

建物の日陰の移動がレール中立温度に与える影響

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 高木 柚子
新潟大学工学部 正会員 阿部 和久

1 はじめに

ロングレールの不動区間における座屈強度を左右するパラメータの一つにレール中立温度が挙げられ、軌道座屈対策のためにはその挙動の把握と適切な管理が重要と考えられる。中立温度はふく進の発生によって設定温度からの変動を受ける。ふく進の発生機構として、レール温度の空間分布が不均一になることで高温部が膨張し、低温部が収縮することや、列車の力行・制動によってレールに外力が作用することなどが考えられる。

本研究では、このうち前者に着目し、レール上に日陰区間と日向区間が存在することによるふく進の発生を対象に、中立温度と日陰の関係性を明らかにする。具体的には、日々の気温変化と太陽輻射熱やレール・空気間の熱移動を考慮したレール温度解析と、道床縦抵抗力を非弾性履歴モデルで与えた軌道ふく進解析を有限要素法を用いて構成し、これを用いて日陰の移動下における中立温度分布の挙動について検討する。

2 解析手法^{1,2)}

2.1 解析モデルの概要

文献1)で構築されたレール温度解析とふく進解析から成る数値解法を用いて、中立温度分布の空間・時間変動を求めると。

レール温度 T の熱伝導方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{C_R \rho A} \{ \gamma Q_S - h S_R (T - T_a) - \epsilon S_R (T^4 - T_a^4) \} \quad (1)$$

ここで、 κ は熱伝導係数、 C_R は比熱、 ρ は質量密度、 A はレール断面積、 h は空気熱伝導率、 T_a は気温、 S_R はレール断面の周長、 ϵ はレールと周辺環境との間での輻射に関する係数、 Q_S は太陽輻射エネルギーに関する値であり、 γ はその吸収率である。レール温度解析においては、式(1)を有限要素法で離散化し、台形則を用いて解くことで、実際の気温から同時刻のレール温度を求める。

また、ふく進解析では前述したレール温度解析によって得られたレール温度 T と、レール拘束力から得られたひずみに基づき、温度伸縮と弾性変形を考慮したレールのつり合い式を離散化して得た節点の軌道長手方向変位から、中立温度を得るものである。レールに作用する軸力 N

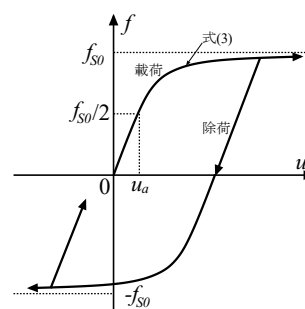


Fig.1 道床縦抵抗力モデル

は次式で与えられる。

$$N = EA(\epsilon - \alpha \Delta T) \quad (2)$$

ここで、 ϵ はひずみ、 EA はレールの伸び剛性、 α は線膨張係数である。ふく進解析において ΔT は、設定温度を基準とした相対温度とし、軸力 N とひずみ ϵ は引張を正とする。なお、レールは締結部において道床縦抵抗力によって拘束されるものとする。道床縦抵抗力は Fig. 1 の非弾性履歴モデルで与え、次式で相対変位と拘束力の関係を与える。

$$f_s = f_{s0} \frac{u}{u_a + |u|} \quad (3)$$

ここで、 u はレールの軸方向変位、 f_s は道床縦抵抗力、 f_{s0} は最終道床縦抵抗力である。また、 u_a は f_s が $f_{s0}/2$ となるときのレール軸方向変位に相当する値である。以下の解析では、まくらぎ 1/2 本 (レール 1 本) あたり $f_{s0} = 4000\text{N}$ 、 $u_a = 1\text{mm}$ で与えた。以上 2 つの解析では Newton-Raphson 法に基づいた反復計算により解を求めた。

2.2 解析条件

軌道両端部の可動区間の干渉を避け、十分な不動区間長を確保するため、まくらぎ 4000 区間 (2400m) をモデル化し、これを解析対象とした。なお、レール両端変位は拘束せずに、道床縦抵抗力が作用する下での伸縮を許容した。レール敷設箇所は新潟市を想定し、北緯 38°、東経 139°、標高 25m として日射量を求めた。直線軌道 (レール) は東西方向に敷設し、軌道に沿って一次元座標 x をレール西端を原点にして設定した。また、まくらぎ間隔は 0.6m、50kgN レールを対象に Table 1 の通りに各種パラメータを設定した。日陰区間の設定に際し、レールと建物の距離 d を 20m、建物によってレール上に生じる日陰の幅 B を 30m、建物の高さは無限とした。解析においては断りがな

パラメータ	単位	値
$C_{R\rho}$	(J/km ³)	3.93×10^6
κ	(m ² /h)	0.0458
A	(m ²)	64.05×10^{-4}
γ		0.8
h	(W/km ²)	10.0
ϵ	(J/hm ² K ⁴)	1×10^{-4}
E	(GPa)	206
α	(K ⁻¹)	12×10^{-6}

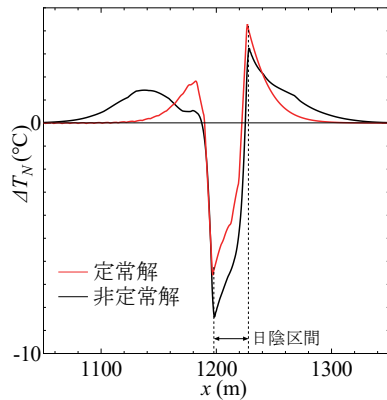


Fig.2 日陰の移動速度の非定常性が中立温度に及ぼす影響

い限り、日中は常に快晴とし、日射を遮るものは建物以外に無いものとする。2010年8月1日～2011年7月31日の一年間を解析対象期間とし、気象庁による新潟市の気温の観測値を用いた。レールの設定温度は解析開始時点の気温とし、8月1日午前1時の気温である28.4°Cに設定した。

3 解析結果

3.1 日陰の移動速度の非定常性が中立温度に及ぼす影響

太陽高度が時間の経過と共に変化するのに伴って日陰の速度が変化する場合（非定常）と、日陰の移動速度が $V=7\text{m/h}$ で一定とした場合（定常）との中立温度の比較を Fig. 2 に示す。なお、2.2 で設定したレールと建物の位置関係の場合、レール温度が日最高値に到達する14時の V はおよそ 7m/h である。非定常解は8月15日14時における数値解析解、定常解は同時刻の気温 T_a と熱量 Q_S を入力とし、日陰区間が一定速度で移動する条件下での解である。

中立温度は定常解に比べて、非定常解の方が日陰区間において約2°C低くなっており、両者の同区間におけるレール温度がほぼ等しいことを考慮すれば、 V の非定常性が危険側に作用していることがわかる。また、定常解では中立温度の変動域は約180mであるのに対して、非定常解では約280mに亘っており、非定常性が中立温度変動域をよ

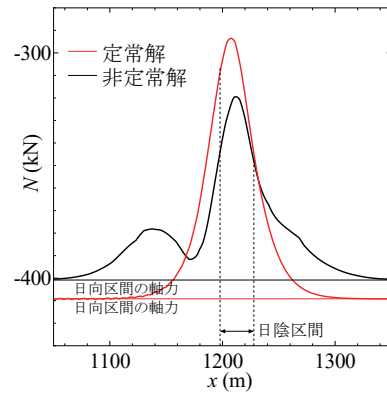


Fig.3 日陰の移動速度の非定常性がレール軸力に及ぼす影響

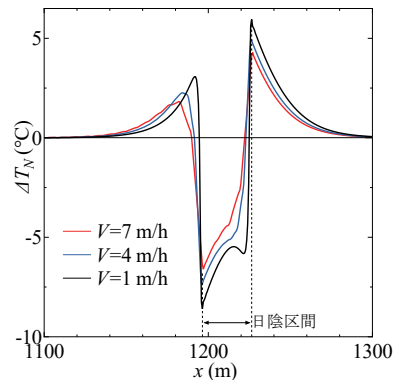


Fig.4 日陰の移動速度が中立温度に及ぼす影響

り広域にしていることが確認できる。さらに、このときのレール軸力 N を Fig. 3 に示した。中立温度が最も低下する日陰区間では、レール温度も低下するため、軸力は日向区間と比べて安全側の値をとっている。また、中立温度と同様に、 V の非定常性が圧縮軸力を相対的に増大させ、また変動域を広げていることが確認できる。

3.2 日陰の移動速度による影響

3.1 での定常解と同様の条件および計算方法にて、日陰の移動速度を $V=1, 4, 7\text{m/h}$ とした場合の中立温度をそれぞれ求め、Fig. 4 に示した。

V が増大するに従って、日陰区間の進行方向後方の極大値は減少し、値の増減は緩やかになっている。加えて、日陰区間における最低中立温度の絶対値も減少していることから、 V の増加は安全側に働く効果がある。また、 V の減少と共に、中立温度が対称的な分布に近づいていくことも確認できる。以上より、日陰の移動速度は中立温度の値や分布形状に大きく影響を及ぼすことがわかった。このことから、レールと建物の距離 d の減少によって V が減ずるため、中立温度分布はより対称性を増すと共に、その絶対値が増加するものと考えられる。

Table 2 Fig. 5 の凡例

	弾塑性	弾性
温度非線形	a	b
温度線形	c	d

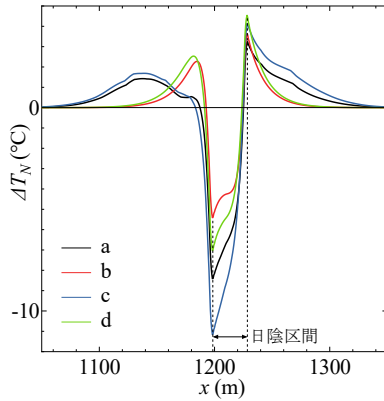


Fig.5 問題の非線形性が中立温度に及ぼす影響

3.3 問題の非線形性が結果に及ぼす影響

ふく進解析における道床縦抵抗力の非線形履歴と、温度解析における式 (1) 右辺第 4 項目の非線形項が中立温度分布に与える影響を調べる。比較のために Table 2 に示した 4 ケースの中立温度を Fig. 5 に示す。なお、実現象に近い条件下での検証を行うために、本節以降では日陰を太陽の日周運動に合わせて移動させている。また、断りがない限りは 8 月 15 日 14 時時点の解を示すものとする。

道床縦抵抗力の非線形性により、中立温度の絶対最大値が 3~4°C 程度増大している。これは、道床縦抵抗力の接線剛性が低下することで、完全弾性な場合よりもふく進が増大することによるものと考えられる。また、日陰区間後方の極大値が低下すると共に、中立温度の変化域は日陰区間後方で約 50m, 前方で約 40m 拡大している。これは、接線剛性の低下により、ふく進を生ずる区間長が伸びたことによるものと推測される。

式 (1) の非線形項は、レールから周囲へ放射される輻射熱に関する項である。これを考慮することで輻射熱によるレール温度の上昇が低減される。当該効果により中立温度の絶対最大値が 1.5°C 以上減少している。

3.4 中立温度の経時変化

4 時から 20 時まで 4 時間おきの中立温度分布を 14 時のものと合わせて Fig. 6 に示した。なお、当該日の日出時刻は 4 時 59 分、日没時刻は 18 時 38 分であった。

中立温度の変動が生じているのは、建物の前後約 120m の範囲で終日一貫しており、さらに経時変化が顕著な区間は、建物の前後約 50m ほどに限られている。中立温度の

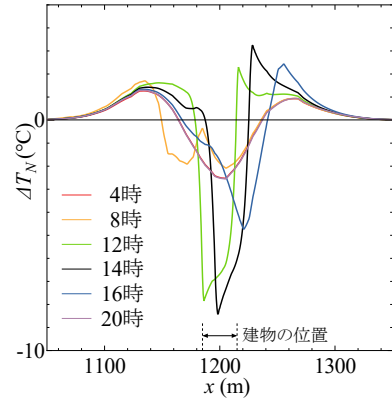


Fig.6 日出から日没までの中立温度の変化

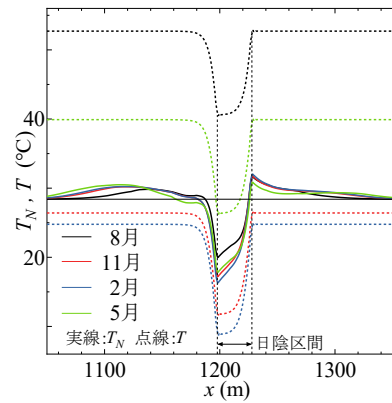


Fig.7 季節によるレール温度と中立温度の変化

絶対最大値は 14 時に発生しており、最大値と最小値の差が最大であるのも 14 時であった。1 日の内で座屈の危険性が最も高まる 14 時の軸力は、3.1 に示した通り、中立温度が低下する日陰区間で安全側の値をとるため、日出から日没まで日陰による中立温度低下が座屈を誘発する恐れはないと考えられる。また、日射を受けない 4 時と 20 時にも中立温度の空間変動が認められる。3.1 において、定常的な日陰の移動下では、日陰通過後の地点では中立温度の変動が消滅することを確認している。したがって、中立温度分布の残留は日射や日陰の非定常性に起因することが理解できる。

3.5 レール温度と中立温度の季節変化

太陽の日周運動や気温の季節的变化が中立温度にどのような影響を及ぼすのかを調べるため、8 月 15 日から 4 か月毎の、14 時のレール温度 T と、相対中立温度にレールの設定温度を加算した絶対中立温度 T_N を Fig. 7 に示す。

中立温度分布の概形に大きな変化は認められないが、日陰区間の絶対最大値は 8 月 15 日が最小で、2 月 15 日が最大となった。一方、軸力の大きさを示す $T_N - T$ (引張が正) は、8 月 15 日に約 -20.5°C, 2 月 15 日に約 7.5°C であり、前者の方が軸力の変動が大きい。

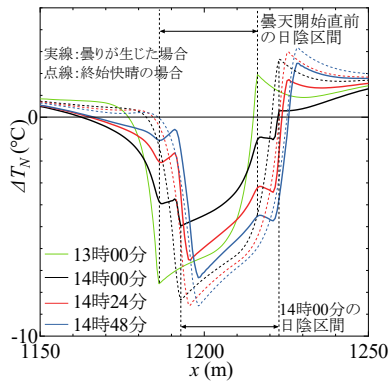


Fig.8 曇天前後の日陰周辺における中立温度分布

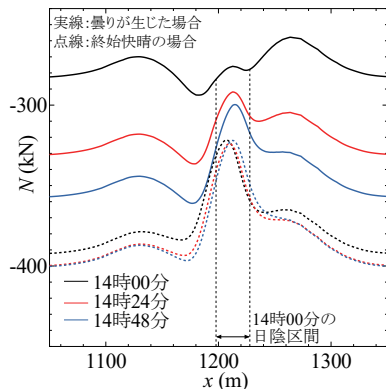


Fig.9 曇天前後の日陰周辺における軸力分布

日陰区間の存在によって生じた不均一なレール温度分布が、ふく進を引き起こし、日陰区間における中立温度の低下をもたらす。日陰区間と日向区間との T の差は、8月15日に約 12°C 、2月15日に約 16°C であった。式(1)より、レール温度 T は太陽輻射エネルギー Q_S 、レール温度と気温の差に関する項 $(T - T_a)$ および $(T^4 - T_a^4)$ の3つの項に依って定まる。それぞれの項の季節ごとの差異を調べたところ、 T と T_a の差に関する2つの項は微小であった。対して、直達日射量と散乱光による日射量から構成される Q_S は、直達日射量が夏季よりも冬季に増加するため、2月15日の値は8月15日より約1割大きい。以上より、季節の変動と共に直達日射量が増加したことで、2月15日の中立温度の負の極値が最小になったと推測される。

4 一時的な曇天が中立温度分布に及ぼす影響

ここまでで得られた解析結果から、日中の中立温度分布は、直達日射を受けない日陰区間では低下し、日陰区間前後の日向区間では上昇することを確認した。さらに、3.1より、日陰区間では中立温度が低下するものの、レールが直達日射を受けないことでレール温度も低下するため、日向区間に比べて軸力が増大することはなく、寧ろ日陰区間の方が安全であることがわかった。なお、ここまでの数値

解析において、天候は常に快晴を想定し、レールへの直達日射を遮るものは建物のみとしていた。しかし、曇天時に雲によって日射が遮られ、レール全体が一樣に直達日射を受けないという状態も実際には発生し得る。一時的に曇天となり、その前に日陰区間であった箇所が太陽の移動により曇天終了後に日向区間に転ずる場合、中立温度低下が残留していた区間が一瞬にして直達日射を受けてレール温度が上昇することで、局所的に相対温度が上昇し、座屈の危険性が高まる恐れがある。そこで、計算開始から8月15日13時までは常に快晴で、14時までの1時間だけ曇天状態になった場合の中立温度分布と軸力分布を求めた。その結果を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。時間変化を詳細に確認するために、日陰区間周辺の14時台の分布を24分刻みで表示した。

曇天中である13時台の中立温度は、その分布形状が概ね一定のまま変動幅が減少し続けた。再び晴天に戻る14時以降では、曇天開始時である13時から日陰の位置が右方向に移動しているため、日陰区間両端の左側に中立温度の急変部が現れている。特に日陰区間左端近傍の日向域では、曇天に伴う中立温度低下の残留が認められる。ただし、曇天から晴天に転ずる14時以降に当該域のレール温度が上昇し出すが、Fig. 8 に示す様に、それと同時に残留していた中立温度低下は徐々に緩和されていく。そのため、レール圧縮軸力が上昇する区間は発生せず、日周運動下の一時的な曇天によっても、特段座屈の危険性が高まる事象は認められなかった。

5 おわりに

本研究では、実際の気温データを用いて太陽の日周運動による日陰区間の移動を考慮したレール温度解析と、非線形性を有する道床縦抵抗力モデルの下でふく進量を求める解析を行った。その結果、レール上の日陰区間の移動が中立温度に影響を及ぼす現象を、様々な視点から調べることができた。軌道座屈の危険性を高める素因となり得る状況を想定した解析を実施したが、いずれの条件下においても、日陰の移動による中立温度の低下がその様な要因には成り得ないとの結論を得た。

参考文献

- 1) 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, 鉄道力学シンポジウム論文集, No.16, pp.101-108, 2012.
- 2) 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 (シンポジウム講演概要), 第26回応用力学シンポジウム, 11006-10-01, 2023.