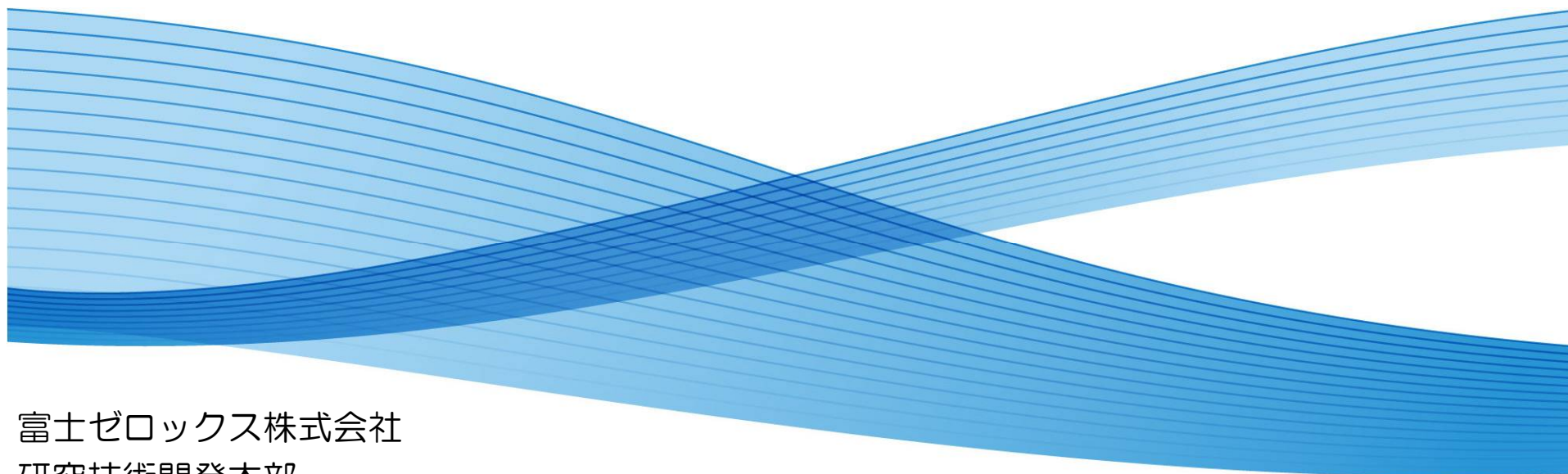


非圧縮性流れに関するOpenFOAM®検証

2013年6月21日 OpenCAEWorkshop 2013



富士ゼロックス株式会社

研究技術開発本部

基盤技術研究所

信頼性メディア解析G 森 一浩 岡本 直樹

*OpenFOAMはOpenCFD社の登録商標です。

1. 概要

背景

1997年～2012年（CFD関連）

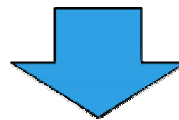
- ・ 解析規模 15年で1500倍（構造系），15年で250倍（非構造系）．
- ・ HWコスト 20年で1/325,（メモリー400倍，CPU数12倍）．
- ・ SWコスト 15年で1.5倍

課題

- ・ 大規模化 or 複雑化し，並列化して解析時間の短縮が必須．
- ・ 市販ソフトウェアだと，4並列程度の解析しかできない．

対策

- ・ オープンソースソフトウェア or 内製ソフトウェアの利用．



代表的オープンソースソフトウェアOpenFOAMの現状把握。
（文献値やANSYS Fluent®による結果と比較）

*ANSYS FluentはANSYS社の登録商標です。

2.1. OpenFOAM検証(ANSYS Fluent比較)

1. 球まわりの非定常流れ解析検証

- ・ 抵抗係数 (C_d 値) と流れの振動周期 T の比較.

2. メッシュデータ変換検証

- ・ ANSYS Fluentのテトラ&ポリヘドラメッシュのOpenFOAMへの読み込み検証 (読み込みとメッシュの品質チェックコマンド動作).

3. 流量比較検証

- ・ 定常解析 (モジュールsimpleFoam).
- ・ ファン特性を与えて, 得られた流量を比較検証 (誤差10%目標).

4. 特定断面速度ベクトル比較

- ・ テトラ要素, 定常解析 (モジュールsimpleFoam).
- ・ 定性的な比較検討 (流れ方&流速の大きな位置など).
- ・ 流速最大値比較 (誤差10%目標).

5. 機能比較検証

- ・ 粒子追跡機能比較.
- ・ ポスト処理機能比較.

乱流モデル, 離散化手法, 行列解法など非圧縮性流れ解析に重要な項目は含まれている.

2.2.1. 球をすぎる流れ

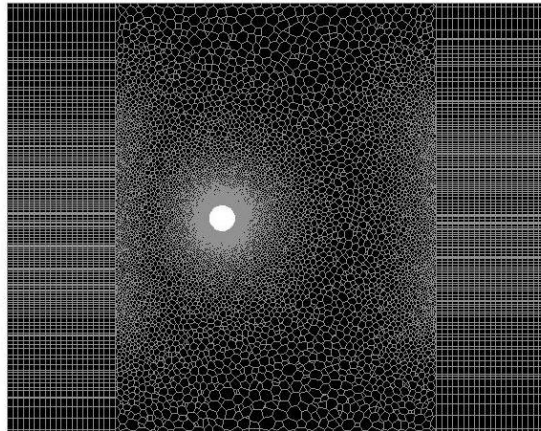
参考文献

- 1) D. A. Jones and D. B. Clarke, “Simulation of Flow Past a Sphere using the Fluent Code” , Maritime Platforms Division, DSTO-TR-2232, Australia, 2008.
- 2) D. B. Schles, “Evaluation of the Aerodynamic Differences of a Balloon Shape and a Sphere Using Computational Fluid Dynamic Modeling in Fluent” , All Graduate Theses and Dissertations, Paper 872, Utah State University, 2011.
- 3) R. Clift, J. R. Grace and K. D. Squires, “ Bubbles, Drops and Particles” , *Academic Press*, NewYork, 1978.
- 4) M.Taneda and K. Itakura, “A precise computation of drag coefficients of a sphere” , *Int. J. Comput. Fluid Dynam.*, **9**, 303, 1998.
- 5) R. Mittal, “Planar Symmetry in the Unsteady Wake of a Sphere” , *AIAA Journal.*, **37**,388-390, 1999.
- 6) B. P. Le Clair, A. E. Hamielec and H. R. Pruppacher, “A numerical study of the drag on a sphere at low and intermediate Renolds numbers” , *J. Atmos. Aci.*, **27**, 308-315, 1970.
- 7) T. A. Johnson and V. C. Patel, “ Flow past a sphere up to a Reynolds number of 300” , *J. Fluid Mech.*, **378**, 19-70, 1999.

2.2.2. 球をすぎる流れ (Re=300&500)

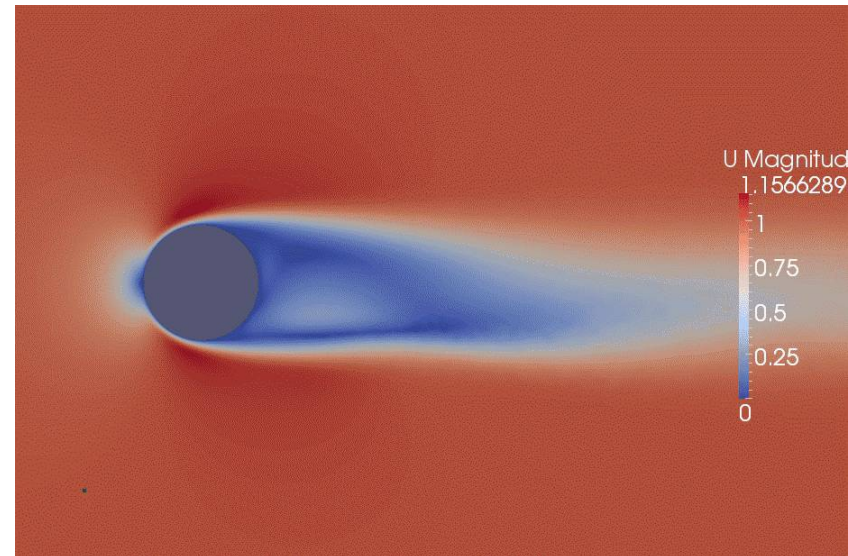
1340734ポリヘドラ要素

Skew 1.709

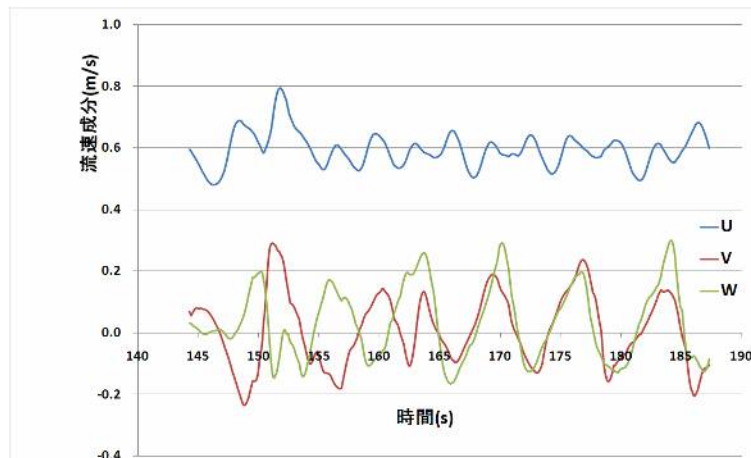
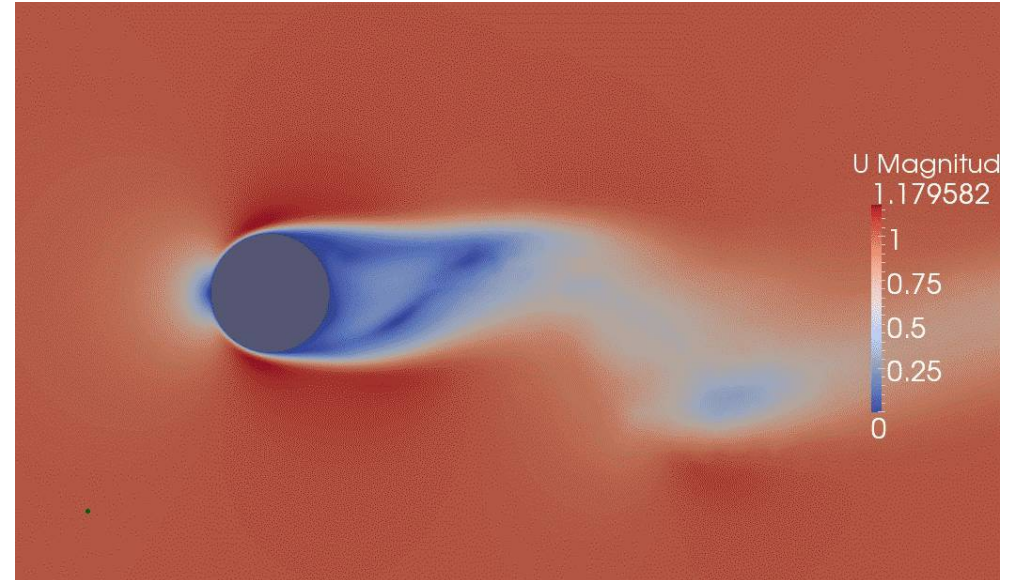


解析メッシュ

Re=300



Re=500



流速各成分の時間変動-位置 (3.5 0 0) -

流速コンターの時間変化-Side View-

2.2.3. 球をすぎる流れ($Re=10^4$)

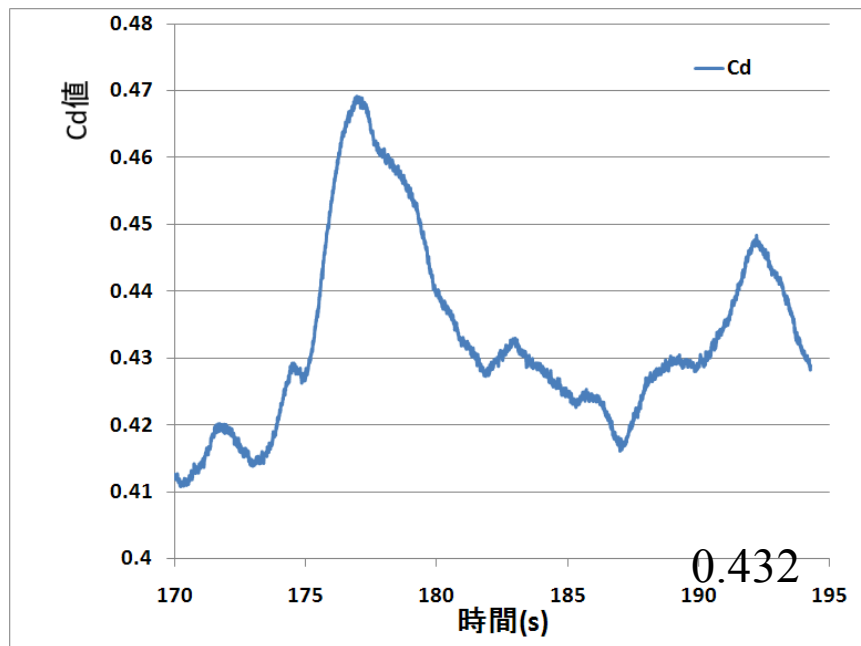
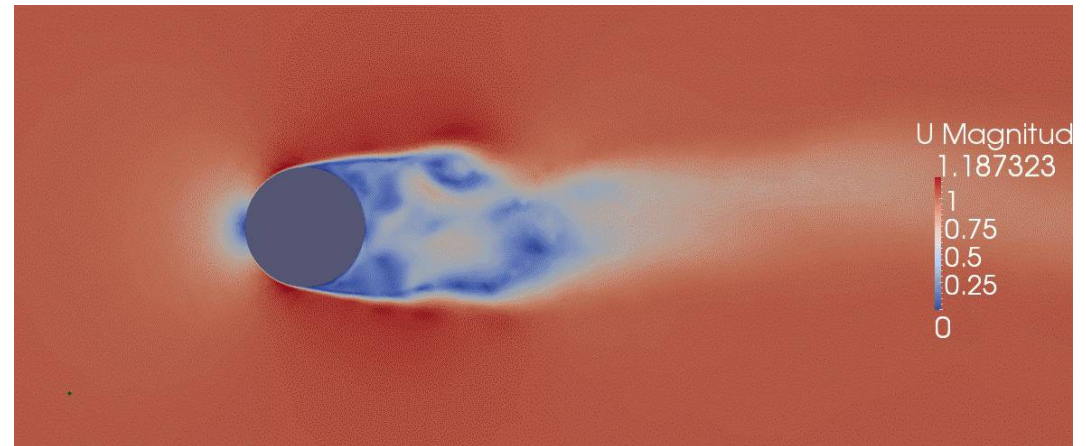
$C_d=0.387$ (ANSYS Fluent)

$C_d=0.393\sim0.438$ (文献1)

oneEqEddyモデル (LES)

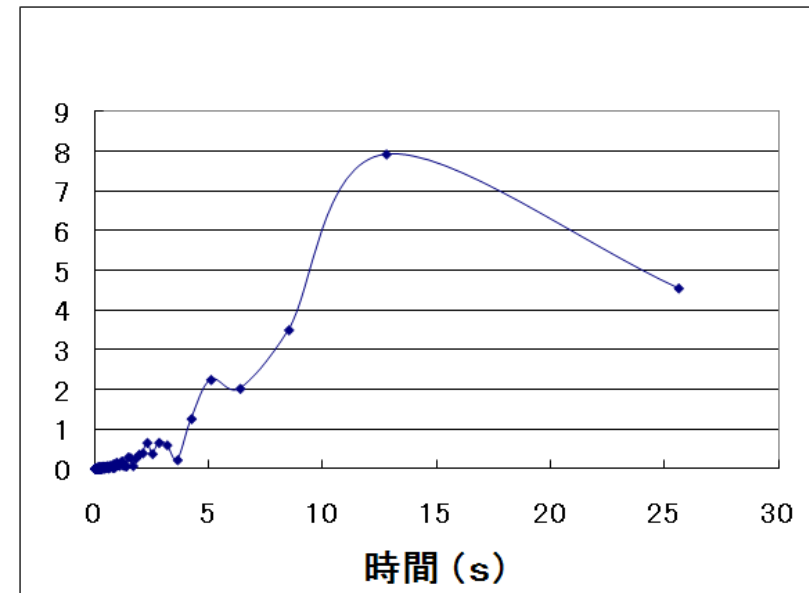
時間刻み 0.0005秒 (Core i7)

6並列で1サイクル4秒



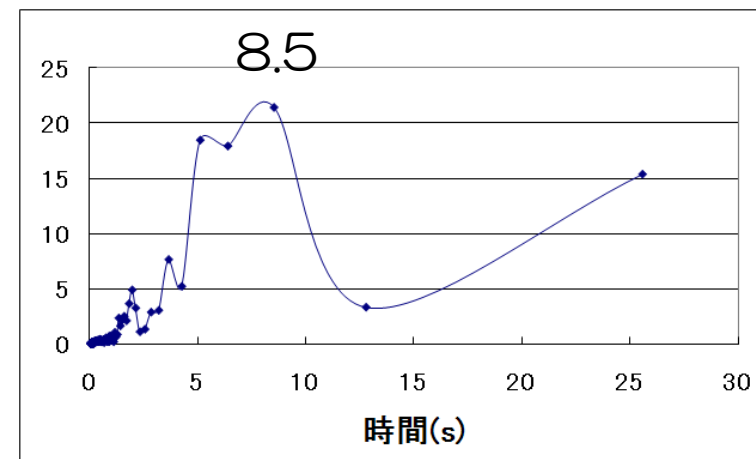
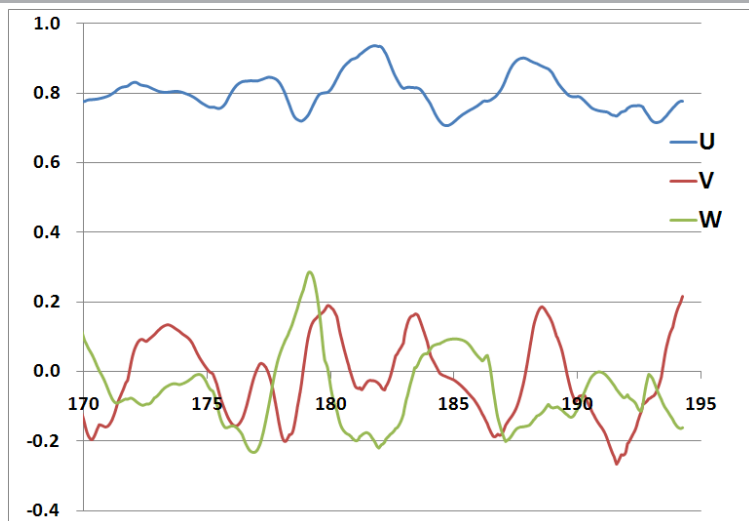
OpenFOAM2.1.1 による C_d 値

流速コンターの時間変化-Side View-



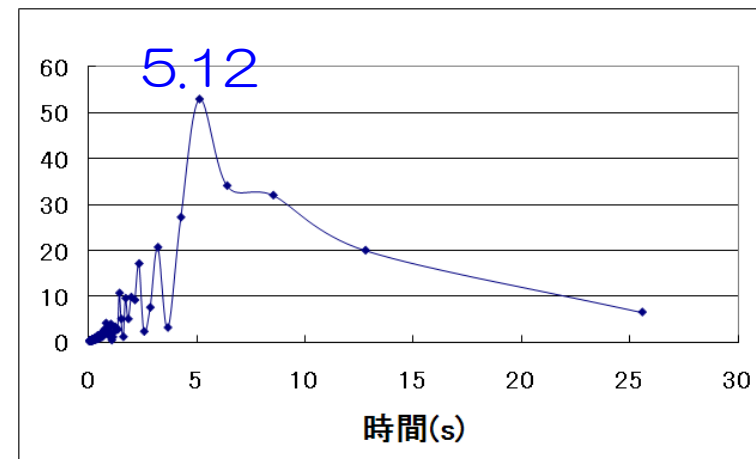
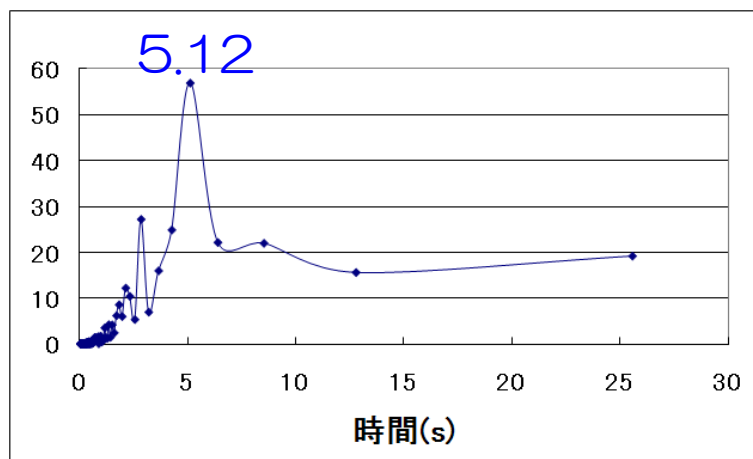
OpenFOAM2.1.1による C_d 値のFFT結果

2.2.4. 球をすぎる流れ($Re=10^4$)



流速各成分の時間変動-位置 (3.5 0 0)

OpenFOAM2.1.1による流速x成分のFFT



OpenFOAM2.1.1による流速y成分のFFT

OpenFOAM2.1.1による流速z成分のFFT

2.2.5. C_d 値と振動周期 T のまとめ

OpenFOAM2.1.x による C_d 値および周期 T の比較.

Re	$C_d(OF)^1$	$C_d(FL)^2$	$C_d(C/E)^3$	$T(OF)$	$T(FL)^2$	$T(C/E)^3$
100	1.091	1.087	1.087-1.096	-	-	-
300	0.658	0.661	0.656-0.671	8.19	7.52	7.30-7.46
500	0.565	—	—	3.4,8.2,6.8(u, v, w)	—	5.98
10^4	0.457*4	0.387	0.393-0.438	5.12(u, v), 5.85(w)	5.236	5.128-5.525
	0.432*5	0.444*6	↑	8.5(u), 5.12(v, w)	↑	↑
10^6	0.141*4	0.104	0.080-0.142	10.6, 6.6, 10.6(u, v, w)	20.84	0.77-20

注

*1 OpenFOAMによる解析値. $Re=100$ 以外は平均値.

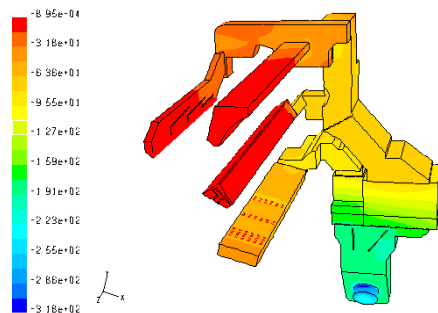
*2 ANSYS Fluentによる解析値.

*3 C/E : 文献1-7による解析値あるいは実験値.

*4 Spalart-AllmarasDDESモデル, *5 oneEqEddyモデル.

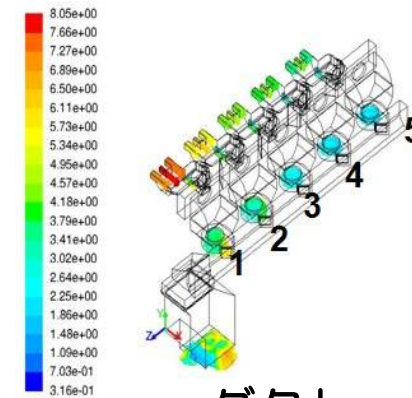
*6 文献2.

2.3. OpenFOAMへのメッシュデータ変換検証



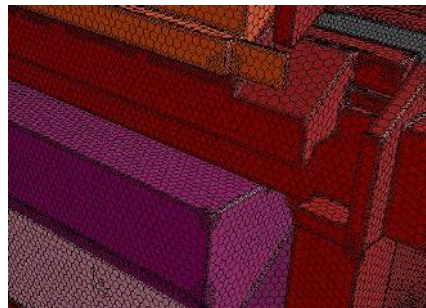
ダクト

テトラ, ポリヘドラ, 六面体 ○

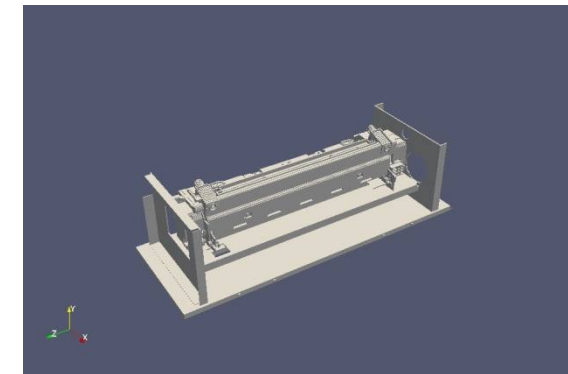


ダクト

テトラ ○



※ポリヘドラ（多面体）要素



定着器

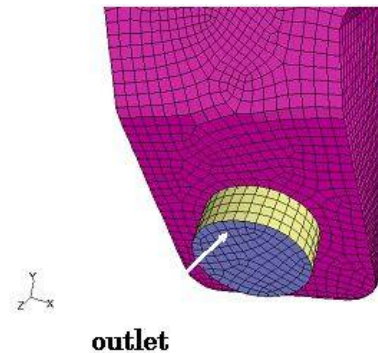
六面体 ○

© ANSYS FluentモデルのOpenFOAMへの変換（読み込み）は問題ない。

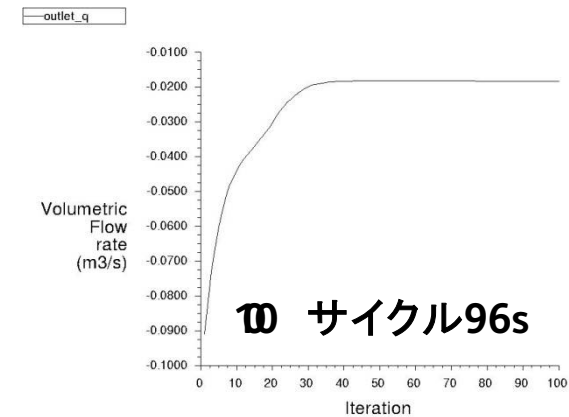
2.4.1. ダクト流量



ダクト形状



Outlet 付近拡大図



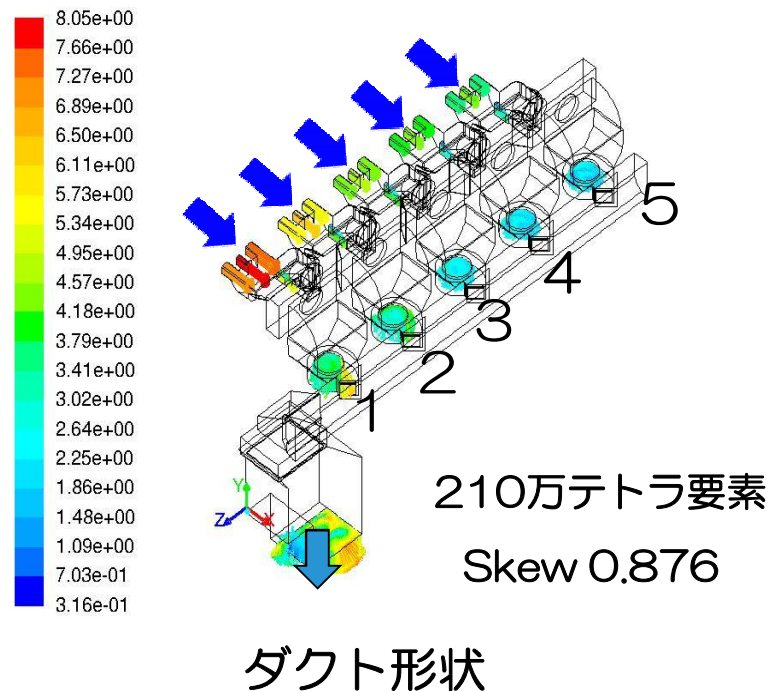
Outlet 流量時系列
(ANSYS Fluent)

ベンチマーク追試結果

- 排気ファン境界条件を与えて, outlet 流量を比較した.
 - ANSYS Fluent (富士ゼロックス) : 0.0184 m³/s(層流)
 - OpenFOAM (富士ゼロックス) : 0.0183 m³/s(層流)

- 流量ANSYS Fluent比-0.5%.
- △ 解析時間ANSYS Fluent比3.6倍 (Ver 2.1.0) .
- × 誤差60% (Ver.2.1.1) .

2.4.2. ダクト流量



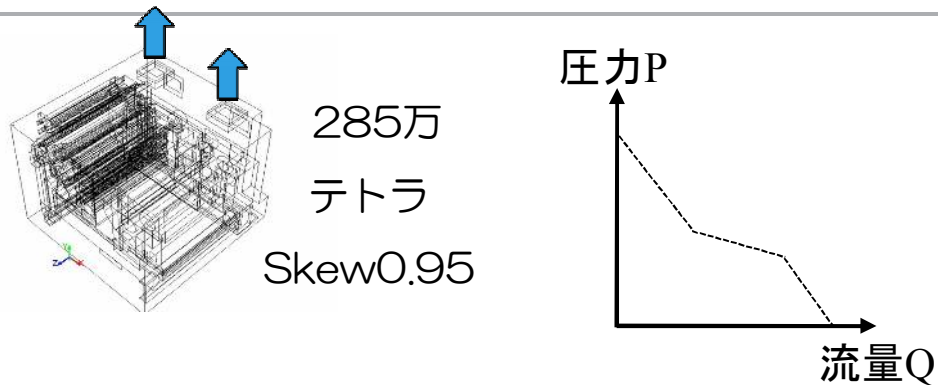
排気ファン条件を与えて全流量を比較.

- $0.0063\text{m}^3/\text{s}$ (ANSYS Fluent14)
- $0.0062\text{m}^3/\text{s}$ (OpenFOAM 2.1.0)
- $0.0069\text{m}^3/\text{s}$ (OpenFOAM 2.1.1)

× 内部に5つのファン条件(P-Q特性)を設定したがファンの前後で圧力変化が生じない. ⇒ 内部ファンの設定が確認できていない.

× Ver2.1.0と2.1.1で答えが異なる (∵プログラムが異なる).

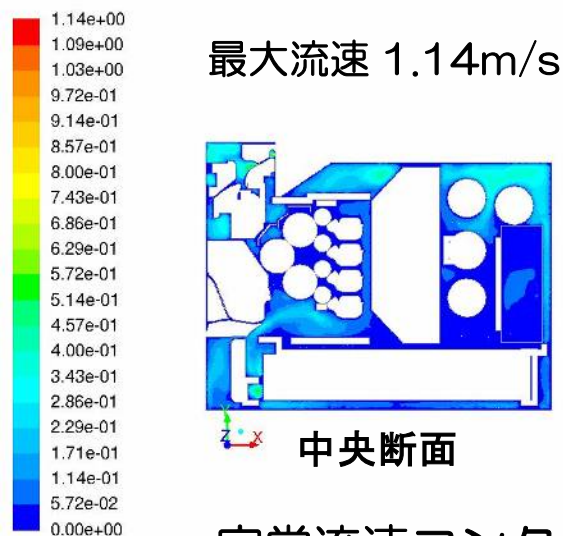
2.5. プリンター簡易モデル流れ解析



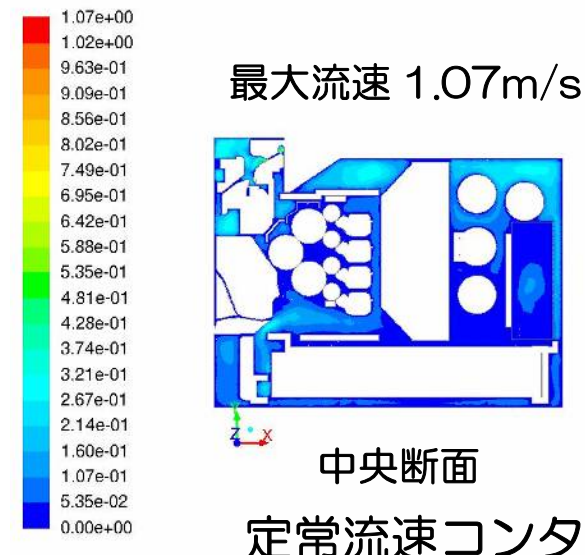
ファン流量比較 (m³/s)

	OpenFOAM 2.1.0	ANSYS Fluent 14	誤差
右上ファン流量	0.01425	0.01204	18.4%
左上ファン流量	0.01412	0.01200	17.7%

ファン特性を与えて流量を求める。



定常流速コンター
(OpenFOAM2.1.0)



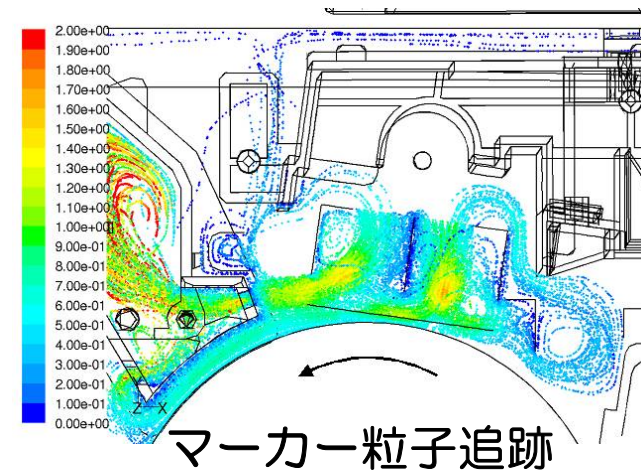
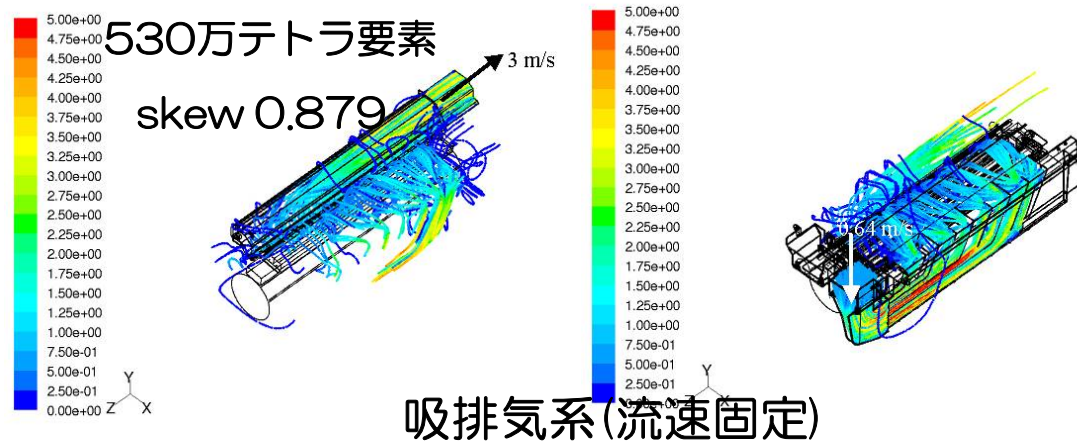
定常流速コンター
(ANSYS Fluent14)

誤差
6.5%

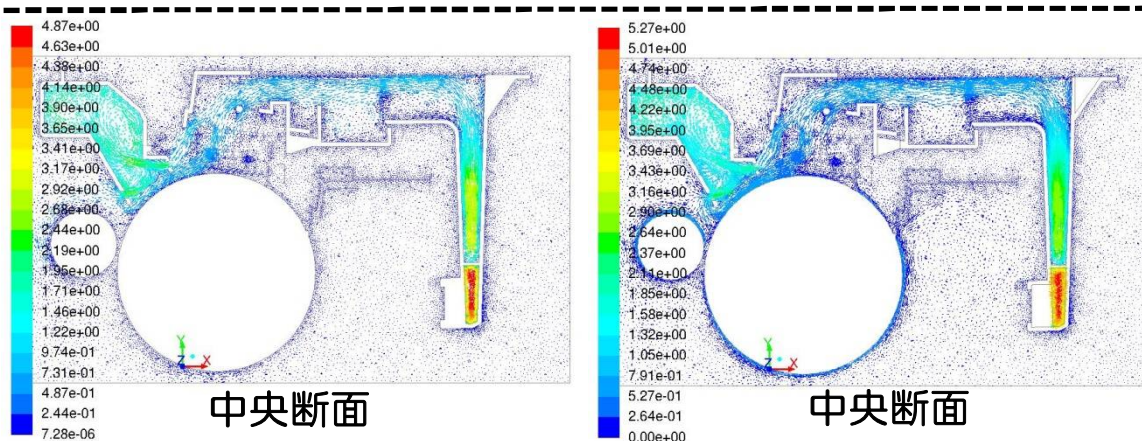
○ 定性的な評価には使えそう (Ver 2.1.0) .
× Ver 2.1.1では収束しなかった。

2.6.1. 帯電器まわり流れ解析

2004年ころ, ANSYS Fluentで実施.



ANSYS Fluent による解析

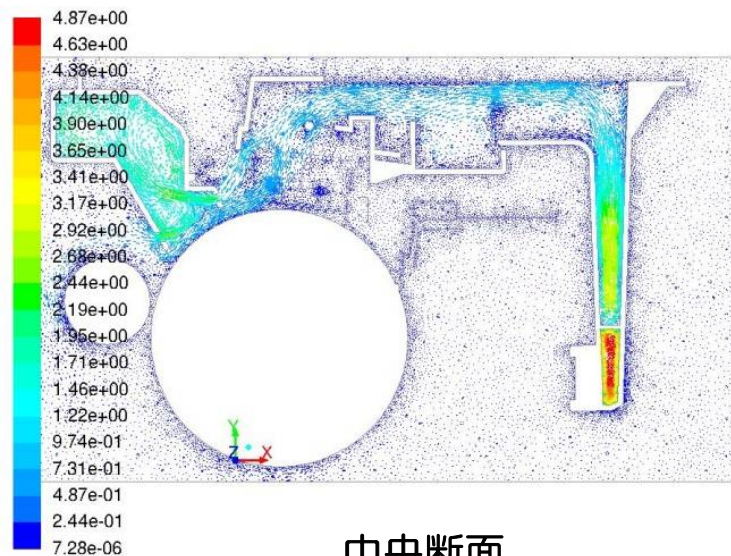


K. Mori, H. Okamoto, M. Shiraishi and A. Nishimura, "Computational Fluid Dynamics of Ionic Wind in a Corona Device in Electrophotography-(2)", J. Imaging. Sci. Technol., **48**, 0405021-040502.8, 2009.

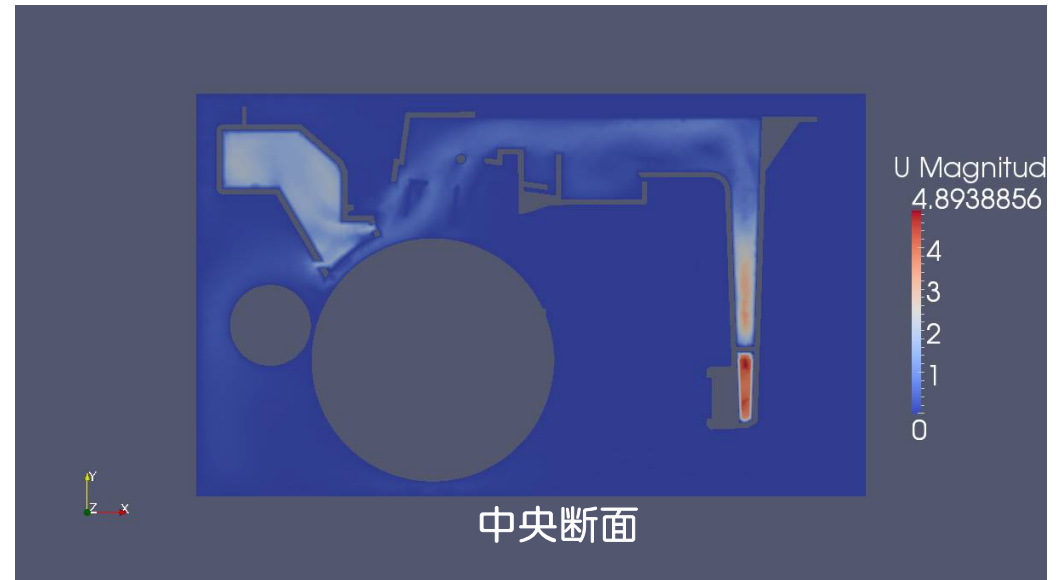
定常流速ベクトル
(OpenFOAM2.1.1)

定常流速ベクトル
(ANSYS Fluent14)

2.6.2. 帯電器まわり流れ解析



ANSYS Fluentによる速度コンター表示

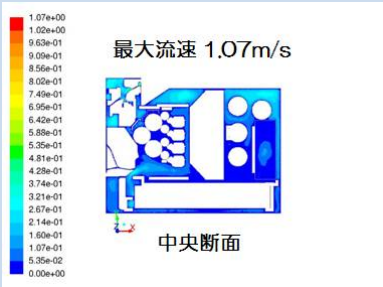
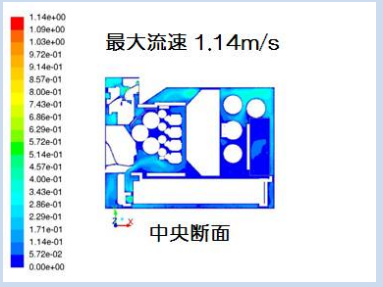
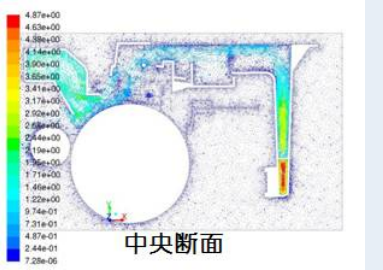
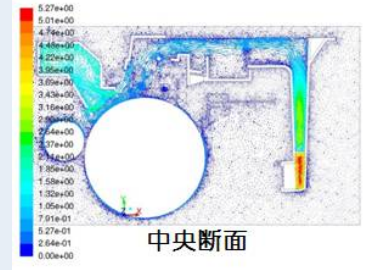


OpenFoamによる速度コンター表示

- 最大流速誤差 -7.6%
- 定性的な評価には使えそう.
- △ 圧力損失が確認できていない.
- △ ポスト処理.
 - ・ マーカー粒子追跡.
 - ・ 平均値計算機能.
 - ・ 解析モデル移動速度.
 - ・ 表示速度.

3.1. OpenFOAM個別検証まとめ

個別検証まとめ

	OpenFOAM	ANSYS Fluent	特記事項
球まわり	抵抗係数や周期が精度良く解析できた。	—	ポリヘドラ, pisoFoam.
ダクト	内部ファンの設定が確認できてない。	内部ファンの設定ができる。	排気ファン設定では同じ傾向。
プリンター 簡易 全体モデル	断面流速コンター 	断面流速コンター 	- V2.1.1では解析できていない。 - 定性的評価に使える。
帯電器 まわり	断面流速ベクトル 	断面流速ベクトル 	定性的な評価に使用できる。

3.2. OpenFOAM検証結果まとめ

検証まとめ

	解析モデル	特記事項
メッシュ 変換	・全モデル	・ ANSYS Fluentテトラ&ポリヘドラモデル 100%変換できた(10/10).
流量比較	・ダクト ・プリンター全体簡易	・ 定常解析 (simpleFoam). ・ ダクト2%以内, 簡易プリンター 20%(V2.1.0). ・ 内部ファンが確認できていない. ・ V2.1.1では, 誤差約60%.
特定断面流 速ベクトル	・プリンター全体簡易 ・帯電器まわり	・ テトラ要素, 定常解析 (モジュールsimpleFoam). ・ 最大流速誤差 6.5%&7.6%. ・ 定性的に一致.
ポスト処理	—	・ 動作が遅い. ・ 操作が複雑. ・ 結果処理ソフトの導入が必要.

■ 非定常解析：層流&LES解析ともに良好な結果が得られた。

■ 定常解析：テトラ要素ではANSYS Fluent同等の結果が得られた（V2.1.0）。

4. 全体のまとめ

1. 球まわり非定常解析では良好な結果が得られた.
 - ・ LES解析ができるようになった.
2. 定常解析では概ね良好な結果が得られた.
 - ・ 使いこなすにはコストや時間が必要.
3. 内部ファン設定が確認できていない.
4. バージョンによって解が異なる場合がある.
 - ・ 流れの解析ごとにバージョン管理が必要.
5. 結果表示が遅く, 操作も複雑.
 - ・ ポスト処理専用ソフトが必要.
6. ANSYS Fluentなどの機能の一部でも代替できれば, コスト削減効果大.

