制御積雪荷重を用いる勾配屋根における制御日数について

ON THE TERM CONTROLLED BY SNOW LOAD: PRACTICAL USE OF SNOW SLIDING ON PITCHED ROOF

高倉政寛*, 千葉隆弘**, 伊東敏幸***, 苫米地 司****

Masahiro TAKAKURA, Takahiro CHIBA, Toshiyuki ITO
and Tsukasa TOMABECHI

In this study, we examined the reliability of a method for evaluating snow load on a pitched roof that takes into account the occurrence of snow sliding. Data on the properties of adfreezing resistance and frictional resistance, the main resistant forces that determine the occurrence of snow sliding, were summarized from various previous reports. Based on these data, indoor and outdoor experiments were performed. The following results were obtained. 1) The degree of frictional resistance depends on the size of the snow particles. Frictional resistance decreases from about the fifth day after snow has accumulated on the roof, when the snow particles are 1~2 mm in diameter (granular snow). 2) Changes in adfreezing resistance depend on changes in atmospheric temperature. There is no adfreezing resistance when the atmospheric temperature rises above the melting point of ice. Based on the data of these two resistant forces, we calculated the number of days required for snow sliding to occur. Changes in atmospheric temperature and the natural rate of snow granulation were used as indices in the calculation. By using our method of calculation, we were able to clarify the number of days required for snow sliding to occur on a building with a pitched roof, indicating that it is possible to design a building for which snow load can be controlled.

keywords: *Pitched roof, Snow load, Snow sliding off, Snow quality*

勾配屋根, 積雪荷重, 雪の滑落, 雪質

1. はじめに

多雪地域に建設される建築物は、降積雪現象がもたらす問題を除いて計画することができない。特に大規模構造物の積雪荷重は大きな外力となり、構造上の制約を受ける場合が多い。そのため、既存建築物のいくつかでは、この荷重を屋根雪の滑落によって積極的に制御する試みが行われている^{1, 2)}。このような考え方を取り入れる場合は、滑落が発生するまでに要する期間が重要となる。積雪荷重の評価について日本建築学会建築物荷重指針（以下、荷重指針）をみると、実験や調査に基づいた検討によって十分に信頼性のある屋根雪処理が可能な場合、降雪から処理に至る期間内の積雪量を用いて積雪荷重を求めることが可能となっている³⁾。

雪が滑落するまでに要する期間を検討する場合、滑落の発生条件を明らかにしておく必要がある。ここで、建築基準法施行令第86条第4項をみると、屋根勾配が30°を越える場合、積雪荷重を低減して評価することが可能となっている。既往の観測例をみても、屋根勾配の増加に伴って滑落現象が頻繁に発生するため、積雪荷重が小さくなる^{4, 5)}。このように屋根勾配は、雪の滑落による積雪荷重の増減を簡便に評価できる指標の一つと言える。一方、屋根勾配のみでは、屋根葺材の種類や外気温の影響による滑落特性の違いを考慮することが難しいと考える。屋根雪の滑落現象を支配する諸抵抗力について既往の研究をみると、凍着抵抗力や摩

擦抵抗力、雪の破壊抵抗力が滑落条件に大きな影響を及ぼす⁶⁾。これらの抵抗力は、屋根葺材の種類等、建物固有の特性に影響を受ける一方、外気温や雪質等にも影響を受ける⁶⁾。従って、雪が滑落するまでに要する期間を予測しようとする場合は、屋根勾配のみでなく、滑落を妨げる抵抗力を指標として滑落条件を定義する必要があると考える。

このようなことから本研究は、屋根雪の滑落に及ぼす雪質の影響について検討を行った前報⁶⁾に引き続き、勾配屋根における積雪荷重の設定に関する基礎資料の提示を目的とする。はじめに、雪の滑落を支配する抵抗力を既往の研究から整理した。整理して得られた結果に基づいて、雪質の経日変化に関する実験・観測を行った。これらのことから、屋根雪の滑落条件を定義し、降雪から滑落までに要する日数の算出法を提案する。

2. 雪の滑落を支配する抵抗力

滑落現象を利用して積雪荷重の制御を行う場合、この現象に至るまでの屋根上積雪状況を予測することが重要となる。この予測を行うためには、屋根雪の滑落条件を明らかにする必要がある。ここで、滑落現象を支配する抵抗力について整理すると次のようになる。滑落現象を支配する抵抗力は、連続的な屋根雪の破断を阻止する破断抵抗力と、屋根雪と屋根葺材との間に発生する界面

* 北海道工業大学大学院 大学院生・修士(工学)

** 北海道工業大学大学院 大学院生

*** 北海道工業大学建築工学科 助教授・博士(工学)

**** 北海道工業大学建築工学科 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Hokkaido Inst. of Tech., M. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Hokkaido Inst. of Tech.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Hokkaido Inst. of Tech., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Hokkaido Inst. of Tech., Dr. Eng.

抵抗に大別できる。前者の破断抵抗には積雪の引張およびせん断抵抗があり、これらの抵抗は屋根形状の工夫、屋根面の温度分布を均一にすること等で低減あるいは解除することが可能である^{7, 8)}。後者の界面抵抗には、凍着および摩擦抵抗がある。この2つの抵抗について増減特性を考察すると、以下のようになる。

2.1 凍着抵抗の増減特性

既往のモデル実験結果^{9, 10, 11)}をみると、屋根用塗装鋼板における-10℃の凍着抵抗は、いずれの研究でも200kg/m²以上となる。例えば、屋根勾配 30° の建築物で、このような凍着抵抗が作用すると、滑落に必要な屋根上積雪深は1.3m ($\sin\theta \times \text{積雪単位重量} \div \text{凍着抵抗} = \sin 30^\circ \times 300 \text{ kg/m}^3 \div 200 \text{ kg/m}^2$) 以上となる。ここで、氷の融点である0℃付近の凍着抵抗について既往の研究^{12, 13)}を整理すると図-1になる。図のように、凍着抵抗は、-2℃前後の温度になると急減する傾向がみられ、0℃以上になると殆ど作用しない。このように、凍着抵抗には顕著な温度依存性があり、氷の融点に近づくに伴って減少する。従って、屋根雪が滑落するまでに要する日数を評価する場合、凍着抵抗が継続的に作用する日数、すなわち外気温がマイナス温度で推移する日数が重要な指標の一つになると考える。

2.2 摩擦抵抗の増減特性

既往の研究をみると、摩擦抵抗は、屋根葺材の表面粗度が増加するに伴って大きくなる¹⁴⁾。一方、雪質の違いによっても、摩擦抵抗は大きく変化する。ここで、雪質および屋根葺材の表面粗度が摩擦抵抗に及ぼす影響について、既報⁶⁾を整理すると図-2になる。図のように、屋根雪が滑動中の摩擦抵抗である動摩擦係数は、屋根葺材の表面粗度が大きくなると3～5倍にまで増加する。一方、雪質が及ぼす摩擦への影響についてみると次のようになる。屋根雪の雪質がしまり雪(粒径0.1～0.5mm)の場合は、屋根葺材と雪との界面で発生した水分が雪に吸い上げられる現象(毛管現象)が発生するため¹⁵⁾、摩擦抵抗が極めて大きくなる。この場合の動摩擦係数は平滑な塗装鋼板($R_z=1.4 \mu\text{m}$)で0.75、粗面の場合($R_z=23.16 \mu\text{m}$)で2.5程度となる。一方、ザラメ雪2(粒径1～2mm)のように粗大化した雪粒子の場合、動摩擦係数は水分の影響を受けにくく、平滑な塗装鋼板の場合で0.25、粗面の塗装鋼板では1.25前後となる。このように、ザラメ雪2における摩擦抵抗は、しまり雪の場合に比べて約1/2にまで減少する。これらのことから、摩擦抵抗は雪粒子が大きくなるに伴って減少し、雪が滑落しやすくなると考える。

屋根雪の滑落を支配する抵抗をみると、凍着抵抗の増減は外気温の推移に依存する。一方、摩擦抵抗は、屋根葺材の表面粗度の影響を受ける一方で、雪粒子のザラメ化にも支配されている。これらの結果をみると、凍着・摩擦抵抗の依存指標を適切に組み合わせることで、屋根雪が滑落するまでに要する日数が算出できると考える。

3. 積雪最下層における雪粒子の経日変化

摩擦抵抗は、屋根雪の最下層におけるザラメ化の影響を受け

る。そのため、粒径0.1～0.5mmのしまり雪では、屋根雪が滑落しにくい。一方、粒径1～2mmのザラメ雪になると滑落しやすくなる。従って、滑落の発生に要する日数を評価する場合は、最下層の雪粒子がザラメ化するのに要する日数を明らかにしておく必要がある。このことから、屋根雪の最下層における雪粒子の経日変化に関する屋内・屋外実験を行った。

3.1 実験および観測の方法

雪粒子の経日変化に関する屋内実験は、図-3に示す模擬屋根(無暖房)を低温室内に設置して行った。図のように、模擬屋根には自然雪を10cm堆積させて、屋根葺材に接する最下層の雪粒子を24時間経過毎に採取した。雪粒子は融解を防ぐため、採取直後に-5℃の低温室内でビデオカメラ(倍率10倍)で撮影した。撮影は各時間毎に3回行い、15個の雪粒子から平均雪粒径を算出した。なお、低温室の室温は、札幌における1～2月の外気温平年値を想定して-5℃とした。同時に、屋外に設置(札幌市手稲区)した無暖房の屋根(塗装鋼板葺)を対象に、雪粒子の経日変化を観測した。なお、この観測は1999年1～2月に実施し、観測方法は屋内実験と同様である。これらの屋内・屋外の実験結果から雪粒子のザラメ化について評価した。

図-1 既往の研究から得られる凍着抵抗

注)本図で示す各雪の含水状態は、毛管現象が発生するような状態(W3)で示してある⁶⁾。

図-2 摩擦抵抗に及ぼす雪質の影響

3.2 雪粒子の粗大化状況

屋根雪の最下層における雪質を観察したところ、雪粒子は、写真-1のように、日ごとに大きくなってゆく様子が確認できた。このような雪粒子の経日変化をみると図-4になる。なお、図中には、建物内部で暖房（野地板温度 2.4℃）を行っている場合の結果を併せて示してある¹⁶⁾。図のように、暖房を行っている場合、最下層の雪は2日で1mmを越える粒径となる。一方、無暖房の場合をみると、1mmを越える粒径となるのに4～5日を要している。なお、勾配屋根における屋根上積雪の調査を行った既往の研究結果をみると、無暖房屋根の場合、最下層の雪が1～3mmの粒径となるのに3～4日を要している⁵⁾。

次に、雪粒子のザラメ化に及ぼす外気温の影響についてみると、平均気温が最も低い1月28日からの観測では、1mm以上の粒径となるのに要する日数が最も長くなっている。既往の研究をみると、50cmを下回る積雪深の場合、雪の下層温度は、外気温の影響を受ける¹⁷⁾。このようなことから、本実験で想定した-5℃を下回る外気温で、積雪深が50cm未満となる地域では、図-4に示した粒径粗大化に要する日数よりも大きな値を採る必要がある。

屋根雪の最下層が滑落しやすいザラメ雪（粒径1～2mm）となるためには、降雪から数日間程度の期間を要する。このように雪粒子がザラメ化してゆく過程をみると、屋根雪の滑落に要する日数を評価する場合、摩擦抵抗力へ及ぼすザラメ化の影響を考慮する必要がある。また、滑落が発生するのに要する日数とその時の雪質が明らかになれば、雪質と摩擦抵抗力の関係から屋根勾配を設定することが可能になると考える。

4. 凍着抵抗力が作用することを考慮した滑落の評価

屋根雪の滑落現象は、摩擦抵抗力のみでなく凍着抵抗力が及ぼす影響も大きい。図-1で示した通り、-10℃では凍着抵抗力の影響によって雪が滑落しにくい。一方、この抵抗力は0℃以上になると、殆ど作用しない。このことから、滑落現象の発生に要する日数を評価する場合、外気温がマイナス温度で推移する日数が重要な指標の一つになると考える。このことから、外気温がマイナス温度で推移する日数を気象資料から算出した。

4.1 凍着抵抗力が作用する条件

凍着抵抗力は、0℃以上になると殆ど作用せず、雪が滑落しやすくなる。このことから、本研究では、凍着抵抗力が作用するか否かの境界を0℃と考えて、日最高気温が0℃以下で推移する期間を凍着抵抗力の作用日数と定義した。ここで、凍着抵抗力の作用日数は、積雪荷重の評価に大きく関わるので、荷重指針に示されているような建築物の設計法に対応した資料を提示する必要がある。このことから、凍着抵抗力の作用日数の各年極値を気象資料から抽出し、100年再現期待値を算出した。再現期待値の算出はGumbel確率紙に作用日数の極値(33年分)をプロットし、プロット値を直線回帰して求めた。なお、凍着抵抗力の作用日数の算出に用いた気象資料は、荷重指針における再現期待値算出に用いられている観測年数（平均34年間）と同等の観測年数を持つ資料として、全国の気象官署における33年間(1962～1994年)の気象観測値が収録されている地上気象観測原簿データ¹⁸⁾とした。

4.2 凍着抵抗力の作用日数の算出方法

凍着抵抗力の作用日数の各年極値をGumbel確率紙上にプロットした結果を札幌・釧路を一例として示すと図-5になる。図のように、凍着抵抗力の作用日数は必ずしも直線的な分布形状ではなく、地点ごとに極値分布（プロット値の分布）が異なっている。そのため、33年間分のプロット値全てを直線回帰（破線）して100年再現期待値を得ると、釧路のように過小評価する場合がある。ここで、地点によって極値分布の形状の違いが指摘されている年最大積雪深では、極値上位 1/3のプロット値のみを直線回帰する再現期待値の算出方法が提案されている¹⁹⁾。この方法で再現期待値を算出すると、図-5中の実線で示した回帰式になる。

図-3 屋内実験に用いた模擬屋根

写真-1 屋外観測によるザラメ化の様子（無暖房）

図-4 屋根上積雪の最下層における雪粒子の経日変化

図-5 稚内・札幌における凍着抵抗力の作用日数 (破線: 33年分の極値を全て直線回帰した場合、実線: 極値上位1/3のデータを直線回帰した場合)

表-1 多雪地域における凍着抵抗力の作用日数

所在地	気象官 署名	北緯(°)	標高(m)	凍着抵抗力の 作用日数(日)	所在地	気象官 署名	北緯(°)	標高(m)	凍着抵抗力の 作用日数(日)
北海道	稚内	45.4	2.8	75	青森	八戸	40.5	27.1	12
北海道	北見枝幸	44.9	6.1	92	秋田	秋田	39.7	9.4	10
北海道	羽幌	44.4	7.9	64	岩手	大船渡	39.1	36.5	10
北海道	雄武	44.6	13.8	99	岩手	盛岡	39.7	155.2	14
北海道	留萌	44.0	22.0	60	岩手	宮古	39.7	42.5	7
北海道	旭川	43.8	111.9	81	山形	新庄	38.8	94.4	15
北海道	網走	44.0	37.6	69	山形	酒田	38.9	3.1	9
北海道	小樽	43.2	24.9	44	山形	山形	38.3	152.5	12
北海道	札幌	43.1	17.2	31	新潟	相川	38.0	34.6	5
北海道	岩見沢	43.2	42.3	61	新潟	新潟	37.9	1.9	7
北海道	帯広	42.9	38.6	48	新潟	高田	37.1	12.9	5
北海道	釧路	43.0	31.7	63	宮城	仙台	38.3	38.9	7
北海道	根室	43.3	25.8	58	宮城	石巻	38.4	43.0	9
北海道	寿都	42.8	15.7	37	石川	輪島	37.4	5.3	4
北海道	室蘭	42.3	42.6	41	石川	金沢	36.6	26.1	4
北海道	苫小牧	42.6	5.9	35	富山	伏木	36.8	12.1	4
北海道	浦河	42.2	33.5	39	富山	富山	36.7	8.6	7
北海道	江差	41.9	3.7	25	長野	長野	36.7	418.2	10
北海道	函館	41.8	33.2	22	長野	松本	36.3	610.0	5
北海道	倶知安	42.9	174.4	57	長野	諏訪	36.1	760.3	7
北海道	紋別	44.4	15.8	74	福井	福井	36.1	9.1	4
北海道	広尾	42.3	32.4	46	岐阜	高山	36.2	560.2	9
青森	深浦	40.7	66.1	21	鳥取	境	35.6	2.1	3
青森	青森	40.8	3.0	22	京都	舞鶴	35.5	2.5	2
青森	むつ	41.3	2.9	26	滋賀	彦根	35.3	87.3	2

この図から得られる再現期待値は、再現期間2年(非超過確率50%)のようにその期間が極めて短い場合、再現期待値がプロット値を下回る場合があるものの、再現期間100年(非超過確率99%)に対する値を得る場合、33年分全てを直線回帰した場合(破線)に比べてプロット値に近似した再現期待値を得ることができる。凍着抵抗力の作用日数は、その値が積雪荷重の評価に用いられる場合、非超過確率50%のような平面的な数値が要求されるのではなく、耐用年数中に起こり得る最大値が必要となる。このことから、以下の検討では凍着抵抗力の作用日数として極値上位1/3のプロット値のみを直線回帰して得られる100年再現期待値を用いることにした。

4.3 地点別にみた凍着抵抗力の作用日数

全国の気象官署における凍着抵抗力の作用日数について100年再現期待値を算出した。その一例として、多雪地域に属する地点

での算出結果を表-1に示す。表のように、緯度が高い地点になると凍着抵抗力の作用日数は長期間となる。また、緯度が38.5°以上の場合、新庄と酒田のように同緯度の地点でも、標高の高い新庄の作用日数は、酒田に比べて大きな値となる傾向がみられた。ここで、稚内における算出結果をみると、凍着抵抗力の作用日数は75日となり、2.5ヶ月の間、滑落が発生しにくい状況が継続することになる。すなわち、凍着抵抗力の増減特性からみると、滑落の処理日数として75日を設定する必要がある。一方、福井の算出結果をみると、凍着抵抗力の作用日数は、4日となる。この結果に従って、凍着抵抗力の増減のみを指標とする場合、福井では、滑落の処理日数は4日とすることが可能になる。

5. 積雪荷重の制御に要する日数に関する考察

凍着抵抗力の作用日数を算出したところ、福井での作用日数は4日となった。しかし、摩擦抵抗力の影響を考慮すれば、屋根雪

図-6 日数を基軸とした場合における凍着・摩擦抵抗力の推移

のザラメ化が4日以内に起こらない場合、滑落が極めて発生しにくいこととなる。すなわち、屋根雪の滑落に要する日数は、凍着抵抗力の増減のみを指標とした場合、危険側に評価するケースもあり得る。このことから、凍着抵抗力のみでなく、摩擦抵抗力の増減特性を組み合わせ、雪が滑落するまでに要する日数の評価手法について考察する。凍着・摩擦抵抗力の増減特性を雪の滑落に必要な日数として整理すると図-6になる。はじめに、凍着抵抗力について考察すると、プラスの外気温となることが多い地域の場合、この抵抗力は短期間のうちに小さな値となる。しかし、摩擦抵抗力をみると、降雪直後は雪粒子が小さいことから、滑落しにくい。このことから、凍着抵抗力の作用日数が雪粒子の粗大化に要する日数よりも短い場合は、摩擦抵抗力の増減特性を基準とした滑落の評価を行う必要がある。具体的には、図-4に示した札幌における雪粒子の粗大化に要する日数を基準とした場合、荷重評価に用いる積雪深は、5日を上回る増分積雪深とする必要がある。また、多雪地域で一般的に用いられている塗装鋼板は、経年劣化に伴って表面粗さ R_z が増加し、25年以上経過すると R_z が $17\sim 26\mu\text{m}$ 程度になる²⁰⁾。図-2の通り、摩擦抵抗力は、屋根葺材の表面粗度の増加に伴って3~5倍になる。すなわち、屋根葺材が劣化するほど、滑落は見込めなくなることも十分に考慮する必要がある。

これらのことから、屋根雪の滑落処理に要する日数は、人工的に屋根面に熱を与える融雪雪処理²¹⁾を使用しない自然滑落の場合、屋根雪のザラメ化による摩擦抵抗力の増減を考慮した日数を設定する必要がある。なお、荷重指針では、制御積雪荷重を算出する際の積雪深として、7日増分積雪深を提示している。この7日増分積雪深は、凍着抵抗力の作用日数および屋根雪のザラメ化に要する日数が7日以下の地域に建設される勾配屋根の有効な荷重評価指標になると考える。一方、マイナス温度が長期間継続するような北海道等で自然滑落を考える場合は、凍着抵抗力が7日以上継続的に作用する。このような地点では、凍着抵抗力の作用

する日数内における積雪深（例えば、稚内では75日間の積雪深）を算出することで、勾配屋根で発生する滑落を考慮した制御積雪荷重を算出することが可能になると考える。

6. まとめ

本研究では、勾配屋根における雪の滑落を考慮した屋根上積雪荷重の評価手法について検討した。はじめに、滑落現象の発生を支配する抵抗力として、凍着抵抗力および摩擦抵抗力の特性について既往の研究を整理した。整理して得られた結果から、摩擦抵抗力の雪質依存性、および凍着抵抗力の温度依存性について検討した。これらのことから、雪質のザラメ化に要する日数、および外気温がプラス温度となる日数を基軸とした滑落の発生に要する日数の算出法を提案した。屋根雪の滑落に要する日数が明らかになることで、勾配屋根を持つ建築物における積雪荷重評価の際に制御積雪荷重を用いることが可能であることを示した。

【参考文献】

- 1) 小竹達也、他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、pp. 34-39、1996. 10
- 2) 倉橋勲、他4名：（仮称）但馬ドームの積雪荷重の検討、日本建築学会技術報告集、第5号、pp. 91-95、1997. 12
- 3) 日本建築学会編：建築物荷重指針・同解説、第5章 積雪荷重、pp. 168-235、1993
- 4) 木村幸一郎：屋根上積雪の自然落下について、日本雪氷学会誌、第5巻7号、pp. 6-9、1943. 7
- 5) 清原潔：住宅屋上積雪の建築計画的取り扱い方法に関する研究、北海道寒地建築研究所研究報告、No. 5、1960. 2
- 6) 高倉政寛、伊東敏幸、吉米地司：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、第510号、pp. 45-50、1998. 8
- 7) 島田洋：サスペンション膜構造物の除雪実験、日本雪氷学会誌、Vol. 6、No. 3、pp. 10-17、1990. 9
- 8) 吉米地司、他3名：屋根雪の雪溜現象に関する基礎的研究、日本雪氷学会誌、Vol. 11、No. 2、pp. 2-9、1995. 4
- 9) 渡辺正朋：屋根葺材と雪氷との凍着強さに関する研究、第9回日本雪氷学会大会論文報告集、pp. 127-130、1993. 1
- 10) 吉田光則、他7名：着氷雪防止技術に関する研究、各種材料の着氷力について、北海道の雪氷、第12号、pp. 24-26、1993
- 11) 吉米地司、伊東敏幸：屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究、日本雪氷学会誌、第56巻3号、pp. 215-222、1994. 9
- 12) 前田博司：金属板屋根における積雪の滑落、日本雪氷学会誌、第41巻3号、pp. 199-204、1979. 9
- 13) 清水増治郎、木村忠志：氷点下における雪の屋根材への付着、日本雪氷学会誌、第54巻3号、pp. 269-275、1992. 9
- 14) 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2）屋根葺材に対する雪氷の滑走速度および動摩擦、日本雪氷学会誌、第9号、pp. 4-15、1988. 12
- 15) 水野悠紀子、若浜五郎：湿雪の付着強度、低温科学、物理編、第35輯、pp. 133-145、1977
- 16) 伊東敏幸、高倉政寛、吉米地司：屋根雪の経時的な雪質変化および摩擦特性、日本雪氷学会誌、Vol. 15、No. 1、pp. 3-9、1999. 1
- 17) 小島賢治：雪と氷10問8答、日本雪氷学会誌、第48巻3号、pp. 159-167、1986. 9
- 18) 気象庁編：地上気象観測原簿データ（CD-ROM）、気象業務支援センター
- 19) 和泉正哲、三橋博三、高橋徹：年最大積雪深の確率統計的性質と再現期間推定法、日本建築学会構造系論文集、第390号、pp. 49-58、1988. 8
- 20) 伊東敏幸、吉米地司、星野政幸：劣化した塗装鋼板の表面性状と滑雪性について、日本雪氷学会誌、Vol. 10、No. 2、pp. 2-10、1994. 4
- 21) 大塚清敏、他5名：膜構造物の融雪・滑雪に関する研究、膜構造研究論文集'91、No. 5、pp. 93-104、1991. 12

(1999年5月10日原稿受理、1999年8月27日採用決定)