屋根葺材と雪氷の摩擦に関する研究 (その2) 屋根葺材に対する雪氷の滑走速度および動摩擦

渡辺 正 朋^{*1} 平井 和 喜^{*2}

1. はじめに

屋根葺材と雪氷の摩擦問題は、勾配屋根における屋根雪の滑走防止対策、滑走飛距離の予測、自然滑落方式による雪処理屋根の構法化など建築の屋根雪対策にかかわる問題である。

この屋根雪の摩擦問題には、滑動抵抗力あるいは滑走開始勾配の評価にかかわる静摩擦問題と屋根雪の滑動に際して発生する滑走速度あるいは滑走飛距離の予測に必要な動摩擦問題の二つがある。

前報(その1)¹⁾では、屋根葺材の表面特性を視点として葺材8試料を選び、これら葺材試料と氷との静摩擦係数並びに静摩擦の変化要因についての実験分析を示した。

本研究は、各種屋根葺材に対する雪氷の滑走速度および動摩擦の基礎的性状を把握することを目的とし、滑走開始勾配(摩擦角)の滑走運動で発生する速度および動摩擦に視点をおいて実験分析を試みたものである。

雪氷の摩擦理論はまだ不十分なことから、摩擦問題に即した実験研究の意義は大きく、実験に際しては研究課題に適した実験装置の工夫も課題となっている。本研究では、摩擦角で発生する滑走運動を検討するために傾斜平板法による装置を構成して実験を行った。

2. 既往の研究および本研究の視点

雪氷の摩擦に関する研究は、J. Jolyによるスケートの滑走性についての研究(1887)に始まる。その後、摩擦機構について多くの研究が試みられてきたが、機構そのものについてもまだ統一的説明が行える状況にはない。

対馬の一連の研究^{3) 4) 5)}では、摩擦機構の古典論とされている凝着説に着目し、これにより氷の摩擦問題について定量的な説明を試みるとともに動摩擦における荷重効果、速度効果および温度効果など依存要因についての議論を展開している。対馬のこれらの研究は、屋根雪の滑走問題を扱った研究ではないが、雪氷の動摩擦の変化要因について多くの知見を与える。屋根葺材と雪氷の摩擦問題にこれらの知見を置き換えてみると、摩擦特性を把握するためには以下の要件についての検討が必要となる。

- ① 葺材表面の粗さ形状とその分布による動摩擦の変化(掘り起こし現象)
- ② 接触圧力による動摩擦の変化(荷重依存性)
- ③ 滑走速度による動摩擦の変化(速度依存性)
- ④ 温度条件による動摩擦の変化(温度依存性)

屋根葺材と雪氷との動摩擦研究では、これら変化要因についての検討が望まれるが、既往の関連研究が少なく、温度効果を除いては、統一的検討はまだ行われていない。

* 1 八戸工業大学助教授・工修

* 2 東北大学教授・工博

(本稿受理 昭和63年11月10日)

屋根雪氷の動摩擦に関する研究事例としては、前田⁶⁾、宮内⁷⁾、城下⁸⁾、清水⁹⁾および上野¹⁰⁾の研究があげられる。これらの研究の特徴は、研究に用いた葺材試料が、金属板や合成樹脂板など、表面が平滑なものに限られていること並びに動摩擦測定における速度条件が、 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/sと滑雪速度の実際からみると極めて低速な領域の条件に限られること（城下⁸⁾、清水⁹⁾、上野¹⁰⁾）である。滑雪速度の実験例としては、清水¹¹⁾の加熱強制滑落方式の実験があげられる。この報告では、塩化ビニル鋼板葺、3/10勾配、新雪積雪10～90cmについての実験の場合、発生した滑動速度は、0.17～100cm/sの範囲である。但し、動摩擦の測定は、行われていない。

摩擦研究の実験方法では、既往の研究の殆どが水平滑動法による強制滑動実験を採用している。この実験方法の欠点としては、水平滑走距離の確保が難しく、高速滑走実験が困難なことがあげられる。実験速度について自由度の高い実験方法としては回転円盤法があげられる。しかし、この方法による装置では、葺材や雪氷を円形平板に加工しなければならないが、葺材および雪氷いずれについても試料作りには困難が多い。

雪氷の動摩擦に関わる変化要因については、対馬による前述の要因4件の他に雪質効果が指摘されることがある。動摩擦の雪質効果については清水⁹⁾のざらめ雪としまり雪の比較、静摩擦については鈴木¹²⁾による木下硬度0.5～9.5kgf/cm²の雪および氷についての比較がある。いずれの研究でも雪氷の質による摩擦係数の差異は認められないことが報告されており、氷体による摩擦特性の実験結果が屋根雪氷一般に当てはまることを示唆している。

これらの研究成果を踏まえ、本研究では、屋根葺材に対する雪氷滑走の基礎的特性を把握することを目的に以下に示す二つの視点から検討を進める。

① 摩擦角で発生する滑走運動では、速度については実際の自然滑走における速度の最小値が、動摩擦については最大値が得られることに着目し、自然滑走が発生する最小勾配における滑走速度および動摩擦の特性を把握する。なお、これらの特性値は、屋根雪氷の滑走問題を解くための基本的資料となる。

② 屋根葺材に対する雪氷の摩擦角は、葺材の表面粗さおよび温度による変化が極めて大きい¹⁾が、これらを一般則として予測・制御することは現状では困難である。この理由から本研究では、滑走開始勾配の制御を、表面粗さが特徴的に異なる葺材試料を選択することにより滑走開始勾配を変化させる方法を採用する。

3. 研究方法

3.1 実験および解析

本研究では、滑走開始勾配（摩擦角）で発生する滑走運動を測定し、滑走速度および動摩擦の検討を行う方法を採用した。この方法による滑走速度と動摩擦は、葺材試料および温度条件に固有な滑走開始勾配で発生する特性である。

滑走時に発生する平均速度 V 、加速度 α および動摩擦 μ_k は、傾斜平板上の一定区間 L に対する滑走時間 t の測定値を運動方法則から導かれる次式に代入して求める。なお、本実験における測定値は、6回の実験値の平均値とし、一般に変動の大きいとされる摩擦特性の統計的検討も試みた。

$$\text{平均速度: } V = \frac{L}{t} \quad (\text{cm/s}) \quad (1)$$

$$\text{加 速 度: } \alpha = \frac{2V}{t} \quad (\text{cm/s}^2) \quad (2)$$

$$\text{動 摩 擦: } \mu_k = \frac{g \sin \theta - \alpha}{g \cos \theta} \quad (3)$$

但し、 L ：滑動距離（cm）

t ：滑動時間（s）

g ：重力加速度（cm/s²）

θ ：摩擦角（°）

動摩擦は、一般に静摩擦より小さく、速度の増加とともに減少する。従って、滑走開始勾配で発生した滑走は、滑走を阻止する外力が働かない限り持続する。つまり、この摩擦角で発生する滑走速度は、葺材と温度条件に固有な雪氷滑走の最小値であり、この滑走に際して発生する動摩擦は、葺材と雪氷に固有な動摩擦の最大値に相当することになる。

3.2 実験装置

滑走距離 L に対する滑走時間 t は、傾斜角が連続的に変えられる滑走台に装着した光電スイッチにより測定した。測定距離は、傾斜平板上の滑走開始点から0.1cm下方に設置したスタートセンサーとこの位置から L cm下方に配置したストップセンサーの区間とし、この滑走距離 L cmについての滑走時間 t を赤外線センサーから光電スイッチに受け1/100秒の精度で測定した。図-1は、滑走実験に用いた装置の構成を、写真-1は、この装置による実験状況を示している。

滑走運動の距離は、一律25cmに設定しているが、滑走速度がおよそ0.5cm/s以下の極めて遅い滑走運動となる場合には、滑走距離を1.5または5 cmに短縮して測定した。

図-1 実験装置の構成

写真-1 滑走実験の状況

3.3 実験条件

滑走実験は、静摩擦実験における滑走開始勾配

(摩擦角)の測定に際して発生した滑走運動を観測する方法を採っている。従って、この実験の諸条件は前報の静摩擦実験のそれと全て同じであるが、動摩擦の変化にかかわる条件についてその概要を以下に示す。

(1) 葺材表面の粗さ

屋根葺材の表面粗さと雪氷摩擦の定量的関係についてはまだ明らかにされていない。ここでは、表面粗さ規格(JIS B 0601)による中心線平均粗さ(R_a)および最大高さ(R_{max})を計測し、粗さ効果の検討資料とした。表-1には、主要な屋根葺材として選定した8試料の内容およびこれらの粗さ測定値を示した。

(2) 接触面の圧力

滑走体は、質量を874gf、氷ブロック3体に錘を載せた3点接触方式の滑動体と平板な葺材試料との見かけの接触面積を9 cm²とした。従って、水平状態での氷ブロック接触面の圧力は、97gf/cm²となる。積雪深100cmの場合、その水平接触面圧力は、およそ20~40gf/cm²の範囲にあるが、これに較べると本実験の圧力は、やや大きい。この圧力設定の理由は、完全平面は期待できない葺材試料と氷ブロックの接触のなじみをよくすることであり、氷の圧力破壊のない範囲で大きめの圧力状態にすることが望ましいと考えたことによる。因みに、氷の破壊強度のなかで最も低い剪断強度は、およそ10kgf/cm²であり、設定圧力はこの約1/100に当たる。

(3) 滑走速度

滑走速度の実験内容は、滑走開始勾配で発生した滑走初期の平均速度および加速度とした。これらは、前述の実験方法によって得られる滑走時間 t の測定値をそれぞれ(1)、(2)式に代入して求めた。

(4) 温度条件

乾燥摩擦あるいは境界摩擦と見做せるマイナス温度域については3水準(-10℃, -5℃, -1℃)、潤滑摩擦と見做せるプラス温度域については+3℃の1水準、計4水準を実験温度とした。なお、温度の制御は、各水準とも最大±2℃の範囲にある。

(5) 雪氷の質

3点接触方式の滑動体として用いた3体のブロッ

表－１ 屋根葺材の試料および表面粗さ

試料記号	葺材試料の概要		表面粗さ:cut off 0.25mm	
	材料の名称	表面および板厚	Ra(μm)	Rmax(μm)
C-02	成型石綿セメント板	細砂圧着、5.0mm厚	6.7	47.9
G-01	フロート板ガラス	平滑な鏡面、2.7mm厚	0.00	0.00
G-03	型板ガラス	梨地凹凸、5.6mm厚	1.79	3.58
M-02	圧延鋼板	艶消し素地、1.5mm厚	0.48	4.92
M-11	着色亜鉛鉄板（青色系）	光沢塗装、0.6mm厚	0.14	1.34
M-12	着色亜鉛鉄板（茶色系）	艶消し塗装、0.6mm厚	0.26	2.34
M-13	塩化ビニル金属積層板	エンボス凹凸、0.6mm厚	0.64	3.35
X-03	ラワン合板（型枠用）	粗目の素地、12mm厚	1.8	14.3

表－２ 滑走開始勾配および25cm滑走時の平均速度

葺材試料	統計	-10℃水準		-5℃水準		-1℃水準		+3℃水準	
		勾配(%)	v (cm/s)	勾配(%)	v (cm/s)	勾配(%)	v (cm/s)	勾配(%)	v (cm/s)
C-02	mean	67	81	46	68	39	58	41	7
	V(%)	22	5	15	15	15	16	10	121
G-01	mean	18	0.03	16	0.11	6	0.15	* 1	14
	V(%)	11	67	13	18	33	27	—	4
G-03	mean	8	27	8	31	3	6	19	47
	V(%)	13	19	25	13	0	83	21	15
M-02	mean	27	60	25	54	17	34	* 1	0.11
	V(%)	7	7	32	17	12	32	—	36
M-11	mean	19	33	13	17	5	7	* 1	4
	V(%)	5	18	23	59	20	173	—	93
M-12	mean	24	48	15	35	7	6	2	0.09
	V(%)	4	6	7	6	14	48	0	13
M-13	mean	9	18	10	20	4	5	* 1	—
	V(%)	11	33	10	25	25	65	—	—
X-03	mean	70	93	67	87	48	68	71	69
	V(%)	10	7	19	9	31	22	11	49

(注) * 印のデータは、傾斜角度θを 0.5° に固定して行った測定値

ク状水塊は、水道水をおよそ -18°C で氷結した多結晶氷である。各氷ブロックの形状は、底面 $1.5\text{cm} \times 2.0\text{cm}$ 、上面 $2.5\text{cm} \times 3.0\text{cm}$ 、高さ 2.0cm とする逆台形で、プラスチックの製氷容器を用いて作製した。

4. 結果および考察

4.1 滑走開始勾配における滑走速度

表-2は、摩擦角に対応する滑走開始勾配(%)および滑走開始点から 25cm あるいはそれ以内の滑走における平均速度 V についての6回測定値の平均値と変動率を実験温度4水準について示している。

この実験で得られた発生速度は、最小値が 0.03 cm/s (試料G-01, 勾配 18% , -10°C)、最大値は 90 cm/s (試料X-03, 勾配 70% , -10°C)である。

傾斜平板上で発生する自然滑走の運動は、重力加速度 g に依存する。動摩擦が働かないと仮定した場合、滑走開始勾配 θ 、初速 0 cm/s 、滑走距離 25cm を条件とする平均速度 V は、次式で与えられる。

$$V = \frac{1}{2} g \sin \theta \sqrt{\frac{50}{g \sin \theta}} \quad (\text{cm/s}) \quad (4)$$

この平均速度の実験結果は、試料および温度により多様な変化を示している。図-2は、平均値による滑走開始勾配(%)と平均速度 V の関係を各実験温度について示したものである。図中の曲線は、(4)

図-2 実験温度による滑走開始勾配と平均速度

式のそれである。

これらの結果から、滑走開始勾配における滑走速度については、以下のことが指摘できる。

① 滑走開始勾配がおおよそ20%以下の場合、平均速度 V の多くは重力加速度 g による速度($V = 0.5 g t \sin \theta$)より小さくなり、等速度型の低速滑走挙動を示す。

② 滑走開始勾配がおおよそ20%を超える場合、平均速度 V の多くは重力加速度に依存する速度に近似し、加速度を伴った滑走挙動を示す。

③ 雪氷の融解点に近い -1°C および融解温度域の $+3^{\circ}\text{C}$ 水準では、おおよそ10%以下の滑走勾配で速度10cm/s以下の低速の滑走挙動を示す試料がある。ガラス系の試料のG-01とG-03ならびに着色鉄板系のM-11とM-13がこれに該当する。

④ 全試料のうち極めて平滑な面を持つフロート板ガラス(G-01: $Ra=0.0$, $R_{max}=0.0$)は、マイナス温度域で滑走勾配に関係なく0.15cm/s以下の極めて低い速度で滑走する。

⑤ 速度の変動率は、滑走勾配のそれが最大値が33%であるのに対し、この値を越えるものが測定条件32件のうち11件にのぼる。変動率50%が越える7件の測定条件のうち6件は、速度10cm/s以下の低速滑走の場合である。低速滑走時に変動が大きくなる理由として、低速滑走では試料面のうねりなど平面性の乱れが敏感に速度に影響することが考えられる。

4.2 滑走開始勾配における加速度

滑走開始勾配で発生した加速度の解析値を表-3に、平均値を用いた滑走勾配と滑走加速度のマイナス

表-3 滑走開始勾配で発生した加速度

茸材試料	統計	-10°C 水準		-5°C 水準		-1°C 水準		$+3^{\circ}\text{C}$ 水準	
		勾配(%)	α (cm/s ²)	勾配(%)	α (cm/s ²)	勾配(%)	α (cm/s ²)	勾配(%)	α (cm/s ²)
C-02	mean	67	531	46	385	39	274	41	9
	SD	22	178	15	106	15	82	10	17
G-01	mean	18	0	16	0	6	0	* 1	15
	SD	11	2	13	0	33	0	---	0
G-03	mean	8	59	8	76	3	4	19	177
	SD	13	24	25	23	0	0	21	55
M-02	mean	27	291	25	237	17	99	* 1	3
	SD	7	40	32	87	12	49	---	0
M-11	mean	19	91	13	28	5	12	* 1	3
	SD	5	30	23	22	20	26	---	4
M-12	mean	24	184	15	99	7	4	2	0
	SD	4	21	7	12	14	2	0	0
M-13	mean	9	30	10	34	4	2	* 1	---
	SD	11	16	10	15	25	2	---	---
X-03	mean	70	691	67	608	48	380	71	468
	SD	10	84	19	108	31	157	11	314

(注) * 印のデータは、滑走勾配 θ を 0.5° に固定して行った測定値

温度域での関係を図-3に示す。なお、図中の実線は、重力加速ベクトルの滑走斜面成分を示している。

実験条件で発生した加速度は、最小値が0 cm/s²、最大値が691cm/s²である。これらの発生加速度を滑走開始勾配との関係で見ると、およそ20% ($\theta = 11^\circ$) 以下の場合には100cm/s²以下の低い加速度を示し、これを越える領域では重力加速に依存して200cm/s²以上の加速度が発生している。図-4は、前者についての試料および温度条件との関係を、図-5は、後者についてのそれを示している。

これらの結果から、滑走開始勾配で発生する加速度については、以下の事実が指摘できる。

① 一般に加速度は、重力加速度に依存するため滑走勾配が大きくなるほど増加するが、その変化の仕方は試料によって異なる。この内、特異な性状を示すものとしてフロート板ガラス(G-01)があげられ、表面粗さが皆無に近いこの試料では、滑走勾配の大小およびマイナス域での温度変化に関係なく加速度は、発生しない。

② 滑走勾配がおおよそ20%以上で発生する加速度は、概ね滑走面の重力加速度成分と同じである。このことは、滑走勾配が20%以上での滑走では、動摩擦抵抗がほとんど働いていないことを意味する。この傾向を示す葎材試料は、C-02、M-02およびM-12である。しかし、木製の葎材試料であるX-03では、-10℃と-5℃でこの傾向から外れた加速度が発生している。

③ 滑走勾配がおおよそ20%以下では、加速度が概ね滑走面の重力加速度成分より小さいことから、動摩擦抵抗が働いている。この傾向を示すデータは、試料M-11とM-13のそれである。但し、梨地状の凹凸が加工されている型板ガラスG-03では、-10℃および-5℃のデータがこの傾向から外れ、発生加速度は滑走面の重力加速度成分とほぼ同じである。

4.3 滑走開始勾配と動摩擦係数 (μ_k)

滑走開始勾配の滑走運動で発生した μ_k の解析値を表-4に、滑走勾配の平均値と μ_k の平均値との関係を図-6に示す。

葎材試料および温度条件に固有な摩擦角で発生し

図-3 滑走開始勾配で発生した加速度

図-4 低勾配における加速度の変化

図-5 高勾配における加速度の変化

表-4 滑走開始勾配で発生した動摩擦係数

葦材試料	統計	-10°C 水準		-5°C 水準		-1°C 水準		+3°C 水準	
		勾配 (%)	μ_k	勾配 (%)	μ_k	勾配 (%)	μ_k	勾配 (%)	μ_k
C-02	mean	67	0.00	46	0.04	39	0.09	41	0.40
	SD	22	0.16	15	0.07	15	0.05	10	0.05
G-01	mean	18	0.18	16	0.16	6	0.06	* 1	-0.01
	SD	11	0.02	13	0.02	33	0.02	—	0.00
G-03	mean	8	0.02	8	0.01	3	0.03	19	0.01
	SD	13	0.01	25	0.01	0	0.00	21	0.03
M-02	mean	27	-0.04	25	0.00	17	0.07	* 1	0.01
	SD	7	0.03	32	0.02	12	0.04	—	0.00
M-11	mean	19	0.19	13	0.11	5	0.03	* 1	0.01
	SD	5	0.01	23	0.01	20	0.03	—	0.00
M-12	mean	25	0.05	15	0.05	7	0.07	2	0.02
	SD	4	0.02	7	0.01	14	0.00	0	0.00
M-13	mean	9	0.06	10	0.06	4	0.05	* 1	—
	SD	11	0.01	10	0.01	25	0.05	—	—
X-03	mean	70	-0.14	67	-0.12	48	0.04	71	0.18
	SD	10	0.07	19	0.05	31	0.07	11	0.34

(注) * 印のデータは、傾斜角度 θ を 0.5° に固定して行った測定値

図-6 滑走開始勾配と動摩擦係数

図-7 勾配の増加と動摩擦の低下

た μ_k の解析値は、最大値が試料G-01の-10℃における0.18、最小値がX-03の-10℃における-0.14である。 μ_k 値には、マイナスは存在しないが、解析値として得られたマイナスの μ_k 値は、滑走に際し何等かの加速エネルギーが働いていたことを意味する。このエネルギーは、滑走面に発生する振動現象あるいは滑走面の粗さ形状やうねり面により発生した滑走体のジャンプ現象によるものと考えられる。

本実験の範囲では、滑走開始勾配と動摩擦について以下の現象が認められる。

① 滑走開始勾配がおおよそ20%以下の滑走で発生する μ_k は、摩擦角の大きいものほど増大する(図-6)。この傾向を示す試料は、G-01、G-03、M-11、M-12およびM-13であり、これらに共通な表面粗さの特長としてCut Off 0.25mm測定のRmaxがいずれも4.0 μ m未満となることが指摘できる。

② 滑走開始勾配がおおよそ20%以上の滑走で発生する μ_k は、同一試料では摩擦角が大きくなるほど低下し、解析値としてマイナス値を示すものがある(図-7)。この傾向を示す葺材試料はM-02、C-02およびX-03である。なお、これら試料のCut Off 0.25mmのRmaxは、いずれも0.4 μ mを上回る。

4.4 動摩擦の速度効果

この実験における速度測定は、摩擦角で発生した速度についてのみであり、同一傾斜角について速度を変化させた実験は行っていないことから速度と動摩擦の関係について統一的検討はできない。

ここでは、同一葺材試料についての温度による μ_k 、Vおよび α の変化をV- μ_k および α - μ_k の散布図として表し、これより各々の効果を読み取ることにした。

図-8は、平均速度Vと μ_k の関係を、図-9は、加速度 α と μ_k の関係を、いずれも乾燥あるいは境界摩擦と見做されるマイナス温度領域の3水準について平均値により表したものである。これらの図

は、速度、加速度いずれについても動摩擦が急激に低下する領域があることを示している。この急激な動摩擦の低下は、高速滑走にともなって発生する振動あるいは飛翔現象によるものと推察される。

これらの散布図から、動摩擦 μ_k に対する平均速度Vおよび加速度 α の効果については以下のことが指摘できる。

① Vが50cm/s以下の低速領域では、 μ_k の変化は、葺材試料あるいは温度に依存する傾向が強く、Vの効果は明確に現われない(図-10)。一方、Vが50cm/s以上の領域では、いずれの試料でもVの増加とともに μ_k は、急激に低下する(図-11)。

② μ_k に対する α の効果もVのそれと類似した傾向を示し、加速度がおおよそ200cm/s²以上の領域では、加速の増加とともに μ_k は、急激に低下する。

4.5 動摩擦係数と静摩擦係数

一般に、動摩擦係数 μ_k は、静摩擦係数 μ_s のおおよそ75%程度になることが知られている。屋根葺材と雪氷の μ_k については、金属板葺材を試料とした実験例^{8) 9) 10)}があるが、 μ_s 値との関係については検討されていない。

図-12は、速度効果が顕在化しない滑走開始勾配20%以下の領域で発生した μ_k を μ_s との関係で示している。図-13は、高速領域における μ_s と μ_k の関係である。

これより、滑走開始勾配で発生する μ_k と μ_s の関係については、以下の特性が指摘できる。

① 滑走開始勾配の滑走で発生した μ_k は、 μ_s がおおよそ0.2までの試料では μ_s の増加につれて増大するが、それ以上の μ_s を持つ葺材では、滑走勾配の増加とともに速度も増すため μ_k は低下する。

② μ_s がおおよそ0.2以下の範囲にある葺材試料(G-01、G-02、M-11、M-12、M-13)の場合、 μ_k の μ_s に対する比率は、概ね80%である。

③ これらの事実は、温度条件がマイナスの場合、20%勾配以下の屋根で起こる滑雪では動摩擦抵抗が働き、これを越える勾配屋根の滑雪では、動摩擦は無視できることを示唆する。

図-8 動摩擦に対する速度の効果

図-9 動摩擦に対する加速度の効果

図-10 低速域における動摩擦の変化

図-11 高速域における動摩擦の変化

図-12 低速域の静摩擦と動摩擦

図-13 高速域の静摩擦と動摩擦

5. ま と め

滑走開始勾配（摩擦角）における雪氷の滑走では、実際の屋根雪滑走で発生すると考えられる速度の最小値および動摩擦の最大値が得られることに着目し、傾斜平板法の滑走実験により屋根葺材に対する雪氷の主に乾燥摩擦における滑走速度および動摩擦の基本的な特性について検討した。

これより、既往の研究ではまだ議論されていない次の現象を明らかにすることができた。

(1) 屋根葺材と温度条件に固有な滑走開始勾配（摩擦角）で発生する滑走運動には、1.0cm/s以下の等速度型の低速滑走と重力加速度に依存する加速型滑走の二つの形態がある。

(2) 滑走速度および動摩擦の特性には、滑走勾配についての境界領域があり、およそ20%勾配を境界にして異なった変化形態を示す。

(3) 動摩擦は、滑走開始勾配がおおよそ20%以下の領域で発生する低速滑走の状態で発生し、その値は、静摩擦係数の概ね80%の値となる。

謝 辞

本研究の考察を進めるに当たり、富山大学・対馬勝年教授ならびに東北大学・三橋博三助教授から関連文献のご提供とご助言頂きました。心よりお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 渡辺正朋・平井和喜：屋根葺材と屋根雪の摩擦に関する研究（その1）主要な屋根葺材と水ブロックの静摩擦，日本雪工学会誌，第3号，pp.1-11，1987
- 2) 対馬勝年：スケート・スキー 1. 氷質・雪質と滑走，冷凍，61巻，710号，pp.1-9，1986

- 3) 対馬勝年：単結晶氷の摩擦に関する研究 I 鋼球と氷の（0001）面および（0110）面の摩擦に及ぼす荷重，速度，温度の効果ならびに摩擦機構としての凝着説，低温科学物理篇，35，pp.1-22，1977
- 4) 対馬勝年：単結晶氷の摩擦に関する研究 II 滑走体の寸法効果および界面剪断強さと掘り起こし強さの温度，速度，荷重依存，低温科学物理篇，35，pp.23-33，1977
- 5) 対馬勝年：単結晶氷の摩擦に関する研究 III 結晶方位による動摩擦係数，摩擦痕幅，掘り起こし強さの異方性，低温科学物理篇，35，pp.35-46，1977
- 6) 前田博司・杉森正義：屋根の雪荷重に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.559-560，1975
- 7) 宮内信之助：新潟県下における屋根雪処理の動向，新潟大学災害研究年報，2号，pp.99-108，1980
- 8) 城下好夫・対馬勝年：金属平板と氷との摩擦実験，日本雪氷学会秋期大会講演予稿集，105，1981
- 9) 清水増次郎・木村忠志：屋根雪の滑落促進 IV，日本雪氷学会秋期大会講演予稿集，127，1985
- 10) 上野 学・高島和希・高村久雄・福本博光：雪氷に対する屋根鋼板の特性評価，雪氷，49巻，3号，1987
- 11) 清水増次郎・木村忠志：屋根雪の滑落促進 V，日本雪氷学会秋期大会講演予稿集，112，1986
- 12) 鈴木 剛・上野 学・山田郁郎・高村久雄・福本博光：耐雪用屋根材の諸特性（3報），日本雪氷学会秋期大会講演予稿集，113，1986
- 13) 前野紀一・福田正巳編：雪氷の構造と物性 4. 氷の力学的性質，古今書院，pp.105-121，1986版
- 14) F. B. Beer・E. R. Johoston，長谷川節訳：工学のための力学（上），315-322，1982版

SYNOPSIS

STUDY ON FRICTION BETWEEN ROOFING MATERIALS AND SNOW ON ROOF

(part 2) Sliding Velocity and Kinetic Friction occurred in Angle of Friction

by MASATOMO WATANABE
Hatinonohe Institute of Technology
and
KAZUNOBU HIRAI
Tohoku University

The former paper (part 1) presented the results of experiments made on the static friction between the ice block and staple roofing materials.

In this paper the experimental results of the sliding velocity and kinetic friction which were occurred in the friction angle are presented. Sliding experiments were carried out by the apparatus adapted the method of "slant table" which was used in the former study. The sliding mass, roofing materials, and other conditions of this experiments are same as the study part 1 at all.

The summary of the results is shown below.

- (1) The changes of the sliding velocity and kinetic friction in the case of the sliding slant under about 20% is different with the changes of them in the case of the sliding slant over about 20%.
- (2) In the case of a slant under some 20%, the mean velocity depend on the roughness of materials' surface or the condition of temperature. A ratio of the kinetic friction to the static friction is roughly 80% in this slant condition.
- (3) In the case of a slant over some 20%, change of the mean velocity depend on the gravity acceleration and the value of kinetic friction decrease suddenly with increases of the sliding slant.