

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420837

研究課題名(和文) 運航履歴情報と他船情報を利用した船速推定の高精度化

研究課題名(英文) Improvement of ship speed estimation using voyage history and other ships' information

研究代表者

小林 充 (KOBAYASHI, MITSURU)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：10373416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：海流予測はウェザールーティングをはじめとした省エネルギー運航に広く利用されており、海流推定の高精度化は省エネ効果を向上させる。既存の海流推定は、衛星観測による海面高度や温度等のデータをもとに海洋動力学モデルを解くことにより行われているが、流速の直接計測ではないことなどの理由で船舶観測データから得られた黒潮流路と一時的に乖離することがある。本研究ではAIS受信データを用いて現在の海流を推定する方法を提案した。船舶の運航データをもとに検証したところ、日本沿岸域全体の推定精度は既存推定手法と同等、特にウェザールーティングが効果的となる黒潮海流流域では推定誤差が既存推定手法より小さかった。

研究成果の概要(英文)：Ocean current estimation has been widely used for weather routing and energy-saving navigation. Increasing accuracy of the estimation makes energy-saving navigation more efficient. Ocean current have been estimated by solving ocean dynamic models and by being assimilated with the satellite observation data so far. However, there are some differences between estimated current data and actual current state which can be seen on site. This study proposes the method for current estimation by means of ships' navigation data collected from coastal AIS receivers. In this experimental results, estimation accuracy of the proposed method was the same level in comparison with that of existing estimation method in the entire coastal area of Japan. The results show that in Kuroshio watershed area which is susceptible to affect weather routing navigation due to especially high-speed ocean current, the estimation error was decreased to 79-88% of those of existing estimation.

研究分野：船舶海洋工学、数理工学

キーワード：海流推定 ウェザールーティング AIS 海事システム

## 1. 研究開始当初の背景

筆者はこれまで、NEDO 省エネルギー研究開発「内航船の環境調和型運航計画支援システムの研究開発」（平成 18～20 年度，21～22 年度）において内航船のウェザールーティングといえる最適運航計画支援システムの研究開発を行ってきており、実証システムを作成し民間企業にて内航船社にむけてサービスを開始した。これは、風・波・海流の予測情報を利用して個船の運航性能データをもとに最も省エネになる推奨航路と到着時刻を守る機関出力を演算して船舶に送信し、操船を行う一連のシステムである。平成 22 年度において本システムの実証試験を行い、航路計画でおよそ 4%の燃料消費削減効果を実証した。現在も、本システムを搭載し最適航路で運航している内航船舶が複数隻存在している。

ここで、個船の実海域中運航性能は、

①一般配置図等の船体形状より、ストリップ法などの計算によって風向の関数としての風圧抵抗係数、波向・波周期の関数としての波浪抵抗増加係数を求める。

②理論値と実際との誤差を調整するために、軸馬力計を船舶に設置、航海計器からのデータとともに記録し、風速や波浪予測、対水船速等と主機出力との関係を回帰分析的な手法でフィッティングすることで、風波、船速と主機出力との関係を総合的に求めている（前述の研究課題および平成 23～25 年度科研費研究課題において、応募者が手法を開発）。

以上の手法により、気象予測情報と船舶の主機出力とから対水船速を推定し、海流予測とのベクトル計算で対地船速とし、到着地の推定到着時刻（ETA）を算出している。

ところが、風波予測、海流予測は陸上の気象予測に比べて正確性に欠ける。理由は主に、観測地点が陸上ではアメダスなど整備されているのに比べて海上では観測ブイなどに限られ、現在の気象海象状態を反映することが困難であるためである。現状の推定手法による船速推定、ひいては到着時刻の推定は精度が高くなく、本システムで算出する主機回転数を提示することによる最適船速計画は乗組員にあまり信用されていないのが現状である。中でも、海流予測誤差は船速推定誤差の大きな要因となっている。

ところで、船舶の運航中は、周囲の AIS 情報や、その時点まで運航されてきた自船の運航履歴情報が入手可能である。また、前述の運航支援システムで運航している他船舶の情報も同時に得ることができる。

AIS は船舶の衝突防止のために自船の位置や船速を周囲に自動的に送信し、また他船の

情報を受信するシステムであり、500GT 以上の船舶には搭載が義務付けられている。その情報には船位・対地船速のほか、対地進路、船首方位が記載されている。通常、対地進路と船首方位は同じ方向を向いているはずであるが、これがずれていることで、進路とは直角の方向に海流が流れていることが推定される。進路の異なる AIS 情報を集めることで、海流ベクトルを推定できる。AIS 情報は容易に収集できるため、複数の船舶の受信情報を集めることで広域の海流分布を得られることが考えられる（応募者によって特許出願済「海流推定方法及び海流推定システム」特願 2013-184801）。

このように、運航中の時点で取得でき、船舶の船速推定に役立つ情報は多く、これらを利用して船速推定の精度を高め、到着時刻を高精度化し、遅着防止のための前倒し運航を行わなくても乗組員が安心できる環境を整備することで減速運航を促して燃料消費量を削減し、地球環境を保護する一助とする。

## 2. 研究の目的

船舶は予定到着時刻(ETA)の推定が正確でないため、約束した到着時刻に遅れないために早めに航行して到着港付近で沖待ちをすることが日常化している。しかし速い航行は燃料消費が大きいと、船速の高精度な予測による沖待ち時間の低減が環境負荷低減につながる。

これまで気象海象予測や実海域性能推定の技術向上がめざましく、応募者もこれらの技術を取り入れてきたが、船速推定に一定の誤差が残り、特に海流予測誤差による推定船速誤差が大きい。そこで、運航中の時点で AIS や運航支援システムで取得できる他船の航行状況や自船舶の航行履歴データを用いて集計することで、船速や到着時刻推定の高度化を図る。

## 3. 研究の方法

船社の協力を得て、複数隻の研究対象船舶に航行データを収集、通信するシステムを搭載し、航海計器の出力値や AIS データを陸上に送信する。また、沿岸 AIS データを利用する。

AIS データから船舶のドリフトを求める。AIS データ 1 件には当該船舶の対地進路・船速、船首方位が含まれるため、船舶のドリフトベクトルのうち 1 成分（進路に対する法線成分）のみ得られる。

船舶のドリフトは海流による移動のほか、風圧力の影響も考えられるが、単純化のため

ここでは海流ベクトルと一致しているものと見做す。

進路の異なる AIS データが近傍時空間上の海域で得られる場合、連立方程式を解くことで海流ベクトルを特定することができる。実際には数多くの AIS データを得られるため、最尤法などの手法で誤差を最小化するベクトルを求め、海流マップを作成する。

協力船舶の航行データより、対地移動ベクトルと対水移動ベクトル（対水船速と船首方位からなる）との差分で船舶のドリフトを求め、海流計測値とする。AIS で求めた海流マップの精度を確認する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 海流推定の定式化

ここでは単純化のため、船舶の対水移動ベクトルを船首方位と対水船速で定義づけられ、船舶のドリフト（対地移動ベクトルと対水移動ベクトルの差）と海流ベクトルは一致しているものとする。

図 1 において、船舶の対水移動ベクトルの方向を点線 L で、対地移動ベクトルを OD で示す。L は D を通過し、方角を船首方位にとる直線である。海流ベクトル OP は図で示すようなものと推察されるが対水移動ベクトル PD の大きさ（対水船速）が不明であるため、点 P は L 上にあるということがわかるのみで一意に定めることができない。このとき進行方向の異なる船舶が、同一の海流があると考えられる時空間的近傍に存在する場合、図 2 のように船位 O を重ねるように描画することで、点 P を L<sub>1</sub> と L<sub>2</sub> の交点として決定することができるので、海流ベクトルを一意に定めることができる。実際はさらに多くの運航情報が集まるので、図 3 のようにこれらを重ねて各 L<sub>i</sub> からの距離を最小化する点 P を求めることになる。

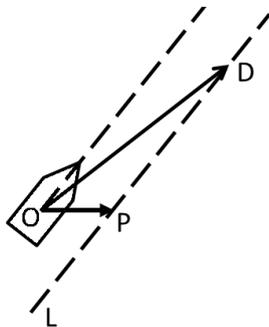


図 1 AIS 1 件による海流推定  
(解が不定)

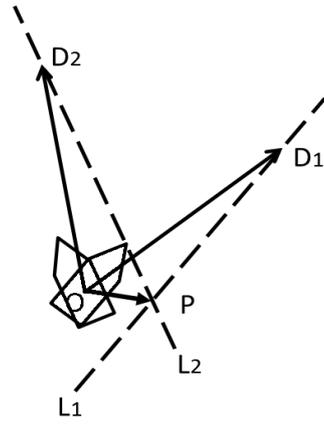


図 2 AIS 2 件による海流推定  
(解が特定)

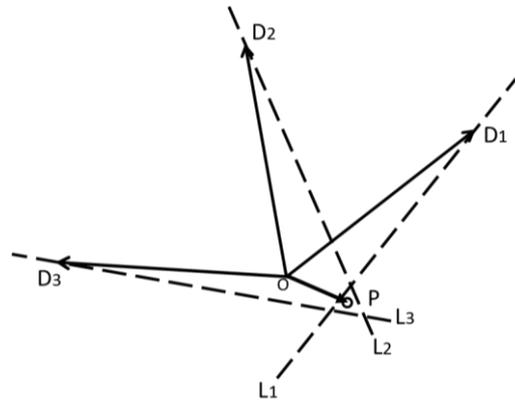


図 3 AIS 件数が多い場合の海流推定  
(解の誤差を低減)

海流ベクトル OP の算出方法は次のようになる。

各 AIS 受信レコード  $i$  は対地船速ベクトル  $OD_i$ 、船首方位  $\theta_i$  をもつ。また、船の大きさや変針中であるかどうか、現在求めようとしている海域の中心座標や時刻からのずれ等で定義できるデータの重要性を示す重み  $w_i$  が与えられる。

点 P は各  $L_i$  からの距離の重みつき二乗和を最小化する。対地船速を SOG, 対地進路を COG とし、点  $D_i$  の座標は次の式で定義される。

$$\begin{aligned} x_{D_i} &= SOG_i \cos COG_i \\ y_{D_i} &= SOG_i \sin COG_i \end{aligned} \quad (1)$$

直線  $L_i$  は点  $D_i$  を含み船首方位を向く。

$$L_i : (x - x_{D_i}) \sin \theta_i - (y - y_{D_i}) \cos \theta_i = 0 \quad (2)$$

点  $P(x_p, y_p)$  と直線  $L_i$  との距離  $\varepsilon_i$  は次の式で表される。

$$\varepsilon_i = |(x_p - x_{D_i}) \sin \theta_i - (y_p - y_{D_i}) \cos \theta_i| \quad (3)$$

海流 OP に対する観測値  $L_i$  の観測誤差  $\varepsilon_i$  が正規分布と仮定すると、その確率  $p(L_i|P)$  は次のようになる。

$$p(L_i|P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{\varepsilon_i^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (4)$$

尤度関数を  $L(P|L_1, L_2, \dots, L_n)$  とすると、

$$\begin{aligned} L(P|L_1, L_2, \dots, L_n) &= p(L_1|P)p(L_2|P)\dots \\ &= \prod p(L_i|P) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^{n/2} \prod \sigma_i} \exp(-f(P)) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{at } f(P) = \sum_i \frac{\varepsilon_i^2}{2\sigma_i^2} \quad (6)$$

$1/(2\sigma_i^2)$  を各 AIS 受信レコードの重み  $w_i$  と読み替えたとき、尤度  $L$  を最大化する点  $P$  は

$$f(P) = \sum_i w_i \varepsilon_i^2 \quad (7)$$

を最小化するので、

$$\frac{\partial}{\partial x_p} f(P) = \frac{\partial}{\partial y_p} f(P) = 0 \quad (8)$$

より

$$\begin{aligned} (\sum_i w_i \sin^2 \theta_i) x_p + (-\sum_i w_i \sin \theta_i \cos \theta_i) y_p \\ + \sum_i w_i (-\sin^2 \theta_i x_{Di} + \sin \theta_i \cos \theta_i y_{Di}) &= 0 \quad (9) \\ (-\sum_i w_i \sin \theta_i \cos \theta_i) x_p + (\sum_i w_i \cos^2 \theta_i) y_p \\ + \sum_i w_i (\sin \theta_i \cos \theta_i x_{Di} - \cos^2 \theta_i y_{Di}) &= 0 \end{aligned}$$

となる。これを

$$\begin{pmatrix} A & B \\ B & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D \\ E \end{pmatrix} = 0 \quad (10)$$

とすると、

$$P = \left( \frac{BE - CD}{AC - B^2}, \frac{BD - AE}{AC - B^2} \right) \quad (11)$$

が得られ、海流が一意に定まる。

## (2) 海流の推定

海流推定の元となる AIS データとして(株)東洋信号通信社 全国沿岸 AIS データを用いて推定を行った。

前章における重み  $w_i$  として、海流を推定したい注目点の座標 (緯度  $Lat$ ・経度  $Lon$ )・日時  $T$  に対して、取得した AIS レコードの船位・時刻 ( $Lat_i$ ・ $Lon_i$ ・ $T_i$ ) が一定角度・一定時間の相違ごとに半減するよう指数的に低減することとし、さらに計算量削減のため重みが一定値以下のレコードは算入しないよう設定した。すなわち、

$$dist_i = \sqrt{\left(\frac{Lat - Lat_i}{Lat_{1/2}}\right)^2 + \left(\frac{Lon - Lon_i}{Lon_{1/2}}\right)^2 + \left(\frac{T - T_i}{T_{1/2}}\right)^2} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} w_i' &= 2^{-dist_i} \\ w_i &= \begin{cases} w_i' & (\text{if } w_i' \geq 0.1) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

とした。

計算の元となる AIS レコード件数が少ない場合や、各 AIS レコードの船首方位線  $L_i$  が互いに平行・逆平行に近い場合には、点  $P$  の移動に対する  $f(P)$  の感度が低いため推定結果が不安定になりやすいという性質がある。このような場合は、(10)式における行列式

$$Det = AC - B^2 \quad (14)$$

が小さいという特徴があるので、この値に閾値  $Det^{\text{th}}$  を設けてこれを下回る海域の推定結果は使用しないこととした。

比較対象としては、海潮流予測システム JCOPE-T により人工衛星観測データ等をもとに推定された同時刻の表層流の推定値を使用した。以下、既存手法の推定と呼ぶ。2014年7月2日0~24時UTCの沿岸AISデータを使用して同日12時UTCの日本沿岸の海流を推定した結果を図4に示す。図に重畳して描画した黒線は海上保安庁海洋情報部による黒潮流軸数値情報をもとに作成した黒潮流軸位置である。既存手法による同時刻の海流推定値を図5に示す。既存手法による海流推定は解像度が細かく流路がはっきりと表示されているが、その流路は海洋速報と一部乖離がみられる。今回の例では、既存手法の推定では黒潮の流軸が日向灘(宮崎県沖)や相模灘(伊豆半島東岸)に深く入り込むように推定されているが、海上保安庁による流軸情報ではそのようになっていない。AIS海流推定ではこの部分は流軸情報に沿った結果を示しており、現実の状況を表しているものとして参考にできることを示唆している。

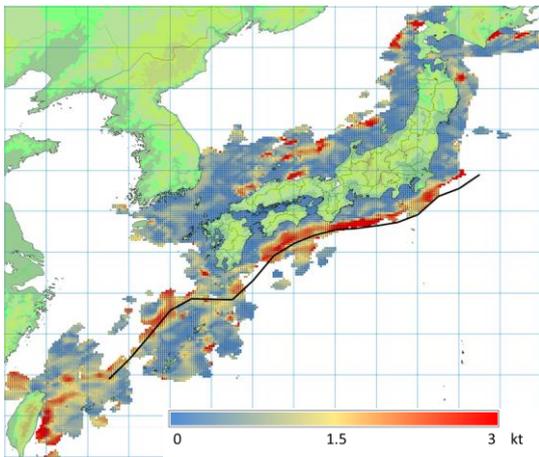


図 4 AIS による海流推定

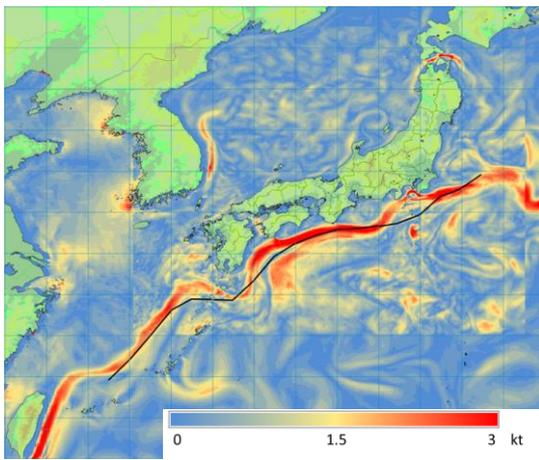


図 5 既存手法による海流推定

### (3) 船舶計測値による検証

2015年1年間について船舶で計測した海流流速（北方向，東方向）を基準とし，沿岸 AIS データに基づく海流推定と既存推定を比較し考察する。

検証用計測値としては，環境省からの受託「航海・配船計画支援システム導入による船舶からの CO<sub>2</sub> 排出削減実証事業」（略称：エコ SHIPPING・プロジェクト）において船載機を設置した船舶も含めた内航船舶のうち，対水船速をはじめ計測値が安定的に取得されている 26 隻の航海モニタリングデータをもとに，10 分毎の対地方位・船速，船首方位，対水船速平均値からドリフトベクトルを演算して海流計測値とみなした。なお，これについても加減速中を含む著しい減速中，転回前後はドリフトベクトルと海流ベクトルが一致していない可能性があるため，船速 8kt 以下または 10 分前・10 分後の記録に対して 5 度以上の進路変化がある記録を除外している。また，ドリフトベクトルの大きさが 3kt を超える場合は対水船速計の動作異常である可能性があるためこれを除外した。検証船舶の航跡を図 6 に示す。

AIS に基づく海流推定は，各日 15 時 UTC の海流を推定した。AIS データは各計測時刻に対して前後 24 時間ずつ計 48 時間の沿岸 AIS データを使用し，検証用計測を行った前述の船舶から発信された AIS レコードは除外した。海流分布推定のための空間分解能を 0.1deg とし，推定パラメータは  $Lat_{1/2}=0.05deg$ ,  $Lon_{1/2}=0.1deg$ ,  $T_{1/2}=12$  時間,  $Def^H = 100$  とした。船舶の計測点（座標，時刻）に対する推定値の導出は時空間内挿とし，推定海流ベクトルの大きさが 3kt を超える場合は AIS レコードを発信する船舶の計器不具合等により推定に失敗している可能性があるためこれを除外した。検証に使用する船，他船の出力と著しく異なり異常が疑われる船舶からの AIS レコードは除外した。

既存手法による推定に関しては時空間分解能 1/36deg, 1 時間のものを用い，直近の推定による推定値に対する最近傍セルの値を取得した。

AIS 推定，既存手法の推定による推定海流ベクトルをそれぞれ南北方向，東西方向に成分分離し，船舶による計測値と比較した際の RMSE（Root Mean Square Error）値を表 1 に示す。表中，黒潮海域としているものは図 6 において枠線で囲った海域に限定したものである。黒潮航路は内航船ウェザールーティングによる燃料消費削減効果が特に大きく航行隻数も多いため，正確な黒潮状態を把握することは地球温暖化対策に極めて重要である。

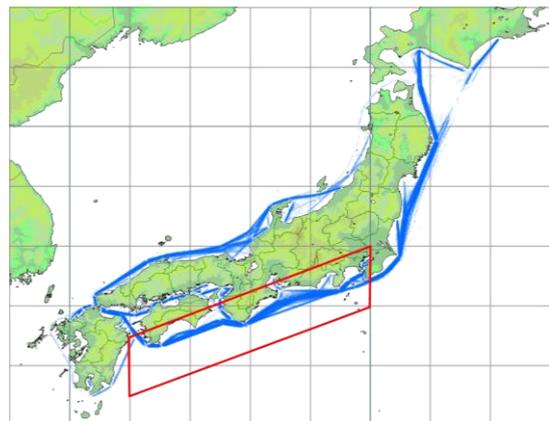


図 6 船舶によるドリフト計測位置（青）と黒潮流域の定義（赤）

表1 船舶ドリフトを正としたAIS推定海流と既存海流推定との誤差比較 (RMSE, knots)

	沿岸全域		黒潮流域	
	南北成分	東西成分	南北成分	東西成分
AIS 海流	0.65	0.65	0.54	0.74
既存推定	0.63	0.69	0.62	0.94
AIS/既存	104%	95%	88%	79%

(注) 船舶の計測毎の誤差のRMSEを示す

表1の結果によると、沿岸海域全体においてはAISによる推定は既存手法と比べほぼ遜色のない推定誤差に収まっている。一方で、黒潮海域に限定すれば、AIS推定は既存手法と比べ誤差が小さく、現状に近い海流推定ができていていることを示している。

#### (4) まとめ

本研究では、船舶の運航情報を利用した海流推定を行うため、AISで取得できる船舶運航情報から海流を推定する手法を提案し、日本沿岸海流に適用して推定を行い、人工衛星観測等を使用した既存の推定手法による推定海流と比較検証を行ったところ、以下の知見を得た。なお、3.で述べたとおり、船舶のドリフトは海流による移動のほか、風圧力の影響も考えられるが、単純化のためここでは海流ベクトルと一致しているものと見做していることに注意すべきである。

① AIS情報の取得できる日本沿岸海域で推定海流が取得され、海岸から遠方では取得できなかった。値が取得された海域はほとんどの沿海航行区域を覆うものである。また、速度が大と推定された流域が黒潮流軸観測情報にほぼ沿っており、既存推定で流路を外している海域でもほぼ一致して推定できていることが確認された。

② 年間を通した船舶計測値による精度検証を行ったところ、沿岸全域では既存手法と同程度の誤差となったが、内航船ウェザルーティングにとって重要な黒潮流域に限定すると既存手法に対し誤差が小さく、推定精度が既存手法に比べて優れていることが確認された。

今後は平成29～31年度科研費「AISを利用した内航船ウェザルーティングのための高精度な沿岸海流推定」にて推定の高度化を目指す。ここでは、海流と船舶ドリフトの乖離の主因と考えられる風圧力の影響の除去、既存海流推定とのデータ同化による高精度かつ抜けのない海流マップの作成等を行う予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

[1]小林充, AISによる沿岸海流の推定, 日本船舶海洋工学会平成28年春期講演会講演論文集, 2016年5月26日, 福岡県中小企業振興センター(福岡市)

[2]小林充, 内航船の航海最適化とAISによる海流試算, マリンITワークショップ, 2016年2月26日, 宮城県庁(仙台市)

[3]小林充, 航海計画支援システム搭載機の就航船への導入について, 日本船舶海洋工学会平成27年度秋季講演会講演論文集, 2015年11月17日, 東京大学生産技術研究所(東京都目黒区)

[その他]

[1]小林充, モジュール追加型データ収録・配信システム, プログラム登録P第10576号-1, 2016年2月25日

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

小林 充 (KOBAYASHI, Mitsuru)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 その他部局等 研究員

研究者番号: 10373416