

路面温度および凍結予測手法の開発

舟田久之*・仙黒邦行*・松川宗夫*

日本気象協会

石坂 正**

富山県

Development of a Method for Predicting Road Surface Temperature and Icing on Roads

By

Hisayuki Funada, Kuniyuki Senkuro and Muneco Matsukawa
Japan Weather Association

and

Tadashi Ishisaka
Toyama Prefecture

Abstract

Micrometeorological observations were carried out during three winter seasons,1988-1991,on a road at Tateyama-cho in Toyama prefecture.The results were as follows.

- 1.The results of situations of a road surface which were automatically recorded by the road surface frozen detector were nearly the same as ones of man's eyes observation.
- 2.Examining the moving observation by car,road surface temperature before sunrise were lower on long large bridges and high bridges,and were higher in tunnels and under high bridges.
- 3.According to heat balance analysis,the change of road surface temperature is especially related to weather and situation of a road surface.
Thus,considering weather and situations of a road surface,equations to predict the road surface minimum temperature were given.
- 4.Examining relations between icing and road surface temperature,a method for predicting icing on roads was given.

* 北陸センター ** 水雪対策室

Key Words : Road surface temperature, Icing on roads, Road surface frozen detector,
Heat balance analysis, Prediction method

キーワード: 表面路温, 路面凍結, 路面凍結検知器, 熱収支解析, 予測手法

1. はしがき

雪や氷は毎年、雪国の県民の日常生活や産業活動などに多大な支障を及ぼしている。とくに多雪地方の道路においては、路面凍結や圧雪による道路の交通障害が多発している。

このため、交通障害を軽減し、より円滑な交通の確保に資するために、路面凍結予測等の情報が強く求められている。

こうしたことから、富山県では科学技術庁防災科学技術研究所長岡雪氷防災実験研究所と共同して、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（官民特定共同研究）の一環として、昭和63年度から雪と氷を中心とした気象等の観測業務を開始した。

この3冬季のデータによって調査を行ったところ、観測地点における路面温度および凍結の予測手法について、開発の初期の目標を達成することができた。

2. 冬季の気象および物理量

富山県は図1に示す県道の富山立山公園線上の中新川郡立山町東中野新において、定点観測地点を設置して微気象観測を昭和63年度から3冬季間にわたって行った。

この定点観測地点における気象・物理量等の観測機器の施設状況は、図2に示すとおりで、これらの測器によって観測した気象・物理量等を図示した例を、図3(a)(b)に示す。(図3(b)のフラックスは顕熱量で下から上が+)

この定点観測の結果、およそ次のことが分かった。

- (1) 風向は南よりの風が多い。
- (2) 風速は全体に弱いですが、時々10m/sを超える南風が吹く。
- (3) 日射量とアルベドおよび天空放射量は正の相関がある。
- (4) 気温と表面路温（路面温度を路温と略す）はかなり高い正相関がある。
- (5) 路温は深くなるにしたがって振巾が小さく、深さ50cmでは日変化がなくなる。
- (6) 熱流は深さ30cmではほとんど0に近いが、深さ11cmの熱流（地中から地表への流れを+）は深さ2cmと深さ50cmの温度差と逆相関になっている。
- (7) 路面状態（路面検知器による乾燥、湿潤、凍結、積雪の4階級）は、雨量があると湿となり、夜間には凍となることがある。また、積雪深がある場合には雪または凍となる。

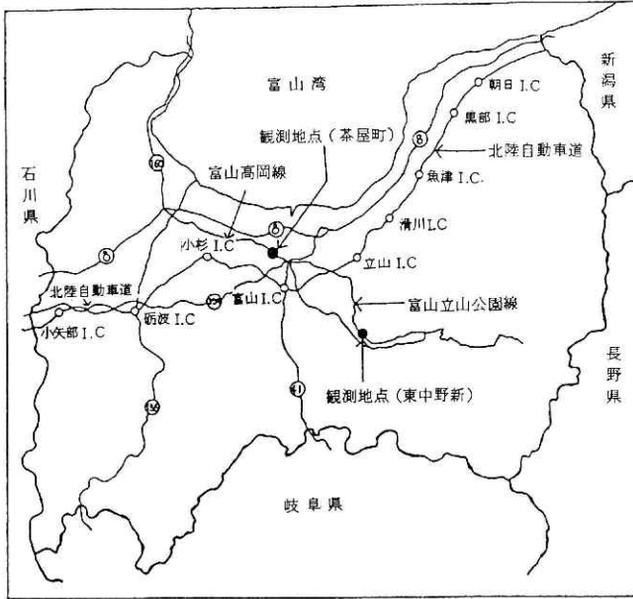


図1 富山県内の主要路線と定点観測地点
 Fig.1 Principal roads in Toyama prefecture and position of micrometeorological observations.

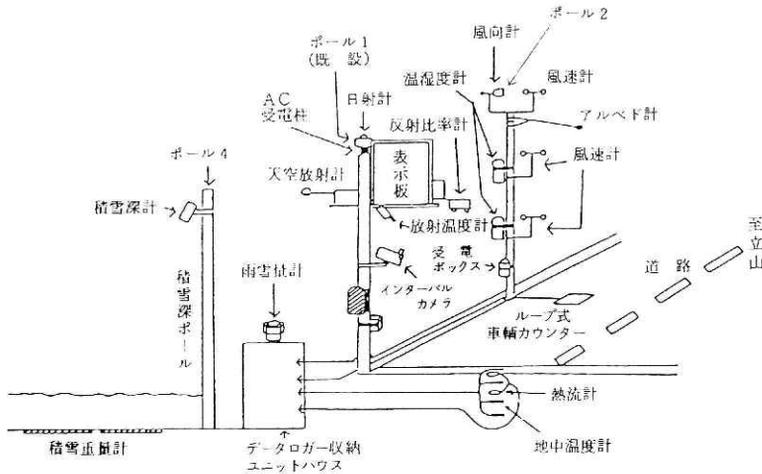


図2 定点観測概略図(富山立山公園線:東中野新)
 Fig.2 Schematic view of micrometeorological observation (at Higashi-Nakanoshin on the Toyama-Tateyama Park road).

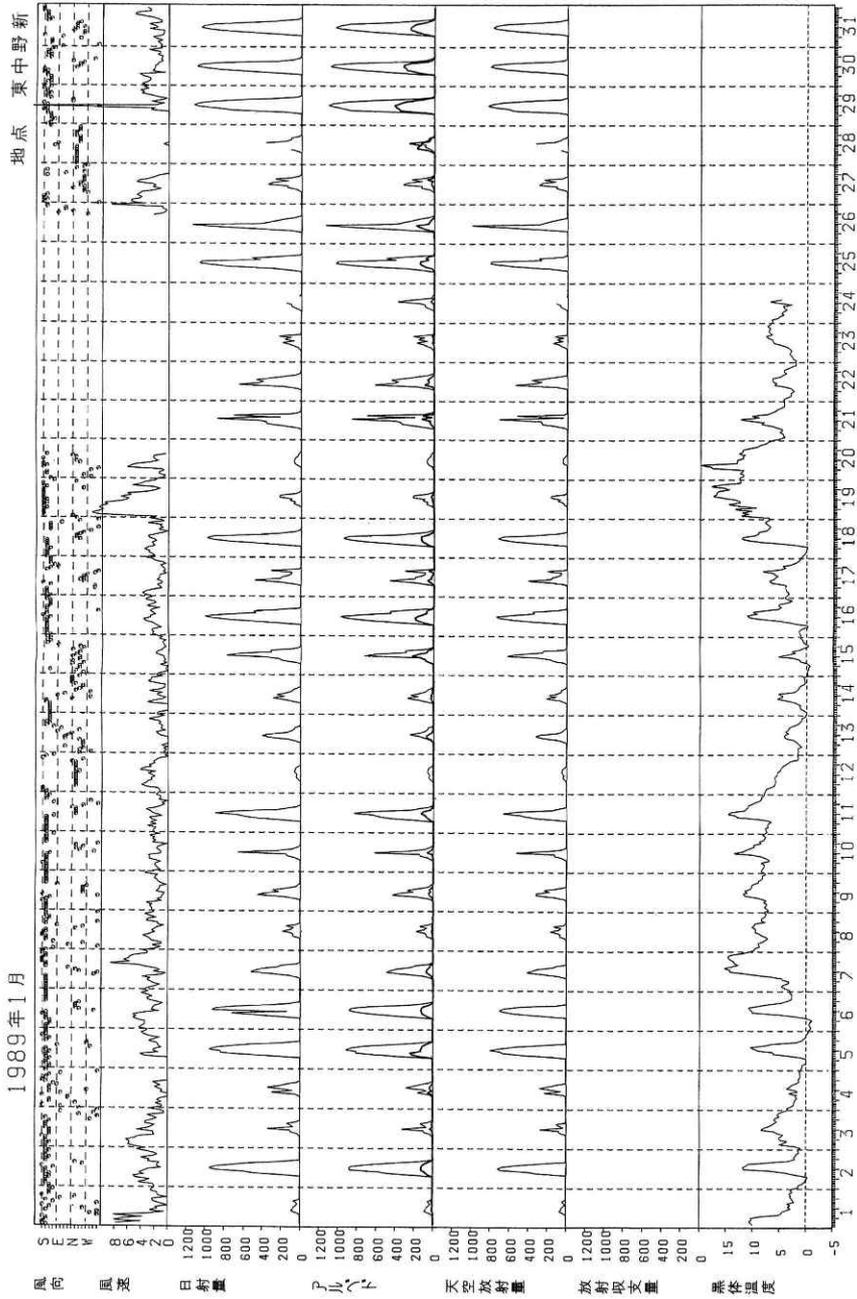


図3 (a) 気象・物理量

Fig.3 (a) Time variation of Meteorological and physical elements.

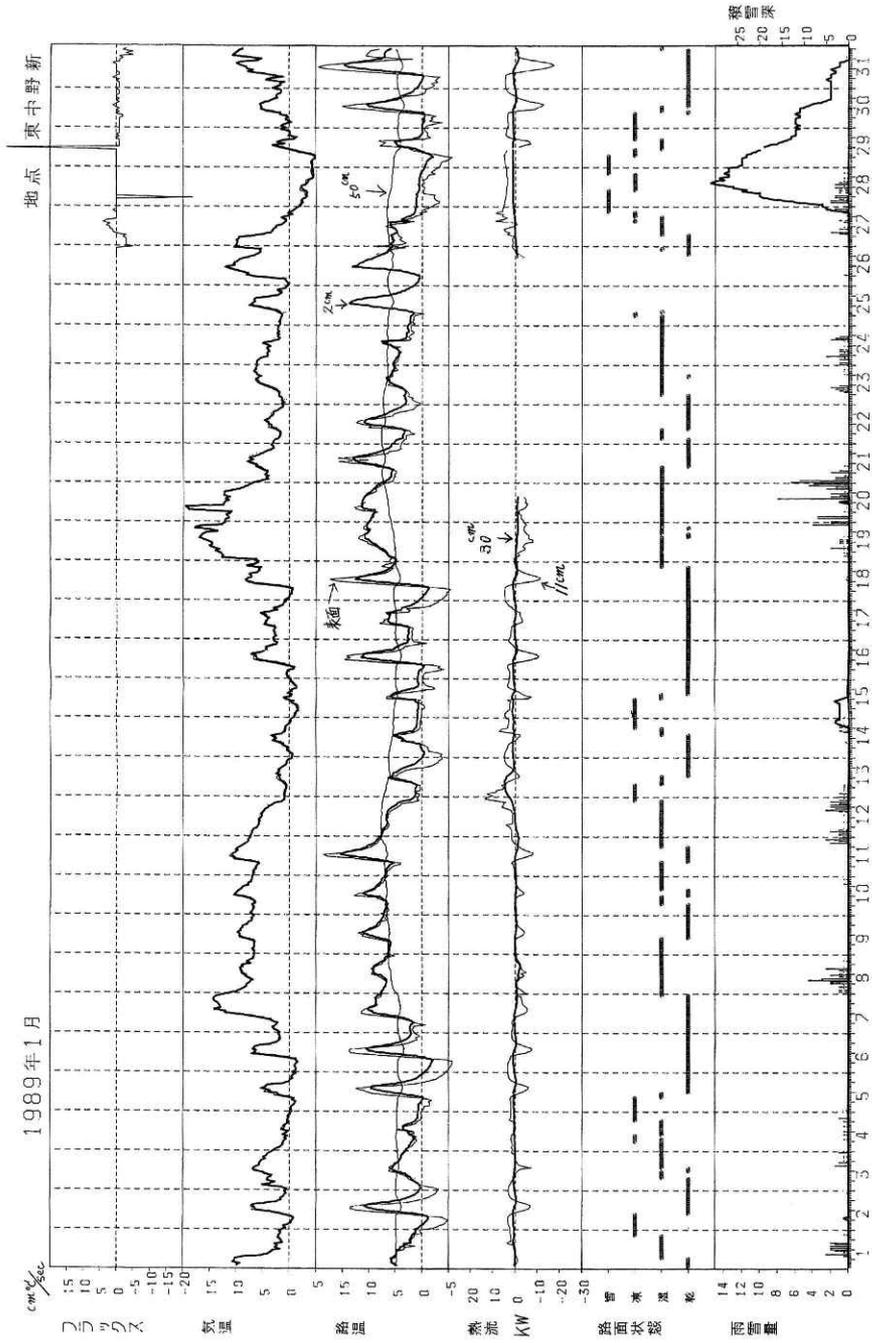


図 3 (b) つづ

Fig.3 (b) Same as in Fig.3(a).

3. 熱収支的解析

高橋・中尾・清水(1989)は路面の有限な厚さ ΔZ の部分について、その温度変化を考慮した熱収支方程式として、次のように取扱っている。

$$Q_{NR} + Q_s + Q_L + Q_C + Q_x = Q_M + \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \Delta Z \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで Q_{NR} は放射収支量、 Q_s は顕熱、 Q_L は昇華蒸発による潜熱、 Q_C は地中からの伝導熱量、 Q_x は自動車の発熱などの熱、 Q_M は凍結融解による熱、 ρ は路面の密度、 C は路面の比熱である。

左辺の量が負の時は、右辺の温度が下降して 0°C となって、水分があれば凍結が進行する。

放射収支量の Q_{NR} は、次のように分けられる。

$$Q_{NR} = I(1 - \alpha) + Q_{RL} \uparrow + Q_{RL} \downarrow \quad \dots\dots\dots (2)$$

I は水平面日射量、 α はアルベド、 $Q_{RL} \uparrow$ は長波放射上向き成分、 $Q_{RL} \downarrow$ は長波放射下向き成分である。

北陸において強い凍結が発生するのは、大陸から寒気が流れてきており、夜間には晴天となって風が弱く、早朝に冷えこむ時である。

このことは、式(2)において、 $I = 0$ 、また $Q_{RL} \downarrow$ が小さく、次式が成立している時である。

$$Q_{NR} \doteq Q_{RL} \uparrow \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、この項が他の項(Q_s 、 Q_L 、 Q_C 、 Q_x 、 Q_M)と比較して、かなり大きいことである。

よって、路温の変化は式(1)において、左辺の第1項の Q_{NR} が最も重要な役割を持っていることである。

立山町東中野新の定点における平成元年1月～3月までの積算日射量を天気別に統計すると、図4(a)に示すとおりである。

冬季における快晴の日射量は $20 \sim 30 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、平均で $25.4 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、晴れの場合は $17 \sim 27 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、平均で $21.8 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、曇りの場合は $7 \sim 22 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、平均で $14.4 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、雨の場合が $1.8 \sim 7 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、平均では $4.3 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、雪の場合は $4.4 \sim 12 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ で平均で $8.5 \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ で、雨の場合が最も小さい。

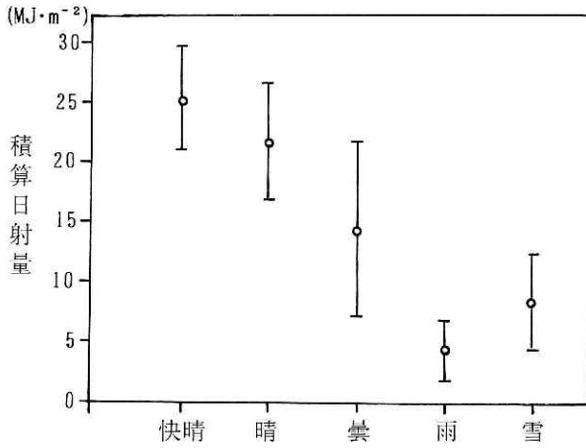


図 4 (a) 天気別積算日射量の平均値偏差
 Fig.4(a) Relation between weather and flux of solar radiation.

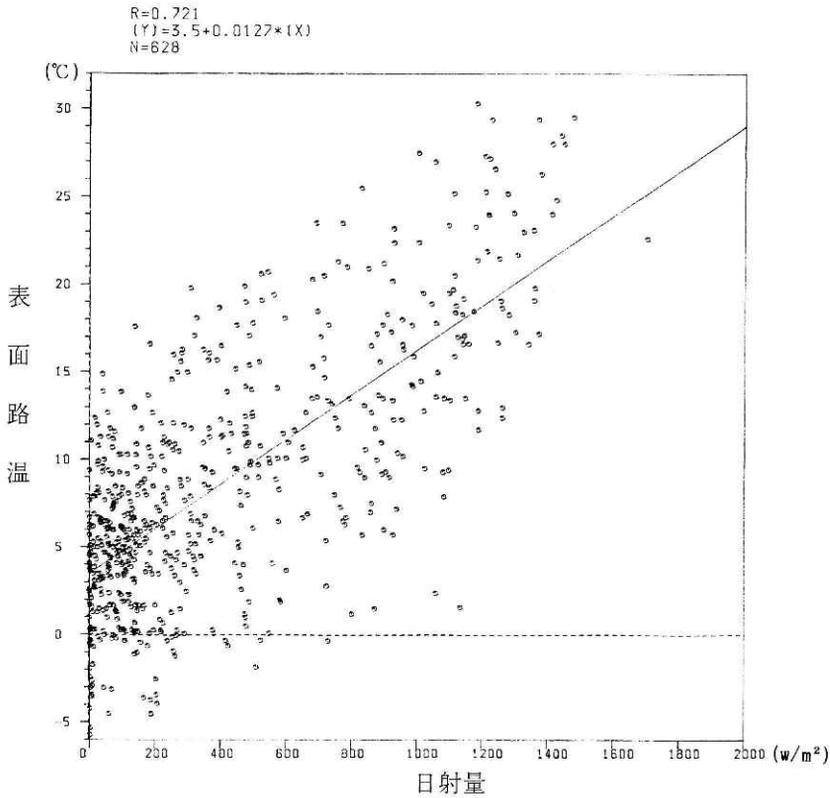


図 5 表面路温と日射量
 Fig.5 Relation between road surface temperature and flux of solar radiation.

立山町の定点における日射量と、表面路温との関係は図5に示すとおりで、回帰線を中心にかなり点が散在しているが、相関係数が0.721でかなり関係が深く、日射が強いと表面路温が上昇することを示している。

同じく夜間の積算放射収支量を天気別に調べると、図4(b)に示すとおりである。

積算放射収支量は晴れの場合には、3.8~6.3MJ・m²、平均で5.1MJ・m²、曇りの場合は2.3~4.8MJ・m²で平均で3.5MJ・m²、また雨の場合は0.7~2MJ・m²、平均で1.3MJ・m²、雪の場合には1.6~2.8MJ・m²で、平均では2.2MJ・m²で、雨の場合が最も小さい。

平成元年1月~3月までのデータによって、積算放射収支量と最低路温との関係を調べると、図6に示すとおりで負の相関があり、積算放射収支量の大きい時に表面路温が低い。

このことは夜間に晴れて積算放射収支量が大きくなると、最低路温が低くなることを示している。

顕熱Q_sについては、バルク公式(4)を用いることが多い。

$$Q_s = \beta(T_1 - T_0)U_1 \dots\dots\dots (4)$$

βは係数、T₁は気温、T₀は路温(表面)、U₁は風速である。

立山町の定点における地面から2mの高さにおける顕熱フラックスと表面路温との相関係数は+0.549でやや小さい正相関であった。

なお、式(4)においてT₁とT₀の差が大きくなる程、また風速が強い程、Q_sが大きくなるので、交通量が多くなるとQ_sも大きくなり、表面路温が上昇することになる。

地面の雪氷や水の昇華蒸発等による潜熱Q_Lは、空気中の水蒸気量に関係している。また、降雨や降雪にも関係している。

地中からの熱伝導量Q_cは一般に式(5)が適用される。

$$Q_c = K \frac{\partial T_g}{\partial Z} \dots\dots\dots (5)$$

Kは地中の熱伝導率、T_gは地温、Zは地表を0としての高さである。

立山町の定点における路面から深さ11cmの地中における熱流と表面路温との関係は、図7に示すとおりである。

路温が上昇すると、地表から地中へ熱が流れるので、深さ11cmにおける熱流が負となり、地表が冷えてくると(ほぼ5℃以下)、地中から地表へ熱が流れるので逆相関となり、相関係数は-0.828と大きな負相関となっている。

Q_xは自動車の発熱、排気ガス、タイヤの発熱、その他融雪剤散布による熱などがあげられる。

式(1)の左辺の各項の熱量が得られれば、右辺の路温の変化および凍結融解による熱を求めることができる。

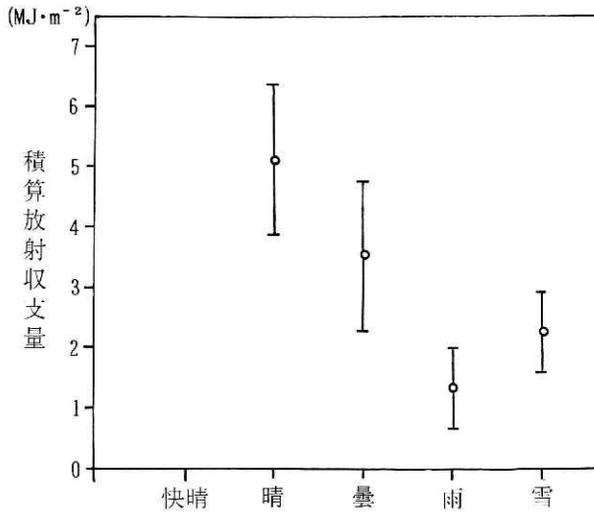


図 4 (b) 天気別積算放射収支量の平均値偏差
Fig.4(b) Relation between weather and radiation balance.

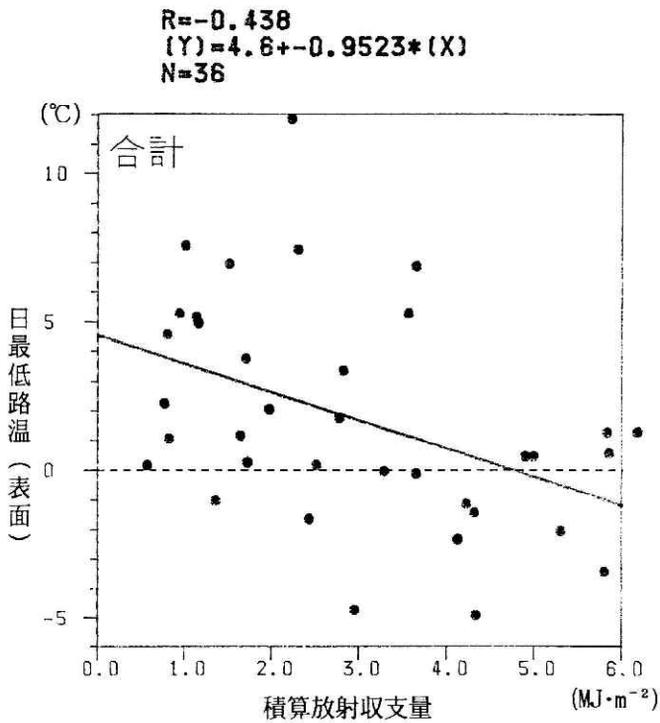


図 6 日最低路温 (表面) と積算放射収支量との関係
Fig.6 Relation between read surface minimum temperature and radiation balance.

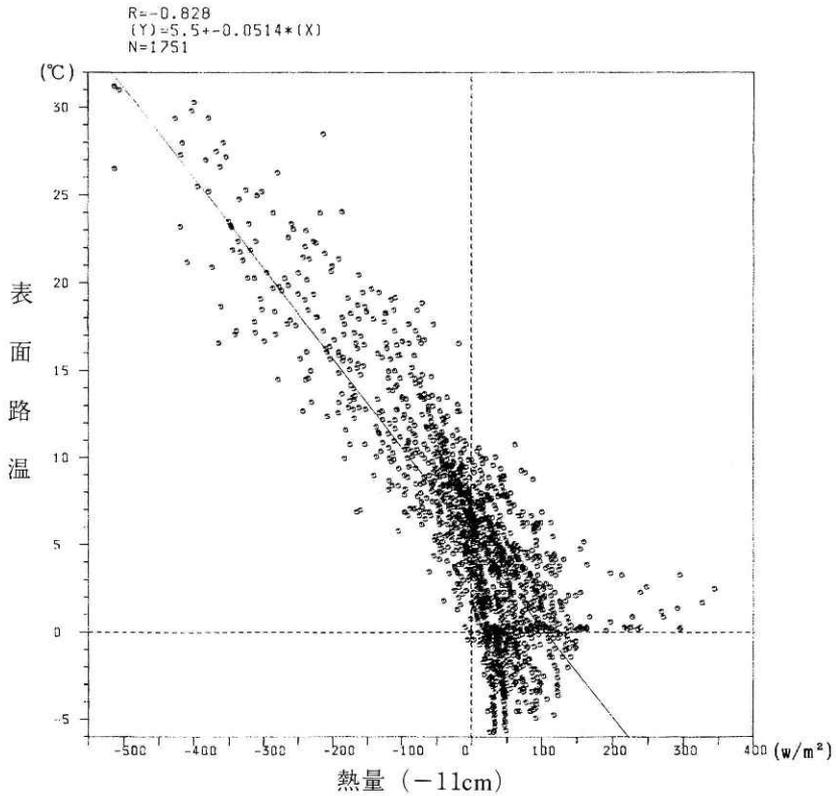


図7 表面路温と熱流 (-11cm) との関係
 Fig.7 Relation between road surface temperature and flux of heat(at-11cm).

4. 路面状況と路温・気象

路温の変化は、前章で述べたように日中の日射量や夜間の積算放射収支量が最も関係が深い。しかし、夜間の積算放射収支量と最低路温との相関係数は図6に示すように意外に小さかった。

この原因として路面の状態や初期の路温などの条件が考えられる。よって、天気や立山町における路面状態と路温や気温の日変化等について調べる。

4.1 路面検知器による路面状況

正確な路面状況を得るには、人間の目で観測することが最も理想的であるが、立山町の定

点に路面検知器を設置してデータを収集し、初年度にはインターバルカメラと比較し、2年度と3年度には人の目視による観測と比較して検討した。

(1)路面検知器とインターバルカメラ

路面検知器による路面状況（積雪、凍結、湿潤、乾燥の4種類）の観測は、昭和63年度は12月末から平成元年4月半ばまで30分ごとに行い、一方、インターバルカメラによる観測は平成元年1月26日から2月23日まで、10分ごとに8ミリのカラー写真撮影を行って路面の状況を観測した。

路面検知器は車道の一部（1点に近い）の観測で、その面積が狭く、積雪・凍結・湿潤・乾燥の4種類の中の1つを観測するが、インターバルカメラは視野が広く、車道ばかりでなくその周囲が見えて、積雪、凍結、ぬれ、乾燥などの4つの状況と一緒に観測されたり、その中の一つを検知器が観測していることがほとんどであった。

路面検知器は昼夜の別なく観測可能であるが、インターバルカメラは日の出から夕方までの観測で、夜間には観測が不可能になる欠点等がある。

30分ごとの両者の観測を比較すると、表1に示す検証分割表となる。路面の乾燥と湿潤については、ほとんど合致している。（合致率＝ $\frac{278+220}{278+7+220+16}=95.6\%$ ）

しかし、凍結と積雪については合致しているものが少ない。これについてはインターバルカメラと検知器の視野の違いによるものと、インターバルカメラではシャーベットやジャム状の雪を積雪と観測するが、検知器ではシャーベットやジャム状の雪はアルベドが白い積雪と異なるので、凍結と観測するために一致しない。

よって、凍結と積雪を一緒にすると、路面検知器は凍結または積雪は61回、インターバルカメラは64回となり、全体の合致率（P）は

$$P = \frac{278+220+4+7+57}{278+7+9+16+220+14+1+1+4+2+11+57+7} = 90.3\%$$

表1 インターバルカメラと路面凍結検知器の検証
Table 1 Varification statistics of conditions of a road surface by interval-camera and frozen detector.

		インターバルカメラ			
		乾燥	湿潤	凍結	積雪
路面凍結検知器	乾燥	278	16	1	2
	湿潤	7	220	1	11
	凍結	9	14	4	57
	積雪	-	-	-	7

即ち、凍結と積雪の区別をせず、路面の状況を乾燥と湿潤と凍結または積雪の3階級に分けた場合には、路面検知器とインターバルカメラとの合致率は約90%となる。

したがって、インターバルカメラによる観測を正しいものとする、路面検知器の精度は約90%（但し凍結または積雪として、この区別はしない）と言える。

(2)目視観測と路面検知器との比較

立山町における路面の目視観測は、平成元年と平成2年度の2冬季について朝と夜の2回、毎日実施された。

路面検知器は乾燥・湿潤・凍結・積雪の4階級で観測している。この中の凍結は路面が結氷している場合と、雪または氷がシャーベット状または透明なザラメ状やジャム状になっている場合とがある。

目視観測は乾燥・湿潤・凍結・シャーベット・積雪の5階級によって行われているので、検知器が凍結として観測した場合には、結氷とシャーベット状（ザラメ状やジャム状を含む）に分ける方法を調べ、その後目視観測と比較する必要がある。

目視観測で凍結とシャーベットを観測し、しかも観測時刻が路面検知器の観測時刻と一致している回数は2年間で50回あった。

このデータについて、気温または表面路温によって、検知器の凍結を結氷とシャーベットに分けることが可能かを検討する。

a. 気温による判定

路面検知器が凍結の場合に、立山町における高さ2mの気温が0℃またはそれ以下の場合を結氷とし、0.1℃以上の場合をシャーベットとして目視観測データによって、表2に示す分割表を作成した。

この表より気温による合致率は次のとおりとなる。

$$\text{合致率} = \frac{6 + 28}{6 + 9 + 7 + 28} = 68.0\%$$

表2 気温による分割表
Table 2 Division by air temperature.

目視 検知器	凍結	シャーベット
結氷 $T_2 \leq 0^\circ\text{C}$	6	7
シャーベット $T_2 > 0^\circ\text{C}$	9	28

b. 路面温度による判定

路面検知器が凍結の場合に、立山町における表面路温が -1.0°C より低温の場合には結氷とし、 -0.9°C より高い場合にはシャーベットとして、目視観測とによって表3に示す分割表を作成した。

この表より表面路温による合致率は

$$\text{合致率} = \frac{11+32}{11+3+4+32} = 86.0\%$$

86%となり、表面路温を用いる方が、気温を用いるより精度がよい。

表3 表面路温による分割表
Table 3 Division by road surface temperature.

検知器 \ 目視	凍結	シャーベット
結氷 $T_R \leq -1^{\circ}\text{C}$	11	4
シャーベット $T_R \leq -0.9^{\circ}\text{C}$	3	32

(rT_0 : 表面路温)

表4 目視と検知器の比較
Table 4 Comparison of conditions of road surface by man's eyes observation and frozen detector.

機械 \ 人	目 視					
	乾燥	湿潤	凍結	シャーベット	積雪(圧雪)	
検知器	乾 燥	91	1	—	—	—
	湿 潤	10	73	—	1	—
	結氷 $rT_0 \leq -1^{\circ}\text{C}$	13	3	11	3	3
	シャー ベット $rT_0 \geq -0.9^{\circ}\text{C}$	5	7	4	32	1
	(積 雪)	—	—	—	1	15

c. 目視と路面検知器

目視観測の時刻と検知器による観測時刻とが一致している回数は、この2冬季に274回あった。この中で検知器が凍結として観測した回数が82回あった。

この82回について、前項において調べた表面路温による判別方法を用いて、結氷とシャーベットに別けて目視観測の5階級に合わせるようにして分割表を作ると、表4に示すとおりである。

この表より合致率を求めると、

$$\text{合致率} = \frac{91+73+11+32+15}{91+10+13+5+1+73+3+7+11+4+1+3+32+1+3+1+15} = 81.0\%$$

かなり合致している。よって、観測方法が異なるが、かなりの精度で目視と検知器が合致し、検知器の観測（表面路温を利用する）は調査に利用できるものとする。

4.2 天気・路面状態と路温・気温

(1)晴れの場合

天気が晴れ（富山地方気象台の天気は立山町の天気とほぼ同じと考える）で、立山町の路面が乾燥（図8(a)の路面が1）の例として図8(a)（平成元年2月5日）に示す。

この例では夜半過ぎから早朝にかけて路温（0 cm）、気温（高さ2 m）共にほぼ0℃であったが、夜明け後の7時頃から上昇して13～14時頃に最高となり、表面路温が20℃くらい、深さ2 cmの路温は15℃くらい、気温は7℃くらいまで上昇したが、その後は下降し夜半

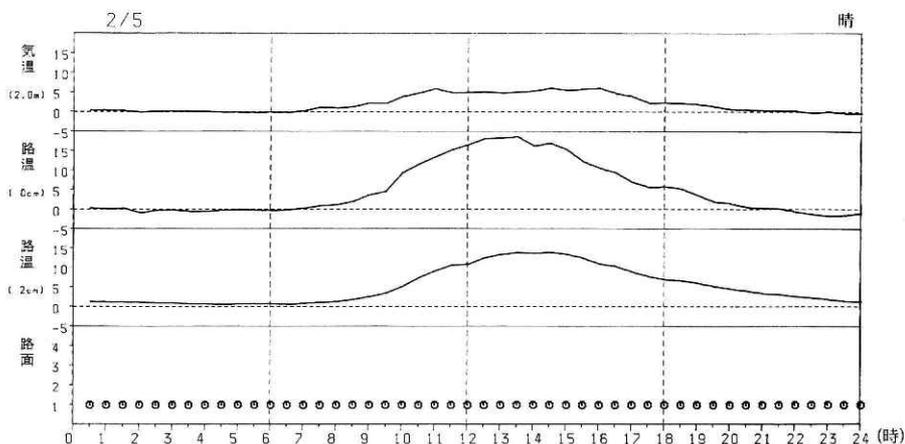


図8(a) 晴れの例（平成元年2月5日）

Fig.8(a) An example of fair.

には0℃くらいになっている。表面路温の変化が最も大きい。

天気が晴れだが、路面状態が始めは4（積雪または圧雪）の状態から3（凍結またはシャーベット）になり、それが溶けて路面状態が2（湿潤）となり、昼頃には路面が乾燥（1）となった例（平成元年2月4日）を図8(b)に示す。

前日に雪が降って積雪が8cmくらいあり、寒気が流入しているため、4日の朝まで気温・路温（表面）は氷点下であったが、夜明け後ゆっくり上昇して積雪がシャーベット状となり、気温・表面路温ともにほぼ0℃となった。

9時30分頃には雪が融けて路面がぬれの状態となり、その後は表面路温が順調に昇温して

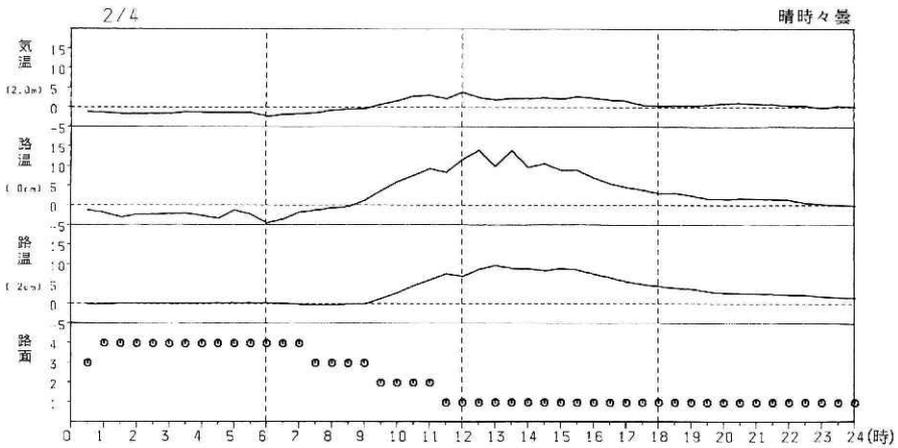


図 8 (b) 朝に積雪がある例（平成元年2月4日）

Fig.8(b) An example of the ground is covered with snow at morning.

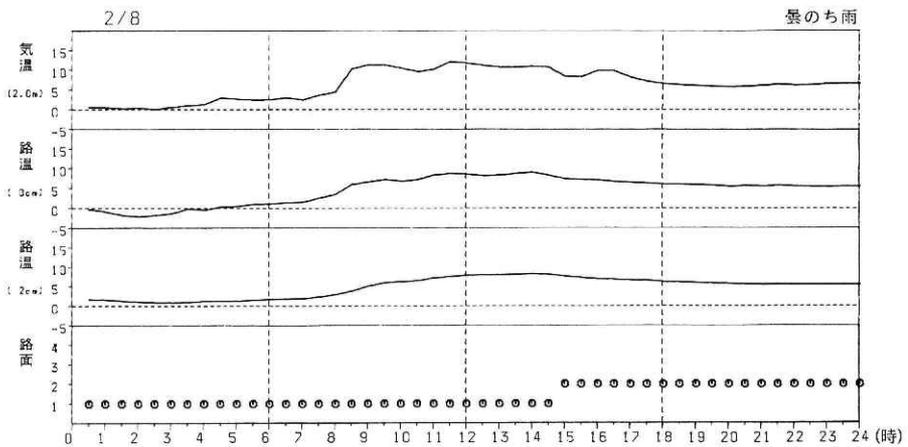


図 8 (c) 曇りのち雨の例（平成元年1月27日）

Fig.8(c) An example of cloudy, rain later.

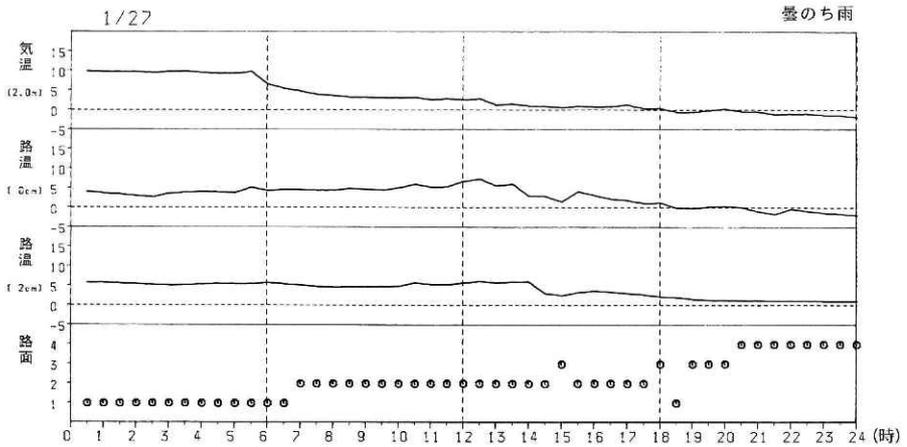


図 8 (d) 曇りのち雪の例 (平成元年 1 月 27 日)

Fig.8(d) An example of cloudy,snow later.

12時30分頃にはほぼ15℃となった。しかし、時々雲が広がり表面路温にはピークと谷が2つほど見られる。

気温は正午に5℃くらいになったが、路面に積雪がある場合には融解熱が必要なため、晴れても気温や路温が上昇しないことを示している。

(2)曇りの場合

曇りで午後から雨となり、立山町における路面が14時30分までは乾燥(1)であったが、15時から湿潤となった例(平成元年2月8日)を図8(c)に示す。

夜半過ぎから早朝にかけて表面路温が氷点下、気温が0℃くらいであったが、路面が1(乾燥)であるため凍結はなかった。

夜明け後に路温・気温ともに上昇して、気温が正午頃に12℃くらいまで昇温したが、曇りで日射が弱いために表面路温は正午頃に10℃くらいまでしか上昇しなかった。

午後は雨が降り出し、路面が2(湿潤)となり路温や気温が下降し始めたが、夜間の放射収支量が小さいため、冷え方が小さい。

天気が曇りから雨のち雪になり、立山町における路面が1(乾燥)から2(湿潤)になり、雪が降り出してから路面状況が3(凍結またはシャーベット)そして4(積雪または圧雪)となった例(平成元年1月27日)を図8(d)に示す。

0時頃に強い南風が吹いて暖気が流入して、冬としては10℃くらいの高温で、顕熱(Q_s)によって路温も比較的高かった。

6時頃から雨が降り出し7時から路面は2(湿潤)となり、暖気から寒気が変わるため、夜明け頃から気温が下降し始め、15時には0℃くらいとなり雨が雪に変わり、路面が3

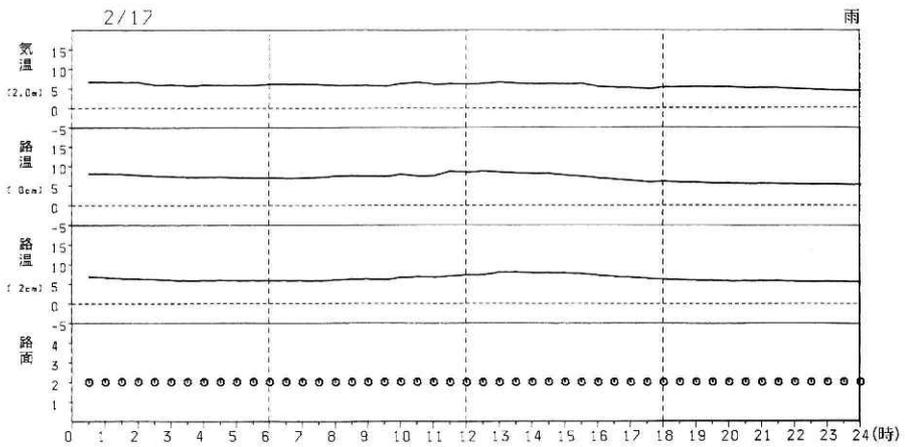


図 8(e) 雨の例（平成元年 2 月 17 日）

Fig.8(e) An example of rain.

（シャーベットまたは凍結）となった。

その後は 2 と 3 と移り変わり、20 時 30 分から 4（積雪）となった。この時の気温・表面路温ともに 0°C 以下となっている。

このように曇りの場合には放射収支量や日射量が小さいため、気温や路温の日変化が小さく、暖気や寒気の移流によって変化し、その顕熱によって路温が変化し、また雨や雪が降ることによって、式(1)の Q_L （昇華蒸発の潜熱）によって路温や気温が下降するなどの変化が現れる。

(3) 雨の場合

図 8(e) は夜半から雨が降って路面が 2（湿潤）でぬれている状態である。雨天の場合には図 4(a) および図 4(b) で示したように、積算日射量や積算放射収支量が最も小さいので、路温や気温の日変化が最も小さい。

(4) 雪の場合

前日（1 月 27 日）の午後から雪が降り出し、夜半頃には立山町で積雪が 5 cm くらいになり、1 月 28 日は雪が降り続き 28 日夕方頃に積雪が 30 cm くらいに達した雪の日の例として図 8(f) を示す。

寒気が流入していて気温と表面路温が夜半から氷点下となっているが、日中には弱い天空放射 (Q_{NR}) と自動車などによる熱 (Q_x) によって、表面路温が 8 時から 17 時まで、ほぼ 0°C となり気温より少し高くなった。

このため、車が通る車道では 10～19 時まで積雪が融けて路面状態が 3（シャーベット）となったが、19 時 30 分から再び路面状態が 4（積雪）となった。

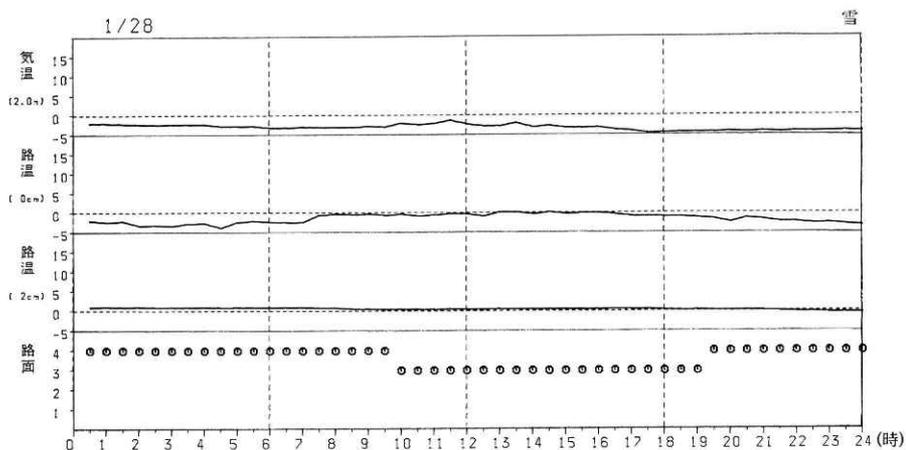


図 8 (f) 雪の例 (平成元年 1月28日)

Fig.8(f) An example of snow.

以上のように、路温は式(1)の Q_{NR} に関係の深い天気と、式(1)の Q_L に関係している路面状況および自動車などの Q_x によって、複雑に変化しているの調査を進めるには、天気や路面状況などの層別化が必要であると考えられる。

5. 路面形態と路面温度および地域特性

路面形態と路温との関係および路温の地域特性を調査するために、県道の富山高岡線と富山立山公園線について、自動車に赤外線放射温度計と温度計を据え付けて、県道を走行しながら表面路温と気温を観測した。

その記録の例を図9(a), (b)に示す。これらの結果は下記のとおりである。

(1)路面形態と路温

- a. 長い大橋や高架の上では路温が低い。
- b. 高架の下では路温が高い。
- c. トンネルやスノーシェッドの中では路温が高い。
- d. 崖などが無い山道では路温が低い。

(2)路温の地域特性

- a. 標高の高い山沿い地方は路温が低く、標高の低い地方が路温が高い。
- b. 人口の多い市街地は農村地帯より路温が高い。
- c. 路面が濡れていると、一般に路温が低い。



図9 (a) 路温変化 (富山立山公園線, 平成元年3月25日夜半)

Fig.9(a) Changes of road surface temperature.

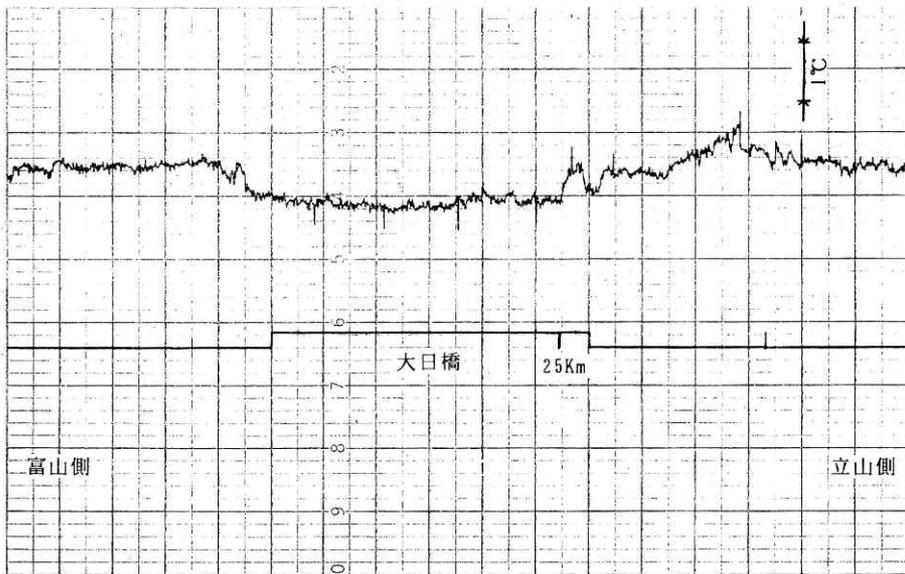
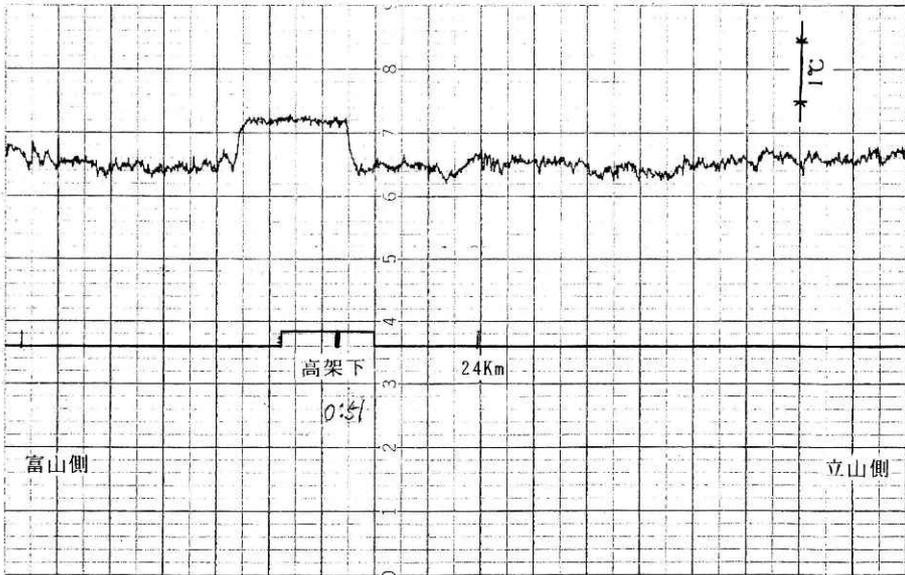


図9(b) 路温変化つづき
Fig.9(b) Same as in Fig.9(a).

6. 路温と気象・物理量

路温を予測する手懸りを得るために、3章や4章を踏まえて路温に関係が深い気象要素や物理量を探した。

(1) 定点における路温と気象・物理量

立山町の定点における昭和63年度冬季のデータによって、表面路温と気象要素および物理量との関係は表5に示すとおりである。

高さ2.0mと3.8mにおける気温と表面路温との相関係数は、0.71~0.72で低い2.0mの方が相関係数が僅かに大きい。

高さ2mの気温と表面路温との散布図は図10(a)に示すとおりで、0℃付近は比較的まとまっているが、気温が5℃以上になるとバラつきが大きい。

表面路温と地中路温との関係は表5より地表に近い程、相関係数が大きく深さ2cmと表面との散布図は図10(b)に示すとおりで、回帰線上に良くまとまっている。

高さ2.0m、3.8mおよび5.0mの風速と表面路温は表5に示すように相関係数が小さい。

表5 路温（表面）と気象・物理量との相関

Table 5 Correlation of road surface temperature and meteorological elements and physical elements.

要素 (X)	相関係数 (R)	個数 (N)	回帰式 (Y:路温)
気温 (2.0m)	0.720	2082	$Y = 1.3 + 1.0246 X$
気温 (3.8m)	0.710	2082	$Y = 1.5 + 1.0021 X$
路温 (-2cm)	0.962	2082	$Y = -1.6 + 1.2616 X$
路温 (-11cm)	0.685	2082	$Y = -2.3 + 1.4306 X$
路温 (-20cm)	0.458	2082	$Y = -1.1 + 1.1950 X$
路温 (-50cm)	0.059	2082	$Y = 3.94 + 0.29050 X$
風速 (2.0m)	0.280	1751	$Y = 3.42 + 1.07454 X$
風速 (3.8m)	0.250	1751	$Y = 3.63 + 0.85991 X$
風速 (5.0m)	0.243	1751	$Y = 3.67 + 0.79604 X$
熱流 (-11cm)	-0.828	1751	$Y = 5.5 - 0.0514 X$
熱流 (-30cm)	-0.324	1751	$Y = 5.52 - 0.00094 X$
放射収支量	-0.400	518	$Y = 6.97 - 0.03770 X$
日射量	0.721	628	$Y = 3.5 + 0.0122 X$
顕熱	0.549	1280	$Y = 5.26 + 1.38426 X$
交通量	0.236	1924	$Y = 4.01 + 0.00284 X$

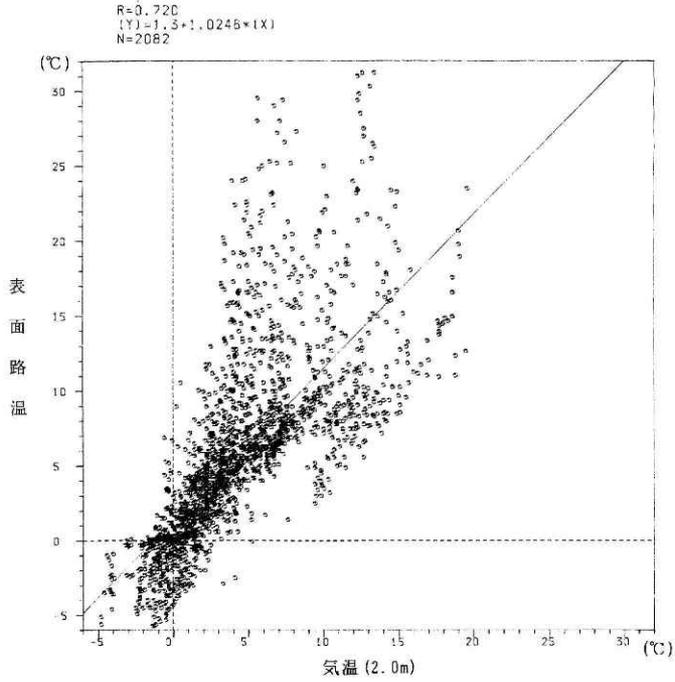


図10(a) 表面路温と高さ 2 m の気温

Fig.10(a) Relation between road surface temperature and air temperature(at 2m).(c)

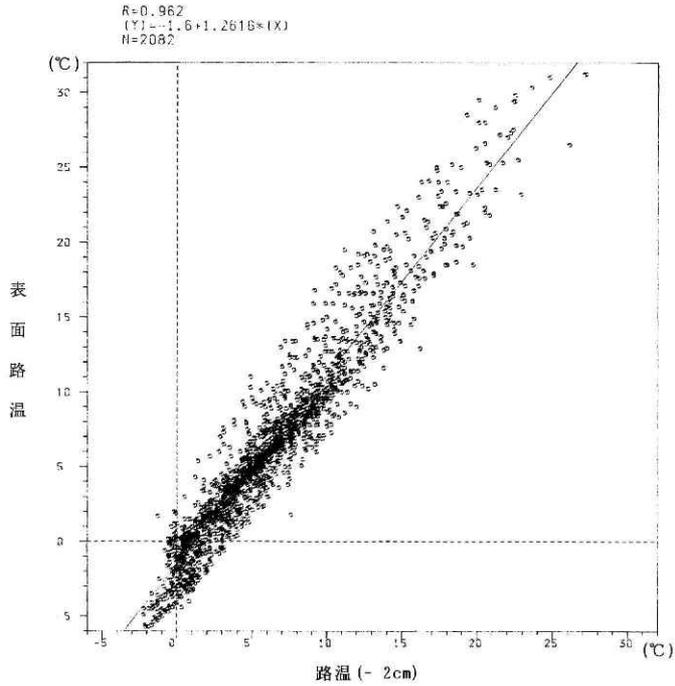


図10(b) 表面路温と深さ 2 cm の路温

Fig.10(b) Relation between road surface temperature and road temperature(at-2cm).

深さ11cmと30cmの熱流と表面路温との関係は共に負相関で、深さ11cmの方が関係が深い。深さ11cmの散布図は図7で示したとおりである。

日射量と表面路温との関係は相関係数は0.721でやや大きく、その散布図は図5に示したとおりである。

放射収支量・顕熱・交通量と表面路温との関係は表5に示すように相関係数がやや小さい。

また、日射量とアルベドとの相関係数は+0.987で大きく、回帰式は次のとおりである。
(Y：日射量, x：アルベド)

$$Y=22.39+0.973x$$

(2)最低路温と最低気温

立山町の定点における最低路温（表面）と、同定点における最低気温との関係は表6に示すとおりである。高さ3.8mより2.0mの方が相関係数がやや大きく、また、24時日界より9時日界の方が相関係数がやや大きい。以後、9時日界のデータを取扱うことにする。

(3)最低路温とアメダス最低気温

立山町の定点における日最低路温（表面）と、立山町に近い富山・上市・八尾の3地点におけるアメダス（AMeDAS：地域気象観測システムの英訳、Automated Meteorological Data Acquisition Systemの略）の日最低気温との関係を調べた。

9時日界の散布図は図11に示すとおりで、立山町と同様に山沿いの八尾町における相関係数が最も大きく0.936となっている。

9時日界の立山町の最低路温（表面）と、富山における9時日界の最低気温との関係を天気別（富山の朝3時）に散布図を作ると、図12に示すとおりである。

雪の場合は例数が少なく、相関係数が小さいが、その他の天気については相関係数が+0.8～+0.95で大きい。また、上市や八尾についても富山と同じような相関係数が得られた。

表6 最低路温と最低気温

Table 6 Correlation of road surface minimum temperature and minimum air temperature.

日界	最低気温 (X)	相関係数 (R)	個数 (N)	回帰式 (Y：最低路温)
24時 日界	高さ 2.0m	+0.812	89	$Y = -1.0 + 1.0X$
	高さ 3.8m	+0.806	89	$Y = -0.9 + 1.0X$
9時 日界	高さ 2.0m	+0.897	88	$Y = -1.0 + 1.1X$
	高さ 3.8m	+0.893	88	$Y = -0.8 + 1.1X$

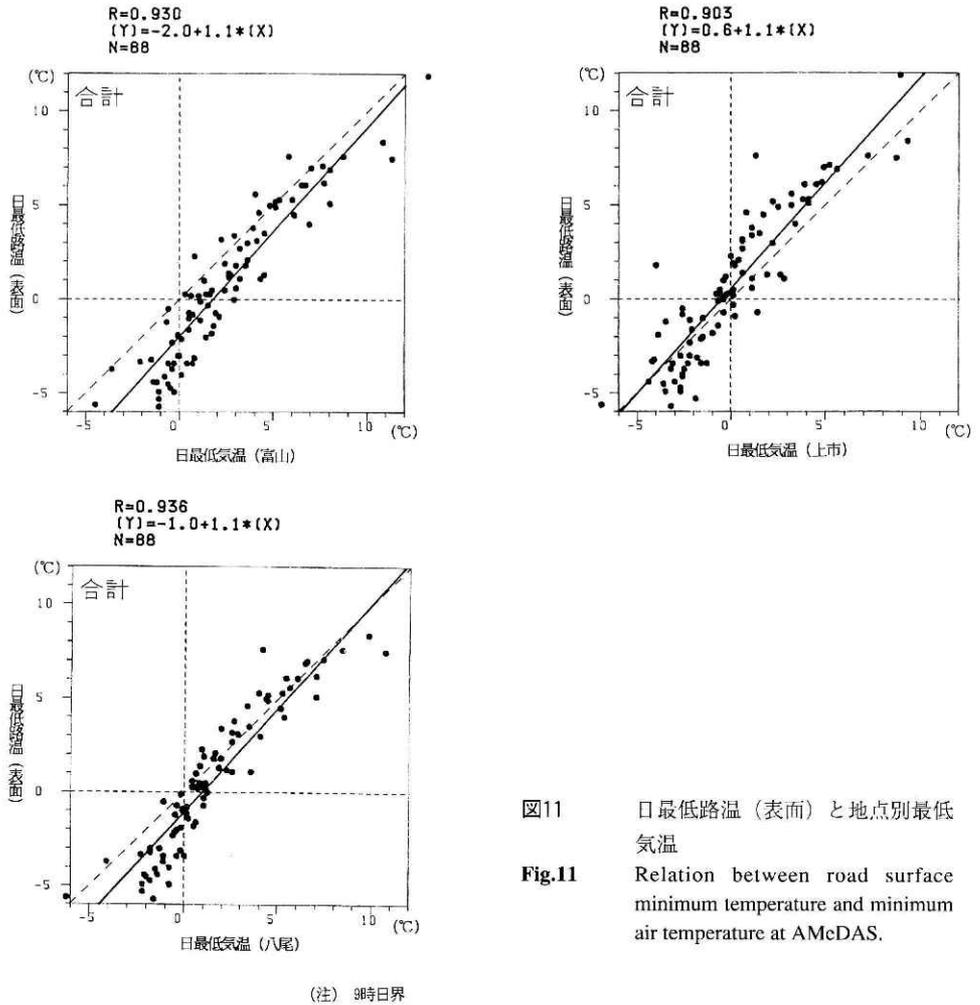


図11 日最低路温(表面)と地点別最低気温
Fig.11 Relation between road surface minimum temperature and minimum air temperature at AMcDAS.

7. 路温の予測因子

前章では立山町の最低路温(表面)は、現地やアメダス3地点の最低気温と非常に関係が深かった。このことは最低路温の予測因子が、最低気温の予測因子によく似た気象要素であることを示唆している。

7.1 最低路温と地上気象

種々の文献を参考にして次のような気象要素について調べた。

(1)最低路温(表面)と前日15時の富山の気温

昭和63年度冬季88日間のデータによる立山町における9時日界の最低路温(表面)と、前日15時の富山の気温との相関係数は表7に示すとおりで、曇りや晴れの相関係数は大きいですが、雪や快晴の場合は小さかった。

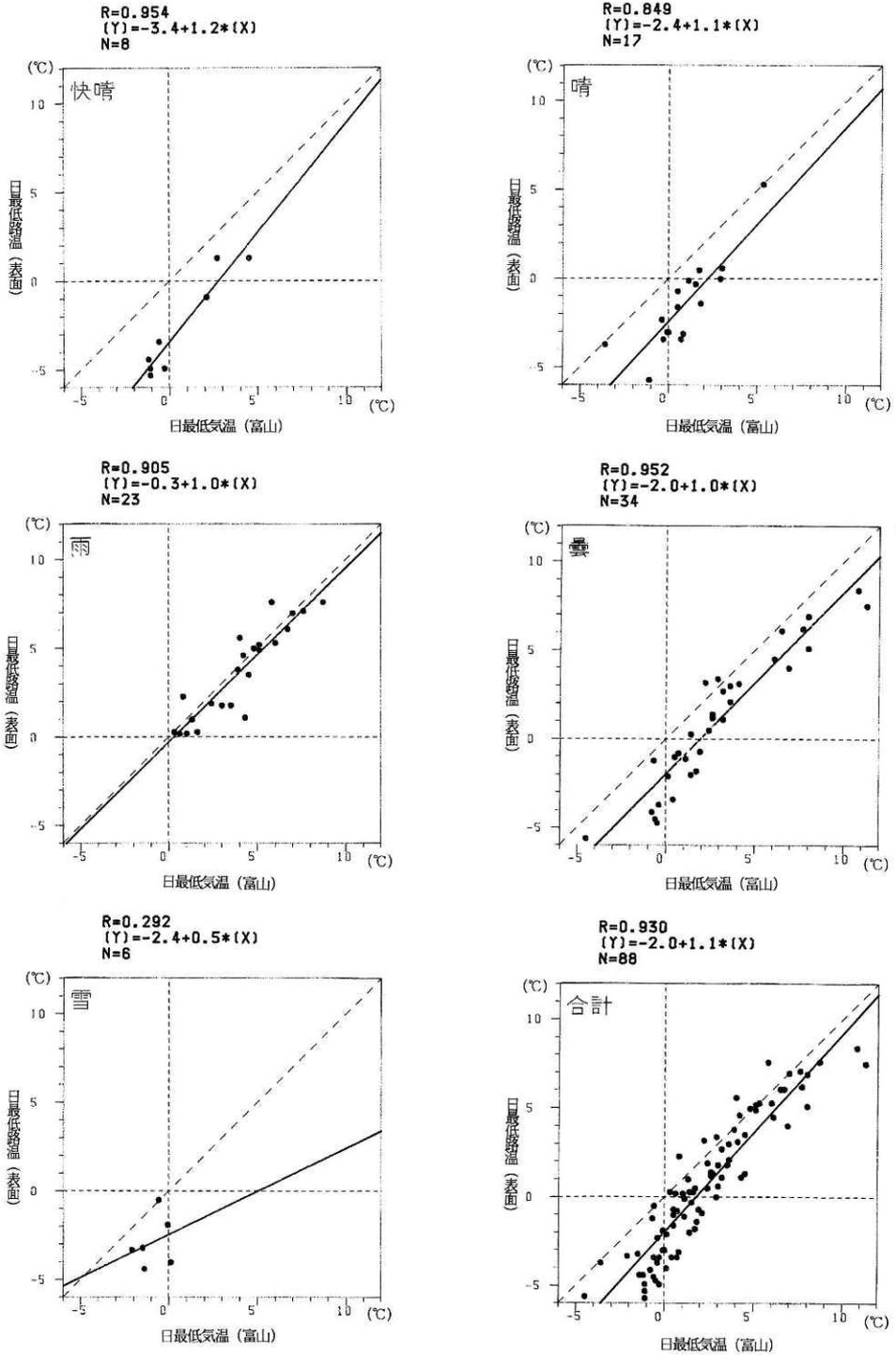


図12 最低路温 (表面) とアメダス地点の最低気温 (富山) との関係 (天気別)

Fig.12 Relation between road surface minimum temperature and minimum air temperature at Toyama(distinguish weather).

表7 最低路温と前日15時の気象要素

Table 7 Correlation of road surface minimum temperature and meteorological element at the day before.

X	富山気温	富山露点温度	立山気温
Y	最低路温 (表面)	最低路温 (表面)	最低路温 (表面)
	前日15時	前日15時	前日15時
快晴	0.333	-0.067	0.857
晴	0.724	0.655	0.579
曇	0.863	0.756	0.885
雨	0.527	0.519	0.529
雪	-0.354	0.047	0.016
合計	0.702	0.696	0.755

表8 最低路温と前日15時の路温との相関係数

Table 8 Correlation of road surface minimum temperature and road temperature at the day before.

X	前日15時路温 (表面)	前日15時路温 (-2cm)
Y	最低路温 (表面)	最低路温 (表面)
快晴	0.781	-0.815
晴	0.545	0.578
曇	0.501	0.567
雨	0.076	0.078
雪	-0.443	-0.255
合計	0.379	0.432

(2)最低路温 (表面) と前日15時の立山の気温

同様に現地の立山における前日15時の気温との関係は表7に示すとおりで、全データによる相関係数は0.755で富山より少々大きい。

このことはイニシャルデータは現地のデータを用いる方が良いことを示している。

(3)最低路温 (表面) と富山の前日15時の露点温度

同様に立山町の最低路温 (表面) と前日15時の富山の露点温度との関係は表7に示すとおりで、全データの相関係数は0.696である。

(4) 最低路温 (表面) と前日15時の路温

a. 前日15時の表面路温

立山町の最低路温 (表面) と、現地の前日15時の表面路温との関係は表8に示すとおりである。

天気別（富山の朝3時の天気）では、快晴の場合には相関係数がやや大きいですが、その他の天気や全データでの相関係数が小さく、予測因子として利用できない。

b. 前日15時の深さ2cmの路温

最低路温（表面）と現地の前日15時の深さ2cmの路温との関係は表8に示すとおりで、快晴の場合は相関係数が大きいですが、雨や雪の時は小さく全データでも小さいので予測因子として利用できない。

以上の地上付近の5要素の中から現地立山の15時気温、富山の15時気温、富山の15時の露点温度が予測因子として利用できるものと考えられる。

7.2 @最低路温と高層気象

北陸では輪島測候所において、毎日9時と21時の2回の高層気象観測が行われているので、そのデータと9時日界の立山町における最低路温との関係を調べる。

輪島における500mb高度、500mb気温、700mb気温、850mb気温と最低路温との相関係数を天気別に調べたものは表9に示すとおりである。

この表から相関係数は前日9時の850mb気温と前日21時の850mb気温が大きく、前日9時の700mb気温がやや大きく、予測因子として利用できるものと考えられる。

また、表面の最低路温の方が、深さ2cmのものより相関係数が少々大きいので、表面の最低路温の予測式を作成することにする。

7.3 路面状況別の最低路温と気象要素

前節までの調査によって路温の予測因子として重要な気象要素を抽出した。しかし、熱収支の考えから天気別に調べたが、雨や雪の場合には相関係数が小さかった。

この原因として路面が水や雪がある場合には、蒸発熱や融解熱によって路温が下降するためと考えられるので、路面の状況別に調べることが必要である。

したがって、これまで得られた路面温度の予測因子として重要な気象要素について、路面状況別に相関係数を求めると、表10に示すとおりとなる。

この表より、相関係数が0.6以上のものを予測因子として重要なものとする。乾燥の場合は立山の前日15時の気温、富山の前日15時気温、富山の前日15時露点温度、輪島の前日9時の850mb気温の4要素である。

路面が濡れの場合は、立山の前日15時の気温、富山の前日15時気温、輪島の前日9時850mb気温、輪島の前日21時850mb気温の4要素である。

また、路面に積雪がある場合には、輪島の前日21時850mbの気温が重要である。（路面状況は路面検知器による最低路温時の状況）

8. 最低路温の予測式

表 9 最低路温と輪島高層資料の時間別相関関係の比較
 Table 9 Correlation of road surface minimum temperature and aerological data at Wajima.

X	500mb気温			500mb気温			700mb気温			850mb気温		
	最低路温 (表面)			最低路温 (表面)			最低路温 (表面)			最低路温 (表面)		
Y	前日9時	前日21時	当日9時									
快晴	0.435	0.375	0.047	0.661	0.374	0.335	0.608	0.468	-0.014	0.747	0.860	0.734
晴	-0.113	-0.264	-0.363	0.250	0.008	0.047	0.302	0.053	-0.067	0.688	0.242	0.138
曇	0.682	0.571	0.380	0.615	0.561	0.515	0.720	0.755	0.617	0.939	0.861	0.676
雨	0.224	0.184	0.132	0.155	0.209	0.349	0.355	0.397	0.302	0.521	0.580	0.278
雪	0.166	0.140	0.313	-0.167	-0.171	-0.160	-0.213	0.074	-0.143	-0.239	-0.060	0.034
合計	0.516	0.337	0.120	0.540	0.445	0.397	0.616	0.592	-0.093	0.807	0.743	0.464
X	500mb気温			500mb気温			700mb気温			850mb気温		
Y	最低路温 (2cm)											
	前日9時	前日21時	当日9時									
快晴	0.464	0.413	-0.068	0.699	0.391	0.456	0.698	0.484	0.054	0.765	0.900	0.735
晴	-0.028	-0.166	-0.778	0.139	-0.008	0.081	0.329	0.051	-0.052	0.619	0.251	0.087
曇	0.631	0.527	0.084	0.558	0.508	0.488	0.663	0.736	0.597	0.906	0.831	0.660
雨	0.195	0.043	-0.068	0.322	0.222	0.257	0.448	0.360	0.185	0.629	0.528	0.086
雪	-0.378	-0.654	-0.778	0.355	-0.290	-0.366	0.567	-0.530	0.452	0.561	0.108	-0.380
合計	0.473	0.300	0.084	0.506	0.402	0.375	0.589	0.555	-0.033	0.805	0.727	0.440

注) 数値は相関係数 (r) を示す。合計は全データによる

表10 路面状況別の最低路温と気象要素の関係
Table 10 Correlation of road surface minimum temperature and meteorological element by condition of road surface.

気象要素	時間	路面状況別相関係数		
		乾 燥	濡 れ	積 雪
立山気温	前日15時	0.701	0.836	0.492
富山気温	前日15時	0.633	0.847	0.588
富山露点温度	前日15時	0.621	0.362	0.290
輪島850mb気温	前日09時	0.753	0.732	0.540
輪島850mb気温	前日21時	0.562	0.819	0.682
輪島700mb気温	前日09時	0.421	0.522	-0.365
立山路温(表面)	前日15時	0.581	0.500	0.348
立山路温(-2cm)	前日15時	0.590	0.551	0.365

前章までの熱収支理論に基づいた調査を進めた結果、立山町における最低路温と関係の深い地上気象データや高層気象データの幾つかを見出すことができた。

これらの気象要素を予測因子として、立山町と茶屋町における最低路温の予測式を作成して、その制度について調べる。

8.1 立山町の最低路温予測式

(1) 予測式の作成

前章において立山町の最低路温（表面）と関係の深い予測因子を6要素ほど見出すことができた。この中で前日15時の気温は富山より現地の立山町の方が少々相関係数が大きく、またイニシャルデータとして立山町のデータを用いた方がよい。

また、前日9時の輪島850mb気温と700mb気温は予測作業を午後実施する場合には実値を用いることができ、また前日21時の輪島850mb気温は気象庁の数値予報を利用することができる。

よって、予測因子として前日15時の立山町の気温、前日15時の富山の露点温度、前日9時の輪島850mb気温、同時刻の輪島700mb気温、前日21時の輪島850mb気温の5要素を取り上げ、富山の朝3時の天気および立山町の路面状況（朝6時の検知器の実測）別に層別化して、昭和63年度から平成2年度までの3冬季のデータによって重回帰式を作成した。

その式の回帰係数は表11に示すとおりで、これを最低路温（表面）の予測式とする。

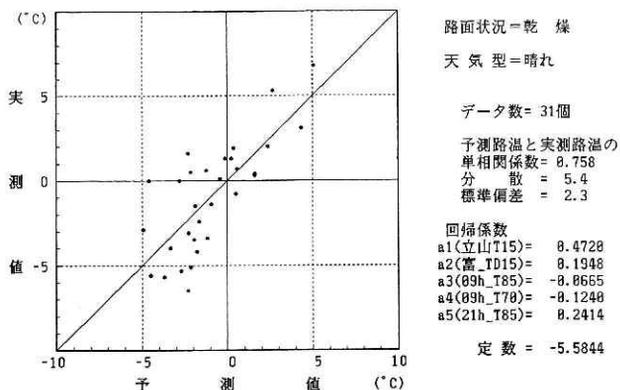
(2) 予測式の検証

前項の予測式の従属資料による最低路温（表面）の予測と実測によって散布図を作り、相関係数や標準偏差等を求めて検証を行う。

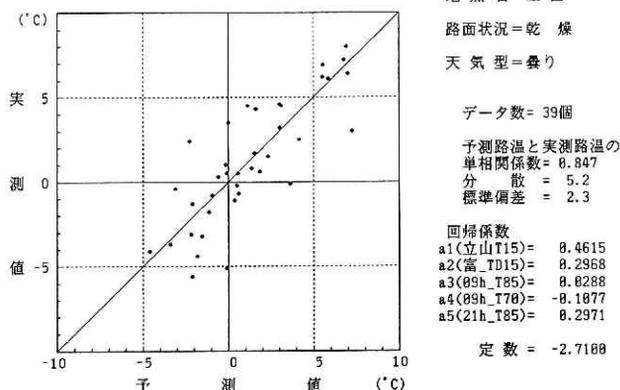
散布図の中から重なるものを図13(a)～(g)に示す。また、それぞれの予測式の相関係数・誤

表11 立山町における最低気温(表面)の予測式
 Table 11 Equations to predict the road surface minimum temperature at Tateyama-cho.

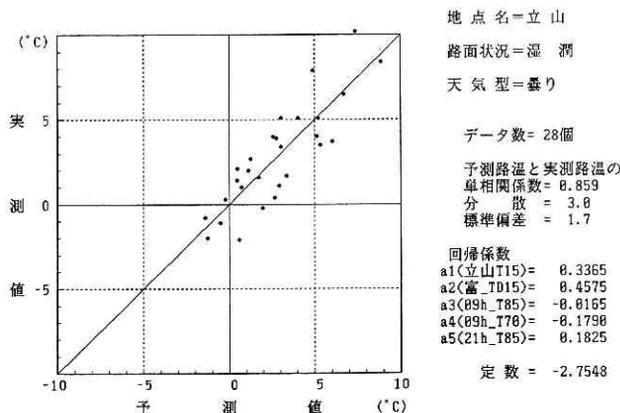
状況 状態	天気 型	立山 T15 a1	富 TD15 a2	9h-T85 a3	9h-T70 a4	21h-T85 a5	定数	データ 数	相関 係数	分散	標準 偏差
無	無し	0.1706	0.2145	0.0921	0.0272	0.3332	1.2128	260	0.832	4.9	2.2
	晴れ	0.1674	-0.0050	0.0233	0.0911	0.3432	-0.0796	112	0.777	2.4	1.5
	曇	0.2995	0.1990	0.1409	0.0052	0.2198	0.0173	200	0.865	2.1	1.4
	雨	0.2760	0.1158	0.1037	-0.1766	0.3527	0.1212	132	0.868	1.7	1.3
乾	雪	0.2337	0.1910	-0.0133	0.0537	0.2419	0.0343	76	0.823	1.4	1.2
	無し	0.4458	0.2657	-0.0395	-0.1524	0.3818	-3.8605	75	0.772	6.7	2.6
	晴れ	0.4720	0.1948	-0.0665	-0.1240	0.2414	-5.5844	31	0.758	5.4	2.3
	曇	0.4615	0.2968	0.0288	-0.1077	0.2971	-2.7100	39	0.847	5.2	2.3
湿	雨	-0.8208	-0.4640	1.8422	0.1569	0.1150	22.0144	4	1.000	-0.0	0.0
	曇	*****	*****	*****	*****	*****	*****	***	*****	***	***
	雨	0.1722	0.2585	0.0287	-0.0579	0.3427	0.9846	88	0.794	4.0	2.0
	雪	0.4708	0.1634	-0.0511	0.0196	0.0489	-4.7095	8	0.666	6.1	2.5
凍	曇	0.3365	0.4575	-0.0165	-0.1790	0.1825	-2.7548	28	0.859	3.0	1.7
	雨	0.0124	0.0463	0.1804	-0.0942	0.3749	3.6360	52	0.765	2.3	1.5
	雪	*****	*****	*****	*****	*****	*****	***	*****	***	***
	無し	-0.0453	-0.0463	0.3490	0.0612	0.2484	3.4442	67	0.630	3.9	2.0
積	晴れ	0.0752	-0.1474	0.4087	-0.1267	0.8744	4.1471	16	0.849	2.6	1.6
	曇	-0.0115	-0.1519	0.4180	0.0971	0.1629	3.6639	29	0.577	4.0	2.0
	雨	0.1128	0.1504	-0.1713	0.0506	-0.1145	-1.4733	8	0.816	0.2	0.4
	雪	0.3494	-0.0569	0.1031	0.1531	0.0588	1.5125	14	0.686	3.6	1.9
積	無し	0.0800	0.1124	0.0298	0.0904	0.2811	1.4644	29	0.779	2.2	1.5
	晴れ	*****	*****	*****	*****	*****	*****	***	*****	***	***
	曇	-0.1580	0.2600	0.4704	-0.0057	-0.0973	1.5925	4	1.000	-0.0	0.0
	雨	-0.0029	0.0871	-0.0082	-0.0157	0.0599	-0.1754	2	1.000	-0.0	0.0
積	雪	0.1626	0.0889	-0.0878	0.1915	0.3256	2.5076	23	0.764	2.5	1.6



(a) 乾燥・晴れ

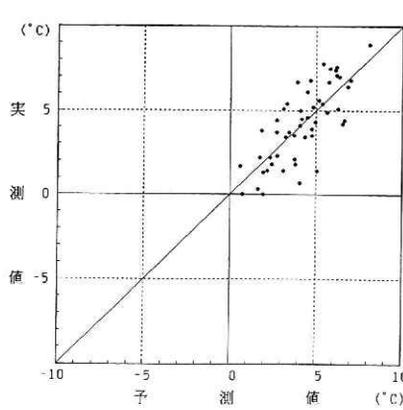


(b) 乾燥・曇り



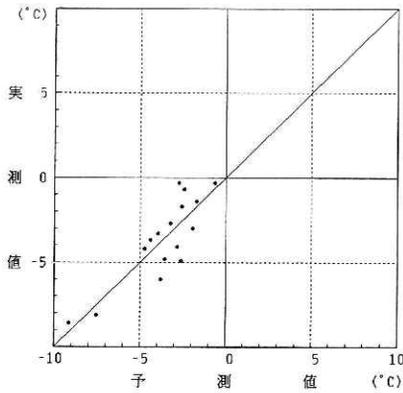
(c) 湿潤・曇り

図13 (a)～(g) 最低路温の予測と実測の散布図 (立山町)
Fig.13 (a)～(g) Relation between forecast and survey of road surface minimum temperature(at Tateyama-cho).



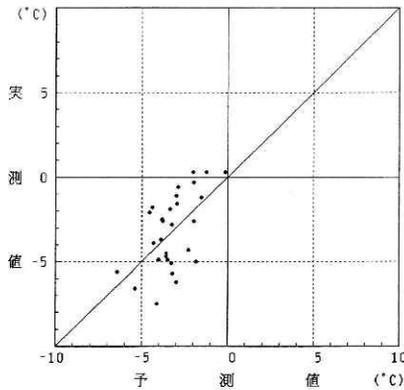
地点名=立山
路面状況=湿潤
天気型=雨
データ数= 52個
予測路温と実測路温の
単相関係数= 0.765
分散 = 2.3
標準偏差 = 1.5
回帰係数
a1(立山T15)= 0.0124
a2(富_TD15)= 0.0463
a3(09h_T85)= 0.1804
a4(09h_T70)= -0.0942
a5(21h_T85)= 0.3749
定数 = 3.6360

(d) 湿潤・雨



路面状況=凍結
天気型=晴れ
データ数= 16個
予測路温と実測路温の
単相関係数= 0.849
分散 = 2.6
標準偏差 = 1.6
回帰係数
a1(立山T15)= 0.0752
a2(富_TD15)= -0.1474
a3(09h_T85)= 0.4087
a4(09h_T70)= -0.1267
a5(21h_T85)= 0.8744
定数 = 4.1471

(c) 凍結・晴れ



地点名=立山
路面状況=凍結
天気型=曇り
データ数= 29個
予測路温と実測路温の
単相関係数= 0.577
分散 = 4.0
標準偏差 = 2.0
回帰係数
a1(立山T15)= -0.0115
a2(富_TD15)= -0.1519
a3(09h_T85)= 0.4180
a4(09h_T70)= 0.0971
a5(21h_T85)= 0.1629
定数 = 3.6639

(f) 凍結・曇り

図13 (a)~(g) 最低路温の予測と実測の散布図 (立山町)
Fig.13 (a)~(g) Relation between forecast and survey of road surface minimum temperature(at Tateyama-cho).

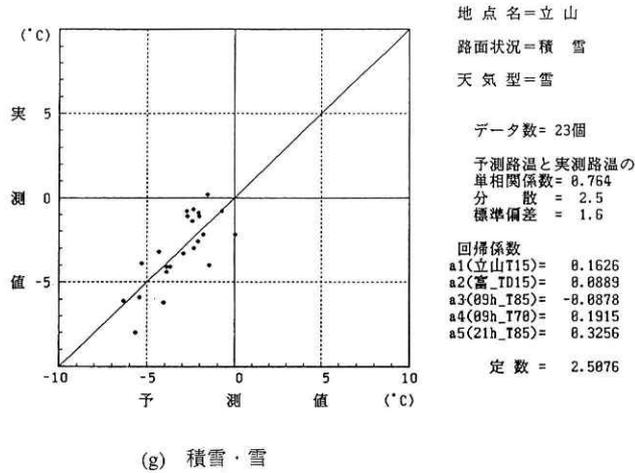


図13 (a)～(g) 最低路温の予測と実測の散布図 (立山町)
Fig.13 (a)～(g) Relation between forecast and survey of road surface minimum temperature(at Tateyama-cho).

差の分散および標準偏差は表11に示したとおりである。

路面状況を取扱わず天気のための層別化によるものは、相関係数が大きく、標準偏差は2℃以下である。

路面が乾燥の場合、天気が雨と雪の例数はほとんどなく、晴れと曇りは標準偏差が2℃よりやや大きい。

路面が湿潤の場合、天気が晴れの例数が少なく予測式は不安定であるが、曇りと雨は相関係数が大きく、標準偏差が2℃以下で予測式は利用できそうである。

路面が凍結の場合、天気が雨の場合は例数が少なく予測式は不安定で、標準偏差は小さいが予測には利用できない。その他の天気は相関係数の小さいものがあるが、利用できそうである。

路面に積雪がある場合、天気が晴れについては相関係数がやや大きく標準偏差が2℃以下で予測に利用できそうだが、天気が晴れの例がなく予測式が作れなく、また、曇りや雨の例数が少なく、予測式は不安定である。

8.2 茶屋町の最低路温の予測式

(1) 予測式の作成

茶屋町は立山町と同じく富山県内であるため、予測因子は立山町と同じ気象要素であるだろうと考え、次の5要素を選んだ。

a. 茶屋町の前日15時の気温

表12 茶屋町における最低路温の予測式
Table 12 Equations to predict the road surface minimum temperature at Chaya-cho.

地点名 = 茶屋町

状況 型式	天気 型式	係数					データ 数	定数	分散	標準 偏差	
		茶屋T15 a1	富TD15 a2	09h_T85 a3	09h_T70 a4	21h_T85 a5					
無	無し	-0.3540	0.1198	0.0675	0.2727	0.2937	9.1210	159	0.555	16.9	4.1
	無晴れ	0.3546	0.3374	-0.1768	-0.0593	0.1615	-5.0250	32	0.595	8.9	3.0
	曇り	-0.4906	-0.0724	0.3294	0.4040	0.1083	12.1392	63	0.561	19.4	4.4
	雨	-0.3905	0.2323	-0.2530	0.3185	0.4578	10.4295	40	0.525	16.9	4.1
	雪	-0.4550	-0.7567	-0.2930	0.5521	0.2425	11.1113	24	0.434	12.2	3.5

- b. 富山の前日15時の露点温度
- c. 輪島の前日9時の850mbの気温
- d. 輪島の前日9時の700mbの気温
- e. 輪島の前日21時の850mbの気温

茶屋町における路面状況の観測は、目視によって毎日1回行われたが、観測時刻が不規則で、また路面凍結や圧雪はほとんどなく、雪が降った日には僅かにシャーベット状の雪があることを記録されている程度で、路面状況別に層別化することが困難であった。

よって、富山地方気象台の朝3時の天気による層別化のみにとどめた。

また、昭和63年度から平成2年度までの3冬季のデータを取扱ったが、欠測などによってデータ数は3年間で160日ほどしか利用できなかった。

このようにして重回帰式を作ったものは、表12に示すとおりである。

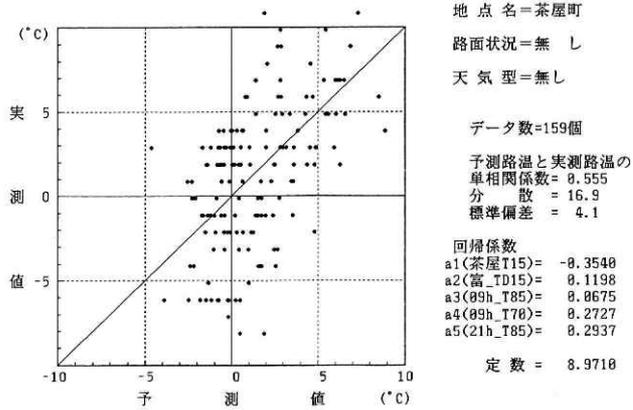
(2) 予測式の検証

従属資料による最低路温(表面)の予測と実測の散布図・相関係数・標準偏差などを調べて検証する。散布図は図14(a)~(e)に示すとおりで、相関係数・誤差の分散および標準偏差は表12に示すとおりである。

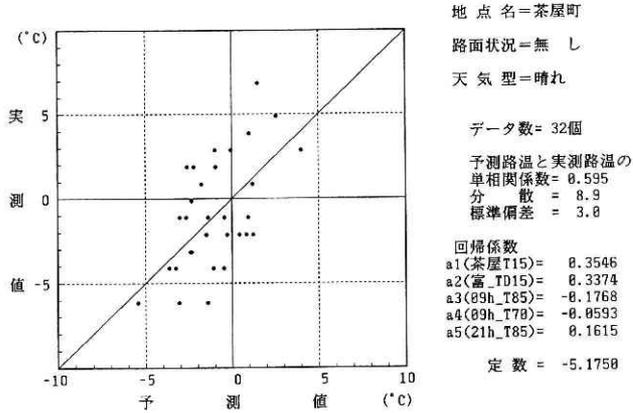
茶屋町の予測式の相関係数は、どの天気についても相関係数が立山町より小さく、また標準偏差が大きく精度が悪い。

この原因として交通量が多いためと考えられるので、近い将来において交通量や路面状況を加えて、予測式の精度向上について研究する必要がある。

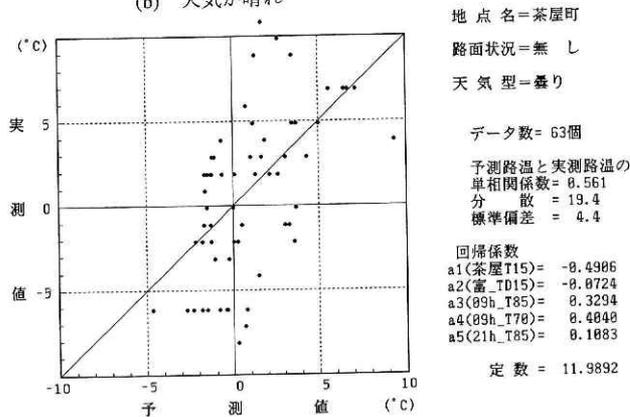
9. 立山町における凍結予測



(a) 天気の層別なし



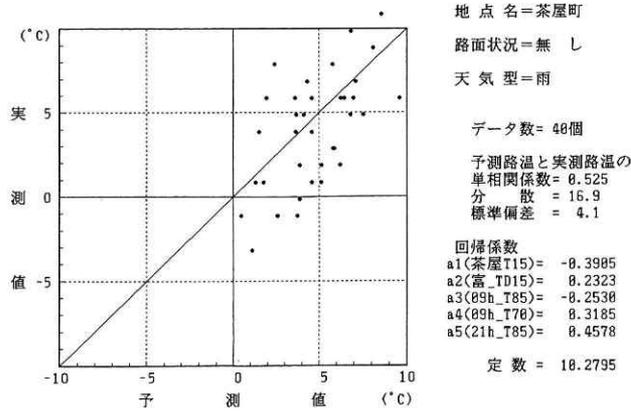
(b) 天気が晴れ



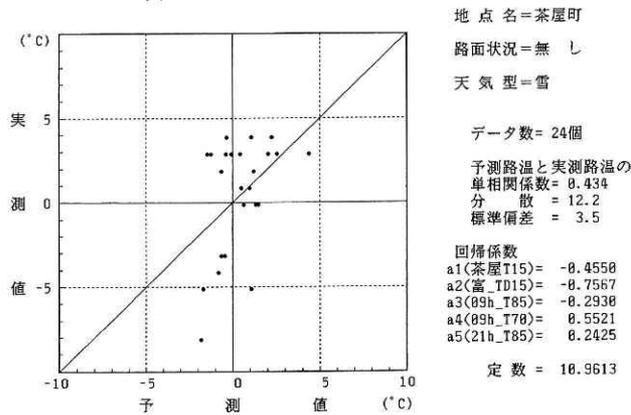
(c) 天気が曇り

図14 (a)～(e) 最低路温の予測と実測の散布図(茶屋町)

Fig.14 (a)～(e) Relation between forecast and survey of road surface minimum temperature(at Chaya-cho).



(d) 天気が雨



(e) 天気が雪

図14 (a)～(c) 最低路温の予測と実測の散布図 (茶屋町)
 Fig.14 (a)～(e) Relation between forecast and survey of road surface minimum temperature (at Chaya-cho).

県道の立山町東中野新の定点において、平成元年度と2年度の冬季に朝7～8時、夜は18～24時に1日2回、路面状況の目視観測が行われた。そのデータによって調べる。

(1)凍結観測時の表面路温

立山町の定点では放射温度計による表面路温は毎正時のデータが整理されている。したがって正時に目視観測が行われ、その時に凍結が観測されている時の表面路温について、1℃ごとの頻度分布にすると図15(a)となる。

-1.0～-1.9℃の頻度が最も大きく33%、-2.0℃以下の頻度の合計が41%、よって-1.0℃以下の頻度の合計が73%となり、-1℃以下で路面が凍結していると考えられる。(0.0～

0.9℃は水と氷が混じってシャーベット状とみられる)

(2)路面凍結と最低路温

2 冬季間の目視観測データによって、路面が凍結している観測をした時から12時間前までの最低路温（表面）の頻度分布図を作ると、図15(b)に示すとおりとなった。

凍結発生の頻度の合計が-2℃以下では60%となり、路面がぬれている時には、最低路温（表面）が-2℃以下になることが、凍結発生の目安となる。

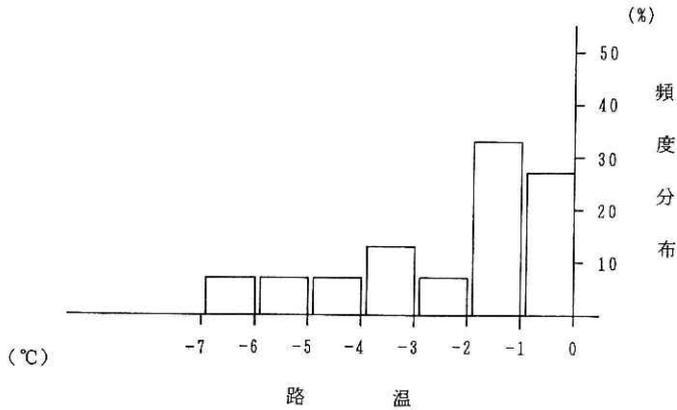


図15(a) 目視による凍結観測時の路温の頻度分布（於：立山町）

Fig.15(a) Frequency of road surface temperature at icing on roads by man's eyes observation.

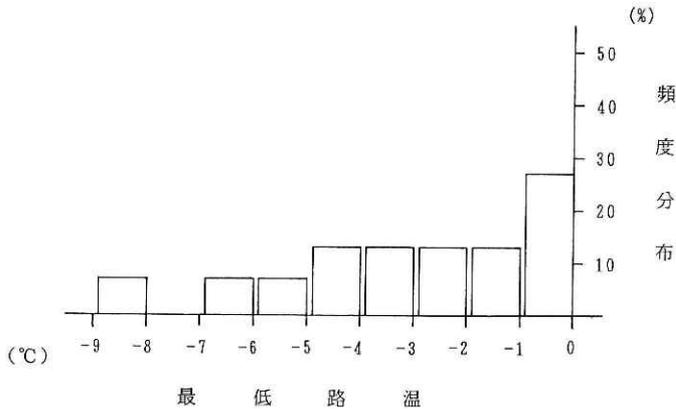


図15(b) 凍結観測時の前12時間内の最低路温の頻度分布（立山町における目視観測）

Fig.15(b) Frequency of road surface minimum temperature with in 12 hours at icing on roads.

したがって、天気予報を利用して路面の乾き、または濡れの状況を予測し、最低路温（表面）を予測することによって、凍結予測が可能である。

10. 結び

昭和63年度から雪と氷を中心に県道の富山立山公園線の立山町東中野新において、気象や物理量の観測を3年間行ってデータを収集した。

路面検知器による路面状況は、目視による状況とは、表面路温を加味することによって、目視とほぼ一致し、路面検知器が利用できることが確かめられた。

移動観測によって表面路温は、長大橋や高架橋などの上では低く、トンネルや高架などの下では高く、また山沿いは低く、人口の多い市街地が高いなどの路面形態や地域特性が得られた。

熱収支的な解析では、日射量と天気との関係、積算放射収支量と天気との関係などを調べたところ、予測式を作る場合には天気と路面状況別に層別化が必要であること、また予測因子として5要素を抽出し、重回帰法によって統計的に予測式を作り、その検証を行った。

そして凍結発生と最低路温（表面）との関係を調べ、それに天気予報を活用することによって路面凍結予測が可能であることを述べた。

謝 辞

この研究は科学技術庁防災科学技術研究所と富山県と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。

本研究を行うにあたり、防災科学技術研究所長岡雪氷防災実験研究所長の中村博士、第2研究室長の中尾博士はじめ関係各位に御指導を賜ったことを記し、謝意を表したい。

参考文献

- 1) 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
- 2) 富山県（1987）：富山県雪情報通信システム開発業務報告書
- 3) P.J.Rayer（1987）：The Meteorological Office forecast road surface temperature model, Meteorological Magagin, 116, 180-191.
- 4) 須田公男・水嶋正二・赤川正臣（1988）：一般国道8号・17号の路面凍結予測について，日本雪氷学会誌雪氷，Vol.50, No.3, 155-163.
- 5) 洲崎治平・井上要三・仙黒邦行・飯塚敏樹・矢島 篤（1989）：橋梁部における路面凍結調査，雪と道路協議会，雪と道路，Vol.10, No.21, 60-70.

- 6) 植木直之 (1989) : 重回帰法を用いた路面温度予測システムについて, 雪と道路, Vol.10, No.21, 42-48.

(1992年7月8日 原稿受理)