

領域オブジェクトを用いた回転流シミュレーション

Rotating flow simulation based on Domain-object

金田 豊(発表者)

坪井一洋(指導教官)

The purpose of this research is to design the Domain-object for simulating rotating flow problems. In particular, we present several models with and without synchronization among Domain-objects. The feature of the models is investigated by an axisymmetric flow problem of the source-sink flow.

1. はじめに

計算流体力学にオブジェクト指向技術を導入し、効率的な流れのシミュレーションを実現する研究が行なわれた[1]. この研究では、領域分割法のオブジェクト化によって領域オブジェクトを定義し、全領域をそれらの組み合わせによって構成している. ここではオブジェクト化された各部分領域を領域オブジェクトと呼ぶことにする[2].

本研究の目的は、回転流のシミュレーションが行える領域オブジェクトを作成し実装することにある. その際、領域オブジェクトに対して同期型、非同期型のモデルを示した. 回転2円板間ソースシンク流れを例としてそれらの特徴を調べた.

2. 領域オブジェクトの設計

2.1 基礎方程式

ここでは円筒座標系の軸対称流れについての連続の式と非圧縮性ナビエ・ストークス方程式を示す[3]. 擬似圧縮法を用いた場合の基礎方程式は以下のように表される.

・連続の式

$$\frac{\partial P_R}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial r v_z}{\partial z} = 0$$

・ナビエ・ストークス方程式

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r(v_r v_r - t_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial r(v_z v_r - t_{rz})}{\partial z} \\ = -\frac{\partial P_R}{\partial r} + 2\Omega^* v_\theta + \frac{(v_\theta v_\theta - t_{\theta\theta})}{r} \\ \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r(v_r v_\theta - t_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial r(v_z v_\theta - t_{z\theta})}{\partial z} \\ = -2\Omega^* v_r - \frac{(v_r v_\theta - t_{r\theta})}{r} \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r(v_r v_z - t_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial r(v_z v_z - t_{zz})}{\partial z} \\ = -\frac{\partial P_R}{\partial z} \end{aligned} \right.$$

ここで、 Ω^* は z 軸まわりに回転する容器および円筒座標系の回転速度を表す. P_R は遠心力を加えた圧力, r, θ, z は Ω^* で回転する円筒座標系の半径, 方位角, 軸方向座標を表す. v_r, v_θ, v_z は速度ベクトルの r, θ, z 軸方向成分, ρ は密度, μ は動粘度を表す.

2.2 同期型と非同期型

領域オブジェクトを設計する際にオブジェクト間で

同期を取るタイプと取らないタイプを考えた. ここで「同期型」とは、各領域オブジェクト間で同じ時刻のデータをやり取りしながら計算を進めていく場合を意味する.

今回、これらの異なるタイプを考えた理由は大きく2つある. 1つは、非同期を考えることで並列計算を模擬できることである. 他の理由は、領域オブジェクト間での計算に独立性を与えることである. これによって、流れの計算を行う際に収束を加速できる可能性がある.

既に述べたように、同期型では領域オブジェクトが計算を進める際に同じ時刻のデータをやり取りする. この同期型モデルの概念図をFig. 1に示す. この場合は、各領域オブジェクトが同じ時間の刻み幅を持ち、同じステップ数だけ進むことになる.

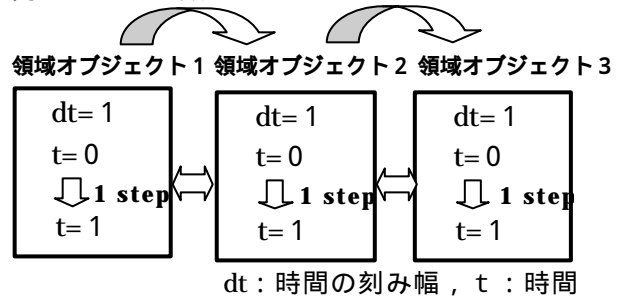


Fig. 1 同期型モデルの概念図

一方、「非同期型」とは各領域オブジェクト間で異なる時刻のデータをやり取りし計算を進める場合を意味する. ただし、非同期型にも2種類ある. 各領域オブジェクトが持つ時間の刻み幅は同じだが進むステップ数が異なるため非同期になるタイプと各領域オブジェクトが進むステップ数は同じだが時間の刻み幅が異なるため非同期になるタイプである. ここでは前者を完全非同期型モデルと呼び、後者を擬似非同期型モデルと呼ぶことにする. これらの概念図をそれぞれFig. 2, Fig.3に示す.

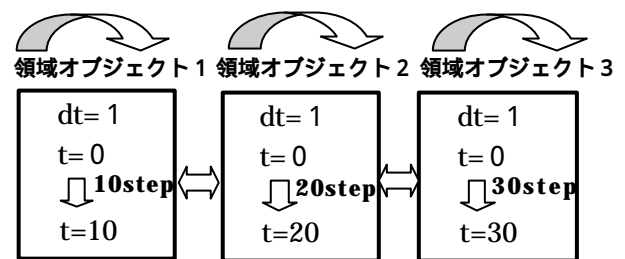


Fig. 2 完全非同期型モデルの概念図

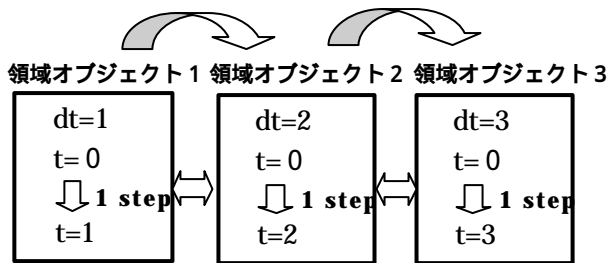


Fig. 3 擬似非同期型モデルの概念図

3. 計算結果と考察

3.1 回転2円板間のソースシンク流れ

本研究では回転流の例として回転2円板間におけるソースシンク流れを取り上げる[3]. 回転2円板間ソースシンク流れのモデルをFig. 4に示す. この図において網掛けの領域が実際に計算する部分であり, この領域内に軸対称な流れが生じる.

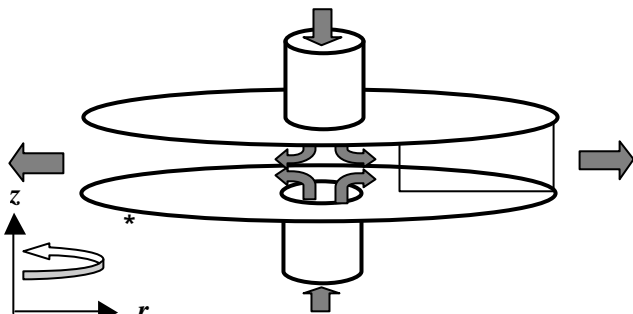


Fig. 4 回転2円板間ソースシンク流れのモデル

3.2 完全非同期型の問題点

完全非同期型の領域クラスを作成するに当たってJava言語のマルチスレッドという機能を用いた. この完全非同期型では, 各領域オブジェクトがスレッドによって独自にステップ数を進める.

そのため, 場合によってはかなり異なる時刻でのデータが領域オブジェクト間で交換されることになる. その結果, 途中で計算が破綻することがある.

この問題に対しては, 領域オブジェクト間でそれぞれのステップ数を調べ, それらの差が一定値以下となるように各領域オブジェクトが調整を行うことで解決できた. しかしながら, 環境によってはスレッドの不均衡から計算に不都合が生じた. したがって, 現状では完全非同期モデルの信頼性は低いといえる.

3.3 擬似非同期型による収束の加速

回転2円板間ソースシンク流れにおいて収束した状態での流れの様子をFig. 5に示す.



Fig. 5 収束した計算結果

この図からわかるように, 上・下壁面付近で急激に流速が大きくなっている. このことから, これらの領域に合わせて全体の格子幅を小さく設定する必要があ

る. しかし, 格子幅を小さくすると, それに応じて時間の刻み幅も小さくしなくてはならない. その結果, 解が収束するまでの時間が増加することになる.

領域オブジェクトでは, 格子数を自由に設定できるという利点を用いて, 上・下壁面付近と中央部で異なる格子幅を設定した. その結果, 領域オブジェクト毎に異なる時間の刻み幅を用いることになる. これは, 前述の擬似非同期型モデルによって実現できる. ただし, 領域毎に異なる時間の刻み幅を用いることができたのは扱う流れが定常の解を持つ流れだからである. 同期型モデルと擬似非同期型モデルを用いて, 5万ステップ計算させた流れ場の様子をFig. 6とFig. 7に示す.

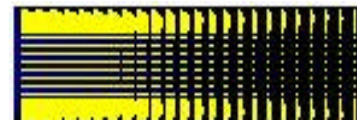


Fig. 6 同期型の計算結果 (50000step)



Fig. 7 擬似非同期型の計算結果 (50000step)

この結果から明らかなように, Fig. 7の方がFig. 5の結果に近いことがわかる. 実際, 収束するまでのステップ数と実行時間を比較した結果をTable 1に示す. これより, 擬似非同期型モデルによって約16%収束が加速されていることがわかる.

Table 1 収束までの比較

	同期型	擬似非同期型
収束するステップ数	約 95 万	約 80 万
収束までの実行時間	約 1 時間 41 分	約 1 時間 23 分

4. まとめ

本研究の目的は, 回転流のシミュレーションが行える領域オブジェクトを作成し実装することである. このとき, 同期型モデル, 完全非同期型モデル, 擬似非同期型モデルを作成した. まず, 完全非同期型のクラスを設計し並列計算の模擬をした. さらに, 領域オブジェクトの利点を利用して格子集中を行い, 擬似非同期型モデルによって収束が加速されることを示した.

参考文献

[1] 籠島高, 坪井一洋: 日本流体力学会年会 2000 講演論文集 (2000), pp.373-374.
 [2] 籠島高: 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, 平成 11 年度茨城大学工学部システム工学科卒業研究論文, (1999).
 [3] 森西洋平, 中林功一, 土田陽一, 岩間秀樹: 準剛体回転成層流の数値解析手法, 日本機械学会論文集(B編), 60 巻 572 号, (1994 4), pp.136-143.
 [4] 籠島高, 金田豊, 坪井一洋: 第 14 回数値流体力学シンポジウム, C04-2, (2000).