

「みらい」船舶搭載ADCPデータのキャリブレーション

島田 浩二*1

北極海における陸棚域—海盆間の水塊交換に対する中規模の渦の役割を調べるためには、内部ロスビー変形半径 (10-15km) の水平スケールを持つ中規模渦を分解するのに十分な空間分解能 (5km以下) を有する絶対流速データが要求される。船が16ノットで航行する場合、5km以下の空間分解能とは、時間分解能が10分以下であることに対応する。また、10cm/sの精度を有する絶対流速データであることも同時に要求される。一定速度で航行している場合には、この条件を満たす絶対流速データを得ることは比較的容易である。しかし、CTD観測などが頻繁に行なわれるときは、船は大きな加速度をもつ。このような場合には、流速計測が行なわれた時刻の船速を正しく用いることが極めて重要である。例えば、船の加速度が 3cm/s^2 のとき、流速測定時間に関する10秒の誤差は30cm/sの絶対流速誤差をもたらす。

キーワード：音響式流向流速計, 北極海, 中規模渦

Calibration of R/V Mirai Shipboard ADCP data

Koji SHIMADA*2

In order to examine roles of mesoscale eddies on the water mass exchanges between shelf regions and basins in the Arctic Ocean, absolute velocity data sets which resolve the mesoscale eddies with horizontal scale of internal Rossby deformation radius (10-15km) and have accuracy less than 10cm/s are required. When the ship sails at a constant speed, it is easy to acquire the absolute velocity data sets satisfying the above requirements. Just before and after CTD stations, ship acceleration increases. In such case, it is crucially significant to use correct ship velocities at each measurement time to calculate absolute velocities. For example, when the ship acceleration is 3cm/s^2 , 10 seconds error in measurement time causes the absolute velocity error of 30cm/s.

Keywords : Acoustic Doppler Current Profiler, Arctic Ocean, Mesoscale eddies

*1 海洋観測研究部第3研究グループ及びカナダ海洋科学研究所

*2 Ocean Observation and Research Department and Institute of Ocean Sciences

1. はじめに

北極海における主密度躍層以浅の水の水塊起源は陸棚域にあり、陸棚域から海盆域間の水塊交換は米国を中心とする国際プロジェクト Shelf-Basin Interaction の主要テーマとなっている。水塊輸送の形態は様々考えられるが、中規模渦による輸送が重要である。図1は2000年10月1日のアラスカ州バロー沖の渦構造を捉えたRADARSAT画像である。波動擾乱、渦、ストリーマーなど様々な中規模現象が観測されている。特に夏季の陸棚水は温暖であり、その外洋域への水塊輸送は熱輸送を伴う。9月28日の画像では、暖水ストリーマーが既に沖に存在していた渦に取り込まれている様子が分かる。10月6日以降、アラスカ沿岸北極域の気温は著しく低下し結氷が始まったが、ストリーマーにより大量の暖水が供給された領域(巨大渦の存在域)では開水域となっていることが分かる。このように、海洋中規模現象がローカルな海洋-海水-大気相互作用に影響を及ぼしていると考えられる。10月8日の画像に見られる巨大渦のスケールは半径50km程度であるが、巨大渦の形成に参与した沿岸密度流の波動擾乱のスケールは上層の内部変形半径(10-15km)程度である。従って、北極海での中規模現象の詳細を議論するためにはこのような中規模擾乱を十分に分解できる絶対流速データ(空間分解能5km以下)が必要となる。北極海で観測される渦の流速は30-50cm/s程度であり、誤差が10cm/s以下の精度で絶対流速を求めることも同時に要求される。船速を8m/sとすれば、10分以下の時間分解能(5km以下の空間分解能に対応)が要求される。

複数のADCPアンサンブルデータに対し統計処理を行う前に、まず元のADCPデータ記録間隔の時間分解能を保ち、且つ、極力誤差を含まない絶対流速データセットを作成することが重要な第一ステップとなる。ここでは、2000年の「みらい」北極航海における船舶搭載ADCPデータの処理結果について報告する。

2. データ処理

ここでは、1分毎に記録されたADCP生データ(Water Tracking データ, Bottom Tracking データ)及び1秒毎に記録されたGPSデータを用いる。

2.1. GPSデータ

取得されるGPSデータには短周期(5-20秒)の振動が含まれるので、1秒毎に取得されたGPSデータに対し透過周波数帯域<2Hz、遮断周波数帯域>3Hzのローパスフィルタをかける。ここでは、アンサンブル時間間隔の時間分解能(1分)を有する絶対流速データセットを作成するため、透過周波数帯域を2Hz以下とした。次にローパスフィルタを施したGPSデータセットより、船速(GPS速度)及び加速度を求める。受信衛星の切り替わりなどでGPS位置データのジャンプが起こることがあるが、このような場合には非現実的に大きな加速度となる。従って、加速度に閾値を設けることにより、GPS位置データのジャンプに起因するGPS速度の異常値は除去できる。MR00K06-LEG2航海での「みらい」の加速度は最大7cm/s²程度であり、ほとんどが5cm/s²の以下の値

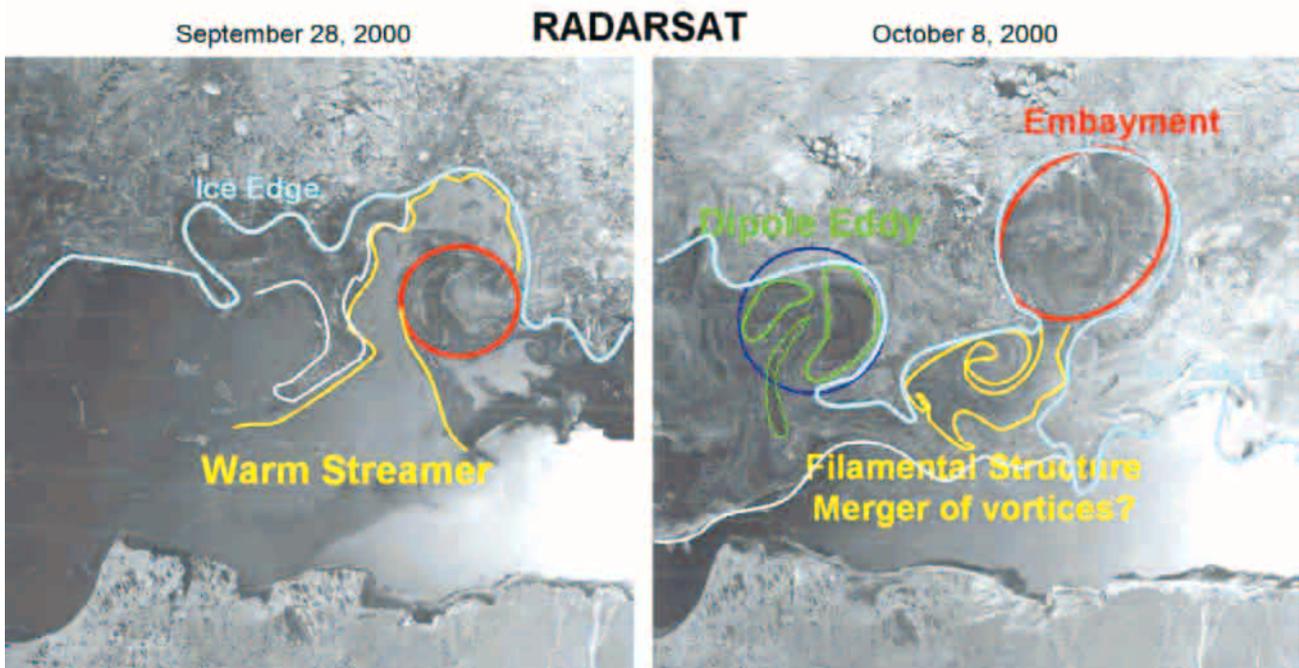


図1 2000年9月28日及び10月8日のRADARSAT画像(アラスカ州バロー岬付近)。
(Copyright Canadian Space Agency 2000)

Fig. 1 RADARSAT images on September 28, 2000 and October 8, 2000 near Point Barrow.
(Copyright Canadian Space Agency 2000)

をとる。ここでは、 5cm/s^2 を越える加速度である場合には欠損値として処理する。しかし、以上 $1\text{--}5\text{cm/s}^2$ の加速度値となるケースがアラスカ沖ポーフォート海では全体の約50%にも及んでいる。このような場合、もし真の流速計測時刻と絶対流速補正に用いる船速データの時刻が10秒ずれていたとすると、 $10\text{--}50\text{cm/s}$ の絶対流速誤差が付加されてしまうことになる。留意すべき事項は、ADCPにより計測された時刻を正しく見積もることである。流速計測時刻の見積もりについては2.3.にて述べる。

2.2. ADCPのキャリブレーション

「みらい」船舶搭載ADCPは船首－船尾方向に対して、トランスデューサー#1と#2を結ぶ方向が45度の方向に取り付けられている仕様となっている。しかし、実際には正確に定められた角度で取り付けことは難しく、取り付け角度誤差が実際には存在する。また、横風や流れが存在する場合、真の船のHeadingとGPS位置データから計算されるHeadingは一致しない。この不一致も、絶対流速算出の際には取り付け角度誤差と等価の誤差を生み出す。このような誤差を総合して、Heading誤差(α)と呼ぶことにする。Heading誤差により、例えば船の進行方向と直交する方向の流速成分に対しては、おおよそ船速 $\times \sin(\alpha)$ 程度の流速誤差が生まれる。もし $\alpha=3^\circ$ 、船速が 8m/s の場合、流速誤差は 40cm/s にも達する。また、Heading誤差に加えて、もしADCPが傾斜して取り付けられていれば、種々の演算の結果求められる流速値に含まれる誤差は取り付け傾斜角の誤差にほぼ比例して増大する。この誤差を取り付け傾斜角誤差(β)と呼ぶことにする。上記の α 、 β の値を推定するADCPキャリブレーションの方法はJoyce(1989)¹⁾によって記述されている。MR00K06-LEG2航海では、十分な数のBottom Tracking データが取得されていたので、Bottom Tracking データを利用する方法を用いる(Joyce, 1989¹⁾)。キャリブレーションに用いるGPS速度データ、Bottom Tracking 速度データの閾値は以下の通りである。

(1) GPS速度データ

1. 加速度 1cm/s^2 以下
2. 船速 10m/s 以下

(2) Bottom Tracking速度データ

1. 相関が95%以上
2. BT鉛直速度が 10cm/s 以下
3. BTエラー速度が 10cm/s 以下
4. Echo強度が25 counts以上
5. %good値が80%以上

つまり、ADCPキャリブレーションに際しては、加減速が著しいときのデータは用いない。MR00K06航海Leg2のマッケンジー湾沖よりダッチハーバーまでの区間でのキャリブレーションの結果を図2に示す。Heading誤差(α)、取り付け傾斜角誤差(β)は、それぞれ、 $\alpha=2.8376$ 、 $1+\beta=0.9912$ であった。

2.3. 流速計測時刻

ADCP観測に同期して取得されるGPSデータには、各アンサンプルのADCP計測サイクルの終了直後にアンサンプル番号が挿入される。アンサンプル番号が挿入された時刻はADCPにより流速計測(Bottom Tracking計測も含む)が行なわれる時間とは実際はずれている。各アンサンプルデータは複数の計測値を統計処理することにより求められたものであるため、絶対流速を求める際に用いるべきGPS速度(船速)は実際に計測が為されていた時刻のGPS速度であり、その時刻を正確に見積もる必要がある。

アンサンプル番号の記録時刻を $T0+n*TE$ とすると、真の流速計測時刻($T0+n*TE+\Delta Tm$)であり ΔTm だけずれている。ここで、 $T0$ は初期時刻(定数)、 n はアンサンプル番号、 TE はアンサンプル時間間隔である。 ΔTm を正しく見積もることを試みる。実際、ADCPキャリブレーション、流速補正に用いるGPS速度の取得時刻を $T0+n*TE+\Delta T$ とすると、 ΔT と ΔTm がずれていれば、加速度 $\times |\Delta T-\Delta Tm|$ 分の絶対流速誤差が生じる。このような誤差は、加減速時に大きくなるはずである。また、 $|\Delta T-\Delta Tm|$ が大きい場合には、観測期間にわたって積分した全運動エネルギーも増大するはずである。つまり、全運動エネルギーを最小する ΔT が真の ΔTm と一致していると考えてよいであろう。

図3はADCPキャリブレーション、流速補正を行った時の平均速度(全運動エネルギーの平方根に比例)とその5次の多項式近似曲線を示したものである。多項式近似曲線から、平均速度が最小となるのは、 $\Delta Tm=-20$ 秒のときであることが分かる。図4は、 $\Delta T=-20$ の場合の55m深の流速場を示したものである。ここでは、複数のアンサンプルデータにまたがる平均操作、フィルタ処理は一切、行っていない。但し、図では、以下の条件を満たす場合のみ流速ベクトルを表示している(5分毎に表示している)。

(1) Water Trackingデータ

1. 相関が25%以上
2. echo強度が64 counts以上
3. 補正前の流速が 10m/s 以下
4. 鉛直速度 10cm/s 以下
5. エラー速度 10cm/s 以下
6. %good値が80%以上

(2) GPSデータ

1. 船の加速度が 5cm/s^2 以下
2. 求めた船のGPS速度が 10m/s 以下

流速、流向の変化は船の軌跡に沿って連続的に変化しており、陸棚斜面上で東向きの流れとなるAlaskan Coastal Waterの流れが非常に綺麗に捉えられていることが分かる。細かく見てゆくと、陸棚斜面に沿って波長が経度方向に約 1.5 度(=約 57km)の空間スケールを持つ擾乱が存在することが分かる。1波長の $1/4$ は約 14km であり、これはロスビーの内部変形半径と一致している。MR00K06航海では、同海域にて渦分解CTD/XCTD観測は為されていないが、約1週間後の10月初旬にカナダ砕氷船ローリエ

MR00K06 ADCP CALIBRATION (00K6014R) [$\alpha=2.8376, \beta+1=0.9912$]

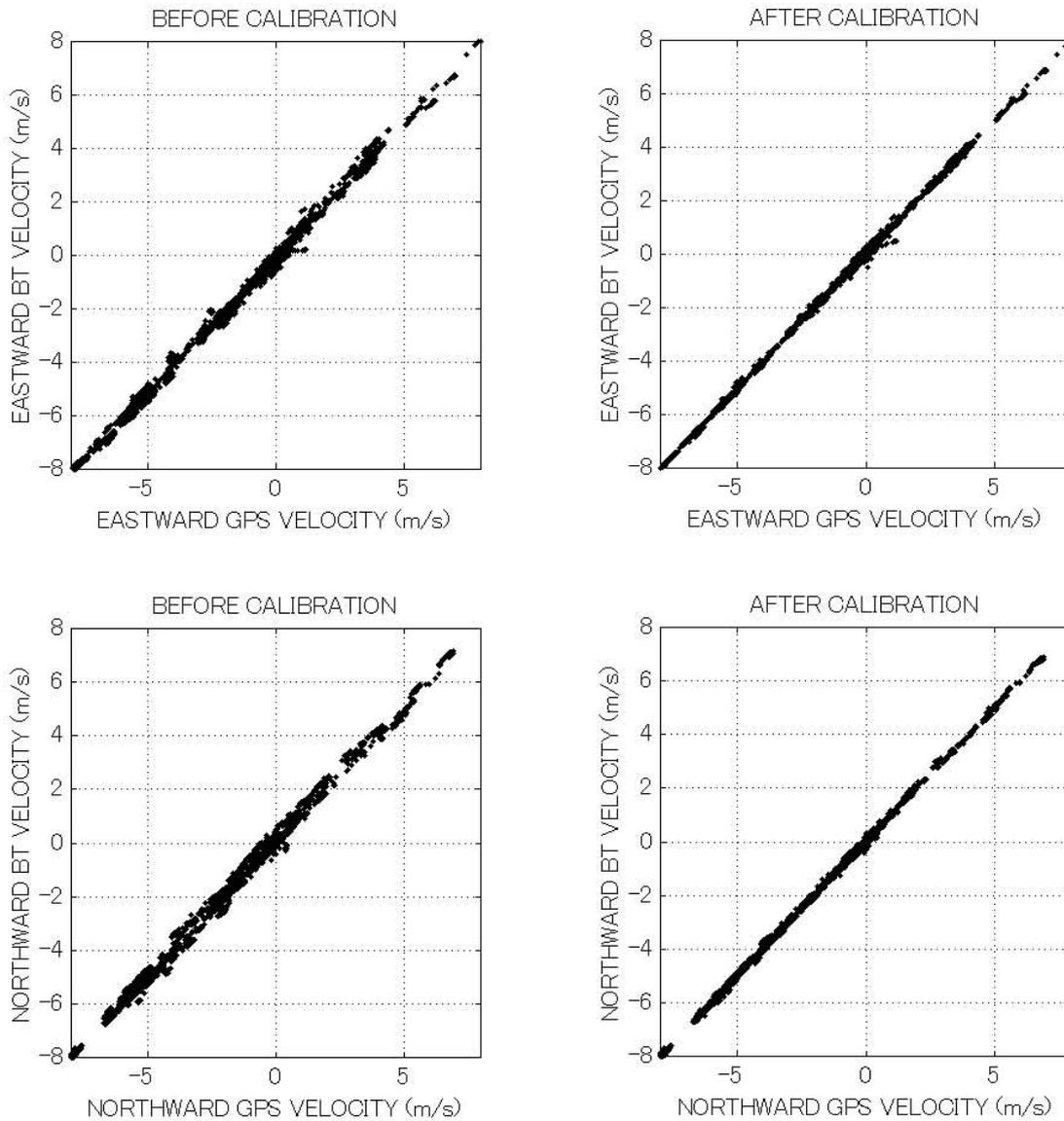


図2 ADCPキャリブレーションの結果(GPS速度とBottom Tracking速度の比較)

上：東向き速度成分, 下：北向き速度成分,
左：キャリブレーション前, 右：キャリブレーション後

Fig. 2 Calibration results (comparisons between GPS velocities and Bottom tracking velocities).

Upper panel: Eastward velocity component, Lower panel: Northward velocity component

Left panel: Before calibration, Right panel: After calibration

号より渦分解XCTD観測が実施された(図5)。そこで観測された擾乱の水平スケールは「みらい」船舶搭載ADCPにより観測された擾乱(図4)とほぼ同じスケールであったことが分かる。以上のことから、ここで行った一連のデータ処理により複数のADCPアンサンブルデータを統計的に処理することなく、目的としていた北極海での中規模現象を捉える分解能、精度を有する絶対流速データを作成できたものと考えられる。もしも流速計測時刻に誤差が存在する場合

には、このような精度で流れ場を求めることができない。 $\Delta T=39$ ($|\Delta T-\Delta T_m|=19$ 秒)の場合の絶対流速場を図6に、 $\Delta T=21$ ($|\Delta T-\Delta T_m|=41$ 秒)とした場合の絶対流速場を図7に示す。予想通り、船の加減速時(加速度が 1cm/s^2 以上)のときに絶対流速誤差が著しく大きくなっていることが分かる。これらの結果から、流速計測時刻を高い精度で見積もることが、エラーの少ない基本絶対流速データセットを作成するのに極めて重要であることが再認識されるであろう。

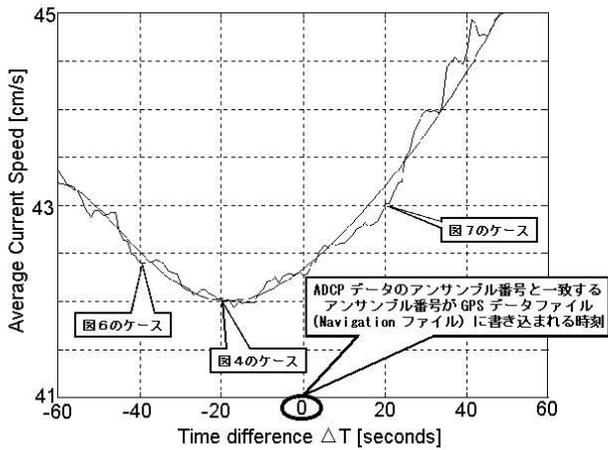


図3 計算に用いた流速計測時刻 (ΔT) と 55m 深の流れの平均速度との関係。

青: 計算値, 赤: 5 次の多項式曲線

Fig. 3 Relationship between ΔT and mean current speed at 55m deep.

Blue: original values, Red: Polynomial curve fitting (degree 5)

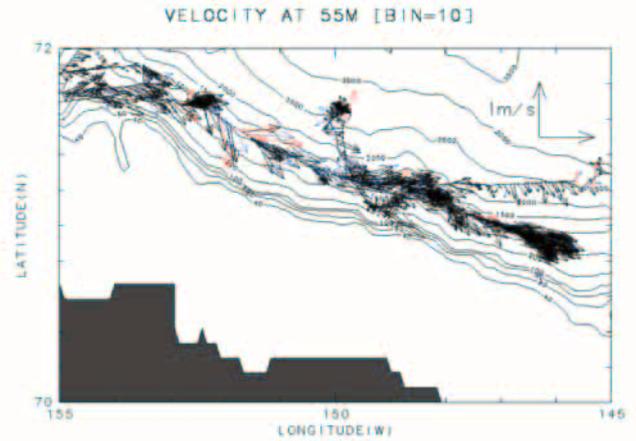


図4 全エネルギーを最小とする ($\Delta T = -20$ 秒) 場合の, ボーフォート海陸棚斜面域における 55m 深の流れ場。

黒色ベクトル: 船の加速度が 1 cm/s^2 以下

青色ベクトル: 船の加速度が $1 \sim 3 \text{ cm/s}^2$

赤色ベクトル: 船の加速度が $3 \sim 5 \text{ cm/s}^2$

Fig. 4 Velocity field at 55m deep on Beaufort Shelf Slope satisfying minimum total energy ($\Delta T = -20$ seconds).

Black vectors: $a < 1 \text{ cm/s}^2$, (a: ship acceleration)

Blue vectors: $1 < a < 3 \text{ cm/s}^2$, Red vectors: $3 < a < 5 \text{ cm/s}^2$

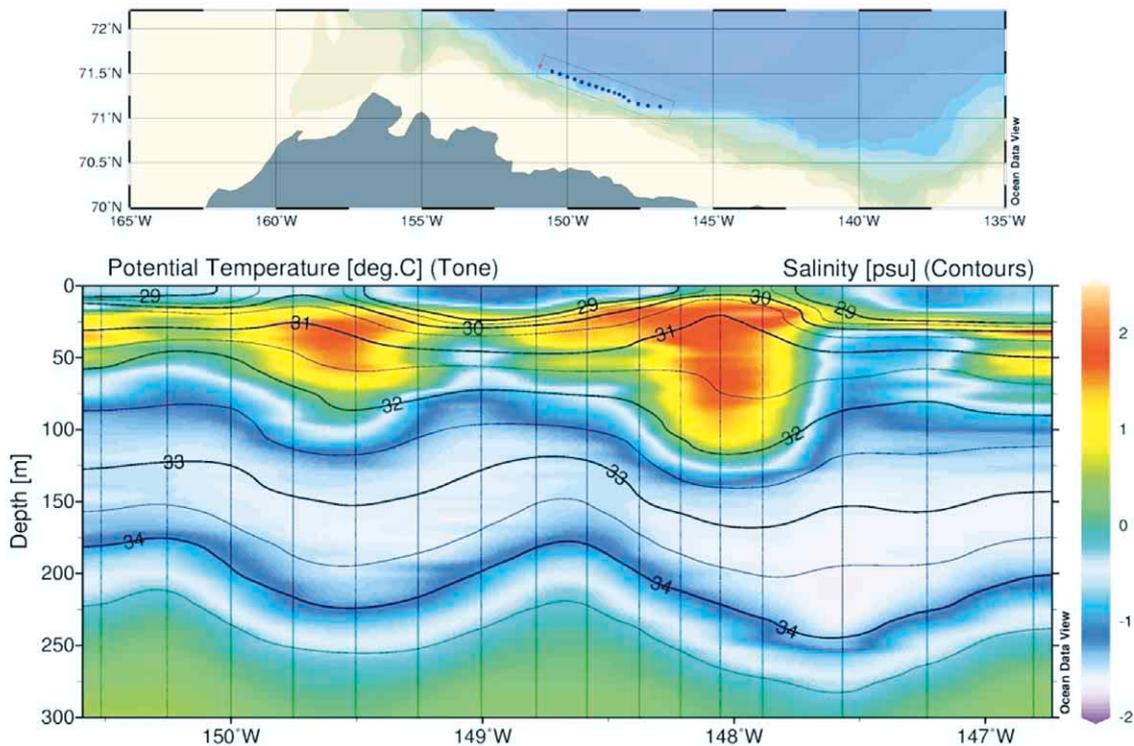


図5 2000年10月上旬にXCTD観測により見出された, ボーフォート海陸棚斜面上での中規模擾乱

Fig. 5 Mesoscale variabilities observed in XCTD section along the Beaufort Shelf slope in early October, 2000.

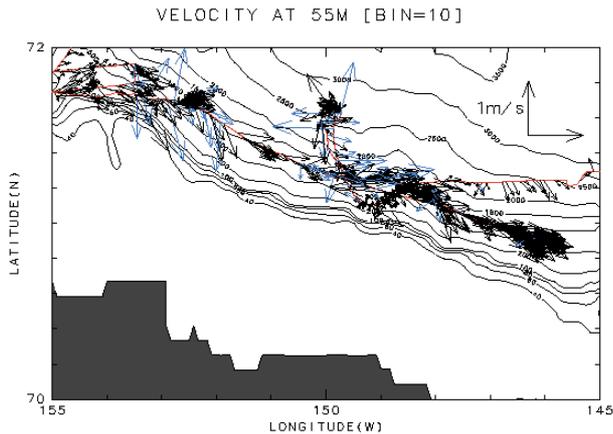


図6 $\Delta T = -39$ 秒としたときのボーフォート海陸棚斜面域における55m深の流れ場。流速ベクトルの色に関しては、図4の説明を参照。

Fig. 6 Velocity field at 55m deep on Beaufort Shelf Slope for $\Delta T = -39$ seconds. The explanation for vector colors is described in figure 4.

3. まとめ

本稿では、複数のADCPアンサンブル・データを統計的に処理することなく、エラーの少ない絶対流速データを求めることを試みた。その際に、最も重要なことは、真の流速計測時刻を適切に見積もることである。図4に示した流速データは複数のアンサンブルデータに対して統計処理を行って得られたものではない。言い換えると、元のADCPデータに対しては何ら統計処理を加えていない。ここで得られた絶対流速データ(1分間隔)を統計的に処理すれば、時間分解能及び空間分解能は多少犠牲になるが、さらに精度の高い絶対流速データを得ることができるであろう。少なくとも、目的としていた中規模現象の詳細を論ずることのできる10分の時間分解能(5kmの空間分解能)を持つデータセットを構築するための準備は整ったものと思われる。

ここで述べた方法を用いても船舶が大きく旋回する場合など、真のHeadingとGPS位置データにより計算される

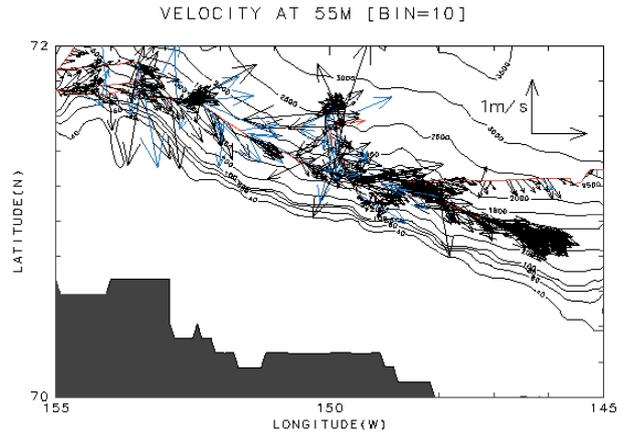


図7 $\Delta T = 21$ 秒としたときのボーフォート海陸棚斜面域における55m深の流れ場。流速ベクトルの色に関しては、図4の説明を参照。

Fig. 7 Velocity field at 55m deep on Beaufort Shelf Slope for $\Delta T = 21$ seconds. The explanation for vector colors is described in figure 4.

Headingが大きすぎて絶対流速データに大きな誤差が含まれる場合にも若干ではあるが見出されている。複数のGPSを配置することにより、真の船のHeadingを正確にモニタしておくことが望まれよう。

謝辞

滝沢隆俊氏, 小林智加志氏, 西野茂人氏をはじめとする, MR00K06次航海参加者には, 今回のADCP観測に協力いただきました。また, 菊地隆氏にはADCPの設定等の議論を行っていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Joyce, T. M., On In-Situ 'Calibration' of Shipboard ADCPs, J. Atmos. Oceanic Technol. 6, 169-172, (1989).

(原稿受理: 2001年1月15日)