

鉄 道 総 研 報 告

第39巻 第8号

2025年8月

論文

- 車両** 新幹線車両走行時に台車部から発生する圧力変動・空力音の低減対策
..... 阿久津真理子, 宇田東樹 (1)
- 施設** まくらぎ直結分岐器用固定クロッシングの弾性支持構造を有する分岐タイプレートの開発
..... 清水紗希, 大高亮輔, 玉川新悟, 弟子丸将, 松谷真吾 (9)
- 施設** **電気** 列車前方画像を用いた沿線設備の劣化診断手法の開発
..... 前田梨帆, 向嶋宏記, 長峯望 (17)
- 電気** 太陽位置及び被写体ブレが光切断式トロリ線摩耗計測に及ぼす影響
..... 薄広歩, 松村周, 平良優介 (25)
- 電気** ミリ波帯電磁界の熱作用による細胞障害閾値の評価
..... 池畑政輝, 吉江幸子, 鈴木敬久, 佐々木洋 (33)
- 電気** **運転** 特殊信号発光機の明滅検知装置の開発
..... 小室翔嗣, 向嶋宏記, 長峯望 (41)
- 運転** 訪日外国人旅行者の鉄道利用データを用いた周遊テーマ抽出と施策への活用
..... 稲場亘, 中川伸吾, 渡邊拓也, 深澤紀子 (49)

技術報告

- 施設** トンネルと斜めに交差する弱層が盤ぶくれに与える影響
..... 野城一栄, 嶋本敬介, 川越健 (55)

新幹線車両走行時に台車部から発生する圧力変動・空力音の低減対策

阿久津 真理子* 宇田 東樹*

Countermeasures of Low-Frequency and Aerodynamic Noise Emitted from Shinkansen Train

Mariko AKUTSU Toki UDA

When a Shinkansen train runs at high speeds in an open section, low-frequency noise and audible noise are emitted from the bogies. It is essential to reduce these aerodynamic noises in order to achieve further speed increases in the future. To understand the generation mechanisms of low-frequency and audible noise, field tests and low-noise wind tunnel tests were carried out. This paper describes the measurement method used in the wind tunnel testing and the development of countermeasures against low-frequency and audible noise.

キーワード：台車部空力音，明かり区間圧力変動，風洞試験，マイクロホンアレイ

1. はじめに

新幹線車両が明かり区間を高速で走行する際、圧力変動や空力音が発生する。圧力変動は、車両の通過に伴う構造物の振動や車両まわりの流れ場の変化に起因して発生し、このうち車両から発生する圧力変動は、編成の先頭部・後尾部における準静的な圧力場、ならびに中間部の通過に伴い発生する空気力学的な低周波圧力変動で構成される。本報告では100Hz以下の周波数成分を圧力変動と定義するが、本研究で対象とする中間部から連続的に生じる圧力変動のうち、5～20Hzの周波数成分は沿線家屋の建具のがたつきを引き起こす可能性があることがわかっている^{1) 2)}。空気力学的な圧力変動は、列車の走行速度の6乗に比例して音圧レベルが増加する特徴があるため、高速化を見据えて現象解明や対策の検討が必要である。

空気力学的な圧力変動は、波長が長いことに加え、新幹線車両が高速で移動するため、その発生源の特定が困難である。そこで、鉄道総研では、実際の新幹線の沿線において低周波音レベル計をレール方向に並べてリニアアレイを構成する手法を提案し、多数の列車に対してアンサンブル平均をとることで、圧力変動の発生箇所が台車部および車両間隙部であることを解明した³⁾。

空力音は、車両表面の凹凸で生じる風切り音であり、台車部のほか、パンタグラフ部などにおいても発生する。本稿では可聴音のうち100Hzよりも大きい周波数成分を空力音と呼ぶ。空力音の周波数成分は、新幹線沿線騒音の環境基準値の対象に含まれるため、新幹線の速度向上のためには空力音を低減し、環境基準値内におさめることが新幹線の沿線環境のために必須である。

これらの圧力変動や空力音は空気力学的な要因で発生するため、風洞を用いた評価が可能である。そこで、鉄道総研では、台車部から発生する圧力変動や空力音の低減を目指し、大型低騒音風洞にて縮尺模型を用いた低減対策の検討を進めている^{4) 5) 6)}。本報告では、大型低騒音風洞における測定方法を概説するとともに、これまでの検討により得られた低減対策案をまとめる。なお、低減対策の実装に向けた基礎的な検討段階であり、実車両へのぎ装の可否を考慮していない対策も含まれている。

2. 風洞試験

2.1 大型低騒音風洞

風洞試験は、鉄道総研が滋賀県米原市に所有する大型低騒音風洞（以下、低騒音風洞）にて実施した。低騒音風洞は音響計測に特化した設計がなされており、測定部が無響室であることに加え、風路における内壁の吸音コンクリートや消音器等の対策により、ノズルから下流側に3m、側方に4.5mの地点において、風速300km/hで暗騒音75.6dB(A)という優れた低騒音性能を実現している⁷⁾。今回使用した開放型測定部は、測定部の寸法が幅3.0m×高さ2.5m×長さ8mであり、最高400km/hでの送風が可能である。

2.2 1/5縮尺車両模型

台車部から発生する圧力変動や空力音を模擬するため、1/5縮尺の車両模型を使用した。車両模型は新幹線車両の下部を再現した形状であり、図1、図2に示すように、模型後方寄りに台車が設けられている。車両模型は全長6400mmであり、台車部以外からの空力音の発生を抑制するために台車部・模型固定部以外は平滑な形状である。台車模型は一般的な台車の細部まで詳細に模

* 環境工学研究部 騒音解析研究室

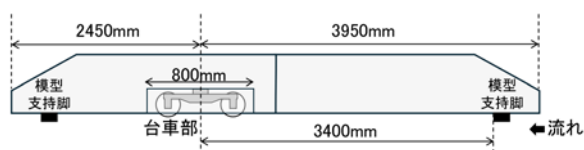


図1 1/5縮尺車両模型の概要

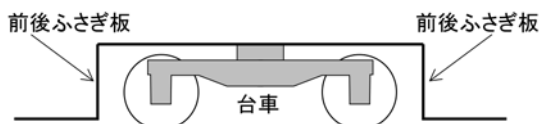


図2 台車部の概要

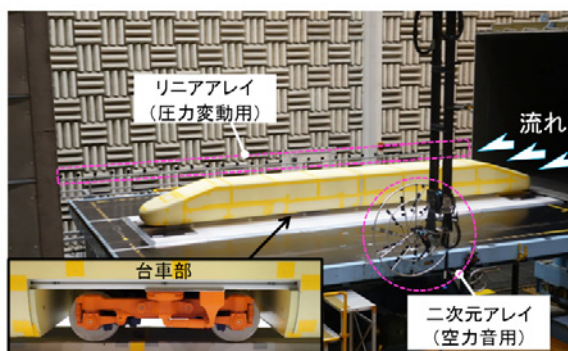


図3 風洞試験の様子
(測定時は台車部にフルカバーを設置)

擬した精密台車模型を用い、車体に設けられた台車格納空間（以下、台車キャビティ）に取り付けた。

風洞試験の様子を図3に示す。車両模型は簡易的に模擬されたレールを介して地面板に固定し、車両模型、地面板ともに静止した状態で送風・測定を行う。ここで、実際の車両が軌道を走行する際、先頭車両と2～3両目以降の中間車両で床下流速が異なることが報告されている⁸⁾。そこで、風洞試験において中間車両の床下流速を模擬するため、車両模型の下面と軌道との間隔は実際の新幹線の1/5縮尺である80mmとした状態で、風洞のノズルの高さを地面板よりも高く設定し、風洞のノズル端部から発達する自由せん断層を利用する方法を用いる⁹⁾。

本試験では1/5縮尺の模型を用いるため、風洞試験で収録される音の波長も縮尺換算して、現車の周波数とする必要がある。波長は周波数と反比例の関係にあるため、縮尺が1/nの場合の現実の周波数 f_{real} （以下、現車換算後周波数）は測定周波数 f_{meas} を用いて次式で表される。

$$f_{\text{real}} = f_{\text{meas}} / n \quad (1)$$

3章以降では、現車換算後周波数にて示す。

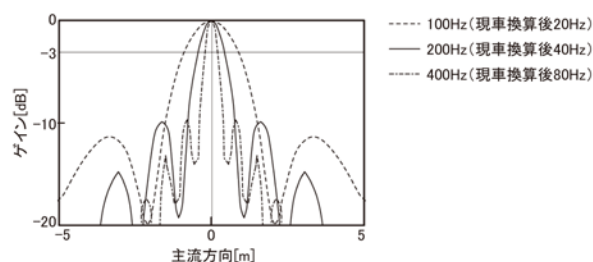


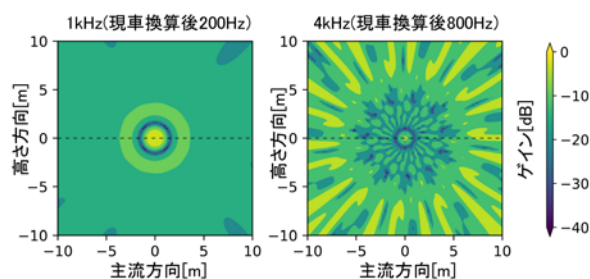
図4 リニアアレイの指向特性
(アレイから4m離れ)

2.3 測定機器

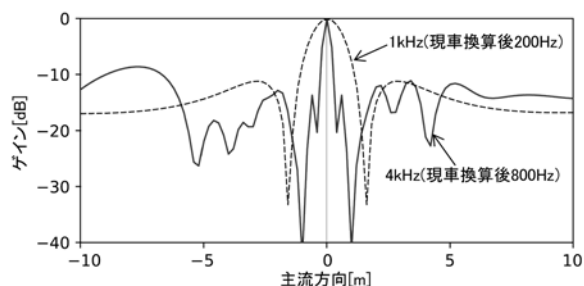
台車部から発生する圧力変動と空力音はそれぞれ、車両模型の側方に設置したマイクロホンアレイにより測定した。ここで、マイクロホンアレイとは、複数のマイクロホンを並べた装置であり、それぞれのマイクロホンに入力される音の位相差から音の到来方向を推定することができる。

圧力変動の測定に用いるマイクロホンアレイ（以下、リニアアレイ）は、車両模型の4m側方（現車換算後20m）に29本のマイクロホンを0.3m（現車換算後1.5m）間隔で全長8.4m（現車換算後42m）にわたって一列に配列したものである。これにより、レール方向に沿った圧力変動の一次元の音源分布が得られる。今回使用したリニアアレイの指向特性を図4に示す。ゲインが大きいほど、その方向に対する感度が高いことを示している。主流方向0mにおけるゲインの幅（メインローブ）に着目すると、100Hz（現車換算後周波数20Hz）における-3dB分解能は±1m以内である。これは、低周波成分の音源となる車両模型の支持部や風洞のノズル・コレクタから、評価対象である台車部を十分に分離できる性能である。

空力音の測定に用いるマイクロホンアレイ（以下、二次元アレイ）は、HBK社製であり、66本のマイクロホンをホイール状に配列したものである。マイクロホンが二次元的に配列されているため、面的な音源分布が得られる。1kHzと4kHzの指向特性を図5に示す。図5(a)の二次元分布より、両周波数帯において中心に位置するメインローブのゲインが最も大きく、アレイの正面に指向性が強いことがわかる。ここで、メインローブに着目すると、4kHz帯のメインローブの領域は1kHz帯よりも小さく、鋭い指向特性を有することがわかる。メインローブ以外の領域に着目すると、4kHz帯の結果において放射線状に指向性パターン（サイドローブ）が形成されている。これらの傾向は、図5(b)に示す高さ0mにおける指向特性からも明らかであり、低い周波数ではメインローブ幅が広く、サイドローブが少ないため、解像度は低いが良好なS/Nを有する、高い周波数ではメ



(a) 平面における指向特性



(b) 高さ 0m における水平方向の指向特性

図 5 二次元アレイの指向特性
(アレイから 3.5m 離れ)

インローブ幅が狭く、サイドローブが多いため、解像度が高いが S/N が悪化するというトレードオフの関係となる。これは一般的なマイクロホンアレイの特性と一致する。一方、この二次元アレイの -3dB 分解能は、1kHz（現車換算後周波数 200Hz）で $\pm 0.6\text{m}$ 程度と、本風洞試験における空力音の評価に十分な性能である。

風洞試験では、圧力変動と空力音を同時に測定するため、流れに向かって左側にリニアアレイ、右側に二次元アレイを設置し、図 3 に示す配置で測定を行った。なお、リニアアレイ、二次元アレイともに、得られた音源分布について、評価対象である台車部を含む領域内で音圧レベルを空間積分した値により圧力変動と空力音の評価を行った。また、空力音については環境基準の評価方法に合わせ、周波数重み付け特性 A を施した。

3. 低減対策案

はじめに、圧力変動と空力音の発生原理について整理する。圧力変動は、例えば、台車キャビティ前後の下端における渦の自励振動など、台車キャビティの空間に起因して発生していると考えられる。そのため、台車キャビティの形状等を変更することで音源対策になると予想される。空力音は、台車構成部品に速い流れが当たることによって発生する風切り音であると考えられ、下方に位置する台車構成部品（車輪や主電動機、歯車装置）に加え、下流側のふさぎ板下端が発生源であることがわかっており¹⁰⁾、音源対策としては台車構成部品に速い流れが当た

表 1 台車部における低減対策案

対策	分類	バリエーション
跳ね上げ材（図 6）	音源対策	キャビティ下端
		キャビティ内
フラットアンダーカバー（図 7）	音源対策 伝搬対策	幅 25mm（現車 75mm）
		幅 35mm（現車 175mm）
		幅 25mm + 吸音材
角度付ふさぎ板（図 8）	音源対策	—
側カバー突起（図 9）	音源対策	—
キャビティ上端ユニット（図 10）	音源対策	矩形形状
	伝搬対策	丸み付け形状
膜吸音材（図 11）	伝搬対策	—

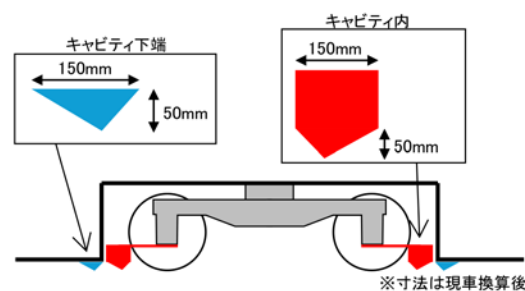


図 6 跳ね上げ材

らないようにすることが考えられる。

これを踏まえ、本稿で扱う低減対策案を表 1 に示す。表中の分類における音源対策とは音源から発生する圧力変動や空力音自体を低減させる対策であり、伝搬対策とは音の伝搬過程において遮音または吸音することで観測される圧力変動や空力音を低減させる対策である。なお、営業線を走行する新幹線車両は往復走行することを考慮し、本項で扱う対策は全て、台車部の左右・前後において対称である。

3.1 跳ね上げ材

跳ね上げ材は、図 6 に示すように下向きの三角形状となっており、台車部に流入する流れを下方に偏向し、台車構成部品に作用する流れの流速を小さくすることを意図したものである。まくらぎ方向に一樣の形状であり、取り付け位置はキャビティ下端およびキャビティ内の 2 か所とした。キャビティ内の跳ね上げ材は軸箱から伸ばした腕状部品により取り付け・固定されている。

3.2 フラットアンダーカバー

フラットアンダーカバーは、図 7 に示すように台車側カバー（フルカバー）の下端に水平の板を取り付けた対

策であり、車両側方から側カバー下端を巻き込みながら流入する流れを阻害するとともに、台車部で発生した空力音が台車キャビティ外に伝搬する際には遮音することを意図した。本稿ではまくらぎ方向寸法の異なる2条件とフラットアンダーカバー上面に吸音材を設置した条件の計3条件を検討した。なお、吸音材としては一般的に広く用いられるPETウールを使用した（以下同様）。

3.3 角度付ふさぎ板

角度付ふさぎ板は、図8に示すように、前後ふさぎ板を水平から60度で傾斜させた形状であり、台車キャビティ内の流れを変化させることで主に圧力変動の低減を図ったものである。

3.4 側カバー突起

側カバー突起は、図9に示すように、車両の側カバーのうち台車部以外の箇所について、下端を30mm（現車150mm）下方に突出させるパーツである。車両床下の流れのうち左右に変動する流れを抑制し、台車部に作用する流れを変えることを意図した対策である。なお、本試験では台車上流側の一部に取り付けたが、実際に車両に適用する場合には台車部以外の全長に取り付けることを想定した。

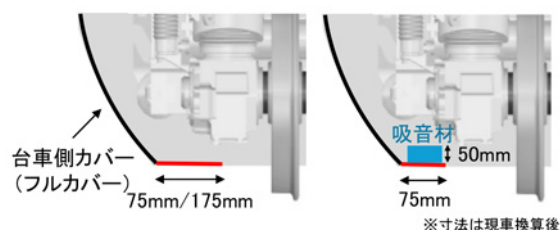


図7 フラットアンダーカバー

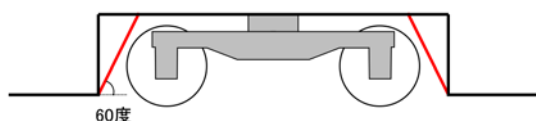


図8 角度付ふさぎ板

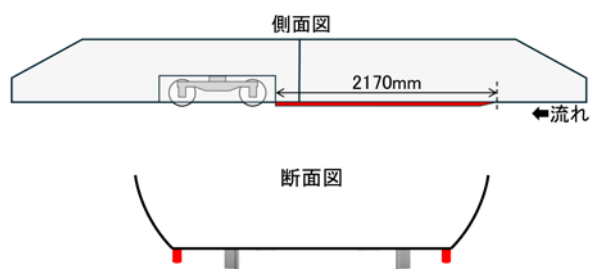


図9 側カバー突起

3.5 キャビティ上端ユニット

キャビティ上端ユニットは、図10に示すように、前後ふさぎ板と台車キャビティ上面のなす角部分に吸音材入りのユニットパーツを配置する対策であり、キャビティ内の流れの変化による圧力変動の低減および、吸音材による空力音の低減効果を意図した。なお、ユニットパーツの表面を十分な開口率を有する多孔板にすることでユニットとしての効果と吸音材の効果を両立する構造とした。

3.6 膜吸音材

膜吸音材は、図11のとおり台車キャビティ上面に塩化ビニル製の膜を取り付け、膜の共振による圧力変動の低減を意図した対策である。なお、背後空気層として高さ10mm（現車換算後50mm）の空間を設け、内部を吸音材で充填した。

4. 風洞試験結果

4.1 基本形状におけるS/Nの確認

本節では、対策等を施していない基本条件と、台車を取り外してキャビティを埋めた平滑条件の結果を参照し、風洞試験結果の概況について述べる。はじめに、無指向性マイクロホンでの測定結果を図12に示す。なお、圧力変動の320km/hの結果ではノイズが増加する傾向が見られたため、以降の結果において、圧力変動は260km/h、空力音は320km/hの結果を示す。

無指向性マイクロホンは、全方向にほぼ同等の感度を有するマイクロホンであり、二次元アレイの中心に設置した。このため、無指向性マイクロホンの結果には、今回評価対象とする台車部から発生する空力音以外に、風洞設備から発生する音や車両模型の支持部から発生する空力音も含まれる。図12より、圧力変動では、平滑条件の音圧レベルは基本条件よりも増加した。音源となる

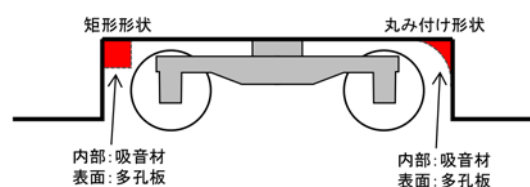


図10 キャビティ上端ユニット

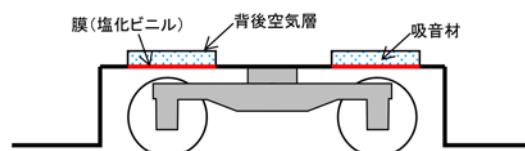


図11 膜吸音材

凹凸形状が存在しない平滑条件が基本条件を上回ったため、無指向性マイクロホンでは圧力変動が捉えられていないと考えられる。また、空力音は、基本条件の音圧レベルが平滑条件より大きいものの最大で 5dB 程度の差であり、騒音評価に必要な S/N を確保できていない。

次に、リニアアレイと二次元アレイの結果を図 13 に示す。圧力変動、空力音ともに基本条件の音圧レベルが平滑条件を上回る結果となった。空力音の結果では、基本条件の音圧レベルが平滑条件を上回り、この差が台車部から発生する空力音である。全ての周波数領域で音圧レベルの差が 10dB 以上であり、十分な S/N を確保できていることがわかる。圧力変動においても基本条件の音圧レベルが平滑条件を上回るものの、その差は 2~10dB 程度と小さい。しかし、図 12 の無指向性マイクロホンの結果と比較すると、リニアアレイを使用することで圧力変動の発生を捉えられていることがわかる。ただし、リニアアレイの結果においても 31.5Hz 帯は S/N が小さく、本稿において、当該周波数帯の測定結果は参考値として扱う。また、これらの周波数スペクトルは風洞試験の結果であり、実際の新幹線台車部から発生するものとは異なるため、各周波数帯における音圧レベル変化を検証に用いる。

4.2 低減対策

低減対策を施したケースについて、風洞試験におけるマイクロホンアレイでの測定結果を参照しながら考察を

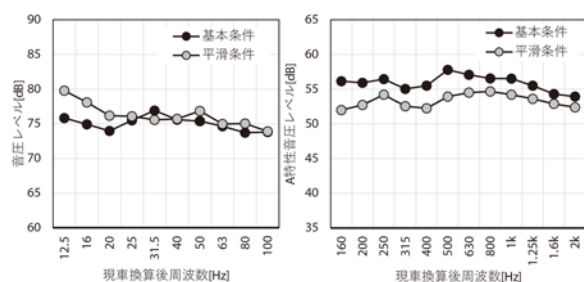


図 12 無指向性マイクロホンでの測定結果
(左：圧力変動 260km/h, 右：空力音 320km/h)

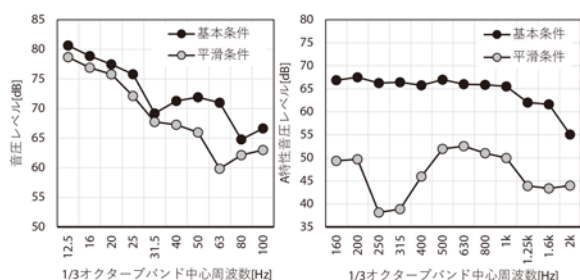


図 13 マイクロホンアレイでの測定結果
(左：圧力変動 260km/h, 右：空力音 320km/h)

行う。なお、対策によって、1 回の測定結果を示すものと、複数回の測定結果の平均値を示すものがある。

4.2.1 跳ね上げ材

跳ね上げ材を適用した場合の圧力変動・空力音の変化量を図 14 に示す。これは、同シリーズの測定における対策なし（基本条件）との音圧レベルの差を示すものである。キャビティ下端の跳ね上げ材は 31.5Hz 帯以下の圧力変動と 400Hz 帯以上の空力音に低減効果を有する。一方、250Hz 以下の空力音で音圧レベルが増加しているのは、下方に偏向された流れが車輪に当たって生じる空力音（車輪空力音）によるものと考えられる。また、キャビティ内の跳ね上げ材は 31.5Hz 帯以下で圧力変動が増加するが、40Hz 帯以上の圧力変動と空力音の広い周波数帯で低減効果を有する。なお、400Hz 帯以上ではキャビティ下端の跳ね上げ材の音圧レベルを上回る。

これらの低減効果は跳ね上げ材により床下流れが下方に偏向したためと考えられる。しかし、それぞれの跳ね上げ材による音圧レベルの低減量は周波数によって異なるため、実車両の周波数スペクトルに合わせて両者を選択することが考えられる。

4.2.2 フラットアンダーカバー

フラットアンダーカバーの結果を図 15 に示す。圧力変動に対しては、ほぼ全ての周波数帯で幅 35mm（現車 175mm）の低減量が最も大きく、幅 25mm（現車 125mm）の低減効果はほとんどない。35mm は今回実

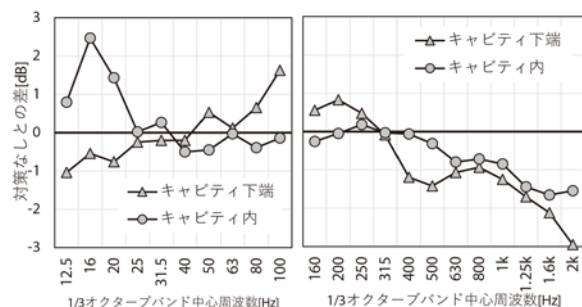


図 14 跳ね上げ材による低減効果
(左：圧力変動 260km/h, 右：空力音 320km/h)

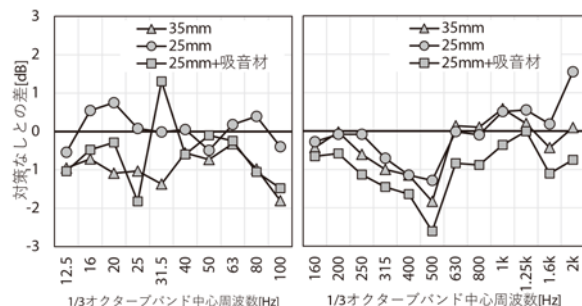


図 15 フラットアンダーカバーによる低減効果
(左：圧力変動 260km/h, 右：空力音 320km/h)

施したフラットアンダーカバーにおいて最も幅広い条件であり、台車部の流れが変化したことにより起因すると考えられる。一方、25mmでも吸音材を組み合わせることで31.5Hz帯以外の周波数帯で圧力変動の低減効果が認められた。なお、31.5Hz帯は測定時のS/Nが不足するため、実際には効果を発揮する可能性がある。空力音についても同様に、35mmの方が25mmよりもやや低減量が多い傾向がある。吸音材と併用することでフラットアンダーカバーと吸音材の効果の両者が現れ、一部の周波数帯を除き、1dB程度低減した。

4.2.3 角度付ふさぎ板

前後ふさぎ板を角度付形状にした結果を図16に示す、本対策は圧力変動に特に効果的であり、63Hz帯以下の圧力変動が低減している。これは、対策により台車内の容積が減少したことや、ふさぎ板角度の変更による流れの変化の影響と考えられる。一方、空力音は250Hz帯以上でやや増加する傾向があり、キャビティ内の流れが変わることに起因すると考えられる。これより、ふさぎ板の角度が空力音にも影響を与えることが示唆された。

4.2.4 側カバー突起

側カバー突起の結果を図17に示す。多くの周波数領域で圧力変動の低減効果が認められるが、20Hzと40Hzで特に低減量が大きく、対策の形状を変更することで特定の周波数において低減効果を持つように設計できる可能性がある。一方、空力音では、ほぼ全ての周波数領域

で音圧レベルが微増し、低減効果は現れなかった。特に1kHz帯以上では0.5dB以上の増加量であり、側カバー突起自体から空力音が発生している可能性がある。

4.2.5 キャビティ上端ユニット

キャビティ上端ユニットの結果を図18に示す。圧力変動では、矩形形状と丸み付け形状の両形状ともに25Hz帯以上のほぼ全ての周波数帯で音圧レベルが低減しており、キャビティ上端ユニットの配置による台車キャビティの容積の減少やキャビティ形状の変更によって、キャビティ内の流れが変化することが要因と考えられる。また、空力音についてもほぼ全ての周波数帯で音圧レベルが低減し、ユニット内の吸音材による吸音効果が現れたと考えられる。

4.2.6 膜吸音材

膜吸音材の結果を図19に示す。圧力変動では25～63Hz帯で低減効果があるが、空力音の低減効果はほぼない。膜を用いた吸音材は、比較的低い周波数に効果があり、本結果においても膜吸音の効果が現れたものと考えられる。今回用いた塩化ビニル製のシートのように、空気を通さない材質で膜を構成できるため、現車適用時にメンテナンス性にも優れるという利点がある。

5. まとめ

新幹線の台車部から発生する空気力学的な圧力変動と

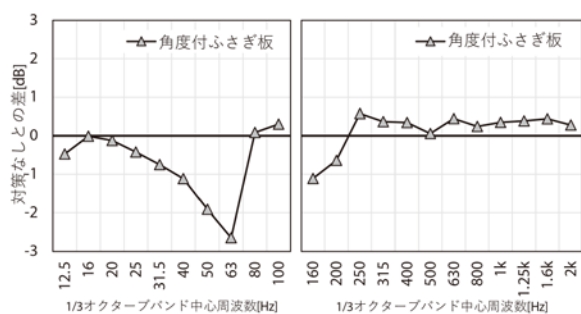


図16 角度付ふさぎ板による低減効果
(左：圧力変動 260km/h, 右：空力音 320km/h)

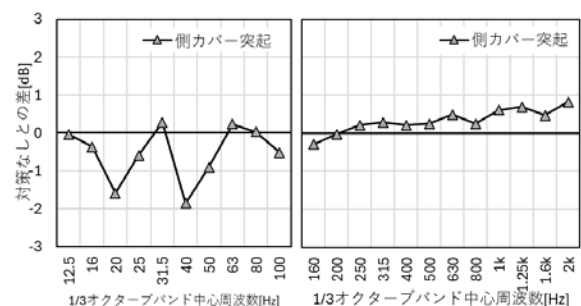


図17 側カバー突起による低減効果
(左：圧力変動 260km/h, 右：空力音 320km/h)

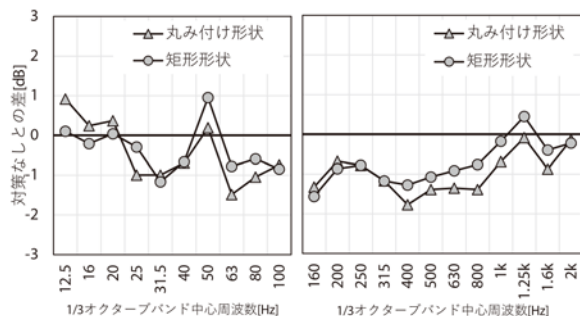


図18 キャビティ上端ユニットによる低減効果
(左：圧力変動 260km/h, 右：空力音 320km/h)

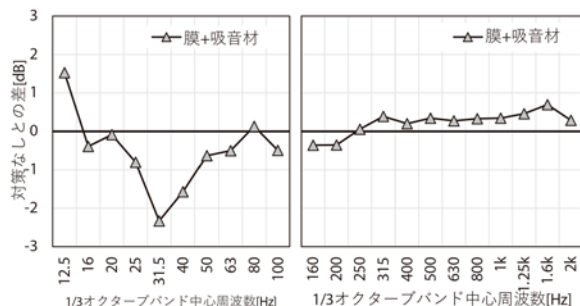


図19 膜吸音材による低減効果
(左：圧力変動 260km/h, 右：空力音 320km/h)

空力音を対象とし、大型低騒音風洞における測定方法について概説するとともに、圧力変動と空力音を低減するための対策を考案した。2種類のマイクロホンアレイを活用して圧力変動と空力音の同時測定を行い、ふさぎ板角度付と側カバー突起、膜吸音材は圧力変動に効果があること、跳ね上げ材、フラットアンダーカバー、キャビティ上端ユニットは圧力変動と空力音の両者に効果があることを確認した。本稿は低減対策に向けた基礎的検討であり、車両へのぎ装等への検討はしていない。今後、今回得られた知見を元に、現車適用に向けた低減対策の検討を進める予定である。

文 献

- 1) 高見創, 菊地勝浩, 前川博, 栗田健, 若林雄介: 高速車両が明かり区間を走行する際に生じる低周波音, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.73, No.735, pp.103-110, 2007
- 2) 高見創, 菊地勝浩: 明かり区間走行時に生じる高速列車の低周波音分析, 鉄道総研報告, Vol.23, No.7, pp.5-10, 2009
- 3) 宇田東樹, 北川敏樹, 栗田健, 若林雄介: 高速走行する列車から発生する明かり区間圧力変動の発生源, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.879, pp.1-13, 2019
- 4) 宇田東樹, 北川敏樹: 鉄道車両の台車部から発生する空力音に関する風洞試験, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集, 2019
- 5) 宇田東樹, 北川敏樹: 高速走行する鉄道車両の台車部付近における流れと空力音の解析, 日本騒音制御工学会秋季発表会, 2019
- 6) Toki Uda, Mariko Akutsu: Sound source distribution of high-speed trains and reduction of aerodynamic bogie noise, INTER-NOISE Conference Proceedings, pp.3709-3716(8), 2022.
- 7) 井門敦志, 善田康雄, 近藤善彦, 松村豪, 鈴木実, 北川敏樹: 大型低騒音風洞の基本性能, 鉄道総研報告, Vol.13, No.12, pp.5-10, 1999
- 8) 宇田東樹, 若林雄介, 栗田健, 岩崎誠, 山崎展博, 井門敦志: スラブ軌道区間における新幹線車両下部の流速分布, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.830, pp.1-16, 2015
- 9) 山崎展博, 長倉清, 北川敏樹, 宇田東樹, 若林雄介: 風洞試験を用いた新幹線車両下部から発生する空力音の評価手法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.5, pp.17-22, 2015
- 10) 宇田東樹, 北川敏樹: 音響透過板を用いた台車部空力音の測定および評価手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.3, pp.29-34, 2020

まくらぎ直結分岐器用固定クロッシングの 弾性支持構造を有する分岐タイプレートの開発

清水 紗希* 大高 亮輔** 玉川 新悟*
弟子丸 将*** 松谷 真吾*

Development of Tie Plate with Elastic Support Structure for Rigid Crossings Fixed Directly to Composite Sleepers

Saki SHIMIZU Ryosuke OTAKA Shingo TAMAGAWA
Tadashi DESHIMARU Shingo MATSUTANI

Turnouts fixed directly to composite sleepers for the Shinkansen trains have large dents on the nose rails, compared to those of ballasted turnouts. To solve this issue, focusing on the difference in the dynamic load depending on the support condition, the authors newly developed a tie plate for rigid crossings with elastic support. The developed tie plate can make depth of dents on nose rails of turnout fixed directly to composite sleepers equal to that for a ballast turnout. In addition, it is compatible and replaceable with the conventional tie plates.

キーワード：分岐器，クロッシング，締結，弾性支持，解析，性能照査

1. はじめに

図1に示すように、鉄道の線路を2つ以上に分ける構造を分岐器といい、ポイント、リード、クロッシング、ガードから構成される¹⁾。同図に示すクロッシングは固定クロッシングである。固定クロッシング（以下、「クロッシング」という。）には欠線部があり、ノーズレールからウィングレールへ（またはウィングレールからノーズレールへ）の車輪の乗り移りによって構造的に衝撃が生じる。これにより、乗り移り箇所のレールには落ち込みや挫壊が生じており、これらの損傷がクロッシングの交換理由の多くの割合を占めている²⁾。また、まくらぎ直結分岐器（以下、「直結分岐器」という。）は、分岐器用省力化軌道として敷設されており³⁾、図2に示すように、合成まくらぎ（以下、「まくらぎ」という。）をコンクリート道床で合成樹脂を介して直接支持する構造となっている。

本研究の対象は新幹線に敷設されている直結分岐器のクロッシングである。当該クロッシングでは、バラスト分岐器と比較して、累積通過トン数に対するノーズレール頭部の落ち込み量が大きく、その交換周期が短いものが散見されている。その原因として、直結分岐器が合成まくらぎをコンクリート道床と合成樹脂で直接支持する

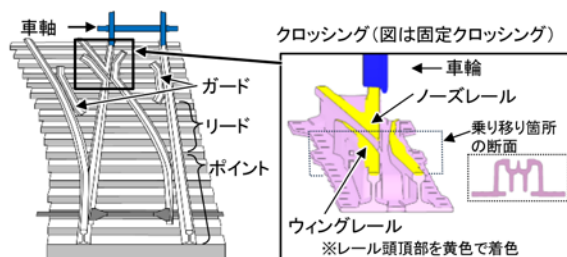


図1 分岐器のクロッシングと各部の名称

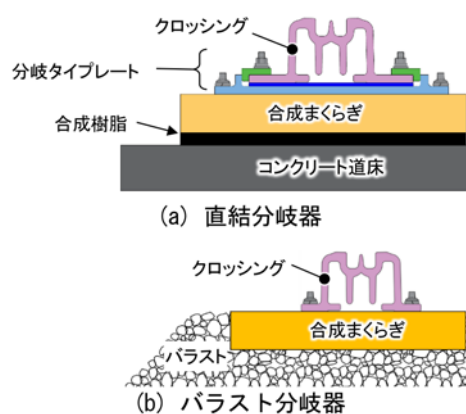


図2 分岐器の構造の比較

構造となっており、バラスト分岐器と比較するとより剛に支持されていることが考えられる。

これまでに、現地調査から支持構造により軌道支持剛性（図3）や落ち込み量（図4）、落ち込み形状（図5）に差が見られることを報告するとともに、クロッシング

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室
** 元 軌道技術研究部 軌道構造研究室
*** 軌道技術研究部 軌道構造研究室（現 レールメンテナンス研究室）

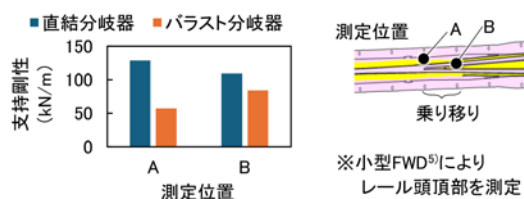


図3 乗り移り箇所の軌道支持剛性の測定結果⁴⁾

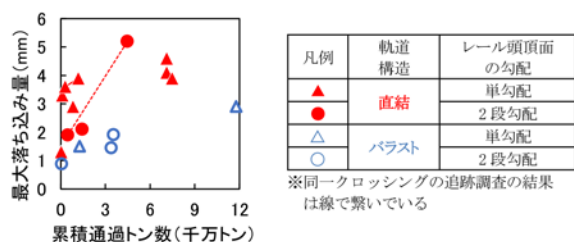


図4 落ち込み量の測定結果

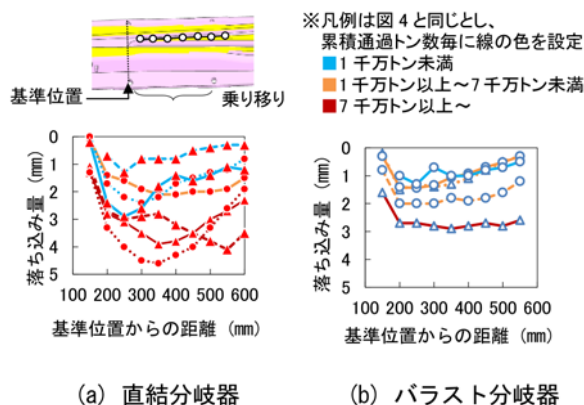


図5 ノーズレールの落ち込み形状の測定結果

をFEMソリッド要素でモデル化した車両走行解析モデルを構築し、その妥当性を確認した⁴⁾。なお、図4中の2段勾配クロッシング⁶⁾とは、乗り移りの衝撃緩和のために、走行する車輪踏面形状に合わせてレール頭頂面の勾配を2段階で設計したものである。本稿では区別のため、2段勾配クロッシングでないクロッシングを「単勾配クロッシング」という。また、図5中の基準位置とは、ノーズレール先端付近の締結位置であり、本稿ではノーズレールにおけるレール長手方向の位置を基準位置からの距離で示した。

本研究では支持剛性による作用荷重の違いに着目し、直結分岐器におけるノーズレール頭部の落ち込み量をバラスト分岐器と同等にすることを目的に、弾性支持構造を有するクロッシング用の分岐タイププレート（以下、「開発品」という。）を開発した。本稿では開発品の性能照査および試験敷設について報告する。なお、本稿では16番片開き分岐器のクロッシングを対象とした。

2. 弾性支持構造の基本構造

2.1 現行の分岐タイププレート

直結軌道用の現行の分岐タイププレート（以下、「現行品」という。）は、まくらぎがコンクリート道床に固定されていることから、上下・左右の調整を可能とするため、図6に示すような構造をしている。クロッシングとタイププレート本体の間に調整板を設置することで、上下方向の調整が可能となっており、タイププレート本体にレール長手方向の勾配を有するショルダーを設け、座金をレール長手方向へ移動させることにより左右方向の調整が可能となっている。

2.2 開発品の構造設計⁷⁾

開発品について、下記に示す条件に基づき設計を行った。

- (1) クロッシングを弾性支持する。
 - (2) まくらぎの交換を行うことなく、現行品からの置き換えを可能とする。
 - (3) 現行品が持つ上下・左右の調整機能を損なわない。
- 上記の設計条件を元に設計、試作した開発品を図7に示す。その概要は以下の通りである。
- (1) 弾性材をクロッシングの下に配置し、鋼直改良形レール締結装置と同じ板ばねで座金を締結することで2重弾性締結構造とした。
 - (2) 弾性材は、次項で後述するように、クロッシング走行時の輪重変動がバラスト分岐器の場合と同等になるように設計した。
 - (3) 現行品とクロッシングの高さを合わせるため、タイププレート本体を分割して2つの部材とし、「横圧受け金具」とした。
 - (4) 上下方向の調整を行う場合は、現行品と同様に、クロッシング下の弾性材と敷板の間に設置した調

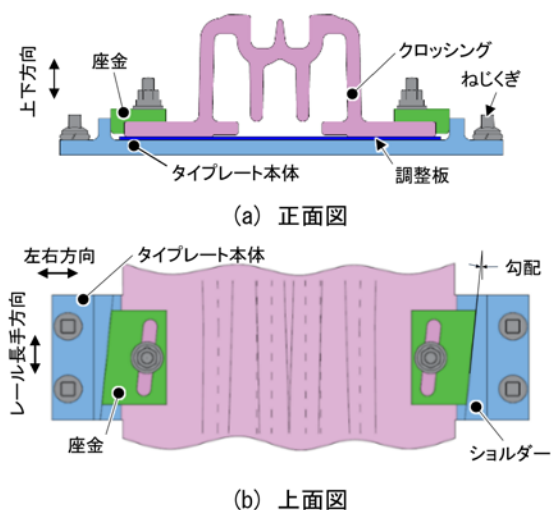


図6 現行の分岐タイププレート

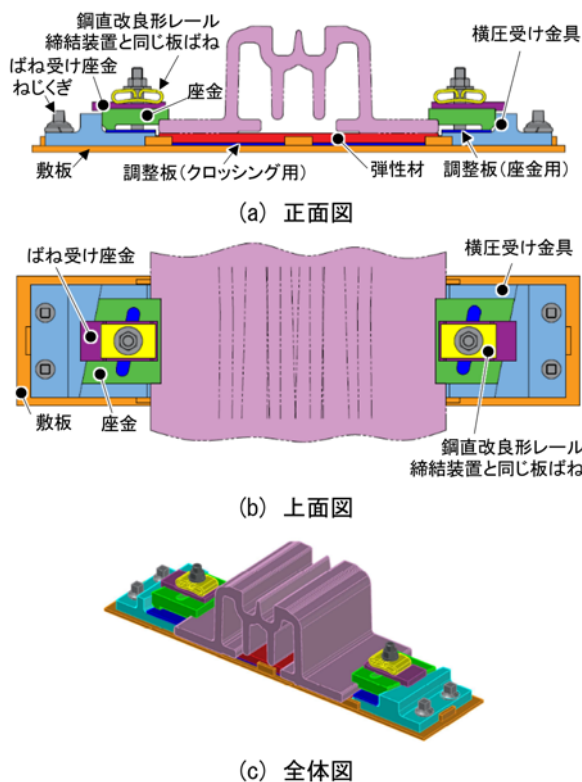


図7 開発品の構造

整板（クロッシング用）により行うが、その場合も座金の姿勢が変わらないように、座金の下にも調整板（座金用）を配置した。

- (5) 現行品からの置き換えの際に、ねじくぎ用穴を補修せずに打替えることができるように、現行品のねじくぎ用穴位置と、開発品のねじくぎ用穴位置は50mm以上離れた⁸⁾。

2.3 弾性材

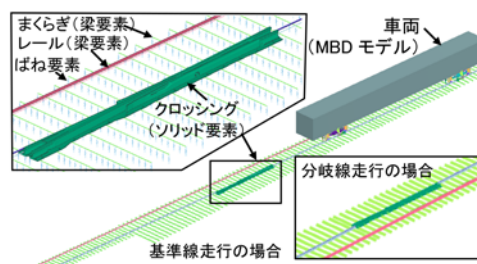
2.3.1 落ち込みの要因

直結分岐器とバラスト分岐器のクロッシングにおいて、落ち込みに差が生じる要因を推定するため、落ち込みが生じているクロッシング上を走行した場合の解析を実施した。図5に示したノーズレールの落ち込み形状を図8(a)に示す走行解析モデル⁴⁾のクロッシングに反映し、乗り移りの衝撃により生じる輪重変動の最大値（以下、「乗り移りによる衝撃荷重」）を算出した（図8(b)）。図5に示した落ち込み形状から、バラスト分岐器はノーズレール先端から後方にかけてなだらかに推移しているのに対し、直結分岐器の場合は落ち込みの変化が大きい傾向が見られ、これにより、同程度の最大落ち込み量であっても、バラスト分岐器よりも直結分岐器で乗り移りによる衝撃荷重が大きいケースが見られることを確認した。

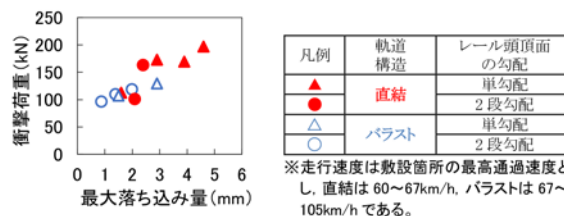
落ち込み形状に差が生じる要因を推定するため、敷設

初期を想定して設計形状のクロッシングを走行した場合の解析を実施した。図9に乗り移りの際の輪重の推移を示す。水平軸は図5と同様である。結果から、乗り移りによる衝撃荷重は両者で同程度であるものの、衝撃後の輪重波形に差がみられた。さらに、乗り移り箇所での輪重に対する接触面積や、クロッシングの材質である高マンガン鋼の塑性変形特性⁹⁾から、図9の敷設初期に作用する輪重によってノーズレールに生じる落ち込みを算出した結果を図10に示す。結果から、ノーズレールは構造上、車輪と接触する面積が小さくなるため、低荷重でも落ち込みが生じることを確認した。さらに、最大落ち込み量は同程度であるが、形成される落ち込み形状には差がみられ、直結分岐器の場合のほうが落ち込みの変化が大きい傾向であった。

以上の検討から、直結分岐器とバラスト分岐器の落ち込みに差が生じる要因を以下のように推定した。



(a) 走行解析モデルの概要⁴⁾



(b) 最大落ち込み量と衝撃荷重の関係

図8 最大落ち込み量と衝撃荷重の関係

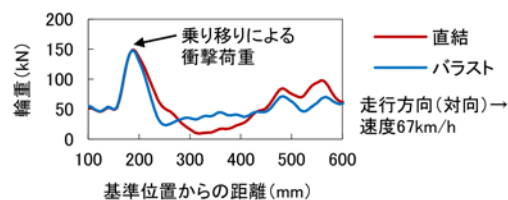


図9 走行解析の結果

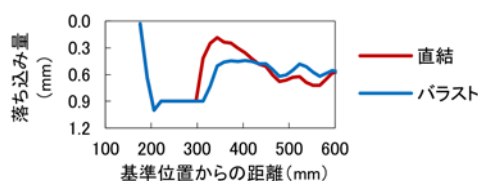


図10 ノーズレールに生じる落ち込み

- (1) 支持構造の違いにより、乗り移りの衝撃後の輪重波形に差が生じる。
- (2) 輪重波形の差により、直結分岐器は凹凸の変化が大きい落ち込みが形成され、それにより衝撃も大きくなり、落ち込みが進展する。バラスト分岐器は凹凸の少ない落ち込みが形成されることにより、衝撃も小さくなり、落ち込みの進展も小さくなる。

2.3.2 弾性材の設計と製作

落ち込みの要因から、下記に示す条件に基づき弾性材の設計を行った。

- (1) 衝撃による輪重抜けを抑制する。
- (2) 輪重抜けの後の輪重変動を抑制する。

輪重変動については、輪重抜けが影響していると考えられることから、まずは輪重抜けを抑制する弾性材の物性値を算定することとした。走行解析を実施し、ばね定数と減衰係数および最小輪重について整理するとともに、目標値を定めた(図11)。なお、本稿における弾性材のばね定数や減衰係数の値は1締結あたりの値である。

さらに、同図に示すように、5種類の材料のばね定数や減衰係数から、最も目標に近い材料Ⅳを選定した。なお、より精度よく動的挙動を再現するために、ばね定数や減衰係数は乗り移りの衝撃により発生する振動の周波数帯に対する動的載荷試験から得られた値を用いている。

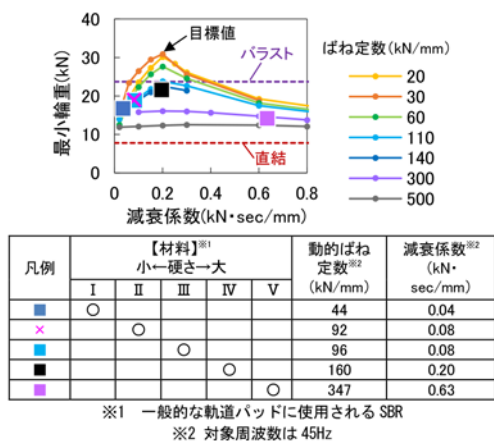
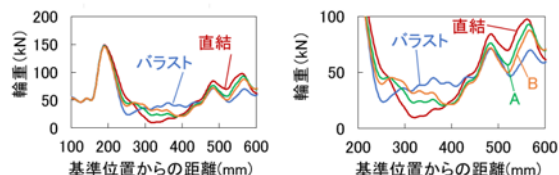


図11 各材料のばね定数と減衰係数



	凡例	動的ばね定数※ (kN/mm)	減衰係数※ (kN·sec/mm)	静的ばね定数 (kN/mm)
(a) 全体	A	184	0.214	115
(b) 拡大	B	100	0.138	54

※ 対象周波数は45Hz

図12 弾性材 A, B の場合の輪重の結果

選定した材料Ⅳにより、上記選定時と同じ溝形状で開発品の弾性材のサイズにした A と、溝形状により低ばね化した B を製作した。なお、溝形状とは弾性材の表面に掘る溝の形状で、ばね定数や減衰係数に影響する。A, B の物性値を反映した走行解析の輪重の結果を図12に示す。結果から、より輪重抜けやその後の輪重変動が抑制されていた B を開発品の弾性材とした。

2.4 適用範囲

開発品は、図13に示すクロッシングの乗り移り付近の6締結に敷設することとした。これは、図14に示すように、開発品をクロッシング全締結に敷設した場合と、乗り移り付近の4締結または6締結のみに敷設した場合の走行解析を実施した結果、6締結の場合のほうがよりクロッシング全締結に敷設した際と同等の輪重変動となることを確認したためである。

3. 性能照査⁷⁾

開発品の分岐タイプレートについて、鉄道構造物等設計標準 軌道構造の「5.5 レール締結装置」¹⁰⁾(以下、「設計標準」という。)に準拠して疲労破壊に関する安全性の照査を実施した。

3.1 性能照査の方法および要求性能と照査項目

表1に設計標準に記載された要求性能と性能項目を示す。また、表2に疲労破壊に関する安全性を照査するために実施した試験と照査指標を示す。

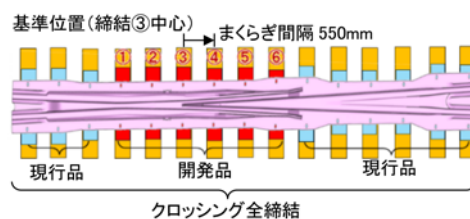


図13 開発品の適用範囲

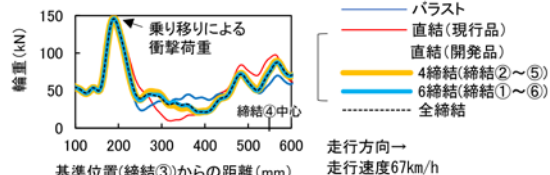


図14 走行解析の輪重の結果

表1 要求性能と性能項目

要求性能	性能項目
安全性	疲労破壊

表 2 試験項目と照査指標

試験項目	照査指標
静的二方向载荷試験	板ばねの応力 レール頭部左右変位量
動的二方向载荷試験	構成部材の外観

表 3 算出条件

設計軸重 (kN)	走行速度 (km/h)	
	基準線	分岐線
170	130	75

表 4 設計作用

設計作用の パターン	荷重 種別	A 荷重 (極まれに発生する 極大荷重)	B 荷重 (しばしば発生する 最大荷重)
①	輪重	140.3kN	97.8kN
	横圧	86.3kN	34.0kN
②	輪重	177kN	
	横圧	44kN	

照査に用いる設計作用は、乗り移りの衝撃を考慮し、レール継目部用のレール締結装置の設計作用¹¹⁾としたパターン①と、FEM 解析モデル⁴⁾によってクロッシング走行時の最大輪重、横圧を算出したパターン②の 2 種類を設定した。算出条件を表 3 に、算出した設計作用を表 4 に示す。

疲労破壊に関する安全性の照査は、次式に示す照査式に基づき実施した。

$$\gamma_i \cdot \frac{I_{Rd}}{I_{Ld}} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 I_{Rd} ：設計応答値、 I_{Ld} ：設計限界値、 γ_i ：軌道構造係数である。設計応答値 I_{Rd} は、応答値 I_R に構造解析係数 γ_a を乗じて算定した。応答値 I_R は、静的二方向载荷試験によって取得されるレール頭部左右変位量および板ばねの応力とした。

設計限界値 I_{Ld} は、限界値 I_L を軌道部材係数 γ_b で除して算定した。レール頭部左右変位量については新幹線軌道における設計限界値 5.2mm とし、板ばねの応力についてはばね鋼 (SUP9) の耐久限度線図⁹⁾の第 2 破壊限度および第 2 へたり限度とした。なお、本照査では軌道構造係数 γ_i 、構造解析係数 γ_a 、および軌道部材係数 γ_b はいずれも 1.0 とした。

また、表 2 に示した照査項目のうち、構成部材の外観の照査は、動的二方向载荷試験を実施し、試験後の構成部材の外観に異状がないことを確認することとした。

なお、上記の静的二方向载荷試験と動的二方向载荷試験は、設計標準⁴⁾に記載された「レール締結装置 1 組に対する载荷試験による方法」により実施した。

3.2 静的二方向载荷試験

3.2.1 板ばねの発生応力が最大となる締結位置の算定

開発品の適用範囲のうち、最も小返り角が大きくなり、板ばねの発生応力が大きくなると想定される締結位置を、FEM 解析モデルにより算定した。図 15 に解析モデルを、各ばね定数を表 5 に示す。

締結位置①～⑥に表 2 の設計作用を载荷した場合の最大小返り角を図 16 に示す。なお、小返り角は軌間外向きにレールが小返る向きを正としている。その結果、どの設計作用に対しても、小返り角が最も大きく、板ばねの応力が最も大きくなるのは締結位置③であることがわかった。

3.2.2 载荷条件の検討

1 締結での試験を実施する場合の試験荷重や载荷高さは、レール圧力、レール横圧力、小返りモーメントに基づき決定する。前項の解析より、最も小返り角が大きかった締結位置③に設計作用を载荷した場合のレール圧力、レール横圧力を表 6 に示す。表 6 のレール圧力、レール

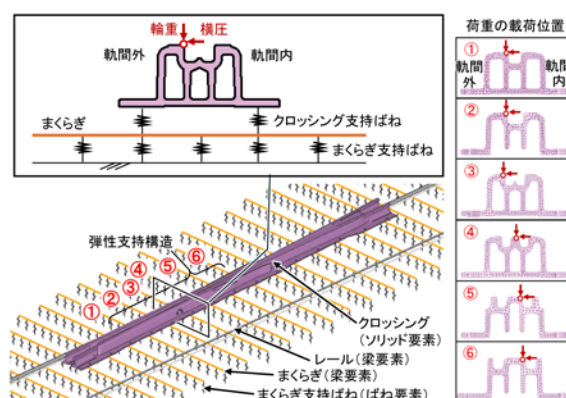
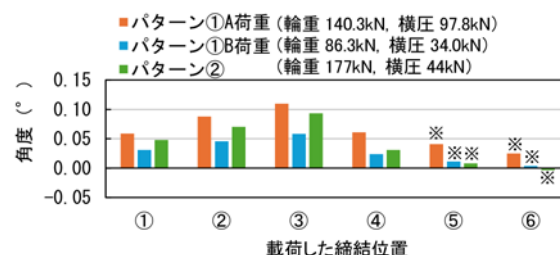


図 15 解析モデルの概要

表 5 ばね定数 (kN/mm)

方向	クロッシング支持ばね		まくらぎ支持ばね
	弾性支持構造	現行品	
上下	53 [*]	剛結	直結軌道相当 ⁴⁾
左右	67 [*]	200	剛結
前後	67	200	31

※ 1 締結の静的载荷試験の結果から算出



※最大位置は载荷位置とは異なる

図 16 ①～⑥に設計作用を载荷した場合の最大小返り角

ル横圧力を図 17 に示すクロッシングを模した試験用レールに載荷した場合の小返りモーメントと、解析で得られた小返りモーメントがつり合うように載荷高さを算出した場合、試験用レールの高さ H は 400mm 程度となり、使用する試験機の載荷高さの上限を超える結果となった。そこで、試験用レールの高さ H を試験機で載荷可能な高さである 220mm とし、小返りモーメントが前項の解析と一致するように水平方向の試験荷重を表 6 のレール横圧力よりも大きくした。この場合、水平方向の試験荷重は、表 6 の最下行に示すように、レール横圧力よりも最大で 15kN 程度大きくなるものの、横圧受け金具の横滑りなどの横圧強度を確認するうえでより厳しい条件となるため、得られる試験結果は、高さ 400mm で試験をした場合を包含すると考えられる。

上記の検討によって算出した分岐タイププレート 1 組に鉛直荷重と水平荷重の合力 P_1 、 P_2 を載荷する。表 7 および表 8 に P_1 、 P_2 の最大値 P_{1max} 、 P_{2max} を示す。載荷の際には試験用レールに図 17 に示すように角度 θ_1 の方向から P_1 を載荷し、角度 θ_2 の方向から P_2 を載荷する。

3.2.3 試験結果と照査結果

表 9 の要領で静的二方向載荷試験を実施した。本試験で得られた板ばねの発生応力を耐久限度線図にプロットした結果を図 18 に示す。図から、パターン①と②の板

ばねの応力は、いずれも第 2 破壊限度と第 2 へたり限度に収まっていた。

また、レールの頭部左右変位量は、パターン①と②でそれぞれ最大 0.50mm と 0.42mm であった。これらの結果を式 (1) で照査した結果を表 10 に示す。表 10 より、板ばねの発生応力とレール頭部左右変位量は、いずれも照査式を満足することを確認した。

3.3 動的二方向載荷試験

本試験は、疲労破壊に関する安全性の照査のうち、試験後の構成部材の異状の有無についての照査を目的としている。

表 11 の要領で図 19 に示すように、動的二方向載荷試験を実施した。その結果、板ばね、締結ボルトおよび弾性材等の部材について、100 万回載荷後にき裂や顕著

表 9 静的二方向載荷試験の載荷要領

載荷サイクル	試験荷重 (kN)
予備載荷	P_1 : 0.0 → 5.0 P_2 : 0.0 → 5.0
第 1～3 回目 (A 荷重相当: P_1 載荷)	P_1 : 5.0 → P_{1max} → 5.0 P_2 : 5.0 (一定)
第 4～6 回目 (B 荷重相当: P_2 載荷)	P_1 : 5.0 (一定) P_2 : 5.0 → P_{2max} → 5.0

P_{1max} : パターン① 37.4kN, パターン② 44.8kN

P_{2max} : パターン① 23.9kN, パターン② 44.8kN

表 6 レール圧力とレール横圧力

	パターン①		パターン②
	A 荷重 (kN)	B 荷重 (kN)	
レール圧力	35.4	24.4	44.8
レール横圧力	10.7	2.9	2.1
割り増した レール横圧力	18.2 (+7.5)	9.9 (+7.0)	17.4 (+15.3)

() は荷重増加分

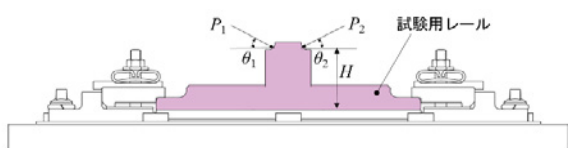


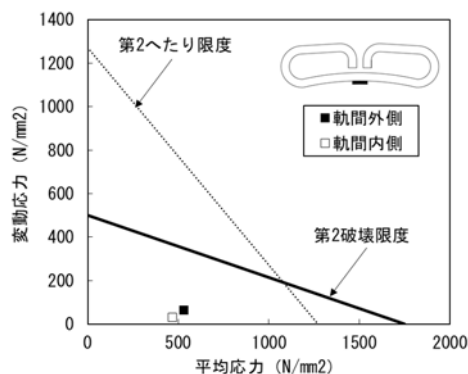
図 17 載荷方法

表 7 パターン①の鉛直荷重と水平荷重

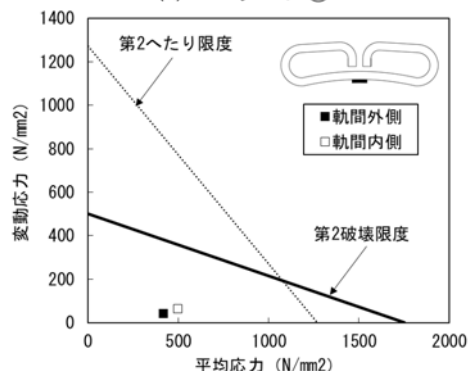
	鉛直荷重 (kN)	水平荷重 (kN)	試験荷重 (kN)	角度 (°)
P_{1max}	35.4	18.2	37.4	$\theta_1=56.2$
P_{2max}	24.4	9.9	23.9	$\theta_2=57.9$

表 8 パターン②の鉛直荷重と水平荷重

	鉛直荷重 (kN)	水平荷重 (kN)	試験荷重 (kN)	角度 (°)
P_{1max}	44.8	17.4	44.8	$\theta_1=64.1$
P_{2max}	44.8	17.4	44.8	$\theta_2=64.1$



(a) パターン①



(b) パターン②

図 18 耐久限度線図による照査

表 10 板ばね応力とレール頭部左右変位量の照査結果

照査指標		板ばね 発生応力	レール頭部 左右変位量
応答値	I_R	静的二方向 載荷試験の応力	静的二方向載荷 試験の変位量
設計応答値	I_{Rd}	$1.0I_R$	$1.0I_R$
限界値	I_L	第2破壊限度と 第2へたり限度	5.2 mm
設計限界値	I_{Ld}	$I_L / 1.0$	$I_L / 1.0$
軌道構造係数	γ_i	1.0	1.0
照査式		$\gamma_i \cdot \frac{I_{Rd}}{I_{Ld}} \leq 1.0$	
照査 結果*	パターン①	○	○ (0.096)
	パターン②	○	○ (0.081)

※照査結果 ○：要求性能を満足，×：要求性能を不満足

表 11 動的二方向載荷試験の载荷要領

項 目	単位	载荷条件
荷 重	kN	$P_1: 5.0 \sim P_{1max}$ (角度: θ_1)
		$P_2: 5.0 \sim P_{2max}$ (角度: θ_2)
繰返し周波数	Hz	5.5
目標繰返し回数	回	1×10^6

P_{1max} : パターン① 37.4kN, パターン② 44.8kN

P_{2max} : パターン① 23.9kN, パターン② 44.8kN



図 19 動的二方向載荷試験の状況

な摩耗等の変状は認められなかった。

以上より、疲労破壊に関する安全性の照査のうち、試験後の構成部材の異状の有無についての照査を満足することを確認した。

4. 試験敷設

開発品の施工性およびその効果を確認するため、新幹線の片開き分岐器に試験敷設を実施した。

図 13 に示した 6 締結において、既設の分岐タイプレートを撤去し、開発した弾性支持構造を有する分岐タイプレートを設置するとともに、クロッシングの交換も実施した。一晩の作業時間帯で、分岐タイプレートの交換とクロッシングの交換を問題なく施工できることを確認した。敷設状況を図 20 に示す。

敷設後 1 か月の開発品の落ち込み量の結果を図 21 に示す。同箇所には敷設していた過去のクロッシング 2 台の結果、および、それぞれ異なる箇所であるが、バラスト分岐器のクロッシングの結果も併せて示した。なお、これらのクロッシングの落ち込み量測定時の敷設期間は、



図 20 敷設状況

凡例	軌道 構造	クロッシングの レール頭頂面の勾配	締結 構造
◆ (今回)	直結	2 段勾配	開発品
● (過去)	直結	2 段勾配	現行品
▲ (過去)	直結	単勾配	現行品
○	バラスト	2 段勾配	現行品
△	バラスト	単勾配	現行品

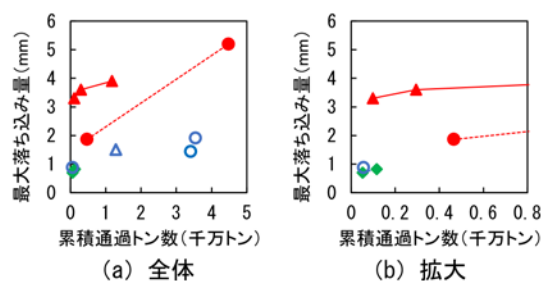


図 21 落ち込み量の推移

2 週間～数年である。

過去のクロッシング 2 台の落ち込み量の結果は、過去の調査⁴⁾と同様に、累積通過トン数が小さい初期において、落ち込み量の増加が大きい傾向がみられる。開発品（2 段勾配）は敷設後 1 か月で累積通過トン数 115 万トンであり、落ち込み量は 0.8mm であった。現行品（単勾配）の累積通過トン数 98 万トンの落ち込み量と比較すると 75% 減少した。また、現行品（単勾配）の結果から、累積通過トン数約 100 万トン～500 万トンの間で落ち込み量が大きく増加しないと仮定し、現行品（2 段勾配）の累積通過トン数約 466 万トンの落ち込み量と比較すると 56% 減少した。

さらに、バラスト分岐器と比較すると、開発品（2 段勾配）は敷設後 2 週間で累積通過トン数 51 万トンにおける落ち込み量は 0.7mm であり、バラスト分岐器のクロッシング（2 段勾配）の累積通過トン数 56 万トンの落ち込み量 0.9mm と同程度であった。

5. まとめ

弾性支持構造を有するクロッシング用の分岐タイプレートの開発を行った。結果をまとめると以下のとおりである。

- ・弾性材をクロッシングの下に配置し、鋼直改良形レール締結装置と同じ板ばねで座金を締結する 2 重弾性

締結構造の分岐タイプレートを開発した。

- ・開発品について、設計標準に準拠して性能確認を実施し、疲労破壊に関する安全性の照査を満足することを確認した。
- ・新幹線の片開き分岐器に開発品を試験敷設し、施工性に問題ないことを確認した。また、累積通過トン数が異なるものの、過去に同箇所敷設したクロッシングの落ち込み量と、開発品の敷設後1か月の落ち込み量を比較すると、1/2程度減少した。また、バラスト分岐器のクロッシングと比較すると、敷設後2週間の落ち込み量は同程度であった。

今後は、引き続き落ち込み量の追跡調査を実施し、開発品の効果を確認することにより、敷設拡大を図っていく予定である。

文 献

- 1) 及川祐也：分岐器，RRR，Vol.73，No.9，pp.28-31，2016
- 2) 佐藤浩司，神津大輔：クロッシングの材料状態管理に関する研究，土木学会第66回年次学術講演会，IV-122，pp.243-244，2011
- 3) 須田征男，長門彰，徳岡研三，三浦重編：新しい線路，日本鉄道施設協会，pp.466-468，1997
- 4) 清水紗希，塩田勝利，山本智之，及川祐也：合成まくらぎ直結分岐器における固定クロッシングの損傷に関する基礎検討，鉄道工学シンポジウム論文集，No.26，pp.209-216，2022
- 5) 伊藤壱記，中村貴久，佐野禎：FWDを用いた軌道支持状態の評価に関する研究，日本鉄道施設協会誌，Vol.52，pp.60-63，2014
- 6) 原幸一郎，倉津次郎：走行する車輪の踏面形状に適合させたクロッシングの開発，土木学会第68回年次学術講演会，VI-467，pp.933-934，2013
- 7) 大高亮輔，清水紗希，玉川新悟，弟子丸将：弾性支持構造を有した固定クロッシング用分岐タイプレートの開発，第31回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2024）講演論文集，2024
- 8) 佐藤泰生編：分岐器の構造と保守－増補改訂版－，日本鉄道施設協会，p.339，2017
- 9) 大高亮輔，清水紗希，佐藤弘規，上田将司：鋼マンガン鋼製固定クロッシングの落ち込みに関する重錘落下試験，土木学会全国大会第79回年次学術講演会，2024
- 10) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造，丸善出版，pp.52-60，2012
- 11) 玉川新悟，弟子丸将，山本智之：継目部用レール締結装置1組に対する載荷試験方法の構築，鉄道総研報告，Vol.37，No.2，pp.25-31，2023

列車前方画像を用いた沿線設備の劣化診断手法の開発

前田 梨帆* 向嶋 宏記* 長峯 望*

Development of a Method for Diagnosing Deterioration of Railside Facilities using Train Forward Images

Riho MAEDA Hiroki MUKOJIMA Nozomi NAGAMINE

Railside facilities are installed at stations and at various locations between them. Therefore, facility management operations, such as identifying locations and types and carrying out individual inspections, are labor-intensive and require labor savings. To reduce the labor required for facility management, we have developed a system that enables the facility inspector to check the condition of the rail side facilities remotely using a video camera to capture images in front of the train. The developed system can estimate kilometers travelled, recognize equipment automatically, and estimate the degree of deterioration of the signal equipment boxes. This paper describes an overview of the system, evaluates its accuracy, and outlines the prospects for monitoring the deterioration of facilities.

キーワード：沿線設備，画像処理，劣化診断，列車前方画像，AI

1. はじめに

鉄道の沿線設備は、駅構内および駅間に点在する形で設置されている。そのため位置・種類の把握や個別の検査といった設備管理業務においては人的および時間のコストが大きく、近年の少子高齢化に伴った労働人口が減少している背景を鑑みても、設備管理業務の省力化が要求されている。

このことから、我々は設備管理業務の省力化を目的として、現場に赴かずに沿線の状態を確認でき、また全22種類の沿線設備の抽出、および信号器具箱の劣化診断が可能なシステムを開発している^{1) 2)}。本システムは市販のビデオカメラと吸盤マウントからなる撮影システムを運転台の窓ガラスに設置し、列車前方画像を撮影することで実施できる。

本稿では、列車前方画像を用いた沿線設備の劣化診断システムの概要を説明したのち、各処理部について精度評価を含む詳細を述べる。また、本システムを応用した時系列での劣化推移の監視の展望について述べる。

2. 背景と目的

2.1 設備管理の現状

信号設備などの沿線設備は一か所に集中して設置されるのではなく、線区全体の各駅および駅間に広範に設置されている。このため、設備の種類や位置を把握し、それらに対して個別に検査を行う設備管理業務は、多大な労力を必要とするのが現状である。例えば、各設備に対

して定期検査に加えて多客期の事前点検等、一年間に複数回の検査を行っているが、検査のための移動距離は長大であり人的・時間的なコストが大きい。検査のうち電気・機械的な測定については近年遠隔モニタリング技術の発展による検査頻度の削減が期待されているが、外観検査や設置位置の確認については、いまだ作業員が現地で実施する必要がある、加えて外観検査は作業員の主観的な目視判断のノウハウに依存しているのが現状である。

このような設備管理業務における作業負担の軽減や設備検査の定量化のために、車上から線路周辺や設備の状態確認を行えるシステムが求められている。

2.2 本研究の目的

我々は沿線設備の管理業務支援を目的とし、現地での検査・確認作業の省力化を高価なセンサ等を用いることなく、安価に実現するためのシステムの開発に取り組んでいる。本システムでは市販のビデオカメラ等で撮影した列車前方画像を入力とし、俯瞰画像の生成による線路周辺の状態把握、キロ程に対応した設備一覧の取得、設備の外観の劣化状態の推定を可能とする。これらにより車上から撮影できる範囲の沿線や設備の状態を確認できる。さらには、検査において定量的な劣化度の推定が可能となれば、作業員や線区による判断のばらつきを削減できる等の効果が期待される。

3. 沿線設備の劣化度診断システム

3.1 全体概要

本システムでは低コストかつ簡便な撮影のため、市販のビデオカメラと吸盤式の固定マウントを用いて列車前

* 情報通信技術研究部 画像解析研究室

方の窓から沿線を撮影する。撮影装置および撮影画像の一例を図1、図2に示す。以下、図2のような画像を列車前方画像という。

列車前方画像に対して、AIや画像解析によって、フレームごとのキロ程推定、軌道面の長尺俯瞰画像の生成、設備の自動認識を行う。また劣化診断手法として、認識した設備画像に対する外観劣化度の推定を可能とする。本システムの概略図を図3に示し、以下で各処理の概要を述べる。



図1 撮影装置



図2 列車前方画像

(1) 軌道面の長尺俯瞰画像の生成

列車前方画像の軌道面領域を俯瞰画像に変換し、連続するフレームを合成することによって、軌道面を真上から俯瞰したような長尺の画像を生成する。

(2) キロ程の推定

画像フレーム間の画素移動量を実スケールへ換算し走行距離や列車速度を求める。加えて、撮影開始／終了キロ程を入力することにより列車前方画像の各フレームに対してキロ程情報を付与することができる。

(3) 設備の自動認識

信号設備をはじめとした全22種類の沿線設備の種類と位置を、物体検知AIを用いて認識する。このとき、認識結果はバウンディングボックス（矩形）で出力するものとする。

(4) 信号器具箱の外観劣化度の推定

認識した信号器具箱画像に対しては、その画像が含む領域に対して、外観劣化度を判定することが可能である。学習時には分類問題として学習させた結果を推定確率の重みつき和として計算し、連続値で推定結果を出力する。

次節で(1)～(3)の処理内容について、次章で(4)について詳しく述べる。

3.2 軌道面の長尺俯瞰画像の生成

運転台から撮影された列車前方画像は軌道面が画像上部につれて小さく台形に撮像される。そこで、まず図4に示す射影変換処理により疑似的に軌道面を真上から撮影したような俯瞰画像を出力する。

つぎに、長尺画像の生成のために、得られた俯瞰画像を合成していく。まず、列車前方画像の1フレーム毎に俯瞰画像を生成する。次に、一つ前のフレームの俯瞰画像との距離を算出し、その距離に応じて画像を重ねて合成する。ここではフレーム間の距離は画素移動量として

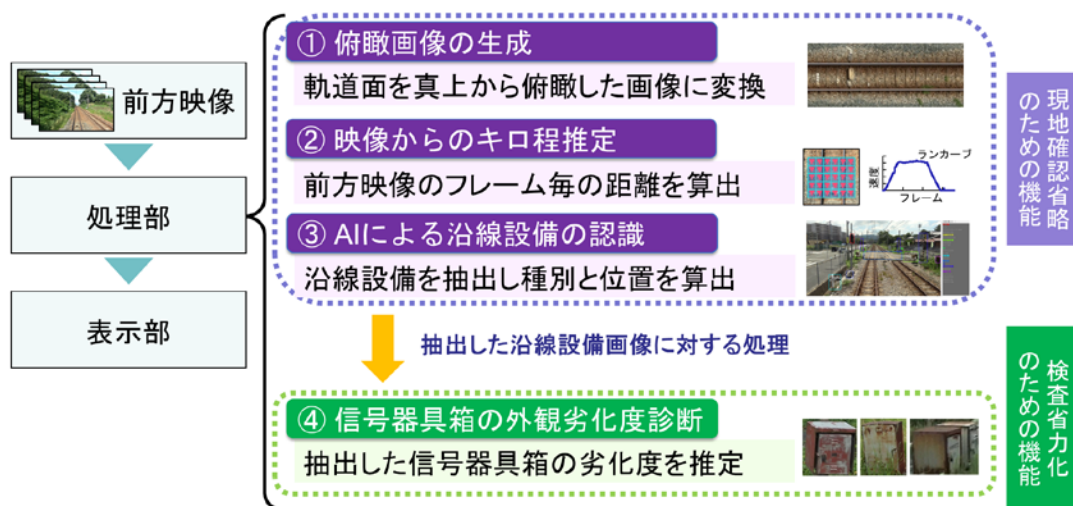


図3 システムの全体概要

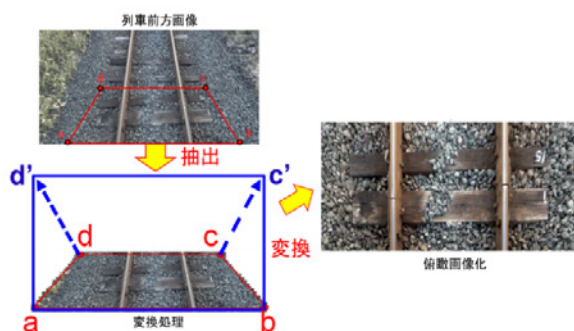


図4 射影変換による俯瞰画像化

表され、オプティカルフローによって求めることができる。オプティカルフローとは、画像中の輝度情報を解析し、対象となる速度場（フレーム間の画素移動量）から物体の移動方向と速度を表す手法である。得られた画素移動量に従って俯瞰画像の進行方向の位置を調整し、レール位置を基準として画像を合成する。結合部を滑らかにするため、俯瞰画像どうしが重なる領域においては、画像の周波数に応じて不透明度に強弱をつけるマルチバンドブレンディング^{3) 4)}による合成手法を採用した。

以上の処理によって生成した軌道面の長尺俯瞰画像の例を図5に示す。短い区間の画像が結合され、線路方向の長尺画像になっていることがわかる。

3.3 キロ程推定手法

撮影した列車前方画像および本システムで得られる俯瞰画像や設備認識結果は、実際の管理業務で活用する上では実際のキロ程と対応づいている必要がある。そこで列車前方画像から移動距離および速度を算出し、各フレームに車両走行位置のキロ程情報を付与する。

各フレーム間の移動距離および速度の算出には、オプティカルフローから得られる画素単位の移動量を累積し、撮影区間全体における相対的な移動距離を画素単位で算出する。これにより、画像上の各フレームが撮影された地点における相対距離（画素ベースの移動量）を得ることができる。さらに、この相対距離情報を実際のキロ程に変換するために、既知のキロ程を有する2点以上の参照点（駅や地上子等）を用い、その間の移動量を画

素単位で測定し、内分することで当該フレームのキロ程を算出する。具体的に、図6に示すように計測地点Sの画素単位の相対距離 D_S を、その前後の参照点R1、R2の画素単位の距離とキロ程をそれぞれ (D_{R1}, X_{R1}) 、 (D_{R2}, X_{R2}) とすると、Sにおけるキロ程 X_S は以下の式で求められる。

$$X_S = \frac{(D_{R2} - D_S)X_{R1} + (D_S - D_{R1})X_{R2}}{D_{R2} - D_{R1}} \quad (1)$$

式(1)を各フレームに適用することで、全ての画像にキロ程を割り付けられる。さらに、フレーム間の相対距離と撮影時刻の差分から移動速度も算出することが可能となる。

営業線で撮影した実映像を使用して、キロ程推定手法の精度を検証した。検証に用いた映像における列車の実走行距離はおよそ35kmである。精度の検証にあたっては、正解データとしてATS地上子のキロ程を使用した。ATS地上子は敷設されたキロ程が既知であるため、ATS地上子が画像下端に写っているフレームを使って、65箇所分の正解点を設定した。65箇所の正解点のうち、全区間長をおおよそ4等分するように5点を参照点として使用し区間全体のキロ程を推定した。推定結果に対して、参照点に使用していない60点でキロ程の推定誤差を評価した結果を図7に示す。なお、区間中に断キロ（運用上の都合によりキロ程が連続していない地点）が含まれていたため、断キロ地点に対しても正しいキロ程を割り付けた。図7は横軸が映像の時間、縦軸が誤差の絶対値である。図7より、参照点（600秒、1100秒地

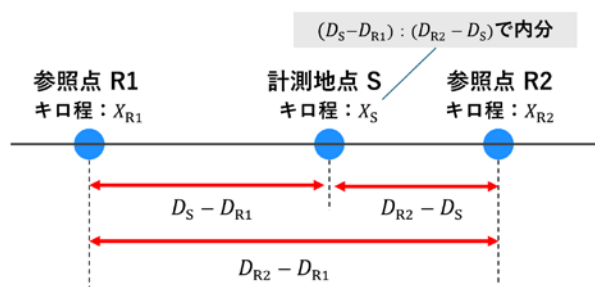


図6 参照点によるキロ程の割り付け



図5 長尺俯瞰画像の生成結果例

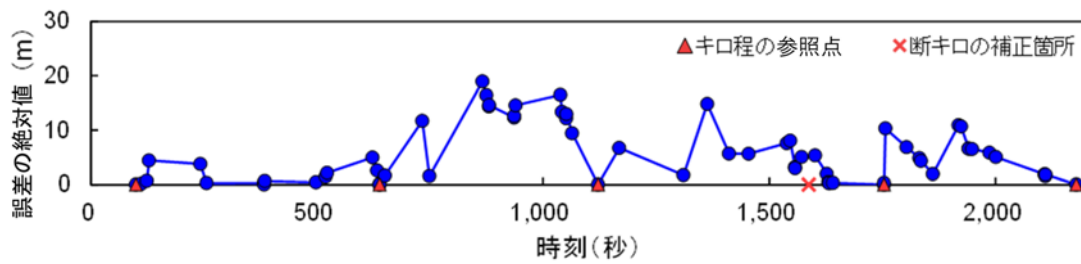


図7 キロ程の推定誤差

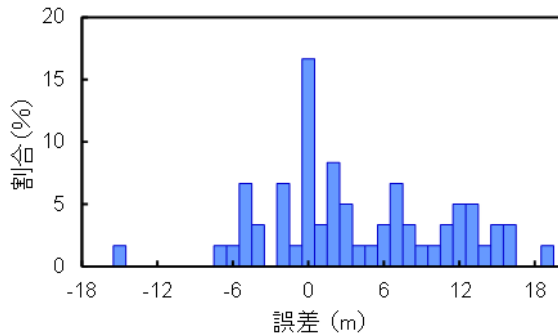


図8 キロ程推定誤差の分布

点等)では誤差が0になる一方で、参照点から離れた地点(800秒から1000秒周辺等)で山なりに誤差が大きくなる傾向が確認できる。なお、区間全体について、誤差の絶対値の平均を算出した結果は約6mである。また、図8に誤差の割合を示す。誤差が0mである箇所の割合が最も大きく、最大誤差は19mであった。

列車前方映像から推定したキロ程は走行距離の影響を受ける一方で、鉄道におけるキロ程は実際の列車の走行距離とは必ずしも一致しないため誤差が発生すると考えられる。本手法は、映像中からキロ程によっておよその位置を検索する用途には十分適用可能と考えられる。

3.4 物体検知 AI による設備認識手法

設備の種別や位置を、撮影した可視光画像から自動で把握するため、物体検知 AI によって沿線設備を認識する手法について述べる。物体検知 AI のモデルは YOLOX⁵⁾ を基に構築した。YOLOX は 2021 年に Megvii Technology 社によって開発された Deep Learning による検知アルゴリズム YOLO シリーズの一種である。学習方法の改良によって、従来の YOLO モデルより少ないパラメータで同等の精度を実現しており、性能と処理速度が両立できるという特長をもつ。提案手法においては、列車走行に伴って得られる大量の列車前方画像のフレームに対して処理を行う必要があることから、YOLOX を採用した。

本研究では、約 1.8 万枚の列車前方画像を学習データとし、表 1 に示す全 22 種類の沿線設備を認識するモデルを作成した。構築した物体検知 AI により、入力した

表 1 設備一覧名称

No.	設備名	No.	設備名
①	信号機	⑫	勾配標
②	地上子	⑬	非常ボタン
③	速度制限標識	⑭	信号喚呼位置標
④	特殊信号発光機 (回転形)	⑮	踏切道
⑤	特殊信号発光機 (点滅形)	⑯	インピーダンスボ ンド
⑥	停止位置目標	⑰	車両接触限界標識
⑦	踏切制御子箱	⑱	鉄道沿線電話
⑧	踏切遮断機	⑲	電化柱
⑨	器具箱	⑳	踏切警報機柱
⑩	電気転てつ機	㉑	接続箱
⑪	キロポスト	㉒	中継信号機



図9 設備認識結果

画像中に存在する設備種別とその位置をバウンディングボックスとして出力する。出力結果の例を図9に示す。

構築したモデルの検知性能を確認するため、約 2km の区間の列車前方画像に対して物体検知を試行した結果、走行した線路の沿線にある 165 箇所の設備に対して今回検証に用いた画像においては見逃しが発生しなかったことを確認した。

4. 信号器具箱の外観劣化度推定手法

4.1 手法の概要

外観検査は作業員の主観的な目視判断に依存している

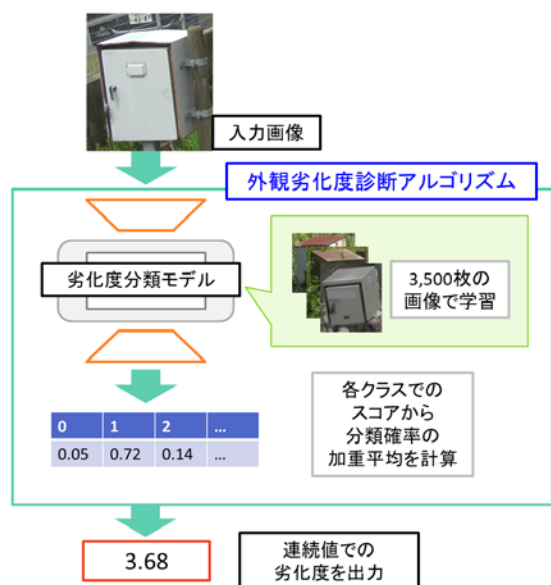


図 10 信号器具箱の外観劣化度判定手法

のが現状であり、定量的な劣化度が推定できれば、作業員や線区による判断のばらつきを削減できる等の効果が見込まれる。そこで、本システムでは、3.3 節で列車前方画像から抽出した信号器具箱画像を対象として AI モデルにより外観劣化度を定量的に推定する手法を導入した。

列車前方画像から 3.3 節の物体検知 AI によって抽出した信号器具箱の画像から、画像分類 AI を用いたアルゴリズムによって外観劣化度の値を 0～10（0：健全，10：交換等が必要）の範囲の連続値で判定する。図 10 にアルゴリズムの処理フロー図を示す。列車前方画像より切り出した信号器具箱の画像約 3,500 枚に対して、検査作業員の判定により 0～10 の離散値、すなわち全 11 クラスの劣化度分類を行ったデータセットを作成し、データセットをもとに Swin Transformer⁶⁾ を用いて画像分類 AI モデルの構築を行った。

Swin Transformer は自然言語処理モデル Transformer ベースのネットワークの一種である。Transformer は、系列データ内の依存関係を一度に捉える Self-Attention 機構によって、離れた画素どうしの情報も効率的に処理できるモデル構造を有する。Swin Transformer は、画像を異なるパッチサイズで分割して、重要な領域に着目する Attention の計算を行うことにより、様々なスケールで階層的に特徴量を抽出する機構を有する。中間的な劣化状態を含めた段階的な学習が可能であるほか、従来の Transformer では固定されていたパッチサイズが可変となることから、画像の解像度が異なる条件下でも画像分類タスクに関して高い性能を誇る。したがって、車両が走行するに伴い列車前方画像中の設備の写る大きさが変化する信号器具箱の分類タスクに適したネットワークであるといえる。

Swin Transformer は画像を任意のカテゴリへ分類するタスクに用いられている。本研究では学習時において、教師データの正解ランクと、大きく異なるランクへ誤判定した際の損失を大きく、近いランクへ誤判定した際の損失を小さく設定して、順序のある劣化度ランクの推定へ適用している。

構築した画像分類モデルから各劣化度クラスのスコアを出力し、スコアを確率として解釈可能な形に変換するために Softmax 関数を用いて 0 から 1 の値に変換する。これにより、出力をクラスごとの分類確率として解釈でき、入力画像に対する加重平均での予測値を出力することで、離散値分類の学習データから連続値での劣化度判定を実現した。

4.2 精度評価

(1) カメラ画像から作業員が判定した結果との比較

複数の列車前方画像から信号器具箱画像を抽出し、これらの画像に対して、現場での検査経験のある技術者が学習データと同じ判定基準で劣化度を 0～10（0：健全，10：交換等が必要）で分類した計 1,410 枚の画像を用いて判定精度の検証を行った。

結果のバイオリンチャートを図 11 に示す。横軸は現場での検査経験のある技術者が離散値で判定した外観劣化度ランク（以下、真値）で、縦軸が提案手法によって連続値で推定した外観劣化度の値である。各ランクでの縦軸方向のチャートの長さは推定値のばらつきを示し、横軸方向に推定結果の分布を示している。

まず、判定結果の分布からその値の確からしさについて考察する。図 11 では、全ランクにおいて真値の周辺で推定結果の分布が最大となっており、また推定値の中央値が真値と近接していることがわかる。ただし、0 と 10 のランクの推定値の中央値は隣接するランクと近い値を持った。これは連続値での推定に各ランクの加重平均を用いたことによって、0 以下および 10 以上の隣接するランクが存在しない場合に推定結果が偏ってしまうことが原因と考えられる。

次に判定精度について評価を行う。ここでは推定結果 $\hat{y}$ が真値 y に対して誤差が ± 0.5 となる場合を正解とした。誤差が ± 0.5 よりも大きくなった場合、離散値での表現において正解に最も近いランクが隣のランクとなるためである。ランク全体における判定精度を算出した結果、78.1%であった。これは、劣化度の低いランクにおいて学習データのランク付けがばらついたことから全体の判定精度が低下したと推察される。ただし、より劣化が進行している設備を抽出して確認する、という用途を想定した場合、劣化度の低いランク間での推定のばらつきは実用には大きく影響しないと考えられる。

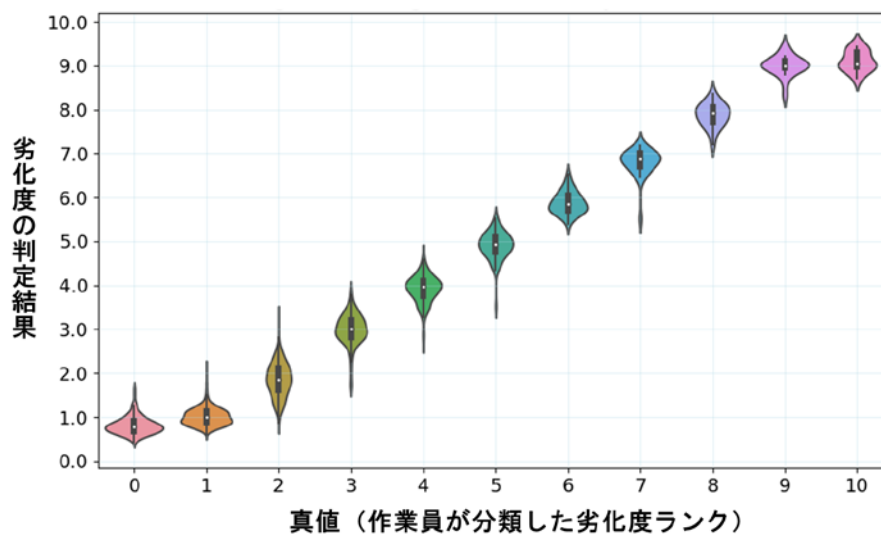


図 11 画像から作業員が判定した結果との比較

(2) 現地検査結果との比較

現地での検査では、一方向からの撮影画像は見えない底部の穴や破損も加味して劣化状態が判定されるが、列車前方画像からはそれらの情報は得られない。そこで、画像からの AI による判定結果と、現場での検査経験のある技術者が現地に赴き検査した結果との比較・分析を行い、列車前方画像からの劣化度判定の有用性について検討する。比較・分析にあたっては、前節で検証に用いた信号器具箱のうち、踏切用に使われている器具箱（以下、踏切器具箱）を対象とした。

定期検査では、年 1 回現地に赴いて設備の外観について「要処置」、「要注意」、「問題なし」の三つの検査基準で判定する。定期検査が行われた時期と最も近い時期に行われた列車前方画像の撮影データから、当該の踏切器具箱の画像を抽出し、AI による劣化度判定値を取得した。

現地での検査結果と、AI による外観劣化度の判定値との関係を図 11 に示す。検査結果は合計 57 サンプルあり、うち「問題なし」が 47 サンプル、「要注意」が 1 サンプル、「要処置」が 9 サンプルであった。図 12 より、「問題なし」、「要注意」、「要処置」の各検査基準の平均値は、1.82、3.85、3.54 であった。「要注意」に該当するサンプルは検証データでは極端に少なかったため平均値が「要処置」よりも高くなっているが、「問題なし」よりも「要処置」の方が、その劣化度の平均値が約 1.9 倍高くなった。このことから一方向から撮影した画像を入力した AI による外観劣化度判定と、現地に赴いた技術者が検査した結果の間には一定の相関の傾向が見られる。

図 12 の「要処置」ランクにおいて劣化度が最大／最小となる踏切器具箱の画像をそれぞれ図 13、図 14 に示す。図 13 は天板の錆の多さから外観劣化度が 4 を超える値で判定された一方で、図 14 の内部の錆は画像に情報が含まれないため 3.0 程度の劣化度として出力され、

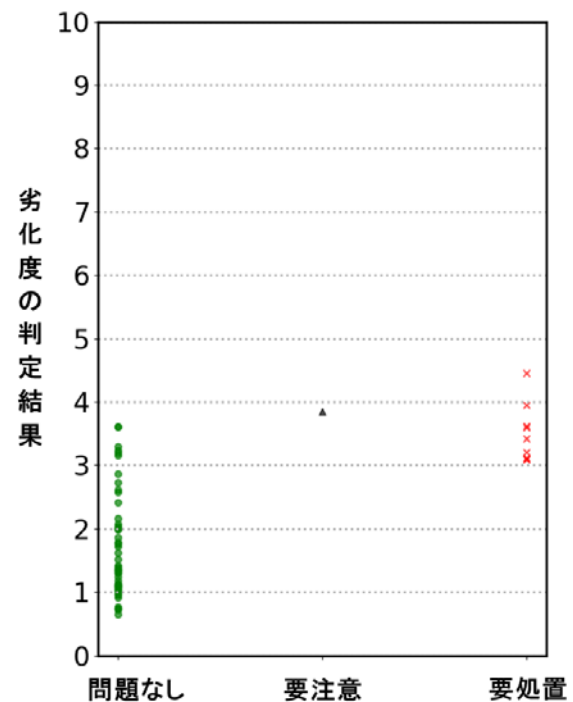


図 12 現地検査結果との比較

「問題なし」の一部の踏切器具箱と類似した値となった。

例えば、劣化度ランク 3.0 以上の劣化度の踏切器具箱を「要処置」相当として抽出した場合、誤検知（「問題なし」の踏切器具箱も劣化として判定する）が一部発生するものの、目視検査の一次スクリーニング等への活用は可能と考えられる。今後、検査へ適用するためには安全率を考慮した判定閾値を設ける等、さらなる検討が必要である。



図 13 劣化度が最大の踏切器具箱



図 14 劣化度が最小の踏切器具箱

5. 時系列での劣化状態監視の検討

本システムによって連続値で出力された外観劣化度の活用法としては、例えば鉄道事業者が管理している膨大な数の設備について順位付けを行うことにより、設備更新の優先度を決定づけられることがあげられる。現在の「要処置」、「要注意」、「問題なし」の三つの検査基準では、ランク内の個々の設備の状態を判別できない。そこで、連続値による優先順位の付与を行うことで、個々の設備ごとに順位づけが可能となることは効果が大きい。さらに、将来的な設備のCBM（Condition Based Maintenance）を視野に入れた、継続的な状態監視にも資すると考えられ、以下ではそれらへの適用可能性について述べる。

現行の設備管理においては、その外観劣化度のランク付けによる検査を行い、処置が必要なランクに至った場合に適宜取替計画を実施している。離散値で管理している設備において継続的な状態監視を行う場合、ある時点で次の劣化度ランクへ判定がステップ的に進行する事象が発生するが、一方、劣化度を連続値で管理すれば、時系列での劣化挙動を詳細に可視化できる。これにより離散値データよりも統計的な取り扱いが容易となると考える。

これらの劣化度の推移に関して、営業線に敷設された

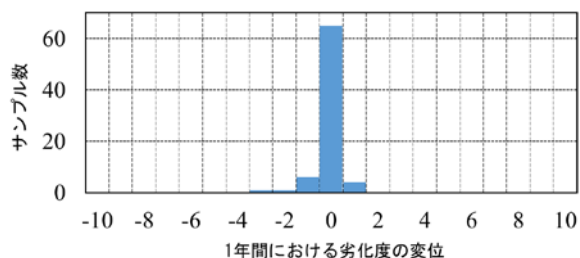


図 15 1年間の踏切器具箱の劣化度の変化

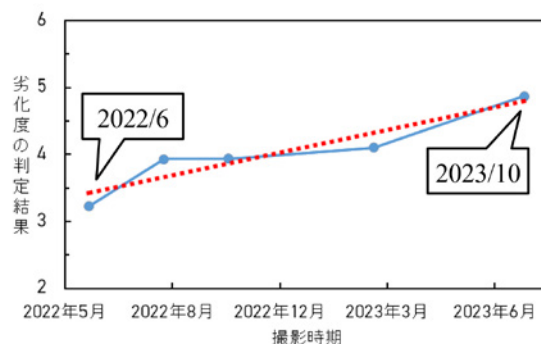


図 16 最も劣化が進行した踏切器具箱の劣化推移

踏切器具箱 78 サンプルを対象に劣化度の AI による推定値の 1 年間における変化を図 15 に示す。1 年間での劣化推移は大半が 1 以下でばらついており、大きな変化は確認できなかった。サンプルのうち推移の最大値を示した、すなわち 1 年間で最も劣化の進行した踏切器具箱についてその設備画像の 2022 年 6 月から 2023 年 10 月にかけての変化のようすを図 16 に示す。天板や側面の錆の割合が増加していることが確認でき、劣化の進行が値として反映されているといえる。

踏切器具箱全体に関しては 1 年間の撮影データでは劣化の大きな進行は確認できなかったものの、図 16 に示すように劣化が推移している様子を確認できたことから、今後長期的なデータを取得していくことで、劣化の進行の予測に活用できる可能性があると考えている。

6. まとめ

沿線設備の管理業務を低コストで省力化することを目的として、市販のビデオカメラで撮影した列車前方画像

から現地へ赴かずに沿線や設備の状態を確認できるシステムを開発した。本稿では、システムを構成する画像からのキロ程推定、軌道面の長尺俯瞰画像の生成、設備の自動認識、信号器具箱の外観劣化度の推定のそれぞれを実現する手法について述べた。

また、開発した劣化診断手法により、設備の劣化度が連続値で推定できることを活用し、定期的に撮影した同一線区の列車前方画像から踏切器具箱の外観の劣化を定量的に把握できることを確認した。今後は、より長期的な設備画像データの取得と、取得データに基づく予測モデルの適用等、設備劣化度の状態監視手法を構築するためのさらなる検討を行い、検査の省力化に資するシステム構築を目指す。

謝 辞

本研究における信号器具箱の外観劣化度判定のための学習データセット作成にあたり、九州旅客鉄道株式会社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る。

文 献

- 1) 向嶋宏記, 長峯望: ハンディカメラによる列車前方映像を用いた信号設備の管理支援システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.8, pp.45-50, 2022
- 2) 長峯望, 向嶋宏記: ハンディカメラ映像からの信号設備認識手法, 電気学会研究会資料 交通・電気鉄道 リニアドライブ合同研究会, TER-20-025, 2020
- 3) P.J. Burt and E. H. Adelson: "A multiresolution spline with application to image mosaics", ACM Transactions on Graphics, Vol.2, No.2, pp.217-236, 1983.
- 4) 向嶋宏記, 長峯望: 沿線設備の保守省力化のための列車前方映像を用いた線路周辺の長尺な俯瞰画像生成手法, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌) Vol.144, No.3, pp.60-69, 2024
- 5) Zheng Ge, Songtao Liu, Feng Wang, Zeming Li, Jian Sun. "YOLOX: Exceeding YOLO Series in 2021" arXiv preprint arXiv: 2107. 08430, 2021.
- 6) LIU, Ze, et al, "Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows," In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, pp.10012-10022, 2021.

太陽位置及び被写体ブレが 光切断式トロリ線摩耗計測に及ぼす影響

薄 広歩* 松村 周* 平良 優介**

Influences of Sun Position and Subject Blur
on Contact Wire Wear Measurement Using Light Section Method

Hiromu SUSUKI Itaru MATSUMURA Yusuke HEIRA

Current methods of measuring contact wire wear are unable to accurately measure the diameter of unevenly worn contact wires. To address this issue, we have developed a wear measurement method using a light section method for contact wires. We have also conducted basic studies on the fundamental configuration of cameras and laser light sources, as well as performance verification in limited environments. In order to apply this method to real vehicles, it is necessary to investigate how disturbances caused by the sun's position and subject blur due to high-speed running affect measurement performance in real-world environments. We have verified their performance of these factors in this study and report that the proposed measurement method has sufficient performance.

キーワード：トロリ線，トロリ線摩耗，局部摩耗，偏摩耗，残存直径，光切断法，画像処理

1. はじめに

一般の電気鉄道では、電気車はトロリ線とパンタグラフすり板の接触により走行用の電力を得る。トロリ線はパンタグラフとのしゅう動により摩耗するため、その摩耗管理が重要である。現行の摩耗検出では、電気検測車等からレーザー光の走査やラインカメラでの撮影等によりトロリ線のしゅう動面幅を計測し、残存直径に換算している。ただし、わたり線箇所等トロリ線が偏摩耗した箇所では、しゅう動面幅を正しく計測できないという課題がある（図1）。

上記課題を解決するため、先行研究ではラインレーザーとカメラを組み合わせる光切断法を用いたトロリ線断面形状計測手法を提案している¹⁾。また、同手法の原理検証を実施しており、ラインレーザーとカメラの配置

等の基本構成の提案や、特定の条件（低速、直射光の影響なし）において計測精度（残存直径換算）が概ね $\pm 0.1\text{mm}$ あることを確認している。一方、本計測技術を新幹線車両での計測に適用するにあたっては、実車環境で想定される諸条件が計測性能に及ぼす影響を調査する必要がある。そこで本研究では、実車環境で想定される摩耗計測への影響のうち、比較的大きい影響と考えられる、太陽位置がトロリ線形状計測に及ぼす影響と、高速走行に伴う被写体ブレが計測精度に及ぼす影響について、模擬環境での実験により検証したので報告する。

2. 光切断式トロリ線摩耗計測の概要

光切断式トロリ線断面形状計測の概要²⁾を図2に示す。車両屋根上にカメラとライン状のレーザー光源を搭載し、車両の走行によりトロリ線下部の断面形状を走査

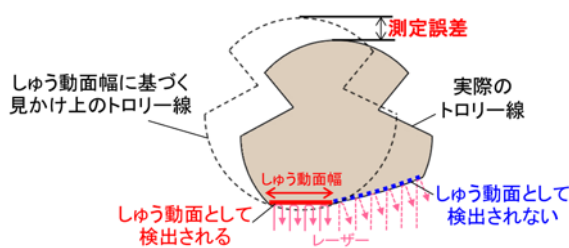


図1 偏摩耗による摩耗計測誤差¹⁾

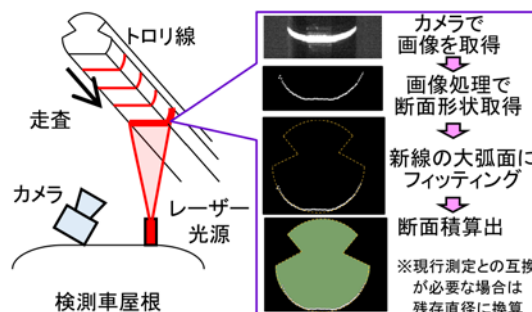


図2 光切断式トロリ線断面形状計測の概要²⁾

* 電力技術研究部 集電管理研究室

** 元 電力技術研究部 集電管理研究室

表 1 トロリ線摩耗計測に必要な仕様

計測範囲	偏位	-400 mm～+400 mm
	レール面上高さ	4800 mm～5300 mm
計測精度	残存直径換算	±0.3 mm 以内
サンプリング	サンプリング間隔	50 mm (360 km/h 走行時)
	サンプリング周波数	最大 2 kHz
計測環境	時間帯・日照条件	夜間日中問わず計測可能
	天候	雨雪以外は計測可能

する。具体的には、トロリ線下部に照射されたレーザーの反射光をカメラで撮影し、高輝度画素を抽出することで、トロリ線下部形状の座標データ（以下、プロファイル）を得る。また、取得したプロファイルと新線のプロファイルをフィッティング処理により比較して、残存断面面積を算出する。

この手法により、図 1 に示すような偏摩耗トロリ線に対しても正確な断面面積が計測可能となる。

なお、以降本報告でのトロリ線摩耗計測結果については、現場の管理方法に合わせて断面積から残存直径に換算した値で表す。

3. 仕様と装置構成

3.1 トロリ線摩耗計測に必要な仕様

新幹線の営業線におけるトロリ線摩耗計測の仕様を表 1 の通り整理した。まず、計測可能範囲は、新幹線一般区間におけるトロリ線の架設範囲であるレール面上高さ 4800～5300mm、左右偏位±300mmとした。摩耗計測精度は、現行手法（しゅう動面幅からの換算）と同等程度の残存直径換算±0.3mm 以内とし、現行手法では誤差が大きい偏摩耗箇所でも精度維持を目標とした。また、線路方向の測定間隔について、現行の実績は最高 285km/h 走行時に 50mm 間隔であるが、360km/h 走行時においても現行手法と同等の 50mm 以下の間隔を目標とした。

3.2 カメラ・レンズ・レーザー光源の構成

光切断法によるトロリ線摩耗計測が可能なハードウェア（カメラ、レンズ、レーザー光源）として、先行研究²⁾で以下の構成が検討されている。

- ・カメラ：最大 7kHz でプロファイルを取得可能な光切断用カメラ
- ・レンズ：焦点距離 50mm の C マウントレンズ
- ・レーザー光源：スリット状に照射する波長 660nm、出力クラス 3B のレーザー光源
- ・バンドパスフィルタ（BPF）：中心波長 660nm のバンド幅が狭小なバンドパスフィルタをレンズに装着
- ・シャインブルーファダプタ：カメラとレンズの間に挿

入することで任意の面全体にレンズの焦点を合わせ、被写界深度を確保する。

上記のカメラとレンズを 1 組用いた構成を基本とし、先行研究¹⁾では夏期・日中・晴天・低速運転（約 5km/h）でのトロリ線残存直径計測精度が概ね±0.1mm 以内であることを確認している。以下本報告では基本構成で検証を実施した。

なお、基本構成を 4 組用いれば、仕様に示したトロリ線の架設範囲を網羅し、分解能が偏位方向 $\Delta x \approx 0.2\text{mm}$ 、高さ方向 $\Delta y \approx 0.4\text{mm}$ （サブピクセル処理で約 0.03mm）のプロファイルを取得可能である。

4. 太陽位置がトロリ線形状計測に及ぼす影響調査

4.1 想定される計測への影響

先行研究²⁾で、太陽光がカメラの画角に入らない条件においては手法の有効性が示されている。一方、実際の計測ではカメラが車両屋根上からトロリ線を見上げる形になるため、カメラの画角内に太陽光が写り込む可能性は十分にある。カメラに写り込む太陽光の輝度がトロリ線下部に照射されたレーザー輝線の輝度よりも大きい場合、トロリ線プロファイルが取得できない可能性がある。そこで、太陽高度と方位の変化を模擬可能な計測系を構成し、太陽位置による外乱がトロリ線形状計測に及ぼす影響を調査した。

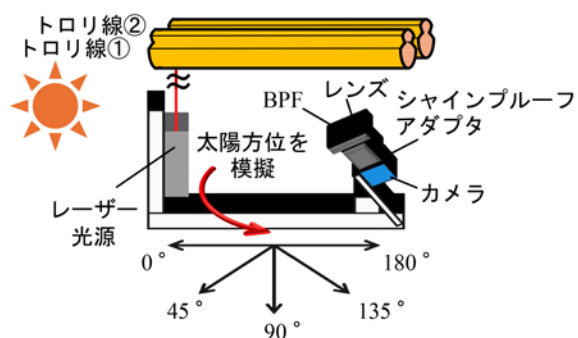
4.2 計測条件

計測系の概要図を図 3 に示す。カメラ、レーザー光源、トロリ線を図 3 のように固定し、系全体の角度を変更可能な構造とした。これにより太陽高度の変化を模擬し、計測系を台車に乗せて回転させることで見かけの太陽方位の変化を模擬した。トロリ線を 2 本配置した理由は、トロリ線の背後に太陽がない状態とある状態について、トロリ線プロファイルの欠損の有無を比較するためである。なお、本計測試験の主目的は太陽光の影響調査であるため、条件を揃えやすい、かつトロリ線の計測プロファイルと新品プロファイルのフィッティングが容易な摩耗していないトロリ線を用いた。

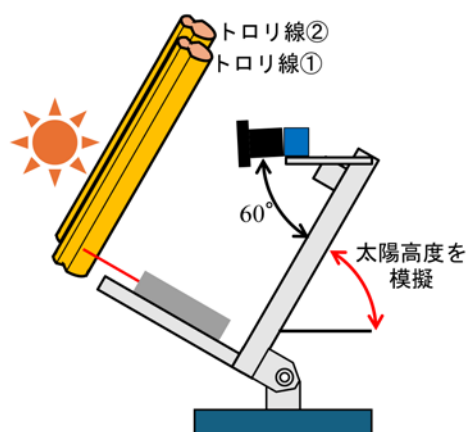
試験は、冬季・日中に実施した。カメラに対する太陽の方位・高度を変化させて 45 通りの条件でトロリ線プロファイルを取得した。

4.3 計測結果

図 4 に見かけの太陽高度と方位に対する、計測したトロリ線のプロファイルを構成する座標点の数（以下、プロファイル点数）を示す。プロファイル点数を計上したところ、大部分の条件で 130 個以上であった。図 3 の



(a) 太陽方位の模擬



(b) 太陽高度の模擬

図3 太陽位置影響調査試験の計測系

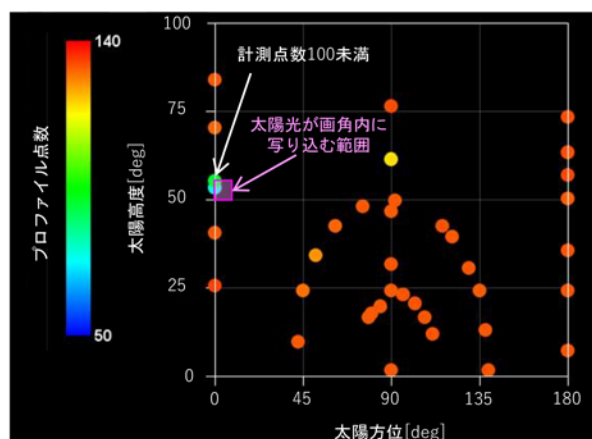


図4 太陽高度・方位とプロフィール点数

計測系におけるプロフィール点数は、ノイズのない環境下かつ新品直径が同一トリ線であれば130～135個程度である。したがって、130個未満のときはプロフィールに欠損があると考えられる。全90通り（45条件×トリ線2本）の試験結果のうち点数が130個未満のものは7通り（4条件）であった。

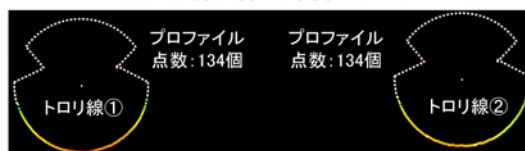
そこで、プロフィールに欠損がほとんどない条件と、多くの欠損が確認された条件について、取得画像およびプロフィールの比較を行った。図5～図7に取得画像



(a) 取得画像（グレースケール）

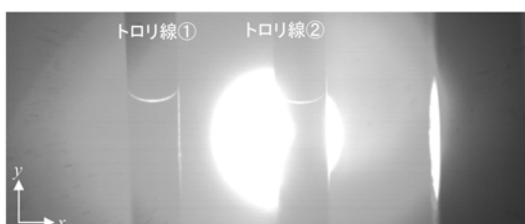


(b) 取得画像（輝度マップ）

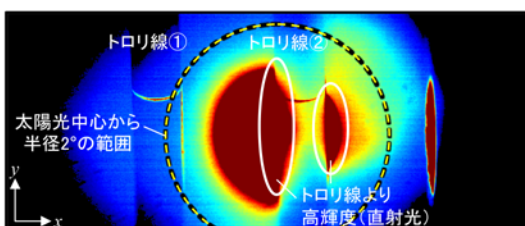


(c) プロファイル（点群データ）

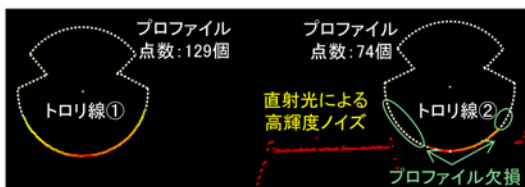
図5 プロファイルに欠損がない場合³⁾



(a) 取得画像（グレースケール）



(b) 取得画像（輝度マップ）



(c) プロファイル（点群データ）

図6 プロファイルに欠損がある場合（条件1）³⁾

（グレースケール・輝度マップ）とプロフィールを示す。輝度マップおよびプロフィールは、高輝度画素を暖色、低輝度箇所を黒色もしくは寒色で着色している。プロフィール図中には円弧形状に基づいてフィッティングし

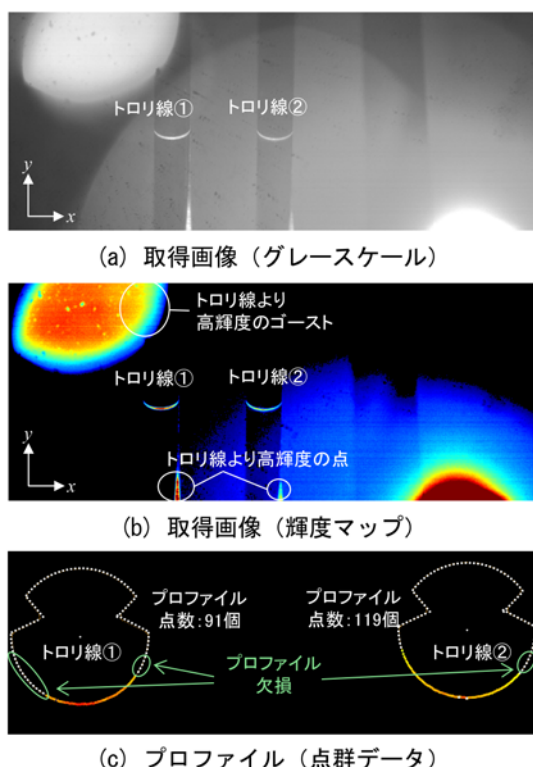


図7 プロファイルに欠損がある場合（条件2）³⁾

たトロリ線新品形状を破線で示している。

(1) プロファイルに欠損がない場合

画角内に直射光はなく、トロリ線に照射されたレーザーの輝線（以下、レーザー輝線）より輝度が高い画素がない（図5）。

(2) プロファイルに欠損がある場合（直射光）

図6ではトロリ線②の背後に直射光による高輝度画素があり、トロリ線プロファイルが欠損していた。トロリ線①の輝線の最小輝度より直射光の輝度が大きい範囲は、カメラ中心と太陽中心を結ぶ線からの角度で約2°相当であった。余裕分を考慮するとトロリ線の輝線が太陽中心から約3°以上離れれば欠損点なく測定可能であると考えられる。

(3) プロファイルに欠損がある場合（ゴースト等）

図7は、トロリ線輝線自体は撮影出来ているが、画角右下に直射光が写っており、左上に太陽によるゴースト（レンズ・カメラ内部での反射光により生じる光の像）が認められた。図7(b)では直射光やゴーストの箇所のほか、トロリ線①、②の下部にレーザー光の輝線より明るい部分が認められた。これはトロリ線の側面で太陽光が反射したものと考えられる。図7(c)では、プロファイルに欠損が認められた。図7のトロリ線①、②のようなプロファイルの欠損対策については4.4節で後述する。

(1)～(3)より、下記の条件で太陽光によってトロリ線プロファイルが欠損することがわかった。

- ・カメラ中心と太陽中心を結ぶ線から3°以内の範囲にトロリ線輝線がある場合
- ・画角内に太陽光があり、ゴーストが発生している場合
- ・トロリ線側面の太陽光による反射が強い場合

なお、本試験は4.2節で前述の通り、冬季に実施したものである。冬季以外における太陽光の影響については、追って検証する予定である。

4.4 トロリ線プロファイルの欠損対策案

光切断式トロリ線摩耗計測では、画像の縦方向の輝度重心を計算することでトロリ線のプロファイルを取得している²⁾。また、得られたプロファイルのうち、トロリ線と考える大きさをもつ点の集合を、トロリ線として抽出している。このアルゴリズムは、図7(b)ゴーストのように、輝度が大きいかつある程度の大きさをもつ点の集合をトロリ線として誤検出するという課題がある。

この課題に対し、図7(a)のようにトロリ線上のレーザー光の輝線を撮影できている場合、アルゴリズムの工夫により欠損を回避可能と考えられる。例えば、プロファイル取得時に図7(a)の直射光やゴーストのようにレーザー光の輝線より明らかに広い範囲に高輝度データが存在する場合、高輝度領域の面積に基づいてレーザー光と直射光やゴーストを区別するアルゴリズムの構築により、直射光やゴーストの影響を排除できる可能性がある。

また、図7(a)トロリ線①の下部に認められた高輝度箇所は、トロリ線の側面で太陽光が反射したものと考えられる。この反射光の誤検知を防ぐ対策として、高輝度領域のアスペクト比を算出することで、レーザー光の輝線（横長）とトロリ線側面の反射光（縦長）を判別するアルゴリズムの構築が考えられる。

5. 被写体ブレが形状計測に及ぼす影響調査

5.1 想定される計測への影響

本計測技術を用いた計測装置を新幹線車両に適用する場合、高速走行に伴う画像のブレ（被写体ブレ）が課題となる。具体的には、カメラ露光時間中の、トロリ線偏位・高さのカメラに対する移動量や、トロリ線局部摩耗に伴うトロリ線大弧面の形状変化量が大きくなると、光切断像を撮影する際に被写体ブレが生じ、トロリ線の摩耗計測精度に影響を及ぼす可能性がある。

そこで、次節以降では露光時間中のトロリ線の移動量・形状変化量を概算する。また、高速度域を模擬した環境でのトロリ線摩耗計測試験を実施することにより、被写体ブレがトロリ線の摩耗計測精度に及ぼす影響を調査した。

5.2 高速度域における被写体ブレの概算

5.2.1 被写体ブレの定義

本検討における被写体ブレについて定義する。3.2 節の構成における画像分解能は最小で $\Delta x \times \Delta y = 0.17\text{mm} \times 0.37\text{mm}$ である。本報告では、1 回の露光時間内に被写体がこの分解能より大きく移動、または形状変化する状態を「被写体ブレ」と定義する。

5.2.2 トロリ線の移動量・形状変化量

走行速度 $v = 360\text{km/h}$ ($= 100\text{m/s}$) の車上的における、相対的なトロリ線の移動量・変化量を概算する。計算条件は 1 径間の長さを $S = 50\text{m}$ 、トロリ線偏位は 1 径間半サイクル、カメラの露光時間 $T = 100\mu\text{s}$ とした。ここでは、計測装置が車両に搭載されていると仮定し、走行に伴う露光時間中のカメラとトロリ線の相対的な位置関係の変化やトロリ線の断面形状の変化と、カメラの最小分解能との関係を検討する。計算上の座標系は偏位方向を x 軸、高さ方向を y 軸、軌道中心を $x = 0$ とする。

(a) トロリ線のジグザグ偏位による移動量

新幹線におけるトロリ線偏位は、一般区間において $x = \pm 250\text{mm}$ 以内に架設することが求められている⁴⁾。トロリ線偏位の変化は隣り合う支持点間で -250mm から $+250\text{mm}$ となるときの最大であるため、露光時間 $T = 100\mu\text{s}$ あたりの偏位によるトロリ線移動量 $\Delta x_{stg}(\text{mm})$ は、

$$\begin{aligned}\Delta x_{stg} &= \frac{2x}{S} vT = \frac{2 \times 0.25}{50} \times 100 \times 10^{-4} \\ &= 0.10 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.10 \text{ mm}\end{aligned}\quad (1)$$

となり、この値は分解能 $\Delta x = 0.17\text{mm}$ より小さい。

(b) トロリ線の高さ変化による移動量

トロリ線高さは、新幹線の一般区間（高速走行区間）においてそのこう配が $\Delta h = 3\text{‰}$ 以下となるように架設されている⁴⁾。露光時間 $T = 100\mu\text{s}$ あたりの高さ変化によるトロリ線移動量 $\Delta y_{hgt}(\text{mm})$ は、

$$\begin{aligned}\Delta y_{hgt} &= \Delta h v T = 0.003 \times 100 \times 10^{-4} \\ &= 0.03 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.03 \text{ mm}\end{aligned}\quad (2)$$

となり、この値は分解能 $\Delta y = 0.37\text{mm}$ より小さい。

(c) トロリ線の局部摩耗に伴う形状変化量

トロリ線に局部摩耗があるとしゅう動面のこう配に伴ってトロリ線の断面形状が急激に変化する（図 8、図 9）。まず、露光時間 $T(\text{s})$ あたりのトロリ線の鉛直方向の形状変化量 $\Delta y_{shp}(\text{mm})$ を求める。トロリ線長手方向 $l(\text{mm})$ あたりの残存直径の変化量を $\delta(\text{mm})$ とし、そのこう配（以下、局部摩耗こう配）を $\Delta d = \delta/l$ と定義する（図 8）。複数の Δd を実測・調査した文献 5 によれば、 Δd は最大で 14‰ であった。これらより、露光時間 $T = 100\mu\text{s}$ あた

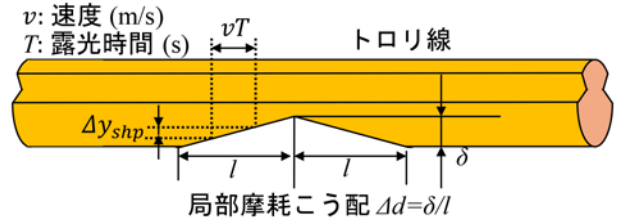


図 8 トロリ線局部摩耗に伴う形状変化と局部摩耗こう配⁶⁾

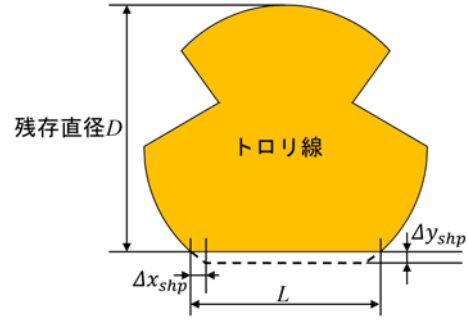


図 9 トロリ線局部摩耗に伴う形状変化（断面図）⁶⁾

りのトロリ線の鉛直方向の形状変化量 $\Delta y_{shp}(\text{mm})$ は、

$$\begin{aligned}\Delta y_{shp} &= \Delta d v T = 0.014 \times 100 \times 10^{-4} \\ &= 0.14 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.14 \text{ mm}\end{aligned}\quad (3)$$

となり、この値は分解能 $\Delta y = 0.37\text{mm}$ より小さい。

次に、露光時間 $T(\text{s})$ あたりのトロリ線の水平方向の形状変化量 $\Delta x_{shp}(\text{mm})$ を求める。図 9 のようにしゅう動面が水平であると仮定すると、しゅう動面幅 $L(\text{mm})$ と残存直径 $D(\text{mm})$ の間に次の式が成り立つ。

$$L = 2\sqrt{D(D_0 - D)}\quad (4)$$

ここで、 $D_0(\text{mm})$ は新品時のトロリ線の直径である。式 (4) を $D(\text{mm})$ について微分すると、

$$\frac{dL}{dD} = \frac{D - 2D_0}{\sqrt{D(D_0 - D)}}\quad (5)$$

となる。ここで、 $\Delta x_{shp}(\text{mm})$ はしゅう動面幅 $L(\text{mm})$ の微小変化、 $\Delta y_{shp}(\text{mm})$ は残存直径 $D(\text{mm})$ の微小変化と言い換えることができるため、以下の式が成り立つ。

$$\Delta x_{shp} = \frac{D - 2D_0}{\sqrt{D(D_0 - D)}} \Delta y_{shp}\quad (6)$$

式 (6) について、例として $\Delta y_{shp} = 0.14\text{mm}$ としたときの残存直径 $D(\text{mm})$ とトロリ線の水平方向の形状変化量の絶対値 $|\Delta x_{shp}|(\text{mm})$ の関係を図 10 に示す。 $D_0 = 12.34\text{mm}$

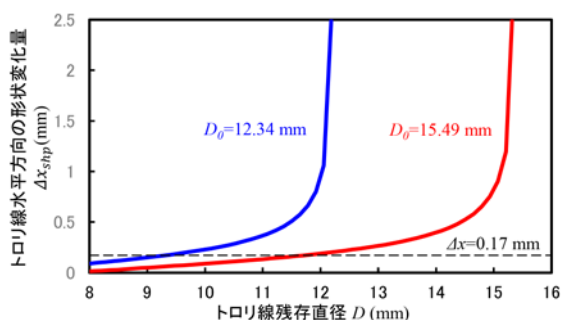
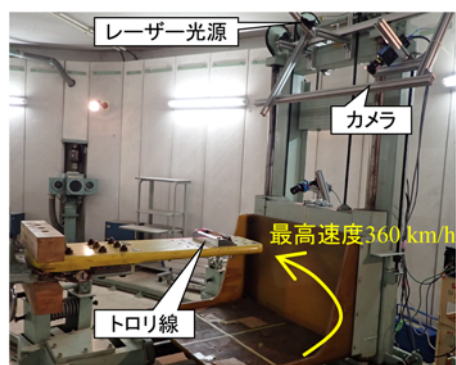
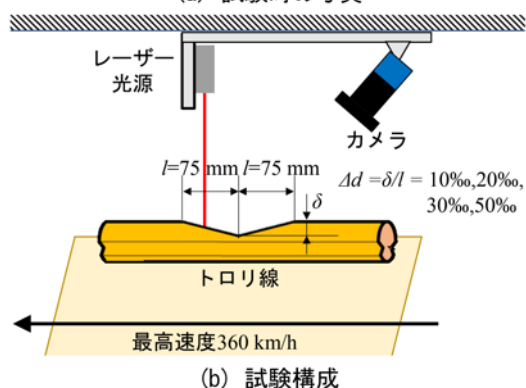


図 10 形状変化量 $\Delta y_{shp} = 0.14\text{mm}$ のときのトロリ線水平方向の形状変化量⁶⁾



(a) 試験時の写真



(b) 試験構成

図 11 高速度域を模擬した摩耗計測試験の概要⁶⁾

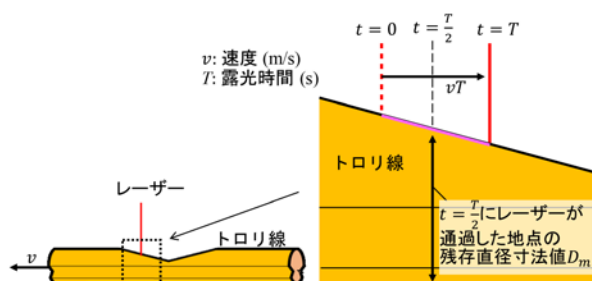


図 12 寸法値と計測値の比較箇所⁶⁾

(GT-110) の場合、残存直径が 9.4mm より大きい場合、 $\Delta x_{shp}(\text{mm})$ が 2.1 節の分解能 $\Delta x = 0.17\text{mm}$ より大きくなる。 $D_0 = 15.49\text{mm}$ (GT-170) の場合、残存直径が 11.8mm

より大きい場合、 $\Delta x_{shp}(\text{mm})$ が 2.1 節の分解能 $\Delta x = 0.17\text{mm}$ より大きくなる。

以上より、局部摩耗に伴うトロリ線の水平方向の形状変化が被写体ブレを発生させ、摩耗計測に影響を及ぼす可能性がある。この影響調査のため、最大 50% までの局部摩耗こう配を模擬したトロリ線を製作し、高速度環境下での摩耗計測を実施した。

5.3 高速度域を模擬したトロリ線摩耗計測試験

5.3.1 試験条件

試験の概要を図 11 に示す。円周方向に 360km/h で回転可能な回転台に、局部摩耗を模擬したトロリ線を設置し、図 11 (b) に示すように 4 章と同じカメラとレーザー光源の構成でトロリ線の摩耗を計測した。局部摩耗の条件は GT110, GT170 それぞれについてしゅう動面長手方向に 10%, 20%, 30%, 50% の局部摩耗こう配をつけたものとした。計測精度は、カメラがシャッターを切つて ($t = 0\text{s}$) から露光時間の 1/2 経過した時刻 ($t = T/2 = 50\mu\text{s}$) における摩耗模擬トロリ線の図面上の残存直径 D_m (以下、寸法値) を真値とし、光切断法による計測で得られた残存直径の比較により評価した (図 12)。

5.3.2 試験結果

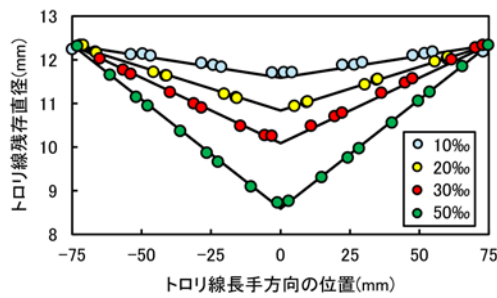
トロリ線の摩耗計測結果を、図 13 に示す。実線が寸法値、各プロットが本計測技術による計測値である。計測値と寸法値の差を図 14 に示す。寸法値との誤差は概ね $\pm 0.2\text{mm}$ 未満であり、誤差の最大値は GT170, 50%, 残存直径真値 12mm 付近 (トロリ線中心付近) の条件において約 0.25mm であった (図 14)。

以上より、高速度域を模擬した環境においても、局部摩耗によるトロリ線形状変化による残存直径の計測誤差は $\pm 0.3\text{mm}$ 以内であり、被写体ブレによる摩耗計測精度への影響は小さいことがわかった。この精度は現行方式と同等であり、新幹線車両に適用可能であるといえる。

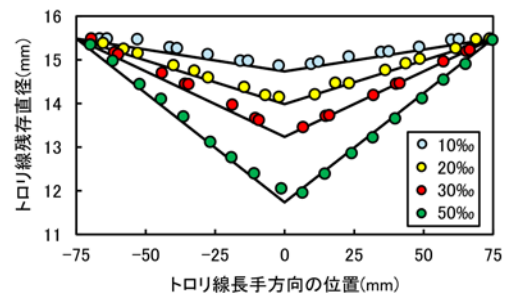
今回の試験で $\Delta x_{shp} > 0.17\text{mm}$ もしくは $\Delta y_{shp} > 0.37\text{mm}$ となる条件でも誤差が小さかった理由を考察する。露光時間 T の間に Δx_{shp} , Δy_{shp} だけ形状変化したとき、カメラで取得するプロファイルは、 $t = 0(\text{s})$ の形状と $t = T(\text{s})$ の形状が概ね平均化された形状になると考えられる (図 15)。このとき、図 15 においてハッチングした領域の面積 $2\Delta s$ が断面算出の誤差要因となるが、全体の断面積に対してわずかな領域であるため、 Δx_{shp} や Δy_{shp} が大きくても、結果的に残存断面積および残存直径の誤差が小さくなったと考えられる。

6. まとめ

光切断法を用いたトロリ線摩耗計測について、実車環境のうち、太陽位置がトロリ線形状計測に及ぼす影響と、

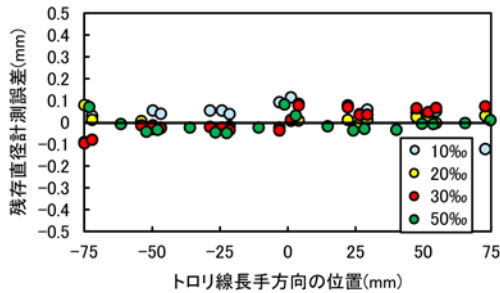


(a) GT110 トロリ線

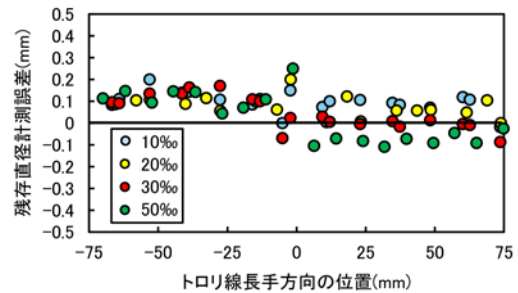


(b) GT170 トロリ線

図 13 局部摩耗トロリ線の摩耗計測結果⁶⁾



(a) GT110 トロリ線



(b) GT170 トロリ線

図 14 残存直径計測誤差（計測値－寸法値）⁶⁾

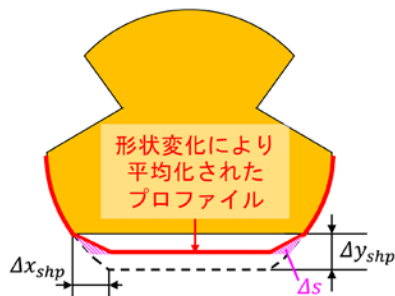


図 15 形状変化により平均化されるプロファイルと断面面積誤差 Δs

高速走行に伴う被写体ブレが計測性能に及ぼす影響について実験的に検証した。

太陽位置による影響については、カメラ画角内にゴーストや直射光が写らない場合は、太陽光がトロリ線プロファイル取得に及ぼす影響がないことがわかった。一方、カメラ画角内に写ったゴーストやトロリ線側面の反射光がレーザー光の輝線の真上や真下にある場合は、トロリ線プロファイルの一部が欠損することがわかった。この影響については高輝度領域の面積やアスペクト比に基づく判別アルゴリズム構築によりゴーストや反射光の影響を除去可能であると考えられる。太陽光によるトロリ線計測への直接的な影響は、カメラ中心と太陽中心を結ぶ線から約 3° の範囲にトロリ線表面の輝線が存在する場合に限定されており、それ以上離れると欠損点無く測定

可能であると考えられる。

高速走行に伴う被写体ブレについて、概算により局部摩耗による形状変化の影響が最も大きくなると想定された。高速度域を模擬した環境での試験の結果、局部摩耗に伴うトロリ線形状変化による残存直径の計測誤差は 0.3mm 以内であり、被写体ブレによる摩耗計測精度への影響は小さいことがわかった。

なお、鉄道総研では本研究の結果に基づき、光切断式トロリ線摩耗計測装置を試作し、新幹線車両に搭載して摩耗計測試験を実施した。新幹線車両での計測試験結果については追って報告する。

文 献

- 1) 薄広歩, 根津一嘉, 松村周: トロリー線の摩耗形状を光で測る, RRR, Vol.77, No.9, pp.16-19, 2020
- 2) 薄広歩, 根津一嘉, 松村周: 光切断法を適用したトロリ線断面形状測定的基础研究, 鉄道総研報告, Vol.33, No.6, pp.29-34, 2019
- 3) 平良優介, 薄広歩: 太陽光の外乱が光切断法によるトロリ線断面形状計測に及ぼす影響, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-23-053, 2023
- 4) 国土交通省鉄道局監修, 電気関係技術基準調査研究会編: 解説 鉄道に関する技術基準 (電気編), 第五版, 2022
- 5) 鉄道電化協会: トロリー線局部摩耗について, トロリー線自動測定装置の研究, pp. 付 11-付 13, 1968

6) 薄広歩, 松村周, 平良優介: 光切断法によるトロリ線摩耗
計測の高速度域における精度検証, 2023 年電気学会産業

応用部門大会, 5-51, 2023

ミリ波帯電磁界の熱作用による細胞障害閾値の評価

池畑 政輝* 吉江 幸子* 鈴木 敬久** 佐々木 洋***

Evaluation of Cytotoxicity by Exposure to 60 GHz Millimeter Wave in *In Vitro*

Masateru IKEHATA Sachiko YOSHIE Yukihiisa SUZUKI Hiroshi SASAKI

Recent advances in information processing technology have led to the improvements of wireless data communication technology in various areas including railway systems. This study investigated the possible health effects of millimeter waves (60 GHz), which are used in next-generation communication technology, on the human body. Using a three-dimensional tissue model constructed from normal human cells, the authors conducted experiments for the aim of this study. The results of the experiments showed that the threshold for cell damage is incident power density of approximately 200 mW/cm² under exposure conditions of 6 minutes, which is the evaluation time required for compliance with the current regulations. In addition, it was also shown that, the threshold for cytotoxicity decreases to approximately 130 mW/cm² under high-temperature and high-humidity conditions (42.5°C, 80% humidity). This mechanism is attributed to thermal factors, and it was found that cell surface temperatures exceeding 50°C can be a condition that causes damage.

キーワード：ミリ波，熱作用，電磁界の健康リスク，再構築皮膚組織モデル，電波防護指針，細胞実験

1. はじめに

電波（電磁界）資源の開発，活用はわが国としての大きな命題の一つであるが，新しい周波数帯や技術を社会実装するためには，社会受容の前提となる安全性の担保が必要不可欠である。そのため，総務省は生体電磁環境研究により，データの蓄積や評価技術の開発を行っている。

本研究は，鉄道システムにおいても活用に向けた開発が進められている超高周波帯の電磁界の安全に関する基礎的な知見を得るために，総務省の委託を受けて，60GHzを対象として細胞実験での熱障害閾値について検討を行った結果を報告する。

2. 背景

鉄道システムは様々な要素技術の集大成であり，また実際に車両を動かすための機器はほとんどが電気電子機器であるため，鉄道車両や施設などにおける電磁環境は複雑なものとなっている。例えば，300Hz以下の極低周波帯では，き電システムや主電動機由来の漏洩電磁界が，中間周波帯（300Hz～数kHz）では主変換機由来の漏洩電磁界が，また高周波帯（数百MHz以上）では一般的に多く使われている通信などで利用する電磁界が存在し，これらの電磁界の強度は非常に弱いものの，時間・

空間的な変動が大きいという特徴がある。

一方，「電磁界，電磁波」の健康影響については，1970年代後半に米国の疫学者によって送電線からの電磁界と小児白血病発症リスクの関連¹⁾が報告されて以来，社会的に大きな関心が寄せられている。現状では，発生源が明確な電磁界（送電線や携帯電話等）の影響が特に懸念されているものの，鉄道車両等の電気を動力とした公共交通機関，電磁調理器，非接触ICカード，盗難防止装置，RF-IDなど，種々の機器・装置由来の様々な電磁界ばく露が日常的に増大していることから，これらに対する懸念もある。しかし，一般的な健康影響への不安は，電磁界，電磁波のばく露の実態について，またその健康への影響についての正確な知識がないことが大きな原因となっている。したがって，「科学的」な根拠をもとに，健康影響の程度を明らかにしていくこと，すなわち健康リスク評価を行うことが重要である。そのため，鉄道総研では定常磁界²⁾，商用周波電磁界³⁾，中間周波電磁界⁴⁾，それらの複合的な電磁界ばく露^{5) 6)}による生体影響の評価を行い，科学的に厳密には検出し得るが，環境中でのばく露による影響は無いか，あるとしても実用上リスクとして考慮すべき影響を持つ可能性は大変低いことを見出してきた。

また，近年では情報処理技術の高速化・高度化により，ビッグデータの収集，分析，利用，制御などが一般化する中，IoTを始めとした多様な無線データ通信は鉄道分野も含めて実装のための開発が進められている。実際，わが国では，2020年度より第5世代移動無線通信技術（5G）の社会実装が進み，高速・大容量化が進むと

* 人間科学研究部 快適性工学研究室
** 東京都立大学大学院
*** 金沢医科大学

表 1 電磁界強度指針（全身ばく露平均）：電波の強さ（瞬時値）の基準値（一般環境）

周波数 f	電界強度の実効値 E[V/m]	磁界強度の実効値 H[A/m]	磁束密度の実効値 [T]
10kHz-10MHz	83	21	2.7×10^{-5}

表 2 電磁界強度指針（全身ばく露平均）：電波の強さ（平均時間6分間）の基準値（一般環境）

周波数 f	電界強度の実効値 E[V/m]	磁界強度の実効値 H[A/m]	電力束密度の実効値 S[mW/cm ²]
100kHz-3MHz	275	$2.18f^{-1}$	0.2 f/1500 1
3MHz-30MHz	$824f^{-1※1}$	$2.18f^{-1}$	
30MHz-300MHz	27.5	0.0728	
300MHz-1.5GHz	$1.585f^{1/2}$	$f^{1/2}/237.8$	
1.5GHz-300GHz	61.4	0.163	

※1:fはMHzを単位とする周波数(例:30MHzなら30、1.5GHzなら1500の数値を与える)

もに、鉄道においても、車上一地上の通信や列車制御への適用が検討されている。さらに将来的には、第6世代（6G）、第7世代（7G）の移動無線通信技術の開発が進み、30～300GHzの電磁界資源の利活用が拡大していくことが見込まれ、鉄道分野においても、走行する列車との大容量高速無線通信技術として100GHz帯を利用する技術の開発等が進んでいる⁷⁾。これらの技術は、鉄道においても、様々なデータセンシングにより安全な運行を実現するための大容量高速データ無線通信や無線電力伝送、セキュリティ、非破壊検査などへの応用が想定され、鉄道を始めとした公共交通網の安全と安心の維持、サービスの向上に適用されていくと考えられる。

これらに加えて、様々な種類の個人端末（携帯電話端末・ウェアラブル機器・バーチャルリアリティー用ゴーグル・無線LAN端末等）や、60GHz帯ミリ波レーダーを携帯デバイスや腕時計等に組み込んだユーザーインターフェイスの開発も進められており、日常環境における電磁界のばく露シナリオは益々複雑化することが予測される。

一方、このような電磁界利用が開発されるためには、電磁界の安全（対人間、対機器）を担保することが必要であるが、特に「対人間」、いわゆる健康リスクについては、特に慎重に検討する必要がある。

2.1 わが国における電波の人体防護

わが国における電波資源の管理は、総務省が所掌している。電波のばく露から人体を防護するための指針として、移動体無線通信の急速な普及に対応するべく、1990年に電波防護指針⁸⁾が答申されている。10kHz以上300GHzまでの電磁界については、この指針に基づき、総務省が電波法により規制を導入している。なお、

無線通信への混信や、医療機器、電気・電子機器などに及ぼす影響は、電磁両立性（EMC）の観点から別に検討され、同電波法や経済産業省の電気用品安全法などによる規制が導入されている。

この電波防護指針では、電磁界の生体作用として明らかにされており、科学的にも確立している作用を防護対象としている。すなわち、100kHz以下は神経への刺激作用、100kHz以上は熱作用であり、原則としてこれらの作用が起きない、あるいはこれらの作用の結果として生理的な変動を及ぼさないように、研究結果として報告されている作用の閾値をもとに全周波数帯に内挿、外挿を行い、閾値をもとに安全率を付与した「基礎指針」が策定されている。そして、この基礎指針をもとに、実測できる物理量（電界強度、磁界強度、電力密度、比吸収率、入射電力密度等）の基準値として、「管理指針」が策定されている。管理指針は、大きく「管理環境（職業的ばく露）」とそれ以外の「一般環境」に分けられ、基礎指針にそれぞれの環境に応じた安全率を踏まえた形で規定されている（表1、2、3）。これらの基準値は、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）⁹⁾やIEEEの国際電磁界安全委員会（ICES）¹⁰⁾で策定されているガイドライン・基準に準拠したものである。

しかしながら、今後ミリ波帯電磁界など超高周波帯の利活用が進む中で、基礎指針の前提となる熱作用については、本来根拠とすべき生物材料による実データが充分とは言えず、特に組織の障害に着目しその閾値を検討した例は、金沢医科大学の研究以外にはない^{11) 12)}。そのため、電波そのものの作用、あるいは電磁界が利活用される際の具体的なばく露シナリオを考慮した健康リスク評価に資する科学的根拠の蓄積は課題となっている。

表3 局所吸収指針（一般環境、6分間平均）

周波数 f	指標	基準値
100kHz-6GHz	局所SAR ^{※1}	任意の組織10g当り2W/kg(四肢では4W/kg)
6GHz-30GHz	入射電力密度 ^{※2}	任意の体表面 ^{※3} 4cm ² 当り2mW/cm ²
30GHz-300GHz		任意の体表面 ^{※3} 1cm ² 当り2mW/cm ²

※1:「比吸収率(SAR:Specific Absorption Rate)」とは、生体が電磁界にばく露することによって単位質量の組織に単位時間に吸収されるエネルギー量

※2:「入射電力密度」とは、電磁波伝搬の方向に垂直な単位面積当たりの通過電力

※3:人体の占める空間に相当する領域中の任意の面積

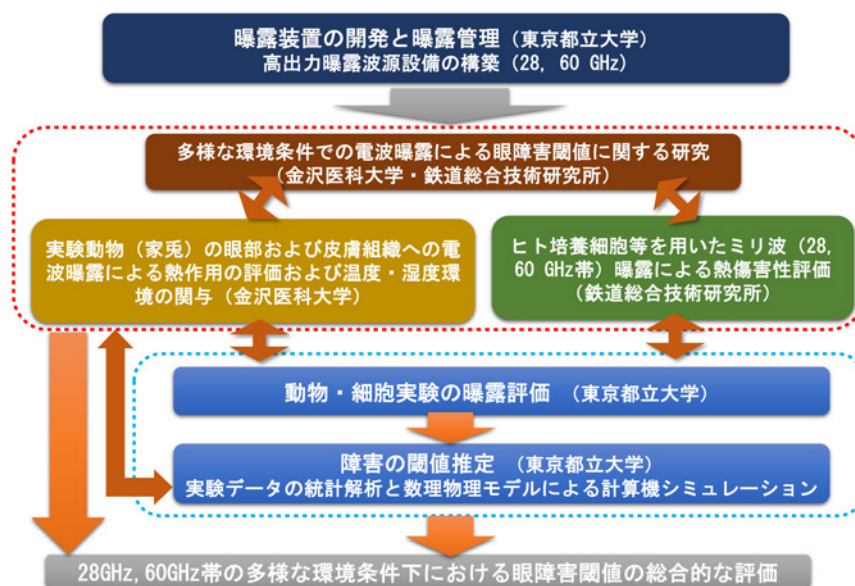


図1 「多様な環境条件での電波曝露による眼障害閾値に関する研究」プロジェクトの研究体制

2.2 本研究の位置づけ

総務省においては、特にこの健康リスクの管理に資する知見の獲得、蓄積のため、生体電磁環境研究を推進しており、本研究は、その一環として、鉄道総研、金沢医科大学、東京都立大学の3機関が協働して実施したプロジェクト研究「多様な環境条件での電波曝露による眼障害閾値に関する研究」の一部である。

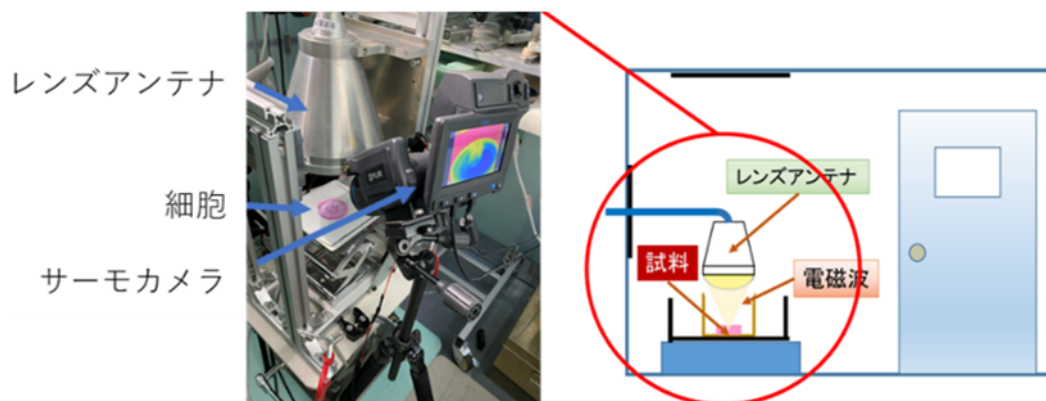
このプロジェクト研究は、図1に示す通り、動物実験、細胞実験の両面から、上述した、新しい移動体無線通信技術が利用するミリ波の周波数帯の電磁界ばく露の生体影響、具体的には傷害の閾値を検索することを目的とした。

環境中のミリ波帯電磁界が人体にばく露した際に、その電力のほとんどは体表で吸収されるため、生体影響を考慮すべき部位は皮膚および眼が妥当である。したがって、本プロジェクトでは3次元ヒト皮膚表皮および角膜モデル（鉄道総研が担当）あるいは家兎（金沢医科大学が担当）を対象として、検討を行った。本プロジェクトは、より具体的なばく露シナリオ、条件として、上述の新技术の使用環境における環境温度・湿度状況や、国

際的な環境で想定される各条件での電磁界による眼傷害の閾値を生物学実験により探索するため、ヒト角膜や皮膚の組織構造を再構築した3次元再構築組織モデルを用いたばく露実験により、細胞傷害性やそのメカニズム、さらには多様な環境条件がばく露による作用に与える影響等について検討することにより、動物実験で得られる知見を補完するとともに、ヒトにおける影響評価に関する基礎的な知見を得ることを目的としており、本稿では60GHzのミリ波帯電磁界での検討結果を報告する。

3. ミリ波帯電磁界の熱作用による細胞障害閾値の評価

本研究では、電磁界の健康リスク管理の根拠をより強固にするために、これまで超高周波帯の熱傷害閾値を評価するモデルとして用いられていた家兎でのばく露実験を、同じばく露装置を用いてヒト自体の細胞を用いた生物試料で実施することで、より詳細なメカニズムあるいは家兎とヒトの種差についての考察を得ることを目標と



- ・恒温恒湿チャンバー内でレンズアンテナを垂直方向に設置し、その直下に細胞を静置
- ・大気下、開放系でミリ波電磁界を6分間ばく露
- ・チャンバー内の温湿度条件
 - a. 温度 $33\pm1.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50\pm10\%$ (標準条件)
 - b. 温度 $42.5\pm2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $80\pm10\%$ (高温多湿条件)

図2 ミリ波ばく露実験の状況

している。そのため、可能な限り家兎と同様のミリ波帯電磁界ばく露条件での実験が望ましいと考え、通常の細胞培養温度（ 37°C ）とは異なる、家兎での実験で計画する標準条件と高温多湿条件時の家兎角膜の表面温度を踏まえ、標準条件では室温（ 24°C ）での家兎角膜表面温度（ 33°C ）および家兎実験時の湿度（50%）、また高温多湿条件では、温度 45°C 、湿度80%で馴化した家兎の角膜表面温度（ 42.5°C ）および家兎実験と同等の湿度（80%）の設定で実験を行った。また、電磁界のばく露時間は、わが国の電波法における評価で用いられ、家兎の実験設定ともなっている6分間とした。また、通常の細胞培養は5%の炭酸ガス環境下で行われるが、6分間のばく露（前後合わせ10分間）での炭酸ガス濃度の低下による影響は限定的であり、予備実験において、本実験で評価する細胞毒性や遺伝子発現変化には影響が見られなかったことから、炭酸ガスについては制御をおこなわないこととした。また、上方から3次元組織モデルの表面に直接電磁界をばく露するため、ばく露チャンバー内のレンズアンテナ直下に、3次元組織モデルが膜の上に形成されたウェル（培養用のカップ）を静置し、大気下、開放系でばく露実験を実施した（図2）。

3.1 60GHz 帯電磁界ばく露装置

本報告で対象とする周波数は60GHz帯であり、発振した電磁界を導波管（WR-15）で恒温恒湿シールドチャンバー内に誘導し、最終的にレンズアンテナを介して対象となる細胞にばく露する構成とした。レンズアンテナは、特性を測定した結果、60GHz帯で-3dBビーム幅として14mmφ以下（7.5mmφ）が得られることを確認し、

60GHzの電磁界の波源としてQuinStar Technology社製の信号発生器（QBO-6040VSOG）を使用した（図3）。

設置したレンズアンテナでの出力特性、ファントムでの温度上昇等については、東京都立大において、ビーム分布や入射電力についての見積もり範囲が適切であり、細胞実験が可能であることを確認した上で実験を実施した。

3.2 正常ヒト細胞を用いた再構築3次元組織モデル

本研究では、人体のばく露シナリオに基づきヒトの表面組織を対象とする。ヒトの表面組織、すなわち皮膚や眼については、皮膚の上層部（表皮）あるいは角膜の生化学的・生理学的特性を厳密に模倣した再構築ヒト表皮または角膜が数社で開発されており、ヒトの健康に対する有害性の評価項目である皮膚刺激性等を評価するための*in vitro*実験系（OECDテストガイドラインTG489¹³⁾等）に採用され、そのための供給体制も確立している。本研究では、主として日本で開発されたJTec社の表皮モデル（ラボサイト エピ・モデル12）を主要な試料とした。これらの3次元組織モデルは、ヒト正常皮膚あるいは角膜細胞を用いて培養し重層化した再構築組織モデルであり、皮膚モデルでは形態的に人の皮膚（表皮）が持つ基底層、有棘層、顆粒層、角質層を有し、角膜モデルはヒト角膜の上皮組織（細胞が8層程度重層化）に類似した構造を有している。

3.3 ミリ波帯電磁界のばく露

図2に示したミリ波帯電磁界ばく露装置を用いて、ばく露実験を行った。実験時には毎回、入射電力密度と温度上昇分の関係を確認するため、レーザーによるウェル

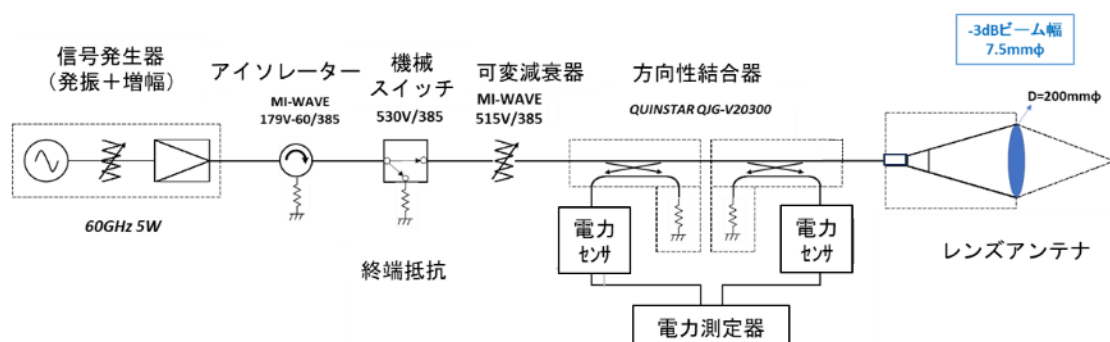


図3 ミリ波帯電磁界（60GHz）の生体ばく露装置コンポーネント図

位置の調整後、ヒト3次元組織モデル1ウェルの壁を切り取り、サーモカメラでウェル表面が撮影できることを確認した後、そのサンプルに対して、数十～数百 mW/cm^2 の入射電力密度でのばく露実験を行い、その際のサーモカメラによる試料表面温度（熱画像）の測定結果をもとに、実験条件の設定を行った。ばく露実験に用いる3次元組織モデルのウェルの壁は予め切り取った。

ミリ波帯電磁界ばく露実験は、ばく露位置にヒト3次元組織モデル1ウェルをセットした後、ばく露チャンバーの扉を閉め、ばく露装置への投入電力とサーモカメラによる熱画像およびばく露チャンバー内の温湿度の記録を開始し、1分間静置してからミリ波帯電磁界ばく露を開始した。6分間のばく露後、1分間静置してから記録を停止し、細胞ウェルを回収した。回収したウェルは、炭酸ガス培養器に移動した後、更に48時間培養を行った。

ミリ波帯電磁界のばく露実験の際のミリ波帯電磁界強度は、最初に検討した入射電力密度と温度上昇の関係から、標準条件（温度33度、湿度50%）では、入射電力密度50～400 mW/cm^2 の範囲で、また高温多湿条件（温度42.5℃、湿度80%）では50～200 mW/cm^2 の範囲で検討し、設定条件ごとに必要数（ $N=3\sim5$ ）の独立したばく露実験を繰り返した。なお、本研究で用いる入射電力密度は、家兎実験との互換性も考慮しつつ東京都立大学が行ったばく露評価により、直径13mmのばく露領域の入射電力密度の平均を示す。

3.4 MTT アッセイによる細胞障害の評価手法

MTT アッセイは、テトラゾリウム塩の一種であるMTT [3-(4, 5-ジメチル-チアゾール-2-イル)-2, 5-ジフェニルテトラゾリウムブロマイド] が細胞内に取り込まれたのち、ミトコンドリアにある脱水素酵素により還元され、生じるフォルマザン（紫色物質）の量が代謝活性のある細胞数と相関するため、これを比色法（吸光度570nm）で定量することにより、生細胞数を測定する方法である（図4）。

実験手順は、ばく露実験処理終了後、前培養と同じ

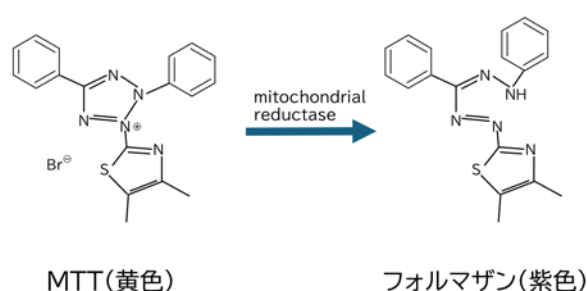


図4 MTT アッセイの原理

33℃のCO₂培養器ですべての実験サンプルを後培養（約42時間）した後、サンプルを37℃に加温したMTT入り培地が入った12穴プレートに移し、3時間静置して反応させる。反応後、インサートカップ底面をリン酸緩衝液（PBS）で洗浄し、洗浄したインサートカップを新しい12穴プレート（各ウェルにPBSを1mlずつ分注）に移し、4℃で保存した。保存の前後でインサートカップの3次元組織モデル表面を写真撮影した。その後、3次元組織モデルをピンセットでつまんでインサートカップから剥離し、イソプロパノールに一晩以上浸漬してMTT反応産物（フォルマザン）を完全に抽出した。この抽出液の570nmおよび650nmの吸光度を測定し、イソプロパノールを対照として、吸光度（570nm）から吸光度（650nm）を差し引いた値を測定値とした（式(1)）。

$$\text{測定値} = \langle \text{検体の吸光度 (570nm} - 650\text{nm)} \rangle - \langle \text{対照の吸光度 (570nm} - 650\text{nm)} \rangle \quad (1)$$

この測定値を基に、式(2)よりばく露試料の生細胞率を求めた。

$$\text{生細胞率}(\%) = \frac{\text{ばく露試料の測定値平均}}{\text{対照の測定値平均}} \times 100 \quad (2)$$

なお、後述するように、電磁界ばく露の不均一性により、特に細胞障害に至る作用の現れ方は中心部から同心円状であり、ばく露後の試料の状態は通常のMTTアッセイ

セイが対象とする均質なサンプルではなかったため、色素を抽出した値は参考とし、細胞障害の閾値の判定にあたっては、上記の吸光度測定データのデータによらず、撮影した画像をもとに細胞障害の発生の有無で判定することとした。

3.5 障害閾値の評価結果

MTT 染色による評価は、細胞が障害を受け活性が低下している状態、すなわち死に至ったかどうかを評価する比較的重篤な影響を検出する評価手法である。一般的に、細胞での実験の際には、全ての細胞に均一な条件で評価対象の物質等を曝すことが基本であるが、ミリ波帯電磁界ばく露に関しては、均一なばく露が困難であり、レンズアンテナの特性のとおり、その電力強度は、焦点となる中心部で強く周辺部で弱いガウス分布となる。そのため、強い入射電力による障害は試料の中心部から発現する。

この状態で MTT アッセイを行ったところ、細胞障害が中心部で局所的に生じているにもかかわらず、全体の吸光度で評価すると有意な変化として捉えられなかった。通常の MTT アッセイは、試料全体で平均化した評価を行なう系であるため、不均一な系において影響が過小評価される可能性がわかった。そのため、細胞障害の閾値の判定にあたっては、全体から抽出した吸光度測定データは参考として、後培養後に撮影した画像をもとに細胞障害の発生の有無で判定を行った。

皮膚モデルの標準条件でのばく露試験では、試料全体から色素を抽出して吸光度を測定した場合には、 $250\text{mW}/\text{cm}^2$ では明確な影響が見られず、 $500\text{mW}/\text{cm}^2$ で明確な生存率の低下が見られるため、その間に閾値があるという評価が得られた(図5)が、実際には、図6の染色時の試料画像に示す通り、 $250\text{mW}/\text{cm}^2$ で顕著な障害が認められることから、閾値はそれ以下であること

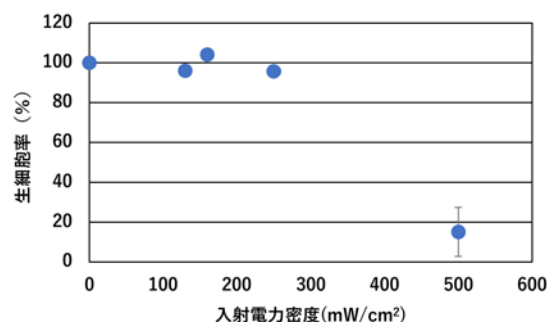


図5 MTT アッセイによる吸光度での細胞障害評価(標準条件, $N \geq 3$)

が明らかである。このように、試料を平均化して測定することで、本来検出すべき影響を適切に評価できない可能性が高いことから、評価のクライテリアを家兎での実験と同等の考え方とし、ばく露前後で3次元組織モデルの表面を観察、撮影し、オンサイトでの細胞死の有無を指標に細胞障害の有無を判定し、閾値を推定した。

標準条件(温度 33°C 、湿度 50%)での皮膚モデルのばく露サンプルを MTT 処理した際の染色像の例を図6に示す。画像からは、 $180\text{mW}/\text{cm}^2$ では障害が見られず、 $250\text{mW}/\text{cm}^2$ では障害が生じていることが確認できる。この現象は本研究で実施したすべてのばく露実験で同様に観察された。このような障害の有無と後述する温度上昇を勘案し、およそ $200\text{mW}/\text{cm}^2$ 前後が閾値であると評価した。一方、高温多湿条件(温度 42.5°C 、湿度 80%)では $130\text{mW}/\text{cm}^2$ では細胞障害は認められず、 $150\text{mW}/\text{cm}^2$ では繰り返し認められた。図7に典型例を示す。実験時に記録した熱画像からは、入射電力密度とばく露開始からの経過時間に応じた温度上昇が確認されており、高温多湿条件でのばく露では、標準条件と比較して開始点での温度が高いことから、障害を起こす温度に到達するまでの時間が短く、また、ばく露した6分間

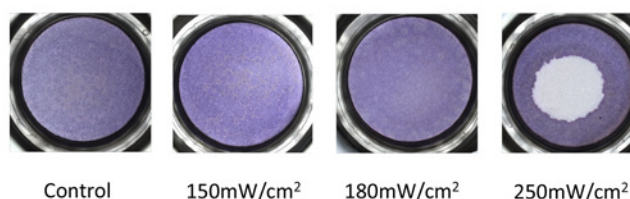


図6 皮膚モデルにおける標準条件での 60GHz ミリ波ばく露による細胞障害評価例

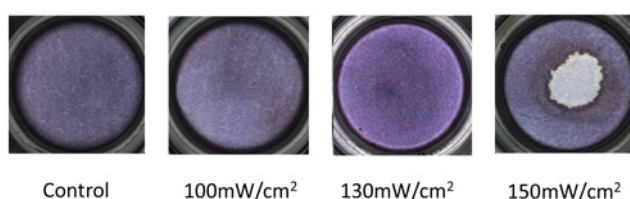


図7 皮膚モデルにおける高温多湿条件での 60GHz ミリ波ばく露による細胞障害評価例

の間に高温で保持される時間が長いために、比較的低い電力密度のばく露で細胞の生存率が低下した可能性が考えられた。

3.6 考察

ヒト3次元再構築皮膚組織モデルを用いて、60GHzのミリ波帯電磁界の6分間ばく露による細胞障害閾値やその他の影響についての基礎的な検討を進めた。実験で得られた知見からは、入射電力密度と関連した温度上昇が細胞障害の主たる要因であり、到達温度が $51^{\circ}\text{C} \pm 1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 程度で細胞の障害が見られることがわかった。実験時に取得した入射電力密度と最高到達温度および温度上昇(Δt)を図8に示す。環境の影響としては高温多湿条件(42.5°C , 80%)の方が、標準条件(33°C , 50%)よりもより低い入射電力密度で障害が起きた。これに関しては、入射電力密度ではなく、試料の表面温度を指標にした場合に、本研究のばく露条件である6分間のばく露により細胞が障害を受けた条件は到達温度が 51°C 程度であったことから、ばく露開始時の環境温度が高いため、ミリ波電磁界のばく露による温度上昇分が小さくても細胞障害に至っていたと考えられる。これらのことから、ミリ波帯電磁界のばく露による細胞障害はミリ波帯電磁界の吸収による熱が主要な要因であり、実態としては環境に応じて 50°C 前後に達する入射電力密度が細胞障害についての閾値といえるであろう。

また、家兎での動物実験との比較については、小島らの実験結果¹²⁾と比較すると、低い閾値が得られる傾向にあった。これは、温度上昇についても同様の傾向(同じ入射電力密度で大きな熱上昇が得られる傾向)であった。家兎の実験では、血流や涙液などの能動的な熱輸送

に加え、横方向から角膜に対してばく露を行うため、熱の蒸散があると考えられるのに対し、皮膚組織モデルへのばく露では、能動的な熱輸送はなく、また上方からのばく露のため、皮膚組織モデルの下方にある培養液を通じた熱の蒸散などがなかったためと考えられる。細胞の応答を解析する遺伝子発現の変化などを含め、詳細な比較・検討については、今後の課題となる。

4. おわりに

本研究では、今後本格的な導入・展開が見込まれるミリ波帯の無線通信機器の利用に伴う電磁界のばく露について、日常環境の多様な環境条件を考慮し、多様な環境が電磁界ばく露の生体作用に与え得る影響等を勘案しながら、人体防護の根拠となっている熱作用の閾値とそのメカニズムを確認する上で必要な、電磁界ばく露の際の細胞内の応答について検討するために実施した「多様な環境条件での電波ばく露による眼障害閾値に関する研究」における「ヒト培養細胞等を用いたミリ波帯電磁界ばく露による熱障害性評価」の研究として、3次元組織モデルへの家兎実験と同等の条件を考慮した60GHz帯のミリ波電磁界ばく露実験を行い、細胞障害の閾値を評価した。その結果として得られた知見の概要は、以下の通りである。

- ・ミリ波電磁界のばく露実験としてヒト3次元皮膚組織モデルを用い、家兎実験における家兎角膜表面の環境を模擬した標準条件あるいは高温多湿条件で6分間のばく露実験を実施した。
- ・標準条件(温度 33°C 、湿度50%)のばく露実験では、細胞障害の閾値は入射電力密度 $200\text{mW}/\text{cm}^2$ 周辺となることがわかった。
- ・高温多湿条件(温度 42.5°C 、湿度80%)では、細胞障害は $130\text{mW}/\text{cm}^2$ 周辺に閾値がある可能性が示された。

これらは、いずれもわが国の電波ばく露からの人体防護の局所吸収指針の一般環境の基準値($2\text{mW}/\text{cm}^2$)よりも数十~100倍程度高く、現状の規制に基づいて運用されている機器は、電波ばく露による熱作用による障害に対して十分な防護ができる状況にあるといえる。また、実際の作用は熱であり、細胞障害を起こした条件では、細胞表面の最高到達温度が 50°C 前後に達していたと考えられる。したがって、6分間のばく露条件では、この温度に達する入射電力密度が細胞障害についての閾値といえるであろう。

本研究では、電波のばく露から人体を防護するための根拠となっている熱作用に着目し、その細胞障害についてヒト3次元組織モデルを用いた検討をおこなった。今後は、非熱作用の有無等についても検討を進めていきたい。

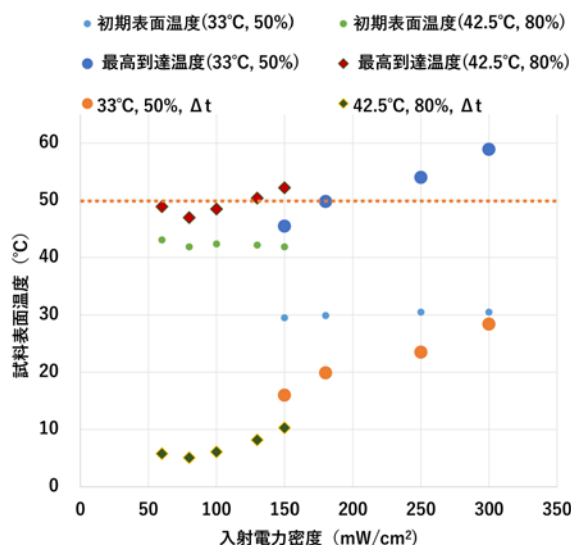


図8 3次元組織モデルへの6分間の60GHz電磁界ばく露による試料表面の温度上昇特性

謝 辞

本研究は総務省委託研究「多様な環境条件下での電波ばく露による眼障害閾値に関する研究」(JPMI10001)により実施された。

また、本研究の遂行にあたっては、東京都立大学上條敏生特任助教、羽田亜紀リサーチアシスタント、金沢医科大学田崎隆史准教授、小島正美教授にご指導頂きました。深くお礼申し上げます。

文 献

- 1) Wertheimer N, Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol.* 1979 Mar; 109(3): 273-84. doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112681.
- 2) Y. Takashima, J. Miyakoshi, M. Ikehata, M. Iwasaka, S. Ueno, T. Koana, Genotoxic Effects of Strong Static Magnetic Fields in DNA-Repair Defective Mutants of *Drosophila melanogaster*, *J Radiat. Res.*, 45, (2004), 393-7.
- 3) Y. Takashima, M. Ikehata, J. Miyakoshi, T. Koana., Inhibition of UV-induced G1 arrest by exposure to 50 Hz magnetic fields in repair-proficient and -deficient yeast strains, *Int J Radiat Biol.*, 79, (2003) 919-24.
- 4) S. Nakasono, M. Ikehata, M. Dateki, S. Yoshie, T. Shigemitsu, T. Negishi, Intermediate frequency magnetic fields do not have mutagenic, co-mutagenic or gene conversion potentials in microbial genotoxicity tests, *Mut. Res.*, 649, (2008), 187-200.
- 5) Sachiko Yoshie, Yuki Ogasawara, Masateru Ikehata, Kazuyuki Ishii, Yukihiisa Suzuki, Keiji Wada, Kanako Wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki, Chiyoji Ohkubo, Evaluation of biological effects of intermediate frequency magnetic field on

differentiation of embryonic stem cell, *Toxicology Reports*, Volume 3, 2016, Pages 135-140.

- 6) 池畑政輝, 鈴木敬久, 岩坂正和, 多氣昌生: 静磁場と変動磁場の同時曝露による生体影響評価手法, 鉄道総研報告, Vol.20, No.1, pp.35-40, 2006
- 7) 川崎邦弘, 中村一城: ミリ波技術の鉄道応用に関する動向, 鉄道総研報告, Vol.30, No.1, pp.51-54, 2016
- 8) 電気通信技術審議会答申 諮問第38号, “電波利用における人体の防護指針”, 平成2年6月
- 9) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys.* 2020 May;118(5): 483-524. doi: 10.1097/HP.0000000000001210. PMID: 32167495.
- 10) “IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz,” in IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019), pp.1-312, 4 Oct. 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8859679.
- 11) Kojima, M., Suzuki, Y., Sasaki, K. et al. Ocular Effects of Exposure to 40, 75, and 95 GHz Millimeter Waves. *J Infrared Milli Terahz Waves* 39, 912-925 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0497-z>.
- 12) Kojima, M., Tasaki, T., Suzuki, Y. et al. Threshold for Millimeter-Wave (60 GHz)-Induced Ocular Injury. *J Infrared Milli Terahz Waves* 43, 260-271 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10762-022-00850-w>.
- 13) OECD (2019), Test No.431: In vitro skin corrosion: reconstructed human epidermis (RHE) test method, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264264618-en>.

特殊信号発光機の明滅検知装置の開発

小室 翔嗣* 向嶋 宏記* 長峯 望*

Development of Obstruction Warning Signal Detection Device

Shoji KOMURO Hiroki MUKOJIMA Nozomi NAGAMINE

Obstruction warning signals indicate a stop signal to the driver when a situation occurs that disturbs train operation, such as at a level crossing. On many railway lines, drivers check the flashing of obstruction warning signals visually, which may cause a risk of missing the signal. For this reason, a support device was developed that detects flashing lights from images taken by a front camera and alerts the driver to pay attention to the train ahead. This paper describes the detection methods and the device used to detect flashing, and report on the verification results in commercial train operations.

キーワード：特殊信号発光機、画像処理、明滅検知、列車前方画像、踏切

1. はじめに

鉄道において、踏切や沿線等で列車の運行に支障を与える事態が発生した場合に、その異常事態を運転士に伝えるための特殊信号として、特殊信号発光機がある。特殊信号発光機は、踏切支障検知装置（非常ボタン）、踏切障害物検知装置などと連動しており、平時は滅灯しているが、異常を検知した場合に明滅発光する。運転士は、その明滅発光を認めた際には、緊急的に列車を停止させるためにブレーキを扱う。特殊信号発光機は必ずしもATS（自動列車停止装置）等と連動していないため、即時にブレーキ操作をするためには、運転士には相当の注意力が求められる。そこで、運転士の見逃し防止や負担軽減を目的に、カメラ映像から明滅発光を自動的に検知して運転士へ通知し、運転支援を行う明滅検知装置（以下、本装置とする）を開発した。

本装置は、運転台に設置したカメラで列車前方画像を撮影し、連続して撮影した画像から特殊信号発光機の明滅発光をリアルタイムで検知する。検知した場合には、表示や音声案内によって運転士へ通知する（図1）。また、列車運転台に設置するため、小型で、かつ振動などの環境条件に則している必要がある。さらに、本装置では、正常に動作していることを自己診断し、診断結果をLED表示することで、装置の健全性を乗務員が確認できるように装置開発を行った。

本稿では、特殊信号発光機の明滅検知手法^{1) 2)} および本装置の概要について述べたのち、営業列車において量産試作装置を設置して検知性能の評価を行った結果を報告する。

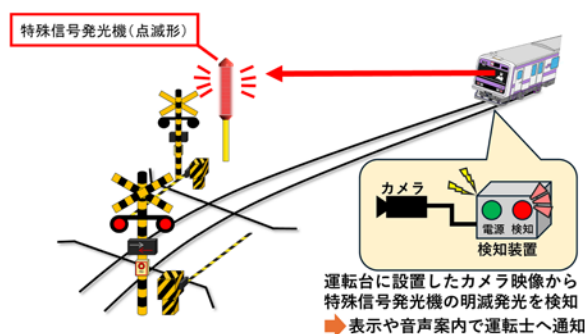


図1 開発システムの概要

2. 特殊信号発光機と沿線環境

2.1 特殊信号発光機の概要と検知対象

JR各社で導入されている特殊信号発光機は、回転型および点滅形の2種類があり、発光方式が異なる（図2）。点滅形は、外形寸法が約 $\phi 100\text{mm} \times 500\text{mm}$ の円筒型で、運転士から見える面に縦長に赤色のLEDユニットが配置されており、その赤色LEDが一定周期で点滅を繰り返す。一方、回転型は、正五角形に並んだ5つの赤色灯が2灯ずつ反時計周りに循環点滅する。いずれの方式とも、メーカーの製品仕様における視認距離は800m以上とされている。本研究では、点滅形の特殊信号発光機の明滅発光を検知対象とした。

点滅形の特殊信号発光機は、制御機により明滅発光を制御されており、仕様上の明滅発光の周波数は約 500 ± 50 回/分（約8.3Hz）である。実際には、点滅周波数が仕様で定められた範囲の限界値になることは少なく、実力値としては 500 ± 10 回/分程度である。

* 情報通信技術研究部 画像解析研究室



図2 特殊信号発光機の外観

凡例	機器名称	回/分
■	点滅形特殊信号発光機	500
●	回転形特殊信号発光機	60
◆	踏切警報灯	50
◇	交通信号機（点滅式）	60
●	止まれ標識（点滅式）	60
▲	緊急自動車用パトランプ	50～250
●	自動車ハザードランプ	60～120
▲	工事用パトランプ	120 or 170
✕	鉄道信号機	6,000 or 7,200
▼	道路交通信号機	6,000 or 7,200

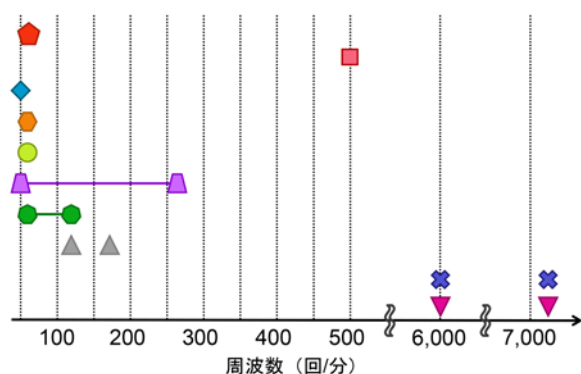


図3 沿線の赤色発光物体の明滅周波数

2.2 鉄道沿線環境における赤色発光物体の調査

特殊信号発光機の明滅発光を検知するためには、形状を認識する手法のほか、明滅発光のパターンを照合する方法が考えられる。形状認識は、画像内において認識対象の特徴がはっきりと表れている必要がある。点滅形特殊信号発光機は特徴的な形状をしているものの、遠方からカメラで撮影した場合、単一点のように映るため認識が困難となる。そこで、特殊信号発光機の発光色と周波数に着目したアルゴリズムを開発することとした。周波数によって検知を行う場合は、赤色で明滅発光する設備もノイズ源となり得るため、鉄道沿線環境の赤色発光

物体の調査を行った。図3に各機器の明滅発光周波数の調査結果を示す。点滅形特殊信号発光機の明滅発光周波数は500回/分であるのに対し、踏切警報灯や道路環境に設置された点滅式の信号機および標識、ハザードランプやパトランプは50～250回/分程度であった。また、常時点灯ではあるが電源周波数に起因する明滅がみられる鉄道信号機や道路交通信号機の発光周波数は、6,000回/分もしくは7,200回/分であった。これらの調査結果から、点滅形特殊信号発光機の明滅発光周波数は、近傍の周波数帯域に明滅発光する設備が存在しないことから、特有の周波数と言える。

3. 明滅検知手法の開発

3.1 明滅検知手法の概要

特殊信号発光機の明滅発光の変化を矩形波とみなすと、周波数が約8.3Hzであるため、周期は約120ms、一回の点灯時間及び減灯時間は約60msとなる。この明滅発光を30fpsのカメラ（1フレームあたり33.3ms）で撮影する場合、明滅と撮像の周期の差が小さいこと、両者が同期していないことから、撮影するタイミングにより、連続するフレームでの明滅パターンは1つに定まらない。そこで、検知対象とする明滅周波数の範囲について、あらかじめフレーム毎の明滅パターンを作成してテーブルに登録し、判定時はテーブルを参照して特定の周波数範囲内であることを判定する方法とした。この提案手法の特徴は、同一の赤色発光体でも異なる周波数の明滅発光を検知しないことである。

3.2 明滅パターンの特定および照合

3.2.1 明滅パターンの特定および照合手順

明滅パターンの特定および照合のアルゴリズムは、下のような手順である。

- (1) フレーム内の特殊信号発光機の候補となる赤色領域を抽出する。
- (2) 過去一定時間の連続フレームから、特殊信号発光機の候補となる赤色領域に対して明滅パターンを計算する。
- (3) 計算した明滅パターンと、テーブルに登録済みの特殊信号発光機の明滅パターンを照合する。

3.2.2 明滅パターンの特定および照合処理

3.2.1節で示したアルゴリズムを単純に処理した場合、計算にかかる時間は、赤色領域についてパターン計算に必要なフレーム数と、登録されたパターン数の積となる。複数の赤色領域が存在する場合、その領域毎に過去のフレームを含めたフレーム間の計算が必要となるため、計算量が大きくなる。そこで、3.2.1節で示した(2)および(3)の処理を高速化するため、明滅の判定に用いる

複数画像を1枚分の画像情報に圧縮し、画素単位で明滅発光を検知するアルゴリズムを開発した。具体的には、フレーム内に映る特殊信号発光機の明滅発光を、点灯を「1」、滅灯を「0」として2値化する。この処理を判定に用いる連続フレームに対して行い、2値化した連続フレームを統合する。たとえば、24フレームを統合する場合、1画素あたり24bitの情報を持つ一般的なカラー画像1枚分として処理することができる。これにより、少ない計算量で処理を行うことができる(図4)。ここで、カラー画像1枚分の情報量として標準的な画像処理ライブラリで処理することを考えると、1画素あたり24bit以下の情報量とすることが望ましい。また、開発したアルゴリズムでは、パターン照合は2進数表現された明滅パターンが登録されたテーブルを参照し、明滅パターンが一致するか否かを求めて出力値を返すのみのため、処理負荷が軽くリアルタイムでの検知が可能である。

3.3 アルゴリズムの改良

3.3.1 ビットシフトによる明滅パターン算出の高速化

本アルゴリズムでは、明滅パターンの計算処理をさらに削減することを目的として、ビットシフト演算を採用している。入力映像の総フレーム数を F としたときの各フレーム $\{I^1, I^2, I^3, \dots, I^F\}$ と表す。 $I_{\mu,v}^t$ を t 番目のフレームの座標 (μ, v) における画素値とした場合、ビット長 N で表され各画素の明滅パターン $P_{\mu,v}^t$ は、次のように求めることができる(図5)。ここで、 N は判定に用いる連続フレーム数(明滅パターンの長さ)を表している。

$$\text{Binarize}(x) = \begin{cases} 1 & \ll N-1, x \geq th \\ 0 & \ll N-1, x < th \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{u,v}^t = (P_{u,v}^{t-1} \gg 1) \oplus \text{Binarize}(I_{u,v}^t) \quad (2)$$

$$P_{u,v}^0 = 0 \quad (3)$$

$\text{Binarize}(x)$ は、 x の値があるしきい値 th 以上か否かを表す N ビット長のビット列を返す関数である。また、 $x \gg k$ および $x \ll k$ はビットシフト演算であり、前者は x の値を右、後者は左の方向へ2進数で k ビット分シフトさせていることを表している。ビットシフトにより新たにビットが出現した場合の値は0とし、右ビットシフトによってあふれた値は無視されるものとする。さらに、 th は赤色領域に対する2値化のしきい値、 $\oplus$ はビット単位の論理和を表している。

ここで、ビットシフト演算を使用せずに明滅パターンを求めた場合、判定する当該フレームにおいて、判定に用いる N フレーム分の2値化画像から計算するため、パターン長 N に応じて計算量は大きくなる。一方で、

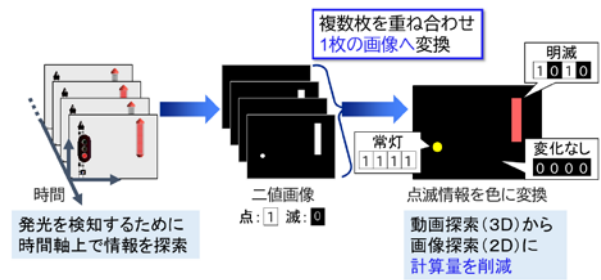


図4 明滅パターンの特特定義および照合の高速化概念図³⁾

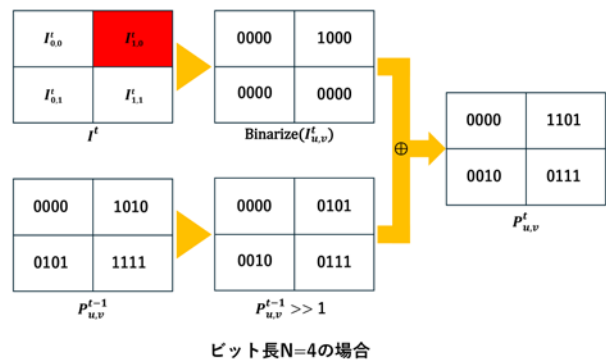


図5 ビットシフト演算を用いた明滅パターンの算出

式(2)では、パターン長 N を増加させたとしても、新たに観測したフレームの2値化結果をビットシフト演算で1フレーム前の明滅パターンに挿入するだけのため、パターン長 N によらず計算量は一定となる。

3.3.2 ブレ補正機能

明滅検知手法において、明滅パターンの算出に過去一定時間分のフレーム情報を用いる。そのため、列車走行時の車体動揺やカーブ区間等によって、カメラ映像中における特殊信号発光機の位置が移動することが考えられる。この場合、連続するフレーム間で同一の発光体であることが認識できなくなると、明滅パターンを正しく算出できない。このことから、プーリング処理およびオプティカルフローを組み合わせたブレ補正機能を処理に組み込んだ。

図6にプーリング処理によるブレ補正の概要を示す。プーリング処理は、画像処理において、一定領域の代表値を取得することで、特徴を保持しながらデータ量を削減することが可能な手法である。車体動揺等によって、連続するフレームで特殊信号発光機の位置が一定領域内で微細に移動する状況においては、プーリング処理の適用により、この影響を無視することができる。

また、図7にオプティカルフローによるブレ補正の概要を示す。オプティカルフローは、連続するフレームから画像内の各画素の動きを推定する手法である。オプティカルフローの計算結果を用いることで、曲線区間等において画像中の特殊信号発光機が連続して大幅に移動

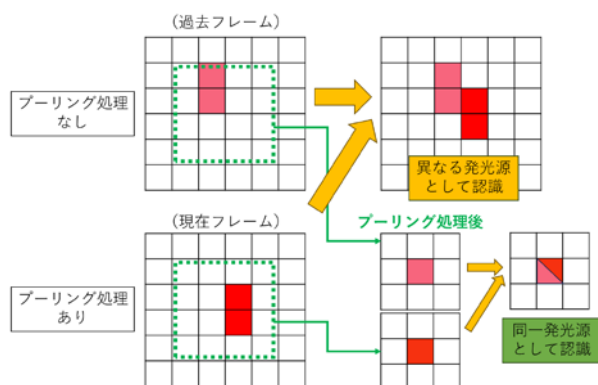


図6 プーリング処理によるブレ補正

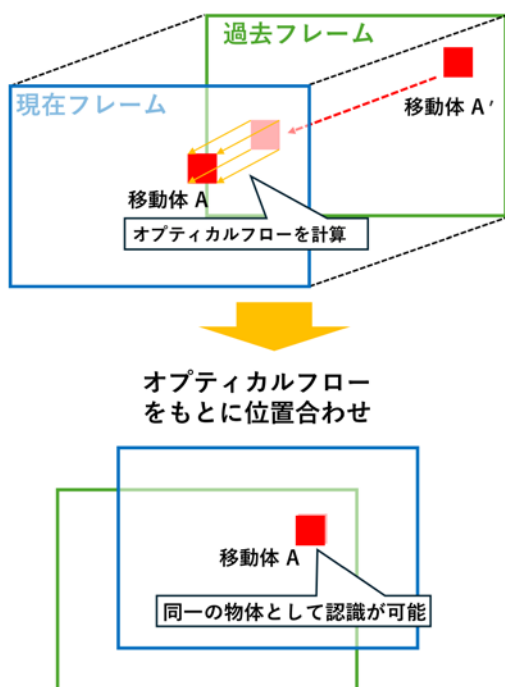


図7 オプティカルフローによるブレ補正

する場合においても、同一発光体として認識することが可能となり、正しく明滅パターンを計算することができる。

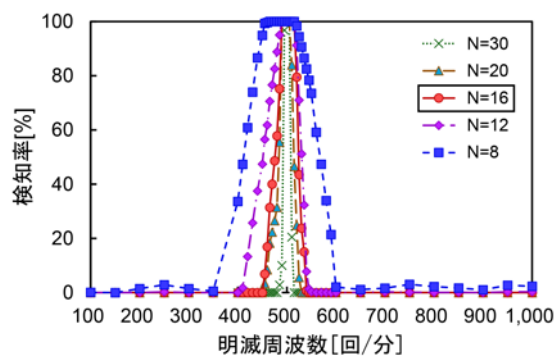
3.4 明滅検知アルゴリズムの評価

開発した明滅検知アルゴリズムを用いて、明滅周波数に対する特性および検知距離について評価した。

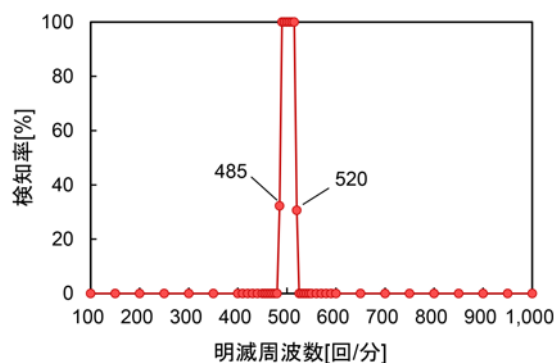
3.4.1 発光パターン長および明滅周波数の検知

明滅検知手法において、あらかじめ検知対象とする周波数に応じた明滅パターンをテーブルに登録する必要がある。明滅パターンのパターン長が長いほど、周波数に対する検知率の特性が急峻となるため、検知対象とする周波数以外を除外する性能は向上するが、検知の応答性が低下する。

そこで、適切な明滅パターン長を定めるため、明滅パターン長を変化させた場合の明滅周波数に対する検知率



(a) 各明滅パターン長の検知率



(b) 500±10 回/分を検知範囲とした場合の検知率 (N=16)

図8 明滅周波数に対する検知性能

を確認した。パターン長 N を8から大きくしていくに従い、検知する周波数範囲は狭くなっていくが、 $N = 16$ 以上では変化が小さいことがわかった (図8 (a))。

2章で述べた通り、特殊信号発光機の明滅周波数の実力値は $500 \text{ 回} \pm 10 \text{ 回/分}$ である。そこで、 $N = 16$ とし、 $500 \pm 10 \text{ 回/分}$ を検知対象としてパターンを登録し、明滅周波数に対する検知率を評価した。

評価では、100 回/分から1,000 回/分までの範囲で、100 回/分間隔で変化させた明滅画像を作成し、それらを用いて検知性能を検証した。図8 (b) に明滅検知手法の検定処理等を通過した後の、各明滅周波数で処理した総フレーム数に対する検知率を示す。485 回/分から520 回/分の範囲の明滅を検知しており、概ね想定した周波数範囲になることが確認できた。

3.4.2 検知距離に対する性能評価

カメラ映像を用いた特殊信号発光機に対する距離毎の検知性能を評価するため、鉄道総研所内にて静止状態における検証試験を実施した。鉄道総研所内では、直線道路において最大でも400mの距離しかない。そのため、スケール比 1/3 の試験用特殊信号発光機を作成し、換算距離で3倍の試験ができるようにした。試験方法として、カメラの距離から200m～400mまでの区間において、各地点に試験用特殊信号発光機を一定時間停止した

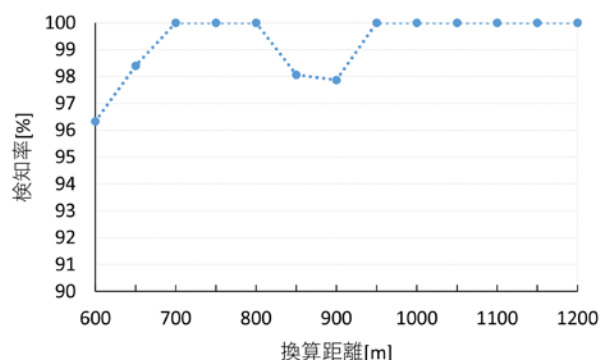


図9 検知距離（静止状態）

うえて、フレーム単位の検知率を確認した。

図9に、静止状態における各距離で処理した総フレーム数に対する検知率を示す。換算距離として、600m～1,200m 相当の各地点において、安定した検知結果が得られ、特殊信号発光機の見通し距離である 800m 以上においても検知可能であることが分かった。

4. 特殊信号発光機の明滅検知装置

4.1 明滅検知装置の概要

3章に示した通り、明滅検知アルゴリズムの評価を実施した結果、特殊信号発光機の明滅周期のみ検知可能かつ、見通し距離 800m 以上でも検知可能な検知性能を有することが確認できた。そのため、営業列車でのモニタラン試験を実施することを目的に、開発した明滅検知アルゴリズムが実装された量産試作装置を製作した⁴⁾。量産試作装置の製作にあたり、実用化を想定して下記の条件を考慮した。

- 自己診断機能を備え、装置の動作が正常であることを判別できること。また、装置で何らかの異常発生時には、安全側の出力（故障の通知）を行うこと。
- 運転台に後付けで設置することから、可能な限り装置サイズを小型化すること。
- 運転台に後付けで設置することから、装置への電源供給はサービスコンセントから行えること。
- 運転台に設置するため、JIS E 4031（鉄道車両用品振動及び衝撃試験方法）に対応できること。

4.2 装置構成

開発した量産試作装置の機器構成を図10に示す。量産試作装置は、列車前方を撮影するカメラ、列車前方の映像から特殊信号発光機の明滅発光を検知する画像処理部、ハードウェアの健全性診断や出力制御を行う制御部および運転士への通知を行う出力部で構成される。

装置で使用したカメラの諸元を表1に示す。カメラは4K以上の解像度かつ明滅検知手法に必要な 30fps を満

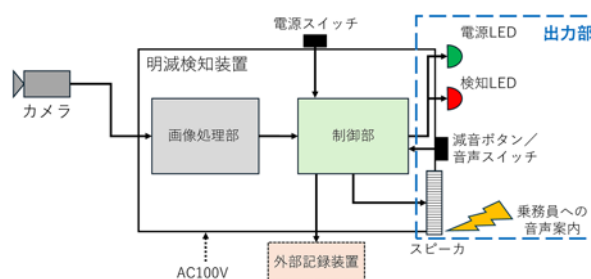


図10 装置の構成図

表1 カメラの諸元

最大解像度	4024×3036 (W×H)
最大フレームレート	31fps
レンズ焦点距離	16mm

たすものを選定した。

画像処理部では、カメラより出力された映像を用いて、実装した明滅検知アルゴリズムにより特殊信号発光機の明滅発光の判定処理を行う。カメラより出力された映像および、装置での明滅検知判定結果は、画像処理部に接続された外部記録装置に保存される仕組みとした。また、制御部では、LED表示および通知音声の制御に加え、ハードウェアの健全性診断機能を搭載し、故障時に運転士が認識できるような作りとした。出力部では、制御部の制御に基づき、装置状態および検知処理状態を表すLED表示と、スピーカーによる通知音声の出力を行う。

4.3 通知音声

本装置が特殊信号発光機の明滅発光を検知した際に、通知音声のセリフとして「前方に注意してください」を選定した。本装置は、列車のブレーキ装置を直接行うものではなく、運転士の負担軽減を目的とした支援装置である。運転士は、本装置から出力された音声案内を受けて前方を確認し、状況を判断して必要であればブレーキ操作を行う。そのため、通知音声のセリフはブレーキ操作を直接促すセリフではなく、前方注意を促すものとした。また、通知音声の声色は、合成音声で複数の男女の音声を作成し、乗務員経験者の意見を踏まえて、既存システムで採用されている音声案内と区別しやすい、トーン等が異なる女性の声質を選定した。

5. 営業列車でのモニタラン試験

5.1 実施内容

製作した量産試作装置を営業列車1編成の片運転台に仮設し、モニタラン試験を実施した。モニタラン試験



図 11 モニタラン試験時の装置設置状況知例

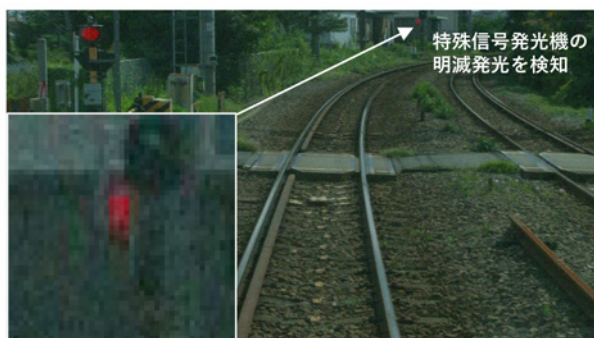


図 12 モニタラン試験時の明滅発光検知例

は、当該列車が営業運転か回送かに関わらず、全ての走行を対象に評価を実施した。なお、装置は、車両の電源が投入されていて電源供給がされている状態であれば、運転方向に関わらず全ての映像を録画する。また、映像には後進時も含められているが、前進、後進時に関わらずに走行時全てを評価対象とした。評価を行うため、モニタラン試験時は、リアルタイムでの検知状況が記録された出力ログおよびカメラ映像を外付けの外部記録装置に保存し、定期的に出力ログおよび映像を回収した。

評価では、検知率に加えて誤検知率を確認した。ここで、カメラ映像中で特殊信号発光機が明滅発光しており装置が明滅発光中に検知できた場合を「正検知」、明滅発光しているにも関わらず、装置が検知をできなかった場合を「未検知」、明滅発光していないにも関わらず、装置が検知した場合を「誤検知」としている。

評価対象に用いる特殊信号発光機の明滅発光は、継続的な明滅発光に対する検知性能を評価するため、3秒以上継続したものとした。開発した検知手法は、過去一定時間分の映像から特殊信号発光機の明滅発光を検知するものである。明滅発光の継続時間が一定時間よりも短い一時的な発光は、画像が安定取得できていない場合や、アルゴリズムとして必要な時間が確保できていない場合等に相当すると考えられるためである。

検知率の算出は、人間の目視で確認した特殊信号発光

表 2 2023 年度のモニタラン試験の結果

	日中帯	全件
発光回数	91 件	112 件
検知回数	87 件	98 件
未検知回数	4 件	14 件
検知率	95.6%	87.5%
誤検知率		0.69 回/時間

機の明滅発光の判断結果を真値とし、それに対してカメラ映像を用いて装置が処理した結果を比較することで算出した。人間の目視による明滅発光の判断は、モニタラン試験中に装置に接続した外部記憶装置に出力された映像を全て目視で確認し、明滅発光を特定した。また、誤検知率は、モニタラン試験を通して装置から音声出力された全件を解析して評価した。

5.2 試験結果

モニタラン試験は、2023 年 7 月～2024 年 1 月の期間に実施した。図 11 にモニタラン試験の量産試作装置の設置状況、図 12 にモニタラン試験時に特殊信号発光機の明滅発光を検知した例を示す。装置は、モニタラン試験中に故障や不具合等は発生せず、安定動作していることが確認できた。また、評価結果は表 2 に示す通りとなった。

5.2.1 検知率の評価

評価対象である特殊信号発光機が明滅発光した全件 112 件について天候状態を確認したところ、晴天、曇天、雨天の天候状態を網羅していることが分かった。どの天候状況においても特殊信号発光機の明滅発光を検知することができた。発光回数に対する検知回数から求めた検知率は、検証期間全体で 87.5% となり、日中帯では 95.6% となった。また、日中帯かつ線形が曲線区間である状況において特殊信号発光機が明滅した場合でも、見逃しなく検知できることが確認できた。この結果から、

3章に示したアルゴリズム改良の有効性が確認できたと考える。

5.2.2 未検知事象の調査

モニタラン試験の検証期間全体において、未検知事象が14件発生した。未検知事象については以下の通りである。

(1) 登録パターン外の明滅 (2件)

メーカーの仕様範囲内での明滅発光周期であるが、予め登録したパターン外である514回/分の明滅発光であった。そのため、装置にパターンを追加登録することにより検知可能となることが分かった。

(2) 2本の特殊信号発光機の近接明滅 (1件)

直線区間で2か所の踏切で同時支障が発生し、2機が非常に接近した状態かつ非同期で明滅していたため発生した事象である。これについては、画像上で一定離隔が存在している状況であれば、プーリング処理の領域設定の調整で2機の特殊信号発光機を区別できる適切な大きさに設定することで解決が見込める。

(3) カメラ画像上での部分的な遮蔽 (1件)

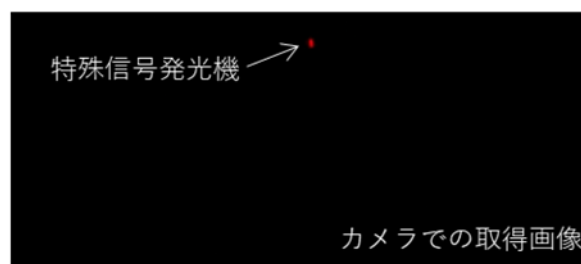
明滅発光中の特殊信号発光機が、断続的に一部遮蔽されていた事象である。これについては、実用時にカメラの設置位置や地上設備の状況を確認した上、運用することが望ましい。

(4) 夜間の明滅 (10件)

画面内における輝度が極端に低い状態では特徴点が無いことから、ブレ補正機能のオプティカルフローが正しく計算できなかったためである。図13に夜間における前方映像例を示す。この事象に対して、オプティカルフローをオフにした場合、検知率が90%以上に向上することを確認した。輝度が極端に低い夜間においては、カメラ全体の輝度値を元に、オプティカルフローをオフにして運用することが有効であることが分かった。

5.2.3 誤検知と運転士へのヒアリング

装置の誤検知率は、太陽光や夜間の街灯による反射など、昼夜問わず偶然明滅パターンと一致した場合に発生する可能性がある。そのため、モニタラン試験の検証期間全体を対象に評価を行った。誤検知は、特定シーンでの事象でないことから、誤検知率は1時間あたりに音声出力をした回数の割合として算出し、0.69/回/時間という結果となった。モニタラン試験では、川や沿線の建物の窓からの反射など、同一箇所でも多く発生していることが分かった。また、運転士へのヒアリングでは、音声案内に対して否定的な指摘はなかった。音声案内については、前方注意を促す音声であり、ブレーキ操作を促す音声案内ではないことから、一定程度は許容される状況であったと考える。



(a) カメラ映像



(b) 加工したカメラ映像

図13 夜間におけるカメラ映像例 (同一画像)

6. まとめ

運転士による特殊信号発光機の明滅発光の目視確認を支援するため、運転台に設置したカメラの映像から特殊信号発光機の明滅発光を自動で検知し、運転士へ通知する明滅検知装置を開発した。

モニタラン試験では、量産試作装置の安定動作を確認すると共に検知性能の検証を行った。モニタラン試験の結果、様々な天候条件によらず安定して検知できることが確認でき、昼間の時間帯においては、95.6%の検知率が得られた。

今後は、夜間および未検知となった事象への対応を行い、さらなる検知性能の向上を図る予定である。

謝 辞

本研究におけるモニタラン試験の実施にあたり、東日本旅客鉄道株式会社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る。

文 献

- 1) 向嶋宏記, 長峯望, 野村拓也, 市川武: 列車前方カメラを用いた特殊信号発光機の明滅検知手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.7, pp.17-22, 2020
- 2) 向嶋宏記, 長峯望, 野村拓也: 特殊信号発光機の明滅検知手法, 電気学会論文誌D, Vol.41, No.3, pp.212-222, 2020
- 3) 向嶋宏記, 長峯望, 野村拓也, 市川武: 踏切の異常を知ら

せる信号をカメラで捉える, RRR, Vol.77, No.9, pp.12-15, 2020

4) 長峯望, 小室翔嗣, 向嶋宏記, 木村隆寛, 似内一郎: 特殊

信号発光機の明滅検知装置の開発, 鉄道と電気技術, Vol.35, No.7, pp.11-17, 2024

訪日外国人旅行者の鉄道利用データを用いた 周遊テーマ抽出と施策への活用

稲場 亘* 中川 伸吾* 渡邊 拓也* 深澤 紀子*

Extracting “Tour Themes” from Railway Usage Data of Foreign Visitors to Japan and Its Application to Policy Measures

Wataru INABA Shingo NAKAGAWA Takuya WATANABE Noriko FUKASAWA

This study aims to obtain knowledge that can be used for railway operators' policy measures to improve convenience of foreign visitors' travel within Japan. Using station boarding and alighting data, we analyzed day-by-day use of railways by foreign visitors touring major cities in Japan. We assumed “tour themes” associated with combinations of stations, and attempted to extract various tour themes from a large data set using topic model. Given the characteristics of the station boarding and alighting data, we applied BTM (Biterm Topic Model), an effective topic model for short texts, to the actual data and extracted 30 tour themes. Moreover, we proposed possible policy measures by interpreting these 30 tour themes, as a case study. The results demonstrate that, based on the data, railway operators can consider policy measures to promote foreign visitors' tour within Japan and improve transportation planning.

キーワード：訪日外国人旅行者，入出場データ，周遊テーマ，トピックモデル，BTM

1. はじめに

訪日外国人旅行者が日本国内を移動する際に鉄道を利用する割合は地方部と比べて都市部で高く、鉄道利用率は関東地方で57.5%、近畿地方で64.4%と半数以上となっている¹⁾。そのため、鉄道事業者にとって訪日外国人旅行者の移動需要を満たすことは重要な課題であり、訪日外国人旅行者の受入環境の整備を目的とした様々なサービス向上施策に取り組んでいる²⁾。一方で、訪日外国人旅行者の周遊行動の実態は定量的に把握できておらず、鉄道事業者が持つデータを活用する方法も十分に確立されていない。鉄道利用状況から旅行者の周遊行動を把握できれば、旅行者の嗜好に基づく旅行商品の開発や輸送計画の改善が可能となり、周遊促進や人気観光地へのアクセス向上につながる事が期待される。また、訪日外国人旅行者の鉄道利用のさらなる増加や、特定路線・区間で生じる混雑の緩和に寄与できる。

このような背景のもと、本研究では訪日外国人旅行者の利便性向上に資する鉄道事業者の施策への活用を見据え、鉄道事業者が持つデータから大都市圏内を周遊する旅行者の周遊行動を抽出する手法を開発した。具体的には、駅の入出場に関するデータ（以下、入出場データと表記）にトピックモデルを適用して周遊テーマを抽出し、周遊テーマを解釈して施策提案に活用する方法を整備した³⁾。本研究における周遊テーマとは神社仏閣巡り、景勝地巡りなどのように訪問地の組合せから連想される旅

のテーマを指し、解釈とは周遊テーマごとに人気度の高い訪問地の特徴を考察することを指す。大都市圏を対象とするのは、鉄道ネットワークが発達しており、多様な周遊テーマが抽出可能と考えられること、駅と訪問地の対応づけが容易であり、周遊テーマを解釈しやすいと考えられることによる。トピックモデルでは周遊テーマの抽出のほか、周遊テーマごとに人気度の高い訪問地の組合せが把握可能である。これにより、鉄道事業者が訪日外国人旅行者を対象としたサービス向上施策を検討する際に、人気度の高い単一の訪問地ではなく、人気度の高い訪問地の組合せを考慮することができる。なお、本研究では入出場データの特徴を踏まえ、トピックモデルの一種であるBTM (Biterm Topic Model)⁴⁾を採用した。

ある大都市圏内における訪日外国人旅行者の一日の入出場データにBTMを適用して周遊テーマを抽出した。そのうえで、ケーススタディとして周遊テーマの解釈、施策例の提示を行い、提案手法の有効性を示した。

2. 周遊テーマの抽出方法

2.1 トピックモデルによる訪問地選択過程の定式化

トピックモデルを用いて周遊テーマを抽出するためには、旅行者の訪問地選択過程をモデル化する必要がある。トピックモデルとは、人間が文書を書く過程を「著者が文書のトピックを決めてからトピックと関連の深い単語を選ぶ」と仮定して、文書の生成過程を確率的に記述するモデルである。この考え方を旅行者が旅程を決める過程に対して適用すると、「旅行者が旅行の周遊テーマを

* 情報通信技術研究部 情報解析研究室

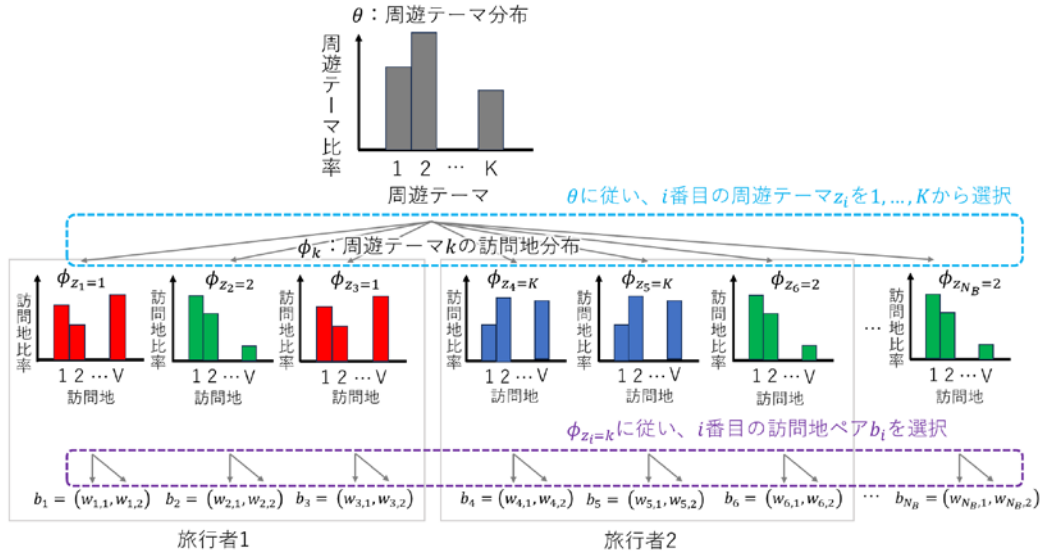


図1 旅行者の訪問地ペア選択過程

決めてから周遊テーマと関連の深い訪問地を選ぶ」と仮定でき、トピックを周遊テーマ、著者を旅行者、文書を各旅行者の旅程、単語を訪問地と読み替えることができる。すなわち、旅行者の訪問地選択過程をトピックモデルで記述することが可能になる。この手法を用いて、本研究では周遊テーマの抽出を試みる。なお、本研究では降車駅を訪問地、2箇所以上の訪問地の組合せを周遊と定義し、複数事業者が乗り入れる駅であっても事業者ごとに異なる駅として扱う。

最も代表的なトピックモデルであるLDA (Latent Dirichlet Allocation) では、同一文書内に出現する単語の組合せをもとにトピックを抽出するため、単語の数が少ないとトピックの解釈が困難となる場合がある。入出場データを訪問地履歴として活用する場合、GPSデータ等と比較して観測できる訪問地の数が少ないため、周遊テーマの解釈が困難となる可能性がある。そこで本研究では、BTMを用いて、旅行者の訪問地選択過程をモデル化することとした。

BTMでは、同一文書内の2つの単語の組合せを明示し、その組合せが文書全体の中で出現する頻度をもとにトピックを抽出する。そこで、旅行者の訪問地履歴にある複数訪問地から2箇所を選択するすべての組合せ（以下、訪問地ペアと表記）を作成する。例えば、旅行者の訪問地が w_1, w_2, w_3 である時、その旅行者の訪問地ペアは以下の3つになる。

$$(w_1, w_2, w_3) \rightarrow \{(w_1, w_2), (w_2, w_3), (w_1, w_3)\}$$

そのうえで、旅行者が周遊テーマを選択する過程と周遊テーマに応じた訪問地ペアを選択する過程は、それぞれ多項分布を用いて式(1)、(2)のように表現できる。

$$z_i \sim \text{Multi}(\theta) = p(z_i | \theta) \quad (i = 1, \dots, N_B) \quad (1)$$

$$b_i \sim \text{Multi}(\phi_{z_i}) = p(b_i | \phi_{z_i}) \quad (i = 1, \dots, N_B) \quad (2)$$

ここに、

$b_i = (w_{i,1}, w_{i,2})$ ($i = 1, \dots, N_B$): すべての旅行者において観測された訪問地ペアのうち*i*番目の訪問地ペア

z_i : b_i に対して推定された周遊テーマ

$\theta = (\theta_1, \dots, \theta_K)$: 旅行者が周遊テーマ k ($k = 1, \dots, K$)を選択する確率のベクトル（周遊テーマ分布）

N_B : 訪問地ペアの総数

$w_{i,1}$: *i*番目の訪問地ペアの1つ目の訪問地

$w_{i,2}$: *i*番目の訪問地ペアの2つ目の訪問地

$\phi_k = (\phi_{k,1}, \dots, \phi_{k,V})$: 旅行者が周遊テーマ k において訪問地 v ($v = 1, \dots, V$)を選択する確率のベクトル（訪問地分布）

である。図1に、BTMにおいて旅行者が訪問地ペアを選択する過程を示す。 θ は旅行者全体が持つ周遊テーマへの嗜好であると言え、鉄道事業者にとっては周遊テーマの人気度として見る事ができる。一方、 ϕ_k は周遊テーマ k において旅行者全体が持つ訪問地への嗜好であると言え、鉄道事業者にとっては訪問地の人気度として見る事ができる。以降では、 θ_k を確率分布 θ に対する周遊テーマ k の人気度を表す周遊テーマ比率と呼び、 $\phi_{k,v}$ を確率分布 ϕ_k に対する訪問地 v の人気度を表す訪問地比率と呼ぶ。 θ と ϕ_k の偏りを表現するため、BTMではこれらパラメータの生成過程を、Dirichlet分布を用いて式(3)、(4)のように表現する。

$$\theta \sim \text{Dir}(\alpha) = p(\theta | \alpha) \quad (3)$$

$$\phi_k \sim \text{Dir}(\beta) = p(\phi_k | \beta) \quad (4)$$

ここに、

α : θ を制御する K 次元パラメータベクトル

β : ϕ_k を制御する V 次元パラメータベクトル

であり、 α と β はハイパーパラメータである。 θ , ϕ_k , z_i は、 b_i から推定し、 α , β は、Dirichlet 分布が無情報事前分布となるように 1.0 とした。

BTM では旅行者ごとに訪問地選択過程をモデル化するわけではないため、旅行者 d が持つ周遊テーマ k ($k = 1, \dots, K$) に対する嗜好 $\rho_d = (\rho_{d,1}, \dots, \rho_{d,K})$ を直接把握することはできない。そこで、 θ , ϕ_k を推定した後に、旅行者 d の訪問地ペア b_i に対して推定された周遊テーマ z_i を集計して ρ_d を算出する。

2.2 提案手法の妥当性の検証

実際の訪日外国人旅行者の周遊データを用いて提案手法の妥当性を検証する。訪日外国人旅行者のみが購入でき、日本国内のある 1 つの大都市圏内を主要エリアとする複数の鉄道事業者で利用可能な乗車券（以下、訪日商品 X と表記）から得られる入出場データを用いた。訪日商品 X は利用に応じて運賃が必要であり、入出場データには入出場した駅と時刻が記録されている。

提案手法における入力データは旅行者の訪問地ペア b_i に相当する訪問地履歴である。本研究では、入出場データに記録された降車駅のうち、乗換時に記録されたデータを削除した一覧を入力データとした。具体的には、以下の 3 つの条件をすべて満たす場合は乗り換え目的の入出場と判断して削除し、旅行者ごとに降車駅を求めて、入力データを作成した。

- ・ 出場から次の入場までの時間が 30 分以内
- ・ 出場駅と入場駅の直線距離が 1km 未満
- ・ 出場駅から次の入場駅までの間に必ず改札を通過

分析対象期間は 2016 年 4 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日、分析対象地域は同一地方区分に含まれる 4 都道府県（以降では、ア県、イ県、ウ県、エ県と表記）を含む大都市圏、分析対象者は 1 日の訪問地がすべて分析対象地域に含まれる旅行者とした。入出場データからは旅行者の行動を複数日にわたって把握可能であるが、利用日が分散している場合、リピーターと思われる旅行者の 1 回の旅程を特定することが難しい。そこで、今回は降車駅を 1 日ごとに集計し、各旅行者の複数日にまたがる旅程も 1 日ごとに区切って集計した。以上の方法で作成したデータセットについてまとめると、1 日ごとに区切った旅行者の総数（以下、延べ旅行者数）は 594,870、旅行者数は 260,261、重複を除く降車駅の総数は 157、平均降車駅数は 2.46 であった。

トピックモデルでは、扱うトピックの数をあらかじめ決める必要があるため、入出場データにトピックモデル

を適用するには、事前に周遊テーマの数を設定する必要がある。そこで、作成したデータセットから周遊テーマの数が異なる複数のモデルを推定して説明力を比較する。その後、説明力が高いモデルを使って提案手法の妥当性を評価する。図 2 に、周遊テーマ数と尤度比の関係を示す。尤度比は推定したパラメータによってモデルの尤度（説明力）がどの程度向上したかを示す指標である。周遊テーマの数が 30 を超えると尤度比が頭打ちになり、周遊テーマ比率が非常に小さく、解釈が困難であるような周遊テーマが抽出されるようになった。このことから、周遊テーマの数が 30 のモデルを妥当性の検証に用いた。

提案手法の妥当性を検証するには、抽出された周遊テーマが実際の訪日外国人旅行者の旅のテーマと一致することを確認する必要があるが、旅のテーマを定量的に把握することは困難である。そこで、各周遊テーマにおける人気度の高い訪問地と、外部データから把握可能な実際の訪問地の傾向の比較を以て、妥当性の検証とした。表 1 の左側 2 列に、各周遊テーマの比率、および各周遊テーマにおける訪問地比率上位 5 駅が属する都道府県を整理した。そのうえで、各県の含まれるすべての周遊テーマの比率を足し合わせてその県の訪問率を求め、日本政府観光局（Japan National Tourism Organization : 以下 JNTO と略）が公表している訪日外国人旅行者の都道府県別訪問率⁵⁾と比較した（図 3）。JNTO データは日本全国、入出場データは 4 都道府県を周遊する旅行者の割合であるため、後者は前者における訪問率よりも高い割合を示したが、相対的な訪問率は同様の傾向を示していた。

以上のことから、入出場データから得られる旅行者の降車駅を訪問地と仮定してトピックモデルを適用し、周遊テーマを抽出する提案手法は一定の妥当性を有すると考えられる。

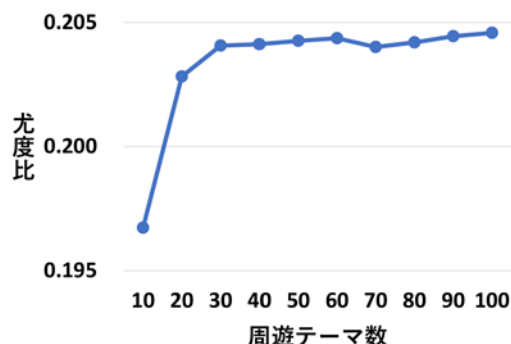


図 2 BTM の周遊テーマ数と尤度比の関係

表 1 抽出された周遊テーマの特徴一覧

テーマ	比率	都道府県	観光地分類	事業者路線	駅事業者数
1	0.159	ア県	繁華街	A社a線	1
2	0.114	イ県	寺社	B社a線,C社a線	2
3	0.096	ア県	繁華街	A社b線,A社c線	1
4	0.095	ア県,イ県	景勝地,寺社	C社b線	1
5	0.060	ア県	繁華街,テーマパーク,城	C社c線,C社d線,A社a線	2
6	0.055	ア県	繁華街	A社a線,A社d線	1
7	0.052	イ県,エ県	寺社,公園	C社a線	2
8	0.042	イ県	寺社,博物館	D社a線	2
9	0.036	ア県,エ県	寺社,公園,繁華街	E社a線	3
10	0.027	イ県	城,寺社,博物館	D社b線	1
11	0.027	ア県,イ県	寺社,景勝地,繁華街	F社a線,F社b線	2
12	0.025	ア県,エ県	繁華街,寺社	C社d線	2
13	0.024	ア県	テーマパーク,繁華街	C社c線	3
14	0.023	ア県	水族館,繁華街,城	A社e線,A社a線	1
15	0.021	ア県	繁華街,博物館,景勝地	F社c線,A社a線	2
16	0.021	ア県	繁華街	A社f線	1
17	0.020	ア県,ウ県	繁華街,城	C社e線	1
18	0.019	ア県	繁華街,寺社	A社c線	1
19	0.012	ア県	繁華街,公園	A社a線	2
20	0.010	ア県	繁華街	G社a線	2
21	0.010	ア県	繁華街,公園	A社a線	1
22	0.008	イ県	景勝地,寺社	H社a線,H社b線	2
23	0.008	ア県	空港,買い物	G社b線,C社b線	3
24	0.008	イ県,エ県	寺社,公園	E社b線	3
25	0.008	エ県	寺社	D社a線	3
26	0.007	ア県,ウ県	繁華街,温泉	I社a線,A社a線	3
27	0.006	ウ県	動物園,繁華街	J社a線,C社e線	3
28	0.004	ア県,ウ県	繁華街,球場	K社a線,K社b線	2
29	0.000	ア県,イ県	景勝地,繁華街,博物館	A社b線	4
30	0.000	ア県	城,繁華街	一貫性なし	3

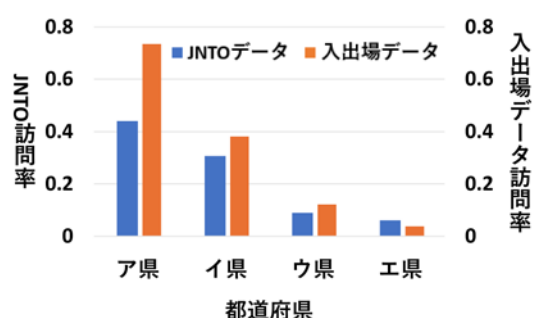


図 3 都道府県別訪問率の比較

ケーススタディを実施した。

1 点目の方法では、各周遊テーマにおける訪問地比率上位 5 駅の特徴を整理した。上位 5 駅の最寄りに存在する観光地のタイプを表 1 の 3 列目に記す。観光地のタイプは繁華街、寺社、景勝地、テーマパーク、城、水族館、公園、空港、買い物、温泉、動物園、球場、博物館の 13 種類とし、筆者の主観で分類した。周遊テーマ 1, 3, 6 はア県の繁華街を中心とした狭いエリアを重点的に散策する周遊であり、「ア県繁華街巡り」のような名称が付けられる。一方、周遊テーマ 4, 7, 9 は複数都道府県の寺社など有名観光地を広域的に訪れる周遊であり、「広域有名観光地巡り」のような名称が付けられる。以上のように、訪問地比率上位駅の都道府県、観光地のタイプを整理することで、周遊の範囲や目的を推定することが可能となる。次に、各周遊テーマの事業者路線および駅事業者数を整理した。これを表 1 の右側 2 列に記す。事業者路線は、事業者名を大文字のアルファベット A~K、路線名を事業者ごとにアルファベットの小文字とした。全体的に同一の事業者路線の駅が集約された周遊テーマが多く、30 個の周遊テーマのうち、17 個は事業者路線が 1 つであった。分析対象地域は複数鉄道路線が輻輳するエリアであり、実際に訪問された観光地は複数事業者路線からアクセス可能な観光地であることが多かった⁶⁾。そのため、同一の観光地を目的地とした周遊では、他の目的地とのアクセスの相性から特定の事業者路線が利用される傾向が多いと考えられる。一方で、周遊テーマ 2 は B 社と C 社、周遊テーマ 5 は C 社と A 社が含まれるなど、併せて利用されやすい事業者の組合せが存在すると思われる。以上のように、訪問地比率上位駅の事業者路線、事業者数を整理することで、利用交通手段を推定することが可能となる。

2 点目の方法では、周遊テーマ 4 の周遊テーマ出現量を月ごとに集計した (図 4)。周遊テーマ 4 は景勝地に分類される観光地が含まれる周遊テーマであり、春と秋に卓越する傾向が認められた。特に青色で示した 11 月の周遊テーマ出現量は前後の閑散期と比較して 2 倍程度になっており、主に秋の紅葉を目当てにした周遊だと

3. 周遊テーマを活用した施策案検討手法

3.1 周遊テーマの解釈方法

トピックモデルから得られる周遊テーマ分布と訪問地分布をもとに、周遊テーマの特徴を考察して周遊テーマを解釈する方法を二つ提案する。

1 点目は、人気度が高い訪問地の特徴を、都道府県、最寄り観光地、事業者路線、駅事業者数の 4 項目で整理する方法である。本研究では降車駅の選択過程をモデル化するため、降車駅から訪問地以外の情報を得ることができる。具体的には、降車駅から把握できる都道府県と訪問地の組合せをもとに周遊の範囲や目的を推定したり、訪問地までの利用交通手段を推定したりできると考えられる。なお、事業者路線は、訪問地比率が高い降車駅が 2 駅以上含まれる路線を指し、駅事業者数は、訪問地比率が高い降車駅が所属する鉄道事業者の数を指す。

2 点目は、各旅行者が持つ周遊テーマに対する嗜好 (以降では、周遊テーマ出現量と表記) を時期ごとに集計する方法である。同じ周遊テーマが相対的に出現しやすい時期と出現しにくい時期を把握することで、季節の違いとして現れる周遊テーマの特徴が把握可能となり、周遊テーマの解釈の正確性が向上すると考えられる。

3.2 ケーススタディ

2.2 節で作成したデータセットから推定した周遊テーマの数が 30 のモデルを使って、周遊テーマを解釈する

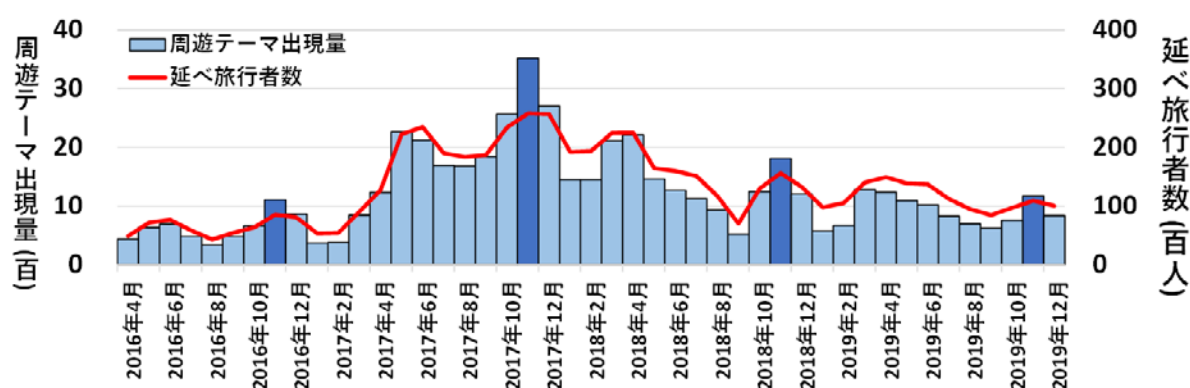


図4 観光地分類に景勝地が含まれる周遊テーマ4の出現量の推移

考えられる。以上のように、周遊テーマの特徴を高い精度で考察することで、特に重点的に実施すべき施策やその時期が検討可能となり、施策の実施効果を高めるための定量的な根拠が得られる。

周遊テーマの解釈が可能となることで、併せて訪問されやすい傾向がある訪問地を把握できる。これにより、周遊の促進や、輸送計画の改善につながるさまざまな施策を検討可能である。実施する施策の規模に応じて、周遊の促進や輸送計画の改善につながる施策を提案できることを、具体的な例をあげて示す。

日々の宣伝や案内の出し方に関する施策として、一つの周遊テーマの中で複数ある人気度が高い駅同士を案内するポスターの掲示等があげられる。この施策は駅の特徴によらず実施可能であるが、例えば、周遊テーマ2や周遊テーマ5のように人気度が高い駅に異なる事業者が含まれる周遊テーマに対しては、事業者間連携を進める際の基礎資料になると考えられる。

商品の設計・設定に関する施策として、一つの周遊テーマの中で複数ある人気度が高い駅を周遊可能な旅行商品の発売等があげられる。例えば、周遊テーマ7では異なる都道府県に存在する最寄り駅が上位5駅に含まれていた。これは地理的に離れた2つの観光地が同じ日に周遊されていることによる結果だと考えられる。そこで、これらの観光地の入場券と乗車券をセットにした旅行商品により、これら観光地を周遊する鉄道利用の増加が期待される。

より規模の大きな施策として、同じ周遊テーマに含まれる駅同士の乗り継ぎ利便性を向上させるダイヤへの改善、現時点で人気度の高い周遊テーマへの輸送力向上等があげられる。

周遊テーマ出現量に着目することで、これら施策の実施効果を高めるための定量的な根拠が得られる。例えば、周遊テーマ4のような需要の変動が大きい周遊テーマに対しては需要減少時にキャンペーンを重点的に展開したり、需要増加時に臨時列車を設定したりするなどの意

思決定に活用可能と考えられる。以上のように、周遊テーマの解釈結果をもとに、周遊の促進や輸送計画の改善につながる施策を提案することが可能となる。

なお、周遊テーマの解釈結果をもとに施策活用を進める際には、周遊テーマの偏りに留意する必要がある。例えば、本研究で用いた訪日商品Xは、発売箇所が特定地域であるため他地域からの広域周遊が過小評価される可能性や、逐一運賃を支払う方式の乗車券であるため乗り放題タイプの商品で周遊可能な観光地が過小評価される可能性がある。周遊の促進を目的とする場合は、現時点で人気度の高い周遊テーマだけでなく、今後利用者の増加が見込まれる周遊テーマを抽出することも重要である。乗り放題タイプの商品で周遊可能な観光地は既に人気度の高い周遊テーマであると考えられ、そうでない観光地同士が周遊テーマとして集約されやすいとすれば、潜在的な新しい周遊パターンの確立という目的に対して、活用価値の高い結果が得られている可能性がある。一方、輸送計画の改善を目的とする場合は、すべての鉄道利用者を対象に施策を検討する必要があるため、結果の偏りに留意し、他の鉄道利用データとの整合性を確かめる必要がある。

4. 本研究の課題と今後の拡張

本章では、本研究の課題に対する解決策と今後の解決策の方向性について論じる。まず、提案手法の一般性を検証するために、他の地域を鉄道で周遊する訪日外国人旅行者を対象とした適用事例を積み重ねる必要がある。また、旅行者の周遊テーマをより正確に抽出できるよう、実際の訪問地選択過程をより反映した旅行行動を分析する必要がある。具体的には、1日ごとではなく1回の旅行全体でテーマを立てて訪問地を決める、優先順位や宿泊地によって訪問の順序や滞在時間が異なる、などの旅行行動を反映できるよう、以下のような周遊行動を分析する必要がある。

1 点目は、複数日にわたる周遊行動である。全旅程を対象とすることでより詳細な周遊テーマが把握できる。全旅程に関する周遊テーマを抽出できれば、周遊テーマと宿泊地、滞在日数との関係も分析可能となり、施策への活用可能性向上が期待される。しかしながら、複数日にわたる周遊を対象とすると鉄道利用を伴わない周遊の割合が増加し、周遊の全体像把握がより困難になると考えられる。そのため、こうした分析を行うためには、入出場データと他の交通機関による移動を組み合わせるなどして、データセットの作成方法を工夫する必要がある。

2 点目は、訪問順序を考慮した周遊行動である。訪問の順序を把握することで周遊ルートが確立し、より効果的な施策を検討可能になると考えられるが、トピックモデルを本稿のデータセットにそのまま適用しても訪問地の順序は考慮できない。そのため、訪問地の順序を明示したデータセットを作成してトピックモデルを適用する、訪問地の順序のような構造的な情報を組み込んだモデルに改良する、といった対応を取る必要がある。

3 点目は、滞在時間を考慮した周遊行動である。入出場データから訪問地の滞在時間を正確に把握することはできないが、出場から次の入場までの時間を算出すれば、降車駅周辺における滞在時間が推定できる。降車駅を滞在時間で重み付けしたデータセットを作成し、本研究で用いた分析手法を適用することで、より実態に即した周遊テーマが得られる可能性がある。

5. まとめ

本研究では、入出場データにトピックモデルを適用して大都市圏内を周遊する訪日外国人旅行者の周遊テーマを抽出する手法を開発し、周遊テーマを解釈して施策提案に活用する方法を整備した。そのうえでケーススタディにより、周遊テーマの解釈例や施策提案への活用例を示した。

トピックモデルによる旅行者の訪問地選択過程のモデル化では、観測される訪問地の数が少ない入出場データの特徴を踏まえて、BTMを採用した。また、分析対象地域の特性を踏まえて、降車駅を訪問地として分析した。

周遊テーマを解釈するために、各周遊テーマの訪問地比率上位の駅を都道府県、観光地分類、事業者路線、事業者数の4つの項目で整理する方法を提案した。これに

より、周遊テーマの特徴を、周遊の範囲、目的、利用交通手段の観点から考察することが可能となった。また、旅行者の周遊テーマに対する嗜好を周遊テーマ出現量として月ごとに集計し、季節の違いに現れる周遊テーマの特徴を把握可能とした。

解釈した周遊テーマをもとに、併せて訪問されやすい訪問地や周遊テーマ出現量に着目して、周遊促進や輸送計画の改善につながる施策を検討する方法を提示した。

以上の方法論を、実際の鉄道利用データから得られる旅行者の訪問地履歴に適用し、鉄道事業者にとって訪日外国人旅行者の周遊促進や、輸送計画の改善につながる施策を定量的な根拠をもとに検討できることを示した。

今後は、提案手法をさらに発展させ、効果的な施策立案への貢献を目指す。

文 献

- 1) 国土交通省 FF-Data (訪日外国人流動データ) 分析例 (運輸局ブロック別 ブロック内移動の交通機関分担率) : https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku_soukou_fr_000022.html (参照日 : 2023 年 2 月 24 日)
- 2) 国土交通省鉄道局 鉄道分野におけるインバウンド受入環境整備について : <https://www.mlit.go.jp/common/001240898.pdf> (参照日 : 2023 年 2 月 24 日)
- 3) 稲場亘, 中川伸吾, 渡邊拓也, 深澤紀子 : 訪日外国人旅行者の鉄道利用データを用いた周遊パターン抽出に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.79, No.20, 論文 ID: 23-20056
- 4) Cheng, X., Yan, X., Lan, Y. and Guo, J.: BTM: Topic modeling over short texts, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol.26, No.12, pp.2928-2941, 2014.
- 5) 日本政府観光局 訪日外国人消費動向調査集計表 平成 29 年 (2017 年) 参考表 6 国籍・地域 (21 区分) 別 都道府県別訪問率【観光・レジャー目的】 : <https://www.mlit.go.jp/kankocho/siryoutoukei/syouthityousa.html> (参照日 : 2023 年 11 月 15 日)
- 6) 京都市産業観光局 京都観光総合調査 平成 29 年 (2017 年) 1 月~12 月 pp.65 〈訪問地トップ 25 (複数回答)〉 : https://www.kyokanko.or.jp/wp/wp-content/uploads/2019/05/kyoto_tourism_stat_2017.pdf (参照日 : 2023 年 11 月 15 日)

トンネルと斜めに交差する弱層が盤ぶくれに与える影響

野城 一栄* 嶋本 敬介* 川越 健**

The Effect of Weak Layers Intersecting Diagonally with Tunnel on Tunnel Floor Heaves

Kazuhide YASHIRO Keisuke SHIMAMOTO Takeshi KAWAGOE

It is well known that floor of tunnels often heaves at the intersection with a weak layer. Therefore, we conducted a study focusing on the effect of the angle and position in which the weak layer intersects with the tunnel on floor heave. A case study was conducted on tunnels that had recently experienced floor heave. The results showed that the amount of vertical displacement of the invert excavation surface during tunnel construction is large in areas with fractured strata and a high slaking index. This is particularly the case in areas where such strata extend below the invert at a gradual gradient. Laboratory tests showed that rocks taken from strata with many fractures are more susceptible to deterioration due to water absorption and are more likely to deform. Furthermore, we were able to reproduce the above tendency using numerical analysis. In order to suppress floor heave in the tunnels, it was found that it is important to select the structure of the invert taking into account the angle and position at which the tunnel intersects with the weak layer.

キーワード：トンネル，覆工，盤ぶくれ，割れ目，弱層，交差

1. はじめに

鉄道トンネルにおいて，完成後に盤ぶくれが問題となる事例が数多く報告されている^{例えば1)}。これらの事例は，多くが，地山の塑性域の拡大によりトンネル覆工やインバートに土圧が作用して変形が生じたとされている¹⁾。

トンネル建設時には，事前の地質調査の結果や，施工中の切羽観察，内空変位等の計測結果を踏まえて支保が選定されている。その一方で，最適と思われる支保を選択し，また，追加の調査や計測を実施し，完成後の盤ぶくれに細心の注意を払って施工された場合でも，完成後に盤ぶくれなどのトンネルの変形が生じる例²⁾が見られるのが現状である。

盤ぶくれのメカニズムや，盤ぶくれを防止する構造等については，様々な検討^{例えは3)}が実施されてきてはいるものの，盤ぶくれが発生する恐れのある箇所を精度よく事前に把握することが難しい現状がある。

本論文では，完成後のトンネルの変形の要因として，断層や割れ目を多く含む層（以下「弱層」）に着目し，文献調査，掘削事例の分析，岩石試験，数値解析により多角的に研究を行った結果について示す⁴⁾。

2章では，既往のトンネルの変形事例の分析によりトンネルが変形した箇所の地山性状を分析し，泥質岩の分布地域に事例が多いこと，地質構造とトンネルの3次元的位置関係がいくつかのパターンに分類できることを

示す。

3章では，2章で示したパターンの中の1つのパターンについて，インバート掘削面の鉛直変位データを有するトンネルの施工記録を分析し，弱層とトンネルとの交差位置関係とインバート掘削面の変位と関係性について示し，トンネルが傾斜が緩い弱層と交差する箇所では盤ぶくれが多く見られることを示す。

4章では，割れ目に着目して岩石試験を実施し，弱層の一つである割れ目が多い地層から採取した岩石は吸水による劣化がみられることを示す。

5章では，弱層がトンネルに与える影響を，弱層の強度を低下させる数値解析により検証し，傾斜が緩い弱層との交差が，供用後のトンネルの盤ぶくれに影響を及ぼすことを示す。

6章では，まとめを示すとともに，弱層とトンネルとの交差位置関係に着目して，施工時，供用後の盤ぶくれを防ぐ上での留意点について述べる。

2. 地質構造とトンネルの変形との関係

トンネルの変形が発生した区間の地質構造を把握するために「トンネル」，「変状」を主なキーワードとして文献（80トンネル，88工区の事例）を収集し，そのうち，地質性状が具体的に記載されている57トンネルを対象として分析を行った^{4) 5)}。

トンネルの変形箇所の地質構造を岩石強度の相対的な分布の観点から整理すると以下の3つに大別できる（以下，「地山タイプ [1] ～ [3]」と呼ぶ）（図1）。

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

** 元 防災技術研究部 地質研究室

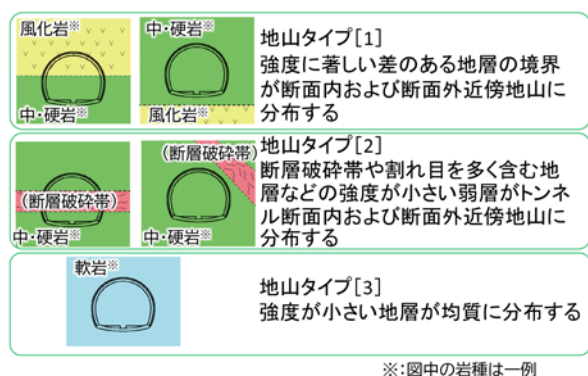


図1 トンネル変状箇所の地質構造のタイプ⁴⁾

- ・地山タイプ [1]：強度に著しい差のある地層の境界が断面内および断面外近傍地山に分布する。岩石強度の相対的な違いから2層にモデル化できる。(13トンネル)
- ・地山タイプ [2]：断層破砕帯や割れ目を多く含む地層などの強度が小さい弱層がトンネル断面内および断面外近傍地山に分布する。岩石強度の相対的な違いから3層にモデル化でき、中間の弱層の層厚（幅）は他の2層に比べて狭い。(32トンネル)
- ・地山タイプ [3]：強度が小さい地層が均質に分布する。岩石強度としては1層としてモデル化できる。(12トンネル)

地山タイプでもっとも多いのは、地山タイプ [2] であった。また、トンネルの変形箇所に分布する主な岩種は泥岩・頁岩がもっとも多く（全体の39%）、次いで火砕岩類（同23%）であった。

この地山タイプ [2] は、過去の解析的、実験的な研究において、あまり取り上げられていない。そこで、本稿では地山タイプ [2] を主な対象として検討を行った。

3. 施工事例の分析

トンネルの変形については、データの取得が比較的容易な建設時の計測（内空変位、天端沈下）の結果を用いて分析されることが多い。しかし、内空変位の測線は、最もインバートに近い測線でもトンネルの施工基面よりもやや上の位置で、計測方向も水平方向であり、これに着目してインバート掘削面の鉛直変位を議論するには限界があった。そこで、トンネル施工時に、インバート掘削面の鉛直変位が特別に計測されていたAトンネル^{6) 7)}を対象に、岩石試験結果や交差する弱層との位置関係と建設時のインバート掘削面の鉛直変位との関係について事例分析を行った^{4) 5)}。

3.1 Aトンネルの概要

図2 (a) にAトンネルにおける施工実績にもとづく

地質縦断面図と建設時の計測の結果を、図2 (b) にインバート掘削面の鉛直変位を示す。Aトンネルの地質は中期中新世の層厚約300mの均質な泥岩である⁸⁾。切羽観察記録のスケッチ、写真、記事欄の記載、現地調査などから、おおむね泥岩、シルト岩などの泥質岩を主体として、凝灰岩の薄層が挟まれている。また、硬軟の違いが層状に出現しており、切羽スケールで地層を見ると、岩相や強度の異なる地層が累重し、図面左側に向かって下がる地質構造となっている。地質境界の傾斜は10~20°程度が多く、断層の傾斜はさまざまであるが、縦断面図上では20~30°程度のものが多い。

3.2 岩石試験結果とインバート掘削面の鉛直変位との関係

Aトンネルで実施された岩石試験（X線回折によるスメクタイトの定量分析、浸水崩壊度試験、針貫入試験から換算された一軸圧縮強さ）の結果と地山強度比を図2 (c) に示す。

図より、スメクタイト含有量はおおむね10~20%間にはばつきが少なく分布している。既往の指標を参考にすれば、膨潤性粘土鉱物による影響は乏しいものと考えられる。浸水崩壊度は4か所を除いて値が4となっている。そのため、全体にスレーキングしやすい地山と考えられる。地山強度比はいずれの箇所でも2以上となっている。

以上のように、Aトンネルの位置する地山では、スメクタイト含有量、浸水崩壊度、地山強度比はコントラストが少なく分布しておりこれらとインバート掘削面の鉛直変位との間に明瞭な関係を見出すことは困難であった。

3.3 弱層とインバート掘削面の鉛直変位との関係

ここでは、図2の地質縦断面図で、地層境界、断層、破砕部などの弱層に位置する(A)~(E)に着目し、交差する弱層との位置関係とインバート掘削面の鉛直変位との関係に着目して考察を行った。ここで、(A)~(E)はインバート掘削面の鉛直変位が大きくなっている箇所、(F)は対比のために選定した箇所である。

- ・150m付近（図2中の(A)）

インバート掘削面の鉛直変位が大きくなっている。これは、150mから起点方に分布する強風化泥岩の影響もあると思われるが、150m付近では、F4断層がインバート下に分布していることが特徴で、その上盤側が変位している。

- ・240m付近（図2中の(B)）

インバート掘削面の鉛直変位が大きくなっている傾向がある。傾斜が緩い地層が分布している。

- ・390m付近（図2中の(C)）

内空変位は25mm程度しか発生しておらず、一次イ

ンバートは施工されていないが、インバート掘削面の鉛直変位が大きくなっている。ここでは、地層境界が起点方に向かって傾斜が緩い角度で下がっており、インバート下の地山に強度の異なる地層境界が存在している可能性が考えられる。

- ・ 1,140m～1,200m 間（図2中の（D））、1,190m 付近（図2中（E））

インバート掘削面の鉛直変位が大きくなっている。この区間は、SL 付近に縦断面図上での水平方向の地層境界が存在するとともに、1,190m 付近には破碎された泥岩が分布している。そのため、周辺の岩盤と比べて強度の弱い層がインバート掘削面に存在している可能性が考えられる。

- ・ 890m～940m 間（図2中の（F））

断層が分布するがインバート掘削面の変位が小さい箇所がある。890m～940m 間は、割れ目の頻度あるいは破碎帯の切羽に占める割合が他の区間と比べて大きく、その範囲で内空変位が大きくなっている。この区間では、インバート掘削面の鉛直変位はわずかである。

（F）は、傾斜が急な断層が比較的多く分布することが（A）～（E）と異なる特徴となっている。

以上のように、傾斜が緩い断層などが分布する図2中の（A）～（E）でインバート掘削面の鉛直変位が大きくなる傾向が見られることがわかった。

4. 割れ目が発達する地層から採取した岩石の吸水による劣化

仲野^{9) 10)}によると、トンネル周辺地山の変状は、その初期は主に地山の低強度が要因となり、遅れて吸水軟化による強度低下が要因となるとされている。また、切羽の進行に伴い、トンネル周辺地山の含水状態は変化すると考えられる。

そこで、完成後のトンネルの変形の要因の一つとして、掘削による地山の緩みに伴う割れ目の伸張、増加と、岩石の含水状態の変化による強度の変化に着目することとし、本章では、地山タイプ [2] における弱層の一つとなりえる、割れ目を多く含む岩石（以下「割れ目部」と呼ぶ）と、それとほぼ同じ箇所から採取した割れ目を含まない岩石（以下「塊状部」と呼ぶ）を対象として、スレーキングや吸水膨張特性に着目した試験を行い、トンネルの変形につながる岩石の性質について検討を行った結果を示す⁴⁾。

4.1 岩石試験の方法

岩石試料の一覧を表1に示す。岩石は、古第三紀および新第三紀の地山に位置するトンネルの切羽で採取したほか、B トンネルで実施したボーリングにおいて採取し

表 1 岩石試料の一覧

年代	岩種	採取箇所	箇所数	凡例
古第三紀	泥質岩	切羽	4切羽	◆◇
新第三紀	泥質岩	切羽	1切羽	■□
	泥質岩	ボーリングコア	5箇所(Bトンネル)	○

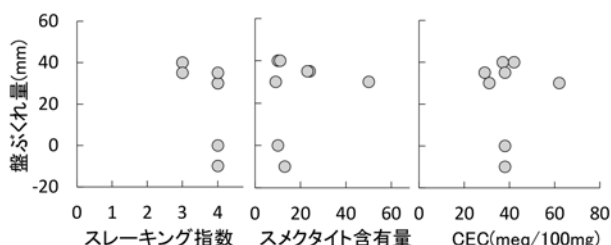


図3 既往の鉱物学的指標と盤ぶくれ量との関係 (B トンネル試料)⁴⁾

たコアを用いた。B トンネルは新第三紀の泥質岩の地山に位置するトンネルで、完成後比較的早期にインバートの盤ぶくれが生じた。B トンネルの試料は、盤ぶくれ箇所におけるインバート掘削面より下の地山（以下、「インバート下地山」と呼ぶ）のボーリングコアを用いた。それ以外は、人頭大以上の大きさの岩塊を掘削中のトンネル切羽や露天掘り鉱山の掘削面からブロックサンプリングにより採取した。採取した岩石は、第2章で示したトンネルの変形事例の多い地質である、泥岩・頁岩、火砕岩類に属している。

岩石試験は、膨潤性の指標を得るためにこれまでに多用されてきた、スレーキング試験、スメクタイト含有量試験、陽イオン交換容量試験（CEC）、一軸圧縮試験、吸水膨張試験を実施した。スメクタイト含有量試験は桜井ほか¹¹⁾の方法により、その他は、地盤工学会の試験方法に基づき実施した。

4.2 岩石試験の結果

図3に、B トンネルの試料について、スレーキング指数、スメクタイト含有量、CECの値と、その位置で本インバート設置後に発生した盤ぶくれ量との関係を示す。

今回の研究の範囲では、スレーキング指数が1, 2の場合の盤ぶくれの事例は得られていないが、スレーキング指数が3, 4の場合、盤ぶくれ量が大きい傾向にあることがわかった。一方で、スメクタイト含有量やCECの値と盤ぶくれ量との間には明瞭な関係は認められず、これらの既往の鉱物学的な盤ぶくれの指標からは、掘削後の盤ぶくれ量を予測することが難しいことがわかる。

図4に、スレーキング試験の結果を示す。新第三紀の泥質岩の試料ではスレーキング指数は3あるいは4であった。切羽から採取した試料においてはスレーキング

指数は3であり、割れ目部と塊状部で差はなかった。一方、古第三紀の泥質岩の試料では、塊状部で同2、割れ目部で同4と、割れ目部でスレーキング指数が大きい傾向があることがわかった。

図5に、スレーキング指数と既往の膨張性の指標との関係を示す。スレーキング指数と各指標の間には明瞭な関係はないが、それぞれの関係でスレーキング指数の下限値が指標ごとに見いだせることがわかった。例えば、スレーキング試験時吸水率からは、スレーキング指数の大きい試料には吸水率が大きい試料が含まれるが、スレーキング指数が小さい試料には吸水率が小さい試料のみが含まれ、少なくとも今回対象とした試料の範囲では、吸水しやすい試料はスレーキングしやすいことが示唆された。

図6に、吸水膨張率と吸水膨張応力との関係を示す。全体として吸水膨張率が大きい試料では、吸水膨張応力も大きい傾向にあること、同じ時代の試料において比較すると割れ目部で吸水膨張率、吸水膨張応力ともに大きな値を示すことがわかった。

図7に、スレーキング指数と吸水膨張応力との関係を示す。スレーキング指数が3、4の試料は、相対的に高い吸水膨張応力を示すことがわかる。

以上から、今回対象とした試料においては、スレーキ

ング指数が1、2の場合の盤ぶくれの事例は得られていないが、スレーキング指数が3、4の場合、盤ぶくれ量が多い傾向にあること、割れ目部では塊状部に比べて、吸水膨張率や吸水膨張応力が大きいこと、スレーキング指数と吸水膨張応力とは関係があることがわかった。

5. 傾斜した弱層の影響についての解析的検討

これまでの分析から、傾斜が緩い断層などが分布する箇所インバート掘削面の鉛直変位が大きくなる傾向があること、地山タイプ [2] における弱層の一つとなり

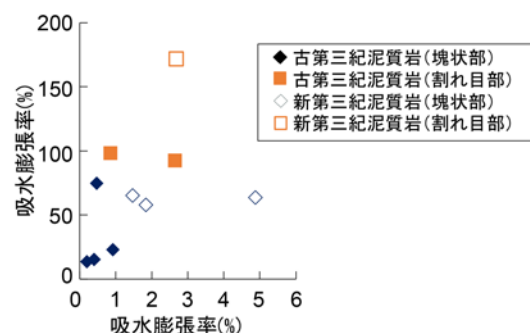


図6 吸水膨張率と膨張応力との関係⁴⁾

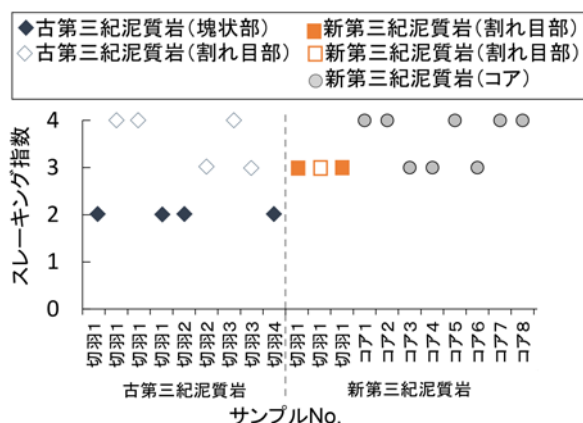


図4 スレーキング試験の結果⁴⁾

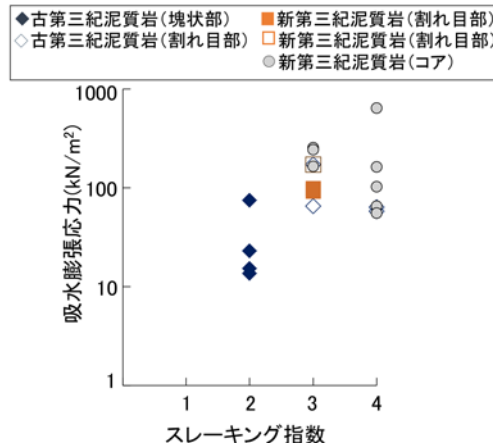


図7 スレーキング指数と吸水膨張応力との関係⁴⁾

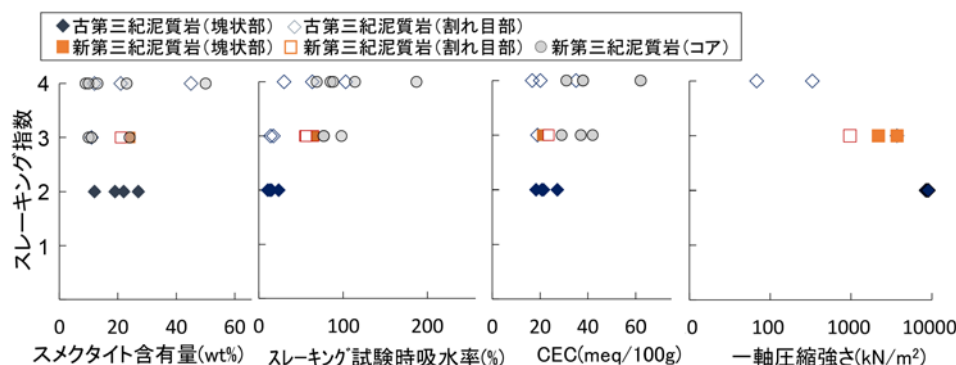


図5 既往の膨張性指標とスレーキング指数との関係⁴⁾

える割れ目部は、塊状部と比較してスレーキングしやすいこと、吸水により膨張し結果として強度が低下しやすいことが推察された。

本章では、傾斜した弱層がインバートの変位に与える影響を数値解析により検討した結果を示す⁴⁾。

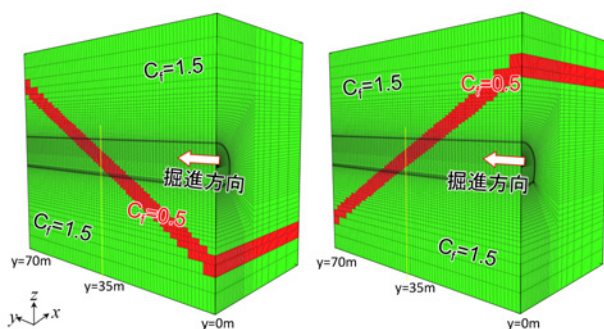
5.1 解析手法と解析モデル

数値解析では、弱層を健全部よりも地山強度比 C_f を小さくし、かつトンネル完成後に強度を低下させることで表現することとし、弱層の水平面に対する傾斜角度に着目して、ケース 1：流れ目 30° 傾斜、ケース 2：差し目 30° 傾斜、ケース 3：流れ目 20° 傾斜の 3 ケースについて、3 次元有限差分コード FLAC3D を用いた解析を行った。図 8 にケース 1 とケース 2 を例にとり解析モデルを示す。

弱層の層厚は 4m とし、切羽では見かけ上、地層が水平に出現している状況とした。弱層には、過去の解析事例を参考とし、地山強度比 $C_f=0.5$ 相当、非弱層部には $C_f=1.5$ 相当の物性値を与えた。トンネル延長方向 70m をモデル化し、中間に当たる延長方向 $y=35\text{m}$ の位置で弱層中央部が SL を通過するようにした。土かぶり厚は 200m として、解析領域上面（天端から 25m 位置）に 175m 分の土かぶり荷重を与えた。側面、底面をローラー支持とし、側圧係数は 1.0 とした。

本解析では、トンネルの掘削から完成後の変状発生までを一貫して表現する手法¹²⁾ を適用した。掘削は三次元逐次掘削により表現し、完成後の変状は、掘削後の地山の破壊接近度（緩み）に応じて粘着力 c が低下するとしてモデル化した。掘削解析は、NATM の補助ベンチ付き全断面工法（ベンチ長 3m）を想定して、1m ずつ掘削と支保の構築をくり返した。トンネル断面形状は図 9 に示す通り、新幹線トンネルの標準的な断面とし、支保工は $I_{sp}^{13)}$ 相当とし、鋼製支保工 H-150、吹付けコンクリート 150mm、ロックボルト 3m×14 本を、それぞれ Beam 要素、Solid 要素、Cable 要素でモデル化した。

地山は Mohr-Coulomb の破壊規準に従う弾完全塑性



(a) ケース 1 流れ目 30° (b) ケース 2 差し目 30°

図 8 解析モデル⁴⁾

体としてモデル化した。

5.2 解析結果

ケース 1（流れ目）の解析結果を図 10（a）に、ケース 2（差し目）の解析結果を図 10（b）に示す。図の上段には $y=70\text{m}$ まで上下半掘削が完了した時点の変位分布を、下段には劣化ステップ $N=50$ における変位分布を示している。

変位量がピークとなる位置について見ると、掘削時のスプリングライン（S.L.）位置の内空変位がピークとなる位置と完成後の盤ぶくれがピークとなる位置はケース 1（流れ目）で 14m、ケース 2（差し目）で 15m 異なる。一般に、掘削時において、内空変位が大きくなってきた場合、支保の増強や、一次インバートによる早期閉合が実施される。流れ目の場合は将来的に盤ぶくれしやすい箇所を通過してから内空変位が増加するため、盤ぶくれしやすい箇所に対して構造上の配慮が行われにくい可能性がある。なお、完成後の盤ぶくれ量がピークとなる位置は、ケース 1（流れ目）では $y=22\text{m}$ で、弱層がインバート下地山の中に姿を消している位置である。切羽観察は上半切羽を中心として実施されているが、このような傾斜した弱層をトンネルが貫く場合には、弱層がインバート下地山に潜っている箇所でも盤ぶくれ量が大きくなる可能性があることを意味する。

ケース 3（流れ目 20°）の変位分布を図 11 に示す。ここで、ケース 3 は、3. で示した A トンネルの F4 断層（図 2 中の（A））に相当する条件である。

弱層の傾斜角度が緩くなることで、ケース 3（流れ目 20°）の完成後の盤ぶくれピークの位置は、ケース 1（同 30°）の 7m 後方になっている。また、ケース 3（同 20°）の方が、ケース 1（同 30°）よりも盤ぶくれ量が大きく、また発生する範囲が広がっている。傾斜角度が小さい場合は、交差する長さが相対的に長くなるため、トンネルの完成後の盤ぶくれに与える影響が大きくなることによるものと考えられる。

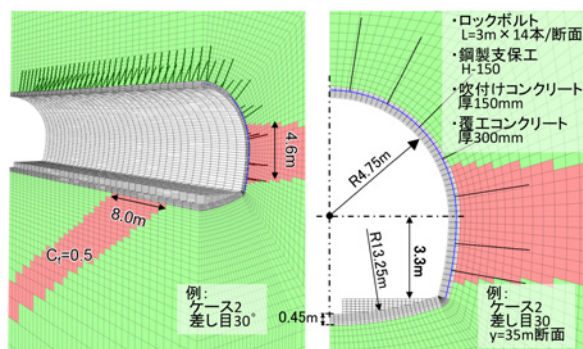


図 9 トンネル断面形状、構造⁴⁾

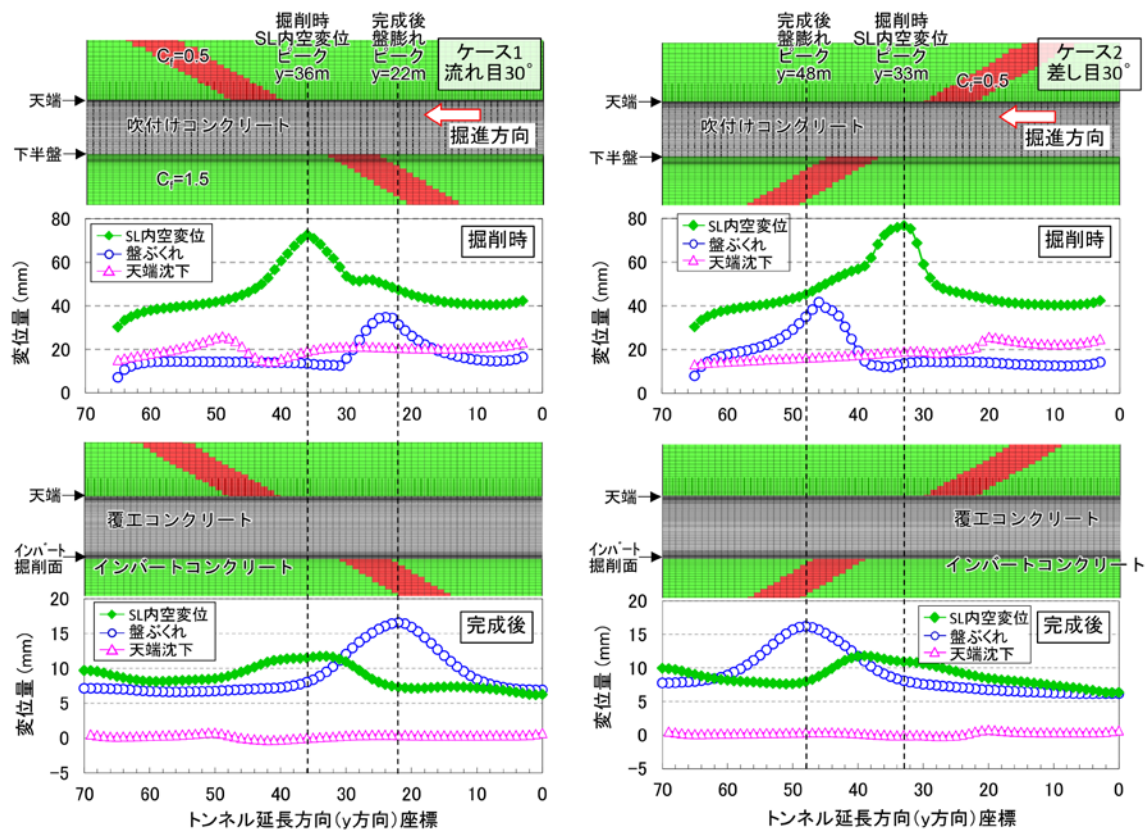


図 10 発生変位分布 (ケース 1 : 流れ目 30°, ケース 2 : 差し目 30°)⁴⁾

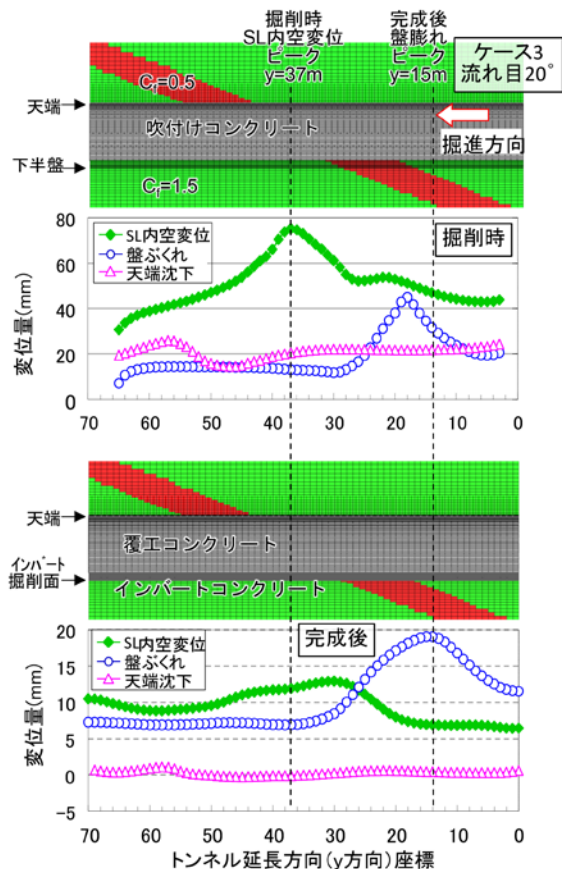


図 11 発生変位分布 (ケース 3 : 流れ目 20°)⁴⁾

6. まとめ

本論文では、完成後のトンネルの変形の要因として、断層や割れ目を多く含む層を弱層に着目し、文献調査、掘削事例の分析、岩石試験、数値解析により多角的に研究を行った。以下に成果をまとめる。

- 1) 既往のトンネルの変形事例の分析によりトンネルが変形した個所の地山性状を抽出し、泥質岩の分布地域に事例が多いこと、地質構造とトンネルの3次元的な関係が大きく3つのタイプに分けられること、また割れ目の多い地層の存在が影響している可能性を示した。
- 2) インバート掘削面の鉛直変位データを有するトンネルの施工記録を分析し、地層構成とインバート掘削面の変位量との間には関係性が認められ、傾斜が緩い断層などが見られる箇所でインバート掘削面の変位量が大きくなる傾向が見られることがわかった。
- 3) 割れ目の多い部分から採取した試料や実際にインバートの盤ぶくれが生じた箇所の岩石試料を用いた岩石試験を実施したところ、割れ目の多い地層から採取した岩石は吸水による劣化の度合いが大きく、変形しやすいことが分かった。
- 4) 弱層がトンネルに与える影響を数値解析で検証した。インバート掘削面を含むトンネル断面外の地層が完

成後のトンネルの変形に影響を及ぼすこと、弱層の傾斜角度が小さい場合はこの影響が大きくなることがわかった。

トンネル断面外の地層が完成後のトンネルの変形に影響を及ぼし、変形の範囲や変形量はトンネルと弱層の交差角度などの交差関係の影響を受けるといえる。現状では上半の支保パターンに対応してインバート構造が選定される場合があるが、施工実績に基づく地質縦断図等を作成し、地質の面的な分布や掘削断面外への連続性を把握したうえでインバート構造を選定することが、施工時、完成後の盤ぶくれを防ぐ上で重要といえる。

文 献

- 1) 嶋本敬介, 川越健, 野城一栄, 小林寛明, 磯谷篤実: 含水比変化に着目した山岳トンネルの盤ぶくれメカニズムの推察, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.76, No.1, pp.34-48, 2020
- 2) 国土交通省: 北陸新幹線の工程・事業費管理に関する検証委員会 報告書, 2021
- 3) 小林寛明, 上野光, 磯谷篤実, 嶋本敬介, 岸田潔: 完成後の盤ぶくれを防ぐ新たなインバートの抑制効果, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.71, No.1, 2019
- 4) 川越健, 嶋本敬介, 野城一栄, 今地洋佑, 若林功起: 割れ目を含む弱層との交差関係に着目した盤ぶくれに関する考察, 土木学会論文集, Vol.80, No.6, ID: 23-00198, 2024
- 5) 川越健, 嶋本敬介, 野城一栄: 泥質岩中の割れ目の密集部がトンネルの変状に与える影響の検討, 第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.295-300, 2016
- 6) 木梨秀雄, 伊藤哲, 藤岡大輔, 鈴木拓也, 辻村幸治: トンネル施工中の計測にもとづく盤ぶくれの長期予測と対策工選定, 第47回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.305-310, 2020
- 7) 今地洋佑, 今林泰史, 後藤裕太郎, 上野光, 川越健, 嶋本敬介, 野城一栄: 切羽観察記録からの将来的なインバート部地山の変位箇所抽出に関する考察, 土木学会第74回年次学術講演会, III-187, 2019
- 8) 近畿地方土木地質図編纂委員会: 近畿地方土木地質図解説書, 国土技術センター, p.124, 2003
- 9) 仲野良紀: 膨張性地山の実態, トンネルと地下, Vol.6, No.10, pp.15-25, 1975
- 10) 仲野良紀: 第三紀層泥岩の力学的性質と膨張性トンネル, 地すべり等のメカニズムに関する一連の研究, 第43回地盤工学シンポジウム, pp.11-22, 1988
- 11) 桜井孝, 立松英信, 水野清: 膨潤性粘土鉱物の簡易定量法の研究, 鉄道技術研究報告, No.1312, 1986
- 12) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 建設時の影響を考慮した山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1, Vol.69, No.2, pp.105-120, 2013
- 13) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 山岳トンネル設計施工標準・同解説, p.65, 2008

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

小島謙一

■企画・監修

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

鉄道総研報告 第39巻 第8号

2025年8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. 8

Aug. 2025

PAPERS

- Countermeasures of Low-Frequency and Aerodynamic Noise Emitted from Shinkansen Train
..... M.AKUTSU, T.UDA (1)
- Development of Tie Plate with Elastic Support Structure for Rigid Crossings Fixed Directly to
Composite Sleepers
..... S.SHIMIZU, R.OTAKA, S.TAMAGAWA, T.DESHIMARU, S.MATSUTANI (9)
- Development of a Method for Diagnosing Deterioration of Railside Facilities using Train Forward
Images
..... R.MAEDA, H.MUKOJIMA, N.NAGAMINE (17)
- Influences of Sun Position and Subject Blur on Contact Wire Wear Measurement Using Light Section
Method
..... H.SUSUKI, I.MATSUMURA, Y.HEIRA (25)
- Evaluation of Cytotoxicity by Exposure to 60 GHz Millimeter Wave in In Vitro
..... M.IKEHATA, S.YOSHIE, Y.SUZUKI, H.SASAKI (33)
- Development of Obstruction Warning Signal Detection Device
..... S.KOMURO, H.MUKOJIMA, N.NAGAMINE (41)
- Extracting "Tour Themes" from Railway Usage Data of Foreign Visitors to Japan and Its Application
to Policy Measures
..... W.INABA, S.NAKAGAWA, T.WATANABE, N.FUKASAWA (49)

RESEARCH REPORT

- The Effect of Weak Layers Intersecting Diagonally with Tunnel on Tunnel Floor Heaves
..... K.YASHIRO, K.SHIMAMOTO, T.KAWAGOE (55)

