

ドップラーログを利用した流速測定

石井春雄*・西田英男**・小杉 瑛*・上野義三*・道田 豊*

CURRENT MEASUREMENT BY USING DOPPLER LOG

Haruo Ishii* Hideo Nishida** Akira Kosugi*
Yoshizo Ueno* and Yutaka Michida*

Abstract

A new method of current measurement on shipboard by using acoustic Doppler log, can describe a detailed current structure both in horizontally and vertically. In comparison with traditional GEK (Geomagnetic Electro Kinetograph), this method has several advantages of capability to measure a current velocity, 1) without towing electrodes, 2) without change of ship's course, 3) at subsurface layers, and 4) in a shallow water region at depths of a few hundred meters, or in low-latitude area near the magnetic equator.

In 1984 and 1985, current observations were made with the Doppler log system (130kHz, 3 beams) installed on S/V *Takuyo* as a ship speed meter. Obtained current profiles in each observation are reasonable. From such a good result, it is recognized that new method is useful and would be widely used instead of GEK.

1. はじめに

海洋の流れの情報は、船舶の安全かつ経済的な運航、効率的な搜索救助・防災活動、海洋の開発利用などにとって欠かせない情報である。この流れを航走しながら測定する手段として、従来は主にGEK（電磁海流計）によってきた。しかし、GEK測流の場合、船尾から約300mの電線を曳航し、再三針路を変更する（通常、90°変針を2回と180°変針を1回）ため、荒天時とか、航路筋や沿岸域の船舶が輻湊する海域での測定は危険を伴う。また、表面の流速しか測定できないうえ、磁気赤道付近の低緯度海域や、水深が100m程度より浅い海域では測定誤差が大きいという短所がある。さらに、船の行動の時間的制約が加わり、一般に測定は15～60海里間隔でなされているため、鉛直方向はもちろんのこと、水平方向の詳細な流れの分布を知るうえで充分と言えなかった。このようなGEKの問題から、船上において、容易かつ迅速に流れを測定できる手法の開発が望まれていた。かかる状況において、近年、超音波を用いたドップラーソナーの測流への利用が試みられ、その有効性が指摘された（Joyce *et al.*, 1982）。この方法は、GEKのように曳航物や船の変針を必要とせず、連続的に、しかも複数層の流速を同時に測定できる長所がある。

* 海洋調査課 Ocean Surveys Division

** 企画課 Planning Division

1983年8月に就役した水路部の測量船新「拓洋」にも、船速計としてドップラーログが装備され、これを利用した測流が1984年2～3月の第1回WESTPAC（西太平洋海域共同調査）航海時に試験的に実施された。結果は良好であり、その有効性が認識され、実用化へ向かうこととなった。現在、ドップラーログは測量船「拓洋」をはじめ20隻近くの巡視船に装備されており、測得データは飛躍的に増加し、今までにない詳細な流況が明らかになりつつある。本報告では、ドップラーログを利用した測流の原理と測定誤差について述べるとともに、測流結果の例をGEK測流や水温観測により推測される流れの場との比較を含めて紹介し、その有効性を示す。

2. 測定原理

ここでは、ドップラーログを利用した流速測定の方法を述べる。船底に取付けられた送波器から一定周波数の超音波ビームを海中に向けて発射し、海底や、プランクトンなどの海中浮遊物によって反射された音波を、送波器とともに取付けられた受波器で受信する（第1図）。発信周波数と受信周波数との間には、送・受波器（船）及び反射物体が動いているため、周波数偏移（ドップラーシフト）が生ずる。このシフト量 f_d は船と反射物体間の相対的速度に比例し、次のように近似できる¹⁾。

$$f_d = 2f_0 (V \cos A + W \sin A) / C \quad (1)$$

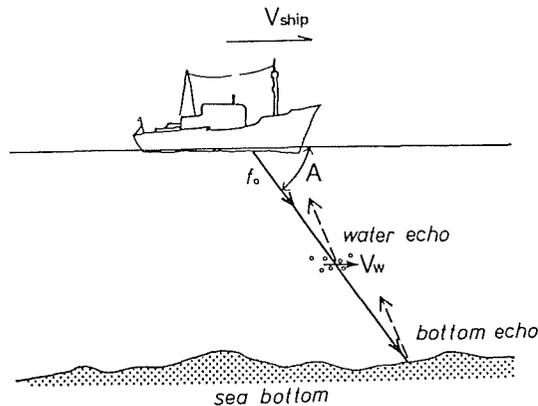


Figure 1 Scattering of acoustic beam transmitted from ship with the frequency f_0 .

ここで、発射ビームの周波数を f_0 、発射角度（海面となす角度）を A 、音速度を C とし、船と反射物体間の相対速度の水平成分を V 、鉛直成分を W とする。 V の方向は、発射ビームを水平面に投影したときの方向である。(1)式の f_d には鉛直成分 W も寄与するので、1本の超音波ビームだけでは V と W を分離できない。そこで、逆方向にも発射角 A で送波し、ドップラーシフト

1) 簡単な例として、周波数 f_0 の音波の発信体が速度 v で反射物体（静止）に近づきつつ反射波を観測する場合を考える。観測される周波数 f' は、 $f' = \frac{C+v}{C-v} f_0$ (C は音速)と表わされ、 $a=v/C$ とすればシフト量 $f_0 - f'$ は $\frac{2af_0}{1-a}$ となる。 $a \ll 1$ の場合、 $f_0 - f' \approx 2f_0a(1+a) \approx 2f_0a = 2f_0v/C$ と近似できる。本文の場合は、 v を船と反射物体を結ぶ方向の相対速度に置きかえればよい。

$$f'_d = 2f_0 \{V' \cos(180^\circ - A) + W' \sin(180^\circ - A)\} / C \quad (2)$$

を測定する。相対スピードは2本のビーム間では等しい、すなわち $V=W'$ 、 $W=W'$ と仮定することにより、鉛直成分を消去できる。(1)-(2)から

$$f_d - f'_d = 4f_0 V \cos A / C$$

f_d と f'_d は、船と反射物体が近づく時と遠ざかる時の同時に得られるシフト量であるから $f_d = -f'_d$ である。

$$\text{よって、} f_d = 2f_0 V \cos A / C \quad (3)$$

$$\text{または、} V = f_d C / 2f_0 \cos A \quad (3')$$

を得る。(3)、(3)'の V は1対のビーム方向の速度成分であるため、これに直角な方向にもう一对のビームを放射し、得られた2成分をベクトル合成して相対的な水平速度が求まる。以下、速度は水平方向のみ着目し、また、海中の反射物体の速度は物体の存在する層の海水の速度に等しいと仮定する。

2対の超音波ビームのドップラーシフト量を測定することにより、反射物体が海中にあれば船の海水に対する相対的速度（対水船速とよび、 $V_{\text{ship}/W}$ と表わす）が、反射物体が海底であれば船の地球に対する速度（対地船速とよび、 $V_{\text{ship}/G}$ と表わす）が、それぞれ得られる。2対のビームは、一般には、船首-船尾方向と船の左右方向にとられる（4ビーム方式）。「拓洋」のドップラーログ（古野電気株式会社製の「音波ログ」、CI-20-H型）は、 $f_0 = 130\text{kHz}$ 、 $A = 60^\circ$ であり、第2図に示すように船首方向の1本を含む3ビーム方式である²⁾。

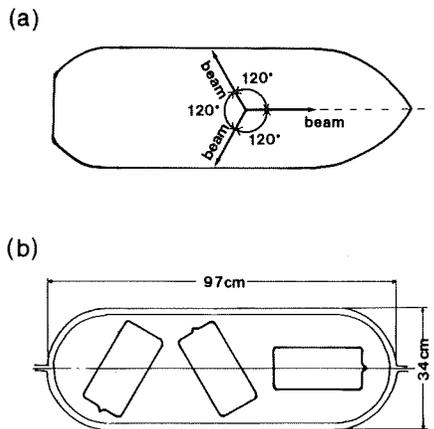


Figure 2 Plane view of three acoustic beams transmitted from ship (a), and alignment of three radiators/receivers units mounted on the bottom of ship (b). (from Furuno Electric Co., Ltd., 1983)

対地船速と対水船速の差は海水の速度によるので、対地船速から対水船速をベクトルの的に引き算すれば、海水の地球に対する速度（流速、 $V_{W/G}$ ）が得られる（第3図）。

$$V_{W/G} = V_{\text{ship}/G} - V_{\text{ship}/W} \quad (4)$$

2) 船の斜め後方に向けた2本のビームによるドップラーシフト量から、船尾方向の速度成分と船の左右方向の速度成分を算出する。

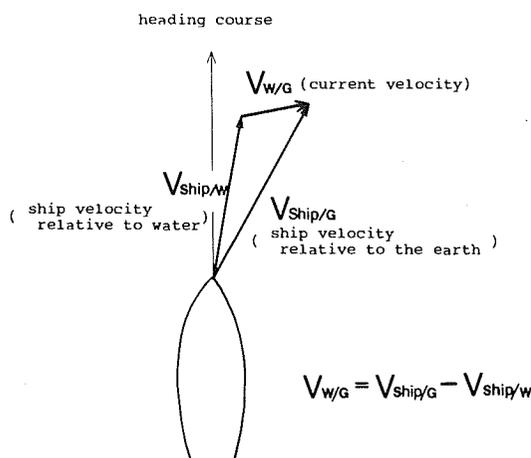


Figure 3 Relations between the vectors denoting ship's velocities and current velocity.

対水船速は、ログによるドップラーシフト量の測定とジャイロコンパスによる船の針路方向の測定とから求まるので、対地船速が得られれば流速を決定できる。対地船速の求め方は2通りある。ひとつは、海底からの反射波をキャッチしてそのシフト量を測定する方法であり、もうひとつは、船位情報から船の偏位量（ドリフト）を計算する方法である。以下、前者による場合を対地モード、後者の場合を対水モードとよぶことにする。「拓洋」のログシステムにおける対地モードでの流速測定は、通常、水深300m程度までの浅い海域に限られる。したがって、外洋でのログを利用した測流は対水モードで行うことになり、船位情報が不可欠である。

以上がドップラーログを利用した測流の原理であるが、さらに、この方法では複数層の流速測定が可能である。反射波は海中の全ての層から受波器に返って来るが、あらかじめ設定された発信から受信までの所要時間帯を有する反射波だけ選別し、所要時間と音速度の関係から反射物体の存在する層の深さを得る。すなわち、タイムゲイトをかけて任意の層の流速を求めるわけである。「拓洋」の場合、同時に3層の測流が可能である。ひとつは、送・受波器の下方から5～10mの層（対水基準層）であり、船の吃水を考慮して海面下10～15mの流速が求まる。これを表面流速と見なしている。残る2層は、海中の状態で変化するが200～300m以浅の範囲で設定できる。なお、海底からの反射波は、この3層からの反射波とは区別される³⁾。

3. 測定システム

本節では、「拓洋」のドップラーログを利用した流速測定システムの概要を述べる。第4図に機器構成とデータの流れを示す。対地モードでの測定の場合、対水基準層に対する船速と対地船速とともに、設定した2層の流速がログシステムの演算処理ユニットで計算され、ディスプレイに表示される。表面流速は(4)式による計算が別途必要である。対水モードの場合のディスプレイには、対水基準層に対する船速と、送受波器

3) 海底からの反射波は、音響信号の散乱強度のピークによって識別されていると考えられるが、詳細は不明である。深海域において対水モードで測定中、表層の気泡からの強い反射が海底からのそれと判断され対地モードに切り換わることが稀にある。

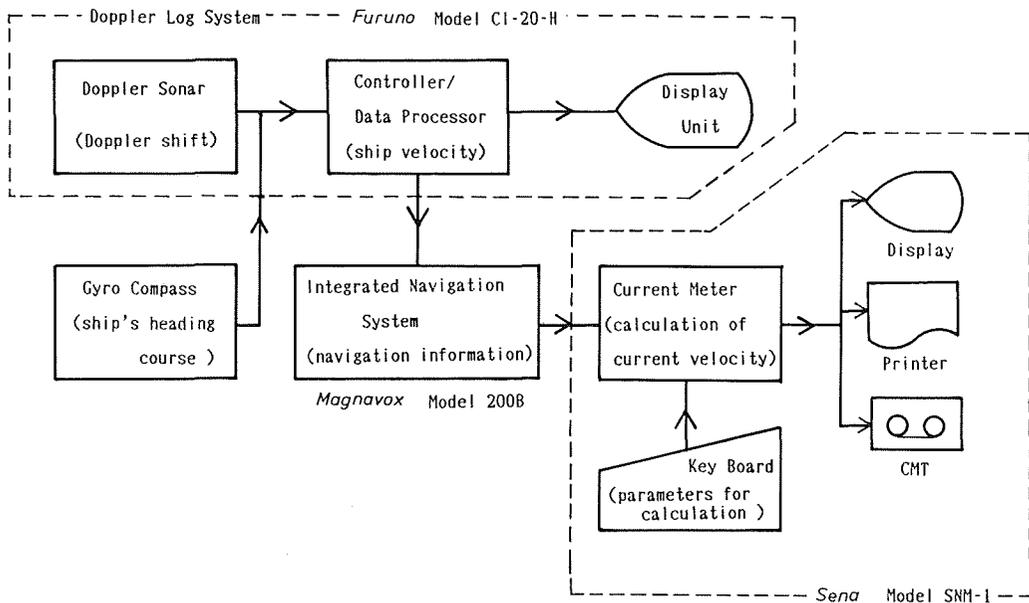


Figure 4 Schematic diagram of the current measurement system with Doppler log system, installed on S/V *Takuyo*.

の直下約2mの層（表層とよぶ）に対する船速，さらに設定した2層における表層に相対的な流速が表示される。したがって，ログシステムが測位システムと結合されていないときは，表示データを記録した後，別に得た船位情報とあわせて，(4)式によりベクトル演算を行って各層の流速を求めなければならない⁴⁾。「拓洋」では，流速計算に必要なデータは複合測位装置（マグナボックス社製，モデル200B）を経由し，測位装置による船位情報とともに偏位流速計（セナー株式会社製SNM-1）に送られ，ここで流速計算と結果の出力がなされる。

ところで，音波ビームは送波器から殆ど連続的（1秒に1～4回）に発射されるため，対水船速も連続的に得られる。一方，船位情報もLoran-Cなどにより連続的に得られる。したがって，流速値も秒単位で求めるわけであるが，種々の測定誤差に基づくバラツキが当然ながら生ずる。ここに，ある時間幅を設定しての平均操作が，妥当な流速値を得るうえで必要となる。第4図のシステムでは，2秒ごとの対水船速と船位のデータを用いて，1分から60分の間から適宜選択した平均操作時間（分単位）内の平均流速値を算出している。また，船位の緯度・経度は不良データを除去したうえで，平滑化処理が加えられている。次節で述べるとおり，対水モード時に使用する船位は，高い精度が要求され，測位データのバラツキを補正するうえで，平滑化処理が必要なためである。しかし，より信頼性の高い流速値を得るために，どのような平均操作あるいは平滑化処理が優れているかは，今後とも検討するべき問題である。

4) 現在では，Loran-Cなどの測位装置や流速計算部を組み込んだログシステムが，測流計器として複数社により開発，市販されている。

4. 流速測定上の誤差

第2節の原理によりドップラーログを利用して得られた流速値には、種々の原因による誤差が含まれる。以下に対地モードと対水モードとに分けて、誤差をもたらす原因を挙げてみる。

まず、対地モードの場合であるが、誤差を

- (1) 送・受波器等の機器自体に起因するもの、と
- (2) 測定対象である海水の構造、及び、船の運動形態に起因するもの、

とに分けて考える。対地モードでの流速を与える対地・対水船速は、いずれも反射波のドップラーシフト量 f_d の測定から、 $C \cdot f_d / 2f_0 \cos A$ により求まる。したがって、(1)としては、シフト量 f_d の決定方法と発信周波数 f_0 の安定性が主に考えられる。発信ビームには幅があるから、反射波も当然ある角度幅をもって返ってくるし、さらにタイムゲイト(第2節参照)をかける際の時間幅もあるため、結局 f_d はひとつの値ではなく、分散性をもって分布するであろう。この中から、シフト量を特定するのであるから、得られる船速にも誤差を生ずる結果となる。しかし、これらに基づく誤差は現時点では評価しておらず、公称誤差を信ずるよりない。「拓洋」の「音波ログ」のそれは、船速では $\pm(1\%+0.1)$ ノット、流速では方向が ± 3.5 度、スピードが $\pm(船速の2\%+0.2)$ ノットである(古野電気株式会社, 1983)。10ノット航走を例にとると、船速で ± 0.2 ノット、流速で0.4ノット程度の誤差となり、流速については大きい誤差と言える。ただし、これらの公称誤差が個々の測定の際の値、すなわち超音波の送受信1回あたりに生ずるランダムな誤差と解釈すれば、単位の時間の平均操作により、平均流速値の誤差は小さくすることができる。また、対地モード測定時に、同一海域に高精度の流速計を設置して測流し、両者の結果を比較することにより、誤差の見積りが可能となる⁵⁾。

(1)として、ほかに送・受波器の取付け不良がある。Joyce *et al.* が指摘しているとおおり、特にビームが船首方向からズレている場合の船速誤差は大きい。船首方向からのズレを θ とし、対水船速の船首方向成分を V_{sw} とすると、船首方向に $V_{sw}(1-\cos\theta)$ 、船の左右方向に $V_{sw}\sin\theta$ の差が生じ、計算される流速成分にもこれらに比例した誤差が含まれる。仮に取付け不良があったとしてもズレはたかだか 5° 程度だろうから、 $V_{sw}=10$ ノット、 $\theta=5^\circ$ とすると、前者は0.038ノット、後者は0.87ノットとなる。船首-船尾方向の流速には深刻な影響はないが、船の左右方向の流速成分にとってビームのズレは無視できない。

取付け不良による発射角度Aの変化に起因する誤差もあるが、本節で後述するように、Aからのズレが小さければ無視できる。しかし、いずれにせよ、取付け不良がある場合は測得流速値に系統的誤差が現われるはずであり、同一海域、同一時間帯での往復観測などによってこれを見出し、測定値に対して補正することが可能である。

(2)については、

- a. 流れの場の非一様性
- b. ローリング、ピッチング等の船の動揺
- c. 音速度の空間的変化
- d. 送・受波器の付近での気泡発生

5) 1985年11月に高知沖の浅海域で、約2日間、このような比較観測が測量船「拓洋」で行われた。現在、結果を解析中である。

が主に挙げられる。これらは、海洋においては避けられない現象である。以下a. から順に説明する。測定原理で述べたとおり、音波の反射層における海水の3次元的速度は、一对のビームに関して等しいと仮定している。しかし現実には、送・受波器間を音波が伝播する範囲でも流れの場は一様でなく、特に波浪に伴なう表層海水の運動は無視できないであろう。さらに、船の動揺による発射ビーム方向の変化は、設定した層とは異なる深さの層での反射をもたらし、反対方向の2本のビームのドップラーシフト量は仮定に反して異なるであろう。このような条件で測定されたシフト量の誤差は、先の(1)について述べた誤差に重畳されるわけだが、残念ながらその定量的評価は未だされていない。なお、黒潮の縁辺部のように水平流速の変化が急激な海域では刻々と測定流速値も変化するが、平均して求めた流速値は平均操作時間内に船が通過した海域での平均的流速場を与えるものと理解すればよい。

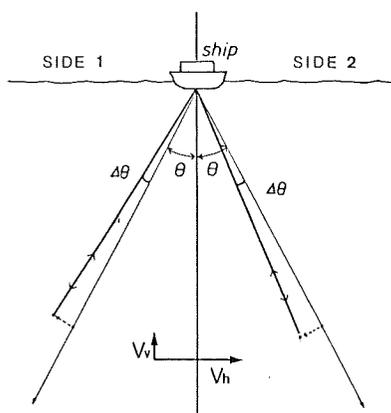


Figure 5 A pair of acoustic beams with angles $\theta \pm \Delta\theta$ to the vertical; $\Delta\theta$ is deviation from the aligned angle θ . V_h and V_v are horizontal and vertical components of ship's velocity relative to current velocity, respectively.

b. にあげた船の動揺は、たとえ流れの場が一様であっても、ビーム発射角の変化により、シフト量の決定に影響を与える。いま、第5図のようにビーム発射角が設定角度 θ から $\Delta\theta$ だけ変化した場合を考える（便宜上、発射角は鉛直線から測っている）。船と反射層の間の相対速度の水平成分を V_h 、鉛直成分を V_v とし、2本のビームについてのドップラーシフト量を f_{d1} 、 f_{d2} とすると、(1)式で $k=2f_0/C$ とおき

$$f_{d1} = k(V_h \sin(\theta + \Delta\theta) + V_v \cos(\theta + \Delta\theta))$$

$$f_{d2} = k(-V_h \sin(\theta - \Delta\theta) + V_v \cos(\theta - \Delta\theta))$$

これから

$$\begin{aligned} \Delta f &= f_{d1} - f_{d2} = k\{V_h[\sin(\theta + \Delta\theta) + \sin(\theta - \Delta\theta)] + V_v[\cos(\theta + \Delta\theta) - \cos(\theta - \Delta\theta)]\} \\ &= 2k \cdot \sin\theta (V_h \cos\Delta\theta - V_v \sin\Delta\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

を得る。(5)式で $\Delta\theta=0$ 、 $f_{d1}=-f_{d2}$ とおけば、(3)式と同様となる。すなわち、

$$\Delta f_0 = 2k \sin\theta \cdot V_h \quad (6)$$

(5), (6)式から

$$\frac{\Delta f - \Delta f_0}{\Delta f_0} = \frac{V_h(\cos\Delta\theta - 1) - V_v \sin\Delta\theta}{V_h} = -1 + \cos\Delta\theta - \sin\Delta\theta \cdot \frac{V_v}{V_h} \quad (7)$$

が求まる。船が傾いた場合の誤差は、(7)で見積られると考える。\$V_h\$を10ノット、\$V_v\$を1 m/sと仮定し、\$\Delta\theta\$を\$5^\circ\$、\$10^\circ\$、\$20^\circ\$としたときの(7)の値は、それぞれ\$-2.1\%\$、\$-5.0\%\$、\$-12.9\%\$となる。傾きが10度程度になると測定誤差も無視できない大きさになる。船のローリングやピッチングが規則的であり、角度変化が周期的な場合は、その周期より充分長い時間で平均することにより誤差を小さくできる。しかし、\$\cos\Delta\theta\$は正の符号をもつため、平均操作によっても(7)の値は負となり、対水船速は過小評価される。

c. の音速変化は、音波の伝播経路上の音速が正しく把握されないとき問題となる。しかし、ログシステムに一定音速値が入力されていても、海面下200~300mが測定対象ならば、音速変化による誤差は±2% (±30/1500)程度におさまるであろう。また、現場での音速度を見積った後、流速値に補正をほどこすことも原理的には可能である。最後にd.の気泡発生については、気泡による音波の反射が設定した層での反射を妨げ、その結果ドップラーシフト量の測定の誤差となって現われると考えるが、詳しくは不明である。それゆえ、誤差の定量的評価は難しい。

上記a, b, dに関しては、波浪が大きな影響を与えることが容易に想像される。風波やうねりは、船底下の海水の動きを非一様化し、船の動揺をひきおこし、砕波により大量の気泡を生成する。井本・穀田(1986)は、対水船速の方位、スピードのバラツキ(2秒毎に測定された150個のデータの標準偏差)を風浪階級別(階級1~6)に調べ、階級に比例してバラツキも大きくなることを指摘している。波浪による影響を見積った例として注目され、さらに蓄積したサンプルデータを用いた解析と誤差量の評価が期待される。

以上が対地モードの場合である。次に、対水モード測定時の誤差について述べる。対水モードでは、上述の対水船速測定誤差のほか、対地船速の計算に必要な船位の測定誤差が加わる。いま、海面上の任意の2点A, Bをとり、この間を対水モードで流速を時間間隔 \$t\$ で測るとすると、\$t\$秒ごとの流速 \$v_w\$は(4)式より

$$v_w = v_{\text{ship}/G} - v_{\text{ship}/W}$$

A→B間の所要時間を \$T\$ とし、得られた測定値の個数を \$n\$ とする (\$nt=T\$)。さらに、A→B間の平均流速を \$V_w\$ とおくと

$$\bar{V}_w = \Sigma v_w / n = \Sigma (v_{\text{ship}/G} - v_{\text{ship}/W}) / n = \Sigma v_{\text{ship}/G} / n - \Sigma v_{\text{ship}/W} / n \quad (8)$$

(8)式は平均流速が、船位情報から求めた対地船速のベクトル平均値とドップラーログで得た対水船速のベクトル平均値の差であることを示す。個々の対地、対水船速ベクトルの差を求めた後で平均しても同じである。さて、A, B点の水平位置ベクトルを \$x_A, x_B\$ とし、個々の測定点のそれを \$x_i\$ と表わすと、

$$\begin{aligned} \bar{V}_{\text{ship}/G} &= \Sigma v_{\text{ship}/G} / n \\ &= \Sigma \{ (x_i - x_{i-1}) / t \} / n = (x_B - x_A) / nt \\ &= (x_B - x_A) / T \end{aligned}$$

となり、対地船速は始点、終点の位置と平均操作時間 \$T\$ で決定される。通常、\$T\$ は分のオーダーであり、時間の測定誤差 \$\Delta T\$ は無視できるから、対地船速の誤差を \$\Delta V_{s/G}\$ とすると

$$\bar{V}_{\text{ship}/G} + \Delta V_{s/G} = \{ (x_B + \Delta x_B) - (x_A + \Delta x_A) \} / (T + \Delta T) = (x_B - x_A) / T + (\Delta x_B - \Delta x_A) / T$$

$$\Delta V_{s/G} = (\Delta x_B - \Delta x_A) / T \quad (9)$$

を得る。ここで、\$\Delta x_A\$ と \$\Delta x_B\$ はそれぞれA, B点の測位誤差である。(9)式の値は、そのまま流速の誤差となって現われるから、対水モードの際は高精度の位置が必要である。ただし、系統的な測位誤差はキャンセルさ

れるから絶対的位置を高精度で要求されるのではなく、ランダムな誤差が小さいことが要求される。

Δx_A と Δx_B をランダム誤差と考えると、

$$|\Delta V_{s/G}| = |(\Delta x_B - \Delta x_A)/T| \leq 2|\Delta x_A|/T \quad (10)$$

といった最大誤差がおさえられる。例えば、 T を5分とし、位置精度を100mとすると、(10)式の最右辺の値は1.3ノットに達する。流速としては耐え難い誤差であり、この値を0.3ノットにおさえるためには、位置測定に約25mの(相対的)精度を要する。もっとも、これは最大誤差についての例であって、平均的な誤差は(10)式中辺の量の期待値で表わされるべきである。この期待値に関する議論は後の報告にゆずりたい。

対水モードでの流速の誤差を小さくするうえで、高精度の位置、言い換えれば測位装置が必要なことを述べた。しかし、性能の良い受信機と、正しい位置計算ソフトを持ったとしても、明らかに異常と見なせる流速値を得るおそれのあることを指摘しておく。井本・穀田は、流速の異常値がLoran-C電波の欠射や不安定時のほか、船が大きく変針したときに現われるとしている。また、 $90^\circ \sim 180^\circ$ の変針時に対地・対水船速の方位が、変速時に船の対地・対水スピードが、それぞれ大きなバラツキを示すとしている。彼らが用いたデータ以外でも、変針や変速の際に、流速値が異常となる事例は少なくない。停船してCTD観測を行っている場合でさえ、船首方向を常時変えるためか、疑わしい流速値を得る。原理的には、船の変針や変速は流速測定に影響しないはずである。現在、この疑問点に対する解答はないが、筆者らはドップラーシフト量の得られた時間と船位が得られた時間との相違に着目している。この時間の相違は、信号受信からシフト量あるいは船位の決定までにそれぞれ要する時間の差、いわば時定数の差である。仮にこの時間差を10秒とした場合、10ノットで航走すれば見かけ上の測位誤差は約50mとなり、流速の誤差は無視できない。時定数の差は、変速時の値のバラツキも説明できる。同様に、変針や変速時の対水船速のバラツキも、ログとジャイロの時定数の差によると考えることができる。しかし、着目の正否についての検討は今後に残される。

5. 測流結果

本節では「拓洋」による測流結果を、1984年の3月と4月、1985年の2～3月と5～6月の例を挙げて示す。ドップラーログを用いた測流が測量船で行われたのは、「拓洋」の第1回WESTPAC航海時であり、第6、7図はその際の東シナ海における結果である。測流海域の水深は約120mと浅く、対地モードで測定された。流速値は、ディスプレイ上のアナログ記録を撮影し、これから読み取ったもので、流向は16方位、スピードは0.1ノット単位である。また、測定深度は8mと50mを設定したが、吃水を約5mと考えそれぞれ13mと55mとする。第6図は表面(13m深)の流速ベクトルを、第7図は流向とスピードの時間変化を、GEKによる値とともに示してある。ふたつの方法による結果はほぼ一致する。さらに第7図は、流向、スピードとも約12時間周期の変化を示唆している。浅海域でのGEK測定値は信頼性が低いとされるが、Nagata *et al.* (1981)は東シナ海の大陸棚上の測定結果から浅海域でもGEKが有効であることを示している。また、Saiki-Yanagino (1982)は、東シナ海のGEKデータの統計解析から陸棚域における半日周潮流の特性を知るうえでGEKが有効であるとしている。これから、第7図の時間変化は半日周期の潮流を測定した結果と考えられる。さらに、表面から少なくとも水深の半分程度の深さまでは、流れの方向、スピードが変化しない構造であることもわかる。ドップラーログによる測流は、通常の一測線上のGEK観測では難しい、このような海況の把握が可能である。なお、このときはGEK測定中、すなわち船の変針時にも流速を得ているが異常な値は見られない。対地モードでGEKを行いつつ測流した他の例(脚注5参照)でも同様であり、前節で述べた変針時の異常流速値の出現が対水モード測定時に特有な現象であることを示している。

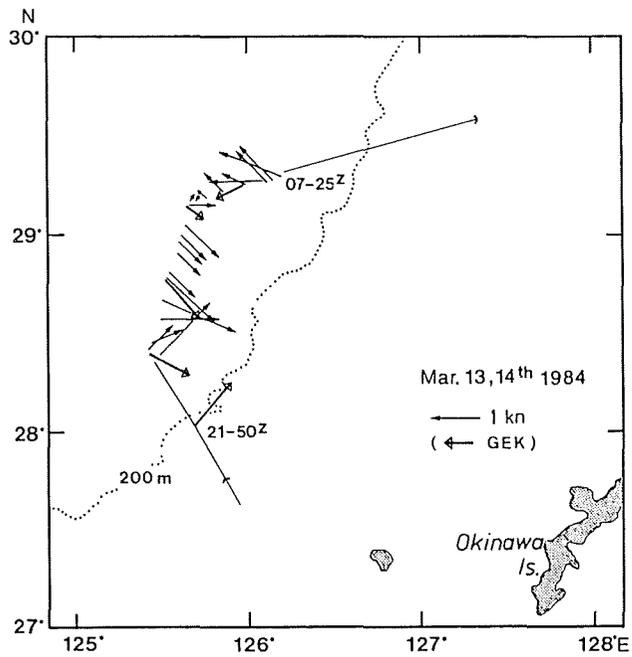


Figure 6 Surface current measured with GEK and Doppler log, by S/V *Takuyo* in her 1st WESTPAC cruise.

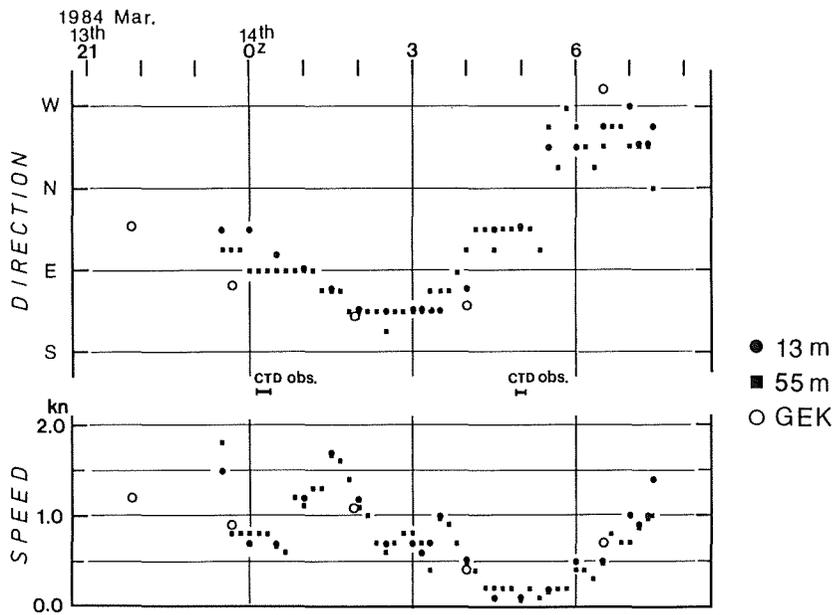


Figure 7 Direction and speed of current velocity measured with GEK (○) and Doppler log (●, ■), in the area shown in Figure 6.

東シナ海の観測に引き続き、本州南方の深海域(3000m以深)において対水モードでの測流が試行された。ログによる対水船速と複合測位装置で船位変化から計算される対地船速を、刻々とデジタル表示する機器が「拓洋」にある。この表示データを10個程度読み取って平均値を得る操作を、5～10分の時間々隔で行い、マニュアルで(4)式のベクトル演算をして流速を求めた。対地、対水船速の平均値の算出に用いたデータ数は少なく、平均流速を与える時間々隔も一定でないにもかかわらず、結果(第8図)は妥当であった。すなわち、3月19日～21日に得られた流速分布は、水路部が月2回発行している「海洋速報」の200m水温水平分布(昭和59年第7号;観測期間3月14日～4月4日)から推定される流れの強さ、方向のそれと大きな矛盾はない。

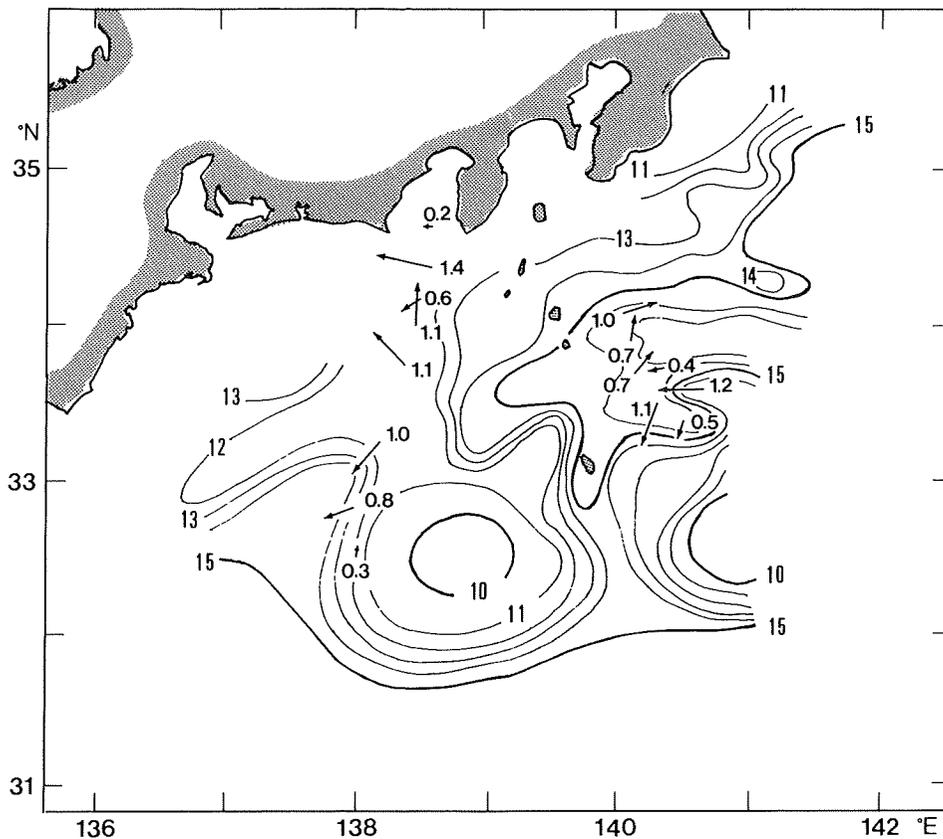


Figure 8 Horizontal distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$) at a depth of 200m, and surface current velocities (knots) measured by using Doppler log with navigation information given by the Integrated Navigation System. Current measurement was made by S/V *Takuyo* in from 19 to 21 March 1984. Temperature distribution is cited from the *Quick Bulletin of Ocean Conditions* (No.7, 1984, Mar.14–Apr.4) published by the Hydrographic Department twice a month.

WESTPAC航海時に試験的に実施したドップラーログ利用の測流は、対地、対水モード双方で有効なことが認識された。そして翌4月にはLoran-C装置(古野電気製)とログとを連結させ、所要のデータから自動的に計算した流速をカセットテープとプリンタに出力する測流システムの試験が実施され、1分ごとの表

面を含む計4層の流速が半月間にわたって得られた。第9図はその一部である。静岡県南方の冷水塊・黒潮を横切る測線における、5個に1個の割合で抽出した表面流速ベクトルと鉛直水温分布（「海洋速報」第8号、-4月3~18日-より）が示される。水温勾配の大きなところで3ノット以上とスピードは大きく、流向も妥当であり、第8図の場合と同様、水温場から推定される流速と合致する結果が得られた。更にこの試験時に測定された流速の鉛直方向の変化に着目し、表層エクマン層の構造や鉛直渦動粘性係数に関する解析も試みられている（石井ら、1985）。

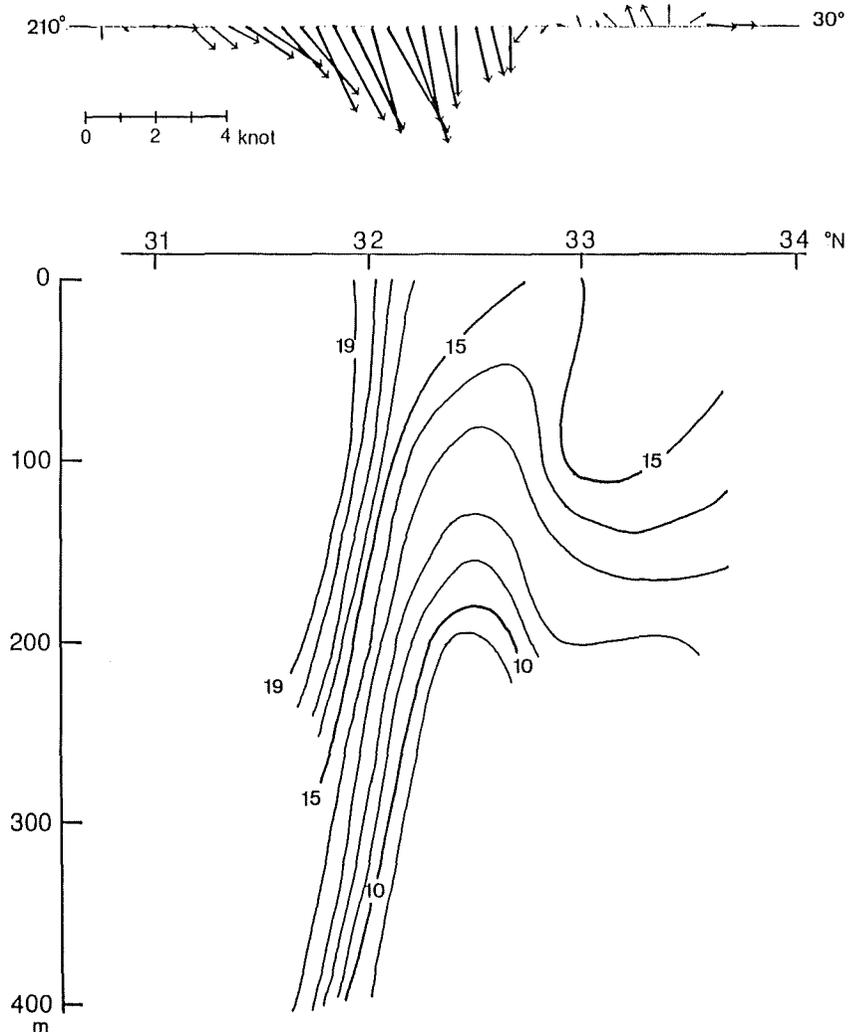


Figure 9 Surface current measured by using Doppler log together with Loran-C system (upper), and temperature section (lower), along the line from 30° (NNE) to 210° (SSW) across the Kuroshio south of Japan. Current measurements were made on April 14 and 15, 1984 by S/V *Takuyo* and temperature section is based on the *Quick Bulletin of Ocean Conditions* No.8 (Apr.3-18), 1984.

1985年2～3月の「拓洋」による第2回WESTPAC航海では、第4図に示した測流システムが整備され、対水モード測定時の表面流速は自動的に計算、出力できるようになっていた。結果を第10図に示す。ここで流速は5分間（データ数150個）の平均であり、明らかに異常な値や疑わしい値——船の変針、変速時や荒天時の測定に比較的多く見られる（前節参照）——は除いている。また、便宜上10個に1個の割合で流速ベクトルをプロットしてある。図では、黒潮、北赤道海流、南赤道海流など西太平洋の顕著な海流をはじめ、 $28^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ の黒潮逆流（西向き）や 6°N 、 135°E 付近の赤道逆流（東向き）と思われる海流が描き出されている。また、黒潮逆流と北赤道海流との間に東向きの亜熱帯逆流が存在するといわれ、測定結果でも 144°E 線上の $18^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ と台湾東方に東向きの流れが見られる。しかし、定常的な東向流かどうかは測線間隔の広さから判定できず、渦の存在による可能性もある。

赤道から 20°N 付近の低緯度海域で測流ができたのは、ドップラーログを利用しているからである。GEKは、曳航電極が地球磁場の鉛直成分を横切の際に生ずる起電力の測定から流速を得る計器で、その鉛直成分が零となる磁気赤道付近を含め低緯度では使用できない。第10図の海域における磁気赤道は 8°N 付近に位置し、第1回WESTPACのGEK観測は 20°N 以北に限られている。ドップラーログ利用の測流のこの長所と、複数層の測定が可能という長所を活かして得られた結果が第11図である。上段の図は第10図の破線内の海域における表面（約10m深）と約200m深の流速分布を示す。表面では、 3°N 以南に南赤道海流が卓越し、最大 2.1 ノットが測得されている。しかし、200m深では南赤道海流の直下に東向きの流れが見られる。赤道潜流と考えられる。下段は 142°E 線（上段図のA～B間）に沿う、流速の東西成分値の分布である。マイナス（陰影部）は東向きを表す。なお、表面と200mのほか、設定深度50、100、150mで測定が行われ、表面以外の流速はディスプレイ上の表面に相対的な流速値を読み取った後、マニュアルで計算して求めている。断面図から、南赤道海流とその直下の潜流が明瞭にわかる。 4°N 以南の西向流部の流量は約35SV、 $3^{\circ}30'\text{N}$ 以南の東向流部の流量は約4SVとそれぞれ見積られる⁶⁾。前者を南赤道海流の流量とすれば妥当な量であるが、後者は赤道潜流の流量としては少ない。潜流の中心部がもっと深くにあるためと、当海域が赤道潜流の起源域であるためと想像される。また、潜流の北側にも赤道逆流と思える東向きの流れがある。赤道付近で得られたこれらの測流結果は一般的海流像と合致しており、ここでもドップラーログを用いた方法の有効性が示された。

測流例の最後に、1985年5～6月の結果を示す（第12図）。「拓洋」による海底地形等の測量調査時に、これと並行して観測されたもので、航走しながら測定できる本測流方法ではじめて可能である。図の例では、南北約120km、東西約250kmの比較的狭い海域内に、統計図等からは到底予想できない複雑な流れが見られる。特に、 25°N 、 139°E に中心を持った直径100km程度の反時計廻りの渦が目される。存在した位置と規模から、中規模渦とよばれるものと考えられる。表面の水平成分のみとは言え、渦の流速分布をこのように詳しく測定された例を筆者らは知らない。「拓洋」の扱った渦やその周辺の流れの様子は、外洋の流れが我々の想像する以上に複雑であることを示唆している。

以上、ドップラーログを用いた測流例を示した。個々の例について、より詳しい解析と記述がされるべきであるが、ここでは立ち入らず紹介にとどめる。しかし、測定された流速あるいはその分布は、GEK測定値、水温分布、海流に関する一般的な知識に反することはなく、むしろ良く合っている。測定精度の定量化は未だなされていないが、これらの測定例は、本方法が実用に充分耐えるものであることを示している。少な

6) 流量の単位としてSV（スヴェルドラップ）を用いた。1SV= $10^6\text{m}^3/\text{sec}$ 。

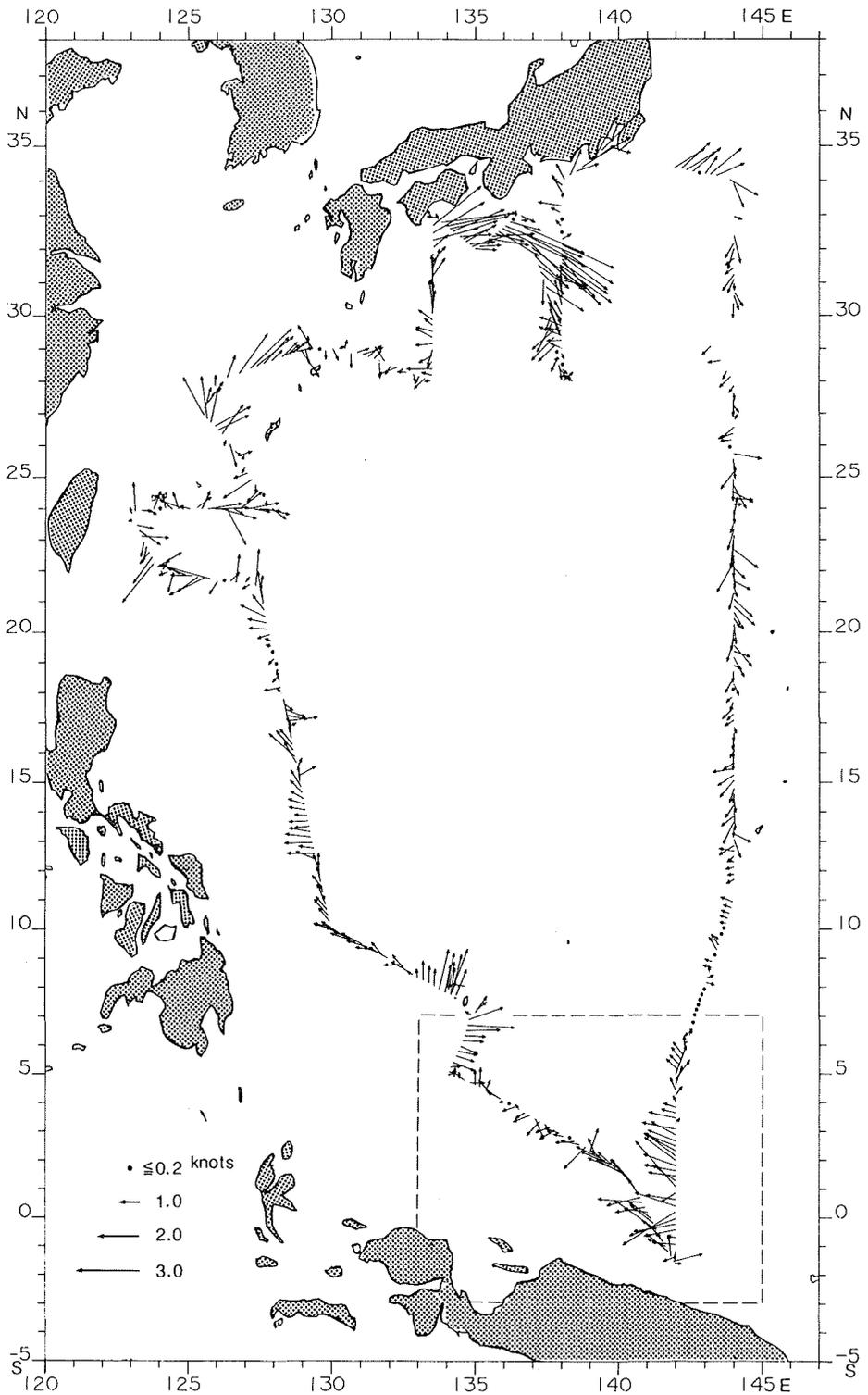


Figure 10 Surface current velocities obtained by the measurement system shown in Figure 4; observed from February 8 to March 17 1985 by S/V *Takuyo* in her 2nd WESTPAC cruise.

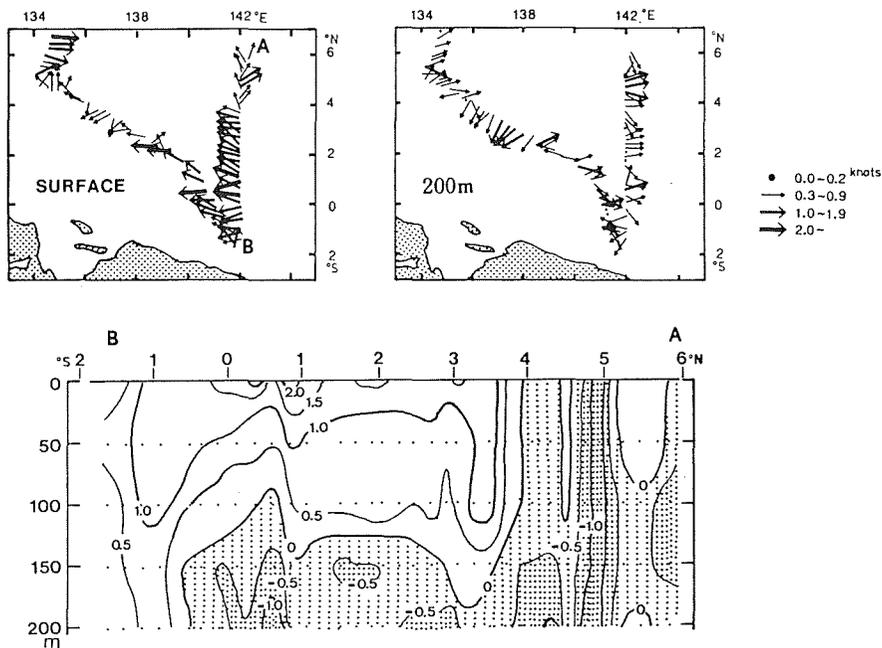


Figure 11 (Upper panel) current velocities at depths of about 10m (surface) and about 200m in the area shown with broken lines in Figure 10 ; observation was made in from 18 to 22 February 1985. (Lower panel) east-west component of current velocity (knots) from A to B in the upper panel; minus value (dotted area) denotes eastward flow.

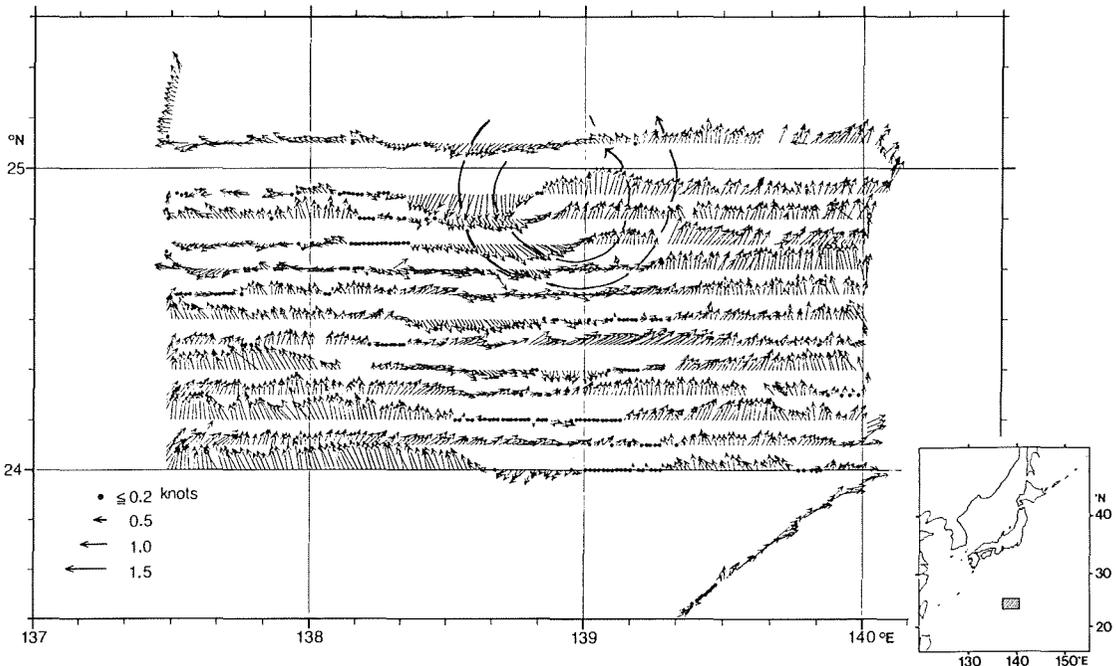


Figure 12 Surface current velocities obtained by the measurement system shown in Figure 4 ; observed from May 26 to June 3 1985 by S/V *Takuyo*.

くともGEKに比べて、測定上の幾つかの利点と同程度及至それ以上と推測される精度とから、優っていると考える。

6. まとめ

超音波ビームのドップラーシフト量の測定から流速を求めるといふ、ドップラーログ利用の船上での新しい測流方法は、従来のGEKに比べて

- (1) 電纜のような曳航物を必要としない。
- (2) 船を再三変針させずに、航走しながら連続的に測定できる。
- (3) 表面以外に、海中の複数層における流速の測定ができる。
- (4) 水深数百メートルの浅海域や、磁気赤道付近の低緯度帯でも測定可能

といった長所をもつ。本方法によって測定された流速場は、対地、対水両モードについて、定性的には充分妥当なものである。と同時に、上記の長所を活かすことにより、GEKでは困難な時空間的に詳細な流速場の把握が可能である。流速の測定精度の定量的評価はなされていないが、少なくともGEKと比較——本報告では記載しなかった例も含める——して劣るとは思えない。ドップラーログは、高価格という短所を補う長所により、GEKにかわる測流方法として定着すると考える。

測流精度の定量的評価には、波浪の影響や船の測位誤差の見積りが必要である。また、得られる流速の誤差を小さくするために、より良い平均操作方法と高精度の測位システムの開発・導入が必要である。これらは、係留系などの他の測流手段による比較観測の実施とともに、今後の課題として残される。

ドップラーログは測量船、巡視船に搭載され、これを利用した測流が現在活発に実施されている。その結果、これまで相対的に流れのデータの少なかった沿岸域や船舶輻湊域をはじめとして、飛躍的にデータ量が増加している。蓄積されたこれらのデータは、流況の変動特性把握や予測に大きく寄与すると期待される。一方、多量のデータの迅速かつ適確な処理体制の確立もまた急務である。

おわりに、本報告で紹介した流速測定にあたり協力いただいた「拓洋」乗組員の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 古野電気株式会社 1983：音波ログCI-20-H取扱説明書
- 井本泰司・穀田昇一 1986：偏位流速計データ フィルタリングの一方法について——観測ノート——，水路技報，NO.4.
- 石井春雄・道田豊・西田英男 1985：音波ログ測流にみられた表層エクマン層について，日本海洋学会春季大会講演要旨集，121-122.
- Joyce T. M., D. S. Bitterman, Jr. and K. E. Prada 1982：Shipboard acoustic profiling of upper ocean currents, *Deep-Sea Res.*, 29, No.7A, 903-913.
- Nagata Y., K. Yonemura and H. Nishida 1981：GEK measurements in a shallow water region, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 37, 21-30.
- Saiki M. and T. Yanagino 1984：Characteristics of the tidal current deduced from the GEK data in the Eastern China Sea, *Oceanogr. Mag.*, 34, 41-45.