1306 SUS車両外板汚れの解析

Analytical Study of Stains on the Outside Sheet of Stainless Steel Vehicles

正［土］ ○田中 誠 (鉄道総研)　　江成 孝文 (鉄道総研)

正［機］ 木村 昌敏 (JR東日本)

Makoto TANAKA, Takafumi ENARI RTRI. 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunnji City

Masatosi KIMURA, JR East Co.

To investigate the characteristics of the stains on the outside sheets of stainless steel vehicles, we measured the changes in surface glossiness, surface color and components of stain, and proved that the amount of stain on the outer surface of stainless steel vehicles was less than 1/10 that of painted steel vehicles. Furthermore, it was also clarified that the principal component of stain was corrosion products of rail steel. These results indicate that the mechanism of stain adhesion on stainless steel vehicles is different from that on painted steel vehicles.

Keyword: railway, stainless steel, analysis, stain, vehicle

1．はじめに

車両は，最も顧客に近い存在であるため，輸送という商品に対する顧客のイメージに与える影響が大きい。このため，顧客に不快感を与えないように，車両内外の清掃を頻繁に行っている。一方で，清掃コストの低減や環境に与える負荷低減に係わるニーズが増加している。これに対応するためには，洗浄方法や洗浄剤の変更が必要となる。

塗装車両外板の汚れについては，過去に実施された機械洗浄方法の検討過程で多くの知見が得られている[1),2),3)]。しかし，最近に増加しているSUS車両の外板汚れについて定量的に検討した事例がほとんどない。そこで，SUS車両外板の汚れに関する実態を把握するための調査・分析を実施して，塗装車両の汚れと比較した。

2．調査及び分析方法

選定した車両編成について通常実施されている洗浄（概ね2～3日間隔）を行なわずに走行させ，走行距離1412km（1回目），2599km（2回目），4046km（3回目），5703km（4回目）の時点で調査し，最後に通常実施されている機械洗浄を行った後に再度調査（5回目）した。

2.1 調査対象車両及び調査部位

調査対象は，幕張電車区のE217系（11両編成）の11号車（先頭車）及び8号車（中間車）とした。具体的には，11号車ではFig.1に示すドア下の3箇所(①～③),窓とドアの間となる側中間の2箇所（Ⅰ，Ⅱ）の計5箇所，8号車ではドア下の5箇所（①～⑤），側中間の4箇所（Ⅰ～Ⅳ）の計9箇所とした。

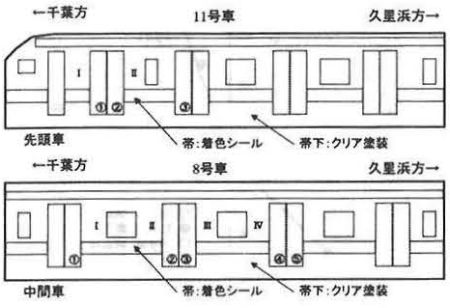

Fig.1 Points of measurement on the car No.11 and No.8

2.2 調査及び分析方法

調査項目は，1）試験期間中の降雨状況調査，2）付着汚れの採取と成分分析，3）外板の色変化，4）外板の光沢度変化，5）車両外板用SUS鋼板の表面粗さとした。

具体的には，1）試験期間中の降雨状況は，車両の走行線区に当たる神奈川，東京及び千葉気象台のデータを用いて評価した。2）外板表面に付着する汚れは，一定面積に付着する汚れをエタノール（JIS特級）を含ませたポリウレタン樹脂製発泡材で拭い取り採取した。成分分析は，過去に実施された塗装車両での結果[3)]と比較できるように，全蒸発残留物，鉄分，銅分，けい素分，炭素分，油分とした。3）色の変化は，JIS Z 8722（色の測定方法，第2種分光測光器条件ｂ）に準拠した測色装置（日本電色工業株式会社製簡易型分光光度計ＮＦ３３３型）を用いて10度視野で測定した。4）光沢度は，JIS Z 8741（鏡面光沢度，方法3）に準拠した60度鏡面光沢度計（日本電色工業株式会社製光沢計ＰＧ－３Ｄ）を用いて測定した。5)表面粗さは，触針式表面粗さ計（東京精密製ハンディーサーフE30A）で計測した。

3．調査及び分析結果

3.1 調査期間中の降雨状況

1回目の調査までは降雨の影響を受けていない。その後2回目の調査までに降雨時間約10時間，降雨量約10㎜の影響を受けた。2回目から3回目の調査までには，降雨の影響を受けていない。3回目と4回目の調査間に降雨時間38時間，降雨量30～40㎜の影響を受けた。

3.2 汚れ分析結果

汚れの分析結果において，鉄（Fe）分，銅（Cu）分及びけい素（Si）分は，大気環境中での存在状態を考慮して，FeOOH，CuO及びSiO_2として計算した。全蒸発残留分から鉄分，銅分，けい素分，炭素分及び油分を差し引いた残りは，その他成分とした。その他成分としては，塵埃成分としてのカルシウム（Ca）やカリウム（K）などを含む鉱物や水分などが考えられる。

5703km走行後（4回目）のドア下（11号車①と8号車④）の成分比率をFig. 2に示す。鉄分が汚れの主成分であることが分かる。次いで含有量の多い成分は炭素分であった。油分，銅分，けい素分は少量計測された。中でも，銅分と

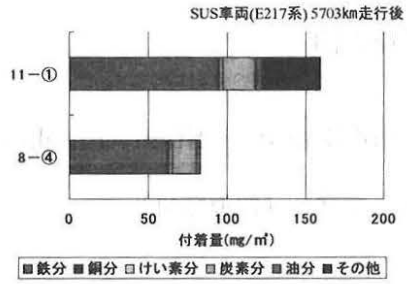

Fig. 2 Analytical results of stain components

けい素分は，量が少なく定量的評価は出来なかった。

3.2.1 11号車の汚れ分析結果

部位②，IIは毎回汚れを採取しているので，各測定の間に付着した汚れになる。部位①，Iは最終測定時にのみ汚れを採取しているので全走行期間中に蓄積した汚れになる。部位③は機械洗浄後に汚れを採取した箇所である。

鉄分の分析結果をFig. 3に示す。降雨が観測された後の測定（2回目と4回目）では，ドア下の付着量が側中間より多いが，降雨のない期間の測定（1回目と3回目）ではドア下と側中間は同程度の付着量であった。毎回測定した結果の積算値は，ドア下が側中間の2倍以上であった。連続走行後の付着量は，毎回測定の積算値より小さい結果となった。さらに，機械洗浄後も除去しきれずに10%ほど残留しているのが認められた。

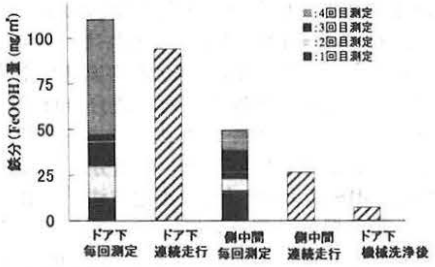

Fig. 3 Ferrous components of the stains

炭素分については，Fig. 4に示すように，ドア下では降雨が観測された後の測定（2回目と4回目）で付着量が多く，側中間では降雨の有無の差が明確ではなかった。ドア下と側中間の付着量には鉄分ほどの大きな差はなかった。連続走行後の付着量は，毎回測定の積算値より小さく，半分以下であった。さらに，機械洗浄後も除去しきれずに30%ほど残留しているのが認められた。

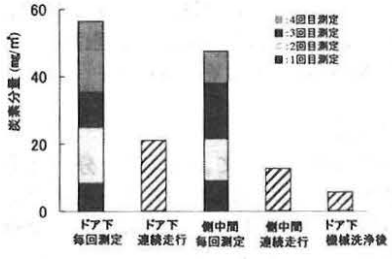

Fig. 4 Carbon components of the stains

油分の分析結果をFig. 5に示す。ドア下より側中間での付着量が多く，降雨が観測された後（2回目と4回目）付着量が降雨のない期間（1回目と3回目）の付着量より小さい。連続走行後の付着量は，毎回測定の積算値より著しく小さかった。機械洗浄後の測定結果は連続走行後の結果とほぼ同等で，油分は機械洗浄で除去されない結果となった。

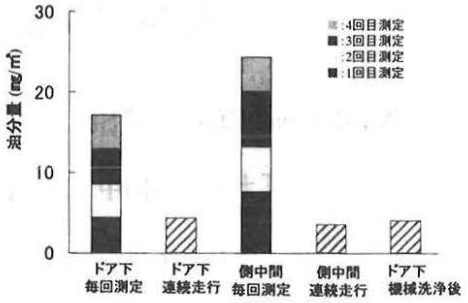

Fig. 5 Oil content of the stains

3.2.2 8号車の汚れ分析結果

測定のたびに場所を変えて汚れ採取を行った。このため，測定結果は測定までの走行で付着蓄積した汚れとなる。全蒸発残留分の測定結果をFig. 6に示す。11号車とは異なり，降雨後のドア下で僅かに増加しているが，1回目測定に比較して大きく増加する傾向が認められない。

機械洗浄後の測定結果が約 20mg/m²と 11 号車での結果と同様に汚れが機械洗浄実施後も汚れの残留が認められた。

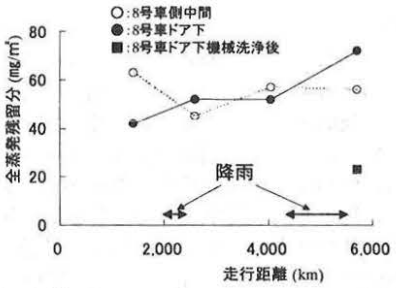

Fig. 6 Variances of evaporation residues

成分別の測定結果は次の通りである。ドア下では走行に伴い鉄分の増加が計測され，降雨後に増加量が多くなったが，側中間については，走行に伴う鉄分の増加は認められず，むしろ降雨後の測定値が小さくなった。炭素分は走行距離4000 kmまでは微増していたが，大きな降雨を受けた後に減少した。油分は，11号車と同様に，走行による付着量の増減はなかった。

3.3 色測定結果

測定値（光の3原色に相当する3刺激値X，Y，Z）から，色の違いの程度を表すL*a*b*表色系のL*，a*，b*を計算した。L*は明度差指数といわれ色の明るさを，a*とb*はクロマティクネス指数といわれ，色相と彩度（色の度合い）を2次元で示す値である。

走行に伴う明度，色の度合いの変化は，11号車ドア下が最も大きく，次いで8号車のドア下で変化していたが，側中間は何れの車両でも変化が小さかった。大きな変化を示

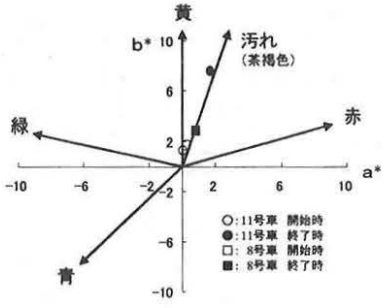

Fig. 7 Chromaticness of stains on surface

したドア下のクロマティクネス指数を Fig. 7 に示す。ドア下の色の度合いは，11 号車と 8 号車とも同じ方向（茶褐色）に変化していることが認められる。

感覚的な色の変化を示す尺度として，色空間でどの程度離れたかを示す色差(⊿Ea*b*)が広く用いられている。色差は次式で求められる。

変化量 (⊿L, ⊿a*, ⊿b*) =測定値－初期値　(1)*

$$\Delta Ea^*b^* = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{1/2} \quad \cdots\cdots(2)$$

色差の走行距離による変化を Fig. 8 に示す。11 号車ドア下は，降雨後に大きく変化しているが，その他の箇所では大きな変化が認められない。人間の色変化の認識については，個人差などの影響が大きく，定量的な定義が困難である。しかし，目安的には，色差⊿Ea*b*が 5 以上となった場合に色の変化を感じるといわれている。この観点からは，試験走行で色の変化が認識されるのは，約 5700km 走行した後の 11 号車ドア下のみといえる。

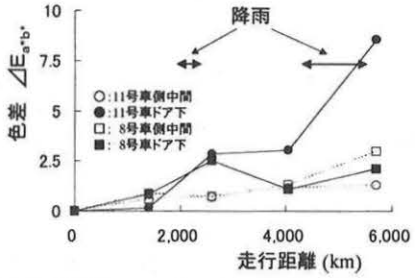

Fig. 8 Variances of surface color differences

ドア下である 11 号車③の機械洗浄後の測定値の初期値からの変化量を Table 1 に示す。

Table 1 Variances of surface color after washing

測定部位	⊿L*	⊿a*	⊿b*
11 号車③ドア下	-1.22	0.26	1.27

機械洗浄後も初期の状態まで戻らずに，茶褐色を帯びた状態にとどまっているのが分かる。

3.4 外板の光沢度変化

光沢度は，測定面に付着する粒子状物質による光散乱や光吸収の影響を受ける。

側中間では光沢度の変化が小さく，降雨の後の測定では，光沢度がその前の測定より増加していた。ドア下では，光沢度が走行とともに低下した。得に，11 号車ドア下では降雨の後に光沢度が 50%ほど大きく低下した。

機械洗浄後の初期値に対する光沢度の比率は，11 号車のドア下で 99%であった。これは，機械洗浄で光沢が走行試験前の状態にまで回復していることを示す。

3.5 SUS 鋼板の表面粗さ測定結果

SUS 鋼板の表面粗さ測定の結果，最大高さ粗さ 16.7μm，10 点平均粗さ 11.5μm であった。プロフィールとから，SUS 鋼板は，高さ 10μm 程度，凸部頂点間の幅が 50μm 程度の凹凸を持つ表面と考えられる。

4．考察

4.1 ＳＵＳ車両外板の付着汚れについて

汚れの成分分析の結果，銅分とけい素分は，定量的評価ができるほどの量は付着していなかった。

炭素分と油分は，11 号車では毎回測定の積算値に比較して連続走行後の測定値が非常に小さく，むしろ 4 回目測定の値に近い結果であった。8 号車でも 2 回目測定以後に付着量の増加が見られなかった。このことは，炭素分と油分は 1000km～2000km 走行で付着量が飽和し，その後の走行では付着と脱落の平衡状態に至っているためと想定される。

11 号車の鉄分の毎回測定結果(Fig.3)を見ると，ドア下では降雨の後に付着量が大きく増加しているが，側中間では降雨の後がその前の測定値より少ない結果であった。この結果は，ドア下では降雨時に発生する鉄分が主で，側中間では降雨のない期間に発生する鉄分が主であることを示唆している。

降雨時にはレールの表面が濡れ，鉄の腐食反応が促進されている。このため，レール表面には，腐食生成物である鉄酸化物の微結晶が堆積している。この上を列車が走行することで，水膜中の鉄酸化物の微結晶は，先頭車の車輪で鉄酸化物を含む水滴として容易に巻上げられる。この場合には，水滴は高くまで舞上れないため，レールに近い車両の下部に多く付着することになる。中間車では，既にレール上に残留する鉄酸化物量が少なくなっているため，付着量が先頭車より少なくなる。付着した鉄酸化物は，微結晶であるため，走行風や降雨の影響を受け難く，走行に伴う表面からの脱落が少なく，降雨のたびに外板表面に蓄積する。これは，色測定において，ドア下の色が走行に伴い茶褐色が鮮明になる方向へ変化していることからも裏付けられる。

降雨のない期間では，レールや車輪の表面が乾燥している。乾燥した金属が摩擦することにより，金属摩耗鉄紛が発生する。鉄道沿線での鉄粉の飛散の調査事例などを見ると，厚み 1μm 以下で，直径数μm と扁平な摩耗紛は容易に走行風で広い範囲に飛散できる。そのため，その中を走行する車両外板全体にわたり比較的均一に付着することができると想定される。金属摩耗鉄紛は，比較的大きく，比重が大きいので，SUS 外板に付着しても走行風や降雨で容易に離脱することができる。8 号車側中間で降雨後の付着量減少を計測していること，光沢度が降雨後に回復したことなどから，金属摩耗鉄分は炭素分や油分と同様に，1000km～2000km 走行で付着量が飽和に達し，その後の走行では付着と脱落の平衡状態に至っていると想定される。

4.2 車両外板の機械洗浄について

汚れ成分分析の結果，機械洗浄後も汚れの残留が計測されている。特に，油分に関しては，機械洗浄で殆ど減少していない。ドア下の色測定では，茶褐色が残留する結果を示した。一方で，光沢度の測定では，試験開始前の測定まで回復していた。

SUS 鋼板の表面は，深さ 10μm 程度，凸部頂点間の幅 50μm 程度の凹凸を持つ。このような凹凸面では，光沢度測定結果は凸部頂点の情報を，色測定結果は凸部頂点と凹部谷底の情報を多く反映する。

以上の測定結果と SUS 表面の粗さが光沢度と色の測定結果に与える影響とから，現状の機械洗浄方法（ブラシ洗浄方法）では，表面の凸部頂点に付着する粒子状物質は除去できるが，凹部の底に付着する粒子状物質の除去が期待できないことを示すと考えられる。

4.3 ＳＵＳ車両と塗装車両の汚れ比較

昭和 54 年度（1979 年度）に実施された塗装車両の汚れ調査結果[3]と今回実施した SUS 車両の調査結果を比較した。比較は，今回とほぼ同じ走行条件である幕張電車区所属の総武線用車両(113 系：7 日間 3,163 km走行）の結果を用いた。塗装車両での測定部位 1 両目側腰板，中央車側腰板に相当する SUS 車両の測定箇所は 11 号車ドア下（11－①）と 8 号車ドア下（8－④）である。これら箇所での汚れ成分分析結果を Fig. 9 に示す。

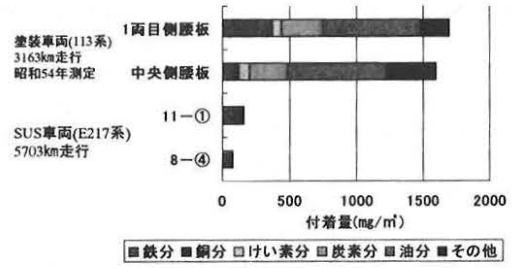

Fig. 9 Comparison of stain components on SUS surfaces and painted surfaces

塗装車両は，走行距離約 3200km と SUS 車両の 60%以下の走行にもかかわらず，汚れの付着量は 10 倍以上である。付着量の違いに測定時期の大気環境や車種の違いが影響すると懸念されたので，過去の大気環境測定結果や両車種でのブレーキシステムの違いなどを検討した。この結果，環境等には大きな差がなかった。従って，汚れ成分分析結果の違いは，車両外板の表面特性の違いが反映されていると想定される。

鉄分の付着量は，塗装車両の 1 両目と SUS 車両の 11 号車では約 4 倍で塗装車両の中央車と SUS 車両の 8 号車では約 1.5 倍であった。銅分とけい素分は SUS 車両ではほとんど計測されていないが，塗装車両では銅分で約 10mg/㎡ほど，けい素分で約 70mg/㎡ほど計測され，先頭車より中間車が多い結果となっている。炭素分と油分は，先頭車と中間車での差は少ないが，SUS 車両に比較して著しく多い量（炭素分で約 15 倍，油分で約 200 倍）が付着していた。

塗装車両と SUS 車両での汚れ付着量の違いは，次に示す表面での付着形態の違いによると想定される。

4.4 汚れ成分の付着形態について

大気に浮遊する油分は単分子若しくは複数の分子の会合体で，直径数 nm 程度の油滴と想定される。炭素分については，有機化合物の燃焼時のすすが主で直径 100nm 以下の微粒子と想定される。大気中に浮遊するけい素分は，直径 0.1μm 以下の微粒子から数μm までの粒子と想定される。浮遊できる金属摩耗鉄粉は，厚み 1μm 以下で，直径数μm の扁平状粒子と想定される。鉄酸化物は鉄イオンの水和で生成した直径 100nm 以下の含水水酸化鉄の微結晶と想定される。金属鉄の比重を 7.8，鉄酸化物の比重を 4，二酸化けい素の比重を 2.5，炭素の比重を 2，油分の比重を 1 と仮定する。これらの各成分に想定される大きさと比重を用いて，Fig. 9 の汚れ付着量から先頭車ドア下付近の汚れ付着形態について考察すると次のようにいえる。

油分の平均厚みは，塗装車両で約 700nm と計算され，比較的厚い油膜で存在する。SUS 車両では，約 5nm の厚みと計算され，単分子から数分子程度の吸着層として存在する。

炭素分は，塗装車両では概ね全面に炭素の粒子が付着している。SUS 車両では点々と付着している。

鉄分の分析では金属摩耗鉄紛と鉄酸化物に分けていないので，金属摩耗鉄紛と鉄酸化物の比率は不明である。そこで，降雨を受けていない時の測定値を金属摩耗鉄紛によると仮定し，Fig.3 から計測された鉄分の概ね 20%が金属摩耗鉄紛とする。この場合には，塗装車両では，金属摩耗鉄紛が点々と付着し，鉄酸化物がほぼ全面に均一に付着している。SUS 車両では，塗装車両の 1/5 程度，すなわち，金属摩耗鉄紛のみならず，鉄酸化物も点々と付着している。

けい素分は，比較的大きな粒子と想定されるので，塗装車両，SUS 車両とも広い面積に点々と付着している。

以上の汚れ成分の付着形態に関する想定結果を模式的に

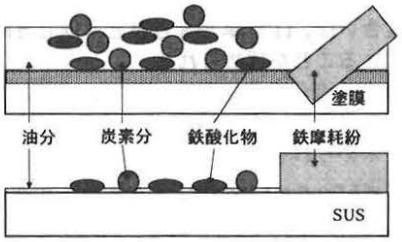

Fig. 10 Stain adhesion models

示すと Fig. 10 のようになる。

つまり，塗装車両では，塗膜表面の高い親油性と表面電荷のため，飛来した油分が厚い油膜に成長する。この油膜の中に飛来した鉄酸化物や炭素分が取り入れられることで付着量が増加する。鉄摩耗紛は，硬く扁平であるため塗膜に突き刺さるように付着することができる。このため，付着した汚れ物質は，走行風や降雨では容易に離脱できない。

SUS 外板表面は，塗膜に比較して，親水性が高く，表面電荷を帯びないので，油分は数分子程度の吸着層以上には成長できない。このため，鉄酸化物と炭素分は互いに重なることなく，表面に点々と付着できるのみである。その間に扁平な鉄摩耗紛も付着しているが，塗膜に付着した場合より容易に走行風や降雨で離脱できる。

5．まとめ

SUS 車両を通常実施する洗浄を行わずに約 5700km 走行し，その間に付着する汚れの分析，外板表面の光沢度及び色変化の測定を行い塗装車両の汚れとの比較を行った。この結果，以下に示す SUS 車両外板汚れの特徴を明らかにすることができた。

- SUS 車両の汚れ付着量は，塗装車両の 1/10 以下であった。
- 汚れの主成分は鉄分（金属摩耗鉄紛と鉄酸化物）で，次いで付着量の多い成分は炭素分と油分であった。銅分やけい素分の付着量は微量であった。
- 金属摩耗鉄紛，炭素分と油分は，1000km～2000km 走行で付着量が飽和し，蓄積性が低いことが分かった。
- 蓄積性の高い汚れ成分は，鉄酸化物で，降雨時のレールの腐食生成物が走行による舞上り付着したものと想定された。
- 約 5700km 走行で，色の変化が認識できるまで変化したのは先頭車のドア下のみで，他の部位では汚れ付着を目視で確認できるほどには色が変化していなかった。
- 現行の機械洗浄（ブラシ方式）では，SUS 鋼板の凹部に付着する汚れが除去できないことが分かった。

6．おわりに

これまでに検討されことのなかった SUS 車両外板の汚れについて，定量的な調査・分析を行い，塗装車両とは異なる汚れ付着形態であることなどを明らかにした。この結果を踏まえて，SUS 車両外板に有効な洗浄方法の検討を行い，保守省力化や環境負荷低減に寄与したいと考えている。

参考文献

1)「塗装回帰延長のための塗料と洗浄の研究報告書」，（社）日本鉄道技術協会，昭和 36～38 年
2) 中島，今井，住吉，大川；「車両外部洗浄用洗剤」，鉄道技研報告， No.582, 1967 年 4 月
3)「車両汚損の調査研究に関する報告書」，（株）トラフィックエンジニヤリング，昭和 56 年 3 月