

鉄道総研報告

第38巻 第3号

2024年3月

論文

- 車両** 圧電素子を内蔵した軸ばね防振ゴムによる台車の走行状態監視手法
..... 間々田祥吾, 太田達哉, 嵯峨信一, 吉川和宏 (1)
- 車両** **電気** 横風を受ける在来線パンタグラフの揚力増加メカニズムと対策に関する数値解析
..... 阿部巧, 中出孝次, 光用剛 (9)
- 施設** 鋼棒群を用いた鋼鉄道橋制震装置の設計法
..... 和田一範, 櫛谷拓馬, 豊岡亮洋 (17)
- 施設** 周辺地物からの放射熱を考慮した夜間のレール温度予測法の開発
..... 浦川文寛, 渡辺勉 (25)
- 施設** **電気** 火山灰が鉄道の電気・信号設備に及ぼす影響の評価と降灰情報の活用法の提案
..... 西金佑一郎, 寺田夏樹, 小西武史, 浦越拓野, 河村祥一 (35)
- 電気** 自律運転に向けた沿線・車両状態情報に基づく運行リスク評価手法
..... 太田佑貴, 祇園昭宏, 西本翔, 櫻井勇輝 (43)
- 電気** 車上主体の自律型列車制御システムの開発
..... 北野隆康, 熊澤一将, 藤田浩由, 杉山陽一 (49)

圧電素子を内蔵した軸ばね防振ゴムによる 台車の走行状態監視手法

間々田 祥吾* 太田 達哉* 嵯峨 信一** 吉川 和宏***

A Method for Monitoring Running Condition of a Bogie by Using an Axle Spring Isolation Rubber with a Built-in Piezoelectric Element

Shogo MAMADA Tatsuya OTA Shinichi SAGA Kazuhiro YOSHIKAWA

Axle spring isolation rubber installed on an axle box is subjected to loads equivalent to the wheel loads during running. Therefore, to investigate a method for monitoring running conditions of a bogie, as first step in the research in this paper, we fabricated an axle spring isolation rubber with a built-in piezoelectric element (AIBP). Since an AIBP can generate an electric charge in response to the load, it may be effective as a method for monitoring the running condition of the bogie. Then, running test with AIBP installed on the bogie was conducted to obtain wheel loads by calculated by converting the electric charge generated from the AIBP into a load. The test result of running tests showed that the calculated rubber load correlates with the wheel load, so that the time waveform of the rubber load could be used to monitor the running condition of the wheel.

キーワード：車軸軸受，軸箱，軸ばね防振ゴム，圧電素子，時間波形

1. はじめに

鉄道車両の走行にとって、台車は最も重要な部位である。そのため、これまでに台車の走行状態を監視する様々な手法が検討されている^{1) 2)}。現在、台車の走行状態を監視する一般的な手法としては、PQ輪軸を用いて走行中の車輪に鉛直方向に加わる輪重および水平方向に加わる横圧を測定する手法や、台車の表面に加速度センサなどを設置して台車の各部位の振動状態を測定する手法などがある^{3) 4)}。その一方で、PQ輪軸は高価であることに加え、測定に専門的な技術が求められる。そのため、全ての台車に設置して常時監視することは困難である。また、加速度センサなどを台車の表面に設置する場合、長期間の設置に対して、走行中の落失や飛来物との接触の危険性が懸念される。

そこで、筆者らは、できるだけ安価で簡易に測定でき、さらに長期間の設置に対しても落失などの危険性が低い監視手法を検討した。本検討では、過去の知見に基づき^{5) 6)}、台車の走行状態を監視するセンサの箇所として、台車内の図1に示す車軸軸受を封入する軸箱上に設置される軸ばね防振ゴムに着目した。図1に示すように、軸ばね防振ゴムには走行中の輪重の変動（以下、輪重変動）に相当する荷重の変動が加わると考えられる。その

ため、荷重を測定するセンサとして軸ばね防振ゴムを活用することができれば、軌道状態や車両状態が反映された荷重変動によって走行状態を監視できると考えられる。

本検討では、軸ばね防振ゴムにセンサの機能を付与するため、圧電素子を内蔵させた軸ばね防振ゴム（以下、センサ軸ばね防振ゴム）を作製した。圧電素子は、加わった荷重に応じて電荷を発生させる特性があり、発生した電荷から加わった荷重を測定するフォースセンサの材料として利用される^{7) 8)}。また、センサ軸ばね防振ゴムは、通常の軸ばね防振ゴムと交換して設置するため、設置方法がPQ輪軸と比較して簡易であることや走行中の落失などの危険性が低いという利点がある。

本報告では、センサ軸ばね防振ゴムの基本性能の評価結果、実際の台車に設置して実施した実軌道における走行試験の結果およびセンサ軸ばね防振ゴムを台車の走行状態監視に活用する手法について検討した結果を述べる。

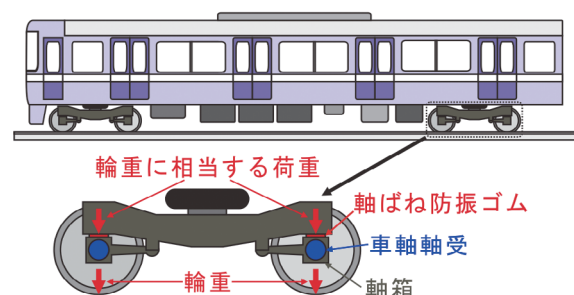


図1 軸ばね防振ゴムの設置箇所

* 材料技術研究部 防振材料研究室

** 車両技術研究部 ブレーキシステム研究室

*** 東日本旅客鉄道株式会社

2. センサ軸ばね防振ゴムの基本性能

2.1 センサ軸ばね防振ゴムの概要

作製したセンサ軸ばね防振ゴムの外観を図2に示す。

図2に示すように、1体のセンサ軸ばね防振ゴムに2体の圧電素子を内蔵した。使用した圧電素子は、現在最も一般的に使用されるチタン酸ジルコン酸鉛であり、直径約16mm、厚さ2mmの円盤状に成型したものをを用いた。また、センサ軸ばね防振ゴムには、内部の圧電素子から発生する電荷を取り出すための2本のケーブルが取り付けられている。

2.2 センサ軸ばね防振ゴムの校正値

センサ軸ばね防振ゴムで発生した電荷から加わった荷重を算出するためには、電荷の値を荷重に変換する校正値が必要である。以下に校正値の求め方を示す。

校正値は、図3に示すように、試験機を用いてセンサ軸ばね防振ゴムを厚さ方向に加振する動的加振試験を実施し、試験で得られる荷重振幅および電荷振幅の関係から求めた。動的加振試験の条件は、台車に設置した状態を想定して65kNを平均荷重とし、変動荷重として振幅1kN、5kN、10kN、15kN、20kN、25kN、周波数0.1Hz、1Hz、10Hzの正弦波を設定した。なお、電荷は、2体の圧電素子に対して個々にチャージアンプを接続し、発生した電荷量を電圧値として測定した。後述する走行試験では、4体のセンサ軸ばね防振ゴム（センサ軸ばね防振ゴムNo.1～No.4）を使用した。ここでは、例としてセンサ軸ばね防振ゴムNo.1の試験結果を示す。

動的加振試験における荷重およびセンサ軸ばね防振ゴムNo.1の2体の圧電素子（素子No.1-1、No.1-2）の電荷の時間波形例を図4に示す。図の結果は荷重振幅10kN、加振周波数1Hzの結果である。

図4より、2体の圧電素子から発生する電荷量はほぼ同等である。なお、圧縮方向の荷重に対して負の電荷が発生しているが、これは測定の際に使用したチャージアンプ内における積分回路の特性によるものである。次に、



図2 センサ軸ばね防振ゴムの外観

計測された時間波形に対して周波数解析を実施し、荷重振幅および電荷振幅を求めた結果を図5に示す。ただし、図4に示すように、素子No.1-1とNo.1-2の電荷振幅の大きさはほぼ同等であったため、図には素子No.1-1の結果のみを示す。

図5より、荷重振幅と電荷振幅は高い相関性を示している。また、加振周波数が0.1Hz、1Hzおよび10Hzにおける傾きはほぼ同等である。この結果は、センサ軸ばね防振ゴムに加えられる荷重の周波数が校正値に与える影響が小さいことを示している。

動的加振試験の結果より、校正値は動的加振試験において実施した全試験条件の荷重振幅と電荷振幅の傾きから算出した。なお、図5に示した結果では傾きが2.4pC/Nと算出されるが、図4に示すように荷重と電荷の位相が逆となるため、校正値は-2.4pC/Nとなる。なお、センサ軸ばね防振ゴムNo.2～4についても、センサ軸ばね防振

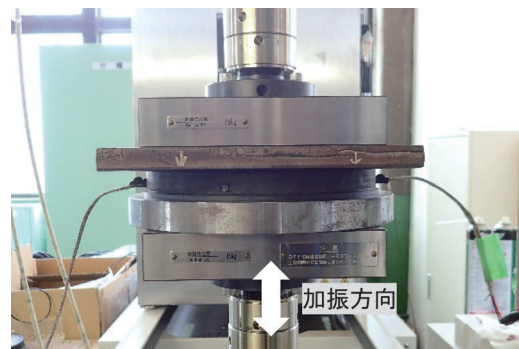


図3 動的加振試験の状況

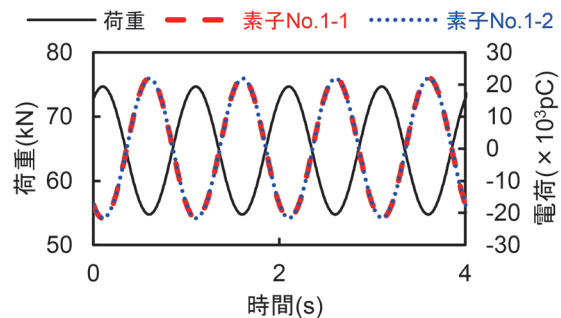


図4 荷重および電荷の時間波形

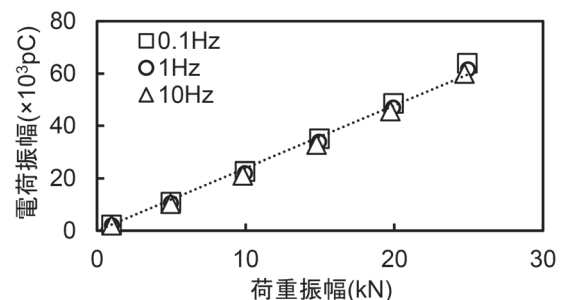


図5 電荷振幅と荷重振幅の関係

ゴム No.1 とほぼ同等の試験結果が得られた。

3. 実軌道における走行試験

3.1 走行試験におけるセンサ軸ばね防振ゴムの配置

走行試験では、1台の台車における1位～4位の全ての軸箱上にセンサ軸ばね防振ゴムを設置した。走行試験におけるセンサ軸ばね防振ゴムの配置を図6に示す。

図に示すように、センサ軸ばね防振ゴム No.1, No.2 を設置した1軸はPQ輪軸であり、センサ軸ばね防振ゴム No.3, No.4 を設置した2軸は通常の輪軸である。また、センサ軸ばね防振ゴム内の2体の圧電素子の配置は、図6に示すように、車軸に対して平行となるように設置した。なお、図6に示すように、素子No.の枝番号が-1（以下、素子No.-1）の圧電素子は台車外側となり、-2（以下、素子No.-2）の圧電素子は台車内側となる。

3.2 センサ軸ばね防振ゴムによる荷重の測定方法

走行試験において、センサ軸ばね防振ゴムには走行中の上下方向の輪重変動に相当する荷重が加わり、その荷重に応じて電荷が発生すると考えられる。そこで、電荷量の測定結果と前述した方法によって試験前に算出しておいた校正値 d から、以下の式を用いてセンサ軸ばね防振ゴムで測定される荷重（以下、ゴム荷重）を算出した。

$$F_R = Q/d \quad (1)$$

ここで、 F_R はゴム荷重、 Q は発生電荷である。

センサ軸ばね防振ゴムから発生した電荷は動的加振試験の場合と同様にチャージアンプを介して測定した。ここで、測定されるゴム荷重は、チャージアンプのフィードバック回路における抵抗値と静電容量の積である時定数によって、入力された荷重に対する応答性が異なる。時定数が短いほど、ゆっくり変動する荷重に対する追従

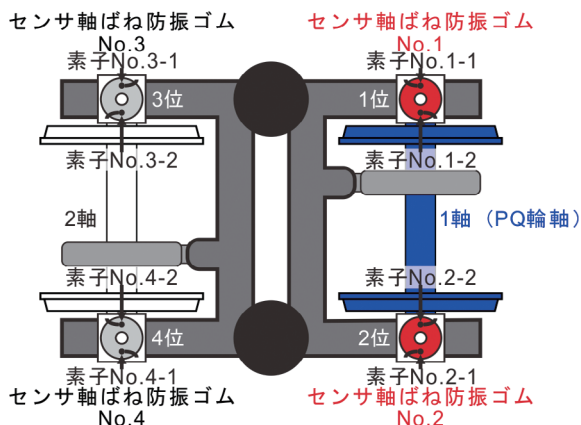


図6 走行試験におけるセンサ軸ばね防振ゴムの配置

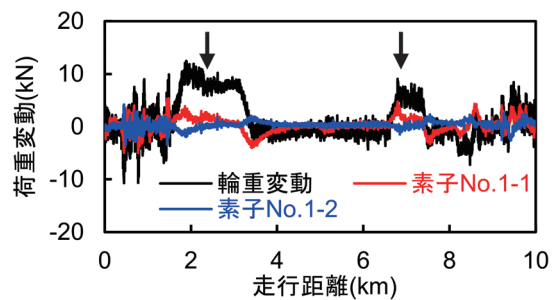
性は低下するが、時間経過に伴って波形のベースラインがずれるドリフトの影響が小さくなる。一方、時定数が長いほどゆっくり変動する荷重に対する追従性は向上するが、ドリフトの影響が大きくなる。走行試験では、時定数を10sに設定してゴム荷重を測定した。時定数を10sの設定では、一定の荷重が継続的に入力された場合、見かけ上の荷重が10s後に63.2%まで低下することになる。

3.3 ゴム荷重と輪重変動の比較

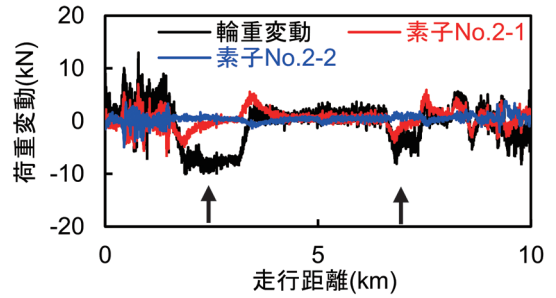
最高速度約100km/h、走行距離約10km（以下、A区間）におけるゴム荷重およびPQ輪軸による輪重変動の時間波形の比較を図7に示す。図に示す輪重変動は走行中の輪重から停車中の静止輪重を引いた値を示す。なお、図7に示す時間波形には以下に示す処理をしている。

輪重変動によって台車の走行状態を監視するためには時間波形を長時間測定する必要があるが、長時間の測定では、遅く変動する波形の方が監視しやすい。また、PQ輪軸によって簡易的に輪重の緩やかな変動成分を監視する場合、5Hz程度よりも高い周波数帯域の波形を除去するローパスフィルター（以下、LPF）処理をされることがある。これらを考慮して、走行試験ではゴム荷重、輪重ともに5HzのLPF処理をした。

図7より、輪重変動とゴム荷重を比較すると、全体的にゴム荷重の振幅が輪重変動の振幅よりも小さい。これは、センサ軸ばね防振ゴムの場合、圧電素子がゴムに内蔵されており、衝撃的に大きく変動する荷重が緩和されるためと考えられる。また、図中の矢印で示した曲線区



(a) 1位



(b) 2位

図7 A区間における輪重変動とゴム荷重の時間波形

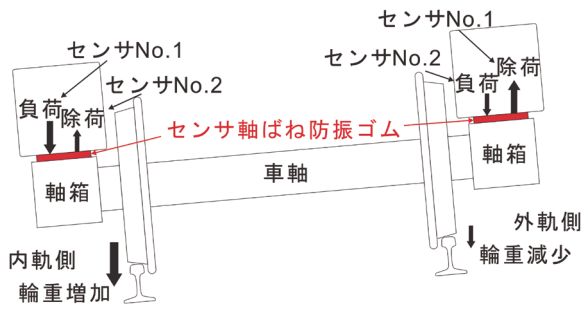


図8 曲線区間における輪重およびゴム荷重の推測

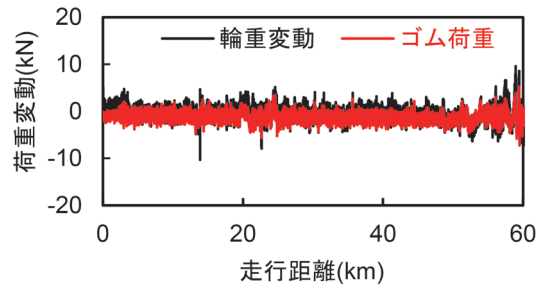
間ではゴム荷重が輪重変動に追従しにくく、0kNに戻る傾向がある。これは、前述したチャージアンプの時定数により、曲線区間のように増加した輪重が継続的に加わり続ける場合、ゴム荷重が見かけ上変化するような波形になったものと考えられる。なお、走行試験では時定数を100sに設定した場合でも測定したが、その場合、曲線区間におけるゴム荷重の追従性は向上するものの、ドリフトの影響により、正確な測定が困難であった。

次に、素子 No.-1 と素子 No.-2 のゴム荷重を比較すると、素子 No.-1 のゴム荷重は振幅が大きく、変動傾向が輪重変動と概ね相関するのに対して、素子 No.-2 のゴム荷重は振幅が小さく、変動の傾向も輪重変動と逆となっている。このような結果が得られた要因については今後詳細な検討が必要であるが、走行中に軸箱上加わる荷重が均一でなく、曲線区間ではゴム荷重および輪重に図8に示すような偏りが生じ、軸箱上面の内側よりも外側の荷重の変動が大きくなる可能性が考えられる。

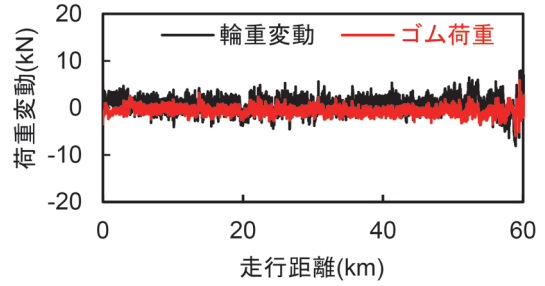
図7に示す結果より、センサ軸ばね防振ゴムで得られるゴム荷重を用いて台車の走行状態を監視する場合、素子 No.-1 のゴム荷重の方が輪重変動傾向に近く、より正確に走行状態を監視できる可能性があることがわかった。そこで、A区間と最高速度および走行距離が異なる最高速度約200km/h、走行距離約60km（以下、B区間）および最高速度約300km/h、走行距離約50km（以下、C区間）において素子 No.-1 のゴム荷重と輪重変動を比較した。結果を図9および図10に示す。

図9、図10より、1位および2位ともにA区間よりもゴム荷重と輪重変動には高い相関がある。この要因を以下に考察する。

まず、B区間については、A区間のように増加した輪重が加わり続けるような曲線区間が存在しなかったことが要因と考えられる。次に、C区間については曲線区間の距離が約2kmであり、A区間と同程度である。その一方で、A区間よりも走行速度が速いことから、輪重の変動の変化が速いことに加え、輪重が増加して加わる時間も短いため、ゴム荷重が輪重に追従しやすかったことが要因と考えられる。

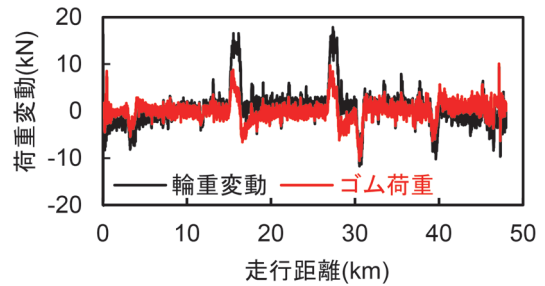


(a) 1位

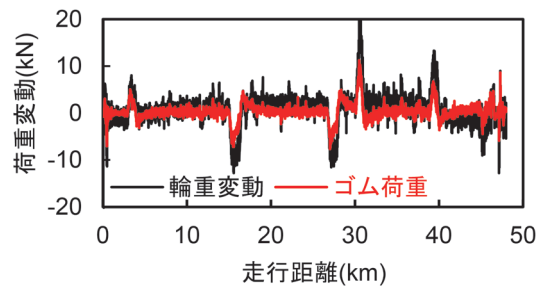


(b) 2位

図9 B区間における輪重変動とゴム荷重の時間波形



(a) 1位



(b) 2位

図10 C区間における輪重変動とゴム荷重の時間波形

以上の結果より、センサ軸ばね防振ゴムで得られるゴム荷重は輪重変動と相関することがわかった。なお、センサ軸ばね防振ゴムを用いた監視手法としては、ゴム荷重の変動を輪重変動と正確に一致させることを目的としておらず、後述するような適用方法を検討している。

4. センサ軸ばね防振ゴムを活用した監視手法の提案

走行試験の結果より、ゴム荷重は輪重変動と相関があり、ゴム荷重を活用して台車の走行状態を監視できる可能性があることが見出せた。ここでは、実際の運用において、センサ軸ばね防振ゴムを活用して台車の走行状態を監視する手法について検討した結果を述べる。

4.1 センサ軸ばね防振ゴムの設置数の低減方法

走行試験では、図6に示すように1台の台車に対して1位～4位の全ての軸箱上に設置した4体のセンサ軸ばね防振ゴムによって計8体の圧電素子で得られるゴム荷重を個々に測定した。一方、実際の運用における監視手法を想定すると、全ての軸箱上にセンサ軸ばね防振ゴムを設置し、圧電素子に接続されたケーブルを車上まで配線することは煩雑であり、施工性に劣る。また、個々の圧電素子で得られるゴム荷重を個別に評価することは煩雑であり、チャージアンプやデータロガーなども圧電素子と同じ数が必要であるため、コストにも影響する。そこで、監視に用いるゴム荷重の波形の数や設置する圧電素子の数を減らす手法を検討した。

手法の一つとして、同じ車軸に設置した2体のセンサ軸ばね防振ゴム内の素子 No.-1 のゴム荷重の差（以下、並行ゴム荷重差）を用いることを検討した。ここで、素子 No.-1 のみを用いる理由は、前述したように外側に設置した素子 No.-1の方がゴム荷重の変動が大きく、台車の走行状態を反映しやすいと考えたためである。その結果、並行ゴム荷重差によって、後述する手法と同様に台車の走行状態を監視できる可能性があることがわかった。その一方で、本手法では、監視に用いるゴム荷重の波形の数を減らすことができ、センサ軸ばね防振ゴムに内蔵するセンサを1体に減らすことができるが、センサ軸ばね防振ゴムの数を減らすことができない。また、センサ軸ばね防振ゴムの数を減らすために、台車内の1本の車軸のみにセンサ軸ばね防振ゴムを設置した場合、個々の軸の状態を把握することができない。

そこで、図11に示すように、台車の対角の位置に設置したセンサ軸ばね防振ゴム内の素子 No.-1 のゴム荷重の差（以下、対角ゴム荷重差）を用いる手法を検討した。本手法では、1台の台車に設置するセンサ軸ばね防振ゴムの設置数が2体となることに加え、並行ゴム荷重差と同様にゴム荷重の変動が大きい素子 No.-1のみを用いることにより、圧電素子の数が2体となる。また、対角ゴム荷重差を算出することにより、監視に用いるゴム荷重の波形の数を減らすことができる。以下の記述では、素子 No.1-1 と素子 No.4-1 の対角ゴム荷重差を No.1-No.4、素子 No.3-1 と素子 No.2-1 の対角ゴム荷重差を

No.3-No.2 と示す。

本手法では、個々の車輪の輪重変動を詳細に把握することは困難であるが、台車全体としての走行状態を把握することは可能であると考えられる。

4.2 対角ゴム荷重差の比較

A 区間、B 区間および C 区間において、走行日が異なる走行試験における対角ゴム荷重差の比較を図12、図13および図14に示す。図中の日数は、センサ軸ばね防振ゴムを設置後、走行を開始した日からの経過日数を示す。なお、図に示した結果は、走行速度などの走行条件がほぼ同等の複数の走行日における結果である。

図12～図14より、対角ゴム荷重差の波形は全ての区間において、異なる走行日であってもほぼ同様である。

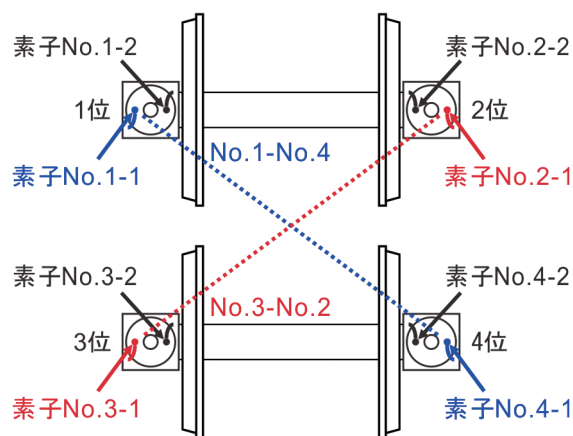
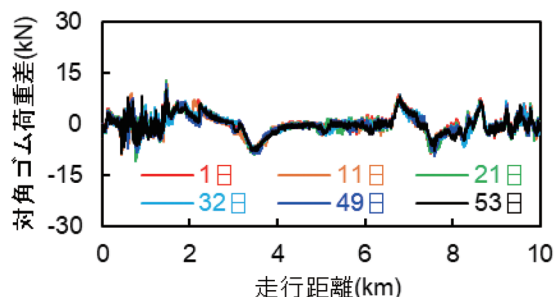
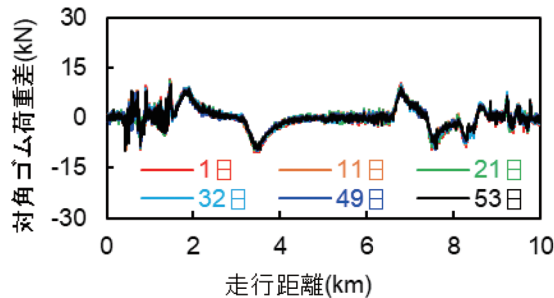


図 11 対角ゴム荷重差の算出位置

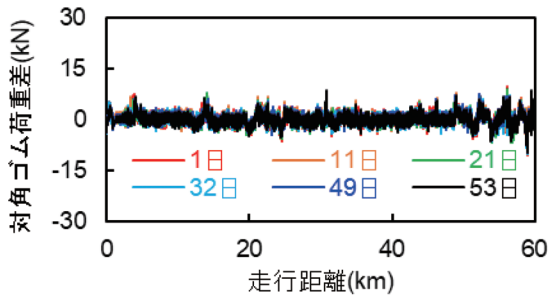


(a) No. 1-No. 4

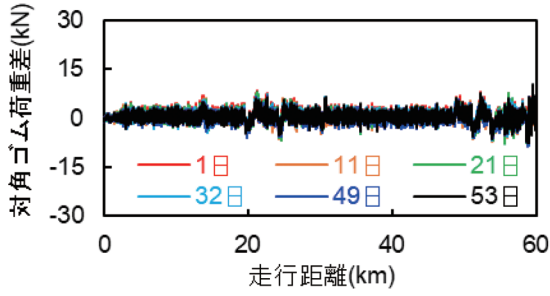


(b) No. 3-No. 2

図 12 A 区間における対角ゴム荷重差の比較

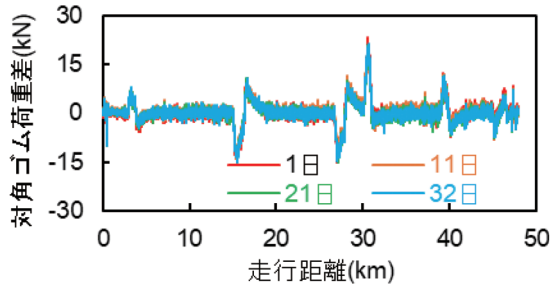


(a) No. 1-No. 4

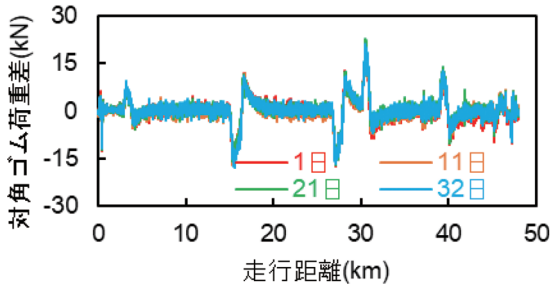


(b) No. 3-No. 2

図 13 B 区間における対角ゴム荷重差の比較



(a) No. 1-No. 4



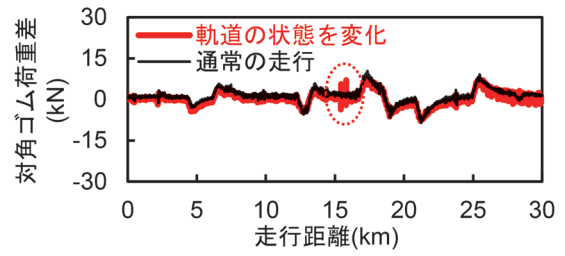
(b) No. 3-No. 2

図 14 C 区間における対角ゴム荷重差の比較

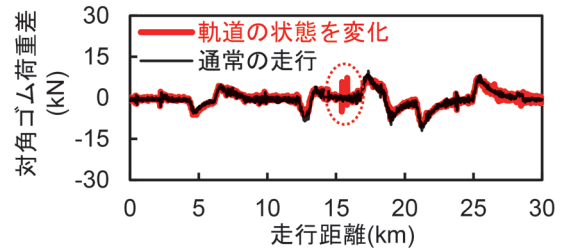
これは、同じ走行条件で同一の走行区間を走行した場合、得られる対角ゴム荷重差の波形がほぼ同様となることを示している。この結果より、対角ゴム荷重差の波形を通常の走行状態と比較することによって通常と異なる走行状態となった事象を早期に検知できる可能性がある。

4.3 通常と異なる走行状態における対角ゴム荷重差

対角ゴム荷重差によって通常と異なる走行状態となっ

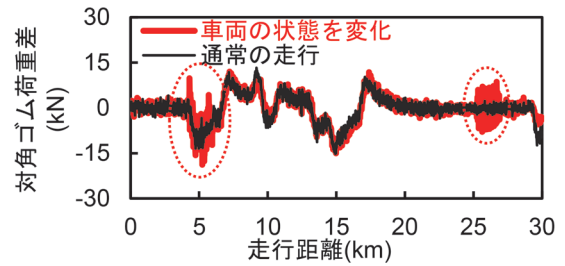


(a) No. 1-No. 4

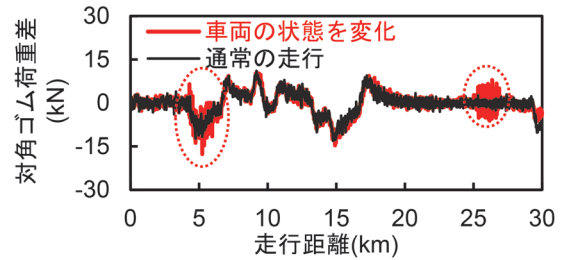


(b) No. 3-No. 2

図 15 軌道の状態を変化させた場合の対角ゴム荷重差



(a) No. 1-No. 4



(b) No. 3-No. 2

図 16 車両の状態を変化させた場合の対角ゴム荷重差

た事象を把握できるか検討するため、走行試験において通常の走行状態と人工的に軌道不整を発生させた状態（以下、軌道状態を変化させた場合）および車体を強制的に加振させた場合（以下、車両状態を変化させた場合）の対角ゴム荷重差を比較した。結果を図 15 および図 16 に示す。軌道状態および車両状態を変化させた区間は図中の赤い丸で囲った箇所である。

図 15、図 16 より、図中の赤い丸で囲んだ区間において、通常の走行の場合は対角差ゴム荷重に大きな変動がないのに対して、軌道状態および車両状態を変化させた場合に対角ゴム荷重差が顕著に上下に変動している。

以上の結果より、対角ゴム荷重差によって台車の走行状態を監視できる可能性がある。実際の運用における監視手法としては、通常の走行状態における対角ゴム荷重差の波形を蓄積して機械学習させておき、通常の走行状態と異なる状況が同地点において継続して発生した場合に軌道状態を調査し、断続的に発生した場合に車両状態を調査するなどの運用方法が想定される。

5. おわりに

台車の走行状態を簡易に評価でき、長期間の設置に対して落失などの危険性を低減する新たな監視手法として、軸ばね防振ゴムに圧電素子を内蔵したセンサ軸ばね防振ゴムを活用する手法を検討した。

センサ軸ばね防振ゴムの基本性能を評価した結果、センサ軸ばね防振ゴムは圧電素子の特性を利用することにより、走行中にセンサ軸ばね防振ゴムに加わる荷重（ゴム荷重）の変動を把握できることがわかった。

センサ軸ばね防振ゴムを台車に設置し、実軌道における走行試験を実施した結果、ゴム荷重は、輪重変動と相関があり、台車の走行状態を把握できる可能性が見出された。また、センサ軸ばね防振ゴムを活用した監視手法を検討した結果、台車の対角の軸箱上に設置されたセンサ軸ばね防振ゴムのゴム荷重の差を求めることにより、通常と異なる走行状態となった場合を検知できる可能性があることがわかった。

今後、センサ軸ばね防振ゴムの長期耐久性の評価や走行状態を監視するシステムの構築などの課題を克服する

ことにより、センサ軸ばね防振ゴムを用いて台車の走行状態を常時監視できる可能性がある。

文 献

- 1) 大庭拓也, 山田幸一, 岡田信之, 相馬仁, 谷藤克也: 振動解析に基づく新幹線台車の状態監視, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.757, pp.2459-2467, 2009
- 2) 宮崎裕汰郎, 道辻洋平, 久田行徳, 長澤研介: PQ 輪軸による鉄道車両走行試験データの分析支援システム, 日本機械学会 2018 年度年次大会 講演論文集, G1800102, 2018
- 3) 野木村龍, 間々田祥吾, 岡村吉晃, 山中翔, 鈴木康大: センサ防振ゴムを用いた軸受の損傷検知手法の開発, 第 24 回鉄道技術連合シンポジウム 講演論文集, S2-7-5, 2017
- 4) 千葉智: TC 型軸箱温度検知装置の開発, JR EAST Technical Review, No.21, pp.27-30, 2009
- 5) 辺見信彦: 転がり軸受けの異常診断, 計測と制御, 第 55 巻, 第 3 号, pp.221-227, 2016
- 6) 間々田祥吾, 太田達哉, 宮本修吏, 岡村吉晃: 鉄道車両用車軸軸受の自律型損傷検知システム, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.902, DOI:10.1299/transjsme.21-00124, 2021
- 7) 大嶋和彦, 石黒稜人, 尾形和哉: 圧電素子の正・逆圧電効果を利用した静荷重センサの開発, 日本 AEM 学会誌, Vol.27, No.4, pp.419-427, 2019
- 8) 下井信浩, 間所洋和: 3 軸加速度とピエゾ荷重センサを用いたベッドモニタリングシステムに関する研究, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.12, pp.1092-1100, 2013

横風を受ける在来線パンタグラフの揚力増加メカニズムと対策に関する数値解析

阿部 巧* 中出 孝次* 光用 剛**

Numerical Flow Simulation of Mechanism of Increase and Method for Suppressing Increase in Lift Force of Pantograph Head of Conventional Line Pantograph under Crosswind

Takumi ABE Koji NAKADE Takeshi MITSUMOJI

We numerically investigated the aerodynamic characteristics of a conventional line pantograph in a crosswind by using large-eddy simulations (LESs). Although previous experimental study revealed that the lift force increases significantly under crosswind conditions, the mechanism of the phenomenon has not been clarified. Therefore, the flow fields around the pantograph head were carefully investigated by LESs. It was found that there are two main mechanisms: one is a stationary large-scale vortex generated on the upper surface of the pantograph head, and the other is a pressure increment on the lower surface of the pantograph head. In addition, LESs were conducted using modified pantograph head shapes to investigate methods for reducing the lift force of the pantograph head taking account of the mechanisms above. As a result, maximum lift reduction rate reaches approximately 60%, indicating that effective lift force reduction method was proposed.

キーワード：数値シミュレーション、在来線パンタグラフ、揚力特性、空力特性、横風、LES

1. はじめに

走行中のパンタグラフの揚力の適正化は安定した電力供給のために重要である。在来線パンタグラフの揚力の適正值は車両や架線の諸条件に依存するため、明確な基準値等はないものの、過去の研究¹⁾では営業運転で問題なく使用されている各種パンタグラフの揚力特性が調査され、揚力の値が走行速度 100km/h において数 N～30N 程度であることが報告されている。在来線は新幹線よりも走行速度が低く、通常走行時のパンタグラフの揚力が問題となることは少ない。一方で、強風時には横風により揚力が増加する場合があります。横風環境下を想定した在来線パンタグラフの揚力特性の調査が行われてきた。一般に車両が横風を受けた場合には、車両側面の肩部からの跳ね上げによりパンタグラフは真横からだけでなく上下方向の流れにもさらされるため、跳ね上げの角度に着目し、パンタグラフ近傍の流れ場が調査された。このような様々な条件の横風を想定し、近年導入が進む在来線用シングルアームパンタグラフの揚力特性が実験的に調査され^{2) 3)}、揚力が増加する横風の風速や風向に関する知見が得られた。また、著者らの近年の研究⁴⁾では、強風時の揚力増加と架線への割り込み事故に関連して、割り込みが生じ得る揚力の限界値が示されており、揚力増加を抑制する手法が望まれる。

揚力特性について多くの知見が得られつつある一方で、横風により揚力が増加するメカニズムを解析した研究は見られず、揚力増加の抑制手法の検討もなされていない。そこで、本研究では数値解析手法の LES (Large-eddy simulation) を用いて、横風により揚力が増加する流れにおける揚力増加メカニズムの解明および揚力増加の抑制手法の検討・評価を行った。一般的にパンタグラフ揚力とは空気力による押上力の変化のことを指し、これは枠組等のリンク機構の影響を含むものである。本研究ではパンタグラフに固定した座標系において、空気力により生じる鉛直上向きの力を揚力と定義したうえで、パンタグラフの揚力に対して寄与が大きい舟体に着目し、舟体表面の圧力分布を積分して得た揚力を議論する。

2. 数値解析手法

2.1 計算モデル

計算対象は、鉄道総合技術研究所の大型低騒音風洞を用いた風洞実験³⁾で使用された一般的な在来線用シングルアーム型パンタグラフの実機形状モデルである。また、揚力増加抑制手法の検討のため、実機形状モデルを基本形状とし、舟体形状を変更した 3 種類の形状を用意した。計算領域および座標系は図 1 に示す通りで、計算領域は全計算ケースで同一とした。

計算で用いた実機形状モデルを図 2 に示す。本研究は舟体揚力特性と舟体周りの流れ場が主な対象であるため、

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

** 鉄道力学研究部 集電力学研究室

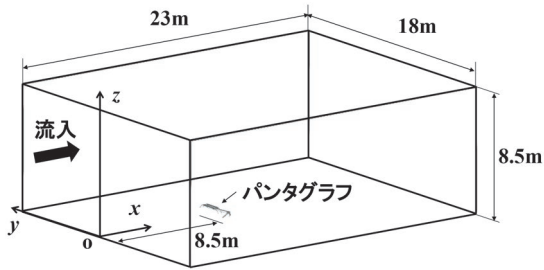


図1 計算空間

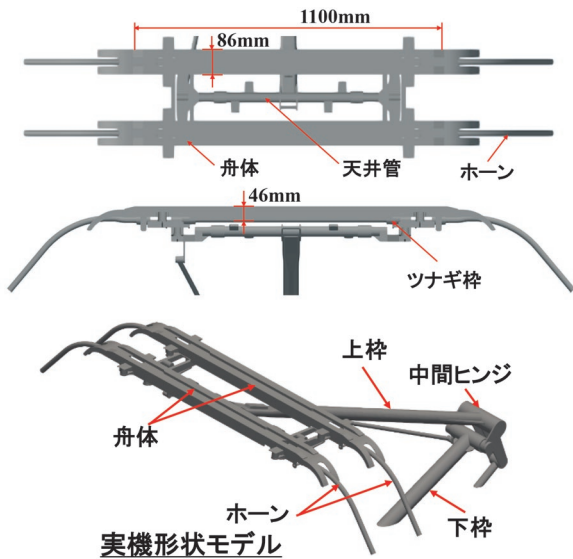


図2 パンタグラフモデル

下枠の一部と上枠，ホーンと舟体を計算対象とした。計算格子は，舟体近傍に最小格子幅 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2\text{mm}$ の等間隔格子を分布させ，モデルから離れるほど格子間隔が広がる直交不等間隔格子とした。計算格子数は，横風なしで約10億点，横風ありで約12億点である。

2.2 座標系と計算条件

主流流速は80km/hに固定した。主流流速と実機形状モデルの舟体高さ(0.046m)に基づくレイノルズ数は約 6.8×10^4 である。以下，特に注記しない限り，無次元化した物理量に関しては，代表速度 $U_\infty = 80\text{km/h}$ と代表長さ $L = 1\text{m}$ で無次元化した値とする。

パンタグラフ下部からの跳ね上げを有する横風を再現するため，流入風を固定して計算空間内でモデルを回転させた。物体に固定した座標系は，回転がない場合にはxyzそれぞれに対し $\xi\eta\zeta$ の方向が対応するように定義した。 $\xi\eta\zeta$ の原点は上流側の舟体下面の中心位置とし，下流側の舟体下面の中心位置には $\xi\eta\zeta$ の原点を設定した(上流と下流の舟体で $\xi\eta\zeta$ の原点が異なる)。

図3にパンタグラフのヨー角 θ ，ロール角 ϕ および主流流速 U_∞ の関係を示す。ヨー角 θ は走行車両に対する

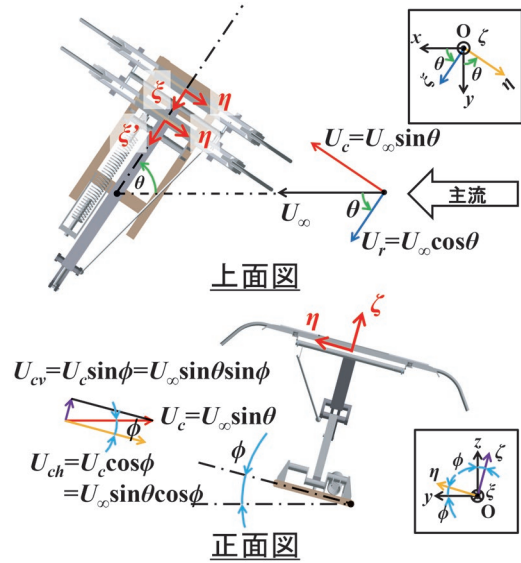


図3 速度と座標系の関係



図4 舟体の断面形状

風向角を表現するため横風角と呼び，ロール角 ϕ は横風の跳ね上げを表現するため跳ね上げ角と呼ぶ。また，走行時に列車が正面から受ける風速を走行速度 U_r とし，跳ね上げを含めた横風の風速を横風速度 U_c とする。計算条件の決定方法の詳細は文献5に示すが，揚力が極大となる風向の条件として，横風角 $\theta = 56^\circ$ ，跳ね上げ角 $\phi = 15^\circ$ ，中間ヒンジが下流側となる反なびき条件にて計算を実施した。計算は全ケースで主流流速 $U_\infty = 80\text{km/h}$ (横風ありの場合の $U_r = 45\text{km/h}$ 相当)とし，揚力を比較する際は走行速度を $U_r = 60\text{km/h}$ に固定し，揚力を換算した。

計算は，実機形状モデル(以下，「実機」)において横風あり・なしの両条件を実施した(3.1節，3.2節では単に横風あり，横風なしと呼称)。また，舟体形状を変更した3形状を用意した。図4に舟体の断面形状を示し，図5に形状変更の方法と形状変更範囲を示す。断面形状は上流側舟体のみを示したが，走行方向の違いによるパンタグラフ形状の非対称性をなくすために，上流側と下流側舟体の形状は前後対称とした。「切り欠き」は舟体下部を斜めに切り欠いており，その η 方向の範囲は図中に示す突起部(ばね受け板)間の領域($-0.335\text{m} \leq \eta \leq 0.335\text{m}$)である。「開口」は舟体の上部に複数の開口部を設けており，舟体上部の一対のすり板間の領域($-0.55\text{m} \leq \eta \leq 0.55\text{m}$)を開口とした。「併用型」は「開口」に対して切り欠きを設けた形状である。ここで，「開

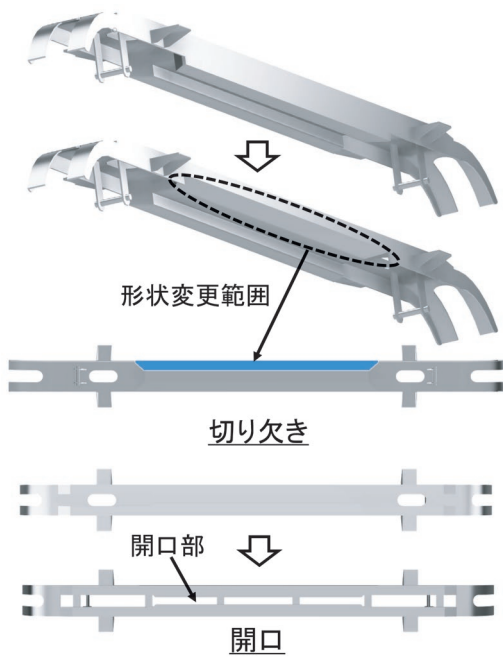


図5 舟体形状の変更方法

口」と「併用型」の舟体は風洞実験⁴⁾で用いた模型の構造に合わせて中空とした。ただし、検討段階ではさらに多くの形状について数値解析を実施しており、ここでは揚力低減効果が比較的大きかったものを選定した。

2.3 数値計算の概要

非圧縮性流体のLESの基礎式に対して、差分法による離散化を施した。サブグリッドスケールモデルには、コヒーレント構造スマゴリンスキーモデル⁶⁾を用いた。空間の離散化は二次精度の中心差分法⁷⁾を、時間進行は三次精度のアダムス・バッシュフォース法を用いた。圧力のポアソン方程式の解法は、計算領域全体の平均圧力値を基準圧力としてヤコビ法を用いた。境界条件は、 x_{\min} （流入面）で速度を1に固定、 x_{\max} （流出面）で対流流出条件、パンタグラフ表面を速度ゼロのすべりなし境界条件、遠方境界面（ $y_{\min}, y_{\max}, z_{\min}, z_{\max}$ ）をすべり境界条件とした。モデルの形状の表現は、直交格子法のボックス型手法とした。

本計算は、一様流を初期値とし、流れ場が統計的に定常状態になるまで時間進行を行った。無次元の時間刻み間隔を $\Delta t=0.0002$ とした。圧力係数等の統計量は、無次元時間で $T=10\sim 30$ の計算結果を平均して算出した。

3. 解析結果と考察

3.1 風洞実験と計算結果の比較

数値計算結果の妥当性を検証するため、風洞実験を実施し、舟体表面の圧力係数分布を比較した結果、両者の結果は概ね一致することを確認した。詳細は文献5を参

表1 舟体揚力の実験と計算の比較

Case name	主流 [km/h]	Lift 1 [N] (上流側舟体)	Lift 2 [N] (下流側舟体)	Lift 1 + Lift 2 [N]
横風なし (実験)	60	—	—	2.53
横風あり (実験)	108	—	—	41.0
横風なし (計算)	60	0.280	1.28	1.56
横風あり (計算)	108	31.3	12.1	43.5

照されたい。

3.2 横風による舟体揚力増加メカニズム

3.2.1 横風による舟体揚力の変化

横風による舟体揚力の増加について調査する。物体に作用する空気力を検討する際、主流流速を一定とすることが多いが、ここでは一定の速度で走行する条件の舟体揚力の横風による変化を検討するため、走行方向の流速を $U_f=60\text{km/h}$ で統一した。計算は主流流速 $U_\infty=80\text{km/h}$ であるが、上記の条件を再現するには、横風がある条件では $U_\infty=108\text{km/h}$ とする必要がある。本研究が対象とする速度域（ $U_\infty=60\sim 180\text{km/h}$ 程度）の実験での無次元揚力は、流速によらず概ね等しいため、流れ場のレイノルズ数依存性は小さいと考えられ、揚力は流速の2乗に比例すると仮定して、以下の式(1)、(2)に示す換算揚力を算出した。

$$L_{A_u60} = (60 / 80)^2 \times L_{A_u80} \quad (1)$$

$$L_{B_u108} = (108 / 80)^2 \times L_{B_u80} \quad (2)$$

ここで、下付き添え字A、Bはそれぞれ横風なし、横風ありを示し、uの後の数字は U_∞ の値を示す。

表1に横風あり・なしの2ケースについて、式(1)と式(2)から算出した前後2本の舟体の揚力を、実験結果とともに示す。ここで、実験結果の2本の舟体揚力の合計値（Lift 1 + Lift 2、以下、合計揚力）は、舟体を含むパンタグラフ全体の揚力の測定結果から、2本の舟体を取り除いた状態のパンタグラフの揚力を減じて算出し、2本の舟体が受ける空気力による揚力を模擬した値である。一方で、数値計算では、物体に作用する空気力（舟体表面圧力の積分値）から揚力を算出した。上述の様に、実験と数値計算は異なる方法で舟体に作用する空気力による揚力を算出したが、表1の合計揚力は実験と数値計算で良好に一致する。表1から、横風により実験と計算ともに合計揚力が40N程度増加する。また、計算結果から、横風による上流側舟体の揚力（Lift 1）の増加量が下流側舟体の揚力（Lift 2）よりも大きく、横風ありの合計揚力の3/4程度を占める。以降では、2本の舟体で揚力の増加量に差が生じた原因を考察する。

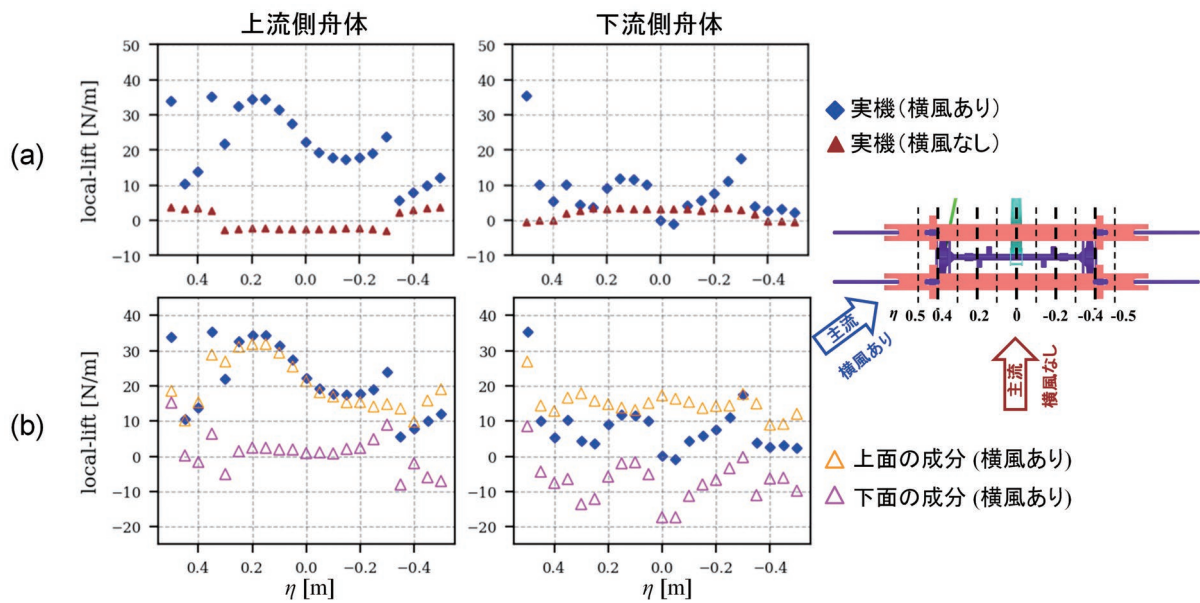


図6 局所揚力分布 (横風あり・なしの比較)

図6 (a) は横風あり・なしの場合について、上流側と下流側舟体それぞれのスパン方向（レールと直交する方向）の局所揚力分布を示す。局所揚力は各 η 断面における舟体周りの圧力係数 C_p の分布を η 方向単位幅で積分して求めた。左右の図はそれぞれ上流・下流側の舟体であり、 η 軸左側が横風の上流である。横風なしの場合、局所揚力はスパン方向にほぼ一様だが、横風ありの場合には全体的に揚力が高く、局所的なピークを持つ分布となる。特に、2本の舟体の η 正方向の端部付近や、上流側舟体の $\eta=0.2\text{m}$ 付近で局所的に顕著な揚力増加が見られる。

横風ありの場合の舟体揚力について、揚力の上下面の内訳を明確にするため、図6 (b) に上下面の局所揚力分布を分けて示す。ただし、上面の揚力は上面圧力と基準圧との差分の積分値とし、下面も同様である。まず、上流側舟体について、上面の揚力分布は $\eta = 0.2\text{m}$ 付近にピークがあるが、下面の揚力分布の変化は小さい。その結果、上面の揚力の影響が強くと表れ、舟体上面に重要な空力的な現象があると示唆される。次に、下流側舟体については、上流側で見られた $\eta = 0.2\text{m}$ 付近の上面の局所揚力のピークが消失し、下面の揚力が局所的に小さくなる。両者は揚力減少に寄与し、揚力は上流側よりも減少する。2本の舟体で揚力に差が生じた原因は、舟体同士の流れの干渉や主流に対する部材の位置関係の違い等が考えられる。

3.2.2 流れ場の比較

横風ありの時間平均流れ場を図7に示す。灰色の面はQ値（速度勾配テンソルの第二不変量）の等値面を示し、流線は流速の大きさで、パンタグラフ表面は C_p の値で色付けした。俯瞰図から、上流側舟体の前面に衝突

した流れが上側へ剥離し、舟体上面へと巻き込まれながら下流へと移流し、定常的な渦管が生じる。上面図から、この渦管近くの舟体上面に強い負圧領域が広がり、表1中のLift1の顕著な増加に寄与する。

時間平均流れ場の η 断面（舟支えと上枠の間の断面）内の流れを図8、図9に示す。横風なしでは、上流側舟体前面に流れが衝突し、上面と下面それぞれで剥離が生じる。上下面の剥離による負圧がバランスし、横風なしでは舟体揚力がわずかに正となる。横風ありでは、図7の渦管が上流側舟体上面付近に見られ、強い負圧が生じている。

また、横風なしとは異なり、流れが舟体の下側から作用するため、下面では剥離-再付着が生じず、低圧部が見られない。このように、渦管による舟体上面の負圧の

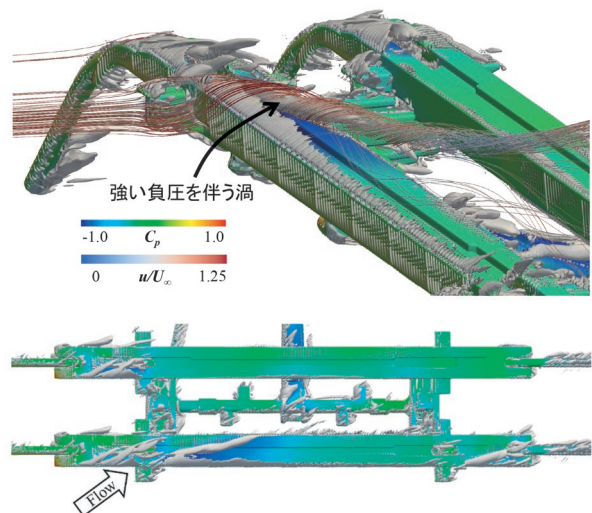


図7 舟体上面の流れ

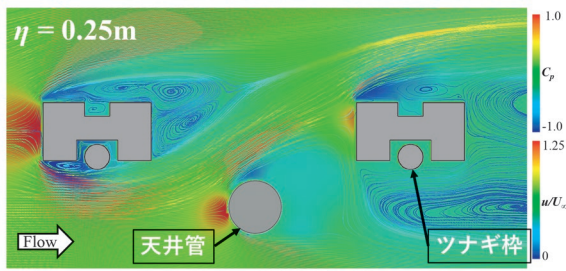


図8 断面内の流れ（横風なし）

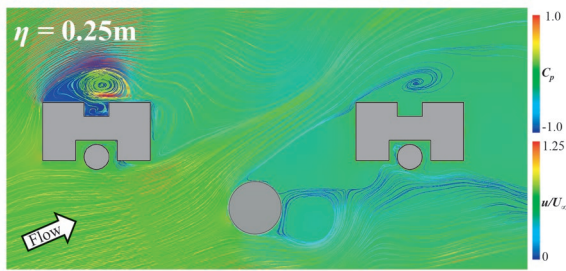


図9 断面内の流れ（横風あり）

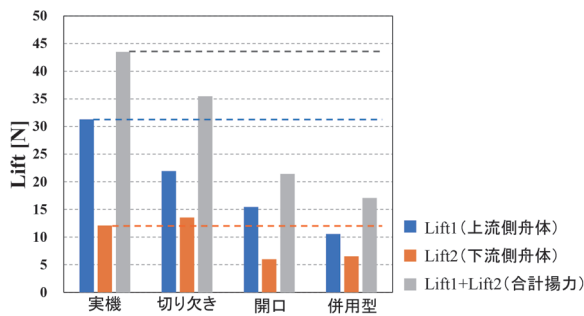


図10 舟体揚力の変化

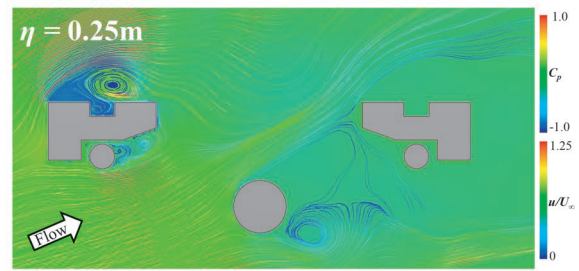
増加と、跳ね上げ風による舟体下面の負圧部の消失（圧力上昇）により、上流側舟体の揚力が顕著に増加したと考えられる。下流側の舟体も同様に、上面の局所的な強い負圧部と下面の圧力上昇が揚力の増加に寄与すると考えられる。

3.3 舟体揚力増加の抑制手法

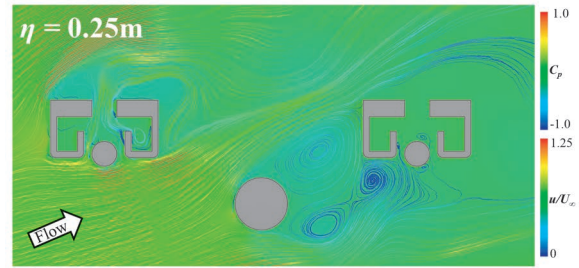
3.3.1 舟体形状の変更による揚力増加の抑制効果

前節では横風により舟体揚力が増加する現象を調査した。本節では、前節の流体现象を踏まえ、舟体揚力の増加を抑制する舟体形状を検討し、その効果を評価した。検討する舟体形状は図5に示す3形状（切り欠き、開口、併用型）であり、舟体揚力は換算式(2)を用いて列車の走行速度が60km/hの場合で比較した。

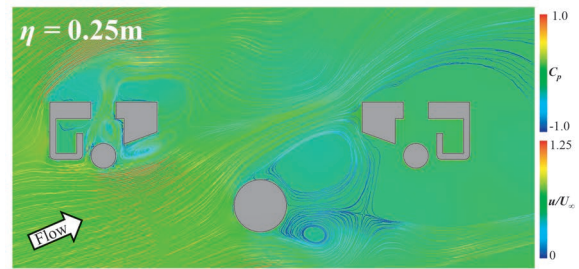
図10に「実機」と3形状で得られた舟体の揚力を示す。揚力は上流側舟体と下流側舟体で分けて示し、2本の舟体の合計揚力も示した。まず、舟体下面を切り欠いた「切り欠き」では、上流側舟体の揚力が顕著に低下し、



(a) 切り欠き



(b) 開口



(c) 併用型

図11 3形状の断面内の流れ

合計揚力は「実機」よりも18.5%減少した。次に、舟体の上下面に開口部を設けた「開口」では、上流側舟体の揚力減少率が「切り欠き」より高いうえ、下流側舟体の揚力も顕著に減少した。その結果、「実機」と比べて合計揚力は50.7%減少し、「切り欠き」よりも顕著な揚力増加抑制効果が得られた。また、「切り欠き」と「開口」の両方の特徴を有する「併用型」では、「開口」よりも上流側舟体の揚力がさらに減少し、合計揚力の減少率は60.8%に達し、最大の効果が得られた。ここで「開口」において、開口部による舟体上向き（ ζ 方向）投影面積の減少率は約18%であるが、舟体合計揚力の減少率は50.7%であり、舟体の受圧面積の減少分よりも高い効果が得られた。これは、「開口」による揚力減少は、受圧面積の減少のみならず、流れ場の変化によることを示唆する。

3.3.2 流れ場の比較

図11に3形状の η 断面内の流れを示す。図9の「実機」と比較すると、「切り欠き」では上流側舟体下面と天井管の間の流路が拡大し、下面の圧力上昇が緩和される他、円柱形のツナギ棒の後流に低圧部が生じ、揚力低下に寄与する。また下面の流れの変化を受けて上面の渦

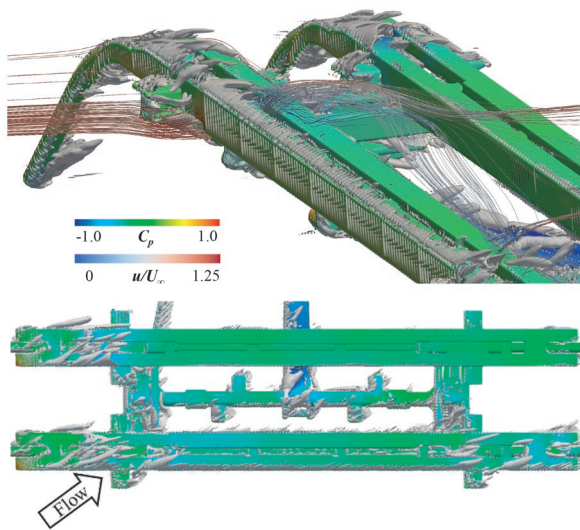


図 12 舟体上面の流れ（開口）

管が弱まっており、負圧が弱まる。この上下面の流れの変化により、上流側舟体揚力が減少したと考えられる。

「開口」では、舟体を上下に貫通する開口部を通過する流れにより上流側舟体上面の渦が消滅し、強い負圧の領域が消失した（詳細は図 12 を参照）。ここで、切り欠きによるツナギ後流の低圧部と、開口による上面の負圧の消失は異なる流体现象であり、「併用型」では両者の効果が同時に得られるため、舟体揚力増加抑制効果が最大となったと考えられる。

図 12 に「開口」の舟体周りの時間平均流れ場を示す。図 7 の「実機」と比較すると、開口部において下面から上面へ通り抜ける流線が見られる。この開口部を通過する流れが、上面の負圧を伴う渦管と干渉することで渦管がほぼ消失しており、舟体上面の負圧が弱まる。この流れの干渉は舟体スパン方向両端付近の開口部においても見られ、「実機」で見られた舟体上面の渦管が至る所で弱まっている。これが、「開口」において揚力が顕著に減少した主な流体的な現象であると考えられる。

3.4 風洞実験による計算結果の検討

前節で検討した舟体形状を変更した際の数値計算結果については、別途実験を実施した。「開口」については、計算モデルと実験供試体の形状は同一の形状とし、計算と実験の合計揚力は良好に一致した（実験の詳細は文献 5 を参照）。また、「切り欠き」と「併用型」については、計算モデルと実験供試体の形状に差異があるが、類似形状にて同様の揚力が得られることを確認している⁵⁾。したがって、計算結果は舟体揚力の増減を適切に再現しており、本研究で検討した内容の有用性が示された。

4. まとめ

本研究では、横風環境下で走行中の在来線パンタグラフを対象として LES を用いた数値解析を行い、横風により舟体揚力が増加する要因を明らかにするとともに、舟体形状を変更した場合の揚力増加の抑制効果を評価した。本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 横風環境下では、上流側の舟体揚力が前後 2 本の舟体の合計揚力のうち 3/4 程度と大部分を占める。
- (2) 横風環境下の舟体揚力は、舟体上面の負圧を伴う渦と、下面に衝突する流れによる圧力上昇により増加する。上面の渦は舟体前縁で剥離した流れが舟体上面に巻き込まれることで生成され、周囲に強い負圧の領域を生じるため揚力増加に寄与する。下面の流れは、横風が無い場合の剥離-再付着流れに伴う負圧が、下側からの流れを受けて消失し、圧力が上昇するため揚力増加に寄与する。
- (3) 舟体形状を変更し、揚力増加抑制効果を調査した。「切り欠き」と「開口」、「併用型」の全てにおいて、形状変更前と比較して揚力が減少し、減少率はそれぞれ 18.5%、50.7%、60.8% であった。
- (4) 「切り欠き」は、上流側の舟体下面から下流側の舟体上面にかけて流路を拡大し、下面に負圧を生じることに加え、上面の負圧を伴う渦を弱めることで揚力減少効果を得る。「開口」は、開口部による受圧面積の減少に加え、開口部を通る流れが舟体上面の渦と干渉し、負圧を弱めることで高い揚力減少効果を得る。両者は流体现象が異なるため、併用することで最も高い揚力増加抑制効果が得られる。

文 献

- 1) 網干光雄, 清水政利, 吉行秀春: 在来線パンタグラフの空力特性, 鉄道総研報告, Vol.6, No.9, pp.25-32, 1992
- 2) 小林樹幸, 光用剛, 白田隆之, 山下義隆, 常本瑞樹, 清野智明, 安達一徳: 横風が作用する在来線パンタグラフの揚力特性, 第 25 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018), No.18, DOI:10.1299/jsmetd.2018.27.1307, 2018
- 3) 磯野達志, 光用剛, 平川裕雅, 白田隆之: 舟体の外形寸法が横風環境下における在来線パンタグラフの揚力特性に及ぼす影響評価, 第 28 回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2019), No.19, DOI: 10.1299/jsmetd.2019.28.1102, 2019
- 4) 光用剛, 天野佑基, 阿部巧, 小林樹幸, 磯野達志, 中出孝次, 野口雄平: 在来線パンタグラフの横風揚力特性に着目した割り込み事故防止策, 第 29 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2022), 2022

- 5) 阿部巧, 中出孝次, 光用剛: 横風を受ける在来線パンタグラフの揚力増加メカニズムと抑制手法に関する数値流体解析, 日本機械学会論文集, Vol.89, No.926, DOI: 10.1299/transjsme.23-00121, 2023
- 6) Kobayashi, H., "The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow," *Physics of Fluids*, Vol.17, pp. 045104-1-12, DOI: 10.1063/1.1874212, 2005
- 7) 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

鋼棒群を用いた鋼鉄道橋制震装置の設計法

和田 一範* 櫛谷 拓馬** 豊岡 亮洋*

Design Method for Seismic Control Devices Installed on Steel Railway Bridges

Kazunori WADA Takuma KUSHIYA Akihiro TOYOOKA

Some authors of this paper have proposed a damping device with a bridge collapse prevention function installable in narrow spaces. In this paper, we propose a method for the rough design of the proposed device. Specifically, we organized the results of the nonlinear response analysis of a single degree of freedom system and proposed a nomogram that can be used to calculate the displacement of the girders and the response ductility factor of the piers in accordance with equipment specifications. By using this result, it is possible to have a rough idea of the specifications to meet the required performance before detailed dynamic analysis is carried out, so it is expected to reduce the amount of work involved in the detailed calculations.

キーワード：制震装置，設計法，鋼鉄道橋

1. はじめに

既設の橋りょう・高架橋の耐震補強法として、鋼板巻き立て工法などの一般的な工法の適用が困難な場合、制震装置の適用が有力な選択肢のひとつとなる。鉄道橋においては、く体の補強が困難な長大橋に摩擦型ダンパーが適用された事例¹⁾、店舗利用のため柱の補強が困難な高架橋にブレース型ダンパーが適用された事例²⁾などが挙げられる。しかし、都市部の道路や鉄道を跨ぐ橋りょうでは、桁下空頭が十分取れず、従来のダンパーが適用できないような場合もある。そこで、著者らのグループは無道床の鋼鉄道橋を対象とした鋼棒群を用いた小型の落橋防止機能兼用型制震装置（以下、提案装置）を開発している³⁾。

制震装置は今後も適用事例が増加していくことが期待される。現状では、制震装置の設計は、骨組モデルに代表される詳細な解析モデルを構築し、装置の諸元をパラメータにした繰り返しの非線形動的解析を行う（以下、詳細解析と表記）ことが一般的である。しかしながら、このような非線形動的解析の繰り返し計算という作業は煩雑であり、適用に際して障害となっている。要求性能を満足する可能性が高く、かつ過大なスペックではない諸元を初期値として設定できれば、繰り返し計算の回数削減、すなわち設計作業の省力化が期待できる。

そこで、鋼鉄道橋へ提案装置を適用するにあたり、詳細解析を行う上での鋼棒諸元の初期値を効率的に設定する手法（以下、鋼棒諸元の概略設定法と表記）を構築した⁴⁾。本手法を用いた提案装置の設計フローを図1に示

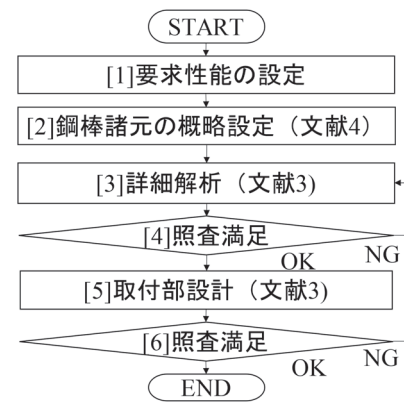


図1 提案装置の設計フロー

す。作業が煩雑化しやすい [3] 詳細解析に入る前の [2] の段階で要求性能を満足するための鋼棒の大まかな諸元を設定できるため、詳細解析での繰り返し計算の回数削減が期待できる。本稿では、図1に示す提案装置の設計法の中でも特に文献4の一部に示される装置の概要、パラメータスタディによる傾向分析、応答変位および応答塑性率の算定ノモグラムについて述べる。

なお、採用事例の多い摩擦型ダンパーを対象とした類似の検討を著者の一部が実施しており⁵⁾、本稿の成果と合わせることで多数の制震装置の効率的な設計が可能となる。

2. 検討概要

本章では、提案装置の概要について述べた後に、鋼棒諸元の概略設定法を構築するうえで、対象とした橋りょうとモデル化手法、検討パラメータについて述べる。

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

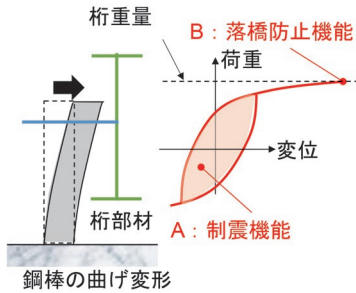
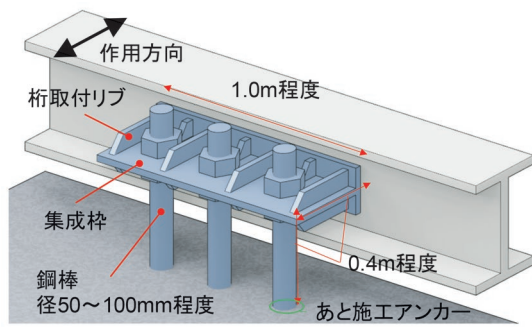


図2 提案装置の概要

2.1 提案装置³⁾の概要

提案装置は図2に示すように、複数の鋼棒を橋台天端にあと施工アンカーで設置し、集成枠を介して桁に取り付けることで、桁の慣性力を一様に鋼棒群に伝達する構造である。鋼棒の塑性化後の曲げ変形によるエネルギー吸収効果で制震機能を有する（図2のA）とともに、鋼棒の高い延性で桁重量を支持することで落橋防止機能を有する（図2のB）。さらに、狭あいな桁支承部上に設置することを想定し、鋼棒径 ϕ が50~100mm程度、鋼棒本数 n は1箇所当たり3~8本程度、全体寸法は径80mm、鋼棒3本の場合、幅1m×高さ0.4m×奥行0.4m程度という小型なサイズであり、桁下空頭を侵さない。また提案装置で発揮される制震機能は、鋼棒径、鋼棒本数、鋼棒材料、荷重の作用高さなどを調整することで任意に調整可能である。

2.2 検討対象橋りょうとモデル化法

検討対象とする橋りょうおよびモデル化のイメージを図4に示す。片側が橋台でもう一方が橋脚となっている橋りょうを検討対象とした。このような構造は、道路を跨ぐ架道橋、鉄道を跨ぐ線路橋、河川を跨ぐ河川橋などに存在する。検討方向は、提案装置が落橋リスクに対する対策という主旨に鑑みて橋軸方向とした。

モデル化としては、鉄道の耐震設計で行われる設計振動単位⁶⁾の考え方にに基づき、1自由度系でモデル化した。すなわち、図3における赤点枠で囲まれた桁—固定支承—橋脚を1つの設計振動単位としてモデル化した。このとき、橋脚は文献6を参考に骨格曲線にBi-Linear、履歴特性にCloughモデル（降伏剛性に対する降伏後の剛

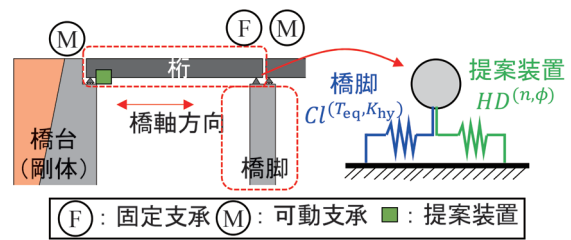


図3 検討対象構造とモデル化法

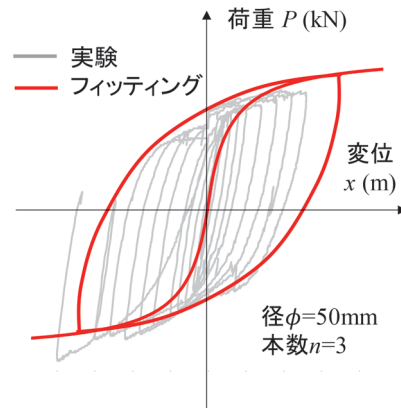


図4 装置の非線形特性(鋼棒径50mm, 鋼棒本数3本)

性低下倍率 $a=0.1$ 、除荷時の剛性低下指数 $\beta=0.2$)を設定し、減衰特性は周期依存させた。橋台は十分健全であると仮定し、地盤と同一挙動する剛体とみなすこととした。提案装置の非線形特性は、既往の要素実験結果にフィッティングさせるようにMasing則に従う双曲線モデルでモデル化したもの（図4³⁾を基本とし、2.3節で述べるように鋼棒本数や鋼棒径の違いに応じて、図4の結果を補正することで、任意の鋼棒本数・径に対してモデル化可能とした。

2.3 検討パラメータの整理

検討パラメータとしては、橋脚の振動特性（等価固有周期 T_{eq} 、降伏震度 K_{hy} ）および提案装置の諸元（鋼棒径 ϕ 、鋼棒本数 n ）、桁や橋脚の質量を1質点系に置換する際の等価質量 m がある。1質点系の運動方程式を基に各パラメータの関係を考察することで、次章で検討するパラメータを整理する。

対象とするモデルの運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \frac{Cl^{(T_{eq}, K_{hy})}(x)}{m} + \frac{HD^{(n, \phi)}(x)}{m} = -\ddot{z} \quad (1)$$

ここで、 x は変位、 h は減衰定数、 ω は固有円振動数、 z はある入力地震動に対する地表面変位を表す。また、 $HD^{(n, \phi)}(x)$ は鋼棒径 ϕ 、本数 n 本の時における双曲線モデルの復元力、 $Cl^{(T_{eq}, K_{hy})}(x)$ は等価固有周期 T_{eq} 、降

伏震度 K_{hy} における橋脚の復元力を表す。

上式において、復元力を表す左辺第3項と第4項が質量に依存して変化すると予想される。ここで、左辺第3項は2.2節で述べたように骨格曲線がBi-Linear型、履歴曲線がCloughモデルの非線形特性となる復元力項であり、図5および次式に示すように、等価固有周期 T_{eq} 、降伏震度 K_{hy} 、剛性低下率 α 、除荷時の剛性低下指数 β で規定され、等価質量に依存しないことが知られている。

$$\text{降伏点} : p_y = K_{hy} * g \quad (g : \text{重力加速度}) \quad (2a)$$

$$\text{初期剛性} : k_1 = \left(\frac{2\pi}{T_{eq}}\right)^2 \quad (2b)$$

$$\text{2次剛性} : k_2 = \alpha k_1 \quad (\alpha : \text{定数}) \quad (2c)$$

$$\text{除荷時剛性} : k_r = k_1 \left(\frac{d_{max}}{d_y}\right)^{-\beta} \quad (\beta : \text{定数}) \quad (2d)$$

次に、式(1)の左辺第4項 $HD^{(n,\phi)}(x)/m$ について考える。この非線形特性は前述したように既往の要素実験結果³⁾にフィッティングさせるようにMasing則に従う双曲線モデルでモデル化しており、骨格曲線は次式で表される。

$$P_{HD}^{(n,\phi)}(x) = \frac{K_0(\phi)nx}{1+x/\delta_y(\phi)} \quad (3)$$

ここで、 $K_0(\phi)$ は剛性に関するパラメータ、 $\delta_y(\phi)$ は降伏変位に関するパラメータであり、それぞれ鋼棒径 ϕ の鋼棒1本あたりの指標である。例えば、鋼棒径50mmの場合は要素実験結果をフィッティングすることにより、 $K_0(50) = 2.6 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ 、 $\delta_y(50) = 1.1 \times 10^{-2} \text{ m}$ となる。上式において、鋼棒本数が n' 本の場合の骨格曲線は次式で表せる。

$$P_{HD}^{(n',\phi)}(x) = \frac{n'}{n} P_{HD}^{(n,\phi)}(x) \quad (4)$$

また、Masing則は骨格曲線には依らないため、次式が成り立つことが分かる。

$$HD^{(n',\phi)}(x) = \frac{n'}{n} HD^{(n,\phi)}(x) \quad (5)$$

今、等価質量が m' 、鋼棒本数が n' である場合、式(1)は次式で表記できる。

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \frac{Cl^{(T_{eq},K_{hy})}(x)}{m'} + \frac{HD^{(n',\phi)}(x)}{m'} = -\ddot{z} \quad (6)$$

式(6)に式(5)を代入すると以下が得られる。

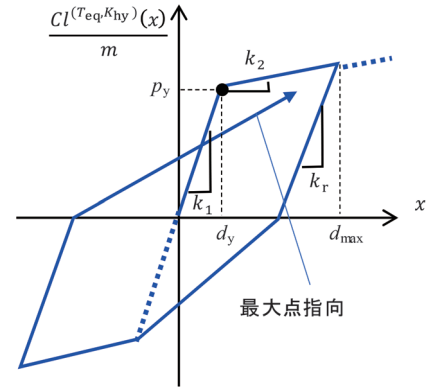


図5 橋脚の復元力モデルの概要

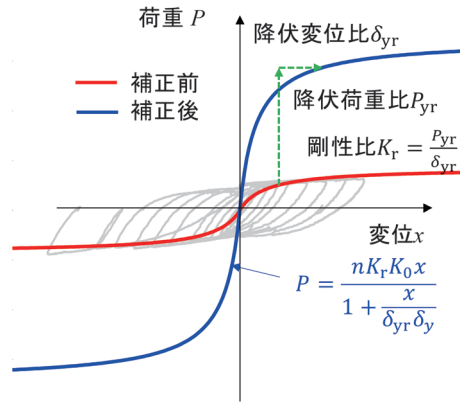


図6 提案装置の非線形特性（鋼棒径が異なる場合）

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \frac{Cl^{(T_{eq},K_{hy})}(x)}{m'} + \frac{n'HD^{(n,\phi)}(x)}{m'n} = -\ddot{z} \quad (7)$$

ここで、式(7)と式(1)を比較すると、左辺第3項は先述したように等価質量に依らないため、式(7)と式(1)で異なる箇所は左辺第4項の係数だけである。この係数が等しいとき、すなわち

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m'} \cdot \frac{n'}{n} \Leftrightarrow \frac{m'}{m} = \frac{n'}{n} \quad (8)$$

が成り立つ時、質点の挙動は一致する。式(8)から、基準となる質量 m と実際の質量 m' の比率と基準の鋼棒本数 n と実際に設置する鋼棒本数 n' の比率が一致した場合に、桁の挙動は一致するということが分かる。すなわち、ある基準質量 m であらかじめ検討しておけば、実際の橋りょうに適用する際には基準質量 m と実際の質量 m' の比率に合わせて鋼棒の本数を調整することで、質量の違いに対応することが可能である。

また、鋼棒径を変える場合は図6および次式で示すように、剛性比 K_r 、降伏変位比 δ_{yT} を用いて補正する。

表1 検討パラメータ一覧

項目	パラメータ
橋脚	等価固有周期 $T_{eq}(s)$
	降伏震度 K_{hy}
	基準質量 $m(t)$
提案装置	鋼棒径 $\phi(mm)$
	鋼棒本数 n (基準質量 m に対して)

$$P_{HD}^{(n,\phi)}(x) = \frac{K_0(\phi')nx}{1+x/\delta_y(\phi')} = \frac{K_r K_0(50)nx}{1+x/(\delta_{yr}\delta_y(50))} \quad (9)$$

ここで、剛性比 K_r は次式で示すように降伏荷重比 P_{yr} と降伏変位比 δ_{yr} の比で表される。

$$K_r = \frac{P_{yr}}{\delta_{yr}} \quad (10)$$

また、鋼棒径 ϕ の降伏荷重 P_y および降伏変位 δ_y は、鋼棒を片持ち梁と仮定して、縁応力度が降伏強度 σ_y に達する際の荷重と変位として次式で算定する。

$$P_y = \frac{I\sigma_y}{0.5\phi} \cdot \frac{1}{h}, \quad \delta_y = \frac{P_y h^3}{3EI} \quad (11)$$

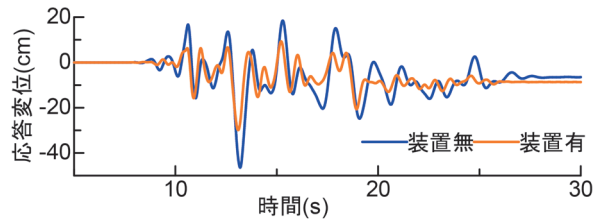
上式において、 I は鋼棒の断面2次モーメント、 h は載荷点高さ、 E はヤング係数である。異なる鋼棒径について、式(11)を用いて降伏荷重、降伏変位を算定することで、骨格曲線を補正するための式(9)に必要なパラメータが算定できる。

以上をまとめると、次章で示すパラメータスタディを行う際は、表1が検討パラメータとなる。本稿では、等価固有周期 T_{eq} は $0.2s \sim 5s$ 、降伏震度 K_{hy} は $0.2 \sim 2$ の範囲で網羅的に設定し、基準質量 m は $100 \sim 2000t$ で設定した。鋼棒径 ϕ は $50mm, 80mm$ の2ケース設定し、鋼棒本数 n は $1 \sim 12$ 本で設定した。また、入力地震動は、鉄道構造物の耐震設計⁶⁾で考慮しているL2地震動スペクトルII (G3地盤)とした。なお、文献4では他の設計地震動も含めた検討を実施している。また、鋼棒の材質や載荷高さもパラメータになり得るが、それらは文献3の実験条件で固定(材質:SS400, 載荷高さ:基部から400mm)としている。

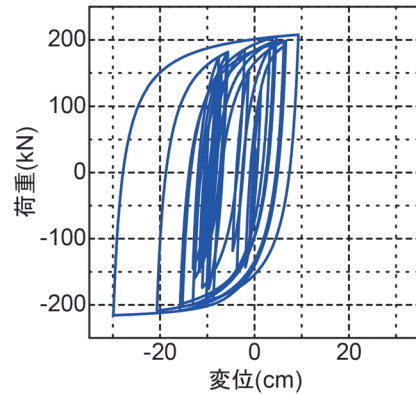
3. パラメータスタディによる傾向分析

3.1 応答変位波形と装置の履歴曲線

本章では、ノモグラムを算定する前にいくつかの解析結果を分析することで、応答結果の傾向分析を行う。解



(a) 桁の応答変位波形



(b) 装置の履歴曲線

図7 応答結果の例 ($T_{eq}=1.0s, K_{hy}=0.5, m=100t$)

析結果の一例として等価固有周期 $T_{eq}=1.0s$ 、降伏震度 $K_{hy}=0.5$ 、基準質量 $m=100t$ 、鋼棒径 $\phi=50mm$ 、鋼棒本数 $n=8$ 本とした場合の桁の応答変位波形および提案装置の履歴曲線を図7に示す。本図より提案装置がループを描くことでエネルギー吸収する制震効果を発揮し、提案装置を設置しない場合に比べて、最大応答変位が低減することが確認できる。以降では、各パラメータに対する最大応答変位や応答塑性率等で結果を分析する。

3.2 鋼棒諸元と応答値の関係

鋼棒本数または鋼棒径以外のパラメータを固定し、鋼棒諸元と桁の応答変位および橋脚・基礎系の応答塑性率の関係の例として等価固有周期 $T_{eq}=1.0s$ 、降伏震度 $K_{hy}=0.5$ 、基準質量 $m=100t$ とした結果を図8に示す。本図より、鋼棒本数 n が増加するほど、また鋼棒径 ϕ が大きいほど、桁の応答変位および橋脚・基礎系の応答塑性率の低減量が大きいことがわかり、提案装置による制震効果が大きいことがわかる。ただし、鋼棒径 $\phi=80mm$ の場合には鋼棒本数が5本以上の範囲で応答塑性率が低減しにくくなっていることがわかる。これは等価固有周期 $T_{eq}=1.0s$ 、降伏震度 $K_{hy}=0.5$ 、基準質量 $m=100t$ における装置の履歴曲線(図9)に示すように、鋼棒本数が少ない場合は、装置で荷重を負担しつつ、履歴ループで減衰効果も発揮されるが、鋼棒本数が増えると、装置がほぼ弾性体のように振る舞うことで、鋼棒本数が少ないときに見込まれた履歴減衰の影響が小さくな

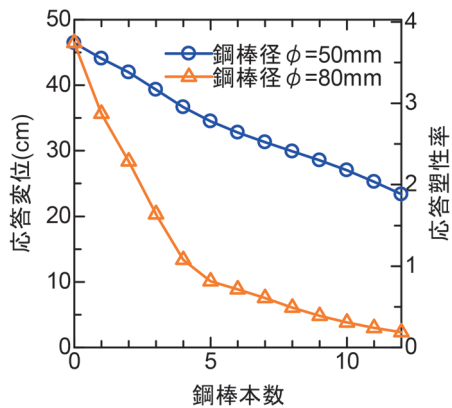


図8 鋼棒諸元と応答変位，応答塑性率の関係例
($T_{eq}=1.0s$, $K_{hy}=0.5$, $m=100t$)

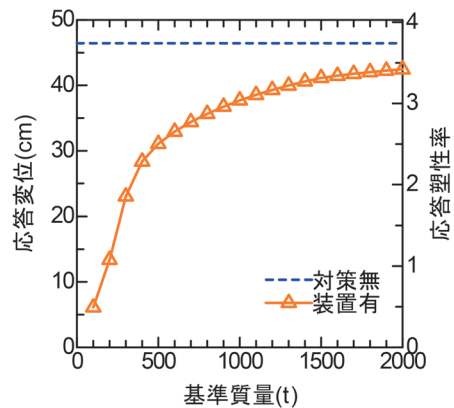


図10 基準質量と応答変位，応答塑性率の関係例
($T_{eq}=1.0s$, $K_{hy}=0.5$, $n=8$)

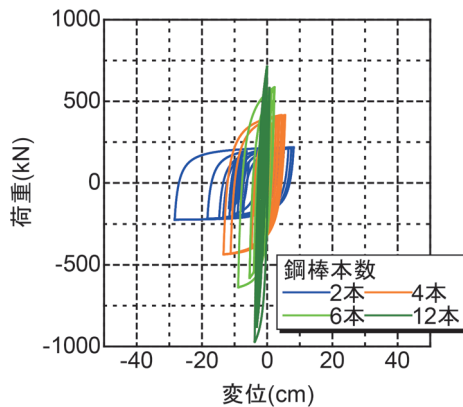
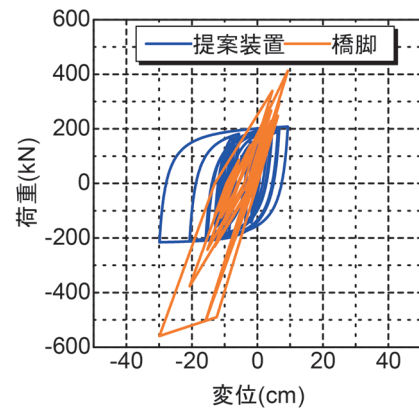


図9 鋼棒諸元と装置の履歴曲線の関係例
($T_{eq}=1.0s$, $K_{hy}=0.5$, $m=100t$, $\phi=80mm$)

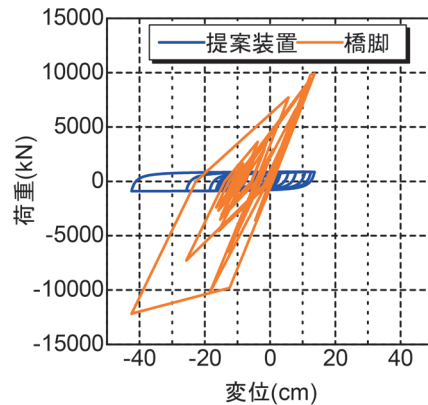
るためと考えられる。

3.3 基準質量と応答値の関係

基準質量以外のパラメータを固定し，基準質量と桁の応答変位および橋脚・基礎系の応答塑性率の関係の例として等価固有周期 $T_{eq}=1.0s$ ，降伏震度 $K_{hy}=0.5$ ，鋼棒径 $\phi=80mm$ ，鋼棒本数 $n=8$ とした場合の結果を図10に示す。本図より基準質量 m が大きいほど，装置導入による応答変位や応答塑性率の低減量が小さい，すなわち提案装置による制震効果が小さいことがわかる。これは，橋脚と提案装置の履歴曲線（図11）から明らかなように，基準質量 m が大きくなるほど，橋脚の復元力が提案装置の復元力よりも相対的に大きくなり，提案装置の制震効果が相対的に小さくなるためである。提案装置は都市内の無道床の鋼鉄道橋での施工を想定した小型なサイズの範囲で検討しているため，例えば図10の条件で桁の応答変位を50%程度抑制させたい場合，桁質量300t程度が適用できる構造物の上限となる。



(a) 基準質量 $m=100t$



(b) 基準質量 $m=2000t$

図11 提案装置と橋脚の履歴曲線
($T_{eq}=1.0s$, $K_{hy}=0.5$, $\phi=80mm$, $n=8$)

4. 応答変位，応答塑性率の算定ノモグラムを用いた鋼棒諸元の概略設定法

本章では，前章で述べた検討パラメータの範囲で網羅的に地震応答解析を実施した結果を基に応答変位，応答塑性率の算定ノモグラムを整理する。本章ではまずノモ

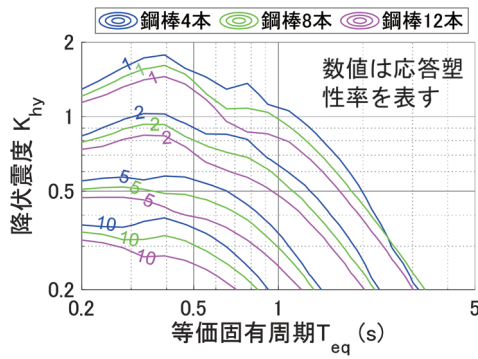


図 12 ノモグラムの一例 ($\phi=50\text{mm}$, $m=100t$, L2 地震動スペクトルⅡ (G3 地盤))

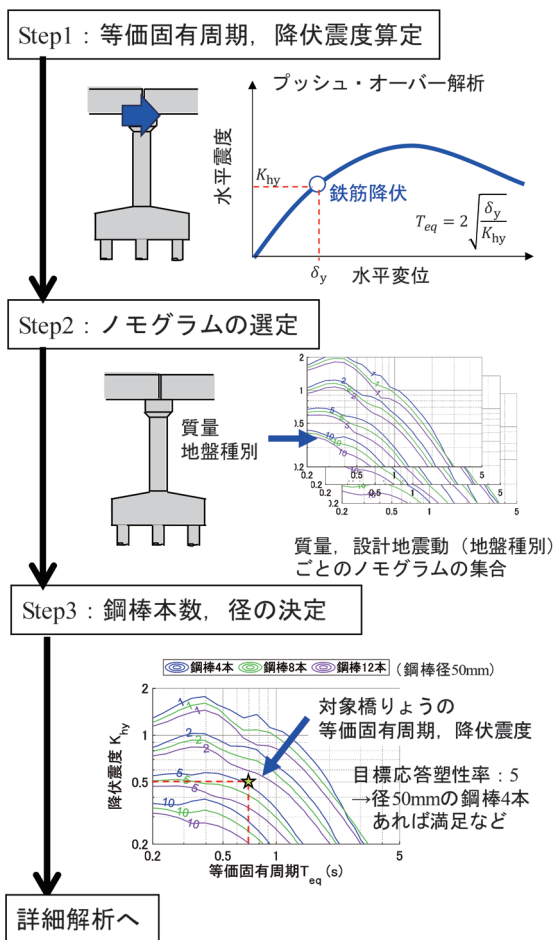


図 13 ノモグラムを用いた鋼棒諸元の概略設定の手順

グラムの概要を示した後、ノモグラムを利用した鋼棒諸元の概略設定の手順を具体例に基づいて示す。

4.1 ノモグラムの概要

一般的な鉄道橋りょう・高架橋の耐震設計では、構造物の等価固有周期、降伏震度を所要降伏震度スペクトルと呼ばれる図上にプロットすることで応答塑性率を算定している⁶⁾。このスペクトルは、設計地震動ごとに用意

されており、設計者は等価固有周期、降伏震度を事前に評価しておけば、詳細な動的解析をせずに応答値を算定できる仕組みとなっている。鋼棒諸元の概略設定法についても、この所要降伏震度スペクトルに類似した表現方法を考える。

具体的には、提案装置が設置された図 3 のモデルを対象にした網羅的な動的解析結果を整理することで、等価固有周期、降伏震度ごとの応答変位および応答塑性率の等値線を整理する。ノモグラムの一例を図 12 に示すが、このような図を設計地震動および鋼棒径、鋼棒本数、基準質量ごとに事前に構築する。

4.2 ノモグラムを利用した鋼棒諸元の概略設定の手順

前節で構築したノモグラムを用いた鋼棒諸元の概略設定の手順を図 13 および以下に示す。なお、この内容は図 1 に示した詳細解析に移る前の作業となる。

- ・ Step1: 対象橋りょうの等価固有周期、降伏震度を算定する。これには、対象橋りょうの骨組み解析モデルによるプッシュ・オーバー解析が必要となるが、図 1 の詳細解析において使用する骨組み解析モデルを利用可能である。
- ・ Step2: 対象橋りょうの桁の概算質量、設計地震動（当該橋りょう位置での地盤種別）の情報から、適切なノモグラムを選択する。
- ・ Step3: Step1 で得られた等価固有周期、降伏震度を Step2 で選択されたノモグラムにプロットし、応答塑性率、応答変位が目標とする制限値以内に収まるために必要な鋼棒本数、鋼棒径をノモグラムから読み取る。ここで、目標とする制限値については、落橋に至らないための桁かかり長や対象橋りょうの変形性能に応じて設定することを想定している。

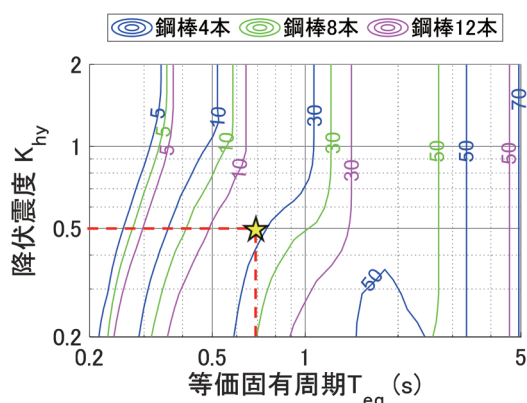
なお、上述した鋼棒諸元の概略設定が適用可能な条件は図 3 で示すモデルで表現できる構造形式、地震時挙動となる。すなわち、対象橋りょうが 1 質点系でモデル化できることが前提であり、斜角を有する場合や背の高い橋りょうなどは適用不可である。また、目標とする応答変位に至るまでに橋脚く体が損傷レベル 4 に至る場合や桁支承部の可動範囲を越える場合は、図 3 のモデルでは地震時挙動を表現できていないため、鋼棒諸元の概略設定法が適用不可となる。

4.3 ノモグラムを利用した鋼棒諸元の概略設定の例

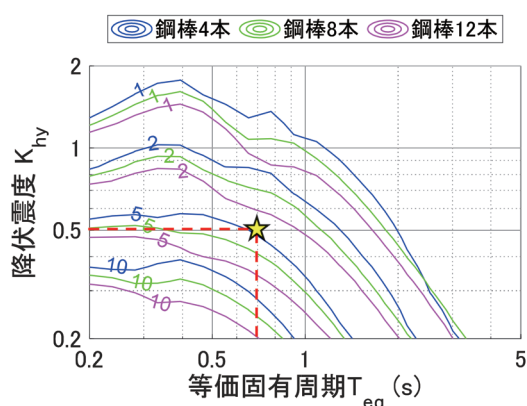
ノモグラムを利用した鋼棒諸元の概略設定の例を示す。対象橋りょうの等価固有周期、降伏震度、桁質量や目標となる制限値、設計地震動の情報を表 2 に整理する。表 2 の等価固有周期 T_{eq} 、降伏震度 K_{hy} を図 14 (a) に星印でプロットするが、鋼棒径 $\phi=50\text{mm}$ 、鋼棒本数 $n=4$ 本で目標とする応答変位を満足することがわかる。

表2 鋼棒諸元の概略設定を行う対象橋りょうの情報

等価固有周期 $T_{eq}(s)$	0.7
降伏震度 K_{hy}	0.5
等価質量 $m(t)$	150
目標応答変位(cm)	30
目標応答塑性率	5
設計地震動	L2 スペクトル II (G3 地盤)



(a) 応答変位 (単位: cm)



(b) 応答塑性率

図 14 ノモグラムを用いた鋼棒諸元の概略設定の例 ($\phi=50\text{mm}$, $m=100\text{t}$)

また図 14 (b) より、上記鋼棒諸元で、目標とする応答塑性率も満足できることがわかる。最後に、対象橋りょうの桁質量とノモグラムの基準質量の比は 1.5 となるので、式 (8) より実際に必要な鋼棒本数は 6 本となることがわかる。

以上のようにノモグラムを用いることで、橋りょうの振動特性および設計地震動を設定すれば、詳細解析を行う前に、目標とする応答変位や応答塑性率を満足するために必要な鋼棒本数、鋼棒径を概略的に把握できる。

5. まとめ

本稿では著者らのグループが提案している無道床の鋼鉄道橋を対象とした狭あい施工可能な落橋防止機能兼用型制震装置の設計法を示した。特に、設計作業の省力化のため、詳細解析を行う前に鋼棒諸元の初期値を効率的に設定する方法を構築するため、橋りょうを 1 自由度系で簡易にモデル化したうえで、鋼棒諸元と橋りょう諸元を多様に変化させた地震応答解析を実施し、鋼棒諸元と応答変位や応答塑性率との関係性を整理した。そして、鋼棒諸元や橋りょう諸元から応答変位や応答塑性率を簡易に算定できるノモグラムを構築し、それを用いた鋼棒諸元の概略設定法を提案した。本稿の知見を以下に示す。

- ・ 鋼棒径、鋼棒本数が大きいほど、橋りょうの応答変位や応答塑性率を低下させる効果がある。ただし、鋼棒本数が多すぎると、装置がほぼ弾性体のように振る舞い、履歴減衰の影響が小さくなるため、効率的に応答が低減できる鋼棒径、本数の条件が存在する。
- ・ 桁質量が大きくなるにつれ、提案装置による応答変位や応答塑性率の低減効果が小さくなり、提案装置を適用できる橋りょうには限界がある。
- ・ 以上の傾向も踏まえて、橋りょうの等価固有周期、降伏震度、桁質量および鋼棒の径、本数をパラメータに応答変位、応答塑性率の算定ノモグラムを構築した。本ノモグラムを活用することで、詳細解析を行う前に、目標とする応答変位や応答塑性率を満足するために必要な鋼棒本数、鋼棒径を概略的に設定できる。

文献

- 1) 豊岡亮洋, 古屋卓稔, 中田裕喜, 宇野匡和: 免制震構造を活用した大規模鉄道 PC 橋りょうの耐震補強, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.279-286, 2016
- 2) 喜多直之, 吉田幸司, 岡野素之, 関雅樹: 鉄道 RC ラーメン高架橋を対象とした圧縮型鋼製ダンパープレース工法の実用化, 土木学会論文集 F Vol.63, No.3, pp.277-286, 2007
- 3) 土井達也, 豊岡亮洋, 齊藤雅充, 和田一範, 名波健吾, 福本守: 狭隘な箇所に設置可能な落橋防止機能兼用型制震装置の開発, 土木学会論文集, Vol.79, No.13, 22-13003, 2023
- 4) 和田一範, 柳谷拓馬, 豊岡亮洋: 狭隘箇所に設置可能な落橋防止機能兼用型制震装置の概略設計法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol.78, No.4, pp.1_152-I_161, 2022
- 5) 豊岡亮洋: 所要の応答塑性率を実現する摩擦型ダンパーの設計手法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol.73, No.4,

pp.I_568-I_579, 2017

耐震設計, 丸善出版, 2012

6) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説

周辺地物からの放射熱を考慮した 夜間のレール温度予測法の開発

浦川 文寛* 渡辺 勉*

Development of Nighttime Rail Temperature Prediction Method
in Consideration of the Radiant Heat from Surrounding Geographical Features

Fumihiko URAKAWA Tsutomu WATANABE

This study proposed a new method capable of predicting the rail temperature distribution in nighttime at intervals of about 1 m by modeling the radiant heat of rail in detail using digital surface model (DSM) and meteorological data. To verify its prediction accuracy, the distribution of rail temperature and radiant heat were measured on an actual track. As a result, the minimum rail temperature was about 2°C high at the measurement points near buildings compared with that at other points due to strong radiant heat. We also confirmed that the proposed method can accurately reproduce the actual rail temperature distribution in nighttime.

キーワード：レール温度予測，軌道座屈，熱収支，地物の放射熱，DSM

1. はじめに

主要な鉄道線路の多くで、レール同士を溶接してつなぎ、継目をなくしたロングレールが用いられている。ロングレールは走行安全性の向上、騒音や振動の低減、乗り心地の向上等、多くの利点を持つ反面、継目部でのレール伸縮を吸収する機能がなくなるため、夏季にレール温度が上昇した際に圧縮のレール軸力が発生し、軌道が水平方向に張り出す、軌道座屈の危険性が高まる。一方、冬季のレール温度低下による引張の軸力はレール破断および破断時開口量の増加の原因となる。いずれも列車脱線につながる可能性のある重要な事象であるが、温暖化によるレール温度の上昇が懸念される昨今では、軌道座屈に対する安全性を確保すること、および人口減少社会に対応するための管理の省力化との両立が喫緊の課題である。ロングレールでは、レール温度 T_R に対するレール軸力 P_R (圧縮を正) は式 (1) より算出される。

$$P_R = EA\beta(T_R - T_0) + \Delta P \quad (1)$$

ここで、 E 、 A 、 β はそれぞれレールの縦弾性係数、断面積、線膨張係数である。 T_0 は設定温度と呼ばれる、レールの中立温度 (軸力がゼロとなる温度) の管理上の目標値である¹⁾。 ΔP はレールのふく進 (長手方向への移動) や低温時作業によって生じる付加軸力である^{1) 2)}。我が国の軌道座屈に対するロングレール管理においては、レール温度が高温となる夏季までに、式 (1) の T_R に夏

季の予想最高レール温度を代入して求めた最大発生軸力と、軌道の剛性と形状から算出される座屈耐力とを照査して座屈に対する安全度の判定を行う。さらに、判定結果に応じ、道床碎石の追加や軌道整備、設定替 (ふく進量を適正值に調整する作業)、夏季特別巡回等の処置を行う²⁾。夏季特別巡回とは、日々のレール温度を常時測定し、レール温度が管理値 (50°C 前後) を超過した際に現場の状態を目視で確認するもので、近年の熱環境下では夏季の晴天時はほぼ毎日、夏季特別巡回が必要となる等、多大な労力を費やしている。式 (1) から明らかなように、設定温度 T_0 を高く設定することで、高温時のレール軸力を低減できる反面、低温時の引張のレール軸力が増加する。そのため、冬季の予想最低レール温度から設定温度 T_0 の上限を定めるとともに²⁾、冒頭で述べたリスクを鑑み、 T_0 は 25°C ~ 30°C 程度とすることが一般的である。

このように、軌道座屈防止のためには高温時だけでなく、低温時のレール温度予測が重要である。前者については詳細な予測法がいくつか提案されているが^{3) ~ 6)}、後者については気温による簡易な予測が行われている。年間の最低レール温度は、地域や標高差による気象条件の違いで大きく変わることは容易に予想される。また、樹木等からの放射熱によって、夜間のレール温度が変化することが報告されている⁷⁾。実務上、上記要因に伴うレール温度の変化を把握することは難しく、予想最低レール温度は線区単位で一律に定めているのが現状である。上記要因を考慮してレール温度の線路長手方向の分布を定量的に予測し、設定温度や遊間を最低レール温度の予測値に応じて最適化することで、軌道座屈に対する安全性

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

の確保、および安全度判定による処置の必要数量の低減といった、管理の省力化を実現できると考える。

レール温度が最高値となるのは夏季の昼間、最低値となるのは冬季の夜間である。道路の温度管理の分野では、道路表面を平面としてモデル化し、日射（太陽の短波放射）および大気と周辺地物（地面、建物、樹木等の総称）の長波放射（以下「放射熱」とする）による吸収熱を、平面との相対角度を考慮して計算し、道路表面の温度を予測している⁸⁾。筆者らは文献3にて、既往研究⁸⁾における日射の評価法をレールの熱収支モデルに適用するとともに、レール長手方向の熱伝導解析を行って、レール温度を予測する手法を開発した。文献3のレール温度予測モデルでは、日射および日射を受けるレールの3次元形状をモデル化することで、日射が支配的となる昼間のレール温度を解析で精度良く再現することができた。一方、放射熱が支配的となる夜間については、周辺地物からの放射熱を後述のとおり簡易にモデル化していたため、レール温度の解析値が実際の値よりも低くなる等、解析精度に問題があった³⁾。本稿では、夜間レール温度の解析精度の向上を目的とし、周辺地物の高さを含む標高データ（以下「DSM：Digital Surface Model」）と周辺地物の温度からレールに照射される放射熱を精緻に計算し、レール温度を予測するモデルを提案した。さらに、実軌道にてレール温度と放射熱を測定し、解析結果と比較することで、提案手法の有効性と解析精度の検証を行った。なお、以降は文献3で開発したモデルを「昼間レール温度予測モデル」、本稿で開発したモデルを「夜間レール温度予測モデル」と呼ぶ。

2. 夜間レール温度予測モデルの詳細

2.1 座標系の定義

本章では時間軸を t 、レール長手方向の位置を l 、レールの断面における周方向の位置を k とする。また、西→東を X 軸、南→北を Y 軸、鉛直上向きを Z 軸とし、 XYZ 座標系の位置を $\{X\} (= \{X, Y, Z\}^T)$ 、 XY 平面上の方位

角を ψ 、仰角を θ と表記する。

2.2 モデルの特徴

夜間レール温度予測の計算フローを図1に示す。まず、GIS (Geographic Information System) データと気象条件からレールが吸収する熱流量 $Q_{IN}(l, t)$ を計算する。さらに、初期のレール温度を指定した後、レールが排出する熱流量 $Q_{OUT}(l, t)$ をレール温度より求め、熱伝導解析を実施して時刻 Δt 後のレール温度を算出する。これを任意の時刻 t_N まで繰り返し、位置 l における t_0 から t_N のレール温度 $T_R(l, t)$ を得る。この計算フローは昼間レール温度予測モデルと同じであるが、レールが受ける放射熱（図2 (a)）のモデル化手法が異なる。昼間レール温度予測モデルではレールが受ける日射を計算する際、レール周囲の地物を DSM でモデル化し、日射（太陽からの短波放射）の地物による遮蔽を考慮している³⁾。一方、放射熱については、地面を地物のない水平面として地面の放射熱を計算しており、地物の放射熱お

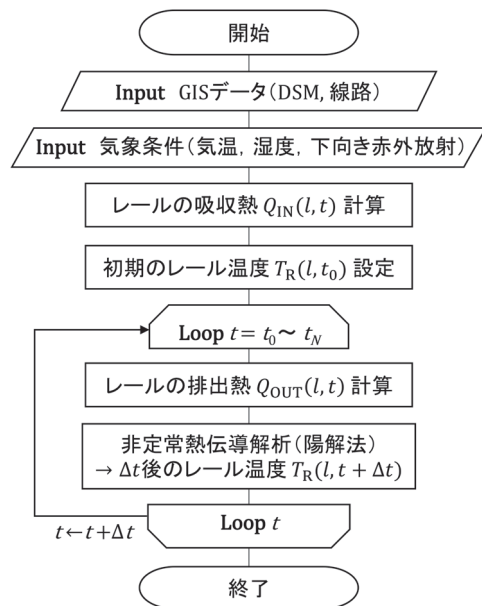


図1 夜間レール温度予測モデルの計算フロー

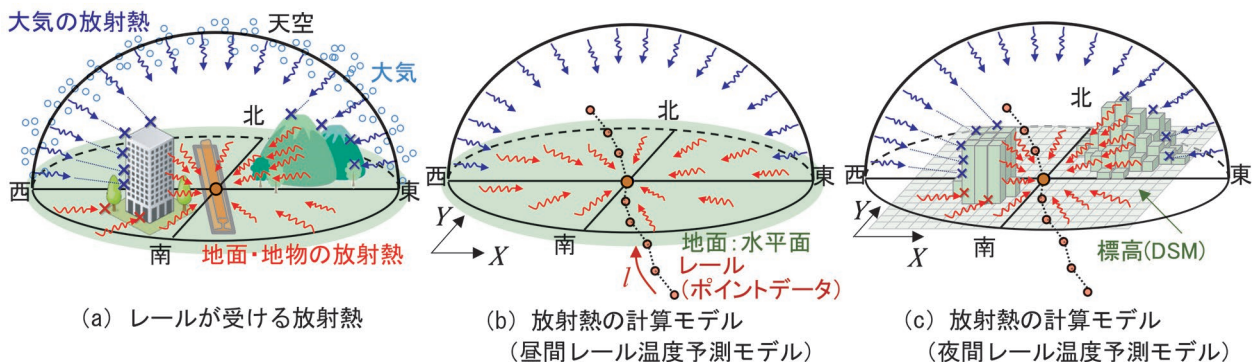


図2 放射熱の計算モデル

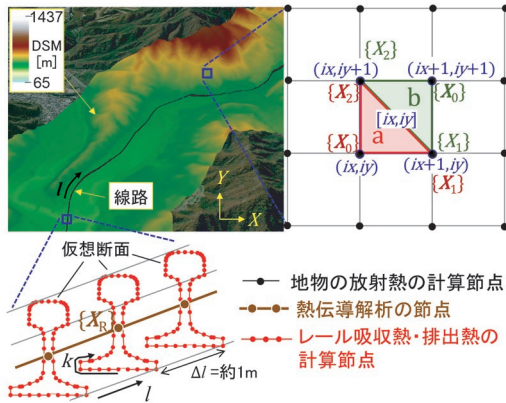


図3 GISデータに基づく解析メッシュ作成

よび地物による大気と地面の放射熱の遮蔽を考慮してない(図2 (b))。このような簡易なモデル化手法が夜間のレール温度予測の誤差要因となっていたため、夜間レール温度予測モデルでは実際の熱環境(図2 (a))を再現できるように、DSMを用いて地物の放射熱および地物による大気と地面の放射熱の遮蔽を考慮する精緻なモデル化手法(図2 (c))を適用した。なお、当然ながら夜間レール温度予測モデルでは日射はゼロである。

2.3 GISデータに基づく解析メッシュ作成

2.3.1 DSMのラスターデータに基づく地物の要素分割

ラスターデータとは、GISにおいて標高を表す一般的なデータ書式の一つで、セルを格子状に分割してセル毎に値を格納したデータ形式である。図3に示すとおり、 X 方向に $ix(=1, 2, \dots)$ 、 Y 方向に $iy(=1, 2, \dots)$ の節点番号を付与し、DSMのラスターデータの4節点から四角形 $[ix, iy]$ を作成する。さらに、要素を平面として後述の放射熱の計算式を簡略化するため、 $[ix, iy]$ を a, b の三角形要素に2分割する。三角形 a の節点 $0, 1, 2$ は節点 $(ix, iy), (ix+1, iy), (ix, iy+1)$ 、三角形 b の節点 $0, 1, 2$ は節点 $(ix+1, iy+1), (ix+1, iy), (ix, iy+1)$ とする。

2.3.2 レールの3次元形状のモデル化

レールのモデル化については文献3と同様、線路のGISデータに沿って、約1m間隔で熱伝導解析用の節点を配置し、その節点周りに仮想的なレール断面(仮想断面)を付加し、レールの3次元形状を、傾斜を持つ平面の集合として模擬する(図3)。この仮想断面を用いてレール表面による他のレール表面への放射熱の遮蔽を判別するとともに、放射熱とレール表面の相対角度を計算し、吸収熱に反映させる。このような手法を用いることで、既往研究⁶⁾と比較してレール形状の再現精度を確保しつつ、計算コストを大幅に縮減でき、100km程度の広範囲にわたるレール温度分布の計算を可能としている。

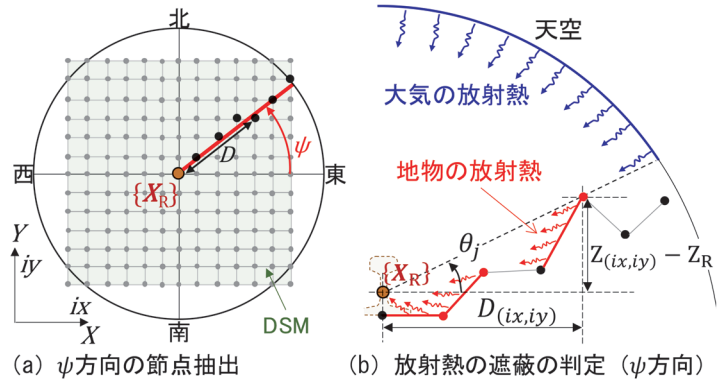


図4 GISデータに基づく解析メッシュ作成

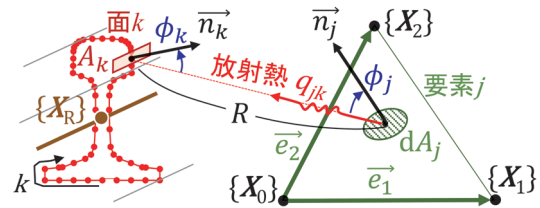


図5 GISデータに基づく解析メッシュ作成

2.4 レールが受ける地物の放射熱の計算方法

2.4.1 放射熱がレールに到達する要素の特定

方位角 ψ 方向について、図4 (a)に示すように、レールから見た ψ 方向の接点(ラスターの中心)を抽出する。次に図4 (b)に示すように、レールから抽出した接点を見た仰角 $\theta_j(=\tan^{-1}\{(Z_{(ix, iy)}-Z_R)/D_{(ix, iy)}\})$ が式(2)を満たす接点(図4 (b)の赤点)とそのレール側の接点を含む要素をレールに放射熱が到達する要素とする。これを全方位($0 \leq \psi < 2\pi$)に対して実施する。

$$\theta_j \geq \max\{\theta_j(D < D_{(ix, iy)})\} \quad (2)$$

2.4.2 地物の放射熱の定式化

図5に示すように、レール表面上の面 k が三角形要素(地物) j から受ける放射熱 q_{jk} を考える。面 k は要素 j に対して十分小さく、面 k 上の位置の影響は無視できると仮定すると、 q_{jk} は次式で表すことができる。

$$q_{jk} = \frac{A_k}{\pi} \sigma \cos \phi_k \int_{\text{要素}j} \varepsilon_j T_j^4 \frac{\cos \phi_j}{R^2} dA_j \quad (3)$$

ここで、 A_j, A_k :要素 j , 面 k の面積、 ε_j :要素 j の放射率、 σ :ステファンボルツマン係数、 T_j :要素 j の絶対温度、 ϕ_k, ϕ_j :面 k と要素 j を結ぶ線分と各面の法線ベクトル \vec{n}_k, \vec{n}_j の成す角度、 R :面 k と要素 j 上の点を結ぶ線分長である。図5に示す \vec{e}_1, \vec{e}_2 は式(4)で定義される三角形要素 j の2辺のベクトルであり、レールから要素 j 上の点

に向かうベクトル \vec{r} はベクトル \vec{e}_1, \vec{e}_2 を用いて式(5)で表すことができる。

$$\vec{e}_1 := \{X_1\} - \{X_0\}, \quad \vec{e}_2 := \{X_2\} - \{X_0\} \quad (4)$$

$$\vec{r} = s_1 \vec{e}_1 + s_2 \vec{e}_2 + \{X_0\} - \{X_k\} \quad (5a)$$

$$0 \leq s_1 \leq 1, \quad 0 \leq s_2 \leq 1, \quad 0 \leq s_1 + s_2 \leq 1 \quad (5b)$$

ここで、 $\{X_0\}, \{X_1\}, \{X_2\}$ は三角形要素の節点0, 1, 2、 $\{X_k\}$ は面 k の中心の3次元座標である。要素 j の内部で放射率と絶対温度は一樣とすると、式(3)を式(4)と式(5)のベクトルを用いて変形すると式(6)が得られる。

$$q_{jk} = \frac{A_k}{\pi} \sigma \cos \phi_k (2A_j \varepsilon_j T_j^4) \int_0^1 \int_0^{1-s_1} \frac{\cos \phi_j}{|\vec{r}|^2} ds_2 ds_1 \quad (6)$$

要素 j の面積 A_j は式(7)、法線ベクトル \vec{n}_j は式(8)、 $\cos \phi_j$ は式(9)より計算できる。面 k の法線ベクトル \vec{n}_k はレールの方位角と形状データから取得でき、 $\cos \phi_k$ は式(10)である。

$$A_j = \frac{1}{2} \sqrt{|\vec{e}_1|^2 |\vec{e}_2|^2 - (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2)^2} \quad (7)$$

$$\vec{n}_j = \frac{\vec{e}_1 \times \vec{e}_2}{|\vec{e}_1 \times \vec{e}_2|} \quad (8)$$

$$\cos \phi_j = \frac{\vec{n}_j \cdot \vec{p}}{|\vec{n}_j| |\vec{p}|} \quad (9)$$

$$\cos \phi_k = \frac{\vec{n}_k \cdot \vec{p}}{|\vec{n}_k| |\vec{p}|} \quad (10)$$

式(7)~式(10)を式(6)に代入して要素 j からレールが受ける放射熱 q_{jk} が計算でき、これを前項で特定した全ての要素、レール表面に適用して合計することで、位置 $\{X_R\} (=l)$ のレールが周辺地物から受ける放射熱 $Q_G (= \sum_k \sum_j q_{jk})$ を計算できる。

2.5 レールが受ける大気放射熱の計算方法

大気放射熱の計算には下向き赤外放射 R_D を使用する。下向き赤外放射とは、大気中の雲・水蒸気・二酸化炭素等が天空の全方向から地表面に放射する放射熱であり、地球温暖化の監視のため、気象庁で常時観測されている⁹⁾。計算の際には大気放射熱が天空の全方向で一樣であると仮定し、かつ図4に示す地物による放射熱の遮蔽を考慮し、式(11)にて下向き赤外放射 R_D を補正する。さらに、面 k の面積、補正した下向き赤外放射、お

よびレール表面上の面 k から天空を仰ぎ見る形態係数の積(式(12))より、面 k が受ける大気放射熱を算出する。

$$R_D = \frac{R_D}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} sky(\psi, \theta) \cos \theta d\theta d\psi \quad (11)$$

$$p_k = A_k R_D \frac{1 + \cos \beta_k}{2} \quad (12)$$

ここで、 $sky(\psi, \theta)$ は地物による大気放射熱の遮蔽の有無を表すパラメータであり、図4(b)に示すとおり、 $\theta > \max |\theta_j|$ を満たす天空の領域では大気放射熱がレールに到達するとして1、それ以外では0とする。 β_k は面 k の水平面からの傾斜角である(図6)。位置 $\{X_R\} (=l)$ において、レールの全周にわたって放射熱 p_k を求めてそれらを合計することで、レールが大気から受ける放射熱 $Q_W (= \sum_k p_k)$ を計算できる。レールの吸収熱 Q_{IN} は Q_W, Q_G およびレール表面の放射率 ε_R を用いて次式となる。

$$Q_{IN}(l, t) = \varepsilon_R (Q_G + Q_W) \quad (13)$$

2.6 レールの排出熱と熱伝導解析

レールの排出熱 Q_{OUT} は、軌道パッド(レール底面とまくらぎ上面間に設置する緩衝用ゴムパッド)への熱伝導 J_C 、空気への対流熱伝達 J_T 、レール表面からの放射熱 J_R の合計で、 J_C はレール温度と気温、 J_T はレール温度、気温、風速、 J_R はレール温度の関数としてモデル化する³⁾。夜間のレール温度は気温と軌道パッドの温度をしばしば下回り、その際は空気と軌道パッドから熱を吸収するが、計算上は負の排出熱として処理する。

熱伝導解析では、レールの熱収支($Q_{IN} - Q_{OUT}$)を熱伝導方程式に代入し、 Δt 間の温度変化を陽解法にて逐次計算する。詳細は文献3を参照されたい。

3. 夜間レール温度の解析精度の検証試験

図7(a)の写真のように、建物と近接する箇所にてレール温度とレールが受ける放射熱を測定し、両者を比

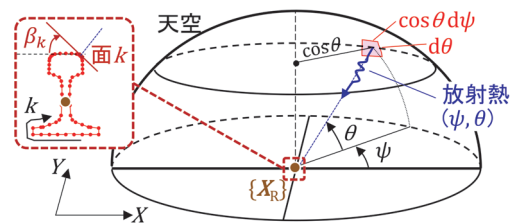


図6 レールが天空の (ψ, θ) 方向から受ける大気放射熱

較した。さらに、夜間レール温度予測モデルに入力する気象要素を測定し、解析で得られたレール温度を測定値と比較し、解析精度を検証した。

3.1 測定条件

図8に試験箇所周囲の地物および測点を示す。試験箇所は、ロングレール敷設区間のバラスト軌道、軌道線形は直線、レールはJIS 60kgレール、まくらぎはPCまくらぎが使用されている。周囲の主な地物として建物1、建物2、建物3がある(図7(a)、図8)。試験日は、2022年12月7日から2023年1月7日で、当該期間に降雪はなく、降雨が発生したのは12月13日、18日、22日の3日間である。各種測定内容は次のとおりである。

3.1.1 レール温度

当該箇所のレール温度の分布を捉えるため、図8に示す11測点(T1~T11)で、FC(フィールドコーナ)側のレール腹部に熱電対(図7(b)左上、T-FFF(M)、福電社)を設置してレール温度を10分間隔で測定した。

3.1.2 気象要素(気温、風速)

図8に示すように、T1付近の地面から高さ1mの位置にウェザーステーション(図7(b)右、Vantage pro 2、DAVIS社)を設置して気温(A1)と風速(W1)を、T9付近の地面から高さ20cmの位置に温湿度計(図7

(b)左中、LR5001、HIOKI社)を設置して気温(A9)を10分間隔で測定した。

3.1.3 周囲からの放射熱

箇所毎の周囲からの放射熱の差を測定するため、図8に示すように、T2、T6、T9付近に長波放射計(図7(b)左下、CHF-IR02、クリマテック社)を設置し、大気と周辺地物からの放射熱(L2、L6、L9)を10分間隔で測定した。ただし、本測定機の測定値は、機器設置面(ここでは水平面)が受ける放射熱であり、測定感度 U が測定機から見た地物の仰角 θ の正弦に比例($U \propto \sin\theta$)するため、地物の高さが低く、遠方にある程、その地物からの放射熱の測定値が実際よりも小さくなる。そこで、図9に示す、文献7で開発した天空の放射熱分布の測定装置を用いた。本装置は、レール頭頂面にサーモグラフィカメラを据え付けて天空の全領域を複数回に分けて撮影し、得られた熱画像を放射熱に変換して統合することで、天空の全領域の放射熱分布を球面(仰角 θ による測定感度の低下なし)で測定可能である。本装置を用い12月15日の3時から4時の間で、T1、T2、T4~T10の計9測点にて測点から見た天空の放射熱分布を測定した。

3.2 解析条件

図10にレール温度の測定結果を示すが、解析対象日は、試験期間中にレール温度が最低(T11で -6°C)となった12月24日の夜間(0時~7時)とその翌日の25



(a) 試験箇所周囲の状況



(b) 測定機器の設置状況

図7 試験状況の写真

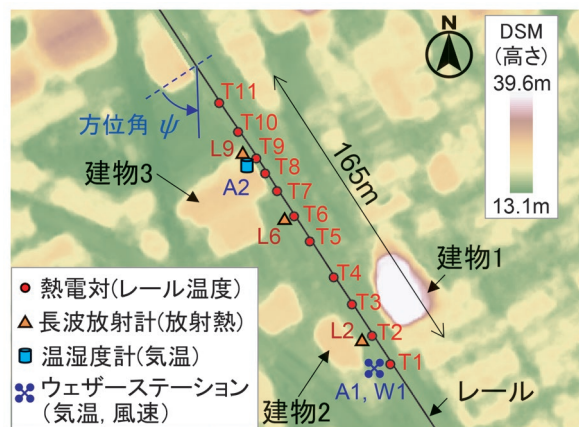


図8 測点とその周囲の地物の配置

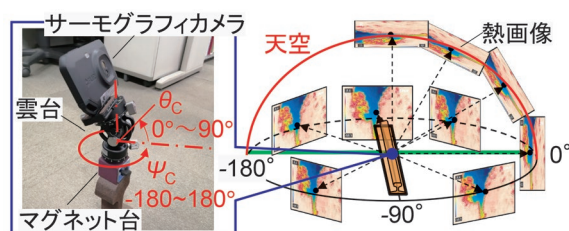


図9 放射熱(球面)分布の測定装置

日の夜間とした。

3.2.1 地理データ

解析に使用した地理データは、図8に示すDSMとレール節点のデータである。DSMはNTT DATA社のAW3D高精細版DSM(0.5mピッチ)を、レール節点はArcGIS Geo Suite詳細地図の線路のラインデータL_RROADに沿って約1m間隔で作成したポイントデータを用いた。

3.2.2 気象データ

レール温度予測に使用する気温と風速データには、図11上に示すウェザーステーションにおける気温(A1)、風速(W1)の測定結果を用いた。図11下は地物と大気の放射熱の合計であり、L6が最も放射熱が小さい。これは、長波放射計を設置した3箇所の中でL6が周囲の建物から最も遠く、地物の放射熱が小さいためである。よって、L6の測定結果には大気の放射熱成分が最も多く含まれると考え、解析時の大気の放射熱にはこれを用いた。

3.2.3 解析パラメータ

レール温度と軸力の予測計算に使用した主なパラメータを表1に示す。レール表面の放射率 ϵ_R は、頭頂面(幅30mm)では照り面を想定して0.20、その他は酸化面を想定して0.75とした¹⁰⁾。地物の放射率 ϵ_j は、地物の標高がレールの標高+0.1mより低い要素は地面を想定して0.95¹¹⁾、その他は樹木等の間隙による放射熱の低下および人工物を想定して0.57(地面の0.6倍)とした。地物の温度は気温の測定値(図11上“A1”)を用いた。時間増分 Δt は10分(600秒)、レール長手方向の空間

増分 Δl は線路のポイントデータ間隔と同じ1mとした。

3.3 試験結果

3.3.1 レール温度と放射熱の測定値の比較

図12にサーモグラフィカメラによる天空の放射熱分布の測定結果を示す。図中の方位角 $\psi=0^\circ$ は南西側の線路直交方向(図8の左下方向)、 $\pm 90^\circ$ は測定レール、 $0^\circ \sim 180^\circ$ はT1側、 $-180^\circ \sim 0^\circ$ はT11側である。図12において、建物、樹木、電架柱等の地物が存在する箇所は放射熱が大きいため白～赤色で、地物が無く大気から放射熱を受ける箇所は青色で示されている。また同図より、建物の窓やベランダ等の凹凸部は、平面部よりも放射熱が大きいが読み取れる。T2付近の建物1とT8付近の建物3を比較すると、南側(南西方向)の壁面が線

表1 解析パラメータ

項目	記号	値
レール表面の放射率	ϵ_R	頭頂面: 0.20
		頭頂面以外: 0.75
地物の放射率	ϵ_j	$Z < (Z_R + 0.1m)$: 0.95
		$Z \geq (Z_R + 0.1m)$: 0.57
大気の放射熱	R_D	図11下“L6”
ステファンボルツマン係数	σ	5.67×10^{-8}
地物の温度	T_j	気温と同じ
軌道パッド熱伝導率	λ_p	0.25 W/(mK)
軌道パッド厚さ	L_p	0.007 m
レール鋼密度	ρ_R	7820 kg/m ³
レール比熱	c_R	461 J/(kgK)
レール熱伝導率	λ_R	50 W/(mK)
レール断面積	A_R	0.00775 m ²

Z: 地物の標高, Z_R : レールの標高

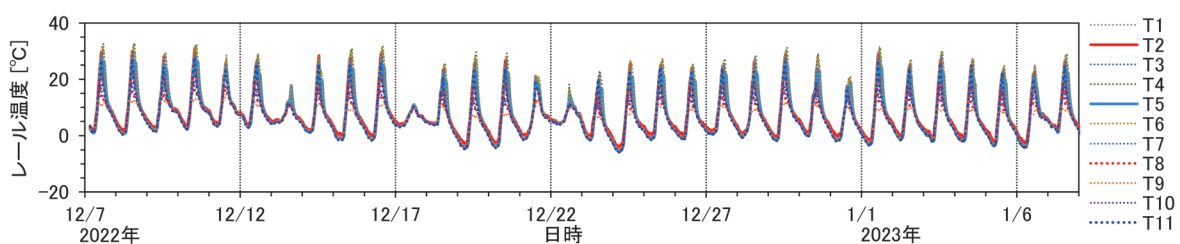


図10 レール温度の測定結果

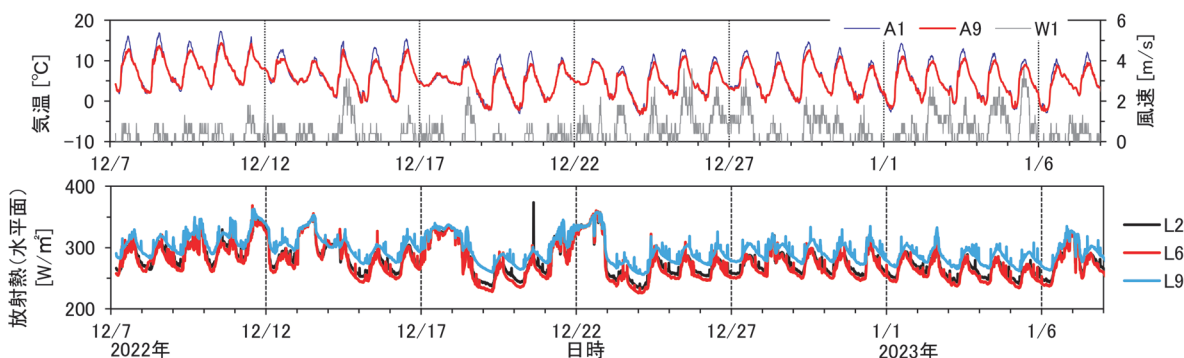


図11 気象要素の測定結果(上: 気温・風速, 下: 放射熱)

路に面している建物1は、ベランダが線路側に張り出しているため(図7(a))、北側(北東方向)が線路に面している建物3よりも凹凸が多く、放射熱も大きく(図12の赤色が濃く)なった。また、建物2の壁面の放射熱は全体的に建物3のそれよりも大きい(図12)。この理由は明確には分からないが、建物2は変電所、建物3は共同住宅であり、建物の用途が異なることによる外壁の放射率や断熱性、壁面温度等の差が関係していると考えられる。

図12の測定結果を天空の全領域で積分し、レールが受ける放射熱を計算した結果と、レール温度との比較を図13に示す。図12、図13より、周囲の建物に近いT2とT8は、他の測点と比べてレールが受ける放射熱が大きく、建物から遠いT5やT11よりもレール温度が約2℃高い等、周辺地物とその放射熱および夜間のレール温度との関係には明確な相関性が見られる。

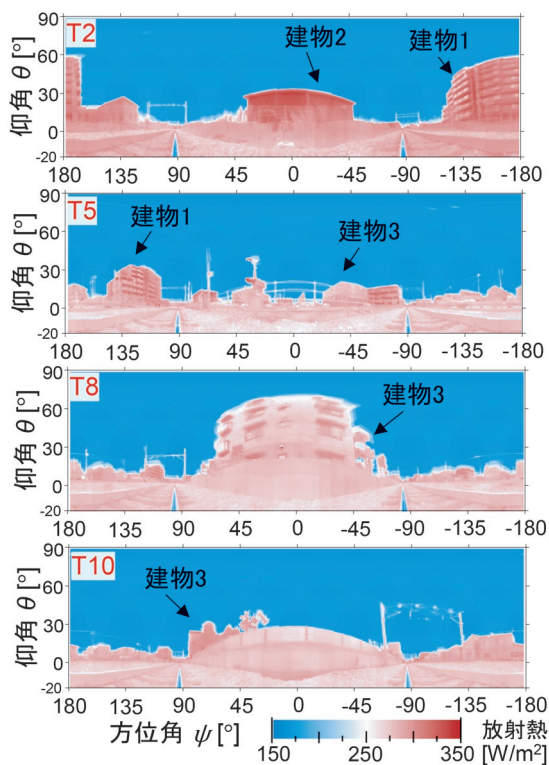


図12 放射熱(球面)分布の測定装置

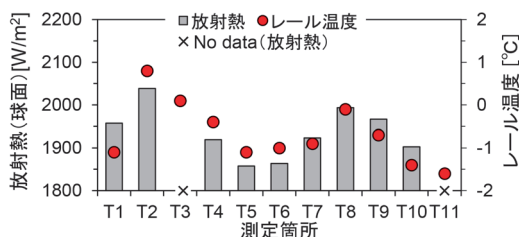
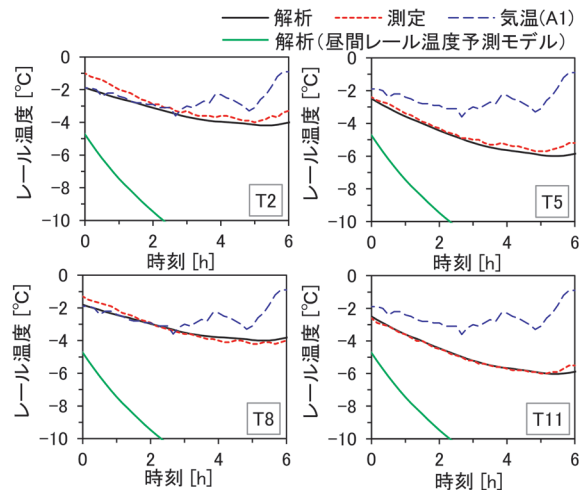


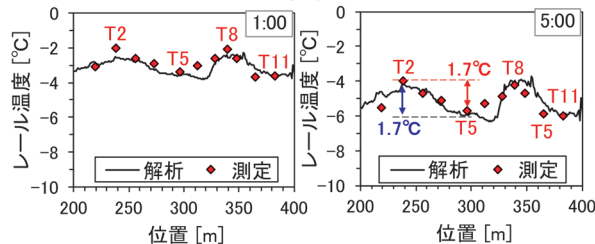
図13 レール温度(12月15日3:30)と放射熱の測定

3.3.2 レール温度の測定値と解析値の比較

図14に12月24日のレール温度の測定値と解析値の比較を示す。図14(a)には気温の測定結果と昼間レール温度予測モデルによる解析結果も記載している。時刻歴波形について図14(a)より、気温とレール温度の測定値を比較すると、レール温度は5時頃まで下がり続け、T11では-6℃まで低下するのに対し、気温は3時頃には低下が収まり、最低値は-3.5℃と、レール温度と異なる挙動を示した。また、地物の放射熱を考慮しない昼間レール温度予測モデルの解析結果では、3時の時点でレール温度が-10℃を下回る等、測定値との大幅な乖離が見られる。一方、夜間レール温度予測モデルによる解析値と測定値を比較すると、両者は近い値となった。ここで、T8の最低レール温度の解析値は測定値よりも0.2℃高いのに対し、T2では測定値よりも0.3℃低い。これは、前項で述べた建物の形状や用途等に起因する建物毎の放射熱の差を考慮できていないことが原因と考えられるが、解析結果への影響は0.5℃以下と小さい。レール温度分布について図14(b)より、建物に近いT2では建物から遠いT5よりも5時のレール温度が1.7℃高い測定結果が得られたが、解析でも同様の結果が得られており、測定値と解析値がよく一致することが分かる。このように、DSMデータを用いて地物からの放射熱を詳細にモデル化することで、夜間のレール温度



(a) 時刻歴波形



(b) レール温度分布

図14 レール温度の測定値と解析値の比較(12月24日)

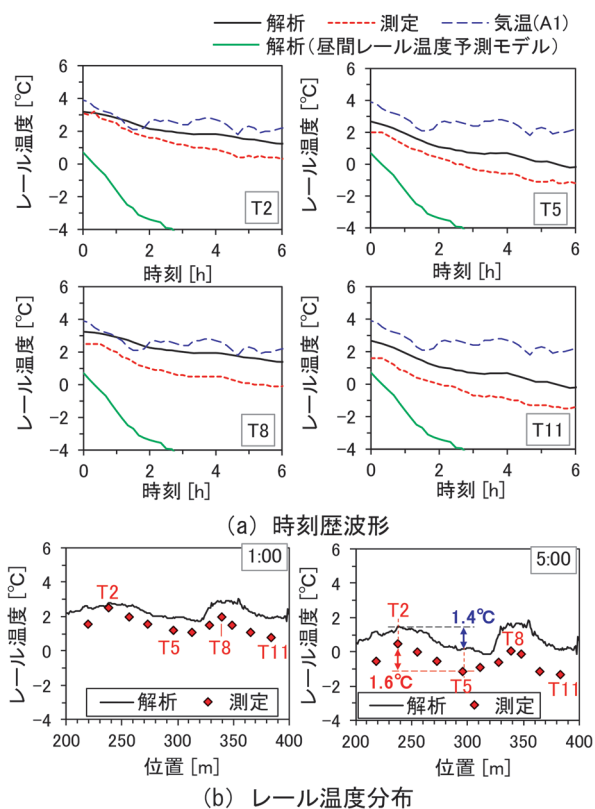


図 15 レール温度の測定値と解析値の比較(12月25日)

の解析精度を既往研究³⁾と比較して大幅に向上させることができた。

図 15 に、12月25日のレール温度の解析値と測定値の比較を示す。図 15 (b) 右より、建物に近い T2 と建物から遠い T5 の 5:00 におけるレール温度の差は測定と解析共に 1.5°C 前後であり、測点間のレール温度差は測定と解析で概ね一致した。しかしながら、夜間レール温度予測モデルの解析値は、昼間レール温度予測モデルと比較すると測定値と近い値が得られたものの、全測点でレール温度の解析値が測定値よりも 1°C ~ 1.5°C 高くなった。

4. 考察

レール軸力管理において重要となる、年間の最低レール温度とその線路長手方向の分布を詳細に予測することを目的とし、DSM データを使用した周辺地物の放射熱のモデル化に基づく夜間のレール温度予測法を提案した。冬季夜間に実線路で行った測定では、建物に近い測点では遠い測点と比較し、レールが受ける放射熱が大きくなり、かつ最低レール温度が約 2°C 高くなる等、レール温度と放射熱および建物の配置との間に、明確な相関性が認められた。一方、レール温度と気温は異なる挙動を示し、夜間の最低値は気温がレール温度より 2.5°C 高かつ

た。従来、レールおよびその他軌道部材の夜間の温度は気温から推定されることが多いが、これらの結果はレール温度を気温のみから正確に予測することは難しく、地物の放射熱をモデル化する提案手法の有効性を示している。測定した気象条件を提案手法に適用し、レール温度を解析的に求めたところ、測定期間中にレール温度が最低となった 12月24日については、測定値と解析値がよく一致した。ところが翌日の解析では、測点間のレール温度差は解析で再現できたものの、試験箇所の全測点でレール温度が測定値よりも解析値の方が 1°C ~ 1.5°C 高くなった。レール温度分布は、気象条件に起因する広範囲の平均的なレール温度に、地理条件に起因する局所的な変動が重畳する形で現れると考えられる。後者については、測点間の温度差が測定と解析で一致したことから、提案手法にて精度よく再現できることが分かった。一方、前者については、試験箇所全体で同様の解析誤差が生じたことから、気象条件の取得とそのモデル化手法に問題があったと考えられる。これについては今後も検証を続ける予定である。

以上、地理条件に起因する最低レール温度分布の局所的な変動を、提案手法により精度良く算出できることが分かった。今回の試験では、箇所間の最低レール温度の差は最大で 2°C 程度であったが、河川沿いや高架橋上等の周辺地物が少ない箇所と山間部等で路面や樹木が近接する箇所とでは、レール温度差がより顕著となることが予想される。提案手法を用いてこれら最低レール温度差を定量的に予測し、設定温度に反映させることで、夏季の軌道座屈の安全性の向上と、設定替、夏季特別巡回等、レール軸力の増加により必要となる処置の数量の低減が期待される。ただし、今回の試験では、気象条件の取得とそのモデル化手法が原因と思われる解析誤差が見られており、地域や標高等による気象条件差が、最低レール温度に与える影響については引き続き検討を行いたい。また、提案手法では DSM を用いることで建物の細かな形状を簡略化してモデル化し、かつその特性値（放射率、壁面温度）を同一としたが、測定では建物の形状や用途等に起因すると思われる建物毎の放射熱の差が観測された。そのレール温度の解析結果への影響は 0.5°C 以下と小さかったが、提案手法を広く活用するためには、多種多様な構造物、地形、植生等で影響がどの程度生じるかの検証が必要と考える。

5. 結論

レール軸力管理において重要となる、年間の最低レール温度とその分布を詳細に予測することを目的とし、DSM データを使用した周辺地物の放射熱のモデル化に基づく夜間のレール温度予測法を提案した。また、提案

手法の有効性と精度検証のため、実軌道にてレール温度とレールが受ける放射熱を測定し、予測値と比較した。得られた知見を以下に示す。

- ・レール温度と放射熱および建物の配置との間に明確な相関性が認められた一方で、レール温度と気温は異なる挙動を示した。この結果より、レール温度を気温のみから正確に予測することは難しく、地物の放射熱をモデル化する提案手法の有効性を確認した。
- ・建物が近接する測点では他よりも最低レール温度が約2℃高くなる等、地理条件に起因する最低レール温度分布の局所的な変動が観測されたが、提案手法によりこれを精度良く算出できることが分かった。
- ・大気の放射熱、建物の形状や用途に起因すると思われる解析誤差が見られたことから、気象条件のモデル化手法、および多種多様な構造物、地形、植生等の最低レール温度への影響について、引き続き検証が必要である。

文献

- 1) 玉川新悟, 西宮裕騎, 瀬瀬智也: 低温時のロングレール保守作業制限の見直しの提案, 鉄道総研報告, Vol.36, No.3, pp.11-16, 2022
- 2) 保線工学編集委員会(編): 保線工学(上)第5編-第1章, pp.284-330, 鉄道現業者, 2016
- 3) 浦川文寛, 渡辺勉: 地理・気象データを使用した鉄道用レール温度予測法, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.76, No.2, pp.I_553-I_564, 2020
- 4) Zhang, Y., Clemenzi, J., Kesler, K. and Lee, S. : Real time prediction of rail temperature, Proceedings of the AREMA 2007 Annual Conference, Chicago, IL.
- 5) Bruzek, R., Al-Nazer, L., Biess, L. and Kreisel, L. : Rail temperature prediction model as a tool to issue advance heat slow orders, AREMA 2014 Annual Conference, Chicago, IL.
- 6) Wang, H., Chen, J., Balaguru, P. N. and Al-Nazer, L. : Thermal benefits of low solar absorption coating for preventing rail buckling, Proceedings of the 2015 Joint Rail Conference, San Jose, CA, USA.
- 7) 浦川文寛, 渡辺勉, 辻江正裕: 沿線地物の赤外線量分布の測定及びその夜間レール温度との関係, 第29回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2022), S2-7-2, 2022
- 8) 齊田光, 藤本明宏, 福原輝幸: 熱収支法による広域路面温度予測モデル—乾燥路面の路線温度分布予測—, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.69, No.1, pp.1-11, 2013
- 9) 気象庁高層気象台 赤外放射観測: https://www.jma-net.go.jp/kousou/obs_third_div/rad/rad_ir.html (参照日: 2023年2月22日)
- 10) 化学大辞典編集委員会 編: 化学大辞典—シー 縮刷版 (4巻), 東京化学同人, p.817, 1963
- 11) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994

火山灰が鉄道の電気・信号設備に及ぼす影響の評価と 降灰情報の活用法の提案

西金 佑一郎* 寺田 夏樹** 小西 武史***
浦越 拓野* 河村 祥一*

Evaluation of Impact of Volcanic Ash on Railway Electric and Signal Equipment and
Proposal of Utilizing Information on Ash Fall

Yuichiro NISHIKANE Natsuki TERADA Takeshi KONISHI
Takuya URAKOSHI Shoichi KAWAMURA

Ash fall could have critical impacts on railway such as the failure of shunting of the track circuit and the decrease in insulation performance of insulator. In this study, we experimentally investigated conditions that cause these impacts of volcanic ash. Then, we clarified that over 0.05 mm thick volcanic ash causes the malfunction of shunting and that 1.2 mm thick volcanic ash containing saltwater causes the insulator flashover. Based on the results, we propose prevention actions against ash fall for railway companies to mitigate the impacts, using public information on eruption.

キーワード：降灰，短絡不良，がいし，絶縁性能，火山ハザードマップ，降灰予報

1. はじめに

日本には 111 の活火山が存在する。そのうち 50 火山は、今後 100 年程度の中長期的な噴火の可能性および社会的影響を踏まえ、火山防災のために監視・観測体制の充実等の必要がある火山¹⁾として、常時観測の対象となっている。火山活動により発生する現象は、降灰、噴石、火砕流、火山性地震など様々であり、これらが鉄道に与える影響は多岐にわたる²⁾。これらのうち降灰は風によって火山灰が遠方まで運ばれることにより、影響が広範囲に及ぶ。

降灰による鉄道の被災形態は、視界不良、モーターの不具合、トンネルの動作不良など多様な事例が確認されている²⁾。これらのうち、火山灰がレール上に堆積することによる短絡不良や、がいし表面に付着することによる絶縁性能の低下は、噴火後の鉄道の安全輸送を確保する上での重要な課題である。そこで、本研究では軌道回路（一般的な軌道回路と踏切制御子の 2 種類）とがいしを対象とし、降灰の条件に応じてこれらの鉄道設備が受ける影響の程度を評価し、さらにその結果を踏まえて降灰時の鉄道の対応方法を提案することを目的とした。本研究ではまず、火山灰の電気的性質を解明するた

めに電気抵抗率を測定した。次に、軌道短絡試験およびがいしの絶縁性能試験を実施し、火山灰が軌道回路やがいしに及ぼす影響の程度やその発生条件を整理した。さらに、その結果を踏まえ、火山ハザードマップや降灰予報などの火山防災に関する公的情報を活用した、鉄道における降灰時の対応方法を検討した。

2. 火山灰の電気的性質

2.1 概要および試料

火山灰の電気的性質を把握し、その性質を踏まえて火山灰が軌道回路やがいしに及ぼす影響を検討するため、火山灰の電気抵抗率試験を実施した^{3) 4)}。火山灰の電気的性質は含水状態によって異なると想定されるため、異なる含水比での電気抵抗率を測定した。また、火山灰と反応した後の水部分の電気的性質を把握するために、懸濁液の電気伝導率および水溶性成分の分析を実施した。これらの試験に用いた火山灰試料を表 1 に示す。

2.2 試験方法

図 1 (a) に示す試験容器に含水比を調整した火山灰を充填し、四極子法によって火山灰の電気抵抗率を測定した (図 1 (b))。火山灰の電気抵抗率 ρ ($\Omega \text{ m}$) は式 (1) で求めることができる。式 (1) の A は試験容器の断面積 (m^2)、 L は測定用電極間距離 (m)、 V_s は印加開始から 1 分後の測定用電極間の電位差 (V)、 V_R は同時刻の抵

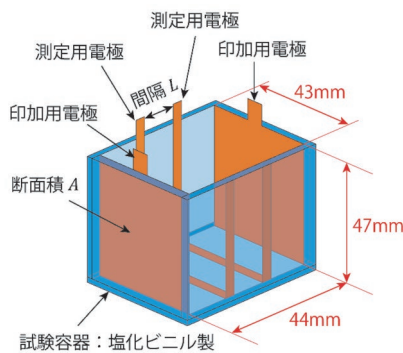
* 防災技術研究部 地質研究室

** 信号技術研究部 信号システム研究室

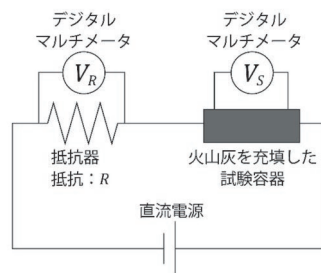
*** 電力技術研究部 き電研究室

表 1 試験に用いた火山灰試料⁴⁾を一部編集

試料番号	火山	説明
Sa	桜島	2014年12月18日の噴火による火山灰を桜島で噴火後数時間以内に採取。
Sb	桜島	鹿児島市内で回収され、屋外で1年以上保管されていた火山灰を2014年に採取。
Aa	阿蘇山	2016年10月8日の噴火による火山灰を噴火後12時間以内に採取。
Ab	阿蘇山	2016年10月8日の噴火による火山灰を10月13日に採取。噴火から採取までの間に降雨あり。
K	霧島(新燃岳)	2018年3月6日の噴火による火山灰を3月7日に採取。
F	富士山	宝永噴火(1707年)によると判断される火山灰および火山礫を静岡県御殿場市の地層から2016年に採取。
T	—	市販品の豊浦砂。



(a) 試験容器



(b) 測定回路

図 1 火山灰の電気抵抗率測定⁴⁾

抗器での電圧降下 (V), R は抵抗器の抵抗 (Ω) である。

$$\rho = \frac{A V_S}{L V_R} R \quad (1)$$

また、懸濁液の電気的特性については地盤工学会の基準に準拠し、土懸濁液の電気伝導率試験方法 (JGS 0212-2009) および水溶性成分試験方法 (JGS 0241-2009) を実施した。

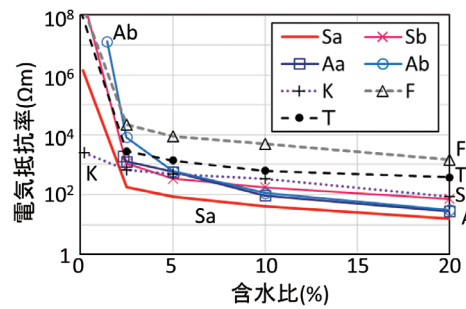


図 2 火山灰の電気抵抗率の測定結果³⁾

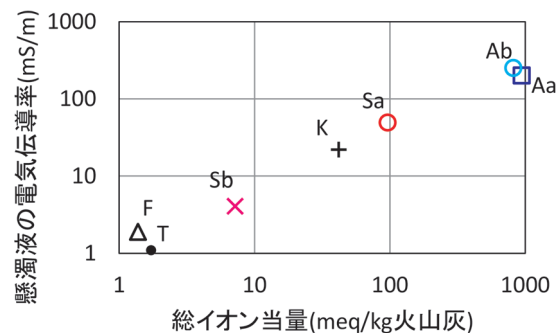


図 3 電気伝導率と総イオン当量の関係³⁾を一部改変

2.3 試験結果および考察

火山灰の電気抵抗率の測定結果を図 2 に示す。K (霧島 (新燃岳)) を除くと、含水比 2% 未満では電気抵抗率が $10^6 \Omega m \sim 10^8 \Omega m$ 以上 (測定限界以上) と高いのに対し、含水比 2.5% では電気抵抗率が $10^2 \sim 10^4 \Omega m$ に急減し、その後も含水比の増加に伴って電気抵抗率は低下した。K は含水比が 0.2% の場合でも電気抵抗率が $10^3 \Omega m$ 程度と比較的低いが、含水率の増加に伴い電気抵抗率が低下する傾向は他の試料と同様であった。また、含水比 5% 以上における電気抵抗率は T と F が比較的高く、その他の試料は比較的低い。同じ含水比条件では、T と F を除く試料毎の電気抵抗率の違いは 10 倍程度であった。

懸濁液の電気伝導率試験および水溶性成分分析の結果を図 3 に示す。水溶性成分は乾燥した火山灰 1kg から溶出した総イオン当量 (E; 式 (2)) で示した。式 (2) の C_i は溶出したイオン i のモル濃度、 Z_i はその価数である。

$$E = \sum_i C_i \times Z_i \quad (2)$$

懸濁液の電気伝導率と総イオン当量には正の相関が認められたことから、火山灰から溶出するイオンが多いほど、懸濁液が電気を通しやすいことが分かる。

また、火山灰試料によって懸濁液の電気伝導率および総イオン当量は異なり、噴火後数日以内に採取した火山灰 (Sa, Aa, Ab および K) では比較的高い結果であっ

た。例えば同じ桜島の火山灰でも、1年以上屋外で保管されたSbより、噴火直後に採取されたSaの方が懸濁液の電気伝導率、総イオン当量が高い。これは、噴火直後の火山灰は水に溶けやすい成分を多く含んでいたのに対し、長期間降雨に晒された火山灰は水に溶けやすい成分が溶出したためと考えられる。

懸濁液の電気伝導率と含水比20%での火山灰の電気抵抗率を比較すると、負の相関が認められた(図4)。このことと、懸濁液の電気伝導率は総イオン当量に依存していたことから、試料毎の火山灰の電気抵抗率の違いはイオン溶出量の差に起因し、イオン溶出量が多い火山灰では含水した火山灰の電気抵抗率が低くなると考えられる。

本試験より、火山灰の電気抵抗率は含水比により大きく変化することが分かった。この結果を踏まえ、電気抵抗が高いことで発生しうる軌道回路の短絡不良、電気抵抗が低いことで発生しうるがいしの絶縁性能の低下について、実験的に検討した内容を3章、4章に示す。これらの実験には、十分な量を確保できた桜島の火山灰Sbを主に用いた。Sbは火山灰試料の中で比較的電気抵抗率が高い(図2)ため、降灰後数日以内に採取した火山灰と比較した場合、軌道回路の短絡不良に関する検討では安全側、がいしの絶縁性能の低下に関する検討では危険側の評価結果になる可能性がある。

3. 降灰による軌道回路の短絡不良に関する検討

レール上に堆積した火山灰がレール-車輪間の通電を阻害し、短絡不良を生じさせる可能性がある²⁾が、短絡不良が生じる条件について詳細な検討はなされていなかった。本研究では、鉄道総研の試験線に軌道回路を構成し、レール上に火山灰を散布させた状態で車両を走行させることで、火山灰が軌道短絡に与える影響を調査した^{3) 5)}。

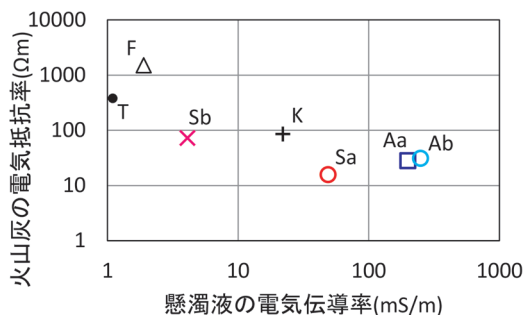


図4 含水比20%での火山灰の電気抵抗率と懸濁液の電気伝導率の関係⁴⁾

3.1 試験方法

試験方法の模式図を図5に示す。軌道回路の起点方端部5~8mの区間のレール上に、ケースごとに設定した厚さの火山灰を散布した(表2)。その状態で車両を起点方から走行させ、車両が試験区間を通過する際の軌道リレーの残留電圧および扨上・落下をメモリハイコーダで計測するとともに、車軸の通過タイミングを車軸検知子で把握した。また、車両の走行によってレール上の火山灰が飛散しないように、走行条件は速度10km/h程度のだ行とした。今回の試験は、一般的な軌道回路(商用周波数回路)と踏切制御子(H型)に対してそれぞれ実施した。試験の際に測定した短絡感度は、一般的な軌道回路で0.12Ω、踏切制御子で1.4Ωであった。以降、単に「軌道回路」と記載した場合は一般的な軌道回路を指す。

本試験では桜島の火山灰Sbを主に用い、ケースごとに火山灰の厚さを変えるほか、乾燥条件と湿潤条件でそれぞれ試験を実施した(表2)。なお、試料Sbの量の不足を補うため、火山灰の厚さ1mmのケースのみ、Sbとは異なる箇所から採取された桜島の火山灰で代用した。湿潤条件では、火山灰を散布した後で洗浄機を用いて水を噴霧した。なお、火山灰の含水比は乾燥条件で1%未満、湿潤条件で5~26%であった。

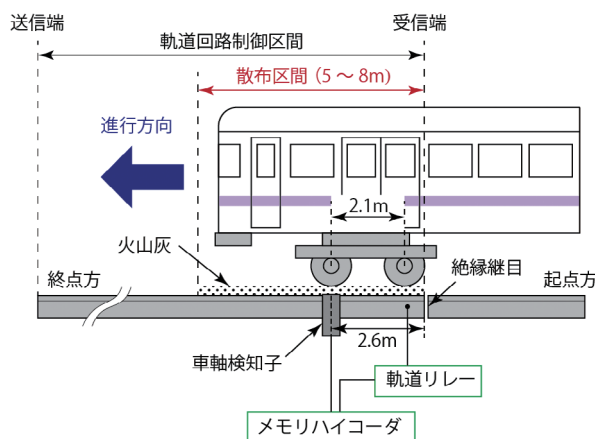


図5 軌道短絡試験の模式図⁵⁾を一部改変

表2 軌道短絡試験における火山灰の散布条件

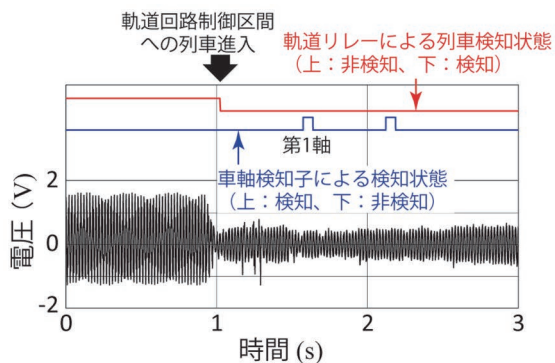
試験対象	火山灰の厚さ(mm)						
	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2	0.5	1
軌道回路	◎	◎	◎	◎	—	◎	◎
踏切制御子	◎	◎	◎	◎	○	—	—

◎：乾燥条件と湿潤条件で実施；○：乾燥条件でのみ実施；—：実施せず

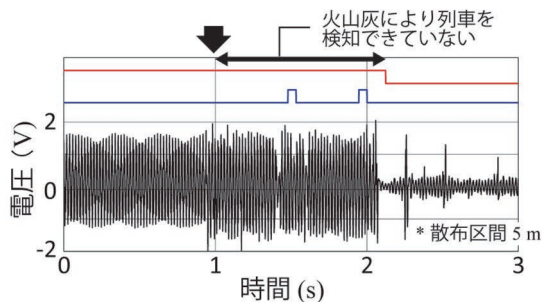
3.2 試験結果

3.2.1 軌道回路の場合

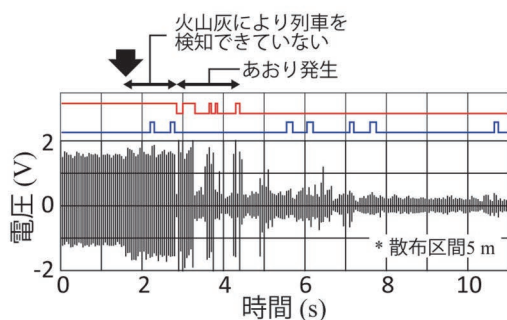
試験結果の例を図6に示す。火山灰を散布しないケース（図6(a)）では列車が軌道回路制御区間に進入した時点で、軌道回路が正常に短絡して列車が検知され、その後車軸検知子が車軸の通過を検知している。一方、乾燥状態の火山灰を厚さ0.05mm散布したケース（図6(b)）では、車軸検知子が第1軸の通過を検知した時点でも軌道回路が短絡しておらず、列車を検知できていないことがわかる。このケースでは、第1軸が散布区間を通過すると軌道回路は正常に短絡した。また、湿潤状態の火山灰を厚さ0.1mm散布したケース（図6(c)）では、第1軸が散布区間を通過する間は軌道回路が短絡せず、



(a) 火山灰散布なし



(b) 火山灰 0.05mm 厚, 乾燥条件



(c) 火山灰 0.1mm 厚, 湿潤条件

図6 軌道短絡試験の結果の例⁵⁾を一部改変

散布区間通過後は短絡と不短絡が繰り返される「あおり」という不安定な状態が発生した。表3に各試験条件での軌道回路の短絡状況を整理する。火山灰の厚さが0.025mm以上では列車検知が不安定な状況となり、0.05mm以上では列車検知ができなかった。また、湿潤条件では散布区間外でも不短絡またはあおりが生じる場合があり、これらの試験時には列車通過後、散布区間外の数m~100mにわたり、レール上に火山灰が付着していた。

3.2.2 踏切制御子の場合

各試験条件における踏切制御子の短絡状況を表4に示す。踏切制御子は軌道回路よりも短絡感度が大きいいため、軌道回路の場合（表3）に比べて検知状況は良いが、火山灰の厚さが0.025mm以上では列車検知が不安定な状況となり、0.2mmでは列車検知ができなかった。

3.3 考察

軌道回路においてレール上に0.05mm程度、踏切制御子においては0.2mm程度の厚さの火山灰が堆積すると、不短絡となるリスクが発生する可能性がある。ただし、本試験はレール上の火山灰が飛散しないように低速で車両を走行させるという、不短絡が生じやすい条件で実施したため、実際には上記の厚さ以上の火山灰が堆積しても正常に短絡する場合があると考えられる。特に、乾燥状態にあるレール上の火山灰は走行時に飛散する可能性がある。また、湿潤状態で散布区間外においても不短絡

表3 軌道回路の短絡試験結果⁵⁾

火山灰の厚さ	短絡結果	
	乾燥条件	湿潤条件
0.01mm	短絡	短絡
0.025mm	あおり発生	あおり発生
0.05mm	不短絡	不短絡
0.1mm	不短絡	不短絡 (散布区間外であおり発生)
0.5mm	不短絡	不短絡 (散布区間外であおり発生)
1mm	不短絡	不短絡 (散布区間外でも不短絡)

表4 踏切制御子の短絡試験結果⁵⁾

火山灰の厚さ	短絡結果	
	乾燥条件	湿潤条件
0.01mm	短絡	短絡
0.025mm	あおり発生	短絡
0.05mm	あおり発生	あおり発生
0.1mm	あおり発生	あおり発生
0.2mm	不短絡	—

* —は試験を実施していないことを示す。

やあおりが発生した原因については、湿潤状態の火山灰が車輪に付着した状態で車両が散布区間外を走行したためと考えられる。

4. 降灰によるがいしの絶縁性能の低下に関する検討

降灰時に電力会社で停電が発生した事象が報告されており、その原因は火山灰ががいしに付着することで漏れ電流が増加したためと推定されている⁶⁾。鉄道の電気設備でも、降灰によって同様の事象が生じる可能性がある。そこで、火山灰の付着状態ががいしの絶縁性能に与える影響を実験的に検討した^{3) 7) 8)}。

4.1 試験方法

火山灰を付着させたがいしの絶縁抵抗測定ならびに交流または直流の課電装置を用いた漏れ電流試験を実施した。図7に交流による課電試験時の試験回路を示す。試験に供したがいしは表5に示すA～Cの3種類とした。がいしA、Bは懸垂がいし、がいしCは長幹がいしである。懸垂がいしの場合は吊り下げたがいしに対し図8に示す4パターンの範囲に火山灰を付着させた状態で、長幹がいしの場合は水平にしたがいしの上面のみに火山灰を付着させた状態で試験を行った(図9)。火山灰は桜島の火山灰Sbを使用し、がいしの水平投影面積1m²あたりに付着させる火山灰の量(以降、付着密度)は0.2kg/m²と1.2kg/m²の2パターンとした。これらの付着密度は、火山灰の密度を1g/cm³とすると、それぞれ厚さ0.2mmおよび1.2mmに相当する。また、火山灰を付着させる際には水道水を噴霧した。さらに、火山灰と塩分の両者ががいしに付着した場合の塩害のリスクについて検討するため、水道水の代わりに3%食塩水を噴霧

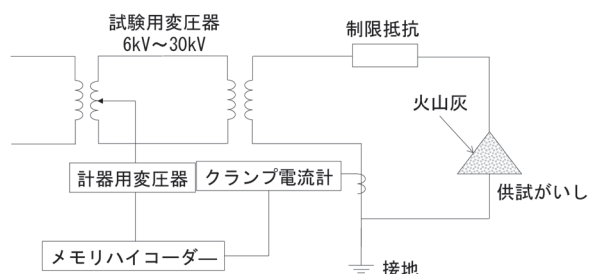


図7 課電試験時の試験回路(交流の場合)⁷⁾

表5 試験に用いたがいし

番号	種別	材質	説明
A	懸垂	磁器	長径: 180mm
B	懸垂	磁器	長径: 250mm
C	長幹	磁器	笠数: 6

した場合の試験も実施した。

4.2 試験結果および考察

がいしA、Bに関して、火山灰付着時の絶縁抵抗と交流課電時の漏れ電流の測定結果を図10にまとめる。ここでは火山灰を付着させる際に水道水を用い、がいしAには10kV、Bには20kVの交流電圧を印加した。

火山灰の付着範囲と付着密度の増大に応じて絶縁抵抗は低下し、交流課電時の漏れ電流は著しく上昇した。例えば付着密度1.2kg/m²でがいしAの表裏全面に火山灰を付着させた場合、絶縁抵抗は1MΩを下回り、10kV印加時の漏れ電流は100mAに達した。このように、付着密度1.2kg/m²、表裏全面付着の条件で絶縁性能が著しく低下することが分かった。なお、がいしBの表裏1/4に1.2kg/m²の火山灰を付着させた条件では放電が発生してせん絡に至った。このケースの漏れ電流は、過電流によって試験装置が停止する直前に計測された最大値を図10に示した。この結果から、耐張吊りのがいしなど両面に火山灰が付着しうる設置状況にあるがいしでは、火山灰によるせん絡のリスクが相対的に高いと考えられる。

次に、火山灰に水道水を噴霧した場合と食塩水を噴霧した場合の試験結果を図11に示す。この試験では、がいしA、Bは表裏全面に、がいしCは上面に火山灰を付着させ、がいしAに直流1.8kVを、がいしB、Cに交流10kVを印加した。なお、がいしCでは火山灰の付着密度を1.2kg/m²の1パターンのみで実施した。電源は直流課電装置では10mA、交流課電装置では100mAに達すると停止に至るため、停止に至った場合は装置の上限電流値をプロットした。

水道水と食塩水の結果を比較すると、後者の絶縁抵抗がより低く、漏れ電流がより大きい傾向が見られた。ま

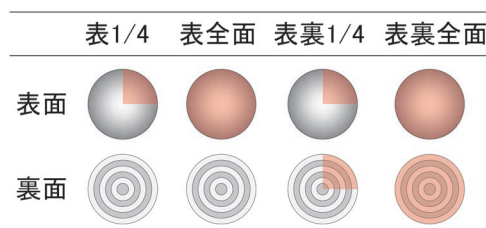


図8 懸垂がいしへの火山灰の付着パターン



図9 長幹がいしへの火山灰の付着状況の例³⁾

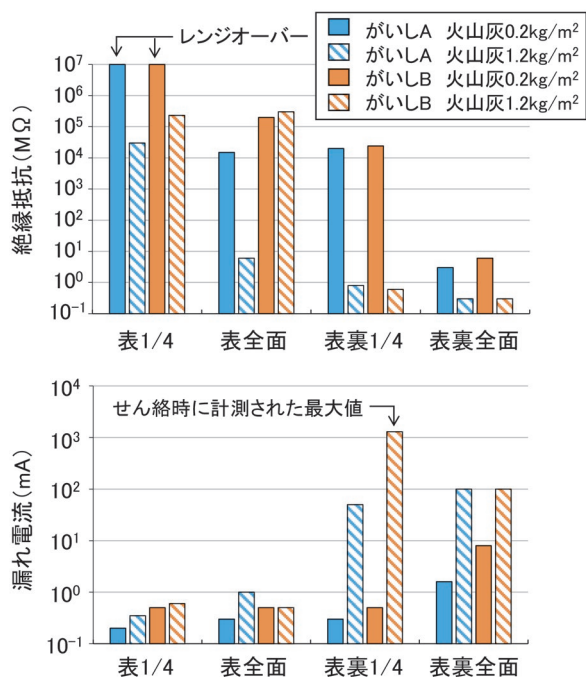


図 10 火山灰付着時のがいの絶縁抵抗と交流課電時の漏れ電流測定結果



(a) がいし B (付着密度 1.2kg/m²; 食塩水)



(b) がいし C (付着密度 1.2kg/m²; 食塩水)

図 12 課電時に放電が生じた状況の例³⁾

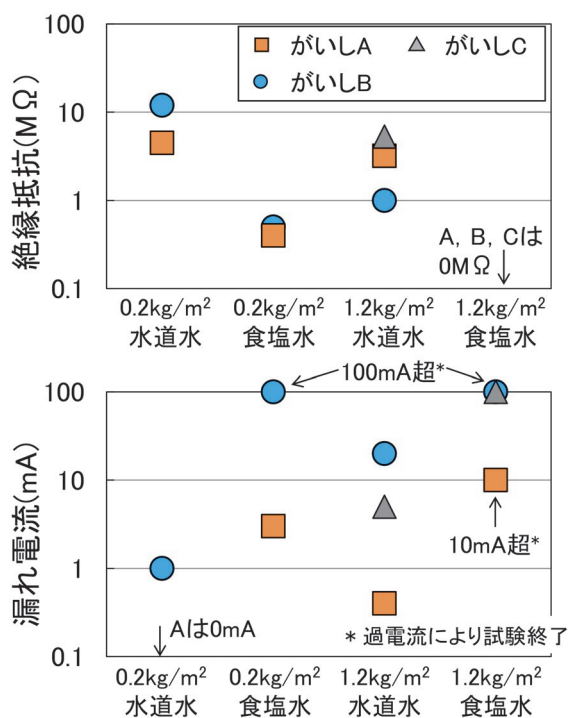


図 11 水道水を噴霧した場合と食塩水を噴霧した場合の測定結果の例³⁾ を一部改変

た、水道水を噴霧した場合は、付着密度 1.2kg/m² では放電が生じるケースがあったが、付着密度 0.2kg/m² ではすべてのケースで放電は生じなかった。一方、食塩水を噴霧した場合は、付着密度に関わらず試験したすべてのケースで課電時に放電が認められた。課電時に放電が

生じた状況の例を図 12 に示す。本結果より、沿岸地域においてがいに火山灰が付着した場合、せん絡のリスクがより高まると想定される。

5. 公的情報を活用した降灰時の対応方法

以上の結果を踏まえ、降灰に関する公的情報を有効に活用した、鉄道における降灰時の対応方法について検討する。

降灰に関する公的情報には、火山防災協議会が作成する火山ハザードマップと、気象庁が公表する降灰予報がある。火山ハザードマップは、火山灰等の各火山災害要因の影響が及ぶ恐れのある範囲を地図上に特定し、視覚的に分かりやすく描画したものである。このうち火山灰については、過去の噴火時の実績、または噴火規模や風向・風速等を仮定した場合のシミュレーション結果から、想定される火山灰の堆積厚さごとの到達範囲が示されている。これを活用することにより、相対的に降灰による影響が発生するリスクが高い箇所をあらかじめ把握することが可能である。

降灰予報には、噴火が起きたと仮定した場合の降灰範囲を予測する「降灰予報 (定時)」、噴火直後に発表され、1 時間先までの降灰量分布を予測する「降灰予報 (速報)」、噴火から概ね 30 分後に発表され、6 時間先までの降灰量分布の時間変化を予測する「降灰予報 (詳細)」の 3 種類がある⁹⁾。降灰予報 (速報) と (詳細) では、降灰厚さが「少量 (0.1mm 未満)」, 「やや多量 (0.1mm

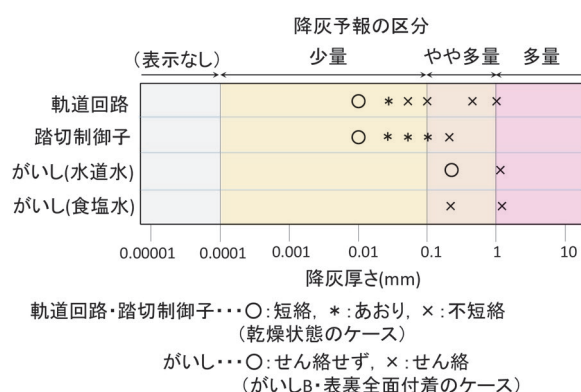


図 13 降灰予報の区分と試験結果の比較³⁾ を一部改変

～1mm)], 「多量 (1mm 以上)」の3段階で発表される。ここで、少量とは0.1 μ m～0.1mmに相当する厚さである。この降灰厚さの区分と3章、4章の試験結果を合わせて図13に示す。この図から、降灰予報で「多量」とされる範囲では、軌道回路や踏切制御子の不短絡ならびにがいしの絶縁性能低下に伴うせん絡が生じるリスクがあると考えられる。一方、表示がない範囲(0.0001mm未満)についてはこれらが生じるリスクは小さいと考えられる。ただし、今回試験に用いた火山灰Sbは電気抵抗率が比較的高いため、軌道回路や踏切制御子の不短絡が生じやすく、がいしの絶縁性能の低下が生じにくい火山灰であったと想定される。そのため、軌道回路や踏切制御子の不短絡のリスクについては安全側、がいしのせん絡のリスクについては危険側の評価となっている可能性がある。また、降灰予報は数値計算に基づく予測情報であり、実際の降灰範囲や降灰厚さとは異なりうることに留意する必要がある。

以上を踏まえると、例えば表6に示したような公的情報の活用例が考えられる。平常時は、火山ハザードマップに基づき火山灰の影響が想定される範囲を把握しておく。これは、除灰用具の配備箇所の検討等に利用できる。噴火警戒時には、連絡体制の確立や降灰時の対応の確認を実施する。なお、実際の噴火では、「噴火警報」が発表されずに噴火に至る場合がある。噴火後には、降灰予報に基づき降灰が予測される範囲を絞り込んだうえで、目視による降灰状況の確認等を行う。この際、図13に基づき火山灰の厚さを踏まえて発生しうる事象を検討し、対応方法を検討する。

6. まとめ

本研究では、降灰の条件に応じて軌道回路やがいしが受ける影響の程度を評価し、その結果を踏まえて降灰時の対応を提案することを目的とし、火山灰を用いた実験的検討および公的情報を活用した降灰時の鉄道の対応方

表 6 鉄道における公的情報の活用例⁵⁾

タイミング	関連する公的情報	活用例
平常時	火山ハザードマップ	降灰による影響範囲の想定 除灰用具の配備箇所の決定 軌道回路やがいしの状況把握
噴火警戒時	噴火警戒レベル	対策本部等の設置, 連絡体制の確立
	降灰予報(定時)	除灰要員の手配, 用具の準備
噴火後	降灰予報(速報, 詳細)	設備点検
降灰後	降灰予報(詳細) 天気予報(降水量)	除灰範囲, タイミングの決定

法の検討を行った。本研究によって得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 火山灰の電気抵抗率は含水比に強く依存し、含水比が2%程度未満では電気抵抗率が概ね10⁶ Ω m程度以上であることに対して、含水比が20%では10～100 Ω m程度となることを明らかにした。
- (2) 軌道短絡試験の結果、レール上に堆積する火山灰の厚さが0.025mm程度ではあおりが発生し、0.05mm以上では不短絡が発生する可能性があることを示した。さらに、踏切制御子でも火山灰により列車検知が不安定になる場合があることを示した。
- (3) がいしの絶縁性能試験の結果、火山灰の付着量の増加に伴い絶縁性能が低下し、1.2mm程度の火山灰の付着によりせん絡が発生する可能性があることを示した。さらに、食塩水を含有させた場合、絶縁性能の低下が著しくなり、せん絡のリスクが高まることを示した。
- (4) 上記の結果に基づき、火山灰が軌道短絡やがいしの絶縁性能に影響を及ぼし得る条件を整理した。さらに、公的情報を活用した降灰時の鉄道の対応方法を提案した。

これらの成果は、鉄道事業者が防災計画を策定する際や、軌道短絡やがいしの絶縁性能の観点から降灰に対する対応を検討する際に活用できる。

謝 辞

阿蘇火山博物館の渡邊一徳博士より火山灰試料の一部を提供して頂いた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 気象庁活火山とは：https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/katsukazan_toha/katsukazan_toha.html (参照日：2023年6月13日)
- 2) 浦越拓野, 西金佑一郎, 川越健：国内の火山活動における鉄道の被災及び対策事例, 鉄道総研報告, Vol.29, No.1, pp.47-52, 2015
- 3) 浦越拓野, 河村祥一, 寺田夏樹, 小西武史：火山灰の電気的性質と軌道短絡やががいしに及ぼす影響, 日本鉄道施設協会誌, Vol.65, No.10, pp.59-62, 2019
- 4) Urakoshi, T., Nishikane, Y., Kawamura, S., "Resistivity of volcanic ash and Its Relation to Elemental Composition," in Ohta, T., Ito, T., Osada, M., "Rock mechanics and engineering geology in volcanic fields," CRC Press, pp.34-41, 2023.
- 5) Nishikane, Y., Terada, N., Urakoshi, T., Kawamura, S., "Resistivity of volcanic ash and Its Relation to Elemental Composition," in Ohta, T., Ito, T., Osada, M., "Rock mechanics and engineering geology in volcanic fields," CRC Press, pp.107-113, 2023.
- 6) 川畑秋馬, 入佐俊幸, 上妻生朗：火山灰汚損がいしの漏れ電流特性, 電気学会論文誌B, Vol.115, No.8, pp.956-963, 1995
- 7) 平川慎太郎, 小西武史, 西金佑一郎：火山灰が付着した電気鉄道用がいしの性能検証, 平成30年電気学会全国大会論文集, No.5-246, pp.406-407, 2018
- 8) 小西武史, 平川慎太郎, 西金佑一郎：電気鉄道用がいしの火山灰付着による絶縁性能低下の実験検証, 平成30年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.9-3-19-9-3-20, 2018
- 9) 気象庁降灰予報の説明：https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/qvaf/qvaf_guide.html (参照日：2023年6月13日)

自律運転に向けた沿線・車両状態情報に基づく 運行リスク評価手法

太田 佑貴* 祇園 昭宏* 西本 翔* 櫻井 勇輝*

Operation Risk Assessment Method based on Information on Wayside and Vehicle Conditions
for Autonomous Train Operation

Yuki OTA Akihiro GION Sho NISHIMOTO Yuki SAKURAI

We have been developing an autonomous train operation system that allows trains to be operated automatically while controlling wayside equipment based on the conditions of a vehicle and wayside. Autonomous train operation not only controls the acceleration and deceleration of a train, which is achieved by automatic operation, but also automatically makes operational decisions on board. We have developed a railway dynamic map as an information infrastructure for collecting and sharing necessary onboard and wayside condition information for making operational decisions and for risk assessment. This paper provides an overview of condition information management and risk assessment using railway dynamic map.

キーワード：自律運転，運行リスク評価，ダイナミックマップ，情報共有・配信

1. はじめに

鉄道における自動運転は、地下鉄や新交通システムなどにおいて実用化されており、これらにはATO（Automatic Train Operation）システムが利用されている。近年、乗務員の負担軽減や輸送の効率化を目的に、自動運転に注目が集まっており、一般線区におけるドライバレス化を目標とした自動運転の検討と実証実験^{1) 2)}が進められている。

鉄道総研では、この自動運転の進化形として、より安全で柔軟な列車運行をできるだけ少ない地上設備で実現する自律運転³⁾の研究開発に取り組んでいる。ここでの自律運転は、線路内や沿線の状態、旅客流動、防災情報などの様々な情報に基づき、列車が沿線設備を制御しながら、自律的に走行する運行制御システムを指す。自律運転と従来の自動運転（ATO）との違いは、ATOで実現されている列車の加減速制御に加え、従来は指令員や地上装置が担っていた運行判断を車上で自動的に行うことにある。このうち、車上で運行判断を実現するには、各種状態情報を車上に集約するとともに、地上・車上間および列車間での情報共有の仕組みが必要である。

そこで本研究では、この車上で運行判断を実現するための要素技術として、状態情報の収集・管理と、状態情報に基づくリスク評価手法について検討を行った。

2. 自律運転の概要と実現の課題

2.1 自律運転システムの概要

2.1.1 現在の自動運転

鉄道における自動運転を乗務形態により分類したものを表1に示す。表中のGOA⁴⁾は、Grade Of Automationの略であり、数字が大きくなるほど自動化のレベルが上がっていくことを示している。現在、地下鉄等で行われているATOによる自動運転は、運転士による列車起動操作などを伴うことから、GOA2に相当する。また、高架のように人が容易に立ち入れない構造でホームドアが整備されている線区では、GOA3やGOA4に相当する自動運転が行われている。現在実用化されているこれらのシステムでは、各地点の制限速度や駅間の運転時分に沿って作成された速度パターンに従って走行するように列車の加減速が制御される。近年では、列車の前頭に

表1 JIS E 3802⁴⁾ に準じた自動運転の分類

自動化レベル	乗務形態	導入状況
GOA0	運転士（および車掌）が乗務	路面電車
GOA1		一般線区
GOA2	運転士が乗務	地下鉄 首都圏新都市鉄道 等
GOA3	前頭以外に係員が乗務	舞浜リゾートライン
GOA4	係員の乗務なし	ゆりかもめ 神戸新交通 等

* 信号技術研究部 列車制御システム研究室

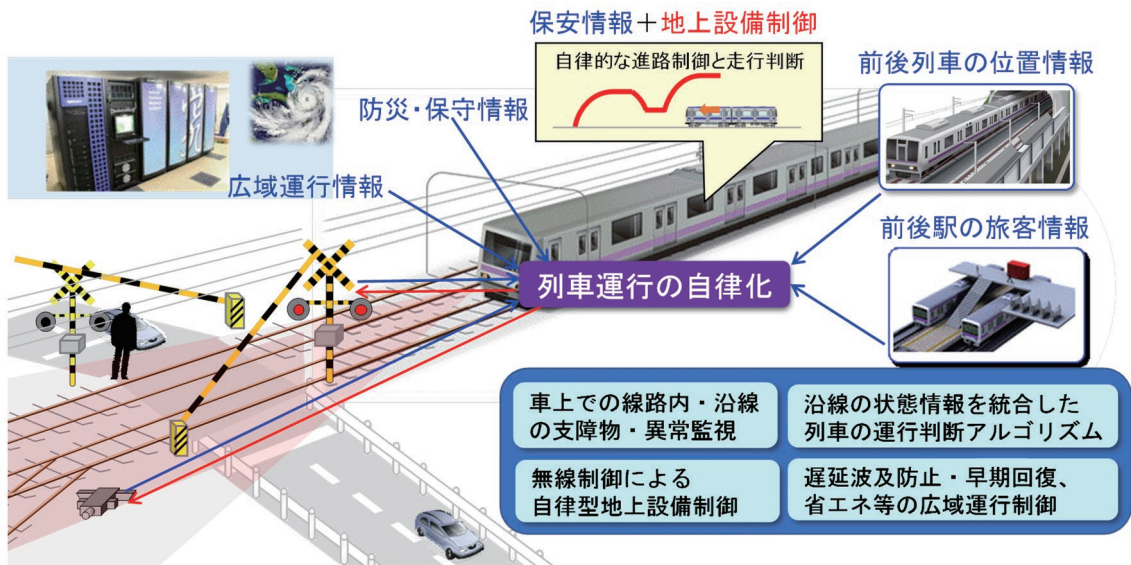


図1 自律運転の実現イメージ

係員が乗務して自動運転を行う方式（GOA2とGOA3の中間のためGOA2.5と呼称）以上のレベルに相当する自動運転を、踏切などがある一般線区で実施する場合の技術的課題の抽出と要件が検討されている⁵⁾。

2.1.2 自律運転

自律運転では、GOA3以上に相当するドライバレス運転をさらに高度化させ、従来から行われている加減速制御だけでなく、各種状態情報に基づいた適切な運行判断を自動的に行う。その実現イメージを図1に示す。

図1のように、個々の列車が自ら線路内・沿線等の状態を把握し、踏切等の地上設備を車上から直接制御しながら、走行速度を制御する。自律運転実現のための要素技術として、次の①～④が挙げられる。

- ① 画像・LiDARによる線路内・沿線の異常検知
- ② 線路内・沿線と車両の状態情報を統合して列車運行の可否を判断するアルゴリズム

- ③ 列車からの無線による地上設備の直接制御

- ④ 遅延波及防止・早期回復、省エネ等のための広域での運行管理アルゴリズム

自律運転では、これらの要素技術を統合することで、乗務員が担っていた車上での判断だけでなく、地上の指令員や地上装置が担っていた各種判断や制御も車上主体で実施し、少ない地上設備で高度な自動運転を実現する。

2.2 自律運転の課題

取り上げた技術的課題のうち、「②線路内・沿線と車両の状態情報を統合して列車運行の可否を判断するアルゴリズム」には、運行上の影響（リスク）となる沿線や車両の状態情報を車上に集約する手段と、列車が安全に走行できる範囲を車上で判断する手法が必要である。

現在の鉄道運行では、地上装置が検知した各種情報をもとに、指令員が運行判断と運転規制を行い、列車（乗務員）は指令員から指示された運転規制に従って走行している。また、乗務員またはシステムが線路内や車両状態の異常に気付いた場合は、停止判断等を行うことで安全を確保している。ここで、運行判断に関わる情報の流れを図2に示す。地上側では各種設備の監視システム、および防災情報システム等の情報を指令所に集約して運行判断を行い、運転規制が必要な場合はCTC/PRCを介した運転抑止と臨時速度制限の設定、表示器または無線等による乗務員への通告を行っている。さらに、指令所を介さない方法として、現場装置である踏切支障検知装置や落石検知装置等が監視と信号発報を行っている。

列車の自律運転の実現には、自列車の認識範囲の安全を確認するだけでなく、自列車の視認範囲外の状況を正しく認識して適切な制御を行うことが求められる。しかしながら、現行の運行制御システムにおいて地上・車上

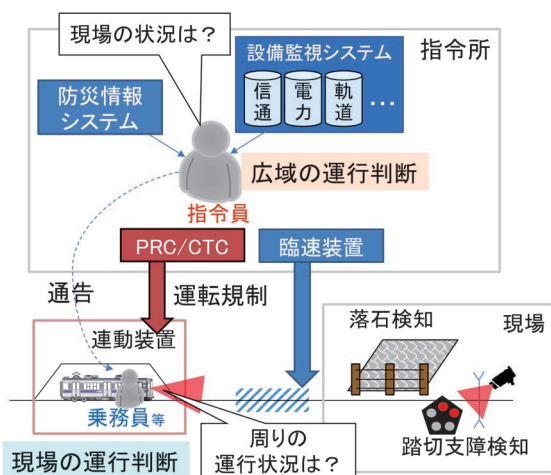


図2 現行の運行判断・運転規制

間で送受信できる情報は限られているため、指令所や周囲の列車が取得または集約した情報の大部分を活用することができない。さらには、複数の競合する情報から運行に係るリスクを自律的に判断する手法も確立されていない。

したがって、自律運転システムの実現には、これらの状態情報を取得する手法に加え、多数の情報を集約・共有によって運行判断を行うためのリスク評価手法が必要である。

3. 状態情報の管理手法

3.1 管理対象とする状態情報

列車の運行に影響する事象として、大きく線路上や沿線の支障によって列車がその地点を通過することやその地点にとどまることに危険がある場合、および、車両の状態によって列車の走行が継続不可能になる場合が考えられる。このような影響を判断するには、沿線や車上の状態情報の中から列車運行へ影響するものを抽出する必要がある。このような、列車運行に影響のある状態情報を、ハザード情報と定義する。

ハザード情報の抽出元となる状態情報には、大きく車内由来、沿線由来および作業等の計画に基づく情報がある。これらのうち、沿線由来の情報は鉄道事業者の内外から得られる情報に分類できる。対応する情報例と情報の特性を整理すると、表2のようになる。

沿線で検知できる情報は、予め対象となるエリアを明確化し、異常発生時にハザード情報として取り扱う一方、車上で検知する地上支障は臨時にハザード情報を設定することが基本となる。車上で検知できる情報でも、車両の状態にかかわるものは、現在地からの走行継続可否の判断として、他の状態情報に基づく判断を上書きして列車の停車等を行う場合に利用できる。計画に基づく情報は、保守作業等を実施する範囲をハザード情報と同等なものとして設定し、作業進捗などに合わせて状態を変化させることが考えられる。

3.2 状態情報管理の要素

自律運転における運行リスク評価に必要な状態情報には、3.1節で示したように、様々な種類のものが存在する。これらの情報は、それぞれ情報変化の時間特性が異なり、時々刻々と変化するものから、長いスパンで変化がないものまで多様である。このような時間特性が異なる情報を一元的に扱う手法として、自動車分野で検討が進められている、ダイナミックマップ⁶⁾がある。概念図を図3に示す。ダイナミックマップでは、情報変化の時間特性に応じて動的情報、準動的情報、準静的情報、静的情報の4階層に区分しており、例えば突発的な変化が

表2 状態情報の分類と特性 (例)

情報元	主な情報の例	情報の特性
車 上	<ul style="list-style-type: none"> ・車両電装品状態 ・異音、異臭 ・振動センサ 	<ul style="list-style-type: none"> ・列車の走行継続可否に影響 ・時間経過により変化
	<ul style="list-style-type: none"> ・前方支障検知 	<ul style="list-style-type: none"> ・列車位置からの相対距離で検知 ・短時間で状態変化
沿 線	<ul style="list-style-type: none"> ・転落検知装置 ・踏切支障検知 	<ul style="list-style-type: none"> ・情報源の位置や警報が報知される範囲が既知 ・時間経過により変化
	<ul style="list-style-type: none"> ・気象警報 ・地震情報 ・ハザードマップ 	
計 画	<ul style="list-style-type: none"> ・保守作業 ・工事速度制限 	<ul style="list-style-type: none"> ・日や時間などの単位で範囲設定

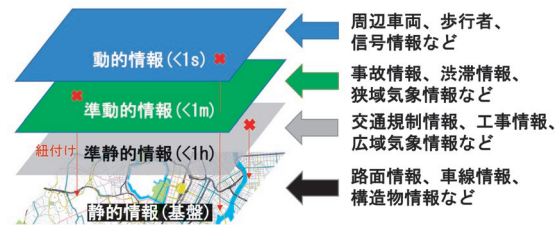


図3 ダイナミックマップの概念

考えられる前方障害物の情報は動的情報に、大規模な工事等がない限り長期にわたって変化がない車線情報などは静的情報に区分される。自動車のダイナミックマップは、これら4階層に割り付けた情報をもとに、自動運転時の危険回避や、渋滞を避ける走行などに活用される。これらの情報は緯度・経度による座標を基準にダイナミックマップ上に展開される。

このような概念は、鉄道の自律運転にも活用可能であることから、鉄道への適用可能性について検討した。自動車と異なる点として、展開する状態情報の位置が緯度・経度による座標を基準としたものと、キロ程のような線路上の位置を基準にしたものの2種類が存在する点である。そこで、鉄道への適用においては、地図情報をベースとした地図面に加えて、自動車におけるダイナミックマップの車線情報に相当する線路配線略図をベースとした線路図面を用意し、これら2面に展開された情報を統合して活用することとした。これを鉄道ダイナミックマップ^{7) 8)}と称し、概要を図4に示す。

鉄道ダイナミックマップは、地図面と線路図面の2面を持つことにより、状態情報を統合して一元的に管理できるだけでなく、使い方に応じた情報提供が可能となる。自律運転の制御に用いる場合には、列車の線路上の位置を基準にリスク評価をすることになるため、線路図

面に展開された情報が有効となる。一方、指令員等の人間系への情報提供の観点では、地図上に展開された情報を表示することで、現状に応じた判断を補助することも可能である。

3.3 鉄道ダイナミックマップを用いたリスク管理・評価手法

鉄道ダイナミックマップは、列車および各種監視シス

テムのダイナミックな情報を統合管理するデータベースであることから、鉄道内のセンシングデータを集約するシステムと捉えることが出来る。

各列車、防災システム、設備監視システム、または沿線設備は、自身が取得または検知した情報を、鉄道ダイナミックマップのフォーマットに変換して配信する。配信情報の利用にあたって参照する情報の抜けや漏れがないよう、走行中の列車、存在する設備、防災情報の配信元の情報リストを線区単位で管理する(図5(a))。

列車は、この配信元の情報リストを用いて各配信元から情報を取得することにより、自列車で直接認識できない範囲の状況も把握できる。さらに、自列車で直接認識した情報を重ね合わせて判断に用いる(図5(b))。例えば、大雨により斜面崩壊の可能性をハザードマップと気象情報により認識し、監視システムの情報、先行列車または対向列車の観測情報や当該区間の通過実績の有無による通過可否の推定と、自列車による見通し確認を組み合わせることで、総合的なリスク評価ができる。また、地上側においても、各装置の配信情報を取得することにより、従来と同様の設備管理、および状況把握が可能である。

なお、情報配信の単位については、装置個別に実施する分散構成を基本とするが、中間装置が一部情報を集約

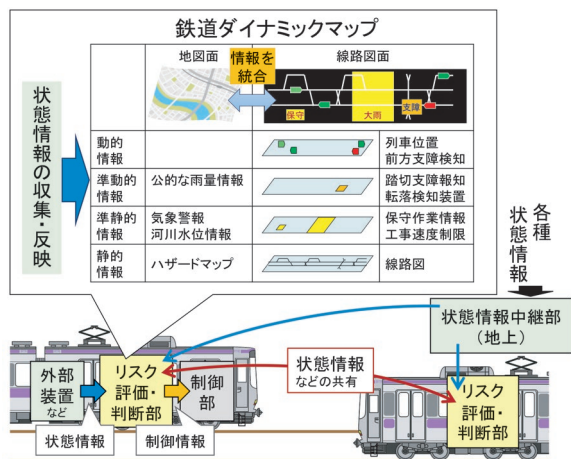
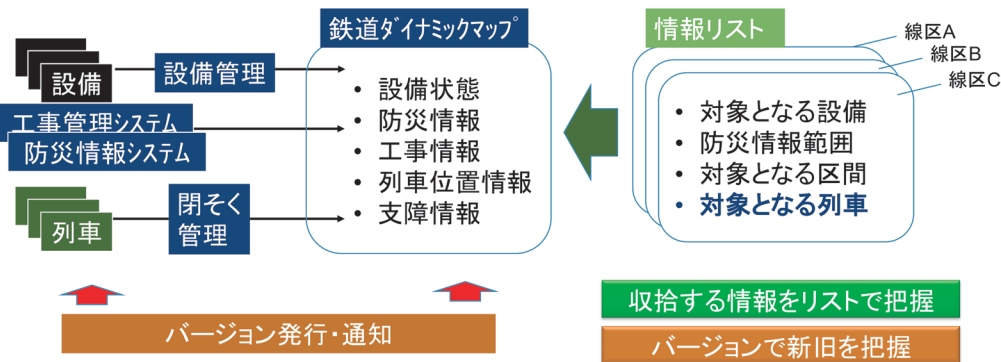
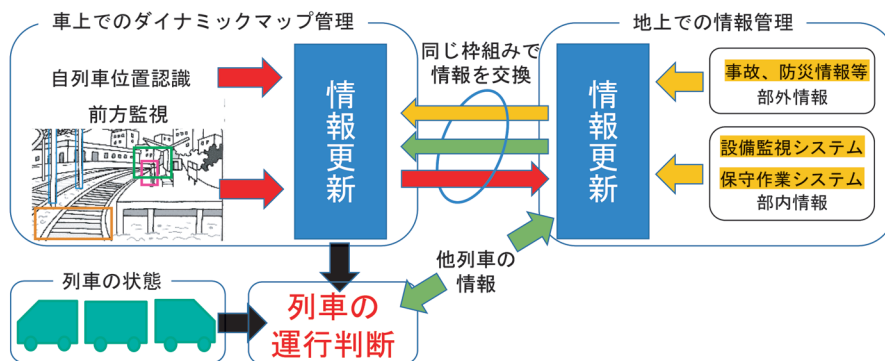


図4 鉄道ダイナミックマップの概要



(a) 共有・配信する情報の管理



(b) 運行判断への適用時の情報共有・配信手法

図5 鉄道ダイナミックマップにおける情報共有・配信手法

して再配信する構成や、統合する構成も可能である。

このようにして各列車のダイナミックマップ上に集約された状態情報と、自列車の現在位置および走行経路に基づいて、各列車自身の走行に影響する状態情報がないかをダイナミックマップ上で分析する。

4. 鉄道ダイナミックマップの実装

4.1 鉄道ダイナミックマップの実装例

これらの検討を踏まえ、鉄道総研の所内試験線を対象として、地図と線路図のデータを用意し、図6、図7に示す鉄道ダイナミックマップを作成するとともに、模擬列車の配置が可能な鉄道ダイナミックマップのシミュレータを開発した⁹⁾。基盤となる地図情報は、国土地理院が提供する地理院地図¹⁰⁾のデータに、別途作成した線路データ等を重ねて利用している(図6)。

開発したシミュレータでは、地上設備の故障、運転規制、支障物などが設定可能である。これらの情報を設定すると、各列車が認識する情報が更新され、列車から一定の範囲内に存在する運転上の制約を認識できる。図7は、図6に示したハザード情報が得られた場合に、図6中の列車1・列車2がそれぞれ認識する情報の例を示し

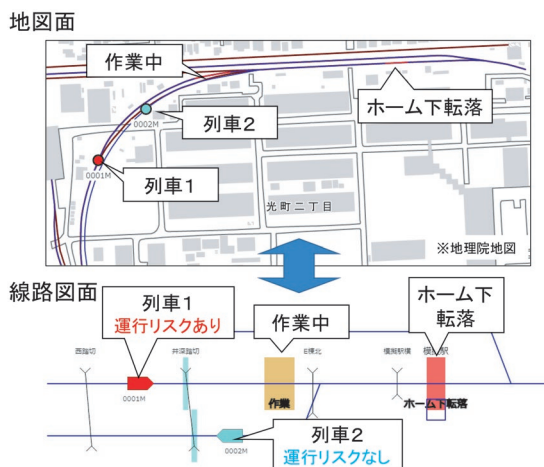


図6 鉄道ダイナミックマップの実装例
(地図画面・線路画面)

列車1の状態情報テーブル

列車番号	列車名	列車位置	列車速度	列車向き	列車状態
0001H	列車1	0001H	100km/h	北	運行中
0002H	列車2	0002H	100km/h	南	運行中

列車1のダイナミックマップ上には、作業中のハザード情報が走行経路上に運行リスクとして認識されている。

列車2の状態情報テーブル

列車番号	列車名	列車位置	列車速度	列車向き	列車状態
0001H	列車1	0001H	100km/h	北	運行中
0002H	列車2	0002H	100km/h	南	運行中

列車2のダイナミックマップ上には、作業中のハザード情報が走行経路外に認識されているため、運行リスクなしである。

図7 鉄道ダイナミックマップの実装例
(シミュレータによるハザード情報の更新例)

ている。列車1は、走行経路上に運行に影響するハザード情報があるため図7の当該情報が赤色で示されるとともに、図6の列車シンボルも赤色となっている。列車2もこれらのハザード情報を認識しているが、走行経路上ではないため、図7の状態情報の色は変化せず、図6の列車シンボルも水色となっている。このように、鉄道ダイナミックマップ上に展開された状態情報と列車の走行経路を組み合わせることで、各列車への影響を評価することが可能である。

4.2 自律運転以外への活用

鉄道ダイナミックマップは、現行の運行業務における指令員や乗務員の運行判断の補助にも適用可能である。何らかの輸送障害が発生した場合、現状では指令員等が各装置から収集した情報を指令所内のホワイトボード等に展開して状況の可視化等を図っているが、ここに鉄道ダイナミックマップを適用すると、情報の一元的な収集・表示ができ、判断の効率化が可能となる(図8)。また、車上にも表示装置を設置することで、指令員と乗務員の間での情報共有を円滑にすることも可能である。

5. まとめ

自律運転における車上での運行判断を実現するための要素技術として、状態情報の収集、管理、評価の方法について検討を行った。

運行判断に必要な車両や沿線状態情報を整理し、これらの情報を管理するための情報基盤として、地図画面と線路画面の2面を有することを特徴とする、鉄道ダイナミックマップを開発した。列車位置および進路に対して、列車の運行に影響するハザード情報を状態情報から抽出する機能を鉄道ダイナミックマップに実装した。また、鉄道ダイナミックマップを、現行の運行業務における輸送障害発生時の指令員の判断支援として活用する方法を提案した。

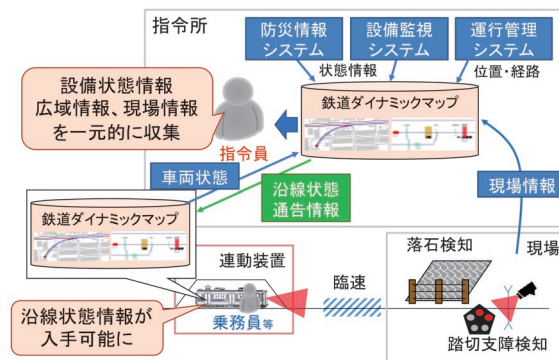


図8 鉄道ダイナミックマップの指令業務への活用イメージ

今後は、開発した鉄道ダイナミックマップを自律運転車上装置のリスク評価・判断部に適用し、自律運転における運行判断機能の詳細な開発に活用する。

文 献

- 1) 横山啓之：山手線におけるATO走行試験の概要，JREA，Vol.62，No.8，pp.8-11，2019
- 2) 青柳孝彦，溝尻将征：ATS-DKをベースとした自動運転システムの概要，運転協会誌，Vol.63，No.4，pp.9-12，2021
- 3) 川崎邦弘：信号通信分野におけるICT活用に関する研究開発の経緯と展望，鉄道総研報告，Vol.34，No.7，pp.1-4，2020
- 4) 自動運転都市内軌道旅客輸送システム（AUGTシステム）—安全要求事項，JIS E 3802：2012
- 5) 鉄道における自動運転技術検討会：鉄道における自動運転技術検討会とりまとめ，2022，<https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001512132.pdf>（参照日：2024年1月5日）
- 6) 佐藤健哉，渡辺陽介，高田広章：解説 動的地理情報共有のためのアプリケーションプラットフォームとしてのダイナミックマップの役割，電子情報通信学会誌，Vol.101，No.1，pp.85-90，2018
- 7) 祇園昭宏，太田佑貴，西本翔，櫻井勇輝：列車自律運転のための情報共有及び情報配信手法の検討，令和4年電気学会全国大会講演論文集，pp.248-249，2022
- 8) 太田佑貴，祇園昭宏，西本翔，櫻井勇輝：自律運転列車のリスク判断における鉄道ダイナミックマップの基礎検討，令和4年電気学会全国大会講演論文集，pp.250-251，2022
- 9) 太田佑貴，祇園昭宏，西本翔，櫻井勇輝：鉄道ダイナミックマップを活用したリスク判断に基づく自律運転，鉄道と電気技術，Vol.33，No.7，pp.3-6，2022
- 10) 地理院タイル：<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>（参照日：2024年1月5日）

車上主体の自律型列車制御システムの開発

北野 隆康* 熊澤 一将** 藤田 浩由*** 杉山 陽一*

Development of an On-board Autonomous Train Control System

Takayasu KITANO Kazumasa KUMAZAWA Hiroyuki FUJITA Yoichi SUGIYAMA

As a basic technology for realizing autonomous train operation, we propose two functions: a function to create a running profile onboard a train and a function to directly control wayside equipment from a train. The function to create a running profile onboard a train generates a running pattern to recover from delays caused by abnormalities, based on information such as timetables that is acquired and held by the onboard train. On the other hand, the function to directly control ground equipment from the vehicle is to set the train's path by the on-board equipment, switch the necessary turntable machines, and control level crossing warning.

キーワード：列車運行の自律化，自律型列車制御，走行パターン，車上進路制御，踏切警報制御

1. はじめに

鉄道総研が自動運転の進化形として研究開発に取り組んでいる自律運転¹⁾は、できるだけ少ない地上設備でより安全かつ柔軟な列車運行の実現を目指すものである。自律運転を現実のものとするためには、個々の列車が運転状況と線路内・沿線等の状態を把握し、踏切等の地上設備を制御しながら、自ら安全に走行速度を制御する技術が必要となる。中でも、列車が自律的に走行するための制御システムは、自律運転の基盤となるものであり、列車を安全に走行させる機能をできる限り車上に搭載したうえで、従来は運転士や係員に委ねられていた取り扱いも含めてシステム化する技術を確認する必要がある。そこで、筆者らは、車上装置に列車制御に係る機能を集約し、各列車が自律的に進路を決定して走行できる制御システム（以下、このシステムを自律型列車制御システムと呼ぶ）の開発に取り組んでいる。

本報告では、自律型列車制御システムを構築するための要素技術として、車上装置が列車ダイヤから設定される運転曲線に基づいて走行するパターン（以下、走行パターンという）を自動で作成する機能と、車上から地上設備を直接制御する機能を提案し、各機能の効果を試算した結果を報告する。まず2章で自律型列車制御システムの概要と構成を示したのち、車上で走行パターンを作成する機能を3章で述べる。この機能は、異常発生等で遅延が発生した場合に、車上取得・保有するダイヤ等の情報に基づいて遅延を回復する走行パターンを生成するものである。4章では、車上から地上設備を直接制御する機能について述べる。

2. 自律型列車制御システムの概要

2.1 自律型列車制御システムの構成

自律運転では、列車が単独でも走行できることが基本となるが、都市圏のように複数の路線が集中するエリアや、列車密度が高い線区などでは、広域での運行状況を把握して管理することで、圏内もしくは線区内全体でのスムーズな運行を実現する必要がある。このため、自律運転のシステム構成として、輸送需要に応じて次に示す2種類の形態を想定している。

(1) 列車が単独で自律的に走行する形態

各列車が、事前に入力されたダイヤ情報・ハザードマップと、自列車位置・速度に基づいて走行パターンを作成して進路を構成し、車上から転てつ機や踏切を制御する²⁾。

(2) 列車の自律的な運行を地上からサポートする形態

地上の中央に運行に関わる情報を集約・配信する装置（以下スーパーバイザという）を設置し、スーパーバイザにて線区全体の列車の動きや、旅客の流れ、リアルタイムハザードマップ、メンテナンスなどの情報を集約し、列車の運行を管理する（図1）。各列車は、スー

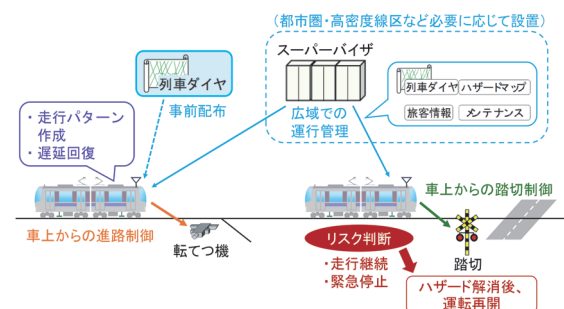


図1 自律型列車制御システムの構成

* 信号技術研究部 列車制御システム研究室
** 信号技術研究部 運転システム研究室
*** 信号技術研究部 信号システム研究室

パバイザから与えられる自列車のダイヤ情報に基づいて、(1)と同様に、走行パターンを作成して進路を構成し、車上から転てつ機や踏切を制御する。

2.2 列車が自律的に走行する列車制御システムの機能

ここでは、2.1節に示した構成に基づいて、自律型列車制御システムに求められる機能を示す。車上で自律的に制御するケースとして、通常走行時と異常発生時のそれぞれの制御が想定される。通常走行時は、車上でダイヤ情報に基づいて進路を構成して走行パターンを作成し、進路上の転てつ機や踏切を直接制御する(図2(a))。異常発生時沿線支障検知等で停止した列車が運転再開する際に、遅延回復を目指す走行パターンを作成する(図2(b))。

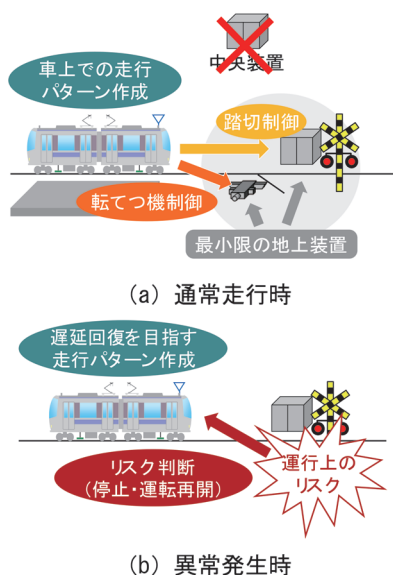


図2 自律型列車制御システムの主な機能

これらを踏まえ、自律型列車制御システムの主な機能として、以下を挙げる。

- (1) 列車出発時に、車上のダイヤ情報に従って車上で走行パターンを生成する
- (2) 列車が安全に走行できる進路を確保する
- (3) 現場に設置される転てつ機と踏切の制御装置を車上から直接制御する
- (4) 列車が沿線支障検知等により停止した後、運転再開する際に遅延回復できるような走行パターンを作成する

2.3 装置構成

提案するシステムでは、車上で自律的な制御を実施するため、図3に示すとおり、車上装置と現場の地上装置で構成する。車上には、車上装置、車上DB(車両性能や線路情報を登録)、および無線機を搭載し、走行パターンの作成、進路設定、踏切制御を行う。現場に設置する地上装置は転てつ機と踏切に対応する制御装置のみとする。

3. 車上装置における走行パターンの作成

各列車は、車上装置が取得して保有している列車ダイヤに基づいて走行パターンを作成し、その走行パターンに従って走行する。これは、自動運転における定時運転機能、すなわち列車ダイヤに設定された各駅の発着時刻通りに列車を走行させる機能を拡張するものである。

従来の自動運転では、あらかじめ走行パターンを作成しておき、その走行パターンに従って走行する^{3) 4)}。これに対して、自律型列車制御システムでは、列車ダイヤの変更等に柔軟に対応するため、始発駅を出発する前に

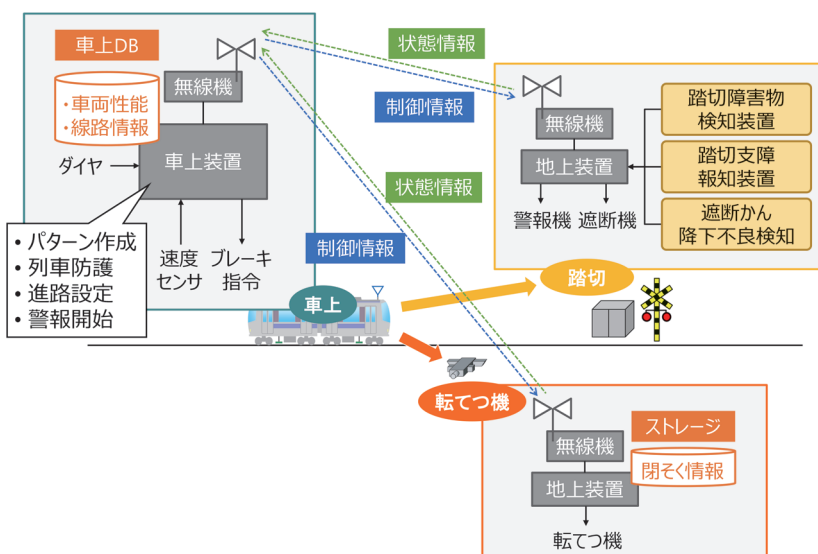


図3 自律型列車制御システムの装置構成

車上で走行パターンを作成および更新する。緊急停止情報等によって駅間で停止した場合は、列車自身が走行パターンを再作成し、運行を継続する。

本章では、自律型列車制御システムにおける車上で走行パターン作成を実現する機能として、列車ダイヤに基づく走行パターン作成と、緊急停止後の回復運転に対応する走行パターン作成の2つの機能について述べる。

3.1 列車ダイヤに基づく走行パターンの作成機能

列車ダイヤに基づいて走行パターンを作成する手法⁵⁾をベースとする。まずは駅間を最短で走行することを基本として、そこから駅間の最高速度を下げる等の処理を適用することで、列車ダイヤ上に定められた駅間の走行時間を満たす走行パターンを作成している。駅間の走行時分については、列車ダイヤに示される各駅の発着時刻から算出する。この手法は各列車の駅間の走行パターンを瞬時に作成できることが利点であることから、この手法を自律型列車制御システムに応用し、車上で走行パターンを作成するアルゴリズムを構築した。

提案する具体的な走行パターン作成アルゴリズムを以下に示す。

- ①列車ダイヤから各駅の発着時刻および発着番線を抽出し、駅間の走行時間 t_1 を算出する (Step 1)
- ②車上に記録される線路データ (停止位置や勾配、速度制限等) および車両データ (引張力や列車長、走行抵抗等) から、駅間を最短で走行する走行曲線を作成する (Step 2)
- ③車上で作成した走行曲線における駅間の走行時間 t_2 と①の走行時間 t_1 を比較し、その差が閾値より大きくなる場合 ($T < t_1 - t_2$) は、駅間の最高速度を低下させて再度走行曲線を作成する (Step 3)
- ④再度作成した走行曲線にて③の処理を繰り返す
- ⑤ $T \geq t_1 - t_2$ となる場合に、その走行曲線を駅間の走行パターンとして確定する (Step 4)

これらのアルゴリズムのイメージを図4に示す。このアルゴリズムは各駅停車を前提としているが、通過列車の場合でも、②にて駅における列車の到着間隔を示す追込時隔を考慮することで対応できる⁶⁾。

3.2 緊急停止後の回復運転に対応する走行パターンの作成機能

自律型列車制御システムでは、自動運転と異なり、緊急停止情報等によって駅間で列車が停止した場合でも、列車自らが運転再開の状況を判断した上で次駅までの走行を可能とすることを目標とする。駅間で列車が停止する場合、駅出発時に作成した走行パターンと実走行の間に乖離が生じるため、列車が停止した地点から次駅の停止位置まで新たに走行パターンを作成する必要がある。また、駅間で列車が停止することで駅間の走行時間が増加し、遅延が生じる。そこで、列車ダイヤに基づく走行パターン作成機能を拡張することで、運転再開した後に自律的に遅延を回復する走行パターンを作成する機能を開発した。以下、走行パターンの再作成および列車遅延の回復を実現する機能について示す。

3.2.1 走行パターンの再作成

駅間で列車が停止した場合、列車の停止地点が運転再開後の出発地点となる。そこで、この停止地点を3.1節の走行パターン作成における始発駅とみなして、走行パターンを再作成する。ただし、列車遅延を回復するため、以下の処理とする。

- ①最短で走行する走行曲線を走行パターンとする (次駅に列車ダイヤより早着する場合でも、3.1節の③④の処理を実施しない)
- ②次駅の発予定時刻が列車ダイヤ上の発時刻より遅延する場合、次駅とその先の駅間を最短で走行する走行パターンを適用する

3.2.2 停車時間調整による遅延回復

一般的な列車ダイヤでは、各駅での最小の停車時間で

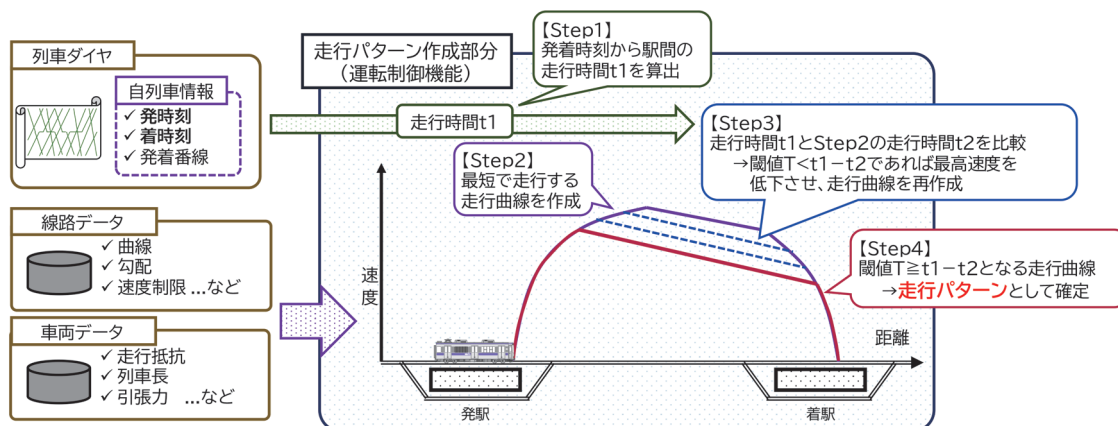


図4 列車ダイヤに基づく走行パターン作成機能

ある最小停止時分と、停車時間に付加される余裕が定められている。

そこで、自律型列車制御システムでは、列車の遅延状況に応じて、停車時間を活用した遅延回復も図る。具体的には、遅延発生時は駅到着時の着時刻と、列車ダイヤで計画された発時刻を比較し、その差分が最小停車時分を満たしている場合は計画された発時刻に従い、対象駅を出発する⁶⁾。ただし、最小停車時分を満たせない場合は、対象駅の着時刻に最小停車時分を加算した時刻を、その駅の発時刻として更新する。

3.3 遅延回復効果の検証

ここで、列車走行中に緊急停止が発生して遅延が生じる場合を例として、提案手法により生成した走行パターンと、その遅延回復効果を試算した結果を図5に示す。この例では、列車ダイヤ上でA～B駅間の走行時間は120秒、B～C駅間は115秒と定められている。駅出発時には、開発した機能により、車上で走行時間に対応した走行パターンが作成される(図5中の青線)。列車走行中、緊急停止情報等によって650m地点に停車するが、それまでの走行パターンから大きく離れ、遅延が発生する(約38秒)。緊急停止した要因が取り除かれて運行再開する場合、提案手法により、遅延が回復するような走行パターンが再作成される(図5中の褐色の線)。

列車がこの走行パターンに従って走行することで、B駅着時点では約2秒、C駅着時点では約9秒の遅延が回復する。これより、再作成した走行パターンは遅延回復にも寄与するといえる。ただし、今回は検証の簡略化のため、最高速度を含む速度制限に達した場合に、惰行運転は適用せずに等速走行することとした。

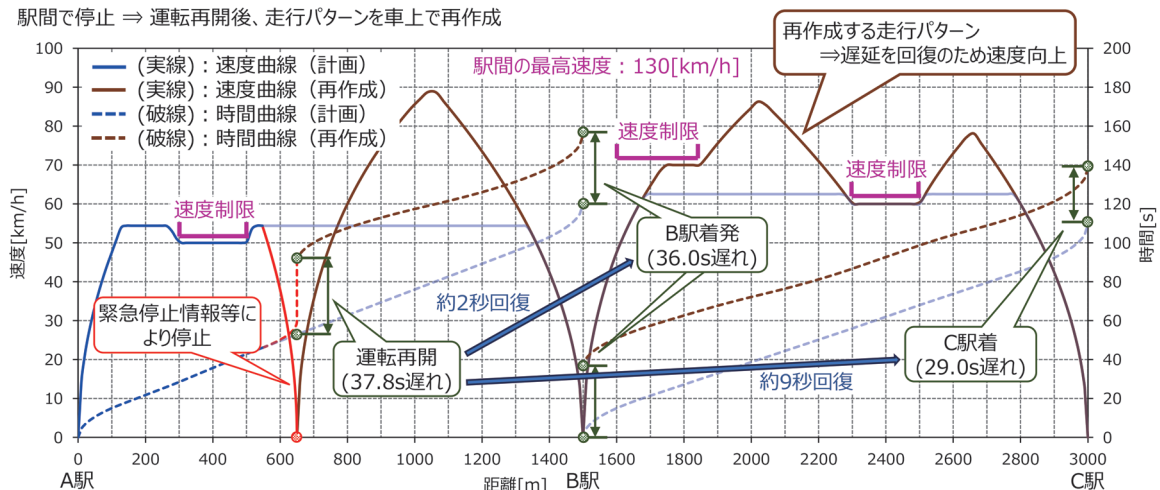


図5 列車ダイヤに基づく走行パターン作成機能

4. 車上からの地上設備制御

4.1 車上からの進路・転てつ機制御

4.1.1 中央装置に依らない進路・転てつ機制御の提案

本節では、列車自身が他列車の位置や進路を踏まえて、進路に関する転てつ機を制御する機能を提案する。この機能は、車上装置が進路を設定し、転てつ機の転換制御を行うが、進路や転てつ機の鎖錠状態については転てつ機を制御する地上制御端末にて保持し、転換鎖錠を指示した車上装置のみが解錠できるという考え方で安全を確保するものである。

4.1.2 装置構成

この機能は、図6に示すように、車上装置と現場設備を制御する地上制御装置によって実現される。地上制御装置は、転てつ機のみと接続され、その制御と列車の位置、進路に関する情報の記憶を行う。一方、車上装置は、分散して配置された地上制御装置と連携して主体的に制御を行う。各装置間で伝送される制御情報は、直近の装置間(車上装置と地上制御装置または地上制御装置同士)で必要な範囲に順次伝送する。なお、装置間の伝送路は特定の回線に限定せず、直近の装置間で情報伝送

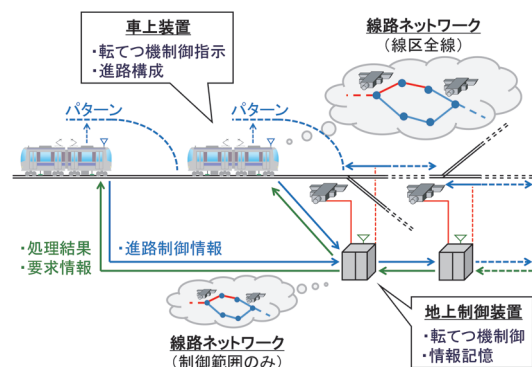


図6 車上からの進路・転てつ機制御

が確立できる伝送回線を使用することを前提とする。

4.1.3 他列車の位置や進路の把握と転てつ機の制御

車上装置が地上制御装置と制御電文を送受信することで間隔制御を含む進路制御を行う。自列車の進路確保にあたって、車上装置は前方直近の地上制御装置に列車位置や進路制御情報を送信する。地上制御装置は、受信した進路制御情報に基づいた処理を行い、処理結果および要求された情報を当該車上装置へ返信し、さらに進路内方側で隣接する地上制御装置にも同じ内容を転送する。この転送処理を進路の終端に相当する地上制御装置に至るまで繰り返すことで、車上装置と関係する地上装置の間で情報を共有する。進路確保を要求した車上装置は、地上制御装置から返信された情報により他列車の進路状況や先行列車の在線状況、装置の状態を取得でき、それに基づいて自身が確保できる進路を決定し、進路の確保・転てつ機の転換・鎖錠を行う。進路や転てつ機は、それぞれ確保・鎖錠した車上装置のみが解錠可能とすることで、他列車に対する排他制御が可能となる。進路の確保・転てつ機の鎖錠を行った車上装置は、安全に走行できる箇所を防護点として、その外方まで走行可能とすることで安全を確保する²⁾。

4.2 車上からの踏切制御

4.2.1 無線を用いた踏切警報制御

自律型列車制御システムにおいても、基本的な踏切制御の考え方は、無線式列車制御システムにおける踏切制御と同様である(図7)。

無線式列車制御システムにおける踏切警報制御では、任意速度において踏切道まで最大加速度で加速した場合に、設定した警報時間を確保できる位置において警報開始とする仕組みとしている。これにより、低速接近時には警報開始位置をより内方に設定することで、現行の固定位置での警報制御と比較して、不要な警報時間の短縮を実現している。しかし、現行の無線式列車制御の踏切制御における警報開始の仕組みは運転士による手動運転を前提としているため、最大加速度にて警報制御することで、警報開始後の運転操縦を限定しないよう配慮している。そのため、本来の意味での定時間警報制御とはなっていない。

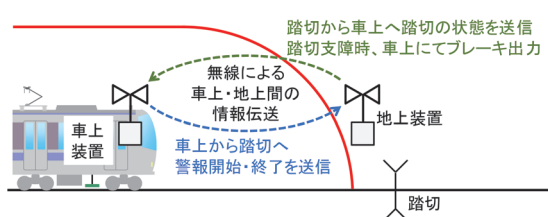


図7 無線を用いた踏切制御

4.2.2 警報制御機能

自律型列車制御システムにおける踏切制御では、3章で述べた機能によって得られる走行パターンの列車位置および速度情報に基づき踏切までの到達時間を算出し、設定した警報時間となる位置において警報開始のトリガとなる情報を踏切に指示する(図8中の警報開始パターン)⁷⁾。警報開始パターンの算出には、設定警報時間に無線伝送遅延時間(マージン)を加算するとともに、走行パターンの速度情報に速度検出センサの変動幅を加算した値を使用する。さらに、実際の列車速度があらかじめ設定した走行パターンを超過しないよう、速度超過防止パターンを設け、警報時間不足を防止する。

駅出発方に位置する構内踏切など、駅出発条件に関する踏切については、走行パターンから当該踏切までの到達時間を算出し、不足する時間分、出発を抑止することで警報時間不足となることを防止する。例えば、設定警報時間に対して踏切到達時間が10s不足する場合は、駅出発予定時刻の10s前を警報開始タイミングとすることで、不要な出発抑止とならないようにする。

4.2.3 列車防護機能

車上装置は、車上DBに登録したブレーキ減速度や踏切位置などの情報に基づき、図8に示すように踏切に対して車上で防護パターンを発生させる⁷⁾。列車の速度が防護パターン速度を超過すると、自動的に常用ないし非常ブレーキを出力する仕組みとする。

正常時は、踏切からの状態情報として、遮断完了条件に加えて「支障検知なし」を受信し、防護パターンを消去する。一方、踏切支障時は「支障検知あり」を受信し、防護パターンを継続とすることで、列車を踏切手前までに確実に停止させる。ただし、列車が踏切に進入する直前に支障を検知した場合は、検知タイミングによって踏切までに停止できない可能性があるが、「支障検知あり」を受信すると同時に防護パターンを再発生させること

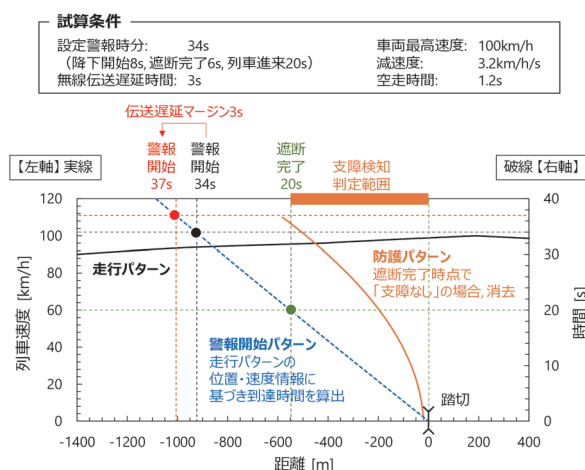


図8 警報制御機能と列車防護機能の概要

で、非常ブレーキを出力する。この防護パターンは、車両のブレーキ減速度や空走時間などを考慮するとともに、遮断完了時点で通常運転に支障しないよう設定警報時間と合わせて設計を行う。

なお、自律型列車制御システムでは、防護パターンによる停止後の運転再開も自動で行う。特に車上および地上に設備した様々なセンサからの情報を組み合わせ、運転再開に支障なしと判断した場合に、防護パターンを消去あるいは徐行パターンを発生させる機能を持たせておくことが重要である。また、大規模な遅延や運休など、一度警報開始した踏切を警報停止して遮断解除する場面も想定されるが、この場面での運転再開については、駅出発時の考え方を適用し、必要に応じて警報時間不足を防止するための出発抑止をかけることで対応する。

4.3 警報時間短縮効果の検証

提案した踏切警報制御方式（以下、走行パターン方式）による警報時間の短縮効果について、現行の固定位置での警報制御方式（以下、現行方式）、ならびに無線式列車制御システムにおける踏切警報制御方式（以下、最大加速方式）と比較を行った。3種類の踏切警報制御方式について、加速、定速（ここでは速度変化が10km/h未満）、減速の3つのケースで警報時間を試算した。ケーススタディとして、駅間の模擬的な走行パターンをSPEEDY（運転曲線作成システム）により作成し、位置および速度情報を約10m毎のデータとして与えた。検証対象の踏切は、1,101m（加速ケース）、3,064m（定速

ケース）、5,200m（減速ケース）の3箇所とし、設定警報時間はいずれも34sとした。また、車両性能は、最高速度100km/h、最大加速度2.0km/h/sとした。車上・踏切間の無線通信による伝送遅延等を考慮し、3sのマージンを設けるとともに、走行パターン方式の算出にあたっては速度検出センサの変動幅として、走行パターンに2km/hを加算した値を採用した。警報時間の算出結果を図9および表1に示す。

現行方式の警報時間は、最高速度で算出されるため走行パターンによって変動するが、警報距離としては一定値（100km/h、34sにおいては945m）となる。最大加速方式においては、低速接近となる加速ケースで短縮効果が得られるが、最高速度付近での接近に対しては、現行方式と比較して伝送遅延等のマージン分だけ警報時間が延長される結果となった。一方、走行パターン方式においては、伝送遅延等のマージン3sならびに速度マージン2km/h（1s程度）が加算されるが、いずれのケースにおいても38sで警報開始となった。

したがって、今回提案するシステムのように事前に走行パターンが得られる場合は、走行パターン方式を採用することで定時間制御の精度向上が実現し、警報時間短縮に大きく寄与できる。

5. まとめ

本稿では、列車運行の自律化に向けて開発した自律型列車制御システムの機能と装置構成を報告した。具体的には、自列車の走行位置や速度に基づいて車上から進路を設定し、転てつ機や踏切などの地上設備を直接制御する機能、車上で適切な走行パターンを生成する機能について、手法の考え方と実現方法を提案し、機能の効果を試算した結果を述べた。

車上に走行パターンの生成機能を持たせることで、緊急停止情報等により駅間で停止後、自律的に遅延回復可能な走行パターンの自動生成が可能となる。また、車上からの進路・転てつ機制御機能により、地上に中央制御装置を設置せずに安全に列車を走行させることが可能となる。さらに、提案した踏切制御手法により、走行パターンに基づく踏切定時間制御、ならびに防護パターンによる停止後の運転再開の自動制御も実現可能となる。

今後は、自律型列車制御システムの機能とハザードに対する走行判断の機能を搭載した車上装置や地上装置を試作して走行試験を行い、列車運行の自律化の実現性や有効性を検証する予定である。

文献

- 1) 川崎邦弘：列車運行の自律化と利便性・効率性の向上、

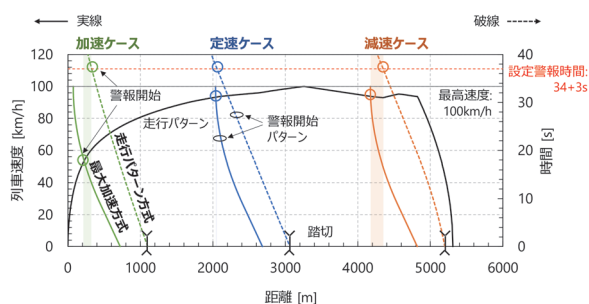


図9 警報時間の算出結果と走行パターン

表1 警報時間の算出結果

試算ケース		走行パターン方式	最大加速方式	現行方式
加速	警報開始地点	778m	880m	945m
	警報時間	38s	45s	50s
定速	警報開始地点	1014m	1024m	945m
	警報時間	38s	38s	35s
減速	警報開始地点	860m	1025m	945m
	警報時間	38s	45s	42s

- RRR, Vol.76, No.1, pp.12-15, 2019
- 2) 曾我俊輔, 杉山陽一, 櫻井勇輝: 車上からの制御を主体とした運行システムにおける自律的な進路制御の安全性検証, 電気学会産業応用部門大会, 2022
 - 3) 木村彰: 時刻一位置パターンを用いた電気車における定時運転制御の提案, 電気学会論文誌 D, Vol.119, No.7, pp.942-949, 1999
 - 4) 大矢純子, 射場智, 中澤弘二: 地下鉄向け自動列車運転システム, 東芝レビュー, Vol.63, No.12, pp.41-45, 2008
 - 5) 武内陽子, 坂口隆, 熊澤一将, 國松武俊, 佐藤圭介: 運転曲線レベルで再現可能な列車運行シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.28, No.4, pp.41-46, 2014
 - 6) 熊澤一将, 遠山喬, 往古直之, 小野雄人: 追込み時隔を基にした運転パターン作成手法, 令和4年電気学会全国大会, 2022
 - 7) 藤田浩由, 高崎建, 進藤卓朗, 一色竜杜, 曾我俊輔, 北野隆康: 自動・自律運転における踏切制御手法の検討, 令和5年電気学会全国大会, 2023

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

谷村幸裕

■企画・監修

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

鉄道総研報告 第38巻 第3号

2024年3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

©2024 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. 38 No. 3

Mar. 2024

PAPERS

- A Method for Monitoring Running Condition of a Bogie by Using an Axle Spring Isolation Rubber with a Built-in Piezoelectric Element
..... S.MAMADA, T.OTA, S.SAGA, K.YOSHIKAWA (1)
- Numerical Flow Simulation of Mechanism of Increase and Method for Suppressing Increase in Lift Force of Pantograph Head of Conventional Line Pantograph under Crosswind
..... T.ABE, K.NAKADE, T.MITSUMOJI (9)
- Design Method for Seismic Control Devices Installed on Steel Railway Bridges
..... K.WADA, T.KUSHIYA, A.TOYOOKA (17)
- Development of Nighttime Rail Temperature Prediction Method in Consideration of the Radiant Heat from Surrounding Geographical Features
..... F.URAKAWA, T.WATANABE (25)
- Evaluation of Impact of Volcanic Ash on Railway Electric and Signal Equipment and Proposal of Utilizing Information on Ash Fall
..... Y.NISHIKANE, N.TERADA, T.KONISHI, T.URAKOSHI, S.KAWAMURA (35)
- Operation Risk Assessment Method based on Information on Wayside and Vehicle Conditions for Autonomous Train Operation
..... Y.OTA, A.GION, S.NISHIMOTO, Y.SAKURAI (43)
- Development of an On-board Autonomous Train Control System
..... T.KITANO, K.KUMAZAWA, H.FUJITA, Y.SUGIYAMA (49)

