雪氷と各種材料板の動的相互作用*

(第1報, 雪の動摩擦機構に関する実験的検討)

阿部 雅二郎^{*1}, 伊藤 廣^{*1}
植田 勝己^{*2}, 大友 敏克^{*3}

Dynamic Interaction between Snow-Ice and Various Sheet Materials (1st Report, Experimental Examination of the Dynamic Friction Mechanism of Snow)

Masajiro ABE, Hiroshi ITO,
Katsumi UEDA and Toshikatsu OTOMO

The dynamic interaction between snow-ice and various sheet materials, which is important for the development and design of machine structures and snow-removing equipment used in snowfall regions, is not very well understood. In this study, the dynamic interaction is discussed from the viewpoint of dynamics of machinery and elastic-plastic mechanics. This study is the first to explain the interaction theoretically and experimentally. The study of snow-ice from a mechanical engineering approach as mentioned above has been named "glaciodynamics", and as a part of this, research on glaciology is performed. In this report, the dynamic friction resistance that is practically important in dynamic interaction is measured in a low-temperature room and the results are discussed. The purpose of this report is to clarify the properties of various sheet materials on snow sliding and to construct a basis for theoretical explication of the dynamic friction mechanism.

Key Words: Snow-Ice, Glaciodynamics, Dynamic Friction Factor, Friction, Lubrication, Tribology, Snow Sliding Velocity, Snow Temperature, Contact Pressure of Snow

1. 緒 言

降雪地域における機械構造物や除雪機械の設計を行うために重要な雪氷の力学的特性あるいは雪氷と各種材料板の動的相互作用については不明な点が多い。雪氷の摩擦については古くから研究されている^{(1)~(4)}が、これらは概して低温物理学の立場から雪氷そのものの特性を説明しているものが多い。しかし、機械構造物や除雪機械の設計を行うためには、機械工学の立場からの研究が必要となる。

本研究では、機械設計の基礎となる機械力学、弾塑性力学の視点から雪氷に関する特性を解明し^{(5)~(9)}、このような雪氷に関する科学を雪氷力学(Glaciodynamics)と呼び、その一環として、雪氷潤滑工学(Glaciology)に関する先端研究を行う。

本報では、雪と各種材料板の動的相互作用において、設計上重要な意味を持つ動摩擦抵抗に注目し、動摩擦機構に関する実験的検討を行う。

動摩擦抵抗を規定する動摩擦係数 μ_D は、定数ではなく、次のように種々の因子の関数であると考えられ

る。これは、雪が粘弾性物質であること及び、その融解によって流体潤滑状態が発生するためである。

$$\mu_D = f(V, T_s, P_s, \rho_s, R_z, \theta, a, \dots) \quad (1)$$

ここで、 V : 滑雪速度、 T_s : 雪の温度、 P_s : 雪の接触圧力、 ρ_s : 雪の密度、 R_z : 材料板の表面粗さ、 θ : 材料板と水滴の接触角、 a : 材料板の経年変化指数である。

本報では、これらの因子の中で特に重要であると考えられる滑雪速度 V 、雪の温度 T_s および雪の接触圧力 P_s に着目した実験を行い、その結果について考察する。

2. 実験材料および方法

2.1 試験板および供試雪 表1に実験に用いた試験板の種類および表面性状、表2に金属試験板の化学成分を示す。試験板は滑雪速度依存性実験、すなわち、滑雪速度が動摩擦抵抗に及ぼす影響を明らかにする実験では、Tap-1~Sfc-8の8種類、雪温度依存性、雪の接触圧力依存性実験では、Tap-1~PFn-10の10種類の試験板を用いた。表1には、雪と材料板の動摩擦抵抗に大きく影響を及ぼすと考えられる、試験板の10点平均粗さ R_z および試験板と水滴の接触角 θ を表面性状として示している。なお、1種類の材料板に

*¹ 正員、長岡技術科学大学(〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)。

*² 准員、三菱重工業(株)(〒100 東京都千代田区丸の内2-5-1)。

*³ 学生員、長岡技術科学大学大学院。

表 1 試験板の種類と表面性状

Sheet No.	Materials	Surface finish condition and Specification	Ten point average roughness R_z (μm)		Contact angle θ ($^\circ$)	
			V	Ts, Ps	V	Ts, Ps
T a p - 1	Titanium	Annealed and pickled	2.87	10.93	64.5	66.7
T v a - 2	Titanium	Vacuum annealed	0.55	3.04	33.0	61.7
T a n - 3	Titanium	Anodized	3.07	6.97	52.0	54.8
T f c - 4	Titanium	Fluoroplastics coated	1.47	4.85	70.5	65.8
S S n - 5	Stainless steel	Noncoated	1.89	2.18	69.0	46.5
S S f - 6	Stainless steel	Fluoroplastics coated	1.95	4.91	68.5	58.0
S p c - 7	Resinified steel	Polyester resin coated	0.46	2.82	79.5	81.5
S f c - 8	Resinified steel	Fluoroplastics coated	2.09	8.92	79.5	75.3
R P n - 9	Rigid polyvinyl chloride	Noncoated	—	2.29	—	70.3
P F n - 10	Polytetrafluoroethylene	Noncoated	—	5.29	—	80.0

V : The values on test sheet used in the experiments to investigate the effect of V

Ts, Ps : The values on test sheet used in the experiments to investigate the effect of Ts and Ps

表 2 金属試験板の化学成分

(Weight %)

Sheet No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	H	O	N	Fe	Ti
T a p - 1	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.10	0.03	0.10	bal.
T v a - 2	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.10	0.03	0.10	bal.
T a n - 3	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.10	0.03	0.10	bal.
T f c - 4	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.10	0.03	0.10	bal.
S S n - 5	<0.08	<1.00	<2.00	<0.045	<0.03	8.0 - 10.5	18.0 - 20.0	—	—	—	bal.	—
S S f - 6	<0.08	<1.00	<2.00	<0.045	<0.03	8.0 - 10.5	18.0 - 20.0	—	—	—	bal.	—
S p c - 7	0.04 - 0.06	0.01	0.03	0.01	0.012	—	—	—	—	—	bal.	—
S f c - 8	0.04 - 0.06	0.01	0.03	0.01	0.012	—	—	—	—	—	bal.	—

対して、 R_z 及び θ の測定は V 依存性と T_s , P_s 依存性実験のために 2 回行われている。これらの実験に使用した試験板は、組成、製造方法は同一であるが、異なる試験板を用いている。雪は、密度 $0.1 \sim 0.4 \text{ g/cm}^3$ のしまり雪を用いた。

2.2 実験方法 実験は、図 1 に示す雪氷特性試験機を用いて、雪と試験板間の動摩擦力を室温 T を制御した低温室内で測定した。

摩擦力測定は、以下の手順で行った。まず、塩化ビニールパイプ(以下スノーサンブラと呼ぶ)に採取した供試雪を密度が 0.4 g/cm^3 になるように圧縮充填し、そのスノーサンブラを下端が試験板と接触しないように試験板上に設置する。その後、AC サーボモータによって試験板を移動させ、雪と試験板間に作用する摩擦力をロードセルによって測定した。

滑雪速度依存性実験では、 V を 0.5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 mm/s の 7 種類に変化させ、低温室内の温度 T は 0, -4°C の 2 種類とした。

雪温度依存性実験では、 T を 2, 0, -2 , -4 , -6 , -8°C の 6 種類に変化させた。この際、雪温度 T_s は

図 1 雪氷特性試験機概略

スノーサンブラ底面における温度とし、熱電対により測定した。なお、 T と T_s の温度差は、約 $\pm 1^\circ\text{C}$ であった。 V は 0.5, 10, 100 mm/s の 3 種類とした。

雪圧依存性実験では、 P_s を 0.4, 0.8, 1.2 kPa の 3 種類に変化させた。この 3 種類の P_s は、密度 0.4 g/cm^3 の雪が、それぞれ 10, 20, 30 cm 積雪した場合に底面に生じる圧力に相当する。 T は 0, -4°C の 2 種類とし、 V は 0.5, 50 mm/s の 2 種類とした。

3. 実験結果

3・1 動摩擦係数と滑雪速度の関係 図2に動摩擦係数 μ_D と滑雪速度 V の関係を示す。図2(a)に示す $T=0^\circ\text{C}$ の場合、 μ_D は V が増加するにしたがって増加する傾向がある。各試験板についてみると、Tva-2のチタン板とSSn-5, SSf-6のステンレス鋼板、Spc-7の樹脂塗装金属板の μ_D が小さい。Tap-1, Tan-3のチタン板とSfc-8のフッ素樹脂塗装鋼板は、これらと比較すると、 μ_D がかなり大きい。しかし、チタン板は、 V 増加時に μ_D が多少減少する傾向が見られ、高滑雪速度下では滑雪性が向上する可能性がある。

図2(b)に示す、 $T=-4^\circ\text{C}$ の場合、 $T=0^\circ\text{C}$ の場合とは逆に、 μ_D は V が増加するにしたがって減少する傾向がある。各試験板についてみると、Spc-7のポリエステル樹脂塗装鋼板の μ_D が、 V の変化にあまり影

響を受けず最小となった。また、Tap-1, Tan-3のチタン板は、他の試験板に比べ、 V 増加時の μ_D の減少割合が大きい。

3・2 動摩擦係数と雪温度の関係 図3に動摩擦係数 μ_D と雪温度 T_s の関係を $V=0.5, 10, 100\text{ mm/s}$ の場合に対して示す。 $T_s=-9\sim-2^\circ\text{C}$ の領域では、 T_s の増加にしたがって μ_D は減少するが、 $T_s=-1^\circ\text{C}$ 近傍を越えると、 T_s の増加にしたがって μ_D が増加するようになる。しかし、図3(a)に示す $V=0.5\text{ mm/s}$ の場合、Tva-2のチタン板、SSn-5のステンレス鋼板とRPN-9の硬質塩化ビニール板では、 $T_s=-1^\circ\text{C}$ 近傍以上になっても μ_D が増加傾向に転ずることはない。

3・3 動摩擦係数と雪の接触圧力の関係 図4に $T=0^\circ\text{C}$ における動摩擦係数 μ_D と雪と板の接触圧力 P_s の関係を $V=0.5, 50\text{ mm/s}$ の場合に対して示す。

(a) $T=0^\circ\text{C}$ の場合 (b) $T=-4^\circ\text{C}$ の場合図2 μ_D と V の関係

Symbol	Sheet No.
—○—	T a p - 1
-▲-	T v a - 2
-□-	T a n - 3
-▼-	T f l - 4
-◇-	S S n - 5

Symbol	Sheet No.
—●—	S S f - 6
-△-	S p c - 7
-■-	S f c - 8
-▽-	R P n - 9
-◆-	P F n - 10

(a) $V=0.5$ mm/s の場合 (b) $V=10$ mm/s の場合 (c) $V=100$ mm/s の場合図 3 μ_D と T_s の関係

$P_s=0.4\sim 1.2$ kPa の範囲では, $V=50$ mm/s における Tva-2 のチタン板の場合を除き, μ_D は P_s の増加にしたがって減小する傾向を示す。ただし, SSf-6 のステンレス鋼板, RPn-9 の硬質塩化ビニール板と PFn-10 のフッ化エチレン樹脂板の μ_D は, P_s の変化にあまり影響を受けない。

図 5 に, $T=-4^\circ\text{C}$ の場合の μ_D と P_s の関係を示す。 $T_s=0^\circ\text{C}$ の場合を比較すると, P_s を変化させた際の μ_D の変化量は少ないことがわかる。

4. 雪と板の摩擦潤滑モデル

3章の実験結果より明らかになった, 雪と材料板間の動摩擦係数 μ_D に関する以下の知見に注目して, 各種材料板上での雪の摩擦潤滑モデルを構築する。

(a) 滑雪速度 V 依存性

(1) 雪温度 $T_s \geq 0^\circ\text{C}$ の場合

μ_D は V が大きくなるにしたがって大きくなる傾向がある。これは, T_s が雪の融点以上では, 雪と材料板間に水が介在し, 滑雪速度の増加と共に増加する水の粘性抵抗が摩擦抵抗の主な原因になるためである。

(2) $T_s < 0^\circ\text{C}$ の場合

μ_D は V が大きくなるにしたがって小さくなる傾向がある。これは, T_s が 0°C 以下の場合, 材料板の表面凹凸による抵抗と対馬⁽¹⁰⁾ が述べている雪と材料板間の凝着部を引裂くせん断力が摩擦抵抗の主原因となると考えられるが, これらの抵抗の V 依存性に対応していると考えられる。このことは, 凝着界面のせん断強さが接触時間に比例する傾向があることを小島⁽¹¹⁾ の研究結果などから理解できる。なぜならば, V が増加すると, 凝着が成長する接触時間が減少し, 凝着部

図 4 $T_s=0^\circ\text{C}$ における μ_D と P_s の関係

のせん断抵抗による摩擦抵抗が低下するからである。

(b) 雪温度 T_s 依存性

$V=10, 100 \text{ mm/s}$ の場合, T_s が約 -2°C 以下では, T_s の上昇に対して μ_D は減少傾向を示すが, $T_s=-2\sim 0^\circ\text{C}$ 近傍で μ_D の T_s 依存性が大きく変化し, T_s の上昇に対して μ_D が急増する。これは水の粘性抵抗の影響と考えられる。しかし, $V=0.5 \text{ mm/s}$ の場合, この現象が起こらない材料板が存在する。これらの板では, $V=0.5 \text{ mm/s}$ 程度では, 摩擦熱の発生による雪の融解量が少なく, 水の粘性抵抗の影響が小さいものと思われる。

(c) 雪の接触圧力 P_s 依存性

$T_s=0^\circ\text{C}$ の場合, P_s が増加するにしたがって μ_D は, ほぼ減少するが, $T_s=-4^\circ\text{C}$ の場合は $T_s=0^\circ\text{C}$ の場合に比べて μ_D の変化量は少ない。これは, $T_s=0^\circ\text{C}$ で

は, 摩擦抵抗の主原因は, 雪と材料板間に存在する水の粘性抵抗であるが, $P_s=0.4\sim 1.2 \text{ kPa}$ の範囲では, 粘性抵抗が P_s の影響を, あまり受けないためと考えられる。また, $T_s<0^\circ\text{C}$ の場合, 摩擦抵抗の主原因の一つである界面の接着部を引裂くせん断力が, P_s の増加にともなって凝着部の面積増加に対応して増加するため, 摩擦抵抗と垂直抗力の比である摩擦係数は, あまり変化しないものと考えられる。

(d) 材料の表面性状依存性

(1) 10点平均粗さ R_z の増加にともない, ほぼ μ_D も増加する。これは, 主に R_z の増加とともに材料表面の凹凸によって生み出される抵抗が増すことによると考えられる。

(2) 材料と水滴の接触角 θ の増加にともない μ_D は減少する傾向がある。これは, θ が増加すると粘性

図5 $T_s=-4^\circ\text{C}$ における μ_D と P_s の関係

抵抗を生み出す水膜の面積が減少すること及び吉田ら⁽¹²⁾の実験で確認されているように、凝着部を引裂くせん断力が θ に反比例することによるものと考えられる。

これらの考察をもとに、本研究では、雪と材料の接触面における凝着部のせん断抵抗、材料の表面凹凸による抵抗、および潤滑物質である水の粘性抵抗によって摩擦抵抗が生じると考える。これらの抵抗が雪と材料板間の全摩擦抵抗に占める割合は、滑雪速度 V や雪温度 T_s さらに、雪と材料間に発生する摩擦熱により発生する水の量等に影響されると考えられる。

以上のことを考慮すると、雪と材料板間の摩擦潤滑状態は図6に示す境界潤滑モデル、流体潤滑モデルおよび2種類の混合潤滑モデルのいずれかで表現できると考えられる。各潤滑モデルについて説明すると次のようになる。

(1) 境界潤滑モデル [図6(a)]

雪と板の界面に水が存在せず、摩擦抵抗は主として、凝着部のせん断抵抗及び表面凹凸による抵抗によって生じる。

(2) 流体潤滑モデル [図6(b)]

界面に潤滑剤となる水が十分に存在し、水膜厚さが材料板の表面凹凸の高さ以上となる場合のモデルで、摩擦抵抗は主として水の粘性抵抗によって生じる。

(3) 混合潤滑モデル [図6(c), (d)]

前記の2つのモデルの中間の状態にあるモデルである。この混合潤滑モデルは以下の2種類が考えられる。境界潤滑状態で、界面に発生した摩擦熱により雪の温度が融点に達する条件下では、雪と材料間に水が発生

し、潤滑状態は混合潤滑状態へと移行する。このような場合、雪と板の潤滑状態は図6(c)に示したような凝着部が存在する状態になりやすい。摩擦抵抗は凝着部のせん断抵抗、表面凹凸による抵抗および水の粘性抵抗によって生じる。また、流体潤滑状態で、水膜厚さが表面粗さ以下になるような場合、材料板の表面凹凸を乗り越える抵抗が生じ、潤滑状態は図6(d)に示すような凝着部の存在しない混合潤滑状態になりやすい。この場合の摩擦抵抗は主として、表面凹凸による抵抗および水の粘性抵抗によって生じる。

これらの各潤滑モデルに対し、動摩擦抵抗は、雪と材料板間の凝着部のせん断に要する力を F_A 、表面凹凸を乗り越えるのに要する力を F_R 、水の粘性による力を F_V とすると以下の式で与えられる。

境界潤滑モデル

$$F_B = F_A + F_R \dots\dots\dots (2)$$

流体潤滑モデル

$$F_H = F_V \dots\dots\dots (3)$$

凝着部が存在する混合潤滑モデル

$$F_M = F_A + F_R + F_V \dots\dots\dots (4)$$

凝着部が存在しない混合潤滑モデル

$$F_M = F_R + F_V \dots\dots\dots (5)$$

5. 結 言

雪と各種材料板の動摩擦機構を実験的に検討し、以下のことが明らかになった。

(1) 動摩擦係数 μ_D は滑雪速度 V の影響を受ける。雪の温度 $T_s = 0^\circ\text{C}$ の場合は、 V の増加にしたがって μ_D は増加する傾向を示すが、 $T_s = -4^\circ\text{C}$ の場合は、

図6 雪と板の摩擦潤滑モデル

逆に V の増加にしたがって μ_D は減少する傾向を示す。

(2) μ_D は雪の温度 T_s の影響を受ける。 $T_s = -9 \sim -2^\circ\text{C}$ の領域では、 T_s の増加にしたがって μ_D は減少するが、 $T_s = -1^\circ\text{C}$ 近傍以上では、逆に μ_D は増加傾向を示すようになる材料板が多い。

(3) μ_D は雪の接触圧力 P_s の影響を受ける。 $T_s = 0^\circ\text{C}$ の場合は、 P_s の増加にしたがって μ_D は減少する傾向があるが、 $T_s = -4^\circ\text{C}$ になると、 P_s の変化に対する μ_D の変化量が小さくなる。

(4) 上述の傾向に対する総合的な考察から、潤滑状態に応じて4種類の摩擦潤滑モデルが考えられる。

本研究のは、今後、本報で提案した摩擦潤滑モデルを用いて、動摩擦抵抗の理論式を導き、動摩擦機構の理論的考察を行う。さらに、動摩擦抵抗が問題となる機械装置等の設計指針を示していく予定である。

最後に、本研究は、平成2～4年度文部省科学研究費(一般研究C, 課題番号02650178)の補助のもとに実施されたことを付記し、ここに謝意を表する。また、本

研究を遂行するにあたり、貴重な資料を提供していただいた、神戸製鋼所鉄鋼事業本部各位に、厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) Joly, J., *Sci. proc. Roy. Dublin Soc*, 5(1886), 453-454.
- (2) Bowden, F. P. and Hughes, T. P., *Proc. Roy. Soc*, A172 (1939), 280-298.
- (3) Weyl, W. A. and Colloid, J., *Sci*, 6(1951), 389-405.
- (4) Niven, C. D., *J. Phys*, 37(1959), 247-255.
- (5) 栗山・伊藤, 日本雪氷学会誌, 48-3(1986), 133-140.
- (6) 伊藤, 雪と道路, 22(1990), 63-71.
- (7) 何・阿部・伊藤・中谷・栗山, 寒地技術シンポジウム講演論文集, (1989), 171.
- (8) 阿部・伊藤・植田・中谷・西村, 第7回日本雪工学会大会論文報告集, (1990), 15-22.
- (9) Abe, M., Ito, H., Ueda, K., Aoyagi, H. and Nishimura, T., The dynamic interaction between titanium and snow, *Proceedings of Seventh World Conference on Titanium*, 出版予定.
- (10) 対馬, 潤滑, 21(1976), 287-294.
- (11) 小島, 低温科学物理編, 24(1965), 299-303.
- (12) 吉田・大市・今野・後町, 第7回寒地技術シンポジウム, (1991), 626-631.