

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—

牛尾収輝*

Frequent sea-ice breakup in Lützow-Holmbukta, Antarctica,
based on analysis of ice condition from 1980 to 2003

Shuki Ushio*

(2003年7月14日受付; 2003年9月5日受理)

Abstract: The history of sea-ice breakup in Lützow-Holmbukta, Antarctica, has been investigated for the period 1980–2003. Though spatial and temporal scales for breakups are different among each event, breakup phenomena have occurred at least 19 times. The geographical sites of breakups are almost the same in the bay and commencement is usually in autumn. In particular, the 1997/1998 event covered a wide area and was of long duration. Since then, autumn to early winter breakup has continued until winter 2003. It is suggested that a southerly wind field, small snow depth and mild winter prior to the breakup are factors which favor breakup events.

要旨: 南極リュツォ・ホルム湾で発生した海水流出の事例を、1980年から2003年までの間について調べた。事例によって流出の面積や持続期間に差異はあるが、過去24年間の内、計19年で流出が認められた。大半の流出が湾の中央北部から東部に至る、ほぼ同一箇所で発生しており、流出は秋季に始まることが多い。1997年厳寒期に発生した広域流出は、翌1998年冬季まで継続し、流出面積・期間共に最大規模となった。その後、2003年までの間は秋季から初冬に亘る流出が毎年継続している。頻発している海水流出の要因について、南寄りの風、少雪年の継続、暖冬の影響との関連から考察した。

1. はじめに

南極昭和基地のあるオングル諸島周辺は、ほぼ通年にわたって定着氷で覆われている。しかし、この定着氷も夏季には融解の促進や点在する開水面の拡大に伴い、場所によっては氷上作業に支障を来すほど不安定になることもある。オングル諸島を取り巻くリュツォ・ホルム湾全体では、定着氷野の一部が割れて、湾外に流出する様子が衛星観測で捉えられている。海水は海水面に比べて高アルベドであり、また海洋表層を寒気から遮断する“断熱材”としても働く。従って、海水流出後に現れた開水面では大気—海洋間の熱交換が活発になり、

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

南極資料, Vol. 47, No. 3, 338–348, 2003

Nankyoku Shiryo (Antarctic Record), Vol. 47, No. 3, 338–348, 2003

© 2003 National Institute of Polar Research

流出域とその周辺の気象および海洋表層環境に局地的な影響が及ぶことも考えられる。

このような海水の流出現象を通して、沿岸域の海水変動機構を理解することが本研究の主な目的である。リュツォ・ホルム湾を対象として、衛星画像や各種報告資料から海水状況の変化を把握した。流出域を含めて同湾海水域における気象・海洋観測データはほとんど無いため、昭和基地の観測データを参考にして、海水流出の要因を地上風系や海水積雪、気温変化との関連から推測した。

2. 海水流出の事例 ～どこで発生しているか～

1980年3月18日、昭和基地周辺で定着氷の流出したことが第21次南極地域観測隊によって報告されている。この時、東オングル島のすぐ北に位置する北の浦の海水上に駐機していたセスナ機が水没し、氷盤上に係留されたままのピラタス機は西の浦まで漂流した。この流出の一因として、勢力の強い低気圧に伴って発生したうねりが湾内まで進入したことが、定着氷野を崩壊させたと考えられている (Higashi *et al.*, 1982)。

これまでの衛星観測によると、昭和基地周辺に限らずリュツォ・ホルム湾全体で見ても、海水流出の様子が捉えられている。図1および図2a-cは、リュツォ・ホルム湾周辺海域のNOAA/AVHRR赤外画像で、表面温度が相対的に高い領域が黒くなるように処理されてい

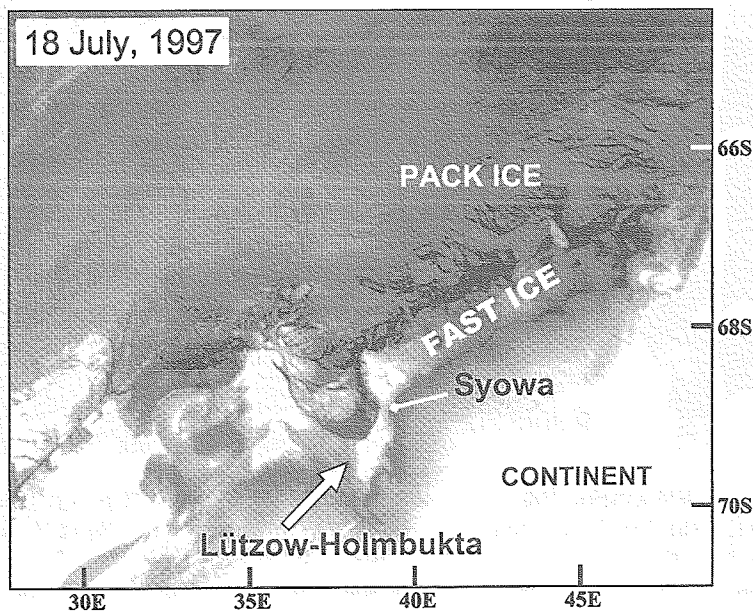


図1 1997年冬季に発生した大規模流出(7月18日受信, NOAA衛星AVHRR赤外画像)

Fig. 1. A large-scale sea-ice breakup in winter. NOAA/AVHRR image on 18 July, 1997.

る。湾内では海水流出後に残った定着氷の領域（白色系）と、ほぼ中央の開水面または薄氷域（黒～灰色系）とが識別できる。特に図1に示した1997年の事例では、7月中旬に広域流出が始まってから、翌1998年までの間に、流出面積は湾全体の約3分の2に相当する領域にまで拡大した。他の年についても流出面積の規模や持続期間の長短には違いはあるが、流出のほとんどは湾の中央北部から東部に至る箇所が発生している。

図2dの海底地形図（Moriwaki and Yoshida, 2002に基づく）に照らし合わせると、流出域の縁が位置する東経38度付近は、その東方に広がるプリンスオラフ海岸沿いの大陸棚の西端で、水深が急激に増す箇所に相当する。ここを境界に、西側（沖側）が流出していること

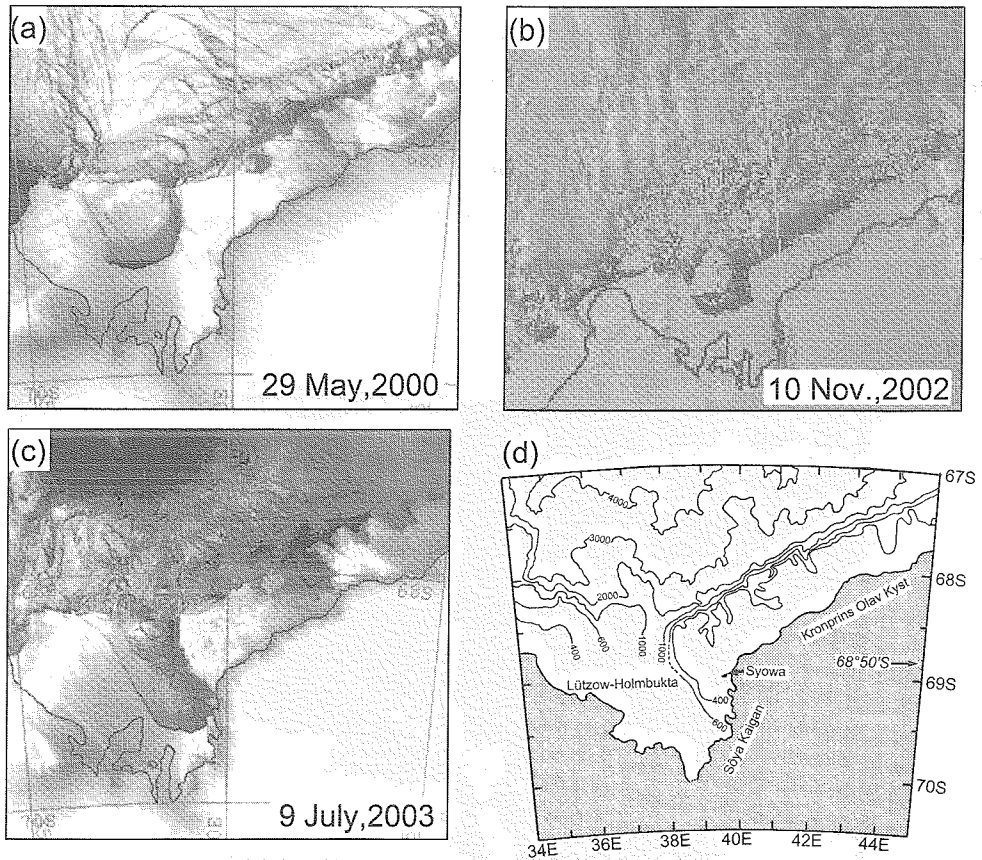


図2 NOAA衛星AVHRR画像で見たリュツォ・ホルム湾海水流出の様子。(a)2000年5月29日、(b)2002年11月10日、(c)2003年7月9日、および(d)流出海域周辺の海底地形図。深度の単位はm。海底地形図はMoriwaki and Yoshida (2002)に基づく。

Fig. 2. Sea-ice breakups in Lützow-Holmbukta appearing on NOAA/AVHRR images. (a) May 29, 2000; (b) November 10, 2002; (c) July 9, 2003, and (d) bathymetric chart in and around the sea-ice breakup area. Isobathymetric lines are in meters. The chart was drawn by referring to Moriwaki and Yoshida (2002).

から、海洋の流れや波の影響も海水流出に寄与している可能性が示唆される。

3. 海水の流出歴 ～発生の時期と年～

本小論で扱う海水流出は、定着氷のクラック発生や活発な広域融解に始まり、割れた氷盤の沖合への漂流を指す。リュツォ・ホルム湾の海水流出の発生有無は次のように定めた。南緯 68 度 50 分以南に及ぶ湾内定着氷野の割れ込み、または流水状態となったことが、NOAA および MOS-1 衛星の画像上で認められた場合を流出発生と見なした。また、衛星画像が得られていない期間については、昭和基地における地上観察や航空機観測に基づく流出関連の記述を、各隊次の日本南極地域観測隊報告（以下、観測隊報告）で調べた。しかし、流出有無を判断するためのデータや資料が、毎日について揃っているわけではない。そこで、流出期間の概略を把握するために、各月を上旬（1日～10日）、中旬（11日～20日）、下旬（21日～31日）の3つに区分し、一日以上の流出が認められた期間を抽出した。

図3に1980年2月から2003年7月までの流出期間をまとめた。湾中央部の流出の他、湾の東縁、昭和基地東方のオングル海峡から南部の湾奥に至る宗谷海岸沿いに、開水面または薄水域が認められた時期も示した。流出のほとんどは秋季に始まり、冬明けに流出域は凍結して、湾全体では安定な海水状態となっている。1980年代は、流出時期や持続期間の違いはあるが、ほぼ毎年発生している。1990年4月から6月には、湾内に巨大なV字型クラックが形成されたが、氷盤は流出しなかった（第31次観測隊報告）。1993年と1994年に流出した形跡が認められたが（第34次および第35次観測隊報告）、その他は顕著な流出は無く、1990年代の前・中期は比較的安定な氷状が維持されたと推測される。1997年の事例では、3月中旬にV字型クラックが発達し、4月中旬には流出域が湾内まで進入した（図3）。その後、厳冬期の7月も薄氷形成と流出が繰り返され（図1）、湾内が凍結、安定したのは翌1998年7月末であった。流出面積と共に、持続期間についても衛星観測開始以来、最大規模であった。この流出以降、2002年まで毎年、3月中・下旬に流出が発生した後（例えば、図2a）、7月以降に安定するパターンが繰り返された。しかし、2002年には春を迎えた11月になって、再び流出が始まった（図2b）。1997年厳冬期の広域流出と共に、2002年の再流出は特異な事例と言える。なお、後者については、図2cの2003年7月上旬以降も流出が持続していることを、第44次観測隊による衛星受信画像で確認している。

NOAA および MOS-1 衛星によって、海面状態が観測されるのは晴天時のみであり、昭和基地における目視範囲や飛行区域も限定される。また、1991年6月から1997年1月までの間、リュツォ・ホルム湾上を毎日回帰する NOAA 衛星の受信作業は休止していた。この期間に該当する観測隊報告によると、湾内海水状態は比較的安定していたと推測されるが、未確認の海水流出も十分有り得る。このように、海水流出の有無を判断するための衛星画像や目視観測による情報量には制約があることから、図3の流出期間数は過小評価となっている。

JARE		Month / Period													
snow/winter	Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year	
	21								V	V				1980	
	22	V					V	V	C	C	C	V		1981	
*	23					V		V	C					1982	
	24				V			V	V	V				1983	
	25	V	V											1984	
	26							V	C	C				1985	
	27	V	V	V		V						V	V	1986	
	28	V	V	V										1987	
	29													1988	
	30													1989	
*	31					V	V	V	V	V				1990	
*	32													1991	
*	33													1992	
*	34													1993	
*	35													1994	
*	36													1995	
*	37													1996	
*	38			V	V									1997	
	39													1998	
	40				V			V	V	V				1999	
	41													2000	
	42													2001	
	43													2002	
	44													2003	
snow	JARE	Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year

図3 1980年から2003年までの間のリュツォ・ホルム湾の海水流出歴。黒色部：湾中央部で流出した期間；横線部：宗谷海岸沿いのみに開水面が見られた期間；灰色部：流出の形跡が認められた等、流出していた可能性が高いと判断した期間；V：湾内にV字型のクラックが発生した期間；C：湾内に南北方向のクラックが発生した期間；*：北の浦海水上積雪深の最大増加量が60cm以上の年。

Fig. 3. History of sea-ice breakup in Lützw-Holmbukta from 1980 to 2003. Black-colored period: breakup in the central part of the bay; hatched period: breakup occurred only along Sôya Kaigan (Sôya Coast); gray: inferred as period with high possibility of breakup; V: v-shaped crack appeared; C: north-south crack appeared; *: year with maximum increase of 60 cm or more for snow depth at Kita-no-ura Cove, Syowa Station.

可能性がある。しかし、このことを考慮しても、1980年から2003年までの間については、計19年の流出が認められ、頻繁に海水が流出していたことは明らかである。

4. 流出要因の考察

図3に示したように、宗谷海岸沿いで開水面（または薄水域）が現れる原因として、裸氷帯が大陸近傍で卓越していることが上げられる。裸氷帯は日射を吸収しやすく、夏季の活発な融解が開水面の発達に寄与している。

リュツォ・ホルム湾の中央部では、海水流出は秋季に始まることが多い。この理由として、①春から夏に至る融解期を経て、氷盤の破壊強度が最低となる時期が秋季である、②秋季は沖合流氷域が北方へ広く発達していないため、湾内にうねりが進入しやすいと同時に割れた氷盤が沖に輸送されやすい、しかも、③昭和基地では地上風（北東風）が秋季に強いことか

ら (Ohshima *et al.*, 1996), 外洋で発達する風浪からうねりが発生しやすい時期でもある, の3点が考えられる. 以上の推測に基づき, 本論では湾内海水の広域流出に起因する要素として, 地上風系, 海氷上積雪, 寒候期の気温偏差について考察した. しかし, 現地観測データに限られているため, 事例解析に留めざるを得ない.

4.1. 地上風系

1997年7月に発生した流出事例に関して, 昭和基地で観測された地上風の風向別頻度を調べた. 風向別頻度とは, 各月における16方位毎の風向頻度を百分率で示した値である. ここでは定着氷野の崩壊と割れた氷盤の流出に寄与する, 北東及び南寄りの風の頻度を表1にまとめた. 冬季の大規模な流出発生前に相当する4月には, 北東風の頻度が平年値の約2倍であった. また, 同月のブリザード延べ日数は15日で(平年値: 6.5日), 過去最高値に達している. ブリザード時の卓越風向は北東または東北東であり, 風速も大きい. 前述したように, 沖合流水域が未だ北方へ十分に張り出していない秋季に, 強い北東風が頻繁に吹いたことによって, うねりの進入効果が増強した. このことが結果的に, 定着氷野のクラック発生やそれに伴う崩壊を助長したと推測される. 1997年は冬季の広域流出に発達する前に, 湾中央北方沖では定着氷縁からの崩壊が時間と共に進行し, それが南下した結果, V字型クラックの発生に至ったと考えられる.

定着氷野の崩壊後も, 割れた氷盤が沖合に運ばれず, 湾内に留まることがある(例えば, 1990年4月~6月). 氷盤は風の応力を受けて漂流することから, 沖に向かう南寄りの風が卓越すれば, 流出が促進されると考えられる. 1997年5月~7月の南風は平年値の約2倍の頻度で吹いていた(表1). また, 南寄りの風として, 真南の他に南南東および南東の風向頻度についても, 平年と比べて1997年は相対的に高かったことが明らかである. 割れた氷盤の沖合への輸送は, このような南方からの風が一因であったと考えられる. さらに, 南寄りの風はリュツォ・ホルム湾沖の流水野を発散させる. つまり, 定着氷縁に形成される開水面(通称, 大利根水路)の幅が広がったり, 沖合流水域の密接度が低下したりすることで, 湾内か

表 1 1997年の昭和基地風向別頻度(%). 平年値は1967年から1995年までの平均である.

Table 1. Frequencies percentage (%) of wind direction at Syowa Station in 1997. The normal values are calculated by averaging values from 1967 through 1995.

Wind direction Year \ Month	NE		S/SSE/SE	
	April	May	June	July
1997	42	13/ 8/ 9	12/ 8/ 6	12/11/ 6
Normal	22	7/ 6/ 4	6/ 7/ 6	6/ 6/ 4

らの海水流出が促進されることになる。

4.2. 海水上積雪

積雪は大気と海水の間に挟まって、海水域の熱交換に影響を及ぼす。積雪表面が高アルベドであるために、積雪が多い時は夏季の海水融解が抑制される。さらに、積雪の多寡と気象条件によっては、雪が夏季に融解し、積雪層内を浸透した融解水が氷点下の海水表面に接して再凍結する。これは Kawamura *et al.* (1997) が明らかにした上積氷 (superimposed ice) の形成で、多雪域の海氷成長機構においては、雪ごおり (snow ice: 積雪の重みで氷盤が沈下し、積雪中に浸透した海水の再凍結によって形成された氷) と共に、上方成長の重要性が指摘されている。多雪状態が続くと、海水は夏季の融解抑制や上方成長によって、破壊強度は増す傾向となる。つまり、定着氷野の外力に対する安定性が増し、流出は抑制される。反対に、積雪が少ない場合は、夏季の日射増大や昇温によって融解が進行し、海水の破壊強度の低下が秋季の流出要因に結びつく。

リュツォ・ホルム湾内では、広域にわたる海水上積雪深の年々変化を知るデータは無い。そこで、昭和基地北の浦定着水上で、気象定常部門によって毎年計測されている雪尺網のデータを参考にした。年によって雪尺網の設置場所が異なることもあるが、周囲の氷山や島の影響をほとんど受けず、吹き溜まり状態にならない場所で観測されたと仮定し、積雪深の年々変化を反映するデータと見なした。図4は1980年以降、各年の観測開始時(通常は2月頃)の雪面位置を零とし、それからの増減で表した積雪深の相対的な変化である。積雪が比較的多い年か少ない年かが明瞭に分かれることが特徴的である。ここで、積雪深の最大増加量が60cm以上の年を「多雪年」とし、図3の該当年には記号“*”を付した。その結果、多雪年が持続した1990年代前・中期は、海水流出が少なく安定した海水状態であり、他の年では少雪の持続期と流出の頻発期とがほぼ一致していることがわかる。なお、最大増加量が負の値を示した1988年、1998年、2001年、2002年については、雪面の削剥や昇華による消耗が卓越したことを表している。

さらに、1968年から1979年までの間の積雪深も調べた結果(但し、1971年と1976年の記録は不明)、少雪であった1969年と1970年を除いて他は全て多雪年であった。従って、1968年から2002年までの35年間については、多雪期と少雪期とが数年毎、交互に繰り返されている傾向が強く、降積雪を伴う広域の大気環境の変動が示唆される。

積雪深の年々変化の特徴を反映、支持する結果として、砕氷艦「しらせ」によるリュツォ・ホルム湾の砕氷航行記録が参考となる。「しらせ」は連続砕氷が困難な海域では、ラミング砕氷(チャージング)を行う。砕氷航行の難易度には、積雪を含めた海水状態が大きく影響すると言われる。一般的な傾向として、海水が厚く、また積雪が多い場合は砕氷効果が小さく、その一つとしてラミング砕氷による船体の進出距離も小さくなると考えられる。図5はラミ

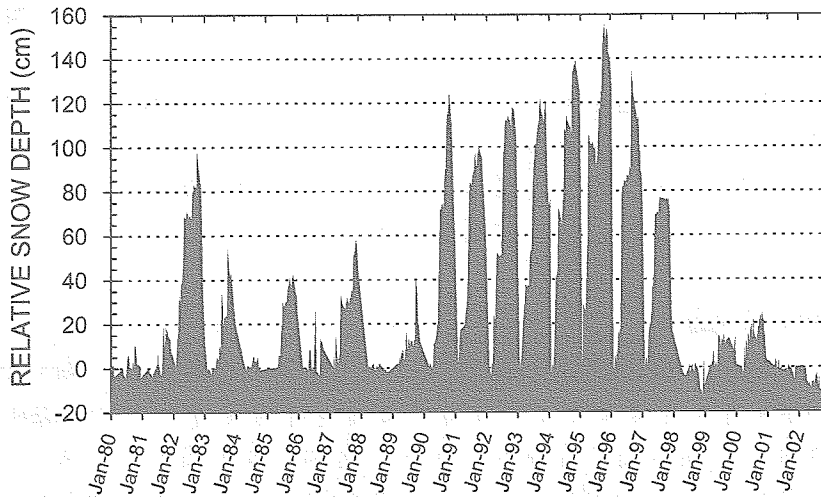


図 4 1980年から2002年までの昭和基地北の浦定着氷上における積雪深の変化。各観測隊の最初の測定日（通常は2月頃）からの相対的な変化量で示したものである。

Fig. 4. Relative variation of snow depth on land-fast ice at Kita-no-ura Cove, Syowa Station, from 1980 to 2002. For each year, the date of the first measurement is taken as zero on the ordinate axis.

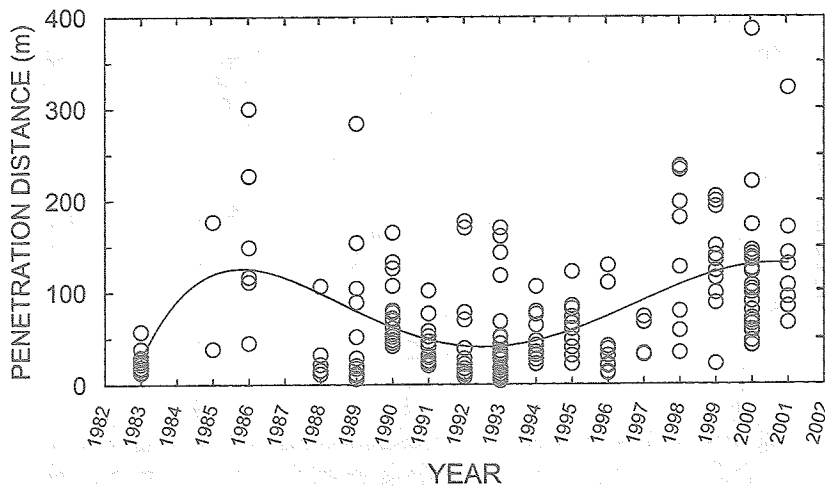


図 5 1983年から2001年までの「しらせ」のラミング砕氷による進出距離の変化。横軸は出港した年で示している。1993年は昭和基地に接岸せず、基地の西北西沖約20kmまでの砕氷航行記録に基づく。実線は5次多項式近似曲線を示す。

Fig. 5. Variation of penetration distance by ramming icebreaking of Shirase. Years of departure from Tokyo are indicated along the abscissa. In 1993, the ship did not come alongside Syowa, so data are based on the route up to 20 km off Syowa Station. The solid curve approximates a fifth degree polynomial.

ング砕氷時の平均進出距離の年による違いを示す。このデータはラミング砕氷の実績を日毎で集計し、ラミング一回当たりの進出距離を一日で平均したもので、リュツォ・ホルム湾における往路砕氷航行時のみを対象とした。進出距離は1990年代の前・中期で短く、同年代以降および1980年代中期でやや長い傾向が見られる。ラミングによる進出距離が長いことは、難易度の低い砕氷航行であったことを示すものである。これは氷厚や積雪深が比較的小さいことを反映していると考えられ、同時期に海水流出が頻発したことも符合する。

4.3. 寒候期の気温偏差

流出発生的前提条件は、海水が割れることである。海水野の破壊に関わる氷盤の力学的性質を決める要素の一つが水中ブラインであり (Schwarz and Weeks, 1977), その体積比は海水温度に依存する (Frankenstein and Garner, 1967). 一般に海水温度が高いほど、水中ブラインの体積比は増加し、氷盤の破壊強度は低下する。海水温度は、大気—海水—海洋間の熱収支で決まるが、ここでは気温に着目した。海水温度は気温に追従して変化することから、暖候期における海水温度の昇温の度合いは、その直前の冬季に気温がどの程度低下していたかに依存すると考えられる。そこで、流出の発生頻度が高い暖候期の海水強度に影響を及ぼす、真冬から初春に至る寒候期の気温変化を調べた。

海水上の気象観測が無いため、昭和基地の地上気温データを用いた。同基地の月平均気温

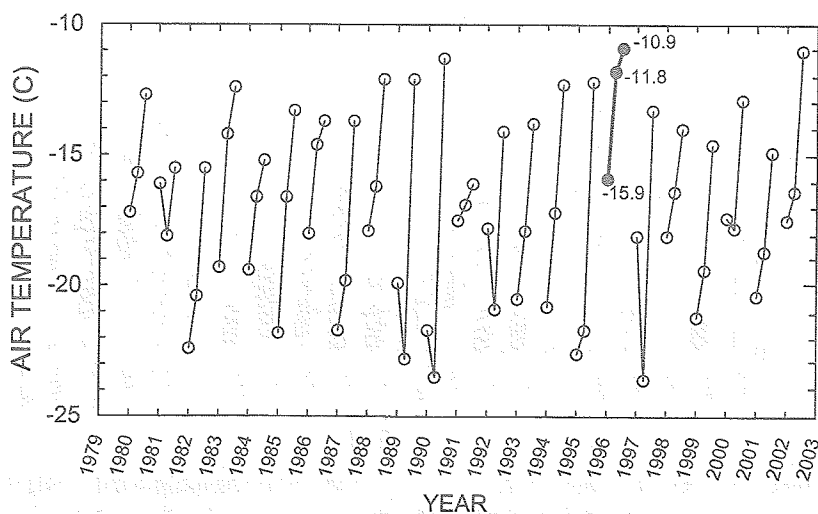


図 6 昭和基地における8月、9月、10月の月平均気温の年々変化。年毎に各月の値を順に結んでいる。1996年の値のみ黒丸で示す。

Fig. 6. Inter-annual variation of monthly mean air temperature during the cold season (August, September, October) at Syowa Station. Values for each month are connected in sequence. The values for the 1996 season are indicated by closed circles.

は、平年では8月に最低値を示す。8月、9月、10月の月平均気温を順に、年毎に示したものが図6である。1996年は他の年よりも、月平均気温がいずれも高い値を示している。特に同年9月と10月の値は、共に過去30年間では最高極値で、平年値との偏差はそれぞれ6.2°C、2.6°Cであった。両月の平均気温は、同基地の年平均気温-10.5°Cに迫るほどの高温でもある。8月の値も平年値との偏差は3.7°Cで、観測史上第二位の高温であった。このように冬季気温の低下の度合いが小さい場合、氷盤の冷却は弱く、破壊強度の増大も抑制される。また、Enomoto *et al.* (2002) は、1996/1997年夏季(11月~2月)の気温が比較的高かったために、海水の融解期間が長くなったことを示している。1990年代前・中期の比較的安定な海水状態が維持されていたところに、1996年冬季に生じた気温の顕著な正偏差とそれに続く夏季の高温が、翌シーズンの1997年に流出を引き起こした可能性がある。

5. ま と め

衛星画像や観測隊報告等を用いて、リュツォ・ホルム湾の海水流出歴をまとめた。その結果、1980年から2003年までの24年間では、少なくとも19年について流出が認められた。昭和基地周辺の定着氷が流出しない年であっても、湾全体で見ると流出が頻繁に起こっている、つまり不安定な海水状態であると言える。流出要因の可能性として、地上風、海氷上積雪、気温の3要素について考察した。少雪年の継続と暖冬に加え、強い北東風が氷盤の崩壊を招き、そこに南寄りの風が吹くことによって、割れた氷盤を湾外へ流出させた、という定性的なシナリオが考えられる。

また、湾内のほぼ同一箇所が繰り返されることで、流出域の氷厚増加量が小さい一方、流出せず湾内に残った多年氷は厚く維持される。2000/2001年夏季、湾内の「しらせ」航路上で行われた電磁誘導法による氷厚の連続計測の結果、南緯68.82度付近に氷厚分布の不連続が見出され(南側で厚い)、この地点は流出域の縁に相当していた(Uto *et al.*, 2003)。このように一年氷と多年氷の間では、力学的性質としての破壊強度に明瞭な差が生じているため、ほぼ同じ箇所が崩壊と流出が繰り返されやすくなっていることも考えられる。また、流出域の海底地形図の対比から示唆される、海水の流れや波の物理的な効果を考察することも必要である。

リュツォ・ホルム湾の海水状態は、昭和基地との間を往復する砕氷艦の航行にも影響を与える。今後、より効果的な航行計画を立案する観点からも、同湾とその周辺域の海水変動機構を明らかにすることが期待される。また、過去には短時間のうちに海水が流出した事例もある(1980年3月18日)。昭和基地における観測・設営作業の計画立案、遂行に当たっては、流出を含めた基地周辺の海水状態が天候の良否と共に重要な判断材料となる。海水流出の予測は困難であるが、安全確保に万全を期すことが不可欠である。そのためにも、事例解析の蓄積を基に経験的に注意すべき事象を明らかにし、南極観測の現場で運用される行動指針に

資することも重要であろう。海水流出の詳細な物理過程の解明は今後の課題である。

本研究を行うに当たり、以下の資料を参考にした。

- ・「日本南極地域観測隊報告第9次隊～第13次隊」南極地域観測統合推進本部。
- ・「日本南極地域観測隊報告第14次隊～第42次隊」国立極地研究所。
- ・「南極地域観測協力実施報告書第21次～第24次」砕氷艦ふじ。
- ・「南極地域観測協力実施報告書第25次～第43次」砕氷艦しらせ。
- ・「第11次南極地域観測隊気象部門報告」(大野ら)南極資料, No. 42, 16-34, 1971.
- ・「第13次南極地域観測隊気象部門報告1972」(藤沢ら)南極資料, No. 49, 72-90, 1974.
- ・「第14次南極地域観測隊気象部門報告1973」(小妻ら)南極資料, No. 51, 53-66, 1974.

昭和基地の風向別頻度データおよび同基地北の浦海水積雪深データの使用に当っては、気象庁観測部管理課南極観測事務室に便宜を図っていただいた。また、衛星画像の利用に際しては、国立極地研究所情報科学センターおよび気水圏研究グループ、第44次南極地域観測隊の協力を得た。本研究に要し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

- Enomoto, H., Nishio, F., Warashina, H. and Ushio, S. (2002): Satellite observation of melting and break-up of fast ice in Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **16**, 1-14.
- Frankenstein, G. and Garner, R. (1967): Equations for determining the brine volume of sea ice from -0.5° to -22.9°C . *J. Glaciol.*, **6**, 943-944.
- Higashi, A., Goodman, D.J., Kawaguchi, S. and Mae, S. (1982): The cause of the breakup of fast ice on March 18, 1980 near Syowa Station, East Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **24**, 222-231.
- 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.
- Moriwaki, K. and Yoshida, Y. (2002): Bathymetric chart of Lützow-Holmbukta, 1/250000. *Spec. Map Ser. Natl Inst. Polar Res.*, No. 4b.
- Ohshima, K.I., Takizawa, T., Ushio, S. and Kawamura, T. (1996): Seasonal variations of the Antarctic coastal ocean in the vicinity of Lützow-Holm Bay. *J. Geophys. Res.*, **101**, 20617-20628.
- Schwarz, J. and Weeks, W.F. (1977): Engineering properties of sea ice. *J. Glaciol.*, **19**, 499-530.
- Uto, S., Shimoda, H. and Izumiya, K. (2003): Sea ice thickness and snow depth distribution of the summer land-fast ice in Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Proc. 17th Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions, POAC'03, Trondheim*, vol. 1, 175-183.