

# 通勤電車内のウイルス拡散の数値シミュレーション

佐々木 桃 (指導教員: 吉田裕亮)

## 1 はじめに

例年のインフルエンザの感染者数は、国内で推定約1000万人[1]いると言われており、また2019年の冬から世界的に流行している新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の国内での2020年3月からの累計感染者数は2021年1月25日現在36万人を超えている[2]。インフルエンザや新型コロナウイルス感染症などのような発熱や咳を起こす感染症は高齢者や基礎疾患がある方などの免疫力の低下している方には二次性の肺炎を伴う等、重症化するリスクが大変高い。

これらの感染症の一般的な感染経路は飛沫感染、接触感染と言われており、飛沫感染の主な感染場所は学校や劇場、満員電車などの人が多く集まる場所である。

そこで、本研究では主な通勤・通学手段である電車内における飛沫感染に着目し、窓を開けることや空調による感染対策の効果を、咳により呼出された唾液粒子の車両内での移動や拡散の様子をシミュレーションにより検討する。

## 2 モデル化・格子生成

### 2.1 モデル化

以下の図のような長さ、幅、高さがそれぞれ20m、3m、2mの直方体を車両に見立てた[3]。また、電車は10m/s(36km/h)で走行していると仮定する。

### 2.2 格子生成

格子数は長さ方向に200、幅方向に30、高さ方向に20とし、壁の近くで細くなるような不等間隔の格子を使用した。車両モデルの内部に座席を用意し、また乗車率に合わせて人をランダムに発生させた。これら流れに対する障害物は、障害物のある格子において流速を強制的に0にすることで表現した。具体的には流れの領域で1、障害物の領域で0である配列を用意し、速度の配列に掛け合わせた。

## 3 計算方法

### 3.1 基礎方程式

取り扱う空気の流れは非圧縮性流体の流れとみなせるので、連続の式、非圧縮性Navier-Stokes方程式を使用する。また、ウイルス濃度と温度差(基準温度からの差)は移流拡散方程式を用いて計算する。

### 3.2 解法

数値解法にフラクショナルステップ法[4]を用いた。時間間隔は $\Delta t=0.00125$ とし、支配パラメータである $Re$ 、 $Gr$ 、 $Pr$ 、 $Sc$ はそれぞれ10000、100000000、0.71、7.1とした。計算ステップ数は50000回であり、計算終了時では実時間6秒に対応する。空間の差分近似については、ナビエ・ストークス方程式の非線形項には3次精度上流差分、ただし境界より一つ内側のみ1次精度上流差分、その他の項には中心差分を用いた。また、時間の差分近似については1次精度オイラー陽解法

を使用した。

### 3.3 境界条件

走行中の窓の開いた電車を想定し、窓の開いている部分から長さ方向に流れが入ってくるようにし、連結ドアの部分の速度の大きさは窓から入ってくる流量と同じになるように設定した。また、天井にある空調からはスイングしながら車両内に流れが流入、リターン口から流出するようにし[5]、その速さは窓からの流速の3割とした。リターン口の部分の速度の大きさは、空調から入ってくる流量と同じになるように設定した。(図1に格子と座席および乗車率100%のときの人の配置、図2に境界条件を示す)

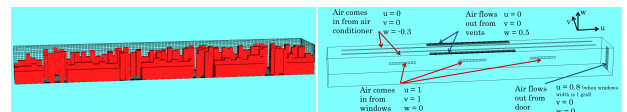


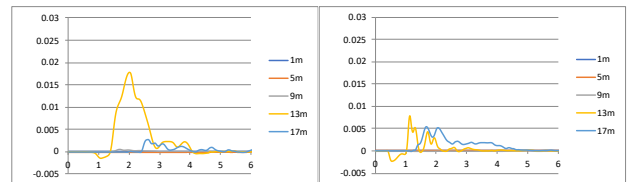
図1: 格子

図2: 境界条件

## 4 計算パターン

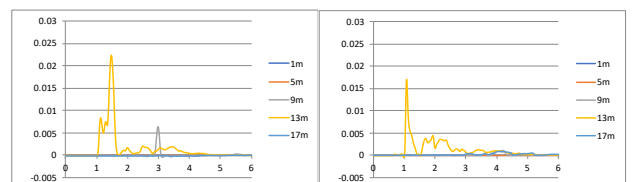
窓を1格子(13cm)、2格子(27cm)開けたときについて、それぞれ空調なし、暖房、冷房、さらに乗車率が0%、50%、100%、150%、また、発生源が長さ方向前から2m、6m、10m、14m、の計76パターンの計算を行った。

## 5 計算結果と考察



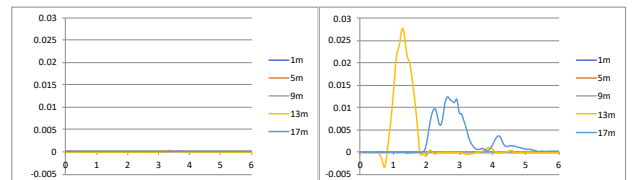
(a) 空調なし:窓13cm

(b) 空調なし:窓27cm



(c) 冷房:窓13cm

(d) 冷房:窓27cm



(e) 暖房:窓13cm

(f) 暖房:窓27cm

図3: 観測位置

図3は発生源が先頭から10mの位置の時の全ての観測位置におけるウイルス濃度を表したグラフである。どの計算結果でも発生源よりも後ろの観測位置の中で一

番近い13mにおいて一番高い濃度が観測される。また、そのピークが窓を13cm開けたときよりも窓を27cm開けたときの方が早く現れるが、このことは窓を27cm開けたときの方が、流れが速いことを示している。暖房ありの窓を13cmを開けた場合のみ、どの観測位置でもほとんど粒子（ウイルス）が観測されなかった。流れを可視してみたところ、粒子のほとんどが発生源のちょうど上あたりにあるリターン口から抜けていた。暖房ありの窓を27cm開けた場合と同じようにならなかったのは、窓を27cm開けた場合の方が流れが速いためリターン口に引っ張られずに流される粒子がより多かったからだと考えられる。また、空調なしの場合はリターン口は起動しておらず、冷房ありの場合では、重い冷たい空気が天井から入ってくることで粒子も下に移動して天井にあるリターン口から離れていくためリターン口の影響が小さい。一方、暖房ありの場合では軽い暖かい空気の影響で粒子も上に移動するため、リターン口の影響が大きいと考えられる。

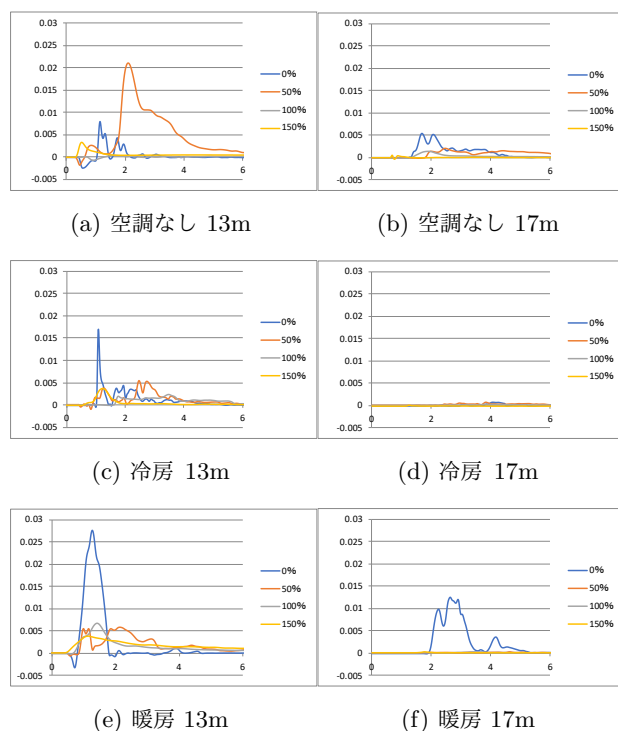


図4: 窓27cm 乗車率

図4は図3と同じ発生源の位置で窓を27cm開けた際の、観測位置が13mと17mにおける場合の乗車率が0%、50%、100%、150%の時のグラフである。空調オンの場合では乗車率0%以外では17mの位置にはほとんど到達していない。観測位置13mでは暖房ありの方が冷房ありと比べてピーク値も合計値も高い。冷房ありと比べて暖房ありでは軽い空気の影響で粒子が上に移動するため、また観測地点は顔の高さを想定しているため、観測地点における濃度が暖房の方が全体的に高かったと考えられる。また空調なしと比べても、乗車率50%以外の場合では暖房ありの方がピーク値も合計値も高い。空調なしの乗車率50%以外では障害物がある方が観測値が低い。障害物があるとそれを避けるような流れになり、人が塊になっているところではウイルスはその場からあまり移動せず少しづつ拡散する。乗車率が高くなるほど人の塊が増え、連結ドア方向への移動が

遅くなったり、その場で停滞したりする。そのため、乗車率が高い、100%、150%時では13m地点での観測値が低いと考えられる。

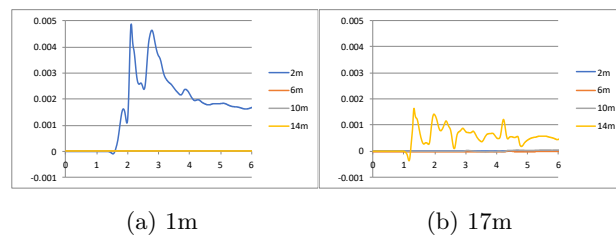


図5: 冷房あり 窓13cm

図5は、冷房ありで窓を13cm開けた場合の全ての発生源における車両の一番前と一番後ろの観測位置、1m、17mでのウイルス濃度を表したグラフである。観測位置が1mの場合でも、17mの場合でも、発生源が観測位置から一番近いところ以外ではほとんど粒子が観測されていないことがわかる。また、観測位置よりも発生源の方が後ろにあるにもかかわらず、観測位置が1mのときでの発生源が2mのときの方が、観測位置が17mのときで発生源が14mのときに比べて6秒間の間に観測されるウイルス濃度は高い。さらに、全ての発生源での濃度の合計値も観測位置1mの方が高かった。観測位置17mは、全ての窓から入ってきた流れが足し合わさったあとの位置である。そのため、発生源が近くでも他の観測位置よりもその場での流速が速く、すぐに通過するので合計値が低いと考えられる。1mの位置ではそれより前の位置から流れてくることはないものの、どの窓よりも前に位置しているため連結ドアの方向にあまり流されずその場で拡散する。その結果、合計値が高くなったと考えられる。

## 6 まとめ・今後の課題

- 冷房ありよりも暖房ありの方が顔の高さあたりで観測されるウイルス濃度が高い。
- 乗車率が高いときは流れがあまりなく、連結ドアの方向にゆっくり移動する、もしくは粒子も発生源の周りでのみ広がる。
- 車両の先頭よりも後ろ側の連結ドア部分付近の方が観測されるウイルス濃度の合計値が低い。

ことが本研究よりわかった。今後の課題は人の熱を考慮したり、電車のスピードを変えたりなど、より現実に近い条件を計算に取り入れていきたい。

## 参考文献

- [1] 厚生労働省, 季節性インフルエンザ患者数の推計方法の見直しについて: <https://www.niid.go.jp/niid/images/epi/flu/levelmap/suikei181207.pdf>
- [2] 厚生労働省, 新型コロナウイルス感染症について: [https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000164708\\_00001.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000164708_00001.html)
- [3] 交友社, 2015: 形式図 JR東日本 E235系量産先行車, 鉄道ファン, 7月号(vol.55)
- [4] 河村哲也, 2014: 流体解析の基礎, 朝倉書店
- [5] 林伸明, 島宗亮平, 長谷川晋一, 2015: シミュレーションによる車内温熱環境の再現と評価, JR EAST Technical Review-No.53, 13-18