

GIS データを用いた軌道の広域 2 次元 FEM によるふく進と軌道座屈の発生予測法

浦川 文寛* 渡辺 勉*

A Method of Predicting Rail Creeping and Track Buckling Using Wide-area 2-D FEM of Railway Tracks Based on GIS Data

Fumihiko URAKAWA Tsutomu WATANABE

This study developed a horizontal two-dimensional static elasto-plastic FEM analysis program for rail track. The validity of the developed program was confirmed by comparing it with an existing one-dimensional analysis model. Additionally, it was found that the developed program was able to analyze the behavior prior to track buckling and the buckling temperature T_A with the same level of accuracy as the existing buckling analysis model. Furthermore, corner breakage in curves was a problem in the analysis using GIS line data of railway. Therefore, we proposed a smoothing method in which corner breakage was replaced with a circular arc of radius R and then moving average was performed, and confirmed its effectiveness.

キーワード：ふく進，軌道座屈，GIS，広域の構造解析，軌道線形の平滑化，日陰/日向

1. はじめに

主要な鉄道線路の多くで，レール同士を溶接してつなぎ，レール継目（ここでは，継目板とボルトによりレール端部を接続する普通継目を指す）をなくしたロングレールが用いられている。ロングレールは走行安全性の向上，騒音や振動の低減，乗り心地の向上等，多くの利点を持つ反面，レール継目でのレール伸縮を吸収する機能がなくなり，レール温度が上昇した際に圧縮のレール軸力が発生する。そのため，夏季の高温時に，特にバラスト軌道では，軌道がレール直交方向に張り出す軌道座屈の危険性が高まる。ロングレールではレールの温度 T_R に対する圧縮軸力 P_R は式(1)より算出される。

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

ここで， E, A, β はそれぞれレールの縦弾性係数，断面積，線膨張係数である。 T_0 は設定温度と呼ばれる，レールの中立温度（軸力がゼロとなる温度）の管理上の目標値である¹⁾。 ΔP は設定温度と中立温度の差による付加軸力で，レールのふく進（長手方向の移動）や軌道作業によって生じる。我が国のロングレール管理では，レール温度が高温となる夏季までに，式(1)の T_R に夏季の予想最高レール温度とふく進量を代入して求めた最大発生軸力と，軌道の剛性と形状から算出される座屈耐力とを照査して座屈に対する安全度の判定を行う。さらに，判定結果に応じ，道床バラストの追加や軌道整備，設定替（長手方向に移動したレールを元の位置に戻す作業），夏季特別巡回等の処置を行うことで，軌道座屈に対する安全性を確保している²⁾。

通常，ロングレール軌道は予想最高レール温度に対して十分な座屈耐力を得られるよう設計されており，安全度判定で問題となる箇所のはほとんどはふく進が大きい箇所である。ここで，現状のふく進測定は

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

おおよそ 200 m 間隔で行われており、局所的なふく進の発生までを正確に把握できているとは言い難い。また、前述の処置には多大な労力が必要となるため、著大なふく進の発生が予見される箇所にて適切な対策（例えばアンチクリーパー³⁾の設置等）を講じ、ふく進自体を低減させることが望ましい。このように、ふく進の詳細かつ定量的な予測は、軌道座屈に対する安全性の向上と管理コストの低減のために重要である。

ふく進の原因は既往の文献でいくつか挙げられているが、それらは①列車の通過や制動による荷重⁴⁾、②軌道の修繕・保守作業^{1) 4) 5)}、および③レール温度（年間の最高/最低温度^{4) 5)}、日陰/日向の温度差および太陽の日周運動に伴う日陰の移動^{6) 7)}）に大別できる。この内、①と②のふく進への影響については不明な点が多く、定量的な予測が難しい。一方③については、阿部ら^{6) 7)}の理論的検討により明らかにされつつある。また、筆者らが開発したレール温度予測モデル^{8) 9)}では、GIS (Geographic Information System) データと気象データを用いて 100km 程度の広域のレール温度分布を、地物による日陰を加味して予測することが可能である。このレール温度の予測結果を入力値とした軌道の構造解析を行うことで、レール温度によって発生するふく進の定量的な予測が可能と考える。同様の検討は文献 10 にて行われたが、レール長手方向の 1 次元解析であったため、曲線や通り変位、日陰による左右レールの温度差等、軌道の変形に影響すると思われる種々の条件を再現できなかった。

これら条件を再現するためには水平方向の 2 次元解析が必要であるが、2 次元解析にはふく進の精緻化だけでなく、軌道座屈を解析上で再現できるという利点がある。詳細は 4 章で述べるが、既往の FEM による座屈解析は座屈耐力の指標を算出するため、非線形の解法に弧長増分法を用いる等、比較的複雑な計算を行っている。そのため、対象とする線路延長は 1km 程度と短かく、軌道変位等の条件も限定される¹¹⁾。

本稿では、レール温度によるふく進を精緻にモデル化するため、水平方向 2 次元の静的弾塑性 FEM 解析プログラム（以降「開発プログラム」）を Fortran にて開発する。開発プログラムは非線形の解法を単純化することで、100km 程度の広域のふく進および座屈の計算を可能とするものである。これを既往のレール温度予測モデルと組み合わせ、バラスト軌道におけるふく進および軌道座屈の発生を解析的に予測する手法（図 1）を提案する。また、既往の解析モデルとの比較等から、開発プログラムの妥当性を検証する。

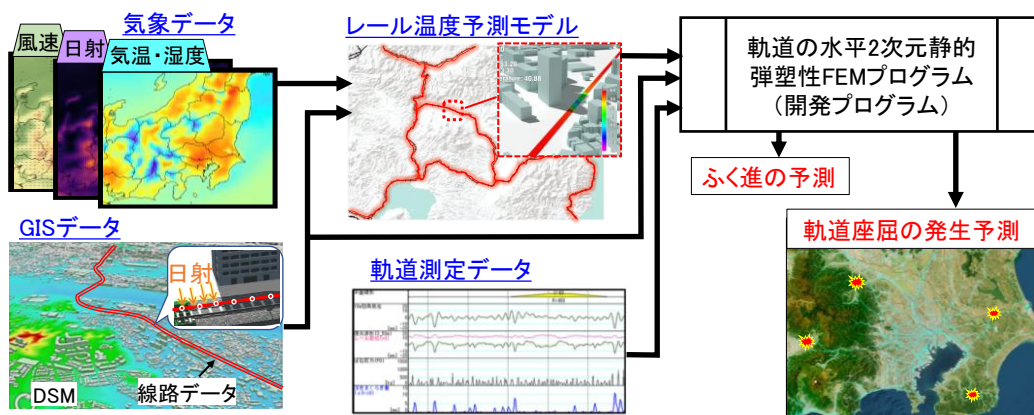


図 1 鉄道線路の広域 2 次元 FEM によるふく進と軌道座屈の発生予測法

2. 開発プログラム

2.1 モデルの概要

図 2 に示すとおり、レールとまくらぎをオイラー梁要素、レール締結装置を並進と回転方向のばね要

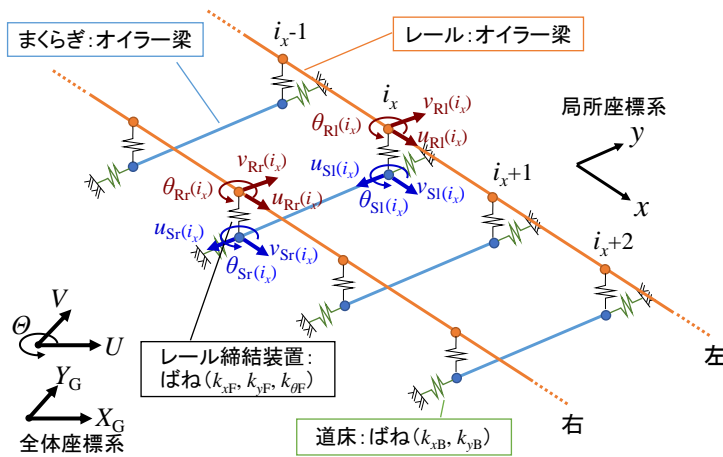


図2 解析モデルの構造・座標系

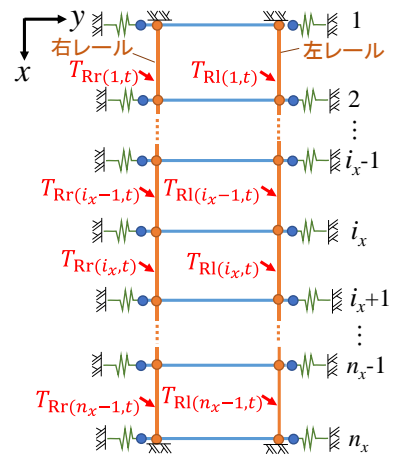


図3 解析モデルの荷重条件・拘束条件

素、道床を並進方向のばね要素でモデル化する。ここで、開発プログラムおよび本稿では、レール長手方向を局所座標系の x 、レール直交方向を局所座標系の y とし、 $+y$ 側を x 軸の正方向を向いて左側とする。また、全体座標系の X_G, Y_G は入力する GIS データに準ずる。レール締結装置のばね要素はレールとまくらぎの節点を結合し、道床のばね要素はまくらぎの節点と不動点を結合する。 x 方向に位置番号 i_x ($=1, 2, \dots, n_x$) を与え、レール要素 i_x は、 i_x と $i_x + 1$ のレール節点から成る要素とする (図 2)。まくらぎ節点を左右のレール節点と同じ位置に配置し、 i_x の左右のまくらぎ節点を両端とする梁要素をまくらぎ要素 i_x とする (図 2)。荷重条件は図 3 に示すとおり、左右レール要素 i_x に熱解析で得られた左右レール温度 $T_{Rl}(i_x, t)$ 、 $T_{Rr}(i_x, t)$ を与え、レールの熱膨張による軸力を負荷する。拘束条件は図 3 に示すとおり、モデル両端 ($i_x=1, n_x$) の左右レール節点を完全固定とする。開発プログラムでは、GIS 線路データに沿って概ね 1m 間隔でレール節点を配置し、その節点毎の位置座標とレール温度の時刻歴データ (レール温度予測モデル^{8) 9)} の解析結果を使用) を読み込み、前述の要素、荷重条件、境界条件のモデル化を自動で行う。

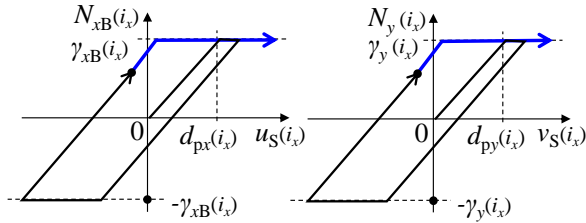
2.2 線形/非線形モデル

線形/非線形のモデル化手法を表 1 にまとめる。まくらぎがバラスト道床上を滑動する動きを再現するため、道床のばね要素は降伏荷重 γ と降伏変位 d_p で定義される完全弾塑性とする (図 4)。実軌道ではレール締結装置部でもレールは滑動しうるが、「レール締結装置の抵抗力 \gg 道床の抵抗力であるため、ふく進は道床部で生じる」という従来のバラスト軌道におけるロングレールの設計法¹²⁾を踏襲し、レール締結装置のばね要素は弾性線形ばねでモデル化する。また、軌道座屈や曲線区間でのレールの張り出し等の大変形に対応するため、幾何学的非線形としてレール梁要素の回転を考慮する。具体的には図 5 に示すとおり、レールの要素座標系をレール変位に応じて逐次定義する。その他は全て線形モデルとする。

開発プログラムでは一般的な FEM と同様、節点変位 $\{D\}$ を未知数とし、要素毎に静的な力のつり合いから立てた要素剛性方程式を全体剛性方程式に重ね合わせ、全体剛性方程式を $\{D\}$ について解く。非線形モ

表 1 要素毎の線形/非線形のモデル化手法

部位	要素	材料非線形	幾何学的非線形	境界条件非線形
レール	オイラー梁	線形	要素の回転	線形
まくらぎ	オイラー梁	線形	線形	線形
締結装置	ばね (x, y, θ)	線形	線形	線形
道床	ばね (x, y)	完全弾塑性	線形	線形



(a) 軌道長手(x)方向 (b) 軌道直交(y)方向
図4 道床のばね特性 (完全弾塑性)

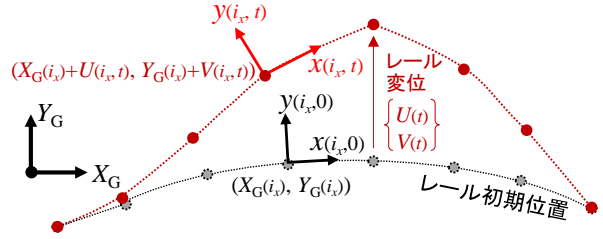


図5 節点変位に応じたレールの要素座標系の定義

デルを導入するため、求めた $\{D\}$ を使用してまくらぎ節点の塑性変位とレールの要素座標系を更新し、前回の節点変位の解 $\{D\}$ との差が収束判定値 D_c (本稿では 0.05mm とする) 以下となるまで繰り返し計算を行う。定式化や計算フロー等の詳細は文献 13 を参照されたい。

3. ふく進解析の妥当性の検証

3.1 解析条件

軌道の延長は 200m とし、図 6 に示すように線形は直線，円曲線，曲線 (GIS データ) とする。直線については文献 10 の 1 次元解析プログラム (以降「既往プログラム」) との比較を行う。円曲線について、ロングレール区間では曲率半径 R が概ね 600m 以下は急曲線に分類され、かつ軌道の剛性の関係から R は 300m 以上とすることが一般的である¹²⁾。ここでは、急曲線における解の安定性を確認するため、曲率半径 R を 600m ($R600\text{m}$)、および R の最小値よりも急な 200m ($R200\text{m}$) とした 2 条件で解析を行う。曲線 (GIS データ) では、実線路の GIS データから曲線区間 200m を抽出して使用する。

解析パラメータは、一般的なバラスト軌道のロングレール区間を想定して表 2 を用いる。既往プログラムでも同様の解析パラメータを使用するが、レールは梁ではなく軌道長手方向のばね要素であるため、ばね定数は $E_{R(i_x)}A_{R(i_x)}/L$ ($=0.00775\text{m}^2 \times 206 \times 10^9\text{N/m}^2 / 1\text{m} = 1.60\text{MN/m}$) とする。ここで、 L はレールの x 方

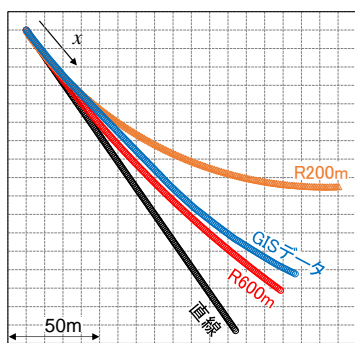
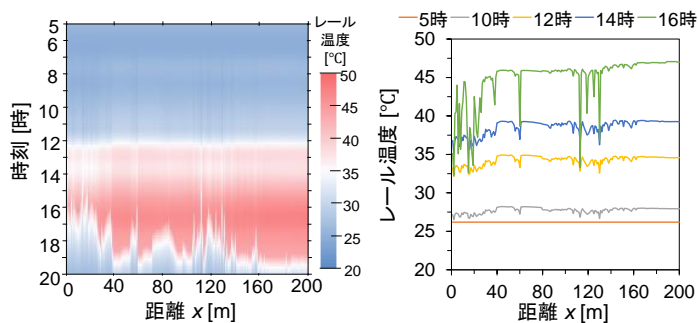


図6 線路(左レール)の線形データ



(a) 時空間分布のコンター (b) 特定時刻の温度分布
図7 解析に用いたレール温度

表2 軌道の解析パラメータ (片側レール, 1m 当たり)

部材	記	項目	設定値	部材	記	項目	設定値
レール (JIS 60kg)	E_R	ヤング率	$206 \times 10^9\text{N/m}^2$	レール締結 装置	k_{xF}	ばね定数 $_x$ 方向	$62.5 \times 10^6\text{N/m}$
	A_R	断面積	0.00775m^2		k_{yF}	ばね定数 $_y$ 方向	$31.3 \times 10^6\text{N/m}$
	I_R	断面 2 次モーメント	$5.12 \times 10^6\text{m}^4$		$k_{\theta F}$	ばね定数 $_回転方向$	$4.33 \times 10^4\text{rad/m}$
	β_R	線膨張係数	$11.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	道床	γ_{xB}	降伏荷重 $_x$ 方向	8000N
PC まくらぎ	E_S	ヤング率	$88 \times 10^9\text{N/m}^2$		γ_{yB}	降伏荷重 $_y$ 方向	4000N
	A_S	断面積	0.033m^2		d_{pxB}	降伏変位 $_x$ 方向	0.002m
	I_S	断面 2 次モーメント	$3.4 \times 10^4\text{m}^4$		d_{pyB}	降伏変位 $_y$ 方向	0.002m

向の節点間距離である。レール温度は、日射量・熱伝導の連成解析⁸⁾により、日陰を考慮して算出した図 7 の値を用いる。レールの中立温度は 30℃とする。

3.2 解析結果

3.2.1 直線

図 8(a), (b)に、直線のレールの軸力と x (レール長手) 方向の変位の解析結果をそれぞれ示す。レール軸力について、図 8(a)より、開発プログラムの解析結果 (実線) と既往プログラムの解析結果 (破線) は一致することが分かる。レール変位について、図 8(b)より、開発プログラムと既往プログラムを比較すると、距離方向の波形のずれが若干見られるものの、両者の値はほぼ等しい。距離方向の波形のずれは、レールの温度応力計算の際、既往プログラムではレール梁要素 i_x を構成する節点 i_x と $i_x + 1$ の温度の平均値 $(T_{R(i_x)} + T_{R(i_x+1)})/2$ を使用しているのに対し、開発プログラムでは $T_{R(i_x)}$ を使用しているためと思われる。

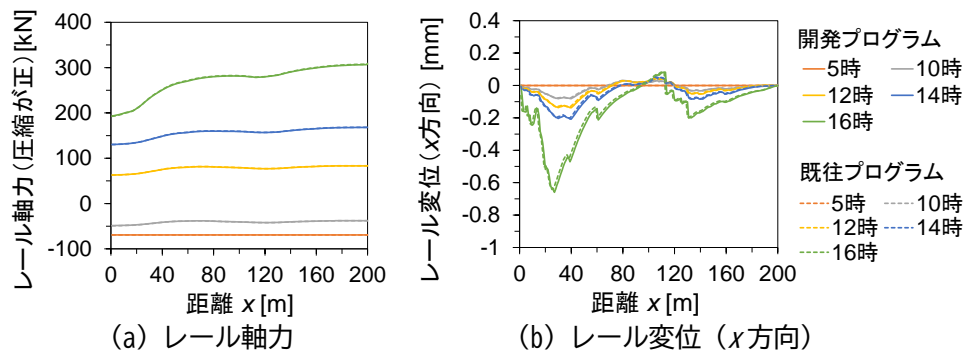


図 8 直線の解析結果および既往プログラムとの比較

3.2.2 円曲線

図 9 に、右 (曲線外側) レールの軸力と, x, y (レール長手, 直交) 方向の変位の解析結果を示す。レール y 方向変位について、レールが高温となる 12 時以降では曲線全体が外側に張り出すような変位が生じ、R200m の変位は R600m よりも約 3~4 倍程度大きくなった (図 9(c))。レールの軸力と x 方向変位については、R600m と R200m で差は見られない (図 9(a), (b))。また、図 9(b), (c)より、レール x, y 方向変位は 1mm 以下と、道床ばねの降伏変位の 2mm (表 2) よりも小さいため軌道に塑性変形は生じていない。そのため、レールの軸力 (図 9(a)) と x 方向の変位 (図 9(b)) は直線 (図 8(a), (b)) とほぼ等しくなった。

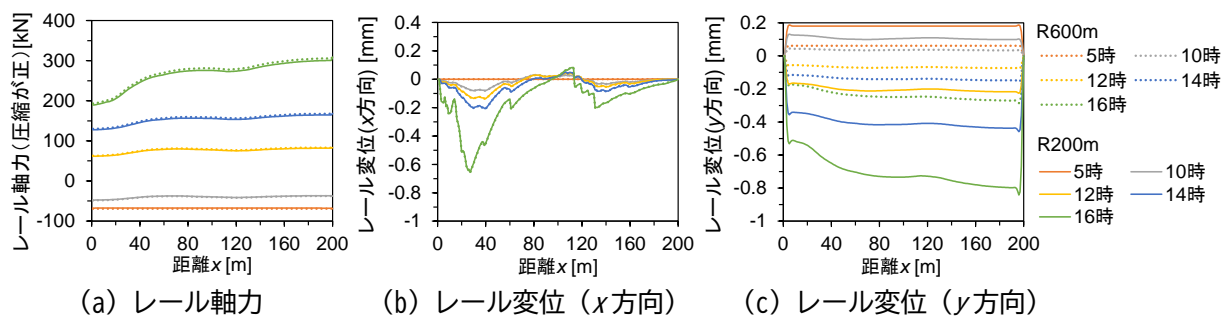


図 9 円曲線の解析結果

3.2.3 曲線 (GIS データ)

図 10 に GIS 線路データから算出したレール初期形状の曲率を示すが、解析区間内に曲率が $0.04m^{-1}$ を超える (曲率半径 R が 25m を下回る) 箇所がいくつか存在することが分かる。これは、実線路の線形は直線と円弧が緩和曲線を挟んで接合されて曲率が緩やかに変化するのに対し、GIS 線路データでは、線路を直線の集合で表しており、直線の接合部ではレールが角折れの状態となるためである。図 11 に、GIS 線

路データを用いた解析結果を示すが、前述の角折れ箇所では y 方向変位が 10mm を超える著大変位が局部的に生じ (図 11(c))，円曲線と比較してレールの軸力が低下し (図 11(a))， x 方向変位が増加した (図 11(b))。このように，入力した線路の形状データの問題によりレールに著大な変位が生じたものの，そのような特異な条件下においても計算は問題なく収束し，解析結果にも不自然な挙動は見られない。

以上，開発プログラムによる直線と円曲線での解析結果が既往プログラムと一致したこと，R200m の急曲線およびレール y 方向変位が 10mm を超える特異な条件下でも安定した解が得られたことから，開発プログラムの妥当性を確認できた。一方で，GIS 線路データに含まれる角折れが解析上で問題となった。開発プログラムは地理情報と関連付けた日射量解析との連成解析を前提としており (図 1)，レールの位置情報として GIS データの使用は不可避である。そのため，解析を実施する前に，レール線形の平滑化や，軌道の設計形状による補正を行う等，GIS 線路データの調整が必要であることが分かった。これについては，5 章にて GIS 線路データの角折れを解消するための平滑化方法を検討する。

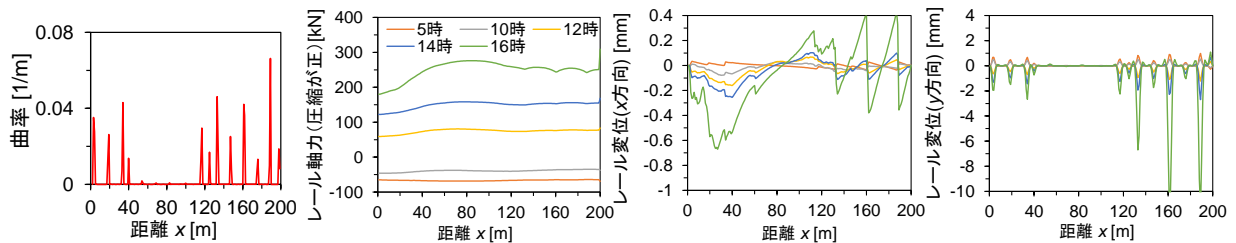


図 10 GIS 線路データの曲率

(a) レール軸力 (b) レール変位 (x 方向) (c) レール変位 (y 方向)
図 11 曲線(GIS データ)の解析結果

4. 座屈解析の精度検証

軌道座屈におけるレールの中立温度からの温度上昇量と y (レール直交) 方向変位には図 12 に示す関係がある。実際の軌道では，図 12 の赤破線に示すとおり，レール温度の上昇に伴い軌道の微小な変位が増大し，限界点(A)点に達すると瞬時に大変位が発生して(B)点へ飛び移る。図 12 の(A)点の左側および(C)点の右側は安定なつり合い状態であり，それぞれ座屈前および座屈発生後の状態に対応する。(A)~(C)間は不安定なつり合い状態であり，実際にはこの状態で軌道がつり合いを保つことはない。(A)点における温度 T_A は，実際に軌道座屈が発生する「座屈発生温度」であり， T_A に相当する軸力を「座屈発生軸力」と呼ぶ。(C)点における温度 T_C は，理論上これ以下では軌道座屈が生じない温度であり， T_C に相当する軸力を「最低座屈強さ」と呼ぶ¹²⁾。ここでの「相当する軸力」とは，レールの変位が完全に拘束された状態で，中立温度からの温度上昇量 T' により生じる軸力であり， $EABT'$ (E, A, B はレールの縦弾性係数，断面積，線膨張係数)で表される。 T_A と T_C は，従来から座屈耐力を表す指標に用いられており，既往の座屈解析モデル¹¹⁾では T_A と T_C を得るため，弧長増分法を用いて不安定なつり合い状態を解き，図 12 の黒線の関係を算出している。一方，開発プログラムは実現象と同様，図 12 の赤破線に示すとおり，レール温度が T_A に達すると軌道座屈が生じて y 方向変位が急激に増加する。これは，開発プログラムは実軌道の挙動の再現を目的としており，レール温度に対する安定なつり合い条件を時間ステップ毎に解いているためである。このように，開発プログラムでは T_C を算出することはできないが， T_A の算出は可能である。

本章では，開発プログラムにて静的座屈解析を行い，レールの温度上昇量と y 方向変位の関係から座屈発生温度 T_A を求め，既往の座屈解析モデルによる T_A の解析結果と比較し，解析精度を検証する。既往の座屈解析モデルには，FEM 軌道安定性解析ツール ATRAS^{11) 14)}を用いる。

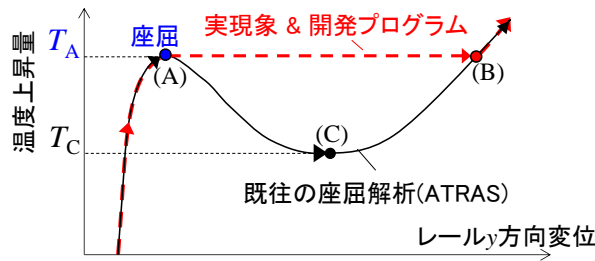


図 12 軌道座屈時のレールの中立温度からの温度上昇量と y 方向変位の関係

4.1 解析条件

軌道線形には文献 14 と同様、半径 $R=600\text{m}$ の円曲線に、軌道座屈の起点となる波長 l 、波高 $\delta_0=20\text{mm}$ 、中心位置 x_0 の初期通り変位 δ を曲線外側に張り出すように重ねさせた形状を用いる (図 13)。図 13 の δ は第 I 波形と呼ばれ、既往の座屈解析において曲率半径の小さい (おおよそ 1000m 以下) 条件で使用される通り変位である¹⁵⁾。また、レール温度は日陰による温度低下を模擬するため、レール長手方向の温度差 ΔT_x (図 14(a))、左右レールの温度差 ΔT_y (図 14 (b)) を与える。レール長手方向の温度分布は図 15(a)に示すとおり、温度差 ΔT_x 、温度が低下する延長 W 、および初期通り変位の中心からの距離 λ により定義する。また、温度差 $\Delta T_x, \Delta T_y$ は、 T_1 が所定の $\Delta T_x, \Delta T_y$ に達した時点から、 T_2 を T_1 と同じ速度で温度上昇させることで計算に導入する (図 15(b))。ここで、解析上の軌道座屈は、レール温度上昇に伴い初期通り変位が増大して発生するため、初期通り変位の中心位置 x_0 と座屈箇所の中心位置は等しい。

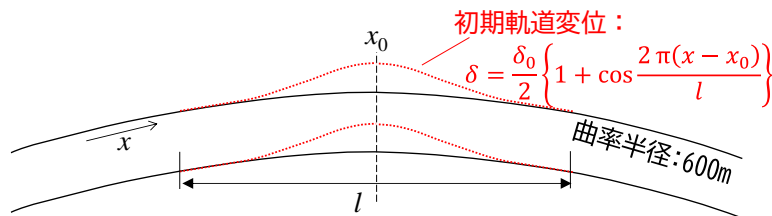
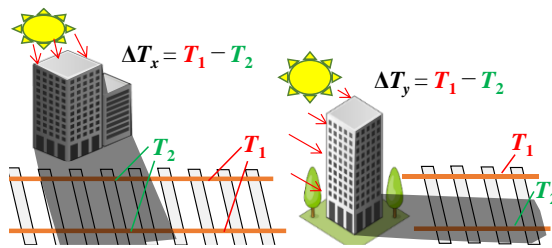
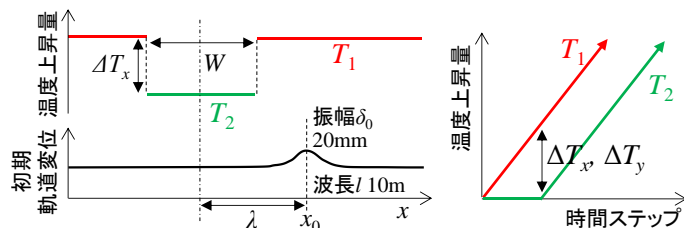


図 13 座屈解析に使用する軌道線形



(a) 長手方向の温度差 ΔT_x (b) 左右の温度差 ΔT_y

図 14 日陰等によるレール温度差



(a) 長手方向の温度分布 (b) 温度上昇の位相差

図 15 温度差 $\Delta T_x, \Delta T_y$ の解析への導入方法

表 3 座屈解析の解析パラメータ (片側レール 1m 当たり)

部材	記号	項目	設定値	部材	記号	項目	設定値
レール (JIS 50kgN)	E_R	ヤング率	$206 \times 10^9 \text{N/m}^2$	レール締結 装置	k_{xF}	ばね定数_x 方向	$62.5 \times 10^6 \text{N/m}$
	A_R	断面積	0.00642m^2		k_{yF}	ばね定数_y 方向	$31.3 \times 10^6 \text{N/m}$
	ν_R	ポアソン比	0.3		$k_{\theta F}$	ばね定数_回転方向	$4.33 \times 10^4 \text{rad/m}$
	β_R	線膨張係数	$11.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	道床	γ_{xB}	降伏荷重_x 方向	8000N
PC まくら ぎ	E_S	ヤング率	$88 \times 10^9 \text{N/m}^2$		γ_{yB}	降伏荷重_y 方向	4000N
	A_S	断面積	0.033m^2		d_{pxB}	降伏変位_x 方向	0.002m
	ν_S	ポアソン比	0.3		d_{pyB}	降伏変位_y 方向	0.002m

表 4 座屈解析の解析ケース ※曲線外側が高い条件を正とする

	$\Delta T_x [^\circ\text{C}]$	$\Delta T_y [^\circ\text{C}]$	$W [\text{m}]$	$\lambda [\text{m}]$	$\gamma_{yB} [\text{kN/m}]$	ケース数
Case0	0	0	0	0	4.0	1
Case1	15, 30	0	35, 70	0~85	2.0, 2.8, 4.0, 6.0	29
Case2	0	-20, 10, 20	0	0	2.0, 4.0, 6.0	9

解析パラメータは既往の座屈解析の値¹⁴⁾を参照して表3とする。解析ケースは表4に示すとおりで、温度差のない標準状態を Case0、レール長手方向の温度条件 ΔT_x 、 ΔT_y 、 W 、 λ 、道床の y 方向の強度 (降伏荷重 γ_{yB}) を変えた 29 ケースを Case1、左右レール温度 ΔT_y と γ_{yB} を変えた 9 ケースを Case2 とする。

4.2 解析結果

Case0, Case1, Case2 のレール温度上昇量と y 方向変位の関係 (Case1, Case2 は一例) を図 16 に示すが、前述のとおり、開発プログラムは座屈直後の剛性低下による不安定な力のつり合い状態を追跡できず、座屈後に y 方向変位が急増したが、軌道座屈が発生する(A)点 (図 12) は既往モデル (ATRAS) とほぼ同じである。また、座屈発生温度 T_A の、開発プログラムと ATRAS の解析結果の比較は図 17 に示すとおりで、両者はよく一致することが分かる。これらの結果より、開発プログラムは座屈発生温度 T_A を既往の座屈解析モデルと同程度の精度で解析できることを確認した。

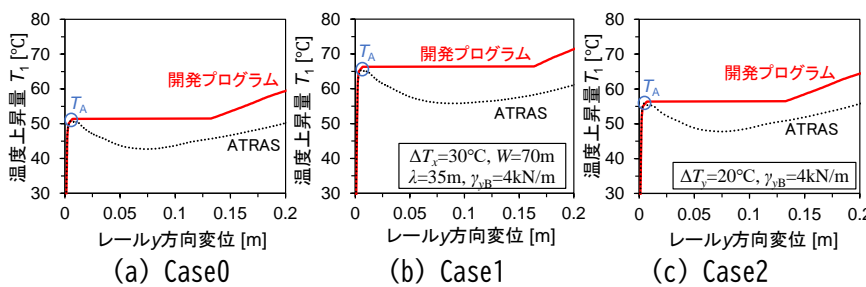


図 16 座屈解析の結果 (レール温度上昇量 vs. y 方向変位)

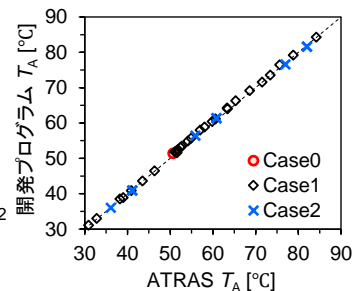


図 17 座屈発生温度 T_A の比較

5. GIS 線路データの平滑化方法 の検討

5.1 平滑化方法

5.1.1 移動平均による平滑化

対象の節点座標 $\{X_{G(i_x)}, Y_{G(i_x)}\}^T$ を、その接点を中心とした指定範囲内の節点の位置座標の平均値とする。

5.1.2 円弧による平滑化

図 18 に示すように、GIS 線路データに節点位置で接する半径 $R_{(i_x)}$ の円を左右に配置し、円が GIS 線路データと 2 点で接触する箇所では、データをその 2 点間の円弧で置き換える。

5.1.3 円弧+移動平均による平滑化

後述するが，前項の円弧による平滑化では，円弧（平滑化データ）と直線（元データ）の結合部で曲率が大きくなったため，円弧で平滑化したデータをさらに移動平均で平滑化するものである。

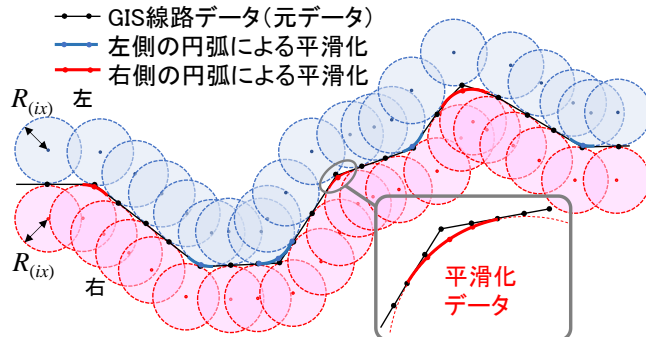


図 18 円弧による GIS 線路データの平滑化

5.2 平滑化の試計算

前節の平滑化方法を図 19 に示す延長約 12km の GIS 線路データに適用し，表 5 に示す 7 条件で平滑化を実施した。GIS 線路データの曲率が特に大きかった $x=911\text{m}$ 付近の，平滑化前後の線路形状の一部を図 20，曲率分布を図 21 に示す。図 20 より，曲線の角折れ部にて最大約 2m の変化が確認できる。また，移動平均による平滑化では，元データに見られる角折れが解消され，曲率の最大値は①20m 移動平均では 0.013m^{-1} ，②40m 移動平均では 0.007m^{-1} となった。円弧による平滑化について $x=911\text{m}$ の角折れに着目すると， $x=911\text{m}$ 近傍では③R200m 円弧，④R300m 円弧とも設定した円弧半径 R 分の 1 の曲率となるが，③R200m 円弧では $x=927\text{m}$ ，④R300m 円弧では $x=938\text{m}$ で局所的に曲率が増加した（図 21）。これは，線路

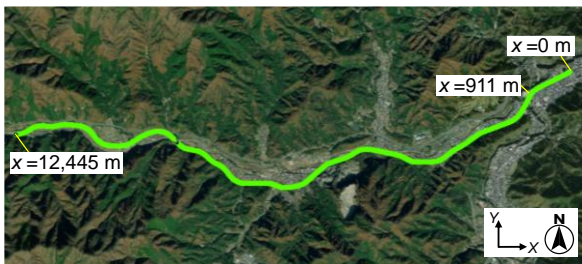


図 19 GIS 線路データ (①元データ)

表 5 平滑化条件

平滑化条件	平滑化方法	平均範囲	円弧半径
①20m 移動平均	5.1.1 項	20m	-
②40m 移動平均	5.1.1 項	40m	-
③R200m 円弧	5.1.2 項	-	200m
④R300m 円弧	5.1.2 項	-	300m
⑤R200m 円弧+20m 移動平均	5.1.3 項	20m	200m
⑥R300m 円弧+20m 移動平均	5.1.3 項	20m	300m
⑦R300m 円弧+40m 移動平均	5.1.3 項	40m	300m

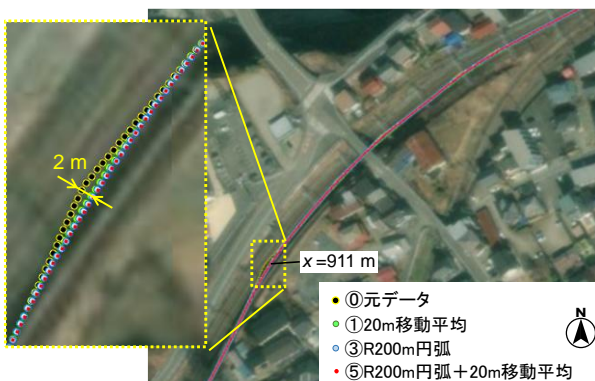


図 20 平滑化による線路形状の変化 ($x=911\text{m}$ 付近)

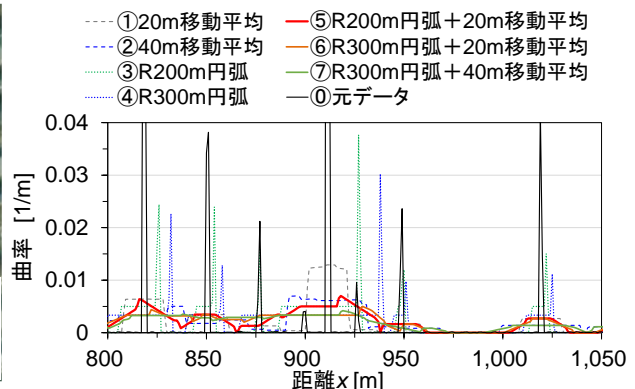


図 21 平滑化による曲率分布の変化

データは 1m ピッチの離散データであるため、円の理論上の接触位置と節点配置のずれにより、円弧（平滑化データ）と直線（元データ）の結合部で新たに角折れが生じたためある。円弧+移動平均による平滑化では、前述の円弧と直線の結合部における角折れが緩和され、曲率の最大値は⑤R200m 円弧+20m 移動平均では 0.007m^{-1} 、⑥R300m 円弧+20m 移動平均では 0.005m^{-1} 、⑦R300m 円弧+40m 移動平均では 0.004m^{-1} 、となった（図 21）。また、円弧+移動平均では、 $x=911\text{m}$ の角折れ部近傍にて、曲率が円弧半径の逆数（R200m では 0.005m^{-1} 、R300m では 0.0033m^{-1} ）となり、かつ角折れ部から離れるにつれ曲率が徐々に減少して直線と結合されることが分かる（図 21）。実線路では円曲線と直線、または 2 つの円曲線の間で曲率を緩やかに変化させる緩和曲線が設けられているが、円弧+移動平均による平滑化により、このような実線路の線形を再現できた。

これらの結果より、移動平均または円弧+移動平均による平滑化を行うことで、GIS 線路データの角折れを除去できることが分かった。ただし、移動平均では曲線の線形が元データの形状分解能や精度に依存するため、種々の GIS 線路データに対して広く適用することは難しい。一方、円弧+移動平均による平滑化では、角折れの除去に加え、円曲線と直線の間で曲率が緩やかに変化する緩和曲線を模擬することができた。以上より、GIS 線路データの平滑化には、円弧+移動平均による平滑化を採用することとした。今回は平滑化に用いる円弧の半径を全区間で同一としたが、曲線半径の実際の値を曲線毎に設定することで、実線路の線形形状を再現できると考える。図 6 の「GIS データ」に R200m 円弧+20m 移動平均による平滑化を行い、3.2.3 項と同様の解析を行った結果を図 22 に示す。同図より、平滑化前に見られた角折れ部での局所的な著大変位（図 11(c)）が、平滑化によって解消されることを確認した。

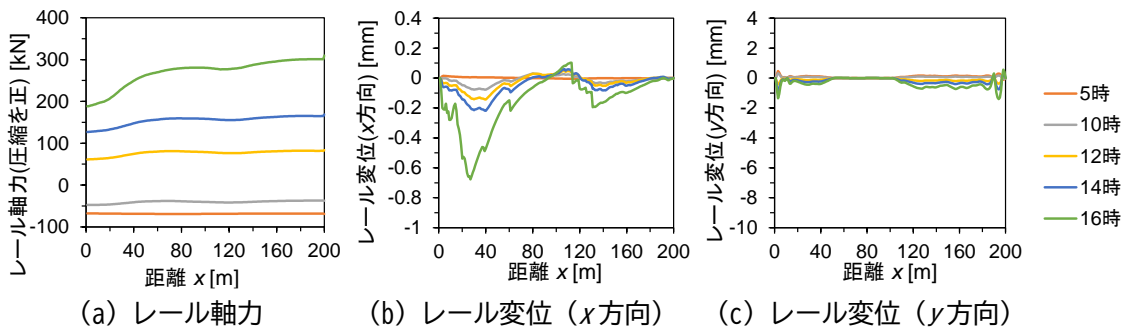


図 22 図 6 「GIS データ」を平滑化した線路データを用いた解析結果

5.3 平滑化後の GIS 線路データを用いた解析例

図 19 の GIS 線路データを R200m 円弧+20m 移動平均にて平滑化し、図 23 に示すレール温度を入力して開発プログラムによる解析を行う。ここで、図 23 の温度分布は、図 19 に示す線路と標高の GIS データから、夏季（9 月 1 日）晴天時の平均的なレール温度を推定した結果であり、局所的に温度が低下している箇所は、トンネル区間または周囲の山等の陰となっている箇所である。解析パラメータは、一般的なバラスト軌道のロングレール区間を想定した表 2、および軌道座屈が発生しやすい条件として、表 2 の道床の y 方向の降伏荷重 γ_{yB} を $1/2$ (2 kN) とした 2 条件とする。

図 24(a), (b)に、右レールの x 方向と y 方向変位の、14 時の解析結果を示す。図 24(a)より、 $\gamma_{yB}=4\text{kN}$ では日陰等によりレール温度の x 方向の勾配が高い箇所にて最大 5mm のふく進（レール x 方向変位）が生じた。 $\gamma_{yB}=2\text{kN}$ では、曲線区間で 50mm を超える著大な通り変位（レール y 方向変位）が発生し（図 24(b)）、その近傍で約 2mm のふく進が生じた（図 24(a)）。このようなレールの直交方向の変位に伴うふく進は、既往の 1 次元解析¹⁰⁾では再現できない挙動であり、2 次元の静的弾塑性 FEM 解析を行う開発プログラム

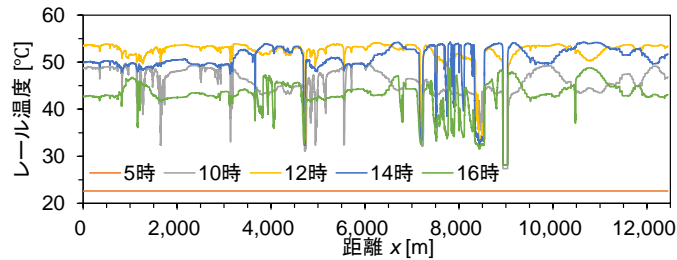


図 23 解析に使用したレール温度の時空間分布

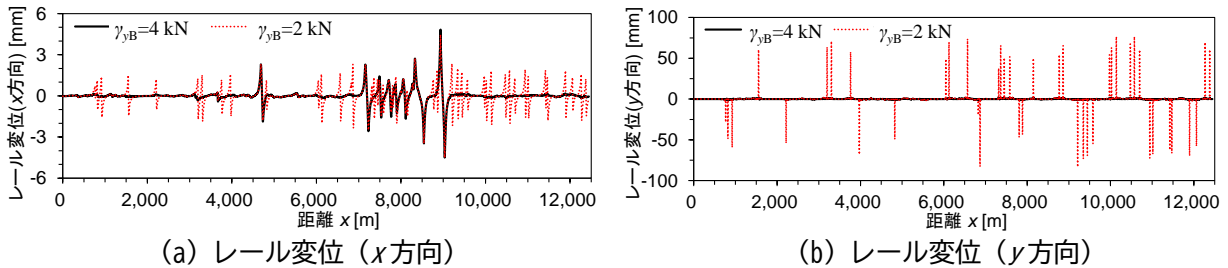


図 24 図 19 の GIS 線路データを R200m 円弧+20m 移動平均で平滑化した形状を用いた 14 時の解析結果

の有効性が示された。

以上、本稿で提案した手法により、これまで実施困難であった延長 10km を超える広域のふく進と軌道座屈解析を、曲線や通り変位、左右レール温度差等、レール直交方向変位に影響すると思われる種々の条件を考慮して実施できることを確認した。

6. まとめ

本稿では、水平方向 2 次元の静的弾塑性 FEM 解析プログラムを開発するとともに、既往のレール温度予測モデルとの連成解析により、ふく進および軌道座屈の発生を解析的に予測する手法を提案した。また、既往の解析モデルとの比較を行い、開発プログラムの妥当性を検証した。得られた結果を以下にまとめる。

- ・開発プログラムによる直線と円曲線での解析結果は、既往の 1 次元解析結果と一致した。また、曲率半径 200m の急曲線およびレール y 方向変位が 10mm を超える特異な条件下でも安定した解が得られたことから、開発プログラムの妥当性を確認した。
- ・開発プログラムは、軌道座屈前の挙動および座屈耐力の指標の一つである座屈発生温度 T_A を、既往の座屈解析モデルと同程度の精度で解析できることが分かった。
- ・レールの位置情報として GIS 線路データを使用して解析を行うには、曲線区間の角折れの補正が必要であることが分かった。そこで、GIS 線路データの角折れ部を指定半径 R の円弧で置き換え、さらに移動平均を行う平滑化手法により、円曲線と直線間の緩和曲線を模擬できるなど、実線路の再現性が高い補正が行えることを確認した。また、これにより、角折れ部での局所的な張り出しの問題を解消できた。
- ・開発プログラムにより、既往の 1 次元解析では不可能であった、曲線区間等でのレールの直交方向の変位に伴うふく進挙動を再現することができた。
- ・以上の結果より、開発プログラムの精度と有効性を確認でき、提案手法によるふく進および軌道座屈の発生予測は可能であることが分かった。今後は、軌道変位や、気象条件の季節変動、太陽の年周運動をモデル化し、それらがふく進の進展や軌道座屈の発生に及ぼす影響を明らかにする予定である。

文 献

- 1) 玉川新悟, 西宮裕騎, 額瀬智也: 低温時のロングレール保守作業制限の見直しの提案, 鉄道総研報告, Vol.36, No.3, pp.11-16, 2022
- 2) 保線工学編集委員会編: 保線工学 (上) 第 5 編-第 1 章, pp.284-330, 鉄道現業社, 2016
- 3) 新版軌道材料編集委員会編: 新版 軌道材料 第 4 編-第 4 章, pp.220-224, 鉄道現業社, 2011
- 4) Esveld, C., "Improved Knowledge of CWR track," in Interactive Conference on Cost Effectiveness and Safety Aspects of Railway Track, UIC/ERRI, Paris, France, 1998. https://esveld.com/Download/TUD/D202_Paris_98.PDF (閲覧日: 2025 年 4 月 21 日)
- 5) Zakeri, J.A., Mohammadzadeh, S. and Barati, M., "New definition of nutral temperature in continuous welded railway track curves," Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol.61, No.1, pp.143-147, 2018.
- 6) 阿部和久, 桑山卓也, 元好茂: 空間的・時間的な温度変化を受けるロングレールの軸力分布解析, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.16, pp.101-108, 2012
- 7) 高木柚子, 阿部和久, 紅露一寛: 建物の日陰の移動がレール中立温度に及ぼす影響, 土木学会論文集, Vol.80, No.15, 23-15007, 2024
- 8) 浦川文寛, 渡辺勉: 地理・気象データを使用した鉄道用レール温度予測法, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.76, No.2, pp. I_553-I_564, 2020
- 9) 浦川文寛, 渡辺勉: GIS データを使用した夜間の鉄道用レール温度予測法の開発, AI・データサイエンス論文集, Vol.4, No.3, pp.425-434, 2023
- 10) 浦川文寛, 渡辺勉, 木村成克: 日陰等に起因するレール軸力変動の広域予測法の提案, 第 26 回 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019), S2-4-2, 2019
- 11) 浅沼潔, 曾我部正道, 後藤恵一, 徳永宗正: 弾塑性有限変位解析によるバラスト軌道の座屈温度特性値に関する検討, 土木学会論文集 A2, Vol.68, No.1, pp.78-91, 2012
- 12) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造 11 章 ロングレール, 丸善出版, pp.173-186, 2012
- 13) 浦川文寛, 渡辺勉: GIS データを用いた鉄道線路の広域 2 次元 FEM によるふく進と軌道座屈の発生予測法, AI・データサイエンス論文集, Vol.5, No.3, pp.84-94, 2024
- 14) 浦川文寛, 渡辺勉, 木村成克: 地物の陰影を考慮した軌道座屈安定性評価に関する一考察, 鉄道工学論文集, Vol.23, pp.245-252, 2019
- 15) 沼田実: ロングレールの座屈強さ, 鉄道総研技術研究報告, No.721, 1970