

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

列車走行時の窓開けによる 車内換気量を評価する

通勤型車両内の感染症対策のうち、「密閉」対策のひとつとして窓開けによる車内換気があります。窓を開ければ車内の換気が良くなることは経験的にわかっていますが、走行する鉄道車両の換気量に関する知見は多くはなく、車内の換気量を定量的に評価することが求められています。そこで、走行時の窓開けによる車内換気量を予測できる数値シミュレーションツールを開発しました。また、各種条件下の換気量の計算結果を整理し、換気量の簡易予測式を提案しました。



中出 孝次
Koji Nakade
鉄道力学研究部
計算力学研究室
主任研究員(上級)



高垣 昌和
Masakazu Takagaki
鉄道力学研究部
計算力学研究室長



遠藤 広晴
Hiroharu Endo
人間科学研究部
人間工学研究室
主任研究員

はじめに

鉄道車両内において、窓を開ければ車内の換気が良くなることは経験的にわかっています。しかし、窓の開き量、列車速度、そして車内状況(混雑度など)に対して、換気量がどのように変化するかについての定量的な知見はほとんどありませんでした。そこで、鉄道総研内製の流体解析ツール(空気流シミュレーター)¹⁾を用いて、換気量の定量的な評価を試みました。

ここでは、空気流シミュレーターを用いた走行時の窓開けによる換気量の評価方法、各種条件変更に対する換気量の評価結果を示すとともに、計算結果から得られた換気量予測式を紹介します²⁾。

車内換気を調べる流れの数値シミュレーション方法

計算対象は、通勤型車両3両編成としました(図1)。換気量を評価する車両は2両目です。車両モデルの車内の様子を図2に示します。ロングシートと荷棚をモデル化しています。評価対象の2両目の窓は、左右それぞれ3箇所あり、窓幅を2.07mとしました。

乗車時の車内の様子を図3、図4に示します。車両モデルは、定員160人とし、乗車率50%は80人乗車、乗車率100%は160人乗車となります。また車内には、空調機モデルを車両天井部に設置しました。空調機モデルは、2列のライン状の吹出口、その2列の吹出口の間に位置する送風機、車両の中央付近に位置する吸込口の3つで構成されています(図5)。吹出口および吸込口の流量は $2\text{m}^3/\text{s}$ としました。このときの吹出風速は $1.3\text{m}/\text{s}$ (鉛直下



図1 車両モデル(通勤型車両3両編成)

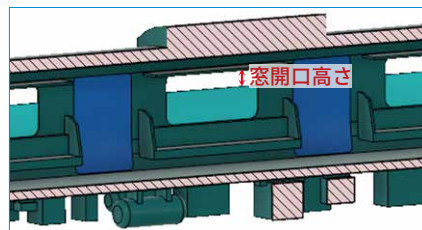


図2 車両モデルの車内の様子(空車)

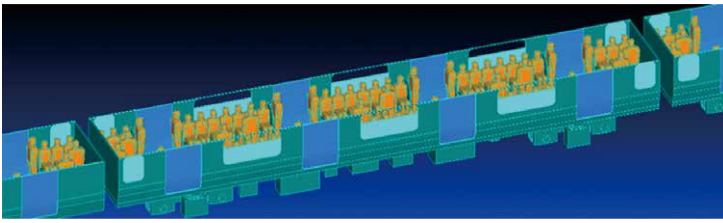


図3 乗車時の車内の様子 (乗車率50%)

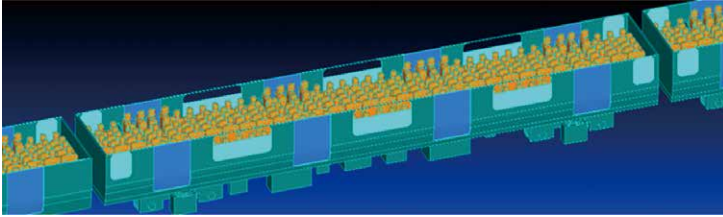


図4 乗車時の車内の様子 (乗車率100%)

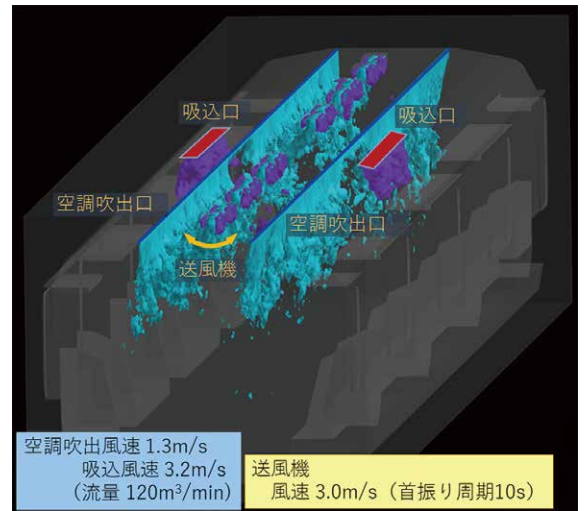


図5 空調機モデル
(下向き風速(水色), 上向き風速(紫色))

向き), 吸込風速は3.2m/s(鉛直上向き)となります。送風機は風速3m/sとし、車両の左右方向に首振り運動をします。首振り角度は鉛直下向きから左右方向にそれぞれ40°, 首振り周期を10秒としました。なお、本研究における空調機モデルでは、車内の空気を循環する機能のみを有し、新鮮外気の導入は考慮していません。

計算領域全体を図6に示します。シミュレーションでは車外と車内の空気の流れを同時に計算します。シミュレーションでは、計算領域を格子状に分割して、流れを計算します。ここで用いた計算格子の分布は、車両近傍領域で格子間隔20mmの一樣等間隔格子とし、車両から離れるに従って計算格子間隔が広がる直交不等間隔格子(総計算格子数は約3億)としました。

計算ケースのパラメーターは、列車速度(72km/h(20m/s), 45km/h(12.5m/s)), 乗車率(0%, 50%, 100%), 空調機(なし, あり), 窓開口高さ

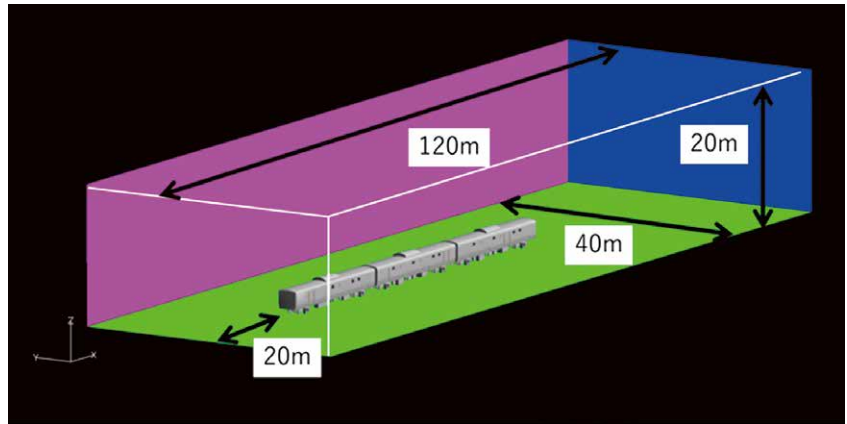


図6 計算領域全体

(350mm(窓開口面積4.26m²), 170mm(窓開口面積2.04m²))としました。これらの組み合わせとして、各種条件変更に対する影響評価が必要と判断した合計10ケースを計算条件としました。

流れの数値シミュレーションには、時々刻々と変化する車外および車内の流れの様子を精度良く再現できる計算手法であるラージ・エディ・シミュレーション(LES) (☞参照) とよばれ

る方法を用いました。計算の実行には鉄道総研のスーパーコンピューター(CRAY製, XC50)を用い、1ケースあたりの計算(300秒間のシミュレーション)に要した計算時間は約9日間となりました。

車内換気量の評価方法

流れの数値シミュレーションから得られる車内の空気の流れをもとに換気量を評価します³⁾。本研究では、車内の114箇所(1秒間に40個の仮想粒子(流れに追従する質量ゼロの粒子)を発生させて、車内の粒子の個数の時間変化を調べることで換気量を求めました⁴⁾。車内で発生させた粒子は車内の空気の流れに追従し、ある時間の経

☞ ラージ・エディ・シミュレーション (LES)

乱流の数値シミュレーション方法のひとつ。計算格子で解像できない小さな乱れをモデル化して、流れの数値シミュレーションを行います。ほかのモデル化手法と比較し、モデルへの依存が小さいため、さまざまな乱流に対する適用性に優れ、精度良く流れを予測することができます。

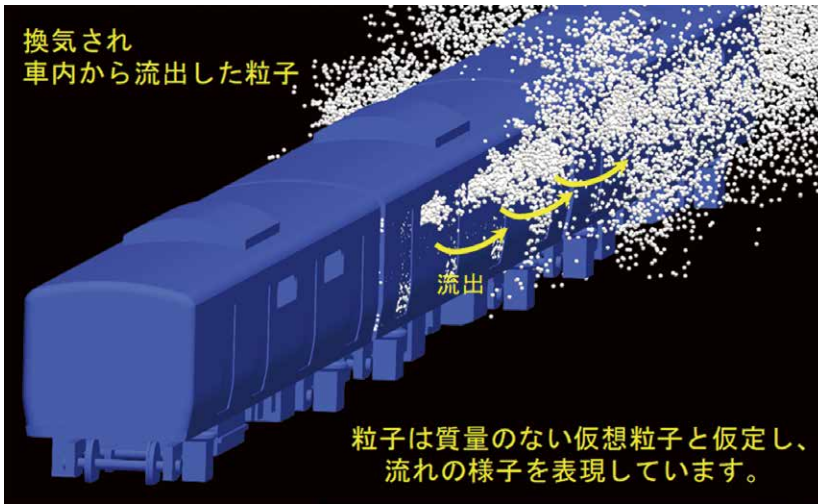


図7 窓開けによる車内換気の様子
(2両目車内で発生する仮想粒子が窓から流出)

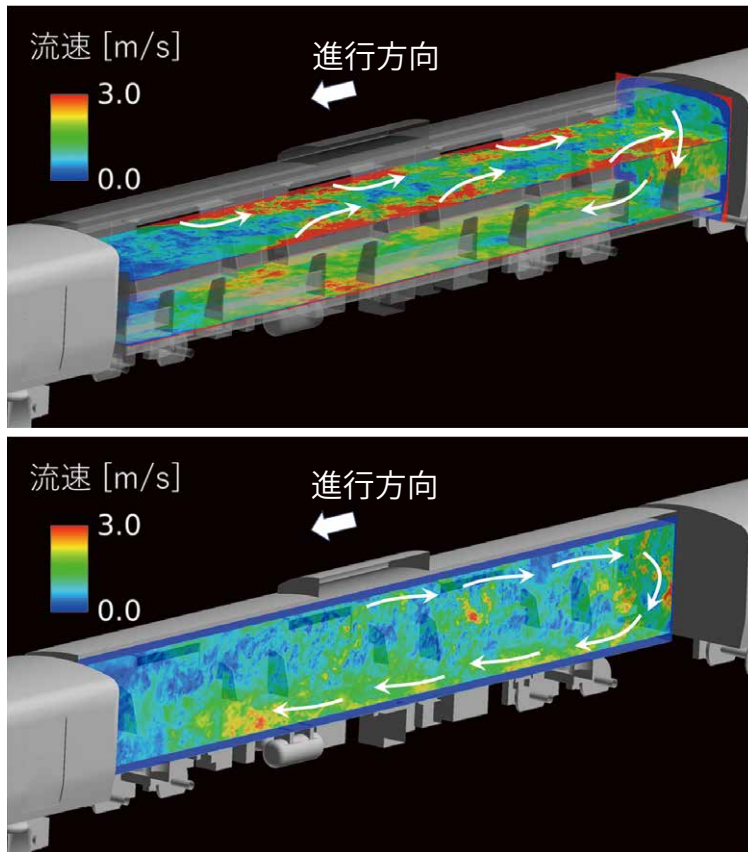


図8 瞬時の車内の流れの様子
(列車速度72km/h, 空車, 空調機なし)

過後には、窓から車外に流出されます(図7)。この流出されるまでの時間が短いと換気がよいと評価できます。本研究において、車内の粒子数の時間変化を調べる評価時間は最短でも200秒間を確保しました。

空調機モデルにおいては、粒子が吸

込口から吸い込まれる場合があります。この粒子は、吹出口においてランダムな位置から吹き出されるようにモデル化しました。

車内の流れの様子

列車速度72km/h, 空車, 空調機な

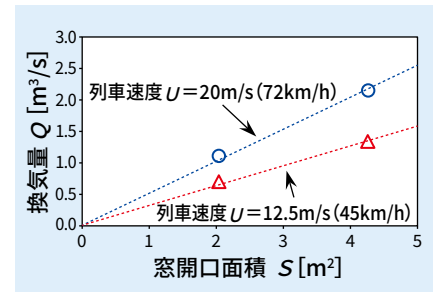


図9 窓開口量の影響

しの計算条件について、瞬時の流れの様子を図8に示します。ここでは、車内の床面付近の水平面、窓開口部の水平面、車端付近の鉛直面における流速の大きさのコンター(図8上)と車両幅中心の鉛直面における流速の大きさのコンター(図8下)を示しています。これらの時間変化を動画により観察すると、窓から流入する流れは車内の進行方向後ろ側の車端まで流れ、車端で床面に向かう下降流となり、床面付近では進行方向前側に向かう流れとなります。つまり、一車両内全体を循環する大きな流れが形成されます。また、このような流れの存在は、混雑時の条件についても同様に確認できました。

車内換気量の評価結果

各種条件変更(全10ケース)に対する換気量への影響を整理した結果を示します。なお、シミュレーションにより得られた換気量は、実測値とおおむね対応することを確認しています。

(1) 窓開口量の影響

乗車率0%・空調機なしのデータを用い、換気量に対する窓開口量の影響を調べた結果を図9に示します。換気量は窓開口面積にほぼ比例することがわかりました。

(2) 列車速度の影響

乗車率0%・空調機なしのデータを用い、換気量に対する列車速度の影響を調べた結果を図10に示します。換気量は列車速度にほぼ比例することがわかりました。

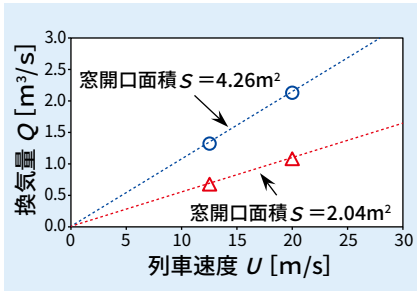


図10 列車速度の影響

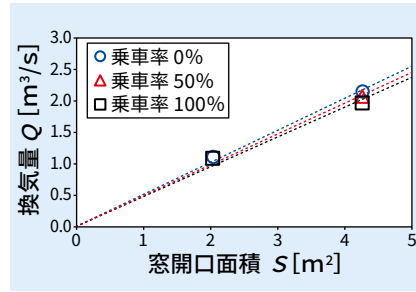


図11 混雑度の影響

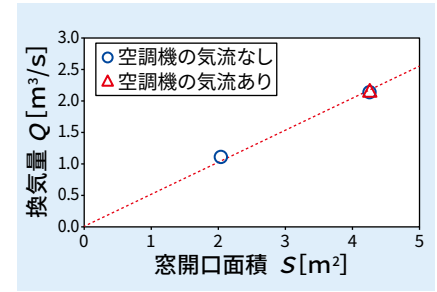


図12 空調機の気流の影響

(3) 混雑度の影響

列車速度20m/s (72km/h)、空調機なしのデータを用い、換気量に対する混雑度の影響を調べた結果を図11に示します。乗車率0%と乗車率100%の差は約8%程度となりました。つまり、混雑度が換気量に及ぼす影響は大きくないことがわかりました。

(4) 空調機の気流の影響

列車速度20m/s (72km/h)、窓開口面積4.26m² (窓開口高さ350mm)のデータを用い、空調機の気流が換気量に及ぼす影響を調べた結果を図12に示します。本条件では、空調機の気流が換気量に及ぼす影響はほぼないことがわかりました。

車内換気量の簡易予測

シミュレーション結果より、換気量は、窓開口面積および列車速度にほぼ比例することがわかりました。また、車内の状況(混雑度、空調機の気流の存在)は換気量に大きな影響を与えないこともわかりました。そこで、換気量の簡易予測式として、

$$Q = \alpha \times S \times U$$

Q: 換気量[m³/s]

S: 窓開口面積[m²]

U: 列車速度[m/s]

を提案しました。係数 α は実測もしくはシミュレーションから決めます。参考までに、本シミュレーション(乗車率0%・空調なし)結果から得られた係数は、 $\alpha=0.026$ です。

なお、ここで提案しました換気量の

簡易予測式では、窓の開口条件を開口面積として統一的に扱っています。実際は、同じ開口面積でも、窓の配置・形状により、係数 α は異なる可能性があります。現状、本計算モデルの窓配置・形状と大きく変わらない車両にかぎり、 $\alpha=0.026$ で概算値を予測することが可能だと考えられます。

換気量の予測例を以下に示します。窓幅1.2m、窓開口高さ10cm、窓枚数6枚(1車両あたり)とし、列車速度70km/hで走行した場合を考えます。換気量の簡易予測式($\alpha=0.026$, $S=0.72$, $U=19.4$)より、当該車両の窓開けによる換気量は0.36m³/sとなり、車内の空気が約5~6分に1回入れ替わることが予測されます。

鉄道車両には、空調機による外気導入ができる車両もあります。ここで、窓開けに加え、空調機による外気導入が行われる際には、それにより換気量は大きくなります。ここで、計算結果(空調機の気流が窓開けによる換気量に影響しない)を考慮すると、外気導入による換気量を、窓開けによる換気量に加算することで、総換気量を予測することができると考えられます。例えば、上に示した予測例の状況にさらに空調機で外気導入0.43m³/sが行われた場合には、総換気量は0.79m³/sとなり、車内の空気が2~3分に1回入れ替わることが予測されます。

おわりに

本研究により、走行時の窓開けによ

る車内換気量の定量的な予測ができるようになりました。今後、本研究で開発したツールの適用範囲を検証するために、現車試験を行い、それと比較検証する予定です。

なお、本シミュレーションモデルにおいて、車両には窓の開口以外の隙間はなし、走行風以外の車外環境からの外乱はなし(横風などの影響なし)、さらに、走行速度の変化はなし(加減速なし)という理想状態を想定したものであり、実際にはその状況に応じて換気量はさらに増加することが考えられます。RRR

文献

- 1) 中出孝次, 井門敦志, 梶島岳夫: 台車を含む鉄道車両モデルにおける車両床下の蛇行流れ(実形状の鉄道車両モデルにおける大規模流れ構造のLES), 日本機械学会論文集, Vol.87, No.894, 2021
- 2) 中出孝次, 高垣昌和: 走行時の鉄道車両の窓開けによる車内換気効果の数値シミュレーション, 第34回数値流体力学シンポジウム講演論文集, D05-1, 2020
- 3) 伊藤一秀, 加藤信介, 村上周三: Particle TracingによるVisitation Frequency, Purging Flow Rateの基礎的解析(不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究), 日本建築学会計画系論文集, Vol.65, No.534, pp.41-48, 2000
- 4) 小林知広, 梅宮典子, 近本智行, LIM EUNSU: 複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究(その2) LESによる単一開口及び複数開口の解析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(大阪), 第4巻, pp.201-204, 2015