

鉄道総研報告

第37巻 第9号

2023年9月

論文

- 車両** 主電動機軸受における転動体と保持器の接触力測定に基づく保持器摩耗の予測
..... 鈴木大輔, 高橋研, 糸魚川文広, 前川覚, 岡村吉晃 (1)
- 車両** 画像による地上からの車両床下状態確認手法
..... 小島崇, 宮原宏平, 風戸昭人, 鶴飼正人 (9)
- 施設** 鉄道コンクリート桁におけるひび割れと非構造部材の影響を考慮した曲げ剛性の算定方法
..... 徳永宗正, 池田学 (17)
- 施設** 通り変位データを用いたロングレールの座屈発生温度の簡易な推定方法
..... 山岡大樹, 玉川新悟, 西宮裕騎 (25)
- 電気** 信号用電子機器における延命対策効果の定量化手法
..... 藤田浩由, 高崎建, 進藤卓朗, 神谷剛志 (33)
- 運転** 情報提供の観点からみた車外への避難の類型化と課題整理
..... 斎藤綾乃, 増田貴之, 鈴木浩明, 高井唯史, 山内香奈 (41)

主電動機軸受における転動体と保持器の接触力測定に基づく保持器摩耗の予測

鈴木 大輔* 高橋 研* 糸魚川 文広**
前川 覚** 岡村 吉晃*

Cage Wear Prediction Based on Measurement of Contact Force between Rolling Element and Cage
in Traction Motor Bearings in Railway Vehicles

Daisuke SUZUKI Ken TAKAHASHI Fumihiro ITOIGAWA
Satoru MAEGAWA Yoshiaki OKAMURA

Bearings used in traction motors in railway vehicles are used under light loads and at high rotational speeds, so that their life is determined by cage wear due to contact with rolling elements rather than raceway flaking. In this paper, in order to predict the cage wear, we measured the forces of rolling elements which act on cage. As a result, the magnitude, duration of action, and frequency of the forces could be obtained. In addition, the forces were integrated with time to obtain impulses to show the relationship between the impulses and the cage wear.

キーワード：機械要素，トライボロジー，主電動機，転がり軸受，円筒ころ軸受，保持器摩耗

1. はじめに

主電動機軸受は主電動機（鉄道車両の駆動用モータ）の回転子を支持する転がり軸受である。この軸受は、基本動定格荷重の数%程度の軽荷重かつ高回転で使用されるため、転動体が転がり接触する内外輪の軌道面のはく離による寿命（疲労寿命）ではなく、転動体がすべり接触する保持器の摩耗による寿命（摩耗寿命）によって軸受が使用できなくなることが多い。そのため、計算される疲労寿命¹⁾よりもはるかに短い期間での軸受交換を余儀なくされている。また、このような使用条件における保持器摩耗を予測する方法は確立されておらず、適切な軸受の使用期間を定めることが困難である。保持器摩耗は転動体との接触部で発生することから、保持器摩耗を予測するためには、転動体と保持器の運動および接触力の測定とその詳細な解析が必要と考えた。

主電動機は車両の運行により加減速を繰り返すため、軸受の使用される回転数（本報告では単に回転数と記述した場合、内輪回転数を指す）の範囲が広い。軸受を広範囲の回転数で使用した場合、保持器の振れ回り挙動は回転数の増加に伴って変化し、保持器中心の軌跡が下部で揺動している状態から過渡状態を経て円形に振れ回る状態となることが知られている²⁾。転動体と保持器の接触力はこの挙動に影響されると考えられるため、保持器の振れ回りの遷移を含む広い回転速度域においてこれら

を観察する必要がある。これまでに、転がり軸受において転動体と保持器の接触力が測定によって求められた例^{3) 4)}はあるが、保持器の振れ回りを拘束する形態で測定されており、保持器の振れ回りが生じる状態で転動体と保持器の接触力が測定、解析された事例はない。本報告では保持器の振れ回りを拘束しない状態で、転動体と保持器の接触力と保持器挙動の同時測定が可能な測定系を構築し、広範囲の回転数において測定を行った。また、測定結果をもとに、保持器の摩耗量に関する考察を行った⁵⁾。

2. 測定方法

2.1 対象とした軸受

対象とした軸受は主電動機に広く使用されている円筒ころ軸受（呼び番号：NU214）であり、その仕様を表1に示す。内外輪およびころは軸受鋼製、保持器は高力黄銅物製である。保持器は転動体案内のため、ころ以外の部品とは接触しない。対象とした軸受は主電動機用ではあるが、一般の円筒ころ軸受とほぼ同等の仕様である。また、ころ径のばらつきが測定に与える影響を排するため、ころ径相互差が2 μ m以下となるころを使用した。

2.2 ころと保持器の接触力の測定方法

ころと保持器の接触力は図1に示すように16箇所あるポケットのうち1箇所のポケット内に2つの小型のロードセル（株式会社共和電業製、LMA-A-100NM81Z050）を取り付けることで直接測定した。測定対象としたポ

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

** 名古屋工業大学

表 1 対象とした軸受の仕様

軸受の種類	円筒ころ軸受	
内径	70mm	
外径	125mm	
幅	24mm	
ラジアルすきま	0.090-0.125mm	
ころピッチ円径	97.5mm	
ころ数	16	
ころ径	13mm	
ころ丈	13mm	
保持器案内方式	転動体案内	
材料	軌道輪	JIS SUJ2
	ころ	JIS SUJ2
	保持器	JIS CAC301
基本動定格荷重	83500N	

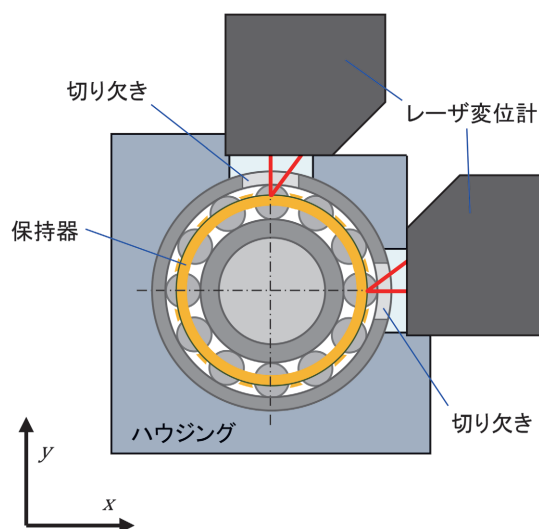


図 2 保持器中心の変位量の測定方法

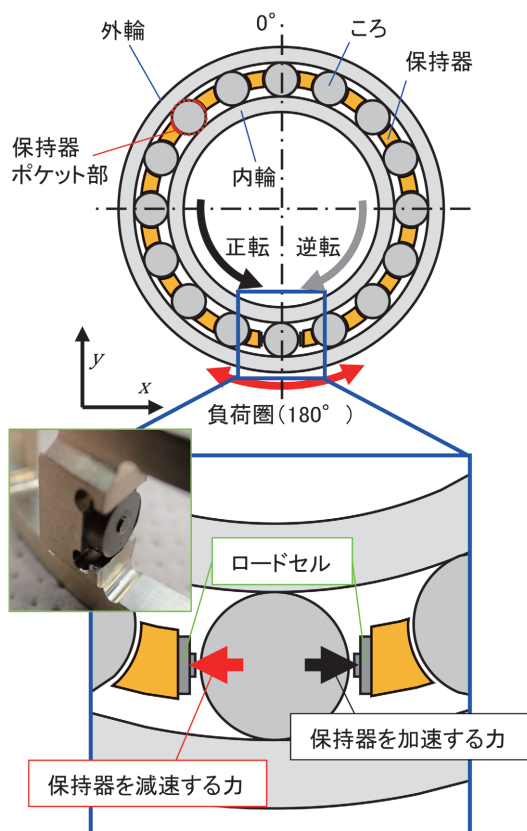


図 1 ころと保持器の接触力の測定方法

ケットの凹面部を平坦面となるよう切削により除去し、ロードセルの中心がころの公転ピッチ円上で平行になるように接着した。2つのロードセルの突起部間の距離はころと保持器ポケットのクリアランスの設計値と変わらないようにした。これにより、ころの転がり方向の前後で2種類の力を測定できる。本報告では保持器の回転方向にころが保持器を押す力を「保持器を加速する力」、保持器の回転とは逆方向にころが保持器を押す力を「保持器を減速する力」と記述する。図1中に内輪の回転方向が正転（反時計回り）の場合に測定されるこれら2つの

力および測定結果を示す際に使用する座標系および角度も示している。角度は非負荷圏の中心（鉛直上）を 0° 、負荷圏の中心（鉛直下）を 180° とし、回転方向に対して増加するものとする。

2.3 保持器中心の変位量の測定

保持器の触れ回りによって生じる保持器中心の並進変位は、図2に示すように2台のレーザ変位計（株式会社キーエンス製、LK-G35A）をそれぞれ水平方向（x方向）変位と鉛直方向（y方向）変位が測定可能な位置に固定して測定した。軸受ハウジングおよび外輪にはレーザ光を妨げない必要最低限の切り欠きを加工した。保持器中心の並進変位測定位置は保持器外周部であるため、それぞれの測定位置において一方の変位が他方に変位を生じさせるが、外周部曲率半径は保持器中心の並進変位に比べて十分大きいので、この変位を無視しても保持器触れ回り挙動計測の精度は十分である。また、この方法で保持器の中心位置の軌跡を求める場合、保持器の変形や真円度の影響も受けるが、これらは並進変位量に比べて小さいこと、およびすべての測定を同じ保持器で行っていることから、測定結果の相対比較には影響をおよぼさない。

2.4 保持器の運動を拘束しない測定系の構成

本研究の特徴である保持器の運動を拘束しない状態でのころの運動、およびころと保持器の接触力の測定を可能とする装置の概略図を図3に示す。本装置では試験軸受の外輪はハウジングに、内輪は回転主軸に取り付けられており、任意の回転数およびラジアル荷重で回転させることができる。主軸は試験軸受および支持軸受（a）で支持され、一端が継手を介してモータに直結されている。

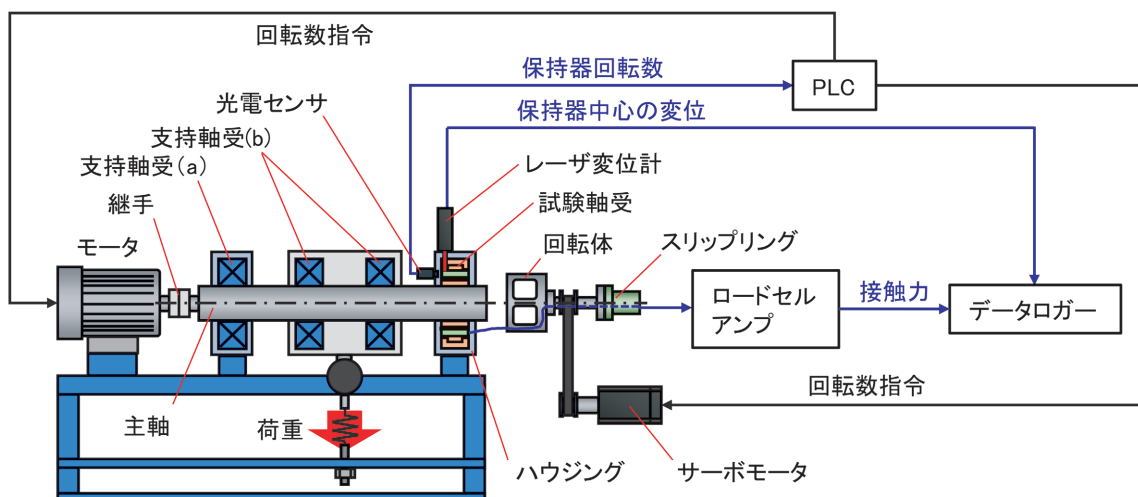


図3 測定装置の概略図

る。回転数はプログラマブルロジックコントローラ（以下、PLC）からモータに回転数指令を与えて制御し、ラジアル荷重は主軸の支持軸受（b）を介してバネによって与えている。ラジアル荷重の負荷方向は鉛直下方であり、試験軸受の負荷圏は鉛直下方（図1における180°前後）となる。

保持器の運動を拘束することなく回転する保持器に取り付けられたロードセルへの給電と信号取得を行うために、保持器の正面に保持器と回転を同期させた回転体を配設し、この回転体からロードセルへ給電線および信号線を結線した。給電線および信号線ともに細線であり十分軽く、張力による拘束力や保持器の不釣り合い荷重は生じない。これらは回転体からスリップリングを介してロードセルアンプへと結線される。保持器と回転体の同期は、保持器回転数を光電センサで測定し、その回転数をPLCに取り込み、PLCから回転体を回転させるためのサーボモータに回転数指令を送ることで実現した。この方法を用いると、ロードセルの給電線および信号線に張力が働かないので、これらが保持器の運動に影響を与えることはない。また、2.3節で示した方法で保持器中心の変位量を測定するために、レーザ変位計がハウジングに取り付けられており、データロガーと接続されている。

2.5 測定条件

測定条件を表2に示す。ラジアル荷重は主電動機において軸受が支持している回転子の重量を参考に970Nとした。この荷重は試験軸受の基本動定格荷重（83500N）に対して約1.2%の軽荷重である。潤滑にはリチウム複合石けんグリースを使用した。グリースは軸受の潤滑に必要な最小限の量とすべく、内輪に薄く塗布した後に軸受を回転させ、軸受全体になじませた。回転方向は正転と逆転の両方向とし、回転数を500、1000、2000、

表2 測定条件

ラジアル荷重	970N
潤滑剤	リチウム複合石けんグリース
回転方向	正転、逆転
回転数	500, 1000, 2000, 3000, 4000/min

3000、4000/minと変化させ、回転数がころと保持器の接触力におよぼす影響を確認することとした。なお、回転方向を正転と逆転の両方向としたのは、軸受の対称性や2つのロードセルの測定値に差異がないことを確認するためである。データ収録はサンプリング周波数を10kHzとして、各条件で保持器が100回転分に達するまで実施した。

3. 測定結果

3.1 ころと保持器の接触力

ころと保持器の接触力の測定結果のうち、回転数が1000/minおよび3000/minの場合を図4に例示する。ここでは、測定対象としたポケットが図1に示した0°に位置した時を0sとし、保持器が1回転するまでの測定結果を回転方向および回転数ごと示している。なお、保持器1回転に要する時間は保持器の理論回転数から求まる周期と一致しているため、公転すべりは発生していない。各グラフでは上段に黒線で「保持器を加速する力」を、下段に赤線で「保持器を減速する力」を示している。また、負荷圏にあたる部分をハッチングしている。なお、各条件で保持器100回転分を測定したが、そのうち10回転分を重ねて示している。「保持器を加速する力」は負荷圏の中央から出口にかけて連続的に発生する傾向を示している。これは、負荷圏内どころが内外輪からのトラクションにより加速され、保持器ポケットの前方に衝突す

ることで発生したと考えられる。一方、「保持器を減速する力」は負荷圏を出た後から断続的に発生する傾向を示している。これは、負荷圏を脱したところが転がり方向の油膜力による減速と、保持器ポケットの後方への衝突による加速を繰り返したために発生したと考えられる。また、回転数が1000/minでは負荷圏の入口から中央にかけても接触力が発生している。これは何らかの影響で負荷圏に侵入しにくいころを保持器が押すために発生したと考えられるが、負荷圏にころが侵入しにくかった原因やほかの回転数で発生しなかった原因は不明である。

次に、ころと保持器の接触力だけでなく、接触時間も考慮した評価を行うため、図4における接触力の測定結果を時間で積分し、力積を求めた。保持器が1回転する間の力積の変化のうち、回転数が1000/minおよび3000/minの場合を図5に例示する。ここでは、各条件で測定した保持器100回転分をすべて重ねて示している。なお、内輪の回転方向によらず傾向は同じであったため、正転時の結果のみを示している。また、積分開始は各力が発生し始める直前からとし、「保持器を加速する力」は負荷圏の入口を通過した時点から、保持器を減速する力」は負荷圏の出口を通過した時点からとした。「保持器を加速する力」から求めた力積は、負荷圏の中央から出口にあたる箇所まで急激に増加し、その後はほぼ一定の値を示している。また、保持器100回転中では力積の増加が顕著なものとならないものがある。これらのことから、「保持器を加速する力」によるころと保持器の

間の運動量交換は大部分が負荷圏でなされており、かつ保持器の回転ごとに顕著に発生するわけではないことが分かる。一方、「保持器を減速する力」から求めた力積は、負荷圏の出口付近以降で徐々に増加している。回転数が低い条件ではある程度保持器が回転すると力積は一定になるのに対して、回転数が高い条件では力積が増加し続けている。また、保持器100回転中では力積がほぼ同様に増加している。回転数が1000/minでは次の負荷圏に突入する後半で力積が急激に増加しているが、前述のとおり何らかの影響で負荷圏に侵入しにくいころを保持器が押すためであると考えられる。以上のことから、特定の回転数の負荷圏突入時を除けば「保持器を減速する力」によるころと保持器の間の運動量交換は、負荷圏を脱出した後にころと保持器が同じ速度になるまで断続的になされ、かつ保持器回転ごとの再現性が高い現象であることが分かる。

上記の結果から、保持器1回転当たりの力積を測定条件ごとに平均した結果を図6に示す。図中のエラーバーは標準偏差を示している（注：負の値は測定されていない）。なお、「保持器を加速する力」は主に負荷圏内で、「保持器を減速する力」は主に負荷圏外で発生していたことから、それぞれこの範囲内の力積を用いて算出した。「保持器を加速する力」および「保持器を減速する力」から求めた保持器1回転当たりの力積はおおむね近い値をとっており、両者とも回転数が2000/minまでは減少し、それ以上ではほぼ一定の値となっている。両者の力

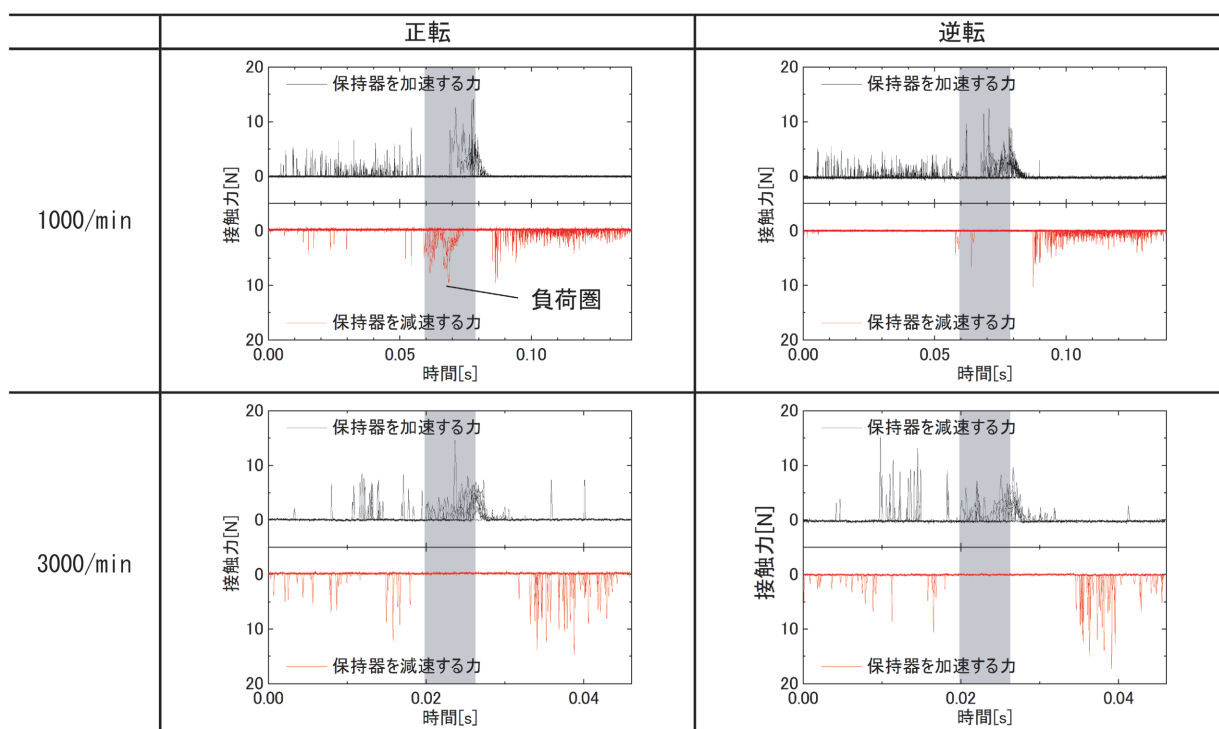


図4 ころと保持器の接触力の測定結果

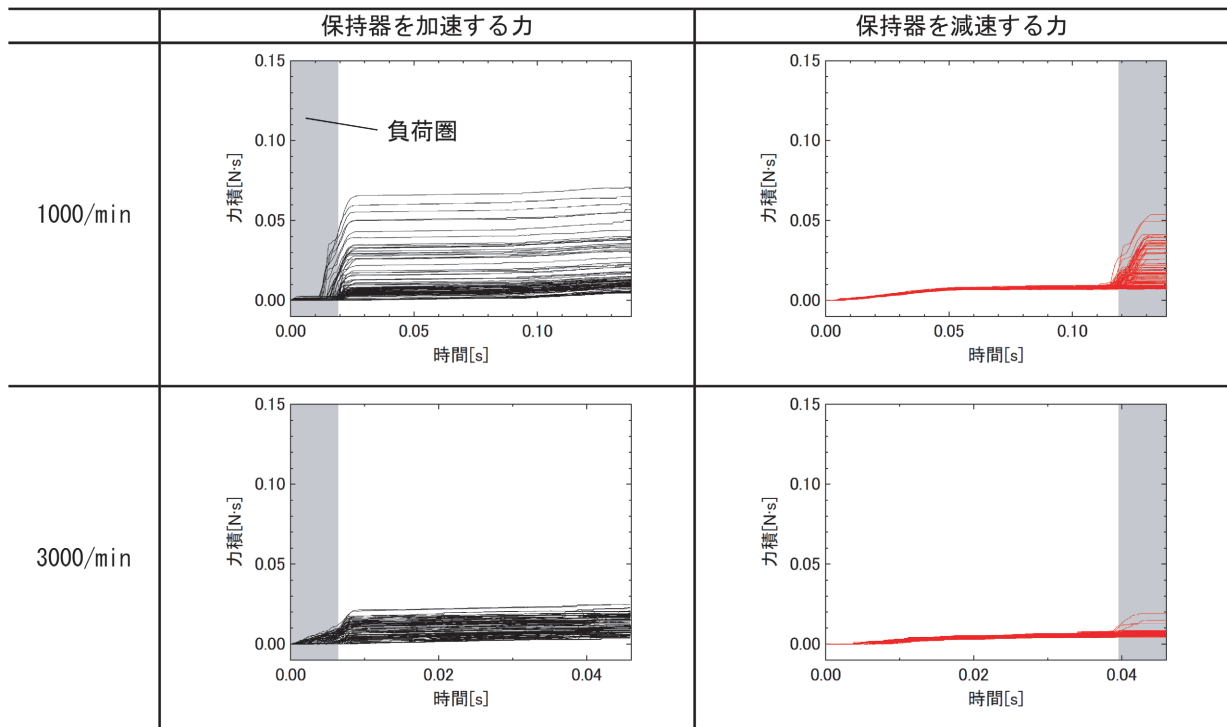
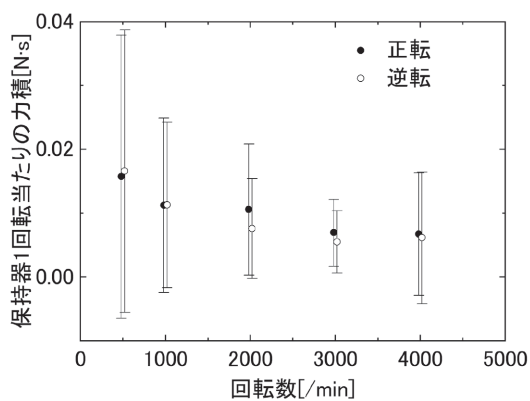
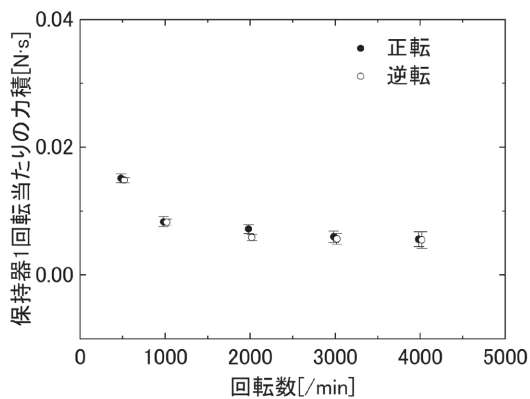


図5 ころと保持器の接触力から求めた力積



(a) 保持器を加速する力



(b) 保持器を減速する力

図6 保持器 1 回転当たりの力積

積がほぼ同じことから、「保持器を加速する力」および「保持器を減速する力」により授受される運動量がほぼ同じであることが分かる。保持器の回転数がほぼ一定であること、保持器はころ以外からの外力を受けないことを考えれば、適切な測定結果と考えられる。また、「保持器を加速する力」から求めた力積の標準偏差が大きいの。これは保持器を加速する仕事は、すべての保持器ポケットで毎回発生するわけではなく、保持器がある回転数以下に減速した際に、負荷圏に位置した保持器ポケットで発生するためと考えられる。

3.2 保持器中心の変位量

保持器の振り回りによる保持器中心の変位量の測定結果を図7に示す。測定結果は図1および図2に示した座標系に従い、保持器の中心位置の軌跡を各条件につき保持器10回転分示している。なお、正転時は紙面に対して反時計回りに、逆転時は紙面に対して時計回りに保持器は回転している。正転と逆転において保持器中心の変位は互いにy軸対称であり、同様の挙動を示している。回転数が1000/min以下の条件では保持器中心は図中の下部で主に左右に変位しており、保持器が0°付近のころを支点に垂下し、左右に揺動している。回転数が増加すると、この揺動の中心が保持器の回転方向に移動し、回転数が3000/minを超えると保持器中心は円形に振れまわっている。また、2000/minでは上記2つの遷移状態となっている。回転数の増加にともない、保持器中心

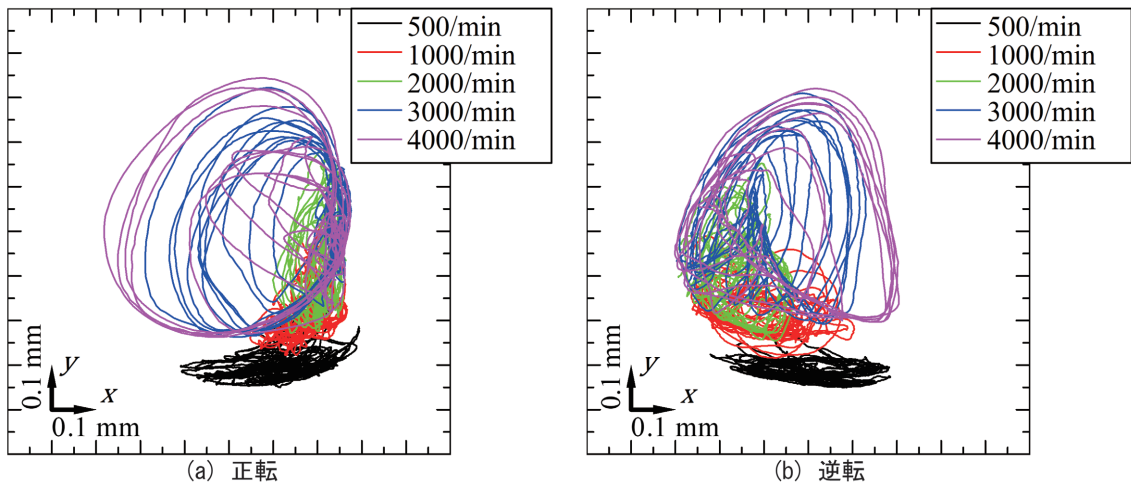


図7 保持器中心の変位量

を並進させる力の主体が重力やころとの接触力から保持器の重量アンバランスによって発生する遠心力に代わるため、保持器中心の軌跡の形状が変化したと考えられる。また、保持器中心の変位が回転数によって変化したことから、保持器の振り回りを拘束しない測定系が構築できたと考えられる。

4. 考察

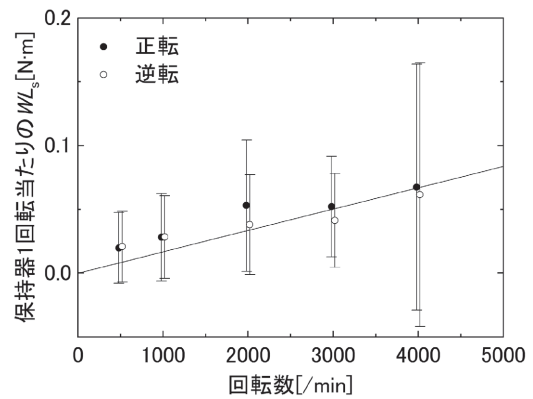
本報告における測定結果から保持器摩耗量について考察する。ここでは、保持器の摩耗形態が凝着摩耗であると仮定し、その摩耗量 V_w は次の Archard の式⁶⁾ に従うものとする。

$$V_w = K \frac{WL_s}{H} \quad (1)$$

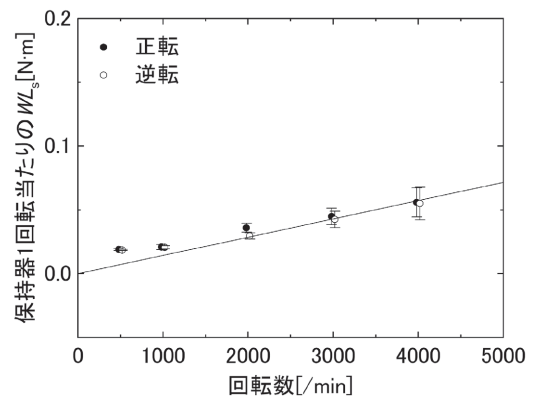
ここで、 K は摩耗定数、 W は荷重、 L_s はすべり距離、 H は軟らかい方の材料の硬さ（本報告の場合、保持器の硬さ）である。摩耗定数 K と軟らかい方の材料の硬さ H は測定条件によって変化しないと考えられるので、 V_w は W と L_s の積 WL_s に比例する。保持器摩耗における W はころと保持器の接触力 F_c であるが時間に対して変化するため、これを L_s で積分することで WL_s を求めた。また、 L_s はころの周速度 ($=r_t \omega_r$, r_t はころの半径、 ω_r はころの角速度) に時間を乗ずることで得られる。よって、 WL_s は次式によって与えられる。

$$WL_s = \int F_c dL_s = \int F_c dt \cdot r_t \omega_r \quad (2)$$

すなわち、ころと保持器の接触力による力積ところの周速度の積となる。ここで、各測定条件間で比較するために、保持器 1 回転当たりの WL_s を求めた結果を図 8 に示す。保持器 1 回転当たりの力積は 3.1 節の値を用い



(a) 保持器を加速する力



(b) 保持器を減速する力

図8 保持器 1 回転当たりの WL_s

た。「保持器を加速する力」および「保持器を減速する力」の測定結果から求めた保持器 1 回転当たりの WL_s は、いずれも回転数に比例して増加する傾向を示している。ただし、500/min および 1000/min の値は図中の直線（原点を通り、2000/min～4000/min の値を近似した線）より上側に位置している。以上のことから、回転数を下げると軸受 1 回転当たりの保持器摩耗量は減少するが、

その程度は 500/min および 1000/min において鈍化すると考えられる。この原因は不明であるが、1000/min 以下の条件では保持器中心が左右に揺動していたことに関連する可能性が考えられる。

以上のことから、 K が決定すれば、 V_w を定量的に予測することができる。また、 K が決定しない場合においても K を定数とみなせば、使用条件を変更した際に、 V_w が使用条件の変更前の何割程度になるといった予測を行うことができる。

5. まとめ

主電動機軸受の保持器摩耗を予測するための知見を得るため、保持器の振れ回りを拘束しない状態でころと保持器の接触力と保持器挙動の同時測定が可能な測定系を構築し、広範囲の軸受回転数において測定を行った。また、ころと保持器の接触力と保持器摩耗の関係について考察した結果、以下に示す知見を得た。

- (1) ころと保持器の接触力を測定した結果、「保持器を加速する力」は負荷圏の中央から出口にかけて連続的に発生した。これは、負荷圏内でころが内外輪からのトラクションで加速され、保持器ポケットの前方に衝突することで発生したと考えられる。一方、「保持器を減速する力」は負荷圏の出口付近から断続的に発生した。これは、負荷圏を脱したころが転がり方向の油膜力による減速と、保持器ポケットの後方への衝突による加速を繰り返したために発生したと考えられる。
- (2) (1) で測定した力を時間で積分し、保持器 1 回転当たりの力積を求めた結果、「保持器を加速する力」および「保持器を減速する力」から求めた保持器 1 回転当たりの力積はおおむね近い値をとり、両者とも回転数 2000/min までは減少し、

それ以上ではほぼ一定の値となった。

- (3) 保持器中心の変位量を測定した結果、回転数が 1000/min 以下の条件では保持器中心は下部で左右に揺動し、回転数が増加するとこの揺動の中心が保持器の回転方向に移動し、回転数が 3000/min を超えると保持器中心は円形に振れまわった。
- (4) 保持器摩耗量がころと保持器の接触力とすべり距離の積に比例するとし、(2) で得られた力積を用いてこの積を導出した。その結果、軸受 1 回転あたりの摩耗量は回転数の増加にともなって増加すると考えられる。

文 献

- 1) 日本産業規格：転がり軸受—動定格荷重及び定格寿命，JISB1518，2013
- 2) 多田誠二：高速回転下における保持器音および振動・挙動の解析，KOYO エンジニアリングジャーナル，No.160，pp.31-38，2001
- 3) 角田和雄：玉軸受の保持器に作用する力（第 1 報，内外輪が互いに並行変位している軸受荷重を受ける場合），日本機械学会論文集（第 3 部），Vol.32，No.239，pp.1164-1175，1966
- 4) Stacke, L-E., Fritzon, D., "Dynamic behavior of rolling bearings: simulations and experiments," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol.215, No.6, pp.499-508, 2001.
- 5) 鈴木大輔，高橋研，糸魚川文広，前川覚：円筒ころ軸受におけるころと保持器の接触力（ころと保持器のダイナミクスに着目した考察），日本機械学会論文集，Vol.88，No.911，DOI: 10.1299/transjsme.22-00153，2022
- 6) Archard, J.F., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," Journal of Applied Physics, Vol.24, No.8, p981. 1953.

画像による地上からの車両床下状態確認手法

小島 崇* 宮原 宏平* 風戸 昭人* 鵜飼 正人**

Automating Visual Inspection for Underfloor Equipment of Railway Vehicles Using On-Track Cameras

Takashi KOJIMA Kohei MIYAHARA Akihito KAZATO Masato UKAI

The authors developed an image capturing system and a diagnosis algorithm for automating visual inspection of underfloor equipment of railway vehicles. The developed system consists of a line scan camera, line lights, a laser Doppler velocimeter and a computer, to scan passing vehicles from the ground. Test results using real vehicles indicate that the system can obtain detailed continuous images of the side of vehicles. The proposed algorithm using template matching and subtraction is designed to be robust against disturbances. The algorithm was tested on images captured under simulated variations in weather and the stain of underfloor equipment. As a result, the algorithm diagnosed, for example, whether the valve was fully open normally with an accuracy of AUC 0.990.

キーワード：車両検査，外観検査，画像解析，ラインセンサカメラ，テンプレートマッチング

1. はじめに

鉄道車両は安全に運転できる状態で使用するために、一定の期間や走行距離に応じた車両の検査を鉄道事業者において定めて実施している。車両の検査のうち、列車検査または仕業検査（以下、「仕業検査」と記す）は、車両の種類などにより定めた2～10日程度の周期で、列車として運転できる状態で行う。ブレーキなどの機能を確認するほか、主要部分の状態を外観や音などで確認する。外観の検査は現在、作業員が各部を目視することにより行われている。この外観検査を自動で行うことができれば、車両の検査の省人化や省力化が期待できる。仕業検査における車外の外観検査箇所は、床下機器に集中している。そこで本研究では、仕業検査における床下機器の目視確認箇所を対象に、画像を用いて自動診断する手法を検討し、撮影手法および検査アルゴリズムを開発した。

2. 撮影手法の検討と撮影装置の開発

2.1 撮影手法の検討

仕業検査における床下機器の検査は、車両の側面から作業員が確認できる箇所を対象に行っている。そのため、地上に固定したカメラで、通過する車両の床下機器の側面を連続的に撮影することにより、検査に必要な画像を効率的に取得できると考えられる。そこで、図1に示す撮影手法を提案した。レーザドップラ速度計により、通

過する車両の速度を非接触で計測し、車両の移動距離に対応した等距離間隔のパルスをラインセンサカメラに出力する。ラインセンサカメラは、このパルスが入力されたタイミングで車両側面の1ライン分の画像を撮影し、その画像を横方向につなぎ合わせて2次元画像を生成して記録用コンピュータに送信する。記録用コンピュータは、受信した画像を保存する。ライン照明は、撮影箇所を線状に照らす。これによって、走行速度の変動に左右されない連続画像が得られる。

2.2 撮影装置の仕様検討

撮影装置の仕様を検討するため、図1に示した撮影機

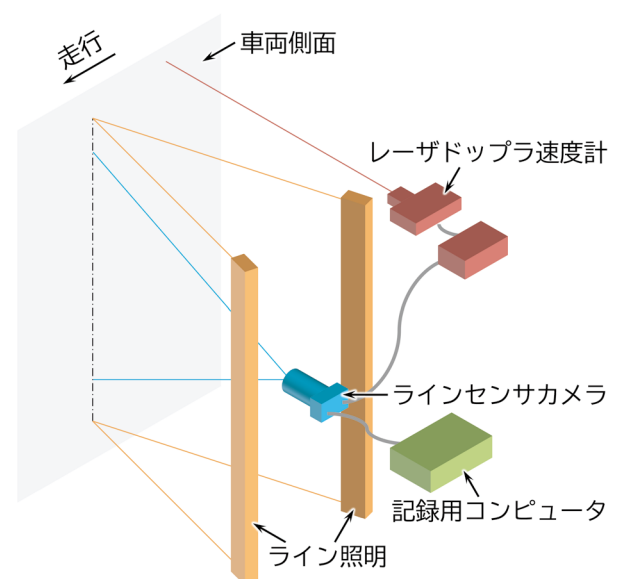


図1 車両床下撮影装置の機器構成

* 車両技術研究部 車両運動研究室

** 旧 信号・情報技術研究部 画像・IT研究室

器を用いて条件を変えながら実車両を撮影する試験を実施した。一般に画像検査の性能は照明に大きく依存するため、本試験では、照明とカメラの向きが平行に近い「順光」(図2 (a)), 水平方向に角度を持った「片側斜光」(図2 (b)), 同様の角度で両側に照明を配置した「両側斜光」(図2 (c)) の3条件で撮影した。

撮影画像の例を図3に示す。順光では、図3 (a)に示すように、照明が正反射する部分に白飛びが発生した。特に、床下機器表面の汚れが少ない車両で顕著であった。白飛びを防ぐために露出を下げて撮影すると、ほかの部分が黒つぶれした。白飛びや黒つぶれは撮影後に補正できないため、状態確認に必要な情報が失われる可能性がある。

これに対し、片側斜光では、主に拡散反射による光を捉えるため、床下機器表面の汚れの少ない車両であっても白飛びはほとんどみられなかった。一方、図3 (b)に示すように、手前にある部品や凸部に遮られて照明の反対側に影が生じる。一般に片側斜光は、きずなどの凹凸の検出に適しているが、床下機器のように奥行きが深い対象物では、影の影響を大きく受けるため、その部分の検査が困難になることが懸念される。

両側斜光では、片側斜光に比べ、わずかな凹凸は見えにくくなるものの、片側斜光で生じたような顕著な影はみられなかった。そこで、床下機器の画像検査に適した照明として、図2 (c)に示す両側斜光を選定した。このほか、良好に撮影できる各機器の仕様や配置などを選定した。

2.3 撮影装置の試作

選定した仕様で撮影機器を一つの筐体に納める構造を検討し、図4に示す撮影装置を試作した。筐体は防滴構造とし、軌道側の全面を透明の亚克力板を用いた窓とした。レーザドップラ速度計は、本体が防水仕様であることと、撮影試験における条件設定の柔軟性を考慮し、本研究では筐体の上に配置した。

2.4 実車両の撮影による機能確認

試作した撮影装置を車両基地の屋外に仮設し(図5)、撮影装置の前を25km/h以下で通過する複数の車両形式の入換車両を延べ621両撮影した。天候は晴れであった。撮影後にヒストグラム均等化により輝度を補正した日中および夜の撮影画像の例を図6に示す。本試験の結果から、太陽光、車両通過速度、車両形式によらず、開発した撮影装置を用いて車両側面の精細な連続画像が得られることを確認した。

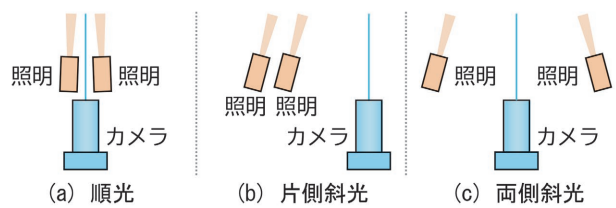


図2 照明条件(上から見た図)

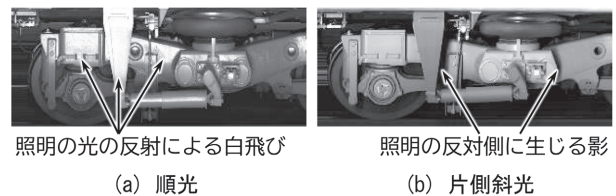


図3 照明位置による撮影画像の比較

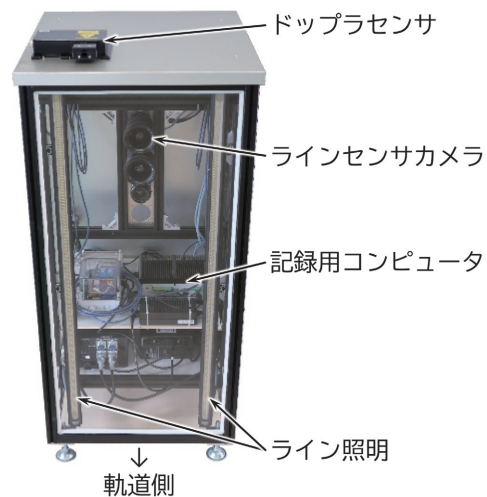


図4 試作した車両床下撮影装置



図5 試作した撮影装置による撮影試験

3. 検査アルゴリズムの検討

近年、深層学習を用いた外観検査手法が多く提案されており、従来のルールベースの手法では困難な診断を可



(a) 日中（直射日光あり）



(b) 夜（日光なし）

図6 輝度補正後の撮影画像

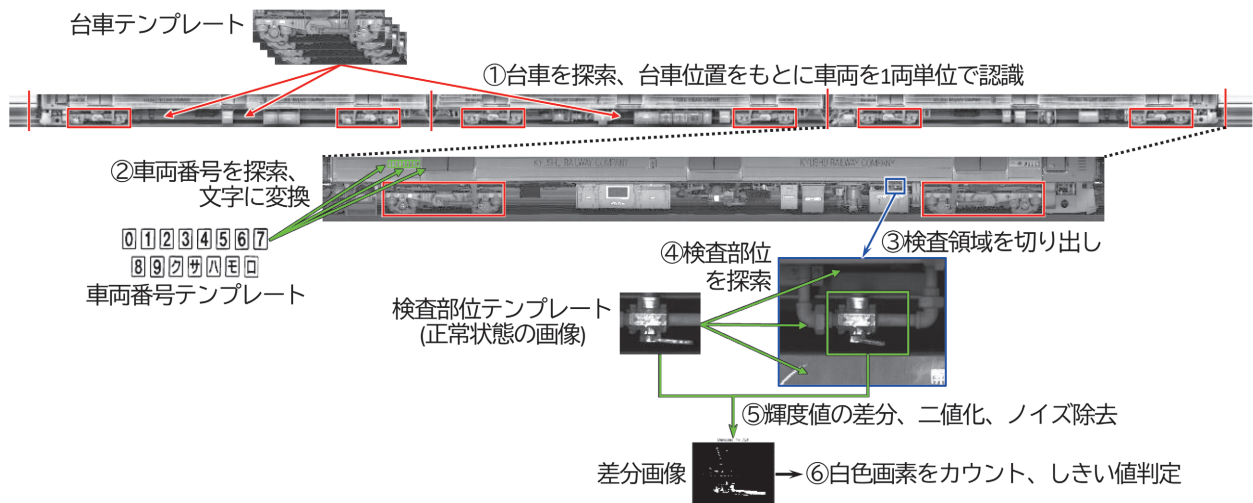


図7 検査アルゴリズム

能にしている。しかし、深層学習の特徴として大量の学習用画像を必要とするため、適用対象によっては、必要な診断精度を得るための十分な学習用画像を用意できない場合がある。一方、本撮影装置ではラインセンサカメラを用いた等距離間隔の撮影を行うため、対象物の大きさや角度がほぼ一定の均質な画像が得られることから、ルールベースの手法でも十分な検査性能が期待できる。そこで、本研究では、異常を模擬した車両を車庫内で撮影した画像を用いてルールベースのアルゴリズムを検討し¹⁾、テンプレートマッチングと差分を基本とした検査アルゴリズムを開発した（図7）。図中の丸数字に対応する説明を以下に記す。

- ① 撮影された一編成の床下側面の連続画像から、テンプレートマッチングにより台車を検出し、その位置をもとに車両を1両単位で認識する。
- ② 認識した車両1両ごとの撮影画像から、テンプレートマッチングを用いて、車体に表示された車両番号を認識する。
- ③ 車両番号に対して座標により定義した検査部位を含む領域を切り出す。
- ④ 切り出した領域に対し、あらかじめ用意した正常な検査部位の画像をテンプレートとしてテンプレート

マッチングを行い、検査部位の正確な位置を検出する。

- ⑤ 検出した検査部位の画像とテンプレートに対してヒストグラム均等化により輝度補正を行い、両者の輝度値の差の絶対値を計算し、二値化とノイズ除去を行う。これにより正常時と異なる部分が白く抽出される。
- ⑥ 表れた白色画素の数（以下、「差分画素数」と記す）を算出し、設定したしきい値より小さければ正常、しきい値以上であれば異常と判定する。

本論文では、③～⑥のアルゴリズムの検証について述べる。

4. 検査アルゴリズムの検証と改良

4.1 床下機器の異常模擬と撮影試験

試作した撮影装置を鉄道総研所内試験線の軌道脇に設置し、通過する試験車両の床下側面を撮影する試験を実施した（図8）。床下機器の異常を模擬するため、模擬床下機器を試験車両の床下側面部分に取り付けた。模擬床下機器として、外観の特徴の異なる代表的な部品とその異常状態を選定し、コックの開閉（ハンドル角度）、

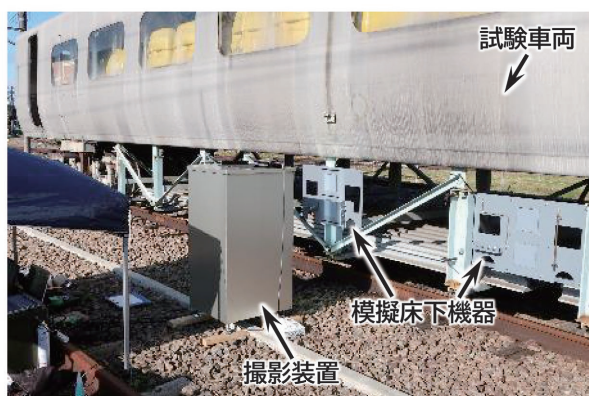


図8 床下機器異常模擬撮影試験

六角ボルト（以下、「ボルト」と記す）のゆるみおよび脱落，調整棒および配管の曲損，平板のきずおよびへこみを設定した（図9）。実使用で想定される正常時の外観の変化を模擬するため，模擬床下機器全体に汚れを想定して酸化鉄を付着させた条件を設定したほか，きずおよびへこみの設定箇所にチョークチェックを施した。天候変化の模擬として，検査部位に直射日光を当てた「晴れ」，当てない「曇り」，直射日光を当てず撮影装置の窓に霧吹きをした「雨」（図10）の3条件を設定した。また，撮影窓に土を付着させた「汚れ」条件を設けた。

4.2 アルゴリズムの検証

曇り条件の撮影画像から検査部位のテンプレートを作成し，提案したアルゴリズムを各撮影画像に適用した。本論文では，検査部位のうち最も多くの異常条件を設定



図10 雨条件の撮影装置の窓

したコックに対する結果を主に示す。

曇り条件の異常状態（ハンドル角度90°）に対する結果を図11（a）に示す。差分画像の主にハンドル部分が白色になっており，期待どおりハンドル角度の異常が適切に検出されている。差分画素数は5,996画素であった。

検査部位の一部にのみ直射日光が当たった正常状態（ハンドル角度0°）の結果を図11（b）に示す。差分画像の大半の領域が白色になっている。本アルゴリズムでは，撮影時の明るさの違いを補正するため，検査画像とテンプレートに対して輝度補正を施しているが，特に図11（b）に示す検査画像のように外乱光が一部分にのみ当たる場合，輝度補正によりその影響を抑えることは難しい。これによって，検査画像とテンプレートとの差分が大きくなった。差分画素数は，異常状態（図11（a））より多い46,060画素となった。このほか，コックの汚れの有無によっても著しい差分が生じることがわかった。この結果から，外乱光の変化や検査部位表面の汚れ

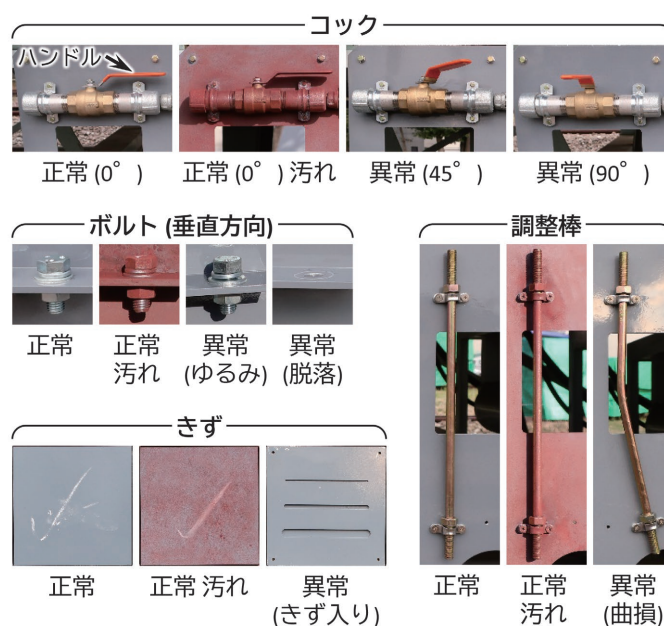


図9 模擬床下機器の条件設定の例
（一般のカメラで撮影した写真）

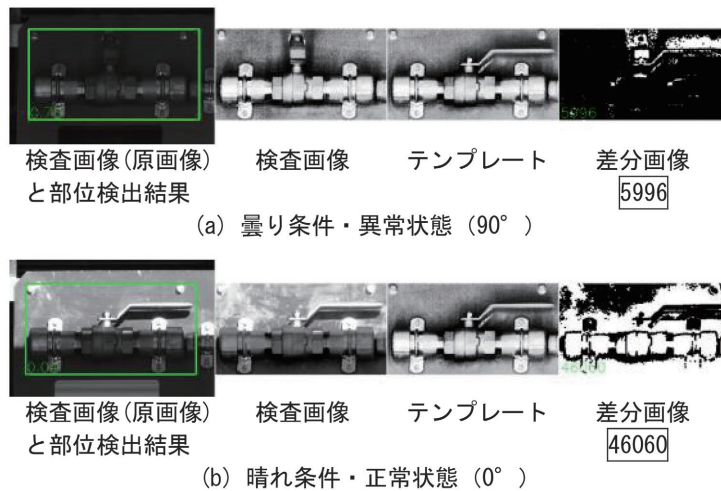


図 11 基本アルゴリズムによるコックの診断処理結果
(四角枠内の数字は差分画素数を表す)

状態の個体差など、検査部位の異常以外の外観の変化にアルゴリズムを対応させる必要があることがわかる。

4.3 アルゴリズムの改良

検査部位の異常以外の外観の変化の影響を抑える方法を検討し、アルゴリズムに以下の改良を加えた。

- (1) 複数のテンプレートの使用：検査部位の汚れや形状の個体差の影響を抑えるため、複数の車両から作成したテンプレートを用意し、検査対象画像に対してすべてのテンプレートでマッチングを行って、マッチングにおける類似度がもっとも高いテンプレートを選定する。
- (2) エッジ検出の追加：輝度の違いの影響を避け検査部位の形状の違いを検出しやすくするため、エッジ（輪郭）検出を用いる。エッジ検出は、検査部位のテンプレートマッチング（3章④・図7④）の前に、検査対象画像および検査部位のテンプレートに対して行う。
- (3) 差分評価領域の制限（マスク処理）：背景などの輝度変化による影響を排除するため、差分画素数を算出する領域を差分画像に設定する。

4.4 改良したアルゴリズムの検証

本論文では、複数テンプレートとして曇り条件におけるコックの汚れなしと汚れありの2枚、マスク処理としてハンドルの可動領域以外を除外する設定（図12）とした結果を示す。図11と同じ撮影画像に対して改良アルゴリズムを適用した結果を図13に示す。改良前のアルゴリズム（以下、「基本アルゴリズム」と記す）で差分画像の大半が白色になった晴れ条件の正常状態については、改良アルゴリズム（図13（b））では、差分画像の白色部分はわずかとなった。エッジ検出によって、検



図 12 マスク画像
(黒色=除外領域)

査画像とテンプレートの明るさの違いが排除され、さらにマスク処理によって、ハンドル以外のエッジの差が除外されたためと考えられる。正常状態の差分画素数は、異常状態の851画素より少ない301画素であり、期待通りの結果が得られた。

テンプレートに用いた画像を除くすべての撮影画像に対して改良アルゴリズムを適用して算出した差分画素数を図14に示す。本検討では、ハンドル角度15°以上を異常状態と定義した。図14から、ハンドルの角度が大きいほど差分画素数が大きい傾向がみられる。ハンドル角度15°以上を異常状態と定義し、しきい値を530に設定した場合、偽陽性率（正常な画像に対して異常と診断した割合）は1.5%、真陽性率（異常な画像に対して異常と診断した割合）は95.9%であり、良好な診断結果が得られた。

診断結果を評価するために、ROC 曲線（受信者動作特性曲線, Receiver Operating Characteristic curve）と AUC（Area Under the Curve）を用いた。ROC 曲線は、横軸を偽陽性率、縦軸を真陽性率として、異常と診断するしきい値を変えながら両者を計算してプロットしたものである。得られた曲線が、偽陽性率0、真陽性率1の点の近くを通るほど判別性能がよいことを表す。AUC は、ROC 曲線の右下部分の面積であり、値が大きく1に近いほど判別性能がよいことを表す。

差分画素数から計算した ROC 曲線と AUC を図15に示す。基本アルゴリズムの AUC は0.521であるのに対

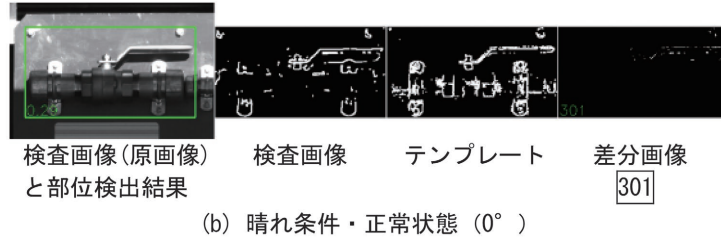
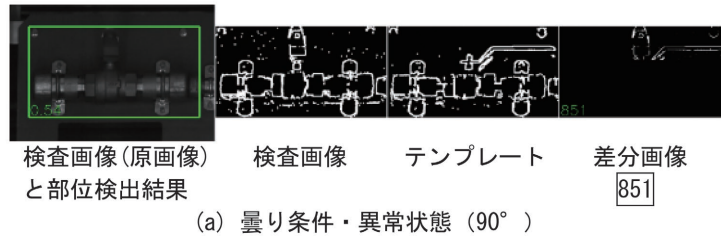


図 13 改良アルゴリズムによるコックの診断処理結果
(四角枠内の数字は差分画素数を表す)

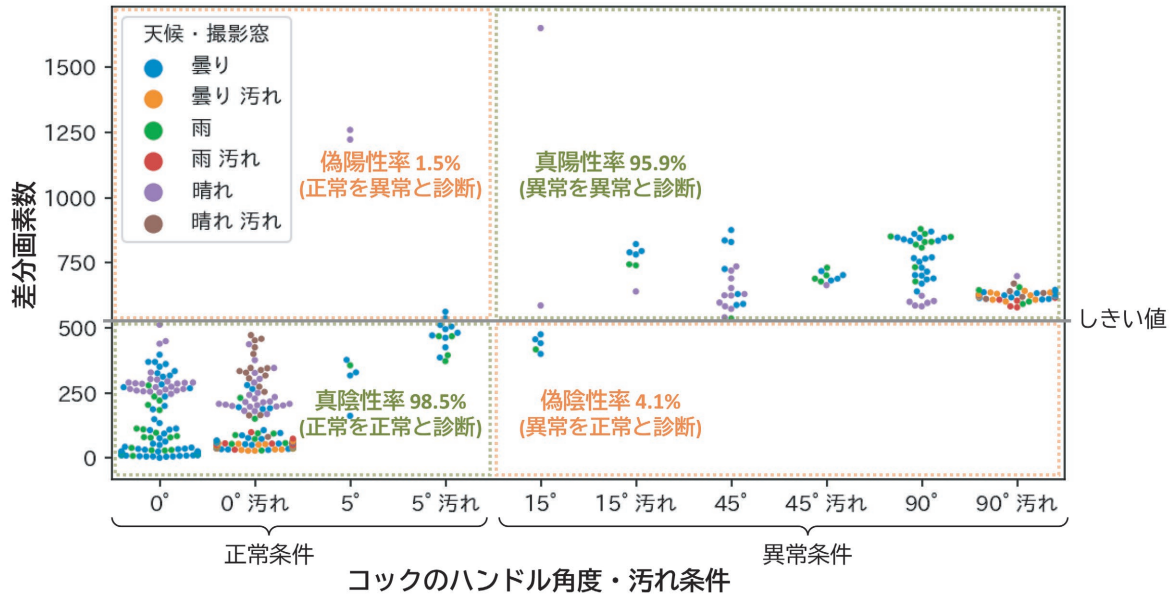


図 14 改良アルゴリズムにより各撮影画像から計算したコックの差分画素数

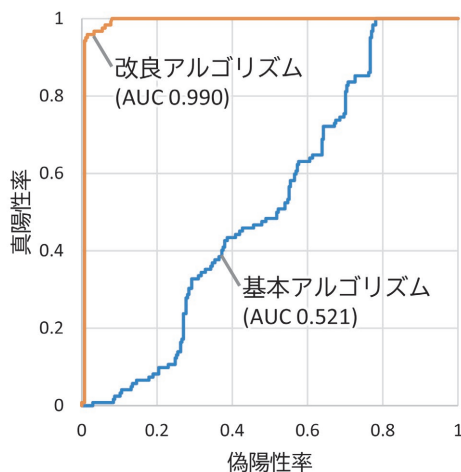


図 15 コックの診断の ROC 曲線

し、改良アルゴリズムの ROC 曲線の AUC は 0.990 であり、良好な判別性能があることがわかる。

テンプレート、エッジ検出、マスクの条件の組み合わせを変えて各検査対象に対して診断処理を行った。検査対象ごとにもっとも高い AUC が得られた診断処理条件と AUC の値を表 1 に示す。これらの結果から、検査対象に応じて処理条件を適切に選定する必要があることがわかる。本試験で模擬した床下機器の異常状態については、本アルゴリズムにより、ボルトのゆるみ、平板へのきず入りの診断は難しいが、コックの開閉、ボルトの脱落、調整棒や配管の曲損の診断は可能と考えられる。

表1 検査対象ごとの診断性能

検査対象	テンプレート数	エッジ検出	マスク	AUC
コック 開閉	2	あり	あり	0.990
ボルト (垂直方向) 脱落	1	なし	あり	0.982
ボルト (垂直方向) ゆるみ	1	なし	あり	0.865
ボルト (まくらぎ方向) 脱落	4	なし	なし	0.985
ボルト (まくらぎ方向) ゆるみ	4	あり	あり	0.909
調整棒 曲損	2	あり	あり	0.986
配管 曲損	1	あり	あり	0.961
平板 きず入り	1	なし	—	0.553

5. まとめ

本研究では、鉄道車両の仕業検査における床下機器の目視確認箇所を対象に、画像を用いて自動で検査する手法を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 走行する車両の床下側面を撮影する手法を検討し、ラインセンサカメラ、ライン照明、レーザドップラ速度計を用いた撮影装置を開発した。試作した撮影装置を車両基地の屋外に仮設して複数の入換車両を撮影し、良好な連続画像が得られることを確認した。
- (2) 上記の撮影装置で撮影した画像から検査部位ごとの正常状態の画像を作成し、それをテンプレートとして検査対象の撮影画像との輝度値の差分量から異常を検出する検査アルゴリズムを開発した。
- (3) 床下機器の異常および表面の汚れを模擬した試験車両を走行させ、天候条件を変えながら撮影する試験を実施した。テンプレートと検査対象画像と

で、日照や床下機器の汚れ状態が大きく異なる場合、輝度値の差分のみではその影響を顕著に受けることがわかった。

- (4) 複数のテンプレートとの照合、エッジ検出、マスク処理を検査アルゴリズムに加えることにより、日照や床下機器の汚れによる輝度変化の影響を抑制できることがわかった。上記(3)の試験で撮影したコックを診断した結果、AUC 0.990の判別精度が得られた。

本研究では、選定した代表的な床下機器を対象に、外乱を設定して診断性能を評価した。今後は、対象機器を広げて検証するとともに、撮影装置を長期間設置して実運用車両を撮影することにより、実環境における性能評価を行っていく。

また、本研究では、検査対象によらない汎用的な検査アルゴリズムについて検討した。検知が困難であった異常に対しては、検査対象の特徴に応じた検査アルゴリズムを開発する予定である。

謝辞

本研究における撮影試験の実施にあたり、九州旅客鉄道株式会社および西日本旅客鉄道株式会社の関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文献

- 1) Kohei MIYAHARA, Takashi KOJIMA, Akihito KAZATO, "Development of anomaly detection method using railway vehicle side images," STECH2021, 2021.

鉄道コンクリート桁におけるひび割れと非構造部材の影響を考慮した曲げ剛性の算定方法

徳永 宗正* 池田 学*

Method for Estimating Bending Stiffness of Concrete Girder during Train Passage Considering Effects of Concrete Cracks and Non-Structural Member

Munemasa TOKUNAGA Manabu IKEDA

This paper presents the results of a study on the evaluation method of concrete girder stiffness when calculating the impact coefficient and deflection. Based on the fatigue test of concrete members, we proposed an estimation formula that considers bending stiffness reduction due to crack propagation in cyclic loading. In addition, we quantified the stiffness contribution of each type of nonstructural members by means of finite element analysis for various girder structures. Finally, we proposed a simple evaluation method for the reloading bending stiffness of the girder considering the stiffness reduction due to concrete member cracks and the stiffness contribution of non-structural members.

キーワード：衝撃係数，変位・変形量，曲げ剛性，ひび割れ，非構造部材

1. はじめに

高速鉄道における列車運行速度の向上，低剛性な桁の採用等により，実橋りょうにおいて，主桁の曲げひび割れによる剛性低下に起因する列車通過時の顕著な共振現象が確認されている¹⁾。

共振現象による動的応答増幅を精度良く予測するためには，設計段階において桁の曲げ剛性を適切に評価する必要がある。列車通過時にはコンクリート部材にひび割れが発生した後の，再載荷時有効剛性 EI_{eqr} (図1参照)を想定する必要がある。ここで，再載荷時有効剛性とは，再載荷時に有効とみなせる断面をもとに算出した剛性であり，繰り返し荷重に伴い剛性が変化するためひび割れ発生後の割線剛性 EI_e やひび割れ断面理論による剛性 EI_{cr} とは異なる。一方で，従来の設計標準²⁾においては，図2で概念を示すコンクリート部材の曲げひび割れ発生に伴う剛性低下や非構造部材の剛性寄与の取り扱いに関して具体的な方法は示されておらず，衝撃係数の算定時には従来から便宜的に全断面有効剛性が用いられてきたが，この適用範囲等は明確化されてこなかった。

桁の曲げ剛性は，主桁の曲げひび割れの発生によって低下する一方で，鉄道構造物には軌道や防音壁，高欄等の非構造部材が主構造上に設置されることから，これら非構造部材が主構造の曲げ剛性に少なからず影響を及ぼす。これらの非構造部材の影響は，SRC桁やスパンの短い単版桁等，本体の主構造の断面剛性が相対的に小さ

い場合には一層大きくなる。このような場合に非構造部材を考慮しない場合には固有振動数を過小評価し，衝撃係数の算定値が実測よりも過大となる傾向にある。この非構造部材の影響は，その種類や形状，配置等に依存して大きく変化することから，近年の鉄道橋りょうで実際に用いられている軌道形式，高欄形状等に即した実設計で適用可能な桁の曲げ剛性の評価方法が求められていた。

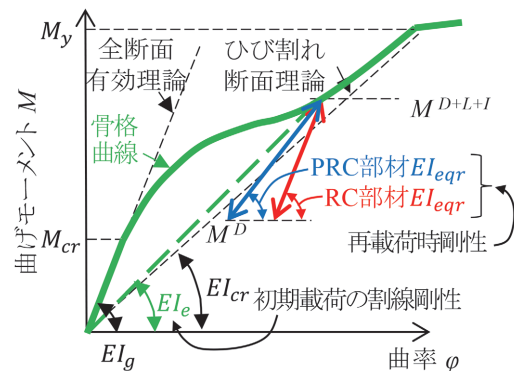


図1 コンクリート部材の再載荷時剛性

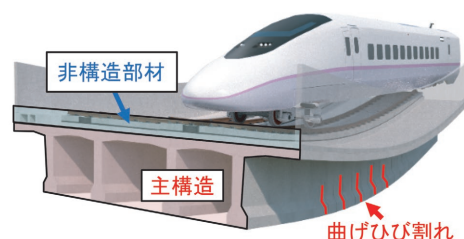


図2 コンクリート桁の曲げ剛性への影響要因

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

本稿では、列車通過時のコンクリート桁の再載荷剛性に対して、コンクリート部材のひび割れや軌道等の非構造部材が及ぼす影響に関する検討結果と、これに基づくコンクリート桁の再載荷時剛性の評価方法を示すとともに、従来の全断面有効剛性の適用範囲等を明確化した。

鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）（第Ⅱ編 橋りょう）および同（第Ⅲ編 コンクリート構造）では、本成果が取り入れられ、列車通過時の桁等の構造要素に対して、衝撃係数、たわみの算定の際には、曲げひび割れによる剛性低下と非構造部材の寄与を考慮した再載荷時有効剛性を用いることを原則とした。

2. 繰り返し載荷下におけるひび割れ発生時のコンクリート部材の再載荷時剛性

2.1 実験方法

表1に、供試体諸元一覧を示す³⁾。本検討ではPRC部材と、プレストレスを導入しない場合の基本的な特性を把握するためのRC部材を実験対象とした。一般的な鉄道橋のパラメータ範囲となるように、供試体の鋼材比やプレストレスの導入量などの諸元を調整した。引張鉄筋比は引張鉄筋とPC鋼棒を含んだ値である。プレストレス係数は鉄筋とPC鋼材の強度の和を基準としたPC鋼材の強度の比であり、値が大きいくほどPC部材に近い挙動を示す。鉄筋係数はコンクリート断面の圧縮強度を基準とした鉄筋とPC鋼材の強度の比であり、同程度に設定した。供試体はRC部材、PRC部材それぞれ2体製作し、載荷パターンを静的載荷試験、疲労試験で変化させた合計4ケースの実験を行った。

コンクリートはRC部材、PRC部材で共通の材料を用い、材料試験結果より圧縮強度は47 (N/mm²)、引張強度は3.56 (N/mm²)、ヤング率は32.2 (kN/mm²)であった。PRC部材のグラウトは高流動型の材料を用い、材料試験結果より圧縮強度は83.6 (N/mm²)、引張強度は3.57 (N/mm²)、ヤング率は64.9 (kN/mm²)であった。

図3に、実験概要を示す³⁾。図に示すように、静的載荷試験では部材の基本的な履歴特性を評価することを目的として、引張鉄筋の降伏までは荷重制御で20kNの増分、降伏以降は変位制御として2mmの増分で荷重レベルを増加させた。各荷重レベルにおける繰り返し回数は

表1 供試体諸元一覧

ケース	名称	PC鋼棒			引張鉄筋			載荷パターン
		径	導入緊張力 (kN)	プレストレス係数 λ	径	引張鉄筋比	鉄筋係数	
1	RCs	-	-	0	D22	1.0%	0.118	静的載荷試験
2	RCf	-	-	0	D22	1.0%	0.118	疲労試験
3	PRCs	$\phi 17$	165	0.716	D13	0.6%	0.131	静的載荷試験
4	PRCf	$\phi 17$	165	0.716	D13	0.6%	0.131	疲労試験

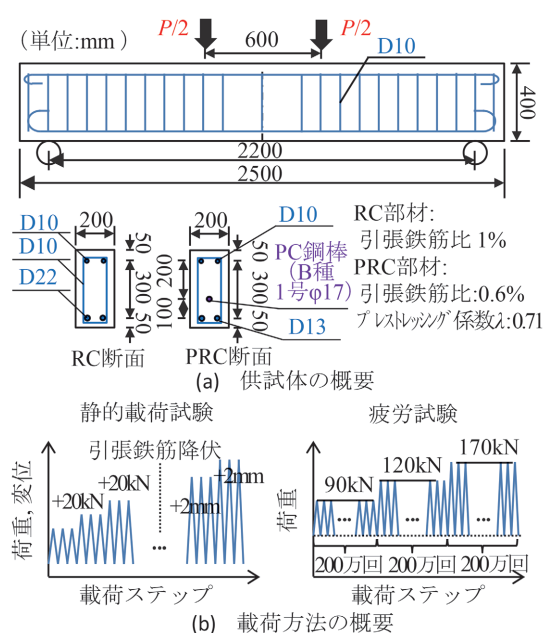


図3 実験概要

3回とした。除荷時には5kN程度の載荷荷重を維持した。一方、疲労試験では動的に載荷し加振周波数は5Hzを基本として、死荷重程度の鉄筋応力(100MPa程度)を想定した50kNを下限荷重として、上限荷重を70, 120, 170kNと増大させた。各荷重レベルにおける繰り返し回数は200万回とした。

2.2 実験結果

図4に、静的載荷試験および疲労試験から得られた荷重と変位の関係を示す。灰色線で示す静的載荷試験から、ひび割れが発生し骨格曲線上で剛性が低下する領域(RC部材は50kN程度以上、PRC部材は90kN程度以上)に着目すると、荷重の増加とともに除荷時および再載荷時の荷重変位関係の勾配が小さくなっていることから、除荷時および再載荷時の剛性はひび割れが発生する前の弾性時の剛性よりも小さくなるのが分かる。RC部材は、PRC部材と比較して、荷重の増加と共に除荷時の残留変位が大きくなるのが分かる。PRC部材の履歴特性は、RC部材と比較して、除荷時に原点付近を指向する傾向にあり、残留変位が小さくなる一方、再載荷時剛性は低下する傾向となる。即ち、ひび割れ幅を低減するために導入されるプレストレスは、梁全体系の剛性を低下させる結果となることが分かる。

疲労試験の繰り返し載荷時の荷重-変位関係上のループの最大荷重点と最小荷重点を直線により結んだ時の剛性である再載荷時剛性について考察する。疲労試験から、RC部材の場合、200万回の繰り返し載荷後における再載荷時剛性 K_{egr} は、各荷重振幅の初期載荷時の剛性と比較して、50-90kN時は11%程度、50-120kN時には6%

程度、50-170kN時には16%程度低下している。RC部材の場合、繰り返し荷载により K_{eq} は50-90kN時には10%程度、50-120kN時には33%程度、50-170kN時には20%程度低下しており、RC部材と比較して低下幅が大きい。特にRC部材に対しては列車通過に伴う繰り返し荷载により剛性が低下し、動的応答は増大する方向に推移することとなる。

図5(a)に、一般的な鉄道橋の諸元を想定したRC部材、PRC部材の静的荷载試験により得られた荷重レベル(荷重を曲げモーメントに変換)と再荷载時の有効断面二次モーメント I_{eqr} の変動幅の関係を示す。再荷载時の有効断面二次モーメントは、再荷载時の剛性をコンクリートのヤング率で除して求めている。図は、再荷载時の有効断面二次モーメント I_{eqr} を、全断面有効による断面二次モーメント I_g およびひび割れ断面理論による断面二次モーメント I_{cr} を基準として無次元化して示している。

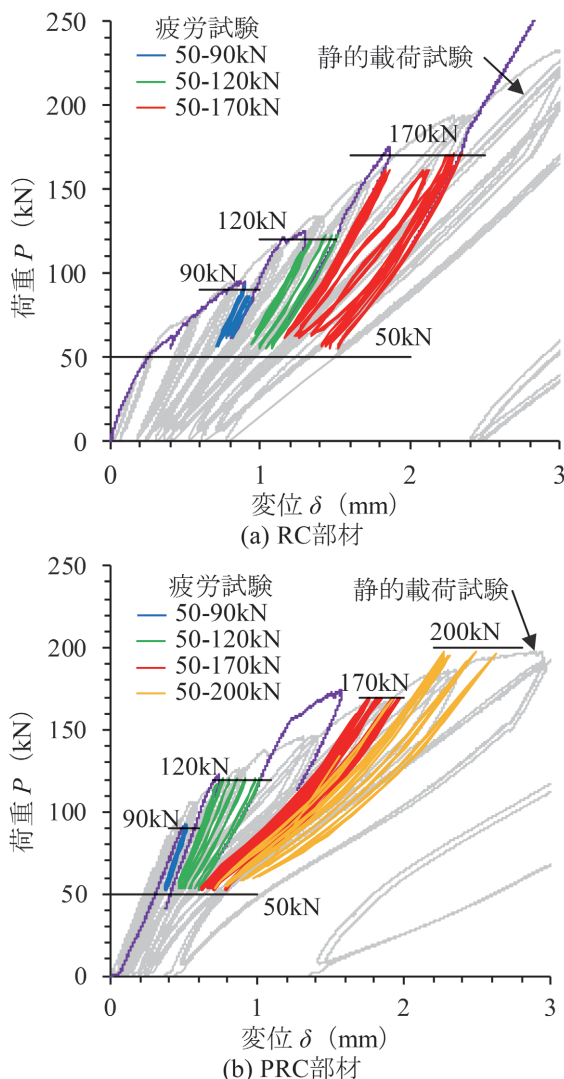
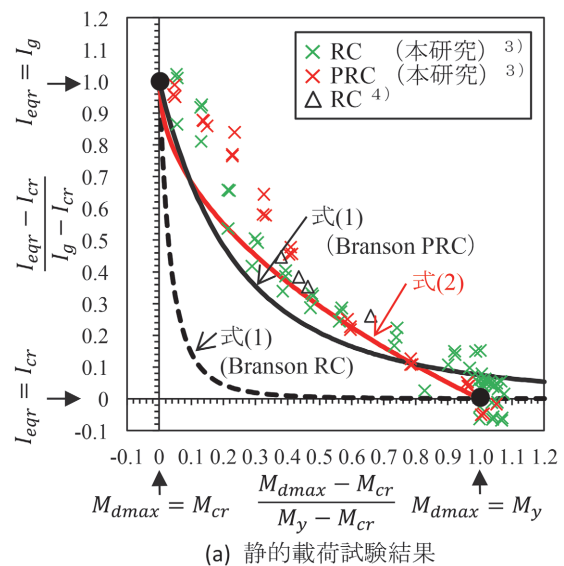


図4 荷重と変位の関係

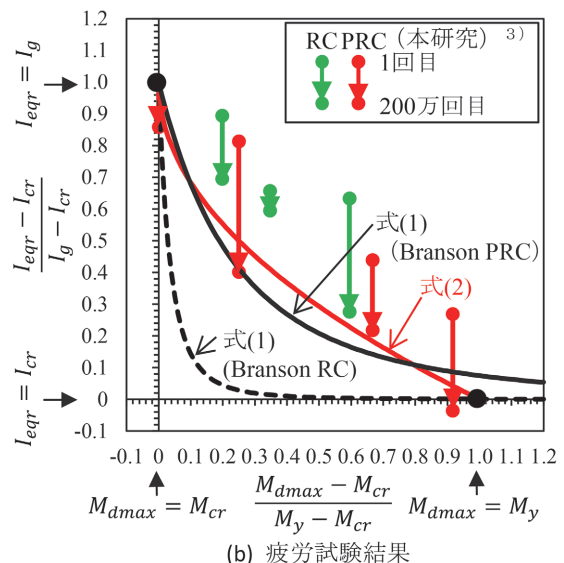
図には、既往の研究⁴⁾により得られたRC部材の関係を△で併せて示す。図から、ひび割れモーメント M_{cr} に近い領域では全断面有効剛性 I_g となる一方、曲げモーメントの応答値 M_{dmax} が増加して降伏モーメント M_y に近づくにつれて、ひび割れ剛性 I_{cr} に漸近することが分かる。RC部材とPRC部材を比較すると、横軸、縦軸共に図中の式により無次元化することで、概ね同様の曲線上に分布することが分かる。Branson則²⁾⁵⁾を書き換えると式(1)となり、図中に式(1)を示している。

$$\frac{I_{eqr}}{I_g} = \frac{I_{cr}}{I_g} + \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right) \left(\frac{M_{cr}}{M_{dmax}}\right)^3 \quad (1)$$

ここで、 M_{cr} : 曲げひび割れ発生時の曲げモーメント ($\gamma_c=1.0$, $\gamma_b=1.0$), M_{dmax} : 曲げモーメントの応答値である。



(a) 静的荷载試験結果



(b) 疲労試験結果

図5 荷重と再荷载時の有効断面二次モーメントの関係

式(1)はPRC部材に対しては整合的であるが、RC部材に対しては過小評価を与えている。なお、Branson則は単調荷重時のひび割れによる剛性低下を算定するものであり、繰り返し荷重の影響は考慮されていない。

図5(b)に、疲労試験により得られた荷重レベルと再荷重時の有効断面二次モーメント I_{eq} の変動幅の関係を示す。疲労試験の結果から、各荷重レベルの一回目の再荷重時剛性は静的荷重試験の結果よりも大きい傾向にあることが分かる。これは、再荷重時剛性が最大荷重だけでなく、荷重振幅の下限值(死荷重)にも依存しているためと考えられる。さらに、200万回の繰り返し荷重により再荷重時剛性は低下する。

以上の荷重試験データに基づき、コンクリート梁部材の再荷重時剛性の推定式として式(2)を提案する。

$$\frac{I_{eq}}{I_g} = \frac{I_{cr}}{I_g} + \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{M_{dmax} - M_{cr}}{M_y - M_{cr}}}\right) \quad (2)$$

ここで、 M_y :降伏曲げモーメント ($\gamma_c=1.0, \gamma_b=1.0$) である。列車通過時の再荷重時剛性は、疲労試験の結果から分かるように本来は繰り返し回数に依存して変化する

が、式(2)は、設計時における使用を想定して疲労試験の200万回目の結果をほとんどの場合に安全側の評価を与えるように設定した。図5に式(2)を示しているが、式(2)は荷重レベルの増大に伴う断面二次モーメントの減少傾向を精度よく表現できており、試験データの平均よりやや下側の評価を与えている。

3. 非構造部材がコンクリート桁の再荷重剛性に与える影響

3.1 解析方法

図6に、解析モデルの概要を示す⁶⁾。新幹線のコンクリート桁から、スパン10.0mのRC単版桁(以下、「S10」)、スパン9.3m、24.1mのRCT型桁(以下、「T10」および「T24」)、スパン21.1mのH鋼埋め込み桁(以下、「SRC22」)、スパン29.2mのPRCT桁(以下、「PRC30」)の5種類を対象として、3次元有限要素法を用いて、固有値解析により1次(鉛直曲げ)の固有振動数を評価した。対象とした非構造部材は、近年の一般的なコンクリート桁を想定して、路盤コンクリート、セメントアスファルト(CA)モルタル、軌道スラブ、レール、トラフ、

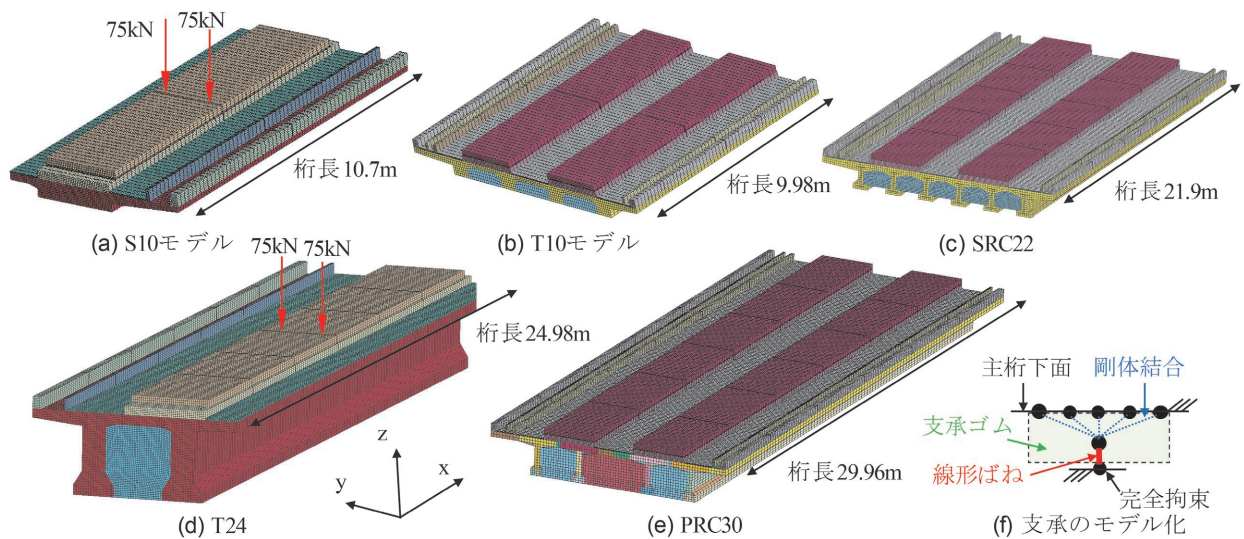


図6 解析モデルの概要

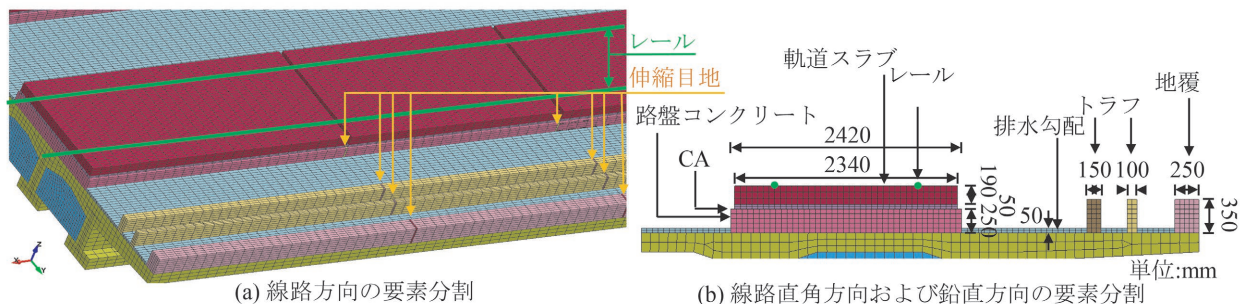


図7 非構造部材の寸法および要素分割

地覆，排水勾配コンクリート，RC高欄とした。S10は東海道新幹線，T24は東北新幹線（大宮-盛岡間），T10，SRC22，PRC30は北陸新幹線（軽井沢-長野間）で用いられた標準設計である。

図7に示すように非構造部材の形状，寸法は，近年の新幹線線区の標準的な値を用いた⁶⁾。非構造部材には初期ひび割れ抑制の目的から伸縮目地が設置される。その配置は設計段階で設定されることもあるが，施工段階で決定されることが多いため，同一の標準設計で設計された桁であっても伸縮目地の配置が異なる場合がある。路盤コンクリート，トラフ，地覆，RC高欄に伸縮目地を考慮し，一般的な値として，目地の配置間隔は5m，目地の線路方向の長さは30mmとした。

3.2 解析結果

図8に，固有値解析により得られた固有振動数 f とスパン L_b の関係を示す。固有振動モードは主構造全体系の1次曲げモードに着目し，各対象橋りょうに対して非構造部材を考慮しないケースおよびRC高欄以外全てを考慮したケース（目地有り，目地無し）の結果を示している。図から，T10，S10に着目すると，非構造部材を考慮しない場合，固有振動数は $40L_b^{-0.8}$ 程度の値となる一方，非構造部材を全て考慮した場合には $80L_b^{-0.8}$ 程度の値となり，非構造部材の影響により固有振動数が2倍程度に増加していることが分かる。SRC22の場合は，非構造部材の影響で固有振動数が3.91Hzから5.57Hzまで+42%程度増加しており，PRC30の場合は，2.77Hzから3.95Hzまで+43%程度増加している。

3次元FEMにより得られる固有振動数を基に，以下の方法により断面剛性に換算して評価する。主構造を添え字 m (main structure)，非構造部材を添え字 n (non structural member) で表現し，主構造と目地数 j を有する非構造部材を同時に考慮した場合の曲げ剛性を $EI_{m+n,j}^{FEM}$ ，主構造のみを考慮した場合の曲げ剛性を EI_m^{FEM} とすると，非構造部材に起因する曲げ剛性増分 $\Delta EI_{n,j}^{FEM}$ は $EI_{m+n,j}^{FEM} - EI_m^{FEM}$ で算出する。さらに，非構造部材による平面保持の仮定の成立性を評価する指標として，有効係数 λ_n は上記 $\Delta EI_{n,j}^{FEM}$ と平面保持の仮定に基づき算出される非構造部材に起因する曲げ剛性増分 ΔEI_n^{beam} の比 $\Delta EI_{n,0}^{FEM} / \Delta EI_n^{beam}$ により算出する。

図9に，非構造部材の種類毎の有効係数 λ_n を示す⁷⁾。 $\lambda_n = 1$ の場合には非構造部材と主構造が剛結され平面保持が成立すること， $\lambda_n = 0$ の場合には非構造部材の剛性寄与が皆無であることを意味する。図から，路盤コンクリートは0.9，トラフは0.3，地覆は0.5程度の有効係数 λ_n を考慮することで概ね安全側の評価となることが分かる。結果は割愛するが，同様に，排水勾配コンクリートは1，CAモルタルは0.5，軌道スラブは0.5，レールは0.5程度の有効係数 λ_n が安全側の評価を与える値と

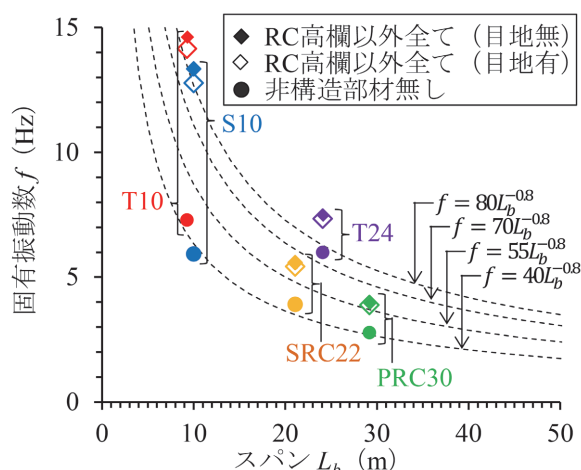


図8 固有振動数とスパンの関係

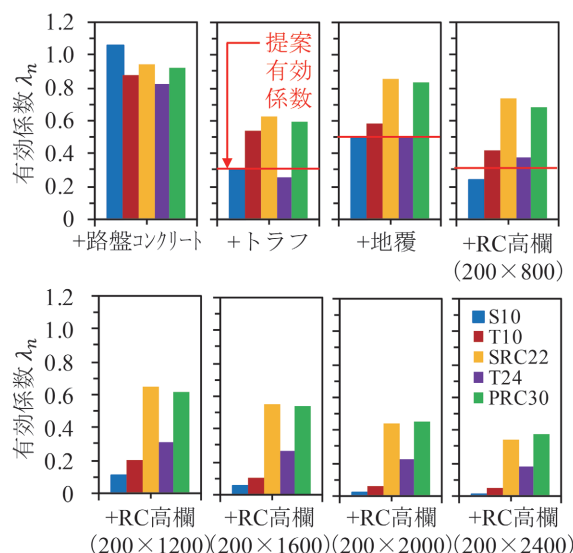


図9 非構造部材の種類毎の有効係数 λ_n

して得られている。ただし，レールやトラフ，地覆は断面面積が小さいこと，排水勾配コンクリートは中立軸に近く主構造の有効剛性に及ぼす影響が一般に小さいことから，実設計で考慮するメリットは少ない。RC高欄は高さの増加とともに有効係数が低下する傾向にあり，概して $\lambda_n = 0 \sim 0.8$ 程度の範囲にあり，高さが800mmの場合は $\lambda_n > 0.3$ 程度を概ね満足する結果であることが分かる。

非構造部材の伸縮目地による剛性増分の低下量について考察する。この低下は目地部において曲げ剛性が局所的に低下することで，有効となる曲げ剛性が低下することによる。伸縮目地を有する場合の曲げ剛性の有効係数 $\lambda_{n,j}$ は $\Delta EI_{n,j}^{FEM} / \Delta EI_{n,0}^{FEM}$ により算出する。ここで， $\lambda_{n,j}$ の添字 j は伸縮目地の線路方向の個数， $\Delta EI_{n,0}^{FEM}$ は伸縮目地が0個として各非構造部材を考慮した場合の曲げ剛性の増分，ここで， $\Delta EI_{n,j}^{FEM}$ は伸縮目地が j 個として各非構造部材を考慮した場合の曲げ剛性の増分を表す。 $\lambda_{n,j} = 1$

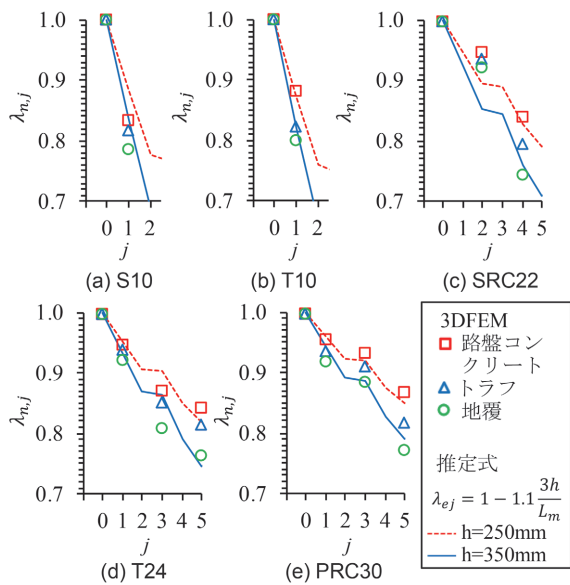


図 10 伸縮目地数が主構造の曲げ剛性の有効係数に及ぼす影響

の時、伸縮目地による剛性低下が発生しないことを意味する。

図 10 に、路盤コンクリート、トラフおよび地覆の非構造部材上の伸縮目地数が主構造の曲げ剛性の有効係数に及ぼす影響を示す。縦軸は $\lambda_{n,j}$ である。横軸は伸縮目地数 j であり、5m 間隔を基本としていることから、スパンが短い 10m 程度の桁の場合は 1 つしか配置されない。図中の推定式は、非構造部材の線路方向応力の分布を考慮した変断面梁のモード剛性に基づき、理論的に算出した簡易近似式である。 h は非構造部材の高さ、 L_m は目地間隔であり 5m が一般的な値である。

図から、目地数の増加とともに全構造部材において $\lambda_{n,j}$ が低下する傾向が確認できる。トラフ、地覆と比較すると路盤コンクリートの低下量が小さいことが分かる。これは、路盤コンクリートの高さ h が 250mm である一方、トラフ、地覆の高さ h は 350mm であり、高さが高い程、伸縮目地近傍において応力を負担しない非構造部材の領域が相対的に増加するためと考えられる。目地が各桁に最大限設置された場合、 $\lambda_{n,j}$ は 0.75~0.85 程度であり、伸縮目地の影響で 15~25% 程度の主構造剛性に対する寄与が低下することが分かる。

4. 列車通過時のコンクリート桁の再載荷時曲げ剛性の算定方法

4.1 応答急増領域の判定

以上の検討結果に基づき、コンクリート桁の曲げ剛性の設定方法を提案する。

一般的な RC 桁および PC 桁の曲げ剛性については、

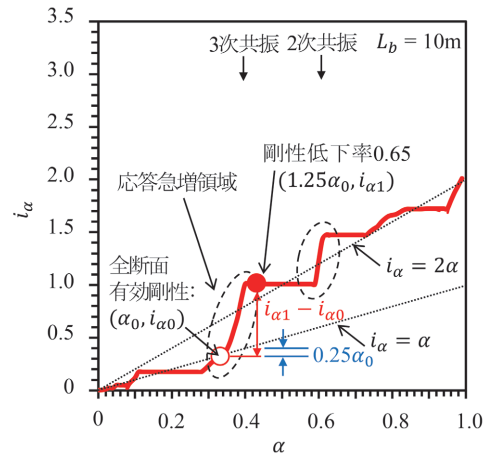


図 11 応答急増領域の判定方法の概要

従来の設計標準と同様に、全断面有効剛性（以下、従来法とする）とする。RC 部材は曲げひび割れによる剛性低下が認められるが、実構造物で想定される荷重レベルでは低下の割合は小さく、非構造部材の剛性寄与による増加分と相殺されるため、全断面有効剛性で設定できると考えられる。一方、PRC 桁に対しては、曲げひび割れによる剛性低下を想定して共振に伴う応答急増領域の判定を行い、従来法の適用可能性を判断する。共振による顕著な動的応答増幅が懸念される場合には、曲げひび割れによる剛性低下と非構造部材の寄与を考慮して再載荷時有効剛性を算定（以下、詳細法とする）する。

図 11 に、応答急増領域の判定方法の概要を示す。衝撃係数は、式 (3) により表される速度パラメータ a を関数として L_v/L_v 毎に与えられた解析結果により求めることができる (L_v は車両長)。

$$a = \frac{v}{2fL_b} \quad (3)$$

ここで、 v は列車速度、 f は固有振動数である。

図から、本ケースの場合は $a = 0.3 \sim 0.4$ 、 $a = 0.6$ の領域で急激に増加していることが分かる。この領域ではそれぞれ 3 次共振、2 次共振 ($fL_v = 3, 2$) が発生しており、列車荷重による加振周期と部材の固有振動数が一致することにより応答が急増する。このような応答急増領域で部材を設計する場合には、部材剛性に依存して衝撃係数が大きく変動することから、精緻に部材剛性を評価する必要がある。一方で、それ以外の領域では衝撃係数は a に対して鈍感となり、部材剛性の設定が衝撃係数の算定に及ぼす影響は小さい。

応答急増領域の判定は以下の手順で実施する。

- ①全断面有効剛性 EI_g に基づき衝撃係数 i_{α_0} ($a = a_0$) を算定する。

- ②剛性低下率 0.65 を仮定して衝撃係数 i_{a1} ($a = 1.25a_0$) を算定する。
- ③ $i_{a1} - i_{a0} < 0.25a_0$ もしくは $i_{a1} < 2a_1 (= 1.25a_0)$: 応答急増領域外であり従来法による算定可
 $i_{a1} - i_{a0} \geq 0.25a_0$ かつ $i_{a1} \geq 2a_1 (= 1.25a_0)$: 応答急増領域内であり詳細法による算定が必要
- 上記②で曲げひび割れによる剛性低下率の観測値として最も小さい部類に入る 0.65 を仮定し、③においてこのときの衝撃係数の試算により、曲げ剛性低下時の衝撃係数の増加を判定するものである。

4.2 再載荷時有効剛性の評価方法

コンクリート桁や合成桁等でひび割れの発生の有無や、線区によって非構造部材の種類や形状が異なる。これらの違いを主構造との一体性を表す有効係数という統一した指標を用いて、簡易な断面計算から算定する方法を提案する。

図 12 に、再載荷時有効剛性 EI_{eqr} 算定の概要を示す。再載荷時有効剛性 EI_{eqr} は、ひび割れの発生や繰り返し載荷に伴う剛性低下および非構造部材の剛性寄与を考慮して算定する。具体的には、 EI_{eqr} は式 (4) により設計での簡便性を考慮して平面保持の仮定に基づき算出する。ただし、断面を構成する各要素 i に存在するひび割れ、伸縮目地の影響を加味して有効係数 λ_i により剛性を低減する。

$$EI_{eqr} = \sum_i E_i \lambda_i (I_i + A_i (y_i - e)^2) \quad (4)$$

$$e = \frac{\sum_i \lambda_i E_i y_i A_i}{\sum_i \lambda_i E_i A_i} \quad (5)$$

ここで、 E_i : 各断面構成要素の設計ヤング率、 A_i : 各断面構成要素の断面積、 I_i : 各部材図心軸回りの断面二次モーメント、 y_i : スラブ上面からの各部材図心までの距離、 e : ひび割れと非構造部材を考慮した場合の平均的な図心位置である。

RC、PRC 部材等、主構造に曲げひび割れの発生による剛性低下が予想される場合、実験結果の概ね下限を示す経験式である式 (2) により有効係数 $\lambda (= I_{eqr}/I_g)$ を算定する。式 (2) の M_{dmax} は、本来は衝撃係数の関数とな

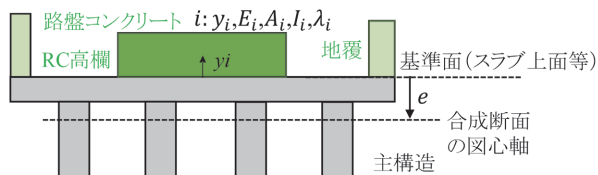


図 12 再載荷時有効剛性 EI_{eqr} 算定の概要

るため繰り返し計算により算定する必要があり煩雑となることから、実務設計においては一般的な設計条件における安全係数等を勘案して $M_{dmax} = 0.8M_y$ としてよい。この時、 $I_{eqr} \doteq 0.1I_g + 0.9I_{cr}$ を与える。PC 部材や鋼部材等のように主構造の剛性低下が発生しない場合には、 $I_{eqr} = I_g$ とする。

非構造部材に対しては、供用期間に渡って主構造と一体性が確保できる構造詳細が成立する場合には有効断面に見込めると考えられる。路盤コンクリートおよび軌道スラブは、主構造の剛性への寄与が大きい部材であることから、設計で考慮することが合理的である。ただし、非構造部材種別に応じた有効係数 λ を考慮する。有効係数 λ は、主構造と一体打ちでない伸縮目地を有する路盤コンクリートに対しては、 $\lambda = 0.9$ に、伸縮目地の影響で 15~25% 程度の主構造剛性に対する寄与が低下することから有効係数に 0.8 を乗じて、一般的な有効係数 $\lambda = 0.9 \times 0.8 \doteq 0.7$ とする。軌道スラブは $\lambda = 0.5$ とする。一般に、レールや排水勾配コンクリートや背の低い地覆等のその他の非構造部材を考慮しても良いが、断面が小さく寄与は小さいことから無視して計算するのが合理的である。

4.3 提案方法の妥当性の検証

表 2 に、再載荷時有効剛性 EI_{eqr} の推定手法の妥当性を示す。ここでは、顕著な共振現象が発生している PRC 桁 ($L_b = 29.2m$)¹⁾ を対象として試算を行い、提案手法の妥当性を検証する。非構造部材は、現地測定に近い条件として、路盤コンクリートは幅 2420mm × 高さ 100mm ($\lambda_n = 0.9 \times 0.8$)、トラフは 250mm × 350mm ($\lambda_n = 0.3 \times 0.8$)、地覆は 250mm × 350mm ($\lambda_n = 0.5 \times 0.8$)、排水勾配コンクリートは 2500mm × 500mm ($\lambda_n = 1.0$)、CA モルタルは 2340mm × 50mm ($\lambda_n = 0.5$)、軌道スラブは 2340mm × 190mm ($\lambda_n = 0.5$)、レールは 60kg レール ($\lambda_n = 0.2$) とした。伸縮目地が設置される非構造部材にはその影響を考慮した。実測結果は同一の標準設計の 10 橋程度の時系列データの多数の実測結果の範囲を示している、2.42~4.5Hz 程度の範囲である。列車速度が 260km/h の場合、2.89Hz となると 1 次共振が発生する。表から、再載荷時有効剛性 EI_{eqr} と全断面有効剛性 EI_g の比の実測値は最小で 0.7 程度であり、提案法

表 2 再載荷時有効剛性 EI_{eqr} の推定手法の妥当性

	実測		推定法			
	最大	最小	全断面有効	提案法		
非構造部材	有	有	-	考慮	考慮	
ひび割れ	-	有	-	考慮	考慮	
f (Hz)	4.5	2.42	2.92	3.29	2.00	2.38
EI_{eqr} / EI_g	2.37	0.69	1.00	1.27	0.47	0.67

により非構造部材とひび割れをそれぞれ考慮することで実測の最小程度の固有振動数および EI_{eq}/EI_g を適切に評価できていることが分かる。 EI_{eq}/EI_g の実測値は最大で 2.4 程度であり、提案手法で非構造部材のみを考慮した 1.27 より大きい値を示しているが、これはコンクリート材料のヤング率や路盤コンクリートの厚さが個体ごとに異なることなどが大きく影響していると考えられる。主構造のヤング率を 1.3 倍、路盤コンクリートの厚さを 300mm と仮定すると 4.2Hz となり、実態の高剛性な例に近い値となる。

5. まとめ

本稿では、衝撃係数およびたわみの算定の際のコンクリート桁の曲げ剛性の評価方法に関する検討を行った結果を示した。

- ・コンクリート部材の静的荷重試験および疲労試験結果に基づき、繰り返し荷重の増加によるひび割れの進展と曲げ剛性の低下を考慮した推定式を提案した。
- ・多様な桁構造を対象とした有限要素解析等により、非構造部材の種類毎に桁剛性への寄与を定量化した。
- ・コンクリート部材のひび割れによる剛性低下と、非構造部材の剛性寄与を考慮した桁の曲げ剛性の簡易評価方法を提案した。

文献

- 1) 徳永宗正, 池田学: 鉄道 PRC 桁の複線同時荷重によるひび割れ進展に伴う動的応答増大の再現解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.77, No.2, pp.I_467-I_476, 2021
- 2) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 丸善, 2004
- 3) Tokunaga, M., and K. Narita. "Evaluation of Vibration Characteristics of RC and PRC Beam Members Under Cyclic Train Loading." EASEC16. Springer, Singapore, pp.437-443, 2021.
- 4) 渡辺忠朋, 松本信之, 涌井一: たわみ量の算定に用いる RC 桁の曲げ剛性に関する一考察 (曲げ・せん断 -II). コンクリート工学年次論文報告集, 14(2), pp.251-254, 1992
- 5) Branson, D.E. (1977), Deformation of Concrete Structures. McGraw-Hill, New York.
- 6) 徳永宗正, 八木英輝, 池田学, 曾我部正道: 非構造部材が鉄道橋りょうの主構造の振動特性に及ぼす影響度評価. 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.75, No.2, I_145-I_153, 2019
- 7) 徳永宗正, 池田学: 非構造部材を考慮した鉄道橋りょうの主構造の曲げ剛性の評価手法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.3, pp.580-596, 2020

通り変位データを用いたロングレールの座屈発生温度の簡易な推定方法

山岡 大樹* 玉川 新悟* 西宮 裕騎*

Simple Estimation Method of Buckling Temperature of Continuous Welded Rail Considering Lateral Track Irregularities

Daiki YAMAOKA Shingo TAMAGAWA Yuki NISHINOMIYA

The control index for buckling of continuous welded rails in Japan is set based on the lowest rail temperature increase that buckling can occur theoretically. However, there is a considerable difference between the index temperature and the buckling temperature at which the actual rail buckling occurs. Therefore, the current buckling control index may have an excessive safety margin for buckling. In order to improve the accuracy of control index, it is necessary to estimate buckling temperature affected by lateral track irregularities. In this study, we have proposed a method for easily estimating the buckling temperature of continuous welded rails considering lateral track irregularities measured by a track inspection car.

キーワード：通り変位データ，軌道検測車，ロングレール，座屈発生温度，FEM

1. はじめに

バラスト軌道のロングレールでは，温度変化に伴う伸縮がレール締結装置とまくらぎを介して道床により拘束されるため，レール軸力が生じる。特に，夏季高温時になると，圧縮方向のレール軸力が生じ，これが許容限度に達すると，軌きょうはレール横方向に道床を押し出しながら張り出す座屈を生じる恐れがあるため，ロングレール区間では座屈に対する適切な管理が必要となる。

レールへの温度荷重と軌道の内力の釣り合い状態として，図1にレール横移動量と中立温度（レール軸力が0となる温度）からのレール温度上昇量の関係を示す。レール温度上昇量が大きくなり，同図の極大点Aに到達すると，釣り合い状態が不安定な経路ACを介することなく点Bへと飛び移り，レール横移動量が一気に増加する。これが軌道でみられる座屈の挙動を表している。なお，レール横移動量が微小な経路OAのうち，点Cにおけるレール温度上昇量 T_c までの経路では，任意のレール温度上昇量における釣り合い点がひとつしかなく飛び移り座屈が生じないことから， T_c は座屈が理論上生じ得るレール温度上昇量の下限値となる。ここで，点Aにおけるレール温度上昇量 T_a （以下，座屈発生温度）は，通り変位の増大等により低下することが指摘されている¹⁾²⁾。日本の現行の座屈管理では，通り変位が座屈強度に及ぼす影響を包含する形で， T_c をもとに座屈に対する安全余裕度を評価している³⁾。

しかしながら，座屈発生温度 T_a と T_c の間には少な

らず温度差があることから，現行の座屈管理は安全余裕度を必要以上に確保している可能性があり，保守コストの観点から合理的でない場合もあると考えられる。一方で，安全余裕度の緩和に向けては，通り変位の影響を受ける座屈発生温度を精度よく評価する必要がある。これまでに，座屈発生温度と T_c の温度差を考慮して安全余裕度を緩和しようとする検討⁴⁾が行われているが，この検討は実際の軌道でみられる複雑な通り変位を十分に考慮したものではない。

そこで，実軌道の座屈発生温度を精度よく評価することを目的に，軌道検測車で取得された通り変位データを，レール横方向のゆがみ形状（以下，レール形状）として考慮した軌道のFEMによる座屈解析を多数実施した。その結果を踏まえて，多大な計算コストを要するFEM解析を介することなく，複雑な通り変位の状態を考慮したロングレールの座屈発生温度を簡易に推定する方法⁵⁾を提案した。

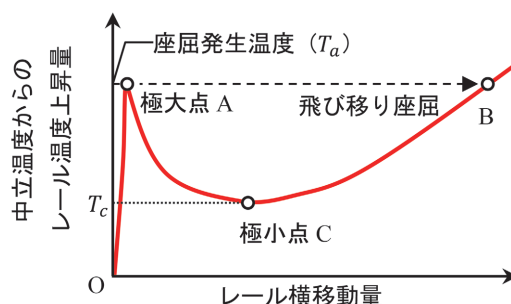


図1 レール横移動量とレール温度上昇量の関係

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

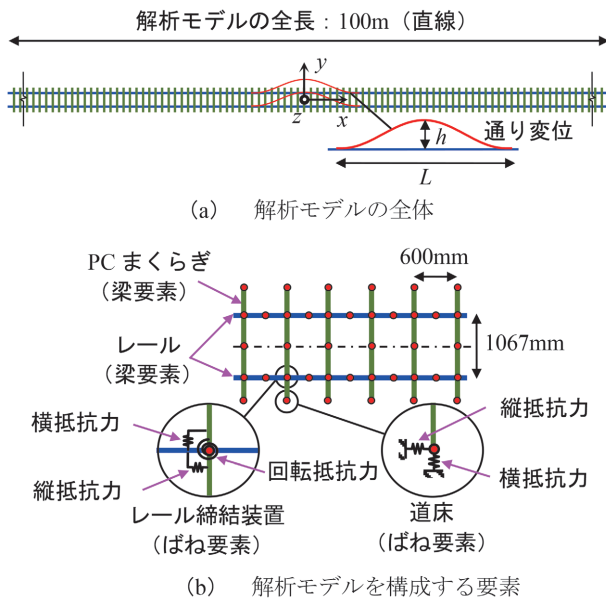


図2 座屈解析モデルの概要

2. FEM 座屈解析による基礎的検討

2.1 解析ツールおよび解析モデルの概要

軌道のFEM座屈解析では、著者らの一部が過去に開発した非線形静的座屈解析ツール⁶⁾を用いることとした。なお、本解析ツールは、実物大軌道を用いた座屈試験の結果と良好な一致を得ており、その妥当性を確認しているものである⁶⁾。

図2に本稿で用いた座屈解析モデルの概要を示す。本モデルは全長100mの直線軌道モデルで、温度変化に伴うロングレールの自由伸縮が生じない不動区間を想定して、両端のレール長手方向(x軸並進方向)の変位を拘束した。レールとまくらぎについてはEuler梁要素で模擬した。また、レール締結装置については縦方向(x軸並進方向)・横方向(y軸並進方向)・回転方向(z軸周り回転方向)の抵抗力の特性をレール上の節点とまくらぎ上の節点を接続するばね要素で、道床縦抵抗力および道床横抵抗力の特性をまくらぎ端の節点と不動点を接続するばね要素で定義した。なお、各ばね要素は非線形特性を付与することができる。

本解析は有限変位理論に基づき、釣り合い経路の解法として荷重増分法と弧長増分法⁷⁾を併用している。

2.2 解析モデルの諸元

表1に解析モデルの諸元を示す。レールとまくらぎはそれぞれ50kgNレールと3号PCまくらぎを対象として、各材料特性を付与した。レール締結装置の各抵抗力は実際のバラスト軌道用のレール締結装置で標準的に使用される値⁸⁾⁹⁾とした。道床縦抵抗力および道床横抵抗力は非線形特性⁴⁾とし、道床横抵抗力の最終値(以下、

表1 解析モデルの諸元(標準値)

項目	値	
50kgN レール	ヤング率	$2.058 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.3
	線膨張係数	$1.14 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
	断面積	$6.42 \times 10^3 \text{ mm}^2$
	断面2次モーメント (z軸回り)	$3.22 \times 10^6 \text{ mm}^4$
3号PC まくらぎ	ヤング率	$2.2 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.2
	断面積	$2.84 \times 10^4 \text{ mm}^2$
	断面2次モーメント (z軸回り)	$1.14 \times 10^8 \text{ mm}^4$
	長さ	2000 mm
レール 締結装置	回転抵抗力のばね定数	27.6 kNm/rad
	縦抵抗力のばね定数	12 kN/mm
	横抵抗力のばね定数	43 kN/mm
道床 横抵抗力	最終値 g_0	4 kN/m/レール
	算定式 g	$g = g_0 \times v / (v + 1.0)$ v: y 方向変位 (mm)
道床 縦抵抗力	最終値 k_0	6 kN/m/レール
	算定式 k	$k = k_0 \times u / (u + 1.0)$ u: x 方向変位 (mm)
通り変位	波長 L	10 m
	波高 h	13 mm

最終道床横抵抗力)は、急曲線を除く区間で一般的に確保される値¹⁰⁾とし、道床縦抵抗力の最終値は最終道床横抵抗力の1.5倍とした。

また、次節の2.3.1項の検討に際して、式(1)による仮想的な通り変位を図2(a)および表1に示す通り与えた。

$$y_0 = \frac{h}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi}{L} x \right), \quad -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (1)$$

ここに、 y_0 : 通り変位、 h : 通り変位の波高、 L : 通り変位の波長である。

なお、本稿では初期の通り変位に伴うレールの曲げモーメントや道床抵抗力の変化等は考慮していない。

2.3 FEM 座屈解析による基礎的検討

2.3.1 各パラメータと座屈発生温度の関係

本項では解析モデルのパラメータである、レール締結装置の各抵抗力、道床縦抵抗力、道床横抵抗力、通り変位の波高に関して、各パラメータを変化させた座屈解析を実施し、各パラメータと座屈発生温度との関係を整理した。なお、任意のパラメータを変化させる際には、その他のパラメータ値は表1に示す値(標準値)でそれぞれ固定した。

図3に各パラメータと座屈発生温度の関係を示す。まず、図3(a)～(c)によると、レール締結装置の各抵

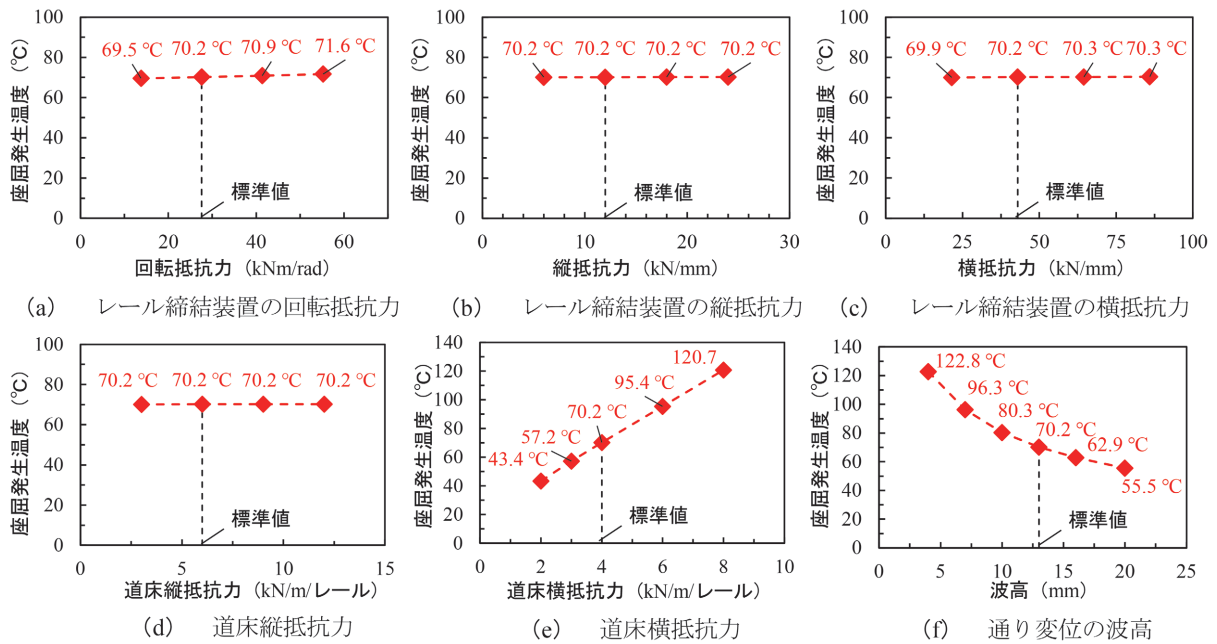


図3 各パラメータと座屈発生温度の関係

抵抗力をそれぞれ標準値の0.5倍～2.0倍で変化させた場合の座屈発生温度は、最大値で71.6℃、最小値で69.5℃であり、標準値の場合の座屈発生温度70.2℃と比較しても顕著な差は認められなかった。

次に、図3(d)によると、道床縦抵抗力については、標準値の0.5倍～2.0倍で変化させた場合の座屈発生温度が標準値の場合と一致した。一方、図3(e)によると、道床横抵抗力については、その増加に対して座屈発生温度は13℃/(kN/m/レール)程度の変化が認められた。

最後に図3(f)によると、通り変位の波高の増加に対して座屈発生温度は非線形に低下し、波高を4mmから20mmに増加させると67℃程度の低下が認められた。

2.3.2 通り変位に関するパラメータが座屈発生温度に及ぼす影響

軌道検測車で測定した通り変位波形をもとに座屈発生温度を推定するためには、波形を特徴づけるパラメータのうち、座屈発生温度に影響する支配因子を特定することが重要である。そこで本項では、軌道検測車で取得される複雑な通り変位を用いた検討に先立ち、通り変位波形の種類やその波高および波長を変化させた座屈解析を行い、通り変位に関するパラメータと座屈発生温度の関係を整理した。

本項では、軌道の座屈強度に関する理論解析¹⁾に従来用いられてきた、図4に示すような4種類の波形を通り変位波形として、その波長および波高に関するパラメータ解析を実施した。なお、各波形を表す数式についてはここでは省略する。解析モデルは図2と同様とし、解析諸元は表1に示す値とした。

各波形の波長 L を10m～20m、波高 h を4mm～20mm

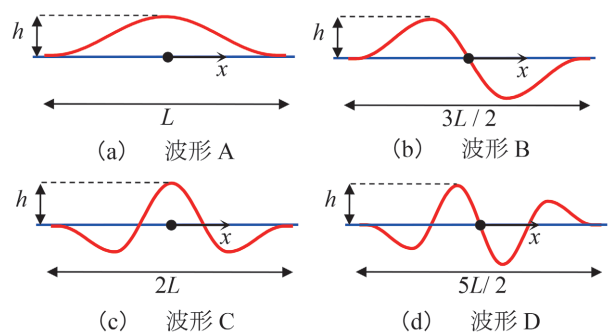


図4 設定した通り変位波形

で変化させてFEMによる座屈解析を行った。上記の波長 L の範囲は、在来線の乗り心地向上の観点から、軌道変位の抑制が効果的となり、軌道管理上で重要となる値である¹¹⁾。また、波高 h の最大値20mmは、JRの在来線で用いられている軌道整備基準値¹²⁾のうち、走行速度120km/h以上の線区における通り変位の基準値相当の値である。

図5(a)に、波高10mmで一定とした場合における波長と座屈発生温度の関係を示す。同図より、各波形について、波長の増加に伴い座屈発生温度が増加する傾向を示している。ただし、同じ波長で比較した場合、波形により座屈発生温度が異なることが分かる。

図5(b)に、波長10mで一定とした場合における波高と座屈発生温度の関係を示す。同図より、各波形について、波高の増加に伴い座屈発生温度が低下する傾向を示している。ただし、同じ波高で比較した場合、波形により座屈発生温度が異なることが分かる。

以上の結果と、図4に示した波形よりも複雑な波形を

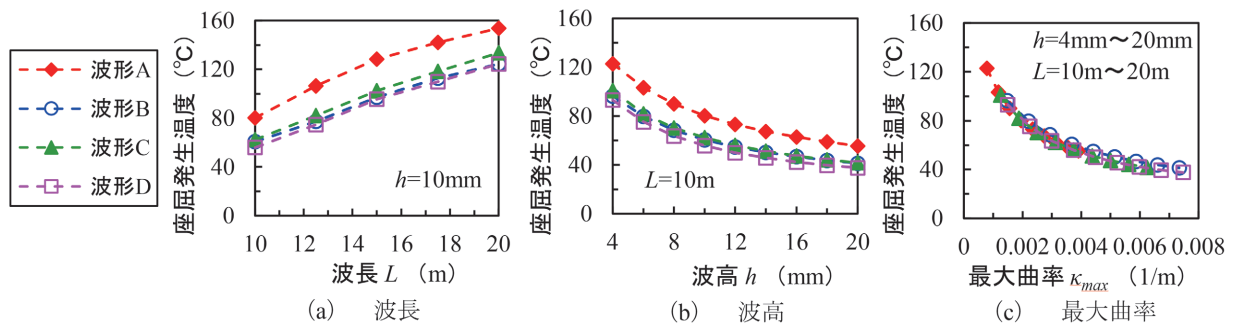


図5 通り変位に関する各パラメータと座屈発生温度の関係

有する実軌道の通り変位では、波長や波高を定義することが困難であることから、波長もしくは波高のパラメータのみで実軌道の座屈発生温度を推定するのは困難であると考えられる。一方で、波長の増加と波高の減少に伴い座屈発生温度が増加する傾向を踏まえると、波形の曲率と座屈発生温度の間には関係性があることが推測される。そこで、曲率と座屈発生温度に着目した整理を行った。

図5(c)に波長が10m~20m、波高が4mm~20mの場合における波形の曲率の最大値（以下、最大曲率、 κ_{max} ）と座屈発生温度の関係を示す。なお、波形の曲率は、次章に示す軌道検測車データにも適用できるように、曲率の算定式を離散化した式(2)~式(4)により計算している。

$$\kappa = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

$$y'' = \frac{1}{2} \left(\frac{y_0 - y_1}{x_0 - x_1} + \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} - \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right) / (x_1 - x_{-1}) \quad (3)$$

$$y' = \frac{1}{2} \left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} + \frac{y_0 - y_1}{x_0 - x_1} - \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \right) \quad (4)$$

ここに、 $x_i, y_i (i = -2 \sim 2)$ は連続する5点のレール節点の通り変位を含むx軸、y軸の座標値である。

図5(c)より、座屈発生温度は、各波形について、最大曲率の増加に伴い低下する傾向を示している。また、同じ最大曲率において、各波形における座屈発生温度は概ね一致している。よって、波形の最大曲率により、複雑な通り変位を有する実軌道の座屈発生温度を推定できると考えられる。

3. 通り変位データを用いた軌道の座屈解析

本章では、2章の基礎的検討の結果を踏まえて、軌道検測車で測定した通り変位データを用いた座屈解析を行

表2 解析ケースの内訳

基本線形 (曲線半径R)	ケース数	実際の測定区間の基本線形
直線	144	直線
R800m	28	R > 800m
R600m	61	400m < R ≤ 800m
R400m	60	R ≤ 400m

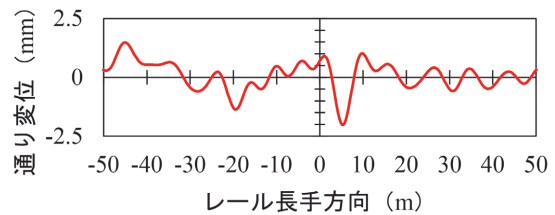


図6 生成した通り変位の復元波形の一例

い、解析結果と通り変位波形の最大曲率との関係を整理することで、軌道検測車データから座屈発生温度を簡易に推定する方法について検討した。なお、本稿では通り変位波形が座屈解析結果に及ぼす影響に着目するため、高低変位や水準変位、平面性変位などの他の軌道検測データは考慮していない。

3.1 解析モデルの概要

解析モデルに反映する通り変位データは、2台車方式の軌道検測車により2.1m-14.4m 偏心矢法¹³⁾で測定されたものを用いた。なお、測定した通り変位データはデジタル逆フィルタ¹⁴⁾にかけて復元波形¹⁴⁾に変換し、これを解析モデルのレール形状に付加した。曲線軌道の場合は円曲線状のレール形状に復元波形を付加した。ここで、復元波形を生成する際の波長帯域は、正矢方式で測定される検測車データへの適用および正矢量に対する基本線形の影響を除去することを踏まえて6m~45mとした。なお、直線および曲線軌道(曲線半径 R400m・600m・800mの3パターン)の解析ケースを表2に示すように計293ケース生成した。図6に生成した通り変位の復元波形の一例

(直線軌道)を示す。解析モデルの寸法および通り変位以外のパラメータは図2および表1と同じである。

3.2 制御節点の設定

解析を実施するにあたり、弧長増分法では、解析モデル中で他の節点の自由度よりも変位が相対的に大きくなると考えられる節点の自由度をあらかじめ選定し、その節点の自由度における釣り合い経路を収束計算により逐次追跡する必要がある。本解析では、釣り合い経路を追跡する節点を「制御節点」とし、座屈発生方向に該当するy軸並進方向において解析モデル中で相対的に大きな変位が生じると想定して、制御節点のy軸並進方向の釣り合い経路を追跡することとした。なお、それ以外の節点の自由度における収束計算ステップごとの各変位は、制御節点のy軸並進方向の変位に従属させる形で求めることができる。

一方で、通り変位は図6のように複雑な形状を有しており、座屈が発生する位置(以下、座屈発生位置)をあらかじめ特定できない。ここで、2章の検討では、最大曲率が座屈発生温度に対して関連性があることを示した。そこで本解析では、最大曲率が座屈発生温度や座屈発生位置に影響を及ぼすと予想し、最大曲率となる位置(以下、最大曲率位置)に該当するレール節点を制御節点として座屈解析を実施した。ただし、最大曲率位置で座屈が生じない場合には、座屈発生位置を特定できるまで制御節点を逐次変更して解析を行った。なお、表2に示す解析ケースはすべて、解析結果が解析モデル両端の拘束条件の影響を受けないよう、事前検討により座屈発生位置が解析モデルの両端から15mの範囲内に入るケースは含んでいない。

3.3 解析結果

3.1節に示した293の解析ケースについて、座屈解析を実施した。図7に、図6の通り変位を付与した解析ケースにおける座屈後のレール形状を一例として示す。同図より、最大曲率に該当する位置の近傍において、座屈が生じていることが分かる。その一方で、最大曲率位置と座屈発生位置が乖離するケースも確認された。ただし、このようなケースでは、図8に示すように座屈発生位置における曲率が最大曲率と近い値となっていた。本研究では、離散データであるレール形状の曲率を式(2)~式(4)の通り計算しているが、離散データの曲率の計算方法は他にも様々な方法があり、計算方法によって曲率の値が異なることが示唆されている¹⁵⁾。すなわち、本研究において最大曲率位置と座屈発生位置が乖離したケースについて、本研究で示した曲率の計算方法以外の方法で曲率を計算すると、最大曲率位置と座屈発生位置が一致する可能性も考えられる。ただし、本研究では、

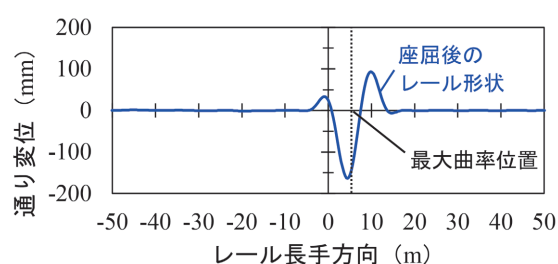


図7 座屈後のレール形状

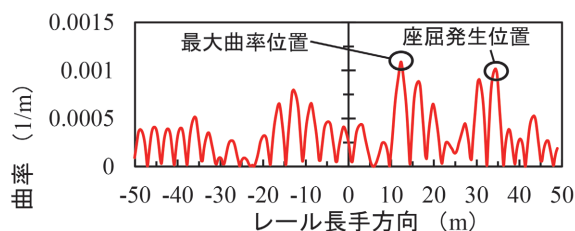


図8 最大曲率位置と座屈発生位置が乖離した解析ケースの曲率分布

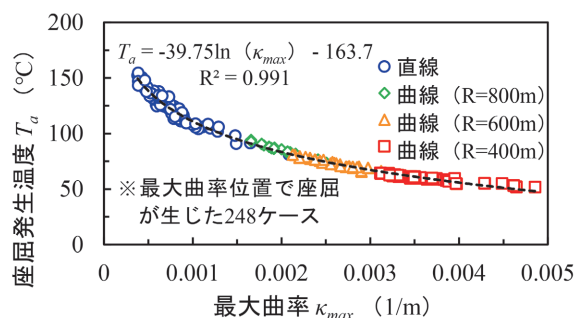


図9 最大曲率と座屈発生温度の関係

曲率の計算方法の違いによって、最大曲率位置と座屈発生位置がどの程度一致するかについて、精度の比較検証を実施していないため、今後の検討課題としたい。なお、本研究で検討した範囲内では、最大曲率位置で座屈したケースは293ケース中248ケースであり、80%以上の割合で、最大曲率位置で座屈が生じる結果となった。

続いて、最大曲率位置で座屈が生じた248ケースについて、図9に示すように、最大曲率と座屈発生温度の関係を整理した。同図より、最大曲率と座屈発生温度の間には、決定係数0.99程度の対数関数を介した強い関連性があることを確認した。また、最大曲率位置以外で座屈が生じた45ケースについて、図9中に示した回帰式に各解析ケースにおける最大曲率を代入して座屈発生温度を推定し、FEMによる解析値と比較した。図10に、上記45ケースの座屈発生温度の比較結果を示す。同図によると、最大曲率位置と座屈発生位置が一致しない場合でも、最大曲率を説明変数として、座屈発生温度を精度よく推定できることが分かった。これは前述の図8の

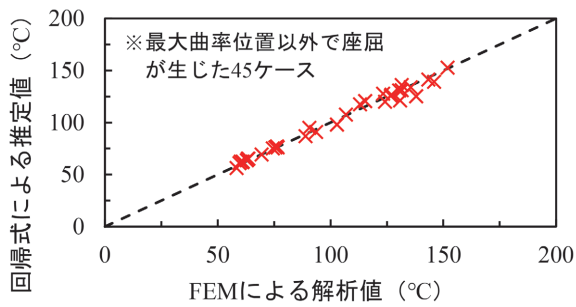


図10 座屈発生温度の比較結果

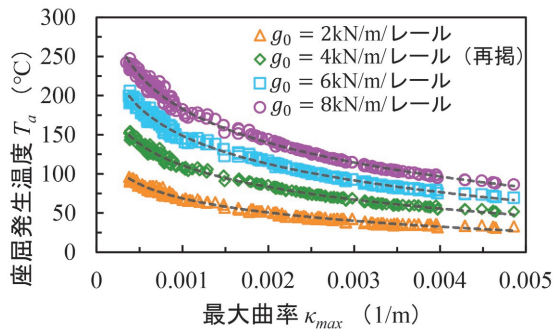


図11 道床横抵抗力別の最大曲率と座屈発生温度の関係

ように、各解析ケースについて、座屈発生位置における曲率が最大曲率と近い値となっているためである。

3.4 道床横抵抗力別の回帰推定式

ここまでの検討では、解析モデル中の道床横抵抗力の最終値を4kN/m/レールで一定とした一連の解析を実施した。一方で、座屈発生温度は道床横抵抗力の影響も受ける。そこで、表2に示した全解析ケースについて、最終道床横抵抗力 g_0 を2, 6, 8kN/m/レールとした場合（他のパラメータは固定）について、それぞれ同様に座屈解析を実施し、最大曲率と座屈発生温度の関係を整理した。

表3に道床横抵抗力ごとの最大曲率位置で座屈したケース数を、図11に道床横抵抗力ごとの最大曲率と座屈発生温度の関係を示す。また、表4に道床横抵抗力ごとに得られた、最大曲率（対数表示）を説明変数としたときの座屈発生温度の回帰式の係数と決定係数を示す。

表3より道床横抵抗力を変化させた場合でも、88%以上の区間で座屈発生位置を予測できる可能性があることを示した。また、表4より最大曲率と座屈発生温度の間には、決定係数0.99程度の対数関数を介した強い関連性があることを確認した。

以上より、評価区間ごとに異なる道床横抵抗力が設定された場合でも、道床横抵抗力の値に応じて評価区間内の最大曲率から座屈発生温度を推定できると考えられる。

表3 最大曲率位置で座屈したケース数

g_0 (kN/m/レール)	最大曲率位置で座屈したケース数 (293 ケース中)
2	258 (88.1%)
6	272 (92.8%)
8	266 (90.8%)

表4 回帰式の係数と決定係数

g_0 (kN/m/レール)	a	b	決定係数
2	-26.21	-112.1	0.990
6	-52.14	-211.2	0.990
8	-62.41	-247.9	0.991

(回帰式の形式: $T_a = a * \ln \kappa_{max} + b$)

4. おわりに

本研究では、バラスト軌道のロングレールを対象とした一連のFEMによる座屈解析を行い、軌道検測車で測定した通り変位データに基づき、座屈発生温度をFEM解析よりも簡易に推定する方法について検討した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) レール締結装置の抵抗力、道床縦抵抗力、道床横抵抗力および通り変位の波高を変化させた座屈解析を行った結果、道床横抵抗力と通り変位の波高が座屈発生温度に及ぼす影響が大きく、なかでも波高の変化により座屈発生温度が鋭敏に変化することを確認した。
- (2) 通り変位の波形やその波高および波長を変化させたパラメータ解析を行った結果、波長や波高と座屈発生温度の関係は波形毎に異なるものの、波形の最大曲率と座屈発生温度の関係は、各波形で一致することを明らかにした。
- (3) 軌道検測車で測定した通り変位の復元波形をレール形状（曲線区間の場合は円曲線を付加）とした座屈解析を行った結果、軌道形状の最大曲率と座屈発生温度の間には、最大曲率を説明変数とした回帰式の決定係数が0.99程度の強い関連性があることを確認した。また、この関連性は、道床横抵抗力を変化させた場合も同様であることを確認した。
- (4) 軌道検測車で測定した通り変位をもとに、レール形状の最大曲率を計算し、これと上記(3)の回帰式を用いることで、簡易に座屈発生温度を推定する実用的な方法を示した。

今後は、道床横抵抗力やレール温度、中立温度等のばらつきなど、軌道の実状態をさらに考慮した座屈発生温度の簡易な推定手法の構築を目指していく予定である。

文 献

- 1) 沼田実：ロング・レールの座屈強さ，鉄道技術研究報告，第 721 号，1970
- 2) 宮井徹：エネルギー法による軌道座屈の数値解析，鉄道技術研究報告，第 1271 号，1984
- 3) 国土交通省監修：鉄道構造物等設計標準・同解説—軌道構造，丸善，pp.173-186，2012
- 4) 西宮裕騎，片岡宏夫：座屈発生点を考慮したロングレールの座屈安定性の評価法に関する一考察，鉄道工学シンポジウム論文集，第 20 号，pp.9-15，2016
- 5) 玉川新悟，山岡大樹，西宮裕騎：軌道検測車で測定した通り変位波形に基づくロングレールの実用的な座屈発生温度の推定法，構造工学論文集，Vol.69A，2023
- 6) 玉川新悟，西宮裕騎：FEM 解析ツールを用いた実物大軌道座屈試験の再現解析，鉄道工学シンポジウム論文集，第 23 号，pp.267-274，2019
- 7) Ramm, E.: Strategies for Tracing the Nonlinear Response Near Limit Points, *Nonlinear Finite Element Analysis in Structural Mechanics*, pp.63-89, 1981.
- 8) 梅田静也，熊崎弘：3号 PC まくらぎ用 5形改良形レール締結装置の開発，鉄道技術研究報告，第 1332 号，1986
- 9) 玉川新悟，片岡宏夫，西宮裕騎，小谷隼：分岐器介在ロングレールの横方向安定性評価の高精度化，鉄道総研報告，Vol.27, No.4, pp.11-16, 2013
- 10) 伊藤稔：ロングレールの設定温度と道床横抵抗力，新線路，Vol.50, No.4, pp.28-31, 1996
- 11) 古川敦：軌道管理からみた乗り心地向上，RRR, Vol.62, No.12, pp.10-13, 2005
- 12) 国土交通省鉄道局監修：解説 鉄道に関する技術基準（土木編）第三版，日本鉄道施設協会，2014
- 13) 竹下邦夫：偏心矢法による軌道狂い検出法，鉄道総研報告，Vol.4, No.10, pp.18-24, 1990
- 14) 吉村彰芳：軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の検討とその適用，土木学会論文集，Vol.377, pp.117-126, 1987
- 15) 小野直樹，瀧山龍三：離散点で表された曲線の曲率の計算について，テレビジョン学会技術報告，Vol.17, No.76, pp.7-14, 1993

信号用電子機器における延命対策効果の定量化手法

藤田 浩由* 高崎 建* 進藤 卓朗* 神谷 剛志*

Quantitative Evaluation Method of Lifetime Prolonging Measures for Electronic Signalling Equipment

Hiroyuki FUJITA Ken TAKASAKI Takuro SHINDO Tsuyoshi KAMIYA

There is a strong need for prolonging the lifetime of electronic signalling equipment to reduce the replacement costs. On the other hand, the availability of equipment has become an issue due to the recent shortage of semiconductors. Since the actual lifetime of electronic signalling equipment depends on the lifetime of the electronic components and solder joints with the substrates, it is possible to prolong the lifetime by selecting suitable electronic components and improving the environment of use. In this paper, a method for quantitatively evaluating the effect of lifetime prolonging measures was investigated utilizing the developed method for evaluating the lifetime of electronic signalling equipment.

キーワード：信号用電子機器，電子部品，延命対策，寿命予測，定量化手法

1. はじめに

鉄道信号設備は、列車の安全・安定運行を確保するための設備として、沿線に広く導入されている。また、信号設備の高機能化および小型化に伴い、リレー制御による継電機器から電子機器への置換えが進んで久しい。一方で、電子機器は劣化傾向の把握が困難であることが多く、導入された電子機器の更新時期の適切な設定が課題となっている。昨今では、更新にかかるコスト低減に加え、部品供給が不安定な状況への対応策として、電子機器の長寿命化に対するニーズが高まっている。

これまでに著者らは、機器室等の屋内ならびに鉄道沿線環境に設置されている信号用電子機器（以下、それぞれ屋内電子機器、沿線電子機器とする）に着目し、使用環境に応じた摩耗故障期の故障率を算出する寿命評価手法を開発した^{1) 2)}。本寿命評価手法において、信号用電子機器の耐用寿命は、構成する電子部品や基板とのはんだ接合部の寿命に依存することが示されており、電子部品の選定や構成要素の寿命に影響を与える使用環境の改善などで延命を図ることができると考えられる。

そこで、これまでに開発した寿命評価手法を活用し、延命対策の効果を定量化する手法について検討した。本稿では、寿命評価手法の概要を述べるとともに、延命対策として取り得る手段ならびに対策効果の定量化手法について、ケーススタディを実施した結果と併せて報告する。

2. 信号用電子機器の寿命評価手法

本章では、これまでに開発した信号用電子機器の寿命

評価手法の概要について述べる。

2.1 寿命評価のアプローチ

信号用電子機器は、複数の基板から構成されることが多く、各基板上に電子部品がはんだにより接合されることで回路が構成されている。したがって、電子機器全体の動作を阻害する故障は、電子部品故障、基板故障、はんだ接合部故障の3点に分類される。過去に鉄道事業者ならびに著者らにより、信号用電子機器の撤去品調査を行った結果、アルミ電解コンデンサなどの有寿命部品に明確な特性変化（劣化）を観測するとともに、沿線電子機器において温度変化に起因するはんだクラックを確認した。また、基板上の配線には錆や亀裂、断線などの特異な点は確認されなかった^{1) 2)}。ゆえに、電子部品およびはんだ接合部を寿命評価の対象部位として扱うこととした。また、撤去品調査ならびに使用環境に関する現地調査を行った結果、沿線電子機器において寿命に影響する環境ストレスについては、温湿度が支配的であることが示された²⁾。

そこで、沿線電子機器の寿命評価については、図1に示すように実装電子部品の寿命予測（部品評価）とはんだ接合部を含む基板の寿命予測（基板評価）の2つのアプローチで実施することとした。以下、2.2節に電子部品の寿命予測手法について述べる。

2.2 電子部品の寿命予測手法（部品評価）

本節では、図1に示した沿線電子機器の寿命評価手法のうち、電子部品の寿命予測手法として、主機能に影響する部品抽出、信頼性試験データの取得、使用環境条件での寿命算出の3段階について概要を示す。

* 信号技術研究部 信号システム研究室

2.2.1 主機能に影響する部品抽出

対象機器において、構成する電子部品が寿命となった場合に、当該機器の機能に与える影響度解析をFMEA (Failure Mode and Effect Analysis) の手法を用い、影響なし (Lv. 0)、動作不安定 (Lv. 1)、部分機能停止 (Lv. 2)、ユニット停止 (Lv. 3)、装置機能停止 (Lv. 4) までの5段階のレベルを定義して実施する。基本的には、レベル2以上の影響度であれば、自己診断機能により故障検出が可能である一方で、機能に影響があるため、その部品寿命を機器寿命と捉えることができる。その結果、アルミ電解コンデンサや光系素子 (フォトカプラなど) に代表される有寿命と考えられる部品、ならびに発熱の大きい部品を抽出することになる。

2.2.2 信頼性試験データの取得

抽出した電子部品について、当該部品製作メカより信頼性試験データを取得し、加速条件 (温湿度、電圧・電流)、試験時間、試料数、故障判定基準などの試験条件を把握する。ここで、後述する累積故障確率の経年変化を導出するためには、部品寿命まで試験を実施した信頼性決定試験データの取得が望ましいが、一般には公規格に基づく信頼性適合試験データのみが多い³⁾。

いずれの場合であってもメカによる既実施の信頼性試験データを活用することで、新たな加速試験の実施を不要とすることができる。

2.2.3 使用環境条件での寿命予測

信頼性試験データを実際使用環境に合わせるため、加速モデルを使用して、使用環境下での故障時間 L_1 を算出する (加速係数 AF を求め、検証時間 L_0 との積で算出)。このとき、故障メカニズムが複数想定される場合には、それぞれに対応した加速モデルにより故障時間を並列で算出し、最短時間となるものを採用する。なお、加速モデルは、機器稼働時のストレス要因に関するものを選定することとし、部品製作メカ毎にモデルが異なる場合は、対象部品の製作メカに合わせて選定することとする。アルミ電解コンデンサ、フォトカプラにおける代表的な加速モデルとして、それぞれ電解液蒸散に伴う静電容量低下を表す 10°C 2倍則 (アレニウス則の近似) を式 (1)、内蔵するLEDの輝度低下を表すBlackモデルを式 (2) に示す。

$$L_1 = L_0 \cdot 2^{\left(\frac{T_0 - T_1}{10}\right)} \quad (1)$$

$$L_1 = L_0 \cdot \left(\frac{J_0}{J_1}\right)^n \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (2)$$

ここで、 E_a は活性化エネルギー、 k はボルツマン定数、 J は電流密度、 T は絶対温度、 n は係数を示し、添え字の1は使用環境条件、0は試験環境条件を示す。

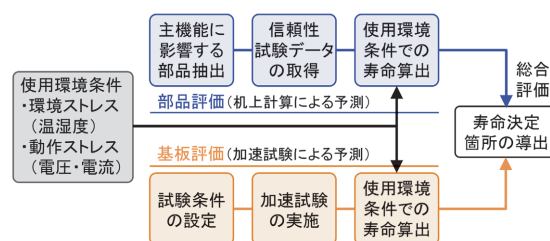


図1 沿線電子機器の寿命評価手法の概要

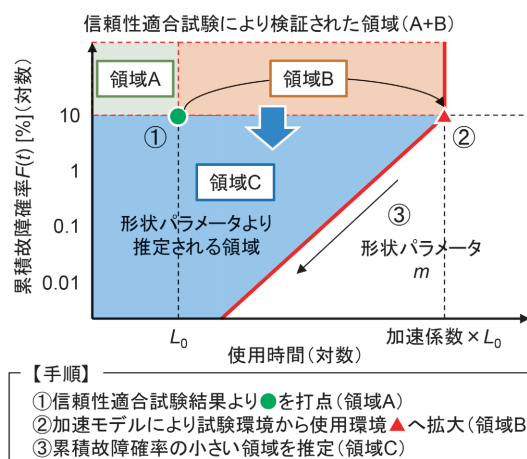


図2 信頼性適合試験に基づく累積故障確率の経年変化推定手順

また、電子部品の信頼性試験データより、検証範囲を特定する。信頼性決定試験を実施している部品の場合は、定義されている故障時間を使用する。一方、信頼性適合試験のみを実施している部品に関しては、信頼水準 (C_L) における試料数 (n) で規定される累積故障確率 ($F(t)$) の値を式 (3) より求める³⁾。

$$F(t) = 1 - (1 - C_L)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

ここで、信頼性適合試験結果より累積故障確率の経年変化を推定する手法を図2に示す。例えば、試料数22個、信頼水準90%、故障数0個の試験結果で検証可能な領域は、式 (3) より図2中のAで示される領域となる ($F(t)=10\%$)。本領域を加速モデルにより使用環境下での故障時間に拡大すると、Bの領域となる。さらに、図2に示したようなワイブルプロット上での故障分布の形状パラメータ (m) を経験的に決定し、累積故障確率の小さい領域を推定すると、検証領域はCまで拡大できることとなる。これは、Bにおいて1個目の故障が発生したと仮定し、電子部品毎に最小と考えられる形状パラメータの値を定める (経験値の中での安全側) ことで求められる最悪想定での拡大検証領域を推定したものと言える。

このように、図2の関係が得られると、任意の累積故

故障率に至るまでの時間を推定することができるため、対象部品における耐用寿命の決定を可能としている。

3. 延命対策として取り得る手段

3.1 延命対策の考え方

信号用電子機器の延命対策として取り得る手段について、対象機器の設計変更、および使用環境の見直しの大きく2種類的手段に分類し、2章で述べた寿命評価手法に基づき検討を行った⁴⁾。前者は、対象電子機器を構成する電子部品の選定や回路構成など、後者は、寿命の支配的要因である温湿度環境の改善などが該当する。以下、3.2、3.3節にそれぞれの具体的な手段について述べる。

3.2 対象機器の設計変更による対策

本対策は、電子部品の選定と回路構成の見直しを主とする。対象機器を構成する電子部品のうち、寿命評価手法にて故障に至る時間が短い部品を抽出し、抽出された部品に対して対策を行う。対策として取り得る手段については、①部品自体を長寿命対応品あるいは②信頼性試験条件の厳しいものに変更すること、③回路構成を見直すことで、部品を定格値以下で動作させるデイレージングの度合いを高めることが挙げられる。それぞれの具体的な手段を表1に示す。一方、はんだ接合部については、応力を緩和する基板設計の見直しなどの対策も挙げられる。

なお、本対策は設計変更を伴うため、既製品の延命対策にはなりにくいが、本質的な対策となることから新規設計時やオーバーホール時の手段としては有効と考える。

3.3 使用環境の見直しによる対策

本対策は、対象機器の使用環境のうち寿命の支配的要因である温湿度環境の見直しを主とする。温湿度環境の見直しは、これまでに鉄道事業者や機器製作メーカーが様々な取り組みをしており、代表的な事例では直射日光による温度上昇を防ぐための収容箱への遮蔽板設置がある。遮蔽板を設置することで、収容箱内の温度変化が緩やかとなり、日較差（最高温度と最低温度の差分）が小さくなるとともに、平均温度も若干低下することが示されている²⁾。寿命評価手法を踏まえると、上記事例のような使用環境の改善により信頼性（加速）試験条件と使用環境条件との差を大きくすることができるため、加速係数の増加分だけ対策効果が期待できる。

なお、本対策は対象機器自体への対策ではなく、使用環境による対策となるため、既製品の延命対策としても有効である。使用環境の対象を温度と湿度に区分し、具体的な対策として、温度については収容箱表面への機能性塗料の塗布などによる温度ならびに温度差低減対策

表1 設計変更による延命対策の手段

対象	手段	具体例
部品選定	長寿命対応品	保証時間（検証時間 L_0 ）が長い部品を選定 例) 検証時間 $L_0 = 1,000\text{h} \rightarrow 5,000\text{h}$
	信頼性試験条件の厳しい部品	試験での検証温度や電圧・電流が厳しい条件、あるいは試料数の大きい部品を選定 例) 試験温度 $T_0 = 105^\circ\text{C} \rightarrow 125^\circ\text{C}$ 試験電圧 $V_0 = 5\text{V} \rightarrow 6\text{V}$ 試料数 $n = 10 \text{個} \rightarrow 22 \text{個}$
回路構成	デイレージング	回路構成を見直すことで、使用条件を緩和（加速係数の増加、故障判定しきい値の緩和） 例) 使用電圧 $V_1 = 6\text{V} \rightarrow 5\text{V}$ 使用電流 $I_1 = 20\text{mA} \rightarrow 10\text{mA}$ 故障判定しきい値 初期値 -20% 低下 $\rightarrow -30\%$ 低下

を、湿度については収容箱内部への調湿材の設置などによる湿度低減対策を実施し、鉄道総研所内にて比較検証試験を行った結果を3.3.1および3.3.2項に示す。

3.3.1 温度・温度差低減対策

本項では、収容箱内部の温度ならびに温度差低減を目的に表面への機能性塗料の塗布などの対策を比較検証した結果を示す⁵⁾。

(1) 検証方法

沿線電子機器として一般的な踏切用列車検知装置用の収容箱（制御子箱）を供試体とし、表2に示す対策を実施した。供試体として用いた制御子箱は、箱本体に対して扉面と下部を除き、遮蔽板が取り付けられている。対策には、屋根用高日射反射率塗料（JIS K 5675）で規格化された近赤外線領域の光を高レベルで反射する特性を持つ高日射反射率塗料、放射冷却現象を生じさせる放射冷却塗料およびフィルムを用い、直射日光のあたる面に施工した。放射冷却塗料およびフィルムは、直射日光だけでなく収容箱内部の熱を放出する効果を持つことから、直射日光のあたる面だけでなく、箱本体にも施工した供試体を比較用に準備した。

日射による収容箱内の温度上昇の低減効果を検証するため、2022年9月29日～10月4日の6日間、鉄道総研所内において、箱内に温湿度ロガー（おんどとり TR-72wf-S, T&D 製）を設置し、空間温度を測定した。また、外気温度と照度を測定するため、百葉箱に温度および照度ロガー（おんどとり TR-74Ui, T&D 製）を設置した。なお、供試体の設置環境の均一化と現地環境を模擬するため、図3に示すように風通しの良いケース上に収容箱の扉面を南向きに揃えて設置するとともに、日射による影の影響を相互に受けにくい離隔を確保した。

(2) 検証結果

試験期間の代表として、晴天であった10月3日の温度測定結果を図4に示す。照度の変化に合わせて箱内温度も追従しており、対策なしでは箱内温度が外気温に対

表2 温度・温度差低減対策の供試体施工条件

No.	対策	施工箇所	日射反射率 [%]	放射発散度 [W/m ²]
1	対策なし (基準)	—	—	—
2	高日射反射率塗料	扉+遮蔽板	88	—
3	放射冷却塗料	扉+遮蔽板	86	100
4	放射冷却塗料	箱本体+遮蔽板	86	100
5	放射冷却フィルム	扉+遮蔽板	83	110
6	放射冷却フィルム	箱本体+遮蔽板	83	110

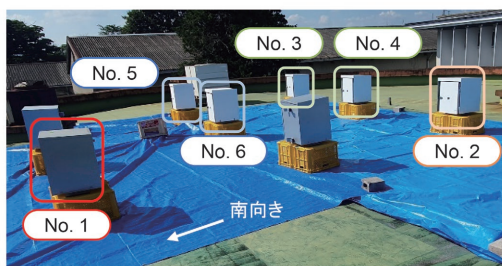


図3 供試体設置状況 (温度測定)

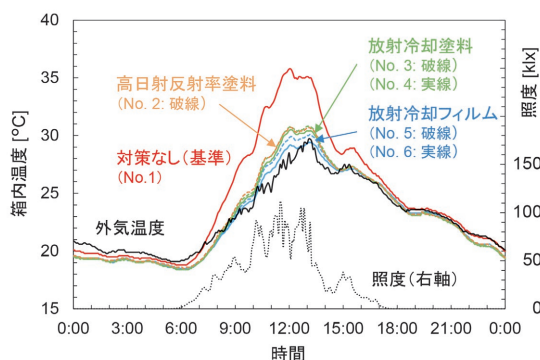


図4 温度測定結果 (10月3日, 照度含む)

して最大で7℃程度高い結果となった。対策なしを基準とすると、温度差低減につながる最大温度の抑制効果は、放射冷却フィルム (No. 6 : -6.4℃, No. 5 : -5.7℃) が最も大きく、放射冷却塗料 (No. 4 : -5.3℃, No. 3 : -5.0℃) および高日射反射率塗料 (No. 2 : -5.1℃) についても5℃程度の抑制効果が得られた。また、施工箇所による差異は、箱本体にも施工した供試体の方が1℃未満ではあるが最大温度の抑制効果が大きい結果となった。つまり、直射日光だけでなく、収容箱内部の熱を放出する効果が得られたと言える。

一方、平均温度については日射の影響がない早朝ならびに夜間時間帯において、箱内温度が外気温とほぼ同一となることから、最大温度ほどの抑制効果はないものの、概ね2℃~3℃程度の低減効果が得られた。

3.3.2 湿度低減対策

本項では、収容箱内部の湿度低減を目的に箱内部への調湿材の設置による対策を検証した結果を示す⁶⁾。

(1) 検証方法

温度・温度差低減対策の検証と同一の制御子箱を供試

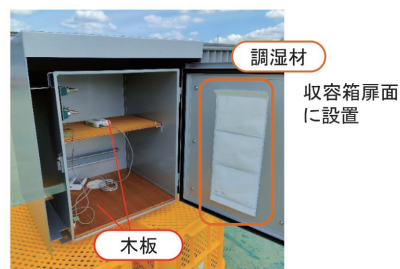


図5 供試体設置状況 (湿度測定)

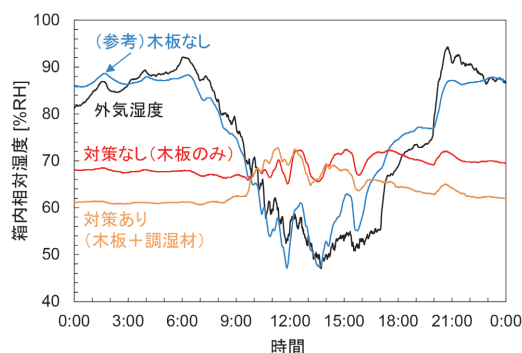


図6 湿度測定結果 (9月4日)

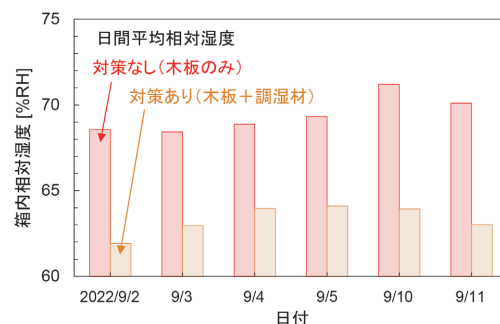


図7 湿度測定結果 (1日平均相対湿度)

体とし、調湿材の有無による箱内相対湿度の低減効果を検証するため、図5に示すように収容箱扉面の内側に調湿材 (G-プレス, NTT AT 製) を設置した。また、制御子箱は通常、内部を仕切るために木板 (ラワン合板) が用いられており、木板自体も調湿効果を発揮すると考えられるため、参考までに木板を取り外した条件でも検証を行った。なお、いずれの条件においても箱内を密閉状態とした。

検証試験は、2022年9月2日~5日、同9月10日、11日の延べ6日間実施し、測定条件は温度・温度差低減対策の検証と同一とした。

(2) 検証結果

試験期間の代表として、晴天かつ期間中最も気温の高かった9月4日の湿度測定結果を図6に示す。外気の湿度と木板なしの条件がほぼ同一の変化をしており、日中にかけての外気温の上昇に伴い相対湿度が低下する様

相となった。これは、空気中の水蒸気量がほぼ一定であるのに対し、外気や木板なしでは、温度が上昇したため見かけ上の相対湿度が低下した結果と考えられる。一方、木板のみ、および木板と調湿材を組み合わせた条件では、1日を通して相対湿度の値はほぼ一定となった。木板および調湿材については、同様の条件下においても調湿効果が作用したため、相対湿度が一定に保たれたと考えられる。また、調湿効果について日間の平均相対湿度で比較すると、図7に示すように調湿材を設置した条件の方が木板のみよりも高い調湿効果が得られ、相対湿度が5～7%程度低下する結果となった。

4. 延命対策効果の定量化手法

4.1 延命時間の定量化

3章で示した延命対策の実施効果について、定量的な評価を行うため、延命時間への換算を行う。これにより、各対策の実施効果が延命時間という同一の評価軸で比較できるため、対策の費用対効果の評価が容易となる。

延命時間の定量化にあたっては、2章で述べた寿命評価手法を活用する。対象機器の設計変更による対策において、部品選定の見直しについては、寿命評価の基準となる信頼性試験条件（試験時間、試験温度、試料数など）が変更となる。したがって、見直し前後の電子部品の信頼性試験条件を用い、寿命評価結果を比較することで、延命時間を導出することができる。一方、回路構成の見直しについては、ディレーティングによる使用電圧や故障判定しきい値などの使用条件の変更となるため、見直し前後の電子部品の使用条件を用い、上記と同様に寿命評価結果を比較することで、延命時間を導出することができる。また、使用環境の見直しによる対策においても、回路構成の見直しと同様に温湿度などの使用条件の変更となる。

すなわち、各延命対策による効果は、信頼性（加速）試験条件と使用環境条件との差分による加速係数の増加分、および試験条件における検証時間や試料数の増加分により、延命時間に換算することで定量評価が可能となる。ここで、信頼性適合試験結果より累積故障確率の経年変化を推定する手法として示した図2に基づき、加速係数および検証時間、試料数が増加した場合の検証範囲の拡大イメージを図8に示す。

4.2 ケーススタディ

本節では、延命対策の手段毎に延命時間を試算したケーススタディ結果について述べる。延命対策の手段は、部品選定の見直しにおいては長寿命対応品および信頼性試験条件の厳しい部品への変更、回路構成の見直しにおいてはディレーティング、使用環境の改善においては温

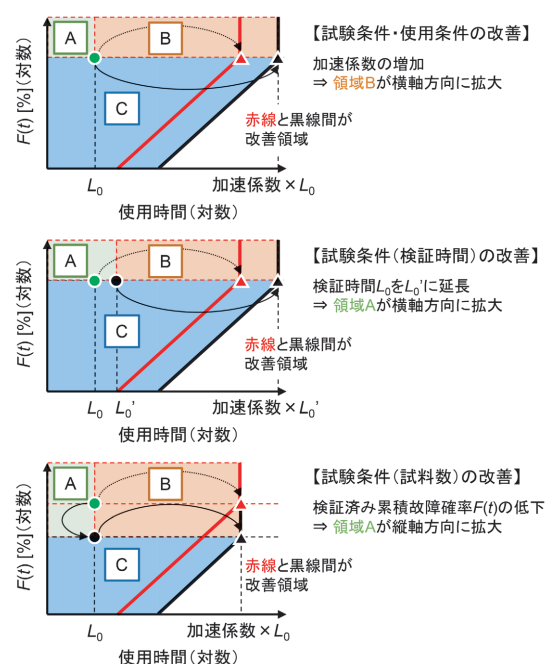


図8 加速係数、検証時間、試料数の増加に伴う検証範囲の拡大イメージ

度、湿度、温度差の低減の事例を対象とした。延命対策効果の定量化結果を表3に示す。なお、はんだ接合部以外の電子部品は、累積故障確率1%に至るまでの時間（B1 life）を試算した。

部品選定の見直しにおいては、アルミ電解コンデンサを例に、信頼性試験条件として試験時間、試験温度、試料数を変更した場合の延命時間を試算した。試験時間および試験温度の変更に対しては加速モデルとして、 10°C 2倍則である式(1)を用い、試料数の変更に対しては式(3)により、延命時間の定量化を行った。対策前の電子部品と比較して、特に長寿命対応品（1,000h品 → 5,000h品）や温度カテゴリ（ T_0 ）のランクを上げた部品（ 105°C 品 → 125°C 品）を選定することで、大幅な延命効果が期待できる結果となった。また、回路構成の見直しにおいては、フォトカプラを例に入力電流 I_F をディレーティング（20mA → 16mA）した場合の延命時間を Black モデルである式(2)を用いて試算し、加速モデルに応じた延命効果が得られることを確認した（式(2)中の電流密度 J を電流 I と読み替え）。さらに、使用環境の改善においては、3.3節で示した検証試験で得られた結果を参考に、アルミ電解コンデンサを例に温度低減（平均温度 3°C 低減）、はんだ接合部を例に温度差低減（温度差 5°C 低減）、半導体を例に湿度低減（平均相対湿度 5% 低減）した場合の延命時間を試算した。はんだ接合部については、加速モデルとして、式(4)に示す修正 Coffin-Manson 則を用い、半導体については式(5)に示す相対湿度モデルを用いた。

表3 延命対策効果の定量化結果（ケーススタディ）

対象	手段	試算対象・条件 ^{※1}	対策箇所	関係式	試算結果	
					延命時間（年） ^{※2} （対策前・対策後の 寿命予測値）	延命効果 （倍） ^{※3}
部品 選定	長寿命対応品	アルミ電解コンデンサ $L_0 = 1,000\text{h}$, $T_0 = 105^\circ\text{C}$, $n = 6$ 個, 部品 発熱 $+20^\circ\text{C}$, 収容箱平均温度 $+5^\circ\text{C}$	$L_0 = 5000\text{h}$	式 (1)	+14.2 (3.6・17.8)	5.0
	信頼性試験条件の 厳しい部品		$T_0 = 125^\circ\text{C}$	式 (1)	+10.6 (3.6・14.2)	4.0
			$n = 22$ 個	式 (3)	+1.3 (3.6・4.9)	1.4
回路 構成	ディレーティング	フォトカプラ $L_0 = 50,000\text{h}$, $I_{F0} = 50\text{mA}$, $T_0 = 40^\circ\text{C}$, 部 品発熱 $+20^\circ\text{C}$, 収容箱平均温度 $+5^\circ\text{C}$, $I_{F1} = 20\text{mA}$	$I_{F1} = 16\text{mA}$	式 (2)	+6.1 (11.0・17.1)	1.6
環境 改善	温度低減	アルミ電解コンデンサ $L_0 = 1,000\text{h}$, $T_0 = 105^\circ\text{C}$, $n = 6$ 個, 部品 発熱 $+20^\circ\text{C}$, 収容箱平均温度 $+5^\circ\text{C}$	平均温度 3°C低減	式 (1)	+0.8 (3.6・4.4)	1.2
	温度差低減	はんだ接合部 試験サイクル 500 回, $T_{0\text{max}} = 80^\circ\text{C}$, $T_{0\text{min}}$ $= -20^\circ\text{C}$, 収容箱平均温度 $+5^\circ\text{C}$ 使用環境温度差（遮蔽板無） $+10^\circ\text{C}$	温度差 5°C低減	式 (4)	+28.1 (28.5・56.6)	2.0
	湿度低減	半導体 $L_0 = 1,000\text{h}$, $T_0 = 85^\circ\text{C}$, $RH_0 = 85\%RH$, $n = 22$ 個	平均湿度 5%低減	式 (5)	+69.5 (134.1・203.6)	1.5

※1 試算条件共通：周囲の温湿度は、気象庁観測所（東京）の値を基準

※2 延命時間：はんだ接合部以外の試算結果は累積故障確率 1%に至るまでの時間（B1 life）

※3 延命効果：対策後の寿命予測値を対策前の寿命予測値で除した値

$$L_1 = L_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_0}\right)^m \cdot \left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_1}\right)^n \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_{1\text{max}}} - \frac{1}{T_{0\text{max}}}\right)\right] \quad (4)$$

$$L_1 = L_0 \cdot \left(\frac{RH_0}{RH_1}\right)^n \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (5)$$

ここで、 f は1日当たりの温度サイクル数、 ΔT は温度差、 T_{max} は最高温度、 RH は相対湿度、 m 、 n は係数を示し、添え字の1は使用環境条件、0は試験環境条件を示す。いずれも使用環境の改善に対して、加速モデルに応じた延命効果が得られることを確認した。

このケーススタディにより、延命対策の手段毎にその効果を延命時間として定量化できることが確認できた。本定量化手法を用いることで、各対策にかかる費用や実現性を考慮した実施判断が可能となると考えられる。

5. おわりに

本稿では、信号用電子機器の寿命評価手法の概要を述べるとともに、延命対策として取り得る手段ならびに対策効果の定量化手法について、ケーススタディを実施した結果と併せて報告した。

延命対策の手段として、対象電子機器を構成する電子部品の選定や回路構成の見直し、および寿命の支配的要因である温湿度環境の改善を挙げた。延命対策の実施効果については、寿命評価手法を活用し、延命時間へ換算

する手法を構築することで、各対策の実施効果が延命時間という同一の評価軸で比較できるため、対策の費用対効果の評価が容易となる。

今後、本定量評価手法や使用環境センシングによる状態監視手法⁷⁾をはじめとする寿命予測技術を活用することで、信号用電子機器のライフサイクルコストの最適化を目指す。

文 献

- 1) 藤田浩由, 丹羽順一, 新井英樹：電子連動装置の使用環境を考慮した寿命評価手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.32, No.5, pp.23-28, 2018
- 2) 国崎愛子, 藤田浩由, 野村拓也, 石井琢：鉄道沿線信号設備における電子機器の寿命予測手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.7, pp.11-16, 2020
- 3) 松岡敏成：品質保証のための電子部品の信頼性試験, 日本接着学会誌, Vol.50, No.10, pp.318-325, 2014
- 4) 藤田浩由, 高崎建, 進藤卓朗, 神谷剛志：信号用電子機器における延命対策効果の定量評価手法, 第29回鉄道技術連合シンポジウム, S2-1-1, 2022
- 5) 進藤卓朗, 藤田浩由, 神谷剛志, 高崎建, 一色竜社：信号用電子機器の温度環境改善に関する検討, 第29回鉄道技術連合シンポジウム, S2-3-4, 2022
- 6) 神谷剛志, 藤田浩由, 進藤卓朗, 高崎建, 一色竜社：信号用電子機器の湿度環境改善に関する検討, 第29回鉄道技術連合シンポジウム, S2-3-3, 2022
- 7) 藤田浩由, 椿健太郎, 高崎建, 往古直之：使用環境センシ

情報提供の観点からみた車外への避難の類型化と課題整理

斎藤 綾乃* 増田 貴之** 鈴木 浩明***

高井 唯史# 山内 香奈##

Typology of off-Train Evacuation from the Viewpoint of Information Provision and Sorting out Issues

Ayano SAITO Takayuki MASUDA Hiroaki SUZUKI

Tadashi TAKAI Kana YAMAUCHI

As a baseline study on the provision of information to enable a prompt evacuation from a train, the types of evacuation were grouped into three categories: immediate evacuation with passengers only, evacuation by remote instruction and evacuation by Staff Guidance. The web-based survey has shown that there is a certain degree of role awareness in helping fellow passengers each other during escape, and that cooperative behavior can be expected. It has also shown that those who understood instructions more clearly tended to act more immediately. Thus, it is considered important to inform passengers about their expected role, the flow of action to be taken, and the overall evacuation process.

キーワード：駅間停車，避難，情報提供，無人運転

1. はじめに

地震や車両火災など車内外の要因によって駅間に停車した列車から旅客を避難させる状況に備えて、避難を迅速なものとするさまざまな対策がとられている。避難誘導訓練、避難用器具の搭載、誘導のための係員の配備、降車方法の検討など多様な側面があるうち、本稿に述べる調査研究は、駅間に停車した列車内にいる旅客への情報提供を対象とする。

迅速な避難のためには、旅客に対して必要な情報を速やかに、かつ、わかりやすく伝えることが重要である。このため、旅客に何をどのように知らせるかを明らかにすることが課題となるが、提供すべき情報やその提供方法は、非常事態の種類や車内に搭載されている非常用設備や係員の有無などの避難に関わる状況によって異なる。そこで、まず様々な避難状況を旅客への情報提供の観点で3類型に集約した(第3章)。また、提供する内容・方法は旅客の心理・行動的な特性に基づいて決める必要がある。そこで、駅間に停車した列車からの避難を想定したWeb調査を実施し、避難が必要な状況における旅客の行動の意向や、それを規定する役割意識等を把

握した(第4章)。これらを元に情報提供について考慮すべきポイントを整理した(第5章)。本稿では、将来的な無人運転(GoA4.0¹⁾)まで視野に入れ、最も避難誘導が難しい条件として乗務員がいない場合の車外避難について検討した。ここでは、運転士や車掌など列車内にいる係員を乗務員と呼び、指令や駅係員など列車外にいる係員と区別する。ただし、列車の内外にいる係員を総称する際も係員を用いる。

2. 駅間停車時の避難に関する既存報告

駅間に停車した列車からの避難誘導については、従来より異常時対応のための体制づくりや避難訓練など各種の検討が行われているが、近年では東日本大震災や大阪北部地震、停電による長時間停車などを契機に課題の整理や提言が行われている^{2)~5)}。それらによれば、通信途絶時などには指令の許可を得ずに乗務員が避難の判断をすること、走行可能な場合には旅客を降ろさず低速で列車を駅まで走行させること、降車・誘導に必要な設備を配備することや、避難時の案内放送定型文の作成、実践的な訓練の実施、降車方法の周知、旅客への避難場所や避難経路の周知などが挙げられている。その他、降車や避難の迅速化に対する協力意識の徹底も対策として挙げられ、降車誘導への協力や旅客同士の助け合いも期待されている。

* 人間科学研究部 安全心理研究室(現 人間工学研究室)

** 人間科学研究部 安全心理研究室

*** 研究開発推進部(現 人間科学研究部)

東日本旅客鉄道株式会社

元 人間科学研究部 安全心理研究室

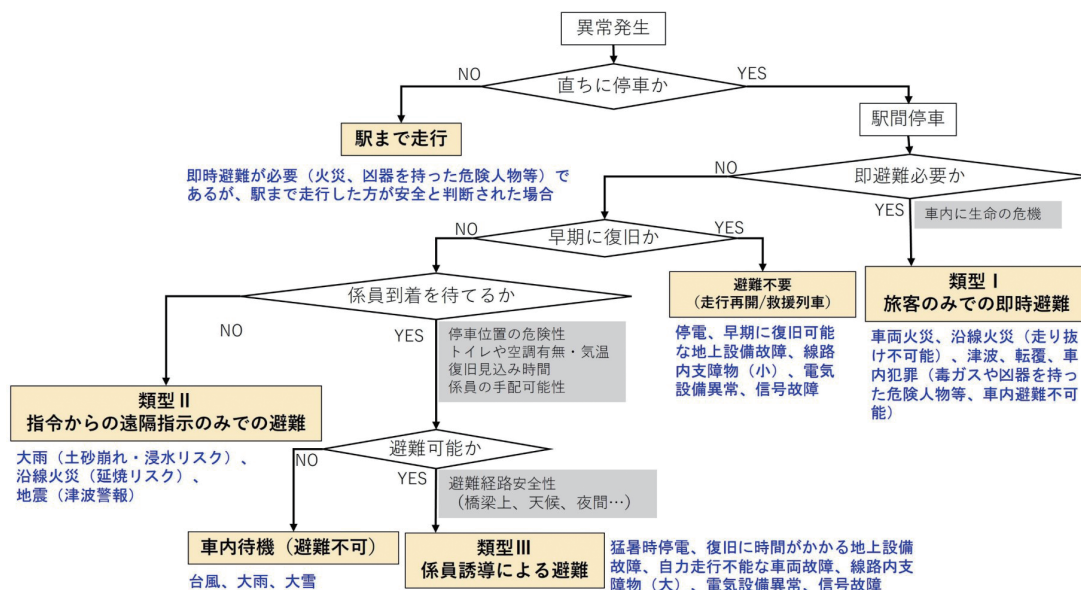


図1 避難の分類（係員が車内にいない場合）

3. 情報提供の観点から見た避難の類型化

3.1 避難の類型化

旅客に提供すべき情報の検討のためには、多様な避難状況がある程度一般化して整理する必要がある。そこで、避難誘導が最も難しいと考えられる乗務員がいない場合について、発生しうる車外避難のパターンを図1のように整理した。図1中の青文字は、分類をイメージしやすくするために典型的な異常事象を記載したものであるが、車両の構造、軌道の特徴、駅間距離、事象の規模、係員の配置などによって同じ事象でも異なる類型に分類されることもある。図中の網掛け部分は、直上の菱形内の判断に影響を与える要素の例である。

まず、異常事象の発生後に、駅間で停車する場合と駅まで走行する場合に分かれる。駅まで走行する場合は線路上への避難は生じないため本検討の対象外とする。駅間での停車は、緊急性が高く即時の避難が必要な場合と緊急性がそこまで高くない場合に分かれる。前者は例えば大火源の放火など列車内に生命の危機がある場合で、これを避難の類型Iとした。係員が駆けつける時間的余裕がないので旅客のみで避難することとなる。外部との通信が途絶する、または指令が列車の異常を把握できないなどで指令からの避難指示がないケースでは、旅客自身で避難が必要かどうかを判断しなくてはならない可能性もある。

即時の避難が必要なく、比較的短時間で運転再開が見込めたり、救援列車の併結で駅まで移動したりする場合は、車外避難は不要なので本検討の対象外とする。

復旧にある程度の時間が見込まれ、旅客を降車させる必要があると判断されれば避難・誘導のための係員が派

遣されるが、停車地点に浸水の恐れがある場合など係員到着を待つ時間的余裕がないこともある。外部との連絡が途絶えておらず、車内放送等が利用できる場合は、指令からの遠隔指示のみでの避難も起こり得る。これを類型IIとした。

係員を待てる場合は係員を待ち、避難が可能な状況であれば係員の誘導による避難となる。これを類型IIIとした。

係員が列車に到着しても、大雪などのために移動できず車内で待機をする場合もある。これは、最終的に走行再開か類型IIIに移行する。

以上のように、車外避難は、旅客のみでの即時避難（類型I）、指令からの遠隔指示のみでの避難（類型II）、係員誘導による避難（類型III）の3種類に大きく分けられる。

3.2 旅客に求められること

避難に必要な要素は、異常の検知、避難が必要かどうかの判断、避難方法に関する情報、避難の実行である。乗務員がいる列車で異常が発生すると、乗務員が自らもしくは旅客の通報によってそれを検知して列車を停車させ、状況確認と避難の検討を行う^{6) 7)}。避難が必要な場合は、指令または乗務員が指示し、係員の誘導で避難させる。乗務員がいない列車で異常が発生する場合は、自動、遠隔での状況確認や、旅客の通報などによって異常が検知され、自動もしくは遠隔で避難の必要性が判断され、派遣された係員もしくは遠隔の指示で避難すると考えられる。

乗務員の有無によらず、旅客は、通報によって異常の検知を補う、車内待機や避難の指示に従う、旅客同士が助けあうなどで避難の実行に協力している。

乗務員がいない場合について、迅速な避難のために必

表1 迅速な避難に必要な要素の具体例と避難類型別にみた起こり得る状況の例

迅速な避難に必要な要素の具体例	避難の類型		
	I 旅客のみで避難	II 遠隔指示のみで避難	III 係員誘導で避難
避難の必要性がわかる (避難指示, 異常の検知と程度の判断)	<ul style="list-style-type: none"> 指示を待って避難が遅れる 必要がないのに降車する⇒ 	<ul style="list-style-type: none"> 通報しないため避難指示がでない 指示内容がわからない⇒ 指示に従わない⇒ 	<ul style="list-style-type: none"> 係員を待たずに避難 係員から離れた車両に伝わらない
どこから出ればよいかわかる	<ul style="list-style-type: none"> (乗降ドアから避難できない線区で) 非常口がわからない⇒ 	<ul style="list-style-type: none"> 指示内容がわからない⇒ 	<ul style="list-style-type: none"> 係員から離れた車両に伝わらない
「非常口」を開けて, 車外に出られる	<ul style="list-style-type: none"> 非常口を開けられない⇒ 非常口以外から避難する⇒ 梯子が設置できない⇒ 誤った方法のため安全装置が働かない⇒ 移動制約者が避難できない⇒ 足元が暗くて降りられない⇒ 	<ul style="list-style-type: none"> 指示内容がわからない⇒ 	<ul style="list-style-type: none"> 係員から離れた車両で開けられない
どちらに行けばよいかわかる 線路上の危険がわかる	<ul style="list-style-type: none"> 間違った方向に移動する⇒ 対向車に触車, 感電する⇒ 	<ul style="list-style-type: none"> 指示内容がわからない⇒ 車外に指示が届かない 	<ul style="list-style-type: none"> 係員の誘導からはぐれてしまう
列車から離れられる	<ul style="list-style-type: none"> 滞留が発生し, 車内の人が降車でできない⇒ 	<ul style="list-style-type: none"> 指示内容がわからない⇒ 	<ul style="list-style-type: none"> 係員の誘導からはぐれてしまう

※⇒は, それより右側の類型でも起こり得ることを示す

要な要素の具体例と, それが妨げられることが起こりうる状況を避難の類型別に表1に示す。類型Iは最も厳しい条件として, 連絡手段がなく, 指令に限らず外部からの避難に関する指示や誘導が一切ない状態を想定した。表中において矢印(⇒)がついた項目は, それより右側の類型でも起こりうる状況である。

表1の第1列に示す「迅速な避難に必要な要素の具体例」の内「避難の必要性がわかる」は避難が必要な状況であることを認識し, 避難の意思決定をすることである。類型II・IIIでは避難指示によることができるが, 類型Iでは旅客自らが異常を検知し, 避難が必要かどうかを判断できなくてはならない。起こりうる状況として, 類型Iでは, 旅客が「避難が必要な場合には指示がある」と避難指示を待って逃げ遅れることや, 車外の方が危険なのに降車してしまうことが挙げられる。降車すべきでない状況での降車は類型II・IIIでも起こりうる。類型IIでは車内の状況確認を, 監視カメラやセンサの情報もしくは旅客と指令員などとの通信によって遠隔で行うが, 非対面のコミュニケーションであることや, 通報ボタンの使用には抵抗があること⁸⁾などから, 避難指示の前提となる情報が旅客から指令に十分に伝わらない可能性が挙げられる。また, 指令から車内に留まるように指示が出ても, 旅客がこれに従わずに降車してしまうことも挙げられる。類型IIIでは, 係員の到着を待たずに避難してしまうことや, 係員から離れた車両に指示が伝わらないことなどが挙げられる。

「どこから出ればよいかわかる」, 「非常口を開けて車外に出られる」, 「どちらに行けばよいかわかる」, 「列車

から離れられる」は, 避難に関する情報と実行である。非常口の場所や非常口を開ける方法がわからないために時間がかかることや, 誤って危険な方法で実行してしまうこと(例えば, 非常口と連動して作動する安全装置が非常口以外から脱出することで働かない), 方法がわかっても段差や暗さなどの困難さのために時間がかかることなどが起こり得る。場所や方法がわかることについて, 類型Iではその場の表示や既存の知識で対応しなくてはならない。類型II・IIIでは係員の指示があるが, 類型IIは遠隔のコミュニケーションであること, 類型IIIでは係員から離れた車両に旅客がいることもあるため, 指示内容が伝わるのに時間を要す可能性もある。これらの状況は, わかる人が周囲の旅客に伝えたり, 手助けしたりするといった協力行動によって, ある程度補える側面もある。

避難の判断や実行が, 類型Iではその場の表示や既存知識ででき, 類型IIでは遠隔の指示で, 類型IIIでは係員の誘導のできるような情報提供が求められる。

4. 役割意識等に関する Web 調査

4.1 調査概要

緊急時に旅客が避難指示に従うことや旅客同士の協力が得られることは迅速な避難の要件である。そこで, 乗務員がいる現状の鉄道システムにおいて旅客が「避難時に期待される可能性のある行動」をどのように認識しているか(以降, 役割意識とする), 避難指示に対する協力行動がどの程度行われそうか(以降, 協力意向とする), 避難時もしくは平常時からどのような情報が望ま

れているかを把握する目的でWeb調査を実施した。調査は、2021年12月に首都圏在住の鉄道利用者を対象として実施し、4394通回収した。調査は場面想定法（ある特定の状況を設定し、その状況における回答者の行動などを聞く方法）で行い、最も良く利用する路線を、回答者が利用する時間帯（朝の通勤時間帯もしくは昼間時間帯）での利用時に駅間停車したことをイメージしてもらった。乗務員の人数によって回答傾向が異なる可能性を考慮して、都市型ワンマン・無人運転線区利用者とツーマン運転線区利用者の2群を設定したが、回答傾向に大きな違いはなかったため全体での結果を示す。なお、乗務員がいる線区についての回答が99%以上であった。特定の年齢層に偏らないよう配慮し、20～39歳1707人、40～59歳1769人、60歳以上918人から回答を得た。男女はほぼ半数ずつであった。

駅間停車で車外への避難が必要となる状況として、変電所火災による長時間の停電（以降、停電）、トラックによる踏切支障（本報告では省略）、津波の危険がある区間での地震（以降、地震）の3種類を設定して、避難指示の理解度と、指示を受けてどのような行動をとるか（避難指示への反応）について質問した。停電と地震は避難の緊急度が違うものとして設定したもので、乗務員がいない場合であれば、それぞれ図1の類型Ⅲと類型Ⅱに対応する。

避難指示は、停電と踏切支障では先頭車両から降車するため先頭車両へ移動するよう、地震では乗降ドアを開けるので降車するよう指示するものとし、文字で提示した。指示内容の理解度を4段階（1：よくわかる、2：だいたいわかる、3：あまりわからない、4：まったくわからない）でたずねた。

避難指示への反応と協力行動については、表2に示す行動内容に対して自分がしそうかどうかを6段階（1：絶対しなさそう、2：しなさそう、3：ややしなさそう、4：ややしそう、5：しそう、6：とてもしそう）でたずねた。「4：ややしそう」以上の評価を「行動意向がある」とした。

また、図2に示すような、旅客が起こす可能性のある6種類の協力行動（鉄道事業者が期待していない行動も含まれる）について、地震時に鉄道事業者からどの程度期待されていると思うか7段階（1：まったく期待されていない、2：期待されていない、3：あまり期待されていない、4：やや期待されている、5：期待されている、6：とても期待されている、0：わからない）でたずねた。「4：やや期待されている」以上の評価を「役割意識がある」として割合を算出した。

また、避難時もしくは普段から「列車内の非常用設備や非常時にとるべき行動などについて知りたいこと」を自由に記述するよう求めた。

表2 意向を聞いた行動

行動の内容と“略称”	
避難指示への反応	率先して移動/降車する“率先避難”
	数人が動き始めてから後に続く“人に続く”
	ほとんどの人が動いてから行動する“大半行動後”
	係員が来るまでその場にいる“係員待つ”
協力行動	子どもや外国人など状況がわからない人に声をかける“声掛け（説明）”
	お年寄りなどの移動に手を貸す/降車に手間取っているお年寄りを助ける“高齢者援助”
	人々の行動を促す声掛けをする（行きましょう、あっちですよ）“声掛け（促進）”
	望ましくない行動を注意する（押し合わないで、撮影しないで）“諫める”
	声掛けする人に協力する“声掛けに協力”

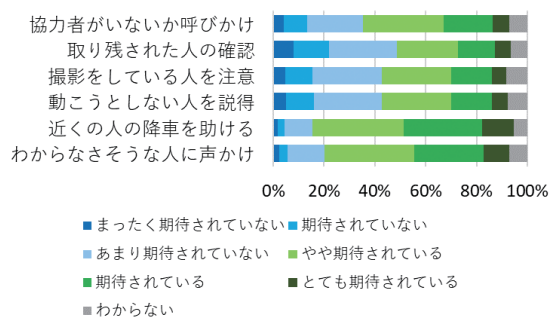


図2 事業者から期待されていると思う程度

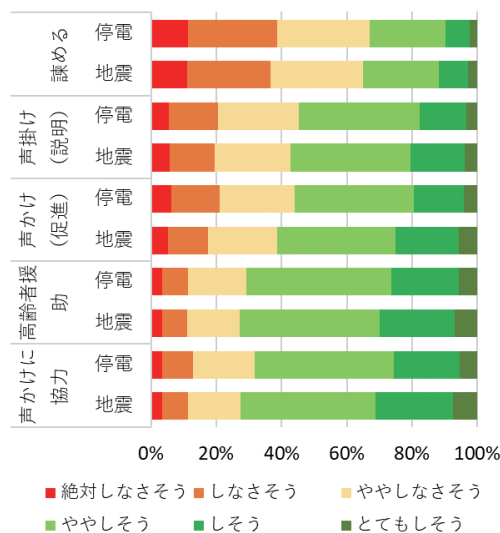


図3 協力意向

4.2 結果と考察

4.2.1 役割意識と行動意向

図2に各行動を事業者から期待されていると思う程度の結果を示す。役割意識がある人（4：やや期待されている～6：とても期待されているを選択した人の和）の割合は「近くの人を助ける（79.0%）」、「状況

がわからなさそうな人に声をかける（72.6%）」で比較的高かった。「取り残された人の確認」、「撮影を注意」、「動こうとしない人を説得」については期待されていると思う割合と期待されていないと思う割合が同程度であった。性別・年齢群別にみると、男性では若年層ほど役割意識がある人の割合が低い傾向がみられた。例えば「近くの人の降車を助ける」について、女性は20～39歳が78.9%、40～59歳が79.5%、60歳以上が79.2%であったのに対し、男性はそれぞれ73.5%、80.3%、84.8%であった。

停電や地震という具体的想定での行動についての協力意向の割合を図3に示す。「声掛けに協力」、「高齢者援助」では協力意向のある人が70%前後であった。「声掛け（促進）」や「声かけ（説明）」は協力意向のある人が55～61%であった。「諫める」は33～35%で、協力意向のない人の方が多かった。

図4に「近くの人の降車を助ける」ことを期待されていると思う程度別に地震を想定した場合の「高齢者援助」の協力意向を示す。期待されていると思うほど、手助けをする意向も高い傾向がみられた。啓発などによって役割意識が明確になることで協力行動がより生起するようになることが期待できる。

4.2.2 避難指示の理解度と対応

避難指示の理解度は、「よくわかる」が停電で46.7%、地震で36.8%、「だいたいわかる」がそれぞれ45.0%、49.0%、「あまりわからない」が6.1%、10.8%、「まったくわからない」が2.2%、3.4%であった。地震時の方が停電時より「よくわかる」が少なく、「あまりわからない」が多かったのは、指示された行動（乗降ドアから地面に降車する）をイメージできる人が相対的に少なかったためと考えられる。

避難指示への反応（表2）について意向のある人の割合は、「率先して避難」が停電で75.0%、地震で75.9%、「人に続く」がそれぞれ80.7%、77.9%、「大半行動後」が47.5%、43.9%、「係員待つ」が22.6%、19.8%であった。「人に続く」の割合が最も高かった。

図5に避難指示の理解別に避難指示への反応を示す。避難指示が「よくわかる」人では「率先避難」の意向が高く（停電時84.2%、地震時85.0%）、「大半行動後」は低い（41.2%、36.3%）。「だいたいわかる」人では、「人に続く」意向が最も高い（83.5%、82.5%）。「わからない」人も最も高いのは「人に続く」であるが、「大半行動後」が過半数（59.2%、57.1%）を占めた。避難指示の理解度が高いほど「率先避難」の意向が高い傾向がみられた。この調査から因果関係には言及できないが、不確実な状況下では人は同調行動をとる傾向がある⁹⁾ことから、避難指示を理解しやすいものとする事で率先行動をする人が増える可能性がある。この確認には避難指示文言を

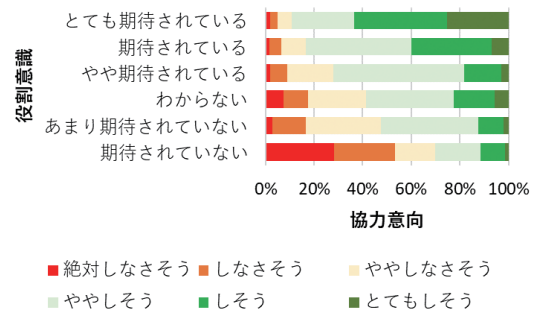


図4 降車の手助けについての役割意識と協力意向

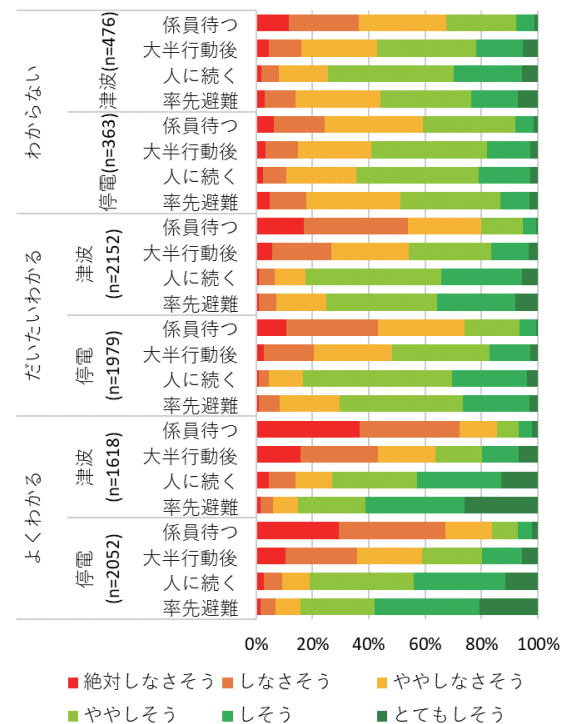


図5 避難指示の理解度別に見た指示への反応

「あまりわからない」「まったくわからない」はまとめて示す

操作する実験が必要である。その際、今回は避難指示を文字で提示したが、車内放送と同様に音声で提示することが望ましい。

4.2.3 情報提供に対する要望

避難時もしくは普段から知りたい情報として最も多く記述されたのが「何をすればよいかの一連の流れ（約1600件、回答者の36%）」であり、旅客機で提示される安全ビデオのように具体的な行動を示す啓発を求める記述（約400件）と合わせると約2000件（同46%）であった。非常設備の場所や使用法が約830件（19%）、小まめなアナウンスを求めるものが約460件（10%）、どのような場合に通報や避難が必要であるかといった非常の判断基準を示してほしいというものが約230件であった。してはいけないことや注意点を知りたいというものが約120件であった。非常時に指示があるのかな

いのかや、係員が何をしてくれるのかなど、係員の対応について知りたいという意見が約70件、旅客に期待される行動として何をどこまでやればよいかを知りたいという意見が約60件であった。その中には、「高齢者に手を貸すべきか、余計なことをしない方がよいのか」、「鉄道事業者側の作業に支障が出る行為にならないかを考えて躊躇する」のような記述があり、旅客が行ってよいかどうかの懸念が協力行動の妨げになっている可能性が示唆された。

4.3 旅客調査のまとめ

都市圏の乗務員がいる線区を対象とした場面想定法調査により、以下のことが示された。

- ・地震時を想定した際に高齢者などの降車の手助けを鉄道事業者から期待されていると感じる人は79.0%であった。他者を諫めることを期待されているとする人の割合は低かった。
- ・地震を想定した際に避難指示後に率先して移動しようとする人の割合は、全体で75.9%であるが、避難指示の理解度が高い人では高く(85.0%)、避難指示の内容をわからない人では低かった(55.9%)。
- ・提供を望む情報として、何をすればよいかの一連の流れが多く挙げられた。非常設備の場所や使用方法や使用の基準の他、係員の対応や旅客に期待される行動が知りたいという意見が一定数記述された。

5. 知らせるべき内容に関する考察

駅間停車した列車からの避難時に、高齢者などの降車の手助けや声かけなどをする事について、事業者からある程度期待されていると感じる人が回答者全体の70%以上を占め、停電や地震を想定した避難状況において降車の手助けや声掛けをしようとする割合も70%前後であったことから、旅客に一定程度の協力に関する役割意識があることが示された。その一方で「余計なことをしない方が良いのではないか」といった懸念が協力行動を抑制する可能性が示唆された。事業者から期待される協力行動を知りたいという直接的な記述や、何をすればよいか知りたいとの意見が多いことから、旅客に期待される行動を明確に示すことが望まれている。役割意識が強いほど協力意向も高かったことから(図4)、協力を求める具体的内容について検討する必要はあるが、旅客の役割意識を高める啓発によって、協力行動も促進されることが期待できる。なお、大阪北部地震時に駅間停車を経験した旅客に対する調査¹⁰⁾では、乗務員からの協力要請に今後応える意向を示した旅客は97%であったのに対し、自ら援助行動を行った人は15%であった。援助行動にはきっかけが必要であり、車内放送等で

の要請の重要性が示唆されている¹⁰⁾。

旅客が求める情報として、避難を含む非常時の対応の一連の流れや全体像が挙げられた。全体像とは、避難指示の有無や、係員がどのような対応をするかの他、例えば駅間停車に対して、低速で駅まで走行する場合と降車する場合があるというような大きな枠組みのことである。一般に、緊急時には人間の情報処理能力が低下するが、その一例が注意の一点集中であり、引いて開けるドアを押し続けて逃げ遅れた事例が紹介されている⁹⁾。ドアを開ける方法として押すことだけに注意が集中し、引いてみるという発想の転換ができなかったものである。低速で最寄り駅まで移動できる状況であるにもかかわらず、「ドアの開け方」という部分的な知識のみが啓発によって印象に残っていると、「ドアを開けて降車する」以外の行動を思いつかなくなるということも考えられる。列車のまま駅まで移動することについても啓発することが望ましい。

個々の非常用設備の使用法を知りたいという要望も多く挙げられた。これらについては別途検討を行っており、事前の映像視聴などの支援によって避難用梯子の組立時間が短縮されることなどを確認している¹¹⁾。

避難指示内容をよく理解する人ほど、率先して行動する意向が高かった。普段からの啓発や避難誘導時の指示文言の検討により、いざというときに避難指示を理解しやすい状況を作っておくことが、迅速な避難のために有効と考えられる。一部の人が指示に従った行動を率先してとるだけでも、どうすべきかわからない人にとっては、その人が追従する対象となり、避難開始までの時間短縮が期待できる。

旅客と鉄道事業者のような利用者とりスク管理者間の協力連携に必要なこととして、「社会的現実の共有化」と「制度信頼の向上」が考えられる(池田¹²⁾)。「社会的現実の共有化」とは、例えば、車外避難が必要になる場合があること、旅客が適切な行動をとることで、被害の拡大を防げることなどを旅客が認識することである。「制度信頼」とは、鉄道の係員という存在に対しての信頼と鉄道システムに対しての安心が結びついた、鉄道事業者に対する信頼である。鉄道総研では、制度信頼を高める方策も検討しており、異常時の対処行動に関する啓発動画が、鉄道事業者に対する信頼を高めることに役立つことを明らかにしている¹³⁾。

避難の前提となる異常の検知については旅客による発見と通報の果たす役割も大きいと考えられるが、通報の必要性を認識しても実際に非常通報ボタンを押すことには抵抗があることが報告されている⁸⁾。通報を促進するための対策についても別途検討している¹⁴⁾。

6. まとめ

迅速な車外避難を可能とするための情報提供に関する基礎検討として、乗務員がいない場合の避難状況を、旅客のみでの即時避難（類型Ⅰ）、遠隔指示による避難（類型Ⅱ）、係員の誘導による避難（類型Ⅲ）の3類型に集約した。駅間停車を想定させたWeb調査により、降車の際の助け合いにある程度の役割意識があり、協力行動も期待できることが把握された。役割意識を高めることによって協力行動が促進され、迅速な避難につながる可能性があることが示唆された。避難指示が示す意味内容を理解できる人ほど率先して避難する傾向があることが示され、この点においても避難指示をわかりやすいものとするのが重要であると考えられた。迅速な避難のために、旅客に期待する行動や、避難に関する一連の流れ、避難の全体像を知らせることが重要であると考えられる。

文献

- 1) JIS E3802：自動運転都市内軌道旅客輸送システム（AUGTシステム）—安全要求事項，2012
- 2) 津波発生時における鉄道旅客の安全確保に関する協議会：津波発生時における鉄道旅客の安全確保に関する協議会報告書，2013
- 3) 大規模地震発生時における首都圏鉄道の運転再開の在り方に関する協議会：大規模地震発生時における首都圏鉄道の運転再開の在り方に関する協議会報告書，2012
- 4) 国土交通省：大阪北部地震における運転再開等に係る検討，2018
- 5) 国土交通省：猛暑時の停電による駅間停車への対応についての取りまとめ，2019
- 6) 岡景則：列車内での火災対応に関する乗務員教育体制の構築，JREA，Vol.60，No.6，pp.41335-41338，2017
- 7) 坂下修，小川陽久：山間部における列車乗務員の地震対応に関する研究，JREA，Vol.61，No.6，pp.42289-42292，2018
- 8) 大道環，高須洋，堀下智子：お客さまへの効果的な協力要請，働きかけ方の研究，あんけん，Vol.3，pp.26-31，2010
- 9) 古田富彦：安全・危機管理に関する考察（その2）—緊急時の人間行動特性—，国際地域学研究，第6号，pp.239-254，2003
- 10) 西日本旅客鉄道株式会社安全研究所：異常時におけるお客様対応に関する調査レポート—2018年大阪北部地震を振り返って—，2021
- 11) 山内香奈，小野間統子，増田貴之，石突光隆，對馬銀河，北村康宏，佐藤文紀，菊地史倫：自動運転列車の非常はしごの設置支援に関する基礎検討，日本心理学会，第84回大会，2020
- 12) 池田謙一：行政に対する制度信頼の構造，年報政治学，010-1，pp.11-30，2010
- 13) 山内香奈，増田貴之：電車内での安全啓発動画の視聴効果に関する基礎的検討—鉄道事業者に対する社会的信頼の促進効果—，日本心理学会，第85回大会，2021
- 14) 増田貴之，斎藤綾乃：旅客の呼出しボタン使用の促進／抑制要因—啓発メッセージの効果の検討—，人間工学会第63回大会，2022

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

谷村幸裕

■企画・監修

川崎邦弘	長倉 清	日比野有	高橋紀之
石毛 真	神田政幸	重枝秀紀	桃谷尚嗣
布川 修	新井英樹	福田光芳	松井元英
上半文昭	斉藤実俊	水上直樹	富田 優
小島謙一			

鉄道総研報告 第37巻 第9号

2023年9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

©2023 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. 37 No. 9

Sep. 2023

PAPERS

- Cage Wear Prediction Based on Measurement of Contact Force between Rolling Element and Cage in Traction Motor Bearings in Railway Vehicles
..... D.SUZUKI, K.TAKAHASHI, F.ITOIGAWA, S.MAEGAWA, Y.OKAMURA (1)
- Automating Visual Inspection for Underfloor Equipment of Railway Vehicles Using On-Track Cameras
..... T.KOJIMA, K.MIYAHARA, A.KAZATO, M.UKAI (9)
- Method for Estimating Bending Stiffness of Concrete Girder during Train Passage Considering Effects of Concrete Cracks and Non-Structural Member
..... M.TOKUNAGA, M.IKEDA (17)
- Simple Estimation Method of Buckling Temperature of Continuous Welded Rail Considering Lateral Track Irregularities
..... D.YAMAOKA, S.TAMAGAWA, Y.NISHINOMIYA (25)
- Quantitative Evaluation Method of Lifetime Prolonging Measures for Electronic Signalling Equipment
..... H.FUJITA, K.TAKASAKI, T.SHINDO, T.KAMIYA (33)
- Typology of off-Train Evacuation from the Viewpoint of Information Provision and Sorting out Issues
..... A.SAITO, T.MASUDA, H.SUZUKI, T.TAKAI, K.YAMAUCHI (41)

