

## ボトムトラッキングを用いた簡素な LADCP データ処理方法

齊藤 勉\*

### Simple LADCP data processing method with bottom tracking

Tsutomu SAITO\*

**Abstract :** In LADCP (Lowered Acoustic Doppler Current Profiler) observations an unique data processing of following procedures is examined. First, every relative velocity profile obtained with a fixed time interval in a down cast is transformed into an absolute velocity profile by adding the horizontal ADCP drift velocity at each time. Next, they are averaged for every depth and consequently a full absolute velocity profile is obtained. Here, the horizontal ADCP drift velocity at each time is estimated from the mean difference between the relative velocity profile at the time and the absolute velocity profiles at the adjoining times. For a starting point of the chain of process, absolute velocity profiles obtained by ADCP bottom tracking near a sea bottom are used. For accuracy evaluation, rms differences between the LADCP data and vessel-mounted ADCP data obtained in five observations are calculated. As a result, the rms differences classified by depth layer (36-500 m) and by observation are about 15 cm/sec in common.

**Key word :** LADCP, data processing, accuracy evaluation

LADCP (吊下型音響流向流速計; Lowered Acoustic Doppler Current Profiler) 観測は, ADCP を CTD (Conductivity Temperature Depth recorder) のフレームに取り付けて行われ, CTD 観測中に ADCP により得られる大量の相対流速プロファイル (ADCP に対する各層の相対流速: 一般的に約 1 秒間隔で取得) から, 各測点における海面から CTD 観測深度までの絶対流速プロファイルを得る技術である。この観測技術は, WOCE (World Ocean Circulation Experiment) を背景として, 船底 ADCP の測流可能範囲からはずれる深層を対象とした流速プロファイリング技術として開発され発展してきた (Firing, 1998)。絶対流速プロファイルを得るためのデータ処理方法については, Fischer and Visbeck (1993) および Visbeck (2002) において確立され, 近年の海洋観測において広く用いられるようになった。

しかし, その観測を実施するには, 観測者の専門的な知識および技術が必要であり, 未だに一般的な観測手法になったとは言えない。例えば, 黒潮流域の各都県水産業関係試験研究機関による地先海域での漁業調査船による定線調査では, 現在に至るまで LADCP 観測は行われていない。

これらの定線調査で LADCP 観測が一般的に行われるようになるには, より簡便にデータを取得することが可能な観測システムの構築が必要である。その対象海域の多くは水深が 1000 m 以下で, 海流の計測に利用できる音波の散乱体として, プラクトンなどの浮遊物質の他に, 水温躍層の水温の乱れが多く存在する ADCP 測流にとって良好な測定環境である。また, 最新の ADCP がもつ優れたボトムトラッキング機能 (音波により ADCP の海底からの距離および海底に対する ADCP の移動速度を計測する機能) を使用できる。これらの測定環境条件に特化した場合, より簡素

な方法によっても十分な精度をもった流速プロファイルが得られると考えられる。

本研究では、水深が1000 m 以下の黒潮前線周辺域を対象とした観測システム構築を可能とする簡素な独自のデータ処理手法を検討した。その際、1) 機器構成が簡素であること、2) 同じ処理条件で対象海域における安定したデータ取得が可能であること、3) 取得されたデータが常に一定の精度をもつこと、の三つを必要条件と考えた。その結果、ADCP 降下中に等時間間隔で得られた個々の相対流速プロファイルを、各時刻の ADCP 水平移動速度を加算することにより絶対流速プロファイルに変換し、最後にこれらを単位深度毎に平均して、海面から海底までの一つの絶対流速プロファイルを得るという方法を試すことにした。各時刻の ADCP 水平移動速度は、その時刻の相対流速プロファイルと隣接する時刻の絶対流速プロファイルとの差の平均から順次推定した。この連鎖的処理の起点には ADCP が海底近くにある時刻に ADCP のボトムトラッキング機能により得られた絶対流速プロファイルを使用した (Fig. 1)。

この独自のデータ処理方法を用いた LADCP 観測を、水深が1000 m 以下の九州南方の黒潮前線周辺域に配置した測点 (Fig. 2) において、水産総合研究セ

ンター所属の調査船、蒼鷹丸 (892トン) により計5回実施した (Table 1)。これら5回の観測で得られたデータを用いて、その精度について船底 ADCP データとの比較により評価した結果、十分な信頼性が検証されたので、新しい LADCP データ処理方法として、その独自の方法についての詳細を報告する。

## 観測方法

今回の LADCP 観測においては機器構成を簡素なものとした (Fig. 3)。ADCP については RDI Workhorse ADCP (周波数 300 kHz, ビーム角 20°) を、CTD については蒼鷹丸に装備されている SBE 911 plus 24 Hz CTD を使用した。ADCP は、バッテリーケースと共に CTD フレームにトランスデューサー (音波の送受波器) を下向きにして取り付け使用した。ADCP の CTD フレームへの取付金具には、内蔵磁気コンパスへの磁場の影響を微小にするために sus316 ステンレス鋼を使用した。CTD を降ろす速度は 1 m/sec とし、降ろす最大深度は海底上 50~100 m までとした。

データ処理は、以下の【1】～【4】の手順で行った。

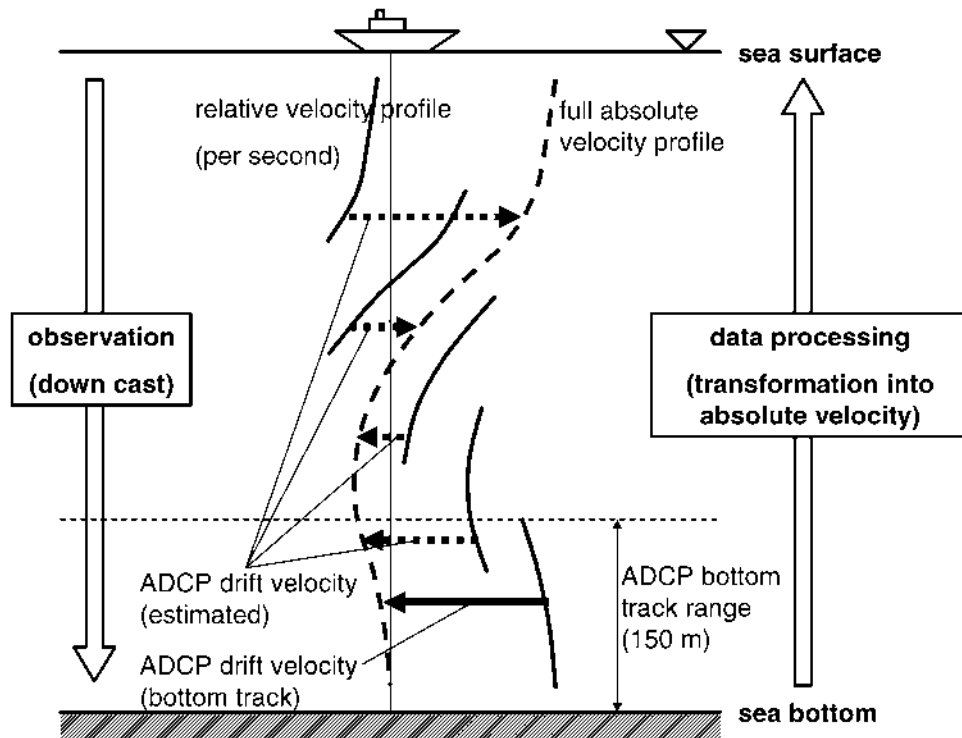


Fig. 1. Schematic diagram of data processing.

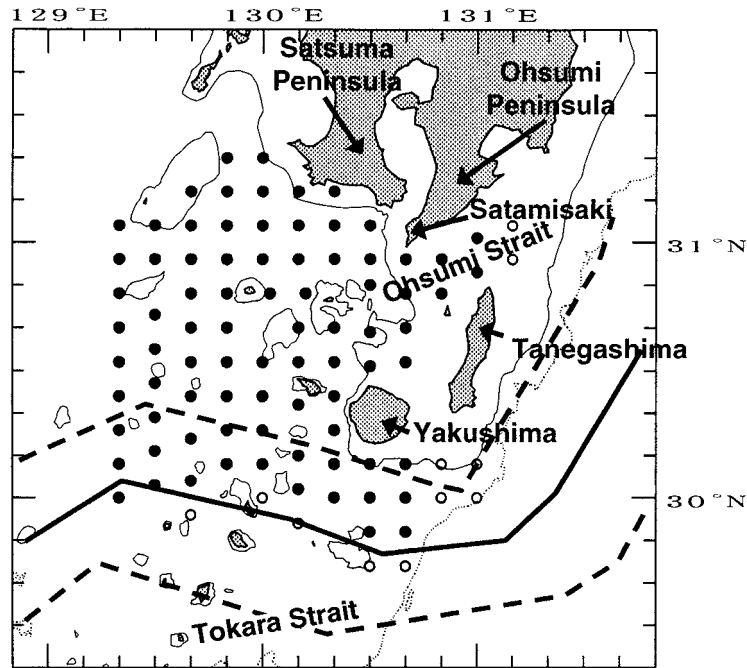


Fig. 2. Bottom topography south of Kyushu, and stations of LADCP observations. Black dots are 82 stations carried out in all observations. White dots are 11 stations carried out only in observations A-C. The depth contours of 200 m are shown with thin solid lines, while those of 1000 m are shown with thin dotted lines. Additionally, the mean (a thick solid line) and the standard deviation range (between two thick dashed lines) of the position of the Kuroshio axis (Yamashiro and Kawabe, 2002) are shown.

Table 1. Periods of LADCP observations by the RV Soyo-maru

Observation	Period of CTD/LADCP observation
A	June 15-20, 2000
B	June 17-22, 2001
C	March 9-13, 2002
D	June 21-25, 2002
E	March 8-12, 2003

**【1】 ADCP データの加工**

データ処理で使用する ADCP データの項目は、①データ取得時刻、② ADCP 姿勢データ (Pitch, Roll)、③ボトムトラッキングデータ (ADCP 水平移動速度、ADCP から海底までの距離)、④各層相対流速 (u, v, w) である。④は、10 m 間隔20層 (第1層は ADCP トランスデューサーから 2m) のデータからなる。①~④を0.76秒間隔で取得した (1 ピング毎)。実際の観測において、ADCP の測流範囲は120 m 程度、ボトムトラッキング可能範囲は150 m 程度

であった。これらの範囲からはずれる③と④はエラーとなる。

また、ADCP は内蔵 2 軸傾斜計の Pitch, Roll データにより座標系を補正している (RDI, 1997)。傾斜計の測定限界が27° であるため、それ以上 ADCP が傾いていたときの③と④をエラーとした。

さらに、ADCP は内蔵の磁気コンパスを方位の決定に使用しているため、③と④に対して、地磁気偏角 (真北と磁北のなす角度) の補正を施した。地磁気偏角については、国土地理院が地磁気測量で得られた全

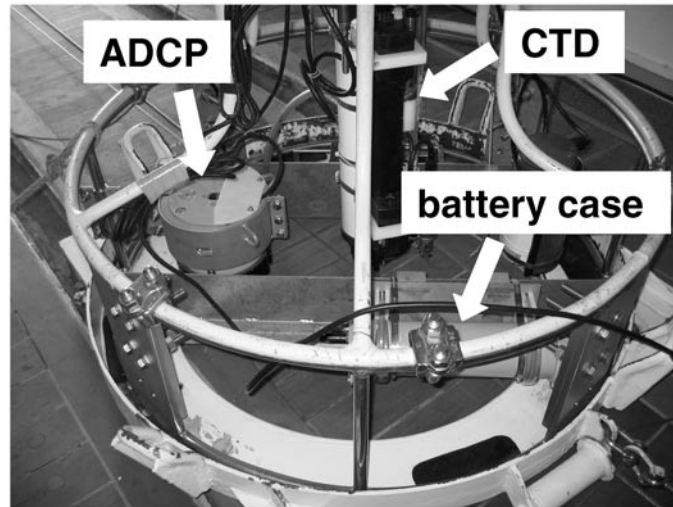


Fig. 3. Equipment for LADCP observation.

国各地の偏角値を2000年1月1日0時（世界時）の値に統一し、それらの値を用いて全国の偏角分布を緯度と経度の2次式で近似した式を公表している。この近似式を使用して各測点の緯度・経度から地磁気偏角を計算した。

上記の処理を施した0.76秒間隔の ADCP データを、内挿により1秒間隔のデータに変換した。

## [2] ADCP データと CTD データの統合

1秒間隔の ADCP データを、同時に1秒間隔で取得した CTD データ（使用するデータ項目は、データ取得時刻と圧力）と、データ取得時刻により統合した。その際、各時刻の ADCP の深度および各観測層の深度をそれぞれ、以下の圧力の1次式で近似した式(1)、(2)から算出した。

$$\text{ADCP 深度(m)} = \text{圧力(db)} \times 0.992 \quad (1)$$

$$\text{第 } n \text{ 層深度(m)} = 2 + n \times 10 + \text{圧力(db)} \times 0.992 \quad (2)$$

ここで、係数の0.992は、日本南岸黒潮域の1000 m 以浅での利用を前提として、この海域の1000 m 深における深度と圧力の経験的關係である [1000 m - 1008 db] から決めた。

調査船の磁場の内蔵磁気コンパスへの影響を考慮し、海面から10 m 以内に ADCP があるときの③と④をエラーとした。さらに、海底からの反射波の測定への影響を考慮し、海底から10 m 以内となる層についての③もエラーとした。

この時点での処理データは、1秒間隔で、その項目は、⑤ ADCP 深度、⑥ ボトムトラッキングデータ（ADCP 水平移動速度、ADCP から海底までの距離）、⑦ 各層深度および相対流速 ( $u, v, w$ ) である。⑦に

ついては④と同じく、10 m 間隔20層のデータからなる。

## [3] 絶対流速の算出

以下に示す i) ~ ii) の手順で、⑦の相対流速プロファイルを絶対流速プロファイルに変換した。

- i) 観測（CTD 下降時）の終盤の ADCP が海底から150 m 未満の距離にあったときの各時刻について、ボトムトラッキングにより得られた ADCP 水平移動速度 ( $u_a, v_a$ ) をその時刻の各層相対流速 ( $u, v$ ) に加算することにより各層絶対流速 ( $U, V$ ) を得る。
- ii) ADCP が海底から150 m 以上の距離にあったときの各時刻について、下層（時間的にはその時刻より後）で得られた既に絶対流速化された10個（10秒間）のプロファイルを深度1 m 毎に平均することにより求めた絶対流速プロファイルと、その時刻の相対流速プロファイルとの差の平均からその時刻の ADCP 水平移動速度 ( $u_a, v_a$ ) を推定した。それを、その時刻の各層相対流速 ( $u, v$ ) に加算することにより各層絶対流速 ( $U, V$ ) を得る。つまり、1秒ずつ時間をさかのぼりながら（海底から海面方向に）、各時刻の相対流速プロファイルを変換することになる。

ここで、各時刻の20層の全データの中から質の悪いデータを可能な限り除去することが重要である。各層の絶対流速データを精査した結果、第1層~5層においては常時安定して良質のデータが取得できるが、他の層においてはデータにスパイクが多く見ら

れた。そのため、第1層～5層のデータのみ使用することとし、それ以外の層のデータをエラーとした。また、CTD フレームの水中での鉛直的な移動（約1 m/sec）の際に生じる後流による測流への影響がない（ADCPのトランスデューサーは下向き）CTD 下降時のデータのみ使用するために、第1層の相対流速成分  $w$  が30 cm/sec 未満の時刻のデータもエラーとした。このとき、観測層の間隔を10 m、CTD 降下速度を1 m/sec とすると、海面近くと最下層を除き、深度1 m 毎に5データ程度が得られることになる。Fig. 4 (a) は、2002年3月11日に種子島南方の黒潮北縁部の測点（30° N, 131° E, 水深 1080 m）で得られたデータについて、ここまでの処理を施して得られた各時刻の絶対流速ファイル（1017個）をすべてプロットしたものである。

この時点での処理データは、1秒間隔で、その項目は、⑧各層深度および絶対流速（ $U$ ,  $V$ ）のみである。⑧については、10 m 間隔5層のデータからなる。

#### 【4】流速プロファイルの完成

海面から海底までの一つの絶対流速プロファイルを得るために、1秒間隔のすべての絶対流速プロファイル⑧を深度1 m 毎に平均する。さらに、⑧の観測層の間隔が10 m であることに起因するノイズを平滑化するために、鉛直方向に10 m（11データ）移動平均をとり、最終的な1 m 間隔の絶対流速プロファイルを得る（Fig. 4 (b)）。この絶対流速プロファイルは深度1 m 間隔のデータであるが、このデータを使用して解像できる現象の鉛直空間スケールは10 m 程度ということになる。

#### 船底 ADCP データとの比較による精度評価

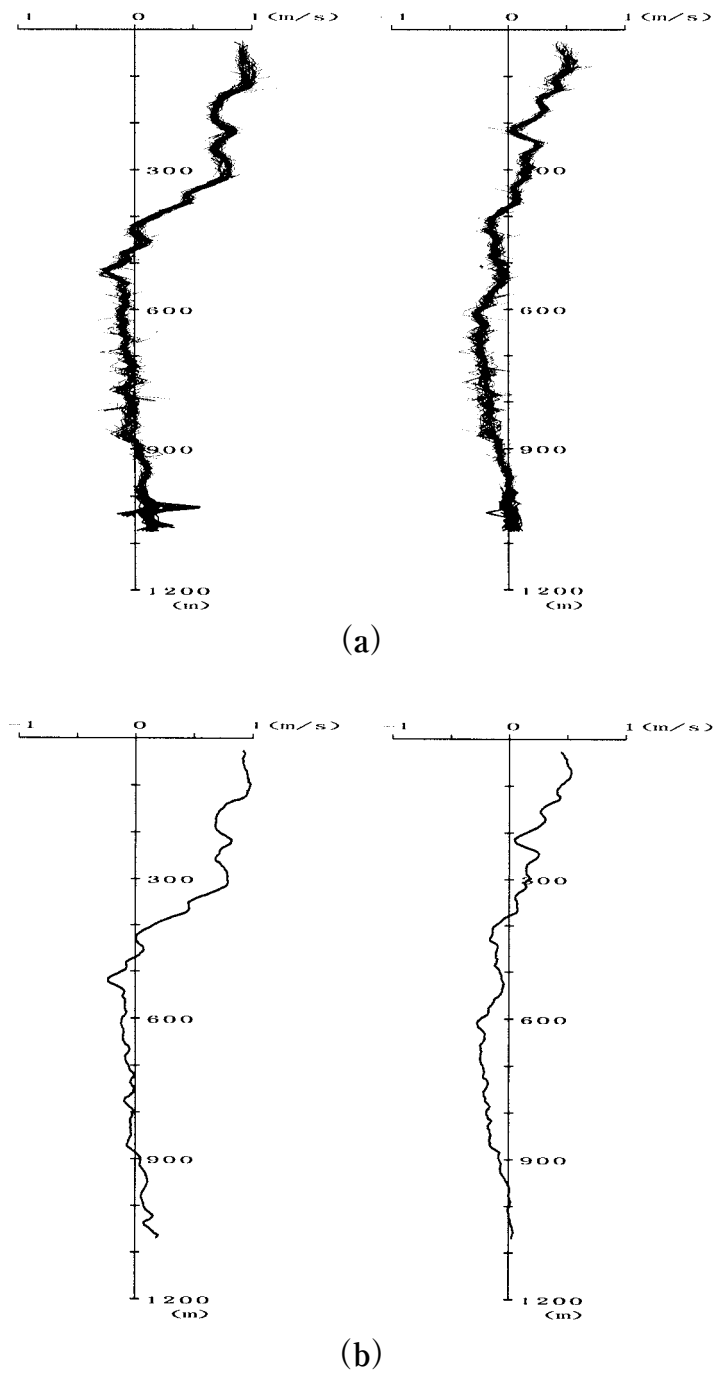
今回の LADCP 観測結果の妥当性を、船底 ADCP データとの比較により検証した。5回の調査で得られた LADCP データ（36 m 深流速分布）を Fig. 5 (a)～(e) に、蒼鷹丸の RDI 社製の75 kHz 船底 ADCP による測流結果と一緒に示し、二つのデータを相互に比較した。今回の船底 ADCP 観測は、16 m 間隔50層の設定（第1層は36 m）で行われたが、当海域における測流可能範囲は500～600 m 程度であった。船底 ADCP データは、1分間隔で取得した相対流速（20ピン平均）に10分移動平均を施し、これに5秒間隔で取得した DGPS（Differential Global Positioning System）の位置データから推定した船速（10分間隔の2データから算出した5秒間隔の船速に1分移動平均を施したもの）を加算して絶対流速とし、内挿により0.5海里間隔のデータを作成した。船底 ADCP ト

ランスデューサーの取り付け角の誤差補正は、Joyce（1989）の方法で行った。船底 ADCP の精度は、船速推定誤差により10 cm/sec 以下程度である（金子・伊藤, 1994）。Fig. 5 には、船速が5ノット以上の時のデータのみを表示した。今回の LADCP データは海底近くで得られるボトムトラッキングデータを起点として海面方向に順次流速プロファイルを積分した結果であり、海面近くほど誤差が大きくなる。一方、船底 ADCP データは、トランスデューサーから近い層ほど精度が高い。そこで、36 m 深（船底 ADCP の第1層）の流速分布で比較した。Fig. 5 における比較の結果は、5回の観測にいずれについても概ね一致していた。

統計的に両者を比較するために、5回の観測の全測点における船底 ADCP の観測層（36～500 m 深における16 m 間隔30層）について、LADCP データ（ $U_{L-ADCP}$ ,  $V_{L-ADCP}$ ）と船底 ADCP データ（ $U_{VM-ADCP}$ ,  $V_{VM-ADCP}$ ）のデータ対を作成した。船底 ADCP データについては、停船観測中のデータは使用できないので、各測点位置から2海里以内で5ノット以上の船速で航行中のデータの平均値を使用した。36 m 深のすべてのデータ対を使用して  $U$  成分、 $V$  成分それぞれについて相関係数を求めると、それぞれ0.92, 0.86であった。

Table 2 には、36 m 深から500 m 深までの計10層について、5回の観測の全測点の LADCP データと船底 ADCP データの差の平均値と rms 値を示した。rms 値は、180 m と260 m の  $U$  成分を除くと、各深度間に大きな違いが見られず、いずれも15 cm/sec 程度であった。180 m と260 m の  $U$  成分の大きな rms 値については、大陸棚斜面上の測点における船底 ADCP データの異常値に起因していた。

また、各深度における水平流速場の空間変動特性を把握するために、Table 2 には各深度について LADCP データの平均値と標準偏差も示した。標準偏差は、36～340 m 深の8層においては、前述した LADCP データと船底 ADCP データの差の rms 値より大きく、仮にこの rms 値がすべて LADCP データの誤差であったとしても、これらの深度における水平流速場の空間変動についての記述は十分可能であると言える。420 m 深および500 m 深の2層においては、標準偏差と rms 値が同程度であるが、この rms 値については LADCP データの誤差そのものと言うわけではなく、船底 ADCP データの誤差（前述したとおり10 cm/sec 以下程度）も反映されたものである。さらに、前述したとおり、今回の LADCP データは海底近くで得られるボトムトラッキングデータを起点として



**Fig. 4.** 1017 velocity profiles (each is composed of 5 depth layers with 10 m interval) sampled per second after transformation into absolute velocity (a), and full velocity profile obtained by averaging them every 1 m and smoothing them by 10 m (11 data) running mean (b). Eastward and northward component are shown on the left and the right respectively. Data obtained at the station in the Kuroshio northern edge (30° N, 131° E, depth 1080 m) on 11 March 2002 are used.

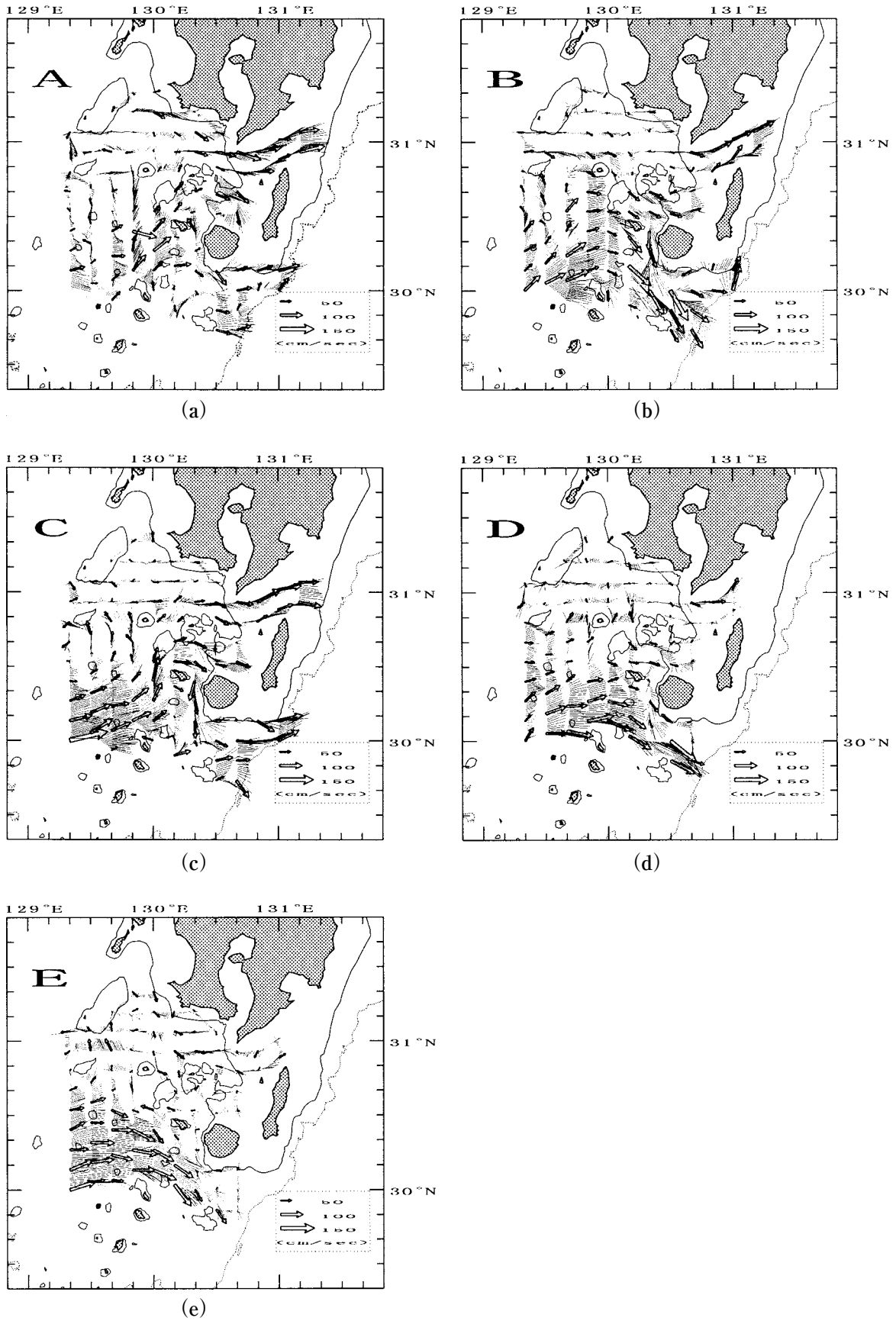


Fig. 5. Comparison between LADCP data (arrow) and vessel-mounted ADCP data (line) for 36 m velocity fields in five observations A-E by the RV Soyo-maru. Result in observations A-E is shown in (a)-(e) respectively. The depth contours are the same as Fig. 2.

海面方向に順次流速プロファイルを積分した結果であり海底近くほど精度がよい。よって、これらの深度における水平流速場の空間変動についての記述の可否については、この結果のみからは判断できない。

各観測間における観測精度のばらつきの有無についても調べた。Table 3 には、5 回の各観測について、全測点の36 m 深から100 m 深までの計5層のLADCP データと船底 ADCP データの差の平均値と rms 値を示した。rms 値は、各観測間に大きな違いが見られず、いずれも15 cm/sec 程度であり、各観測時の海況や密度成層の違いに関係なく、常に一定の精度が得られていたと言える。

## まとめ

今回の九州南方における LADCP 観測のデータ処理においては、ADCP 降下中に等時間間隔で得られた個々の相対流速プロファイルを、各時刻の ADCP 水平移動速度を加算することにより絶対流速プロファイルに変換し、最後にこれらを単位深度毎に平均して、海面から海底までの一つの絶対流速プロファイルを得るという独自の方法を採用した。各時刻の ADCP 水平移動速度は、その時刻の相対流速プロファイルと隣接する時刻の絶対流速プロファイルとの差の平均から

**Table 2.** Comparison classified by depth between LADCP data and vessel-mounted ADCP data in five observations (A, B, C, D, E). For each of ten depth layers (36–500 m), mean and standard deviation of LADCP data ( $U_{L-ADCP}, V_{L-ADCP}$ ), and mean difference and rms difference between the LADCP data and vessel-mounted ADCP data ( $U_{VM-ADCP}, V_{VM-ADCP}$ ) are shown.

Depth (m)	No. of data	$U_{L-ADCP}$		$V_{L-ADCP}$		$U_{L-ADCP} - U_{VM-ADCP}$		$V_{L-ADCP} - V_{VM-ADCP}$	
		(cm/sec)		(cm/sec)		(cm/sec)		(cm/sec)	
		mean	std	mean	std	mean	rms	mean	rms
36	438	31.4	37.3	2.0	33.1	0.4	14.9	1.8	17.2
52	443	29.2	36.5	2.5	30.8	0.0	14.4	1.7	15.7
68	446	27.2	35.4	2.4	29.9	-0.4	14.2	1.6	14.5
84	441	25.2	34.7	1.9	30.2	-1.2	16.8	2.1	16.1
100	425	22.5	34.5	1.9	29.8	0.4	15.9	2.3	14.8
180	386	17.4	30.9	2.3	27.6	-1.4	23.3	1.9	14.0
260	327	15.0	26.7	2.8	23.1	-2.1	25.3	1.2	16.3
340	253	12.5	23.3	1.7	19.0	0.7	13.8	2.3	14.5
420	226	8.0	16.2	1.3	15.3	0.4	12.4	1.7	15.9
500	181	3.3	14.0	0.7	13.5	-0.2	13.3	2.5	17.4

**Table 3.** Comparison classified by observation between LADCP data and vessel-mounted ADCP data in five depth layers (36–100 m). For each of five observations (A, B, C, D, E), mean and standard deviation of LADCP data ( $U_{L-ADCP}, V_{L-ADCP}$ ), and mean difference and rms difference between the LADCP data and vessel-mounted ADCP data ( $U_{VM-ADCP}, V_{VM-ADCP}$ ) are shown.

Observation	No. of data	$U_{L-ADCP}$		$V_{L-ADCP}$		$U_{L-ADCP} - U_{VM-ADCP}$		$V_{L-ADCP} - V_{VM-ADCP}$	
		(cm/sec)		(cm/sec)		(cm/sec)		(cm/sec)	
		mean	std	mean	std	mean	rms	mean	rms
A	455	23.5	30.8	7.0	25.0	-1.0	14.3	3.6	18.5
B	458	29.1	32.1	-1.9	41.6	-1.3	18.0	0.3	16.8
C	459	30.3	38.1	9.1	31.4	-3.2	14.9	2.3	12.8
D	405	28.3	40.9	1.2	24.2	4.0	13.5	3.2	14.2
E	416	24.3	36.4	-5.6	24.2	1.4	15.0	0.0	15.4



順次推定した。この連鎖的処理の起点には ADCP が海底近くにある時刻に ADCP のボトムトラッキング機能により得られた絶対流速プロファイルを使用した。

この方法で得られたデータの精度評価のため、5回の調査航海で得られたデータについて、船底 ADCP データとの差の rms 値を算出した結果、500 m までの各深度間および各調査航海間に大きな違いは見られず、いずれも 15 cm/sec 程度であった。九州南方の水平流速場の空間変動特性を把握するために各深度について算出した流速の標準偏差は、36~340 m 深の 8 層においては、この rms 値より大きく、これらの深度における水平流速場の空間変動についての記述は十分可能であると言えた。

今回の LADCP 観測データの精度評価は、船底 ADCP データとの比較により行われ、その絶対誤差を評価したものではない。しかし、黒潮前線域の様々な海況において取得された多くのデータを使用しての評価結果から、常に一定の精度で流速鉛直プロファイルが得られていたことが示された。今回用いた LADCP データ処理方法は、今後、黒潮流域の各都県水産業関係試験研究機関による地先海域での漁業調査船を用いた定線調査で使用できるような簡便な LADCP 観測システム開発の際に有効に役立つと考える。

#### 謝 辞

本技術報告を作成する際に、助言を頂いた九州大学応用力学研究所の今脇資郎教授、市川 香准教授、馬谷紳一郎博士、中央水産研究所の入江隆彦博士、宮地

邦明博士に心からお礼申し上げます。5回の九州南方の黒潮前線周辺域における観測で多大なご協力を頂いた歴代の蒼鷹丸船長はじめ乗組員の皆様にも心から感謝申し上げます。本研究は農林水産技術会議フロンティア研究「海洋生物資源の変動要因の解明と高精度変動予測技術の開発」の一部として行われた。

#### 文 献

- Firing E., 1998 : Lowered ADCP development and use in WOCE. *International WOCE Newsletter*, **30**, 10-14.
- Fischer J. and Visbeck M., 1993 : Deep velocity profiling with self-contained ADCPs. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 764-773.
- 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.
- RDI, 1997 : ADCP coordinate transformation - formulas and calculations, RD Instruments, 26pp.
- Visbeck M., 2002 : Deep velocity profiling using lowered acoustic Doppler current profilers: bottom track and inverse solutions. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 794-807.
- Yamashiro T. and Kawabe M., 2002 : Variations of the Kuroshio axis south of Kyushu in relation to the large meander of the Kuroshio. *J. Oceanogr.*, **58**, 487-503.