

論文 レール遊間検査における測定条件緩和に向けた検討

原田 祐樹¹・藤原 武実²

¹正会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部施設部 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田二丁目4-24)
E-mail: yuuki-harada@westjr.co.jp

²正会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部施設部 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田二丁目4-24)
E-mail: takemi-fujihara@westjr.co.jp

当社では、検査の省人化・省力化を目指し、車上から測定した画像データ及びレール温度データを用いて、レール遊間検査を実施することを目指している。現在の管理手法では、検査実施の前提として測定レール温度の条件が存在するため、軌道検測車のように列車運用による検査では対応できない場合がある。

そこで今回、レール温度変化が継目板拘束力内にとどまる条件下においても、測定当日のレール温度変化量を考慮し、細分化した修正遊間量を作用させる手法、及びレール温度変化の履歴データを用いた手法について考案した。

次に本手法の妥当性を検証するために、レール遊間の試験測定を行い、本管理手法の適用シミュレーションを行い、結果と現在の管理手法を比較して、本管理手法の妥当性について考察を行った。

Key Words : joint gap, control of track buckling, condition of joint gap measurement, correction joint gap size

1. はじめに

少子高齢化が進むわが国では、生産年齢人口が加速度的に減少することにより労働力確保が困難となることが予測されており、当社においても労働力不足への対応は緊急かつ最重要課題である。その対応策の一つに「地上検査の車上化」を目指しており、その一環として施設・電気設備診断システム¹⁾の測定データを活用した、人力による現地検査の置換えを検討している。本稿では、その中でレール遊間検査の車上化に向けての課題である測定条件の緩和について、検討を行ったのでその内容について紹介する。

2. 検査車上化に伴う現行検査手法の課題

当社の遊間管理では1回測定に基づく危険度判定法²⁾を適用している。この現行の管理手法における遊間量測定の留意点を表-1に示す。遊間検査は、遊間がレール温度の変化に伴って伸縮している状態であることを前提に判定を行うことから、測定時のレール温度条件は大変重要である。

施設・電気設備診断システムは将来的に在来線の検測車に搭載を予定しており、取得したレール温度と画像から遊間量を計測することにより遊間検査を実施する。しかし、検測車の運行日や時間帯は列車ダイヤ等の車両運用上の制約を受けるため、必ずしも測定条件を満たせるとは限らない。また、測定時のレール温度条件を満足しない場合に車上測定により再測定を行うことは、遊間修正等の処置に対する期間を確保する観点から困難である。従って遊間検査を車上化するためには、測定時のレール温度条件を緩和する方向に見直すことが必要となる。

表-1 遊間量測定の留意点

パターン	測定時期	測定時のレール温度条件
レール温度 上昇時	遊間が 収縮しつつあるとき	20℃～30℃ (20℃以下でも晴天で 温度上昇時なら可)
レール温度 下降時	遊間が 拡大しつつあるとき	当日の最高温度より15℃以上 下降時で0℃以上の温度 (やむを得ない場合、最高温度 との差12℃以上、-3℃以上まで 緩和)

3. 新たな遊間管理手法

2章で述べた課題の解決を図るために、新たな遊間管理手法（以下、「新手法」という）の検討を行った。新手法の検討にあたっては、現行の管理手法の適用拡大を基本方針とした。具体的には測定時のレール温度条件を満足する場合には現行の管理手法を適用し、条件を満足しない場合における修正遊間量の適用法を検討することとした。

(1) 新手法の概要

a) 座屈側管理手法

現在の遊間管理手法（以下、「現行法」という）では、測定時の温度条件を満足する際の修正遊間量を1mmとして換算を行い、設定遊間線を算出している¹⁾。

測定時の温度条件を満たさない領域（遊間ループ上における継目板拘束力内）について、測定日の最高（最低）レール温度からの下降（上昇）量毎に継目板拘束力を細分化して設定した修正遊間量を作用させる手法を考案した。

図-1にこの考え方（レール温度下降時）を示す。新手法では、修正遊間量を細分化して付与することとした。ここで細分化にあたっては、施設・電気設備診断システムの遊間測定の分解能が0.5mmであること、及び実用性を考慮し、本検討においては4分割とし修正遊間量の付与単位を0.5mmに割り切ることとした。また、修正遊間量の設定にあたっては、現行法と比較して、同等もしくは安全側へ設定遊間線を導く仕組みとし、最大で修正遊間量0.5mm相当分安全となる。なお、レール温度が下降を始めてから自由伸縮を始めるまでの温度（以下、「継目板拘束力突破温度」という）について、現行法のやむを得ない場合を適用して本検討では12℃としている。レール温度上昇時についても同様の考え方で修正遊間量を設定している。

b) 破断側管理手法

レール温度下降時における破断側限度 e_l は式(1)により算出される⁴⁾。

$$e_l = \left\{ -t + 2 \left(t_A - \frac{\Delta e'_R}{\beta L} \right) + t_B + t_{min} \right\} \beta L + e_{max} \quad (1)$$

ここで、 $t_A = R_f / EA\beta$, $t_B = R_b / EA\beta$

t : 測定レール温度 β : 線膨張係数 L : レール長さ

e_{max} : 継目遊間の開口限度 t_{min} : 最低レール温度

$\Delta e'_R$: 継目板拘束力による遊間変化量

R_f : 継目板拘束力 R_b : 継目ボルトの曲げ抵抗力

式(1)の $2 \left(t_A - \frac{\Delta e'_R}{\beta L} \right)$ の項は、継目板拘束力に関するも

のであり、レール温度上昇時に許容しているリスクと同様となっている。測定時の温度条件を満たさない領域

（遊間ループ上における継目板拘束力内）について、破断側判定を行う場合は、図-2に示すように測定日の最高（最低）レール温度からの下降（上昇）量温度変化量により細分化した係数 k を設定し、式(2)により破断側限度を算出することとした。係数を4分割としたのは、座屈側と同様に修正遊間の付与単位を0.5mm毎とするためである。なお、係数 k の設定では、座屈側と同様に、現行法と比較して同等もしくは安全側へ破断側限度を導くような値を設定しており、最大で修正遊間0.5mm相当分安全となる。また、継目板拘束力突破温度は座屈側と同じく12℃としている。

$$e_l = \left\{ -t + 2 \left(t_A - k \frac{\Delta e'_R}{\beta L} \right) + t_B + t_{min} \right\} \beta L + e_{max} \quad (2)$$

(2) 仮想最高・最低レール温度

遊間検査前のレール温度変化量が十分でなく、最高レール温度や最低レール温度が継目板拘束力内にとどまってしまう場合、新手法で修正遊間を与えると条件によって大きく安全側、あるいは危険側に設定遊間線を導く可能性が想定される。これを本来理想とする設定遊間線に近づける方法として仮想最高（最低）レール温度を導入し、その温度からの下降（上昇）量に応じて修正遊間量及び係数 k を与えることとした。仮想最高・最低レール温度の考え方を表-2に示す。

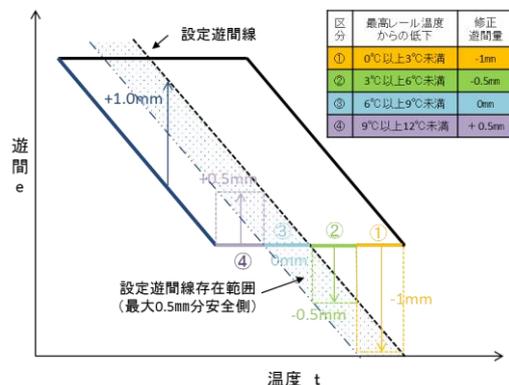


図-1 新手法（座屈側・レール温度下降時）

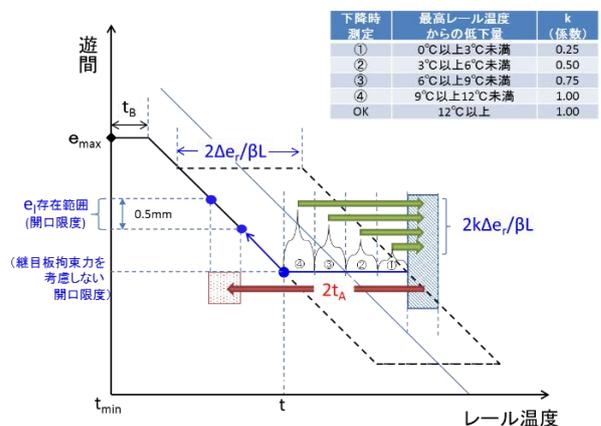


図-2 新手法（破断側・レール温度下降時）

表-2 仮想最高・最低レール温度の考え方

判定	測定レール温度条件	最高・最低レール温度が継目板拘束力内にとどまった状態で新手法を適用させた場合に想定される影響	仮想最高レール温度のはたらき	仮想最低レール温度のはたらき
座屈側	下降時	修正遊間が一部小さく設定され、大きく安全側に判定される	修正遊間を適正に修正し過剰なランク発生を抑制	
	上昇時	修正遊間が一部大きく設定され、危険側に判定される		修正遊間を安全側に修正
破断側	下降時	修正遊間が一部小さく設定され、危険側に判定される	修正遊間を安全側に修正	
	上昇時	修正遊間が一部大きく設定され、大きく安全側に判定される		修正遊間を適正に補正し過剰なランク発生を抑制

図-3に仮想最高レール温度と修正遊間の具体例を示す。継目板拘束力領域内でレール温度が最高値に至り (②⇒③)、その後温度下降時に遊間を測定する場合 (③⇒④) において、当日の最低レール温度から継目板拘束力突破温度分 (12℃) を加えたものを仮想最高レール温度として実際の最高レール温度に替えて用いることとする。

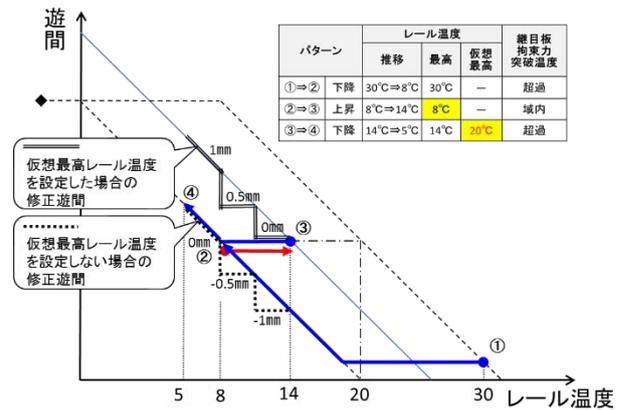


図-3 仮想最高レール温度の具体例

表-3 試験概要

測定間隔	30分間隔
測定期間	1週間程度
測定箇所 選定条件	<ul style="list-style-type: none"> ・3継目以上連続 (片側) ・25mレール ・明かり区間 ・測定中に保守作業なし

4. 遊間挙動把握試験

遊間検査の車上化を検討するにあたり、レール遊間挙動の実態把握と新手法の妥当性を確認するため、連続的に遊間量とレール温度を計測する試験を実施した。

(1) 試験概要

測定試験の概要を表-3に示す。様々な気象条件での遊間の挙動を把握するため、1週間程度連続で計測を行った。なお、トンネルや橋梁上など周辺環境が特異な箇所は除いている。

(2) 測定装置

24時間連続の計測を実施するために、自動で遊間を測定する装置を開発した。測定の頻度や必要となる電力量を考慮し、一定時間間隔でカメラにより撮影した静止画を画像処理することにより、遊間の挙動を遊間量で定量化することとした。

開発した装置の外観を図-4に、この装置で撮影した画像を図-5に示す。デジタルカメラのオートタイマー機能を活用し、30分間隔の撮影を行うこととし、カメラ等の電源にはカーバッテリーを使用している。装置の測定精度は±0.5mmである。これは、現行の検査の測定精度±1mmと比較して十分な精度を有している。

撮影開始時の遊間量については、別途上部から撮影した画像から画像処理により算出し、図-5中のターゲット間の距離から算出した変化量を足し合わせることで各時点での遊間量を算出している。また、測定時点でのレール温度については、レール腹部に貼り付けた温度計測装置によりデータを収録している。



図-4 装置外観



図-5 撮影画像

(3) 計測結果

測定装置を使用し、2016年10月～2018年5月の遊間検査実施時期を中心に営業線で遊間挙動の測定を行った。ある1継目の遊間測定結果及び同一箇所3継目平均した結果を図-6に示す。測定レール温度と遊間量の関係を1継目単独で確認すると、図-6(a)の例のように理想的なループを描かないものが一定数確認された。一方、図-6(b)のように隣接した3継目の平均をとると、概ね理想的なループ形状に近づく傾向が確認された。現行法も遊間のランク判定には隣接した3継目の平均値を用いていることを考慮し、分析には3継目平均の遊間量を用いることとした。

3継目を1区間とし、30分毎の測定データ（110区間・36298サンプル）について現行法の測定温度条件の適合割合を表-4に示す。現行法を満足しているのは全体の半数に満たないことから、車上化を行うためには測定温度条件の緩和が必要であることが分かる。

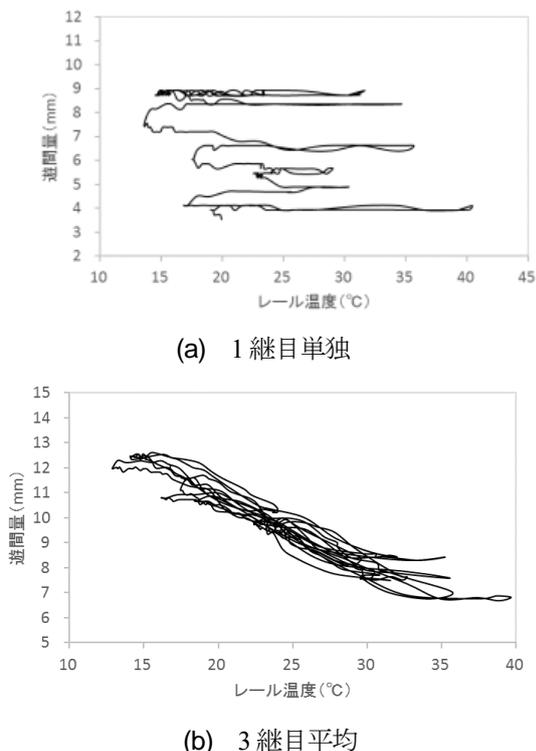


図-6 レール温度と遊間量の関係

表-4 現行の測定温度条件の適合割合

条件		レール温度 下降時	レール温度 上昇時	合計
現行法の 測定温度条件	適合	27.7%	7.2%	34.9%
	不適合	34.7%	30.4%	65.1%
合計		62.4%	37.6%	100.0%

5. 新手法の検証

(1) 遊間挙動把握試験結果での検証

a) 座屈側管理手法

遊間挙動把握試験で取得したデータを使用して、3章に示した新手法及び仮想最高レール温度適用の検証を行った。ある3継目区間でのレール温度下降時における測定遊間（3継目平均値）と、座屈側の修正遊間について現行法と新手法を適用したものの分布を図-7に示す。

レール温度下降時では、レール温度が概ね25℃付近より低い領域については、最高レール温度からの温度変化量が十分大きいので現行法と新手法の結果は一致する。一方、現行法では評価できない温度領域についても新手法による分布と現行法で得られる設定遊間線との乖離は小さく、現行法に近い設定遊間線を導いていることがわかる。

図-7と同じ区間での、各測定点におけるレール温度0℃での設定遊間量（以下、「y切片」という）分布を図-8に示す。なお、y切片は遊間量をe、測定レール温度をtとした時の、定尺レールの設定遊間の計算式より $0.285t+e$ で算出する。現行法に比べ新手法ではy切片が小さい領域へ分布している。これは座屈に対して安全側

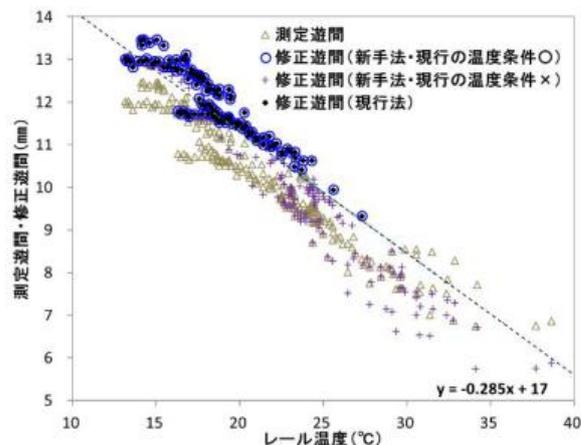


図-7 各遊間量の分布（座屈側・レール温度下降時）

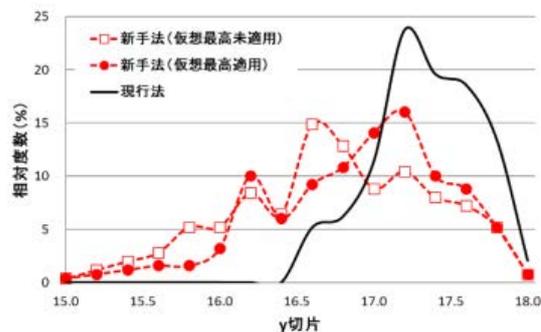


図-8 設定遊間線 y 切片の分布状況（座屈側・レール温度下降時）

の評価となることから、新手法の理論が反映されていることが確認できる。一方、過度に安全側の評価を行うことは遊間修正量の増加につながることから、新手法において仮想最高レール温度の採用の有無を比較した結果、仮想最高レール温度を導入することでy切片の安全側への分布をある程度抑制できることが明らかとなり、仮想最高レール温度の有効性が確認できた。

レール温度上昇時において、図-7と同じ区間における測定遊間と、現行法及び仮想最低レール温度を適用した新手法による修正遊間の分布を図-9に、y切片の分布を図-10に示す。

現行法の温度条件領域（20℃～30℃）に適合し、かつ最低レール温度からの温度変化量を満たしている場合は、現行法と新手法の結果は一致する。また、一致しない領域においても新手法による分布と現行法で得られる設定遊間線との乖離は小さいものの、座屈に対して危険側に分布する傾向が認められた。これは、実際の継目板拘束力が遊間量換算で1mmよりも小さいため、現行法の判定において、レール温度上昇時の方がレール温度下降時よりも相対的に安全側へシフトしていることが原因である。レール温度下降時を含めて評価した場合、新手法の

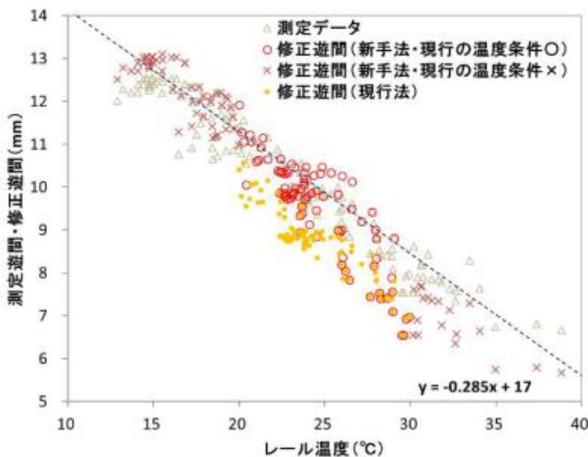


図-9 各遊間量の分布（座屈側・レール温度上昇時）

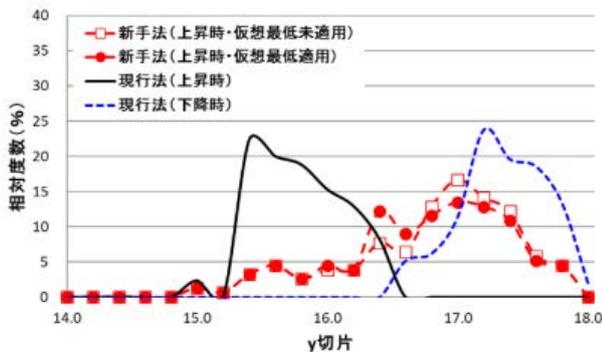


図-10 設定遊間線 y 切片の分布状況（座屈側・上昇時，下降時の比較）

y切片が現行法での最大値を超過することはなく、新手法が現行法より危険側の判定とならないことが確認できた。

仮想最低レール温度の適用の有無を比較すると、適用ありの方が若干安全側へ分布している。これは、当日の最低レール温度が継目板拘束力内にとどまる場合に、レール温度上昇時の新手法を適用すると、危険側へ設定遊間線を導く場合があるからであり、レール温度下降時の場合と逆の作用となることが確認できた。

b) 破断側管理手法

当社の破断側管理手法では、式(1)のボルト曲げ応力について、継目板ボルト1本に大きな曲がり又は折損を許容した値を適用して得られる開口限度量をC限度と呼称し、ランク判定対象箇所でC限度を超える箇所が存在する場合はLランクとしている。図-11及び図-12は、図-7と同じ区間においてそれぞれレール温度下降時と上昇時での測定レール温度と、C限度と測定遊間の差（以下、「C限度余裕量」という）の関係を示している。このC限度余裕量は、遊間が理論通り挙動している場合に

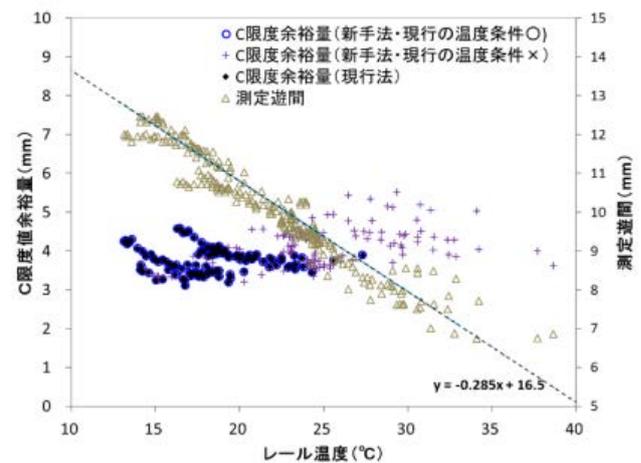


図-11 各遊間量の分布（破断側・レール温度下降時）

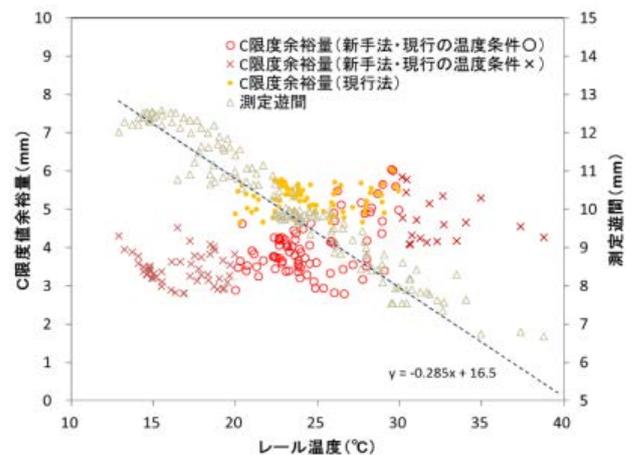


図-12 各遊間量の分布（破断側・レール温度上昇時）

は一定となる。またC限度余裕量が小さければ遊間ランクが発生しやすい状況であることを示しており、より安全側の判定である。

レール温度下降時、上昇時ともに現行法と比較してC限度余裕量が概ね同等の値となっていることがわかる。

次にC限度余裕量の分布状況を図-13に示す。現行法の結果について、下降時測定は上昇時測定と比較して安全側へ分布していることがわかる。この箇所の継目板拘束力の遊間換算量は、測定データからの推定値で0.22mmである。下降時の判定では、式(1)で適用する継目板拘束力1mmと比較して小さいため、安全側へ分布する結果となっている。新手法については、下降時のみでの比較では新手法の方が危険側への分布となるものの、その分布は現行の下降時と上昇時の間に存在している。上昇時測定を含めた現行法の最大値には納まっており、新手法が現行法と比較して危険側の判定とならないことが確認できた。

(2) 自動遊間測定装置による検証

新手法について、現行法との比較による検証を行うため、自動遊間測定装置を使用した連続区間測定を実施した。自動遊間測定装置とは、当社が遊間検査時に使用する装置であり、計測台車内に設置したカメラにより継目部を上方から撮影し、その画像データを計測台車内のコンピュータで画像処理し遊間量を計算する。計測台車を軌道自転車により牽引または推進走行し測定する。測定精度は±1mmである。

レール温度下降時において測定時のレール温度条件を満たした場合（以下、「検査時」という）と満たさない場合（以下、「試験時」）での遊間測定を実施し、それぞれでランク判定を行った。試験時については新手法で修正遊間量の算出及び開口限度の算定を行った以外は、現行法と同様の方法によりランク判定を行った。試験は2017年及び2018年の秋の遊間測定時期に実施し、127km分のデータを得た。

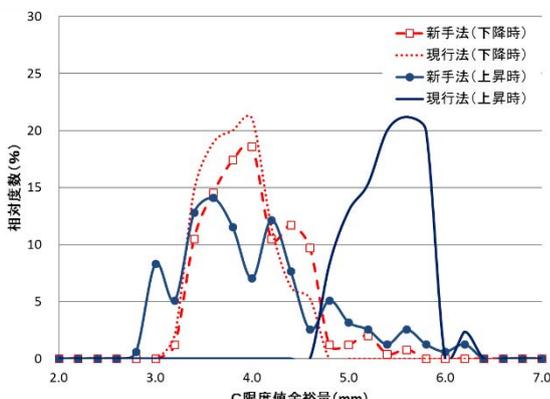


図-13 C 限度余裕量の分布状況（破断側・上昇時、下降時の比較）

ここで当社の現行の管理手法では、約20～30km間隔で設置されたレール温度計毎に受け持ちエリアを定めている。これらのレール温度計で記録した最高又は最低レール温度を、その受け持ち区間の最高又は最低レール温度として一位に定めて、測定時のレール温度条件を満足しているかを判断している。今回の検証においても、レール遊間測定前の温度変化履歴の把握には、これらのレール温度計データを用いることとし、データの評価はレール温度計の受持ちエリア及び測定日毎に実施した。

a) 座屈側管理手法

図-14に吉備線（総社）及び紀勢線（古座）での座屈側判定の検証結果を示す。なお、括弧内はレール温度計設置箇所を示している。吉備線（総社）では、新手法で評価した場合の遊間ランク発生延長が増大し、特にCランクについては、約5倍の増加となった。これは、手法考案時の狙いである安全側の判定が達成できていること示している。また仮想最高レール温度を作用させた新手法の検証結果では、Cランクの発生延長は現行法と同程度となった。仮想最高レール温度を作用させない場合は、遊間整正量の増大が懸念されるが、仮想最高レール温度を作用させることにより、現行と同等程度の整備量に抑制することができている。

一方、紀勢線（古座）では遊間ランク延長が減少した。これは、現行法では整備すべき箇所と判定される箇所が整備されなくなる可能性を示しており、危険側の判定となる。このように、今回の試験時のデータではランク延長が減少する区間が一定割合で見られた。

そこで、試験時における当日の最高レール温度と遊間測定時のレール温度の変化量の平均値と、遊間ランク延長増減割合の関係を図-15に示す。遊間ランク延長増減割合は、検査時に対する試験時の遊間ランク延長の増減を算出し、その区間のレール延長で割ったものである。温度変化量が小さい範囲では、遊間ランク延長が増大傾向となっている。これは、現地の平均的な継目板拘束力突破温度が、この度採用した数値（12℃）と比較して小さく、実際には伸縮している状態にもかかわらず安全側に配慮した補正を受ける影響と考えられる。

一方、新手法が危険側の判定となる理由を検証するた

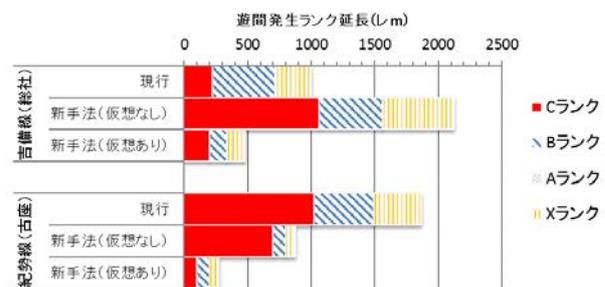


図-14 検証結果（座屈側判定）

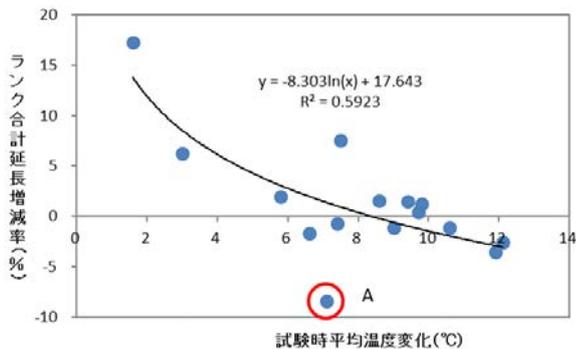


図-15 試験時平均温度変化とランク延長増減の関係

め、図-15において大きなランク延長の減少が見られたAの箇所に着目し、試験時と検査時の測定遊間の差を調査することとした。この箇所の測定遊間差（検査時の測定値－試験時の測定値）の相対度数分布を図-16に示す。全体的な傾向と比較すると、検査時の遊間ランク発生箇所の分布は、0付近で乖離していることがわかる。測定時のレール温度は、試験時の方が検査時より平均9.1℃高かったため、本来であればプラス数ミリ程度の差が生じる。ランク発生箇所において測定遊間差0mm付近が増加するという事は、著大な継目板拘束力等によりレール温度変化にかかわらず遊間が変化しない継目が、遊間ランクが発生していない区間より多く存在していたと考えられる。

今回の検証では、全ての区間で試験時の方が測定レール温度が高かった。レール温度により遊間量に変化しない継目では、高いレール温度で測定した方が危険側の判定となることから、一部区間の座屈側判定が危険側となった可能性が考えられる。なお、座屈側判定の検査は2月～3月で実施している。この時期のレール温度は年間を通じて最も低いため、新手法での著大な継目板拘束力の影響は、現行法と同程度の実用性を有するものと考えられる。

b) 破断側管理手法

図-17に、山陰線（和田山）と小浜線（小浜）で得られた破断側判定の結果を示す。山陰線（和田山）では、新手法の方がランク延長が大きくなり、安全側の結果となった。また仮想最高レール温度の有りの場合の方が、無しの場合と比較してランク延長が増加しており、座屈側管理手とは逆の作用となっている。これは、仮想最高レール温度を適用することにより測定レール温度との温度差が大きくなるため、式(2)に適用する係数kが大きくなり、座屈側限度値が小さくなることに起因する。

小浜線（小浜）では、現行法よりランク発生延長が微減となっているものの、その割合は3%と些少である。またこの他の区間では、全て発生ランク延長が現行法と

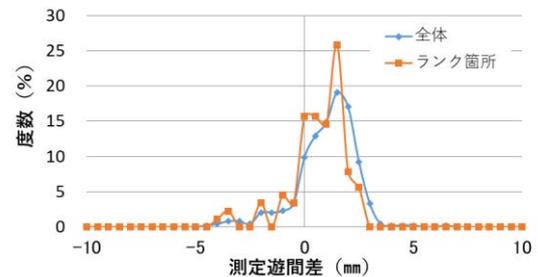


図-16 測定遊間差の度数分布

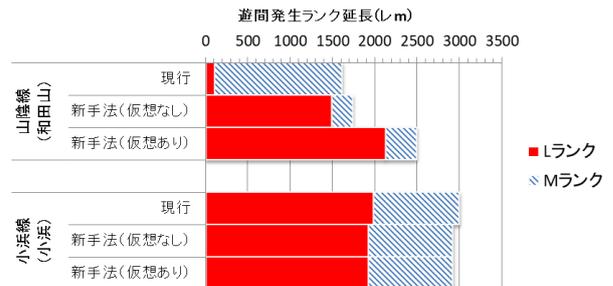


図-17 検証結果（破断側）

比較して増加しており、破断側の新管理手法が想定通り概ね安全側の判定となっていることが確認できた。

6. まとめ

今回、新たな遊間管理手法を考案し、試験による取得データによりその妥当性を検証した。その結果、破断側管理手法については、測定条件を緩和した場合においても、現行法と比べて安全側の判定を行うことができた。一方、座屈側判定においては現行法と比較して一定割合で危険側判定となる箇所の存在を確認した。しかし、これは著大な継目板拘束力を有する継目の影響であることが考えられ、座屈側測定を行う冬季から春季の測定においては影響を低減できる可能性があることから、引き続き試験測定及びその分析を行い、新手法適用の可能性を探っていく予定である。

参考文献

- 1) 津田晃宏：線路設備診断システム，日本鉄道施設協会誌，Vol.55，No.8，2017.8
- 2) 徳岡研三：温度変化環境下の標準軌道構造における列車運転の安全に関する総合的な研究，東京大学，1997
- 3) 保線工学編集委員会編：保線工学（上），P337
- 4) 保線工学編集委員会編：保線工学（上），P349

(2019.4.5 受付)

EXAMINATION FOR EASING OF CONDITIONS IN JOINT GAP MEASUREMENT

Yuki HARADA, Takemi FUJIHARA

For labor saving of the track inspections, we are examining the measurement of joint gap using image data and rail temperature data measured on the vehicle. In the present control method, for limitation of the rail temperature at the time of the measurement, We may not use measurements provided in track inspection car.

Therefore, we devised methods to ease the condition of joint gap measurement. Specifically, the first method is to make the subdivided correction joint gap size act even when the rail temperature change is small. The second is a method to calculate the actual temperature change amount using history data of rail temperature.

Next, in order to verify this method, we made a test measurement of joint gap and applied simulation of this control method. After that, the results were compared with the present control method, and the validity of this method was discussed.