

航法電波と音波による海潮流の高精度測定†

小野房吉*・青山繁**

HIGH ACCURACY MEASUREMENT OF SEA CURRENT BY NAVIGATION ELECTRIC WAVE AND ACOUSTIC WAVES†

Fusakichi Ono* and Shigeru Aoyama**

Abstract

An acoustic sea currentmeter, in combination of a position measuring device navigation electric waves, log an acoustic log and a gyro-compass, has been developed and used practically as the equipment for surveying sea current in vast and deep sea in 3-dimensional manner. However, this equipment presently suffers from lower measuring accuracies in deep sea than in shallow sea because of lower accuracy for measuring velocities in relation to land using navigation electric waves.

This report describes a new method for achieving a level of accuracies about 10 times as high. According to the method, the same data as conventional practice is used for measuring velocities to land using navigation electric waves. However, only incremental components of measured time differences are dealt with for converting velocities. Another merit of the new method higher operating rate of calculation. The new electric wave log is assembled in conventional meter, thus realizing high-accuracy metering of sea current even in deep sea.

In addition, it is also reported that the new electric-log is capable of comparing frequencies of received waves to a reference frequency at the receiving point, in high accuracies, and also applicable to measuring frequencies of a standard oscillator.

1. はじめに

海の流れを面的、立体的に調査する場合の困難は、基準が最寄りでないことである。河川では兩岸あるいは河底が基準となるが、陸地から遠く離れた深い海では、そうした何ものもない。そのような海水の流れを±0.1kn (秒速5cm/sec)の精度で測定するという事は、長い間、海洋学者の夢であった。この夢が音波ログの出現で現実のものとなりつつある。音波ログは、船底から数条の超音波パルスビームを所定の指向角で海中に発射し、海水及び海底反射波のドップラ周波数を測定して、対水及び対地船速を船首方向に対して測定できる装置である。浅い海での流速は、この測定を水平ジャイロ信号を用いて測地座標に変換して求める。発射パルスは巾の狭いものであるが、反射波は水深各層から戻るため連続的な減衰波となり、周波数の測定にゲートを設けることで水深各層の流れも測定できる。第1図に音波による流速測定装置の構造を示した。深い海では、船底から斜めに発射した音波の海底反射は受信困難となるから、対地速度を他の方法(無線航行援助システムの利用)で求める。従来の装置では、この場合の対地速度の測定精度が不十分なためきめ細

† Received 30th September 1988

* 海洋研究室 Marine Research Laboratory

** 古野電気(株) Furuno Electric Co., Ltd.

かく精度の高い測流が困難であった。

この報告は、対地船速の測定に同じ航法電波を用いるが、測定原理が従来のように測地経緯度の時間的変化から速度を求めるのではなく、時間差測定データに含まれる速度成分(変化分)から直接測地座標上の速度を求める電波速度計^{*1}と、音波ログ及びジャイロコンパスの三者を組み合わせた海潮流の測定方法の実験結果について述べる。

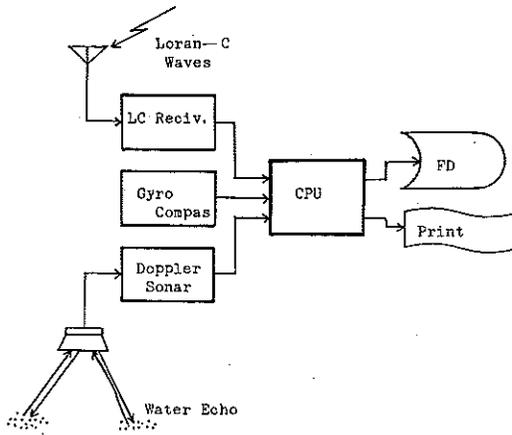


Figure 1. Block diagram of an acoustic Current Velocity Meter.

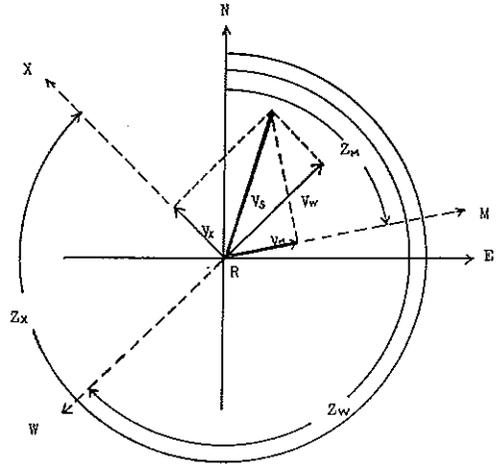


Figure 2. Velocity meter use of the Radio Navigation Waves.

2. 航法電波を利用する電波速度計の原理

一般に航法電波は、一つの主局と一定の関係で同期した電波を放射する複数の従局によって構成されている。電波の周波数は高安定であり、一定のスケジュールで放射されている。この電波を移動体上で受信し、無線局と同じ周波数の基準周波数 f_0 と比較すると、 C を電波伝播速度としたとき、受信点から見た電波放射局方向の速度成分 V に比例したドップラ周波数 $df=f_0 V/C$ 、又は連続測定値から位相差の変化が測定される。この測定値は一つの局について一つ得られるから、そのシステムが三局で構成されていれば三つのデータが同時に取得できる。このデータから受信点の測地座標上の速度を求めることを考える。第2図に受信点 R が速度 V_s で移動したときの各局方向の速度成分 V_M, V_W, V_X の関係を示した。

各電波放射局及び受信点の局符号をそれぞれ M, W, X, Y, R その測地経緯度を $(\lambda_M, \phi_M), (\lambda_W, \phi_W), (\lambda_X, \phi_X), (\lambda_Y, \phi_Y), (\lambda_R, \phi_R)$ とすれば、受信点 R から見た各局の北から東回りに計った方位 Z_M, Z_W, \dots が球面三角法公式から次のとおり計算できる。まず M 局について两点間の角距離 χ の余弦は

$$\cos \chi = \sin \phi_R \sin \phi_M + \cos \phi_R \cos \phi_M \cos (\lambda_M - \lambda_R) \tag{1}$$

$$\theta = \cos^{-1} ((\sin \phi_M - \sin \phi_R \cos \chi) / (\sin \chi \cos \phi_R)) \tag{2}$$

方位 Z_M は

$$\sin (\lambda_M - \lambda_R) \geq 0 \text{ のとき } Z_M = \theta, < 0 \text{ のとき } Z_M = 2\pi - \theta \tag{3}$$

Z_W, Z_X, Z_Y も同様に計算する。

こうして受信点から見た各局の方位が計算できれば、先に測定された各局のドップラ周波数(速度成分) d_M, d_W, d_X, d_Y を東西南北方向成分 V_N, V_E に分解する方程式は

$$\left. \begin{aligned}
 d_M &= V_N \cos Z_M + V_E \sin Z_M + \Delta f \\
 d_W &= V_N \cos Z_W + V_E \sin Z_W + \Delta f \\
 d_X &= V_N \cos Z_X + V_E \sin Z_X + \Delta f \\
 d_Y &= V_N \cos Z_Y + V_E \sin Z_Y + \Delta f
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ただし Δf : 基準発信器の周波数偏差

と書ける。第3図に方程式の物理的關係を示した。

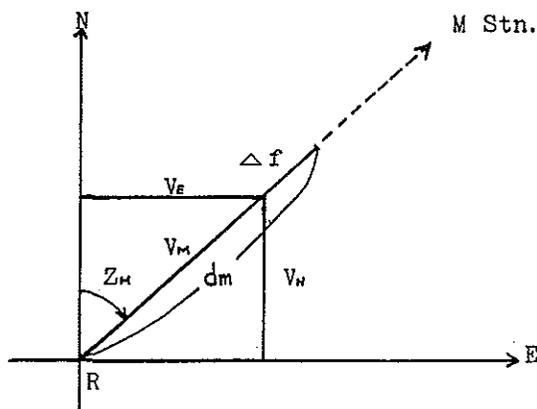


Figure 3. Principle of an observation equation.

この方程式で未知数は $V_N, V_E, \Delta f$ の3つであるから、互いに方位の異なった3つの局のデータがあれば解ける。方位の計算は、電波受信点に対して、電波発射局が十分遠ければ（一般には十分遠い）送信点の多少の位置の違いは方位に殆どきかないから概略でよい。

方程式での解法：各未知数の係数を $a_i = \cos Z_i, b_i = \sin Z_i, c_i = 1, d_i = d_i$ (i は各局に対応) と置き、これらの $i = M, W, \dots Z$ までの以下の積 $[a_i a_i], [a_i b_i], [a_i c_i], [a_i d_i], [b_i b_i], [b_i c_i], [b_i d_i], [c_i c_i], [c_i d_i]$ を計算し、次の正規方程式を作る。

$$\left. \begin{aligned}
 [a_i a_i] V_N + [b_i a_i] V_E + [c_i a_i] \Delta f &= [d_i a_i] \\
 [a_i b_i] V_N + [b_i b_i] V_E + [c_i b_i] \Delta f &= [d_i b_i] \\
 [a_i c_i] V_N + [b_i c_i] V_E + [c_i c_i] \Delta f &= [d_i c_i]
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

正規方程式ができると、この解は係数の行列式から次のように全く機械的に得られる。

$$D = \begin{vmatrix} [a_i a_i] & [b_i a_i] & [c_i a_i] \\ [a_i b_i] & [b_i b_i] & [c_i b_i] \\ [a_i c_i] & [b_i c_i] & [c_i c_i] \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$V_N = (1/D) \cdot \begin{vmatrix} [d_i a_i] & [b_i a_i] & [c_i a_i] \\ [d_i b_i] & [b_i b_i] & [c_i b_i] \\ [d_i c_i] & [b_i c_i] & [c_i c_i] \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$V_E = (1/D) \cdot \begin{vmatrix} [a_i a_i] & [d_i a_i] & [c_i a_i] \\ [a_i b_i] & [d_i b_i] & [c_i b_i] \\ [a_i c_i] & [d_i c_i] & [c_i c_i] \end{vmatrix} \quad (8)$$

$$\Delta f = (1/D) \cdot \begin{vmatrix} [a_i a_i] & [b_i a_i] & [d_i a_i] \\ [a_i b_i] & [b_i b_i] & [d_i b_i] \\ [a_i c_i] & [b_i c_i] & [d_i c_i] \end{vmatrix} \quad (9)$$

こうして、各局の時間差測定データが測地座標の緯度経度方向の速度成分に変換できる。これから船速の絶対値 V 及び進行方向 Z は

$$V = \sqrt{V_N^2 + V_E^2} \quad (10)$$

$$\theta = \cos^{-1}(V_N/V) \quad (11)$$

方位を北から東回わりにとると

$$V_E \geq 0 \text{ のとき } Z = \theta, < 0 \text{ のとき } Z = 2\pi - \theta \quad (12)$$

以上が航法電波を利用する電波速度計の原理である。

この方式では、受信点の基準発信器の電波発射システム基準に対する周波数偏差は、 Δf として分離するから速度測定誤差の原因とはならない。このことは言い換えれば、従来は不可能であった移動体上における基準発信器の周波数安定度の測定が、この方式によれば可能であることを意味する。

これまでの説明は、受信点の基準周波数に対して受信波の周波数を比較したデータについて述べた。しかし、この方式の速度測定原理は、言わば一般解であるから、従来の双曲線航法方式受信機で取得した時間差データに対してもそのまま適用できる。理由はこれらの測定データの時間の経過による変化分が受信点の移動による速度成分に他ならず、この方式の基準周波数源が、主局電波の到来波に置き換わったのと同様だからである。従って、双曲線方式データでは、主局電波に対応するデータ d_M は "0" となる。第4図に基準発信器を使った距離方式データと双曲線方式データの関係を示した。(1)が受信点の基準パルス、(2)が主局の発射パルス、(3)が主局の受信点における到来パルス、(4)が従局の発射パルス、(5)が従局の受信点における到来パルスである。 Δt は(1)の(2)に対する同期偏差である。

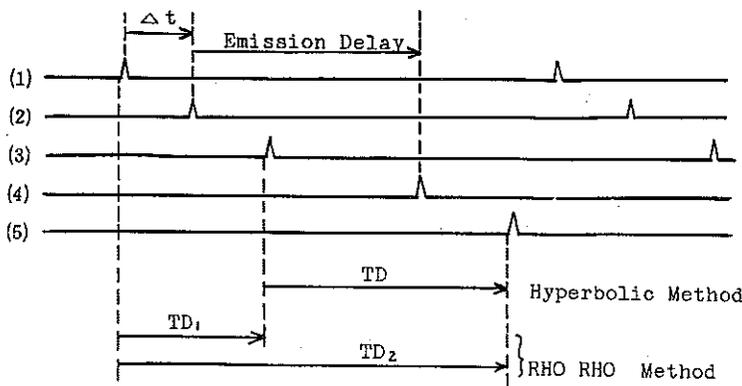


Figure 4. Timing chart of the Loran-C Waves.

そこで、このデータを用いて本方式で解く場合は $d_M = 0$, $d_W = TD_{W2} - TD_{W1}$, $d_X = TD_{X2} - TD_{X1}$, $d_Y = TD_{Y2} - TD_{Y1}$ として変化分をもとめ方程式を作る。この場合(4)式の Δf は、受信点の主局方向に対する速度成分であり主局のドップラ周波数に対応する。

3. 測定データの2階移動平均

現在最も精度が高いとされる航法電波は、デッカ又はロランCであるが、これを利用する場合、この受信

この3個の和で当然9である。又、 $n=4$ とすると各項は数列第4行のとおりに4となり和は16となる。従って、 $n=3$ における速度は $9 \cdot 300 / (3 \cdot 3 \cdot 3)$ m/s, $n=4$ における速度は $16 \cdot 300 / (4 \cdot 4 \cdot 3)$ m/sとなる。

このように(14)式によれば速度に対応する位相変化の測定が拡大して測定されるので速度成分は測定単位を μs (マイクロ秒), 電波伝播速度を v (m/ μs), 測定時間々隔を t 秒, 速度成分を V (kn), (15)式で計算された測定量を D としたとき

$$V_i = \frac{D \cdot v \cdot 3600}{n^2 \cdot t \cdot 1852} \quad (\text{kn}) \quad (15)$$

(i: 当該局に対応)

この方法は受信点が移動していることを前提にしているから、移動していなければ、個々の測定値のバラツキが $0.1 \mu s$ より小さいときステップ変化が表われるが、通常多少のバラツキと速度を持つのでスムーズな平滑化が行われ問題とならない。

基準発信器の周波数偏差: (9)式で求めた Δf は、受信点の参照基準パルス作成の基準となった標準発信器周波数の利用電波発射システムの標準発信器周波数に対する偏差と述べた。従って、この電波速度計はそのまま移動状態でも測定できる高精度な周波数安定度測定装置としても利用できる。

この場合の周波数偏差 Δf は、データの単位が (kn) で与えられたときは、これを秒速に換算し、電波伝播速度で除せばよいから

$$\Delta f = \frac{\Delta f' \cdot 1852}{v \cdot 3600} \quad (\text{Hz}) \quad (16)$$

となる。固定点に於ける Δf は方程式を解くまでもなく(14)式の単位換算を行わず単に

$$\Delta f = \frac{D}{n^2 \cdot t} \quad (\text{Hz}) \quad (17)$$

である。

この方法による周波数測定は、単一局ではなくシステムの平均周波数に対して測定されること。又、測定時間の2乗に比例して精度が向上することが特徴である。

4. 音波による船速の測定

第5図において、速度ベクトル \vec{V} で走行する船の点 O から方向ベクトル \vec{B} の方向に周波数 f_0 で音波を送信したとする。このとき速度ベクトル \vec{W} で移動する散乱体 S の点 O' で受信した音波の受信周波数 f_w は、音速を

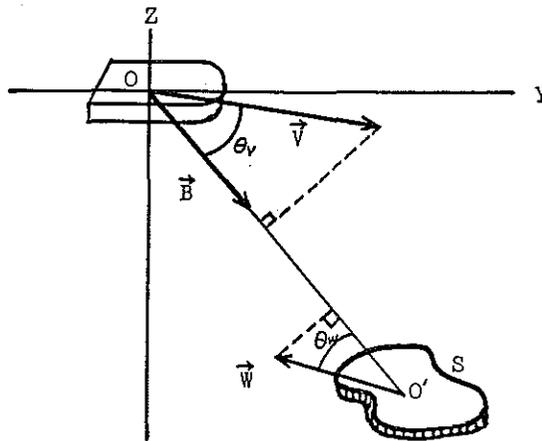


Figure 5. Principle of the Doppler Log.

Cとすると

$$f_w = f_0 \frac{C + |\vec{W}| \cos \theta_w}{C - |\vec{V}| \cos \theta_v} \quad (18)$$

次に、この散乱体Sからの反射波を船の点0で受信したときの受信波数 f_v は

$$f_v = f_w \frac{C + |\vec{V}| \cos \theta_v}{C - |\vec{W}| \cos \theta_w} \quad (19)$$

この式は f_w に(18)式を代入し、近似すると次式のように簡単になる。

$$f_v = f_0 \left(1 + \frac{2 (|\vec{V}| \cos \theta_v + |\vec{W}| \cos \theta_w)}{C} \right) \quad (20)$$

よって、ドップラシフト fd_v は

$$fd_v = f_v - f_0 = \frac{2 f_0}{C} (|\vec{V}| \cos \theta_v + |\vec{W}| \cos \theta_w) \quad (21)$$

上式をビームの方向ベクトル \vec{B} で表わすと \vec{B} と \vec{V} 及び \vec{W} の内積が

$$\vec{B} \cdot \vec{V} = |\vec{B}| \cdot |\vec{V}| \cos \theta_v = |\vec{V}| \cos \theta_v$$

$$\vec{B} \cdot \vec{W} = |\vec{B}| \cdot |\vec{W}| \cos (\pi - \theta_w) = -|\vec{W}| \cos \theta_w$$

ただし、 \vec{B} は単位ベクトル ($|\vec{B}| = 1$) で表わされるから

$$fd_v = \frac{2 f_0}{C} (\vec{B} \cdot \vec{V} - \vec{B} \cdot \vec{W}) = \frac{2 f_0}{C} (\vec{V} - \vec{W}) \cdot \vec{B} = \frac{2 f_0}{C} \cdot \vec{V}_w \cdot \vec{B} \quad (22)$$

ただし、 \vec{V}_w は相対速度ベクトル ($\vec{V} - \vec{W}$)

ここで、 $\vec{V}_w = (V_{wx}, V_{wy}, V_{wz})$, $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$

ただし、 B_x, B_y, B_z は \vec{B} の方向余弦

とおくと

$$fd_v = \frac{2 f_0}{C} (B_x V_{wx} + B_y V_{wy} + B_z V_{wz}) \quad (23)$$

となり、各ビーム毎に B_x, B_y, B_z を求めることによって、ドップラシフト fd_v を求めることができる。各ビーム

の方向ベクトル $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3$ の方向余弦が以下のように表わされるとき

$$\vec{B}_1 = (B_{1x}, B_{1y}, B_{1z}), \vec{B}_2 = (B_{2x}, B_{2y}, B_{2z}), \vec{B}_3 = (B_{3x}, B_{3y}, B_{3z})$$

各ビームのドップラシフト $f_{DV1}, f_{DV2}, f_{DV3}$ を求める式は行列式で表わすと

$$F_d = B \cdot V_w \cdot 2 \cdot f_0 / C$$

ただし、

$$F_d = \begin{vmatrix} f_{DV1} \\ f_{DV2} \\ f_{DV3} \end{vmatrix}, \quad B = \begin{vmatrix} B_{1x} & B_{1y} & B_{1z} \\ B_{2x} & B_{2y} & B_{2z} \\ B_{3x} & B_{3y} & B_{3z} \end{vmatrix}, \quad V_w = \begin{vmatrix} V_{wx} \\ V_{wy} \\ V_{wz} \end{vmatrix} \quad (24)$$

となる。また上式より

$$V_w = B^{-1} \cdot F_d \cdot C / (2 \cdot f_0) \quad (25)$$

ただし、 B^{-1} は B の逆行列

座標軸を船の進行方向に対して6図のようにとると、各ビームの方向余弦は

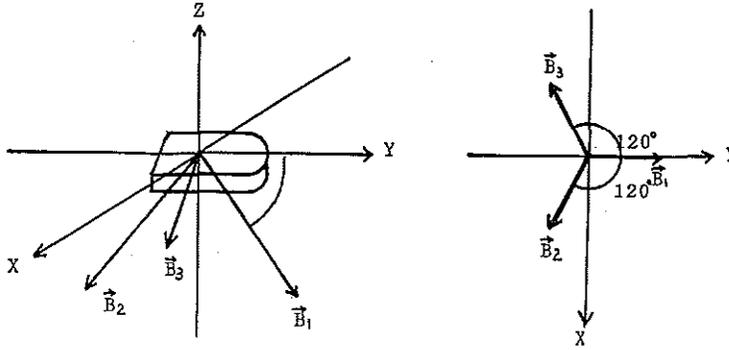


Figure 6. A coordinate axis of the Doppler Log.

$$B_1 = (0, 1/2 \cdot \cos \theta_0, -\sin \theta_0)$$

$$B_2 = (\sqrt{3/2} \cdot \cos \theta_0, -1/2 \cdot \cos \theta_0, -\sin \theta_0)$$

$$B_3 = (-\sqrt{3/2} \cdot \cos \theta_0, -1/2 \cdot \cos \theta_0, -\sin \theta_0)$$

ただし、 θ_0 はX, Y平面からの俯角

従って、測定ドップラシフト f_{dv1} , f_{dv2} , f_{dv3} から相対速度ベクトル V_w を求める式は、上記の行列式を解くことによって以下のように求められる。

$$V_{wx} = \frac{C}{2 \sqrt{3} \cdot \cos \theta_0 \cdot f_0} \cdot (f_{DV2} - f_{DV3}) \quad (26)$$

$$V_{wy} = \frac{C}{3 \cdot \cos \theta_0 \cdot f_0} \cdot \left(f_{DV1} - \frac{f_{DV2} + f_{DV3}}{2} \right) \quad (27)$$

$$V_{wz} = \frac{C}{2 \cdot \sin \theta_0 \cdot f_0} \cdot \left(-\frac{f_{DV1} + f_{DV2} + f_{DV3}}{3} \right) = \frac{C}{2 \cdot \cos \theta_0 \cdot f_0} \cdot \frac{1}{\tan \theta_0} \cdot \left(-\frac{f_{DV1} + f_{DV2} + f_{DV3}}{3} \right) \quad (28)$$

ここで、 $k = C / (2 \cdot \cos \theta_0 \cdot f_0)$ と置くと上式は

$$V_{wx} = \frac{k \cdot f_{DV2} - k \cdot f_{DV3}}{\sqrt{3}} \quad (29)$$

$$V_{wy} = \frac{2 \cdot k \cdot f_{DV1} - k \cdot f_{DV2} - k \cdot f_{DV3}}{3} \quad (30)$$

$$V_{wz} = -\frac{k \cdot f_{DV1} + k \cdot f_{DV2} + k \cdot f_{DV3}}{3 \cdot \tan \theta_0} \quad (31)$$

実際の演算では音波ログの信号処理部で $k \cdot f_{DV1,2,3}$ を0.1knの分解能で量子化した値 $N_{1,2,3}$ を用いる。

すなわち

$$V_{wx} = (N_1 - N_3) / \sqrt{3} \quad (32)$$

$$V_{wy} = (2 \cdot N_1 - N_2 - N_3) / 3 \quad (33)$$

$$V_{WZ} = -(N_1 + N_2 + N_3) / (3 \cdot \sqrt{3}) \quad (34)$$

こうして求まる対水速度は、船首尾を結んだ線に平行な線を Y 軸、水平でこれに直角な線を X 軸、X 軸 Y 軸に直角な線を Z 軸とした成分であるから、これを水平ジャイロ信号を用いて測地座標に対する量に以下の手順で変換する。

$$V_W = \sqrt{V_{WX}^2 + V_{WY}^2 + V_{WZ}^2} \quad (35)$$

ここで、電波速度計では速度の Z 成分は得られないから、水平成分のみに着目すれば

$$V_W = \sqrt{V_{WX}^2 + V_{WY}^2} \quad (36)$$

$$\theta_W = \cos^{-1} (V_{WY} / V_W) \quad (37)$$

水平ジャイロにより与えられる測地座標に対する船首方位を θ_{GY} とすれば、速度の東西南北方向成分は

$$V_{WN} = V_W \cos(\theta_W + \theta_{GY}) \quad (38)$$

$$V_{WE} = V_W \sin(\theta_W + \theta_{GY}) \quad (39)$$

である。

5. 海流の算出

(7), (8)式で求まる対地速度と(38), (39)式の対水速度の差が流れである。即ち流れの東西南北方向成分を V_{CN} , V_{CE} とすれば

$$V_{CN} = V_N - V_{WN} \quad (40)$$

$$V_{CE} = V_E - V_{WE} \quad (41)$$

従って、流れは

$$V_C = \sqrt{V_{CN}^2 + V_{CE}^2} \quad (42)$$

流れの方向は

$$\theta_c = \cos^{-1} (V_{CN} / V_C) \quad (43)$$

以上電波速度計と音波ログ及び水平ジャイロコンパスを用いた海流の求め方について述べたが、実際の演算に当り、電波速度計と音波ログの測定データは、それぞれ別々の平滑処理を行うので、データの対応時刻について整合をとる必要がある。

以上洋上における流れの測定について新技術を中心に述べたが、ここで流れ測定的全演算過程を図にまとめると第7図のとおりである。

6. 実験結果

昭和62年9月3～10日に測量船「昭洋（船長：山本賢一）」で実施した超音波流速計の性能検証試験の際、手持ちのロランC受信機を用い、従来の方法により3秒毎に時間差測定と位置データを取得収録して、オフラインで、この提案方法の速度計算を行ったところ、所期の精度が確保できることが分かった。計算結果の1部を第1表に示す。この表で第1～17字は日付と時刻、第19～36字はロランCデータ、第38～57字は緯度、第61～70字は進路と速度、第74～78は主局電波のドップラ周波数換算値で、単位は10のマイナス10乗、第80～85字は主局電波の到来方向である。第2表は第1表の計算で得られた対地速度を音波ログによる対水速度から差し引いて水深各層の流れを計算した例である。

第8図は御前崎遙か南方での太平洋上の測流結果を示す。本船は約30度、13knで航行中であつたが、本実験のためコースを90°, 180°, 270°, 0°にとり、各30分間の航走を試みた。従って航跡図は海流の影響がなければ

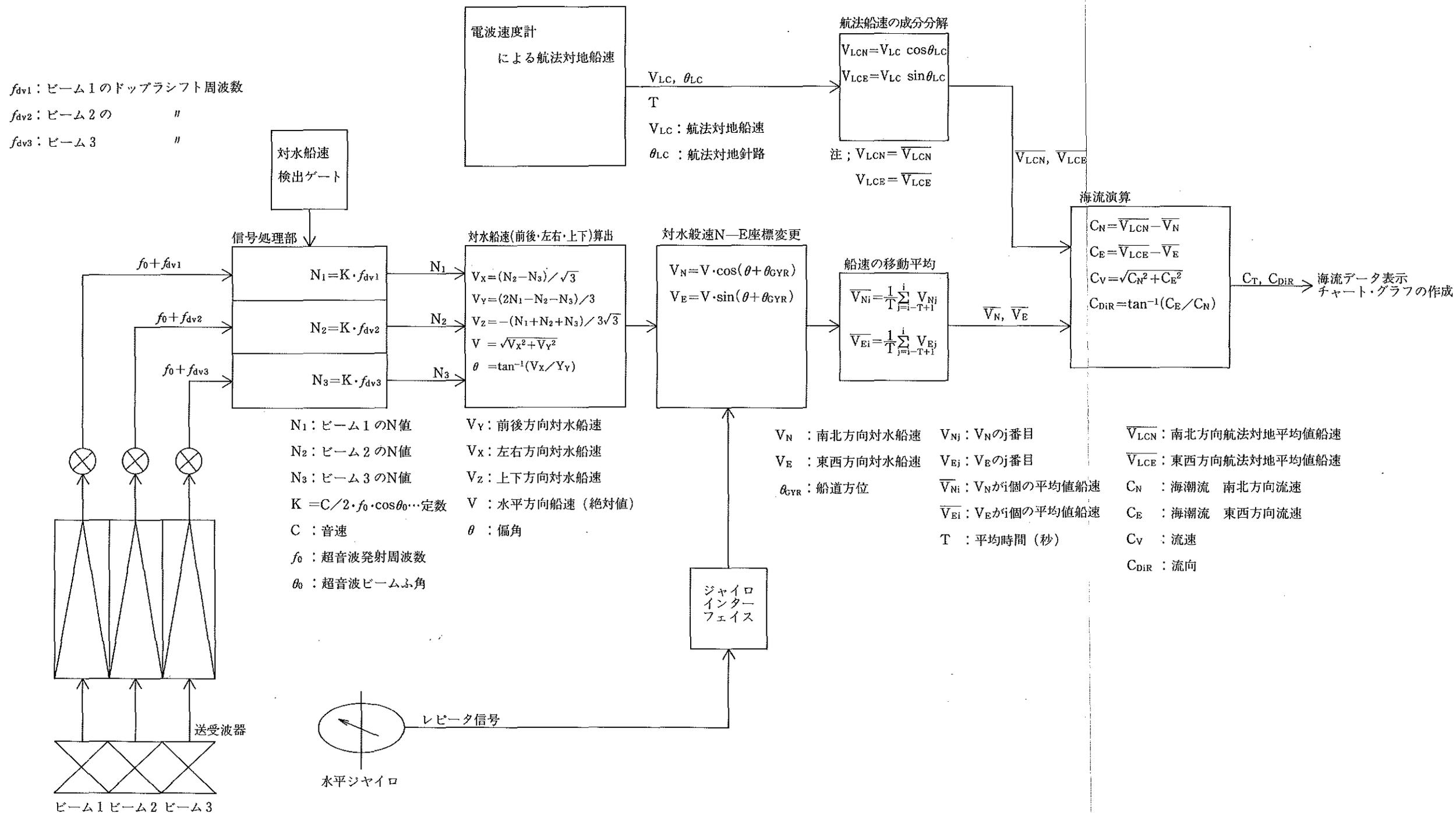


Figure 7. An operation flow of an acoustic current velocity meter.

正方形になるべきところ，海流のため図のように変形した。この変形の具合と矢符が示す流速測定結果の整合具合，転回点前後の測流の整合，交点における測流結果が再現性の良さを示している。

Table 1. Example of the ground velocities and doppler frequency measured by Loran-C waves

1

DATE		TIME			-----DATA-----			LAT.	LONG.	HED	SPD	Dop.F	Zm
Y	M	D	h	m	s	W	X	Y			kn	×E-10	
87/09/07	12:56:30	183764383339605036	31	42.537	138	15.641	36.0	12.79	-128.9	158.68			
87/09/07	12:56:33	183763383338605036	31	42.547	138	15.646	35.3	12.88	-135.7	158.68			
87/09/07	12:56:36	183763383336605036	31	42.557	138	15.652	35.6	12.89	-133.3	158.68			
87/09/07	12:56:39	183762383335605037	31	42.567	138	15.659	35.6	12.98	-134.4	158.68			
87/09/07	12:56:42	183762383334605036	31	42.577	138	15.665	35.6	13.02	-134.9	158.68			
87/09/07	12:56:45	183761383333605037	31	42.587	138	15.671	35.5	13.10	-135.2	158.68			
87/09/07	12:56:48	183761383332605037	31	42.597	138	15.678	35.3	13.12	-136.9	158.68			
87/09/07	12:56:51	183760383331605037	31	42.608	138	15.684	35.4	13.14	-137.6	158.69			
87/09/07	12:56:54	183760383330605037	31	42.618	138	15.690	35.3	13.07	-135.8	158.69			
87/09/07	12:56:57	183759383328605037	31	42.628	138	15.696	35.2	13.08	-137.2	158.69			
87/09/07	12:57:00	183759383327605038	31	42.638	138	15.702	35.1	13.15	-136.4	158.69			
87/09/07	12:57:03	183758383326605038	31	42.648	138	15.708	35.1	13.24	-137.7	158.69			
87/09/07	12:57:06	183758383325605038	31	42.658	138	15.716	34.6	13.25	-137.7	158.69			
87/09/07	12:57:09	183757383324605037	31	42.668	138	15.721	33.8	13.27	-139.9	158.69			
87/09/07	12:57:12	183757383323605038	31	42.678	138	15.726	33.4	13.23	-140.7	158.69			
87/09/07	12:57:15	183756383322605038	31	42.687	138	15.732	33.4	13.24	-140.8	158.69			
87/09/07	12:57:18	183756383321605036	31	42.697	138	15.738	33.1	13.27	-141.2	158.70			
87/09/07	12:57:21	183756383319605038	31	42.707	138	15.745	32.9	13.27	-141.7	158.70			
87/09/07	12:57:24	183755383318605038	31	42.717	138	15.751	32.3	13.20	-142.8	158.70			
87/09/07	12:57:27	183755383317605038	31	42.727	138	15.758	32.2	13.20	-142.7	158.70			
87/09/07	12:57:30	183754383316605039	31	42.737	138	15.765	31.7	13.17	-143.6	158.70			
87/09/07	12:57:33	183753383315605039	31	42.747	138	15.771	31.7	13.17	-143.6	158.70			
87/09/07	12:57:36	183753383314605039	31	42.756	138	15.776	31.4	13.15	-143.2	158.70			
87/09/07	12:57:39	183752383313605039	31	42.766	138	15.783	31.3	13.27	-145.6	158.70			
87/09/07	12:57:42	183752383312605039	31	42.776	138	15.789	31.2	13.25	-144.7	158.70			
87/09/07	12:57:45	183752383311605039	31	42.786	138	15.796	30.7	13.20	-146.7	158.71			
87/09/07	12:57:48	183751383309605039	31	42.796	138	15.803	30.2	13.11	-146.6	158.71			
87/09/07	12:57:51	183751383308605040	31	42.806	138	15.808	30.1	13.12	-147.2	158.71			
87/09/07	12:57:54	183750383307605040	31	42.816	138	15.815	30.6	13.19	-146.9	158.71			
87/09/07	12:57:57	183750383306605040	31	42.826	138	15.822	30.0	13.27	-147.2	158.71			
87/09/07	12:58:00	183749383305605040	31	42.836	138	15.829	29.5	13.38	-149.5	158.71			
87/09/07	12:58:03	183748383304605041	31	42.846	138	15.836	29.8	13.42	-149.5	158.71			
87/09/07	12:58:06	183748383303605041	31	42.856	138	15.843	30.3	13.41	-148.1	158.71			
87/09/07	12:58:09	183747383302605041	31	42.865	138	15.851	30.9	13.48	-146.9	158.72			
87/09/07	12:58:12	183747383301605041	31	42.876	138	15.858	31.3	13.52	-146.6	158.72			
87/09/07	12:58:15	183747383299605041	31	42.887	138	15.865	31.3	13.51	-146.2	158.72			
87/09/07	12:58:18	183746383298605041	31	42.897	138	15.872	31.1	13.50	-146.2	158.72			
87/09/07	12:58:21	183746383297605041	31	42.907	138	15.878	31.1	13.51	-146.8	158.72			
87/09/07	12:58:24	183745383296605041	31	42.917	138	15.884	31.0	13.45	-145.8	158.72			
87/09/07	12:58:27	183745383294605041	31	42.927	138	15.891	31.0	13.46	-146.3	158.72			
87/09/07	12:58:30	183744383293605041	31	42.937	138	15.896	31.4	13.49	-145.7	158.72			
87/09/07	12:58:33	183744383292605042	31	42.947	138	15.904	31.8	13.51	-143.9	158.73			
87/09/07	12:58:36	183744383291605041	31	42.957	138	15.910	31.7	13.44	-144.2	158.73			
87/09/07	12:58:39	183743383290605042	31	42.967	138	15.916	31.6	13.40	-144.1	158.73			
87/09/07	12:58:42	183743383289605042	31	42.977	138	15.921	31.9	13.36	-143.8	158.73			
87/09/07	12:58:45	183742383288605042	31	42.987	138	15.927	32.0	13.30	-142.4	158.73			
87/09/07	12:58:48	183742383287605042	31	42.996	138	15.932	31.3	13.22	-143.3	158.73			
87/09/07	12:58:51	183741383286605042	31	43.005	138	15.937	30.5	13.20	-145.4	158.73			
87/09/07	12:58:54	183740383285605043	31	43.016	138	15.942	30.3	13.12	-145.2	158.73			
87/09/07	12:58:57	183739383284605043	31	43.025	138	15.949	30.1	13.04	-145.3	158.73			
87/09/07	12:59:00	183739383282605043	31	43.034	138	15.954	30.4	13.04	-145.0	158.74			
87/09/07	12:59:03	183738383281605043	31	43.044	138	15.960	30.6	13.04	-144.8	158.74			
87/09/07	12:59:06	183738383280605043	31	43.053	138	15.967	30.8	13.04	-144.6	158.74			
87/09/07	12:59:09	183738383279605044	31	43.063	138	15.972	31.1	13.02	-143.1	158.74			
87/09/07	12:59:12	183737383278605044	31	43.072	138	15.981	31.6	13.02	-142.4	158.74			

Table 2. Example of a current data by the measurement system in figure 7.

音波ロケ 海潮流観測データリスト
 [1987年 09月07日12時]

No.	Time. m: s	Lat	Lon	航法船速				ロケ船速				船首 gyro	水深 M Dep	第1測定層				第2測定層				第3測定層						
				Er	Nav k	Ndir °	N	Log k	Ldir °	L	Sdp m			Cur0 k	Dir0 °	A	C	Sdp m	Cur1 k	Dir1 °	A	C	Sdp m	Cur2 k	Dir2 °	A	C	
1	56:30	N 31°42.610'	E138°15.680'	00	13.0	32.6	0	13.6	21.7	0	23.0	W	0	5	2.5	130.4	0	0	25	2.6	127.7	0	0	50	2.7	126.8	0	0
2	56:33	N 31°42.620'	E138°15.690'	00	13.0	32.3	0	13.6	21.6	0	23.2	W	0	5	2.5	130.5	0	0	25	2.5	127.8	0	0	50	2.6	126.9	0	0
3	56:36	N 31°42.620'	E138°15.690'	00	13.0	32.5	0	13.7	21.7	0	23.1	W	0	5	2.5	130.5	0	0	25	2.5	128.2	0	0	50	2.6	127.1	0	0
4	56:39	N 31°42.640'	E138°15.700'	00	13.1	32.5	0	13.7	21.8	0	22.5	W	0	5	2.5	130.1	0	0	25	2.5	127.8	0	0	50	2.6	126.6	0	0
5	56:42	N 31°42.650'	E138°15.700'	00	13.2	32.3	0	13.7	21.8	0	22.4	W	0	5	2.5	129.4	0	0	25	2.5	127.1	0	0	50	2.6	125.9	0	0
6	56:45	N 31°42.650'	E138°15.700'	00	13.2	32.4	0	13.7	21.7	0	22.3	W	0	5	2.5	129.0	0	0	25	2.5	126.4	0	0	50	2.6	125.3	0	0
7	56:48	N 31°42.670'	E138°15.730'	00	13.3	32.2	0	13.7	21.7	0	22.5	W	0	5	2.4	128.3	0	0	25	2.5	125.5	0	0	50	2.6	124.5	0	0
8	56:51	N 31°42.690'	E138°15.730'	00	13.3	32.3	0	13.7	21.7	0	23.3	W	0	5	2.4	127.8	0	0	25	2.5	124.7	0	0	50	2.6	123.9	0	0
9	56:54	N 31°42.690'	E138°15.730'	00	13.2	32.2	0	13.7	21.7	0	23.5	W	0	5	2.4	127.6	0	0	25	2.5	124.4	0	0	50	2.6	123.6	0	0
10	56:57	N 31°42.690'	E138°15.740'	00	13.2	32.1	0	13.7	21.6	0	24.0	W	0	5	2.4	127.5	0	0	25	2.5	124.1	0	0	50	2.6	123.4	0	0
11	57:00	N 31°42.710'	E138°15.740'	00	13.3	32.0	0	13.7	21.4	0	23.3	W	0	5	2.4	127.1	0	0	25	2.5	123.7	0	0	50	2.5	123.0	0	0
12	57:03	N 31°42.710'	E138°15.740'	00	13.4	32.0	0	13.6	21.3	0	23.2	W	0	5	2.4	126.4	0	0	25	2.5	123.1	0	0	50	2.5	122.5	0	0
13	57:06	N 31°42.730'	E138°15.770'	00	13.4	31.6	0	13.6	21.3	0	23.4	W	0	5	2.4	125.7	0	0	25	2.5	122.7	0	0	50	2.5	122.0	0	0
14	57:09	N 31°42.740'	E138°15.760'	00	13.4	30.8	0	13.7	21.3	0	24.2	W	0	5	2.4	125.2	0	0	25	2.4	122.3	0	0	50	2.5	121.6	0	0
15	57:12	N 31°42.740'	E138°15.760'	00	13.4	30.5	0	13.6	21.3	0	24.1	W	0	5	2.4	124.7	0	0	25	2.4	121.9	0	0	50	2.5	121.3	0	0
16	57:15	N 31°42.750'	E138°15.770'	00	13.4	30.4	0	13.6	21.3	0	23.4	W	0	5	2.3	124.2	0	0	25	2.4	121.6	0	0	50	2.4	120.9	0	0
17	57:18	N 31°42.770'	E138°15.790'	00	13.4	30.2	0	13.6	21.4	0	24.0	W	0	5	2.3	123.7	0	0	25	2.4	121.3	0	0	50	2.4	120.6	0	0
18	57:21	N 31°42.770'	E138°15.790'	00	13.4	30.0	0	13.6	21.5	0	23.0	W	0	5	2.3	123.2	0	0	25	2.3	121.0	0	0	50	2.4	120.3	0	0
19	57:24	N 31°42.790'	E138°15.790'	00	13.4	29.4	0	13.5	21.5	0	23.1	W	0	5	2.2	122.8	0	0	25	2.3	120.7	0	0	50	2.4	120.1	0	0
20	57:27	N 31°42.800'	E138°15.800'	00	13.4	29.3	0	13.5	21.6	0	22.5	W	0	5	2.2	122.4	0	0	25	2.3	120.5	0	0	50	2.3	119.9	0	0
21	57:30	N 31°42.800'	E138°15.800'	00	13.3	28.9	0	13.5	21.7	0	22.5	W	0	5	2.2	122.2	0	0	25	2.3	120.5	0	0	50	2.3	119.9	0	0
22	57:33	N 31°42.820'	E138°15.820'	00	13.3	28.9	0	13.5	21.6	0	22.2	W	0	5	2.1	122.0	0	0	25	2.2	120.4	0	0	50	2.3	119.8	0	0
23	57:36	N 31°42.830'	E138°15.820'	00	13.3	28.6	0	13.5	21.7	0	22.2	W	0	5	2.1	121.8	0	0	25	2.2	120.3	0	0	50	2.3	119.8	0	0
24	57:39	N 31°42.830'	E138°15.820'	00	13.5	28.4	0	13.5	21.8	0	23.2	W	0	5	2.1	121.5	0	0	25	2.2	120.1	0	0	50	2.2	119.6	0	0
25	57:42	N 31°42.850'	E138°15.840'	00	13.4	28.3	0	13.5	22.0	0	23.5	W	0	5	2.1	121.3	0	0	25	2.2	120.0	0	0	50	2.2	119.5	0	0
26	57:45	N 31°42.860'	E138°15.840'	00	13.4	27.9	0	13.5	22.2	0	23.5	W	0	5	2.0	121.2	0	0	25	2.1	119.9	0	0	50	2.2	119.4	0	0
27	57:48	N 31°42.860'	E138°15.840'	00	13.3	27.5	0	13.5	22.4	0	23.5	W	0	5	2.0	121.2	0	0	25	2.1	119.8	0	0	50	2.2	119.4	0	0
28	57:51	N 31°42.880'	E138°15.850'	00	13.3	27.4	0	13.5	22.6	0	24.1	W	0	5	2.0	121.3	0	0	25	2.1	119.7	0	0	50	2.1	119.3	0	0
29	57:54	N 31°42.890'	E138°15.870'	00	13.4	27.8	0	13.5	22.5	0	22.4	W	0	5	1.9	121.2	0	0	25	2.1	119.6	0	0	50	2.1	119.2	0	0
30	57:57	N 31°42.890'	E138°15.870'	00	13.5	27.2	0	13.5	22.5	0	23.1	W	0	5	1.9	121.1	0	0	25	2.0	119.4	0	0	50	2.1	119.0	0	0
31	58:00	N 31°42.900'	E138°15.870'	00	13.6	26.8	0	13.5	22.5	0	22.3	W	0	5	1.9	121.0	0	0	25	2.0	119.1	0	0	50	2.1	118.8	0	0
32	58:03	N 31°42.920'	E138°15.900'	00	13.6	27.1	0	13.4	22.2	0	23.2	W	0	5	1.9	120.7	0	0	25	2.0	118.8	0	0	50	2.1	118.5	0	0
33	58:06	N 31°42.920'	E138°15.900'	00	13.6	27.6	0	13.4	22.3	0	23.5	W	0	5	1.9	120.5	0	0	25	2.0	118.5	0	0	50	2.1	118.1	0	0
34	58:09	N 31°42.930'	E138°15.900'	00	13.7	28.1	0	13.4	22.4	0	23.3	W	0	5	1.9	120.2	0	0	25	2.0	118.1	0	0	50	2.0	117.7	0	0
35	58:12	N 31°42.960'	E138°15.910'	00	13.7	28.5	0	13.4	22.5	0	22.5	W	0	5	1.8	119.9	0	0	25	2.0	117.7	0	0	50	2.0	117.3	0	0
36	58:15	N 31°42.960'	E138°15.910'	00	13.7	28.5	0	13.5	22.5	0	23.1	W	0	5	1.8	119.6	0	0	25	2.0	117.4	0	0	50	2.0	116.9	0	0
37	58:18	N 31°42.970'	E138°15.910'	00	13.7	28.3	0	13.5	22.6	0	22.2	W	0	5	1.8	119.4	0	0	25	2.0	117.1	0	0	50	2.0	116.5	0	0
38	58:21	N 31°42.980'	E138°15.920'	00	13.7	28.3	0	13.5	22.5	0	23.1	W	0	5	1.8	119.2	0	0	25	1.9	116.8	0	0	50	2.0	116.2	0	0
39	58:24	N 31°42.980'	E138°15.920'	00	13.6	28.2	0	13.5	22.5	0	23.2	W	0	5	1.8	119.0	0	0	25	1.9	116.6	0	0	50	2.0	115.9	0	0
40	58:27	N 31°43.000'	E138°15.930'	00	13.6	28.2	0	13.5	22.5	0	23.5	W	0	5	1.8	118.9	0	0	25	1.9	116.4	0	0	50	2.0	115.6	0	0
41	58:30	N 31°43.010'	E138°15.930'	00	13.7	28.5	0	13.5	22.5	0	24.0	W	0	5	1.8	118.7	0	0	25	1.9	116.1	0	0	50	2.0	115.2	0	0
42	58:33	N 31°43.010'	E138°15.930'	00	13.7	29.0	0	13.5	22.4	0	23.5	W	0	5	1.8	118.5	0	0	25	1.9	115.8	0	0	50	2.0	114.9	0	0
43	58:36	N 31°43.020'	E138°15.950'	00	13.6	28.9	0	13.6	22.4	0	24.1	W	0	5	1.8	118.3	0	0	25	1.9	115.7	0	0	50	2.0	114.7	0	0
44	58:39	N 31°43.040'	E138°15.960'	00	13.6	28.7	0	13.5	22.5	0	23.2	W	0	5	1.8	118.2	0	0	25	1.9	115.6	0	0	50	2.0	114.6	0	0
45	58:42	N 31°43.040'	E138°15.960'	00	13.5	29.0	0	13.5	22.6	0	22.4	W	0	5	1.8	118.2	0	0	25	1.9	115.5	0	0	50	2.0	114.4	0	0
46	58:45	N 31°43.050'	E138°15.970'	00	13.5	29.2	0	13.5	22.7	0	22.3	W	0	5	1.8	118.1	0	0	25	1.9	115.4	0	0	50	2.0	114.3	0	0
47	58:48	N 31°43.060'	E138°15.970'	00	13.4	28.5	0	13.6	22.9	0	22.4	W	0	5	1.8	118.2	0	0	25	1.9	115.4	0	0	50	2.0	114.2	0	0
48	58:51	N 31°43.060'	E138°15.970'	00	13.4	27.8	0	13.7	22.8	0	22.3	W	0	5	1.8	118.3	0	0	25	1.9	115.4	0	0	50	2.0	114.2	0	0
49	58:54	N 31°43.080'	E138°15.980'	00	13.3	27.5	0	13.7	22.6	0	22.0	W	0	5	1.8	118.4	0	0	25	1.9	115.4	0	0	50	2.0	114.2	0	0
50	58:57	N 31°43.100'	E138°16.000'	00	13.2	27.4	0	13.7	22.6	0	22.1	W	0	5	1.8	118.6	0	0	25	1.9	115.5	0	0	50	2.0	11		

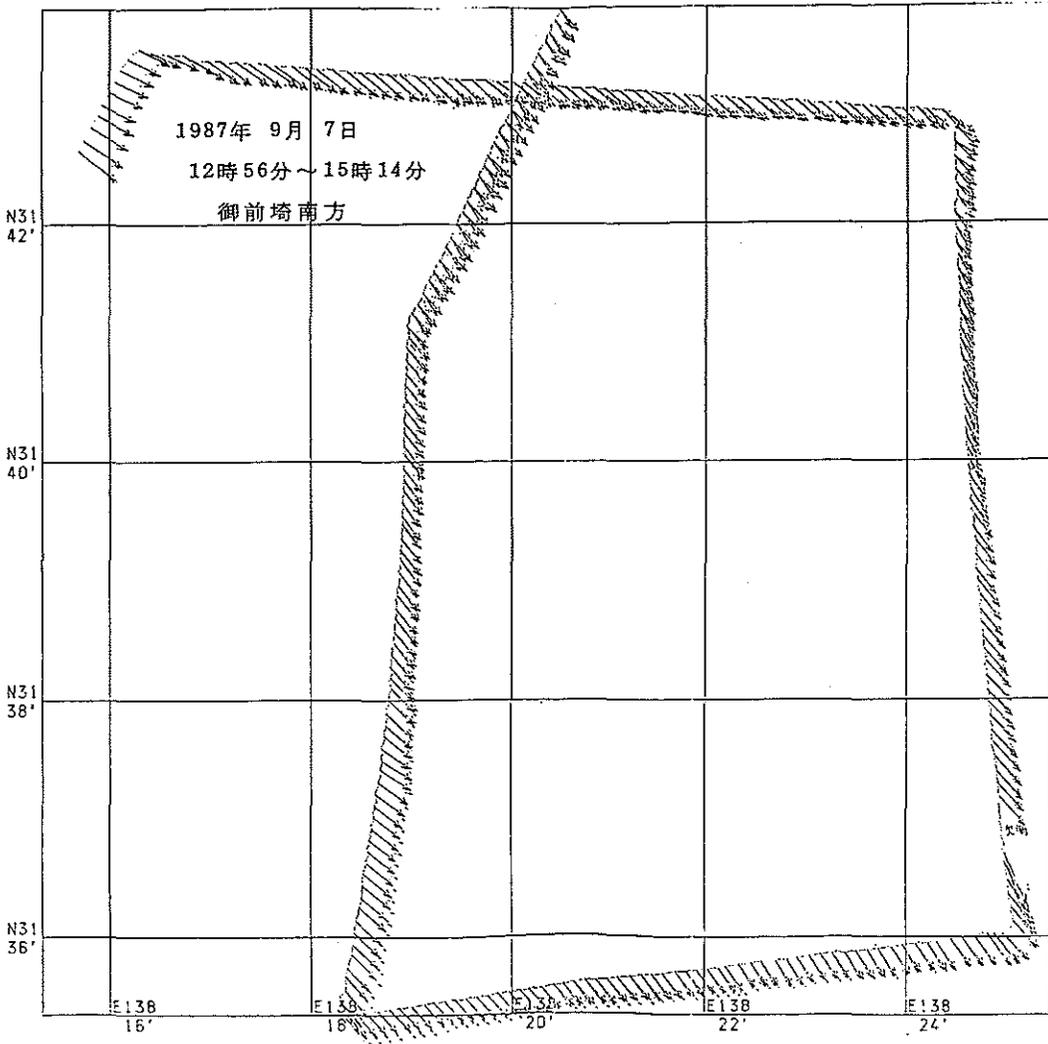


Figure 8. Surface current velocities obtained by the measurement system in Figure 7.

7. むすび

海水の流れ、温度分布、塩分濃度等は、海洋学の基本的な測定量であるが、このうち流れの測定が最も難いとされる。この報告で述べた新しい方式の電波速度計と音波ログを組み合わせた音波流速計が海洋学の今後の発展に寄与できれば幸いである。また、この電波速度計の原理に基づき、船舶等動揺体上でも $\pm 1 \times 10^{-10}$ 程度の周波数の測定が可能である。原子周波数標準等高安定発信器の周波数安定度の船舶・自動車等における動揺性能の測定にも利用できる。他分野への応用を期待したい。

本研究の実施にあたり、水路部海洋調査課の関係者及び測量船「昭洋」の乗組員の方々から協力がありましたことを記して感謝いたします。

参 考 文 献

小野房吉：電波航法の新しい測位原理，水路部研究報告18，p. 133～144，(1983)

小野房吉：電波航法の新しい測位原と測位精度の評価，航海学会誌，航海，79，p. 35～40，(1984)