

延長60kmの軌道に対する365日間の レール温度シミュレーション

鉄道力学研究部 軌道力学研究室
主任研究員 浦川 文寛

背景(1): ロングレール管理の難しさ

- レール軸力 P_R ➡ 著大な温度変化 ➡ 軌道座屈, レール破断

$$P_R = \frac{\alpha(T_R - T_0)}{\text{温度荷重}} + \Delta P$$

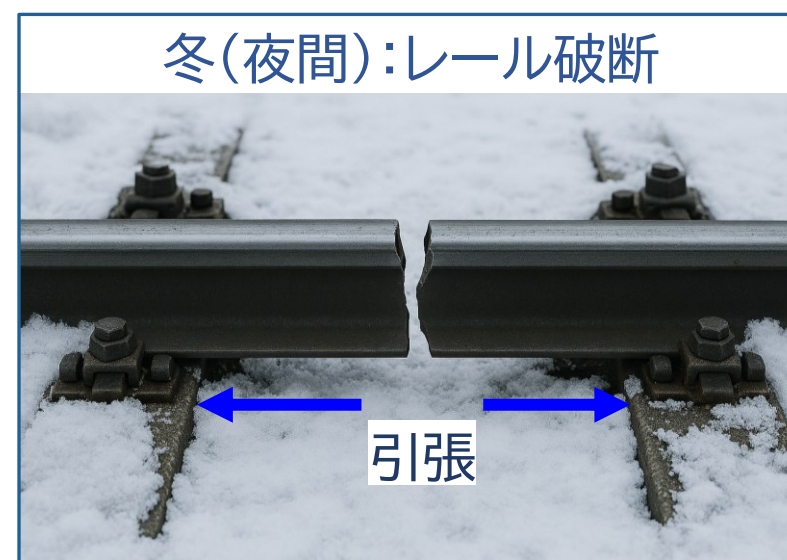
T_R : レール温度, T_0 : 設定温度
 ΔP : 心く進等による付加軸力

- 年間の予想最低・最高レール軸力の基準値超過

↓
・ 設定替え (ΔP の解消) 多大な労力

- 測定レール温度の基準値超過

↓
・ 夏季特別巡回(見張り)
・ 運転規制(徐行, 停止) 多大な労力



※本図は生成AI(M365 Copilot)により作成されたものです。

背景(2): 環境・社会状況の変化

ネガティブ要素

- 人口減少・高齢化の進行 ➡ 維持管理の金銭的・人的資源の確保が困難に

- 地球温暖化の進行 {
 - ・ 夏季の気温等の上昇
 - ・ 極端な気象 (晴天, 無降水日) の増加

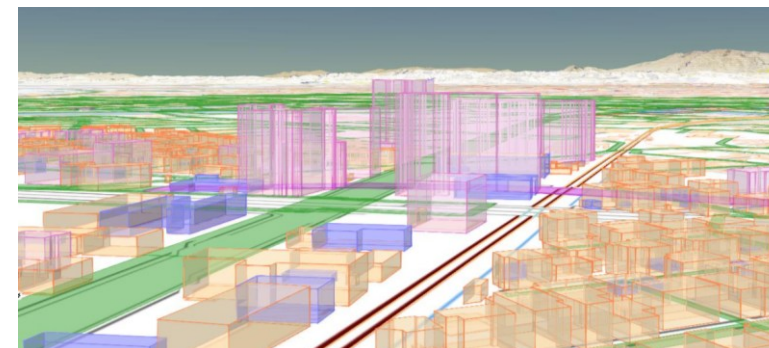
↓
レール温度が高温となる頻度が増加 ➡ 夏季特別巡回・運転規制の頻度が増加

ポジティブ要素

国土地理院「3次元電子国土基本図の整備」,
第53回国土地理院報告会

- 3次元電子国土基本図の整備 (政府によるDX推進)

➡ 高度GISデータを安価に利用できる環境の整備



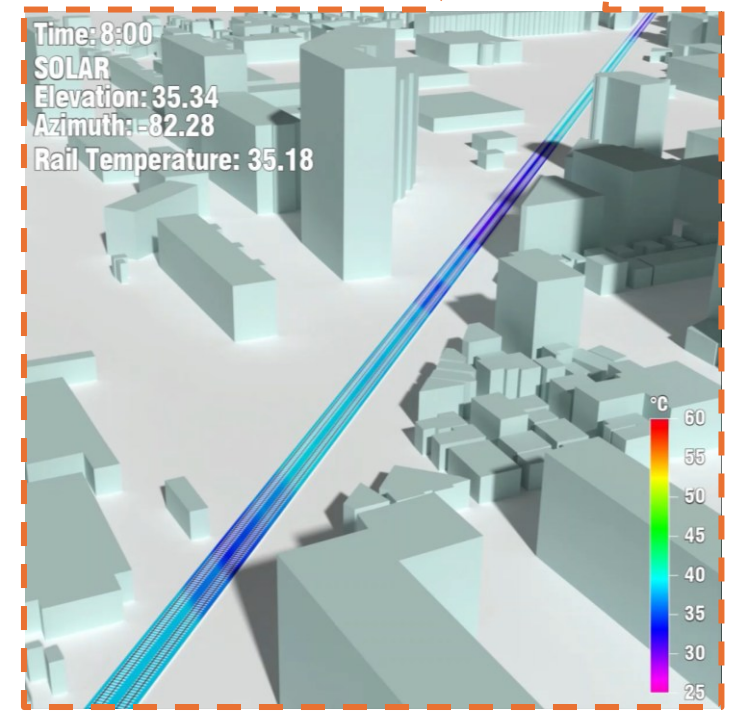
目的(1): 解析によるレール温度・軸力予測

GISデータを用いた
熱解析による、レール
温度・軸力の予測・推定



- 日射と長波放射（夜間の放射冷却）によるレール温度変化を場所毎に計算
- 通年（365日間）の解析
→ 高温となるの日時・場所を網羅

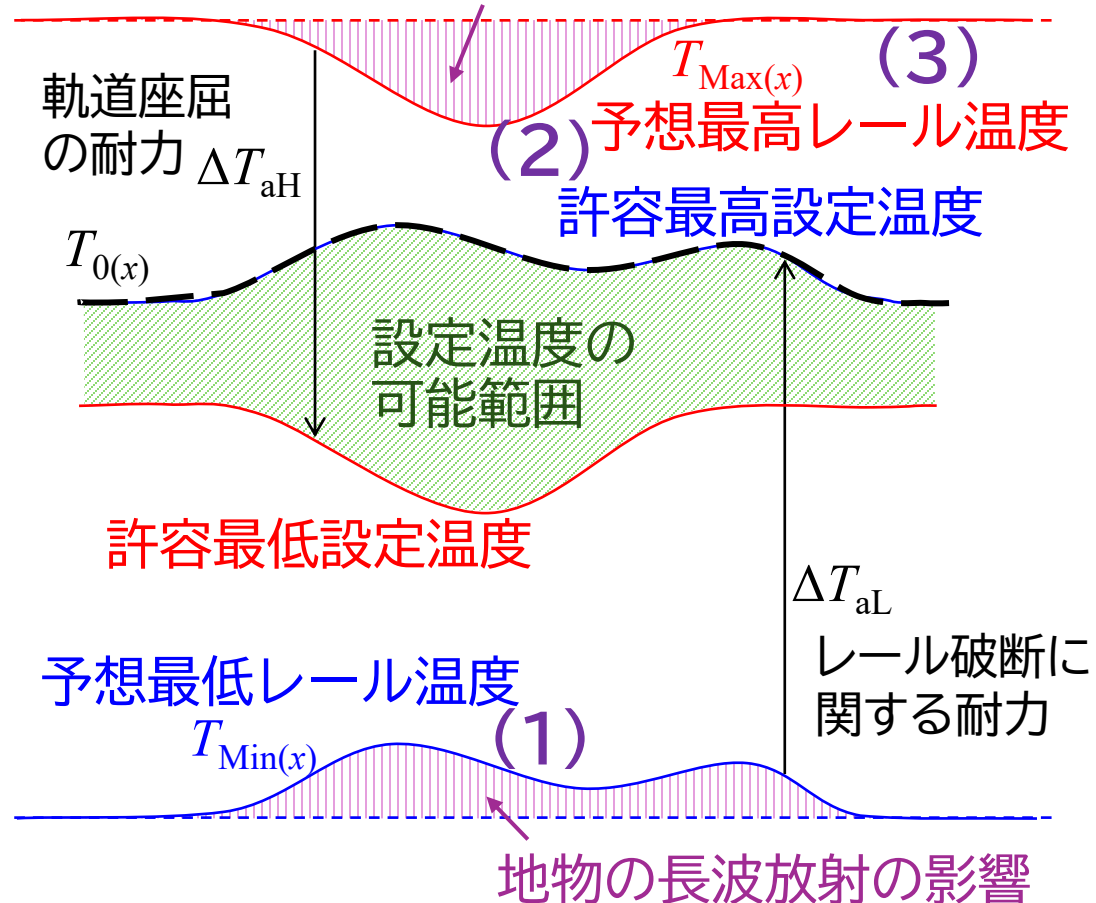
➡ **ロングレール管理の効率化**



目的(2): ロングレール管理の効率化の検討

温度・軸力解析に基づく管理：
位置 x 毎に温度・軸力を予測

地物による日陰・レールの敷設方向の影響



(1) 予想最低レール温度 $T_{\text{Min}(x)}$ に基づく
設定温度 T_0 の引き上げ
⇒夏季軸力の緩和

(2) 予想最高レール温度 $T_{\text{Max}(x)}$ に基づく
軌道座屈に関する管理値の緩和

(3) 予想最高レール温度 $T_{\text{Max}(x)}$ に基づく
高レール軸力発生箇所抽出
⇒IoTデバイス, 機械学習を用いた常時
監視・予測

- 1 解析モデルの概要
- 2 365日間のレール温度解析
- 3 軌道の構造解析(レール温度→軸力)
- 4 ロングレール管理の効率化の検討
- 5 まとめ

レール温度解析モデル概要 ~GISに基づく実空間準拠モデル

Railway Technical Research Institute

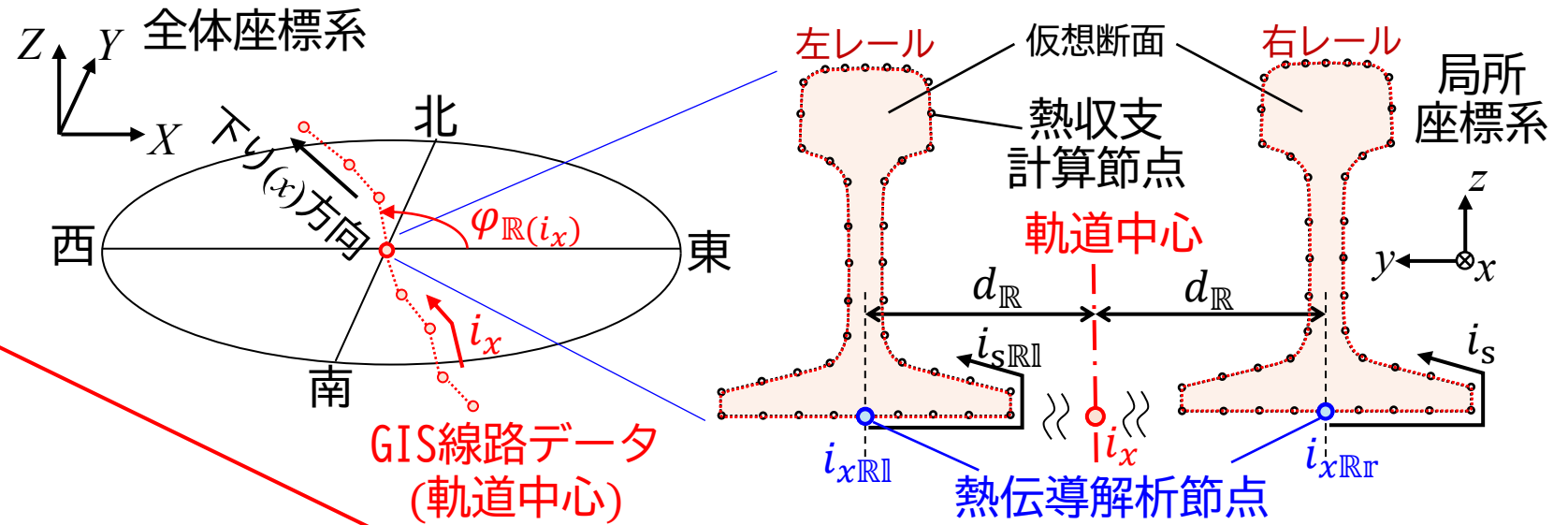
① GIS線路データから
節点作成

② レール表面の吸収熱
 Q_{INR} 計算

③ レール表面の排出熱
 Q_{OUTR} 計算

④ レール長手 (x) 方向の
熱伝導解析

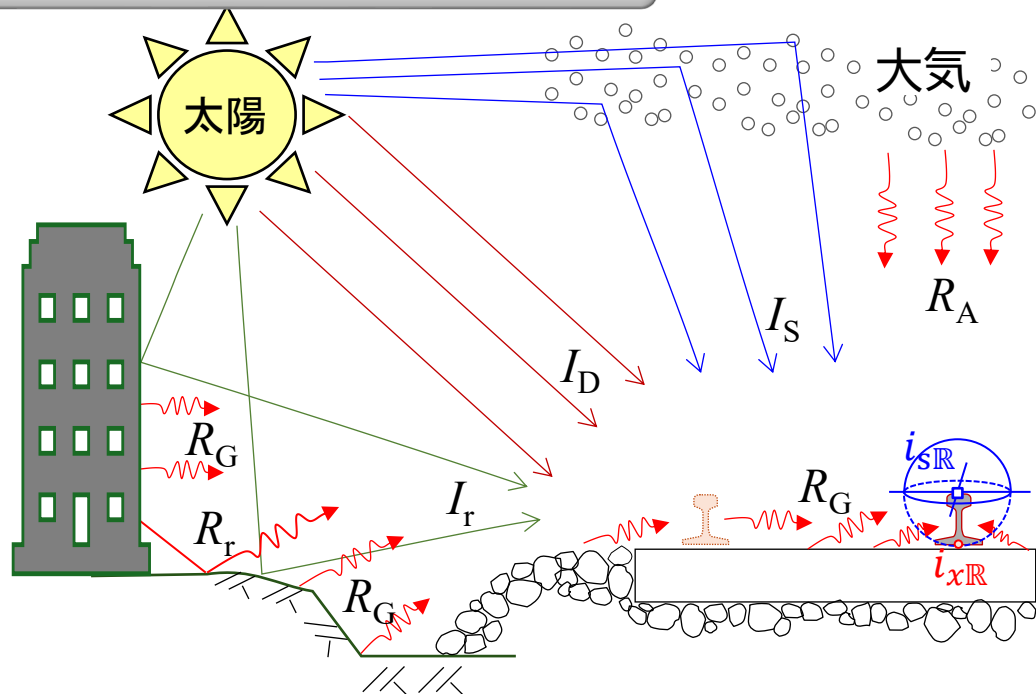
指定時刻まで繰り返し



全球可視要素を用いた熱計算
(本研究の最大の特徴)

レール温度解析モデル概要 ～レール表面の吸収熱

レールが受ける放射熱



気象データ：日射量

I_D : 直達日射 I_S : 散乱日射

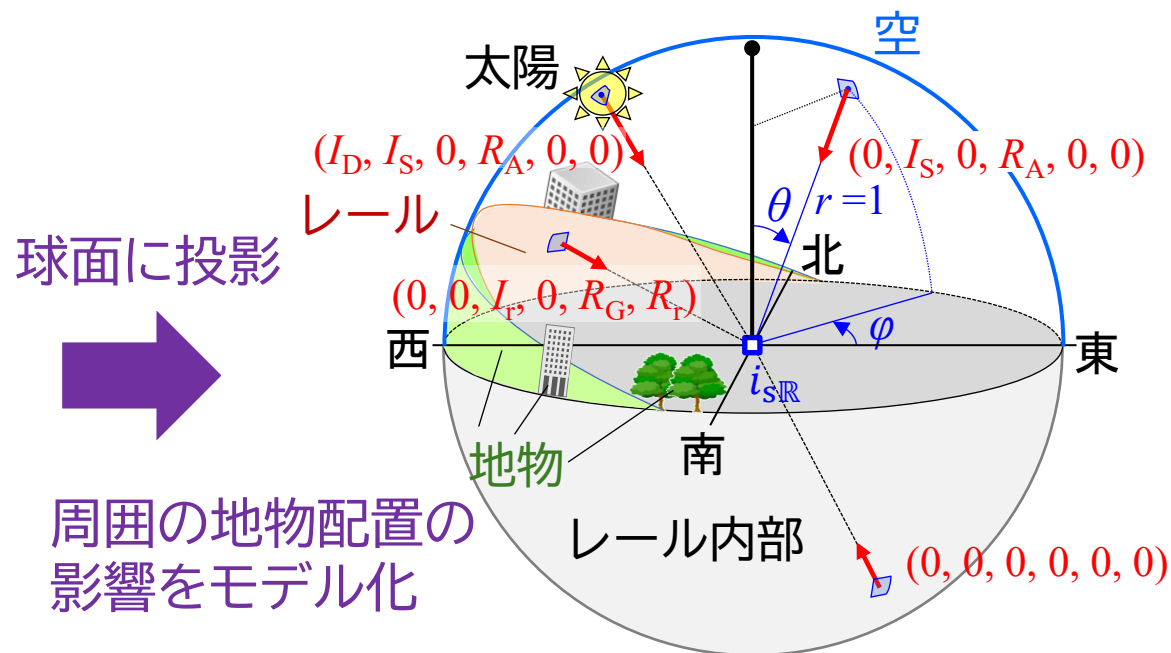
I_r : 地物の反射日射

R_A : 大気の大気放射 下向き赤外放射

R_G : 地物の長波放射

R_r : 地物の反射長波放射

全球可視要素 E_V



球面に投影



周囲の地物配置の影響をモデル化

全球可視要素を用いた新たな手法

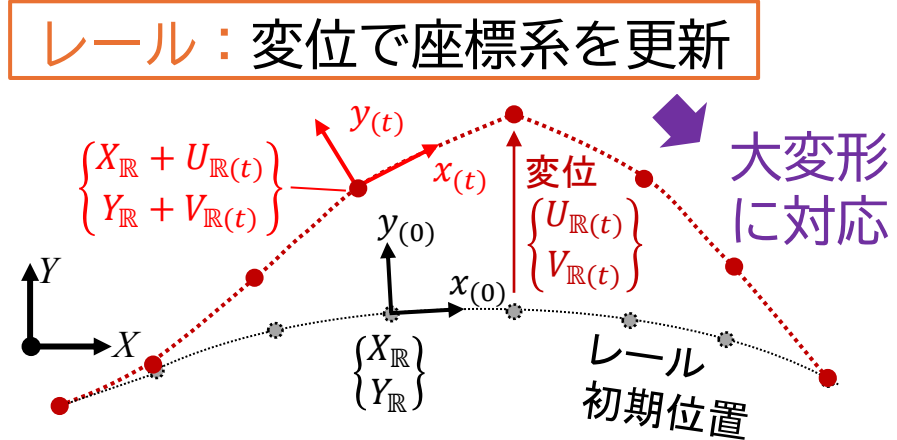
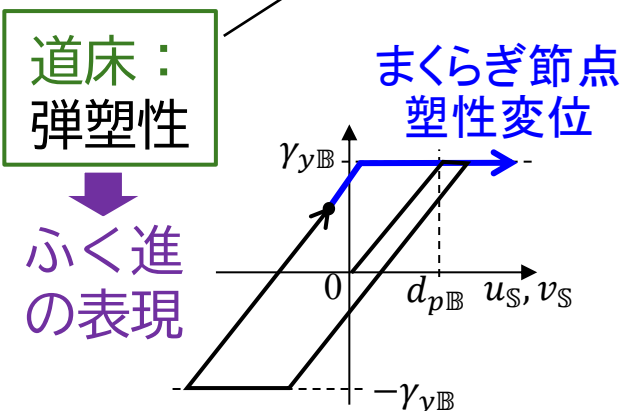
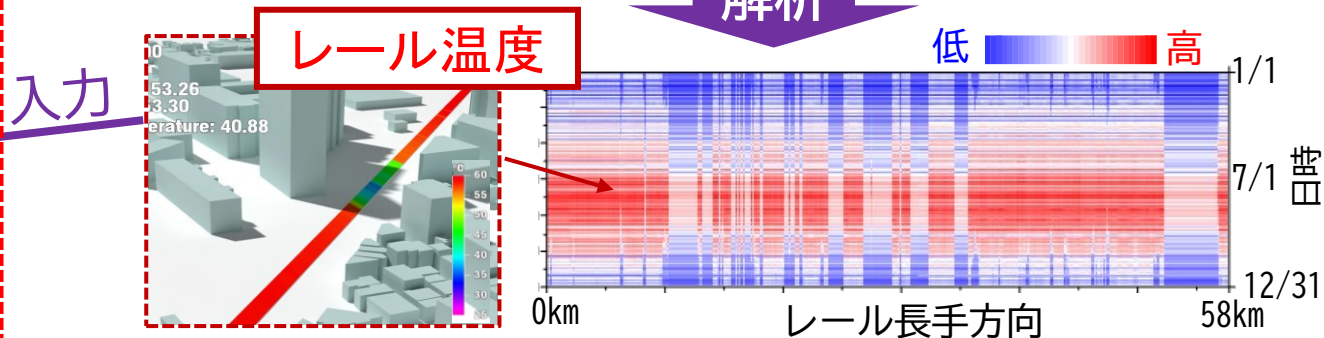
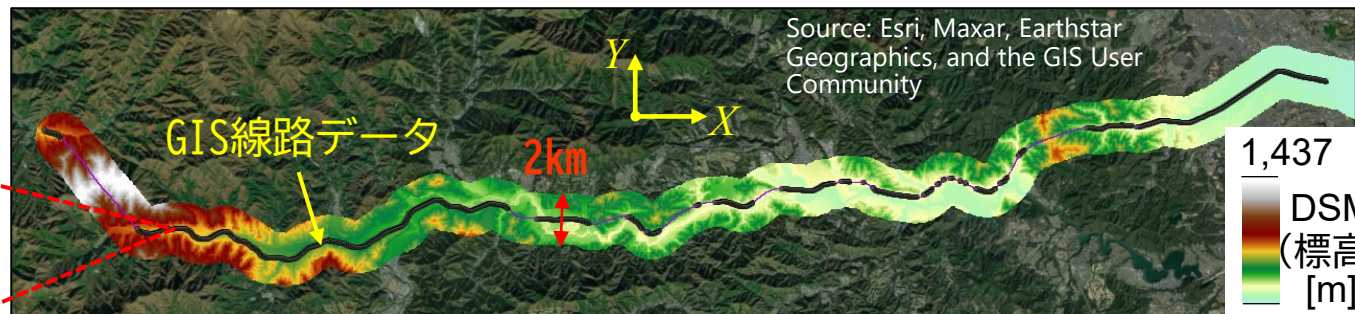
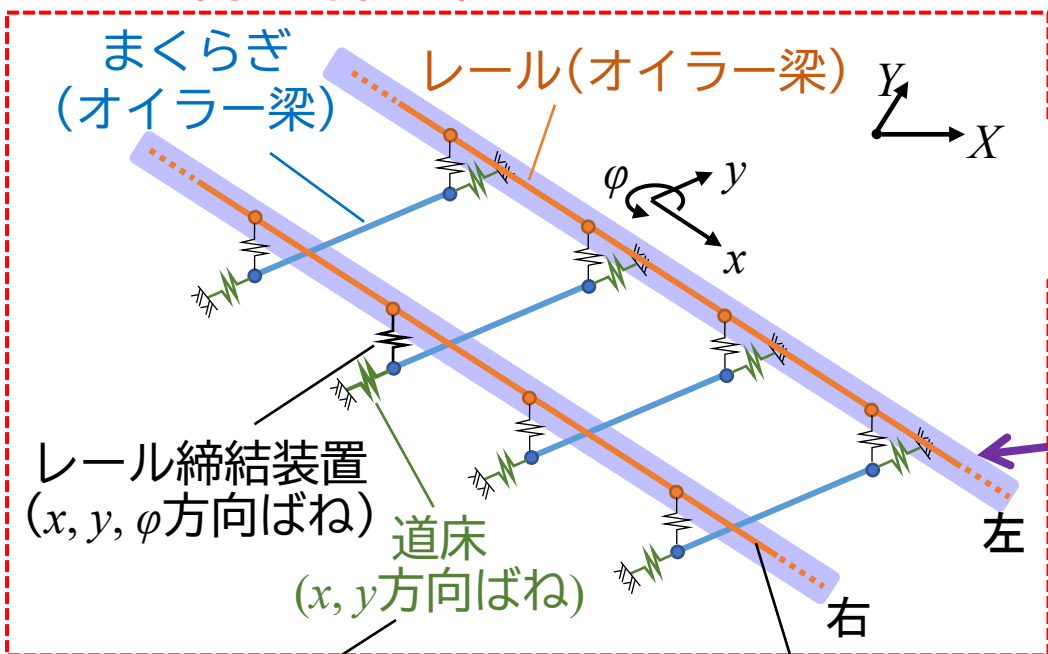
⇒ 放射熱計算の効率化・並列化の容易性

⇒ 精密かつ高速を実現

(延長60km, 365日間の温度解析が5時間以下)

軌道の構造解析モデル(レール温度→軸力)概要

2次元静的弾塑性FEM

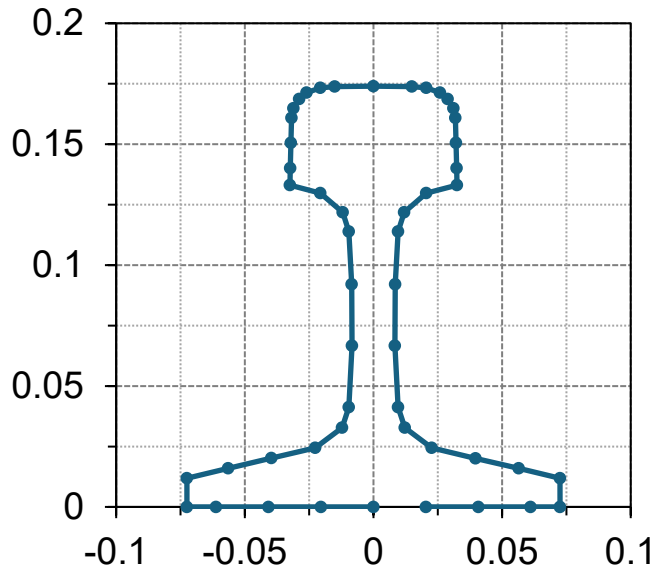


- 独自プログラム：モデルの作成～求解を自動化
- 365日間のレール温度を365日間のレール軸力に

レール温度解析条件 ～解析日時・区間・軌道条件・パラメータ等

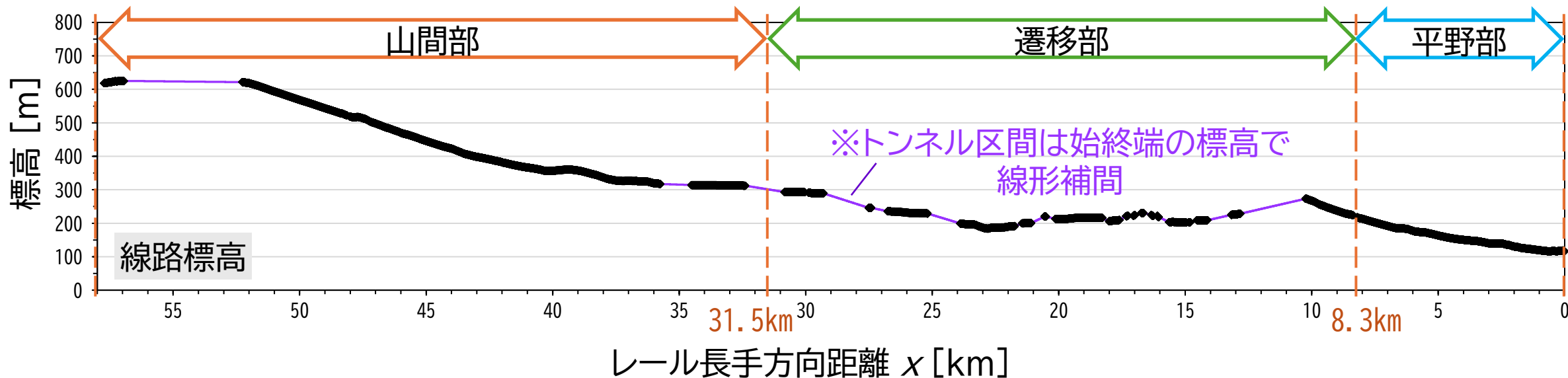
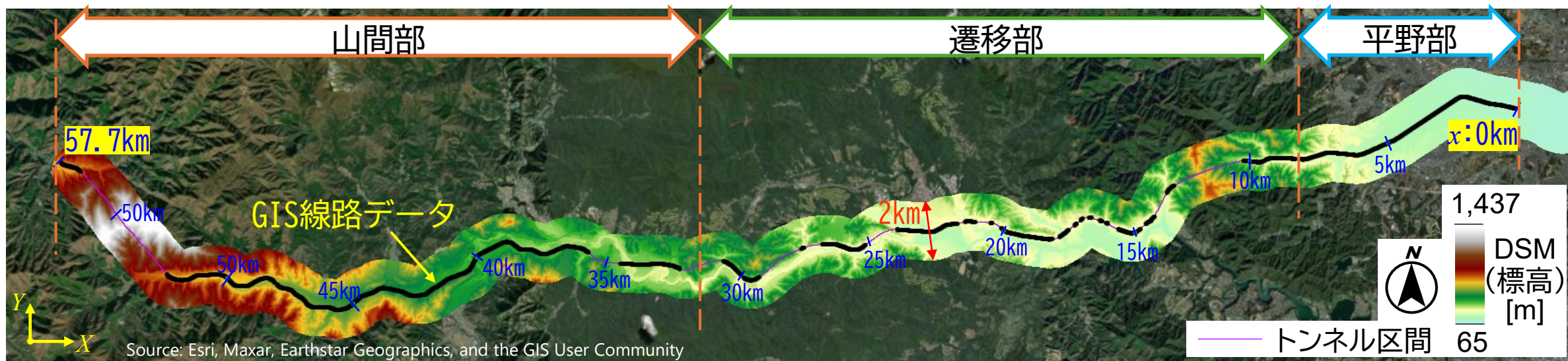
- 解析期間: 2023年1月1日 0:00 ~12月31日 23:50 (時間増分 $\Delta t = 10$ 分)
- 解析区間: 延長57.7km (空間間隔 $\Delta x = 1$ m)
- 軌道条件: JIS 60kgレール, バラスト軌道のロングレール不動区間(分岐器, 各種継目なし)

レール断面形状・節点配置



記号	値	説明	主な解析 パラメータ
λ_P	0.25	軌道パッド熱伝導率 [W/(mK)]	
L_P	0.007	軌道パッド厚さ [m]	
σ	5.67E-08	ステファンボルツマン係数 [w/(m ² K ⁴)]	
Lr_R	0.5	レール代表長さ [m]	
ρ_R	7820	レール鋼密度 [kg/m ³]	
C_R	461	レール比熱 [J/(kgK)]	
λ_R	50	レール熱伝導率 [W/(mK)]	
A_R	0.00775	レール断面積 [m ²]	
P_A	1013.25	大気圧 [hPa]	
ϵ_{IGF}	0.8	地物表面の短波放射率	
ϵ_{RGF}	0.8	地物表面の長波放射率	
ϵ_{IGr}	0.8	地面(水平より下側)の短波放射率	
ϵ_{RGr}	0.8	地面(水平より下側)の長波放射率	
ξ	0.0225	長波放射の吸光係数(夏季:0.03, 冬季:0.015の平均)	

レール温度解析条件 ～地理条件・GISデータ



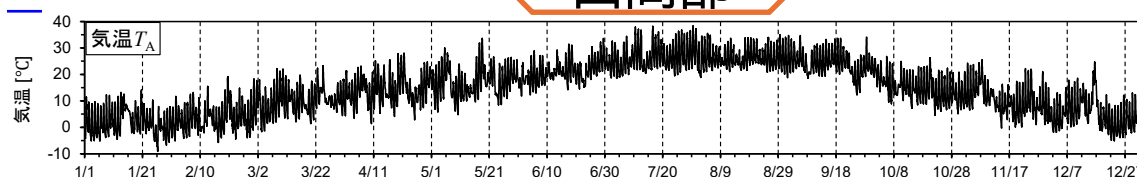
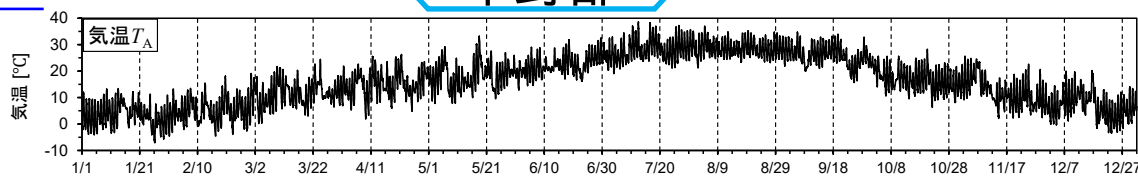
レール温度解析条件 ～気象条件

- 平野部・山間部：解析箇所から最も近いアメダス観測値
- 遷移部：平野部と山間部の平均

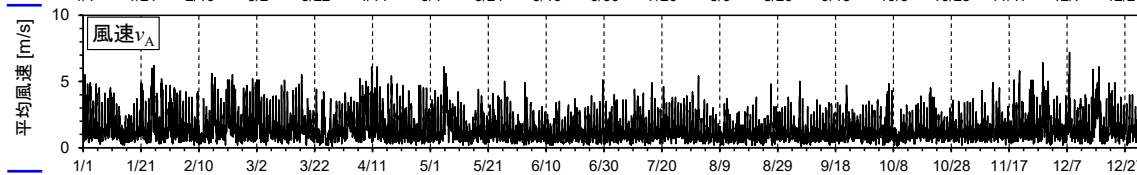
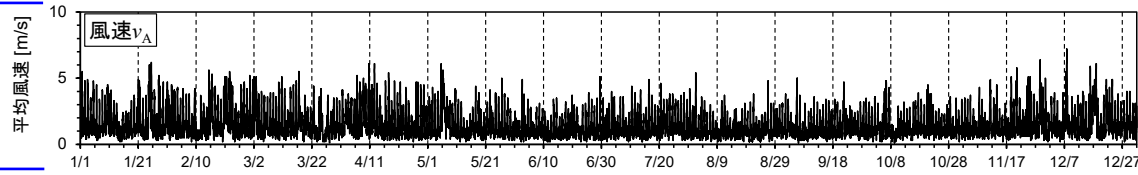
平野部

山間部

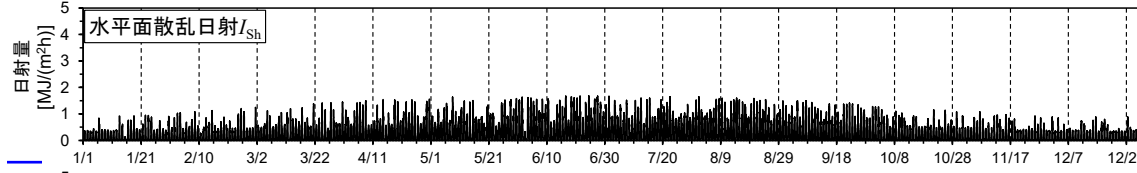
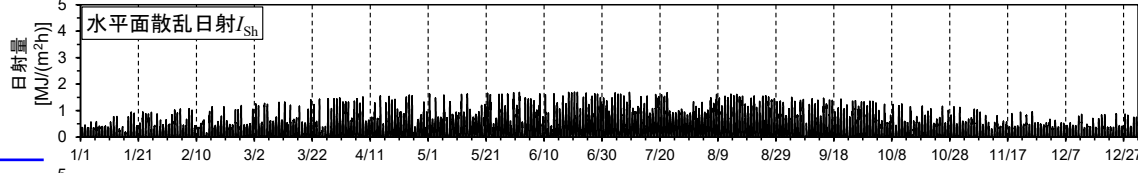
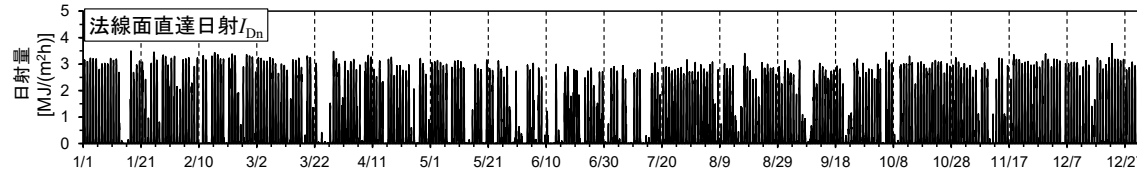
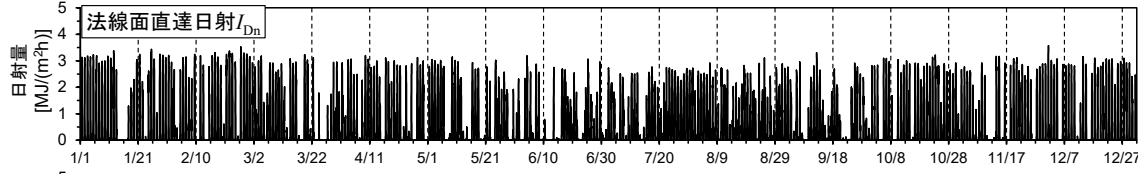
気温



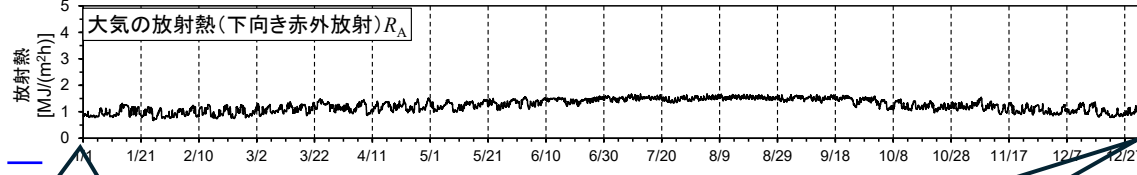
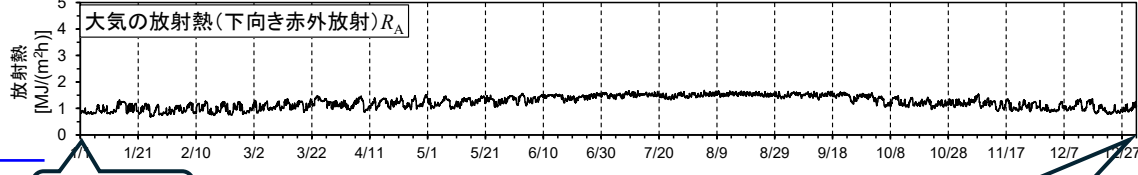
風速



日射量



大気の放射熱



1月1日

日時(2023年)

12月31日

1月1日

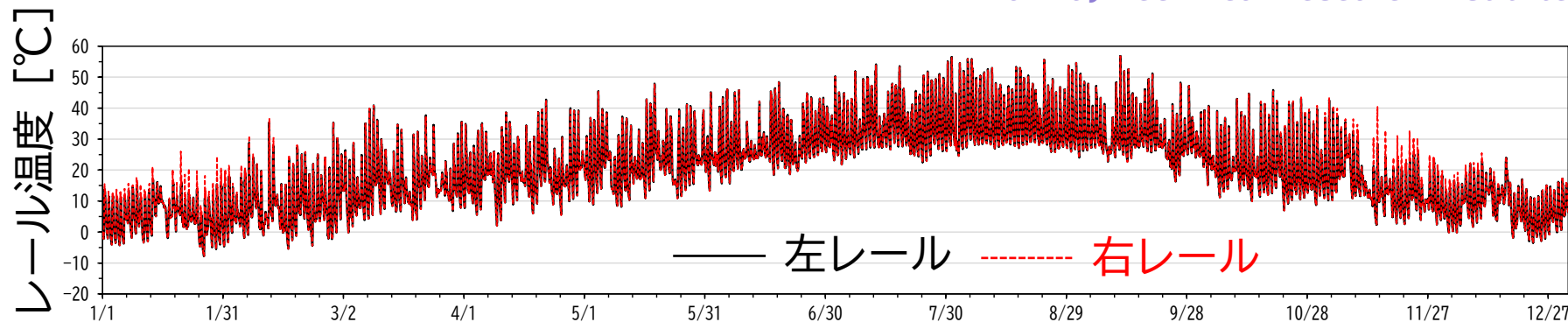
日時(2023年)

12月31日

解析結果 ～レール温度時刻歴 ※各区間の最高温度発生箇所

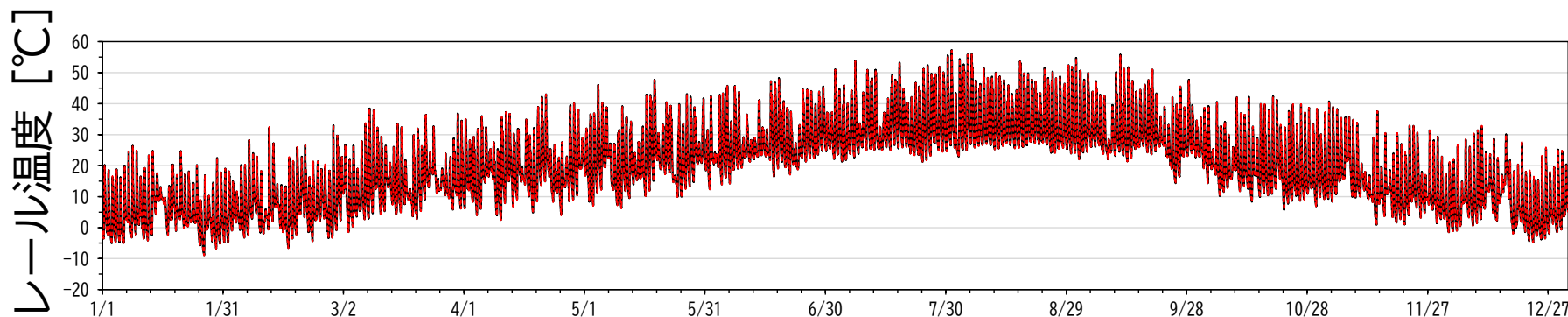
平野部 ($x = 5.686\text{km}$)

	左レール	右レール
最高	56.8°C	56.7°C
最低	-7.8°C	-7.8°C



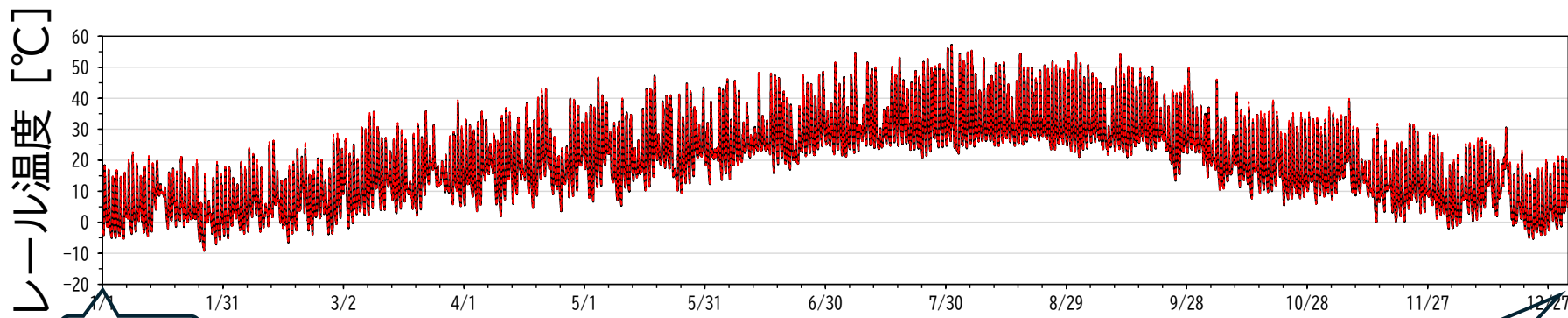
遷移部 ($x = 14.231\text{km}$)

	左レール	右レール
最高	57.2°C	57.1°C
最低	-8.9°C	-8.9°C



山間部 ($x = 40.307\text{km}$)

	左レール	右レール
最高	57.2°C	57.3°C
最低	-9.2°C	-9.2°C

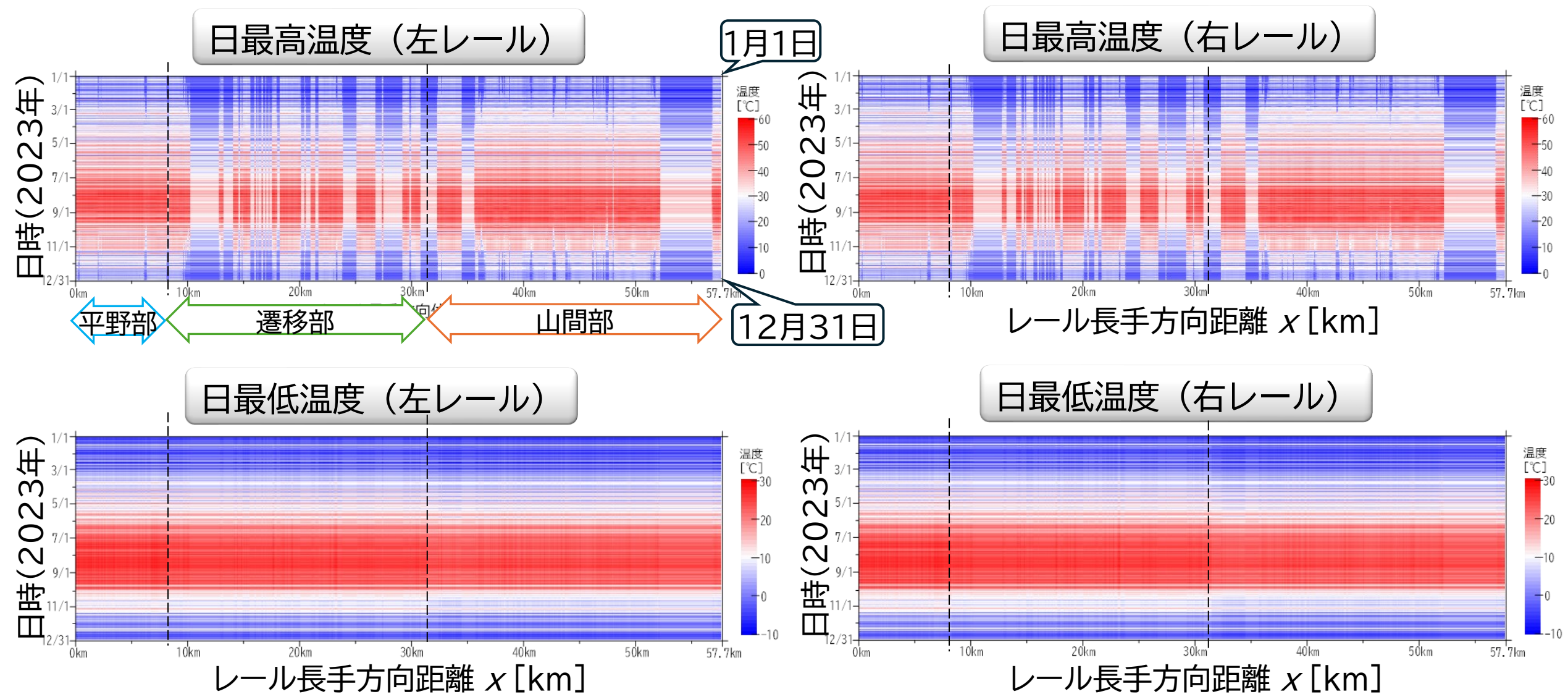


1月1日

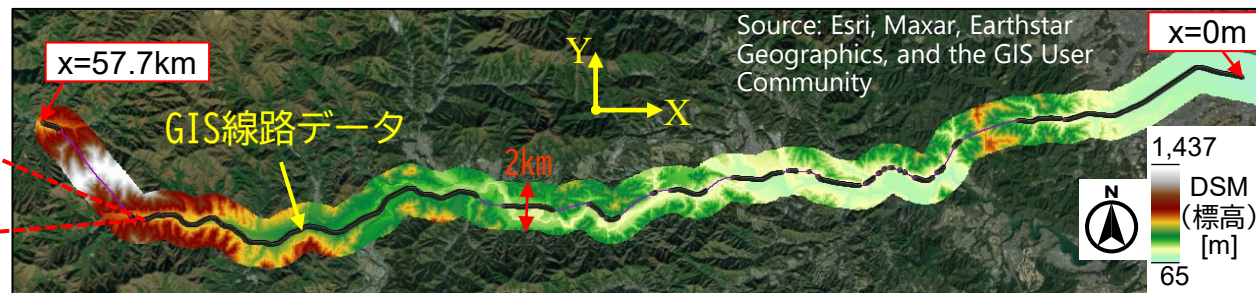
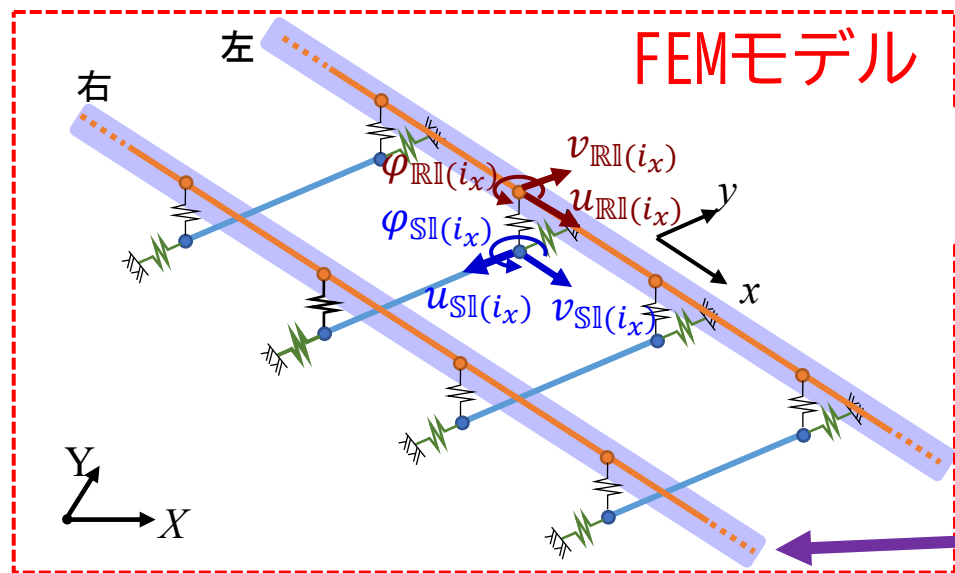
日時 (2023年)

12月31日

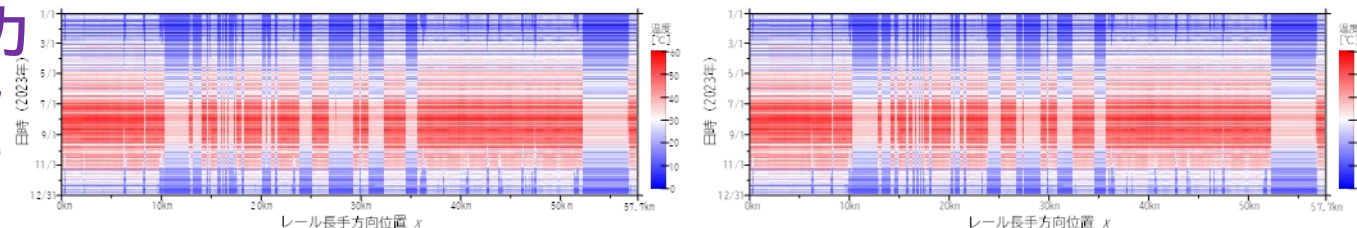
解析結果 ～日最高・最低レール温度の時空間分布



解析条件(軌道の構造解析)



左右レール温度の時空間分布(解析結果)



解析パラメータ

一般的なバラスト軌道を模擬

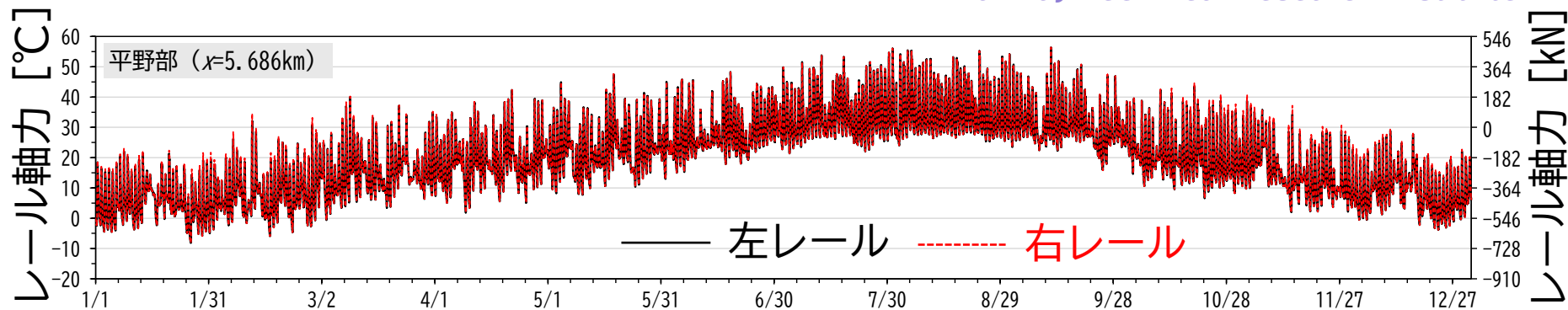
部材	記号	項目	設定値	単位	部材	記号	項目	設定値	単位
レール (JIS 60kg)	E_R	ヤング率	206×10^9	N/m ²	レール 締結装置	k_{xF}	ばね定数_x方向	62.5×10^6	N/m
	A_R	断面積	0.00775	m ²		k_{yF}	ばね定数_y方向	31.3×10^6	N/m
	I_R	断面2次モーメント	5.12×10^6	m ⁴		$k_{\theta F}$	ばね定数_回転方向	4.33×10^4	Nm/rad
	β_R	線膨張係数	11.4×10^{-6}	/°C	バラスト 道床	γ_{xB}	降伏荷重_x方向	8000	N
PCまくら ぎ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

解析結果 ～レール軸力(温度換算)時刻歴 ※各区間の最高温度発生箇所

Railway Technical Research Institute

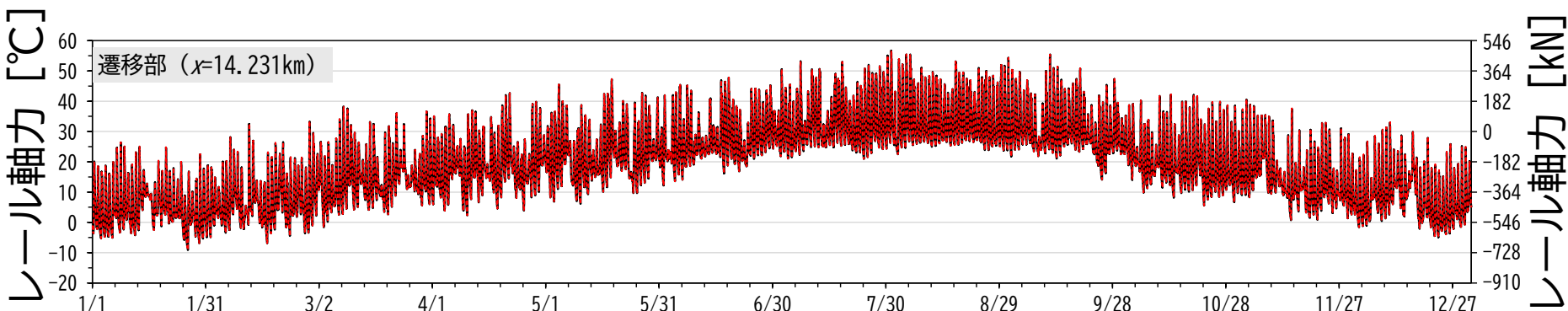
平野部 ($x = 5.686\text{km}$)

	左レール	右レール
最高	56.3°C	56.4°C
最低	-8.1°C	-8.1°C



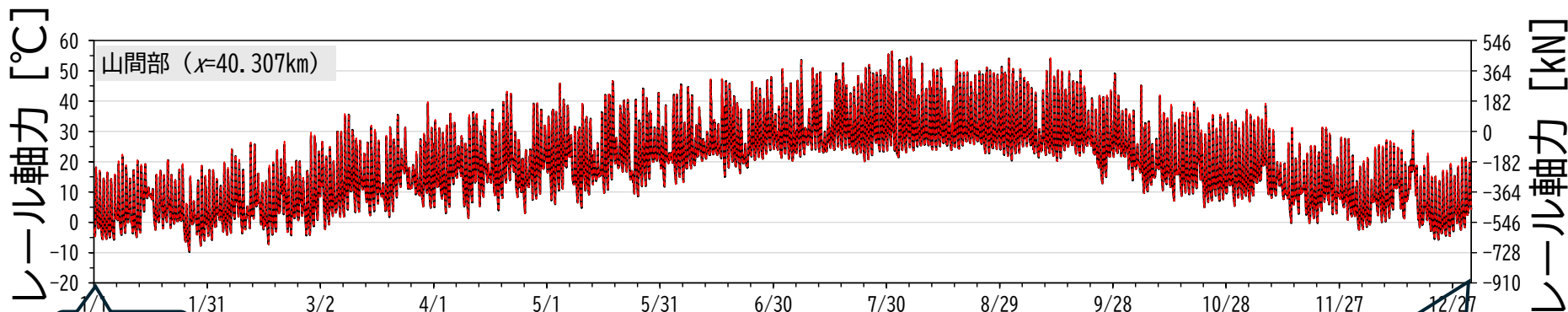
遷移部 ($x = 14.231\text{km}$)

	左レール	右レール
最高	56.7°C	56.7°C
最低	-9.1°C	-9.0°C



山間部 ($x = 40.307\text{km}$)

	左レール	右レール
最高	56.3°C	56.4°C
最低	-9.7°C	-9.7°C



1月1日

日時 (2023年)

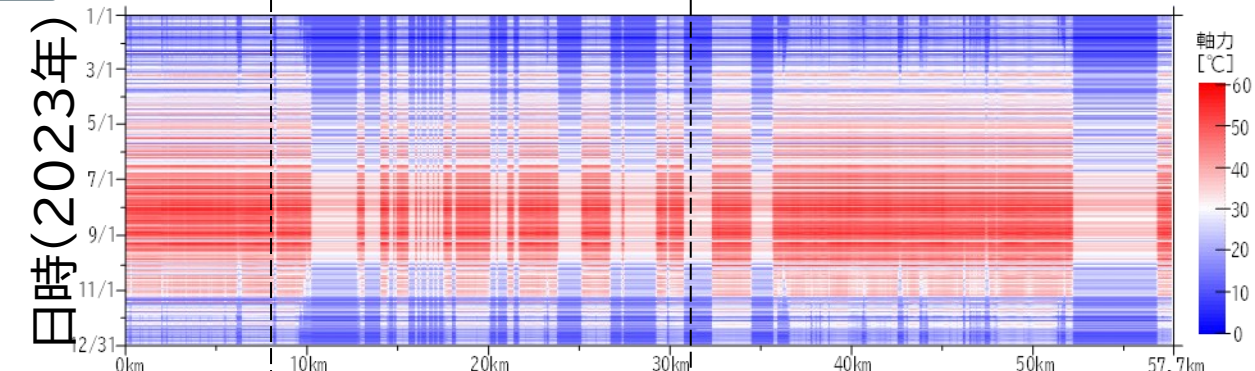
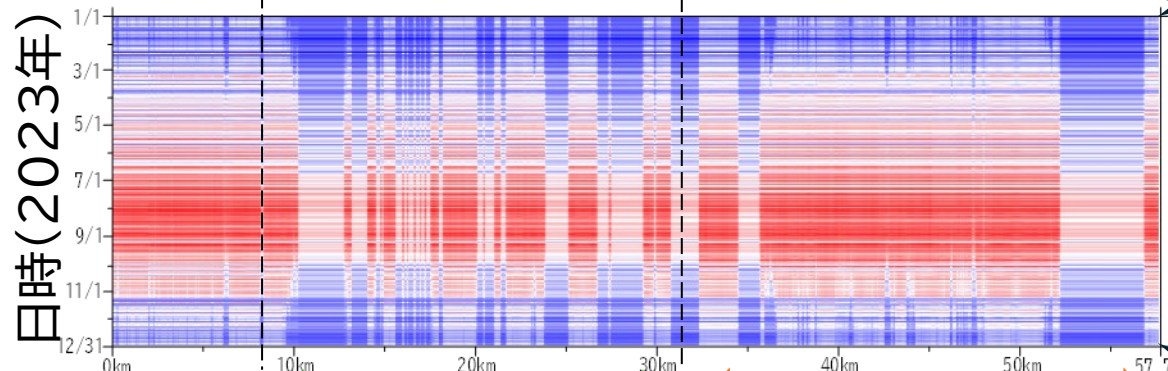
12月31日

解析結果 ～日最高・最低レール軸力の時空間分布

日最高軸力 (左レール)

1月1日

日最高軸力 (右レール)

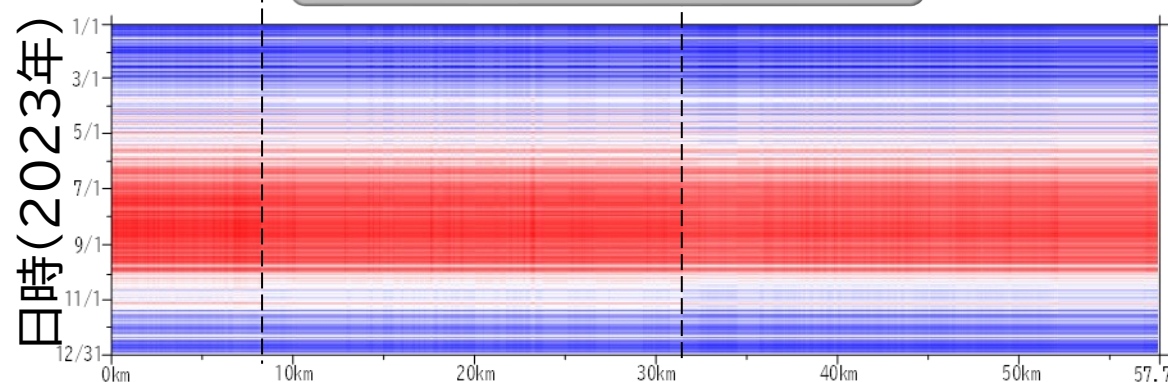


平野部 ← 遷移部 → 山間部

12月31日

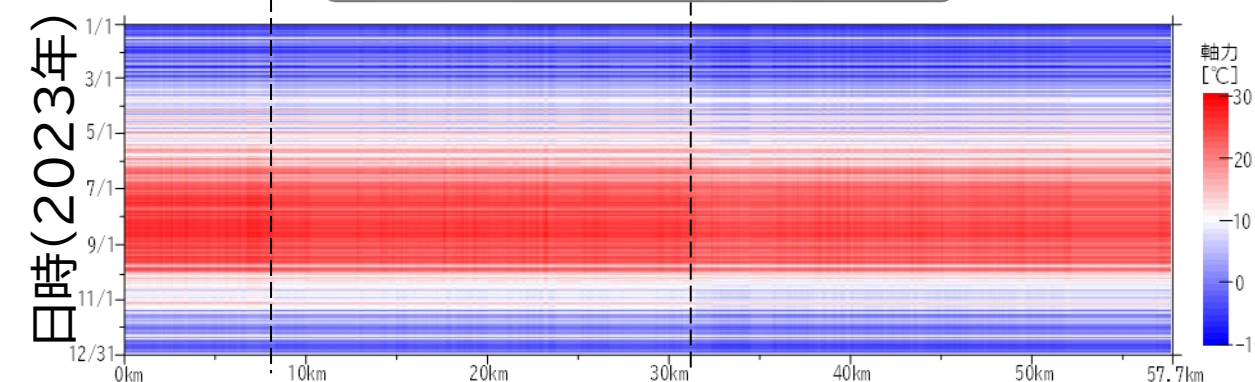
レール長手方向距離 x [km]

日最低軸力 (左レール)



レール長手方向距離 x [km]

日最低軸力 (右レール)

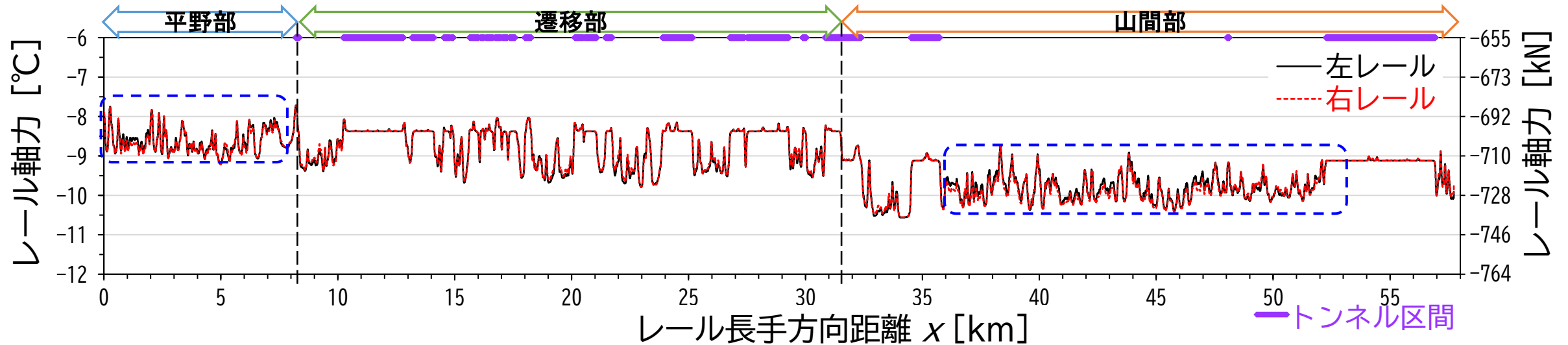


レール長手方向距離 x [km]

- 1 解析モデルの概要
- 2 365日間のレール温度解析
- 3 軌道の構造解析(レール温度→軸力)
- 4 ロングレール管理の効率化の検討**
- 5 まとめ

(1) 予想最低レール温度 $T_{\text{Min}(x)}$ に基づく設定温度の引き上げ

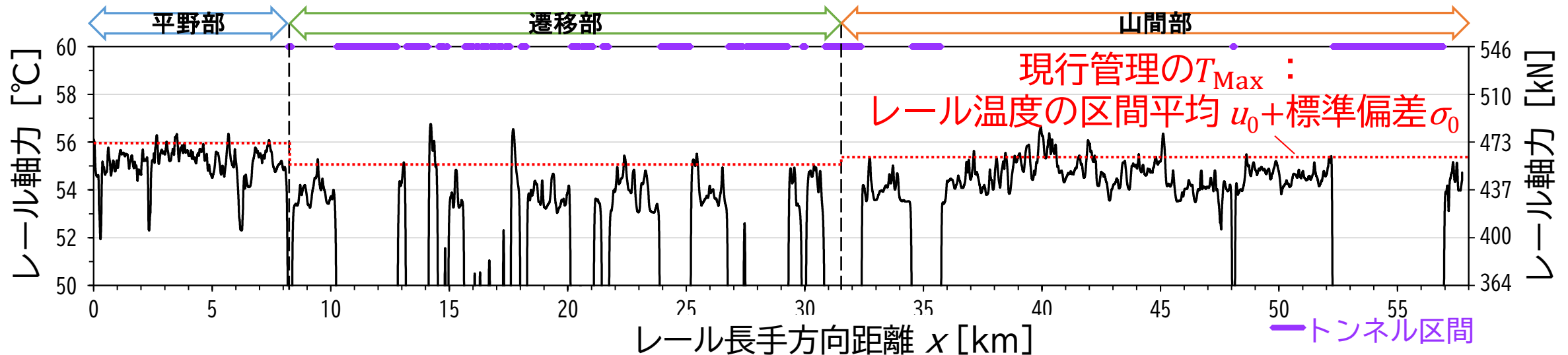
年最低レール軸力分布の解析結果（予想最低レール温度 $T_{\text{Min}(x)}$ に対応）



- 地理条件等による年最低レール温度・軸力の変動幅は 1.5°C 以下
→ 設定温度の施工精度を考えると、設定温度を場所毎に設定することは難しい。
- 気象条件が異なる地域単位で設定温度を大まかに変えることは可能と思われる。

(2) 予想最高レール温度 $T_{\text{Max}(x)}$ に基づく軌道座屈の管理値の緩和

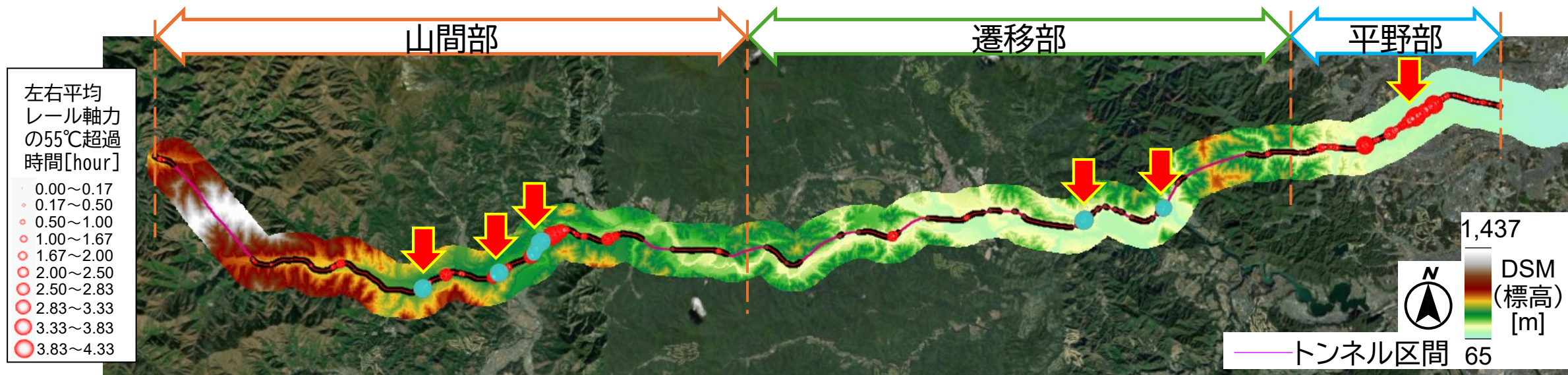
年最高左右平均レール軸力分布の解析結果（予想最高レール温度 $T_{\text{Max}(x)}$ に対応）



- 左右平均レール軸力 $T_{\text{Max}(x)}$ が $(u_0 + \sigma_0)$ より 1°C 以上低い箇所が全体で**44%**,
 2°C 以上低い箇所が**6.6%**存在する。

➡ $(u_0 + \sigma_0)$ との差分より、基準値を緩和できる可能性を示した。

(3)高レール軸力発生箇所抽出

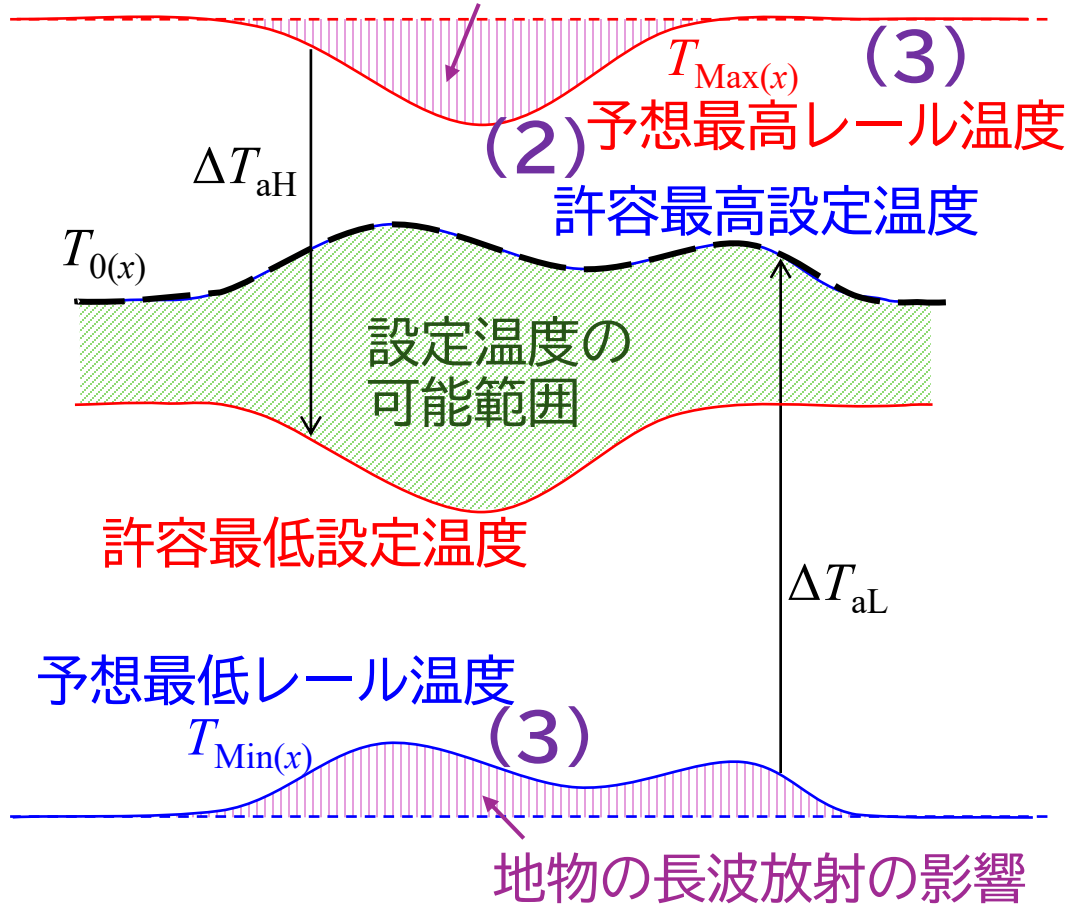


● の大きさ: 高軸力となる累積時間 ● 水色ハイライト: 高軸力($u_0 + 2\sigma_0$ 超過)箇所

- 地理・気象条件を考慮し、1年間を通したレール温度・軸力解析に基づき、レール軸力が高くなる箇所を抽出することができた。

まとめ

地物による日陰・レールの敷設方向の影響



- (1) 年最低レール軸力 $T_{\text{Min}(x)}$ の場所毎の差は 1.5°C 以下と小さい。
→設定温度を場所毎に変えることは難しい。
- (2) 年最高レール軸力 $T_{\text{Max}(x)}$ と現行管理の比較
 1°C 以上低い箇所が44%,
 2°C 以上低い箇所が6.6%存在する。
→軌道座屈の管理値を緩和する余地がある。
- (3) 1年間を通したレール温度・軸力解析より,
周囲よりも高いレール軸力の発生が予想される箇所を抽出できた。

レール温度解析

- 地球温暖化による**これまでとこれからのレール温度変化**の推定・予測
- **過去の張り出し箇所**のレール温度再現(発生原因の調査等)
- **気象予報データ**を使用した短期(半日程度先)レール温度予測
- 反射塗料, 散水, レールの送電利用時の温度変化予測

レール以外の温度解析への適用

- **PCまくらぎの凍害予測**(2026年度新規テーマ)
- 軌道スラブ・てん充層の凍結融解シミュレーション
- 橋りょうの温度変化とその軌道への影響解析

1. 浦川文寛, 渡辺勉: 周辺地物からの放射熱を考慮した夜間のレール温度予測法の開発, 鉄道総研報告, Vol.38, No.3, pp.25-33, 2024
2. 浦川文寛, 渡辺勉: GIS データを用いた軌道の広域2次元FEMによるひく進と軌道座屈の発生予測法, 鉄道総研報告, Vol.39, No.10, pp.44-55, 2025
3. 浦川文寛, 渡辺勉, 木村成克: GISデータを使用した広域レール温度予測法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.4, pp.53-58, 2020
4. 浦川文寛, 渡辺勉: 地形・建物データと気象予報情報からレール温度を予測する, RRR, Vol.78, No.3, pp.12-15, 2021