

マスク装着時の顔周りの非定常流れの数値解析

上村兼一郎¹⁾ ・ 菊地正憲²⁾ ・ 平野公孝³⁾

Numerical analysis of the unsteady flow around the face wearing mask

Kenichiro KAMIMURA, Masanori KIKUCHI, Kimitaka HIRANO

Abstract

In recent years, the opportunity to use a mask is increasing for hay fever or a measure against influenza. So that, various masks have been developed and researched. Originally, the mask was used against particulate in factories but, it came to be known by many people as a prevention article taking advantage of the Spanish flu in 1919. Afterward, a form and a material changed, and the nonwoven fabric is mainly used now.

While the usage rate of the mask is increasing, in the present research, a visualization experiment and numerical analysis of a calm indoor flow, etc. are performed. However, the report of the analysis of the three-dimensional flow containing a mask has been hardly made now.

So, in this research, three-dimensional numerical analysis using thermo-fluid numerical analysis software FLUENT is conducted. As a result, we got visualization of the unsteady flow around the face wearing mask.

Key Words:

CFD, Mask, cough, unsteady flow

1. はじめに

近年、花粉症やインフルエンザ対策のため、マスクを多用する機会が非常に増えている。それに伴い、様々なマスクが開発、販売されてきた。特に2009年は、新型インフルエンザの発生に伴いマスクの普及率も高く、消費量は4月から6月にかけて前年比400%となった。

もともとマスクは、粉塵よけとして用いられている

工場用マスクが始まりで、1919年のスペイン風邪をきっかけに予防品として注目を集めた。以後、インフルエンザが流行するたびに、マスクの使用量は増え、それに伴って枠のない布地だけのものが誕生し、布地にガーゼが使われるようになるなど、マスクは次第に形を変え、現在のマスクの形になってきた。

マスクの使用率が高まっている中、現在の研究においては、人体呼吸域流れの可視化実験と数値解析¹⁾やマスク内外の流れ性状と肺への付加の検討²⁾などが行われているが、マスク装着時の顔近傍の三次元的な流れの解析が行われていない。三次元的な流れの解析によって、マスクの隙間からの流れや飛沫の軌跡などが

1) 機械システム工学専攻大学院生

2) 機械システム工学科教授

3) 機会システム工学科名誉教授

検討でき、マスクの性能の検討や装着時の息苦しさなどの日常生活において使用する際の問題についての検討材料としても用いることが可能となる。

そこで、本研究では、顔近傍の三次元数値解析システムの構築とマスク装着時の顔近傍の流れの解明を通してマスクや顔への影響を明らかにすることを目的とする。

2. 解析手法とモデリング

2.1 使用ソフトウェア

本研究で用いた数値解析ソフトはANSYS社製の有限体積法汎用熱流体解析ソフトウェアFLUENT³⁾、流体解析プリプロセッサGAMBIT、同じく流体解析プリプロセッサのTGridを用いた。また、顔のモデルの離散化のためにユニカミノルタ製の非接触3次元デジタイザVIVID910および、同社ソフトのPolygon Editing Toolを使用した。

2.2 支配方程式

全ての流れに対して質量保存則と運動量保存則に関する支配方程式が有限体積法により解かれ、質量保存則に関しては連続の式、運動量保存則に関してはNavier-Stokes方程式が解かれる。流れが乱流の場合、これに追加で乱流モデルが解かれる。

2.3 乱流モデル

本研究においてレイノルズ数が 2.9×10^4 なので乱流モデルとして、標準 $k-\epsilon$ モデルを使用した。ただし、レイノルズ数の代表速度を11.2m/s、代表長さを顔の口の横幅、0.04mとしている。代表速度の詳細は4.2.1節に記す。

2.5 複雑形状のモデル

三次元スキャニングによって解析対象を離散化し、それとは別に計算領域を作成する。グリッドモデルを作成後、ボリュームメッシュを作成する。手順を図1に示す。

3. 解析モデル

3.1 顔

顔のモデルについては図2にモデルの素となった石膏を、図3にデジタイザで離散化したデータを示す。顔のサイズは縦0.199m、横0.132m、高さ0.189mとした。

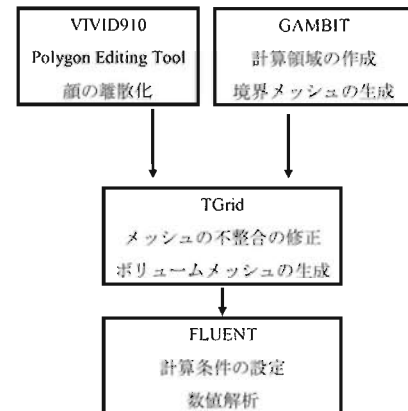


図1 モデリングシステム



図2 石膏のモデル

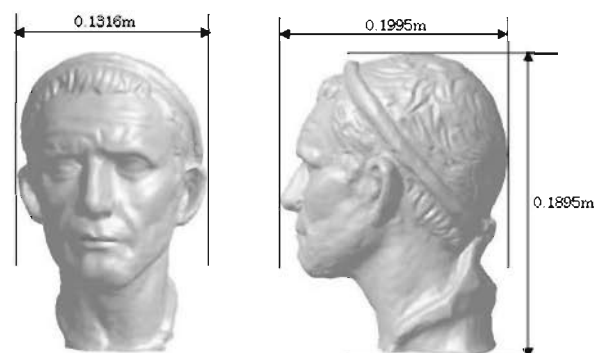


図3 離散化した顔データ

3.2 計算領域

ここでは、顔周りの非定常流れを解析するので、三次元で解析を行った。計算領域は顔のモデルを中心に縦1.00m、横1.00m、高さ0.65mとした。その概要を図4に示す。また、顔の寸法を代表長さとする、縦方向に5倍、横方向に7倍、高さ方向に3.4倍となっている。

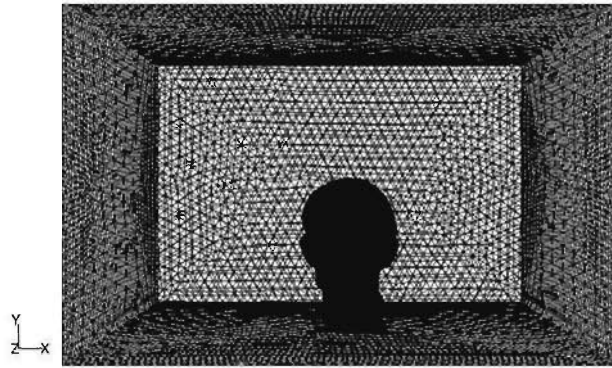


図4 計算領域

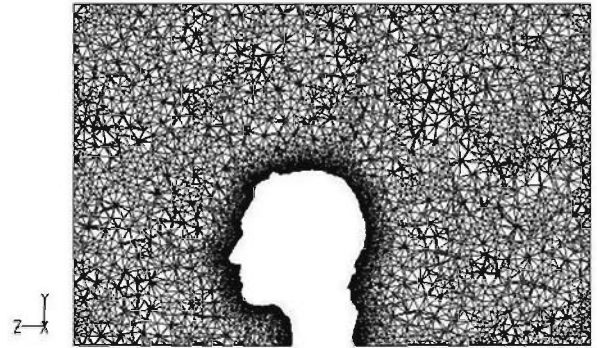


図5 顔側面 (x 軸方向) からみた YZ 平面図

3.3 マスク

本解析でのマスクの形状については、前述の顔の鼻、両頬のもっとも突出している点を曲線で結び作成した。図4に示す。また大きさは、縦 0.093m、横 0.112m、高さ 0.07m、厚さ 0.001mとしてある。

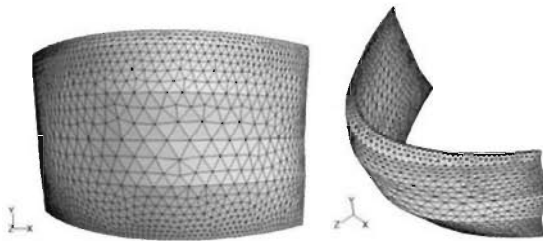


図4 マスクの形状

3.4 メッシュ構造

本解析では複雑形状を数値解析するため、TGridを用いることで要素分割を容易にした。本来ならばGAMBITですべて作業を行うことができるが、今回のように三次元デジタイザで離散化したものを用いるとメッシュ同士の不整合が生じてしまい、メッシュ生成が大変困難になる。その不整合の修正が可能かつ、メッシュ生成に容易にするためである。なお、生成したボリュームメッシュは四面体メッシュとし、総メッシュ数は約 140 万となっている。図5に顔側面 (x 軸方向) からみた YZ 平面図を示す。

4. 数値解析条件

4.1 物性値

使用流体は空気とし、大気圧、25°Cの状況で行う。本解析での流体の密度は 1.184kg/m^3 、粘度は $1.82 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ とした。

4.2 境界条件

4.2.1 境界流入条件

本解析では、一定の速度の場合と時間的に変化する場合の2種類を用いた。後者については図6のような速度変動を与えた。共に最大値は 11.2m/s をとるようにしており、後者においては時刻が 0.11 秒のときに最大値をとるようにしてある。これは、加藤伸介⁹⁾の咳飛沫の室内輸送性状の検討にある平均値 11.2m/s を参考にした。

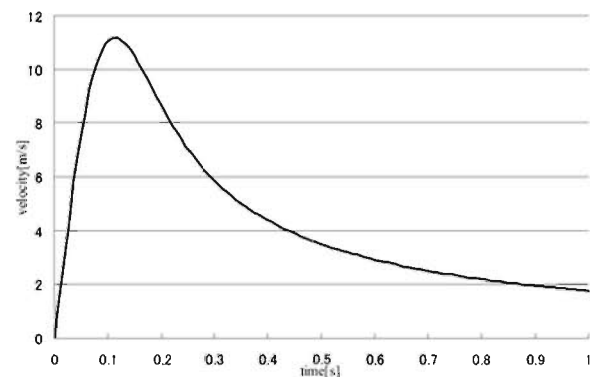


図6 流入境界条件

4.2.2 境界流出条件

圧力流出条件とし、ゲージ圧力で 0Pa となるように設定した。

4.2.3 物体表面上の境界の条件

壁面境界条件は、顔表面上での速度を 0m/s とした。また、床に該当する部分にはすべり壁の条件を設定した。顔表面の皮膚は流れによって厳密にはわずかに変形すると考えられるが、それが流れに及ぼす影響は無視できるとして解析した。

4.2.4 マスク

本解析モデルのマスクは多孔質媒体として近似した。

本解析モデルにおけるマスクは不織布であり，多孔質媒体の境界条件として設定する粘性抵抗および慣性による抵抗については素材によってまばらである．そこで，今回は，平均繊維直径 $5\mu\text{m}$ ，空隙率 90% という条件を与えた．その結果，浸透率 $\alpha=1.215\times 10^{-11}$ ，慣性による抵抗係数 $C_2=9.6\times 10^{-4}$ となった．

5. 結果と考察

5.1 顔周りの圧力と速度の解析

一定速度における速度ベクトル速度コンター図のマスクの無い場合を図7，マスクの有る場合を図8に示す．明らかにマスクの無い場合は直線的に流れていくことがわかるが，マスクの有る場合は，マスクに遮られ鼻やあごの方向に流れている様子が見られる．図9に図8の鼻の下の領域を拡大した速度ベクトル図を示す．明らかにマスクと顔の間に大きく渦を描いていることがわかる．またマスクによって流れが大きく変えられていることも分かる．図10に流入速度を変化させたモデルの速度ベクトル速度コンター図を示す．圧力分布について図11に一定速度におけるマスクの無い場合の圧力コンター図を，図12にマスクの有る場合を示す．これも速度と同じようにマスクの有無による大きな違いが見られる．



図7 マスクの無い場合の速度分布



図8 マスクの有る場合の速度分布

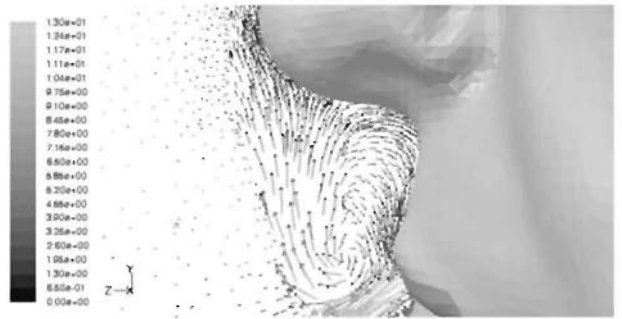
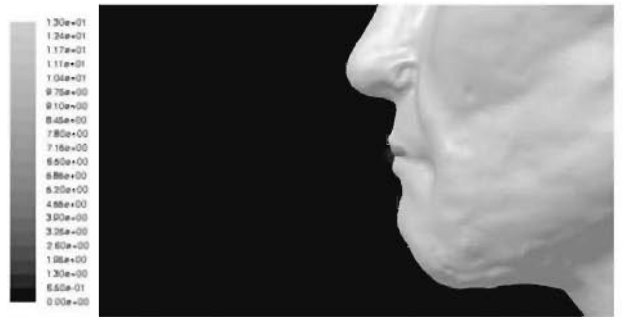


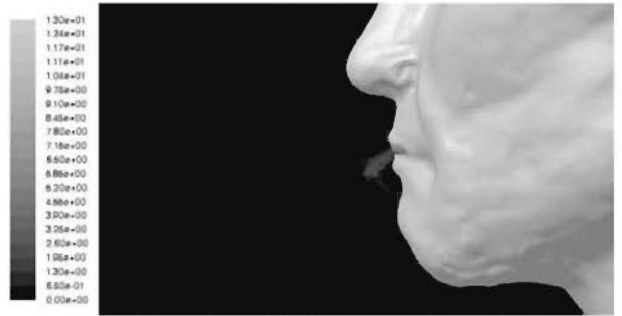
図9 鼻の下の速度ベクトル図



t=0.01s



t=0.11s



t=0.80s

図10 流入速度を変化させるモデルの速度分布図

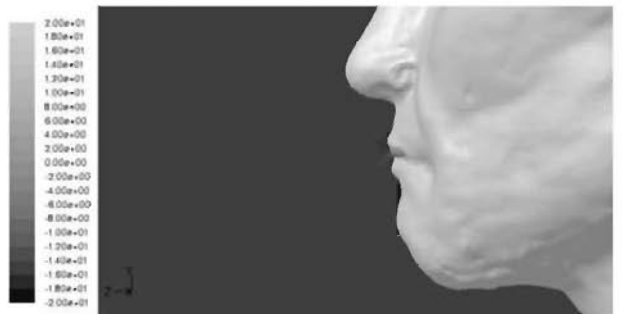


図11 マスクの無い場合の圧力分布図

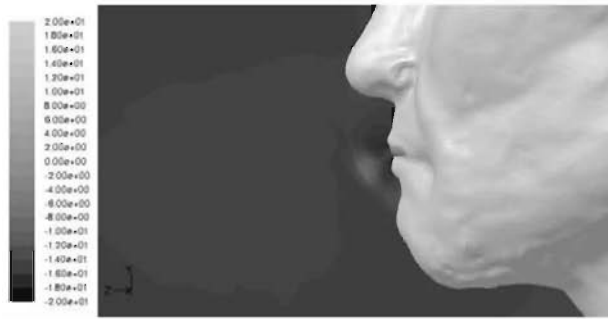


図 12 マスクの有る場合の圧力分布図

5.2 マスク内の流れの解析

一定速度におけるマスクの無い場合の流線を図 12, マスクの有る場合を図 13 に示す. マスクが無い場合は, 滑らかな曲線を描いているのに対して, マスクが有る場合は, マスクと顔の間で大きく渦を巻いている様子が見られる. また, 口から流出した気体のほとんどは鼻やあごとマスクの隙間から出ているように見られる. 図 14 に対してマスクを顔側から見た流線を図 15 に示す. 図 15 からも口から流出した気体のほとんどが鼻やあごとマスクの隙間から出ていることがわかる. これらより, 今回のマスクの条件では, ほとんどの気流がマスクを通過していないことがわかる. 図 16 に流入速度を変化させたモデルの流線を示す. 流入量が多くなるにつれて渦が発生し, 流入量が減少すると渦は消滅している.



図 13 マスクの無い場合の流線

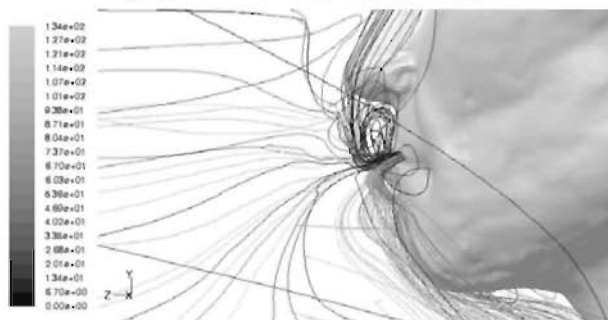


図 14 マスクの有る場合の流線

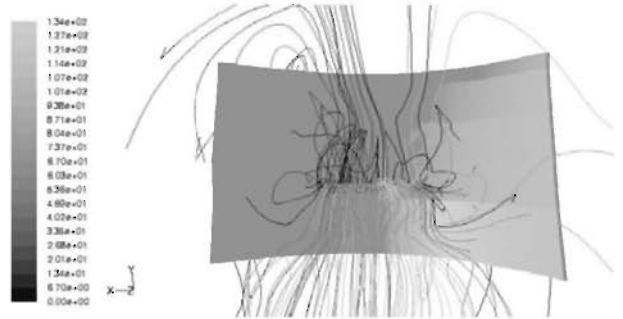
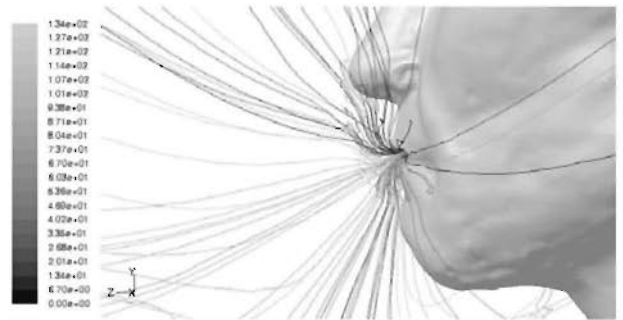
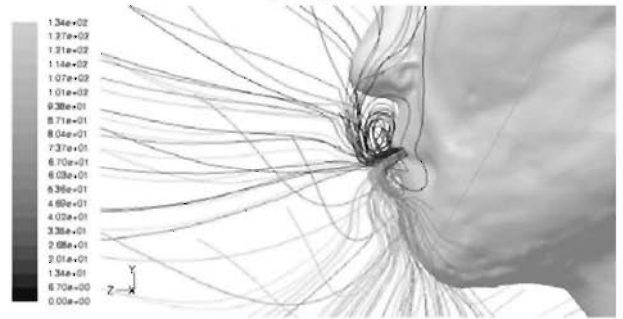


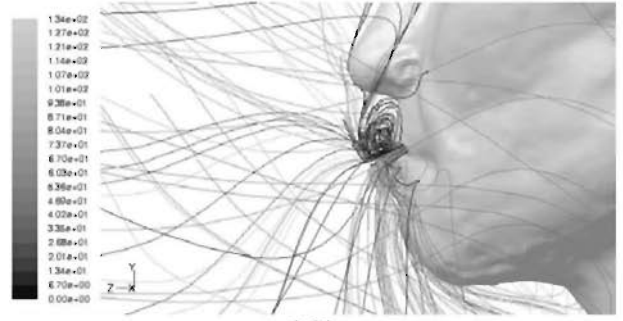
図 15 口側からみたマスクを通る流線



t=0.01s



t=0.11s



t=0.80s

図 16 流入速度が変化するモデルの流線

5.3 顔に働くせん断応力

顔表面に働くせん断応力の図についてマスクの無い場合を図 17 に, マスクの有る場合を図 18 に示す. 図 17 と図 18 を比較すると, 唇周囲のせん断応力の分布はほぼ等しくみえるが, 鼻やあご付近において大きな違いが見られる. これは口から流出した空気が鼻やあごの近くを通ることが原因と考えられる. またこれがマスク装着時の呼吸における違和感のひとつだと考えられる.



図 17 マスクの無い場合のせん断応力分布図



図 18 マスクの有る場合のせん断応力分布図

5.4 マスクを通過する流量

ここでは、口から流出する流体の流量について考察する。口から流出した気体の流量を図 19 に示す。また、マスクを通過した気体の流量を図 20 に示す。これらと比較すると口から流出した流量とマスクを通過する流量は同様に変化していることがわかる。図 21 に口から流出した流量とマスクを通過した気体の流量の比のグラフを示す。流出直後においては口から流出した気体がマスクに達していないので不安定だが、0.1 秒を経過すると安定し始め、約 1.8 パーセントになる。これは、今回の解析に用いた多孔質媒体の条件においては、口から流出した気体の約 98 パーセントはマスクを通過せず、鼻やあごとマスクの隙間から流出していることを示している。

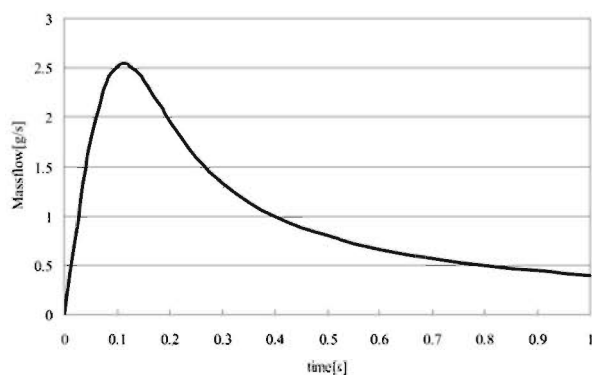


図 19 口から流出した流量

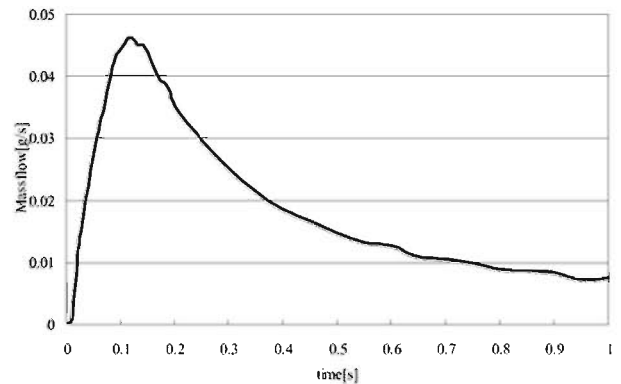


図 20 マスクを通過した流量

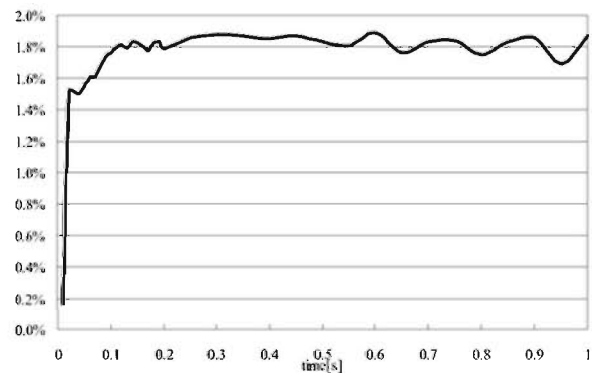


図 21 口とマスクの流量比

6. おわりに

本解析では顔周りの非定常流れの数値解析を行うにあたり、速度分布図、圧力分布図、流線、せん断応力分布図、流量について解析した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 三次元スキニングから離散化による三次元数値解析システムの構築ができた。
- (2) 顔近傍の流れの可視化ができた。
- (3) マスクの有無が口から流出した気流にどのような影響を与えているかがわかった。

また今後の課題としては次のようなことがあげられる。

- (1) 今回のモデルで使用したマスクは、顔のモデルから作成したもので、形状についての考察があまりできない。したがって市販されているようなマスクの解析が必要である。
- (2) 多孔質媒体として近似したマスクの条件は理論上の値から導出したものであるから実際の実験から得られた値で解析する必要がある。

- (3) 本解析では、熱を考慮しておらず、実際には口から流出する気体は熱を持つので、熱を考慮した解析つまり、マスクと口まわりの間の温度分布などについて解析する必要がある。

終わりに本研究を遂行するにあたり、被服学の観点から貴重なアドバイスを頂いた本学教育文化学部の岡村好美教授に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 朱, 林, 加藤, 村上, 可視化実験と数値解析による静穏室内の人体呼吸域流れ性状の検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 583, 2004. 9
- (2) 笠原, 村上, 加藤, マスク内外の流れ性状と肺への負荷の検討, 日本建築学会大会芸術公演梗概集
- (3) FLUENT 6.x User's Guide, Fluent Inc./Fluent Asia Pacific
- (4) 加藤, 咳飛沫の室内輸送性状の検討, ながれ 26, p331-339 (2007)