

鉄 道 総 研 報 告

第40巻 第9号

2026年9月

論文

- 車両** シミュレーションによる車両入換条件下における制動距離の制御性の検証
..... 木崎裕太, 宮原宏平, 中澤伸一 (1)
- 車両** 大型低騒音風洞を模擬する数値風洞の開発とビル風問題への適用例
..... 中出孝次, 中野宏章, 阿部巧, 井門敦志, 井上達哉 (12)
- 電気** フロントロッド肘金の折損要因の分析と折損を防ぐ保守方法
..... 潮見俊輔, 重盛壮平, 押味良和 (22)
- 電気** **運転** 物体検知 AI とステレオカメラによる構内の支障物検知システム
..... 向嶋宏記, 影山椋, 長峯望, 小室翔嗣 (33)

シミュレーションによる車両入換条件下における
制動距離の制御性の検証

木崎 裕太* 宮原 宏平** 中澤 伸一*

Simulation-based Verification of Braking Distance Controllability under Shunting Train Conditions

Yuta KIZAKI Kohei MIYAHARA Shin-ichi NAKAZAWA

In train shunting at railway facilities, it is difficult to control the stopping distance due to differences from main line operation regarding brake control elements. In this study, we create a simulation environment to reproduce expected shunting train conditions and conduct Train Automatic Stopping Control (TASC) simulations. We will also confirm the controllability of the stopping distance using a previous brake control method under shunting train conditions.

キーワード：ブレーキシステム、車両入換、自動空気ブレーキ、連結器力、定位置停止制御(TASC)

1. はじめに

近年の人口減少を背景に、より一層の業務の効率化・省力化の一環として鉄道分野においても自動運転の導入に向けた取り組みが急速に進んでいる¹⁾²⁾。これらの自動運転技術は、本線を走行する旅客列車を主な対象とし、ホームドアの設置などの施策とも関連して、安全性・定時性の確保のため車両を速やかに正確な位置に停車させる定位置停止制御（Train Automatic Stopping Control : TASC）が重要な役割を果たしている。この TASC が高性能な車両や高度な信号保安システムの利用を前提としている一方で、鉄道分野では車両基地などの専用施設構内での車両の小移動（以下、車両入換とする）が日常的に行われ、本線での営業運転とは異なる条件下で車両を走行させる状況が多数ある。車両入換は、低速のため車両を停止させやすい一方で、連結した車両の一部にのみブレーキが作用する、番数の小さい分岐器を通過するなどの条件が営業運転とは異なる。これらの条件下においては、停止位置精度に加え、列車座屈などのリスクを防ぐためにブレーキの強さや操作頻度などに制約が課される場合があり、ブレーキ操作の自動化において課題となる。

また、一般的な鉄道車両のブレーキシステムは開ループ制御³⁾であり、既存の TASC 手法では地上子などの信号設備からの情報に基づく速度曲線に追従するように車両のブレーキ力を調整して目標の位置に停止させる。これを車両入換に導入するには、多様な車両条件への対応や地上信号設備の新設などを必要とするため容易ではない。これに対し、同等の制御機能を車両側のみで完結させることができれば、地上子への依存を低減することで設備の追加を抑制し、TASC 導入コストの低減を通じた自動運転の広範な普及にも寄与が期待できる。よって、車両入換作業の省人化を実現するためには、既存車両にも適用可能な車上完結型のブレーキ制御系の開発が望まれる。

車上完結型のブレーキ制御手法として、「距離基準減速度制御」を TASC に適用した先行研究³⁾では、2両編成の旅客電車を用いた現車試験により有効性が示されているにとどまり、自動空気ブレーキ式車両や機関車けん引列車など、車両入換で想定されるブレーキシステムに対する有効性は検証されていない。また、ブレーキの応答特性や車両間の連結装置に発生する力（以下、連結器力とする）の相互作用によって発

* 車両技術研究部 ブレーキシステム研究室

** 車両技術研究部 車両運動研究室

生する編成車両の前後方向ダイナミクス（Longitudinal Train Dynamics : LTD）を考慮して、TASC の性能に与える影響を検討した例はほとんどない。

そこで本研究では、車両入換におけるブレーキ操作の自動化のためのブレーキ制御手法の検討、性能評価のために、車両入換で想定される車両条件・制約を再現可能なブレーキシミュレーション環境を構築する。そして、構築した環境において、ブレーキ指令方式やブレーキ軸数が異なる、車両入換で想定される3つの編成車両モデルを作成し、本線走行車両を想定した先行研究の既提案手法である距離基準減速度制御を適用した TASC シミュレーションを行う。さらに、シミュレーションにおいて、各編成車両モデルのブレーキ制御に関する複数のパラメータを変更した場合の停止距離の誤差の分布を確認することで、既提案手法による車両入換条件下の編成車両への適用可能性を確認する。

2. シミュレーションのためのモデル化

本章では、構築したブレーキシミュレーション環境を構成する各要素のモデル化について述べる。

2.1 連結器力モデル

連結器力モデルは、連結された車両の相対変位により連結装置に発生する圧縮・引張方向の変位を入力とし、連結装置前後の車両に作用する連結器力を出力として規定したものである。本研究では、編成内各車両のブレーキ動作により発生する連結器力が編成車両の運動と停止距離に与える影響や、ブレーキ操作方法によって生じる連結装置の座屈などのリスクを考慮可能とするために、実機の連結装置の構成要素である緩衝器の試験データを用いて連結器力モデルを作成した。作成したモデルでは、緩衝器 1 個によるバネ-ダンパ要素で接続された車両間に発生する連結器力を再現した。作成したモデルの変位入力に対する連結器力出力の特性を図 1 に示す。なお、連結器力の符号は入力変位が減少する（連結装置が圧縮される）場合を負の値として表示している。図 1(b)より、作成したモデルは、変位入力に対して連結器力出力にヒステリシスを示しており、緩衝器が持つゴム緩衝器実機の特性を反映している。

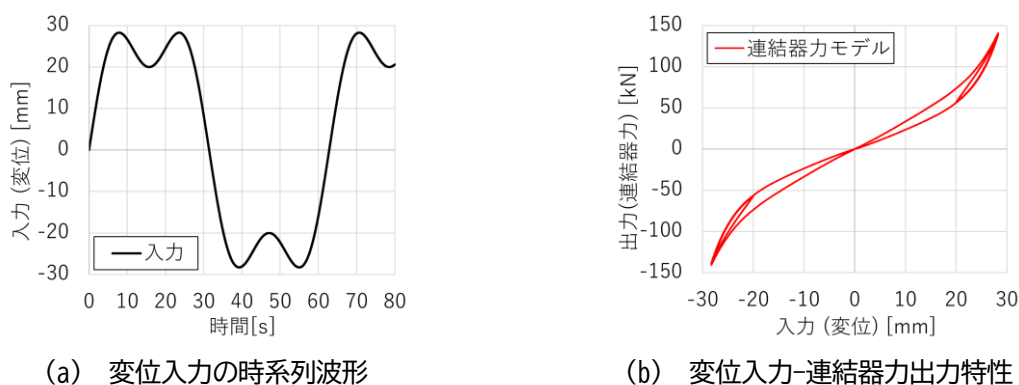


図 1 連結器力モデル

2.2 自動空気ブレーキモデル

空気指令式ブレーキの一種である自動空気ブレーキシステムについて、本研究では、ブレーキノッチを入力とし、編成内各車の基礎ブレーキ装置に供給するブレーキシリンダ（BC）圧を出力とするモデルとして規定し、編成内を引き通したブレーキ管（BP）内の圧縮空気によるブレーキ指令の伝達や、各車両に搭載される制御弁の応答特性と応荷重機能によって調整される最終的な BC 圧の生成を再現する。

図2に示す通り、作成した自動空気ブレーキモデルは3つのサブモデルで構成される。まず、ノッチーBP圧モデルでは、8段のブレーキノッチに対するBP圧の減圧量とその応答特性をむだ時間と1次遅れ系（ゲイン1，時定数1s）で規定し、むだ時間の設定を調整することでBPによるブレーキ指令の伝達の遅れを再現している。次に、BP圧ーBC圧モデルでは、BP圧の変化に応じて編成内各車両の制御弁が出力するBC圧の応答特性をむだ時間と1次遅れ系（ゲイン1，時定数1s）で規定している。本報では、ブレーキノッチ入力がない時の既定BP圧（490kPa）からの減圧量をBC圧出力とした。3つ目の応荷重機能モデルは、車両が積載率によらずブレーキノッチごとに設定された減速度を発揮するようブレーキ力を調整するために、荷重変化に応じて最終的なBC圧を生成する要素を模擬している。作成したモデルを用いて、機関車1両（Loco）と、積載率をそれぞれ0%，50%，100%とした貨車3両（FC01～03）の4両編成車両における自動空気ブレーキシステムを再現し、一定ノッチのブレーキ指令を与えたシミュレーション結果を図3に示す。図3内のグラフより、作成したモデルは、ノッチ入力に応じたBP圧の減圧・増圧と、ブレーキ指令の伝達の遅れ、制御弁の応答と応荷重機能による各車両の積載率に応じたBC圧の出力を再現している。

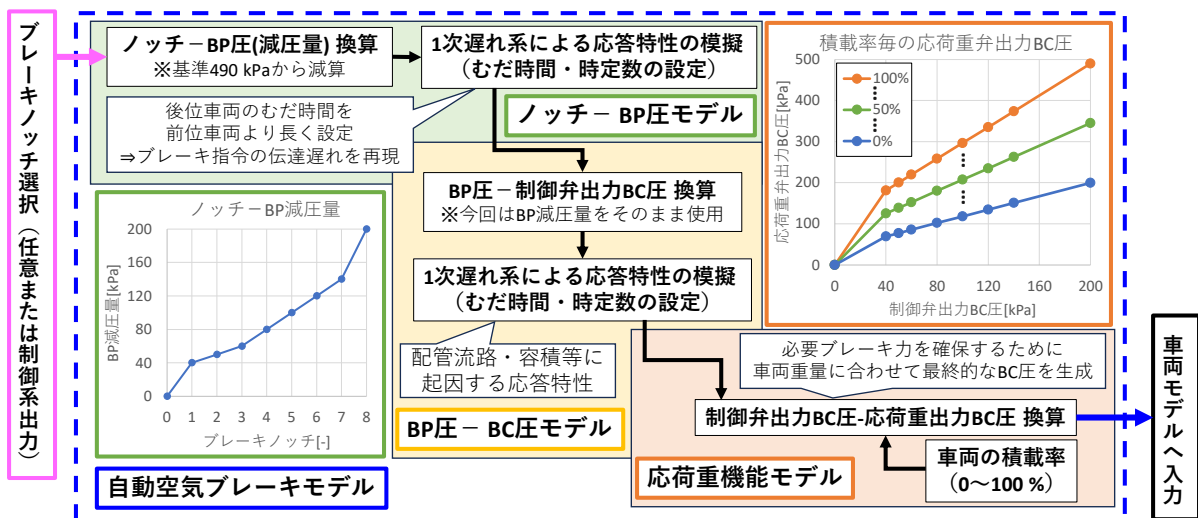


図2 自動空気ブレーキモデルの構成

自動空気ブレーキ：

編成に引き通した配管(BP)内の圧縮空気で指令を伝達するため、各車両のブレーキ動作に遅れがある ex. 貨物列車など

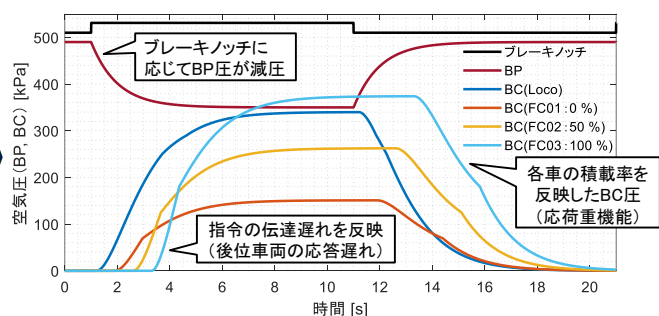
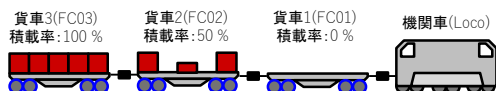


図3 自動空気ブレーキモデルのシミュレーション例

2.3 基礎ブレーキ装置およびブレーキ摩擦材のモデル

基礎ブレーキ装置およびブレーキ摩擦材モデルは、ブレーキシステムモデルが出力したBC圧を押付力に変換し、さらに押付力をブレーキ力に変換するモデルである。BC圧 P が基礎ブレーキ装置に入力された際に発生する押付力 F_p は式(1)で表される。ここで、 S はブレーキシリンダ面積、 τ はテコ比、 κ は機械効率であり、この押付力と摩擦材の摩擦係数 μ_f を用いてブレーキ力 F_b は式(2)で表される。図4にBC圧ーブレー

キ力変換の模式図を示す。一般的な摩擦材の特性の一つとして、速度が低下するにつれて摩擦係数が上昇する傾向が知られている。本研究では、低速でのブレーキシミュレーションにおける現車要素の再現として、文献4を参考に、摩擦係数 μ_f を式(3)および図5に示す車両速度 V_c の関数として定義した。

$$F_p = S \cdot \tau \cdot \kappa \cdot P \quad (1)$$

$$F_b = \mu_f \cdot F_p \quad (2)$$

$$\mu_f = \frac{1}{-0.0002V_c^2 + 0.0409V_c + 1.818} \quad (3)$$

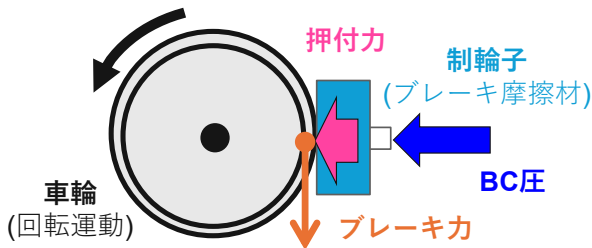


図4 BC圧-ブレーキ力変換の模式図

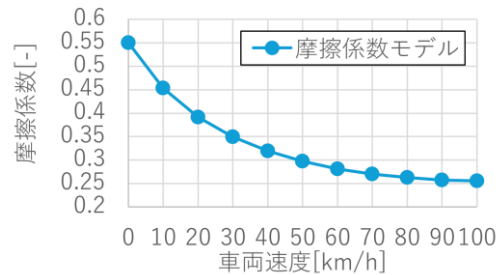


図5 摩擦材の摩擦係数モデル

2.4 一車両モデル

一車両モデルは、走行中の車両にブレーキ力を与え、車輪・レール間に接線力が発生することで、車両速度と車輪周速度が減速する運動を規定するモデルであり、平坦なレール上で車両前後方向の運動のみを考慮し、まくらぎ方向の運動は考慮しない。一車両4軸モデルの模式図と各記号の意味を図6に示す。減速運動に関わる数式を式(4)～式(6)で定義し、添字 i は軸位を表す。式(4)は車両の並進運動、式(5)は各輪軸の回転運動を表す。式(6)は接線力が接線力係数と各輪軸荷重の積であることを示す。接線力係数は、車輪・レール間のすべりやすさを規定する粘着条件のモデルとして考慮できるが、本報では滑走が生じないほど十分に余裕があるモデルとした。4軸が独立に運動し、4軸の接線力の合力で車両の並進運動が減速する。このとき、車両の端部に作用する連結器力として隣接車両から受ける力の授受を考慮した減速運動を表現する。後述する編成車両モデルでは、この一車両モデルで車両質量を可変として積載率を変化させた貨車のモデルと、車両質量を固定として軸数を6軸に拡張した機関車のモデルを用いる。

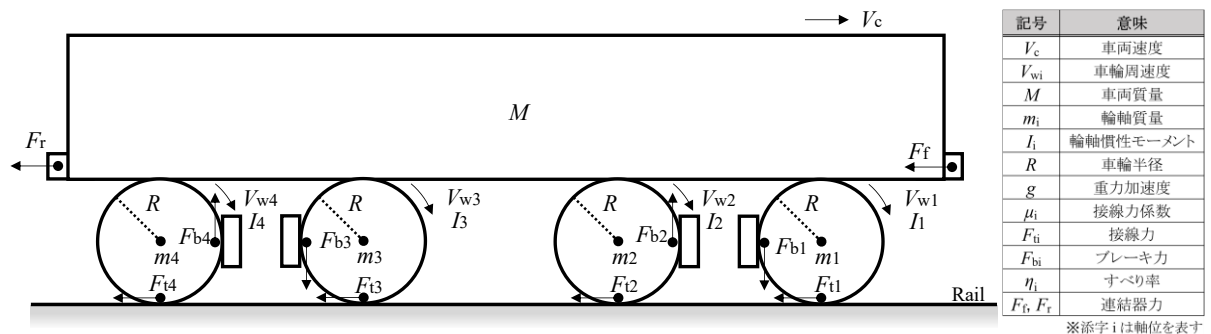


図6 一車両4軸モデル

$$(M + m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \frac{dV_c}{dt} = -(F_{t1} + F_{t2} + F_{t3} + F_{t4}) - (F_f + F_r) \quad (4)$$

$$\frac{I_i}{R} \frac{dV_{wi}}{dt} = F_{ti}R - F_{bi}R \quad (5)$$

$$F_{ti} = \mu_i \left(\frac{M}{4} + m_i \right) g \quad (6)$$

3. シミュレーション環境

構築したシミュレーション環境および編成車両モデルの構成とそれによる計算結果について述べる。

3.1 シミュレーション環境の構成と編成車両モデル

構築したブレーキシミュレーション環境の構成を図7に示す。2.1～2.4節で述べたモデルを統合して、機関車1両と貨車10両を連結した計11両の編成車両モデルを構築した。

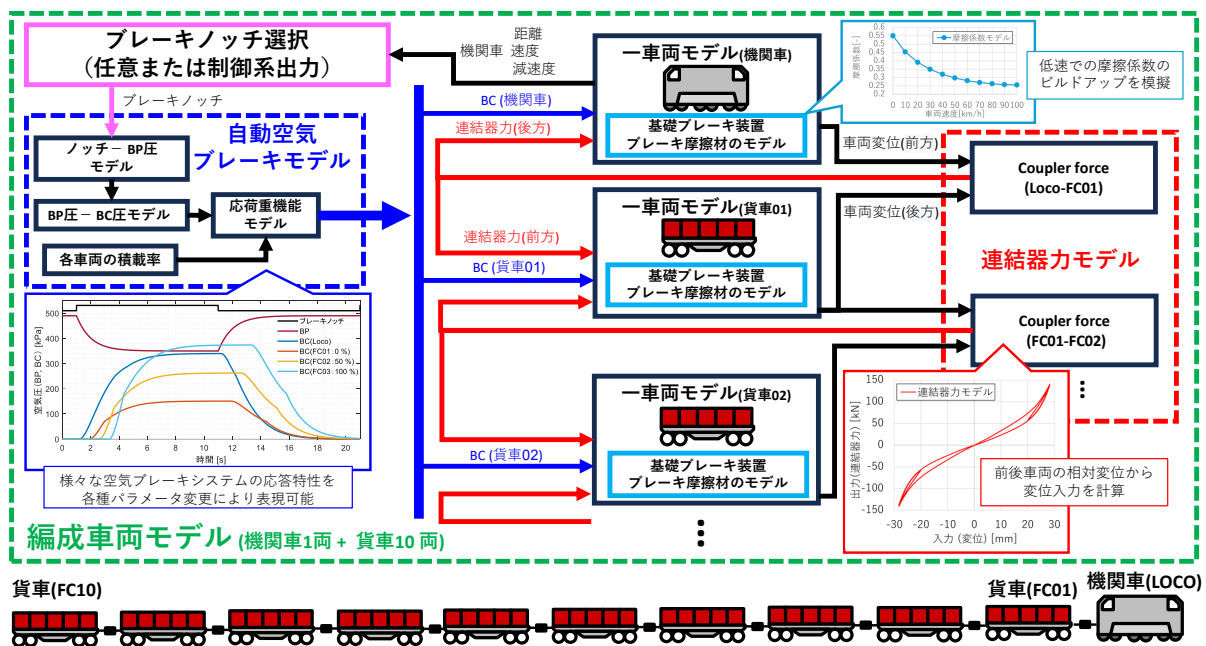


図7 シミュレーション環境の構成

機関車と貨車を模擬した2種類の一車両モデルの車両諸元を表1に示す。車両入換で想定される車両条件の再現として、2.2節の自動空気ブレーキモデルのパラメータを調整し、異なるブレーキ指令方式とブレーキ軸数をもつ3つの編成車両モデルを作成した。各編成車両モデルのブレーキシステムの設定を表2に示す。EPBモデルは各車へのブレーキ指令の伝達に遅延がほぼない電気指令式の空気ブレーキ（EPB：Electro-Pneumatic control Brake）を想定した設定、AABモデルは自動空気ブレーキ（AAB：Automatic Air Brake）を想定した設定である。IBモデルは機関車けん引車両などの再現として、編成の先頭車のみ単独にブレーキ（IB：Independent Brake）が作用するように、AABモデルで機関車のみブレーキが作用する形で模擬する設定とした。

3.2 計算結果

構築したシミュレーション環境において各編成車両モデルの一定ブレーキノッチによるブレーキシミュレーションを行い、各ノッチに対するブレーキ距離、減速度を確認した。貨物列車で想定される編成内の各車両重量の違いがブレーキ性能に与える影響を確認するために、各貨車の積載率の条件として表3に示す6パターンを設定した。条件1,2では、各貨車に均等にそれぞれ100%, 50%の積載率を設定した。条件3~6では、全貨車の平均積載率が50%としつつ、貨車ごとに異なる積載率を設定した。

表1 一車両モデルの車両諸元の設定

モデル	意味	数値	単位
共通	車輪半径	0.43	m
	重力加速度	9.8	m/s ²
機関車 (LOCO)	車両全体質量 (車両 + 全輪軸)	96000	kg
	輪軸慣性モーメント (6軸共通)	250	kgm ²
	BC圧力からブレーキ力への変換係数《式(1)および(2)》※	43.6	N/kPa
貨車 (FC)	空車 車両全体質量 (積載率: 0%)	18700	kg
	満車 (積載率: 100%)	59200	
	輪軸慣性モーメント (4軸共通)	160	kgm ²
	BC圧力からブレーキ力への変換係数《式(1)および(2)》※	35.9	N/kPa

※ 摩擦材の摩擦係数《式(3)》が0.3の時

表2 各編成車両モデルのブレーキシステムの設定

モデル	BPによるブレーキ指令伝達の むだ時間	BP-BC間のむだ時間	
		機関車	貨車
EPB	0 [s]	0.2 [s]	0.4 [s]
AAB	0.5 * (n-1) [s] ※		
IB	なし (機関車のみブレーキ)		なし

※ n: 列車進行方向前側からの両数

表3 6つの積載条件における各貨車の積載率の設定

積載条件	各貨車(FC)の積載率[%]										
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	平均
No.1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
No.2	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
No.3	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	50
No.4	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	50
No.5	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	50
No.6	95	85	75	65	55	45	35	25	15	5	50

各編成車両モデルにおいて1~8ノッチの一定ブレーキによるシミュレーションを、初速度(15, 30km/h)、積載条件(1~6)を組み合わせた条件で行った。MATLAB/Simulinkを用いて環境構築し、シミュレーションの時間刻みは5msとした。各編成車両モデルのシミュレーション実施例を図8に示す。各図グラフは上段が各車両速度、中段が各車両内の輪軸に作用するブレーキ力の総和、下段が各車両間の連結器力のそれぞれ時系列波形であり、機関車と貨車の6両(連結器力は5箇所)の抜粋である。連結器力の符号は変位入力が増加する(連結装置が圧縮され、前後車両を押し返す力が作用する)場合を負、増加する(連結装置が伸長し、前後車両を引き寄せる力が作用する)場合を正とした。

図 8 では、ブレーキシステムの違いと、連結器力による車両ごとに異なる挙動の影響を反映し、編成車両モデルによって各車両のランカーブが異なる。また、ブレーキ摩擦材の摩擦係数の速度依存性を再現したことにより、減速するにしたがってブレーキノッチが一定でもブレーキ力が大きくなる。さらに、連結器力は、編成車両内のブレーキの応答特性やブレーキ軸数の違いを反映した定性的な傾向を再現している。

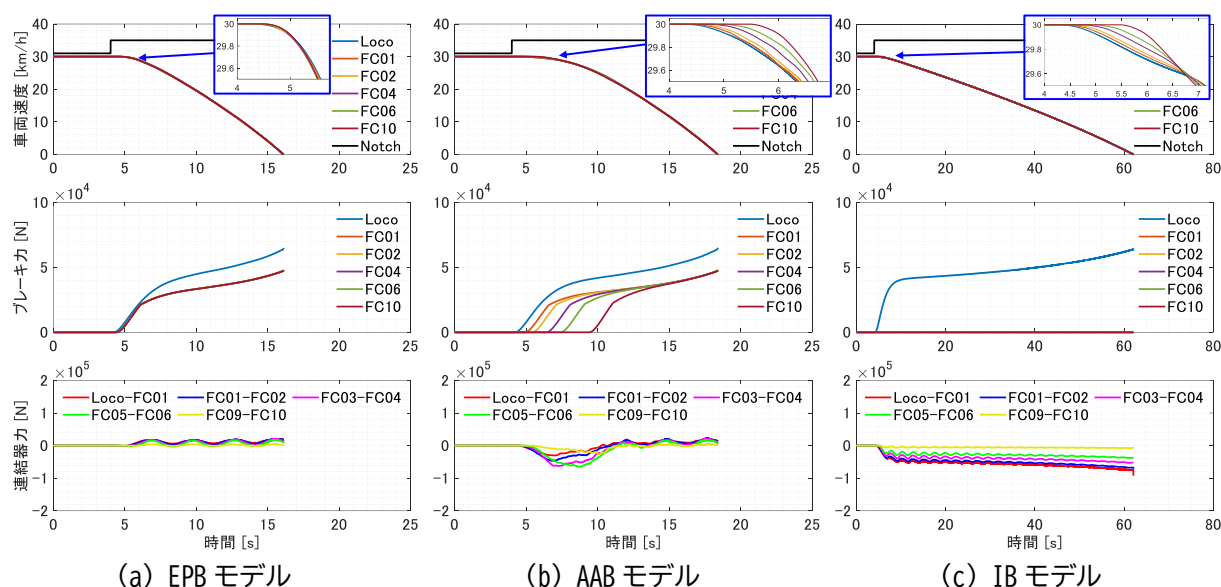


図 8 各編成車両モデルのシミュレーション実施例（積載条件 2，初速 30km/h，4 ノッチ）

ブレーキ 4 ノッチ条件のシミュレーション結果より、各編成車両モデルの各初速度、積載条件に対するブレーキ距離と減速度を図 9 に示す。減速度は、ブレーキ開始から停止までの空走を含む全ブレーキ距離と初速度を用いて算出した距離基準平均減速度である。図 9 より、EPB モデルでは積載条件によらず安定したブレーキ性能を発揮した一方、AAB モデルではブレーキの応答特性と積載条件に起因して同一ノッチであってもブレーキ性能が変動した。IB モデルでは初速度 15km/h と 30km/h における減速度がほぼ同等となった。これは、IB モデルは他の編成車両モデルに比べブレーキ距離および時間が長いいため、相対的に摩擦係数が小さい速度域にある時間が長くなるためである。また、IB モデルは他のモデルに比べてブレーキ軸数が少ないため、積載条件 1 では顕著にブレーキ性能が低下した。

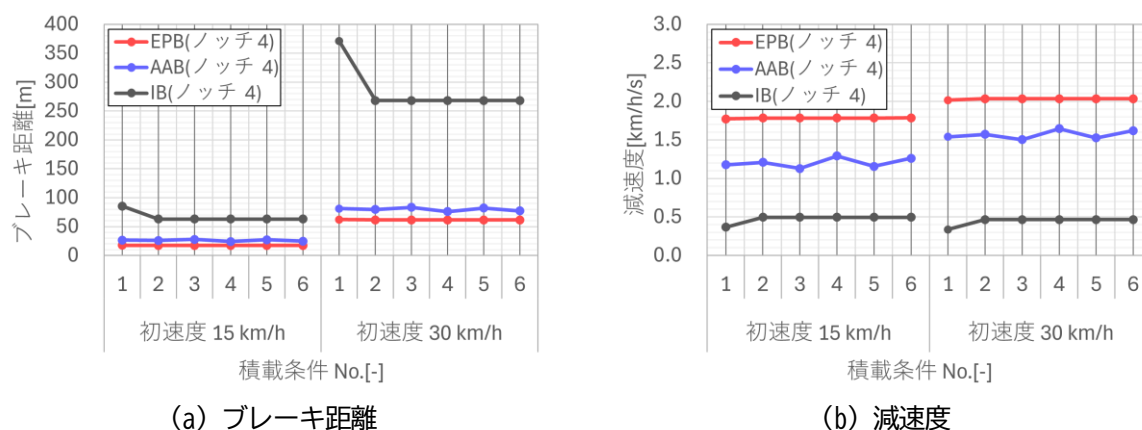


図 9 各編成車両モデルのブレーキ性能（4 ノッチ時）

4. 車両入換条件下での定位置停止制御シミュレーション

本章では構築したシミュレーション環境を用いた定位置停止制御（TASC）シミュレーションを行い，車両入換で想定される3つの編成車両モデルに対する既提案手法の適用可能性を確認する。

4.1 定位置停止制御系の設計

3章の各編成車両モデルに対して定位置停止制御系を設計した。制御手法には距離基準減速度制御³⁾を適用し，PI制御器とスミス補償器を用いて構成した。スミス補償器に必要な制御対象のモデルは，3.2節に示した各編成車両モデルの積載条件2～6（積載率の平均が50%となる5つの条件）における各ブレーキノッチの平均減速度の平均値を使用したノッチ入力ー減速度出力の関係と，ブレーキシステムのモデルと同じ時定数の1次遅れ系とむだ時間（本報では貨車のBP-BC圧間のむだ時間0.4sを適用）を組み合わせで表現した。TASCシミュレーションでは，編成車両モデルごとに参照するノッチ入力ー減速度出力の関係のみを変更し，その他の制御系の設定は共通とした。

距離基準減速度制御による停止位置の精度がブレーキノッチ段数によって変化する⁵⁾ことから，本報においても，既定で8段のノッチを指定した値で等分し，最大24段までノッチ段数を細分化する機能を設けた。また，自動空気ブレーキ式車両などでは，ノッチ入力に対するブレーキ力の応答特性を考慮して，編成車両の減速度が安定するまで一定時間ノッチを維持する運転操作を行う場合がある。本報ではこれを制御上の制約の一つとして模擬することとして制御器出力にゼロ次ホールドを挿入し，シミュレーション時間を基準にブレーキノッチ出力のサンプリング時間を変更することで，任意の時間ノッチを保持する機能を設けた。

4.2 シミュレーション条件の設定

図7のシミュレーション環境におけるブレーキノッチ選択ブロックの設定を4.1節で設計した制御系に置換してTASCシミュレーションを行った。本報で適用するTASCのためのブレーキノッチ選択ブロックの内部を図10に示す。目標停止距離は，図9に示した初速度30km/h，積載条件2～6における4ノッチのブレーキ距離に約10%を加えた，各編成車両モデルのブレーキ性能に余裕をもたせた値として，EPBモデルで70m，AABモデルで90m，IBモデルで300mとした。各編成車両モデルにおいて，初速度(15,30km/h)，積載条件(1～6)，制御器のノッチ保持時間(1,2,4s)，制御器のノッチ段数(8,16,24段)を組み合わせた全108パターンのシミュレーションを行った。

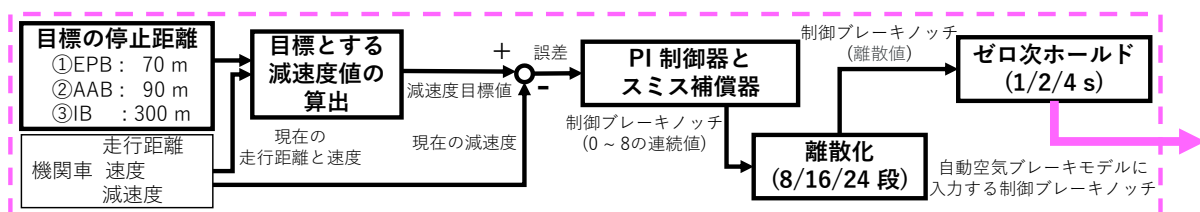


図10 定位置停止制御系のブロック線図

4.3 結果

各編成車両モデルのTASCシミュレーション結果の例を図11に，すべての結果による目標停止距離に対する誤差（停止距離誤差）の分布と各パラメータの関係を図12に示す。図12内の各グラフの横軸は，停

止距離誤差の分布（0.5m 刻み）で、最上段はヒストグラムである。負値の誤差は目標位置より手前で停車した場合を表す。誤差が-15m 以下となった結果はまとめてカウントし、5m を超えた結果は制御不良（×）としてカウントした。2～5 段目のグラフは各パラメータ（初速度、積載条件、ノッチ保持時間、ノッチ段数）と停止距離誤差との2変量ヒストグラムであり、頻度をカラーバーで表している。

図 12 の初速度と停止距離誤差との2変量ヒストグラムより、いずれの編成車両モデルにおいても、初速 30km/h に比べ 15 km/h の条件で制御性能が低下し、目標地点より手前に停止する傾向を示した。これは、本報では初速度 30km/h におけるブレーキ性能に基づき制御系を設計したことと、摩擦係数の速度依存性により同じノッチでも速度低下に伴いブレーキ力が大きくなることから、停止直前の低速域で適切なノッチ選択およびブレーキ力の調整ができなかったためと考えられる。

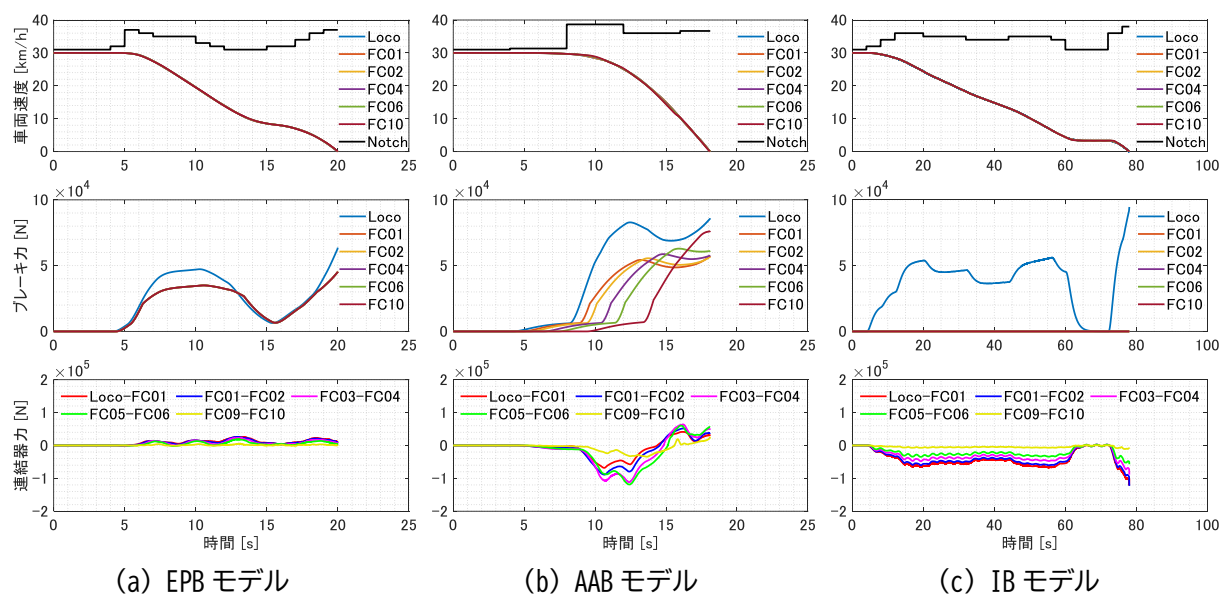


図 11 各編成車両モデルの定位置停止制御シミュレーション実施例

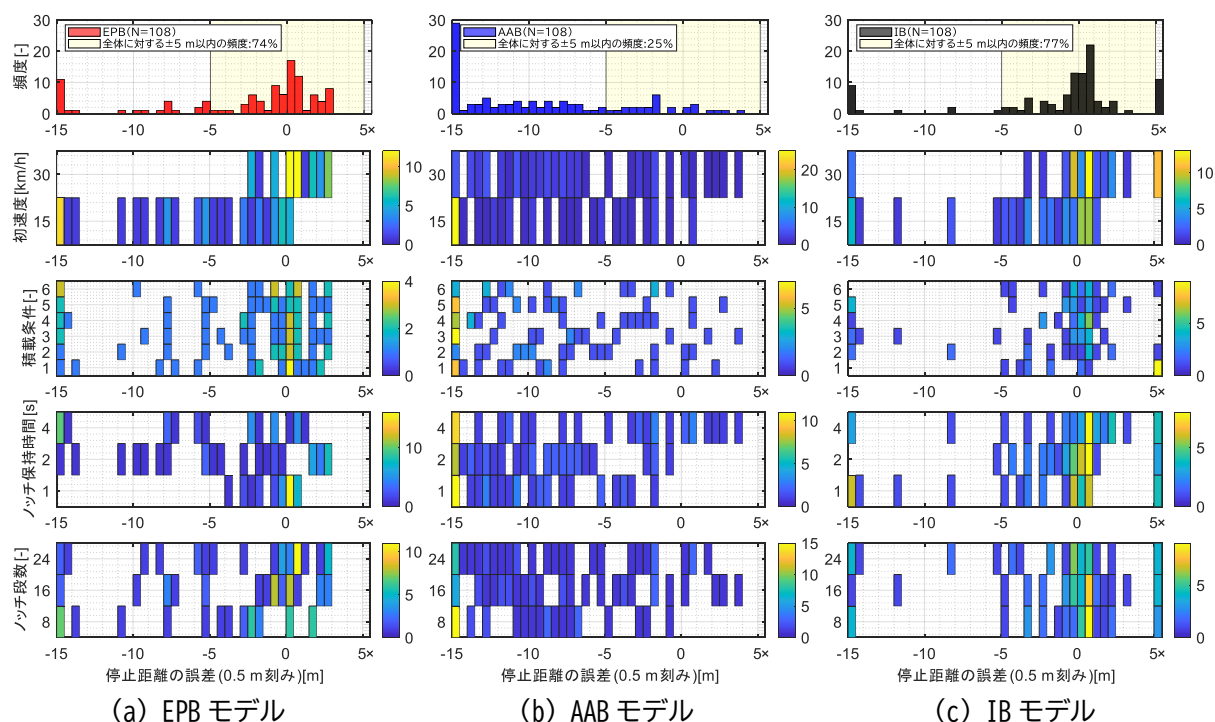


図 12 定位置停止制御シミュレーションにおける停止距離の誤差分布と各パラメータとの関係

編成車両モデルに着目すると、図 12(a)の EPB モデルでは、誤差の分布に対し積載条件の影響はほぼなかった。また、ノッチの保持時間が短く、段数が多いほど誤差分布が 0 に近づいており、ノッチ選択の自由度が停止距離の制御性能に影響する傾向が確認できた。一方、図 12(b)の AAB モデルでは、誤差-15 m 以下の分布が全体の 27%を占めたことから目標地点より手前に停止する傾向が強く、積載条件 1 と後位車両の積載率が相対的に高い積載条件 3, 5 でその頻度が高かった。また EPB モデルとは異なり、ノッチ保持時間が長いほど誤差分布が 0 に近づく傾向を示した。AAB モデルでは、ブレーキの応答特性と積載条件により、各車両が発揮するブレーキ力とその応答順序が異なることから、ノッチ操作および目標減速度に対する編成車両の減速度の追従性が変化する。本報の結果から、自動空気ブレーキ式車両に対する TASC の設計では、目標減速度に到達するまで選択したノッチを適切に維持する手法を構築することが、停止距離の精度向上に繋がると考えられる。図 12(c)の IB モデルでは、制御不良が全体の 10%を占め、積載条件 1 かつ初速度 30km/h の場合で特に頻度が高かった。また EPB モデルとは異なり、ノッチの保持時間や段数の違いによる可制御性への明瞭な影響は確認できなかった。本報の結果から、ブレーキ軸が少ない IB モデルの場合、編成車両に負荷できるブレーキ力が小さいため、調整可能な編成の減速度の量がノッチ段数に関わらず小さくなることから、ノッチ選択の自由度が制御性能に与える影響は相対的には少ないと考えられる。ただし、絶対的なブレーキ力が小さいため、ブレーキ開始直後からただちに適切なノッチを選択できなければ逸走する可能性が高まる。よって、機関車けん引車両に対する TASC の設計では、ブレーキ開始直後のブレーキノッチを高めに選択し目標地点前までに十分減速するなど、確実な停止機能の実装が重要と考えられる。

以上より、車両入換を想定した 3 つの編成車両モデルに対する TASC シミュレーションを行うことで、車両入換条件下における既提案手法の適用可能性を確認できた。

5. まとめ

本研究では、車両入換におけるブレーキ操作の自動化のためのブレーキ制御手法の検討、性能評価を行うために、車両入換で想定される車両条件・制約を再現可能なブレーキシミュレーション環境を構築した。構築した環境において、電気指令式空気ブレーキ車両を対象とした先行研究の既提案手法である距離基準減速度制御を、車両入換条件を模擬した編成車両モデルに適用し TASC シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、車両入換にて想定される自動空気ブレーキ式車両やブレーキ軸数の少ない機関車けん引車両では、既提案手法による停止距離の制御性の低下や逸走が確認され、停止距離精度向上にはブレーキシステムの特性に合わせた適切なノッチ選択が可能な制御系設計が必要であることがわかった。

今後は、構築したシミュレーション環境内の各要素モデルを精緻化するとともに、現車試験によるシミュレーション環境の精度検証も進めることで、車両入換を対象とした定位置停止制御手法の開発のための検討を進める。

なお本稿は、文献 6 の第 14 回世界鉄道研究会議の会議論文集の内容を編集して転載したものである。

文 献

- 1) JR 東日本：新幹線にドライバレス運転を導入します，JR 東日本 HP ニュースリリース，2024 年 9 月 10 日
- 2) JR 九州：2024 年 3 月 16 日より 2 つの「自動運転」を開始します！～香椎線 GOA2.5 自動運転開始，鹿児島本線 自動列車運転支援装置の実証運転開始～，JR 九州 HP ニュースリリース，2024 年 2 月 22 日
- 3) 中澤伸一：減速度フィードバックの機能追加によるブレーキ距離精度の向上，鉄道総研報告，Vol.34，No.12，pp.11-16，2020
- 4) 運転理論研究会：運転理論（再改訂版），日本鉄道運転協会，p.77，2010

- 5) Shin-ichi, N., “Effect of the number of control command steps in brake system with deceleration feedback loop structure on accuracy of train stop position”, 13th World Congress on Railway Research (WCRR 2022), Birmingham, UK, June 6-10, 2022.
- 6) Yuta, K., Kohei, M., Shin-ichi, N., “Simulation-based verification of braking distance controllability under shunting trains conditions”, 14th World Congress on Railway Research (WCRR 2025), Colorado Springs, USA, November 17-21, 2025.

大型低騒音風洞を模擬する数値風洞の開発と
ビル風問題への適用例中出 孝次* 中野 宏章* 阿部 巧*
井門 敦志** 井上 達哉*

Development and Application of a Numerical Simulation for a Large-Scale Low-Noise Wind Tunnel

Koji NAKADE Hiroaki NAKANO Takumi ABE
Atsushi IDO Tatsuya INOUE

This study presents a numerical wind tunnel that replicates the airflow environment of the Maibara Large-Scale Low-Noise Wind Tunnel at the Railway Technical Research Institute. The tool integrates detailed geometric modeling using a 3D laser scanner with high-fidelity flow simulations performed on the RTRI's computational platform. Validation against physical wind tunnel tests demonstrated a strong consistency in airflow characteristics. By reducing the number of required test conditions and measurement points, this numerical tool enhances the efficiency and accuracy of wind tunnel testing. When used alongside conventional experiments, it accelerates research workflows and provides a complementary means for investigating aerodynamic issues.

キーワード：数値風洞，空気流シミュレータ，直交格子法流体解析，ラージ・エディ・シミュレーション，風洞実験，ビル風

1. はじめに

鉄道総研の大型低騒音風洞（滋賀県米原市に設置）は、1996年の稼働開始以降、鉄道の空気力学や空力音に関する研究など、多くの空力現象の解明における重要な研究開発ツールとして活用されている。しかし、多数の実験課題への対応の必要性や風洞を稼働させるコスト面での制限などにより、一つの実験課題において長期間の実験実施による占有や頻繁な実験条件変更への対応は困難である。そこで、実験条件の補完や間引き、実験誤差の把握、さらには実験自体の実施が困難な条件に対する検討を計算と連携しながら進めることで、風洞実験の効率化および高度化を実現するための数値解析ツールとして、大型低騒音風洞の気流を数値シミュレーションで再現する「数値風洞」を開発した。

このような数値風洞を構築する取り組みは、鉄道総研以外でも、航空・宇宙分野、自動車分野、建築分野など、大型風洞を有するいくつかの組織で進められている^{例えは 1) 2) 3)}。代表的なものとして、宇宙航空研究開発機構（JAXA）による DAHWIN（デジタル／アナログ・ハイブリッド風洞，Digital/Analog-Hybrid Wind Tunnel，ダーウィン）が挙げられる。これは EFD（Experimental Fluid Dynamics，実験流体力学）と CFD（Computational Fluid Dynamics，計算流体力学）がそれぞれの弱点・技術課題を相補的に解決するとともに、EFD と CFD の各データを統一的に生産・管理して対等な比較検証が可能なプラットフォームを整備することにより、風洞実験と数値シミュレーションの両者の有用性を向上させ、航空・宇宙機的设计時間／コスト／リスクの低減，設計データ精度／信頼性の改善を行うことを目指して開発されたものである¹⁾。

鉄道総研で開発する数値風洞のコンセプトは、鉄道分野を想定する大型低騒音風洞の特徴をそのまま引

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

** 元 風洞技術センター

き継ぎ、開放型測定部および密閉型測定部のそれぞれに対応した風洞の気流を再現することと定める。特に、CFD の専門家でなくても容易に計算を実行できるような仕組みとして計算格子の作成が容易な直交格子法に基づく流体解析方法の採用、現実的な時間で計算を進めるための風洞形状のモデル化および計算格子数削減のための壁面近傍の計算モデルの採用などが特徴となっている。また、本報告では触れないが、数値風洞における実験供試体の形状データの作成過程において三次元レーザースキャナーを採用し、点群データを用いた形状表現も利用できるように工夫している⁴⁾。これにより、数値風洞の運用において、実験供試体の計算モデル作成から流体計算まで一気通貫で実施できるシステムとなり、数値風洞の運用の効率化を実現している。

本報告では、数値風洞モデル、数値風洞の計算方法、数値風洞による風洞気流の再現結果とともに、数値風洞の適用例を示す。

2. 大型低騒音風洞の気流を再現する数値風洞の構築

2.1 数値風洞モデル

大型低騒音風洞⁵⁾の気流を再現するための数値風洞モデルを作成した。大型低騒音風洞には3つの風洞形態がある。開放型測定部・3m×2.5m ノズル、開放型測定部・5m×3m ノズル（前方胴）、密閉型測定部・5m×3m 断面の3つである。本節では、開放型測定部・3m×2.5m ノズルを用いた風洞試験に対応した数値風洞モデルを示す。なお、開放型測定部・5m×3m ノズル（前方胴）の形態は同様の考え方で構築している。また、密閉型測定部は断面積がわずかに変化する筒で構成している。

開放型測定部を用いる風洞は、ノズル、支持台車、コレクタの3つから構成される。ここでは、ノズルから吹き出す風洞気流を再現することが目標になる。実物のノズルは、流路断面が徐々に小さくなる狭まり管であるとともに、ノズル内壁は柔毛材によるムートン加工が施されており、複雑で微細な形状となっている。数値風洞モデルでは、このような形状を忠実に再現するのではなく、できるだけ単純な方法で、ノズル吹き出し位置の流速分布を再現することを目指した。作成した数値風洞モデルを図1に示す。ノズル内壁および外壁の上流部には立方体のブロック列を配置するとともに、流入境界面では境界層厚さをもつ気流を設定することで、乱流境界層が生成されるようにした。また、ノズル外の流入境界面からは伴流に相当する風を流入させた。以上に示す、ブロック、境界層厚さ、伴流流速の3つをパラメータとして調整することで、大型低騒音風洞のノズルから吹き出す気流を再現した。

数値風洞の計算領域を図2に示す。計算領域は、主流方向に15m、水平方向に20m、鉛直方向に14mとし、ノズルおよびコレクタを含む無響室全体とした。これは、風洞気流の端部の一様でない気流の影響までを考慮することで、風洞気流に対する供試体の閉塞効果など、数値風洞で風洞実験を忠実に再現できるようにするためである。計算格子分布を図3に示す。計算格子分布は見やすくするために4点おきに間引いて表示している。計算格子は直交不等間隔格子とし、ノズル断面を主流方向に延長したすべての領域で計算格子間隔が密（主流方向の格子間隔20mm、主流に直交方向の格子間隔10mmの等間隔格子）となるように設定した。これは、計算格子間隔が密となる領域をできるだけ広く設定することで、供試体の設置位置によらず同一の計算格子で計算できるようにするためである。計算格子数は、主流方向750点、水平方向576点、鉛直方向512点の合計約2.2億点とした。なお、計算コストは大きくなるが、計算精度を重視する場合には、供試体付近の計算格子をさらに密にすることで計算精度の向上をはかることが可能である。

境界条件を次に示す。流入境界面で速度固定境界条件、流出境界面のコレクタ内部で対流流出境界条件、コレクタ外部で速度固定境界条件、水平方向および鉛直方向の遠方境界面で対称境界条件とした。物体の

壁面境界条件はすべりなし境界条件としたが、壁面近傍の計算格子数を節約し、計算時間を短縮するために、次節に示す壁関数を用いた。

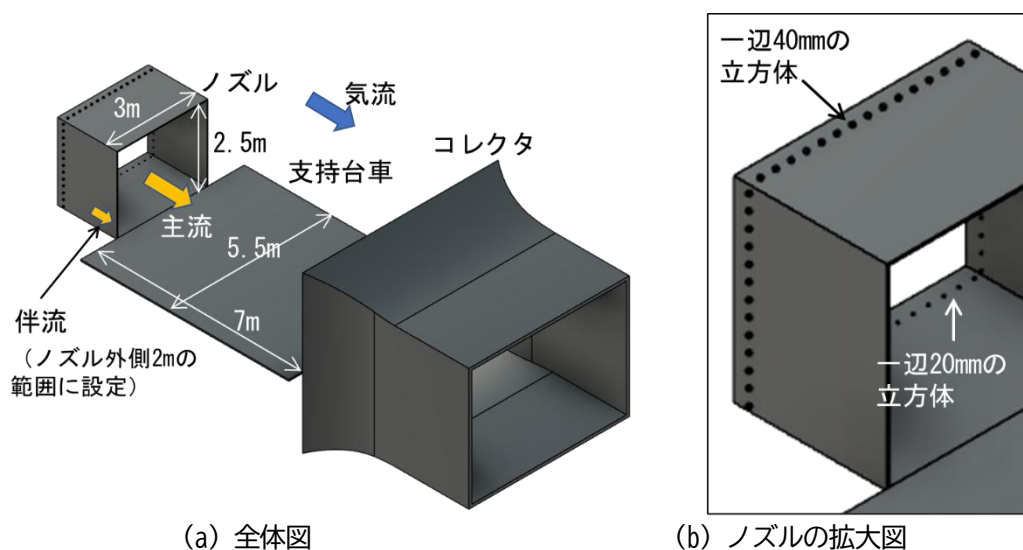


図1 数値風洞モデル（大型低騒音風洞の開放型測定部）

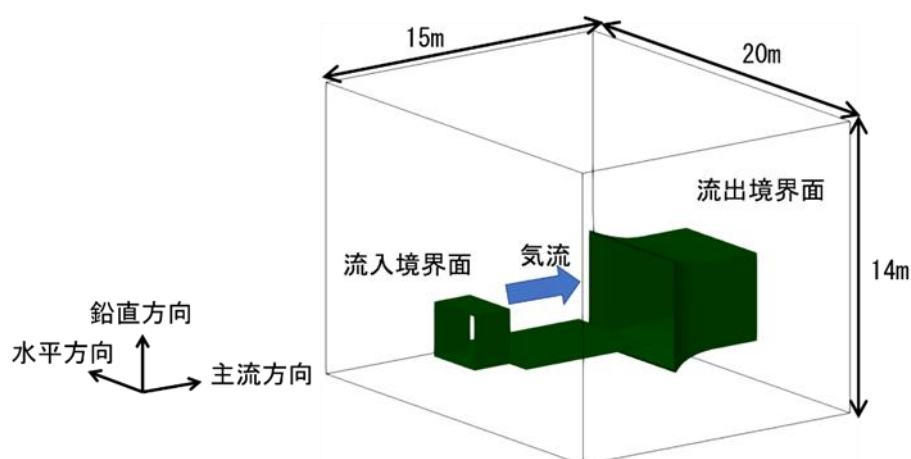


図2 数値風洞の計算領域（無響室）

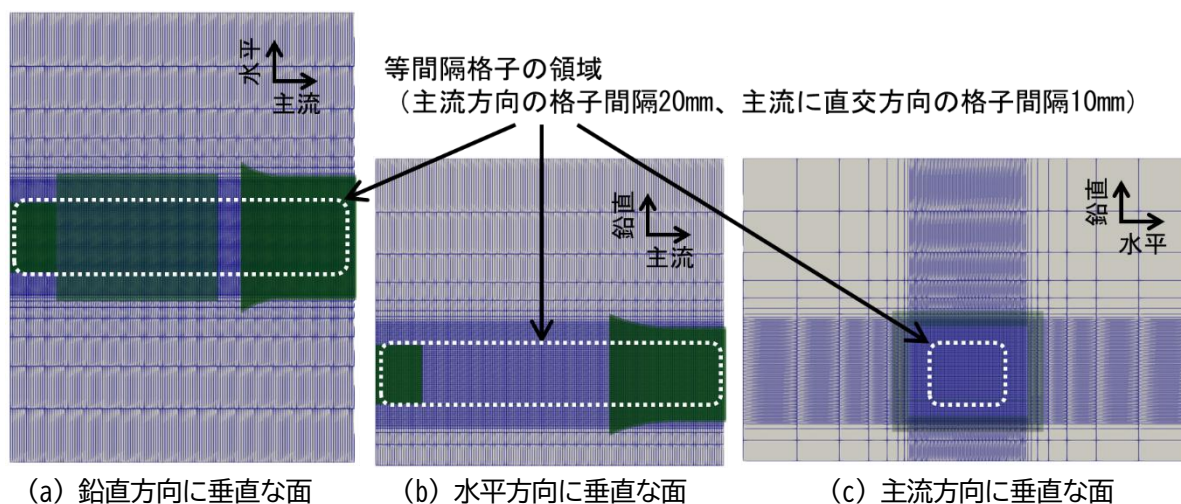
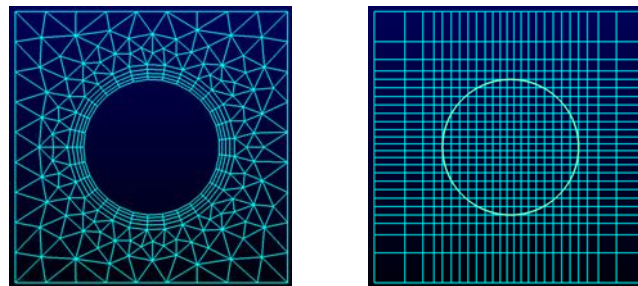


図3 数値風洞の計算格子（4点毎に間引きして表示）

2.2 数値風洞の計算方法

2.2.1 空気流シミュレータの概要

数値風洞における流体解析ソフトウェアには、鉄道総研で開発している「空気流シミュレータ⁶⁾」を用いる。空気流シミュレータは直交格子法に基づく流体解析方法を採用していることに特徴があり、通常の流体解析（商用の流体解析ソフトウェア）で必要となる計算格子作成作業を大幅に簡略化できるため、特に複雑形状を対象とした流体シミュレーションには有用な解析ツールとなっている（図4）。なお、物体形状表現の精度は通常の流体解析で用いられる境界適合格子よりも低くなるが、十分な計算格子数を用いることで、例えば高レイノルズ数の円柱に生じるドラッグクライシス現象（抗力が急減する現象）などを良好に再現できることを確認している。また、直交格子を基本としたシンプルな計算アルゴリズムの採用により、大規模並列計算において、高い並列計算効率を得られている。現在までに空気流シミュレータは、横風、パンタグラフ、車両周りの流れ、車内換気など、鉄道に関する様々な空気流のシミュレーションに適用されてきた^{例えば7)}。



(a) 境界適合格子

(b) 直交格子

図4 円柱周りの流れを計算するための計算格子の例

基礎式は非圧縮性流体の連続の式とナビエ・ストークスの式であり、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）により非定常乱流解析を行う。代表速度を V 、代表長さを W 、空気密度を ρ 、空気の動粘性係数を ν とし、速度を V 、圧力を ρV^2 で無次元化すると、LES の基礎式は以下ようになる。ここで、 $u_i=(u_1, u_2, u_3)$ と p は、LES における無次元化された速度（主流方向成分、水平方向成分、鉛直方向成分）と圧力とする。また、 $Re=VW/\nu$ はレイノルズ数である。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、 τ_{ij} は LES における粗視化によって生じた量であり、空気流シミュレータではコヒーレント構造スモグリンスキーモデル⁸⁾を用いて計算する。

数値計算では、物理量の定義点をスタッガードに配置（圧力：計算格子中心、速度：計算格子界面）し、空間の離散化には直交不等間隔格子に適した二次精度の中心差分法⁹⁾を用いる。速度と圧力のカップリングにはフラクショナル・ステップ法を用い、三次精度のアダムス・バッシュフォース法に基づく時間進行をおこなう。計算における物体形状の表現は、直交格子法のボクセル型手法（計算格子セル単位で流体と固体を区別）とする。

2.2.2 壁面境界条件モデル

壁面近傍の流れは、壁面の流速ゼロから急激に増加するため、精度よく流体計算を行うためには、壁面近傍に細かな計算格子が必要になる。また、このような細かな計算格子間隔の要求は、流速が増加するにしたがって、より厳しくなる。基本的な流れに対しての見積もりではあるが、必要な計算格子数は流速の1.8乗に比例することが知られており、流速増加とともに膨大な計算格子が必要になる。そこで、数値風洞では、壁面近傍を細かな計算格子で解くのではなく、粗い格子のままモデル化して扱うことにする。これは、数値風洞では計算時間を短縮することを第一と考えているためである。

壁面近傍の流れのモデル化として、最も基本的な手法である「壁関数」に基づく方法¹⁰⁾を数値風洞に導入した。この方法では、壁面に近接した速度はある境界層の速度分布（関数式）に対応していると仮定し、この境界層分布から解析的に壁面の摩擦応力を算出することで、流体計算を進めるものである。数値風洞では、境界層分布としてスポルディング則と呼ばれる関数式を採用した。

数値風洞に実装した壁関数の検証計算例を示す。計算対象は、編成車両模型の屋根上の境界層流れである。計算結果の検証のための風洞実験の様子を図5に示す。計算モデルを図6に示す。計算格子数は主流方向2420点、水平方向546点、鉛直方向550点とした。計算格子の最小格子間隔は1mmとした。

計算結果と実験結果の比較を図7に示す。図7(a)は、壁関数を用いない場合の計算結果で、図7(b)は壁関数を用いた場合の計算結果である。いずれの計算も計算格子は同一である。図7(a)では、計算格子不足により、計算結果と実験結果には若干の乖離が見られる。一方、図7(b)では、壁関数を用いて計算格子不足を解消できたため、計算結果と実験結果は良好に一致した。これより、数値風洞に実装した壁面境界条件モデルの妥当性を確認できた。

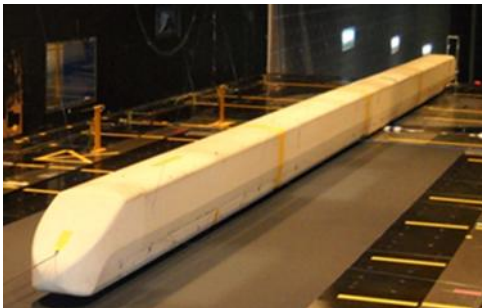


図5 車両の屋根上流れの風洞実験

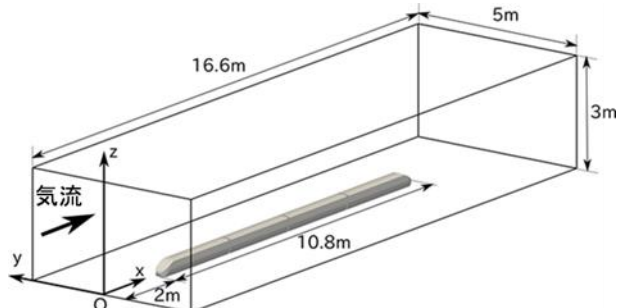
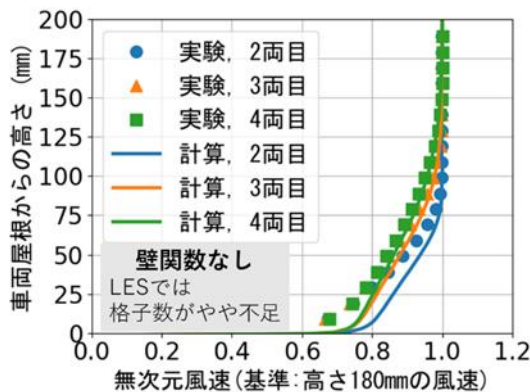
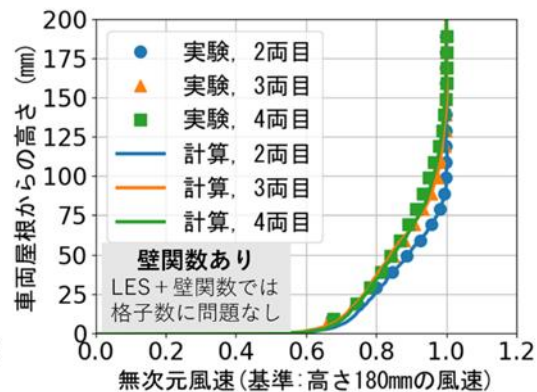


図6 計算モデル



(a) 壁関数なし



(b) 壁関数あり

図7 車両の屋根上流れの流速分布について計算と実験の比較

2.3 数値風洞の計算結果

2.3.1 開放型測定部の流速分布の検証結果

風洞気流 50m/s における数値風洞の計算結果を示す。流れの様子として、渦構造の可視化を図 8 に示す。図の画角からは判別できないがノズル中心付近の流れは乱れのない一様流となる。そして、ノズル壁面付近からの流れは、ノズル外の流速がゼロに近い流れとノズル内の高速流れ（風洞気流 50m/s）の境界に形成される混合層流れにより、大きな乱れが発生している。

開放型測定部のノズルーコレクタ間流れの気流特性について、計算結果と風洞実験結果を比較する。瞬時の流速コンターを図 9 に示す。図 9 に記載する水平方向に延びる 2 本のライン上（混合層）の平均流速と変動流速について計算と実験を比較した（図 10）。また、図 9 に記載する鉛直方向に延びる 2 本のライン上（支持台車上の境界層）の平均流速と変動流速について、計算と実験を比較した（図 11）。水平方向の平均流速および変動流速分布について良好な一致が確認できる。また、鉛直方向の平均流速分布についても良好な一致が確認できるが、変動流速については壁面近傍において若干の差異が見られる。これは壁関数モデルによるものであり、平均流速を合わせることはできても変動流速まで合わせることは難しい。なお、壁面近傍から離れた領域では良好な結果が得られている。

数値風洞の計算は、鉄道総研のスパコン（Cray 製、XC50）の 20 ノード（全ノード数 262 ノード）を用いたときに、一様流の初期値から流速分布の統計量を算出するまでに要した計算時間は約 8 時間であった。

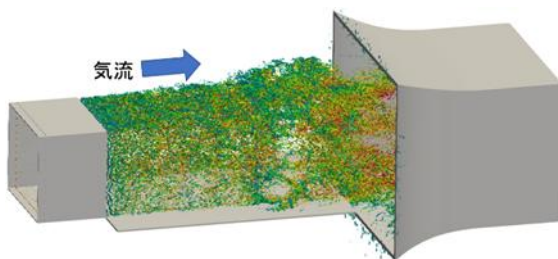


図 8 渦構造の可視化（色：流速の大きさ）

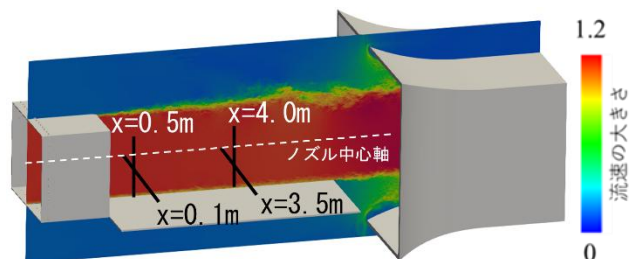
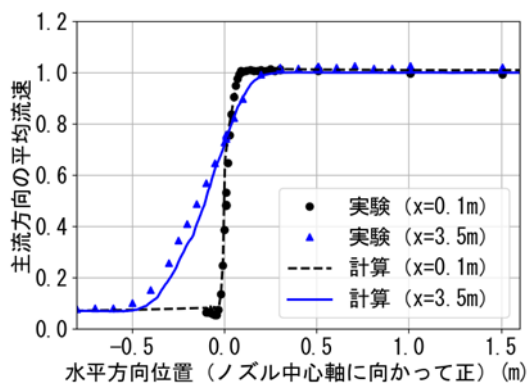
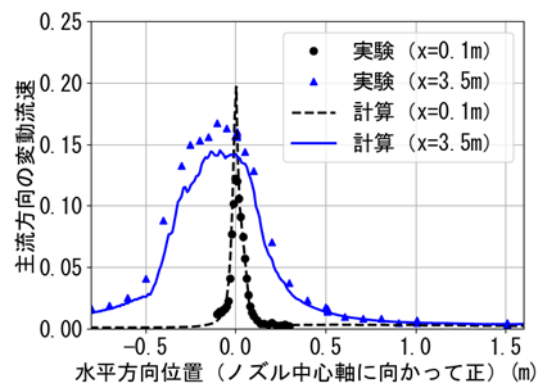


図 9 瞬時の流速コンター（無次元）

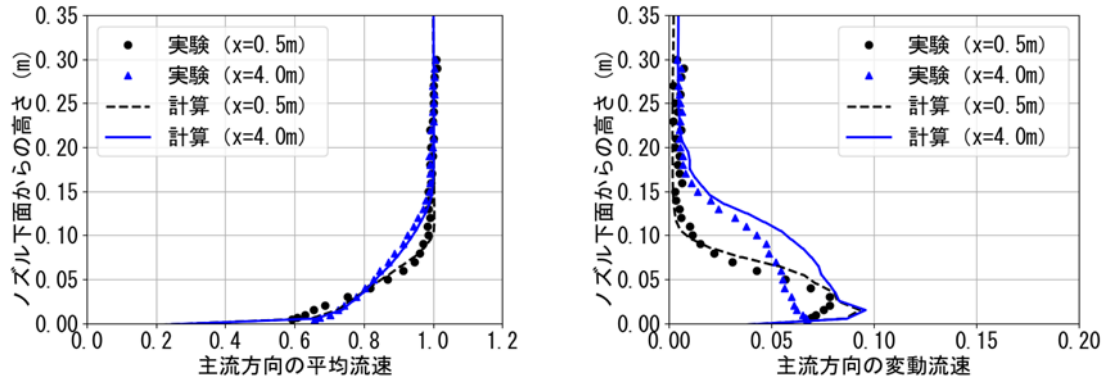


(a) 主流方向の平均流速（無次元）



(b) 主流方向の変動流速（無次元）

図 10 高さ方向ノズル中心位置における水平方向の流速分布（混合層）



(a) 主流方向の平均流速（無次元）

(b) 主流方向の変動流速（無次元）

図 11 水平方向ノズル中心位置における鉛直方向の流速分布（支持台車上の境界層）

2.3.2 支持台車を下げた条件における開放型測定部の流速分布の検証結果

パンタグラフの風洞実験等，実験供試体の下部が風洞気流に当たらないように支持台車を下げて実験する場合がある．支持台車を 880mm 下げた場合の開放型測定部のノズルーコレクタ間流れの気流特性について，計算結果と風洞実験結果を比較する．渦構造の可視化を図 12 に示す．瞬時の流速コンターを図 13 に示す．図 13 に記載する鉛直方向に延びる 2 本のライン上の平均流速と変動流速についての計算と実験を比較した結果を図 14 に示す．平均流速分布および変動流速分布ともに，計算結果と実験結果の良好な一致が確認できた．

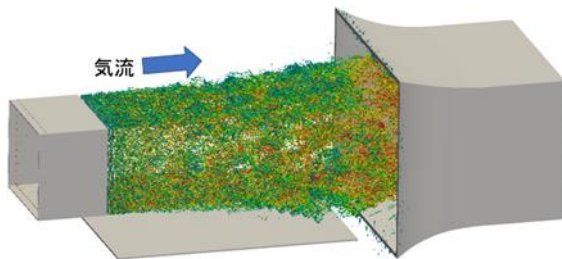


図 12 渦構造の可視化（色：流速の大きさ）
（支持台車下げ）

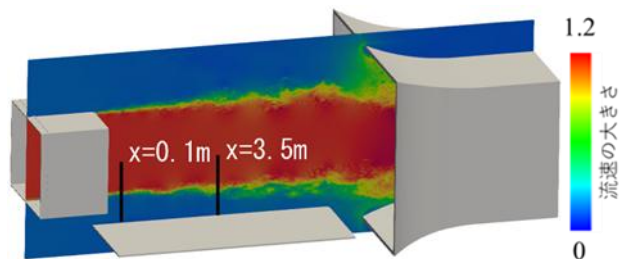
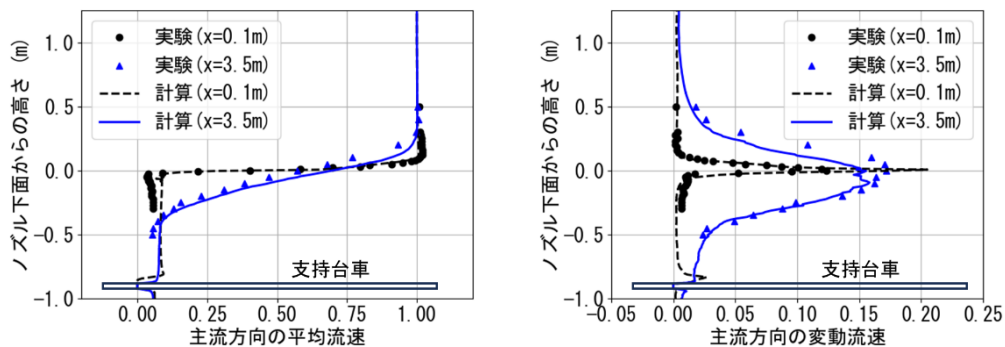


図 13 瞬時の流速コンター（無次元）
（支持台車下げ）



(a) 主流方向の平均流速（無次元）

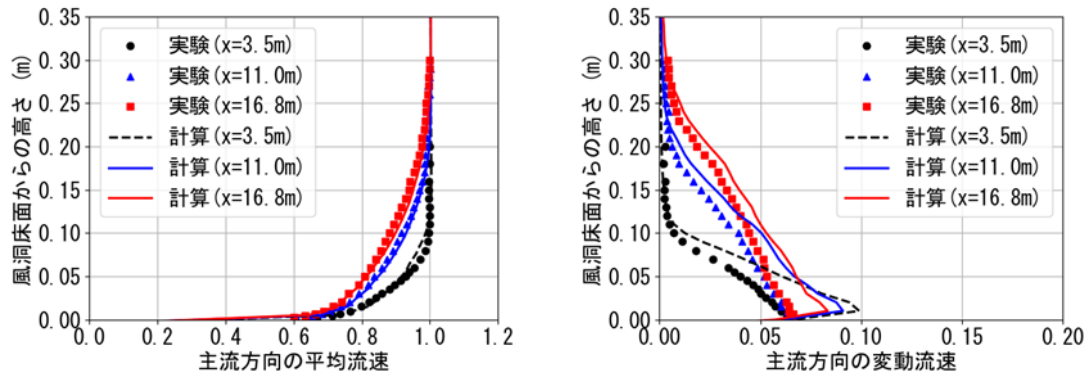
(b) 主流方向の変動流速（無次元）

図 14 水平方向ノズル中心位置における鉛直方向の流速分布（混合層）

2.3.3 密閉型測定部における流速分布の検証結果

計算領域は大型低騒音風洞の密閉型測定部を想定し、主流方向 20m、水平方向 5m、鉛直方向 3m の立方体の領域とした。なお、数値風洞の流入境界面は密閉胴の始点より 3m 上流側に、また、流入境界付近には開放型測定部のモデルと同様の立方体ブロック列を設置した。計算格子分布は、主流方向の格子間隔 20mm、主流に直交方向の格子間隔 10mm の等間隔格子とした。計算格子数は、主流方向 1000 点、水平方向 506 点、鉛直方向 306 点の合計約 1.5 億点とした。

風洞床面上に発達する境界層の流速分布について、計算結果と風洞実験結果の比較を図 15 に示す。開放型測定部の支持台車上の境界層分布の検証結果と同様、平均流速分布の良好な一致および変動流速の壁面近傍における若干の差異を確認した。



(a) 主流方向の平均流速（無次元）

(b) 主流方向の変動流速（無次元）

図 15 密閉型測定部の床面上の境界層（気流 50m/s、境界層吸い込み装置オフ）

3. 数値風洞の適用例

代表的な実験条件について数値風洞と風洞実験を比較検証した上で、実験の代替として数値風洞を活用することは風洞実験の効率化にとって有効である。ここでは、ビル風の風洞実験の一部代替として数値風洞を活用した事例を示す。

ビル風の風洞実験の様子を図 16 に示す。鉄道高架橋の近くにビルが存在すると周囲の風速が変化し、走行する列車に作用する空気力が変化する可能性がある。ビルによる高架橋上の風速の増加率を調べるのが実験の目的である。数値風洞の計算結果として瞬時の風速分布を図 17 に示す。また、風速の時間平均値について、高架橋中心位置におけるレール方向分布を図 18 に示す。比較として、風洞実験で測定した風速分布を示す。ここで、風速測定は 1 次元熱線流速計により測定されており、流速の方向は判別できないことに注意する。計算と実験の比較により、逆流のない領域での良好な一致が確認できる。また、逆流領域は、計算結果を 1 次元熱線流速計相当に換算することによって比較することができ、計算が実験と一致することも確認できた。つまり、数値風洞は実験を良好に再現するとともに、実験ではわからない流れの方向に関する情報も得られることが確認できた。

ビル風の風洞実験では、風向角、ビル幅、ビル間隔がパラメータになる。風洞実験では時間の制約を考慮して実験条件を 4 条件に絞り、残りの条件は数値風洞で代替した。ここでは、数値風洞で 16 条件を実施した（図 19）。このように、数値風洞で実験を代替することで実験条件を削減し、風洞実験の効率化が図れることを実証した。

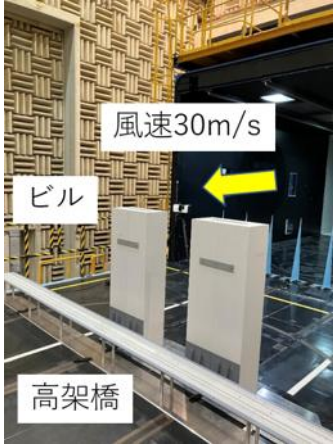


図 16 ビル風の風洞実験

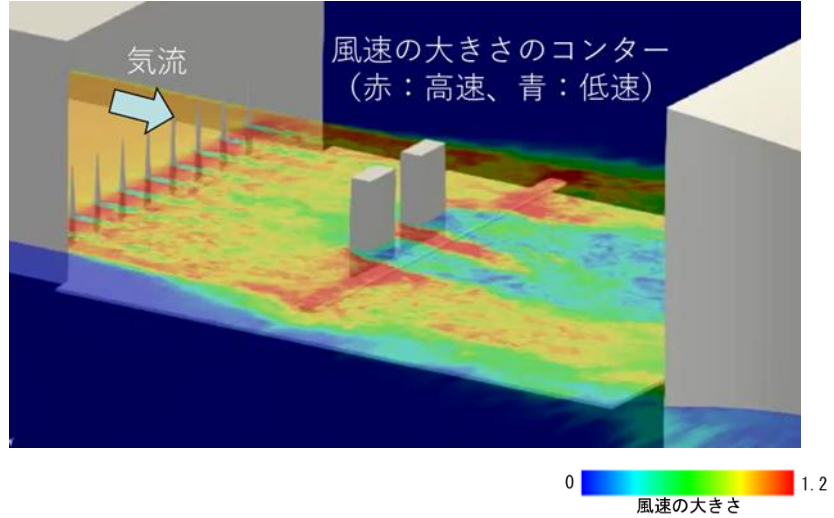


図 17 ビル風の風洞実験への数値風洞の適用

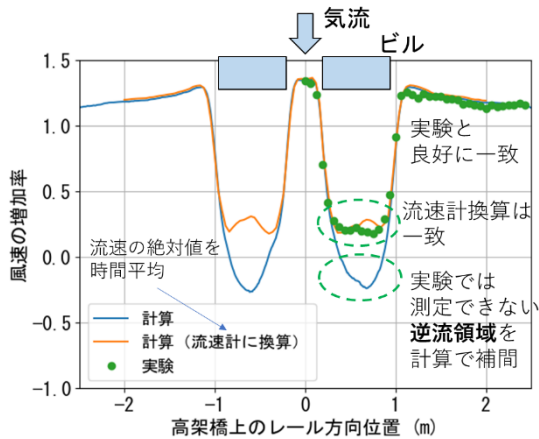


図 18 数値風洞の検証および測定補間
(風速の増加率：ビル無しに対する増加率)

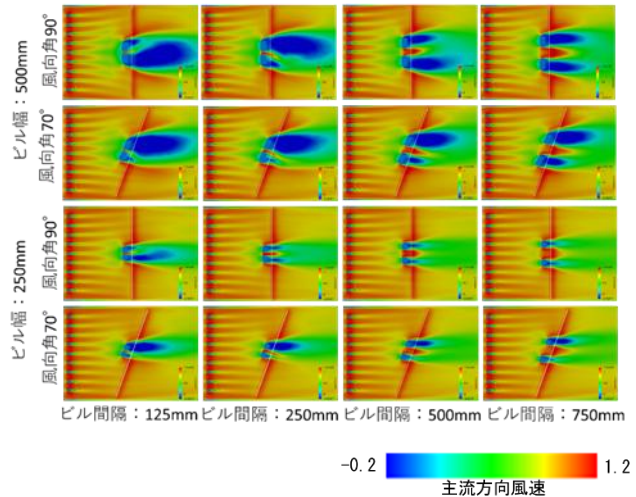


図 19 数値風洞による風洞実験の一部代替
(パラメータ：風向角，ビル幅，ビル間隔)
(主流方向風速のコンター)

4. まとめ

風洞実験の高度化・効率化の推進を目的に、大型低騒音風洞を数値シミュレーションで再現する「数値風洞」を構築した。成果を以下にまとめる。

- (1) 大型低騒音風洞の開放型測定部と密閉型測定部のそれぞれの風洞形態に対応した計算モデルを構築した。特に、開放型測定部では、ノズル，模型支持台車，コレクタを含み，無響室全体を計算領域とすることで，測定部における風洞気流全体を計算対象にできる計算モデルとした。
- (2) 数値風洞における流体計算は，複雑な形状の流れを効率よく計算できる，直交格子法に基づく流体解析ツールである「空気流シミュレータ」（鉄道総研内製）を用いた。ここで，物体壁面付近の計算格子を削減する工夫として，壁関数モデルを導入し，計算時間の短縮を実現した。
- (3) 開放型測定部および密閉型測定部の風洞気流について，風洞実験で測定した風速分布を数値風洞で良好に再現できることを確認した。
- (4) 数値風洞の適用例として，ビル風の風洞実験に数値風洞を適用し，数値風洞の活用性を検討した。風

洞実験で測定できなかった風速の情報を提供するとともに、実験条件の一部を数値風洞で代替することができ、風洞実験の効率化に数値風洞が活用できることを実証した。

現在、数値風洞の適用範囲の拡大として、移動物体を扱える計算方法を数値風洞に導入するための研究開発を行っている。これにより、大型低騒音風洞で実施する模型走行装置を用いた横風風洞実験¹¹⁾に数値風洞が適用できるようになることが期待できる。将来的には、風洞実験の模擬に留まらず、実物の鉄道の模擬へと発展していくことになると考えられる。その中では、実物と数値シミュレーションが高度に連携する「デジタルツイン」としての数値シミュレーションが鉄道の空力問題の研究開発に活用できるようになると期待される。

文 献

- 1) 口石茂, 渡辺重哉, 加藤裕之, 青山剛史, 村上桂一, 橋本敦, 藤田直行, 松尾裕一, 船江幸弘, 荻野純: JAXA における EFD/CFD 融合に向けた試み—デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞構想 (第2報), 第41 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集, pp.61-64, 2009
- 2) 中島卓司, 坪倉誠: 自動車分野における CFD と風洞技術の連携, 可視化情報, Vol.45, No.172, pp.11-14, 2025
- 3) 富永禎秀, 蔣子韜: 建築分野における CFD と風洞技術の連携, 可視化情報, Vol.45, No.172, pp.15-18, 2025
- 4) 中出孝次, 井門敦志, 阿部巧, 井上達哉: 大型低騒音風洞を模擬する数値風洞の開発, 第31 回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2022) 講演論文集, PS2-12, 2022
- 5) 井門敦志: 鉄道総研大型低騒音風洞, 可視化情報, Vol.32, No.124, pp.26-31, 2012
- 6) 中出孝次: 鉄道車両周りの空気流を再現する, RRR, Vol.79, No.1, pp.4-7, 2022
- 7) 中出孝次, 佐久間豊, 梶島岳夫: トンネル走行時の鉄道車両動揺に関わる変動空気力の発生メカニズム (単純形状の鉄道車両モデルにおける大規模流れ構造の LES), 日本機械学会論文集, Vol.87, No.893, 2021, DOI:10.1299/transjsme.20-00366
- 8) Kobayashi, H., “The subgrid-scale models based on coherent structure for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow, Physics of Fluids, Vol.17, pp.045104-1-12, 2005.
- 9) 梶島岳夫: 不等間隔格子に適合する対流項の差分法, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.65, No.633, pp.1607-1612, 1999
- 10) 森西洋平, 小林敏雄: 人工的壁面境界条件を用いた LES の構成およびその評価, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.57, No.540, pp.2595-2601, 1991
- 11) 鈴木実: 車両模型走行装置を用いた横風空気力特性風洞試験手法, 鉄道総研報告, Vol.30, No.7, pp.41-46, 2016

鉄道総研報告
RTRI REPORT

フロントロッド肘金の折損要因の分析と折損を防ぐ保守方法

潮見 俊輔* 重盛 壮平* 押味 良和*

Investigation of Causes of Breakage of Front Rod L-shaped Fitting
and Maintenance Methods to Prevent It

Shunsuke SHIOMI Sohei SHIGEMORI Yoshikazu OSHIMI

Breakage of front-rods caused by environmental conditions around turnouts and point machines has been an issue in maintaining signalling equipment. This study first investigated the relationship between environmental conditions and strain in front rods through field surveys and measurement tests. Secondly, this study conducted a stress analysis of front rods using a FEM. The results identified the locations of stress concentration in front rods and clarified how the extension adjustment condition affects stress. Using these findings, precautions for maintenance work on turnouts and point machines were proposed to prevent breakage of front-rods.

キーワード：フロントロッド，肘金具，転てつ装置，有限要素解析，折損

1. はじめに

転てつ装置は、分岐器の可動部に対して動作（転換）と保持（鎖錠）等を行う信号保安装置であり、電気転てつ機に代表される動力転てつ機と、スイッチアジャスタやフロントロッド等の転てつ付属品から構成されている。このうち、転てつ付属品は、動力転てつ機とトンブレール等の分岐器可動部を接続して、転換動作や転換後の機械的鎖錠を行い、開通方向を動力転てつ機にフィードバック（照査）する重要な機能を有している。転てつ付属品のうち、フロントロッドは照査の機能に加えて、スイッチアジャスタによる機械的鎖錠を補完する機能（補の鎖錠）を有している。

転てつ装置は、車両が分岐器の欠線部や継目を通過する際の振動や衝撃を受けやすい環境で用いられるが、主の鎖錠機能を持つスイッチアジャスタや電気転てつ機本体の損傷は、車両走行中の安全性に直接影響するため避ける必要がある。そのため、照査による異常検出が可能なフロントロッドを、スイッチアジャスタや電気転てつ機本体より先行して破損させるように意図した設計思想（強度協調）が経験的に適用されてきた。

一方で、運転速度向上による車両通過時の衝撃の増加や、列車本数の増加に伴う衝撃の繰り返し頻度の増加によるフロントロッドの折損と、列車運行の安定性への影響が長年の課題となっている。これに対して、1970年代から1980年代にかけてフロントロッドの形状や使用材料の改良が行われており^{1) 2)}、折損件数が減少している。しかし、現在も依然として一部でフロントロッドの折損が発生しており、主に肘金において折損が発生している状況である³⁾。また、個別の事例に注目すると、分岐器等の使用環境や、転てつ装置を含む施工・調整状態が通常と異なる箇所が発生することがわかっている。

本稿では、フロントロッド折損の要因となる、トンブレールとロッドを接続するL字状の部材である肘金（図1）におけるひずみ、応力の応答と、これに関係する分岐器や転てつ装置の設置環境についての現地調査、実験、解析の結果について報告する。また、折損を防ぐための保守方法について述べる。

* 信号技術研究部 信号システム研究室

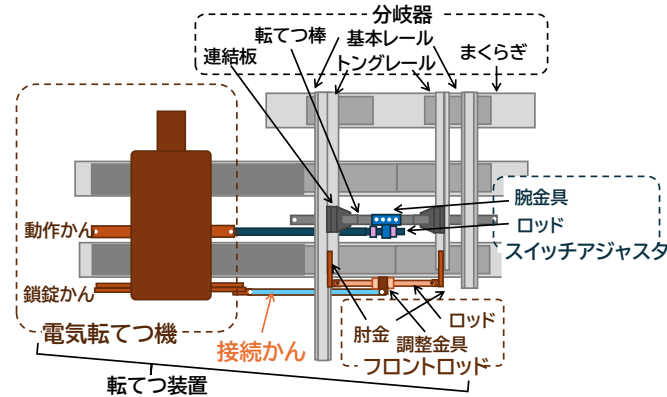


図1 転てつ装置とフロントロッドの構成の一例

2. フロントロッドの折損と車両通過時の影響

2.1 フロントロッドの構造と折損

転てつ装置とフロントロッドの構成の一例を図1に示す。フロントロッドは、スイッチアジャスタにより動かされたトングレールの開通方向や接着状態を電気転てつ機の鎖錠かんに伝達し、照査や補の鎖錠の機能を有する。フロントロッドは左右のトングレールに取り付ける2個の肘金と、両肘金を結ぶロッドと調整金具から構成される。ロッドの長さは左右のトングレールの離隔にあわせて調整した上で取り付けを行うため、フロントロッド自体は設計上、力が常時作用する箇所ではない。

しかし実際には、フロントロッド各部には車輪の通過に伴い車両から受ける輪重や横圧による力や、衝撃が作用する。また、ロッドの長さ（張り）を調整して、左右トングレールの間隔やトングレールの接着状態を調整することがあり、トングレールの弾性力がフロントロッドに常時作用する場合がある⁴⁾。このような力が車輪の通過の都度、繰り返し作用することで、肘金やロッドが折損することは経験的に知られている³⁾。

折損が発生する部位は、1980年代まではロッドと肘金でそれぞれ発生していたが、フロントロッドの材料や構造の改良が進んだ1990年代以降はロッドの折損が減り、肘金の折損が中心となった¹⁾。30分以上の遅延を伴う輸送障害として国土交通省に報告された、折損箇所が明記されているフロントロッド折損は、3年間（調査期間：2013年～2015年）で3件発生しており、その全てが肘金または肘金締結ボルトで発生している。このように、現在のフロントロッドの折損は、主に肘金を主とした断面変化部や、断面積が小さい部位で特に発生しているといえる。

2.2 折損の発生状況と設備条件

フロントロッドの折損に関する実態を把握するため、鉄道事業者4社の協力の下、2007年度から2022年度に普通分岐器において発生したフロントロッドの折損箇所を調査した。また、過去に発生した折損を踏まえて、通常よりも短い周期でフロントロッドを交換している箇所についても調査した。

表1に、分岐器の種類と線区の特性ごとに分類した折損等の箇所数を示す。折損が発生した箇所は15年間で23箇所であり、内19箇所が関節分岐器であった。このうち1箇所については2.1節に述べた2013年から2015年に発生した30分以上の輸送障害を伴う事象に該当する。また、交換周期の短縮は11箇所で実施されており、内9箇所が関節分岐器であった。また、弾性分岐器2箇所については車両基地の洗浄線付近に設置された弾性分岐器であった。このように、フロントロッドの折損等は関節分岐器での箇所が多く、

特に通過列車がある地方幹線において多い。また、弾性分岐器の折損箇所は、レールの破損等により特に衝撃を受けやすい箇所や、塩害地域、洗浄線付近などの腐食が進行しやすい箇所などのフロントロッドの折損原因が個別に特定されている箇所が大半を占めた。

表1 折損等の発生箇所と設備条件

回答種類	分岐器の種類	線区の特徴	箇所数
折損	関節分岐器 (50N)	地方・通過列車あり	19
	弾性分岐器 (50N, 60kg)	都市圏・通過列車あり	2
		都市圏・通過列車なし	1
		地方・通過列車あり	1
交換周期短縮	関節分岐器	地方・通過列車あり	9
	弾性分岐器	車両基地内	2

2.3 折損箇所における設備状態の調査

以上の調査結果を踏まえて、①50N 関節分岐器、②通過列車あり、③地方の幹線の3条件を満たす13箇所（折損履歴あり5箇所、更新周期短縮1箇所、折損なし7箇所）および弾性分岐器の折損履歴がある1箇所を対象とし、転てつ装置や分岐器の設置環境に関する現地調査を実施した。

代表的な調査結果を表2に示す。折損履歴や交換周期の短縮を実施している箇所では、車両通過時にトンダレールに対して衝撃を与えうる、トンダレール後端部の段差や、レール踏面の荒れ・欠損、トンダレールと床板の浮きなどの、折損履歴のない箇所ではみられない状態が確認された。また、犬くぎやボルト等のガタつきや抜けなど、衝撃により影響を受けたと推察される状態も複数の箇所で確認された。このことから、フロントロッドの折損に車両通過時の衝撃が影響している可能性があるかと推察された。

表2 転てつ装置と分岐器の設備状況調査（代表結果）

調査項目		調査結果	
		折損あり・周期短縮	折損なし
調査箇所数		7箇所 (内1弾性分岐器)	7箇所
衝撃の 要因	トンダレールと 床板の接触	良好 6箇所 先端接触なし 1箇所	良好 7箇所
	トンダレールと リードレールの段差	あり 6箇所 (全ての関節分岐器)	あり 1箇所 なし 6箇所
	トンダレール等踏面の 荒れ・欠損	あり 1箇所 なし 6箇所	なし 7箇所
	犬くぎ、ボルト等の ガタつき	あり 4箇所 なし 3箇所	なし 7箇所

2.4 車両通過時のフロントロッドひずみと振動加速度

折損実績があり、交換周期の短縮を実施している5箇所（箇所A～E）と、折損実績のない4箇所（試験箇所F～I）において、車両通過時のフロントロッド各部のひずみ、トンダレール先端付近の基本レールとまくらぎの振動加速度等を測定した。図2に測定項目とフロントロッドのひずみ測定箇所を示す。

測定結果の一例として、折損履歴のある箇所Aと折損履歴のない箇所Fにおける車両通過時の接着側肘金長穴上部（図2①）のひずみを図3に示す。箇所A、Fともに、ひずみの変動が車両の通過に伴って変動しているが、箇所Aの変動は箇所Fと比べて大きいことが認められた。

表3に車両通過時の各部のひずみから使用材料の縦弾性係数を $E=206\text{GPa}$ として算出した応力の変動の大きさ（Peak to peak 値、以下 p-p 値）とそのときの列車速度を示す。

折損実績があり、交換周期の短縮を実施している5箇所のうちA～Cの3箇所では、肘金長穴部付近の

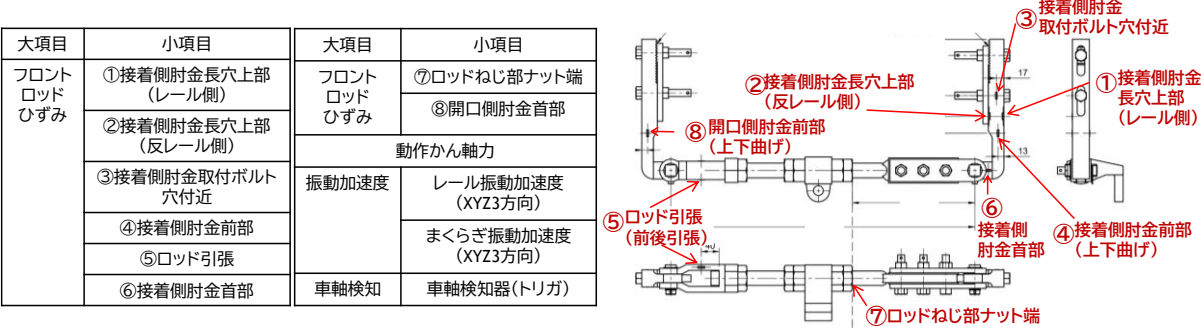


図2 測定項目とフロントロッド上のひずみ測定箇所

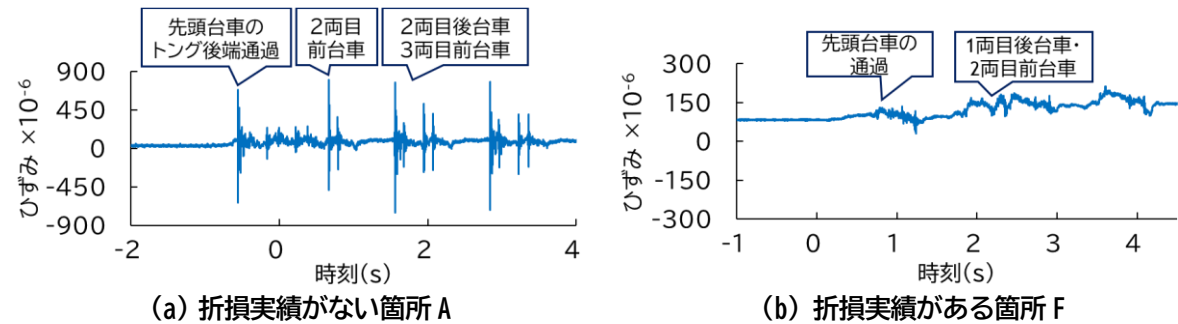


図3 車両通過時の接着側肘金長穴上部ひずみ

表3 車両通過時の応力と列車速度

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	折損履歴 有	折損履歴 有	周期短縮	折損履歴 有	折損履歴 有	なし	なし	なし	なし
後端部段差 (mm)	+0.9	+0.9	-4.3	+1.0	あり※1	なし	なし	なし	-0.9
列車速度 (km/h)	58.7	90.3	77.4	41.0	57.2	61.6	60.6	84.8	90.1
長穴上部① (MPa)	326.2	-	201.9	35.1	84.3	74.0	66.1	48.0	140.1
長穴上部② (MPa)	195.7	350.4	111.6	38.5	69.7	64.8	61	44.4	116.6
ボルト穴付近③ (MPa)	183.0	410.4	111.1	12.0	40.1	-	28.3	22.0	72.8

後端部段差 +は後端部が高いことを、-は後端部が低い事を示す。
 ※1 測定なし。写真による目視で2mm以上の段差があると推定される

応力変動が202MPa～410MPaとなった。材料の疲労限（片振幅200MPa）⁵⁾を超過する応力が観測された箇所Bでは、測定の実施後に折損が発生しており、車両通過時の衝撃によりフロントロッドの折損に至っていることが確認された。

各試験箇所で見られたひずみの変動は、編成の先頭台車および各車両の後台車先頭軸が、トンブレイル後端部を通過する際に特に大きく、トンブレイル後端付近の大床板における衝撃と同時に観測された。一例として、試験箇所Bにおける車両通過時の肘金穴上部のひずみと、大床板上の上下方向加速度を図4に示す。トンブレイル後端に近い大床板上で測定した加速度が後端部通過時の衝撃で大きく変化する際に、同時にひずみも変化していることがわかる。このことから、フロントロッド肘金の折損につながる応力変動は、トンブレイル後端部の段差などの車両通過時の衝撃に影響を受けているといえる。また、応力変動の大きさから、この衝撃が折損の主要因と考えることができる。なお、車両通過時のトンブレイルへの衝撃は、トンブレイル後端のリードレールとの段差のほかに、トンブレイル先端側が床板と接しておらず車両通過により上下にばたつく箇所や、レール頭部の欠損等により衝撃する箇所でも生じることが知られて

いる。折損防止において、これらの状態にも注意を払うことが重要といえる。

また、上記に示した外観検査に基づく方法に加えて、車両通過時の衝撃の大きさを簡易的に取得する装置を試作してその適用性について検討した。図5に試作した簡易形の衝撃測定装置と測定結果の一例を示す。この装置は、まくらぎ等に一時的に仮設して車両通過時の衝撃を記録する機能をもつ。定量的に振動や衝撃の大きさを計測する際に用いる一般的な測定器に対して、計測可能な周波数等の性能に制限がある。そのため、信号設備が受ける振動のJIS規格⁶⁾との絶対値による比較は行えない制約がある。しかし、図6に示す相対的な振動の大きさ（加速度の平均 p-p 値）は一般的なセンサと試作品で高い相関があることから（ $R^2=0.89$ ），正常な箇所との相対比較用途として適用できると考えられる。

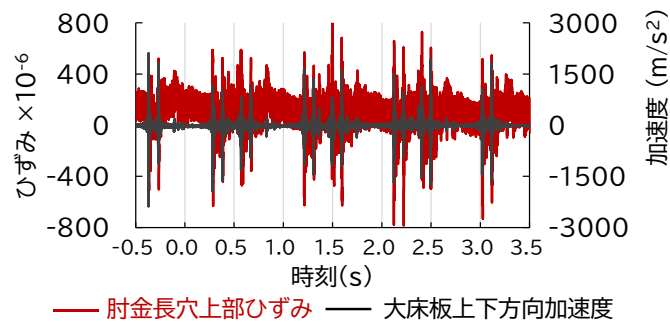


図4 肘金ひずみと大床板振動加速度

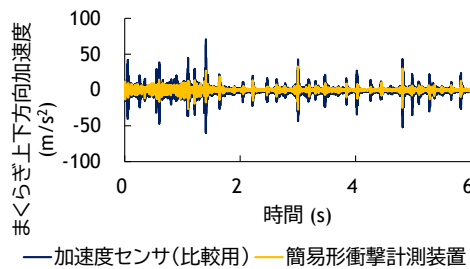


図5 簡易形衝撃計測装置と計測波形の例

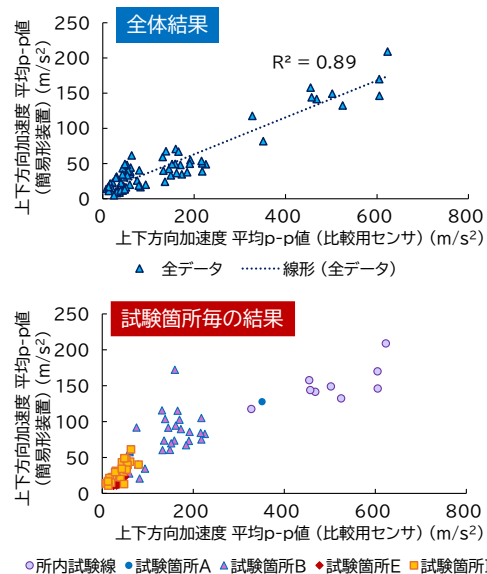


図6 簡易形装置と比較用センサの出力比較

3. 有限要素解析を用いた転てつ装置、分岐器の調整状態の影響評価

車両の通過に伴うトングレールへの衝撃がフロントロッドの応力変動に影響することを現地測定にて確認したが、転てつ装置や分岐器の調整状態が、フロントロッドの折損に与える影響については明らかになっていない。しかし、設備の調整状態は実設備で任意に設定することが難しく、その影響を評価するためのひずみを計測するためのひずみゲージの貼付箇所や方法にも制約がある。そこで、転てつ装置や分岐器の調整状態を任意に設定でき、フロントロッド肘金の応力分布が得られる有限要素解析と実験を組み合わせることで、調整状態が折損に与える影響について検討することとした。

3.1 フロントロッドの解析モデル

有限要素解析モデルとして、(a)フロントロッド肘金単体のモデル（以降、単体モデル）と、(b)フロントロッド全体（肘金およびロッド）と転換動作に関する分岐器の構成部材を含むモデル（以降、全体モデル）を作成した。(a)の単体モデルについては、肘金および歯金のかみ合わせを再現したモデル（標準モデル）と、両者のかみ合わせを省略したモデル（簡易モデル）を作成した。図7にこれらのモデルの概形を示す。

単体モデルについては、可能な限りメッシュサイズを1mmの六面体ソリッド1次要素としたが、歯型や首部曲面などの六面体とすることが難しい要素は四面体要素とした。また、トングレールや試験治具に相当する受け板をモデルに含めた。なお、単体モデルにおける簡易モデルでは、長穴周辺の要素を2次要素に変更した。

全体モデルについては、評価の主対象である肘金を含むフロントロッド全体と、肘金とボルトで締結されるトングレール先端部をソリッド要素とした。一方で、転換時の数秒間の動作を解析する際の計算負荷を抑えるため、転てつ棒より後端側のトングレールについては、接触とたわみのみを計算するビーム要素とし、断面特性をレールにあわせて設定した。また、転てつ棒と連結板については剛体としたが、結合部のガタについては実物と同様に考慮できるよう、接触による力の伝達を計算することとした。

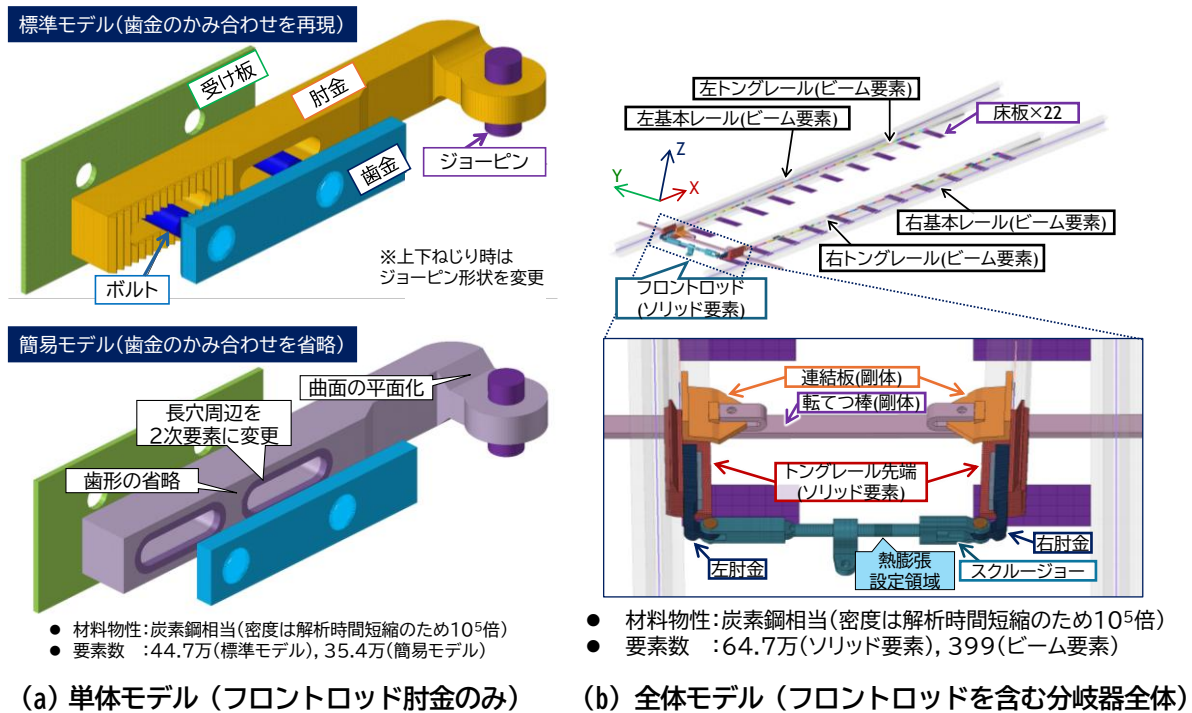


図7 有限要素解析モデル

3.2 肘金への静荷重載荷時の実験と解析結果の比較

フロントロッド肘金の解析モデルや解析条件を検討するため、肘金に静荷重を作用させた際の各部のひずみを測定する実験を実施した。また、実験と同様の条件で有限要素解析を行い、解析結果と実験結果を比較した。実験及び解析は、日本国内で広く使われているフロントロッドの一つである、B721-N形の肘金とロッドを対象とした。図8に示す治具を用いて、左右曲げ（軌間中心およびその逆方向）、および上下ねじり（天地方向）の各方向に対して油圧シリンダを用いて静荷重を載荷した。実験では、2.4節で述べた現地試験と同様に、ひずみゲージを用いて各部のひずみを測定した。

実験結果の一例として、肘金の左右曲げ方向と、上下ねじり方向の主要な測定点の最大ひずみを図 9 に示す。左右曲げに対しては、首部の断面が変化する測定点⑩において最大値となった。また、先端側の長穴付近の測定点⑫⑬⑯⑰の曲げひずみが大きい結果となった。一方、上下ねじりに対しては、先端側の長穴部の測定点において最大値を示した一方、首部のひずみは相対的に小さい結果となった。

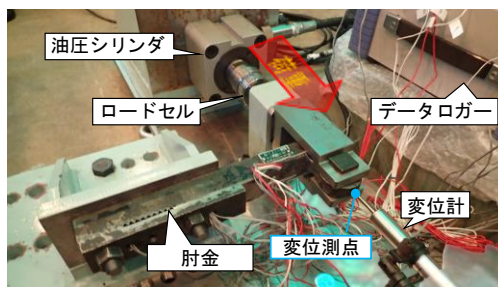
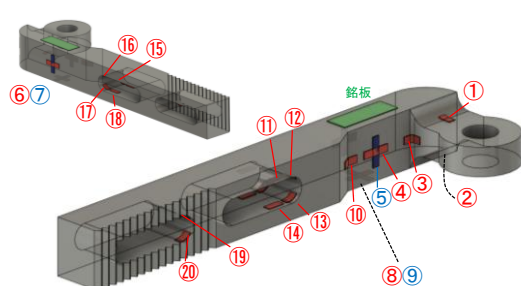


図 8 静荷重試験治具（左右曲げ時）



測定点	名称	ひずみ (×10 ⁻⁶)	
		下方向 (ねじり) 载荷	軌間中心方向 (曲げ) 载荷
①	首部上部	177.8	2.2
④	首部側面	-93.9	-287.1
⑩	首部根本	65.9	-698.8
⑪	長穴ボルト穴近傍(反レール側)	431.3	-554.8
⑫	長穴内部上部(反レール側)	478.1	-200.9
⑬	長穴内部下部(反レール側)	-379.4	-265.1
⑯	長穴内部上部(レール側)	536.8	571.7
⑰	長穴内部下部(レール側)	529.8	18.2

図 9 载荷試験時の測定点と主要測定点の試験結果

単体モデルを用いた解析結果の一例として、下向きねじりの解析結果として第一主ひずみコンターと主な測定点における解析と実験によるひずみを図 10 に示す。歯型を再現した標準モデルと簡略化した簡易モデルは同様の傾向のひずみ分布が得られおり、かつ実験結果に対しても同様の傾向が得られることを確認した。ただし、長穴曲面部周辺で実験結果とひずみの差異が大きい測定点（図 9 の⑫）があった。これらは応力集中箇所のため、ひずみゲージの貼付位置と解析上のひずみ値取得部位に微少な位置のずれがあった場合でも誤差が生じやすく、この影響により差異が生じたものと推察される。

左右曲げの解析結果を図 11 に示す。標準モデルと簡易モデルは首部や長穴部においてほぼ同様のひずみ分布が得られおり、かつ実験においてひずみの変化が大きい部位が、解析においても同様に変化していることを確認した。ただし、実験結果と解析結果のひずみの差異が大きい測定点（図 8 の⑫）や標準モデルと簡易モデルで差異が大きい測定点があった。これらは、何れも応力集中箇所のため、計測部位と解析上のひずみ値取得部位の僅かな位置のずれや分布の違いがあった場合に誤差が生じやすく、この影響により差異が生じたものと推察される。

上下ねじり方向や左右曲げ方向の静荷重载荷時に大きなひずみが確認された肘金長穴部（図 9 の⑪⑫⑯⑰）付近は、2.4 節に示した車両通過時の現地試験結果においても最大のひずみを記録している。このことから、車両走行時の肘金の応力変動は、肘金に対するねじりや曲げの応答によるものと考えられる。また、解析で得られた第一主ひずみコンターから、肘金の損傷は長穴部分（内側、外側）を起点として生じうることが示された。

このことから、肘金は特に長穴部付近の応力が大きいため外観検査において特に注意して確認を行うべき箇所であるといえる。また、損傷が在姿で確認が可能な外側だけではなく、穴の内側からも生じうるこ

とから、分岐器細密検査やトングレー交換等の取り外しを伴う作業の際には、穴の内部の状態にも注目して状態を確認することが重要であるといえる。

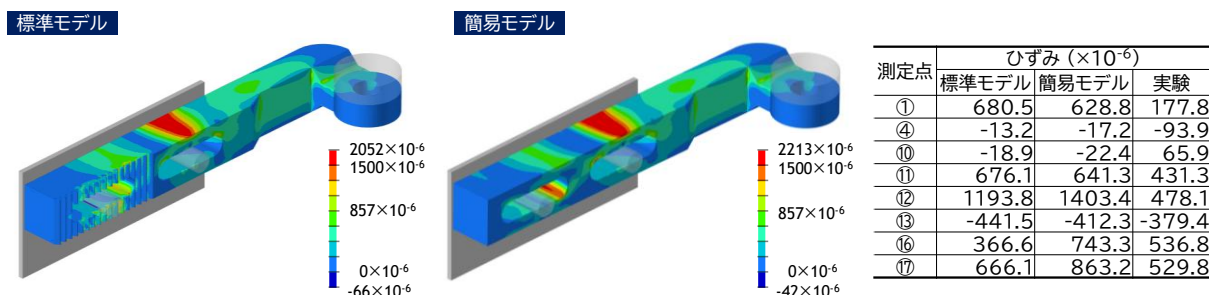


図 10 下向き载荷時の第一主ひずみコンター

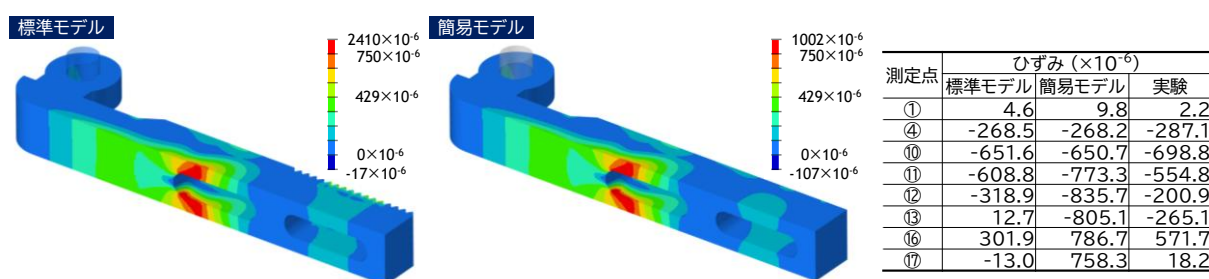


図 11 曲げ载荷時の第一主ひずみコンター

3.3 フロントロッドの張り（左右長）調整の影響評価

フロントロッドの調整として、フロントロッドの左右離隔の調整（いわゆる「張りの調整」）がある。左右のトングレーの先端を結ぶフロントロッドは、設置箇所にあわせて左右離隔を調整できる構造となっており、トングレー先端の基本レールの接着を確保するために、左右離隔を長くする（張る）調整が行われる場合がある。本来は力のかからない設計のフロントロッドに軸力が生じる張り調整と、フロントロッドの応力の関係を明らかにするため、実験と解析のそれぞれでフロントロッドの張りとは応力の関係について検討した。

実験、解析ともに鉄道総研所内の試験用分岐器（50N レール、関節片開き 10 番）に、B721 形フロントロッドを取り付けた条件で実施した。実験では、フロントロッドを取り外した状態での左右トングレー離隔（692mm）を基準として、ここから 2mm ずつ離隔を変更した際の各部ひずみ等について測定した。また、密着力については、動作かんにおいてジョーピン形軸力計を用いて都度計測し、1kN 程度となるように調整した。

また、解析では、全体モデルを用い、初期状態から左右離隔を-4.9mm、-2.4mm、0mm、+2.1mm、+5.7mm の 5 段階（正の値はフロントロッドを張る側、負の値は縮める側）で設定し、トングレーを基本レールに向かって押しつける密着力に相当する荷重をスイッチアジャスタに与えた条件でのひずみを計算した。

実験結果として、肘金におけるトングレー接着時の応力とフロントロッドの左右離隔、および転てつ棒と連結板のすき間の関係を図 12 に示す。肘金長穴部の測定点①、②の転換完了時の応力は、初期状態に近い長さで調整した際に最小となった。左右長を初期状態（692mm）から縮めた状態と伸ばした状態でそれぞれ応力が増加し、実験で得られた応力の最大は 80MPa であった。材料の疲労限（200MPa）⁵⁾ を超えるものではないため、単体で折損に至らしめるものではないが、車両通過時の衝撃に伴う応力変動と重ね合わせた応力が肘金において観測されるため、左右長の調整状態が良好な場合と比べると小さな応力変動で

折損に至ると考えられる。

折損防止の観点から、左右長の調整は適正な状態とすることが望まれる。なお、転てつ棒の調整状態が適正な場合は、転てつ棒と連結板の間が、基本レールに接着する側については隙間がない状態、開口している側については隙間がある状態となり、外観から正常な状態が判断可能である。

解析結果の一例として、胴付きの分岐器において接着不良を解消するために左右長を伸ばした際のフロントロッドのひずみに関する結果（第一主応力のコンター）を図13に示す。フロントロッドの左右長を伸ばしたことで、肘金の先端側の長穴付近に応力が集中し、フロントロッドを張った場合は軌間側の面に、縮めた場合はトングレール側の面に引張の強い領域が生じた。このことから、接着状態の改善を意図したフロントロッド左右長の「調整」は肘金の折損に対して影響を与えるため、その状態を常態とすることは望ましくないことが確認できる。

上記の解析結果はトングレールと基本レールがトングレール先端部付近で接触する理想的な状態での結果であるが、実際には転てつ棒より後端側に接触点があり、トングレール先端はすき間がある状態（胴付き）の分岐器も存在している。このような状態がフロントロッドの応力に与える影響を評価するため、トングレール先端から 2m 地点までが基本レールと接していない胴付きの分岐器のモデルを構築した上で、実設備における調整と同様にトングレール先端を接着させるようフロントロッドの張りを設定した際のひずみ、応力の解析を行った。結果を図14に示す。接触点が転てつ棒より後端側にある胴付き状態で、かつ

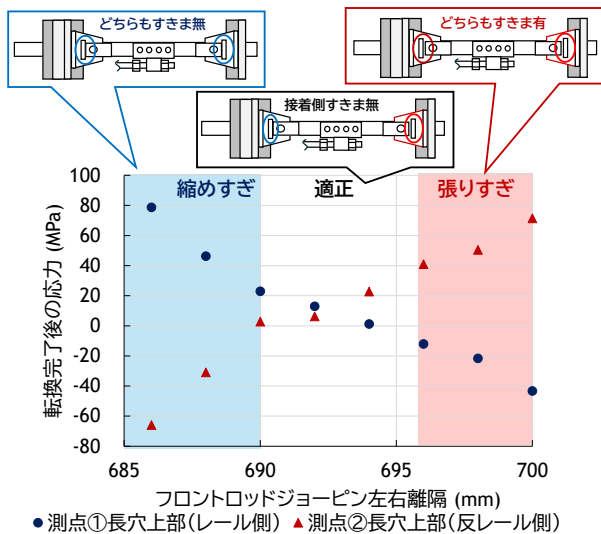


図12 フロントロッド左右離隔調整時の肘金
応力と転てつ棒・連結板間のすき間

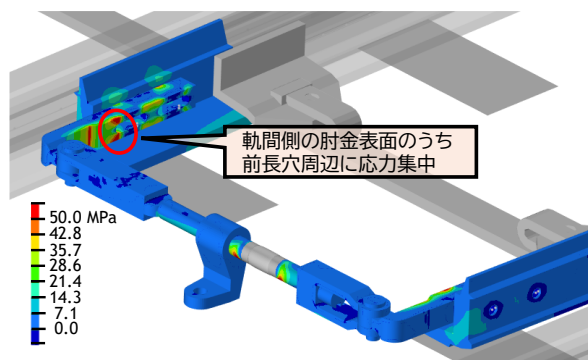


図13 張り調整時の第一主応力コンター

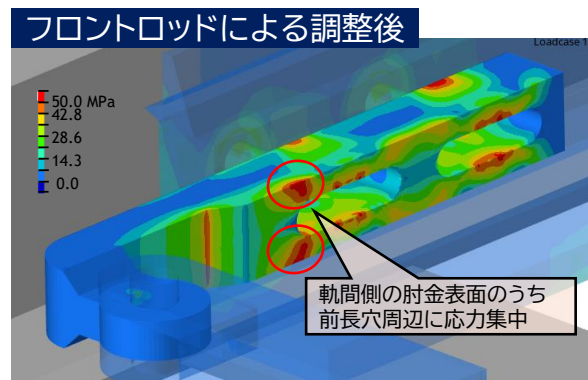
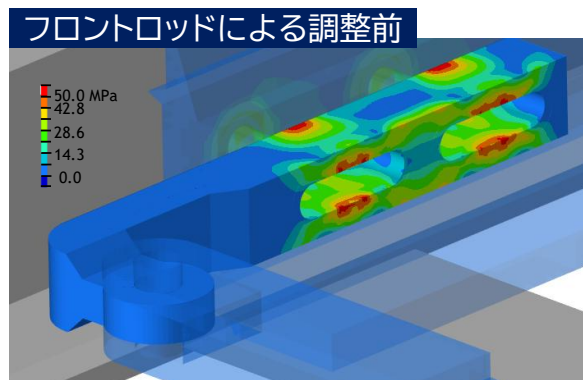


図14 接着状態をフロントロッド離隔で調整した際の影響評価（第一主応力コンター）

胴付きを解消させるためにフロントロッドの長さ調整を行った場合は、フロントロッド肘金長穴部のひずみが、良好な接着状態のケースよりも大きくなることが示された。

4. フロントロッド折損を防ぐための保守方法

一連の実験結果および解析結果から、普通分岐器におけるフロントロッドの折損につながる応力変動と設備の種類、状態に関して以下の結果を得た。

- (1) 折損が過去に起きた箇所や交換周期を短縮している箇所は主に、関節分岐器である。
- (2) トングレール後端に上下方向の段差を有する箇所、レール頭部に欠損を有する箇所、トングレール先端付近が床板に接触せずレールが上下にばたつく箇所では、車両通過に伴う衝撃が発生し、肘金に対して著大な応力変動をもたらす折損の主要因である。
- (3) 肘金に対する上下曲げ、左右ねじりにより、肘金前側の長穴内外に応力集中が生じる。この箇所は、特に折損のリスクが高いため、外観検査上注目すべき箇所である。
- (4) フロントロッドの左右離隔（張り）の不適切な調整や、胴付きの分岐器に対するフロントロッドによる強制的な接着状態の確保は、肘金長穴部の応力を増加させる。車両通過時の応力変動と複合して折損をもたらす可能性がある。
- (5) フロントロッドの調整状態は、転てつ棒と連結板の接触状態により、適切な状態を判断することが可能である。

上記の結果を踏まえたフロントロッドの折損原因と保守上の要点を図 15 に示す。外観検査において特に注目すべき箇所は、フロントロッドの折損リスクが高い肘金長穴部（肘金長穴の内部、外部）（検査ポイント①）、折損の主要因である車両通過時の衝撃に影響するトングレール後端部の上下段差等（検査ポイント②）、および折損に間接的に影響する応力増加につながるフロントロッドの左右離隔調整不良を判断するための連結板と転てつ棒の接触状態（ポイント③）の 3 点を示した。また、上記の内容を一般的な信号設備の保守マニュアル⁷⁾へ記載した場合の例を図 16 に示す。この保守方法については、2025 年度より鉄道事業者の保守マニュアルにて反映、導入されている。

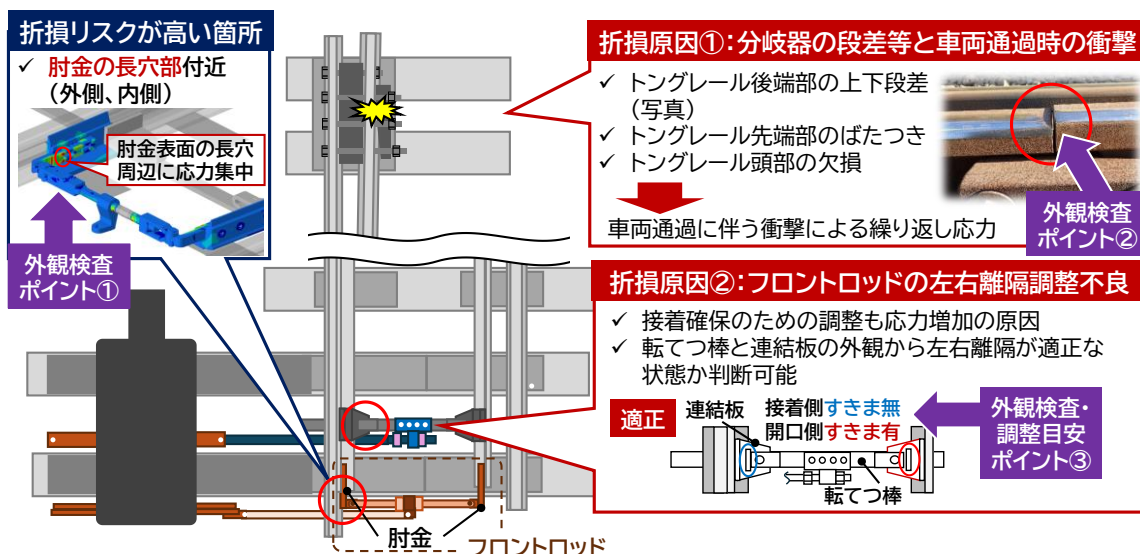
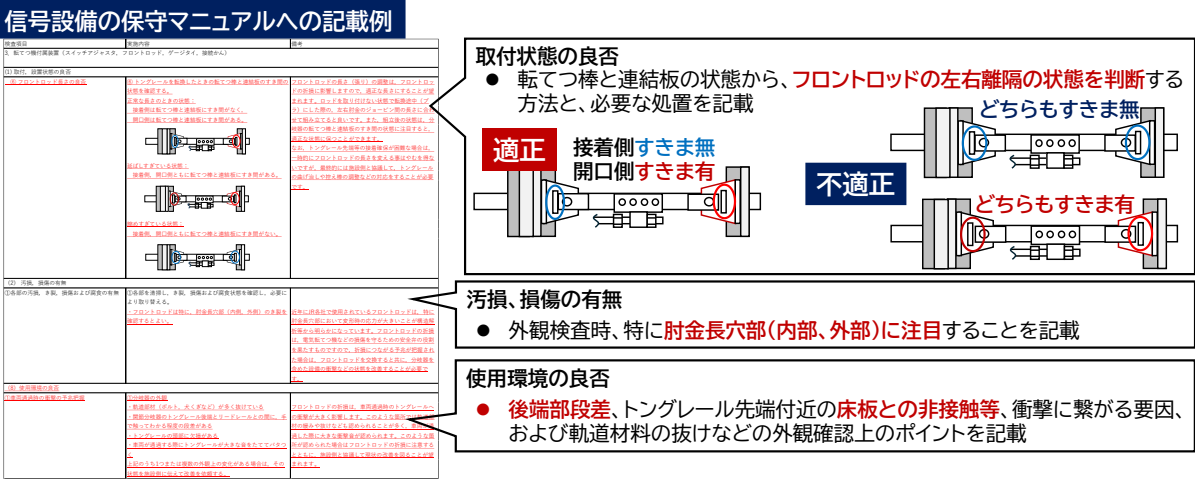


図 15 フロントロッドの折損原因と保守上の要点



5. まとめ

本稿では、フロントロッドの折損要因について、転てつ装置や分岐器の設置環境、調整状態と肘金の応力の関係を、現地調査、実験、解析を踏まえて整理した。また、フロントロッドの折損を防ぐための保守上の留意点と保守マニュアルへの記載例を示した。

謝 辞

本研究における現地調査と現地試験の実施にあたり、関係者には多大なご協力を頂いた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

1) 転てつ装置技術検討会：平成元年度 転てつ装置技術検討報告書，pp.45～62，1989
 2) 安原碩人，伊東周二，鹿間政男：フロントロッドの改良（第1報）—現地応力測定—，鉄道技術研究所速報，No.82-61，1982
 3) 潮見俊輔，他：転てつ装置の保守管理手法に関する調査，2024年電気学会産業応用部門大会講演論文集，pp.V-93-96，2024
 4) 重盛壮平，他：フロントロッドの張りが応力に与える影響，第31回鉄道技術・政策連合シンポジウム，S2-8-1，2024
 5) 金属材料研究所：金属材料研究所疲れデータシート No.1 機械構造用炭素鋼 S25C(0.25C)の疲れ特性データシート，pp.6-8，1978
 6) 日本産業規格：JIS E 3014:2026 鉄道信号保安部品—振動試験方法，2026
 7) 信号・踏切設備，電力設備 保守マニュアル（改訂版），日本鉄道電気技術協会，1996

鉄道総研報告
RTRI REPORT物体検知 AI とステレオカメラによる
構内の支障物検知システム向嶋 宏記* 影山 棕**
長峯 望* 小室 翔嗣***

Stereo Camera-Based Obstacle Detection System in Railway Yards

Hiroki MUKOJIMA Ryo KAGEYAMA
Nozomi NAGAMINE Syoji KOMURO

Several railway operators are currently advancing toward driverless operations. To achieve end-to-end autonomy, operational conditions must be investigated not only along mainlines but also within depots and station premises. Our prior work addressed a forward obstacle detection system for mainline. Because environments such as yards and stations feature distinct characteristics—including object types, operation speeds, sightlines, and operational rules—this paper redefines the performance requirements and detection targets. Focusing on these environments, this paper defines the performance requirements based on current technology, proposes a train-borne obstacle detection architecture tailored to depot/station operations, and reports evaluation results for representative scenarios.

キーワード：列車前方映像，ステレオカメラ，AI，前方監視，構内

1. はじめに

近年，複数の鉄道事業者においてドライバレス運転の実現に向けた取り組みが進められている．列車の運行全体をドライバレス運転とするためには，本線走行以外に車両基地や駅の構内における運転も自動化することが求められてくる．このようなドライバレス運転の取り組みの中で，列車前方の支障物検知技術は，総合的な判断による安全確保¹⁾を実現するための要素技術の一つとして期待されている．我々は，これまでに主に本線の走行を想定した列車前方の支障物検知システムの検討を進めてきた²⁾．特に，本線走行中は，遠方の支障物を検出することに主眼を置いたが，構内においては要求される検知距離が短くなるなど，前提条件が一部異なる．

そこで，本報告では車両基地や駅の構内での走行にターゲットを絞り，列車前方の支障物検知システムを実現する場合の構成を提案し，システムを構成する．各手法の性能を評価した結果について述べる．

2. 構内における支障物検知システムの構成

2.1 構内における条件の整理

本稿で想定する構内での走行とは，主に入換等を目的に駅や車両基地などで車両が低速で走行している状態である．支障物検知という観点で本線と構内での走行条件を比較した時，基本的には構内での走行条件は本線での走行条件に包含されると考えられる．つまり，構内のみを対象にした場合，想定する条件の範囲が本線よりも小さくなる部分が多い．ただし，前方の支障物の検知の際の分岐器の開通方向を含めた

* 情報通信技術研究部 画像・AI研究室
** 旧 情報通信技術研究部 画像解析研究室
*** 元 情報通信技術研究部 画像・AI研究室

自列車の進路の認識については、本線よりも複雑な構造となる可能性がある。それ以外の条件で、本線と構内の最も大きな違いは前提とする車両の走行速度が異なる点である。本線は線区最高速度までを想定する必要があるが、入換の場合は通常 20～45km/h 程度と想定できる。目標の設定においては、この速度から支障物検知システムが支障物を検知した際に、即座に非常ブレーキを動作させれば停止可能であると考えられる 100 m を目標とした。ただし、100m はあくまでも本稿における目標の値であり、実運用を検討する際には、車両の性能や、線区ごとの勾配の影響、天候による制動距離の変動などの要素についても加味してマージンを設けるなど慎重に判断する必要がある点には注意されたい。その他、本稿における支障物検知システムの要求仕様については以下の通りである。

- ・特定の検知対象物については人物を検知すること
- ・車両改造を最低限に留めるために、センサを車両内の運転台に設置すること
- ・特急列車等の流線型の先頭形状に対応できること
- ・保守作業に使用される台車や工具箱などの事前に想定されていない支障物が原理的に検知できること

2.2 支障物検知システムの構成

2.1 節で整理した内容について、分岐器の開通方向や人物の検出は事前に学習させる対象が明確であることから、可視光カメラを用いた AI に対応が可能であると考えられる。一方、工具箱などの事前に想定されていない物体は、学習データとして用意して AI に学習させることはできない。そこで、不特定の物体は 3 次元的に支障物として捉えることで対応する。なお、人物についても立体物として検出が可能であるが、将来的に人物の退避状態の認識などの検討ができるように AI による物体検出を併用する。

3 次元データを取得する方法は、LiDAR やミリ波が考えられるが、車内にセンサを設置する前提であるため、前面ガラスによってレーザー光やミリ波が減衰する。また、車両の先頭形状によらないことが求められるが、LiDAR は斜めの前面ガラスで反射されて距離の測定ができない場合もある。以上をふまえ、本稿では視差によって距離を推定するステレオカメラを採用する。

ステレオカメラによる支障物検知システムの構成を図 1 に示す。2 台の可視光カメラで撮影された画像を使って、ステレオ視による距離推定と立体物の検出、片方のカメラの画像を用いた検知範囲の設定と AI による人物の検出を行う。各フレームで設定された検知範囲との内外判定の結果から、過去の複数フレームにおけるフレーム単位での検知判定を行い、連続的に対象物を検知していた場合にシステムとして検知したことを確定させ、検知結果を出力する。出力された検知結果を使って、アラーム音や発光などで警報を運転士へ通知することや、将来的には車両の制御系を操作してブレーキを動作させることを想定している。次章において、処理部における各処理の詳細を述べる。

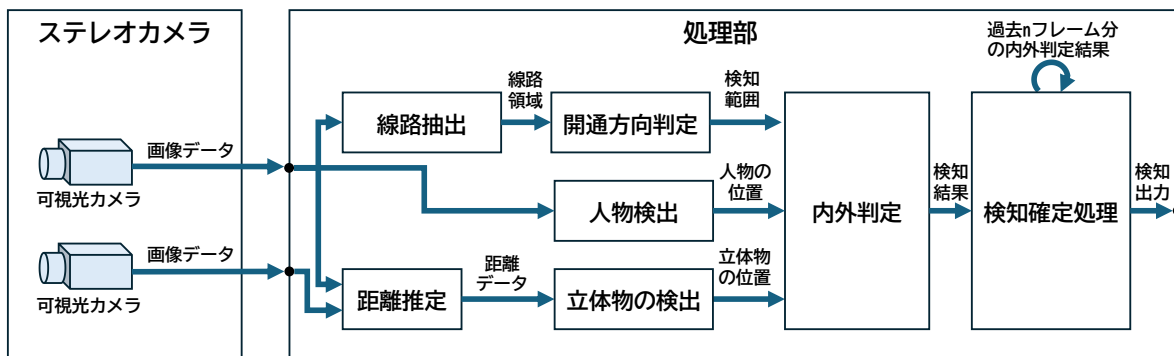


図1 ステレオカメラによる支障物検知システムの構成

3. ステレオカメラによる支障物検知手法

提案する支障物検知システムは、検知範囲の設定、人物の検出、立体物の検出、最終的な検知の確定処理からなる。本章では、これら各手法の詳細を述べる。

3.1 検知範囲の設定と分岐器の開通方向の判定

画像から自身の進行方向のレールに沿って検知範囲を設定する。まず、画像中の特定の領域を画素単位で分類する「セマンティックセグメンテーション」と呼ばれる方式の AI モデル（以下、線路抽出 AI）を用いて「レール頭頂面」「左右レールの間の領域」を予測する。次に、隣接線の領域を除外するため、図 2 に示す通り画像下端の範囲から連続して繋がる線路領域を進行方向の線路領域として選択する。最後に左右レール頭頂面間の領域を広げて検知範囲を設定する。ここでは軌間と建築限界の幅が決まっていることを利用して、両者の比率の分だけ左右レール間の領域を広げることで、おおよそ建築限界の範囲内を検知範囲と定めている。また、線路抽出 AI は、様々なシーンの列車前方面像 3,324 枚に対しレール頭頂面、左右レール間の領域に色を塗ってラベル付けした教師データで学習した。図 3 にアノテーションの例を示す。自列車が走行しない隣接線であってもアノテーションを付与しているため、線路抽出 AI の出力は自列車の走行線と隣接線のすべてを含めた線路領域となる。

分岐の無い区間では前述した方法で進行方向の線路領域を選択することが可能である。一方で、分岐が存在する場所では、線路開通方向に沿って検知範囲を設定する必要がある。そこで我々は、分岐器の開通方向を判定する手法を提案した³⁾。提案手法では、左右のレールは常に分岐器の開通方向に向かって連続することに着目し、レール頭頂面の連続性によって開通方向を判定する。開通方向の判定処理を図 4 に示す。まず、線路抽出 AI で予測されたレール踏面領域に対して複数の水平線を設定し、水平線とレール領域の交点から一定の間隔を保つ点の組を左右レールのペアとして抽出する。次に、画像下端から消失点方向

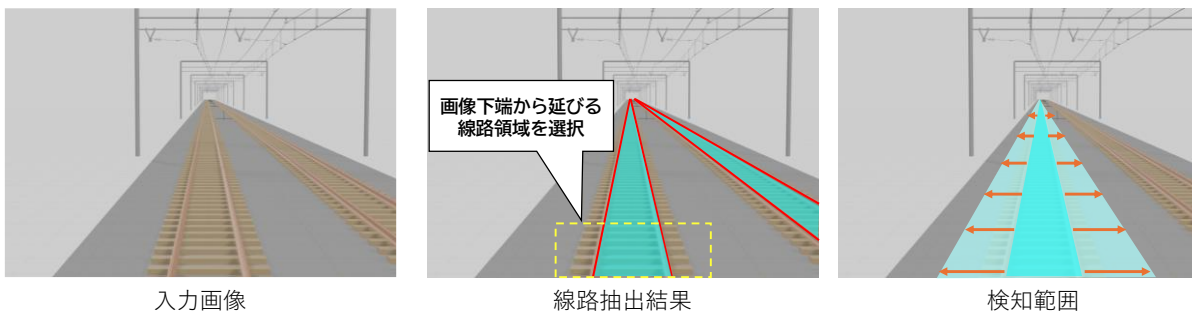


図 2 検知範囲の設定処理

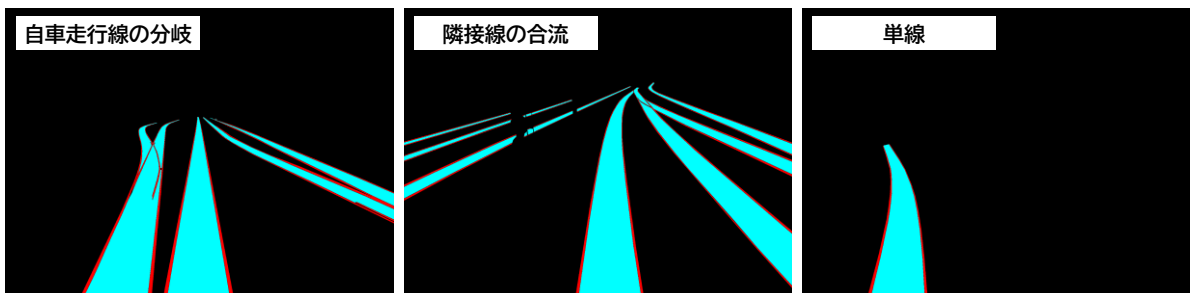


図 3 線路抽出 AI における学習データの例（アノテーションの例）

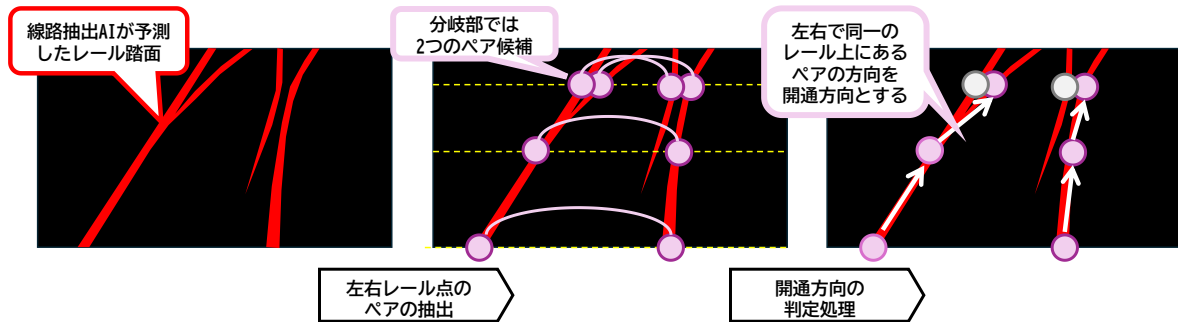


図4 分岐器開通方向の判定処理



(a) 背向方向

(b) 対向方向

図5 分岐器開通方向の判定処理結果例

に向けて、これらのペアのうち、左右それぞれで同一のレール上にあるものを順番に選択することで分岐器開通方向を判定する。最終的に選択された2本のレールを使い、検知範囲を設定する。

分岐器開通方向の判定処理の結果例を図5に示す。図5の例では(a)が背向方向、(b)が対向方向の分岐器であり、提案したアルゴリズムでどちらの分岐器も開通方向が判定でき、さらに奥にある分岐器についても開通方向が判定できていることが分かる。開通方向の判定精度はセマンティックセグメンテーションによるレールの頭頂面の領域抽出の精度に依存する。

3.2 人物検出

人物の検出にはYOLOX⁴⁾を用いる。COCOデータセット⁵⁾での事前学習済みモデルでは、転倒している人物やヘルメットと安全チョッキを着用した作業員に対する性能が低下する。これは、COCOデータセットに含まれる画像には、転倒している人物や、安全チョッキを着用した作業員がほとんど含まれていないためである。そこで、鉄道環境における人物の学習データでファインチューニングする。

線路内で転倒した人物を撮影できるのは、試験線路などの場所に限られる。しかし、AIの汎化性能を向上させるためには様々な鉄道環境で撮影した人物で学習させることが望ましい。そこで、人物が写っていない列車前方画像に対して、生成AIによって人物を合成して学習データを作成し、YOLOXの学習に用いる⁶⁾。図6に生成AIによって線路内に転倒した作業員を生成した例を示す。

3.3 ステレオカメラによる立体物検出

3.3.1 カメラキャリブレーションの省力化

ステレオカメラでは、2カメラ間で視差を推定する際の処理を簡便にするため、2カメラの画像が完全に平行となるように配置されることが望ましい。しかし、実際には完全に平行に設置することは難しいため、

キャリブレーションにより、2 カメラ間で画像が平行になるように変換を行う。一般的なキャリブレーションは、図 7 のように特定の模様を描かれた板をカメラの前にかざし、画像から検出した模様の位置を基準に板とカメラ間の位置を推定し、2 カメラの位置関係を間接的に計算する。適切なキャリブレーション結果を得るためにはカメラの視野範囲をカバーするように複数の箇所でもボードを撮影する必要がある。

しかし、鉄道環境でキャリブレーションを実施する場合、作業員が触車する恐れがあるため、車両の前方の線路内で板を掲げての撮影が容易ではない。他の車両が確実に線路内に入って来ない措置を取るか、カメラを車両から取り外してから行う必要があり、保守の際の負担が大きいことが想定される。

そこでカメラを鉄道車両に設置したままで、2 カメラに共通で映るレールの位置を基準に平行化を行う手法を提案した⁷⁾。具体的には、画像のまくらぎ方向の傾きおよび上下方向のずれを補正したのち、画像に映るレールを線路抽出 AI によって検出した結果から仮想的な無限遠点である左右レールの消失点を求め、2 カメラ間で消失点の位置における視差がなくなるように2つの画像を変換する。変換前後の左右カメラ画像を重ねたアナグリフ画像と、変換後の2カメラの画像から距離を推定した結果を図 8 に示す。図 8(a)からは2つの画像が平行になっていることから、レール位置を基準とした平行化が適切に動作していることが分かる。また、図 8(b)はカメラから物体までの距離が色に変換されており、手前の設備から奥の設備まで距離が推定されていることが確認できる。



図 6 生成 AI によって生成した線路周辺で転倒した作業員

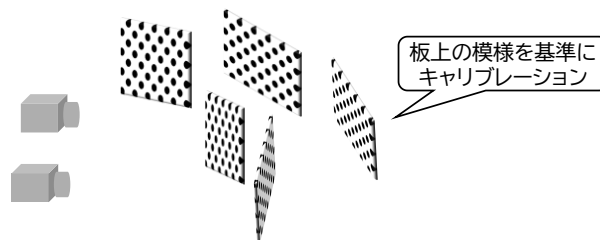
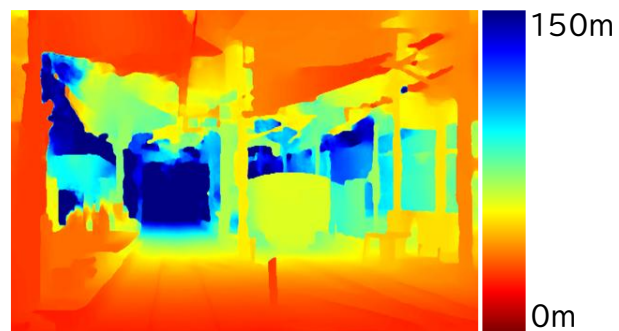


図 7 キャリブレーションのイメージ図



(a) アナグリフ画像



(b) 距離画像

図 8 ステレオカメラによる距離推定

3.3.2 距離画像からの立体物の検知

人物を含めた不特定の立体物を、線路抽出 AI によって推定したレール頭頂面の情報と、ステレオカメラからの距離画像を用いて検知する⁸⁾。立体物検知の処理を図9に示す。まず、距離画像を、カメラを中心とした3次元座標系の点群に変換する。線路抽出 AI で推定したレール頭頂面の領域が対応する点群から、レールレベルの平面を Random Sample Consensus (RANSAC)によって推定する。レールレベルからの高さが一定以上となる点のみを立体物として抽出し、距離画像に戻す。

このようにして得られた立体物のみの距離画像には、実際には地面付近などにおける距離推定の誤差に起因するノイズなども含まれる。このようなノイズを除去する手法としては、3次元空間でのクラスタリングにより物体を抽出する方法が考えられる。しかし、これらの手法は計算負荷が比較的大きいという課題がある。

そこで、立体物の距離分布に基づく軽量のノイズ除去手法を提案する。まず、図10に示すように距離画像を列方向に一定幅の短冊状領域へ分割する。次に、各領域において距離ごとの画素分布をヒストグラムとして算出する。実際の物体に由来する距離値は分散が小さい一方で、距離推定誤差に起因するノイズは分散が大きい、あるいは領域が極端に小さい傾向をもつ。このため、物体が存在する距離に対応するヒストグラムはスパイク状のピークとして観測される。最後に、得られたヒストグラムに対してしきい値処理を適用し、特定の距離に集中して分布する成分のみを抽出することで、ノイズを効果的に除去する。

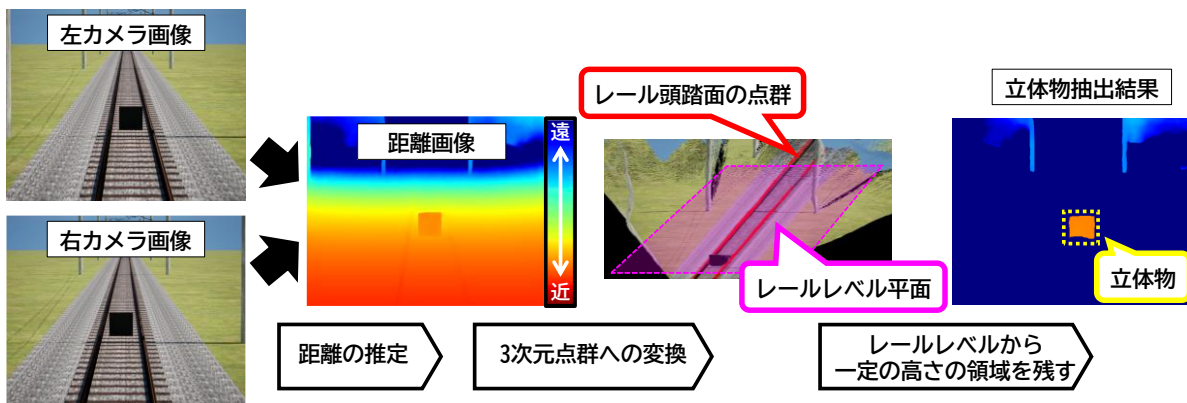


図9 立体物の検知処理

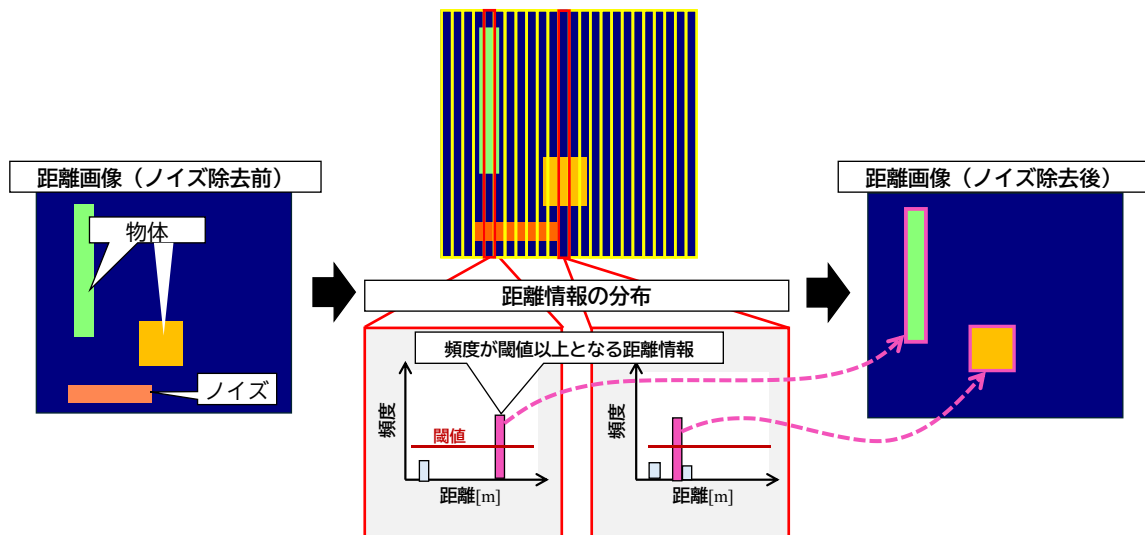


図10 立体物の距離画像からのノイズ除去処理

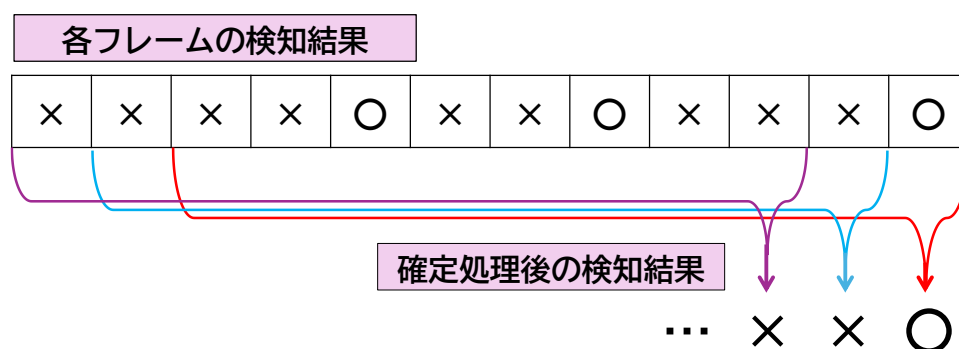


図11 検知結果の確定処理

3.4 検知の確定処理

フレーム単位での検知処理の結果の中には瞬間的な誤検知や未検知も含まれる。最終的な出力におけるこれらの影響を除くため、過去の連続するフレームのうち、一定数以上のフレームで検知出力がされている場合に検知を確定させる処理を施す。検知結果の確定処理の例を図11に示す。図11では、検知が10フレーム中3フレーム以上存在する場合に確定処理において検知と出力する様子を示している。以降の評価試験においても、検知確定処理のパラメータは10フレーム中3フレーム以上と設定した。

4. 検知性能評価

4.1 評価用データの撮影

対象との距離ごとの検知性能を評価するため、実際の車両基地構内においてデータ取得試験を実施した。本試験では、実際の車両にステレオカメラを仮設し、車両を被写体から遠ざける方向に走行させてデータを取得した。この1回の走行を1試番として、2023年6月～8月までの8日間に、昼間43試番、夜間36試番の合計79試番を実施した。被写体は図12に示す通り、服装や姿勢の異なる人物、および人物以外に20cm²～30cm²程度の工具箱・工具バッグを対象とした。また、撮影に用いたカメラの諸元を表1に示す。カメラは、レールレベルからの高さは約2.7mで俯角は約4.0°、基線長は25cmでまくらぎ方向に平行に配置した。

4.2 評価方法

検知性能評価にあたり、実際のシステムの適用場面に近い条件で評価するため、撮影時に車両が被写体から遠ざかる向きに画像を取得し、評価時に逆再生することにより、被写体に近づく方向を再現した。なお、安全のために、被写体となる人物は車両が離れていく方向に動き出したことを確認した後、線路内に立ち入った。検知距離については、隣接フレーム間での軌道面の画素値の移動量を推定し、走行試番の画像群全体で積算したものを実際の走行距離と対応付けることで、フレームごとの対象との距離を算出した。

被写体が最も遠い場所から順に検知処理を行うと、一定の距離まで近づいたタイミングで対象を検知できるようになり、被写体が一時的に画角から外れない限りは被写体の手前まで検知状態が持続する。このような検知・未検知の境界となる距離を「最遠検知距離」と定義し、条件別に集計した。なお、撮影時においてカメラと被写体が最も近接した状態において対象を検知できなかった場合、実際にどの程度の近傍距離で検知が可能であるかを評価することが困難である。このため、本報告では最遠検知距離を0mとして集計した。



図 12 被写体の例

表 1 使用したカメラの諸元

解像度	水平 1,920px, 垂直 1,536px
素子サイズ	3 μm
レンズ焦点距離	24 mm
感度※	1,953 mV

※露光時間 1/30 秒での値

4.3 評価試験の結果

人物について、時間帯および姿勢ごとの最遠検知距離の平均値と標準偏差を箱ひげ図で示したグラフを図 13 に示す。公開データセットのみで学習した AI モデル①と、AI によって生成した転倒している作業員を学習させた AI モデル②のそれぞれで評価している。AI モデル①では、ステレオカメラによる立体物の検出でも、転倒した状態では、レールレベルとの差が小さく転倒した人物を検出することができなかった。一方で、AI モデル②では転倒状態を含めた人物について、最遠検知距離は 100 m 以上となった。これは人物認識の AI の性能向上によるものである。

夜間においては、対象が撮像される距離が短くなり、最遠検知距離は 50m 程度であった。これは、画像全体が暗くなることでステレオカメラによる視差の推定ができず、AI による認識では安全チョッキによる光の反射によって検出性能が低下したためであると考えられる。対策としては、明るさを補正する処理を追加し、ステレオカメラによる視差の計算をしやすくする方法と、安全チョッキによって反射した状態の学習データを追加することで AI による認識性能を向上させることが考えられる。

最後に、人物以外のバッグや工具箱については、今回のシステムでは検出ができなかった。これは、RANSAC によるレールレベル平面の推定精度が不十分であるためと考えられる。具体的には、レール頭頂面の抽出誤差や、ステレオカメラによる距離推定誤差の影響により、推定される平面が実際のレールレベ

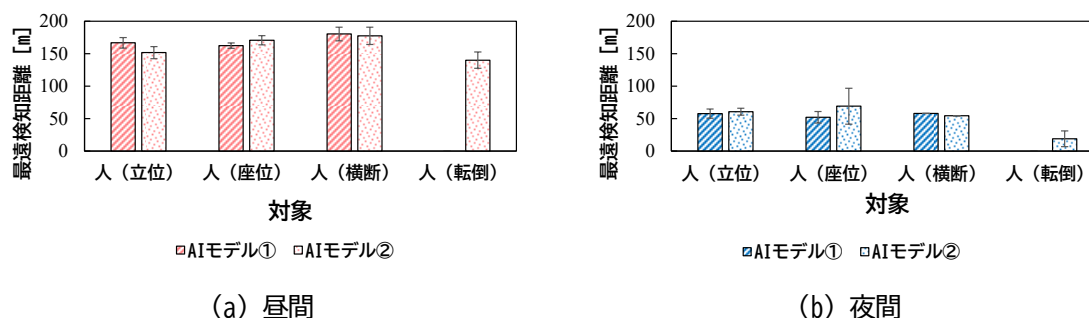


図 13 AI モデルごとの各対象の最遠検知距離

表 2 処理装置の諸元

CPU	Intel® Core i9-10900TE (1.8 GHz/4.5 GHz 10 コア 20 MB キャッシュ)
GPU	NVIDIA RTX A4500
メモリ	64 GB
ストレージ	2 TB
備考	ボックス PC 鉄道規格 EN50155 認証

表 3 リアルタイム動作における条件別の最遠検知距離

No.	対象物	時間帯	最遠検知距離 (m)
1	人 (立位)	昼	104
2	人 (立位)	昼	184
3	人 (立位)	昼	162
4	人 (立位)	昼	108
5	人 (横断)	昼	181
6	人 (横断)	昼	130
7	人 (立位)	夜	23
8	人 (立位)	夜	23

ルよりも高い位置、あるいは実際とは異なる傾きを有する平面として推定される場合がある。その結果、レールレベル平面以上の領域から立体物を抽出する段階で、本来検出されるべき地面近傍の対象物が平面下に埋もれてしまい、立体物として正しく抽出されないという問題が生じた。

この問題に対する対策としては、レール抽出の精度を向上させることや、ステレオカメラの基線長を拡大することで距離分解能を向上させ、距離推定精度の改善を図ることが有効であると考えられる。

4.4 リアルタイム動作の検証

提案手法について、2 カメラからの画像の取得からモニタへの検知結果の出力までの一連の処理を、実車環境でリアルタイムに動作させる試験を 8 試番実施した。車両基地構内において、実車の運転台に、ステレオカメラおよび処理装置、モニタを仮設した。処理装置の諸元は表 2 の通りである。処理装置は実際の車載装置に近い仕様を有するものとして、鉄道車両に搭載することを想定して設計されたボックス PC を用いた。被写体から車両は遠ざかる方向に走行し、フレーム単位の検知結果を保存した。列車が被写体に近づく方向で走行した場合と同等になるように、逆再生して評価することでシステムの最遠検知距離を求めた。

人物の昼夜別の最遠検知距離を算出し、条件別にまとめた結果を表 3 に示す。昼間は、100 m 以上遠方で人物を検知できていることが分かる。処理の性能に関しては、1 秒あたり 2~3 フレーム程度であったため、今後高速化などの検討を進める。

5. まとめ

本報告書では、構内をターゲットにセンサを用いた列車前方支障物検知システムの構成と検知アルゴリズムを提案し、実際に車内に設置したステレオカメラを用いた評価試験の結果を示した。

線路の分岐が多い構内において線路の開通方向に検知範囲を設定するため、AI が予測した左右レールが画像下端から連続する方向に判定することで、開通方向を判定する手法を提案した。提案手法では、昼間の人物について姿勢によらず約 100 m から検知できることを示した。一方で、夜間における検知性能、および人物以外の軌道面付近の物体の検知性能に課題があることを示した。

今後は軌道面付近での物体検知性能の課題への対応と、時間帯以外に天候状態が変化した際の提案手法における性能評価を行う予定である。

文 献

- 1) 国土交通省：鉄道における自動運転技術検討会とりまとめ, <https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001351026.pdf>, 2022 (参照日: 2024 年 12 月 26 日)
- 2) 影山 椋, 長峯 望: 列車前方監視のためのセンサフュージョンによる支障物検知手法の検討, 電気学会論文誌 D, Vol.144, No.3, pp.70-78, 2024
- 3) 影山 椋, 長峯 望, 山下 光太郎, 丸山 量志: 構内における列車前方監視のための検知範囲設定手法, 第 30 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2023) 講演論文集, S6-1-6, pp.410-413, 2023
- 4) Y Zheng Ge and, Songtao Liu, Feng Wang, Zeming Li and Jian Sun, “YOLOX: Exceeding YOLO Series in 2021,” CoRR, vol. abs/2107.08430, arXiv preprint arXiv:2107.08430, 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2107.08430>.
- 5) L. Tsung-Yi, et. al., “Microsoft coco: Common objects in context,” In Proc. of the 13th European Conference on Computer Vision, pp.740-755, 2014.
- 6) 清水 義輝, 影山 椋, 長峯 望, 山下 光太郎, 丸山 量志: 学習データの改良による車上型支障物検知手法の検知性能向上, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-23-067, 2023
- 7) 影山 椋, 長峯 望: レール位置を用いた車載ステレオカメラの効率的な平行化手法, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-24-094, 2024
- 8) 影山 椋, 長峯 望: 列車前方監視のためのステレオカメラによる線路内の立体物検知手法, 第 31 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2024) 講演論文集, SS6-3-3, 2024

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

曾我部正道

■編集責任者

小島謙一

■企画・監修

川崎邦弘	重枝秀紀	石毛 真	武内陽子
坪川洋友	渡辺信行	田所敏弥	根津一嘉
桃谷尚嗣	布川 修	福田光芳	平井 力
半田和行	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40巻 第9号

2026年9月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2026 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. 40 No. 9

Sep. 2026

PAPERS

- Simulation-based Verification of Braking Distance Controllability under Shunting Train Conditions
.....Y.KIZAKI, K.MIYAHARA, S.NAKAZAWA (1)
- Development and Application of a Numerical Simulation for a Large-Scale Low-Noise Wind Tunnel
.....K.NAKADE, H.NAKANO, T.ABE, A.IDO, T.INOUE (12)
- Investigation of Causes of Breakage of Front Rod L-shaped Fitting and Maintenance Methods to Prevent It
.....S.SHIOMI, S.SHIGEMORI, Y.OSHIMI (22)
- Stereo Camera-Based Obstacle Detection System in Railway Yards
.....H.MUKOJIMA, R.KAGEYAMA, N.NAGAMINE, S.KOMURO (33)

