

# 鉄道通勤車両空間を対象とした環境解析と置換換気システムの性能評価

## CFD Analysis of Indoor Environment in Commuter Train and The Performance Evaluation of Displacement Ventilation System

学生会員 ○川又 光 (東京工芸大学大学院) 正会員 伊藤 一秀 (東京工芸大学)  
Hikaru KAWAMATA\*<sup>1</sup> Kazuhide ITO\*<sup>1</sup>  
\*<sup>1</sup> Tokyo Polytechnic University

In this paper, the indoor environmental quality for the railway vehicle space was analyzed for assuming the getting on rate to be a parameter of analysis. Especially air quality and temperature distributions in vehicle space were analyzed by using CFD technique. Furthermore, it reports on the result of examining the controllability of indoor climate in the vehicle when the displacement ventilation system was applied in it.

### はじめに

本研究では、主に通勤に使用される鉄道車両内空間を対象として車両内に形成される流れ場、温度場、ならびに汚染物質等の拡散場の様相を数値解析により予測することで、利用者にとって快適かつ健康・衛生的な車内空間を計画するための基礎データを提供することに目的がある。日本では、朝夕の通勤ラッシュ時には平均乗車率が200%を越える車両も存在し、公衆衛生の観点からは日常的に劣悪な車両環境となっていることが予想される。時差通勤の推奨や運行列車の増便により、乗車率の緩和という側面から対策が行われているものの、鉄道通勤車両空間の環境実体の報告や、車内空調システムの改善による室内環境改善効果の検討等に関する報告は殆ど見受けられないのが実情である。

このような背景のもと、本研究では実在する鉄道車両空間を対象として、人員密度(乗車率)をパラメータとした場合の室内環境解析を行うことで、通勤車両空間の温度場、汚染物質濃度場の検証を行った結果を報告する。更に、車両空間の空気質改善を目的として、置換換気型の空調方式を適用した場合の車両空間内の環境制御性に関して数値解析により検討した結果も併せて報告する。

### 1. 対象とする鉄道車両空間とモデル化

解析対象とする鉄道車両空間の概要を図1に示す。実際の車両内部空間の写真も図1中に併せて示している。車両空間は19.3m×2.2m×2.5(h)mであり、窓面に沿って座席が配置されている。本報では、実在する通勤車両をベースに、座席、窓、空調機器の吹出口、排気口等、実際の車両空間の幾何形状をほぼ正確に再現している。解析対象とする車両は前後に同型の車両が連結されている列車の中間車両とし、幾何形状と境界条件の対称性を考慮して、1車両の1/2空間(図1中の対称面)を解析対象領域としている。

また本報では2種類の空調方式を解析対象とする。吹出口・吸込口の幾何形状・位置を図2に示す。基本ケース(図

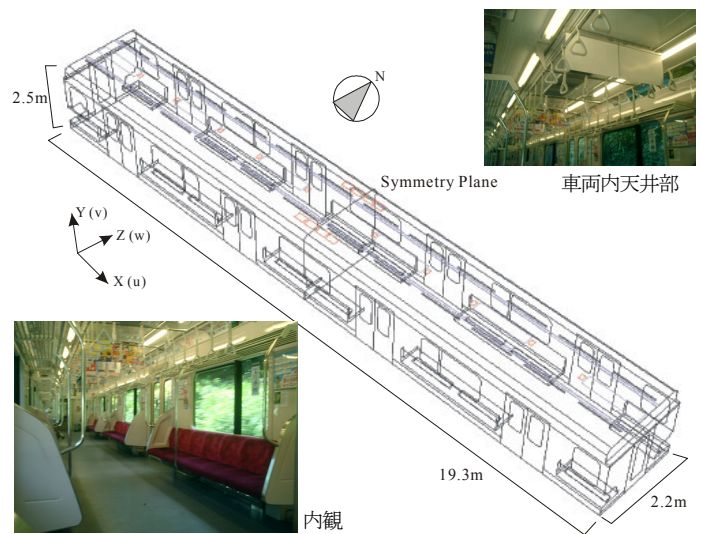
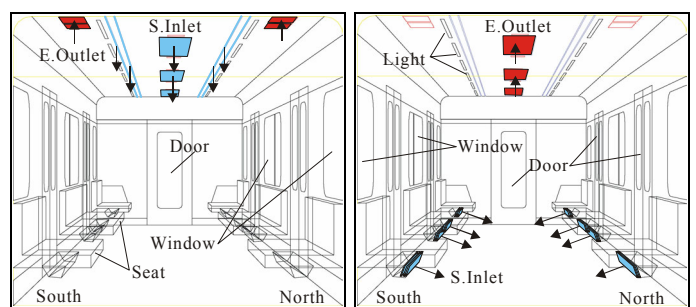


図1 解析対象車両空間概要



(1) 天井ユニット型 (2) 置換換気型  
図2 車両空間内部と空調方式

2(1))は通常車両内空調に用いられる天井ユニット型で、この空調方式では天井中央部に空調吹出口が2種類(グリル型とスリット型)設置されている。メインの空調吸込口は1車両で2カ所のみを設定であり、図1の車両中央部の解析対称面位置に設置されている。

本報で適用を検討する置換換気方式(図2(2))は、通常、座席の下側に設置されている補助ヒータ部分を空調吹出口として利用し、居住域の低レベルより外気導入を行う

表 1 計算ならびに解析条件

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Turbulence Model | Low Re type k-ε model (Abe-Nagano Model, 3-dimensional calc.)                                                                                                                                                                                                                                     |
| Mesh             | 1,516,966 (Unstructured mesh)                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Scheme           | Convection Term: QUICK                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Inflow Boundary  | $U_{in} = 0.169$ or $0.315$ [m/s], (See Table 2)<br>$k_{in} = 3/2 \times (U_{in} \times 0.05)^2$ , $\varepsilon_{in} = C_{\mu} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$ , $C_{\mu} = 0.09$ , $l_{in} = (\text{Slot width}) \times 1/7$                                                                       |
| Outflow Boundary | $U_{out} = \text{Free slip}$ , $k_{out} = \text{Free slip}$ , $\varepsilon_{out} = \text{Free slip}$ , $T_m = 20.98$ or $26.34$ [°C]                                                                                                                                                              |
| Wall Treatment   | Velocity: No slip, $k _{wall}$ : No slip, $\varepsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ , Temperature: Adiabatic condition (Convective heat flux (W/m <sup>2</sup> k) is given from Heat Balance Equation on each wall surface)<br>Radiation: Emissivity 0.9 (Symmetry plane: 0.0), |
| Contaminant      | Passive Contaminant                                                                                                                                                                                                                                                                               |

表 2 解析ケース一覧ならびに熱負荷条件 (1 車両分)

| Case     | 乗車率 [%] | 人数 [人] | 人体体積 [m <sup>3</sup> ] | 人体発熱 [W] | 照明負荷 [W]                           | 壁面冷熱 [W]                          | 室内日射負荷 [W]                         |                                   | 熱負荷合計 [W] | 空調吹出    |          | 空調方式       |
|----------|---------|--------|------------------------|----------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------|---------|----------|------------|
|          |         |        |                        |          |                                    |                                   | 北                                  | 南                                 |           | 温度 [°C] | 風速 [m/s] |            |
| Case 1s  | 0       | 0      | 0.0                    | 0        | 1113.6<br>(40.6 W/m <sup>2</sup> ) | -                                 | 958.2<br>(106.5 W/m <sup>2</sup> ) | 1651<br>(183.5 W/m <sup>2</sup> ) | 3722.8    | 20.98   | 0.169    | 現状(図 2(1)) |
| Case 2s  | 100     | 157    | 10.0                   | 10770    |                                    |                                   |                                    |                                   | 14092.2   |         |          |            |
| Case 3s  | 190     | 298    | 19.1                   | 20780    |                                    |                                   |                                    |                                   | 24503.2   |         |          |            |
| Case 2s' | 100     | 157    | 10.0                   | 10770    |                                    |                                   |                                    |                                   | 14092.2   |         |          |            |
| Case 1w  | 0       | 0      | 0.0                    | 0        | 1113.6<br>(40.6 W/m <sup>2</sup> ) | 2105.2<br>(-40 W/m <sup>2</sup> ) | 580.4<br>(64.5 W/m <sup>2</sup> )  | 3536<br>(393.0 W/m <sup>2</sup> ) | -3218.8   | 26.34   | 0.169    | 現状(図 2(1)) |
| Case 2w  | 100     | 157    | 10.0                   | 12182    |                                    |                                   |                                    |                                   | 8963.2    |         |          |            |
| Case 3w  | 190     | 298    | 19.1                   | 23462    |                                    |                                   |                                    |                                   | 20243.2   |         |          |            |
| Case 2w' | 100     | 157    | 10.0                   | 12182    |                                    |                                   |                                    |                                   | 8963.2    |         |          |            |

ものである。空調吸込口は天井中央部に設置している。吹出口・吸込口の位置関係を除き、その他の条件は全て統一している。

## 2. 数値解析概要

鉄道車両空間の流れ場・温度場ならびに汚染質拡散場の解析は、CFD (計算流体力学) をベースとする数値解析により行う。室内流れ場は、低 Re 型 k-ε model (Abe-Nagano model) に基づく 3 次元解析を行う。境界層粘性底層内部まで解析対象とするため、壁面近傍では、y+ (Wall Unit) が 10 以下の領域を最低 3 分割以上したメッシュ分割とする。離散スキームは移流項に QUICK、その他は 2 次中心差分を用いる。速度の壁面境界条件は no-slip 条件、温度は各表面の熱収支式より算出される対流熱流束を与える。放射解析も連成して行う。壁面間の相互放射熱伝達の解析では、discrete beam 法により形態係数を算出し、radiosity 法による緩和計算により室内の相互放射性状を解析する。放射計算では壁面部分を流体解析メッシュの 10 倍程度のスケールの放射用メッシュを作成し、放射束を割り当てる。数値解析概要を表 1 に示す。

### 2.1 車両内部の人員密度(乗車率)のモデル化

車両内部の超過密状態を数値解析上で再現するために、床面レベルから 1.8[m] 領域を対象として、運動量の輸送方程式中に仮想的な運動量 Sink Term を導入する。本研究では仮想的な運動量 Sink Term として、仮想的なポアラスメディアを設定し、運動量損失を意図的に与えたもので、本研究では(1)式で表現する。

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} u_i + C_d \frac{1}{2} \rho |u_i| u_i \quad (1)$$

ここで  $\alpha$  および  $C_d$  は均質なポアラスメディア内での Ergun 則を仮定し次式で与える。ここで、 $D_p$  は仮想メディアの直径 [m]、 $\varepsilon$  は空隙率 [%] を示す。

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (2)$$

$$C_d = \frac{3.5}{D_p} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (3)$$

(1)か～(3)式を用いて人員密度を 0 [%]、100 [%]、190 [%] の 3 段階に設定し、混雑時の車両内環境解析を行う<sup>注1)</sup>。

### 2.2 解析ケース

解析ケース一覧ならびに熱負荷条件を表 2 にまとめて示す。主な解析パラメータは、夏期・冬期の別他、乗車率、車両空調方式、である。これらを組み合わせ、全 8 ケースの解析を実施する。車両内の熱負荷として、人体発熱<sup>注2)</sup>、照明負荷<sup>注3)</sup>の他、窓面に日射負荷を設定する。本解析では、窓面熱負荷は東京南中時を対象とした車両外側日射負荷の 1/2 を室内側発熱と仮定して均一に与えている<sup>注4)</sup>。冬期には窓面を除く壁面に冷熱負荷を均一に与えている。吹出温度は、空調目標温度を夏期 26 [°C]、冬期 22 [°C] と設定し、乗車率 0 [%] の場合の車両内熱バランス式より吹出温度  $T_m$  を算出する<sup>注5)</sup>。この吹出温度条件を他の乗車率のケースにも適用する<sup>注6)</sup>。吹出風速は車両内への導入空気量を換気回数 20 [回/h] と仮定して算出する。

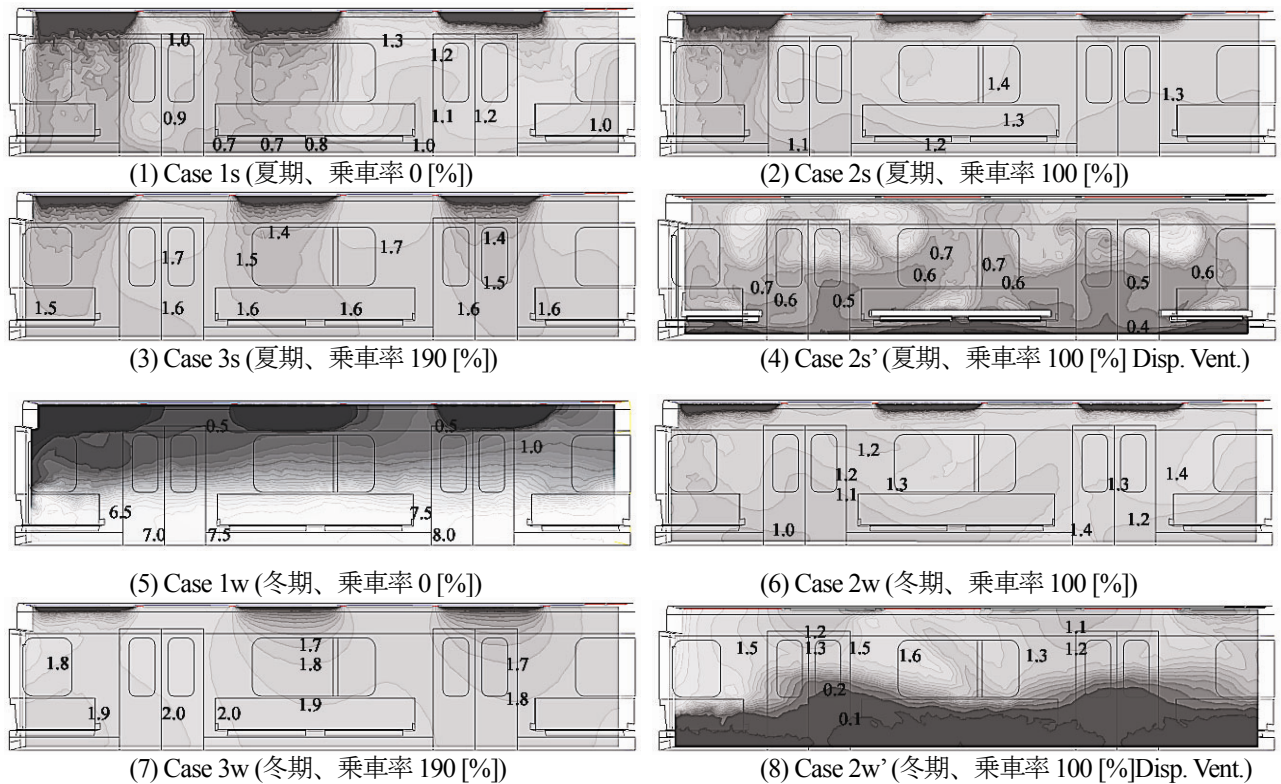


図3 空気齢(SVE3)解析結果 (車両z方向中央x-y断面、名目換気時間で無次元化)

### 2.3. 換気効率指標

本解析では空気齢(SVE3)ならびに規準化居住域濃度  $C_n$  を用いて居住域空気質性状の評価を行う。

加藤らの提案する SVE3 では、室内様に単位時間当たり総量  $q$  の汚染質発生がある場合の位置  $p$  での濃度と瞬時一様拡散濃度( $C_s$ )を用いて(4)式により空気齢分布が算出可能である。

$$SVE3(X) = \frac{C'_X(X)}{C_s} \quad (4) \quad C_s = \frac{q}{Q} \quad (5)$$

(4)式は汚染質の定常一様発生を仮定した場合のその条件下における濃度分布を直接空気齢分布に読み換えるものである。

規準化居住域濃度( $C_n$ )とは居住域平均濃度( $C_p$ )と完全混合濃度( $C_s$ )の比として定義される換気効率指標であり、気調和・衛生工学会の換気規格である SHASE-102 (2003) において定義されている。

$$C_n = \frac{C_p}{C_s} \quad (6)$$

本研究では床面から 1.8m までの空間を居住域とし、汚染質は人体起源を模擬し、居住域一様発生と仮定する。

## 3. 解析結果

### 3.1 流れ場・温度場の解析結果

本報では居住域レベルの空気質制御性に注目しているため、紙面を考慮して流れ場ならびに温度場の解析結果の図は割愛する。車両内の平均風速ならびに平均温度の解

析結果を表3に示す。

本解析では換気回数 20 [回/h]の条件で吹出風速を設定しているが、全てのケースにおいて居住域の平均風速は 0.1 [m/s]程度以下となりドラフトは感じない風速レベルとなった。また人員密度 0 [%]時の空調目標温度と熱負荷条件より算出した吹出空気温度を全ケースに適用しているため、人員密度が上昇するに伴い、居住域レベルの平均温度も急激に上昇し、特に人員密度 190 [%]では人体発熱により人員密度 0 [%]と比較して 25 [°C]以上の温度上昇となる。夏期・冬期ともに置換換気方式(Case 2s'ならびに Case 2w')を採用することで、天井ユニット型方式(Case 2sならびに Case 2w)と比較した場合に、若干ではあるが居住域温度を低く制御することが可能となる。

### 3.2 空気齢(SVE3)分布解析結果

空気齢(SVE3)分布の解析結果を図3に示す。夏期条件では、天井面から供給された冷房空気によって車内が攪拌され、比較的混合した流れ場が形成されるため、居住域では相対的に均一な空気齢分布が形成される。乗車率が高くなるに従い、居住域空気齢も大きくなっていく。置換換気方式を採用することで居住域空気齢が大きく低下する様子も観察できる。冬期条件では乗車率 0 [%]のケースにて車内に明確な温度成層が形成され、それ故、居住域空気齢が大きくなっていく。乗車率が高くなるにつれ居住域に設定された人体発熱に起因する熱対流により居住域が攪拌され、車内の空気齢分布が均一化していく傾向が観察される。



表3 車両内平均風速・温度・換気効率等の解析結果

| Cases    | 居住域平均風速<br>[m/s] | 居住域平均温度<br>[°C] | 居住域平均空気齢<br>[-] | 室平均空気齢<br>[-] | 規準化居住域濃度<br>[-] |
|----------|------------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| Case 1s  | 0.10             | 25.0            | 1.01            | 1.02          | 1.01            |
| Case 2s  | 0.14             | 38.9            | 1.11            | 1.08          | 1.11            |
| Case 3s  | 0.12             | 50.4            | 1.24            | 1.19          | 1.24            |
| Case 2s' | 0.06             | 36.6            | 0.88            | 0.97          | 0.99            |
| Case 1w  | 0.03             | 17.4            | 3.38            | 2.85          | 4.39            |
| Case 2w  | 0.11             | 37.3            | 1.28            | 1.28          | 1.29            |
| Case 3w  | 0.08             | 48.4            | 1.98            | 1.95          | 1.86            |
| Case 2w' | 0.06             | 35.6            | 0.89            | 0.97          | 0.96            |

### 3.3 換気効率の解析結果

車両内の換気効率指標の解析結果を表3にまとめて示す。居住域平均空気齢に着目した場合、夏期の乗車率 190 [%] のケース(Case 3s)では乗車率 0 [%] のケース(Case 1s)と比較して居住域平均空気齢の値が 20 [%]程度悪化する結果となった。また乗車率 100 [%]の条件下では、置換換気方式を採用することで、通常方式と比較して 20 [%]程度の換気効率改善効果が見込める結果となった。

冬期の条件では、車率 0 [%]に車内に強い温度成層が形成され、それ故室平均空気齢が 3.38 と大きな値になるが、乗車率が 100 [%]ならびに 190 [%]のケースでは居住域に設定される人体発熱による熱上昇流により車内に循環流が形成され、車率 0 [%]と比較して、換気効率が改善される結果となった。また冬期条件においても、置換換気方式を採用することで 30 [%]程度の居住域換気性状の改善となる結果となった。

### 4. 結論

本研究では通勤車両空間を対象とした CFD 解析を実施することで、車内環境予測を行うと共に、置換換気システムを導入した場合の環境制御性に関する検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

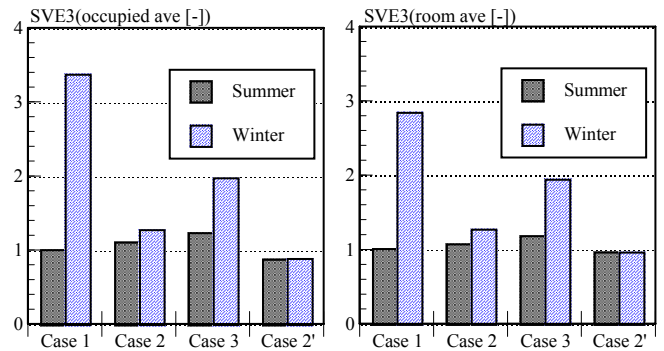
- (1) 空調吹出温度を一定の条件で乗車率を変化させた場合、乗車率が 190 [%]の場合には 0 [%]の場合と比較して、居住域レベルの平均温度が 25°C以上上昇する。
- (2) 乗車率 100 [%]と 190 [%]を比較した場合、天井ユニット型空調方式において夏期には約 10 [%]、冬期には 35 [%]程度、換気性状(空気齢)が悪化する結果となった。
- (3) 置換換気方式を導入することで、居住域空気質(空気齢)を 20~30 [%]程度改善可能な結果となった。

### 謝辞

本解析を行う上で解析モデルの作成・データ整理等は松本昌樹氏(研究当時東京工芸大学卒業生)の労に負う面が大である。記して深甚なる謝意を示す。

### 注釈

- [1] 小田急電鉄によれば、通勤車両の長手座席は 7 人掛けと 3 人掛けで構成されており、その他の床面は 0.35 [m<sup>2</sup>/人]が立座席として定義されている。乗車率 100 [%]の場合、1 車両当りの着座人数は 54 名、立席(立っている人数)は 103 名となる。



(1) 居住域平均空気齢 (2) 室平均空気齢  
図4 空気齢解析結果

- [2] 人体発熱は車内の座席数に応じて座位ならびに立位の人数を算出した上で、顕熱分のみを考慮して全人体発熱を算出している。
- [3] 照明器具は 40 [W]の電球が一車両当たり 24 本設置されていると仮定。
- [4] 窓面熱負荷は以下に示す東京南中時の外側日射負荷の 1/2 を室内側発熱と仮定して均一に与える。  
夏期:北窓面日射負荷 213 [W/m<sup>2</sup>]、南窓面 367 [W/m<sup>2</sup>]  
冬期:北窓面日射負荷 129 [W/m<sup>2</sup>]、南窓面 786 [W/m<sup>2</sup>]
- [5] 吹出温度は乗車率 0 [%]の場合の空調目的温度  $T_{ave}$  を夏期 26[°C]ならびに冬期 22 [°C]として以下の熱バランス式より算出する。  
$$q_t = Cp \cdot \rho \cdot Q(T_{ave} - T_{in}) \quad (A1)$$
- [6] 車両内の人体負荷を無視した条件で空調吹出温度を算出しているため、乗車率が 100 [%]ならびに 190 [%]のケースでは車両内が高温となる。
- [7] 平均濃度算出の際の空間体積は人体による占有体積を差し引いたネットの空間体積を用いている。

### 参考文献

- [1] Kato, S., and Murakami, S. (1988) New Ventilation Efficiency Scales based on Spatial Distribution of Contaminant Concentration Aided by Numerical Simulation. ASHRAE Transactions 94(2): 309- 330
- [2] SHASE102 (2003) 換気規準・同解説, 空気調和・衛生工学会
- [3] K. Abe, T. Kondo, Y. Nagano (1994) A New Turbulent Model for Predicting Fluid Flow and Heat Transfer in Separating and Reattaching Flows -1, Flow Fields Calculations, Int. J. Heat Mass Transfer, 37, (1): 139-151