

鉄道総研報告

第37巻 第12号

2023年12月

論文

- 車両** **運転** 車両側面カメラによる安全確認支援装置の開発
..... 合田航, 向嶋宏記, 長峯望 (1)
- 施設** 新幹線高速区間に適用可能なテルミット溶接法
..... 寺下善弘, 高木雄太 (9)
- 電気** クラウド型連動装置の構成と処理手法
..... 寺田夏樹, 潮見俊輔, 遠山喬 (17)
- 運転** タブーサーチを用いた整備作業ダイヤ自動作成手法の開発
..... 小久保達也, 加藤怜, 中東太一 (27)

解説

- 施設** 常時微動計測による橋脚の固有振動数同定システムの導入マニュアルの概要
..... 渡邊諭, 入栄貴, 藤原将真 (35)

車両側面カメラによる安全確認支援装置の開発

合田 航* 向嶋 宏記* 長峯 望*

Development of Safety Check Support Device for Driver Using Side Camera on Rolling Stock

Wataru GODA Hiroki MUKOJIMA Nozomi NAGAMINE

This paper describes the development of a safety check support device to further enhance safety check on the platform using side cameras on rolling stocks. Utilizing deep learning-based image processing techniques, the developed device detects the approach of passengers on the platform in real-time from camera footage to notify the driver of it, providing assistance in safety checks. Additionally, the device is equipped with the function of automatic passenger counting at each station. This paper presents an overview of the developed device and reports the results of the evaluation experiments.

キーワード：車両側面カメラ，ワンマン運転，物体検知，画像処理，ディープラーニング

1. はじめに

現在，ワンマン運転を実施している列車では，運転士がプラットフォーム上に設置されているホームミラーなどを目視することによって，旅客の安全確認が行なわれている。これに対して，近年では運転士の目視による安全確認の新たな方式として，車両側面カメラを搭載した車両の運用が一部ワンマン運転区間で始まっている。このような区間では，車両側面カメラにより得られた映像が運転台に表示され，運転士はこの映像を見ることで旅客の安全確認を行っている。

筆者らは，車両側面カメラを活用したさらなる安全性の向上を目的として，画像処理技術によってカメラ映像からホーム上の旅客の接近をリアルタイムで検知する装置を開発した。システムの全体像を図1に示す。

このシステムにより，ドア開閉時の安全確認だけではなく，ホーム進入時や進出時など運転士がカメラの映像のみを注視することが難しいタイミングでも，ホーム上の旅客の安全確認を支援できるので，運転士の負担が軽減される。

さらに，開発した装置は，安全確認の機能に加え，乗降人数カウントの機能も備えている。装置が駅ごとにカウント処理を自動で実行し，その情報を csv 形式等で保存する。ダイヤや運用両数の設定，ワンマン化する区間や線区の拡大など運用上の意思決定における判断材料として，この情報を活用可能である。

本論文では，2章で車両側面カメラの概要を述べ，3章，4章で提案するアルゴリズムを説明する。5章でアルゴリズムの装置への実装，6章で装置の性能評価の結果を示す。最後に7章でまとめについて述べる。

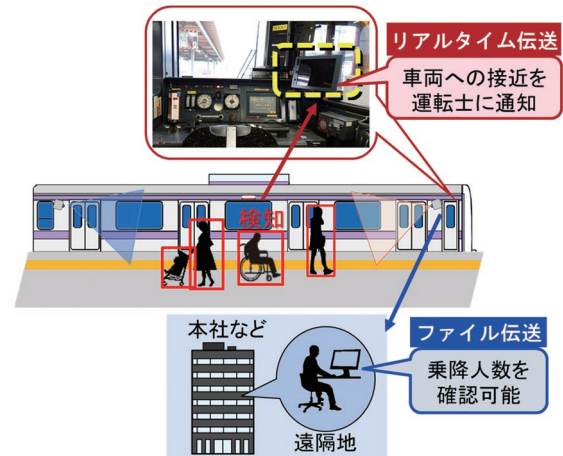


図1 システムの全体像

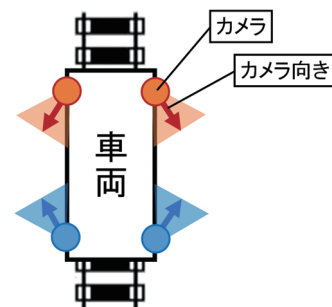


図2 車両全体に対する車両側面カメラの配置

2. 車両側面カメラ

車両側面カメラは，車両の前後左右の4箇所に設置されている。車両進行方向に対して，車両の後方から前方を監視するカメラと前方から後方を監視するカメラが左右にそれぞれ存在する。車両を真上から俯瞰した図を図2に示す。丸のシンボルがそれぞれ車両側面カメラを表

* 情報通信技術研究部 画像解析研究室

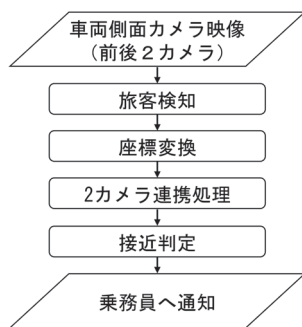


図3 安全確認支援手法の処理フロー

しており、矢印がカメラの向きを示している。

それぞれのカメラは、車両ドアの高さ程度に設置されており、斜め下に向けてプラットフォーム全体を監視できるような俯角、画角で設置される。

運転台のモニターは、車両の進行方向に対して、前方から後方を撮影した映像を表示する。車両が駅に停車し、ドアが開くとカメラ映像が表示され、発車後、一定速度を超過すると表示がオフとなる。また、ドアを取り扱うホーム側のカメラの映像が表示される。

3. 安全確認支援アルゴリズム

3.1 全体の処理フロー

車両側面カメラによる安全確認支援アルゴリズムは、図3に示す処理フローとなり、大きく分けて4つの処理によって構成される。はじめに、1車両から得られるホーム側前後2カメラの映像中に映っている旅客を、ディープラーニングによって作成したモデルが検知する。次に、その旅客の接近状態を推定するため、画像中の座標から実距離の座標へ変換し、車両への接近距離を算出する。最後に、前後2カメラ分の映像から得られた旅客の接近距離に対して事前に設定した閾値に応じて「注意」や「危険」といった判定を行う。

次節以降で、処理の具体的な内容について述べる。

3.2 旅客検知

取得されたカメラ映像に対して、ディープラーニングにより作成したモデルを用いて検知を行う。検知対象の旅客として、人物（全身・頭部）、車いす、ベビーカー、白杖をディープラーニングにより学習させ、検知を行うモデルを作成した。学習には、図4の例に示すような鉄道総研で撮影を行った独自のデータセット36,000枚のほか、人物が映ったCOCOデータセット¹⁾等のオープンデータから24,734枚の画像データを追加した計60,734枚の画像データを使用した。鉄道総研内の実験環境における検知の様子を示したものが図5である。図5より、検知された旅客が外接矩形で描画される様子が



図4 作成した学習データの例

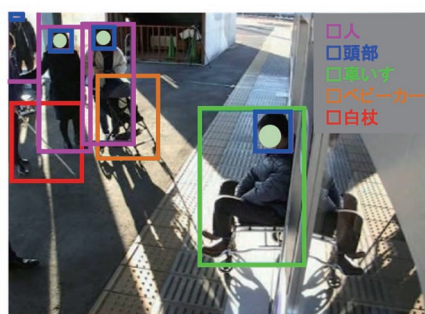


図5 旅客検知の様子

確認できる。

3.3 座標変換

検知された旅客に対する外接矩形の底辺中心を足元座標として定義する。この足元座標に対して、射影変換²⁾を用いて、実距離と対応したホーム俯瞰座標を算出する。カメラ座標系において撮影された平面上の任意の点 $X_{cam} \in \mathbb{R}^2$ に対して、実距離座標系における対応点 $X_{real} \in \mathbb{R}^2$ とする。このとき、2点間の写像は、ホモグラフィ行列 $H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ (ただし、いずれかの要素は1) によって、以下で示される。

$$\begin{bmatrix} X_{real} \\ W' \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X_{cam} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$X_{real} = \frac{X'_{real}}{W'} \quad (2)$$

ここで、 \mathbb{R} は実数集合であり、 $W' \in \mathbb{R}$ は $W' \neq 0$ を満たす。上式より、未知変数は8つであるので、対応する X_{cam} , X_{real} が4点存在すれば H は一意に定まる。

これを利用し、実寸のサイズが既知である視覚障害者誘導用ブロック（以下、点字ブロック）数個分の四角形の頂点4点とそれに対応する点字ブロックの画像上の4

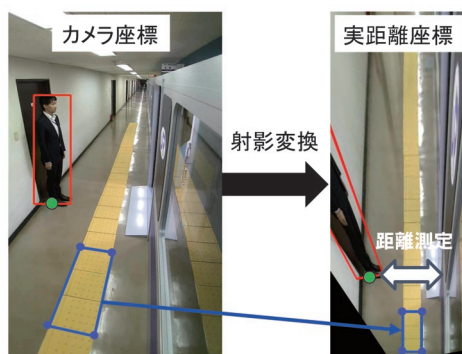


図6 旅客検知と実距離座標の算出

点により実距離座標への変換式を求めることができる。

変換式は各カメラで一度算出し、カメラの設置位置が不変かつ駅のホーム面高さが規格の基準内を満たす限り、駅ごとの変換式は同一とみなせる。また、変換式については、AR マーカーで自動算出することも可能である³⁾。実際に射影変換を行うと図6のように実距離に対応する座標に変換できる。

3.4 2カメラ連携処理

車両長である約20mの安全確認を行うため、2台のカメラの連携処理を行う。2台のカメラの検知領域が図7のように車両長の半分より長い範囲となるように設定する。検知領域の設定理由は、カメラに対して人物が遠いほど位置算出精度が低下することから、それぞれのカメラに対して近い領域側を検知領域とするためである。

また、2台のカメラの両方の検知領域となる図7中斜線部分が車両の中央付近に存在する。これは、境界付近での検知漏れを防ぐためである。両方の検知領域が重なる部分については、同じ人物を二重で検知する可能性があるが、安全側の過検知であり、運用上の問題はない。

3.5 接近判定

点字ブロックの内側（ホーム端から離れる側）は安全、点字ブロック上は注意、点字ブロックの外側（ホーム端側）は危険といった接近の基準がある。しかしながら、点字ブロックの設置位置が駅ごとに異なる場合や点字ブロックが設置されていない場合なども考えると、必ずしも統一された安全基準として判断に使うことはできない。したがって、統一的安全基準で判定を行うため、接近判定を点字ブロックの内外ではなく、車両と旅客間の距離で判定することとした。

通常の点字ブロックによる基準と合致するように、車両から100cm（車両とホームの間隙20cm+ホーム端から点字ブロックまでの距離80cmと想定）までを危険、100cm～140cm（内方線付き点字ブロックの幅40cmを想定）を注意、それ以外を安全とする判定基準を暫定的

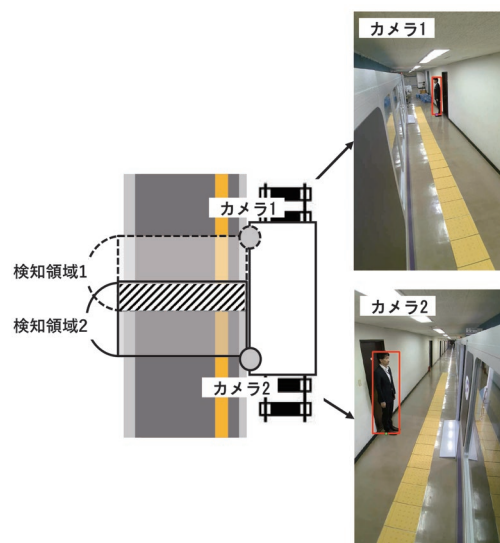


図7 2カメラの連携処理

に採用している。この基準は任意に変更可能である。

4. 乗降人数カウントアルゴリズム

4.1 全体の処理フロー

開発した装置では、安全確認支援に加えて乗降人数カウント機能も搭載した。この機能は、安全確認支援機能の一部を流用することで、計算量を抑えつつ、さらなる活用の幅の拡大を目指したものである。

車両側面カメラによる乗降人数カウントアルゴリズムは、図8に示す処理フローとなり、大きく分けて3つの処理によって構成される。安全確認支援アルゴリズムと同様にディープラーニングにより作成したモデルが検知を行い、検知した対象の追跡を行う。これにより、検知対象の移動の軌跡が取得可能となる。次に、検知した対象に対して、設定したドア位置を通過した方向と人数を求めることで、乗降人数をカウントする。最後に乗降人数カウントデータをcsv形式等で出力する。

次節以降で、処理の具体的な内容について述べる。ただし、旅客検知については安全確認支援アルゴリズムと同様であるので省略する。

4.2 追跡

検知した旅客に対して過去の数フレームから同一旅客であることを特定し、追跡を行う。追跡のアルゴリズムにはBytetrack⁴⁾を採用した。Bytetrackでは、図9のように旅客検知の出力で検出の信頼度が過去フレームにおいて高かった対象が遮蔽等により一時的に信頼度が下がっても、過去フレームから予測できる追跡により位置を推定する。これにより、乗降時などの旅客同士の重なりが頻発する場面でも見逃さずに追跡が可能となる。ま

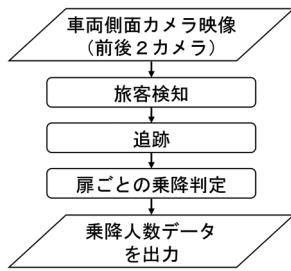


図8 乗降人数カウントアルゴリズムの処理フロー

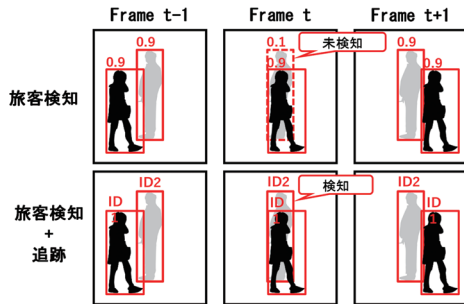
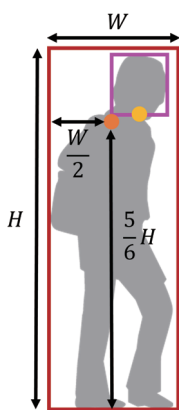


図9 ByteTrackによる追跡



図10 カウントする扉の設定 図11 追跡点の定義 (人物は試験関係者)



た、ByteTrack の処理時間は1~3msであり、リアルタイムでの処理が可能である。

4.3 扉ごとの乗降判定

図10のようにカウントする扉に対して、それぞれ基準線(図10中の緑線)を設定する。この基準線への通過方向と回数を計測して乗降人数をカウントする。カウントする際に追跡する点は、図11中に橙色と黄色の点で示した2点を設定する。基本的には、混雑時でも映りやすい頭部の底辺中心(図11中の黄点)を追跡点としてカウントを行う。一方、未検知が起こるケースも想定し、その際には足元座標から全身の5/6の高さの点(図11中の橙点)を代替の追跡点としてカウントを行う。足元座標から全身の5/6の高さは、人間の平均の頭身が

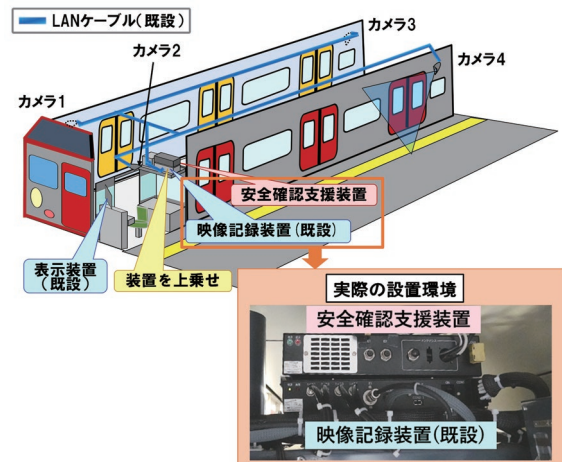


図12 全体の装置構成

7頭身程度であり、斜め上から映る影響でやや少なめの頭身に映ることを考慮したものである。

5. 車載装置の開発

5.1 全体の装置構成

車両側面カメラによる安全確認支援装置の全体構成を図12に示す。図中のカメラ、LANケーブル、映像記録装置、表示装置は車両側面カメラシステムとして既存の設備として設置されているものである。これに対し、3章、4章のアルゴリズムを実装した安全確認支援装置を搭載することで、支援機能を追加で導入する。

5.2 装置の設計

装置の設計にあたり、1車両に1台の安全確認支援装置を搭載することを考えると、車両数に応じて多数の装置が必要となる。したがって、1台当たりを可能な限り低コストで実現できることが望ましい。その際、コスト面での課題はディープラーニングにより作成したモデルでの検知を使用している点である。この処理には多くの並列演算を要するため、一般的にはGPUなどの高価な画像処理用半導体を用いられる。

これを避けるために、ディープラーニングにより作成したモデルでの検知の高速化を実施し、CPUのみで検知可能なモデルを作成した。これは、通常の学習を行った高性能なモデルに対して、図13に示すような、中間層を削減する(知識)蒸留とネットワーク構造を最適化する枝刈りと呼ばれる軽量化技術を使用することで実現した。

これにより、CPUのみで20ms前後でディープラーニングにより作成したモデルでの検知が可能となり、処理全体を含めても100ms以内で完了することができる。

以上より、安全確認支援装置の処理部はCPUのみを

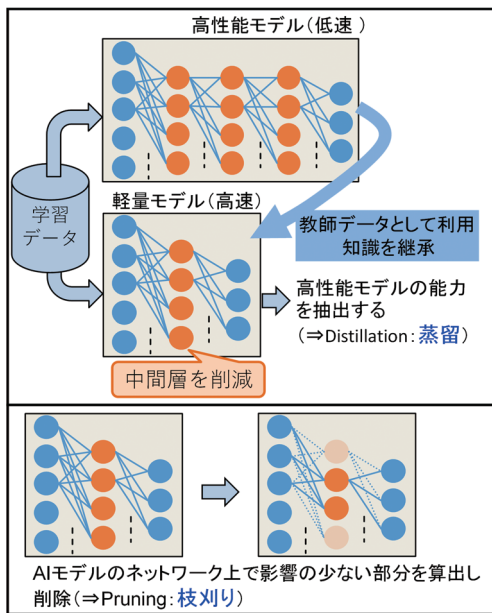


図 13 ディープラーニングモデルの高速化



図 14 安全確認支援装置の外観

表 1 安全確認支援装置の仕様

仕様一覧	
入力電圧	DC100V (+10%, -30%)
消費電力	最大 100W
使用温度	-10~50℃
使用湿度	20%~90% (結露無きこと)
外形(W×D×H)	390mm×260mm×70mm
設計質量	5kg 以下
搭載 CPU ボード	CPU : core i5-1185GRE Clock : 1.8GHz メインメモリ : 8GB
LTE ルータ機能	閉域 SIM VPN 通信に対応

採用した。その結果、専用冷却ファンが不要となり、小型化、低騒音化、耐振動性 (JIS E4031「鉄道車両用品-振動及び衝撃試験方法」適合) 等が実現可能となった。上記を踏まえて開発した安全確認支援装置プロトタイプの外観を図 14、仕様を表 1 に示す。LTE ルータの機能により、検知結果や乗降人数のデータの伝送も可能である。

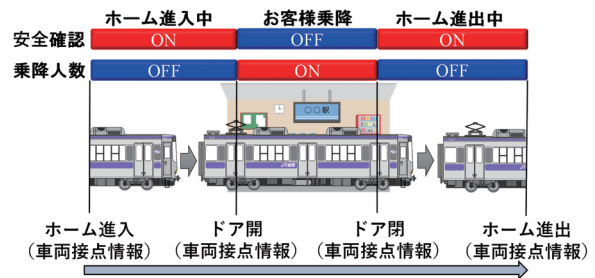


図 15 処理実行のタイミング



図 16 運転士への表示画面例 (人物は試験関係者)

5.3 既存の車両側面カメラシステムとの連携

安全確認支援及び乗降人数カウント機能を適切に実行するためには、装置を既存の車両側面カメラに接続し、連携する必要がある。連携が必要な部分は、安全確認支援と乗降人数カウントを ON/OFF する処理実行タイミングの決定と安全確認支援における運転士への通知である。それぞれについて述べる。

5.3.1 処理実行のタイミング

処理実行のタイミングを図 15 に示す。車両の接点情報を既存システムから受け取り、ホーム進入、ドア開、ドア閉、ホーム進出の 4 つをタイミングの基準とする。安全確認の通知に関して、ドア開～ドア閉までの旅客乗降中は、注意や危険となる領域に侵入してくることは通常の挙動である。したがって、このタイミングで注意や危険等の通知は実行しない。通知が必要なタイミングはホーム進入からホーム進出のうち、お客様の乗降がないときであるとし、乗降中は通知を OFF とした。一方、乗降人数カウントについては、ホーム進入、進出時に旅客が乗降することはないはずであり、このタイミングでは処理を OFF とする。

5.3.2 安全確認支援における運転士への通知方法

安全確認支援装置による接近判定の情報を、既設の乗務員への映像表示装置 (タブレット端末) へ通知する。検証用に作成した表示方法を図 16 に示す。「注意」、「危険」など接近状態ごとに外枠の表示を行い、音による発報も行う。また、検知対象の種別 (人物、車いす、ベビー



図 17 走行試験の様子（人物は試験関係者）

カー、白杖）も表示可能である（図 16 中画面内に白文字で表示）。現在の表示方法は暫定であり、各鉄道事業者の運用方法や安全への考え方に合わせて、個別にカスタマイズすることで通知方法を変更可能である。

6. 性能評価

6.1 走行試験による安全確認支援の精度評価

車両側面カメラによる安全確認支援装置の動作確認および性能評価を行うため、車両側面カメラシステムが搭載されている 815 系車両に試作した安全確認支援装置を接続した。JR 九州鹿児島本線（八代～熊本）で試運転列車による走行試験を 2 往復（日中・夜間）で実施した。試験の様子を図 17 に示す。

走行した 22 駅停車分の映像を解析し、誤検知率と未検知率を評価した。ここで、誤検知率は安全な状況にもかかわらず発報したフレームの割合、未検知率は点字ブロックを超えた接近で発報しなかったフレームの割合と定義した。試験結果として、誤検知率は 0.02% であり、未検知率は 3.80% であった。未検知の中で最多のケースは、白杖の見逃しであった。ただし、白杖については、人物と同時に存在するケースが通常であり、人物を検知できれば、安全確認を支援は可能であると考えられる。そこで、白杖を評価対象から除くと、誤検知率は 0.02% であり、未検知率は 1.75% であった。さらに、学習データの量が多い人物に限ると、誤検知率は 0.00%、未検知率は 0.36% であり、5 フレーム（0.5 秒）以上の未検知は 1 件も存在しなかった。車いすやベビーカーも人物と同程度に学習データを増やすことで精度向上が期待できる。

6.2 実映像による乗降人数カウント精度評価

映像データを用いた乗降人数カウントの性能評価を行った。815 系車両が運用されている豊肥本線（熊本～肥後大津）の 558 駅停車分の映像データを使用した。この映像データには、始発から終電の時間帯、天候（晴・曇・雨・雷雨）、屋内外、駅構造（単式、島式）等の条

表 2 乗降人数カウントの扉ごとの正解率

	カウント正解率 (乗車)	カウント正解率 (降車)
手前扉	95.19%	95.86%
中央扉	95.72%	84.49%

件が無作為に含まれている。815 系車両は 3 扉であるため、カメラから近い順に手前扉、中央扉とする（図 10 中ではそれぞれ、扉 1、扉 2 を指す）。この場合、前後にカメラがあるため、中央扉については 2 重でカウントすることとなる。中央扉に関しては、カメラ 2 台で計測された乗降人数から、平均や最大値等の統計量で推定する。今回は平均値を採用した。全映像で目視と装置によるカウント結果をそれぞれ累計し、正解率（装置カウント数/目視カウント数）を扉ごとにまとめたものを表 2 に示す。

表 2 より、中央扉の降車を除いて正解率は 95% 以上である。一方、中央扉の降車のみ正解率は 84% 程度となり、ほかに比べて誤差が大きいことが確認できる。これは、Bytetrack のアルゴリズムの影響であると考えられる。Bytetrack はこれまで検知できていた対象が一時的に遮られた際にも正しく検知できる効果はあるが、最初に出現する際に遮られて検知ができない場合には対応していない。したがって、中央扉の降車は、最初の出現時に遮られる可能性が高く、見逃すケースが多いと考えられる。

全体的な精度としては、駅ごとに乗車と降車を区別して高頻度のカウントが可能であることを考慮すると、実用上は活用可能な精度と考えられる。

7. まとめ

車両側面カメラを活用したさらなる安全確認の高度化を目的として、安全確認支援装置を開発した。本装置は、カメラ映像からホーム上の旅客の接近を画像処理技術によりリアルタイムで検知し、乗務員へ通知することが可能である。また、本装置は安全確認のみではなく、乗降人数カウントの機能も備えており、停車駅ごとにカウントを自動で実行可能である。

今後は、実用化に向けてユーザインタフェース等の最終調整を行う予定である。

謝 辞

本研究にあたり、九州旅客鉄道株式会社、八幡電気産業株式会社の関係者の皆様には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár, C.L. Zitnick: Microsoft coco: Common objects in context, Proceedings of the European Conference on Computer Vision, pp.740-755, 2014.
- 2) 吉野純樹, 長峯望, 向嶋宏記, 合田航: AR マーカーを用いた車両側面カメラ用画像変換パラメータの算出手法, 交通・電気鉄道研究会, TER-21-067, 2021
- 3) David A. Forsyth, et.al: コンピュータビジョン, 共立出版, 2017
- 4) Yifu Zhang, Peize Sun, Yi Jiang, Dongdong Yu, Zehuan, Yuan, Ping Luo, Wenyu Liu, and Xinggang Wang. BYTETrack: Multi-object tracking by associating every detection box. arXiv preprint arXiv: 2110.06864, 2021.

新幹線高速区間に適用可能なテルミット溶接法

寺下 善弘* 高木 雄太**

Aluminothermic Welding Method Applicable to Shinkansen High-Speed Sections

Yoshihiro TERASHITA Yuta TAKAGI

In a previous study, aiming at introduction of an aluminothermic welding method to Shinkansen lines, we developed the aluminothermic welding method that can improve bending fatigue strength. However, since the rails at the base of the rail foot weld collar did not melt slightly, and this had to be removed by grinding. In addition to this, there is concern about the occurrence of “solidification crack” in the aluminothermic welding method, which is a factor preventing its introduction to the Shinkansen lines. Therefore, in this study, we solved the problem that the rail at the base of the rail foot weld collar does not melt by improving the mold shape and welding conditions. We also generally clarified the mechanism of solidification crack and proposed a welding procedure to prevent it.

キーワード：テルミット溶接，曲げ疲労強度，未溶融部，余盛形状，三分割モールド，凝固割れ

1. はじめに

東海道新幹線建設に国産のテルミット溶接法が適用されたが、開業当初から溶接部の曲げ疲労強度に起因した損傷が頻発して問題となり、現在でも、一部の新幹線を除いてテルミット溶接法の適用が制限されている^{1) 2)}。そのため、新幹線の高速区間における現場溶接施工は、主に緊張ガス圧接法とエンクロズアーク溶接法によって担われているが、前者はレール移動を許容できない分岐器付近の施工には適用できず、後者は技術者に高い技量が求められるとともに、必要な技量を有する技術者自体を確保することが困難になっている。

そこで、レール移動を必要とせず、溶接技術者の確保が比較的容易であり、在来線において多くの適用実績を有するテルミット溶接法に着目し、現場溶接法の選択肢を広げるため、先行研究では余盛形状を改良したモールドの使用に併せて余盛止端部の研削を組み合わせることで、曲げ疲労強度を向上させ、新幹線高速区間に敷設可能な工法を開発した³⁾（以下、「提案法」とする）。しかしながら、提案法は図1に示すレール底部領域の余盛止端部にわずかな未溶融部が残存する場合があります、図2のように余盛止端部を研削加工して未溶融部を完全に除去するとともに、磁粉探傷検査にて未溶融部が完全に除去されたことを確認する必要がある。

また、新幹線軌道にテルミット溶接法を導入する際、曲げ疲労強度のほかに、早期折損につながる凝固割れの発生が懸念されていた。テルミット溶接部に生じる凝固

割れは、底部領域における溶接金属の最終凝固段階で、レールが長手方向外方に引っ張られることでレール下部から底部領域の溶接金属中心部に生じる割れと考えられている⁴⁾が、レール移動のメカニズムなど未解明の部分が残っており、新幹線への導入が進まない一番の要因となっていた。

本研究ではこれらの課題を解決するため、未溶融部を解消するためのモールド形状および溶接条件を見直した「改良法」を提案するとともに、凝固割れの発生防止策を提案した。また、前述した提案法を用いた新幹線軌道における敷設試験を実施し、高速区間における現場溶接法として実用化の目処をつけた。

2. 未溶融部解消のための改良法の開発

余盛内に位置するレールを十分に溶融させるためには余盛止端部の角度を増加させて溶鋼の充填される領域を拡大することが有効であるが、余盛止端部が応力集中しやすい形状となり、曲げ疲労強度向上が見込めないという、相反する難しさを有している。

そこで本研究では、提案法のモールドの内部形状を一



図1 余盛止端部の未溶融部 図2 余盛止端部の研削処理

* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

** 元 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

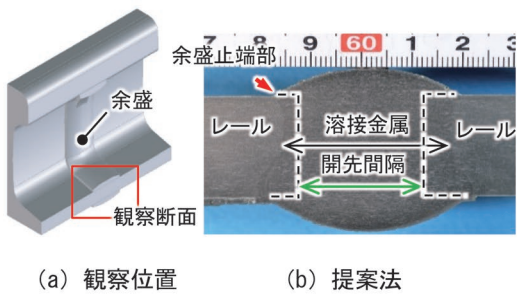


図3 レール底部領域の余盛断面形状

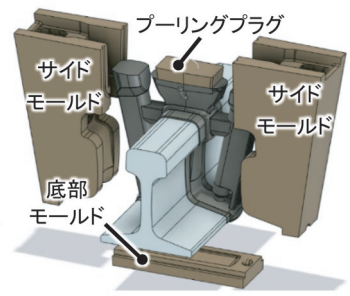


図4 3分割モールド

部改良するとともに、予熱時間やレール開先間隔（以下、「先先間隔」という）の溶接条件を変更することで、未溶融部を解消する方法（以下、「改良法」とする）を提案した。

2.1 モールド形状の改良

図3に、提案法と改良法のレール底部領域の余盛止端部形状を示す。これまでの検討結果³⁾から、レール底面側には200MPa以上の圧縮残留応力が生じるため、荷重載荷時にレール底部に引張方向の応力が作用しても絶対値として小さい値に留まることから、曲げ疲労強度にほぼ影響を及ぼさないと判断し、提案法のなだらかな形状に比べて溶鋼の充填領域を拡大できる直角形状とした。また、底部上面側は、余盛止端部の角度を変更した複数のモールドによる事前検討で、応力集中により曲げ疲労強度に及ぼす影響が最も小さかった提案法と同じ形状を採用した。さらに曲げ疲労強度向上の観点から鑄バリの発生を抑制するとともに、表面きずや湯漏れの施工不良の発生を防止するために、現行の2分割モールドではなく、レールとモールドとの隙間を極力小さくでき、かつ施工性も高い図4に示す3分割のモールド構造とした。

2.2 レール開先間隔および予熱時間の選定

表1に本研究で試作した改良型モールドを用いて実施した代表的な試験体作製時の溶接条件と試験体作製後に未溶融部の発生状況を確認するために実施したレール底部上面余盛止端部に対する磁粉探傷試験結果を示す。

表1 代表的な試験体作製時の溶接条件と底部上面余盛止端部の磁粉探傷結果

TPNo.	開先間隔 (mm)	予熱時間 (秒)	磁粉探傷による未溶融部の有無
1*	25±1	150	発生
2	25±1	180	発生
3	25±1	195	未発生
4	29±1	150	発生
5	29±1	180	未発生

*提案法の溶接条件

なお、本試験では提案法の溶接条件（開先間隔：25±1mm、予熱時間：150秒）を基準として、予熱時間の延長と開先間隔の拡大の有効性を確認することを目的とした。なお、予熱炎のガス圧力は、標準の酸素0.5MPa、プロパン0.15MPaである。

予熱時間を延長あるいは開先間隔を拡大した試験体で余盛止端部の未溶融部の抑制効果が認められたものの、同様の条件で作製した複数の試験体で未溶融部の発生の有無にばらつきがあることが判明した。そこで、安定した溶け込みを達成するためにはさらなるレール底部の予熱温度上昇、すなわち予熱時間の延長が必要と判断した。

図5は、さらなる予熱時間延長の可能性を検証するためには実施した予熱試験の結果であり、図中に示す開先面となるレール端面から5mm内側の頭部（H）、腹部（W）、底部中央（B1）および底部足部（B2）の温度履歴である。また、提案法の溶接条件での予熱温度を目安として破線で併せて示している。なお、予熱試験はワンタッチ式継手（日東工器製）を2箇所を使用した現場仕様のホース構成（ホース長20m）にて実施しており、上述した試験体作製時のホース構成（ワンタッチ式継手なし、ホース長10m）と比較して、ガス圧力がより低下することとなる。

また、通常の溶接施工では予熱が完了した後にルツボを設置し、溶剤に点火して生じるテルミット反応によって溶鋼がモールド内に注入されるまで40秒程度の時間を要する。未溶融が生じやすい底部足部の温度を高い状

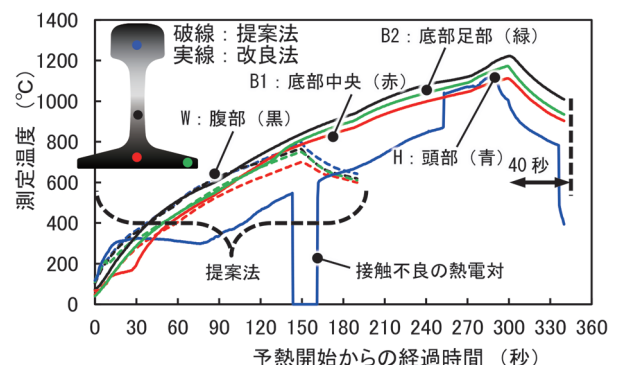


図5 温度測定試験結果

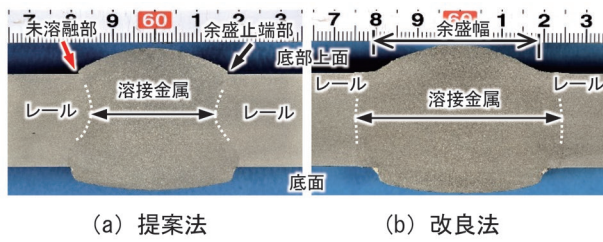


図6 底部足部の縦断面マクロ組織

表2 試験体作製時の溶接条件

モールド	開先間隔 (mm)	予熱時間* (秒)	ボンベ圧力 (MPa)	
			酸素	プロパン
改良法	29±1	300	0.5	0.15
逆ひずみ (mm)	静置時間 (秒)	テルミット溶剤 (るつぽ)		
4.0-5.0	420	60/Z90 SkV-Elite L25 (シングルユース)		

*現場仕様のホース構成

態に維持することなどが望ましいと考え、この時点（グラフの終端である予熱完了から40秒経過後）での温度を評価することとした。

改良型モールドを用いて提案法の2倍となる300秒まで予熱した結果、予熱完了から40秒経過後の底部中央および底部端部のレール温度はそれぞれ903℃、935℃となり、提案法の条件と比較して約300℃高く維持できることを確認するとともに、予熱時間延長に伴うモールドの溶損は認められなかった。なお、予熱時間を延長した際の頭部領域の温度は、熱電対の接触不良により正しい値が計測されていないが、一部のデータよりその他の領域と大差はないと判断した。

図6に提案法に比べて予熱時間を2倍の300秒、開先間隔を4mm拡大（29mm±1mm）した溶接条件で作製した試験体の底部足部（底部側面から40mm内側）で観察した縦断面マクロ組織を、提案法の溶接条件で作製した試験体と比較して示す。提案法では、やや黒く見える溶接金属（溶融領域）がレール板厚の中央付近で最も狭くなっているとともに、底部上面余盛止端部では余盛幅を超えてレールが溶融しておらず、未溶融部が発生する状況となっている。一方、改良法では余盛幅を十分に超えてレールが溶融しており、この条件で安定して未溶融部を解消できる見通しを得た。

2.3 改良法の曲げ疲労強度

表2に示す改良法の溶接条件で作製した5本の試験体における曲げ疲労強度を評価するため、レール底部領域に引張応力の作用するHU（レール頭部を上向き）姿勢にて、支点間距離1300mm、中央載荷点距離150mm、載荷周波数3Hzの4点曲げ疲労試験を実施した。なお、

表3 曲げ疲労試験結果

TPNo.	応力全振幅 (MPa)	繰り返し数 (回)	破断の有無 (破壊起点)
6	210(240-30)	2,000,000	未破断
	240(270-30)	2,000,000	未破断
	270(300-30)	907,119	破断(底面)
7	250(280-30)	1,081,511	破断(底面)
8	240(270-30)	1,909,258	破断(底部上面)
9*	240(270-30)	2,000,000	未破断
	250(280-30)	2,000,000	未破断
	260(290-30)	2,000,000	未破断
	270(300-30)	1,112,242	破断(母材)
10*	260(290-30)	920,960	破断(底面)

*底部上面余盛止端部研磨

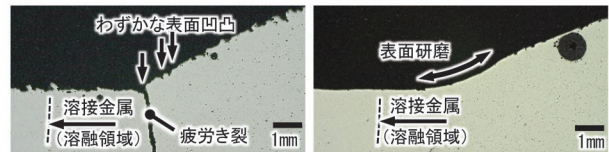


図7 底部上面余盛止端部の溶融状況と表面形態

底部上面余盛止端部に対する磁粉探傷試験を実施した結果、未溶融部の発生を示唆するきず磁粉模様は、いずれの試験体にも観察されなかった。曲げ疲労試験は、レール底面における最小応力を30MPaとする片振り条件を採用し、繰返し数200万回を限度として、破断の有無で曲げ疲労強度を評価した。なお、200万回の繰返し載荷で未破断の場合は、レール底面における応力全振幅をさらに10~30MPa増して再度曲げ疲労試験に供することで、応力全振幅210~270MPaの範囲の10ケースを評価した。表3に試験結果を示す。なお、TPNo.6~TPNo.8の3本の試験体は後処理をしない溶接ままである。図7に底部上面の余盛止端部をレール長手方向に切断した断面で観察した溶融状況と表面形態を示す。これより、余盛止端部を超えて十分にレールを溶融できているが、溶接ままでは図7(a)に示すように底部上面の余盛止端部にわずかな表面凹凸が存在し、ここから疲労き裂が発生して破断に至った。そのため、TPNo.9、TPNo.10の試験体では図7(b)に示すように、溶接施工後に後処理としてわずかな表面凹凸を研磨している。

また、応力全振幅が250MPa以上の試験条件で、レール底面の余盛止端部から破断する試験体が見受けられた。通常、レール底面側は大きな圧縮残留応力が作用するため、270MPa程度までの試験条件では底面の余盛止端部が破壊起点となることはない³⁾。しかしながら、当該試験体作製では、溶接直後に試験体を運搬したため、底面モールドが早期に外れた試験体が存在した。その結果、底面側の冷却速度が早くなり、残留応力や表面硬さにばらつきが生じ、250~270MPaの試験条件でも底面

余盛止端部から疲労き裂が発生して破断に至った可能性がある。

これより、改良法で施工した溶接部の曲げ疲労強度は、後処理をしない溶接ままの試験体で、応力全振幅が240MPaで未破断あるいは200万回直前で底部上面余盛止端部から破断した結果に加えて、250MPa以上の応力全振幅条件でも破壊起点とならなかったことより、240MPa程度の曲げ疲労強度を有していると判断した。また、溶接施工後に底部上面余盛止端部のわずかな表面凹凸を研磨することで、無欠陥のエンクローズーク溶接部の曲げ疲労強度と同程度の260MPaまで向上できることを確認した。

以上の試験結果から、改良法は未溶融部を解消でき、かつ曲げ疲労強度を後処理なしで240MPa程度に向上可能であり、さらに底部上面余盛止端部のわずかな表面凹凸を研磨除去することで260MPa以上に向上可能である。なお、この曲げ疲労強度を達成するためには、底面および腹部領域のモールドは、溶接部の温度が300℃以下になるまで（出鋼完了から40分程度）保持しておくことが必要と考える。

3. 凝固割れ発生メカニズム解明とその防止策

3.1 テルミット溶接施工時のレール挙動

1986年以降、JRグループにおいて、営業線上でテルミット溶接部が凝固割れの溶接欠陥を原因として折損、あるいは撤去に至った事例は、鉄道総研が把握しているだけで35件に上る。この中で資料として残っている当時の事故速報や施工記録を改めて確認した結果、詳細な記載がないものも多かったが、凝固割れが発生した溶接施工には、以下に示すような傾向が認められた。

表4に各施工形態の件数を整理して示すように、凝固割れが発生しやすい施工形態として、損傷レール交換、EJやIJ撤去のように交換するレールの両端を本線上で溶接するケース（「以下、「2口施工」」とする）が、1箇所溶接施工となるロングレールの設定替えなど（以

表4 凝固割れ発生の施工形態

施工当日の溶接施工数の件数	
1口施工	2
2口施工(両端)	26
不明	7
2口施工(26口)の施工順	
1口目	2
2口目	13
不明	11

下、「1口施工」とする）に比べて圧倒的に多いことがわかる。また、2口施工の内、施工順序が明らかとなっているケースを抽出すると、2口目の施工箇所凝固割れが多く発生していることが判明した。

短尺レール交換において緊張器1台で交換箇所を囲い込む溶接施工や緊張器を使用しない溶接施工を想定すると、挿入した短尺レールはほとんどレール締結装置での固定ができないため、2口目の溶接施工における溶鋼の凝固段階で、1口目の溶接部の凝固、冷却に伴う収縮によって、2口目の溶接箇所において短尺レールが1口目の方向に引っ張られると考えられる。このように、2口施工の1口目の溶接部の凝固、冷却に伴うレール収縮が、2口目での凝固割れ発生に影響していると考え、試験軌道を用いて2口施工を想定した溶接施工時のレール挙動を測定した。

溶接試験は、図8に溶接試験時のレール配置、レール締結状態およびレール変位測定位置の概略を示す。ここで、6mレール（以降、「短尺レール」という）の終点方レール端部は、2口施工時の2口目の溶接箇所を想定している。この短尺レールと18.1mレールに継目板で拘束した4.2mレールをテルミット溶接し、両レール端部の変位の経時変化を予熱開始から測定した。なお、溶接部の頭頂面温度が約300℃に達した時点で、水をかけて冷却した。

溶接試験は短尺レールの締結条件の違いを比較する目的で2回実施し、1回目は溶接部の凝固、冷却に伴うレール挙動を把握するためにほぼ無締結とし、2回目は

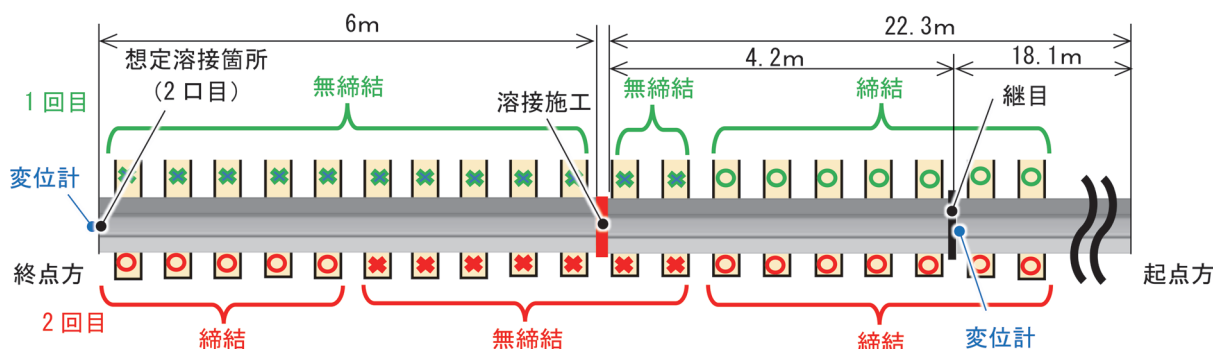


図8 溶接試験時のレール配置、締結状態と各測定位置の概略

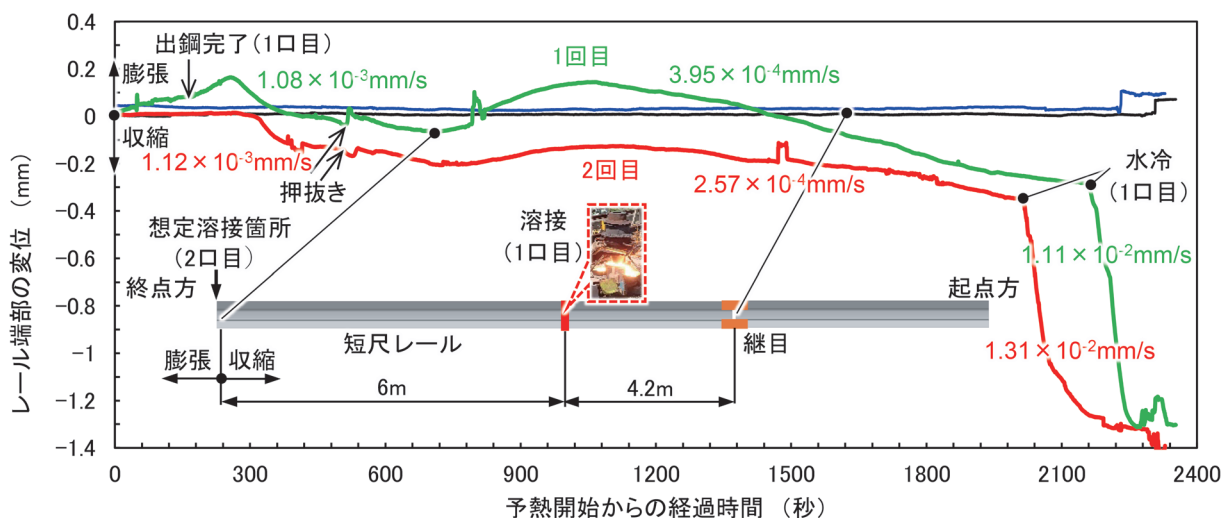


図9 溶接施工時のレール端部の挙動

実施工での締結箇所数を再現した。なお、本試験では、在来線で使用されているテルミット溶接（現行法、通称ゴールドサミット溶接）の材料と溶接条件を用いることとした。

図9は、1回目および2回目の溶接試験における短尺レールの終点方レール端部と4.2mレールの起点方レール端部の変位である。測定結果より、予熱および溶鋼充填によって溶接部付近のレールが膨張することで、短尺レール端部も伸びる方向に移動し、溶鋼の凝固がある程度進む（出鋼完了から100秒程度）と、溶鋼の凝固、収縮に伴い、今度は縮む方向にレール端部が移動していることがわかる。また、レール頭部余盛の押抜きが完了した後、再びレール端部は伸びる方向に移動しているが、これは溶接部が相変態（原子配列が変化すること）⁵⁾の生じる温度域まで冷却して一時的に膨張することに起因していると推察する。その後は、溶接部の温度低下に伴い、レール端部が徐々に縮む方向に移動し、溶接部の頭頂面温度が約300℃に達した時点で、水冷処理を施すと、さらに速い速度で縮んで移動していることがわかる。

なお、5本のまくらぎのレール締結装置を緊締した2回目では、予熱および溶鋼充填によるレール移動が抑制されるとともに、レール端部の変位量に若干の差はあるものの、溶鋼の凝固、冷却過程で短尺レール端部が伸び縮みする挙動およびタイミングに大差はないことを確認した。

3.2 凝固割れの再現試験

凝固割れの発生要因とされる被溶接レールが長手方向外方に引っ張られる原因が、3.1節で述べた1口目の溶接部の凝固、冷却に伴う収縮と考え、その状況を再現するため、溶鋼の凝固段階で被溶接レールを長手方向外方へわずかに移動させる溶接試験方法を考案し、実施した。

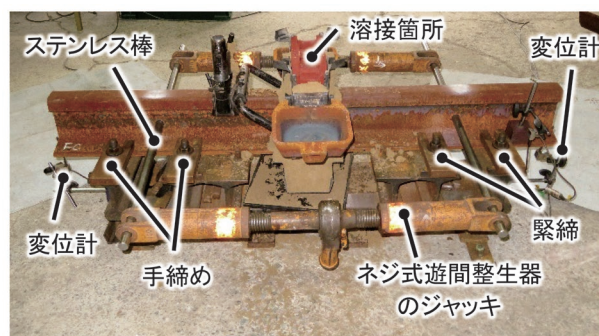


図10 考案した凝固割れ再現試験方法

図10に再現試験の状況を示すように、左右の被溶接レールの開先面から約400mm離れたレール腹部に穿孔した継目穴（φ25mm）に、長さ1mのステンレス棒（SUS304、曲げ剛性3.14N・m²）を挿入し、ネジ式遊間調整器（鉄友工業（株）製：レールキャッチ部を除くジャッキ部のみ）を差し込んで操作してジャッキを伸ばさせることにより、ステンレス棒を介してレールに最大約10kNの引張力を作用させた。また、右側の被溶接レールは溶接台に締結して固定させ、左側のレールは可動できるように締結部のネジを手締めとし、被溶接レールの両端に設置したカンチレバー式変位計で、予熱開始からの変位を測定した。なお、溶接試験ではレールに引張力を作用させるタイミングと移動量をパラメータとして、14ケース実施した。また、レールに引張力を作用させるタイミングは、一連の試験におけるレール移動の状況から出鋼完了から60～100秒の範囲で変化させた。

図11に測定結果の一例を示す。溶鋼充填によって溶接部付近のレールが膨張し、出鋼完了から約85秒でネジ式遊間調整器のレバー操作を繰り返した結果、可動可能な左側のレール端部は、さらに約0.1mm外方に移動

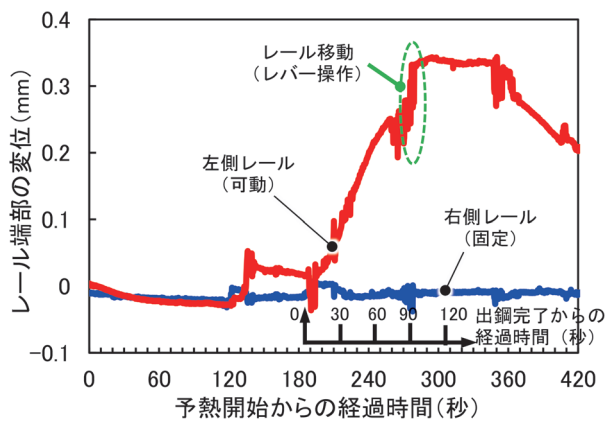


図 11 再現試験におけるレール挙動測定結果の一例

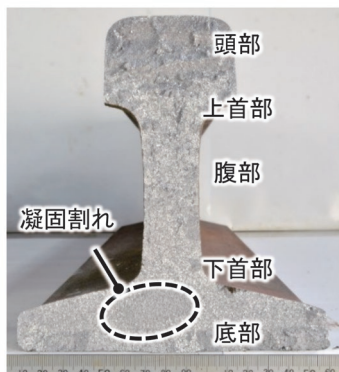


図 12 再現した凝固割れの破断面

した。また、溶接部の凝固が完了した時点でステンレス棒を撤去すると、溶接部の凝固、収縮に伴い左レール端部が徐々に内側に移動した。

再現試験での凝固割れ発生の有無および発生領域を確認するため、1m スパン中央集中荷重による静的曲げ試験を実施し、溶接部を強制的に破断させた。図 12 に破断面を示すように、下首部から底部領域に営業線上で早期折損する溶接部と同様の形態の凝固割れが観察された。破断荷重は 600kN であり、60kg 普通レールテルミット溶接部の曲げ破断荷重とたわみ量の基準値 (HU: 1080kN-10mm) に比べて著しく低く、このような凝固割れが生じたテルミット溶接部は短期間で折損に至る可能性が高い。

このように、溶鋼の凝固段階でステンレス棒によって被溶接レールを長手方向外方にわずかに移動させることによって、営業線で生じる凝固割れを再現することができた。

なお、一連の再現試験では、引張力を作用させて出鋼完了から 75~95 秒の範囲でレールが移動し、かつ移動量が 0.25mm までに留まった場合に、図 12 と同様の凝固割れを再現できた。その一方で、同様のタイミングでレールを移動させても、溶鋼の温度が低下して凝固がよ

表 5 各工法によるレールが伸びるタイミング

	出鋼完了からの経過時間(分 秒)	
	溶接完了時間 (静置時間)	レールが伸びるタイミング
現行法	6'00" (4'00")	09'06" ~ 15'03" 08'59" ~ 15'18"
改良法	9'00" (7'00")	13'14" ~ 19'11"

り進んだ状態ではレールが移動しないケースが見受けられた。この結果より、営業線で生じる凝固割れは底部領域の凝固が完了して溶接部がある程度の強度を有する 20 秒程度の中に、10kN 未満の作用力を受けて発生している可能性がある。

3.3 凝固割れ発生防止のための施工手順

3.1 節および 3.2 節の結果から、連続する 2 口施工を想定したケースでは 2 口目の溶鋼の凝固段階が、1 口目の溶接部の変態に伴い膨張するタイミングに合致すれば、理論的には凝固割れは発生しないと考える。

表 5 に、3.1 節で示した溶接試験における 1 口目の溶接部が膨張してレールが伸びるタイミングを整理する。なお、本溶接試験は上述した現行法だけではなく、2 章で検討した改良法でも実施しており、その結果も併せて示す (図 9, 図 13 から読み取った時間)。ここでは、1 口目の溶接箇所溶鋼がモールド内に充填されてからの経過時間で示す。また、表 5 中に示した溶接完了時間とは、静置時間 (溶鋼の凝固が完了してモールドの解体を開始するまでの時間) に、約 2 分程度を要するモールド解体とレール頭部余盛の押抜き作業を見込んだ目安である。これより、現行法と改良法では入熱量が異なるために、1 口目の溶接部が膨張するタイミングに違いがあるものの、溶接完了時間から約 3~4 分後に膨張し始め、6 分程度膨張し続ける傾向はほぼ同じである。

図 13 は 3.1 節で示した溶接試験と同様の試験において、改良法を用いて測定したレール端部 (2 口目の溶接箇所) の変位に、凝固割れ発生防止として提案する 2 口目の溶接施工のタイミングを重ね合わせて示したものである。1 口目の溶接施工が完了した後、1 分程度で速やかに 2 口目の溶接施工 (予熱) を開始することで、2 口目の溶接部の凝固と 1 口目の溶接部が膨張するタイミングが合致していることがわかる。また、溶接部の温度低下に伴うレールの移動速度は、最大でも約 $3.0 \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{mm/s}$ であることから、底部領域の凝固が完了して溶接部がある程度の強度を有する 20 秒程度での移動量は十分に小さいと考える。これより、2 口目の溶接部の凝固段階がこのタイミングから外れた場合でも、即座に凝固割れの発生につながる可能性は低いと考えるが、常

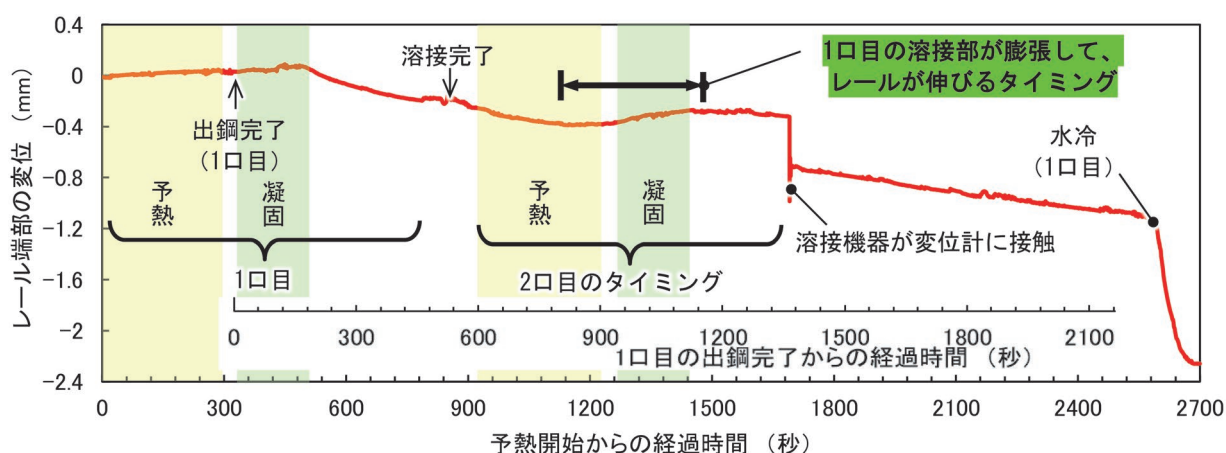


図 13 改良法による 2 口施工を想定したレール端部の変位と溶接施工のタイミング

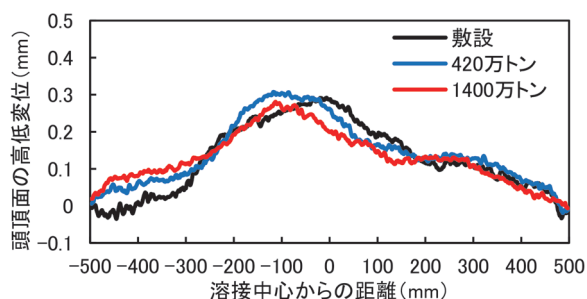


図 14 試験溶接部の頭頂面形状の推移例

にレールが等速で縮むとは限らないため、1口目の出鋼完了から現行法で約7分後、改良法で約10分後に2口目の溶接施工（予熱）を開始する手順が凝固割れの発生防止策としては有効と考える。また、上記の施工手順は、短尺レール交換を想定した場合であり、長尺レール交換などでは、緊張器を2台使用する、あるいは溶接機材を2組持参できる場合には、2口同時に溶接する施工手順も凝固割れ発生防止策として有効である。

4. 新幹線軌道での試験敷設結果

新幹線高速区間へのテルミット溶接法の導入のために、提案法で施工したテルミット溶接部について、まずは低速区間である東海道新幹線大井車両基地への回送線に試験敷設して、経時変化状態を追跡調査した。また、1年6か月にわたる追跡調査（累積通過トン数約2170万トン）で異常が発生しないことが確認されたことから、高速区間における経時変化を検証する目的で、提案法で施工したテルミット溶接部を営業線に試験敷設し、調査を開始した。なお、いずれも基地で溶接施工したテルミット溶接部を敷設したものである。

図 14 は、営業線の高速区間に敷設した溶接部のレール長手方向の頭頂面形状の推移の例である。頭頂面形状は、敷設から約1400万トンの累積通過トン数でも、敷

設時とほとんど変化がなく、溶接金属や熱影響部境界での局所的な落ち込みなども見受けられず、良好に推移していることがわかる。また、超音波探傷試験においても、敷設時の検査結果から変化はなく、底部余盛止端部からの疲労き裂の発生などの異常が発生していないことを確認した。なお、今後は、累積通過トン数1億トン程度まで追跡調査を継続し、最終的な評価を行う予定としているが、概ねテルミット溶接法の新幹線高速区間への導入に目処が付いたと考える。また今後は、本研究で開発した「改良法」について試験敷設を進め、現場溶接法としての施工性も含めてテルミット溶接法の有効性を確認する予定である。

5. まとめ

テルミット溶接法を新幹線高速区間における現場溶接法として実用化することを目的とし、先行研究（提案法）で課題として残ったレール底部上面余盛止端部の「未溶融部」の発生を解消し、かつ曲げ疲労強度の向上が可能なテルミット溶接法（改良法）を開発するとともに、早期折損につながる「凝固割れ」の発生防止について検討した。本研究で得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) 余盛止端部への応力集中を低減するために、レールとの密着性が高い3分割モールドを採用して内部形状に改良を加えた。さらに、溶融性能を向上させて未溶融部の発生を解消するために、現行法に比べて予熱時間を2.5倍、開先間隔を4mm拡大することで、施工性に影響を及ぼすことなく曲げ疲労強度を230MPa以上に向上可能な施工法を開発した。
- (2) ネジ式遊間調整器を用いて溶鋼の凝固段階でのわずかなレール移動を可能とする試験方法を考案し、営業線上で早期折損する溶接部と同形態の凝固割れを完全に再現した。また、溶接施工時のレール挙動を把握することで「凝固割れ」の発生メカニズムを

- 概ね解明し、これを防止する施工手順を提案した。
- (3) 提案法の新幹線軌道での試験敷設を経て、新幹線高速区間での実用化に目処をつけた。

文 献

- 1) 栗原利喜雄：レール損傷に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1188，pp.284～299，1981
- 2) 坂口和弘：九州新幹線におけるゴールドサミット溶接の本格導入，日本鉄道施設協会，Vol.59，No.9，pp.27-28，2021
- 3) 寺下善弘，山本隆一，岩崎幹大，相澤宏行：曲げ疲労強度の向上が可能なテルミット溶接工法の開発，鉄道総研報告，Vol.35，No.4，pp.11-16，2021
- 4) 伊藤太初，寺下善弘，辰巳光正，山本隆一，設楽英樹：テルミット溶接部における凝固割れの発生条件と折損防止策，鉄道総研報告，Vol.23，No.10，pp.59-64，2009
- 5) 矢島悦次郎，市川理衛，古沢浩一：若い技術者のための機械・金属材料，丸善，1967

クラウド型連動装置の構成と処理手法

寺田 夏樹* 潮見 俊輔* 遠山 喬*

Study on Interlocking Device on Cloud Computing Environment

Natsuki TERADA Shunsuke SHIOMI Takashi TOYAMA

We report our study and proposal on interlocking devices in a cloud computing environment, which realizes resilience, reduction of time and cost for replacement, and provides the interlocking process as a service. The proposed system has the feature of processing interlocking logics of different stations independently. The proposed system has three layers: terminal devices to interface track circuits, signals, and switches, etc., logic units to process interlocking logics, and controllers to assign the interlocking table to logic units. We defined the specification of the terminal devices, logic units and controllers, and carried out verifications on them.

キーワード：連動装置，クラウド，Interlocking as a service，セグメント，非同期処理

1. はじめに

連動装置は、列車の位置や進路に関する指示に基づき、信号機や転てつ機等の現場機器相互の連鎖を確保しながら、駅構内の現場機器制御を行うものである。その機能はリレーや電子計算機などにより実現されてきた。従来から存在するリレーによる連動装置（継電連動装置）では、駅毎もしくは駅構内を分割した小単位毎に設ける構成が採られてきた。近年電子計算機による連動装置（電子連動装置）も広く利用されるようになった。電子連動装置も当初は駅ごとの構成のみであったが、最近では同一線区上の複数駅を制御する集中連動方式の開発や実用化が進んでいる。集中連動方式は、連動装置の維持管理の集中化など保全面等での効果があり、特に地方線区における運営の低コスト化に貢献している。

鉄道総研では、集中連動の概念を拡張し、クラウドコンピューティングの概念を導入することで、電子連動装置の論理演算機能を異なる線区の複数の駅に対してサービスとして供給する、クラウド型連動装置の開発を進めている。本報告では、最初に現状の連動装置の課題をもとにクラウド型連動装置のコンセプトをまとめ、解決すべき技術課題について述べる。次に、クラウド型連動装置の実現方法として提案する構成と各部の機能仕様の概要を示す。最後に、その実現性についてシミュレーションにて検討した結果を示す。

2. 連動装置のクラウド化のコンセプト

クラウド型連動装置の開発を進めるにあたり、各種連

動装置の現状を把握し、こういった形態での装置の実現が望まれるか検討を行った。

2.1 連動装置の現状

駅構内の列車の進路を制御する連動装置は、論理演算を行うハードウェアによって、機械連動装置、継電連動装置、電子連動装置等に大別される。

現在では電子連動装置は、JR各社の連動装置の約40%を占める。1985年の東神奈川駅での実用化から35年を経ており、今後高経年の設備が増加することから、寿命延伸に対する技術開発のニーズが高まっている。一方、中小鉄道事業者の連動装置の80%を占める継電連動装置は、1960年代に多く導入された。現在、その多くが50年を越える経年と推察される。連動装置の更新は、結線や配線の作成と審査、施工のための設置スペースや建屋の確保、新旧を並立させるための配線工事、新旧切り替えての動作確認等、更新までの工数が多い。更新の容易化に対する技術開発のニーズは高いと考える。

連動装置は駅構内で1台、進路数の多い大駅では複数台用いる構成が一般的であるが、近年、同一線区の複数の駅を1台の電子連動装置で所掌する「線区集中連動装置」が開発、導入されている¹⁾²⁾。線区集中連動装置では、論理の演算を行う1台の論理部と、現場機器を制御するための電子端末を各駅に設置し、論理部と電子端末間を伝送回線に接続している。線区全体を1つの駅構内と同様に処理することで、論理部の台数削減に加えて、駅間の閉そく装置の機能の内包が可能となった。集中連動装置は、進路数が少ない地方線区のほか、整備新幹線でも導入されている³⁾。

また、連動装置と現場機器、現場機器相互の制御や表示情報の通信手段に従来の1:1の接続に代わり、ネッ

* 信号技術研究部 信号システム研究室

3. クラウド型連動装置の基本構成の検討

3.1 現在の電子連動装置の処理手順とクラウド型連動装置における技術的課題

現在の電子連動装置の論理部は通常、稼働系と待機系の1組の論理部から構成されている。装置が処理する連動論理は、内部に各駅の論理をROMやストレージ等により入力し、処理時には高速なRAM上に読み出した上で実行している。連動装置と処理対象駅は1:1ないし1:Nとして固定的に対応づけられており、稼働しながら対象駅を変更することはできない。

入出力や論理演算等の処理は、設計時に定めた一定周期毎に実行される。処理対象駅が複数存在する場合であっても、入出力や論理演算は一定時間周期毎に1回のタイミングで全駅をまとめて実行する。そのため、工事等で処理を停止させる場合に特定の駅のみ処理を停止させることはできず、処理対象駅全てを停止させる必要がある。また、論理を変更する際には、変更箇所のみならず他駅の制御に影響する可能性がある。

現在の電子連動装置は安全性の確保のために、2組ないし3組のCPUとメモリを備え、処理過程や処理結果を照合して不一致があった際に安全側動作に移行する、フェイルセーフCPUを用いている。

また、装置間の通信手段にネットワークを用いる連動装置等は、専用のネットワークを構成し、装置間の通信遅延に上限を設けてそれ以上の遅延を許容しない構成を採用している。

したがって、クラウド型連動装置を実現するためには、以下の(a)~(c)の技術的課題を解決することが必要となる。また(d)については、処理対象駅が数百を超える大規模システムを低い初期コストで実現する際に必要となる。

- (a) 駅ごとの処理の独立性を確保した処理手法
- (b) 連動論理部への処理の割当および管理手法
- (c) ネットワークの遅延を許容する処理手法
- (d) 汎用CPUによる高安全な連動論理処理手法

本稿では、(a)~(c)の開発について述べる。以下各節において検討概要を示す。なお、(d)についてはネットワークを介して多数決を行うフェイルセーフ構成を提案しているが⁷⁾、まだ基礎検討の段階である。そのため連動論理の処理については、既存のフェイルセーフCPUを用いる前提でシステムの検討を行った。

3.2 駅ごとの処理の独立性を確保した処理手法

現在の電子連動装置で複数駅を取り扱う場合、論理演算や入出力は駅ごとに細分化せず一括で処理を行う方式を採用しているが、クラウド型連動装置においては駅ごとの処理の独立性を確保することが機能上必要とな

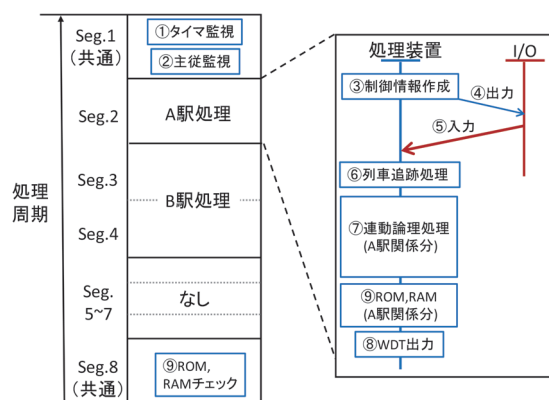


図2 セグメント分割と処理の割り当て

る。そこで、電子連動装置が周期的に行っている処理を、共通処理と各駅個別の処理に分けた上で、それぞれを連動装置の処理能力を細分化した単位(セグメント)に割り当てて順次実行する方式を提案する。

図2にセグメントの分割と処理の割り当ての概念を示す。図2の「seg.」はセグメントの略である。各駅で個別に実行する処理としては、制御情報の作成、入出力、列車追跡処理、論理演算、各駅固有のデータに関するROMおよびRAMのチェック、ウォッチドックタイマの出力が挙げられる。各駅の進路数やリレー数によって入出力や論理演算に必要な処理能力は異なるため、進路数の多い駅にはセグメントを多く割り当てる必要がある。図2に示す例では、一定処理周期で実行している処理を8セグメントに分割し、1番目と5番目のセグメントを共通処理に割り当てて、2番目にA駅の処理を3~4番目にB駅の処理を割り当てている。また、5~7番目は余剰の処理能力である。このようにセグメント単位で処理を割り当てることにより、処理順序を定義づけることができる。更に、連動論理部毎の余剰処理能力を定量的に示すことが可能となる。

3.3 連動論理部への処理の割当・管理手法

複数の連動論理部を組み合わせる多数の駅の連動装置の機能を提供するクラウド型連動装置では、複数の連動論理部に処理対象の駅を割り当てる機能が必要となる。また、連動論理部の動作が停止した場合等の処理が正常に実施できない場合には、他連動論理部の余剰セグメントへ処理を動的に再割り当てする機能が必要となる。これらの実行制御機能を担う「コントローラ」を連動論理部と対で設けることで、連動論理部の機能は現在の電子連動装置を踏襲しながらも、多数の連動論理部を連携させる機能を実現する手法を提案する。ここでコントローラは連動論理データを保有し、連動論理部は必要に応じてそのデータをダウンロードする。複数のコントローラが存在する場合は連動論理データを共有し、協調して連

動論理部の計算資源の割り当てを行う。

コントローラによる動的割り当て機能により、連動論理部については必要とする負荷に応じてその数量の増減が可能、すなわちスケラブルとなり、保守による部分的な停止や更新も実現可能となる。

図3にシステム構成を示す。システムは、コントローラと連動論理部のほか、現場機器と接続する現場端末、連動用ネットワーク上の情報を取得し記録する監視端末、進路制御端末、データ書き換え装置から構成される。コントローラ相互間、連動論理部と現場端末間、進路制御端末と連動論理部間はそれぞれネットワークで接続する構成としている。

ネットワークについては、図3では有線としているが、無線による接続も可能である。接続する機器はホワイトリスト形式で共有し、リストにない機器からの接続は無視する。新たな機器の追加時はデータ書き換え端末を通じてリストを更新する。暗号化や認証といったセキュリティ対策が必要であり、認証サーバも設ける。ただし、クラウド型連動装置に特有となるセキュリティ要件はなく、利用するネットワークの種類や特性に応じてセキュリティ要件を定める必要がある。特に無線を使用する場合などはセキュリティ対策の強度を上げる必要がある。

3.4 伝送遅延の影響を小さくする連動論理

現在の電子連動装置等では、連動論理部で扱う現場端末の情報が所定の周期内に全て揃う（同期する）ことを前提に、軌道回路や転つ機等の表示情報等を入力とした論理演算を一定周期で行っている。現場端末からの情報の欠落や遅延が発生した場合、連動論理部の処理が停止するため、伝送遅延や端末の処理時間に対しては相應の性能と信頼性が要求されている。

しかし、連動論理部と被制御駅、連動論理部相互を物理的に離れた位置に配置することを許容するクラウド型

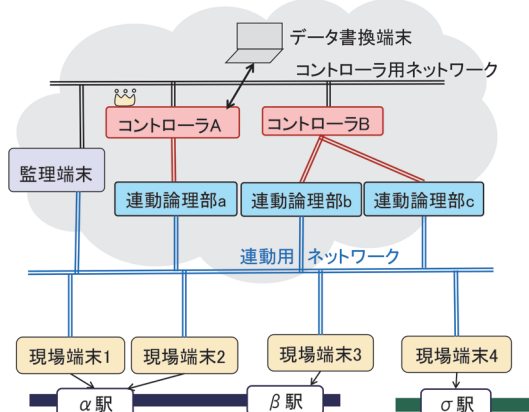


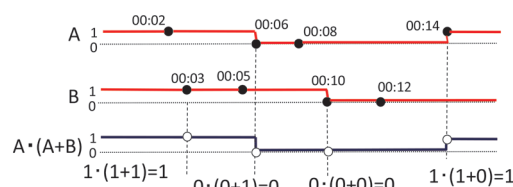
図3 連動論理部間の連携を可能とするシステム構成

連動装置において同様の前提条件を置くことは、ネットワーク設備等のコスト増加の要因となりうる。また、信号機器をネットワークで接続する考え方がより一般化した際に、低コスト化や保守性向上の観点から、有線に限らず、無線等の多様な伝送方式に対応できることが望ましい。このため、連動論理部で扱う現場端末の情報が一定周期内に全て揃うことを前提としない、連動論理部と現場機器の非同期動作を実現し、かつ情報の欠落や遅延が連動装置の機能に与える影響を低減する方法を開発することが必要である。

現在の連動論理は、バイナリ表現の「1」と「0」、リレーの「動作」と「落下」等の2値論理を基本としている。非同期動作では、伝送の遅延による情報の「不定」の状態を考慮する必要があるため、コンピュータを用いた信号装置の黎明期において研究がなされた3値論理による手法を提案する。3値論理は、「不定」状態に対する演算方法の違いにより、C形フェイルセーフ論理（「不定」に基づく演算結果はすべて「不定」）やφ形フェイルセーフ論理がある。後者は入力に「不定」が含まれていても、出力に影響がなければ「0」や「1」に確定することから、「不定」状態による処理の遅延を改善する効果が見込まれる。また、連動論理を構成する論理式には変更を必要としないため、現在の電子連動装置で用いられる結線入力方式やマトリクス方式のデータをそのまま適用することが可能である。

図4に入力A、Bに対する出力A・(A+B)について、入力が揃ってから処理を実施する現在の連動装置をベースとした処理と、3値論理を用いた非同期動作のタイムチャートを示す。ここで図4下図のφは「不定」を表す。従来の手法ではA、Bそれぞれが「0」と確定した「00:10」の段階で出力が確定したが、3値論理では、Aが「0」と確定した「00:08」で出力が得られる。

従来の連動装置の論理演算(2値論理)



3値論理を用いた非同期動作

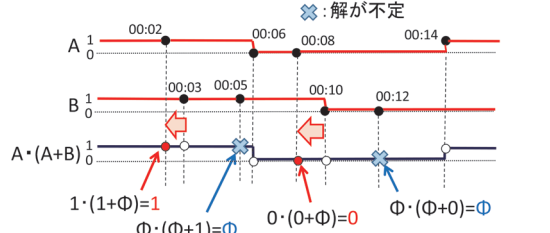


図4 非同期連動処理の例

4. 各構成要素の機能仕様の検討

図3に示したシステムを構成する各部の機能仕様を検討した。上流となるコントローラ、連動論理処理の中心となる連動論理部、そして現場機器と接続される現場端末の順にその検討結果を説明する。

4.1 コントローラの機能仕様

本章では、3.3節で紹介したコントローラの機能仕様について検討した結果について述べる。検討の前提として、コントローラは複数台を設置可能とした。また、コントローラと連動論理部の関係は1:nの関係とした。すなわち各コントローラに対して、その配下となる連動論理部が複数台存在し、逆に連動論理部から見たコントローラは特定の1台となる。

4.1.1 コントローラ相互の死活監視、データ共有機能

コントローラは相互にその死活監視を行う。また、コントローラや連動論理部のリストおよびその状態、連動論理データやセグメント割り当てデータを共有する。この死活監視とデータの共有は同じ枠組みの中で実施する。コントローラのうち、任意の1台をマスターコントローラ、その他をスレイブコントローラと定め、マスターがスレイブに対して順次問い合わせを行う、マスタースレイブ方式でのポーリングを基本的な死活監視の仕組みとした。

死活監視とデータ共有の基本的な流れを図5に示す。マスターコントローラは保有するデータのリストをスレイブコントローラに送る。スレイブは、自身が保有するデータと比較しマスターよりも新しいデータのリストを、自身および配下の連動論理部の状態と合わせてマスターに返送する。マスターからの保有データリストに対して、スレイブが保有していないデータがあった場合は、マスターに別途データの要求をし、スレイブにダウンロードする。逆にスレイブが保有するデータの中にマスターが保有しない情報があれば、返送されたリストに従い、マスターがスレイブに要求を送りダウンロードする。

コントローラ間の死活監視において、マスターからの問

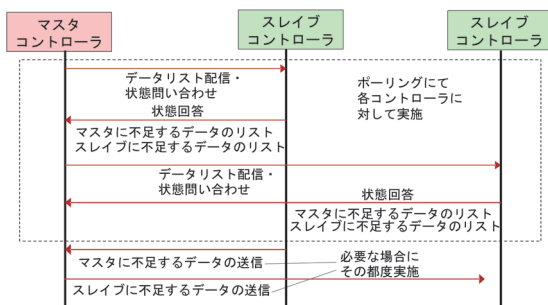


図5 コントローラ総合の死活監視とデータ共有

い合わせに対し、スレイブから反応が一定時間返ってこない場合は、マスターがスレイブの故障と判断する。一方、スレイブにおいてマスターからの問い合わせが一定時間来ない場合は、マスターの故障と判断する。この場合、残されたスレイブの中から新たにマスターを選定する。

4.1.2 マスター権の選出およびマスター統合機能

マスター故障時の新マスター選出にあたっては、選出ルール（例えば、IDが若いサーバを選定する）を決めたうえで、その選出ルールで最優先となるサーバがマスターとして立候補し、それを承認することで、以後そのサーバがマスターとして動作するというのが基本的な考え方である。この新マスター選出にあたって、コントローラが動作していないなどの理由で、一部コントローラからのマスター承認が得られない可能性も想定されるため全コントローラからの承認は必須とはしない。一方、スレイブが停止している間にマスターが交替した場合などで、旧マスターからの死活監視問い合わせが停止している間に別のコントローラからの死活監視問い合わせがある場合は、そのコントローラをマスターとして認識するものとする。

ここでコントローラの故障判定を通信の有無で判断した場合、ネットワークの障害と装置の故障とが区別できない。そのため、ネットワークの障害が発生しコントローラが2つ以上のクラスタに分離した場合は、実際にはマスターが動作し続けているのにも関わらず、マスターから分離されたクラスタにおいて別途マスターが立ち上がることになる。つまりネットワーク分離を考慮すると、再統合の際のマスター統合処理について検討が必要となるが、これらの処理についても手順を定めた。

4.1.3 連動論理部の状態監視

各コントローラは配下の連動論理部のリストを所有しており、そのリストに従い配下の連動論理部に対しポーリングをかける。連動論理部に対して現在のセグメント割り当て状態を送るとともに、連動論理部の自身およびセグメントの状態に対する照会をかける。連動論理部は、それに対して応答をする。

4.1.4 監視端末(コントローラネットワーク上の仕様)

コントローラが連動論理部の死活監視を行うとはいへ、連動論理部はコントローラが停止しても動作し続ける前提としている。しかしコントローラが停止すると、その配下の連動論理部の死活監視機能も停止してしまう。そこでコントローラによる連動論理部の状態監視機能を補う装置として監視端末を設ける。

監視端末はコントローラ用ネットワークと連動論理用ネットワークの双方に接続し、連動論理部の死活監視を行うものである。仮にコントローラが停止しても、監視端末が連動論理部の状態を取得し、他のコントローラにその情報を送ることで、連動論理部が停止した場合でもそれを検出することが可能となる。

コントローラが停止している場合にその配下の連動論理部に新しいセグメントを割り当てたり、すでに割り当て済みセグメントの解放を行ったりすることはできないが、さらにその連動論理部の一部が停止した場合にはその代替となる新しいセグメントの割り当てを他のコントローラ配下の連動論理部に行うことが可能となる。

監理端末が全ての連動論理部を監視できるとは限らないため、監理端末についても複数台配置して、それぞれが、担当範囲の連動論理部の状態を監視する形をとる。

4.2 連動論理部の機能仕様

連動論理部は、連動用ネットワークを介して、現場端末からの表示情報を受信し、各駅の連動論理処理を実行し、現場端末へ制御情報を送信する。クラウド型連動装置における連動論理部の機能は、大きくセグメント機能と連動論理処理機能に分けられる。

連動論理部のセグメント機能は、上位のコントローラの持つセグメント割り当て機能と連動論理部の状態監視機能によってセグメント割り当て状態を受信し、連動論理部の計算資源を割り振るものである。図6に、1台の連動論理部全体の状態遷移図を示す。現在の一般的な電子連動装置では、連動論理データの変更時に、連動論理部の再起動を行うのに対し、クラウド型連動装置では連動論理部自体の再起動は行わず、定常処理中に駅単位で初期化を行うのが特徴である。

連動論理処理機能については、駅単位に割り振られた計算資源の中で、現場端末から受信した表示情報を解析し、連動論理を適用し、制御情報を生成する、連動装置の中核となる機能である。クラウド型連動装置においては、現場端末と連動論理部が非同期で動作を行う非同期連動処理に対応している点が特徴である。

4.2.1 セグメント機能の詳細

セグメント機能においては、セグメント間で相互に影響する部分を最小化することが安全性、アベイラビリティの観点で重要である。このため、計算資源の分割と保護の考え方について整理を行った。

大規模な駅等では、1つの駅の処理に複数のセグメン

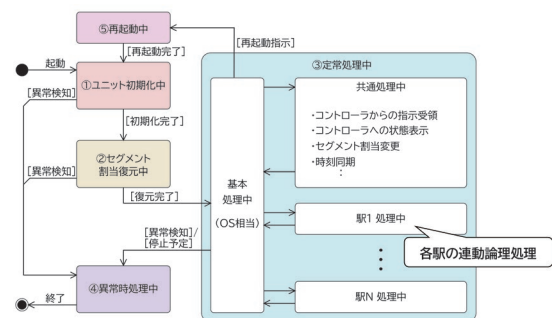


図6 連動論理部の状態遷移図

トを使用する。このため、1つの駅用に割り当てられたセグメントの組を「タスク」として定義し、同一のタスクに所属するセグメントに対し、コントローラ側でコンテキストIDを付与する方法を採用した。なお、各セグメントで状態の復元、保存を行うため、同一タスクに属するセグメントが連続している必要はない。

連動論理部は、OSに相当する基本機能によって、セグメント単位の一定時間毎にタスクを切り替えながら実行する。各処理は、時間内に完了することを前提とするが、異常の発生により完了しない場合には、基本機能により処理時間に応じて強制的にタスク切り替え（プリエンプション）を行う。当該タスクは異常検知状態となり入出力は停止する。ただし、現場機器における安全は現場端末側で確保する仕組みとなっているため問題はない。

計算資源のうちメモリ（不揮発性のROMと揮発性のRAM）については、セグメント単位で独立した領域を固定的に確保し、他のタスクからはアクセスできないように保護する。なお、クラウド型連動装置は連動論理データを変更する際に、連動論理部自体の再起動は行わない。このため、クラウド型連動装置では、RAM上のデータが主体であり、ROM上のデータはコントローラが停止中でも連動論理部を起動可能にするためのバックアップとして機能する。

図7にセグメント（タスク）の初期化から解放までの状態遷移を示す。各タスク内で異常を検知した場合には、連動処理を停止し、セグメントを解放する。この解放は、新たにセグメント割り当てが可能な状態にすることを意味し、データの消去等は行わない。これは故障原因究明等のために状態保持できるようにするためである。

4.2.2 非同期連動処理の詳細

非同期連動処理については3.4節で紹介したが、非同期連動処理をフェイルセーフCPU上で実装できるよ

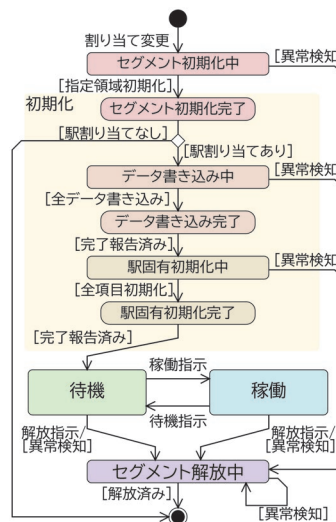


図7 セグメントの状態遷移図

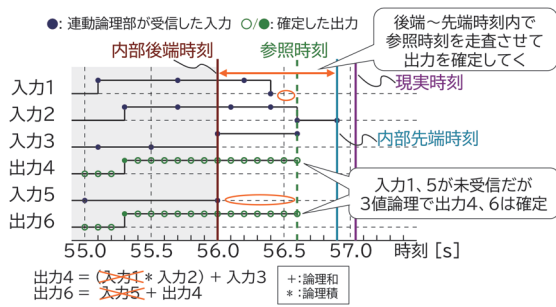


図8 連動内部時刻の定義と出力確定手順

う、時間の扱いについて具体化を行った。非同期連動処理では、現場機器の状態が変化した時刻、その情報が連動論理部で受信された時刻、その情報を使って制御出力を決定する時刻が、それぞれ異なる。このような時間の概念に対処するために、連動論理部内部の時間体系を定義した。図8にその概念を示す。図8は、現実時刻、内部先端時刻、参照時刻、内部後端時刻の4つの時刻を示しており、現実時刻以外は、タイムスタンプに基づく時刻である。内部後端時刻は、全ての入出力が確定している時刻であり、これより過去は、既に全ての状態が確定しているため再計算が不要である。内部先端時刻は、連動論理部が受理している最も現実時刻に近い入力の時刻であり、これより未来は、情報不足で状態の確定が期待できないため計算が不要である。このように、連動内部時間を有限の範囲に設定することで、ある現実時刻において、不要な処理の実行を避けることができる。参照時刻は、連動論理部が連動論理の計算を行う連動内部時間における時刻である。連動論理部は、1処理周期のタスクに割り当てられた時間の許す限り、内部後端時刻と内部先端時刻の間で参照時刻を走査させながら、出力を確定させる。また、仮想的なリレー単位でタイムアウト判定を行う仕様とした。

4.3 現場端末の仕様

現場端末は、軌道回路や信号機、電気転つ機などの現場機器の制御や表示情報の取得を行う。そのため、①制御情報の受信、②優先度に従った制御情報の処理、③制御情報の照査、④現場機器の制御、⑤現場機器からの表示の取得と出力に関する処理機能を備える。クラウド型連動装置では、信号機器室や器具箱等に現場端末を配置して多数の現場機器を集中制御する形態と、現場機器内やその近傍に現場端末を配置して1台～数台の現場機器を制御する分散的な形態のいずれも取りうる。したがって、機能仕様は両形態に適用できるものとした。

現場端末に対し、複数の連動論理部から出力される制御情報に不一致があった場合の異常検出の機能については、4.1節において紹介したコントローラによる連動論

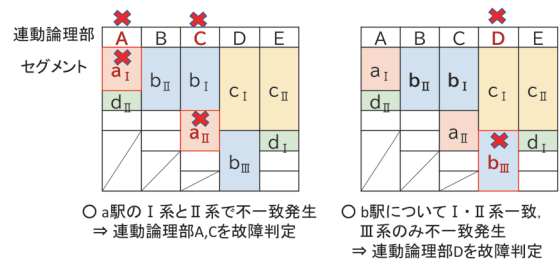


図9 監理端末による連動論理部の不良判定

理部の死活監視機能を補う監理端末に設けた。

4.3.1 制御情報の受信、優先度に沿った制御情報の処理

連動論理部から送信された制御情報は、現場端末ですべて受信する。一定時間周期で処理を行う現場端末は、処理周期のはじめに受信した制御情報から自端末が属する駅の制御情報の有無を判定し、該当する制御情報が含まれる場合は表示情報の出力を行う。また、端末配下の現場機器に対する制御情報が含まれる場合は、制御情報の照査を行う。また、上記のいずれにも関係しない制御情報については破棄する。

4.3.2 制御情報の照査と現場機器の制御

通常、1つの連動論理データは複数台の連動論理部で演算を行うため、現場機器に対する制御情報は複数の連動論理部から送信される。複数の連動論理部から送信された制御情報のうち、制御情報に付与された「優先度」が最も高いものを現場端末側で選択して制御に用いる。

また、現場端末は複数の連動論理部からの制御情報を受信し、情報の不一致や不着が検出された際には監理端末に通知する。各連動論理部の演算や制御出力のタイミングは非同期であり、かつネットワーク上の遅延の影響を各制御情報が受けるため、現場端末への制御情報の到達は同期しない。そのため、情報の不一致や不着の検出は制御情報のタイムスタンプ時刻に基づき行われる。また、情報の不一致や不着は監理端末に伝達する。

4.3.3 監理端末（連動用ネットワーク上の仕様）

監理端末は、コントローラによる死活監視を補うものであるが、連動用ネットワークにおいては動作ログの取得とその解析による連動論理部の動作判定を行う。さらに現場端末から送信される連動論理部からの制御情報の不着や不一致に関する情報を受信する。監理端末はセグメント割り当てデータを用いて、制御情報の不着や不一致が発生した論理部とセグメントを特定する(図9)。

こうして異常を検出した際に、これを取得した監理端末がコントローラ用ネットワークを通じて連動論理部の動作状態をコントローラに共有する。

5. クラウド型連動装置の実現性の検討

5.1 コントローラ機能仕様の検証

コントローラの機能について、モデル検査手法を利用して機能検証を実施した。モデル検査とは、システムを記述したモデル（一般的に状態遷移モデルとして記述される）の性質を計算機により網羅的に調べる手法の総称である。古典的なモデル検査手法ではあるが、元々が通信プロトコルの検証手法として開発が進められた SPIN⁸⁾ を使用して、コントローラ機能、例えば死活監視の問い合わせ、マスタが停止したときの新マスタの再選定、さらにはネットワーク分離時やマスタ統合時の振る舞いについて検証を実施し、仕様に問題ないことを確認した。

5.2 非同期連動処理

連動論理部における非同期連動処理に特化したシミュレータを作成し、その実現性を確認した。シミュレータでは伝送遅延の発生をシナリオ形式で設定可能とし、実際の条件設定でのシミュレーションが可能である。

シミュレーション事例として列車追跡機能の例を示す。車両追跡論理は、車両の移動に伴う隣接軌道回路の状態変化を参照することで、軌道回路の状態を不正落下と不正上を含む5状態で表現するものである。ここで、隣接軌道回路の落下から当該軌道回路の落下までの時間（進入時隔）が、既定値（ここでは0.9秒）未満の場合に、車両による短絡ではないと判断して不正落下とする論理があるが、この時間が0.5秒の不正な時に当該軌道回路の落下の情報が1秒遅延しても、見かけの時間によらず不正落下を誤りなく判断できることを確認した。このように、非同期連動論理処理が時間の判定が必要な論理を含めて問題なく適用できることを確認した。

5.3 全体構成のシミュレーション

クラウド型連動装置のコントローラ、連動論理部、現場端末、監理端末の機能を模擬するシミュレータを構築した。シミュレータは、コントローラや連動論理部の停止、ネットワークの分断や統合に伴うマスタ選定やセグメント再割り当てに関する動作のほか、連動論理部内の3値論理に基づく論理演算、非同期制御、制御情報と表示情報の授受、現場端末における制御情報の照査、現場機器の制御模擬（シナリオデータや制御情報に基づいた表示出力、制御情報のログ記録等）、監理端末による連動論理部停止の検出に関する機能と動作を模擬する機能を備える。また、ネットワーク上の通信遅延に対する動作への影響についても評価する機能を持つ。

セグメント再割り当て動作に関しては以下のとおりである。コントローラ配下の連動論理部の停止の検出と、

マスタコントローラによる稼働中の連動論理部上へのセグメントの割り当てを行い、セグメント割り当てデータを各コントローラに配信し連動論理部上で動作を開始する、一連の動作がシミュレータ上で行われている事を確認した。

6. まとめ

連動装置の論理処理をクラウド環境上に構築するクラウド型連動装置について検討した。提案したシステムはコントローラ・連動論理部・現場端末の3階層からなる。各連動論理部の処理周期をセグメントと呼ばれる単位に分割し、セグメント毎に連動論理処理を独立して行わせる。また、連動論理データはコントローラで保有し、処理対象の動的割り当てと連動論理データのアップロードをコントローラで行う。また、同一のデータを複数の連動論理部で処理させ、その結果を現場端末に集めることで連動論理処理の多重化を実現する。必要な処理量に応じて連動論理部増やせるスケーラブルな構成と連動論理処理の独立性が特徴となっている。また、伝送遅延の対策として非同期論理処理についても提案した。

なお、本報告では連動装置を対象としているが、個々の階層内で検討された処理方法を活用することで、他のシステムへの適用も可能であると考えられる。

連動装置のクラウド化の最終形は、連動論理部に汎用CPUを使う技術を確認することで実現すると考えている。この場合、連動論理部そのものがクラウド上に仮想化されると考えられるが、汎用CPUを用いてフェイルセーフを確保する技術については、引き続き検討を行う。

文献

- 1) 奥谷民雄, 島添敏之: 鉄道信号用線区集中電子連動システムの開発と評価, 電気学会論文誌D, Vol.119, No.11, pp.1307-1314, 1999
- 2) 中野浩之: 加古川線 CTC 化 (線区集中連動方式), 鉄道と電気技術, Vol.15, No.11, pp.41-45, 2004
- 3) 大野聡: 九州新幹線 (博多・新八代間) 集中連動方式の開発と実用化, 鉄道と電気技術, Vol.24, No.8, pp.11-16, 2013
- 4) 西山淳, 国藤隆: ネットワーク信号制御システム—システム概要とモニターラン試験について—, 鉄道と電気技術, Vol.17, No.4, pp.28-31, 2006
- 5) A. Kaldenbach.: Die Digitale LST bei der DB Netz AG Eine Einführung in die Digitale Stellwerkstechnik, Fachvortrag BF Bahnen, 2019.
- 6) Siemens: Trackguard® Simis Interlocking as a Service (SIaaS), <https://www.mobility.siemens.com/ch/en/portfolio/>

- rail/automation/interlocking-systems.html (参照日：2020年8月17日).
- 7) 遠山喬, 福本聡：ネットワークを介した多数決を利用した鉄道信号システムの基礎的 FMEA, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.120, No.288, DC2020-67, pp.43-48, 2020
- 8) G. J. Holzman. : The SPIN Model Checker, Addison-Wesley, 2004.

タブーサーチを用いた整備作業ダイヤ自動作成手法の開発

小久保 達也* 加藤 怜* 中東 太一*

Development of Automatic Calculation Method for Maintenance Worker Scheduling Using Tabu Search

Tatsuya KOKUBO Satoshi KATO Taichi NAKAHIGASHI

Maintenance worker scheduling is a daily schedule for each worker group to perform inspection and maintenance work such as cleaning of rolling stock during a turnaround operation of a superior trains at a terminal station. Since it varies from day to day according to changes in daily train timetables and rolling stock operations, it is required to be created for each day. We have proposed a method for automatic creation of maintenance worker schedules with tabu search, one of meta-heuristics. In this paper, to confirm the effectiveness of the proposed method, we compared an actual schedule with schedules by proposed method. The results indicated that the proposed method could generate a stable solution within a practical computation time of 3 minutes, regardless of the size of the train schedule.

キーワード：整備作業ダイヤ、車両運用、スケジューリング、メタヒューリスティクス、タブーサーチ、混合整数計画法

1. はじめに

ターミナル駅において、特急列車等の優等列車を折返し運用する際には、清掃や点検等の整備作業を実施する必要がある。整備作業は、複数グループ（以下、組）に分かれて実施されるが、各組が1日に担当する列車の整備作業計画は整備作業ダイヤにより示される。整備作業ダイヤは、日々異なる列車ダイヤ・車両運用に対応するため、各日について作成される。現在、整備作業ダイヤは、熟練した計画作成担当者の手作業により作成されているが、整備作業員の労働負荷の観点での制約条件が複数存在するため、1日分の計画作成に数時間かけており、多大な労力を要している。したがって、整備作業ダイヤの自動作成による省力化が求められている。

整備作業ダイヤの自動作成に関する研究は、著者らの知る限り報告されていない。整備作業ダイヤの作成では、割り当てる整備作業の開始時刻や作業時間が整備作業ごとに異なること、組数および各組の始終業時刻、休憩時間や固定業務時間が所与等の特有の条件を考慮する必要がある。整備作業ダイヤ作成問題に類似している問題として、人員割当問題、生産スケジューリング問題、乗務員スケジューリング問題等が挙げられる。人員割当問題は、割り当てる作業の時間が均一であり、各人員の勤務時間も一律に固定で与えられている¹⁾²⁾。生産スケジューリング問題は、各作業が処理される機械の順序が決まっており、各機械における作業の時間が異なるのみであり、目的関数は一般に作業の完了時刻の最小化となる³⁾。乗

務員スケジューリング問題は、作業員（乗務員）の始終業時刻が定められておらず、勤務に自由度がある⁴⁾。以上より、既存の研究成果を本問題へ適用するのは困難と考えられる。

本問題は、実用性の観点から、計算時間が3分程度以内であること、自動作成のために設定しなければならないパラメータの数が少ないこと、同じ入力であれば同じ整備作業ダイヤを出力すること等の要件がある。また、入力データによっては、すべての制約条件を満たす実行可能解が存在しない可能性が考えられる。さらに、実際に運用されている整備作業ダイヤ（以下、現行運用）を分析した結果、制約条件は、緩和不可能な制約充足の優先度が高い制約条件と緩和可能な制約充足の優先度が低い制約条件とに分かれていることが明らかになった。

そこで、前述した要件に基づき、メタヒューリスティック手法の1つであるタブーサーチ（以下、TS）を適用し、実規模の問題に対して、制約条件の優先度を考慮した整備作業ダイヤを短時間で自動作成可能な手法（以下、提案法⁵⁾⁶⁾⁷⁾を開発した。提案法の有効性を確認するため、現行運用および混合整数計画法（以下、MIP）によって作成した整備作業ダイヤとの比較を行った⁷⁾。

2. 整備作業ダイヤの概要

折返し列車のうち、整備作業を実施する必要のある列車はあらかじめ定められており、整備作業の開始時刻は列車の到着時刻により決まる。各整備作業にかかる時間は、整備作業の内容に応じて決められている。整備作業を行う作業員は組ごとに分かれて、それぞれ別の列車の

* 信号技術研究部 運転システム研究室

整備作業を担当する。1日に整備作業を行う組数は所与であるが、各組は勤務時間帯（AM・PM）ごとに分類されており、この分類を「組群」と呼ぶ。

整備作業ダイヤを作成する際に使用する入力データを図1に示す。図1中の上を示したテーブルは、当該日に整備作業が必要な列車を表している。「2M」等は列車番号と対応した列車の整備作業であり、番線と作業時間帯は所与である。図1中の下を示したテーブルは、各組が作業可能な時間帯を表している。「休」「所」は休憩や会議等の所定外業務（以下、固定作業）であり、その時間帯は所与である。固定作業に必要な時間を「固定作業時間」と呼ぶ。また、「始」は始業後準備時間、「終」は終業前準備時間、「中」は中断準備時間（休憩・所定外業務前に必要な準備時間）、「再」は再開準備時間（休憩・所定外業務後に必要な準備時間）であり、それぞれ必要な時間は所与である。始業後準備時間と終業前準備時間を「始終業準備時間」、中断準備時間と再開準備時間を「固定作業準備時間」と呼ぶ。

図1の入力データをもとに作成された整備作業ダイヤを図2に示す。図1は、組群が2つ、組が4つ、整備作業が2M～28Mの14列車の例であり、図2のように、所与の組に対して、全ての整備作業を割り当てる必要がある。作成担当者は、図1のうち、準備時間と固定作業時間を除いた時間帯で、以下に述べる各種勤務条件を満たしながら、各組のいずれかに整備作業を割り当てる。まず、始業時刻・固定作業の終了時刻が早い組順に最初の整備作業、終業時刻・固定作業の開始時刻が遅い

組順に最後の整備作業を割り当てる。また、ある整備作業から次の整備作業へ移行する際に作業番線が変更となる場合には、「番」で記載した番線移動時間が発生する。さらに、整備作業時間または番線移動時間の終了時刻から、次の整備作業時間の開始時刻までに一定時間を確保できず、連続で整備作業をしたとみなせる場合（以下、連続作業）には、連続作業後から次の整備作業への番線移動時間後に、トイレ休憩等に該当する「加」で記載した加算時間を確保する必要がある。

3. 整備作業ダイヤ作成問題

3.1 整備作業ダイヤのグラフ表現

本研究では、整備作業ダイヤをノードとアークを用いたグラフ表現を応用して表現することとした。整備作業ダイヤをグラフ表現した例を図3に示す。ノードは、各整備作業に対応して設定する「整備作業ノード」、各組に対応して設定し、勤務開始を示す「始業ノード」、勤務終了を示す「終業ノード」、各組の各固定作業に対応して設定する「固定作業ノード」の4種類を設ける。また、各ノードには、「開始時刻」および「終了時刻」を設定する。整備作業ノードは対応する整備作業の開始時刻および終了時刻、始業ノードは開始時刻および終了時刻ともに対応する組の始業時刻、終業ノードは開始時刻および終了時刻ともに対応する組の終業時刻、固定作業ノードは対応する固定作業の開始時刻および終了時刻を設定する。アークは任意の2つのノードにおいて、一方

整備作業が必要な列車

番線	07:00	10:00	13:00	16:00	19:00
1		8M			26M
2	4M	6M 12M 16M		22M	
3			14M	20M	24M
4	2M	10M	18M		28M

2M等 : 整備作業

各組が作業可能な時間帯

組群	組	07:00	10:00	13:00	16:00	19:00
1	1	始		中 休 再	終	
	2	始		中 所 再	終	
2	3		始		中 休 再	終
	4		始		中 所 再	終

↑ : 出退勤時刻
 休 所 : 休憩・所定外業務(固定作業)
 始 終 : 始終業前後の準備
 中 再 : 固定作業前後の準備
 □ : 整備作業が可能な時間帯

図1 整備作業ダイヤの作成に必要な入力データの例

組群	組	07:00	10:00	13:00	16:00	19:00
1	1	始 2M 番	6M 12M 中 休 再 22M 終			
	2	始 4M 番	8M 中 所 再 24M 終			
2	3		始 10M 番 16M 番 加 20M 中 休 再 26M 終			
	4		始 14M 18M 中 所 再 28M 終			

↑ : 出退勤時刻
 2M等 : 整備作業
 休 所 : 休憩・所定外業務(固定作業)
 始 終 : 始終業前後の準備
 中 再 : 固定作業前後の準備
 番 : 整備作業間に必要な番線移動
 加 : 連続で作業した場合に必要なトイレ休憩等

図2 図1の入力データに基づいて手作業で作成された整備作業ダイヤの例

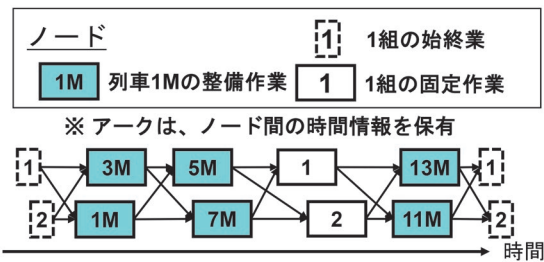


図3 整備作業ダイヤのグラフ表現の例

の開始時刻が、もう一方の終了時刻である場合に、後者のノードから前者のノードに向けて張る。ただし、いずれかのノードから始業ノードに向けたアーク、終業ノードからいずれかのノードへ向けたアーク、始業ノード同士のアーク、終業ノード同士のアーク、異なる組の固定作業ノード同士のアークは張らない。アークは、ある作業の次に実施可能な作業を意味し、実施可能な場合にアークが張られることになる。また、各アークは、「作業間の時間」の情報を保有する。これは、接続した2つのノード間の間合い時間を意味し、「接続先ノードの開始時刻—接続元ノードの終了時刻」で計算する。本研究では、番線移動時間、各準備時間、加算時間の必要時間が不足している場合においても、アークを設定することで、後述する優先度の高い制約条件を充足するため、優先度の低い時間に関する制約条件の違反を許容可能なグラフとした。

3.2 制約条件

制約条件は、「割り当てに関する条件」、「作業本数に関する条件」、「時間に関する条件」の大きく3種類に分けられる。以下に、制約条件を示す。

(1) 割り当てに関する条件

- ・制約条件①：作業割り当て制約
対象の全作業にいずれかの組を1組のみ割り当てる。
- ・制約条件②：作業割り当て順序制約
始業時刻・固定作業終了時刻が早い組の順に、直後の最初の作業を割り当てる。また、終業時刻・固定作業開始時刻が遅い組の順に、直前の最後の作業を割り当てる。なお、この制約が適用される固定作業と、適用されない固定作業がある。

(2) 作業本数に関する条件

- ・制約条件③：作業本数上限制約
各組が1日で作業可能な本数は設定値以内とする。
- ・制約条件④：組群内作業本数差上限制約
ある組群内における各組の作業本数の差は設定値以内とする。
- ・制約条件⑤：組群間作業本数差上限制約

ある組群間の各組の作業本数の差は設定値以内とする。

(3) 時間に関する条件

- ・制約条件⑥：番線移動時間制約
作業間で番線移動が発生する場合は、移動のために必要な時間を確保する。
- ・制約条件⑦：始業・終業準備時間制約
各組の始業後および終業前に必要な準備時間を確保する。
- ・制約条件⑧：固定作業準備時間制約
各組の固定作業時には、前後に中断準備時間および再開準備時間を確保する。
- ・制約条件⑨：連続作業時間制約
作業間で十分な間合い時間がなく一定回数連続して作業した場合には、番線移動時間に加え加算時間を確保する必要がある。具体的には「番線移動が終了した時刻から次の作業の開始時刻までの間合い時間が〇分以下で、連続して作業を△回行った場合、次の作業後に□分確保する」といった条件の形で定義される。また、条件は複数種類ある場合がある。

これらのうち、緩和不可能な制約充足の優先度が高い制約条件は、割り当てと作業本数に関する各種制約条件①～⑤であり、緩和可能な制約充足の優先度が低い制約条件は、時間に関する制約条件⑥～⑨である。現行運用を分析した結果、優先度が高い制約条件の充足が、実用面で重要であることが明らかとなっている。

3.3 目的関数

本問題では、組数、各組の始業時刻は所与であるため、定められた組数と時間内で、整備作業員の労働負荷の均等や低減を考慮して、作業を割り当てる必要がある。そこで、負荷の均等を目的とした各組の作業本数分散と、負荷の低減を目的とした組全体の番線移動時間、加算時間の重み付き和を目的関数の評価値とし、最小化する。

また、先述のように、入力データによっては、すべての制約条件を満たす実行可能解が存在しない可能性が考えられる。そこで、各制約条件の設定値からの逸脱量をもとにペナルティを設定し、重み係数をかけた値を目的関数値に加算する。提案法における各ペナルティは、制約条件①は未割当整備作業本数、制約条件②は作業順序を違反する組合せ数とする。制約条件③～⑤、⑦～⑨は、各制約条件の設定値から大きく違反することを抑制するため、設定値からの逸脱量の二乗和とする。また、番線移動時間の制約条件⑥は、最低限必要な番線移動時間を確保するため、設定値からの逸脱量の四乗和とする。さらに、制約条件には必ず充足すべき項目と緩和可能な項目があるため、各ペナルティに重み係数をかけ、制約

条件の優先度を考慮可能とする。具体的には、優先度の高い制約条件①～⑤の重みを非常に大きな値となるように設定する。以下に目的関数を示す。

$$\min \left\{ w_1 t_1 + w_2 t_2 + w_3 t_3 + \sum_{n=1}^9 p_n e_n \right\} \quad (1)$$

t_1 : 作業本数分散

t_2 : 合計番線移動時間

t_3 : 合計加算時間

w_1, w_2, w_3 : 各項に対する重み係数 ($w_1 + w_2 + w_3 = 1$)

e_n : 制約条件 n のペナルティ ($n = 1, \dots, 9$)

p_n : 各ペナルティに対する重み係数

4. 整備作業ダイヤ自動作成問題へのタブーサーチの適用

4.1 タブーサーチの概要

提案法で適用した TS は、Fred Glover が組合せ最適化問題を解くために提案したメタヒューリスティック手法の一種である⁸⁾。TS は、直近で探索した解を記録するタブーリストを用いて探索を行う。記録する解の個数は、事前に設定したタブーリスト長によって決まり、タブーリストに含まれる解に遷移することはできない。TS は、制約を満たす近傍解の中でタブーリストに含まれない目的関数値が最も良い解に、現在まで探索した中で最も目的関数値が良い解（以下、最良解）より改悪でも移動することで、多峰性のある目的関数でも良質な解を探索することが可能である。また、メタヒューリスティック手法の性質上、必ずしも最適解が得られる保証はないが、一般的に、大規模問題に対して短時間に良質な解を生成可能であることが知られているため、多くの分野で幅広く使われている手法である。

提案法では、一般に効率的な探索が可能と知られているアスピレーション基準を適用する^{8) 9)}。アスピレーション基準とは次時点の探索点の候補の中で、より目的関数値が良い点は、タブーであっても採用するというものである。

本研究では、タブーリストに入れる要素は 4.3 節で述べる近傍解生成法によって変更される整備作業のみとする。加えて、最良解より目的関数値が良い近傍解は、変更される整備作業がタブーリストに含まれていても採用する。

提案法における TS の手順を以下に示す。

- Step.1 初期解を生成する (4.2 節参照)。生成した初期解を暫定解とする。探索回数 $iter = 1$ とする。
- Step.2 暫定解から近傍解を生成する (4.3 節参照)。ただし、近傍解生成によって変更される整備作業がタブーリストに含まれる場合、最良解よりも

目的関数値が高い場合は、近傍解として生成しない。

- Step.3 近傍解の中で、目的関数値が最も良い解を選択し、暫定解とする。近傍解生成によって変更された整備作業をタブーリストに入れる。
- Step.4 $iter$ が事前に設定した $iter_{max}$ に達したならば最良解を出力し終了する。そうでなければ、 $iter = iter + 1$ とし、Step.2 へ戻る。

4.2 初期解生成法

以下に、初期解生成法の手順を示す。なお、事前に、各組に「現在ノード」を設定する。現在ノードとは、各組に割り当てられたノードの中で最も終了時刻が遅いノードである。

- Step.1.1 全ての組に対し対応する始業ノードを割り当て、全ての組の現在ノードを初期設定する。
- Step.1.2 全ての組の中から、現在ノードの終了時刻が最も早い組を選択し（ただし、現在ノードが終業ノードの組は選択しない）、現在ノードからのアークが接続している整備作業ノードの中で、いずれの組にも割り当てられていない、かつ最も作業間の時間が短い整備作業ノードを抽出する。抽出できない場合は、Step.1.5 へ。
- Step.1.3 抽出した整備作業ノードの終了時刻が、Step.1.2 で選択した組に対応するいずれか、かつ未割当の固定作業ノードの開始時刻を過ぎる場合は、Step.1.4 へ。Step.1.2 で選択した組に対応する終業ノードの開始時刻を超過する場合は、Step.1.5 へ。それ以外の場合、抽出した整備作業ノードを割り当て、現在ノードを更新し、Step.1.7 へ。
- Step.1.4 固定作業ノードを割り当て、現在ノードを更新し、Step.1.6 へ。
- Step.1.5 終業ノードを割り当て、現在ノードを更新する。
- Step.1.6 全ての組の現在ノードが終業ノードとなった場合、現在の割り当てを初期解とし、式 (1) に基づく目的関数値を算出し、処理を終了する。さもなければ、Step.1.2 へ戻る。

4.3 近傍解生成法

提案法では、全ての評価値の改善と割り当て制約を除く全ての制約条件の解消を目的として、3つの近傍解生成法を構築した。近傍解生成法①は、時間に関する評価値と時間に関する制約条件の違反の解消に寄与する。一方で、改善作業本数は変更しないため作業本数分散の評価値の改善と作業本数に関する制約条件の違反の解消には寄与しない。また、近傍解生成法②と③は全ての評価値の改善と割り当て制約を除く全ての制約条件の解消に

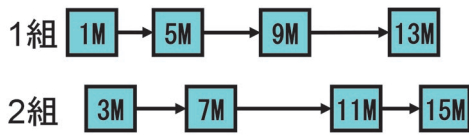


図4 暫定解の例

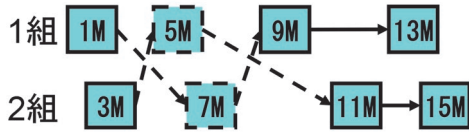


図5 1-1 交換の例

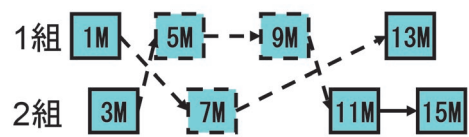


図6 2-1 交換の例

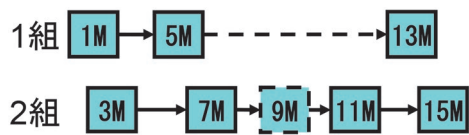


図7 1-0 挿入の例

寄与する。複数の近傍解生成法を用いて、広範囲に探索することで、最良解を得る可能性を向上させる。近傍解生成のもととなる暫定解の例を図4に示す。

近傍解生成法①：1-1 交換

ある組の1つの整備作業ノードと、他の組の同時時間帯の交換可能な1つの整備作業ノードを入れ替える。図5にこの方法で作成した近傍解の例を示す。

近傍解生成法②：2-1 交換

ある組の連続した2つの整備作業ノードと、他の組の同時時間帯の1つの整備作業ノードと入れ替える。図6にこの方法で作成した近傍解の例を示す。

近傍解生成法③：1-0 挿入

ある組の1つの整備作業ノードを、他の組の同時時間帯の作業間に挿入する。図7にこの方法で作成した近傍解の例を示す。

5. ケーススタディ

5.1 試算条件

提案法の有効性を確認するため、3日分の実際の列車ダイヤと車両運用を用いて検証を行った。具体的には、同日の現行運用とMIPによって作成した整備作業ダイヤとの比較を行った。なお、MIPの定式化の詳細については、文献7を参照されたい。

今回試算する事例における整備作業が必要な列車本数と組数は、Case.1が99本で7組（小規模）、Case.2が120本で8組（中規模）、Case.3が147本で9組（大規模）である。また、各日共通で以下のような条件を設定した。

- 作業本数上限：18本
- 組群内作業本数差上限：2本
- 組群間作業本数差上限：2本
- 各準備時間：10分～20分
- 番線移動時間：0分～3分
- 連続作業制約1：5分空かずに2連続で整備作業した場合、5分加算
- 連続作業制約2：8分空かずに5連続で整備作業した場合、10分加算

ケーススタディにおける目的関数の各項の重み係数を表1に示す。目的関数における各ペナルティに対する重み係数は、制約充足の優先度が低い制約条件⑥～⑨よりも、制約充足の優先度が高い制約条件①～⑤を優先的に満たすような整備作業ダイヤを作成することを指向して設定した。また、TSのパラメータは、タブーリスト長50、探索回数5,000回で計算終了とした。また、実用上の要件として、180秒以内での自動作成が求められているため、全ての試算において、計算時間180秒で打ち切りとした。計算には、PC（CPUがIntel Core i7-8700（3.20GHz）、メモリが64GB）を用いて、TSを用いた提案法の開発にはC言語（Microsoft Visual Studio 2019）を使用し、MIPの求解には、数理最適化ソルバーGurobi Optimizer 9.5.1¹⁰⁾を使用した。

5.2 試算結果

各Caseにおける現行運用（Ⅰ）と、提案法（Ⅱ）、MIP（Ⅲ）による試算結果の目的関数値、各評価値、各ペナルティを表2に示す。表2において、提案法の目的関数の各評価値と制約充足の優先度が高い制約条件の

表1 ケーススタディにおける目的関数の各項の重み係数⁷⁾

w_1	w_2 [min.]	w_3 [min.]	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
0.9	0.05	0.05	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100	100	100	100

表2 各 Case の現行運用 (I) と、提案法 (II), MIP(III) による試算結果の目的関数値, 各評価値, 各ペナルティ⁷⁾

Case.	目的関数値	t_1	t_2 [min.]	t_3 [min.]	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9
1-I	708.67	0.69	131	30	0	0	0	0	0	0	1	0	6
1-II	506.86	0.12	100	35	0	0	0	0	0	0	1	0	4
1-III	506.66	0.12	96	35	0	0	0	0	0	0	1	0	4
2-I	5613.65	1.00	165	90	0	0	0	0	0	2	1	19	34
2-II	17313.05	1.00	168	75	0	0	0	0	0	5	104	0	64
2-III	3711.43	0.75	135	80	0	0	0	0	0	3	5	0	29
3-I	14917.35	0.67	200	135	0	0	0	0	0	0	1	92	56
3-II	13912.05	0.67	164	65	0	0	0	0	0	5	20	29	85
3-III	916517.35	0.67	200	135	1	2	1	2	3	7	1	76	81

各ペナルティを赤字で記載する。

現行運用と提案法により生成した整備作業ダイヤを比較すると、Case.1 では、提案法により合計番線移動時間は31分短縮し、合計加算時間は5分増加した。Case.2 では、提案法により合計番線移動時間は3分増加したが、合計加算時間は15分短縮した。Case.3 では、提案法により合計番線移動時間は36分、合計加算時間は70分短縮した。以上より、提案法は現行運用と比べて、番線移動時間、加算時間のいずれもほぼ同等か低減できていることから、提案法により整備作業員の負荷を低減した整備作業ダイヤが作成できることを確認した。

提案法は、全ての Case において、実用的な計算時間約 60 秒で最良解を得た。また、提案法は、全ての Case において、優先度の高い制約条件①～⑤に対応するペナルティ項が全て 0 となり、実用的な解が得られた。本問題は、計算時間が3分程度であること、優先度の高い制約条件①～⑤を充足することが、実用面で最重要であるため、提案法は、短時間で実用的な整備作業ダイヤを作成可能であるといえる。

MIP は Case.1, 2 では現行運用、提案法と比べ目的関数値が下回る良質な解を得ているものの、すべての Case において、180 秒の計算時間では最適解を得ることはできなかった。特に、Case.3 では目的関数値が明らかに劣っているが、180 秒の段階では暫定解の精度を表す双対ギャップが極めて大きいことから、明らかに計算時間が不足していることを確認した。また、優先度の高い制約条件①～⑤を違反しており、実用的な解が得られていない。すなわち、MIP は最適解を得られる保証があるものの、特に整備作業数が多い日に対しては、実用上求められる数分程度の計算時間では、充足すべき制約条件を必ずしも全て満たすことができず、実用的な解を算出することができない可能性がある。

以上より、提案法は、整備作業数が多い日でも安定して短時間で、優先度の高い制約条件①～⑤を充足し、か

つ、合計番線移動時間と合計加算時間を短縮するような整備作業ダイヤを求めることができおり、本研究が提案する TS を用いた手法は実用面で有効な手法であるといえる。

6. まとめ

本研究では、メタヒューリスティック手法の1つである TS を適用し、実規模の問題に対して数分程度で整備作業員の負荷を低減した整備作業ダイヤを自動作成可能な手法を開発した。提案法の有効性を確認するため、現行運用の整備作業ダイヤとの目的関数値と各評価値を比較した。また、提案法はメタヒューリスティック手法の性質上、必ずしも最適解が得られる保証が無いことから、理論的に最適解を保証する MIP によって作成された整備作業ダイヤとの比較を行った。

ケーススタディにより、提案法は、作業が必要な列車本数に関わらず、安定して、3分程度以内の実用的な計算時間内で、優先度の高い制約条件を満たす解を出力し、かつ、合計番線移動時間と合計加算時間を短縮するような整備作業ダイヤを作成することが可能であることが明らかとなった。以上より、実用面で有効な手法であることを確認した。今後、パラメータや目的関数各項の重みの感度分析を行い、より目的関数値の良い解を出力可能なパラメータと目的関数各項の重みを決定し、実務への導入に向けて取り組んでいく。

文献

- 1) B. Korte and J. Vygen, "Combinatorial Optimization," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- 2) 柳浦睦憲, 茨木俊秀: 組み合わせ最適化—メタ戦略を中心として—, 朝倉書店, 2001
- 3) 黒田充, 村松健児: 生産スケジューリング, 朝倉書店,

2002

- 4) (財) 鉄道総合技術研究所運転システム研究室：鉄道のスケジューリングアルゴリズム, NTS, 2005
- 5) 小久保達也, 加藤怜, 中東太一, 武内陽子, 田中峻一：整備作業ダイヤ自動作成へのタブーサーチの適用, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-22-063, 2022
- 6) 小久保達也, 加藤怜, 中東太一：制約違反を許容したタブーサーチによる整備作業ダイヤ自動作成手法, 電気学会産業応用部門大会, R5-12, 2022
- 7) 小久保達也, 加藤怜, 中東太一：整備作業ダイヤ自動作成手法の開発におけるタブーサーチ手法と混合整数計画法の比較, 第29回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2022), S5-1-2, 2022
- 8) F. Glover and M. Laguna, "Tabu Search, Kluwer Academic Publishers," 1997.
- 9) 橋本英樹, 野々部宏司：入門タブー探索法, オペレーションズ・リサーチ, Vol.58, No.12, pp.703-707, 2013
- 10) Gurobi Optimizer, <https://www.octobersky.jp/products/gurobi> (参照日：2023年9月29日)

常時微動計測による橋脚の固有振動数同定システムの導入マニュアルの概要

渡邊 諭* 入 栄貴* 藤原 将真*

Introduction Manual of Natural Frequency Identification System of Bridge Piers by Constant Microtremor Measurement

Satoshi WATANABE Hiroki IRI Shoma FUJIWARA

In recent years, disasters have frequently occurred due to rapid river flooding and prolonged high water levels caused by typhoons and localized heavy rainfall. It is therefore necessary to establish a method for monitoring the destabilization of river piers during rising water. In response to this need, we have prepared an introduction manual for a natural frequency identification system, which that includes an the algorithm for identifying the natural frequencies of piers from microtremor measurements, the basic specifications of the acceleration sensors required to construct a microtremor measurement system, the application conditions of this system, and methods for evaluating the measurement results.

キーワード：固有振動数，常時微動，加速度センサ，導入マニュアル

1. はじめに

近年、台風や局所的な豪雨に伴う急激な河川の増水および高水位の長期化による災害が頻発化している。それに伴い、河川内に位置する橋脚基礎周囲の地盤が増水によって洗掘され、最終的に橋脚が沈下・傾斜・流出するといった災害が多発している。これらの災害は、場合によっては列車の河川への脱線転覆につながり大惨事に至る可能性がある。そのため、増水時において橋脚の健全度を監視することが今後さらに重要となる。

橋脚の健全度を評価する手法として、衝撃振動試験法¹⁾がある。同手法は重錘により橋脚を直接加振することで健全度を示す指標である固有振動数を同定し、その値の低下度から橋脚の健全度を評価する手法である。しかし、この手法は重錘による打撃が必要なことから、増水時の計測が困難であるという課題があった。そこで、橋脚の固有振動数を連続的に計測することを目的として、常時微動（以下、微動という）を計測することで固有振動数を把握する手法の開発が鉄道総研で進められてきた。この研究の成果として、橋脚天端部2か所にセンサを設置して微動を計測することで、固有振動数を同定するアルゴリズムを開発した（以下、同定アルゴリズム^{2) 3) 4)}。また、この同定アルゴリズムを模型実験および供用中の実橋脚の一部に適用し、固有振動数の同定が可能であることを確認するとともに^{5) 6)}、計測センサとして低コストな加速度センサを用いた場合の同定精度を

向上する手法を開発した⁷⁾。

これら一連の開発成果を活用した固有振動数同定システム（以下、同定システム）の普及を図るため、固有振動数同定アルゴリズムとともに、常時微動計測システムの構築に必要な加速度センサの基本仕様、上記システムの適用条件や計測結果の評価方法等とを合わせたマニュアルを作成したので、その内容について解説する。

2. マニュアルの構成

作成したマニュアルの章構成は図1の通りである。マニュアルは全7章で構成されている。1章では常時微動

1章	常時微動計測の意義と本マニュアルの内容
2章	常時微動計測手法の適用範囲
2.1	既往の計測技術と適用範囲
2.2	適用対象となる基礎の構造条件
2.3	適用にあたっての留意点
3章	固有振動数同定アルゴリズム
3.1	固有振動数同定アルゴリズムの概要
3.2	固有振動数の自動算定手法の概要
3.3	固有振動数の評価方法
4章	常時微動計測システムの構築
4.1	常時微動計測システムの基本構成
4.2	計測システム構築にあたって検討すべき項目
4.3	計測システム構成の例
5章	微動計測用センサの選定
5.1	速度センサの仕様
5.2	加速度センサの仕様
6章	計測条件
6.1	サンプリング周波数・計測時間
6.2	計測頻度
7章	設置方法
7.1	計測システムの設置方法の例
7.2	設置にあたっての留意点

* 防災技術研究部 地盤防災研究室

図1 マニュアルの章構成

計測の意義とマニュアルの内容をとりまとめており、2章以降に具体的な適用範囲やアルゴリズムなどを取りまとめている。以下にマニュアルの各章の内容を概説する。

3. 常時微動計測手法の適用範囲

マニュアル2章では、常時微動計測手法の特徴とともに、適用対象となる基礎構造や適用にあたっての留意点について記載している。以下にその内容を概説する。

常時微動計測手法は、衝撃振動試験と異なり打撃による加振が不要である。しかしながら、微小な振動現象である常時微動を利用した手法であるため、適用範囲は衝撃振動試験よりも限定される。そのため、①衝撃振動試験においても固有振動数の同定が困難な橋脚、②減衰定数が大きく卓越振動数が明瞭でない橋脚、③固有振動数付近に桁や付帯構造物などの卓越振動数が存在する橋脚の場合には適用できない可能性が高いとした。

本手法は、「直接基礎形式」、「直接基礎形式+木杭基礎」および「基礎部分が短いケーソン基礎」を対象とし、河川管理施設等構造令が制定・施行された1976年（昭和51年）以降に新設された橋脚、ラーメン構造形式、橋台などの抗土圧構造物には原則として適用しないこととした。なお、対象とする構造物においても、背の高い橋脚、斜角の程度が大きい橋脚、トラス桁や長大橋を支持する橋脚、背が低く土被りの厚い橋脚や高架橋の特徴を有するものについては、事前に衝撃振動試験のデータを確認あるいは新たに取得して、上記①～③の振動特性ではない橋脚かどうかを検討することを推奨している。

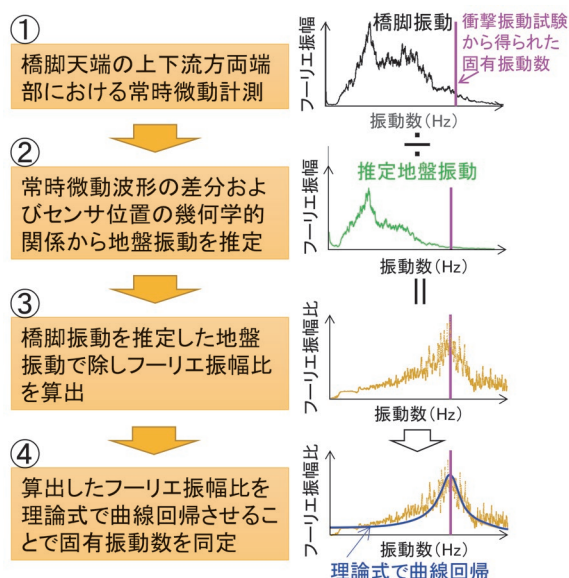


図2 同定アルゴリズムの処理フロー

4. 固有振動数同定アルゴリズム³⁾ 8)

マニュアル3章では、同定アルゴリズムの詳細について整理している。

本手法では、橋脚天端で計測される橋脚振動（応答波形）を地盤の振動とそれに応答する橋脚のロッキング振動の和であると仮定している。また、洗掘による橋脚の傾斜の多くは桁の拘束の影響により上流方、すなわち橋軸直角方向に発生するため、橋軸直角方向の固有振動数の評価を基本とする。本手法による固有振動数の同定手順は以下のとおりである（図2）。

- ① 橋脚の天端両端部で橋軸直角方向の水平成分と鉛直成分の微動を計測する。
- ② 各微動センサにおける水平成分と鉛直成分を軌跡としてプロットしたりサーージュの角度と、センサ設置間隔との幾何学的関係からロッキング振動の回転中心位置を求める。また、前述した仮定を踏まえ、両端部における微動の鉛直成分の差分からロッキング振動の鉛直成分を求め、同様に幾何学的関係からロッキング振動の水平成分を算出する（図3）。橋脚上で計測した微動の水平成分から算出したロッキング振動の水平成分を差し引き、地盤振動の水平成分（入力波形）を求める。
- ③ 橋脚上で計測した微動の水平成分のフーリエ振幅を②で推定した地盤振動の水平成分のフーリエ振幅で除したフーリエ振幅比（伝達関数）を算出する。
- ④ 算出したフーリエ振幅比（伝達関数）に対し、地盤からの振動を入力とした場合の式(1)で表される減衰定数を有する振動モデルの理論解の波形をフィッティングさせ、両者が最も良く一致する際（決定係数が最大）の振動数を求める。

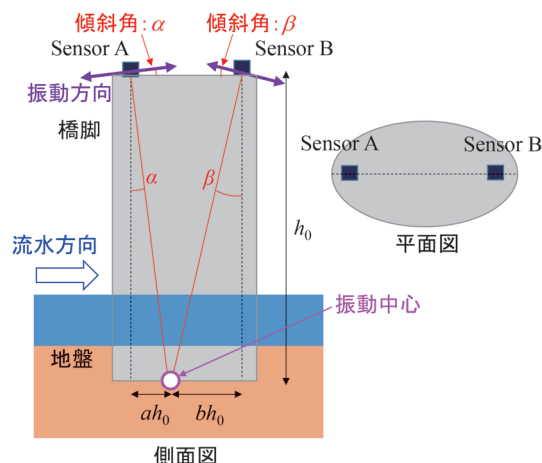


図3 橋脚の一次振動の概念図³⁾

表1 システム構築に関する主な検討項目と検討概要

検討項目	検討概要
堅牢性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 暴露環境を考慮した堅牢性の検討 ・ 防塵・防滴性能の保護等級 IP67 を推奨
作動温度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設置地域を考慮した作動温度の確認 ・ 気温変化に伴う躯体内圧力変化による防水性能の保持が必要
電源構成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設置状況を考慮した電源構成の決定 ・ 一次電池、二次電池の各特性の把握 ・ 省電力設計の必要性
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電化区間における耐電磁ノイズ性能の確保 ・ バラスト等の飛散物への耐久性の確保

$$\frac{\hat{x}_a(f)}{\hat{x}_g(f)} = \sqrt{\frac{1 + (2hf/f_0)^2}{|1 - (f/f_0)^2|^2 + (2hf/f_0)^2}} \quad (1)$$

ここに、 $\hat{x}_a(f)$ は橋脚の水平方向振動のフーリエ振幅、 $\hat{x}_g(f)$ は橋脚の鉛直方向振動のフーリエ振幅、 $\hat{x}_a(f)/\hat{x}_g(f)$ はフーリエ振幅比（伝達関数）、 f : 振動数 (Hz)、 f_0 : 橋脚の固有振動数 (Hz)、 h : 減衰定数である。

同定手法の基本原理は上記①～④のとおりであるが、実際のアルゴリズムでは、その後、同定精度を高めるための複数の演算処理と、処理フローに基づく固有振動数の自動算定を実施している。詳細については文献⁸⁾を参照されたいが、これらを同定システムに実装するために必要な内容についてはマニュアルにも詳述している。

なお、同マニュアルにおける固有振動数に基づく橋脚基礎の健全度評価は、衝撃振動試験における固有振動数の評価に準拠⁹⁾することとした。

5. 常時微動計測システムの構築

マニュアル4章では、常時微動計測システムの構築について整理している。

システム構築にあたっては、微動センサ、データ収録部および電源に関する検討が、計測システムの設置にあたっては、橋りょう上で暴露される環境であることを考慮した検討が必要である。表1に、マニュアルに示した各検討項目とその内容を示す。

6. 微動計測用センサの選定

6.1 センサの仕様

マニュアル5章では、速度センサおよび加速度センサの選定について、各センサに要求される精度や性能の観点で整理している。

速度センサおよび加速度センサの仕様選定にあたっては、固有振動数同定アルゴリズムが十分に適用できるセンサの特性が必要である。マニュアルでは、開発段階で

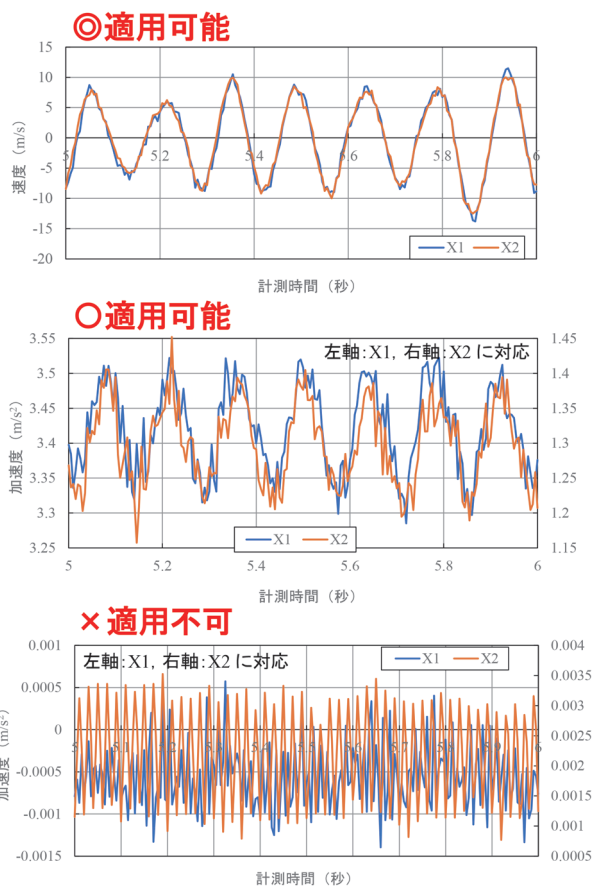


図4 橋軸直角方向の微動波形の一致度と適用可否のイメージ

利用した速度センサの仕様を参考として示すとともに、低コスト化を図る上で有利と考えられる加速度センサに求められる仕様をとりまとめている。以下に検討した加速度センサの仕様を述べる。

6.2 同期精度

固有振動数同定アルゴリズムの適用にあたっては、各センサにおいて高い同期性能を確保する必要があるとともに、個別のセンサ間での誤差が可能な限り小さい加速度センサを選定する。具体的には、①内部ノイズが小さいセンサ、②AD変換を伴わないデジタル出力のセンサあるいはノイズが少ないAD変換機能、③同じ場所に設置した際にセンサ間の各軸の出力が一致するセンサ、が必要である。マニュアル中には適用可否の目安となる同期精度を示している（図4）。

6.3 外部ノイズ

各加速度センサが有する内部ノイズに関する仕様上の特性と合わせて、計測システムの構築においては外部ノイズの影響を除去する必要がある。マニュアルでは、同定アルゴリズムが適用できる具体的なノイズレベルを示

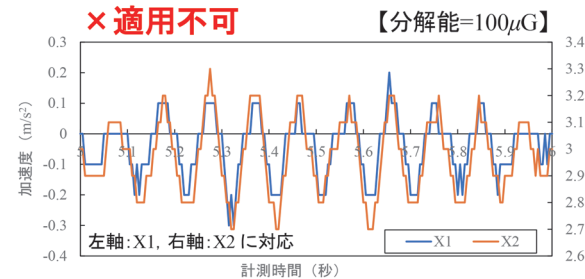
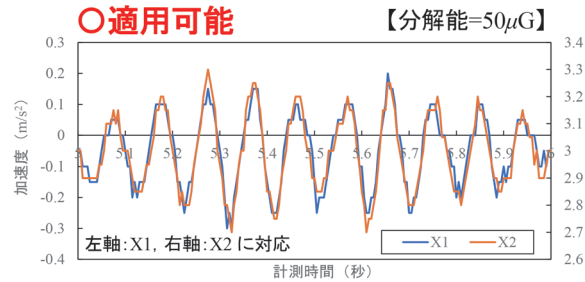
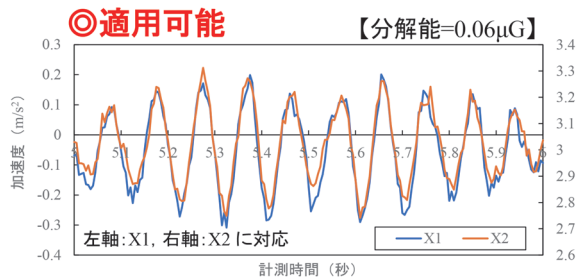


図5 分解能を変化させた場合の波形

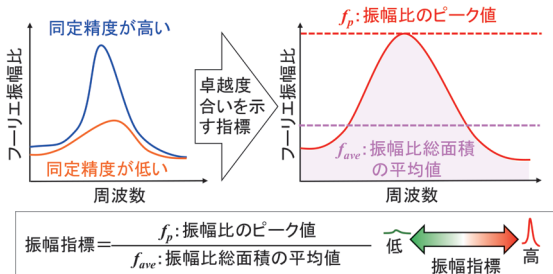


図6 振幅指標の定義概念図

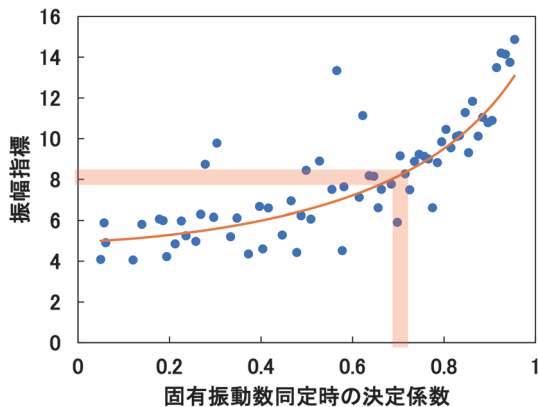


図7 固有振動数同定時の決定係数と振幅指標との関係の例

表2 加速度センサの選定例の主な仕様

項目	仕様
基本構成	デジタル3軸加速度計
センサ種類	周波数変化型
分解能	0.06μG/LSB AD分解能32bit 実行分解能28bit
帯域	DC~460 Hz
検出範囲	±15 G
サンプルレート	1,000 Sps(1msec)
ノイズ密度	0.5μG/√Hz
電源電圧	9~32 V
消費電流	35 mA(Typ.) @ 12V
動作温度範囲	-30~+70°C
防水・防塵	IP67

した。

6.4 分解能

加速度計の最小分解能（センサの最小感度に相当）が同定精度に及ぼす影響を検討するため、元波形に対し最小分解能を段階的に変化させたデータを作成して同定された固有振動数ならびに理論解フィッティングの決定係数を比較した。その結果、最小分解能は最低でも50μG（全掘削条件における計測波形の振幅RMS値の約3%）が推奨されることを示した（図5）。

6.5 伝達関数の形状に基づく適用性

同定アルゴリズムで求められる伝達関数の形状に基づいて整理している。伝達関数におけるフーリエ振幅比における振幅比総面積の平均値と振幅比のピーク値との比（振幅指標）を採用し（図6）、この指標と理論解とのフィッティング時の決定係数との関係を整理した。

結果として、固有振動数が同定可能なのは振幅指標が概ね5を超えた範囲であり、振幅指標が8を超えると同定精度が向上する（図7）。本手法の適用にあたっては、予備計測等により伝達関数の波形を得た段階で同定アルゴリズムの適用の可否を判断することを推奨している。

6.6 加速度センサの仕様例

加速度センサの選定例として、固有振動数同定アルゴリズムの検討に用いた加速度センサの主な仕様を示した（表2）。

7. 計測条件・設置方法

マニュアル6、7章ではそれぞれ計測条件および設置方法とその留意点についてとりまとめた（図8、9）。マニュアルへの主な記載事項を表3に示す。また、微動センサの固定と保護の実例についても紹介している。

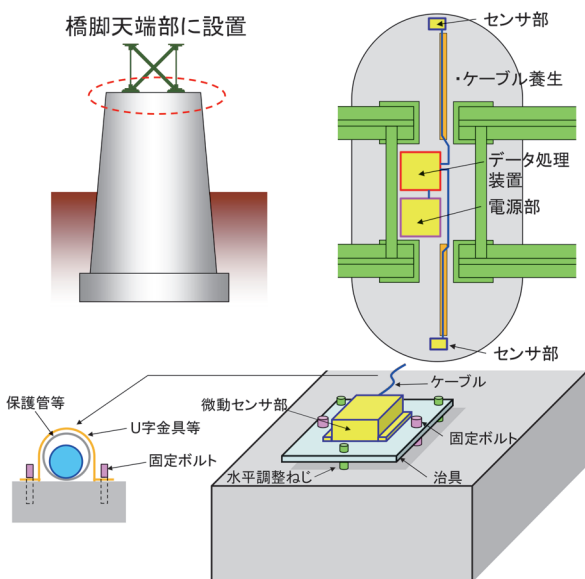


図8 計測システム設置イメージの一例
(バッテリー駆動の場合)

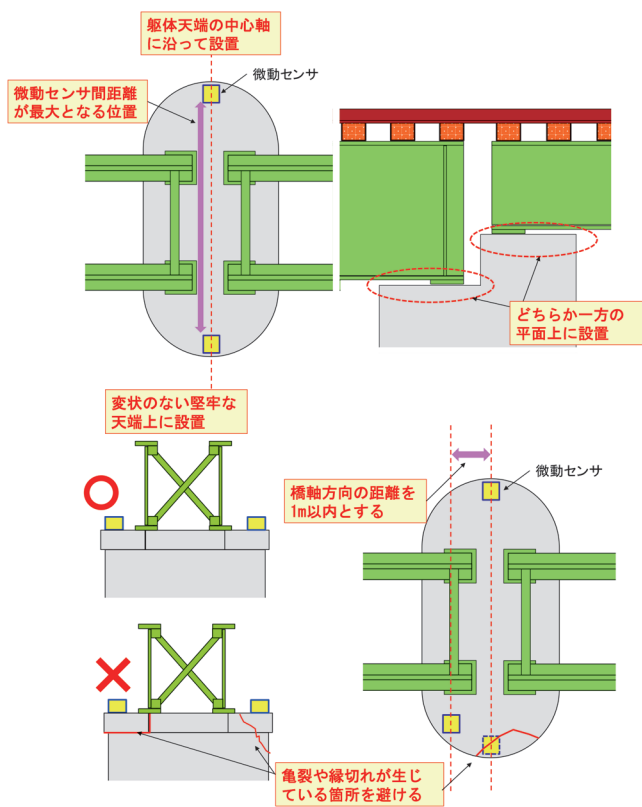


図9 微動センサ設置における留意点イメージ図

表3 計測条件・設置方法に関する主な記載事項

記載項目	内容
サンプリング周波数, 計測時間	・100Hz以上を推奨 ・5分間以上を推奨
計測頻度	・30分間隔以上を推奨
設置方法	・躯体天端の橋軸直角方向の中心軸に沿って, センサ間距離が最長となるように設置 ・桁座の高さが起終点で異なる場合には, 同一の天端平面上に設置 ・亀裂や縁切れのある位置は原則設置しない ・位置をずらす場合には, 微動センサ間の橋軸方向の距離の差が1m以内の差とする
微動センサの固定	・橋脚天端への剛結 ・ケーブルのバタつき防止

8. まとめ

本稿では、常時微動計測を用いた固有振動数同定システムの導入マニュアルについて解説した。このマニュアルは国土交通省を通じて入手することが可能であり、近年、発展が目覚ましいIoT関連分野の技術を合わせて活用することで、固有振動数の変化の情報を遠隔地でも簡易かつ迅速に確認することが可能となり、運行情報の発信や検査・補修体制の確保など、公共交通機関としての社会的サービスレベルの向上に寄与すると考えられる。なお、マニュアルの内容は今後新たな知見の蓄積によって加筆・修正する可能性がある。

謝辞

本研究は、国土交通省の交通運輸技術開発推進制度(JPJ002223)の助成を受けたものである。

文献

- 1) 西村昭彦, 棚村史郎: 既設橋梁橋脚の健全度判定法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.3, No.8, pp.41-49, 1989
- 2) 樺健典, 渡邊諭, 宮下優也: 橋脚天端の両端部で計測した微動に着目した固有振動数同定手法, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.20, pp.61-68, 2016
- 3) 樺健典, 湯浅友輝, 内藤直人, 渡邊諭: 橋脚天端両端部の微動計測による橋脚基礎地盤の洗掘に対する健全性評価手法, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.4, pp.319-327, 2018
- 4) 渡邊諭, 内藤直人, 湯浅友輝, 樺健典: 常時微動を用いた新たな固有振動数同定手法の実橋りょうへの適用性に関する検証, 土木学会第74回年次学術講演会, 3-206, 2019
- 5) 渡邊諭, 内藤直人, 湯浅友輝, 樺健典: 断面形状が異なる

- 橋脚模型を用いた新たな固有振動数同定手法の適用性の検証, 第54回地盤工学研究発表会概要集, pp.1175-1176, 2019
- 6) 内藤直人, 渡邊諭, 布川修, 櫻健典: 異なる地盤材料が直接基礎橋脚模型の振動性状に及ぼす影響, 第54回地盤工学研究発表会概要集, pp.1177-1178, 2019
- 7) 渡邊諭, 入栄貴, 藤原将真: 常時微動による橋脚の固有振動数の同定精度向上に関する基礎検討, 土木学会全国大会 第77回年次講演会, III-37, 2022
- 8) 渡邊諭, 櫻健典, 内藤直人, 湯浅友輝: 河川橋脚の天端部両端での微動計測による固有振動数の自動算定手法, 鉄道総研報告, Vol.33, No.9, pp.11-16, 2019
- 9) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)基礎構造物・抗土圧構造物, 丸善出版, 2007

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37巻 第12号

2023年12月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2023 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先
総務部広報 電話 042-573-7219

RTRI REPORT

Vol. 37 No. 12

Dec. 2023

PAPERS

- Development of Safety Check Support Device for Driver Using Side Camera on Rolling Stock
.....W.GODA, H.MUKOJIMA, N.NAGAMINE (1)
- Aluminothermic Welding Method Applicable to Shinkansen High-Speed Sections
.....Y.TERASHITA, Y.TAKAGI (9)
- Study on Interlocking Device on Cloud Computing Environment
.....N.TERADA, S.SHIOMI, T.TOYAMA (17)
- Development of Automatic Calculation Method for Maintenance Worker Scheduling Using Tabu
Search
.....T.KOKUBO, S.KATO, T.NAKAHIGASHI (27)

REVIEW

- Introduction Manual of Natural Frequency Identification System of Bridge Piers by Constant
Microtremor Measurement
.....S.WATANABE, H.IRI, S.FUJIWARA (35)

