

DGPSを用いた簡素なLADCPデータ処理方法

齊藤, 勉
水産総合研究センター中央水産研究所

<https://doi.org/10.15017/14186>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 135, pp.69-75, 2008-09. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

DGPS を用いた簡素な LADCP データ処理方法

斉藤 勉^{*1}

(2008年7月31日受理)

Simple LADCP data processing method with DGPS

Tsutomu SAITO

E-mail of corresponding author: tsaito@fra.affrc.go.jp

Abstract

In LADCP (Lowered Acoustic Doppler Current Profiler) observations a 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 using DGPS data when ADCP is located near a sea surface are used. For accuracy evaluation, rms differences between the LADCP data and vessel-mounted ADCP data obtained in two 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 words : LADCP, DGPS, data processing, accuracy evaluation

1. はじめに

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)¹⁾. 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)²⁾ および Visbeck (2002)³⁾ 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, 黒潮流域の各都府県水産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. その観測対象の多くは深度 1000 m 以内で, 海流の計測に利用できる音波の散乱体として, プラン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. こ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. そこで, 斉藤 (2008)⁴⁾ 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

*1 水産総合研究センター中央水産研究所

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3つを必要条件と考えた。斉藤 (2008)⁴⁾は, 深度 1000 m までの観測において最新の 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)を使用できる水深が 1000 m 以下の黒潮流域における観測での使用に限定した簡素な独自のデータ処理手法を検討した。そして, 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おいて, その精度について船底 ADCP データとの比較により評価し, 十分な信頼性が得られることを示した。

前述した黒潮流域の各都県水産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の対象海域は, 水深が 1000 m 以上の海域も含む。これらの海域においては, 深度 1000 m までの観測では ADCP のボトムトラック機能を使用することができない。よって, これらの定線調査全体において簡便にデータを取得することが可能な観測システムを構築するためには, 斉藤 (2008)⁴⁾の方法とは別に, それと同程度の精度のデータを得ることが可能な, しかも ADCP のボトムトラッキング機能を使用しない簡素な独自のデータ処理手法を新たに検討しなければならない。そこで本研究では, DGPS (Differential Global Positioning System)を用いた方法を検討した。

海上保安庁のホームページの説明によると, DGPS は, 米国が運用する全世界的な測位システム(GPS)の民間利用に解放された標準測位サービスからの信号をあらかじめ正確な位置が分かっている場所(基準局)で受信し, GPS で得られた位置と真の位置からその誤差を計算し, それを補正值として送信局から放送し, GPS を利用した測位精度を向上させるシステムである。日本においては現在, 海上保安庁が全国 27 カ所に DGPS 局を配置し運用を行っており, 中波帯(283.5 kHz~325.0 kHz)の電波を使用し, 米国が運用する GPS の精度が 1 m 以下となるような補正值を直接ユーザー受信機に提供している。その有効範囲は, DGPS 局から 200 km 以内の範囲とされている。この範囲に前述した黒潮流域の各都県水産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の対象海域はすべて含まれる。

本研究では, ADCP のボトムトラッキングの代わりに DGPS を使用して, 斉藤 (2008)⁴⁾と同様な方法(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ィールを, 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ィールに変換し, 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 1 つの

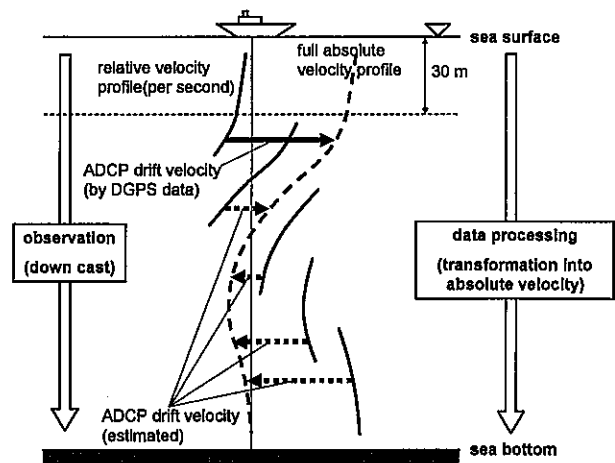


Fig. 1 Schematic diagram of data processing.

絶対流速プロフィールを得るという方法)を試すことにした。ここで, 各時刻の ADCP 水平移動速度は, その時刻の相対流速プロフィールと隣接する時刻の絶対流速プロフィールとの差の平均から順次推定する。これは斉藤 (2008)⁴⁾と同様である。ただし, 異なるのは, この連鎖的処理の起点に ADCP が海面近くにある時刻に DGPS 測位データを使用して得られた絶対流速プロフィール(海面近くでは ADCP 水平移動速度が船速と等しいと仮定して算出する)を使用する点であり, データ処理を進める方向が, 斉藤 (2008)⁴⁾の方法では海底から海面方向であったのに対し, 本研究の方法では逆に海面から海底方向となる(Fig. 1)。

この独自のデータ処理方法を用いた LADCP 観測を, 九州南東~四国沖の黒潮流域に配置した測点(Fig.

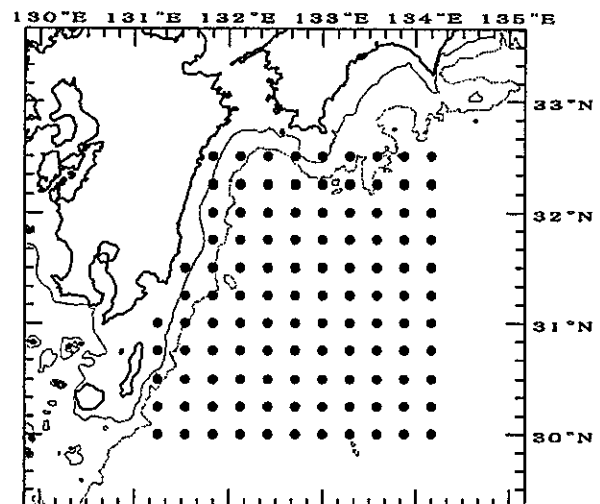


Fig. 2 Bottom topography southeast of Kyushu, and stations of LADCP observations. Black dots are 111 stations carried out in observations A, B. The depth contours of 200 m are shown with thin solid lines, while those of 1000 m are shown with thin dotted lines.

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

Observation	Period of CTD/LADCP observation
A	June 21-July 1, 2006
B	November 11-22, 2006

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2回実施した(Table 1)。その調査海域はDGPS局から200 km以上となる海域も含むが、2回の調査いずれにおいても、全測点においてDGPS局(トカラ中之島、都井岬、瀬戸、室戸岬のいずれか)から補正值を受信することができていた。これら2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、斉藤(2008)⁴⁾の方法と同様に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。

2. 観測方法

今回のLADCP観測での機器構成は、斉藤(2008)⁴⁾と同様である(Fig. 3)。ADCPについてはRDI Workhorse ADCP(周波数300kHz, 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 24Hz 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

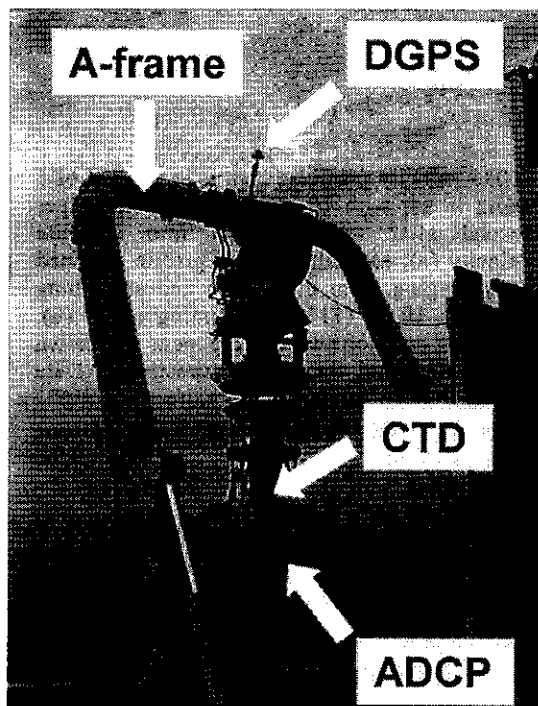


Fig. 3 Equipment for LADCP observation.

器)を下向きにして取り付けで使用した。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1000 mとした。また、海面近くでのADCP水平移動速度とDGPSデータから求める船速ができるだけ等しくなる様に、DGPSの設置場所を観測中にCTDケーブルが海中に繰り出されるAフレームの頂点に設置した(Fig. 3)。

データ処理は、以下の【1】～【5】の手順で行った。

【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、②ADCP姿勢データ(Pitch, Roll)、③各層相対流速(u, v, w)である。③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。①～③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程度であった。これらの範囲からはずれる③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)⁵⁾。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】DGPSデータの加工

データ処理で使用するDGPSデータは1秒間隔の緯度・経度データである。DGPSデータの取得は、船速を推定することを目的としており、緯度・経度データからそれを算出した。具体的には、ある時刻の30秒前と30秒後の位置から(1分間隔の2データから)その時刻の船速を推定した。

この時点でのDGPSデータは、1秒間隔で、その項目は、④データ取得時刻、⑤DGPS船速データである。

【3】ADCP, DGPS および CTD データの統合

1秒間隔のADCPデータおよびDGPS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、以下の圧力の一次式で近

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関係である[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をエラーとした.

この時点での処理データは、1 秒間隔で、その項目は、⑥ADCP 深度、⑦DGPS 船速データ、⑧各層深度および相対流速 (u, v, w) である。⑧については③と同じく、10 m 間隔 20 層のデータからなる.

【4】絶対流速の算出

ここで、以下に示す i) ~ ii) の手順で、⑧の相対流速プロファイルを経流速プロファイルに変換した.

i) 観測 (CTD 下降時) の序盤の ADCP が海面から 30 m 未満の距離にあったときの各時刻について、DGPS 船速と ADCP 水平移動速度 (u_a, v_a) が等しいと仮定して、DGPS 船速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 が海面から 30 m 以上の距離にあったときの各時刻について、上層 (時間的にはその時刻より前) で得られた既に絶対流速化された 10 個 (10 秒間) のプロファイルを経流速 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 秒ずつ順次 (海面から海底方向に)、各時刻の相対流速プロファイルを経流速プロファイルに変換することになる.

次のプロセスにおいて、これらのデータに平均操作を施すことになることから、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

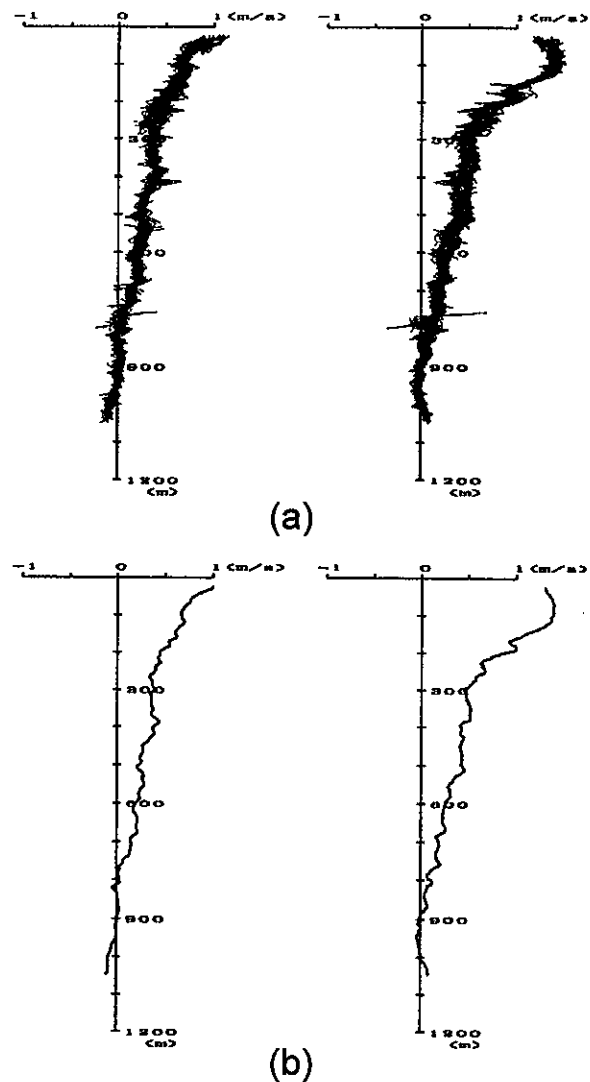


Fig. 4 1035 velocity profiles (each is composed of 5 depth layers with 10 m interval) sampled per second after transformation into absolute velocity (a), and full velocity profile obtained by averaging them every 1 m and smoothing them by 10 m (11 data) running mean (b). Eastward and northward component are shown on the left and the right respectively. Data obtained at the station in the Kuroshio ($30^{\circ} 45'N, 132^{\circ} 42.5'E$, depth 3833 m) on 25 June 2006 are used.

度が得られることになる. Fig. 4(a)は、2006年6月25日に九州南東沖の黒潮上の測点 ($30^{\circ} 45' N, 132^{\circ} 42.5' E$, 水深 3833 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 (1035 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、⑨各層深度および絶対流速 (U, V) のみである。⑨については、10 m 間隔 5 層のデータからなる.

【5】流速プロファイルの完成

ここで、海面から最下層までの1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⑨を深度1m毎に平均する。さらに、⑨の観測層の間隔が10m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10m(11データ)移動平均をとり、最終的な1m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1m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10m程度ということになる。

3. 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、斉藤(2008)⁴⁾と同様に、船底 ADCP データとの比較により検証した。2回の調査で得られたLADCPデータ(36m深流速分布)をFig. 5(a), (b)に、蒼鷹丸のRDI社製の75kHz船底 ADCP による測流結果と一緒に示し、2つのデータを相互に比較した。船底 ADCP 観測は16m間隔50層の設定(第1層は36m)で行われ、当海域における測流可能範囲は500~600m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ピング平均)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)⁶⁾の方法で行った。船底

ADCPの精度は、船速推定誤差により10cm/sec以下程度である(金子・伊藤, 1994)⁷⁾。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。Fig. 5における比較の結果は、2回の観測にいずれについても概ね両者は一致していた。

統計的に両者を比較するために、2回の観測の全測点における船底 ADCP の観測層(36~500m深における16m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。36m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0.82, 0.94であった。

Table 2には、36m深から500m深までの計10層について、2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、36m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15cm/sec程度であった。36mのU成分の大きなrms値については、観測Bの一部区間で見られた船底 ADCP データの第1層データの異常値に起因していた。他のrms値についても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10cm/sec以下程度)も反映されたものであることに留意されたい。

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、36~500m深の全層においては、前述したLADCP

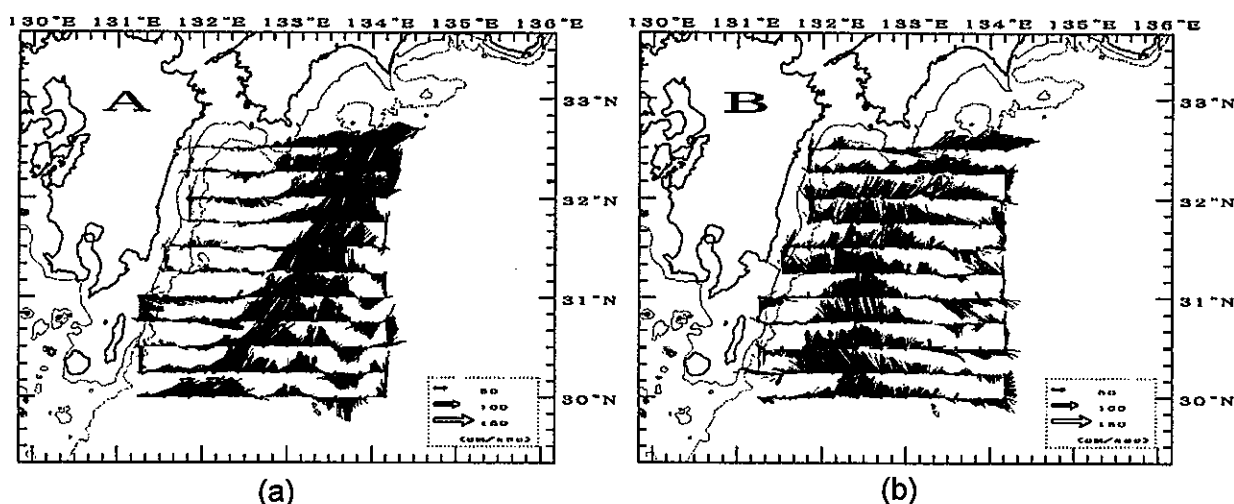


Fig. 5 Comparison between LADCP data (arrow) and vessel-mounted ADCP data (line) for 36 m velocity fields in two observations A, B by the RV Soyomaru. Result in observations A, B is shown in (a), (b) respectively. The depth contours are the same as Fig. 2.

Table 2 Comparison classified by depth between LADCP data and vessel-mounted ADCP data in two observations (A, B). For each of ten depth layers (36 m – 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	234	21.1	35.8	32.9	43.3	-2.1	25.0	-1.0	14.6
52	237	19.8	34.4	33.1	41.5	-3.8	17.3	-0.3	12.2
68	237	19.9	33.3	32.8	40.1	-4.0	14.5	0.2	11.2
84	236	18.5	33.4	32.2	40.2	-5.0	14.6	-1.2	18.0
100	230	17.5	33.0	32.2	39.7	-5.3	14.5	0.4	12.3
180	226	14.7	30.2	30.7	37.0	-5.0	14.5	-0.1	12.5
260	226	10.8	27.9	27.9	35.4	-5.2	16.0	0.1	13.3
340	222	8.6	26.1	25.2	31.0	-5.2	17.3	0.2	13.5
420	220	5.9	23.6	20.1	27.4	-5.6	17.3	-0.4	13.6
500	215	3.3	20.8	16.9	23.7	-6.3	17.2	0.4	14.0

Table 3 Comparison classified by observation between LADCP data and vessel-mounted ADCP data in five depth layers(36-100 m). For each of two observations (A, B), 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	580	23.1	36.7	33.8	45.6	-6.0	15.6	-1.4	12.0
B	594	15.7	30.7	31.5	35.9	-2.2	19.4	0.7	15.4

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。

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、2 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。

5. おわりに

今回検討した LADCP データ処理方法で得られたデータの精度評価のため、2 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。これは、斉藤 (2008)⁴⁾ のデータ処理方法による結

果と同様であった。

この 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、斉藤 (2008)⁴⁾ のデータ処理方法と併用することにより、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

本技術報告の作成に使用したデータを得るために実施した 2 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蒼鷹丸の当時の河内 淳二船長はじめ乗組員の皆様に心から感謝申し上げます。本研究は独立行政法人水産総合研究センターの交付金一般研究「黒潮一沿岸水系の相互作用の把握と海況予測技術の高度化」による研究の一部として行われた。

参考文献

- 1) E. Firing, International WOCE Newsletter, Vol. 30, (1998) 10-14
- 2) J. Fischer and M. Visbeck, J. Atmos. Oceanic Technol., Vol. 10, (1993) 764-773
- 3) M. Visbeck, J. Atmos. Oceanic Technol., Vol. 19, (2002) 794-807
- 4) 齊藤 勉, 水産総合研究センター研究報告, Vol. 23, (2008) 1-9
- 5) RDI, ADCP coordinate transformation - formulas and calculations, RD Instruments, 26pp. (1997)
- 6) T. M. Joyce, J. Atmos. Oceanic Technol., Vol. 6, (1989) 169-172
- 7) 金子 新, 伊藤 集通, 海の研究, Vol. 3, (1994) 359-372