

回転する障害物による流体攪拌

理学専攻・情報科学コース 段家 加生里

1 はじめに

攪拌とは流体をかき混ぜる操作を指す。かき混ぜる物質や分野によってその呼称は異なるが、ここでは統一して系内の成分の分布状態を均一化すること、また棒や板やプロペラ状の攪拌子を槽内で一定速度、一方向に回転させることを攪拌と定義して研究を進めていく。

攪拌は私たちの生活の中にも身近に存在しており、その応用は様々である。また、攪拌の性能に主に関係する攪拌機にはたくさんの種類があるが、本研究ではその中でも代表的な攪拌機をモデル化し、攪拌の様子の変化を観察し、評価を行う。

2 計算方法

流体を攪拌することによって起こる流体の流れは遅く、非圧縮性流体とみなせるので、連続の式 (1)、Navier-Stokes 方程式 (2)、仮想粒子としての温度 T の移流拡散方程式 (3) を使用する。これらを攪拌機と同じスピードで回転する回転座標系で表現した上で、フラクショナル・ステップ法を用いて計算した。

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta v - Tk \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (v \cdot \nabla)T = \frac{1}{Re \cdot Pr} \Delta T \quad (3)$$

v :速度ベクトル, p :圧力,
 Re :レイノルズ数, T :温度,
 k :鉛直方向の単位ベクトル, Pr :プラントル数

3 モデル化

3.1 格子生成と境界条件

半径 1:高さ 2.5 の同心二重円筒格子を用いる。モデル化した攪拌機付近で格子が細くなる不等間隔格子とした。境界条件としては、蓋無の容器としたため上壁を free-slip 条件、側壁と底壁は no-slip 条件とした。また、攪拌機は一定速度 ω で回転する (3.14 秒/回転)。ただし、攪拌始めの 1.5 回転のみは線形的に攪拌機の色を増やし、それ以降を一定速度とした。

3.2 攪拌機のモデル化

今回は様々な攪拌機の中から、広く使用される 5 種類の攪拌機計 7 パターンの攪拌機をモデル化し、同じ条件での計算結果を評価していく。生活に身近な攪拌機として、棒状のマドラー型 (以下 madora とする。), 棒の先に平板をつけたスプーン型 (以下 spoon) をモデル化し、また工業的にも広く使用させられる攪拌機として、2 枚羽根型 (以下 hane2), 3 枚羽根型 (以下 hane3), 4 枚羽根型 (以下 hane4), アンカー翼型 (以下 anker), フラットタービン型 (以下 disc) をモデル化した。

以下の図 1 には、それぞれ左側に参考にした実在の攪拌機を、右側に今回モデル化した攪拌機を示している。

攪拌機形状	攪拌機図
マドラー (madora)	
スプーン (spoon)	
ピッチドパドル (hane2)	
ピッチドパドル (hane3)	
ピッチドパドル (hane4)	
アンカー翼 (anker)	
フラットタービン (disc)	

図 1: 攪拌機のモデル化

4 評価方法

4.1 攪拌時間の評価

本研究では、攪拌によって計算領域内の温度分布を統一すること、またその際の攪拌機の違いによる攪拌効率を評価することを目的とする。

計算領域下半分に温度 1.0、上半分に温度 0.0 の液体を入れ、攪拌による温度変化の様子を観察する。攪拌において領域内の最大温度と最少温度を計算し、その差が 0.01 以下となったとき攪拌終了とし、その時間を攪拌時間と定義する。攪拌機の違いによる攪拌時間を比較することで攪拌機の性能を評価する。

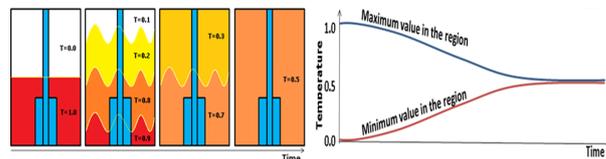


図 2: 攪拌の過程概念図 図 3: 最大温度と最小温度

4.2 仕事の評価

攪拌効率という観点から仕事の大きさに着目し、攪拌機の違いによる仕事の大きさを比較する。仕事は攪拌機にかかるトルクの大きさを攪拌時間まで時間で積分したものとし、図 4 の塗りつぶしの面積で表される。トルクとは攪拌する流体から攪拌機にかかる圧力差に

単位面積をかけ、回転軸中心からの距離をかけたものであり、トルクが大きくとも攪拌時間が小さい場合や、トルクは小さくとも攪拌時間が大きい場合などでも厳密に攪拌効率を比較するため仕事の大きさを調べることにした。

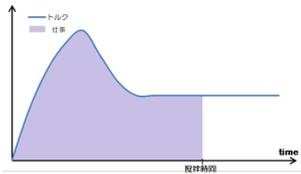


図 4: トルクと仕事

4.3 攪拌機の体積の評価

攪拌機自身の重さという観点から攪拌機の体積に着目し、計算領域全体における攪拌機自身が占める体積の割合と攪拌時間との関係を調べる。重い攪拌機ほど攪拌時のエネルギーを必要とすると考えた。

5 計算結果

それぞれの攪拌機について計算を行った。図 5 は hane2 の攪拌過程の様子である。時間経過と共に温度が拡散していく様子がみられる。

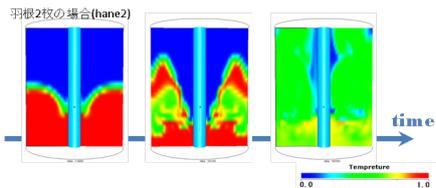


図 5: 攪拌の様子 (hane2)

5.1 攪拌時間

図 6 は計算した攪拌機 5 種類計 7 パターンにおける攪拌時間の比較のグラフである。最も攪拌時間が大きいのは hane2 で、最も攪拌時間が短いのは disc であった。hane2 は disc の約 2.5 倍の攪拌時間を要す結果となった。

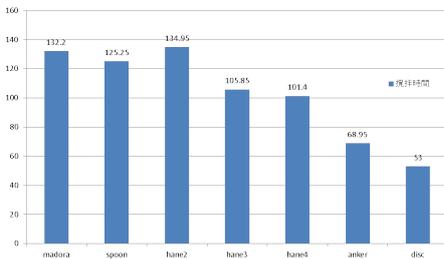


図 6: 攪拌時間

5.2 仕事

図 7 は攪拌時間と仕事をそれぞれグラフにしたものである。攪拌時間が短くても、仕事大きいものがあることがわかる。また、図 8 は攪拌時間と仕事の相関図である。攪拌時間が短ければ短いほど、また、仕事小さければ小さいほど、つまり相関図の左下にあるほど攪拌効率が良いと言えるので、最も攪拌効率が良いのは disc となった。また、右上にある spoon や madora は攪拌効率が悪いと言える。

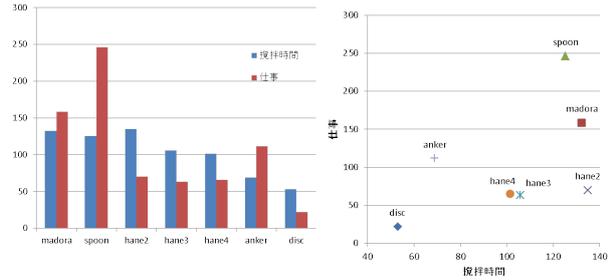


図 7: 仕事と攪拌時間 図 8: 仕事と攪拌時間の相関

5.3 攪拌機の体積

図 9 は攪拌機自身が計算領域内を占める割合と、攪拌時間の相関を表した図である。ほとんどの攪拌機が領域内の 0.1% 以下程度なのに対し、disc は攪拌時間は短いですが、体積が 0.8% 程度と他の攪拌機よりも大きいことがわかる。

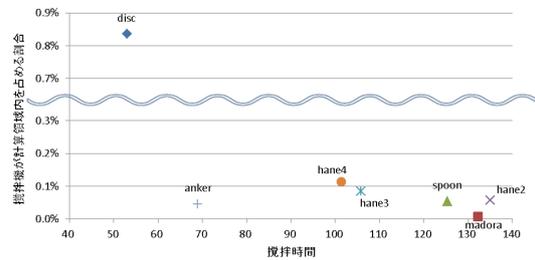


図 9: 攪拌機体積比と攪拌時間の相関

6 まとめ

本研究では、5 種類計 7 パターンの攪拌機をモデル化し、それぞれについての計算結果から攪拌機の効率について 3 つの観点において比較した。

5.1 の攪拌時間という観点、5.2 の仕事という観点では、disc が最も攪拌効率が良いと言える。

しかし、5.3 の攪拌機の体積という観点になると、disc は最も攪拌機の体積が大きい、すなわち自身の重さも大きいため、より多くのエネルギーを必要とすることから、攪拌効率は悪いと言える。

以上の結果より、本研究では最も攪拌効率の良い攪拌機の提案はできなかった。本研究の目的である、最も効率の良い攪拌機の提案をするためには、他の観点による攪拌効率の検証も必要であると考えられる。

7 今後の課題

今後の課題としては、攪拌機と流体との間の摩擦や、その他の観点での評価による攪拌効率の比較を行うことや、計算をより現実の装置に近づけることが挙げられる。

参考文献

- [1] 河村哲也, 流体解析 1, 朝倉書店 (1997)
- [2] 河村哲也, 流体解析 2, 朝倉書店 (1997)