

鉄 道 総 研 報 告

第39巻 第12号

2025年12月

論文

- 【施設】洗掘で被災した鉄道橋脚の事例分析に基づく洗掘発生危険度の評価手法
..... 渡邊諭, 藤原将真, 吉田郁政 (1)
- 【施設】レール頭頂面に形成した落葉起因の黒色皮膜除去装置の開発
..... 幸野真治, 井戸達哉, 辻江正裕, 鈴木淳一, 生駒一樹 (14)
- 【運転】運転整理の評価指標の提案と運転整理手配の分析・評価手法
..... 高田真由, 國松武俊, 田中峻一 (23)

技術報告

- 【電気】転てつ装置の保守管理と転てつ機モニタの活用に関する調査
..... 潮見俊輔, 押味良和, 重盛壮平 (32)
- 【運転】営業列車おける GOA2.5 自動運転と手動運転における運転士の視線配分の比較
..... 中川千鶴, 赤塚肇, 青柳孝彦, 藤井彩佳 (41)

洗掘で被災した鉄道橋脚の事例分析に基づく
洗掘発生危険度の評価手法

渡邊 諭* 藤原 将真* 吉田 郁政**

Evaluation Method for the Risk of Scouring
based on Case Studies of Railway Bridge Piers damaged by Scouring

Satoshi WATANABE Shoma FUJIWARA Ikumasa YOSHIDA

In order to optimize the maintenance and management of railway bridges to mitigate scouring disasters that threaten the safety and stability of railway transport, it is crucial to appropriately assess the risk of localized scouring occurring at bridge piers. In this study, we propose an indicator to represent the risk of scouring. This indicator was determined by calculating the dimensionless tractive forces acting on the riverbed from hydrological statistics recorded during scouring disasters, then comparing and organizing the results between disaster-affected and non-affected conditions. As a result, we found a consistent linear relationship between the normalized scouring force and the root penetration ratio when in the event of disasters.

キーワード：局所洗掘，河川橋脚，水文統計量，無次元掃流力，根入れ比

1. はじめに

鉄道の河川橋りょうにおいては、増水時に橋脚基礎の周辺地盤が局所的に洗掘され（以下、洗掘という）、橋脚基礎が沈下・傾斜し甚大な被害が発生する場合がある。これらに対する維持管理に必要なリソースを最適化するためには、洗掘により被災の可能性が高い橋脚の抽出が重要となり、過去には、統計分析に基づく洗掘危険度の判定¹⁾や、採点表形式での抽出の取組^{2) 3)}がある。しかし、これらの取り組みでは洗掘が発生しやすい素因の経験的な評価が主眼となっており、洗掘を発生させる外力に関しては十分に考慮されていない。洗掘は河床の耐力特性と、河川流の外力特性との相互関係により発生・進行する複雑な現象であるため、外力である増水時の流量の影響を考慮した洗掘危険度の定量的な評価方法が求められている。

そこで本研究では、河川橋脚の洗掘を対象とした維持管理の効率化を目的として、過去の洗掘災害事例の河川流量データから、河川橋脚における洗掘の発生危険度を表す指標に関して検討した。さらに、この結果を利用し、相対的に洗掘の危険性が高い橋りょうの抽出手法を提案した。また、洗掘危険度は河川状況のみならず、橋りょうの構造条件である阻害率や橋脚基礎形式、基礎の根入れ深さなどにも大きく影響を受けるため、線形判別分析⁴⁾や機械学習⁵⁾を用いた分析事例もある、そうした橋りょう構造に起因する洗掘への抵抗性は別途検討することとし、本稿では洗掘災害発生時における指標の経験値を洗掘に対する耐力と見なして洗掘の発生危険度の基準値を表現することを試みた⁶⁾。

2. 分析対象

鉄道総研が保有する資料によると、1974年以降に増水により鉄道の河川橋りょうに何らかの変状が発生

* 防災技術研究部 地盤防災研究室

** 東京都市大学

した事例は91件であった。被災種別ごとに整理すると、橋脚に洗掘が生じたものが最も多く(41件:44.6%)、次いで橋脚が流失したもの(27件:29.3%)、橋脚が傾斜したもの(20件:21.7%)、橋脚が損傷したもの(3件:3.3%)、洗掘防護工の変状(1件:1.1%)の順となる。この収集した91件のうち、災害発生日時が明確な事例は30件であるが、このうち水位観測記録を有するものは11事例である。この中からさらに、①被災形態が橋脚洗掘および橋脚傾斜の事例、②橋りょう近傍の河床断面図が取得可能な事例、③被災橋りょうから約10km以内の水文観測点から流量・水位データが取得可能な事例、④被災橋りょう周辺の河床勾配および河床材料の代表粒径の情報が取得可能な事例、の条件を満たす表1の8橋りょうを抽出し分析対象とした。ここで、橋脚が流失したものを対象外としたのは、被災メカニズムとして桁に作用する流体力が支配的であること、橋脚流失を発生させる降雨は被災前に検知できる可能性が高いことによる。また、河川の状況や根入れ等の記述は検査記録に基づいている。

被災形態について、洗掘は一般的に河川流が直接作用する橋脚の上流側で発生することが多い。上記8橋りょうは、被災後の調査で桁冠水の痕跡が認められておらず上流側への傾斜が発生していた。一方で、いずれの事例も増水後の水位低下時において異常発生を知得したものであり、詳細な水位変化を含め経時的な状況変化については不明である。そのため、被災時に橋脚に作用したと考えられる河川流量の最大値を推定し、その規模に着目した検討を行う。なお、表1の各項目の求め方については後述する。

いずれの被災橋脚も無防護であり、後述する洗掘の発生危険度を表す指標の検討においては、被災橋脚および無防護橋脚全てを対象とした分析を実施している。図1に、被災した橋りょう位置における河川断面図を示す。上記8橋りょうの河川のうち、低水護岸が設けられた高水敷を有するものはC、H橋りょうである。また、G橋りょうの被災橋脚より堤防側には張コンクリートにより遊歩道として整備されている。それ以外の河川では砂州が形成されており、A、B、D、E、F、G橋りょうの被災橋脚はその砂州上に、C、H橋りょうは平常時に水が流れる滞筋中に位置している。

表1 分析対象(8事例)の概要と分析に使用したパラメータ⁶⁾

橋梁	被災年月	被災橋脚	被災概要	基礎形式	無防護橋脚数/ 全橋脚数	セグメント ¹³⁾	河床勾配 I	河床材料の 代表粒径 $d_R(m)$	粗度係 数 n	観測データ	データ期間	被災時 流量 $Q(m^3/s)$
A	2003/8	19P傾斜 20P基礎露出	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	直接	21/21	2-2~3	1/2596	0.0105	0.0195	水位 上流側17km	2002 - 2019	1824.6
B	2004/9	1P	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	直接(1~5P) 杭(6~10P)	7/10	2-2	1/1200	0.7 (推定)	0.04	水位 上流側1.5km	1992 - 2020	1334.3
C	2006/7	3P	滞筋中の橋脚が傾斜	直接(1~5P) 杭(6P)	6/6	2-2	1/2880	0.01	0.03	流量 下流側2.5km	2001 - 2017	643.8
D	2012/7	2P	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	直接	2/6	1	1/200	0.05	0.025	流量 下流側1.5km	2001 - 2017	387.7
E	2015/9	10P	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	ケーソン	15/21	1	1/196	0.063	0.0263	流量 上流側8km	2001 - 2017	2194.6
F	2016/8	3P	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	直接	4/4	1	1/152	0.3 (推定)	0.035	水位 上流側7km	2008 - 2019	291.3
G	2017/10	5P	平水時に水が流下しない砂州の橋脚が傾斜	杭(1P) 直接(2~5P)	3/6	2-1	1/260	0.035	0.024	水位 上流側0.5km	2001 - 2017	351.9
H	2017/10	3,4P基礎露出	滞筋中の橋脚の基礎が露出	直接+杭	8/9	2-2	1/1210	0.004	0.027	水位 下流側4km	2006 - 2019	2385.2

3. 鉄道河川橋脚の洗掘発生危険度を表す指標の検討

3.1 着目した指標および分析の流れ

洗掘現象は、橋脚周りの土砂流失をとともう河床変動により生じる。そのため、洗掘の発生危険度を表す指標として無次元掃流力に着目し、被災時の流量に対応する無次元掃流力を算出するとともに、被災時と比較するため各年の最大流量に対応する無次元掃流力と比較した。まず、収集した水位・流量の観測データから河川流量観測断面における被災時および各年の最大水位・年最大流量を抽出する。次に、抽出した

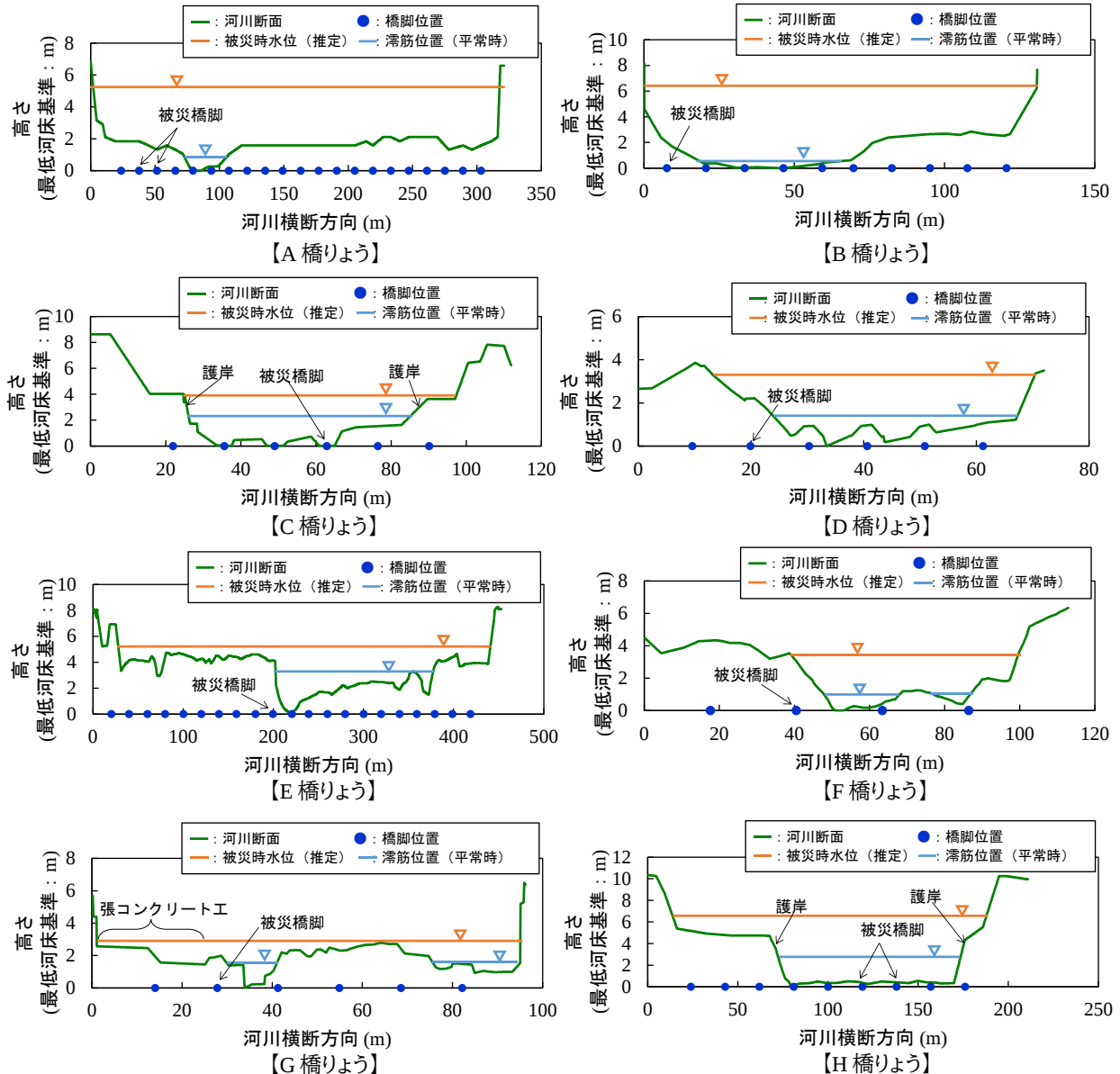


図1 被災橋りょう位置における河川断面図⁶⁾

年最大流量が被災橋りょう位置に流下すると仮定し、この位置の河川断面に基づいた流量を算出して年最大流量に対応する被災橋脚位置での水位、流量、および平均流速を求め、これらから無次元掃流力を算出する。流量算出には様々な手法^{7) 8) 9) 10)}があるが、鉄道事業者が多数の河川橋りょうを対象として解析を実施する場合を考慮し、必要なパラメータ数が少ない簡易な手法が望ましい。そこで、境界混合を考慮しない複断面等流計算⁷⁾とし、分割断面ごとの無次元掃流力を算出する。ここではエネルギー勾配=河床勾配とすることができる等流¹⁰⁾と仮定したが、これは被災箇所近傍の水文観測所が基本的にか所であり、被災橋りょう付近のエネルギー勾配を算出することが困難であったためである。また、複断面形状を呈する河川では、堆積メカニズムの違いにより河床位置により河床材料は異なり、それに伴い粗度係数は異なるが、上述のとおり実務への適用を考慮して河床材料は一様とみなした。

上記の仮定の下、河川断面を横断方向に N 分割 ($1, 2, i \dots N$) した各断面内の平均流速 v_i を式(1)で、各断面内の流量 q_i を式(2)で、河道断面全体の流量 Q を式(3)で求めた。ここで、 n は河床の粗度係数、 A_i は各断面の面積、 L_i は各断面の潤辺、 I は河床勾配、 A_i/L_i は径深であり、河川の横断方向に対して、マンニングの粗度係数 n 、河床勾配 I は一定とし、水面高さは横断方向に変化しないと仮定した。

$$v_i = \frac{1}{n} \left(\frac{A_i}{L_i} \right)^{2/3} I^{1/2} \quad (1)$$

$$q_i = A_i v_i \quad (2)$$

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i \quad (3)$$

表 1 中には、8 橋りょうの構造諸元とともに、計算に用いたパラメータをまとめている。表中のデータは河川整備計画における付属資料、各種財産図や災害記録から取得した。河川勾配 I および代表粒径 d_R に関して、G 橋りょう以外の 7 橋りょうは各河川管理者が作成した整備計画等の資料中のもの、もしくは河川縦断図より算出したものであり代表粒径は d_{60} である。G 橋りょうについては鉄道事業者が実施した測量結果の値を用いた。マンニングの粗度係数 n については、整備計画等の資料中から取得した値であるが、代表粒径のデータが取得できなかった B, F 橋りょうについては、式(4)で表されるマンニング・ストリクラーの式により算出した。

$$n = \frac{d_R^{1/6}}{7.66\sqrt{g}} \quad (4)$$

河床材料の土粒子比重 G_s はすべての河川で 2.65 とした。 g は重力加速度を示す。また、流量記録がある C, D, E 以外の橋りょうでは水位観測地点の流量を一旦同様の流量計算で推定した上で、被災橋りょう位置にその推定流量を与えて算出した。図 2 に、各被災橋りょうにおける被災年以前までの年最大流量と被災時の流量をそれぞれ示す。なお、図 1 中には、平常時における滞筋の概略位置とともに、算出した被災時の流量が流下したときの水位を示している。表 1 に示したパラメータおよび式(1)～(3)から、式(5)により無次元掃流力 τ^* を求めた。

$$\tau^* = \frac{u_*^2}{(G_s - 1)gd_R} = \frac{gRI}{(G_s - 1)gd_R} \quad (5)$$

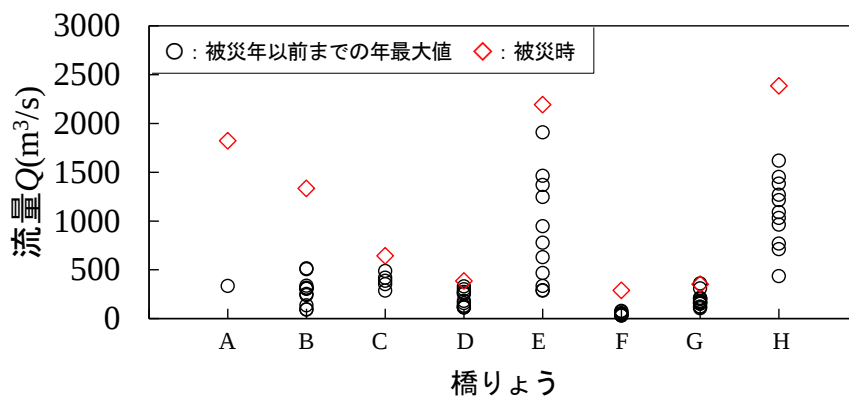


図 2 橋りょう別にみた年最大流量（被災年まで）⁶⁾

3.2 無次元掃流力の分析結果

山本¹¹⁾ は、日本の沖積河川において年最大流量に対応する無次元掃流力の平均値と代表粒径との間に一定の関係があることを示している。そこで、図 2 に示した被災年以前までの年最大流量ならびに被災時の

流量に対応する無次元掃流力（以下、年最大無次元掃流力という）を被災した橋脚ごとに整理しプロットしたものが図 3 である。被災時の年最大無次元掃流力◇の位置に着目すると、いずれの橋りょうもプロット群の上端部、すなわち既往最大値を超えた値で被災していることが分かる。ただし、G 橋りょうについては、被災時の値を超過しても被災を免れているケースが存在する。図中には、参考値として各代表粒径の河床材料が一様に分布すると仮定して岩垣の式¹²⁾による無次元限界掃流力（土粒子に作用する掃流力と、土粒子の抵抗値との釣り合いから求められる河床材料が移動を始める限界の強さを表す理論値、ここではいずれも $\tau_c^*=0.050$ ）を破線で示した。仮定のため単純な比較はできないが、C、E、G および H 橋りょうでは被災時のみならず、被災以前において参考値を大きく超過している年が多数存在する。したがって、作用した年最大無次元掃流力の大小関係を比較するだけでは、橋りょう・橋脚間の洗掘に対する抵抗性の相対的な差異を評価するのは限界がある。一方、山本¹¹⁾は自然堤防の形成や氾濫原の堆積を含む河道スケールや平面形態を規定する流量として平均年最大流量が適切である、と述べている。そこで本稿では、平均年最大流量に対応する無次元掃流力を求め、その値に対する増水時の無次元掃流力の比率を求めることで、洗掘に対する抵抗性を評価できる、と考えた。すなわち、過去に平均的に作用した無次元掃流力が大きい橋脚であれば、根入れや橋脚構造の違い等に起因して相対的に洗掘に対する抵抗性が強い、と仮定した。

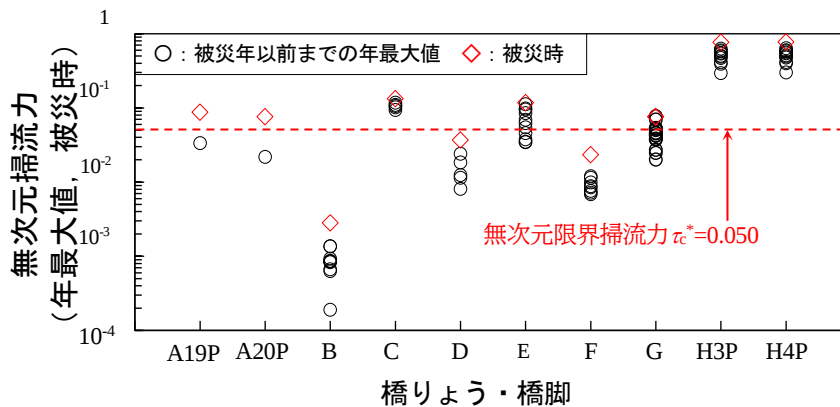


図 3 橋りょう別にみた年最大無次元掃流力（被災年まで）⁶⁾

3.3 無次元掃流力の正規化

各河川の流況は地形・地質学的な構造の違いにより様々であり、本来それら背景的要因を考慮せずに無次元化した指標を用いることには課題がある。一方で、災害発生危険度の相対的な評価を行うために河川の特性を表す指標の正規化量を用いることは有効であり、例えば、井上¹³⁾は無次元断面積を導入して洪水時の橋りょう被害リスクの評価を行っている。

ここでは、各年で求められる年最大無次元掃流力の平均値を求め、その値に対して何倍の値が作用したときに洗掘により被災したかを橋りょう同士で比較することで相対的な危険度評価を実施することとした。同観点から、図 3 に示した被災時の無次元掃流力をその橋脚における洗掘に対する耐力の上限値、既往最大値を下限値と考え、それぞれの値を年最大無次元掃流力の平均値で除した正規化量を算出した。図 4 に算出イメージを、式(6)に正規化した無次元掃流力の定義を示す。

$$\text{正規化量} = \frac{\text{被災時の値もしくは既往最大値}}{\text{年最大無次元掃流力の平均値 (年最大の無次元掃流力の総和 / 観測年数)}} \quad (6)$$

正規化の分母となる「年最大無次元掃流力の平均値」は、年最大流量に対応する年最大の無次元掃流力の総和を観測年数で除した値であり、被災時を含む全観測期間を対象として算出した。全観測期間を対象と

したのは、観測開始から被災までの期間が短い場合、平均値の算出に用いるデータ数が不足し、結果的に正規化した際のばらつきが大きくなってしまふことを防ぐためである。同様の理由により、普段滞筋になり箇所位置する橋脚では、観測年によって年最大無次元掃流力が0となる場合があるが、これらは除外して平均値を算出した。また、近年では気候変動の影響により豪雨の発生頻度が増加しており、その影響があると考えられる近年を含む全期間を対象とすることで安全側の評価になると考えたためである。

図5に、各橋りょうにおける年最大無次元掃流力の平均値と被災時を含む年最大無次元掃流力との関係を示す。破線は両者が1:1となる線を、◇は被災時を、△は既往最大値を示している。図から、年最大無次元掃流力の平均値と被災時および年最大無次元掃流力の既往最大値には強い正の相関があり、一部の既往最大値を除いて年最大無次元掃流力の平均値よりも大きいことが分かる。すなわち、年最大無次元掃流力の平均値を基準に被災し得る値の大小関係を評価できる可能性を示唆している。以降の検討は、この正規化した値（以下、正規化量という）を用いる。

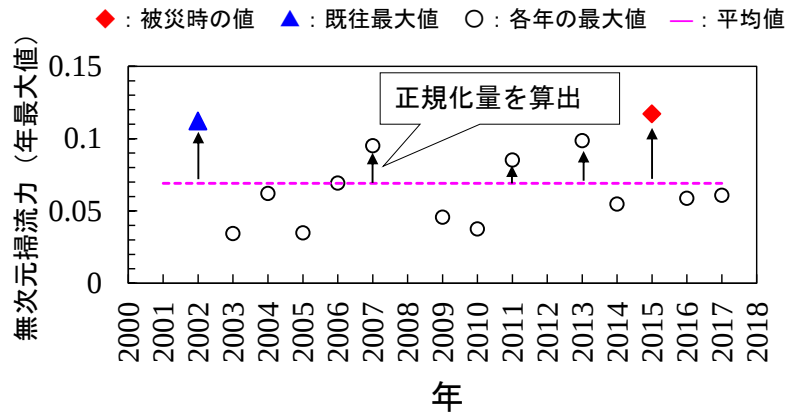


図4 正規化量の算出イメージ⁶⁾

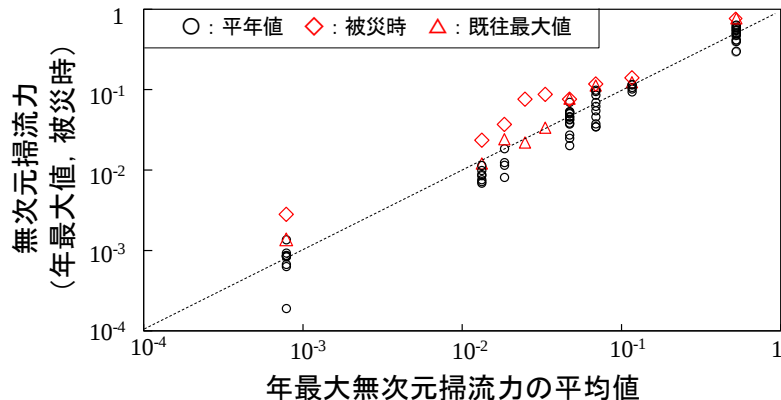


図5 橋りょう別にみた年最大無次元掃流力（被災年まで）⁶⁾

4. 洗掘発生危険度を表す正規化量の基準値の検討

4.1 基準値の考え方

洗掘の可能性が高まると考えられる正規化量の基準値の設定について検討する。ここでは、橋脚が立地する河川内の位置条件に着目した正規化量、橋脚の根入れ比に着目した正規化量、について検討した。前者は、維持管理において目視のみで取得できる情報であるのに対し、後者は図面による躯体寸法の情報とともに、橋脚位置における河床高さの計測が必要となる。以下に、それぞれの検討内容について述べる。

4.2 橋脚の位置条件ごとの正規化量

洗掘の可能性が高まると考えられる正規化量の基準値の設定について河川内の位置条件に着目し検討する。図6は、上記で述べた各橋りょうにおいて算出した正規化量と、その正規化量の再現期間を橋りょうごとに求め、両者の関係を改めて整理したものである。横軸の正規化量の再現期間は、すべての年最大無次元掃流力の値からガンベル法¹⁴⁾により再現期間を算出し、それぞれの年最大無次元掃流力に対応する再現期間を求めたものである。図から、正規化量の分布範囲は0~4程度の範囲にあり、橋りょう別にみると、被災時の正規化量は大きいものからB, A, D, F, E, G橋りょうである。これらは、安定した砂州に位置していた橋脚が被災した事例であり、次いで滞筋中のH, C橋りょうと続く。つまり、通常時に水が流下していない位置にある橋脚では、図5に示したように被災時の無次元掃流力が無次元限界掃流力より小さく理論的には河床変動が生じないと判断される場合でも、被災時の正規化量は1を超えて大きくなる傾向となっている。同時に、被災時の正規化量に対応する再現期間も大きくなっており、平年と異なる顕著な水位が生じていることを示している。逆にH, C橋りょうでは滞筋にあるため増水事象も多く、被災時の正規化量に対応する再現期間は短い。なお、正規化量が1, すなわち平均年最大無次元掃流力に対応する再現期間は概ね2~3年であり文献11)の内容と整合する(図中黒破線)。このように橋脚位置の違いにより被災時の正規化量も異なる傾向が示唆されており、橋脚の位置条件に着目して正規化量を整理する。

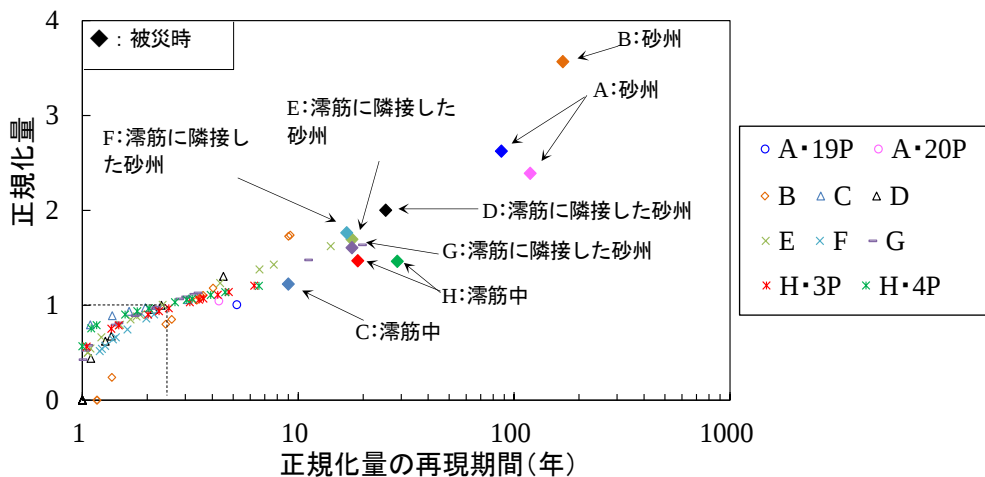


図6 年最大無次元限界掃流力の正規化量とその再現期間⁶⁾

整理の対象とした橋脚は表1に示した8橋りょうを構成する橋脚のうち、被災橋脚と同じ無防護の全橋脚とした。今回用いた位置条件の分類は、滞筋中の橋脚、滞筋に隣接する橋脚および陸地の橋脚の三種類とした。ここでいう滞筋中の橋脚とは、平水時に流路となる箇所位置する橋脚を指し、陸地とは平水時に流路とはならない箇所位置する橋脚、そのうち上記の滞筋の直近に位置する橋脚が滞筋に隣接する橋脚となる。なお、この分類は、文献2の洗掘採点表における判定項目中の表現をそのまま採用したものである。分類された橋脚数は滞筋中の橋脚：19基、滞筋に隣接する橋脚：8基および陸地の橋脚：30基となる。図7に、上記で対象とした全橋脚において、年最大流量発生時の正規化量に加え、正規化量が1を超えた増水イベントの全ピーク値を集計して箱ひげ図で示す。また、その対象期間は、被災時を含む全観測期間を対象とした。なお、データ中には当該橋脚位置まで水位が上昇しなかった年のデータ(正規化量0)は含めていない。これは、長大橋りょうでは陸地の橋脚を多数有するため、その高さまで水位が到達しない観測年を加えると正規化量0の度数が顕著に大きくなり、増水発生時の統計的な特性が不明瞭になってしまうためである。

図 7 から、データ群のばらつきを表す四分位範囲は陸地の橋脚が最も大きく、次いで滞筋に隣接する橋脚、滞筋中の橋脚の順となり、第 3 四分位数+1.5×四分位範囲における最大値（以下、最大値という）の値も同様の傾向を示すことが分かる。これらは、ある程度の規模以上に増水しないと水位が観測されない陸地では流量の相対的なばらつきが大きくなる一方で、常時水が流下する滞筋では増水時の流量のばらつきは小さくなるためである。平均値をみると、陸地の橋脚が他の 2 種よりも若干大きい値となるが、これは陸地において正規化量が 1 を超える増水イベントそのものが他の二種の橋脚と比べ相対的に大規模な出水となるため、それらを集計した場合に平均値を押し上げたためと考えられる。

図 7 中には、被災橋脚における被災時ならびに被災前の既往最大値となる無次元掃流力の正規化量を位置条件別に重ねて示している（図中◇、△）。プロット位置から、災害が発生し得る正規化量の範囲は位置条件によって異なる傾向を示し、それらの平均は滞筋の橋脚で 1.28、滞筋に隣接する橋脚および陸地では最大値付近の 1.77、2.41 となる。また、B 橋りょうでは被災時の正規化量が顕著に大きいですが、この値は外れ値に相当していることがわかる。これは、この時の被災時流量の再現期間が数百年のオーダー（図 8 参照）であるためである。同プロットを含まない場合の平均値は 1.57 となる。

陸地および滞筋に隣接する橋脚は一般に基礎の根入れが大きく安定しているため、最大値に近い規模の増水が作用しないと洗掘災害に至らないものと考えられる。一方、滞筋の橋脚における被災時の正規化量は、第 3 四分位数をやや超えた範囲に位置する。上述のように増水時でも流量のばらつきが少ない滞筋では、正規化量が他の二種ほど 1 を大きく超えない場合でも、急激に洗掘の危険性が高まることを示唆している。

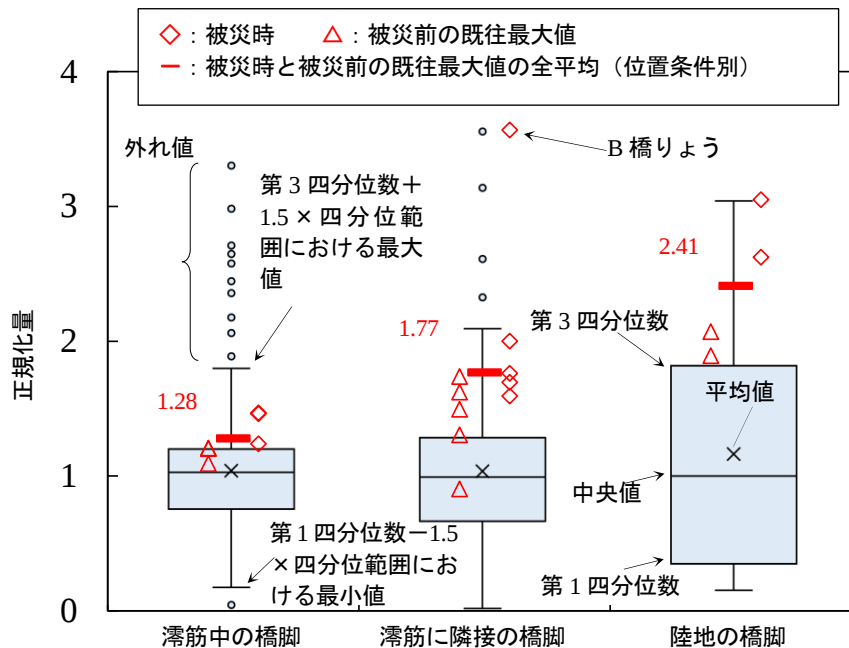


図 7 位置条件別における正規化量の分布と被災時および被災前の最大の正規化量⁶⁾

4.3 根入れ比と正規化量との関係

洗掘の可能性が高まると考えられる正規化量の基準値の設定について根入れ比に着目し検討する。図 8 は正規化量と根入れ比との関係を、図 7 と同じデータを対象として図をプロットしたものである。プロットにおいて、被災時の正規化量および被災前における正規化量の既往最大値、また被災時および既往最大時の出水発生時における被災橋脚以外のデータ、それ以外の橋脚のデータを区別している。また、図 7 と比較できるように、滞筋中の橋脚、滞筋に隣接する橋脚、陸地の橋脚をそれぞれ区別している。さらに、図

中には、根入れ比と被災時および既往最大時の正規化量との関係を線形近似したものを示している。一般的に、橋脚基礎の底面まで洗掘が進行すると基礎の安定性が急激に低下することが知られている。そのため、切片を 0 すなわち根入れが消失すると基礎形式等の区別なく河川の流体力により不安定化すると仮定した近似直線とした。

図から、被災時および既往最大時ともに根入れ比と正規化量の間には明瞭な正の相関関係があることが分かる。被災時の決定係数は 0.958、既往最大時の決定係数は 0.877 となっている。被災時の近似直線は、ほぼすべてのプロットを包括する上限付近に位置しており、正規化量を根入れ比との関係で整理することで、ばらつきの少ない相関関係が得られている。また、橋脚の位置条件をみると、根入れ比が増加するにつれて、滞筋中の橋脚、滞筋に隣接する橋脚、陸地の橋脚の順にプロットされており、図 6 で被災時の正規化量が顕著に大きかった B 橋りょうが最も右上にプロットされる結果となった。すなわち、ある根入れ比に対して、洗掘が発生する恐れがある正規化量の限界値を一義的に求められる可能性を示している。また、既往最大時の近似直線は被災時の近似直線のやや下かつプロット群の上側に位置しており、洗掘が発生する危険性が高まる根入れ比の目安となると考えられる。なお、E 橋りょうはケーソン基礎形式であり、4 基の橋脚で根入れ比が 7 を超える規模（最大 15.3）となっている。正規化量はいずれも 4 を下回っており、上記の回帰直線を大きく下回る位置にプロットされるため、図 8 の横軸は根入れ比 4 までの範囲しか示していない。

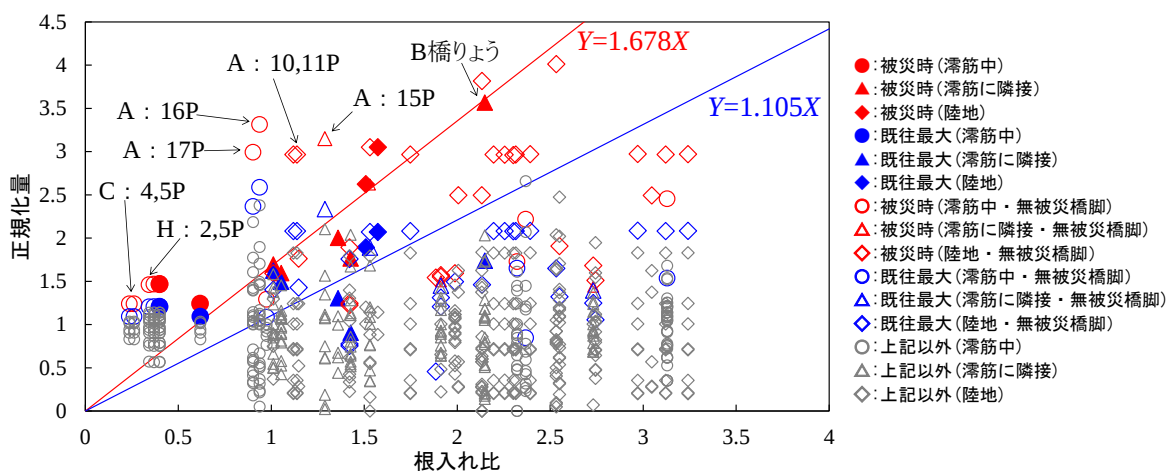


図 8 根入れ比と正規化量との関係⁶⁾

4.4 基準となる正規化量の選定

4.2 節では、被災時の正規化量の平均値は橋脚の位置条件により異なっており、橋脚の位置条件別の統計的な傾向と合わせて実現象と整合することを示した。しかし、平均値付近で被災している橋りょう数が少ないことから、洗掘に対する基準値として用いるには、ばらつきが大きくなっている可能性がある。これは、橋脚の位置条件を 3 分類に限定しているためと考えられる。

それに対し 4.3 節では、洗掘災害の発生を判断する基準値を、根入れ比と正規化量との関係から得られる指標により評価できる可能性を示した。橋脚の洗掘に対する抵抗性として根入れ比は重要な要素であり、文献 2 の洗掘採点表においても最も大きな配点が与えられている。これは、過去の経験から根入れ比が大きいほど洗掘の被害を受けにくくなることを反映したものであり、本稿で示した根入れ比と正規化量との関係においても矛盾がない結果となっている。また、被災時における詳細な洗掘発生状況は不明であることから河川や橋脚の構造特性の影響度は未知であるものの、根入れ比と正規化量という二つの定量的な値を用い、さらに被災時および既往最大時の二つの近似直線により一定の幅を持つ指標となっていると考え

られる。限られたデータでの結果であることから維持管理の現場に適用するためには精度を向上させる必要はあるものの、根入れ比に対応する正規化量を、その根入れ比における洗掘発生の危険性の基準値として用いることが可能と判断した。

一方、図 8 中では、被災橋脚以外のデータにおいて上記の近似直線を大きく超えるにも関わらず被災に至らなかった橋脚が複数存在する。具体的には、A 橋りょうの 10, 11, 15, 16, 17P, C 橋りょうの 4, 5P, H 橋りょうの 2, 5P である。これらの橋脚が被災に至らなかった理由を経験的な知見により考察すると以下のとおりである。

A 橋りょうで被災した 19, 20P は河川の左岸側に位置し、河川の湾曲にともなう攻撃地形に該当するため、被災時において湾曲の内側に位置する他の橋脚よりも洗掘を受け被災した可能性が考えられる。被災を免れた 16, 17P は被災橋脚よりも根入れ比が小さいものの被災を免れているが、基礎底面が岩着していることなどが考えられる

C 橋りょうの 2 橋脚はいずれも滞筋中に位置しているが、橋りょうの上流側で河川幅の狭窄が生じており、かつ同狭窄箇所付近には鉄道橋脚より大規模な橋脚躯体を有する道路橋が存在する。これらの影響により被災橋脚付近で局所的な流速や乱れの増加など洗掘を促進させる流れが発生した可能性が考えられる。

H 橋りょうでは、上流側に捨石による落差工状の構造物が設置され河川は緩やかに左に湾曲しており、C 橋りょうと同様に上記の構造物の下流側で流れが複雑化した可能性がある。

いずれも、平面的な河川形状や橋りょうの周辺構造物の状況からの推察にとどまるが、上記いずれの橋りょうも文献 2) において経験的に洗掘を助長すると考えられる特徴を有しており、実務に適用する際には、これらの項目に合致するものほど対策の優先順位が高い橋脚として抽出することが考えられる。

5. 洗掘発生危険度を表す正規化量の基準値の検討

ここでは、4.3 節で示した被災時における近似直線から根入れ比に対応する正規化量を基準値として仮定した場合に、複数の橋りょうの中から洗掘発生危険度を相対的に比較する手法を提案する。

モデルケースとして、橋りょう①と②を比較する例を示す。まず、橋りょう①と②と比較にあたり、各橋りょうにおいて洗掘が懸念される橋脚を抽出する必要がある。その手法として、例えば各橋脚の配点の大小から抽出する方法^{2) 3)}があるが、ここでは①橋りょうは根入れ比 1.1 の無防護の橋脚、②橋りょうは根入れ比 1.3 の無防護の橋脚、が抽出されたものと仮定し、どちらが洗掘に対する危険性が高いかを判断する。図 8 中に示した被災時の線形回帰式から基準値に相当する正規化量を求めると①橋りょうは約 1.85、②橋りょうは約 2.18 が得られる。

斜面の耐降雨性の比較事例では、崩壊に至る降雨の再現期間の大小関係から危険度を判断する取り組み¹⁵⁾がある。また、星野ら¹⁶⁾は、年最大流量の非超過確率の大小に着目して洪水危険度を評価している。ここでの提案手法の考え方も同様に、基準値に相当する正規化量とその再現期間に着目し、再現期間の違いが河川ごとの流域や流出の特性を含む過去の増水の経験値を表していると考えた。

図 9 は、抽出された橋脚のうち、基準値に相当する正規化量を図 6 と同様に横軸を再現期間として示したものである。例えば、①橋りょうの場合、基準値 1.85 に対応する再現期間は図 9 横軸上の▲となる。一方、②橋りょうでは、基準値 2.18 に相当する再現期間は図 9 横軸上の●となる。両者を比較すると、●は▲より再現期間が短いため洗掘発生が懸念される外力が高頻度で発生することとなり、相対的に危険性が高いと判定される。仮に、被災時における正規化量に対応する再現期間がほぼ同値である場合には、対象とする橋りょうにおいて検討時点までに経験した正規化量の既往最大値と図 8 中に示したそれぞれの近似

直線との大小関係，ならびに既往最大時の正規化量に相当する再現期間から相対的な危険度を比較することができる。また，4.4 節で示した事例のように，経験的に明らかな洗掘を助長する項目との適合数なども比較の判断に利用できると考えられる。

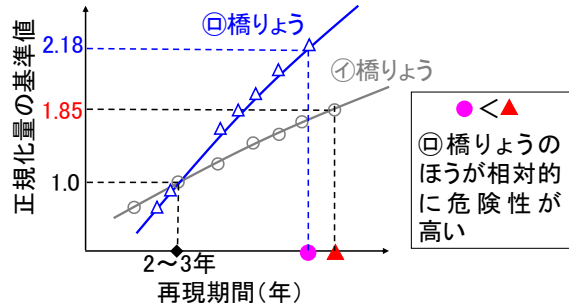


図9 正規化量の基準値に相当する再現期間に着目した橋脚の危険度の比較イメージ⁶⁾

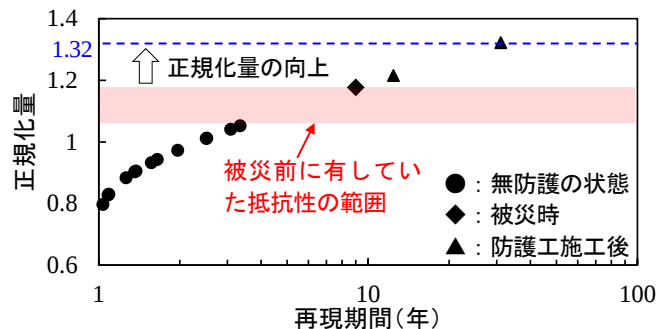


図10 防護工による抵抗性向上効果（C 橋りょう）⁶⁾

この試案を用いることで，過去の経験値を踏まえつつ洗掘発生の危険性が高い橋脚を有する橋りょうが複数ある場合にも，相対的な危険度の比較が可能となる。また，これまで観測されていない未曾有の豪雨を想定した場合でも，再現期間を用いることで相対的な比較が可能であり，近年懸念されている気象の激甚化にも対応したものになっている。一般に，鉄道における洗掘災害に対する防災投資は，他の構造物よりも費用が大きいため，その意思決定の最適化により維持管理の効率化につながることが期待される。

ここで，根入れ比と正規化量との関係式の適用範囲は，正規化量が1を超える範囲とするのが妥当と考える。理由として，前述のとおり正規化量が1となる再現期間は概ね2~3年であり，鉄道における定期検査の周期2年がそれを下回らないことが維持管理において重要と考えられるためである。1より小さい正規化量に対応する根入れ比となった場合には，別途詳細な検査を行うとともに必要に応じて基礎補強や洗掘防護工の設置など各種対策工の検討が考えられる。

なお，上記の試案の有効性を検証するには，洗掘防護工などの施工により正規化量が向上したことを確認することも重要である。事例が少ないため定性的な例示に留まるが，C 橋りょうは被災後の復旧対策として河床全幅に根固めブロックが敷設されたのちに被災時を超える増水を経験している。図10は被災時および被災前後に経験した正規化量と再現期間との関係を示したものであり，図の横軸は図6と同じ再現期間である。図から，補強後に正規化量1.32の増水を経験しており，補強効果が正規化量の向上として明瞭に現れていることが分かる。

5. まとめ

鉄道において過去に発生した洗掘災害事例の中から外力の算出可能な橋りょうに対し、橋脚に作用する無次元掃流力と年最大無次元掃流力の平年値との比（正規化量）を求めて、橋脚の位置条件と正規化量ならびに根入れ比と正規化量との関係をそれぞれ整理した。そのうち、根入れ比に対応する正規化量に基づき、橋脚の洗掘に対する危険度の比較手法を提案した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 水位または流量観測記録を有する 8 橋りょうについて、各年の観測記録から鉄道橋りょうの断面位置における年最大無次元掃流力を算出した。また、各橋脚の洗掘に対する耐力を比較するために、年最大無次元掃流力の平年値との比（正規化量）を求めた。算出した正規化量と被災した橋脚の根入れ比には線形の相関関係があり、根入れ比に対応する正規化量を、その根入れ比における洗掘発生の危険性の基準値とすることを提案した。

(2) 根入れ比に対応する正規化量の再現期間に着目し、洗掘に対する危険度を定量的に比較する試案を作成した。その結果、根入れ比に対応する正規化量の再現期間の大小を相対的に比較することで、洗掘が懸念される橋りょうを精度よく抽出できる可能性を示した。

なお、上記の根入れ比と正規化量の近似直線は限られた事例に基づくものであり、これを一般的な基準値として現行の維持管理手法に適用するには、事例の蓄積・分析を踏まえたさらなる精度向上と妥当性の検証が必要である。将来的には、既往の取り組みである線形判別分析の深度化や機械学習に基づく洗掘危険度の評価方法の開発など新たな知見と組み合わせて、洗掘の懸念がある橋りょうの抽出、抽出された橋りょうの危険度の比較、さらには水位に基づく運転規制値の最適化までの一連の業務を支援する総合的な維持管理手法の構築を目指したい。

文 献

- 1) 佐溝昌彦, 渡邊諭, 杉山友康, 岡田勝也: 統計的手法における被災注意橋脚抽出手法, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 69 巻, 3 号, pp. 237-249, 2013
- 2) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) 基礎構造物・抗土圧構造物, 付属資料 4「洗掘を受けやすい橋梁を抽出するための採点表」, 丸善出版, 2007
- 3) 道路保全技術センター: 道路防災点検の手引き(豪雨・豪雪等), pp. 123-147, 2007
- 4) 七澤利明, 宮原史, 藤田智弘, 佐々木惇郎, 山田薫, 島田裕貴: 道路橋の洗掘による被災リスク要因に関する研究 - 被災事例の統計分析等による検討及び令和 3 年(2021 年)の豪雨災害調査 -, 国土技術政策総合研究所資料, 第 1202 号, 2022
- 5) 我部山喜弘, 角野拓真, 岡崎百合子, 中村太郎, 岡崎慎一郎, 梶谷義雄, 渡邊諭, 佐溝昌彦: 機械学習を採用した橋脚の洗掘被災リスク評価モデルの構築, 土木学会論文集 B1 (水工学), 76 巻, 2 号, pp. I_601-I_606, 2020
- 6) 渡邊諭, 藤原将真, 吉田郁政: 鉄道橋脚の洗掘被災事例の水文統計量に基づく洗掘発生危険度指標に関する基礎検討, 土木学会論文集, Vol. 80, No. 1, 23-00029, 2023
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局: 国土交通省河川砂防技術基準(調査編), 平成 26 年 4 月, https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/index.html (参照日: 2022 年 4 月 1 日)
- 8) Chow, V. T.: Open-Channel Hydraulics, International Student Edition, McGraw-Hill, pp. 138-140, 1959.
- 9) 福岡捷二, 藤田光一: 複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用, 土木学会論文集, 1989 巻, 第 411 号, pp.63-72, 1989
- 10) 木ノ瀬紘一, 森望, 浮辺悦信: 新たな領域分割法による不等流計算 - 抵抗体群を杭群とした場合 -, 農業土木学会論文, 1998 巻, 197 号, pp.9-19, 1998
- 11) 山本晃一: 構造沖積河川学 - その構造特性と動態 -, 山海堂, 2004
- 12) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 1956 巻, 第 41 号, pp.1-21, 1956
- 13) 井上隆, 山村優桂, 二瓶泰雄: 豪雨時の橋梁被害リスク評価指標の検討 ~ H30 年西日本豪雨の三篠川橋梁被害縦断分布データを用いて ~, 土木学会論文集 B1 (水工学), 75 巻, 2 号, pp. I_1417-I_1422, 2019
- 14) GUMBEL, E. J.: The Return Period of Flood Flows, The Annals of Mathematical Statistics, Vol.12, No.2, pp.163-190, 1941.

- 15) 布川修, 杉山友康, 太田直之, 畑明仁, 堀倫裕, 亀村勝美, 岡田勝也: 鉄道の降雨時運転規制を考慮した斜面崩壊の発生頻度期待値算出方法, 土木学会論文集 C, 66 巻, 1 号, pp.78-88, 2010
- 16) 星野大雅, 平沢勇之助, 戸倉駿人, 山本隆広: 年最大流量の非超過確率を用いた洪水危険度指標の開発の試み, 土木学会論文集 B1 (水工学), 71 巻, 4 号, pp. I_1489-I_1494, 2015

レール頭頂面に形成した 落葉起因の黒色皮膜除去装置の開発

幸野 真治* 井戸 達哉** 辻江 正裕*
鈴村 淳一*** 生駒 一樹***

Development of Equipment to Remove Black Leaf Layer Formed on Rail Top Surface by Fallen Leaves

Masaharu KONO Tatsuya IDO Masahiro TSUJIE
Junichi SUZUMURA Kazuki IKOMA

On mountain railways in autumn, a black leaf layer is formed when fallen leaves are stepped on by wheels, containing moisture. This layer tends to reduce adhesion in wet conditions, resulting in wheel spinning or sliding. Our focus was on the chelating effect of citric acid, and we verified its effectiveness in removing the black leaf layer. We then proposed a method of removing the black leaf layer involving spraying citric acid, sliding a brush and cleaning with water, and developed equipment for carrying out these procedures. Following test on a commercial line using this equipment, we confirmed that it had sufficient performance to remove the black leaf layer.

キーワード：車輪／レール，落葉，黒色皮膜，空転，滑走，クエン酸

1. はじめに

秋季の山間線区においては、車輪に踏まれた落葉がレール頭頂面で皮膜状態になる。さらに、朝露や小雨などの水分を含むことで、葉に含まれるタンニンと鉄が反応（タンニン鉄が生成）し黒色の皮膜（以下、「黒色皮膜」とする）が形成される^{1) 2)}。この黒色皮膜は、湿潤条件下では粘着力の低下を引き起こし、列車の空転や滑走が発生しやすくなることが報告されている^{3) 4)}。黒色皮膜の対策として、現状では沿線の樹木の伐採やレール研磨などが実施されている。しかし、落葉による空転・滑走が懸念される区間は一般に数キロ程度におよび、沿線樹木の伐採により対策する場合は極めて長い延長に対して実施する必要があるため、多額の費用を要している。また、レール研磨により対策する場合は手持ち式の研磨機や作業車タイプの機械式の研磨機⁵⁾などがあるが、約2～3km/h程度と低速での施工となるため、施工延長がごくわずかとなっている。このように、現状の対策法は多大な費用や労力を要するため、より容易かつ安価に黒色皮膜の形成を抑制、もしくは除去する方法の確立が課題となっている。

本研究では、レール頭頂面に形成した黒色皮膜を除去する対策として、クエン酸が持つタンニン鉄を分解する作用に着目した。クエン酸は、キレート効果（複数の配位座を持つ配位子が金属イオンと結合し、分離しにくい）によりタンニンの代わりに鉄と錯体を生成するため、クエン酸水溶液をレールに散布することで、黒色皮膜の除去効果が期待できる。そこで、円筒型試験片に擬似的な黒色皮膜を形成させて2円筒転がり摩擦試験を実施し、クエン酸による黒色皮膜の除去効果を検証した⁶⁾。

次に、上記の2円筒転がり摩擦試験の結果を踏まえ、クエン酸を用いた黒色皮膜除去法の仕様を検討した。上記の試験で試験片に形成させた黒色皮膜は、営業線のレール頭頂面に形成する黒色皮膜そのもので

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

** 元 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

*** 材料技術研究部 潤滑材料研究室

はなく、皮膜の厚さや成分などが異なるため、営業線の黒色皮膜の除去に有効なクエン酸水溶液の濃度や研磨材の接触荷重などの条件は明確ではない。そこで、クエン酸水溶液を用いたレール頭頂面上の黒色皮膜の除去においてより効果的な適用条件を検討するため、営業線において黒色皮膜除去試験を実施した⁷⁾。

最後に、営業線での検討結果を踏まえ、黒色皮膜除去装置を開発した。本装置は、クエン酸散布等の施工を長距離にわたり実施できるように、軌道自動自転車を採用することとした。本装置を用いて、黒色皮膜が形成されている営業線にて黒色皮膜の除去試験を実施し、装置の性能を評価した⁸⁾。

2. 2 円筒転がり摩擦試験

2.1 試験方法

本試験においては、図 1 に示す転がり－すべり摩擦力試験機⁹⁾を使用した。本試験機は、円筒形の車輪試験片とレール試験片を接触させた状態で法線力を与え、任意のすべり率の下で試験片接触部に作用する接線力を測定できる。また、液体を試験片接触部に供給させながら試験片を転動させることができる。

試験条件を表 1 に示す。本研究で実施した接線力測定試験においては、試験片間の Hertz 最大接触圧力を実際の車輪／レール間の接触圧力と同程度の 857MPa とするため、法線力は 450N とした。法線力を加えた後、空転発生時における低速域での走行を模擬するため、各試験片の回転数 177rpm（1km/h 相当）、すべり率 0.1%（レール試験片がわずかに低い周速度）で試験を開始した。なお、開始から 2 秒程度は、すべり率 0% でモータが加速するため、接線力は発生しない。試験開始から 300 秒間は、接触部近傍に液体を 10mL/min で散布し、試験開始から 1800 秒後に試験を終了した。試験中は、接線力および法線力を測定するとともに、試験片の外観を撮影した。なお、本研究で用いた試験片は、実際の車輪とレールから切り出して製作したものである。

黒色皮膜が形成している営業線における車輪／レール接触を模擬するため、車輪試験片の表面は通常の金属表面とし、レール試験片については 5% タンニン酸水溶液に 5 時間浸漬することで、あらかじめ表面に黒色皮膜を形成した。また、クエン酸の効果について検討するため、接触部に供給する液体を蒸留水および濃度 1%、3%、5%、10% のクエン酸水溶液の 5 条件とした。

2.2 試験結果

2.2.1 試験開始直後

黒色皮膜の除去過程について検討するため、本項では試験開始から 30 秒間の結果に着目する。まず外観

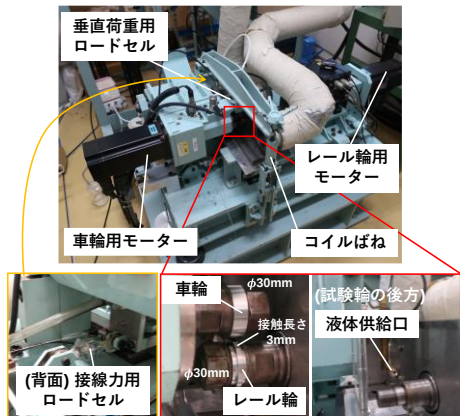


図 1 2 円筒転がり－すべり摩擦力試験機

表 1 2 円筒摩擦試験の試験条件

車輪・レール試験片の直径	30mm
接触長さ	3mm
車輪試験片回転数(周速度)	177.00rpm
レール試験片回転数	176.82rpm
すべり率	0.1%
法線力(最大接触圧力)	450N (857MPa)
供給液体	水 クエン酸水溶液 (濃度 1%, 3%, 5%, 10%)
液体供給流量	10mL/min
液体供給時間	試験開始後 300s
試験時間	1800s

変化に関して、代表して蒸留水およびクエン酸 10 % の条件における試験片の様子を図 2 に示す。図 2(a) より、蒸留水を供給した条件では、30 秒経過するまでレール試験片の黒色皮膜の変化はほとんど確認できなかった。一方、図 2(b) より、クエン酸水溶液 10 % の場合は、試験開始から 9 秒経過した時点でほとんど除去された。なお、クエン酸水溶液 1 % を供給した条件では、試験開始から 15 秒経過した時点でほとんど除去された。

次に、試験開始から 30 秒間の接線力係数（接線力／法線力）の測定結果を図 3 に示す。図 3 より、クエン酸水溶液の滴下条件に着目すると、概ね濃度が高いほど接線力係数が早期に増加する傾向が見られた。一方で、蒸留水の場合は 30 秒間でほとんど変化せず、低い値であった。試験片の外観変化より、クエン酸水溶液の濃度が高いほど黒色皮膜も早期に除去されたことから、クエン酸水溶液の濃度が高いほど、車輪試験片とレール試験片の金属同士が早期に接触することで、摩擦係数が増加したと考えられる。

2.2.2 全試験時間

液体の供給終了後の接線力係数の変化について検討するため、本項では全試験時間（1800 秒）に着目する。全試験時間の接線力係数の測定結果を図 4 に示す。図 4 より、蒸留水供給後の接線力係数は 0.1 程度まで増加した。蒸留水を供給する条件においても、試験開始から 180 秒後には黒色皮膜がほとんど除去されていた。このことから、この接線力係数の増加は、両試験片の金属同士が接触し、微細な凹凸が摩耗し、実際に接触する面積（真実接触面積）が増加する「なじみ」過程と考えられる。一方、クエン酸水溶液供給後の接線力係数は安定せず、ほとんどの時間で蒸留水供給後の値よりも低い値を示した。これはクエン酸が残存することにより、錆が発生するなど表面の性状が変化したことが原因と推定される。したがって、クエン酸水溶液による黒色皮膜除去後は、直ちに水で洗浄することにより、粘着力の改善が期待できると考えられる。

3. 営業線における黒色皮膜除去法の仕様検討

2 章の試験結果より、クエン酸水溶液を供給することで黒色皮膜を早期に除去できるものの、供給から長時間経過すると、蒸留水供給条件よりも摩擦係数が低くなることがわかった。そこで、営業線においては、



図 2 試験開始後 30 秒間の試験輪の外観変化

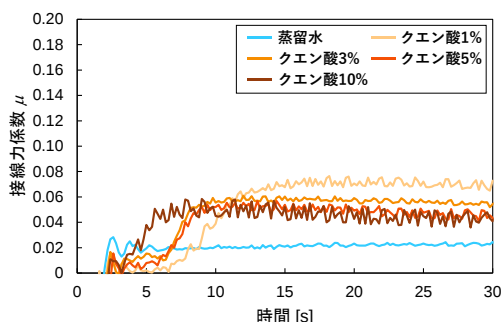


図 3 試験開始直後の接線力係数

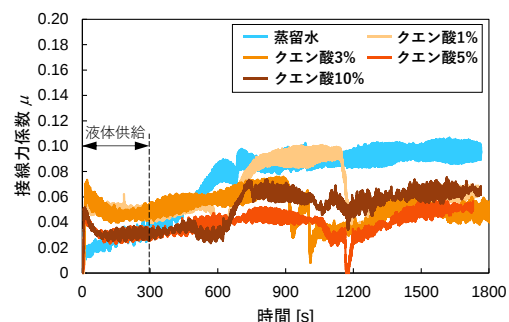


図 4 全試験時間の接線力係数

クエン酸水溶液をレール頭頂面に散布し、研磨材の摺動により黒色皮膜を除去した後、水でクエン酸水溶液および黒色皮膜の残渣を洗い流すという方法が効果的と判断した。本章では、上記の手法によるレール頭頂面上の黒色皮膜の除去において、より効果的な適用条件を検討するために、営業線の本線で実施した黒色皮膜除去試験について述べる。

3.1 試験方法

3.1.1 試験手順

黒色皮膜の除去試験は、図5に示す手順にしたがって実施した。各工程の詳細な作業内容を以下に示す。なお、各工程の丸付きの番号は図5の手順に対応している。

(1) レール頭頂面撮影…①, ④, ⑦

黒色皮膜の除去の程度を外観で評価するため、デジタルカメラによりレール頭頂面を真上から撮影した。①では黒色皮膜が付着した初期のレール頭頂面、④ではクエン酸水溶液または水道水を散布した状態のレール頭頂面、⑦では研磨材摺動および水道水の散布を実施した状態のレール頭頂面を撮影した。

(2) 膜厚測定…②, ⑧

レール頭頂面は、膜厚測定に十分な広い面を有しているため、黒色皮膜の除去程度を膜厚により評価することとし、電磁式膜厚計（A456CFTS, Elcometer Limited 製）によりレール頭頂面の皮膜の厚さを測定した。電磁式膜厚計は、電磁石の入ったプローブの先端をレールに近づけることで電磁誘導を発生させて、プローブとレールの間の距離のわずかな変化に対応する電圧の変化を利用して膜厚を測定する。②では初期のレール頭頂面上の膜厚、⑧では一連の工程後の膜厚を測定した。いずれも、試験区間 50cm を 5cm 間隔で 11 箇所測定した。

(3) クエン酸水溶液または水道水散布（事前散布）…③

試験区間のレール頭頂面に対して、市販の園芸用噴霧器を用いてクエン酸水溶液または水道水を散布した。散布は一方向に一度だけ行った。散布の様子を図6に示す。噴霧器からの液体の噴射量は約 7mL/s で、噴射口の移動速度は約 800mm/s とした（以下、本工程を「事前散布」と呼ぶ）。

(4) 研磨材の摺動…⑤

試験区間のレール頭頂面に対して、ナイロン製研磨材（スコッチブライト工業用パッド 8447, 3M 製）の摺動を行った。鉄材から切り出した重りを 3 個または 4 個重ねて、重りの底面に研磨材を貼り付けることで接触面圧を与える構造とした。重りの質量は 1 個当たり約 400g（研磨材を貼り付ける重りのみ約 300g）である。研磨材の摺動速度は約 25mm/s とし、図7のように一方向に一度だけ摺動させた。

(5) 水道水散布（事後散布）…⑥

条件によらず、研磨材を摺動させた後に水道水の散布を行った。散布方法は（3）項の事前散布と同様である（以下、本工程を「事後散布」と呼ぶ）。

3.1.2 試験条件

試験条件を表2に示す。2円筒摩擦試験では、クエン酸水溶液の濃度を最大 10%としており、濃度が高いほど黒色皮膜の除去効果は高い。一方、濃度 5%および 10%のクエン酸水溶液をレールに散布すると、レール頭頂面の錆形成による軌道回路の短絡不良の発生が懸念されるが、クエン酸の散布後に水を散布すれば（図5の手順⑥）、錆の形成が抑制され、水のみを散布した場合と同程度の膜厚となることを確認している。ここでは、実使用において必要な水の散布量を考慮し、本試験では水道水と濃度 1%, 3%, 5%のクエン酸水溶液の 4 種類を散布した。また、研磨材とレールの間の接触面圧は、実使用において研磨材に負荷可能な荷重の大きさを考慮し、7.4kPa（重り 3 個）と 10.0kPa（重り 4 個）の 2 条件とした。同じ条件下に

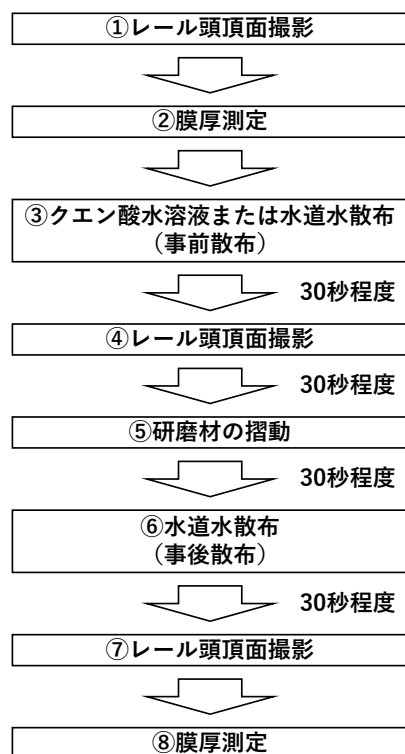


図5 黒色皮膜除去試験の手順



図6 液体散布の様子



図7 研磨材の摺動の様子

表2 黒色皮膜除去試験の試験条件

事前散布液体	水道水, クエン酸水溶液 1, 3, 5%	研磨材	スコッチブライト工業用パッド 8447
事後散布液体	水道水	研磨材の接触面圧	7.4kPa (重り 3 個), 10.0kPa (重り 4 個)
散布液体の噴射量	約 7mL/s	研磨材の摺動速度	約 25mm/s
噴射口の移動速度	約 800mm/s	同一条件下での試験回数	3 回

おける試験は3回実施した。なお、図5に示すように、③事前散布から⑦レール頭頂面撮影までの各手順の時間間隔は約30秒とした。

3.2 試験結果

3.2.1 レール頭頂面の外観

黒色皮膜が形成している初期のレール頭頂面、事前散布直後のレール頭頂面、および研磨材の摺動と事後散布を行った後のレール頭頂面の外観の例を図8に示す。

まず、初期のレール頭頂面と事前散布直後のレール頭頂面を比較すると、事前散布液体や研磨材の摺動時の接触面圧によらず、事前散布だけでは黒色皮膜の外観はほとんど変化しないことが確認できる。つまり、クエン酸水溶液を散布するだけでは黒色皮膜を除去できないと言える。

次に、事前散布液体による結果の違いについて比較する。図8より、事前散布液体が水道水であっても、研磨材の摺動とその後の事後散布により黒色皮膜が若干除去されるが、クエン酸水溶液の方がより顕著に黒色皮膜が除去されていることがわかる。また、クエン酸水溶液の濃度が高くなるほど黒色皮膜の除去が顕著であることもわかる。以上から、接触面圧が同等の条件においては、高濃度のクエン酸水溶液を散布した方が黒色皮膜は除去しやすいと言える。これらの結果から、クエン酸水溶液が、室内試験で形成させた擬似的な黒色皮膜だけでなく、営業線で形成する黒色皮膜も除去できることを確認できた。なお、研磨材摺動時の接触面圧の違いに着目すると、接触面圧が高い方が黒色皮膜はわずかに多く除去されたが、除

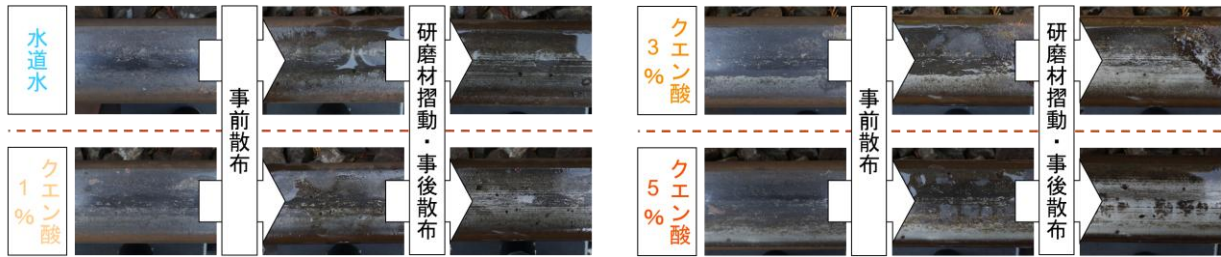


図8 レール頭頂面の外観変化の例（写真は接触面圧 7.4kPa）

去の程度に大きな差異は見られなかった。

3.2.2 黒色皮膜の膜厚

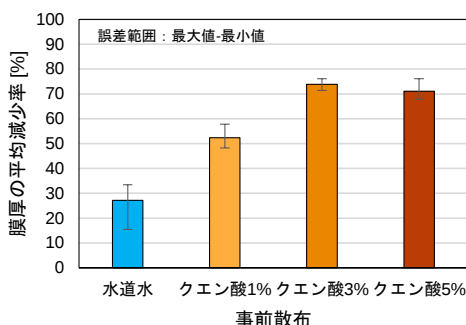
初期のレール頭頂面および除去試験後のレール頭頂面の膜厚測定結果より、膜厚の減少量を算出した（初期の膜厚測定値は、4~7 μm 程度であった）。次に、初期のレール頭頂面の膜厚に対する減少量の割合（減少率）を黒色皮膜の除去程度と捉えて算出し、各条件の試験回数3回で平均した。膜厚減少率の平均を図9に示す。接触面圧 7.4kPa の場合の平均減少率は水道水で 30%程度、濃度 1%のクエン酸水溶液で 50%程度、濃度 3%、5%のクエン酸水溶液で 70%程度であり、接触面圧 10.0kPa の場合の平均減少率は水道水、濃度 1%のクエン酸水溶液で 30%程度、濃度 3%のクエン酸水溶液で 70%程度、濃度 5%のクエン酸水溶液で 60%程度である。以上から、接触面圧 7.4kPa および 10.0kPa のいずれの場合も、水道水や濃度 1%のクエン酸水溶液に比べて、濃度 3%や 5%のクエン酸水溶液を事前散布した方が膜厚の減少率は大きいことがわかる。

以上の検証により、膜厚測定による黒色皮膜の除去程度の評価においては、水道水や濃度 1%のクエン酸水溶液に比べて、濃度 3%以上のクエン酸水溶液の方が除去効果は高いことが確認できた。

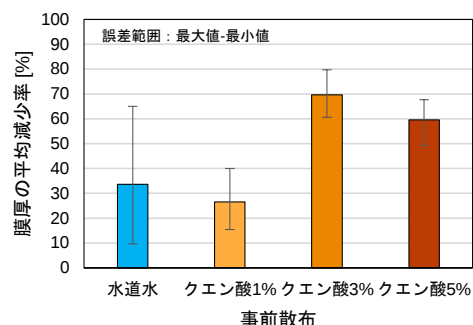
3.3 黒色皮膜除去の仕様

3.2 節の結果より、クエン酸水溶液の濃度が高くなるほど、外観上黒色皮膜が多く除去されたほか、濃度 3%以上のクエン酸水溶液を事前散布することで、高い膜厚減少率を得られた。ただし、これ以上濃度を高くすると、水で洗い流しても錆の形成を抑制できず、軌道回路における短絡不良が発生することが懸念されることから、レール頭頂面の黒色皮膜の除去においては濃度 5%のクエン酸水溶液が適していると考えられる。

本試験においては、研磨材の接触面圧の違いによる黒色皮膜除去の程度に大きな差異は見られなかったが、クエン酸水溶液の濃度が高い条件においては、いずれの接触面圧でも黒色皮膜が顕著に除去されていた。したがって、研磨材の接触面圧は少なくとも 7kPa から 10kPa 程度を確保すればよいと考えられる。



(a) 接触面圧：7.4kPa



(b) 接触面圧：10.0kPa

図9 黒色皮膜の膜厚の平均減少率

4. 黒色皮膜除去装置の開発および性能評価

3 章の営業線での検討より、レール頭頂面にクエン酸を散布し、レール頭頂面に工業用の研磨材(ナイロン製)を摺動させてせん断力を作用させることによって、黒色皮膜を除去可能であることが確認できた。これらの手順に基づき、営業線において形成した黒色皮膜を連続的に除去する黒色皮膜除去装置(以下、「除去装置」と呼ぶ)を開発した。そして、黒色皮膜が形成している営業線において、除去装置を用いた黒色皮膜除去の試験施工を実施した。

4.1 除去装置の構造

除去装置の概要を図 10 に示す。本装置は、2 台の軌道自動自転車および 1 台の牽引用トロを援用しており、①クエン酸を散布する「クエン酸水溶液散布機構」、②レール頭頂面に円筒型研磨材を接触させ、せん断力を与え黒色皮膜を除去する「黒色皮膜除去機構」、③クエン酸や黒色皮膜の残渣を洗浄する「水散布機構」で構成される。まずクエン酸水溶液散布機構を設置した 1 台目の軌道自動自転車を走行させ、レール頭頂面にクエン酸水溶液を散布する。次に、黒色皮膜除去機構および水散布機構を搭載した牽引用トロを、2 台目の軌道自動自転車で牽引しながら走行し、クエン酸と反応した黒色皮膜の除去、およびクエン酸と黒色皮膜の残渣の洗浄を行う。このように、クエン酸水溶液の散布と黒色皮膜の除去を独立して実施できるため、クエン酸と黒色皮膜の反応時間を確保することが可能である。また、黒色皮膜除去機構については、レール頭頂面との接触面積を増加させるとともに、せん断力を発生させるため、ピッチ方向に転動する円筒型の研磨材を採用した。

4.2 試験施工条件

試験施工の条件を表 3 に示す。この条件は、3 章の検討結果および、別途基地線で実施した仕様検討により決定した。走行速度については、施工速度を向上させつつ、走行風の影響を受けず確実にクエン酸水溶液をレール頭頂面に散布させるよう 10km/h とした。クエン酸水溶液の滴下量は、走行速度 10km/h においても、レール頭頂面を十分に濡らすことができるよう 600mL/min とした。円筒型研磨材の周速度は、軌道自動自転車が 10km/h で走行しても、レール頭頂面に対して後方へすべりを与えられるよう 20km/h とした。接触荷重は、3 章の検討において黒色皮膜が除去できた時の接触面圧(7~10kPa)以上の面圧を確保できる値とした。水の散布量は、クエン酸水溶液および黒色皮膜の残渣を十分に洗浄できるよう 1200mL/min とした。

試験施工箇所は、例年黒色皮膜の形成が確認される約 5km の山間区間を対象とした。この区間のうち、黒色皮膜の形成が実際に顕著であった延べ 22 地点にて、施工前後の外観観察および膜厚測定を実施した。



表 3 試験施工条件

軌道自動自転車の走行速度	10km/h
クエン酸水溶液の滴下量	600mL/min
円筒型研磨材の周速度	20km/h
円筒型研磨材の接触荷重	28N
水の散布量	1200mL/min

図 10 黒色皮膜除去装置の概要

4.3 試験施工結果

施工前後におけるレール頭頂面の外観観察の一例を図 11 に示す。施工前にはレール頭頂面全域にわたって黒色皮膜が形成していることが確認できる。一方、施工後にはレール頭頂面にわずかに黒色皮膜が斑状に残存する状態となっており、レール頭頂面に形成していた黒色皮膜の大部分が除去されたことが確認できた。また、その他の地点においても、概ね同様に黒色被膜が除去されることを確認した。

施工前後に実施した黒色皮膜の膜厚測定結果について、代表として 6 地点の結果を図 12 に示す。いずれの地点においても、除去施工により黒色皮膜が除去され、その膜厚も減少していることが確認できる。本研究における除去施工で最も除去効果が認められたのは、図 12(b)に示す地点 B の内軌で 92%減少であった。また、測定地点全体では、約 60%の膜厚が減少する効果が確認できた。いずれの地点においても施工後の平均膜厚は約 2 μ m まで除去できていることから、施工前の平均膜厚が薄い箇所については、相対的に除去した膜厚の割合が低く出たものと考えられる。なお、図 12(c)に示す地点 C の外軌においては 5%の減少にとどまっている。これは地点 C が半径 250m の急曲線であり、かつ 105mm のカントと 10mm のスラックが設定されていることから、除去装置が内軌側へ移動することで、外軌側においてレール頭頂面中心に研磨材が十分に接触していなかったことによるものと考えられる。ただし、車輪と主に接触する GC 側については、外観観察により黒色皮膜が除去されていることを確認した。

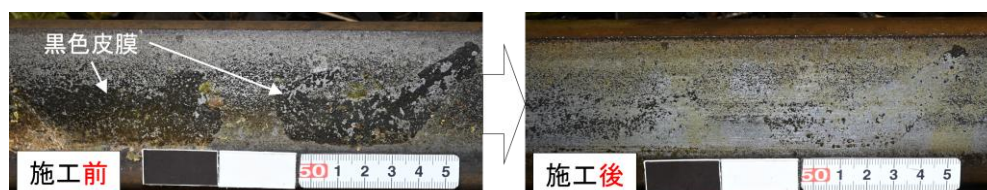


図 11 試験施工前後のレール頭頂面の外観の例

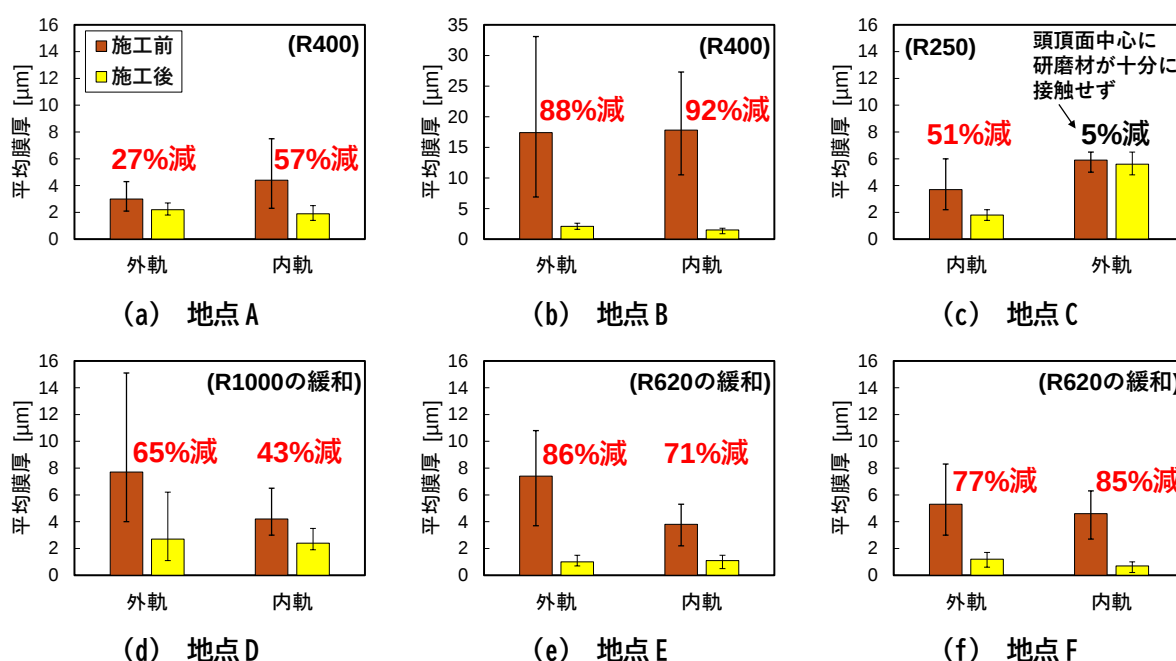


図 12 試験施工前後の膜厚平均値の例

5. まとめ

本研究では、クエン酸が持つタンニン鉄を生成させにくくする作用に着目し、クエン酸を用いた黒色皮膜の除去法について検討した。まず、2円筒試験機を用いた摩擦試験により、クエン酸による黒色皮膜の除去効果を確認した。次に、クエン酸水溶液を用いたレール頭頂面上の黒色皮膜の除去において、効果的な適用条件を検討するため、レール頭頂面に対するクエン酸水溶液（または水）散布、研磨材の摺動による除去、水散布の一連の工程による黒色皮膜除去試験を実施した。最後に、クエン酸散布機構、黒色皮膜除去機構および水散布機構から構成される黒色皮膜除去装置を開発し、黒色皮膜が形成している営業線において、除去装置を用いて黒色皮膜除去の試験施工を実施した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 2円筒試験機による摩擦試験の結果、クエン酸水溶液の濃度が高いほど、接線力係数が早期に増加し、黒色皮膜も早期に除去された。ただし、長時間経過すると、クエン酸水溶液供給後の接線力係数は安定せず、ほとんどの時間で蒸留水供給後の値よりも低い値を示した。したがって、クエン酸水溶液による黒色皮膜除去後は、直ちに水で洗浄することにより、粘着力の改善が期待できると考えられる。
- (2) 営業線における黒色皮膜除去の仕様検討の結果、散布するクエン酸水溶液の濃度は5%のものを、研磨材の接触面圧は少なくとも7kPaから10kPa程度を確保すればよいと判断できた。
- (3) 黒色皮膜除去装置による試験施工の結果、レール頭頂面の外観において、黒色皮膜の大部分が除去された。また、試験後に膜厚が平均で約60%、最大で92%減少しており、本装置が営業線の黒色皮膜に対して高い除去効果を発揮できることを実証した。

文 献

- 1) 菅原衛：山間線区における空転滑走に関する研究，土木学会第67回年次学術講演会，VI-495，pp.989-990，2012
- 2) 生駒一樹，鈴村淳一，木村成克，陳樺：落葉によるレール上黒色皮膜の生成と評価，第25回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集（J-RAIL2018），U0024，2018
- 3) H. Chen, T. Furuya, S. Fukagai, S. Saga, K. Ikoma, K. Kimura and J. Suzumura, "Wheel slip/slide and low adhesion caused by fallen leaves," Wear, Vol. 446-447, 203187, 2020.
- 4) Z. Li, O. Arias-Cuevas, R. Lewis and E.A. Gallardo Hernández: Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in leaf contaminated wheel-rail contacts, Tribology Letters, 2009, 33, 97-109.
- 5) 相馬直樹：旭川支社管内における秋季空転防止対策および鹿衝突防止対策，新線路，2021年8月号，pp.6-8，2021.
- 6) 幸野真治，辻江正裕，浦川文寛，鈴村淳一：レール頭頂面に形成した落葉起因の黒色皮膜除去法の検討，鉄道工学シンポジウム論文集，第27号，pp.79-86，2023
- 7) 幸野真治，辻江正裕，浦川文寛，井戸達哉，鈴村淳一，陳樺：クエン酸を用いた落葉に起因する黒色皮膜除去法の仕様検討，鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2023)，S2-1-1，2023
- 8) 幸野真治，辻江正裕，浦川文寛，鈴村淳一，生駒一樹：レール頭頂面に形成した落葉起因の黒色皮膜除去試験，土木学会年次学術講演会，VI-691，2024
- 9) 陳樺：研究開発七つ道具 転がりすべり摩擦試験機，RRR，Vo. 70，No. 4，p. 41，2013

運転整理の評価指標の提案と運転整理手配の分析・評価手法

高田 真由* 國松 武俊* 田中 峻一*

Proposal of Evaluation Metric for Train Rescheduling and Analysis and Evaluation Method for Train Rescheduling Arrangements

Mayu TAKADA Taketoshi KUNIMATSU Shunichi TANAKA

To support dispatchers in their traffic rescheduling operations during transport disruptions, the authors propose the concept of "number of late-arriving passengers," develop a new operational adjustment simulator, and propose an analysis method for evaluating the impact of implemental adjustment plans on passenger convenience. Specifically, each item is as follows: Firstly, the "number of late-arriving passengers" is used as an evaluation metric for comparing different traffic rescheduling plans, representing the number of passengers whose arrival delay at a station exceeds a threshold. Secondly, the train rescheduling simulator predicts timetables based on different rescheduling arrangements. Finally, the proposed method for analysis uses the number of late-arriving passengers to determine which period and section of travel convenience has changed due to changes in traffic rescheduling arrangements. In this paper, we describe the three items mentioned above in detail.

キーワード：運転整理，列車ダイヤ，輸送計画，単線路線，旅客行動，評価指標

1. はじめに

人身事故等に起因してダイヤ乱れが発生すると、乱れたダイヤを元に戻すために、運転整理が行われる。運転整理では、旅客の利便性が低下しないよう、適切な運転整理手法が求められている。

鉄道事業者では、旅客の利便性が低下しない運転整理ができるよう、指令員が実施した運転整理を振り返り、より望ましい運転整理手配が無かったか、他の運転整理案の検討および実際の運転整理との比較が行われる（図1）。この比較においては、仮に他の運転整理案を実施した場合の列車運行状況を予測し、旅客の利便性を反映した評価指標を用いて、定量的な相対評価ができる手法を用いることが望ましい。

旅客の利便性を反映できる評価手法については、実際に行われたものとは異なる運転整理に対して旅客への影響度合いを定量的に算出できる評価指標が無いため、どちらが相対的に良い運転整理案かを判断するための分析・評価手法が確立されていないという課題がある。実務では、運転整理の評価指標として、各列車・各駅の遅延量の総和である総遅延時分や、列車の運休本数、ダイヤ乱れ発生からダイヤ回復までの

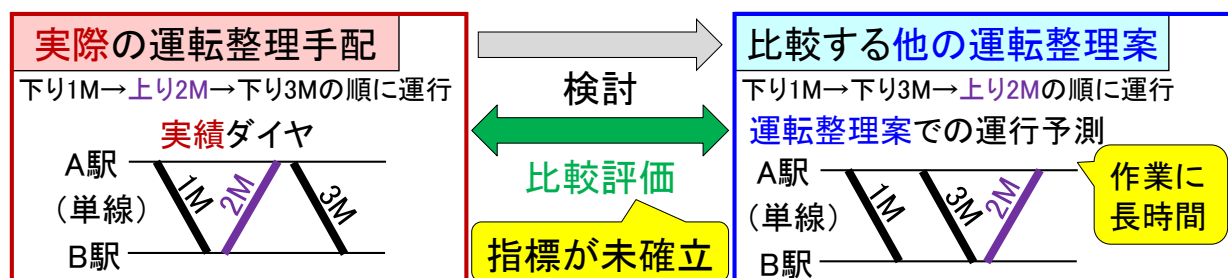


図1 運転整理の振り返り

* 信号技術研究部 運転システム研究室

時間等が用いられてきたが、旅客への影響を適切に評価できないという課題がある。先行研究では、利用者の不効用にに基づく手法¹⁾がある。これは、シミュレーションにより、輸送障害時の移動時間、乗換、混雑を推定し、利用者が受ける不効用を時間単位に換算することで、平常時と比較する手法である。また、ICカードの平常時所要時間との差分に基づく手法²⁾は、輸送障害時のICカードデータをもとに、利用者が実際に受けた影響を評価する手法である。いずれの手法も、旅客の目的駅到着遅延の合計を評価値の一部としているため、目的駅到着が1分遅延した旅客が10人いた場合と、目的駅到着が10分遅延した旅客が1人いた場合の区別はできない。また、影響を受けた時間と旅客の人数の積である「POINT」に基づく手法³⁾では、輸送障害の発生場所・発生時刻・運転再開時刻・運休本数をもとに、輸送障害の規模感を評価する指標が提案されている。しかし、運転再開時刻や運休本数が変化しない手配を実施した場合には評価値は変化しない。また、ICカードの平常時所要時間との差分に基づく手法と、「POINT」に基づく手法は、輸送障害が発生した際に得られるデータを使用しているため、実際の運転整理手配以外の他の運転整理案に対する評価値を算出できないという課題がある。

そこで本研究では、運転整理の振り返り作業の品質向上を目的に、実際に行われた運転整理手配以外の運転整理案に対しても適用可能な評価指標を提案した。また、提案した評価指標を用いて、複数の運転整理を比較・分析して手配案の適否を判断する手法を構築した。そして、単線区間・複線区間が混在する通勤路線を対象に、提案手法を用いたケーススタディを行い、提案手法の有用性を確認した。

2. 運転整理の分析・評価手法

2.1 評価指標の基本的な考え方

運転整理の変更による旅客の利便性の変化を手配に対する良否の評価に反映するためには、旅客行動の変化に応じて評価値が変化することが望ましい。先行研究²⁾の手法は、輸送障害時のICカードデータを用いているため、運転整理を変更した場合の評価値を算出できない。先行研究³⁾の手法は、輸送障害の規模感を評価する指標を求めているため、運転再開時刻や運休本数が変化しない手配を実施した場合には評価値は変化しない。運転整理を変更した場合にも適用可能で、運転再開時刻や運休本数が変化しない手配でも、旅客行動の変化による運転整理の相違が測れる評価指標が望ましい。そこで、個々の旅客の出場駅への到着時刻をもとにした評価指標を定義し、複数の運転整理案を相対評価する手法を定めることとした。

まず、ある運転整理案を実施した場合、各旅客が出場駅への到着が平常時と比べてどれだけ遅れたかを、「到着遅延時分」と定義した。そして、設定した到着遅延時分の閾値を超える旅客の総数を、「到着遅延人数⁴⁾」と定義し、運転整理の評価指標とした。この到着遅延人数を、複数の運転整理案に対して計算し、大小関係を比較したうえで、「到着遅延人数がより小さい方が良い運転整理案」という評価手法を定めた。

到着遅延時分は、平常時の自動改札機データ、計画ダイヤ、評価対象の運転整理案を実施した場合の予測ダイヤから推計できるため、輸送障害時の自動改札機データを必要としない。したがって、到着遅延時分、および、到着遅延人数は、実際の運転整理手配以外の他の運転整理案に対しても算出可能である。

2.2 到着遅延人数の算出フロー

到着遅延人数の算出フローを図2に示す。

まず、ある運転整理手配を実施した場合に想定される運行状況（予測ダイヤ）を、運転整理シミュレータを用いて推定する。次に、平常時の自動改札機データを用いて、当日の計画ダイヤ、予測ダイヤのそれぞれに対し、各旅客の列車乗継経路を推定する。このとき、それぞれのダイヤにおいて旅客が最も早い時間で

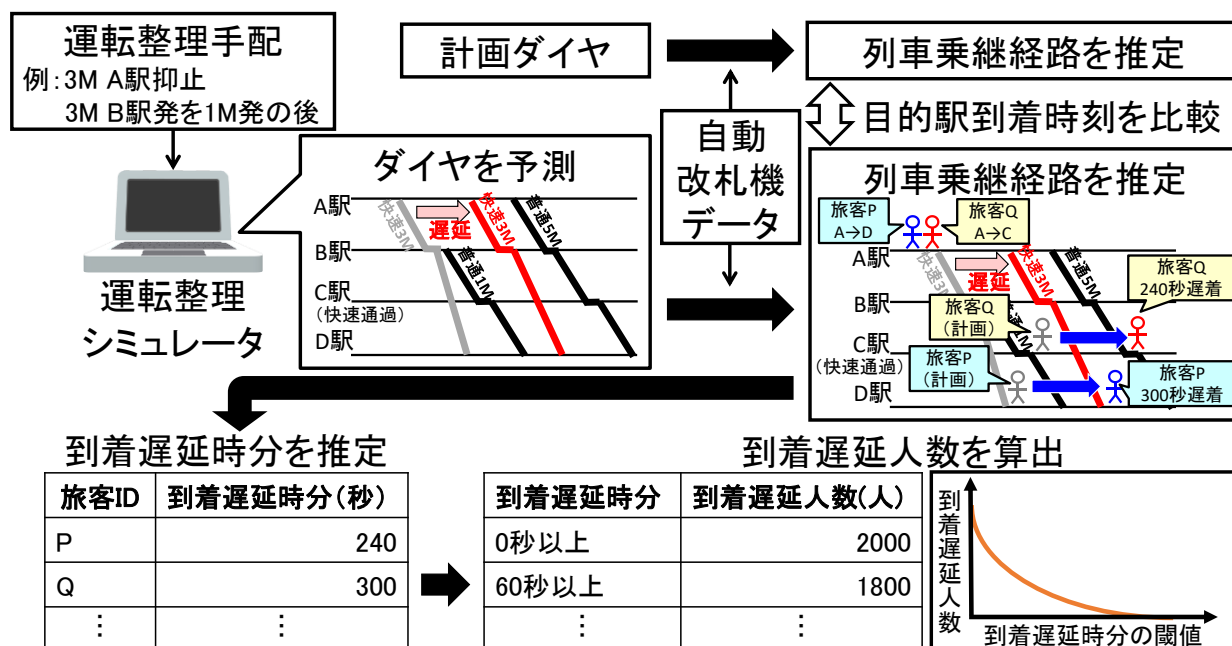


図2 到着遅延人数の算出フロー

目的駅に到着できる列車に乗車するという前提とした。

そして、計画ダイヤと予測ダイヤにおける列車乗継経路の推定結果を旅客1人1人について比較することで、予測ダイヤの到着遅延人数を、様々な到着遅延時分の閾値に対して算出する。

以下、2.3節で列車乗継経路と到着遅延時分の推定方法の概要、2.4節で複数の運転整理案の比較・分析手法について述べる。また、2.5節で運転整理手配からダイヤを予測するための運転整理シミュレータについて述べる。

2.3 到着遅延時分の算出方法

各旅客の到着遅延時分は、出場駅への到着が計画と比較してどのくらい遅れたかを表す。到着遅延時分の算出方法を図3に示す。具体的には、A駅からD駅に向かう旅客Pは、計画ダイヤではA駅から快速3Mに乗り、D駅へ向かうが、仮に快速3Mが遅延した場合には、遅延した快速3Mを利用するため、D駅の到着が遅れる。また、A駅からC駅へ向かう旅客Qは、計画ダイヤではA駅から快速3Mに乗りB駅で乗り換え、普通1MでC駅へ向かう。しかし、仮に快速3Mが遅延した場合には、旅客QはB駅での普通1Mへの乗換ができないため、後続の普通5Mに乗り換えることになり、C駅の到着が遅れる。このように、各旅客について、計画ダイヤと輸送障害が発生したダイヤのそれぞれの利用経路と出場駅への到着時刻を予測し、到着遅延時分を推計する。

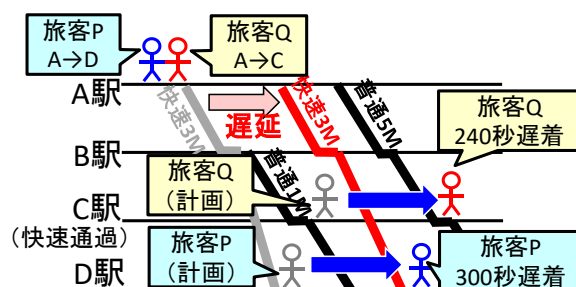


図3 旅客の到着遅延時分

2.4 複数の運転整理の比較・分析手法

前節までの方法により、平常時の自動改札機データと、運転整理手配を再現した場合の予測ダイヤを活用して、旅客の列車乗継経路を推定することで、様々な運転整理案に対しても、列車運行予測に基づいた旅客の利便性の観点による定量的な評価が可能となる。さらに、列車乗継経路推定結果を活用することで、遅延が増大した旅客は、どの列車を利用したのかという詳細な比較・分析も可能となる。具体的な比較・分析手法は以下の通りである。

まず、到着遅延人数を比較し、運転整理案の良し悪しを判定する。具体的には、複数の運転整理案に対して、様々な到着遅延時分の閾値を設定して到着遅延人数を計算する。そして、横軸に到着遅延時分の閾値を、縦軸に到着遅延人数を取るグラフを作成して、到着遅延人数を可視化する。このグラフにより、「多くの閾値について到着遅延人数が小さい方が良い運転整理案」と判定する。

次に、2つの運転整理案で到着遅延人数に差がある要因となる運転整理手配を特定するための分析を行う。具体的には、まず、2つの運転整理案で目的駅到着時刻が変化した旅客に限定して、到着遅延時分をクロス集計して2次元ヒストグラムで表示する。さらに、到着時刻の差が大きかった旅客が利用した列車の乗車人数を表す色付きダイヤ図を用いて、旅客の目的駅到着がより遅れる原因となる列車を可視化し、その列車に対する運転整理手配を特定する。

2.5 運転整理シミュレータ

実際の運転整理手配以外の運転整理案を作成する場合は実績ダイヤが無いため、予測ダイヤを作成する必要がある。しかし、複数の運転整理手配が関係しあう中、基準運転時分や停車時分の確保、運転時隔の考慮、順序関係等、様々な制約を考慮して、全列車・全駅における到着・発車時刻を予測する計算を順番に行う必要があるため、単純な線区を除き、手作業での推定は困難である。

そこで、図2に示した算出フローを効率的に行うため、運転整理手配を画面上で入力でき、入力された運転整理手配に応じて、先行研究⁵⁾のダイヤ予測手法に基づいて予測ダイヤを計算・表示し、計算された予測ダイヤに対し、評価指標である到着遅延人数を求める運転整理シミュレータを開発した。

なお、運転整理シミュレータを用いて、実際の運転整理手配と他の運転整理手配を比較する際は、条件をあわせることが必要である。しかし、実績ダイヤでは、駆け込み乗車等による駅停車時分の増大や、運転士の運転操作による駅間走行時分のばらつき等、当日発生した停車時分や走行時分のゆらぎが含まれている。一方で、運転整理シミュレータで作成する予測ダイヤでは、停車時分や走行時分は最小停車時分・基準運転時分を基本としており、当日のゆらぎが含まれていない。

そのため、実際の運転整理手配に対して評価を行う場合には、当日の実績ダイヤをそのまま用いずに、当日の運転整理手配を運転整理シミュレータに入力し、予測ダイヤとして出力された列車ダイヤを用いて評価を行う。

運転整理シミュレータは、図4に示す3つの主要な機能からなる。

(1) 運転整理手配の入力

画面上に列車ダイヤを表示し、画面上の列車スジ（列車線）を選択することで、その列車に関係する運転整理手配（運休、順序変更、時刻変更、車両運用変更等）を入力できる。

(2) 予測ダイヤの計算

入力された運転整理手配を適用した場合の予測ダイヤを求め、画面上に表示する。予測ダイヤの計算にあたり、速度を優先する理由から、グラフ理論を用いた手法を採用した⁵⁾。計算された予測ダイヤを見ながら、さらに運転整理手配を入力することも可能とし、運転整理手配の入力、予測ダ

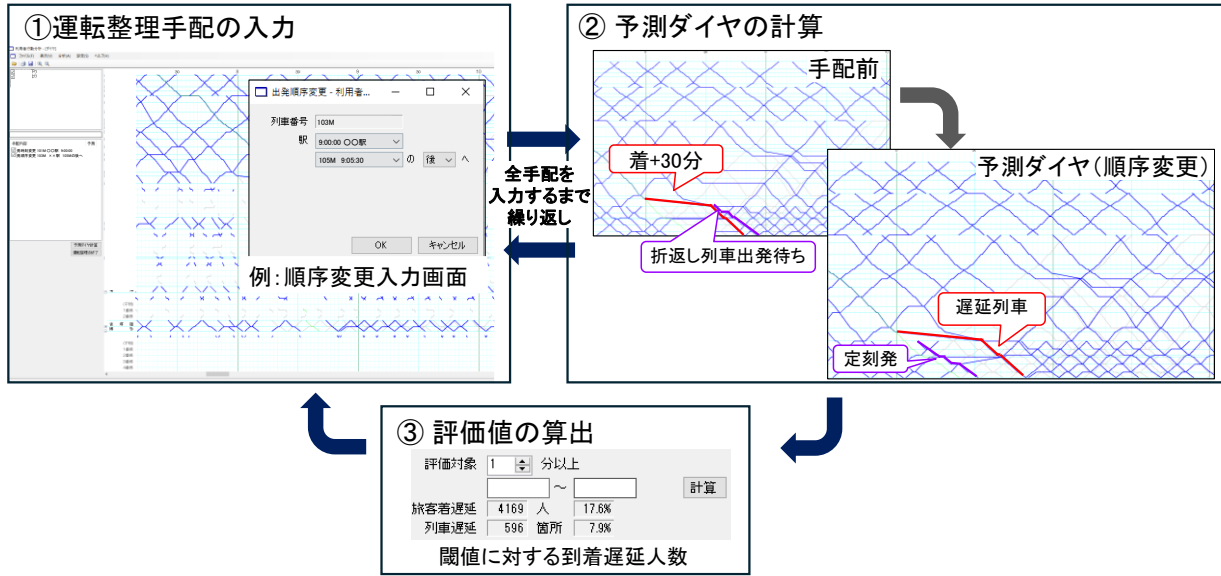


図4 運転整理シミュレータの機能

ダイヤの計算を繰り返しながら運転整理案を作成することを想定している。

(3) 評価値の計算

作成された予測ダイヤに対し、指定された閾値に対する到着遅延人数を計算し、画面上に表示する。また、到着遅延人数の算出の他、各列車の駅間乗車率や遅延による列車線の色分け等を行い、視覚的に遅延や混雑を示すことも可能である。

3. ケーススタディ

3.1 ケーススタディでの運転整理の概要

提案する評価指標と分析・評価手法の有効性を確認する目的で、単線区間・複線区間が混在する通勤路線の実際の運転整理事例を対象に、ケーススタディを実施した。具体的には、以下の(a), (b)のダイヤを比較した。

(a) 実際に行われた運転整理を反映したダイヤ（以下、実績再現ダイヤ）

(b) 実際とは異なる運転整理を反映したダイヤ（以下、仮想ダイヤ）

(b)仮想ダイヤは、実際に行われた運転整理の一部手配を望ましくないものに変更することで作成した。

(a)実績再現ダイヤと(b)仮想ダイヤに対し、到着遅延人数を算出して比較した。

ケーススタディでは、運転整理を一切実行しない場合や列車の追加運休を想定して、様々なケースを試行したが、ここでは代表例として、実際には運休した列車を運休しない手配を想定したケースを報告する。分析対象の実績再現ダイヤを図5(a)に示す。図5(a)に示す列車 T_1 が8:17にC駅を発車予定であったが、急病人対応により27分遅れで運転を再開した。(a)実績再現ダイヤでは、A～G駅間を走行する4本の列車を運休し、行き違い駅変更と、着発時刻の調整を行った。

一方、(b)仮想ダイヤでは、4本の運休手配を行わなかった場合を想定して、(a)実績再現ダイヤのA駅の上り列車間隔と、G駅の下り列車間隔が空いた箇所に、上り2本、下り2本の列車を追加し、行き違い駅の変更や着発時刻の調整を行って作成したものである。この(b)仮想ダイヤについては、運転整理の実務を行う指令員より、走行距離が長い列車の発車が(a)実績再現ダイヤよりも遅れるため、望ましくない旨の見解が得られている。この仮想ダイヤに対し、運転整理シミュレータにより作成した予測ダイヤを図5(b)に

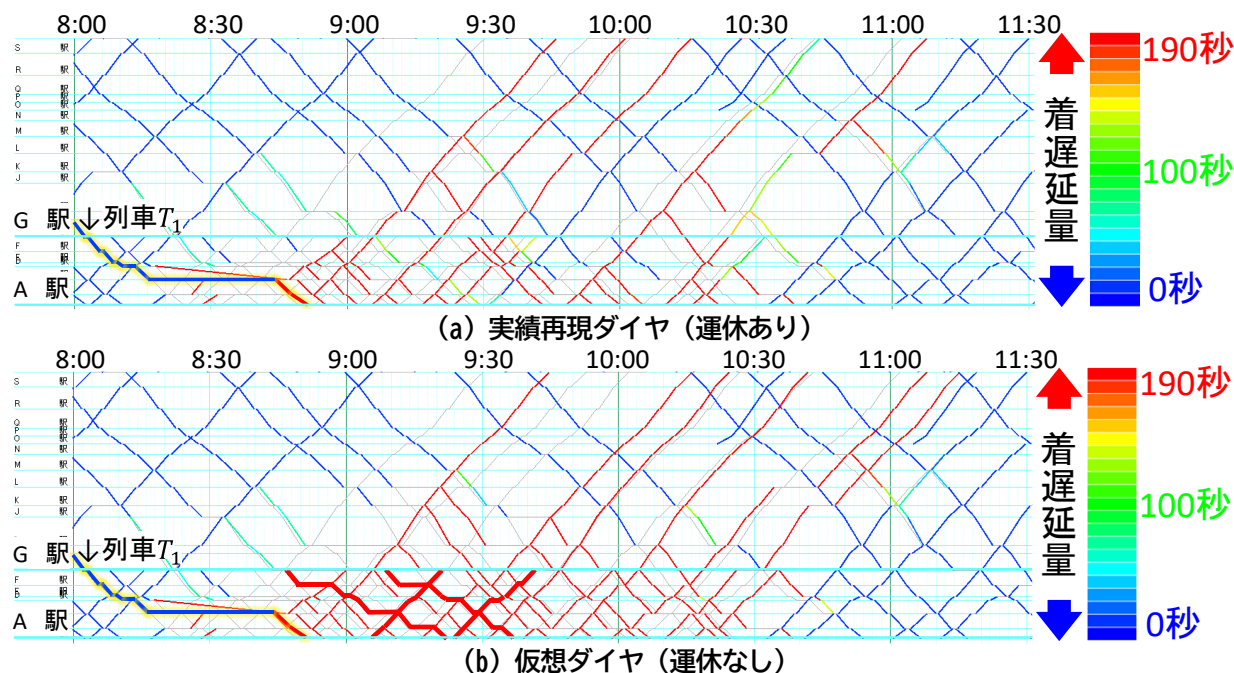


図5 列車の着遅延量による色付きダイヤ

示す。追加した4本の列車は赤太線で示されている。A～T 駅間を走行する列車の発車が遅れて、3分以上の遅延が11:15頃まで継続することがわかる。

3.2 到着遅延人数の比較結果

運転整理シミュレータを用いて、実績再現ダイヤと仮想ダイヤにおける到着遅延人数を算出し、比較した結果を図6に示す。ほぼ全ての閾値において、実績再現ダイヤの方が仮想ダイヤよりも到着遅延人数が小さくなっており、実績再現ダイヤの方が仮想ダイヤよりも良い運転整理だったと判定され、指令員の見解とも一致した。特に、閾値が3分以上18分以下での到着遅延人数に差があることがわかる。

3.3 2次元ヒストグラムによる到着遅延時分の分布の可視化

(a)実績再現ダイヤと(b)仮想ダイヤの到着遅延人数に差が出た原因を探るため、各旅客の各ダイヤでの到着遅延時分の分布に着目する。(a)実績再現ダイヤと(b)仮想ダイヤで目的駅到着時刻が異なる全旅客の到着遅延時分をクロス集計して、2次元ヒストグラムで可視化した結果を図7に示す⁶⁾。

全体的な傾向として、図7の左側に、暖色系のマスが多いことから、実績再現ダイヤは仮想ダイヤより

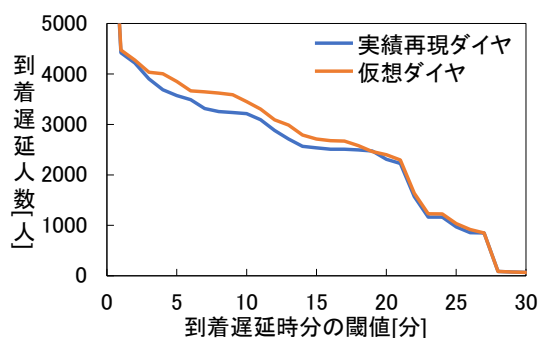


図6 到着遅延人数の比較結果

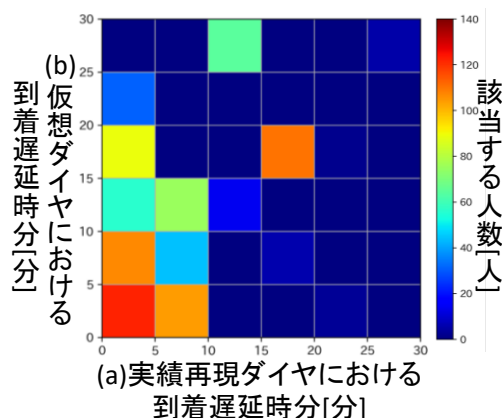


図7 2次元ヒストグラム

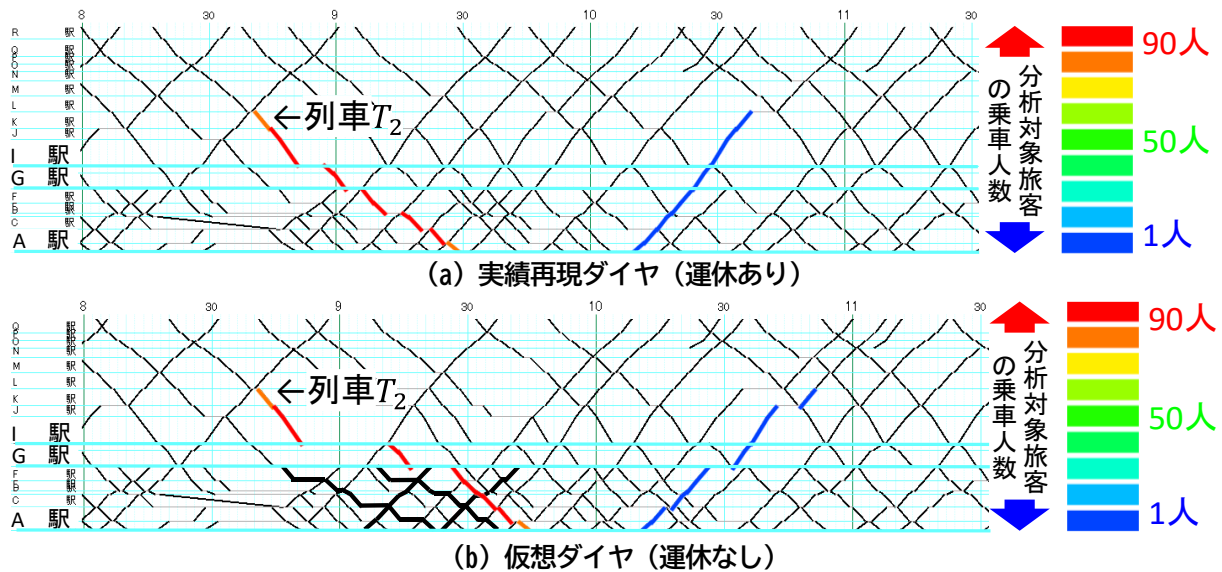


図8 分析対象旅客の乗車人数によるダイヤ

も、目的駅到着が早い旅客が多数存在することがわかる。

また、特に到着遅延時分の差が大きい暖色系のマスは、図6に示した到着遅延人数の差の主要因と考えられる。具体的には、実績再現ダイヤでは到着遅延時分が5分未満であったが、仮想ダイヤでは到着遅延時分が15分以上20分未満であった旅客等である。次節では、このマスに該当する旅客が、どの列車を利用するのかを分析し、影響の大きい列車や運転整理手配の抽出を試みる。

3.4 到着遅延人数への影響が大きい運転整理手配の抽出手法

前節で分析対象とした旅客89名が実績再現ダイヤと仮想ダイヤで乗車した列車を集計し、色付きダイヤで表示した結果を図8(a)および(b)に示す。図8(b)に黒太線で示す4本の列車は、実績再現ダイヤで運休した列車である。

図8(a)(b)より、分析対象旅客の多くは、列車T₂を利用することがわかる。この列車T₂の運行時刻を図8(a)(b)で比較すると、仮想ダイヤでは、実績再現ダイヤで運休となったG駅発の列車がG～A駅間を走行するため、実績再現ダイヤと比較して列車T₂のI駅出発が遅れている。これに伴い、列車T₂のA駅到着は、仮想ダイヤでは実績再現ダイヤと比較して、さらに15分30秒遅延している。すなわち、列車T₂のA駅到着遅延により、列車T₂に乗車しA駅を目的駅とする83名の旅客の到着が遅れることがわかる。これより、実績再現ダイヤにおける、G～A駅を走行する列車4本を運休し、T～A駅を走行する列車T₂のI駅出発を早める運転整理手配は、旅客の到着遅延時分を増大させないために効果的であったと分析できる。

本稿で紹介した事例以外でも、指令員が望ましいと考えるほうの運転整理が判別できることや、評価結果に影響を与える運転整理手配を特定できることを確認している。以上より、本対象路線においては、到着遅延人数による複数の運転整理案の比較・分析手法の有用性を確認した。

3.5 実務で用いられる評価指標

3.1節で示した2つのダイヤに対して、運転整理の実務で用いられる評価指標である「ダイヤ回復までの時間、列車の運休本数、列車の総遅延時分」を計算して比較し、運転整理案の良し悪しを判定できるか否かを確認した。

評価指標の計算結果を表1に示す。(a)実績再現ダイヤと(b)仮想ダイヤを比較した場合に、ダイヤ回復ま

表1 評価指標の比較

評価指標	(a)実績再現ダイヤ	(b)仮想ダイヤ
ダイヤ回復までの時間[時間]*1	2.4	2.5
列車の運休本数[本]	4	0
列車の総遅延時分[時間]*2	29.9	63.0

*1: 運転再開から列車の遅延が1分未満になるまでに要した時間

*2: 全駅・全列車の到着遅延の和

での時間の増分は0.1時間と、ほとんど変わらない。また、運休本数と総遅延時分は、一般的にトレードオフの関係にある。列車を運休すると評価指標の計算対象となる列車が減るため、列車の総遅延時分は小さくなるためである。したがって、この2つの指標は同時に比較する必要がある。運休本数が同程度であった場合は、総遅延時分が小さい方が良い運転整理案と考えられる。しかし、本稿のケーススタディのように、運休本数が異なる運転整理案を比較する場合には、どちらの運転整理案がより望ましいかを明らかにすることができない。従って、実務で用いられる評価指標では、今回のケーススタディで扱った2つの運転整理案の良し悪しを明確には判定できないことがわかる。

これに対し、本研究で提案した到着遅延人数は、3.2節で示したように、ほとんどの閾値で(a)実績再現ダイヤよりも(b)仮想ダイヤの方が大きく、実績再現ダイヤの方が良いと判定できており、指令員の見解とも一致した。以上のケーススタディの結果より、到着遅延人数は実務で用いられる評価指標では判定できない良し悪しを測れることを確認した。

4. まとめ

本研究では、運転整理の振り返り作業の品質を向上させることを目的として、実際の運転整理以外の他の運転整理案に対しても算出可能で、利用者の利便性を反映した評価指標を提案し、それを用いた評価手法を提案した。具体的には、運転整理の評価指標として到着遅延人数を提案し、到着遅延人数が小さい方がより良い運転整理案という評価手法を示した。また、運転整理手配を入力することで予測ダイヤを計算し、その予測ダイヤの評価指標を算出可能な運転整理シミュレータを開発した。これらにより、到着遅延人数や到着遅延時分を用いた運転整理の良し悪しの判定や、評価結果に差が生じる要因となる運転整理手配や列車を特定するための比較・分析手法を構築した。

ケーススタディとして、実績再現ダイヤと一部の運転整理手配を望ましくないものに変更した仮想ダイヤを運転整理シミュレータで作成し、到着遅延人数を算出、比較した。その結果、到着遅延人数は実績再現ダイヤの方が小さくなることを確認し、評価指標が適切であることを確認した。また、2つのダイヤの到着遅延人数に差が生じた要因を分析するため、2次元ヒストグラムで到着遅延時分の差が大きい旅客を抽出し、列車ダイヤ上で乗車人数を可視化する分析をした結果、評価結果に差が生じる要因となる運転整理手配を抽出できることを確認した。

今後は、本提案手法が複線路線や異なる種別の列車の接続がある場合にも適用可能かどうかの検証や、提案した評価指標に基づいた運転整理自動作成アルゴリズムの開発を行う予定である。

文 献

- 1) 小林里紗, 家田仁, 柴崎隆一, 寺部慎太郎: 利用者の利便性から見た非常時の運転整理ダイヤの評価, 第7回鉄道連合シンポジ

ウム J-Rail 2000, No.3408, pp.379-382, 2000

- 2) 角田史記, 加藤学, 大塚理恵子, 助田浩子, 大関一博: 交通系 IC カードを利用した鉄道輸送障害時の影響を定量化する方法の研究, 情報処理学会論文誌データベース, Vol.6, No.3, pp.187-196, 2013
- 3) 館雅憲, 福山浩史: 輸送安定度指標「POINT」の開発と全社展開, 第 44 回サイバネ・シンポジウム論文集, No.101, 2007
- 4) 高田真由・國松武俊: 単線路線の運転整理に対する評価指標の考察, 第 29 回鉄道連合シンポジウム J-Rail 2022, S5-1-3, 2022
- 5) 田中峻一: 交差支障競合時の順序関係を考慮した予測ダイヤ作成手法, TER-23-042, MSS-23-008, 2023
- 6) 高田真由・國松武俊: 運転整理の変更により影響を受ける旅客の抽出・可視化手法, 令和 6 年電気学会全国大会, K503-A1, 2024

鉄道総研報告
RTRI REPORT

転てつ装置の保守管理と転てつ機モニタの活用に関する調査

潮見 俊輔* 押味 良和* 重盛 壮平*

A Survey on Switch-and-Lock Equipment Maintenance and Utilization of Point Machines Monitors

Shunsuke SHIOMI Yoshikazu OSHIMI Sohei SHIGEMORI

We carried out a survey on maintenance methods for switch-and-lock equipment in order to search for future research and development. Actual states of facility conditions were investigated through a questionnaire and interview survey to 87 railway operators in Japan. The specific survey items were maintenance methods, maintenance cycles, replacement criteria, benefits of point machine monitoring systems and its tasks. The results of this survey showed that the condition monitoring data from point machines has been used to extend the inspection periods and reduce the number of inspection items. Furthermore, we also confirmed that R&D on condition monitoring may contribute to help today's maintenance issues, such as a shortage of maintenance workers.

キーワード：転てつ装置，動力転てつ機，保守管理，状態監視，鉄道信号

1. はじめに

転てつ装置は、鉄道において列車の進行方向を変える軌道構造である分岐器に対して、動作（転換）や保持（鎖錠）等を行う信号保安装置である。一般的には、電気転てつ機などの動力転てつ機と、フロントロッドなどの転てつ付属装置から構成される。転てつ装置は列車運行の安全性に影響するため、設備を健全な状態に保つよう管理することが求められる。また、転換不能発生時には適切かつ迅速な処置を行い、列車運行への影響を小さくすることが重要である。そのため、転てつ装置は定期的な検査の実施や、状態や使用年数等に基づいた修繕や更新が行われている。しかし、労働人口の減少等による検査修繕業務の担い手不足や保守管理コストの増加は、従来通りの修繕や更新を難しいものにしている。転てつ装置を含む鉄道設備の保守管理体制やコスト低減に関して、これまでも鉄道事業者単位で様々な省力化や低コスト化の施策が行われてきた。これらの施策を今後更に発展させるためには、他の鉄道事業者における施策や経験を踏まえた、保守管理手法や体制の検討、技術開発に取り組むことが重要である。

本報では、2022 年から 2023 年にかけて実施した、鉄道事業者へのアンケートと聞き取りに基づき、転てつ装置の保守管理の実態について調査を行った結果¹⁾を報告する。従来の定期的な巡回検査に関する実態調査のほか、一部の鉄道事業者で導入が進められている、転てつ装置の状態監視装置（転てつ機モニタ）の導入や利活用、現状の課題に関する調査結果について報告する。また、調査結果を踏まえて、今後の転てつ装置の保守管理における課題と、転てつ機モニタによる定期検査の代替等の課題解決の方向性を示す。

2. 保守管理に関する実態調査

2.1 調査目的および調査方法

転てつ装置の保守管理に関する実態と、近年導入が進められている転てつ機モニタの現状把握、転てつ機モニタの現時点での評価、および定期検査の代替手段として活用する際の課題を踏まえて、将来の研究

* 信号技術研究部 信号システム研究室

開発の方向性を整理することを目的として、鉄道事業者に対するアンケート調査と聞き取り調査を実施した。

アンケート調査は、2022 年秋に鉄道事業者 150 社局（新幹線を含む普通鉄道、路面電車、新交通）に対してアンケート（全 32 問）を配布して、内 87 社局から回答を得た。アンケート項目の概要を表 1 に示す。転てつ装置の状況に関する設問、検査や更新に関する設問、および転てつ機モニタの現状と活用状況等に関する質問を行った。また、アンケートに回答した鉄道事業者のうち 10 社局に対しては、回答結果の詳細や保守体制等の実態に関する聞き取り調査を 2023 年に実施した。

表 1 アンケート項目の概要

カテゴリ	質問数	主な質問
動力転てつ機の状況	8問	動力転てつ機の種類、数量、最古設備の使用年数、動作回数、過去に発生した故障事例
転てつ付属装置の状況	6問	転てつ付属装置の種類、最古設備の使用年数、損傷や摩耗等の有無と頻度
転てつ装置の管理・検査	5問	台帳管理状況、検査頻度、検査機器、検査の着目点
転てつ機モニタ	5問	導入状況、監視項目、効果、課題、求める機能
設備更新の状況	5問	取替基準、オーバーホールや転用の状況
保守・管理の考え方等	3問	維持管理における課題、自由回答等

2.2 動力転てつ機の種類

転てつ装置はモータ等の動力によって転換や鎖錠等を行う動力転てつ機と、スイッチアジャスタ等の転てつ付属装置から構成される。このうち動力転てつ機について、国内で使用されている装置の種類と種類毎の導入状況を把握するためアンケート調査を実施した。アンケートの項目としては、動力転てつ機の種類や使用年数、動作回数などの状況に関する設問を設定した。動力転てつ機に関する集計結果として 87 社局からの回答の概略を図 1 に示す。日本国内では様々な種類の動力転てつ機が用いられているが、回答のあった多くの鉄道事業者（87 社中 74 社）で在来線用の NS 形電気転てつ機が使用されている。NS 形以外の電気転てつ機を使用している鉄道事業者についても、多くは NS 形電気転てつ機を併用している状況であった。このことから、多くの鉄道事業者を対象とした転てつ装置の技術開発を行う際は、NS 形電気転てつ機を対象の一つとすることが重要であることが確認された。

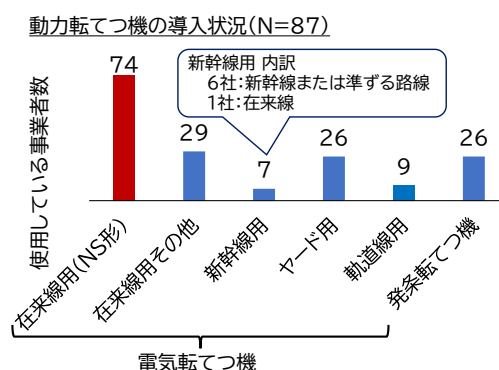


図 1 動力転てつ機の種類と導入している鉄道事業者数

2.3 電気転てつ機の使用年数と動作回数

電気転てつ機の実際の使用年数や動作回数に関する状況を把握するため、鉄道事業者における最大の使用年数および動作回数に関する設問を設定した。最大使用年数に関する集計結果を図 2 に示す。最大使用年数は 20 年～30 年とする回答が最多であり、10 年～60 年の範囲に大半の回答が分布した。50 年以上の年

数にわたって使用すると回答した鉄道事業者に対してその理由について聞き取り調査を行った結果、①オーバーホールの実施により設備台帳上の製造年が古い設備がある、②代替となる電気転てつ機が調達できないため継続使用している旨の回答が得られた。また、②に該当する鉄道事業者に個別の聞き取り調査を行ったところ、路面電車用の電気転てつ機の代替品が少なく、1960年代前後に製造された電気転てつ機を修繕して使用しているとの回答が得られた。

電気転てつ機の動作回数に関する集計結果として、鉄道事業者内の1日あたりの最大動作回数と最大の累計動作回数の関係を図3に示す。両者に該当する電気転てつ機は必ずしも同一とは限らないが、定性的には1日の動作回数が多い鉄道事業者では累計動作回数も多い結果が得られた。一方で、1日の動作回数が50回以上100回未満の鉄道事業者で、累計動作回数が100万回を超えると回答した事業者が複数あった。1日あたり99回動作すると仮定した場合でも100万回に達するまでに単純計算で27年以上を要することから、累計動作回数が多く、かつ使用年数も長い電気転てつ機も存在しているといえる。このように、電気転てつ機の使用年数や動作回数は鉄道事業者によって様々であるといえる。

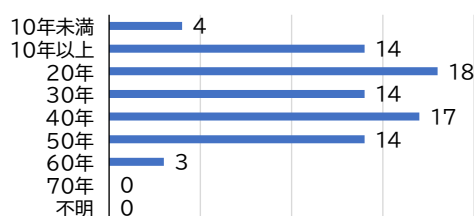


図2 電気転てつ機の最大使用年数 (N=84)

該当する事業者数(社局)	日あたり動作回数(回)									記載なし
	不明	400~	300~400	200~300	150~200	100~150	50~100	25~50	~25	
不明	4	2	0	2	1	3	5	3	3	0
100万~	0	4	2	5	4	1	3	0	0	0
80~100万	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0
60~80万	0	0	0	0	2	1	3	0	0	0
40~60万	0	0	2	1	2	3	1	3	0	1
30~40万	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0
20~30万	0	0	0	0	0	0	2	3	1	0
10~20万	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0
~10万	0	0	0	0	0	0	1	0	4	0
記載なし	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3

図3 電気転てつ機の1日あたり最大動作回数と最大の累計動作回数

2.4 電気転てつ機の修繕・更新

電気転てつ機の使用年数や動作回数が鉄道事業者によって様々となる要因について検討するため、電気転てつ機の更新に関する動作回数や使用年数などの基準や目安の設定状況について調査を実施した。

その結果、動作回数や使用年数に基づき更新を実施している鉄道事業者は51社局(全体の58.6%)であり、約40%の鉄道事業者は特定の基準を定めた更新は実施されていないことが確認された。加えて、基準等を定めて更新を実施している鉄道事業者においても、その基準は様々であることが確認された。図4に更新周期に関するアンケートの回答結果を示す。社内基準等で更新を行う使用年数や動作回数を定めている鉄道事業者と、基準は特に定めず、更新の目安として使用年数や動作回数を用いる事業者があるが、いずれも使用年数20年~30年、および動作回数30万回~50万回ないし、100万回~150万回で更新するとした回答が多く得られた。動作回数に関する基準もしくは目安が鉄道事業者で大きく異なっている理由について聞き取り調査を実施した結果、電気転てつ機的主要部品の解体検査と更新を行うオーバーホール修繕を行っている鉄道事業者において、最終的に廃棄するまでの期間が長いことが判明した。オーバーホール修繕の回数は鉄道事業者により異なるが、回答のあった鉄道事業者全てでオーバーホール回数に上限を定めていた。

修繕や更新の時期については、信号工業協会の寿命の目安²⁾等を踏まえつつ、オーバーホール修繕の実施有無、故障の発生実態、工事予算や体制、過去の故障履歴、メーカー保証期間後の使用に関する考え方など

の鉄道事業者毎の体制や経緯、状況を踏まえて各鉄道事業者で定めている実態が得られた。オーバーホール修繕に関しては電気転てつ機本体の輸送を伴うことから、鉄道事業者毎の対応は様々であった。修繕を行う箇所（メーカ工場や指定工場、もしくは鉄道事業者自社内）への輸送に要するコストは距離等の影響を受けるため、新造品と輸送費を含めたオーバーホール品との価格差が小さい鉄道事業者ではオーバーホール修繕が実施されることが少ないことが判明した。一方、オーバーホール修繕の内業化などにより低いコストで実施できる鉄道事業者では、オーバーホールを比較的短い周期や動作回数で行い、購入から廃棄まで比較的長期間使用している事が多い旨の回答が得られた。

転てつ装置の修繕や更新の考え方は、上記の通り鉄道事業者で様々であるが、故障の発生履歴、検査修繕体制、経済的要素などの影響を受けており、年数や動作回数の基準を一律に定めることは難しい。しかし、転てつ装置の劣化・故障のメカニズムの解明やこれらに影響する環境要素の特定^{3) 4)}が進むことで、鉄道事業者間で共通して適用可能な更新判断に関する根拠やその判断基準が示されるようになると思う。また、使用予定年数と使用環境に応じた振動などの環境に対する耐久性試験・評価方法の開発⁵⁾についても、更新周期の適正化や延伸に寄与するものとする。

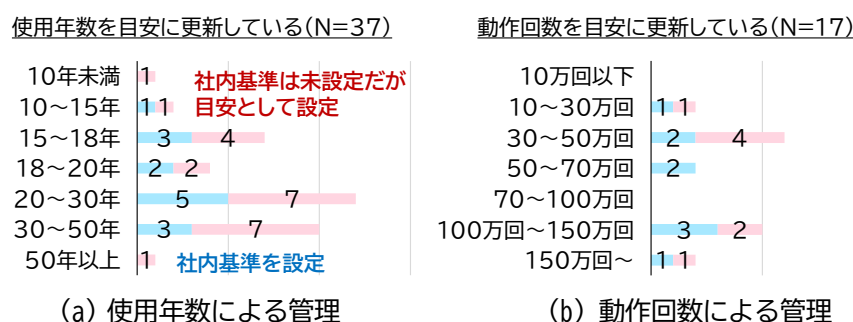


図4 電気転てつ機の更新周期に関する回答結果

2.5 転てつ装置の故障

転てつ装置の主要構成要素である、電気転てつ機、スイッチアジャスタ、フロントロッドにおける故障について、発生している事象やその発生部位について調査を行い、多くの鉄道事業者に共通する故障要因の特定を試みた。アンケート結果で得られた主な故障部位と報告のあった鉄道事業者の数を図5に示す。

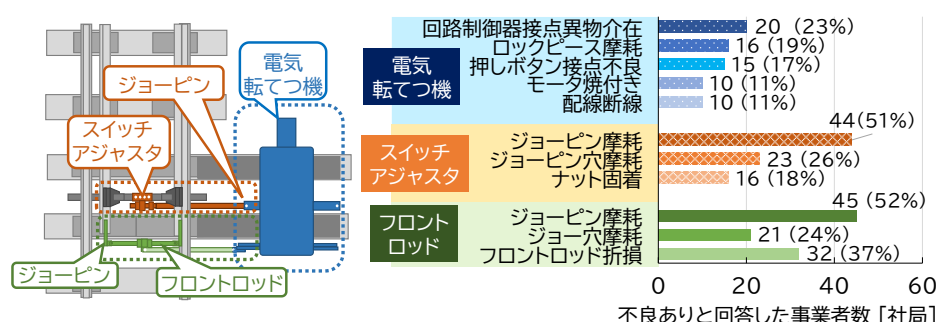


図5 転てつ装置と主要な故障部位に関する回答結果

電気転てつ機本体の故障は、回路制御器の異物介在や押しボタンの接点不良、モータ焼付き、断線といった電氣的な故障が10%～20%の鉄道事業者から報告された。機械的な故障としては、ロックピース摩耗に関する報告が約20%の鉄道事業者から報告された。

転てつ付属装置に関する故障については、スイッチアジャスタ、フロントロッドに共通してジョーピンやジョー穴の摩耗に関する報告数が多く、特にジョーピンの摩耗は約半数の事業者で発生した旨の回答があった。また、フロントロッドの折損は32社局（37%）から報告された。フロントロッドの折損やジョーピンの摩耗が過去に発生した鉄道事業者への聞き取り調査からは、これらの事象は特殊分岐器用のフロントロッドや継手金具、路面電車において道路下に埋設するスイッチアジャスタ等で特に発生しているとの回答を得た。これらの箇所ですぐに生じやすい、列車通過時の振動や衝撃、水没や湿気による腐食等がこれらの事象の発生に影響したと推察される。

2.6 転てつ装置の検査

転てつ装置の故障やそれに至る状態変化を防ぐための検査に関する状況を調査した。転てつ装置の検査は通常、目視確認等を主体とする検査（以下、巡回検査）と、電流等の測定や調整作業を主体とする検査（以下、総合検査）が実施されている。巡回検査と総合検査について、それぞれの周期や実施内容に関してアンケートを通じて回答を得た。検査周期に関する回答を図6に示す。

巡回検査の実施周期は1ヶ月以上3ヶ月未満、次いで3ヶ月以上6ヶ月未満とする回答が多い結果が得られた。一方で、巡回検査の実施周期を1年以上と法定周期に近い周期で設定している旨の回答も9社局から得られた。検査の実施周期については、個々の鉄道事業者の事情や判断により、法定周期より短い期間で実施している実態が得られた。なお、検査項目に関する回答では鉄道事業者間で大きな差異は確認されなかった。

総合検査の実施周期は1年以上2年未満とする鉄道事業者が多い結果が得られた。一方で2社局からは2ヶ月以下の頻度で実施している旨の回答が得られた。聞き取り調査からは、鉄道事業者独自の施策として、線区の種類や重要度による検査周期の段階分けや、転てつ機モニタ装置の導入箇所における検査周期の見直し等が行われていることが判明した。検査項目に関しては、鉄道事業者間で概ね類似しているが、密着度測定器など使用する器具に相違点があった。また、2.5節に述べたフロントロッドの折損に対して、特殊分岐器のフロントロッド肘金や、路面電車における道路下に敷設したスイッチアジャスタ等に対して、浸透探傷検査（カラーチェック）を実施している旨の回答が、複数の鉄道事業者から得られた。

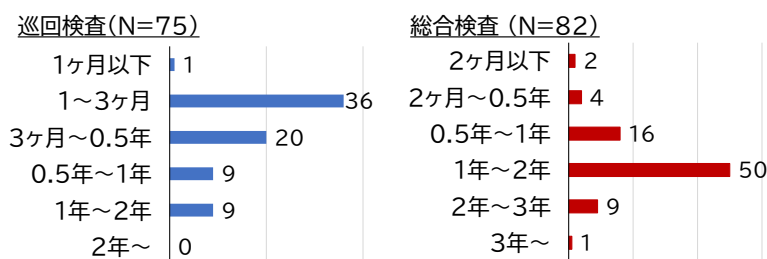


図6 転てつ装置の検査周期に関する回答結果

3. 転てつ機モニタに関する実態調査

3.1 導入状況と主な機能

転てつ装置の動作状態を監視、記録する状態監視装置（転てつ機モニタ）は、日本国内においては1980年代後半から異常検知や遠隔監視を行う手段として開発、導入が進められてきた⁶⁾。初期の転てつ機モニタ

の導入から約 35 年が経過し、当初の異常検知等の手段から予防保全のためのデータ取得の手段として活用されつつある。また、活用のための枠組みや具体的な代替の範囲などは今後の課題であるが、定期検査の代替手段としての転てつ機モニタの活用が期待されている。現時点における、転てつ機モニタを導入済みの鉄道事業者における現状の評価と課題、および導入されていない鉄道事業者における導入上の課題について調査し、実態の把握と今後の方向性について検討した。

まず、転てつ機モニタの導入状況と導入効果、および課題について 2.1 節に述べた方法により調査を行った。アンケートによる導入状況に関する回答を図 7 に示す。回答結果から、転てつ機モニタは 87 社局中 25 社局（約 30%）で導入されていることが確認された。導入は主に新幹線や都市鉄道、大手鉄道事業者が中心であったが、地域鉄道への導入例についても報告されている。導入後の効果や課題感に関する回答では、19 社局（導入した社局の 76%）が「効果がある」との回答が得られたが、12 社局（同 48%）からは「機能に課題を感じる」と回答した。また、5 社局（同 20%）は「効果を検証中」、1 社局は「効果が得られない」と回答があった。

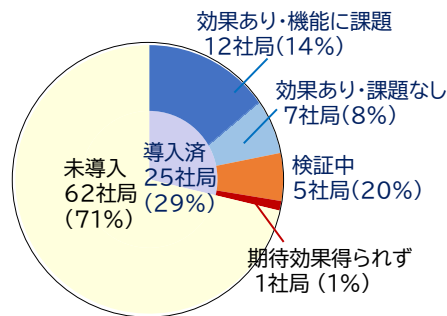


図 7 転てつ機モニタの導入状況と導入後の課題感に関する回答結果

また、導入済みの転てつ機モニタの機能に関する設問として、測定により取得可能な項目、測定値から推定を行う項目について回答を得た。転てつ機モニタの主な監視項目は、①モータの電圧・電流、②鎖錠かん変位、③WR 電流であり、導入済みの転てつ機モニタは①～③の何れか、もしくは全てが備えられている旨の回答があった。測定値からの推定機能については、モータ電流等から、転換負荷やモータトルク、動作かんストロークの推定機能が備えられている転てつ機モニタが多く用いられていることが確認された。

3.2 導入効果と課題感

次に、転てつ機モニタを導入済みの鉄道事業者における現状の評価と課題、および未導入の鉄道事業者における導入上の課題について調査を行った。アンケートおよび聞き取り調査から得た主な回答を表 2 に示す。回答は、転換不能の予防や復旧・調整作業の支援、保守への活用に関する肯定的な内容のほか、導入時のコストや投資効果に対する課題、および未導入の鉄道事業者における保守体制の現状を踏まえた課題が得られている。

転換不能の予防や作業支援、保守への活用に関する肯定的な回答としては、「転換負荷や鎖錠かん変位などの時間に対する変化が知得しやすい事象を捉えて、予防的に処置を行った」旨の回答や、「遠隔地の設備における異常やその予兆に基づき、予め対応要員を充てた」、「鎖錠かん変位などの状態量が数値化したことで調整が容易になった」旨の回答が得られた。設備の動作状態が遠隔地で知得でき、状態量が可視化できる転てつ機モニタの機能に対しては、肯定的に捉えられていると考えることができる。

一方で、導入時のコストや投資効果に関して、「故障や異常に対する効果は感じる一方で、そもそもの発

生頻度が低いため、転てつ機モニタの導入や維持更新費用が高額である」、「コストパフォーマンスの面で課題を感じる」主旨の回答が複数の鉄道事業者から得られた。また、「転てつ機モニタを導入したが、状態変化がそもそも発生しない安定稼働の設備であったため、異常対応としての効果が得られていない」との回答も得られた。温度変化が少なく日照がない地下区間における鎖錠かん変位や、転換負荷が小さい関節分岐器の転換負荷など、そもそも状態変化が起きにくい環境に導入したために、結果的に導入効果が得られず、投資に対する効果が得られないという評価に至っている事例も確認された。このような鉄道事業者からは、設備故障や変状等が少なく、転てつ機モニタの必要性が小さいため、転てつ機モニタの更新を躊躇するとの声も聞かれた。

一方で、転てつ機モニタの導入効果を向上させるために、異常状態の監視目的だけではなく、保守や検査への活用、具体的には転てつ機モニタによる検査項目の置き換えと、巡回検査や総合検査の検査周期の延伸に活用している、もしくは活用したい旨の回答も複数の鉄道事業者から得られた。一部の鉄道事業者では実際に導入箇所の一部において検査周期を延伸したとの回答があった。

投資効果に関する別のアプローチとして、モニタ装置の低コスト化に関する取り組みや提言として、「モニタ装置を汎用機器で構成して施工している」といった回答や、転換時間のみ計測する少ない機能の装置により、コスト低減を図る取り組みなども行われている。また、状態変化が大きい箇所に絞った導入や可搬形機器による監視ができれば効果が高まるとの回答が得られた。

設備投資や要員数に限りがある中小鉄道事業者からの回答としては、「指令や保守の要員が少なく、監視装置が出力する異常や予兆への即応体制を取ることで自体が難しい」との回答もあり、転てつ機モニタの導入が必ずしも鉄道事業者の体勢や業務とマッチしない場合には適用し難い現状も確認された。

表2 電気転てつ機の状態監視装置に関する導入効果と課題に関する主な回答結果

カテゴリ	主な回答
転換不能の予防	・転換負荷の増加傾向を捉えて転換不能前に処置を行うことができた ・状態がリアルタイムで捉えられるため、分岐器部分交換後等の推移を得やすくなった 等
復旧作業支援	・雪による転換不能が知得できるため、異常時の要因配備が容易になった
調整支援	・鎖錠かんの調整を数値に基づき実施できるようになった
投資効果、保守への活用	・導入したが転てつ機が安定稼働しており、異常対応としての効果が得られていない ・投資に対する期待効果の評価が難しい ・転換不能の発生頻度減少、点検周期延伸、更新時期延伸を期待して導入を進めた ・検査の置き換えができれば、検査工数が減る点で導入の利点が出る可能性がある
その他	・汎用シーケンサを活用することで導入コストの低減を図っている ・CTCセンターの要員が1名のため、導入してもデータ確認等の対応ができず活用が難しい

4. 保守管理の課題

4.1 転てつ装置の更新

転てつ装置の経年に関する調査結果から、50年以上の長期にわたり使用されている電気転てつ機や、累積動作回数が100万回を超過し、かつ長期間使用されている電気転てつ機が存在することが確認されている。路面電車用の電気転てつ機など、製造中止に伴いやむを得ず修繕して使用している事例もあるが、一般論としては、設計時の想定にない故障や異常を防ぐため、適正な使用年数や動作回数で更新を進めることが必要である。電気転てつ機の更新は多くの工数と要員、技能を必要とするため、適切な計画を策定し

た上で、更新を実施していくことが望まれる。

使用年数や動作回数に基づき更新計画を策定する方法は、約 6 割の鉄道事業者で採用されている。製造年数や動作回数などの基本的な管理情報や故障実績等から策定できるため、鉄道事業者の規模を問わず広く適用可能である。また、故障時の影響度なども評価指標に加えた RBM（Risk Based Maintenance）の鉄道信号設備の更新計画策定への適用や⁷⁾、転てつ機モニタで取得したデータや設備台帳の情報を総合した数値指標から更新優先度を判断する手法⁸⁾は、更新を必要とする設備が多い鉄道事業者において有用といえる。

4.2 転てつ装置の検査と転てつ機モニタの活用

転てつ装置の検査周期に関する調査結果から、検査周期が鉄道事業者によって大きく異なることが確認された。検査周期の長さは、各鉄道事業者における保全の考え方やこれまでの故障等の実績、および要員や体制に依るため、一律に定めることは難しい。しかし、労働力の減少により現在の検査体制を維持することは困難であるため、故障等による安定性の低下を避けつつ検査周期の見直しや補完を行うことは、鉄道事業者の規模を問わず避けることができないと考える。

これに対して、検査周期の延伸が可能な設備や、周期延伸が許容できる期間を、定期検査の履歴を分析することで示す手法が提案されているほか⁹⁾、転てつ機モニタを導入している鉄道事業者で検査周期を延伸している事例が本アンケートでも報告されている。いずれも個別の設備で異なる状態変化等の「くせ」の存在を踏まえて、データの分析や転てつ機モニタによる補完により検査周期の延伸を図る取り組みであり、上記課題に対して有用である。

また、転てつ機モニタの検査への活用は、転てつ機モニタの設備投資に対する効果に関する課題、所謂「コストパフォーマンスがよくない」ことに対して、検査周期の見直しや検査項目の削減が投資効果の改善に寄与するとの回答も得られている。今後、転てつ機モニタによる定期検査の周期延伸や検査項目の置き換えが可能になれば、転てつ機モニタの適用線区の拡大も図られるものと期待される。

5. まとめ

本報告では、鉄道事業者へのアンケートと聞き取りに基づき、転てつ装置の保守管理と転てつ機モニタ装置の活用に関する実態調査結果を示した。また、調査結果を踏まえた現状の保守における課題を示した。転てつ装置を含む信号保安装置の保守管理においては、更なる労働力人口の減少等に対応した省力化が求められる。転てつ機モニタによる監視が可能な転てつ装置の検査項目、検査方法を再定義し、故障の発生頻度や検査の水準を保ちながら省力化を進める取り組みが今後必要になると考える。

謝 辞

本調査の実施にあたり、アンケートおよび聞き取り調査にご協力いただいた鉄道事業者各位に厚く御礼を申し上げます。

文 献

1) 潮見俊輔, 押味良和, 重盛壮平, 高崎建, 神谷剛志, 一色竜杜, 会田直矢: 転てつ装置の保守管理手法に関する調査, 2024 年電

気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.V-93-96, 2024

- 2) 鉄道信号用装置・機器の耐用寿命に関する検討書 改訂第4版, 信号工業協会, 2017
- 3) 嶋本琢磨, 田處恵大, 波多野明日可, 泉聡志, 酒井信介, 新野善行, 鈴木雅彦, 金田敏之: 列車通過時振動による特殊分岐器フロントロッド部品の摩耗予測のための有限要素モデリング, 日本機械学会論文集, Vol. 85, No. 873, 2019
- 4) 重盛壮平, 潮見俊輔: フロントロッドの張りが応力に与える影響, 第31回鉄道技術・政策連合シンポジウム, S2-8-1, 2024
- 5) 押味良和, 潮見俊輔, 神谷剛志, 一色竜杜: 信号設備の振動耐久試験における加振加速度の提案, 鉄道総研報告, Vol.38, No.5, pp.11-16, 2024
- 6) 潮見俊輔: 動力転てつ機の状態監視技術の技術動向に関する調査, 2023年電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.V-78, 2023
- 7) 酒井信介: リスクに基づくメンテナンス, JR East Technical Review, No.32, pp.1-4, 2010
- 8) 東急電鉄 ニュースリリース 状態保全(CBM: Condition Based Maintenance)支援システムを4月下旬より運用開始:
<https://www.tokyu.co.jp/company/news/list/Pid%3Dcbm.html> (参照日: 2025年6月13日)
- 9) 稲場亘, 松岡弘大, 為広重行: 設備の検査周期適正化に向けた検査記録の統計分析手法, JREA, Vol.68, No. 8, pp.19-22, 2025

営業列車における GOA2.5 自動運転と手動運転における
運転士の視線配分の比較中川 千鶴* 赤塚 肇*
青柳 孝彦** 藤井 彩佳**Comparison of Driver's Line of Sight Distribution during Commercial Train Operation
by GOA2.5 Automatic and Manual SystemsChizuru NAKAGAWA Hajime AKATSUKA
Takahiko AOYAGI Ayaka FUJII

A comparative study of driver gaze allocation during automatic and manual operation on a demonstration train was conducted to verify whether the forward gaze allocation during automatic operation is equivalent to that during normal manual operation. We measured the forward gaze allocation of three drivers on test trains and 15 drivers on commercial trains and analyzed eleven of them. The results showed that 10 of the 11 drivers had the same or greater forward gaze allocation during automatic operation as during manual operation.

キーワード：自動運転, GOA2.5, 視線計測

1. はじめに

GOA2.5 は、前頭に運転士以外の係員（自動運転乗務員）が乗務する形態の自動運転である。自動運転乗務員の業務の 1 つとして異常を認めた場合の非常停止操作があり、現状の手動運転（GOA1）を行う運転士と同等に異常を認めた際に同様の操作が行われる必要がある。特に、GOA2.5 の対象である、踏切があり駅にホームドアがない線区においてその重要度は高い。一方、異常を認め速やかな非常停止操作を行うには、進行方向である前方に視線が向いていることと、覚醒レベルが運転作業に適切な範囲に収まっている必要がある。

本稿ではこのうち、自動運転時の前方への視線配分が通常の手動運転と同等であるかを検証した調査について報告する。

2. 試運転列車での予備調査

営業列車で通常運転時の運転士の視線を測定するには、測定準備やセンサ装着が簡便である必要がある。鉄道運転士の乗務時の視線計測に関しては、これまで、計測機器が大掛かりとなるため試運転列車を設定することが多かった^{1) 2)}。国鉄時代に営業列車で計測した事例があるが³⁾、異なる運転士 2 名で 1 回ずつの測定に留まっている。特に、今回対象とした自動運転の実証線区はワンマン運転で、視線配分の範囲は運転台上部にある乗降確認用の車上モニタを含み、非常に広範囲である。このような広範囲の視線配分を正確かつ簡便に解析する製品は、本研究当時にほとんどなかった。このため、最初に予備的検討として試運転列車を設定し、3 名の運転士を対象として市販の視線計測装置を活用し視線配分について検証した。

* 人間科学研究部

** 九州旅客鉄道株式会社

2.1 調査方法

2.1.1 調査区間と調査対象者

調査は自動運転の実証線区において3日間実施した。試運転列車を設定し、同一区間を1日2往復した。対象区間は駅間が約1~2分の11駅で走行時間は片道で35分前後であった。調査対象者は、メガネ型センサを使用するため乗務時にメガネを着用しない運転士とし、1日1名、合計3名の運転士を測定した（以後、運転士A、B、Cとする）。すべて運転士歴は10年以上であった。

2.1.2 調査条件

1日の運転は、午前1往復、午後1往復とした。各往復の間の休憩時間は約45分であった。運転方式（自動運転・手動運転）は往復ごとに変更した。実施順序が結果に影響する可能性があるため、運転士A、Bは1往復目を手動運転とし、運転士Cは1往復目を自動運転とした。

2.1.3 測定項目

視線計測は、運転室にセンサ類を設置する Smart Eye Pro（SMARTEYE Co.,Ltd. 以後、設置型センサ）と、メガネ型のトビーグラス3（トビー・テクノロジー（株）、以後、メガネ型センサ）を用いた。設置型センサは往路で、メガネ型センサは復路での測定に用いた。測定の様子を図1に示す。

設置型センサは、運転台側に設置した複数の赤外線カメラから視線を測定し、運転士側から前方に向けて設置した前方視野カメラ（図1(a)）と同期することで、自動的に前方視野カメラの撮像範囲での視線配分を算出する機能を有している。このため、運転時の視線配分調査には最適と思われたが、設置に時間がかかることや、運転室に設置できる機材数ではハンドル操作や運転席上部の車上モニタは測定領域外となる欠点がある。

一方、メガネ型センサは可搬型で運転台への固定は不要で扱いやすいが、前方視野カメラがメガネ部分に内蔵されているため撮影範囲が常に動き、視線配分の自動解析機能もない。

視線以外の計測として、自動・手動運転での作業負担の差をみるため、生理計測と主観評価を実施した。なお、この調査は調査者が常に添乗した状態で測定しているため緊張が生じやすく、その影響を受けやすい覚醒度（眠気度）の評価には適さないが、分析時の参考のために眠気に関する主観評価を行った。

生理計測として心拍（WHS3、ユニオンツール（株））、脈拍（OH1、POLAR Inc.）と呼吸（ZenTracker、（株）コト）を測定した。また、乗車時と折り返し時に、疲労や覚醒状態を反映するフリッカー値と主観評価を測定した。主観評価は、眠気の状態として9段階の眠気度（カロリンスカ尺度）と、疲労の状態として0~100の範囲の数字による疲労度を口頭で回答してもらった。図2に主観評価の内容を示す。

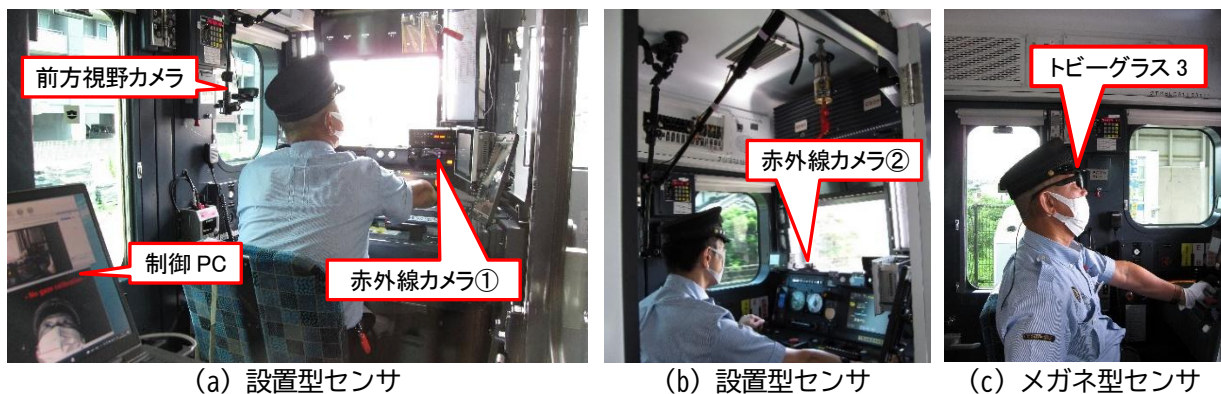


図1 視線計測の様子

【1】現在の「眠気の状態」をもっともよく表した数字を、以下の表から選んでお答えください

目覚めている	非常に はつきり		目覚めている		どちらでもない		眠い		(眠気と戦っている) とても眠い
1	2	3	4	5	6	7	8	9	

(a) 眠気度 (カロリンスカ尺度)

【2】現在の「疲労」について、0～100の範囲で、数字でお答えください

全く疲れていない

0

非常に疲れている

100

(b) 疲労度

図2 眠気度と疲労度の主観評価内容

2.2 結果

2.2.1 視線配分計測

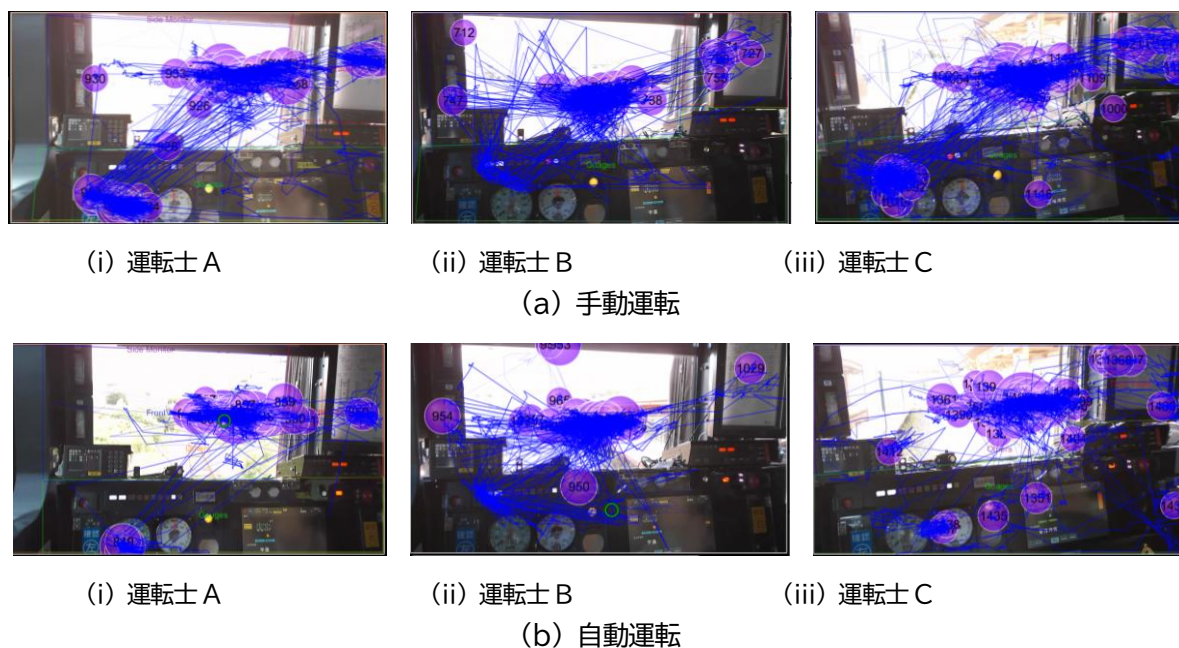
視線配分の計測例として、各運転士の視線の動きの例を図3に示す。図中の青線は視線移動の軌跡、円は視線停留があったことを示し、円の直径は停留時間の長さを示す。この図から、運転士Aと運転士Cは、手動運転では速度計等の機器を頻繁にみていることがわかる。一方、運転士Bでは、手動運転と自動運転において、前方と速度計等機器との視線移動に特徴的な違いはみられなかった。

視線は2つのセンサで測定したため、それぞれの結果について述べる。

設置型センサの前方視野カメラの映像に対し、運転士の代表的な視線配分のエリアとして下記の3つのエリアを定義し、エリアごとの視線配分を調べた(図4(a))。

<視線配分の対象エリア(設置型センサ)>

- ① 前方：前方の窓
- ② 機器類：運転台の速度計・圧力計等
- ③ 時刻表：運転台右側に設置されている時刻表



※青線は視線移動の軌跡、円の直径は視線停留時間の長さを示す

図3 設置型センサによる運転士の視線の移動と停留の例(左から、運転士A、B、C)

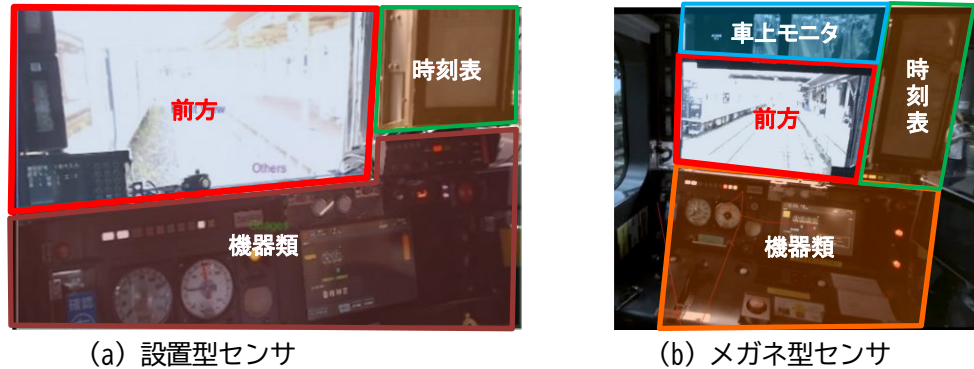


図4 視線配分分析の対象エリア

一方、メガネ型センサはカメラがメガネに内蔵されているため視線が向いた全てのエリアを撮影することができる。このため、設置型センサでは捉えられなかった車上モニタを加えた以下の4つのエリアを検知対象として視線配分を調べた(図4(b))。

<視線配分の対象エリア(メガネ型センサ)>

- ① 前方：前方の窓
- ② 機器類：運転台の速度計・圧力計等
- ③ 時刻表：運転台右側に設置されている時刻表
- ④ 車上モニタ：運転席前方窓の上部のモニタ

設置型センサでの解析結果を図5に示す。なお、以後の解析では自動と手動運転時を比較し、手動運転時に対する視線配分の差が5%(5ポイント)以内を同等と見なすこととする。

図から、運転士Aと運転士Cでは自動運転時の方が手動運転時より前方視線配分が5ポイント以上増加したが、運転士Bでは明確な差がなかったことがわかる。

次に、メガネ型センサで測定した結果について述べる。メガネ型センサは視線配分の自動分析機能がないため画像解析プログラムを作成して分析を行った。なお、作成した画像解析プログラムの精度を検証したところ、分類対象とした動画からランダムに抽出した画像に対する自作プログラムによる分類結果と、目視による判定結果の一致度は約90%以上であった。

メガネ型センサの解析結果を図6に示す。なお、運転士Cはメガネ型センサでの測定に不備があったため、運転士Aと運転士Bの結果である。運転士Aは自動運転時の方が手動運転時より前方視線配分が5%以上増加し、運転士Bでは5%以上の差はみられなかった。この傾向は設置型センサの結果と一致する。なお、図6が図5と結果が一致していない理由は測定した区間が異なるためである(図5は往路、図6は復路の測定結果)。

なお、メガネ型センサでのみ測定できた車上モニタの結果をみると、運転士Bは自動運転で手動運転時の倍近く車上モニタをみていることがわかる。車上モニタは駅出発直後にホーム上の安全を確認するために見るものであり、異常を認めるための視線配分という観点では車上モニタへの視線配分は前方への視線配分と同様に重要である。

2.2.2 その他の測定項目

生理指標では、呼吸が全体として手動運転時にやや早まる傾向がみられたが、運転方式の実施順序が運転士A、Bと逆であった運転士Cでは、1往復目の自動運転の往路で最も呼吸が早かった。心拍数には明確な差はみられなかったが、3名とも1往復目の往路が最も高い値を示した。このことから、これらの生理指

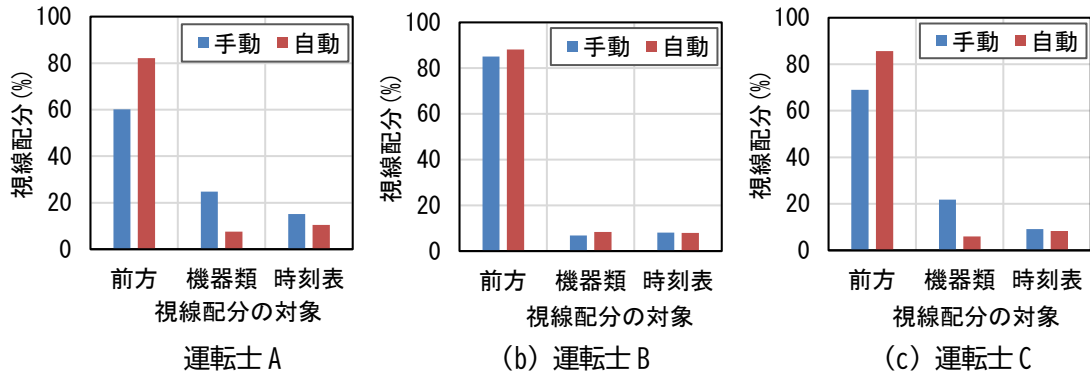


図5 主要視線配分の対象エリアにおける視線配分率（設置型センサ）

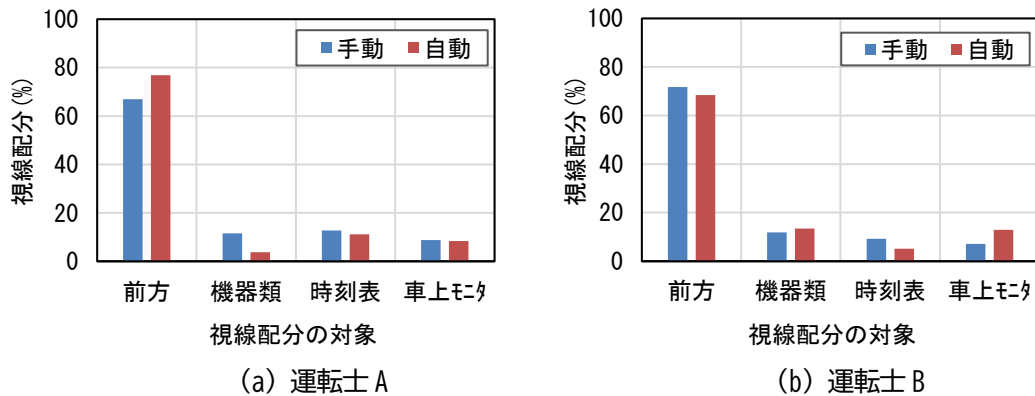


図6 主要視線配分の対象エリアにおける視線配分率（メガネ型センサ）

標は、運転方式の違いより順序効果の影響、つまり測定開始直後の緊張状態が影響したと思われる。フリッカー値は運転方式による明確な違いはみられなかった。眠気度と疲労に関する主観評価においても運転方式による明確な違いはみられなかった。

3. 営業線での本調査

自動運転時の視線配分が現状の手動運転時と同等であることを検証するには、通常業務の状態である営業列車で、可能な限り多くの運転士の視線データを確認することが望ましい。2章で述べた予備的検討により、営業列車での測定に適したメガネ型センサを活用した視線配分分析が技術的に可能となったため、本調査では、メガネ型センサを用いて営業列車で運転士の視線を測定し、自動運転と手動運転での視線配分を比較検証した。

3.1 調査方法

3.1.1 調査区間と調査対象者

調査区間は2章の調査と同じ区間を走行する営業列車で実施した。調査対象者は事前説明を受け、測定に合意したメガネ不使用の運転士15名を調査対象とした。運転士歴は5年以上、内14名は10年以上であった。しかしこのうち4名で測定不備が生じたため、解析は11名に対して行った。年齢は、30代が4名、40代2名、50代2名、60歳以上が3名であった。

3.1.2 調査手順

運転士が運転台に乗り込んだ時点で、実験者が簡単な説明を行い、眠気度と疲労度を口頭で質問した。ま

表 1 測定項目と測定機器・方法

No	測定項目	測定機器・方法	運転士への装着	備考（記録媒体等）
1	視線	トビーグラス 3	メガネ型センサ	専用ロガー
2	心拍（脈拍）	CHET	腕バンド	iPad
3	呼吸	CHET	腹部バンド	iPad
4	眠気度	カロリンスカ尺度	なし（口頭回答）	実験者が記録
5	疲労度	0～100 の範囲の数値	なし（口頭回答）	実験者が記録



図 7 測定機材（左：メガネ型センサ 中央：生理計測システム CHET）と測定の様子（右）

た，測定の準備として運転士へのセンサ装着と測定機材の設置をした．所要時間が 5 分以内となるよう実施した．

3.1.3 測定項目と機材，装着方法

測定項目はほぼ 2 章の調査と同じである．測定項目と機材を表 1 にまとめ，図 7 に機材の外観および測定の様子を示す．

生理計測には営業列車で速やかに測定開始できるよう改良したワイヤレスセンサを用いた生理測定システム CHET（図 7 中央）⁴⁾を用いた．これは鉄道総研が開発したシステムであり，複数の市販ウェアラブルセンサを bluetooth で繋ぎ，GPS 情報や振動加速度と同期して測定端末（iPad mini, Apple Inc.）に記録できるものである．表 1 No.1～3 の測定項目は連続測定を行い，No.4～5 の主観評価は乗り込み時と折り返し時に口頭で回答してもらった．なお，営業列車での測定のため，測定に時間を要するフリッカー値測定は行わなかった．

3.2 結果

3.2.1 視線配分計測

解析は駅停車時を除いた走行時のデータに対して行った．前方への視線配分を，運転士ごとに自動運転時と手動運転時で比較した結果を図 8 に示す．縦軸は，手動運転時の視線配分を 100 とした場合の自動運転時の前方への視線配分比率を示す．値が 100（図中の赤点線）であれば手動運転と同じ視線配分，100 以上の場合手動運転時より前方への視線配分が多いことを意味する．

結果として，11 名中 10 名（約 91%）で 100 以上もしくは 100 ± 5 ポイント以内，つまり自動運転での前方視線配分が手動運転時と同等もしくは増加していた．なお，残る 1 名（D04）も減少は 5.7 ポイントであった．

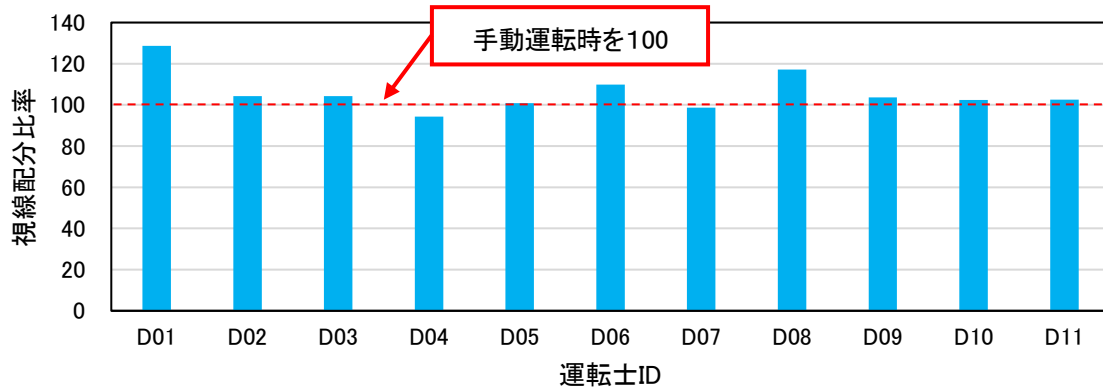


図8 自動運転時の列車前方への視線配分比率（手動運転時を100）

3.2.2 その他の測定項目

生理指標では、心拍数は全体として同一運転士内での差は小さく、また、運転方式に関連した何らかの傾向はみられなかった。呼吸間隔は自動運転時の方が長い（呼吸がゆっくりしている）ケースがやや多く、手動運転時の方がゆっくりだったケースは11例のうち2例のみであった。これは2章の調査結果とも一致した。

眠気度と疲労に関する主観評価において、運転方式による明確な違いはみられなかった。

4. まとめ

GOA2.5 自動運転において、自動運転乗務員の列車前方への視線配分が現状の手動運転を行う運転士と同等であるかを検証するため、自動運転の実証線区において、自動・手動運転時の運転士の視線を測定した。その結果、列車前方への視線配分が、自動運転時は手動運転時に比べ同等もしくはやや増加することを確認した。

なお、前方の支障物等を認めることができるか否かは、適切な視線配分とともに、注意意識を向けていることも重要である。自動運転は、運転操作の作業量が軽減され、視線を前方に配分しやすくなるメリットがある。一方で、自動運転に限らないが、直線区間や駅間が長いなど、人間の特性上、注意の維持が難しい条件を含む線区もある。このような線区に導入する場合は、乗務員に眠気が生じる可能性等への考慮が必要であり、本稿では紹介しないが、我々は、覚醒維持に有効で乗務内容に親和性が高い方策に関する基礎的な検討も実施しており、指差喚呼や任意の発話、指差喚呼に対する自動応答が覚醒維持に対し効果があることを示唆する結果を得ている⁵⁾。

今後、GOA2.5 自動運転のように従来とは異なる作業環境が生まれていくこと、また携わる人材の資質も多様化していくことが予想される。このような中で鉄道の安全性を維持・向上させるために、新たなシステムと人間との連携や、人間特性を考慮した多面的な検討を継続することが重要である。

文 献

- 1) 宗重倫典, 藤澤厚志, 福田啓介: 運転士の注視行動に関する研究, JREA, Vol.55, No.11, pp.32-35, 2012
- 2) 西本嗣史, 宗重倫典: 運転士の注視行動に関する研究(2) 一夜間および日中走行結果の比較一, JREA, Vol.56, No.11, pp.31-34, 2013
- 3) 水田淳一, 伊南盛治, 吉岡哲二, 工藤 盈, 伊藤祐天, 飯山雄次: 列車運転における視作業分析, 人間工学, Vol.11, No.2,3, pp.55-61, 1975

- 4) 中川千鶴：鉄道運転業務中の運転士の覚醒レベル変化の検知を目的とするウェアラブルデバイスを活用した状態モニタリングシステムの検討，日本人間工学会第 59 回大会 Supplement 号，No.P2E1-17，2023
- 5) 中川千鶴，赤塚肇，鈴木大輔，秋保直弘，鈴木浩明：鉄道運転作業に親和性の高い覚醒維持方策に関する基礎的検討，日本人間工学会第 60 回大会 Supplement 号，No.2E2-2，2024

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

小島謙一

■企画・監修

川崎邦弘	上半文昭	石毛 真	武内陽子
仁平達也	瀧上唯夫	田所敏弥	根津一嘉
桃谷尚嗣	布川 修	福田光芳	平井 力
松井元英	池田 学	宇田東樹	遠藤広晴
富田 優	豊岡亮洋		

鉄道総研報告 第39巻 第12号

2025年12月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2025 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先
総務部広報 電話 042-573-7219

RTRI REPORT

Vol. 39 No. 12

Dec. 2025

PAPERS

- Evaluation Method for the Risk of Scouring based on Case Studies of Railway Bridge Piers damaged by Scouring
.....S.WATANABE, S.FUJIWARA, I.YOSHIDA (1)
- Development of Equipment to Remove Black Leaf Layer Formed on Rail Top Surface by Fallen Leaves
.....M.KONO, T.IDO, M.TSUJIE, J.SUZUMURA, K.IKOMA (14)
- Proposal of Evaluation Metric for Train Rescheduling and Analysis and Evaluation Method for Train Rescheduling Arrangements
.....M.TAKADA, T.KUNIMATSU, S.TANAKA (23)

RESEARCH REPORT

- A Survey on Switch-and-Lock Equipment Maintenance and Utilization of Point Machines Monitors
.....S.SHIOMI, Y.OSHIMI, S.SHIGEMORI (32)
- Comparison of Driver's Line of Sight Distribution during Commercial Train Operation by GOA2.5 Automatic and Manual Systems
.....C.NAKAGAWA, H.AKATSUKA, T.AOYAGI, A.FUJII (41)

