

列車走行安全のためのレール継ぎ目遊間の 管理に関する研究

徳岡研三¹・福井義弘²・山口義信³

¹フェロー会員 工博 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 施設部 (〒530-8341 大阪市北区芝田2-4-24)

²正会員 工修 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 施設部 (〒530-8341 大阪市北区芝田2-4-24)

³正会員 西日本旅客鉄道株式会社 京都支社 湖西保線区 (〒520-0242 滋賀県大津市本堅田5-16-3)

レールの継ぎ目部に設定されている遊間は、レール温度上昇時に発生する軌道座屈、及びレール温度下降時に発生する継ぎ目板ボルトの曲がり・折損を防止するために設けられている。従って、その管理は列車運転の安全を確保する上で極めて重要である。本研究においては、従来の遊間管理手法を改善し、これを実務に適用した成果について述べるとともに、改善された手法から算出される危険度について、コンピュータ・シミュレーションから得られた結果と対比させ、その有効性について論証した。その結果、改善された手法による危険度は、危険度が大きい、即ち軌道座屈の安全性の観点では危険領域にある部分で、十分な信頼性のあることが定量的に確認できた。このことは、改善された手法の導入以来、軌道座屈による鉄道事故がほとんど発生していないことを理論的に証明するものである。

Key Words : inspection and adjustment method of rail joint gap, track buckling(sun kink), degree of danger, Monte Carlo method

1. はじめに

レールを木まくらぎに犬釘締結した軌きょうをバラスト上に設けた標準的な有道床軌道は、走行する列車荷重により車輪走行路に不整等が生じ、管理レベルが維持できなくなったり場合には保全を行うことを前提としている。このような構造では、列車を安全に走行させるため、種々の機能を絶えず維持するための保全が要求されている。

列車走行安全に直接関わる機能としては、「著大な列車荷重により急激な構造破壊を生じない。」、「温度変化により発生するレール軸力により、軌道の座屈、継ぎ目板ボルトの破断を生じない。」等がある。これらの機能は、昭和30年～40年代にかけての研究・開発により、レールは製造法の改良や重量化、まくらぎはタイプレート敷設、コンクリート化(PCまくらぎ化)により部材・構造の強化がなされ、急激な構造破壊や疲労破壊が生じる可能性は低減してきたが、温度変化により発生するレール軸力に対しては未だ十分な機能向上がなされず、レール張り出しと称する軌道座屈が特として生じ、列車の走行安全に大きな危惧を与えてきた。

従来から標準的な軌道構造においては、これを敷設する場合にレール継ぎ目部に、レール温度変化に伴うレ

ル伸縮を容易にするための適当なギャップ(遊間)を設け、レール軸力の発生を軽減している。この遊間の大きさはレール温度、レール長さ毎に定められているが、レールのふく進(レール長手方向の移動)などにより徐々に変化する。この値が過小の場合にはレール温度上昇時の軸力がレールに蓄えられ座屈を、過大な場合には継ぎ目板ボルトの曲がり・折損等による軌道材料の損傷が生じることになる。

この座屈の発生や材料の損傷を防止するため、遊間量を所要の範囲内に維持(遊間管理)することが行われているが、遊間状態の評価や維持・整備には多大な労力を費やしているのが現状である。にもかかわらず、この遊間状態の整備は従来、遊間2回測定法の実施など管理手法上の問題があり、不良箇所の特定や危険度による順位付けといった定量化された形ではほとんど行われていなかった。他方、昭和50年代初め頃からマルチブルタイタンバー(線路を突き固めして整備する大型の保線機械)を用いた軌道保守が大規模に展開され、道床横抵抗力(バラストにより軌きょうの横方向変位に抵抗する力)が以前に比べ長い延長にわたって低下した軌道状態となっていた。この結果、道床横抵抗力の連続的な低下と相まって、遊間状態整備不良を主要因とする張り出しに

による列車脱線事故が多発し、社会的な問題となつた。

このような遊間管理面での問題が生じたのは、前述のとおり従来の手法が現場とマッチし難いものであり、十分に定着していなかったことによる。そこで、実務に適合した遊間の評価手法(これを著者の名前の頭文字をとって「KT法」と称する。)を昭和51年に新たに提案し、旧国鉄大阪鉄道管理局管内においてこれを定着させ、この種事故の沈静化を成し遂げた。

具体的には「KT法」は、遊間状態良否の評価に、より合理的な危険度の考え方を用いる方法を提案したものであり、後に一部改善を加えた形で昭和57年全国鉄に対し、新しい遊間管理手法(これを「施設局法」と称する。)として指導された。その後、従来、十分体系的に構成されていなかった部分についても順次適用範囲の拡張を行い、総合的な手法に作り上げた。例えば、50mレール区間の管理手法の制定¹⁾、破断側の管理手法²⁾及び低温時測定手法の制定等々である。

また、上記の手法では、骨格をなす座屈に対する判定線の引き方に問題があり、危険度そのものを判定線とする、より適正な手法に作り替えた。これが、本論文でこれから述べる著者が構築した「KT改善法」である。

これら一連の手法は長年の現場の経験をベースとして、必然的なバラツキを有する各影響因子(例えば「道床横抵抗力」や後述する「継ぎ目板拘束力」など)について技術的判断による設定を行い、かつこれをデータで補完するという考え方によって構築されている。このことは現行の管理手法のベースとなっている危険度に疑義を生じさせるものであり、正確な判断を行うためにはバラツキを有する各影響因子を統計的に扱う必要があると考えられる。そこで、現地の調査結果から得られた統計的なデータを前提とし、レール発生軸力のシミュレーション手法(モンテカルロ法)により各因子が組み合わされた総合的な危険度を定量的に示すことを試みた。

以下、本論文においては、遊間管理の基礎理論から始め、「KT改善法」の構成ならびにその適用成果について述べ、これをコンピュータ・シミュレーションから得られた結果と対比させ、「KT改善法」の有効性について論証するとともに、その改善の方向ならびに今後の研究課題について述べるものである。

2. 遊間管理の基礎理論

(1) 継ぎ目遊間図

規定で定められているのは、図-1に示す継ぎ目遊間図³⁾である。この遊間図は、継ぎ目板を解きフリーな状態とした時の遊間量を示しており、その理由はレール交

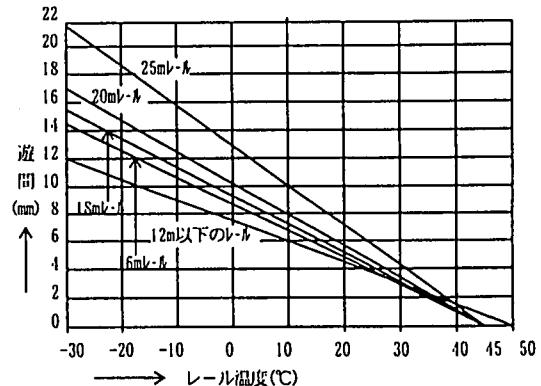


図-1 継ぎ目遊間図

換作業や遊間整正作業により遊間設定する場合、継ぎ目板を所定状態にセットしていない、即ち継ぎ目板によりレールの自由伸縮が妨げられていない状態が前提となっているためである。

なお、継ぎ目遊間図で定められている遊間量は

- ・レール温度上昇時の座屈
 - ・レール温度下降時の継ぎ目板ボルトの曲がり・折損
- 双方にほぼ均等な安全率を有するよう設定されている。

また、継ぎ目遊間図の伸縮勾配は、レールが自由伸縮する場合の伸縮量であるから、次式により与えられる。

$$\Delta l = \beta \times l \times \Delta t \quad (1)$$

ここで、 Δl : レールの温度変化に対する伸縮量

β : レール鋼の線膨脹係数($0.0114\text{mm}/^\circ\text{C}/\text{m}$)

l : レールの長さ

Δt : レール温度の変化量

継ぎ目遊間図において、レールがその標準的長さである25mの場合、遊間量 e を表す式は

$$e = -\beta \times l \times \Delta t + 12.8 \quad (2)$$

としている。

(2) レール温度の上昇または下降に伴う遊間の変化

継ぎ目板の締結構造は、レール両側面に設置した継ぎ目板をボルトで締め付けることにより固定するようになっている。また、ボルトの締結トルクは規定で定められており、この値に従ってボルトを締め付けた場合、継ぎ目板はレールの自由伸縮を妨げる力を持つことになる。これを継ぎ目板拘束力と呼んでいる。なお、レール種別別のボルト締め付けトルク及び継ぎ目板拘束力は、表-1に示すとおりである。この継ぎ目板拘束力の働きにより、

表-1 ポルト締め付けトルク (kgf·cm) 及び継ぎ目板拘束力

レール	60kg	50 T	50 N	50PS	40 N	37kg
熱処理ボルト	5,000	5,000	5,000	5,000	4,000	3,500
拘束力(t f)	30.0	30.0	19.3	19.3	15.4	17.8

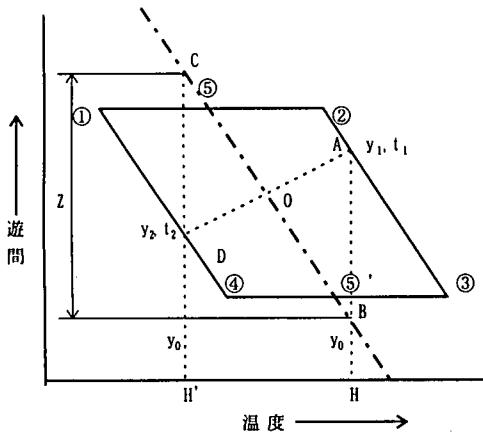


図-2 遊間ループ

レール温度変化に伴う遊間量の変化は、図-2に示すようなループを描くことになる。図中、1点鎖線で示したもののが設定遊間であり、継ぎ目板を解いてレールをフリーな状態とした時の遊間量である。

設定遊間上の⑤点においては軸力は発生しておらず、⑤②間ではレール温度が上昇しても遊間は変化しないで、継ぎ目板拘束力により圧縮軸力が徐々に増加する。軸力が継ぎ目板拘束力に等しくなるまで増加すると、それ以後はレールは自由伸縮るので、②点より遊間は縮小し始める。レール最高温度の③点から温度が徐々に下がると、軸力は徐々に減少し、⑤'点では軸力が再び0となり、更にレール温度が下がれば軸力が圧縮から引張りに変化して、⑤'④間では引張り軸力が作用する。引張り軸力が継ぎ目板拘束力に等しくなるまで増加すると、それ以後はレールは自由伸縮るので、④点より遊間は拡大し始める。即ち、A点では軸力は圧縮、D点では引張りである。

(3) 遊間の不良判定

実際の遊間の良・不良を判定しようすれば、定められている継ぎ目遊間図と比較しなければならない。前述したように、継ぎ目遊間図はレールをフリーの状態にした時の遊間量であるから、実際の遊間の設定遊間を測定

によって求める必要がある。このため、レール温度上昇に伴い遊間が縮小しつつある時(②③間)、及びレール温度下降に伴い遊間が拡大しつつある時(④①間)の2回測定を行わなければならない。レール温度が上昇し遊間が縮小しつつある時のA点における遊間を y_1 、その時のレール温度を t_1 とし、レール温度が下降中で遊間が拡大しつつある時のD点における遊間を y_2 、その時のレール温度を t_2 とするとき、 $\triangle ABO \equiv \triangle CDO$ から

$$y_1 + y_2 = Z + 2y_0 \\ y_0 = (y_1 + y_2 - Z) / 2 \quad (3)$$

ここで、

$$Z = \beta l (t_1 - t_2)$$

である。従って、

$$y_0 = \{y_1 + y_2 - \beta l (t_1 - t_2)\} / 2 \quad (4)$$

この $y_0 = BH$ がレール温度 t_1 における設定遊間を示すことになる。レール温度 t_1 の時の設定遊間CHは

$$y_0 + Z = CH$$

であるから、

$$y_0 + Z = (y_1 + y_2 + Z) / 2 \\ = \{y_1 + y_2 + \beta l (t_1 - t_2)\} / 2 \quad (5)$$

により、設定遊間を算出することができる。

このような手法で算出された設定遊間と継ぎ目遊間図の規定遊間を比較し、その差が±2mm以上の箇所に対して不良と判定、遊間整正等所要の処置をとることが定められていた。これが従来の遊間管理手法である。

3. 遊間管理手法 (KT改善法) について

(1) 従来の遊間管理手法の問題点

2項で述べた従来の遊間管理手法にはさまざまな問題点があったが、その内重要なものをあげれば以下のとおりである。

a) 遊間の2回測定について

従来の手法では設定遊間を求めるため、前述のようにレール温度上昇に伴い遊間が縮小しつつある時、及びレール温度下降に伴い遊間が拡大しつつある時の両測定値によって行うことになっている(いわゆる遊間の2回測定法)。このように、遊間を2回にわたって測定するためには、1回目と2回目との間に相当の時間経過を必要とし、特に2回目の測定が夕刻以降の勤務時間外となるため、日勤の勤務体系をとっている現場では絶えず行うのは困難な手法であり、実態としてほとんどの箇所で正しくは行われていなかった。

正確な測定を行うことは、その後行われる不良判定のベースをなすものであり、現場第一線の保守責任者はこのことを十分認識してはいたが、当時の国鉄における労使問題の影響もあって確たる改善処置はとられず、結果

として保守責任者の主観的判断による部分的な不良箇所の除去に留まっていた。

b) 優先順位について

測定によって求められた設定遊間と継ぎ目遊間図の規定遊間を比較し、その差が±2mm以上あるものを遊間整正の対象とするという基準は、不良箇所の選定には役立つものであるが、その内危険度が高いものはどれかという優先順位を確定しようとすると問題が生ずる。何故ならば、レール、まくらぎ、バラストあるいは締結装置の種類が全線区でみて、それ程異なっていなかった時代であれば差の大きさだけで危険度の大小が判断可能である。

しかし、使用されているレールだけとっても37kg(30kgを含む)から60kgまで7種類にも及び、まくらぎは木とPC(コンクリート製)、バラストはふるい砂利と碎石というように軌道構造の差異が多種類にわたると、単純に差の大きさだけで危険度の大小を判断することはできない。さらには、線路の線形の内、特に曲線半径の大小についても危険度に影響を与えるのである。

不良箇所全てを遊間整正で対応するならば、危険度の判定は必要ないであろう。しかし、限られた労力しか遊間整正作業に振り向けられない場合は、最も危険度の高い箇所から作業を行っていくべきであり、その際必要となるのは合理的な優先順位である。

c) 不良判定基準について

前述したように、従来の遊間管理手法における不良判定基準は±2mmである。この基準は長年の経験をベースとし、軌道構造等の条件が最も悪い場合を前提として定められている。従って、b)と同様に軌道構造や線形にそれ程大きな差異がなければ、基準としての問題は生じない。しかし、軌道構造等の差異が多種類にわたる場合は、判定のバラツキが大きくなり、危険度の高い箇所が放置され危険度の低い箇所に遊間整正作業が投入されるという逆転現象を招来することになりかねない。即ち、不良判定基準についても、軌道構造等の差異に関わらず一定の危険度となるように定める必要がある。

(2)「KT改善法」の提案

上記の問題点を解消し、合理的かつ効率的遊間管理手法として提案したのが、これから述べる「KT改善法」である。「KT改善法」には、勿論レール温度上昇時の座屈及びレール温度下降時の継ぎ目板ボルトの曲がり・折損両方の管理手法が含まれているが、列車の走行安全に対する重要性から見て両者を同一視することはできないので、ここではレール座屈に関する管理手法に限って話を進めることとする。

a) 1回測定法の導入

1回測定法とは、遊間ループ図(図-2)上の②③間(レ

表-2 継ぎ目板拘束力の遊間換算値(大鉄局)

レール種別	50N	50PS	40N	37kg	30kg
継ぎ目板拘束力温度換算値(°C)	2.9	3.4	0.5	1.6	2.0
修正遊間量(mm)	0.8	1.0	0.2	0.5	0.4

表-3 継ぎ目板拘束力の遊間換算値(施設局)

レール種別	50N	50PS	40N	37kg	30kg
継ぎ目板拘束力温度換算値(°C)	3.8	2.6	3.7	2.7	2.7
修正遊間量(mm)	1.1	0.8	1.1	0.8	0.8

ール温度上昇時)、もしくは①④間(レール温度下降時)のいずれか、即ちレールが自由伸縮している状態でのレール温度と遊間の測定値から設定遊間を求める方法である。そのためには、継ぎ目板拘束力の値を事前に知らなければならない。継ぎ目板の締結構造は前述のとおり、レール両側面に設置した継ぎ目板をボルトで締め付けることにより固定するようになっている。このボルトとナットの間には、バネ鋼製のロックナットワッシャを挿入し緩みを極力防ぐような構造としているが、継ぎ目部は上下方向の剛性がレール中間部に比べ1/3程度であり、しかもレール頭頂面には凹凸が生じやすく、これにより車両から大きな衝撃力を受けることになる。それ故、時間の経過とともに緩むことが避けられない構造である。

このため、継ぎ目板拘束力の遊間換算値に関する調査が大阪鉄道管理局(表-2)や国鉄本社(表-3)によって広範囲に行われた。表中の修正遊間量とは、継ぎ目板拘束力が作用している状態で、継ぎ目板の拘束を解き、そのとき生じた伸縮量を意味し、継ぎ目板拘束力の温度換算値とは修正遊間量を後述の式(7)にl=25mを代入して求めた値である。その結果は理論値の1/3程度であり、これを踏まえてレール種別に関係なく継ぎ目板拘束力の遊間換算値を1mmとすることとした。遊間測定値からこの1mmを加減すれば(レール温度上昇時測定の場合は遊間測定値より減じ、下降時測定の場合は加える)、設定遊間を求めることができる。これを修正遊間と称している。

b) 危険度の算出

危険度は、最低座屈強さに対する発生レール軸力の比 α を用い、式(6)で表す。

$$\alpha = \frac{\text{発生レール軸力}}{\text{最低座屈強さ}} = \frac{P_a}{P_l} \quad (6)$$

この危険度の値によりランク判定を行い、遊間整正の優先順位付けを行う。以下、レール軸力及び最低座屈強さの計算方法について述べる。

[レール軸力]

レールは軸方向に全く拘束されない場合、温度変化に応じて自由伸縮する。この時のレール伸縮量 Δl 及び軸力 P_a は、

$$\Delta l = \beta (t - t_0) l \quad (7)$$

$$P_a = 0 \quad (8)$$

t : レール温度 (°C)

t_0 : 設定レール温度 (°C)

となる。

また、レールが完全に拘束されている場合には、

$$\Delta l = 0 \quad (9)$$

$$P_a = EA\beta (l - t_0) \quad (10)$$

E : レール鋼のヤング率 $2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$

A : レールの断面積 cm^2

となり、温度変化に伴いレールに軸力が蓄積されることになる。

以上の4つの式を基礎式として、レール温度が最高に達したときの軸力が算出できる。遊間が存在するときには式(7), (8)を用い、遊間が0に達したのち軸力が蓄積される過程においては、式(9), (10)を用いればよい。

まず、前述の継ぎ目板拘束力の遊間換算値を用いて修正遊間を算出する。この時、遊間が0になり軸力が蓄積する過程で、前後の遊間の影響も考慮に入れる必要があるため、前後の継ぎ目を含めた3継ぎ目の合計遊間量を平均した値を測定遊間として用いる。遊間が0になるまでの温度上昇量 Δt は、式(7)を変形し、

$$\Delta t = \frac{y_0}{\beta l} \quad (11)$$

と表すことができる。

従って、式(10)の基礎式に式(11)の項を加え、軸力の計算式は

$$P_a = EA\beta (t - \frac{y_0}{\beta l} - t_0) \quad (12)$$

となる。

[最低座屈強さ]

軌道の座屈が一般の構造部材のそれと大きく異なる点は、座屈を阻止する力としてレール自身の剛性の他に道床横抵抗力、及びレールとマクラギの組立剛性による軌きょう曲げ強さが働くことにある。それらを考慮した軌道座屈現象に関する研究⁴⁾により、最低座屈強さ P_c は次に示す簡略式⁵⁾によって求めることができる。

$R \geq R_o$ の場合

$$P_{c2} = 3.63 J^{0.383} g^{0.535} N_j^{0.267} \quad (13)$$

$R < R_o$ の場合

$$P_{c1} = 3.81 J^{0.383} g^{0.535} N_j^{0.267} - 20.2 J^{0.789} N_j^{0.600} / R \quad (14)$$

表-4 軌道状態による区分

種別区分	道床種別	道床肩幅	種別
I	碎石	あり	PC
II		I, III以外の構造	
III	ふるい	不足	木

表-5 最低座屈強さ (1f)

軌道状態	直・曲	60kg	50N	50PS	40N	37kg
		R ≥ 1,000m	82	70	73	61
g=400kgf/m	R=500m	80	68	72	60	59
	R=300m	77	64	68	58	56
	R ≥ 1,000m	70	60	62	52	51
g=300kgf/m	R=500m	68	58	61	51	50
	R=300m	63	54	57	49	47
	R ≥ 1,000m	56	49	50	42	41
g=200kgf/m	R=500m	53	47	48	40	39
	R=300m	50	44	45	39	37
	R ≥ 1,000m	50	44	45	39	37

表-6 従来の限度に対する危険度 (%)

軌道状態	直・曲	60kg	50T	50N	50PS	40N	37kg
		R ≥ 1,000m	54	53	49	47	46
g=400kgf/m	R=500m	55	53	50	47	47	44
	R=300m	57	55	53	50	48	46
	R ≥ 1,000m	63	61	57	55	54	51
g=300kgf/m	R=500m	65	63	59	56	55	52
	R=300m	70	66	63	60	57	53
	R ≥ 1,000m	79	76	69	68	67	63
g=200kgf/m	R=500m	83	80	72	71	70	67
	R=300m	88	85	77	76	72	70
	R ≥ 1,000m	88	85	77	76	72	70

$$\text{但し}, \quad R_o = \frac{112.2 J^{0.406} N_j^{0.333}}{g^{0.535}} \quad (15)$$

J : レールの横剛性 (cm^4)

g : 道床横抵抗力 (kgf/cm)

N_j : 軌きょう曲げ強さ

R : 曲線半径 (cm)

ここで、個々の条件毎に計算するのは煩雑かつ効率的ではないので、敷設環境に応じ以下のような場合分けを行った。

①線形については3種類とする。

$$R \geq 1,000m \quad 1,000m > R \geq 500m \quad 500m > R \geq 300m$$

②道床横抵抗力については、軌道構造、軌道状態に応じ、3種類に区分した。

I ($g \geq 400 \text{ kgf/m}$)

II ($g \geq 300 \text{ kgf/m}$)

III ($g \geq 200 \text{ kgf/m}$)

この区分に相当する軌道構造等を表-4⁶⁾に示す。

③レールについては、60kg, 50T, 50N, 50PS, 40N, 37kg(30kgを含む)の7種類に区分した。

以上の①, ②, ③の区分に従い、最低座屈強さPIを求めたのが表-5⁶⁾である。

(注: このPIは式(13), (14)の簡略式を用いず、沼田のノモグラフ⁴⁾を用いて算出している。)

c) 不良判定基準

従来の限度士2mmは、簡単に座屈側の危険度 α に換算でき、これを表-6に示す。この表から士2mmの限度は危険度からみてかなりの差があり、これをベースに判定を行った場合、均一な安全性を確保するという観点で問題があることがわかる。このため、ロングレールの座屈に対する安全度の計算手法を勘案して、限度を定めることとした。

ロングレールは、道床横抵抗力に30%、最低座屈強さに20%の安全率をみて計算されているので、同様の計算を行い、座屈側の危険度を算出すると、その最低値として65%が得られる。即ち $\alpha < 65\%$ であれば座屈に対して安全であるとみなせるので、この値を新たな限度として設定した。

また、1~2箇所程度この65%の限度を超過していても、その前後の軸力が低ければ平均化していくと考えられるので、連続5継ぎ目以上65%を超過している場合に限定して判定を行うこととした。

d) ランクの区分と処置

前述したように、危険度が連続5継ぎ目以上65%を超過している箇所をランク判定の対象とし、その連続する継ぎ目の内の最大の危険度 α を用いて、以下のランク区分を行った。

$\alpha \geq 90\%$	… Cランク
$90\% > \alpha \geq 75\%$	… Bランク
$75\% > \alpha$	… Aランク

遊間整正の優先順位がC→B→Aとなることは言うまでもないが、特にCランクについては危険度が高いため、完全に遊間整正を実施することとした。Bランク、Aランクの判定となった箇所の内、以下に示す条件の箇所についてはロングレールと同等の安全性が確保されているとみなすことから、原則として遊間整正作業は行わず、監視及び作業制限(道床を緩め、道床横抵抗力を低下する可能性がある作業の制限)で対処することとしている。

○PCまくらぎ・道床余盛り(まくらぎ端のバラストが盛り上がった状態になっている場合)有り

$\alpha < 80\%$ (A, Bランク対象)

○PCまくらぎ・道床余盛りなし

$\alpha < 70\%$ (Aランク対象)

○木まくらぎ・道床余盛り有り

$\alpha < 75\%$ (Aランク対象)

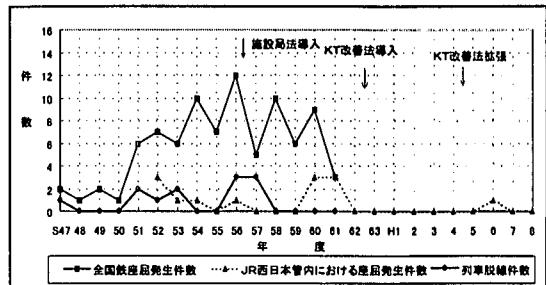


図-3 年度別発生件数(本社速報事故のみ)

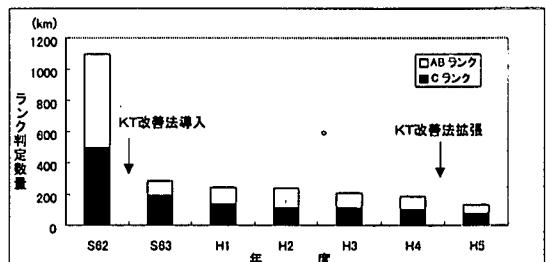


図-4 遊間検査の判定結果推移

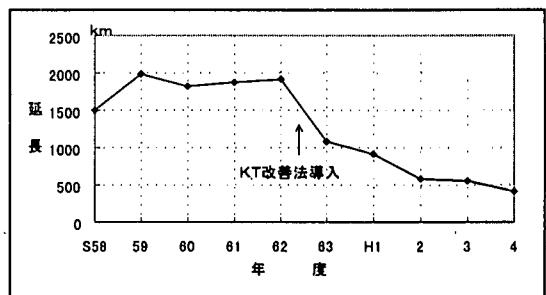


図-5 遊間整正作業量の推移

4. 実作業への適用結果

図-3に、年度別の軌道座屈発生件数と、これによる列車脱線事故の件数を示す。

この図によれば、現在適用している「KT改善法」の草案となった昭和57年における「施設局法」の導入開始、及びその後の手法定着化により、軌道座屈の発生件数は昭和56年をピークに減少し、昭和61年には2件の発生に留まった。また、列車脱線は昭和58年以降0件で推移している。

図-3にはJR西日本管内の軌道座屈発生件数を併せて示しているが、分割民営化後の昭和62年以降は継ぎ目を有する標準的な軌道において、「作業の施工不良」に伴う1件のみの発生となっている。

ちなみに、「施設局法」がまだ十分定着していなかった昭和59年に発生した軌道座屈について、その要因の分

析を行ってみた。

<主な要因>

- | | |
|------------------------|----|
| ①構造物前後の浮きまくらぎによるもの | 3件 |
| ②作業の施工不良によるもの | 4件 |
| ③遊間管理図の判定不適切によるもの | 4件 |
| ④遊間管理手法が一部不明確であったもの | 4件 |
| ⑤継ぎ目部の保守不良で遊間が動かなかつたもの | 1件 |

これから、定着度が不十分で管理が未熟であったもの(③、⑤)と、道床状態の整備が不良であったもの(①、②)が殆どであった。④の事例は、50mレール区間の座屈であり、その遊間管理に対しては「施設局法」がそのまま適用できなかったことが原因である。この事故を契機として、50mレールを含んだ遊間管理手法への拡張の必要性が提言されることとなった。

図-4、図-5に、JR西日本管内における遊間検査の判定結果、及び遊間整正作業の実績を示す。これによると、昭和57年の「施設局法」の導入により整正量及び不良判定数が急増し、以降均衡状態で推移する。しかし、昭和62年の「KT改善法」の導入により、昭和63年以降その数量は1/2～1/3と大幅に減少することになる。さらに、平成5年のレール温度下降時における1回測定法の導入('KT改善法'の拡張)により、その数量は微減となっている。

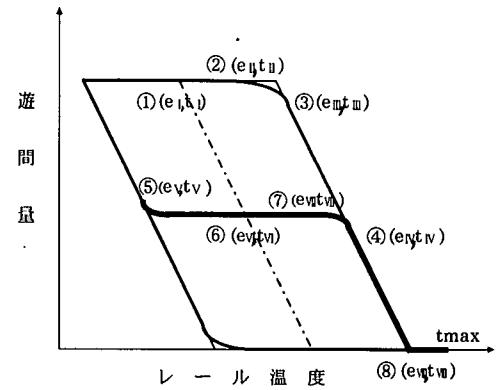
このようにして、遊間管理手法の確立、適用範囲の拡張を経て、継ぎ目を有する標準軌道構造の列車走行安全は確実に確保されるようになったのである。また、その他の効果として、軌道座屈に対するリスクを増加させることなく、「KT改善法」により遊間整正量が大幅に減少し(約1,000km)、約13億円(JR西日本管内)の経費節減を、さらに「KT改善法」の拡張により約5人程度の保守要員削減を果たしている。これらを合計すれば、JR西日本の線路保守費総額に対して約7%に相当する規模となる。

5. 「KT改善法」の確率統計論的検証

これまで述べた遊間管理手法は、実務レベルでは十分な実績があるものの、必然的なバラツキを有する各影響因子について技術的判断により、これを一定値に設定して手法の効率化を図っている。この項では、こうした影響因子を多数の実データから得られた確率変数の扱いとし、新たに提案したレール発生軸力シミュレーションを用いて、現行の手法をモンテカルロ法⁹⁾により確率統計的に検証した。

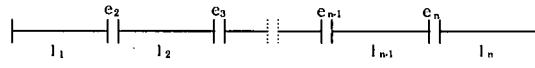
(1) 軸力モデルの構築

レールの軸力は、レール温度の変化に伴い図-6に示すようなループを描いて変化する。各々のレールは図-7に示すように連なっているため、レール温度の変化によ



e₁, ..., e₇ : ある一つの遊間の時間経過による変化を示す。

図-6 遊間ループ



e_n : n番目の継ぎ目の遊間量
l_n : n番目のレール長

図-7 レールの配列

り相互のレールが軸力等の影響を及ぼし合うことになる。

いま、レール温度上昇に伴い遊間が縮小しつつある時、及びレール温度下降に伴い遊間が拡大しつつある時の遊間量をそれぞれe_n、e_vとし、その時のレール温度をt_n・t_vとする。その後の時間経過に伴い、夏季の最高レール温度t_{max}(60°C)に達するまでレール温度が上昇する場合を考える。

一般に、レール温度が△t上昇する場合の軸力の増加分はEAβ△tである。この式を用いて、レール温度をt_{max}まで差分化して表すこととする。軸力計算を△t°C上昇毎に行うものとすれば、1ステップ前の軸力を用いて

$$P_j = P_{j-1} + EA\beta \Delta t \quad (16)$$

j : 計算回数

と表現できる。

次に、レール温度が設定時の温度から上昇し、継ぎ目板拘束力を上回るまでは、これによる軸力P_aが発生する。

$$P_a = P_j \quad (P_j < R_f) \quad (1) \rightarrow (2) \quad (17)$$

R_f : 継ぎ目板拘束力

発生軸力が継ぎ目板拘束力に達した時は、

$$P_a = R_f \quad (18)$$

その時の温度変化量は、

$$R_f / EA\beta$$

となる。

さらに、軸力が継ぎ目板拘束力を超えて増加すると(2)→(3)，レールの伸びに伴って道床総抵抗力r(バラスト

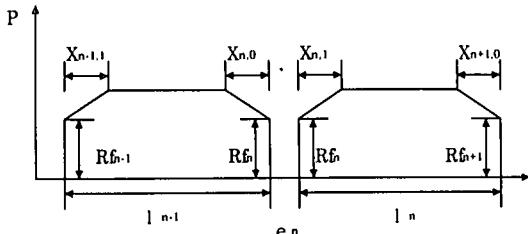


図-8 軸力図

による動きようの縦方向移動に抵抗する力)により、新たにレール軸力が付加され、 r_n をレール l_n における道床縦抵抗力とすれば $r_n l_n / 2$ まで軸力が蓄えられることになる。これを式で表わすと、②③間において道床縦抵抗力相当の軸力に達するまでの発生軸力 P_a は、

$$P_a < R_f_n + \left(l_n - \frac{R_f_n - R_f_{n+1}}{r_n} \right) r_n / 2 \\ = (r_n l_n + R_f_n + R_f_{n+1}) / 2 \quad (19)$$

ならば

$$P_a = P_j$$

但し R_f_n : n番目の継ぎ目板の拘束力

R_f_{n+1} : $n+1$ 番目の継ぎ目板の拘束力

となる。また、道床縦抵抗力相当に達した③点の発生軸力 P_a は

$$P_a = (r_n l_n + R_f_n + R_f_{n+1}) / 2 \quad (20)$$

となる。

次に、道床縦抵抗力により軸力が蓄えられつつある時の遊間変化量を考える。この時、軸力の変化によりレールが伸縮する。その区間長(可動区間)を図-8に示すように X_{n-1} , $X_{n,0}$ とすると、

$$X_{n,1} = (P_a - R_f_n) / r_n \quad (21a)$$

$$X_{n,0} = (P_{a-1} - R_f_n) / r_n \quad (21b)$$

となる。レールの伸び量は

$$\Delta l = \Delta l_1 - \beta X_{n,1} \Delta t + \beta X_{n,0} \Delta t \quad (22)$$

$X_{n,1}$: 継ぎ目 n に接する終点方可動区間長

$X_{n,0}$: 継ぎ目 n に接する起点方可動区間長

である。この伸び量 Δl を設定遊間量 e_n から差し引くことにより、その時の遊間量を算定できる。

また、列車走行によるふく進(温度変化以外の原因でレールが縦方向に移動すること)によっても遊間は影響を受ける。ふく進量(累積通トン百万 t 当たり) d [mm]は時間の関数であるが、シミュレーションに当てはまるようにな发生軸力と同様、温度の関数とする。既往の研究データ(図-9)より、時間とレール温度の関係は概ね正弦波で近似できる。これを式で表すと、以下のとおりである。

$$t = A \cdot \sin\{2\pi(T-F)/365\} + B \quad (23)$$

$$A=27, B=33, F=83$$

t : レール温度 T : 2月1日からの日数

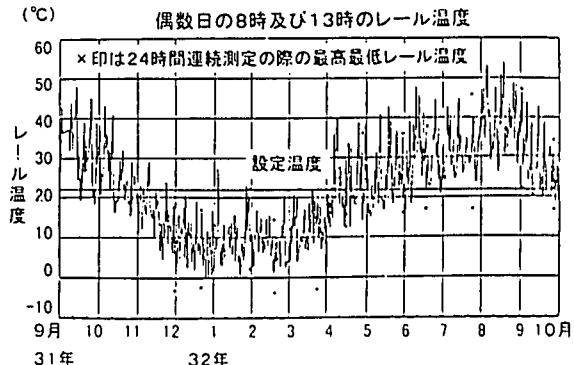


図-9 年間レール温度変化

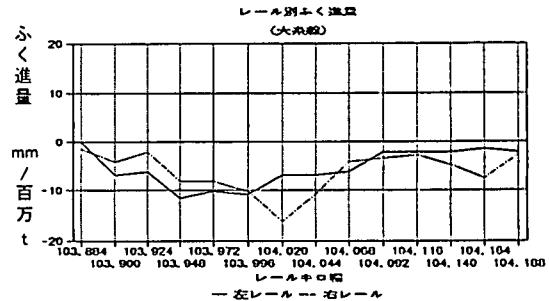


図-10 三角波型ふく進量

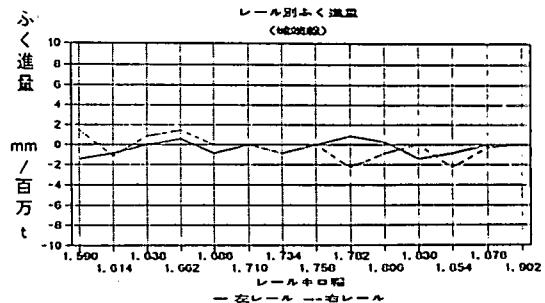


図-11 分散型ふく進量

一方、ふく進 d は時間と線形関係にあるため、次式で定義できる。

$$d = aT_n \quad (24)$$

a : 定数

ここで、 T_n は遊間を測定した時点からの通トン[百万 t]である。シミュレーションで計算を始めるのは遊間を測定した時点からであり、 T は2月1日からの日数であるので、計測時点までに経過した日数 T は次式で与えられる

$$T = (365/2\pi) \sin^{-1}((t_1 - B)/A) + F \quad (25)$$

但し、 t_1 : 遊間測定日の最高レール温度

また、単位を換算するため、1日あたりの通トンが必要となる。よって T_n は

$$T_n = \frac{(T - T_1)}{W} \times \text{年間通トン} / 365 \quad (26)$$

日数 1日あたりの通トン

従って、ふく進をレール温度の関数で表すと

$$d = a \frac{W}{2\pi} \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{t-B}{A} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{t_1-B}{A} \right) \right\} \quad (27)$$

但し、 W : 年間通トン

t : 任意のレール温度

ふく進についてはレールごとに進み量が異なる。また、レールふく進の実態調査を行った結果、図-10、図-11に示すように、ふく進量が中央部で大きくなるタイプ（「三角波型」と称す。）と、特異な傾向を示さないタイプ（「分散型」と称す。）に別れていることがわかった。即ち、定数をそれぞれのレールに対して与える場合、ふく進の場所ごとの分布に何らかの傾向がある線区と全く傾向がない線区それぞれに対し、その与え方を変える必要がある。そこで、前者については場所の関数で与え、後者についてはランダムに与えることとする。

以上の検討結果を利用し、春季に計測された遊間状態からスタートして、夏季に年最高レール温度に達するまでの軸力を計算する。遊間の動きは本来、日々のループを描かせながら徐々にレール温度が上昇していく状態を考えるべきであるが、最高レール温度が同じであればループ上の元の位置に戻ることから、日々の計算ではあえてループを描かせず日々の最高レール温度のみを用いることとし、その差分を徐々に与えてやることにより、温度、遊間、軸力変化を計算する。

上記の検討を踏まえて、レール温度上昇による発生軸力の推移を計算手順に沿って示すと、以下のとおりとなる。

測定遊間(④、⑤)から、継ぎ目板拘束力、道床縦抵抗力を温度換算した値を加減した温度(⑥)より計算を開始する。まず、継ぎ目板拘束力に相当する軸力に達するまで上昇する。(⑥→⑦) (図-12)

$$P_a = P_j (P_j < R_f) \quad (28)$$

⑦から④にレール温度が上昇すると、遊間の縮小に伴い道床縦抵抗力の影響を受け、軸力が増大する。

$$P_j < (r_n l_n + R_f + R_{f,n+1}) / 2 \quad (29)$$

ならば

$$P_{a,n} = P_j$$

道床縦抵抗力による軸力は、最大 $r_n l_n / 2$ まで蓄えられる

(④時点) (図-13)

その後⑧までレールは自由伸縮し、無遊間となるまで軸力の変化はない。(図-14)

$$P_{a,n} = (r_n l_n + R_f + R_{f,n+1}) / 2 \quad (30)$$

無遊間になると再び軸力がたまっていくが、その時その

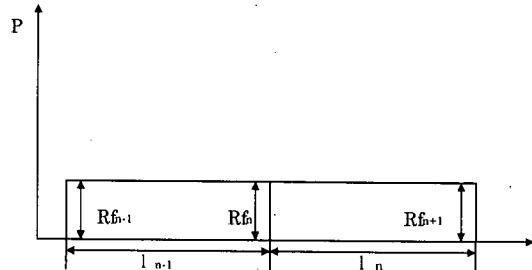


図-12 軸力分布図

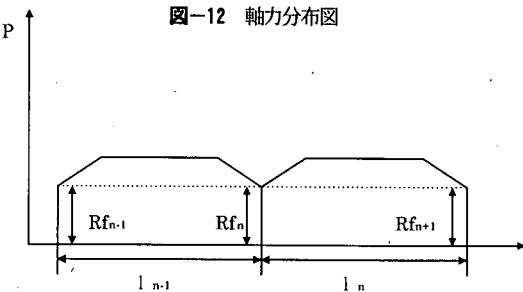


図-13 軸力分布図

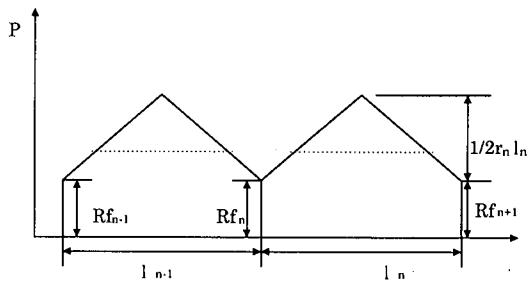


図-14 軸力分布図

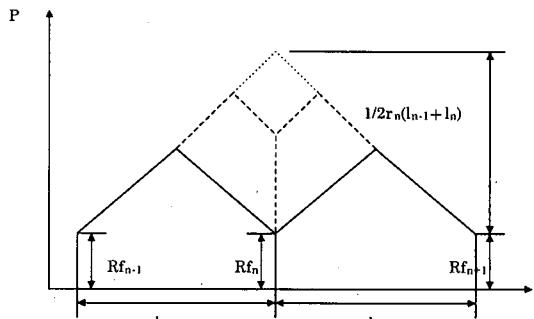


図-15 軸力分布図

レールが持ち得る最高軸力は、無遊間継ぎ目の両側のレールを1つのレールとして扱うことにより求められる。即ち、式(30)中の l_n に無遊間継ぎ目両端のレール長の和を用いれば算出できる。それぞれのレールの軸力は温度

表-7 シミュレーションに用いる諸数値

	因子	種類の内容
定数	曲線半径	1000m, 500m, 300m
	レール重量	50N
	動きよう剛性	PCまくらぎ:1.3, PCまくらぎ:1.1, 木まくらぎ:1.0
確率	継ぎ目板拘束力	PCまくらぎ(平均値 $m=1.5t$, 標準偏差 $\sigma=0.4$) 木まくらぎ($m=1.3t$, $\sigma=0.4$)
	道床縦抵抗力	PCまくらぎ($m=600kgf/m$, $\sigma=63$) 木まくらぎ(F型タイプレート)($m=300kgf/m$, $\sigma=35$) 木まくらぎ(大釘締結)($m=150kgf/m$, $\sigma=21$)
	変数	ふく進量 △波型($m=2mm$, $\sigma=4$) 分散型($m=0.2mm$, $\sigma=0.7$) ふく進 0
	道床横抵抗力	PCまくらぎ($m=501kgf/本$, $\sigma=53$) 木まくらぎ・碎石($m=326kgf/本$, $\sigma=38$) 木まくらぎ・ふるい($m=274kgf/本$, $\sigma=38$)

表-8 シミュレーションの組み合わせ条件

まくらぎ	レール	曲線半径	組み合わせ条件
PC	50 N	1,000	・発生軸力 ○道床縦抵抗力 1種類(確率変数)
		500	○ふく進量=0(定数) ○継ぎ目板拘束力 1種類(確率変数)
		300	・最低座屈強さ ○動きよう剛性は 1.1, 1.3 の 2種類
	木	1,000	・発生軸力 ○道床縦抵抗力は 2種類(確率変数)
		500	○ふく進量は 0, △波型, 分散型の 3種類 ○継ぎ目板拘束力 1種類(確率変数)
		300	・最低座屈強さ ○動きよう剛性は 1.0 の 1種類

上昇に伴い、無遊間継ぎ目の両側の2本のレールを1本のレールとして扱った場合の最高軸力に達するまで増加する。(図-15)

$$Pa = \{r_n(l_{n-1}+l_n) + Rf_{n-1} + Rf_{n+1}\} / 2 \quad (31)$$

また、レールふく進についてはレール温度の上昇に伴い与えられ、これによっても遊間が変化することになる。

なお、無遊間になった後の相互のレールふく進量は、それぞれの平均値で与えている。

最低座屈強さの計算方法については、3-(2)-b)で述べたとおりである。

(2) シミュレーションによる手法検証の方法

前述したように、レール温度の上昇により軌道に発生するレール軸力 Pa と最低座屈強さ Pt を用いて、軌道座屈に対する危険度を求めることができる。 Pa 及び Pt に影響を与える因子としては、

①発生軸力

- ・継ぎ目板拘束力
- ・ふく進量
- ・道床縦抵抗力

②最低座屈強さ

- ・道床横抵抗力

がある。これらの因子が示す分布は、相互に独立した計

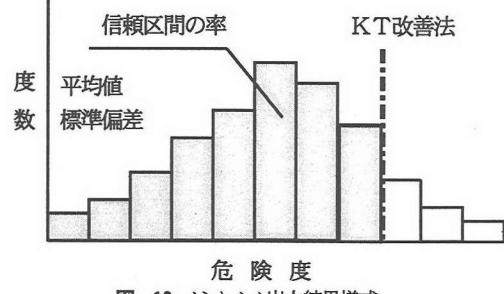


図-16 シミュレーション出力結果様式

測定値から得られており、各々について統計的な解析を行った結果、正規分布をしていると考えてよい^③。なお、道床の種類(碎石、ふるい)、整備状態(道床肩幅、安定度)、まくらぎの種類(木、PC)などの軌道構造別に諸数値の分布する領域範囲がそれぞれ異なることから、構造別の確率分布として扱うこととした。

このことから、多数の独立した確率分布関数の組合せにより、危険度が求められることになる。よって、その分布状態から実現値を得るには、モンテカルロ法を用いたコンピュータ・シミュレーションによって、正規乱数を発生させる方法が最も適していると考えられる。いま、配列された任意のレールに対して、上述の因子の実現値を用いて座屈危険度を計算する。危険度は、任意標本 $\{x_1, \dots, x_n\}$ 、確率変数 $y = F\{x_1, \dots, x_n\}$ から

$$\alpha\{x_1, \dots, x_n\} = Pa/Pt = \frac{Pa[Rf\{x_1, \dots, x_n\}, r\{x_1, \dots, x_n\}, d\{x_1, \dots, x_n\}]}{Pt[g\{x_1, \dots, x_n\}]} \quad (32)$$

により、任意のレールに対して計算できる。また、この危険度は、配列された N 本のレールに対しても同様に算出できる。一方、現行の遊間管理手法による危険度は、軌道構造により一義的に決定される。この危険度 α と式(32)から得られた分布 $\alpha\{x_1, \dots, x_n\}$ を対比することにより、現行手法の危険度が検証できる。

シミュレーションに用いる諸数値、及び組み合わせ条件は、軌道構造から決定される定数と確率分布とにより表-7、表-8に示すとおり与える。また、遊間量の入力データは次の3種類とした。

- ①実測データでCランクが発生したもの(危険遊間)
- ②実測データで無ランクのもの(安全遊間)
- ③レール温度16°C時の規定遊間

シミュレーションは40継ぎ目分行い、最端部の境界条件の誤差を除去するため中間の20継ぎ目に対してのみ評価を行うこととする。計算条件は、コンピュータの処理能力から0.3°C毎に計算を行い、発生させる乱数も1ケースあたり500個とした。

表-9 シミュレーション結果総括表(実測値・ランク発生あり)

軌道構造		ふく進 剛性	曲線 半径	危険度		KT 手法 割合	修正 危険度	安全割 合
PC	碎石			シミュレーション	KT 手法			
木	砂石	なし	1.1	1000	0.51~0.83	0.65	55.6	0.70
			1.1	500	0.51~0.84	0.65	54.0	0.71
			1.1	300	0.52~0.87	0.68	65.4	0.74
			1.3	1000	0.49~0.80	0.62	54.0	0.67
			1.3	500	0.49~0.81	0.63	65.4	0.69
			1.3	300	0.50~0.84	0.65	62.6	0.71
			1.0	1000	0.53~0.84	0.77	95.2	0.80
			1.0	500	0.53~0.86	0.79	95.2	0.82
			1.0	300	0.55~0.81	0.82	95.0	0.85
			分散型	1.0	1000	0.38~0.86	0.77	97.4
			分散型	1.0	500	0.39~0.88	0.79	97.4
			分散型	1.0	300	0.41~0.83	0.82	97.2
			分散型	1.0	1000	0.61~0.96	0.77	47.8
			分散型	1.0	500	0.62~0.98	0.79	48.4
			分散型	1.0	300	0.64~1.00	0.82	48.4
			ふるい	1.0	1000	0.41~0.72	0.98	100.0
			ふるい	1.0	500	0.41~0.74	0.99	100.0
			ふるい	1.0	300	0.43~0.79	1.05	100.0
			分散型	1.0	1000	0.37~0.77	0.98	100.0
			分散型	1.0	500	0.38~0.80	0.99	100.0
			分散型	1.0	300	0.39~0.85	1.05	100.0
			三角波型	1.0	1000	0.46~0.73	0.98	100.0
			三角波型	1.0	500	0.47~0.76	0.99	100.0
			三角波型	1.0	300	0.49~0.81	1.05	100.0

表-10 シミュレーション結果総括表(実測値・ランク発生なし)

軌道構造		ふく進 剛性	曲線 半径	危険度		KT 手法 割合	修正 危険度	安全割 合
PC	碎石			シミュレーション	KT 手法			
木	砂石	なし	1.1	1000	0.47~0.73	0.53	13.6	0.58
			1.1	500	0.47~0.74	0.53	13.6	0.59
			1.1	300	0.47~0.74	0.55	17.2	0.61
			1.3	1000	0.45~0.71	0.53	40.0	0.58
			1.3	500	0.45~0.71	0.53	36.2	0.59
			1.3	300	0.48~0.74	0.55	36.2	0.61
			1.0	1000	0.46~0.79	0.63	70.8	0.66
			1.0	500	0.46~0.81	0.64	70.8	0.67
			1.0	300	0.48~0.86	0.67	70.8	0.70
			分散型	1.0	1000	0.38~0.77	0.63	78.0
			分散型	1.0	500	0.37~0.78	0.64	78.0
			分散型	1.0	300	0.38~0.82	0.67	78.4
			三角波型	1.0	1000	0.50~0.81	0.63	46.4
			三角波型	1.0	500	0.51~0.83	0.64	46.4
			三角波型	1.0	300	0.53~0.88	0.67	47.2
			ふるい	1.0	1000	0.33~0.66	0.78	100.0
			ふるい	1.0	500	0.33~0.68	0.81	100.0
			ふるい	1.0	300	0.34~0.72	0.88	100.0
			分散型	1.0	1000	0.28~0.68	0.78	100.0
			分散型	1.0	500	0.28~0.70	0.81	100.0
			分散型	1.0	300	0.29~0.74	0.86	100.0
			三角波型	1.0	1000	0.43~0.72	0.78	100.0
			三角波型	1.0	500	0.43~0.75	0.81	100.0
			三角波型	1.0	300	0.45~0.79	0.86	100.0

(3) シミュレーション結果

シミュレーションによる出力結果は、各入力データにおける最大・最小軸力分布図及び最高・最低危険度分布図として、図-16の様式でまとめた。ここで、現行の管理手法による各入力データでの危険度については、道床縦抵抗力を無視しているため過小評価されているので、これを補正した危険度を修正危険度として算出した。この修正危険度より低い危険度が、全体の中でどの程度の割合を占めているかが求められれば、現行手法の有する信頼性を知ることができる。

これらの結果を一覧表にしたものと、表-9、表-10、表-11に示す。

これらの表から、以下述べる知見が得られた

a) 入力データがランク発生の実測データの場合

この場合は修正危険度以下の割合が、PCまくらぎ(碎石)で86.6~91.8%、木まくらぎ(碎石)のふく進なし及びふく進が分散型の条件で97.2~99.6%、ふく進を三角波型で与えた条件で67.0~67.2%、木まくらぎ(ふるい)で100%となった。ランク発生箇所に対しては、遊間整正や作業制限などの何らかの対策が講じられることを考えると、「KT改善法」による評価は十分な安全余裕を有していることがわかる。この余裕が過大になると、遊間整正作業量の増大を招くことになるのでこの点からみても修正危険度は、ほぼ妥当な指標になっていると考えられる。

表-11 シミュレーション結果総括表(規定遊間)

軌道構造		ふく進 剛性	曲線 半径	危険度		KT 手法 割合	修正 危険度	安全割 合
PC	碎石			シミュレーション	KT 手法			
木	砂石	なし	1.1	1000	0.40~0.67	0.42	0.6	0.47
			1.1	500	0.40~0.67	0.42	0.6	0.48
			1.1	300	0.41~0.70	0.44	1.0	0.50
			1.3	1000	0.38~0.64	0.40	0.6	0.45
			1.3	500	0.38~0.65	0.41	1.4	0.47
			1.3	300	0.40~0.67	0.42	1.0	0.48
			1.0	1000	0.45~0.79	0.50	29.4	0.53
			1.0	500	0.46~0.81	0.51	29.8	0.54
			1.0	300	0.48~0.85	0.53	29.2	0.56
			分散型	1.0	1000	0.34~0.84	0.50	14.8
			分散型	1.0	500	0.35~0.86	0.51	16.2
			分散型	1.0	300	0.36~0.91	0.53	16.2
			三角波型	1.0	1000	0.62~0.91	0.50	0.0
			三角波型	1.0	500	0.62~0.94	0.51	0.0
			三角波型	1.0	300	0.65~0.98	0.53	0.0
			ふるい	1.0	1000	0.43~0.84	0.62	59.8
			ふるい	1.0	500	0.43~0.87	0.64	63.8
			ふるい	1.0	300	0.45~0.92	0.68	68.0
			分散型	1.0	1000	0.30~0.85	0.62	65.8
			分散型	1.0	500	0.32~0.93	0.64	67.2
			分散型	1.0	300	0.34~0.99	0.68	69.2
			三角波型	1.0	1000	0.59~0.98	0.62	0.4
			三角波型	1.0	500	0.60~0.97	0.64	1.0
			三角波型	1.0	300	0.62~1.00	0.68	2.2

しかし、木まくらぎ（ふるい）の場合は、いずれの条件でも修正危険度がシミュレーション結果の最大値を大きく上回っているので、遊間整正作業量のさらなる縮減が図れる可能性を示唆している。

b) 入力データが無ランクの実測データ（安全遊間）の場合

この場合は、修正危険度以下の割合がPCまくらぎ（碎石）で66.2～90.0%，木まくらぎ（碎石）で66.4～88.0%木まくらぎ（ふるい）で100%であった。修正危険度とシミュレーションによる危険度の最大値との差は、最大でも20%以下であり、無ランク ($\alpha < 65\%$) とCランク ($\alpha \geq 90\%$) の危険度の差25%より小さく、無ランクからCランクへの危険度の逆転現象は発生しない。また、遊間整正作業の適正化を図る目的で「KT改善法」は構築されているので、修正危険度以下の割合がこの程度以上であれば実務上は問題がないということがわかる。木まくらぎ（ふるい）の場合は、a) と同様、遊間整正作業量のさらなる縮減を図ることが可能である。

c) 入力データが規定遊間の場合

この場合、PCまくらぎ（碎石）、及び木まくらぎ（碎石）でふく進なし、ふく進が分散型の条件では、「KT改善法」による修正危険度以下の割合が小さく、危険側へ乖離していることになって必ずしも好ましい状況とはいえない。しかし、シミュレーション結果の分布範囲をみると、ランク発生となる65%以上の頻度は比較的小さいので、座屈安定性の面では実務上特に問題はないと考えてよい。木まくらぎ（ふるい）でふく進なし及びふく進が分散型の条件では、修正危険度以下の割合が71.0～76.6%であり、妥当な結果である。ただ、木まくらぎでふく進を三角波型で与えた場合は、危険度の乖離は勿論、シミュレーション結果の分布範囲についても65%以上の割合が極めて大きいので、ふく進が著しく発生している区間ではふく進対策工を十分に施す必要があると考えられる。

また、今回のシミュレーションでは、現行の手法において無条件に危険度を90%としてCランクに判定している3箇所連続無遊間継ぎ目についても、その危険度の検証を行っている。その方法は、入力条件として3箇所連続無遊間であって軌道構造が最も有利な場合(PCまくらぎ、碎石、曲線半径R=1000m)と、2箇所連続無遊間であって軌道構造が最も不利な場合(木まくらぎ、ふるい、曲線半径R=300m)とを選び、両者の危険度を比較するというものである。結果は表-12に示すとおりであり、レール温度16°Cの時の規定遊間である8mmの場合をとって評価すると、3箇所連続無遊間の場合の危険度は軌道構造上最も有利な場合でも87%となり、安全余裕を考慮すると危険度90%・Cランクと判定するのが妥当であることがわかった一方、2箇所連続無遊間の場合は最も不利な場合でも危険

表-12 連続無遊間ランク判定のミュレーション条件及び結果

計算条件	レール温度=16°C	無遊間以外の継ぎ目の遊間量(mm)				
		6	7	8	9	10
PC・碎石・R=1,000m・3継ぎ目無遊間	0.95	0.91	0.87	0.82	0.78	
PC・碎石・R=1,000m・2継ぎ目無遊間	0.85	0.82	0.79	0.75	0.68	
木・ふるい・R=300m・2継ぎ目無遊間			0.85	0.77	0.68	

注)3継ぎ目連続無遊間の場合には、継ぎ目番号9, 10, 11 2継ぎ目連続

無遊間の場合は、継ぎ目番号10, 11を無遊間とし、他の継ぎ目の遊間量はすべて同じ値とした

度は85%であり、無条件にこれをCランクと判定すれば、いたずらに遊間整正作業量を増大させるだけである。以上のことから、連続無遊間による無条件でのCランク判定は、3箇所連続（3継ぎ目以上）とすることが妥当である。

6. 現行の手法に対する評価と改善および今後の研究課題

(1) 現行の手法に対する評価と改善

前5章において述べたコンピュータ・シミュレーションの結果から、現行の「KT改善法」に対する評価と改善の方向について以下述べる。

- ①現行の手法で最も危険度が高いCランクについては、シミュレーションの結果でみても危険度が高く、遊間整正対象箇所とすることはきわめて妥当である。Cランクより危険度が低いB、Aランクについても、これを遊間整正対象箇所または酷暑期の作業制限対象箇所とすることが同じく妥当であることは容易に類推できる。
 - ②木まくらぎ（ふるい）の場合、「KT改善法」によって求めた危険度がシミュレーション結果の最大値を大きく上回っていることから、その評価を大幅に改善できる。即ち、遊間整正対象箇所に指定する危険度の下限を引き上げ、遊間作業量を削減することが可能である。
 - ③レールふく進を三角波型で与えた条件では、規定遊間であっても危険度が高く、こういった箇所ではふく進防止対策がきわめて重要である。ふく進の状況が現場できちんと把握できている場合は、ランク判定を高い側に見なおすことも必要と考えられる。
 - ④3箇所連続無遊間の場合、現行手法ではこれをCランクに判定しているが、シミュレーションによる危険度から判断して妥当である。
- これらのことから、現行の管理手法により遊間整正対象箇所の抽出を行い、これを実務において厳正に反映している限りは安全上の問題が惹起されることはないと考えられる。

(2) 今後の研究課題

今後の研究課題としてとり上げるべき項目は、以下のと

おりである。

- ①B, Aランク発生箇所に対して、同じくシミュレーションを行い、その統計的特徴を把握して、遊間整正対象箇所に指定する危険度の下限の検証を行うこと。特に、ふく進が発生している箇所については、B, Aランクであっても危険度が大きくなる可能性がシミュレーションから示唆されている。
- ②危険度65%を判定線とすることについての妥当性を検証すること。また、判定線を超過する継ぎ目数が、5継ぎ目より少ない場合これを無視してよいかどうか、かなり多数になる場合一層危険度が増大することがないのかどうか、検証すること。
- ③危険度が同じであっても、判定線超過の状態、例えば丘陵状に超過している場合と高い山状になっている場合の差について、シミュレーションによる比較を行うこと。
- ④Aランクや無ランク箇所における酷暑期の作業制限の考え方については、シミュレーション手法の適用により改善すること。また、酷暑期に行うレール張り出し警備（特別巡回検査）対象箇所の選定に、シミュレーション手法を活用すること。
- ⑤道床横抵抗力を増大する方法を適用した場合の効果について、統計的なデータを蓄積しシミュレーション手法を用いて判定すること。
- ⑥シミュレーション手法をさらに簡略化し、ランク発生の全箇所に適用できるようにして、順位付けを一層正確なものにすること。

7. おわりに

本研究においては、軌道座屈に影響を与える各因子の実測データを用い、その危険度をシミュレーションにより算出して、これを現行の遊間管理手法による危険度と比較することにより、その評価を行った。その結果、現行手法による危険度は、危険度が大きい、即ち軌道座屈の安全性の観点では危険領域にある部分で、十分な信頼

性のあることが定量的に確認された。このことは、現行手法の導入以来、軌道座屈による鉄道事故がほとんど発生していないことを理論的に証明するものである。また、本研究で用いたモンテカルロ法によるシミュレーションは実態に即しており、軌道座屈の危険度評価に対して十分活用できることを裏付けている。

しかし、本研究から、現行手法は遊間管理においてまだ改良できる余地が残されており、今後各種データのさらなる蓄積、コンピュータ・プログラムの改修を実施すれば、なお一層効率的かつ高信頼性を有する手法に改善できると考えられる。

謝辞：本論文の作成にあたっては、多くの方々からの助言、指導、協力を得たが、特に、東京大学工学部土木学科 家田 仁教授には、内容の詳細に至るまで適切な助言及び指導を多分にいただいた。ここに記して、謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 徳岡研三、武上康介：50mレールの遊間管理、土木学会 第41回年次学術講演会、1986. 11.
- 2) 佐藤吉彦、梅原利之：線路工学、日本鉄道施設協会、1987. 2.
- 3) 日本国鉄道：軌道整備基準規程、1964. 12.
- 4) 沼田 実：ロング・レールの座屈強さ、鉄道技術研究報告、No. 721, 1970. 8.
- 5) 佐藤吉彦、小林 悟：60kgレールを含む各種レールの軌道座屈強さと座屈強さ簡略式、鉄道技術研究報告、No. 759, 1971. 10.
- 6) 神谷牧夫、寛 和夫：レールの遊間一張り出し防止のための一、鉄道現業社、1984. 2.
- 7) U. A. ロザノフ、E. M. ソボリ（坂本 実、磯野秀明訳）：確率論・モンテカルロ法、総合科学出版、1973. 3.
- 8) 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、博士論文、1997. 2.

(1998. 1. 12 受付)

A STUDY ON THE INSPECTION AND ADJUSTMENT OF RAIL JOINT GAP
FOR THE SAFETY OF TRAIN OPERATION

Kenzo TOKUOKA, Yoshihiro FUKUI and Yoshinobu YAMAGUCHI

In this study, the existing inspection and adjustment method of rail joint gap is evaluated by comparing the degree of danger calculated from the existing method with that calculated from the computer simulation using the Monte Carlo method. In conclusion, it can be verified that the degree of danger calculated from the existing method is sufficiently reliable in the range of dangerous area where the risk of track buckling (sun kink) is very high. It can also be indicated theoretically that after the existing method was introduced to JNR track maintenance , probability of occurring of track buckling has been drastically reduced.