

土木研究所資料

第1306号

雪寒対策調査(1)

昭和52年12月

建設省土木研究所

はじめに

この調査は、道路交通障害の一つである凍結・圧雪の諸特性を解明し道路管理の合理的かつ、経済的な手法を確立するための基礎資料を得ることを目的とし、北陸地方建設局の依頼により昭和49年度～51年度の3ヶ年間にわたって下記の項目について実施し、その結果をまとめたものである。

なお、凍・圧雪は気象条件、交通量、地形等の多くの要因に左右されることから、その解明にはこれらの諸要因の組合せによる数多くのデータが必要となるが、今回の調査では短期間であるため十分なデータが収集できず、必ずしも完全なものとはなっていない。したがって、ここでは主として凍・圧雪の熱収支の基本的な考え方と試験、調査結果から凍・圧雪特性の一般的傾向について考察を加えさらにすべり特性から見た凍・圧雪の工学的分類試案についてまとめたものである。

- 1) 凍・圧雪の発生特性に関する調査
- 2) 凍・圧雪の工学特性に関する調査
- 3) 凍・圧雪の工学的分類手法の検討(すべり特性から見た凍・圧雪分類)

新潟試験所

所長 青木 忠男

研究員 下村 忠一

” 石平 貞夫

金子 英雄

(併任) 榎 彦二郎

(現、北陸地建・高田工事事務所)

〔雪寒対策調査(1)〕

目 次

	ページ
〔凍・圧雪特性に関する調査〕	1
1. 概 説	1
2. 凍・圧雪発生の基本となる考え方	1
2-1 凍・圧雪の発生と熱的環境の概念	1
2-2 凍・圧雪の発生に関する基本式	2
2-2-1 放射熱収支	3
2-2-2 大気伝達熱収支	5
2-2-3 搬送熱収支	6
2-2-4 伝導熱収支(地熱)	7
2-2-5 車両の放熱	7
2-2-6 凍・圧雪発生への寄与	7
3. 凍・圧雪に関する現地調査	8
3-1 調査地点の概況	8
3-2 調査方法	9
3-3 調査結果の概要	9
3-3-1 藤沢地区の降雪特性	9
4. 凍・圧雪特性に関する解析	12
4-1 凍・圧雪の出現頻度	12
4-1-1 時刻別の降雪状況と圧雪の発生状況	12
4-1-2 凍・圧雪の種類別発生頻度	13
4-2 圧雪の持続時間	14
4-3 凍・圧雪の発生と気象因子との相関	15
4-4 累降雪深と交通量による圧雪深の関係	16
4-5 圧雪の発生限界	17
4-6 熱収支から見た凍・圧雪の発生形態	19
4-6-1 積算寒度による凍・圧雪の検討	19
4-6-2 熱収支量による凍・圧雪の検討	21
5. まとめおよび問題点	22
〔凍・圧雪の工学特性に関する調査〕	23
1. 概 説	23
2. 調査方法	24
2-1 凍・圧雪の物理特性	24

2-2 凍・圧雪のすべりに関する試験	24
3. 調査結果および考察	25
3-1 現地圧雪の工学特性	25
3-1-1 概況	25
3-1-2 凍・圧雪の種類と硬度分布	29
3-1-3 圧雪の硬度と気温・交通量との関係	29
3-2 室内試験による圧雪の工学特性	32
3-2-1 圧密した雪の密度と硬度変化	32
3-2-2 温度低下による圧雪の硬度特性	33
3-3 凍・圧雪のすべり特性	34
〔室内試験〕	34
3-3-1 静止摩擦試験	34
3-3-2 動摩擦試験（発進時のすべり摩擦試験）	36
1) かわき圧雪によるすべり試験	36
2) 含水圧雪のすべり試験	40
3) 氷板によるすべり試験	41
〔屋外すべり試験〕	42
3-3-3 発進すべり抵抗試験	43
3-3-4 制動時のすべり試験	43
4. まとめおよび問題点	44
〔凍・圧雪の工学的分類に関する検討〕	49
1. 現在の凍・圧雪分類の考え方	49
2. 現状の凍・圧雪分類手法の問題点	50
2-1 凍・圧雪の発生状況から見た場合の問題点	50
2-2 凍・圧雪の工学特性から見た場合の問題点	51
3. 凍・圧雪のすべり特性から見た工学的分類試案	52
〔冬期間における交通の管理・運用に関する考え方〕	57
1. 凍・圧雪の発進時のすべり特性について	57
1-1 発進摩擦係数の簡便式および図	57
1-2 すべり摩擦係数と発進勾配	59
1-2-1 限界発進勾配	59
1-2-2 加速性と発進特性	60
1-3 積雪道路の縦断勾配長に関する検討（試算）	62
2. 凍・圧雪の発生および工学特性から見た自動車の安全性について	67
3. 除雪、薬剤散布の時期等に関する考察	68
おわりに	69
参考文献	70

[凍・圧雪特性に関する調査]

1. 概 説

交通量の多い道路に積った雪は除雪する間もなく、車輛によって踏み固められ種々の凍結・圧雪に変化する。一般に、路面に積った雪の量は70~80%が圧雪として路面に残留すると言われているが、この残留した雪は、路面の外部と内部からの受熱、放熱のいかんにより凍・圧雪の発生から消長まで路面の熱収支の問題として取扱われる。もちろん、その消長や質の変化は熱収支の他に交通量、気温、および降雪量等が関与することは当然である。

このように、路面上に発生する凍・圧雪の発生機構は非常に複雑であると同時にその種類も多く性質も大きく異なる。したがって、その解明は難しく各方向で調査研究が進められてはいるが、まだ、十分な結論を得るまでに至っていないのが現状である。

今回の調査は、このような現状から現地観測を主体とした凍・圧雪の発生パターンや物的特性等の解明を目的とし実施したものである。

2. 凍・圧雪発生の基本的な考え方

2-1. 凍・圧雪の発生と熱的環境の概念

道路表面に、凍結、圧雪が発生する場合の熱的条件としては、表1-1のようなことが考えられる。

つまり、路面温度がプラスで、地中からの供給熱量より降雪が融解するための熱量を差し引いた残りの熱量、あるいはそれに気象熱収支量を加えた熱量が、融雪水の蒸発熱量を上まわれればかわき路面を保ち、蒸発熱量に満たなければ、しめり、または、ぬれ路面(表のa型)となり、路面に雪は残らず無雪時の道路と変りなくなる。

気象熱収支量がマイナスでも、その絶対値が上記の残余熱量よりも小さく、融雪熱量よりも大きければ表のb型となり、路面はしめり、ぬれの状態で雪はない。

また、c型は気象熱収支量がマイナスで絶対値が残余熱量より大の場合で、この時は路面に雪が残り、その多少によってシャーベット状、スノージャム状、しめり、ぬれ圧雪、また

は、ザクレ雪となる。気象条件によ
って、さらに放熱量を増せば積雪は
表層から凍結し、半凍結状態のしめ
りザクレ雪となるが、これは車輛に
よって破壊される。冷却が進むにつ
れ、かわきザクレ雪（人工のかわき
ザラメ雪）となり、粘結性のない砂
状の雪質となる。

次は、路面温度がマイナスの場合
であるが、気象熱収支量がプラスの
d型では上記の残余熱がマイナスで、
その絶対値が気象熱収支量よりも小さい場合であり、その差の程度によってe型と同様の路
面積雪あるいは、圧雪となる。

e型は残余熱がマイナスで、その絶対値がプラスの気象熱収支量に等しいか、または大き
い時であり、凍結状態の圧雪となる。

f型は、いずれの項もマイナスの場合で、融解する条件が全くないので凍結・圧雪となる。

以上、極端な高温や低温を除いて、普通に発生する路面積雪や圧雪と熱的環境の關係につい
て概念的な考え方を述べたものであるが、いずれにしても路面が無雪であるか、ジャム状な
どの積雪を残すか、圧雪状態となるかは基本的には表1-1のような熱収支条件によって決ま
るものと考えられる。圧雪発生状態の時は、雪の降り方と交通量に比例して圧雪の成長が促
進されるであろう。

上記の熱的環境と路面状態は気象、降雪、交通の条件によって左右され、それが時間的に
定常ではない。ある状態が続いて、その後環境が変れば積雪や圧雪の状態が変わり、そこに雪
層の変化が生じて圧雪などの成層化が促される。圧雪表面の融解水が浸透し、停滞して凍結
すれば氷板を形成し、また、路面の水分が晴天時の放射冷却などにより冷却過程に入り凍結す
れば氷膜が発達することとなる。

2-2. 凍・圧雪の発生に関する基本式

路面積雪、凍・圧雪の発生や成長は前項で記したように路面の内部と外部の熱的環境のバ
ランスに降雪量
と交通量から
んでいる。
この路面表面
における熱収支

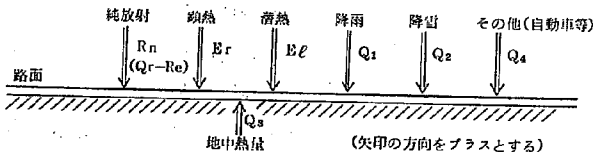


図1-1 路面における熱収支の模式図

型	路面 温度	外部熱源		内部熱源		路面状態
		気象熱収支量		供給地熱量から降雪融解熱量を差引いた残余熱量		
a	+	+	≧	+		雪なし かわきしめりぬれ
b		-	≦	+		
c		-	>	+		シートベルト状 ジャム状の しめりザクレ しめり圧雪 かわきザクレ
d	-	+	>	-		凍結・ 圧雪
e		+	≦	-		
f		-	≧	-		

表1-1 路面積雪・圧雪の発生と熱的環境

を横式図で示すと図1-1の通りである。この図に示した方向(矢印)の熱量(+)とすると路面表層に蓄えられる蓄熱量(M)は次式によって与えられる。

$$M = Q_r + R_o + E_r + E_l + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Q_r = 吸収短波放射量

R_o = 有効長波放射量

この蓄熱量(M)は路体の表層のその時点の温度に影響される熱量であり、凍・圧雪が発生するかしないかは、Mが負(-)か正(+)かで決まるものである。

ここで言う外部熱源としての熱収支項は、放射熱、大気伝達熱、降水による搬送熱、および車輦による熱交換があり、内部熱源としては、路体内部からの地温による伝導熱が考えられる。

このようなことから、内外部の熱源と路面積雪との間の受熱、放熱の際の熱収支項の概要とその観測方法についてふれてみる。

2-2-1. 放射熱収支

太陽放射のうち0.3~3.0ミクロンの短波長は日射量(R_s)として路面、雪面に受熱作用を与えるが、そのうち実際に路面、雪面が獲得する熱量 Q_r は

$$Q_r = R_s (1 - \alpha) \dots\dots\dots (2)$$

である。 α はその面の短波長反射率で、雪面では0.9~0.5程度であり、したがって Q_r には日射の一部だけとなる。これに対し湿路面の α は0.2~0.3で雪面の場合と逆に日射の大部分を吸収する。日射量の観測は普通のガラスドームつきの日射計で測られる。しかし、 α を求めるためには日射の反射量を別に測定する必要があり、また同一面でも α は雲の状態で散乱光の割合が変わって変化する。それで、 Q_r を知るには直接に日射吸収量(上向き、下向きの日射量の差)を測定した方が合理的である。

雪面や路面がマイナスの低温の時でも、より低温な天空に向かってその面から、長波長の放射として放熱して面の冷却作用として働いている。波長の3.0ミクロン以上の近赤外、赤外線であるこの長波放射を有効放射(R_o)、または、夜間放射と呼んでいる。これは、夜間に限らず日中も放射しているが、日中は日射の差引きとなるので測り難い。この R_o の中には面と大気との間の大気放射量も含まれているが、 R_o の直接測定が困難なので、今まで数多くの R_o の推定式が提示されてきた。これらの式には大気の水蒸気圧の項を必要とし、少なくとも湿度の観測値がなければ算出できない。その方法として、面附近の温度の項も入れて考えた場合のBudykoの式を次に示す。

$$R_e = \sigma T^4 (a - b\sqrt{e \cdot c}) + 4 \sigma T^3 (\theta_s - \theta_a) \dots\dots\dots(3)$$

- e : 百葉箱内の水蒸気圧 mb
- σ : ボルツマン常数
- T : 気温の絶対温度
- θ_s, θ_a : 面の温度と気温で
- a, b, c は係数でそれぞれ 0.39, 0.058, 0.75

Budykoの式では晴天の場合、気温 $-5 \sim +10^\circ\text{C}$ 、雪面温度 0°C 、湿度 $50 \sim 100\%$ の範囲では R_e は $-5.5 \sim 12.1 \text{ cal/cm}^2/\text{hr}$ となる。乾燥した晴れた夜では $80 \sim 170 \text{ cal/cm}^2$ の放熱となる。これを氷の厚さにすれば $1 \sim 2 \text{ cm}$ となり、この放射冷却だけで結氷することになる。この R_e の推定式は晴天時のものであり、実際は曇量や曇高によって補正しなければならない。

以上は個々のものについての考え方を述べたが、路面の放射収支量として必要となるものは、次の純放射量 (R_n) である。

$$R_n = R_s (1 - \alpha) - R_e \dots\dots\dots(4)$$

すなわち、太陽放射の波長は $0.3 \sim 3.0$ ミクロンに範囲するが、大気や地球からの放射は $3 \sim 60$ ミクロンを持っている。したがって、 $0.3 \sim 60$ ミクロンの広い範囲の波長の放射エネルギーを測定することはかなり難しい。したがって、 $R_s(1 - \alpha)$ と R_e を測定するにはやっかいな問題がある。しかし、純放射量 (R_n) を直接測定するには純放射計があり、これを用いて一応測定できる。これには、ポリエチレンドームをつけた示差放射計や通風放射計等がある。

以上を補って、純放射量 (R_n) を直接測定するには純放射計があり、これを用いて一応測定できる。これには、ポリエチレンドームをつけた示差放射計や通風放射計等がある。

以上の放射熱量の各項の日変化の様子の参考例を図 1-2 に示す。積雪のある日中の日射 (R_s) が相当に強くても、その吸収量 (R_a) は図のように少なく、さらに日中でも有効放射 (R_e) が差引かれるので純放射 (R_n) としての受熱量は雪面では僅かなものとなる。

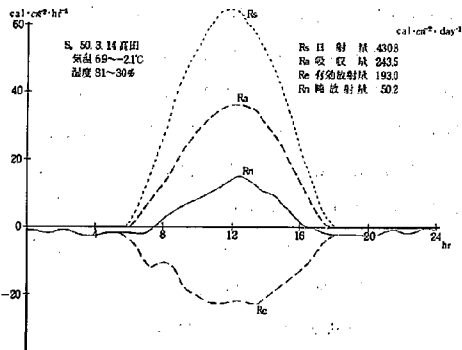
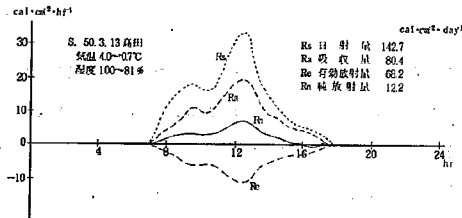


図 1-2 放射熱収支の日変化

2-2-2. 大気伝達熱収支

大気の温度による顕熱収支や、大気中の水蒸気による潜熱収支は大気の乱流拡散によって、路面や雪面と熱交換が行われ、面は受熱あるいは放熱の過程となる。

気温による顕熱伝達熱収支 (E_r) は顕熱伝達係数 h に比例して、

$$E_r = h (\theta_a - \theta_s) \dots\dots\dots (5)$$

となる。 θ_a, θ_s は気温と面の温度である。 $(\theta_a - \theta_s)$ がプラスであれば面は受熱過程となり昇温する。 θ_s が雪面温度で 0°C であればこの受熱量は融雪熱として消費される。 $(\theta_a - \theta_s)$ がマイナスであれば凍結あるいは、冷却効果を示す。

暖かい大気が雪面などの低温の面に接すれば、大気中の水蒸気が面に露を結び、その時凝結潜熱 (597 cal/g) を放出して雪面であれば融雪を促し、路面では昇温させる。 0°C 以下の場合でも気温よりも面が低温の時には水蒸気は、面に直接に昇華して霜を結び昇華潜熱 (677 cal/g) を放出する。上の逆の条件では蒸発や逆の昇華 (固体-気体) の過程をとり、面から蒸発熱などを奪って面を冷却させる。

潜熱伝達量 (E_l) は、伝達係数を (K) とすれば顕熱伝達と同じ型をとると考え、

$$E_l = K (e_a - e_s) \dots\dots\dots (6)$$

として表わされる。 e_a は大気の水蒸気圧、 e_s は雪面や路面温度に対する飽和水蒸気圧である。前記のように ($e_a - e_s$) がプラスであれば凝結過程となり、雪面では融雪熱となる。気温の高い春さきの雪面でよくこの現象が現れる。上と逆に気温も雪面温度の低い時は蒸発や昇華の過程をとり冷却される。冬期寒冷時の雪面はこの状態が続く。

上記の顕熱伝達係数 h は、面の粗度や観測器の面上の高さがわかれば、ほぼ風速によって決まる係数として次式で得られる。

$$h = C_p \cdot \rho \cdot K^2 \cdot U_a / \{ \ln(a/Z_0) \cdot \ln(b/Z_0) \} \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^2/\text{sec}/^\circ\text{C} \dots\dots\dots (7)$$

C_p : 空気の定圧比熱 (= 0.2399 cal/g $^\circ\text{C}$)

ρ : 空気の密度 (一気圧当り 0.00129 g/cm 3)

K : カルマン常数 (= 0.41)

Z_0 : 面の粗度 (= 0.05 ~ 0.25/cm)

U_a : 面上 a の高さの風速 (m/sec)

a, b : 風速計及び、温度、湿度計の面上の高さ (m)

大気が中立状態の場合には、 h は風速に比例するものとしてよい。潜熱伝達も顕熱と同じ輸送形式をとるものとして、蒸発、凝結潜熱 = 597 cal/g, 昇華潜熱 677 cal/g とし、蒸発、凝結の場合の伝達係数を K_e , 昇華の場合の係数を K_s とすれば、

$$K_c = 1.74 \text{ h}$$

$$K_s = 1.53 \text{ h}$$

として示され、風速の関数となり、また、気圧変化にも関係するが、ここでは省略する。

2-2-3. 搬送熱収支

降雪、降雨は路面積雪の原料となるほかに熱量を搬送する役割もあり、面の温度と異なる降水は面の熱収支に関与する。しかし、極端な暖雨は融雪作用が認められるが、一般には降水による搬送熱量は他の項の熱量と比較して小さいので、ここでは無視し、特別の場合以外は考慮しないことにする。ただ、前項の凝結潜熱が降雨時には湿度が多くなり、このために面が受熱することに注意しなければならない。冬期の降雨のもつ熱量は微々たるものであるが、圧雪の変質をうながす点に注目する必要がある。なお、この時の基本式は一般に次のように表わされる。

① 降雨による熱量 (Q_1)

$$Q_1 = 0.1 \rho_w c_w (t_r - 0.1) \cdot r \quad (\text{cal/cm}^2 \cdot \text{h}) \quad (8)$$

ρ_w : 水の密度 ($\approx 1 \text{ g/cm}^3$)

c_w : 水の比熱 ($\approx 1 \text{ cal/g} \cdot \text{C}$)

t_r : 雨水の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

r : 降雨強度 (mm/hr)

路面温度は 0.1°C に保たれていると仮定する。

上式に $r = 10 \text{ (mm/hr)}$ 、 $t_r = 3^{\circ}\text{C}$ と仮定して代入すると、

$$Q_1 = 2.9 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{h} \text{ となる。}$$

② 降雪による熱量 (Q_2)

降雪時には、以上の熱量のほか、降雪によって直接路体に熱が与えられる(または奪われる)。これは、降雪の温度を 0°C まで上昇させるに要する熱量 Q_u と、降雪を融かすに要する熱量 Q_m とに分けるため、 $Q_2 = Q_u + Q_m$ となる。この Q_u および Q_m は、それぞれ次のようにして計算する。

$$Q_u = S_f \cdot r_s \cdot C \cdot |t_s| \quad (9)$$

$$Q_m = J \cdot S_f \cdot r_s \quad (10)$$

S_f : 降雪量 cm/h

r_s : 雪の密度 $\approx 0.1 \text{ g/cm}^3$

C : 雪の比熱 $\approx 0.5 \text{ cal/g} \cdot \text{C}$

t_s : 雪温 $^{\circ}\text{C}$

J : 雪の融解潜熱 $\approx 80 \text{ cal/g}$

2-2-4. 伝導熱収支(地熱)

路面の温度は路面内部の熱源である地熱によって補給維持される。無雪時に蓄積保存された地熱が、秋から冬にかけて深部の熱源から路体に伝導熱として路面に輸送される。この場合、路体を構成する地中の水蒸気拡散による熱輸送もあるが、ここではこの熱も含めて伝導熱として取扱うことにする。

地温による伝導熱量(Q_s)は、次式から路体の垂直温度勾配と路体の熱伝導率によって求められるが、

$$Q_s = -K \frac{\partial T_s}{\partial Z} \Big|_{Z=0} \quad \text{cal/cm} \cdot \text{h} \quad \dots \dots \dots \text{ (11)}$$

K : 路体の熱伝導率

アスファルト : $1.8 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{C}$

コンクリート : $2.78 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{C}$

T_s : 路温, 地温 C

Z : 地中への深さ cm

路面近くの温度勾配は路面における熱消費の多少によって変動する。自然積雪地の地表面温度はほぼ0℃で、地表に対する熱補給は積雪初期から終期に向って、単調に減少の過程をたどり、温度勾配には経日変化が認められないほどである。融雪水が地中に激しく浸透する日だけ僅かに温度勾配が乱れるだけである。これに反し、道路ではその機能を維持するため除雪が頻繁に行われ、路面が露出する機会が多い。従って、気象条件によって外部から受熱したり放熱したりするので路面附近の温度勾配の変動が激しく、地熱による伝導熱量の変化が時間的に変り、路面の熱収支関係を複雑なものにしている。

2-2-5. 車輛の放熱(Q_4)

走行中の車輛は発熱状態にあり、特に路面の近くにあつて一部路面と接しているタイヤは路面の積雪に対して熱源として考えられる。走行中のタイヤ温度は、気温-6℃のとき20℃に達した実測例があり、そしてタイヤの昇温は車輛の速度に比例的に高温となり、また、圧雪面が硬いほど高温になるようである(1970木下)⁽¹⁾。

この熱源と路面、雪面との熱交換がどのような型式をとるかは不明であるが、路面の積雪の変質のためにこの熱量が与えられているのではないかと言われ、交通量の多い時は一つの熱収支項として考えられるオーダーになると考えられる。

2-2-6. 凍・圧雪発生への寄与

路面の熱収支に関与する項目は、上記のように多くあるが、冬期の気象因子と関連して、凍・圧雪の発生活長への寄与度が異なる。

放射熱収支については、前述のように、日射量が直ちに寄与するわけではなく、日射吸収量より長波放射量を差引いたものが放射熱流として路面に与えられるわけである。路面が汚

れていない圧雪で覆われている状態では、雪面放射熱収支の実測（1973，大沼ら）⁽²⁾によれば日射量が 400 cal/cm/day 程度にならなければ放射熱流はプラスとならない。純放射量の測定値も冬期雪面では、 $-5.0 \sim +5.0 \text{ cal/cm/day}$ の範囲で、マイナスが大部分で $0 \sim -0.5$ に集中している。

大気伝達の顕熱量は、実測例では $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ の気温で $\pm 0.5 \text{ cal/cm/hr}$ で、潜熱量は冬期の気温が $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下では雪面蒸発が起り冷却作用として働き、実例では $-0.8 \sim -1.6 \text{ cal/cm/hr}$ のオーダーであり、これら大気伝達熱は風速によって大きく変化する。

輸送熱は一般に小さく放射、伝達熱に比較すればオーダーを異にする。しかし、雨としての降水は凍・圧雪の変質に影響する所が大きい。

路面からの伝導熱は、道路表面とその下層の温度勾配に比例的であり、自然積雪下では雪層は受熱過程で過ぎるが、除雪が頻繁に行われる路面は日中高温、夜間低温にさらされる機会が多いので凍・圧雪への伝導熱の授受の方向とその量に変化がある。

以上の熱的環境からみて、放射、伝達、伝導の熱収支によって、路面積雪の残存や凍・圧雪の発生がおこり、これにタイヤによる圧密が関与する。熱収支項を気象因子によって代替させ、その発生と気象因子との関係を次項で統計的に取扱うことにする。

3. 凍・圧雪に関する現地調査

3-1. 調査地点の概況

調査の対象となった国道18号線藤沢パーキングは直江津から22km地点で、標高は150mの所にある。この地区は国道18号線で最も雪が多いと言われる直江津から野尻湖間（45km）の中間にあり気象現象の変局点でもある。一方、降雪パターンから見ると山雪型と里雪型の両方を有するため、比較的降雪回数も多い。気温は冬期間を通じ最低で $-6 \text{ }^\circ\text{C}$ 前後、平均値で $+0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度であり比較的気温は高い。したがって、降雪量が多いこともあり路面表面で圧雪になるケースが多く凍結になることは比較的少ない。また、交通量は積雪寒冷地特有の現象で以前は有雪期と無雪期とではかなりの差が見られたが、その差もだんだん縮小され現在では冬期で平均 4,500 台/日程度となっている。

一方、時間帯別では、日中が最も多く、夜間、特に午前1時～5時頃までは非常に少なくして10台/h程度になることがある。これのほとんどは、大型トラックで占めている。このようにこの地区は積雪地域の中でも非常に雪が多く、また他の地区に比べ冬期間交通量も多い所であり、都市と結ぶ重要な路線の一つとなっている。

3-2. 調査方法

この調査は、写真1-1に見るように、藤沢パーキングの国道脇に設けられた計測小屋に表1-2に示すような計測器類を設置し、それぞれの測定を行なった。測定期間は、昭和49年度を初年度とし51年度の冬期までの測定を行なったものである。

また、測定時間は気温、路温、日射、風向風速については連続測定とし、路面状況、降雪状況は8mm自動撮影装置により10分間隔で撮影する方式をとった。

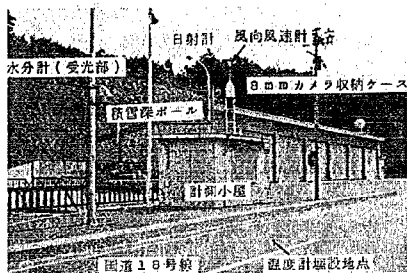


写真1-1 観測施設(藤沢除雪ステーション)

機 器 名	仕 様
風 向 風 速 計	プロペラ型自記風向風速計(測定範囲: 2 m ~ 60 m 16方位)
日 射 計	太陽電池による
温 度 計	熱電対銅コンスタンタン(気温、路温共) 路温の埋設深さ……地表より -1, -5, -20, -50 cm
8 mm カメラ	エルモ自動撮影装置 (10分に1枚撮影可能) (積雪深・路面状況を同時撮影)

表1-2 機器の諸元

3-3. 調査結果の概要

3-3-1. 藤沢地区の降雪特性

雪が降る要因としては、上層気象の気圧配置、風の流れ、雪雲の大きさ等が大ききものとしてあげられるが、局地的には地上の気象、あるいは地形条件に大きく左右される。今回の調査では、後者について考察を加えたものであり、以下、その概況を述べる。

(A) 降雪状況

図1-3は、月別の気温と降雪回数の関係を示したものである。これによると、各月ともほぼ正規分布に近似した形を示しており、降雪時の温度範囲は-4℃から+4℃の範囲とな

った。すなわち、降雪になる気温は $+4^{\circ}\text{C}$ が限界値となり $+2^{\circ}\text{C}$ 以上では全体の4%以内と非常に少ない値を示した。月別の降雪頻度を見ると、そのほとんどが平均気温の時に最大値を示した。すなわち、平均気温前後に降雪回数が最も多く全体で見ると平均気温 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の時の降雪回数が75%も占めていることがわかった。また、この時の時間降雪深別出現頻度および日降雪状況を図1-4に示す。

これによると1時間降雪の出現頻度、すなわち、1時間に降る雪の深さは4cm以下が圧倒的に多く全体の79%を示し、6cm以下は96%を占めている。一方、1日の降雪量(1~3月までの値)について見ると10cm以下が68%を占め、比較的少ないことを示している。

また、今回の調査には、51年1月に1週間降り続いた豪雪のデータも入っているが、全体として日降雪量は少ない。これは1月以後の降雪が例年に比べ非常に少なかったことによるものと思われる。したがって、50年度の大雪が降ったケースは例外に属し、一般的には雪雲が上空に停滞し断続的に降るのではなく連続的に降るものと考えられる。

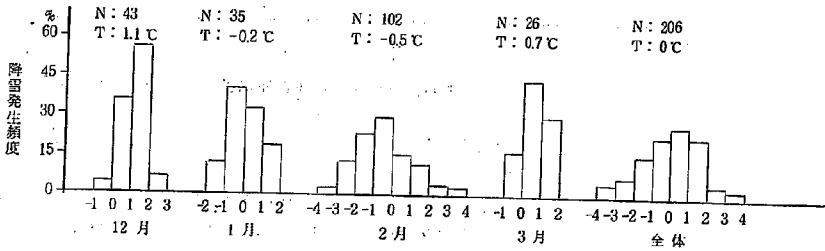


図1-3 藤沢地区の気温と降雪頻度 (N: 回数の合計, T: 月平均気温)

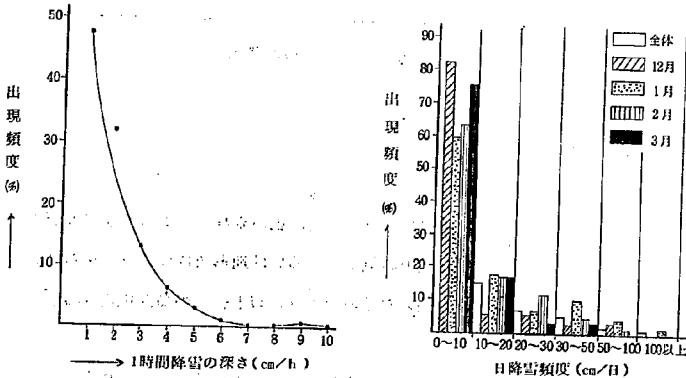


図1-4 藤沢地区における時間降雪および日降雪の頻度分布

(B) 降雪時の風向と風速

降雪時の風向は上層気象は別として、平地部、山間部、あるいは海岸、近傍の山の高さ等局所的地形によってそれぞれ異なるものである。また、この地区では風向は雪の降りはじめに大きな関連を有し、雪害対策上、重要な要因の一つである。この藤沢地区は、ちょうど海岸から吹き上げた風が山と山の谷間を通して、長野県境の山々（妙高山等）にぶつかるケースが非常に多い。また、この風が妙高山等に突き当たって海岸の方へ吹き降ろされる。いわゆる「妙高おろし」と称する風もあるが、これは秋から冬の初めに多く発生するが、冬期間は比較的少ない。

図1-5は、49年度と50年度の2冬期間の各天候別の風向を示したものである。これによると、雪の場合は前述のとおり海岸から山側に吹き付ける北東からの風が主体となり、全体の68%を占め、東西の風、つまり妙高降ろしと称するものが17%となっている。一方、晴もしくは曇りの場合には、この逆の傾向を示し、雨の場合は、北東、南西とだいたい同じような結果となっている。

一方、大雪が降る時には風はほとんどなく、“音もなくしんしんと降り続く”と言われているが今回の調査では、図1-6に示すように、比較的少なく1~3 m/secの風が最も多い結果となり、最大で8 m/sec（全体の0.3%）である。また、降雪強度別に見ると、データ数が少ないこともあり結論を得るまでには至

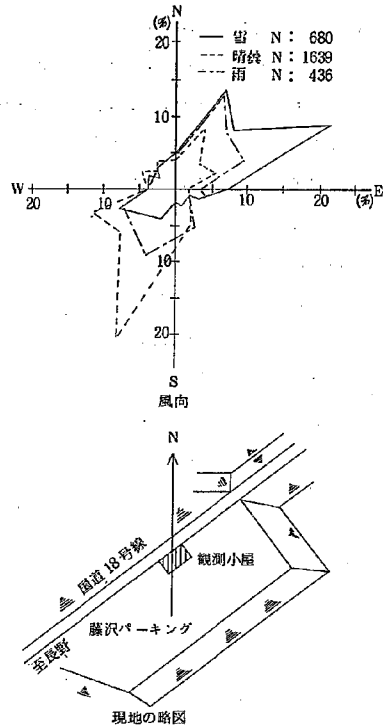


図1-5 藤沢パーキングにおける風向

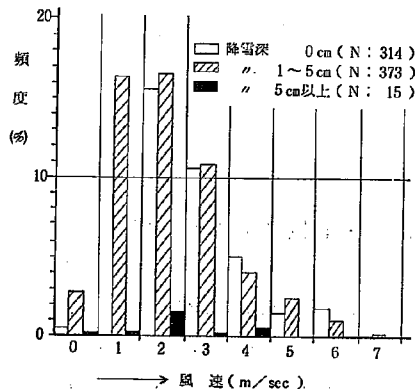


図1-6 階級別降雪深と風速の関係

っていないが、その傾向としては降雪量が多い時は風速も小さい。

(C) 降雪密度と気温の関係

降雪密度は、落下高さ（結晶の相異による）、上層気温等に大きな影響をうけると言われる。また、降雪密度の大小は、雪の散り方、あるいは積った雪の重さ、変形の変合により大きく異なるものであり雪害対策の面でもその手法が異なるものである。一般に降雪密度は、 $0.03 \text{ g/cm}^3 \sim 0.15 \text{ g/cm}^3$ の範囲で記録されており、その差は非常に大きい。密度の小さいものは北海道のように気温が低い地方で記録されたものであり、大きいものはだいたい北陸地方のものである。

この調査では、藤沢地区と言う比較的気温が高い地区の温度条件（ $-3^\circ\text{C} \sim +1^\circ\text{C}$ ）のものであり、その結果は図1-7に示すとおりである。これによると気温が -1°C 以下の場合には $0.05 \text{ g/cm}^3 \sim 0.09 \text{ g/cm}^3$ の範囲にあり、高温になるにつれ降雪密度も上がり大きいもので 0.14 g/cm^3 程度が記録された。このように気温の上昇に伴って密度が高い値を示すことは、気温の低い北海道の場合にはサ

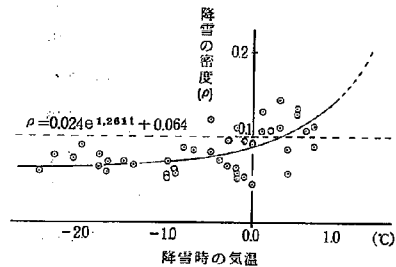


図1-7 降雪時の平均気温と降雪の密度

ラサラした軽い雪であるのに対し、比較的気温が高い北陸地方の場合、バタバタした重い雪が多くなる原因の一つであると言えよう。なお、この時の回帰方程式は、

$$\rho = 0.024e^{1.281t} + 0.064 \dots\dots\dots (2)$$

ρ : 降雪密度 (g/cm^3)

t : 気温 ($^\circ\text{C}$)

で表わされる。

4. 凍・圧雪特性に関する解析

4-1. 凍・圧雪の出現頻度

4-1-1. 時刻別の降雪状況と圧雪の発生状況

図1-8は、時間別別の降雪状況と圧雪の発生状況を示したものである。なお、図中の温度は時間ごとの冬期間（12月～3月）の平均気温を示したものである。

これによると降雪は夜間に集中し、中でも朝方(3時~7時)に最も多く降ることを示している。一方、圧雪については、この降雪パターンと同じような分布を示していることがわかった(この時の降雪回数と圧雪発生回数の相関は79%と高い値を示した)。図中、点で囲んだ部分はザラメ圧雪(ジャムに近い圧雪)を示しているが、これは気温の高い日中、および夕

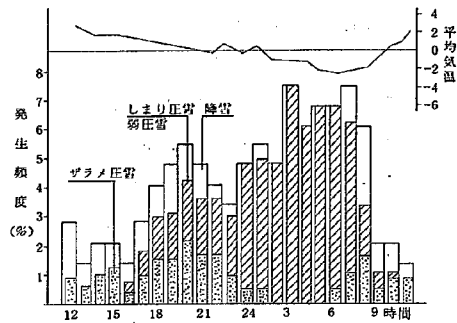


図1-8 時間帯別降雪、圧雪の発生頻度

方に最も多く発生し、しまり雪は夜間の気温が低下した時間に最も多くなっている。いけるならば、この地区では夜間、特に朝方が降雪回数も多く、圧雪発生率も高いため最も注意が必要と言える。

一方、凍結については、この地区では比較的気温が高いこともあって非常に少なかった(圧雪発生回数との比は、1.5%程度)。したがって、ここでは図表を省略するが、その傾向としては、発生時間帯は圧雪の発生時間帯と異なり、夜間23時ごろから朝方の3時ごろが最も多くなっている。これは、日中の気温上昇等に伴って融雪水が路面に発生し、これが夜間の気温低下によって凍結するものと思われる。

4-1-2. 凍・圧雪の種類別発生頻度

凍・圧雪の発生は、既述の通り気象、交通量等の要因に大きく左右される。したがって、その種類も異なることから、表1-3に示すような凍・圧雪の種類別による出現状況についてまとめて見た。

これによると、この藤沢地区は図1-8にも示したように気温が比較的高いことから、降雪があっても大部分が弱圧雪かジャム状の雪であり、凍結となるケースは全体の1.5%と非常に少ない結果となっている。

(単位:時間)

種類 月別	ジャム	弱圧雪	圧雪	凍結	合計	比率 (%)
12月*	105	10	22	15	152	12.0
1月	89	92	132	3	316	25.0
2月	338	96	224	0	658	52.0
3月*	102	11	25	0	138	11.0
合計	634	209	403	18	1,264	100.0
比率(%)	50.1	16.6	31.8	1.5	100.0	

*1部に欠測あり

表1-3 各種の凍・圧雪の出現時間数
(49年~51年の12月~3月のものである)

(注: 弱圧雪と圧雪の判別は、目視によるもので圧雪の表面に水分があり、比較的軟い圧雪を弱圧雪と言い、硬い乾いたものを圧雪とした。)

一方、月別に見ると、一部欠測はあったが、1月、2月が最も多く全体の77%を占めていた。

また、図1-8のデータを用い弱圧雪と、圧雪の昼夜の出現状況について見ると表1-4に示すように、弱圧雪の発生は半分半分であるのに対し、圧雪は大部分が夜間に発生していることがわかった。これは、図1-8でも示したように夜間は気温が低くなること、交通量が少ないためと言えよう。

(単位：時間)

種類 昼夜別	弱圧雪		圧雪	
	昼	夜	昼	夜
12月	10	0	8	14
1月	35	57	27	105
2月	56	40	70	154
3月	4	7	1	24
小計	105	104	106	297
合計	209		403	
比率(%)	50.2	49.8	26.0	7.4

表1-4 弱圧雪・圧雪の昼夜出現時間数
(日射が0の時を夜とした)

4-2. 圧雪の持続時間

圧雪がどれだけ持続するかは、気温、降雪量、降雪パターン、交通量等によって大きく異なるものである。

図1-9は、年度別による圧雪持続時間の相対度数を示したものである。

この図に示すように、1~2時間という圧雪帯が最も多く全体の28%、1時間以下が19%、

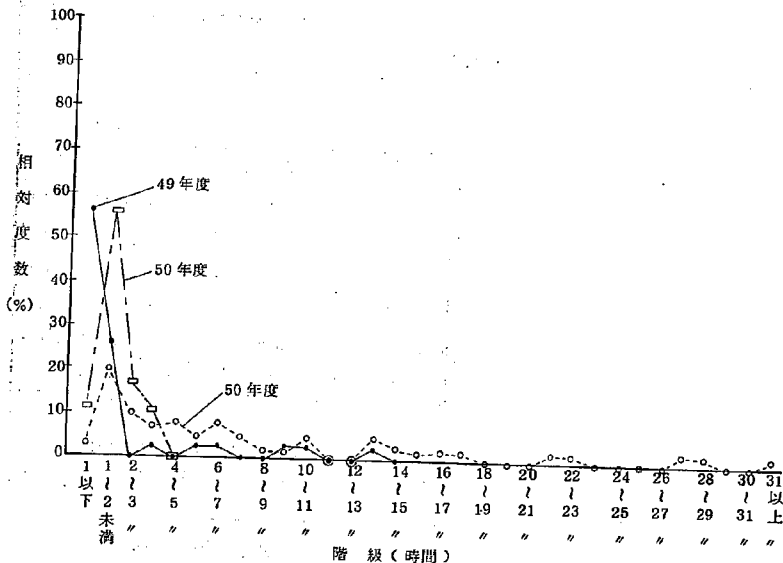


図1-9 圧雪持続時間の相対度数分布

2~3時間が8%という値を示している。また、持続時間の大きいものとしては27時間以上が5回観測されている。これは、異常降雪時の3日とか4日も降り続いた時のものであり、一般的には、1~3時間程度が最も多く、長くても夕方6時ごろから数時間降り続き圧雪となり朝方の8~10時ごろ(持続時間がせいぜい14時間程度)には、融解するケースと言えよう。

4-3. 凍・圧雪の発生と気象因子との相関

凍・圧雪の発生は熱収支論が基本となるが、既往の気象資料では熱収支を論ずるに不足する点があるので、ここでは、今までに実測された路面の定点気象観測調査資料をもとにして凍・圧雪等の発生条件、あるいは持続と気象因子との関係についてまとめた。この時の観測項目は次のとおりである。

天気概況、積雪深、時間降雪量、降雪密度、圧雪の種類、圧雪硬度、圧雪温度、圧雪重量、圧雪密度、圧雪の深さ、路面水分、日射量、風速、風向、雪温、路体温湿度5点、交通量(車種、チェーンの有無)、純放射量(但し高田)

————— 使用した項目

----- 参考にした項目

次に路面状態を“圧雪の種類”の項

目は、次の6種類に分類整理した。

乾路、湿路、シャーベット状(水ベタ)、ジャム状、弱圧雪、圧雪(凍結、ザラメも含む)

また、気象条件を路面熱収支および圧雪と相関の高いものとして次の2項目を選定し、項目毎の各段階の出現回数分布をとり、各路面状態を呈した時の気象限界を考察した。

- ・気 温：大気伝達熱量の変化の目安として時間毎の観測値を示した。
- ・降雪深：時間毎の降雪の深さで圧雪の発生持続時間に関係あるものとして選んだ。

以上の2項目から凍・圧雪の出現状況についてまとめると、表1-5となる。

路面積雪・圧雪の状態		乾		湿		シャーベット状	ジャム状	弱し 圧め 雪り	圧凍 雪結
		路	路	路	路				
気 温	>5.0	2	0	0	0	0	0	0	0
	5.0~2.0	8	17	10	5	0	11		
	2.0~1.0	7	10	13	19	2	16		
	1.0~0.5	3	3	6	22	6	25		
	0.5~0.0	7	0	7	17	7	27		
℃	0.0~-0.5	4	2	0	20	8	42		
	-0.5~-1.0	0	4	3	10	9	36		
	-1.0~-2.0	0	3	7	10	13	76		
	-2.0~-5.0	0	1	1	20	5	80		
	合 計	31	40	47	123	50	313		
0℃以上%		87	75	77					
0℃以下%					49	70	75		
降 雪 深 cm/hr	6.0	0	0	0	6	2	33		
	6.0~3.1	0	0	0	18	6	65		
	3.0~1.1	0	4	3	26	20	82		
	1.0~0.6	0	0	4	10	10	23		
	0.5~0.3	0	2	5	14	1	13		
	0.2~0.0	0	3	4	7	0	10		
合 計	24	29	28	29	7	93			
1cm/hr以下%		100	89	85					
1cm/hr以上%					50	61	56		

表1-5 路面状態と気象条件の関係

この結果から凍・圧雪の発生状況について考察すると次のようなことが言える。

- ① 気温については0℃以下では70%以上が圧雪、弱圧雪となる。
- ② 0℃以上で圧雪、弱圧雪と観測されているのは圧雪、弱圧雪の衰退期に起る現象と思われる。
- ③ 降雪深については、当然のことであるが、降雪の多い時はジャム～圧雪となる割合が多い。
- ④ 時間降雪深の1cm以上が265回あるが、そのうちジャムか圧雪となる割合は97%で圧雪となるのは70%である。

一方、純放射（昭和50年1月～51年3月までの7回のデータ）と凍・圧雪の出現状況についてみると表1-6に示すように、路面に雪がある時（シャベット状から圧雪の状態）は零かそれ以下がほとんどである。

以上、凍・圧雪発生と主な気象要因について述べた。しかし、実際にはこの他に路面表面温度、風速、日射、および交通量（次項で概略を述べる）等の多くの要因があるが、データ不足であり、今回は概略的な傾向をみるにとどめた。

路面積雪・圧雪の状態		乾	湿	シキ	ジャ	弱し	圧凍
		路	路	ベ	ム	圧	雪
		路	路	ット	状	雪	結
純放射量 cal cm ⁻² hr ⁻¹	>5.0	3	1	0	0	0	0
	5.0～2.0	2	5	4	0	0	0
	2.0～1.0	2	4	0	0	0	0
	1.0～0.5	0	0	0	0	0	0
	0.5～0.0	0	3	0	3	0	0
	0.0	1	6	2	23	7	47
	0.0～-0.5	1	5	1	16	6	25
-0.5～-1.0	2	3	1	3	0	7	
-1.0～-2.0	10	0	0	1	0	3	
-2.0～-5.0	1	0	0	1	1	1	
合計		22	27	4	47	14	83
0以上%		32	48				
0以下%				50	94	100	100

表1-6 路面状態と純放射量の関係

4-4. 累降雪深と交通量による圧雪深の関係

既述のとおり、路面上に雪が積ると、これが自動車によって圧密され、圧雪となる。この圧雪は、降雪量、交通量、あるいは気温等によって深さも雪質も異なるものである。この圧雪深とか質等の検知は、検知機器がまだ開発されていないことから非常に難しい。したがって、除雪車の出動に際しては、目視によるか、積雪深計（ある限られた場所に設置したもの）から路面の圧雪深を概略的に知る、いわゆる経験的な手法がとられているため十分な除雪体制がひかれているとは言えない現状である。

このような現状から、ここでは、圧雪深を大きく左右する累降雪深、気温、交通量についての相互関係を調べ、さらに、この予測式について検討を行なった。表1-7は藤沢パーキングおよび試験所の構内における圧雪深と各要因との相関を示したものである。なお、構内におい

場所	要因	累降雪深	気温	交通量
藤沢ステーション		0.68	0.19	0.11
構内		0.95	0.04	—

表1-7 圧雪深と各要因との相関

ては、転圧回数（24回/h）および輪重（250 kg）を一定としたため、表1-7では交通量の項は除いた。

これによると累降雪深（圧雪になる時からの積算降雪量）は、圧雪深とかなりの高相関を示し、特に構内においては95%と非常に高い結果となった。これに対し、気温、交通量は非常に低い値となった。いかえるならば、累降雪深を検知することによってかなり高い精度で圧雪深を予測することができるものと言えよう。また、藤沢が構内の相関より低くなった原因としては、除雪、薬剤散布等が多く行われたことと、交通量の影響が定量的に把握できなかったためと思われる。

一方、図1-10は、表1-7の結果を基に重回帰式による累降雪深、気温と圧雪深との関係を示したものである。なお、この図では、既述のように交通量の相関が非常に低かったため、ここでは省略した。これによると藤沢と構内とは、多少違う傾向を示したが、これは前述のように除雪、および薬剤散布等の影響によるものと思われる。

また、それぞれの圧縮比（圧雪深÷累降雪深）について見ると気温が0℃の場合、構内では0.13、現地では0.093となった。つまり、降雪深が10.0cmあった場合、圧雪深は構内で1.3cm、現地では0.93cmになる

ことを示している。この差は、藤沢と構内とは転圧方法等が異なるためと考えられる。

気温の影響については、表1-7に示したようにかなり相関が低いことから十分な結論を得るまでに至っていないが、この重回帰式から見ると気温が低下すると多少圧雪深が増大することがわかった。なお、この重回帰式は、5%水準で有意であった。

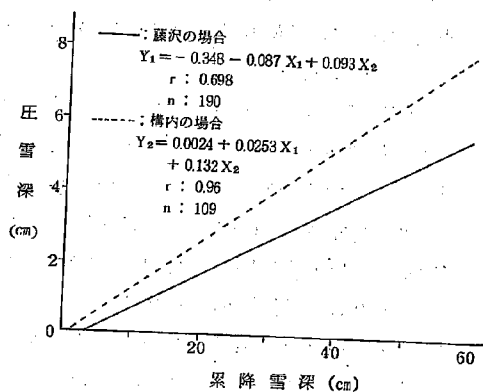


図1-10 気温0℃における累降雪深と圧雪深の関係
(X₁: 気温, X₂: 累降雪深)

4-5. 圧雪の発生限界

路面に積った雪が圧雪になるか、どうかは、既述のように路面表面温度、気温、交通量に大きく左右される。たとえば、新雪が、自動車のタイヤによって転圧され圧雪となるのであるが、気温、路面表面温度の上昇、日射、交通量の増大等に伴って圧雪に融解熱が加えられ、これが圧雪を溶かすだけの熱量であれば圧雪はなくなる。しかし、それ以下の熱量では圧雪となって残る。この関係は各種要因の組合せによって発生形態も大きく変わるものであるが、中でも自動車の場合は、タイヤ熱、排気ガス、あるいはタイヤの攪乱作用で圧雪発生の遅延、

融雪の促進効果が非常に大きいものと思われる。

図1-11は交通量を2段階に分け圧雪が発生する時点の気温と降雪深の関係を上側に示し、この時の気温と路温(路面表面より1cmの深さに埋設した温度計による)との関係を下側に示した。なお、この地区の交通状況は朝方、夕方と通勤時間

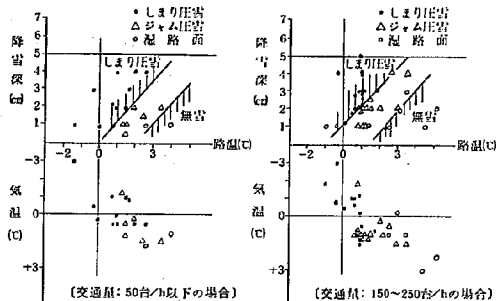


図1-11 圧雪限界

帯が最も多く250台/h前後、少ない時は深夜の1時~4時ごろで、50台/h以下(最も少ない時で10台/h前後が記録された)となっていた。図中の交通量別ではデータ数が少なくその傾向を調べるために大きく分類し、朝方から夜間(午後10時ごろまで)の150~250台/hのものとして深夜の50台/h以下の2種類とした。また、車種別では、日中は小型自動車の占める割合が多いが夜間になるにつれ大型車、特にトラック類が多くなる。車の速度は平均40km/h程度であった。

これによると路面温度が高い場合、降雪深がある程度あっても路面に雪が積ることなく降雪と同時に融解されていることがわかる。また、交通量別に見ても非常に少ない50台/h以下の場合と200台/h前後の交通量とでは圧雪になる温度と、降雪量が異なって来る。たとえば、路面表面温度(地表より1cmの点)が+1℃の時、交通量が50台/h以下の場合には1.2cm程度の降雪があれば路面にしまり圧雪ができるのに対し、150~250台/hのものは2.2cm/hの降雪が無ければしまり圧雪にならない。また、サラメ圧雪の場合はしまり圧雪に比べ、降雪がある程度あっても路面温度が高い場合に発生している。

このように、今回の調査では交通量別ではデータ数が少ないこともあって2分類としたことと、交通量の少ないものは深夜のものが主体であったことなどから、交通量の影響については十分な結論を得るまでは至っていない。しかし、この図からわかるように、交通量が圧雪に与える影響はかなり大きいものと言えよう。

一方、圧雪が発生する時点の路面温度と気温の関係についてみるとかなりのバラツキがあるが、その傾向としては路面温度の方が1~2℃程度気温より高めとなっている。これは、路面温度計が舗装体内に埋設されているため、地表面のように気温に直接影響されず、急激な変化を示さないことと、地熱の影響によって温度が比較的高い値を示すことが原因であると思われる。また、この気温と路温の差は、低温になるに伴い路温の方が高く、高温になる

につれその差は小さくなる。これは高温（温度がプラスになる）になるにつれ路面に降った雪の融解作用によって徐々に路面温度が低下し、気温に近づいたためと思われる。したがって少量の雪ではザラメもしくは湿路面の状態であるが、降雪量が多いと圧雪となる。

4-6. 熱収支から見た凍・圧雪の発生形態

こゝでは、積算寒度（気温、路温、純放射量のマイナスのみを加算したもの）と凍・圧雪の発生状況と、熱収支の一般式から圧雪の発生状況について検討を加えた。なお、今回は、純放射計による測定回数が少なかったことから、こゝでは、その一例を示し傾向を述べるにとどめた。

4-6-1. 積算寒度による凍・圧雪の検討

図1-12は、昭和52年2月21日から2月23日までの路面状況と積算寒度、および、積算量（交通量、日射、降雪量、風速量の積算量）について示したものである。この図の交通量、風速は大体一定の伸びを示しているが、路温および純放射は、日射の影響で日中はほとんど平行状態（プラス側にある）であるが夕方から朝方にかけて上昇している。また、この純放射量は、曇天、降雪時には上昇が少なく晴天になると急上昇している。

このような気象条件下において、凍・圧雪の発生について考察すると次のとおりである。

- ① 圧雪は日射（純放射量がプラスされる）に大きく左右され、その量によって融解される時間が大きく異なる。また、路温が -1°C 以下が続き純放射量がマイナスであれば乾圧雪が発生する。
- ② 凍結は純放射量の増減に大きく左右される。たとえば、2月21日の18時頃から純放射量が增大しているが、降雪が伴っているためその伸びは少なく圧雪となっているが、2月22日の17時頃から純放射量（これに伴って路温も増大）が急激に増大し、路面状態が湿路面であったため3時間程度で氷融が発生している。これは、降雪が無かったため晴天となり気温の低下に伴って純放射量が増え凍結したものである。

このように、夕方路面が湿れていて夜間晴天となる場合には凍結に特に注意が必要である。

- ③ 気温と路面の相関はあまり高くないが、路温と純放射量との相関は比較的高く今後の凍・圧雪の検知のための指針となろう。

- ④ 圧雪硬度と気象因子との相関は、除雪や薬剤散布等の影響により不明瞭であるが、一般的な傾向としては、気温や路温の低下により圧雪の硬度は増大する。しかし、日射量が増えると弱圧雪となる。（気温と硬度の関係図（図2-5）を参照）。

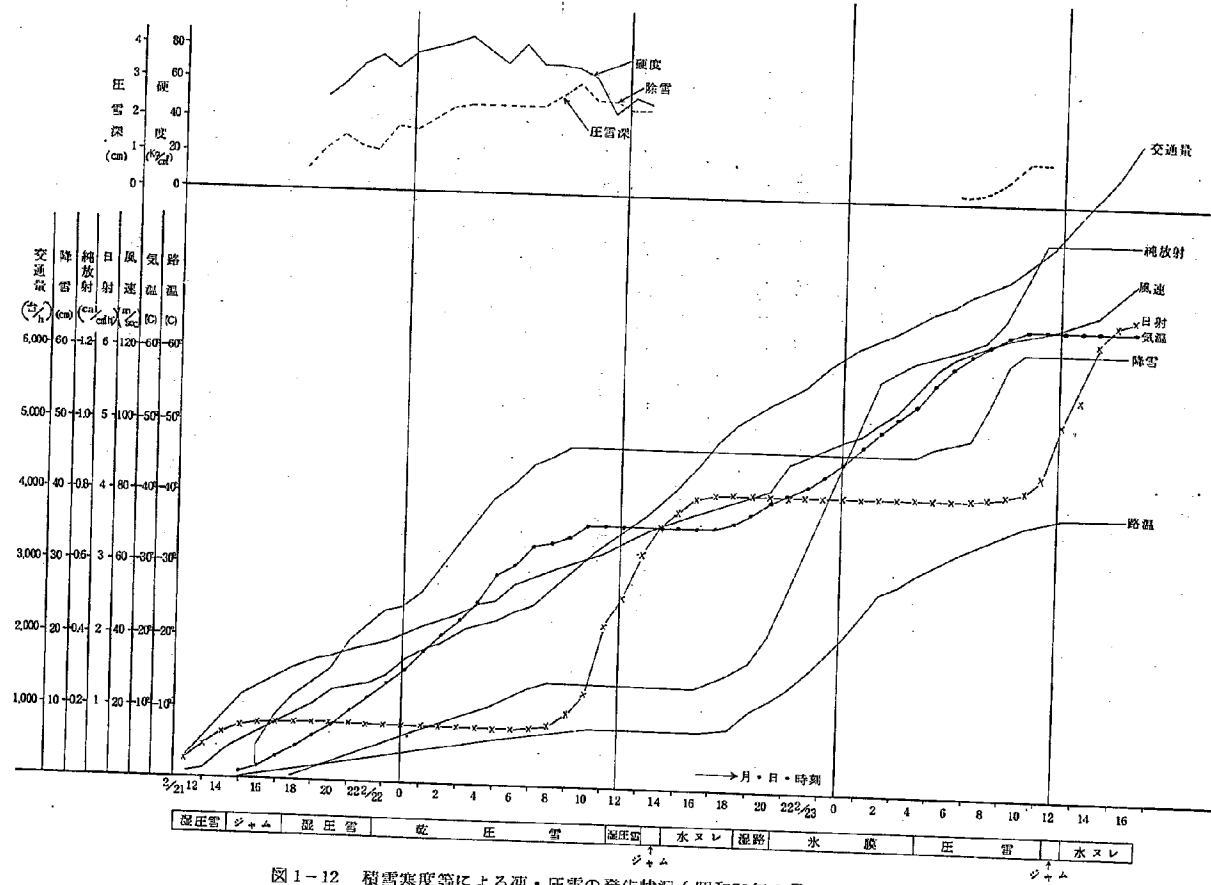


図1-12 積雪寒度等による凍・圧雪の発生状況 (昭和52年2月21日～23日まで)

1996

4-6-2. 熱収支量による凍・圧雪の検討

路面の熱収支量を“凍・圧雪の発生に関する基本式”の項で述べた式を用い図1-12のデータを基に気象的熱源（純放射，顕熱，潜熱，降雪量）と地中熱源とに分けて計算した結果を図1-13に示した。これから、熱収支量（合計値）がマイナスであれば、凍結，圧雪が発生し、プラスであれば、凍・圧雪が融解しジャムとか水ヌレ等が発生することが解る。

一方、地熱の移動は、気温の低下，降雪量等のように寒冷化させる要因があれば、地表面に熱が放出（プラス側）され、日射の影響等によって地中が加熱されている。その量は、全般に少なく、 $2 \sim 3 \text{ cal/cm}\cdot\text{h}$ 程度であるが、純放射等により大気へ放出する量が多ければ地中からの放出も多い（2月23日の零時で $7.5 \text{ cal/cm}\cdot\text{h}$ となった）。また、地中へ供給される量は、日射量，路面状況等によって異なるが、ここでは、2月22日の13時頃が最高となり $4.5 \text{ cal/cm}\cdot\text{h}$ となった。

このように、熱収支量は、気象条件，路面状況等によって異なる。なお、今回は、交通量についての検討を行なわなかったが、この影響もかなり大きいものと考えられる。

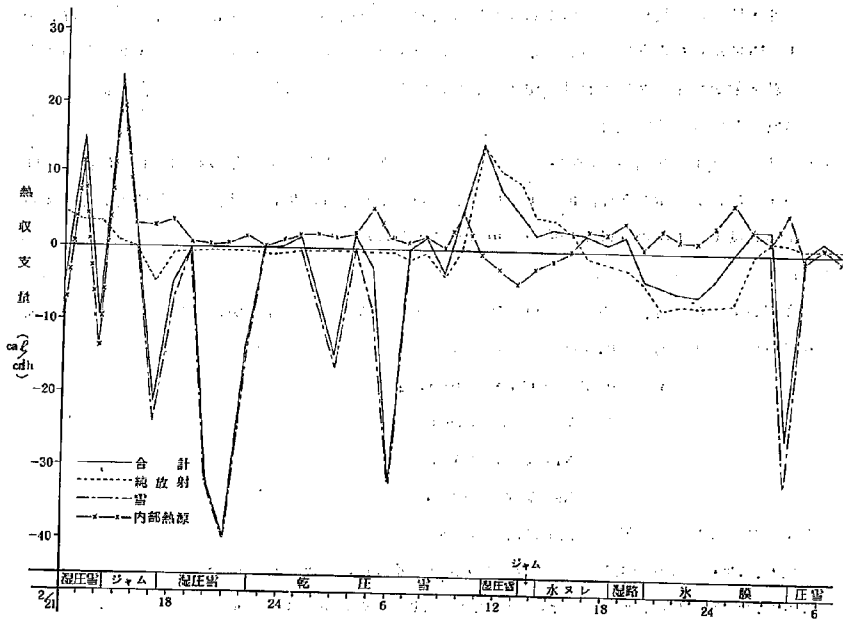


図1-13 熱収支量と凍・圧雪の発生状況（昭和52年2月21日～23日まで）

5. まとめ、および問題点

今回得られた結果から凍・圧雪特性について概略的にまとめると次の通りである。

1) 凍・圧雪の発生および質の変化

- ① 気温が高い地方（平均気温が0℃付近）では、水分の含んだ圧雪（68%程度がジャムもしくは弱圧雪で、乾き圧雪は30%程度であった）が多く発生する。
- ② 凍結の発生は、気温が高く降雪量（回数）が多い地方では非常に少ない。しかし、このように気温の高い地方では、日中、日射等により圧雪が融解されるケースが多く、夜間の急激な冷え込みがある場合には、凍結するので十分注意する必要がある。
- ③ 気温が零度以下で降雪深が1cm/h以上の場合は、弱圧雪や乾き圧雪が多く発生する。
- ④ 降雪があり、純放射量がプラスの場合、路面の凍・圧雪状態は、水ベタが50%、ジャムが91%で弱乾き圧雪は100%となった。このように、純放射量の+、-により明確に圧雪の種類が分かれることは、今後の凍・圧雪の予測・検知を行う上での大きな要因となる。
- ⑤ 凍・圧雪の質変化は発生時と同じで、純放射量、気温等に大きく左右される。たとえば、図1-13に示したように、熱収支量がプラスかマイナスかによって異なり、マイナスの熱量が多く純放射がマイナスであれば、湿り圧雪から乾き圧雪へ、あるいは湿り路から氷膜へと変化し、プラス側にあれば、この逆となる。
- ⑥ 圧雪の発生と交通量との関係については、データ量が少ないが、その傾向としては図1-11のように、交通量が50台/h以下の場合と150～200台/hの場合では、しまり圧雪が発生する路面温度（-1cm点）は1°程度の差があることがわかった。

2) 累積降雪深と圧雪の厚さ

降雪があった場合、圧雪となる厚さは気温、交通等によって異なるが、圧縮率が9.3%、つまり、10cmの降雪に対し、0.93cmの圧雪ができることになる。また、その予測式は、

$$Y = -0.348 - 0.087 X_1 + 0.093 X_2 \dots\dots\dots 13$$

ここで、Y：圧雪深（cm）

X₁：気温（℃）

X₂：累積降雪深（cm）

となった。なお、この時の重相関係数は0.698である。

以上、凍・圧雪の発生等に関する結果の概要を述べたが、凍・圧雪の発生、質変化等は、非常に多くの要因に左右されることからその説明には数多くのデータが必要となるものであり、ここで述べたのはその一部にすぎない。したがって、今後は、より多くのデータを収集すると共に、薬剤の効果（凍・圧雪の物理的現象がどう変るか）、除雪の実態等の究明もあわせて実施し、冬期間交通の合理的、経済的な手法の確立に結びつけて行く必要があろう。

〔凍・圧雪の工学特性に関する調査〕

1. 概 説

雪氷路面のすべり抵抗に関する実験は、昭和35年頃からはじめられたようであるが、当初は、圧雪路面でタイヤの種類や速度別に縦、横のすべり係数を調べ、砂や氷点降下剤を散布した路面のすべり試験が行われた。これらの試験は、北海道、青森、山形、福島、山梨、新潟および富山などで行われたが、その時の外的条件としては、外気温の観測のみで雪の物理的性質の記録はない。39年頃から、道路状況として、古い雪や、とけはじめた状態、圧雪の作成状態などを考へて、これを区別した実験も行われ41年から路面温度の観測が加えられた。その結果、雪氷路面のすべり摩擦係数として大略的に表2-1にまとめられた。⁽³⁾

このような実験と並行して、タイヤのすべり率、走行速度、塩化物散布後の摩擦係数の測定、あるいは、横すべり等についての試験も各地で行われるようになった。

しかしながら、これらはすべりの対象である路面の雪あるいは氷の物性の吟味が欠けており、物理的、工学的な取扱いの基盤が弱かった。ましてや、既述のとおり凍・圧雪は気象条件に、大きく左右されることからすべり抵抗の値も大きく変化する。したがって、凍・圧雪のすべり特性を究明するに当っては、物理特性の把握が大きな課題であるためと言えよう。

このようなことから、ここでは積雪時

の安全を計るために、その主原因となる凍・圧雪の物理特性と自動車のタイヤとのすべり摩擦を究明し、合理的な検知、予知手法等の確立を目的として、その物理特性（気温、密度、硬度との関係）、工学特性（発進時のすべり摩擦）についての測定を行なったものである。

状 態	μ	速 度
氷 ～ 氷 板	0.10～0.20	30～40km/hr
新雪、氷に近い圧雪	0.20～0.25	
普 通 の 雪	0.25～0.30	平滑な氷または
ざらめ雪、とけはじめた雪	0.30～0.40	新雪は0.1以下
積雪上に塩化物散布	0.35～0.45	になることもあ
積雪上に砂散布	0.20～0.30	る。
砂と塩化物の混合散布	0.30～0.50	

表2-1 雪氷路面のすべり摩擦係数 (μ) ⁽³⁾

※ すべり率 = (走行した距離) - (タイヤの回転した周距離) / (走行した距離)

2. 調査方法

2-1. 凍・圧雪の物理特性

凍・圧雪の工学特性について、現地（藤沢地区）と室内（低温室）において諸調査を実施したものである。その方法は、前者については現地圧雪の工学特性（密度、硬度等）を前節で述べた施設（写真1-1）と方法により自動観測と人手による凍・圧雪の細部観測（圧雪状況、圧雪の密度、硬度等）を圧雪の発生から融解するまでについて観測したものであり、後者については、低温室において自然積雪（新雪、しまり、ザラメの3種類）を用い、表2-2の組合せにより凍・圧雪の気温、硬度、密度変化特性について行なったものである。なお、加圧方法は試料箱に雪を入れ油圧ジャッキ（7用）によって0.5cm/secの速度で圧密した。

	雪、温(℃)	雪 質	圧密荷重(Kg/cm ²)	資料函寸法(cm)
圧密実験	0, -7, -14	3 種類	0, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20	15×15×15
測定器具	木下式硬度計、接触型表面温度計、密度は資料函より直接計測			

表2-2 実験条件及び使用器具

2-2. 凍・圧雪のすべりに関する試験

すべり試験は、室内（低温室）を主体に、前項で作成した雪質のものと水を凍結させたものについて各温度条件で、写真2-1に示すようなすべり試験装置（仕様は表2-3に示す）により、タイヤ別（リブ、スノー、ラジアル、スパイク）の静止抵抗（手動式で台車をジャッキで加圧し、その力をプループリングにて検出する方法）

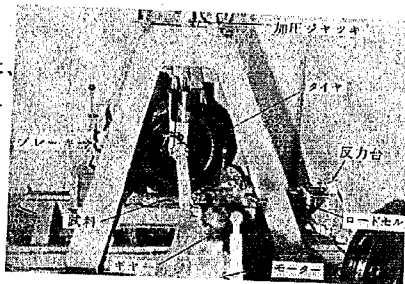


写真2-1 室内用すべり試験装置

項目	概 要
加圧 輪重	50~250kg/輪、可変可能
駆 動 方 法	直流(75kw)モータを使用し、自動車のクラッチ等により駆動
トルク等の検出方法	トルクメーター(20kg-m)とロードセル(1用)によりそれぞれの出力を検出
タイヤの規格	6.45-1.3

表2-3 諸方法

と駆動時、つまり、発進時の測定を行なった。なお、実験に使用したタイヤはDUNLOP社製である。また、構内試験として50年度に設置した圧雪作成および、すべり試験装置により（写真2-2・3 および表2-4）一部の測定を実施した。

試験予定項目	
(1) 圧雪特性に関する調査	
1. 雪質気温と輪重(50kg/1輪~2t/1輪)による圧密特性	
2. 圧雪の気象変化特性	
(2) すべり摩擦に関する調査(縦, 横すべり)	
1. 発進, 走行, 制動時におけるすべり抵抗	
2. タイヤの大きさ(大型, 中型)および種類別(リブ, リブチェーン, スノー, スパイクラジアル)のすべり抵抗	
3. 薬剤散布とすべり	
仕 様	
型 状 寸 法	長さ2.4m 巾1.7m 高さ2.2m
タイヤ載荷方法	油圧式(0~2 ton)
走行速度	10km/h
タイヤサイズ	試験輪 6.45-13, 7.50-20 転圧輪 6.45-13
駆動モートル	交流可変速 7.5kw
変速段数	4段(1:130~1:0.24)
クラッチ	可調整型電磁クラッチ
ブレーキ (試験輪のみ)	ガイドレバー式デスクブレーキ
油圧シリンダー ストローク	転圧輪 40cm 試験輪 20cm

表2-4 試験項目および仕様⁽⁵⁾

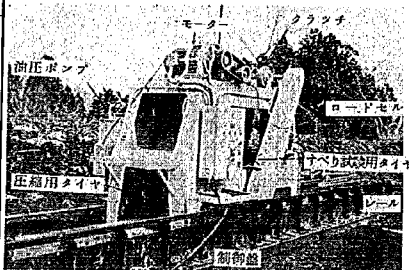


写真2-2 圧雪作成およびすべり試験装置

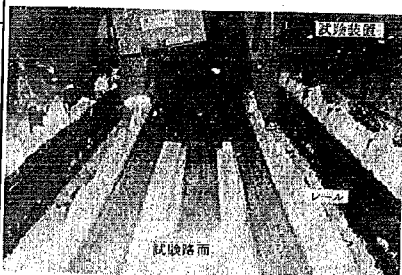


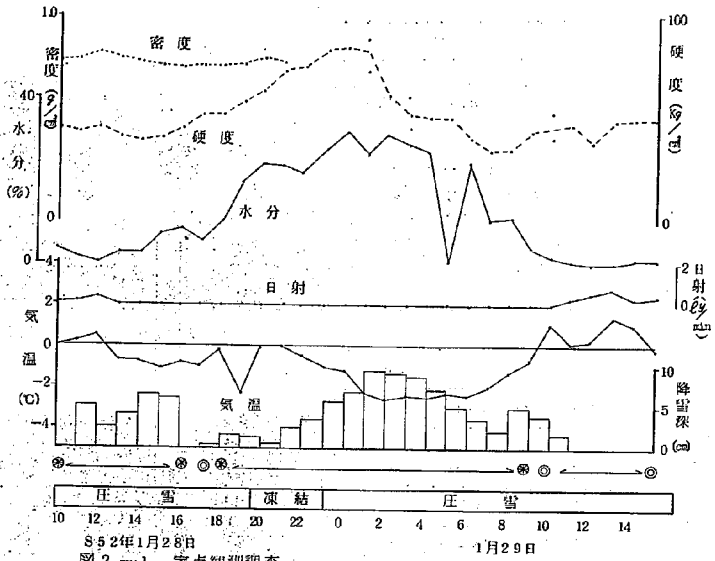
写真2-3 試験状況

3. 調査結果および考察

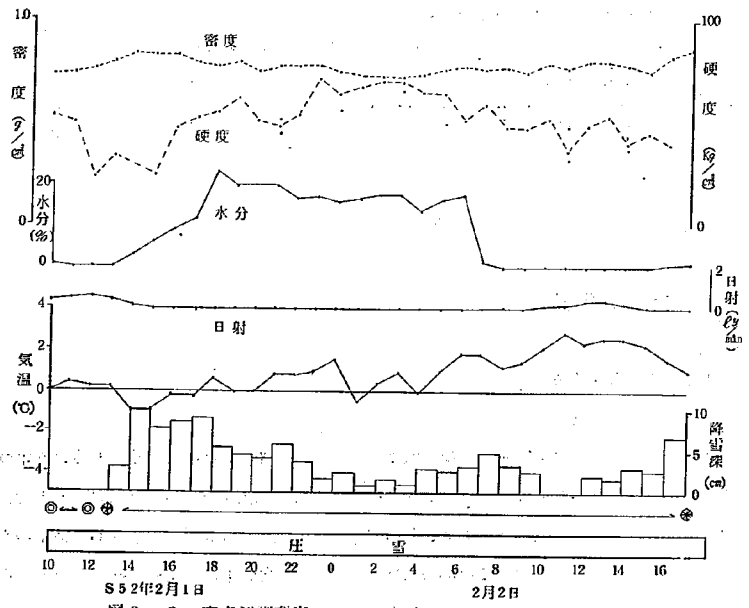
3-1. 現地圧雪の工学特性

3-1-1. 概 況

藤沢における定点観測結果の一例を図2-1, 2, 3に示す。これは、硬度, 密度の測定時の路面状況, 気象状態を見るために、同図に路面状況と気象因子のうち、圧雪の硬度と関係がある気温, 降雪深, 日射, 水分およびその時の天気を記したものである。なお、図中の水分量は反射係数により求めた。この時の値は、0~20程度が凍結, 乾路, 乾圧雪20~60が弱圧雪、60以上がシャーベット、湿路面を示す。また、その時の状況の一例を写真2-



852年1月28日 1月29日
 図2-1 定点観測調査
 (時間ごとの状況は写真2-4に示す)



852年2月1日 2月2日
 図2-2 定点観測調査

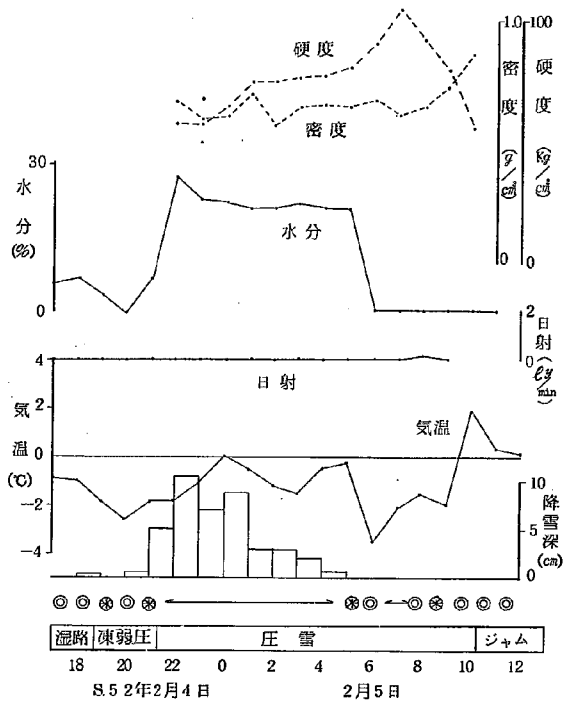
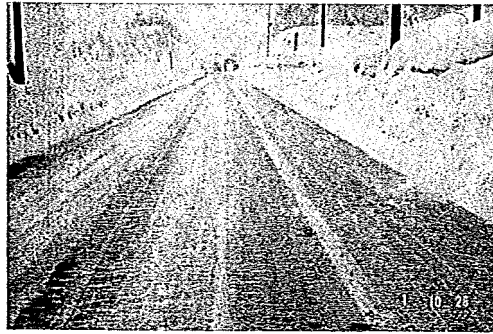


図 2 - 3 定点観測調査



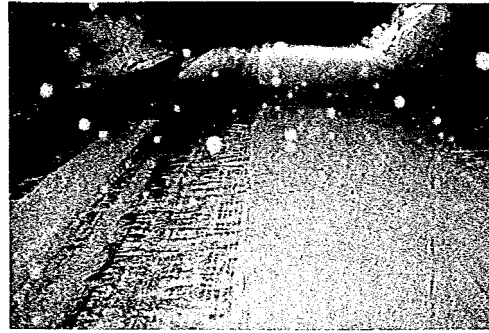
S 52年1月28日
10時

圧雪種類	
ぬれ圧雪(CW)ぬれ粒雪(GW)	
気温 0℃	雪温 -0.1℃
圧雪深	3.4 cm
圧雪硬度	45 Kg/cm ²



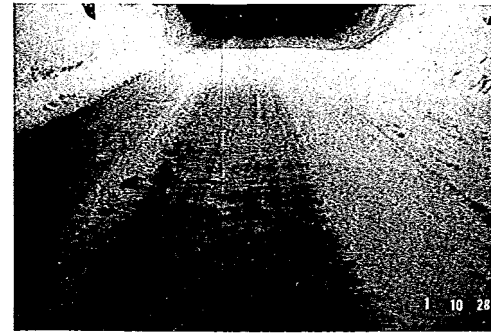
S 52年1月28日
16時

圧雪種類	
ぬれ圧雪(CW)	
気温 -0.8℃	雪温 -0.8℃
圧雪深	5.1 cm
圧雪硬度	45 Kg/cm ²



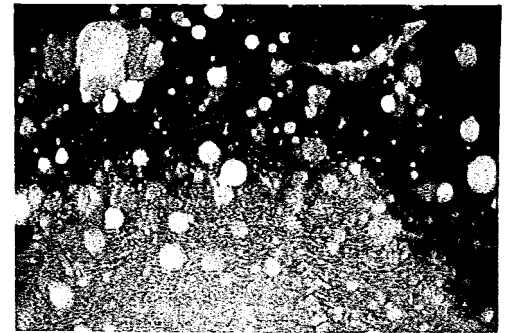
S 52年1月28日
19時

圧雪種類	
氷板(1W)ぬれ圧雪(CW)※ (ぬれ) (表層1cm位は新雪)	
気温 -2.3℃	雪温 -1.8℃
圧雪深	5.1 cm
圧雪硬度	75 Kg/cm ²



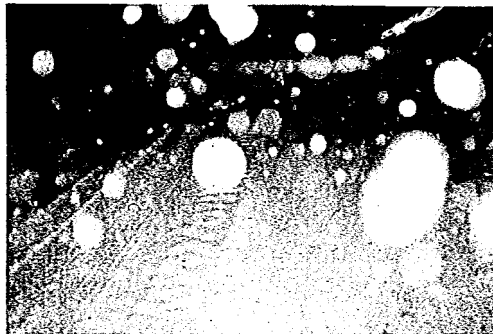
S 52年1月28日
22時

圧雪種類	
ぬれ粒雪(GW) (薬劑散布による)	
気温 -0.5℃	雪温 -2.0℃
圧雪深	5.0 cm
圧雪硬度	50 Kg/cm ²



S 52年1月29日
2時

圧雪種類	
路面積雪下部にぬれ粒雪(GW)	
気温 -2.5℃	雪温 -2.0℃
圧雪深	5.8 cm
圧雪硬度	62 Kg/cm ²



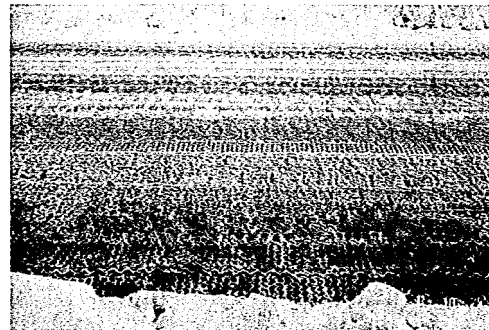
S 52年1月29日
6時

圧雪種類	
かわき圧雪(表層部新雪)(CD)	
気温 -2.5℃	雪温 -2.0℃
圧雪深	10.9 cm
圧雪硬度	40 Kg/cm ²



S 52年1月29日
8時

圧雪種類	
かわき圧雪(表層部新雪)(CD)	
気温 -1.5℃	雪温 -2.2℃
圧雪深	11.4 cm
圧雪硬度	35 Kg/cm ²



S 52年1月29日
10時

圧雪種類	
ぬれ粒雪(GW)	
気温 +1.0℃	雪温 -2.0℃
圧雪深	6 cm
圧雪硬度	40 Kg/cm ²



S 52年1月29日
13時

圧雪種類	
ぬれ粒雪(GW)	
気温 +1.3℃	雪温 0℃
圧雪深	5.0 cm
圧雪硬度	45 Kg/cm ²



S 52年1月29日
15時

圧雪種類	
ぬれ粒雪(GW)	
気温 -0.2℃	雪温 -0.5℃
圧雪深	4.5 cm
圧雪硬度	45 Kg/cm ²

写真2-4 凍・圧雪状況(昭和52年1月28日~1月29日) (※印は、交通量が少ないため
圧雪が成長しない。)

444

4に示した。

この図によると、圧雪の硬度範囲はだいたい20~110kg/cm²にあり、この地区では、あまり硬い圧雪は観測されなかった。また、圧雪硬度の変化について見ると一般的に新雪が多い時刻か、日中の気温上昇によって融解された時点が最も弱い圧雪となり、気温の上昇時や小降り状態になり、自動車等で踏み固められた時点が最も硬い圧雪となるようである。なお、この図には示していないが除雪後も130kg/cm²程度の硬い圧雪が記録されている。

一方、密度については、気象条件が同一であればだいたい同じような値(0.6~0.8g/cm³)を示しているが、気温、日射の増大に伴って圧雪がジャム化された場合、かなり重い値を示す。

3-1-2. 凍・圧雪の種類と硬度分布

図2-4は、圧雪の種類ごとに、硬度を5kg/cm²間隔にまとめてその出現度数を調べたものである。

図中の、 $N \cdot \bar{R}$ はそれぞれ各圧雪種類ごとの総度数と硬度の平均値である。全体の傾向として、凍結時のものが最も値が大きく、他は、圧雪中の水分が多くなるにつれて小さくなっている。雪質ごとに硬度の違いをみると、しまりと圧雪以外は、測定回数が少ないため十分な結論を得ることはできないが、このしまりと圧雪は、正規分布に似ており、硬度の大きい方にやや数が多くなっている。図2-5は、同系列とみられる圧雪をまとめたもので、分布の形は同様である。凍結と(水ベタ+ジャム)については、その平均の硬度の大きさは、それぞれ40kg/cm²、90kg/cm²となり他との区別が明瞭であるが、(しまり+圧雪+乾圧雪)と(弱圧雪+弱しまり+部分圧雪+湿圧雪)では、両者の平均がほぼ等しく、上・下の値が変化する範囲もほぼ同じで、硬度の上での区別は困難であるように思える。後2者の分散がともに約20で、変化の幅はかなり大きい。

このように、かなりのバラツキが出た原因として、気象条件の違いによるもの、あるいは、薬剤散布等の外的要因が加わったことなどによるものが考えられる。

3-1-3. 圧雪の硬度と気温・交通量との関係

圧雪の硬度を変える要因としては、気象(気温、日射、風等)、交通量等があり、これらの要因は、種々の組合せにより、圧雪の質、発生時期等が異なるものである。ここでは、その主要な因と思われる気温、交通量と圧雪硬度(木下硬度計による)について降雪が無い場合と降雪時のものを区別し、それぞれの相関あるいは重回帰式による検討を行なって見た。その結果、変数間の相関を表2-5に示し、重回帰式による交通量、気温と圧雪硬

	Y	X ₁	X ₂
圧雪硬度(Y)		-0.678	0.376
気温(X ₁)	(-0.518)		-0.051
交通量(X ₂)	(-0.234)	(-0.027)	

表2-5 変数間の相関行列
()内は降雪時、その他は無降雪時を示す)

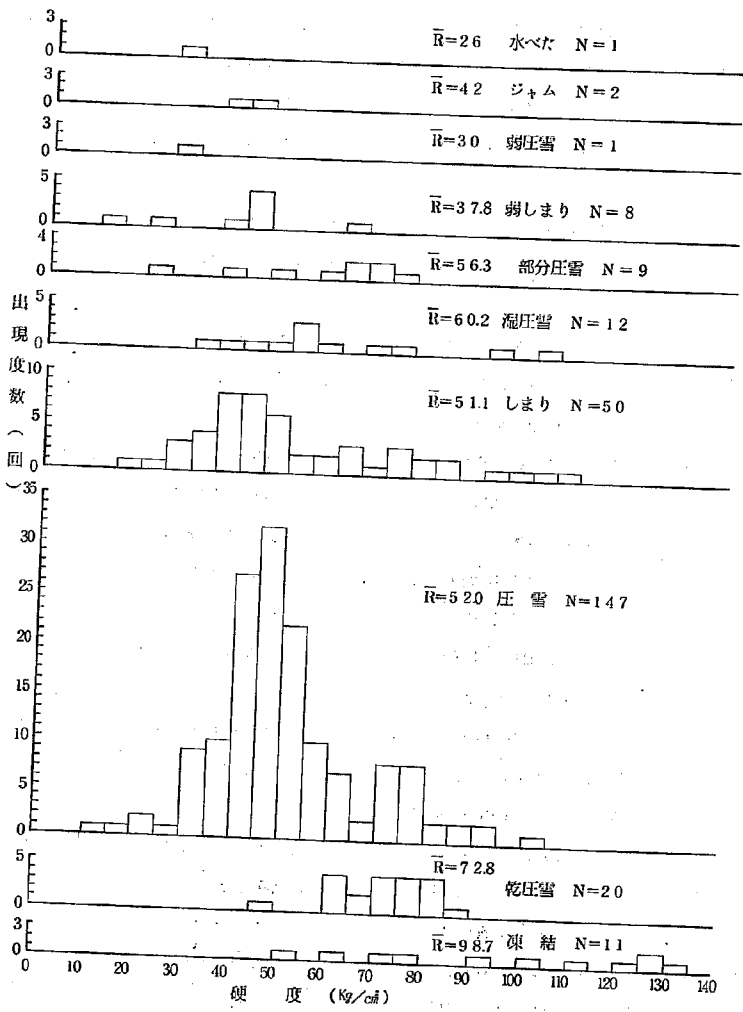


図 2 - 4 圧雪種類別硬度度数分布 (統計 N = 261)

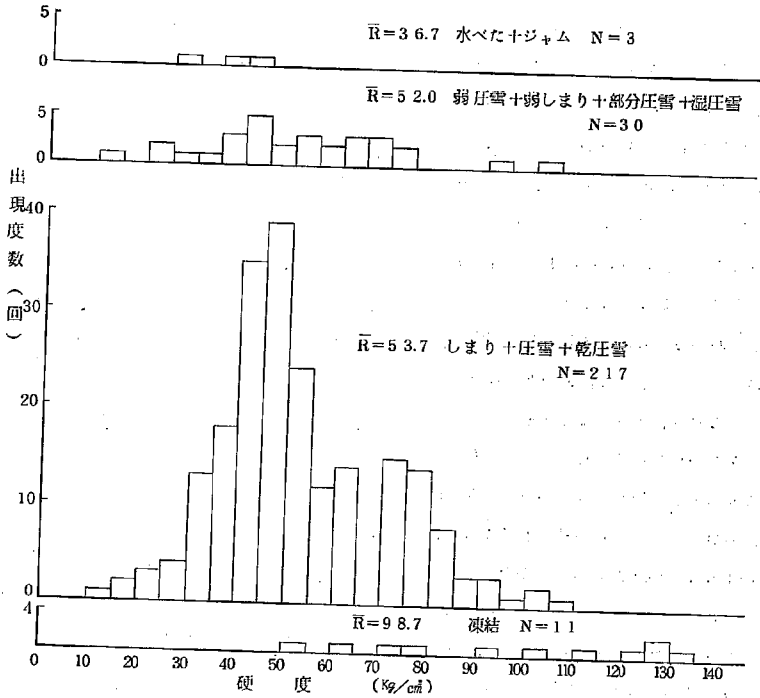


図 2-5 圧雪種類別硬度度数分布

度との関係を図2-6に示した。なお、この回帰式は5%水準で有意のものである。

これによると、表2-5に見るように圧雪の硬度は、気温とかなりの高相関を示しているが交通量は低い相関にあることがわかった。これは、今回の測定時において温度範囲が比較的小さかったこと、硬度が大きく変化と思われる無降雪時のデータが少なかったことによるものと考えられる。しかし、この結果から圧雪の硬度は気温に大きく左右されるが交通量は、特に降雪時の場合、あまり影響ないことがわかった。また、他の要因として考えられる降雪量、風等についても実施したが、これらはかなり相関が悪く十分な結論を得るまでに至らなかった。

一方、交通量が10~200台の範囲における気温と硬度の関係について、図2-6に示したが、この図から圧雪の硬度は気温の低下に伴って、降雪時、および、降雪がない場合にも同じような傾向で増加していることがわかる。しかし、降雪時の場合は、その値が小さく、さらに、覆氷も小さくなった。これは、雪質による圧縮率の違いと降雪がない場合には、日射やタイヤ熱による表面の融解作用があり、これが夜間には気温の低下によって再凍結されるために、このような差が出たものと思われる。また、交通量による影響については、表2-5に示したように圧雪硬度との相関は低く出ているが、その傾向としては、降雪が無い場

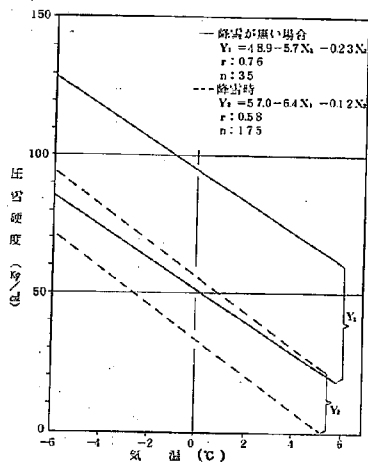


図2-6 交通量10~200台/hの範囲の気温と硬度の関係
(X₁:気温、X₂:交通量)

合の圧雪は交通量の増大に伴って硬度も増加し、降雪時には、交通量が増加するに伴って低下する結果となった。これは前述のように雪質が違うことと、降雪時には薬剤散布の回数が多いこと等によるものと思われる。

以上、重回帰方式により圧雪の硬度特性に関する検討を加えたものであるが、その結果、重回帰係数が比較的低い値となった。しかし、この式は、重回帰式の有意性から見た場合、圧雪の硬度を予測するための一手法としてある程度期待できるものと言えよう。また、重回帰係数が低くなった原因としては既述のように薬剤散布等のような外的条件に大きく左右されることと、現地観測の測定方法にも多少問題が残されていること等によるものであり、今後は、これらの点をさらに説明する必要がある。また、この回帰式は、温度範囲が14~-6℃と比較的狭いことと、データ数が少なかったため直線として表わしたものであるが、

曲線的な関係も十分考えられることから低温域についてのデータも今後さらに収集し解析する必要があるものと思われる。

3-2. 室内試験による圧雪の工学特性

雪は、圧力が加えられると組織変形を起しながら雪の内部に含まれている空気を排出し硬化が進み圧雪に成長する。これは、実際の道路の場合、自動車荷重、あるいは気象条件等によって発生するものであるが、その現象は複雑でありさらには圧雪の密度、硬度も交通量、タイヤの種類、車重によって変化するため、圧雪特性、あるいは、発生機構の解明は非常に難しいものと言えよう。

このようなことから、ここでは、室内(低温室)において作成した種々の圧雪により次の項目について行なった。

3-2-1. 圧密した雪の密度と硬度変化

雪を圧密する方法としては、緩速圧密と急速圧密がありこれによって造られた圧雪は密度等の点で、その性質が大きく異なるものである。今回の実験では、実際の道路は、自動車によって急速圧密されているものとして比較的早い圧密方法をとった。

その結果、図2-7に雪温0℃における圧密特性を示した。なお、図中(a)に ρ_s (圧雪密度 g/cm^3)と σ (圧密荷重 kg/cm^2)との関係、(b)に、圧雪密度 ρ_s とR(木下式による圧雪硬度値 kg/cm^2)との関係を示した。

これによると、(a)の $\rho_s - \sigma$ の関係では、雪の初期条件(密度)が異なっても2~3 kg/cm^2 程度の圧密荷重が加わると新雪としまり雪とではほぼ同一数値となり一定勾配で上昇する傾向を示した。これは、新雪、しまり雪の持つ空隙比の差によるもので新雪がある程度の加圧を受けるとしまり雪に変化し数値的には同じ結果となったものと思われる。

また、(b)の $R - \rho_s$ の関係では、圧雪密度が0.4 g/cm^3 程度までは圧雪硬度がほとんど変化がなくそれ以上になると急上昇し圧雪硬度が120 kg/cm^2 程度になるとほぼ一定値となった。なお、この図からは、雪質別の傾向は得られなかった。この原因として、雪は特に新雪は圧縮性に富み、また、圧雪は新雪からいろいろな条件によって変化しその過程でしまり雪を経て生成されるためある程度の圧雪密度(0.4 g/cm^3)になるまでその影響が表われなかったためと思われる。

以上、圧密特性についてその傾向を述べたが実際の場合には、

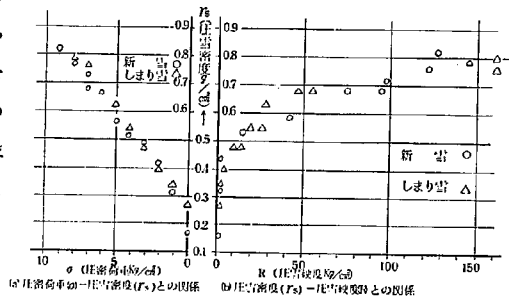


図2-7 雪温0℃における圧密特性

気温、交通量等の条件によって雪質は変化し圧雪の硬度は大きく変るものである。しかし、今回の実験は、同一温度で2種類の雪質だけについて行なったため雪質別の特性を見ることはできなかったが、新雪としまり雪では、密度(ρ_s)が0.49/cm以下では硬度はほとんど変化しないがそれ以上になると硬度が急上昇する。これを圧密荷重から見ると2kg/cm²程度(現地で測定できる硬度の最低平均値を示す)の荷重が加えられた状態で自動車荷重を考えると小型乗用車以上に相当する。また、これ以上の硬度では、大型車、小型車等の車重の異なるものの反復作用によって発生するものと考えられる。

なお、この図に、木下等が⁽¹¹⁾⁽⁶⁾図示した硬度-密度の下限曲線をプロットしてみるとほとんどこの曲線をたどっている。木下等の測定は北海道での気温の低い所で実施したものであるが、下限曲線では、この実験の0℃環境と大体似ていることから ρ_s -R曲線が合致したものと見られる。

3-2-2. 温度低下による圧雪の硬度特性

雪は降雪時の雪温によって、付着力が異なり圧縮された場合にはその硬度が変わる。このようなことから圧雪が発生した後の温度変化によってどのように硬度変化するかを図2-8に示した。これによれば0℃の圧雪は温度を低下させると放物線形状を描いて硬度が上昇する。この現象は0℃の雪の場合、各雪ともその雪片あるいは粒子の周囲に水分が付着しているために、氷点下でその水分が凍結し、粒子間の接着剤の働きをして、圧雪硬度が増加するものと思われる。また、雪質別に見ると初期硬度は、ほぼ一定であるが新雪、しまり雪、ザラメ雪の順にその上昇勾配が急になる傾向がある。

これは、雪片あるいは粒子間の付着面積の相違によるもので、

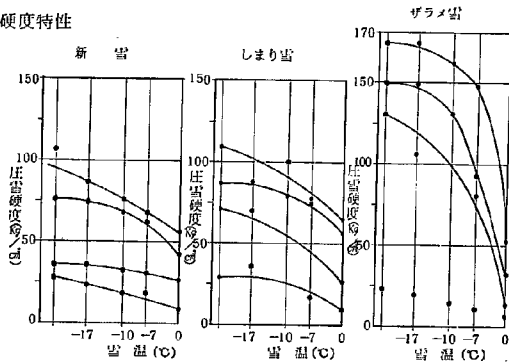


図2-8 温度低下による0℃圧雪の硬度変化

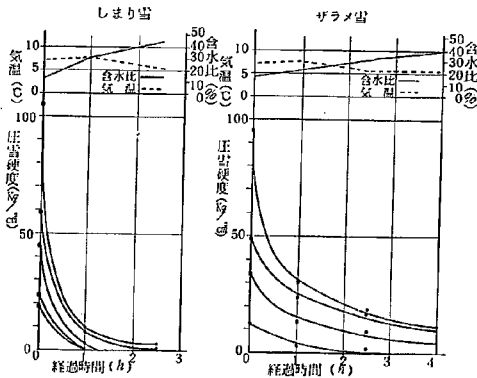


図2-9 屋外気象条件下における0℃圧雪の硬度変化

新雪の場合には0℃では含水比の影響を受け、粘着性が他の雪質より大きい、低温になった状態ではその雪片間の付着面積が小であるために、圧雪の硬度は低く増加が少ない。この実験から圧雪が発生した場合、現地の自動車荷重が圧雪の発生時とそれ以後も余り変わらないとすれば夜間は気温の低下によって圧雪硬度が増し、とくにザラメはこの傾向が強い。

また、圧雪はどの程度の時間経過によって硬度が減衰するか、その現象を把握するため、しまり、ザラメ雪について試験した結果を図2-9に示した。これによると気温等の条件が同じでも雪質別にその残留硬度が違ふことが明らかとなっている。これは上記の様な粒子間の付着面積や、付着力の大小により組織が融解される速度が異なるためと推測される。また、硬度100kg/cm²以下の各圧雪試料を比較した場合にしまり雪とザラメ雪では1時間以上の減衰速度が異なる。さらに、図のように硬度変化は含水比が増すことによって減少し圧雪が軟弱化する傾向がある。これは、雪が融解されて含水比が増加し、それによって粒子間の付着力が低下するためである。このことから逆に、日中気温が低い場合には融解による含水比の増加が少ないことから圧雪の持続時間は長くなるといえる。この実験は単純な条件のみであるが、現地圧雪は通過車軌のチェーン等によって攪乱され、気温、日射等が融解に対して効果的に作用するため融解減衰は、試験結果よりも早くなるものと考えられる。

3-3. 凍・圧雪のすべり特性

凍結・圧雪表面とタイヤとのすべり抵抗（主として発進時のすべり摩擦抵抗）に關する試験を室内、構内において実施した。以下、その結果について述べる。

【室内試験】

室内試験では、静止時と発進時のすべり特性について実施した。試料は、現地（自然積雪）のしまり雪、ざらめ雪を採取し、これをいろいろな硬度別に圧密したものと水を凍結させた氷板について実施したものである。また、圧雪については、水分を含まないものと水を含んだ状態（自然に融解させたもの）のものについても実施した。

3-3-1. 静止摩擦試験

現地の圧雪は、圧雪表面がタイヤチェーン、トレッドパターン等によって凹凸形状となっているがこの実験に使用した圧雪は鋼板を乗せて圧密するために表面は平滑な状態でありまた、密度、硬度は現地圧雪と同じ程度のもの

	雪質	温度				備考
		0	-5	-10	-15	
密度 (g/cm ³)	しまり	0.55	0.72	0.54	0.65	※ 0.4~0.7
	ザラメ	0.46	0.51	0.53	0.52	
硬度 (kg/cm ²)	しまり	147.7	152.1	137.4	106.6	※ 20~130
	ザラメ	120.9	164.3	167.1	149.3	
含水率 (%)	しまり	0~9 (圧密前)				
	ザラメ	0~13 ()				

※現地圧雪の平均値

表2-6 試験に使用した圧雪の物理条件（平均値）

を用いた。この時の圧雪の物理的條件の平均値は表2-6に示す。なお、今回使用した圧雪はこれを作成するに当って圧密される雪が比較的水分を含んでいたため（雪温0℃以上の場合）、その表面に氷膜が発生する例が多くそれを布等で除去する方法をとったが所定の温度に冷却すると表面が凍結を始めるため、薄氷板の圧雪試料が主体となっている（このような圧雪は、天候が曇天でその表面が比較的遅い速度で融解され夜間の気温低下によって発生する場合が多い）。

既述の方法によって得られた結果は図2-10に示した。

これによるとタイヤ別静止摩擦抵抗値は、リフトタイヤの場合他のものに比べや、低下しさらに、スパイクタイヤの場合は多少大きく表われているがバラツキが大きく明確にその傾向を把握することができなかった。この理由として、圧雪の作成方法の問題点および、タイヤの摩擦の關係が考えられ、

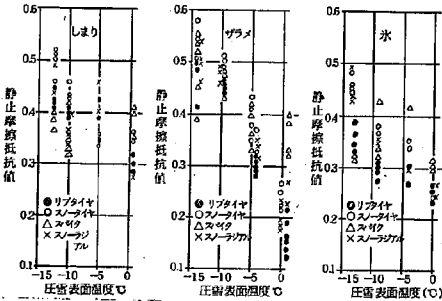


図2-10 圧雪表面温度と各タイヤ別の静止摩擦

特に、タイヤと圧雪の摩擦は、静止時（発進時等）と、稼動時（走行時、制動時）に分けられ、稼動時によるものは、タイヤの回転時におけるタイヤ自身の変形、あるいはトレッドの大きさ（タイヤの種類）によって、圧雪を剪断する力が増減しタイヤ種類の差が表われることが考えられる。この静止時の測定では、比較的硬い圧雪（硬度：100kg/cm以上）で、さらに、タイヤに回転を与えない完全ロック状態において行なったため、タイヤと圧雪との剪断力がなく、タイヤの接するゴムと圧雪との摩擦力のみ得られたためトレッドの影響があまり出なかったものと思われる。

一方、雪質別にみると全般的には、静止摩擦抵抗は各タイヤとも温度の影響を受け、0℃では抵抗値が低く温度が降下すると高くなる傾向を示している。しまり雪、氷については比較的緩勾配で上昇しているのに対し、ザラメ雪は温度低下によって急勾配で上昇する結果となった。

これは、空隙比と含水比による影響が大きく、ことにザラメ雪の場合は含水量が多く高温時では、雪粒間の付着力が融解作用によって低下し、さらには、圧縮によって圧雪表面に氷膜が発生し摩擦抵抗が非常に小さな値となったものと思われる。また、低温時（-15℃）では、ザラメ雪の雪粒間が結氷されると昇華作用によって表面は他の雪質に比べ極小の凹凸状態が多くなり摩擦抵抗値が高くなったことが原因と思われる。

このようなことから、凍・圧雪路面では、車が発進する場合気温が低い時点ではあまり間

題はないが、気温が上昇した0℃付近では摩擦抵抗値が低下するため発進困難な状態となり、さらに、しまり雪の圧雪が気温の上昇によって融解され、ザラメ雪に変質し圧雪表面に氷膜が発生した場合には最も危険な状態になると言えよう。

3-3-2. 動摩擦試験（発進時のすべり摩擦試験）

これは、静止摩擦試験とは異なり、タイヤに回転を与えそのトルクと反力から発進時の動摩擦を検出するものである。この試験では、かわき圧雪および、氷によるものと、圧雪の表面に水が含んだ場合のすべり特性について行なった。

1) かわき圧雪によるすべり試験

圧雪（かわき）の発進抵抗試験から発進時のすべり摩擦係数を求めた例は多い。しかし、ここでは雪の試料を圧縮することにより、圧雪の硬度を変化させその際の摩擦係数（ μ ）を、4段階の圧雪温度のもとで3種類のタイヤについて実験を行なった。

試験の際の輪重は250kgで、その他の条件は表2-7のとおりである。

上記のほかに、51年3月に同じ設定温度で実験を行なった時の硬度と摩擦係数の測定結果も加えて解析した。なお、実験結果の平均硬度（4回測定）とすべり抵抗を取りまとめたものは省略する。

前記のように、この実験は51年3月と12月に実施したものであり、試料雪の初めの密度も表2-7のように不同であり圧密度合も種々あるので結果として、発進時の測定値もかなりのバラツキがあった。したがって、ここではこれらのデータから、硬度（R）の巾を10kg/cm²毎にし、 μ の値を平均して試料雪別、タイヤ種類別、設定温度別にまとめて表2-8に示した。

この表を、雪質、タイヤ種類ごとに図化したのが図2-11~16である。この図から考えられることは、硬度の増大とともに μ は増大するが、ある硬度になると μ は極大値を示し、それより高い硬度では μ が減少する傾向があることである。この傾向は既往の実験でも指摘されており、注目すべき現象である。

資料雪	圧密前の密度	圧雪の密度	設定温度	雪温	備考
しまり雪	0.39~0.43 (0.27~0.36)	0.40~0.58 (0.36~0.48)	0℃	2℃	()はスノータイヤの時の密度
ザラメ雪	0.41~0.46	0.41~0.67	0	1	
しまり雪	0.42~0.48	0.42~0.61	-3	-4	
ザラメ雪	0.47~0.52	0.48~0.62	-3	-3.8	
しまり雪	0.42~0.48 (0.32~0.36)	0.42~0.63 (0.33~0.55)	-7	-8	()はスパイクの時の密度
ザラメ雪	0.48~0.52	0.49~0.63	-7	-8	
しまり雪	0.27~0.38	0.34~0.55	-12	-11.5	
ザラメ雪	0.50~0.55	0.50~0.65	-12	-13	

(51年12月)

この極大値の現われる硬

表2-7 圧雪（かわき）のすべり試験の条件

タイヤ	Rkg/cm ² (O ₂)	0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160		
		~1	~10	~20	~30	~40	~50	~60	~70	~80	~90	~100	~110	~120	~130	~140	~150	~160			
しまり雪 圧雪	リップ	0	0.25	0.22	0.32		0.30	0.24	0.29	0.21	0.24	0.21		0.24							
		-3	0.23	0.31	0.38	0.38	0.39	0.32		0.35		0.33									
		-7	0.25	0.29	0.51	0.46	0.43			0.51				0.38	0.43				0.43		
		-12	0.28	0.31	0.43	0.44		0.43			0.39						0.41				
	スノー	0	0.33	0.31	0.32	0.26	0.31			0.27	0.24		0.23	0.24							
		-3	0.25	0.35	0.41	0.36	0.41	0.35			0.37	0.35	0.37								
		-7	0.26	0.31	0.40	0.43	0.44	0.48	0.43	0.46			0.49		0.52						
		-12	0.22	0.33	0.45	0.49	0.52	0.45	0.46		0.48		0.38								
	スパイク	0	0.35	0.30	0.39	0.29	0.26		0.25	0.25		0.24		0.26				0.24			
		-3	0.25	0.37	0.39	0.38	0.39	0.36	0.35	0.31		0.39		0.41	0.35						
		-7	0.23	0.33	0.45	0.46	0.48		0.52	0.50		0.47									
		-12	0.22	0.32	0.47	0.56		0.45	0.43		0.44										
ザラメ 圧雪	リップ	0	0.20	0.26	0.25	0.19	0.20	0.18	0.18		0.16	0.14					0.14		0.16		
		-3	0.37	0.32	0.45	0.52	0.49	0.46		0.48	0.47										
		-7	0.27	0.32	0.42	0.47	0.55	0.48	0.47	0.49											
		-12	0.29	0.36	0.44	0.50	0.49	0.40			0.52										
	スノー	0	0.33	0.33	0.31	0.30	0.27	0.23			0.22	0.20		0.48					0.18	0.12	
		-3	0.35	0.34	0.32	0.49	0.53	0.45	0.52	0.48											
		-7	0.26	0.27	0.48	0.57		0.59	0.50	0.52											
		-12	0.27	0.38	0.49		0.58	0.55		0.54											
	スパイク	0	0.33	0.33	0.27	0.25			0.25	0.24	0.25							0.27			
		-3	0.38	0.36	0.47	0.49		0.51	0.47	0.45	0.42	0.42									
		-7	0.29	0.36	0.47	0.56	0.54	0.47	0.53			0.49		0.45							
		-12	0.26	0.39	0.49	0.59	0.58		0.58					0.52							

注：硬度Rの範囲に0~1を待に設けたが、これは圧密前の供試雪である。

表2-8 室内すべり試験結果の一覧（硬度Rを10kg/cm²毎に平均した発進時の摩擦係数である）

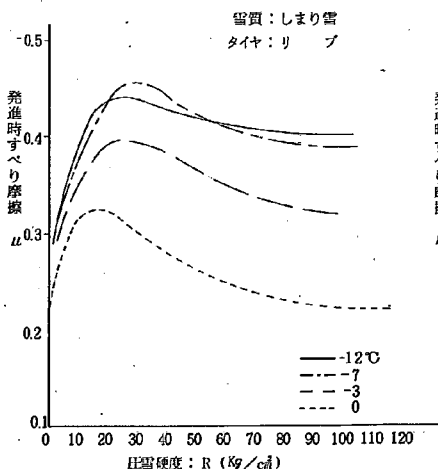


図2-11 雪温別の発進時摩擦係数と硬度の関係

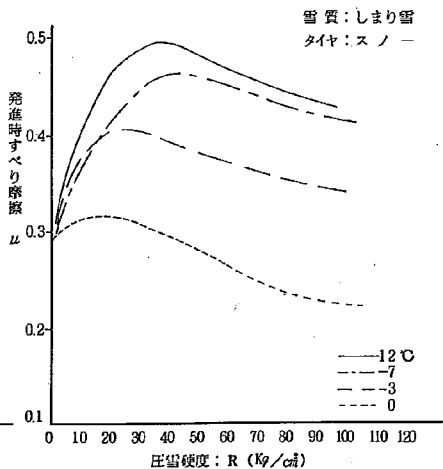


図2-12 雪温別の発進時摩擦係数と硬度の関係

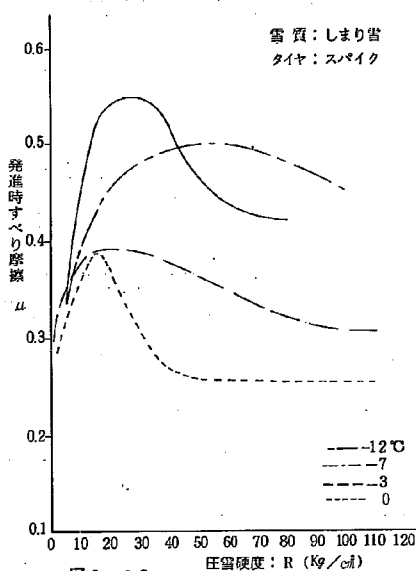


図 2-13
雪温別の発進時摩擦係数と硬度の関係

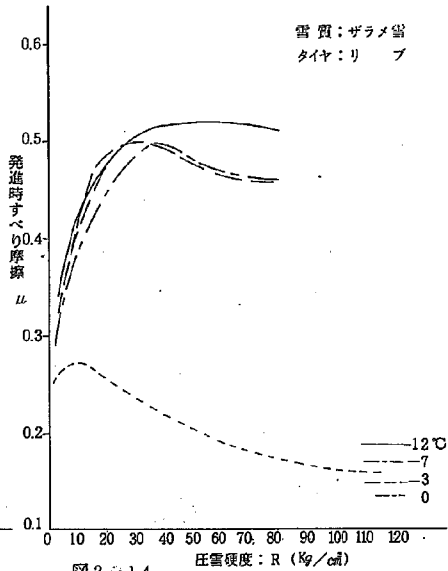


図 2-14
雪温別の発進時摩擦係数と硬度の関係

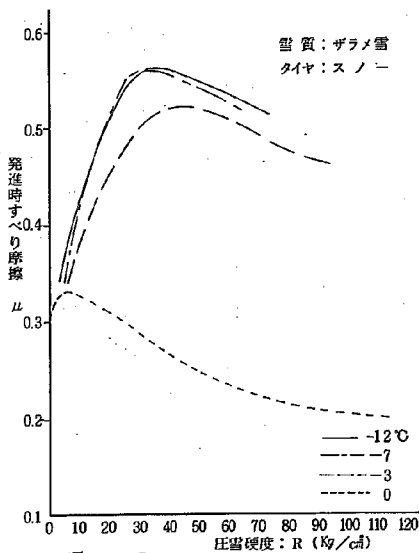


図 2-15
雪温別の発進摩擦係数と硬度の関係

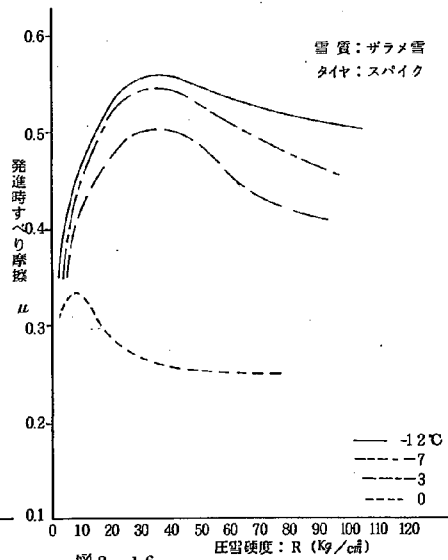


図 2-16
雪温別の発進摩擦係数と硬度の関係

454

度は、それぞれ変化があり、設

定温度が0℃の場合は、各タイヤ共に μ が小さく、極大の山が硬度の低い所に現われ、ザラメ雪での山は、 $R = 0$ 付近に集中し、硬度が大きくなるに従って μ が減少する形を探っている。各図より、 μ の極大値が現われる硬度を示せば表2-9の通りとなる。

資料 雪	測定 タイヤ	温度	0℃	-3℃	-7℃	-12℃	備考
			しまり雪	リブ	15(Kg/cm ²)	20	
	スノー	15	25	40	35		
	スパイク	15	20	55	25		
ザラメ雪	リブ	5	25	35	50		
	スノー	5	40	30	35		
	スパイク	5	35	35	35		

表2-9 μ の極大が現われる硬度

表の中で極大の位置は、低温になるにつれて、硬度の大きい方に進み、 μ の値も大きくなる一般的傾向があるが、しまり雪のリブは-7℃の方が-12℃より μ が大きくなり、硬度の山も高硬度に移るが、ほぼ同じ形をとっている。

この結果から、ある硬度で μ が極大値に達し、しかも低温になるに従って、 μ の値が大きくなり、極大値が硬度の大きい方にずれるということは物理現象としても非常に興味あるものであると同時に、圧雪時の車輛通行上、工学的にも重要な項目の一つとなろう。

以上のことから、発進時の $\mu-R$ の関係で μ に最大値が現われるものとして次のようなことが考えられる。

μ は発進抵抗の最大値(最大トルク)を輪重で除して算出されるが、抵抗力はタイヤのトレッド表面のゴムと雪面との純粋な摩擦抵抗力のほか、トレッドの雪面への食い込みによる圧雪の剪断抵抗が加わり、さらに、ころがり抵抗力に前面の雪を押しつぶす力も関与して全抵抗力が生ずるものと見られる。純粋なすべり摩擦抵抗力は、接触面がすべる時に向面の微細な凹凸の弾性的変力によるものとされているが、圧雪面上のタイヤの発進抵抗には前記のような雪面、塑性破壊力(この場合切削抵抗とも考えられる)が加わるので、この場合の μ は見かけの摩擦係数と考えられる。

また、硬度(R)が大きい時は食い込みが浅く、全面的な食い込みはなく、部分的な剪断抵抗しか現われず、抵抗力の主力はトレッド面と硬い圧雪面との純粋な摩擦抵抗だけであるので μ は小さい値となる。圧雪の硬度 R が小さくなるに従って雪面への食い込みが良くなり、この分の抵抗が増加し、見かけの μ は R に逆比例的に増加する。このことは、対馬(1975)⁽⁷⁾も、 R が大の方がタイヤによる雪面の掘り起し力が小さくなるので μ が小さくなると説明し

$$\mu = \alpha R^{-\beta} \text{----- (14)}$$

の関係になるとして $45 < R < 300$ の場合の μ との相関図を示している。なお、 α 、 β

456

は係数を示す。

一方、さらに R が小さくなると(この実験では $0 \sim 30$)トレッドの食い込みはより安全になるが、圧雪面の剪断力の低下によって抵抗力が弱くなり、 R の減少とともに見かけの μ が小さくなる。このような機構で R に対して μ の最大値が現われるものと考えられる。

また、温度変化について見ると低温の度合いが進むに従って、 $\mu - R$ の曲線が μ について上昇する。これは、低温になるにつれて R が大きくなり、剪断力が増加しトレッドの食い込みによってその効果が増して行くためと思われる。

2) 含水圧雪のすべり試験

0 ℃以下の乾燥圧雪に対して、溶けつつある含水圧雪は硬度が小さく雪温も高いので、すべり係数が変わることは当然考えられる。

このようなことから、ここでは、 -1 ℃で試料雪を圧密して、室温 $+1$ ℃にて $16 \sim 22$ 時間放置し、一部融雪して含水状態となった圧雪の発進抵抗、すなわち、含水比とすべり摩擦の特性について考察したものである。

試験は輪重を 25.0 ㎏に一定とし、タイヤは、リブ、スノー、スパイクの3種について実施した。実験日によって試料の雪の密度に変動があったが、この時の圧密前後の試料圧雪の密度の範囲は表2-10のとおりである。なお、放置前と実験時の硬度を比較すると多少バラツキがあり、しまり雪では実験前の約 $1/8$ に硬度が低下した状態であった。ザラメ雪は、しまり雪と多少異なりその硬度は $1/12$ となった。このザラメ雪の硬度の低下が小さいのは、含水比の差によるものと考えられる。 R と μ の関係について試験した結果より各実験の μ の平均値を算出したのが、表2-11

試料雪	圧雪前の密度 (g/cm^3)	圧雪後の密度 (g/cm^3)	放置時間 (時)	含水比 (%)
しまり雪	0.23~0.32 (0.29)	0.49~0.69 (0.55)	16	44
ザラメ雪	0.48~0.53 (0.51)	0.61~0.71 (0.67)	16	32
ザラメ雪	0.47~0.52 (0.50)	0.61~0.68 (0.65)	22	—
しまり雪	0.32~0.39 (0.33)	0.53~0.72 (0.60)	19	40

表2-10 含水圧雪の実験条件 ()内は平均

試料雪 放置時間	しまり雪		ザラメ雪	
	タイヤ	リブ	タイヤ	リブ
タイヤ	16	19	16	22
リブ	0.21	0.18	0.18	0.17
スノー	0.26	0.20	0.25	0.25
スパイク	0.27	0.23	0.27	0.24

表2-11 含水圧雪の μ の平均値

である。

これによれば、放置時間の長い方が、 μ が小さいが、これは融雪が進み雪面が平滑化されるものと考えられる。 μ をタイヤ種類別にみるとリブが小さく、スノー、スパイクが大きいが、これらはリブに対して雪面へのトレッドの食い込みがきいているものと思われる。

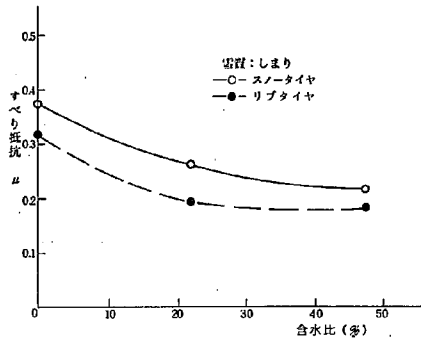


図 2-17 含水比と μ の関係

また、含水比と μ の関係 (データ数が少ないのでここでは、その一例を

示す)を示すと図 2-17 となる。なお、この図の含水比が零多の時のデータは前に求めたものを使用した。

この結果からもわかるように含水比が増大するとかなり μ は低下している。これに、前にも述べたようにタイヤのトレッドの剪断力が低下しているものと思われる。また、タイヤ別で見た場合でも、トレッドの大きいスノータイヤの方が μ の値はやや大きく表われている。

以上のように、圧雪に水分を含んだ場合すべり抵抗値が低下し、自動車の走行には非常に危険な状態になるものと言えよう。

今回の試験では、前に述べたように全層的、つまり、全体的に水を含んだ状態の圧雪についての試験を行なったものであるが実際のしめり圧雪の発生は、しめり新雪の圧縮による圧雪の場合と、暖気や日射によるかわき(寒冷)圧雪が表層から融解して発生する場合があることから全層一様の含水状態と表層だけの含水圧雪を区別して考える必要があろう。今回は、手はじめとして全層しめり、(ぬれ)圧雪のみについて試験を行なったが、物理特性のうち最も重要と思われる含水測定の高難性から、そのデータが少なく、この関係を明らかにし得なかったため、今後さらに、その特性の把握と、気象因子との関係も考えて試験を進める必要がある。

3) 水板によるすべり試験

ここでは、路面上のアイスバーン(凍結)を想定し、水の表面とタイヤ(リブ、スノー、スパイク)のすべり抵抗特性について温度別(0℃、-3℃、-7℃、-12℃)、あるいは、輪重(200kg/輪)について試験を行なったものである。なお、ここで使用した氷の表面は、実際の道路上のものとは異なり平滑面のものを用いた。また、試験方法については、前項のかわき圧雪のものと同じ方法をとった。その結果の一例を図 2-18 に示す。

458

これによると、前出の静摩擦、動摩擦のしまり圧雪の試験でも気温の低下によってすべり抵抗値が増大しているように、氷板でもその傾向がかなり良く表われている。タイヤ別では、スパイク、スノー、リップの順で μ が低下しているが、スパイクの場合は、最も危険と思われる零度前後でかなり高い μ の値を示し気温の低下に伴って増大している。-12℃では0.45の値を示しているのに対して、リップ、スノーの初期(零度)は、 μ の値が0.1~0.13程度と小さく(リップ、スノーとだいたい同じ)気温低下に伴ってスノーは順調に増大し、-12℃ではスパイクと同じ値になっている。しかし、リップは最大で μ の値が0.3程度とスノー、スパイクに比べてかなり低い結果となった。

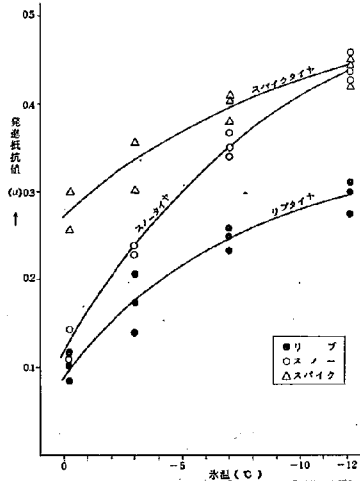


図2-18 氷板による温度と発進抵抗の関係 (輪重: 200kg)

これらの結果から、リップとスパイクとはかなりの差があるが、スノーとスパイクの場合は気温が低い地方(-12℃以下)ではほとんど差がなくどちらを使用してもあまり関係がないものとなる。しかし、気温の高い地方(-12℃以上)では高温になるにつれ、スパイクの効果が明確にでている。この原因としては、氷板の硬度の差によるものと考えられる。したがって、-12℃では、スパイクの痕が氷に食い込むことができないため、タイヤのトレッドの効果のみであることから、スノータイヤと同じ値を示したものと考えられる。また、今回は、輪重200kgのみについて述べたが、スパイクの痕の効果は輪重の増減にも大きく関係するものと考えられ、今後の課題の一つである。

【屋外すべり試験】

この試験は、低温室における試験のように人工的な圧雪作成方法ではなく自然の雪で実物のタイヤによる加圧方式を取り、実際の道路上に発生する圧雪に近い状態の圧雪で、すべり特性等を解明することを目的として実施したものであるが、この試験装置の設置が50年度であるため、1ヶ年分について実施したにすぎない。したがって、データ数(約30点程度)が少ないことから十分な結論を得るまでに至っていないため、今回は、その傾向を示したにすぎない。

まず、この試験方法は、屋外に設けた試験路面に降り積った自然の雪を屋外すべり試験装置の実物タイヤ(リップタイヤ)で転圧して圧雪路面を作り、試験輪(リップ、スノー、ス

459

ノーラジアル、スパイク、リブチェーン)を種々替えて発進、制動抵抗試験を行なったものである。その時の気温は+2℃~-6.5℃で(大部分は+1℃~-5℃)雪温は+0.2℃~-5.4℃(大部分は0℃~-4℃)であった。圧雪密度は、0.3~0.93に及び、大部分が0.4~0.7の範囲となった。また、圧雪の硬度は10~30kg/cm²程度のものであった。

3-3-3. 発進すべり抵抗試験

発進時、つまり、タイヤが発進しようとする時のすべり摩擦を求めたものである。たゞ、低温室の場合と異なるのは、雪質はもちろん、車体自体が前に進むと言うことである。したがって、すべり抵抗値が小さい場合は、車体は動かない。このように、走行加速が外見的に認められないものを発進不能とすると、今回の試験では、リブ、ラジアルタイヤは100%発進不能となり、スノー、スパイクタイヤは約50%がこれに相当した。リブチェーンも発進不能が9回中1回あった。発進不能時の μ の平均値はほとんどが0.1以下で、この占める割合は83%となった。

この時の摩擦係数は、図2-19の記録波形(H:最大、L:空転時)から発進時の最大すべり摩擦係数と空転時の摩擦係数を求めたもので、その結果の一例(平均値を示す)は表2-12のとおりである。

この結果から、概略的ではあるが発進時の最大摩擦係数は、リブチェーンで次いで、スパイク、スノー、リブ、スノーラジアルの順となった。空転時では、リブチェーンを除き(空転時の回数が少なかったため)スパイクタイヤが0.08で他は0.02~0.03となった。

この結果と前出の低温室内の試験結果とでは多少の差が見られる。これは、圧雪表面の状態の差によるもので屋外においては圧雪表面に水分がかなり見られた

点等から μ の値が低下したものと考えられるが、いずれにしても今回の測定条件における圧雪の表面での μ はだいたい0.1程度のもとなろう。しかし、今回は前述のとおりデータが少ないため、今後は、すべり率、あるいは、雪質が変化した場合のすべり測定を行う予定である。

3-3-4. 制動時のすべり試験

この装置は、発進時走行および、制動時(最大10km/h)のすべり試験について行うことができる。ここでは、手始めとし低速(5km/h)による制動時の試験を行なったものである。なお、測定条件は発進

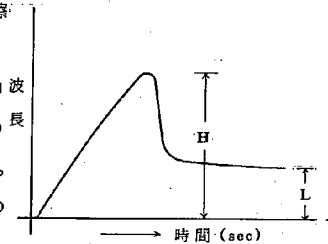


図2-19 発進時の波形

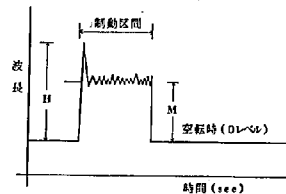


図2-20 制動時の波形

時と同じである。この時の記録波形は、

図2-20に示す。

測定結果は、このように記録された波形から最大値 (H) と平均値 (M) とのすべり摩擦抵抗値を求め、その平均値を表2-12に示した。

この表から、今回の試験時の硬度が10~30の範囲であったため、これに限定すれば、リップ、ラジアルの値は発進時と同じように制動時も小さく、特にラジ

アルが劣っている結果となった。スノータイヤは、発進時のリップと同等か僅かに上廻るが、制動抵抗がや、大きい。スパイクはスノーよりも全般的に大きく、リップチェーン付は他のタイヤより発進、制動とともに当然大きい結果となった。

タイヤ	発進時		制動時	
	最大値	空転時	最大値	平均値
リップ	0.22	0.03	0.23	0.15
スノーラジアル	0.15	0.02	0.19	0.13
スノー	0.23	0.03	0.25	0.17
スパイク	0.24	0.08	0.30	0.19
リップチェーン	0.36	—	0.33	0.23

表2-12 屋外すべり試験によるタイヤ別すべり摩擦係数

4. まとめおよび問題点

こゝでは、路面上に発生する凍・圧雪の硬度、密度特性（国道18号線藤沢地区での調査が主体）と、タイヤと凍・圧雪面の発進時のすべり摩擦特性（室内試験が主体）について実施したものであり、その結果を要約すると次のとおりである。

1) 凍・圧雪の硬度・密度

現地、つまり実際の道路上に発生する凍・圧雪現象は気象条件の他に交通量、除雪、薬剤による要因が加わるため非常に複雑であり、定量的に把握することはできなかったが、今回得られた結果から推測すると次のことが言える。

- ① 平均気温が0℃±2℃前後のところでは、発生する乾圧雪の平均的硬度は40~80kg/cm²、水が70~130kg/cm²程度である。また、湿圧雪、水ではかなり軟化する。なお、乾いた圧雪および、水については、ほとんど夜間（1~5時頃）が多く、湿ったものは、夕方、朝方に最も多く発生する。
- ② 圧雪の密度は、降雪中が比較的軽く（0.6g/cm³前後）、次いで、夜間（0.6~0.7g/cm³程度）であるが、日射や気温の上昇に伴って圧雪の表面が融解されシャーベット状になった時は水分を含んでいるため最も重く（0.8~0.9g/cm³程度）なる。
- ③ 圧雪の硬度を変化させるものとしては、気温、日射、交通量等があげられるが、今回の結果

では表2-5に示したように気温との相関が、降雪中で5.18%、無降雪時で6.76%とかなり高く、交通量では、降雪中が2.34%、無降雪の場合3.76%となった。このように、交通量による影響は比較的少なく表われているが、気温の影響は室内試験結果(図2-8)からもわかるように、凍・圧雪を硬化させる大きな要因となることがわかった。

- ④ 圧雪硬度と交通量(10~200台/h)、気温(-6℃~+4℃)との関係は図2-6に示したように

$$Y_1 = 48.9 - 5.7 X_1 + 0.23 X_2 \text{ ----- (15)}$$

$$Y_2 = 57.0 - 6.4 X_1 + 0.12 X_2 \text{ ----- (16)}$$

ここで、

Y_1 = 降雪が無い場合の圧雪の硬度(kg/cm²)

Y_2 = 降雪時の圧雪の硬度(kg/cm²)

X_1 = 気温(℃)

X_2 = 交通量(台/h)

を得た。この結果、圧雪の硬度は降雪中より降雪が無い場合の方が硬度範囲が広く、さらに、硬くなることがわかった。なお、これは圧雪の硬度が硬くなればなるほど、除雪の難易度を増すものであり、除雪時期決定の一資料となる。

- ⑤ 雪温0℃で圧雪の硬度と密度の関係は、図2-7(室内試験による)に示したように、圧密荷重が増大するにつれ、硬度が50kg/cm²程度までは密度が急上昇し(ここでは0.68g/cm³程度)、それ以後は、緩やかな勾配で上昇することがわかった。また、新雪の場合は、一回小さい荷重で転圧されるとしまり雪と同じ傾向を示すことがわかった。

2) 凍・圧雪のすべり摩擦

- ① 凍・圧雪のすべり摩擦係数は、温度によって大きく左右され(図2-10、表2-8、図2-18等参照)、0℃前後が最もすべり易い。これは、北陸地方のように比較的気温の高い地方で自動車を走らせる場合非常に危険性が多いことを示し、気温の低い地方(札幌等)では比較的安全側にあることを示している。しかし、気温の低い地方でも冬の始めとか4月ごろの気温の高い時期には北陸の場合と同じことが言えよう。

- ② すべり摩擦係数と硬度の関係は、図2-11~16(温度、タイヤ別)に示したように、すべり摩擦係数は硬度が比較的弱い10~50kg/cm²程度(表2-9に示したように、タイヤ、気温、雪質によってその最高値が異なる)に最大値が表われ硬度が増大するにつれ低下することがわかった。これは、タイヤのトレッドによるもので、すべり摩擦係数が最大になる時はトレッドが最も良く雪に食い込んだ状態(剪断力が大きい)であり、硬度が増大するとこの食い込みがなくなりすべり易くなるものと考えられる。また、気温と硬度の関係式は(17)式に示し、その係数を表4-1に示した。

- ③ すべり摩擦係数は、圧雪の含水状態を大きく左右される。図2-17にその一例を示したように、含水比が0%から20%までは急激に低下し、含水比の増大に伴い緩勾配となる。この傾向は、雪質等によって異なるが、いずれにしても圧雪の表面が気温の上昇、日射の影響で湿ってくるとすべり易く危険な状態とならう。
- ④ スパイクタイヤの鋸の効果は、図2-18に示したように、スノータイヤに比べ気温が高い(0℃～-12℃)所で発揮し、-12℃以下になるとスノータイヤとほとんど同じとなることがわかった。これは、凍・圧雪路面の硬度差によるもので、-12℃以下では鋸の食い込みがほとんどないことを示したものである。
- ⑤ この試験の雪質、タイヤ、硬度別による発進時のすべり摩擦係数の範囲をまとめると表2-13のとおりである。
- ⑥ 以上は、室内試験の結果について述べたが、室内での凍・圧雪の作成は既述の通り人手による作成方式を取っているため実際の道路上に発生する凍・圧雪の質とは多少異なる。そこで、自然積雪の条件下で実施するために屋外にすべり試験装置(写真2-2参照)を設置し、すべり試験を実施したが、一年分のデータのみのため、要因別等の試験を行うまでに至らなかった。したがって、今回は、一般的傾向を示したものである。この結果(表2-12参照)は、室内試験と同じような傾向を示しているが、いく分すべり摩擦係数が低く出ている。これは、含水比、あるいは、すべり率等によるものと考えられる。

供試体 タイヤ	硬度範囲	R<10	10 < R < 60				60 < R の推定 最少値(0℃)
			0℃	-3℃	-7℃	-12℃	
しまり	リブ	0.20	0.24~0.32	0.35~0.40	0.42~0.46	0.42~0.46	0.21
	スノー	0.22	0.27~0.32	0.38~0.42	0.40~0.48	0.45~0.52	0.23
	スパイク	0.22	0.25~0.39	0.35~0.39	0.43~0.51	0.43~0.55	0.24
ザラメ	リブ	0.20	0.17~0.25	0.45~0.52	0.42~0.51	0.44~0.52	0.14
	スノー	0.26	0.23~0.31	0.43~0.53	0.48~0.57	0.49~0.58	0.19
	スパイク	0.26	0.24~0.30	0.47~0.51	0.49~0.56	0.49~0.57	0.24

供試体	タイヤ	0℃	-3℃	-7℃	-12℃
※ 水	リブ	0.08~0.12	0.13~0.21	0.23~0.26	0.27~0.31
	スノー	0.11~0.24	0.25~0.28	0.33~0.37	0.42~0.46
	スパイク	0.26~0.30	0.30~0.36	0.38~0.41	0.42~0.45

※ 水は水温のみ

表2-13 発進時のすべり摩擦係数(μ)の範囲(室内試験による)

以上、試験結果の概略的なまとめを行なったが、ここで述べたことは、最終目的（既述のとおり）のための第一段階にすぎない。したがって、今後はこれらの不足分の試験と、

- ① 凍・圧雪の薬剤散布後の質変化、あるいは工学特性の解明。
- ② 除雪後の凍・圧雪特性と除雪機械から見た凍・圧雪特性の解明。
- ③ 室内すべり試験結果（発進時）と現地との相関性等に関する検討。
- ④ タイヤのトレッドの剪断力、および、前面に雪がある場合の走行抵抗等の解明。
- ⑤ すべり率に関する検討。

等に関する諸問題を解明し、除雪時期、方法、交通規制、道路構造および、予測手法等の検討を行い有効的、かつ、合理的な雪害対策を確立する必要がある。

〔凍・圧雪の工学的分類に関する検討〕

1. 現在の凍・圧雪分類の考え方

積雪の分類名称は、日本雪氷学会によって昭和42年に作成され、現在広く使用されている。この分類は、自然に降り積った雪の変態の過程を追って分類したものである。道路上の積雪は直ちに車軌によって圧密、あるいは攪乱され人工が加わるので自然積雪とは、その変態過程や物性が異なる。そこで、積雪の変態に着目して道路積雪の分類が昭和44年に提案され、路面積雪分類試案ができた。

これは、昭和43年建設機械化協会に道路除雪委員会⁽⁶⁾が設けられ、北海道地区、新潟地区(山間地)での路面積雪の種類とその性状や発生などについて調査を行いまとめたものである。その調査方法は除雪の状況、凍・圧雪の種類(新雪、ふきだまり、粒雪、圧雪、氷板、氷膜、水べた)、あるいは、硬度、含水率、粒形、混入物状況などについて定性的な測定を行ったものである。

この調査は、北海道では開発局等によって1月～3月に5ヶ所で延べ74日調査したもので、そのほとんどは気温0°C以下のものである。路面積雪の状態は、新雪、圧雪、氷板がほとんどであった。

一方、新潟では雪害実験研究所等によって、1月～3月に3ヶ所で延19日間調査し、その内7日間は気温がプラスで圧雪、氷板、水べた雪の時のものである。

これらの結果を総合して木下らによって路面積雪分類試案が作成されたが、一部調査不十分(水べた雪)のものがあつたので翌年これを重点に調査し、その結果、修正補足された試案(表3-1)が発表された。

名称	特徴	雪粒状態	密度	硬度
新雪	降ってすぐ	降雪雪片	0.1前後	なし
こなゆき	(粉状)車の通過後舞い上る。舗装面にそう地ふおき。	粒径0.05~0.3mmの相互につながらのりない粒。	0.27~0.41	なし
つぶゆき	(粒状)舞い上らない。熱変態、機械的攪拌、化学処理で出来る。	粒径0.3mm以上の相互につながらのりない丸い粒。	0.28~0.50	なし
圧雪	(板状)おしつめられた雪	粒径0.05~0.3mmの雪粒が相互に網目をなしてつながり合う。	0.45~0.75	20~170
氷板	(板状)圧雪に水が滲みこんで凍ったもの、厚さ1mm以上	粒径0.5~2mmの多結晶氷で直径0.1~0.5mmの気泡を含む。	0.75以上	90~300
氷膜	(膜状)水の膜が凍ったもの、厚さ1mm以下	粒径0.1~0.4mmの多結晶氷で直径0.01~0.1mmの気泡を含む。		
水べたゆき	(液状)雪がとけたもの、車の通過ではわ上る。	粒径1mm以上の相互につながらのりない粒。	0.8~0.96	なし

表3-1 道路上の雪氷の分類表(文献-1による。)

この試案は、道路上の雪氷を雪質の変態過程に注目して分類され、新雪、こな雪、つぶ雪、圧雪、氷板、氷膜、水べた雪の7種類とし、各雪質の特徴、粒の状態および、密度範囲などを示した。この時の雪質、形態等は次のとおりである。

新雪は、自然雪分類名称の中の新雪で、結晶形をとどめ車両に余りかき乱されない降ったばかりの雪である。

こな雪は、車輛の走行によってかき廻され新雪の雪片の枝などがちぎれて微細化したもの、あるいは、走行中のタイヤの熱で結晶の尖端が溶けて丸味のある小粒に変態したものである。乾燥状態では車の通過によって舞い上って視程障害となる。

つぶ雪は、こな雪の粒子が凝集して03mm径位になったものか、あるいは、圧雪が溶けて、ザラメ雪になったものを指している。こな雪の熱変態のほか、溶けかまった圧雪がゆるんでタイヤによって機械的に攪乱されて出来たものであり、この場合、暖気や強い日ざして圧雪がゆるむことと、水点降下剤の散布によって圧雪の結合が弱くなることがある。

氷板は、圧雪の表面が溶けて、その水が圧雪層に浸透して再凍結して生じ、この繰り返して氷板は厚くなって行く。

2. 現状の凍・圧雪分類手法の問題点

現在、凍・圧雪の名称として、表3-1の分類が使用されているが、前にも述べたように圧雪の発生過程は、気象、地形等の条件によって種々変化し、その種類も多く性質も大きく異なるため、地域によっては合致しない所も多い。その原因としては、この分類が寒冷地を主体としていることと、道路管理を行う上での工学的（硬度、すべり抵抗）見地から十分満足されていない等の点がある。そこで、この項では、前のテーマで述べた凍・圧雪の発生特性、あるいは、すべり特性から現在の分類手法の問題点について述べることにする。

2-1. 凍・圧雪の発生状況から見た場合の問題点

図3-1は、気温の低い札幌と比較的高い北陸の高田との降雪と平均気温の比較を行なったものである。この図からもわかるように、気温差では平均5°C前後の差が見られ、さらに、札幌の場合は12月～3月までは、平均気温で0°C以下という非常に寒い地域でもある。これに対し、高田は札幌に比べ降雪量は非常に多いが、平均気温が冬期

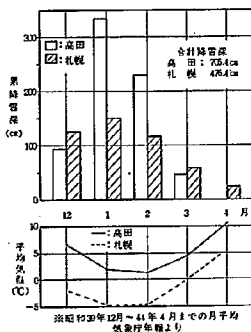


図3-1 札幌、高田の降雪、気温の比較

間通してプラス側にあり、比較的暖かい地域である。この差を凍・圧雪の発生パターンから見ると、札幌のように気温が低い地域では、降雪があるとすぐに圧雪になり、日中の日射の影響等があっても圧雪の表面だけが融解（全部溶けることは非常に少ない）され気温低下によって凍結する。そのような繰り返しが続き常時、圧雪・凍結となっているケースが多いが、高田のように気温が比較的高い地域では、水分の含んだ圧雪が多く（凍結することは少ない）朝方からの気温の上昇、あるいは日射の影響によりほとんど融解されているケースが多い。このことは、表1-3に示した結果からもわかるように、しまり圧雪（水分が0~5%程度）は全体の32%にすぎず、ほとんど弱圧雪（水分が10%前後含んでいるもの）かジャムに近いものとなっている。また、図1-3の気温別の降雪パターンから見ても、新雪は零度付近が最も多く降ることから新雪自体も水分を含んでおり、タイヤによって転圧されれば弱圧雪かジャム状となる。このように気温の高い地域では、“新雪”と言う分類はあまり重要視されていないが、“弱圧雪”、“スノージャム”の発生比率が高いことから、この項を設けた方が工学的（次項で述べる）に意義のあるものと考えられる。

また、“こな雪”も新雪と同じように気温の高い地区ではあまり必要がなく、“つぶ雪”もこな雪の凝集によるケースは考えられず、その成分は融雪に向っている圧雪がタイヤの擾乱によって生じる“ざくれ雪”と称している雪質に相当するものと考えられる。

2-2. 凍・圧雪の工学特性から見た場合の問題点

凍・圧雪道路の管理を行うには、どこに、どういう種類の凍・圧雪が発生し、その危険性はどの程度かを概略的に察知することが必要である。このためにも工学面（すべり摩擦抵抗値）からのアプローチが必要と言えよう。

気温の高い地方では、前項で述べたように凍・圧雪表面、もしくは、全体に水を含んだ、いわゆる、弱体化した凍・圧雪が多い。この現象は、すべり特性（図2-11~17）から見ても非常に危険な状態となる。この特性を見るためにすべり試験におけるスノータイヤ（発進時）の測定結果全部を用い、凍・圧雪がぬれた状態（弱圧雪）と乾いた状態（乾圧雪）に分類し、すべり抵抗値の範囲を相対度数で示したのが図3-2である。なお、この表を作成するに当たっては、硬度的影響を無視し（硬度が10 kg/cm²の時と他のものではすべり抵抗値が0.10

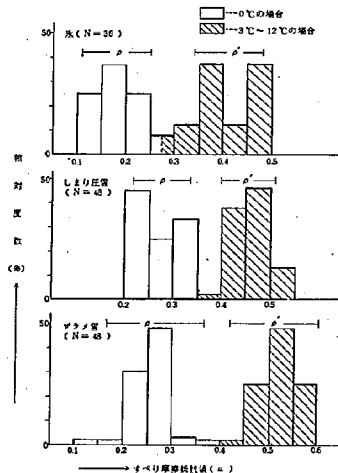


図3-2 凍・圧雪の分類別すべり摩擦抵抗の相対頻度分布（ ρ : 95%の信頼区間を示したものである。N: データ数を示す）

程度しか違わないため)、さらに、気温別については、各気温ごとのすべり抵抗値の差が見られる雪温が0℃(ぬれ状態)と、それ以下(乾き)の雪温の2種類について分類した。

これによると雪温が0℃の場合と、それ以下の温度の場合とでは各雪質とも明確に分類されることがわかる。たとえば、ザラメ圧雪は95%信頼区間で0℃の場合、 μ が0.16~0.34、それ以下の温度に対しては、 μ が0.42から0.58とはっきり分かれている。また、この時の分散も比較的小さな値を示している。なお、ザラメ雪(現在の圧雪分類ではつぶ雪)の場合バラツキが大きく95%信頼区間で、しまり(現在の圧雪分類では圧雪)が0.08程度のすべり抵抗値の差に対し0.2程度の差となっているのは、ザラメ雪は温度条件によって大きく変化する雪の粒子はしまりに比べ大きく、かつ、水分を含んでいるため気温が低下すると、その表面の水分が昇華し凹凸が発生するためにすべり抵抗値に大きな差が生じる)するためと思われる。

以上のように、湿と乾ではすべり特性から見てもその危険性が異なるため、現在の凍・圧雪の種類他に湿、凍・圧雪の項を用いるべきと考えられる。

3. 凍・圧雪のすべり特性から見た工学的分類試案

前項で路面の雪氷形態の分類試案に対する意見と工学的見地からの問題点にふれ、気温の高い地方では、実用的にはこな雪および新雪の分類の必要性の少ないこと等を検討した。道路交通上、路面の雪氷の工学的特性として、発進、走行、制動時の摩擦抵抗の如何が重要であり、この抵抗値が各雪氷状態でも0℃付近で圧雪に水分が介在してしめりの状態になった場合や、硬度の低下した場合は、凍結乾燥状態のものとは異なり別種のような性質を示す。この特性については、前節の試験結果(工学特性)でふれたように、この見地から工学的分類をする必要がある。

それで、今回は表3-1に示した現在の分類表から、新雪、こな雪を一応除外し、乾燥(凍結)状態の雪質を基本とし、積雪状態のものは圧雪とつぶ雪を残し、また、氷状態は氷板と氷膜として、これを図3-3の縦座標にとり、横座標に乾湿の程度をかわき、ぬれ(しめり)、水びたしとして図のような分類方式を作成した。

この分類原案の作成に当っては、前項でも述べたように、各雪質の出現頻度(凍・

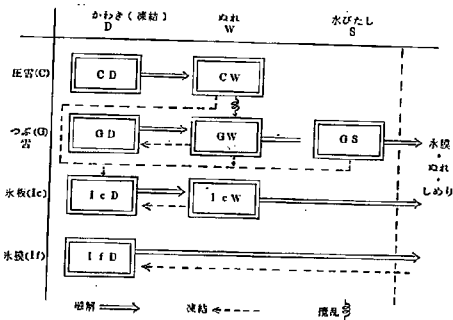


図3-3 凍・圧雪の工学的分類原案

圧雪の発生特性に関する調査)は、ジャム状(GS)が最も高く、次に圧雪(CD)、ぬれ圧雪(CW)、凍結(I f D又はI c D)の順となり、また、すべり特性から見ても重要なものは上記の各雪質と見られるので、一応この分類をすべり特性から見た工学的分類の原案とした。

各分類項の雪質の成因や特徴、および、工学特性についてまとめたものが表3-2である。現地観測定点で観察した雪質の名称は、この原案のような乾、湿による分類意識が十分に徹底しなかったので、雪質の名称に混乱があった。それで、現地の分類名称と、この地方(北陸)で一般に通称されている名称も加えて、それぞれこの案の分類項に相当すると見られる雪質名称の欄に書き添えた。

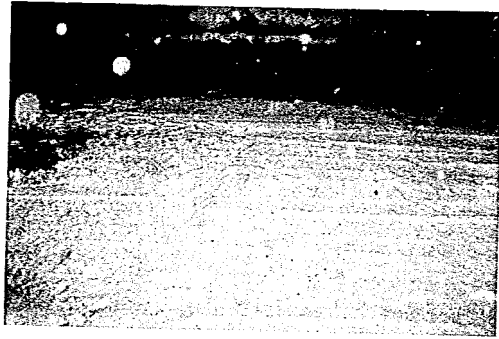
この表の密度の欄は、8ページからの凍・圧雪に関する現地調査結果と23ページからの凍・圧雪の工学的特性において検討した結果によって記入したものである。工学特性は主として室内実験によったものである。室内実験では野外より試料雪を採取し、これを低温室内で人工的に圧密、あるいは、注水によって含水量を変えて所用の試料雪を作ったので、現場の圧雪とは特性に多少の差があると共に、発進時の特性について検討したが(走行時はこれよりすべり抵抗が低下する傾向にある)、定性的には各分類項の特性を表わしているものと考えられる(分類名称別の凍・圧雪状態は写真3-1に示す)。現地の圧雪は降り積るたびに何層にも転圧されて形成されるが、試料圧雪は単層を強制圧縮して作ったものであり、硬度や摩擦係数の値には多少の差異があるものと考えられる。したがって、凍・圧雪分類の決定には屋外実験(今回は一例を示したにすぎなかった)を含めた現地実験によって修正する必要がある。

なお、この表3-2の凍・圧雪分類試案では、一応、新雪、こな雪の分類を取り除いているが、気象条件の厳しい地域では、この現象が十分考えられるため加えることも必要となろう。

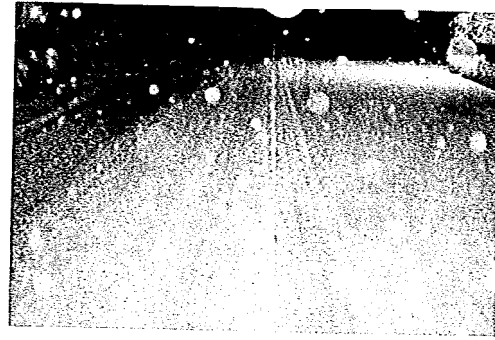
分類記号と名称		成因と特徴	別称	粒径と組織	密度 ρ	硬度 R (木下式)	発達摩擦係数 μ (スノータイヤ)	現地発生履歴 (18号試験地区)		木下分類試験の対応 と圧雪の層構成
								層別	発生状況	
C	CD かわき圧雪	かわき新雪が転圧されたもので、水分のない圧雪。白色	圧雪 しまり	粒径0.05~0.3mmの雪粒が立体的な結合を形成する。	g/cm ³ 0.45~0.75	10~50 100<	0.38~0.52 0.33~0.50	32%	R = 40~55が50% 75%が気温0℃以下	圧雪 単層又は複層(下部、氷板)
	CW ぬれ圧雪	ぬれ新雪が転圧されたものと、CDが融解などでしめり、または、ぬれたもの、表面など部分ぬれと全面的にしめったものもある。白ダク色	湿圧雪 しめり圧雪 弱圧雪	上のCDの結合部または結晶粒界に水分を含む。	0.45~0.75	10~50	0.23~0.34 (風外発達実験 0.17~0.23 風外制動実験 0.12~0.21)	13	R = 30~60が50% 70%が気温0℃以下で発生	対応なし 単層又は複層 (表面ぬれ、下部かわき圧雪)
G	GD かわき粒雪	GWやCWが凍結しつゝあるところを攪乱、粉碎されたもので、乾いた砂状を呈する。晴れた夕方から夜半に多発。	かわき ザクレ かわき ザラメ	粒径3mm以上で、結合が全くない砂状の雪質。人工のかわきザラメ雪。	0.28~0.50	1~15 10~70	0.25~0.45 0.45~0.60	複合で 出 現		対応なし 単層又は複層 (下部、氷板および複合層)
	GW ぬれ粒雪	CWが車輦で切削、攪乱し、生成される場合とタイヤによって圧密され硬化するものもあり温度低下によって氷板状になることもある。	ぬれザクレ ぬれザラメ ジャム	粒径は上のGDと同じであるが付着水で弱い粘着性を示す。	0.4~0.7	1~10 10~100 (温度低下 の場合)	0.25~0.35	53	51%が気温0℃以上	つぶ雪 単層又は複層 (下部、かわき圧雪および氷板)
	GS 水べた雪	CWの融解が進み、水分を増し(含水率40%以上)雪粒と水の混在が認められ、シャーベット状を呈する。また、新雪が強い融解のもとで攪乱されたものはアイスクリーム状である。いずれも、車輦の通過ではねあがる。凍結の可能性もある。	シャーベット 水べた ジャム 大根おろし	粒径は3mm前後で自由水を含み、粘着性がある。アイスクリーム状のものは粒径1mm以下が多く、粘着性がある。	0.80~0.96	<1	0.25~0.39	53	77%が気温0℃以上で発生	水べた 単層
Ic	IcD かわき氷板	CW、GWに融解水が浸透して再凍結し、各々の雪粒が結合し、氷状に成長した状態。	凍結 アイスバーン	粒径が0.5~2mm程度で顕微鏡的に多くの気泡を含む氷の層である。	0.75<	(90~300)	0.10~0.24	複合で 出 現	気温0℃以下	氷板 単層又は複層 (下部かわき圧雪)
	IcW ぬれ氷板	かわき氷板の表面が日射等の影響によって融解され表面に氷膜を形成した状態。	凍結 アイスバーン	"	"	(")	0.23~0.50	"	全体では0℃以下であるが表面付近は0℃	氷板 表面に氷膜
IF	氷膜	路面の水分が凍結して氷皮を形成したもので、運転中、判別し難い場合がある。	アイスバーン	粒径が0.1~0.4mmの多結晶水で小さな気泡がある。	-	-	ほぼ氷板と同じ	1	気温0℃以下	氷膜 単層又は2層 (下部かわき)

表3-2 すべり特性から見た凍・圧雪の工学的分類原案(主として室内実験による)

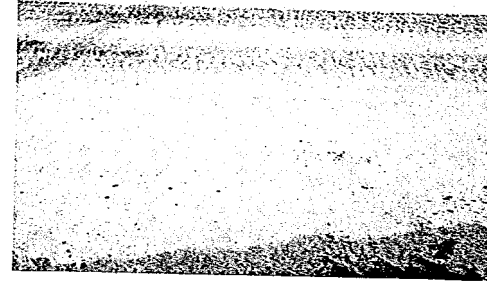
470



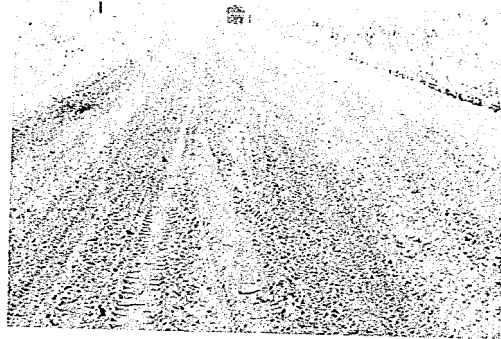
路面積雪.N.(New Snow)



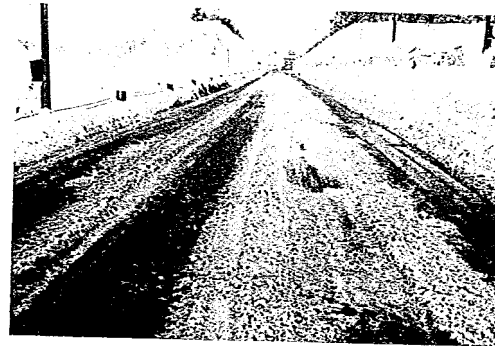
圧雪.C.D.(ComPact.Dry.Snow)



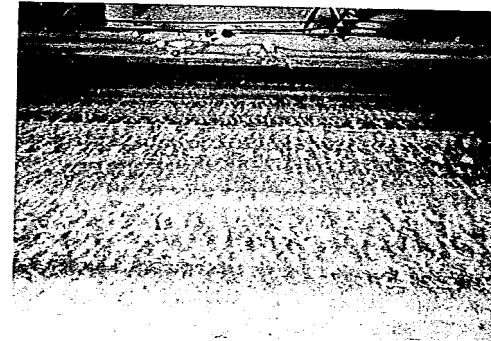
圧雪.C.W.(ComPact.Wet)



つぶ雪.G.W.(Grainy.Wet.Snow)



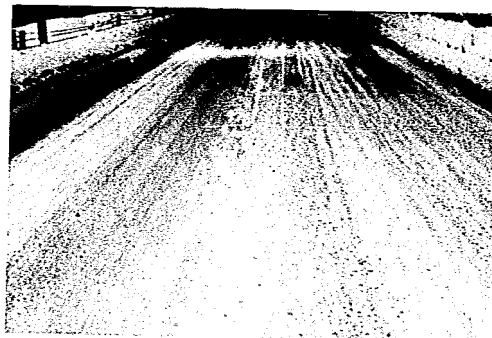
水ベタ.S.(Slush)



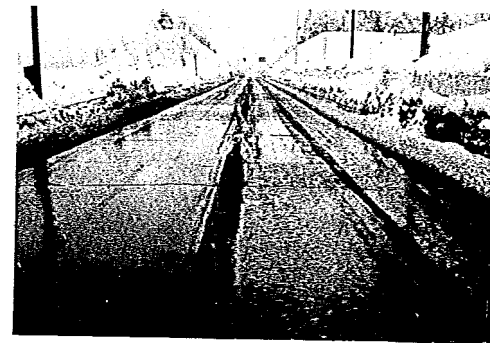
氷板.I.C.(Ice.Crust)



氷板.I.C.(Ice.Crust)



氷膜.I.f.(Ice.Film)



水ぬれ.W.(Wet)

写真3-1. 凍・圧雪の分類と路面状況

471

[冬期間における交通の管理・ 運用に関する考え方]

冬期における積雪地方の道路管理の課題は除雪とすべり対策となるが、路面状態によってすべりの特性も異なることは当然であり、このため路面雪氷状態を道路管理の見地から前項の表3-2のような分類原案を作成した。各分類項の発生と気象因子との相関や各項のすべりに関する性質について統計処理と試験的研究を行なって来た結果、気象条件から凍・圧雪発生の判断基準となる資料を得、また、凍・圧雪の工学特性に関する試験から、各分類項のすべり特性のガイドラインを得た。そこで、ここでは、これらの結果を基に、タイヤ、雪質、気温別の発進摩擦係数の簡便式、図の作成と自動車の発進限界、縦断長の試算、あるいは除雪、薬剤散布の時期等に関する考え方について述べる。

1. 凍・圧雪の発進時のすべり特性について

1-1. 発進摩擦係数の簡便式および図

すべり抵抗値を簡単に検知することは、スリップ警戒情報等の道路管理に大きな効果を与えるものである。そこで、ここでは、前項で得られた発進時のすべり摩擦係数の結果から推定値を求めることとした。

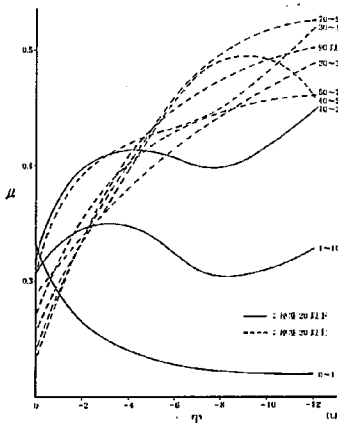


図4-1 硬度(R)をパラメーターとした
「気温」と摩擦係数の関係
—スノータイヤ、しまり圧雪の場合—

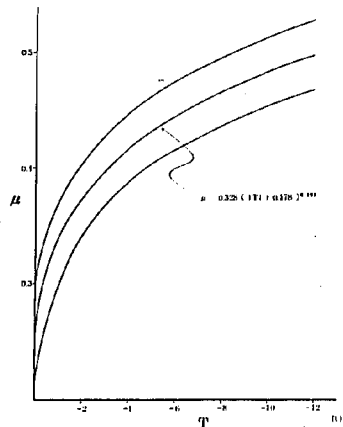


図4-2 硬度(20 < R < 70)を限定した
場合の T-μ の関係
—スノータイヤ、しまり圧雪の場合—

すべり摩擦係数を求めるためには、すべり特性に関する試験でも述べたように、気温（雪温）、雪質、硬度等の要因に大きく左右されることから、これらの項目を現地で測定する必要がある。しかし、気温（ T ）と硬度（ R ）との関係は、図4-1の一例に示すように、 R が20以下と70以上を除外した $20 < R < 70$ ではそれぞれの相関曲線はほぼ同形で、各雪温に対して μ は±0.03の巾でほぼ一致していることがわかる。これらの曲線の包らる範囲を描けば図4-2となり、その中心曲線は

$$\mu = a (|T| + \alpha)^b \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 a , α , b : 係数 T : 雪温

で表わされるため、ここでは、圧雪の硬度を $20 < R < 70$ の範囲に限定（水については、 $R > 90$ とした）し、雪温のみで推定する方式をとった。各タイヤ、雪質別の係数は表4-1に示す。

また、この関係式から μ を簡便に求める方法として、図4-3, 4, 5を作成した。この図から、雪温（ T ）と分類項の雪質とを結び、延長して μ の

タイヤ別 係数	雪質			
	しまり(C)	ザラメ(G)	氷(I)	
リブ	a	0.336	0.331	0.175
	b	0.115	0.189	0.172
	α	0.020	0.050	0.110
スノー	a	0.328	0.401	0.198
	b	0.167	0.143	0.303
	α	0.178	0.020	0.100
スパイク	a	0.371	0.395	0.267
	b	0.095	0.141	0.219
	α	0.040	0.040	1.050

表4-1 $\mu = a (|T| + \alpha)^b$ の係数

(リブタイヤ)

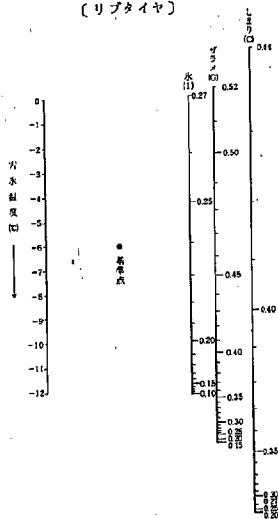


図4-3 発進時の摩擦係数(μ)を雪氷温(T)から求める簡便図($20 < R < 70$)

(スノータイヤ)

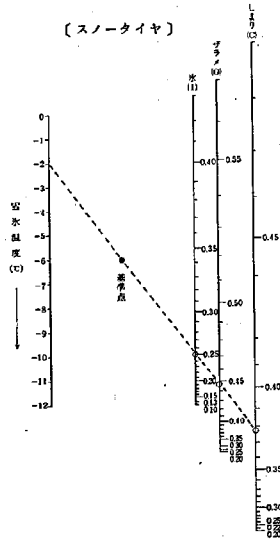


図4-4 発進時の摩擦係数(μ)を雪氷温(T)から求める簡便図($20 < R < 70$)

値を求められる。たとえば、スノータイヤの場合、雪温が -2°C で雪質がしまり (C) の時は図 4-4 からすべり摩擦抵抗値は 0.375 となりザラメ (G) の時は 0.445 となる。氷 (I) の時は 0.25 で表わされる。このような方法で、現地の圧雪、氷の表面温度と雪質がわかれば、簡単に μ の推定値を求めることができる。なお、ここで言う雪温が $-1 \sim 0^{\circ}\text{C}$ の範囲は湿で、 -1°C 以上は乾き圧雪を示している。

以上のように今回は、圧雪の硬度 (R) の範囲を $20 < R < 70$ としているが除外される分、たとえば、 $R < 20$ の場合 (新雪か水分を多く含んだザラメ雪に見られる) は、非常に少ないが図 4-1、あるいは、図 2-11~16 によって解説することができる。しかし、 $R > 70$ の場合については、現地の凍・圧雪の測定結果 (国道18号線藤沢地区) では、発生件数が少なかったこと等から十分なデータがないが、その傾向としては、 $20 < R < 70$ の圧雪のすべり摩擦を求める式から、およそ推測できるものと思われる。

〔スパイクタイヤ〕

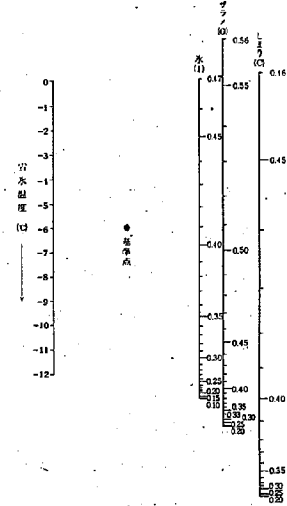


図4-5 発進時の摩擦係数(μ)を雪氷温(T)から求める簡便図 ($20 < R < 70$)

1-2. すべり摩擦係数と発進勾配

凍・圧雪路面での交通渋滞の原因としては、自動車が走行中に危険を感じ急ブレーキをかけスリップし事故あるいは、横向き (道路と直角になる) になり他の車を防げるものと、上り坂でなんらかの理由で停止し、次に発進しようとした場合これが発進不能となるケースがあげられる。

ここでは、今回の測定が後者の場合を対象としていることから発進勾配の限界、および、坂道発進の加速手法等について検討 (試算) した。

1-2-1. 限界発進勾配

自動車が直線区間の上り坂で発進可能かどうかは、次式 (文献-3による) による。

$$M (f_0 + i + \alpha) < M \cdot f \cdot \beta \dots\dots\dots \text{⑧}$$

ここで、M : 自動車の全重量 f_0 : ころがり抵抗

i : 勾配 α : 加速度

β : M に対する駆動輪の荷重配分係数

f : すべり摩擦係数

この式から、 β （空車時）を乗用車の場合0.41、トラック0.43、トレーラー0.38とし、発進時のすべり摩擦抵抗値と発進限界勾配、つまり(18)式が等しくなる場合（ $\alpha = 0$ とし、 $f_0 = 0.02$ とした）について試算すると図4-6のとおりとなる。

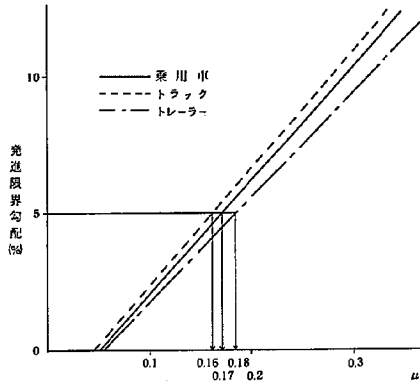


図4-6 発進限界

この図の限界線の上方は発進不能を示し、下方は一応（発進条件によって異なる）発進可能範囲を示すものである。たとえば、道路縦断勾配が5パーセントの場合、図中の細線で示したように、トラックの場合で0.16、乗用車で0.17、トレーラーで0.18の摩擦係数で発進限界となり発進するためには、それ以上のすべり摩擦係数が必要となる。また、この値がそれ以下の場合には、発進が不可能となろう。しかし、この数値は計算上のものであり実際には、運転方法、あるいは、タイヤのすべり、道路表面の形状等によって大きく異なるため発進限界値（ μ ）も増大する。

こゝで示した数値の性質は、凍結（I）、あるいは、しまり（C）、ざらめ（G）の表面が融解し、湿、凍・圧雪の状態になった時に多く見られるものである。

1-2-2 加速性と発進特性

前項でも述べたように、凍・圧雪路面の坂道発進は、ドライバーの上手、下手が重要なポイントとなる。これは、クラッチとアクセル装置の使い方、つまり、加速方法の遅速によるものであり、例えば1mを0.5秒で走り出そうとするのと1秒かかって発進しようとするのでは、発進の可、否に大きな影響を与えるものである。そこで、こゝでは加速度から、すべりの限界を求め、発進の不、可について以下検討した。

図4-7は、無雪期の一般的な走行方法による平均加速度（発進した時から10km/hになった時点の加速度を平均加速度とした）と勾配の関係を示したものである（文献-4による）。この図によると、平地部における大型自動車の発進から5km/hの速度に達する時間は、次式により単純に計算すると0.94秒を要し、乗用車の場合は、

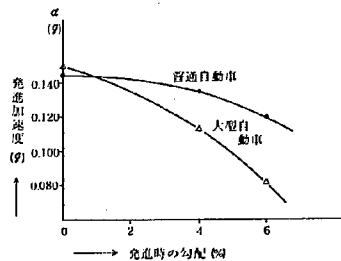


図4-7 無雪期の一般的な発進時の加速度
（目標速度；50km/h）

495

$$T = \frac{V - V_0}{\alpha} \cdot \frac{1}{g} \dots\dots\dots 09$$

こゝで、T : 所要時間 (sec) α : 加速度 (g)
g : 9.8 m/sec² V₀ : 初期速度 (m/sec)
V₁ : T 時間後に達した速度 (m/sec)

0.98 秒と大型車とはほとんど差はないが、6%の勾配部では、トラックが1.77秒、乗用車では1.18秒と差がみられる。これは、車重や能力等によるものであるが、時間をかければ無雪期の場合、発進は十分可能となろう。しかし、凍・圧雪路面では、タイヤとのすべり摩擦の低下によって、その限界があり、前述の通り加速度をいかにするかが問題となる。図4-8は(18)式を用いその限界を示した。これによると、図中、普通、大型自動車を細線で、無雪期4%と明記してあるのは、図4-7の無雪期の発進加速度が、凍・圧雪路面のすべり摩擦係数がいくら以上の時に発進が可能かを調べたものである。つまり、4%の勾配で発進する場合、無雪期では大型車が0.115、普通車では0.138の加速度が一般的な加速状態となっているが、この値を積雪期(路面に凍・圧雪が発生している時)について見る

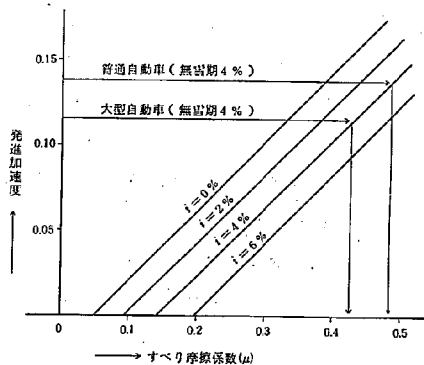


図4-8 加速度を考慮した発進限界

と、大型車では、すべり摩擦係数が0.45、普通車では0.48が限界値となり発進するためにはそれ以上の(すべり摩擦係数が増加すること)路面状態の所でないと発進ができないことを意味する。

凍・圧雪路面のすべり摩擦係数は、前節で述べたように雪質、タイヤの種類等によって大きな差が見られるが、北陸地方のような気温の高い地区では、すべり摩擦係数も小さい。したがって、すべり摩擦係数の大きいチェーン付きタイヤ、スパイク等を使用するか、発進加速度を小さく(いつもよりゆっくり発進する)する方法を取らないと発進が不能となり、交通渋滞の原因となろう。発進加速度を小さくした場合、たとえば、この図の無雪期の発進加速度を1/2にすると大型の発進限界が4%の勾配で0.28、普通車で0.31のすべり摩擦抵抗値となり、無雪期の発進方法に比べ、かなりすべり易い凍・圧雪路面でも発進できる。また、一般に冬期間の発進方法として、3分の1クラッチ操作が効果的と言われてるように凍・圧雪路面では、ゆっくり発進するか、すべり摩擦の大きいタイヤを用い発進するのが最も効果的な方法と言えよう。

1-3 積雪道路の縦断勾配長に関する検討 (試算)

積雪道路の上り勾配部では、路面表面に凍・圧雪があるために、走って来た車が途中で走行不能となるケースが多く、交通渋滞の大きな原因の一つとなっている。このような道路では、チェーン着装等の交通規制を行うことも必要となるが、一方では、道路構造上(安全勾配、長さ等)からの検討も加えることが必要であろう。そこで、ここでは道路構造令³⁾(昭和45年11月)を基に、凍・圧雪のすべり摩擦係数を考慮した場合の縦断勾配、斜面長によって走行して来た車がどこまで登れるか、あるいは、減速されるかについての検討を行なった。まず、自動車が坂道(上り)を走行できるかどうかは、次式によって決まる。

$$A = f \cdot T \geq R \quad \text{㉑}$$

ここで、A : 路面に伝達される駆動力

T : 自動車の駆動力

R : 走行抵抗

f : タイヤと路面の伝達係数

つまり、 $A \geq R$ の場合には自動車は減速することなく登ることができるが、 $A < R$ の場合は、自動車はだんだん減速され、斜面が長ければいつかは停止してしまう。また、(20)式から、自動車が走行する時の一般式は、

$$M \cdot \alpha = F = f \cdot T - R \quad \text{㉒}$$

ここで、M : 質量 F : 余裕索引力

α : 加速度

で表わされ、トン当りの i と r は次式によって求められる。なお、この時のタイヤと路面の伝達係数は発進時のすべり摩擦係数とした。

$$i = \frac{270}{V_m} \cdot h \cdot \eta \left\{ 1.2 - 1.3 \left(\frac{V}{V_m} - 0.6 \right)^2 \right\} \quad \text{㉓}$$

$$r = 1,000 \mu + 10 i + \frac{1,000 \lambda}{w} \cdot S V^2 \quad \text{㉔}$$

ここで、 V_m : 各ギヤにおける最高速度 (km/h)

h : 自動車の馬力 (HP/ton)

η : 効率

V : 車速 (km/h)

μ : タイヤのころがり抵抗

i : 登坂勾配抵抗

$\frac{\lambda}{w} \cdot S V^2$: 空気抵抗

$\left\{ \begin{array}{l} \lambda : \text{空気抵抗係数} \\ S : \text{車輛の投影面積} \\ w : \text{車輛重量} \end{array} \right.$

(21) 式から、重力の加速度 (g) = 9.8 cm/sec^2 , 加速抵抗 (ϵ) = 0.5 とし、変形 (計算方法等については道路構造令を参照されたい) すると、

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{1,000(1+\epsilon)} (f \cdot t - r) = 120.5 (f \cdot t - r) \dots\dots\dots 20$$

となる。この式から、初速度 V_0 が速度 V_1 になるまでの登坂距離 (L) を求める式は、

$$L = \frac{1}{120.5 a} \left\{ \frac{1}{2} [\ell_{0g} (V^2 + bV + c)] \frac{V_1}{V_0} - \frac{1}{|\beta|} \left[t_{\text{an}}^{-1} \frac{V + \frac{b}{2}}{|\beta|} \right] \frac{V_1}{V_0} \right\} \dots\dots\dots 21$$

($C - \frac{b^2}{4} \geq 0$ の場合)

または、

$$= \frac{1}{120.5 a} \cdot \left\{ \frac{1}{2} [\ell_{0g} (V^2 + bV + c)] \frac{V_1}{V_0} - \frac{b}{4|\beta|} \left[\ell_{0g} \frac{V + \frac{b}{2} - |\beta|}{V + \frac{b}{2} + |\beta|} \right] \frac{V_1}{V_0} \right\}$$

($C - \frac{b^2}{4} < 0$ の場合)

となる。この時の係数は次の通りである。

$$a = - \left(\frac{351}{V_m} \cdot h \cdot \eta \cdot f + \frac{1,000}{W} \cdot \lambda \cdot s \right)$$

$$b = \frac{421.2}{V_m^2} \cdot h \cdot \eta \cdot f \cdot \frac{1}{a}$$

$$c = \left(\frac{197.64}{V_m} \cdot h \cdot \eta \cdot f - 1,000 \mu - 10i \right) \cdot \frac{1}{a}$$

$$\beta^2 = \left| c - \frac{b^2}{4} \right|$$

この式から普通トラック (満載時; 14 ton を用いる。) の減速、あるいは、制限長を勾配、路面状態 (f) 別について計算した結果を図 4-9, 10 に示した。この時のギヤチェンジは Top ギヤが 45 km/h の速度までとし、3rd ギヤは 45 km/h から 25 km/h , 2nd ギヤは 25 km/h から 15 km/h , それ以下は Low ギヤとして計算し、ギヤチェンジに要する時間は、0 秒と仮定した。また、計算上に用いた係数は

$h = 10 \text{ HP/ton}$, $\mu = 0.01$, $\lambda = 0.0035$,
 $S = 6.2 \text{ m}^2$, $W = 14,000 \text{ kg}$ とし、 η ; V_m
 は表 4-2 によった。

図中のタイヤと路面の伝達係数 (f) は
 現在道路構造令で縦断制限長を決めるた

ギヤ別	Low	2nd	3rd	Top
V_m (km/h)	15	25	45	80
η	0.8	0.85	0.85	0.9

表 4-2 普通トラックの V_m, η
 (道路構造令による)

めに用いられているものを $f = 1.0$ とし、アスファルト舗装時のものを $f = 0.7$ と想定した。さらにそれ以下の f については、凍・圧雪路面時のものである。つまり、 $f = 0.4$ はチェーン（シングル程度）を用いた場合の平均的な値（ダブルとシングルでは多少異なる）を示し $f = 0.1$ の場合は非常にすべり易い状態（前に述べたように氷面に水分が生じた時のリップ、スノータイヤの場合等である）のものである。また、初速 (V_0) は一般国道に合わせて 60 km/h 、 40 km/h とした。

これによると無雪期に比べ積雪期の場合は、登坂勾配によって大きく減速され、また、途中で停止するケースがある。たとえば、坂を登り初める時の速度を 40 km/h とし、その時の勾配を 6% とした場合、無雪期 ($f = 1.0$) では 350 m 走った地点で 25 km/h の速度に減速されるが、それ以降は

一定速度で走行することができる。しかし、積雪期のチェーンを装着した場合 ($f = 0.4$) には、 500 m で完全に停止し、チェーンなしの氷板上 ($f = 0.1$) を走行する場合には 120 m 程度で停止することになる。この場合には、 40 km/h で坂道を登ろうとするものであるが、 60 km/h の場合には、これより多少距離が延びる。

このようなことから積雪地方の道路では道路表面に凍・圧雪が発生した場合、勾配の如何によっては坂の途中で登れなくなり後続車と関連し交通障害の大きな原因となっている。

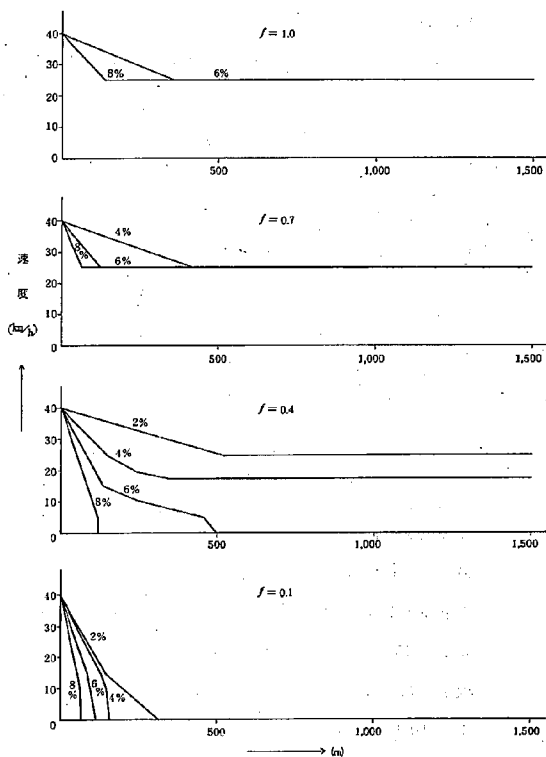


図 4-9 走行性能曲線（速度—距離）
— 初速 40 km/h の場合 —

この現象は横雪山岳地の急勾配の途中でチェーンを取り付け発進して行くケースが現実に多く見られることからもうかがえる。これはリブタイヤかスノータイヤ等のすべり易いタイヤを用いた車が行けるところまで走ってからチェーンを取り付けようとする考え方から起るものと思われる。つまり、途中で停止しチェーンを取り付けている車がある場合、後続車は対向車によって当然停止し、次に発進しようとした場合発進できなくなり順次車が続き交通渋滞となるケースである。

また、図4-11、12は、図4-9、10から登坂勾配別による減速および、停止距離をある速度(V_1)に設定し求めたものである。つまり、この図では初速(V_0)が60 km/h、40 km/hの場合、 V_1 が40 km/h、40 km/h、20 km/hになった時の勾

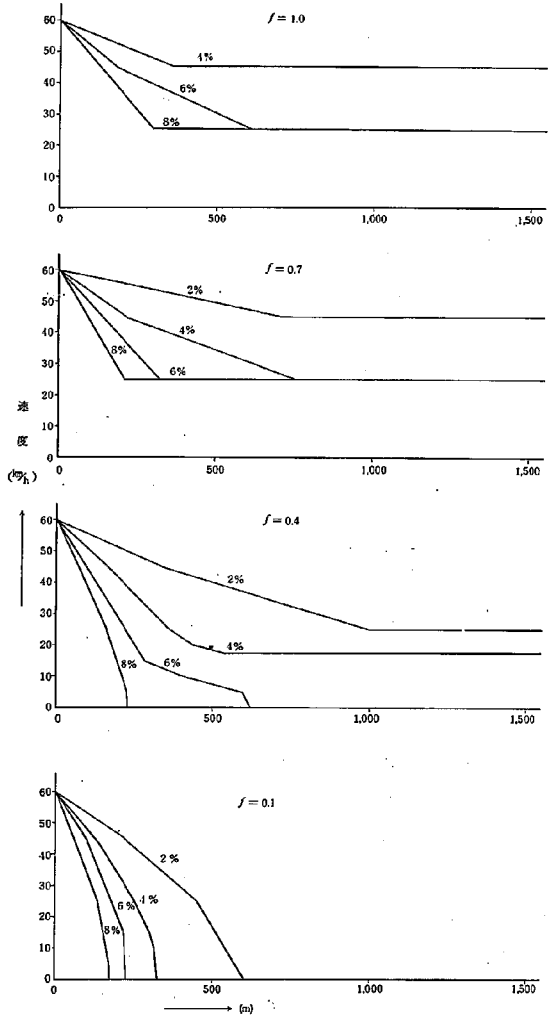


図4-10 走行性能曲線(速度-距離)
— 初速60 km/hの場合 —

配と距離との関係を示したものである。たとえば、この図から V_0 が 60 km/h で勾配が 8% 、 $f = 0.4$ の場合に V_1 が 20 km/h となる距離は、 160 m で 4% では 320 m と倍の距離となる。また V_1 が 0 km/h 、つまり、停止する距離は、 8% の勾配で 230 m 、 6% で 630 m とかなり延びることを示している。

以上のように積雪地方の道路では、無雪地に比べ縦断勾配や長さ等がかなり制約されることから道路構造あるいは、交通規制等の検討が必要となろう。たとえば、積雪地方の道路では、最小限の速度で上り切れば良いとすると、 40 km/h の

速度制限がある道路で平地から山岳地に向う場合、図 4-2 から $f = 0.1$ とすると 2% 勾配の道路で 320 m 、 3% で 210 m 、 4% で 160 m となり、交通規制はこれ以内の所でチェーンを付けさせる必要がある。また、 $f = 0.4$ のシングルチェーンの場合は、 4% 程度の勾配まではほとんど規制する必要はないが、 6% になると 480 m 、 8% で 120 m 走れば停止するため、それ以前にダブルチェーン等の規制が必要となる。しかし、これは坂を上り切るまでに車が停止あるいは、減速されないことを条件としているため、早めに規制を行うことが必要となろう。なお、途中で車を止められた場合には駆動時の発達限界勾配（図 4-6 参照）により発進の可、否が決められる。

ここで述べた登坂勾配と縦断長との関係は、ある仮定のもとで試算したものであり、実際の場合には、車種別の性能、運転方法および、地形条件等によって異なるものと考えられる。したがって、今後は、これらを実証するデータを得ると共に、合成勾配、視相曲線等を考えた道路構造、あるいは、交通規制の検討を行う必要がある。

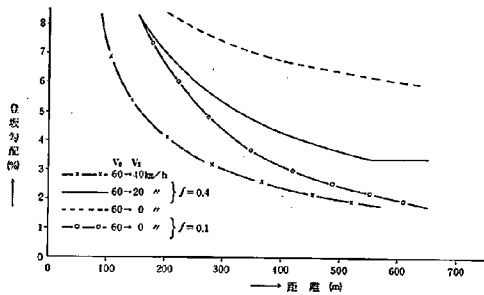


図4-11 勾配別による $V_0 = 60 \text{ km/h}$ の減速・停止距離 ($f = 0.4, 0.1$ の場合)

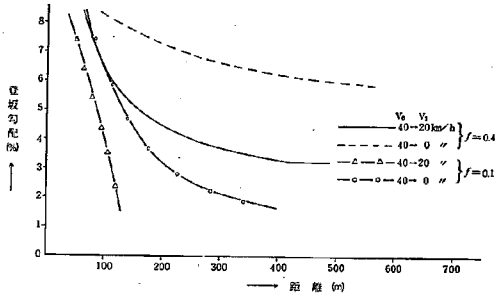


図4-12 勾配別による $V_0 = 60 \text{ km/h}$ の減速・停止距離 ($f = 0.4, 0.1$ の場合)

2. 凍・圧雪の発生および工学特性から見た自動車の安全性について

自動車が凍・圧雪路面を安全に走行するためには、凍・圧雪のすべり摩擦による障害をいかにカバーして運転するかにある。一方、道路管理者としては、これらをいかに対策、管理して自動車の走行の安全を計るかである。そこで、ここでは現在までに得られた凍・圧雪の発生形態、工学特性（硬度、すべり係数）の結果から自動車が最も危険（すべり易い）と思われる気象あるいは、時期等についての考察を2～3述べる。

- ① タイヤの最もすべり易い気象は前に述べたように凍・圧雪表面に水分がある、いわゆる、湿凍・圧雪の状態である。この凍・圧雪の硬度が小さければ（雪質によって異なるが10～40kg/cm²）比較的安全であるが、それ以上の場合、つまり交通量の多い時あるいは、トラック等の重量のある車が多く通過した時には圧雪が硬くなり気温の上昇、日射の影響で表面に水分が発生した時に最も危険な状態となる。この時期は、その地区の気象条件によっても異なるが、冬期間の平均気温が零度前後の所では夕方から24時前後と朝の6時ごろから日中にかけてである。
- ② 日中に発生した凍・圧雪が気温の上昇、日射、交通量等によって融解（全部あるいは表面のみ）し、夕方の冷え込みによって再凍結（氷膜、板あるいは表面）した場合、路面温度が-2℃程度位が最もすべり易く危険である。さらに、この上に数cmの新雪があった場合には、タイヤのトレッドに雪が詰り、すべり摩擦を低下させると共に氷面がすべり面となるため非常にすべり易い。
- ③ 湿圧雪、表面だけが湿粒状の雪（下層は圧雪）あるいは、凍・圧雪に新雪が積った場合にグレーダ等で除雪すると、そこがアイスバーンに近い状態となり非常にすべり易くなる。
- ④ 上記のような雪質の場合は、チェーン付タイヤ（大型トラック等ではダブルチェーン）が最も効果的であり、次いで、やや劣るがスパイクタイヤの順となる。他のタイヤは図2-18に示すように氷板に近い状態では非常に危険である。

- ⑤ このようなすべり易い凍・圧雪路面の下り勾配部（上り勾配については図4-6、9～12参照）では、ブレーキ操作によって無雪路面に比べかなり停止距離が延びるものと考えられる。

たとえば、ここで平地部における制動停止距離は（26）式について検討すると図-13に示したようになり、すべり摩擦が低下することによって無雪時（ $f = 0.7$ とした）よりはるかに制動距離が延びることとなる。したがって、平地部、

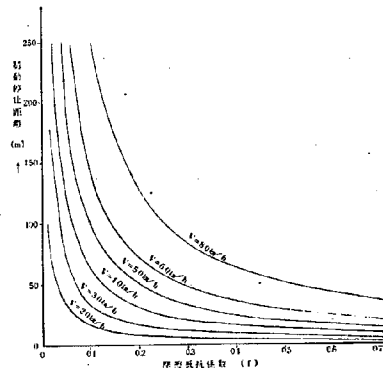


図4-13 速度、摩擦係数と制動距離の関係

特に下り勾配の場合には注意が必要と言えよう。

$$S = \frac{V_2}{2 \cdot g \cdot f} = \frac{V_2}{254 \cdot f} \text{ ----- (26)}$$

ここで、S = 制動停止距離 (m)

V = 制動をかける直前の距離 (km/h)

g = 重力の加速度

f = すべり摩擦係数

3. 除雪、薬剤散布の時期等に関する考察

除雪、薬剤散布の時期、方法等は降雪量、気温、交通量等の要因によって大きく異なる。したがって、これらの現象、あるいは、特性を十分把握、検知し実施することが必要となる。

以下、試験結果、あるいは、現状からその時期、方法等の留意点について述べる。

① 現在の除雪構成はグレーダあるいは、これに類するものが主体となっているが、これは新雪の場合（転圧されないものか1～2回転圧されたもの）と全体に水を含んだジャム状の場合には非常に有効である。しかし、試験の結果によると圧雪の硬度が40 kg/cm²程度以上に高くなると数cmの厚さしか除雪されない。したがって、数時間前（文献-9参照）に硬い圧雪上に薬剤を散布し、新雪と一緒に除雪するか、降雪深あるいは、圧雪深が少なく気温が低い場合にはすべり摩擦係数（図4-3, 4, 5）等を考え薬剤散布のみにする方法をとり夕方あるいは、早朝（6時から8時）に集中的に除雪することが効果的と考えられる。

② 除雪後は、前の項で述べたように圧雪の表面が硬のようになり非常にすべり易くなる。これは、特に湿圧雪の表面を除雪した場合等で、気温が低下している時に多く、最も危険な状態となる。したがって、薬剤散布も併用することが望ましい。

③ 積雪地域での薬剤散布は、除雪（硬い圧雪を軟かくする）のためのものと凍結防止との2通りがあるが、18号線においては前者の方が主体となっている。除雪のための薬剤散布では、除雪機性能が大きな要因となるが図2-6に気温と硬度特性について示したように気温が低下するに従って硬度が増大することから気温と除雪機性能を十分考慮し、薬剤散布の時期あるいは、量を決める必要があろう。

また、凍結防止剤は、自動車のスリップを防止するためにも使用されているが、その時期については前項（自動車の安全性について）を参照されたい。また、急勾配（上り坂）の地区は図4-6, 9～12に示したように特に注意が必要であらう。

おわりに

ここでは、凍・圧雪特性、工学特性に関する基礎的(室内試験が主体)調査および、すべり特性から見た凍・圧雪分類試案の作成を行い冬期間交通の安全管理を計るための資料を得たものである。しかし、実際の道路上に発生する凍・圧雪は既述の通り気象、交通量、地形等によって、その種類も多く、また、発生形態等が異なるため、今回求めた諸特性がすぐに活用されるかどうかは、まだ疑問である。したがって、今後は、これらの一連の検証と目的別による凍・圧雪の分類(今回はすべりを主体とした交通規制、薬剤散布の管理のためのものであるが除雪を主体とした圧雪の硬さ、硬度別による分類等がある)等の検討を行い道路管理の有機的かつ、合理的な手法へ発展させて行く予定である。

おわりに、この試験を実施するに当って北陸地建の方々、および、シャープ株式会社の高田氏の御協力を得たことをここに付記し感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 木下誠一等、北海道における路面積雪調査(Ⅰ)、(Ⅱ)、北海道大学低温科学物理篇第27輯
- 2) 大沼匡之等、融雪促進に関する研究、北陸農業試験場報告第15号昭和48年3月
- 3) 市原 薫、越 正毅、新版・路面のすべり、技術書院
- 4) 市原 薫、路面のすべり抵抗に関する研究(2)、建設省土木研究所報告第138号-2昭和45年1月
- 5) 青木忠男、圧雪作成およびすべり試験装置、土木技術資料 Vol.18 №6
- 6) 日本建設機械化協会、路面積雪調査報告書(2)、昭和45年11月
- 7) 対馬勝年等、道路積雪と車輛のすべり、第12回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集 1975年
- 8) 日本道路協会、道路構造令の解説と運用、昭和45年11月
- 9) 北陸地方建設局、路面の圧雪除去および凍結防止に関する調査試験報告書、昭和49年8月