

南極氷床上観測基地のための雪洞建設に関する一試案

半 貫 敏 夫*・三 橋 博 己*・佐 藤 稔 雄*

A Tentative Proposal of Snow Tunnel Construction Procedure for a Subsurface Observation Station in the Antarctic

Toshio HANNUKI*, Hiromi MITSUHASHI* and Toshio SATO*

Abstract: Most observation stations on the ice sheet in the Antarctic are constructed as subsurface structures. These subsurface stations are composed of buildings and facilities in the snow shelter having a large strength against snow. Mizuho Station of the Japanese Antarctic Research Expedition is a remarkable example of the small subsurface station in the ice sheet. Buildings and facilities of the observation station are constructed in the snow tunnel with little reinforcements.

Since hard work is required to construct a snow tunnel for this type of observation station, an efficient method of snow tunnel construction is examined in this paper. The method proposed in this paper consists of the following procedures: (1) Net-fences are set up around the construction site. (2) The huts are constructed. (3) Snow is controlled to be deposited along the net-fences. (4) The snow deposit will grow thicker along the net-fences. (5) Finally a snow tunnel enveloping the net-fences and the huts will be formed.

In order to realize the snowdrift control procedure, preliminary tests on the ability of net-fences to prevent wind and to deposit snow are examined in this paper. It is found that the ability of the net-fences can be explained by the variable ϕ , which is the density ratio of the net.

It will be possible to use the net-fences for the snowdrift control under the condition that the combination of the density ratio of the net and the thickness of the yarn is devised effectively.

要旨: 南極氷床上に建設された観測用建物は、ほとんどの場合耐雪構造体の中に配置され、これら全体が雪面下にある。他方、みずほ基地では掘削した雪洞の中に建物を配置する方式を採っていて、ここでは雪面下の建物を雪圧から保護するための本格的な耐雪構造体はなく、部分的に雪洞の形を保つための支保工が施されているにすぎない。小規模な基地ではこのみずほ方式が魅力的である。

本論文では、この雪洞型の基地をつくる場合の難点である雪洞建設について一つの省力化試案を提出した。それは雪面下で雪洞を掘削するかわりに、貯雪柵の組み合わせや簡易耐雪構造体を用いて雪面上に建てた建物周辺を覆い、このまわりに雪を積もらせて雪洞にしようというものである。

この雪洞建設方法の実現の可能性を確かめるために、軽量で取り扱いが簡単な網を素材にした貯雪柵の防風、貯雪性能に関する予備的な風洞模型実験を行った。その結果、網の防風、貯雪性能はその充実率 ϕ によって大きく影響されるが、適切な網を選択すれば貯雪柵として十分に役立てられるという感触を得た。現在さらに実験精度を吟味した風洞模型実験を継続している。

* 日本大学理工学部建築学教室. Department of Architecture, College of Science and Technology, Nihon University, 8-14, Kanda Surugadai 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101.

1. はじめに

南極氷床上観測基地の計画にあたっては、雪の吹きだまり制御が、建物の設計、建設、維持管理および耐用年数などに係わる計画上の重要な課題である。雪の吹きだまり制御の立場から氷床上観測基地建物計画の基本方針を分類すると、常時雪に埋没しないように建物を雪面上に維持する方式と、建物を雪面下に埋没させた形で維持する方式とに大別できる。

前者については既に佐藤ら(1983)によって次のような試案が提出された。すなわち、雪面上に建設した高床の人工地盤上に観測用建物を配置し、雪の吹きだまり制御は2段階に分けて行う。まず、周囲に雪の吹きだまりができはじめたら、その積雪量に応じて適宜建物位置を移動させて人工地盤周囲の雪の吹きだまり量を平均化する。この平均積雪量の増加が一定値に達したら、次の段階として人工地盤の床高を調整し、雪面との間に常に一定の空間を確保して風が運んでくる雪粒子を吹き払い、基地建物が雪に埋没しないように制御する方法である。このような雪面上の観測基地の最近の実施例としては、西ドイツ南極観測隊の Filchner 夏基地がある。小規模な観測基地だが、周囲の積雪に応じて床高を調節できる鋼製人工地盤の上に、コンテナを利用した建物を配置したものである。

他方、現在南極氷床上で運営されている恒久的な観測基地のほとんどは雪面下であり、大規模な耐雪構造体内部に、建物や諸施設を設置するという二重構造方式のことが多い。

これとは別に、日本南極地域観測隊のみずほ基地では、雪洞を掘削してその中に建物その他の施設を配置し、観測基地として機能させている。この雪洞の形は補強なしではほぼ安定しており、側壁、天井などの多少のはらみ出しは定期的に人力で削り取るなどの保守を行って基地の正常な運営が保たれている。これには、年間積雪量が約 30 cm と少なく、滞在人員 5-6 名の小規模基地であるなどの好条件が大きく寄与しているが、このみずほ基地設営の経験にもとづいて、本論では、はじめ雪面上に建てた建物周囲に雪の吹きだめ柵（以下「貯雪柵」という）を設置して、その外周にだけ雪の吹きだまりをつくり、その積雪形態をこれら貯雪柵によって制御し、最終的には雪の吹きだまりを、建物を内蔵した雪洞に造りかえるという、雪洞建設の省力化に関する一つの試みを提案し、その可能性について若干の検討を行う。

2. 貯雪柵を利用した雪洞の建設

基地建設の過程も含めて、雪の吹きだまり制御の立場からみた氷床上観測基地建物の分類を図 1 に示す。(A) は雪面上の基地、(B) は雪面下の基地である。(B) はさらに建物を数年間使用可能な耐雪構造体として設計し、これが雪に埋没するにまかせる方法 (B・1) と、何らかの方法で雪洞をつくり、その中に建物を配置する方法 (B・2) に分けられる。(B・2) は雪洞のつくり方によって、安定した雪面下に雪洞を掘削する方法 (B・2・1) および建物を内蔵する耐

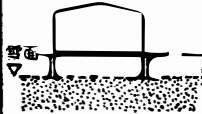
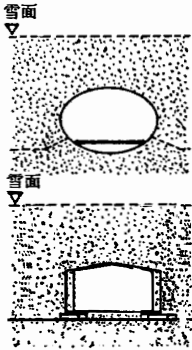
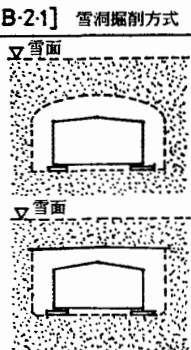
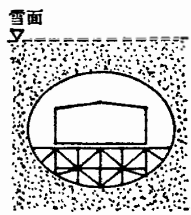
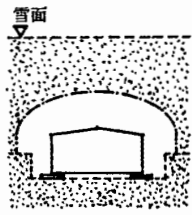
分類	[A] 雪面上の基地	[B] 雪面下の基地			
典型		[B-1] 耐雪構造建物を雪中に埋没させる方式	[B-2] 雪洞方式		
		雪面 	[B-2-1] 雪洞掘削方式	[B-2-2] 耐雪構造体周囲の雪の吹きだまりで雪洞を形成する方式	
			雪面 	[B-2-2(a)] 	[B-2-2(b)] 
特徴	雪の吹きだまりに応じて床高 h を調整する方式。小規模基地向き。	形をいろいろ工夫した耐雪構造の建物を造り、それが埋没するにまかせる方式。建物内部の熱で周囲の雪が変形し、雪圧によってつぶされる例が多い。	雪洞方式。雪洞内の温度を外気温と等しく保つような工夫をすれば保守も容易。雪洞の天井や側壁の変形を抑えるため、雪洞の一部を補強する方法もある。小規模基地向き。	耐雪構造体を造り、その中に建物を建設する方式。この周囲に雪を積もらせて雪洞にする。大規模な建設工程になるが、雪面下の基地としては、最も例が多い。	簡易耐雪構造体を造り、その中に建物を建設する方式。この簡易耐雪構造体は雪洞になるまでの過程で周囲の雪圧に耐えればよい。雪洞形成後は、B-2-1と同方式で保守する。
実施例	Mizuho St. (Japan) Filchner Summer Base (F.R.G.)	Mizuho St. (Japan) Halley St. (U.K.)	Mizuho St. (Japan)	SANAE St. (R.S.A.) G.V. Neumayer St. (F.R.G.) Halley St. (U.K.)	(本論試案)

図 1 雪の吹きだまり制御の立場からみた氷床上観測基地建物計画の基本方針の分類
Fig. 1. The basic styles of observation huts on the ice sheet taking the snowdrift control into consideration.

雪構造体を雪面上で建設し、その周囲に雪を積もらせて雪洞とする方法 (B・2・2) に分類できる。

みずほ基地ではこれまでに (B・2・2) を除くすべての方法を試みた結果、(B・2・1) の雪洞掘削方式で基地建物の増設、更新を行っている。しかし、人力による雪洞掘削は大作業量であり、建設日程の大部分を占めるので、これを改善する方法として考えたのが本試案である。工法としては (B・2・2) に属するが、基本的な考え方は次のとおりである。雪面上で建設した建物周囲に貯雪柵を設けてその外周に雪を吹きだめ、その積雪形を制御するように貯雪柵の形態や配置を工夫して、建物を内蔵する雪洞を形成させようというもので、膨大な量の地吹雪を供給する南極の自然風と雪の吹きだまりを積極的に利用する点に特徴がある (図 1, B・2・2(b))。

上述の考え方にもとづく 2 種類の雪洞建設方法を図 2 に示す。図中第 1 の方法では、まず建設予定地を貯雪柵で囲み、将来そこが雪洞空間となった場合、天井の高さを確保するために雪面に溝を掘って、その中に建物を建設する。ここまでの工程は比較的短時間で済ませることができるので、この間に柵内建物周囲に吹き込んだ雪は、それが少量ならば人力で容易に排出できるだろう。次に貯雪柵外周の積雪が増加して雪洞になるまでの期間だけ、建物上部の雪の重さを支えるための補助構造体をかけわたして建物を雪から保護し、これら全体を雪面下に埋没させる。雪洞上部の積雪層の厚みが増して周囲の雪が圧密される過程で、雪洞内建物からの発熱が周囲の雪に悪影響を及ぼさないためには、建物の断熱を完全にして建物

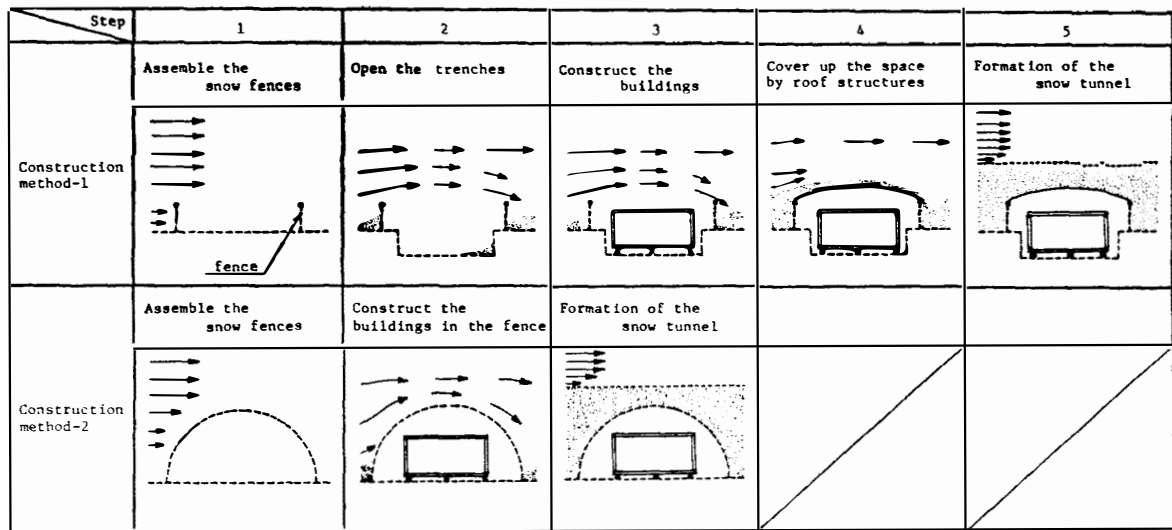


図 2 貯雪柵を利用した新しい雪洞建設方式と工程

Fig. 2. The snow tunnel construction procedure of subsurface stations utilizing snow fences to deposit snow as shown in B·2·2 (b) of Fig. 1.

と雪との接触面をできるだけ少なくすること、雪洞内気温を雪面上の外気温と等しくするように通気孔を設けて雪洞内の空気を常時循環させるなどの対策が必要となろう。

第2の方法では、はじめに比較的軽微な構造の防風、防雪構造体(以下「簡易耐雪構造体」という)で建設予定地全体を覆い、その中で建物の組み立て作業を行う。あとは簡易耐雪構造体周囲に雪の吹きだまりができてそれが成長するのを待てばよい。この簡易耐雪構造体を軽量かつ単純化するためには、対称な雪圧を受けた方がよいので、周囲の雪の吹きだまりはできるだけ対称な形で成長させるのが望ましい。そこで適当に貯雪柵を組み合わせて吹きだまりの形を制御するのも有効かと思われる。また、この簡易耐雪構造体は、たかだかその周囲に雪が積もってそれが雪洞を形成するにいたるまでの期間に作用する雪圧に耐えればよい。雪洞形成後は、一体となった周囲の積雪の引っ張りやせん断抵抗も期待できるはずだから、応力集中が起こらないように雪洞の断面形を工夫したり、雪洞内気温と周囲の雪温との間に温度差が生じないように雪洞内に雪面上の外気を循環させるなどの換気を工夫すれば、みずほ基地の雪洞のように人力による定期的な補修程度で、雪洞の形を保てるのではないかと考えられる。

なお、第2の方法で使用する簡易耐雪構造体は、貯雪柵に比べて規模が大きくなるので、輸送や組み立ての制約条件を考えると、軽量で小容積にまとめられ、しかも組み立てが簡単であることが要求される。そこで網目の小さな網(編み目の粗い織物とみることもできる)または帆布を用いて鉄骨の骨組みを覆う形の耐雪構造体を想定した。雪粒子が内部に吹き込まないように遮断するだけなら、網よりも帆布の方がよさそうだが、この場合は風力係数が大きくなって強風下での組み立てが困難になり、鉄骨構造体に要求される強度も増す。他方、

網を防雪柵に使用した例は内外に多くあり、すでに網の防雪性能はある程度保証されている。そこで本論文では、まず網を使った簡易耐雪構造体がはたして実現可能かどうかを検討する目的で、簡単な風洞模型実験により網の防風性能および雪粒子をどれだけ吹きだめることができるかという貯雪性能を調べることにした。

3. 網を用いた貯雪柵による雪の吹きだまり制御のための簡単な風洞模型実験

網の貯雪性能に影響する因子として、

- (a) 外乱：風速，気温，雪質（粒径分布，安息角など）および吹雪輸送量，
- (b) 網の構成：材質，網糸の太さおよび充実率 ϕ （網の単位見付面積中，網糸で塞がれた実面積の割合＝1－空隙率），
- (c) 貯雪柵の形態（柵と雪面との間に吹き払い空隙を設けたり，主風向と網面との角度を変化させるなどの設置状態），

が考えられる。以下の模型実験は外乱を一定として (b)，(c) の要因に注目したものであり，このうち最も影響が大きいと思われる充実率 ϕ と貯雪柵の形を変動因子として，図3に示す

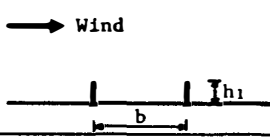
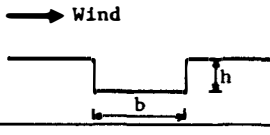
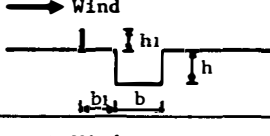
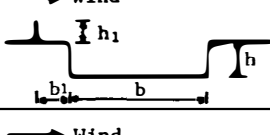
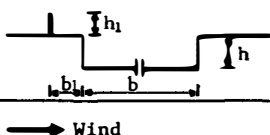
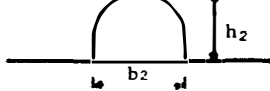
Classification	Test schema	Test number			
Series-1 Variables: ϕ $b=80\text{ mm}$, $h_1=20\text{ mm}$:const.		1-1	1-2	1-3	1-4
		$\phi=0.3$	$\phi=0.39$	$\phi=0.62$	$\phi=1.0$
Series-2 Variables: b/h		2-1	2-2	2-3	2-4
		$b/h=4/3$	$b/h=8/3$	$b/h=4.0$	$b/h=\infty$
Series-3 Variables: h_1/h $b/h=4/3$, $b_1=30\text{ mm}$:const.		3-1	3-2	3-3	
		$h_1/h=1/3$	$h_1/h=1/2$	$h_1/h=2/3$	
Series-4 Variables: h_1/h $b/h=4.0$, $b_1=30\text{ mm}$:const.		4-1	4-2	4-3	
		$h_1/h=1/3$	$h_1/h=1/2$	$h_1/h=2/3$	
Series-5 Variables: h_1/h $b/h=\infty$, $b_1=30\text{ mm}$:const.		5-1	5-2	5-3	
		$h_1/h=1/3$	$h_1/h=1/2$	$h_1/h=2/3$	
Series-6 Variables: ϕ $b_2=80\text{ mm}$ $h_2=60\text{ mm}$:const.		6-1	6-2	6-3	
		$\phi=0.3$	$\phi=0.39$	$\phi=0.62$	

図3 貯雪柵を利用した雪洞建設方法に関する風洞模型実験の計画（模型はすべて2次元模型）
Fig. 3. Wind tunnel test programs using two dimensional obstacle models.

ような実験計画をたてた。

図4に示す性質をもった風洞（測定部断面 30×30 cm，測定部長さ 120 cm の吹き出し型）内に縮尺 100 分の 1 の模型を置いて，まずそれぞれの状態での周辺気流を測定して防風効果

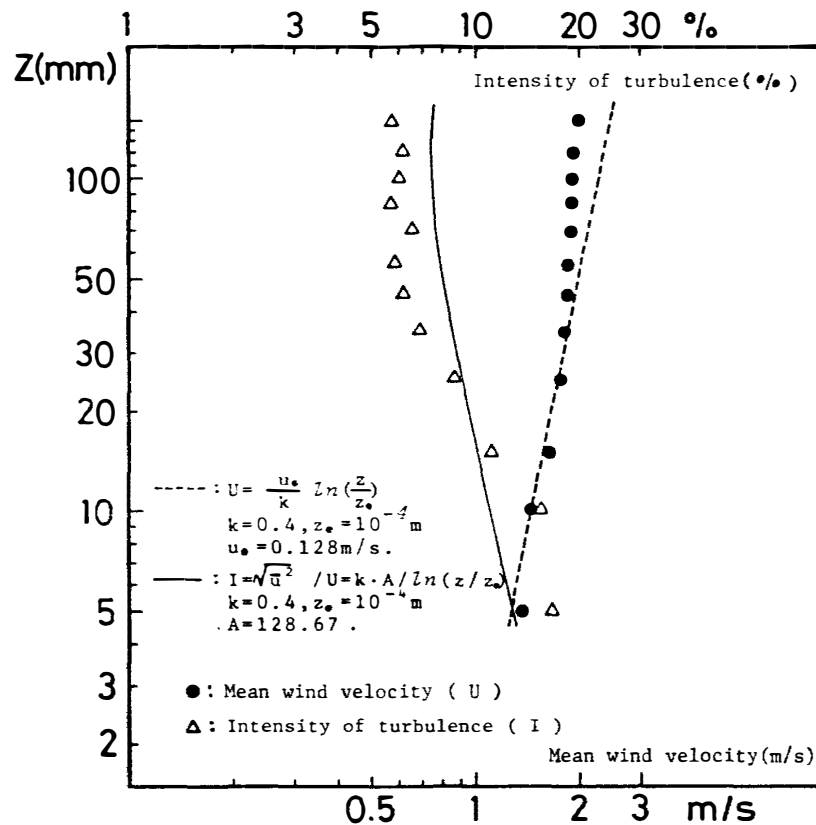


図4 風洞内気流の性状（平均風速の高さ方向分布と乱れの強さの高さ方向分布）
Fig. 4. Mean wind velocity profiles and turbulence intensity profiles of the artificial wind in the tunnel. These profiles are measured by the hot wire anemometer at the center of the test chamber without obstacle models.

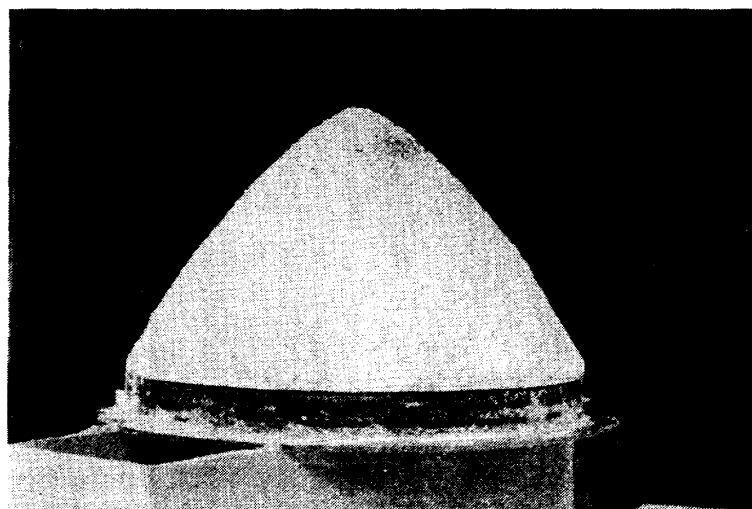


図5 模型雪（炭酸マグネシウム粉末: MgCO_3 ）の安息角を調べる実験
Fig. 5. The angle of repose of snow simulator (MgCO_3).

を確認し、次に同じ風洞を使って炭酸マグネシウム粉末（平均粒径 0.07 mm，安息角約 62° ，図 5 参照）を模型雪とした人工吹雪実験を行って，充実率 ϕ の異なる貯雪柵模型周辺の模型雪吹きだまり状態を測定した。

4. 実験結果の例

網を用いた貯雪柵および簡易耐雪構造体の可能性を調べるための簡単な予備実験の中で，図 3 に示すシリーズ 1 と 6 の結果について述べる．図 6 にシリーズ 1 の実験状況を，図 7 に充実率 $\phi=0.3$ の貯雪柵周辺の模型雪吹きだまり状態を風向に平行な断面図で示す．風洞測定部風上の天井から炭酸マグネシウム粉末の模型雪を供給して吹雪状態をつくり，模型雪供給量を 500 g ごとに区切って，各段階の模型雪吹きだまりの成長を記録したものであるが，この実験の場合には，模型雪粒子が網糸に付着しやすい性質をもっていたため，たちまち網目が塞がれてしまい，はじめの 500 g 供給の段階で既に実質的な充実率 ϕ は網本来の値の 2 倍近くに上昇した．図 8 は簡易耐雪構造体模型の実験状況，図 9 は図 7 と同材質の網を使っ



図 6 2枚並列の貯雪柵模型周辺の模型雪吹きだまり状況を測定する実験（図 3 の実験計画におけるシリーズ 1）

Fig. 6. Examples of snow simulator deposition around the net-fence model.

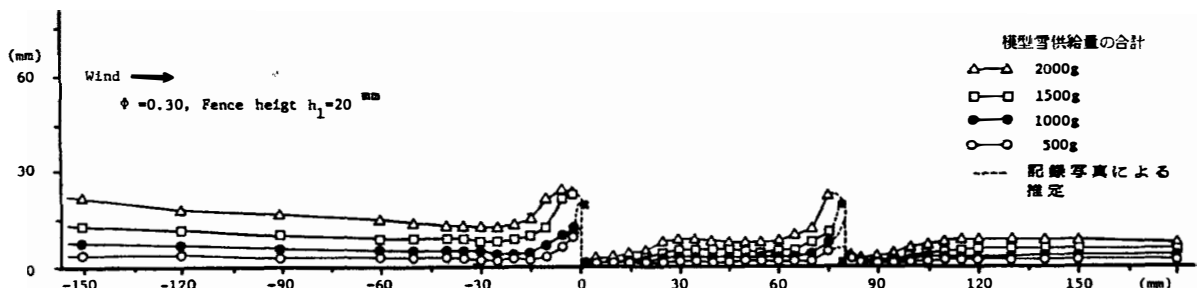


図 7 充実率 $\phi=0.3$ の網を用いた 2 枚の貯雪柵模型周辺の模型雪吹きだまり状況（風向に平行な断面）

Fig. 7. Measurements of the growing process of snow simulator deposition around the net-fences every time when 500 g of snow simulator is supplied.

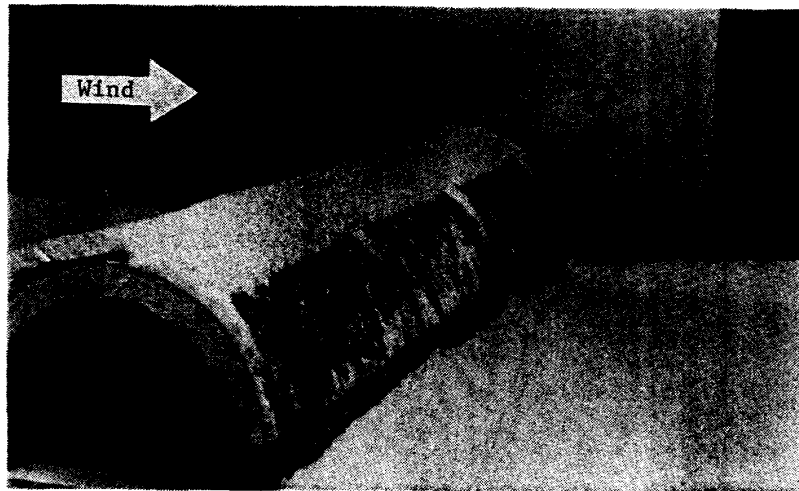


図 8 簡易耐雪構造体模型周辺の模型雪吹きだまり状況を測定する実験
(図 3 の実験計画におけるシリーズ 6)

Fig. 8. Examples of snow simulator deposition around the snow shelter model.

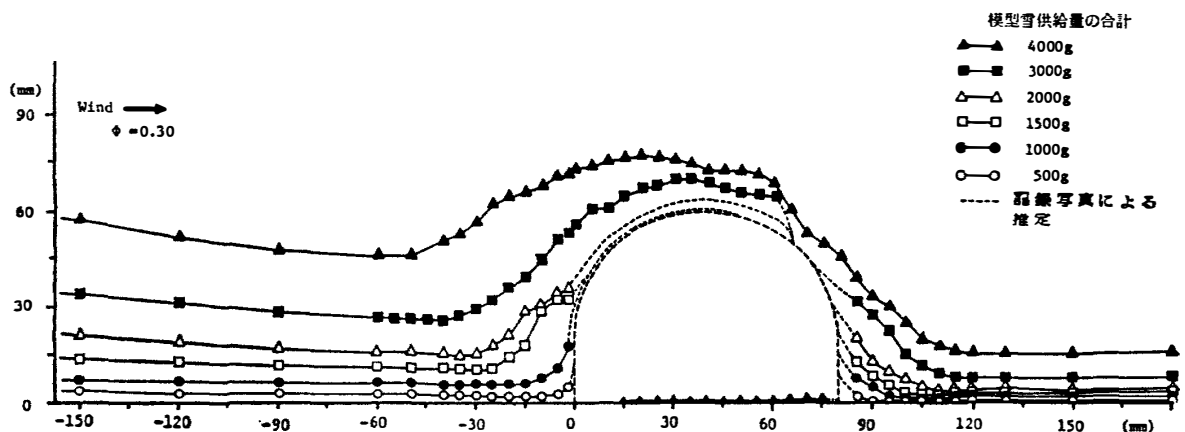


図 9 充実率 $\phi=0.3$ の網を用いた簡易耐雪構造体模型周辺の模型雪吹きだまり状況 (風向に平行な断面)

Fig. 9. Measurements of the growing process of snow simulator deposition around the snow shelter.

た簡易耐雪構造体模型周辺の模型雪堆積状況の風向と平行な断面形である。この実験例のように網糸に着雪現象が起こって、模型雪粒子が早期に網目を塞いでしまうと、模型雪の堆積が雪洞になるまで、内部にはほとんど雪粒子が吹き込まない。

図 10-13 はこれらの網を用いた貯雪柵の防風、貯雪性能をまとめたものである。図 10 は貯雪柵の防風効果を、風洞床面からの高度 1 cm の風向方向各測定位置での風速比で示したものである。風上側に設置した貯雪柵の直後では、充実率 ϕ にほぼ比例して遮風効果が大きく、貯雪柵によって囲まれた建設予定地全域の風速は、風上風速の 20% 以下に減速されることがわかる。

図 11 は模型雪供給量の合計が 500 g および 1000 g のときに貯雪柵風上 180 mm の区間

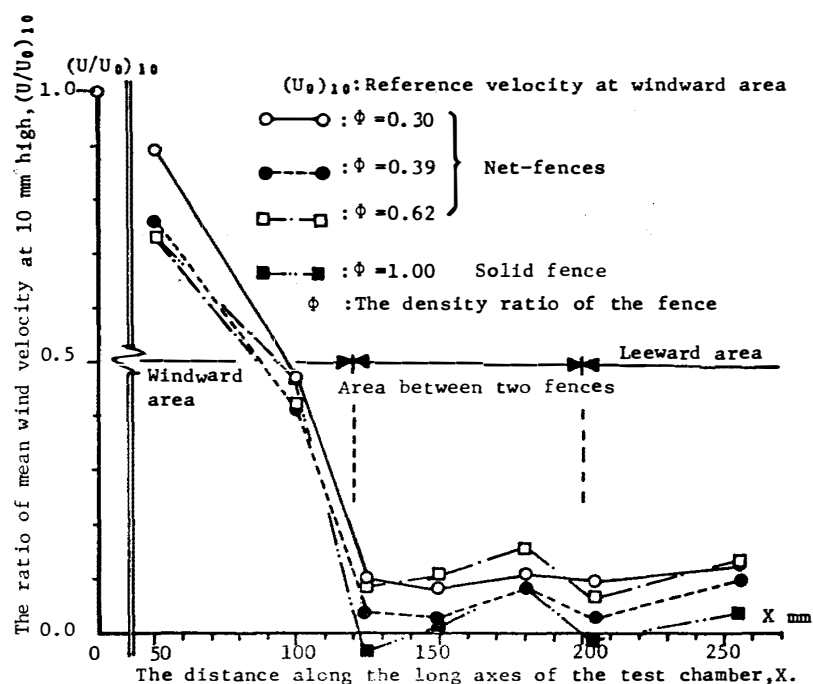


図 10 網を用いた貯雪柵の遮風効果

Fig. 10. Relationship between the normalized wind velocity at the height of 10 mm $(U/U_0)_{10}$ and the distance along the long axes of the test chamber X , where U_0 is the reference wind velocity at a sufficient windward distance from the obstacles, with the same height of 10 mm.

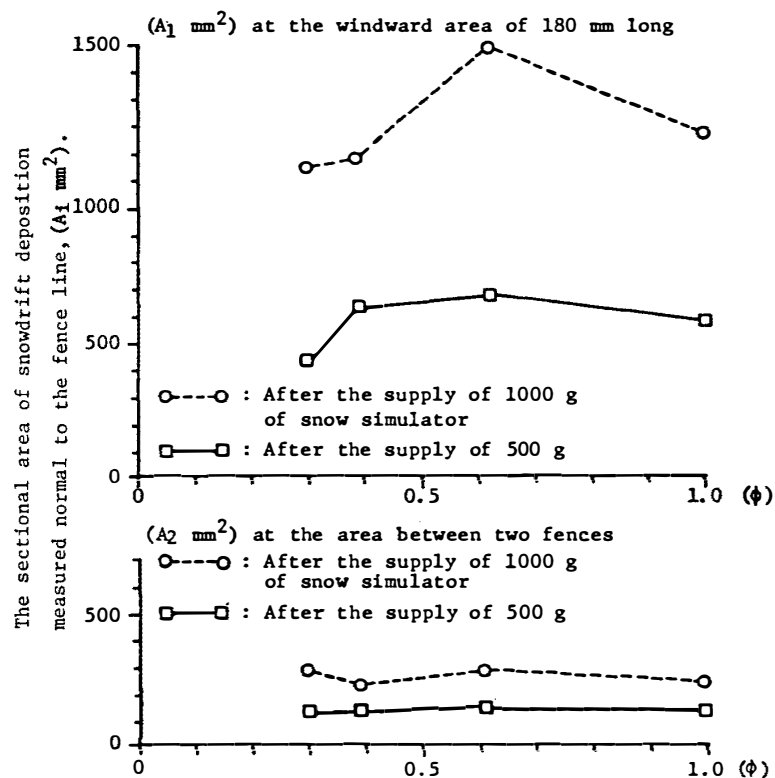


図 11 貯雪柵風上 180mm の区間の模型雪吹きだまり量 A_1 (図 7 の堆積断面の積分値) および 2 枚の貯雪柵で囲まれた区間の模型雪吹きだまり量 A_2 と網の充実率 ϕ の関係

Fig. 11. Relation of the volume of snow simulator deposition A_i to the density ratio of the net-fence ϕ .

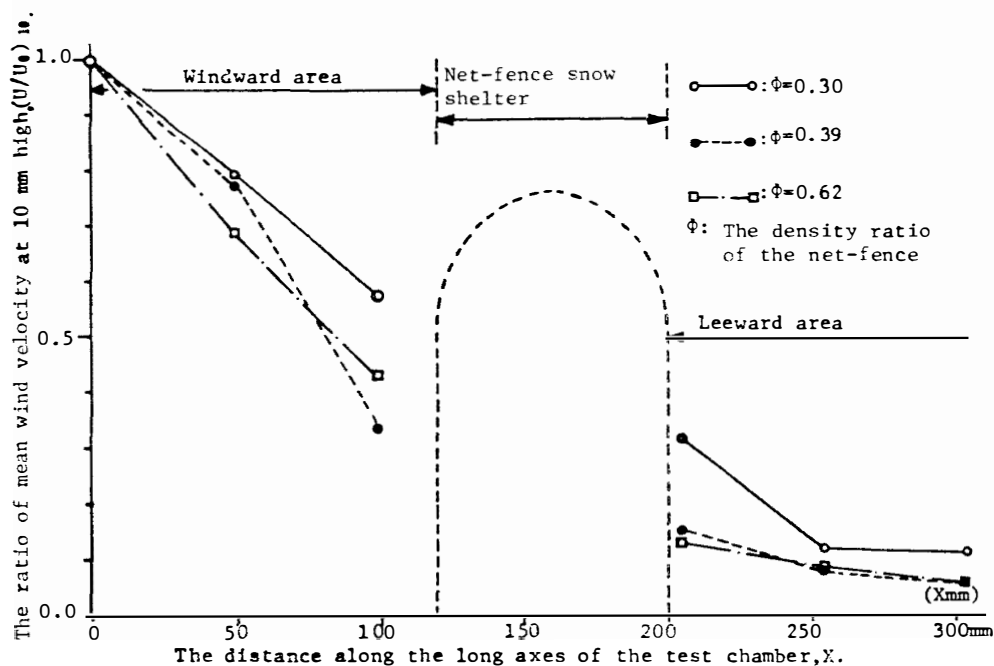


図 12 網を用いた簡易耐雪構造体の遮風効果

Fig. 12. Relationship between the normalized wind velocity at the height of 10 mm $(U/U_0)_{10}$ and the distance along the long axis of the test chamber X , where U_0 is the reference wind velocity at a sufficient windward distance from the obstacles, with the same height of 10 mm.

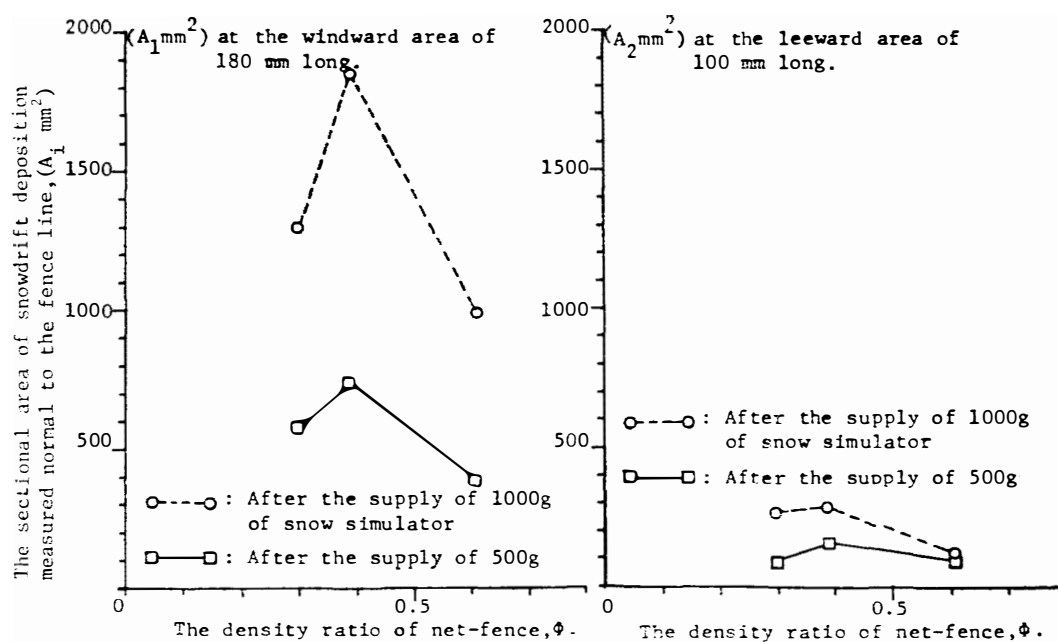


図 13 網を用いた簡易耐雪構造体の風上 180 mm 区間の模型雪吹きだまり量 A_1 (図 9 の堆積断面の積分値) および風下 100 mm 区間の模型雪吹きだまり量 A_2 と網の充実率 ϕ の関係

Fig. 13. Relation of the volume of snow simulator deposition A_i to the density ratio of the net-fence ϕ .

に堆積した模型雪の量 A_1 と、2枚の貯雪柵で囲まれた区域に吹き込んで堆積した量 A_2 を図7の堆積断面のそれぞれの範囲での積分値で表し、これを充実率 ϕ の関数で示したものである。 $\phi=0.39$ の貯雪柵は、 $\phi=1.0$ の場合と同程度の貯雪性能をもつことがわかる。図12は網を用いた簡易耐雪構造体模型の防風効果を図10と同じ方法で示したものであり、図13は同じ耐雪構造体前後の模型雪堆積量と網の充実率 ϕ の関係である。図12,13とも貯雪柵の場合と同じ傾向を示し、ここで用いた模型雪に関しては $\phi \approx 0.4$ の網の性能がすぐれているといえよう。

5. ま と め

以上、簡単な風洞模型実験の結果から、網を用いた貯雪柵によって模型雪が吹きだめられることが確かめられた。雪洞建設の省力化工法開発という所期の目標の第1段階として、その可能性はあるように思えるが、上述の模型実験結果をすぐに南極の自然状態に置き換えて結論を急ぐのは危険である。本実験で用いた模型雪は南極の雪と比べて粒子間の粘着性が大きく、粒径も貯雪柵用の網模型と比べて大きいので、実際よりも着雪現象が起きやすくなっている。また、風洞内での実験風速（約 3 m/s）も含めて実験全体の相似則の吟味が不十分なままなので、これからはさらに条件を明確にした風洞模型実験を継続する必要がある、ある段階では野外模型実験による確認も必要となろう。

文 献

佐藤稔雄・半貫敏夫・西条 修・三橋博己(1983): 南極氷床上的における基地建物に関する基礎的研究。南極地域における自然エネルギー利用ならびに建築・土木構造物に関する基礎的研究。東京, 日本大学理工学部, 12-30.

(1984年12月15日受理; 1985年1月16日改訂稿受理)