

研究ノート

2 軸電磁ログを使用する海流観測における バイアス誤差の補正方法

田中友規*

Development of Bias error Correcting Method for Ocean Current Velocity Measured
by Using Electromagnetic Log with Dual-axis Sensors

Tomonori TANAKA

Abstract

The trajectory prediction of drifting matter is always important for rescue operations on the sea. The ocean current for the prediction is usually observed by ADCP equipped on vessels of Japan Coast Guard. Recently a newly built high-speed vessel is equipped with an electromagnetic log with dual-axis sensors (EM 2 log) taking the place of ADCP, not to spoil its navigational capability. So we were required the evaluation of the ocean current observed by using EM 2 log and the development of processing methods for it. As the results of sea trials, we found a conspicuous bias error included in measured ocean current velocity. The bias error includes misalignment error and scale error, which are also contained in the ocean current observed by ship board ADCP. Although the method to reduce bias error is basically the same with that for ADCP data, dataset for correction of bias error should be prepared for each vessel in various vessel-speeds. This paper shows a solution method to determine the dataset, named 'Random Cruising Method'.

1 はじめに

1.1 ADCP に代わる海流観測機器の必要性

海上保安庁では、海難に伴い人や環境汚染物質が漂流した際に、効果的かつ効率的に人命救助及び海洋環境保護を行うための漂流予測を実施している。漂流予測計算は、漂流開始地点、海の流れ（以下、「海流」）、風、漂流物の特性を基になされるが、海流の代表的な観測手段として ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, 以下「ADCP」) を搭載した巡視船があり、搜索時の海流をリアルタイムに観測している。今日、巡視船の高速化対応のために ADCP に代わる新たな海

流観測機器が求められており、海上保安庁海洋情報部では「2 軸電磁ログ」を使用する海流観測を検討している。

電磁ログは、人工的に作られる磁界の中に 1 対の電極を配置し、ファラデーの電磁誘導法則を利用して船首-船尾方向の対水船速（いわゆる「船速」と呼ばれる）を計測する機器であり、船速距離計の 1 つとして使用されている。2 軸電磁ログは、2 対の電極を配置して船首-船尾方向とこれに直交する左右方向の対水船速を計測する機器であり、通常の電磁ログと比較して離着岸の際などに左右方向の対水船速を知る利点を有する。2 軸

†Received December 25, 2006 ; Accepted March 20, 2007.

* 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

電磁ログのセンサー部は直径約 5 cm で、船底から 1 cm 程度突出させている。2 軸電磁ログの製造・販売会社によると、2 軸電磁ログは国内外を通じて 1 社のみが製造している。

以後、海流を ADCP と 2 軸電磁ログのいずれで観測したかを区別する場合、それぞれを「ADCP 海流」、「EM 2 海流」と呼ぶ。

1.2 ADCP 海流の算出過程に見る EM 2 海流に必要な補正

2 軸電磁ログを使用する海流観測は、ADCP を使用する海流観測^{注1)}と同様に、2 軸電磁ログ (ADCP 使用のときは、ADCP) が計測する対水船速、測位装置 (一般には GPS) の情報から計算される対地船速、船舶搭載のジャイロコンパスの指示方位を得て、これらから海流を算出する。ADCP は 1970 年代に実用化が図られ、その出現以前に用いられていた GEK (電磁流速計: Geomagnetic Electro-Kinotograph) と比較して、容易かつ迅速に海面下の複数層の対水船速が計測できる利点から、今日では船舶搭載型の海流観測機器として確たる地位を築いている。このため ADCP 海流のクオリティ向上のための提案が多くあり、2 軸電磁ログを使用する海流観測においてもこれらの提案が参考になる。

ADCP 海流のクオリティ向上の方法は、気象庁の海洋観測指針 (1999) (以下、「海洋観測指針」) や石井 (2006) などにまとめられている。海洋観測指針では、ADCP 海流の誤差は、平均化やフィルターリングで取り除くことができないバイアス誤差として生じることが多いと指摘したうえで、大きなバイアス誤差の原因として「アライメント誤差」、「スケール誤差」、「ジャイロコンパスの誤差」を挙げている。アライメント誤差は「ADCP の送受信機ビームとジャイロコンパスの回転が流速値に与える誤差」であり、スケール誤差は「真の対水船速と ADCP が計測する対水船速とのスケール差が対水船速に与える誤差」であり、ジャイロコンパスの誤差は、「ジャイロコンパスで一般に言われている速度誤差と緯度誤差」

を指す。石井 (2006) はこれらの他に「ジャイロコンパスの応答の遅延に伴う誤差」、「うねり・波浪に伴う誤差」を挙げている。

2 軸電磁ログを使用する海流観測においてもジャイロコンパスを使用する。うねり・波浪の中での海流観測もある。計測する対水船速のスケール差が生じないという保証はない。ADCP 海流で生じる上記のバイアス誤差が、EM 2 海流でも生じることは十分に考えられる。

本稿では、ADCP 海流に生じるとりわけ大きなバイアス誤差である「アライメント誤差」と「スケール誤差」に着目し、これらのバイアス誤差の補正方法を記した海洋観測指針や石井 (2006) を参考に、EM 2 海流に生じると考えられるこれらの補正を行い、補正後の EM 2 海流の評価を行う。さらに、2 軸電磁ログを使用する海流観測の実用上の問題とその解決法を記す。

なお、本稿で対象とした 2 軸電磁ログ搭載船が使用するジャイロコンパスは、速度誤差と緯度誤差を自動的に補正する機能を有しているため、本稿では「ジャイロコンパスの誤差」は生じないと仮定する。さらに、「ジャイロコンパスの応答の遅延に伴う誤差」は、船舶の変針後の一定時間に観測する海流のフィルターリングで除去できる。「うねり・波浪に伴う誤差」は、有効な補正方法が存在しないことから本稿では無視する。

注 1) 本稿では、ADCP を使用する海流観測は対水モードでの使用を想定している。

2 EM 2 海流のアライメント誤差とスケール誤差の補正式

ADCP を使用する海流観測において、測位装置は一般に GPS が使用され精度も高い。海流の誤差を生むのは対水船速の誤差と考えてよい (石井 (2006)) にもあるとおり、アライメント誤差とスケール誤差は ADCP が計測する対水船速に生じ、これが ADCP 海流にバイアス誤差として引き継がれる。アライメント誤差とスケール誤差を補正するための係数をそれぞれ「アライメント係数」、「スケール係数」とすると、これらの係数の

算出方法は海洋観測指針^{注2)}や石井 (2006) が示している。両者ともに ADCP 搭載船で往復またはこれに近い航走で観測を行い (以下, 「往復観測」), その間は海流が一定かつ対地船速は正しいという前提のもとで定式化を行っている。前者は真の海流を対地船速と真の対水船速から求めるのに対して, 後者は真の海流は観測した海流に ADCP が計測する対水船速と真の対水船速の差分が加わったとして求めることで異なる。2軸電磁ログを使用する海流観測においても, 両者の方法を使用することでアライメント係数とスケール係数を算出することができる。ここでは簡単に触れる。詳細は海洋観測指針や石井 (2006) を参照されたい。

アライメント係数を θ (単位は度: 時計回りが正), スケール係数を k とする。 θ は角度であるが, 便宜上本稿では「係数」と呼ぶ。対地船速を G , 真の対水船速を S , 2軸電磁ログが計測する対水船速を S' とし, G と S から得られる真の海流を U , G と S' から得られる海流を U' とする。地球座標系をとったときの南北成分と東西成分を添字 ϕ, λ で表す (ϕ は北方位が正, λ は東方位が正)。船首-船尾方向とこれに直交する座標系を用いた場合, 船首-船尾方向成分と直交する左右方向成分を添字 x, y で表す (x は船首方向が正, y は右方向が正)。 ϕ, λ と x, y の変換は, 測位装置から算出する方位やジャイロコンパスの指示方位を使用する。

往復観測の往路と復路を添字 1, 2 で表し, 往復観測の間に真の海流に変化がないとする。

海洋観測指針は, U を G と S から求める ($U = G - S$) ことから出発している。

$$\begin{aligned} G_{\phi 1} - S_{\phi 1} &= G_{\phi 2} - S_{\phi 2} = U_{\phi} \\ G_{\lambda 1} - S_{\lambda 1} &= G_{\lambda 2} - S_{\lambda 2} = U_{\lambda} \end{aligned} \quad (1)$$

石井は, U を U' に S' と S との差分が加わったものとして出発している。

$$\begin{aligned} U_{\phi 1}' + (S_{\phi 1}' - S_{\phi 1}) &= U_{\phi 2}' + (S_{\phi 2}' - S_{\phi 2}) = U_{\phi} \\ U_{\lambda 1}' + (S_{\lambda 1}' - S_{\lambda 1}) &= U_{\lambda 2}' + (S_{\lambda 2}' - S_{\lambda 2}) = U_{\lambda} \end{aligned} \quad (2)$$

(1) 式は次式となり, これを展開して k と θ を得る。

$$\begin{pmatrix} \Delta G_{\phi} \\ \Delta G_{\lambda} \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta S_{\phi}' \\ \Delta S_{\lambda}' \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$k = \sqrt{\frac{\Delta G_{\phi}^2 + \Delta G_{\lambda}^2}{\Delta S_{\phi}'^2 + \Delta S_{\lambda}'^2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta G_{\lambda} \Delta S_{\phi}' - \Delta G_{\phi} \Delta S_{\lambda}'}{k (\Delta G_{\phi} \Delta S_{\phi}' + \Delta G_{\lambda} \Delta S_{\lambda}')} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \text{但し, } \Delta G_{\phi} &= G_{\phi 1} - G_{\phi 2} & \Delta S_{\phi}' &= S_{\phi 1}' - S_{\phi 2}' \\ \Delta G_{\lambda} &= G_{\lambda 1} - G_{\lambda 2} & \Delta S_{\lambda}' &= S_{\lambda 1}' - S_{\lambda 2}' \end{aligned}$$

(2) 式は次式となり, これを展開して k と θ を得る。

$$\begin{pmatrix} \Delta U_{\phi}' + \Delta S_{\phi}' \\ \Delta U_{\lambda}' + \Delta S_{\lambda}' \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta S_{\phi}' \\ \Delta S_{\lambda}' \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$k = \sqrt{\frac{(\Delta U_{\phi}' + \Delta S_{\phi}')^2 + (\Delta U_{\lambda}' + \Delta S_{\lambda}')^2}{\Delta S_{\phi}'^2 + \Delta S_{\lambda}'^2}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta S_{\phi}' (\Delta U_{\lambda}' + \Delta S_{\lambda}') - \Delta S_{\lambda}' (\Delta U_{\phi}' + \Delta S_{\phi}')}{k (\Delta S_{\lambda}' (\Delta U_{\lambda}' + \Delta S_{\lambda}') + \Delta S_{\phi}' (\Delta U_{\phi}' + \Delta S_{\phi}'))} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\begin{aligned} \text{但し, } \Delta U_{\phi}' &= U_{\phi 1}' - U_{\phi 2}' & \Delta S_{\phi}' &= S_{\phi 1}' - S_{\phi 2}' \\ \Delta U_{\lambda}' &= U_{\lambda 1}' - U_{\lambda 2}' & \Delta S_{\lambda}' &= S_{\lambda 1}' - S_{\lambda 2}' \end{aligned}$$

(7), (8) 式は, (4), (5) 式の ΔG_{ϕ} を $\Delta U_{\phi}' + \Delta S_{\phi}'$, ΔG_{λ} を $\Delta U_{\lambda}' + \Delta S_{\lambda}'$ に置き換えたものに他ならない。何れから k と θ を計算しても結果は同じになる。

ジャイロコンパスの指示方位の誤差 (緯度誤差と速度誤差を除く。以下同じ) は観測航海ごとに変わり得るため, k や θ も変化する。ADCP を使用した海流観測では 1 年の間に θ の大きさが 3 度以上変化したことも報告されている (工藤, 寄高 (2001))。 k と θ を管理することが必要である。

注2) Pollard and Read (1989) と Joyce (1989) が基になっている。

3 EM 2 海流の算出とその評価

3.1 評価方法の検討

3.1.1 評価基準と評価項目

EM 2 海流の確からしさの評価にあたり, 理想的には真の海流との比較が望ましい。しかし, 真

の海流は不明なことから、何らかの方法により観測される確からしい海流を真の海流に見立てる必要がある。当庁における、2軸電磁ログを使用する海流観測の主たる目的は漂流予測である。今日の漂流予測は海流に風の影響を加味する方法で行われており、ADCP搭載船が観測する海面下約10m層の風の影響が小さい海流の使用を想定している。このため、海面下約10m層のADCP海流を評価基準としてEM2海流の確からしさを評価する。

海流は速さと向きをもったベクトルである。速さと向きを同時に評価するために、EM2海流とADCP海流の速度をそれぞれ南北成分（北が正）と東西成分（東が正）に分ける。なお、2軸電磁ログが計測する対水船速は船首-船尾方向と左右方向であり、ジャイロコンパスの指示方位をもとに、それぞれ南北成分と東西成分に分離・合成される。このため、EM2海流の確からしさを評価について、EM2海流の南北成分と東西成分を別々に評価することは意味をなさない。本稿では、EM2海流の南北成分と東西成分を1つのデータセットを構成する個々の海流成分として取り扱い、同様に取り扱うADCP海流の個々の海流成分との比較からEM2海流の評価を行う。以下、それぞれのデータセットの個々の成分をEM2海流成分、ADCP海流成分と呼ぶ。

3.1.2 評価方法

当庁所属船が観測するADCP海流は、船速が速くなると不確かになることが経験的に指摘されている。このため、ADCP搭載船の船速とADCP海流の誤差との関係を考察し、確からしいADCP海流が得られる船速で航走したときに観測されたADCP海流とEM2海流との比較を行う。このとき、EM2海流の確からしさの目安として、漂流予測担当課からの聞き取りに基づきEM2海流成分とADCP海流成分との差の平均（バイアス誤差）を±0.1knot以内とする。

EM2海流は、ADCP海流と比較して海面に近い船底付近で観測されるために風の影響（吹送

流）を含むと考えられる。ADCP海流(y)はEM2海流(x₁)から風(x₂)の影響を除いたと考えることができ、以下のモデル(A)を仮定する。最小二乗法を使用して、有意性の検定(H₀: β_i = 0, α = 0.05)からx₂を選択か非選択か判断する。モデルの評価は残差分析で行う。x₂が選択された場合は、EM2海流に含まれる風の影響を取り除く。

$$y = \beta_0 + x_1 + \beta_1 x_2 + \varepsilon \dots\dots\dots (A)$$

y: ADCP海流成分 (knot)

x₁: EM2海流成分 (knot)

x₂: 風速成分 (knot) 風の吹き去る方向が正

β_i: 偏回帰係数 (i = 0, 1)

ε: 誤差

3.2 EM2海流の評価

3.2.1 ADCP海流の誤差と船速との関係

2005年12月9日、当庁所属の2隻のADCP搭載船が奄美大島沖の同一海域を時間の隔たりが小さい中で海流を観測した。それぞれをA₁船、A₂船とする。A₁船は9knot、A₂船は9、15、19knotで航走している。海域を緯度・経度1'メッシュに分け、A₁海流、A₂海流のメッシュごとの平均海流をそれぞれ求める。この平均海流をもとに3.1.1と同様の海流成分を算出し、同一海域において時間の隔たりが小さい中での海流は一定という前提のもと、メッシュごとに両者の差を求める。Fig.1はA₂船の船速別の差の分布であり、差の平均を丸印、差の標準偏差を矢印、差を求めたペア数を括弧内の数字で表している。差の平均に注目すると、船速9、15knotでは±0.1knot

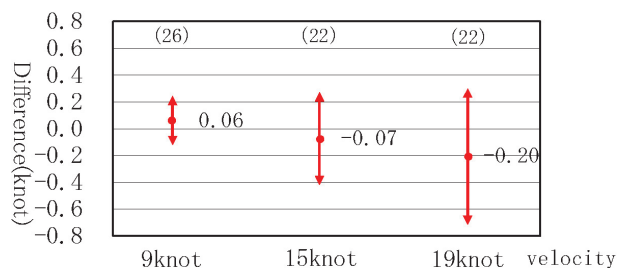


Fig.1 Difference between Ocean current components observed by shipboard ADCPs in several vessel's velocity.

以内であるのに対し、船速 19 knot では -0.2 knot と許容する値よりも大きい。以下、ADCP 搭載船が観測する ADCP 海流のクオリティは同じという仮定をおき、船速 15 knot 以下で航走した際の ADCP 海流を評価基準とする。

3.2.2 EM2 海流の算出

(1) 対象とする EM2 海流

当庁所属の 2 隻の 2 軸電磁ログ搭載船の観測データ（対水船速、対地船速、ジャイロコンパスの指示方位の総称を言う。以下同じ）から 1 分間隔ごとの EM2 海流を算出する。それぞれの船舶を E_1 船、 E_2 船とし、これらが観測する海流を E_1 海流、 E_2 海流とする。3.1.1 と同様に南北成分と東西成分を 1 つのデータセットの個々の成分したときの名称を E_1 海流成分、 E_2 海流成分とする。喫水は E_1 船約 1.3 m、 E_2 船約 3 m である。

E_1 海流・ E_2 海流と、同一海域を時間の隔たりの小さい中で 15 knot 以下の速力で観測した ADCP 海流とを比較する。観測日とそのときの船速 [knot]、風速 [knot] の範囲を、観測日（船速範囲、風速範囲）として表現すると、 E_1 海流については 2005 年 12 月 1 日（5.6~10.8, 5.1~10.4）、2005 年 12 月 9 日（9.3~10.7, 0.1~1.8）、2006 年 6 月 22 日（9.0~40.9, 5.3~12.2）、2006 年 6 月 27 日（5.1~38.6, 14.9~19.1）の 4 日、 E_2 海流については 2006 年 11 月 6 日（3.4~30.0, 7.3~25.8）となる。

(2) スケール係数とアライメント係数の算出

EM2 海流の算出にあたり、バイアス誤差を補正するためのスケール係数とアライメント係数を知る必要がある。これらの係数は航海の度に求めることが理想であるが、当庁所属船の多くは警備や救難などを目的としており、係数を算出するための往復観測を航海の度に行うことは望めない。このため、 E_1 船、 E_2 船が前述の観測日の前後の航海において、必要に応じ又はたまたま実施した往復観測時の観測データから各係数を求める。

各係数の算出に際し、海域を緯度・経度 $0.5'$

メッシュに分け、メッシュごとに往復観測の往路と復路別に観測データの平均値を求める。これらの平均値と式（4）、（5）を使用してメッシュごとに各係数を求める。これらを集合として取り扱い、各係数の平均と標準偏差（以下、「分布」）を算出する。

Table 1~4 は、（1）で評価対象とした EM2 海流の観測日前後の E_1 船、 E_2 船のスケール係数とアライメント係数の分布である。括弧内の数字は各係数の分布の算出に使用したメッシュの往路と復路のペア数を表す。両船ともに、各係数が船速別に異なる傾向があり、船速に応じて使い分けの必要がある。各係数が船速に応じて変化する原因の考察は 4 章で行う。

(3) バイアス誤差を補正した EM2 海流の算出

Fig.2 は（1）で評価対象とした E_2 海流のバイアス誤差の補正前と補正後の一例を表したものである。補正前は往路の海流（赤）と復路の海流（青）が大きく異なっているのに対して、補正後はほぼ等しくなっている。省略するが E_1 海流も同じことが言える。

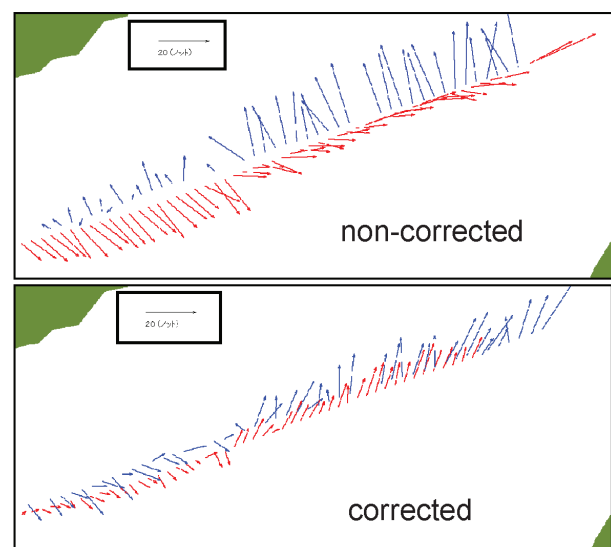


Fig. 2 An example of correction for ocean current velocity measured by using EM2 Log. (Upper) non-corrected, (lower) corrected.

Table 1 Scale factor in several E_1 vessel's velocity.

Velocity Date	~10knot	10~20knot	20~30knot	30~40knot
05.12.01	0.999 ± 0.011 (34)	1.012 ± 0.007 (13)	—	—
05.12.09	—	0.999 ± 0.006 (14)	—	—
06.05.30	—	—	1.023 ± 0.036 (8)	—
06.06.29	—	—	—	1.008 ± 0.005 (74)
06.09.24	—	—	1.032 ± 0.004 (6)	—

Table 2 Same as Table 1, but for E_2 's vessel.

Velocity Date	~10knot	10~20knot	20~30knot
06.07.15	—	0.975 ± 0.014 (55)	—
06.07.16	—	0.987 ± 0.012 (30)	0.994 ± 0.009 (13)
06.07.17	—	0.987 ± 0.009 (42)	—
06.11.06	—	—	0.984 ± 0.014 (26)
06.11.08	0.915 ± 0.016 (9)	—	—
06.11.10	—	0.985 ± 0.006 (30)	0.980 ± 0.008 (20)

Table 3 Misalignment factor (degree) in several E_1 vessel's velocity.

Velocity Date	~10knot	10~20knot	20~30knot	30~40knot
05.12.01	2.55 ± 0.89 (34)	2.99 ± 0.38 (13)	—	—
05.12.09	—	2.14 ± 0.43 (14)	—	—
06.05.30	—	—	0.74 ± 0.36 (8)	—
06.06.29	—	—	—	0.82 ± 0.52 (74)
06.09.24	—	—	1.16 ± 0.22 (6)	—

Table 4 Same as Table 3, but for E_2 's vessel.

Velocity Date	~10knot	10~20knot	20~30knot
06.07.15	—	-3.72 ± 0.88 (55)	—
06.07.16	—	-3.37 ± 0.61 (30)	-2.96 ± 0.83 (13)
06.07.17	—	-3.64 ± 1.02 (42)	—
06.11.06	—	—	-3.16 ± 0.77 (26)
06.11.08	-5.20 ± 0.73 (9)	—	—
06.11.10	—	-2.98 ± 0.73 (30)	-2.98 ± 0.45 (20)

3.2.3 E_1 海流と ADCP 海流との比較

E_1 海流, E_2 海流と同一海域を時間の隔たりの小さい中で航走観測した ADCP 海流とを比較する. 3.2.2 (1) で記したとおり E_1 海流は 2005 年 12 月から 2006 年 6 月までの 4 日間, E_2 海流は 2006 年 11 月 6 日に観測している.

ADCP 海流成分と E_1 海流成分, E_2 海流成分との関係のモデル (A) は, それぞれ $y = -0.02 + x_1 - 0.01 x_2$, $y = -0.05 + x_1 - 0.01 x_2$ となった.

x_2 の係数を用いて風の影響を取り除いた E_1 海流成分, E_2 海流成分と ADCP 海流成分との差の平均と差の標準偏差を Table 5, 6 に, 対応関係を Fig. 3, 4 に示す. Fig. 3, 4 の縦軸は ADCP 海流成分, 横軸は E_1 海流成分又は E_2 海流成分を表

しており, 正負の符号は 3.1.1 に基づく. Table 5, 6 の括弧内の数字は差を求めたペア数を表している. 但し, 船速 20~30 knot 航走時の E_1 海流は観測されていない.

Table 5 の E_1 海流の場合, ADCP 海流成分との差を求めたペア数が少ないときには差の平均の絶対値が大きいが, ペア数が 9 以上確保されている場合には船速や流速にかかわらず小さい. 一方, Table 6 の E_2 海流の場合, ADCP 海流成分との差を求めたペア数が多いにもかかわらず, 差の平均の絶対値が大きい.

Fig. 3, 4 から, ADCP 海流との対応関係を表す相関係数は, E_1 海流の場合は船速に関わらず 0.84 以上と大きいのに対して, E_2 海流は船速 10

Table 5 Differences between ADCP's and E_1 's ocean current components in several vessel's velocity (knot).

velocity ocean current	~10knot	10~20knot	30~40knot	(total)
0~0.5knot	0.08 ±0.17 (27)	0.02 ±0.21 (105)	0.37 ±0.15 (2)	0.04 ±0.20 (134)
0.5~1knot	-0.04 ±0.13 (27)	-0.02 ±0.23 (18)	0.15 - (1)	-0.03 ±0.18 (46)
1~1.5knot	0.17 ±0.11 (5)	0.19 - (1)	0.02 ±0.32 (9)	0.08 ±0.26 (15)
1.5~2knot	-0.02 ±0.05 (3)	- - (0)	- - (0)	-0.02 ±0.05 (3)
(total)	0.03 ±0.16 (62)	0.01 ±0.21 (124)	0.09 ±0.31 (12)	0.02 ±0.20 (198)

Table 6 Same as Table 5, but for E_2 's ocean current component.

velocity ocean current	0~10knot	10~20knot	20~30knot	(total)
0~0.5knot	0.26 ±0.16 (18)	0.12 ±0.37 (10)	0.06 ±0.42 (2)	0.11 ±0.38 (30)
0.5~1knot	0.20 ±0.20 (24)	0.25 ±0.29 (12)	0.06 ±0.41 (2)	0.11 ±0.38 (38)
1~1.5knot	0.30 ±0.16 (50)	0.32 ±0.04 (56)	-0.21 ±0.27 (18)	-0.12 ±0.32 (124)
(total)	0.24 ±0.18 (92)	0.16 ±0.34 (78)	0.02 ±0.41 (22)	0.03 ±0.29 (192)

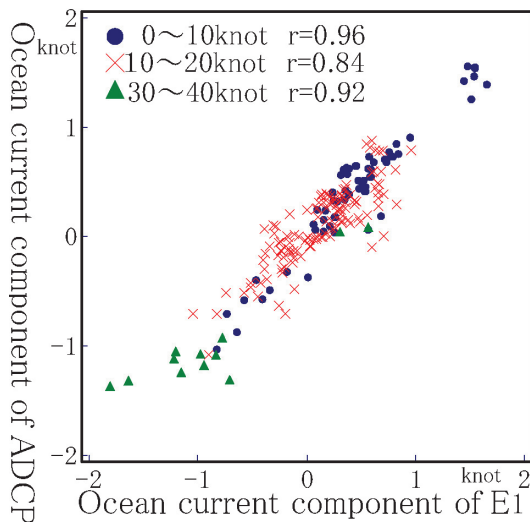


Fig. 3 Correlation between ADCP's and E_1 's ocean current component.

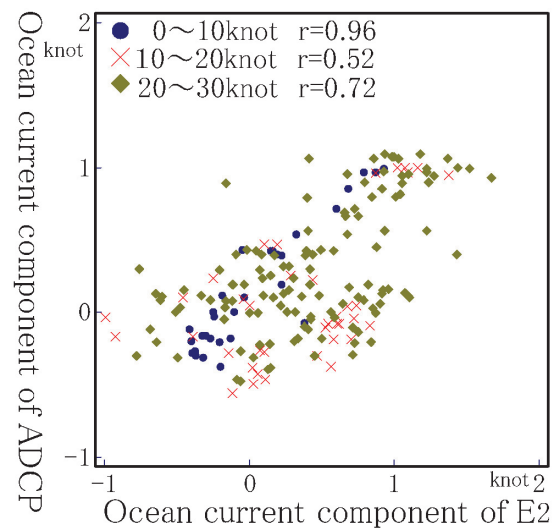


Fig. 4 Same as Fig. 3, but for E_2 's ocean current component.

~20 knot では 0.52 と小さい.

ADCP 海流と E_1 海流は同等と見なすことができるものの、 E_2 海流を同等と見なすことができない。この原因として E_2 海流は 1 日分の限られた観測データであることや、スケール係数やアライメント係数のバラツキの影響が考えられる。観測データを増やすことや、より確かなスケール係数やアライメント係数を算出することで確からしい海流を観測できると考えられる。

4 2 軸電磁ログを使用する海流観測における実用上の問題とその解決法

4.1 実用上の問題

これまでの検討から、2 軸電磁ログが計測する対水船速に含まれるバイアス誤差を適切に補正することで、確からしい海流を算出できると考えられる。バイアス誤差を補正するための係数として「アライメント係数」と「スケール係数」があるが、各係数は船速に応じて変化する。船速に応じて各係数に変化することは、各係数を算出するために、船舶の就役後やジャイロコンパスの調整後

に船速を変えた往復観測を数多く行う必要がある。しかし、当庁の所属船に限らず、時間の制約から往復観測を数多く実施することは困難という実用上の問題が生じる。

また、ここまでは船速 10 knot 間隔で算出したスケール係数とアライメント係数を使用した。この間隔が適当であるかの疑問が残る。船速ごとに各係数が変化することとその解決策を以下で検討する。

4.2 実用上の問題が生じる原因の考察

同一船舶において、スケール係数やアライメント係数が変化することから、この原因がジャイロコンパスの指示方位の誤差に因るものとは考えにくい。その他の原因として、GPS が計測する対地船速の誤差と 2 軸電磁ログが計測する対水船速の誤差が考えられるが、前者に因るものとは考えにくい。このため、後者に注目して、各係数が船速に応じて変化することの原因を考察する。

まず、船速に応じて顕著に変化するアライメント係数について考える。船舶が航走する際、理想的には船首-船尾方向とその左右方向の対水船速は独立であり、両者を平面上にプロットすると傾きをもたない直線関係になるはずである。しかし、実際にプロットすると傾きをもった直線関係が見られる (Fig. 5)。船首-船尾方向と左右方向の対水船速は、そのときどきの海流や風の影

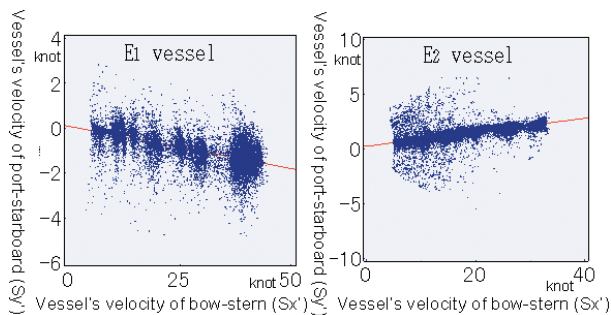


Fig. 5 Relation between vessel's velocities of bow-stern (S_x') and port-starboard (S_y') measured by using EM 2 Log.

響、2 軸電磁ログに備わっている計測誤差、船舶の運動が対水船速に与える誤差を含む。しかし、船舶がさまざまな針路をとったときの対水船速を多く計測することができれば、海流や風などの影響はランダムと見なすことができ、両者の関係に回帰直線を当てはめることができる。

回帰直線の傾き (対水船速の船首-船尾方向に対する左右方向) を β とし、真の対水船速を S (S_x, S_y)、2 軸電磁ログが計測する対水船速を S' (S_x', S_y')、アライメント係数を θ 、スケール係数を k とする。但し、ここでの θ と k は 2 章で説明したジャイロコンパスの指示方位誤差の影響を受けない。区別のためにそれぞれを θ_t, k_t とする。

θ_t と β の関係は以下から求められる。

S と S' の関係は (9) 式で、 β を算出するための式は (10) 式で表される。

$$k_t \begin{pmatrix} S_x' \\ S_y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_t & \sin \theta_t \\ -\sin \theta_t & \cos \theta_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \end{pmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

$$\beta = \frac{\Sigma (S_x' - \bar{S}_x') (S_y' - \bar{S}_y')}{\Sigma (S_x' - \bar{S}_x')^2} \dots\dots\dots (10)$$

(9) 式を (10) 式に代入すると次式になる。

$$\beta = \frac{(-SS_x + SS_y) \sin \theta_t \cos \theta_t + SS_{xy} (\cos^2 \theta_t - \sin^2 \theta_t)}{SS_x \cos^2 \theta_t + 2SS_{xy} \sin \theta_t \cos \theta_t + SS_y \sin^2 \theta_t} \dots\dots\dots (11)$$

但し、

$$SS_x = \Sigma (S_x - \bar{S}_x)^2$$

$$SS_y = \Sigma (S_y - \bar{S}_y)^2$$

$$SS_{xy} = \Sigma (S_x - \bar{S}_x) (S_y - \bar{S}_y)$$

ここで、 SS_{xy} は S_x と S_y の偏差積和であり、 S_x と S_y が互いに独立のときには 0 となる。また、 S_x の範囲が S_y の絶対値の範囲に比べて十分に大きいときには SS_y を無視することができ、 β は以下に近似できる。

$$\beta \doteq -\frac{SS_x \sin \theta_t \cos \theta_t}{SS_x \cos^2 \theta_t} = -\tan \theta_t \dots\dots\dots (12)$$

(12) 式から、 β は θ_t に依存する。船速に応じて θ_t が変化することは、 β も船速に応じて変化することを意味する。

2 軸電磁ログの製造・販売会社によると、工場

出荷時における船首-船尾方向と左右方向の対水船速の計測誤差はともに真の対水船速の 1% 未満である。しかし、船舶への取り付け後には 2 軸電磁ログの取り付けのズレや 2 軸電磁ログ取り付け付近の船底の形状に伴い発生する偏流の影響を受けて船首-船尾方向、左右方向ともに測定誤差、特にバイアス誤差が大きくなる。このためマイルポストの使用から求める真の対水船速と 2 軸電磁ログが計測する対水船速との関係を船速 5 knot ごとに一次式で表し、この式を使用して対水船速を真の対水船速に調整することが行われる。しかし、船舶は左右方向に航走することができないために調整は船首-船尾方向に限られる。

ジャイロコンパスの指示方位誤差の影響を受けないとした場合、(9) 式から、 $Sy' \doteq (Sy - Sx \sin \theta_t) / k_t$ と近似でき、 Sx' は調整されるため Sx となる。 Sx' に対する Sy' は、 $Sy' / Sx' = (Sy - Sx \sin \theta_t) / k_t Sx$ となり、 k_t が一定だとしても船速に対応して変化する。船速に応じてアライメント係数が変化する原因のひとつとして、2 軸電磁ログの船舶取り付け後に行われている対水船速の調整が船首-船尾方向に限られていることがある。 $k_t = 1$ のとき Sy' は $Sy - Sx \sin \theta_t$ となり、船速に応じて Sy との比率が変化する。アライメント係数と同様に、調整が船首-船尾方向に限られることが、スケール係数が船速に応じて変化する原因になる。

対水船速の船首-船尾方向のみの調整は、2 軸電磁ログの本来の目的である船速距離計としての使用を考えると妥当かもしれない。しかし、海流観測での使用を考えると、各係数が船速に応じて変化する原因になることから、左右方向の調整も行われることが望ましい。

4.3 実用上の問題に対する解決法の提案

4.3.1 対水船速の左右方向の補正

スケール係数とアライメント係数が船速に関わらず一定となれば、4.1 に示した実用上の問題は解決される。各係数が一定にならない原因として、対水船速の左右方向の調整ができていないこ

とが考えられるため、これを補正計算で対応することを検討する。

海洋観測指針や石井 (2006) による各係数の算出では、ADCP が計測する各方向の対水船速のスケール係数は一定という前提がある。しかし、2 軸電磁ログの使用では対水船速の船首-船尾方向のみの調整が行われるためにこの前提が成り立たない。このため、以下の方法でスケール係数 (k)^{注3)} とアライメント係数 (θ) を算出する。

(3) 式は (13) 式となり、これを展開して (14), (15) 式を得る。但し、 Sx' は調整されているため Sx としている。

$$\begin{pmatrix} \Delta G_x \\ \Delta G_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta S_x \\ k \Delta S_y' \end{pmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

$$k = \sqrt{\frac{\Delta G_x^2 + \Delta G_y^2 - \Delta S_x^2}{\Delta S_y'^2}} \dots\dots\dots (14)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta G_y \Delta S_x - k \Delta G_x \Delta S_y'}{\Delta G_x \Delta S_x + k \Delta G_y \Delta S_y'} \dots\dots\dots (15)$$

3.2.2 (2) と同じ E₁ 船の観測データを使用し、(14), (15) 式から算出した k と θ の一部を Table 7 に示す。 k と θ が不自然な値であったり、(14) 式の分子が負となり k が求まらないこともある。これは E₂ 船の場合でも同様である。

この原因として、

- ・ Sy' が Sx に比べて小さいにもかかわらず Sx より Sy' の誤差がはるかに大きい
 - ・ マイルポストなどの利用による Sx' から Sx への調整が十分でない
- ことが考えられる。

Table 7 Computed k and θ , which made a point of correction of port-starboard (Sy').

Date	Obs. No	k	θ
12月1日	1	-	-
12月1日	2	5.205	77.8
12月1日	3	-	-
12月1日	4	-	-
12月1日	5	1.818	22.4
12月1日	6	1.888	31.5

「-」は値が求まらないことを表す

4.3.2 ランダム航走法による対水船速の バイアス誤差補正

2軸電磁ログを船舶に取り付けた後の対水船速の調整において、船首-船尾方向と左右方向の対水船速のバイアス誤差が取り除かれ、ジャイロコンパスの指示方位が正しければ、スケール係数とアライメント係数はそれぞれ1と0になると考えられる。この考えから、船首-船尾方向と左右方向の対水船速が含むバイアス誤差の補正を試みる。

これまでと同様に、GPSが計測する対地船速を G (G_x, G_y)、2軸電磁ログが計測する対水船速を S' (S'_x, S'_y)、真の対水船速を S (S_x, S_y)、とする。

真の対水船速を計測できる船舶がさまざまな針路で航走したときの観測点を無作為に抽出し、 G_x と S_x 、 G_y と S_y との差を求める。これらの差は、真の海流の南北方向成分、東西方向成分であるが、抽出する観測点の数が多い場合には、確率変数と見なすことができ、これらの分布は左右対称の尖った形となり、期待値は0になる ($E[G_x - S_x] = 0$, $E[G_y - S_y] = 0$)。しかし、 S' (S'_x, S'_y) は S (S_x, S_y) に加えてスケール誤差、アライメント誤差などのバイアス誤差を含むために $E[G_x - S'_x] = \delta_x \neq 0$, $E[G_y - S'_y] = \delta_y \neq 0$ となる。2軸電磁ログが計測する船首-船尾方向と左右方向の対水船速に含まれるバイアス誤差がそれぞれ δ_x と δ_y になる。これらには、ジャイロコンパスの指示方位の誤差が与えるバイアス誤差も含まれる。

以下、 E_1 船、 E_2 船について、船速5knotごとに δ (δ_x, δ_y) を算出し、 S' (S'_x, S'_y) に含まれるバイアス誤差を補正してEM2海流の算出を行う。整理のため、この方法を「ランダム航走法」、2章で説明した方法を「往復観測法」と呼ぶ。

Fig. 6, 7に、3ヶ月の間に得た観測データから求めた E_1 船、 E_2 船の船速別の δ_x, δ_y を示す。

E_1 船、 E_2 船ともに δ_x の絶対値が船速に関わらずおおよそ0.5knot以内であるのに対して、 δ_y

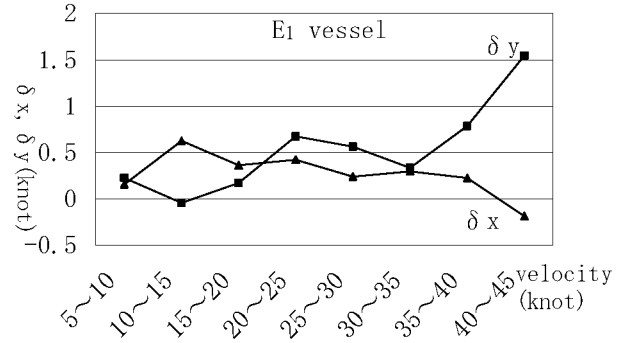


Fig. 6 Bias error on bow-stern (δ_x) and port-starboard (δ_y) ocean current velocity of measured by using E_1 's EM 2 Log.

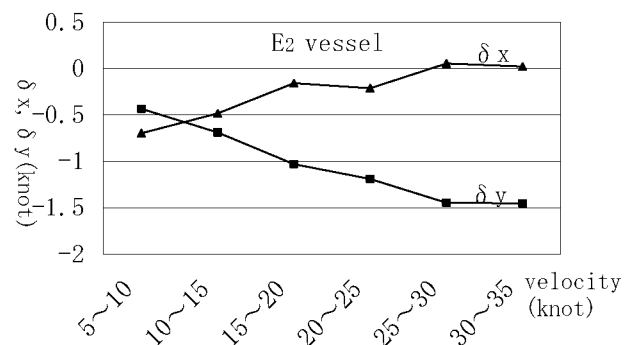


Fig. 7 Same as Fig. 6, but for E_2 vessel.

の絶対値は船速が速くなるにつれて1.5knot程度まで大きくなる。ここで再度、アライメント係数とスケール係数が船速に応じて変化する原因を考察する。

E_1 船について、Table 3からアライメント係数は正である。これはFig. 5(左)からも明らかのように対水船速の船首-船尾方向(S'_x)に対する左右方向(S'_y)の傾き(β)が負の値をもつことを意味する。船速が高速になるにつれてアライメント係数が小さくなることは、 β が小さくなることであり、これは高速になるにつれて S'_x の増加分に比べて S'_y の減少分が小さくなることを意味する。 δ (δ_x, δ_y)に着目すると、高速になるにつれて δ_x の減少分に比べて δ_y の増加分が大きくなることであるが、Fig. 6からこれは明らかである。スケール係数はTable 1から船速が高速になるにつれて大きくなっている。これは高速になるにつれて対水船速を過小評価することであり、高速になるにつれて δ_x と δ_y が大きくなるか、また

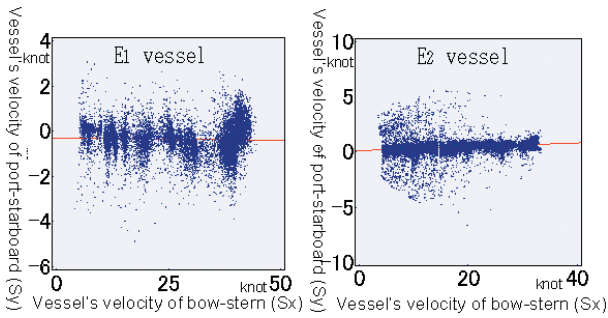


Fig. 8 Same as Fig. 5, but for corrected vessel's velocity.

は、いずれか一方の減少分に比べて他方の増加分が大きくなるかを意味する。これも Fig. 6 から明らかである。E₂ 船においても同様の考え方により船速に応じたアライメント係数とスケール係数の変化を説明できる。

バイアス誤差補正後の E₁ 船、E₂ 船の対水船速の船首-船尾方向と左右方向の関係は Fig. 8 となる。Fig. 5 では回帰直線は傾きをもったが、Fig. 8 での傾きは極めて小さくなっている。2 軸電磁ログを船舶に取り付けた後に行う対水船速の調整が十分でないことが、スケール係数とアライメント係数が船速に応じて変化する原因と判断できる。

3.2.2 (1) と同じ観測データ使用して、ADCP 海流とランダム航走法を適用してバイアス

誤差の補正を行った E₁ 海流、E₂ 海流の比較を行う。ADCP 海流成分と E₁ 海流成分、E₂ 海流成分との関係のモデル (A) は、それぞれ $y = 0.03 + x_1 - 0.01x_2$, $y = -0.02 + x_1 - 0.01x_2$ となる。

風の影響を取り除いた E₁ 海流成分、E₂ 海流成分と ADCP 海流成分との差の分布を Table 8, 9 に、対応関係を Fig. 9, 10 に示す。往復観測法を適用した Fig. 4 では船速 10~20 knot において ADCP 海流成分と E₂ 海流成分との相関係数が 0.52 と小さかったが、Fig. 10 では 0.80 と大きくなっている。Table 9 では、往復観測法を適用した Table 6 の結果と比較して全体的に値が小さくなっている。Table 8, 9 を通して、差の平均の大きい箇所があるが、これは、差を求めたペア数が少ないためと考えられる。この結果から、本稿で提案するランダム航走法は、ADCP の分野でかねてから行われている往復観測法と同等の結果が得られると判断できる。

ランダム航走法を適用することで、2 軸電磁ログ搭載船は 5 knot ごとに船速を変えた往復観測をせずとも、EM 2 海流のバイアス誤差を補正するための係数を知ることができ、2 軸電磁ログを使用する海流観測の実用上の問題が解決できる。

但し、3.2.2 (2) で「EM 2 海流のバイアス誤差を補正するための係数は航海の度に求める

Table 8 Same as Table 5, but for corrected by using 'Random Cruising Method'.

velocity ocean current \	~10knot	10~20knot	30~40knot	(total)
0~0.5knot	0.04 ±0.15 (27)	-0.04 ±0.18 (105)	0.16 ±0.30 (2)	-0.02 ±0.18 (134)
0.5~1knot	-0.16 ±0.21 (27)	-0.04 ±0.31 (18)	0.31 - (1)	-0.10 ±0.26 (46)
1~1.5knot	0.28 ±0.09 (5)	0.45 - (1)	0.02 ±0.44 (9)	0.14 ±0.37 (15)
1.5~2knot	-0.09 ±0.19 (3)	- - (0)	- - (0)	-0.09 ±0.19 (3)
(total)	-0.03 ±0.22 (62)	-0.04 ±0.21 (124)	0.07 ±0.39 (12)	-0.03 ±0.23 (198)

Table 9 Same as Table 6, but for corrected by using 'Random Cruising Method'.

velocity ocean current \	~10knot	10~20knot	20~30knot	(total)
0~0.5knot	0.13 ±0.15 (18)	0.05 ±0.29 (54)	0.03 ±0.37 (20)	0.06 ±0.29 (92)
0.5~1knot	0.05 ±0.14 (10)	0.09 ±0.30 (56)	-0.22 ±0.25 (12)	0.04 ±0.29 (78)
1~1.5knot	0.13 ±0.11 (2)	0.02 ±0.25 (10)	-0.29 ±0.16 (10)	-0.11 ±0.26 (22)
(total)	0.10 ±0.15 (30)	0.06 ±0.29 (120)	-0.12 ±0.32 (42)	0.03 ±0.29 (192)

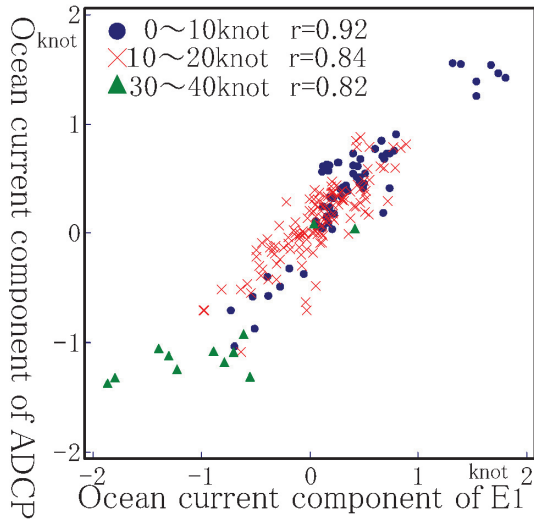


Fig. 9 Same as Fig. 3, but for corrected by using 'Random Cruising Method'.

ことが理想」と記したが、「ランダム航走法」では船舶がさまざまな針路で航走した際に得られる観測データが一定量必要となり、この記載と矛盾する。しかし、当庁所属船のように、航海の度に往復観測法からバイアス誤差を補正するための係数を求めることが見込めない場合には「ランダム航走法」は有効と考える。

ランダム航走法で算出する δ (δ_x , δ_y) は、ドックなどでジャイロコンパスが調整された場合には大きく変化すると考えられる。このため δ の質を評価することが望ましい。 δ の算出のためには、船舶の航路から無作為かつ多くの観測データを抽出することが求められ、その場合 δ_x と δ_y のそれぞれの分布は理想的には左右対称の尖った形状になる。従って、 δ の質を、「観測データの数又は観測時間」、「 δ_x , δ_y の分布の左右対称性(歪度)」、「 δ_x , δ_y の分布の尖り具合(尖度)」から評価することができる。本稿ではスペースの都合上、 δ の質の評価法は割愛する。

注3) スケール係数はこれまでと同じ記号(k)を使用しているが、厳密にはスケール係数の意味は異なる。

5 まとめと今後の課題

2軸電磁ログを使用する海流観測について検討を行った。結果、船底直下の確からしい海流を観測できることが分かった。

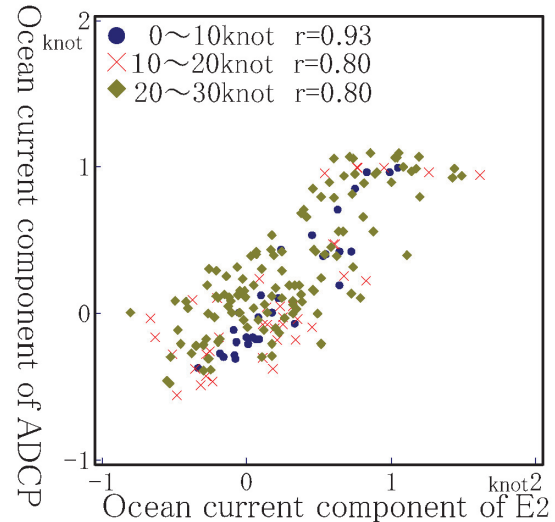


Fig. 10 Same as Fig. 4, but for corrected by using 'Random Cruising Method'.

2軸電磁ログを使用して観測される海流は無視できないバイアス誤差を含む。バイアス誤差を生む大きな原因として、計測する対水船速のバイアス誤差がある。

対水船速のバイアス誤差補正のための係数は、かねてからADCPを使用する海流観測で提案されている往復観測による方法で算出することができる。しかし、ADCPの使用ではこの係数が船速に関わらず一定なのに対して、2軸電磁ログの使用ではこの係数が船速に応じて変化する。これは2軸電磁ログを船舶に取り付けた後に実施している、対水船速の調整の限界によるものである。

この係数を算出するためには、船速を変えた往復観測を定期的に多く実施する必要があるが、当庁所属の船舶に限らず時間の制約からこれは難しい。このため、往復観測に頼らない係数の算出方法をランダム航走法として提案した。これにより2軸電磁ログを使用する海流観測の実用化が可能となる。

海難における捜索時の船速は一般に低速であるが、当庁の船舶が現場に到着するまでの間の漂流予測計算には海流の統計値が使用される。統計値には巡視船が日常に航走しているときに観測される海流が多く含まれる。船速が低速時だけでなく高速時にも確からしい海流が観測できる意義は大きい。

今後の取り組みとして、2軸電磁ログを使用して観測する海流のさらなる誤差低減があり、GPSコンパスの導入や船速に応じて変化するバイアス誤差補正のための係数を一定にする取り組みがある。

最後に、匿名の査読者から適切なお指摘を数多く頂きました。

本稿執筆のために使用した観測データは、当庁所属の2軸電磁ログ搭載船、ADCP搭載船の観測によるものです。

海洋情報部の工藤宏之氏、末広孝吉氏、林王弘道氏、横河電子機器株式会社の家城竜也氏には助言や資料の提供を頂きました。

各位に感謝します。

要 旨

海上保安庁では海難において人や物が漂流した時に漂流予測を実施している。漂流予測に不可欠な海流の多くはADCPを搭載した船舶で観測されているが、巡視船の高速化対応のためにADCPに代わる海流観測機器が必要となり、2軸電磁ログによる海流観測を検討した。結果、2軸電磁ログの使用により船底直下の確からしい海流が観測できることが分かった。さらに、高速時でも低速時とほぼ同等の質の海流を観測できることが分かった。

2軸電磁ログによる海流観測は、ADCPによる海流観測と同様にバイアス誤差の補正が重要である。しかし、2軸電磁ログの使用ではバイアス誤差を補正するための係数は船速に応じて変化する。係数算出のための往復観測を数多く実施する必要があるが、これは簡単でない。

このため、バイアス誤差を補正するための新たな方法としてランダム航走法を提案した。

参考文献

石井春雄 (2006), 船舶搭載型3ビーム式ADCPの測定流速誤差と補正, *海洋情報部研究報告*, 42, 61-87.

Joyce, T.M. (1989), On in situ "calibration" of shipboard ADCPs, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 6, 169 - 172.

気象庁 (1999), 海洋観測指針.

工藤宏之, 寄高博行 (2001), 船舶搭載ADCP測流データの偏り誤差補正について, *水路部技報*, 19, 77 - 80.

Pollard, R. and J. Read (1989), A method for calibrating shipmounted acoustic Doppler profilers and the limitations of gyro compasses, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 6, 859-865.