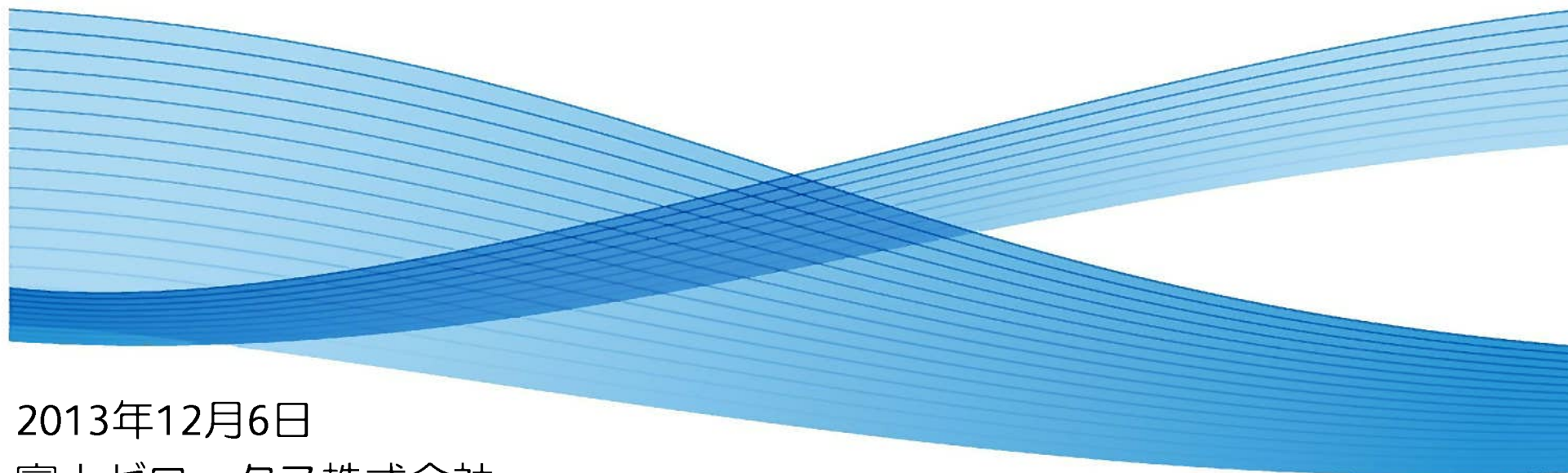


OPENFOAM® の熱設計機能検証 ～ simpleFoam による P-Q特性 ～

OPENCAE Symposium 2013



2013年12月6日

富士ゼロックス株式会社
プロセスイノベーション部
森 一浩

*OPENFOAM®はOPENCFD社の登録商標です。



0. 概要と目次

熱設計機能検証を行っています。その第一段階として、ファンのP-Q特性に関して検証を行いましたので、発表いたします。

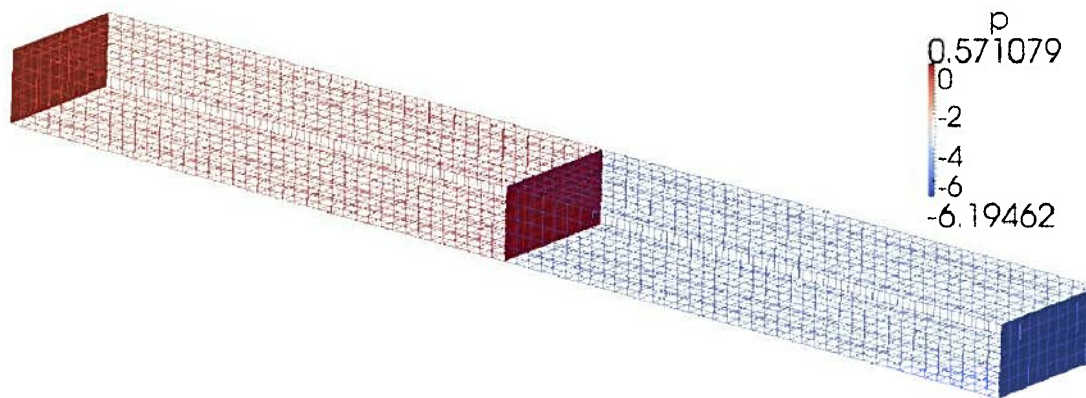
また、本検証では simpleFOAM を用いますので、非圧縮性流れの定常解析の検証も兼ねます。

目次

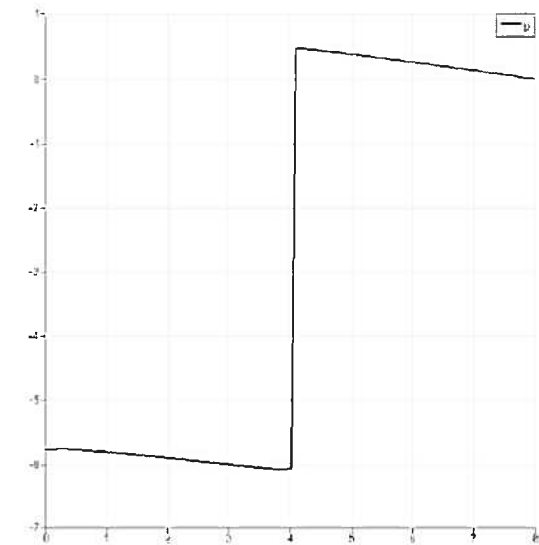
1. P-Q 特性とチュートリアル TjunctionFan
2. 比較事例（実用的な解析モデル4例）
3. OPENFOAM® 検証結果

1. P-Q 特性とチュートリアル TjunctionFan

1.1. ファンP-Q特性



ダクトモデルにおけるファンpatch

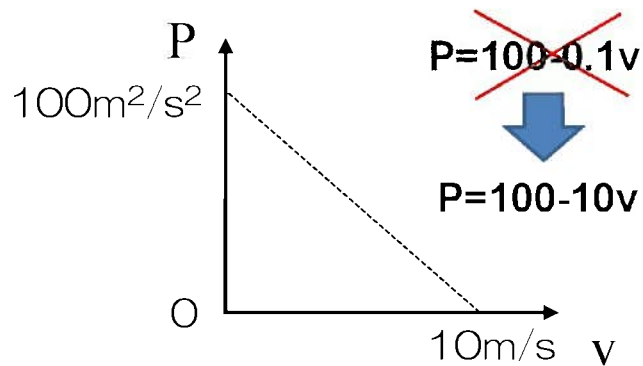


ファンpatch前後の圧力上昇

- モデル内部のPatchに与える境界条件として定義.
- 電子機器でファンを使っているものにファンを実際にモデル化する代わりにパッチ面の境界条件として定義できる.
- fanとしてPatch前後で圧力上昇させる.

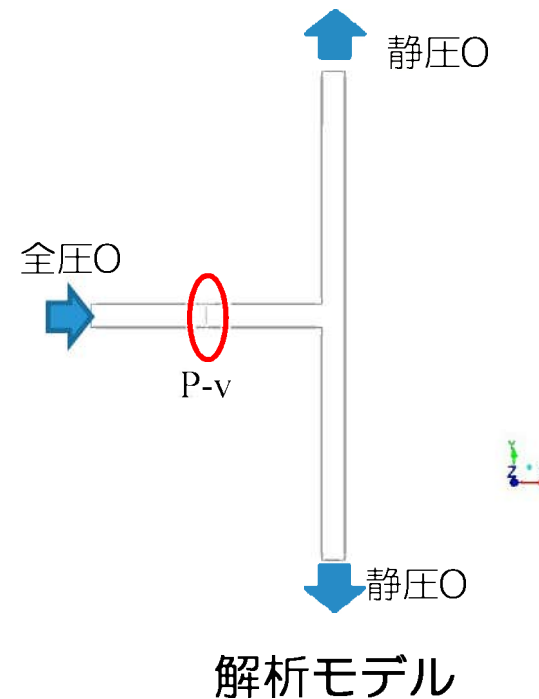
1.2. TjunctionFan

- TjunctionFanの形状を利用.
- 密度 1kg/m^3 , 粘性係数 $0.001\text{kg/m}\cdot\text{s}$ (層流定常解析).
- 入口全圧0規定, 出口静圧0規定.
- P-Q (P-v) 特性を与えて流量を求める.



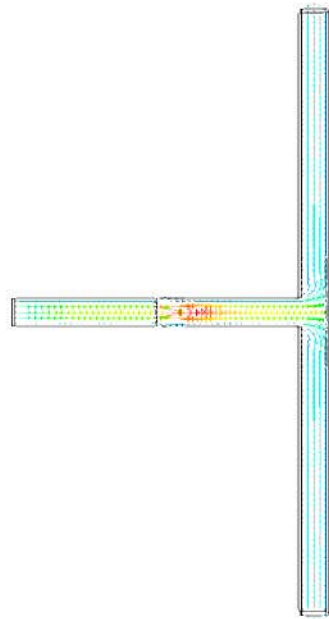
P-v特性

例題設定は実際にありえないような
数字設定のため、現実的な値に修正



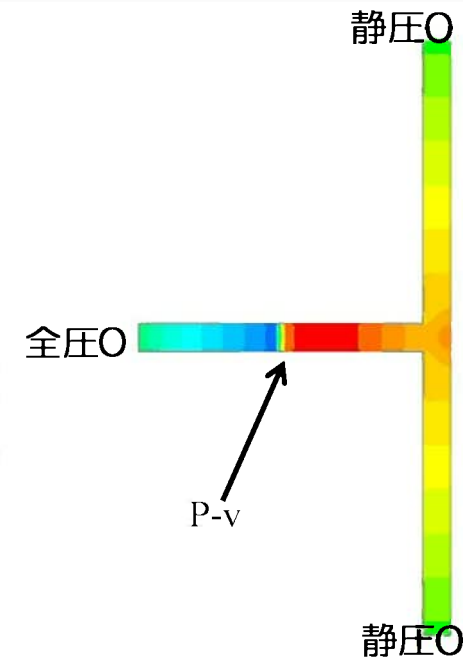
1.3. TjunctionFan(商用ソフト&simple法)

5.91e+00
5.61e+00
5.32e+00
5.03e+00
4.74e+00
4.44e+00
4.15e+00
3.86e+00
3.56e+00
3.27e+00
2.98e+00
2.69e+00
2.39e+00
2.10e+00
1.81e+00
1.51e+00
1.22e+00
9.27e-01
6.34e-01
3.41e-01
4.82e-02



速度ベクトル表示

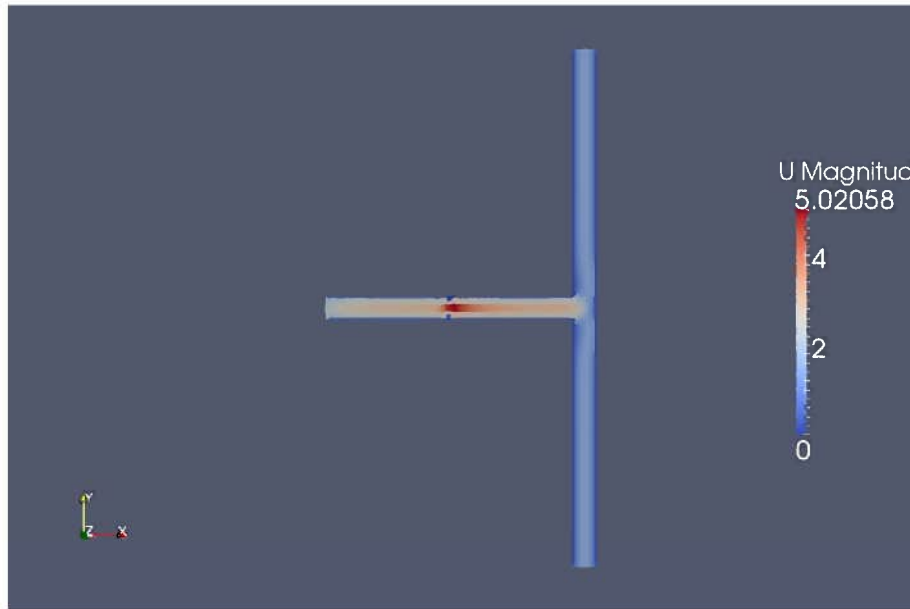
1.95e+01
1.76e+01
1.57e+01
1.38e+01
1.19e+01
1.00e+01
8.16e+00
6.27e+00
4.38e+00
2.49e+00
6.07e-01
-1.28e+00
-3.17e+00
-5.06e+00
-6.94e+00
-8.83e+00
-1.07e+01
-1.26e+01
-1.45e+01
-1.64e+01
-1.83e+01



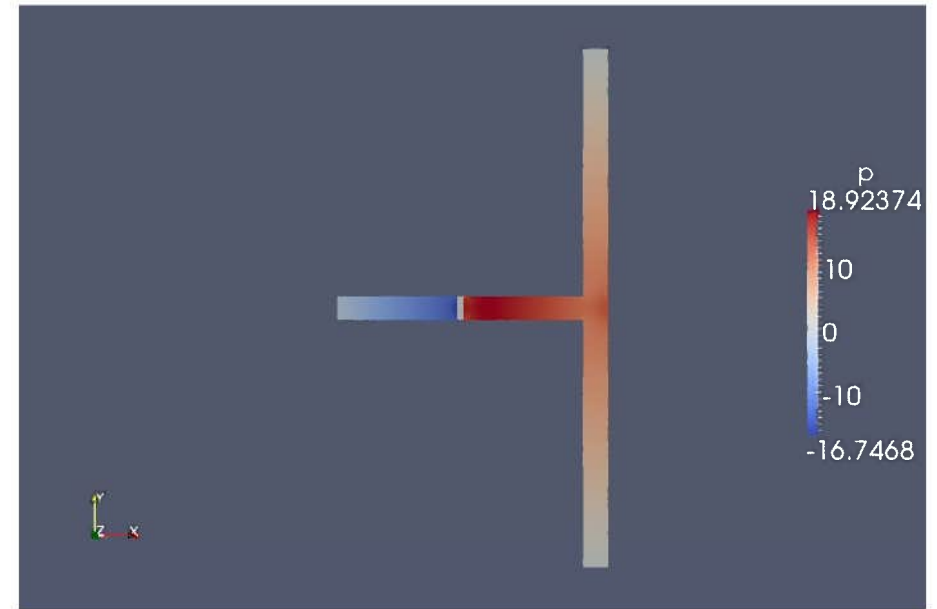
圧力コンター表示

- simple法による定常解析（緩和係数:U 0.5, p 0.3）.
- P-v 特性設定のパッチの下流で圧力上昇.
- 流入量 7.83×10^{-4} kg/s.

1.4. TjunctionFan(OPENFOAM®&simple法)



速度コンター表示



圧力コンター表示

- simpleによる定常解析（緩和係数:U 0.5, p 0.3）。
- P-v 特性設定のパッチの下流で圧力上昇。
- 流入量 7.30×10^{-4} kg/s.

1.5. TjunctionFanまとめ

- チュートリアルTjunctionFanを改良して，P-Q特性の検証を行い，商用ソフト結果と比較して妥当な結果が得られた.
- ファンの（圧力上昇の）方向が指定できない.
- 旋回力は与えられない（与えることは可能，レポートあり）.
- 以下，実用的なモデルで検証を示す（テトラ要素，ポリヘド
ラ要素，複数ファン）.

比較結果（P-Q特性基本機能）

	OPENFOAM®2.2.1	商用ソフト
P-Q特性	○	○
ファン方向	×	○
旋回力	×	○

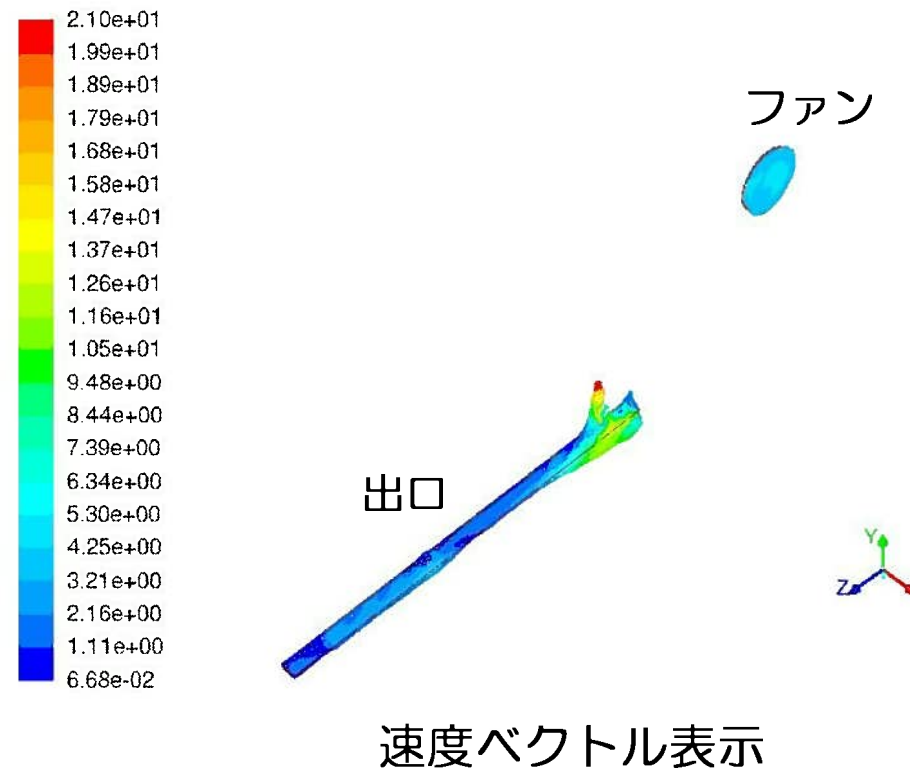
2. 比較事例（実用的な解析モデル4例）

2.0. 解析条件等（以下の比較ケース）

- 4 ケースを 商用ソフト と比較.
- 商用ソフトファイルを コマンド * * * MeshToFOAM® で変換.
- 密度 1 kg/m^3 , 粘性係数 $1.502 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ （層流定常解析）.
- 入口全圧 0 規定, 出口静圧 0 規定.
- P-Q（P-v）特性を与えて流量を求める.
- tutorials/incompressible/simpleFOAM®/pitzDaily ベース.
- 圧力はAMG 使用.
- simple 10回.
- 緩和係数 : U 0.1~0.2.
- 緩和係数 : p 0.2~0.3.



2.1.1. ファンP-Q特性比較事例1（ファン1個，ポリヘドラ）



- ファン部に圧力上昇を定義する.
- 定常解析を実行し，流量を求める.

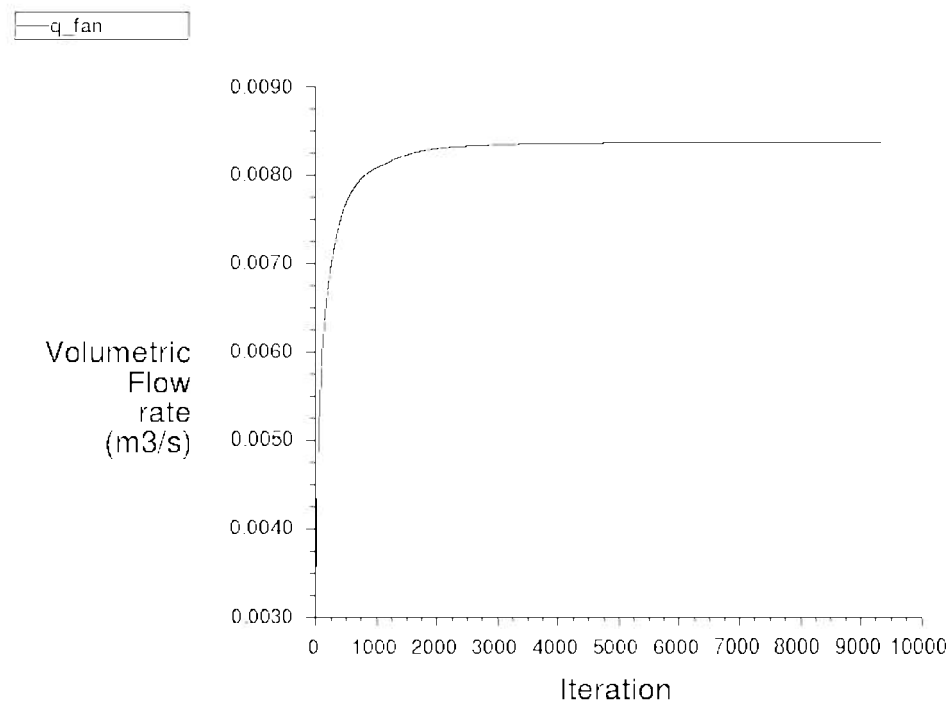
2.1.2. ファンP-Q特性比較事例1-1（ファン1個，ポリヘドラ）

比較結果（事例1-1）

	OPENFOAM®2.2.1	商用ソフト
メッシュ	⇒	ポリヘドラ
メッシュ数	⇒	2519803
最大Skewness	⇒	2.97
最大Aspect比	⇒	12.3
非直交性角度	⇒	79.3 °
最大圧力	258 m ² /s ²	170 m ² /s ²
最小圧力	-474 m ² /s ²	-348 m ² /s ²
最大流速	58.10 m/s	22.07 m/s
流量	0.0079 kg/s	0.0083 kg/s

- 出口の逆流が不安定化.
- 出口の逆流の影響により最小圧力が増加.
- 出口境界を inletOutlet に変更したが，発散.

2.1.3. ファンP-Q特性比較事例1-1（ファン1個，ポリヘドラ）



出口流量変化（商用ソフト）

- 出口流量は定常（商用ソフト）。
- 出口の逆流の影響により流量が単調増加。
- 解析モデルの修正が必要。

2.1.4. ファンP-Q特性比較事例1-2（ファン1個，テトラ）

比較結果（事例1-2）

	OPENFOAM®2.2.1	商用ソフト
メッシュ	テトラ	ポリヘドラ
メッシュ数	9277756 （流体）	2519803
最大Skewness	1.66	2.97
最大Aspect比	20.5	12.3
非直交性角度	79.6 °	79.3 °
最大圧力	304 m²/s²	170 m ² /s ²
最小圧力	-618 m²/s²	-348 m ² /s ²
最大流速	70.66 m/s	22.07 m/s
流量	0.0076 kg/s	0.0083 kg/s

- 出口の逆流が不安定化.
- 出口の逆流の影響により最小圧力が増加.

2.2.1. ファンP-Q特性比較事例2（ファン2個，テトラ）



- ファン部に圧力上昇を定義する.
- 定常解析を実行し，流量を求める.

2.2.2. ファンP-Q特性比較事例2-1（ファン2個，テトラ）

比較結果（事例2-1）

	OPENFOAM®2.2.1	商用ソフト
メッシュ	⇒	テトラ&プリズム
メッシュ数	⇒	4377045
最大Skewness	⇒	1.55
最大Aspect比	⇒	15.27
非直交性角度	⇒	76.0°
最大圧力	39.2 m ² /s ²	36.2 m ² /s ²
最小圧力	-53.5 m ² /s ²	-15.1 m ² /s ²
最大流速	12.54 m/s	8.75 m/s
流量1	0.02270 kg/s	0.01627 kg/s
流量2	0.02333 kg/s	0.01658 kg/s

■ AMG法で解けない（圧力）， PCG法使用（圧力）。

■ 未収束。

2.2.3. ファンP-Q特性比較事例2-2（ファン2個，テトラ）

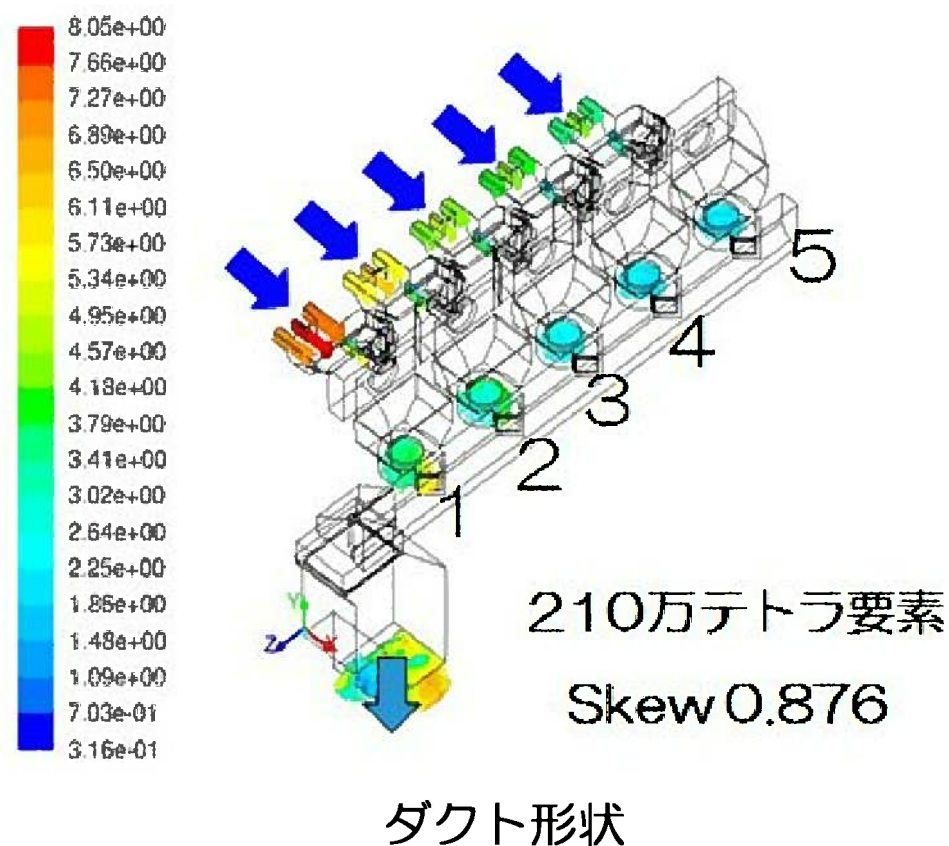
比較結果（事例2-2）

	OPENFOAM®2.2.1	商用ソフト
メッシュ	テトラ	テトラ&プリズム
メッシュ数	5681929	4377045
最大Skewness	1.55	1.55
最大Aspect比	15.27	15.27
非直交性角度	77.9°	76.0°
最大圧力	33.7 m ² /s ²	36.2 m ² /s ²
最小圧力	-17.1 m ² /s ²	-15.1 m ² /s ²
最大流速	7.53 m/s	8.75 m/s
流量1	0.01742 kg/s	0.01627 kg/s
流量2	0.01755 kg/s	0.01658 kg/s

■ AMG法（圧力），緩和係数:U 0.2, p 0.3.

■ 流量誤差 約8%.

2.3.1. ファンP-Q特性比較事例2-1（ファン5個，テトラ）

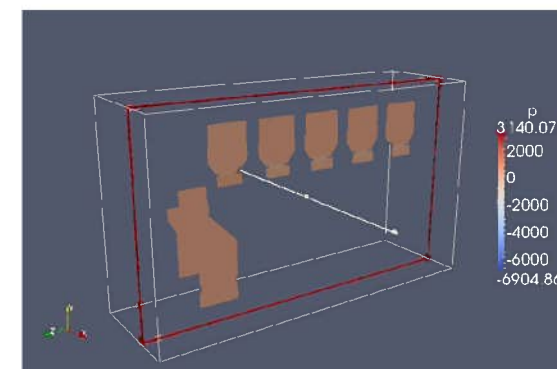


- ファン部に圧力上昇を定義する.
- 定常解析を実行し，流量を求める.

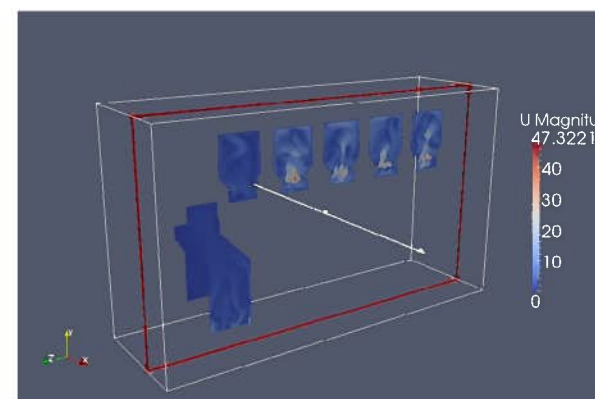
2.3.2. ファンP-Q特性比較事例2-1（ファン5個，テトラ）

比較結果（事例2-1）

	OPENFOAM®2.2.1	商用ソフト
メッシュ	⇒	テトラ
メッシュ数	⇒	2097822
最大Skewness	⇒	1.125
最大Aspect比	⇒	6.982
非直交性角度	⇒	65.4°
最大圧力	3140 m²/s²	246 m ² /s ²
最小圧力	-6904 m²/s²	-120 m ² /s ²
最大流速	47.3 m/s	21.3 m/s
全流量	0.0217 kg/s	0.0621 kg/s



圧力コンター表示

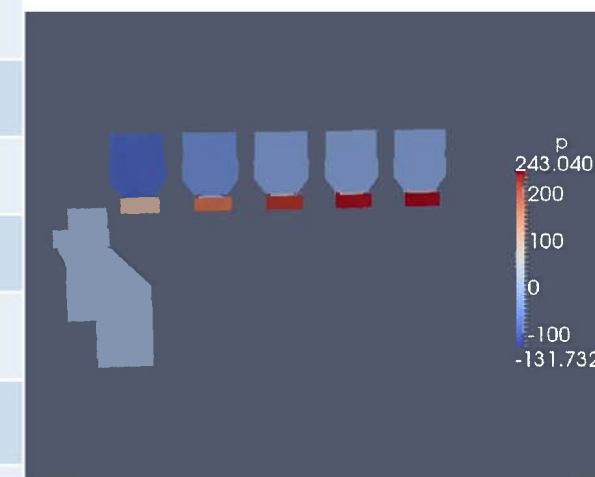


速度コンター表示

2.3.3. ファンP-Q特性比較事例2-2（ファン5個，テトラ）

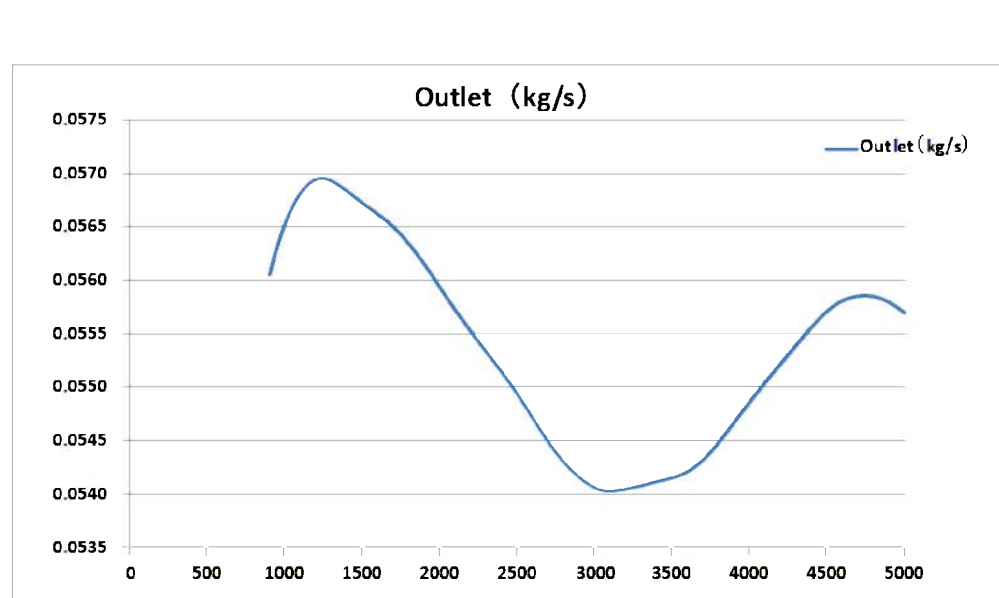
	OPENFOAM®2.2.1	商用ソフト
メッシュ	テトラ	テトラ
メッシュ数	3000503	2097822
Skewness	1.072	1.125
Aspect比	11.12	6.982
非直交性角度	66.7°	65.4°
最大圧力	245 m ² /s ²	241 m ² /s ²
最小圧力	-181 m ² /s ²	-157 m ² /s ²
最大流速	19.8 m/s	21.1 m/s
全流量	0.0540 kg/s	0.0558 kg/s
流量1	0.0154 kg/s (0.285)	0.0155 kg/s (0.278)
流量2	0.0118 kg/s (0.219)	0.0121 kg/s (0.217)
流量3	0.00976 kg/s (0.181)	0.0104 kg/s (0.186)
流量4	0.00872 kg/s (0.161)	0.00894 kg/s (0.160)
流量5	0.00837 kg/s (0.155)	0.00871 kg/s (0.156)

■ 出口の逆流の影響により流量は振動.



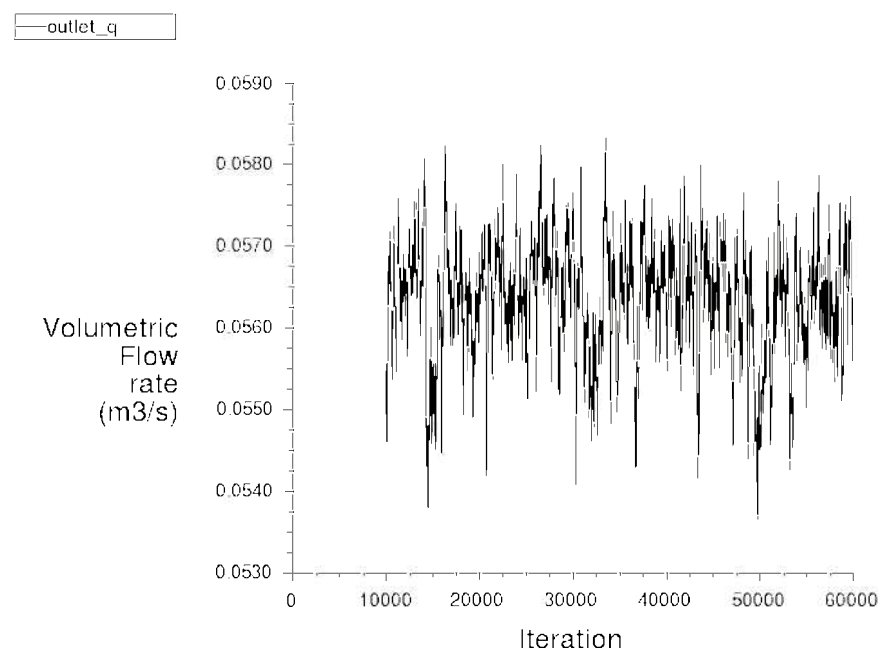
圧力コンター表示

2.3.4. ファンP-Q特性比較事例2-2（ファン5個，テトラ）



出口流量変化（OPENFOAM®）

0.0540 ~ 0.0570

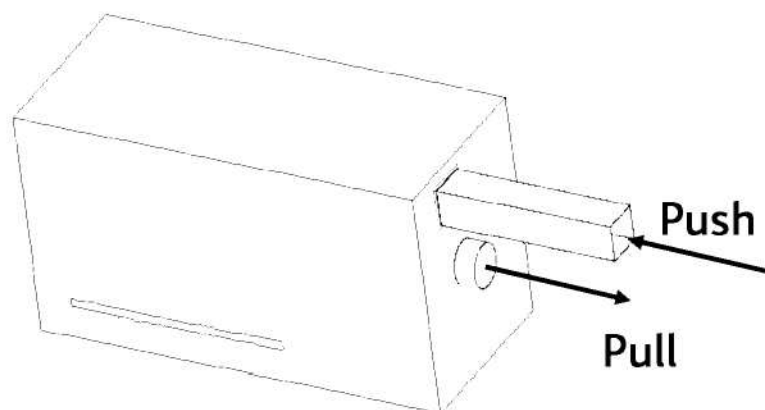


出口流量変化（商用ソフト）

0.0540 ~ 0.0580

■ 解析が安定化.

2.4.1. ファンP-Q特性比較事例3（ファン2個，テトラ）



Push-pull Ventilation モデル

- 4000万要素超モデル.
- ファン部二か所に圧力上昇を定義する.
- 定常解析を実行し，流量を求める.

2.4.2. ファンP-Q特性比較事例3（ファン2個，テトラ）

比較結果（事例3）

	OPENFOAM®2.2.1	商用ソフト
メッシュ	テトラ	テトラ
メッシュ数	56051132	43611698
Skewness (商用ソフト)	0.9552	0.9552
最大Skewness	2.10	2.02
最大Aspect比	18.09	19.16
非直交性角度	80.9°	—
最大圧力	—	214.88 m ² /s ²
最小圧力	—	-544.05 m ² /s ²
最大流速	—	24.97 m/s
Pull 流量	—	0.01958 kg/s
Push 流量	—	0.007239 kg/s

■ 両モデルとも初期に発散.

■ 解析モデル修正中.

3. OPENFOAM® 検証結果

3.1. P-Q特性検証結果

	OPENFOAM® 2.2.1		商用ソフト
TjunctionFan改 六面体	○	■ ファンの方向を指定できない ■ Swirl を考慮できない	○
事例 1-1 ポリヘドラ	△	■ ファン流量は単調増加のあと減少 ■ 最小圧力は増加 ■ 出口の逆流の影響大	○
事例 1-2 テトラ	△	■ ファン流量は単調増加のあと減少 ■ 最小圧力は増加 ■ 出口の逆流の影響大	—
事例 2-1 437万テトラ	×	■ AMGで解けない（圧力） ■ 収束しなかった	○
事例 2-2 568万テトラ	○	■ AMGで解けた（圧力） ■ 流量誤差約8 %	—
事例 3-1 210万テトラ	×	■ Normalが不一致 ■ 収束しなかった	○
事例 3-2 300万テトラ	○	■ ファン流量は収束 ■ 最小/最大圧力も安定化. ■ 出口の逆流大	—
事例 4 4300万テトラ	×	■ 4361万&5605要素モデルともでは初期に発散. ■ 解析モデル修正中.	○

3.2. P-Q特性検証結果

機能

- ファン（圧力上昇）の方向を入力できない.
- Swirl を考慮できない.

結果

- 3/4 ケースについて 商用ソフト 同等の流量が得られた.
- メッシュ数を増やさないと収束しないケースがある.
- 出口で逆流ある場合, 収束しにくい (ケース1) .
- メッシュ品質が悪いと収束しにくい (ケース4) .

全体

- 安定に解析できる条件が商用ソフトに比べて厳しい.
- **simple系定常流れ解析では実用レベルに達している.**

