

# 超音波流速計による海潮流データ処理方式に関する研究 (ロランC電波を利用した対地速度の高精度測定)

小野房吉 : 海洋研究室

## Study of Sea Current Measurement by Doppler-Log

(High Accuracy Measurement of Ground Velocity use the Loran-C Systems)

Fusakichi Ono : Marine Research Laboratory

### 1. まえがき

ロランCは、船舶等が測位するための無線航行援助システムで、利用する電波は地表波の遠達性に優れた長波である。従って、広範な地域で比較的精度の高い測位が可能であり、これを利用する市販の測位装置の最小測位解能は $\pm 0.01'$ である。しかし、この分解能ではこの結果を用いて対地速度を求める場合、 $\pm 0.1\text{kn}$ の精度を得るには数分間以上の長時間平均が必要で、超音波流速計(音波ログを利用した海潮流測定装置)の対地速度計としては精度不足である。

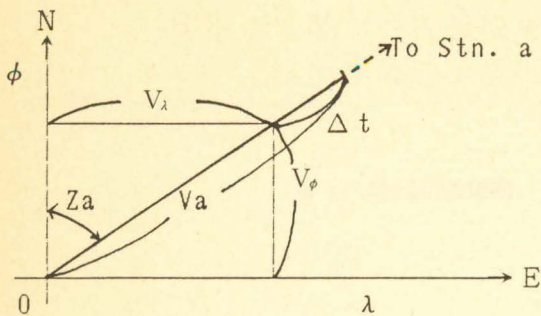
音波ログは船底から指向性の鋭い数条の超音波ビームを所定の方向に発射し、海中及び海底反射音のドップラ周波数を測定して対地速度、水の各層に対する対水速度及び海潮流が対地対水速度の差として船首方向に対して求まる装置である。しかし、この装置がそれ自身で測定できる対地速度の水深には限界(最良の時点で約400m)があり、大水深の海域では利用できない。そこで当庁では音波ログにロランC測位装置を組み合わせ対地速度を求め大水深での測流を可能にした。ところがこの装置の対地速度測定精度は前述のとおりで、音波ログの性能が十分に発揮できず、この改善が緊急な課題であった。

筆者は、問題はロランC電波そのものにあるわけではなく、在来のロランC測位装置の取得位置をそのまま速度変換するという安易な利用方法にあることを指摘した。

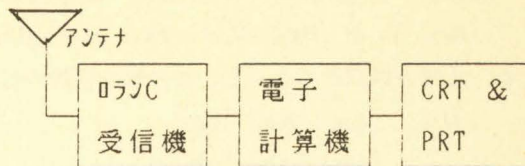
この報告では、ロランC電波受信データから速度成分を検出するのに、従来のように一旦時間差測定データを測地位置に変換後、位置の時間的変化から、速度を求めるのではなく、直接測定データに含まれる速度成分を高精度に抽出する新しい方法を考案し、この方法で検出した速度成分と対地速度を結び付ける方程式を立て、これを解くことにより対地速度を求めることとした電波速度計について述べる。さらにこの原理を本州南方で3秒間隔で取得したロランC時間差データに適用し、1~2分間程度の測定データから $\pm 0.1\text{kn}$ の精度が確保でき、従来より数倍の精度向上があったことを報告する。

### 2. 原理

複数の局で構成される無線航行援助システムの電波を移動体上で受信すると、各電波発射局の方向成分のドップラ周波数または位相差が検出される。これは、その移動体のその局方向の速度成分であるから、このそれぞれの局に対するデータを  $V_a, V_b, V_c, \dots$  としたとき、このデータに対する観測方程式を作る。その前に先ず利用した各電波発射局及び受信点の測地経緯度より、受信点から見た電波発射局の方位を次



第1図 観測方程式の図解



第2図 電波速度計の構成

式で計算する。電波発射局の測地経緯度を  $\lambda_1, \phi_1$ 、受信点の測地経緯度を  $\lambda_2, \phi_2$  とすれば、両点間の角距離  $\chi$  の余弦は

$$\cos \chi = \sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos (\lambda_1 - \lambda_2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sin \chi = \sqrt{1 - \cos^2 \chi} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\theta = \cos^{-1}((\sin \phi_1 - \sin \phi_2 \cos \chi) / (\sin \chi \cos \phi_2)) \quad \dots\dots\dots (3)$$

これから方位  $Z$  は

$$\sin (\lambda_1 - \lambda_2) \geq 0 \text{ のとき } Z = \theta, \sin (\lambda_1 - \lambda_2) < 0 \text{ のとき } Z = 2\pi - \theta \quad \dots\dots\dots (4)$$

この方位を使って、当該データを緯度経度方向成分に分解する方程式は

(第1図参照)

$$\left. \begin{aligned} V_a &= V_\phi \cos Z_a + V_\lambda \sin Z_a + \Delta t \\ V_b &= V_\phi \cos Z_b + V_\lambda \sin Z_b + \Delta t \\ &\vdots \\ V_i &= V_\phi \cos Z_i + V_\lambda \sin Z_i + \Delta t \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

( $i$  は各局に対応)

ただし  $V_\phi$  : 緯度方向速度成分

$V_\lambda$  : 経度方向速度成分

$\Delta t$  : 基準パルスの位相ドリフト

となる。これは1局のデータについて1つの方程式が対応している。これを解いて未知数が決定できれば船速が求まる。この場合方程式に含まれる未知数は  $V_\phi, V_\lambda, \Delta t$  の3つであるから、互いに方向の違った3つの局のデータがあれば未知数の解が得られる。(3)式の方位計算で地球の楕円体補正を無視しているが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)送受信点の位置の多少の違いは方位を殆ど変化させないので問題はない。

**方程式の解法 :**

前述のごとくこの方程式は、3つの未知数をもつので同時に取得された互いに方向の異なる3局のデータがあれば解けるが、4局以上あればデータのばらつきによる精度低下が少なくなり、さらに好結果が得られる。ここでは、こうした多数データがある場合の最小二乗法的解法について説明する。方程式の係数、定数を  $a_i = \cos Z_i, b_i = \sin Z_i, c_i = 1, d_i = V_i$  と置きこれらの  $i = a \sim n$  までの以下の積和

$[a_1a_1], [a_1b_1], [a_1c_1], [a_1d_1], [d_1b_1], [b_1c_1], [b_1d_1], [c_1c_1], [c_1d_1]$ , を計算する。

この計算値より正規方程式は

$$\left. \begin{aligned} [a_1a_1] V_\phi + [b_1a_1] V_\lambda + [c_1a_1] \Delta t &= [d_1a_1] \\ [a_1b_1] V_\phi + [b_1b_1] V_\lambda + [c_1b_1] \Delta t &= [d_1b_1] \\ [a_1c_1] V_\phi + [b_1c_1] V_\lambda + [c_1c_1] \Delta t &= [d_1c_1] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

となる。正規方程式ができると、この解は係数の行列式から機械的に計算できる。

$$D = \begin{vmatrix} [a_1a_1] & [b_1a_1] & [c_1a_1] \\ [a_1b_1] & [b_1b_1] & [c_1b_1] \\ [a_1c_1] & [b_1c_1] & [c_1c_1] \end{vmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

$$V_\phi = (1/D) \begin{vmatrix} [d_1a_1] & [b_1a_1] & [c_1a_1] \\ [d_1b_1] & [b_1b_1] & [c_1b_1] \\ [d_1c_1] & [b_1c_1] & [c_1c_1] \end{vmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

$$V_\lambda = (1/D) \begin{vmatrix} [a_1a_1] & [d_1a_1] & [c_1a_1] \\ [a_1b_1] & [d_1b_1] & [c_1b_1] \\ [a_1c_1] & [d_1c_1] & [c_1c_1] \end{vmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta t = (1/D) \begin{vmatrix} [a_1a_1] & [b_1a_1] & [d_1a_1] \\ [a_1b_1] & [b_1b_1] & [d_1b_1] \\ [a_1c_1] & [b_1c_1] & [d_1c_1] \end{vmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

こうして、各局の時間差測定データが緯度経度方向の速度成分に変換できる。これから求める速度の絶対値V及び進行方向Zは

$$V = \sqrt{(V_\phi^2 + V_\lambda^2)} \dots\dots\dots (11)$$

$$\theta = \cos^{-1} (V_\phi / V) \dots\dots\dots (12)$$

北から東回わりにとった移動方向をZとすると

$$V_\lambda \geq 0 \text{ のとき } Z = \theta, \quad V_\lambda < 0 \text{ のとき } Z = 2\pi - \theta \dots\dots\dots (13)$$

$\Delta t$  は、受信点基準パルスの利用電波発射システム基準に対する位相変化である。

この  $\Delta t$  の導入で基準発信器のドリフト誤差が分離する。

ところで、これまでの説明では受信点の基準パルスに対して受信波の位相を測定したデータについて述べた。しかし、この方式では従来の双曲線航法方式受信機で取得した時間差又は位相差データでもそのまま解ける。その理由は(7)式で  $\Delta t$  を導入しているからである。この値はどのような値でも取り得るから、この説明の受信点の基準パルスは主局電波到来時に同期してもよい。これは言い換えれば基準パルスを主局電波到来時に置き換えたのと同様であることを意味する。そこでこの場合は主局対応データ  $D_m$  を“0=”とした次の方程式を作り(5)式の連立方程式に加えて解く。

$$0 = V_\phi \cos Z_m + V_\lambda \sin Z_m + \Delta t \dots\dots\dots (14)$$

こうして、双曲線方式データを使って解かれる  $\Delta t$  は、受信点の主局方向速度成分でドップラ周波数に対応する。

**基準発信器の周波数安定度の測定：**

(10)式で求めた  $\Delta t$  は、言い換えれば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である。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利用できる。この場合の周波数偏差  $\Delta f$  は、(19) 式に於ける単位換算定数、及び測定単位が  $\mu s$  であることを考慮して

$$\Delta f = \Delta t / (\nu \times 3600 \times 1/1852) \text{ (Hz)} \quad \dots\dots\dots (15)$$

となる。固定点に於ける  $\Delta f$  は方程式を解くまでもなく(19)式の単位換算を行わず単に

$$\Delta f = D/n^2 \text{ (Hz)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

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。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。

### 3. 測定データ

通常ロランC受信機の時間差測定データTDの精度は  $\pm 1\mu s$  であるから、これから速度成分  $V_a, V_b, \dots$  等を常識的な方法で求めても高精度は得られないから特別な工夫が必要である。

無線航行援助システムの電波を受信し、受信点の基準パルスに対して、到来時間差を主従局全部について一定時間毎に連続測定する。こうして測定される  $a, b, c, \dots$  各局毎のデータをそれぞれ  $a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots, c_1, c_2, \dots$  とし次の隔差

$$\left. \begin{array}{l} (a_{n+1}-a_1), (a_{n+2}-a_2), \dots, (a_{n+1}-a_i) \\ (b_{n+1}-b_1), (b_{n+2}-b_2), \dots, (b_{n+1}-b_i) \\ (c_{n+1}-c_1), (c_{n+2}-c_2), \dots, (c_{n+1}-c_i) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

を計算する。

ここで、この計算値は受信点が送信局に対して視線方向に移動しているときに生じる変化であるから移動していなければ"0"となる性質のものである。さらに次式で隔差の和を計算する。

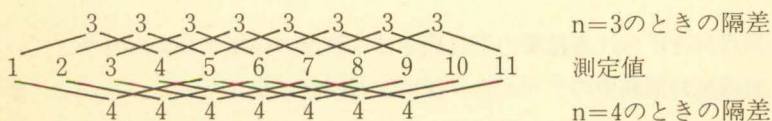
$$D a = (a_{n+1}-a_1) + (a_{n+2}-a_2) + \dots + (a_{n+1}-a_i) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$i = i \sim n$

同様な方法で  $b, c$  各局についても  $D b, D c$  を求める。こうして求められる  $D a, D b, D c$  は、受信点が送信局に対して相対的に移動することによって生ずる測定位相変化の  $n \times n$  に相当する。このことを更に具体的な数値について説明する。

今、全く同じ繰りかえしのパルス列を作る2つのパルスジェネレータA, Bがあるとす。そこでA, Bの位相差を電波を介してBジェネレータの点で測定すると、両者が相対運動をしていないときその値は一定であり、AがBに対して視線方向に等速で遠ざかるとき一定の増加を示して、その方向の速度成分が検出できる。つまり電波は1マイクロ秒で300m進むから、受信点が秒速300mで遠ざかれば1秒毎の測定値は1マイクロ秒づつ増加することになる。この単位時間毎の増分が速度成分である。

そこで1秒毎に測定した測定値の数値を1, 2, 3, 4, 5, ……とし、それについて(18)式を計算してみる。



(16)式の  $n = 3$  とすれば  $a = 1, a_{n+1} = 4$  となることは上の数列から明らかである。第1項(括弧内)は数列

第2行の3個置きの差で第1行のとおり3である。同様に第2項も3である。従って、 $i=n=3$ ということは、この3個の和で当然9である。又、 $n=4$ とすると(1)式の各項は数列第3行のとおり4となり和は16となる。このように(18)式によれば速度に対応する位相変化の測定値が拡大して測定されることが分かる。こうして測定される速度成分は

測定単位を  $\mu\text{s}$  (マイクロ秒)、電波伝播速度を  $\nu(\text{m}/\mu\text{s})$ 、測定時間間隔を  $t$  秒、速度成分を  $V(\text{kn}\cdot\text{ノット})$ 、(1)式で計算された測定量を  $D$  としたとき

$$V_i = (D \cdot \nu \times 3600) / (n^2 t \times 1852) \dots\dots\dots (19)$$

( $i$  : 当該局に対応)

で、分解能が  $(n^2 \cdot t)$  倍となる。

#### 4. 装置の設計例

時間差測定の基本として、受信点に標準発信器を備え、これに対する到来時間差を測定できる新たなロランC受信機を設計することが理想的であるが、在来のロランC受信機を用いても、この方法は効果が期待できる。

第2図にこうした一部市販品を使って設計した電波速度計のブロック図を示した。1は受信アンテナ、2はロランC受信機で、時間差データとこれから計算した測地経緯度を出力している。3は2のデータを受け(1)式以下(17)式までの演算を行う電子計算機、4は測定結果の収録又は表示器である。

#### 5. 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)」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受信機で、従来の方法で3秒毎に時間差測定データと位置データを取得収録してオフラインで、この提案の方法で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表に示した。この表で1～17字は日付と時刻、19～36字はロランCデータ、38～57字は緯度と経度、61～70字は進路と速度、74～78字は主局電波のドップラ周波数換算値で単位は $10^{-10}$ 、80～85字は主局電波の到来方向。

第3図は新方式電波速度計と音波ログを組み合わせた超音波流速計で実際に太平洋で測流した結果である。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がなければ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、転回点における転回前と転回後の測流の整合、交点における測流の再現性が見事に示されている。

第4図に従来の方法で第3図と同時に測流した結果を掲げた。第3図と対比して御覧頂きたい。

#### 6. 測流についての考察

音波ログを用いた測流で、転回点付近における結果の不自然さは本装置の採用当初から分かっていたので、こうした点での測流結果は捨て直線航行期間中のデータのみ採用する指針となっている。しかし、厳密に考えると、船舶はコースを真っすぐにとっても波、風、流れ等の非一様性によって対地的には曲げられるので、必ずしも真っすぐには走れるものではない。従って、こうした航行コースの取り方による誤差発生は、データの品質を低下させるばかりではなく、データの取得効率を低下させるので早急な改善が望まれる。

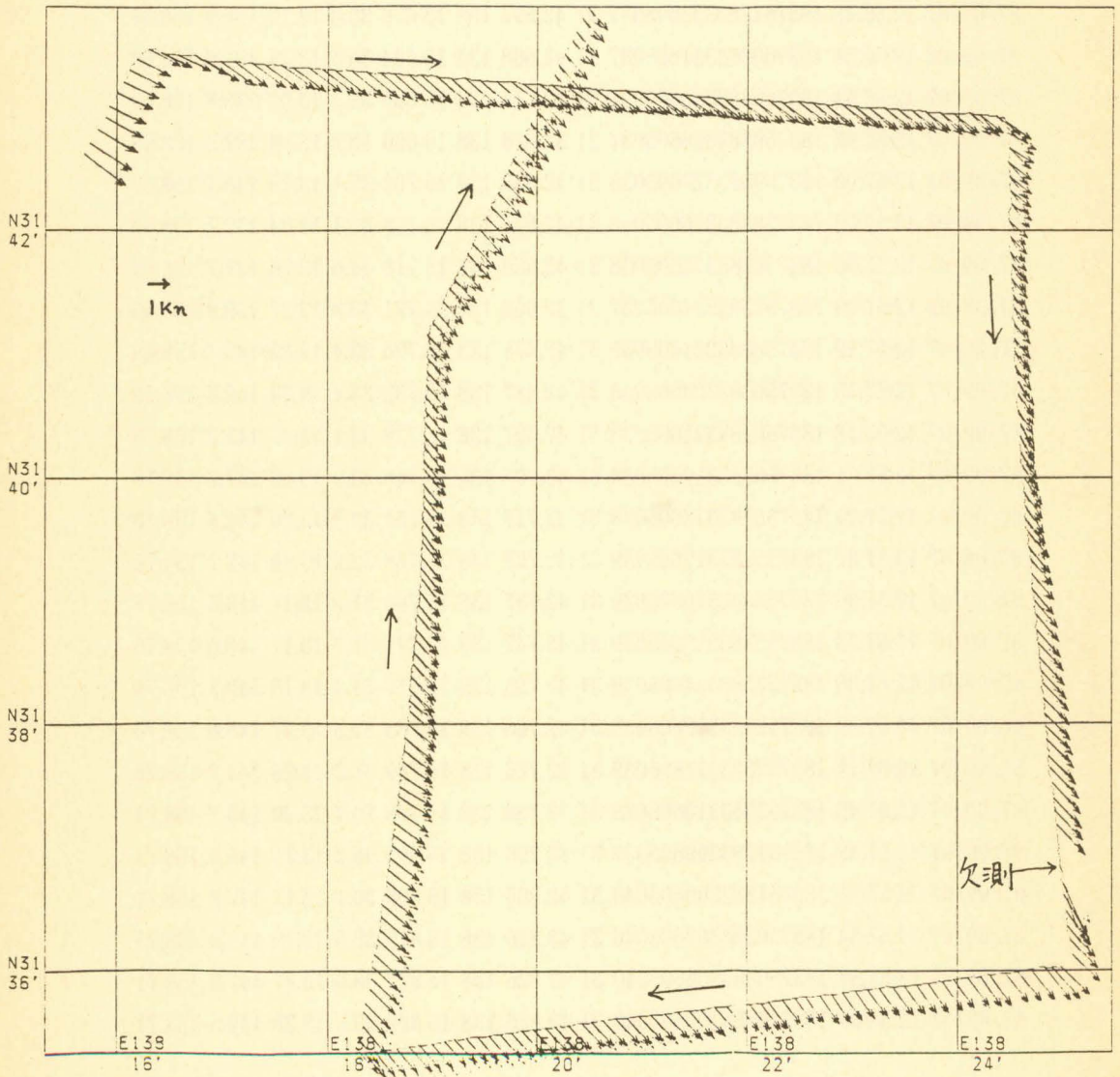
第1表 新方式電波速度計測定結果の例

DATE	TIME	---	DATA	---	LAT.	LONG.	HED	SPD	df	Zm
Y M D	h m s	W	X	Y	° '	° '	°	kn	10 <sup>-10</sup>	°
87/09/07	12:56:30		183764383339605036		31 42.537	138 15.641	35.3	12.88	135.6	158.68
87/09/07	12:56:33		183763383338605036		31 42.547	138 15.646	35.6	12.84	132.5	158.68
87/09/07	12:56:36		183763383336605036		31 42.557	138.15.652	35.5	12.91	134.8	158.68
87/09/07	12:56:39		183762383335605037		31 42.567	138 15.659	35.6	12.97	133.7	158.68
87/09/07	12:56:42		183762383334605036		31 42.577	138 15.665	35.4	13.02	135.3	158.68
87/09/07	12:56:45		183761383333605037		31 42.587	138 15.671	35.5	13.10	135.1	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	35.5	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		1837593833328605037		31 42.628	138 15.696	35.2	13.08	137.2	158.69
87/09/07	12:57:00		1837593833327605038		31 42.638	138 15.702	35.1	13.15	136.4	158.69
87/09/07	12:57:03		1837583833326605038		31 42.648	138 15.708	35.1	13.24	137.7	158.69
87/09/07	12:57:06		1837583833325605038		31 42.658	138 15.716	34.6	13.26	137.7	158.69
87/09/07	12:57:09		1837573833324605037		31 42.668	138 15.721	33.8	13.27	139.9	158.69
87/09/07	12:57:12		1837563833324605038		31 42.678	138 15.726	33.4	13.23	140.7	158.69
87/09/07	12:57:15		1837563833323605038		31 42.687	138 15.732	33.4	13.24	140.8	158.69
87/09/07	12:57:18		1837563833321605038		31 42.697	138 15.738	33.1	13.27	141.2	158.70
87/09/07	12:57:21		1837563833319605038		31 42.707	138 15.745	32.9	13.27	141.7	158.70
87/09/07	12:57:24		1837553833318605038		31 42.717	138 15.751	32.3	13.20	142.8	158.70
87/09/07	12:57:27		1837553833317605038		31 42.727	138 15.758	32.2	13.20	142.7	158.70
87/09/07	12:57:30		1837543833316605039		31 42.737	138 15.765	31.7	13.17	143.5	158.70
87/09/07	12:57:33		1837533833315605039		31 42.747	138 15.771	31.7	13.17	143.6	158.70
87/09/07	12:57:36		1837533833314605039		31 42.756	138 15.776	31.4	13.15	143.2	158.70
87/09/07	12:57:39		1837523833312605039		31 42.766	138 15.783	31.3	13.27	145.6	158.70
87/09/07	12:57:42		1837523833311605039		31 42.776	138 15.789	31.2	13.25	144.7	158.70
87/09/07	12:57:45		1837523833310605039		31 42.786	138 15.796	30.7	13.20	146.7	158.71
87/09/07	12:57:48		1837513833309605039		31 42.796	138 15.803	30.2	13.11	146.6	158.71
87/09/07	12:57:51		1837513833308605040		31 42.806	138 15.808	30.1	13.12	147.2	158.71
87/09/07	12:57:54		1837503833307605040		31 42.816	138 15.815	30.6	13.19	145.9	158.71
87/09/07	12:57:57		1837503833306605040		31 42.826	138 15.822	30.0	13.27	147.2	158.71
87/09/07	12:58:00		1837493833305605040		31 42.836	138 15.829	29.5	13.38	149.5	158.71

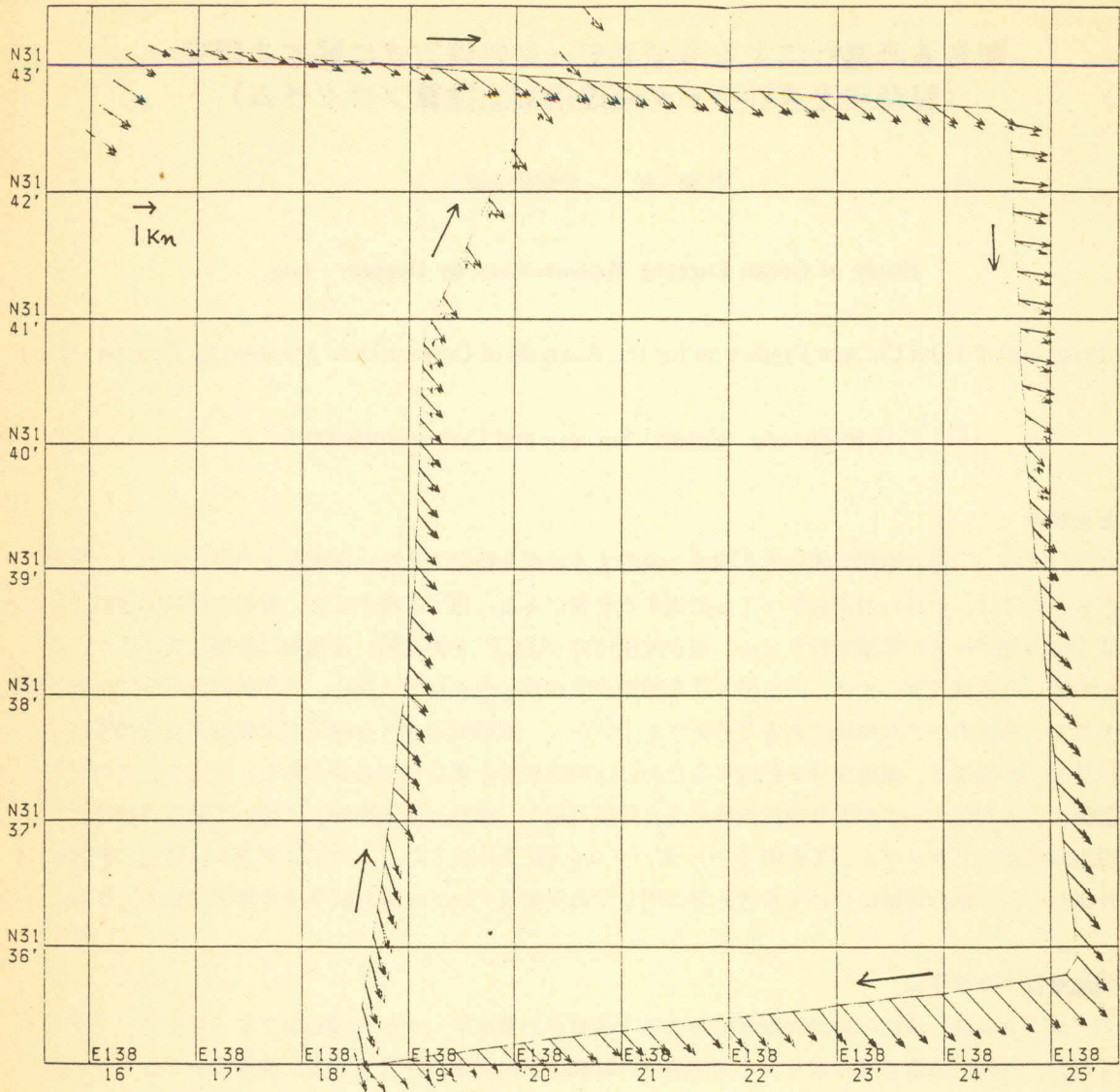
## 7. むすび

この研究は、昭和61～62年度に水路部で実施している「超音波流速計のデータ処理方式に関する研究」の一環として実施した。この研究の課題は、(1)深海域での対地速度測定精度の向上、(2)流成分の分離、(3)船舶動揺による影響の除去であるが、この報告の方法で対地速度測定については平均時間の短縮にも拘らず所期の精度が得られ問題解決の目途がついた。今後はその他の問題の解決とこの方式を実際の装置へ導入し様々の観測状況のもとで安定なデータ取得に耐えるプログラムの開発に取り組む予定である。

最後に本研究の実施にあたり海洋調査課の関係者、測量船「昭洋」の乗組員の方々、古野電気(株)青山、石原両氏の協力がありました。記して感謝いたします。



第3図 新ロランC電波速度計と音波ログを組み合わせた測流結果  
 1987年9月7日12時57分～15時14分で一辺30分  
 水深5,25,50m各層流速の重ね書き、矢符の間隔は0.5分間



第4図 従来のロランC電波速度計と音波ログを組み合わせた測流結果  
 1987年9月7日12時57分～15時14分で一辺30分間  
 水深5,25,50m各層流速の重ね書き、矢符の間隔は1分間

報告者紹介



Fusakichi Ono

小野房吉 昭和63年3月現在、  
 本庁水路部企画課海洋研究室研究官