商船を利用した西太平洋の ADCP 観測*

金子 新[†]・荒井正純[†]・江田憲彰[†]・杉本隆成[†]・中嶋秀夫[†]・袁 宙[†]・鄭 紅[†]
朱 小華^{††}・山根将司[†]

ADCP Observation of the Western Equatorial Pacific by a Commercial Ship

Arata Kaneko,** Masazumi Arai,** Nortiaki Gohda,** Takashige Sugimoto^{††}
Hideo Nakajima,** Zhou Yuan,** Hong Zheng,** Xiaohua Zhu^{***} and Shoji Yamane^{**}

Abstract

The western Pacific ADCP Program started in January 1997 as part of J-GOOS (Japanese Global Ocean Observing System) Program by using a huge mineral transport ship operated mainly between Japan and Australia. This program is planned to continue for more than 10 years under the financial support of the Japanese government. It is expected that surface velocity data obtained repeatedly along the ship track serve as data to predict the large meander of the Kuroshio south of Honshu, Japan and the initiation of El Niño. In this paper, the observation system is briefly introduced and the accuracy and error problems of velocity measurement are discussed. Finally the first commercial cruise data are presented as a typical example of observation data.

1. はじめに

地球上の熱環境の維持と形成に大きな役割を担う海洋中の熱の分布と輸送量を明らかにするには、海流流速を広域にわたって正確に測定する必要がある。さらに、エル・ニーニョ (El Niño) などの異常気象の問題或いは温暖化 (global warming) などの気候変動の問題に対しては広域の流速計測を 10 年以上の長期にわたって継続することが要請される。このような観点から海洋観測法を眺めてみると、広域・長期という要請を満たす有力な測定法として人工衛星の海面高度計 (satellite altimeter) が挙げられる (今脇, 1996)。しかしながら、海面高度計では地衡流バランスが成立するという前提のもとで海面流速を求めるため、この前提がどの程度成立するかを他の方法で検定することが必要である。また、ジオイドの問題があるため流速の絶対値

を正確に求めることは困難である。さらに、外洋の流速場データとしては、海面流速だけでは不十分なことが多いため、他の計測法と併用することにより海面下の流速場を評価する工夫も必要である。

現在、海洋学で広く利用されている音響ドップラー流速分布計 (ADCP) を、外洋を定期運航されている商船の船底に取り付け表層海流場を長期間反復計測できれば、人工衛星では計測することが難しい海面下の流速場データを航路に沿って得ることができる。表層流速場の地衡流バランスの程度は、商船 ADCP 計測と XBT, XCTD 計測を同時に行えば、比較的簡単に調べることができる。将来、ADCP を外洋を定期運航される複数の商船に装備することができれば、人工衛星観測に匹敵する規模の広域海流データを長期間得ることも夢ではない。今回のような一隻の商船 ADCP データであっても、人工衛星の海面高度計データと組み合わせれば、海流場の特性を解明する上でより有益なデータセットを構成できよう。Hanawa *et al.*, (1996) は、東京-小笠原間を定期運航されているフェリーの船底に ADCP を装備し、航路に沿った 400m 深までの黒潮流速を 1991 年から 5 年以上にわたって反復計測することに成功した。その結果、黒潮の表層流路の分岐特性や中規模渦の出現頻度についての新しい知見を得ている。船底型 ADCP による海流の観測は、北

* 1998 年 1 月 23 日受領; 1998 年 6 月 11 日受理

[†] 広島大学工学部; 〒 739-8527 東広島市鏡山 1-4-1

[†] 東京大学海洋研究所; 〒 164-8639 東京都中野区南台 1-15-1

^{††} 通産省工業技術院中国工業技術研究所; 〒 737-0197 呉市広末広 2-2-2

^{**} Faculty of Engineering Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8527 Japan

^{†††} Ocean Research Institute, University of Tokyo, 1-15-1 Minamidai, Nakano-ku, Tokyo, 164-8639 Japan

^{***} Chugoku National Industrial Research Institute, 2-2-2 Suehiro, Hiro, Kure, 737-0197 Japan

Fig. 1. Rear view of the mineral transport ship "First Jupiter".

大西洋のポートエリザベス (米国ニュージャージー州) とバーミューダ間でもコンテナ船を利用して行われているが、船底の ADCP トランスデューサ周辺に発生する気泡対策が十分でないため、観測は未だ予備的な段階に止まっている (Flagg *et al.*, 1998).

広島大学工学部では、1996 年 9 月に、J-GOOS (Japanese Global Ocean Observing System) プログラムの一環として、東京大学海洋研究所と協力して、西太平洋を定期運航されている鉱石運搬船の船底に音響ドップラー流速分布計 (ADCP) を取り付けた。そして、1997 年 4 月からは、文部省科学研究費『国際学術研究』(研究代表者: 第一著者)、また 1997 年 10 月からは科学技術振興事業団『黒潮変動予測実験』(研究代表者: 九州大学応用力学研究所今脇資郎教授) の支援のもとに、西太平洋を縦断する航路に沿った表層海流場を 10 年以上にわたって長期反復計測するプログラムを開始した。本研究では、まず計測システムを紹介し、つぎに計測精度・誤差の問題を議論し、最後に第 1 回業務航海で得られた流速データを観測例として示す。

2. 観測システムと方法

2.1. システムの構成

ADCP は、1996 年 9 月 26 日に広島県の IHI 呉第一工場で進水した第一中央汽船株式会社所属 (パナマ船籍) の『ファースト・ジュピター (First Jupiter)』(83, 658t) の船底に装備された。Fig. 1 に、後方からみたファースト・ジュピターの船尾部の写真を示す。今回使用した ADCP は、アメリカの RD

Fig. 2. Block diagram of the shipboard ADCP system.

Fig. 3. Position of the ADCP transducers and the magnified view of the ADCP container.

Instruments 社製の broad-band 型で発振周波数 150kHz のものである。ADCP は、船上の船橋 (ブリッジ) 内に設置されたパーソナルコンピュータ、ADCP デッキユニットおよび GPS (global positioning system) 受信機 (Trimble 社製 Acutis 6) と船底に Janus 配置された 4 個の音響発振器 (トランスデュー

Fig. 4. Picture of the ADCP transducers stored in the container.

サ) およびマストに取り付けた GPS アンテナとから構成されている (Fig. 2). そして、発振器とデッキユニットは長さ 80m の専用ケーブルで接続されている。

船底型 ADCP は独自のコンパスを持たないため、船舶に設備されたジャイロ・コンパス (株式会社トキメック社製 TG-5000) からの方位信号を受けて南北、東西の流速成分を求める。船底に取り付けられた ADCP トランスデューサは、まず対船流速を計測するので、船速を別に求めることにより対地流速に変換することが必要となる。ADCP は、船が浅海域を走行する時には、海底からの反射波のドップラー効果を利用して船速を求めることができるが、外洋では海底からの反射波が戻って来ないため GPS からの測位データを用いて船速を求める。ADCP 計測の原理等については、前報 (金子・伊藤, 1995) を参照されたい。

ADCP トランスデューサは、船首から約 243m、キール線から約 5m の右舷側の機関室直下の船底に円筒形の特別の収納スペース (凹部) を設けて取り付けられている (Fig. 3)。ADCP トランスデューサの深度は、空積みの時 8m で荷積みの時 18m となる。収納スペースの上面と側面が船底であり、完全に耐圧・防水となるように設計されている。すなわち、ADCP トランスデューサは船体の外側に取り付けられているわけである。この点は、船底の安全管理上重要であるばかりでなく、船舶の海事協会規格上も好都合となる。このような処置が可能であった理由は、本船が新造船であり、設計段階から ADCP の取り付け方法を検討できたことによる。トランスデューサの下側には、収納スペースに蓋をする目的で低密度ポリエチレン製の円形プレートが取り付けられている。円形プレートは、海水とほぼ等しい音響インピーダンスを有しているため、ADCP トランスデュー

Fig. 5. Ship routes of the M. V. First Jupiter.

サから発射された音波をほとんど反射・吸収しない。このため、円形プレート使用による速定レンジの減少は約 1 割程度と見込まれる。円形プレートは、音響窓 (acoustic window) となっているわけである。円形プレートの底面は、周辺の船底面と段差が生じないように特別に注意して取り付けられている。たとえ数 mm の段差でも船が高速で走行する場合には、段差部で cavitation が発生し ADCP 計測に深刻な影響がでる。音響窓がなければ、ADCP トランスデューサの収納スペースが大きな凹部となるため、収納スペース内部に著しい cavitation が発生することはいうまでもない。

円形プレートを取り付けている鉄製のフランジには、収納スペースに気泡や海水を導くために直径 2.5cm の穴が 3 個開けられている。収納スペースの側面には、直径 4cm の空気抜き孔が一つ設けられ、収納スペースにたまった気泡を空気抜きパイプを通して海水と一緒に常時海面位置まで導くように工夫されている。船の航走中に収納スペースに気泡がたまり、トランスデューサの前面に気泡が現われると ADCP 計測は中断されるからである。特に、船の進水時あるいは保守のためにドッグ入りした後は、収納スペースには多量の空気が入っているため空気抜き作業を行わないと ADCP 計測を開始できない。Fig. 4 に、船底に取り付けた ADCP トランスデューサの写真を示す。

2.2. 観測海域と航路

本船は、鉄鉱石と石炭をわが国に輸入するための鉱石運搬船で、重量 83,658t で船長 291m の巨大船である。本船の日本における母港は、茨城県の鹿嶋港と和歌山県の和歌山港である。本船は、1997 年 1 月 23 日の完成後ただちにオーストラリア西

Table 1. Dates and visiting ports for individual test and commercial cruises.

	Date		Port		
	Depart	Arrival	Depart	Visit	Return
1st Test Cruise	Dec.22 - 24,1996		Kure - Nagoya		
2nd Test Cruise	Jan. 7 - 10,1997		Nagoya - Kure		
1st Commercial Cruise*	Jan. 23 - Feb. 19 1997		Kure - Port Hedland - Kashima		
2nd Commercial Cruise	Feb. 27 - Apr. 2 1997		Wakayama - Dampier- Kashima		
3rd Commercial Cruise	Apr. 6 ~ May 31 1997		Kashima - Saldanha Bay -Kashima		
4th Commercial Cruise	Jun. 5 ~ Jul. 6 1997		Wakayama- Port Hedland -Kashima		
5th Commercial Cruise	Jul. 10 ~ Aug. 15 1997		Kashima - Dampier - Kashima		
6th Commercial Cruise**	Aug.18 ~ Sep. 18 1997		Kashima - Dampier - Kashima		
7th Commercial Cruise	Sep. 24 ~ Oct. 21 1997		Wakayama - Prince Rupert - Kashima		
8th Commercial Cruise	Oct. 31, 1997 ~ Feb. 1998 (plan)		Wakayama -Dampier- Rotterdam - Kashima		

*The first one-third data of this cruise are successfully acquired, but the remaining data are lost by the careless switch-off of ADCP.

**Three persons go onboard the ship to cast XCTDs and XBTs on the way to Australia from Japan. The second half data of this cruise from Australia to Japan are lost by a recording error on the optical disk (MO).

部の Port Hedland に向かって処女航海 (第 1 回業務航海) を行ったため、この時の出発港は広島県の呉港であった。本船の寄港国は、主としてオーストラリアであるが、為替相場などの諸事情によっては、南アフリカ、インド、カナダ、ヨーロッパなどにも立ち寄ることになっている。本船の業務上の運航速度は約 8ms^{-1} (約 16 ノット) で、オーストラリア・インド・カナダの往復に約 1 カ月、南アフリカの往復に約 2 カ月、ヨーロッパの往復に約 4 カ月を要する。

Fig. 5 に、本船の航路図を示す。本船が、オーストラリア西部と南アフリカに寄港する際には、西太平洋では同じ航路をとることがわかる。本船は、鉱石 (鉄鉱石、石炭) を日本にピストン輸送するため、荷積み荷降ろしのため港に 3 日~5 日停泊する以外は常に外洋上を航走している。1998 年 1 月時点では、ちょうどオランダのロッテルダムに向かう第 8 回業務航海を行っている途中である。Table 1 に、これまでの全業務航海の日程、寄港地をまとめて示す。第 3 回業務航海で南アフリカの Saldanha

Fig. 6. Velocity error V_e caused by the misalignment angle $\Delta\theta$ between the GYRO Compass and ADCP transducers.

Bay. 第 7 回業務航海でカナダの Prince Rupert に寄港した以外は、寄港地はすべてオーストラリア西部の Port Hedland あるいは Dampier であった。

2.3. 計測条件

計測は、すべて RDI 社提供の Broad-Band 型仕様の Transect.exe プログラムを使用して行われる。音波のビーム軸方向の距離分解能を多少犠牲にしても測定可能距離を大きくするために、すべての業務航海において計測モードは mode=1 に設定された。本モードに対する計測可能深度は、約 220m であった。計測は、観測員が乗船せずに自動計測方式でできるようになっている。そして、データの抜き取り・パラメーター変更・保守などの作業は、船が日本の母港に帰って来た時に観測員が船に向向いて行う。

流速計測は、音波パルスの発射間隔 (pulse width) を 2 秒、音波パルスの平均化時間 (ensemble time) を 1 分、深度幅 (depth bin) を 8m に固定して行われる。即ち、深度幅 8m 間隔の流速分布データが 1 分毎に船上のパーソナルコンピュータのハードディスクに生データとして記録されるわけである。実際の海洋中の音速 C が設定値 ($C_0=1530\text{ms}^{-1}$) と異なれば、実際の深度幅 Δh も設定深度幅 Δh_0 と異なるようになる。 C としてトランスデューサ位置の音速を用いれば良く、この時 Δh は次式で算定できる (Schott and Johns, 1987)。

$$\Delta h = \Delta h_o \times C/C_o \quad (1)$$

GPS による船位の計測は, RDI 社提供の計測プログラム通りに 2 秒間隔で行われる。データ解析における船速の計算時には, このような短い時間幅の GPS データは必要ないので, 1 分間の平均操作を施すことにより 1 分間隔のデータに再編成される。

対地流速 V_f は, 船速 V_s と航走する船に相対的に求めたドップラー流速 V_d の和として次式で与えられる (Fig. 6)。

$$V_f = V_s + V_d \quad (2)$$

本設定条件における V_d の測定精度は約 1 cm s^{-1} である。一般に V_s の測定精度は V_d のそれに比べてかなり悪い。GPS の測位誤差は標準的な値として約 50m であるから, 5 cm s^{-1} 以下の船速の精度を得るためには少なくとも 20 分の平均化を施すことが必要となる。船速誤差は, 測位誤差と平均化時間を用いて $50\text{m}/20 \text{ 分} = 4.2 \text{ cm s}^{-1}$ と簡単に評価できるからである。

流速についても時間幅 20 分, 深度幅 Δh のデータを緯度間隔 0.1° (約 11km), 深度幅 10m のメッシュデータに線形補間法を適用して変換し, 基礎データセットとしている。RDI 社 ADCP では, 受信データの S/N 比が 2 以上のデータを good データと考え, 1 回の平均化時間 (今回の設定では 1 分) の間の繰り返し観測 (約 30 回) における good データの割合を受信データの有効性を知る指標 (percent good) としている。本研究では, percent good が 25% 以下のデータを無効データと考え解析から除外している。

3. 測定精度と誤差の検定

3.1. ジャイロ・コンパスから ADCP への船首角の取り込み誤差

ジャイロ・コンパスから ADCP に取り込まれるステッパ・パルス値は, 北から時計回りに計った角度の値ではなく, 現在値からの偏差である。そのため, 計測開始前に, 船の操舵室に標示されているジャイロ・コンパス角度の値を読み取り, この値を ADCP の船首角 (heading angle) に一致させておかねばならない。RDI 社の ADCP では, 船首角を 1.0° の刻み幅でしか調整できなく, またジャイロ・コンパス角度の刻み幅は $1/6^\circ$ であるため最大 $1/6^\circ$ の取り込み誤差が発生する。この取り込み誤差は, Transect. exe プログラム中に用意されている角度補正値を 0.1° 刻み幅で与えることにより補正できるようになって

Fig. 7. Arrangement of the ADCP transducers on the ship bottom and the misalignment angle $\Delta\theta$ between the GYRO Compass and ADCP transducers.

いる。計測の終了あるいは中断時に電源をきれば, 今までの設定は解除されるので, 再度ジャイロ・コンパス値を ADCP に取り込むが必要になる。そして, このような操作をする度毎に取り込み誤差は変化する。 $1/6^\circ$ の角度誤差でも, 船が 8 m s^{-1} で走る時には, $800 \times \sin(1/6^\circ) = 2.3 \text{ cm s}^{-1}$ 程度の流速誤差を生むので補正することが好ましい。

3.2. 浅海域の航跡図を用いたコンパス補正

ADCP は独自のコンパスを持っていないため流速の南北, 東西成分を求めるには船に装備されたジャイロ・コンパスを利用することになる。流速の各成分を正確に求めるためには, 船底の ADCP トランスデューサを船の中心線 (キール) に対して決められた角度で正確に取り付けることが必要となる。本船の場合には, Fig. 7 に示すように, お互いに向き合ったトランスデューサを結ぶ直線が, キールに対して 45° の角をなすように設計されている。ところが, いくら注意深く取り付けたととしても 1° 以内の角度誤差 (不整合角) $\Delta\theta$ で取り付けを実施すること

Fig. 8. Comparison of the ship tracks obtained by the ADCP bottom tracking mode and GPS.

は困難である。Fig. 6 には、 $\Delta\theta$ によって発生する流速誤差 V_e を模式的に示している。本船のように船速 V_s が 8ms^{-1} の場合、 $\Delta\theta=1^\circ$ の角度誤差でも $V_s \cdot \sin(\Delta\theta)=14\text{cms}^{-1}$ の速度誤差 V_e を生ずる。この速度誤差は、無視できない大きさであるため、観測時に不整合角 $\Delta\theta$ を予め検定することが必要となる。

Joyce (1989) は、観測線に沿って船を多数回走らせ、得られた流速データを最小二乗法を用いて解析することにより $\Delta\theta$ を統計的に求める方法を開発した。この方法で精度良く $\Delta\theta$ を求めるには、非常に多数個のデータが必要となる。ここでは、浅海域を船が進行する時に ADCP の対地モード (bottom tracking mode) と GPS で得られる二種類の船速を時間積分して航跡図 (ship track) を求め、両者を一致させるように $\Delta\theta$ を決める簡単な検定法を紹介する。この方法では、航跡の方向差から $\Delta\theta$ を求めるため、航跡がほぼ直線となっている場合には比較的少数のデータを用いて $\Delta\theta$ を正確に決定することができる。

Fig. 8 に、ADCP の対地モードと GPS で求めた航跡図の一例を比較して示している。このデータは、1997 年 1 月 23 日に、本船が第一回業務航海で瀬戸内海の伊予灘を通行している時、午前 8 時 53 分から 11 時 27 分の 2 時間 34 分の間に得られたものである。ADCP に対する航跡図は、1 分毎の船速データに 20 分の移動平均操作を施した後に得られる 20 分毎のデータを時間積分して求めている。GPS に対する航跡図は、1 分毎の船位データに 20 分の移動平均操作を施して得られる 20 分間隔データを使用して求めている。始点を一致させて描かれた両方の航跡は、ほとんど直線的に南西方向に伸びているが、両者の

方向はわずかに異なっている。GPS の航跡を基準にした場合、ADCP で求めた航跡は時計回りに平均値として 0.88° ずれている。 $\Delta\theta=0.88^\circ$ を得たわけである。航跡線の長さは、GPS に対するものが 62.5814km で ADCP に対するものが 62.3851km であり、両者の差はわずか 196.3m にすぎない。これを、平均船速に換算すると、 $196.3\text{ m}/154\text{ 分}=2.1\text{cms}^{-1}$ となる。船速の絶対値としても両者の差は非常に小さいことがわかる。

以上述べたコンパス補正は、船底のトランスデューサを動かさない限り一定値であるので一度行えば良い。しかしながら、3.1 節で述べたように、ジャイロ・コンパスから ADCP への取り込み誤差が絶対値で $1/6^\circ$ 以内存在し、さらに電源を誤って切った時の問題もあるため、本節で述べたコンパス補正は、本船が、全ての業務航海で浅海域を通過する度毎に行うことが好ましい。

3.3. 緯度変化に伴うジャイロ・コンパスの角度誤差

船舶が、緯度線を横切る方向の速度成分をもって航走している時、ジャイロ・コンパスに角度誤差が発生する。地球の自転速度に船の子午線方向速度が合成されるため、この合力に直交する方向として定義されたジャイロ・コンパスの北が真北と一致しなくなるからである。この角度誤差 $\Delta\theta_1$ は、船舶位置の緯度 ϕ および地球の自転角速度 Ω 、地球の半径 R および緯度線に直交する方向の船速成分 V_s を用いて次式で表わせる。

$$\Delta\theta_1 = \tan^{-1}(V_s/R\Omega \cos \phi) \quad (3)$$

即ち、角度誤差は船速 V_s と緯度 ϕ における地球の自転速度の比に比例する。例えば、 $V_s=8\text{ms}^{-1}$ 、 $\phi=20^\circ$ 、 $R=6370\text{km}$ 、 $\Omega=7.27 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ とすれば、 $\Delta\theta_1=1.1^\circ$ となる。よって、 $\Delta\theta_1$ による流速誤差は $V_s \times \sin(\Delta\theta_1) = 15.4\text{cms}^{-1}$ と評価される。船舶が緯度線を斜めに横切る場合には、緯度線に直交する船速成分は小さくなるため、角度誤差も比例して減少する。この角度誤差によって発生する流速誤差は、地球の自転方向が一定しているため、船舶が地球上どこにいても海流の西向き流速を強化するように作用する。ファースト・ジュピターでは、外洋を航海中は、ジャイロ・コンパスによる自動航法 (オートパイロット) を行っている。このため、8 時間毎に GPS で求めた緯度を乗組員が手動で入力することにより、この角度誤差を補正することになっている。船速については、船に装備されたドップラーログで自動的に入力される。このため、本節の速度誤差は、上記の見積もりより大幅に小さくなっているものと予想される。

Fig. 9. Rear view of the ship equipped with ADCP transducers and a screw. The boundary of the separation zone is drawn with a dashed line surrounding the ship hull.

3.4. 船底直下で発生する大きな鉛直流速

航走する船体の回りには境界層 (boundary layer) が発達する。船底は滑面と考えてよいので、船尾部のトランスデューサ位置でも船底を平板と考えた境界層厚さは、船尾部のトランスデューサ位置でも数 m 程度である。ところが、三次元的形状をもつ船体の下方には、境界層の外側にさらに船首部底部から船尾に向かって発達する剥離によって誘起される流れ場が発達する可能性がある (種子田, 1973)。この剥離領域の厚さは、船体後部にいくにつれ発達する。巨大船である本船では、この厚さが船尾部のトランスデューサ位置では数十 m 程度になるかもしれない。

本船のトランスデューサは、キール (船のスクリュー位置と一致) から約 5 m 右舷側にずれた位置に取り付けられている (Fig. 9)。そのため、左舷側と右舷側に発射された音波ビーム (Beam 1 と Beam 2) が、キールに対して対称な剥離領域内の異なる流速領域を通過する。ADCP は、Beam 1 と Beam 2 の同一深度における流速が等しいと仮定して流速を求めているので誤差が発生することになる。剥離領域内にある Beam 1 と Beam 2 上の同一深度にある点をそれぞれ A, A' とする。点 A, A' における Beam 1 と Beam 2 に沿った方向の流速成分をそれぞれ V_1 , V_2 とし、さらに点 A における (水平, 鉛直) 流速を $(V+\Delta V/2$,

Fig. 10. Typical vertical profiles of the twenty-minute average current velocities W , V_{err} , V_z and V_y obtained on the transects (a) (22.538N, 129.894E) - (22.463N, 129.875E) and (b) (13.869N, 128.090E) - (13.785N, 128.079E). Horizontal bars on each profile indicate the standard deviation during 20 minutes.

W_a). 点 A' における (水平, 鉛直) 流速を $(V-\Delta V/2, W_a)$ とおく。即ち、Beam 1 と Beam 2 の水平流速差を ΔV , 鉛直流速差を 0 としているわけである。このとき、 V_1 , V_2 は次式のように書ける。

$$V_1 = W_a \cos \theta + (V + \frac{\Delta V}{2}) \sin \theta$$

$$V_2 = W_a \cos \theta - \left(V - \frac{\Delta V}{2}\right) \sin \theta \quad (4)$$

ここで, θ は Beam が鉛直となす角度である. これらの二つの式から V , W_a を求めればそれぞれ次式となる.

$$V = \frac{V_1 - V_2}{\sin \theta}$$

$$W_a = \frac{V_1 + V_2}{2 \cos \theta} - \frac{\sin \theta}{2 \cos \theta} \Delta V \quad (5)$$

前式より, 水平流速差 ΔV は水平流速 V に誤差を生じないが, 鉛直流速 W_a に大きな誤差を生じさせることがわかる. しかしながら, 水平流速 V 自体も剥離領域内では本来の海流の流速からずれることになる. 一方, Beam 3 と Beam 4 で求まる鉛直流速を W_b とする (Fig. 7 参照). このとき, $V_{err} = W_a - W_b$ で定義される誤差流速には ΔV の影響は相殺されることが予想される.

Figs. 10 (a), (b) に, 第一回業務航海で (22.538N, 129.894E) と (22.463N, 129.875E) 及び (13.869N, 128.090E) と (13.785N, 128.079E) の間の 20 分間で得られた平均的な鉛直流速 W と誤差流速 V_{err} の鉛直分布の典型例をそれぞれ示す. 同図には, 1 分毎のデータを用いて求めた 20 分間の流速変動の標準偏差を各深度毎に水平な横棒で示している. どちらの場合でも W の平均値は, 船底から 70m 深まで急激に, それ以深ではゆっくりと減少し 160m 以深ではほとんど一定となっている. 160m 以深の 5cm/s の W 流速は, 船が進行方向に前上がりの角度 (トリム角) を持って走っていることから発生しているものである. 船速を 8m/s とすると, 5cm/s の W 流速はトリム角 $= 0.36^\circ$ に相当する. V_{err} については, 予想通り全測定区間で絶対値が 2cm/s 以下の微流速となっている. 20 分間の標準偏差は, W, V_{err} 共に全測定層ではほぼ一定で 1cm/s 以下となっている. 同図には, また船に固定した座標系で求めた 20 分間の水平流速成分 (V_x, V_y) の平均値と標準偏差の鉛直分布を示している. ここで, V_x は船の進行方向に直交して右方向に, V_y は船の進行方向に取っている. 70m 以浅の W の急増する領域に注目する. Fig. 10 (a) では, W に比例した V_x の増加は認められない. V_y についても, 深層から表層までほぼ同じ勾配で増加していて表層で急増する W とは対応しない. Fig. 10 (b) では, V_x, V_y 共に深層から表層まで大きく変化せず, 表層で急増する W とはほとんど相関がない.

本論文では, W 流速が 13cm/s (トリム角による 5cm/s 分を含む) を越える, 約 70m 以浅の剥離領域の影響を強く受けて

Fig. 11. Ship-speed difference ΔV_s plotted against STD20 (HD). The marks $\bullet$ and $\circ$ are used for the data with STD20 (VS) $< 5\text{ cm/s}$ and STD20 (VS) $> 5\text{ cm/s}$, respectively.

いると思われる流速データを解析から除外している. トリム角によって発生する W 流速が 5cm/s であることを考慮すると, W の誤差を 8cm/s に抑えたことを意味する.

3.5. 船速と船首角の短期変動による流速誤差

外洋域における船底型 ADCP 計測では, ADCP 自体の計測精度に比べて GPS による船速の計測精度の方がはるかに劣る. そのため, 船速をできるだけ注意深く算定することが要請される. 本研究では, まず 1 分毎の船位データに 20 分の移動平均操作を施すことによって平滑化し, 次にこの船位データを用いて 1 分毎の船速を求め, これを 20 分毎に平均化することによって 20 分間の平均船速を求めた. この場合, GPS の位置精度を 50m とすれば, 船速の精度は $50\text{m}/20\text{分} = 4.2\text{ cm/s}$ と評価できる. ところが, 平均船速を求めている 20 分間に船速あるいは船首が急激に変動した場合, 船速を正確に求めることが困難となるため大きな船速誤差が発生する. そこで, GPS データで求まる 20 分間の船速と船首の標準偏差をそれぞれ STD20 (VS), STD20 (HD) と定義し, これらの値がある臨界値より大きい区間で得られた流速データを解析から除外することにする. そして, 除外された区間の流速データは, 両隣のデータの線形補間により新たに作る.

Fig. 11 に, 本船が瀬戸内海を航行中に, ADCP と GPS で得られた船速差 $\Delta V_s = |V_{ADCP} - V_{GPS}|$ を STD20 (HD) に対し

それぞれプロットしている。同図では、STD20 (VS) をパラメータとして $\text{STD20 (VS)} = 5 \text{ cm s}^{-1}$ を境にして異なるマークが使用されている。このデータは、本船が、第一回業務航海で瀬戸内海を通過している時に得られたものである。 ΔV_s の値は、 $\text{STD20 (HD)} < 0.8^\circ$ では 10 cm s^{-1} 以下であるが、 $\text{STD20 (HD)} > 0.8^\circ$ では大きく変動しながら急激に増加している。 $\text{STD20 (HD)} < 0.8^\circ$ の領域をもう少し詳しく眺めてみると、 $\text{STD20 (VS)} < 5 \text{ cm s}^{-1}$ を満たすデータは全て $\Delta V_s < 8 \text{ cm s}^{-1}$ の範囲に入っていることがわかる。

以上の結果より、本研究では、 $\text{STD20 (HD)} < 0.8^\circ$ および $\text{STD20 (VS)} < 5 \text{ cm s}^{-1}$ なる条件を課すことにより船速誤差が 8 cm s^{-1} を越えるデータを解析から除外する。この船速誤差は、海流の対地流速算定時に流速誤差となるからである。

3.6. まとめ

これまで述べたように、流速誤差には各種の発生要因がある。そのうち、ジャイロ・コンパスから ADCP への取り込み誤差、ADCP トランスデューサとジャイロ・コンパスの取り付け誤差については、船が浅海域を航走中に得られる二種類の船速を用いて各航海毎に 0.1° の精度で校正できる。 0.1° の角度誤差によって発生する流速誤差はファースト・ジュピターの場合約 1.4 cm s^{-1} となり無視できる程度である。緯度変化に伴うジャイロ・コンパスの角度誤差については、ファースト・ジュピターの場合には、船の乗組員が、自動航法で航走するため 8 時間毎に交替で角度補正するので、流速誤差は無視できる程度となる。船速と船首角の短期変動によって発生する流速誤差については STD20 (VS) 、 STD20 (HD) を指標として悪いデータを除けば、 8 cm s^{-1} の流速の計測精度を維持できる。

船底下方の剥離領域内で発生する水平流速誤差を W の測定値と (5) 式の第二式の右辺第二項を用いて見積もれば、深度 70m で約 25 cm s^{-1} で深度 100m で約 13 cm s^{-1} と非常に大きな値になる。ところが、このように大きな水平流速誤差は、Fig. 10 では認められない。船の回りに作られる海面波によって大きな W が発生している可能性もある。表層において、このような大きな W の発生する原因については、今後さらに検討する必要がある。

4. 流速の実測例

Fig. 12 に、豊後水道から太平洋の日向灘にかけての区間で得られた 1 分間隔のデータを利用して求めた船速のスティック図を示す。スティックの数が多くなりすぎるので表示は、2 分毎になされている。Fig. 12 (a) が生データで、Fig. 12 (b) が

Fig. 12. Stick diagrams of the ship speed obtained in the Bungo Channel and its adjacent seas; (a) raw data and (b) data which satisfy $\text{STD20 (HD)} < 0.8^\circ$ and $\text{STD20 (VS)} < 5 \text{ cm s}^{-1}$.

$\text{STD20 (HD)} > 0.8^\circ$ あるいは $\text{STD20 (VS)} > 5 \text{ cm s}^{-1}$ を満たす誤差の大きいデータを除外して求めたものである。これらの条件を適用することにより、Fig. 12 (a) でスティック図が扇形に交差している誤差の大きい区間のデータが削除されていることがわかる。特に、豊後水道の出口付近で船が大きく転進した前後のデータはほとんど無くなっている。船が大きく転進する時、ジャイロ・コンパスが長周期の才差運動 (Schuler oscillation) をすることからも大きな流速誤差が現われることが知られている (Pollard and Read, 1989)。このことから、船が大きく転進した時のデータの取り扱いには注意を要する。

Fig. 13 は、豊後水道を出てからフィリピンのミンダナオ島沖の北緯 10° に至るまでの区間で 0.3° の緯度間隔毎に描かれた航路に沿った 100m 深度の流速のスティック図である。流速場の特徴を北から順に述べることにする。北緯 $31^\circ \sim 33^\circ$ の区間で、トカラ海峡を出て九州の東岸に沿って北上する黒潮 (Kuroshio) が明瞭に認められる。北緯 25° の周辺に南北からの収束を伴う西向流が存在する。北緯 $21^\circ \sim 23^\circ$ の間に弱い東向流が認められる。また、北緯 15° の周辺で北赤道海流 (North Equatorial Current) が、北向きの黒潮と南向きのミンダナオ海流に分岐している。

Fig. 13. Stick diagram of the horizontal current velocities at 100m depth along the ship route from the Bungo Channel to the 10N latitudinal line.

Fig. 14 (a)~(c) に、豊後水道沖から北緯 28°, 北緯 28°から 19°, 北緯 19°から 10°までの各区間に対する (緯度間隔 0.1°, 深度間隔 10m) のメッシュデータを spline 補間法で平滑化して求めた流速の鉛直断面分布図をそれぞれ示す。それぞれの図の上側が東西成分 u , 下側が南北成分 v に対するものである。

九州の東岸に沿って北北東に向かう黒潮の v 成分は表層で最大となり 110cm/s^{-1} を越えている。 v 流速の水平シアは、流軸の北側が南側に比べてかなり大きくなっている。このことは、 u 流速についても同様である。 u 流速の符号が北緯 29°付近で正、北緯 30.5°付近で負、北緯 31.5°付近で正というように交互していることより、黒潮は九州東方で蛇行していることがわかる。他の海域に比して九州東方の黒潮流軸部で特に傾圧性が強

Fig. 14 (a). Velocity sections for the horizontal current velocities obtained on the transects (a) Bungo Channel to 28N, (b) 28N to 19N and (c) 19N to 10N. The solid lines are used for the positive (northward and eastward) velocity components and the dashed lines for the negative (southward and westward) ones.

くなっている。北緯 29°付近でトカラを西南西方向に抜けた黒潮の u 流速は、表層で最大 70cm/s^{-1} を越えている。この黒潮流軸の周辺では、九州東方の黒潮と対照的に、北側より南側の方が u 流速の水平シアが大きくなっている。北緯 29°から 32°までの黒潮の蛇行の様子は、海上保安庁水路部発行の海洋速報 (1997 年第 3 号) と細部に至るまで非常に良く一致している。

北緯 25°付近に傾圧性の強い西向流が存在し、西向きの u 流速の最大値は 50cm/s^{-1} を越えている。そして、この流速が最大となる位置でちょうど南北から流れが収束し v 流速が零になっている。逆に、北緯 21.5°付近では、南北に流れが発散し、この位置で v 流速が零となっている。この南北流の発散に対応して u 流速は弱い東向流を示す。この弱い東向流は亜熱帯反流 (Subtropical Counter Current) と関係があるかもしれない

(b)

Fig. 14 (b).

(c)

Fig. 14 (c).

(Hasunuma and Yoshida, 1978).

北緯 11° から 17° までの 120m 以浅に、 20cm/s^{-1} を越える西向流が存在する。北赤道海流 (North Equatorial Current) と思われるこの西向流は、北緯 14° 付近を境に北に向かう黒潮と南に向かうミンダナオ海流 (Mindanao Current) に分岐している。この西向流は、最大値でみても 30cm/s^{-1} 以下にすぎず通常年よりもかなり弱い (Toole *et al.*, 1990; Yuan *et al.*, 1995)。このように弱い北赤道海流と 1997 年の初めから発達してきたエル・ニーニョとの関連が注目される。

5. おわりに

現在、熱帯太平洋では、アメリカの海洋大気局 (NOAA) と日本の海洋科学技術センター (JAMSTEC) の協力の下に TOGA/TAO アレイと呼ばれる大規模なエル・ニーニョ観測網が展開されている。それに対して、西太平洋では、今回の商船 ADCP 以外には、気象庁が 147°E と 165°E の経度線上で年 2 ~ 4 回のペースで船底型 ADCP を含む定期海洋観測を行っているだけである。近年、今以上にエル・ニーニョの予測精度を向

上させるには、熱帯だけでなく亜熱帯循環や熱帯・亜熱帯にまたがる子午面循環 (meridional circulation) をモニターすることが必要であるといわれている。これらのことから、毎月のペースで西太平洋の熱帯・亜熱帯循環を横切って行われる今回の商船 ADCP 観測の重要性が理解できる。加えて、西太平洋の海流系を常時監視できれば、わが国の気象・漁業に多大な影響を及ぼす本州南方の黒潮変動を予測するデータとしても役立つことになる。

今回の商船 ADCP 観測が 10 年以上の長期に渡って継続されれば、近年注目されている 10 年周期変動 (decadal variability) や地球の温暖化 (global warming) などの研究にも役立つデータが得られるものと期待される。

以上述べた商船 ADCP データの汎用性と海洋変動予測のための観測システム構築を目指す GOOS プログラムの性格に鑑み、得られた流速データを多方面の研究者が利用できるように順次公開している。本データに関心をお持ちの方は、是非ホームページ <http://www.ocean.hiroshima-u.ac.jp> を参照して頂きたい。

謝 辞

本プログラムは、鉱石運搬船『ファースト・ジュビター』の船主である第一中央汽船株式会社の地球環境研究に対する格別なご理解とご厚意によって初めて実現できました。ADCPの船底設置、試験航海などで多くの心暖まるご支援ご配慮を賜りました同社船舶部次長宮田仁氏を始めとする関係者各位に心から謝意を表する次第です。また、航海中のADCPの計測状態を、適切に監視して下さっている古川隆一船長を始めとする乗組員各位のご親切に対して合わせてお礼申し上げます。

References

- 今脇資郎 (1995): 衛星アルティメター. 海の研究, **4**, 487-508.
- Flagg, C.N., G. Schwartz, E. Gottlieb and T. Rossby (1998): Operating an acoustic Doppler current profiler aboard a container vessel. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 257-271.
- Hanawa, K., Y. Yoshikawa and T. Taneda (1996): TOLEX-ADCP monitoring. *Geophys. Res. Letters*, **23**, 2429-2432.
- Hasunuma, K. and K. Yoshida (1978): Splitting of the subtropical gyre in the western north Pacific. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **34**, 160-172.
- Joyce, T. M. (1989): On in situ "calibration of shipboard ADCPs". *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **6**, 169-172.
- 金子新・伊藤集通 (1994): ADCPの普及と海洋学の発展. 海の研究, **3**, 359-372.
- Pollard, R. T. and J. F. Read (1989): A method of calibrating ship-mounted acoustic Doppler current profilers and the limitations of gyro compasses. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **6**, 859-865.
- Schott, F. and W. Johns (1987): Half-year-long measurements with a buoy-mounted acoustic Doppler current profiler in the Somali Current. *J. Geophys. Res.*, **92**, 5169-5176.
- 種子田定俊 (1973): 物体まわりの粘性流の観察. 粘性抵抗シンポジウム講義録 (日本造船学会), 35-58.
- Toole, J. M., R.C. Millard, Z. Wang and S. Pu (1990): Observation of the Pacific North Equatorial Current bifurcation at the Philippine coast. *J. Phys. Oceanogr.*, **20**, 307-318.
- Yuan, G., I. Nakano, H. Fujimori and A. Kaneko (1995): Long-term measurement of temperature variabilities off Mindanao Island by the ocean acoustic tomography. *J. Oceanogr.*, **51**, 327-339.