

北極海カナダ海盆における海洋循環

島田 浩二^{*1} 畠山 清^{*1} 中村 亘^{*1}
小山 登^{*2} Richard KRISHFIELD^{*3}
本庄 丕^{*3} 滝沢 隆俊^{*1}

ボーフォート海の海洋循環場を氷海用自動観測ステーションのADCP(音響式流速計)データを用いて調べた。その結果、海底地形の平坦な深海盆では、冷たい塩分躍層の存在する深度で運動エネルギー最大となる渦運動が卓越していることが分かった。一方、Northwind Ridge及びChukchi Plateau 周辺では、冷たい塩分躍層及び大西洋水層のいずれの深度においても流れは海山及び陸棚斜面上に集中していることが分かった。大西洋水層では、浅い領域を右手に見る流れが卓越し、流速と海底地形勾配はほぼ線形関係にあることが分かった。冷たい塩分躍層では、海底地形に沿う流れの方向は場所による違いがあることが分かった。

キーワード：海洋循環，海底地形，地衡乱流渦，北極海

On the ocean circulation in the Canada Basin of the Arctic Ocean

Koji SHIMADA^{*4} Kiyoshi HATAKEYAMA^{*4}
Toru NAKAMURA^{*4} Noboru KOYAMA^{*5}
Richard KRISHFIELD^{*6} Susumu HONJO^{*6}
Takatoshi TAKIZAWA^{*4}

Ocean Circulation in the Canada Basin was investigated using current data of ADCP mounted on the line of an Ice Ocean Environmental Buoy. In the flat deep basin, the circulation was characterized by meso-scale eddies having their maximum kinetic energy in the cold halocline layer. On the otherhand, over the Northwind Ridge and Chukchi Plateau, horizontal current in both the cold halocline and Atlantic layer were concentrated on the rims of seamount and shelf break. At the depth of the Atlantic layer, Atlantic water flowed in the direction seeing the shallow region on the right over the entire region. In the Atlantic layer, it was found that a linear relation existed between velocity and gradient of

* 1 海洋観測研究部

* 2 国際気象海洋株式会社

* 3 ウッズホール海洋研究所

* 4 Ocean Research Department

* 5 International Meteorological & Oceanographic Consultants

* 6 Woods Hole Oceanographic Institution

seafloor topography. On the other hand, at 58m depth, the horizontal current was also strongly affected by the seafloor topography, however, the sign of the velocity component tangential to the contours of seafloor topography depended on the location.

Key Words : ocean circulation, seafloor topography, meso-scale eddies, Arctic Ocean

1 はじめに

北極域は、海水－大気間のアルベド・フィードバックにより、気候変動の影響が敏感に現れると考えられている。海水の面的な分布の変動と大気場の関係等に関しては人工衛星観測によりある程度理解が進んでいるものの、気候変動の影響が最も反映されると考えられている海水の総量を把握するのに不可欠な海水厚分布の変動に関しては十分な理解が得られていない。また、海洋構造、循環場に対する理解も平均場をようやく記述できる程度のデータしかなく変動場を理解するレベルにあるとは言えない現状にある。しかし、長い時間スケールをもつ変動に対して海水厚の変動及び海洋循環・成層構造は重要な役割を担っているはずであり、その変動の実態把握と基礎的な力学の理解は北極海の気候システムに関わる役割を解明していく上で不可欠である。

1.1 北極海洋物理学における重要テーマ

(1) 冷たい塩分躍層

北極海では、塩分は深さとともに増加するが、表層から中層にかけて水温も深さとともに増加する。すなわち、塩分成層は安定成層であるのに対し、水温成層に関しては不安定成層状態にあるのが最大の特徴となっている。中層の水温の極大は、フラム海峡から流入する高温・高塩の大西洋水により形成・維持されている。もしも、この水塊が海面に露出することになれば、北極海の海水は著しく減少すると考えられる。しかし、今のところこのようなことは起こっていない。これは、水温は結氷温度で一様であり緩やかな塩分成層で特徴づけられる層(cold halocline)が表層混合層と大西洋水層との間に存在するため、海面冷却に伴う鉛直対流が温暖な大西洋水層にまで達しないことによる。氷の形成、維持に対する冷たい塩分躍層の役割を定量的に理解することは北極海海洋物理学の重要なテーマの一つとなっている。その理解のためには、冷たい塩分躍層の状態(水平分布、成層度、厚さ)と海水状態との関係、水塊起源と形成時期を明らかにしていく必要がある。特に、冷たい塩分躍層で見られる渦の起源は、陸棚斜面上の流れの不安定に起因

していると考えられている。アラスカ沿岸の陸棚斜面は夏期には氷縁域となるのに対し、冬期には定着氷に覆われ、力学的にも熱力学的にも季節変動が大きい。したがって、陸棚斜面上の流れには季節変動が存在し、不安定により生成される渦の挙動にも変動が存在するはずである(Shimada and Kubokawa, 1997²⁾)。どの時期に渦が最も効果的に外洋へと輸送されるのかなど解明すべき点が多く残されている。

(2) 大西洋水

冷たい塩分躍層と同時に定量的に評価しなくてはならない課題はその直下に存在する温暖な大西洋水の循環と変動である。「海水－冷たい塩分躍層－大西洋水」の結合システムが関わる気候変動として以下のような可能性が指摘されている。北極海に隣接するグリーンランド海は、全地球規模の熱塩大循環の出発点となる深層水の形成域となっている。現在、グリーンランド海で深層水が生成されているのは、そこに海水がなく海面塩分が高い状態にあるためである。北極海の海水量、海洋構造の変動は隣接するグリーンランド海の成層構造に変動をもたらし、それが原因となり深層水の形成量に変動を与え得る。深層水の形成量の変動により、さらに、全球を巡る熱塩大循環に変動がもたらされる。また、深層水の形成量の変動は、北大西洋域の大気－海洋結合変動(North Atlantic Oscillation³⁾)に関係しているのではないかと考えられている。また、北極海の海水が著しく後退した場合には、北極海内部で深層水が形成され、全地球を巡る熱塩大循環のパターンそのものが変化する可能性があることも指摘されている(Aagaard and Carmack, 1994¹⁾)。さらに、カタストロフ的な熱塩大循環のパターンの変化は、グリーンランド海での大量の海水や棚氷の融解に伴う淡水供給によりもたらされるという見方もある(Bryan, 1986⁴⁾; Marotzke *et al.* 1986⁵⁾)。

北極海中層に見られる大西洋水はフラム海峡、バレンツ海から北極海に流入し、北極海を陸棚斜面、海山の斜面に沿って反時計回りに循環していると考えられている。また、大西洋水は海盆内部にも広く分布することから、

冷たい塩分躍層水と同様、陸棚斜面、海山の斜面から移流・拡散されていることは間違いない。陸棚斜面上で大西洋水の流れを捉える係留観測は行われているものの、大西洋水の面的な循環場の理解を得るには至っていない。また、大西洋水の流れの駆動源についての理解も得られていない。

1.2 本研究の位置づけ

本研究の目的は、自身が漂流し北極海の海洋循環場の広範囲にわたる鉛直二次元断面データが取得できるIOEBのADCPデータを用いて、上述の二大テーマである「冷たい塩分躍層」「大西洋水層」の海洋循環の理解を深めることにある。2節では、本研究で用いたIOEB1号機のADCPデータについて述べる。3節では、ADCPデータ取得深度における海洋構造の特徴について述べる。4節では、観測された中規模渦の特徴を示し、中規模渦の冷たい塩分躍層形成に対する重要性について述べる。5節では、海底地形に捕捉された流れの特徴について述べ、力学的な考察を与える。6節では、本研究を総括し、さらにIOEB観測は、北極海の海洋学に対する有用性のみならず、海洋学全般、特に中規模渦、海底地形の海洋循環に対する役割を明らかにして行く上で非常に有効な観測手法であることを述べる。

2 データ

IOEB1号機は図1に示す観測装置を搭載している。ADCPは水深14mに設置され、26m深から338m深までの40層のデータを15分ごとに取得している。ここでは、ARGOS経由で取得したデータを用いる。これは2時間平均、鉛直3層(24m)平均したものである。例えば、水深250mの流速場とは、238~262mの平均流速場を意味する。IOEB1号機の各センサーのサンプリング方法、アルゴス衛星を介してのデータの取得方法、精度などの詳細については、畠山ら(1996a⁶⁾, 1996b⁷⁾を参照されたい。

IOEB1号機は平均的に見れば北極海の特徴的な海水運動である時計回りのボーフォートに従って漂流した。図2(a)に、ADCPデータ取得期間中の漂流軌跡と1992年1月1日を第0日としたときの日付を示す。

3 ADCPデータ取得深度と北極海の海洋構造との対応

まず、北極海の成層構造の特徴について概観し、ADCPデータが取得された深度がそれぞれどのような性質

をもつ層に位置しているのかについて述べる。図3は、1997年4月、IOEB1号機の回収・再設置時(北緯76度50.3分、西経132度09.1分)に行ったCTD観測の結果である。塩分のプロファイルから50mと175m深付近に2つの塩分躍層が存在していることが分かる。極域海洋では、密度成層は塩分成層により支配されるため、渦位はこの深度で極大となる。力学的にはこの渦位極大を境界として3層に分類される。海面から50m深の渦位極大までは一様水温(-1.6℃)・塩分(29.25psu)の表層混合層、50m深から175m深までは低温(-1℃以下)で緩やかな塩分躍層で特徴づけられる冷たい塩分躍層、175m以深は高温・高塩の大西洋水である。500m以深データは得られていないが、さらに深いところでは深さとともに塩分は増加し水温は減少する北極海深層水が存在している。しかし、175m以深では顕著な密度躍層(渦位極大)は存在しないため、175m以深の流速場は海底地形の影響が直接反映されたものと考えられる。整理すると、ADCPデータが取得された深度のうち、58, 106, 154m深は冷たい塩分躍層に、202mは冷たい塩分躍層下部若しくは大西洋水層上部に、そして250m深は大西洋水層に位置すると考えられる。

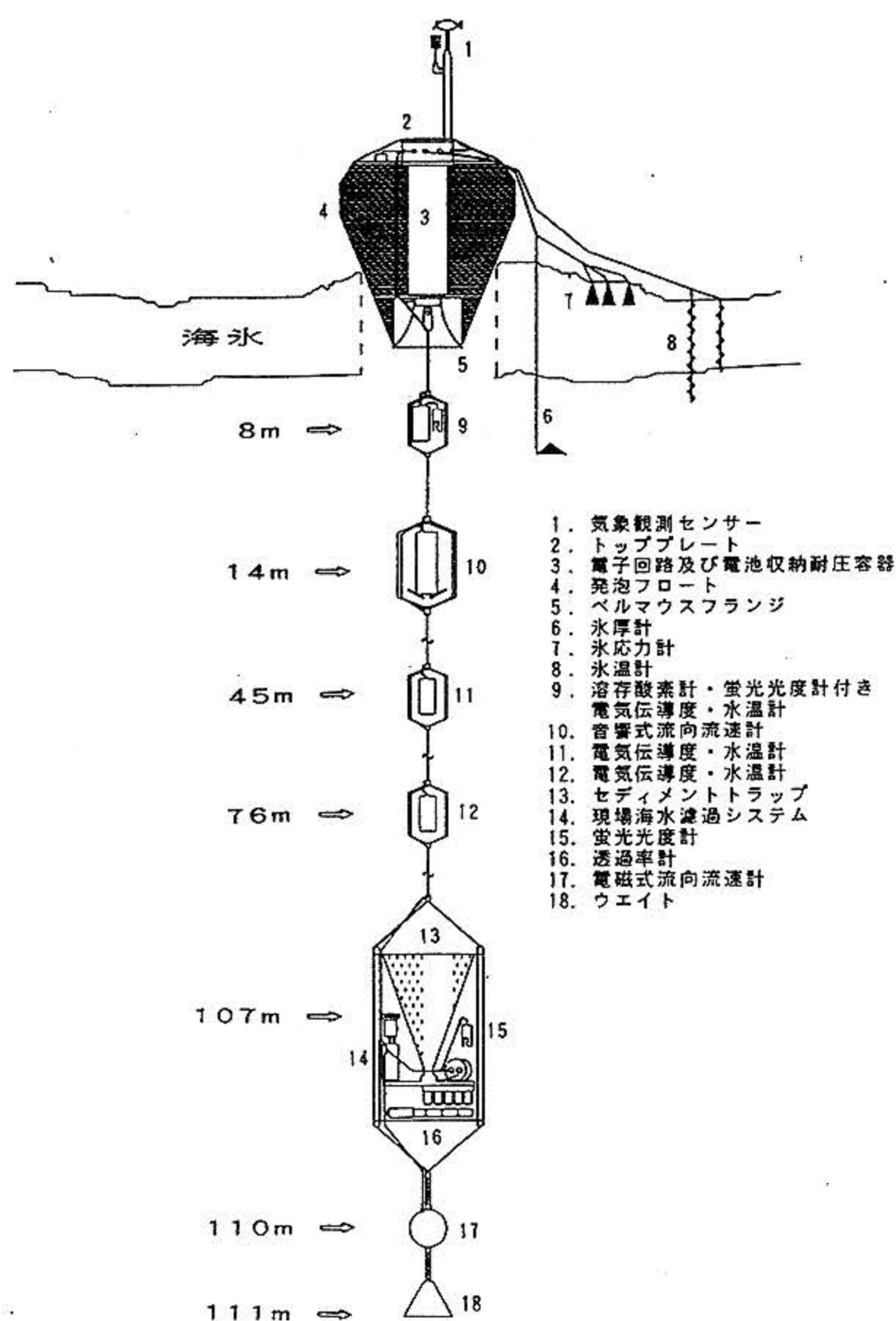


図1 IOEB1号機の構成

Fig. 1 Ice-Ocean environmental buoy (first version)

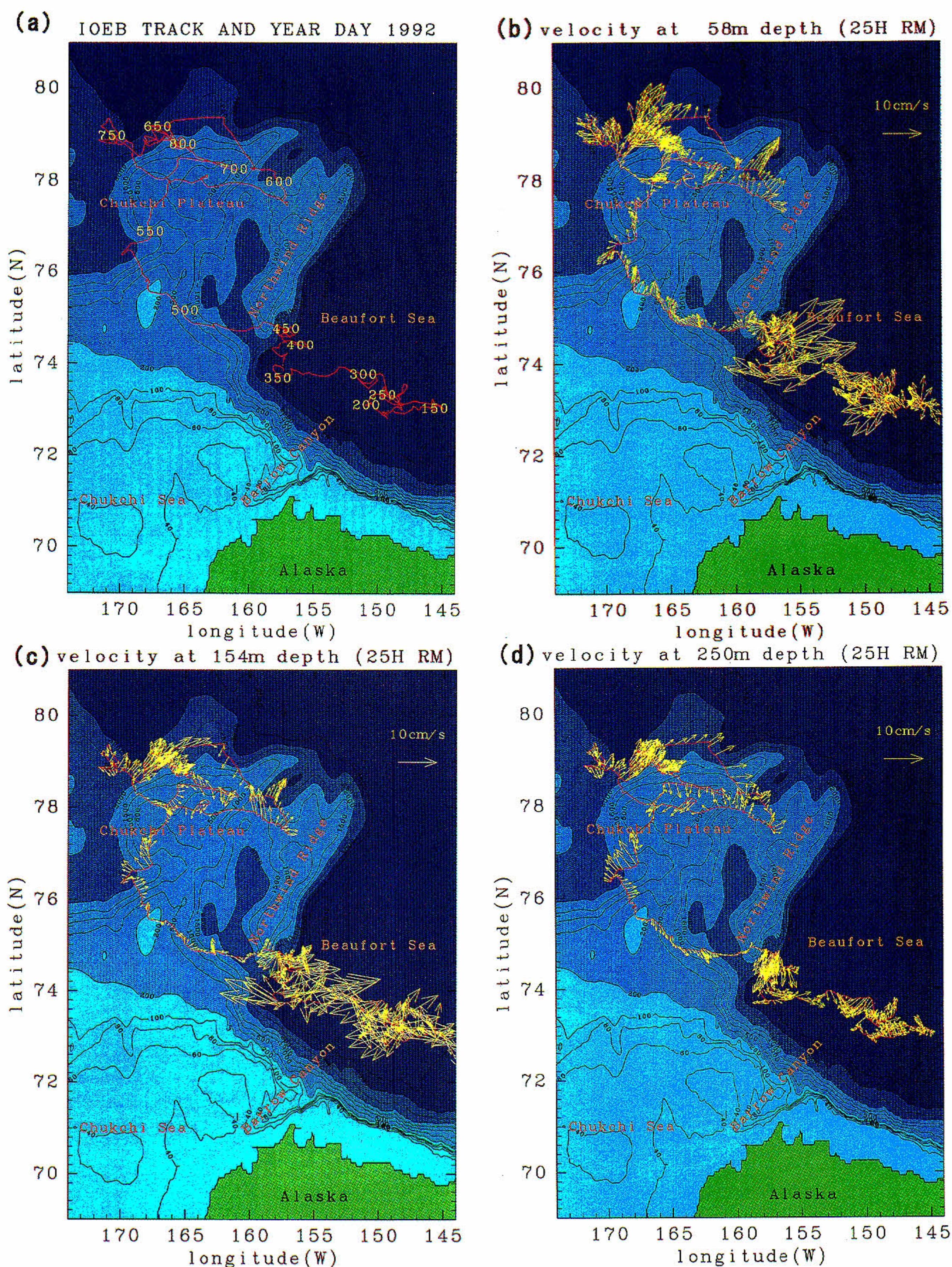


図2 IOEB1号機の漂流軌跡と水平流速場 (25時間移動平均)

(a)漂流軌跡 (漂流軌跡上の数字は1992年のyear day) (b)58m (c)154m (d)250m

Fig. 2 Track of the IOEB-1 and 25hours running mean horizontal velocity field at (b)58m, (c)154m, and (d)250m depths. The numbers on the track denote year day, 1992.

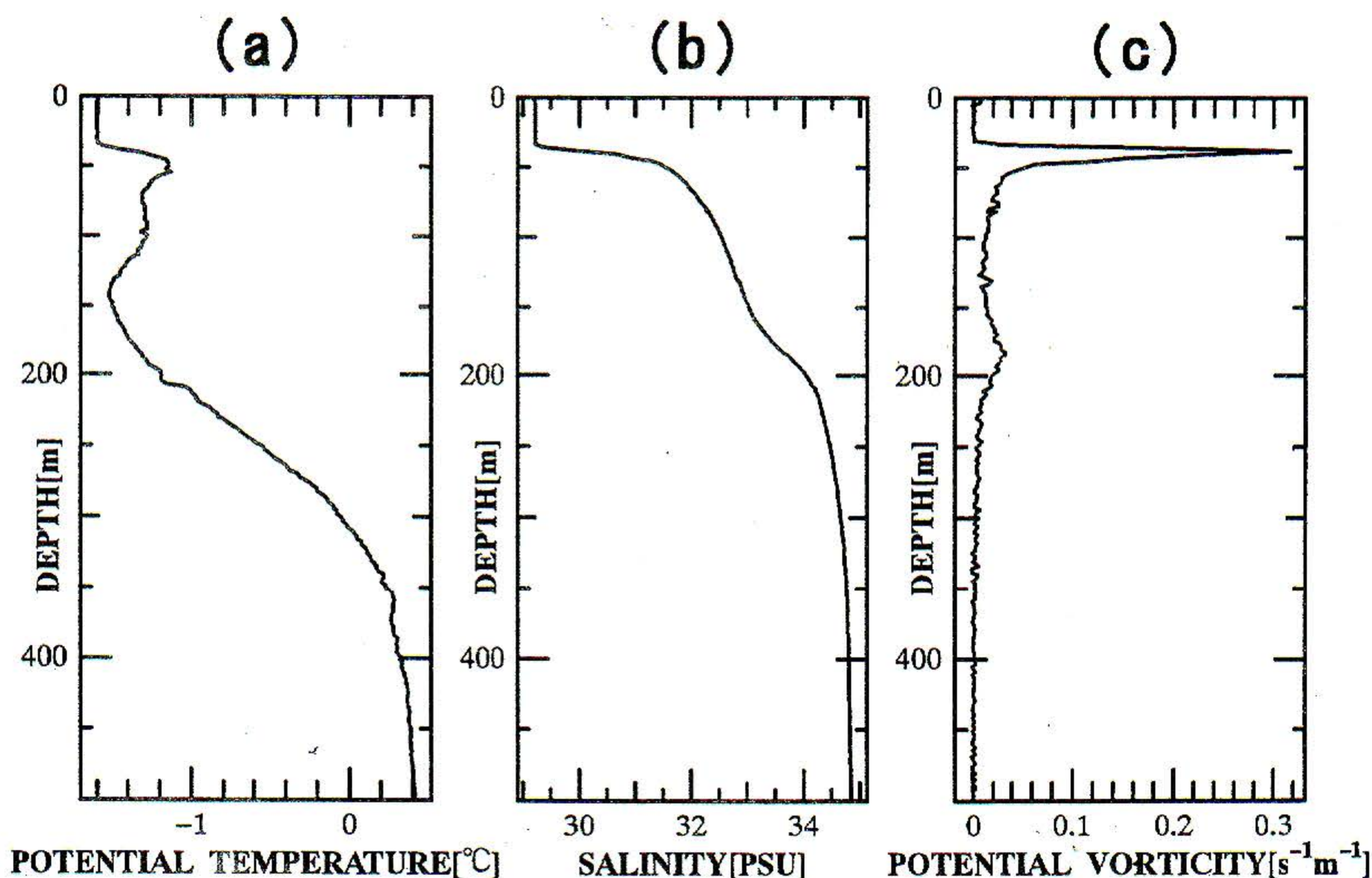


図3 北緯76度50.3分, 西経132度09.1分における(a)ポテンシャル水温, (b)塩分, (c)渦位の鉛直プロファイル
Fig. 3 Vertical profiles of (a) potential temperature, (b) salinity, and (c) potential vorticity at 76° 50.3'N, 132° 09.1'W.

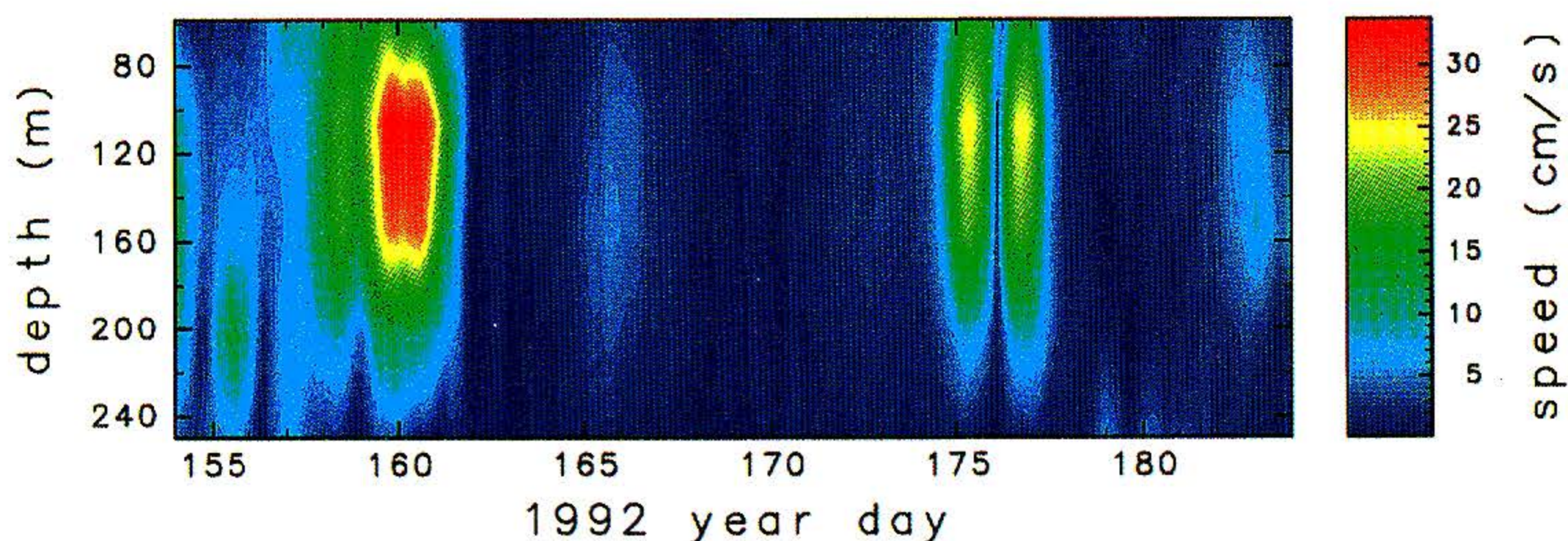


図4 アラスカ沖深海盆における水平流速の絶対値の鉛直分布の時系列
Fig. 4 Time series of vertical profile of horizontal speed.

4 中規模渦

図2(b)–(d)は、25時間の移動平均を施した水平流速場を示したものである。海底地形の比較的平坦なアラスカ沖 Beaufort Sea では、大西洋水の存在する250 m深を除いて強い中規模渦運動が卓越していることが分かる。一方、Northwind Ridge 及びChukchi Plateau 周辺では、渦運動は平坦な深海盆に比してかなり弱いことが分かる。このような渦運動の分布に対する考察については次節で述べる。

図4はアラスカ沖Beaufort Seaで捉えられた中規模渦

の水平流速の絶対値の鉛直構造を示したものである。これから、中規模渦の運動の中心は冷たい塩分躍層に集中していることが分かる。北極海の広い領域で、冷たい塩分躍層下部では珪酸濃度が極大であり、その水塊の起源が大陸近くの沿岸域にあると考えられており (Salmon and Mcroy, 1994⁸⁾), 冷たい塩分躍層水を沿岸域から海盆内部へ運ぶキャリアとして中規模渦が有力視されているが (Aagaard and Carmack, 1994¹⁾), IOEBによる直接測流の結果はこれを支持するものとなっている。

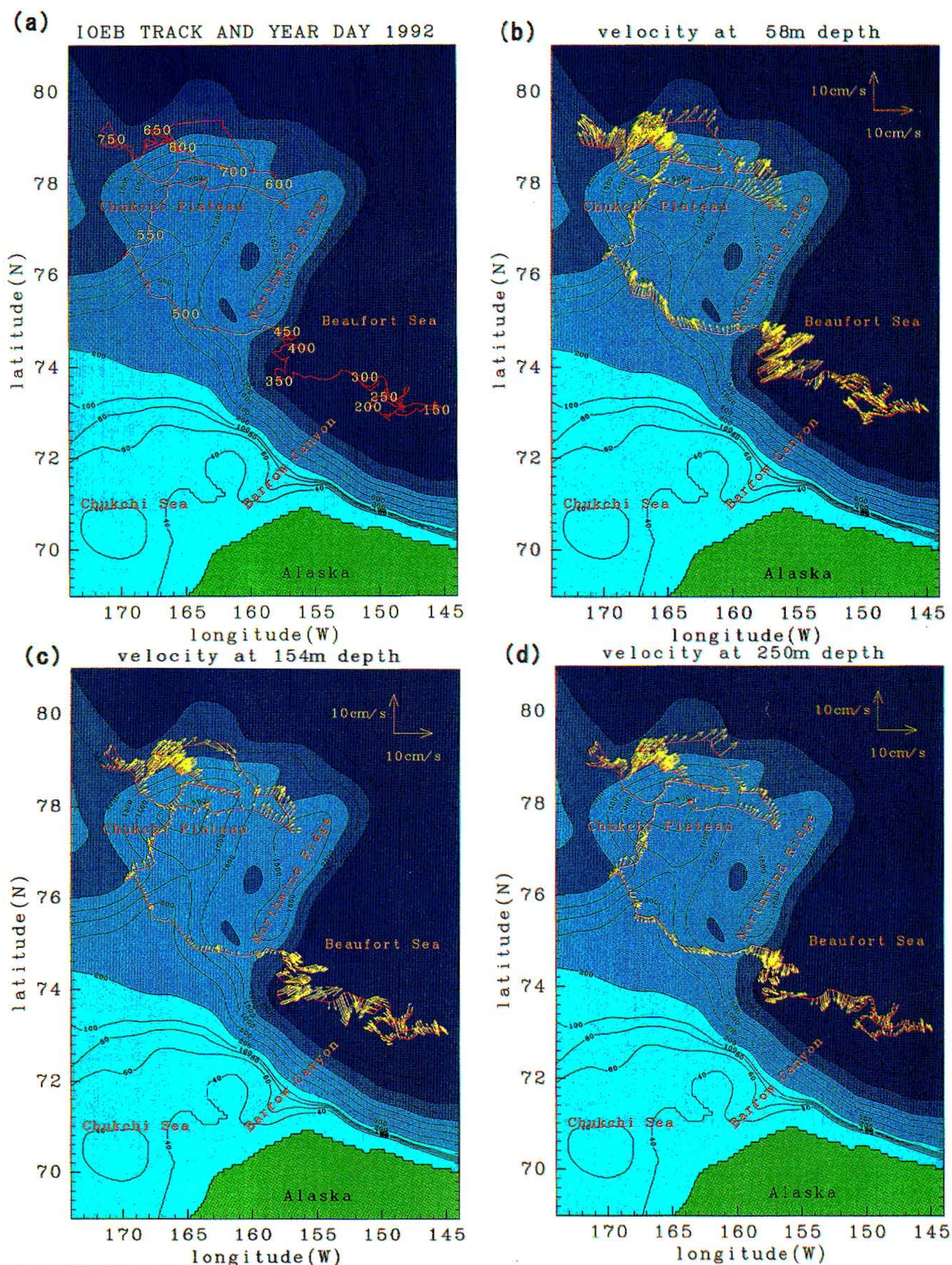


図5 IOEB1号機の漂流軌跡と水平流速場（半径50km内にあるデータの平均値）

(a)漂流軌跡（漂流軌跡上の数字は1992年のyear day） (b)58m (c)154m (d)250m

Fig. 5 Track of the IOEB-1 and 50km filtered horizontal velocity field at (b) 58m, (c) 154m, and (d) 250m depths. The numbers on the track denote year day, 1992.

5 海底地形に捕捉された流れの特徴

海底地形の平坦なアラスカ沖Beaufort Seaでは、渦運動が支配的であったが、Northwind Ridge及びChukchi Plateau周辺域ではADCPデータが取得された全水深にわたって海底地形の等値線に沿った流れが卓越していることが分かる(図2)。ここでは、海底地形に補足された流れと海底地形との関係を調べ、その力学を考察する。

5.1 フィルタリング

IOEBは漂流ブイでありその漂流速度には時間依存性がある。したがって、単純に時間方向にフィルタを施したのでは、空間に対して均質なフィルタリングを行ったことにはならない。そこで、以下の手順に従いフィルタリングを行う。(a)日平均位置を求める。(b)日平均位置から半径Rの円内にあるオリジナルデータ(流速、漂流速度)の単純平均値をその日平均値とする。ここでは、Rとして中規模渦のスケールを特徴づける北極海の内部変形半径(10~15km程度)よりも大きく、Northwind RidgeやChukchi Plateau周りの海底地形を分解できる $R=50\text{km}$ を採用する。

図5に上述のフィルタリングを行ったときの水平流速場を示す。25時間の移動平均水平流速場(図2)で見られたアラスカ沖Beaufort Seaでの中規模渦運動は完全とは言えないまでもかなり押さえられており、ADCPデータの取得された全水深にわたって海底地形に沿う流れの場がより顕著になっていることが分かる。

5.2 大西洋水の流れの実態

冷たい塩分躍層直下の大西洋水はフラム海峡東側から流入し、フラム海峡西側からグリーンランド海に流出しており、北極海内部では、陸棚斜面、海嶺斜面上に流れが集中していることが知られている。250m深の流速場から、温暖な大西洋水のChukchi Plateau西方からアラスカ沖Beaufort Seaへの経路は、Chukchi Plateauの北斜面からNorthwind Ridge東斜面を通る経路と、Chukchi Sea北側の陸棚斜面を通る経路の2つの経路があることが分かる。主経路は前者の経路であり、その流速は約 3 cm/s である。この流速で北極海の陸棚斜面に沿って北極海を一周すると、おおよそ10年を要することになる。これは、フラム海峡の東側から流入し北極海を巡りフラム海峡の西側から流出する大西洋水の移流により、北極海を巡る大西洋水の変動が10年のタイムラグで深層水の形成域であるグリーンランド海に現れる可能性があるこ

とを示唆する。1994年にIOEB1号機が漂流したChukchi Plateau付近で同時期に北極海横断観測が行われており、これまで観測されることがない高温大西洋水が観測されている(Aagaard *et al.* 1996⁹⁾)。彼らは、この高温水は1980年代後半にノルウエー海で観測された高温水の偏差がフラム海峡から流入し、北極海の陸棚斜面に沿って移流し1994年にChukchi Plateau西方で観測されたのではないかと考察している。この考察に従うと、フラム海峡からChukchi Plateau西方の高温水が観測された海域までおおよそ5年程度かかることになる。IOEB1号機により得られた海底斜面上での流速観測結果は彼らの考察と符合するものとなっている。

5.3 海底地形に捕捉された流れの力学に対する考察

これまで、陸棚斜面、海嶺斜面上における係留観測が行われてきたが、空間的に離散的な流速データしか得られていなかったため、大西洋水の流れと海底地形との関係を定量的に評価する研究を行うことはできなかった。また、側面摩擦、底面摩擦、不安定による運動量拡散があるにも関わらず、なぜ大西洋水は流速を大きく減じることなく北極海を巡るのか？その駆動源は何であるのか？といった疑問も解決されていなかった。ここでは、これらの問題にIOEB観測データからアプローチする。

海底地形に沿った流れの力学的性質を明らかにするために、まず、海底地形に沿う流速成分(u_T)と海底地形勾配の絶対値($|\nabla H|$)関係を調べる。海底地形に沿った流速は浅い方を右手に見て流れる流れを正の流速と定義する。図6はその時系列を示したものである。特に大西洋水の存在する250m深では、海底地形に沿う流速成分と海底地形勾配と同期して変化していることがわかる。図7(a)(b)は流速と海底地形勾配の関係を示したもので、両者は、

$$(u, v) = \alpha (h_y, -h_x) \quad (\alpha > 0)$$

なる関係にあることが分かる。この関係に対して、まず渦位保存則からの説明が考えられる。もし外力、散逸を無視できるのならば、定常な流れは等渦位線に沿う。相対渦度を無視し、コリオリパラメータが一定であるとした場合、順圧渦位 q は、水深(h)の逆数となり、流れは等深線に沿う。平均的な水深に対して水深の変化が小さい場合には、流量の保存を考慮すると、流速は海底地形勾配の定数倍となり、上記の関係が説明できるように思える。しかし、上記の関係式の流れは、浅い領域を右手にみる流れであり、流れには方向性が存在することを意

味している。もし、渦位保存則からの説明が的を得ているのであれば、深い領域を右手に見る流れに対しても適用できる必要がある。つまり、流速と海底地形勾配の関係を示した散布図(図7(a)(b))で、

$$(u, v) = \alpha (-h_y, h_x)$$

なる関係も見いだされる必要がある。しかし、カナダ海盆の大気場は高気圧場(Beaufort High)であるのにも関わらず、このような関係が見いだせない。このことから、渦位保存則からの説明のみで海底地形と流れの関係を説明するのは困難であると考えられる。

そこで、有力候補として考えられるのは、地衡乱流渦と海底地形との相互作用によって励起される流れによる解釈である。Holloway (1992)¹⁰⁾は、二次元乱流理論から、

$$\Psi = -fL^2H$$

$$u_* = -fL^2(k \times \nabla H)/H_0$$

Ψ : 流量関数

u_* : 乱流渦と海底地形の相互作用によって励起される流速成分

f : コリオリパラメータ

L_0 : 水平スケールの次元をもつ定数
地衡乱流渦の性質に依存する

H : 水深

k : 鉛直方向の単位ベクトル

を満たす流れが地衡乱流渦と海底地形との相互作用より生じることを見いだした。この理論を基に、地衡乱流渦を表現できない変形半径よりも大きなグリッド・サイズをもつ渦非分解モデルでは、順圧成分の方程式中の粘性項を一般に用いられている $\nu H \nabla u$ ではなく $\nu H \nabla (u - u_*)$ とした方が観測事実と符合する結果が得られることが見いだされている(Eby *et al.* 1994¹¹⁾; Holloway, *et al.* 1995¹²⁾; Nazarenko *et al.* 1997¹³⁾)。実際、Nazarenko *et al.* (1997)¹³⁾では、北極海海洋-海水結合モデルで上記のパラメータ化された地衡乱流渦と海底地形との相互作用の効果を取り込んだ実験($L_0 = 4$ km)を行っており、この効果の重要性を主張している。IOEB観測の結果(図7(a)(b))からは、 L_0 はおおよそ5 kmと見積もられる。観測結果は、地衡乱流渦と海底地形との相互作用による流れのみを含むわけではなく、これと同方向の流速成分をもつ密度流成分も含んでいるため、多少過大評価になっていると考えられる。したがって、IOEB1号機による観測結果は、Nazarenko *et al.* (1997)¹³⁾における $L_0 = 4$ kmの設定の妥当性を支持するとともに、その基であるHolloway(1992)¹⁰⁾の理論の正当性を支持するものであ

ると言える。また、 L_0 は渦の水平スケールに関する物理量であるので、数値モデルの中で渦-海底地形相互作用をパラメータ化なしで表現するためには、海底地形と相互作用する渦の水平スケール L_0 よりも小さい水平分解能が必要であることを意味している。少なくとも渦分解北極海モデルと言うためには2-3 km(<5 km)の水平分解能が必要であろう。

地衡乱流渦と海底地形の相互作用により、等深線に沿った流れが駆動されるとすれば、渦運動エネルギーが等深線に沿う平均流のエネルギーに転化されている必要があろう。25時間移動平均水平流速場(図2)から、Chukchi Plateau, Northwind Ridge 周辺ではアラスカ沖 Beaufort Sea に比して中規模渦の運動は弱くなっていることを既に述べた。これは、海底地形の平坦な領域にあった中規模渦が海山域に進入し海底地形の相互作用の結果、渦のエネルギーが平均流のエネルギーに転化された可能性を示唆するものである。

UT AND GRADIENT OF BOTTOM TOPOGRAPHY (R=50KM)

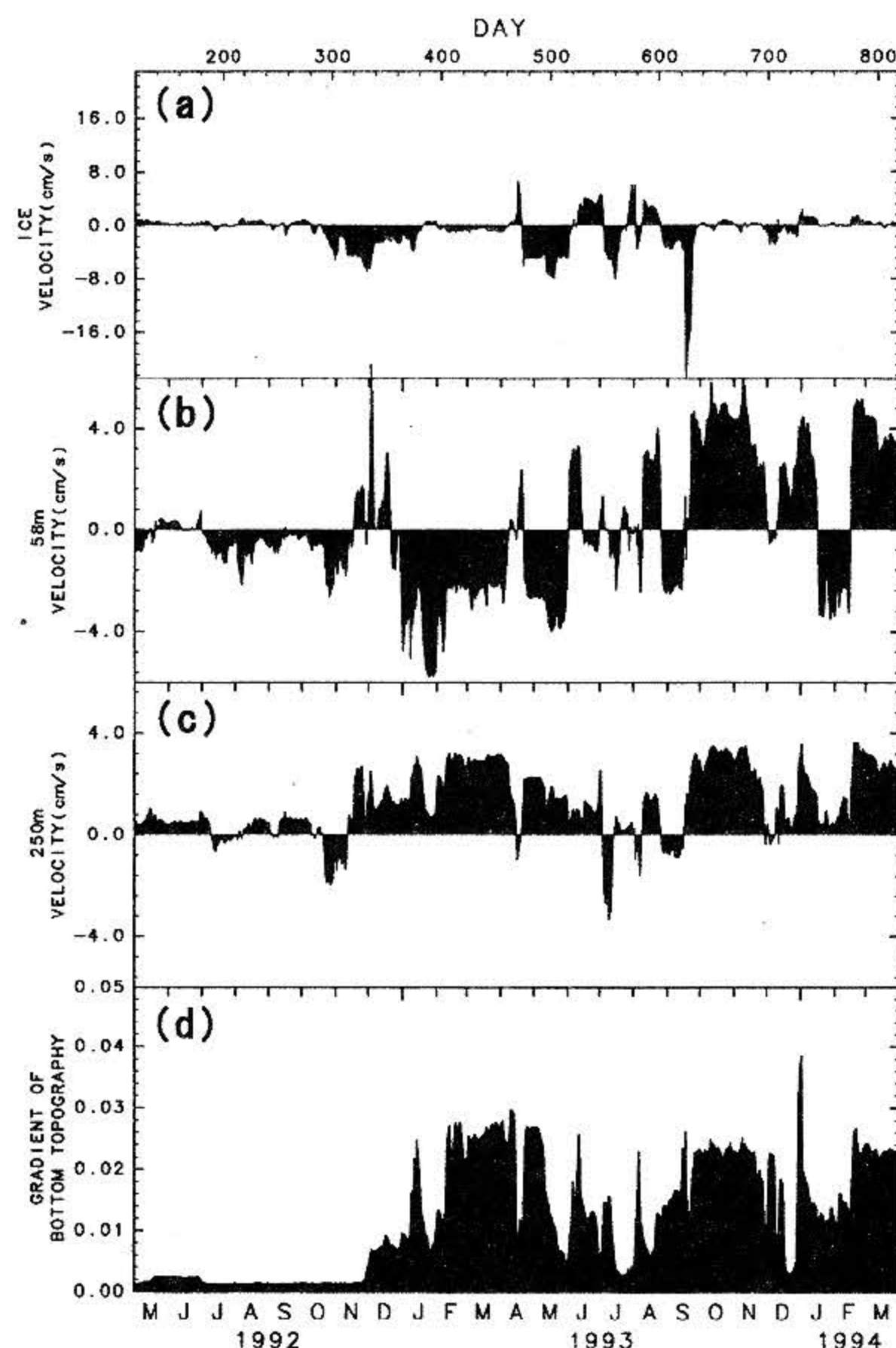


図6 海底地形に沿う速度 ((a)海水, (b)58m深, (c)250m深)と海底地形勾配の絶対値の時系列。

Fig. 6 Time series of horizontal velocity component tangential to contours of bottom topography ((a)sea ice, (b)58m depth, (c)250m depth) and maximum gradient of bottom topography.

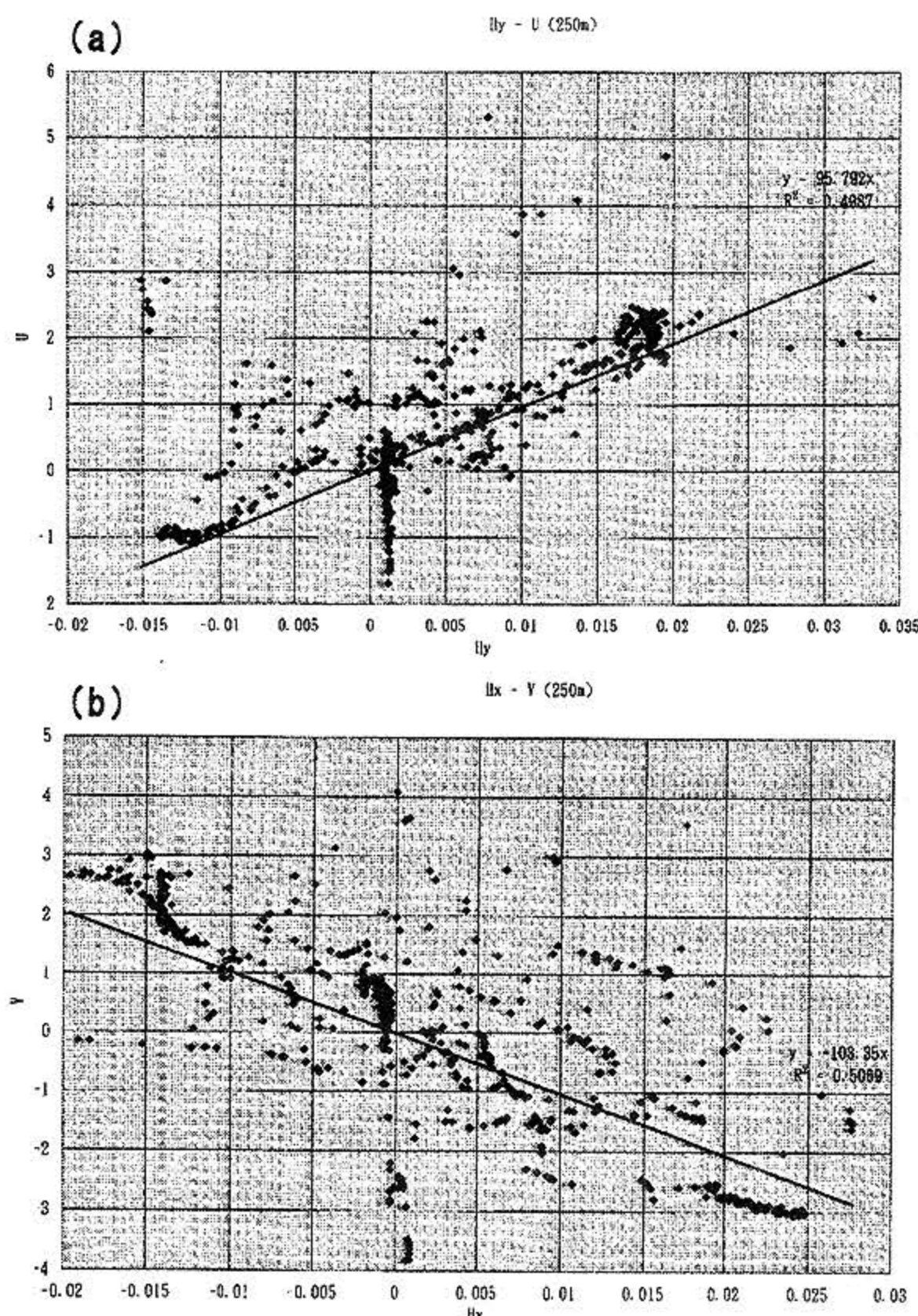


図7 海底地形勾配と250m深における流速の散布図
(a)海底地形の南北勾配(h_y)と東西流速成分(u)
(b)海底地形の東西勾配(h_x)と南北流速成分(v)

Fig. 7 Scatter plot for the relation between gradient of bottom topography and velocity at 250m depth.
(a) gradient of bottom topography in y direction (h_y) vs zonal velocity component (u).
(b) gradient of bottom topography in x direction (h_x) vs meridional velocity component (v).

5.4 順圧西岸強化流

図6において、1992年12月から1993年2月にかけて(1992年1月1日を第1日としたときの380日から450日)、58m深と250m深の流速値の包絡線と海底地形勾配の絶対値が、同一形状で大きく変位していることが分かる。この時期、IOEBの漂流速度(海水移動速度)は、非常に小さく、海洋の流れはその場所での海水応力によって駆動されたものとは考えにくい。この期間の漂流軌跡(図5(a))は等深線に沿っており、海流により海水が駆動されたと考えるのが自然である。全水深にわたって流速場は一樣に海底地形の影響を受けている様子から、海洋の強い順圧応答によって形成されたものであると考えられる。このような流速構造が見られたのは、北北東-南南西方向に横たわるNorthwind Ridgeの東斜面である。これは、Northwind Ridgeが順圧ロスビー波に対して西岸の役割を果たし、西岸強化流的な強い順圧流成分が

形成されたものと考えられる。Northwind Ridge 東斜面の強い順圧流成分は、北極海海洋-海洋結合モデルにおいても見いだされている(Maslowski *et al.* 1997¹⁴⁾; Zhang *et al.* 1997¹⁵⁾)。

5.5 大気-海水-海洋相互作用

5.4で海流により海水が駆動されている可能性があることを述べた。図8はNorthwind Ridge付近での漂流スピードと気温の時系列を示したものである。漂流スピードが大きいつき、気温は著しく上昇することが分かる。この時期、北極圏は厳冬期にあり、太陽からの日射もほとんどないため、著しい気温上昇は海面の露出によるためであると考えることができる。したがって、海流分布の不均一性によりリードが形成され、局所的ではあるが非常に強い大気-海水-海洋相互作用が起こったことが示唆される。Honjo *et al.* 1995¹⁶⁾は、IOEB 2号機による観測から、100m深までの及ぶ低温・高塩化のイベントが数回起こっていたことを示しており(図9)、結氷に伴うブライン排出が原因であると推察している。このようなイベントが起こっていたときIOEB 2号機の漂流速度は増大しており(図10)、同様のことが厳冬期のNorthwind Ridge 付近で起こっていると考えられる。

5.6 Northwind Ridge東斜面とChukchi Plateau北斜面の相違

Chukchi Plateau北斜面からNorthwind Ridge東斜面を通る経路は大西洋水の主経路であると5.2で述べた。しかし、Chukchi Plateau北斜面とNorthwind Ridge東斜面では流れの鉛直構造は大きく異なる。Northwind Ridge東斜面では、5.4で述べた西岸強化流的な順圧流と強い傾圧流(冷たい塩分躍層と大西洋水層では流れが逆向き)との重ね合わせによる流れになっている。Chukchi

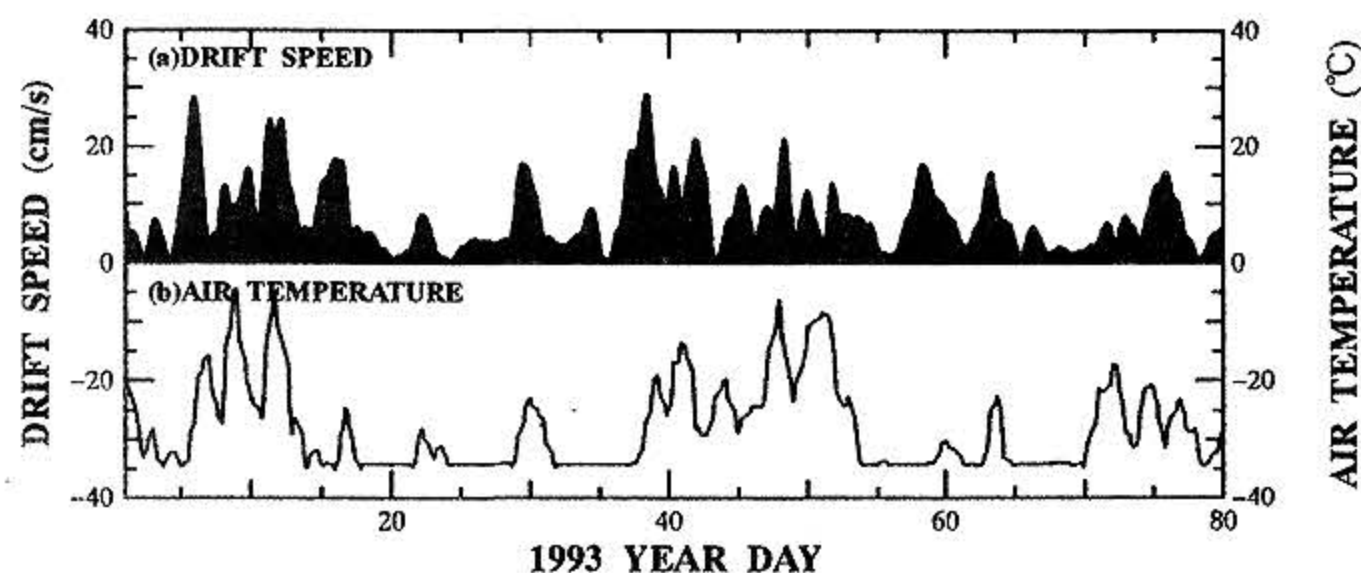


図8 IOEB 1号機の漂流スピードと気温の時系列
Fig. 8 Time series of drift speed of IOEB-1 and air temperature.

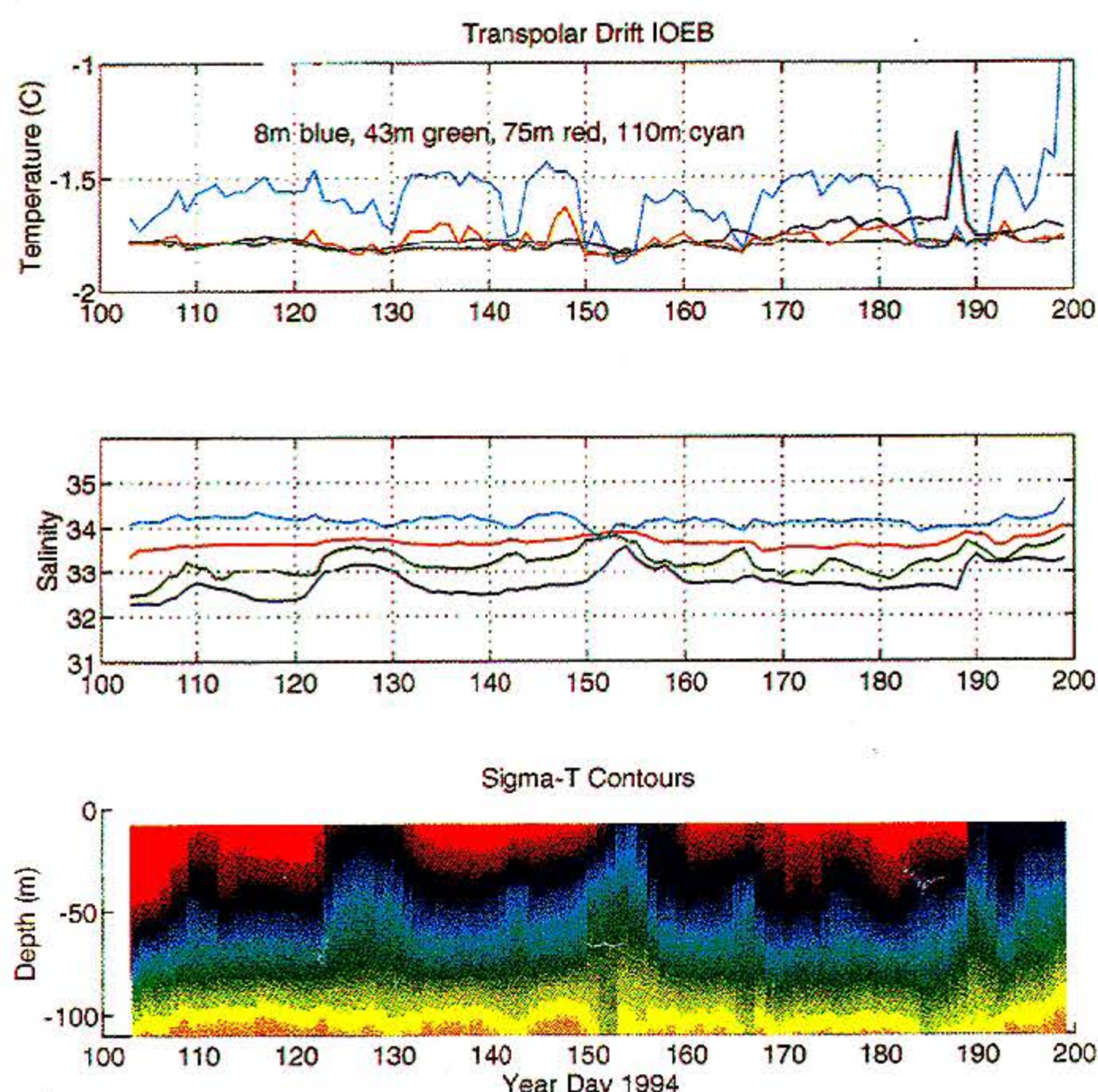


図9 IOEB2号機によって捉えられた水温(上)・塩分(中)の変動。海水下面から110m深までの密度プロファイル(下)から、大量の高密度水(青色とその他の寒色)が軽い表層水を貫いているイベントが数回起こっていることが分かる(Honjo *et al.*, 1995 より)

Fig. 9 Variability of water temperature (upper panel) and salinity at 8m (blue), 43m (green), 75m (red), and 110 (black) observed by IOEB-2. The ocean density profile from ice-bottom to 110m depth (lower panel) indicates the massive amount of dense water (blue and other cool colors) penetrated through the lighter surface water (red and other warm colors) during several events. (From Honjo *et al.*, 1995)

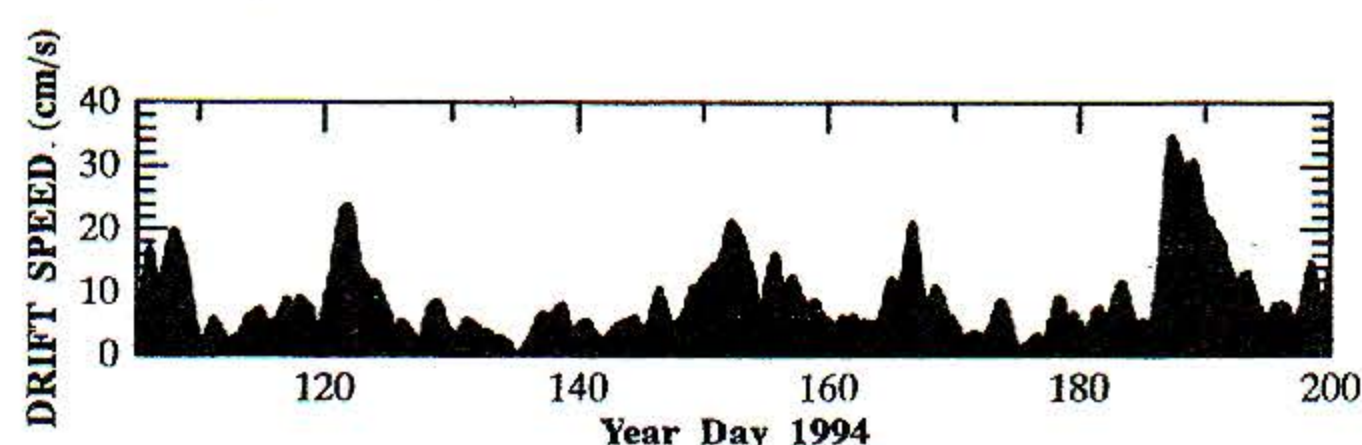


図10 図9で示した水温・塩分イベントに同期した漂流スピードの増大

Fig.10 Increase of drift speed relating to the temperature and salinity event shown in figure 9.

SeaとChukchi Plateau/Northwind Ridgeの境界にあたる南北に走る陸棚斜面上でも傾圧成分が卓越している。一方、Chukchi Plateau北斜面では、流れの傾圧性は弱く順圧成分が支配的である。Steele(1997)¹¹⁾は潜水艦によるXCTD観測データ(水温・塩分)から地衡流計算を行い、Northwind Ridge東斜面では流速の大きな鉛直シアが見られるのに対し、Chukchi Plateau北斜面では

流速の鉛直シアはほとんど見られないというIOEB1号機の観測結果と符合する結果を得ている。Northwind Ridge東斜面で見られた強い傾圧流の生成要因の候補として、海山の存在により、非線形傾圧ロスビー長波の特性曲線が交差し、大きな密度面勾配が形成され、強い傾圧流が生成されるメカニズム(Rhines, 1989¹⁰⁾; Hogg, 1989¹⁹⁾)が考えられる。

6 おわりに

6.1 まとめ

本研究はIOEBによって取得されたADCPデータを用いボーフォート海の循環場について調べた。その結果をまとめると、以下ようになる。

- アラスカ沖ボーフォート海の深海盆では中規模渦運動が卓越し、その運動の中心は冷たい塩分躍層にある。
- Northwind Ridge及びChukchi Plateau周辺では海底地形に捕捉された流れが卓越する。
 - 大西洋水層では、浅い領域を右手に見る等深線に沿った流れが卓越し、海山の斜面上でその流速はおおよそ3cm/sである。
 - 大西洋水層における流速と海底地形勾配は、 $u = -\alpha k \times \nabla h$ の関係を満たす。
 - 南北に走るNorthwind Ridgeの東斜面には、深い領域を右手に見る強い順圧流成分が存在する。
 - Northwind Ridge 東斜面では海洋が海水を駆動している。
 - 南北に走る海嶺の東斜面、陸棚斜面の東斜面では、大西洋水層と冷たい塩分躍層で流れの向きが逆になっており、傾圧性が卓越する。一方、Chukchi Plateau 北斜面は順圧性が卓越する。

6.2 IOEBの海洋物理学一般に対する有用性

北極海に関しては、季節変動はおろか経年変動、長周期変動を対象とした研究が行えるだけのデータセットは揃っていない。また、平均的な海洋循環構造についても断片的な知識によって描像を与えるレベルにあり、定量的な議論を行える状況には無かった。いずれもその要因は、海水の存在による海洋観測の困難さが原因であるとされ、海水は北極海観測の最大の障害物であるかのごとく考えられてきた。しかし、海水が存在することによる恩恵はないであろうか？本稿では、わずか数cm/sのオーダーの海底地形に捕捉された流れや、中規模渦の鉛直構造について述べてきた。これほど、精度の高い流速デー

タを広範囲にわたって取得できたのは、ゆっくりとした速度で移動する海水にIOEBが係留できたためである。IOEB観測は、北極海観測の最大の弱点を最大の利点に転化させた観測手法と言えるのではないだろうか。もし、多数のIOEBが北極海に展開されたならば、数cm/sのオーダーの海底地形に捕捉された平均的な北極海の海洋循環のみならず、北極海に充滿している中規模渦運動の空間分布のマップも描け、大規模な北極海海洋循環に対する中規模渦の役割を定量的に解明することができるであろう。中規模渦の大規模循環場に対する役割の解明が重要視されている今日、IOEB観測による海洋循環の定量的理解は、どの海洋にも通用する一般的な理解をもたらし、中規模渦に代表される強非線形海洋物理学理解の突破口を開く可能性があるのではなかろうか。例えば、黒潮の離岸の問題にもつながるのではないだろうか？

おわん状の海底地形をもつ太平洋では、亜寒帯域では風成循環、地形に捕捉された循環ともに反時計回りであるのに対し、亜熱帯域では風成循環は時計回りで地形に捕捉された循環とは逆方向になっている。西岸近くの大陵棚斜面上の渦—海底地形駆動の南下流が黒潮の離岸緯度を決定する一つの要因になっている可能性があるのではないだろうか？

またさらに、観測事実から海底地形に捕捉された流れの力学について考察できたのは、北極海の主密度躍層が150m~200m深のごく浅い深度に存在するため、海底地形の影響が直接的に反映される主密度躍層以深の流速の鉛直二次元断面観測が可能であったことに起因している。中低緯度海洋では、主密度躍層の深さは1オーダー大きく、IOEB観測に対応する高精度な鉛直二次元断面観測は極めて困難である。最後に、北極海の海水の存在、海洋成層構造の特殊性とIOEB観測技術のマッチングが、新たな海洋観測研究の可能性を秘めていることを強調して結びとしたい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、Institute of Ocean ScienceのGreg Holloway博士には海底地形と流れの力学について数多くの有益な議論をしていただきました。ここに深く感謝の意を表します。また、University of WashingtonのKnut Aagaard博士、Michael Steele博士、Naval Postgraduate SchoolのMaslowski博士らには、有益な情報をいただきました。最後に、多くの北極研究者との交流を導いていただきました、NASDA-EORCの浮田甚郎博士に深く感謝いたします。

引用文献

- 1) Aagaard, K., and E. C. Carmack : The Arctic Ocean and climate: A perspective. In: The polar oceans and their role in shaping the global environment: The Nansen Centennial Volume, Geophys. Monogr. Ser., Vol. 85, edited by O. M. Johannessen, R. D. Muench, and J. E. Overland, 5-20, AGU, Washington, D.C. (1994)
- 2) Shimada, K., and A. Kubokawa : Nonlinear evolution of linearly unstable baroclinic boundary currents. J. Phys. Oceanogr., 27, 1326-1348. (1997)
- 3) The north Atlantic oscillation. In: CLIVAR implementation plan. (1997)
- 4) Bryan, F. : High-latitude salinity effects and interhemispheric thermohaline circulations, Nature, 323, 301-304. (1986)
- 5) Marotzke, J., P. Welander and J. Willebrand : Instability and multiple steady state in a meridional-plane model of the thermohaline circulation. Tellus, 40A, 162-172. (1988)
- 6) 畠山 清・中村 亘・滝沢隆俊・小山 登・本庄 丕・R. Krishfield : 氷海用自動観測ステーションのデータ通信状況. 海洋科学技術センター試験研究報告, 33, 17-25 (1996(a))
- 7) 畠山 清・滝沢隆俊・中村 亘・本庄 丕・R. Krishfield・小山 登 : 氷海用自動観測ステーション (IOEB) の開発. 海洋科学技術センター試験研究報告, 34, 1-15 (1996(b))
- 8) Salmon, D. K., and C. P. Mcroy : Nutrient-based tracers in the Western Arctic: A new lower halocline water defined. In: The polar oceans and their role in shaping the global environment: The Nansen Centennial Volume, Geophys. Monogr. Ser., Vol. 85, edited by O. M. Johannessen, R. D. Muench, and J. E. Overland, 5-20, AGU, Washington, D.C. (1994)
- 9) Aagaard, K., et al., U.S., Canadian researchers explore Arctic Ocean, EOS, 77, 209, 213. (1996)
- 10) Holloway, G. : Representing topographic stress for large-scale ocean models. J. Phys. Oceanogr., 22, 1033-1046. (1992)
- 11) Eby, M., and G. Holloway : Sensitivity of a large scale ocean model to parameterization of

- topographic stress. *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 2577-2588. (1994)
- 12) Holloway, G., T. Sou, and M. Eby : Dynamics of circulation of the Japan Sea. *J. Mar. Res.*, **53**, 539-569. (1995)
- 13) Nazarenko, L., G. Holloway, and N. Tausnev : Dynamics of Transport of 'Atlantic signature' in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, submitted, (1997)
- 14) Maslowski, W., A. R. Parsons, Y. Zhang, and A. J. Semtner : High resolution Arctic Ocean and sea ice simulations. Part 1 : Ocean model design and early results. *J. Geophys. Res.*, submitted, (1997)
- 15) Zhang, Y., W. Maslowski, and A. J. Semtner: High resolution Arctic Ocean and sea ice simulations. Part 2 : Ice model design and early results. *J. Geophys. Res.*, submitted, (1997)
- 16) Honjo, S., T. Takizawa, R. Krishfield, J. Kemp, and K. Hatakeyama : Drifting buoys make discoveries about interactive process in the Arctic Ocean. *EOS*, **76**, 209,215,219. (1995)
- 17) Steele, M : Private communications (1997)
- 18) Rhines, P. B. : Deep planetary circulation and topography: Simple models of midocean flows. *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 1449-1470. (1989)
- 19) Hogg, N. G. : Finite amplitude effects on deep planetary circulation over Topography. *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 1697-1706. (1989)

(原稿受理 : 1997年 6 月10日)