

北極海における夏季ベーリング海水の循環について

島田 浩二*¹ 島山 清*¹ 菊地 隆*¹
西野 茂人*¹ 滝沢 隆俊*¹

夏季にベーリング海から北極海に流入するベーリング海東部陸棚水(SBW: Summer Bering Sea Water)の北極海における循環について調べる。SBWはベーリング海峡を通過後、アラスカ沿岸に沿って密度流として北上しバロー沖で北極海海盆域に達するルートとヘラルド海谷に沿ってチャクチ海西部を北上しウランゲル島北東沖で海盆域に達する2つのルートがある。本稿では前者のルートを経由するSBWについて議論する。係留観測より、高水温で特徴づけられるSBWは、晩秋にバロー沖の北極海陸棚斜面域に達し、さらに翌年の1月にカナダ海盆内の主要海嶺の一つであるノースウインド海嶺に達していることが確認された。陸棚斜面域からノースウインド海嶺へのSBWの移流に対し表面応力の季節変動及び海底地形により流れが制御されることが重要であることが分かった。

キーワード：北極海、夏季ベーリング海水、海洋循環

Circulation of the summer Bering Sea water in the Arctic Ocean

Koji SHIMADA*² Kiyoshi HATAKEYAMA*² Takashi KIKUCHI*²
Shigeto NISHINO*² Takatoshi TAKIZAWA*²

Circulation of the Summer Bering Sea Water (SBW) flowing from the Bering Sea into the Arctic Ocean is investigated. There are two major channels of SBW from Bering Strait to the Arctic Basin. One is a branch flowing along the Alaskan coast as a density current. The other is a branch flowing along the Herald Valley on the western shelf of the Chukchi Sea. Here, we focus on the former branch of SBW. Temperature and salinity records of two moorings being distributed near Barrow and on the Northwind Ridge showed that the SBW reached off Barrow in late fall and reached the Northwind Ridge in January. The transportation of SBW from the shelf region into the Arctic Basin was controlled by surface stress and sea floor topography.

Key Words : Arctic Ocean, Summer Bering Sea Water, Ocean circulation

* 1 海洋観測研究部

* 2 Ocean Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

1. はじめに

夏季にベーリング海より北極海に流入する夏季ベーリング海水(SBW: Summer Bering Sea Water)は西部北極海における熱源の1つである。北極海の気候変動の兆候は海水変動に顕著に現れるが、海水変動をもたらす要因の1つとして海洋から海水への海洋熱フラックスの変動が挙げられる。SBWは西部北極海において海面境界層直下の50-100m深に存在し、その時空間変動は海洋熱フラックスの変動に寄与していると考えられている。McPhee et al. (1998)は、1997年のSHEBA観測時の西部北極海における表層100mの塩分について調べ、1975年のAIDJEX観測時と比較して融解期に約1.2m厚分の淡水供給の増加があったことを報告している。その主要因は海水の融解によるものであり、海水融解に対しアイス・アルベド・フィードバックの重要性を指摘している。海水融解の要因の1つとして、海洋からの熱フラックスの増加について指摘している。本稿では、西部北極海表層場への主熱源であるSBWの循環について、特にその輸送経路に焦点をあて、係留データ、漂流ブイデータ、歴史データ等を用いて調べる。

2. 西部北極海の表層海洋構造

西部北極海とは、グリニッジ標準時線を基準にした場合の西側の北極海を意味する。西部北極海と東部北極海の成層構造の大きな違いは、水温及び塩分が一様な表層混合層直下に水温極大が存在することである。図1は西部北極海の3地点(Northwind Ridge, カナダ海盆中央部多年氷域, アムンゼン湾)での、ポテンシャル水温, 塩分鉛直プロファイル及びポテンシャル水温- σ_θ 図を示したものである。カナダ海盆中央部多年氷域においても亜表層の水温極大が存在していることが分かる。多年氷域では、日射による水温上昇はほとんどないことから、水温極大は移流されてきたものと考えられる。

図1では、混合層直下の暖水は σ_θ が、23 kg/m³以上26.5 kg/m³以下の範囲に分布しているが、冬季の海面密度分布(図2)から、 σ_θ が24.5 kg/m³以下の水は、西部北極海海盆には存在しない。すなわち、冬季においても表層混合層直下の暖水として同定できるのは、 σ_θ が25-26kg/m³の水である。そこで、西部北極海カナダ海盆に広く見られる亜表層の暖水空間分布について、 $\sigma_\theta=25.5$ kg/m³面上のポテンシャル水温分布を用いて議論する。図3a及び図3bはそれぞれ、Environmental Working Group, Arctic

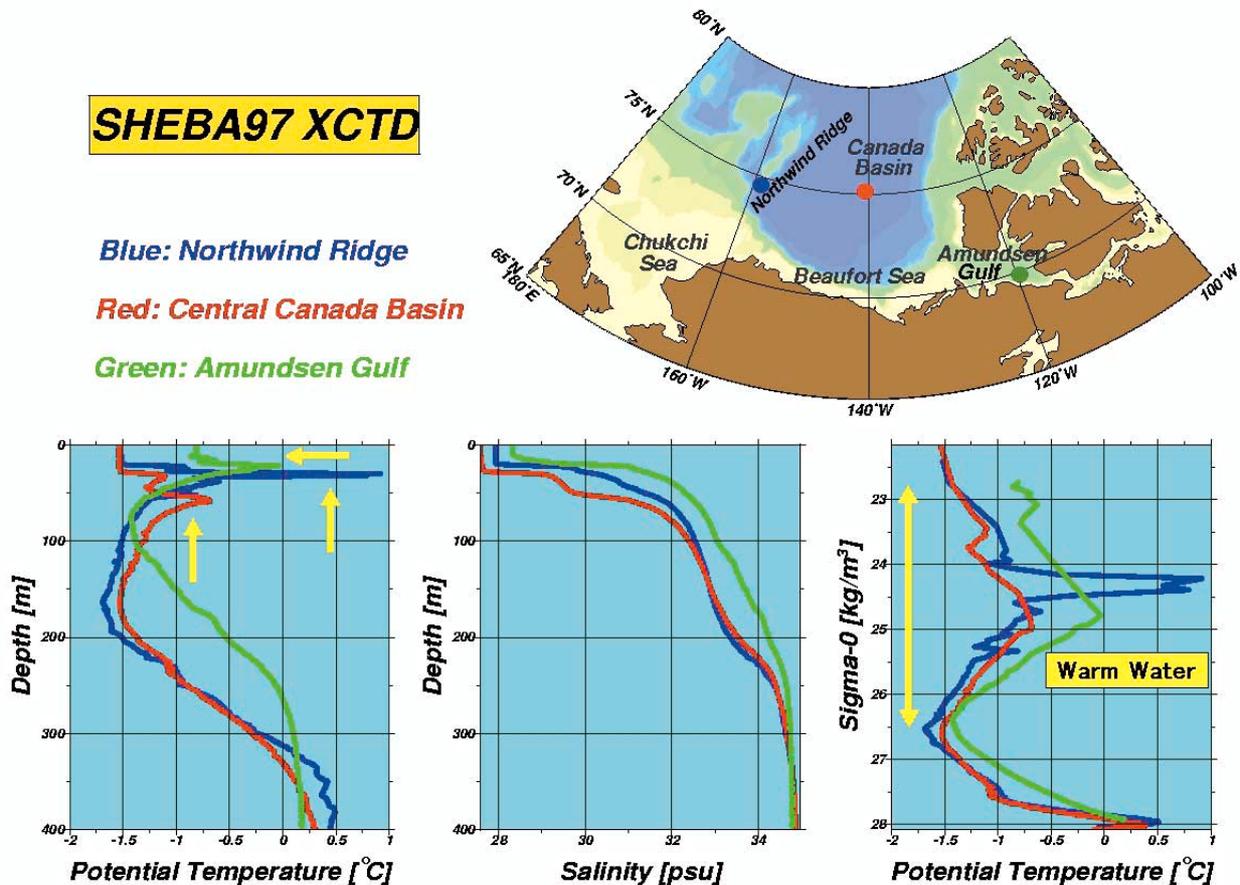


図1 西部北極海の3地点でのポテンシャル水温, 塩分鉛直プロファイル。左下図の矢印は水温極大水を示している。
 Fig. 1 Vertical profiles of potential temperature and salinity at three stations in the western Arctic Ocean.

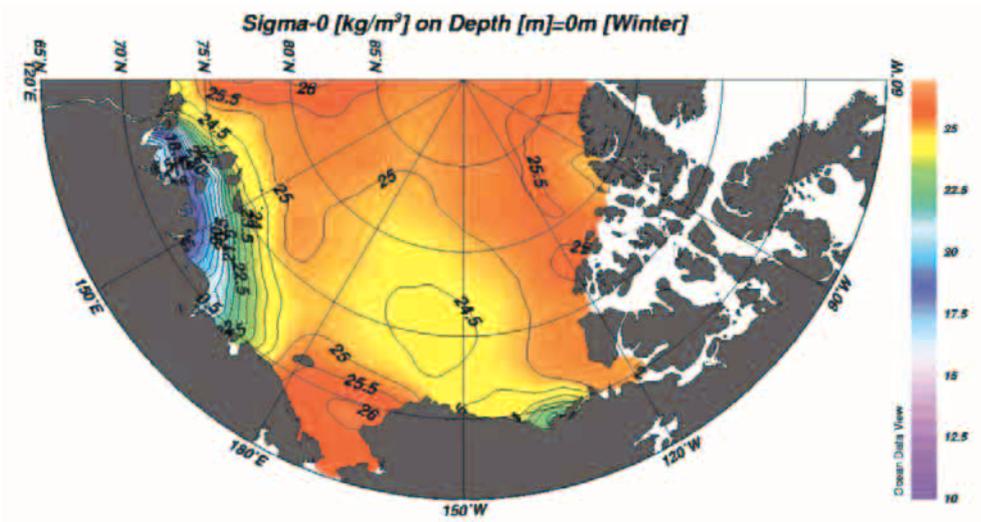


図2 EWG Arctic Ocean Atlas冬季データの水深0mでの σ_θ 分布。
 Fig. 2 EWG winter Arctic Ocean Atlas σ_θ distribution on sea surface.

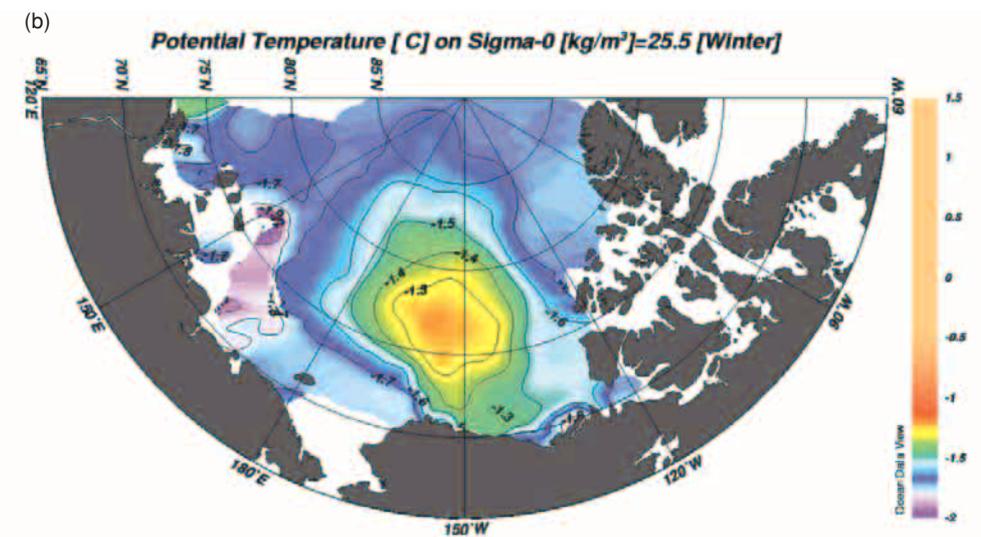
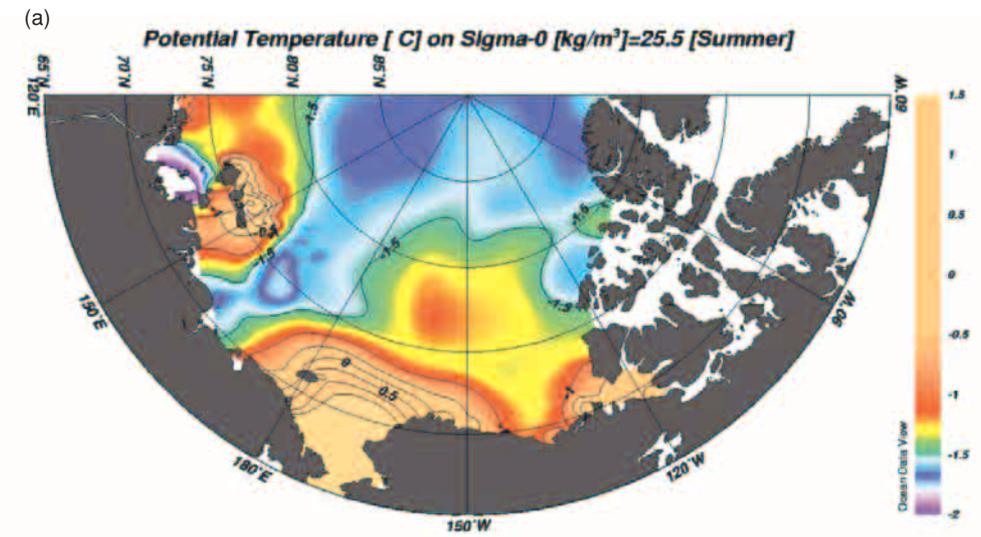


図3 $\sigma_\theta=25.5 \text{ kg/m}^3$ 面上のポテンシャル水温分布。(a) EWG Arctic Ocean Atlas夏季データ (b) 冬季データ
 Fig. 3 EWG Arctic Ocean Atlas potential temperature distribution on $\sigma_\theta=25.5$. (a) Summer field. (b) Winter field.

Ocean Atlas for the Summer Period, Winter Period から求めた夏季(6月~11月), 冬季(12月~5月)のポテンシャル水温分布である。夏季及び冬季いずれの場合も Northwind Ridge上の北緯77度, 西経157度付近を中心とする暖水域が見られることが分かる。図3aの夏季の分布から, 亜表層の暖水の起源としては, チャクチ海の陸棚水とアムンゼン湾周辺海域の表層水(図1)が候補として挙げられる。チャクチ海の陸棚水の起源は, 夏季の東部ベーリング海陸棚域にあったSBWである。これら2つの暖水は, 北極海沿岸域のマッケンジー湾付近(北緯77度, 西経157度付近)で分断されていることが分かる。一方, 冬季の分布では, 亜表層の暖水は, Northwind Ridge周辺からマッケンジー湾以西の西経145度~150度の沿岸域にかけて分布している。従って, SBWが, カナダ海盆に存在する暖水域の形成に寄与しているものと思われる。

亜表層の暖水域が何故Northwind Ridgeを中心とする分布を呈するのか, その背景について考える。冬季(12月~5月)の海面密度分布(図2)と見ると, Northwind Ridgeを中心とする低密度域の分布が亜表層の暖水域の分布とほぼ一致していることが分かる。ここで述べる海面密度とは, 表層混合層密度と考えて頂きたい。西経140度以東の海域及び, チャクチ海では, 表面密度が 25 kg/m^3 以上であり, 亜表層の暖水は存在しない。従って, Northwind Ridgeを中心とする表層混合層の低塩域の存在は, その直下に存在するSBWが持つ「暖かい」という個性の保持に対し重要な役割を果たしていると考えられる。Northwind Ridge周辺域における表層混合層の低塩化の要因として, 以下の要因が考えられる。1つ目の要因として, 西部北

極海では高気圧性の海水運動のため, 海水直下ではエクマン輸送により夏季の融解した低塩分水や河川水が海水運動の中心に向かって集積することが考えられる。しかし, Northwind Ridge上で表層混合層水が低塩分であることから, 単純にエクマン輸送のみで低塩水が供給されるのみならず, 海底地形が表層混合層の低塩分水の流れをコントロールしていることが推測される。2つ目の要因として, 表層混合層直下に暖水が存在するため, 海洋から海水への熱フラックスが大きく, 海水融解が促進されることが考えられる。冬季の表層混合層水温場(図4)においても, Northwind Ridgeの周辺に暖水域が見られる。

3. 着目点の整理

1950年代から1980年代までの気候値から作成した $\sigma_\theta = 25.5 \text{ kg/m}^3$ 面上の水温分布(図3a, 図3b)からSBWの循環について推察される事項を整理する。

- ①SBWの主な流れの1つは, チャクチ海のアラスカ沿岸を北上しバロー沖でカナダ海盆南端の陸棚斜面域に到達する。
- ②バロー沖を通過したSBWは, 5月から11月までをカバーする夏季データにおいて北米大陸沿岸に沿って東方に広がる分布を示すことから, バロー東方のポーフォート海陸棚域, 陸棚斜面域に移流されていると考えられる。冬季のデータにおいても, ポーフォート海西部沿岸域の水温が高いことも東への移流を推察させる。SBWの東向きの移流は, 密度流によりなされていると考えられる。
- ③しかし, 北極海北米大陸沿岸の暖水域はマッケンジー

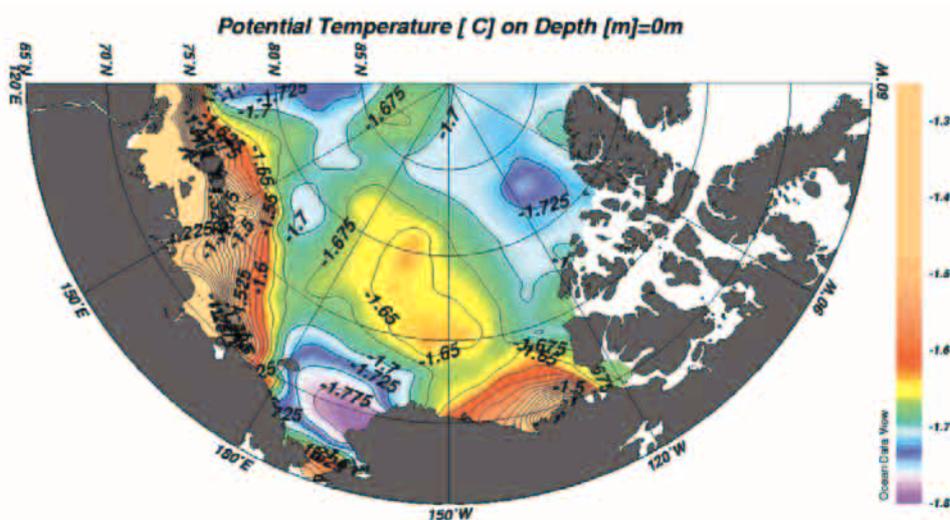


図4 EWG Arctic Ocean atlas冬季データの水深0mでのポテンシャル水温分布。

Fig. 4 EWG winter Arctic Ocean Atlas potential temperature distribution on sea surface.

湾付近までしか到達していないことから、東向きの移流は何らかの要因により停止するものと考えられる。

- ④ 冬季の分布から、一旦はバローの東方の陸棚域、陸棚斜面域に移流・蓄積されたSBWの流れは西向きに転じ、陸棚斜面及び海山斜面に沿って移流されNorthwind Ridgeに到達するものと思われる。

以上の推察について、次節以降、近年行った現場観測データを用い検証を試みる。

4. ベーリング海からポーフォート海陸棚斜面域までの移流

1996年9月から1998年7月にかけて、アラスカ州バロー沖にて係留観測(係留系CBE96)を行った(図5)。係留系CBE96はCTD 3台(SBE16)とADCP 1台(RDI-BB-ADCP150kHz)から構成される。CTDセンサーにより計測された水温、塩分の時系列を図6に示す。78m深の水温時系列から、1996年は11月中旬に、1997年は10月下旬から11月上旬にかけて最大水温となっていることが分かる。この期間には塩分が低下しSBWの塩分レンジ(31.0-32.5psu)にあることから、SBWの移流により水温上昇が起こったと考えられる。東部ベーリング海陸棚域では8月に水温最大となることから(Hunt et al. 1999)、ベーリング海からバロー沖に達するまで2~3ヶ月を要することが推察される。

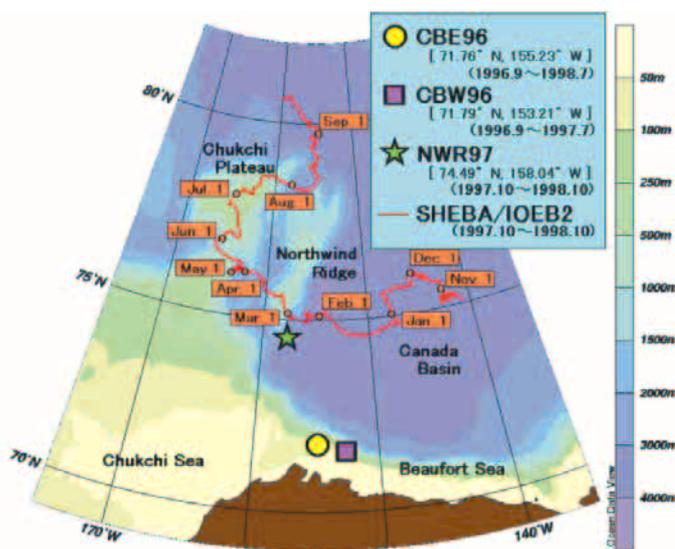


図5 係留系位置及びSHEBA/IOEB2号機の漂流軌跡
Fig. 5 Location of three moorings used here and drift track of the SHEBA/IOEB2.

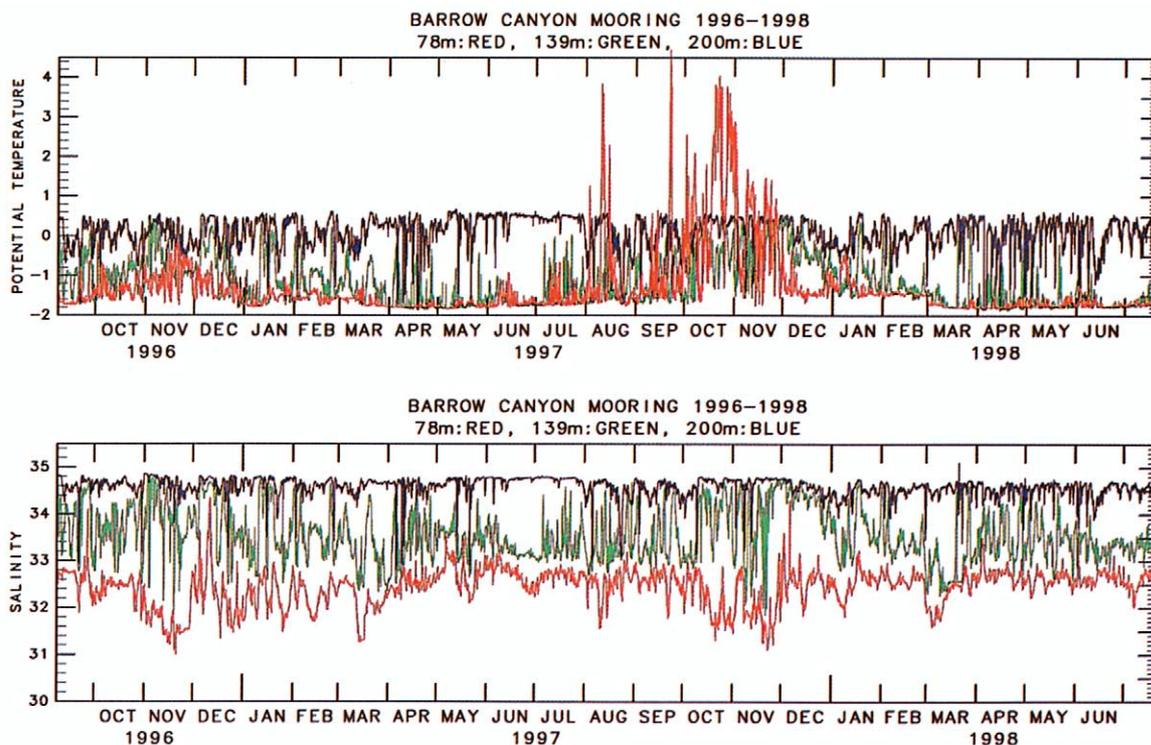


図6 係留系CBE96により観測された水温、塩分の時系列。
Fig. 6 Time series of temperature and salinity measured by the mooring CBE96.

次に、バローでの地上気温の時系列を図7に示すが、SBWがバローに達する時期である10月下旬から11月にかけて気温が上昇しており、SBWの移流に伴う影響が大気場にも現れていることが分かる。図8に1997年11月の925hPa面の月平均温度分布を示すが、高温域は、チャクチ海にあることが分かる。この高温域と開水面域とはほぼ一致している(図9)。SBWは、チャクチ海及びボーフォート海沿岸域における海水形成時期を遅らせるため、海水により海洋熱の大気への輸送が遮断されない環境を提供していると考えられる。表面気温の偏差の影響は、850hPa面の高度分布には現れるが、700hPa面の高度分布には現れておらず、対流圏下部1500m程度にまでしか及んでいないものと思われる。

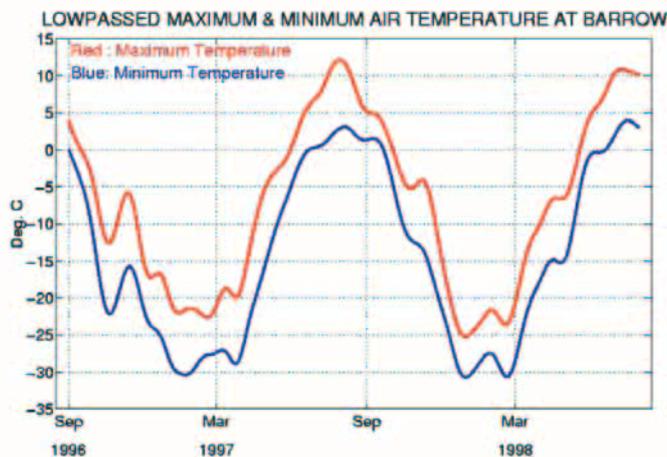


図7 バローにおける気温の時系列。ローパスフィルタを施している。

Fig. 7 Time series of low-passed air temperature at Barrow.

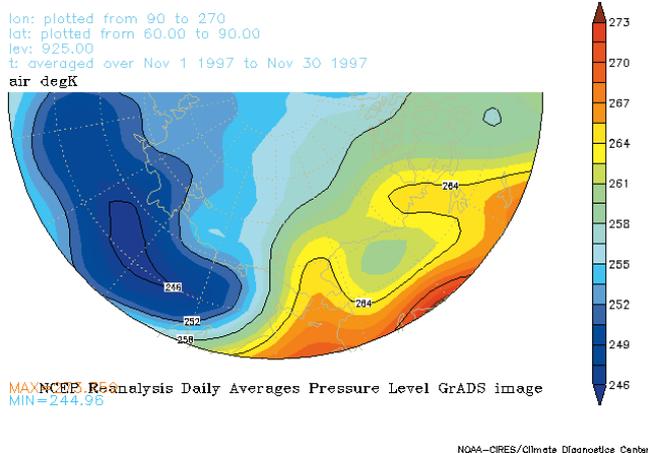


図8 1997年11月の925hPa面の月平均温度分布。NCEP homepageより引用。

Fig. 8 Monthly mean temperature on 925hPa surface in November 1997. From NCEP homepage.

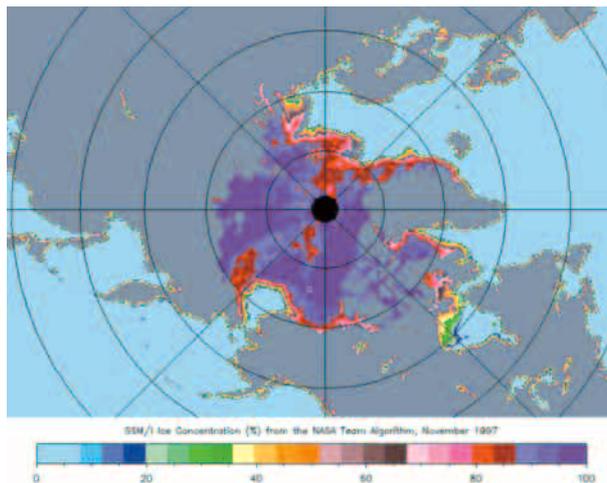


図9 1997年11月の月平均海水氷接度。NCEP-OMB再解析データセット。SHEBA homepageより引用。

Fig. 9 NCEP-OMB Sea ice concentration in November 1997. From SHEBA home page.

晩秋のSBWによる水温極大の経年変動に注目すると、1997年10～11月の水温極大は1996年の水温極大と比較して、約4度ほど高かったこと分かる(図6)。1997年はエルニーニョ年であり、アラスカ周辺の東部ベーリング海陸棚域では、高温化した太平洋水の流入及び日射量の増大により、1996年と比較して約4度の混合層水温の上昇が見られたと報告されている(Overland et al., 1999)。少なくとも、ベーリング海での海洋変動の影響が北極海に現れていることは間違いなさそうである。

5. カナダ海盆陸棚斜面域における流れの季節変動

図10に1996年9月に行った、バロー海谷を横切るセクションの水温・塩分・密度の断面図を示す。低緯度側(沿岸側)の上層に高水温(> 0度)、塩分31-32.5psu、密度25.0-26.0 kg/m^3 のSBWの特性を持つ水塊が見られる。その沖方向の広がりには10～15km程度であり、これは内部変形半径に一致している。つまり、SBWは密度流としてアラスカ沿岸を流れていることが分かる。もし外力が無ければ、北米大陸沿岸に沿って東方向に移流するはずである。1999年10月上旬にボーフォート海陸棚斜面に沿ったXCTD観測(図11)を行ったが、SBWの存在する密度25.0-26.0 kg/m^3 の範囲には水温0度以上の暖水は西経150度付近までしか分布していないことが分かる。西経147度から150度の範囲を除いて、表層(<50m)には水温0度以上の暖水が見られるが、その暖水の塩分は30psu以下であり、融解水若しくは河川水が日射により暖められたものであると考えられる。

気候値データ(図3a, 図3b)では、SBWのはNorthwind Ridgeに中心とする分布となっていることから、SBWは一時的にはボーフォート海陸棚斜面域を東に移流するものの、ある時期を境に西向きの流れに転じるものと考えられる。そこで、バロー周辺に設置した係留系CBE96及

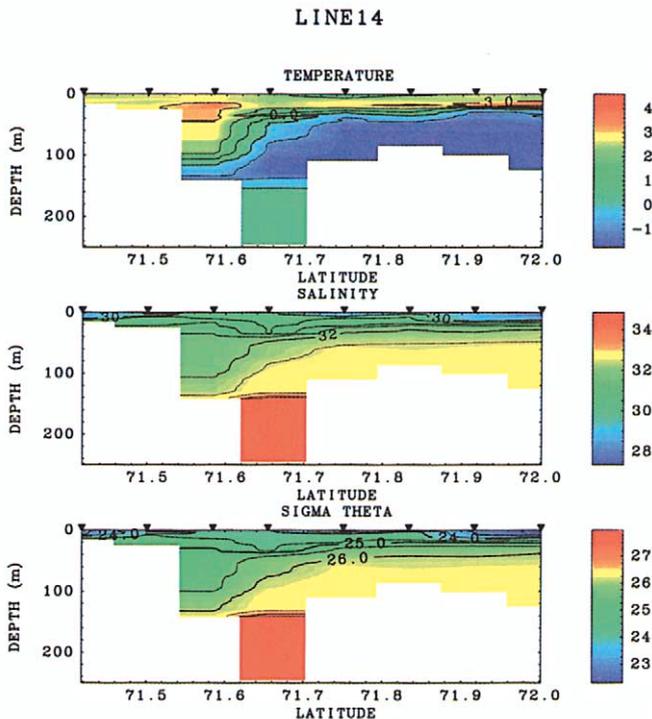


図10 バロー海谷を横切るセクションの水温・塩分・密度断面図 (1996年9月)。

Fig.10 Temperature, salinity and density sections across the Barrow Canyon in September 1996.

びCBW96の流速データを用い、バロー周辺海域における流れの変動について調べる。設置位置については、図5を参照。ここでは、高低気圧の通過や潮汐による変動成分を除去するために、0.019cpdのカットオフ周波数をもつ3次のローパスButterworthフィルタを施した流速場について議論する。図12aに係留系CBE96の78m深の東向き流速を示し、図12bに係留系CBW96の87m深の東向き流速を示す。いずれの地点においても12月から2月にかけての期間に負の値(西向きの流れ)となっていることが分かる。係留系設置海域周辺の東向きの風の指標としてノームとバローの気圧差([ノーム]-[バロー])を考え、その変化について見ると(図13)、負の値を示す(流れが西向きである)12月から2月にかけて気圧差が著しく低下しており、東風が強化されていることが分かる。東風の強化により駆動される西向きの流れが東向きの密度流成分の流れに打ち勝って流向が転じていると考えられる。気圧差から、3月以降5月までの期間も比較的東風が強いと想像されるが、西向きの流れにはなっていない。この時期には沿岸域は定着氷で覆われており、海水運動は陸岸地形により阻止される。つまり、風応力による海洋への運動量のインプットが著しく低下しているものと思われる。そのため、東風が強いにも関わらず東向きの流れに転じたものと考えられる。

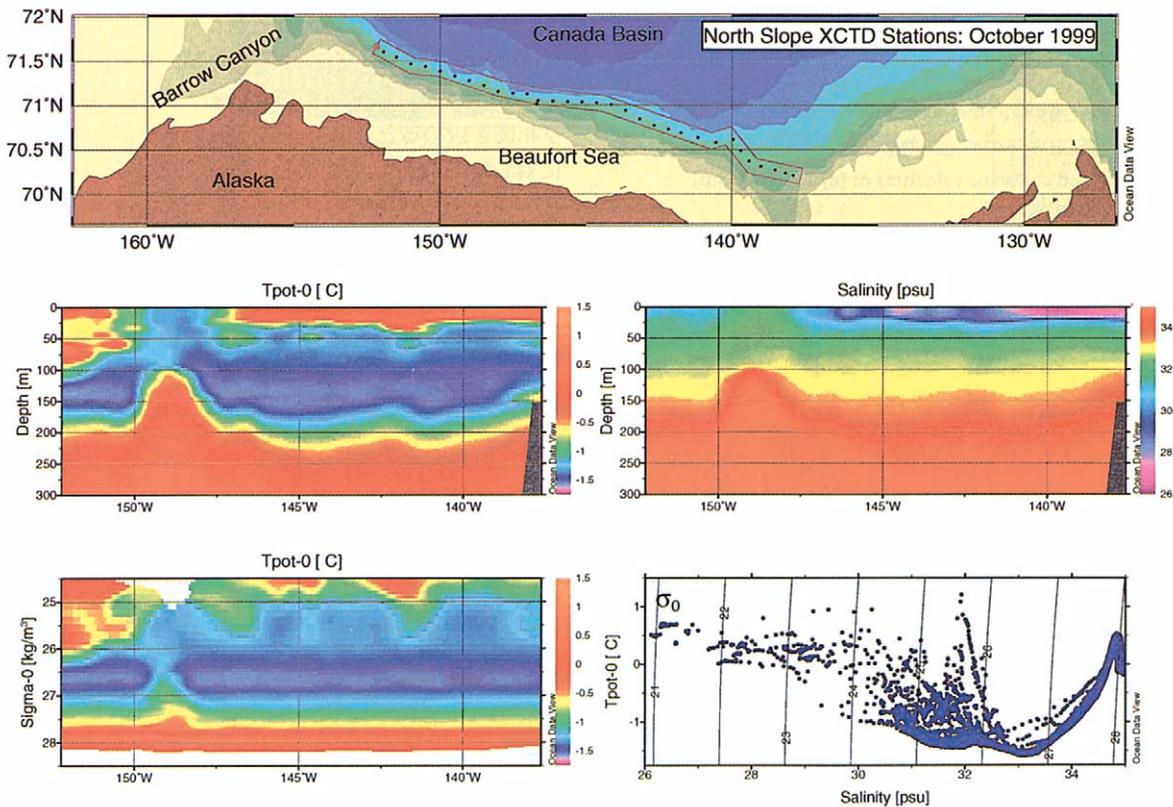


図11 1999年10月上旬のボーフォート海陸棚斜面上的水温、塩分断面図及びTSダイアグラム。

Fig.11 Vertical distributions of temperature and salinity along the Beaufort Shelf Break in early October 1999.

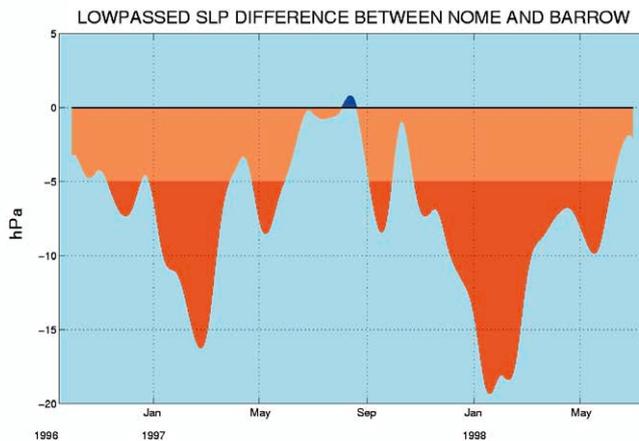
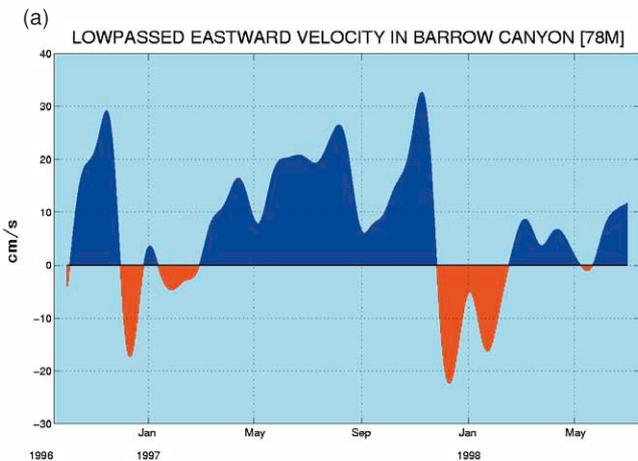


図13 ノームとバローの海面気圧差(「ノーム」-「バロー」)。
Fig.13 Sea level pressure (SLP) difference between Nome and Barrow. [SLP(Nome)-SLP(Barrow)].

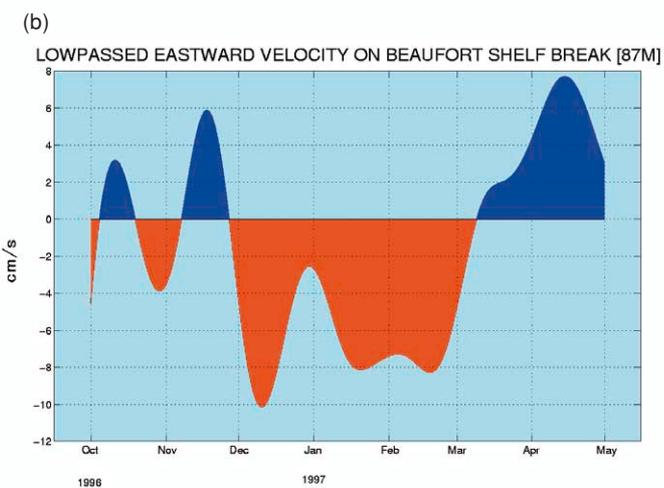


図12 (a)係留系CBE96の78m深の東向き流速の低周波成分,
(b)係留系CBW96の87m深の東向き流速の低周波成分。
Fig.12 Low-passed eastward velocities of (a)CBE96 (78m)
(b) CBW96 (87m).

6. ポーフート海陸棚斜面域からNorthwind Ridgeまでの移流

1997年10月から1998年10月までの期間、Northwind Ridge 東斜面上にて係留観測(係留系NWR97)を行った。その観測期間は係留系CBE96の係留期間の後半と重なっている。1997年から1998年にかけてのアラスカ湾、CBE96 [78m], NWR97 [104m]のSBW存在深度での水温変化について調べる(図14)。バロー沖のCBE96設置地点では晩秋に水温極大が観測されたが、Northwind Ridgeでは、翌年の1月に水温極大となる。両者の時系列からラグ相関を求めると(図15)、CBE96の水温がNWR97の水温に対し80日先行して変動していることが分かる。

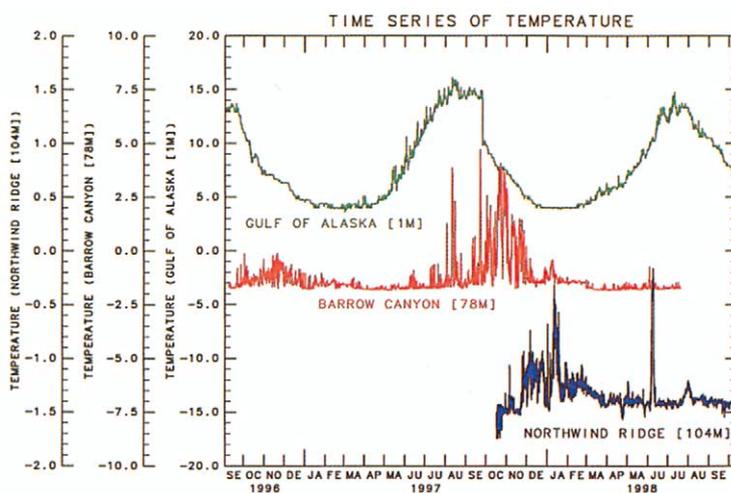


図14 アラスカ湾1m深[NDBC BUOY 46001; 56.30 N 148.17 W], ハバロー沖78m深[Mooring CBE96, Northwind Ridge東斜面上104m深[係留系NWR97]の水温の時系列

Fig.14 Time series of temperatures at Gulf of Alaska 1 m deep [NDBC BUOY 46001; 56° 30' N, 148° 17' W], off Barrow 78m deep [CBE96], and on the Northwind Ridge at 104m deep [NWR97].

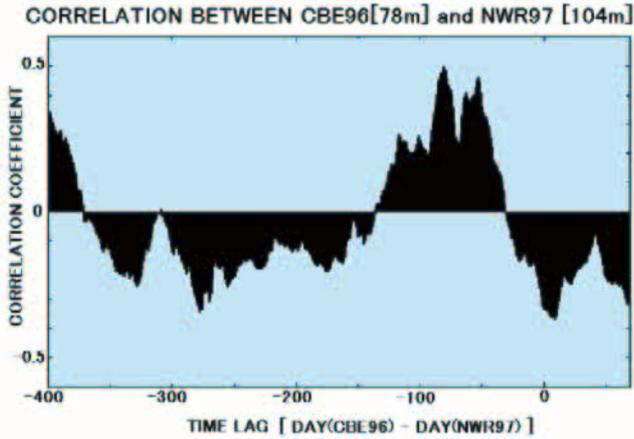


図15 CBE96[78m深]の水温とNWR97[104m深]の水温のラグ相関係数。

Fig.15 Lag correlation coefficient between temperatures at CBE96 [78m deep] and NWR97 [104m deep].

7. Northwind Ridgeに沿った北向きの移流

1997年秋にSHEBAキャンプ南西約50kmに設置したSHEBA/IOEB2号機は1998年2月から3月にかけて係留系NWR97設置位置の北方約60km付近でNorthwind Ridgeを横切った(図5)。これは、SBWがNorthwind Ridgeに達する直後の時期である。図16に、SHEBA/IOEB2号機の漂流軌跡に沿った水温、塩分、ETOPO5海底地形データから求めた海底地形勾配、海底深度を示す。カナダ海盆中央部からNorthwind Ridgeにかけての水深40-100mの範囲に暖水域が見られる。この深度範囲の塩分は、31.5-32.0psuの範囲にあり、SBWであると同定できる。特に、暖かいSBWが見られるのは、海底地形勾配の大きなNorthwind Ridge東斜面上であり、Northwind Ridge東斜面に沿ってSBWが北向きに輸送されていることが示唆される。Northwind Ridgeを東から西に通過後も水深40-100mの範囲に暖水域が見られるが、その水温はNorthwind Ridge東斜面及びカナダ深海盆と比較して著しく低い。

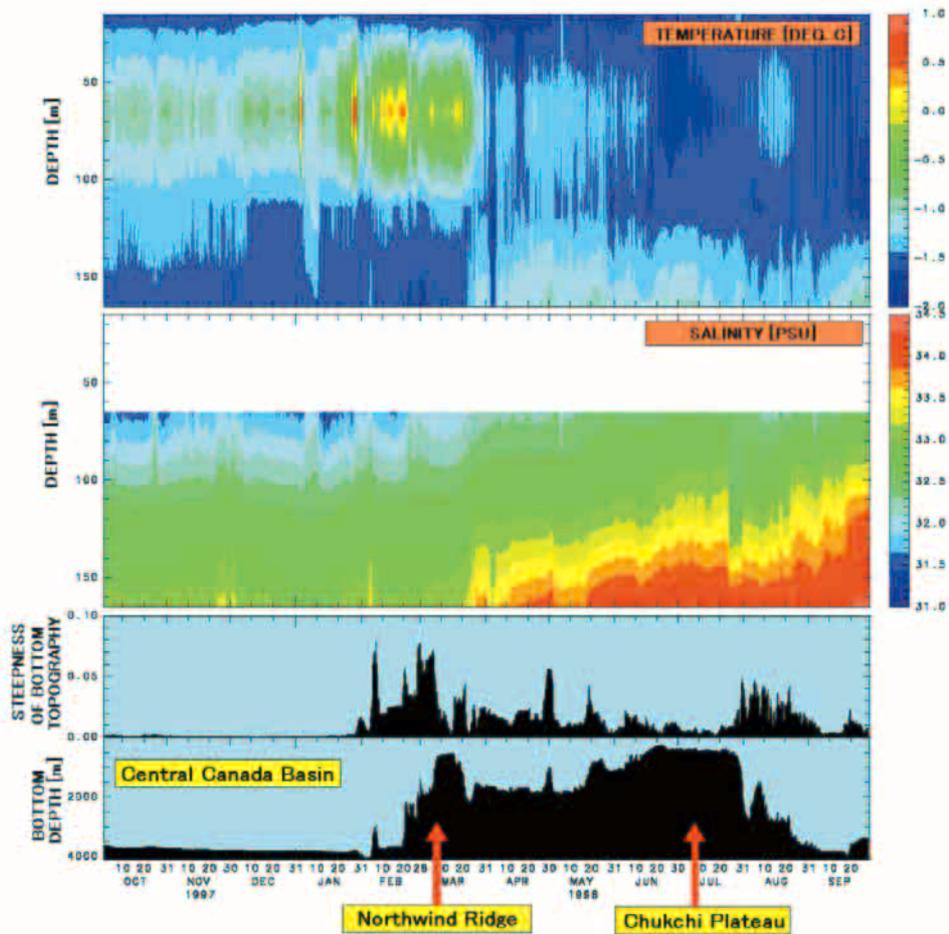


図16 SHEBA/IOEB2号機の漂流軌跡に沿った水温、塩分断面図及びETOPO5海底地形データから求めた海底地形勾配、海底深度。

Fig.16 Vertical distribution of temperature, salinity, steepness of bottom topography calculated from ETOPO5 grid data sets, and total depth along the drift track of the SHEBA/IOEB2.

従って、Northwind Ridge に沿ったSBWの北向き輸送が、気候値に見られたNorthwind Ridgeを中心とする亜表層の暖水分布(図3a, 図3b)をもたらす要因であると考えられる。

図17に海水速度、流速(62m, 158m, 254m深)、海底地形勾配の時系列を示す。各データは半径50kmのボックス・フィルタで平滑化されたものである。海底地形勾配の大きなNorthwind Ridge上(2月中旬~3月中旬)では、深度ともに流れは小さくなっているが、いずれの深度(62m: Summer Bering Sea Water layer, 158m: Cold ha-

locline layer, 254m: Atlantic layer)においても深い方を右手に見る流れになっていることが分かる。つまり、Northwind Ridge東斜面に沿って北上する流れの存在が示唆される。また、Northwind Ridge 東斜面上では、海水速度は流速よりも小さく、海洋力学による流れの形成過程が重要であることが示唆される。具体的には、Northwind Ridge が順圧場の西岸境界としての役割を持つために、北向きの順圧西岸強化流が形成されていると考えられる(島田他, 1997)。

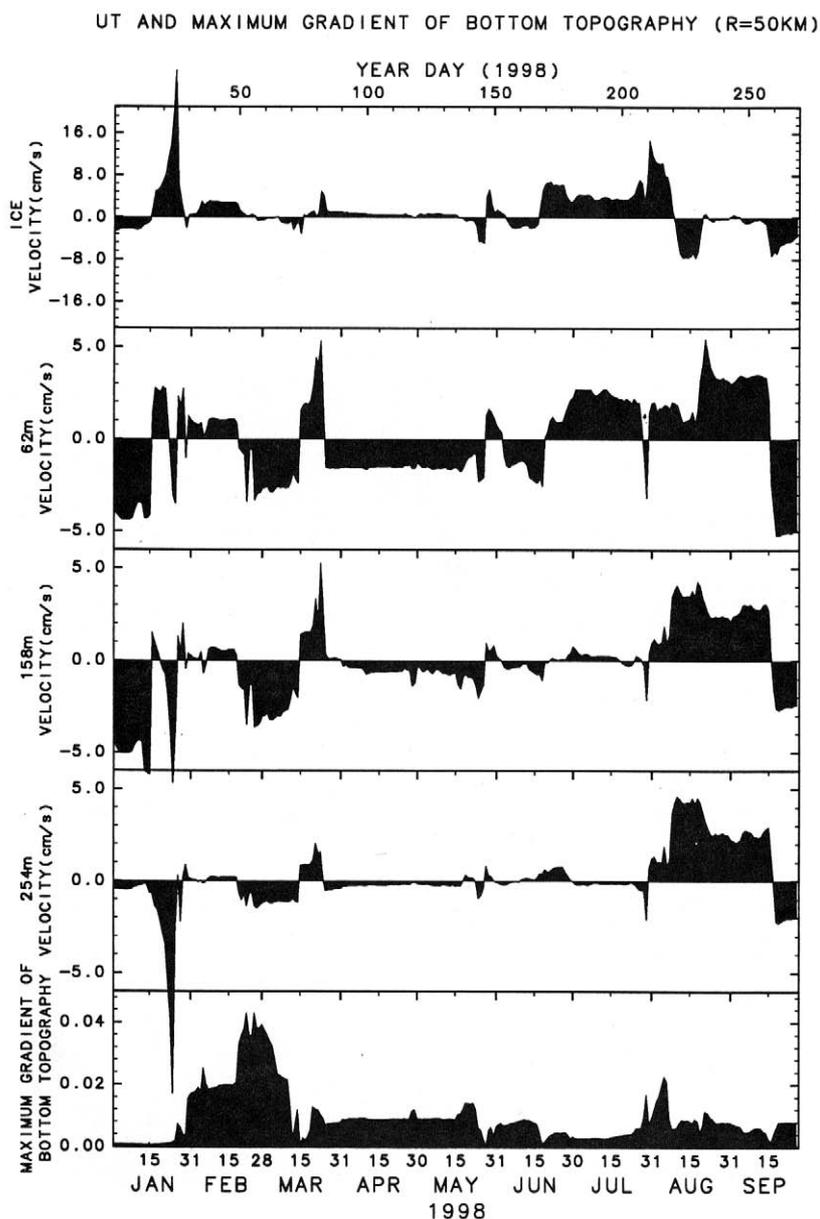


図17 SHEBA/IOEB2号機の漂流軌跡に沿った等深線方向の海水速度成分、流速成分及び海底地形勾配の時系列を示す。各データは半径50kmのボックス・フィルタで平滑化されたものである。
Fig.17 Time series of ice velocity, ocean current velocities tangential to iso-bath, and steepness of bottom topography along the drift track of SHEBA/IOEB2. The all data shown in this figure are filtered by using a box filter with 50km radius.

8. まとめ

図18に西部北極海における夏季ベーリング海水(SBW)の循環についての模式図を示す。

- (1) 西部北極海の表層混合層直下の垂表層にはNorthwind Ridgeを中心とする暖水域が存在する。
- (2) 垂表層の暖水の起源は、夏季ベーリング海水(SBW)であると思われる。
- (3) 表層混合層の低密度域もNorthwind Ridgeを中心に分布しており、垂表層の暖水の「暖かい」という個性の保持に対し役割を果たしているものと思われる。
- (4) SBWは10～11月にバロー沖に達し、翌年1月にNorthwind Ridgeに達する。
- (5) SBWはバロー沖からNorthwind Ridgeに向かって直接移流されるのではなく、一旦はバロー東方のポーフォート海陸棚斜面に密度流により移流される。
- (6) 12月から東風が強まり、流れは西向きに転じる。東風が強化される初冬にチャクチ海及びポーフォート海沿岸域の海水密度度が低いことが海洋の駆動に対し重要である。
- (7) SBWはNorthwind Ridge東斜面に拘束されて北向きに移流される。北向きの流れは、順圧場の西岸強化流によるものと考えられる。

謝辞

本研究に関わる観測に際して、R/V Alpha Helix, CCGS Louis S. St-Laurent, CCGS Des Groseilliers, CCGS Sir Wilfrid Laurierにより行われたものであり、御協力頂いた乗組員並びに研究者に感謝致します。

参考文献

- 1) Hunt Jr, G. L., C. L. Bauini, R. D. Brodeur, K. O. Coyle, N. B. Kachel, J. M. Napp, S. A. Salo, J. D. Schumacher, P. J. Stabeno, D. A. Stockwell, T. E. Whittedge, and S. J. Zeeman (1999): The Bering Sea in 1998: The second consecutive year of extreme weather-forced anomalies., *EOS*, **80**, 561,565-566.
- 2) McPhee, M. G. ; Stanton, T. P. ; Morison, J. H. ; Martinson, D. G. (1998): Freshening of the upper ocean in the Arctic: Is perennial sea ice disappearing?, *Geophys. Res. Lett.* **25** , 1729-1732.
- 3) Overland, J. E., Nicholas A. Bond & Jennifer Miletta Adams. (1999): Atmospheric anomalies in 1997: Links to ENSO?, in *Proceedings of The 1998 Science Board Symposium on The Impacts of the 1997/98 El Niño Event on the North Pacific Ocean and Its Marginal Seas*, PICES Scientific Reports, No. 10.
- 4) 島田浩二, 島山清, 中村亘, 小山登, R. Krishfield, 本庄丕, 滝沢隆俊(1997): 北極海カナダ海盆における海洋循環, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第36号, 207-218.

(原稿受理：1999年12月28日)

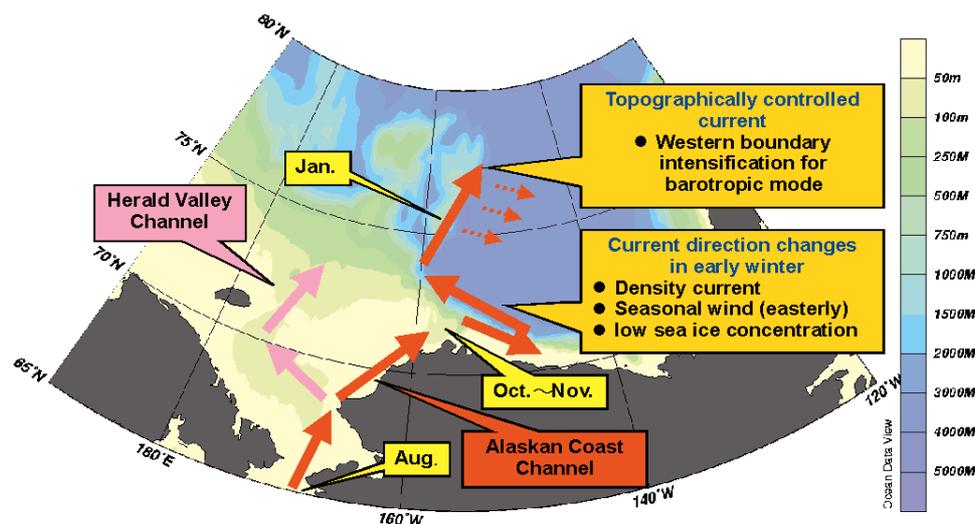


図18 西部北極海における夏季ベーリング海水(SBW)の循環の模式図
Fig.18 Schematic Summer Bering Sea Water (SBW) in the western Arctic Ocean.