

「しらせ」砕氷航行データが示す南極リュツォ・ホルム湾
定着氷の年々変化牛尾収輝¹・宇都正太郎²・泉山 耕²・下田春人²・鮎川 勝¹Interannual variation of landfast ice condition in Lützow-Holmbukta,
Antarctica, derived from navigation log of icebreaker *Shirase*Shuki Ushio¹, Shotaro Uto², Koh Izumiyama², Haruhito Shimoda² and Masaru Ayukawa¹

(2004年5月7日受付; 2004年8月23日受理)

Abstract: Characteristics of sea-ice conditions in Lützow-Holmbukta, Antarctica, have been investigated using the ice navigation log from the icebreaker *Shirase*, which has made a voyage almost at the same season and in the same sailing route every year since 1983. The vessel is considered as a suitable monitoring platform for sea ice. Not only basic information such as ice thickness and snow depth, but also ramming icebreaking data have been analyzed. In particular, the penetrating distances by ramming reflect difficulty in ice navigation and show distinctly interannual variations from 1983 to 2002. The periods with longer distances are consistent with those when breakup of landfast ice occurred frequently in the bay. The penetrating distances have shown a tendency to increase since the end of the 1990s, when ice breakup has been pronounced.

要 旨: 南極リュツォ・ホルム湾において毎年ほぼ同時期、同海域を航海する砕氷船「しらせ」は、海水モニタリング・プラットフォームに適している。同湾の海水状況の年々変化を推測するために、1983年から2002年までの間の「しらせ」砕氷航行データを解析した。主にラミング砕氷と氷厚や積雪深との関係を調べ、ラミング一回当たりの進出距離を砕氷航行の難易度の指標とすることにより、定着氷域の変化の特徴を抽出した。ラミング時の進出距離が短い1990年代前・中期は、航海が困難で厳しい氷状を反映し、氷厚や積雪深が大きい。一方、1990年代終わりから2002年までの間は、進出距離が長い傾向にあり、湾内定着氷の崩壊・流出の頻発期とも符合していることがわかった。

1. はじめに

海水は大気—海洋間の熱交換過程の中で成長・融解する。海水上の積雪も熱交換に影響を与え、さらに風や海流による氷盤の漂流や変形も海水分布を変化させる要因となる。海水域

¹ 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.

² 海上技術安全研究所. National Maritime Research Institute, 6-38-1 Shinkawa, Mitaka-shi, Tokyo 181-0004.

面積の時空間変化については、衛星による広域監視が可能となってきた。そして、各種衛星センサによる取得データの解釈、海水物理量への変換アルゴリズムの開発のためには、氷厚や氷上積雪深など現地観測データの蓄積が不可欠となっている。

海水域の長期変動の把握は気候研究においても重要である。昭和基地が位置するリュツォ・ホルム湾については、1980年以降の海水状況、特に沿岸定着氷の崩壊と割れた氷盤の湾外流出に関して牛尾(2003)が報告した。しかしながら、この海水流出が局所的な現象か、あるいは大気・海洋場の大規模変化の影響を反映しているかを含めて、流出の物理過程は未解明である。

南極観測船「しらせ」船上では、これまで気水圏系研究観測(29-32, 39, 41-45次)として、ビデオカメラによる海水観測が実施された(例えば、下田ら, 1997; 宇都ら, 2004)。また、2000年(42次)には電磁誘導法による氷厚の連続計測が開始、継続されている(宇都ら, 2004)。その他、17, 31-32次越冬期間中にはリュツォ・ホルム湾東部定着氷域で海洋・海水観測が行われた(Wakatsuchi, 1982; Takizawa *et al.*, 1992; 河村ら, 1997)。しかし、系統的な研究観測は行なわれておらず、同湾の氷厚や積雪深など、氷状の年々変化を議論するためのデータは十分ではない。

「しらせ」は1983年の就航以来、リュツォ・ホルム湾周辺では毎年ほぼ同じ時期、同じ海域を航海している。従って、「しらせ」は同湾の氷状をモニタリングする恰好のプラットフォームであると言える。吉田(1985)によると、1984年に国立極地研究所で開催された氷海航行セミナーの報告の中で、「船が氷海中を航行していること自体が測定であり、海水の測定と併せて、船の動きや出力その他の種々の記録を利用することが必要である」と記されている。

そこで、過去20年間にわたる「しらせ」砕氷航行のデータを解析することによって、氷状の年々変化の特徴抽出を試みた。氷厚、積雪深など航路上に限られたデータからではあるが、過去の氷状変化について得られた知見を報告する。

2. 解析に用いたデータ

「しらせ」が毎年発行する『南極地域観測協力実施報告書』には、各隊次の南極地域観測行動中の航海や観測支援に関する内容が記載されている。この中で「航海及び船務関係」の章の「航海記録」、「チャージング記録」の項から氷海航行に関するデータを用いた。「しらせ」は毎年12月中旬から下旬にかけて、リュツォ・ホルム湾沖の流水域から湾内定着氷域を砕氷航行しつつ昭和基地へ接近する。図1は就航した1983年(25次行動)から2002年(44次行動)までの「しらせ」往路航跡の概要を示したものである。定着氷縁が位置する南緯68.4度以南では、航跡の地理的な分布に大きな差異が見られない。そこで、本研究では南緯68.4度以南の定着氷域を対象に解析した。なお、同湾内の往復航海の時期が夏季(12-2月)に相

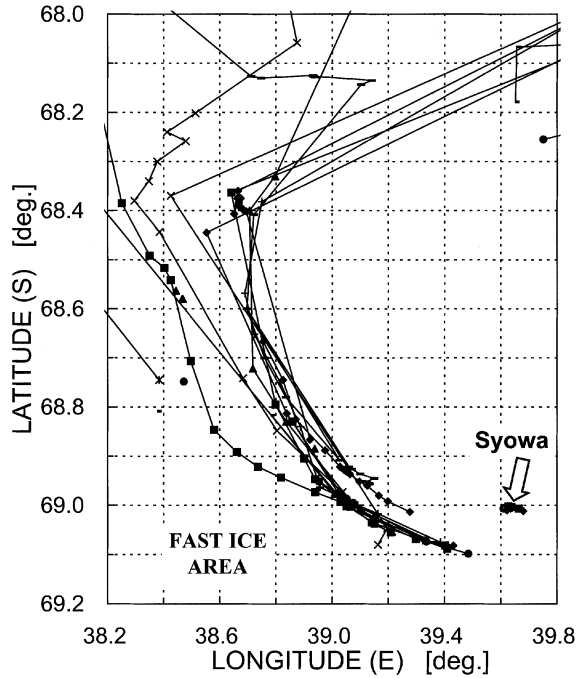
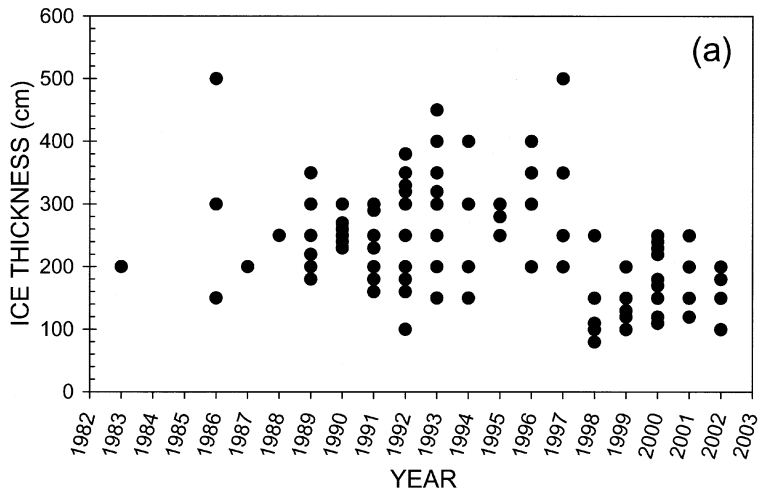


図 1 リュツォ・ホルム湾における「しらせ」の1983-2002年(第25-44次行動)の往路航跡。但し、各日の正午(世界標準時)現在の位置をもとに作図し、地点間を結ぶ線が陸上を横切る場合は削除した。

Fig. 1. The outward-voyage tracks of the icebreaker Shirase in Lützow-Holmbukta. Each symbol indicates the location at noon on a certain day. All the year tracks have been superimposed for operations from 1983 to 2002. Straight lines connecting locations which cross land have been eliminated.



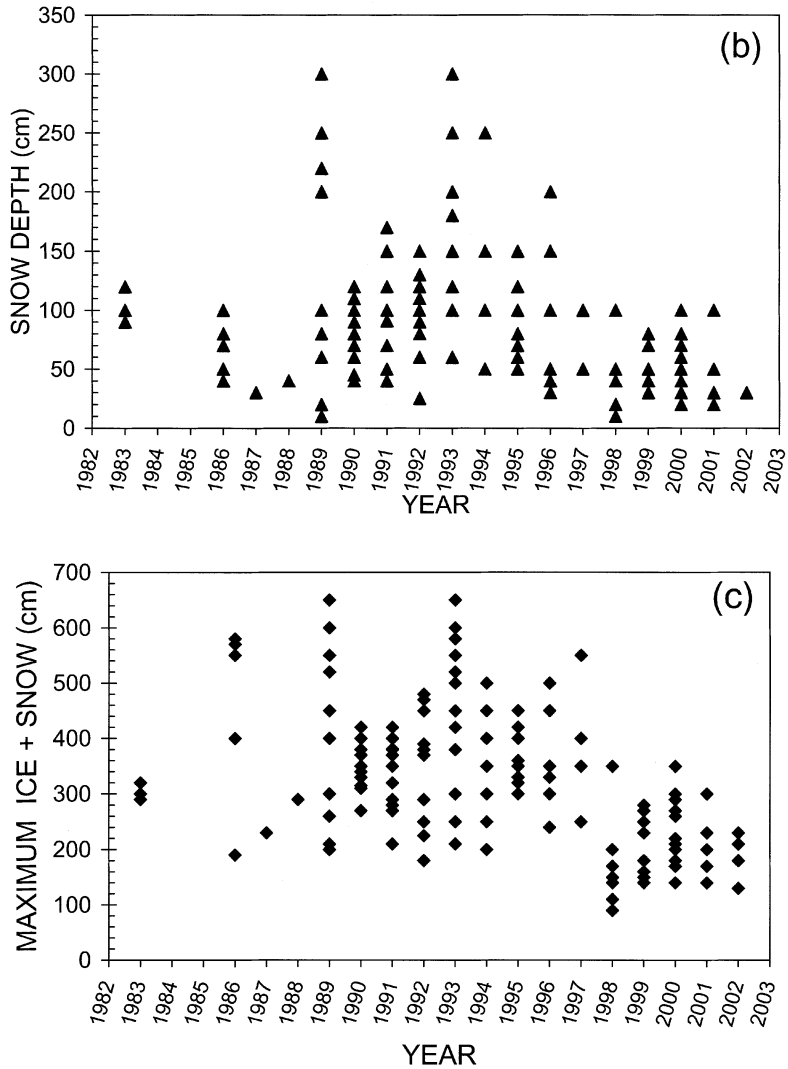


図 2 「しらせ」艦橋から目視計測された (a) 氷厚, (b) 積雪深, (c) 最大氷厚と最大積雪深の和についての年々変化. 日毎の最大値をプロットした. 但し, 1984年と1985年については記録データなし.

Fig. 2. Interannual variations of (a) sea-ice thickness, (b) snow depth and (c) maximum ice thickness plus snow depth. Plotted data are maximum values for each day. No data were recorded in 1984 or 1985.

当することから, 冬季氷状の特徴を名残として捉えるために, 融解があまり進行していない時期の往路データのみを採用した.

3. 結果と考察

3.1. 氷厚と積雪深の年々変化～目視計測の結果

航路上の氷厚および氷上積雪深が艦橋後部の甲板上から見通し法によって目視計測されている。図2は氷厚と積雪深データを各年についてプロットしたものである。データは日毎の最大値であり、氷海航行の往路総日数の違いからデータ数は年によって異なる（1984年と1985年については記録データ無し）。氷厚、積雪深共に1990年代半ばに大きく、その前後で小さい。特に2000年以降は、氷厚および積雪深には減少する傾向が現れている（図2c）。

ここで考慮すべきことがある。図1に示したように、「しらせ」は毎年ほぼ同じ海域を航海しているとは言え、航路周辺には大小の冰山や氷山片が多数あり、また年によっては烈しくハンモックした乱氷帯に遭遇することもある。そのため、昭和基地へ向かう際には船上のレーダー監視や目視、さらにはヘリコプターによる氷状偵察が行なわれている。特に1990年代後半からはRADARSAT衛星による高分解能の海水画像が入手できるようになったことで、効率的な航海の実施、つまり砕氷の容易な航路選定が可能となっている。このような要因が含まれていることを考慮すると、航路上で観測された氷厚や積雪深の値については過小評価されており、1990年代後半にはその傾向が強く現れている可能性のあることを認識しておく必要がある。

また、艦橋からの目視計測においては、航路上で均質なデータを蓄積することに限界がある。それは船首部で砕氷された氷盤のうち、氷厚や積雪深が目視されるものに限られるためである。そこで、この目視計測から示唆される氷状変化の特徴把握を補完するために、砕氷航行データを解析した結果を次節以降に述べる。

3.2. ラミング回数の年々変化

「しらせ」は厚さ1.5mの海水に対して3knotsの速力で連続砕氷する能力を有する。しかし、氷厚・積雪深の増大やハンモック状態の強まりによって、砕氷抵抗がプロペラ推力を上回ると連続砕氷が不可能になり、停止してしまう。このような場合、一旦後退して助走路を確保し、加速前進させて船の重量と船速から生み出される大きい運動エネルギーを持って氷盤に突入する。この砕氷航法をラミング（ramming）という。「しらせ」の場合、ラミング時に氷盤に衝突する時の速度は6-12knotsである。このラミングのことを前述の『南極地域観測協力実施報告書』では、チャージング（charging）と記されているが、本小論では氷海工学分野の用語であるラミングを採用する（例えば、Schultz *et al.*, 1994）。

まず、このラミング回数が過去20年間でどのように変化しているかを調べ、図3にまとめた。往路のリュツォ・ホルム湾定着水域におけるラミング回数は、就航した1983年を除いて1980年代には少なく、1984年（26次）、1985年（27次）および1987年（29次）の回数は零であった。このことは砕氷航行が比較的容易であった氷状が、1980年代半ばに維持されてい

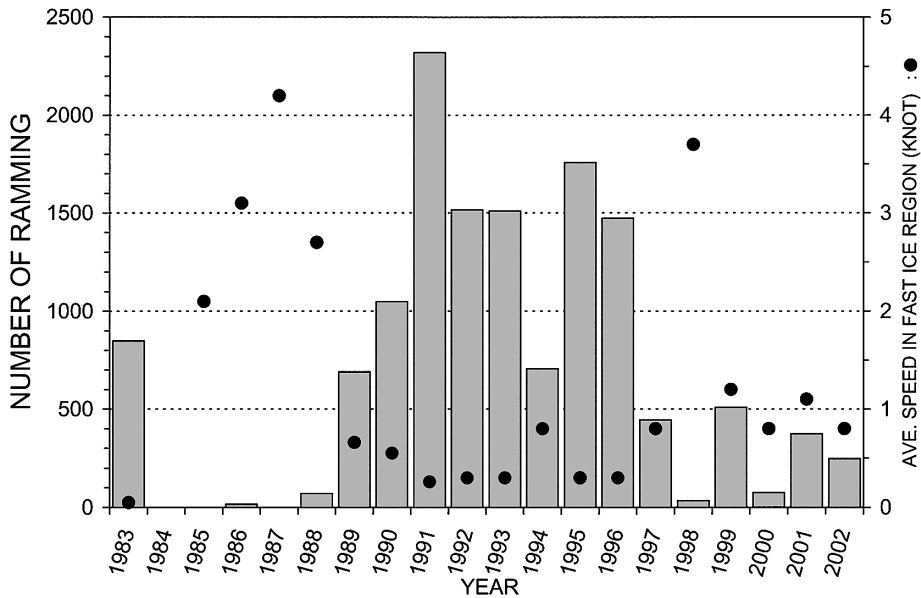


図3 往路定着氷域内のラミング回数と平均速力の年々変化 棒グラフ: ラミング回数; 黒丸: 平均速力 (knot)

Fig. 3. Interannual variations of number of rams and average speed in the fast ice region en route to Syowa Station. A bar chart shows the number of rams and closed circles show average speed (knot) in the fast ice region.

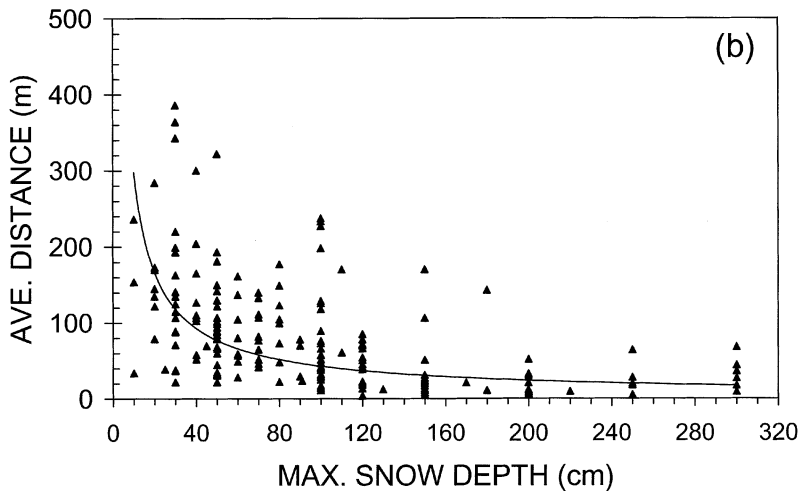
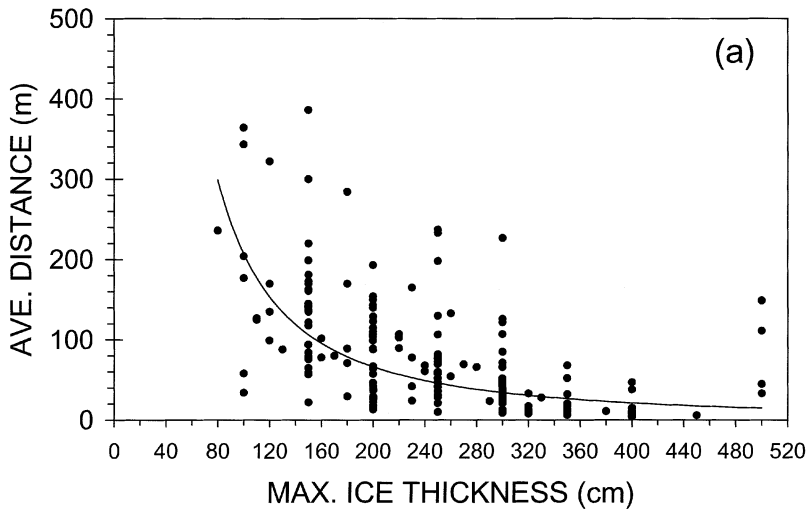
たことをうかがわせる。一方で、1990年代の前・中期はラミング回数が多く、中でも1991年(33次)は2000回を越えている。この年の行動中(1991-1992年)に実施されたラミングの総数は、リュツォ・ホルム湾の往路流水域、復路の定着氷・流水域における回数を含めると、計4441回にも達している(過去最多)。1990年代末以降は回数が少ない状態が続いている。この理由の一つとして、3.1項で述べた衛星情報の活用による航路選定の結果が反映されていると考えられる。図3には、定着氷域を航行する期間の平均速力も示した。ラミング回数が多い年に速力が小さいという関係が見られる。しかし、ラミング回数が約1000回を越えると、その年の平均速力は0.5knot以下になり、負の相関関係が明瞭であるとは言えない。

ラミング回数の大小は、年によって定着氷縁の位置(つまり定着氷域への進入位置の違いによる氷海航行の総日数の変化)や航路が僅かに異なること(3.1項)に大きく依存する可能性が残る。従って、氷厚や積雪深、さらには海水の強度の違いが反映された氷状の変化特性を理解するためには、ラミング回数や平均速力のみでは適切な指標とはなり得ないと考えられる。

3.3. 氷厚・積雪深とラミングとの関係

ラミング時には一回ごとの進出距離が計測され、報告書では一日当りの平均進出距離として記載されている。この進出距離の長短を砕氷航行の難易度指標の一つと見なした。氷厚および積雪深と進出距離との関係を図4に示す。ここで、進出距離はラミング一回あたりの日平均値で示されている。氷厚、積雪深、および両者の和が大きいほど進出距離が短くなる関係が見られる。短い進出距離は、氷厚または積雪深の大きいことが砕氷航行を困難にさせた結果だと考えられる。

図5には氷海航行中に観測された氷厚と積雪深の関係を示す。ばらつきは大きいですが、両者



の間には僅かながら正の相関が見られる。厚い氷は形成時点からの経過時間が相対的に長く、結果的に氷上積雪深の増大につながるものが定性的に理解できる。図4および図5の結果から、ラミングによる進出距離の長短が、氷厚や積雪深の変化の特徴、すなわち過去の氷状の年々変化を反映している可能性を示唆する。

3.4. ラミング時の進出距離の年々変化

進出距離の日平均値を各年でプロットしたものを図6に示す。ラミング実施の総日数が年によって異なり、プロット数の多い（ラミング実施数が多い）年は、結果的に進出距離の値も小さく、厳しい氷状が「しらせ」の前進を阻んだことを示している。進出距離は1990年代の前・中期に短い。一方、1980年代中期および1990年代末以降には長い進出距離が記録されている。宇都ら（2004）によると、ビデオ法の観測結果から1990年（32次）と2000年（42次）には厚い全氷厚（積雪を含む海水の厚さ）が観測されたことが述べられており、進出距離が伸びなかった日の多いことがこれらの年に見られ、定性的に合致する。なお、2003年（45次）のラミング回数は零であり（45次観測隊長、私信）、比較的容易な砕氷航行が2000年以降継続していることは、湾内定着氷の氷厚や積雪深が減少している傾向（図2c）とも合う。図6中にはリュツォ・ホルム湾内の定着氷が流出した時期を牛尾（2003）に基づいて示した。

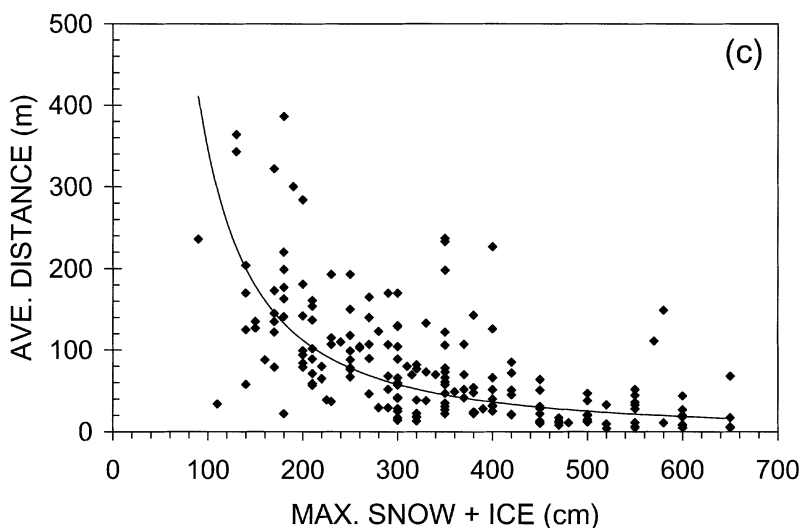


図4 ラミング時の進出距離と (a) 氷厚, (b) 積雪深, (c) 氷厚と積雪深の和との関係。氷厚、積雪深は各日の最大値を採用し、進出距離はラミング一回当たりの日平均値で示している。実線は指数関数で近似したもの。

Fig. 4. Relation between penetration distance and (a) maximum ice thickness and (b) snow depth. The distances are indicated as daily mean value per one ramming action. Each solid line is an exponential approximation.

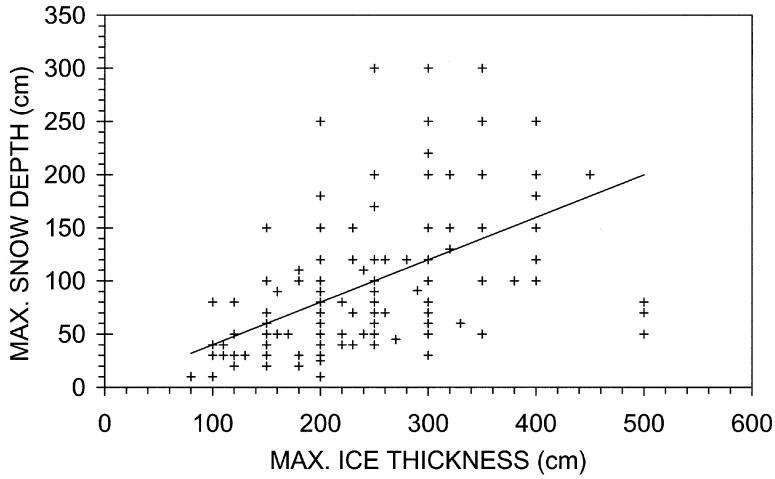


図 5 砕氷航行中に目視計測された最大氷厚と最大積雪深との関係。実線は直線回帰したもの。
 Fig. 5. Maximum values for snow depth versus ice thickness during the period of icebreaking. The solid line is a linear regression.

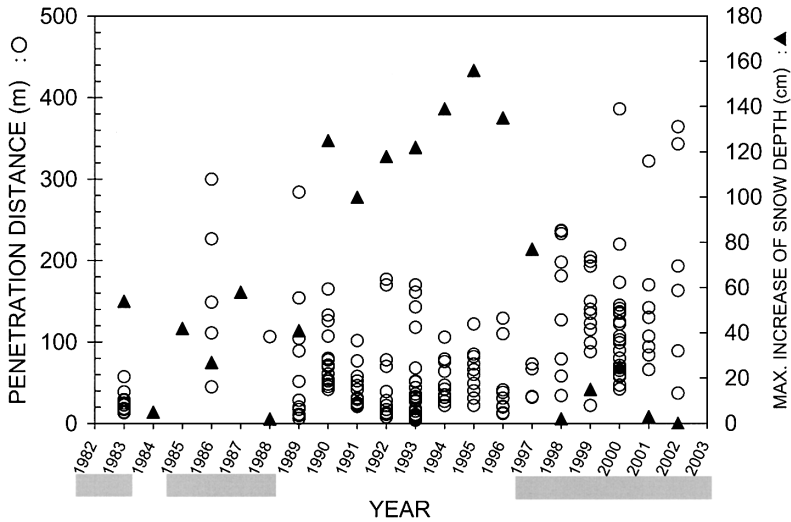


図 6 ラミング砕氷時の進出距離の年々変化 ○: ラミング 1 回当りの進出距離 (日平均値); ▲: 昭和基地北の浦で観測された氷上積雪深の年間増加量の最大値; 横軸の灰色帯: リュツォ・ホルム湾定着氷が崩壊して湾外へ流失した年
 Fig. 6. Interannual variation of penetration distance by ramming icebreaking. In 1993, the icebreaker did not come alongside Syowa Station because of tremendously heavy ice condition in the Lützow-Holmbukta. Open circles: daily mean value of penetration distance per ramming; closed triangles: maximum increase of snow depth at Kita-no-ura Cove off Syowa Station. The shaded periods indicate occurrence of ice breakup in Lützow-Holmbukta.

また、東オングル島北方の北の浦で観測された氷上積雪深の各年最大増加量も加えた。流出の頻発期と進出距離の長い時期とが符合していることがわかる。これは繰り返される海水流出に伴い、氷厚や積雪深の増大が抑制されたことが進出距離を長くし、結果的に砕氷航行の難易度を下げたと解釈できる。反対に、進出距離が短い時期は氷上積雪深が大きい時期と一致し、深い積雪がラミングによる砕氷効果を低減させたと考えられる。

なお、米国の南極観測船 *Nathaniel B. Palmer* の実船試験結果によると、突入時の船速が大きいほど進出距離が大きくなる傾向が示されている (Schultz *et al.*, 1994)。従って、ラミングによる進出距離は、氷厚や積雪深など氷状の他に、氷盤に突入する時の船速や助走距離にも依存する。本小論では考慮しなかった、これらの要素も加味して、氷状特性とその変化を解析することが今後の課題である。このことは船自体を氷状監視センサとする多角的な海水観測の今後を検討する上でも参考になるであろう。

4. 終わりに

「しらせ」砕氷航行データから過去 20 年間にわたるリュツォ・ホルム湾の氷状変化を推測した。砕氷航行の難易度の指標として、ラミング時の進出距離を各年で比較した結果、海水流出が持続する時期と符合することが見出された。これは目視による海水観測結果の解釈を補完すると共に、科学観測データの無い時期の氷状変化についても、砕氷航行データから氷状が推測できる可能性を示すものである。

南極大陸沿岸の海水変動の実態についての研究、観測例は依然として少ない。中でもリュツォ・ホルム湾は海水上の積雪が多い海域として特徴的であり、Kawamura *et al.* (1997) が述べている多年氷の成長・融解機構の解明も沿岸海水域の変動の理解に有益である。同湾の氷状変化は、地球科学研究の課題として重要であり、観測船の航行にも多大な影響をもたらすと考えられる。既存データの解析をさらに進め、今後のモニタリング観測手法を検討すると共に、氷海航行計画をはじめとする南極観測オペレーションや昭和基地周辺の野外観測・設営作業時の安全対策にも資することが期待される。

謝 辞

ユニバーサル造船株式会社技術研究所の山内豊氏ならびに同社艦船設計部の佃洋孝氏には、ラミング砕氷や「しらせ」航行データに関してご教示いただいた。情報・システム研究機構国立極地研究所事業部の大塚英明氏には、「しらせ」の過去の航海記録を提供依頼する際に便宜を図っていただいた。本研究は国立極地研究所一般共同研究「船上観測データによる氷厚の年々変動の解明に関する研究」(平成 14~15 年度)の一環として行なったものである。また、費用の一部は科学研究費補助金基盤研究 C (課題番号 15510015, 代表者 牛尾収輝) によった。ここに記して感謝する。

文 献

- Kawamura, T., Ohshima, K.I., Takizawa, T. and Ushio, S. (1997): Physical, structural, and isotopic characteristics and growth processes of fast sea ice in Lützow-Holm Bay, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **102**, 3345–3355.
- 河村俊行・滝沢隆俊・大島慶一郎・牛尾収輝 (1997): 海洋・海水観測. 南極資料, **41**, 395–414.
- Schultz, L.A., Middleton, R.W. and Dai, R.Y.T. (1994): Operation performance of the RV Nathaniel B. Palmer. ICETECH'94, The Soc. Naval Arch. Marine Eng., T1–25.
- 下田春人・遠藤辰雄・村本健一郎・小野延雄・滝沢隆俊・牛尾収輝・河村俊行・大島慶一郎 (1997): 船上ビデオ撮影による南極沿岸域の海水状況. 南極資料, **41**, 355–365.
- Takizawa, T., Ushio, S., Kawamura, T., Ohshima, K.I., Ono, N. and Kawaguchi, S. (1992): Preliminary results of hydrography under fast ice in Lützow-Holm Bay, Antarctica in 1990. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **6**, 106–125.
- 牛尾収輝 (2003): 頻発する南極リュツォ・ホルム湾の海水流出—1980年~2003年の海水状況から—. 南極資料, **47**, 338–348.
- 宇都正太郎・下田春人・泉山 耕・牛尾収輝・青木 茂・橋田 元・若林裕之・西尾文彦 (2004): 船上観測データに基づく南極リュツォ・ホルム湾定着氷の夏季における氷厚及び積雪深分布特性について. 南極資料, **48**, 165–179.
- Wakatsuchi, M. (1982): Seasonal variations in water structure under fast ice near Syowa Station, Antarctica, in 1976. *Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.)*, **74**, 85–108.
- 吉田栄夫 (1985): 氷海航行セミナー報告. 南極資料, **86**, 119–124.