

# 超音波ドップラー流速計による流速測定と系統的誤差

山田東也<sup>1)</sup>

## Current Measurement Using Acoustic Doppler Current Profiler and Systematic Errors

Haruya YAMADA<sup>1)</sup>

### Abstract

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) is an instrument which measures the current profile by sensing the Doppler shift of undersea scatterers. This instrument is designed to make continuous current measurements at more than one depth; therefore, the oceanic velocity field map is made more easily. However, measurement values usually contain errors. A typical cause of error is the difference between the heading of the transducers mounted in the hull of the ship and the navigation system. Because this error is systematic, it is possible to estimate the coefficients in order to correct acquired ADCP data. This paper examines ADCP data observed by the ship R. V. Mizuho-maru in March 1992. The estimated difference between the heading value is  $-3.26^\circ$ , and the ratio of ship velocity from ADCP data to navigation data is 1.03.

**Key words** ADCP, scatterer, systematic error

### 緒 言

海中の流れは、栄養塩の分布・卵稚仔の輸送・水塊配置などを考える上で重要な情報でありながら、従来それを精度良く測定する方法がなかったため地衡流近似などによる力学計算に頼らざるをえなかった。しかし海峡や沿岸域などの海域では、地衡流バランスや無流面仮定が成立せず流れの場を十分に表すことができない。近年、連続的に複数層の流速を計測できる超音波ドップラー流速計(ADCP)が開発され新たな海流計測機器として大きな期待がもたれている。ADCPによる観測はGEKのように曳航物や観測船の変針を必要としないなどの利点があるが、波による船体の動揺やノイズ等の影響によって測定値に誤差が含まれることが判っている(石井ら1986;西田1991)。また、トランスデューサーとジャイロコンパスとの取り付け角度のずれも誤差の大きな原因となっている。取り付け角度のずれは系統的であるため、統計的手法

---

1992年12月8日受理, 日本海区水産研究所業績A第481号

1) 〒951 新潟市水道町1丁目5939-22 日本海区水産研究所

(Japan Sea National Fisheries Research Institute, Suido-cho, Niigata 951 Japan)

によってその値を見積もることができる。そこで1992年3月に漁業調査船みずほ丸によって得られた ADCP データを使い、取り付けのずれによる誤差を見積もることとする。

本稿をまとめるにあたりデータの収集にご協力いただいた日本海区水産研究所資源管理部永澤亨氏、みずほ丸船長廣橋昇保氏ほか乗組員一同に感謝する。

## 材料および方法

### 1 測定原理

海中には種々の音波散乱体が存在するが、このうち自己遊泳能力のない植物プランクトンや非生物のマリンスノー・微細水温構造などは海水とともに移動すると考えられる。ADCP はこれらの移動をドップラーシフト量を計測することによって求め海中の流れを測定する装置である。いま、音速を  $c$ 、音波を発信する物体(送信器)の速度を  $u$ 、発信周波数を  $fu$ 、それを受信する物体(受信器)の速度を  $v$  とすると受信周波数  $fv$  はドップラーシフト量によって

$$fv = fu \frac{c-v}{c-u} \quad (1)$$

となる。ADCP は送信器と受信機が一体となった超音波送受信器(トランスデューサー)を使用しており、音波散乱体が相対速度  $\mathbf{V}$  で近づいてくるとすると(1)式の関係は

$$fv = fu \frac{c+\mathbf{V}}{c-\mathbf{V}} \quad (2)$$

とあらわせる。ここで海中の流れは音速に対して十分に小さいと考えられることから(2)式は

$$fv \approx fu \left( 1 + 2 \frac{\mathbf{V}}{c} \right) \quad (3)$$

と近似される。

ADCP は鉛直方向から角度  $\theta$  だけ傾いて反対方向を向いた一対のトランスデューサーを用いて流れを測定する(Fig. 1)。一方のトランスデューサー  $T_1$  から発信された周波数  $f_0$  の超音波パルスが音波散乱体  $S_1$  で反射され戻ってくる際の周波数  $f_1$  は、音波散乱体が相対速度  $\mathbf{V}_{\theta 1}$  で近づいているとき(3)式から

$$f_1 = f_0 \left( 1 + 2 \frac{\mathbf{V}_{\theta 1}}{c} \right) \quad (4)$$

となる。ここで  $\mathbf{V}_{\theta 1}$  を水平方向の速さ  $U$  と鉛直方向の速さ  $W$  に分けて考えると(4)式の  $\mathbf{V}_{\theta 1}$  に  $W \cos \theta + U \sin \theta$  が代入され

$$f_1 = f_0 \left( 1 + \frac{2(W \cos \theta + U \sin \theta)}{c} \right) \quad (5)$$

が導かれる。同様に、トランスデューサー  $T_1$  と反対向きのトランスデューサー  $T_2$  について考えると、 $S_1$  と同じく水平方向に  $U$ 、鉛直方向に  $W$  で流れている音波散乱体  $S_2$  の相対速度  $\mathbf{V}_{\theta 2} = W \cos \theta - U \sin \theta$  が代入され

$$f_2 = f_0 \left( 1 + \frac{2(W \cos \theta - U \sin \theta)}{c} \right) \quad (6)$$

が導かれる。(5)式と(6)式から流速成分 ( $U$ ,  $V$ ) が得られる。

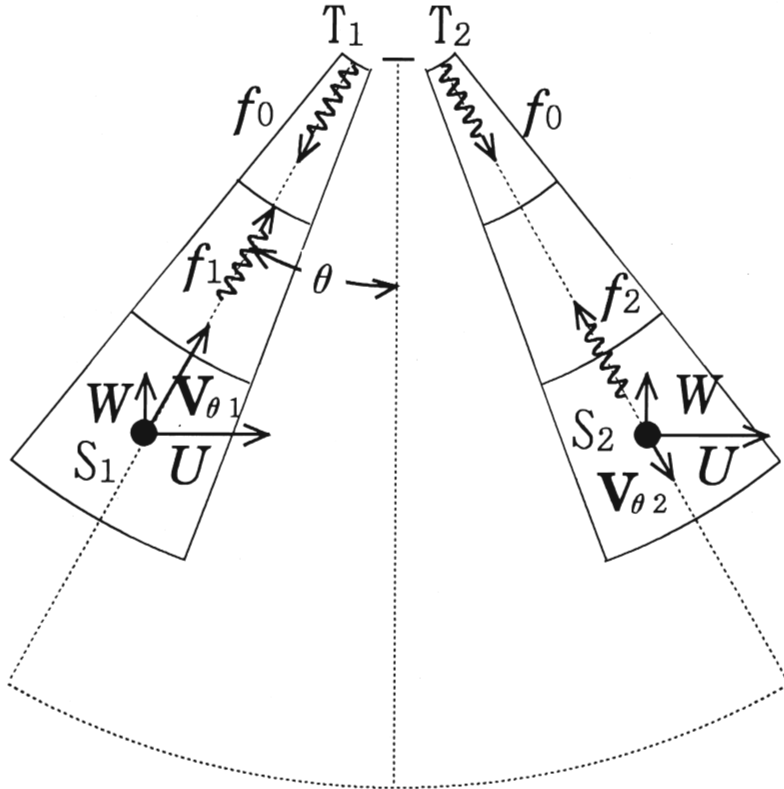


Fig. 1. Schematic model of measurement using ADCP.

$$U = \frac{(f_1 - f_2)c}{4f_0 \sin \theta} \tag{7}$$

$$W = \frac{(f_1 + f_2 - 2f_0)c}{4f_0 \cos \theta}$$

$U$  に直交する水平成分  $V$  についてもトランスデューサー  $T_1, T_2$  と直交する別の 1 組のトランスデューサーを用いて求めることができるが、通常は 3 個のトランスデューサーを用いれば流速成分 ( $U, V, W$ ) が得られる。この流速成分 ( $U, V, W$ ) は船首に固定された座標軸に対してのものであり、地理的座標軸への変換を行い船速を差し引くことによって絶対流速が得られる。

地理的座標軸への変換にはジャイロコンパスの情報を用いるが、トランスデューサーが水平面に対して傾斜していたり、ジャイロコンパスとの間にずれがあれば変換値に誤差が含まれる。ジャイロ軸 ( $X, Y$ ) に対する流速を ( $U, V$ )、トランスデューサー軸 ( $X', Y'$ ) に対する流速を ( $U', V'$ ) とし、トランスデューサーがジャイロコンパスに対して反時計回りに  $\alpha$  だけずれているとすると

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U' \\ V' \end{pmatrix} \quad (8)$$

となる (Fig. 2). また, 船速  $(U_{S/G}, V_{S/G})$  と絶対流速  $(U_{W/G}, V_{W/G})$ , 測定流速  $(U_{W/S}, V_{W/S})$  の関係は

$$\begin{cases} U_{W/G} = U_{S/G} + (1+\beta)U_{W/S} \\ V_{W/G} = V_{S/G} + (1+\beta)V_{W/S} \end{cases} \quad (9)$$

となる. ここで,  $\beta$  はトランスデューサーの水平面からの傾斜効果をあらわす係数である. (8)式と(9)式からトランスデューサー軸に対する流速をジャイロ軸に対する流速に変換する関係式として

$$\begin{pmatrix} U_{W/G} \\ V_{W/G} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{S/G} \\ V_{S/G} \end{pmatrix} + (1+\beta) \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U'_{W/S} \\ V'_{W/S} \end{pmatrix} \quad (10)$$

が得られる.

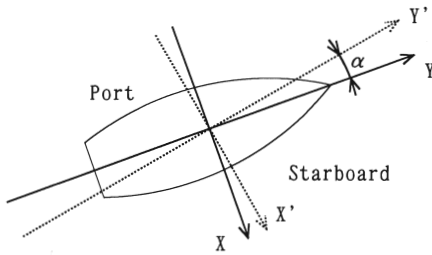


Fig. 2. Schematic model of difference between heading of transducers and navigation system.

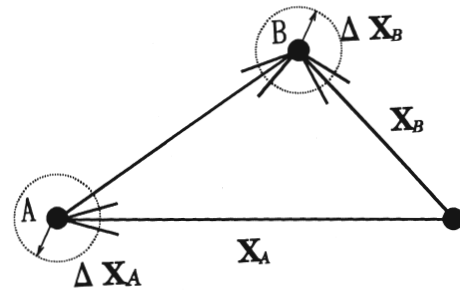


Fig. 3. Schematic model of error by ship position

絶対流速を求めるためには測定流速から船速を差し引かなければならない. 船速は二通りの方法によって求めることができる. 一つは ADCP によって得られた海底のドップラーシフト量を利用する方法で測定流速値と変わらない精度で船速が求まる. もう一つは航法装置の船位情報を利用して船位変化から船速を求める方法である. この場合の船速の精度は船位測定の精度によっている. 任意の A 点から B 点まで観測を行う場合の船位測定の誤差は次のように考えられる. A 点, B 点の水平位置ベクトルをそれぞれ  $\mathbf{X}_A, \mathbf{X}_B$ , A 点から B 点までの所要時間を  $T$  とすると絶対船速  $\mathbf{V}_g$  は,

$$\mathbf{V}_g = \frac{(\mathbf{X}_B - \mathbf{X}_A)}{T} \quad (11)$$

となる (Fig. 3). 測位誤差をそれぞれ  $\Delta \mathbf{X}_A, \Delta \mathbf{X}_B$ , 時間の測定誤差を  $\Delta T$ , 対地船速誤差を  $\Delta \mathbf{V}_g$  とすると(11)式は,

$$\mathbf{V}_g + \Delta \mathbf{V}_g = \frac{(\mathbf{X}_B + \Delta \mathbf{X}_B) - (\mathbf{X}_A + \Delta \mathbf{X}_A)}{T + \Delta T} \quad (12)$$

となり、ここで  $\Delta T$  は  $T$  に対して無視できることから対地船速誤差として

$$\Delta \mathbf{V}_g = \frac{\Delta \mathbf{X}_B - \Delta \mathbf{X}_A}{T} \quad (13)$$

が導かれる。  $\Delta \mathbf{X}_A$ ,  $\Delta \mathbf{X}_B$  をランダム誤差と考えると対地船速の最大誤差は、

$$|\Delta \mathbf{V}_g| = \left| \frac{\Delta \mathbf{X}_B - \Delta \mathbf{X}_A}{T} \right| \leq \frac{2 |\Delta \mathbf{X}_A|}{T}$$

となる。船位測定に  $\mathbf{V}_g$  ロラン C を用いた場合は、その相対誤差が約 100m とされている。そのため対地船速誤差  $|\Delta \mathbf{V}|$  を 10cm/s に押えるためには、約 30 分間の測定時間が必要になる。まだ 24 時間連続して情報を得ることができないが GPS を用いて船位を測定した場合は、その相対誤差が 30m 程度とされていることから測定時間は約 10 分で済むことになる。

## 2 解析データ

1992年3月2日から5日にかけて日本海区水産研究所漁業調査船みずほ丸(150.44トン)によって新潟市の沖合いで海洋観測と同時に ADCP による流れの測定を行った(Fig. 4)。使用した ADCP は RD-Instruments 製 RD-VM150 で、観測層の間隔を 8m、データ平均時間を 1 分に設定した。記録されたデータは 1 分ごとに水平スケール約 400m、約 80 回のドップラーシフト量の平均となっている。RD-VM150 は 450m 深まで海底のドップラーシフトを得ることができ、今回の観測では全観測域でドップラーシフトによる船速を得ることができた。この ADCP によって得られた船速と GPS によって得られた船速を比較することによってトランスデューサーの取り付けのずれによる誤差を見積もった。

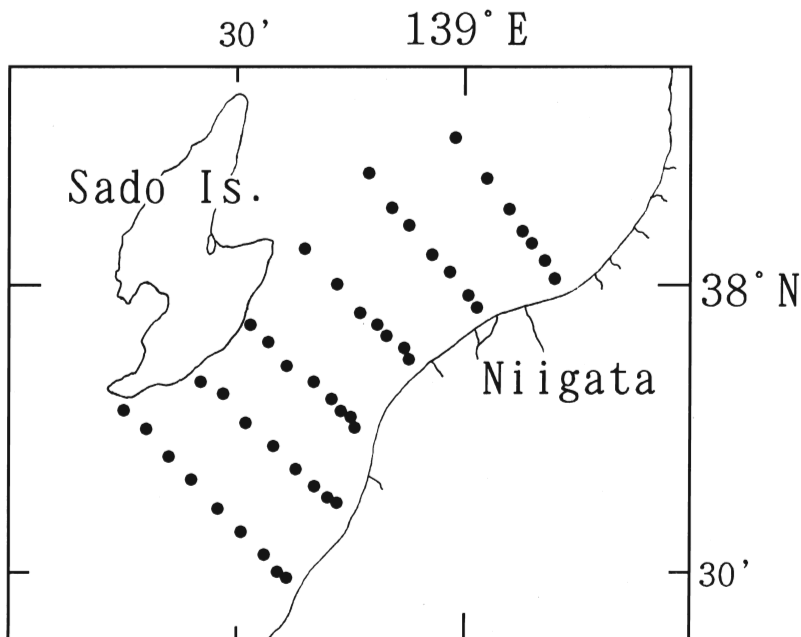


Fig. 4. Map of observed stations for R. V. Mizuho-maru, March 2 to 5.

### 結 果

Fig. 5 に 3 月 2 日に得られた進行方向と船速を示した。それぞれ太線が ADCP によるもの、細線が GPS によって得られたものである。図中に矢印で示した部分は GPS データの欠測により航法装置から船位情報を得られなかった期間を示している。

進行方向については、おおむね GPS によって得られた角度に対して ADCP によって得られた角度が小さく、GPS の進行方向を真の値とするならばトランスデューサーの取り付けの角度が時計回りの方向にずれていることを表している。船速については ADCP によって得られた値が GPS によって得られた値より大きめとなっている。これらの傾向は全観測日を通して変わらなかった。

船位測定の見誤差で検討したように、船位情報に GPS を用いて船速値を算出しても、ADCP データの値の精度に近づけるためには 10 分以上のデータを平均する必要がある。また、観測船の加速、減速及び転進時には、測器の性質上ジャイロコンパスは正確な方位が得られない。そこで一定方向に速度を変えずに航行しているときのデータを平均する必要がある。みずほ丸が観測点間を移動するときの巡航速度が 9 ノットから 10 ノットであることから、今回平均するデータとして、10 分以上 9 ノットを越えて航行しており、その間の進行方向が 10° 以上変化していないものを用いた。全観測データのうち条件を満足するデータは、約 7% の 166 データであった。

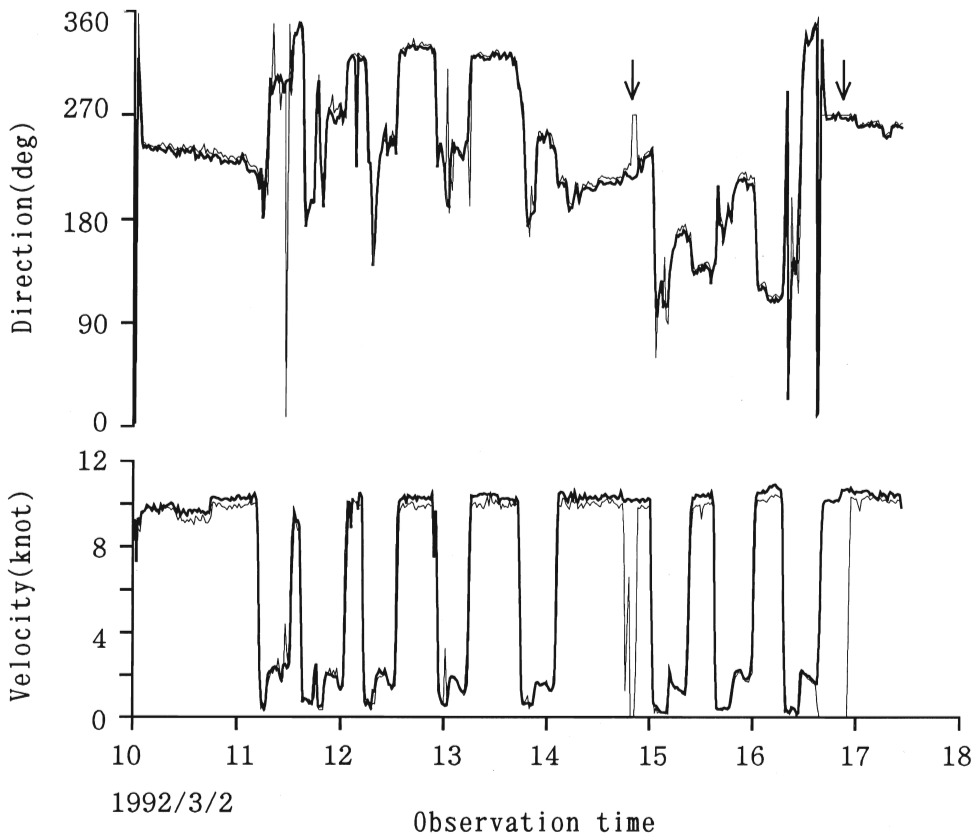


Fig. 5. Ship velocities and directions from ADCP (bold line) and GPS (thin line).

比較の結果、ADCP データの進行方向は GPS データの進行方向に対して  $3.26^\circ$  進行方向左側にずれていることが判った。つまり、ジャイロ軸は船首方向に対して時計回りに  $3.26^\circ$  傾いており、座標軸の変換に用いる(10)式には  $\alpha = -3.26^\circ$  が代入されることになる。また進行速度の絶対値は ADCP データの値が GPS の値の 1.03 倍とわずかに大きめに記録されていた。このことから(10)式中のトランスデューサーの水平面に対する傾斜効果の係数として  $1 + \beta = 0.97$  が代入されることとなる。

## 考 察

軸の角度のずれの補正を行わない場合の絶対流速値の誤差の評価は、船速の求め方によって変わってくる。船速を ADCP から求めている場合は、船速値を引いて求められた絶対流速値はジャイロ軸に対してのものとなり、流速の絶対値を変えずに軸のずれている角度だけ回転させればよい。一方、沖合などで船速を航法装置から求める場合は、船速を含んだ値として測定される相対流速値と航法装置から求められた流速値とで軸がずれているため、絶対流速値に船速値のずれの誤差が含まれることになる。

今回、みずほ丸で観測された ADCP データを用いて ADCP と GPS のデータの差の修正のための係数を導き、 $\alpha = -3.26^\circ$  を得た。みずほ丸で用いた ADCP は起動時にジャイロコンパスとのバイアス値を入力するようになっている。理想的にはこの作業によってトランスデューサー軸の水平面に対するずれの影響を打ち消すことができる。しかし実際にはバイアス値の入力時にも入力誤差が生じる。そのため今回求めた角度修正のための係数は、取り付け角度のずれとバイアス値の入力誤差の両方を含んだ値でありトランスデューサーの取り付け角度のずれをそのまま表しているものではない。またバイアス値の入力誤差は観測毎に変化する値である。そのため今後トランスデューサーの取り付け角度の誤差を求めるために、バイアス値の誤差を考慮した観測毎の誤差の評価を行うとともに、各観測間でバイアス値の誤差の影響がどの程度あるかを検討する必要がある。

## 要 約

ADCP を用いれば海中の音波散乱体のドップラーシフトを測定することによって流れの状態を測定することができる。この装置は多層にわたって連続的に流れを測定することができるため、海洋の流れの場の把握が容易であるが、測定値には誤差が含まれることが判っている。誤差の大きな原因は観測船に取り付けられたトランスデューサーと航法装置のずれによる。この誤差は系統的なものであり ADCP データからデータ修正のための係数を見積もることができる。その例として漁業調査船みずほ丸で得られた ADCP データから見積もられた観測船の進行方向は、GPS データによる観測船の進行方向に対して進行方向左側に  $3.26^\circ$  ずれていた。また進行速度は、ADCP データから得られた値は GPS データから得られた値の 1.03 倍であった。

## 文 献

- 石井春雄・西田英男・小杉英・上野義三・道田豊 (1986) ドップラーログを利用した流速測定. 水路部研究報告, (21), 135-150.  
西田英男 (1991) 対馬暖流の実測. 日本海ブロック試験研究集録, (20), 15-40.