

粒子追跡法を用いた角柱周りの流れの可視化

中央大学 学生員 ○鈴木宏之 中央大学 正会員 平野廣和
八戸高専 正会員 丸岡 晃 中央大学 正会員 佐藤尚次

1. はじめに

角柱まわりの流れの構造に関して、数値流体解析を用いた検討が数多くなされている。そして、解析結果から流れ場の再現方法として、流線や粒子追跡法による可視化がなされている。しかし、流線は定常な流れ場の再現には有効であるが、角柱まわりの流れは、角柱後方においてカルマン渦が発生することで非定常な流れとなるため、厳密な流れ場の再現には至っていない。一方、粒子追跡法では、実際に粒子の流れ場に配置し、時々刻々と粒子を追跡することで非定常な流れ場に対しても厳密な再現が可能であると考えられる。しかし、粒子を流す位置や数に関して確立された理論がないことが指摘されている。¹⁾そこで本研究では、粒子追跡法を用いて非定常な流れ場となる角柱まわりの流れを再現することを目的とし、さらに粒子を流す位置や数に関しても検討を行う。

2. 可視化概要

粒子追跡法には、大きく分けて次の 2 つの方法に分けられる。流体計算の中で粒子追跡をするものと、流体計算と粒子追跡を分離するものである。しかし、流体計算の中で粒子追跡をするようなラグランジュ的手法では、解析結果に数値振動が現れるなどの問題点がある。

本論文では、安定的に解析を行うことができる有限要素法の解析結果を元に、流れ場に粒子を配置することで流れ場を可視化する。次に解析および粒子追跡に関して述べる。

2.1 解析方法

(a) 基礎方程式

基礎方程式は、非圧縮性の Navier-Stokes 方程式を用いて以下のように表す。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla p - \nu \nabla^2 \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad \text{in } \Omega \quad \cdots (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad \cdots (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ は流速、 t は時間、 $\mathbf{F}$ は外力、 p は圧力、 ν は動粘性係数を表す。また、本解析には、著者ら²⁾が提案している IBTD/FS 有限要素法を適用し、乱流モデルには LES の一手法である Smagorinsky SGS モデルを採用する。

(b) 解析領域と境界条件

図-1 に解析領域と境界条件を示す。解析領域は、流入境界が x 軸方向である角柱前方から $12D$ 、流出境界は同方向に $24D$ 、 y 軸方向は $35D$ (閉塞率 3% 以下)、 z 方向 (スパン方向) は $1.5D$ とする。

境界条件には、流入境界 Γ_1 で無次元流速である一様流速 1.0 、流出境界 Γ_2 では移流境界条件とし、 Γ_3 で slip 条件、物体周り Γ_4 で no-slip 条件とし、断面軸方向の境界 Γ_5 は周期境界条件を適用する。

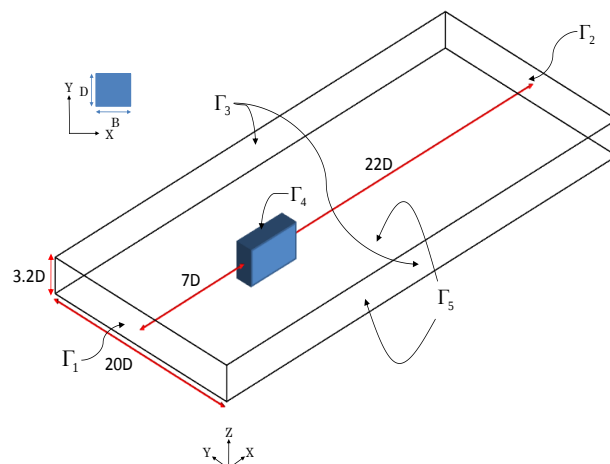


図-1 解析領域・境界条件

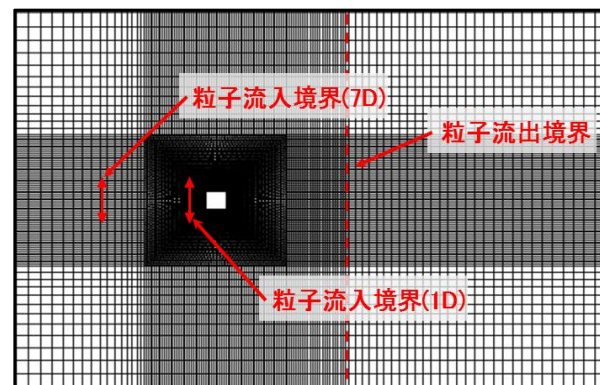


図-2 要素分割

表-1 粒子流入パターン

流入パターン	流入位置(角柱前方からの距離)	流入幅
①	7D	3D
②	1D	3D
③	1D	1D

図-2 に x - y 平面上での要素分割図を示す。基本的に構造格子を用い、物体周囲にのみ非構造格子を用いてモデル化している。

2.2 粒子追跡法

(a) 内挿補間関数

本解析に用いている解析メッシュには、構造格子と非構造格子が混在している。そのため、内挿補間関数には、重み付き平均法を用い、式(3)、(4)で表される。

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i z_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad \cdots (3)$$

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2}} \quad \cdots (4)$$

キーワード：角柱、粒子追跡法

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel.03-3817-1816

fax.03-3817-1803

ここで、 z_p は内挿の対象となる値、 z_i は内挿に用いるデータ、 n は内挿に用いるデータ数、 ω_i は各データに対する重みを表す。

(b) 粒子の流入位置および幅

粒子追跡法の計算量は膨大なものとなるため、粒子の流入位置を角柱に近づけることが必要となる。しかし、角柱周りの流れは、角柱後方にてカルマン渦が発生し上下の対象性が崩れる。そして、流体の連行性により角柱前方においても流れの対称性がわずかに崩れている。そのため、本論文では、図-2 に示すように、角柱前方より 1D と 7D の位置に粒子を流入し、流入位置による変化を検討する。また、角柱と直交する方向の流入幅を 3D と 1D についての比較も行う。表-1 には、本論文で用いる粒子の流入パターンを示す。

3. 可視化結果

3.1 再現性

図-3 に渦度分布図を示し、図-4(a), (b) に流入位置が角柱前方 1D と 7D による粒子追跡を行った結果を示す。図-3 と図-4(a), (b) を比較すると、流入位置 1D と 7D の両者とも渦の位置や大きさは図-3 に示す渦度とほぼ一致し、十分に非定常な流れを再現できていると考えられる。

3.2 流入位置に関して

図-4(a), (b) の 2 つの結果を比較すると、両者にわずかに違いが観察される。例えば、上側から流入された黒い粒子の剥離の様子などに相違があるように観察される。これは、流入と直交方向の流入位置により色分けを行っている。そ

のため、図-4(a), (b) では、流入位置が異なることで見た目上で相違があるように観られると考えられる。

これより、流入方向の流入位置は角柱前方に近づけることが可能であると考えられる。また、本論文では、角柱前方 1D より流入しているが、さらに近づけることが可能であると考えられ、さらに検討することが必要である。

3.3 流入幅に関して

図-4(c) に角柱前方 1D より流入し、流入幅を 1D に変化させた結果を示す。図-4(b), (c) を比較すると、図-4(c) では渦の大きさがわずかに小さいことが観察される。これは、巻き込み渦の成長過程において、渦の周辺の流れを巻き込みながら成長していくため、流入幅を狭くしたことで周辺の粒子を不十分になったためと考えられる。しかし、余分な粒子を排除したことで、渦の位置や成長過程は非常に把握しやすいと言える。また、流入幅の調整には、角柱の辺長比毎に渦の大きさが異なるため、辺長比毎に最適な流入幅の設定が必要であると考えられる。

4. おわりに

本論文では、流入位置と幅を変化させ、粒子追跡法により可視化を行った。得られた知見を次に示す。

- (1) 本論文での可視化結果より、粒子追跡法による角柱まわりの流れの可視化は、渦の位置や大きさをほぼ正確に捉えることが出来、有効な方法であると考えられる。

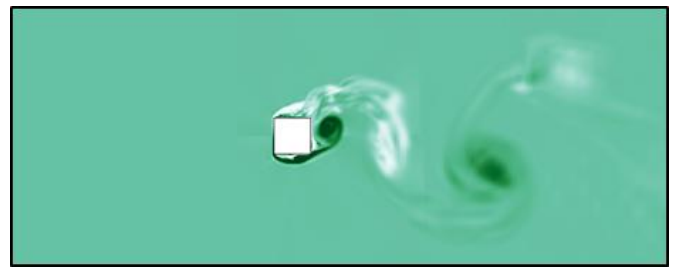
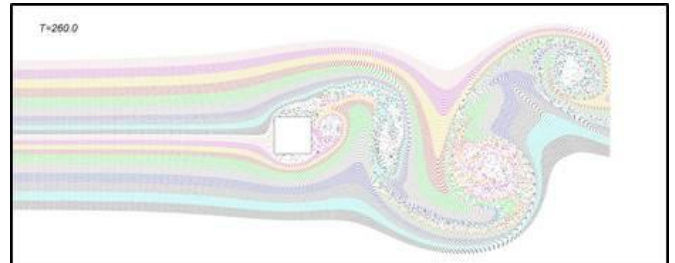
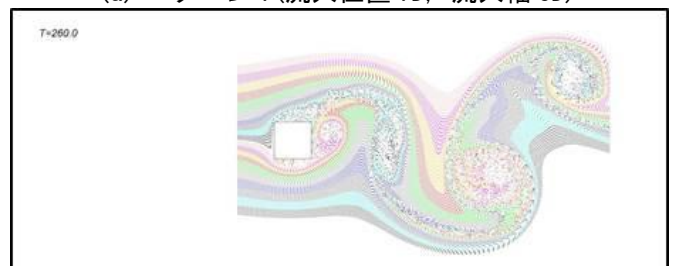


図-3 渦度分布



(a) パターン 1 (流入位置 7D, 流入幅 3D)



(b) パターン 2 (流入位置 1D, 流入幅 3D)



(c) パターン 3 (流入位置 1D, 流入幅 1D)

図-4 粒子追跡法による可視化

- (2) 本論文では、最も角柱に近い場合で、角柱前方 1D より流入を行った。流入位置は、さらに近づけることが可能であると考えられ、さらに検討が必要である。
- (3) 流入幅を必要最低限に抑え、余分な粒子を除外することで、巻き込み渦の成長過程を把握しやすくなる考えられる。しかし、角柱の辺長比により渦の大きさが異なるため、辺長比毎の流入幅の設定が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 仮想粒子密度とボリュームレンダリングによる流れの可視化
http://www2.nagare.or.jp/mm/98/sirayama/index_ja.htm
- 2) 丸岡晃, 太田真二, 平野廣和, 川原陸人: 同時補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮性流れの解析, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.383-394, 1997.