

気動車屋根上排気流れの数値流体解析に基づく
排気管の改良と車体スス汚損低減

原田 夏輝* 野口 雄平* 新木 悠斗* 宮地 徳蔵**

Exhaust Pipe Modifications to Reduce Soot Staining on Vehicle Bodies
Based on Roof-level Exhaust Flow Simulations of Diesel Railcars

Natsuki HARADA Yuhei NOGUCHI Yuto ARAKI Tokuzo MIYACHI

Exhaust gas emitted from diesel railcars can sometimes cause soot staining on surface of car body. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted in this study to investigate the exhaust flow around a car body and to analyze both the causes of soot staining and its countermeasures. Based on the findings from CFD simulations, the exhaust pipes of the actual car were modified. The degree of staining with and without the countermeasure was evaluated based on the image brightness of the car body. As a result, the modified exhaust pipe reduced soot staining on the car body surface.

キーワード：気動車，排気，スス汚損，CFD，画像解析

1. はじめに

国内の非電化路線においては、ディーゼル気動車が広く運用されている。気動車は、ディーゼルエンジンからの排気を、排気管を通じて屋根上に吐出する。図1に示すように、排気管の出口は車間部の屋根上付近に位置することが多い。走行中に排気管から車外に吐出された排気は、走行風により後方へ拡散する。この際、屋根上機器などの障害物が存在すると、排気が車体表面付近に滞留しやすくなる。このような排気の滞留は、車体表面のスス汚損や、車内への排気の流入を引き起こす可能性がある。したがって、屋根上における排気の流れを把握したうえで、排気管や屋根上機器の形状や配置を最適化することが望ましい。

本研究では、実際に運用されている特急型気動車2形式を対象とする。それぞれの形式をA系、B系と呼称する。A系とB系は同一の線区を走行するが、車体のスス汚損度合いは大きく異なる。A系では車体のスス汚損が軽微であるのに対し、B系ではスス汚損が激しく、車体清掃後すぐに表面が黒く汚れてしま

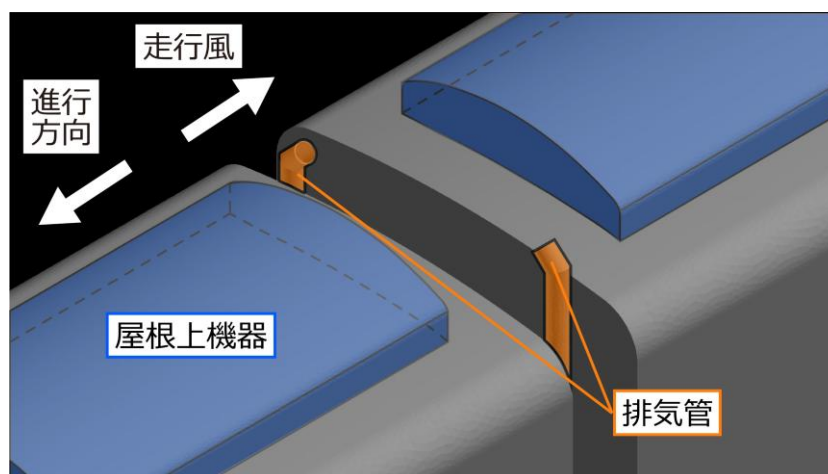


図1 気動車の車間部における排気管の配置の例

* 空力・騒音研究部 車両空力特性研究室

** 空力・騒音研究部 熱・空気流動研究室

うような状態であった。両者の車体形状、編成、運用形態などは類似しており、車体の汚損度合いの違いは、両者の排気管や屋根上機器の形状や配置の違いに起因していると考えられる。

本研究の目的は、B系で生じる車体スス汚損の原因を究明し、その対策について検討することである。まず、A系およびB系を対象として、気動車の屋根上における排気の流れを模擬する数値流体解析（CFD解析）を実施し、屋根上で排気が滞留しにくい排気管形状について検討した。この結果をもとに、現車の排気管形状を改良し、改良前後での車体のスス汚損の低減効果について調査した。

2. 排気流れに関する数値流体解析

著者らは、文献1においてCFD解析を実施し、A系およびB系のそれぞれに対して、排気管から吐出する気流（排気に相当）の車外における分布を評価した。本章では、これらに加えて、B系の排気管を延長する対策について検証した。

2.1 手法

2.1.1 解析対象

CFD解析で用いた車両モデルは、A系およびB系を模擬した2両編成のモデルである。単純化のため、車体の形状は2形式で同一とし、屋根上機器および排気管を変化させた。車体の大きさ（実寸）は幅2800mm×高さ2570mm×長さ20800mmである。床下機器や台車、連結幌などは省略した。車間部には各車両に1本ずつ、合計2本の排気管が設置されている。

車両モデルの条件は、A系条件、B系既存条件、B系改良条件の3条件とした（図2）。なお、すべての条件において、排気管の断面形状は円形（外径140mm、内径120mm）であり、車体妻面から排気管中心ま

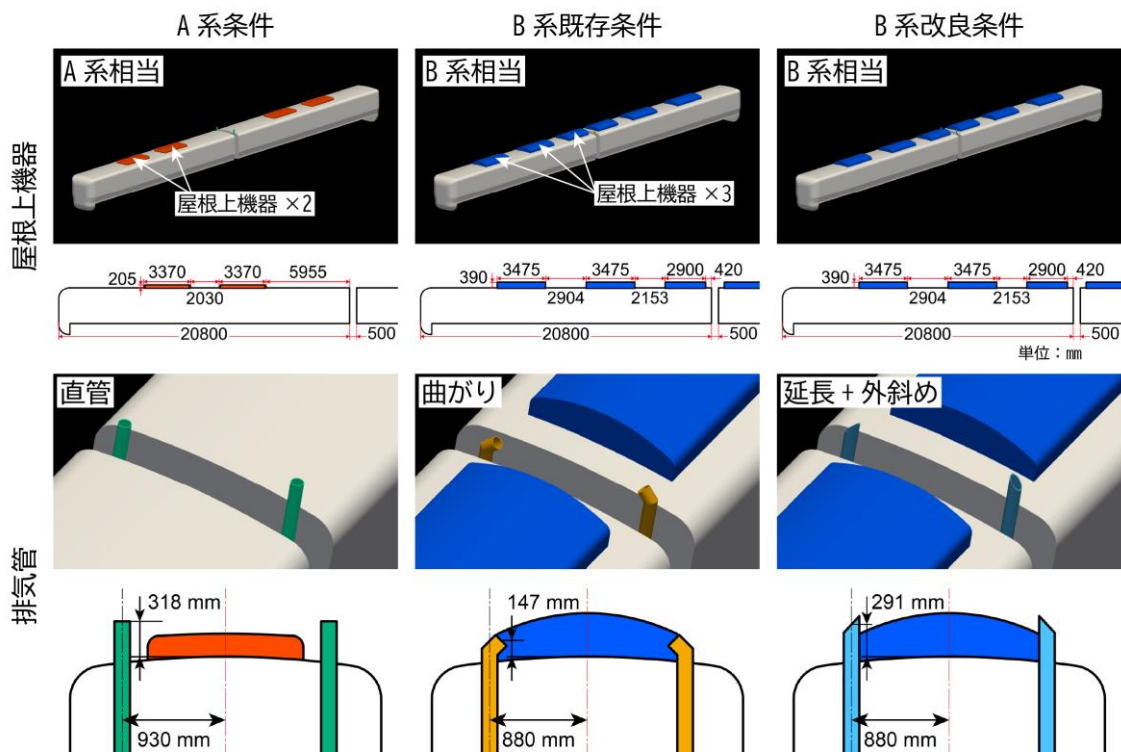


図2 車両モデル

での距離は 100mm である。1 両目の排気管は進行方向に向かって右側、2 両目の排気管は左側に、互い違いになるように配置されている。

A 系条件は、現車の A 系の屋根上機器と排気管をモデル化した条件である。屋根上機器は、1 両につき 2 基であり、その大きさは幅 1400mm×高さ 205mm×長さ 3370mm である。排気管は、鉛直にまっすぐ伸びた形状であり、排気管の車体中央からのまくらぎ方向距離は 930mm である。

B 系既存条件は、現車の B 系の屋根上機器と排気管をモデル化した条件である。屋根上機器は、1 両につき 3 基であり、その大きさは幅 1700mm×高さ 390mm×長さ 2900mm もしくは長さ 3475mm である。B 系条件の屋根上機器においては、厚みが A 系条件よりも大きく、車間部付近に屋根上機器が位置している。排気管は、屋根上で内向きに 45 度折り曲げられており、排気管の直管部の車体中央からの距離は 880mm である。

B 系改良条件は、屋根上機器は B 系既存条件と同じで、排気管の形状のみを変更した条件である。B 系改良条件の排気管は、屋根上機器上面を超える高さに排気管の出口が位置するように、折り曲げ部をなくして直管部を延長し、車両限界に抵触しないように排気管終端部の外側を斜めにカットした形状をしている。

2.1.2 解析手法

汎用の CFD ソフトウェア (Ansys Fluent 17.1) を用いて、非定常・非圧縮性流体解析を行った。CFD における解析条件を表 1 に示す。排気は高温の流体であるため、温度を考慮した解析が必要となる。本解析では、温度差による浮力の影響のみを考慮するブシネスク近似を用いた。本解析では、断熱壁を仮定し、輻射は考慮していないため、排気の高温流体は流体運動 (移流と拡散) によってのみ運ばれる。したがって、本解析では温度分布を排気管から流出する気流の濃度分布とみなすことができる。

明かり区間における走行を模擬した計算を行った。境界条件と計算格子の設定を表 2 に示す。排気管内の断面に流入境界面を定義し、周囲空気より高温の流体を流入させることで、排気の流れを模擬した。なお、すべての流体は空気として扱い、排気の組成は考慮していない。

解析の妥当性を確認するため、CFD で用いた車両モデル形状と類似した形状で縮尺 1/20 の車両模型を用いて、風洞実験を行った²⁾。風洞実験における主流流速は 15m/s であり、代表長さを実車換算 3m としたレイノルズ数は 1.5×10^5 である。流速測定には熱線流速計を使用した。風洞実験においては、排気管および排気管から吐出する排気を含まない、屋根上機器のみの条件に対して流速測定を行ったため、CFD について

表 1 CFD の解析条件

乱流モデル	DDES (Realizable $k-\epsilon$)
浮力	ブシネスク近似
速度と圧力のカップリング	SIMPLE 法
運動量の空間離散化スキーム	有界中心差分法
時間進展	2 次精度陰解法
時間刻み	5×10^{-3} 秒
助走計算の時間	50 秒
統計量の算出時間	50 秒

表 2 境界条件と計算格子の設定

境界条件	車体表面：断熱の壁境界、固定壁 地面：断熱の壁境界、列車速度の移動壁 解析領域側面・上面：対称境界 解析領域入口：速度境界 解析領域出口：自由流出境界 排気管内の断面：速度境界
計算格子	四面体および六面体
車体表面の格子幅	30～60mm
車体 1 層目格子高さ	3mm
排気管内の格子幅	5～10mm
総格子数	約 2700 万

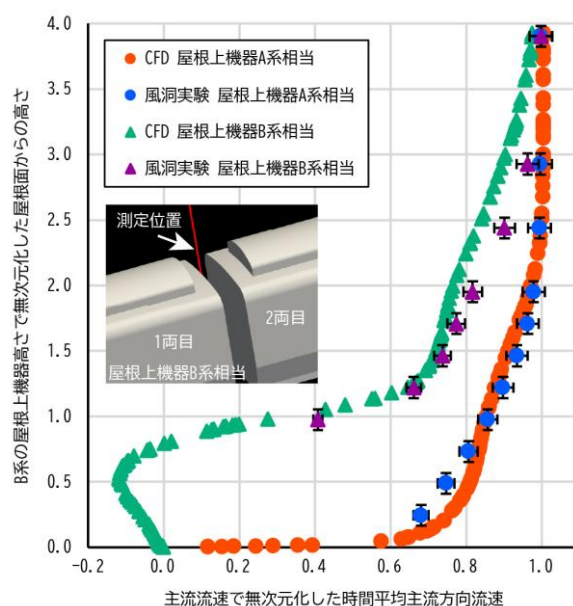


図3 風洞実験およびCFDにおける車間部屋根上流速分布の比較（文献1の図を一部改変）

も同様に排気管・排気を含まない条件の計算を別途実施して比較した。図3に、風洞実験およびCFDにおける、車間部の屋根上付近の流速分布を示す。風洞実験のプロットにおけるエラーバーは拡張不確かさ範囲を表す。流速分布は、風洞実験とCFDでおよそ一致することがわかる。

2.1.3 相似則について

相似則に関して、本解析で考慮する無次元数は、レイノルズ数、リチャードソン数、吐出速度比、の3つである。解析におけるパラメータの値を表3に示す。

列車速度は、解析時間の制約から、現車よりも遅い5m/s（18km/h）とした。レイノルズ数は 1.0×10^6 と現車条件と比較して小さいものの、レイノルズ数の影響が顕著に現れる領域と比べれば十分に大きい値であり、本解析においてはレイノルズ数の影響は小さいと想定される。

排気と周囲空気の温度差は、3Kとした。リチャードソン数は 1.2×10^{-2} である。現車の列車速度を仮に25m/s（90km/h）とし、リチャードソン数をもとに換算すると、本解析での温度差は現車スケールで75Kに相当する。なお、本解析における周囲空気の温度は300Kとした。

現車における、エンジンの排気量、定格回転数、排気管の断面積から排気の吐出速度を概算すると、おお

表3 解析におけるパラメータの値

パラメータ名	記号・定義	本解析における値
列車速度	U	5m/s
排気の吐出速度	V	5m/s
代表長さ	L	3m
排気と周囲空気の温度差	$\Delta\theta$	3K
レイノルズ数	UL/ν	1.0×10^6
リチャードソン数	$g\beta\Delta\theta L/U^2$	1.2×10^{-2}
吐出速度比	V/U	1

※ 定数 ν ：空気の動粘性係数（ $1.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ）， g ：重力加速度（ 9.8m/s^2 ）， β ：空気の熱膨張係数（ $1/300 \text{1/K}$ ）

よそ走行速度に等しいオーダーとなったため、本解析では吐出速度比を 1 と仮定し、排気の吐出速度を、今回設定した列車速度と等しい 5m/s とした。

2.2 結果と考察

図 4 に、瞬時温度場の等値面（気流温度が $0.01\Delta\theta$ となる等値面）を示す。先述したように、本解析における温度分布は、排気管から吐出する気流の濃度分布に相当する。A 系条件では、排気管から吐出する気流は大きく拡散せず、線状を保ったまま屋根上流れによって下流へと輸送される。B 系既存条件では、車間部の低速領域に排気が吐出されるため、排気は車間部に滞留するとともに、屋根上では広範囲におよび、屋根表面に纏わりながら下流側に流れていくことが見て取れる。一方で、排気管形状と出口位置を変更した B 系改良条件では、車間部での滞留はほぼなくなっており、屋根上での広がりも B 系既存条件と比較して緩やかである。

この結果から、排気管を延長する対策（B 系改良条件）によって、屋根上における排気の流れを改善し、車体のスス汚損や車内への排気の流入を防止できる可能性があることがわかった。これは、排気管の出口を屋根上機器よりも高い位置に設けたことにより、排気の屋根上機器への衝突や、車間部への滞留を抑制できたことが理由である。

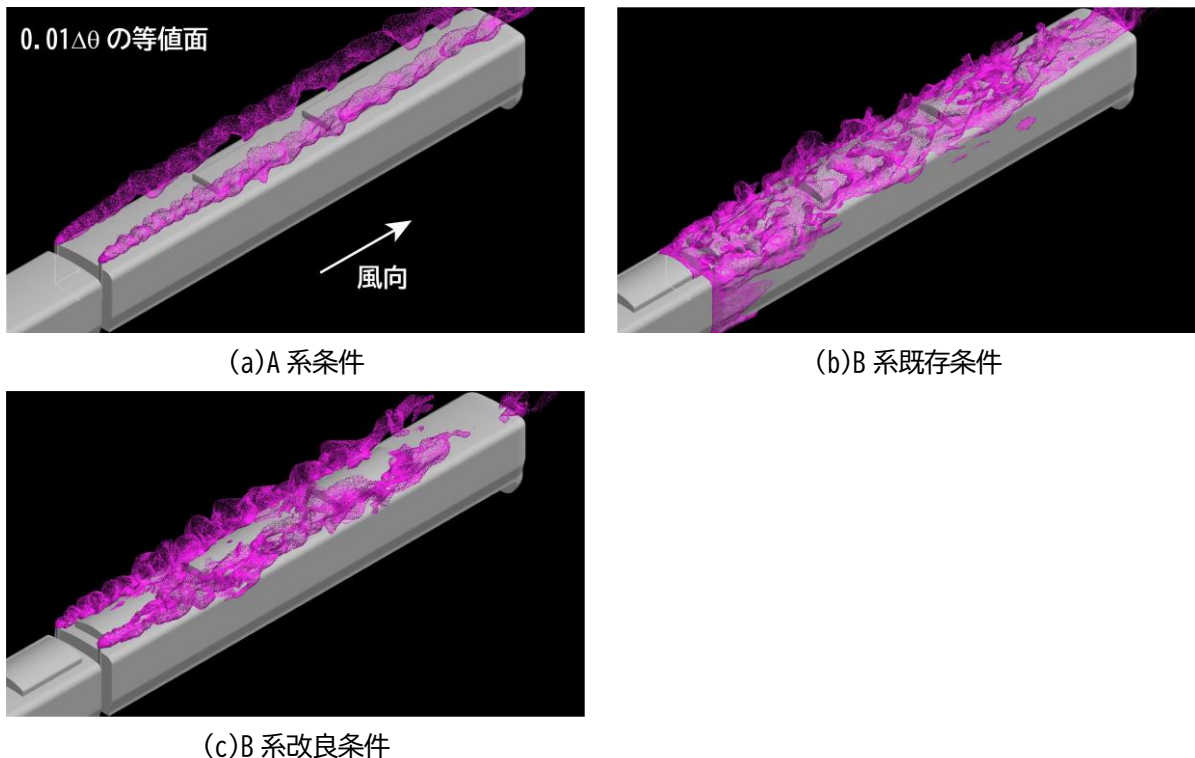


図 4 瞬時温度場の等値面（文献 1 の図を一部改変）

3. 現車試験における車体表面のスス汚損度合いの評価

前章で示した排気管の延長案に従い、現車の B 系の排気管を既存条件（曲がり）から改良条件（延長+外斜め）に変更し、現車試験を行った。本章では、排気管の改良前後における、排気に含まれるススによる車体表面の汚損の度合い（スス汚損度合い）について、画像解析を用いて比較した結果³⁾について述べる。

3.1 手法

営業列車として運用中の B 系車両の外観を定期的に撮影した。対象とする車両は、既存の排気管をもつ B 系 1 編成 3 両（既存編成）と、各車両に対して排気管の改良対策を行った B 系 1 編成 3 両（改良編成）の、計 2 編成 6 両である。各編成の排気管の位置の模式図と、撮影対象面を図 5 に示す。撮影対象面は、2 号車および 3 号車の、車間部妻面に最も近い屋根上機器の車体妻面側の側面である（図 5(a)）。撮影対象面は排気管出口に近く、車体のスス汚損が特に激しい箇所である。画像は約 2 か月間かけて取得した。撮影を開始する前に、図 5(b)に示す撮影対象面の中央付近（20cm×20cm 程度）の汚れをすべて落とした後、当該編成は通常の営業運用に入った。運用開始後は、撮影対象面付近の清掃は行わず、おおよそ 1 週間に 1 回程度の頻度で、デジタルカメラで対象面を撮影した。また、画像の取得と並行して、車両運用パターンも記録し、撮影開始からの総走行距離を取得した。なお、図 5 の編成は、紙面右方向と左方向いずれの向きにも走行する。

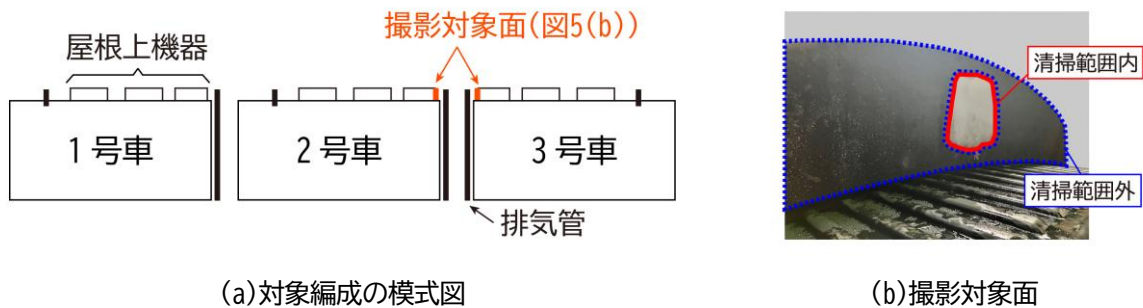


図 5 対象編成の模式図と撮影対象面

取得した画像からスス汚損度合いを定量化する手法について説明する。まず、取得したカラー画像をグレースケール画像に変換した。8bit のグレースケール画像の輝度値は、0 から 255 の値で表され、0 が黒に、255 が白に対応する。今回は単純にこの輝度値を汚損度合いの指標とし、清掃範囲内と清掃範囲外の輝度値の差によって、周囲と比較した汚損度合いを評価した。

汚損度 p および汚損度の変化 Δp の定義は以下の通りである。

$$p = \frac{255 - (g_{in} - g_{out})}{255} = 1 + \frac{g_{out} - g_{in}}{255} \quad (1)$$

$$\Delta p = p - p_{\text{clean}} \quad (2)$$

ここで、 g_{in} は清掃範囲内のピクセルの輝度値の平均値、 g_{out} は清掃範囲外のピクセルの輝度値の平均値である。汚損度 p は、清掃範囲内において、清掃範囲外と比較した汚損の程度を相対的に表す指標である。清掃範囲外と比較して汚損の程度が低い場合（清掃範囲内が白、清掃範囲外が黒の場合）、汚損度 p は 0 に近づき、清掃範囲外と同程度に汚損した場合は 1 に近づく。なお、清掃範囲外は既に汚損が進行しきっており、それ以上汚損が進行しても、輝度値が変化しないと仮定している。また、 p_{clean} は清掃直後に撮影した画像の汚損度であり、汚損度の変化 Δp は、清掃直後と比較して、汚損度合いが時間的にどう変化したかを表す指標である。

清掃範囲内および清掃範囲外の境界（図 5(b)）は、取得したカラー画像を確認しながら、手作業で指定し

た．範囲を選択する際は，日差しが写りこんでいて明るすぎる箇所など，極端な色の部分をなるべく避けるように指定した．なお，過度な逆光により，汚損度が極端な値になる画像については，解析から除外した．

3.2 結果と考察

得られたカラー画像の例として，3号車のカラー画像，汚損度 p ，汚損度の変化 Δp を図6に示す．既存編成では，走行距離2万キロ程度で，清掃範囲内外の色の差がほとんどなくなり，汚損度が1に近づく．一方，改良編成では，清掃範囲内の汚損は，既存編成と比較して進展が遅く，3.5万キロ程度走った時点でも，目立った汚損の進展はみられない．

図6で示した例を含め，撮影を行ったすべての車両（2号車と3号車）の汚損度を図7(a)に，汚損度の変化を図7(b)に示す．既存編成では，走行距離2万キロ程度で汚損度が1に近づき，その後はあまり変化していない．このことから，既存編成においては，2万キロ程度走行することによって，ススの付着がほぼ完

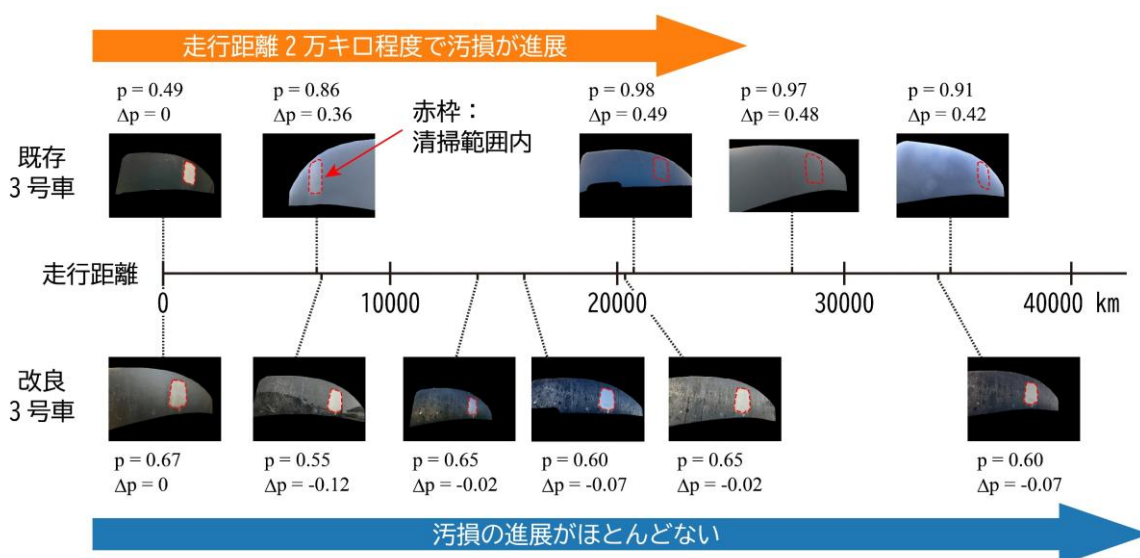


図6 得られたカラー画像の例（3号車）

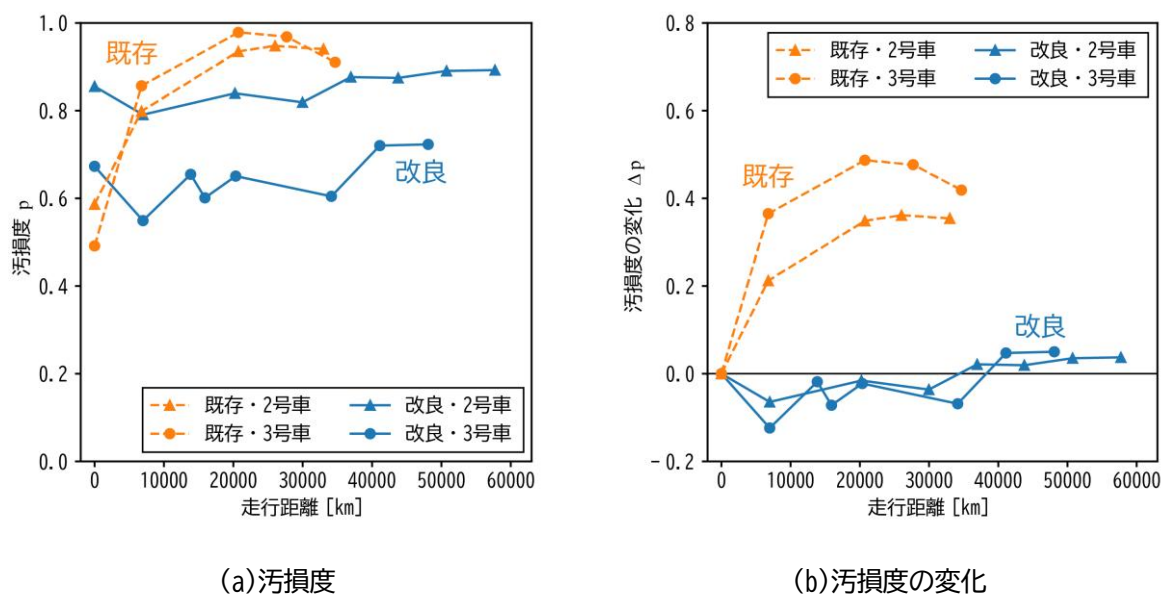


図7 汚損度と汚損度の変化

了し、それ以上汚損が進展しない状態になることがわかる。一方で、改良編成では、5万～6万キロ程度走行しても、汚損度はあまり変化していない。なお、改良編成の2号車は、汚損度の値自体は高いが、これは清掃範囲内外いずれも白に近い状態であり、清掃範囲内外の輝度値の差が少なく、式(1)の汚損度の定義上、値が大きくなってしまったことが理由である。改良編成の2号車は、走行距離によって汚損度が上昇することはないため、汚損はあまり進展していないといえる。

改良編成の汚損低減効果は、汚損度の変化(図7(b))からも明白である。既存編成では、汚損度の変化が大きい(汚損が進展する)のに対し、改良編成では汚損度の変化は0に近く、汚損の進展がほとんどない。

以上より、現車試験においても、排気管の改良によって汚損を抑制する効果を確認できた。今回解析の対象とした屋根上機器側面以外の、車体妻面や側面、屋根表面における汚損低減効果は確認できていないが、図4のように排気の流れが改善されたことを踏まえると、車両全体においても同様に排気管の改良によるスス汚損低減効果があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、特定の形式の気動車で生じる車体スス汚損に着目し、その原因と対策について検討した。まず、CFD解析によって屋根上における排気の流れについて調査し、排気管を延長する対策を提案した。続いて、実際の気動車で排気管を延長する対策を行い、対策前後の車体のスス汚損度合いを画像解析によって比較・検証した。その結果、排気管の改良によるスス汚損低減効果を示した。

2章の内容は文献1の内容を和訳・加筆したものである。3章の内容は文献3の要約であり、著作権は公益社団法人土木学会に帰属する。

文 献

- 1) Harada, N., Noguchi, Y., Araki, Y., Miyachi, T., "CFD analysis of exhaust flow for reducing soot stains on railcar body surfaces," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.270, 106359, 2026.
- 2) 新木悠斗, 野口雄平, 原田夏輝, 宮地徳蔵: 風洞実験による車両連結部の上部の流速分布測定, 第30回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2023), No.S2-8-6, 2023
- 3) 原田夏輝, 新木悠斗, 宮地徳蔵: 排気流れによる車体表面のスス汚損度合いの画像による評価, 第30回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2023), No.S2-8-1, 2023