

特集：換気等を可視化するシミュレーション技術②

コロナ飛沫核拡散を含む 換気解析シミュレーション事例紹介

(株)環境シミュレーション

阪田 升・長井 大祐・永吉 一朗
政岡 沙央理・アブリティップ アプライティ

● はじめに

新型コロナウイルス (COVID-19)による感染症の広がりは極めて深刻な問題であり、社会のあり方や建築そのものについて根源的な考え方の転換を求められる事態となっている。感染は3密と呼ばれる人同士の近接状態と関連があると考えられており、人の住む空間の換気状況がこれまでになく注目されている。

当社のシミュレーション動画は、緊急事態宣言以降、40回以上全国ネットあるいは地方局でテレビ放映され、その回数では突出しており社会的インパクトを与えるとともに換気のあり方について提言・啓蒙している。本稿では、コロナ移流拡散を含む換気シミュレーションの考え方とテレビ放映事例について述べる。

● 換気シミュレーションとは

知られているように換気にはいくつかの方式があり、CFD（計算流体力学）でそれを再現するためにはいくつかのノウハウが必要である。

1種から3種の換気は、給気または排気のいずれかが機械か、両方が機械の方式である。これらは機械の風量を規定流速として解くことができる。それ以外に風力換気と温度差換気の二つの方式があり、これらは解析ソフトによっては異なる解を出すことがある。

風力換気は一定風・一様流を適用することが多いがこれは間違いで、自然

界の風は間欠風・べき乗則であり建物内への給気量は一定風に比べて大きく減じる。一定風の風力換気シミュレーションは換気風量を過大に見積もある可能性が高く、注意が必要である。

これに対し温度差換気は、基本的に煙突効果で空塔内に上昇流を得て換気する方式である。当社ソフトで温度成層状態や中性帯まで予測可能であり、吹き抜けの形状や開口の位置・寸法と熱条件さえ設定すれば、風速条件など与えなくても無風状態での換気状況を再現できる。

本稿で用いた当社熱流体解析ソフトウェアWindPerfectのCFD解析手法を次に示す⁽¹⁾。

- 基礎方程式：NS方程式、連続の式、エネルギー方程式、濃度移流拡散方程式
- 空間の離散化：不等間隔格子
- 時間の離散化：SMAC法
- 移流項：Hybrid中心差分
- 乱流モデル：LES (Large Eddy Simulation)
- 初期条件：流速ゼロ、室温一定、濃度ゼロ

● 先ずは基本のキ

人体周りの気流を解析するに当たり、極めて重要な現象が無視されがちなので注意を喚起しておきたい。それは人体周りに起きる熱上昇流である⁽²⁾。人体は37℃なので室内が27℃とすると10℃もの温度差があり、人の周りでは常に熱上昇流が発生している。その

速さは風速にして約0.3 m/secであり、人は足元から汲み上げられた新鮮空気で常に保護されている。

また人の吐出する咳や呼気も約37℃であり、室温約27℃では呼気は浮力で室内上部に移動し滞留する傾向がある。コロナウイルスを含む飛沫核の移流拡散を予測するには、これら上昇流の再現が必須であることは言うまでもない。



図1 人体周りに発生する熱上昇流

● 咳のシミュレーション

ここでは咳・呼気の移流拡散解析を通して、人体周りの飛沫核の拡散状況や、マスク・スクリーンの効果を予測・検討した。

(1) 人間の咳の挙動

咳のシミュレーションの設定は、風速約22 m/secの流れが0.18秒間持続することで表現される⁽³⁾。この時陥りやすい誤りは、咳を口腔からの単純な噴流とすることである。咳が口腔からノ

ズルの流れのように吐出するとすれば、速度の減衰は小さく咳の飛沫核は遠くに到達することになるが、事実はそうではない。

咳は肺を含む気道で発生するものであり、口蓋で直角に曲がって口腔から外に出る。この気道と口蓋で形成するエルボー（L字型）形状により、口から吐出する流れには大きな乱れが生じ、咳や呼気の気流は口腔から出た時点で既に速度が減衰しており、拡散して遠くには飛びにくい状態となっている（図2、図3参照）。

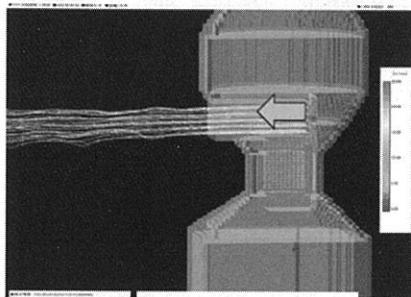


図2 咳の風速分布（エルボーなし：誤）

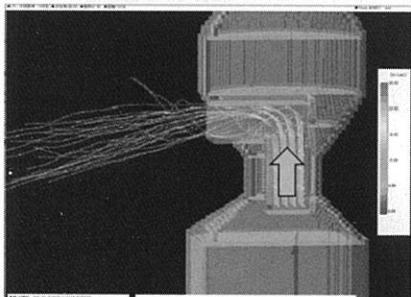


図3 咳の風速分布（エルボーあり：正）

人体周りの熱上昇流、咳・呼気が体温であること、気道と口蓋のエルボー形状であることを仮定すると、咳の呼気は2 mも飛ばず相応の時間が経った後は上方に移動し滞留する。咳の呼気が飛ぶのは1 mがせいぜいである（図4、図5参照）。

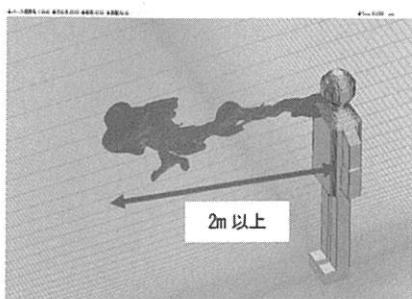


図4 咳の濃度等値面：エルボーなし（誤）

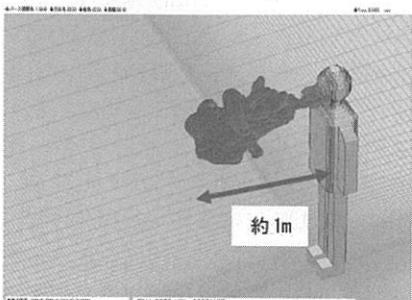


図5 咳の濃度等値面：エルボーあり（正）

マスクを着用した場合は、咳はマスクの上の隙間から吹き出し上方に流れるので、前方に飛沫核が拡散するのを未然に防止できる。頬より上は触らないのが肝要である（図6）。

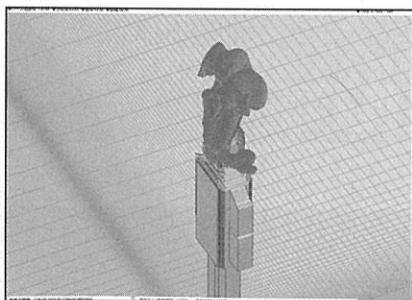


図6 咳の濃度等値面：マスク着用時

(2) スクリーンの効果

スーパーやコンビニのレジでは人の距離が1 mを下回り、咳の呼気は容易

に対面した相手に届きうる（図7）。こうした状況では感染を免れないが、仕切りとなるスクリーンの設置により直接暴露を回避することができる（図8）。しかし問題はまだあり、咳の呼気がクリーンに当たって下降した先のカウンター上は呼気で汚染される可能性がある。

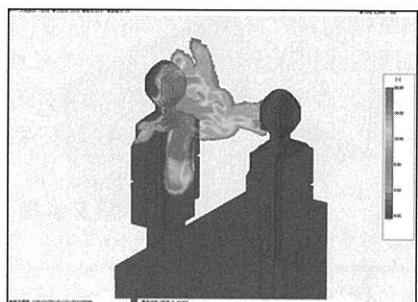


図7 咳の表面濃度：スクリーンなし

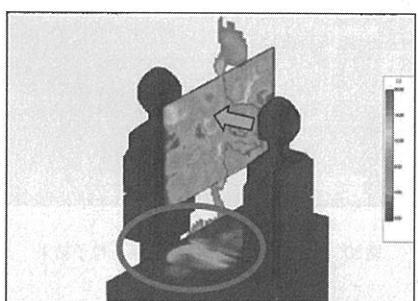


図8 咳の表面濃度：スクリーンあり

● テレビ放映事例

(1) 窓開放時のエアコン気流解析

2020年5月12日TBSテレビ「あさチャン！」に動画を提供した。夏に向けて気温が上がる所以、室内のエアコンと窓換気との関連について検討した。室内に壁掛けエアコンと窓を設置し（図9）外気は有風で部屋に侵入するとした。

エアコンからの吹出し性状は重要で、向きが水平だと室内上部に滞留した感

感染者の呼気を攪拌して部屋中に撒き散らす可能性がある（図10）。吹出しが下向きであれば、冷気が下方から蓄積し天井に向かって呼気を押し上げることができる。窓からの換気は一般に室温よりも高いので、天井から室内に蓄積する傾向がある。

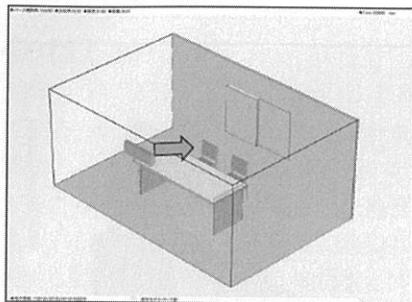


図9 窓開放時エアコン気流解析モデル



図10 窓開放時エアコン気流解析粒子結果

本放映でエアコンには換気能力がないことに言及し一般の方の注意を喚起した。本動画はテレビ朝日やNHKなどでも広く放映された。

(2) 広州レストラン換気解析

2020年6月2日同じくTBSテレビ「あさチャン！」に動画を提供。2020年1月にCDCが報告した中国広州のレストランでのコロナ大量感染を題材に、室内の空調換気と呼気の移流拡散の関係について検討した。

室内の平面図を図11に示すが、エアコンの配置が偏っていて室内の形状も方形ではない。

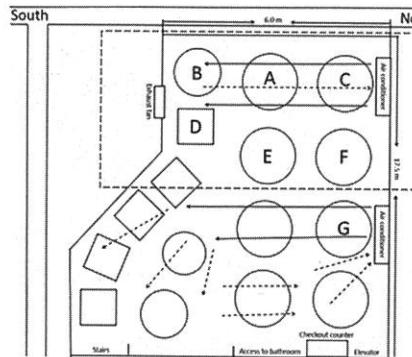


図11 広州レストラン平面図

解析はテーブルと人員の配置を再現し、エアコンと有圧扇による換気とドアの漏気を考慮した。外気11℃、室温22℃設定である。

罹患者の呼気はエアコンからの吹出し気流に乗って室内全体に拡散する様子が分かる。呼気濃度と感染との関係は明確ではない。

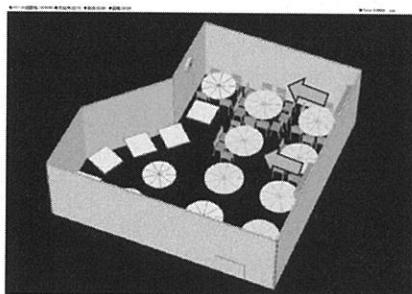


図12 広州レストランCFD解析モデル

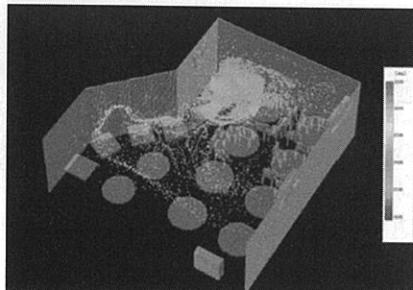


図13 広州レストラン解析結果呼気の拡散

(3) 可視化実験との比較解析

2020年6月12日BS-TBS「報道1930」に動画提供。名古屋市内で同局が行った室内気流の可視化実験をCFDで再現した。発生させたトレーサー（粒径約100μm）の挙動と、CFDで求めた粒子軌跡は概ねよく一致することが分かった。

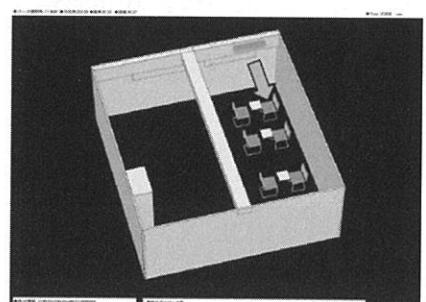


図14 名古屋可視化実験解析モデル

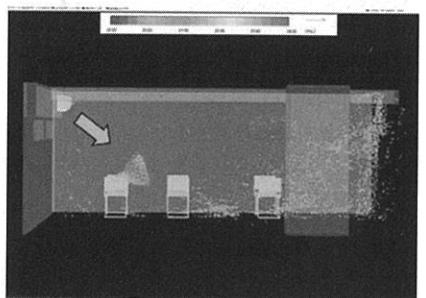


図15 名古屋可視化実験解析結果粒子軌跡

(4) クリーンルームでの粒子可視化実験

2020年7月23日BS-TBS「報道1930」に動画提供。可視化実験は通常の室内ダストが対象で参考にならず。室内気流性状は再現できた。

(5) 密な飲食店での呼気の移流拡散

2020年8月2日テレビ朝日「サンデーステーション」に動画を提供。大阪府知事の飲食店での5人制限を検証した。TV局の指定通り飲食店を再現し、人を密な配置と疎な配置に設定した。

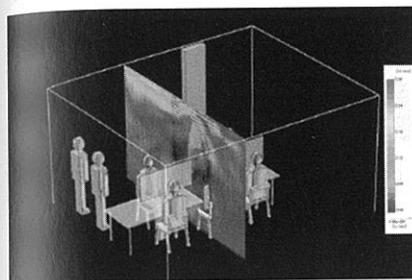


図16 クリーンルーム可視化実験風速分布

部屋はエアコンによる空調がなされていようと仮定しCFDシミュレーションを行った。

5人の密な配置では呼気の拡散が広がらず、濃度の高い呼気塊が当該テーブル周辺に多量に滞留するのが分かる(図17、図18参照)。

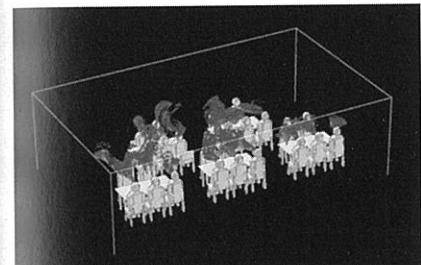


図17 飲食店呼気拡散状況疎な配置

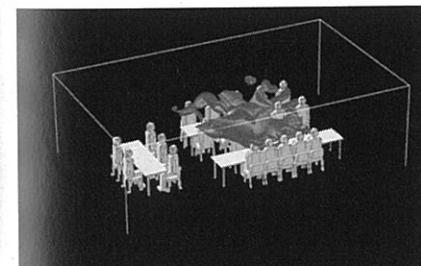


図18 飲食店呼気拡散状況密な配置

また事務所想定でも解析したところ、呼気は天井や周辺に滞留することが判明した(図19)。

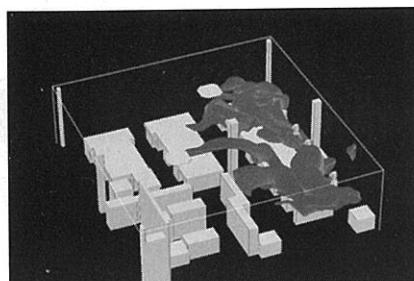


図19 事務所呼気拡散状況濃度分布

(6) 冬季窓開放時の換気解析

2020年11月7日テレビ朝日「サタデーステーション」に動画を提供。北海道の感染者激増を受け、冬季での窓換気について検討した。

室温20℃、外気温0℃として無風状態での窓換気を予測した。室内にはエアコン2台と窓二つを設定し、窓開放時からの換気状況を非定常シミュレーションで再現した。

二つの窓を完全開放では3分後に室内の半分は10℃以下になる(図20)。また窓5cm開放では5分後でも部屋の下方は15℃以上を維持できることが分かった(図21)。



図20 事務所呼気拡散状況温度分布



図21 事務所呼気拡散状況温度分布

● おわりに：まとめ

コロナ関連を含む換気解析事例について述べた。コロナ向けの手法である換気効率解析などを用い、空調換気と呼気の拡散の関係や、空気清浄機等の最適配置を今後検討する。

〔謝辞〕

本稿でのシミュレーションを実施するに当たり、東京大学名誉教授・特命教授の加藤信介先生、元大成建設技術センター副センター長の森川泰成氏にご指導とコメントを頂いた。記して謝意を表する。

〈参考文献〉

- (1) <http://www.env-simulation.com/jp/service/1/wind.php>
- (2) 村上周三・加藤信介・曾潔：数値サーマルマネキンに関する研究（その1）人体表面の対流熱伝達に関する数値シミュレーション、生産研究、47巻、1号、pp.58-61 (1995)
- (3) 加藤信介：咳飛沫の室内輸送性状の検討、ながれ、26, pp.331-339 (2007)

筆者紹介

阪田 升

株環境シミュレーション
代表取締役

長井大祐・永吉一朗・
政岡沙央理・
アブリティップ アプライティ
株環境シミュレーション