レール塗装・散水による温度低減効果を数値計算で予測する



浦川　文寛
Fumihiro Urakawa
鉄道力学研究部
軌道力学研究室
主任研究員



渡辺　勉
Tsutomu Watanabe
鉄道力学研究部
軌道力学研究室長

はじめに

レールは太陽光を受けて気温を大きく上回る温度に達し，熱膨張によって軌道座屈（図1）の危険性が高まります。軌道座屈が発生すると安全な走行が確保できなくなるため，レール温度が基準値に達すると，速度制限や運転見合わせなどが行われます。近年は猛暑の頻発によりレール温度が上昇しやすくなっており，国内外で大きな問題となっています。

海外では白色塗料をレールに塗布する対策が実務として導入され，日本においても反射塗料や散水による温度抑制が検討・実施されてきました。しかし，これらの対策を同じ条件のもとで定量的に比較した例は多くありません。本記事では，筆者らが開発したレール温度解析モデル[1)]を用い，反射塗料や散水による温度抑制効果を示し，その物理的な仕組みを解説します。

レール温度解析モデル[1)]

レール温度変化の原理

レール温度は，レールが吸収する熱エネルギー（以下「吸収熱」），外部へ排出する熱エネルギー（以下「排出熱」），およびレール自身の熱容量によって決まります。この関係は，図2に示すように，容器に水を流し入れる様子に例えると理解しやすくなります。

この例えでは，流し込まれる水が吸収熱，容器の広さ（面積）が熱容量，水位がレール温度

図1　軌道座屈の例



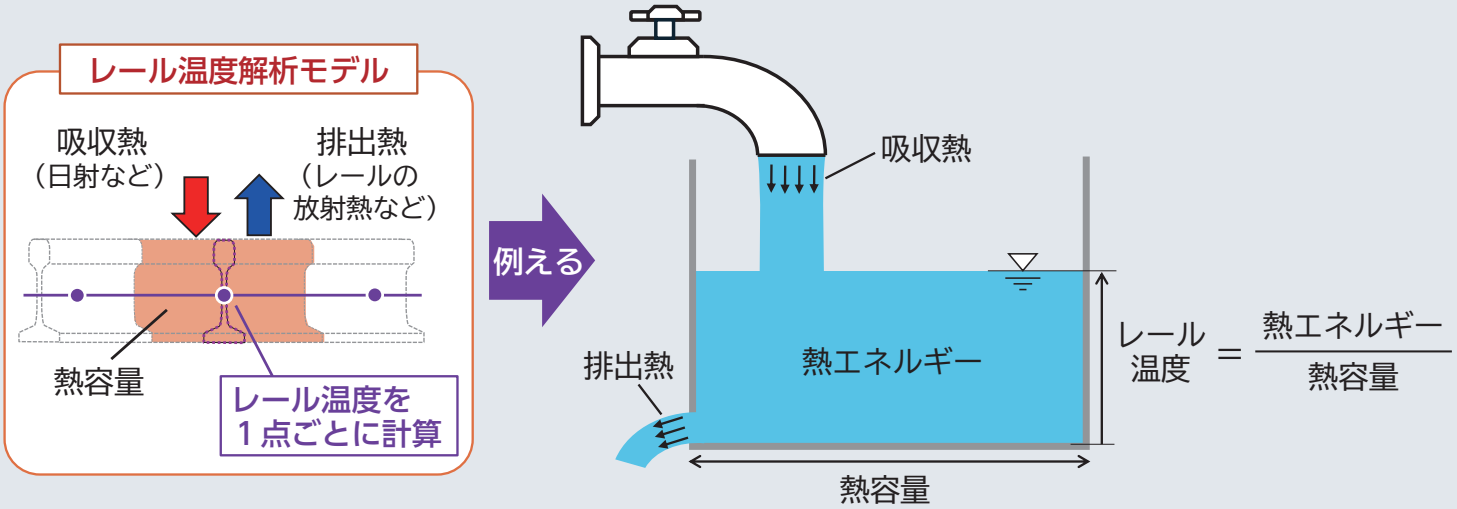


図2　レール温度解析モデルを水の出入りに例えた概念図

に相当します。さらに，容器には穴が開いており，そこから水が流れ出します。これが排出熱です。

吸収熱が排出熱より大きいと水位（温度）は上がり，排出熱より小さい場合は水位（温度）が下がります。また，容器が広い（熱容量が大きい）ほど水位（温度）変化は緩やかになります。同じ重さで比べた場合，レール（鋼）の熱容量は水のおよそ1／9です。そのため，同じ量の熱エネルギーに対し，レールの温度変化は水の約9倍となります。本解析（図2左側）では，気象条件などから吸収熱と排出熱を，レールの形状や材料特性から熱容量を計算し，レール温度を求めています。

レールの吸収熱

レールが吸収する主な熱には，太陽からの日射☞と，大気や周囲の地物（建物，レール自身を含む地球上の物体の総称）が放射する長波放射☞があります。

本解析では，図3に示すように，レール表面

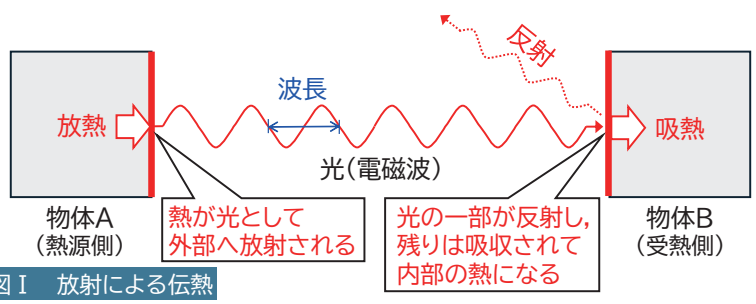
☞ 日射と長波放射

光は，エネルギーが波として空間を伝わる性質をもつ電磁波の一種です。電磁波には，目に見える光（可視光線）のほか，紫外線や赤外線など，目に見えない光も含まれます。図Iに示すように，熱をもった物体の表面は，熱を光として外部に放射します。この光が他の物体表面に当たると，一部は反射し，残りは物体内部で分子の運動エネルギーに変わることで吸収され，物体を温めます。これが放射による伝熱であり，放射によって伝わる熱を放射熱と呼びます。

物体が放射する光は，表面温度が高いほど強くなり，波長（図I参照）は短くなります。熱源が太陽の場合，表面温度は約6000℃と高く，地球に届く放射熱は，大気によって弱められても大きなエネルギーを持っています。地上に到達する太陽の放射の主成分は，0.3 μm～3 μmの可視光線と近赤外線からなる短波長の光で，この放射による熱を「日射」と呼びます。日射は「太陽放射」や「短波放射」とも呼ばれます。

一方，地球上の物質や大気を熱源とする場合，その温度はおおむね100℃以下で，放射される光の波長は10 μm前後です。この放射熱は，日射に比べて波長が長いため「長波放射」と呼ばれます。また，3 μm～100 μmの中赤外線および遠赤外線に相当することから，「赤外放射」とも呼ばれます。単に「放射熱」と言う場合，多くはこの長波放射を指します。

これらの関係を図IIにまとめました。



図Ⅰ　放射による伝熱

熱源	太陽（表面温度：約6000℃）			地球上の物質，大気など（おおむね100℃以下）	
放射熱		日射（短波放射，太陽放射）		長波放射（放射熱，赤外放射）	
光	紫外線	可視光線	近赤外線	中赤外線	遠赤外線
波長[μm]	0.38	0.78	3	25	100

図Ⅱ　日射および長波放射の波長区分

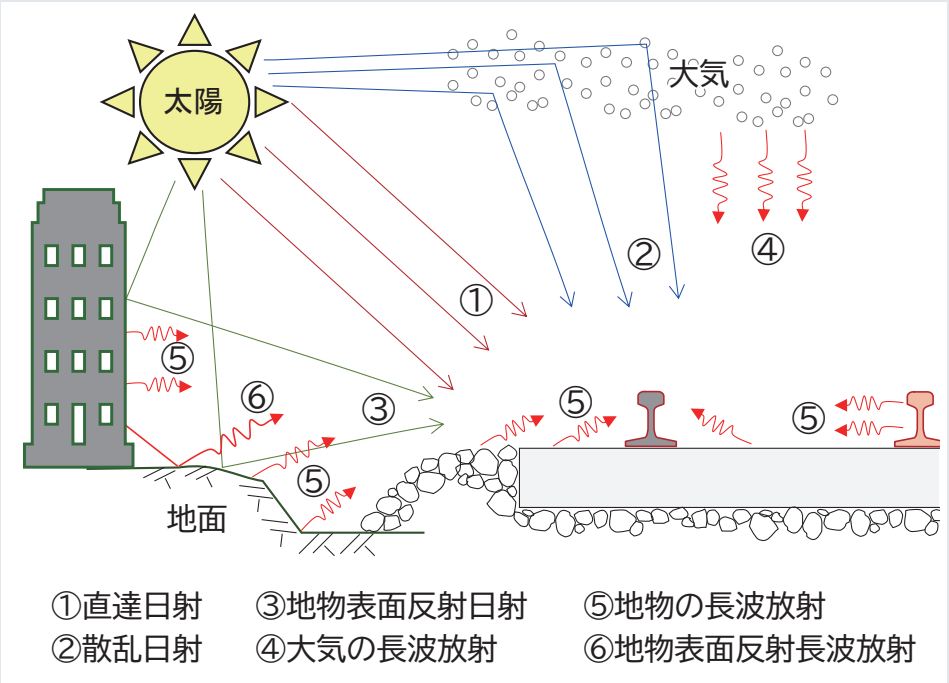


図3　レールの吸収熱

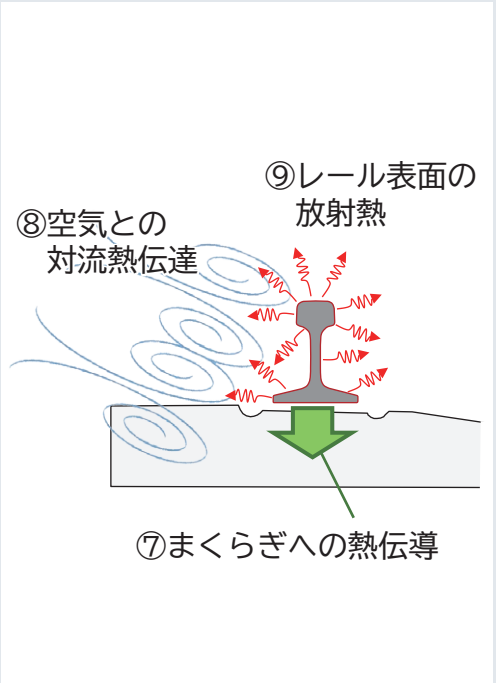
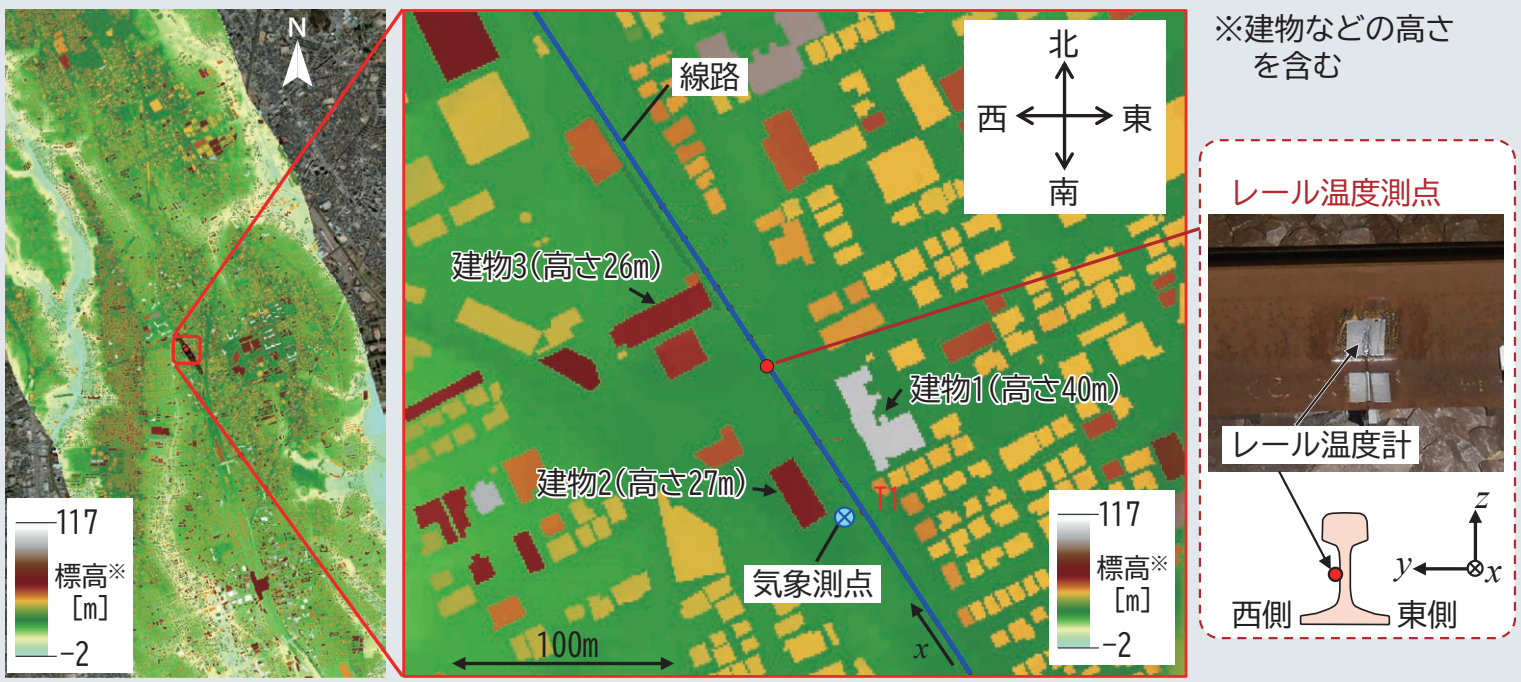


図4　レールの排出熱

が受ける日射として，①直達日射，②散乱日射，③地物表面反射日射の3成分を考慮します。①直達日射とは，太陽から直接レールに届く日射，いわゆる直射日光です。②散乱日射とは，日射が大気中で散乱され，空のさまざまな方向から地表に届く日射です。③地物表面反射日射とは，直達日射および散乱日射が地面や建物などの地物表面で反射した後，レールに到達する日射です。

レール表面が受ける長波放射として，④大気

図5　解析対象区間周辺の数値地図と測定位置



の長波放射，⑤地物の長波放射，⑥地物表面反射長波放射を考慮します。⑥地物表面反射長波放射とは，大気や地物から放射された長波放射が地物表面で反射し，レールに到達する成分です。

レールの排出熱

レールが外部へ排出する主要な熱流束として，本解析では図4に示す⑦まくらぎへの熱伝導，⑧空気との対流熱伝達，⑨レール表面からの放射熱の3つを考慮します。⑧空気との対流熱伝達は，レールと空気との間で生じる複合的な熱移動で，気温が低く風速が大きいほど活発となり，レールの冷却が進みます。

解析モデルの精度検証

図5に示す実線路でレール温度を測定し，解析結果と比較しました。試験日は2019年8月2日で，気象条件（日射量，気温，風速）は図5の気象測点で測定した値（図6）を用いました。日射および長波放射の計算では，図5の数値地図に基づき，建物やレールによる日陰の影響も考慮しています。

図7に示すように，測定値と解析値は全体として良く一致しており，本解析モデルによって実線路のレール温度を精度良く再現できることが確認されました。

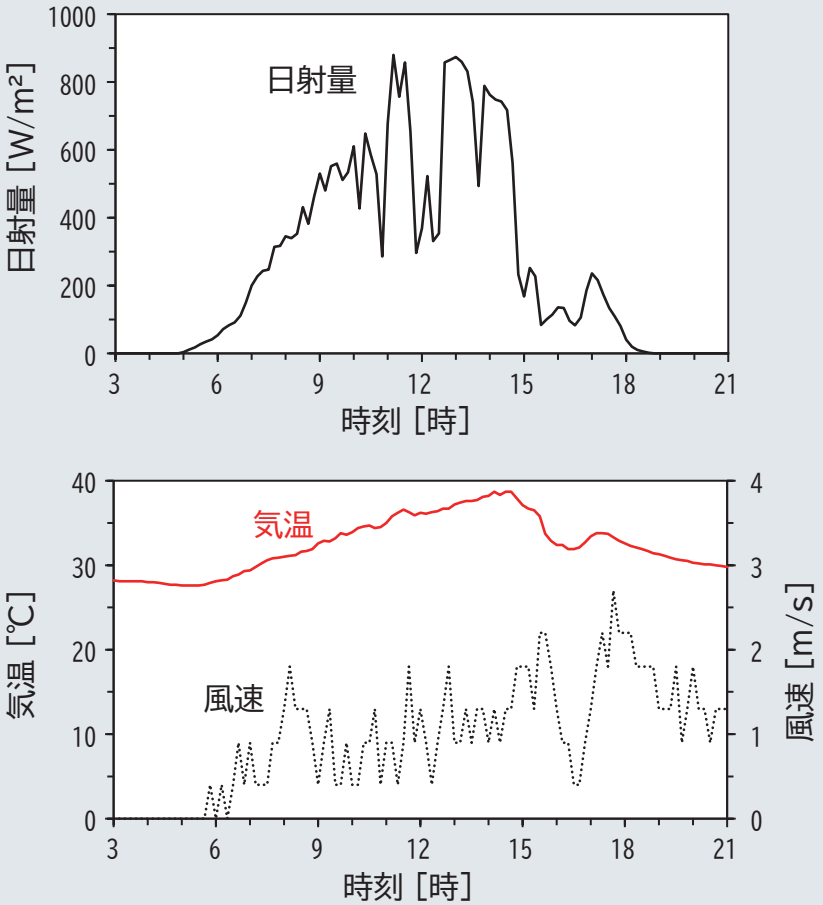


図6　解析に用いた気象条件（日射量・気温・風速の測定結果）

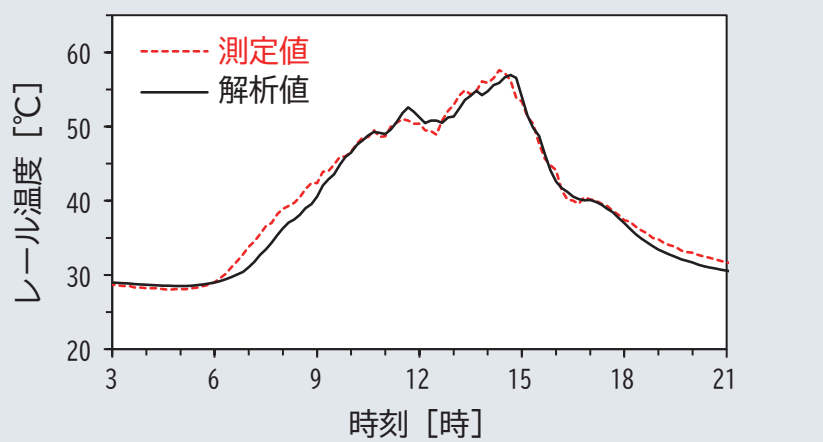


図7　実線路におけるレール温度の測定値と解析値の比較

反射塗料・散水の効果とその原理

反射塗料の効果

反射塗料は，レール表面の日射反射率を高めることで，図3に示す日射成分①～③の吸収を抑制します。これにより吸収熱が減少し，レール温度の上昇が抑えられます。図2の例えで考えると，反射塗料は図8のように水の入口を狭める役割を果たし，容器内の水位，すなわちレール温度の上昇を抑制します。

散水の効果

水は蒸発する際に周囲から熱を奪います。こ

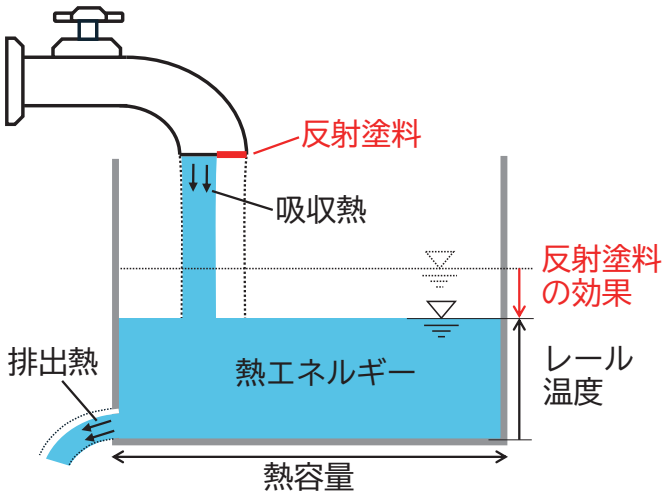


図8　反射塗料によるレール温度低減の概念図

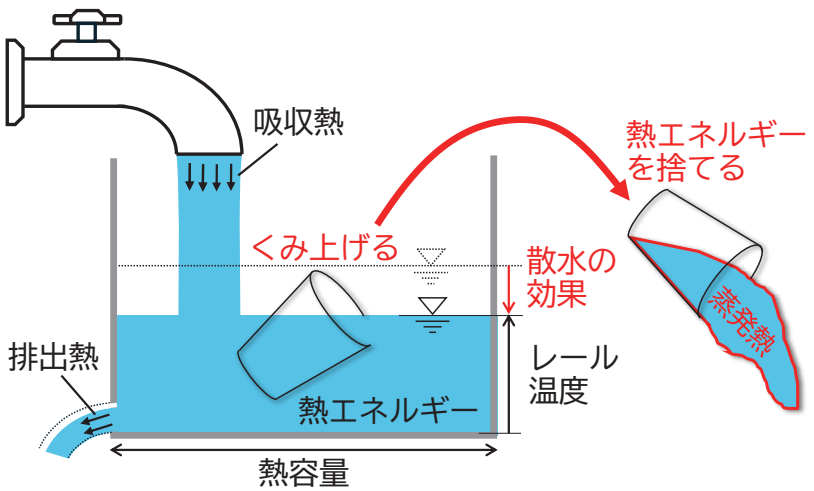


図9　散水によるレール温度低減の概念図

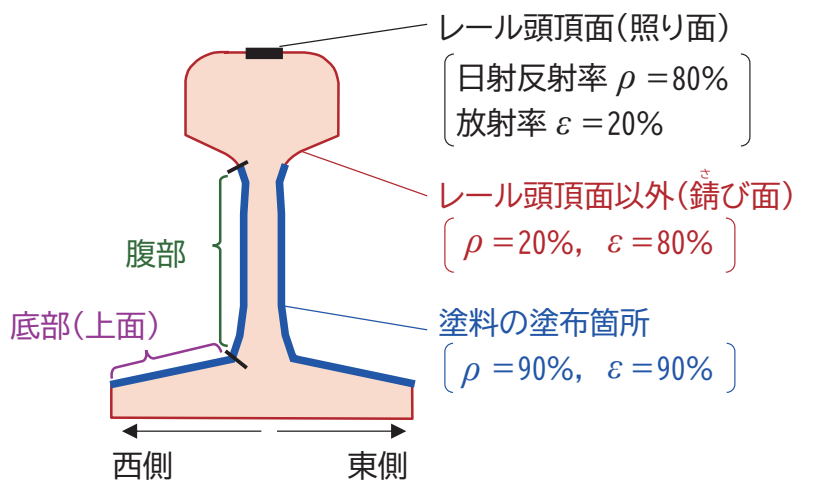


図10　高反射塗料の塗布箇所とそのパラメーター設定

の熱を「蒸発熱（または気化熱）」と呼びます。散水によるレールの冷却は，この蒸発熱を利用するもので，原理は夏の打ち水と同じです。図2の例えで考えると，散水は図9のように，容器の中の水（熱エネルギー）をすくって外に捨てる操作に相当します。100℃の水の蒸発熱は1gあたり約2257Jであり，これは1kgのレールの温度を約4.9℃下げる熱量に相当します。わずかな水量でも大きな冷却効果が得られることが分かります。

解析によるレール温度抑制効果の検証

前述の解析結果を無対策とし，反射塗料の塗布および散水を行った場合を模擬した解析を行いました。

解析条件

反射塗料は，日射反射率ρと長波放射率εで表されます。解析では，塗布箇所のρおよびεを変更することで効果を導入しました。ここでは文献2に相当する高反射塗料（ρ＝90％，ε＝90％）を想定しています。高反射塗料の長波放射率εはレール材と大きな差がないため，この違いによる温度影響は小さいと考えられます。塗布箇所はレールの腹部と底部とし（図10），東側のみ，西側のみ，両側の3条件としました。

散水については，11時から15時の間に，レール1mあたり60gおよび100gの水を1時間ごとに散布する条件を想定しました。水

の蒸発熱を1gあたり2257Jとし，散水量に応じた蒸発熱（2257J×散水量）を吸収熱から差し引くことで，散水効果を模擬しました。

解析結果

図11に塗料塗布時のレール温度の解析結果を示します。無対策時と比較し，最高レール温度は無対策時の57.0℃から，東側のみで1.8℃，西側のみで6.7℃，両側で8.4℃低下しました。東側のみよりも西側のみで効果が大きいのは，午後の西側からの直射日光を効率良く遮蔽できたためです。

図12は散水時のレール温度の解析結果です。散水直後には，60gで約4℃，100gで約7℃の温度低下が生じました。これを繰り返すことで，最高レール温度は，60gで3.4℃，100gで5.5℃低下しました。

これらの結果は，反射塗料と散水がいずれもレール温度を低減できる一方，その効き方や持続性が大きく異なることを示しています。対策の特性を理解したうえで比較することが，実運用を考えるうえで重要になります。

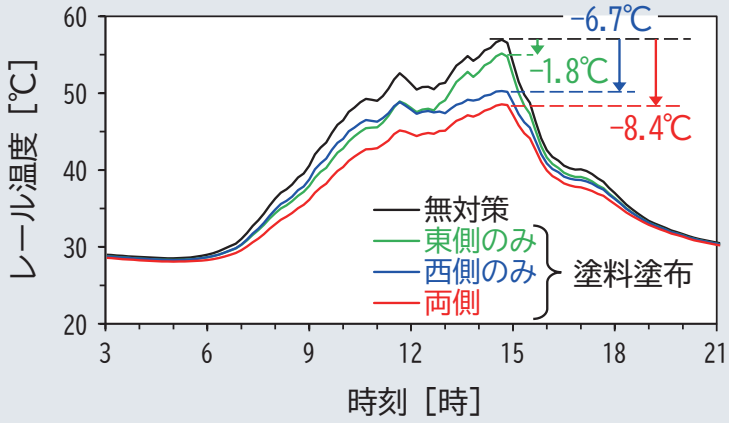


図11　高反射塗料によるレール温度抑制効果

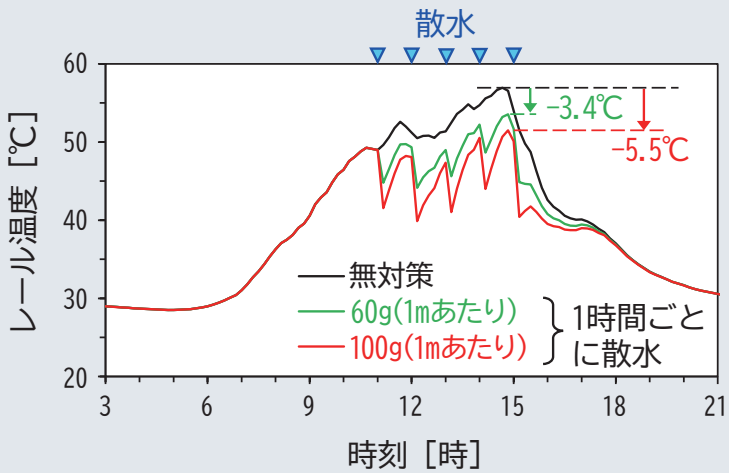


図12　散水によるレール温度抑制効果

おわりに

本記事では，猛暑時のレール温度上昇の仕組みを整理したうえで，反射塗料や散水がレール温度に与える影響を，数値シミュレーションにより検討しました。その結果，反射塗料は太陽からの吸収熱を減らすことで持続的な温度低減効果を示し，散水は水の蒸発によってレール内部の熱を直接取り除くことで，短時間に大きな冷却効果を発揮することが分かりました。

これらの効果は日射や風，周囲環境によって変化するため，実験だけで条件をそろえて比較することは容易ではありません。数値シミュレーションは，実験では試しにくい条件や対策の組み合わせを自由に設定できるという強みがあります。こうした解析を通じて，レール温度変化の仕組みへの理解を深め，気象条件や線路環境に応じたより効果的な対策の検討につながると考えます。RRR

文　献

1）浦川文寛，渡辺勉：全球可視要素を用いた鉄道用レール温度の昼夜・長期連続解析手法，土木学会論文集特集号（応用力学），Vol.82，No.15，論文ID：25-15062，2026
2）櫻田将至：建造物における温度上昇抑制技術「高日射反射率塗料」，DNTコーティング技報，No.16，2016