



Title	道路雪氷の消耗過程の特性
Author(s)	成瀬, 廉二; NARUSE, Renji; 石川, 信敬 他
Citation	低温科学. 物理篇, 46, 135-149
Issue Date	1988-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18554
Type	departmental bulletin paper
File Information	46_p135-149.pdf



道路雪氷の消耗過程の特性*

成瀬 廉二・石川 信敬

(低温科学研究所)

武 市 靖

(北海学園大学工学部)

前 野 紀 一

(低温科学研究所)

(昭和62年11月受理)

I. はじめに

道路上に積もった新雪および吹きだまり雪は、自動車の走行により短時間のうちに圧雪へ変化する。同時に、新雪や軟らかい圧雪は車により削はくされ、雪粒は別の地点に再堆積する。また、路面雪氷の融解が始まると、一般に雪氷面の起伏は著しくなるとともに、自然雪面に比べて急速に融解・消雪がすすむ。本報告では、このような道路雪氷の融解および削はく現象をまとめて消耗とよぶ。

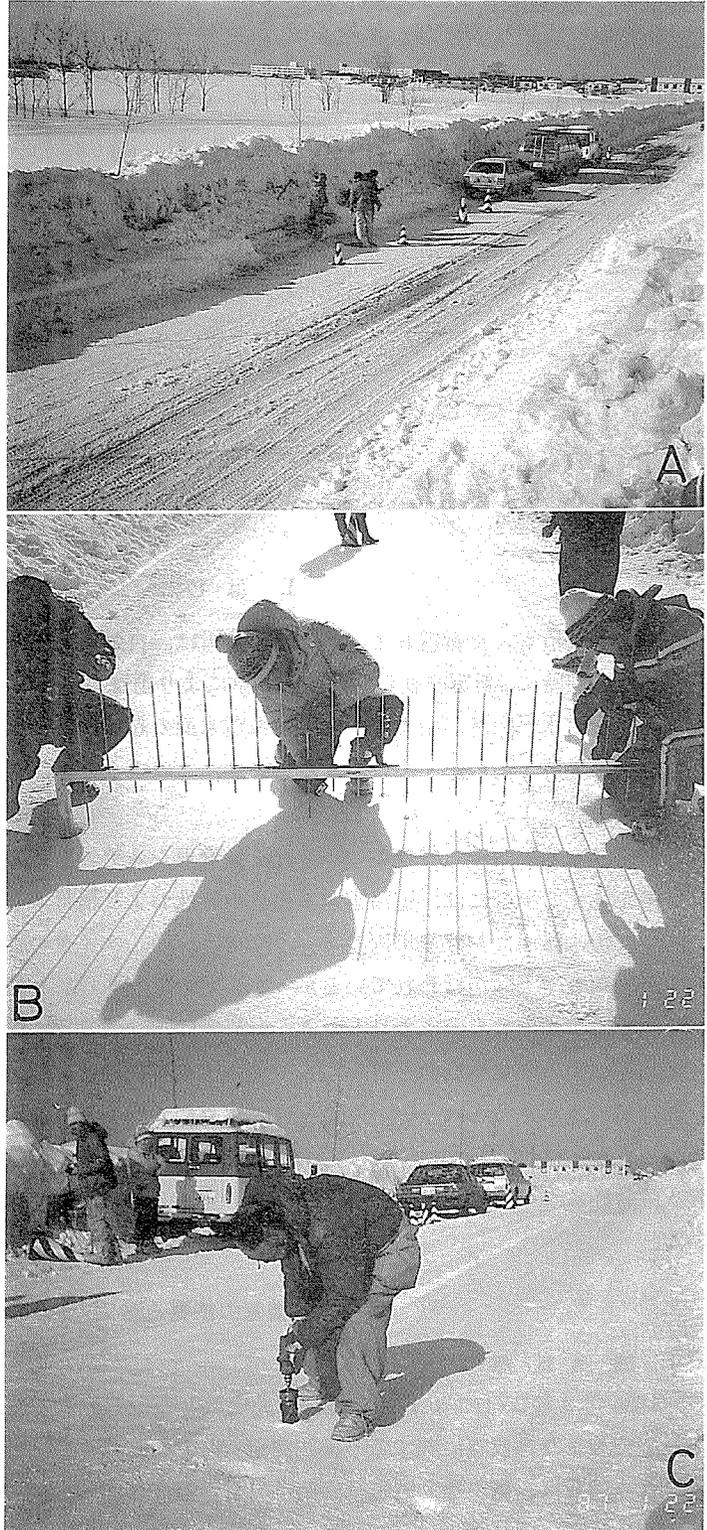
積雪寒冷地における安全かつ円滑な交通管理システムの策定、あるいは効率のよい除雪・排雪計画を講ずる場合には、道路雪氷の変化の特性および消耗過程に関する基礎的知識が不可欠である。雪氷路面における車両のすべり摩擦や交通、タイヤの性能等に関しては古くから数多くの現地調査や実験が行われているが(最近では例えば、畠山・他^{1,2)}, 加来・他³⁾, Harrison^{4,5)}, 道路上の雪や氷そのものに着目した詳しい研究は木下・他^{6,7)}によるもののみである。これまでに、道路上の熱収支観測と併行して、道路雪氷の消耗過程および雪氷の諸性質の変化特性が詳細に調査されたことはない。本論文は、定点における野外観測をもとに、道路雪氷の質量収支の視点からその消耗過程の特性を明らかにしようとするものである。なお、道路雪氷上の熱収支的特性については石川・他⁸⁾が、雪氷の構造と分類については前野・他⁹⁾が別に報告している。

II. 調査の概要と測定方法

1. 観測地点

1986年2月25日、26日に、江別市大麻沢町の住宅地内の道路において、道路雪氷の構造、消耗過程および熱収支に関する予備観測を行った。同観測点の除雪された道路幅は5m、上下線の総交通量は、朝の通勤時には毎時320台、日中は毎時30~60台であった。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第3100号



第1図 A: 篠路町の道路視測定点(1987年3月)。B: 表面起伏測定器にて道路横断プロファイルの測定。C: ドリルにて雪水試料の採取

1987年は、厳冬期(1月19日～23日)および融雪期(2月27日～3月4日)に、札幌市郊外篠路町の市道において定点観測を行った(第1図A)。同観測点の除雪された道路幅は約7.2m、上下線の総交通量は、朝の通勤時には毎時100～120台、日中は毎時30～70台であった。観測期間中、日の出から日没まで約1.5時間毎に、雪氷路面の表面形態、硬度、構造、密度、気温、雪温、アルベド(反射率)、日射量、正味放射量、風速、積雪深、新降雪深、および交通量の観測を行った。これらの内、気象要素の測定方法については石川・他⁸⁾が述べる。

2. 測定方法

1) 交通量

手動カウンターにより、一時間毎の上・下車線、大型車・普通車別の交通車両数を測定した。

2) 表面形態

4cm角のX型アルミニウム製ユニポールにて、長さ2.4m、高さ34cmの表面起伏測定器を制作した。同器の水平桁10cm毎に、直径7mmの鉄棒が昇降し、任意の高さにて固定できるようにしている。観測地点の道路横断線上にて、あらかじめ2.4m間隔にてアスファルト面を露出させた穴をあけておき、そこに測定器を設置し各鉄棒の下端を雪氷路面に接触させる。しかる後に、水平桁から鉄棒上端の高さを測定し、道路上の雪氷深の分布を求めた。第1図Bに、測定中の写真を示す。

3) 表面硬度

道路の横断線に沿い5～7地点にて、木下式硬度計により表面硬度を測定した。なお、一地点にて3回ないし5回の測定を行い、それらの平均値を測定値とした。

4) 雪氷の構造と密度

内径5cmの電池式コアドリルを用い、一日に2ないし5回、雪氷の試料を採取した(第1図C)。低温実験室に持ちかえり、コアの柱状構造の観察、ならびに試料を直方体に整形し、秤量することにより雪氷のバルク密度を測定した。なお、試料の一部についてはアニリン法による薄片観察を行った。

III. 測定結果

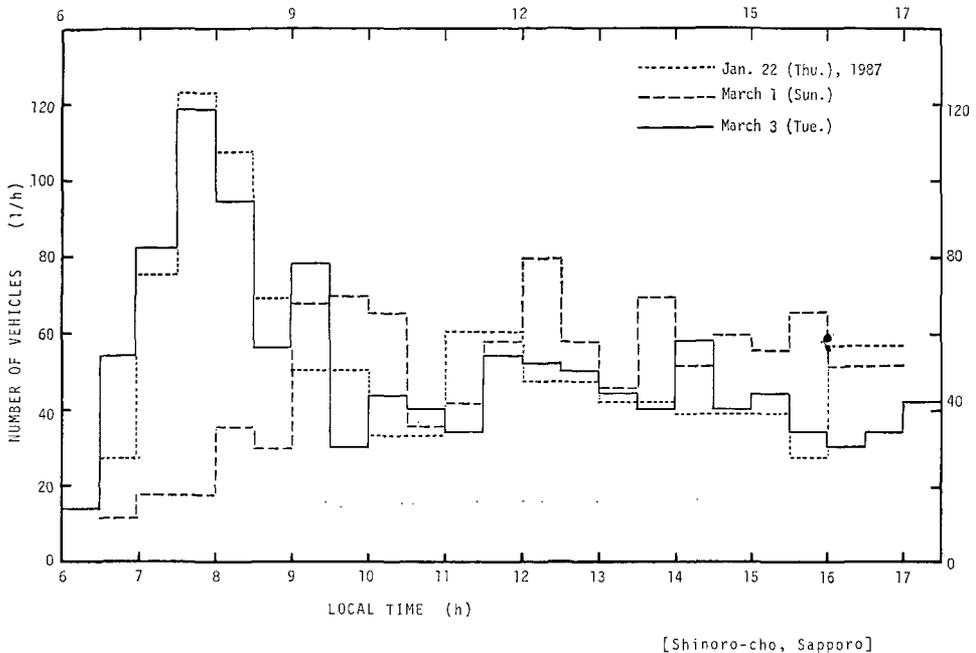
1. 交通量

篠路町の観測地点における上下線総交通量の測定結果から、1987年1月22日(木)、3月1日(日)、3月3日(火)の例を第2図に示す。なお、大型車が全車両に占める割合は日により5%から11%と少なかったため、車種の区別なくまとめて図示した。

2. 表面形態の変化

道路の横断方向に沿う雪氷表面形態の測定結果の内、代表的なプロファイルを図3図、第4図に示す。次節で述べる雪氷の諸性質と、石川・他⁸⁾による気象要素の観測結果等を考慮に入れて、第3、4図のプロファイル変化の特徴を次にまとめる。なお、雪質の名称については前野・他⁹⁾を参照されたい。

1) 「新雪→軟圧雪」変化(第3図A)



第2図 観測定点における交通量の時間変化 (1987年, 篠路町)

破線は1987年1月21日12時30分(篠路町)の路面である。早朝からかなり激しく雪が降り続いたため、路上には厚さ数cmの新雪が堆積している。表面の著しい起伏は、車両通過跡の軟圧雪部と、乱されていない新雪部による凹凸を表わしている。図の実線は、翌朝1月22日06時40分の路面を示す。この期間の積雪深変化は、主に新雪が圧密され軟らかい圧雪へ変化した過程を示すことができる。なお、横断線上2m地点にて積雪深が増加している部分が見られるが、これは削はくされた雪粒が別の場所に移動し再堆積した結果と考えられる。

2) 「乾き軟圧雪→乾き硬圧雪」変化 (第3図B)

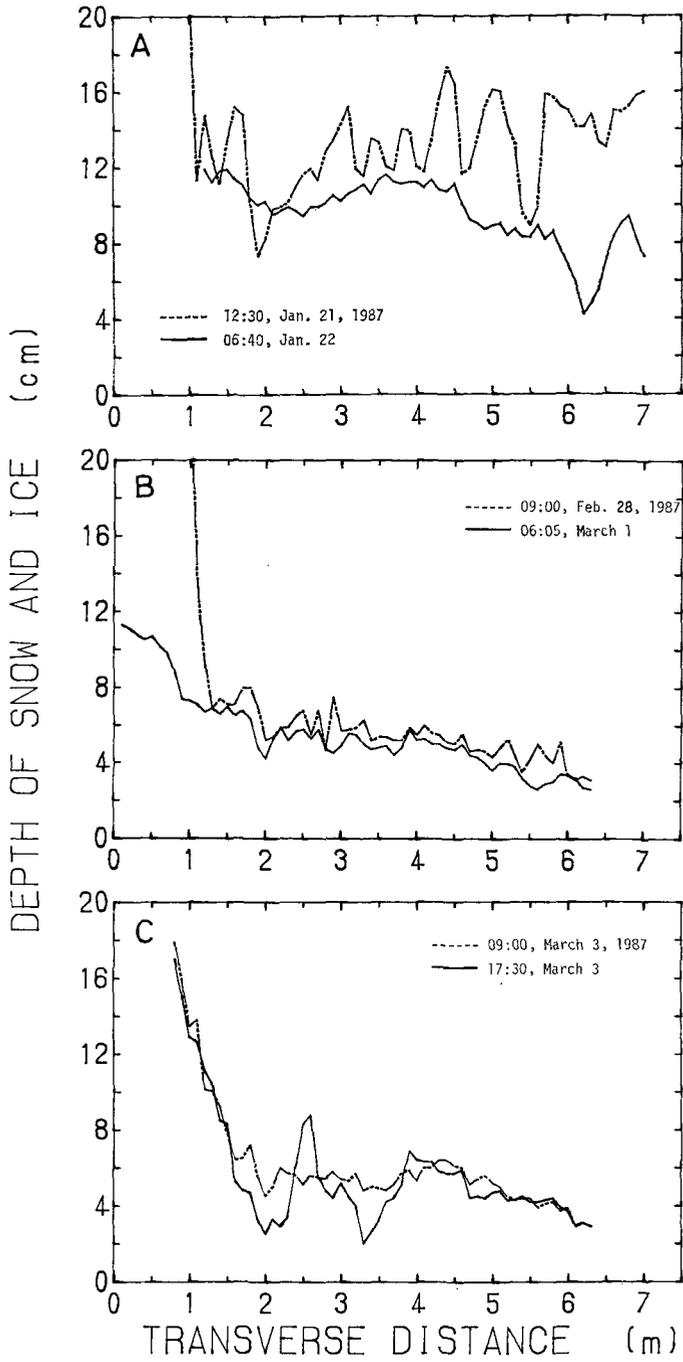
破線は1987年2月28日09時(篠路町)、実線は翌日3月1日06時05分の路面である。この期間には新積雪はほとんどなく、かつ雪温は常にマイナスであった(第7図参照)。したがって、乾いた軟らかい圧雪が次第に硬い圧雪へ変化した過程を示している。

3) 「乾き圧雪→濡れ圧雪・水べた雪」変化 (第3図C, 4図)

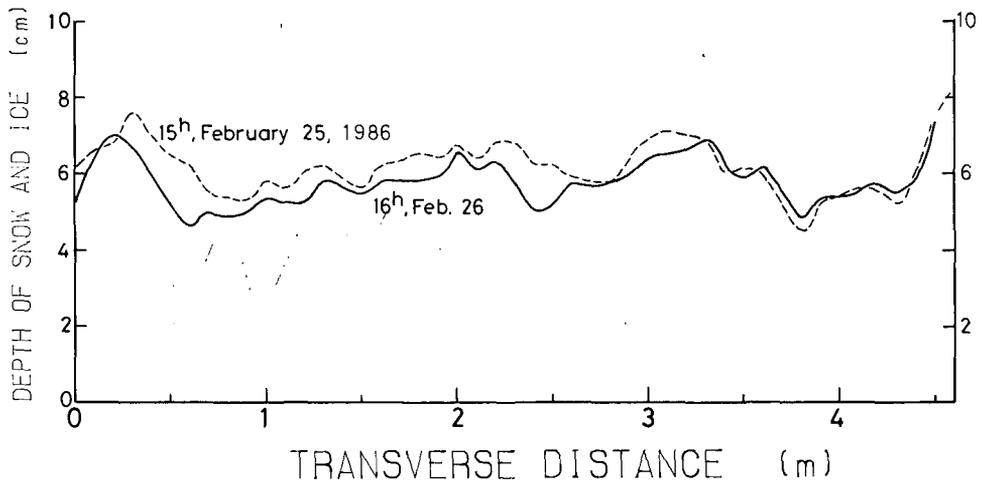
第3図Cの破線は1987年3月3日09時(篠路町)、実線は同日17時30分の路面である。3月3日11時頃から表面雪温は 0°C に達し、夕方にかけて融雪が著しく進んだ(第7図)。したがって、乾き圧雪が融雪進行とともに濡れ圧雪へ、またわだち部では水べた雪へ変化した過程を示している。なお、横断線上2.5mと4m付近にて積雪深が増加している部分は、削はくされた水べた雪が側方に再堆積した結果である。

第4図の破線は1986年2月25日15時(大麻沢町)、実線は翌日2月26日16時の路面である。この変化も、上述と同様に、乾き圧雪→濡れ圧雪・水べた雪過程を示している。

以上の内、1)および3)についてはIV章で改めて考察する。



第3図 雪氷路面の横断プロファイル (1987年, 篠路町)



第4図 雪氷路面の横断プロファイル (1986年, 大麻沢町)

3. 道路雪氷の諸性質の時間変化

1) 予備観測結果 (大麻沢町)

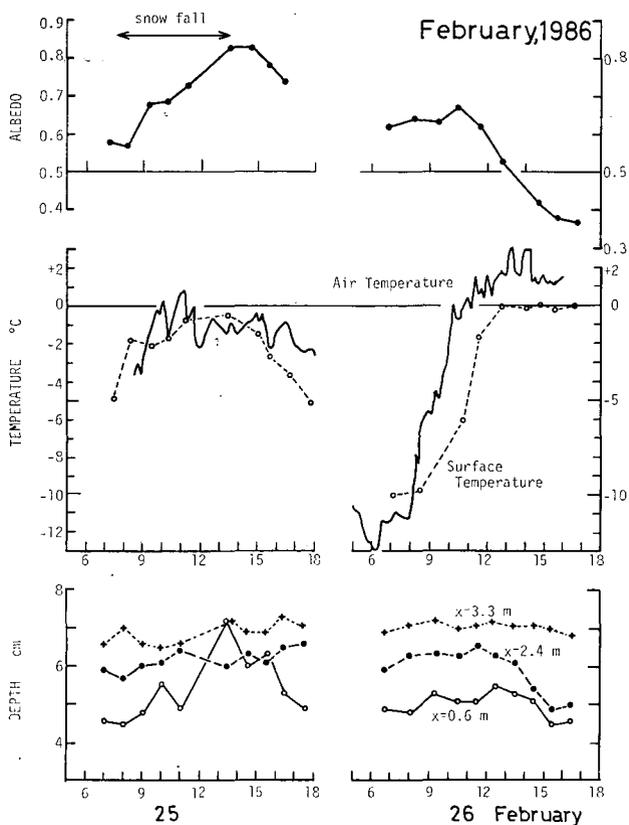
第5図に、1986年2月25日から26日にかけて雪氷路面のアルベド、表面雪温、気温、雪氷深の時間変化を示す。2月25日13時までは、間欠的に降雪と地ふぶきが発生した。同日は、終日路面温度はマイナスで、融雪は起こらず、雪氷深の時間変動は新積雪、圧密、削はくによる雪の移動の結果と考えられる。25日夜間から26日早朝にかけて、著しい放射冷却のため最低気温は -13°C まで低下した。その結果、26日午前中は表面温度はマイナスであったが、正午頃から融雪が盛んに生じた(第4図参照)。路面の平均アルベドは、降雪直後の0.83から、26日夕方には約0.35まで低下した。この現象は、車の走行による路面の汚染と雪氷面が濡れたことの結果である。融雪にともなうこのようなアルベドの低下が融雪を著しく加速させる効果については、石川・他⁸⁾により詳しく解析される。

2) 表面硬度

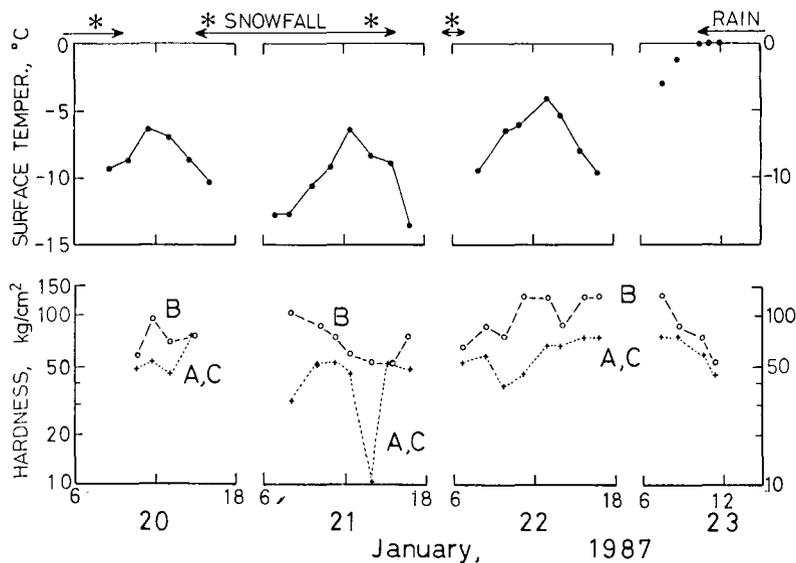
1987年1月20日から23日における、道路雪氷の表面温度および硬度の変化を第6図に示す(篠路町)。22日までは表面温度は -4°C 以下で融雪は起こらず、23日正午前から小雨が降り少し融雪が起こった。

表面硬度は場所による差異が大きい。測定点A, B, Cは道路東側端から道路中央にかけて選定した。B点の硬度が常にA, C点の硬度より大きい傾向を示したので、図にはA, C点の平均硬度をプロットした。20日, 21日はかなりの新積雪があったので、路面は比較的軟らかい圧雪となり、その硬度は一般に $30\sim 100\text{ kg/cm}^2$ と小さい値を示した。22日のB点は 100 kg/cm^2 を越える硬い圧雪となった。23日の朝から昼にかけて硬度の急激な低下は、雪温の上昇と融雪による含水の増加の結果と考えられる。

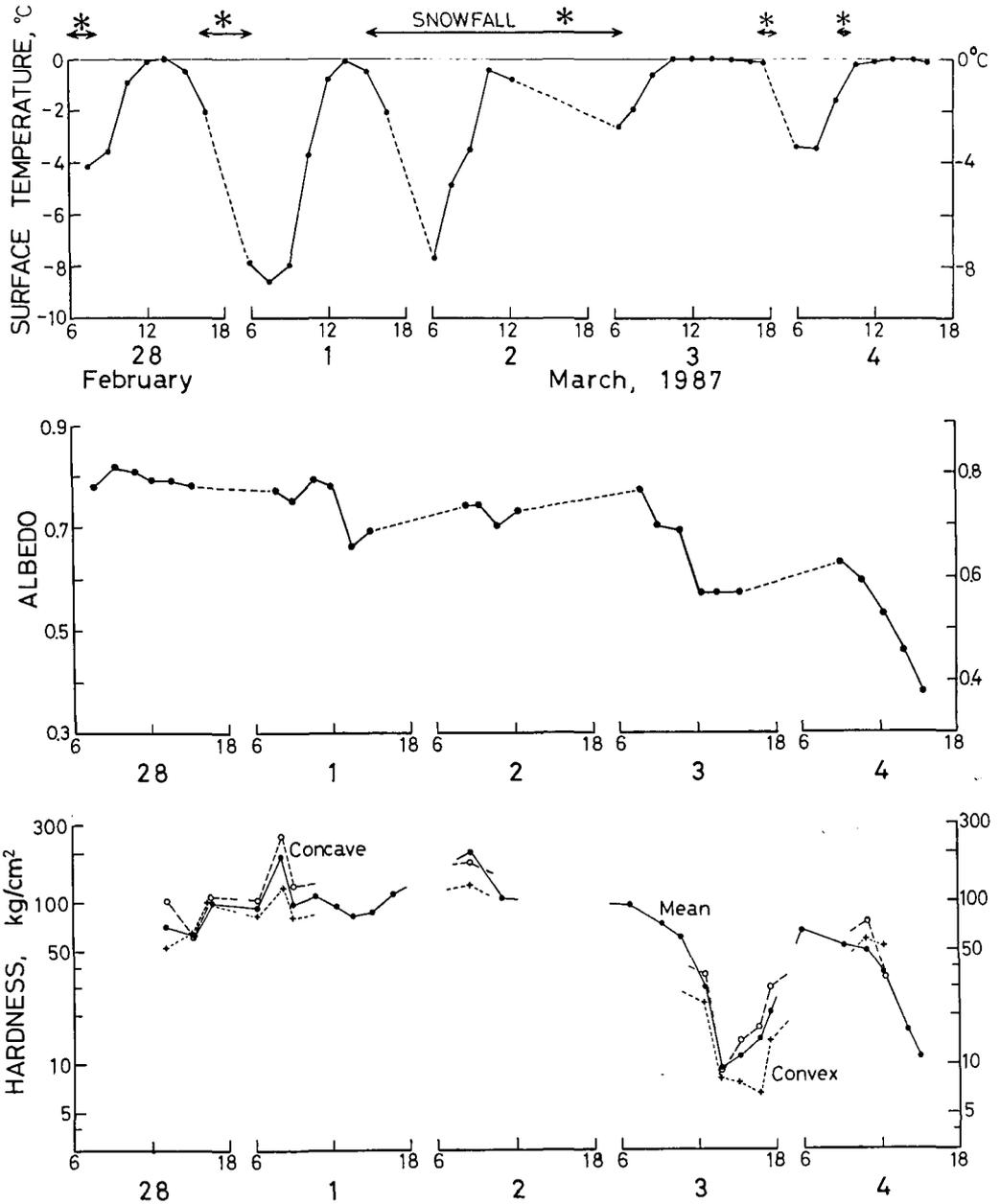
次に、2月28日から3月4日にかけての表面温度、アルベドおよび硬度の変化を第7図に示す。前半の3月2日までは雪温はマイナスで、路面の平均アルベドは0.66から0.82の範囲にあったが、3月3日の正午前から夕方まで、および4日午後には 0°C に達し、融解が進行する



第5図 雪氷路面のアルベド，気温，表面雪温，雪氷深の変化（1986年，大麻沢町）。雪氷深に付した X は，道路側端から横断方向の距離 ($X=2.4$ m 地点はわだち凹部)



第6図 道路雪氷の表面温度および硬度の変化（1987年1月，篠路町）
硬度測定点 A, B, C は，道路側端から中央にかけての地点



第7図 道路雪氷の表面温度，アルベド，および木下式硬度の変化
(1987年2~3月，篠路町)

アルベドは道路横断線に沿う平均値。硬度の○印 (concave) はわだち凹部，+印 (convex) は凸部，●印は道路横断線に沿う平均値を示す

のにもなって平均アルベドは 0.4 以下にまで低下した。2月28日から3月2日の期間は乾いた硬い圧雪状態で，硬度は 60~250 kg/cm² と大きい値を示した。さらに，雪温が 0°C 近くまで上昇する正午から午後には，硬度がやや低下する傾向が認められる。また，3月3日および4日の日中の著しい硬度低下が目される。これは，雪面で融解が生じ，圧雪の組織の結合が

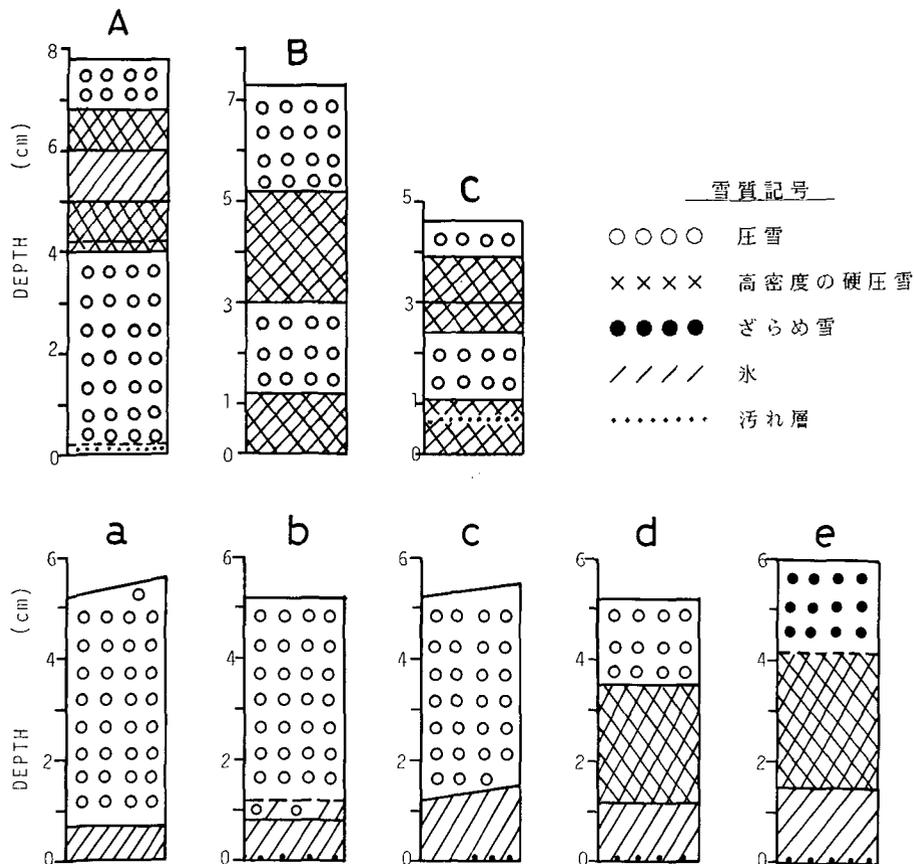
弱くなったためと判断できる。

第7図には、雪氷路面のわだち凹部の測定値を○印にて、凸部を+印にて、平坦部も含めた全測定の平均値を●印にて示してある。凹部の硬度が凸部より大きいという明瞭な傾向が認められた。これは、わだち凹部では車による荷重の繰り返しが多く、凸部に比べてより固く圧密されたためと考えられる。

3) 道路雪氷の構造と密度

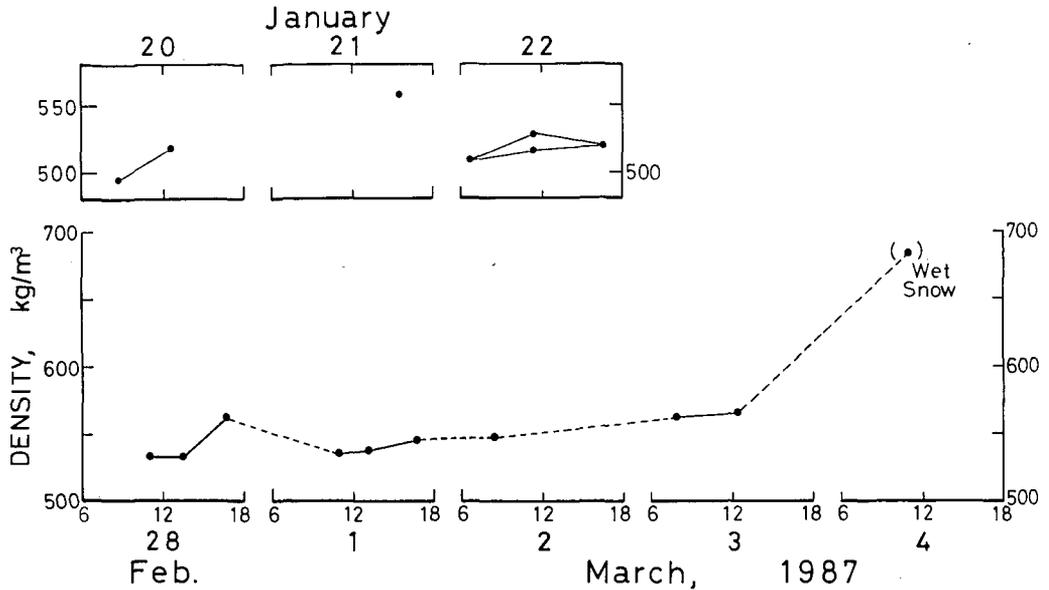
道路雪氷の柱状構造図の観察例を第8図(1986年2月, 大麻; 1987年2~3月, 篠路)に示した。図のAは道路上のほぼ平坦部, Bはわだちの凸部, Cは凹部である。道路雪氷は、このように場所と時間により著しく構造が異なることがわかる。なお、全層の平均密度は、A: 650, B: 690, C: 760 kg/m³であった。

第8図のa~eは、道路中央部のほぼ同一地点の雪氷構造である。aからcまでは融解現象が関与していない圧密過程だが、dとeは明らかに融解水の浸透により高密度の圧雪へ変化



第8図 道路雪氷の構造図

A: 1986年2月25日14時, B: 26日13時, C: 26日16時(大麻沢町)。a: 1987年2月28日13時30分, b: 3月1日13時20分, c: 2日8時30分, d: 3日15時20分, e: 4日15時30分(篠路町)。雪質記号の内、「高密度の硬圧雪」は融解浸透水の凍結によるもの、「ざらめ雪」は粒雪が水べた状になったものである



第9図 乾き圧雪の平均密度の変化 (1987年, 篠路町)

したものである。なお、高密度の硬圧雪と示した雪の密度は、640～790 kg/m³であった。

コアの解析から得られた乾き圧雪の平均密度の時間変化を、第9図 (1987年1月; 2～3月, 篠路) に示す。同図の結果から、乾いた圧雪の平均密度は500から560 kg/m³の範囲にあることがわかる。この値は、雪粒子の破壊や再配列により機械的に圧密される場合の極大密度にはほぼ等しい¹⁰⁾。北海道の厳冬期に積もる新雪の密度は、一般に約50 kg/m³以下であるが、道路上では車の走行により速やかに500 kg/m³程度の圧雪に変化することが明らかとなった。このことについては、次章で改めて考察する。

IV. 道路雪氷の質量収支的考察

1. 質量収支式

道路上の任意の点において、積雪 (あるいは氷) の表面から底面まで単位表面積をもつ雪氷柱の質量収支は、水平歪を無視できるので、次式にて表される。

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = P - M - E, \quad (1)$$

ただし、 h は雪氷深、 ρ は雪氷密度、 P 、 M および E は単位時間、単位面積あたりの質量で表した新積雪量 (降雪と吹きだまり)、融解量、および表面削はく量を示す。一般に、雪氷底面 (アスファルト面) における融解量と表面における昇華・蒸発量は無視できる程度に少ないので、 M は表面における融解量のみを考える。また、削はくされた雪粒が移動して再堆積したときは、 E をマイナスにとる。道路雪氷の密度は深さに関して著しく変動することが多いが (第8図参照)、ここでは全層平均密度とし、時間と場所のみの函数とする。(1)式から、

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = P - h \frac{\partial \rho}{\partial t} - M - E, \quad (2)$$

を得る。

道路雪氷では、右辺第二項の圧密量および第四項の削はく量が著しく大きいことが特徴的である。その結果、路上の雪氷深の時間変化 $\frac{\partial h}{\partial t}$ は、一般に自然積雪に比べて非常に大きく、さらに、面的に不均質な圧密、削はく、融雪が生ずると路面の起伏(わだち)が形成される。

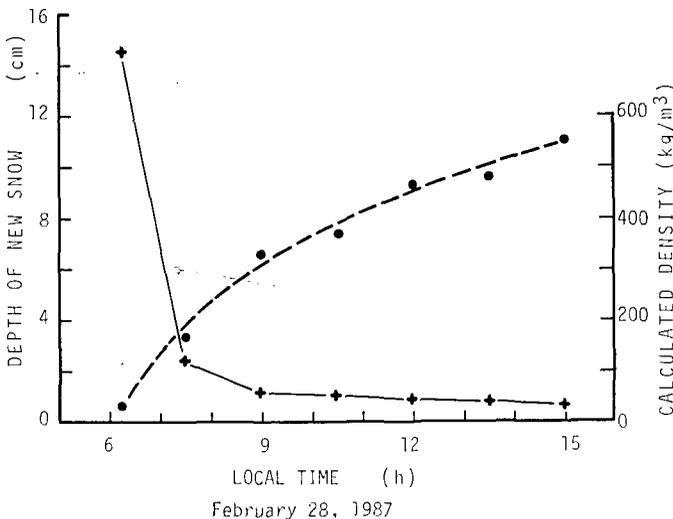
前章に述べた観測結果を用い、(2)式の各項の寄与と特性を次節で考察する。

2. 新雪の圧密過程

道路上の積雪深の測定結果をもとに、新雪が圧密される過程を解析する。例えば、第3図に見られるように、路上の10 cm 間隔の測定値は、場所による差異が大きい上に1~2 mm の測定誤差はさげられない。したがって、道路中央部の横断線上4 m 区間の40点の平均値をとりあつかう。

1987年2月27日夕方には、路上に平均4.2 cm の圧雪があった。その夜から28日早朝にかけて、平均14.5 cm の新雪が積もった。同日15時までの、4 m 区間の平均新雪深変化を、全雪氷深から旧圧雪深を差し引いて求め第10図に示す。なおこの期間、除雪車の走行はなく、新たな降雪もなかった。新雪は、1.5時間後には厚さ2.4 cm、3時間後には厚さ1 cm の圧雪へ変化した。いま、圧雪深が0.7 cm となった15時の密度を 550 kg/m^3 と仮定すると(第9図参照)、圧密される過程の新雪の密度が質量保存を考慮して計算で求められる。その結果を、第10図にあわせて示した。新雪が積もってから約4時間後に、平地の乾きしまり雪の上限密度 350 kg/m^3 (文献^{11,12)}を越えたことがわかる。また、この計算結果によると、06時15分の新雪初期密度は 30 kg/m^3 と見積もられた。08時45分に測定した、乱されていない新雪の密度は 40 kg/m^3 であったので、この計算結果はほぼ妥当であろう。

なお、同日は6時から15時まで上下線合わせて500台の車両が通過したが、これは約5 m



第10図 雪氷路面の新積雪深変化(+印)および計算により得られた新雪・圧雪の密度変化(●印)。

の区間を幅広く走行しているので、車両台数あたりの圧密の寄与は明らかにできない。ただし、車の通過頻度の多い道路のわだち部では、道路全体の平均値よりはるかに短時間の内に圧密が進行しているものと考えられる（前野・他⁹⁾ 参照）。

3. 削はく・再堆積と融解過程

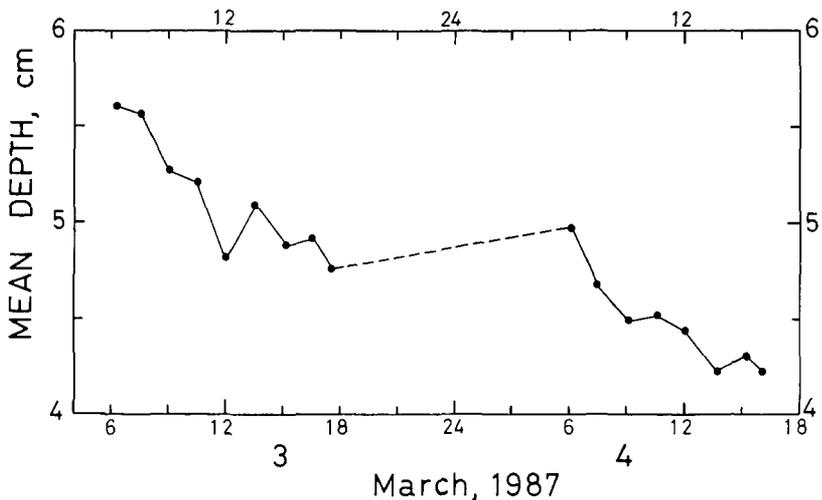
前節と同様に、道路中央の4 m 区間の平均雪氷深をとりあつかう。第11図に、1987年3月3日朝から4日の夕方にかけての平均雪氷深変化を示す。3月3日早朝には、すでに圧雪平均密度は 550 kg/m^3 に達していた（第9図参照）ので、両日の雪氷深変化には圧密の寄与はほとんどないと見なし得る。また、3日夕と4日午前中に少量の降雪があったが、雪氷深変化に大きな影響を与える量ではない。

したがって、第11図に見られる雪氷深の減少傾向は削はく（再堆積）と融解によるものと考えられる（式(2)参照）。以下に、雪氷深測定結果をもとに、融解量を見積もる試みを行う。

車により削はくされた雪粒は、側方に押しやられたり、飛散したり、あるいは車に一時付着してどこかで路上に落下する。このような雪が再堆積する場所は確率的にランダムであるとみなすと、削はく雪はすぐ側方に堆積すると考えてもよい。すなわち、道路の横断線に沿う道路雪氷の総質量は、削はくおよび再堆積現象によっては不変であると仮定する（仮定①）。削はくされる雪の密度は乾き圧雪の値 550 kg/m^3 とし（第9図参照）、再堆積する雪の乾き密度をここでは 350 kg/m^3 と仮定する（仮定②）。融解速度は道路上一般とする（仮定③）。

以上のモデルを模式的に第12図に示す。 t_1 時の雪氷路面の起伏を実線で表す。凹部の+印部分は、 Δt 時間内に削はくされた雪、凸部の+印部分は同時間内に堆積した雪を示す。また、斜線部分は同時間内に融解により消失した雪を示す。これらの結果、 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 時に表面起伏は破線のように変化する。

道路の横断線に沿い10 cm 毎に、 Δt 時間の雪氷深の増加または減少の値をそれぞれ積算し、上記①、②、③の仮定を用いると融解量 M が求められる。



第11図 道路横断線に沿う平均雪氷深の変化（篠路町）

その結果、融解が盛んに起こっていた3月3日10時30分から15時の間に 3.2 kg/m^2 の融解が生じたことになる。これを単位時間あたりの融雪熱量に換算すると $0.24 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h}$ となる。

道路表面雪の詳しい密度と含水率の測定を行っていないので、仮定②における乾き密度の推定値によって計算結果は異なる。再堆積雪の密度を 400 kg/m^3 とすると融雪熱量は $0.21 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h}$ となり、密度を 300 kg/m^3 とすると $0.26 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h}$ が得られる。一方、道路上の熱収支結果の残差項として見積もられた同日の昼間の融雪熱量⁸⁾は約 $0.24 \sim 0.28 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h}$ であった。

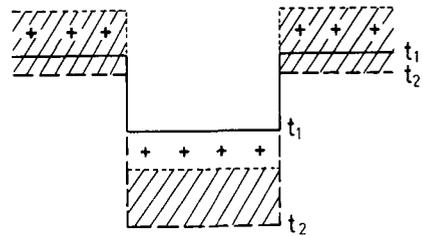
道路雪氷の消耗量や熱収支の測定には、それぞれ様々な要素の誤差を含んでおり、さらに本計算には大きな仮定を設けているため、消耗量から求めた融雪熱量と熱収支から求めた融雪熱量との詳しい比較検討はできない。ただし、融雪過程における雪氷深変化から削はく・再堆積量を分離し、融雪量を見積もることが可能なことをここでは示した。なお、3月4日の日中は削はくされる雪が著しく水を含んだ水べた雪となり、仮定②における妥当な乾き密度を与えることが困難なため、融雪量の算出はできない。

V. おわりに

1986年および1987年冬期における野外定点調査の結果、道路雪氷の消耗過程の特性について得られた主な成果を以下にまとめる。

- 1) 道路上に積もった新雪は、車の走行により速やかに圧密され圧雪に変化する。融解・再凍結過程を経ない乾き圧雪の密度は、 $500 \sim 550 \text{ kg/m}^3$ 程度である。
- 2) 表面から浸透した融解水の再凍結により、道路雪氷内部には高密度 ($600 \sim 800 \text{ kg/m}^3$) の硬い圧雪や氷板がしばしば形成される。その構造は道路上の凹凸等により著しく異なる。
- 3) 圧雪の表面硬度は自然積雪に比べて非常に大きい、とくにわだち凹部の硬度は凸部より顕著に大きい。しかし、融解が始まると硬度は急速に低下し、その結果、雪氷面の削はくが著しく進む。
- 4) 道路上の雪氷深の時間変化には、新雪では圧密と削はく・再堆積の寄与が、融解時の雪では、削はく・再堆積と融解量の寄与が大きい。これらの現象の局所的相違により雪氷路面の凹凸化が進行するが、道路上の広領域の総質量の消耗には融解のみを考えればよい。

別報⁸⁾でも述べられているように、道路雪氷上の気象要素による熱および車(タイヤ、排気熱)からの伝達熱の収支の結果、雪氷面が 0°C に達し融解が始まると、アルベドは著しく低下し、さらに融雪が加速される。圧雪が水を含むようになると硬度が低下し、削はくが進行し、わだち凹部では速やかにアスファルト面が透視または露出する。このような状態になると道路表面の吸収熱は著しく増し、消雪へ向かう。したがって、道路雪氷の消耗、消失過程は、自然積雪のそれと比べて、一般には著しく速やかに進行することが特徴的である。



第12図 道路上のわだちの断面模式図
削はく・再堆積と融解により、雪氷路面は t_1 から t_2 に変化する

謝 辞

本調査・研究をすすめるにあたって、低温科学研究所の西村浩一氏、成田英器氏、植松泰子さん、北大理学研究科大学院生村上茂樹君、小杉健二君、Gino Casassa 君、竹井巖君（現在金沢大学研究生）、海老沼孝郎君（現在日本鋼管株式会社）から多大な協力を得た。記して感謝の意を表します。なお、本研究に要した費用の一部は文部省科学研究費補助金（課題番号 61460169：代表、前野紀一）より支弁された。

文 献

- 1) 畠山惇史・門山保彦・佐々木泰比古 1983 雪氷路面での車両の発進、制動について。土木試験所月報, No. 367, 2-19.
- 2) 畠山惇史・門山保彦・佐々木泰比古 1984 路面状態とすべりまさつ係数。土木試験所報告, No. 84, 1-33.
- 3) 加来照俊・佐藤清二・中辻 隆・藤原隆・小野寺雄輝 1984 わだち部における車両の挙動に関する研究。北大工学部研究報告, 118号, 81-92.
- 4) Harrison, W. L. 1981 Shallow snow model for predicting vehicle performance. *CRREL Report* 81-20, 1-21.
- 5) Harrison, W. L. 1985 Tire performance evaluation for shallow snow and ice. *CRREL Special Report* 85-15, 59-65.
- 6) 木下誠一・秋田谷英次 1969 北海道における路面積雪調査 I—路面積雪分類試案—。低温科学, 物理篇, 27, 163-179.
- 7) 木下誠一・秋田谷英次・田沼邦雄 1970 道路上の雪氷の調査 II。低温科学, 物理篇, 28, 311-323.
- 8) 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, 物理篇, 46, 151-162.
- 9) 前野紀一・成田英器・西村浩一・成瀬廉二 1987 道路雪氷の構造と新分類。低温科学, 物理篇, 46, 119-133.
- 10) 前野紀一 1986 雪の構造の形成と破壊。雪氷, 48巻, 2号, 99-102.
- 11) 秋田谷英次・遠藤八十一 1982 北海道内平地における積雪特性。昭和54-56年度北海道大学特定研究経費研究成果報告書。1-17.
- 12) 成瀬廉二・山田知充・秋田谷英次 1985 石狩平野の積雪分布(1983, 1984, 1985年)。昭和57-59年度北海道大学特定研究経費研究成果報告書。105-112

Summary

Characteristics of an ablation process of snow and ice on roads were studied in the suburbs of Sapporo, Hokkaido, in midwinters and early springs of 1986 and 1987. At every 1 or 2 hours in the daytime during each observation period, measurements were made on roads as to the surface profile of snow and ice, surface albedo, Kinosita's hardness, surface and air temperature, and traffics (for meteorological parameters, see Ishikawa and others, 1987). Structure and bulk density were also measured on core samples.

The mass balance of snow and ice on roads can be expressed by

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = P - h \frac{\partial \rho}{\partial t} - M - E,$$

where h and ρ are the thickness and the depth-mean density of snow and ice, P the amount of precipitation, M the amount of melting and E the amount of erosion (a negative sign for the deposition of eroded snow). We call here both M and E the ablation of snow and ice.

Main results obtained with respect to the mass balance and the change in properties of snow and ice during the ablation process are summarized as follows:

1) Dry new-snow transforms quickly within several hours into dry compacted-snow of $500 \sim 550 \text{ kg/m}^3$ in density.

2) Ice-crust or hard compacted-snow of high density ($600 \sim 800 \text{ kg/m}^3$) is formed in the subsurface layer after refreezing of the meltwater; the structure varies considerably with the surface undulation.

3) Surface hardness shows a larger value at the concave surface than at the convex surface on roads. However, when melting starts, the hardness remarkably decreases so that the erosion process becomes large in degree.

4) To the thickness change $\frac{\partial h}{\partial t}$, contribution of the densification $\frac{h}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t}$ and the erosion (and the deposition) E of snow is predominant during the condition of dry new-snow; whereas, that of the melting M and the erosion-deposition E is predominant during snow melting. These phenomena result in the development of an irregularly undulating snow surface.

Melting of snow causes a decrease in surface albedo and hardness, which highly accelerates the ablation rate of snow and ice. Therefore, the ablation proceeds much rapidly on roads than on a natural snow surface.