

特別 WEB
コラム

コロナウイルスのエアロゾル感染シミュレーション

池田 圭

株式会社アテナシス

1. まえがき

新型コロナウイルスは、直径 $0.06\sim 0.14\mu\text{m}$ の球形¹⁾で、感染者の咳やくしゃみは勿論、会話や呼吸によってもエアロゾル化され、鼻や口から放出される。エアロゾルのサイズは、呼吸に含まれる $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 程度^{2,3)}の小さなものから、咳やくしゃみに含まれる数 $100\mu\text{m}$ の大きな飛沫⁴⁾まで様々な粒径で分布する。一般に、 $1\mu\text{m}$ 程度より大きな粒径のエアロゾル粒子は、重力の影響で比較的短時間に落下する一方、それより小さな粒径ではブラウン運動が支配的となり、長時間浮遊すると考えられている⁵⁾。以下では、英語圏で広く使用される aerosol と、日本エアロゾル学会の定義に従い、粒径に関係なく空気中に浮遊する微粒子を「エアロゾル粒子」と総称する。

新型コロナウイルスの感染経路には接触感染も含まれるが、和田⁶⁾によれば「汗による感染は理論上ありえない」ことから、接触感染のきっかけとなるウイルスの付着も、元々は鼻や口から放出されたエアロゾル粒子の付着が要因と考えられる。従って感染防止のためには、人の周囲に浮遊するエアロゾル粒子の挙動を知ることが最も重要である。昨今、感染リスクを低減する Social distancing として 2 m の間隔が求められているが、咳やくしゃみによって飛散する大きな飛沫が届かない距離とされている⁷⁾。一方、特に室内で長時間浮遊するエアロゾル粒子は、室内の気流に乗って長い距離を移動・拡散することが可能であり、どの方向にどの程度移動し得るかは環境に大きく依存する。最近では、Li 等による数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics, 以下 CFD) によって広州のレストランで発生したクラスターの解析例⁸⁾も報告され、CFD の有用性も示されている。しかしながら、感染拡大と温度や湿度との関係は依然として明らかではなく、浮力の影響に着目した解析例は見つかっていない。本稿では、浮力の影響も考慮した CFD を行い、室内のエアロゾル粒子の挙動を考察した結果と、建物の前に並んだ人の列を想定し、風によって輸送される呼気中の水蒸気分布の結果について報告する。

2. 計算モデル-A

鼻や口を識別できる人体モデルの CAD データ⁹⁾を利用し、CFD-VisCART¹⁰⁾を用いて部屋の中にいる人の周囲に計算格子を生成した。部屋の大きさは、人の足元を原点として

後方 0.5 m, 前方 2 m, 横 1.5 m, 高さは足元から 2.5 m とした。図 1 に斜めから見た中心断面の格子を示す (人体表面、特に顔の近くには細かな計算格子を用いた)。気流とエアロゾル粒子の計算には CFD-ACE+¹⁰⁾を用いた。呼吸のはく量と吸い込む量の時間変動はサインカーブに従うとし、4 秒に 1 回、0.5L の息を鼻から吐き出すように設定した。水蒸気量は、飽和水蒸気量の約半分 (0.1 g/呼吸) を仮定した。感染が拡大した冬場を想定し、周囲の壁面を含む室温は $10\text{ }^\circ\text{C}$, 人の表面温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 鼻から出る空気・水蒸気の温度 $35\text{ }^\circ\text{C}$ とした。始めに気流のみの計算を行い、体温と呼吸によって生じた流速分布を図 2 に、水蒸気 (H_2O) のモル分率 (最大値を 0.001 に固定) を図 3 に示す。

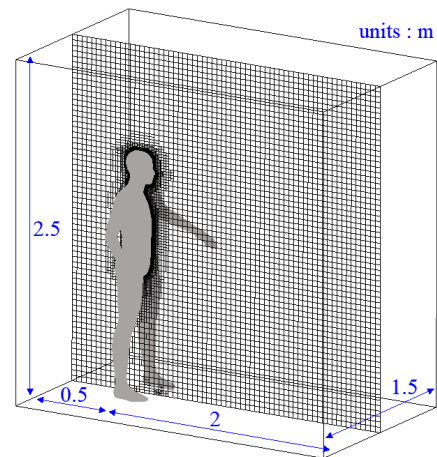


図 1 計算した部屋の大きさと中心断面の計算格子

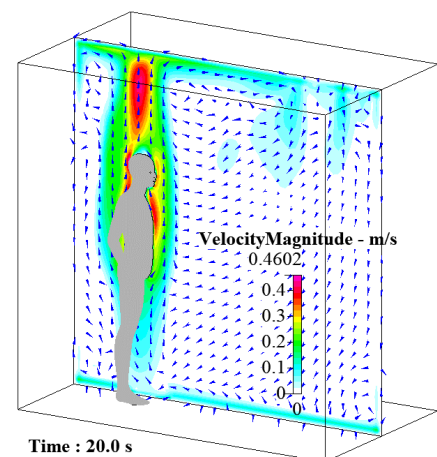


図 2 20 秒後の流速分布 (中央断面, 矢印の大きさ固定)

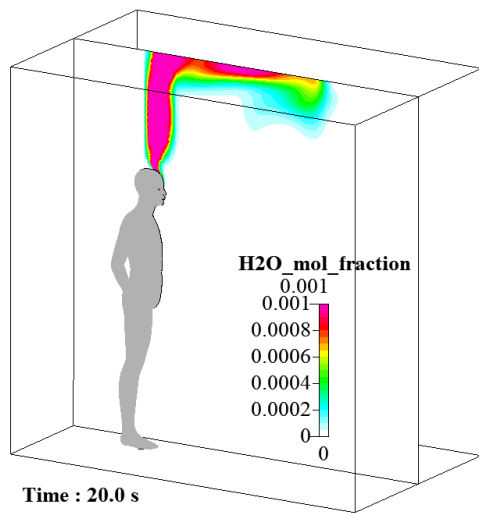


図 3 20 秒後の水蒸気のマール分率（中心断面）

Time step は 0.05 秒固定とし、400 steps（20 秒）の計算を実行した。浮力は、ブシネスク近似（300 K における熱膨張係数：0.0033 1/K）による密度変化によって考慮した。更にその結果を新たな初期条件とし、人の前方（一辺 0.4 m の立方体の領域、中心高さ 1.5 m）に浮遊するエアロゾル粒子 400 ケ（5, 20, 80, および 320 μm 、各 100 個）を配置し、先の呼吸の解析と同様、20 秒間の計算を実行した。なお、現実には温度や湿度の影響、例えば、液滴の蒸発と凝縮を考慮した粒径分布など、より詳細なモデルによる検討が望まれるが、本報は傾向を掴む目的で粒径と数を限定した。また、埃のような固体のエアロゾル粒子との衝突・付着も現実には起こり得るが、環境に強く依存する上、計算に考慮することが難しいことから、本計算では粒径や重さは不変と仮定した。

3. 計算モデル-A の計算結果

320 μm の粒子はすぐに落下したことから、本稿では図示を割愛する。80 μm の粒子は、顔から離れているものの多くは重力の影響で落下してゆくが、人体の近くにあるものは上昇気流に乗って浮上し一部は人体表面に付着することが分かった（図 4、図 5）。20 μm と 5 μm の粒子は、重力の影響で少しずつ落下してゆくものの、多くの粒子が上昇気流ののって輸送され、一部は天井に付着するが、多くの粒子が気流に乗って輸送されることが分かった（図 6、図 7）。

比較のため、室温と人の表面温度を 30 $^{\circ}\text{C}$ とし、その他は全て同じ条件で、室温の高い部屋を想定した計算も行った。本稿では代表的な結果として、粒子サイズ 5 μm の結果を図 8 に示す。浮力による上昇気流はごく弱くしか発生せず、エアロゾル粒子の移動は非常にゆっくりとなった。また、20 μm の粒子の一部は人体表面に付着したが、80 μm の粒子は全て落下した。

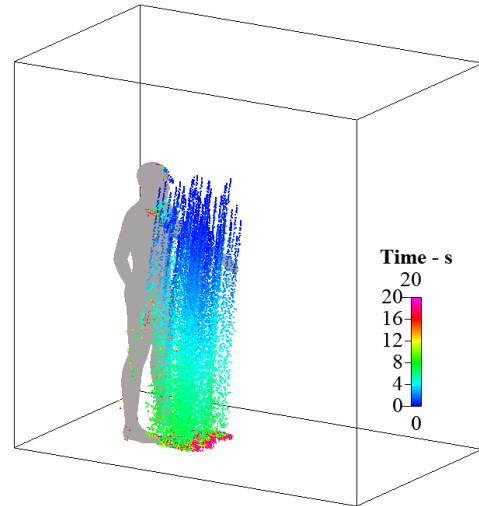


図 4 80 μm の粒子の軌跡

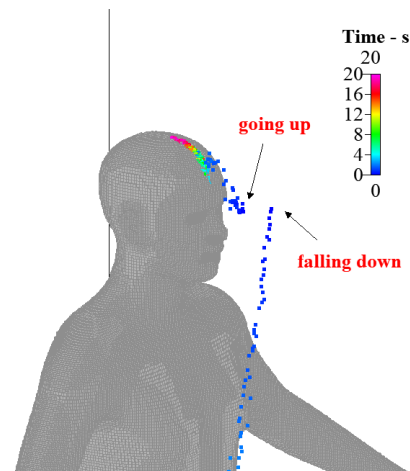


図 5 付着する粒子と落ちる粒子（80 μm ）

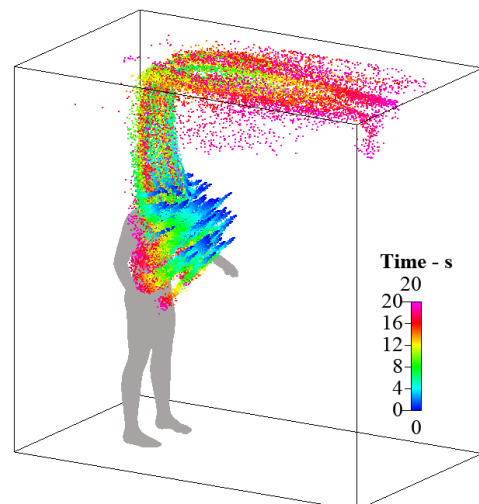


図 6 20 μm の粒子の軌跡

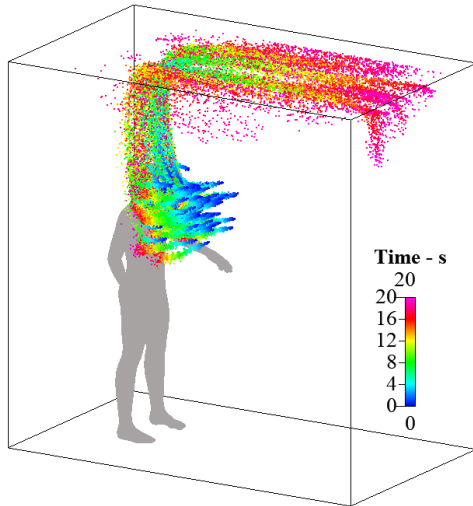


図 7 5 μm の粒子の軌跡

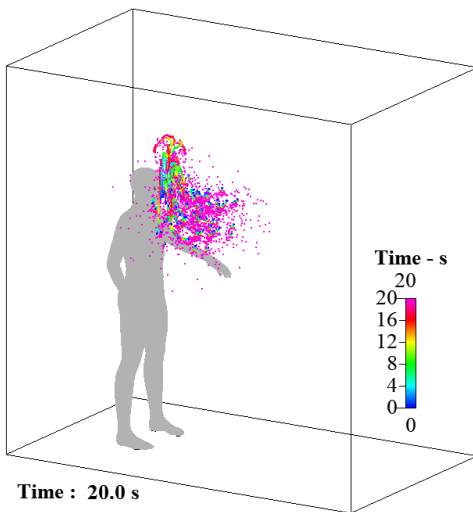


図 8 気温 30 °C の部屋における 5 μm の粒子の軌跡

4. 計算モデル-B

先の室内とは別に、建物の前に並んでいる人の列（先頭より 1 および 3 m 後方では二人が横並び）を想定した計算モデルを図 9 に示す。手前と上の面は対称境界とし、向かって左手（列の前方）より 0.5 m/s の流速で風（乾燥した空気、温度 27°C）が吹いている状況を仮定した。建物の壁面と地面の温度は 20°C、先頭の人の呼吸については、計算モデル-A と同様とした。Time step は 0.01 秒とし、重力と浮力を考慮した。

5. 計算モデル-B の計算結果

先頭の人の呼吸に含まれる水蒸気（H₂O）について、10 秒後のモル分率（最大値は 0.001 に固定）を図 10 に示す。計算は 10 秒以降も継続したが、息をするタイミングで時間的に変動はあるものの、分布に大きな変化はなかった。計算の結果、すぐ後の人のみならず、3 m 後方の人の顔の付近でも水蒸気濃度が比較的高くなることが分かった。

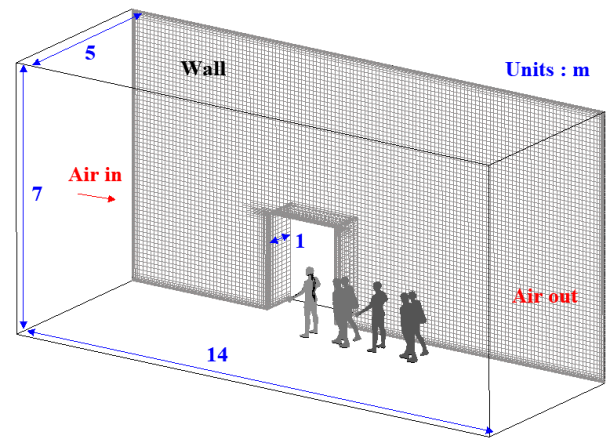
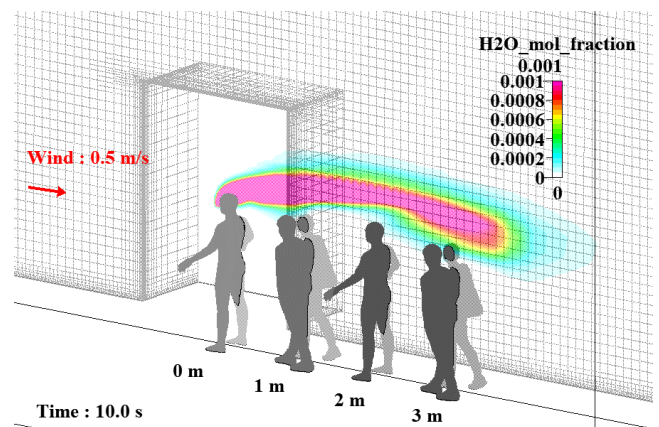


図 9 建物の前に並ぶ人の列を想定した計算モデル



6. 考察

計算モデル-A の結果より、寒い部屋では、数 10 μm の大きなエアロゾル粒子でも、人の呼吸によって生じる上昇気流で上昇し、室内に浮遊することが判明した。従って、咳やくしゃみによって生じる比較的大きなエアロゾル粒子は、気温の低い部屋では浮遊する時間が長くなると予想され、換気されていない状況では、2 m 以上離れていたとしても、滞在時間が長くなればなるほど感染リスクも高くなることが推測される。また、エアロゾル粒子の幾つかは、床は勿論、人体表面に付着することも確認された。数々の報道で指摘されているように、エアロゾル粒子が接触感染にも繋がる可能性を示唆している。なお、粒径が 1 μm 程度の液滴は、例えば寒い季節の呼吸が白く見えてもすぐに見えなくなってしまう様子を思い浮かべると分かるように、短時間で蒸発しながら雲のように粒径が小さくなり、湿度の高い環境でも 0.1 μm 程度まで小さくなると考えられる²⁾。その中にコロナウイルスが含まれる場合、ウイルスに液滴の一部が付着したような状態²⁾で浮遊していると推測される。従って、咳やくしゃみによる比較的大きなエアロゾル粒子を除くと、コロナウイルス自体の移動・拡散は気流の解析から予測するのが妥当である。身近な例として、煙

草の煙をイメージすると分かり易い。煙草の粒子径は多くがサブミクロンで、コロナウイルスを含むエアロゾル粒子と同程度であると考えられる。例えば、カフェに喫煙者がいた場合、数 m 離れていても煙草の匂いが気になる、或いは、街中で歩き煙草の人とすれ違った際、暫く煙草の匂いがした、という経験を持つ人は多いであろう。仮に煙草のエアロゾル粒子にコロナウイルスが付着していたら、煙草の匂いを感じた＝鼻の中にウイルスが着地、した可能性を示唆する。計算モデル-Bの結果は、野外であるにも関わらず、2 m 以上離れていても風下の人に感染リスクが生じることを示唆する。従って、social distancing の 2 m という距離は1つの目安であって、エアロゾル粒子が輸送される側に居た場合は必ずしも 2 m が十分とは言えない点にも注意が必要である。なお、本稿は全てマスクをしていない状況を想定しているが、花粉症の対策と同様に、吸引するエアロゾル粒子を低減させるためのマスク着用は重要である。流体力学の観点からは、顔とマスクの間の隙間をできるだけ狭くすることが望ましい。

7. むすび

今回、室内の人の呼吸によって生じる気流によってエアロゾル粒子が輸送・拡散される様子、及び、建物の前に並んだ人の列の後方に風によって呼気中の水蒸気が運ばれる様子について、数値流体解析による検討を行った。その結果、寒い部屋では、数 10 μm という大きなエアロゾル粒子であっても、浮力の影響により上昇・浮遊して 20 秒という短時間で室内に広く拡散し、換気の重要性が示唆された。同時に、輸送されたエアロゾル粒子が人体表面に付着し、接触感染に通じることもし唆された。数 μm 以下のエアロゾル粒子の輸送については気流の解析が重要であり、建物の前に並んだ人の列の例では、3 m 後方でも感染リスクがあることが示された。これらの現象は、煙草の煙に置き換えて考えると理解し易く、感染防止策を練るヒントに繋がると考えられる。今後、床付近の埃の巻き上げについても考慮しつつ、強制対流を生じさせるエアコンの影響についても検討したい。

文献

- 1) N. Zhu, D. Zhang, W. Wang, X. Li, B. Yang, J. Song, X. Zhao, B. Huang, W. Shi, R. Lu, P. Niu, F. Zhan, X. Ma, D. Wang, W. Xu, G. Wu, G. F. Gao, and W. Tan, *N Engl J Med*, (2020), [DOI:10.1056/NEJMoa2001017]
- 2) W.W.-F. Leung and Q. Sun: *Sep. and Purif. Tech. J.* 245, 116887 (2020)
- 3) P. Fabian, J. J. McDevitt, W. H. Dehaan, R. O. P. Fung, B. J. Cowling, K. H. Chan, G. M. Leung and D. K. Milton, *Plos One* :3 (7) e2691, (2008)
- 4) Z.Y. Han, W. G. Weng, and Q. Y. Huang, *J. R. Soc. Interface*, 10: 20130560 (2013)
- 5) 奥山喜久夫：地学雑誌 **98**, (6), 775 (2010)
- 6) <https://news.yahoo.co.jp/articles/adf2d2676fb7cf6bd69adb13aa2f95c834385f94>
- 7) 尾方壮行, 市川真帆, 堤仁美, 有賀隆男, 堀賢, 田辺新一, 日本建築学会環境系論文集, 83, (743), 57 (2018)
- 8) Y. Li, H. Qian, J. Hang, X. Chen, L. Hong, P. Liang, J. Li, S. Xiao, J. Wei, L. Liu and M. Kang, *MedRxiv* (2020) [DOI: 10.1101/2020.04.16.20067728]
- 9) <https://grabcad.com/library/generic-human-head-and-body-step-1>
- 10) ESI Group, Paris France.

脱稿日 2020年6月5日



池田 圭(いけだ けい)

1989 年日電アネルバ株式会社(現キヤノンアネルバ株式会社)入社。01 年株式会社ウェーブフロントに移籍。08 年に株式会社アテナシスを設立、現在に至る。フランス ESI Group 社のエージェントとしてマルチフィジックスソフトウェア ACE+ Suite を軸に半導体・自動車・電力などの業界でサポート・コンサルティングに従事。プラズマの反応モデルについては英国 Quantemol 社の代理店。