

氷床上の建築物—日本南極地域観測隊の二つの基地—

Subsurface Buildings on the Antarctic Ice Sheet—Design, Construction and Maintenance of Two Stations of Japanese Antarctic Research Expedition—

半 貫 敏 夫 (はんぬき としお)

日本大学助教授 理工学部 (国立極地研究所・講師)

1. はじめに

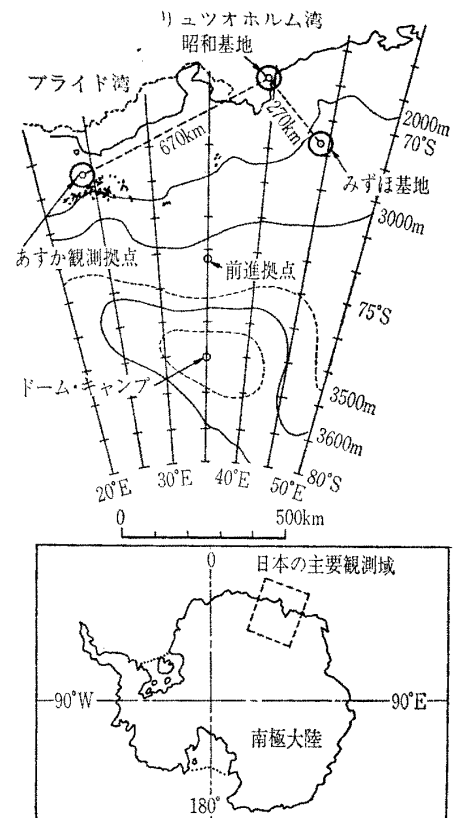
積雪面を支持基盤として建物を造る試み自体はそれほど目新しいことではない。北極圏に住むエスキモーは、安定した積雪層からブロックを切り出して住空間を構築する技術を持ち、苛酷な自然環境下で人が生活するための雪や氷とのつきあい方に関して一つの文化をもっている。

ただし我々のように日頃温暖な地域に住む人間がある時期1/2～1か年の間、研究観測などの目的で南極あるいは北極圏に滞在するための建築物を考えると、かなり前提条件や評価基準が違ってくる。まず、設計の基本姿勢として、我々の日常生活をどこまで極地に持ち込むかという問題がある。研究者は極寒の地で生活すること自体が目的ではないから、無意識のうちに日常の生活文化を持ち込もうとするし、設営担当者は、苛酷な自然環境・建設条件のもとで限られたエネルギー源（現在、南極観測基地では各国とも主として重油が使われている）で、生活空間のアメニティーのグレードをあげるために創意工夫をこらし、両者の歩み寄りの接点で極地建築のシステムが成り立っているのである。

本稿では極地建築を取り巻くさまざまな制約のうち、氷床（相当量の厚さと広がりをもった氷体と定義され、南極とグリーンランドを覆う氷を氷床と呼ぶ）の上に観測基地を設営する場合の雪対策：スノーコントロールについて、日本南極地域観測隊の設営活動を例に紹介する。

2. 日本の南極観測システムと設営の条件

昭和基地をベースとして研究観測を続ける日本観測隊はその調査域の拡大に伴って大陸氷床に観測拠点を求め、現在では昭和基地のほかに二つの氷床上



図—1 日本南極地域観測隊の主要観測域と三つの基地

基地：みずほ基地、あすか観測拠点を維持している（図—1）。

観測隊は越冬隊と夏隊とから成り、それぞれ定常観測、研究観測および設営担当隊員で構成される。観測隊は国内での訓練、準備期間を経て毎年11月に観測船「しらせ」で南極に向かい、夏隊は海洋観測を含めて約3か月、夏期の南極域で研究観測に従事して翌4月に「しらせ」で帰国する。越冬隊は引き続きその後1か年、南極域に滞在して研究観測を行う。各観測隊は、それぞれ単年度で完結した研究観測計画のもとで行動するので、基地の住民は全員が毎年交替する。

表—1 南極への物資輸送

場 所	日本：東京	オーストラリア：フリーマントル	南極：リュツオホルム湾，ブライド湾		
作業・行動	観測隊物資積み込み	生鮮食糧ほかの購入・積み込み	荷 降 ろ し		
輸送方法	「しらせ」による海上輸送		大型物品	通常の手手で扱える物資	燃料
			雪上車による氷上輸送	大型ヘリコプターによる空輸	パイプ輸送

表—2 設計条件一覧

設 計 条 件				要 求 さ れ る 性 能
気象・環境		みずほ基地	あすか観測拠点	断熱性能 結露防止 耐風性能 耐雪性能
	年平均気温	-32.5℃	-18.5℃	
	最高気温	-2.7℃	-10.1℃	
	最低気温	-61.9℃	-32.3℃	
	平均気圧	732.2 mb	869.7 mb	
	平均風速	10.8 m/s	12.8 m/s	
	最大風速	31.9 m/s	34.3 m/s	
	年平均積雪	8.0 cm	14.7 cm	
	設計用風速	40.0 m/s	60.0 m/s	
	設計用雪荷重	200 kgf/cm ² (屋根面積積雪 50 cm)	800 kgf/cm ² (屋根面積積雪 200 cm)	
輸 送	船： 建設物資輸送能力：150～200 ton/年 ヘリコプター機内輸送能力： 棒状部品：長さ 5.5m 以内，単体重量 200 kg 以下 板状部品：1.2m×5.0m 以内			部品の軽量化 部品の寸法・重量制限
建 設	建設技術者の参加：1～2名/年 労働力：1日当たり 8～9名，作業期間：最大 2週間以内 建設機械力・使用可能エネルギー：制約が強い			作業の単純化 部品の軽量化 組立工期の短縮
建物の機能	建物固有の性能			遮音，暖房等の室内気候調整 アメニティー（個室の独立性，共同空間：食堂，会議室，浴室，便所等の使いやすさの工夫，精神，肉体のレクリエーション施設）/空間のゆとり（居住者の精神衛生への配慮：孤立・閉鎖性によるストレスを和らげるため，単調な生活にゆとりをもたせる工夫）
	安全性			防火・耐火性 防災・避難システム
	耐久性			一般に設計寿命：10年 耐久性診断システム
維持・管理	解体移築の可能性			維持・管理の作業量を減らす工夫 廃棄のシステム

以上のような南極観測システムの現状から建設の基本的制約条件を整理すると，

(1) 物資輸送は年 1 回，輸送手段は原則として船→ヘリコプター→雪上車とそりを経て現地に運ばれる(表—1)。そこで物資単体の寸法，重量が制約を受ける。

(2) 設営担当隊員のうち建設の専門家の参加は年 1～2 名に限られる。したがってこれら専門家の指示に従って建設作業に従事するのは，国内でわずかの訓練を受けた研究者や，「しらせ」乗組みの自衛

官による支援グループである。建設作業員の数が限られ，その技術力はほとんど期待できない。

(3) 建設作業期間は最大 1 か月以内に限定される。これは野外作業に適した天候の継続時間と，観測隊の行動計画による制約であり，場所や気候によって変動する。

将来構想としては，航空機による物資輸送や，建設作業の一括請負などの民間活力導入等，外国観測隊の一部では既に行われている方式も検討されているが，現状ではこれらの諸条件を前提として設営

作業が計画される。以上を設計条件として整理すると表—2 のようになる。

3. 初めての氷床上観測基地

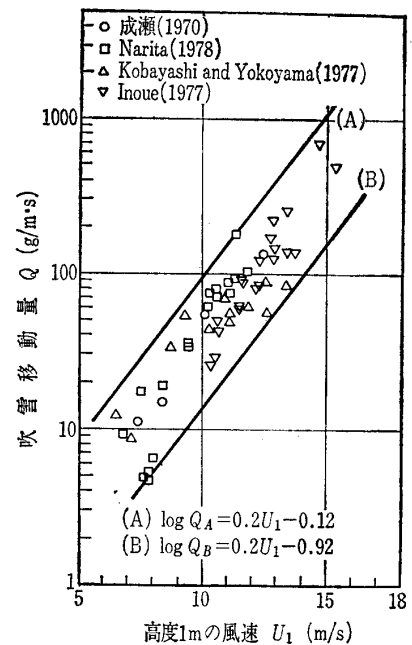
3.1 みずほ基地の沿革

昭和基地の南東約 270 km の大陸氷床上に、日本隊として初めて建設された内陸観測拠点、みずほ基地 (図—1: 70°42' S, 44°20' E, 標高 2 230 m) は、「みずほ高原・エンダービーランドの雪氷学研究計画」の拠点として 1970 年から建設が始められた。1969 年、第 10 次隊による予備調査を経て、1970 年に氷床ボーリング用の作業小屋 1 棟、1971 年に居住棟の建設と発電機設置のための雪洞を掘削して観測隊の長期滞在を可能にした。当初の研究計画が終了した 1976 年以降も国際磁気圏観測計画、極域気水圏観測計画、東クイーンモードランド地域雪氷・地学研究計画と、続けてみずほ基地を拠点とする研究観測が行われたが、1986 年 10 月をもって有人越冬観測を終了、その後は無人観測基地となり、現在に至っている。

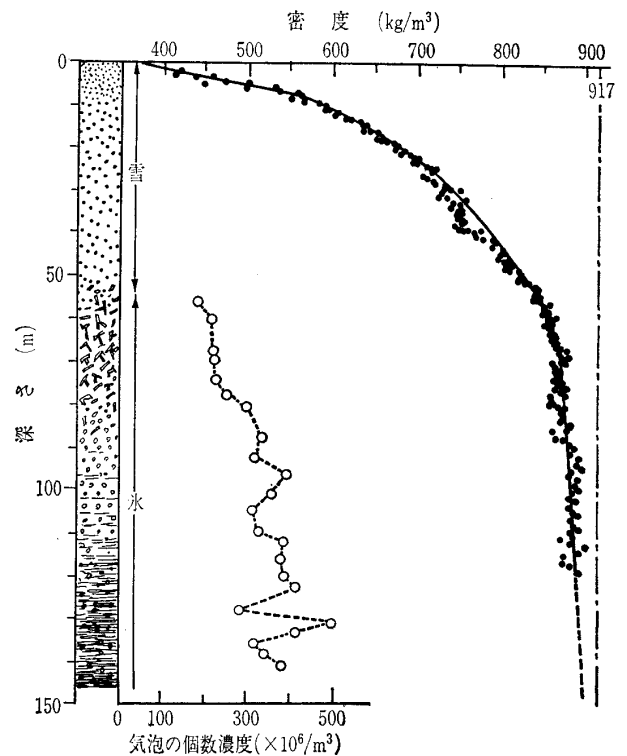
3.2 みずほ基地の環境¹⁾

みずほ基地のある東南極みずほ高原では、12 月～2 月の夏季を除いて常時 10～20 m/s の東風が吹き、このため地吹雪が絶えることはない。空気は乾燥しており、降雪は氷床表面の地吹雪輸送によって再配分されるので、雪の堆積は地形によって大きく変動する。この地吹雪輸送量を風速との関係で示したのが図—2 である。例えば同図中の下限を表す式を使って、高度 1 m の風速を 7.5 m/s (年頻度分布で 178 日、したがってほぼ半年はこの状態が続く) とすると、地吹雪輸送量 Q_B は、3.8 g/m·s となり、単位幅 1 m の空間を 1 日当たり 0.33 t、雪粒子の平均密度を 0.4 g/cm³ とすると 0.8 m³ の雪が流動していることになる。

このほか、雪面を基盤として建物を建てる時には、積雪の物性を知る必要がある。みずほ基地で得られた密度分布を図—3 に示す。内地の雪に比べて粒径が小さく、雪質の分類によると表層でも「しまり雪」に相当する密度 0.35～0.4 g/cm³ という値をもつ。図—4～6 は南極の雪についてのデータをまとめたもので、積雪のヤング係数、引張り・圧密強度および粘性係数と密度の関係である^{2), 3)}。



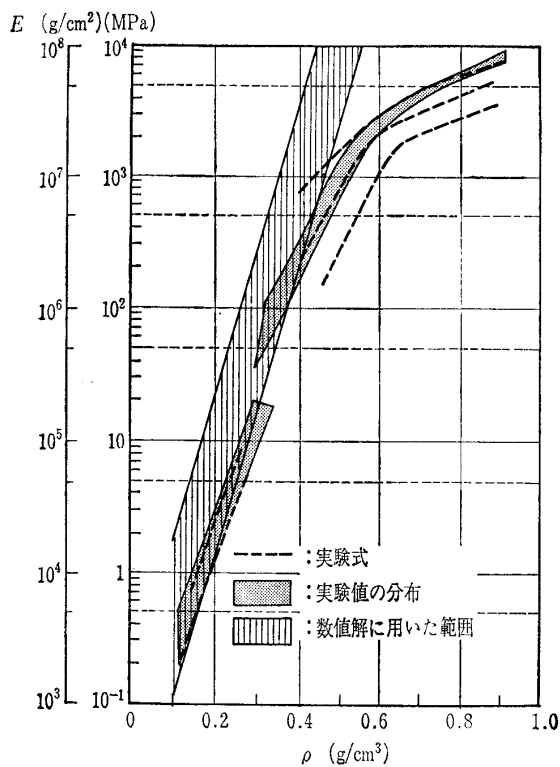
図—2 高度 1 m の風速 U_1 と地吹雪輸送量 Q の関係



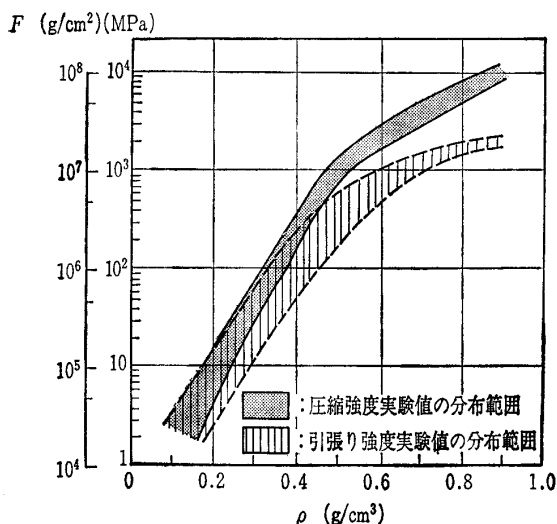
図—3 みずほ基地の氷床ボーリングで得られた表層近傍の密度、気泡含有率のプロファイル

3.3 みずほ基地・居住棟の建設

通常、南極観測隊用建物の設計は国立極地研究所設営専門委員会建築分科会の基本計画に基づいてそれぞれの専門家に依頼されることが多いが、短期使用が前提の仮設建物では国内で使用される既製のプレハブ建築部品に若干の補強を施して持ち込むこともある。みずほ基地のほとんどの建物は後者の考え



図—4 積雪のヤング率 E と密度 ρ の関係

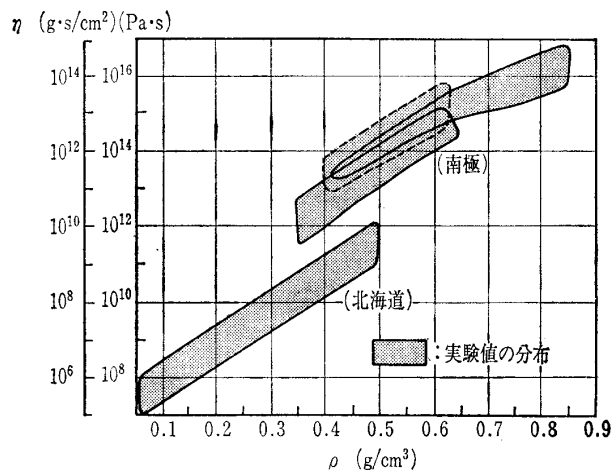


図—5 積雪の引張り、圧縮強度 F と密度 ρ の関係

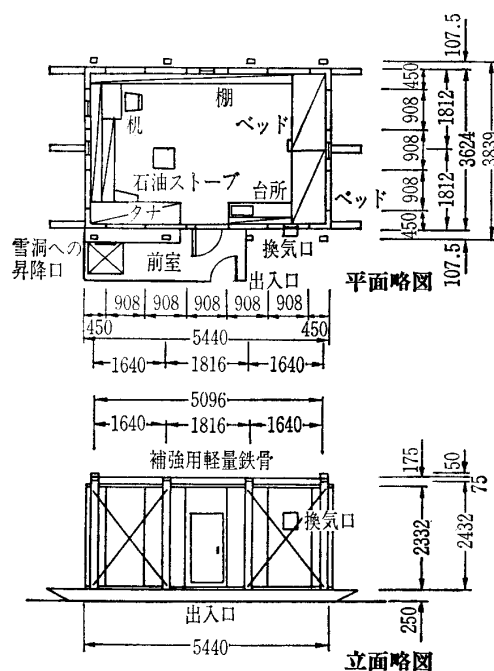
方によって作られた。すなわち、「エンダービーランド計画」終了までの5年間維持できればよいという前提で、市販の冷凍庫用プレハブ建築部品を補強して用い、内部を居住用に改造したのである。

1971年に建設された居住棟(図—7)はこのようにして建設された最初のプレハブ建物であり、その後の基地建物のプロトタイプになった。

当初の構想段階では居住用カブスと同じ発想で、雪面上の適当な位置に、その機能をもつ軽量鉄骨製の土台を並べてその上にアルミパネル製の建物を

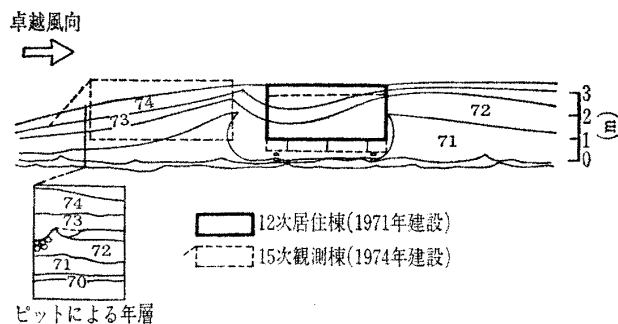


図—6 積雪の粘性係数 η と密度 ρ の関係



図—7 みずほ基地・居住棟(アルミパネルの冷凍庫用建築を改造したもの)

組み立て、そのまま必要に応じて位置を簡単に移動できるように考えられた。これは建物周囲にできる雪の吹きだまりによって建物が早期に埋没しないための工夫であったが、基地の構成要素としての居住区は定位置に固定していないと機能上不便が多く、結局、現地の判断で通常の建物と同様に固定基礎の上に建物が組み立てられることになった。この居住棟の建設とその後の経過の観測から次のような情報が得られた。その一つは雪面の耐荷力に関するもので、建物重量が $200\sim 300\text{ kgf/m}^2$ (基礎板の接地圧にして約 0.9 tf/m^2)程度であれば、足場用の木製道板を敷き並べる程度で特に基礎雪面の処理をしなくても、約10年のライフサイクルを保証できること



図—8 居住棟まわりのスノードリフトの成長

が実証された。ただし、積雪層の圧密沈下は建設初期に著しく、1972年5月末から7月間で約9.9cmの沈下が観測された。

第2は建物周囲の積雪を吹き払うため、床下に21cmの通風用空間を設けた高床式建物のスノーコントロールに関するものである。図—8に示すように、21cmの床高では、雪の吹きだまりを約1年間コントロールするのが限度で、翌1972年4月に基礎の角材を補充して床高を50cmに増したにもかかわらず、吹きだまりは急成長を続け、結局、建築後4年で居住棟はほぼ雪中に埋没した。この雪の吹きだまりの成長は風上よりも風下側の方が早くかつ大きいことも分かった。

3.4 みずほ基地の建設から得られた設営工学的情報のまとめ

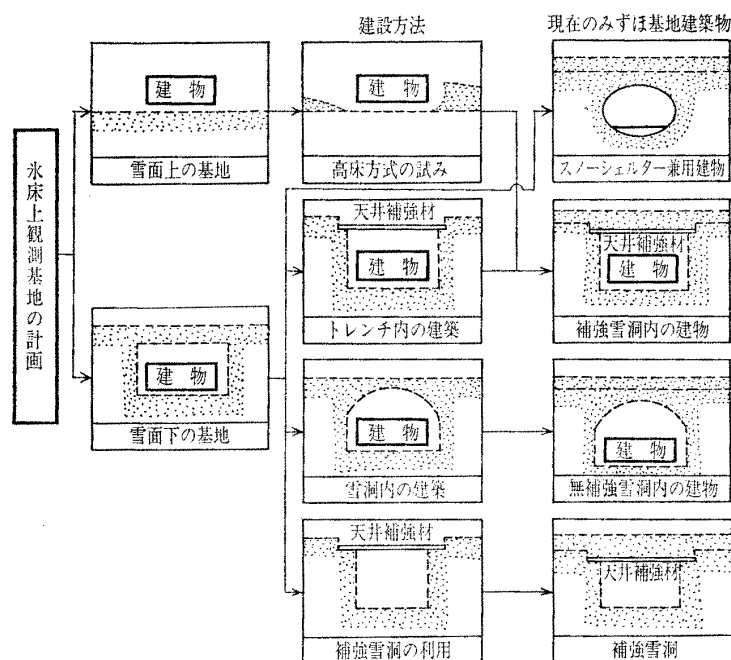
基地建設の過程で、建物を雪面上に維持するか、雪面下にするかという氷床上観測基地の基本計画に

ついでいくつかの試みが行われた。最初の建物、氷床ボーリング作業小屋はコルゲートパイプ製のスノーシェルター兼用建物であり、高床式にしてスノーコントロールを試みたのが居住棟である。発電機室、観測棟はトレンチ内で組み立てたプレハブ建物で、天井に耐雪用構造材をかけた。雪氷実験室はトレンチ上部を補強した雪洞型、このほかの1棟はあらかじめ掘削した雪洞内に部品を搬入して組み立てる工法を用いた(図—9)。

以上の経験から、南極氷床上の小規模な基地では雪面上に建物を維持するための除雪機械力、作業員の手当などが相当困難なので、雪面下の基地とするのがよいことが分かった。また、日本隊のように年間の建設要員、輸送物資が制限され、数年度計画で少しずつ基地を完成させてゆく方式では、無補強雪洞内に小さな床面積の建物を分散配置して雪洞の通路で結ぶのが最適と思われる。

このようにして作られた雪面下の基地では天井や側壁の雪の変形に対する保守が定期的に必要である。発電機室のように発熱量の大きな場所では1か月に1回、その他観測用建物でも熱がこもりやすい天井部について2~3か月に1回程度、雪洞内の整形作業が必要となった。

なお、みずほ基地は単体の床面積が10~30m²程度の小さな建物の集合体なので、不同沈下による障害は報告されなかった。



図—9 みずほ基地で試みられた氷床上基地建設システム

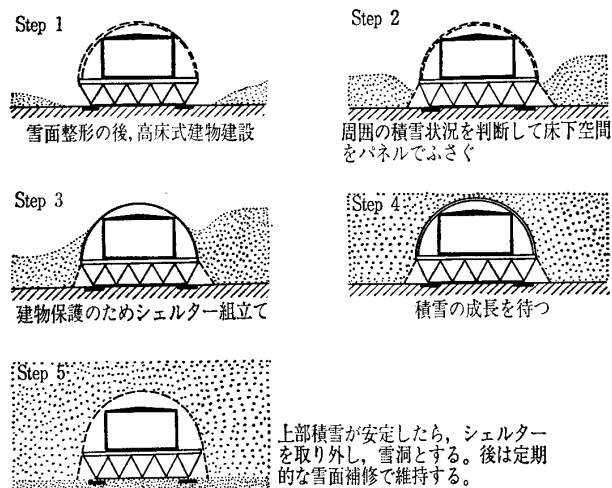
4. 氷床上の観測基地、あすか観測拠点

4.1 あすか観測拠点用建物の設計⁴⁾

一般に極地建築では現場作業の制約が極端に強いので完全プレハブ化して現地に持ち込むのが普通である。そこで建設環境予備調査と設計にかかる時間は長ければ長いほどよく、これに投入されたエネルギーによって結果が決まるといってもよい。あすか観測拠点の場合は予備調査に2年、併行して基本設計のための作業委員会による1年の検討を経て実施設計に入った。

あすか観測拠点を使った研究観測を1983年より10年間とし、初年度は予備調査と建設候補地の選定、次の3年間で最小規模越冬隊8名を収容する施設を建設して越冬観測を開始し、続いて宿泊施設を拡充して後半5年間は15名の越冬

報告—1981



図—10 あすか観測拠点の建築システム

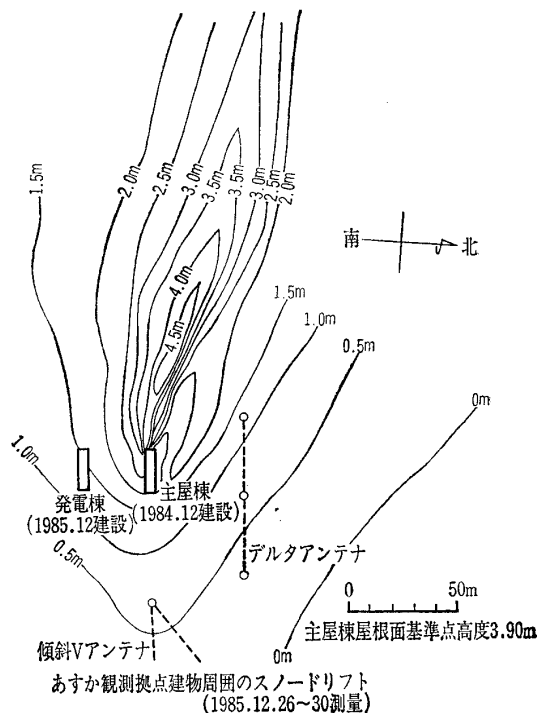
観測隊を送り込む計画で設計がすすめられた。

気象条件はみずほ基地よりもやや緩和されるが作業人数、建設機械力、建設期間などの条件はほぼ共通なので、年1棟のペースで建設作業をすすめ、3年間で基地の最小機能を満たすようにすること、建設作業期間は標準で1週間以内とすること等が設計の基本条件であった。また、予備調査の段階で年間積雪量は約40cmと予想されたので、図—10の過程を経て雪面下の基地を完成させるシステムが採用された。

建物の基礎は合板パネルと角材、高床部分は軽量鉄骨造プレハブトラス、上部構造は、断熱材充填の木質パネル構造（床パネル厚：15cm、壁：12cm、屋根：最小厚15cmで水勾配1/50）で設計された。屋根面に積雪がある場合を考慮して天井に補強用の軽量鉄骨梁がわたされている。

1984年12月にあすか観測拠点に初めて建てられた主屋棟の実設計では、建設条件に未知数が多いこと、特に建設期間の制約から、居住施設、通信施設、食堂、厨房を1棟にまとめて、短辺5m、長辺20mの長方形平面の建物となった。そこで不同沈下障害に備えて基礎面接地圧の均等化（屋根面積雪ゼロで約1tf/m²）、高床トラス部分の剛性を高めることなどが特に配慮された。

翌年建設した発電棟（発電施設と浴室、便所を含む）は、基地の最も重要な施設であり、かつ発熱量も多いので建設工程の増加を犠牲にして不同沈下対策のために2棟独立とし、機能上これの一つにまとめてエキスパンションジョイントで連結した。



図—11 あすか観測拠点のスノードリフト形状

4.2 あすか観測拠点の建設

あすか観測拠点はセールロンダーネ山地北側の氷床上、71°31'S、24°18'E、標高930mの位置にある。ここでは大陸中心部から氷床の傾斜に沿って吹き降ろす斜面下降風は山地でさえぎられるがその代わり積雪が比較的に多いので、図—11のように主風向（ESE）に沿って建物を配置したが、床高を約1mとしても風による建物周囲の積雪の吹払い効果は設計時の予測を下まわり、すぐ吹きだまりの成長が始まった。1年間で風下側の吹きだまりはほぼ屋根面に達しているので埋没速度はみずほ基地の場合の2倍以上である。

現在の観測拠点は主要建物4棟と連絡通路で構成され、7名の越冬隊が滞在しているが図—10のステップ2の状態ですべて雪面下に埋没しつつある。

4.3 観測拠点での設営工学的観測⁵⁾

我が国ではこれまで南極観測基地に関する設営工学的観測が組織的に行われたことはあまりなかったが、あすか観測拠点開設にあたり、関係者の努力によって建設から維持管理にいたる間の設営工学的な基礎資料収集のための観測計画が表—3のように提出され、現在も観測を継続している。前掲の図—11もその成果の一部である。

あすか観測拠点で最も注目されている建物の不同沈下に関する観測例を以下に示す⁶⁾。主屋棟の風下

表—3 あすか観測拠点の設営工学的観測計画

No.	観測テーマ	目的	実施年度
1	建物周囲のスノードリフト観測	積雪による建物の埋没過程を調べ、スノーコントロールの基礎資料とする。	1985～
2	建物の位置関係の測定	建物の屋根面に定点をとって氷床の流動および積雪表層の圧密による変位を計測し、雪面支持力およびクリープ特性を推定する。	1985～
3	建物の不同沈下量	長方形平面の建物が多いので各建物の不同沈下を連続観測し、建物の維持管理上の資料とする。	1985～
4	建物の断熱特性	建物の断熱性能のデータをまとめて、室内気候設計および省エネルギー設計の資料とする。	1987
5	壁面風圧特性	設計外力設定のための基礎資料とする。	1987
6	建物に加わる雪荷重	建物が雪中に埋没してゆく過程で、建物に加わる雪圧を調べ、設計外力設定のための資料とする。	未着手

屋根面に測量基準点を設け、そこから約2.2km離れたセルロンダーネ山塊露岩上の不動点との間の測量を年1回の割合で行った結果が表—4である。セオドライトとレーザー測距儀を用いた測量は、無風で好天に恵まれないと結果が得られず、欠測の年もあるがこれまでのデータでは主屋棟は年間約1.03mの速度で北に流され、年間約0.53mの速度で建物全体の沈下が進行していることが分かった。

この絶対移動量の計測のほかに、主屋棟、発電棟、観測棟の屋根面でもレベル測量を行って相対沈下量を毎年測定している。図—12の主屋棟は建築後2年間無住で、この間に約8cm(1/250)の不同沈下を生じた。建物風上よりもドリフトの多い風下側の沈下が大きい。越冬開始後1年間の沈下量増分は約5cmで、無住の時よりもやや沈下速度が早くなっている。図—13の発電棟では、発電機の運転開始以前の1年間で約4.2cm、越冬を開始した次の1年間で前年のほぼ2倍、約8cmの沈下増分が観測された。

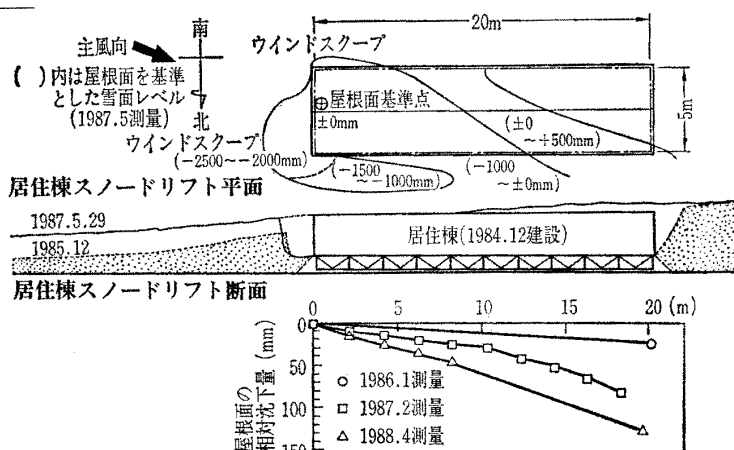
両棟とも、風下側の沈下が多いことが共通しており、これは建物周囲に不均一に積もった積雪層の圧密速度の差が主要因と思われる。建物使用開始後の沈下速度は増す傾向にあるが特に

表—4 あすか観測拠点・主屋棟の流動観測

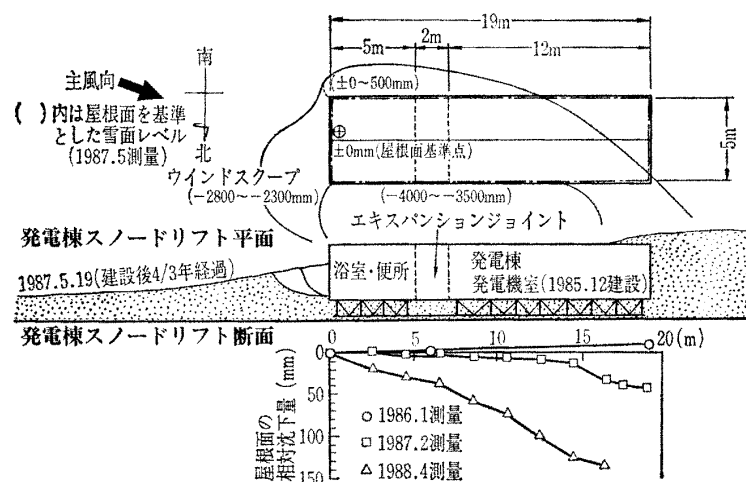
測定日	水平移動速度, 方向	沈下速度
1985. 1. 4	0.0	0.53 m/y.
1985.12.30	—	—
1986. 2. 2	2.16 m/765 days, N (1.03 m/y., N)	0.53 m/y.
1987. 2. 5		0.40 m/y.
1988. 3. 9		—

発電棟の沈下が著しい。積雪層の不均一さ以外にも、積載荷重の増加、建物からの放熱が周囲の雪の物性に影響を及ぼすことなどが付加要因として考えられる。

積雪のクリープ特性から推測できるようにこの圧密速度は時間の経過と共に減少するので、不同沈下がこのままの速度で進行するようなことはなく、1989年現在、あすか観測拠点では建物の不同沈下による障害は現れていない。また、これらの不同沈下量の推定は、粘弾性力学モデルによる長期クリープ解析でほぼ可能なことも確かめられている。



図—12 あすか観測拠点・主屋棟のスノードリフトと不同沈下の状況



図—13 あすか観測拠点・発電棟のスノードリフトと不同沈下の状況

報告—1981

以上のように建物周囲のスノードリフト形態とその成長が不同沈下の主要因とすれば、図—10ステップ2のスノーコントロールが重要となる。あすかのように地吹雪輸送量の多い場所では高床式にして雪の吹払いを考えるよりは、防雪柵などを利用して建物周囲に均等に雪をためる工夫が効果的といえるかもしれない。

5. むすび

日本の南極観測における設営業務のうち、氷床上の観測基地に関する話題をあげて、その設計から建設、維持管理にいたる事例を紹介した。

諸々の制約条件のかかわりかたの複雑さと厳しさに加えて、建築を取り巻く極地環境の変動が激しいために、極地建築について一般的な設計法をまとめるのは大難題である。とりあえずデータベースの充実から始めて、最適な建築システムを探るべく関係者の努力が続けられているのが現状である。極地研究所を中心とする研究観測活動のほかに、最近では

日本建築学会に「極地建築研究会」が誕生し、研究者の輪が広がりつつあるのは頼もしい限りである。

参 考 文 献

- 1) 国立極地研究所編：南極の科学3，気象，古今書院，pp.82~97，1988.
- 2) 前野紀一・福田正巳編：基礎雪氷学講座1，雪氷の物性と構造，古今書院，pp.162~172，1986.
- 3) 佐藤稔雄・半貫敏夫・内田昌勝・小寺 浩：極地における雪洞のクリープ変形解析，日本雪工学会第5回雪工学シンポジウム論文集，pp.39~42，1989.
- 4) 佐藤稔雄・村内 明・平山善吉・半貫敏夫・三橋博巳・内藤正昭：南極あすか観測拠点建築システムの構造強度実験，第30回日本大学理工学部学術講演会講演論文集，pp.133~139，1986.
- 5) 国立極地研究所編：日本南極地域観測隊第27次隊報告(1985~1987)，国立極地研究所，pp.84~87，1987.
- 6) 佐藤稔雄・半貫敏夫・本田泰章・石沢賢二：あすか観測拠点建物の不同沈下について，国立極地研究所第11回極域気水圏シンポジウム講演要旨集，pp.48~49，1988.
- 7) 佐藤稔雄・半貫敏夫・本田泰章・内田昌勝：雪温分布を考慮した粘弾塑性モデルによる雪面上建物の不同沈下解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.69~70，1988.

(原稿受理 1989.10.24)