

凍結路面の発生と気象条件との関係について

The Relationship between Freezing of Road Surface and Weather Conditions.

松沢 勝* 加治屋 安彦**

Masaru MATSUZAWA and Yasuhiko KAJIYA

1993/94冬期に、北海道開発局、北海道および札幌市は、全道の路面状況調査を共同で実施した。この調査結果と、アメダスのデータを用いて、凍結路面の発生と、気象条件との関係を分析した。その結果、朝の最低気温が0℃未満の日における凍結路面の発生は、1) つるつる圧雪で、日降雪深が1 cm以上の場合、2) アイスバーンで、前日の最高気温が0℃未満の場合、3) ブラックアイスで、日降雪深が1 cm未満の場合に多いことがわかった。

さらに、前日の路面との関係に着目したところ、圧雪→つるつる圧雪とアイスバーン、アイスバーン→ブラックアイスの変化が多いこと、前日と同一の凍結路面を保つ傾向があることが判明した。また、この手法を用いて、当日の路面状況と気象状況から、翌朝の凍結路面の出現確率を求める方法も検討した。

加えて、札幌市街部に設置した、路面凍結観測ステーションのデータから滑りやすい路面の発生する条件を調べた。その結果、滑りやすい路面の発生過程には、圧雪からアイスバーン等に変化するケースと、日中に路肩などから融けた水分が早朝に凍結する、二ケースあることがわかった。

キーワード：日降雪深、路面凍結、気象条件

In the 1993-1994 winter Hokkaido Development Bureau, Hokkaido Government and the City of Sapporo conducted a joint survey on the road conditions throughout Hokkaido. We analyzed the relation between the freezing of a road surface and weather conditions using the survey results and data obtained by AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System). It was found that when the air temperature in the morning was below 0°C, freezing of road surfaces tended to occur with one of following conditions: (1) compacted snow with a slippery surface on roads and the daily depth of snowfall over 1cm, (2) ice crust on the roads and the maximum temperature of the previous day was below 0°C, and (3) black ice formed on the road surface and the daily depth of snowfall was less than 1cm.

In addition, we focussed on the relation between the road surface conditions of one day compared with those of the previous day. We found that compacted snow tended to be with a slippery surface or ice, ice crust on roads tended to change to black ice, and the conditions of the previous day tended to persist. We examined the method of calculating the probabilities of road surface conditions for the morning following a certain day from the road and weather conditions of that day.

Also, from the data on freezing of road surfaces collected by observation stations in downtown Sapporo, we found the conditions slippery road surfaces appear. As a result, it was found that there are two ways slippery road surfaces appear: (1) compacted snow changes to ice and (2) water from roadside snow or ice melted in the day freezes in the early morning.

Keywords: daily depth of snowfall, freezing of a road surface, weather conditions

1. はじめに

スパイクタイヤの使用が実質的に禁止された、1992/93冬期の札幌圏では、表面が鏡面化した非常に

滑りやすい凍結路面が出現し、社会問題となった。その後、指定地域が追加され、平成7年4月現在、全道102市町村が指定されている。これは全道人口の86%、

自動車保有台数の85%に当たり、各地で同様な問題が生じている。これに伴い、道路管理に対する関心は、以前にも増して高まりつつある。

このような、非常に滑りやすい凍結路面の対策を施すに当たり、どのような条件で凍結路面が発生しやすいかを明らかにすることは重要である。本報では、北海道内で行われている路面状況調査等から、凍結路面の発生条件について報告する。

2. 全道冬期路面状況調査について¹⁾

北海道内では、1993年2月から、道路管理者である、北海道開発局、北海道、札幌市が共同で路面状況の調査を開始した。当初の調査において路面分類は、圧雪、つるつる圧雪、アイスパーン、ブラックアイス、こぶ氷、乾燥、湿潤、シャーベットの8つに定め、調査者による判定の違いを少なくするために、以下のような説明を付けた。さらに、圧雪、つるつる圧雪、アイスパーン、ブラックアイス、こぶ氷の5分類に関しては、見本写真を添付した。(写真1～5)

- 圧雪 : 上から見て白く見える。滑りづらい普通の圧雪。
- つるつる圧雪 : 上から見て白く見える。表面のみ凍って鏡面化している。滑りやすい。
- アイスパーン : 上から見て透明または黒く(灰、茶)見える。氷の厚さは1mm以上。
- ブラックアイス : 上から見て透明または黒く見える。氷の厚さは1mm未満。
- こぶ氷 : 道路雪氷の表面に、こぶ状の凹凸ができた路面。
- 乾燥 : 乾燥した路面。舗装が裸出。
- 湿潤 : 湿った、または濡れた路面。舗装が裸出。
- シャーベット : 水を含んだもの。水べた雪。

1993年度冬期の調査は、毎朝8時から9時まで、全道60カ所(北海道開発局35カ所、北海道21カ所、札幌市4カ所)で行った。主な調査項目は、路面状況、天候、滞留状況、降雪深(前日の9時から当日の9時まで)、除雪・薬剤散布の実施の有無である。

3. 調査結果¹⁾

本報では、毎日の路面状況と気象条件との関係につ



写真-1 圧 雪



写真-2 つるつる圧雪

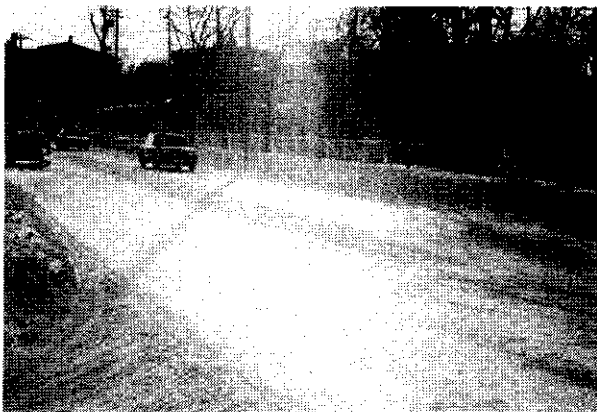


写真-3 アイスパーン



写真-4 ブラックアイス



写真-5 こぶ氷

いて調べ、凍結路面が出現する気象条件に関して検討する。

ところで、スパイクタイヤ禁止以降発生した、非常に滑りやすい凍結路面は、「ツルツル路面」「ミラーバーン」と俗に呼ばれているが、これは、学会や、道路管理者内で認知された呼び名ではない。今回の調査での分類は、スタッドレスタイヤが使用される以前の分類を基にして定められており、このような非常に滑りやすい凍結路面を特定することができない。しかしつつる圧雪、アイスバーン、ブラックアイス、およびこぶ氷は、注意を要する路面と考えられる。本報では、これらを凍結路面と呼び、気象との関係を調べるに当たっては、出現数の少ないこぶ氷を除いた他の3種の路面に着目して解析を行う。また、凍結路面に圧雪を加えたものを雪氷路面と呼ぶこととする。

なお、ここで用いたデータは、路面状況と降雪に関しては、調査票に記入されたもの（全道60地点分、93年12月～94年3月）で、気温は、調査地点近傍のアメダスのデータを用いた。

3. 1 地域別路面状況

図-1に、一冬通じた、支庁別の各種路面状況の出現率を示した。これによると次のことがいえる。

- ・雪氷路面が多いのは、上川など道北地方で、70%以上であり、雪氷路面が少ないのは、道南と道東の太平洋側で、40%以下である。
- ・凍結路面が多いのは、上川と空知で、40%以上であり、凍結路面が少ないのは、後志と道南で、20%未満である。
- ・凍結比＝凍結路面／雪氷路面と定義し、凍結比と、雪氷路面の出現率との関係を調べたところ、道東の太平洋岸で凍結比が高く、普段は、アスファルト路面がでている場合が多いが、いったん雪氷路面になると、

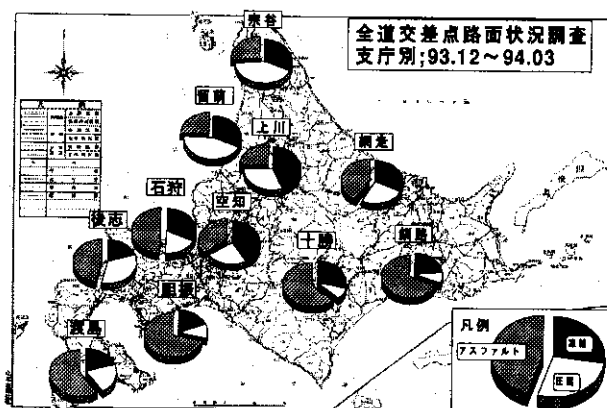


図-1 支庁別路面状況

凍結路面となるケースが極めて多いことがわかる。

これらのことから、地域によって路面の出現傾向がかなり異なっていることがわかる。この原因として、地域により気候が異なることがあげられる。

3. 2 降雪深別出現率

図-2は、前日の9時からの24時間降雪深階級別の各種路面の出現率である。図より、全体として、雪氷路面の出現率は、降雪深の増加に伴い増加することがわかる。これは、圧雪の出現率が高くなるためである。

凍結路面では、降雪が多い場合につるつる圧雪が多く、降雪の少ない場合に、ブラックアイスが多いことがわかる。また、アイスバーンの出現率は、降雪の有無や多少にあまり依存しないことがわかる。

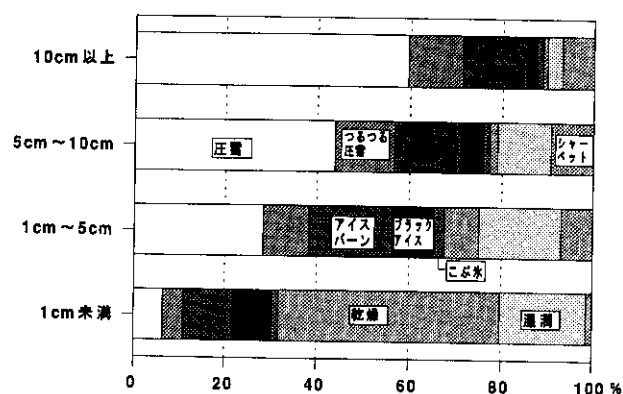


図-2 降雪階級別路面出現率

3. 3 前日の最高気温別出現率

図-3は、前日の最高気温に対する、階級別の路面状況出現率である。全体として、0℃を境に、低い方で雪氷路面が多く、高い方で乾燥・湿潤路面の出現が高くなっている。

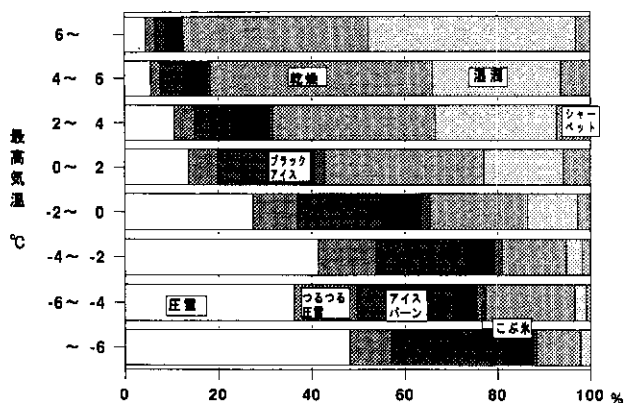


図-3 前日の最高気温別路面状況

凍結路面のうち、つつつる圧雪とアイスバーンは、前日の最高気温が低くなるにしたがい、出現率が増加している。特に0℃を境に、出現率の増加が著しい。一方、ブラックアイスは0～2℃の階級を中心に出現率が高くなっていることがわかる。

3. 4 当朝の最低気温別出現率

図-4は、当日朝の最低気温の階級別出現路面構成比である。

全体として、-2℃を境に、低い方で雪氷路面が多く、高い方で乾燥・湿潤路面の出現が高くなっている。

凍結路面の出現率は、温度が低くなるにしたがい増加する。増加率は0℃付近で大きく、0℃以上では、出現率は極めて低い。

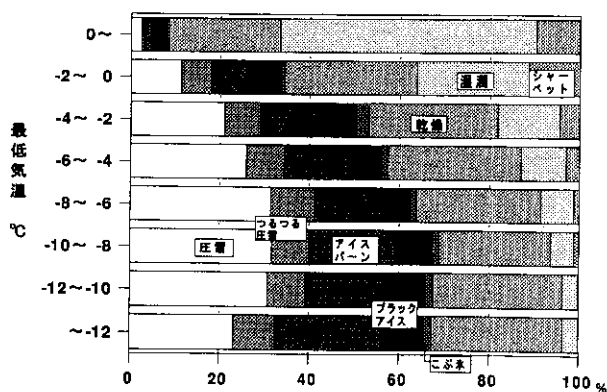


図-4 当朝の最低気温別路面状況

3. 5 複数の気象条件と路面状況

次に、当朝の最低気温が0℃未満の日を抽出し、降雪、前日の最高気温の2条件を組み合わせた、以下の4条件において、各路面の出現率を調べた。

条件1：降雪 ≥ 1 cm、最高気温 ≥ 0 ℃

条件2：降雪 ≥ 1 cm、最高気温 < 0 ℃

条件3：降雪 < 1 cm、最高気温 ≥ 0 ℃

条件4：降雪 < 1 cm、最高気温 < 0 ℃

図-5は、上記の4条件のもとでの各路面の出現率を調べたものである。全体的にみて凍結路面の出現率は、条件3で低くなっている。さらに、

つつつる圧雪：降雪 ≥ 1 cm

アイスバーン：前日の最高気温 < 0 ℃

ブラックアイス：降雪 < 1 cm

の条件で出現率が高いことがわかる。

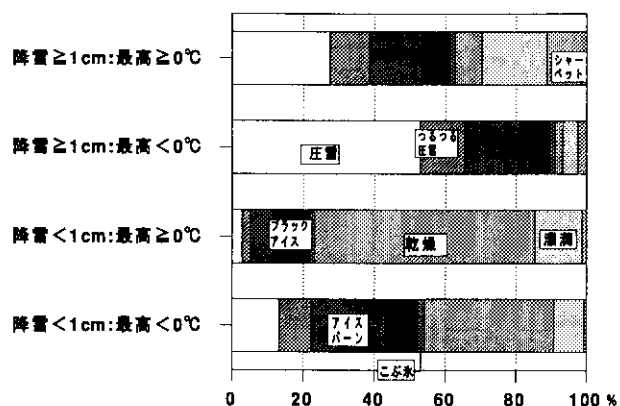


図-5 気象条件別路面出現状況

3. 6 路面の変遷から見た発生条件

路面が凍結するためには、路面上に水分があることが必要である。したがって、前日朝の調査で、路面上に雪氷がある場合と、無い場合では、その後の気象条件が同じでも、形成される路面状況は、全く異なると考えられる。そこで、ここでは、先に用いた条件毎に、前日からの路面の変遷に着目して解析を行なった(図-6)。

条件1の場合は、前日の路面に関して特徴は見られなかった。それ以外の条件では、次の傾向が見られた。

つつつる圧雪の出現前日の路面は、圧雪とつつつる圧雪が多い。

アイスバーンの出現前日の路面は、アイスバーンと圧雪が多い。

ブラックアイスの出現前日の路面は、ブラックアイスとアイスバーンが多い。

4. 路面の変遷から見る路面の予測¹⁾

3. 6節とは逆に、前日の路面を基準にして当日の路面を見ることで、任意の路面が出現する確率を予測することができる。例えば条件4で見ると図-7のようになる。ここで、前日朝の路面がつつつる圧雪の場

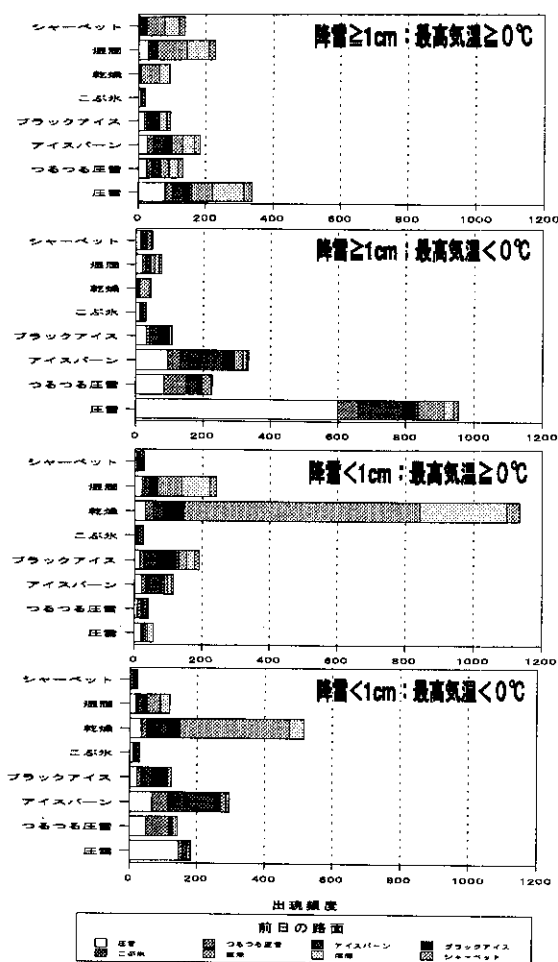


図-6 前日の路面と当日の路面の変遷

合、当朝の路面がつるつる圧雪になる確率が41%、アイスバーンになる確率29%であることがわかる。

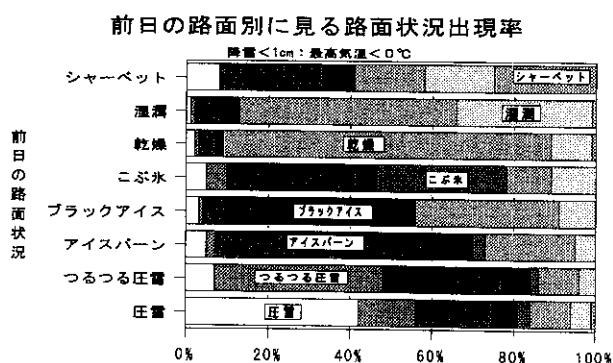


図-7 路面の変遷からみる路面の予測

5. 札幌市内の観測データによる解析²⁾

開発土木研究所では、先に述べた路面状況調査の解析に加え、93/94冬期からフィンランド製の凍結予測システムを導入し、札幌市街部で観測調査を行なっている。このシステムは、日本に比べ降雪の少ない欧米

で広く普及している。このため、このシステムを、多雪地域に適用する場合の改善点などについて検討している。同時に、この札幌市街部の観測調査の結果から、滑りやすい路面の発生する条件の分析も行った。ここではその結果について報告する。

5. 1 観測ステーションの概要

札幌市街部の国道2地点（北1条西3丁目～国道12号と北5条東1丁目～国道5号、図-8）に路面凍結観測ステーションを設置し、調査を行った。

現地では、気温、湿度、風向・風速、降水の有無、日射量、放射収支量などの気象要素を観測するほか、路面凍結センサーにより、路面温度、導電率、イオン分極度を総合判断して路面状況を判別する。このセンサーは、路面状況の判別や、凍結防止剤の残留濃度の検出ができる。また、地中30cmの深さに地温計を設置して、地中からの熱流を測定する。これらの各種データは、現地の自動気象ステーションにより10分ごとに収集され、電話回線を通じて専用コンピュータに送られる。そして、夕方4時に、専用コンピュータに翌朝の最低気温や雲量など気象予測情報を入力することにより、翌朝の路面状況を予測する。

以上が、北欧製の凍結予測システムの概要であるが、これらに加え、間欠ビデオと雨雪量計を設置した。さらに、毎朝9時のパトロールにおいて目視によ

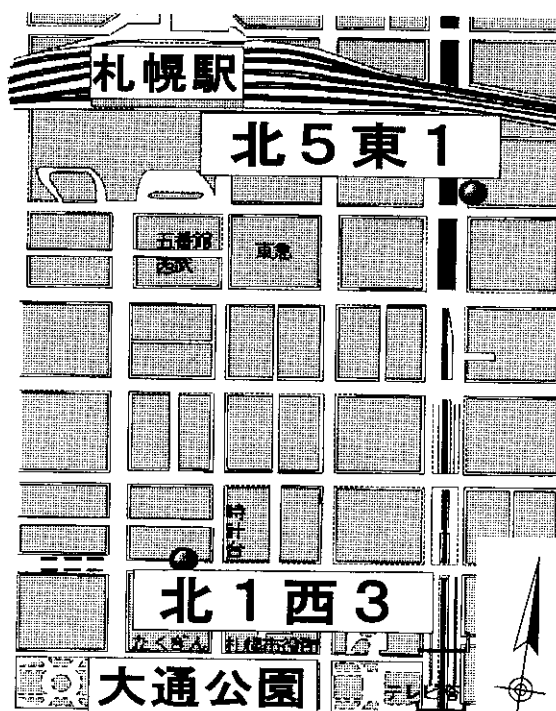


図-8 路面観測ステーション位置図

る路面観察と写真撮影を行った。

5. 2 滑りやすい路面出現時の気象特性

毎朝行なった路面状況観察結果や、バス遅延資料、転倒者救急搬送資料なども参考にして、滑りやすい路面が出現した日を抽出し、前日の12時から当日の11時迄の24時間の気象特性を分析した。抽出した事例は路面状況からType I、Type IIの2つに分類された(図-9)。

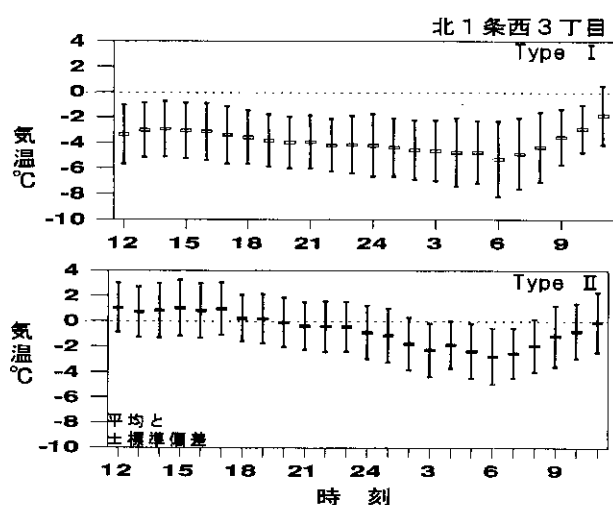


図-9 滑りやすい路面出現時の気温変化

分類の基準は、対象時間帯において、Type I は、主に雪氷路面で覆われていた日で、Type II は、主に乾燥または湿潤路面が見られた日である。

気温の変化を見ると、Type I は、常に氷点下で変化が少なく、気温の平均値は $-5 \sim -4^{\circ}\text{C}$ であった。この結果は、永井他³⁾の結果ともよく一致している。これに対し、Type II は変化が大きく、気温が日中プラスで、早朝に氷点下になっている。また、Type I は、前日に1 mm以上の降水のある傾向が見られた。

以上から、Type I は、圧雪からアイスバーン等に変化した場合で、Type II は、日中に路肩などから融けた水分が、早朝に再凍結した場合と考えられる。

6. 考 察

6. 1 調査結果から見る凍結路面の発生条件

以上の結果をもとに、つるつる圧雪、アイスバーン、ブラックアイスの生成過程と発生条件に関して考察を行なう。

つるつる圧雪は、圧雪の上に氷膜が形成された状態と考えることができる。

図-2によると、つるつる圧雪の出現率は、降雪が1 cm 以上の場合、降雪深の階級によらず、ほぼ一定である。このことから、つるつる圧雪は、1日の累計の降雪深よりも、観測時及び直前の降雪の強さと、積雪表面での融解・再凍結とのバランスによって形成が決まると考えられる。

また、図-5より、つるつる圧雪は、降雪が1 cm 以上の条件で出現しやすく、この場合、前日の最高気温の正負にあまり依存しない。このことから、つるつる圧雪は、降雪後、比較的早い時期(24時間以内)に形成され、表面における氷膜の形成は、タイヤのスリップによる摩擦熱などの、気温以外の要因の影響が大きいと考えられる。

アイスバーンは、厚さ1 mm 以上で、圧雪に水が浸み込んで凍結したものと特徴づけられる。

図-5より、アイスバーンは、降雪が1 cm 未満で、前日の最高気温が 0°C 未満の場合、出現率が高くなっている。これは、すでに生成されたアイスバーンが、同じ状態を保つ傾向が強いためであり、5.2節のType I に相当する。(図-6)。また、圧雪や、つるつる圧雪からアイスバーンに変化する傾向も強い。この変化には、路面上の積雪が融解・再凍結する必要があるが、最高気温が 0°C 未満であるから、積雪の融解には、日射、車両による熱などの影響が大きいと考えられる。

ブラックアイスは1 mm 未満の厚さの氷膜が、舗装表面上にある状態をいう。

ブラックアイスは、5 cm 以上の降雪深で、出現率が急減する(図-2)。これは、ブラックアイスは、その性格上、道路上に多くの水分を必要としないためである。ブラックアイスは、降雪が1 cm 未満の場合、前日の最高気温の正負に関する依存は弱い。すなわち、ブラックアイスの出現には、日中における道路雪水の融解は必要条件ではなく、路面に残る水分が少なく、かつ、観測時の路面温度が融点以下であるという条件を満たしていることが重要である。しかし、道路雪水が融けると、水分が排水されやすいことから、最高気温がプラスになる5.2節のType II の様な場合にはブラックアイスが出現しやすいといえる。同様のことは、ブラックアイスと、湿潤との間の変化が多いことからいえる。

また、図-6より、ブラックアイスは、アイスバーンや圧雪からの変化が見られる。いずれも、路面の水分量が少なくなる過程で、蒸発や融解、削はくなどの影響を受けていると考えられる。

このほかに、降霜によるブラックアイスの出現も考えられるが、今回の調査では確認できなかった。

6. 2 路面の熱収支に関して

圧雪からつるつる圧雪やアイスバーンに変化する傾向が強いことは、既に述べたとおりである。これらは空隙の多い「雪」の状態から、空隙の少ない「氷」の状態への変化であり、これには、融けた水が雪の隙間を埋め、その水が再凍結するという現象が存在すると考えることができる。このような細部の分析を行って凍結現象を明らかにするには、物理的手法を用いることも重要である。

路面上の水分が融解（凍結）するためには、その温度が融点より高く（低く）なる必要がある。このような路面上の熱的条件を調べるために、路面での熱収支の測定が行われている⁵⁾⁶⁾⁷⁾

中尾ら⁵⁾によると、道路表面上の熱収支は次の式で与えられる。

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

ここで、G：日射量

α ：路面のアルベド（反射率）

N：長波の放射収支量（赤外放射収支）

H：顕熱輸送量

E：蒸発・凝結時の潜熱輸送量

C：地面からの伝導熱量

X：通行車両との熱の交換など

であり、路面に熱が流入する方向を正にとる。

路面のアルベドは、乾いた新雪で0.75～0.90、湿った古い雪で0.4～0.6となる⁸⁾。

顕熱伝達量は、一般に次のバルク公式が用いられる。

$$H=\beta(\theta_a-\theta_s)V \quad (2)$$

ここで、 θ_a ：気温、 θ_s ：道路表面の温度、 β ：熱伝達係数、V：路面高1.0mの風速である。

中尾ら⁵⁾の、富山市内における観測によると、路面への熱の収入に関しては、夜間は地中からの熱伝導が主であるが、昼間はほとんどすべてが日射によるものである。また、夜間の熱の支出に関しては、顕熱や潜熱の効果はほとんどなく、長波放射収支が最も効いている。

同様の結果は石川ら⁶⁾も報告しているが、加えて、

暖かい強風がある場合は顕熱輸送による熱の収入が多くなると述べている。

なお、中尾ら⁵⁾は、通行車両の影響については、通行車両が周囲の空気をかき混ぜることによる、顕熱の交換は少ないと述べている。しかし、交差点などで停止している車両からの赤外放射の影響や、タイヤの摩擦熱、タイヤからの伝導熱の影響については、研究例がほとんど無く、議論の残るところで、今後の研究の課題といえる。

7. 終わりに

今回の分析では、凍結路面の発生しやすい気象条件を明らかにした。しかし、今回の調査では、道路管理の上で問題とすべき、非常に滑りやすい路面の出現条件を明らかにすることができなかった。これに関して、94/95冬期の調査では、新しい路面分類法を導入し改善を図った。この新路面分類、および、それに基づいた調査結果に関しては、現在解析中であり、別の機会に報告する。

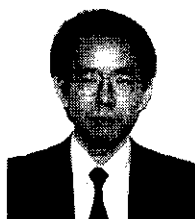
参考文献

- 1) 松沢勝, 加治屋安彦, 荒井秀方, 川端隆 (1995); 全道冬期路面状況調査, 第7回雪と道路の研究発表会資料, 26-39.
- 2) 加治屋安彦, 松沢勝, 小林利章 (1994); 93/94冬期の札幌市街部凍結路面観測ステーションによる観測調査結果について, 第10回寒地技術シンポジウム寒地技術論文・報告集, 76-79.
- 3) 永井智之, 高木秀貴, 大沼秀次 (1994); 札幌市における冬期スリップ事故の分析, 開発土木研究所月報, 499, 23-35.
- 4) 松沢勝, 加治屋安彦, 石本敬志, 高木秀貴, 渋谷孝史, 川端隆 (1993); 92/93全道冬期路面状況調査について, 第9回寒地技術シンポジウム講演論文集, 182-187.
- 5) 中尾正義, 清水増治郎, 高橋修平 (1992); 積雪域交通路における路面凍結に関する研究, 防災科学技術研究所報告, 50, 169-191.
- 6) 石川信敬, 成瀬廉二, 前野紀一 (1987); 道路雪氷の熱収支特性, 低温科学物理編, 46, 152-162.
- 7) 浦上晃一, 佐藤守 (1985); 低温な地下水を用いた道路融雪の実験, 温泉工学会誌, 19, 2/3, 41-62.
- 8) 日本雪氷学会編 (1990); 雪氷辞典, 古今書院, 196 p.



松沢 勝*

開発土木研究所
防災雪氷研究室
研究員



加治屋 安彦**

開発土木研究所
防災雪氷研究室長

*

*

*