

大規模膜屋根構造物における滑雪性状に関する実験的研究

小竹 達也*1

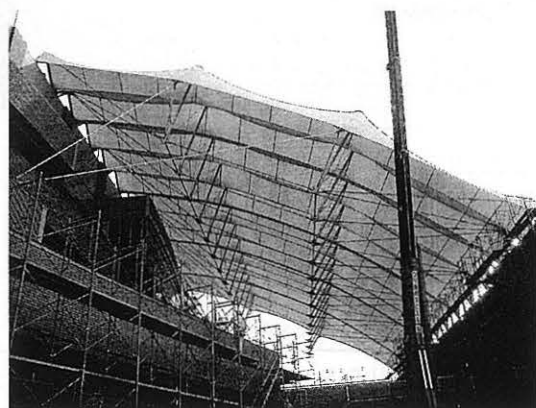
苔米地 司*2

梗 概

これまでに膜材料における滑雪性状については幾つかの実験が行われ、その結果が報告されている。しかし、これらの実験は滑雪面が数メートル程度の装置によるものであり、ドームなどのような大型施設の場合、静摩擦係数などの滑雪前の性状は一致すると考えるが、滑雪開始後の滑雪速度などについてのスケール効果が十分に検討されていないため、その適用性について課題が残るところである。本研究では、長さ 40 メートル以上の膜屋根を持った実規模の実験装置を用いて滑雪実験を実施し、動摩擦抵抗力や粘性抵抗力、空気抵抗力の影響度や高速域における摩擦抵抗の状況などについて検証を行い、実建物における滑雪性状を明らかにした。その結果、動摩擦抵抗力は、滑雪速度が増すと殆ど影響しなくなることや大規模構造物においては粘性抵抗力のほかに空気抵抗力を考慮する必要があることがわかった。

1. はじめに

近年、積雪寒冷地には多くの膜構造屋根によるドーム建築物が建設されており、屋根雪処理には滑雪方式を採用している。これらの建物の堆雪エリアやその床構造を設計する場合、屋根上落雪の滑雪飛距離や落雪衝撃荷重を適切に評価する必要があり、これには屋根上での滑雪性状を明確にすることが重要である。これまでも膜材料における滑雪性状については幾つかの実験が行われ、その結果が報告されている。しかし、これらの実験は滑雪面が数メートル程度の装置によるものであり、ドームなどのような大型施設の場合と比べて、静摩擦係数などの滑雪前の性状は一致すると考えるが、滑雪開始後の滑雪速度などについてのスケール効果が十分に検討されていない。



写-1 JRA新潟競馬場テラスプラザ (2001年4月時点)

本研究では、JRA新潟競馬場スタンド増築工事におけるテラスプラザを覆うサスペンション構造膜屋根施工にあたり、種々の検討のために製作されたモックアップを用いて、滑雪実験を実施した。これらの実験で得られた滑雪抵抗力や滑雪速度などを基に、実現象レベルにおける膜屋根構造物の滑雪性状について検討した。

2. 既往の研究

既往の研究をみると、苔米地ら¹⁾は、表面に四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布(以下、膜材)を張った約 1.8m の滑走面を持った勾配可変式の実験装置を用いて、雪質や積雪重量を変化させた滑雪実験を行っている。その結果、滑雪現象が起こる 0℃ 近辺では動摩擦係数は 0.05~0.1 程度であることが報告されている。

山口ら²⁾は、滑走面長さが 8m の勾配可変式の膜屋根を用いた屋外実験を行っている。実験では滑雪速度の他、滑雪飛距離の計測を行い、その結果と質点の運動法則に従った数値シミュレーション結果を比較し、滑走距離によっては二つの値に差が出てくることを指摘し、動摩擦抵抗力の他に粘性抵抗力を考慮する必要性があることを述べている。

伊東ら³⁾は、滑走面長が 7m の勾配可変式の塗装鋼板屋根を用いて、雪質、積雪重量、界面状態などをパラメータとした実験を行っている。実験では各条件下での滑雪速度の計測を行っており、その結果、いずれの条件においても重力に従った等加速の状態で滑走しており、積雪重量が大きいほど滑雪速度も大きくなり、二つの間に比例関係があることが報告されている。

*1 大成建設株式会社 設計本部・工修

*2 北海道工業大学 教授・工博

菊田ら⁴⁾は、富山県に建設された直径 38m、高さ約 10m の球形膜屋根の降雪状況をビデオにより記録し検証している。その結果、山口ら²⁾の報告と同様に粘性抵抗力を考慮するとシミュレーションにより実現象をよく再現できそうであるが、粘性抵抗力の寄与率はあまり大きくないことを報告している。

これらの研究は、長さが数メートルから 20 メートル程度の滑雪面によるものであり、大規模構造物での滑雪現象とは大きく異なった速度レベルによるものである。従って、その適応性に課題を残しており、実現象レベルでの検証が必要と考えられる。

3. 実験装置概要

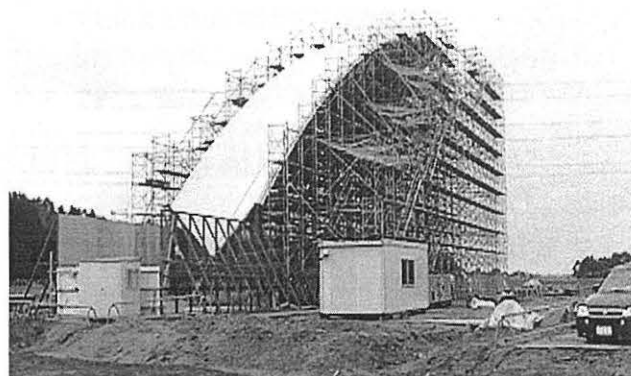
図-1 および図-2 に実験装置の形状を示す。全体形状は、長さ 36m、最大高 22m、曲率半径 59m、最大滑走距離 41m の円弧形状をしており、膜パネルは、幅 4.5m の V 字溝形状となっている。また、パネル中央には 60φ の押えケーブルを配しており、下部軒下の堆雪エリアにアンカーされている。

4. 実験方法

事前予備実験により実験条件を決定し、平成 12 年 2 月 18 日、新潟県北蒲原郡笹神村次郎丸にて本実験を実施した。当日の天気は曇り、気温は 2~3.5℃であった。実験は、図-1 に示した膜パネル谷位置 3 箇所 (4, 7, 10) から雪ブロックを滑走させ、その滑走状況を軒先近辺に設置したビデオカメラ (位置 12) により記録した。なお、使用したカメラはデジタル方式で毎秒 30 コマの記録性能である。

4.1 雪ブロック (試験体)

試験体である雪ブロックは、50cm×50cm×20cm および 50cm×50cm×10cm の 2 種類を用意した。雪ブロックの製作は、写-3 に示したように同形の型枠を用いて、現地積雪を圧密しながら行った。その



写-2 実験装置全景

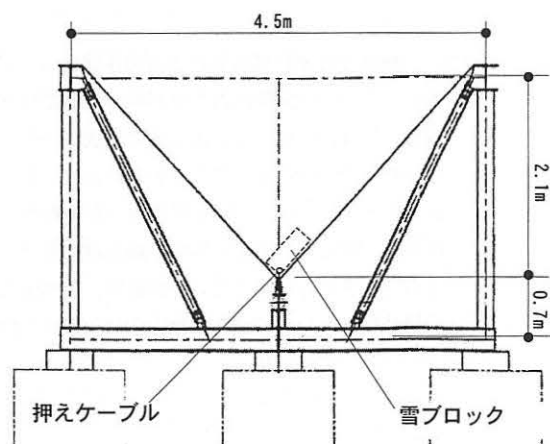


図-2 実験装置断面

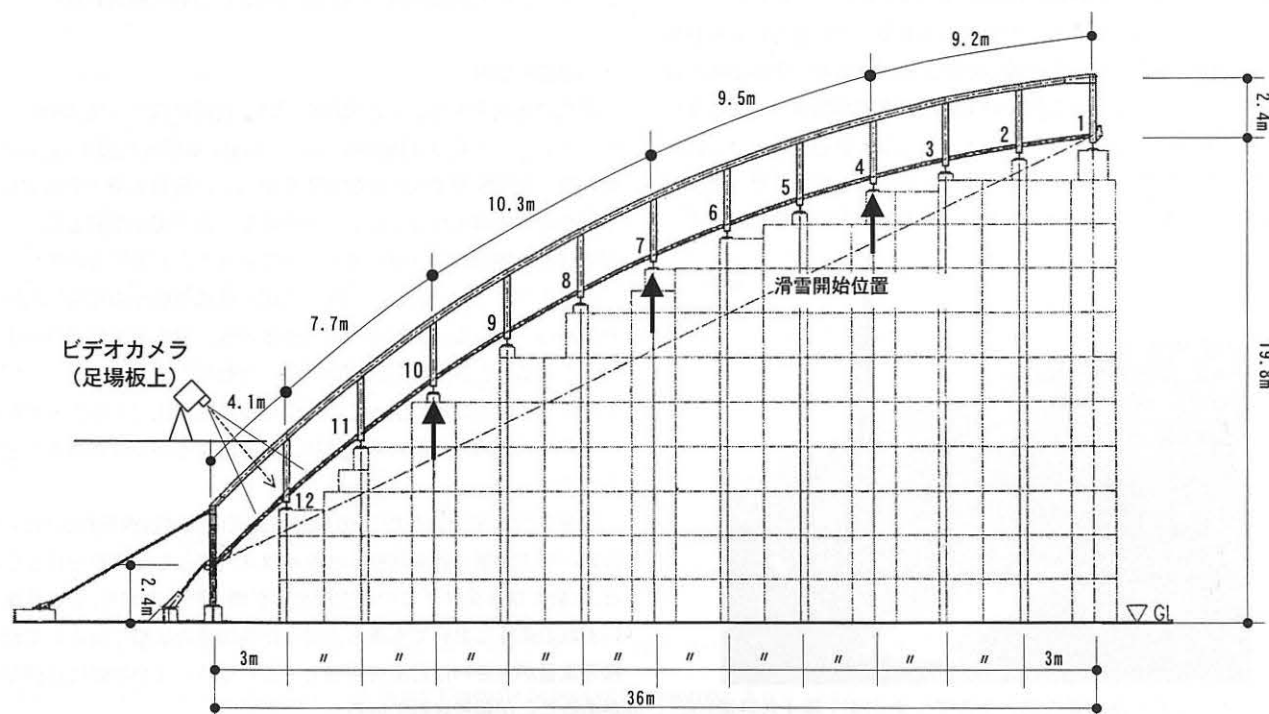


図-1 実験装置概要

際、滑雪開始位置である膜パネル谷部へ雪ブロックを設置するための吊り下げ用ロープを埋め込んだ。なお、雪ブロックに使用した雪質は、ぬれ雪状態であり、雪ブロックの密度は、 $0.47\sim0.75\text{g/cm}^3$ であった（密度 0.6g/cm^3 以上のものが約80%を占めている）。

製作された雪ブロック（重量：30～40kg）は、クレーンを用いて所定の滑雪開始位置まで持ち上げた。写－4に示すように、持ち上げた雪ブロックは、その場で重量を測定し、吊り下げ用ロープを用いて膜パネルの谷位置まで持っていき、ロープを放して自然滑雪させた。

図－2に膜パネル上の雪ブロック位置を示すが、滑雪時には雪ブロックは底面および片側面が膜パネルと接しており、また、押えケーブル上面を覆いながら滑走している。なお、ここでは雪ブロックの底面＋片側面を接触面とし、全滑走中にこれが維持されているも

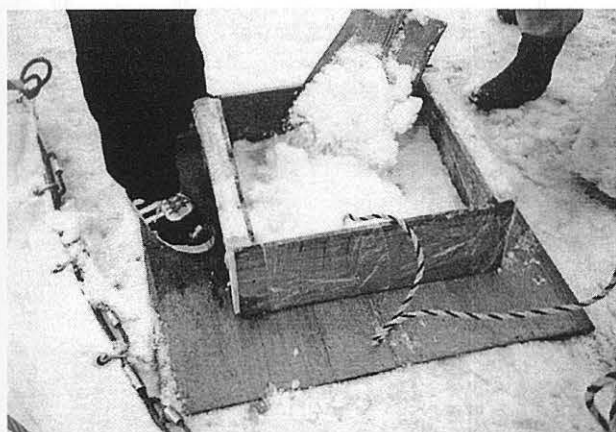
ものとして検討を行なう。

5. 実験結果

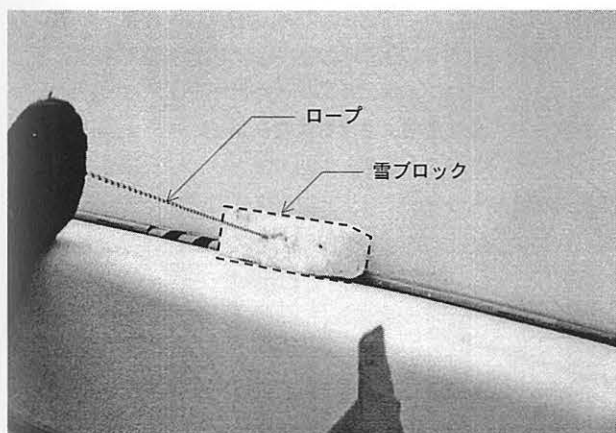
実験における滑雪速度は、ビデオカメラに記録した映像より、写－5に示したように、1/30秒ごとのコマ撮り画像から雪ブロックの位置を読み取り、換算した。

5.1 滑走距離と滑雪速度の関係

図－3に滑走距離と滑雪速度の関係を示す。位置4（滑走長さ27.5m）からの滑走では、滑雪速度は $12.6\sim14.1\text{m/sec}$ 、位置7（滑走長さ18.0m）からは $10.8\sim12.0\text{m/sec}$ 、位置10（滑走長さ7.7m）からは 7.5m/sec であった。このように滑走距離が増加すると滑雪速度も増加する傾向にあることがわかる。ただし、本実験装置の形状的な特徴として、滑走距離が増加するほど、その平均勾配は減少す



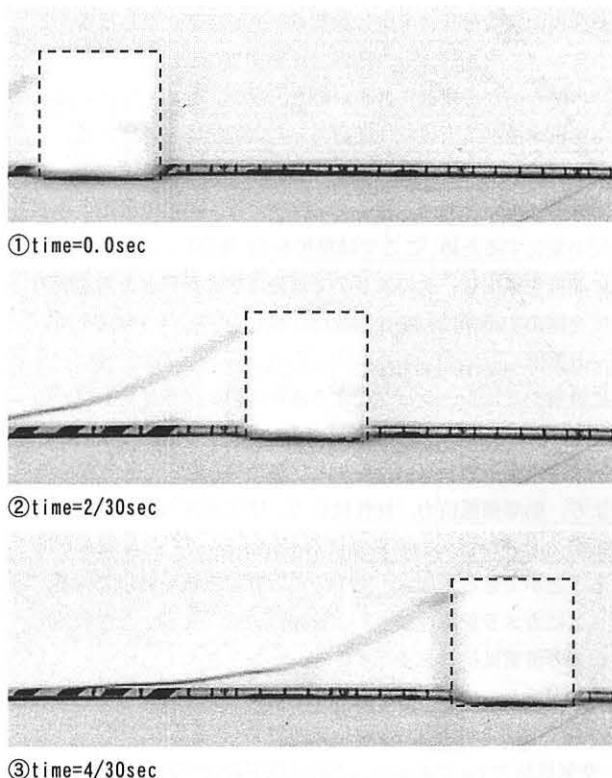
写－3 雪ブロック製作状況



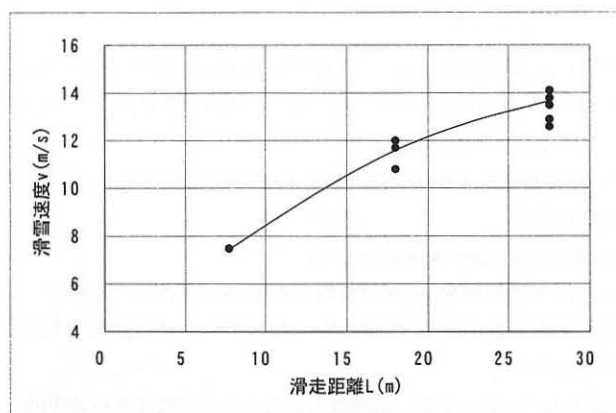
写－4 雪ブロック設置状況

表－1 実験シリーズ

実験シリーズ	滑雪開始位置	雪ブロック寸法(cm)	実験回数
1	4	50×50×20	9
2	4	50×50×10	3
3	7	50×50×20	3
4	10	50×50×20	3



写－5 実験結果（実験ケース2のビデオ記録画像より）



図－3 滑走距離と滑雪速度の関係
（雪ブロック：50cm×50cm×20cm）

るため、直線的な増分傾向にはならないと考えられる。滑雪速度は、滑走距離の他に屋根勾配などにも影響され動摩擦抵抗のみ考慮した場合、滑雪速度は以下の式で求められる。

$$v = \sqrt{2gL(\sin\theta - \mu_k \cos\theta)} \cdots \cdots (1)$$

ここに、 v ：滑雪速度(m/s)、 L ：滑走距離(m)、 θ ：屋根勾配(deg)、 μ_k ：動摩擦係数、 g ：重力加速度(m/s²)である。

5.2 積雪重量と滑雪速度の関係

図-4に実験シリーズ1および2(滑雪開始位置4)における積雪重量と滑雪速度の関係を示す。これによると、積雪重量の増加に伴い滑雪速度も増加する傾向にあることがわかる。また、その分布は、 $v=0.054m+12.048$ で表すことができる。ここに、 v ：滑雪速度(m/s)、 m ：積雪重量(kg)である。

5.3 雪ブロックに働く滑雪抵抗力

本実験装置の円弧形状を考慮した質点の運動法則による滑雪シミュレーション⁵⁾を実施し、その結果と比較することにより、各実験ケースでの総合的な滑雪抵抗力を求めた。なお、ここでは滑雪抵抗力として、動摩擦抵抗力、粘性抵抗力、空気抵抗力を考慮する。

一般に滑雪速度は、動摩擦抵抗のみ考慮した場合は(1)式で求めることができる。ただし曲面屋根上での滑雪では、その位置によって屋根勾配が変化するため、ここでは屋根を20分割し、上方のエリアから順に速度を算出し、次のエリアでは先に求めた速度を初速度として速度を算出する。これを分割数だけ繰り返すという手法を用いた(図-5参照)。

図-6に滑雪シミュレーションによるみかけの動摩擦係数と滑雪速度の関係を示す。本シミュレーションでは、動摩擦係数のみ設定し、他の抵抗力は考慮していない。つまり実験結果と図-6を比較することにより、動摩擦抵抗力、粘性抵抗力、空気抵抗力という総合的な滑雪抵抗力をみかけの動摩擦抵抗力($\mu mg \cos \theta$)に換算した形で求めることができる。なお、図中の式は近似直線を表している。また表-2にカメラ記録位置12より $\theta=41.68^\circ$ としたときの各実験シリーズの滑雪抵抗力 R を示す。

次に実験ケース1~12についてこの滑雪抵抗力 R に含まれている空気抵抗力 F_a 、動摩擦抵抗力 F_b 、粘性抵抗力 F_c を求める。

まず、空気抵抗力 F_a であるが、これは以下の式で表すことができる。

$$F_a = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho_a \cdot S \cdot v^2 \cdots \cdots (2)$$

ここに、 C_d ：抵抗係数、 ρ_a ：空気密度(1.3kg/m³:0℃)、 S ：風の受圧面積(m²)、 v ：滑雪速度(m/sec)である。抵抗係数 C_d は雪ブロックが矩形のため1.2とした。

また、滑雪抵抗力 R から空気抵抗力 F_a を引いたものを F_r とすると、次式になる。

$$F_r = F_b + F_c = \mu_k mg \cos \theta + F_c \cdots \cdots (3)$$

ここに、 μ_k ：動摩擦係数、 m ：積雪重量(kg)、 g ：重力加速度(9.8m/s²)、 θ ：屋根勾配(deg)である。実験シリーズにおける各抵抗力の平均値を表-3に示す。

(3)式を F_r と $mg \cos \theta$ の一次関数と捉えると μ が傾きで F_c が切片に相当する。表-3に示した実験結果から滑雪開始位置4における F_r と $mg \cos \theta$ の関係より μ および F_c を求めると、動摩擦係数0.03、

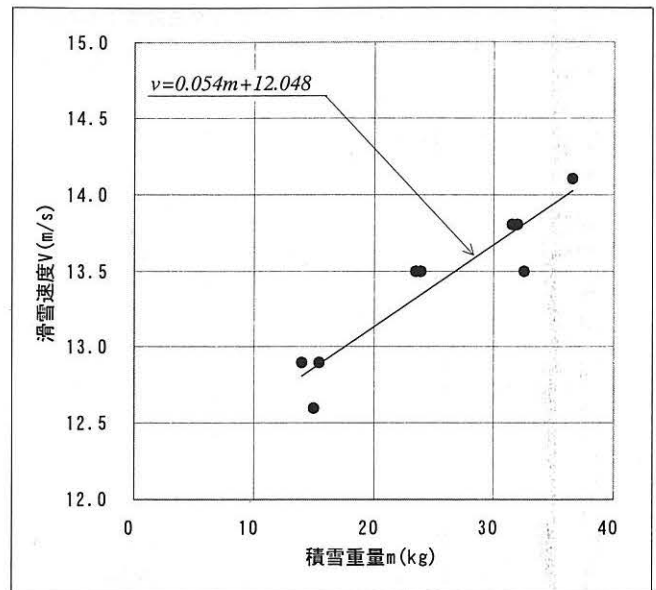
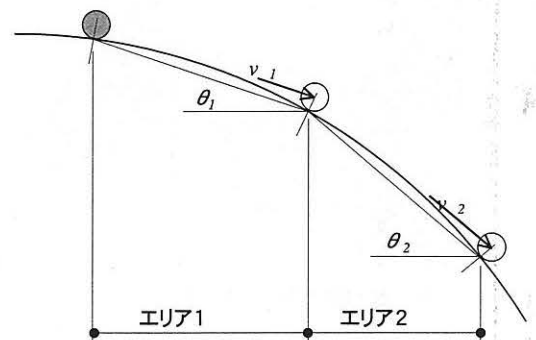


図-4 積雪重量と滑雪速度の関係



$$v_2 = v_1 + g \cdot (\sin \theta_2 - \mu_k \cos \theta_2) \cdot t_2$$

(t_2 ：エリア2における滑走時間)

図-5 曲面屋根における滑雪シミュレーション

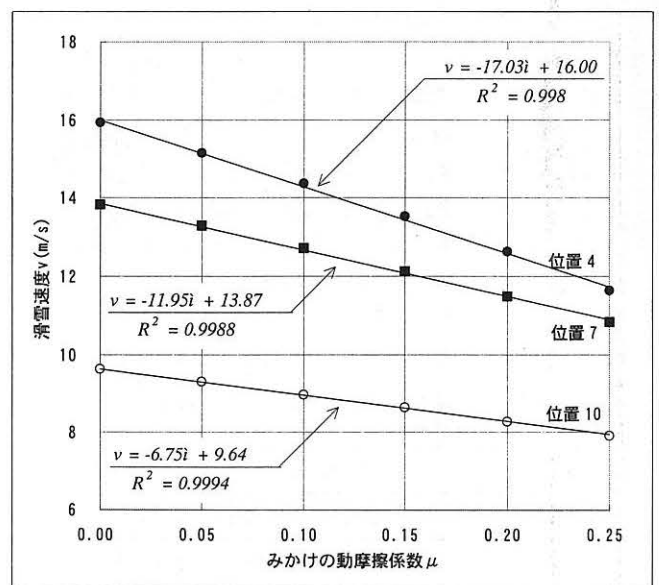


図-6 みかけの動摩擦係数と滑雪速度の関係

粘性抵抗力 11.1N が得られる (図-7 参照)。本実験装置の平均勾配は 26° であり、この結果は山口ら²⁾の実験結果とほぼ一致している。

以上より、雪ブロック寸法の異なる実験シリーズ1と2について、各抵抗力およびその比率を表-4にまとめる。空気抵抗力および動摩擦抵抗力は、実験シリーズ1がシリーズ2の約2倍となっており、その形状に則したものとなっている。また、いずれのシリーズにおいても動摩擦抵抗力の占める割合は小さく2割以下となっており、滑雪速度が大きくなると、その影響は小さくなることからわかる。つまり滑雪速度が大きくなる大規模建築物においては、動摩擦抵抗力の占める割合は2割程度であり、空気抵抗力や粘性抵抗力の方が大きく影響していることがわかる。

6. まとめ

本研究では、これまで殆ど報告されてなかった大規模構造物における実現象レベルでの屋根雪の滑雪性状を膜屋根試験体を用いた屋外実験により検討を行った。その結果、滑雪速度が大きくなると動摩擦抵抗力の影響は小さくなり、粘性抵抗力の他に空気抵抗力を考慮して検討する必要があることがわかった。今回は空気抵抗について一般式からその値を求めたが、その適正な評価を行うには今後パラメータ実験などによる検討が必要である。

参考文献

- 1) 苦米地司ほか3名：膜構造物の屋根雪処理に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第426号，1991.8，pp.99～105
- 2) 山口英治ほか5名：膜構造物における滑雪時の性状に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第437号，1992.7，pp.91～96
- 3) 伊東敏幸ほか2名：屋根上積雪の滑落性状に及ぼす滑雪界面の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，1996.9，pp.103～104
- 4) 菊田道宣ほか3名：球形状ドーム型膜構造建築物における積雪性状の観測（その1．観測概要およびドーム屋根の滑雪性状），日本建築学会大会学術講演梗概集，1994.9，pp.85～86
- 5) 小竹達也ほか1名：大規模建築物の軒下堆雪形状予測手法の提案，日本建築学会技術報告集，第10号，2000.6，pp.25～28
- 6) 小竹達也ほか4名：積雪地域に建設される膜構造物における屋根上積雪荷重の評価について，日本建築学会技術報告集，第3号，1996.12，pp.34～39
- 7) 大塚清敏ほか5名：膜構造物の雪処理に関する研究，（社）日本膜構造協会，膜構造研究論文集'90，No.4，1990.12，pp.55～68
- 8) 高橋 博ほか：雪氷防災，白亜書房，1986.12，pp.240～249
- 9) 絵内正道：積雪寒冷型アトリウムの計画と設計，北海道大学図書刊行会，1995.2，pp.105～112

表-2 動摩擦換算による滑雪抵抗力

実験シリーズ	積雪重量 m (kg)	滑雪速度 v (m/s)	みかけの動摩擦係数 μ	滑雪抵抗力 R $\mu mg \cos \theta$ (N)
1	27.0	12.90	0.18	35.98
	24.0	13.50	0.15	25.79
	23.5	13.50	0.15	25.25
	36.5	14.10	0.11	29.81
	31.5	13.80	0.13	29.79
	31.0	14.10	0.11	25.32
	32.5	13.50	0.15	34.93
	30.0	12.60	0.20	43.84
	32.0	13.80	0.13	30.26
2	14.0	12.90	0.18	18.65
	15.5	12.90	0.18	20.65
	15.0	12.60	0.20	21.92
3	35.0	12.00	0.16	40.03
	32.5	10.80	0.26	61.05
	30.0	11.70	0.18	39.82
4	32.0	7.50	0.32	74.13
	35.0	7.50	0.32	81.07
	37.5	7.50	0.32	86.87

表-3 実験シリーズにおける各抵抗力の平均値

実験シリーズ	滑雪開始位置	滑雪抵抗力 R (N)	空気抵抗力 F_a (N)	他の抵抗力 F_r (N)	$mg \cos \theta$ (N)
1	4	31.22	14.30	16.92	217.95
2	4	20.41	6.39	14.02	108.57
3	7	46.97	10.34	36.63	237.88
4	10	80.69	4.39	76.30	254.96

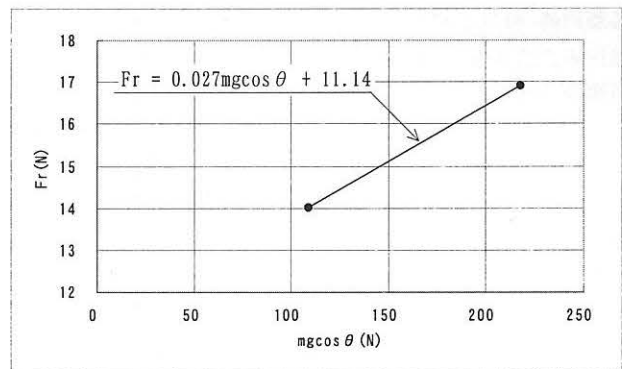


図-7 動摩擦係数および粘性抵抗力の算出

表-4 各抵抗力の比較

実験シリーズ ブロック寸法 (cm)	滑雪抵抗 R (N)	空気抵抗 F_a (N)	動摩擦抵抗 F_b (N)	粘性抵抗 F_c (N)
1	31.22	14.30	5.78	11.14
50×50×20	(100)	(46)	(18)	(36)
2	20.41	6.39	2.88	11.14
50×50×10	(100)	(31)	(14)	(55)

※括弧内は、各抵抗力の比率を示す。

Experimental Study on Resisting Force of Snow Sliding on the Roof of a Large-Scale Membrane Structure

Tatsuya Kotake *1

Tsukasa Tomabechi *2

SYNOPSIS

Several papers have been written in the past about snow sliding tests and about the properties of snow sliding on a membrane roof. Those tests were done using an apparatus that were only several meters long. The static sliding friction properties of a large-scale structure such as a dome may agree well with the results of those tests, however, as the sliding speed may differ much from those tests, it was necessary to develop an estimation method of resisting force when applying it to an actual structure. In this study, snow sliding tests were executed with an actual size membrane roof that is more than 40 meters long. As a result, it was learned that increase in sliding speed hardly influenced the kinetic friction force and it was proved that it is necessary to consider air resisting force in addition to viscous resisting force in a large-scale structure.

*1 Taisei Corporation, Design and Proposal Div., Mr. Eng.

*2 Prof., Hokkaido Institute of Technology, Dr. Eng.