

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06973

研究課題名(和文) AISを利用した内航船ウェザールーティングのための高精度な沿岸海流推定

研究課題名(英文) AIS-based high precision Coastal Current Estimation

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：広域の偏流を高精度に把握することは省エネ運航のために極めて重要である。本件ではAIS運航データを利用した偏流推定を行った。AISデータには偏流をベクトル計算で算出するために必要な対水船速値が記載されていないため、進路の異なる複数のAISレコードを組み合わせることで推定するアルゴリズムを考案した。黒潮沿岸域に適用したところ既存の海流推定より偏流推定誤差を低減できる一方、AISレコードの少ない海域では推定不能であった。そのため既存海流推定に統合するアルゴリズムを適用したところ、さらに誤差が低減し、かつ推定不能海域のないすべての海域について既存推定より高精度な偏流マップを提供できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

外航船では、風波海流を計算して最も燃料消費が少なくなる航路を計算しながら運航する「ウェザールーティング」という技術が一般的です。内航船ではいつも同じ航路を通ることが普通でしたが日本の太平洋沿岸には世界でもまれにみる強力な黒潮海流があるためこれを利用する考えが普及しつつあります。この研究は、黒潮海流の推定を正確にすることで、最適な航路を正確に計算して燃料消費をさらに削減し地球環境の保護に役立っています。具体的には、船同士が衝突しないようお互いに自分の位置を通信しあうAISというシステムがあり、この情報から船がどのように海流で流されているかを抽出して元データとしています。

研究成果の概要(英文)：Ship Drift Estimation has been widely used for weather routing navigation. Improvement of accuracy of the estimation makes energy-saving navigation more efficient. Ocean current estimation database, which is being used as ship drift speed in weather routing services, is generated by solving ocean dynamic models and by being assimilated with the satellite observation data. However, there are some differences between estimated current speed and ship drift speed which can be calculated from GPS, Log speed, Gyrocompass measurement values. This study proposes the method for ship drift estimation by means of ships' navigation data collected using AIS. In this results, the estimation error was decreased to 79% of that of ocean current estimation (JCOPE-T) in Kuroshio watershed area. Furthermore, the integrated estimation attained higher accuracy by means of integration of AIS-based drift estimation vectors and existing ocean current estimation vectors.

研究分野：最適化

キーワード：海流 ウェザールーティング 内航船 航海支援 AIS

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで、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主機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。現在も、本システムを搭載し気象海象に基づく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、個船の船体形状に基づきストリップ法などの流体工学的計算と風洞・水槽試験や本船運航データによる回帰分析によって風向風速・波浪スペクトルの関数としての抵抗増加を求め、実海域船速を精密に推定している(平成23～25年度科研費研究課題等において研究代表者が手法を開発)。

ところで、対水船速と運航上の実際の船速である対地船速の差にあたる偏流ベクトルについては既存の海潮流推定が用いられているが、この精度は十分に高いとは言えない。理由は主に、海流推定の元データといえる観測が衛星による海面の温度・高度計測と、限られた数の海洋ブイによる時空間的にスパースかつ間接的な観測であり、また代表的な海流推定プロダクトの更新インターバルが1週間であるため、現在の気象海象状態を反映することが困難であることが挙げられる。中でも、日本沿岸では黒潮などの強力かつ流域幅の狭い海流が存在し、船速に対する影響が大きいうえに局所性が高く、その予測誤差は船速推定誤差の大きな要因となっている。

その反面、運航中の船舶は、GPSや対水船速計等のセンサによって偏流ベクトルを常に観測している。この観測情報を集めれば偏流の現状を知ることができる。しかし、運航モニタリング・送信システムを搭載した船舶は少ないうえ、船舶の運航情報は船社外に公開されておらず、多数の船舶の情報を一元的に集めるのは容易ではない。

その一方、船舶がVHFで発信するAIS(Automatic Identification System)の情報は比較的容易に入手可能である。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。

2. 研究の目的

本件では、AIS情報を用いて黒潮沿岸域の偏流を精度よく推定することを目的とする。まずはAIS情報のみから偏流を推定する手法を構築して適用し、前述の運航モニタリング装置を搭載した船舶による偏流計測値と比較することで精度を検証する。一方、AIS情報のみをもとにした推定では、近傍を航行する船舶が少ないなどの理由でAISレコードの密度が少ないため精度が悪く、推定無効となる海域が発生する。ウェザールーティングは航路の候補を広域にとるため、推定無効の海域がある偏流推定ではウェザールーティングに適用できない。そのため、既存海潮流推定と統合することで、既存海潮流推定より高精度で、すべての海域をカバーする偏流推定を作成することを目的とする。

3. 研究の方法

まずAIS情報のみから偏流を推定する手法を構築し、船舶による偏流計測値と比較して精度を確認する。次に、推定偏流ベクトルの成分に対する推定値の安定性を示す指標を定義し、これを算出してベクトル成分に分け、既存海潮流推定のベクトル成分に対し安定性指標を参考にベクトル統合してすべての海域をカバーする統合偏流推定を算出し、精度を検証する。

4. 研究成果

(1) AIS情報による偏流推定

前述のとおり、船舶が発するAIS情報には対水船速の記録がないため、アルゴリズムで解決する方法が必要である。図-1において、船舶の対地船速ベクトルODは偏流ベクトルOPと、船首方位に平行な対水船速ベクトルPDの和である。点Pは点Dを通過し、方角を船首方位にとる直線L上にあると考えられるが、対水船速(PD間距離)が不明であるため、点Pを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、同一の偏流状態にあ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L₁とL₂の交点として決定することができ、偏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_iからの距離を最小化する点Pを求めることになる。

偏流の算出方法は次のとおりである。

偏流推定を得ようとする地点（注目地点）の近傍で得られる AIS 受信レコード $i = (1, \dots, m)$ は対地船速ベクトル $OD_i = (x_{Di}, y_{Di})$ ，船首方位 θ_i をもつ。また，注目地点と AIS 発信地点の時空間的距離によって逓減する重み $w_i \in (0, 1]$ が与えられるとする。図-3 における点 $P = (x_p, y_p)$ と直線 L_i 間の距離 ε_i の重み付二乗和（コスト） $f(P)$ を最小化する次の式により偏流推定値が得られる。

$$f(P) = \sum_i w_i \varepsilon_i^2 \quad (1)$$

$$A = \begin{pmatrix} \sum_i w_i \sin^2 \theta_i & -\sum_i w_i \sin \theta_i \cos \theta_i \\ -\sum_i w_i \sin \theta_i \cos \theta_i & \sum_i w_i \cos^2 \theta_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$B = \begin{pmatrix} \sum_i w_i (-\sin^2 \theta_i x_{Di} + \sin \theta_i \cos \theta_i y_{Di}) \\ \sum_i w_i (\sin \theta_i \cos \theta_i x_{Di} - \cos^2 \theta_i y_{Di}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$P = -A^{-1}B$$

重みに関しては，偏流を推定する対象の地点と AIS を取得した地点との緯経度のずれ $\Delta Lat'$ ， $\Delta Lon'$ と時間方向のずれ ΔT に対し，それぞれ重みを半減する係数 $Lat_{1/2}$ ， $Lon_{1/2}$ ， $T_{1/2}$ を導入し，式(4)(5)のように定義した。

$$dist_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta Lat'}{Lat_{1/2}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Lon'}{Lon_{1/2}}\right)^2} \quad (4)$$

$$dist_2 = \left|\frac{\Delta T}{T_{1/2}}\right|$$

$$w' = 2^{-(dist_1 + dist_2)}$$

$$w = \begin{cases} w' & (\text{if } w' \geq 0.1) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

半減係数 $Lat_{1/2}$ ， $Lon_{1/2}$ ， $T_{1/2}$ については，最急降下法によりパラメータ最適化を行った。

推定値の安定性は，コスト $f(P)$ を一定以上増加させない点 P の移動可能面積の逆数として定義した。 $f(P)$ は図-4 のように等高線が楕円形の二次関数であり，その二軸は行列 A の固有ベクトル，各 2 次項微係数は同固有値として得られる。また，正方行列の固有値の積はその行列式と等しいため，結果として推定値の安定性指標は行列 A の行列式 $|A|$ で得ることができる。 $|A|$ は近傍の AIS 受信レコード数が多いほど大きく，それらの船首方位が平行（または反平行）に近いほど小さい。

これらの手法を用いて作成した 2015 年 12 月 20 日の偏流マップを図-5 に例示する。濃淡は東西方向の流速を表す。後述のとおり推定値の安定性を示す行列式 $|A|$ が閾値 10^4 を下回る海域の推定結果は値の安定性に欠けるので無効とし，描画していない。また，内航船は大宗が沿海区域船であるため，図には沿海区域を示す実線を重畳した。

同図から，九州から紀伊半島南岸にかけて黒潮が存在することが確認できる。同じ日時による

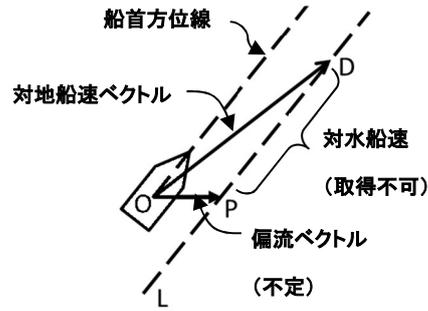


図-1 AIS 1 レコードによる偏流推定（不定解）

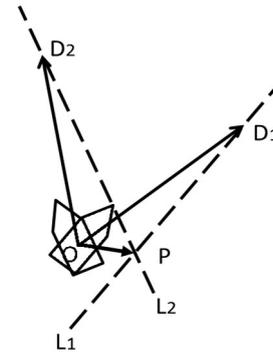


図-2 AIS 2 レコードによる偏流推定（一意解）

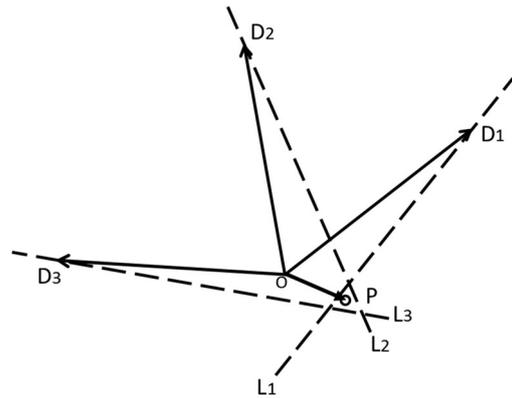


図-3 AIS 多レコードによる偏流推定精度の向上

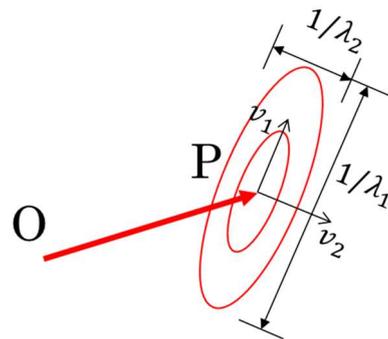


図-4 コスト関数 $f(P)$ の等高線と行列 A の固有値，固有ベクトル

海上保安庁海洋速報の海流図と比較しても、黒潮がほぼ同様の位置に確認されている。

推定が有効とされた海域については、関東から九州にかけての太平洋沿岸については離島周辺を除き沿海区域をほぼ含んでいるが、日本海側や、図には表示していないが北海道周辺などは航行船舶が少なくAIS受信件数が十分でないため、沿海区域を十分に覆う有効な推定を行うことができず推定無効となった。

2015年12月の偏流推定値を本手法により求めて船舶観測値と比較し図-6に示す。横軸は北方向・東方向偏流の船舶観測値、縦軸は本手法による偏流速度推定値である。推定精度の検討のための比較対象として、既存の海潮流予測システム JCOPE-T による同時刻の表層流の解析値 (nowcast) を偏流推定とみなし、船舶観測値と比較したものを図-7に示した。いずれも一目盛は1ktである。それぞれの図中に回帰直線とその式、相関係数を合わせて示す。同節同様、行列式が閾値 10^4 を下回るメッシュの推定結果は無効とした。推定無効海域は観測件数ベースで1.4%であった。

回帰直線が示す通り、本手法による推定のほうが海潮流予測システムによるものに比べ船舶観測値に対する相関係数が高く、また回帰直線が原点近くを通過しており偏りが小さい。偏流推定値と観測値との誤差ベクトルの大きさの平均値 (Mean Absolute Error) は本手法で0.72kt、海潮流予測システムでは0.91ktであった。本手法では誤差も小さく、偏流を精度よく推定できていることが示された。また、図-9に示すように、風速にかかわらず本手法は既存システムに対し誤差の面で優位であった。強風下においても精度が著しく悪化していないため、研究計画にあった風による誤差要因の除去は必要ないものと判断した。

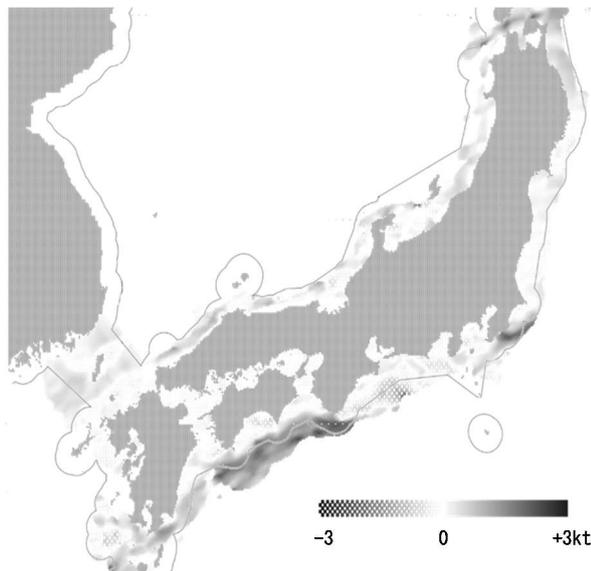


図-5 AISによる偏流推定例(2015.12.20UTC)と沿海航行区域(実線の内側)

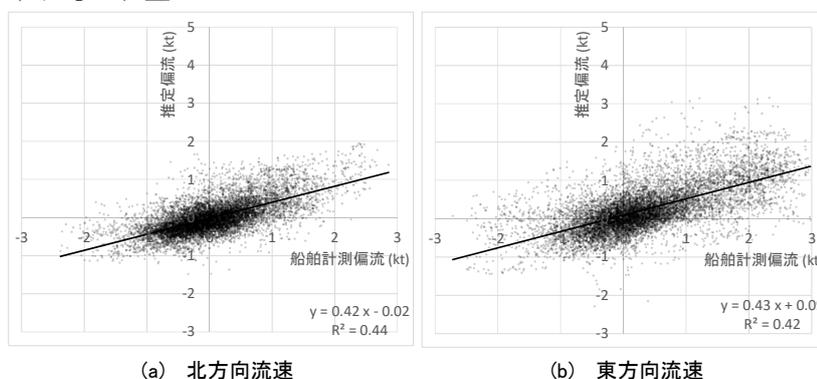


図-6 AISによる船舶偏流の推定値と計測偏流の比較

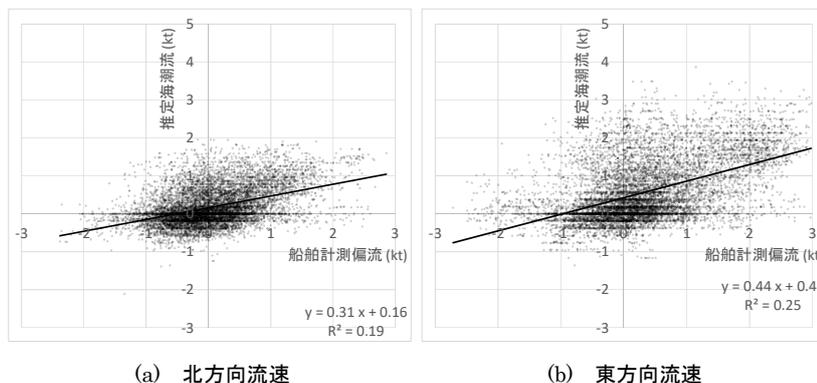


図-7 既存海潮流推定手法による表層海潮流解析値と計測偏流の比較

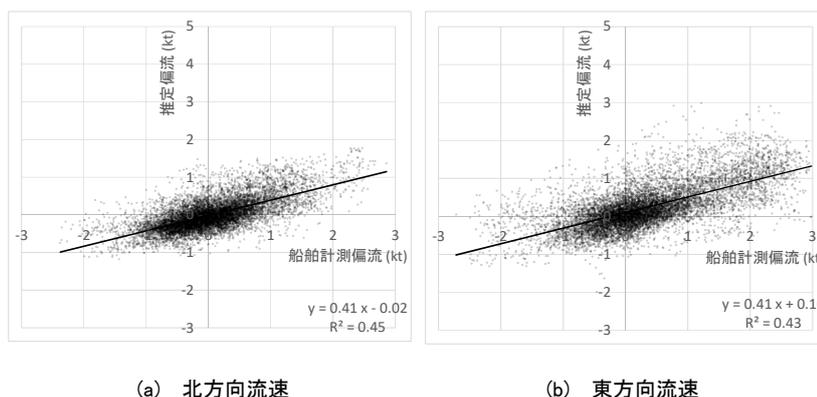


図-8 AISと既存推定の統合による船舶偏流推定値と計測偏流の比較

(2) AIS 偏流推定の既存海潮流推定値との統合

前項では AIS 運航データのみから偏流を推定する手法を述べたが、AIS 受信レコードの少ない海域、すなわち船舶航行隻数が少ない、もしくは海岸線から遠いために受信が困難な海域においては推定値の安定性指標が低く、十分な推定精度が得られない。すべての海域で偏流マップを得るため、既存海潮流への統合を行う。

既存表層海潮流推定値に関し、ある注目地点の推定海潮流ベクトル $v_c = |v_c| \angle \theta_c$ に対して、次のような 2 つのレコードを用意して前節の AIS レコードに追加することで、統合した推定偏流を得る。

$$(OD_{m+1}, \theta_{m+1}, w_{m+1}) = (v_c, \theta_c + \pi/2, 10) \quad (6)$$

$$(OD_{m+2}, \theta_{m+2}, w_{m+2}) = (0, \theta_c, 40) \quad (7)$$

前項と同様に、統合推定偏流を船舶観測値と比較し図-8 に示す。ここでは図-6、図-7 と比較できるように、AIS のみによる行列式が閾値 10^4 を下回るメッシュの推定結果を表示していない。この結果によると、決定係数の値が前者 2 手法よりも改善されていることがわかる。

AIS のみの推定で推定有効とした海域と無効とした海域に分け、(a)AIS のみによる推定、(b)既存手法による解析値、(c)AIS と既存推定の統合による推定値の検証結果を表 1 に示す（紙面の都合で推定無効海域に関する散布図は省略する）。これによると、推定無効海域に関しても、(c)統合による推定は(b)既存手法による推定の決定係数より上昇し、推定が改善されている。(a)AIS のみによる推定では決定係数 R^2 が 0.07 とほとんど参考にならないような推定結果でも、重み係数を考慮した統合によって既存推定を改善する効果があることがわかった。これは統合が単なる推定値の内挿ではなく、AIS による推定、既存手法による推定ともに推定の安定性に基づくベクトル成分に分けて重みづけ統合をしたためであると考えられる。

(3) まとめ

本研究では、黒潮沿岸海域のウェザールーティングの精度向上を目的として、AIS で取得できる船舶運航情報から船舶偏流を推定する手法を提案し、同海域に適用して推定を行い、既存の海潮流推定システムによる推定海潮流を船舶偏流とみなした場合と比較し精度検証を行ったところ、以下の知見を得た。

- ① AIS 取得件数の多い日本沿岸海域で AIS 受信データのみに基づく偏流推定ができ、離島や海岸から遠方では推定できなかった。関東から九州にかけて太平洋沿岸では沿海区域をほぼ覆う海域について偏流推定を行うことができた。
- ② 2015 年 11 月の船舶による偏流観測値を用いてパラメータ最適化を行い、得られたパラメータを使用して同年 12 月の偏流推定を行った。九州から紀伊半島にかけて東向き強い偏流域があることを確認できた。黒潮沿岸域において、観測値との誤差(Mean Absolute Error)は 0.72kt で、既存海潮流推定(JCOPE-T)を偏流とみなした既存手法の場合の誤差 0.91kt と比較し 79%となり、誤差が低減した。決定係数も既存海潮流推定より改善した。風速にかかわらず本手法は既存手法に対して優位であり、また著しく精度が悪化することもなかった。一方、観測地点のうち推定安定性の指標が条件を満たさず推定できなかったものは観測件数ベースで 1.4%あった。
- ③ AIS と既存海潮流推定を統合する手法を考案し、②と同じ期間を対象に偏流推定を行ったところ、既存推定や AIS のみによる推定より決定係数が改善した。特に、②では推定不能とした海域においても推定ができるだけでなく、既存推定より決定係数が改善し、対象海域全域において高品質な偏流マップを提供できることがわかった。

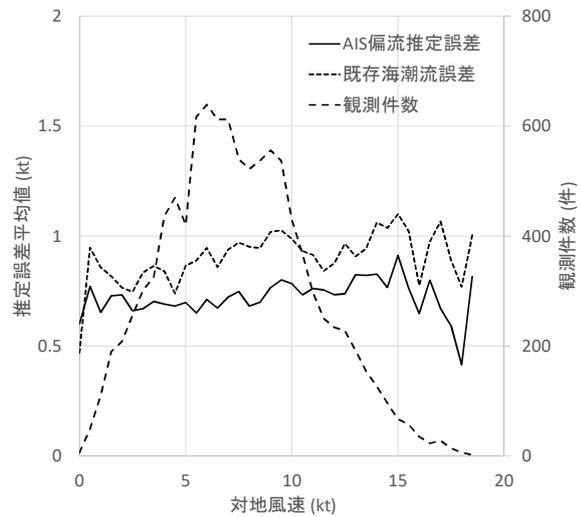


図-9 推定誤差平均値と風速の関係

表 1 推定偏流の船舶観測値による検証

海域	手法	北方向 R^2	東方向 R^2
AIS 推定有効海域 ($ A \geq 10^4$) 覆域 98.6%*	(a)AIS のみ	0.44	0.42
	(b)既存手法	0.19	0.25
	(c)統合	0.45	0.43
AIS 推定無効海域 ($ A < 10^4$) 覆域 1.4%*	(a)AIS のみ (参考値)	0.07	0.30
	(b)既存手法	0.16	0.53
	(c)統合	0.27	0.58

*観測件数ベース

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 小林 充	4. 巻 28
2. 論文標題 AISによる黒潮沿岸域における船舶偏流の推定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会論文集	6. 最初と最後の頁 163 ~ 169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.28.163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 小林 充	4. 巻 207
2. 論文標題 AIS航海データによる船舶偏流の推定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本航海学会誌Navigation	6. 最初と最後の頁 22-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.18949/jinnavi.207.0_22	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Mitsuru Kobayashi
2. 発表標題 Ship Drift Estimation by Using AIS Navigation Data
3. 学会等名 The Asia Navigation Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	松浦 邦明 (Matsuura Kuniaki)	一般財団法人日本気象協会・事業本部 防災ソリューション事業部・担当部長 (82692)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	佐藤 淑子 (Sato Yoshiko)	一般財団法人日本気象協会・事業本部 防災ソリューション事業部・技師 (82692)	