴点ではこのようなピークは見られず、共鳴点で定在波を捉えた妥当な結果であると考えられる。このピークは 450 万要素の方が顕著に出ており、圧力値の精度向上の結果であると考えられる。一方、実験値と比較すると本結果がやや過少評価している傾向があり (実験値では最大変動値が 0.02 程度)、モデルや境界条件の精度向上が今後の課題と考えられる。

本計算では地球シミュレータ向け FrontFlow /red のチューニングを行い、ベンチマーク結果ではベクトル化率 97.67%、並列化率 99.31% を実現した。

#### 4. おわりに

スライディング格子のアルゴリズムの概要とその適用例をいくつか紹介した。今後産業界ではさらに本機能の精度、堅牢性向上が求められると考えられている。そのために、スライディング面での保存量や揺らぎ成分などに着目し、改良することを考えている。また最近では本機能とキャビテーション機能を合わせた解析も行っている。さらに様々な場面で拡張的に使用されて行くため本機能の重要度はますます高まるであろうと考えている。

#### 参考文献

- (1) 黒田 成昭, 小川 誠司, 黒田 治彦, 藤井 義久, 日本機械学会論文集 B 編 62 巻 597 号 (1996) p17
- (2) 三浦 治雄, 小林 博美, 三橋 利玄, 西村 香純, 大友 洋, 西川 憲明, 廣川 雄一, 平成 20 年度先端研究施設共用イノベーション創出事業【産業戦略利用】「地球シミュレータ産業戦略利用プログラム」利用成果報告書. p27