

リュツォ・ホルム湾域を中心とした沿岸露岩・
大陸氷床・海水表面形態の航空機
調査報告 1996-1998 (JARE-38)

金尾政紀・山内 恭*

Airborne surveys of surface topographic condition over the coastal ice-free areas, continental ice sheet and sea-ice around the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica in 1996-1998 by JARE-38

Masaki Kanao and Takashi Yamanouchi*

Abstract: Preliminary airborne surveys for geoscientific and glaciological purposes were carried out by an aircraft (Cessna A185F) during the wintering season of the 38th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-38) in 1996-1998. First, several flights were conducted to investigate the relationship between snow-covered area and geological structure/topography on some outcrop surfaces along the Sôya Coast and in the Prins Olav Coast region. Second, inland flights on the continental ice sheet were carried out to survey the surface conditions of bared blue ice and moraine areas on the Mizuho Plateau, about 50 km eastward of the H-route. Then future prospects for geophysical and glaciological research were investigated. Moreover, feasibility surveys to determine the proper position of the airfield in the vicinity of Syowa Station were carried out in order to establish snow-ice runways for large aircraft for JARE in future. The recommended positions are located 1) near S16 and 2) eastward of the Langhovde region, where surface altitudes on the continental ice sheet are around 500 m. In addition, surveys were carried out to detect changes of sea-ice distribution during the winter and to locate snow-vehicle routes in Lützow-Holm Bay. Fifteen flights with a total of 43h55m flight hours were made for the present purpose in the whole season of JARE-38. Moreover, the surveys around the Amundsen Bay region were carried out using "Sikorsky S61A" helicopters of the icebreaker "Shirase" to decide future locations of seismic experiment lines for the "SEAL" project, along with the environmental assessments for the region.

要旨: 第38次日本南極地域観測隊(以下JARE-38と略す)の越冬期間中において、地学研究部門を中心に固定翼航空機(セスナ式A185型)を用いた種々の地学・雪氷学的な予察調査・偵察飛行を実施した。主なフライトとしては、リュツォ・ホルム湾地域の積雪、氷状の季節変化を調べるための沿岸露岩域の空撮を行い、表層地形・地質構造との相関を調べることで、越冬期間における地上での現地調査のための基礎資料とした。また、大陸氷床上みずほHルート東側にある裸氷帯およびモレーンの調査を実施し、将来の地学・雪氷探査のための基礎資

*国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

料の収集を行った。さらに、昭和基地周辺の大陸氷床上において、JARE における将来の大型航空機導入のための滑走路候補地の調査も行った。他に氷状偵察等を含め、関連の JARE-38 越冬期間中のフライトは、計 15 回、43 時間 55 分に達した。さらに、往復路のアムンゼン湾調査では、「しらせ」搭載のヘリコプター（シコルスキー S-61A 型）を用いて、主に湾周辺の雪氷環境を調べ、将来の人工地震探査の測線の候補地を選んだ。これらのフライトにより、地震探査や大型航空機の導入など、観測・設営の両面において、今後の南極観測における貴重な資料が得られた。

1. はじめに

第 38 次日本南極地域観測隊（以下 JARE-38 と略す）は、南極観測における第 V 期 5 年計画の初年度に当たり、地学系に関連するすべての地球物理学的諸観測が再分類され、新たにモニタリング研究観測およびプロジェクト研究観測として区分された。モニタリング研究観測は、固体地球物理学的な種々の変動現象（地震活動・地殻変動・海水準変動・氷床変動、等）を、30 年以上を目安とした長期間に渡りモニタリングすることを目的としている。プロジェクト研究観測としては、一つは人工衛星追尾や大型計測器により、汎地球的な変動現象（プレート運動・核マントルのダイナミクス等）の監視を行い、固体地球物理学的な解明を目的とするものであり、基地の地学関連施設で連続観測を行う。それに対して、野外での機動観測や航空機による偵察を中心として、リュツォ・ホルム湾地域の地殻および上部マントル（いわゆるリソスフェア）の構造と進化過程を研究することも同時に行われた。

以下には、そのプロジェクト研究観測における固定翼航空機（セスナ A185 型式；以下セスナ機とする）を用いた種々の地球物理・雪氷学的調査・偵察飛行について、JARE-38 越冬中（1997 年 2 月～1998 年 1 月）の結果を中心に記す。主なフライト項目としては、リュツォ・ホルム湾の沿岸地域を中心に、北東方向はプリンス・オラフ海岸沿いに新南岩まで、南西方向は宗谷海岸沿いにボツンヌーテンまで、それぞれ露岩調査を行った。また、大陸氷床上では、みずほ高原の裸氷やクレバスの分布を調べることにより、将来の地学・雪氷調査のための基礎資料収集や、JARE における将来の大型航空機導入のための滑走路候補地の調査も行った。上記に関連した JARE-38 越冬期間中におけるセスナ機による年間フライトは、計 15 回、43 時間 55 分に達した。なお、ピラタス機が JARE-37 で故障し持ち帰られたため、当初予定していた航空磁気測量は行わなかった。さらに、「しらせ」往復路のアムンゼン湾調査では、「しらせ」搭載のヘリコプター（シコルスキー S-61A 型式；以下シコルスキー機とする）を用いて主に周辺域の雪氷環境を調べ、将来の人工地震探査測線の位置決めを行った。

以下に、越冬中にセスナ機で行ったすべてのフライト内容を時系列に示す。また図 1 には、調査地域の概略を示した。

[フライト番号・目的]	[飛行空域]	[年月日]	[飛行高度]
1. 沿岸露岩調査	宗谷海岸 (～至しらせ氷河)	1997.02.27	6000-10000 ft
2. 沿岸露岩調査	プリンス・オラフ海岸 (～至日の出岬)	1997.03.10	6000-10000 ft
3. 沿岸露岩調査	宗谷海岸 (～至しらせ氷河)	1997.03.28	3000-10000 ft
4. 沿岸露岩調査	プリンス・オラフ海岸 (～至日の出岬)	1997.05.13	6000-10000 ft
5. 沿岸露岩調査	宗谷海岸 (～至スカーレン)	1997.05.28	3000-10000 ft
6. 沿岸露岩調査	宗谷海岸 (～至しらせ氷河)	1997.07.29	3000-8000 ft
7. 沿岸露岩調査	プリンス・オラフ海岸 (～至日の出岬)	1997.09.08	3000-10000 ft
8. 裸氷帯・モレーン調査, 大陸氷床滑走路調査	みずほ H ルート東方, S16～ラングホブデ	1997.10.06	対地 3000 ft, 対地 3000 ft
9. 沿岸露岩調査	宗谷海岸 (～至ボツンヌーテン)	1997.10.18	3000-10000 ft
10. 大陸氷床滑走路調査	S16～ラングホブデ	1997.10.22	対地 3000 ft
11. 裸氷帯・モレーン調査	みずほ H ルート東方	1997.11.02	対地 3000 ft
12. 氷縁監視	リュツォ・ホルム湾	1997.11.09	5000 ft
13. 大陸氷床滑走路調査	S16～ラングホブデ	1997.11.12	対地 5000 ft
14. 沿岸露岩調査	プリンス・オラフ海岸 (～至新南岩)	1997.11.20	3000-6000 ft
15. 沿岸露岩調査, 大陸氷床滑走路調査	宗谷海岸 (～至しらせ氷河), S16～ラングホブデ	1997.12.03	3000-10000 ft, 対地 7000 ft

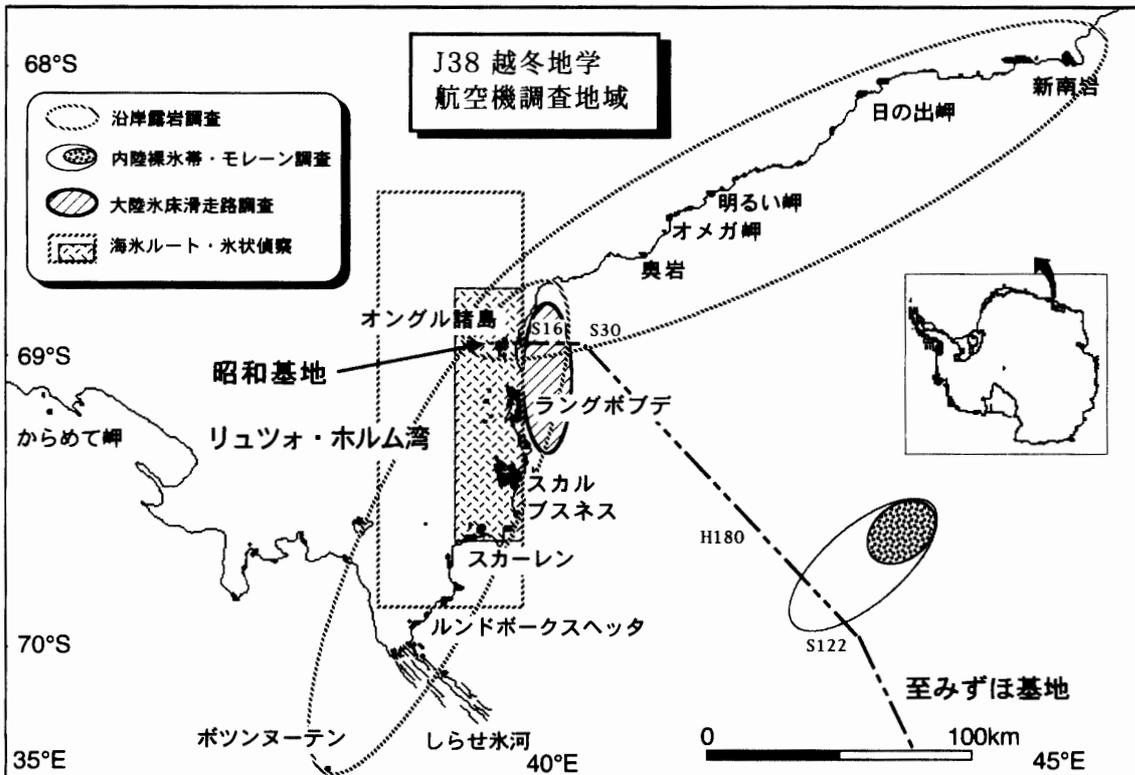


図1 JARE-38越冬中のセスナ機による調査地域の概略

Fig. 1. Area covered by aircraft (Cessna A185F) surveys for geophysical and glaciological purposes during the wintering season of JARE-38.

2. リュツォ・ホルム湾周辺の沿岸露岩調査

リュツォ・ホルム湾地域の沿岸露岩における積雪、氷状の季節変化を調べるために、セスナ機による空撮を行った。空中写真を活用することは、地形調査のために有力な情報取得の方法である。最近では、航空写真により様々な方向・高度から立体視することにより、特に第四紀の地質構造を調査する方法も研究されている（例えば片川・荒木, 1999）。ここでは、様々な方向・高度から露岩域の積雪状況と表層地形・地質構造との相関を調べることで、今後の地表での各種現地調査のための基礎資料とする。例えば露岩域での構造探査のため、地震計を全域に設置する場合を考えると、積雪率に応じて設置方法を工夫する必要がある。つまり雪面の場合にはスパイク式の、岩盤の場合にはフラットベース式の地震計がそれぞれ用いられるため、準備する器材の数量・割合を変える必要が生じるためである。

観測方法は、航空機の後部座席に鉛直下向きに固定したビデオカメラにより、約 3000-10000

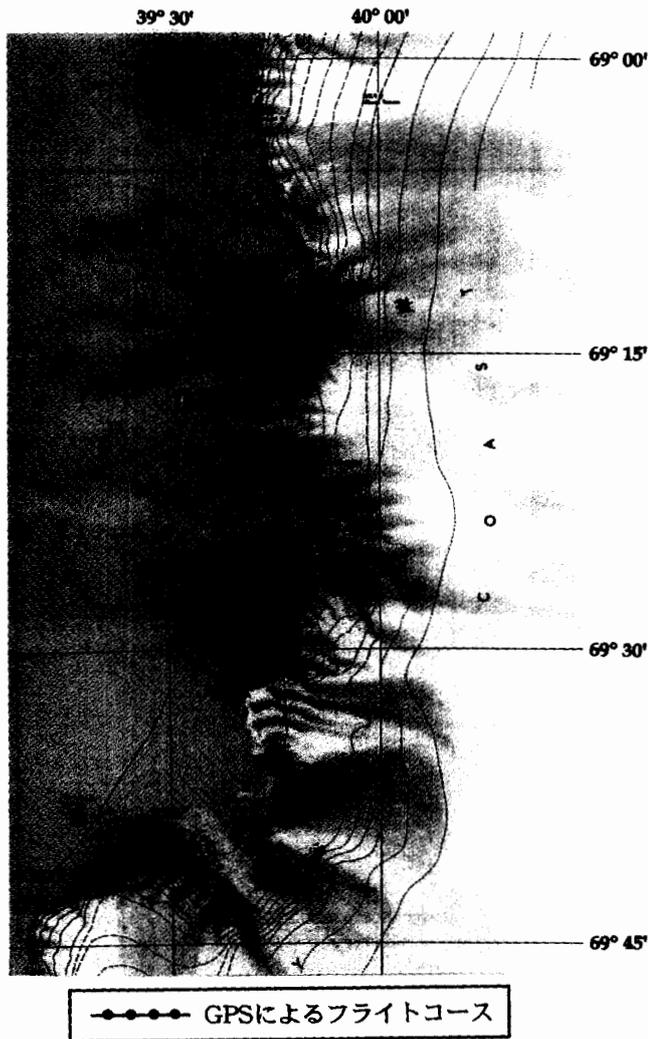


図 2a 沿岸露岩調査のフライトコースの例 (宗谷海岸方面; 1997年5月28日, GPS位置を表示; 国土地理院発行リュツォ・ホルム湾 1:250000, 1989参考)

Fig. 2a. An example of flight course determined by GPS positioning for outcrop surveys along the Sôya Coast (May 28, 1997).

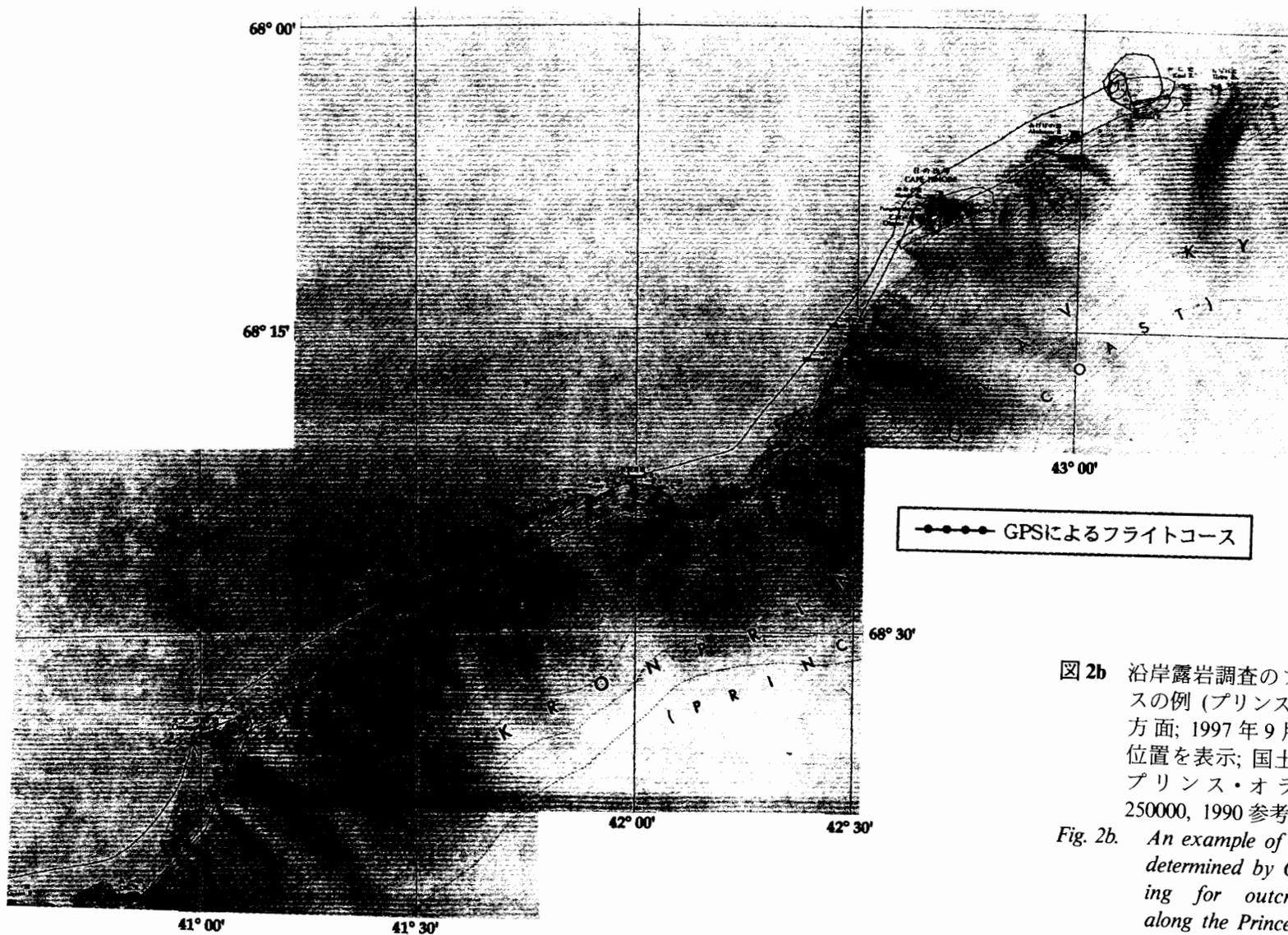


図 2b 沿岸露岩調査のフライトコースの例 (プリンス・オラフ海岸方面; 1997年9月8日, GPS位置を表示; 国土地理院発行プリンス・オラフ海岸1:250000, 1990 参考)

Fig. 2b. An example of flight course determined by GPS positioning for outcrop surveys along the Prince Olav Coast (September 8, 1997).

ft の高度で真上から撮影するとともに、航空用 GPS 受信機 (GARMIN 95XL) により機体の位置を 5 秒サンプリングでパソコンに連続記録した。往路では、主に低い高度 (3000 ft) で積雪状況の詳細を捕らえられるよう海側からの斜め写真を合わせて撮り、復路では高度を 10000 ft 程度まで上げて主に真上写真を中心に撮影し、各露岩の全域が入るように高度とコース取りを適宜調整した。また、特に大きな露岩では、出来るかぎり多くの面積が撮影できるように、撮影領域がわずかに重なるようグリッドサーベイツ的に飛行した。

宗谷海岸及びプリンス・オラフ海岸のそれぞれの方向について、越冬中の飛行可能な時期に 1-2 カ月の間隔をあけてフライトを行い、各々について計 6,4 回実施した。越冬後半の日照時間が伸びる 10 月, 11 月には、さらに飛行空域を延長し、最長それぞれボツンヌーテン, 新南岩までの空撮を 1 回ずつ行った。図 2 には、セスナ機搭載の GPS 位置による沿岸露岩調査のフライトコースの例を示す。

2.1. 積雪状況の季節変化

プリンス・オラフ海岸と宗谷海岸の各々の露岩の例として、オメガ岬とルンドボックスヘッタの積雪状況の季節変化を、斜め写真を並べて示す (図 3, 図 4)。冬期間は特に日照が少ない

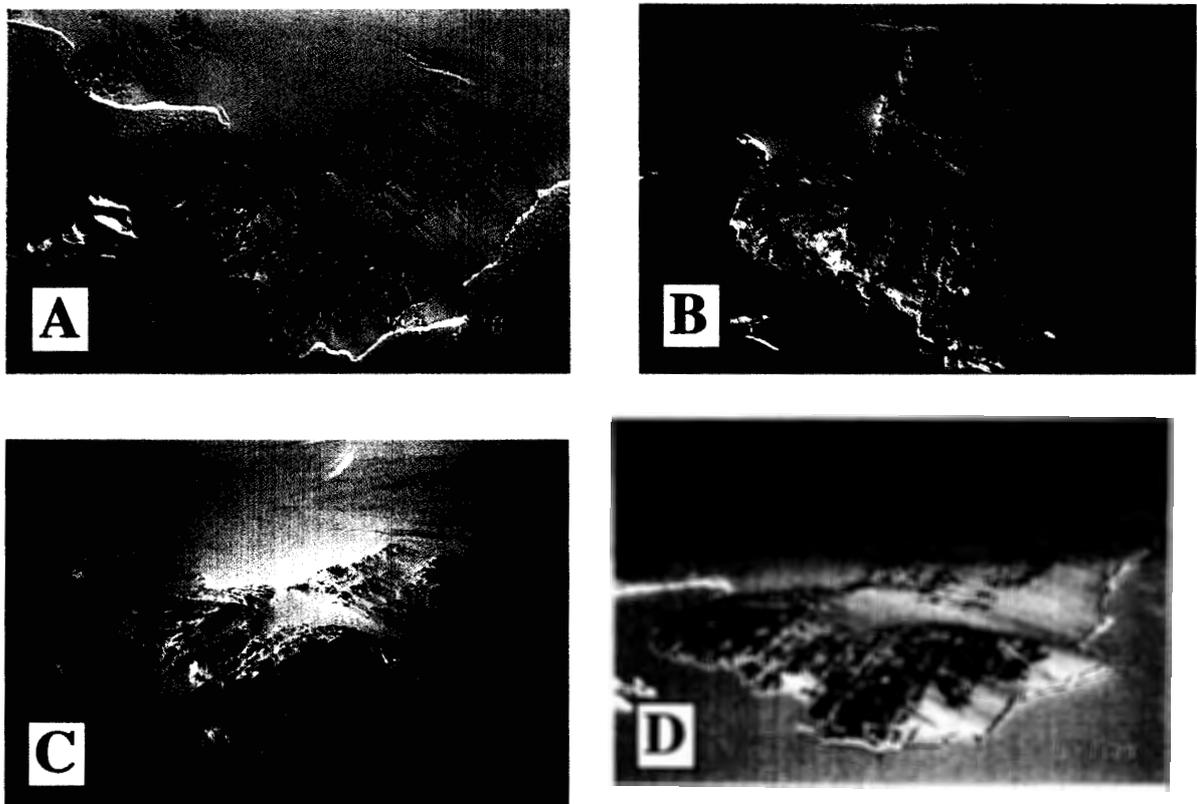


図 3 オメガ岬 (プリンス・オラフ海岸) の積雪状況の季節変化 (斜め写真)

Fig. 3. Seasonal change of snow-covered area on "Cape Omega" in 1997 (A: March 10, B: May 13, C: September 8, D: November 20).

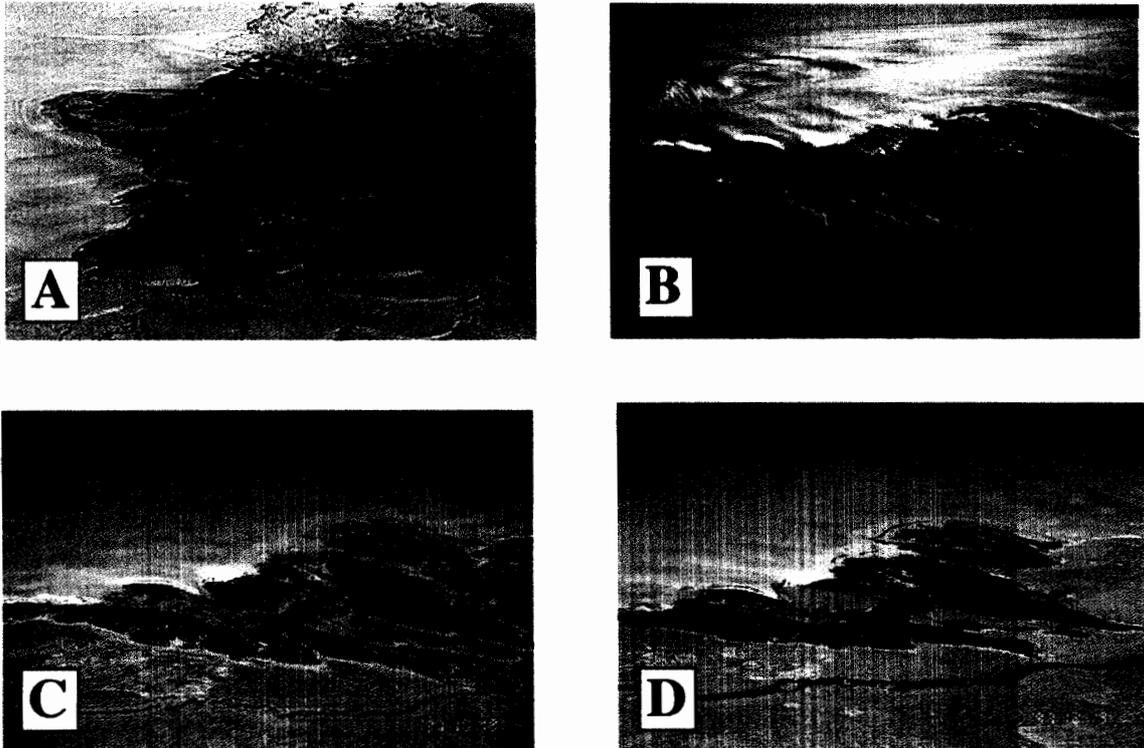


図4 ルンドボークスヘッタ (宗谷海岸) の積雪状況の季節変化 (斜め写真)
 Fig. 4. Seasonal change of the snow-covered area on "Rundvågshetta" in 1997
 (A: February 27, B: March 28, C: October 18, D: December 3).

ため、写真撮影には不向きであると言えるが、逆に季節変化を調べることは、越冬期間中のみしか行えない調査である点が重要といえる。積雪状況は、各露岩の地形の急峻・平坦の度合いにより影響を受けるが、これらの斜め写真からは概して、季節が進むにつれて積雪率が徐々に増加しているようにみられる。

そのため次に、各露岩の積雪率の季節推移をさらに詳しく調べるため、真上写真をもとに簡単な画像処理を行った。以下、スカーレン南部地域を例に処理の方法を示す (図5)。真上写真の画像から積雪部分のみを抜粋するフィルターをかけ、積雪部分の画素数の選択エリア全体に占める割合で露岩露出面積率 (%) (=100-積雪面積率) を求めた。選択エリアを決める際には、海水や露岩内部の池が極力入らないように工夫した。例えば図5の場合には、写真上部 (北部) のスカーレン大池、および左下部 (南西部) の海水部分が入らない領域を選択した。露岩露出部分は視覚的にも黒い色が卓越するため、積雪部分との分離フィルターの選択は、黒色・白色をそれぞれ中心とした、二つのスペクトル・ピークの谷間となるように選ばばよいので、割合に容易である。一つのフライトごとに、各露岩の複数の画像により露岩露出面積率を求め平均をとった。そしてすべてのフライトの結果を並べて、季節変化を求めたものが図6である。あるフライトの一つの露岩についての平均値の誤差は、少ないもので数%以内であり、極夜の

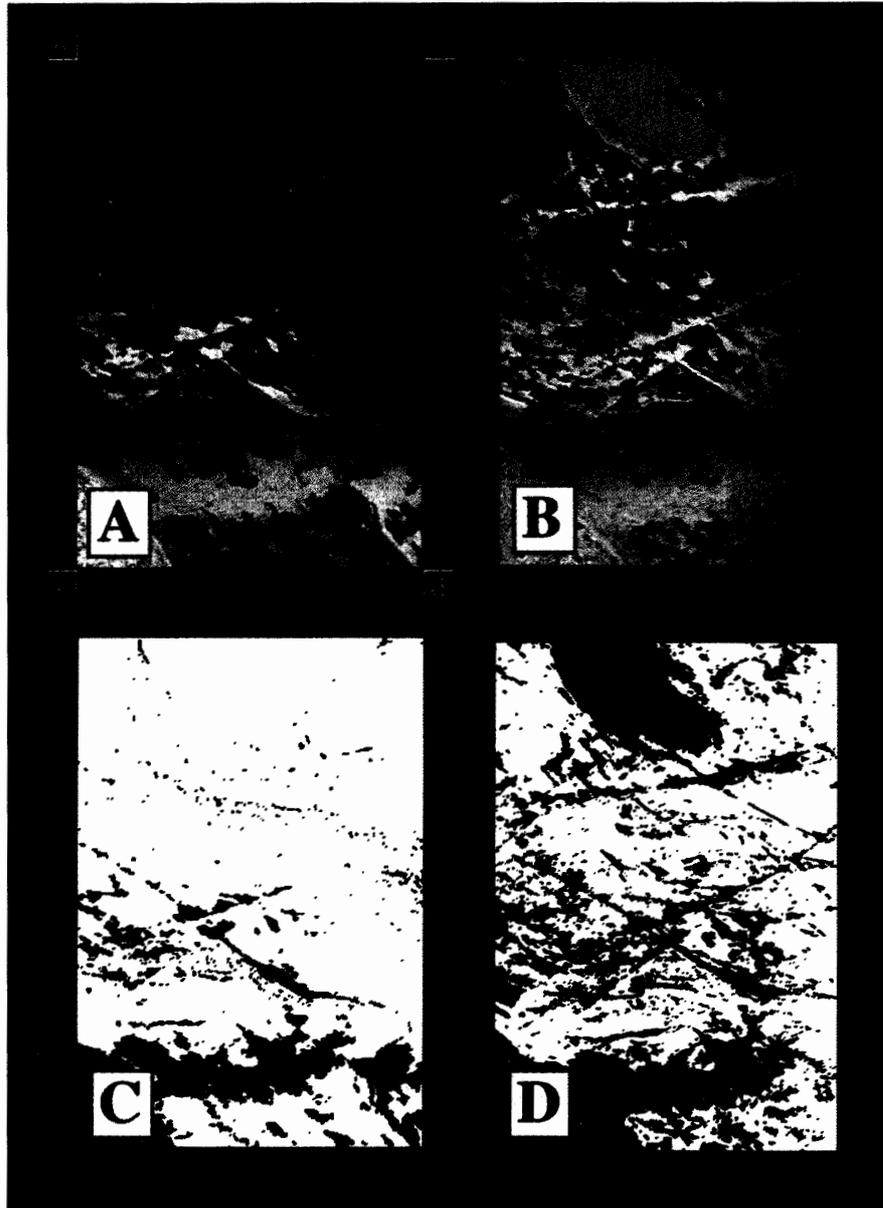


図5 スカーレン南部 (宗谷海岸) の積雪状況の季節比較 (真上写真)
(A; 1997年2月27日, B; 1997年12月3日, C; Aの積雪部分のみを抜粋し黒色で表示, D; Bの積雪部分のみを抜粋し黒色で表示)

Fig. 5. Comparison of seasonal change of snow area in the southern part of "Skallen" in 1997 (A: February 27, B: December 3, C: Enhanced snow area of photo A represented by black color, D: Enhanced snow area of photo B represented by black color). The selected areas are within the coordinate set of (a) $39^{\circ}24.115'E$; $69^{\circ}40.243'S$, (b) $39^{\circ}25.346'E$; $69^{\circ}40.041'S$, (c) $39^{\circ}25.096'E$; $69^{\circ}40.932'S$, and (d) $39^{\circ}25.385'E$; $69^{\circ}40.716'S$.

時期のフライトを中心に誤差が大きくなり、最大 30% 程度である。しかし、ほとんど場合平均値の誤差は 10% 以内に納まっている。

図6より、下記のようにいくつかのことが分かる。プリンス・オラフ海岸、宗谷海岸ともに、

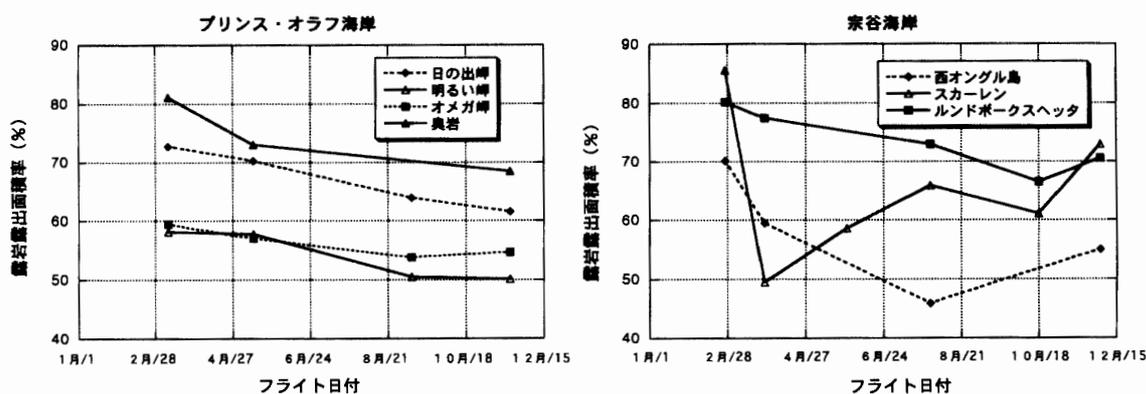


図6 各露岩の積雪状況の季節変化 (左; プリンス・オラフ海岸, 右; 宗谷海岸)

Fig. 6. Seasonal change of the snow-covered area for several outcrops around the Lützow-Holm Bay Region. (left: Prins Orav Coast, right: Sôya Coast).

季節が進むにつれて、全般的に露岩露出面積率は減少 (積雪面積率は増加) する。平坦な場所が多い露岩 (日の出岬, 奥岩, ルンドボクスヘッタ等) では、露岩露出面積率は高く、地形の凹凸が激しい露岩 (オメガ岬, 明るい岬, 西オングル島等) では、露岩露出面積率は概して低い。この原因としては、低気圧に伴う強風により、平坦部分では積雪がブリザードごとに飛ばされる可能性が大きいことを示している。なお、スカーレンについては、積雪率の推移は他の露岩に比べて複雑な傾向を示すが、1997年3月28日のフライトは大きな低気圧通過の直後であったことも鑑みて、全体の露岩の中では中間的な積雪面積率といえる。また、地形的にみても中間的な傾向を示している。さらに、露岩積雪面積率の緯度による違い (南北方向での変化) は、各露岩の海岸線における配置 (手前か奥か) や地形により異なるため、あまり顕著なことは言えない。

2.2. 特定露岩及び周辺域の調査

特定の露岩域の詳細な調査の一例として、プリンス・オラフ海岸の露岩「新南岩」についての概況 (1997年11月20日; フライト番号14) を以下に示す (図7)。「新南岩」は、「しらせ」によるアクセスの便利さや、基地建設・越冬保守のための地形的な諸条件等、JAREにおける新たな観測拠点候補地として、かなり適した場所であると以前より指摘されている。本フライトでは、露岩周辺を十分に巡回することにより、以下の情報を得た。

- ・露岩面積はオングル諸島とほぼ同じであるが、東西の氷河に挟まれた四角い地形 (東: 新南氷河, 西: その支流) をもつ。
- ・全体として平坦な露岩であり、地震計設置・広い面積での展開には有利である。平地が多く強風が心配されるため、高いアンテナ建設とその保守等のためには、今後地上気象データを蓄積する必要がある。
- ・凹地が多く池になり凍結している。海岸に近いので塩分がかなり多いと思われるが、大陸

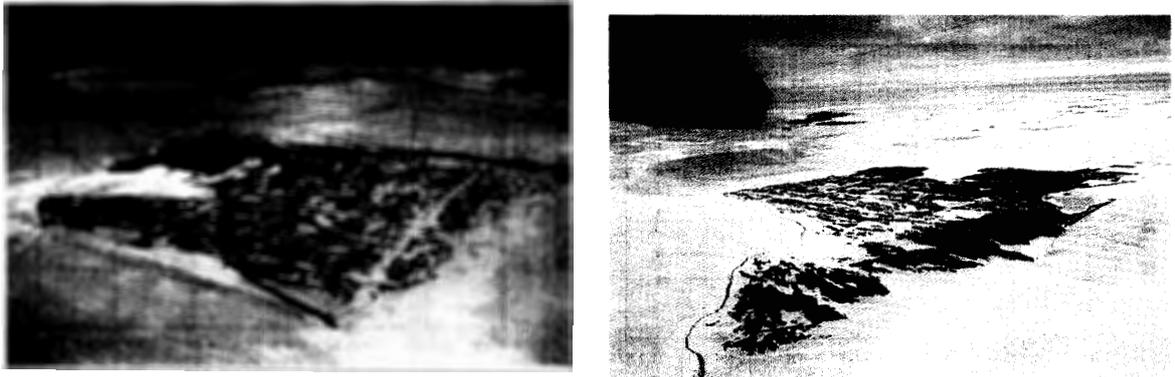


図7 新南岩の斜め写真 (1997年11月20日)

Fig. 7. Photos of "Sinnan Rocks" from Cessna airplane (November 20, 1997). (left: view from SW to NE, right: view from E to W)

氷河に接している東部、南部、西部付近の池は淡水に近い可能性が大きい。

- ・露岸北部の湾に、砕氷船が接岸できると思われる。海水の状態も昭和基地方面と比較しても接岸しやすいであろう。ただし湾の岸壁の高さは上空からは分からないため、地上調査も今後不可欠である。
- ・露岩南部の大陸に接する部分にモレーンが発達し、その周辺は平坦である。そのため、大陸に車両で上陸可能と思われる。しかし、詳細なクレバスの存在については確認できなかった。

今後、第VI期5カ年計画にとどまらず将来的に、プリンス・オラフ海岸やケーシー湾方面の地震探査を含めて各種科学的調査が計画されるであろう。その一つとして例えば、小型ヘリコプターを使用する年度に、昭和基地からの前進拠点としての燃料デポ地、また緊急着陸地等として積極的に利用することが期待される。また、内陸へのルートが確保されれば、雪上車オペレーションの中継地としても利用可能であろう。今後気象データの蓄積を含め、夏期間を中心に各種調査を進めていきたいと考える。

3. 内陸域の裸氷帯・モレーン調査

将来のみずほ高原での内陸ルート沿いの各種地球物理・雪氷学的観測 (アイスレーダー、重力・GPS、隕石・地震探査、等) のための実施可能性を調べるために、みずほHルート東の裸氷帯、及びモレーンの調査フライトを計3回 (1997年9月22日 [山木戸・山下両隊員によるフライト]、10月6日、及び11月2日) 行い、カメラ・ビデオ撮影と共に雪面状態 (青氷帯・クレバス・モレーンの分布等) を調べた。このみずほルート東の裸氷帯については、過去JARE-20により予備的な隕石探査が行われている (矢内, 1981) が、その後本格的な調査は行われていない。

3.1. 氷床の表面形態

セスナ機からの印象は、積雪が全般的に多く、表面に青氷の分布している面積が少ない。また青氷帯は、クレバス周辺の一部に限られる。JARE-20では広域の裸氷を確認している(矢内, 1981)が、JARE-38では同規模のものは確認できなかった。このことは、越冬期間中のフライトの時期的なものであるか、またJARE-20以後に経年変化により次第に雪面下に埋もれたのかは定かでない。

図8に、同範囲のERS衛星(European Remote Sensing Satellite)の合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar; SAR)による画像(左)とフライトコースと調査地域の模式図(右)を示した。ERS/SARデータはマイクロ波を用いるため雲の影響を受けず、雪氷表面及び内部からの電波の後方散乱を観測することができる。衛星画像とフライト調査との対応では、衛星画像の黒い部分が青氷、その周辺の明るい部分が表面の起伏が多いと考えられる。しかしどの程度までの深さを反映しているかは、雪面の状況が場所により異なるため一概には言えない(高橋ら, 1995)。ヌナタク周辺では基盤地形を反映した斑点状の散乱として確認される。実際の空撮では、青氷帯が存在すると思われる平坦部分は大部分積雪に覆われており、起伏の激しい部分のクレバスのみが明瞭に確認された。ERS/SAR画像の黒い部分のうち、A~Cの領域は今回のフライトで確認できた。Cがこの周辺では一番広い裸氷帯と考えられる。モレーンは、裸氷帯Cのやや東側(みずほルート寄り)の位置(S69°38'30.0, E43°19'20.0)に確認することができた。三日月型モレーン2箇が平行に並んでおり、周囲の裸氷帯・クレバスの分布域に比べるとかなり小さい。

3.2. 各種探査の可能性

裸氷帯域のうねりが激しいため、かなり浅いところに基盤岩があると思われる。以前の調査では、山地として認識できていたのかも知れない。クレバスに十分注意すれば、雪上車搭載のアイスレーダーでその直下の基盤の分布が詳細に調べられる。重力測定も併用すれば、補足データが得られ、なお確かである。

隕石探査については、調査対象となるモレーンおよび裸氷帯の面積が、やまと山脈等に比べてかなりせまく、その上流域の青氷帯もそのほとんどが積雪に覆われているため、スノーモービル等利用しての広域的な隕石探査にはあまり向かないであろう。クレバスを避けて安全な方法での調査が望まれる。

ダイナマイト震源による屈折法地震探査は、みずほ高原で行う場合、JARE-41と同様な雪上車オペレーションになる。危険地帯を避けて測線展開を行えば、みずほ高原の面的な構造を得られると期待できる。近い将来に予定しているみずほルートとの交差測線は、H180を起点に北東-南西方向に延ばすため、この裸氷帯域は通過しないことが確かめられている。

なお、グローバルな反射法地震探査でよく使用される起震車(パイプロサイズ)を南極氷床

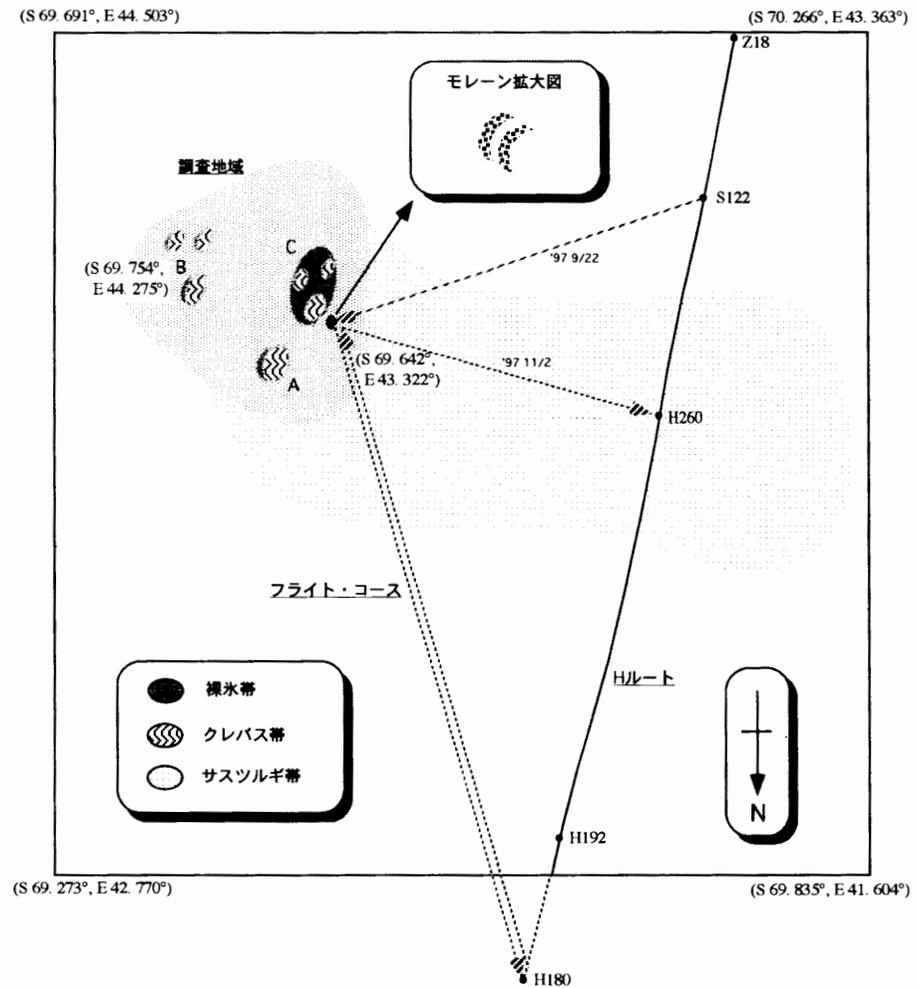
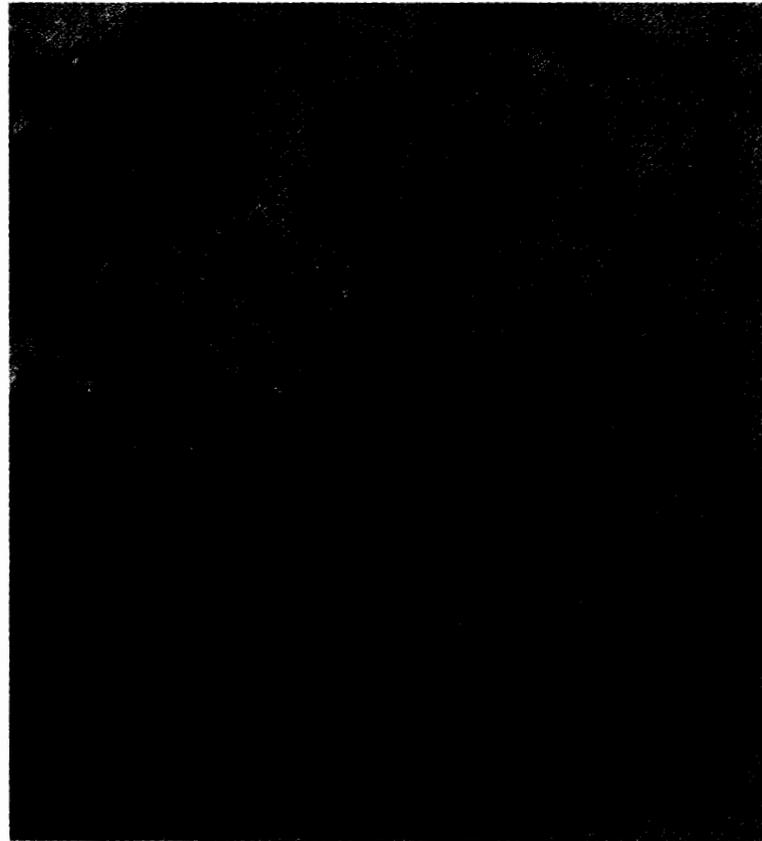


図8 みずほ H ルート東の裸氷帯の ERS/SAR 画像 (左), および調査フライトコースと表面形態模式図 (右)
 Fig. 8. ERS/SAR satellite image (left) schematic illustration and flight course (right) image of bare blue ice and moraine areas on the Mizuho Plateau, about 50 km eastward of the H-route.

で使用し、その能力を十分引き出すためには、表面の密度が大きい雪面 (すなわち青氷帯) が一番望ましい。起震車は、元来石油探査用に開発されたものだが、これまで砂漠やツンドラ地帯でも実績がある。発震エネルギーの効率を考えると、火薬震源の場合も同様に青氷帯が有利である。この地域の裸氷帯は表面に積雪が多いため、その点は不向きであろう。また、地上オペにはクレバスの存在が気にかかるため、他の調査以上に十分注意が肝心である。

なお、みずほルートからこの裸氷帯への車両によるアプローチについては、裸氷帯からの広域的なうねりがHルートまで緩やかに続いているため (図8右)、危険度が高いと考えられる。裸氷帯Cやモレーンから東方への繋がり、H260地点を越えてさらに西部へも続いている。H260付近では、顕著なサスツルギ帯が広範囲に分布している。クレバスが存在しない限り安全ではあるものの、Hルートからこの東方の裸氷帯に近づくには十分注意する必要がある。

4. 大陸氷床上の大型航空機用滑走路調査

近年、JAREにおいて大型航空機の運用が検討されているが、そのための滑走路の候補地としては、表面が車輪で離発着できる強度を持つ必要がある (東, 1996)。昭和基地からの輸送の利便性を考慮して、S16からラングホブデにかけての「圧密した雪上滑走路」と、やまと山脈等の「青氷上の滑走路」が、現段階では現実的に可能で最も適した場所と指摘されている (白石・Klokov, 1997)。JARE-38では、特に昭和基地周辺の大陸氷床上に焦点をあて、白石・Klokov (1997) で指摘されている候補地 [1] (S16南付近)、および候補地 [2] (ラングホブデ氷河源頭部) の斜め空撮を行い、実際の運用の可能性を検討した。

越冬後半を中心に5回のフライトで、雪面の状態、青氷・クレバスの分布、滑走路位置ならびに車両によるアプローチ・ルートの選定、ラングホブデ・ブライボークニツパ露岩への上陸の可能性について調べた。それぞれのフライトの対地高度は、1997年9月19日 (山内による視察, 1000-3000 ft), 10月6日 (1000-3000 ft), 10月22日 (3000-5000 ft), 11月12日 (5000-7000 ft), 及び12月3日 (7000 ft) である。主に斜め写真を撮ると共に、GPSで位置を確認しながらの氷床表面形態のスケッチを行った。図9には、フライトコースの例として1997年11月12日のものを示す。

4.1. 氷床の表面形態

図10 (左) に、フライト調査による滑走路候補地付近の雪面状況を模式的に示した。また、比較のためほぼ同じ範囲のLandsat-1衛星の画像を示す (右)。

S16～ラング氷河源頭部にかけての大陸氷床は、一般的に標高500 m以上で表面が積雪に覆われ、標高がそれ以下になると青氷として露出する (いわゆるフィルン線; firn line)。図10左には、黒線で積雪部分 (Snow surface) と裸表部分 (Bare ice surface) の境界を示した。S16付

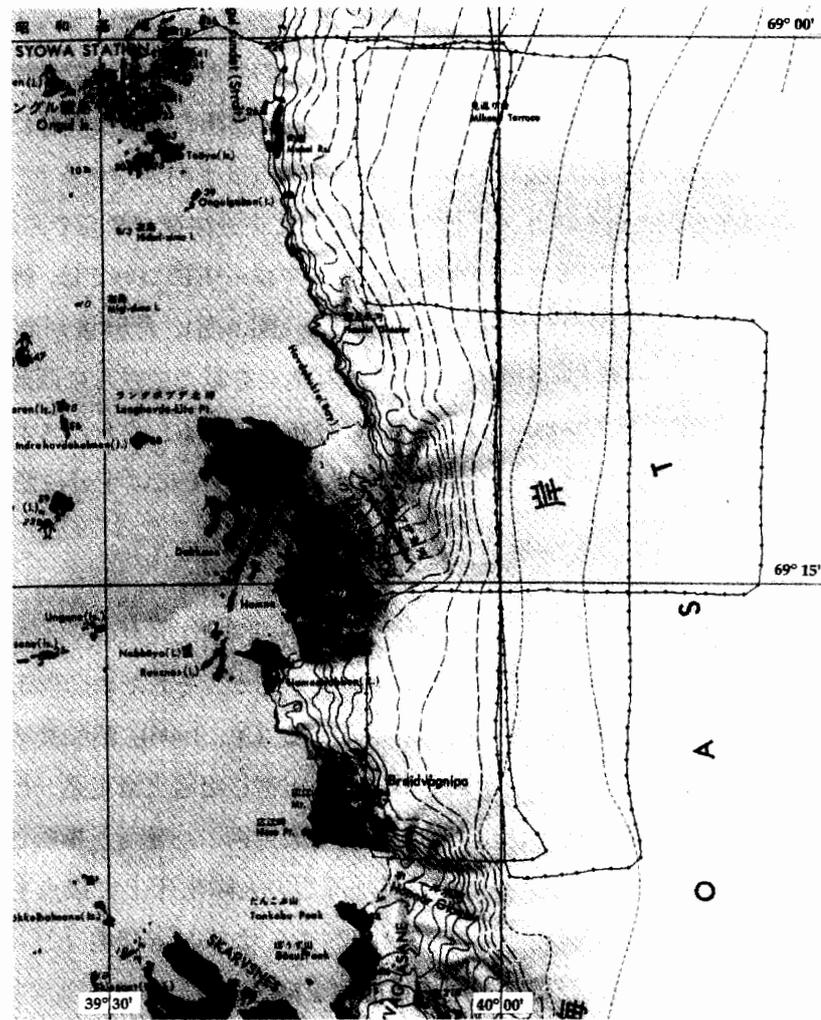


図9 大陸滑走路調査のフライトコースの例 (1997年11月12日, GPS位置を表示; 国土地理院発行リュツォ・ホルム湾 1:250000, 1989参考)

Fig. 9. An example of a flight course determined by GPS positioning for the feasibility survey for an airfield on the continental ice sheet in the vicinity of Syowa Station (November 12, 1997).

近の北部を中心に、積雪が多くなるため、積雪のある標高の下限が400m程度まで低くなる。青氷帯においては、標高が低くなる(西側に行く)につれて傾斜も急になり、うねりが多くクレバスが発達する。特に、葉月氷河やラングホブデ氷河、ホノール氷河の上流やその側面は発達が著しい。標高の高い積雪のある部分でも、所々大きなクレバスがみられるため、実際には沢山のクレバスが隠されている可能性がある。

候補地 [1] (S16 付近):

S16の西部・南部にもクレバスが存在する。候補地 [1] (図10左の斜線で囲まれたエリア)の北側の辺に沿った形で、1箇所(数本)クレバスを確認した。滑走路候補地の全体にわたり積雪があり、かなり平坦に近い。クレバスを避けてうねりのさらに少ない場所を選んで、東方に

滑走路1本分程度移動すればよいであろう (図10左: Recommend position (白抜きエリア)の位置)。青氷が表面近くにまであれば、それほど積雪が深くないと思われるので、候補地 [2]より適しているといえる。さらに、S16経由で昭和基地に近いことも大きな利点である。

候補地 [2] (ラングホブデ氷河源頭部):

大きな氷河の上流に位置するため、特に候補地 [2] (図10左の斜線で囲まれたエリア)の南西部でうねりが著しい。候補地 [1]と同様に顕著なクレバスが、候補地の北側、及び東北側 (風上側)に確認できる。より平坦で積雪の多い場所を選ぶとすれば、東側もしくは南東方向に5 km程度移動した方が望ましい。(図10左: Recommend position (白抜きエリア)の位置)。あるいは、ラングホブデ南部とブライボークニッパの間の氷床上も、平坦さは若干劣るものの滑走路設置の可能性がある。この部分はホノール氷河の北側に面しているため、東の大陸側からの地上アプローチが多少困難になる恐れがある (図11; 候補地の斜め写真)。

4.2. 車両によるアプローチ・ルートの想定

昭和基地から大陸ルートでラングホブデ方面に向かうことを念頭に、「向かい岩 (とっつき岬)~S16~候補地1~候補地2~ラング」のコースで一番適当と思われる場所を想定した (図10左)。実際、過去のJAREにおいては、「向かい岩~S16」はJARE-32で (藤井, 1992), 「~ラングホブデ」はJARE-28, -29で (中西ら, 1988; 渡辺, 1989), それぞれ最後の車両の往復をしており、今回の設定はほぼそれらに沿ったコース取りである。「向かい岩~S16」ルートは、現在の「とっつき岬~S16」ルートのバックアップを兼ねるとともに、距離もかなり短縮されるため、使用頻度の多い「昭和基地~S16」間には大変有用なバイパスで、ぜひとも将来のために再開したいルートである。「候補地 [1]~候補地 [2]」は、大部分の表面は積雪におおわれているように上空からは見えるが、実際は大きなクレバスが数カ所あり危険度が高い。JARE-29においても、標高300 m以下のルート一部では、標識が1年間もたなかった経験もある (渡辺, 1989)。安全性を考慮すれば、より東側の標高が高く傾斜の緩いコース取りが望ましい。「~ラングホブデ」は、ラングホブデ氷河とホノール氷河の上流の、狭い平坦部分を必ず通る必要があるため難所である。

ラングホブデとブライボークニッパの露岩への上陸箇所は、全般的に氷床が急激に落ち込み積雪があり、場所によってはモレーンが発達し一見平坦そうに見える。しかし実際は小さなクレバスが多数存在している可能性がある。ラングホブデ氷河の西側に接する雪鳥池方面はJARE-28, -29で実際に車両によりアプローチした実績があるため、上陸地点を選べば可能と思われる。またブライボークニッパへの上陸は、モレーンが発達しており、ラングホブデに比べてアプローチが易しそうと思われる。今後は、滑走路が選定された後に、実際の地上からの調査でルート開発を行う必要があるだろう。

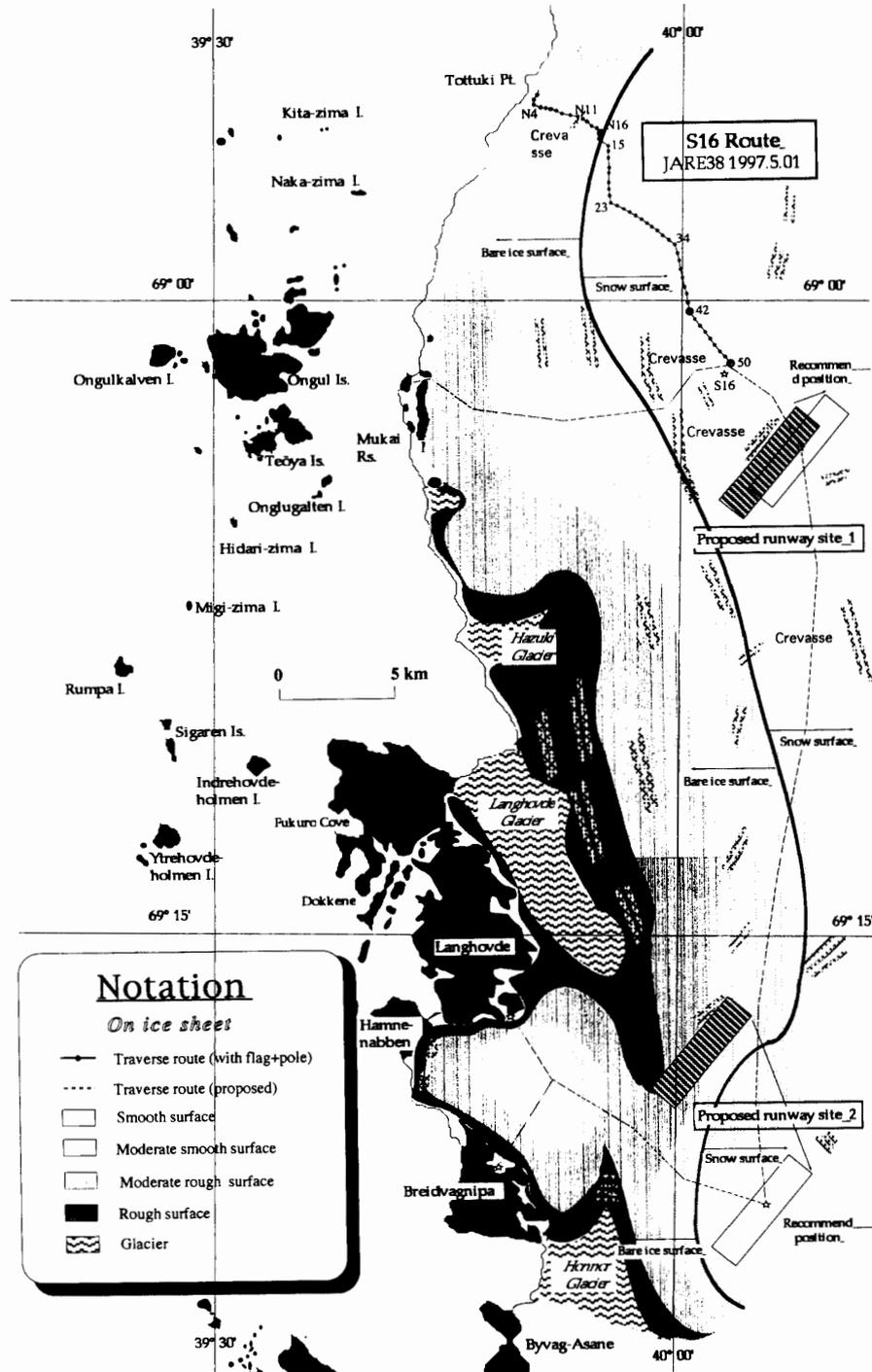


図 10 (左)

図 10 大陸滑走路調査による氷床表面の模式図 (左), およびランドサット衛星画像 (右). 標高 500 m 附近の黒線は, 積雪部分 (snow surface) と裸表部分 (bare ice surface) の境界を示す.

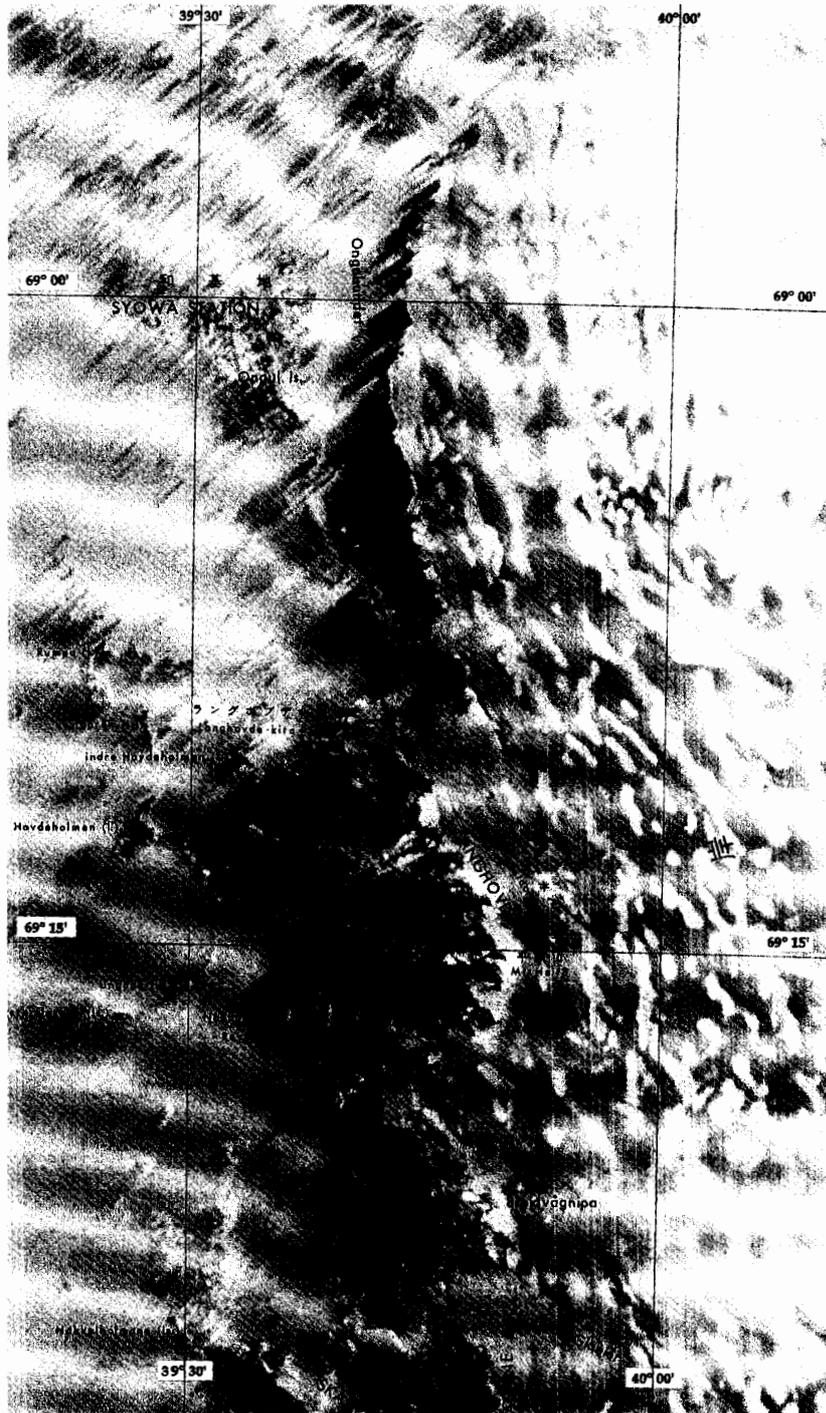


図 10 (右)

Fig. 10. Schematic illustration of the surface condition on the continental ice sheet in the vicinity of Syowa Station and the recommended positions for an airfield (right) and Landsat-1 MSS image of the same area (left). In the right hand figure, the discontinuity between the snow surface and the bare ice surface is shown by the bold black line at around 500 m height on the continental ice sheet.

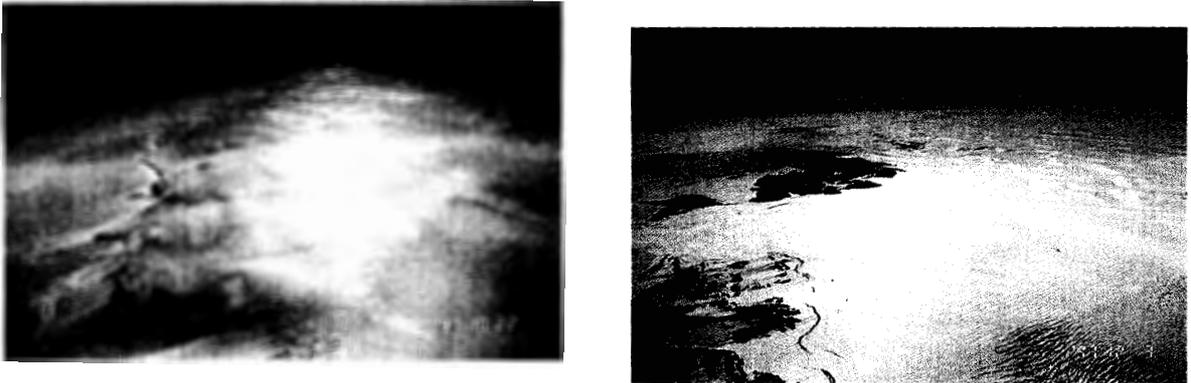


図 11 候補地の斜め写真 (左: [1] (S16 付近), 右: [2] (ラングホブデ氷河源頭部))
 Fig. 11. Photos of the recommended locations for an airfield on the continental ice sheet near S16 (left) (October 22, 1997: view from S to N), and eastward of the Langhovde region (right) (December 3, 1997: view from S to N).



図 12 昭和基地を訪問したツインオッター機
 Fig. 12. Photos of the visiting Twin Otter aircraft (Polar Logistics Co.) at Syowa Station (December 8, 1997).

4.3. JARE における中・大型航空機導入

JARE における航空機導入に関連して、ポーラ・ロジスティック (Polar Logistics) 社のチャーターによるツイン・オッター (Twin Otter) 機が、1997 年 12 月 8 日に昭和基地を訪問した。これは、昭和基地から西 1200 km に位置するドロンニングモードランドの裸氷帯拠点 (Blue One 拠点; ノボラザレフスカヤ基地 (70°46'S, 11°50'E) の南西 100 km; Mellor, 1988) より飛来したもので (図 12), 昭和基地を含めた将来の東南極航空網 (East Antarctic Air Network: EAAN, 白石, 1995) を確立するための実績づくりである。ケープタウンより Blue One

拠点へは、将来的には C-130 機で約 2 週間に 1 回の割合で往復する計画である。昭和基地には 2 泊 3 日の短い滞在であったが、社員 3 名 (うち 2 名はパイロット) と Blue One 拠点からのアクセスの情報交換を行うことができた。12 月 10 日の帰路には、本章で行った大型航空機用滑走路調査の予察的結果を同社員に渡したため、ツインオッター機は S16 附近の氷状を偵察して帰路についた。この来訪により、将来の中・大型航空網の確保のための可能性が高まった。

5. その他のリュツォ・ホルム湾周辺フライト

5.1. 海氷ルート偵察

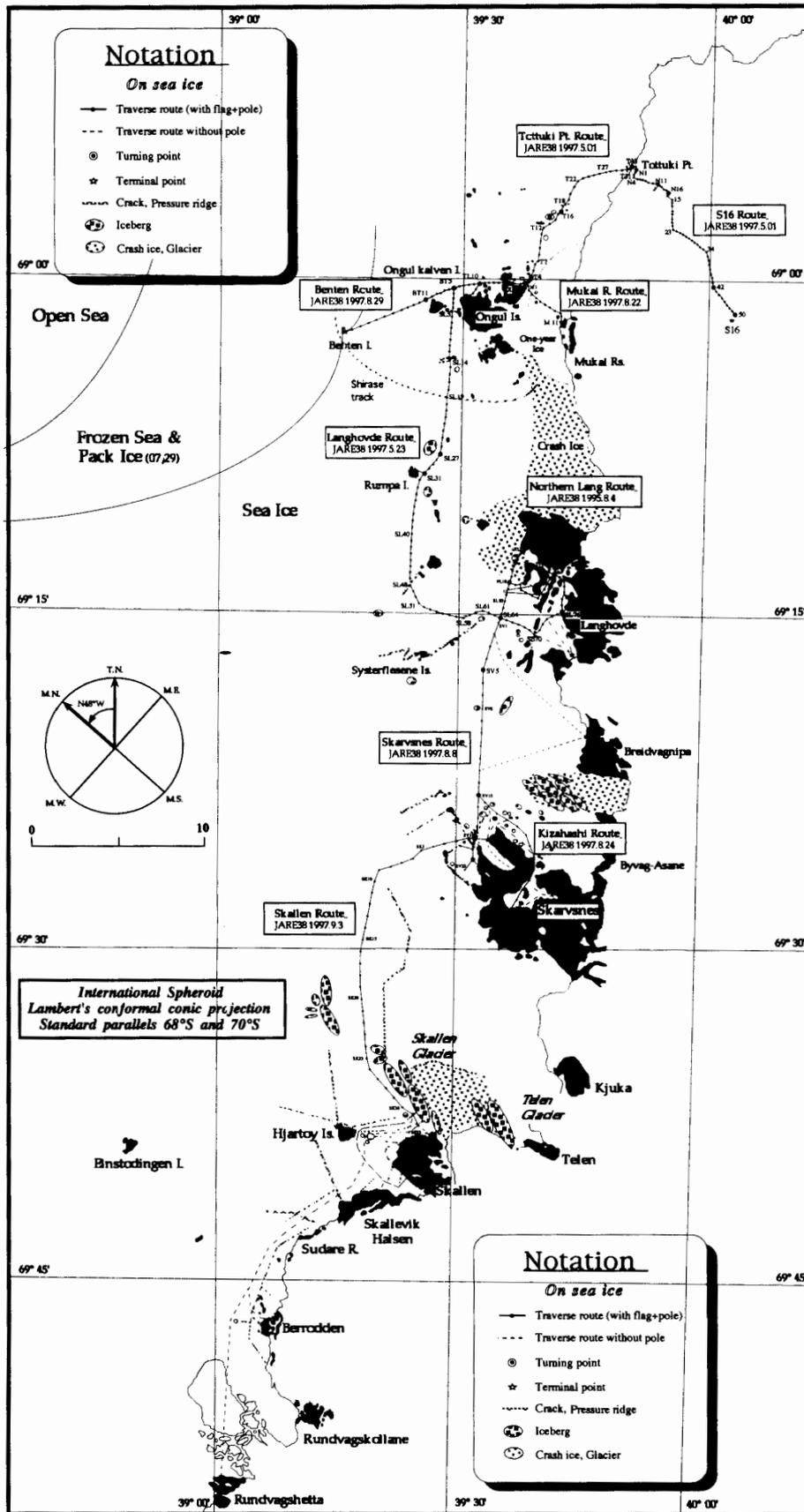
越冬後半の宗谷海岸方面における沿岸露岩調査フライト (第 2 章) では、昭和基地より南方の主要露岩に向かう雪上車旅行のための海氷ルート偵察を兼ねて行った。特に、昭和基地から離れたスカルプスネス・スカーレン方面の氷状は、地上からは把握しづらいため、積極的にセスナ機による上空からの情報を予め得るように努めた。ルート工作前のフライト情報により、氷山やクラック等の分布状態を知り、目的地までの最善のコースを予め設定してから、本番の旅行を実施した。

図 13 には、JARE-38 越冬中の沿岸及び内陸方面起点 (S16) への雪上車ルートをすべて示した。海氷上においては、各種氷山、クラック、プレッシャーリッジ等の情報を、越冬後半における場所を中心に詳細に記載している。なお、各ルート工作の詳細は、東ら (1998) に詳しく記載されている。

5.2. 氷状偵察

JARE-38 期間を通じてのリュツォ・ホルム湾周辺の海水変化は、数回のセスナ機による氷状偵察と NOAA 衛星の画像を基に調べられている (山内, 1998)。ここでは、特に 1997 年 11 月 9 日におけるフライトを例に説明する。リュツォ・ホルム湾内の定着氷の分布について特に注目し、JARE-39 夏期間にいたるまでの海氷ルートの保守・確保、並びに JARE-39 往路の「しらせ」の湾内への進入コースの参考指針とするためである。フライトによる海氷状況は以下の通りである。

- ・リュツォ・ホルム湾内に開水面が大きく入り込んでいることが確認される。これは以前の流水帯が凍結した「氷板」が、11 月はじめに北方に押し流された結果、定着氷から分離したため生じたものである。この割れ目は、すでに 7 月中旬より衛星画像により確認されているものであるが、さらに拡大した。このことは 11 月 9 日の NOAA 衛星画像からも明瞭に確認できる。その分離した氷板の南端はすでに大根水路付近まで北上しており、今後外洋に出ていくものと思われる。また、湾内の開水面は、その表面の一部が薄氷及び薄い流水により覆われ始めているが、今後 1 カ月余りの間に再度厚く凍ることはあまり考えられないであろう。JARE-39 を乗せた「しらせ」が昭和基地に接近する際には、砕氷の必要がほとんどない



13
 Fig. 13.

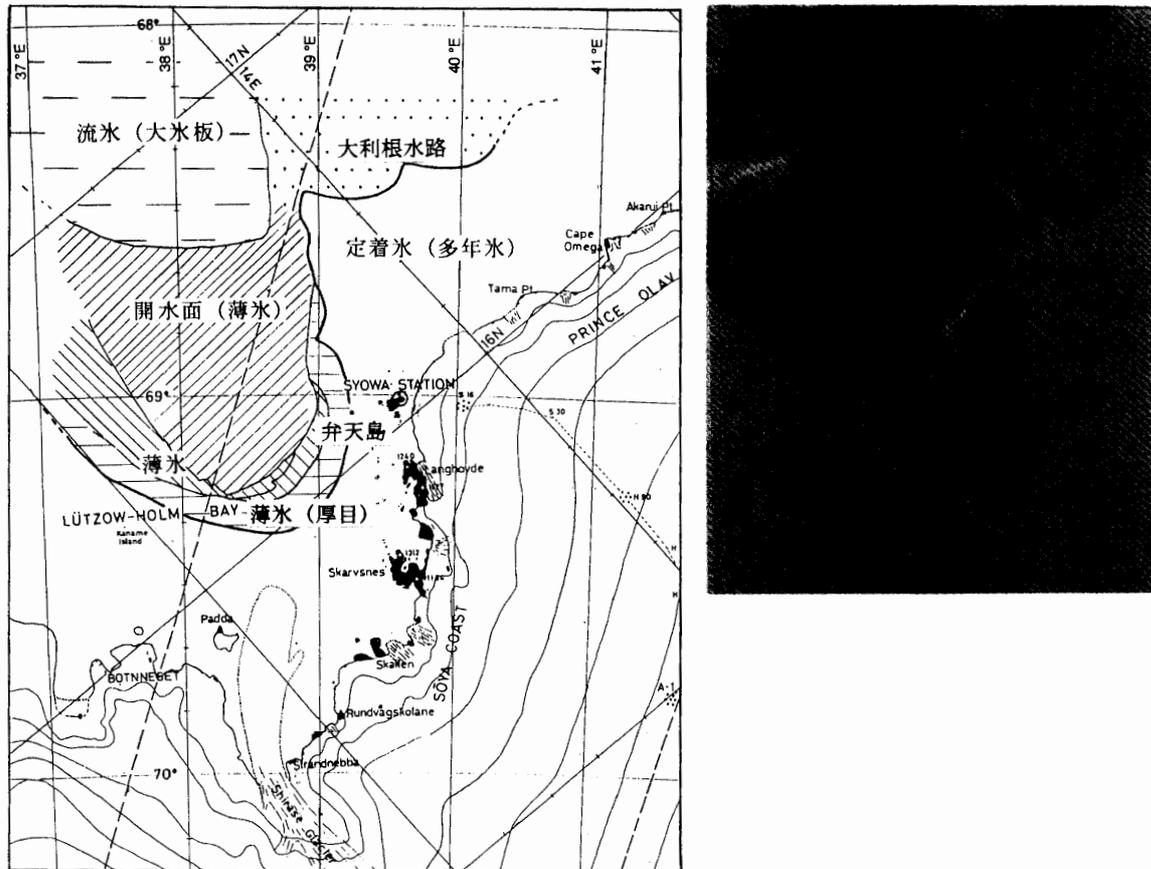


図 14 航空機によるリュツォ・ホルム湾内の定着氷分布 (左, 1997年11月9日), および NOAA 衛星画像 (右, 1997年11月9日)
 Fig. 14. Surface condition and spacial distribution of sea ice in Lützow-Holm Bay (left: November 9, 1997), and the NOAA image of the same area (right: November 9, 1997).

と思われる。

- ・定着氷縁は、弁天島約 15 km 西方よりほぼ真北、及び南西方向へ伸びており、8月15日の調査時とほとんど同じ位置にある。その開水面に沿う氷縁辺は、2重の薄氷帯となっており、より外側の厚い部分 (図 14 左, 薄氷 (厚目)) は 8月15日段階での開水面が凍ったものであり、より内側の (湾に近い) 薄い部分 (図 14 左, 薄氷) は、10月末に氷板が割れた箇所が凍結したと考えられる。(薄氷) の最南端付近では、さらに割れた部分が水路として発達し、細長い島として一部が分離している (図 15 左)。(薄氷) の部分は、まだ不安定な状態であり、再度割れる可能性もある。

図 13 昭和基地から宗谷海岸の各露岩、及び内陸旅行拠点 (S16) への雪上車による海水ルート
 Fig. 13. Traverse routes from Syowa Station to each outcrop along the Sôya Coast, and to point S16 during the wintering season of JARE-38.

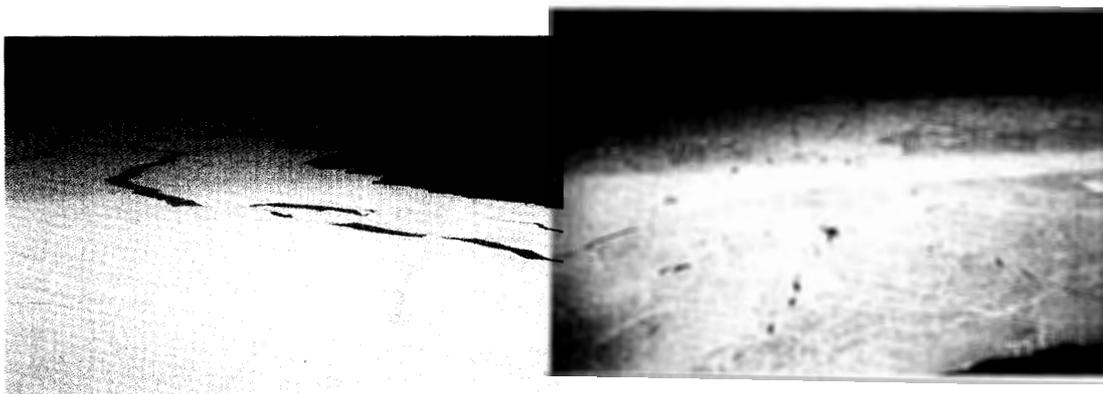


図 15 リュツォ・ホルム湾内の定着氷縁辺の斜め写真 (1997 年 11 月 9 日)。それぞれに薄氷帯、および厚目薄氷帯がみえる。

Fig. 15. Photos of the edge of the sea ice in Lützow-Holm Bay on November 9, 1997 (left: view from E to W, right: view from N to S).

6. アムンゼン湾周辺域における調査

JARE-38 の「しらせ」往路、及び JARE-39 の復路において、環境アセスメントを含めた各種のアムンゼン湾調査オペレーションを行った。その際、将来の人工地震探査のための大陸部分の雪面状況、及び露岩域の広域の空撮を、「しらせ」搭載のシコルスキー機 (S-61A 型) を用いて、計 2 時間×4 回実施した (1996 年 12 月 17 日、及び 1998 年 2 月 23 日～24 日)。1996 年 12 月のフライトは、アムンゼン湾内の「しらせ」から直接トナー島とを結ぶ直線上を往復したのみであったが、1998 年 2 月に実施した 3 回のフライトについては、十分に広範囲の調査を行うことができた (図 16a)。

1998 年 2 月のフライトは、トナー島 (ベースキャンプ (A 拠点) の緯度 67°05'S, 経度 50°16'E) を中心に、アムンゼン湾からケーシー湾周辺を経て、レイナー氷河にかけての大陸氷床上、フライト長約 150 km に渡る地域 (緯度 66°30'S-68°S, 経度 52°E-47°E の範囲) を中心に実施した。平坦な積雪地や青氷帯、クレバスの分布を調べることで、将来の地震測線の展開場所の候補地について、ほぼ確定することができた。また、同時に小型ヘリコプターが着陸可能であるか否かの視点でも調査した。アムンゼン湾においての広域な調査は、JARE-31 (小山内ら, 1991) 以来 2 回目であるが、特に 1998 年 2 月のフライトでは、JARE-31 よりもさらに内陸方面 (ツラ山脈, スコット山脈, レガッタ山脈等) にも拡張して行うことができた。

以下に、トナー島周辺・海水域および大陸氷床域に区分して詳細を記す。また、図 16b は、フライト調査によって得られた模式図であり、大陸氷床における平坦な積雪部分を主に緑色で、青氷帯を主に青色で示している。

6.1. トナー島周辺とアムンゼン湾の海氷・陸氷

トナー島およびその周辺域における地形と積雪状況については、フライト調査と合わせて島内での現地調査 (1996 年 12 月 17 日、及び 1998 年 2 月 20 日) を行っており、以下のように要

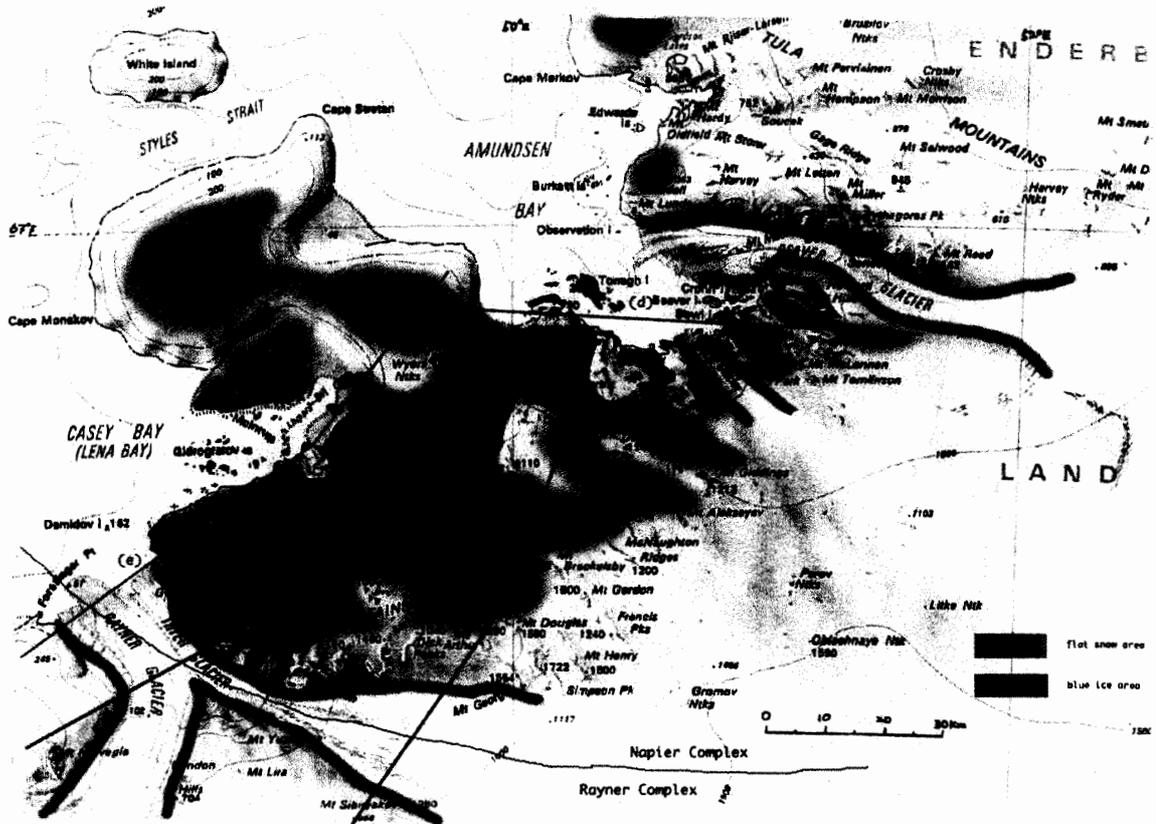


図 16b アムンゼン湾周辺の大陸氷床の表面形態，および将来の人工地震測線案

Fig. 16b. Surface condition on ice sheet and the proposed seismic experiment lines (from (a) to (e)) around the Amundsen Bay region in the future by the SEAL project. The green area is the "flat snow area", and the blue area is the "blue ice area". The red areas are outcrops where small helicopters can land. Edges of the main glaciers are shown in orange.

た。[1998年2月下旬]

- ・トナー島周辺の定着氷は薄く、「しらせ」により簡単に進入でき、接岸可能なまで接近した。ベースキャンプ周辺のタイドクラックもあまり発達していない。潮汐の干満の差が小さいと思われる。海水を歩いての移動は夏場は危険である。
- ・トナー島拠点周辺の小池は、塩分を少し含むが飲料可能。山頂（東）側から海岸（西）側になるにつれて、塩分濃度が上昇する。

6.2. 大陸氷床の表面形態

大陸氷床については、標高 500 m 以下は裸氷帯や氷河が発達している。特に海岸沿いは斜面が急になり、クレパスも多く確認される。標高 1000 m 以上は内陸に入るためガス（雲、霧）がかかる確率が高い。その間の高度は、平坦な積雪面が連なり人工地震探査測線の展開には都合がよい（図 16b）。以下に、各地域別にさらに詳細を記載した。

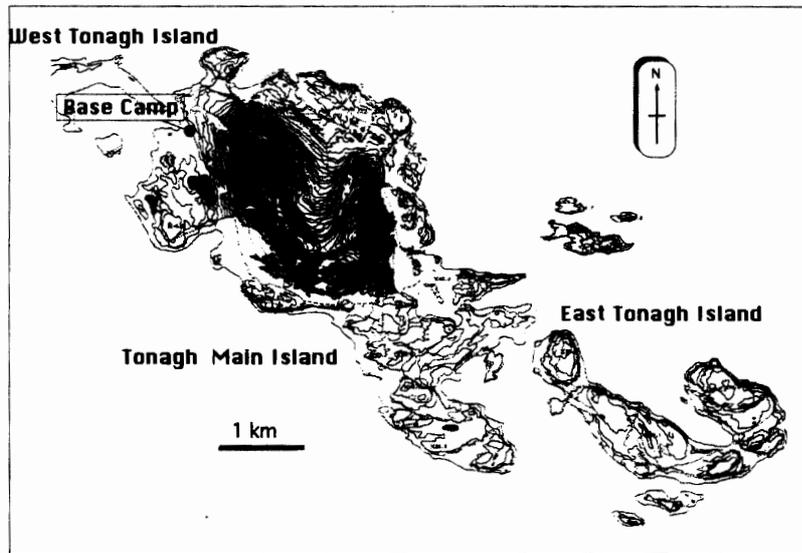


図 16c トナー島地形図とベースキャンプ位置

Fig. 16c. Topographic map of Tonagh Island and the location of base camp (modified after Moriwaki, 1998).

アムンゼン湾周辺 (ビーバー氷河以北)

- ・アムンゼン湾南部と比べて概して積雪多いが、東風によるドリフトが主体と思われる。露岩付近の青氷・積雪部分の斜面は急であり、ヘリコプターの着陸は難しそうである。特に内陸部は標高が低くてもガスがかかる場合が多い。標高 500 m 以上はさらに積雪が多いと思われる。

アムンゼン湾周辺 (ビーバー氷河及び以南)

- ・標高 500 m 以下の湾に面した斜面は、オースター氷河 (Auster Glacier) 以外はすべて青氷帯である。
- ・ビーバー氷河 (Beaver Glacier) は幅も広く平坦であるが、当然ながらクレバスが存在する。ペネトレーター地震計 (澁谷ら, 1991) 投下作業は可能と思われる。

スコット山脈方面

- ・ゴードン山 (Mt. Gordon), ダグラス山 (Mt. Douglas), ヘンリー山 (Mt. Henry) を中心とした地域。山脈中の露岩以外の部分はすべて積雪に覆われ、上空からは一見平坦に見える。
- ・チャールズ山 (Mt. Charles), クロナス山 (Mt. Cronus) の露岩南側に、小さい領域の青氷が発達している。クレバスもわずかに存在する。

ラガッタ山脈方面

- ・Thyer 氷河側の南斜面には、クレバスが存在する。さらに南側にレイナー岩体の露岩を確認できたが、海岸に近い露岩周辺は積雪が多い。
- ・ダイク山 (Mt. Dyke) の南側に小さい面積ながら青氷が発達している。モレーンも存在し、

着陸が可能と思われる。露岩周辺部以外はすべて積雪に覆われている。

ケーシー湾周辺

- ・標高 300 m 以下の海岸斜面は、青氷帯で表面のうねりとクレバス多い。
- ・ Fyfe Hills の北端部、128 m 最高峰の露岩、および Gidrografov 島を始めとする、湾内の他の島々はすべて平坦であり、地震計の設置オペレーションは可能である。ただし、ヘリコプターが着陸可能な平坦部の面積については、さらに調査を要する。

サケラリ (Sakellari) 半島方面

- ・ワイヤーズ・ヌナターク (Wyers Ntks) とその東側の小露岩を確認できる。それ以外の半島部はすべて積雪に覆われ、沿岸部 (海に落ちる部分) にクレバス、氷崖が存在する。ケーシー湾に面するズブシャティ棚氷 (Zubchatyy Ice Shelf) は、一見平らであるが隠れたクレバスが有るとされる。
- ・アムンゼン湾南部に面するワイヤーズ棚氷 (Wyers Ice Shelf) の支流から、Fyfe Hills にかけては、氷床の流動量が多いためかうねりとクレバスが多い。しかしその領域の東側の部分は、青氷は多いがうねりが少なくなる。

6.3. ヘリコプター着陸地点の候補地

1998 年 2 月のフライトで、アムンゼン湾周辺の大陸氷床上および露岩域において、トナー島以外の小型ヘリコプターの着陸候補地を捜した。その結果、以下の場所において可能であろうと思われる。将来の人工地震探査におけるオペレーション時の、地震計設置点等として活用することが期待される。

(大陸氷床上の積雪のある平坦部分)

- 1) リーセルラルセン山北西部のドーム部分、およびグレーデル山 (Mt. Gleadell) 北側の平坦な部分。
- 2) ハワード丘陵南側の東西に細長い領域。ビーバー氷河に平行で非常に緩やかな斜面。
- 3) パドワー山 (Mt. Pardoe) からウエラー山 (Mt. Weller) の海岸露岩部 (湾南側の 2 列目露岩まで) と、クロナス山 (Mt. Cronus) からデベンハムピーク (Debenham Pk.) (湾南側 3 列目露岩) の間の領域。北北西～南南東方向に約 30 km 長さの部分。
- 4) クロナス山からデベンハムピークの南側の領域。3) と平行に約 20 km 長の部分。
- 5) チャールズ山 (Mt. Charles) の南西 10 km にある 705 m 標高の小露岩から南部の領域。さらに南西部に位置するレガッタ山脈、スコット山脈に至る東西 50 km、南北 25 km の積雪のある広い領域。
- 6) サケラリ (Sakellari) 半島にある 2 つのドーム全域 (ディングルドーム (Dingle 431 m ピーク標高)、及び東部の 465 m ピーク標高)。海岸部にクレバスがあるが、それ以外はほとんど平坦である。

7) 一部青氷帯を含むが、パドゥー山 (Mt. Pardoe) からクロナス山西端, 705 m 標高の露岩からファイファ丘陵, さらにワイヤーズ棚氷に囲まれた領域。特に領域の東側部分にうねりが少ない。

(トナー島以外の露岩の平坦部分)

図 16b に, 露岩域における着陸可能と思われる平坦部分を, 赤色で示している。

1) アムンゼン湾周辺域: ハワード丘陵 (Howard Hills), ボウル島 (Bowl I.), 及びブント島 (Bunt I.) の西部分。トッド山 (Mt. Tod), プリーストリーピーク (Priestley Pk), パドゥー山 (Mt. Pardoe) の北側一部 (湾に面した平坦部分)。

2) ケーシー湾周辺域: ファイファ丘陵 (Fyfe Hills) の北端部, 128 m 最高峰の露岩, ジドログラホフ島 (Gidrografov Is), 及びマッキンタイヤー島 (Mcintyre I.)。

また, アムンゼン湾-ケーシー湾周辺における JERS-1/SAR 衛星画像を参照にすると, 氷河や青氷帯の平坦部分は後方散乱が弱いため主に黒く, クレバス帯やうねりの多い場所は後方散乱が強く主に白く表現されている。しかし, 氷床内部の深さをどの程度反映しているかは明確ではなく, 散乱の要因が多いため単周波単偏波の SAR 画像による解析には限界がある (高橋ら, 1995)。従って, 上空からの実際の偵察視野とは若干氷床表面形態のイメージが異なるため, 積雪があり小型ヘリコプターの着陸が可能と思われる地点の選定は, 衛星画像のみからではなく現地での検証が必要である。今後機会をみて現地調査を重ねると共に, 将来の実施に向けて衛星画像データも鑑みて, 最終的な安全な測線を決める必要がある。

7. おわりに

本論文では, JARE-38 における航空機を用いた種々の調査・偵察飛行についての詳細な実施報告と, 予備的な研究成果について述べた。リュツォ・ホルム湾地域の沿岸露岩域では, 表層地形・構造地質との相関に着目して, 積雪, 氷状の季節による変化を調べた。その結果, 冬季では夏季に比べて露岩露出面積の割合が減るが, 平坦な場所が多い露岩では冬季でも露出面積の割合が高いことが分かった。また, みずほ H ルート東の裸氷帯およびモレーン調査からは, 今後の地学・雪氷探査のための基礎資料を収集した。さらに, S16~ラングホプデの大陸氷床上においては, 大型航空機用滑走路の候補地がほぼ選定された。さらに, 「しらせ」往復路のアムンゼン湾調査における, シコルスキー機を用いての湾周辺フライトからは, 将来の人工地震探査の測線の位置決めを行うと共に, 湾周辺の諸環境への影響を評価するための基礎資料を得ることができた。これらのフライトにより, 今後の JARE において観測・設営の両面に渡り, 大きな方向付けがなされるよう期待する次第である。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり, 国内外の様々な方にご助言, ご指導を頂きました。ここに厚くお

礼を申し上げます。国立極地研究所の地学研究グループの皆様には、観測のための支援をして頂きました。特に白石和行教授には、大型航空機の滑走路候補地の調査の提案と有益な議論をして頂きました。また澁谷和雄教授には、衛星画像と実際の氷床表面形態との対応について、また各フライト調査について地球物理学的観点より貴重なご意見を頂きました。さらに調査地域の ERS/SAR 画像、及び NOAA 画像を提供して頂いた古川晶雄助手、ならびに平沢尚彦助手に感謝いたします。

また越冬期間中には、JARE-38 の隊員の諸氏にフライト・空撮の支援をして頂きました。特に航空部門の隊員（成田徹，河端道郎，山下智幸）の方々には、各フライトの諸準備とコース作成に大変お世話になりました。さらに、森脇喜一 JARE-39 夏隊長・帖佐正和艦長ならびに「しらせ」乗員、特に飛行科の方々には、JARE-38, -39 夏期間のシコルスキー・ヘリコプターでのアムンゼン湾調査において、多大なご支援を頂きました。ここに改めてお礼を申し上げます。

文 献

- 藤井理行 (1992): 第 32 次南極地域観測隊昭和基地越冬 (1991) 報告。南極資料, **36**, 441-472.
 東 晃 (1996): 南極へ航空機を飛ばそう。極地, **63**, 48-54.
 東 敏博・金尾政紀・瀬戸浩二 (1998): 4.3 ルート工作。日本南極地域観測隊第 38 次隊報告, 東京, 国立極地研究所, 359-364.
 片川秀基・荒木龍介 (1999): 空中写真を用いた鳥瞰図の作成と地質構造調査への利用。月刊地球, **21**, 827-831.
 Mellor, M. (1988): Hard surface runways in Antarctica. CRREL Spec. Rep., **88-13**.
 森脇喜一 (1998): 第 39 次南極地域観測隊夏期行動報告 1997-1998。南極資料, **42**, 300-320.
 中西 実・斎藤浩明・持田幸良 (1988): 5.3.2 大陸氷床上ラングホブデルルート工作。日本南極地域観測隊第 28 次隊報告, 東京, 国立極地研究所, 279-282.
 小山内康人・高橋裕平・田結庄良昭・土屋範芳・蛭田真一・林 保・今野敏徳・佐野雅史・寺井 啓 (1991): アムンゼン湾野外調査隊報告 1990 (JARE-31)。南極資料, **35**, 118-128.
 澁谷和雄・神沼克伊・水谷 仁・藤村彰夫・塚本茂樹・山田功夫・伊藤 潔・金沢敏彦・高崎政之・伊賀 章 (1991): 南極人工地震観測用ペネトレーターの開発 (I) 1989 年度経過報告。南極資料, **35**, 92-117.
 白石和行 (1995): 東南極航空網構想の現状と課題—SCALOP 南極航空輸送網ワークショップ (1995 年 4 月) から。南極資料, **39**, 170-188.
 白石和行・Klokov, V. (1997): 日本の南極観測基地における氷雪上の滑走路設置の可能性について—東南極航空網構想に関連して—。南極資料, **41**, 778-790.
 高橋 晃・藤井理行・長 幸平・西尾文彦・古川晶雄・渡辺興亜 (1995): 南極域における合成開口レーダー (SAR) 画像の雪氷研究への応用。南極資料, **39**, 205-232.
 渡辺興亜 (1989): 5.2.2 ラングホブデ露岩への大陸氷上旅行。日本南極地域観測隊第 29 次隊報告, 東京, 国立極地研究所, 227.
 山内 恭 (1998): 4.2 海氷状況。日本南極地域観測隊第 38 次隊報告, 東京, 国立極地研究所, 349-358.
 矢内桂三 (1981): 第 2 回 (秋) みずほ旅行報告。日本南極地域観測隊第 20 次隊報告, 東京, 国立極地研究所, 154-155.

(2000 年 1 月 18 日受付; 2000 年 4 月 19 日改訂稿受理)