

積雪域交通路における路面凍結に関する研究

中尾正義*・清水増治郎**

防災科学技術研究所

高橋修平***

北見工業大学

Studies of icing on road surface in snowy region

By

Masayoshi Nakawo and Masujiro Shimizu

*National Research Institute for Earth Science
and Disaster Prevention, Japan*

and

Shuhei Takahashi

Kitami Institute of Technology

Abstract

Heat balance observations were carried out for three winter seasons, 1988-1991, at a road in Toyama, a typical snowy city in Japan. Heat balance analyses indicated that the major heat sink, which caused icing on roads, was a big deficit in long wave radiation balance; atmospheric radiation was a key variable for predicting icing. A use of weather forecasts has been proposed, for the sake of predicting atmospheric radiation, and accordingly icing on roads. Various methods for predicting icing have been discussed and some improvements for adopting conventional prediction methods have been given. Additional discussion has been made on precise measurements of road surface temperatures with the use of infra-red thermometer.

Key words : icing of road surfaces, heat balance, road surface temperature,
prediction method, infra-red thermometer

キーワード:路面凍結, 熱収支, 路面温度, 予測手法, 放射温度計

*長岡雪氷防災実験研究所第2研究室 **長岡雪氷防災実験研究所 ***前専門委員

1. はじめに

最近の社会の発展につれて、積雪地域の交通路についても、除排雪による単なる交通路の確保というだけではなく、より安全な路面管理への要請が社会的に高まってきている。この要請に答えるためには、路面状況を適確に把握、予測することが不可欠であり、これらの情報をもとにすることによってはじめて、道路管理者の適切な対応も可能となる。このため、各地で道路雪氷情報システムの開発に関する研究が活撥に行われてきている。

路面凍結現象は、交通障害の大きな要因のひとつであり、そのことによって多くの交通事故が発生している。特に最近スパイクタイヤの規制によって、凍結路面の車輛の走行に対する不安感が社会的にも高まってきている。路面凍結が生じた場合には、融氷剤の散布等による凍結の解除や運転者に警告を発する等の措置も必要となってくる（例えば、寺田他，1987；Dunn and Schenk, 1979; Mouat and Saunders, 1979）。そのためには、路面凍結が現在生じているということを正確に推定する、さらにその発生をあらかじめ予測する手法の確立が急務である（例えば、建設省北陸地方建設局上越国道工事事務所，1976；OECD, 1989）。

防災科学技術研究所長岡雪氷防災実験研究所では、雪情報システムの開発を行ってきた富山県と共同で、1988年から1991年にかけての3冬期間に実施した官民特定共同研究「交通路における雪氷防災情報システムの開発に関する研究」の中で、路面凍結に関する研究を重要研究項目の1つとして取り上げて推進してきた。本報告では、既報の結果（高橋他，1989；清水他，1989；Shimizu et al., 1992）も含みつつ、今日までに得られた上記共同研究のうち、路面凍結に関する研究の成果を既観する。

2. 路面温度の計測

路面凍結とは、文字通り路面（正確には路面上の水）が凍結することである（雪道にしばしば出現する圧雪現象も、凍結現象と同様の交通障害をひきおこすが、出現の過程あるいは現象が異なるため、ここでは除外する）。つまり、路面に液体の水が存在している状態で、路面温度が水の凝固点すなわち0℃以下に低下した時に生じる。従って、路面凍結を推定もしくは予測するには、路面上での水の有無と路面温度の低下の両者を、推定もしくは予測する必要がある。

路面への水の供給は、降水（降雨の場合と降雪が地面に着くと同時に融解する場合とがある）や路面積雪の融解、路肩からの融解水の流入などが挙げられ、複雑である。しかも、降水だけをとりあげても、その予測それ自身が1つの大きなテーマになるほどの不確実性がある。

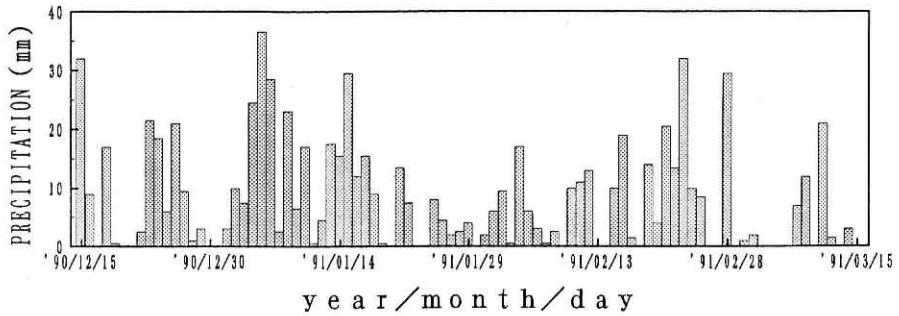


図1 富山市における1990-91年冬期の降水量.

Fig.1 Precipitation in Toyama, 1990-91.

図1に示したのは、富山市内の茶屋町で測定した1冬期間の降水量データの例である。図に示している約90日間のうち、降水が無いのは約20日にすぎず、全期間の4/5は降水が観測されている。さらに、同茶屋町の県道沿いで、3冬期にわたって毎朝9時に路面状態の観測を行ったが、図示した1991年の場合には、路面が濡れていなかったのはわずか10日間にしかすぎなかった。つまり、全期間の1/10しかなかったことになる。9時よりもさらに早朝の朝4～6時頃（路面凍結が生じる路面温度の最低ピークはほぼこの時刻に生じる）ならば、路面が乾燥していた日数はさらに減少するであろう。早朝から昼間にかけて路面が次第に乾いてくることがあるからである。

つまり、富山を含む日本海側の積雪地帯では、冬のモンスーンの影響で降水日数が極端に多く、冬期間、路面はほとんど濡れているとも云える。従って、路面凍結の発現は、路面上の水の有無というよりも、主として路面温度の低下に起因すると考えてよい。すなわち、路面温度を正確に推定もしくは予測することができれば、それはとりもなおさず、路面凍結の発現に対する推定あるいは予測を行ったことと見做してもさしつかえなからう。

路面温度だけを指標として路面凍結を考えると、稀にはあるが、路温が低下しても路面に水が無いために凍結が生じない場合でも、路面凍結が発現したと見做してしまうことがあり得る。しかしこの誤りは、凍結しているにもかかわらず凍結していないと考える誤りとは違って、安全側へとずれている誤りだから、大きな問題とはならないであろう。

路面温度を長期的に計測するには、センサーを道路の表面に埋め込むやり方と、離れた場所から路面の放射温度を計測するやり方とがある。実際の道路では、車輻の通行によって道路表面が次第に削られてくるため、前者の方法はあまり好ましくない。そこで、放射温度計による路面温度の計測がよく行われている。

放射温度計は、測定対象から出てくる全放射量が、その絶対温度の4乗に比例するという法則を利用して温度計測を行うものである。しかし、温度計自身からのエネルギーの一部も受感部に入射しているため、測定したエネルギーの量から測定対象の温度をより正確に求め

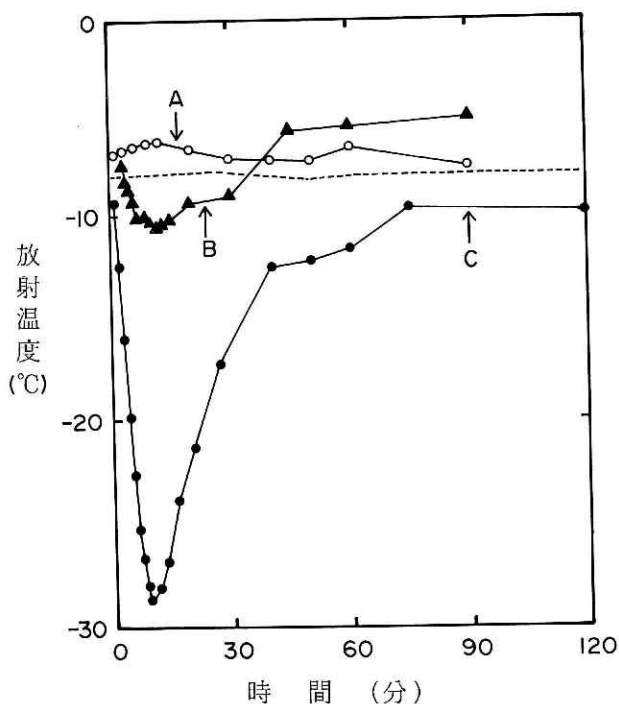


図2 温度計に温度変化を与えた場合の、放射温度計測定値の時間変化. 破線は接触型温度計による測定対象の温度変化を示す. A, B, Cはそれぞれ異なるタイプの放射温度計である.

Fig.2 Temperature readings of different types of infra-red thermometer, after a sudden change of the ambient temperature.

るためには、温度計自身の温度も問題になる。

そこで、自分自身の温度の処理が異なる3種の放射温度計を比較してみたのが図2である。これは、室温(25°C)にあった温度計を-8°Cの低温室に持ち込み、あらかじめ低温室になじませてあったアスファルトの温度を時間を追って計測したものである。接触型のサーミスタ温度計によるアスファルトの温度変化が破線で示してある。A社の温度計は、自分自身の温度を一定に保つ恒温装置を内蔵しているもので、時間の経過にかかわらず、ほぼ同じ温度を計測している。ところがB社のものは、約30分程度は実際の温度よりもやや低い温度を与え、それ以降は高めの温度を計測するという時間変化を示している。この放射温度計は、自分自身の温度を内蔵の温度計で計測し、その値を用いて得られた計測温度を補正するという方式を採用しているものである。自己温度に対する考慮がほとんどはられていないC社の放射温度計では、短時間ではあるが実際の温度と20°C以上も異なる値を計測してしまっている。したがって、B, C社のような方式の放射温度計を用いる時には、温度計自身の温度の変化に特に注意を払う必要がある。

物体からの放射エネルギー量をもとに温度を計測する場合は、測定対象であるその物体の放射率も問題になる。一般に使われている放射温度計の波長は8 μm前後で、このような長波領域では、地球を構成している物質のほとんどは極めて黒体に近く、放射率は1に近いと考えられている。しかし、金属などでは長波領域でも反射の項が効いてきて、放射率は小さい。

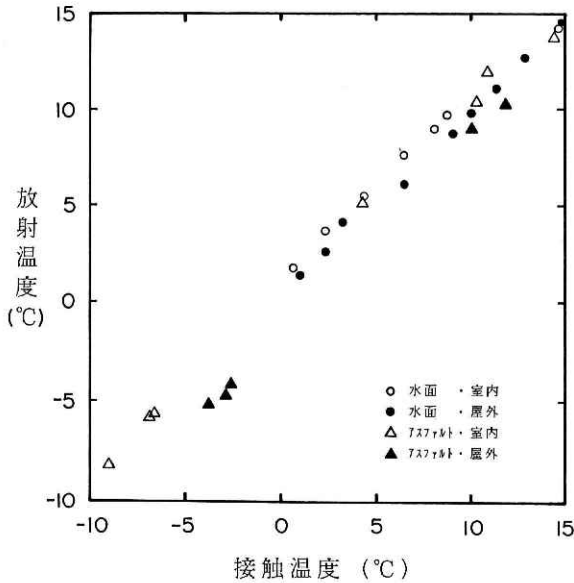


図3 水面およびアスファルトの放射温度と接触温度の比較.

Fig.3 Radiation temperatures for asphalt and water surfaces.

図3に示したのは、路面を構成するアスファルト表面の放射温度を接触型温度計による測定値と比較したものである。参考のために容器に入れた水の場合も示してある。この図を見ると、アスファルトの放射温度が水よりも低めにでており、水に比べてアスファルトの放射率が小さいことをうかがわせる。

しかしよく見ると、水とアスファルトの違いよりも、それぞれの物体の放射温度を屋内で測った場合と屋外で測った場合の違いの方が大きい。水、アスファルトともに、屋外で測定した時の放射温度は屋内よりも1～1.5℃ほど低めである。このことは、放射率が1よりも小さい場合には、測定対象以外の物からの長波放射の反射の項を考慮に入れる必要があることを示唆している。すなわち、

$$\sigma T_m^4 = \epsilon \sigma T^4 + (1 - \epsilon) A \tag{1}$$

ここで、 σ はステファン-ボルツマン定数で、 $5.67051 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ 、 T_m は放射率を1に設定したときに計測される放射温度(K)、 ϵ は放射率、 T は測定対象の温度(K)、 A は測定対象以外の物からの長波放射である。

外部の長波放射 A が0の場合には、式(1)の右辺は第1項だけとなって、 T_m と T には $\sqrt[4]{\epsilon}$ ぶんだけの違いがでてくる。例えば0℃前後における T_m と T の違いは、 ϵ が0.99の場合で約0.7℃、0.95の場合には3.5℃にも達する。しかし A が増加するにつれて T_m と T の差は次第に縮まっていく。 $A = \sigma T^4$ に達すると、 T_m と T は全く等しくなる。このことは、測定対象とほぼ同じ温度をもつ壁で周囲を覆った状態で放射温度計測を行ったことに相当する。

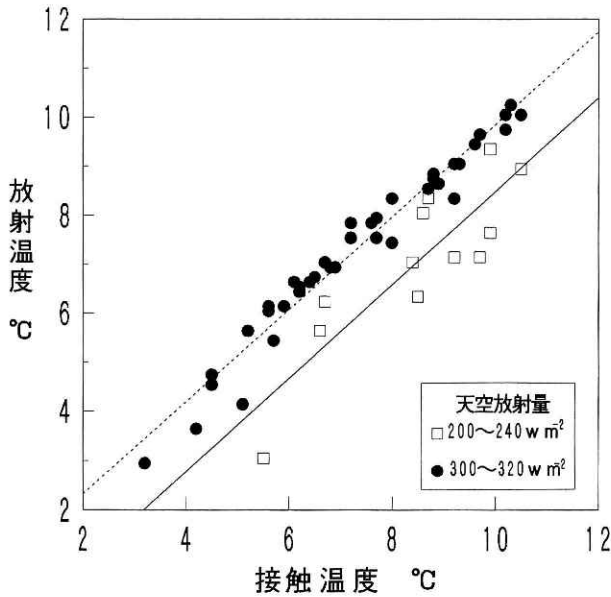


図4 天空放射量の違いによる放射温度の違い。

Fig.4 Radiation temperatures with different atmospheric radiation.

図3に示した、水やアスファルトの温度を屋内で測定した時、これと非常に似かよった状況にあったと考えられる。屋内の壁や天井などの温度は、床に置いた水やアスファルトなどの測定対象物の温度と大きく違わないからである。しかし、屋外で計測した時は、入射してくる外部長波はその源が空気中の水蒸気や雲など、より低温物体から射出されるものであり、また、その量自身も小さいことから、反射の項が少なく、実際の温度よりも低めの放射温度が得られたと考えることができる。

このことをやや定量的に調べたのが図4である。これは、アスファルトの放射温度と接触温度の比較を、天空放射量が大きく異なる、悪天日（Aが大）と好天日（Aが小）それぞれに屋外で行った結果である。明らかに、天空放射量が小さい好天時には、低い放射温度が得られており、悪天時との差は1.4℃程である。式(1)を使って、約100Wm⁻²の天空放射量の違いの影響を見てみると、放射率が0.95の場合で約0.9℃の放射温度の差として現れ、0.92の場合だとほぼ1.5℃の違いになることがわかる。このことをさらに詳細に検討するためには、測定対象の放射率を正しく見積もる必要がある。定量的に議論しようとするれば、天空放射の波長分布特性も問題になってこよう。

図4に示した計測を行った時には、悪天時の路面は濡れていたのに対して、好天日にはアスファルトが乾燥していた。従って、それぞれの放射率が互いに等しいとは限らない。しかしともかく、以上見てきたように、放射温度計による路面温度計測を精度良く行うときには、天空放射の反射の項をきちんと見積もってやる必要がある。つまり、天空放射量を同時に計測しなければならない。

3. 交通路の熱収支特性

路面凍結現象に大きく貢献する気象要素等を調べるために、3冬期間にわたって、富山市茶屋町の県道において、熱収支要素の観測を行った。観測を行った場所は、富山市の呉羽丘陵の東斜面、富山—高岡線沿いの地点である。上下線それぞれ1車線ずつの路線であるが、主要幹線であるため車輛の往来は激しく、車線当たり1日平均15,000台もの通行がある（写真1）。測定要素としては、気温、湿度、風速、風向、日射、天空放射、路面の反射率、路面放射温度、地温、地熱流、雨雪量であり、これらを10分毎にデータロガーで記録した。また、車輛通行台数の測定も連続的に実施した。さらに、道路の概況を把握するために、ビデオカメラによる4分毎に1秒余りのインターバル録画観測を行った。これらの連続自動観測を補足するために、毎冬それぞれ1週間程度のマニュアル観測の他、3冬期ともに毎日朝9時には目視観測を行い、路面状態の記載や各センサーのチェックを行った。

このようにして、得られたデータをもとに、以下の要領で熱収支解析を行った。
交通路面への熱の出入りを式(2)のように考える。

$$G(1 - \alpha) + N + H + E + C + X = 0 \quad (2)$$

ここで、 G は日射量、 α は路面のアルベド、 N は長波の放射収支量、 H は顕熱輸送量、 E は蒸



写真1 富山市茶屋町の観測点

Plate 1 Observation site at Chaya-cho, Toyama.

発凝結に伴う潜熱輸送量， C は地面からの伝導熱量， X は通行車輛との熱の交換その他の量で，すべて路面へ熱が流入する方を正に，路面から熱が奪われる方を負と考える。

G や α は連続的な実測値があるので，式(2)の第1項は直接的に求めることができる。Nの値は，下向きの天空放量Aと路面からの長波放射量Rの和として表現できるので

$$N=A+R \quad (3)$$

前節で詳しく述べたように，実測した天空放射量と路面温度の値から求められる。Hは，高さ z での気温 T ，静止空気中の温度拡散係数 κ ，渦拡散係数 K_H ，定圧比熱 C_p ，空気密度 ρ を用いて

$$H=\rho C_p (\kappa +K_H) \frac{dT}{dz} \quad (4)$$

で表現できる。一般に， κ は K_H に比べて充分小さいとして無視し，乱流輸送理論から導いたバルク公式

$$H=\alpha_H (T_1-T_s) u_1 \quad (5)$$

を実用的に用いることが多い。ただし，ここでの α_H は顕熱のバルク係数， T_1 は高さ1mの気温， T_s は路面温度， u_1 は高さ1mの風速である。

交通路面では，車輛の通行等によって空気が乱され，一種の“かきまぜ効果”が生じるため（次節でも述べる），一般風速が0であっても熱輸送が行われると考えられるため，

$$H=\alpha_H (T_1-T_s) u_1 + \beta_H (T_1-T_s) \quad (6)$$

の方が適当であろう。ここで β_H は車輛が引き起こす風によって生じる熱輸送に関係し，通行車輛台数などの函数となろう。潜熱輸送Eの場合も同様に，一般のバルク公式では

$$E=\alpha_E (e_1-e_s) u_1 \quad (7)$$

で表現されるが（ここで， α_E は潜熱輸送のバルク係数であり， e_1 と e_s はそれぞれ高さ1mおよび路面での水蒸気圧である），交通路面上では

$$E=\alpha_E (e_1-e_s) u_1 + \beta_E (e_1-e_s) \quad (8)$$

の方が適当であろう。ただし β_E は風速が0の時でも行われる潜熱輸送の係数で、これまた通行車輛台数などの函数であろう。

しかしながら、現在のところ β_H や β_E の値を評価することが困難なので、式(6)、(7)の第2項はXの項の中に入れて考えることにして、HやEはそれぞれ式(5)、(7)を用いて求めることにする。 α_H と α_E の値としては、それぞれ成瀬他(1970)と小島他(1985)の値を用いた。

地中伝熱量Cは、地中熱伝導率をk、深さzの地温を T_G とすると、一般的に次式が成立する。

$$C = k \frac{dT_G}{dz} \quad (9)$$

ここでは、地温勾配を求めるのに、路面からの深さ5cmと20cmに埋め込んだ地温計の値を用いた。地面直下の勾配ではないために、結果として得られるCの値に時間遅れや平滑化の現象が現れることが予想されるが、長時間の平均値を議論するためには充分であろう。kの値としては、アスファルトの熱伝導率として一般的に知られる $k=1.628\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$ の値を用いて計算した。

こうして得られた熱収支解析の結果の詳細は現在準備中なので、ここでは1989年2月1日～5日にかけての結果の1例を以下に述べるにとどめる。

2月1日から5日にかけての天気は概ね以下のようなものであった。1日に降っていった雨が夜半にはあがり、2日の朝は薄曇りとなる程度には回復したが、また雨が降りだした。その雨は夜中から雪へとかわり、翌3日の朝9時には道路上にシャーベット状になった5cm程度の積雪が見られた。その雪は日中いったんは融けたものの、雪は終日降りつづけ、翌4日の朝9時には道路上の積雪は10cm程度に達した。しかしこの雪も5日の早朝には降りやみ、朝9時の天気は曇、路面もやっと乾燥してきた。

この期間中に得られた路面のアルベドの値を示したのが図5である。道路上に積雪が無く濡れている場合には0.1～0.15程度であったものが、シャーベット状とはいえ、積雪がある場合には0.4以上の値へとね上がっている。また、路面が乾燥した5日には、アルベドは、道路が濡れている場合よりもいくぶん高く、0.2前後の値を示している。

前述したようにして求めた熱収支各要素の変化を示したのが図6である。路面への熱の収入を見てみると、夜間は地中からの伝導熱が主要な要素であるのに対して、昼間はほとんどすべてが日射によるものであることがわかる。HやE、Nなど他の要素はすべて昼間になると急激に減少して(負の値として増大して)、大量の日射エネルギーを逃している。

路面温度が低下して路面凍結の恐れがでてくるのは主として夜間なので、その部分を拡大して図7に示した。4夜間の結果に共通していえることは、顕熱や潜熱輸送の項がほとんど効果が無いのに対して、主たる収入項が地中伝達熱、支出項が長波放射収支量だということ

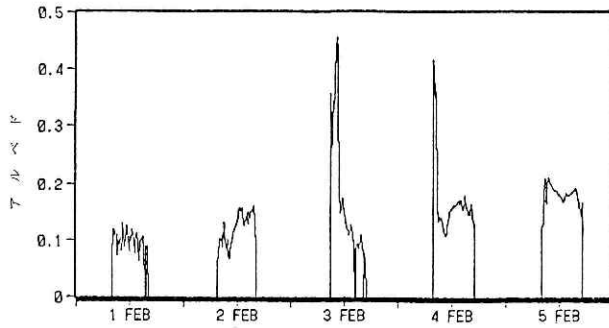


図5 1989年2月1日から2月5日にかけての路面のアルベド。夜間、日射が無い時には計測されていない。

Fig.5 Surface albedo, Feb. 1-5, 1989.

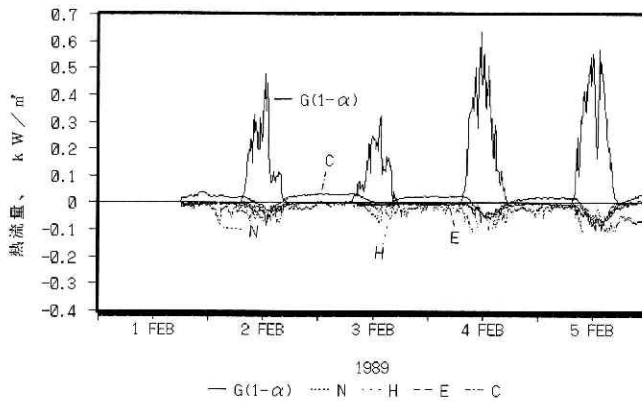


図6 富山市茶屋町の交道路面の熱収支（1989年2月1日-5日）。

G：日射， α ：アルベド，N：長波放射収支，H：顕熱，E：潜熱，C：伝導

Fig.6 Heat budget at a road surface.

である。同様の結果は、石川他（1987）によっても得られている。前述したように、ここで用いた伝導熱の見積もり方では、細かい時間変動のことは議論できないのでここでは触れないが、地面から出る長波放射によって路面から熱が奪われ、それを補うように地下から熱が流入してくることを示している。つまり、夜間の路面温度の低下は、第1義的に長波放射のせいだということができる。

夕方18時より翌朝6時にかけての12時間の、平均熱フラックスを項目別に示したのが図8

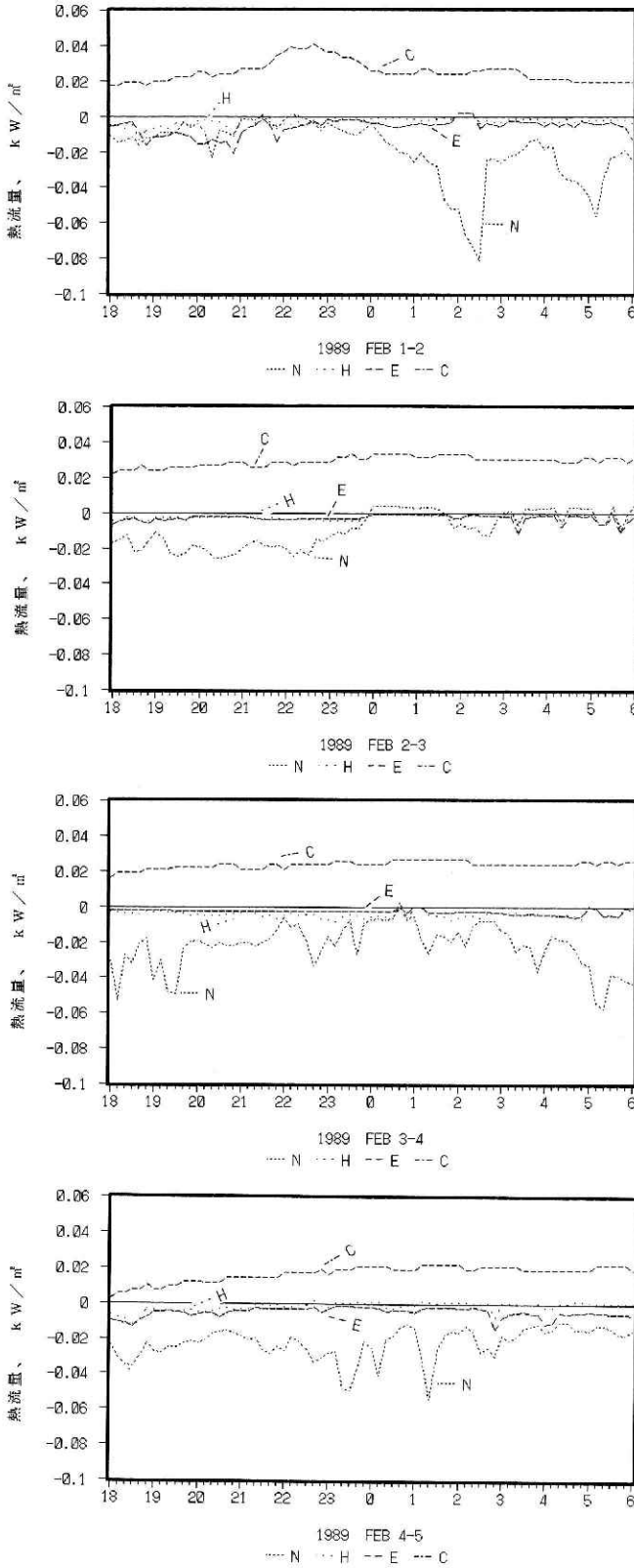


図7 夜間の熱収支(1989年2月1日-5日).
 N:長波放射収支, H:顕熱, E:潜熱, C:伝導
 Fig.7 Heat budget during nighttime.

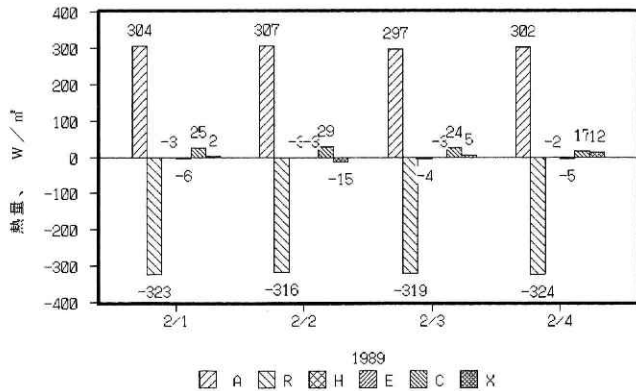


図8 夜間の熱収支各要素の比較. 2/1と示してあるのは2月1日から2日にかけての夜間の意味である.

A: 天空放射, R: 地表面放射, H: 顕熱, E: 潜熱, C: 伝導, X: 残差

Fig.8 Heat fluxes during nighttime.

である. ここでは, 天空からの入力放射Aと地面から出ていくRとを分けてある. また, 残差として求めたXも図示してある. 他の項目と比べて, AやRが極端に大きいことが一日でわかる. 上に述べたように, ここでとりあげた1989年2月1日~5日の間では, 天気の良い日が全く無く, 曇や雨, 雪などであったため天空放射量に大きな変化が無い. しかし, 例えば快晴などの時には天空放射量Aは 200W/m^2 近くにまで低下する. 地面からの長波放射Rはそれほど大きく変化しないので, 天空放射が極端に低下すれば, 結果として放射収支量Nは大きなマイナスとなる. つまり, 図7や8に示したような, 最も天空放射量が多い日でも, 熱の流れの大部分が放射収支量Nであった訳だから, Aが極端に小さい時にはそれにも増してNが大きな負の値になることになる. 従って, 夜間の路面温度の低下を知るためには, 天空放射量が最も重要な要素であることになる.

残差として求めたXの値は, はじめの2日間は概ね0かマイナスであったものが3日目にプラスに転じ, 4日目には地中伝導にも匹敵する程の大きなプラスの値になっている. このことは, “かきませ効果” にあたる式(6)や(8)の第2項では説明できない. 顕熱, 潜熱の項はどちらも小さな値ではあるが負の値だからである. 車輻が発生する熱とも考えられるが, 1日目, 2日目の様子から見て, その分は, マイナスに働く“かきませ効果”にほぼ補償されているであろう. 3日目と4日目が前2日と大きく違うのは, 夜半に道路上に雪が積もったということである. すると, 3日目, 4日目のプラスのXの値は, 積雪の融解熱と考えるのが最も妥当であろう. 量的にも, 4日目の方が積雪が多かったこととも旨く一致する. 式

(2) では、路面積雪の融解の項は考慮に入れていないからである。しかしながら、図8の結果を見る限り、路面温度の低下にとって最も重要なのは天空放射であって、車輛からの発熱や“かきませ効果”，路面積雪の融解などは、顕熱，潜熱輸送の項と同様に、路面温度に対して大きな影響は与えないと云えよう。

4. 路面温度の特性と予測

第2節のはじめに述べたように、路面温度を精度良く予測することができれば、かなり正確に路面凍結を予測できることになる。このため、車社会に移行しはじめた1970年代より、建設省や各自治体、道路公団といった道路管理者を中心として、路面温度の予測への取り組みが開始されてきた。その初期には、路面温度の測定データが希薄であったこともあって、気温予測手法の開発に精力が注がれてきた。

主として用いられたのは、数十個の気象要素（予測値を含む）を説明変数として、交通路各場所における気温を重回帰相関的に予測しようというものである（増田と青木，1986；富山県，1987；1988）。この手法の難点の1つは、手法そのものに帰因する予測値のバラツキ以外に、気温と路面温度とが必ずしも一致しないということである。

図9に示したのは、富山市茶屋町で観測した、最低路面温度と最低気温との関係である。両者の間に良い相関が見られるもののややばらつきがある。従って、最低気温の予測が正確にできれば、路面温度の予測がある程度できることになるが、図に見られるばらつきの程度よりも精度を上げることはできない。

路面温度をより正確に得ようとするれば、熱収支的手法が考えられる。つまり、前節で述べ

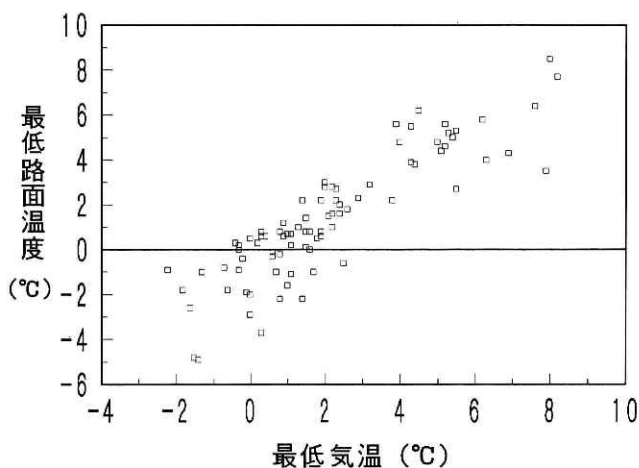


図9 日最低路面温度と日最低気温との関係

Fig.9 Daily lowest values of road surface temperature and air temperature.

たような熱収支各要素を予測することができれば、路面温度が予測できることになる。この手法も既に検討されており (Rayer, 1987), 実際の応用としても利用されているが (Thornes, 1989), 予測可能な時間スケールが短いようである。多くの熱収支要素すべてを事前に精度良く予測することがかなり困難なためと思われる。

以上述べてきた2つの手法では、予測のためには路面温度を計測する必要がない。これらの手法がまず試みられたのは、交通路の表面温度は、その計測それ自身がさほど容易ではなかったという事情も反映しているのかもしれない。しかし最近では、第1節で述べたようなことに充分注意を払う必要はあるものの、放射温度計を用いて比較的容易に路面温度の計測が可能になってきた。事実多くの場所で、路面温度計測データが蓄積されてきつつある。

ある程度の路面温度データの蓄積があれば、予測値を含む複数の気象要素を説明変数として、重回帰相関の手法によって、路面温度を直接予測することが考えられる。この場合には、路面温度と気温との違いを問題にしなくても良いだけ初期に行われた気温予測法よりも有利であり、適当な説明因子の検討などが開始されている (富山県, 1990)。

本節では、路面温度の分布や時間的変化の特性に関する調査結果を述べ、その予測について考察する。

4.1 路面温度の分布

通常の放射温度計では、温度を計測する面の面積が狭いために、測定値がどの程度路面温度を代表しているのかを調べておく必要がある。

写真2に示したのは、道路を横断方向から眺めた路面放射温度の分布である。Aで示したのが中央分離線、BとCが路肩の側線で互いに8m離れている。つまり、1車線当たり4mである。路面温度の分布は、道路に沿った平行なパターンで表われており、この程度の空間スケールでは、表面温度が道路沿いに一様であることがわかる。しかし、横断方向には、路面温度が変化している。

写真2の左端には、画面中央で十字に交差している縦横軸のうちの縦軸に沿った温度変化が示してある。右に行くほど高温であり、左側が低温である。これを見ると、中央分離帯や路側に比べて、車輪が通行する走行レーン内部の方が路面温度が1度程度低いことがわかる。

路側部と走行レーン部との間の温度差が時間的にどう変化するかを見たのが図10のAと印した上の図である。走行レーン中央部およびタイヤ跡付近での路面温度と、路側での表面温度との違いが、それぞれ実線および破線で、走行レーンの方が高いときにプラスになるように示してある。下の図には、参考のために、気温と路面温度 (タイヤ跡よりやや走行レーン内部寄り) で測定した) も載せてある。

図10によると、気温が高い昼間は、走行レーン内部の方が路側よりも路面温度が低いのに

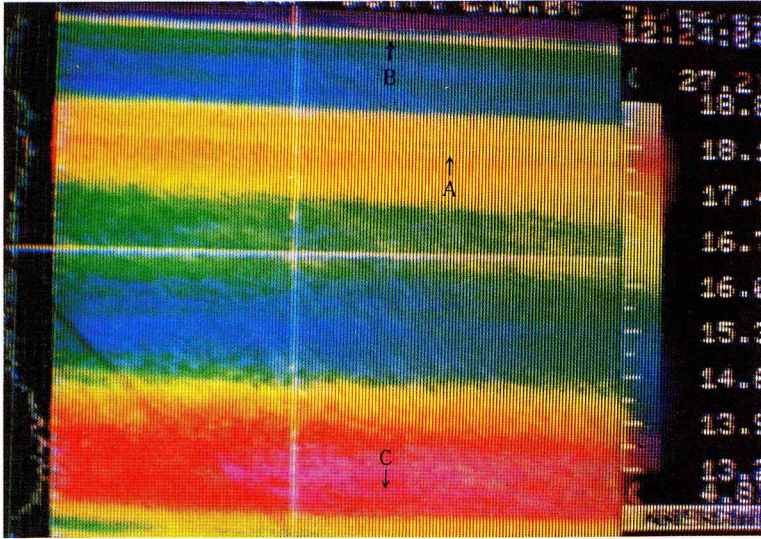


写真2 道路の横断方向に見た路面温度の分布（昼間の観測例）。
A：センターライン，B，C：サイドライン

Plate 2 Lateral distribution of road surface temperature.

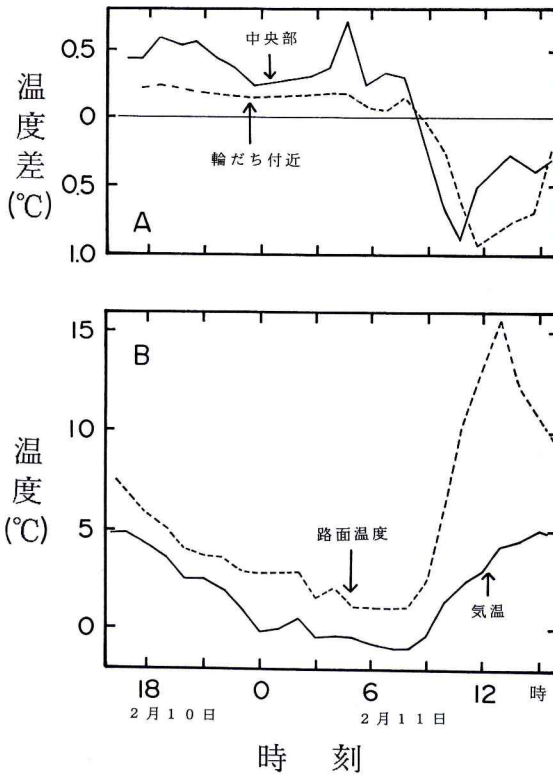


図10 A：走行レーン内部と道路の端との路面温度の違い。前者が高温の場合プラスになるようにとってある。
B：路面温度と気温の時間変化

Fig.10 A：Lateral gradient of road surface temperature.
B：Road surface temperature and air temperature.

対して、夜間は逆に、走行レーン内部の方が高い温度を示している。このことは以下のよう
に考えることができよう。

走行する車輛からは常に熱が放出されている。これは高温の排気ガスを通してのこともあ
らうし、またタイヤの発熱もあろう（走行中のタイヤは路面温度よりも5～10℃も高温であ
ることも観測された）。これらの影響で、一般的には、車輛が通行する走行レーン内部の路
面温度の方が、これらの影響が少ない路側部よりも高温になるであろう。特に夜間はこの効
果に加えて、車輛から放出される長波放射もまた、路面を暖める役割を果たす。

日射がある昼間では逆に、通行する車輛が道路に陰をつくるために、常に日射が当たる路
側部よりも走行レーン内部の方が路面温度が低くなるであろう。また、主に日射のために路
温が急上昇する日中には、顕熱伝達による大気中への熱の放出も増加するが（図6）、その
放出量も、路側部と走行レーン内部では著しく違ふと考えられる。というのは、車輛の通行
によって引き起こされる風は、路側へ行くにつれて急激に低下することが観測されたからで
ある。つまり、車輛の通行による空気の“かきませ効果”によって、走行レーンの内部ほど
顕熱による路面からの熱の放出が促進されることになる。このこともまた、日中は路側部よ
りも走行レーンの方が路面温度が低い原因となろう。

しかしながら、図10に示したように、道路の車輛走行部と路側部の表面温度の違いは高々
1℃程度なので、その範囲内では、道路のどの部分の表面温度を計測しても大きな問題には
ならないであろう。

4.2 路面温度の時間変化と予測

路面温度の測定例を図11に示す。図でわかるように、路面温度は、異なる天候のもとで
も、昼間の13時頃に最大値をとり、朝の6時前後に最低となるという周期変化を繰り返して
いる。前節で述べたように、路面温度の低下に最も大きく影響するのは天空放射量なので、
それを予測することができれば、ある程度路面温度を予測することも可能となろう。

天空放射量と天気との関係を示したのが図12である。各天気ともにその時の天空放射量の
値は大きくばらついてはいるが、“晴”とそれ以外の“曇”や“雪”，“雨”の場合とでは
大きく違う。前者では230～280W/m²なのに対して、後者では280～380W/m²の間に分布し
ている。天空放射は空気中の水蒸気や塵からのものもあるが、主として上空の雲から放出さ
れるものだから、雲量が7以下の晴の場合と、それ以上の“曇”や“雪”，“雨”の場合と
で明瞭に区分されるのはある意味では当然であろう。そこで、天空放射量に代わって、天気
によってデータを整理してみる。

図13に示したのは、図9と全く同じ日最低気温と日最低路面温度との関係を見たものであ
るが、ここでは、天気による区分けがしてある。雲量が少ない“晴”や“晴・曇”のグルー
プと、雲量が多い“曇”以下のグループとの2つに大きく分かれることがわかる。後者のグ

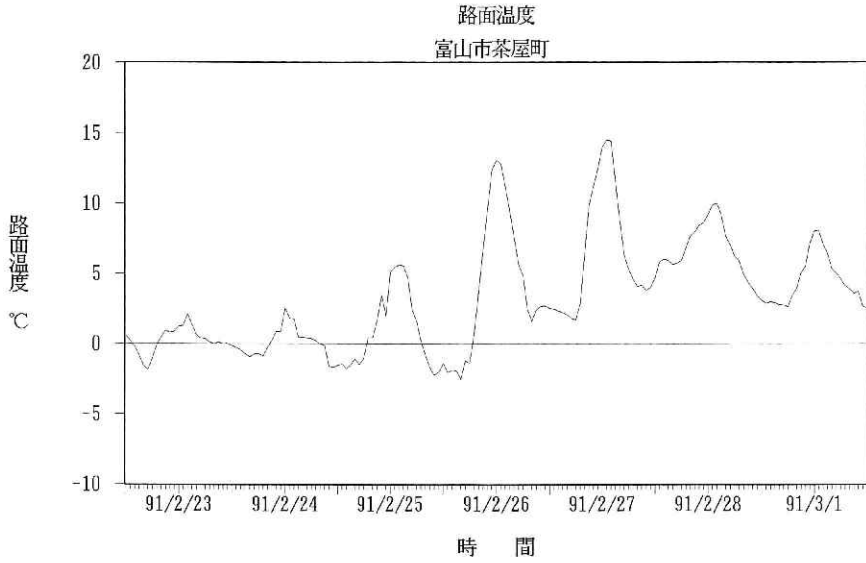


図11 富山市茶屋町での路面温度測定例 (1991年2月23日 - 3月1日)。
Fig.11 Variation of road surface temperature (Feb. 23-Mar. 1, 1991).

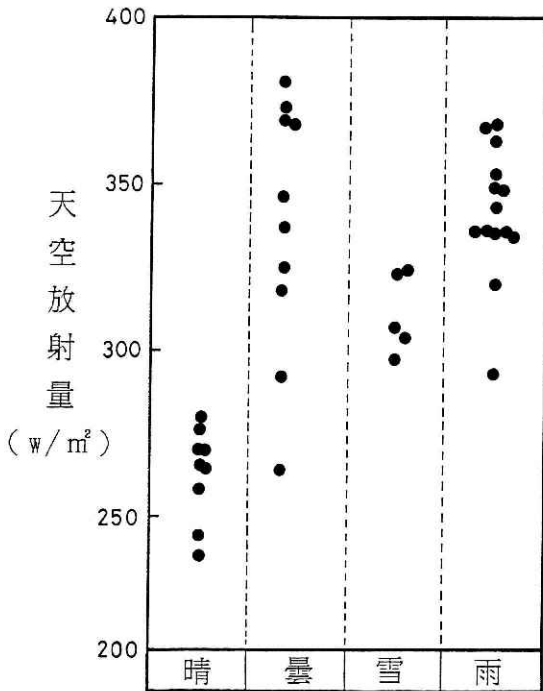


図12 天空放射量と天気との関係
Fig.12 Atmospheric radiations for various types of weather.

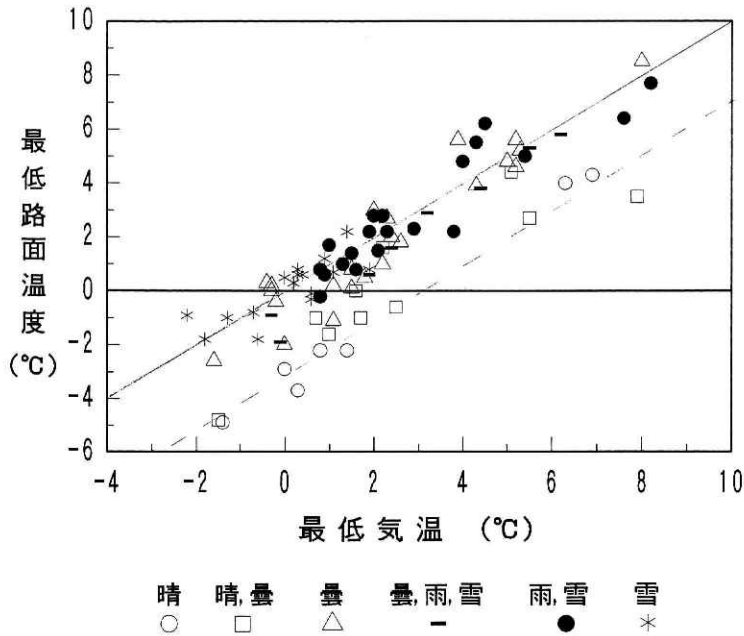


図13 日最低路面温度と日最低気温との関係。図9と同じデータに、天気による区分けをしたもの。
Fig.13 Lowest values of road surface temperature and air temperature for various types of weather.

ループでは、気温と路面温度とが等しいことを示す斜めの実線に2度以内の精度で良く一致している。このことは、後者のグループに属する1989年2月1日～5日の夜間、顕熱輸送が0に非常に近かったということからもうなずける（第3節）。

これに反して、雲量が少ない（つまり天空放射量が小さい）“晴”や“晴・曇”のグループでは、路面温度の方が気温よりも3℃程度も低いことを示している（図13の破線）。つまり、天空放射量が少ない分だけ地面からの放射量が卓越して、そのぶん路面温度を低下させていると考えることができる。

このことは、以下のことを示唆している。従来より複数の機関で重回帰相関的手法によって最低気温を予想しようという研究が積み重ねられてきている。しかし、重回帰式の中に天気情報が入っているものはほとんど無い。多分、天気の情報はデジタルな数字情報になりにくいからであろう。しかし、天空放射量もしくは雲量という、路面温度に大きく影響する要素の予測が困難である以上、それに代わるものとして天気情報を利用するべきであろう。従って、最低気温を重回帰式を使って予測したのちに、天気情報（天気予報として毎日流されている）を加味すれば、さらに路面凍結予測の精度が上がることになる。

天空放射量に代わるものとして、天気情報がある程度有用であることがわかったので、1988年から1991年にかけて3冬期間に収集した路面温度の249日分の日変化データを、天気

パターン毎に分類してみた。分類は雲量に着目して行ったため，“曇”や“雪”，“雨”“あられ”等をすべてひっくるめて悪天（B）とし，“晴”や“快晴”などを合わせて好天（F）とした。1日を昼間（6時から18時まで）と夜間（18時から翌日の6時）とに分けて、それぞれの期間で好天か悪天かを当てはめると、表1に示す4つの天気パターンに分類できる。

各天気パターンに入った日の路面温度データを時間毎にすべて平均して得られた、各パターン毎の平均的な路面温度の日変化の様子を示したのが図14である。

路面温度は昼の13時頃最高値をとり、天気の良い日には15℃以上、天気が悪い日には9度前後である。夕方から翌朝にかけて、路面温度は次第に低下して行くが、その下り方も天気パターンによって異なっている。つまり、好天の時には路面温度の低下量が大きく、悪天のときには小さい。

図14からもわかるように、路面温度が低下して凍結が生じる可能性がでてくるのは、真夜中から早朝にかけてである。しかし、道路管理者等の通常の勤務時間は夕方17時までなの

表1 天気パターンによる分類
Table 1 Weather patterns

記号	天 昼間	気 夜間	日数
F F	好天	好天	33
F B	好天	悪天	31
B F	悪天	好天	22
B B	悪天	悪天	163

昼間と夜間は朝6時と夕方18時とで区分けしてある。
好天と悪天とは雲量が7以下かそれ以上かで分けてある。

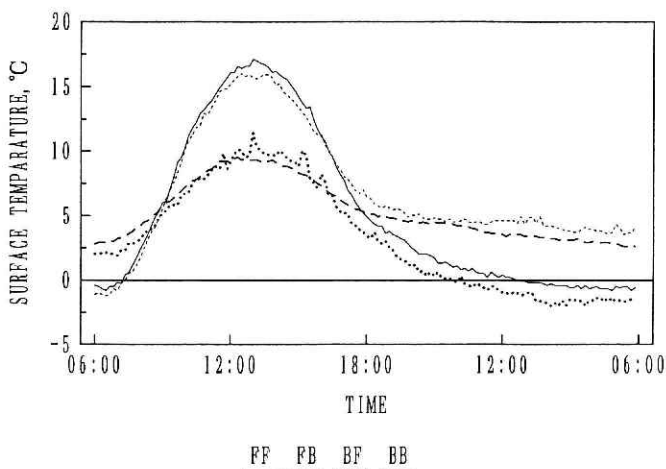


図14 天気パターン毎の路面温度の日変化

Fig.14 Diurnal change of road surface temperature for different weather patterns.

で、可能ならば、それ以前に、翌朝の路面温度予測ができることが望ましい。そうすれば、融氷剤の散布や運転者への警告などの措置を充分にとることができるからである。

そこで、天気パターン毎に夕刻から翌朝までの間にどの程度路面温度が低下するかということを見たのが図15である。これは、図14に示したデータを、12時から16時までの路面温度の平均値が等しくなるように、全体的にずらしたものである。“好天-好天”の天気パターンの場合が路面温度の低下が最も著しく、“悪天-悪天”の場合が最も少ないことがよくわかる。“好天-悪天”の場合と“悪天-好天”の場合には、路面温度の低下量は大差無く、両極端の場合の中間的な値となっている。

このように、路面温度の低下は、天気パターンによって類型化できることになる。しかし、表1に示したような大ざっぱな分類では、精度があまり良くない。図15に示したのは平均値だが、早朝におけるバラツキは5度程度もある。長野県内で同様の解析を行った鴻野（未発表）の結果でも、3時間以上先（16時に予測を行うとすると19時以降）のバラツキの平均値が2度以上のものが3割近くあり、早朝6時の予測となると3度以上のものが5割以上もあるという。

精度を高めるためには、路面温度の日変化データの数を増やして、天気パターンの分類をさらに細分化するのが1つの方法であろう。つまり、天気パターンの細分化によって、パターンと天空放射量との関係をより1:1に対応させようという考え方である。しかし、天空放射量の予測がより正確になっただけでは、正確な予測ができるとは限らない。

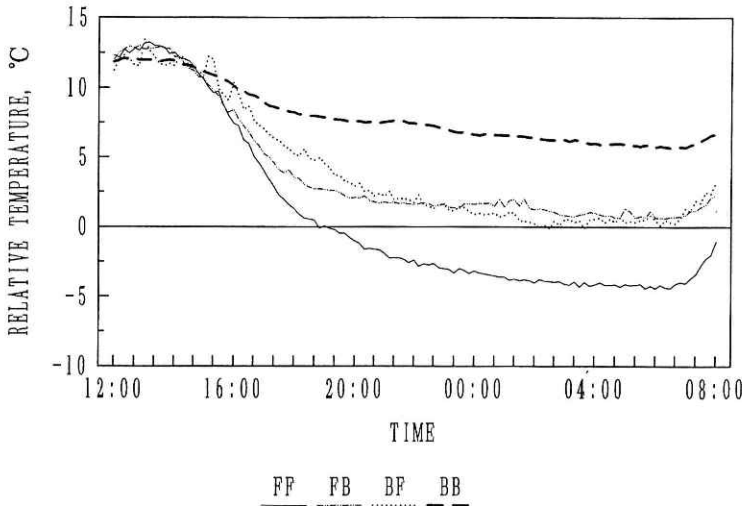


図15 天気パターン毎の路面温度の低下
 Fig.15 Temperature drop for different weather patterns.

図16を見ていただきたい。これは、249例の路面温度日変化データについて、夕方16時から翌朝6時前後の最低路面温度出現までの温度低下を、17時から朝6時までの天空放射量について示したものである。温度低下と天空放射量との間に負の相関はあるものの、バラツキは大きく、同じ天空放射量でも路面温度の低下量は15度前後も異なっている。しかしこれを、夕方16時の路面温度で整理してみると、バラツキはずっと減少する。面白いことに、路面温度の低下量は、16時の路面温度が高い程大きく、低い時には小さいことがわかる。

このことは、路面が高いほど放熱量が大きいことに他ならない。つまり、路面温度の低下には天空放射量が大きく寄与するが、それに加えて、顕熱や潜熱さらに地表面放射も影響することを示している。これらの熱量はすべて、路面温度に比例して地表面から流出していくからである。夕方16時頃の路面温度の低下には（特に好天の時には16時頃の路面温度はまだまだ高い）、顕熱、潜熱等による熱の放出が充分寄与していることになる。従って、天気パターンによる路面温度日変化データの分類によって、翌朝の路面温度を予測しようという場合には、上記のことも充分考慮しておく必要がある。具体的には現在検討中であるが、12時頃から16時にかけての路面温度の低下傾向のようなものをパラメータとして取り入れれば良からう。

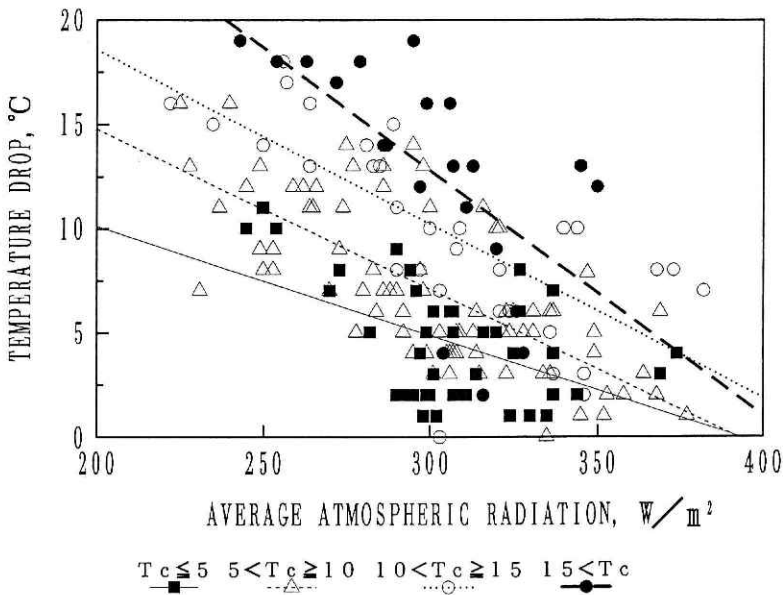


図16 路面温度の低下量と天空放射量との関係。

T_c : 夕方16時の路面温度

Fig.16 The amount of temperature drop versus atmospheric radiation for different values of surface temperature at 16:00.

5. おわりに

スパイクタイヤの禁止措置にともなって、路面凍結予測手法の確立に対する要求は、今後ますます強まっていくと予想される。そのため、交通路の路面温度計測データの蓄積も急激に増加していくであろう。

放射温度計を用いて路面温度を計測する場合には、温度計そのものの特性、特に本体の温度変化に対する補償機構を十分に吟味する必要がある。また、放射温度計を用いた計測では、天空放射量を同時に計測しなければ、正しい路面温度が得られないことにも注意を要する。

富山市茶屋町で行った熱収支観測によれば、夜間の路面温度の低下に最も大きく貢献するのは長波放射収支量である。従って、熱収支的にも、天空放射量の観測は最も重要である。天空放射量の観測は現在まであまり行われておらず、交通路沿いの測点の展開が望まれる。

天空放射量は路面温度の低下に最も重要な要素であるが、そのものの予測は困難なので、代わりに天気予報を路面温度の予測に組み込むことが考えられる。凍結の発現を予測するために、重回帰相関式等によって気温予測という手法を行う場合には、それに天気情報を組み込むことによって、予測精度が向上することが期待される。

路面温度データが蓄積されていれば、天気パターンによる路面温度日変化パターンの分類という手法で、路面温度を予測するという手法を採ることもできる。この場合は、昼間から夕方にかけての路面温度の低下傾向などをパラメータに組み込むことによって、予測精度を向上させることができよう。また、本稿では触れなかったが、路面データが蓄積されている場合には、路面温度データを気象要素との間に重回帰相関式をつくり、気温ではなく路面温度を直接予測するという手法も、検討してみる価値があろう。

謝 辞

本研究では、防災科学技術研究所と富山県との間の官民特定共同研究「交通路における雪氷防災情報システムの開発に関する研究」の一環として実施されたものである。共同研究者である富山県および日本気象協会北陸センターの関係各位と、標記研究をとりまとめた防災科学技術研究所長岡雪氷防災実験研究所の中村勉氏に謝意を表したい。また、天気パターンによる路面温度日変化の分類に関しては、日本気象協会研究所の鴻野繁和氏に有益な御教示を賜ったことを記して感謝したい。本研究の費用の一部は、科学技術振興費より支出された。

参考文献

- 1) Dunn, SA and Shek, RU (1979) : Alternative highway deicing chemicals. Snow Removal and Ice Control Research, Special Report 185, Transport Research Board, NAS, 261-269.
- 2) 石川信敬, 成瀬兼二, 前野紀一 (1987) : 道路雪氷の熱収支特性. 低温科学物理篇, 第46輯, 151-162.
- 3) 建設省北陸地方建設局上越国道工事事務所 (1976) : 雪と道路の調査報告. 第2編, pp604.
- 4) 小島賢治, 石川信敬, 本山秀明, 山田芳則 (1985) : 積雪の蒸発量. 低温科学物理篇, 第44輯, 49-62.
- 5) 増田芳太郎, 青木 茂 (1986) : 降雪・凍結予測システム. 雪と道路, No.8, 59-69.
- 6) Mouat, TW and Saunders, RL (1979) : Detachment of ice from surfaces by application of high intensity light. Snow Removal and Ice Control Research, Special Report 185, Transportarion Research Board, NAS, 289-292.
- 7) 成瀬兼二, 大浦浩文, 小島賢治 (1970) : 気温融雪の野外研究. 低温科学物理篇, 第28輯, 191-202.
- 8) Organization for Economic Co-operation and Development (1989) : Curtailing usage of de-icing agents in winter maintenance. Road Transport Research, pp125.
- 9) Rayer, PJ (1987) : The meteorological office forecast road surface temperature model. Meteorological Magazine, 116, 180-191.
- 10) 清水増治郎, 中尾正義, 高橋修平 (1989) : 積雪域交通路の路面温度特性. 第5回寒地技術シンポジウム講演論文集, 199-203.
- 11) Shimizu, M, Nakawo, M and Takahashi, S (1992) : Characteristics of road surface temperatures in a snowy region, Japan. Proc. US-Japan Symposium on Snow Avalanche, Land Slide, Debris Flow Prediction and Control, 125-132.
- 12) 高橋修平, 中尾正義, 清水増治郎 (1989) : 積雪域交通路の熱収支特性. 第5回寒地技術シンポジウム講演論文集, 195-198.
- 13) 寺田章次, 加賀田晋成, 古庄 隆, 中村俊行 (1987) : 道路の克雪技術, 山海堂, pp207.
- 14) Thornes, JE (1989) : A preliminary performance and benefit analysis of the UK national road ice prediction system. Meteorological Magazine, 118, 93-99.
- 15) 富山県 (1987) : 富山県雪情報通信システム開発業務報告書. 概要版, pp121.
- 16) 富山県 (1988) : 富山県雪情報通信システム開発業務報告書. 概要版, pp166.
- 17) 富山県 (1990) : 富山県雪情報通信システム開発業務報告書—路面凍結予測手法等の開発—. pp280.
(1992年7月28日 原稿受理)