

昭和基地管理棟後流域建物周辺の吹きだまり観測と 人工雪を用いた風洞模型実験

高橋弘樹¹・半貫敏夫²・鮎川 勝³・阿部 修⁴

Snowdrift observation around buildings in the wake of the central building of
Syowa Station and a cold wind tunnel test with artificial snow

Hiroki Takahashi¹, Toshio Hannuki², Masaru Ayukawa³ and Osamu Abe⁴

(2005年3月10日受付; 2005年5月23日受理)

Abstract: A snow drift survey around buildings in the wake of the central building of Syowa Station was carried out from February to November 2002. Wind was measured at two points above the roofs of buildings simultaneously. Measurement of mass flux of snow 0.5 m above the ground was carried out in an undisturbed spot away from the main part of Syowa Station. Studying these observation data, it was found that the relation between the mass flux of snow and the volume of snow deposition around buildings can be expressed simply in a linear equation. And it was confirmed that the form of snow drift was sensitive to the properties of wind.

The wind tunnel test was performed with a 1/100 scale model of the main part of Syowa Station. The blowing snow was modeled with artificial snow in a wind tunnel. The growth of snow deposition around the building models was measured at regular intervals. Variations of the shape of snow drift were observed in the wake especially. In comparison with the snow drift survey at Syowa Station, similarity of snow deposition on the wake of the obstacles was confirmed. The wind tunnel test with artificial snow was useful as a supplement to the field observations.

要旨: 2002年2月から11月にかけて、昭和基地主要部の管理棟後流域にある倉庫棟及び汚水処理棟周辺に発生した吹きだまりの観測を行った。併せ

¹ 日本大学大学院理工学研究科, Student, Graduate School of Science and Technology, Nihon University, 8-14, Kanda-Surugadai 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308.

² 日本大学理工学部, College of Science and Technology, Nihon University, 8-14, Kanda-Surugadai 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308.

³ 情報・システム研究機構国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

⁴ 防災科学技術研究所, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 1400, Tokamachi, Shinjo 996-0091.

て昭和基地主要部の建物近傍2点で風向・風速を観測し、地上高度0.5mの吹雪フラックスを計測した。これらの観測データをもとに、吹雪フラックスに対応した吹きだまりの堆積状況を明らかにし、プリザードの主風向変動が建物周囲の吹きだまり形成に与える影響をまとめた。更に昭和基地主要部周辺を1/100模型によってモデル化した人工雪風洞実験を行って吹きだまり発生状況の再現を試み、その発生と成長の機構を考察した。

1. はじめに

1992年から2001年にかけて整備された南極・昭和基地主要部(69°00'22"S, 39°35'24"E)の建物群周囲で大量の吹きだまりが発生した。この吹きだまりの中に埋没あるいはそれに近い状態となった建物では、出入り口・避難路の遮断、屋根上積雪による母屋、屋根梁のたわみ及び積雪沈降力による付帯設備、屋外階段手すりの変形等の障害が現れた。それに伴う過大な除雪作業の問題も含めて、吹きだまり対策の必要性が、各年次の観測隊から国立極地研究所設営専門委員会建築分科会に報告された。そこで第43次南極地域観測隊(西尾文彦隊長、神山幸吉副隊長兼越冬隊長)は、2002年2月から11月にかけて、昭和基地の吹きだまりの現状を把握するための観測を行った(高橋, 2003; 高橋ら, 2003a, b, c)。本論は昭和基地建物周囲の吹きだまり対策に関する基礎資料を得る目的で、吹きだまり観測の結果と、人工雪を用いた吹雪風洞実験とを比較・検討したものである。

2. 昭和基地主要部の現状と吹きだまり

2.1. 昭和基地主要部の成り立ち

これまで、昭和基地施設の増設・移築等の建設作業は毎年ほぼ1棟(床面積100-200m²)のペースで段階的に進められてきた。しかし基地の全体計画について、合意された明確な完成予想図がないまま、狭い範囲の条件設定(建設物品の輸送条件;重量と容積,新設施設の機能と既存施設の関係,建設期間,建設労働力の配分等に基づく建築可能性など)のもとで各年次の建設計画が決定されるのが通例であった。そこで1989年,観測隊の運営・管理部門の集約,居住環境の改善,防災機能の質的向上を目的として,昭和基地主要部の再開発を意図した「昭和基地更新計画」が国立極地研究所設営専門委員会建築分科会によってまとめられ,これに基づいた建設工事が1992年から2001年まで続けられた。この昭和基地主要部更新計画の実施にあたっては既存建物の機能を保持しながら新設建物への機能移転を図ることが要求された。また,1998年に発効された「環境保護に関する南極条約議定書」(国立極地研究所,2002)に対応して早急に汚水処理棟を建設する必要があった。このような制約条件から,当初の計画とは異なって,いくつかの建物が比較的近接して配置されることになった。

昭和基地主要部の建物配置を図1に示す。2004年現在の昭和基地主要部は,観測隊の運

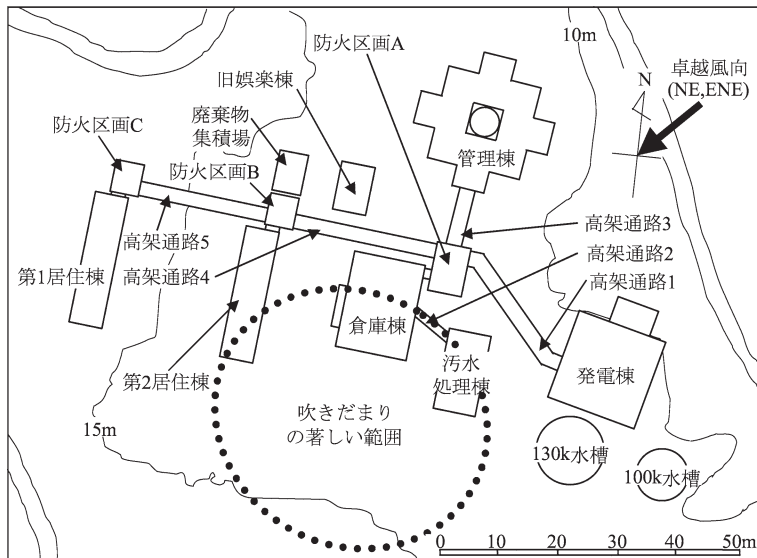


図1 昭和基地主要部の建物配置

Fig. 1. Building layout in the main district of Syowa Station, Antarctica.

営・管理施設に食堂，医務室を併設した大型複合建物:「管理棟」(1993年，722 m²)，居住施設2棟:「第1居住棟」(1997年，284 m²)，「第2居住棟」(1998年，284 m²)，エネルギー施設:「発電棟」(1983年，425 m²)，食料貯蔵，設営物品保管庫兼事務室:「倉庫棟」(1996年，454 m²)，生活廃棄物関連施設2棟:「廃棄物集積場」(2001年，30.4 m²)，「汚水処理棟」(1997年，109 m²)を5本の高床式通路(「高架通路1, 2, 3, 4, 5」(1999年，374 m²))で連結した機能分散型の建物群に，基地開設時に建設された歴史的建築物である「旧娯楽棟」(1957年，40 m²)を加えて構成されている(以上，括弧内は建物完成年，延床面積を示す)。

2.2. 昭和基地主要部における吹きだまりの発生とその対策

昭和基地は，東南極，リュツォ・ホルム湾東岸の南極大陸氷縁から4 km程離れた東オングル島上にある。このため東オングル島北部の沿岸で発達した低気圧の影響を受けやすく(川口，1988)，この低気圧の接近により発生したブリザードと呼ばれる地吹雪(竹内，1996; 小林・前野，2000)によって，海上から大量の雪が昭和基地周辺に輸送される。昭和基地では，吹雪による視程が1 km未満で風速10 m・s⁻¹以上の継続時間が6時間以上となった場合をブリザードと定義している(木津ら，2003)。昭和基地の降水量は降雪よりも地吹雪によって輸送される比率が圧倒的に高い。一度ブリザードが発生すると数日間継続することもあり，年平均のブリザード日数は約50日(国立極地研究所，2003)で，過去には最大瞬間風速61.2 m・s⁻¹(1996年5月27日)を記録したこともある(国立極地研究所，2003)。

ブリザードの卓越風向は主に北東または東北東（木津ら，2003）（図1）である。

一般に昭和基地の建物は高床式で、北東方向からの卓越風に直面する壁面積を最小にするように長辺方向をほぼ北東に向けて配置されている。吹きだまりが壁面に接して出来やすい後流域面積を減らし、さらに建物を高床式とすることによって、床下を吹き抜ける風のエネルギーを保つことで建物周辺の積雪を拭き払うことを期待した吹きだまり対策のためである。

しかし、昭和基地主要部では卓越風向に沿って、比較的近接して建物が配置されたため、最も風上側に位置する管理棟の東側と西側に分かれた吹雪流のうちで、東側の流線が高架通路1に向かい、高架通路1によって吹雪流が乱され、さらにその風下にある倉庫棟と汚水処理棟によって風速が弱められ、雪粒子が空中を浮遊するのに必要な風のエネルギーが失われて、倉庫棟、汚水処理棟周辺に大量の吹きだまりが発生した。この2棟は建物体積が大きいうえ、建物の機能上、高床式にできなかったことが、吹きだまりの発生・成長速度を高める要因となった（図1）。観測期間中最大の吹きだまりにより汚水処理棟がほとんど雪中に埋没したときの状況（2002年9月19日）を図2に示す。



図2 昭和基地主要部で観測された大規模な吹きだまり（2002年9月19日撮影）

Fig. 2. Extreme snow drift behind the central building of Syowa Station observed after blizzard B0224 (photograph on September 19, 2002).

3. 吹きだまり観測の概要

管理棟によって平面的に二手に分かれた吹雪流の流線を考慮して管理棟風下側の領域を管理棟後流域（汚水処理棟，倉庫棟，第2居住棟の周辺）と定めた。この管理棟後流域で最も吹きだまりの多い場所に注目して、あらかじめ観測領域を倉庫棟と汚水処理棟周辺に限定し、いくつかのブリザード前後の吹きだまり形状を写真測量した。吹きだまりの観測期間は2002年2月から2002年11月までの間である。同時に高架通路1の風上側および倉

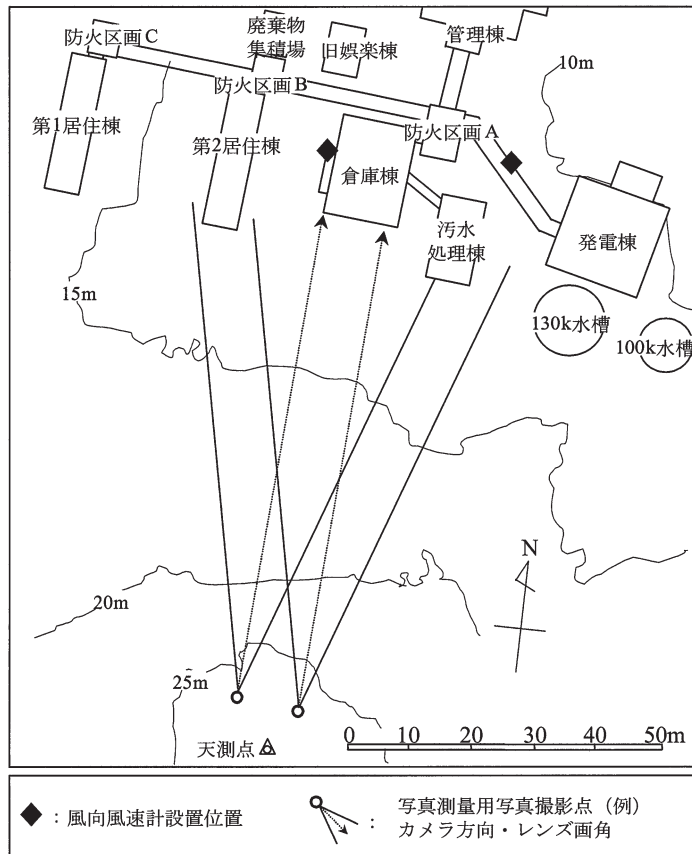


図3 昭和基地主要部の吹きだまり観測用機器配置

Fig. 3. Arrangement of equipment for snow drift observation at Syowa Station.

庫棟風下側の2点で風向風速観測を行った。またブリザード時の吹雪フラックスを知るため地上高度0.5mの位置で飛雪粒子を観測した。写真測量のカメラ位置、レンズ画角、風向風速計設置位置を図3に示す。

3.1. 吹きだまりの測量

吹きだまり形状の測量はステレオ写真測量によって行った。ブリザード発生前とブリザード終息後に天測点付近から汚水処理棟と倉庫棟の周辺を撮影し、データを処理した。撮影には撮像素子27.6×18.4mm、総画素数625万画素の一眼レフレックスオートフォーカスデジタルカメラ、レンズ画角35mmを使用した。ステレオ写真測量の解析に使用した基準点には倉庫棟、汚水処理棟の角点を利用し、「トータルステーション」を用いてその位置座標(x, y, z)を測量した。

3.2. 風向風速観測

吹きだまり観測領域付近の風向風速を、超音波風向風速計2台を使用して観測した。風向風速計の設置位置は次の2点である。一つは防火区画Aと発電棟間の高架通路1を支えるタワーの海氷(北)側に取り付けた。受感部位置は高架通路屋根面から100 cmの高さである。他は倉庫棟西側の階段手摺に取り付けた鋼管柱の先端に設置した。受感部位置は倉庫棟の軒から50 cmの高さである。

3.3. 飛雪粒子計測

吹雪流中の飛雪粒子をSPC (snow particle counter) (Sato *et al.*, 1993) によって計測した。観測場所は、第1夏期隊員宿舎の風上、約10 mの地点である(図4)。地上高度0.5 mのセンサー位置を通過する飛雪粒子の粒径とその数および吹雪フラックスを測定した。粒径45 μm から500 μm までの飛雪粒子を粒径差10-15 μm ごとに分類し、各粒径について1秒ごとにその数をカウントした。

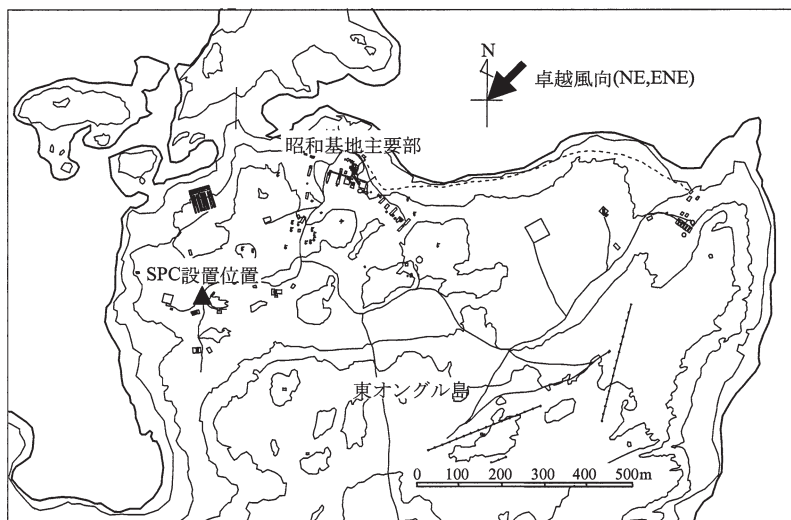


図4 飛雪粒子計 (SPC) の設置位置

Fig. 4. Set position of the snow particle counter: (SPC).

4. 吹きだまりの観測結果と考察

4.1. 観測領域の平均積雪深 h_s (m) と積算吹雪輸送量 Q_0 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) の計算

4.1.1. 観測領域における平均積雪深 h_s (m) の計算

写真測量記録をもとに、図5に示した領域 A_0 の吹きだまり体積を式(1)により計算した。

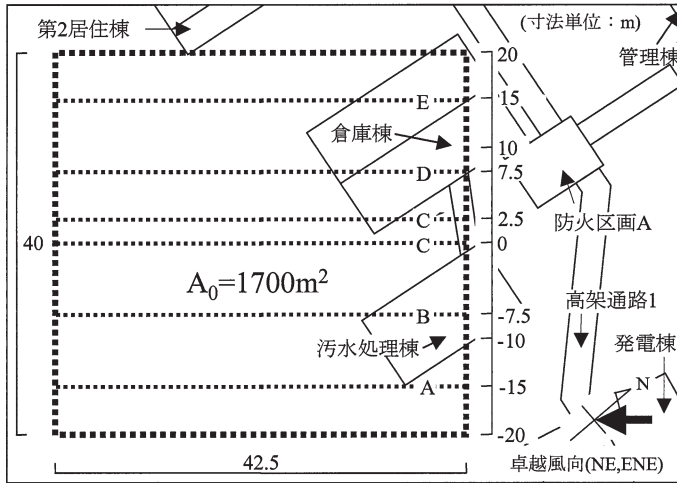


図5 吹きだまりの平均積雪深計算領域 A_0 と断面表示位置 A-E

Fig. 5. Integrated area of average thickness of snow cover, A_0 and cross sectional positions of snow drift, from A to E.

$$V_{A_0} = \int h(A) dA, \tag{1}$$

ここで V_{A_0} : 領域 A_0 の吹きだまり体積 (m^3), $h(A)$: ブリザード発生前後の各測量点 (x, y) の雪面高度差 (m), dA : 各測量点 (x, y) を代表点とする格子面積 (m^2) である。

この V_{A_0} を領域 A_0 の面積 (m^2) で除すことにより, 平均積雪深 h_s (m) は次式によって表せる。

$$h_s = \frac{V_{A_0}}{A_0}, \tag{2}$$

ここで, A_0 : 領域 A_0 の面積 (m^2) である。

同様にして, 領域 A_0 に含まれる建物屋根領域 A_r と図5の範囲 A_0 を, 図6aに示すように倉庫棟, 汚水処理棟を結ぶ高架通路2の中心点を基準にして主風向に沿って分割した領域 A_{v1}, A_{v2}, A_{v3} および図6bに示した領域区分 A_e, A_i, A_w の建物領域を除く平均積雪深を算定した。

4.1.2. 積算吹雪輸送量 Q_b ($kg \cdot m^{-1}$) の計算

地上高度 0.5 m の定点で観測された SPC データを用いて, 以下に示す仮定のもとで積算吹雪輸送量 Q_b ($kg \cdot m^{-1}$) を計算した。

雪粒子の移動を乱流拡散と見なすと, 地上高度 z (m) での吹雪フラックス $q(z)$ ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) は次式で表すことができる。

$$q(z) = n(z) \cdot U(z), \tag{3}$$

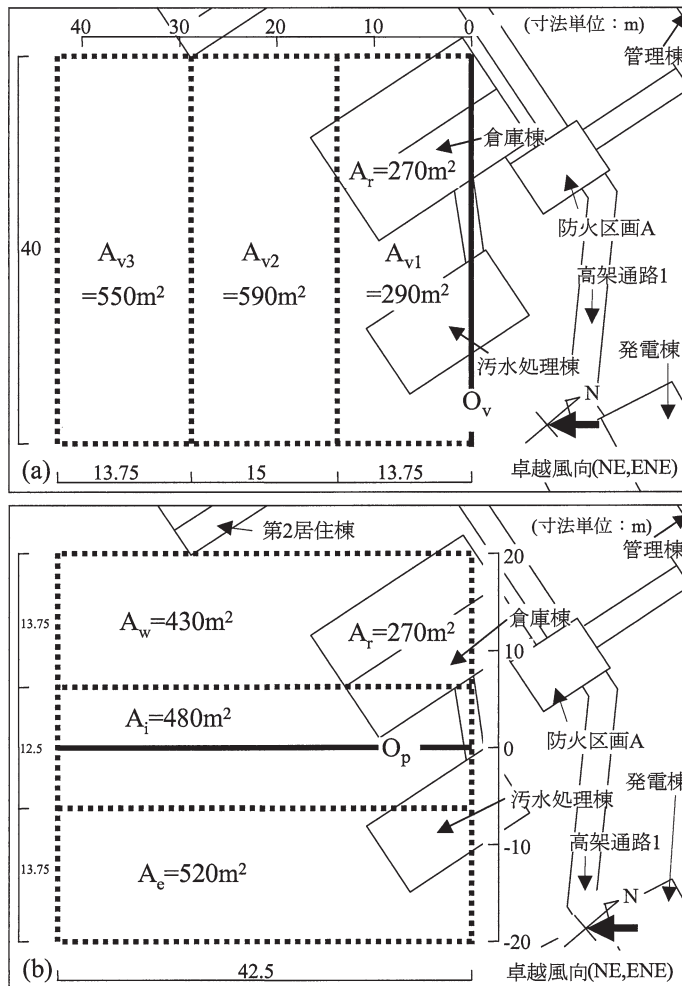


図 6 3分割した吹きだまり積分領域。

(a) 主風方向, (b) 主風向と直角

Fig. 6. Integrated area of snow drift divided in to 3 parallel cells: (a) the main wind direction, (b) perpendicular to the main wind direction.

ここで $n(z)$: 高度 z での吹雪空間濃度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), $U(z)$: 高度 z での平均風速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) である。

吹雪空間濃度 $n(z)$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 平均風速 $U(z)$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) は高度を z (m) として次式で表される (小林・前野, 2000)。

$$n(z) = n_{0.5} \left[\frac{z}{z_{0.5}} \right]^{-w/kU_*}, \quad (4)$$

$$U(z) = \frac{U_*}{k} \ln \frac{z}{z_0}, \quad (5)$$

ここで U_* : 摩擦速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), k : カルマン定数 (通常 $k=0.4$ が用いられる), w : 雪粒子の落下速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), z : 地上高度 (m), z_0 : 粗度定数, $n_{0.5}$: 地上高度 0.5 m での吹雪空間濃度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) である.

式(4), 式(5)を式(3)に代入することにより, 地上高度 z (m) での吹雪フラックス $q(z)$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) は次式のように表せる (小林・前野, 2000).

$$q(z) = \frac{n_{0.5} U_*}{k} \left[\frac{z}{z_{0.5}} \right]^{-w/k U_*} \ln \left[\frac{z}{z_0} \right]. \quad (6)$$

本報では積雪層を, 空隙を含むキャノピー層とみなす簡単なモデルから積雪層の粗度定数を導いた近藤らの報告 (竹内・近藤, 1981) を参照して粗度定数 z_0 を 0.02 cm, みずほ基地 ($70^\circ 41' 53''\text{S}$, $44^\circ 19' 54''\text{E}$) での降雪速度の観測結果 (小林, 1988) から, 雪粒子の落下速度 w を $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ と仮定した. U_* は, 昭和基地気象棟で得られた平均風速データ (地上高度 $z=10.1 \text{ m}$) を用いて, 風速鉛直分布式(5)より求めた. そして $U(0.5)$ 及び SPC 観測記録の $q(0.5)$ を用いて式(3)から $n_{0.5}$ を求め, 式(6)に代入すると $q(z)$ が得られる. SPC 設置期間中の $q(0.5)$ と $U(0.5)$ を, それぞれ図 7a と図 7b に示す. SPC を設置したのは, 2002 年 4 月 1 日 14 時 28 分から 2002 年 9 月 19 時 56 分までである. $q(0.5)$ は, 7 月 20 日 14 時 20 分から 7 月 25 日 14 時 20 分まで欠測した. 図中の $q(0.5)$ と $U(0.5)$ の値は 10 分間の平均値である.

この吹雪フラックス $q(z)$ を, 高度 0.1-15 m の範囲で積分すると, 吹雪輸送量 Q ($\text{kg}\cdot$

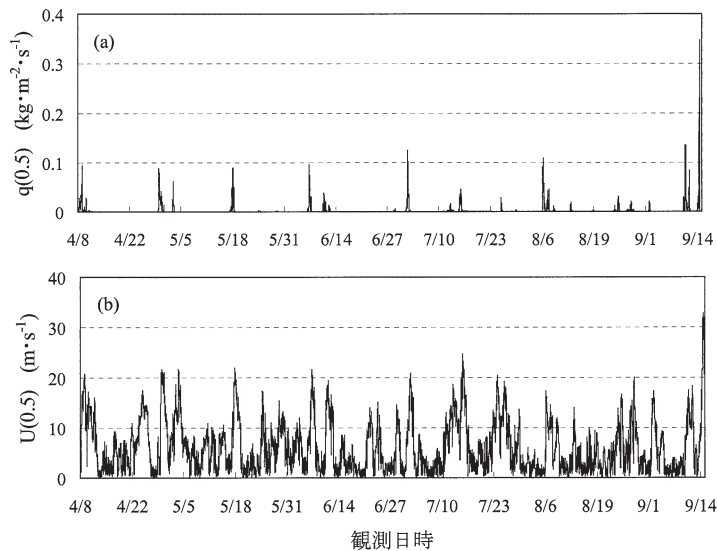


図 7 観測期間中の地上高度 0.5 m の (a) 吹雪フラックス $q(0.5)$ と (b) 平均風速 $U(0.5)$ 0.5 m 以上の地上での観測期間.

Fig. 7. (a) Mass flux of snow, $q(0.5)$ and (b) average wind speed, $U(0.5)$ 0.5 m above the ground during the observation period.

ブルドーザーで除雪した後、24号ブリザード終了後までの観測期間中は、次に述べる局所的な除雪のほか、重機を使用した除雪は行わなかった。従って観測期間中、観測領域における吹きだまりはほぼ累積された形状を保持していると考えてよい。観測期間中の局所的除雪は次の3回行われた；(1)18号ブリザードの来襲前に倉庫棟階段付近を除雪、(2)20号ブリザード来襲前、倉庫棟と汚水処理棟の南側（風下）吹きだまりがほぼ平坦になるように除雪、(3)23号ブリザード来襲前、倉庫棟と第2居住棟間の吹きだまりを除雪した。

4.2.2. ブリザードによる吹きだまりの観測記録

図5に示した吹きだまり観測範囲A₀の地表面の形状を等高線で図8aに示す。右の写真は積雪のない夏季に風下側からみた観測域の状況である。右奥の管理棟の後流域に、大きな容積の倉庫棟と汚水処理棟が並び、且つその風上には防火区画Aと高架通路1,2,3が吹雪流を遮る形で建設されている（図1参照）。観測域の地形は風下に向かう登り斜面（高低差4-5m）で、地表に吹きだまりが堆積しやすい環境である。図8bはブルドーザーを使って除雪した観測開始直前の状態である。左の等高線図は地表面を原点とする積雪深を表す。建物周囲には0.5-1mの積雪が残っている。高架通路1,2の下にも除雪しきれない雪が残っているのが右の写真に示されている。以下、図8c-図8lまでに、観測期間中来襲した15回のブリザード（表1）によって累積した建物周囲の積雪の成長記録を、積雪深の等高線と風下定点からの記録写真の組み合わせで示した。観測期間前半では東寄りの風が多く、東風の時に最大瞬間風速を記録した15号ブリザードが終息した後の吹きだまり（図8e）は汚水処理棟の風下から西に長く伸びる形で堆積した。

18号ブリザードの来襲以前に、倉庫棟西側にある階段付近と倉庫棟屋根上の除雪を行ったので、その影響が図8gの積雪深測量結果に現れていて、倉庫棟西側の外階段周辺と倉庫棟屋根上の吹きだまりが図8fよりも減少している。図8hは倉庫棟～第2居住棟間及び倉庫棟、汚水処理棟風下領域の機械除雪を行った後の状況であり、風下領域は平均2-3mの平坦な雪面に均されている。これとほぼ同様の範囲で除雪を行った後の状況が図8jに示される。

24号ブリザードは最大瞬間風速57.9(m・s⁻¹)という、昭和基地気象観測史上第3位の強風であった。この24号が終息した後の吹きだまりの状態を図8lに示す。倉庫棟周りの吹きだまりピークは屋根面よりも高くなり、そこから南西方向に向かって吹きだまりの長い尾根が形成された。倉庫棟～汚水処理棟間は完全に吹きだまりで塞がれ、汚水処理棟がほとんど埋没した状態となった。倉庫棟～第2居住棟間の吹きだまりは、図8jに示した除雪の効果があって図8kとほぼ同じ積雪状態であった。

図9は、倉庫棟、汚水処理棟後流域の吹きだまりの成長を、その断面形で示したものである。図中の断面A, B, C, D, Eは図5に示すA～E線に対応する位置である。図8lと対比すると倉庫棟～汚水処理棟間に堆積した吹きだまりを示すC断面とD断面の間に吹

きだまりピークがある。C断面の吹きだまりピークは、観測期間中ほぼ定位置（高架通路2の風下10-15mの地点）に形成されているが、吹きだまりの堆積が少ない観測期間前半の断面形には高架通路2の床下を吹き抜ける吹雪流による積雪の吹き払い効果が現れている。

24号ブリザード終息後の断面形を見ると、吹きだまりは倉庫棟風下側約40m（倉庫棟高さの約7倍）まで形成された。

4.2.3. ブリザード継続時間 t_b 内の累積積算吹雪輸送量 $\sum Q_b$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) と累積平均積雪深 $\sum h_s$ (m) の関係

図8bに示す10号ブリザード来襲前の積雪状態を基準として、10号ブリザードから24号ブリザードまでのブリザード継続時間 t_b 内に、図5に示す観測領域 A_0 に累積した吹きだまりの体積 $\sum V_{A_0}$ (m^3) を観測領域 A_0 (1700 m^2) で除した累積平均積雪深 $\sum h_s$ (m) と、毎回のブリザードによる積算吹雪輸送量 Q_b ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) を累積した累積積算吹雪輸送量 $\sum Q_b$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) の関係を図10に示す。時間 t_b 内の累積吹きだまり体積 $\sum V_{A_0}$ の計算において、20号ブリザード来襲前と23号ブリザード来襲前の除雪によって失われた積雪の体積は、その直前の吹きだまり体積増加率を利用して線形補間により推定して計算した。また、吹雪フラックスは16号ブリザードの時と24号ブリザードの後半で欠測したが、16号の吹雪フラックスは、観測期間中の吹雪空間濃度の平均値を用いて推定、同様にして24号の後半の値は、24号ブリザードの前半で観測された吹雪空間濃度の平均値を用いて推定した。図10より、累積平均積雪深 $\sum h_s$ は累積積算吹雪輸送量 $\sum Q_b$ にほぼ比例している。本観測の範囲では累積平均積雪深はまだ線形増加の範囲にある。

図5に示す観測領域 A_0 及び観測領域中にある建物2棟の屋根面積 A_r (270 m^2)、図6aで分割した領域 A_{v1} (290 m^2)、 A_{v2} (590 m^2)、 A_{v3} (550 m^2) 及び図6bで分割した領域 A_e (520 m^2)、 A_i (480 m^2)、 A_w (430 m^2) に堆積した吹きだまりの累積平均積雪深 $\sum h_s$ と累積積算吹雪輸送量 $\sum Q_b$ の関係を図11a, bに示す。ここで、累積積算吹雪輸送量 $\sum Q_b$ は $\sum Q_{b\max}$ ($54380 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$) を基準に無次元化した。それぞれの領域における累積平均積雪深 $\sum h_s$ は累

図8 (反対側) 吹きだまり深さの等高線図 (左図) と観測域の状況 (右図)

(a) スノドリフト観測領域の初期状態・地形, (b) 10号ブリザード来襲前 (観測領域がブルドーザーで除雪された), (c) 10号ブリザード終息後, (d) 13号ブリザード終息後, (e) 15号ブリザード終息後, (f) 17号ブリザード終息後, (g) 19号ブリザード終息後, (h) 20号ブリザード終息後, (i) 22号ブリザード終息後, (j) 23号ブリザード来襲前 (観測領域がブルドーザーで除雪された), (k) 23号ブリザード終息後, (l) 24号ブリザード終息後

Fig. 8 (opposite). Configuration of snow drift, contour map (left panel) and visual condition of the observation area (right panel).

(a) Initial condition of snow drift observation area, (b) before blizzard B0210 (snow was removed by bulldozer in the observation area), (c) after blizzard B0210, (d) after blizzard B0213, (e) after blizzard B0215, (f) after blizzard B0217, (g) after blizzard B0219, (h) after blizzard B0220, (i) after blizzard B0222, (j) before blizzard B0223 (snow was removed by bulldozer in the observation area.), (k) after blizzard B0223, (l) after blizzard B0224.

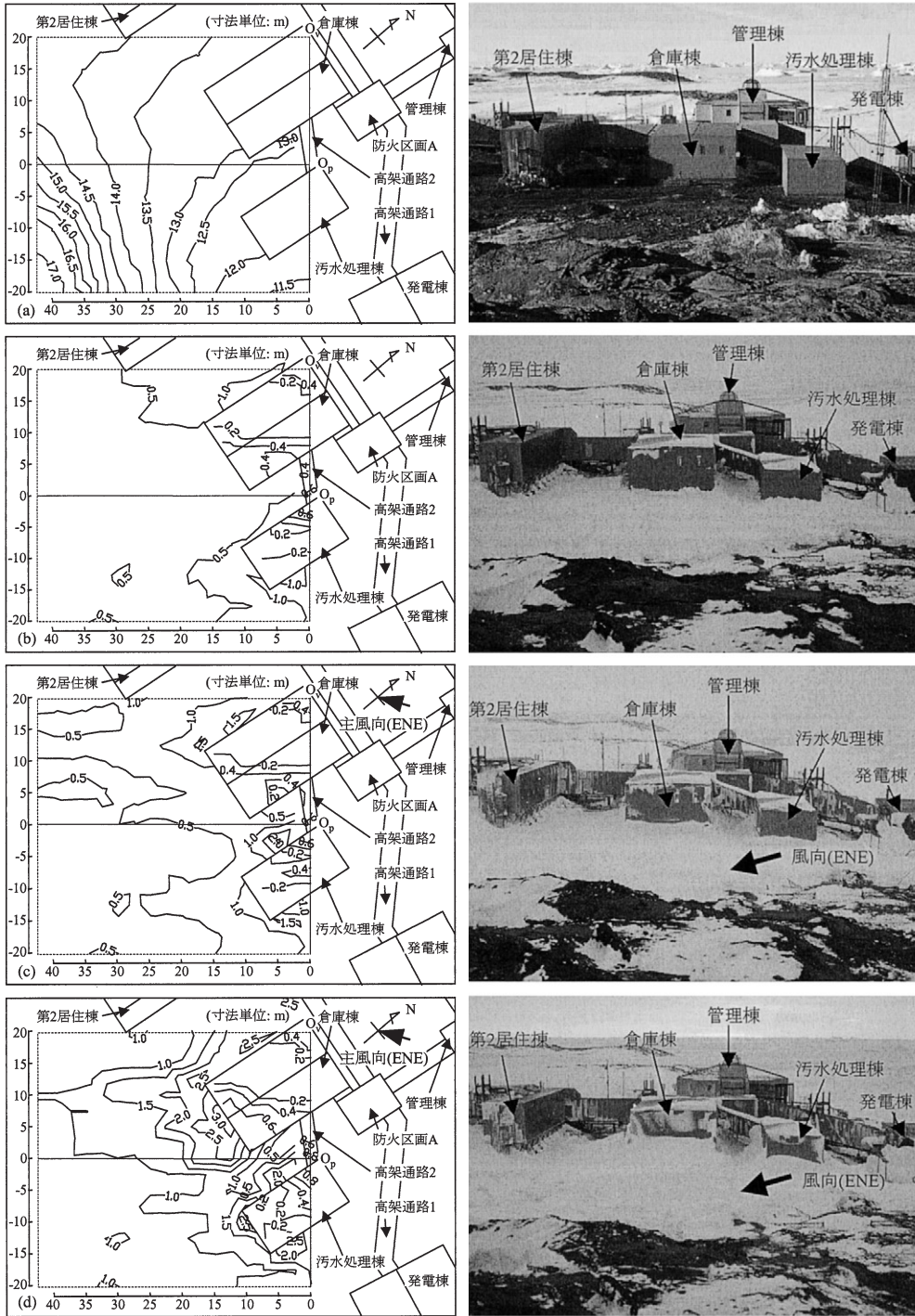


図8 (a)-(d)
Fig. 8 (a)-(d)

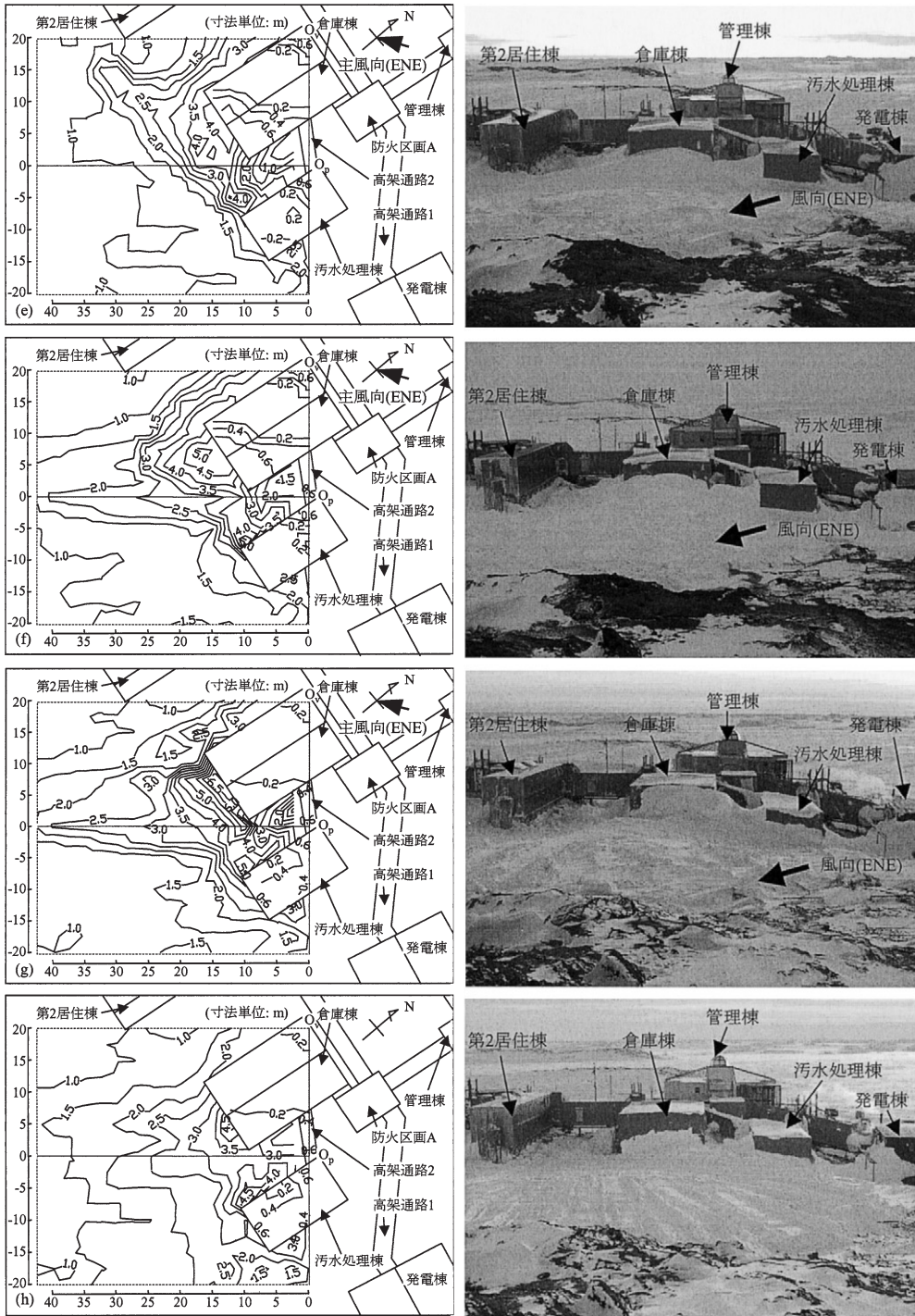


図8 (e)-(h)
Fig. 8 (e)-(h)

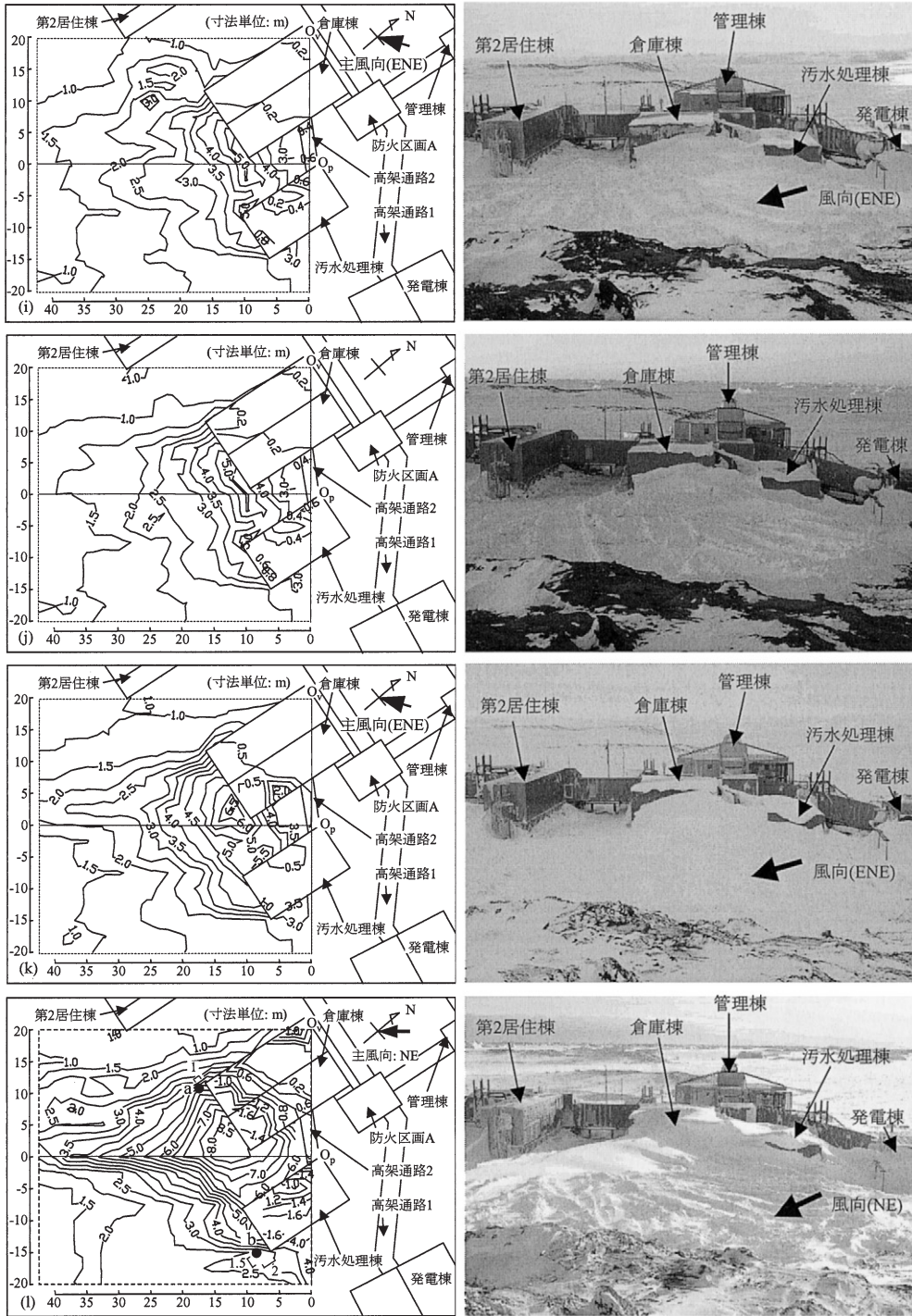


図 8 (i)-(l)
Fig. 8 (i)-(l)

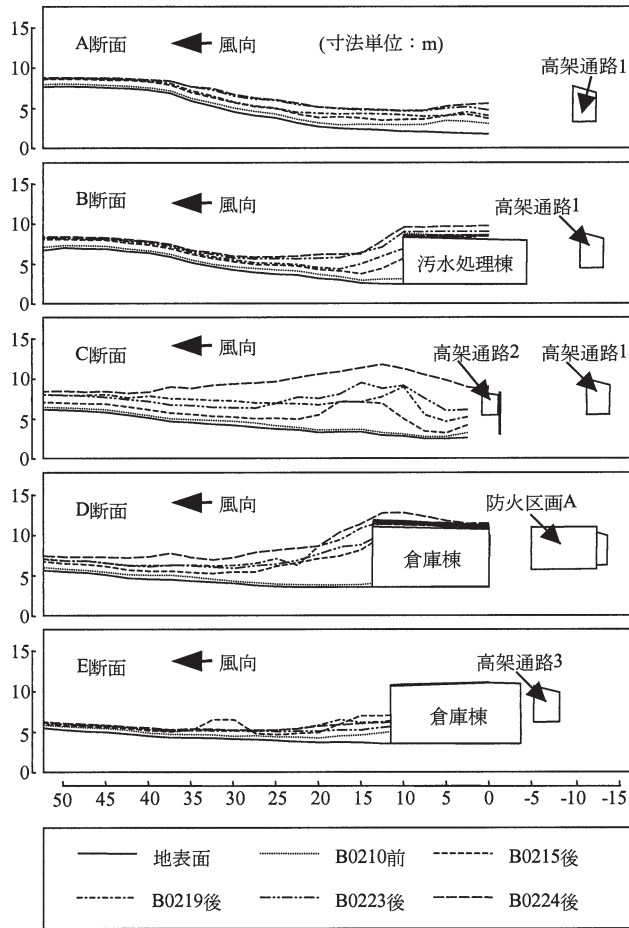


図9 観測期間中の吹きだまり断面の変化

Fig. 9. Variation of snow drift sections during the observation period.

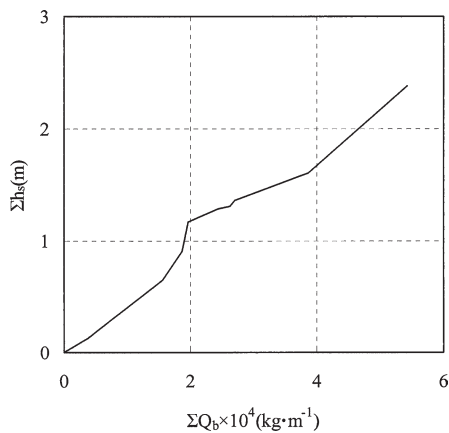


図10 観測領域 A_0 の累積平均積雪深 Σh_s と累積積算吹雪輸送量 ΣQ_b の関係

Fig. 10. Relation between cumulative average thickness of snow cover, Σh_s in the observation area, A_0 and cumulative accumulated snow drift transport rate, ΣQ_b .

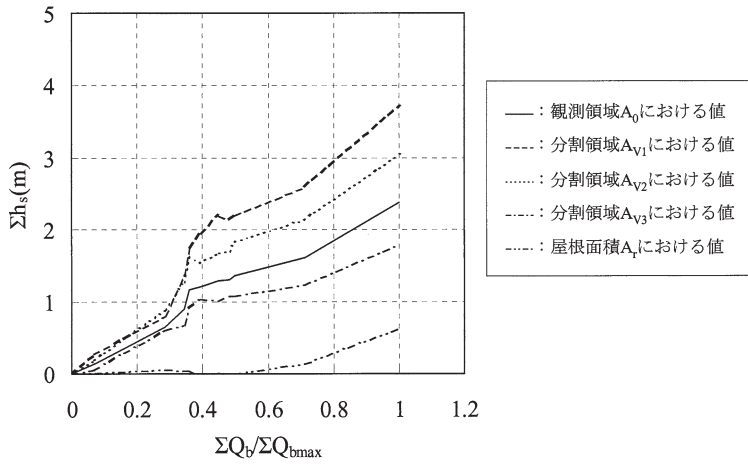


図 11a 図 6a の分割領域内における累積平均積雪深 Σh_s と累積積算吹雪輸送量 ΣQ_b の関係
 Fig. 11a. Relation between cumulative average thickness of snow cover, Σh_s in each cell shown in Fig. 6a and cumulative accumulated snow drift transport rate, ΣQ_b .

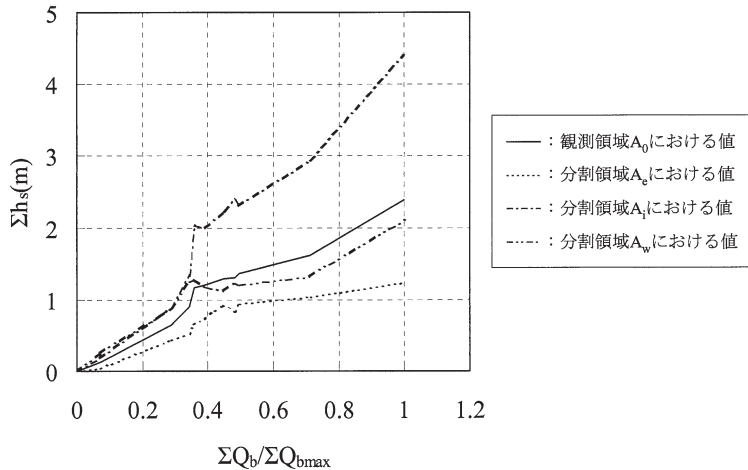


図 11b 図 11a に同じ (除く図 6b の分割領域内)
 Fig. 11b. Same as Fig. 11a except in each cell shown in Fig. 6b.

積積算吹雪輸送量 ΣQ_b にほぼ比例している。

建物風下領域を主風向に沿って3区分し、その間の平均積雪深を計算した結果(図 11a)より、吹きだまりが建物直後の領域 A_{v1} , A_{v2} に集中していることが分かる。また主風向と直角に3区分した領域の平均積雪深(図 11b)を比較すると、領域 A_1 の平均積雪深は領域 A_0 の値の約2倍となっている。ここは倉庫棟と汚水処理棟の間の空間で、基地主要部の建物群のなかで最も風上にある大型建築物;管理棟によって風向を矯正された吹雪流の流線が収束する場所である。

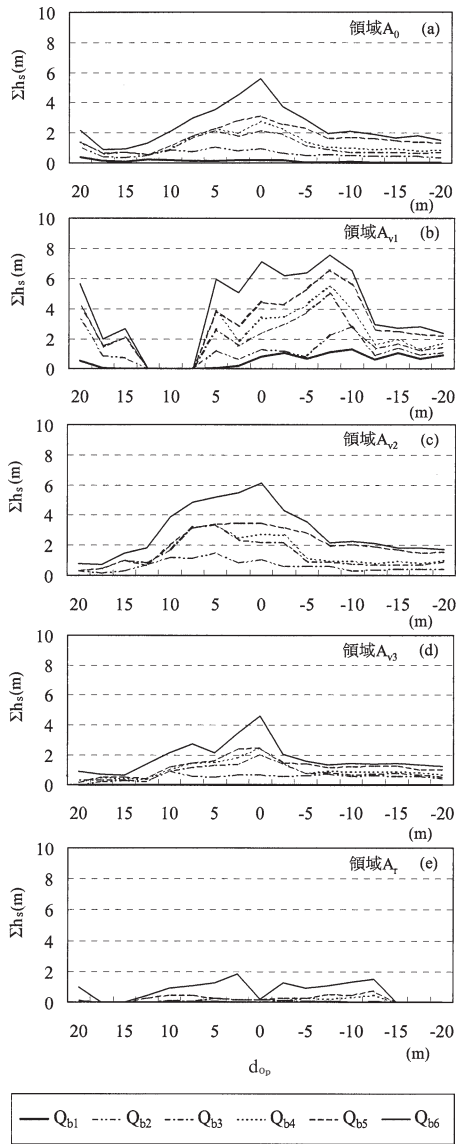


図 12 各観測領域(図 6a)における累積平均積雪深 Σh_s の O_v 軸方向の分布。
 (a) 観測領域 A_0 , (b) 分割領域 A_{v1} ,
 (c) 分割領域 A_{v2} , (d) 分割領域 A_{v3} ,
 (e) 分割領域 A_r

Fig. 12. Distribution of cumulative average thickness of snow cover, Σh_s at each cells shown in Fig. 6a,
 (a) Observation area, A_0 , (b) Each cell, A_{v1} , (c) Each cell, A_{v2} , (d) Each cell, A_{v3} , and (e) Each cell, A_r .

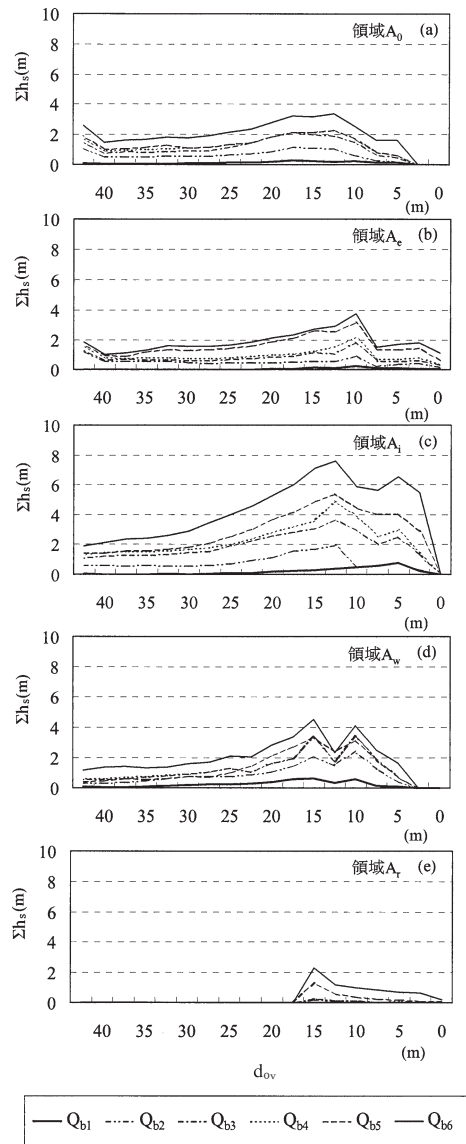


図 13 図 12 に同じ
 (除く図 6b, O_p 軸).

Fig. 13. Same as Fig. 12 except each cells shown in Fig. 6b.
 (a) Observation area, A_0 , (b) Each cell, A_e , (c) Each cell, A_i , (d) Each cell, A_w , (e) Each cell, A_r .

図 12 は、図 6b に示した O_p 軸から主風向と直角に 2.5 m 単位の座標をとり、その間に堆積した累積平均積雪深 Σh_s を、観測全領域 A_0 及び図 6a で分割した A_{v1} , A_{v2} , A_{v3} ごとに計算して示したものである。図 12e は屋根上 (A_r) の累積平均積雪深である。無次元化した累積積算吹雪輸送量 ΣQ_b をパラメーターとして平均積雪深の増加が時間を追って読み取れるように表示してある。図中の記号 Q_{b1} - Q_{b6} は、表 2 に示す $\Sigma Q_b / \Sigma Q_{bmax}$ の時の累積平均積雪深を表す。

図 12a より O_p 軸を中心として ± 5 m の範囲に吹きだまりが集中していること、観測期間の前半でほぼ吹きだまりの形が決まっていること等が確かめられる。最大級のブリザード 24 号による吹きだまりの増分は A_{v2} 領域が最も多く (図 12c)、風下 A_{v3} 領域でも吹きだまり尾根の成長が著しいことが分かる (図 12d)。また屋根上積雪はそのほとんどが吹雪流によって吹き払われるので、建物が吹きだまりに埋没しない限り、急に増えることはない (図 12e)。

図 13 は、図 6a の O_v 軸から風下へ、主風向方向に 2.5 m 単位の座標をとり、その間に堆積した平均積雪深 h_s を、観測全領域 A_0 及び図 6b で分割した A_e , A_i , A_w と屋根面積 A_r ごとに積分した値として示したものである。図 12 と同様に無次元化した累積積算吹雪輸送量 ΣQ_b をパラメーターとしている。全体として A_i 域の吹きだまり量が大きく、24 号ブリザードによる吹きだまり増分も A_i 域が卓越している。このときの A_w 域の増分は吹きだまり尾根の成長によるものである。

表 2 図 12 と図 13 の記号 Q_b
Table 2. Symbol Q_b of Fig. 12 and Fig. 13.

記号	$\Sigma Q_b / \Sigma Q_{bmax}$
Q_{b1}	0.09
Q_{b2}	0.27
Q_{b3}	0.38
Q_{b4}	0.53
Q_{b5}	0.67
Q_{b6}	1.00

4.2.4. 観測領域の飛雪粒子の捕捉率

図 5 に示す観測領域 A_0 に累積した吹きだまりを主風向と直角方向の単位幅当たりの累積吹きだまり質量 m_s ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) として次式により計算した。

$$m_s = \frac{\rho \cdot \Sigma V_{A_0}}{L}, \quad (9)$$

ここで、 ρ : 吹きだまりの密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)、 L : 観測領域 A_0 における主風向と直角方向の長さ (40 m) である。

10 号ブリザード来襲前の積雪状態を基準として、10 号ブリザードから 24 号ブリザード

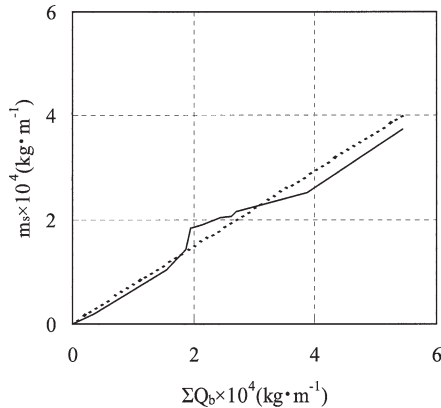


図 14 観測領域 A_0 の吹きだまり質量 m_s と累積積算吹雪輸送量 ΣQ_b の関係

Fig. 14. Relation between mass of snow drift, m_s in the observation area, A_0 and cumulative accumulated snow drift transport rate, ΣQ_b .

表 3 吹きだまりの密度 ρ
Table 3. Density of snow drift, ρ .

測定場所	測定高さ (m)	密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
a	0.5	3.94×10^2
	4.0	3.50×10^2
b	1.0	3.73×10^2
	1.5	3.60×10^2

までのブリザード継続時間 t_b に、図 5 に示す吹きだまり観測領域 A_0 に堆積した単位幅当たりの累積吹きだまり質量 m_s と、累積積算吹雪輸送量 ΣQ_b の関係を図 14 に示す。吹きだまりの密度 ρ は、表 3 に示す実測値の平均値を用いた。表 3 は図 8l (左図) の a, b の 2 地点について 10 月 2 日 (24 号ブリザード来襲後から 15 日後) に測定した結果で、表中の測定高さはその測定地点の地表面からの高さを示す。

図 14 の点線は m_s - ΣQ_b 関係の近似式であり、式 (10) により表される。式 (10) の傾きは観測領域 A_0 の雪粒子の捕捉率を表し、捕捉率は 74% となった。ただし、この観測領域は管理棟、発電棟があるため SPC を設置した場所よりも吹雪粒子が収斂する場所であること、式 (6) には降雪による雪粒子の鉛直フラックスと跳躍運動による吹雪フラックスが含まれていないことなどにより、今回計算した吹雪輸送量 Q_b (式 (8)) は実現象を過小評価したものとなっている。このため式 (10) の捕捉率は、実現象における捕捉率よりも高い値であると考えられる。

$$m_s = 0.74 \cdot \Sigma Q_b. \quad (10)$$

4.3. ブリザードの主風向変動が吹きだまりの形状に及ぼす影響

4.3.1. 昭和基地主要部の建物近傍で計測したブリザード中の風向風速

図 3 に示す高架通路 1 の支柱に取り付けた超音波風向風速計から得たデータを風上側風

向風速，同図の倉庫棟西側，非常階段から支柱を延ばして取り付けした超音波風向風速計より得たデータを風下側風向風速と呼ぶ。観測期間中，ブリザード基準に達した時の風向風速を1秒ごとに記録し，これらのデータから1分平均を求めた。飛雪粒子の影響で風向風速は断続的に欠測した。風上側の風速が $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ を超える吹雪についてはデータが得られなかった。計測できた最大平均風速は $27.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ である。風上風速に対する風下風速の低減率を ϕ として次式で定義した。

$$\phi = \frac{v_w - v_l}{v_w}, \tag{11}$$

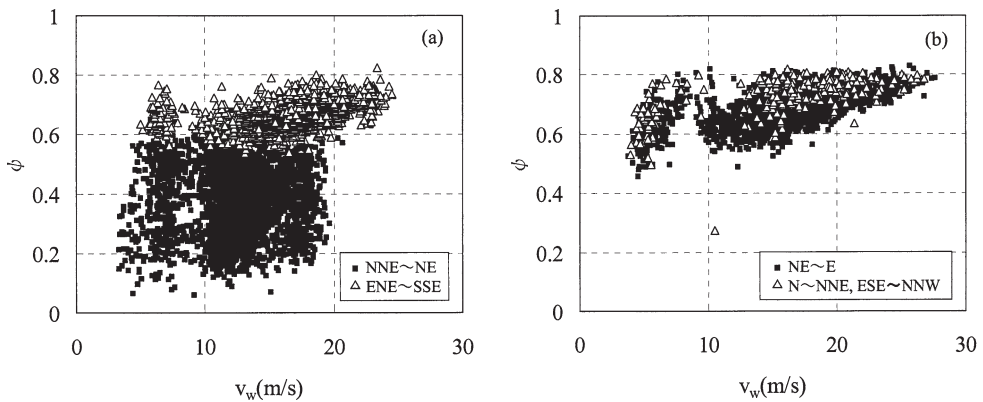


図 15 風上風速に対する風下風速の低減率 ϕ と風上風速 v_w の関係。
(a) 主風向: NE, (b) 主風向: ENE

Fig. 15. Relation between decrease rate of the leeward wind velocity to windward velocity, ϕ and windward velocity, v_w .
(a) Main wind: NE, (b) Main wind: ENE.

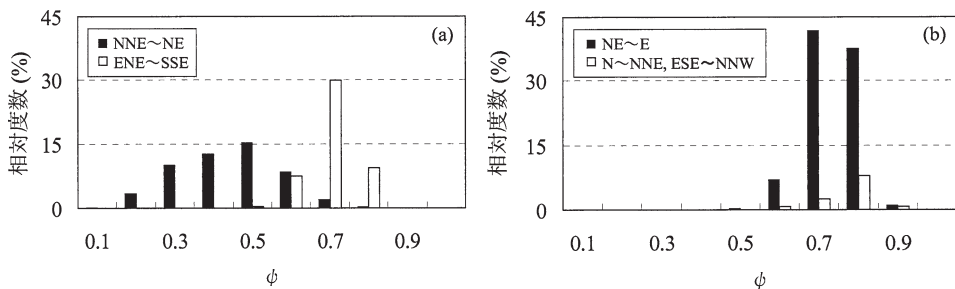


図 16 風上風速に対する風下風速の低減率 ϕ の頻度分布。
(a) 主風向: NE, (b) 主風向: ENE

Fig. 16. Frequency distribution of decrease rate of leeward wind velocity to windward velocity, ϕ ,
(a) Main wind: NE, (b) Main wind: ENE.

ここで w_w : 風上側風速 ($m \cdot s^{-1}$), v_i : 風下側風速 ($m \cdot s^{-1}$) である。

風向風速の観測記録をもとにして、式(11)の ϕ と風上風速 v_w の関係を、主風向をパラメーターとして整理したのが図 15 である。図 15a は主風向が NE の場合、図 15b は主風向が ENE の場合である。図中のプロットは風下側の風向によって分類表示した。すなわち図 15a の■は主風向が NE で、風下側の風向が NNE-NE の場合の ϕ - v_w 関係を、△は風下側の風向が ENE-SSE の場合の ϕ - v_w 関係を表す。これを ϕ に対する風下風向の頻度分布としてまとめたのが図 16 である。図 15a より、ブリザードの主風向が NE で、かつ風下側の風向もほとんど変わらない(NNE-NE)割合は全体のおよそ 53%、風下風向が風上風向 NE に対して大きく変わる (ENE-SSE) 場合は全体の 47%であった。風上風速が $20 m \cdot s^{-1}$ を超えると、風速低減率 ϕ の値の 99%が $0.6 < \phi \leq 0.8$ の範囲に分布する。風下風向が ENE-SSE の場合の 83%が $0.6 < \phi \leq 0.8$ の範囲にあり、これは $0.6 < \phi \leq 0.8$ に分布する ϕ の 95%に相当する量である。他方、風上風速が $20 m \cdot s^{-1}$ 以下の範囲では、風下風向が ENE-SSE の場合が全体の 55%であった。

主風向が NE の場合の、 ϕ に対する風向別頻度分布図 16a を見ると、風下風向が ENE-SSE の場合、 $0.6 < \phi \leq 0.7$ の範囲で出現頻度が最も高く (30%) になった。風下風向が NNE-NE の場合、 $0.4 < \phi \leq 0.5$ の範囲で出現頻度が最も高く (15%) なり、この出現頻度は広い範囲 ($0.2 < \phi \leq 0.7$) に分布した。

ブリザードの主風向が ENE の場合(図 15b)、風下側の風向が NE-E となる割合が、 ϕ の値の 88%を占めた。また $0.6 < \phi \leq 0.8$ の範囲に全データの 90%が集中した。図 16b より ϕ の出現頻度のピークは $\phi=0.7-0.8$ で現れていて、風向による差は少ない。

これまでに示した風向風速データの考察から次のよう結論が導かれる。ブリザードの主風向が NE の時は、風速が $20 m \cdot s^{-1}$ を超えると倉庫棟西側階段上空の屋根上で風向が乱れ、風下風速は風上風速に対して 60-80%減少する。ブリザードの主風向が ENE の時は、倉庫棟西側階段上空の風向は主風向から大幅に偏ることはないが、風速は風上側風速に比べて 60-80%減少する。これらの現象は、いずれも風上にある管理棟が吹雪流の障害となっているために現れたもので、両者ともに、主風向が NE で風速 $20 m \cdot s^{-1}$ 以下のブリザードのときより、建物風下側の吹きだまりが出来やすくなっているといえる。

4.3.2. 吹きだまり形状の比較

ブリザードの主風向が吹きだまりに及ぼす影響を調べるため、観測期間中に来襲したブリザードで最大風速の主風向が NE と ENE、2 種類のブリザード終息後に形成された吹きだまり形状を比較した。対象となるブリザード; 6号(主風向: NE)及び 8号(主風向: ENE)の気象記録の概要を表 4 に示す。これらのブリザードが来襲する前の地表面の状態は全く同じではないが、両者ともに除雪されており、倉庫棟と污水处理棟の風下側は平坦な状態であった。

表 4 風向の違いで比較したブリザードの概要
 Table 4. Outline of blizzard compared with difference for wind direction.

図17 写真 番号	番号	開始		終了		継続時間	階級	最大風速			積算吹雪 輸送量 $Q_b(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$						
		年	月	日	時			分	年	月		日	時	分	風速 (m/s)	風向	起時
a	B0206	2002	4	9	2	40	2002	4	11	5	0	32時間30分	A	28.7	NE	00:20(10)	5002.0
b	B0208	2002	4	29	12	40	2002	4	30	13	10	24時間30分	A	29.9	ENE	19:30(29)	5155.7

観測領域: 倉庫棟及び污水处理棟付近の吹きだまり測量結果を積雪深の等高線図と概況写真のセットで図 17a, b に示す. この吹きだまり断面を, 図 5 に示した A, B, C', D, E ライン断面図として図 18 に示す. 主風向が NE のブリザード 6 号終息後には, 污水处理棟南側コーナーから風下に延びた吹きだまりの尾根が, 倉庫棟南壁側に堆積した吹きだまりと合流して, 南西方向に向かって高さ 1-2 m の吹きだまりの尾根を形成した (図 17a).

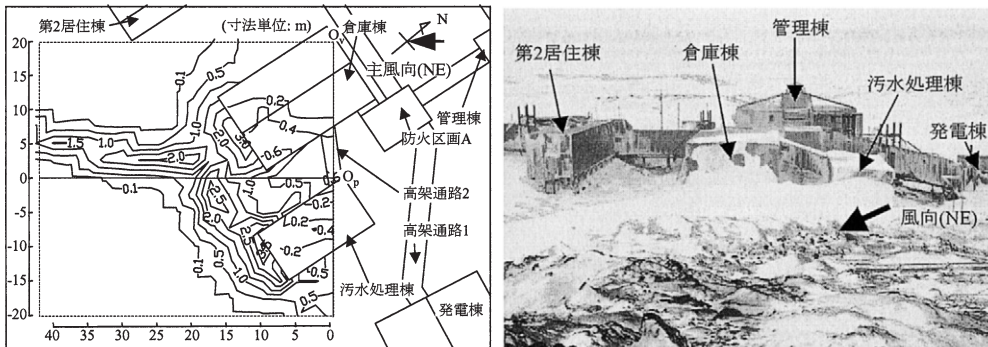


図 17a 主風向 NE のブリザード終息後における吹きだまりの等高線図 (左) と観測域の状況 (右)
 Fig. 17a. Configuration of snow drift after a blizzard from NE, contour map (left) and condition of the observation area (right).

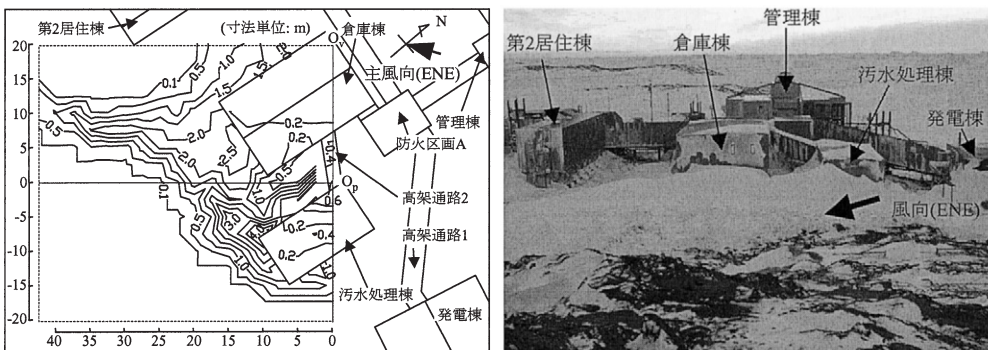


図 17b 図 17a に同じ (除く主風向 ENE)
 Fig. 17b. Same as Fig. 17a except ENE.

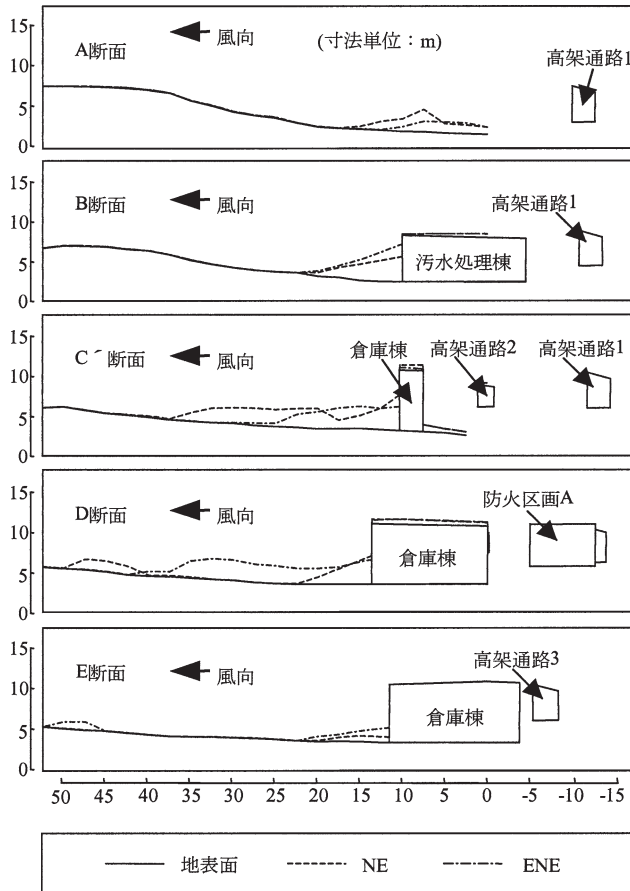


図 18 プリザードの風向別に比較した吹きだまり断面
 Fig. 18. Cross section of snow drifts for different blizzard wind directions.

主風向 ENE の 8 号プリザード終息後には、污水处理棟の南西側の角に約 4 m の堆積があり、これは図 17a よりも深い。そこから西南西に向かって吹きだまりが堆積し、倉庫棟南壁側に堆積した吹きだまりと合流して、西南西の方向に高さ 0.5-2 m の吹きだまり尾根を形成した(図 17b)。図 17a, b を比較すると、観測域の地形が南に向かう上り斜面であるという影響が吹きだまりの分布形に現れているが、吹きだまり尾根の伸展方向はほぼ主風向によって支配されると考えてよい。

吹きだまり断面(図 18)の A 断面からは、風上の高架通路 1 床下を吹き抜ける吹雪流による吹き払い効果で高架通路風下の吹きだまりは通路後方 10-25 m に堆積していること、建物風下側の吹きだまりは壁面に密着する形で残っており、剥離渦による吹き払い(あるいは削り取り)効果があまり見られないこと等の特徴が整理できる。

4.3.3. 主風向の異なる二つのブリザードによる積雪深の比較

観測領域の平均積雪深 h_s と積算吹雪輸送量 Q_b の関係を図 19 に示す。縦軸 h_s と横軸 Q_b

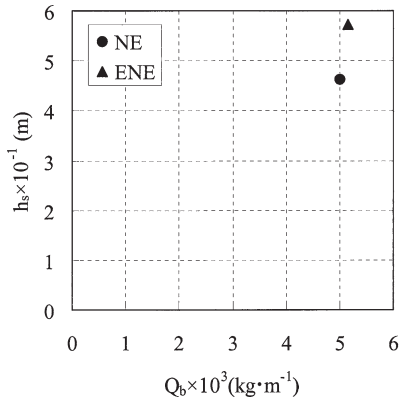


図 19 ブリザードの風向別に比較した観測領域 A_0 の平均積雪深 h_s と積算吹雪輸送量 Q_b の関係
 Fig. 19. Relation between average thickness of snow cover, h_s in the observation area A_0 and accumulated snow drift transport rate, Q_b , for each blizzard wind direction.

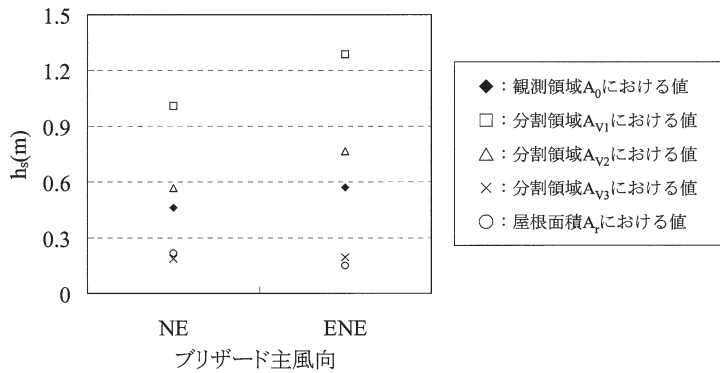


図 20a ブリザードの風向別に比較した図 6a の分割領域内における平均積雪深 h_s
 Fig. 20a. Average thickness of snow cover, h_s in each cell shown in Fig. 6a, for each blizzard wind direction.

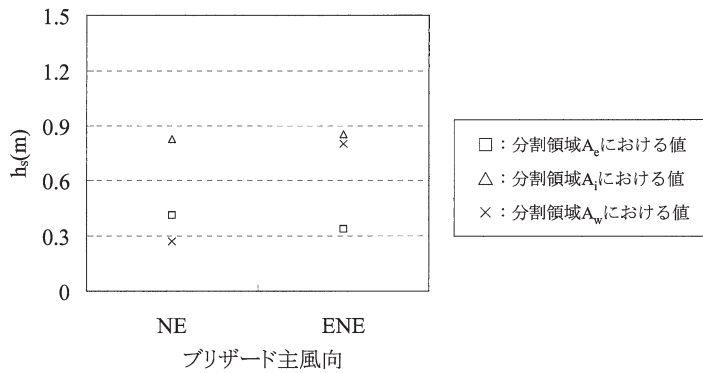


図 20b 図 20a に同じ (除く図 6b の分割領域)
 Fig. 20b. Same as Fig. 20a except in each cell shown in Fig. 6b.

は、それぞれ6号ブリザード（主風向: NE）と8号ブリザード（主風向: ENE）によって発生した観測領域 A_0 の平均積雪深と積算吹雪輸送量である。積算吹雪輸送量 Q_b 、平均積雪深 h_s 共に8号ブリザードの方が多かった。 h_s - Q_b 関係を線形近似したときの傾きも8号ブリザードの方が大きく、8号ブリザードの方が吹きだまりが発生しやすいと言える。

図20は、図11で整理したのと同様に観測域を図6のように分割して、それぞれの分割

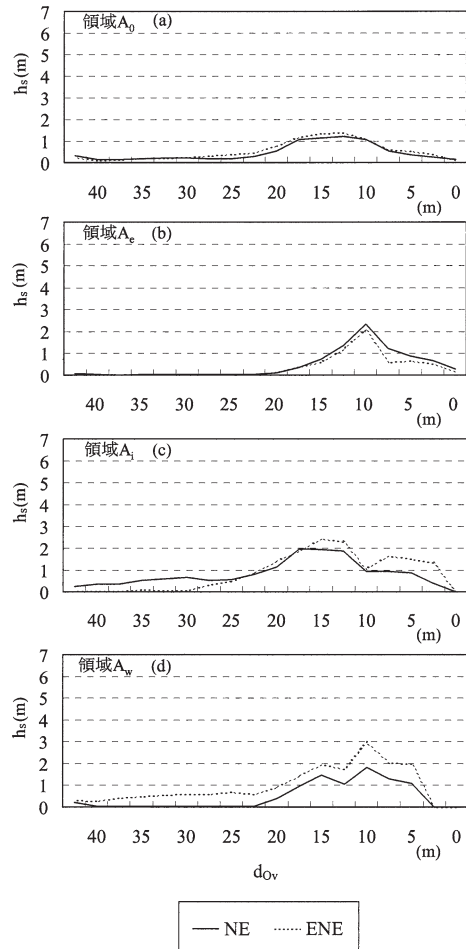
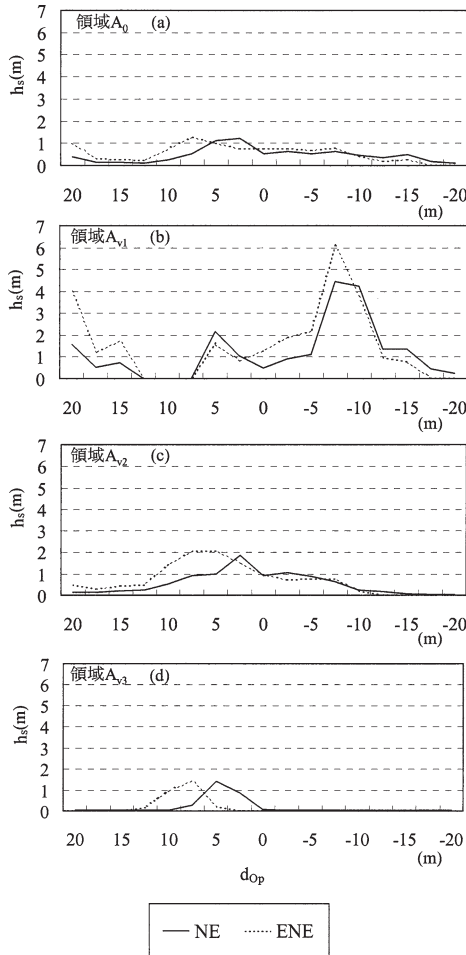


図21 ブリザードの風向別に比較した各観測領域（図6a）における平均積雪深 h_s の O_v 軸方向の分布。
(a)-(d)は図12に同じ

Fig. 21. Distribution of average thickness of snow cover, h_s at each cells shown in Fig. 6a, for each blizzard wind direction. Same as (a)-(d) in Fig. 12.

図22 図21に同じ
(除く図6b, O_p 軸).
(a)-(d)は図13に同じ

Fig. 22. Same as Fig. 21 except each cells shown in Fig. 6. Same as (a)-(d) in Fig. 13.

領域における平均積雪深 h_s を主風向別に示したものである。

卓越風向と平行に分割した領域のうち A_e , A_i に堆積する平均積雪深は 6 号ブリザードと 8 号ブリザードでほぼ同じであったが、倉庫棟南西側 (領域 A_w) の平均積雪深は 8 号ブリザードで多くなった (図 20b)。これは風下吹きだまり尾根の伸展方向がわずかに逸れたためである。卓越風向に直交する 3 領域に関しては、風上側 2 領域 A_{v1} , A_{v2} に溜まる雪の量は 8 号ブリザードの方が多くなっている (図 20a)。屋根雪は 6 号ブリザードの場合がわずかに多かった。

図 21, 22 は図 12, 13 と同様に各分割領域の平均積雪深 h_s の分布を整理したものである。図 21 では、図 6b の O_p 軸 (卓越風向) に平行な 2.5 m 幅の帯状領域を定義し、これを卓越風向に 3 分割した平均積雪深 h_s を示した。この帯状領域に分布する全平均積雪深 (図 21a) とほぼ同じ形の堆積分布が図 21c に見られる。図 22 では、図 6a の O_v 軸に平行な 2.5 m 幅の帯状領域を定義し、さらにこれを O_v 軸に直交する 3 領域に分割した平均積雪深 h_s を示した。ここでもピーク位置を含めた積雪深の分布形を代表するのは領域 A_i の堆積 (図 22c) で、図 22a の全積雪深の風向方向分布とほぼ相似である。

5. 吹雪風洞模型実験

5.1. 実験の概要

昭和基地主要部の吹きだまりを実験室内で再現し、その発生と成長過程を観察する目的で人工吹雪風洞実験を行った (荒井ら, 2003; 遠藤ら, 2002, 2003a, b; 大久保ら, 2002a, b)。実験には防災科学技術研究所長岡雪氷防災研究所新庄支所の低温風洞装置 (図 23) を用いた。風洞内気温は -15°C 、風速は $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ とし、風洞上流にある雪供給装置から $3.14 \times 10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ の人工雪を供給して、人工的に地吹雪状態を再現した。風洞内気温は昭和基地の 5 月～10 月の平均気温 -16.3°C を参考に設定した。風速は、風洞上流から人工雪を定常的に供給する中で、安定した地吹雪層が保持できる最小風速として経験的に決められた値を用いた。

風洞模型の製作にあたっては、昭和基地での吹きだまり観測領域; 管理棟後流域をカバー

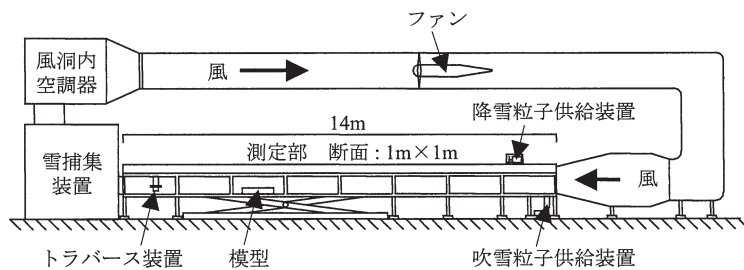


図 23 低温風洞実験装置

Fig. 23. Low temperature wind tunnel test device.

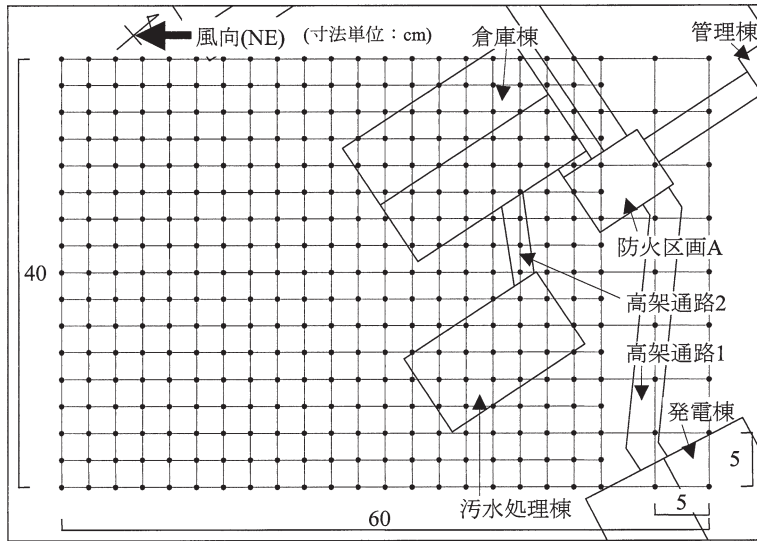


図 24 吹きだまり計測地点

Fig. 24. Points at which snow deposition on the test model was measured.

する昭和基地主要部の建物群及び地形を縮尺 1/100 でモデル化した。模型で再現した領域は主風向 (NE) に 135 m, それと直角方向に 75 m の範囲である。風洞床と地形模型の境界で段差が生ずる場所には、吹雪流の剥離が生じないように傾斜面を付加した。

風洞での吹雪継続時間は 60 分で、20 分ごとに図 24 に示す地形図平面上の計測点、計 375 点で、レーザー距離計により吹きだまり厚さを測定した。

5.2. 風洞実験に使用した人工雪の性状

風洞実験に用いた人工雪は冷凍保管した天然雪を原料としたもので、雪供給装置を経て風洞内に供給されるまでにほぼ均質に加工され、平均粒径がおおよそ 0.3 mm の球形粒子となっている (図 25)。他方、南極で観測される雪の平均粒径は約 $139 \mu (=0.139 \text{ mm})$ だが、粒径のばらつきは大きい。SPC を用いて 2002 年 4 月 29 日～9 月 14 日に昭和基地で観測した、地上高度 0.5 m の吹雪粒径分布を図 26 に示す。風洞実験に用いた人工雪は南極の雪よりも粒径が大きく球形に近いので、実現象と比べて障害物 (建物) に衝突しても着雪しにくく、かつ転動距離も長いことが予想された。

5.3. 吹きだまりに関する実現象と模型実験の相似性について

風洞模型実験では常に相似則が課題である。地吹雪による雪粒子輸送は大部分が浮遊層で行われ、建物近傍等の弱風帯に流れ込んだ雪粒子が落下して跳躍層に混入し、静止して

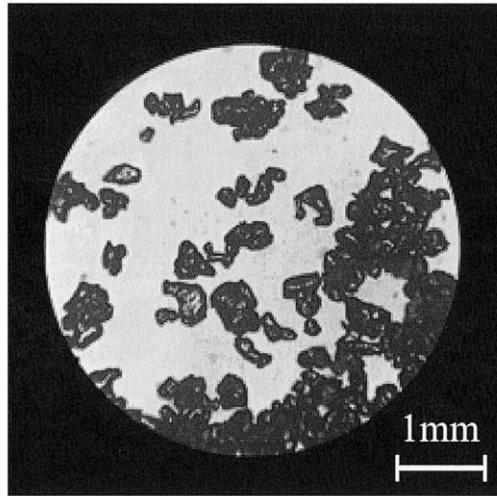


図 25 風洞実験に用いた人工雪

Fig. 25. Artificial snow used for the wind tunnel test.

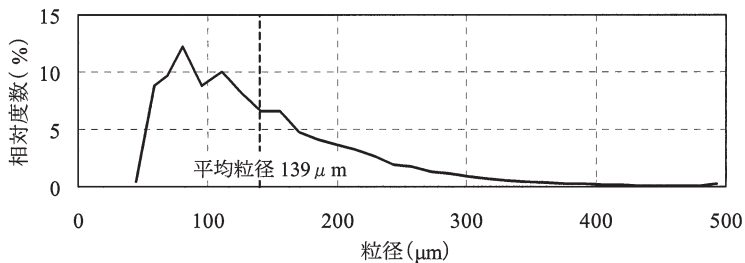


図 26 南極昭和基地で観測された飛雪粒子の粒径分布

Fig. 26. Distribution of particle size of blowing snow observed at Syowa Station, Antarctica.

堆積すると考えられる(竹内, 1996, 2000)。この自然現象を風洞模型実験で近似するには相似則の検討が必要不可欠である。これまで、人工吹雪風洞実験の相似則に関して様々な研究(例えば Tabler, 1980; Kind, 1986)がなされてきたが、現状ではすべての相似則を満足する風洞実験はほとんど不可能である(佐藤, 2003; 三橋, 2003)。

本実験では安濃の提唱した相似則(Anno, 1984, 1985)を用いて吹雪風洞実験の再現性について検討を行った。安濃は、地吹雪による構造物周囲の吹きだまりに関する模型と原型の相似パラメーターとして、風速比と吹雪継続時間比を挙げている。

風速比に関しては、重力と慣性力の比である Froude 数から導かれる実風速 U_p と模型風速 U_m の比: $U_p/U_m = (L_p/L_m)^{1/2}$ よりも、地表雪粒子の運動を支配する限界摩擦速度を原型: U_{*p} 、模型: U_{*m} としてこの摩擦速度比 U_{*p}/U_{*m} を、原型と模型とで幾何学的に対応する位置の摩擦速度比 U_{*pz}/U_{*mz} に一致させるのがよいとしている。

$$U^*_{p}/U^*_{m}=U^*_{pz}/U^*_{mz}, \quad (12)$$

実験の雪粒子はほぼ球形で平均直径がおよそ 0.3 mm, かつ均質なので南極の雪に比べて限界摩擦速度は小さいと思われる。実験は一様流のもとで行っているので $U^*_{pz}/U^*_{mz} > 1$ となっているはずである。また、安濃は U^*_{pz}/U^*_{mz} の値として経験的に 2.46 という値を導いている (Anno, 1984)。これらを考慮すると実風速への換算係数は 2-2.5 程度の数値となると推測される。即ち実験風速 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ はおよそ実風速 $12\text{-}15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ と対応することになる。昭和基地での吹きだまり観測期間中 (2002 年 2 月~11 月) に発生したブリザードの平均風速は約 $16.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ であるので、風速比に関しては、実験風速 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ はほぼ妥当な値と考えてよいだろう。

時間比については、Froude 数から導かれる $T_p/T_m=(L_p/L_m)^{1/2}$ の代わりに、安濃は次式を提案している。

$$T_p/T_m=(L_p/L_m)^2 \cdot (Q_m \eta_m \rho_p)/(Q_p \eta_p \rho_m), \quad (13)$$

ここで、 T : 吹雪継続時間, Q : 平均的吹雪移動量, η : 雪粒子補足率, ρ : 雪粒子密度, L : 代表長さ, 添え字 p, m はそれぞれ実現象及びモデルを表す。

実測と実験の観測領域 A_0 における捕捉率の結果から $\eta_m/\eta_p \doteq 1/6$, 実測と実験で雪粒子の密度はほぼ同じであるから $\rho_p/\rho_m \doteq 1/1$ となる。 Q は風速の 3 乗に比例するからブリザードの平均風速を $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ として, $Q_m/Q_p \doteq 1/20$ 程度の数値となる。従って $(L_p/L_m)^2 = 10,000$, $(Q_m \eta_m \rho_p)/(Q_p \eta_p \rho_m) \doteq 1/120$ として T_p/T_m のオーダーは 80 程度となる。即ち実験 1 時間がおおよそ実時間 80 時間に対応することになる。

この他の相似条件として、雪粒子模型については粒径が構造物の縮尺に近いこと、粒子が凝集しないこと、粒子の付着力の幅が広いこと等を要請しているが、本実験の場合、雪粒子の平均径は原寸の 2 倍程度だが建物模型は 1/100 モデルであり、粒径に関する寸法縮尺率がすでに相似条件を満たさない。雪粒子の付着力も実物の方が大きいと考えられる。また Froude 数から考えても風洞実験の結果には慣性力の影響が大きく現れていることが予想できる。

5.4. 風洞実験における吹きだまりの形状と平均積雪深の比較

実験時間 20, 40, 60 分後の吹きだまり形状の等高線図とその状況を図 27a-c に示す。図 27 の吹きだまり形状を、図 5 の A-E 断面として示したのが図 28 である。また、この断面図には、昭和基地で 24 号ブリザード終息後に観測された吹きだまり断面も合わせて示した。昭和基地の吹きだまり測量結果; 図 8k, l と比べると風洞実験結果は吹きだまりの堆積領域が狭い。人工雪粒子が球形で均質なため障害物や地表面に衝突しても着雪しにくく、慣性項による跳躍・転動距離が長いためと考えられる。図 28, C 断面の通路後流域におけ

る堆積形に後流渦の影響が直接的に現れていることからこの人工雪の特徴が伺える。このように風洞実験の吹きだまり形状は実測に比べると細部で多少の誤差が認められるが、全体としては昭和基地の吹きだまりの特徴をよく現している。管理棟東側で北寄りに風向を矯正された吹雪流がさらに高架通路で流れを妨害されると、倉庫棟と汚水処理棟の間に生じた弱風帯に集中して堆積し始めることが風洞実験でも観察できた。吹きだまりピーク

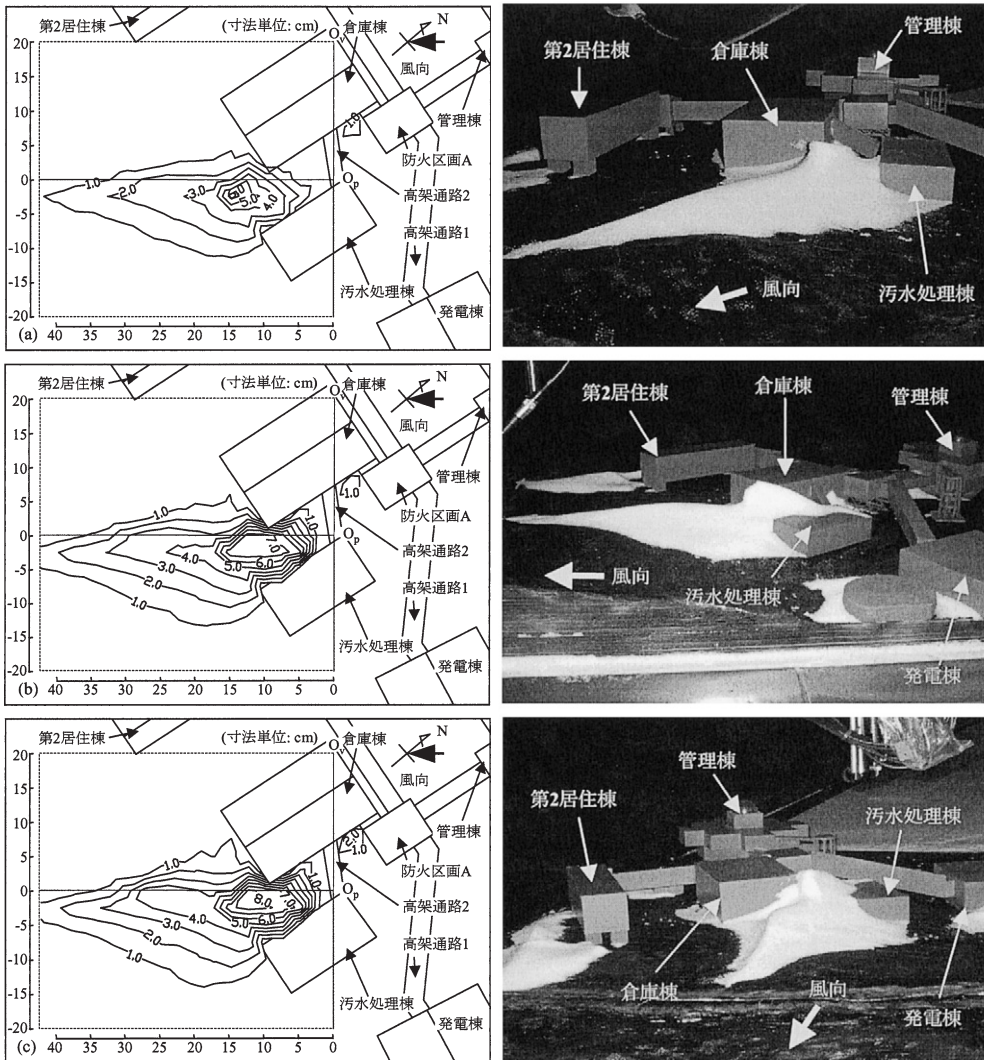


図 27 風洞実験時間 (a) 20 分後, (b) 40 分後, (c) 60 分後の吹きだまり深さの等高線図 (左図) と測定領域の状況 (右図)

Fig. 27. Configuration of snow drift after 20 min (a), 40 min (b), 60 min (c), in the wind tunnel test, contour map (left panel) and visual condition of the measurement area (right panel).

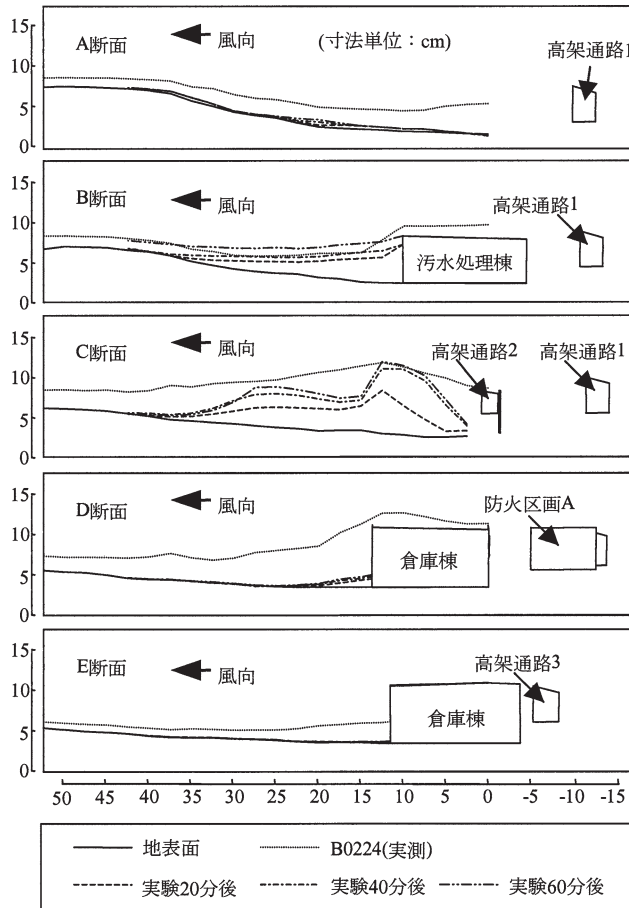


図 28 南極実測と比較した風洞実験の吹きだまり断面

Fig. 28. Snow drift cross section of the wind tunnel test compared with observation in Antarctica.

位置はほぼ実測と同じであり、吹きだまりが成長するにつれて主風向に沿った明確な稜線を形成するところも実測と相似である。風洞実験では吹きだまりの堆積形によって吹雪流の流れ場が変わると、渦の勢力が強い場所で吹きだまりが削られて堆積形が変わるといったダイナミックな現象も観察された。

昭和基地の吹きだまりを整理した図 12 と同様に、図 5 に示した吹きだまり観測領域 A_0 を主風方向に幅 2.5 m に分割し、それぞれの分割領域における累積平均積雪深 $\sum h_s$ を示したのが図 29 である。昭和基地データは 24 号ブリザード終息後の領域 A_0 における累積平均積雪深 $\sum h_s$ 、風洞実験データは実験終了時の領域 A_0 における累積平均積雪深 $\sum h_s$ である。風洞実験データは昭和基地データと比較するため、254 (昭和基地実測の領域 A_0 における累積平均積雪深 $\sum h_s$ /風洞実験の領域 A_0 における累積平均積雪深 $\sum h_s$) 倍した。横軸

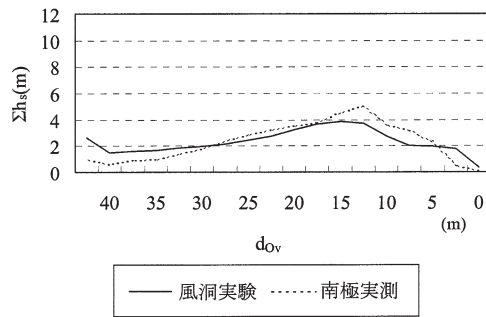
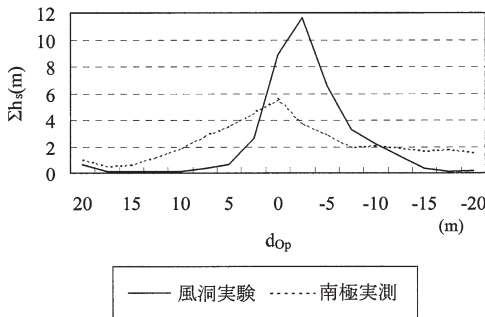


図 29 風洞実験と南極実測を比較した観測領域 A_0 における累積平均積雪深 Σh_s の O_v 軸方向の分布

図 30 図 29 と同じ (除く O_p 軸)
Fig. 30. Same as Fig. 29.

Fig. 29. Distribution of cumulative average thickness of snow cover, Σh_s in the observation area, A_0 , comparison of the wind tunnel test and observation in Antarctica.

は図 6b の O_p 軸を原点とした距離である。風洞実験の方が、吹きだまり堆積領域が狭く、風向に対する横断面の堆積形の特徴を強調しているように見える。ピーク位置、分布形ともに実測の特徴をよく表している。

図 30 は、昭和基地の吹きだまりに関する図 13 に対応するもので、領域 A_0 を主風向と直角に幅 2.5m に分割し、それぞれの分割領域における累積平均積雪深 Σh_s を表したものである。図 29 と同様に、昭和基地データは 24 号ブリザード終息後の累積平均積雪深 Σh_s 、実験データは実験終了時の累積平均積雪深 Σh_s である。風洞実験データは実測データと比較するため 254 倍した。横軸は図 6a の O_v 軸を原点とする距離を表す。主風方向の累積平均積雪深の分布は実測と風洞実験の傾向がよく合っており、風洞実験の値が堆積形の特徴を強調しているのは図 29 と共通した傾向である。

風洞実験における積雪深の増加傾向を図 31 に示す。横軸は累積積算吹雪輸送量 ΣQ_b を無次元化した数値である。実験では吹雪フラックスが一定だから横軸は無次元化時間に等しい。縦軸は累積平均積雪深 Σh_s である。図中に示した実測データは、図 11 から転記したものである。風洞実験データは実測データと比較するため 254 倍した。図 31a は主風向方向に 3 区分したそれぞれの領域 (図 6a) の堆積傾向を示したもので、いずれも平衡状態に収束するような傾向が見られる。先に述べたように一度堆積した人工雪が吹雪流によって容易に矯正されて形状変化するので、換言すれば吹きだまり形状が流れ場に支配される傾向が強いことが原因と考えられる。これは昭和基地の実測では見られなかった傾向である。風向、風速の変動、飛雪粒子の物性の違いから一度堆積した雪を削り取るには風洞実験の場合よりも大きな風のエネルギーを必要とすること等、自然現象の複雑さが風洞実験結果

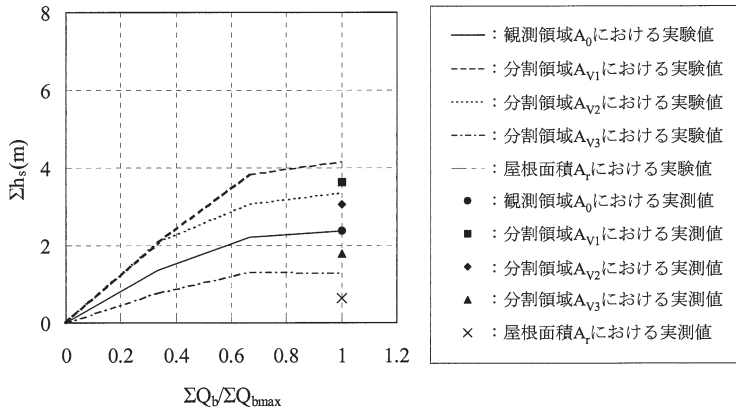


図 31a 風洞実験と南極実測を比較した図 6a の分割領域内における累積平均積雪深 Σh_s と累積積算吹雪輸送量 ΣQ_b の関係

Fig. 31a. Relation between cumulative average thickness of snow cover, Σh_s in each cell shown in Fig. 6a and cumulative accumulated snow drift transport rate, ΣQ_b ; comparison of the wind tunnel test and observation in Antarctica.

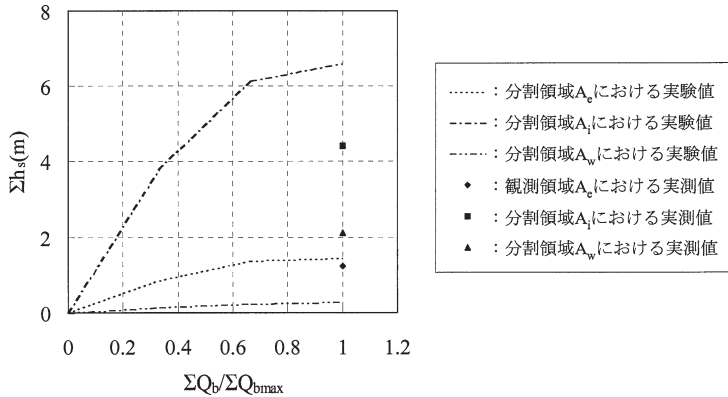


図 31b 図 31a に同じ (除く図 6b の分割領域)

Fig. 31b. Same as Fig. 31a except in each cell shown in Fig. 6b.

の示した特徴を相殺しているものと思われる。実験で得られた各領域の平均積雪深の相対的な関係は実測の傾向とほぼ等しい。これは図 30 から予測できる性質である。図 31b は主風向と直角に分割した 3 領域 (図 6b) における累積平均積雪深の増加傾向を示したもので、図 31a と同様に収束傾向が認められる。これは図 29 で示した堆積傾向の特徴を、吹雪継続時間の関数として表現したものである。各領域の積雪深の相対的な傾向と図 11b から転記した実測値との対応は図 31a の場合ほどよくない。この原因は、図 29 から明らかなように、吹きだまり形が鋭い山となって裾野の広がり方が実物よりも少ないためである。

6. ま と め

南極昭和基地主要部の吹きだまり観測の結果は次のようにまとめられる。

基地主要部風上の管理棟によって平面的に二手に分かれた吹雪流のうちで、管理棟東側の流線が倉庫棟、汚水処理棟に向かい、管理棟を越えた吹雪流の流線と倉庫棟風下後方の斜面で合流する。他方、管理棟西側に分かれた吹雪流は第1、第2居住棟方向に向かうが、この区域では流れの方向に建物が近接して建つことはないので、建物が雪に埋没するほど吹きだまりが成長することはなかった(図32)。問題は管理棟東側に分かれた吹雪流が通路及び建物によって二重三重に遮られたことである。倉庫棟、汚水処理棟風下域に設定した観測領域の吹きだまりは、観測期間中、吹雪輸送量に比例して積雪深が増えた。倉庫棟南側壁面の東寄りの地点で吹きだまりピークが形成されることが多く、そこから主風向に沿って吹きだまりの尾根が形成された。観測された吹きだまりピークの高さは最大で約8.6mであった。これはほぼ建物高さに等しい。これに伴って倉庫棟、汚水処理棟の屋根上に堆積した吹きだまりは最大で1.6mに達したところもあった。しかもこの屋根雪は偏分布荷重なので構造体への影響が無視できない。

倉庫棟西側の外階段付近では主風向が東北東の場合に吹きだまりが付きやすく、北東の風でブリザードの勢力が弱い場合は吹きだまりが出来にくい。この倉庫棟と第2居住棟間はずもとと管理棟後流域の弱風帯だが、流れ込む雪の量が少ないものと考えられる。

ブリザードの主風向が北東の場合、汚水処理棟風下側の吹きだまりは建物南側壁面から

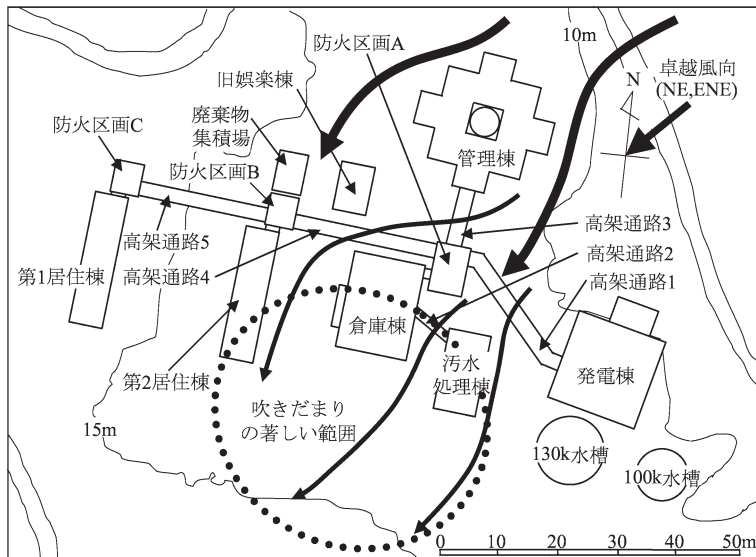


図32 昭和基地主要部周辺の風の流れ

Fig. 32. Flow of wind around the main building at Syowa Station.

主風向に沿って長く伸びたが、ブリザードの主風向が東北東の場合は、その位置が変わって、建物南西側の角から西側壁面にかけて吹きだまりが形成され、主風向が北東の場合よりも第2居住棟寄りに吹きだまりの尾根が伸びた。

南極昭和基地での吹きだまり実測結果を再現する目的で行った吹雪風洞実験はおおむね成功したといってよいだろう。この吹雪風洞実験により、近接配置された建物風下側の吹きだまりはほぼ予測することが出来る。ただし昭和基地の実測に見られるように、主風向、ブリザード継続時間（吹雪輸送量）の変動が吹きだまり形及び吹きだまり量に鋭敏に影響するので、可能性の高い条件下での数種類の風洞実験を総合して予測・評価するのが望ましい。本実験では相似則の検討がまだ不十分だったこと、人工雪の幾何学的特長、物性が南極の雪と大きく違ったことなどから細部には実測との相違点が見られたが、これらは実験の精度を上げることで改善の余地が残されている。

謝 辞

南極での吹きだまり観測にあたっては、観測域の吹きだまりの除雪に規制をかけるなど、第43次観測隊の皆様には越冬生活の快適さを犠牲にご協力いただいた。また測量作業の補助、観測機器の設置などでは多くの隊員の方々にご支援いただいた。また、南極から持ち帰った観測データをまとめる際には、日本大学理工学部建築学科半貫研究室の大学院生、学部生に卒業研究の一環としてデータ整理をお願いした。特に風洞実験では実験準備から実験データの整理までの一連の作業にご協力いただいた。この紙面を借りてお礼申し上げる。

文 献

- Anno, Y. (1984): Requirement for modeling of a snowdrift. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **8**, 241-252.
 Anno, Y. (1985): Supplement to Anno's modeling conditions for a snowdrift. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **10**, 193-195.
 荒井恵太・遠藤悠介・半貫敏夫・阿部 修・高橋弘樹・鮎川 勝 (2003): 南極昭和基地建物の風下側に発生するスノウドリフトとその低減対策に関する風洞実験(1)。第20回日本雪工学会大会論文報告集, 日本雪工学会誌, **19**, 105-106.
 遠藤悠介・阿部 修・半貫敏夫・大久保紀彦・鮎川 勝・高橋弘樹 (2002): 昭和基地管理棟後流域にある建物周辺のスノウドリフトに関する人工吹雪風洞実験(1)。第19回日本雪工学会大会論文報告集, 日本雪工学会誌, **18**, 9-10.
 遠藤悠介・荒井恵太・半貫敏夫・阿部 修・高橋弘樹・鮎川 勝 (2003a): 南極昭和基地建物の風下側に発生するスノウドリフトとその低減対策に関する風洞実験(2)。第20回日本雪工学会大会論文報告集, 日本雪工学会誌, **19**, 107-108.
 遠藤悠介・荒井恵太・半貫敏夫・高橋弘樹・鮎川 勝・阿部 修 (2003b): 南極昭和基地主要部建物風下側のスノウドリフトとその軽減策に関する風洞実験。寒地技術論文・報告集, **19**, 9-16.
 川口貞男 (1988): 低気圧。南極の科学3 気象。初版。国立極地研究所編。東京, 古今書院, 109-119.
 Kind, R.J. (1986): Snowdrifting: a review of modelling methods. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **12**, 217-228.
 木津暢彦・金濱 晋・鎌田浩嗣・上野圭介・長井勝栄 (2003): 地上気象観測。日本南極地域観測

- 隊第 43 次隊報告 (2001~2003). 東京, 国立極地研究所, 234-242.
- 小林俊一 (1988): 地吹雪. 南極の科学 3 気象. 初版. 国立極地研究所編. 東京, 古今書院, 82-97.
- 小林俊一・前野紀一 (2000): 吹雪の構造と発生機構. 基礎雪氷学講座・雪崩と吹雪. 初版. 東京, 古今書院, 121-154.
- 国立極地研究所 (2002): 南極環境保護関係法令集—2002 年—. 東京, 国立極地研究所, 209 p.
- 国立極地研究所 (2003): 基地要覧. 2003 年 (第 15 版). 東京, 国立極地研究所, 6.
- 三橋博巳 (2003): 建築物の雪の吹きだまりと吹雪風洞実験. 雪氷, **65**, 287-295.
- 大久保紀彦・阿部 修・半貫敏夫・遠藤悠介・鮎川 勝・高橋弘樹 (2002a): 昭和基地管理棟後流域にある建物周辺のスノードリフトに関する人工吹雪風洞実験(2). 第 19 回日本雪工学会大会論文報告集, 日本雪工学会誌, **18**, 11-12.
- 大久保紀彦・遠藤悠介・半貫敏夫・鮎川 勝・高橋弘樹・阿部 修 (2002b): 南極昭和基地居住区のスノードリフト対策に関する風洞実験. 寒地技術論文・報告集, **18**, 118-125.
- 佐藤 威 (2003): 吹雪の風洞実験について. 雪氷, **65**, 279-285.
- Sato, T., Kimura, T., Ishimaru, T. and Maruyama, T. (1993): Field test of a new snow-particle counter (SPC) system. Ann. Glaciol., **18**, 149-154.
- Tabler, R.D. (1980): Self-similarity of wind profiles in blowing snow allows outdoor modeling. J. Glaciol., **26**, 421-434.
- 高橋弘樹 (2003): 昭和基地における飛雪量の定点観測と管理棟風下領域のスノードリフト量の関係について. 第 26 回極域気水圏シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 125-126.
- 高橋弘樹・半貫敏夫・鮎川 勝 (2003a): 南極昭和基地主要部のスノードリフト観測. 寒地技術論文・報告集, **19**, 1-8.
- 高橋弘樹・半貫敏夫・鮎川 勝 (2003b): 昭和基地主要部のスノードリフト観測. 2003 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 136.
- 高橋弘樹・鮎川 勝・半貫敏夫 (2003c): 南極昭和基地主要部のスノードリフト観測. 第 20 回日本雪工学会大会論文報告集, 日本雪工学会誌, **19**, 103-104.
- 竹内政夫 (1996): 吹雪とその対策(1)—吹雪のしくみ—. 雪氷, **58**, 161-168.
- 竹内政夫 (2000): 吹雪とその対策(3)—吹き溜まりの発生機構と形—. 雪氷, **62**, 41-48.
- 竹内清秀・近藤純正 (1981): 雪氷面の境界層. 大気科学講座 I 地表に近い大気. 初版, 東京. 東京大学出版会, 156-165.