

# 交差点におけるつるつる路面発生 に関する一考察

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム ○藤本 明宏  
福井大学大学院工学研究科 建築建設工学専攻 福原 輝幸  
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム 高橋 尚人

本研究では、路面に及ぼす車両の熱的影響を明らかにするために、車両通過部と非通過部の路面温度比較実験および車両輻射熱による路面融雪実験を実施した。また、車両底面温度を測定し、車両輻射熱を推定した。

その結果、気象や交通条件によるが信号などで停止した車両は路面温度の上昇および路面雪氷層の融解に作用することが分かった。また、車両輻射熱フラックスは天空放射熱フラックスより相対的に高いことが分かった。

キーワード：路面凍結、路面温度、車両の熱的影響、熱収支

## 1. はじめに

冬期道路管理において、路面温度は凍結防止剤や防滑材の散布を適切に実施するための重要な指標の一つである。路面温度に影響を及ぼす因子は、道路構造や気象などの自然因子と交通や凍結防止剤などの人為因子に分けられる。山間や郊外部では、路面温度は人為因子よりも自然因子に支配されると考えられる。しかしながら、交通量の多い都市部、特に車両が停止する交差点付近においては路面温度に対する強い車両の熱的関与が推測される。既往の研究では、例えば松沢ら<sup>1)</sup>は車両タイヤからの摩擦熱が圧雪表層の氷化を促進させることを報告し、高橋ら<sup>2)</sup>は車両底面からの輻射熱（以下、車両輻射熱と呼称）を考慮した路面温度予測モデルを構築している。しかしながら、車両の熱的影響が路面の熱収支にどの程度影響を及ぼすかについては不明な点が多い。

本研究は、路面に及ぼす車両の熱的影響を定量的に評価することで、路面温度および路面凍結の予測精度の向上ならびに凍結防止剤および防滑材散布の適正化を図ることを最終目的とする。本論文では、冬期に車両通過部と非通過部の路面温度比較実験および車両輻射熱による道路融雪実験の結果を紹介するとともに、車両底面温度の測定結果を基に車両輻射熱を推定したので報告する。

## 2. 車両通過部と非通過部の路面温度比較実験

### (1) 概要

写真-1は、2009年12月29日17時から翌朝8時までの15時間に亘り、一般国道416号幾久第二交差点（福井県福井市地先）で実施した路面温度比較実験の概要を示す。



写真-1 車両通過部と非通過部の路面温度比較実験の概要

また、本実験では、気象観測および交通状況調査も併せて実施した。路面温度 $T_s$  (°C) は放射温度計 (Raytek ST 60, Raytek製) を用いて、車両通過部 (写真-1中の(A)) および車両非通過部 (写真-1中の(B)) でそれぞれ測定した。加えて、路面温度分布をサーモグラフィー (TH9100, NEC製) で適時撮影した。気象観測では、気温、相対湿度、風速、日射量および天空放射量をそれぞれ1分毎に測定した。交通状況調査では、時間交通量 $F_v$  (台/h)、青信号期間 $t_{gr}$  (sec)、赤信号期間 $t_{red}$  (sec) および $t_{red}$ における平均停車期間 $t_4$  (sec) をそれぞれ測定した。

### (2) 結果

実験期間の天気は終始晴れであった。気温は観測開始の5.7°Cから低下し、翌日0時に1.0°Cとなり、その後2.0°C前後を推移した。相対湿度は観測期間を通して60~70%であった。風速は殆どの時間で0.4 m/s以下であり、最大

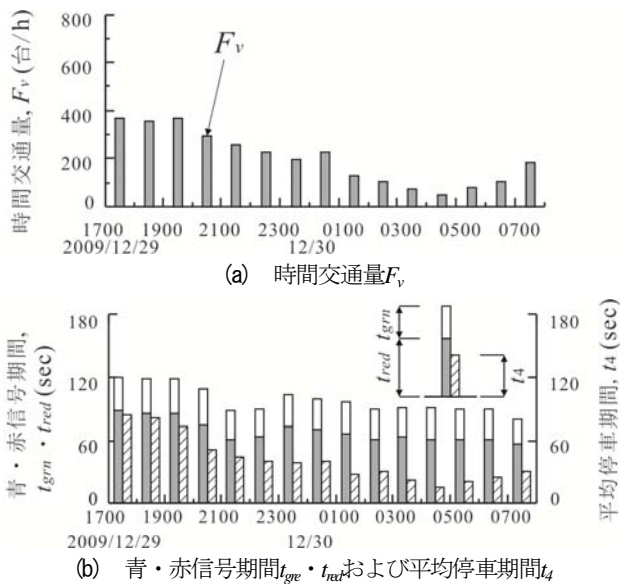


図-1 交通状況調査の結果

風速は翌日6時30分の1.0 m/sであった。天空放射量は300 W/m<sup>2</sup>程度であった。交通状況調査の結果を図-1に示す。 $F_v$ は17~19時の約360台/hから時間とともに低下し、翌日4時には最小の51台/hとなった。 $t_{grn}$ は観測期間を通して概ね30秒であり、 $t_{rrd}$ は17~20時では約90秒、それ以降では60~75秒であった。また、 $t_4$ は17時や18時にはほぼ $t_{rrd}$ と等しいが、その後は $F_v$ の減少につれて短くなり、翌日4時に最小の16秒になった。

図-2は車両通過部および非通過部における $T_s$ の時間変化を示す。車両通過部の $T_s$ 、 $T_{sv}$ ( $\Delta$ )および車両非通過部の $T_s$ 、 $T_{sn}$ ( $\bullet$ )は観測開始時(2009年12月29日17時)の10.9°Cおよび8.2°Cから時間とともに変動を繰り返しながら緩やかに低下し、翌日5時には両者ともに約4°Cになった。両者の差 $\Delta T_s (= T_{sv} - T_{sn})$ は観測開始の2.7°Cから増大し、20時に4.9°Cに達した後は時間とともに小さくなり、翌日1時以降は約0.5°Cになった。今回の車両通過部と非通過部の路面温度測定地点において、相違は交通(車両)以外に考え難いので、 $\Delta T_s$ の要因は車両の熱的影響と推察される。また、 $\Delta T_s$ と $F_v$ の時間変化が類似していることから、 $T_s$ に及ぼす車両熱の関与が示唆される。なお、観測期間における $\Delta T_s$ の平均は1.9°Cであった。

写真-2(a)は赤信号で車両が停車している状況の熱画像(2009年12月29日21時2分)を、写真-2(b)は青信号に変わり車両が発進した直後の路面の熱画像(2009年12月29日21時3分)を、それぞれ示す。同図(a)より、ルーフなどを除いて車体の温度は $T_s$ より高いことが知れる。また、車両非通過部の地点M、NおよびOの $T_s$ は7.2、8.6および9.5°Cであり、車両に近づくにつれて $T_s$ は高くなった。同図(b)では、停車域の地点P、S、RおよびVの $T_s$ は、非停車域の地点QおよびUの $T_s$ より3~4°C高く、 $T_s$ は車両中心線に近づくにつれて上昇した。

以上より、今回の気象・交通条件では、車両は路面温

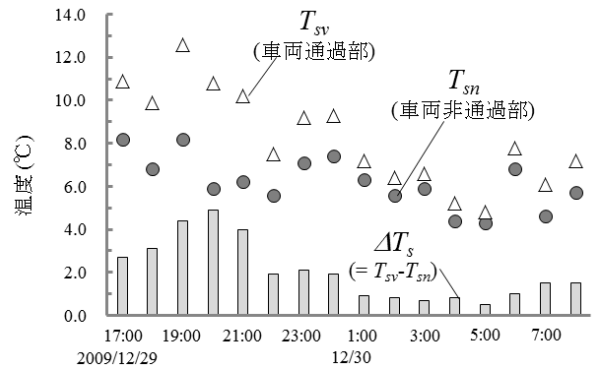
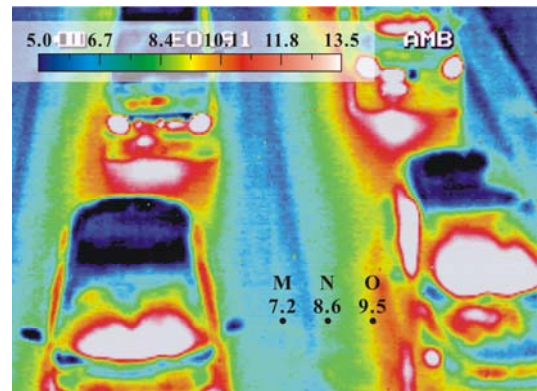
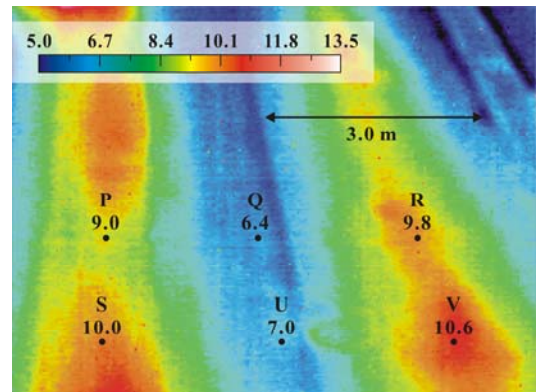


図-2 路面温度 $T_s$ の時間変化



(a) 2009年12月29日21時2分



(b) 2009年12月29日21時3分

写真-2 路面温度分布

度を上昇させるように寄与したと考えられる。また、停止した車両の範囲全体で $T_s$ の上昇が観られたことから、本観測における $T_s$ の上昇は車両輻射熱が主要因と推察される。

### 3. 車両輻射熱による路面融雪実験

#### (1) 概要

写真-2は、2011年1月27日21:00から翌日3:00に亘り、福井大学文京キャンパス構内のアスファルト舗装で実施した車両輻射熱による路面融雪実験の概要である。実験は次の手順で行った。(i)初期の路面雪氷厚さ $z_0$



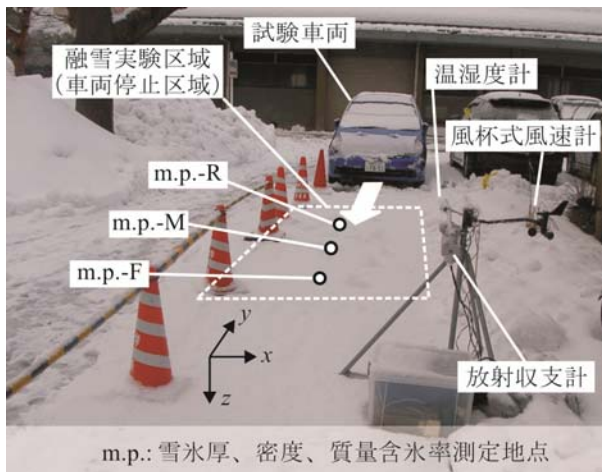


写真-3 車両輻射熱による路面融雪実験の概要

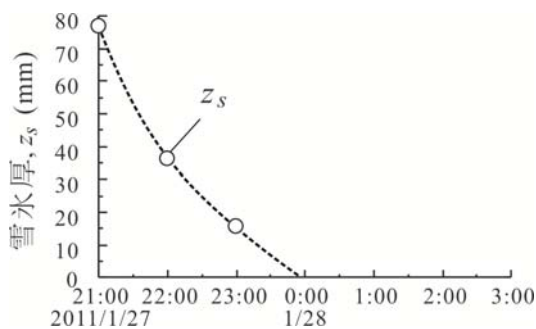


図-3 路面雪氷厚の時間変化 (mp-F)

(m) および雪氷密度 $\rho_s$  ( $\text{kg/m}^3$ ) を測定する、(ii)車両をアイドリング状態で融雪実験区域 (図中の破線に囲まれたエリア=車両停止区域) に停止させる、(iii)1時間おきに車両を融雪実験区域から区域外へ移動させ、 $z_s$ および $\rho_s$ を測定し、路面雪氷状態を撮影した。 $z_s$ および $\rho_s$ は図中に示す車両の前部 (mp-F)、中部 (mp-M) および後部 (mp-R) の地点で、ノギスおよび円管サンプラーでそれぞれ測定した。また、気温、相対湿度、風速および天空放射熱量をそれぞれ1分間隔で測定した。加えて、累計積雪量を車両の影響を受けない場所で降雪板を用いて1時間毎に測定した。

## (2) 結果

気温は約 $0^\circ\text{C}$ 、相対湿度は約90%、天空放射熱フラックスは約 $310 \text{ W/m}^2$ で大きな変化はなかった。また実験の間、断続的な降雪があり、累計積雪量は時間とともに増大し、実験終了3:00に61 mmとなった。

図-3はmp-Fにおける $z_s$ の時間変化を示す。 $z_s$ は、21:00(実験開始)の77 mmから1時間後36 mm、2時間後16 mmに低下し、1/28 0:00までに完全に融解しゼロになった。本論文に示していないが、この融解により $\rho_s$ は実験開始の $169 \text{ kg/m}^3$ から2時間後(23:00)には $398 \text{ kg/m}^3$ に増大した。

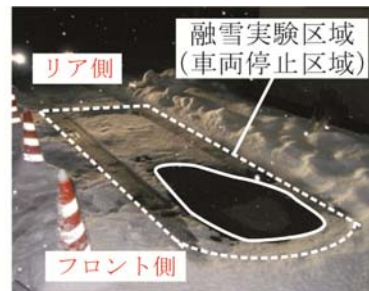
Akihiro Fujimoto, Teruyuki Fukuhara, Naoto Takahashi



(a) 2011/1/27 22:00



(b) 2011/1/28 0:00



(c) 2011/1/28 3:00

写真-4 路面温度 $T_s$ の時間変化

写真-4(a)~(c)は路面積雪・融雪状況の時間変化を示す。図中の破線内は融雪実験区域を、実線内は舗装の露出面(乾燥、湿潤、黒シャーベット状態の路面)である。実験開始の路面は一樣な積雪状態であった(写真-3)。1時間経過後(22:00)、積雪に凹凸(融解)が現れ、車両前部中央付近には露出面が認められた(写真-4(a))。写真-4(b)および写真-4(c)から分かるように露出面は時間とともに拡大した。

## 4. 車両輻射熱の評価

ここでは、サーモグラフィーを用いて車両底面温度 $T_b$  ( $^\circ\text{C}$ )を測定し、車両輻射熱フラックス $q_v$  ( $\text{W/m}^2$ )を推定する。

### (1) 車両底面温度の測定

本研究では、以下の手順で $T_b$ を評価した。

- (i) 市街地で試験車両を30分間走行させる、
- (ii) アイドリング状態のまま、昇降機で車両を持ち上げる、

(iii) サーモグラフィーを用いて車両底面の熱画像を撮影する、

(iv) 車両底面の熱画像から、 $T_v$ の空間分布を作成する。  
試験車両はトヨタのカローラアクシオ（型式：DBA-NZE141）である。今回使用したサーモグラフィーはTVS-200（NEC製）であり、放射率を0.90に設定した。測定条件は $T_a=0, 4$ および $8^\circ\text{C}$ の3ケースである。

写真-5は車両底面の写真を、図-4(a)、(b)および(c)は $T_a=0, 4$ および $8^\circ\text{C}$ における $T_v$ の空間分布をそれぞれ示す。同図(a)では、 $T_v$ はキャタライザーやサブサイレンサー付近で $60\sim 120^\circ\text{C}$ と最も高く、次いでエンジンやセンターパイプ付近で $30\sim 60^\circ\text{C}$ と高い。これらの高温域周辺では $10\sim 30^\circ\text{C}$ 程度でやや高く、それ以外の部分は $0\sim 10^\circ\text{C}$ であった。図-4(b)および(c)より、測定時の気温が高いほど、エンジン部の $T_v$ は高い。しかしながら、キャタライザーやサブサイレンサーの $T_v$ は僅かに低下した。これは測定時の車内暖房の設定が異なったためと推測される。 $T_v$ の空間分布の平均 $T_{va}$  ( $^\circ\text{C}$ ) は $T_a=0, 4$ および $8^\circ\text{C}$ に対して $11.3, 14.4$ および $17.9^\circ\text{C}$ であり、 $T_a$ に比例して上昇した。

## (2) 車両輻射熱フラックスの推定

$q_{rv}$ は、 $T_{va}$ をStefan-Boltzmannの法則に代入することで求められる。すなわち、

$$q_{rv} = \varepsilon_v \sigma (T_{va} + 273.15)^4 \quad (1)$$

である。ここに、 $\varepsilon_v$ ：車両底面の射出率および $\sigma$ ：Stefan-Boltzmann定数である。

$q_{rv}$  ( $\Delta$ ) は、 $T_a=0, 4$ および $8^\circ\text{C}$ でそれぞれ $341, 355$ および $367 \text{ W/m}^2$ であり、 $T_a$ の上昇につれて増大した。冬期における天空放射熱フラックス（下向きの長波放射熱フラックス）は、放射冷却時で $200\sim 250 \text{ W/m}^2$ 程度、降雪日や曇天日で $300\sim 350 \text{ W/m}^2$ 程度であり、本研究で推定した $q_{rv}$ に比べて小さい。また、本計測において最も高温の $T_v$ （キャタライザーやサブサイレンサー付近の $120^\circ\text{C}$ ）で $q_{rv}$ を試算すると $1219 \text{ W/m}^2$ となる。実際に路面に入射する輻射熱フラックスはこれより小さい値と考えられるが、車両停止下の路面の一部では真夏の日射熱フラックスに相当する熱が車両から供給されていると推測される。

## 5. おわりに

本研究では、野外実験を通して車両輻射熱が路面温度および路面雪氷層に及ぼす影響を調べるとともに、車両輻射熱フラックスの推定を行った。その結果、気象条件や交通条件によるものの、車両輻射熱は路面温度の上昇または路面雪氷の融解に寄与することが分かった。

以上より、車両が停・発進を繰り返す交差点部において車両輻射熱が路面雪氷の融解・凍結を引き起こし、つるつる路面の形成を助長させる可能性が示唆される。

## 参考文献

- 1) 松沢勝、石本敬志、前野紀一：圧雪路面における氷膜の形成過程、雪氷、Vol. 58, No. 1, pp. 19-28, 1996.
- 2) 高橋尚人、浅野基樹、石川信敬：熱収支法を用いた路面凍結予測手法の構築について、寒地技術論文・報告集、Vol. 21, pp. 201-208, 2005.

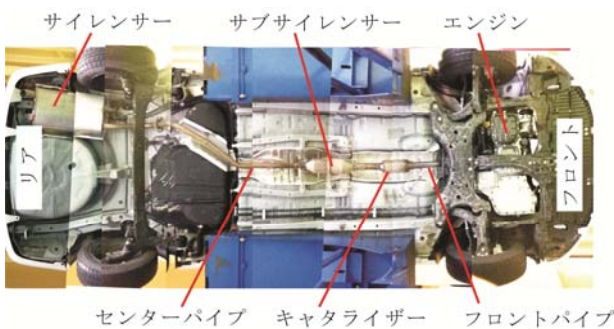


写真-5 車両底面の写真

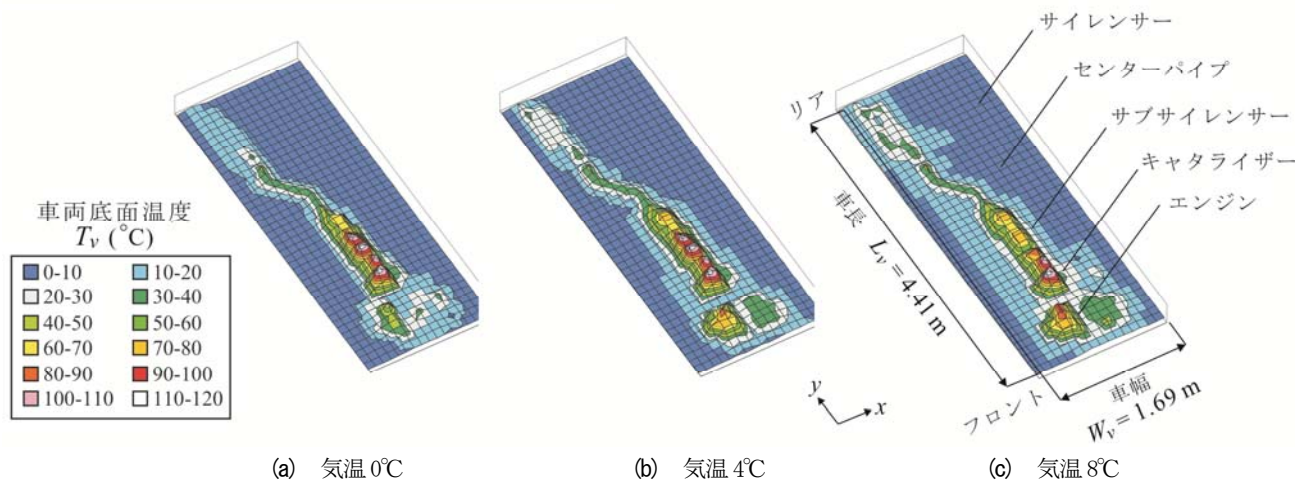


図-4 車両底面温度 $T_v$ の空間分布