

鉄道総研報告

第39巻 第1号

2025年1月

論文

- 車両** ロングシート着座乗客の傷害度との相関に基づく鉄道車両の衝突安全性評価方法
..... 中井一馬, 沖野友洋, 榎並祥太, 永田恵輔 (1)
- 車両** **電気** 電車線振動解析によるパンタグラフ接触力測定法へのスパースモデリングの活用
..... 臼田隆之, 山下義隆, 高橋正樹 (11)
- 施設** 携帯情報端末を活用した低コストな列車巡視支援方法の開発
..... 田中博文, 趙博宇, 蘇迪, 長山智則 (21)
- 施設** 数値解析に基づく沿線地盤振動の低減対策の提案方法
..... 野寄真徳, 横山秀史 (29)

ロングシート着座乗客の傷害度との相関に基づく 鉄道車両の衝突安全性評価方法

中井 一馬* 沖野 友洋**
榎並 祥太* 永田 恵輔**

Method for Evaluating Crashworthiness of Railway Vehicles Based on Correlation
with Injury Severity of Passengers Occupying Longitudinal Seats

Kazuma NAKAI Tomohiro OKINO
Shota ENAMI Keisuke NAGATA

It is important to enhance the safety of passengers on board railway vehicles in the event of a collision. The railway vehicle standard in European countries and the U.S. provides a framework for structural crashworthiness design. On the other hand, there is still no established method for evaluating the crashworthiness design of railway vehicles in Japan. The aim of this study is to propose a safety index for railway vehicles with longitudinal seats. The severity of passenger's head injury in a level crossing accident was estimated using numerical simulation. The correlation between the injury severity of an Anthropomorphic Test Device (ATD) model and the safety indices of vehicles, that is, the integral of the deceleration waveforms, the mean deceleration waveforms and the maximum waveforms, was compared. It was found that the integral of the deceleration values had the highest correlation with the injury values of ATD. We proposed the integral of the deceleration as a method for evaluating the crashworthiness design of railway vehicles with longitudinal seats.

キーワード：鉄道，踏切事故，衝突安全，ロングシート

1. はじめに

日本国内において，鉄道車両の車体構造の設計基準は衝突事故を想定しておらず，「衝突安全性を評価するための指標」が明示されていない¹⁾。一方で，欧米では車体の衝突安全性に関する設計基準が規定されている。例えば欧州では，列車同士の衝突事故（衝突速度 36km/h）を含む複数の事故シナリオを想定して，衝突時に車内に発生する平均減速度などを指標としている²⁾。また米国では，列車同士の衝突事故（衝突速度 48km/h）を想定して，車内に発生する減速度の最大値などを指標としている³⁾。これらの各指標には，それぞれ限度値が設定されているが，想定する事故シナリオや評価指標などは，各国の鉄道システムや過去の事故事例などに基づいて設定されており，様々である。

日本国内で発生した衝突事故事例を調査すると，列車同士の衝突事故は他の事故と比較して寡少であり⁴⁾，踏切での自動車との衝突事故が多い。また，後者の原因に関しては，自動車が直前に横断するなど，未然に防ぐことが困難な状況にある。したがって，自動車との衝突事

故は，国内では検討対象として優先度の高い事故シナリオであると考えられる。また，車体構造の耐衝突性に関する研究は国内でもみられるが^{5)~8)}，車両の衝撃吸収構造の検討や衝突実験の解析による現象再現に留まっており，設計基準設定に資する知見は極めて少ない。

本報告では，国内で過去に発生した主要な踏切事故の統計的調査結果を基に設定した，列車の衝突速度や衝突位置などを変化させた条件でロングシート着座乗客の傷害度解析を行い，シート端部に設置される袖仕切りとの2次衝突時の頭部傷害の程度を推定した（袖仕切りとの2次衝突で頭部の傷害発生リスクが高いことが確認されている⁴⁾）。また，沖野らが回転リクライニングシートに着座した乗客を対象として提案した「衝撃減速度の積分値」⁹⁾（以後，減速度積分値），欧米の指標である「平均減速度」及び「最大減速度」と推定された傷害度との相関を比較することで，国内の実情に即した車体構造の衝突安全性評価指標と限度値を提示する。実際の踏切事故を想定した様々な条件で，ロングシート着座乗客を対象とした客室内の安全性を欧米の指標で評価し，乗客の傷害度を判断基準として車体構造の評価指標の妥当性を検証した報告例はない。そのため，これらの検証結果は，我が国における車両の衝突安全性に関する設計基準の設定に資する重要な知見となる。

* 人間科学研究部 人間工学研究室

** 車両技術研究部 車両強度研究室

2. 様々な踏切事故条件下での客室の安全性評価

本報告では、数値解析を用いて「踏切事故解析」と「乗客傷害度解析」を組み合わせて安全性評価を行った。前者の数値解析では列車モデルを様々な条件で大型ダンプカーモデルに衝突させて、列車モデルに発生する衝撃減速度波形を出力した。後者の数値解析ではロングシートモデルに乗客モデルを着座させ、ロングシートモデルを含む車内設備モデルに踏切事故解析で得られた減速度波形を入力することで、事故時の車内状況を再現した。

「踏切事故解析」には、沖野らが構築したモデル¹⁰⁾を用いた。解析モデルは、標準的なステンレス鋼製車体構造である列車モデルと、大型ダンプカーモデルで構成されている(図1)。本解析モデルを用いて、静止状態のダンプカー側面への列車衝突速度、左右衝突位置、衝突角度、上下衝突位置と積荷質量を入力パラメータとして、ダンプカーへ衝突した際の列車客室の(列車進行方向に対する)衝撃減速度波形を出力した。これらの波形から、欧州基準に準拠した「平均減速度」²⁾、米国基準に準拠した「最大減速度」³⁾、沖野らが提案した「減速度積分値」⁹⁾のそれぞれを車体構造の評価指標として算出した。

「乗客傷害度解析」には、筆者らが構築したロングシートに着座した乗客の傷害度を推定するための乗客傷害度解析モデル¹¹⁾を用いた。本解析モデルは、乗客を模した人体ダミーモデル(自動車業界で身体側面からの衝撃を評価するために開発されたES-2ダミーの剛体モデル)と、実際に列車内で用いられているロングシートとロングシート端部に配置される袖仕切りなどの車内設備モデルで構成した(図2)。本モデルは、上記踏切事故解析から出力された列車客室の衝撃減速度波形を入力することで、その際の頭部の傷害度を出力可能である。図2は、袖仕切りから3席目にダミーモデルを着座させた



図1 列車モデルとダンプカーモデル

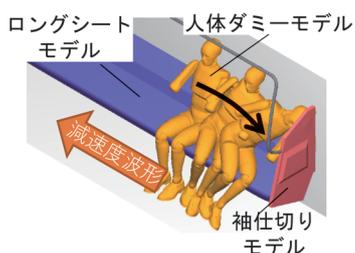


図2 人体ダミーモデルとロングシートモデル

条件で、ダミーモデルが倒れ込みながら袖仕切りに2次衝突している例である。

「踏切事故解析」から得られた4つの評価指標(後述する2種類の平均減速度、最大減速度、減速度積分値)と「乗客傷害度解析」より得られた頭部傷害度を比較することで、乗客傷害度と相関の高い評価指標を検討した。

2.1 踏切事故解析の条件と評価指標

列車衝突速度、左右衝突位置、衝突角度、上下衝突位置と積荷質量を組合せて全37シナリオの踏切事故解析を行った(表1)。基本条件Case1-1は図1に示すように、左右衝突位置は列車の中心線をダンプカーの積荷中央と一致させ、衝突角度は列車とダンプカーの進行方向を直角に配置し、上下衝突位置は列車の台枠下面がダンプカーの荷台下面よりも355mm低くなる位置(以後、基準高さ)とし、積荷質量は11,000kgとした。Case1-2~1-5は左右衝突位置が異なる条件群であり、Case2-1~2-4は衝突角度、Case3-1~3-3は上下衝突位置、Case4-1~4-5は積荷質量がそれぞれ異なる条件群を表している。

列車衝突速度は、20km/h、30km/h、40km/h、54km/h、60km/hの5条件とした。なお、54km/hは、1987年度から2010年度までに国内で発生した踏切における重大事故の推定衝突速度の平均値に対応する¹²⁾。左右衝突位置は、列車の中心線がダンプカーと衝突する位置として、積荷の中央、積荷含むダンプカー全体の重心、ダンプカーのキャビン重心、ダンプカーの積荷最後尾(列車車体幅の半分が重なるラップ条件)、積荷の最後尾から750mm後方へずれた位置(列車車体幅の1/4が重なるラップ条件)の5条件とした。衝突角度は、積荷中央位置を回転軸としてダンプカーの運転台を列車に近づける方向への回転を正方向と定義して、列車とダンプカーの進行方向が直角の条件を0度とし、これを含めて±5度および±10度の5条件とした。上下衝突位置は、基準高さ、基準高さよりダンプカーが177mm低い位置、基準高さよりダンプカーが354mm低い位置(列車の床構体とダンプカーの荷台主枠の中央高さ位置を揃えた条件)、基準高さよりダンプカーが512mm低い位置(列車の床構体下面とダンプカーの積荷下面の高さ位置を揃えた条件)の4条件とした。積荷質量は、0kg、2,750kg、5,500kg、8,250kg、11,000kg、13,750kg(25%の過積載を想定)の6条件とした。なお、表1に示す列車衝突速度が54km/hの条件(Case1-1_54km/h~Case1-5_54km/h、Case2-1_54km/h~Case2-4_54km/h、Case3-1_54km/h~Case3-3_54km/h、Case4-1_54km/h~Case4-5_54km/h)については、「踏切事故解析」と「乗客傷害度解析」を既に実施しており、ロングシート乗客の被害度に及ぼす影響因子を明らかにして、文献13において報告している(文献13に記載した内容の一部を3.1節で示す)。

列車内での乗客の乗車位置による影響を組み込むため、各シナリオについて、列車客室の前方、中央部および後方の3カ所を評価対象とし、減速度波形を全111(37×3)出力し、各波形から2種類の「平均減速度」、「最大減速度」、「減速度積分値」の4つの評価指標を算出した。2種類の「平均減速度」は、減速度波形の30ms区間と120ms区間の移動平均の最大値とする指標²⁾であり、以後それぞれ「30ms平均減速度」、「120ms平均減速度」と呼ぶ。また、「最大減速度」は、50Hzのローパスフィルタ処理をした減速度波形の最大値とする指標³⁾である。「減速度積分値」は、減速度波形を2回積分した値が、ダミー初期着座位置と袖仕切りまでの距離(図3参照、

1席目:277mm, 2席目:690mm, 3席目:1150mm, 4席目:1610mm)と同値になる時刻 t_{imp} までの減速度波形を1回積分した値である。つまり t_{imp} は、乗客が袖仕切りに2次衝突するまでの推定時間に相当する。

2.2 乗客傷害度解析の条件と傷害指標

乗客の初期着座位置が袖仕切りとの2次衝突時の傷害度に与える影響を評価するため、ダミーモデル1体を、袖仕切りに対して1席目から4席目まで着座させる条件を設定した(図3)。シート1人分の座幅を460mmとして、その中心が頭部中心となるよう配置した。但し、1席目条件については、ダミーモデルの体格が大きいた

表1 踏切事故解析の条件

解析条件	衝突速度 [km/h]	左右衝突位置	衝突角度 [degree]	上下衝突位置	積荷質量 [kg]
Case1-1_20km/h Case1-1_30km/h Case1-1_40km/h Case1-1_54km/h Case1-1_60km/h	20 30 40 54 60	積荷中央	0	基準高さ	11,000
Case1-2_40km/h Case1-3_40km/h Case1-4_40km/h Case1-5_40km/h	40	ダンプカー重心 キャビン重心 1/2 ラップ 1/4 ラップ	0	基準高さ	11,000
Case2-1_40km/h Case2-2_40km/h Case2-3_40km/h Case2-4_40km/h	40	積荷中央	+5 -5 +10 -10	基準高さ	11,000
Case3-1_40km/h Case3-2_40km/h Case3-3_40km/h	40	積荷中央	0	基準高さ-177mm 基準高さ-354mm 基準高さ-512mm	11,000
Case4-1_40km/h Case4-2_40km/h Case4-3_40km/h Case4-4_40km/h Case4-5_40km/h	40	積荷中央	0	基準高さ	0 2,750 5,500 8,250 13,750
Case1-2_54km/h Case1-3_54km/h Case1-4_54km/h Case1-5_54km/h	54	ダンプカー重心 キャビン重心 1/2 ラップ 1/4 ラップ	0	基準高さ	11,000
Case2-1_54km/h Case2-2_54km/h Case2-3_54km/h Case2-4_54km/h	54	積荷中央	+5 -5 +10 -10	基準高さ	11,000
Case3-1_54km/h Case3-2_54km/h Case3-3_54km/h	54	積荷中央	0	基準高さ-177mm 基準高さ-354mm 基準高さ-512mm	11,000
Case4-1_54km/h Case4-2_54km/h Case4-3_54km/h Case4-4_54km/h Case4-5_54km/h	54	積荷中央	0	基準高さ	0 2,750 5,500 8,250 13,750

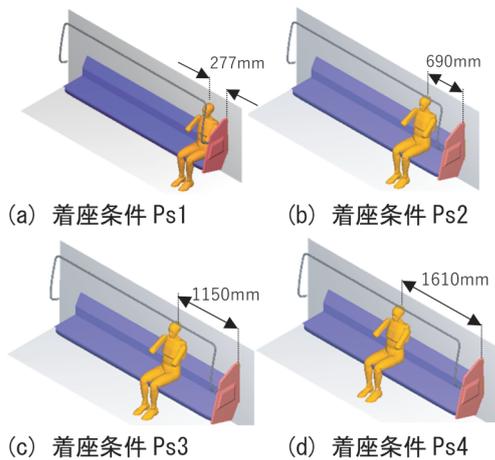


図3 初期着座位置

め、座幅中心に着座させることが出来ないため、中心よりも47mm袖仕切りから遠い側に着座させた。これらの着座条件毎に、前節で述べた111の減速度波形を入力することで、全444条件の解析を実施した。

頭部の傷害度、袖仕切りとの2次衝突時の列車進行方向の頭部速度（以後2次衝突速度と呼ぶ）をダミーモデルから算出した。頭部の傷害度については、保安基準¹⁴⁾で規定されているHead Performance Criterion（前面方向からの頭部傷害指標であるHead Injury Criterionと同じ計算方法であることから、以後HICと呼ぶ）を指標として用いた。数値が大きいほど傷害発生リスクが高まる指標であり、限度値として1000が規定されている。HICはダミー頭部の並進3方向の合成加速度から式(1)を用いて算出した。本報告ではHICとその限度値1000を用いて傷害度の評価を行った。

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt}{(t_2 - t_1)} \right]^{2.5} \right\}_{max} \quad (1)$$

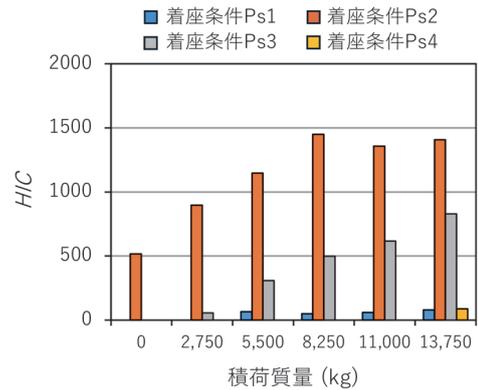
$$|t_1 - t_2| \leq 36ms$$

$a(t)$: 頭部の並進3方向の合成加速度 [G]

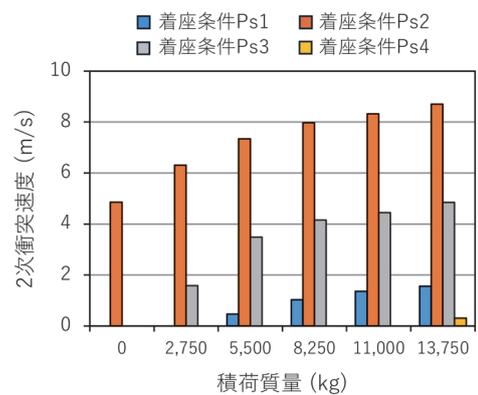
t_1, t_2 : 衝突中の任意の時間

3. 乗客傷害度解析の結果と評価指標の検討

全444条件のうち頭部が袖仕切りに2次衝突する挙動が確認されたのが375条件（1席目：81条件，2席目：111条件，3席目：111条件，4席目：72条件）であり、これらのうちHICが50（限度値1000に対して5%の値）に達しない条件が75条件みられた。本報告では2次衝突する挙動が確認されかつHICが50以上となる300条件（1席目：62条件，2席目：111条件，3



(a) 頭部傷害値 HIC の比較



(b) 2次衝突速度の比較

図4 積荷質量による評価（列車衝突速度40km/h）

席目：87条件，4席目：40条件）を対象として評価した。

3.1 積荷質量が乗客傷害度に及ぼす影響の評価

前述のとおり、筆者らは「踏切事故解析」と「乗客傷害度解析」の結果を用いて、列車衝突速度が54km/hの条件（表1において衝突速度が54km/hの条件）では、積荷質量が乗客の傷害度に及ぼす影響が大きいことを示した¹³⁾。本節では、列車衝突速度が40km/hの条件の結果を用いて、積荷質量が乗客の傷害度に及ぼす影響について評価した（Case1-1_40km/h, Case4-1_40km/h～Case4-5_40km/h）。各条件において列車客室の前方，中央部および後方の減速度波形を入力した際のHICと2次衝突速度の平均値を算出して比較した。

積荷質量とHICおよび2次衝突速度の関係を図4に示す。全般的には、積荷質量が大きくなるとHICと2次衝突速度は高まる傾向がみられた。しかしながら、2席目の着座条件では積荷質量が大きくなると2次衝突速度が高まるにも関わらず、11,000kg以上でHICは高まらず低下する傾向がみられた。列車衝突速度が54km/hでも2席目の着座条件で、同様の傾向が確認されている¹³⁾。これらの条件において、2次衝突直後に頭部が袖

仕切り上部を越える挙動（以後、「跨ぐ」と表現する）が確認され、この挙動により2次衝突時に頭部に発生する加速度が抑えられたことが原因であると考えられる（4.1節で詳細に述べる）。

3.2 減速度積分値による評価

図5に2.1節で示した「減速度積分値」とHICとの関係を初期着座位置毎に図示し、限度値も併せて示した。1席目の着座条件では全条件で限度値を大きく下回り、4席目では1条件のみ限度値を上回った一方で、2席目では77条件で、3席目では31条件で限度値を上回った。今回実施した事故シナリオの範囲内では、1席目・4席目と比較して2席目・3席目の頭部傷害発生リスクが高く、2席目が最も高くなる傾向がみられた。全般的

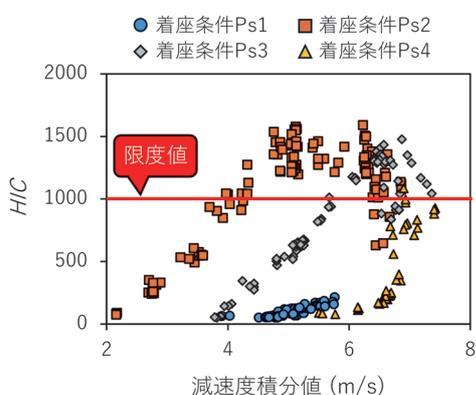


図5 減速度積分値とHICの比較

には、どの着座条件においても減速度積分値が大きくなるとHICも高くなる傾向が確認されたが、2席目については、減速度積分値が5m/s付近を越えるとHICはそれ以上高くなり、低下する傾向が確認された。これは、3.1節で述べたのと同様に2次衝突直後に頭部が袖仕切り上部を跨ぐ挙動が発生したことが原因であると考えられる。跨ぐ状況と跨がない状況ではHICに影響を与えるダミー挙動が異なるため（4.1節で詳細に述べる）、3.3節では跨がない条件を用いて車体構造の評価指標の検討を行った。

3.3 車体構造の評価指標の検討

頭部傷害発生リスクが高かった2席目条件と3席目条件において、「減速度積分値」、欧州基準の「30ms平均減速度」、「120ms平均減速度」と米国基準の「最大減速度」の4つの車体構造の指標と傷害度の指標であるHICの線形近似を行うことで決定係数を算出して相関を比較した（図6）。これらの比較には、2席目はHICが50以上となる111条件から前節で述べた跨ぐ挙動がみられた条件を除外した78条件を用い、3席目はHICが50以上となる87条件を用いた。

4つの指標とHICの決定係数を比較すると（図6(e)）、2席目条件では「減速度積分値」と「120ms平均減速度」の決定係数が同程度で高く、3席目条件では「減速度積分値」の決定係数が最も高かった。このことから、当該着座条件においては、「平均減速度」や「最大減速度」と比較して「減速度積分値」は、乗客傷害度との相関が

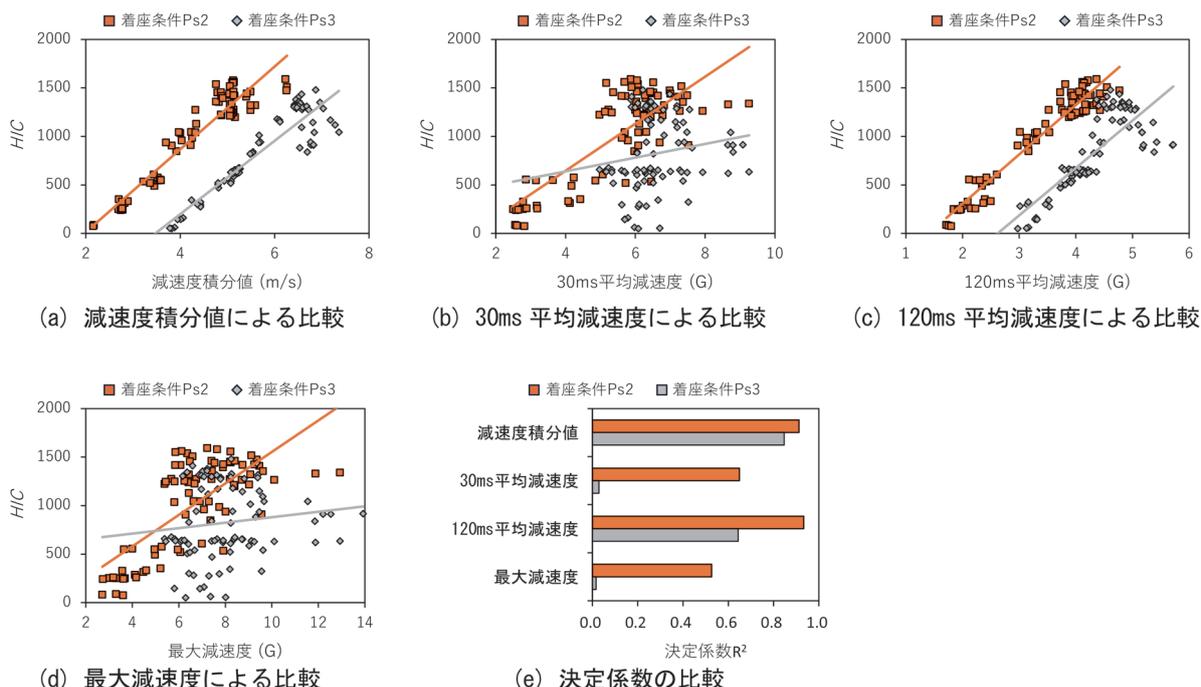


図6 HICと各評価指標間の相関

高い指標であることが示された。

4. 考察

4.1 2 席目の着座条件に関する考察

頭部傷害発生リスクが最も高かった2 席目の着座条件では、「減速度積分値」が5m/s 付近を越えるとHIC が低下する傾向がみられた(図5)。頭部の2 次衝突速度が大きくなるとHIC が高くなることが過去に実施したスレッド試験(本報告で実施した「乗客傷害度解析」を実際の車内設備やダミー人形を用いて行う試験)で確認されていることから¹⁵⁾、2 席目条件における2 次衝突速度と「減速度積分値」を比較した(図7)。本図より減速度積分値が5m/s 以上において2 次衝突速度は低下する傾向がみられなかったことから、HIC の低下は2 次衝突速度の低下が原因ではないと解釈できる。

図8 に示すように「減速度積分値」とダミー挙動を比

較すると、「減速度積分値」が大きくなるとダミーの袖仕切り側への倒れ込みが小さくなり、2 次衝突直後に頭部が袖仕切り上部を跨ぐ挙動が確認された。具体的には図8 右に示すように、頭部が袖仕切りに2 次衝突する際の床面からの頭部高さが約1.2m 以上で、2 次衝突直後に紙面右側方向に頭部が袖仕切りを跨ぐ挙動が確認された。この挙動により2 次衝突時の頭部に発生する衝撃加速度が小さくなり、結果としてHIC が低くなったと考えられる。この現象はスレッド試験でも確認されている⁴⁾。

4.2 車体構造の評価指標と傷害度の相関に関する考察

前章で頭部の傷害発生リスクの高い2 席目条件と3 席目条件において、「減速度積分値」は乗客傷害度との相関が高いことを明らかにした。この理由を考察するため、車体構造の評価指標である「減速度積分値」、「平均減速度」と「最大減速度」と2 次衝突速度の線形近似を行うことで決定係数を算出して相関を比較した(図9)。

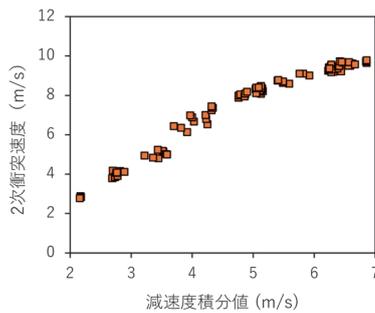


図7 2次衝突速度と減速度積分値

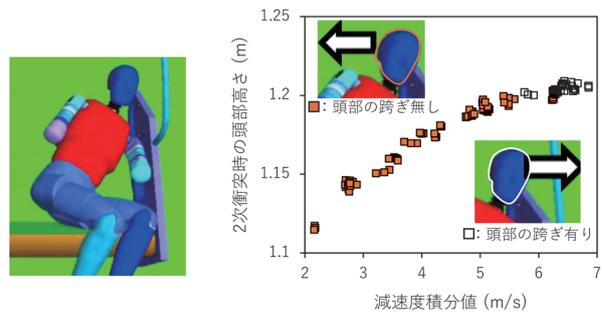
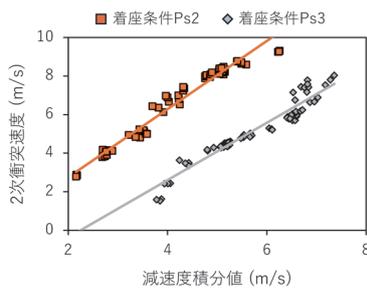
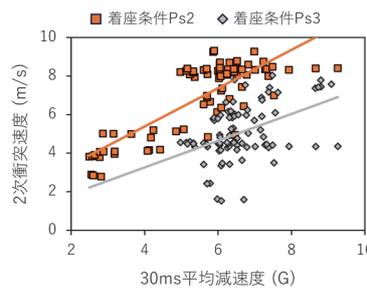


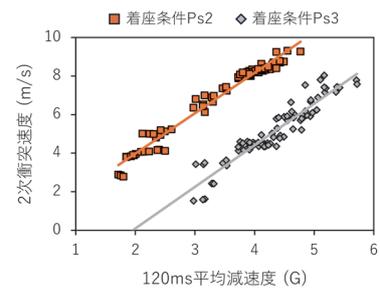
図8 2次衝突時の頭部挙動



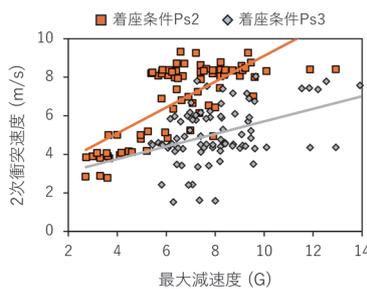
(a) 減速度積分値による比較



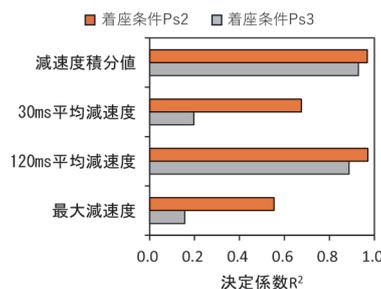
(b) 30ms 平均減速度による比較



(c) 120ms 平均減速度による比較



(d) 最大減速度による比較



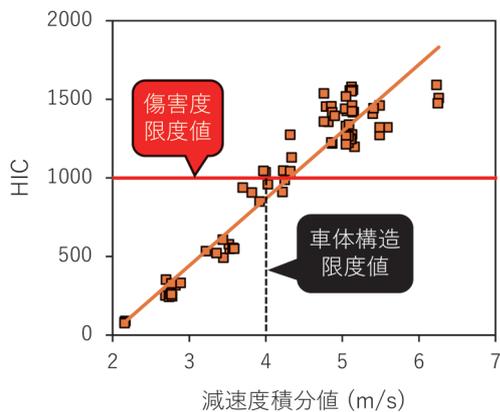
(e) 決定係数の比較

図9 2次衝突速度と各評価指標間の相関

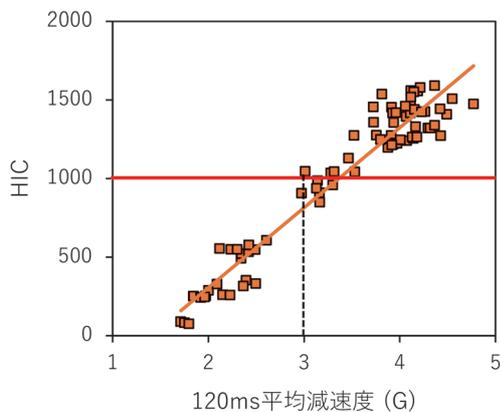
2 席目条件は、前節で述べた頭部が袖仕切りを跨がない挙動となった 78 条件のデータを用いた。図 9(a) は、「減速度積分値」が大きくなると 2 次衝突速度が高くなることを示している。また、3.2 節で 2 席目の傷害発生リスクが最も高くなることが確認されたが、2 次衝突速度も同様に高かった。さらに、どちらの着座条件も「減速度積分値」の決定係数が大きいことから (図 9(e)), *HIC* に影響を与える 2 次衝突速度と「減速度積分値」の相関が高いことが示された。以上を踏まえると、「減速度積分値」と *HIC* の相関の高さは 2 次衝突速度の影響が大きいと解釈できる。

4.3 車体構造の評価指標と限度値の提案

解析結果と考察を踏まえると、「減速度積分値」は、乗客の傷害度との相関が高く、かつ 2 次衝突するまでの時間というロングシート上での着座位置に関する情報が含まれていることから、今回比較した指標の中で、車体構造設計の衝突安全性評価指標として最適であると考えられる。「減速度積分値」を車体構造の評価指標として用いる際の限度値について考察すると、「減速度積分値」



(a) 減速度積分値



(b) 120ms 平均減速度

図 10 車体構造の評価指標の限度値

と *HIC* には正の相関がみられたことから、衝突安全性を高めるためには、衝突時に車体に発生する「減速度積分値」が低いことが望ましい。また、2 席目の着座条件は他の着座条件と比較して頭部傷害発生リスクが高いことが確認されたことから、当該着座条件を対象とすることが望ましい。以上のことから、図 6(a) に示した 2 席目の着座条件の結果を参照して、安全性を確保するための「減速度積分値」の限度値 (以後、車体構造限度値) は *HIC* の傷害度限度値である 1000 を考慮して 4.0m/s 程度以下が推奨される (図 10(a))。

評価基準がない国内においては、「減速度積分値」が最適である一方で、将来の衝突安全性評価基準の ISO 化など、世界共通化を念頭に置くと「120ms 平均減速度」は欧州基準で用いられており、傷害度との相関も良好であることから、これを国内の評価指標として選定することも妥当と考えられた。しかしながら、本指標による車体構造限度値である 5.0G²⁾ のままでは、図 10(b) に示すように *HIC* の傷害度限度値を大きく超えることから、国内のロングシートを配した車体構造の評価に用いる場合には、傷害度限度値である 1000 を考慮して 3.0G 程度以下が推奨される。

国内の実情に即した車体構造の評価指標とその限度値を提示したが、傷害度については 2 次衝突する車内設備に依存する。ロングシート端部にある袖仕切りには様々なタイプがあり、本報告では近年国内で広く採用されている板型タイプの袖仕切りの 1 つを用いて検討を行った。「減速度積分値」と傷害度の相関が高い理由として、減速度積分値と 2 次衝突速度との相関が高いことを確認していることから、異なる板型タイプの袖仕切りであっても、傷害度との相関は高くなると予想される。一方で、推奨した車体構造の限度値 (減速度積分値 4.0m/s、120ms 平均減速度 3.0G) については、袖仕切りのタイプにより異なる可能性が考えられ、袖仕切りの設計変更などにより傷害度を下げることによって、本評価指標の限度値を高めることが期待できる。したがって、本報告において提示した限度値は厳しめの値 (傷害度を考慮する上での安全側の仮定) となっていると考えられる。

4.4 今後の課題

本報告の結果は、列車進行方向のみに衝撃減速度が発生すること、ロングシート上に単一で着座した人体ダミーが袖仕切りと 2 次衝突することを前提としている。実際の列車挙動は進行方向のみでなく、鉄道車両のピッチングの影響もあると考えられるが、スレッド試験で本状況が再現できず解析の精度確保ができないため、解析条件には含めていない。また、人体ダミーモデルと袖仕切りモデルの 2 次衝突時の挙動や傷害度については、袖仕切りなど実際の車内設備を用いた試験との比較により

解析精度を確認している¹¹⁾が、実際の事故に適用した場合の精度確認は行えていない。これは、鉄道車両の踏切事故時の「乗客の傷害発生部位・程度」, 「加害車内設備」, 「事故時の着座位置」といった詳細な情報が現状公表されていないためである。

ロングシート上に複数のダミーが着座している状況については、限られた条件ではあるが解析を実施しており、他のダミーへの2次衝突が原因で胸部傷害値が高まる傾向がみられた¹⁶⁾。但し、ロングシート上の着座ダミー数・着座位置の組合せが多岐にわたり、かつ、ES-2ダミーは1度に片側の胸部しか評価が出来ないので、組合せがさらに多岐にわたる。また、ES-2ダミーの体格が日本人体格より大きいため、ロングシート上に自然な姿勢で着座率100%を再現することが難しく、解析条件の設定に工夫が必要である。このため、複数乗客の評価については、今後の課題と考えている。

5. まとめ

列車事故時のロングシート乗客の安全性を向上させることを目的として、耐衝突性を考慮した車体構造の設計に活用できる、国内の実情に即した衝突安全性評価方法を検討した。国内で過去に発生した事故を参照して、様々な踏切事故条件で衝突解析を行った。その結果、ロングシートに着座した乗客の頭部傷害の程度との相関が最も高くなった、ダミー初期位置と袖仕切り間の距離から求まる時刻 t_{imp} までを積分時間とした、車体の減速度の積分値を評価指標として提案した。また、本指標を用いる際には2席目の着座条件を対象に、限度値として4.0m/s以下を提案すると共に、将来の衝突安全性評価基準のISO化など、世界共通化を念頭におき、欧州基準の評価指標である120ms平均減速度も評価指標の候補となりうることも示した。今後は、提案した車両の評価指標を適用して、具体的な車体構造・車内設備対策の提案を行う予定である。

国内において衝突安全性評価指標とその限度値を決定する場合には、関係省庁、鉄道事業者や車両製造会社などの関係者による議論が必要であり、その際に本報告で得られた知見が有効になると考えている。

本報告は、2021年に日本機械学会論文集で発表した内容¹⁷⁾の一部を割愛・修正の上、転載した。

文献

- 1) 宇治田寧：機械・構造物の強度設計と事例2. 鉄道車体、材料, Vol.59, No.7, pp.575-582, 2010
- 2) CEN: EN15227 2020 Railway applications – Crashworthiness requirements for rail vehicles, 2020.

- 3) Federal Railroad Administration: 49 CFR Part 238 Passenger equipment safety standards, 2011.
- 4) 中井一馬, 榎並祥太: 列車衝突事故時のロングシート着座乗客に対する手すりの傷害軽減効果の実験的検証, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.878, 2019
- 5) 丸中俊則, 田口真, 岸田和人, 熊本秀喜, 吉川孝男: 鉄道車両の耐衝突性能に関する研究 (第1報, 高いエネルギー吸収特性を有する構造の開発と数値計算を用いた耐衝突性能評価技術の研究), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.67, No.664, pp.72-78, 2001
- 6) 丸中俊則, 田口真, 木村敏宣, 岸田和人, 熊本秀喜, 吉川孝男: 鉄道車両の耐衝突性能に関する研究 (第2報, 構体の一両衝突試験と数値計算を用いた衝突挙動の解明について), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.68, No.666, pp.163-168, 2002
- 7) 木村宗太, 用田敏彦, 川崎健, 中村英之, 山口貴吏: 鉄道車両向け衝撃吸収構造のエネルギー吸収特性評価 (損傷力学モデルを適用した数値シミュレーション), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.78, No.793, pp.98-112, 2012
- 8) 濱島豊和, 曄道佳明: 連結装置の塑性を考慮した編成鉄道車両の大変位挙動解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.806, pp.497-507, 2013
- 9) 沖野友洋, 永田恵輔, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 乗客の傷害度との相関に基づく鉄道車両の衝突安全性評価方法, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.881, 2020
- 10) 沖野友洋, 永田恵輔, 佐藤裕之, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 踏切衝突事故時の各因子が列車乗員の被害度に及ぼす影響評価, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.869, 2019
- 11) 中井一馬, 鈴木大輔, 榎並祥太, 沖野友洋, 高野純一: 列車事故時の乗客挙動解析によるロングシート乗客の被害推定と対策, 鉄道総研報告, Vol.33, No.1, pp.29-34, 2019
- 12) 沖野友洋, 山本勝太, 高野純一, 宇治田寧: 列車乗務員の傷害度を指標とした踏切事故時の車両の衝突安全性評価, 第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.12-79, pp.557-560, 2012
- 13) 中井一馬, 榎並祥太, 沖野友洋: 踏切衝突事故時のロングシート着座乗客の被害度に及ぼす影響因子, 鉄道総研報告, Vol.35, No.2, pp.29-34, 2021
- 14) 国土交通省: 別添24 側面衝突時の乗員保護装置の技術基準, 新・道路運送車両の保安基準, pp.769-811, 2009
- 15) Nakai, K., Suzuki, D., Enami, S., Okino, T., Takano, J. and Palacin, R., An Estimation of behaviour and severity of injury to rail passengers occupying longitudinal seats in the event of collision, Proceedings of IRCOBI Conference 2015, pp.315-326, 2015.
- 16) 小美濃幸司, 中井一馬, 白戸宏明, 鈴木大輔: 通勤列車の踏切事故時の乗客挙動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.26, No.1, pp.21-26, 2012

17) 中井一馬, 榎並祥太, 沖野友洋, 永田恵輔: ロングシート
着座乗客の傷害度との相関に基づく鉄道車両の衝突安全性

評価方法, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.903, 2021

電車線振動解析によるパンタグラフ接触力測定法への スパースモデリングの活用

臼田 隆之* 山下 義隆** 高橋 正樹***

Method for Measuring the Pantograph Contact Force in Overhead Contact Line System Using Sparse Modelling

Takayuki USUDA Yoshitaka YAMASHITA Masaki TAKAHASHI

In order to understand the wear mechanism of contact wire and to efficiently prevent OCS failure, the authors have so far developed a method for measuring contact forces of all pantographs during trains passing on sections with sensors installed on the overhead contact line. However, some difficult issues remain in the method for computing the inertial force from contact wire acceleration measured at some measurement points. This paper proposes a method for selecting effective measurement points for contact wire acceleration. LASSO regression, known as one of the sparse modelling techniques, is applied to the proposed method so that suitable points for measuring acceleration are selected for computing inertia force. The results obtained by the proposed method are shown using dynamic simulation data.

キーワード：接触力，電車線，慣性力，トロリ線加速度，スパースモデリング，LASSO

1. はじめに

電車線は構造上の制約から一重系であり，更にその設置場所が高所となっている。このため，パンタグラフの異常などに起因して，ひとたび電車線の破損が発生すると，復旧まで長時間のダウンタイムが発生しがちである。パンタグラフは定期検査により保守されているものの，検査周期間で発生した異常が事故につながることもある。ここで，パンタグラフの異常を電車線側でモニタリングできれば，電気鉄道の安定性を高めるために有益である。パンタグラフの異常には多くの形態があるが一例として，パンタグラフのすり板の欠損，パンタグラフの追従機構の故障や揚力特性の悪化による動特性の悪化などが挙げられる。すり板を対象とするモニタリングシステムについては，画像¹⁾，超音波，電車線の振動²⁾など各種手法を適用したものが開発されているが，パンタグラフと電車線の下部線条であるトロリ線とが接触する力（以下，接触力）などを測定することで，パンタグラフの動特性の異常をモニタリングするシステムについてはまだ実用化されていない。また，トロリ線の摩耗の代表的な影響因子の一つと考えられる接触力を実際の電車線設備で測定可能となれば，トロリ線の摩耗メカニズムの解明にも有益である。

そこで，筆者らは電車線にセンサを設置し，測定区間

を通過するパンタグラフの接触力を測定する手法を開発し，シミュレーションや現車試験でその有効性を検証している³⁾。この手法では，接触力を測定区間のハンガ軸力の合計，測定区間のトロリ線の慣性力，トロリ線張力の鉛直成分の合力として算出している。このうち，ハンガ軸力とトロリ線張力の鉛直成分については，有効な測定法が確立されていたが，測定区間のトロリ線の慣性力を測定する際のトロリ線の上下加速度（以下，加速度）の測定位置選定法について以下の課題が残されていた。本来，柔軟構造物であるトロリ線は多数の固有モードを持つため，その厳密な慣性力を得るためには空間的に連続な加速度分布が必要であるが，この取得は現実的でない。そのため，既提案手法では10数点のトロリ線の加速度によりトロリ線の慣性力を近似していたが，多数の測定点の候補から，合理的な測定点を選定する手法が未確立であった。

このような問題に適用可能な一つの手法にスパースモデリングという手法がある。スパースモデリングは少ないデータから高解像度のデータを取得すること（圧縮センシング）や，大量のデータからデータの表現を簡略化（データ圧縮）を行うことが可能な技術で，医療用のMRIなどにも活用されている技術である⁴⁾。本報告では，上記の加速度の測定点の選定問題に，スパースモデリングによる正則化（以下，スパース正則化）を適用することで，トロリ線の慣性力を測定するための合理的な測定点を効率的に選定する手法を提案し，電車線・パンタグラフの運動シミュレーションデータを利用して，提案手法の有効性を示す⁵⁾。

* 鉄道力学研究部

** 鉄道力学研究部 集電力学研究室

*** 慶應義塾大学

2. 電車線振動解析による接触力測定手法の原理

電車線振動解析による接触力測定の基本原理を以下に示す。トロッコ線を弦とみなせる約 50Hz 以下の周波数を対象として、図 1 のように、トロッコ線の挙動を p 本のハンガで支持されている張力 T の作用する弦として、運動方程式の定式化を行う。接触力を集中荷重 $f_c(t)$ とみなし、 ρ をトロッコ線の線密度、 x_i を i 番目のハンガ点の座標、 h_i を i 番目のハンガに作用する軸力（ハンガの圧縮方向の力）、 v を列車速度、 δ をディラックのデルタ関数とすると、トロッコ線の挙動 $y(x,t)$ は

$$\sum_{i=1}^p h_i \delta(x-x_i) + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = f_c(t) \delta(x-vt) \quad (1)$$

と表現できる。測定区間の長さを L 、測定区間に 1 台のパンタグラフがあると仮定し、式 (1) を測定区間で積分すると次式を得る。

$$f_c(t) = \sum_{i=1}^p h_i + \int_{-L/2}^{L/2} \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx - T \left(\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=L/2} - \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=-L/2} \right) \quad (2)$$

式 (2) の右辺第 1 項は測定区間のハンガ軸力の合計であり、ハンガのひずみなどを測定することで取得可能である。第 3 項は測定区間の境界に作用するトロッコ線張力の鉛直成分であり、測定区間両端のトロッコ線の傾斜により算出される。トロッコ線の傾斜は測定区間両端に加速度計を 2 個隣接して配置することによって算出可能である。第 2 項は測定区間のトロッコ線の慣性力である。第 2 項の導出にはトロッコ線加速度の空間分布が必要であるが、トロッコ線の加速度分布を空間的に連続にセンサで取得するのは困難であるため、 q 箇所の加速度を用いて慣性力を測定することとし、式 (2) を次式で近似することで接触力を測定する。

$$f_c(t) = \sum_{i=1}^p h_i + \sum_{j=1}^q w_j \frac{\partial^2 y_j}{\partial t^2} - T \left(\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=L/2} - \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=-L/2} \right) \quad (3)$$

ここで w_j は j 番目の加速度に対する等価質量に相当する等価質量とする。本式への変換において、空間的に連続な現象を有限の加速度で近似を行う場合、加速度の測定点の選定数と選定箇所の設定法が問題となる。本報告では、この加速度の測定点の選定数と選定箇所を事前に設定した場合と、スパース正則化によって選定した場合について検証を行う。

3. 慣性力測定のための等価質量の導出手法

本章では、はじめに、比較対象の手法として、加速度の測定点の選定数と選定箇所が事前に設定されている場合の等価質量の同定手法を 2 種類提案する。その後、主たる提案手法として、加速度の測定点の選定数と選定箇所が事前に設定されていない状態で、スパース正則化により理想的な測定箇所の選定と等価質量の同定を同時に行う手法を示す。

3.1 最小二乗法による導出法

本節では、加速度の測定点の選定数 q と選定箇所が事前に設定されている場合の等価質量の同定手法について記述する。式 (2) を変形し、第 2 項の慣性力 $f_{\text{ina}}(t)$ を他の項で表すと以下となる。

$$f_{\text{ina}}(t) = \int_{-L/2}^{L/2} \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx = f_c(t) - \sum_{i=1}^p h_i(t) + T \left(\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=L/2} - \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=-L/2} \right) \quad (4)$$

式 (4) の右辺各項は、後述するシミュレーション等で十分高い周波数まで信頼性の高い波形を取得可能である。ここで、表記の簡略化のため、以下のように定義する。

$$a_j(t) := \frac{\partial^2 y_j}{\partial t^2} \quad (5)$$

式 (3) の右辺第 2 項の限定した q 点の加速度の線形形から測定される慣性力の近似値 $f_{\text{ina}}'(t)$ は等価質量 w_j を使用して、

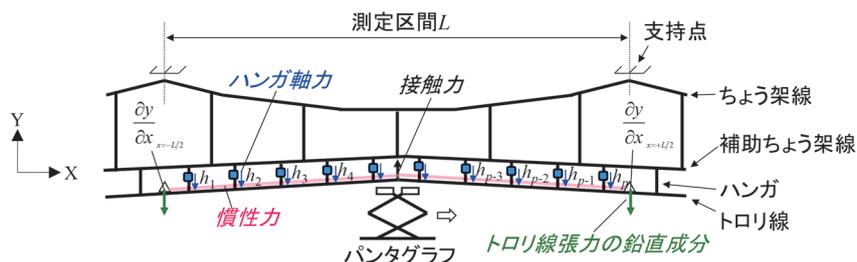


図 1 接触力の測定原理⁵⁾

$$f_{\text{ina}}'(t) = \sum_{j=1}^q w_j a_j(t) \quad (6)$$

と示すことができる。\$N\$ 点の離散時間 \$i(i=1 \cdots N)\$ における表記とし、式 (6) を整理すると次式となる。

$$f_{\text{ina}}'[i] = \mathbf{a}[i] \boldsymbol{\beta} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし、} \mathbf{a}[i] &= [a_1[i] \cdots a_q[i]] \\ \boldsymbol{\beta} &= [w_1 \cdots w_q]^T \end{aligned}$$

この時、式 (7) の慣性力の近似値 \$f_{\text{ina}}'[i]\$ に \$f_{\text{ina}}[i]\$ を代入し、\$\boldsymbol{\beta}\$ を定数として次式を満足する \$\boldsymbol{\beta}\$ を最小二乗法 (LSM) で同定することで、等価質量 \$w_j\$ を導出する。

$$\arg \min_{\boldsymbol{\beta}} \left(\sum_{i=1}^N (f_{\text{ina}}[i] - \mathbf{a}[i] \boldsymbol{\beta})^2 \right) \quad (8)$$

式 (8) の解 \$\boldsymbol{\beta}_{\text{LSM}}\$ は次式で一意に定まる。

$$\boldsymbol{\beta}_{\text{LSM}} = (\mathbf{a}^T \mathbf{a})^{-1} \mathbf{a}^T f_{\text{ina}} \quad (9)$$

3.2 Ridge 回帰による導出法

前節同様、本節も加速度の測定点の選定数 \$q\$ と選定箇所が事前に設定されている場合の等価質量の同定手法について記述する。前節の最小二乗法により求められた等価質量は一部の値が大きくなりすぎるなどして、過適合が生じる場合がある。このような問題を回避する一つの方法として、等価質量の \$L_2\$ ノルムを導入した正則化問題として次式を満足する解を Ridge 回帰により導出する。

$$\arg \min_{\boldsymbol{\beta}} \left(\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (f_{\text{ina}}[i] - \mathbf{a}[i] \boldsymbol{\beta})^2 + \lambda_R \|\boldsymbol{\beta}\|_2^2 \right) \quad (10)$$

ここで、\$q\$ 次元のベクトル \$\mathbf{a}\$ の \$L_m\$ ノルムを以下のように定義する。

$$\|\mathbf{a}\|_m := \left(\sum_{k=1}^q |a_k|^m \right)^{1/m} \quad (11)$$

式 (10) の解 \$\boldsymbol{\beta}_{\text{Ridge}}\$ は次式で導出される。正則化パラメータ \$\lambda_R\$ の値により、解が変化することに注意が必要である。

$$\boldsymbol{\beta}_{\text{Ridge}} = (\mathbf{a}^T \mathbf{a} + \lambda_R I)^{-1} \mathbf{a}^T f_{\text{ina}} \quad (12)$$

式 (12) により得られた Ridge 回帰による解は、過適

合を回避したモデルとなると期待できる。しかしながら、最小二乗法も Ridge 回帰も、使用する加速度測定点を事前に設定する必要がある。\$q\$ 点の加速度測定点の中から \$r\$ 点の加速度を使用するという問題は

$${}_q C_r = \frac{q \cdot (q-1) \cdots (q-r+1)}{r \cdot (r-1) \cdots 2} \quad (13)$$

の組み合わせ数があり、\$q\$ が大きな値である場合、指数関数的に大きな値となるという問題がある。更に、実用上の利便性から、\$r\$ はできる限り小さい値であることが望ましいが、その値の合理的な設定法についても課題が残る。

3.3 LASSO によるスパース正則化法

上記の最小二乗法と Ridge 回帰による手法の課題を解決するため、本節では、式 (10) の \$L_2\$ ノルムの正則化項を \$L_1\$ ノルムに置き換えた LASSO (Least absolute shrinkage and selection operator) を適用し、その結果に対して更に次元縮約を行う手法を提案する。

3.3.1 LASSO による測定点候補の選定

次式の LASSO 型最適化問題として、スパースな解を導出する。

$$\arg \min_{\boldsymbol{\beta}} \left(\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (f_{\text{ina}}[i] - \mathbf{a}[i] \boldsymbol{\beta})^2 + \lambda_L \|\boldsymbol{\beta}\|_1 \right) \quad (14)$$

ここで、\$\lambda_L\$ は正則化パラメータである。スパースな解とは、等価質量のほとんどがゼロとなる解を意味する。そのため、使用する加速度測定点を事前に決めなくても、現象から使用する測定点を合理的に選定することが可能となる。式 (14) によりスパースな解が得られる理由を説明するため、概念図を図 2 (a) に示す。簡単化のため、\$w_j\$ と \$w_{j+1}\$ の 2 変数空間に、最小二乗法の解 (\$\boldsymbol{\beta}_{\text{LSM}}\$、図中の緑の \$\times\$) がある状態を考える。式 (14) の第 1 項の等値面を赤線、第 2 項の等値面を青線で示す。ここで、\$w_j\$ と \$w_{j+1}\$ にそれぞれ対応する加速度 \$a_j\$ と \$a_{j+1}\$ の相関が高い

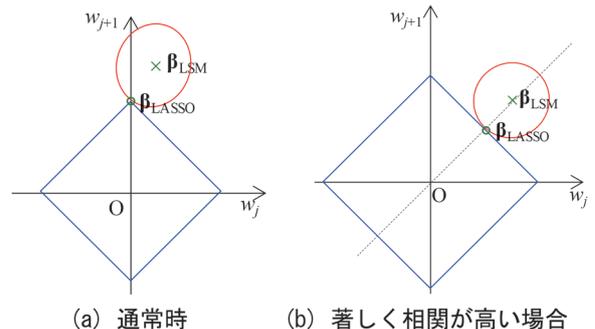


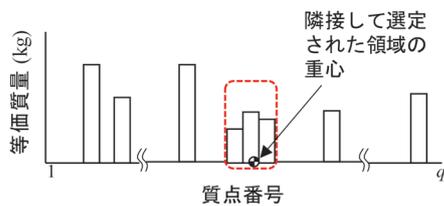
図 2 LASSO の概念図

場合を除けば、最小二乗法の解は図2 (a) のように $w_j = w_{j+1}$ や $w_j = -w_{j+1}$ の直線から離れた場所となることが多い。この場合、式(14)を最小化させる、第1項と第2項の等値面は w_j と w_{j+1} のどちらかの軸上で接点を持ち、これが式(14)の解となる。解が軸上に配置されるということは、他の変数(図2 (b)の例であれば w_j)の値はゼロとなっていることを意味する。同様の効果が多次元空間上で発揮されることで、結果としてLASSOを適用した等価質量はスパースな解(多くの等価質量がゼロな解)となり、加速度測定点の選定数は必要最低限となることが期待される。なお、LASSOの解が軸上に配置されるのは、式(14)の第2項が L_1 ノルムで定義されているため、つまりは、第2項の等値面が軸上に頂点を持つ正方形となるためである。

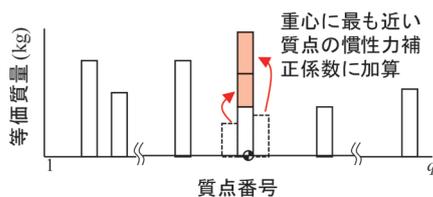
式(14)の解は解析的には解くことができないため、繰り返し計算により導出する。この解法については種々の手法が提案されているが、ここでは座標降下法⁶⁾を使用する。

3.3.2 LASSOで隣接質点を選定される対策

本報告における検討では、最も短い場合で0.2m離れた質点の加速度を全て入力とするが、隣接する質点同士



(a) LASSOの結果



(b) 次元縮約後

図3 隣接質点を選定された場合の次元縮約法

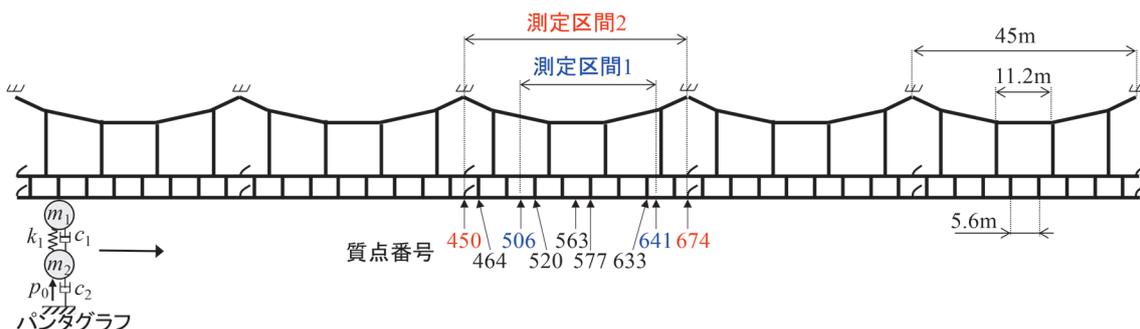


図4 シミュレーションモデル⁵⁾

の加速度は著しく相関が高くなる場合がある⁵⁾。このような場合、最小二乗法の解は図2 (b) のように $w_j = w_{j+1}$ の破線の近傍に配置され、式(14)の第1項の等値面が $w_j = w_{j+1}$ の直線に対し、概ね線対称の形状となる可能性がある。このようなケースでは、 L_1 ノルムによる正則化を行っても、隣接している質点の加速度の双方が選定され、十分にスパースな解とならないという現象が生じる。

そこで、この現象を回避するため、LASSOによる正則化の結果について、以下の次元縮約を施すこととした。ある λ_L に対する式(14)の解 β_{LASSO} のイメージを図3 (a) に示す。この内、隣接している質点を選択された赤破線内について、以下の処理を適用する。

- ① 2つ以上の質点が連続して選択された場合、隣接している全ての質点の等価質量から、X軸の重心位置を算出する(図3 (a) 赤色破線)。重心位置を算出する場合、各等価質量はその絶対値を使用する。
- ② 重心位置に最も近い質点の等価質量を隣接している質点の等価質量の合算値とし、その他の質点の等価質量はゼロとする(図3 (b))。なお、等価質量を合算する場合、等価質量の正負をそのまま計算する。

以上の次元縮約法により、効果的に選定される質点数の低減が可能である。以降では特に言及のない限り、LASSOおよび次元縮約の両者を適用したスパース正則化結果をLASSOの結果と記述する。本手法は隣接質点の加速度の相関が著しく高く、相互に代用可能であることに着目したもので、本手法の適用による慣性力の測定誤差への影響は小さいものと推察される。

4. シミュレーションによる検証と考察

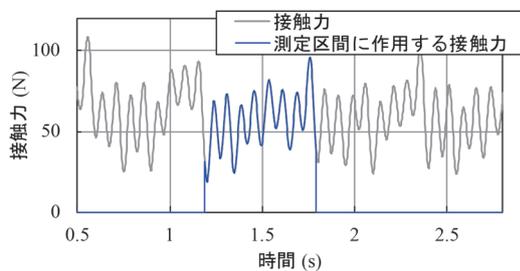
本章では、電車線・パンタグラフの運動シミュレーション⁷⁾の結果を利用して、提案手法の有効性を検証する。シミュレーションは、図4に示す径間長45mの電車線と2質点モデルのパンタグラフの組み合わせで実施した。トロリ線の質点間隔は0.2mとした。各線条の定数とパンタグラフの定数をそれぞれ表1と表2に示す。接触力測定手法の検証を行う測定区間は図4の測定区間1

表 1 電車線の諸元⁵⁾

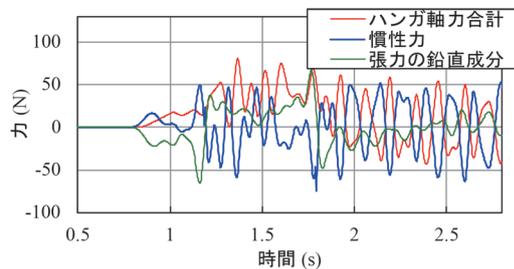
	張力 (kN)	線密度 (kg/m)	波動伝播速度 (m/s)
ちょう架線	24.5	1.45	130
補助ちょう架線	9.8	1.38	84
トロリ線	19.6	1.51	114

表 2 パンタグラフの諸元⁵⁾

m_1	10.3 kg
m_2	11.2 kg
k_1	14700 N/m
c_1	10 N·s/m
c_2	120 N·s/m
p_0	54N



(a) 接触力



(b) 各項の力

図 5 シミュレーション結果⁵⁾

(27m) および測定区間 2 (45m) の 2 条件とし、検証目的に応じて測定区間を変更した。一回に走行するパンタグラフの台数は 1~2 台とし、2 台の場合はパンタグラフ同士の間隔を 60m とした。パンタグラフ走行時には上向きの揚力を考慮し、1 台目と 2 台目のパンタグラフの揚力係数は一般的な新幹線用パンタグラフの揚力特性を勘案してそれぞれ $0.0001\text{N}/(\text{km}/\text{h})^2$ と $0.0004\text{N}/(\text{km}/\text{h})^2$ とした。

以上の条件でパンタグラフを速度 210~270km/h で 10km/h 刻みで走行させるシミュレーションを実施した。1 台のパンタグラフが 270km/h で走行した条件におけるシミュレーション結果の時刻歴データに 15Hz のローパスフィルタを適用した結果を図 5 に示す。図 5 (a) は接触力であり、走行区間全ての接触力を灰色、測定区間 2 に作用した接触力を青色の線で示した。図 5 (b)

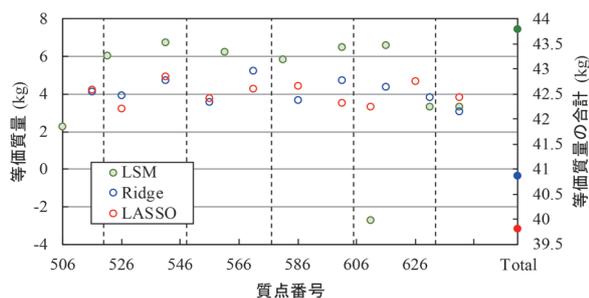
は図 5 (a) の青色の線のデータを式 (2) の右辺各項に分解した状態を示しており、第 1~第 3 項をそれぞれ赤色、青色および緑色の線で示した。電車線の振動の影響により、パンタグラフが測定区間 2 に在線していない時にも各信号が変動している点に注意が必要である。以降では、シミュレーションで得られたトロリ線の加速度から、図 5 (b) に示した青色の慣性力を算出することで、提案手法の特性について比較検証する。

4.1 各提案手法の比較

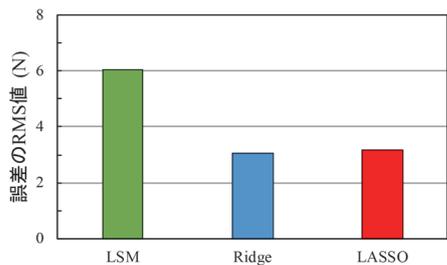
本節では、3 章で提案した 3 つの手法の適用結果について比較し、各提案手法の有効性について検証する。ただし、最小二乗法と Ridge 回帰は加速度を測定する質点位置を事前に設定しておく必要があるが、その最適値は事前には不明である。そこで、本節では、最小二乗法と Ridge 回帰のみ、加速度測定に使用する質点の全ての組み合わせについて総当たりで等価質量を同定し、同定データに対する慣性力の測定誤差 (以下、同定誤差) が最も小さい組み合わせを選定する。しかし、この計算は式 (13) のように、質点の候補が多い場合は非現実的な計算時間となるため、計算機の制約から、測定区間は短く設定した測定区間 1 とし、対象とする質点候補もシミュレーション結果の 0.2m 刻みの質点から 1/5 に間引き、擬似的に間隔 1.0m の 28 点の質点の加速度データから 10 点の質点を選定することとした。本条件の組み合わせ数は約 1.3×10^7 ケースとなる。接触力の測定周波数帯は DC~15Hz とし、各信号に対して 15Hz のローパスフィルタを適用した。なお、同定誤差および測定時の慣性力の測定誤差は RMS 値により評価した。Ridge 回帰は式 (10) の λ_r を設定する必要があるため、同定結果の等価質量の合計値が測定区間のトロリ線の質量 40.8kg とおおよそ等しくなるよう調整を行い、 $\lambda_r=0.21$ とした。

LASSO については、事前に対象とする質点を選定する必要がないため、 λ_L を $10^{-3} \sim 10^1$ 程度の範囲で解の探索を行い、次元縮約処理の結果、質点が 10 点選定された解の中から、同定誤差が最も小さかった、 $\lambda_L=0.21$ における解を選定した。LASSO の解の探索過程については 4.2 節において詳述する。

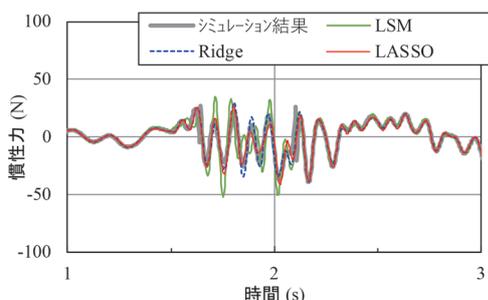
本節では、270km/h 走行時のシミュレーションデータを使用して各手法での等価質量を同定し、その同定結果を使用して 220km/h 走行時の慣性力を算出する。慣性力を算出するために選定された質点、選定された質点に対する等価質量の値およびその合計値を図 6 (a) に示す。図中の右端部の中実のプロットが各条件における等価質量の合計値である。図 6 (a) の縦の破線はハンガ点の位置を示す。また、同定した等価質量を使用して、220km/h 走行時の慣性力を算出した結果の誤差の RMS



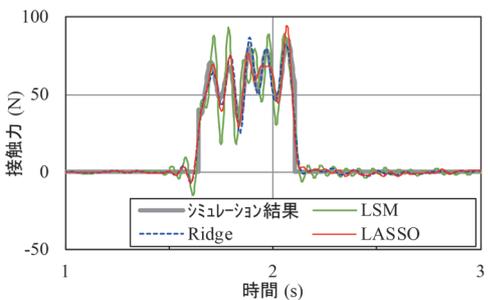
(a) 選定された質点と等価質量⁵⁾



(b) 慣性力の測定誤差



(c) 慣性力の算出結果 (速度 220km/h)



(d) 接触力の算出結果 (速度 220km/h)

図6 各手法の比較結果 (区間1)

値を図6 (b) に示す。更に、220km/h 走行時の慣性力と接触力をそれぞれ算出した時刻歴データを図6 (c) と図6 (d) に示す。なお、接触力は提案手法により得られた慣性力と、ハンガ軸力および張力の鉛直成分の合計値として算出しており、本ケースでは慣性力以外の誤差は含まれていない。図6 (a) から、最小二乗法の結果のみ一部例外があるものの、各手法とも測定区間の端部以外は、各ハンガ間に2点の質点が選定され、その選定部位も同じ質点もしくは隣接する質点となっており、それぞれの係数の合計もトロリ線の質量40.8kgと概ね同等の値となっていた。ここで、図6 (b) ~ (c) から

最小二乗法の結果は他の2手法と比較して、慣性力の測定誤差が大きくなっていることが確認できる。特に、図6 (d) から、パンタグラフが測定区間内を走行している1.6s~2.1sにおいて最小二乗法の誤差が大きくなっていることが確認できる。これは最小二乗法では過適合が発生し、同定した270km/hと傾向の差異がある220km/hのデータに適用した結果、誤差が大きくなっているものと考えられる。過適合を裏付ける結果として、図6 (a) の最小二乗法による等価質量は他の手法によるものと比較して、全体的に大きな値が多くなっており、一部負の値も含まれている。一方、正則化項に重みがついているRidge回帰とLASSOでは過適合は発生せず、良好な測定ができていることが確認できる。なお、最小二乗法の過適合を抑制するためには同定時のデータの多様性を増やすことが有効であるため、以降の検討では、同定時のデータを270km/h、250km/h、230km/hおよび210km/hでの走行時のシミュレーションデータとし、その結果を使用して260km/h、240km/hおよび220km/h走行時の慣性力を算出することとする。

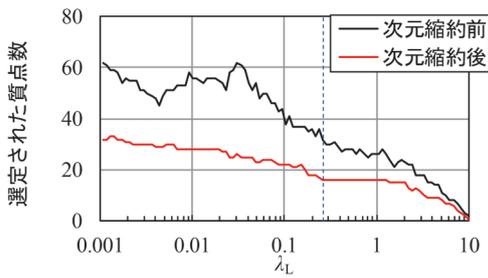
更に、本条件において、最小二乗法とRidge回帰の各手法で等価質量の算出に要した計算時間は、LASSOでの計算時間と比較して、それぞれ約900倍と約1100倍と計算負荷が著しく高かった。また、最小二乗法とRidge回帰は測定区間1より長い測定区間への適用は計算量が急激に増加するため、適用が容易ではなく、計算リソースの観点からも、測定点の選定に総当たり計算を行う必要のないLASSOの著しい優位性が確認された。

本節の検討から、LASSOによる提案手法は、他の手法と比較して、精度と計算効率の観点から高い優位性が確認された。次節ではLASSOによる提案手法について詳細な検討を行う。

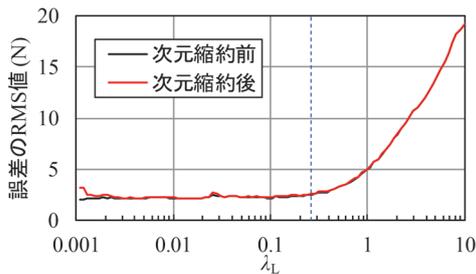
4.2 LASSOによるスパース正則化法の詳細検討

前節の検討では最小二乗法とRidge回帰を総当たり計算したため、計算上の制約から測定範囲を短く制限した上で、質点間隔も大きく設定した条件における検討を行った。一方、LASSOはスパース性を持つ解が得られるため、慣性力補正を行うための質点を事前に設定した総当たり計算を行う必要がない。そのため、以降の検討では測定区間は本来検討を行いたい1径間の長さを有する測定区間2とし、質点間隔も0.2mとした条件でLASSOによるスパース正則化法で解の探索を行った。測定区間のトロリ線の質量は68.0kgとなる。

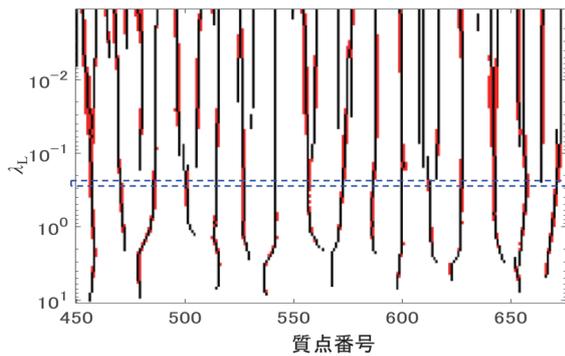
λ_L を $10^{-3} \sim 10^1$ 程度の範囲で解の探索を行った結果を図7 (a) ~ (c) に示す。図7 (a) ~ (b) はそれぞれ λ_L に対して、LASSOにより選定された質点の数と同定誤差をプロットした結果である。黒の線が3.3.1項のLASSOにより得られた結果、赤の線が隣接して選定さ



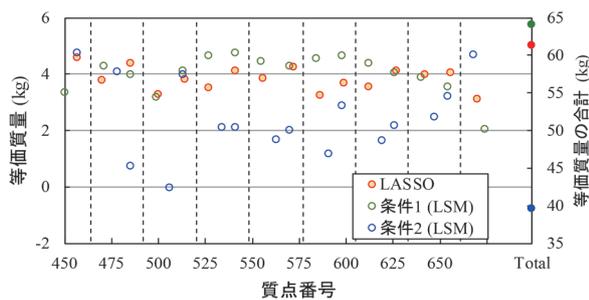
(a) 選定された質点数



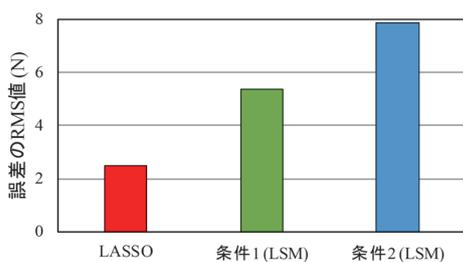
(b) 同定誤差



(c) 選定された質点の軌跡



(d) 選定された質点と等価質量



(e) 慣性力の測定誤差

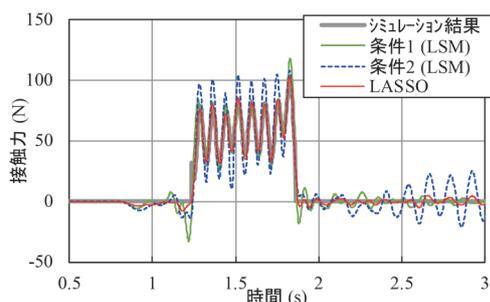
図7 各手法の比較結果 (区間2)⁵⁾

れた質点について、3.3.2項の次元縮約を行った結果である。図7(c)は各 λ_L について選定された質点を図示したものであり、赤色のプロットが次元縮約で削除された質点、黒色のプロットが次元縮約適用後の選定された質点である。図7(a)および図7(b)より、次元縮約を行ったことで、質点数が効果的に削減されているだけでなく、次元縮約後の同定精度もほとんど低下していないことが確認できる。これは次元縮約の合理性についての推測とも一致する結果である。なお、 λ_L が0.002以下の領域では次元縮約によって若干の同定精度の低下が確認されるが、これは図7(c)からもわかるように、4~5点の質点が連続して選定されている箇所を次元縮約する際に相関性が十分高くない質点まで統合された影響と考えられるが、質点の選定数が多すぎる条件での現象であり、実用上問題とならない。また、図7(c)から λ_L の値が小さくなるにつれて、選定される質点数が増加していく傾向や、それぞれの λ_L において、選定される質点が概ね等間隔に分布している様子が確認できる。等速移動する外力を測定する問題であるため、質点がおおよそ等間隔に選定されるのは合理的な結果と考えられる。

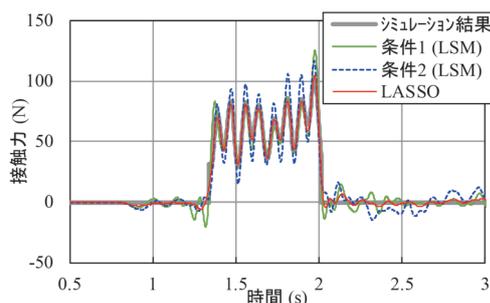
本報告では、これらの解から、できるだけ少ない質点で測定精度の劣化が小さい条件として、 $\lambda_L=0.26$ (図7(a)~(c)の青破線)の条件で、16点の質点を選定した解を使用した。図7(d)、図7(e)に選定された質点の配置、等価質量およびその合計値と、慣性力の測定誤差を示す。また、図8に260km/h、240km/hおよび220km/h走行時の接触力の測定結果の時刻歴波形を示す。図7(d)から、測定区間の端部を除き、一つのハンガ間にそれぞれ2箇所の質点を選定され、測定区間の端部は1箇所の質点を選定されていることが確認できる。選定された質点の位置は、ハンガ間に1波長の定在波が存在する場合の振動モードの腹の位置と概ね一致している。図7(d)から等価質量の合計は61.3kgと実際の質量68.0kgと10%程度の差であり、図7(e)から誤差のRMS値も2.5Nと高い精度で測定できていることが確認できる。また、図8の時刻歴波形でもシミュレーション結果と概ね一致しており、LASSOによるスパース正則化法が有効であることが確認できる。

4.3 従来の試験条件とスパース正則化法との比較

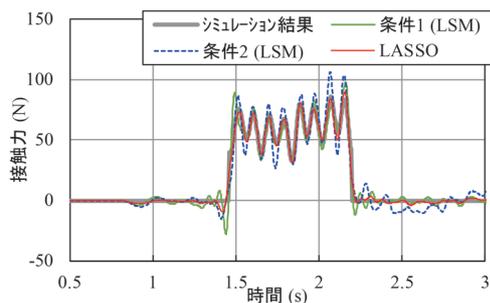
本節では、従来、最小二乗法により等価質量を同定する手法で接触力測定試験を実施していた2種類の加速度測定点の条件から得られる結果と、4.2節のLASSOによるスパース正則化結果について比較を行い、提案手法の検証を行う。条件1は測定区間端部を除き、加速度測定点を各ハンガ点から1.4mの地点に等間隔で配置し、測定区間端部に一箇所ずつ加速度測定点を設置した条件である。測定区間端部を除き、各加速度測定点の間



(a) 260km/h



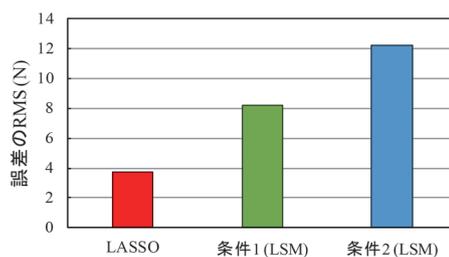
(b) 240km/h



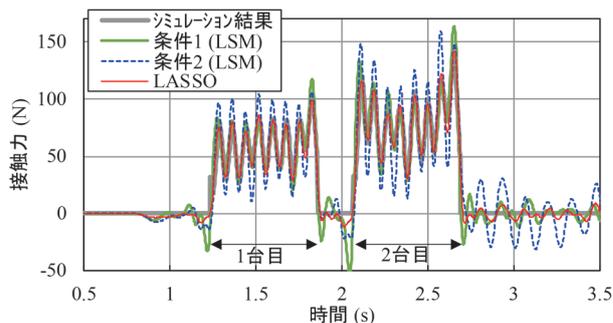
(c) 220km/h

図8 接触力の算出結果 (区間2)⁵⁾

隔は約2.8mとなり、約5.6mのハンガ間に一波長の定在波が発生した場合の振動モードの腹の部分測定するという考え方である。条件2は過去の研究で、電車線の振動形態の検証³⁾などから適用された加速度測定点の設定思想に則った条件である。具体的には、ハンガ間に半波長の定在波が発生した場合の振動モードの腹の部分および、ハンガ間に一波長の定在波が発生した場合の進行方向後ろ側の振動モードの腹の部分測定するという考え方である。図7(d)、(e)に各条件で選定した質点の配置、等価質量およびその合計値と、慣性力の測定誤差を併記する。また、図8に接触力の測定結果の時刻歴波形を示す。本結果から、従来試験を実施していた条件1および条件2ともある程度の慣性力の測定精度はあるものの、いずれもLASSOの結果には及ばないことが確認でき、LASSOによるスパース正則化法の有効性が確認できる。



(a) 慣性力の測定誤差



(b) 接触力の算出結果 (260km/h)

図9 接触力の算出結果 (区間2, パンタグラフ2台)⁵⁾

4.4 2台のパンタグラフが連続走行する場合の検証

LASSOによるスパース正則化結果および最小二乗法での同定結果である図7(d)の結果を利用して、パンタグラフ2台が連続して走行する時の接触力を算出する。慣性力の測定誤差のRMS値を図9(a)に示し、260km/hの際の接触力の測定結果の時刻歴波形を図9(b)に一例として示す。図9からパンタグラフが2台の場合も、4.2節のLASSOによるスパース正則化結果は、条件1および条件2の最小二乗法による同定結果より、精度良く慣性力を測定できていることが確認できる。

なお、図7(e)と図9(a)との比較から、いずれの手法もパンタグラフ2台が走行する場合は、慣性力の測定誤差が増加していることがわかる。これは、1台目のパンタグラフによる電車線の残留振動による影響と考えられる。ただし、LASSOによる正則化結果では、慣性力の測定誤差のRMS値の増加量は1.2Nと小さく、図9(b)の時刻歴波形からも実用上問題とならないことが確認できる。以上の結果より、LASSOによるスパース正則化法はパンタグラフが連続で走行する場合の慣性力の測定にも有効であることが確認できる。

5. まとめ

本報告では、パンタグラフのモニタリングシステムとしての活用や、種々の現象の解明を目的として、電車線にセンサを設置し、測定区間を通過するパンタグラフの接触力を測定する手法についていくつかの提案を行っ

た。具体的には電車線にセンサを設置し、測定区間を通過するパンタグラフの接触力を測定する手法について検討し、LASSOと次元縮約法を組み合わせることによって、効率的にトロリ線の加速度測定点を選定する体系的な手法を新たに提案した。また、1～2台のパンタグラフが通過するシミュレーションデータを使用した検証により、提案手法の有効性を示した。今後は、パンタグラフの追従機構の故障や揚力特性の悪化といったパンタグラフの動特性の悪化を検出するシステムなどに本手法を活用していきたい。

今後の課題を以下に示す。

- LASSOの結果などについて実設備での検証試験を行う。
- 支持点の前後を測定区間に設定した場合の支持点の金具による接触力測定精度への検証を行う。
- 接触力からパンタグラフの動特性異常を検出する手法の検討を行う。

文 献

- 1) 三島潤一郎, 一木剛, 杉浦芳光: 画像によるパンタグラフすり板計測装置の開発, JR EAST Technical Review, No.55, pp.17-18, 2016
- 2) 小山達弥, 白田隆之, 池田充, 久家広嗣: パンタグラフすり板の段付き摩耗検知アルゴリズム, 鉄道総研報告, Vol.31, No.2, pp.41-46, 2017
- 3) 白田隆之, 池田充, 山下義隆, 源導士: 営業線におけるパンタグラフ接触力の地上モニタリング, 鉄道総研報告, Vol.24, No.2, pp.29-34, 2010
- 4) 永原正章: スパースモデリング 基礎から動的システムへの応用, コロナ社, pp.13, 70, 2017
- 5) 白田隆之, 高橋正樹, 山下義隆: 電車線振動解析によるパンタグラフ接触力測定手法へのスパースモデリングの適用, 機械学会論文集, Vol.89, No.927, pp.1-20, 2023, DOI: 10.1299/transjsme.23-00176
- 6) Friedman, J., Hastie, T., and Tibshirani, R., "Regularization paths for generalized linear models via coordinate descent, Journal of statistical software," Vol.33, No.1, pp.1-22, 2010, DOI:10.18637/jss.v033.i01
- 7) 網干光雄: 動特性計算による架空電車線凹凸の評価法, 電気学会論文誌 D, Vol.126, No.7, pp.983-988, 2006

携帯情報端末を活用した低コストな 列車巡視支援方法の開発

田中 博文* 趙 博宇** 蘇 迪*** 長山 智則***

Development of Low-cost Train Patrol Support Method Using Smartphone

Hirofumi TANAKA Boyu ZHAO Di SU Tomonori NAGAYAMA

Although regional railway companies are facing a difficult business environment, they need to properly inspect and maintain railway facilities and rolling stock to ensure safe and stable train operations. In this study, we developed a smartphone-based train patrol support application as a low-cost track condition management method that can be introduced even by regional railway companies. We then carried out test measurements using the developed application on a commercial line and investigated the use of the measurement data. The results show that the acceleration data are effective for train vibration management, and that the forward view video data are effective for understanding track conditions during desk review.

キーワード：列車巡視，スマートフォン，列車動揺，前方画像，地域鉄道，DX

1. はじめに

少子高齢化により鉄道利用者や鉄道従事員が減少する中、鉄道事業者各社は厳しい経営環境にある。この傾向は地域鉄道事業者において特に顕著であり、地域鉄道事業者の約9割において経常収支が赤字になっている¹⁾。さらに、多くの地域鉄道事業者では、保有する鉄道車両や施設の老朽化も進んでいる^{1) 2)}。そのような状況においても、鉄道事業者は鉄道車両を安全に、かつ安定して運行するため、鉄道施設および鉄道車両を適切に検査し、維持管理する必要がある。

これらを支援する方策として、近年、デジタル技術を活用した鉄道業界における業務変革、いわゆる鉄道DX（デジタルトランスフォーメーション）の推進が各所で進められている。その一つの方策として、スマートフォンに代表される携帯情報端末（以下、「携帯情報端末」という。）の活用が考えられる。携帯情報端末は多くのセンサを内蔵しており、また汎用品であることから調達容易であるとともに、専用装置と比較して相対的に低コストである。これを鉄道の維持管理に適用できれば、維持管理費の低コスト化につながるとともに、デジタル技術を駆使することによって、目視や体感で行われてきた維持管理業務の省力化・高度化も実現できる可能性がある。なお、携帯情報端末を社会インフラの維持管理に適用する取り組みは道路分野で積極的に進められてお

り、既に道路巡視の支援や、路面性状管理への適用など、社会実装が始まっている^{3) 4)}。

鉄道分野においては、これまでに携帯情報端末を活用した軌道の維持管理に関する検討^{5) 6)}がいくつか進められてきたが、列車巡視の支援用として広く社会実装された事例はない。本研究では、鉄道構造物等維持管理標準（軌道編）⁷⁾に定められている列車巡視の要件に基づき、携帯情報端末の各種センサを活用した列車巡視支援方法について検討し、専用の列車巡視支援アプリを開発するとともに、実際の鉄道路線において試行した結果を報告する。

2. 携帯情報端末を活用した列車巡視の方法

2.1 鉄道構造物等維持管理標準（軌道編）における列車巡視の位置付けと課題

2007年1月に国土交通省鉄道局長から通達された「鉄道構造物等維持管理標準（軌道編）⁷⁾」（以下、「維持管理標準」という。）において、線路の巡視は、「線路の状態の全般的な把握のため、巡視を行うものとする。」と記載されている。また、その方法は、「線路巡視は徒歩、列車又は軌道モーターカー等によるものとする。」と、記載されている。

さらに、2007年3月に鉄道総研から発行された「鉄道構造物等維持管理標準（軌道編）の手引き⁸⁾」（以下、「維持管理標準の手引き」という。）では、列車巡視においては、「異常な列車動揺の有無、きしみ音の有無、列車の運行に対する支障の有無」などに着目するとの例示が記載されている。

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

** 株式会社スマートシティ技術研究所

*** 東京大学

実際の列車巡視は、多くの場合、鉄道従事員が営業列車等の前頭に添乗し、前述した例示を含む多岐にわたる項目を目視および体感で確認し、野帳等に記録することが一般的である。また、酷暑期において著大な通り変位の発生の予兆を捉えるために、列車巡視を行っている鉄道事業者もあり、多くの人工を要している。このような背景から、これらを含めた列車巡視の省力化や効率化に関する検討も求められている。

2.2 開発した列車巡視支援アプリの概要

前述の維持管理標準および維持管理標準の手引きに定められた列車巡視の位置付けと現状を踏まえ、地域鉄道でも導入可能な低コストな列車巡視の支援方法を検討した。具体的には、列車巡視支援用に開発した専用のアプリケーション（以下、「アプリ」という。）をインストールした携帯情報端末を使用する。列車巡視時に鉄道従事員が目視で確認している多岐にわたる項目については動画あるいは画像を、体感で確認している列車動揺については加速度を活用する。これらによって、列車巡視時の確認項目のデジタルデータでの管理を可能とする。

図1に、列車巡視支援アプリ（Train Patroller）の計測画面を示す⁹⁾。本アプリは、Apple社製のiOSを搭載した携帯情報端末上で動作し、簡易な操作性を追求した仕様とした。現状では、列車巡視時に鉄道従事員が携帯情報端末を鉄道車両に設置し、計測開始・終了を行う仕様となっている。

表1に、本アプリの主な計測項目を示す。本アプリは、携帯情報端末に内蔵されたGPSレシーバによって移動速度と緯度・経度を、モーションセンサによって3軸の加速度と角速度を、背面カメラによって動画を、マイクロフォンによって音声を計測可能である。計測モードは、「振動」「振動 & 動画」「動画」の3つがあり、目的に応じて計測項目を選択できるようになっている。なお、動画については、最高設定においては60fps/4K解像度で計測可能である。また、動画計測時は、ブレの少ない動画を得るために、iPhone 14以上を使用することを推奨している。

2.3 鉄道車両への設置方法

図2に、鉄道車両への携帯情報端末の設置方法の例を示す。まず、図2(a)に示すように、列車動揺の管理のために車体加速度を計測する場合、維持管理標準の手引き⁸⁾においては、「列車の最前部前車または最後部後台車上の床で行う。正確な測定を行うため、加速度計は水平な場所に、列車進行方向に対して真直ぐになるように配置する。」と示されている。しかしながら、この位置はGPSの受信感度が低いこと、また営業車両では台車直上は客室内であることから、実務上は計測に適さ

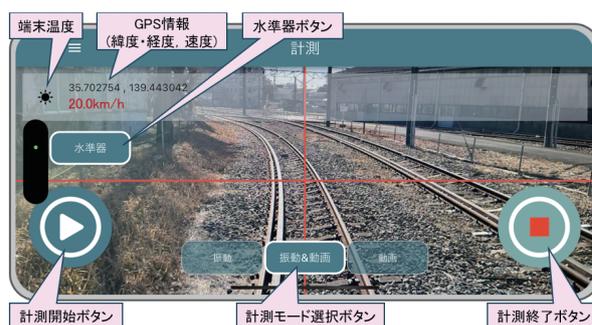


図1 列車巡視支援アプリの計測画面

表1 列車巡視支援アプリの主な計測項目

センサ	計測項目	計測モード			サンプリング等 (ファイル形式)
		振動	振動 & 動画	動画	
GPS レシーバ	移動速度	○	○	○	1Hz (txt形式)
	緯度・経度	○	○	○	
モーション センサ	3軸加速度	○	○	—	100Hz (txt形式)
	3軸角速度	○	○	—	
カメラ (背面カメラ)	動画	—	○	○	10/20/30/60fps VGA/HD/FullHD/4K (mp4形式)
マイクロ フォン	音声	○	○	○	16kHz (m4a形式)

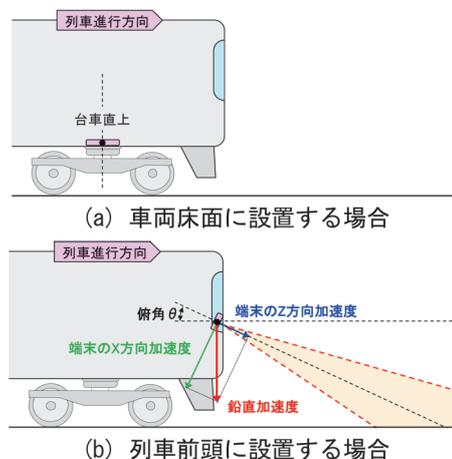


図2 鉄道車両への携帯情報端末の設置方法の例

ない。そのため、図2(b)に示すように、携帯情報端末を鉄道車両の前頭の運転室内のフロントガラス面に設置することを提案する。この位置に設置することで、GPSの受信感度が向上するだけでなく、前方動画を取得することも可能となる。なお、この位置に携帯情報端末を設置した際の加速度は、車両形式によってばらつきはあるが、台車直上に設置した場合と比較して5~15%程度大きくなることが確認されている¹⁰⁾。また、治具を用いることで、携帯情報端末に俯角を設定して固定することが可能となり、確認したい目的に応じて前方動画の視野を調整することが可能となる。なお、携帯情報端末の俯角

を含む設置角度は前方動画の視野の他に列車動揺の評価に影響するため、設置時に図1に示した「水準器」機能で確認可能となっているとともに、計測開始時に自動で記録され、後述する列車動揺の補正に活用可能である。さらに、「端末温度」表示によって、携帯情報端末の内部温度を監視し、熱暴走による計測異常等の発生を事前に防止可能である。

2.4 計測データの処理方法

開発した列車巡視支援アプリによって取得されるデータは、表1に示したように一般的なファイル形式で保存されるため、様々なソフトウェアで表示・処理することができる。ここでは、その一例として、図3に示すような手順でデータ処理を行う。まず、計測データは、Windows OS 環境においては、Apple 社製のメディアプレイヤー「iTunes」を用いてPCに取り込む。次に、携帯情報端末で収録される加速度・角速度データ、およびGPS 関連データは、微小なサンプリング揺らぎが生じることがわかっているため、これを補正するために専用のソフトウェア「Train Patroller Resampler」によって中間データに変換する¹⁰⁾。そして、軌道保守管理データベースシステム「LABOCS¹¹⁾」を用いて、フィルタ処理、時間・距離変換、キロ程付与、著大値リスト作成などを行う。これにより、LABOCS の波形 Viewer でのチャート表示も可能である。なお、LABOCS とは、鉄道総研が開発している軌道関係データの処理に特化した信号処理ソフトウェアであり、多くの鉄道事業者を導入されている。一方、動画データについては、そのまま汎用の動画 Viewer で閲覧したり、LABOCS で作成した字幕情報を重ねてキロ程を付与して閲覧することも可能である。さらに、射影変換処理¹²⁾によって俯瞰画像化し、汎用の画像 Viewer で確認することも可能である。

3. 鉄道路線への試験適用事例

3.1 路線概要と計測方法

開発した列車巡視支援アプリを Apple 社製の携帯情報端末 iPhone 14Pro にインストールし、実際の鉄道路線において試験計測を実施した。試験路線は、単線・電化、大部分がバラスト軌道の路線である。試験区間の年間通過トン数は約 700 万トン、線区の最高運転速度は 130km/h である。

図4に、営業車両（特急形車両）への携帯情報端末の設置状況を示す。この事例では、比較・検証のために3台の携帯情報端末を用いた。端末Aおよび端末Bは車両前頭の貫通扉のガラス面に、端末Cは車両最前部の床上に設置した。端末Aは、軌道を含む線路周辺の広い範囲の状況確認用として、両面テープを用いて俯角0°でガ

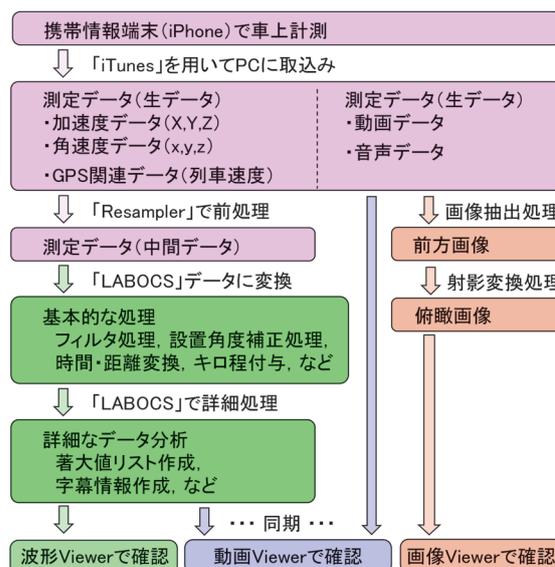


図3 計測データの処理方法の例



図4 営業車両への携帯情報端末の設置状況の例

ラス面に直接固定した。端末Bは、軌道の状況確認用として、十分な剛性を有した市販の吸盤治具を用いて俯角28°で固定した。前方動画は、解像度は4K (3840×2160)、フレームレートは30fpsで取得した。また、端末Cは、比較用として床上に両面テープで直接固定した。なお、今回試験を行った車両形式においては、台車直上は客室内であったため、この位置での測定は実施していない。

3.2 加速度の列車動揺管理への活用例

列車巡視支援アプリによって取得される加速度データは、列車動揺の管理に活用可能と考えられる。図4に示した条件で計測した列車動揺と同じ区間で近い時期に測定された軌道変位の波形例を図5に示す。加速度は、維持管理標準の手引き⁵⁾を参考に、計測した加速度を8Hzのローパスフィルタで処理した波形として示している。同図より、高低変位が大きい箇所では上下加速度が、通り

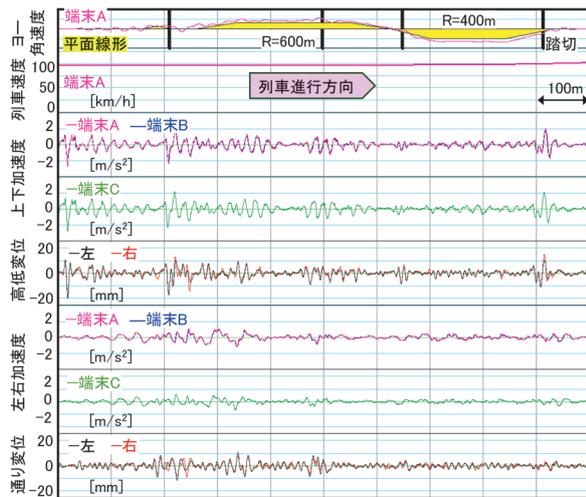
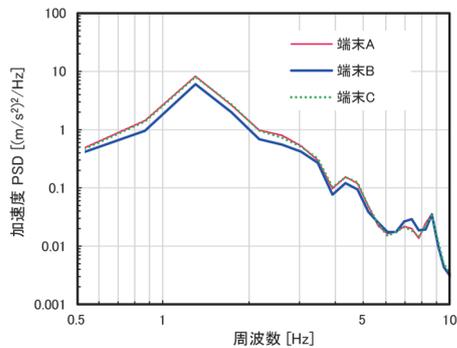
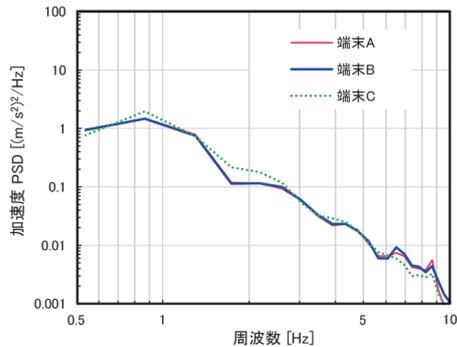


図5 加速度と軌道変位の波形例



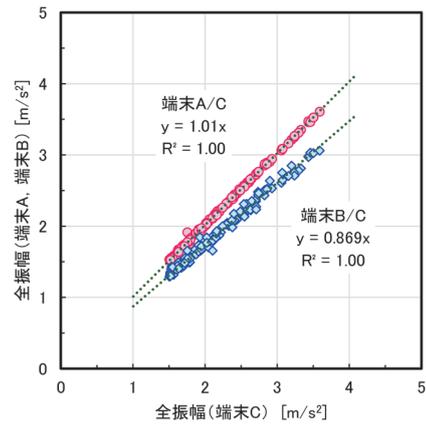
(a) 上下加速度



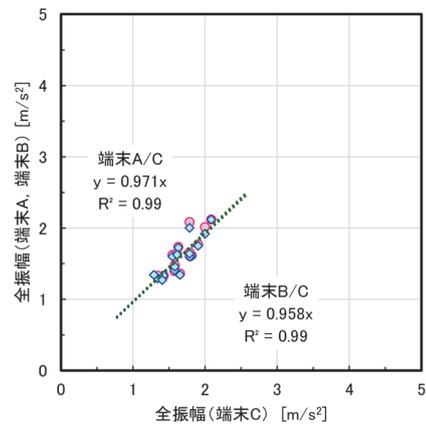
(b) 左右加速度

図6 加速度のPSDの比較(速度約100km/hの区間)

変位が大きな箇所では左右加速度が大きくなる傾向にあることがわかる。また、端末A、Bおよび端末Cの波形を比較すると、携帯情報端末の設置位置や設置方法、俯角によって、波形には明瞭な差はないことがわかる。また、同図中には参考として平面線形に加え、携帯情報端末で同時に計測したヨー角速度を示しているが、平面線形とヨー角速度の位相はよく一致していることから、図3に示した時間・距離変換およびキロ程付与方法は、実用上十分なキロ程付与精度を有していることがわかる。



(a) 上下加速度



(b) 左右加速度

図7 加速度の全振幅の比較

図5に示した区間のデータを用いて算出した加速度のパワースペクトル密度(以下、PSDという)の例を図6に示す。分析した区間の列車の平均速度は、約100km/hである。図6(a)より、上下加速度のPSDは、端末Aと端末Cで概ね同じであることから設置位置の影響は小さいと考えられる。一方、端末Aと端末Bで比較すると、端末Bの方が全体的に小さくなっており、これは、図4に示したように、端末Bは俯角を設定して固定したため、携帯情報端末の加速度の観測軸が鉛直方向からずれたことによる影響と考えられる。次に、図6(b)より、左右加速度のPSDは、端末Aと端末Bで概ね同じであることから、俯角の影響は小さいと考えられる。一方、端末Aと端末Cで比較すると、多少の違いがみられ、これは、図4に示したように、設置位置の違いが影響していると考えられる。

図7に、図5に示した区間を含むデータを用いて算出した加速度の全振幅の比較の例を示す。同図は、上下加速度、左右加速度ともに端末Cの全振幅が1.5m/s²以上のピークを抽出してプロットしている。図7(a)より、上下加速度の全振幅は、端末Cと端末Aは概ね同じであることがわかる。端末Cと端末Bで比較すると、端

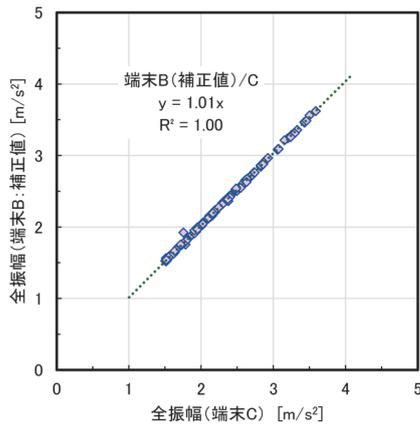


図8 ベクトル合成による上下加速度の補正効果

末Bの方が端末Cより約15%小さい傾向にあることがわかる。これは、端末Bの俯角の影響であると考えられる。次に、図7(b)より、左右加速度の全振幅は、上下加速度と比較して全体的に小さく、かつばらつきが大きい、端末Cと比較して、端末A、端末Bの方が約3~4%小さい傾向にあることがわかる。これは、車両構造による特性と端末の設置位置の影響であると考えられる。

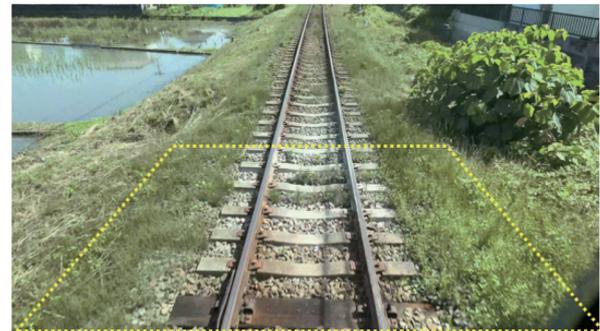
そこで、端末Cとの差が大きかった端末Bの上下加速度について、端末Bの俯角を用いてX軸加速度とZ軸加速度のベクトル合成による鉛直加速度の補正を検討した。図8に、端末Cの上下加速度と、端末Bの加速度をベクトル合成して補正した上下加速度との比較を示す。同図より、両者の差はほぼ解消されており、俯角を設けて携帯情報端末を設置した場合でも、上下動揺の管理に活用できることがわかった。なお、本手法で得られた加速度データを列車動揺検査として活用する場合、列車前頭と台車直上で測定した加速度との差異については、本手法の導入時に比較計測を実施することで、補正可能と考えている。

3.3 前方動画の軌道状態確認への活用例

列車巡視支援アプリによって取得される前方動画データは、机上での線路巡視に活用可能と考えられる。例えば、列車動揺の基準値超過箇所の軌道状態の確認への活用が想定される。図9に、図4に示した条件で取得した前方動画から抽出した噴泥箇所前方画像の例を示す。図9(a)の画像中の上部には、字幕情報としてキロ程と列車速度、上下動揺・左右動揺の全振幅値を示している。当該区間では、列車は約98km/hで走行していたことがわかる。各図中の黄色の台形の破線は、おおよその射影変換の領域である。図9(a)に示す俯角0°で設置した端末Aの前方画像は、線路全体の状況確認に適している。一方、図9(b)に示す俯角28°で設置した端



(a) 端末A (俯角0°)



(b) 端末B (俯角28°)

図9 噴泥箇所前方動画の例

末Bの前方画像は、線路全体を確認するには視野が狭いが、軌道周辺が大きく映っており、図9(a)より詳細に軌道状態を確認することが可能である。

図10に、図9に示した各前方画像を射影変換して俯瞰画像化した結果を示す。各図中には、同一のレール締結装置周りに着目して拡大した画像についても示している。図10(a)に示す端末Aの俯瞰画像は、軌道周辺まで含まれており、画像全体に占める軌道の領域が狭い。一方で、図10(b)に示す端末Bの俯瞰画像は、画像全体の広い領域が軌道で占められており、かつ図10(a)と比較して画像の歪みが小さいことから、レール締結装置等、軌道の細部を確認可能である。

このように、確認したい範囲や対象に応じて、携帯情報端末を設置する際の俯角を適切に設定するとよい。前方動画やこれから抽出した前方画像、さらにはこれを射影変換した俯瞰画像は、列車巡視の支援のみならず、徒歩巡視の補完あるいはその代替として活用できる可能性がある。

なお、前方動画から前方画像を抽出し、射影変換によって俯瞰画像を得るのに要する解析時間については、使用するPCのスペックにも依存するが、今回は、汎用のGPUを搭載したPCを使用し、動画の全フレームの画像を抽出したが、概ね動画再生時間の3倍程度の時間を要した。



(a) 端末 A (俯角 0°)



(b) 端末 B (俯角 28°)

図 10 前方画像を射影変換した俯瞰画像の例

4. まとめ

本研究では、携帯情報端末の各種センサを活用した列車巡視アプリを開発するとともに、これを用いた列車巡視支援方法について検討し、実際の鉄道路線において試行した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 鉄道構造物等維持管理標準（軌道編）に定められている列車巡視の要件を考慮し、携帯情報端末上で動作する列車巡視支援アプリを開発した。開発した列車巡視支援アプリは、簡易な操作性とするとともに、携帯情報端末に内蔵された各種センサとカメラ等を活用し、列車速度や加速度・角速度、前方動画などを計測可能である。なお、動画については、最高設定においては、60fps/4K画質で計測可能である。
- (2) 開発アプリを用いて、鉄道事業者の営業線で列車巡視時の試験計測を実施し、得られたデータの活用方法について検討した。加速度データについては、俯角を設定して端末を設置した場合においても、加速度を補正することで、列車動揺の管理に活用できると考えられる。同様に、前方動画データについては、前方動画にキロ程や加速度値などを字幕情報として付与する方法を開発するとともに、動画から抽出した前方画像を射影変換し

て、俯瞰画像化することで、線路を真上から見たような画像が得られることを示した。これらによって、机上での軌道状態の確認が容易になると考えられる。

最後に、本論文で述べた技術は、列車巡視支援ツールとして一定の実用化レベルにあるものの、例えば自動計測機能や、軌道異常の自動検出技術、さらにはデータ処理・閲覧用のサーバーシステムの開発など、更なる研究の余地がある。これらについては、現在、開発を進めており、別の機会に報告したい。

謝 辞

本論文で提案した列車巡視支援方法の営業線における試行に際し、協力いただいた鉄道事業者の関係各位に敬意を表すとともに、深く感謝の意を示します。

文 献

- 1) 国土交通省・鉄道局：地域鉄道の現状，<https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001573729.pdf> (参照日：2024年8月16日)
- 2) 土木学会・インフラメンテナンス（鉄道）特別委員会編：鉄道インフラの健康診断と将来のメンテナンスに向けた提言，2020
- 3) 長山智則：メンテナンスの効率化・高度化に向けたモニタリング技術開発，日本鉄道施設協会誌，Vol.61，No.3，pp.3-6，2023
- 4) 国土交通省・道路局：点検支援技術性能カタログを拡充－橋梁・トンネル・土工・舗装・道路巡視の点検支援技術を追加，<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001737836.pdf> (参照日：2024年8月16日)
- 5) 篠田憲幸，網島均，松本陽，佐藤安弘，緒方正剛：携帯情報端末を用いた営業列車振動データにもとづく軌道管理手法，日本機械学会論文集，Vol.88，No.911，No.21-00375，2022
- 6) 池内三津喜，田中浩平：スマートフォンを活用した線路保守システムの開発，サイバネティクス，Vol.28，No.1，pp.22-27，2023
- 7) 国土交通省・鉄道局：通達 鉄道構造物等維持管理標準の制定について，国鉄技第73号，2007
- 8) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準（軌道編）の手引き，2007
- 9) 田中博文，趙博宇，蘇迪，長山智則：携帯情報端末を活用した鉄道線路維持管理用の低コストな列車巡視支援方法の実用化に関する研究，AI・データサイエンス論文集，5巻，1号，pp.56-65，2024
- 10) 田中博文，蘇迪，長山智則：携帯情報端末を活用した低コストな軌道状態管理に関する基礎的検討，鉄道工学シンポ

- ジウム論文集, Vol.22, pp.39-46, 2018
- 11) 鉄道総合技術研究所, ジェイアール総研情報システム編 :
軌道保守管理データベースシステム LABOCS Ver.4.2 使用
説明書, 2020
- 12) 長峯望, 坪川洋友, 合田航, 前田梨帆, 加藤爽, 糸井謙介 :
列車前方画像を用いた画像解析による軌道設備の検査, 鉄
道総研報告, Vol.36, No.12, pp.7-12, 2022

数値解析に基づく沿線地盤振動の低減対策の提案方法

野寄 真徳* 横山 秀史*

A Method for Proposing Countermeasures against Ground Vibrations
along Railway Lines based on Numerical Simulation

Masanori NOYORI Hidefumi YOKOYAMA

There have been many studies on countermeasures against train-induced ground vibration. However, in many of the countermeasures, the mechanisms and reduction values have not been clarified. Therefore, countermeasures are generally selected on the basis of previous cases or empirical judgments. Using a numerical simulation consisting of a running train, tracks, supporting structures and the ground, we investigated a method for extracting primary factors of the vibration. Then, a method for proposing countermeasures considering the primary factors was investigated. In addition, this report presents a flow chart which shows the relationship between the primary factors and the proposed countermeasures.

キーワード：鉄道振動，振動低減対策，数値解析，主要因の抽出，構造物の振動特性，地盤の伝播特性

1. はじめに

列車走行に伴う地盤振動（以下，鉄道振動という）は，沿線環境保全のため，必要に応じて振動低減対策が実施されることがある。

振動低減対策には，主に車両対策，軌道対策，構造物対策，地盤対策があり，それぞれ多くの研究例がある¹⁾²⁾。論文等で公開された鉄道振動の対策工のリストを表1に示す。実務では，表1などを用いて候補を選定し，別途各候補の振動低減効果を事前評価した上で，振動低減対策を提案する。しかし，候補の選定や振動低減効果の評価は，既往の事例や技術者の経験的な判断に依存するところが大きく，対策工を施工したとしても想定した振動低減効果が得られないことがある。このため，経験的な判断をできるだけ排し，かつ現地の条件を反映できるような振動低減対策の提案方法が必要である。

鉄道振動の分野では，走行列車・軌道・構造物・地盤をモデル化した数値シミュレーション（以下，鉄道振動シミュレーションという）を用いた研究⁴⁾が行われている。この鉄道振動シミュレーションは，走行列車，軌道，構造物，地盤をモデル化しているため，車両対策，軌道対策，構造物対策，地盤対策の振動低減効果について，振動の発生・伝播メカニズムを考慮した検討を実施できるという利点がある。また，走行列車による構造物への加振力や，構造物上の各点から地盤までの伝達関数など，実測が困難なものをモデルの適用範囲内ではあるが，推定できるという利点もある。

そこで本報告では，振動低減対策の提案方法として，

技術者の経験的な判断への依存を極力抑えた方法を構築することを目的に検討を行った。なお，その提案方法は，振動を低減したい鉄道沿線の箇所において，地盤振動が特に大きくなっている要因（以下，振動卓越の要因という）に着目し，その要因を抑制する振動低減対策を提案する方法とした。また，その過程で振動卓越の要因を抽出する方法に関する検討を行った。これら検討には，鉄道振動シミュレーション⁴⁾を用いた。

2. 検討対象箇所と測定の概要

検討対象箇所の断面図を図1に示す。今回は，複線の3径間の張り出し式ラーメン高架橋区間を対象とし，沿線地盤において鉄道振動測定と表層地盤調査を実施した。基礎は地中梁がない杭長4mの杭基礎である。鉄道振動測定には，リオン（株）製の振動レベル計（VM-52）とティアック（株）製のデータレコーダ（LX-110）を使用した。サンプリング周波数は3kHzとし，鉛直成分と水平2成分を測定した。鉄道振動の測定位置は，測定器を展開した側の軌道中心から線路直交方向に水平距離で10.0m離れた位置（以下，10.0m位置という）とし，測定器を展開した側の軌道を通じた列車を測定対象とした。

検討対象箇所では，表層地盤のS波速度構造を把握するため，表面波探査^{例えば6)}と微動アレイ探査^{例えば7)}を行った。これら地盤調査の結果は，次章の鉄道振動シミュレーションの地盤モデル作成時に使用した。

* 防災技術研究部 地質研究室

表1 地盤振動の低減対策工のリスト³⁾に加筆

種別	手法	工法	説明	
車両	車両軽量化	軸重軽減	高速車両の設計に反映されている。主に車体部の軽量化。	
軌道	低ばね化	低ばね定数レール締結装置	スラブ軌道においてレールとスラブ間の弾性支承部のばね定数を小さくする対策。	
		弾性マクラギ	マクラギ下に弾性材を取り付ける対策。新幹線等の有道床軌道の対策として実用化。	
		バラストマット	有道床軌道のバラストの下に弾性マットを敷く対策。新幹線等の有道床軌道の対策として実用化。	
		弾性マクラギ直結軌道	マクラギを弾性材で支持して路盤に固定。在来線の新設線で実用化。新幹線では試験的な敷設あり。	
		フローティング軌道	主にトンネル区間での対策。軌道を含むスラブ全体を弾性支持装置で支える対策。	
	軌道不整の低減	軌道整備, レール交換, レール削正	軌道整備やレール交換, レール削正等により軌道不整を低減させる	
	高剛性化	高剛性軌道	線路方向の軌道の曲げ剛性を増加する対策。レールのグレードアップ(重軌条化), 既存のマクラギを線路方向に鋼材で締結する工法(マクラギ締結工)等。	
	重量化	マクラギ増設化	マクラギ間隔を狭くして単位延長あたりのマクラギ本数を増加。	
		マクラギ重量化	マクラギの重量を増加。	
	路盤改良	EPSブロック	発泡スチロール(EPS)ブロックを軌道下路盤内に敷き詰める対策。	
立体補強材		立体補強材を軌道下路盤内に敷き詰める対策。		
路盤改良		マクラギ下路盤を注入材により強化する方法, セメント・水・土を混合した改良土による杭(攪拌杭)を構築して路盤を強化する方法等。		
構造物	部材剛性増		構造物の柱や梁などの部材の剛性を増加させる対策や基礎の拡大など。	
	高架橋の端部補強工		張り出し式高架橋の端部を補強する対策。張り出し部のある新幹線高架橋区間で実用化。	
	ダンパー		構造物にダンパーを取り付けて振動を減衰させる対策。	
	動吸振器TMD(tuned mass damper)		錘とバネとダンパーを組み合わせ, ある特定の周波数の振動を吸収する装置。対象とする構造物の固有周波数に同調させて用いるものをTMDと呼ぶ。	
	アクティブ制御, ハイブリッド制御		外部加振装置によって構造物の振動を制御するものをアクティブ制御, TMDとアクティブ制御の組み合わせをハイブリッド制御と呼ぶ。	
地盤	溝	空溝	振動源と対象物との間に溝を設ける対策。	伝播経路である地盤内で振動を遮断し, 対象物へ伝わる振動を低減する。
	地中壁	鋼矢板	振動源と対象物との間に鋼矢板を打設。	
		コンクリート壁	振動源と対象物との間にコンクリート壁を打設。	
		PC壁体	振動源と対象物との間に中空のPC杭(70cm×70cm程度の断面)を連続的に壁状に打設。	
		発泡ウレタン壁	振動源と対象物との間に発泡ウレタンブロックを壁状に埋設。現場発泡により壁体を構築することも可能。	
		改良土壁	振動源と対象物との間にセメント・水・土を混合した改良土により壁体を構築	
		その他	廃ゴム材などで壁体を構築。	
地盤改良	地盤改良	振動源周辺もしくは振動源と対象物との間の地盤を改良する工法。振動源自体もしくは振動源周辺の振動を抑制する。		

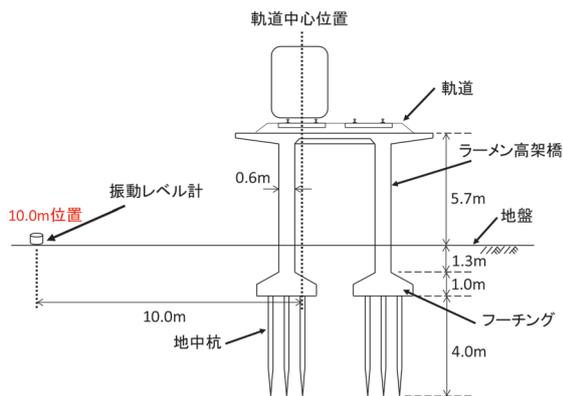


図1 検討対象箇所の断面図と鉄道振動の測定器配置⁵⁾

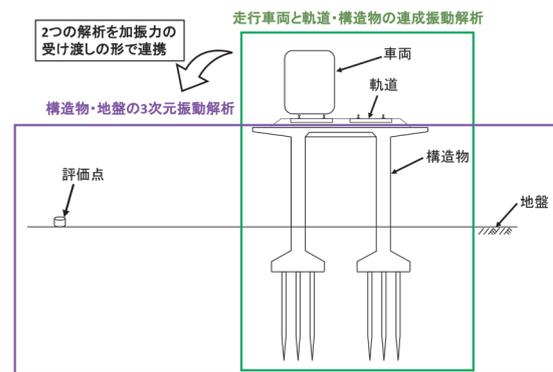


図2 鉄道振動シミュレーションの構成⁴⁾

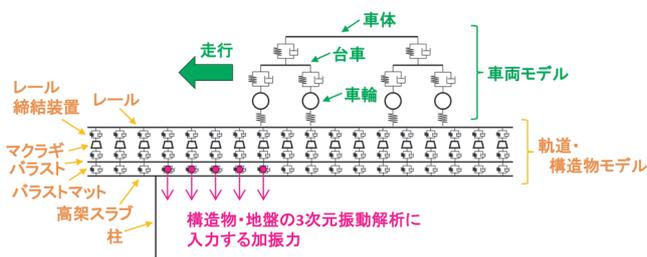


図3 走行車両と軌道・構造物の連成振動解析モデル⁵⁾

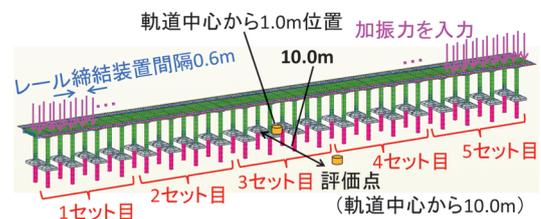


図4 構造物・地盤の3次元振動解析モデル (5セット分をモデル化)⁵⁾

3. 鉄道振動シミュレーションの概要

鉄道振動シミュレーション⁴⁾の構成を図2に示す。今回検討に用いた鉄道振動シミュレーションでは、走行車両と軌道・構造物の連成振動解析(図3)と構造物・地盤の3次元振動解析(図4)の2つに分割し、加振力の受け渡しの形で両者を連携させることで沿線での地盤振動を算出する。

走行車両と軌道・構造物の連成振動解析はサブストラクチャー法を用いた移動体と構造物の動的相互作用解析手法⁸⁾により行った。解析モデルは2次元有限要素法で作成した(図3)。構造物は3径間の張り出し式ラーメン高架橋を5セット分モデル化した。車両は既往の文献⁹⁾を基に標準的な新幹線車両の解析モデルを作成し、解析規模の制約により8両とした。軌道は既往の文献¹⁰⁾を参考に作成し、軌道不整は現地の測定値を用いた。構造物は標準設計図面を参考に作成した。構造物・地盤の3次元振動解析はサブストラクチャー法による動的相互作用解析手法^(例えば11)により行った。構造物モデル(図4)は3次元有限要素法、地盤モデルは薄層要素法で作成した。地盤は地盤調査の結果を参考に作成した。なお、今回の鉄道振動シミュレーションの詳細は文献5を参照されたい。

数値シミュレーションによって算出された地盤振動の再現解析結果を測定記録と共に図5に示す。再現解析は現地測定箇所の諸元を用いて実施した。本報告で使用し

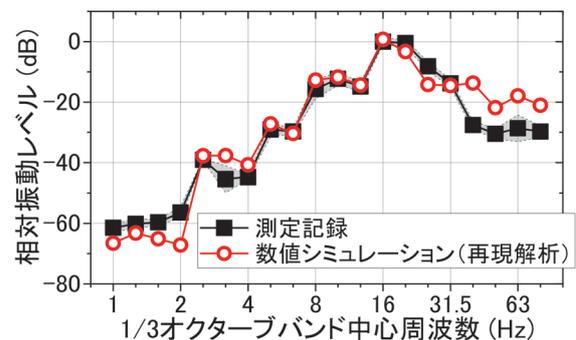


図5 測定記録とシミュレーションによる再現解析結果 (評価位置: 軌道中心から10.0m位置, 灰色の範囲は標準偏差を示す)⁵⁾

た鉄道振動記録は、測定器を展開した側の線路を走行した5列車の記録の平均であり、列車速度の差は平均速度から±6%以内に収まっている。図5は10.0m位置における再現解析結果および測定記録の1/3オクターブバンドスペクトルである。測定記録に関しては標準偏差を併せて示す。図5も含め、本報告中の1/3オクターブバンドスペクトルは測定記録の16Hz帯域の値を0dBとして示した。図5をみると、31.5Hz以下の周波数帯域において、再現解析結果は測定記録を概ね再現していることがわかる。また、再現解析結果および測定記録の両方において、16-20Hz帯域にピークがあり、この帯域で全体の振動レベルが決まっていることがわかる。そこで、次章では16-20Hz帯域に着目し検討を行った。

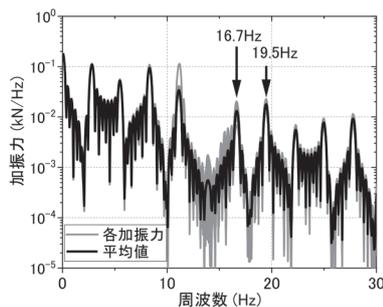


図6 振動源の特性⁵⁾

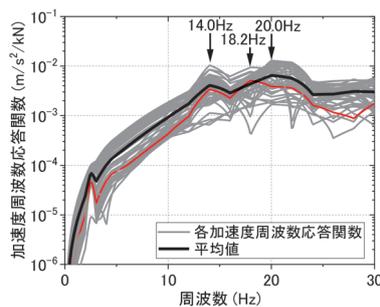


図7 構造物の振動特性 (赤線は18.2Hzにピークを持つ加速度周波数応答関数を示す)⁵⁾

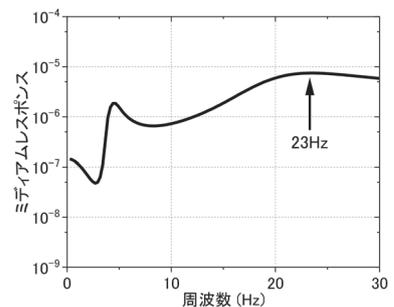


図8 地盤の伝播特性⁵⁾

4. 振動卓越の要因の抽出方法

測定される鉄道振動は、振動源の特性、構造物の振動特性、地盤の伝播特性の3つを掛け合わせたものと考えられ、特定の箇所の地盤振動が卓越する場合には、これら3つの特性のうち1つないし複数に要因があるものと考えられる。しかし、これら3つの特性に分けて実測することは容易ではない。そこで、数値シミュレーションにより、振動源の特性、構造物の振動特性、地盤の伝播特性の3つの個別評価を行い、鉄道振動の振動卓越の要因を抽出する方法について検討を行った。

4.1 振動卓越の要因の抽出方法の検討

本章では、図1に示す10.0m位置を例題として、この位置において測定記録とシミュレーションの両方でピークとなっている16-20Hz帯域の振動を卓越させた要因の抽出を検討対象とした。検討には、3章の鉄道振動シミュレーションと、地盤の水平成層モデルから求まるミディウムレスポンス¹²⁾を用いた。

3つの特性のうち、振動源の特性は走行車両と軌道・構造物の連成振動解析により求めた各加振位置の加振力とそれらの加振力の平均値で評価した。ここで加振力は、レール締結装置間隔で計算したバラスト-高架スラブ間の力とした。

構造物の振動特性は構造物・地盤の3次元振動解析で求めた各加振位置に対する加速度周波数応答関数と、それらの平均値で評価した。加速度周波数応答関数は、各レール締結装置直下の高架スラブ位置を加振位置とし、軌道中心から1.0m離れた地盤位置(図4)を応答出力位置とした。

地盤の伝播特性はRayleigh波の基本モードのミディウムレスポンスとした。

振動源の特性、構造物の振動特性、地盤の伝播特性をそれぞれ図6、図7、図8に示す。まず、振動源の特性をみると、着目帯域内では16.7Hzおよび19.5Hzに車

軸が繰り返し通過することに伴うスペクトルのピーク¹³⁾があり、これが1/3オクターブバンドスペクトルの16-20Hz帯域のピークに対応していることがわかる。しかし、図6に示すように、振動源の特性には周波数の増加と共に振幅が減少するトレンドがあり、16.7Hzおよび19.5Hzのピーク値は他の周波数のピーク値と同程度以下であることから、16-20Hz帯域の加振力の振幅が大きいことがこの帯域で振動が卓越していることの直接的な要因であるとは考えにくい。

次に、構造物の振動特性をみると、周波数の増加と共に振幅が増加するトレンドがあり、平均値では14.0Hzや20.0Hzにそのトレンドから逸脱するピークがある。また、加振位置によっては、18.2Hz付近にピークを持つ点があり、これらのピークが16-20Hz帯域の振動卓越の要因である可能性がある。

地盤の伝播特性をみると、周波数の増加と共に振幅が増加するトレンドに対し、23Hz付近にそのトレンドから逸脱する緩やかなピークがあり、20Hz程度以上の振動が伝播しやすい地盤であることがわかる。23Hz付近と比較すると、20Hz付近の値は8割程度、16Hz付近の値は3割程度となっている。したがって、20Hz帯域の振動卓越には影響していると考えられるが、16Hz帯域への影響は小さく、ピークも緩やかであることから、16-20Hz帯域の振動卓越への影響は構造物の振動特性ほど大きくないと考えられる。以上の検討より、16-20Hz帯域の直接的な振動卓越の要因は構造物の振動特性にあり、振動源の特性や地盤の伝播特性による影響はこれよりも小さいと考えられる。

そこで、構造物の振動特性による振動卓越に寄与する構造物部位を抽出するため、ピークが現れている14.0Hz、18.2Hzおよび20.0Hzについて、構造物の振動形状を検討した。検討においては、構造物・地盤の3次元振動解析モデルを用いて、構造物上を鉛直方向に点加振した際の振動形状で評価した。加振はスラブ中央、柱上、スラブ端部の3ケースを行った(図9)。加振の線

路直交方向位置は左右レール位置であり、2点を同時加振した。振動形状の評価には、実験モード解析¹⁴⁾を用いた。図9の中間スラブ位置を加振したときの実験モード解析の結果を図10に示す。図10には解析に使用した図9のモデルの代表点の変形を図示している。14.0Hzでは線路方向に構造物端部に当たる部分（以下、スラブ端部という（図9））、18.2Hzおよび20.0Hzでは、梁で囲われたスラブ中央部（以下、中間スラブという（図9））で最も振幅が大きい。したがって、構造物の振動特性のうち、特にスラブ端部と中間スラブの振動が、16-20Hz帯域における振動卓越の要因である可能性が高いと考えられる。

4.2 抽出した振動卓越の要因の妥当性の検証

前節にて、16-20Hz帯域における振動卓越の要因として、スラブ端部と中間スラブの変形が大きい振動モードを抽出した。本節では、抽出結果の妥当性について検証した。前節で抽出した振動卓越の要因が真の振動卓越の要因であるならば、その部材の物性値や構造形式を変更して周波数応答関数を変化させれば、それに応じて評価点における対象周波数の鉄道振動も増減すると考えられる。そこで、振動卓越の要因として抽出された部材の物性値や構造形式を変更した解析モデルに対して鉄道振動シミュレーションを行い、変更前後の鉄道振動の差を比

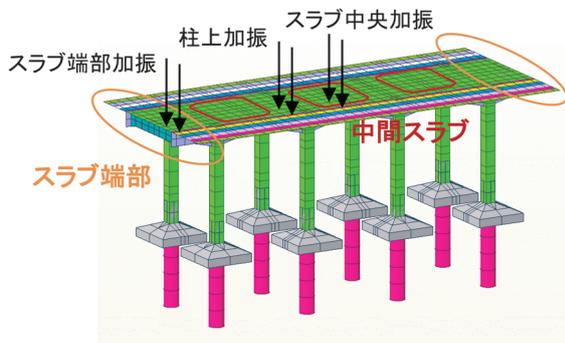


図9 振動卓越の要因の検討における加振位置⁵⁾

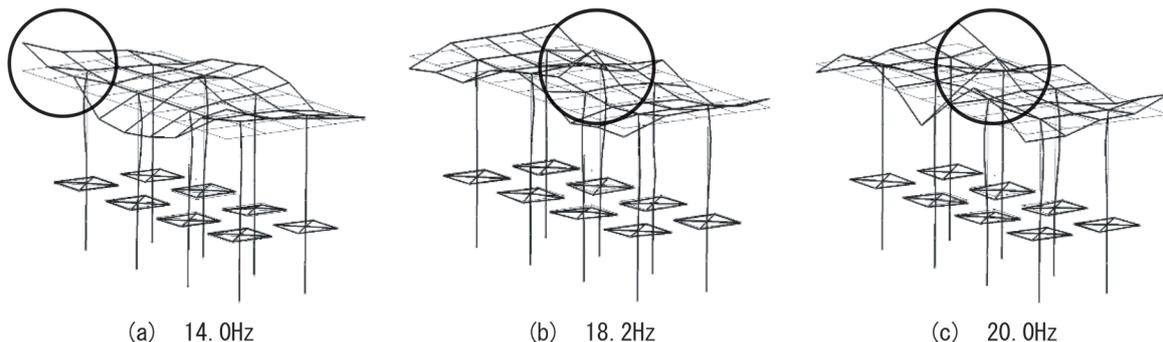


図10 実験モード解析による点加振時の振動形状（○の部分の振幅が最も卓越⁵⁾）

較することで検証を行った。

高架橋の振動対策は表1に示すように、部材剛性増、端部補強工、ダンパーなどがある。ここでは、部材の物性値や構造形式を変更した解析モデルとして、これら振動対策をイメージした解析モデルを作成した。

スラブ端部に関しては隣り合う高架橋と端部同士を剛結合した解析モデル（以下、剛結合モデルという）、中間スラブに関しては断面の剛性を5倍に上げた解析モデル（以下、剛性5倍モデルという）を作成した。剛性5倍モデルでは、解析上は中間スラブの部材のヤング率を5倍に設定した。なお、張り出し式ラーメン高架橋のスラブ端部の振動を抑制する対策には端部補強工¹⁵⁾がある。また、中間スラブの剛性を向上させる方法にはスラブ補強工¹⁶⁾があり、今回の検討ではこれらの対策工を参考にモデルを作成した。剛結合モデルや剛性5倍モデルの加振の条件は、再現解析と同一とした。具体的には、高架橋5セットに走行車両と軌道・構造物の連成振動解析で求めた加振力を入力した。

解析結果を図11に示す。部材の物性値や構造形式の変更前後を対象として振動レベルの変化の有無をみると、剛結合モデルの解析結果では、16-20Hz帯域を含む10-40Hz帯域においてシミュレーション結果が変化して

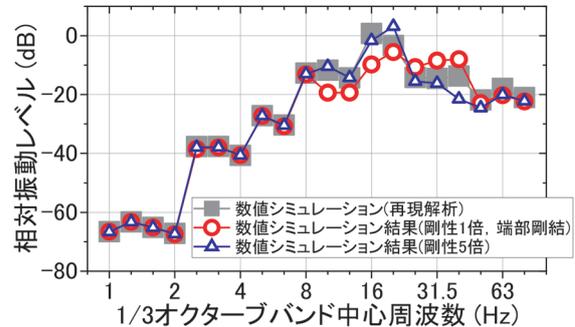


図11 抽出した振動卓越の要因の部材の物性値や構造形式を変更した解析モデルによる鉄道振動シミュレーション結果（評価位置：軌道中心から10.0m位置⁵⁾）

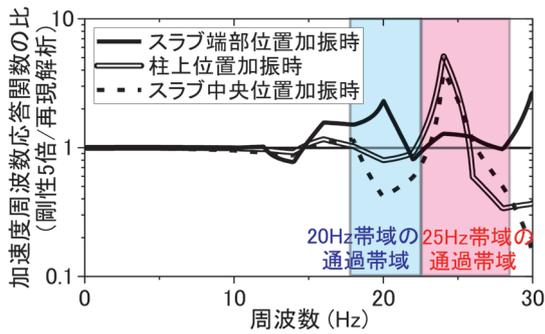


図 12 中間スラブの剛性を 5 倍とした解析モデルと再現解析モデルのスラブ端部位置、柱上位置、スラブ中央位置を加振した際の加速度周波数応答関数の比（応答出力位置：軌道中心から 10.0m 位置）⁵⁾

おり、16-20Hz 帯域における振動卓越の要因であると確認できる。また、剛性 5 倍モデルの解析結果では、16-20Hz 帯域を含む 16-40Hz 帯域においてシミュレーション結果が変化しており、こちらも 16-20Hz 帯域に影響する振動卓越の要因であると確認できる。

このように、振動源の特性、構造物の振動特性、地盤の伝播特性の 3 つの個別評価により、着目した周波数帯域における振動卓越の要因を抽出することができた。

次章では、本章において抽出した振動卓越の要因を用いて、振動低減対策を提案する方法について検討した。

5. 抽出した振動卓越の要因に基づく振動低減対策の提案方法

図 11 の通り、前章では部材の物性値や構造形式の変更前後で 16-20Hz 帯域の振動が変化することを確認した。図 11 において変更前後の振動レベルの大小関係を比較すると、剛結合モデルの解析結果では、再現解析結果と比べ、10-20Hz 帯域で値が小さくなっている。したがって、隣り合う高架橋と端部同士を剛結合することは 16-20Hz 帯域の振動を低減する対策の候補として考えられる。しかし、25-40Hz 帯域では、逆に値が大きくなっている。これは隣り合う高架橋と端部同士を剛結合することで、構造物全体がより剛となったためと考えられる。

一方、剛性 5 倍モデルの解析結果では、再現解析結果と比べ、20Hz 帯域の値が大きくなっている。したがって、中間スラブの剛性を 5 倍にすることを 16-20Hz 帯域の振動を低減する対策の候補にすることは難しい。このように、振動卓越の要因となっている部材が特定できたとしても、その部位の振動のみに着目して、逆効果を生じない振動低減対策を講じることは容易でないと考えられる。

そこで、振動卓越の要因に基づいて振動低減対策を検

討した際に、逆効果となった場合も含めて対応可能な振動低減対策の提案方法について検討を行った。検討にあたっては、まず部材の物性値や構造形式の変更後の解析モデルを対象として特性を再度評価し、変更後の解析モデルで鉄道振動の振動卓越の要因を特定した。特性の再評価方法として、変更後の解析モデルに対して図 6～図 8 を再作成し、各図を比較する方法もあるが、今回は変更前後の比を用いて再評価を行った。次に、特定した振動卓越の要因の振動を抑制した解析モデルを作成し、その解析モデルに対して鉄道振動シミュレーションを行い、部材の物性値や構造形式変更前後の地盤振動を比較した。ここでは、前章で抽出した振動卓越の要因のうち、中間スラブに対策を施した場合を例として、検討を行った。これは部材の物性値や構造形式の変更によって 20Hz 帯域の振動が大きくなった逆効果の例である。なお、振動卓越の要因を抑制する対策の選定は、表 1 などを用いて実施する。対策の選定において、技術者の経験的な判断を現段階で完璧に排することはできないため、その点は今後の課題である。

剛性 5 倍モデルと再現解析モデルの加速度周波数応答関数の比を図 12 に示す。加振位置は、解析モデルのスラブ端部位置、柱上位置、スラブ中央位置（図 9）であり、応答出力位置は 10.0m 位置（図 1）である。ここでは、左右レール位置を同時加振した結果を用いた。図 12 は、解析モデル変更前後に対する高架スラブから地盤振動評価位置までの加速度周波数応答関数の比であり、構造物の振動特性（図 7）と地盤の伝播特性（図 8）を組み合わせた結果と解釈できる。図 12 には 20Hz および 25Hz 帯域の通過帯域（1/3 オクターブバンドフィルタの上下限周波数）を併記した。比が 1 より大きい部分に着目すると、16-21Hz 付近の周波数において、スラブ端部位置を加振した際の比が 1 より大きく、中間スラブの剛性を上げたことでこの帯域の振動が伝わりやすくなったことが 20Hz 帯域の振動が大きくなった要因と考えられる。またこの結果から、剛性 5 倍モデルで振動が増大した要因としてスラブ端部の振動が抽出され、中間スラブの剛性を 5 倍とした上で隣り合う高架橋と端部同士を剛結合することで 16-20Hz 帯域の振動を低減できる可能性があると考えられる。

25Hz 帯域に着目すると、図 11 において剛性 5 倍モデルでは振動の卓越は見られない。図 12 をみると、24Hz 付近では柱上位置とスラブ中央位置加振時の比が 1 より大きいのにに対し、26Hz 以上の周波数範囲では比が 1 より小さい。25Hz 帯域の通過帯域は 22.4～28.2Hz であり、通過帯域の中で振動の増大と低減の効果が打ち消しあったため、結果的にこの帯域の振動の変化が小さくなったと考えられる。

中間スラブの剛性を 5 倍とした上で隣り合う高架橋

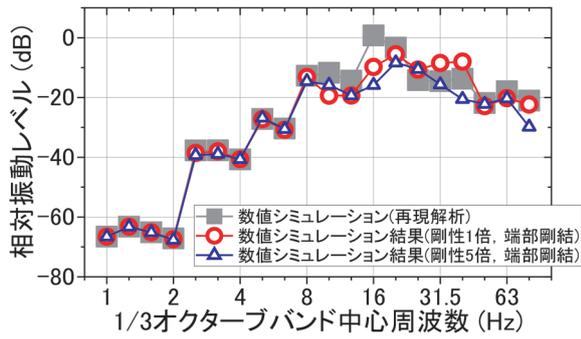


図 13 中間スラブの剛性を 5 倍とした上で隣り合う高架橋と端部同士を剛結合した解析モデルにおける鉄道振動シミュレーション結果（評価位置：軌道中心から 10.0m 位置）⁵⁾

と端部同士を剛結合した解析モデル（以下、剛性 5 倍 + 剛結合モデル）におけるシミュレーション結果を図 13 に示す。図 13 には、図 11 に示した再現解析結果および剛結合モデルの結果（図中、剛性 1 倍，端部剛結）を併せて再掲する。これを見ると、剛性 5 倍 + 剛結合モデル（図中、剛性 5 倍，端部剛結）の結果では、剛結合モデルの結果より、16-20Hz 帯域の値が小さくなること

わかる。また、剛結合モデルの結果では、25-40Hz の値が再現解析より大きくなっているが、その傾向も抑えられている。

以上の検討により、当初の解析モデルから抽出した振動卓越の要因に基づいて検討した振動低減対策が、逆効果となった場合でも、その対策モデルの特性を再度評価し、逆効果となった要因を特定し対策することで、振動低減対策の提案につながる事が確認できた。

ここまでの検討内容を、抽出した振動卓越の要因に基づく振動低減対策の提案方法としてフローにまとめた（図 14）。このフローでは、まず対象となる鉄道沿線の地盤振動を測定し、対策の必要性の有無を判断する。対策が必要な場合には再現シミュレーションを実施し、それを基に振動源・構造物・地盤の各特性を評価する。次に、評価した 3 つの特性のうち、いずれの特性に振動卓越の要因があるかを判断し、その振動卓越の要因を抑える対策案を決める。この際、振動卓越の要因が振動源にあった場合には、測定記録や軌道などの調査データ、シミュレーション結果をより詳細に分析し、振動卓越の要因が車両と軌道のいずれにあるかを判断する必要がある。また、振動卓越の要因が構造物にあった場合には、

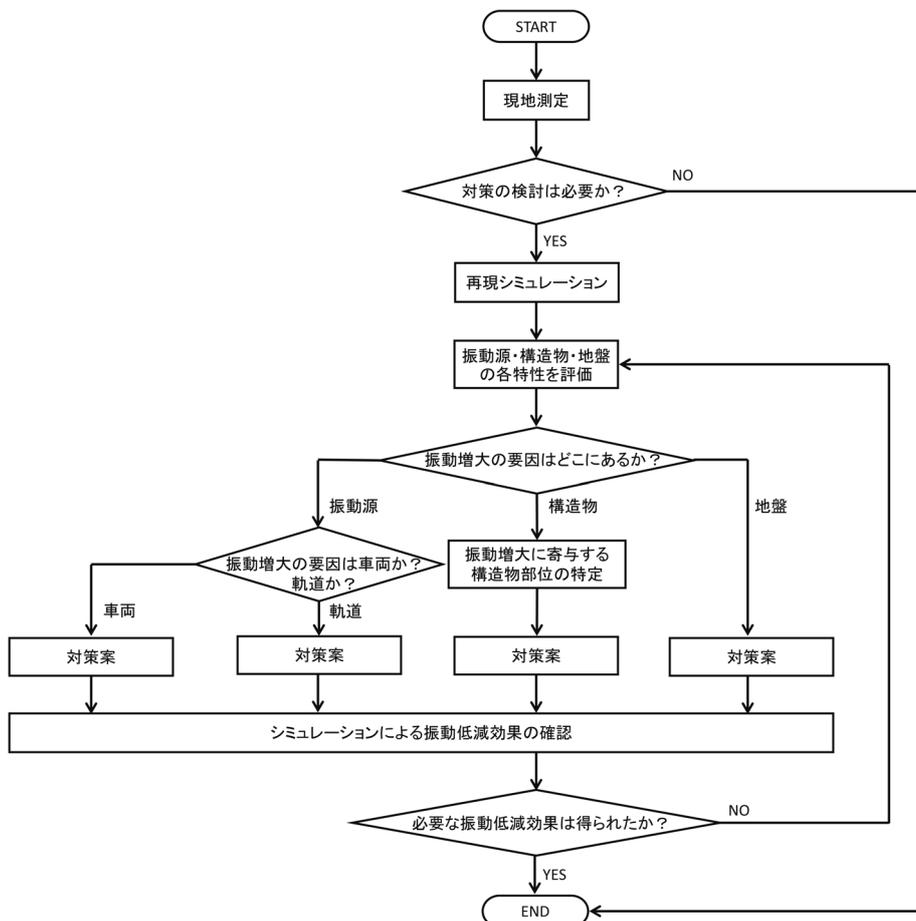


図 14 抽出した振動卓越の要因に基づく振動低減対策の提案方法のフロー⁵⁾

実験モード解析などを用いて、振動卓越に寄与する構造物部位の特定が必要となる。さらに、対策案の効果をシミュレーションにより確認し、必要な振動低減効果が得られる場合にはその対策案を実施する対策として提案する。一方で、必要な振動低減効果が得られない場合には、対策案を加えたモデルで振動源・構造物・地盤の各特性を再度評価し、新たな振動卓越の要因を判断する。このように、抽出した振動卓越の要因に基づき振動低減対策を検討することで、対象箇所合った振動低減対策を提案することが可能である。

本報告では、振動卓越の要因として構造物の部材振動を抽出し、その要因を抑える対策について検討した。これ以外の振動卓越の要因としては、例えば振動源であれば、軌道の振動や車両・軌道の連成系の振動、地盤であれば、伝播特性のピークや構造物・地盤の連成系の振動などが、現地の状況により抽出される可能性がある。これら振動卓越の要因が抽出された場合においても、図14のフローで対策の検討を実施できる。

図14のフローを使用する上で、各振動卓越の要因に対応する対策工は表1などを参考に選定することができる。表1に示した対策工を数値シミュレーションでモデル化する際には、本検討と同様に物性値の変更や要素の追加で実施できる。ただし、対策工ごとに振動低減効果を発揮しやすい環境や研究開発状況が異なるため、検討を行う際には対象の対策工について事前に調査することが重要である。

6. まとめ

本報告では、地盤振動の低減対策の提案方法として、技術者の経験的判断への依存を極力抑えた方法を構築することを目的に検討を行った。なお、その提案方法は、振動を低減したい鉄道沿線の箇所において、地盤振動が特に大きくなっている要因（振動卓越の要因）に着目し、その要因を抑制する振動低減対策を提案する方法とした。また、その過程で振動卓越の要因を抽出する方法に関する検討を行った。その結果、振動卓越の要因を抽出し、抽出した振動卓越の要因に基づき振動低減対策を検討することで、振動低減効果がより大きく逆効果を抑制した振動低減対策の提案につながる事が確認できた。さらに、これらの検討を抽出した振動卓越の要因に基づく振動低減対策の提案方法のフローとして取りまとめるとともに、公開文献等に基づいた振動低減対策工のリストを示した。

振動卓越の要因の抽出および抽出した振動卓越の要因に基づく振動低減対策の提案方法の検討から得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 鉄道振動シミュレーションを用いた振動源の特性、

構造物の振動特性、地盤の伝播特性の3つの個別評価により、着目した周波数帯域の振動の卓越の要因を抽出することができた。

- ・ 振動卓越の要因に基づいて振動低減対策を検討したとしても、逆効果となる場合があることを示した。
- ・ 当初の解析モデルから抽出した振動卓越の要因に基づいて振動低減対策を検討した結果、逆効果となった場合でも、その対策モデルの特性を再度評価し、逆効果となった要因を特定し対策することで、振動低減対策の提案につながる事がわかった。

文献

- 1) 吉岡修：鉄道振動の防止対策法，日本音響学会誌，55巻，6号，pp.445-460，1999
- 2) 社団法人日本騒音制御工学会：地域の環境振動，技報堂出版，pp.187-193，2001
- 3) 芦谷公稔，横山秀史：地盤振動対策の研究開発の現状，鉄道総研報告，Vol.16，No.12，pp.55-58，2002
- 4) 横山秀史，伊積康彦，渡辺勉：3次元振動解析による地盤および建物振動の予測シミュレーション手法，鉄道総研報告，Vol.29，No.5，pp.41-46，2015
- 5) 野寄真徳，横山秀史：数値シミュレーションを用いた列車走行に伴う地盤振動の低減対策の提案方法，土木学会論文集，79巻，2号，論文ID：22-00197，2023
- 6) 芦谷公稔，吉岡修，横山秀史：周波数-波数スペクトルの逆解析による複数モードの位相速度推定と鉄道振動への応用，物理探査，52巻，3号，pp.214-226，1999
- 7) 津野靖士，工藤一嘉：微動を用いた空間自己相関法によるS波速度構造の実務利用への評価，日本建築学会構造系論文集，596巻，pp.17-24，2005
- 8) 矢部明人：サブストラクチャー法を用いた移動体と構造物の動的相互作用解析手法の開発，土木学会第61回年次大会学術講演会，I-424，pp.845-846，2006
- 9) 加藤信二郎，蒲原章裕，横山秀史，岩田裕一：架道橋付近における軌道支持剛性変化が地盤振動に及ぼす影響，鉄道総研報告，Vol.28，No.3，pp.17-22，2014
- 10) 須田征男，長門彰，徳岡研三，三浦重：新しい線路-軌道の構造と管理-，日本鉄道施設協会，pp.336-343，1997
- 11) 土木学会編：動的解析と耐震設計 第2巻 動的解析の方法，技報堂出版，pp.111-161，1989
- 12) Harkrider, D. G.: Surface waves in multilayered elastic media. I. Rayleigh and Love waves from buried sources in a multilayered elastic half-space, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.54, No.2, pp.627-679, 1964.
- 13) 吉岡修，芦谷公稔：軸重・軸配置が地盤振動に与える影響，鉄道総研報告，Vol.3，No.8，pp.33-40，1989
- 14) 長松昭夫：モード解析入門，コロナ社，1993

- 15) 原恒雄, 吉岡修, 神田仁, 舟橋秀磨, 根岸裕, 藤野陽三,
吉田一博: 新幹線走行に伴う沿線地盤振動低減のための高
架橋補強工の開発, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp.
325-338, 2004
- 16) 仁平達也, 笠倉亮太, 黒岩俊之, 前原聡, 岡本大: 超高強

度繊維補強コンクリート板を用いた鉄道 RC ラーメン高架
橋中間スラブ補強工法の開発, コンクリート構造物の補修,
補強, アップグレード論文報告集, 第14巻, pp.453-
460, 2014

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	長倉 清	日比野有	小方正文
仁平達也	瀧上唯夫	田所敏弥	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	豊岡亮洋		

鉄道総研報告 第39巻 第1号

2025年1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. 1

Jan. 2025

PAPERS

- Method for Evaluating Crashworthiness of Railway Vehicles Based on Correlation with Injury Severity of Passengers Occupying Longitudinal Seats
..... K.NAKAI, T.OKINO, S.ENAMI, K.NAGATA (1)
- Method for Measuring the Pantograph Contact Force in Overhead Contact Line System Using Sparse Modelling
..... T.USUDA, Y.YAMASHITA, M.TAKAHASHI (11)
- Development of Low-cost Train Patrol Support Method Using Smartphone
..... H.TANAKA, B.ZHAO, D.SU, T.NAGAYAMA (21)
- A Method for Proposing Countermeasures against Ground Vibrations along Railway Lines based on Numerical Simulation
..... M.NOYORI, H.YOKOYAMA (29)

