

## 振動実験と時刻歴応答解析に基づく各種建築用仕上げ材の滑雪特性の評価

### Evaluation of snow sliding characteristics on finishing materials for buildings based on shaking table test and response analysis

千葉隆弘\* 河合有人\*\*

Takahiro Chiba and Arihito Kawai

#### Abstract

In this study, to evaluate the characteristics of snow sliding on finishing materials for buildings, shaking table test and response analysis were conducted. In the shaking table test, harmonic vibration was conducted in each 1 hour during snow melting in the cold room which was set 5°C. Relationship between the melting conditions and the snow sliding was measured in the test. The kinetic friction coefficient  $\mu_k$  and damping factor  $C_s$ , which is traced the results of the test using equation of motion considering resistance force of kinetic friction and damping factor, were calculated analytically. As the results, the time history of snow acceleration obtained in the analysis was well adapted to the shaking table test. The behavior of the kinetic friction coefficient  $\mu_k$  and the damping factor  $C_s$  during snow melting was changed in each material. The kinetic friction coefficient  $\mu_k$  decreased with the contact angle on the material surface increased except titanium sheet.

#### 1. はじめに

近年、ほとんどの高層建築物でカーテンウォールが採用されている。使用される仕上げ材は、ガラス、アルミ、およびステンレスなどの金属材に加えて、石材や窯業系の材料も使用することができ、多種多様である。また、開口部の水切りに用いる材料には、塗装鋼板に比べて耐久性に優れるアルミやステンレスが用いられるケースが増え、これらの表面処理もいくつかの種類が存在する。こうしたカーテンウォールの採用に伴い、外壁面と窓面との間隔が広がる場合があり、水切り部に積雪が確認されるケースが増えている。その積雪が滑落することによって人的・物的被害が生じる場合があることから、水切り部の落雪対策を検討することが必要となる。その検討で基本となるのは雪と材料表面との摩擦特性であり、確実な滑落が見込まれる水切りの勾配を設定するためには、摩擦係数が必要となる。しかし、既往の研究をみると、住宅の屋根で用いられる塗装鋼板や大型体育施設の屋根で用いられる膜材料の摩擦係数を対象とした研究が中心であり<sup>(1, 2, 3)</sup>、その他の屋根以外で用いられる仕上げ材表面を対象

とした研究は少ないのが現状である。

このような背景から本研究では、屋根以外で用いられる各種仕上げ材を対象に、積雪と仕上げ材表面との摩擦特性を振動実験および時刻歴応答解析に基づいて測定した。

#### 2. 研究方法

振動実験の状況を写真1に示す。大きさ 0.45 ×

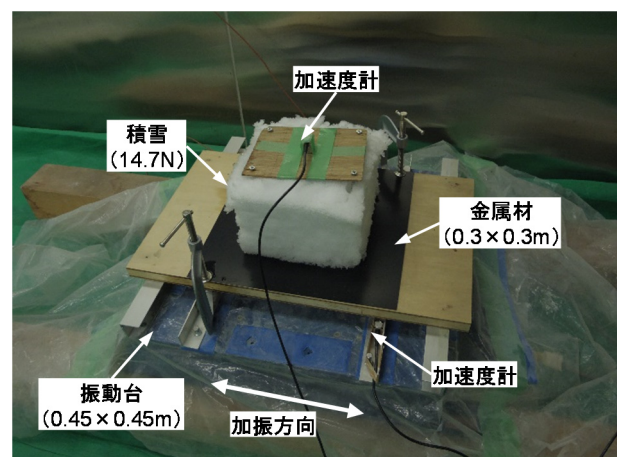


写真1 振動実験の状況

\* 北海道科学大学工学部建築学科（寒地未来生活環境研究所）

\*\* 竹中工務店

0.45m の小型振動台に治具を介して各種仕上げ材を取り付けた。これらの仕上げ材には網目寸法 10mm のふるいを用いて自然雪を積雪させた。この積雪の底面寸法は 200×200mm であり、型枠を用いて重量が 29N (3kgf) になるまで積雪させた。この積雪の上面には加速度計を取り付けた軽いベニア板を載せ、積雪の加速度時刻歴を測定した。なお、加速度計は振動台にも取り付けており、これらのサンプリング周波数は 200Hz である。加振方法は調和振動加振であり、積雪が滑動するまで振幅や振動数を増加させた。

本実験は、北海道科学大学が所有する低温実験室で行った。図 1 に、実験室の温度推移と加振スケジュールを示す。始めに、実験室を -5℃ まで冷却し、その状態で積雪させた直後に調和振動加振を行い、低温時の摩擦特性を把握した。次に、融雪に伴う摩擦特性の変化を把握することを目的に、実験室を 5℃ まで温度上昇させ、上昇させたときから 1h, 2h, 3h, 4h, 6h, および 8h のタイミングで調和振動加振を行った。

実験の対象とした仕上げ材表面、基材の大きさ、積雪の重量、および測定した接触角を表 1 に示す。

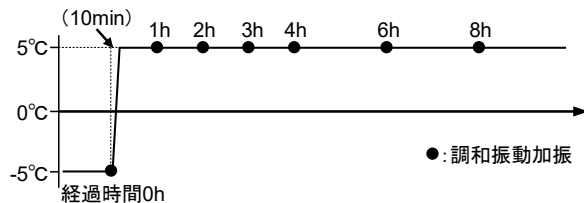


図 1 実験室の温度推移と加振スケジュール

表のように、対象とした仕上げ材表面は、鋼板、アルミ板、ステンレス板、およびチタン板を基本とし、それらの表面を塗装等で変化させた 8 種類である。なお、金属材と比較するため、御影石（本磨き）を対象とした。基材の大きさは 0.3×0.3m を基本とし、TN (チタン板) のみ 0.2×0.3m となっている。積雪の重量は、14.7N (1.5kg) を基本とし、基板が他に比べて小さい TN の場合のみ 8.1N (0.83kg) とした。これら仕上げ材の接触角は、電動ピペットを用いて 4μl の水滴を 5 滴仕上げ材表面に載せ、マイクログラフで撮影した 1 滴ずつの形状を基に測定した。表中の接触角は 5 滴の平均値である。各仕上げ材の接触角をみると、AF, SE, SF, SD のような鋼板や塗装をした仕上げ材は、70～90° であった。SG および TN の接触角は 45～50° であり、他の仕上げ材に比べて小さい。これらに対し、アルミ板にコーティング剤を塗布した AS および AG の接触角は 100° 前後で、他の仕上げ材に比べて大きい。このような仕上げ材を対象に振動実験を行った。

積雪と材料表面との摩擦特性については、時刻歴応答解析を行って把握することとした。具体的には、動摩擦係数  $\mu_k$  および粘性減衰係数  $C_s$  を変化させた時刻歴応答解析を行い、振動実験で得られた積雪の加速度時刻歴に近似する  $\mu_k$  および  $C_s$  を導いた。積雪が滑動している間の運動方程式は、自然雪の質量を  $m_s$ 、自然雪の変位を  $x_s$ 、振動台の変位を  $x_0$ 、重力加速度を  $g$  とすると、以下の式 1) で表される。

表 1 実験に使用した各種建築用仕上げ材と測定した接触角

No.	対象とした材料表面		基材の大きさ	積雪の重量	接触角					平均
					1	2	3	4	5	
1	AF	フッ素塗装アルミ板	0.3×0.3m	14.7N (1.5kg)						91.6°
2	SE	表面エンボス加工ステンレス板	0.3×0.3m	14.7N (1.5kg)						64.8°
3	SF	フッ素塗装鋼板	0.3×0.3m	14.7N (1.5kg)						70.0°
4	SG	御影石(本磨き)	0.3×0.3m	14.7N (1.5kg)						44.8°
5	SD	鋼板(表面塗装なし)	0.3×0.3m	14.7N (1.5kg)						70.4°
6	TN	チタン板	0.2×0.3m	8.1N (0.83kg)						49.6°
7	AS	アルミ板+シリコンスプレー	0.3×0.3m	14.7N (1.5kg)						97.6°
8	AG	アルミ板+フッ素系コーティング剤	0.3×0.3m	14.7N (1.5kg)						103.6°

$$m_s(\ddot{x}_s - \ddot{x}_0) + C_s \dot{x}_s + \mu_k m_s g \frac{\dot{x}_s}{|\dot{x}_s|} = 0 \quad \text{式 1)}$$

本研究では、Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ,  $\Delta t=0.005s$ ) に基づいて時刻歴応答解析を行った。なお、積雪が静止している状態では静摩擦抵抗力が作用していることとし、そのときの静摩擦係数は、動摩擦係数  $\mu_k$  を 0.7 で除して設定した。

### 3. 実験および解析結果

AF (フッ素塗装アルミ板) および SE (表面エンボス加工ステンレス板) における実験結果と解析結果との比較を図 2 に示す。なお、経過時間は、0h, 2h, および 6h の場合を示している。AF の場合をみると、経過時間 0h では、積雪の応答加速度が小さく、 $\mu_k=0.05$ ,  $C_s=3.92 \text{ N}\cdot\text{s/m}$  の解析結果が実験結果と近似した。経過時間 2h の場合をみると、0h に比べて積雪の応答加速度が大きくなり、実験結果と近似する  $\mu_k$  および  $C_s$  が増加し、 $\mu_k$  の増加傾向が顕著である。経過時間 6h の場合をみると、2h の場合に比べて実験結果と近似する  $\mu_k$  および  $C_s$  が減少して

いる。次に、SE の場合をみると、経過時間 0h では、AF と同様に積雪の応答が小さく、 $\mu_k$  および  $C_s$  も小さい。経過時間 2h の場合をみると、積雪を滑動させるための入力下加速度が大きくなったため、実験で得られた加速度波形のノイズが比較的大きい。実験結果に近似する  $\mu_k$  は 0.47 であり、0h からの増加傾向は極めて顕著である。経過時間 6h の場合をみると、 $\mu_k$  は 2h に比べて減少しているものの、 $C_s$  は増加している。このように、融雪が進むにつれて  $\mu_k$  および  $C_s$  が変化し、その傾向は仕上げ材の種類によって異なっている。

次に、TN (チタン) および AS (アルミ板+シリコンスプレー) における実験結果と解析結果との比較を図 3 に示す。TN をみると、経過時間 0h では、実験で得られた加速度波形のノイズが比較的大きいものの、その波形に近似する解析で得られた  $\mu_k$  は 0.15 であり、前述の AF や SE に比べて大きい。一方で、 $C_s$  は 0 となっており、粘性抵抗力が作用しない傾向を示す。経過時間 2h の場合をみると、前述に比べてさらにノイズが大きくなるものの、解析で得られた  $\mu_k$  は 0.3 と急増している。経過時間 6h で

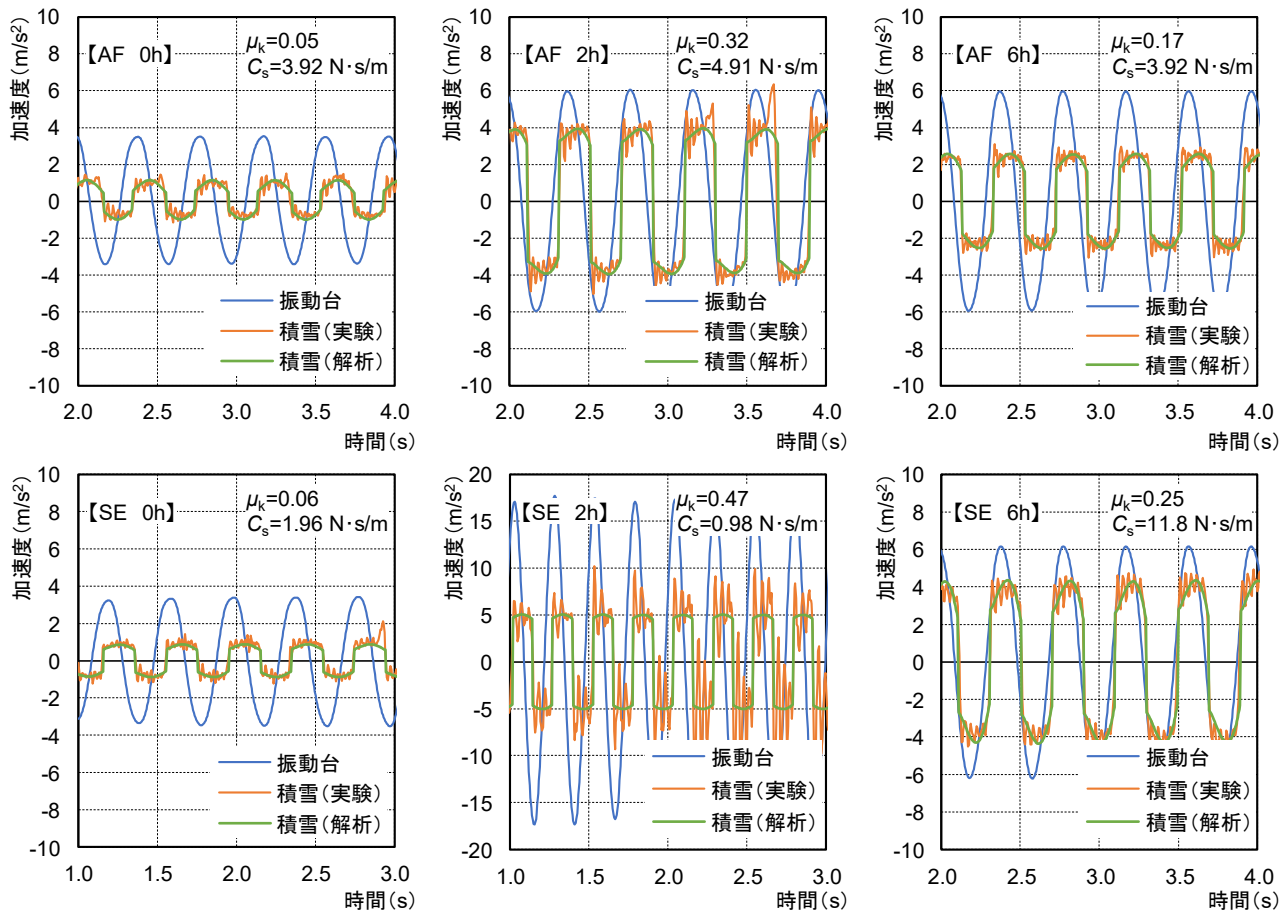


図 2 実験結果と解析結果との比較 (AF および SE の場合)



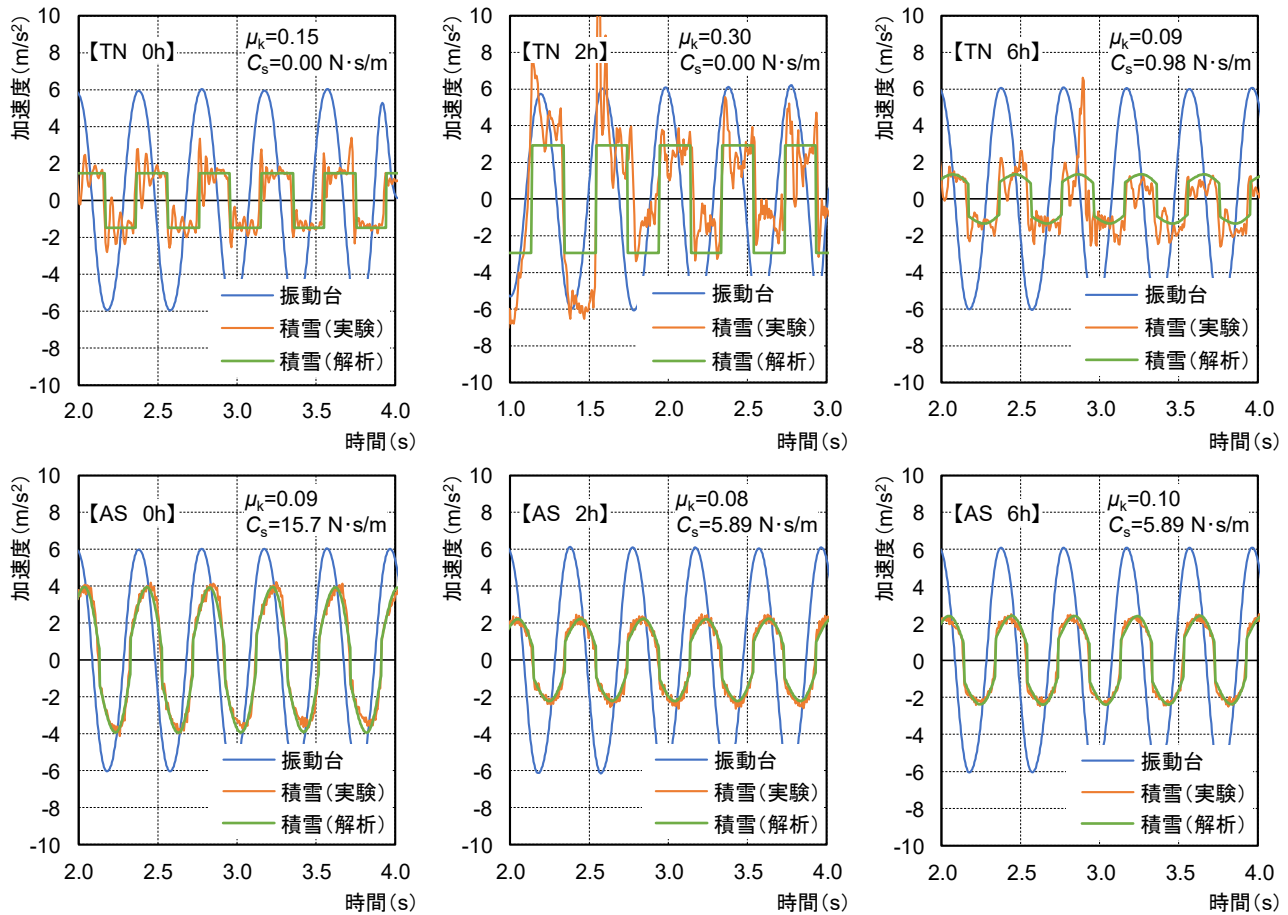


図3 実験結果と解析結果との比較 (TN および AS の場合)

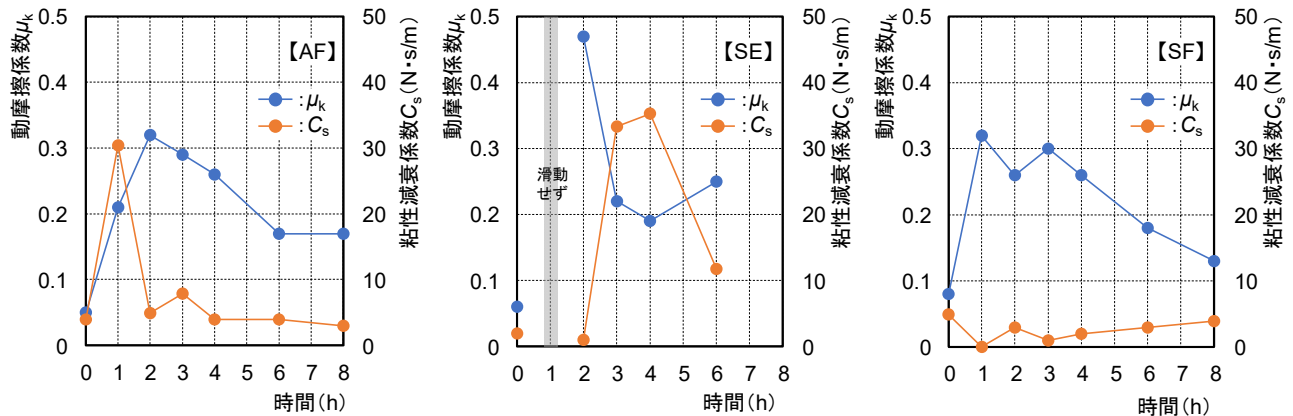


図4 経過時間と動摩擦係数  $\mu_k$  および粘性減衰係数  $C_s$  との関係 (AF, SE および SF の場合)

は、 $\mu_k$  が減少する一方で  $C_s$  が増加しており、前述の AF や SE と異なる傾向を示す。一方、AS の場合をみると、いずれの経過時間においても解析で得られた  $\mu_k$  が小さく、積雪の加速度波形をみると粘性抵抗が支配的である。これは、シリコンスプレーの塗膜上を積雪が滑動しているためであると考えられる。

図4に、AF、SE および SF の場合における経過時間と動摩擦係数  $\mu_k$  および粘性減衰係数  $C_s$  との関

係を示す。なお、図中の  $\mu_k$  および  $C_s$  が示されていない箇所は、入力加速度を増加させた場合においても積雪が滑動しなかったケースである。図のように、いずれの仕上げ材においても、経過時間 0h の  $\mu_k$  および  $C_s$  が小さく、経過時間 2h までこれらの値が増加している。特に、SE の  $\mu_k$  が他の材料に比べて大きい。これらの仕上げ材の接触角をみると、SE が他に比べて小さく、撥水性が低い。これは、融雪水の毛管現象により積雪内部が負圧となり、垂直抗力

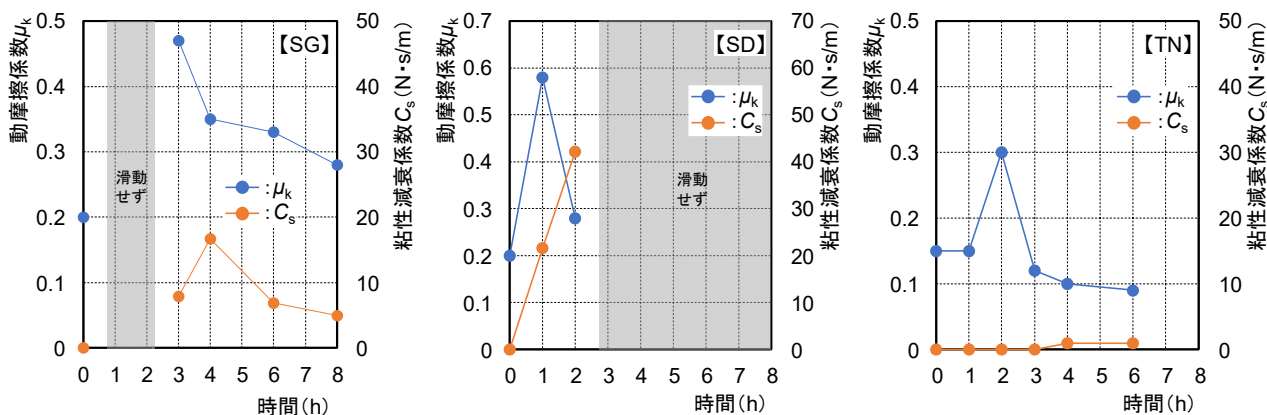


図5 経過時間と動摩擦係数  $\mu_k$  および粘性減衰係数  $C_s$  との関係 (SG, SD および TN の場合)

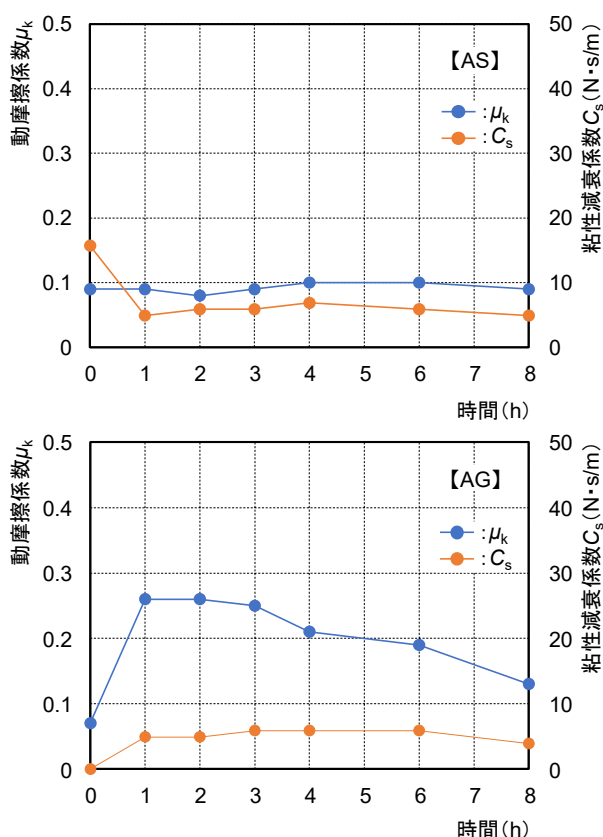


図6 経過時間と  $\mu_k$  および  $C_s$  との関係 (AS および AG の場合)

が増加することによって動摩擦抵抗が増加するとともに、接触角が小さいほどその垂直抗力が増加するのと考えられる。一方、経過時間 3h 以降は、融雪に伴い  $\mu_k$  および  $C_s$  が減少する傾向を示す。次に、SG, SD および TN の場合における経過時間と  $\mu_k$  および  $C_s$  との関係を図 5 に示す。SG および SD の場合をみると、経過時間 0h の  $\mu_k$  が他の仕上げ材に比べて大きめであり、SG では、経過時間 1~2h で振動させても積雪が滑動しなかった。経過時間 3h 以降をみると、 $\mu_k$  と  $C_s$  が減少傾向を示す。SD では、

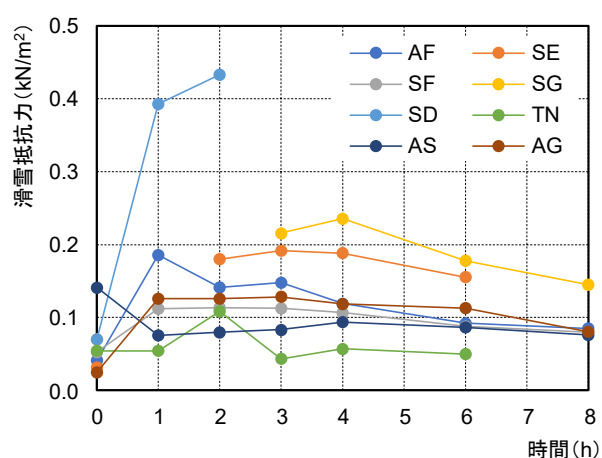


図7 経過時間と滑雪抵抗との関係

経過時間 3h 以降において振動によって積雪を滑動させることができなかった。このように、SG および SD は、融雪水の毛管現象により滑雪抵抗が急増する仕上げ材であり、他の仕上げ材に比べて滑雪性が低いと言える。これらに対し、TN の場合をみると、いずれの経過時間においても振動によって積雪を滑動させることができ、滑雪抵抗は  $\mu_k$  が支配的で、 $C_s$  の影響が他の材料に比べて小さい。図 6 に、AS および AG の場合における経過時間と  $\mu_k$  および  $C_s$  との関係を示す。AS の場合をみると、経過時間 0h の  $C_s$  が大きい傾向を示すものの、 $\mu_k$  および  $C_s$  は一定で推移しており、積雪と仕上げ材表面との摩擦ではなく、積雪とスプレーによる塗膜との摩擦機構になっているのと考えられる。AG の場合をみると、フッ素系の塗膜であることから、経過時間ごとの  $\mu_k$  および  $C_s$  の値が AF や SF と近似した。

図 7 に、経過時間と解析で得られた積雪の最大加速度に積雪の質量を乗じて算定した滑雪抵抗との関係を示す。図のように、SE, SG, および SD の抵抗が他の仕上げ材に比べて大きい。これらの仕

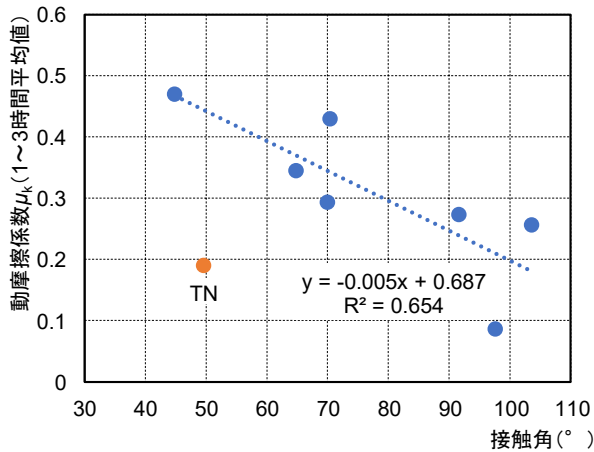


図8 経過時間と滑雪抵抗力との関係

上げ材の接触角をみると、70°以下であることから、滑雪抵抗力は接触角に依存していると考えられる。一方、AS および TN の滑雪抵抗力は、他の仕上げ材に比べて小さい傾向を示す。しかし、経過時間が4h 以上になると各材料での差が小さくなった。ここで、各仕上げ材の接触角と経過時間1~3h で平均した動摩擦係数  $\mu_k$  との関係を図8に示す。両者の関係をみると、TNを除いて接触角の増加に伴い  $\mu_k$  が減少する傾向を示す。すなわち、融雪水の毛管現象によって生じる垂直抗力は接触角に依存することを表している。TNについては、表面の水分が広がりやすい材料であることが指摘されており<sup>(4)</sup>、TN表面に水膜が形成されたことによって、毛管現象の影響が小さくなったものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、積雪と各種材料との摩擦特性を把握することを目的に、振動実験および時刻歴応答解析に基づいて各種材料の動摩擦係数および粘性減衰係数を測定した。その結果、動摩擦係数および粘性減衰係数の値は融雪に伴い変動し、その変動傾向は材料ごとに異なった。特に、動摩擦係数は材料表面の接触角が小さいほど大きくなる傾向を示した。

今後は、各材料の接触角を測定するとともに屋外に曝露し、接触角の滑雪抵抗力依存性、および汚れが材料表面の接触角および滑雪抵抗力に及ぼす影響を測定する予定である。

#### 【参考文献】

- (1) 苫米地司, 山口英治, 伊東敏幸, 星野政幸: 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集, No.426, pp.99-105,

1991.8

- (2) 伊東敏幸, 苫米地司, 星野政幸: 積雪地域における屋根用塗装鋼板の表面劣化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.444, pp.7-12, 1993.2
- (3) 高倉政寛, 伊東敏幸, 苫米地司: 経時的に雪質の変化した屋根上積雪と塗装鋼板との摩擦特性, 日本建築学会構造系論文集, No.510, pp.45-50, 1998.8
- (4) KOBELCO 神戸製鋼: チタン滑雪建材—滑雪性のよい表面状態, 入手先 <<http://www.kobelco.co.jp/products/titan-architectual/usage/snow.html>>, 参照 2018.05.31