

エアシャワー流動の数値解析

小形 達郎 指導教官 森西洋平 助教授

2005 年 2 月 22 日

1 はじめに

本研究では工業製品として実際に使用されているエアシャワーノズルを解析対象とし計算を行う。本研究の解析対象となるエアシャワーとは、精密機械工場や食品工場などに設置され、複数のノズルから強い気流を噴き出して作業者の衣服に付着した塵や毛髪などを除去する装置である。本研究ではそのエアシャワー流動を LES を用いた数値計算により解析することを目的とする。LES は大スケール (Grid Scale) 渦は数値的に解くが、渦の最小スケール (Sub Grid Scale) まで離散化する必要がなく、計算負荷が DNS に比べて低いことが利点である。計算コードを作り、検証計算を行って本計算を行う。LES の SGS モデルにはコヒーレント構造を基にした Smagorinsky モデルを用い、移流項の離散化には 2 次精度中心差分スキームと QUICK スキームを用いる。時間進行法には 3 次精度 Runge-Kutta 法を用いる。得られた数値計算結果よりエアシャワーノズル噴流の特性を考察する。

2 LES の基礎

2.1 LES 基礎方程式

LES では基礎式にフィルター化操作を施す。φ を物理量とするとき、フィルター化操作は次式で定義される。

$$\bar{\phi}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x - x') \phi(x', t) dx' \quad (2.1)$$

これにより、物理量 φ は次式のように GS 量 $\bar{\phi}$ と SGS 量 ϕ' と分離することができる。

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.2)$$

G(x) はフィルター関数であり、次式を満たす。

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(x) dx = 1 \quad (2.3)$$

前節のフィルター化操作を用いて、支配方程式である NS 式および連続の式にフィルター化操作を施すと、次式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\phi} \quad (2.5)$$

となる。ここで、上式中の τ_{ij} は、SGS 応力であり、

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (2.6)$$

と定義される。SGS 応力は、速度の 2 次の項を含むため未知数であり、この項に乱流モデルを導入する。モデル化した τ_{ij} を式 (2.5) に組み込み、数値計算を行う。

2.2 SGS モデル

本研究では流れ場のコヒーレント構造によってモデル定数が自動的に定まるモデル^[1](Coherent-structure Smagorinsky Model, CSM)を用いる。このモデルは LES において最も基本的なモデルである Smagorinsky Model を基本とするもので、流れ場のコヒーレント構造によってモデル定数が自動的に決定し、壁面減衰関数の役割も自動的に果たす SGS モデルである。

2.3 離散化

空間離散化にはコロケート格子を使用し移流項の離散化に 2 次精度中心差分を用いる。時間進行法には 3 次精度 Runge-Kutta 法 (RK3) を用いる。

3 検証計算

本研究で用いる計算コードの検証計算を行う。検証計算の対象はキャビティフロー、傾斜キャビティフローとし、図 1、図 2 に二種類のキャビティフローの計算領域を示す。キャビティフローに関してベンチマークテストの比較対象としてしばしば引用される Ghia et al.(1982)^[2] による計算結果と比較し、計算コードの信頼性を確認する。傾斜キャビティフローに関しては可視化により妥当な結果が得られていることを示し、本研究で用いる計算コードが複雑形状にも対応できることを確認する。本計算結果と Ghia

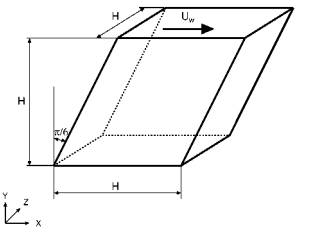
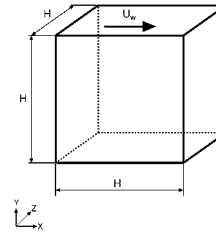


Fig. 1: キャビティフロー Fig. 2: 傾斜キャビティフロー

et al. の計算結果を流速分布として図 3 に示す。図より、本計算

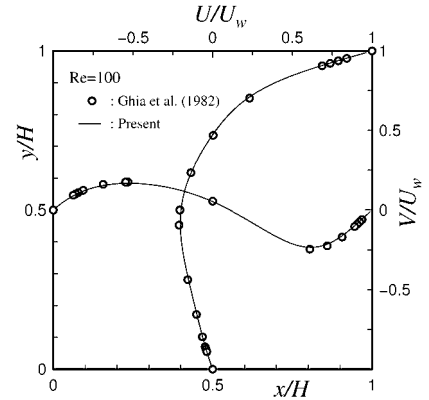


Fig. 3: キャビティフロー

結果と Ghia et al の結果はよく一致しており、このことから本研究で用いる計算コードの信頼性を確認することができた。また傾斜キャビティフローにおいても安定に計算が行われ、これにより本計算コードは複雑形状にも対応する汎用性のあるものであることが確認できた。

4 格子生成

物理面の形状を決める壁の関数を以下のように決定した。

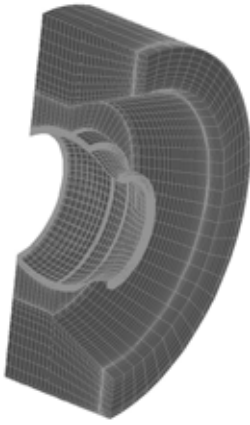


Fig. 4: ノズル形状

- 壁面①

非公開

- 壁面②

非公開

- 壁面③

非公開

- 壁面④

非公開

なおこれらの関数は実際の寸法であり，プログラム上では代表長さ b （ノズル出口径）で無次元化したものを使用する．格子はノズル出口とノズル内壁面で密になるように生成する．生成された三次元格子（ノズル部分）を図 4 に示す．

5 エアシャワーノズルの計算

検証計算によりコードの信頼性が確認でき，エアシャワーノズルの格子も生成できたので，次にエアシャワーノズル噴流の数値計算を行う．

5.1 計算条件

本研究の格子数，計算領域を表 5.1 にまとめて示す．代表長さをノズル出口径 b ，代表速度をノズル入口速度 u としてレイノルズ数を決定する．境界条件は主流方向下流にノイマン境界条件を用いる．初期条件として，ノズル内部に一定の流速を与え，流れ場全体に変動を与えて計算を行う．

Table 5.1 計算条件	
格子数	$N_i \times N_j \times N_k$ $134 \times 60 \times 60$
主流方向長さ	$10.0b$
Re	50000

5.2 計算結果

各時間ごとのベクトル線図により，噴流の発達過程が確認でき．初期の段階でノズル出口壁面で発生した渦が時間とともに下流へ移動していく様子が確認できる．また流れが発達した後は下流の混合層の領域で渦が発生していることがわかる．

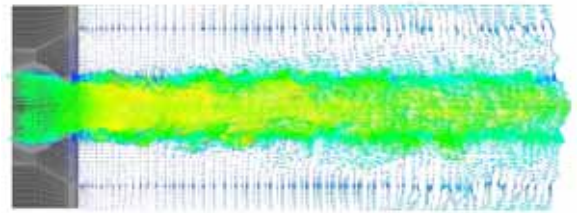


Fig. 5: ベクトル線図発達後

6 結論

LES による数値解析により以下に示す結果が得られた．

- 本研究で用いる計算コードの検証計算をキャビティフロー，傾斜キャビティフローを対象に行い，計算コードの信頼性と複雑形状への適応が確認された．
- エアシャワーノズルを対象として計算を行いその途中経過を可視化することにより噴流の発達過程を確認することができた．また十分時間が経って噴流が発達した時の下流に発生する渦構造を確認した．

参考文献

- [1] 小林宏充, 第 18 回数値流体力学シンポジウム (2004) コヒーレント構造を基にした SGS モデル
- [2] U.Ghia, K.N.Ghia, and C.T.Shin, Journal of Computational Physics 48,387-411(1982) High-Re Solutions for Incompressible Flow Using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Method
- [3] 小国力・河村哲也, 数値格子生成の基礎と応用, 丸善 (1994)