

海洋・海水観測

河村俊行¹・滝沢隆俊²・大島慶一郎¹・牛尾収輝³Ocean and Sea-ice Observations during the
Antarctic Climate Research ProgramToshiyuki KAWAMURA¹, Takatoshi TAKIZAWA², Kay I. OHSHIMA¹ and Shuki USHIO³

Abstract: A five-year program of Antarctic Climate Research (ACR) started in 1987. Air-ice-sea interaction study was one of the main subjects of the program. Intensive observations for this purpose were conducted in Ongul Strait and Lützow-Holm Bay in 1990-1992. Measurements by means of CTD, XBT, AXBT and electromagnetic current meter, and seawater sampling was carried out in order to reveal the flow and oceanic structure under fast ice. Current meters and thermistor chains were also moored to collect long-term data. Sea ice cores were sampled and analyzed to determine the structure and growth processes. In this report, we describe first ocean and sea-ice observations in detail, second, structure and development of sea ice at points across Ongul Strait, and last, growth processes of sea ice in an artificial pool in Ongul Strait.

要旨: 1987年から5カ年計画で始まった「南極域における気候変動に関する総合研究計画 (ACR)」では、「海洋-海水-大気相互作用」の研究が中心課題の一つであった。その目的のために、1990年から1992年までオングル海峡およびリュツォ・ホルム湾において海洋・海水観測が勢力的に実施された。海洋観測では定着水下の海流と海洋構造を解明するために、CTD・電磁流速計・XBTによる観測、採水観測、および流速計・サーミスタチェインの係留を行った。また航空機による海洋観測も実施した。海水観測では海水の構造と成長過程を理解するため、海水コアの採取とその解析を行った。この報告では、まず海洋・海水観測の概要を述べ、次にオングル海峡を横断する観測点での海水成長について記し、最後にオングル海峡に人工的に開けたプールでの海水の成長について述べる。

1. 観測の概要

1.1. リュツォ・ホルム湾での観測

リュツォ・ホルム湾全体の海洋構造の季節変動と、積雪深・氷厚の変動および氷化過程を把

¹ 北海道大学低温科学研究所. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060.

² 海洋科学技術センター. Japan Marine Science and Technology Center, 2-15, Natsushima-cho, Yokosuka 237.

³ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

握するため、31, 32 次越冬期間中の 1990-91 年に海洋と海水の観測を実施した。観測点はパッダ島東方の P ルートの 5 点、ラングホブデ西方の L ルートの 6 点および、弁天島沖の OW ルートの 5 点である (図 1)。観測点の位置と水深を表 1 に示す。観測旅行は 1990, 91 年の 4, 8, 10 月の下旬を中心とする各 3 回、計 6 回行われた。1990 年には全ルートで観測が行われたが、1991 年 4 月は L ルートのみ、また同年 8, 10 月は L ルートおよび OW ルートのみで観測が実施された。

1990 年の観測では、一部の例外を除いて各測点で毎回、CTD 観測および溶存酸素測定用の採水、雪尺・積雪深・氷厚の測定、さらに一部の測点においては $\delta^{18}\text{O}$, ^{14}C , pH 測定用の採水、海水コアの採取を行った。1991 年には、各点で XBT・CTD・電磁流速計での観測、ナンセン採水器による採水、氷厚の測定、海水のコア採取を行った。また、上記の測点以外でも XBT 観測を行い、雪尺・積雪深は密に測定した。一部の測点では流速計・サーミスタチェインの係留も実施した (1.3 章参照)。

また、夏季には「しらせ」搭載のヘリコプター支援による観測も行われた。1990 年 1 月 17-19 日に、パッダ島東方沖の海水上 P0 点において、無人気象ブイ・海象ブイ・流速計の設置と海洋観測、海水のサンプリング、雪尺測定等を行った。1991 年 1 月 25-27 日には、P0 点において、前年に設置した流速計の回収と無人気象ブイ・海象ブイの点検、海洋観測、海水のサンプリング、雪尺観測を実施した。また、1992 年 1 月 17-20 日、P0 点にて、海水サンプリング、CTD・XBT 観測、無人気象ブイの点検を行った。更に、1992 年 1 月 22-24 日、ラングホブデ沖 L 3 点にて、海水サンプリング、CTD 観測、雪尺・積雪深測定、無人気象ブイの点検を行った。

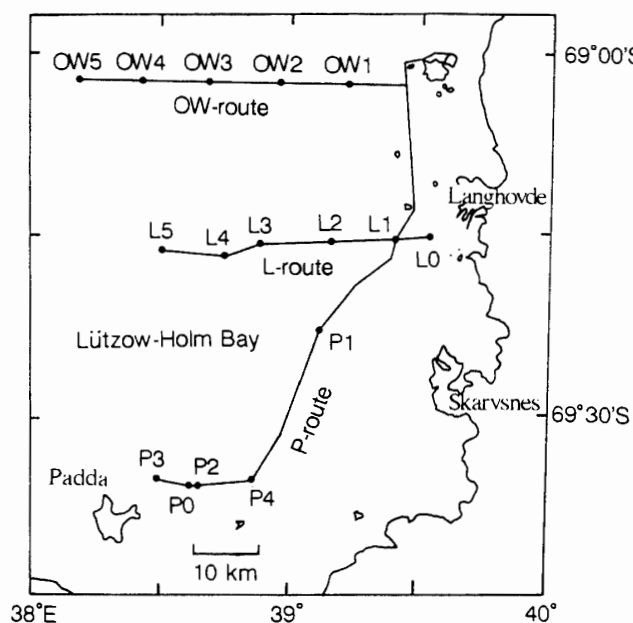


図 1 リュツォ・ホルム湾の海洋・海水観測点
Fig. 1. Observation Points in Lützow-Holm Bay.

表1 リュツォ・ホルム湾の観測点の位置と水深
 Table 1. Position and water depth at the observation points in Lützow-Holm Bay.

観測点	緯度 (S)	経度 (E)	水深 (m)
OW 1	69° 02.8	39° 12.4	158
OW 2	69° 02.7	38° 56.4	183
OW 3	69° 02.7	38° 40.0	430
OW 4	69° 02.7	38° 25.0	721
OW 5	69° 02.2	38° 11.1	758
L 0	69° 15.8	39° 29.8	337
L 1	69° 16	39° 22.5	229
L 2 (1990)	69° 15.6	39° 09.4	225
L 2 (1991)	69° 16	39° 10	492
L 3	69° 16.4	38° 53.2	510
L 4	69° 17.3	38° 46.0	965
L 5	69° 16.8	38° 30.4	645
P 0	69° 35.7	38° 35.9	978
P 1	69° 23.0	39° 06.0	483
P 2	69° 35.9	38° 39.0	1110
P 3	69° 35.3	38° 29.0	600
P 4	69° 35.4	38° 51.7	465

注：1991年のL 1, OW 4 は1990年と同一地点でなく、近傍の点。

海水コアのサンプリングは、電気ドリルのモーターを使用して電動化した内径 100 mm の SIPRE コアドリルで行った。現場で氷温をサーミスタ温度計で測定し、適当に切断処理を施して基地に持ち帰った。通常、海水の構造解析用と化学分析用の 2 本のコアを採取した。構造解析では、厚さ約 5 mm の鉛直断面と水平断面で、気泡形状・ブライン排出路の構造を、厚さ 1 mm 以下の薄片で結晶構造を観察した後、写真撮影した。化学分析用試料は融解後、屈折率式の塩分計で塩分を測定し、一部の試料では酸素同位体比および主要イオンの濃度を測定した。1990 年の観測では一部の地点で、1991 年にはすべての観測点でコアを採取し、以上の処理を行った。

サンプリングで出来た穴は、氷厚測定および XBT (1991 年のみ実施) 観測に利用された。しかし、CTD・電磁流速計での観測、ナンセン採水器による採水、およびサーミスタチェーンの設置・回収では、計器が外径約 130 mm の掘削穴より大きいため、50 cm 四方程度の観測穴を掘削する必要がある。更に大きなアンダー流速計の設置・回収では、60 cm×100 cm 程度の穴を開けなければならなかった。

海洋観測は断熱二重幌の観測カブース (重量約 1.7 トン) で行った。カブースにはウィンチ

各観測期間の湾内の積雪深と氷厚を表2に示す。積雪は大陸付近では少なく、離れるに従って深くなる傾向があった。積雪が多い観測点では1990年から1991年の夏を挟む時期に、氷厚が約1m増大していた。これは、夏の間積雪が融け、その融解水の再凍結で成長していたことを示している。一方、積雪の少ない地点では、海水は冬期間に成長し、夏には減少していた。なお、観測項目や実施方法等の詳細については第31,32次隊報告を参照されたい。

1.2. 基地近傍オングル海峡他での海洋・海水観測

1.2.1. 海峡横断観測

オングル海峡を横切る南緯69度線上に観測点OS1-4(図2,表3)を設け、海洋および海水観測を行った。1991年の観測は、OS1で測定せず、OS3およびOS4は1990と同一の点ではなく近傍の点で行った。

海洋観測では、1990年には4-12月の8,10月を除く毎月1回、OS1-4において、CTD観測と溶存酸素の測定を行った。一部の測点では $\delta^{18}\text{O}$ 、 ^{14}C 、pH測定用の採水も行った。1991年には3-12月の毎月、主にOS3でCTD、XBT、電磁流速計、ナンセン採水器による観測を行った。観測方法はリュツォ・ホルム湾での観測と同様である。

海水関係の観測では、海水の成長に及ぼす積雪の影響を調べるために、1990,91年の両年、海洋観測時に1月に1回の頻度で、OS1-4において氷厚・積雪深・雪尺の測定を行った。また、1991年には各点で4回から6回の海水サンプリングを実施した。表4に積雪深と氷厚を示した。観測結果については2章に記述されている。

1.2.2. 定点での海水成長過程の観測

海水の成長過程を継続的に調べるために、オングル海峡の定着氷上に観測定点(69°01'S,

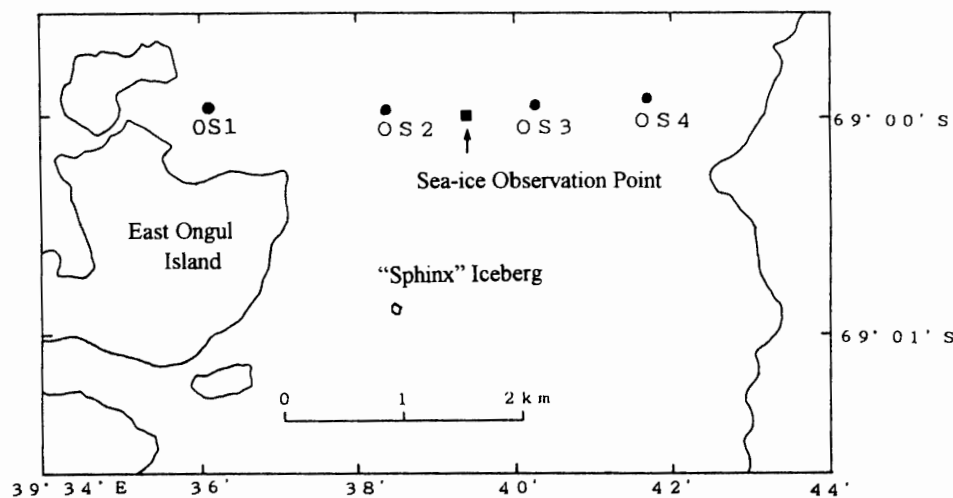


図2 オングル海峡近傍の観測点
Fig. 2. Observation points in Ongul Strait.

表3 オングル海峡横断観測点の位置と水深

Table 3. Position and water depth at the observation points in Ongul Strait.

観測点	緯度 (S)	経度 (E)	水深 (m)
OS 1	69° 00	39° 36.1	36
OS 2	69° 00	39° 38.3	178
OS 3	69° 00	39° 40.4	667
OS 4	69° 00	39° 42.0	300

表4 オングル海峡横断観測点の積雪深と氷厚 (単位: m)

Table 4. Snow depth and sea ice thickness (m) at the observation points in Ongul Strait.

観測日	OS 1		OS 2		OS 3		OS 4	
	積雪深	氷厚	積雪深	氷厚	積雪深	氷厚	積雪深	氷厚
1990/ 4/ 2- 5	0.12	1.44	0.13	1.35	0.17	0.80	0.10	0.65
5/15-17	0.11	1.35	0.22	1.27	0.01	1.01	0.01	0.90
6/11-13	0.13	1.56	0.54	1.28	0.20	1.12	0.10	0.98
7/20- 2	0.50	1.51	0.65	1.30	0.20	1.08	0.25	1.15
9/13-15	0.39	1.74	0.75	1.43	0.10	1.52	0.14	1.46
11/13-15	0.40	1.73	0.92	1.63	0.07	1.69	0.09	1.58
12/17-19	0.40	2.19	0.71	1.89	0.00	1.64	0.00	1.54
1991/ 3/ 5			0.04	1.63	0.03	0.92	0.02	0.28
3/28			0.26	1.52	0.16	0.80	0.00	0.68
4/12			0.20	1.52	0.16	0.78	0.00	0.61
5/ 6- 8			0.19	1.59	0.05	0.83	0.02	0.75
6/ 3- 4			0.25	1.80	0.04	1.15	0.01	0.89
7/15-16			0.46	1.75	0.16	1.24	0.00	1.12
8/ 8			0.60	1.74	0.12	1.23	0.00	1.29
9/ 3			0.54	1.87	0.15	1.42	0.00	1.39
10/11			0.73	1.92	0.27	1.49	0.00	1.51
11/13			0.72	1.90	0.21	1.54	0.00	1.48
12/ 9			0.70	1.79	0.07	1.61	0.00	1.26

39°38'E, 水深 302 m) を設けた (図 2)。32 次隊では、「しらせ」の航跡に阻まれて行けず、それより北方に新たな点を選定した。

定着氷に約 5 m 四方の観測用のプールを作成した。コアドリル、チェーンソーを用いて氷をブロック状に切り取り、人力または雪上車で引き上げ、開水面を出した。プールには気温・氷温・水温測定用の温度センサー (白金抵抗, Pt 200 Ω) を取り付けた。比較のためプール近傍の

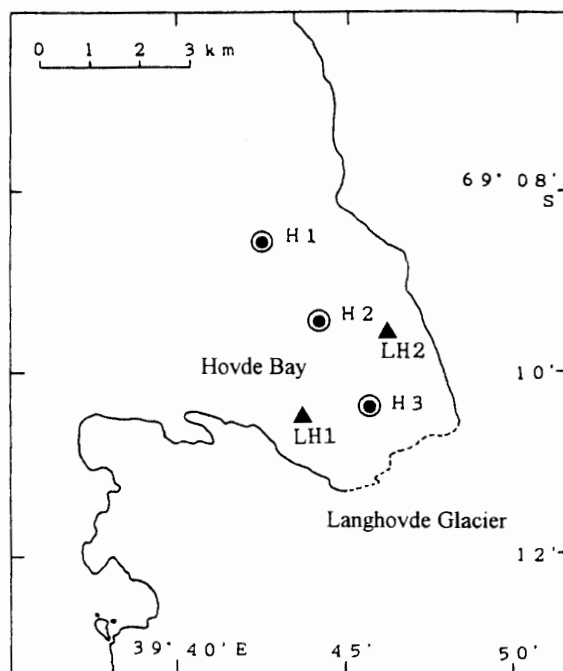


図3 ラングホブデ氷河沖の観測点
Fig. 3. Observation points off Langhovde Glacier.

表5 ラングホブデ氷河沖の観測点の位置・水深および氷厚

Table 5. Position, water depth and sea ice thickness at the observation points off Langhovde Glacier.

観測点	位置		水深 (m)	氷厚 (m)			
	緯度 (S)	経度 (E)		1990/ 9	1990/11	1991/ 5	1991/11
H 1	69° 08.6	39° 42.9	425	1.76	1.98		
H 2	69° 09.6	39° 44.8	460	1.80	1.96		
H 3	69° 10.4	39° 46.4	639	1.79	1.80		
LH 1	69° 10.5	39° 43.7	260			0.98	
LH 2	69° 09.5	39° 46.5	492				1.66

定着氷の氷温・氷下水温も測定した。それらの温度はデータロガー (コーナーシステム社製 KADEC-US および US6) に記録された。ロガーはクーラーボックスに収納し、データは約1月間隔で現場にてラップトップコンピュータで読み取った。

観測結果の詳細は、3章で述べられている。

1.2.3. 氷山近傍での観測

氷山の海洋に与える影響を調べる目的で、オングル海峡中央にほぼ孤立して存在する俗称スフィンクス氷山 (図2) を対象とした。その氷山の近傍で1991年5月と11月、12月上・中旬にCTD・電磁流速計による海洋観測を行った。

表層から 100 m 程までは結氷温度にあった 5 月には大きな特徴は認められなかったが、上層が高温化した 11 月以降の観測では、流下方向の観測点で温度・塩分の鉛直分布に 5-30 m のスケールを持つ顕著なステップ構造がみられた。ステップ構造の存在は上層 70 m ほどまでで、氷山の沈んでいると考えられる水深に一致するので、氷山の影響を示唆するものである。同様のステップ構造はすぐ近くに氷山があったラングホブデ沖の L0 点の 8 月の観測でも見られた。詳細な結果は OHSIMA *et al.* (1994) に記述されている。

1.2.4. ラングホブデ氷河沖の観測

氷河の海洋・海水に与える影響を調べる目的で、ラングホブデ氷河沖での海洋・海水観測を行った (図 3)。表 5 に観測点の位置・水深および観測された氷厚を示す。積雪は常になかった。

1990 年 9 月 17-19 日に H1, H2, H3 で CTD 観測、塩分・溶存酸素・ $\delta^{18}\text{O}$ 測定用の採水を行った。H2 では流速計の係留も行った。11 月 22-23 日に同様の観測と流速計の回収を行った。

1991 年は 5 月 21-22 日に LH1 と LH2 にて、CTD・電磁流速計観測と海水サンプリング (LH1 でのみ) を行った。また、11 月 12 日には、LH1 にて XBT 観測・海水サンプリングを、LH2 にて CTD 観測を行った。

1.3. 係留観測

定着氷下の氷温の鉛直分布および海流の変動を観測するために、表 6 に示したように、流速計とサーミスタチェーンを定着氷上から係留し連続観測を行った。

使用した流速計はアーンデラー社 RCM-7 で、サーミスタチェーンはユニオンエンジニアリング社製多層水温計 Model TR-3 で、長さ 20 m と 100 m でそれぞれ 11 層の水温が測定できる。

1.4. 定着氷上での無人海洋・気象観測

リュツォ・ホルム湾での海水過程を評価するため湾内の定着氷上に無人観測点を 2 カ所設置

表 6 係留観測の位置と期間

Table 6. Position, duration and instrument of the moored observations.

地点	深度	測器	期間
O S 1	1-20m	サーミスタチェーン	1990/09/13~12/19
O S 2	0.5-100m	サーミスタチェーン	1990/09/14~12/18
O S 3	70m	流速計	1991/04/01~07/17, 07/18~11/07, 11/08~12/10
O S 3	370m	流速計	1991/11/08~12/10
L 3	200m	流速計	1991/04/24~10/26
O W 4	450-550m	サーミスタチェーン	1991/08/29~10/29
P 0	300m	流速計	1990/01/18~1991/01/25
H 2	250m	流速計	1990/09/19~11/23

し、基礎資料となる気象・海洋データの通年にわたる取得と海洋混合層の季節変動の観測を行った。一つはパッダ島鯨岬の東約 10 km に位置する海洋・気象観測点 (P0) であり、他はラングホブデ西沖約 30 km のリュツォ・ホルム湾海洋観測 L ルートの L3 地点に設けた気象観測点である (図 1 参照)。

(1) パッダ島沖無人海洋・気象観測点, P0

観測装置は海洋観測 ARGOS ブイ、気象観測 ARGOS ブイそして流速計から成っている。設置作業は 1990 年 1 月 17-19 日に行われた。海洋ブイ (Polar Research Laboratory 社製) は電池・送信機などが入った本体 (長さ 365 cm, 直径 20 cm の円筒) の下に長さ 300 m のケーブルがついている。全体は浮力を持っており水に浮く。ケーブルには 6 カ所 (本体底面から 10, 40, 70, 120, 200, 300 m) に水温と電気伝導度センサーがついている。本体には気温計と気圧計も取り付けられている。観測に必要な電源として 2 年分のアルカリ電池を内蔵している。12 分間隔で測定された結果は ARGOS 方式により衛星に送信されフランス経由で極地研究所に転送された。

気象ブイの測定項目は、気温・風速・日射量・気圧・雪温であり、観測システムは 29 次隊から広域無人気象観測計画として 30 マイル点やみずほ基地に設置された ARGOS 方式ものと同一である。氷が割れても浮くように、測器は直径 2 m の FRP 製の円盤状のフロート (日本飛行機社製) の上に立てた高さ 1.8 m のマストに取り付けられた。電池は 1 年分のリチウム電池を内蔵した。

(2) ラングホブデ沖無人気象観測点, L3

パッダ島沖の無人気象観測 ARGOS ブイと同じものが、1990 年 5 月 7 日に L ルートの L3 地点に設置された。

ブイの保守作業と検証のための気象観測は、両地点とも、リュツォ・ホルム湾海洋観測旅行の際に行われた。

ブイの回収は行わず、電池が切れて送信が停止したのは 1993 年の夏であった。

1.5. 航空機による観測

1.5.1. AXBT 観測

昭和基地沖の沿岸ポリニヤ (氷野内開水面) の水温鉛直分布の季節変化を調べることを目的として、AXBT 観測を行った。AXBT (Airborne Expendable Bathythermograph) とは、航空機からの投下式海中水温計で、海水中を降下するセンサーからの信号は海面に浮かぶ発信器を通して電波となり機上で受信される。使用測器は鶴見精機製 (受信機は ATR-1) で、水深 460 m までの水温鉛直分布が測定できる。

観測は、1990, 91 年それぞれ 9, 7 回のセスナ A185F 型により行われた。観測実施一覧を表 7 に示す。1 回のフライトで 2 本のプローブ (直径 122 mm, 長さ 562 mm の円筒型, 重量 5.3 kg)

を受信アンテナ付きランチャーから投下した。

AXBT のフライト時に、衛星データのトルース観測を兼ねる目的で、定着氷縁及び沿岸ポリニヤでの目視観察及び写真・ビデオ撮影も同時に行った。目視観察では、多くの場合ポリニヤでは新生氷ができつつあるように見られた。ブリザードの直後にはほとんど海水面は見られず、好天が続いた時には大きな海水面が見られるという傾向があった。1991年9月と11月の観測では開水面から盛んに水煙 (frost smoke) が発せられるのが観測された。

1.5.2. TAD 観測

TAD (Tiros Arctic Drifter: 航空機投下式漂流ブイ) は、発信器の付いた長さ 1 m, 直径 12 cm の円筒型ブイで、航空機より投下されると自動的にパラシュートを開いて海水上に着陸するようになっている。着陸したブイは発信器により位置・気圧・気温のデータを発信し、アルゴス経由でデータを収集する。米国 DSI (Defense Systems Inc.) 製で、-50 度仕様、電池寿命は 1 年で、長期にわたって昭和基地沖の流氷の流動及び流氷域の気圧場を測定するのが目的である。

第 1 回目は、1991 年 8 月 10 日に定着氷縁の 1 km 平方の氷板上 (68°14'S, 39°07'E) に、第 2 回目は 9 月 21 日に定着氷縁 (68°19'S, 38°48'E) に、セスナにて投下したが、2 発とも投下直後より送信がとどえた。原因は着地時のショックでプローブに何等かの不具合 (例えば断線) が生じたものと思われる。このため、3 回目は 1992 年 2 月 20 日に「しらせ」のヘリコプターに

表 7 AXBT 観測実施一覧

Table 7. Date, position and estimated water depth at AXBT observation locations.

観測日	緯度 (S)	経度 (E)	水深 (推定)	観測日	緯度 (S)	経度 (E)	水深 (推定)
1990/ 3/ 6	68° 18'	38° 40'	2000	1991/ 1/14	68° 27'	39° 40'	290
3/ 6	68° 14'	39° 20'	1100	1/14	68° 23'	38° 57'	270
4/12	68° 38'	38° 41'	250	3/17	68° 38'	38° 02'	500
4/20	68° 12'	38° 12'	2000	3/17	68° 25'	38° 33'	700
4/20	68° 22'	37° 20'	2000	4/ 9	68° 44'	38° 39'	230
9/29	68° 17'	39° 00'	1500	4/ 9	68° 31'	39° 24'	400
9/29	67° 58'	40° 31'	1000	5/ 3	68° 43'	38° 41'	230
11/14	68° 21'	37° 38'	2000	5/ 3	68° 29'	37° 55'	800
11/14	68° 19'	38° 48'	2000	8/10	68° 17'	38° 47'	2000
11/29	68° 02'	40° 11'	1000	8/10	68° 18'	38° 00'	2000
12/11	68° 32'	38° 15'	440	9/16	68° 20'	38° 37'	1800
12/11	68° 19'	39° 26'	350	9/16	68° 28'	38° 00'	700
12/26	68° 18'	39° 39'	350	11/ 7	68° 23'	38° 53'	400
12/26	68° 26'	38° 11'	500	11/ 7	68° 22'	38° 16'	1000
				1992/ 1/20	68° 26'	38° 45'	250
				1/20	68° 35'	38° 09'	500

よりホバリングしながらロープでつり降ろして、定着氷縁の氷盤 (68°25'S, 38°13'E) に設置した。その後、約5カ月間にわたってデータが得られた。

1.6. 船上観測

1.6.1. XBT 観測

「しらせ」32次行動の往路においては、氷海域に入ってコスモノート海からリュツォ・ホルム湾まで計69本のXBTを投下した。主な目的は、XBTによって得られる海洋構造とビデオ観測によって得られる氷の密接度・厚さとの関係を調べることにある。氷海でのXBT投下は、プローブが氷に当たって破損したり、うまく海中に入っても途中断線したり雑音が入るなどの問題点があった。復路では、コスモノートポリニヤ出現海域の海洋構造を調べる目的で計30個のXBTを投下した。また、33次行動においては水路部と共同のもとに約100個のXBTを投下した。

1.6.2. ブライド湾での係留系の設置と回収

沿岸ポリニヤの通年の海況変動の観測を目的として、「しらせ」から定置係留系を設置した。観測点として、冬季でも開水面が頻りに現われるブライド湾のポリニア域に2点M1 (70°04.8'S, 23°50.1'E, 水深1372m), M2 (70°08.1'S, 23°59.8'E, 水深524m) を選んだ。

1990年2月7日0649 UTにM1において、水面下200m深にアンダーラ流速計RCM-7を、水面下800m深に同RCM-8を1台ずつ係留した。0939 UTにM2の300m深にRCM-7を1台係留した。これらの流速計は海底に沈められた重錘からロープで繋がれ、耐圧ガラスブイによって立ち上げられている。また、重錘の上には超音波式水中自動切離装置(日油技研製L型)を取り付けている。

1991年2月25日に、流速計の係留系の回収を試みた。M1で0458 UT, 0551 UTに、もう一つのM2では、0926 UTに、切り離し装置に切り離し指令を出し、動作確認の応答はあったが、いずれも発見できなかった。回収できなかった原因として、一部のガラス球が破損したための浮力不足等が考えられる。

1.6.3. TZD (海洋漂流ブイ) の投入

本ブイは海面に出ている発信器と海中300m長のサーミスタチェーン(水温センサー列)部からなり、海洋上層10点300m深までの水温分布とブイの漂流位置をアルゴス方式により人工衛星経由でデータ収集を行うものである。米国DSI (Defense Systems Inc.) 製で、-50度仕様、電池寿命は1年である。“コスモノートポリニヤ”出現海域(64°S, 49°E付近)に投入して、この海域の海洋混合層過程を把握することを目的とする。

投入は、1991年3月7日、0700 UT、観測甲板にアルゴスチェッカーを置き、送信音を聴きながら投入した。その後、アルゴス社のコンピューターにアクセクした結果、投入直後から衛星はTZDの電波を受信していないことが判明した。原因は、投入時に甲板から投下された際配

線のどこかが外れたか、水密が不完全で浸水のため回線がショートしたかなどが考えられる。

2. オングル海峡の海水成長

オングル海峡では積雪深が狭い範囲で急激に変化する。海峡を横断する観測点で海水の観測を行った。同海峡での積雪深と氷厚の特性および積雪が海水に及ぼす影響を調べることを目的としている。ここでは得られた結果の概要を述べる。詳しくは KAWAMURA *et al.* (1993) を参照されたい。

2.1. 観測

四つの観測点 (OS1-OS4) をオングル海峡の南緯 69° 上に設置した (図 2)。1990 年 4-12 月の 8 月と 10 月を除く 1 月ごとに OS1-OS4 の積雪深と氷厚を測定した。1991 年には、3-12 月の毎月、OS1 を除く全観測点で雪尺・積雪深と氷厚の測定を行った。また、OS2, 3, 4 で数回、海水のコアを採取し、解析を行った。

2.2. 積雪深と氷厚

図 4 に OS2, 3, 4 での 1990 年 4 月から 1991 年 12 月までの積雪深と氷厚の変化を示す。1990 年と 1991 年の積雪深を比較すると、OS4 での両年の差は顕著で、1991 年にはほとんど雪はないが、1990 年には最大積雪深は 0.25 m であった。OS3 では、両年とも同程度の約 0.2 m であったが、積もる時期に差があった。OS2 の積雪深は、1991 年には 1990 年よりも 0.1-0.2 m 少ないが、同様な変化の傾向を示した。

OS3 と OS4 の海水の厚さは両年ともほぼ同じ変動を示したが、OS4 での 1991 年 5-9 月の成長速度は他の観測点に比べ最も大きかった。これはほとんど積雪のなかったためと考えられる。

OS2 での海水成長は、1990 年 3 月から 9 月までは厚い積雪のためほとんど成長していないが、冬以降に成長が認められ、特に 11 月から 12 月の 1 カ月間に 0.26 m の氷厚増加が見られた。この春季以降の氷厚増加は、11 月に最大値となった積雪深の増大に伴う重量増加のため、水面下に沈み込んだ積雪層に海水が浸透し、その層全体が凍結し、雪ごおり (snow ice) を形成したことによると思われる。1991 年では、1990 年に比べ相対的に海水が厚くなったので、海水面は 12 月以外常に海水の中にあった。このため雪ごおりの形成は困難で春季の氷厚増大も顕著でなかった。

図 5 にオングル海峡での積雪深と氷厚の空間分布を示す。いずれの時期も積雪深はわずか数 km で激しく変化し、大陸から離れるに従って増大していた。積雪の多い観測点で海水が厚くなっていた。このことは、積雪層が厚いと断熱効果のため海水内を通る鉛直方向の熱流量が減少し、それが底面での凍結による海水の成長速度を減少させるといった一般的な海水成長と矛盾する。しかし、厚い積雪の重量が雪ごおりの形成による上方への海水成長を促進するこ

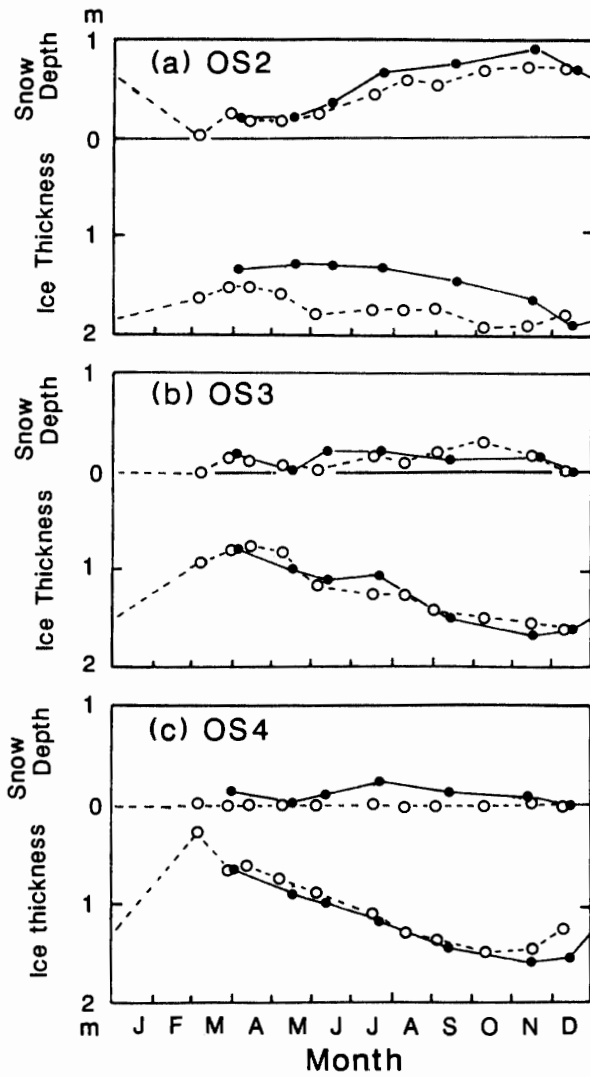


図4 オングル海峡での積雪深と氷厚の季節変化 (実線は1990年, 破線は1991年)
 Fig. 4. Seasonal variation of snow depth and ice thickness at OS2, OS3 and OS4 in 1990 (solid line) and 1991 (broken line).

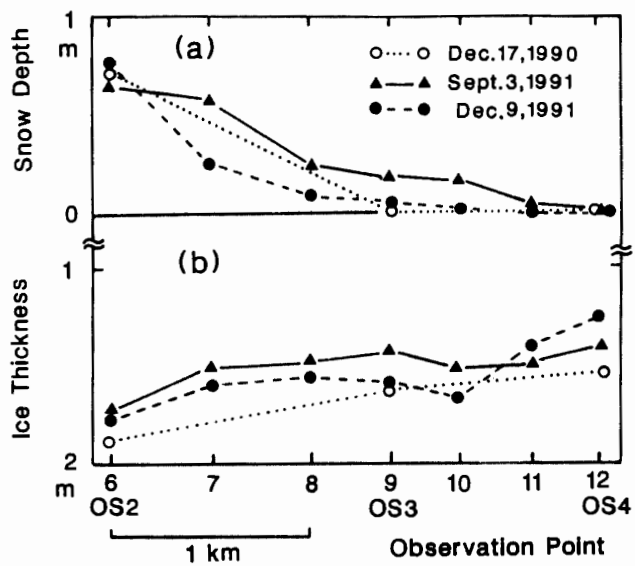


図5 オングル海峡の (a) 積雪深と (b) 氷厚の空間変動
 Fig. 5. Spatial variation of snow depth (a) and ice thickness (b) across Ongul Strait on three representative sampling days.

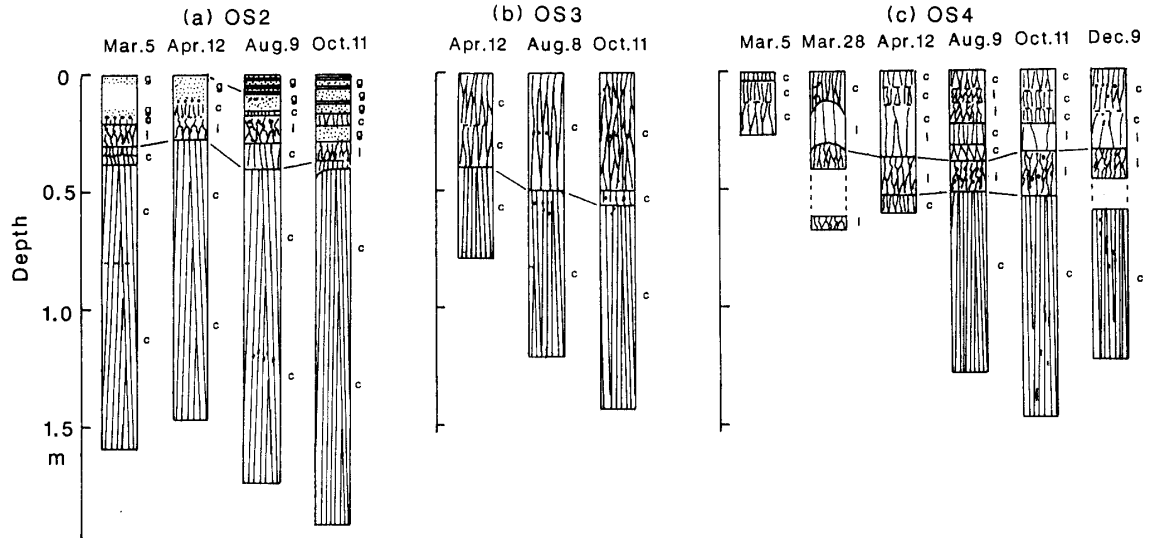


図6 1991年にオングル海峡で採取された海水コアの構造の季節変化。記号c, g, i, lはそれぞれ短冊氷, 粒状氷, 両者の混合または中間の水, 巨大“単結晶”を示す。

Fig. 6. Seasonal variation of stratigraphy of sea-ice cores collected at OS2, OS3 and OS4 in 1991. c, columnar ice; g, granular ice; i, intermediate columnar/granular ice; and l, large single crystalline ice.

ともありうる。LANGE *et al.* (1990) はウェッデル海において、積雪による雪ごおりが冬期間に氷厚を増大させると報告している。OS2において春季に海水の減少が小さいのは、厚い積雪が夏の海水の融解を抑制しているためと考えられる。

2.3. 海氷の構造と塩分

図6, 図7に1991年にOS2, 3, 4で得られた海水コアの構造および塩分分布の変動を示す。

裸氷域のOS4で得られた海氷コアは、全層が短冊氷 (columnar ice) から成り、いくつかの不連続な水平面が入っていた。表層の0.3-0.4 mまでの氷は常に透明で、塩分は0‰に近い。その結晶粒界は非常に滑らかで、海氷特有のモザイク構造がなく、結晶粒径も大きく、海水と等しい $\delta^{18}\text{O}$ の値を持つことから、この層の水は脱塩された海水の融け水の再凍結によると思われる。表層以外の構造等もリュツォ・ホルム湾の少雪域の観測点L1のものと非常に似ていた(河村ら, 1997; KAWAMURA *et al.*, 1997)。

OS3の海氷は全層短冊氷であった。上層約0.5 mまでの海氷は滑らかな結晶粒界と1‰以下の低塩分である特徴を持っていた。0.5-0.7 mの層は結晶粒界が複雑なモザイク構造で、塩分は0.5-2.5‰で脱塩された海水を示唆していた。約0.7 m以深は、この年の新成海水 (塩分は約5‰) である。

OS2では、上層の0.2-0.3 mに、OS3, 4では見られなかった多様な海氷が存在し、その塩分

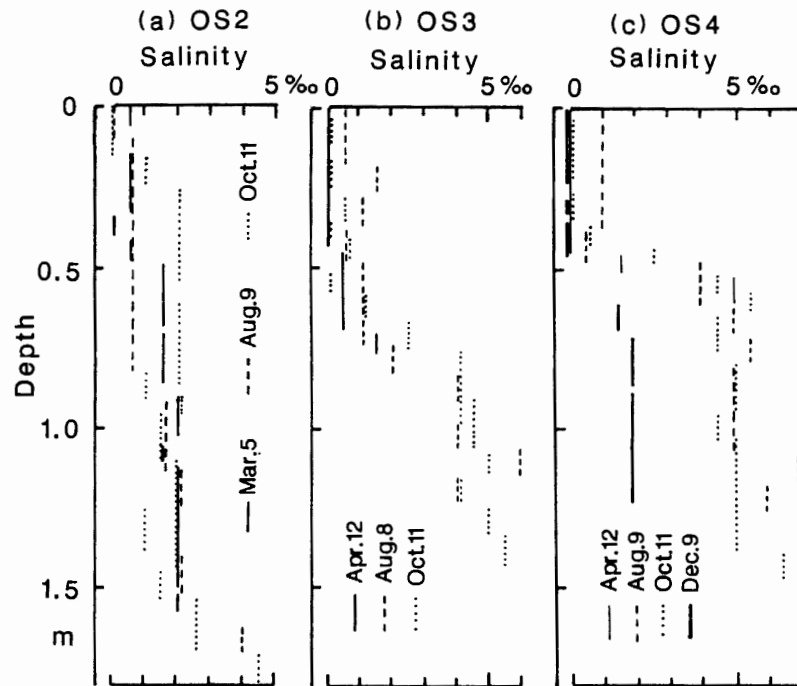


図7 1991年にオングル海峡で採取された海水コアの塩分鉛直分布の季節変化
 Fig. 7. Salinity profiles of cores collected at OS2, OS3 and OS4 in 1991.

は約0‰であった。8月のコアの深さ0.31-0.42 mにある短冊構造の層は、その透明なことと滑らかな結晶粒界から、リュツォ・ホルム湾の透明氷と同様に積雪の融け水の再凍結したものであろう(河村ら, 1997; KAWAMURA *et al.*, 1997)。

2.4. まとめ

オングル海峡では積雪深は海峡を横切って系統的に変化し、大陸から離れるに従って急激に増大した。この積雪深の違いは海水の成長や構造に影響を及ぼした。積雪は海水の成長を抑制するので、冬の積雪域での成長速度は裸水域よりも小さかった。しかし、氷厚自体は積雪域の方が裸水域よりも常に大きかった。

3. オングル海峡観測定点における海水成長過程

オングル海峡定着氷上に設定した観測定点(69°0.1'S, 39°38.7'E, 水深302 m)において海水成長過程に関する観測を実施した。これは厳冬期に現れた開水面において海水が形成され、成長していく素過程を実験的に調べることを目的としたものである。1990年3-12月(31次隊)の間、得られた結果の概要を以下に述べる。

図8は定点の概略図である。観測を開始した3月初め、厚さ122 cmの定着氷上には、裸氷部分が点在しており、積雪は多いところでも数cmであった。開水面から新たに海水を成長さ

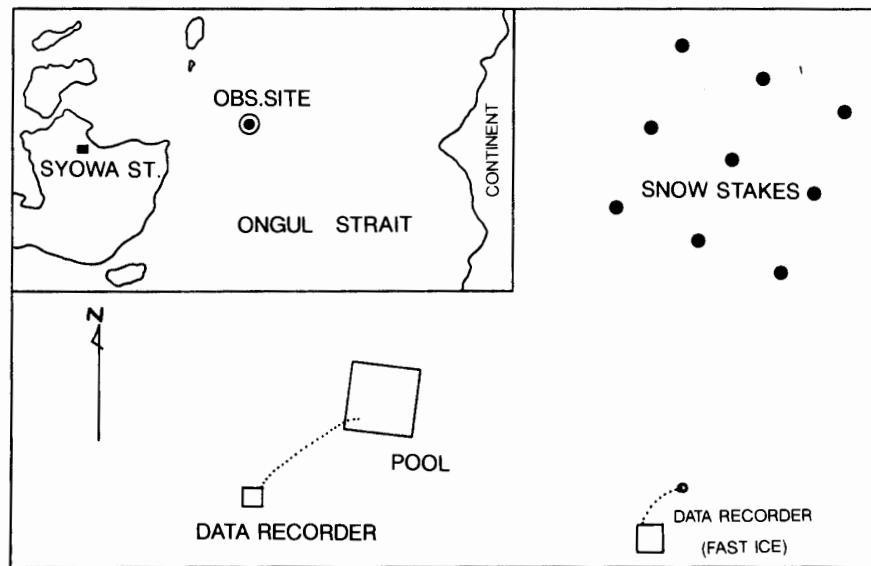


図8 オングル海峡に設置した観測定点概略図

Fig. 8. Schematic of the fixed observation site in the Ongul Strait.

せるために定着氷のブロックを切り取り、4.8 m×4.6 mの実験プールを作成した。このプールに気温・水温分布・水温測定用のサーミスタ温度センサーを設置し、データを10分間隔でデータロガーに収録した。5-10 cm 間隔で支持棒に固定された温度センサーは海氷成長の進行とともに、次々と水中に取り込まれていく。またプールにおける新成氷の成長過程と比較するために、約50 m離れた地点で定着氷内の温度分布・氷下水温測定用のサーミスタ温度センサーを埋め込んだ。これらプールの新成氷および定着氷において氷厚、氷上積雪深、海水塩分、表面水温・塩分の測定を適宜行った。さらにプールの北東約50 mの地点に竹ざおを10 m間隔で9本、格子状に立てた雪尺網を設置した。これらの雪尺を1週間に1-2回、および降雪のあった直後に測定し、積雪深の変化を調べた。

3月8日、開水面の状態から観測を開始した。図9に観測初期、3月21日までの間における実験プールの氷厚、積雪深、海水直下の水温・塩分（海水サンプリング時の測定値）の変化を示す。海水の塩分は屈折率計により測定した。その精度は±1‰である。海水下には14日まで、夏期の海水融解によって形成された25‰未満の低塩分水の名残が見られ、水温は結氷温度より0.2-0.4°C高い状態にあった。海氷の成長と共に塩分は増し、水温は約-1.8°Cまで低下した。11 cmの積雪があった17日以降、海氷の成長速度はやや減少しているが、3月8日から21日までの13日間で海水厚は20 cmに達した。図10に全測定期間（3月8日から11月20日）の海水厚、氷上積雪、海水塩分（全層平均）の変化を示す。海氷上に積雪があった後も海水は厚さを徐々に増しており、10月になって成長がほとんど止まった。9月30日には海水面が海水上面から2 cm上に位置していたことを海水サンプリングのために掘削した穴で観測している。これは積雪の荷重によって海水が押し下げられていることを示している。海氷の全層平均塩分は

初めは最大 10‰ を示した。しかし海水が成長するに従って塩分は低下し、ほぼ 5‰ の塩分に保たれている。図 11 に海水塩分の鉛直分布を示す。上層と下層で相対的に塩分が高くなっており、一年氷が持つ塩分分布の一般的な傾向が現れている。

観測期間中、厚さ 167 cm まで成長した定着氷の塩分分布を図 12 に示す。プール新成氷に比

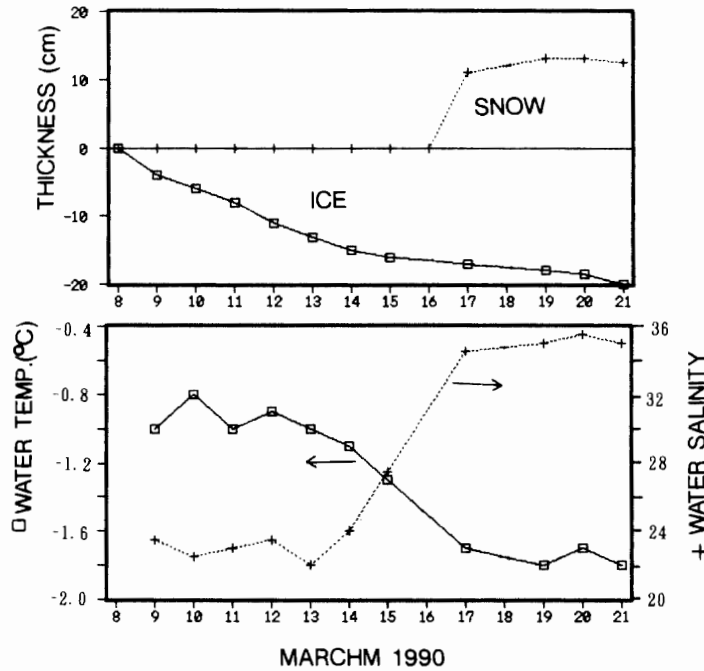


図9 実験プールにおける海水厚、積雪深、海水直下の水温・塩分の変化 (観測初期の3月9-21日の間)

Fig. 9. Variations of ice thickness, snow depth, water temperature, and water salinity at the early stage.

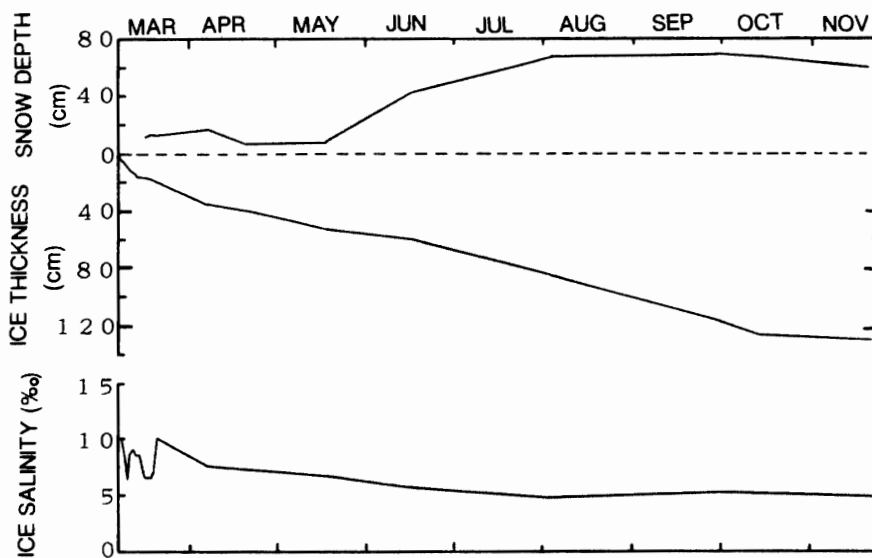


図10 実験プールにおける海水厚、積雪深、海水塩分の変化 (3月8日-11月20日の間)

Fig. 10. Variations of ice thickness, snow depth, and ice salinity at the experiment pool.

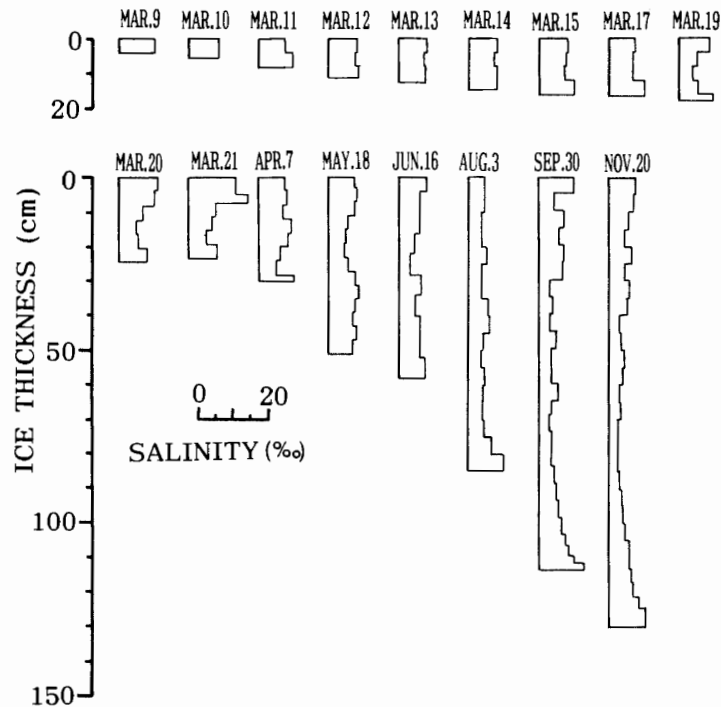


図 11 プール新成氷の塩分鉛直分布の変化
 Fig. 11. Salinity profiles of newly-formed ice at the pool.

べて測定頻度は少ないが、塩分分布はプールの新成氷のそれと同様の傾向を示している。ところがオングル海峡観測地点付近の海水は 1989 年の夏以降、流出していないことから、この定着氷は 1989 年冬に形成された二年氷である。定着氷においても 8 月 3 日の測定の時、氷サンプリングの掘削穴から海水が噴き出し、それが平衡状態に達した時の海水面が海水上面から 13 cm 上に位置していた。プール新成氷と同様、積雪の荷重によって海水が沈下した証拠である。従って、海水上部に現れている高塩分層はこのように滲み上がってきた海水が滞留した結果、形成されたものであると考えられる。4 回の測定において、下層の塩分分布の傾向が類似していることから、この地点における定着氷は下方から滲み上がってきた海水が積雪下部に浸透し、それが凍結した可能性がある。

12 月 10 日、海水上面には水が数 cm の厚さで滞留しており、定着氷に設置していたデータロガーが既に冠水していた。この水の塩分は測定していないが、海水に匹敵するくらいに十分塩分を含んでいた。この冠水が原因でデータロガーの動作が止まったため、測定期間の最後約 10 日間のデータは回収出来なかった。そこでプールの新成氷でモニターしていた水温記録を、12 月 1-10 日の間について示したものが図 13 である。それぞれの温度は海水上面から 11, 16, 21, 31, 41 cm の深さにおける値である (図中の数字が深さを示す)。この時期、水温は既に上昇し続けており、5 日頃から上昇率が増大し、10 日には 5 層が等温となっている。

雪尺データから描いた定着氷上積雪深の変化を図 14 に示す。前述したように海水面が海水

上面より高くなっていたのは積雪の荷重によって海氷が押し下げられたためである。気温が低い冬季は海水内温度も比較的低温であり、海水内部を海水が透過する割合は小さかった。しかし図 15 に示すように、11 月下旬以降の昭和基地における気温変化を見ると、0°C を上回る日が

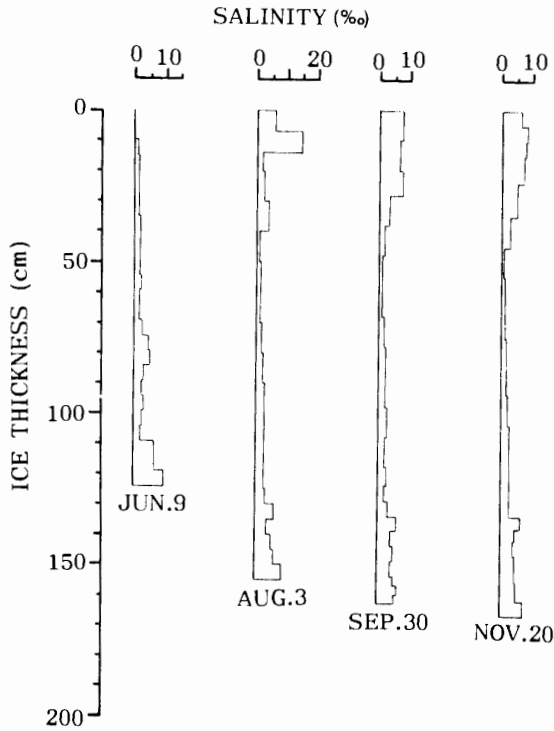


図 12 定着氷の塩分鉛直分布の変化
 Fig. 12. Salinity profiles of the fast ice at the fixed observation site.

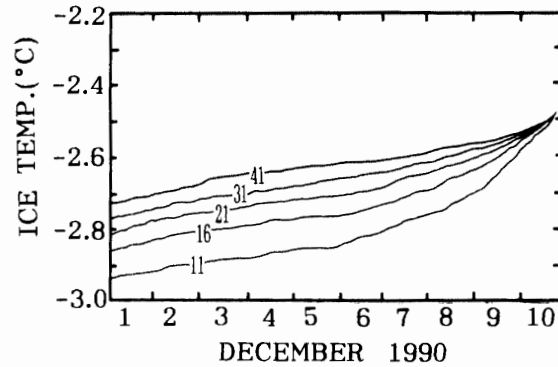


図 13 プール新成氷の上層水温分布の変化。
 図中の数字は海水表面からの深さ (cm)
 Fig. 13. Temperature variations of the upper layer of the newly-formed ice at the pool.

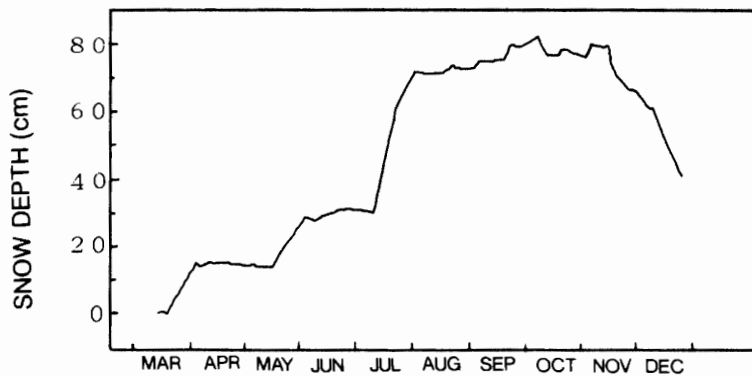


図 14 定着氷上の積雪深の変化
 Fig. 14. Variation of snow depth of the fast ice.

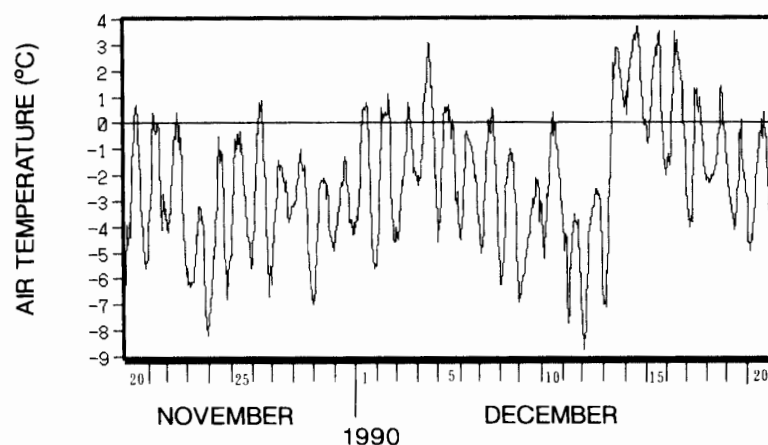


図 15 昭和基地における気温変化 (1990 年 11 月 20 日-12 月 20 日の間, 毎時データ)
 Fig. 15. Variation of air temperature at Syowa Station.

多くなっている。このように春から初夏にかけての気温上昇とともに海水温度も徐々に上昇し、海氷の透水性が増した結果 (ONO and KASAI, 1985), 海水の上方への浸入を引き起こしたと推測される。以上に示したデータから、積雪およびその荷重による海水の浸透が海氷の厚さや塩分分布に影響を与えている可能性がうかがえる。

文 献

- KAWAMURA T., OHSHIMA, K.I., USHIO, S. and TAKIZAWA, T. (1993): Sea-ice growth in Ongul Strait, Antarctica. *Ann. Glaciol.*, **18**, 97-101.
- 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): リュツォ・ホルム湾の海水の特性と成長過程. *南極資料*, **41**, 367-383.
- LANGE, M.A., SCHLOSSER, P., ACKLEY, S.F., WADHAMS, P. and DIECKMANN, G.S. (1990): ^{18}O concentrations in sea ice of the Weddell Sea, Antarctica. *J. Glaciol.*, **36**, 315-323.
- OHSHIMA, K.I., KAWAMURA, T., TAKIZAWA, T. and USHIO, S. (1994): Step-like structure in temperature and salinity profiles, observed near icebergs trapped by fast ice, Antarctica. *J. Oceanogr.*, **50**, 365-372.
- ONO, N. and KASAI, T. (1985): Surface layer salinity of young sea ice. *Ann. Glaciol.*, **6**, 298-299.

(1996 年 6 月 10 日受付; 1996 年 10 月 29 日改訂稿受理)