

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1382 March 2021

船用風向風速計の現地における精度検証とキャリブレーション
—東京湾口定期航路フェリーによる検討—

細川 真也・大倉 翔太

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 「かなや丸」による風観測の概要及び信頼性	4
2.1 観測の概要	4
2.2 角度と測定値の定義	6
2.3 船上風の測定精度と対地風の推定精度	7
2.4 まとめ	10
3. 「かなや丸」の風向風速計の精度検証とキャリブレーション	11
3.1 概要	11
3.2 方法	12
3.3 結果と考察	14
3.4 まとめ	18
4. 一般船舶における風向風速計の精度検証方法	18
4.1 概要	18
4.2 方法	19
4.3 結果と考察	19
4.4 まとめ	24
5. あとがき	24
5.1 本論文の結論	24
5.2 今後の展望	25
謝辞	26
参考文献	27
付録 A 標本平均合成ベクトル長の特性	28
付録 B 船上風の測定精度と対地風の推定精度の関係	29
付録 C 推定される風向風速の往復比較	36

On In Situ Accuracy Verification and Calibration of Wind Speed and Direction Meter on the Ship: Study using a ferry on a regular service route at the mouth of Tokyo Bay

Shinya HOSOKAWA*, Shota OKURA**

Synopsis

Wind observation by ships is important for the understanding of weather and oceanographic conditions and for the safe navigation of ships. Therefore, the accuracy of the observation is required. In this study, the misalignment and scale factor of the wind speed and direction meter were verified based on the data accumulated by the Kanaya-Maru for 1.5 years, and calibration was performed based on the verification results. The results indicated that the wind speed and direction meter on the Kanaya-Maru had a slight clockwise-misalignment angle from the course direction of the ship, and that the wind speed may have been slightly overestimated. Based on the results of this verification, the accuracy was improved by the calibration of this wind speed and direction meter compared to before the correction. Next, for general ships, the characteristics of the wind conditions, the number of data required, and the index used in the validation were discussed to efficiently validate the wind speed and direction meter, using the data from the Kanaya-Maru as simulation data. As a result, it was shown that the moderate wind-speed on the ground and the unbiased wind direction are important to find misalignment angles and scale factors. The number of voyages can be reduced if the verification is conducted under appropriate conditions. In addition, it was shown that it is important to select an appropriate index according to the conditions. Our results may contribute to more accurate atmospheric observations of the Kanaya-Maru in the future and to more efficient field calibration of general ships.

Key words: Wind on ship, Wind on the ground, Mobile observation, Misalignment, Scale factor, On in situ calibration

* Group Leader, Marine Environmental Information Group

** Researcher, Marine Environmental Information Group

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5107, Fax : +81-46-844-1274 E-mail: hosokawa@p.mpat.go.jp

船用風向風速計の現地における精度検証とキャリブレーション —東京湾口定期航路フェリーによる検討—

細川 真也 *, 大倉 翔太 **

要 旨

船舶による風観測は、気象や海象の把握及び船舶の安全な航行のために重要であり正確性が求められる。本研究では、「かなや丸」で約1年半の間に蓄積されたデータに基づき、風向風速計のミスアライメント及び風速値の検証、検証結果に基づいたキャリブレーションを行った。この結果、「かなや丸」の風向風速計には船の進行方向からやや時計回りのミスアライメント角があり、風速の値はやや過大評価している可能性が示された。この検証結果に基づきキャリブレーションしたところ、補正前に比べて精度が改善された。次に、「かなや丸」のデータをシミュレーションデータとして活用し、一般船舶が効率的に風向風速計の検証を行うための風の条件、必要とするデータ数、検証に用いる評価指数の特徴について考察した。この結果、対地風が適度な風速であり、かつ、偏りのない風向の下で検証しなければ明確なミスアライメント角及び風速の倍率を見出せないこと、適切な条件の下で検証すれば航行数は減らせることを示した。また、条件に応じた適切な評価指標の選択が重要であることを示した。本研究成果により「かなや丸」の今後の正確な大気観測が行われ、一般船舶の現地キャリブレーションが効率的に実施されることが期待される。

キーワード： 船上風，対地風，移動観測，ミスアライメント，風速の倍率，現地キャリブレーション

* 海洋環境制御システム研究領域海洋環境情報研究グループ グループ長
** 海洋環境制御システム研究領域海洋環境情報研究グループ 研究官
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5107, Fax：046-844-1274 E-mail: hosokawa@p.mpat.go.jp

1. まえがき

海上における風の観測は気象や海象の把握・予測に欠かせないものの、観測コストの高さから、そのデータは陸上に比べて著しく少ない。このような状況の中で、コストを抑える海上風の観測が行われている。例えば、気象庁は、船舶の安全かつ効率的な運航に資することを目的として、一般船舶から篤志で通報を受けてそれを気象情報として取りまとめた上で船舶関係者へ提供する業務を行っている¹⁾。また、近年の通信機器やセンサーの低コスト化を背景として、海上における風観測システムの構築の試みも行われている²⁾。

海上における風観測の信頼性を高めるためには、その精度の確保が重要となる。しかし、気象観測を目的としていない一般船舶の場合、風観測の障壁も少なくない。例えば、船体の構造が自体が障壁となる場合もあり、数値計算等を用いつつ最善の場所を探ることもある³⁾。また、一般船舶では風向風速計の測定値がアナログ指示器で示されていることも少なくなく、船員による船上風の読み取りミスが対地風の推定に与える影響も検討されている⁴⁾。

また、船舶による風観測は風向風速計自体が移動して行われることから、その観測方法が精度に大きく影響する。船舶による流れの精度に関しては、船舶に搭載した超音波ドップラー流速計 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) による検討が 1980 年代から活発に行われ^{5),6)}、計測器の設置等の誤差がその精度に強く影響することが知られている。しかし、ADCP は船底に設置されていることも多く、一度設置してしまえば取り直しは容易ではない。このことから、現場での計測データに基づいた誤差の定量評価及びキャリブレーションが採用される⁵⁾。

風観測の精度に関してもこの考え方が参考になるが、風向風速計は船上に設置されることから、ADCP に比べて事後で設置誤差を修正しやすい。また、風向風速計の測定値の劣化を抑えるための検定を定期的に行うことで観測精度は確保される⁷⁾。しかし、いずれにしても費用は掛かることから、設置者の立場からすれば、可能な限り、設置の修正は避け、風観測の精度確保はキャリブレーションで済ませたいと考えるのは自然なことである。

港湾空港技術研究所では東京湾フェリー株式会社の協力を得て、2003 年から「かなや丸」の船底に ADCP を設置して東京湾口の流動観測を行っている⁸⁾。さらに、近年は「かなや丸」を用いた大気質観測手法の開発も試みており、その一環として 2019 年から風観測を開始している。この観測においては、東京湾フェリー株式会社から風向風速計のデータを頂くことで費用低減を図っているが、この風向風速計の風観測としての精度は不明である。

本研究では、船舶における正確な風観測を目的とした精度

検証及びキャリブレーションに主眼を置き、「かなや丸」の風向風速計に含まれる誤差の検証及びキャリブレーションを実施した。さらに、このデータを活用し、一般船舶が効率的に風向風速計の精度を現地で検証し、キャリブレーションを行うために気を付ける事項を整理した。

2. 「かなや丸」による風観測の概要及び信頼性

2.1 観測の概要

(1) はじめに

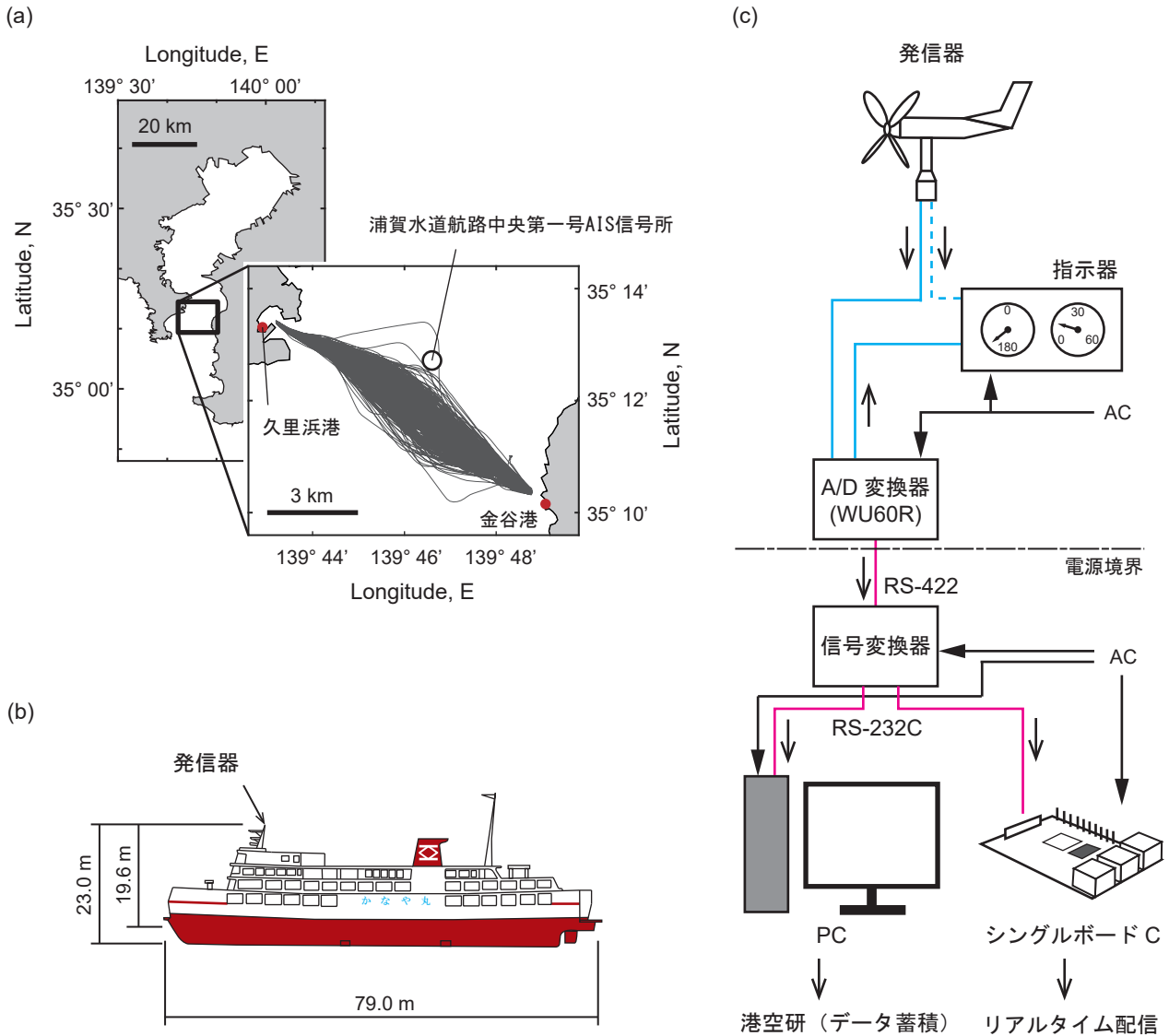
「かなや丸」は、東京湾の湾口上を航行し、神奈川県久里浜港と千葉県金谷港を結ぶ民間フェリーであり、一日当たり 6 もしくは 7 往復する。「かなや丸」の航跡は、多くの場合は久里浜港と金谷港を直線的に結ぶものであるが、周辺船舶を避けるために蛇行することもある (図—2.1a)。風観測に用いる風向風速計は、東京湾フェリー株式会社が所有するマスト上に既設の船用プロペラ式のものであり、計画満載喫水線から鉛直方向に 19.6 m の位置に設置されている (図—2.1b)。風向風速計 (N-162D, 株式会社日本エレクトリック・インスルメント社製 (現 ANEOS 株式会社), 東京) の仕様は、資料が残っておらず精度の詳細は不明である。

風向風速計は、これまで発信器から操舵室の指示器にアナログ信号で引き込んでいたが、港湾空港技術研究所のデータ処理装置にもデータを分配するよう風向風速変換器 (WU60R, 株式会社日本エレクトリック・インスルメント社製, 東京) を設置した (図—2.1c)。データ処理装置には、NMEA 信号 (海上電子装置のデータ仕様) へ変換したデータを引き込み、位置情報と共に定期的に港湾空港技術研究所へ伝送するようシステムを構築した。

「かなや丸」の航路近くには、海上保安庁の AIS 信号所があり (図—2.1a)、ここでも風観測が行われている⁹⁾。AIS 信号所における風向は、概ね北—北東からと南西からの二方向であり (図—2.2a)、「かなや丸」はこの風を横切るように航行している。AIS 信号所における風速は 6 m s^{-1} にピークを有している (図—2.2b)。

風向風速変換器は 2019 年 2 月 5 日の午後に設置し、それ以降のデータが蓄積されている。2020 年 9 月までの約 1 年半の間ではデータの転送不良等による欠測期間が何度かあったものの、月当たり最大で 400 航行のデータが収録された (図—2.3)。風向風速変換器を設置した 2019 年 2 月のデータ数はやや少なく、2019 年 6 月と 12 月は「かなや丸」の入渠のため航行数が少ない。また、2020 年 4 月においては、新型コロナウイルスの感染拡大に伴う緊急事態宣言への対応により航行数が少なくなっている。

なお、「かなや丸」は夜間においては港内で停泊中のため、この風観測は「かなや丸」が運航するおよそ午前 6 時から



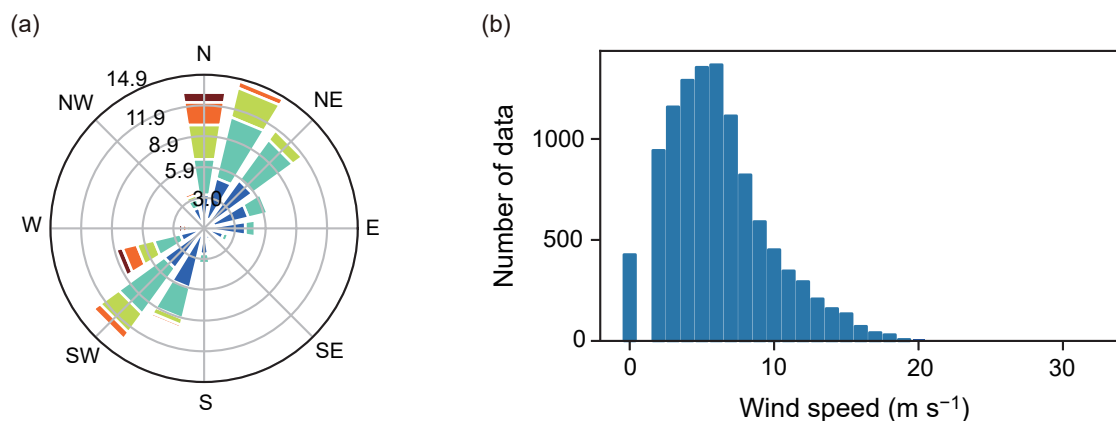
図—2.1 「かなや丸」の航路と風向風速計の概要。(a)「かなや丸」の航路,(b)風向風速計の発信器の設置場所,(c)データの取得方法を示している。「かなや丸」は、神奈川県久里浜港と千葉県金谷港の間を概ね直線的に航行しており、海上保安庁が設置している浦賀水道航路中央第一号 AIS 信号所 (35° 12' 43"N, 139° 46' 36"E; https://www6.kaiho.mlit.go.jp/info/mics_terms.html) 近くを航行している。発信器は、計画満載喫水線より鉛直方向に 19.6 m のマスト上に設置され、ここから操舵室にアナログデータ (シアン) を引き込んでいる。港湾空港技術研究所による観測の開始前は、発信器から指示器へアナログデータを引き込んでいたが (シアン破線)、A/D 変換器を設置してデジタルに変換したデータをデータ処理装置へ取り込むように工夫した (マゼンタ)。

午後 8 時までの限定のものとなっている。また、港内での停泊中は風向風速計の電源を落としているため、港内の風の測定は行っていない。

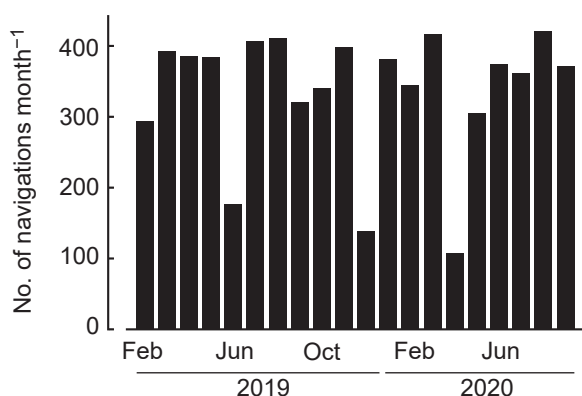
(2) 使用した観測機器

船舶による風観測では、船上の風向風速計の他に船舶の移動方向及び速度が必要となる。「かなや丸」でこれらを測定可能な機器として、GPS コンパス (V102 GPS Compass, Hemisphere GNSS, Inc. 製, AZ) がある。また、流動観測に用いている ADCP (WH-ADCP マリナー 300 kHz, Teledyne

RD instruments 社製, CA) では、船舶と海底面との相対な移動方向と速度を測定する高性能ボトムトラック機能がついており、2% 以内の精度で船舶の移動方向及び速度を測定できる。この機能の方が GPS よりも高精度であり、通常、流動観測においてはこの機能による測定値が採用される¹⁰⁾。しかし、本研究成果が一般船舶で活かされることを期待すると GPS で測定した船速を採用する方が一般性がある。なお、この GPS コンパスの水平精度は単独測位で 2.5 m 未満であり、機器の状態については入渠時にチェックしている。



図—2.2 浦賀水道航路中央第一号 AIS 信号所における 2019 年 3 月 7 日から 2020 年 9 月 30 日までの (a) 風配図と (b) 風速の頻度分布。



図—2.3 解析対象とした月別の航行数 (2019 年 2 月から 2020 年 9 月まで)。航行した中でデータが正常に取得できたものを解析対象としている。

2.2 角度と測定値の定義

(1) 角度の定義

本論文では基準となる方位は北向きとし、北向きから時計回りを正、反時計回りを負として、方位の範囲は -180° から 180° までとした。風は、船上で測定するものを船上風とし、地上に対するものを対地風として用語を区別している。

風向 (θ_w) は風がやって来る方向で定義されるが、船の進行方向 (θ_s) は進む方向で定義しており、それぞれ定義が異なることから注意が必要である (図—2.4a)。

船上風の風向は、船の進行方向に対する時計回りの方向の角度 (α) として定義しており (図—2.4b)、基準方位 (北向き) に対する角度ではない。

(2) 測定値の定義

「かなや丸」に設置した風向風速変換器は 1 秒間隔で風向風速の raw データを出力し、データ処理装置を介して港湾空港技術研究所へ伝送している。風のデータは数秒単位で

大きく変動することから、風の定常成分に関心がある場合は、通常、ある程度の時間で平均化したものを取り扱う⁷⁾。しかし、採用する平均時間が短すぎると変動成分の影響を受け平均も変動し、長すぎれば船舶及び風の定常的な変動を捉えられなくなる。

流動観測のために設置しているデータ処理装置は、研究所へのデータ転送量を抑えるため、船の位置や流速の raw データを 20 秒間で平均している。風観測は船の位置データと共に取り扱う必要があるため、風向風速データもこの時間間隔 (20 秒間) で平均し、これを 1 つのデータとして定義した。

なお、プロペラ式のような機械式の風向風速計では、ペラの慣性モーメントや軸受けの摩擦等の影響で風の高周波数の変動に対しては鈍く応答する¹¹⁾。本研究では高周波数成分を取り扱わないことからこのことは問題とならないが、平均値の代表性については別途検証が必要である。

ここで、1 秒間隔で測定された風向風速 ($\mathbf{v}_{\mathbf{r},\text{measured}}$) と 20 秒間で平均した風向風速 ($\overline{\mathbf{v}_{\mathbf{r}}}$) との関係は下式となる：

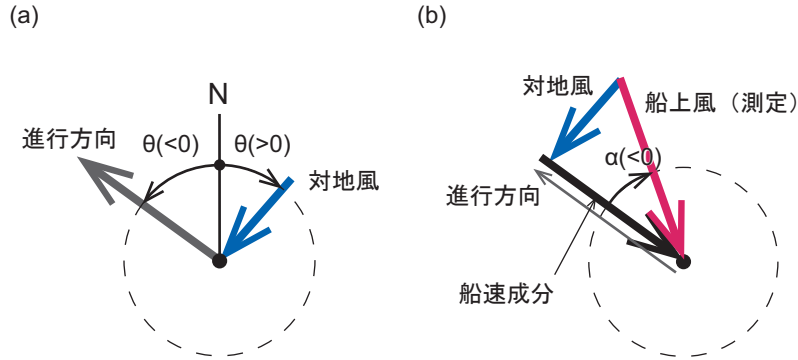
$$\mathbf{v}_{\mathbf{r},\text{measured}} = \overline{\mathbf{v}_{\mathbf{r}}} + \mathbf{v}_{\mathbf{r}}' \quad (1)$$

ここに、 $\overline{\mathbf{v}_{\mathbf{r}}}$ は、 $\mathbf{v}_{\mathbf{r},\text{measured}}$ の南北及び東西成分のそれぞれの平均合成ベクトル¹²⁾として定義しており、 $\mathbf{v}_{\mathbf{r}}'$ はそこからの変動成分である。

船上風が船の移動と対地風に対して線形応答するならば、船上風はこれらの合成ベクトルとして表すことができる (図—2.4b)。ここで、これらの風の 20 秒平均が線形応答するものと仮定すれば、3 つのベクトルの関係は以下で表される：

$$\mathbf{v}_{\mathbf{w}}^* = \mathbf{v}_{\mathbf{r}} - \overline{\mathbf{v}_{\mathbf{s}}} \quad (2)$$

ここに、 $\overline{\mathbf{v}_{\mathbf{s}}}$ は 20 秒で平均した船速ベクトル、 $\mathbf{v}_{\mathbf{w}}^*$ は船上風と船速から推定される対地風である。 $\mathbf{v}_{\mathbf{r}}$ は、 $\overline{\mathbf{v}_{\mathbf{r}}}$ からの補正值であり、その詳細については第 3 章で説明する。なお、対地



図—2.4 本論文で取り扱う角度の定義. (a) 北を基準方位として、船が進む方向を進行方向 (θ) として定義しているのに対し、風が吹いてくる方向を風向 (θ_w) として定義している. 一方、(b) 船上風の風向は、進行方向を基準方位に対して吹いてくる方向 (α) として定義する. それぞれは、時計回りを正、反時計回りを負とし、範囲は -180° から 180° までとする.

風は、船速と船上風の測定に基づく実現値から求まることから、本論文では、船舶によって観測される対地風を推定値としている. 観測値である AIS 信号所における対地風と用語を使い分けしている.

2.3 船上風の測定精度と対地風の推定精度

(1) はじめに

「かなや丸」の船上で測定している風向風速データの平均値の代表性について、対地風の推定精度への影響の観点から検証した. この精度については、まず、船上で測定した値の 20 秒間での変動特性について検討し、次に、その平均値が対地風の推定のための代表性を有しているか検討した. さらに、対地風の推定結果は、最終的に一航行分の平均値として扱うことから、このことに着目した精度検証も行った. なお、対地風の推定の手順については第 3 章で詳述し、ここでは事前評価の位置づけの解析を行った.

(2) 方法

a) 船上で測定する風の変動

「かなや丸」の風向風速計で測定される風の変動を把握するため、風速と風向に分けてそれぞれの変動量と風速との関係を評価した. 風速の変動については、平均時間内に含まれる n 個の raw データに基づき、下式に従って変動係数 (Coefficient of Variation, C.V.) で評価した:

$$C.V. = \left[\frac{\sum_{j=1}^n |v_{r,j}|^2/n}{|\bar{v}_r|} \right]^{1/2} \quad (3)$$

変動係数は、全く変動がなければ 0 を取り、平均と同程度のバラつきがある場合に 1 を取る指数である.

風向の変動については、下式の標本平均合成ベクトル長 (Sample Mean Resultant Length, S.M.R.L.) で評価した:

$$S.M.R.L. = (C^2 + S^2)^{1/2}/n \quad (4)$$

ここに、 C と S は、それぞれ下式で求まる:

$$C = \sum_{j=1}^n \cos \alpha_j \quad (5)$$

$$S = \sum_{j=1}^n \sin \alpha_j \quad (6)$$

ここに、 α_j は 1 秒間隔で出力された船上風の進行方向に対する風向であり、S.M.R.L. は、すべての α が同じであれば 1、完全にばらついている時に 0 となる指数であり、 $1 - S.M.R.L.$ とすることで角度分散として考えることができる¹²⁾.

本論文では、さらに、角度分散を平方根としたものを風向の変動の指標とした. 風向が正規分布に従ってばらつく場合、この指標は、0.4 程度までであれば、標準偏差の大きさと直線的な関係となる (付録 A).

風速と風向の変動を表すこれらの指標に関して、風速の大きさとの関係を分位点回帰により解析した. 分位点回帰は、分位点を用いて誤差を評価する方法であり、任意のパーセンタイル値の傾向を示すことができる. また、外れ値を有するデータに対して頑健な解析結果を示す利点がある¹³⁾⁻¹⁵⁾. 解析対象期間において 1,490,417 データが収録されたが、ここでは、計算負荷を抑えるためにランダムに非復元抽出で抽出した 10,000 データのみを使い、風速が 2 m s^{-1} 以上の条件を満たすデータを対象として分位点回帰を実行した. 解析対象のパーセンタイル値は、下位から 80% と 95% として設定し解析した. R の `quantreg` パッケージを使った¹⁵⁾.

b) 航行中における対地風の変動

本論文では、対地風に関して、20 秒で平均した船上風の測定値と船速から推定し、これをさらに一航行で平均したものを扱っている. 航行については、陸域から離れた湾口中央部付近 (東経 $139^\circ 44.4'$ から $139^\circ 48.0'$ までの区間) での航行として定義した. 「かなや丸」はこの区間をおよそ 20 分で通過し、50 程度の船上風の平均値が得られた.

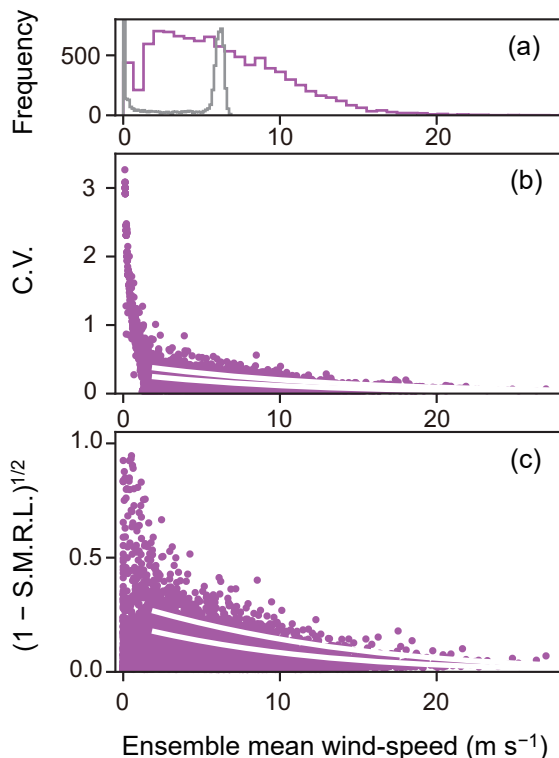
航行中における対地風の変動を把握するため、式(3)より対地風の風速のC.V.を算出し、式(4)より風向の変動を算出した。ただし、 n については湾口中央部付近で得られるデータ数とし、風向については各データにおける推定値 θ_w^* で置き換えた。また、同様に θ_s で置き換え、「かなや丸」の進行方向の角度の変動についても算出した。

(3) 結果と考察

a) 平均データに内在する変動

ランダムに抽出した10,000データのうち、船上の測定風の風速C.V.及び風向の変動を算出できた有効なデータは、それぞれ、8,688データ及び8,670データであった。それ以外のデータは船上風の測定値が 0 m s^{-1} に近く算出できなかった。

このデータのうち、航行中のデータは4割程度であり、それ以外は久里浜港もしくは金谷港の港内で停泊中、旋回中、もしくはゆっくりと移動中のものであり、安定した航行の状態ではなかった。「かなや丸」の航行中の船速の平均速度は、 $6.2 \pm 0.2\text{ m s}^{-1}$ であった。



図—2.5 「かなや丸」で測定した船上風の風速と風向の変動。全1,490,417データ(停泊中も含む)からランダムに抽出した10,000データにおける(a)測定風速の頻度分布と測定風速に対する(b)風速の変動係数(C.V.)及び(c)風向の変動($1 - \text{S.M.R.L.}$ の平方根)を示している。白線は、分位点回帰の結果に基づく下位からの80%値と95%値を示している。

表—2.1 データの変動と20データの算術平均値が取り得る範囲の関係。変動係数及び風向の標準偏差(S.D.)と平均0の正規分布でばらつく20データの算術平均との関係を示している。数値的に求めているため非対称となっているものもある。

指標	Mean \pm S.E.	50% 区間	80% 区間	95% 区間
速度 C.V.				
0.20	0.00 ± 0.04	-0.03 - 0.03	-0.06 - 0.06	-0.09 - 0.09
0.37	0.00 ± 0.08	-0.06 - 0.05	-0.11 - 0.11	-0.17 - 0.16
1.00	0.00 ± 0.22	-0.15 - 0.16	-0.29 - 0.29	-0.44 - 0.44
風向の S.D.				
10°	$0.0^\circ \pm 2.2^\circ$	$-1.5^\circ - 1.5^\circ$	$-2.8^\circ - 2.9^\circ$	$-4.4^\circ - 4.3^\circ$
20°	$0.0^\circ \pm 4.5^\circ$	$-3.1^\circ - 3.0^\circ$	$-5.8^\circ - 5.8^\circ$	$-8.9^\circ - 8.6^\circ$

船上で測定した風速の頻度は、2から 3 m s^{-1} をピークとして大きな方に尾を引く分布であった(図—2.5a)。風速のC.V.と風向の変動は、風速が大きくなる程小さくなる傾向であった(図—2.5b, c)。分位点回帰より、風速のC.V.の95%値は、風速 10 m s^{-1} において0.20、風速 4 m s^{-1} において0.32、風速 2 m s^{-1} において0.37であった。風速 2 m s^{-1} 以下ではC.V.は1.0を超えることもあった(図—2.5b)。

風向の変動の95%値は、風速 10 m s^{-1} において0.14、風速 4 m s^{-1} において0.23、風速 2 m s^{-1} において0.27であった。風速 2 m s^{-1} 以下では、風向の変動は1.0に近づく傾向を示していた(図—2.5c)。

「かなや丸」の船速の精度は、1つのデータが取得される間(20秒間)の移動距離とGPSコンパスの精度から推定できる。まず、「かなや丸」の平均船速($6.2 \pm 0.2\text{ m s}^{-1}$)から、1つのデータが取得される間の移動距離は124mと見積もることができ、GPSコンパスの水平精度が2.5m未満であることから最大でこの倍の誤差(5m)があったとしても、その精度は船速の精度の4%となる。船上風が安定する風速 10 m s^{-1} におけるC.V.は0.20であり、この変動の下で得られる平均値は、期待値として 0.00 ± 0.04 の平均が得られるものの、9%の誤差が生じる可能性もある(表—2.1; 95%確率)。この誤差は、船速の誤差に対して倍程度である。風速 2 m s^{-1} においては(C.V.は0.37)、船速の誤差の4倍となる16%(95%確率)の誤差が生じる可能性がある。

角度の誤差に関しては、「かなや丸」の誤差が進行方向の直角方向に5mあった場合に 2° と見積もることができる。一方、風向は、風速 10 m s^{-1} と 2 m s^{-1} において0.14と0.27で変動していたことから、正規分布のばらつきを仮定すると概ね 10° から 20° の標準偏差に基づく変動があったものと推定される(付録A)。この下での20秒平均は、船速による誤差と比較すると、50%確率では同程度であるが95%確率で十分に大きな誤差が含まれている可能性がある(表—2.1)。

以上のことから、対地風の推定精度においては、船上風の測定精度の方が船速の精度よりも支配的であると判断できる。

しかし、船上風の測定精度が対地風の推定精度に影響する条件は、対地風の風速が船速に対して大きい場合であり（付録B）、実際に「かなや丸」で船上風の測定精度が影響していたかどうかについては、さらなる検討が必要である。

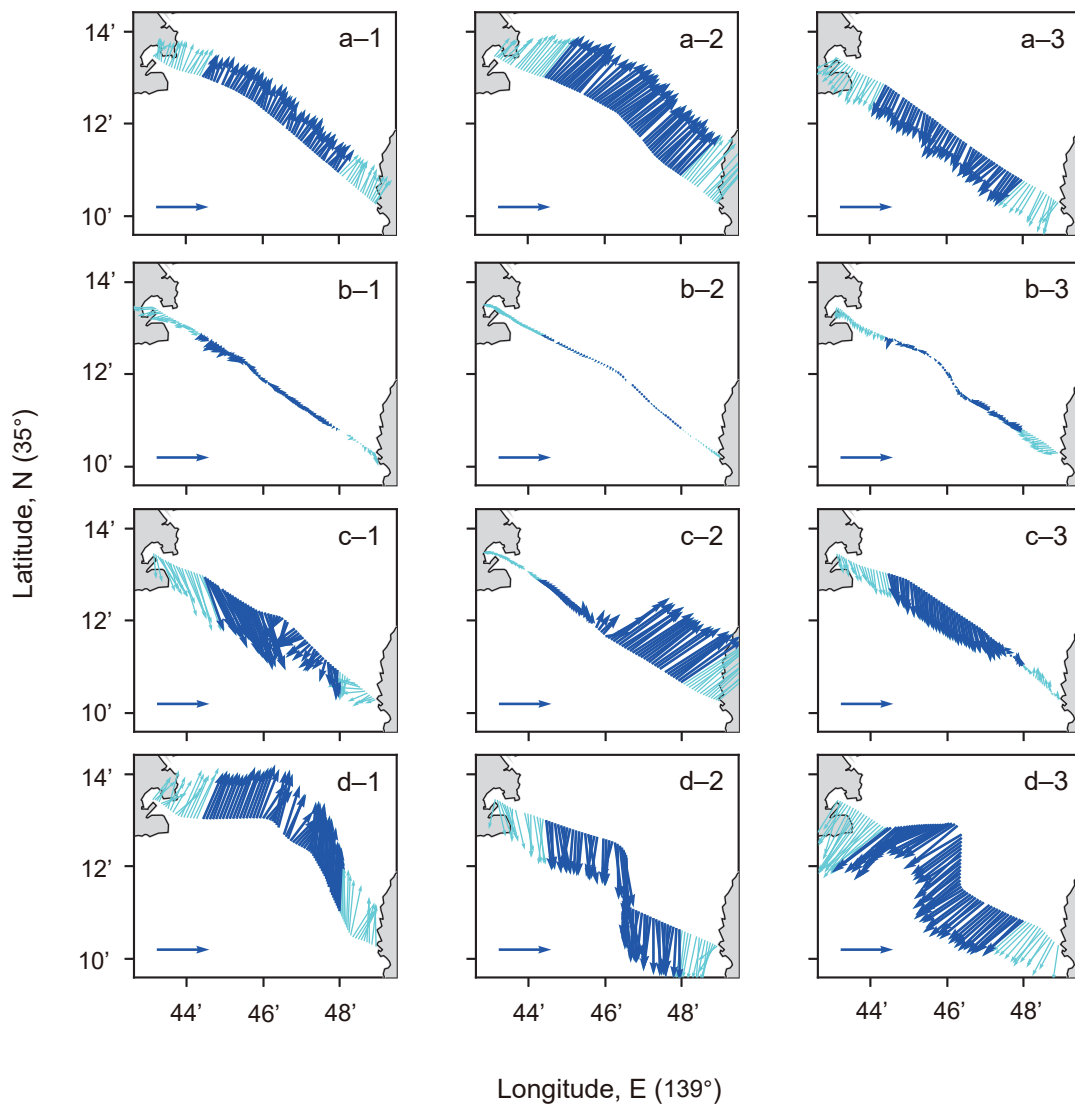
b) 推定される対地風の変動パターン

推定される対地風のパターンとして、風速が大きく、風向及び風速が共に一様なケース（図—2.6a）、風速が小さく、風向及び風速がばらつくケース（図—2.6b）、航路の途中で風速が大きく変化するケース（図—2.6c）、航路が大きく蛇行し、その影響を受けているように見えるケース（図—2.6d）が確認された。

風速 C.V. と風向の変動は、ケース間で違いが見られた（表—2.2）。風速が大きく、風向及び風速が共に一様なケース

では、風速 C.V. と風向の変動は、それぞれ 0.1 程度未満であったが、風速が小さい場合は大きな値であった。航路の途中で風速が大きく変化するケースにおいては、風速 C.V. と風向の変動ともに大きな値であった。例えば、図—2.6c-2 の時間帯においては、气象台横浜観測所や三浦観測所においても風向風速の急激な変動を確認することができる（<https://www.data.jma.go.jp>）。このことから、非常に急激な変化ではあるものの、測定上の問題によるものではなく、実際の対地風の非定常性が捉えられていたものと考えられる。

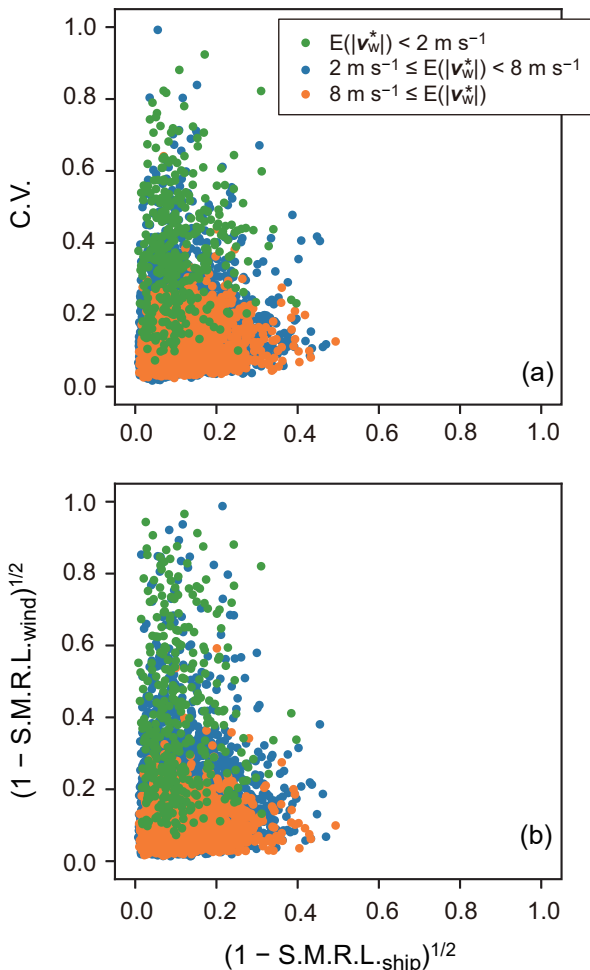
航路が大きく蛇行する場合、進行方向の角度の変動は他のケースよりも大きな値となったが、対地風の風速 C.V. と風向の変動は、対地風が一様な場合と比べてやや大きいものの、他のケースの変動に比べると安定している（表—2.2）。



図—2.6 対地風の風向風速推定の例 ($\alpha_{\text{mis}} = 0.0$, $1 + \beta = 1.0$)。 (a) 対地風の風速が強く定常性が高いケース、 (b) 風速が弱いケース、 (c) 風速が強く非定常性が高いケース、 (d) 航路が大きく蛇行しているケースを示している。濃い青色は、東経 139° 44.4' から 139° 48.0' までの区間の推定結果を示している。

表—2.2 対地風の風向風速推定の例における統計値. 航行中の「かなや丸」の進行方向の変動と対地風の平均風速, 風速の変動係数 (C.V.), 風向の変動を示している. 進行方向及び風向の変動は, $1 - \text{S.M.R.L.}$ の平方根を示している. それぞれのケースについては図—2.6を参照.

ケース名	「かなや丸」				対地風の推定結果		
	年 / 月 / 日	出港	到着	進行方向の角度変動	風速 (m s^{-1})	風速の C.V.	風向の変動
a-1	2019/03/24	15:20	16:00	0.09	5.4	0.09	0.10
a-2	2019/05/09	18:25	19:00	0.13	11.0	0.05	0.06
a-3	2019/11/05	10:20	11:00	0.02	6.2	0.09	0.13
b-1	2019/04/03	14:20	15:10	0.05	1.7	0.36	0.31
b-2	2019/05/25	9:25	10:00	0.10	0.6	0.33	0.64
b-3	2019/12/26	6:20	7:00	0.17	1.2	0.52	0.52
c-1	2020/02/08	18:25	19:00	0.12	8.2	0.38	0.39
c-2	2020/02/22	8:20	9:00	0.07	8.2	0.64	0.58
c-3	2020/06/01	13:50	14:30	0.09	5.1	0.41	0.50
d-1	2019/08/17	15:20	16:00	0.34	9.7	0.15	0.15
d-2	2019/10/17	17:25	18:05	0.36	10.0	0.11	0.08
d-3	2019/10/24	18:15	18:55	0.43	11.5	0.10	0.08



図—2.7 航路の蛇行と対地風の変動の関係. 進行方向の角度の変動に対する (a) 風速の変動係数 (C.V.) と (b) 風向の変動の関係を示している. 対地風はキャリブレーションを行う前の条件 ($\alpha_{\text{mis}} = 0.0, 1 + \beta = 1.0$) に基づき, すべての航行 (6,802 航行) について推定している. $E(\cdot)$ は航行中の平均.

また, 対地風の風速及び風向の変動は, 対地風の風速の大きさに支配されているように見えることから考えても (図—2.7), 進行方向の変動が対地風の変動の主要な要因とは考えにくい.

c) 対地風の推定精度に影響する要因

対地風の変動パターンより, 対地風の非正常性が高い場合を除き, 「かなや丸」の航行中の対地風推定値の均質性は確保されていると判断できる. 実際, 航行中の船上風の風速はほとんどのケースで変動が安定する 4 m s^{-1} 以上であり (図—2.8a ; 6,802 航行中 6,669 航行), 変動が著しく大きくなる 2 m s^{-1} 以下になることはほとんどない (6,802 航行中 6 航行). このことから, 船上風の変動が対地風の変動の主要な要因になっているとは考えにくい.

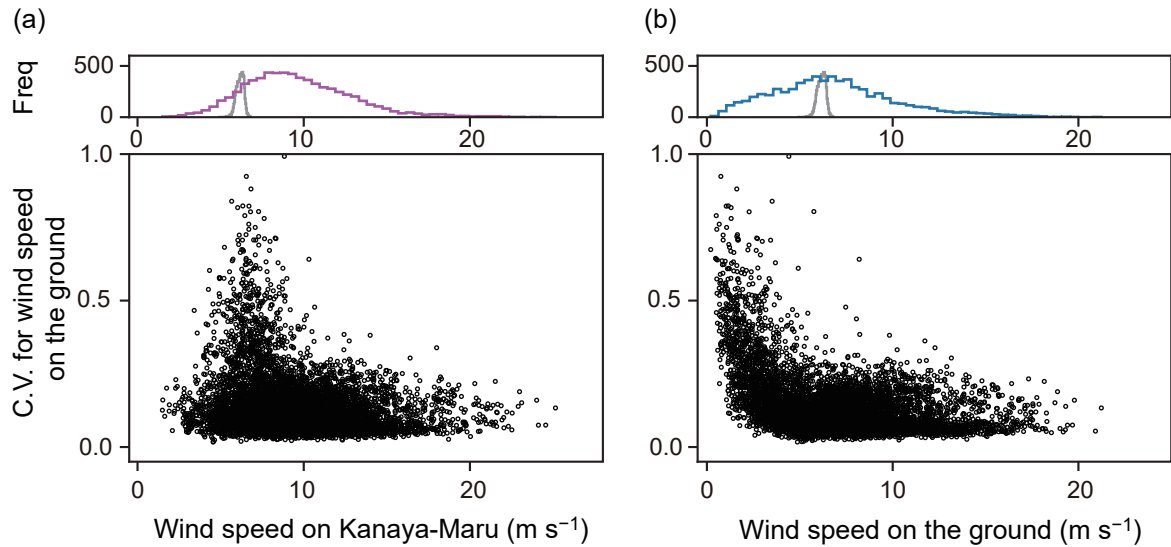
一方, 対地風の風速が小さければ, 風速の変動は大きくなることから (図—2.8b), 対地風の風速の大きさがその推定精度を支配している可能性が高い. この理由については, 理論上からも説明できる (付録 B).

対地風の風向は, 風速が大きいと安定するものの, 風速が小さくなると変動しやすく, 風速の変動とともに同時生起している (図—2.9).

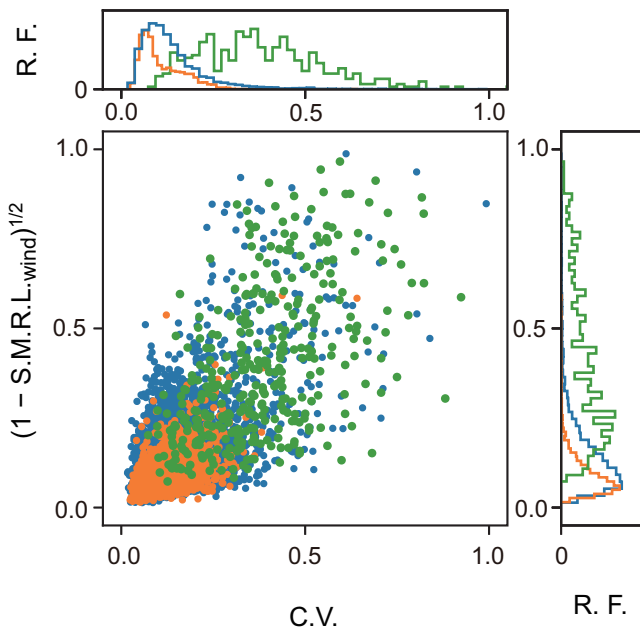
以上より, 風速と風向の変動は, 船上風の測定精度の影響よりも対地風の風速の大きさに強く依存しているものと結論付けることができる.

2.4 まとめ

本章では「かなや丸」における風観測の概要の説明及び風観測を行うにあたっての定義を行い, 風向風速計の測定値及び対地風の推定値の精度に与える影響を評価した. こ



図—2.8 対地風の風速の変動係数 (C.V.). (a) 船上風の風速と (b) 対地風の風速に対する関係を示している. それぞれの頻度分布に「かなや丸」の船速の頻度分布 (灰色) も示している. 対地風はキャリブレーションを行う前の条件 ($a_{\text{mis}} = 0.0$, $1 + \beta = 1.0$) に基づき, すべての航行 (6,802 航行) について推定している.



図—2.9 対地風の風速の変動係数 (C.V.) と風向の変動の関係. 凡例については図—2.8 と同じ. 風速の C.V. と風向の変動の頻度分布は, 各風速カテゴリの中での相対頻度 (Relative Frequency, R.F.) を示している.

の結果, 「かなや丸」の風向風速計で測定される風向及び風速の変動は, 風速が小さいほど大きく, 特に測定風速が 2 m s^{-1} 以下で著しく大きくなることが明らかとなった. 「かなや

丸」では, 20 秒間の平均値を扱うことになるが, この変動の下では, 代表性が損なわれる可能性が考えられた. しかし, 対地風の風速の精度は, 測定精度よりも, むしろ対地風の風速の大きさに強く依存しているものと考えられた.

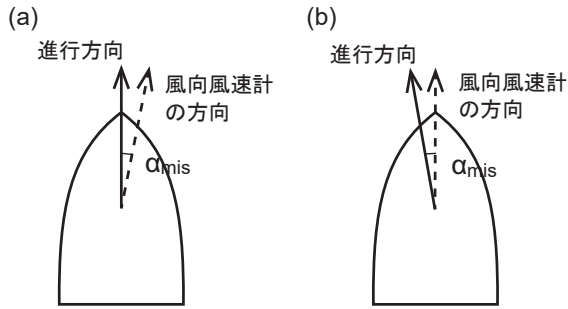
3. 「かなや丸」の風向風速計の精度検証とキャリブレーション

3.1 概要

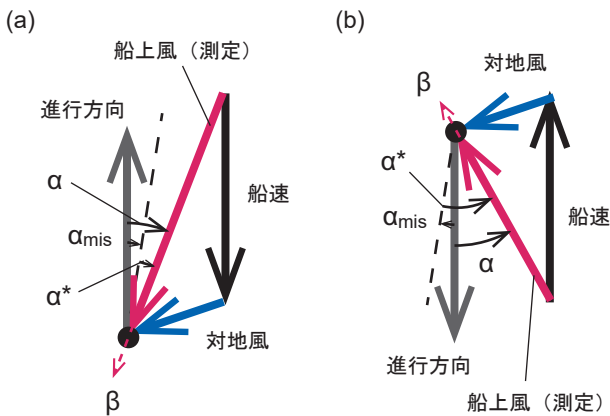
(1) 船舶による流れ観測の知見の整理

移動する船舶による流れの観測では, 船舶の対地及び対水の移動速度を精度よく測定しなければならない. 船舶による流れの観測の一つとして, 船舶に搭載した ADCP による海洋の流動測定に関する研究が 1980 年代に活発に行われ, 機器の取り付け誤差がその推定精度に影響することが明らかにされている. この取り付け誤差として, 船舶に対する機器の水平方向のずれ (ミスアライメント) や ADCP に関しては傾斜して設置されることに起因して流速が変動することがよく知られている^{5),6)}.

船舶で対地風を推定する場合においてもこの考え方は適用できる. ミスアライメントに関しては, 風向風速計の取り付けによる誤差だけでなく (図—3.1a), 船舶の進行方向が船首から偏っている場合に起こり得る (図—3.1b). 風速の変動は, 対地風に対して風向風速計が平行でないことにより生じることが考えられる. これは, 風向風速計に対して対地風が水平に吹いていないこと, もしくは船舶の動揺によるもの等の複数



図—3.1 風向風速計のミスアライメント角の説明. (a) 風向風速計が船首に対してずれて設置されている場合や (b) 風向風速計の方向は船首に一致しているものの、船舶の進行方向が船首に対して偏っている場合にもミスアライメント角が生じる.



図—3.2 「往復航行による風向風速計のキャリブレーション方法. 対地風が同じであっても船の進行方向が違えば、測定する船上風の風向及び風速は大きく異なる.

の要因が想定される。また、対地風に対する風向風速計の設置に係わるだけでなく、風速は風向風速計の出力の劣化によっても変動することも考えられる。

風向風速計にミスアライメントと風速の変動がある場合、船上風の測定値 (\bar{v}_r) と補正值 (v_r) の関係は、Joyce (1989)⁵⁾ に倣って記述すると以下となる：

$$v_r = (1 + \beta) \times R(\alpha_{\text{mis}}) \cdot \bar{v}_r \quad (7)$$

$$R(\alpha_{\text{mis}}) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{\text{mis}} & -\sin \alpha_{\text{mis}} \\ \sin \alpha_{\text{mis}} & \cos \alpha_{\text{mis}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここに、 α_{mis} と β は、それぞれ、ミスアライメント角と風速の変動によるずれ（以下、 $1 + \beta$ を倍率と呼ぶ）であり、 α_{mis} は進行方向から時計回りに正の角度として定義している。ミスアライメントは、上述のとおり、風向風速計の設置に関する水平方向のずれと船舶の進行方向が船首に対して偏っている

場合に生じるが、いずれにしても、ミスアライメント角は進行方向からのずれとして考えれば問題はない。 R は回転行列を表している。

ミスアライメントと風速の変動の影響は、船速に対する対地風の風速の比に依存し、この比が小さくなるほど影響は大きくなる（付録 B）。ADCP による流動観測では、船速に対して小さな流速を測ることが多い。例えば、外洋における流動観測では、船舶側方の流れ成分が数値シミュレーションの結果と合いにくくなることが報告されており¹⁶⁾、これらが影響している可能性が見受けられる。このように、船舶による流動観測では、ミスアライメントと倍率の影響を取り除くことが重要な課題となる¹⁰⁾。

(2) 「かなや丸」の風向風速計の検証の必要性

流れ観測を目的としている船舶においては航行速度を低減することで精度の確保ができるかもしれないが、流れ観測を主目的としていない船舶においては、そのためだけに航行速度を低減させることは難しい。このことは、「かなや丸」における風観測においても同様の事が言える。

「かなや丸」は、 6 m s^{-1} にピークを持つ風が吹く東京湾の湾口において (2.1)、それを横切るように $6.2 \pm 0.2 \text{ m s}^{-1}$ で航行する (2.3)。これは、上述の ADCP による流動観測に比べれば、ミスアライメントと風速の変動の影響を比較的受けにくい条件と言え。しかし、「かなや丸」の側方から吹く風は、ミスアライメントもしくは風速の変動による対地風の推定精度への影響を生じさせる可能性がある（付録 B）。

(3) 本章の目的と概要

本章では、「かなや丸」の風向風速計のミスアライメントと風速の変動の有無の把握を目的として、約1年半の間に蓄積されたデータに基づき、対地風の精度検証を行った。検証方法としては、「かなや丸」の久里浜港と金谷港の往復航行で推定した対地風を比較する方法を採用した。この方法では、同じ対地風を観測しても船上風の測定値が往復間で異なる応答をすることから（図—3.2）、異なった応答に基づいたミスアライメント及び風速の変動を抽出できる（付録 B）。なお、他の観測結果を基準として比較検証する方法もあるが、この方法は、他の基準となる観測所が無い場合でも適用できる利点がある。

本章では、まず、この方法により「かなや丸」が有するミスアライメントと風速の変動の検証によりミスアライメント角と倍率の候補を抽出し、次に、「かなや丸」の航路近くにある海上保安庁の AIS 信号所で測定された対地風と比較し、この候補の妥当性を検証した。

3.2 方法

(1) 往復航行による検証方法の概要

「かなや丸」は、久里浜港と金谷港の間を約1時間程度の

差で往復航行する。ここでは、まず、あらかじめ定めたミスアライメント角と倍率の組み合わせに基づき、測定された船上風を式(7)で補正して式(2)により対地風の風向風速を推定し、各航行ごとに航路中央付近(東経 139° 44.4' から 139° 48.0' までの区間; 2.3 と同様)における平均を求めた。精度検証は、その直近の航行で推定した風向と風速を比較して実施した。なお、久里浜港から金谷港を往路、逆を復路として比較した。

直近の航行は、約1時間程度の差の航行として定義した。対地風は、航行中に風況が大きく変動することもあり(図—2.6b)、必ずしも定常性の仮定は成立しない。しかし、このようなケースは稀であることから、ここでの検証は、大量のデータに基づけば、それらの影響はほとんどないものと考えて実施している。

(2) ミスアライメント角と倍率の探索

ミスアライメント角と倍率については、あらかじめ複数の組み合わせを設定し、パラメータスイープ¹⁷⁾により評価指標が最適となる組み合わせを探索した。パラメータスイープにおいては、まず、ミスアライメントと風速の倍率がでない状態(ミスアライメント角 0° と倍率 1.0)を中心としたミスアライメント角 [-20°, 20°] と倍率 [0.7, 1.1] の区間を設定し、それぞれ、2° 及び 0.05 の間隔で概略解析を実施した。次に、その結果に基づき、区間を狭め間隔を狭めたパラメータスイープを実施した(詳細解析)。

また、ミスアライメント角もしくは倍率が時間的に変動する可能性も考えられることから、全期間だけでなく期間に区切った精度検証も行った(表—3.1)。なお、「かなや丸」の船速については、GPS により十分な精度が得られていることから、測定風の変動のみに着目した。

(3) ミスアライメント角と倍率の妥当性の検証

抽出した最適なミスアライメント角と倍率の組み合わせに基づき、船上風の測定値を式(7)で補正し、式(2)により船速と補正された船上風から対地風を推定した。この推定の妥当性について、次の2つの方法で検証した。

1つ目は、往復航行による風向の視覚的な比較である。風向の往復航行比較は、理論から対地風が小さい場合に 1 対 1 から大きく外れた関係になることが予測されている(付録 C)。すなわち、補正前にこのような関係が見られ補正後に改善されると予測される。この方法は、次に示す他に参照できる観測所が無い場合の検証として有用である。

次に、海上保安庁の AIS 信号所で測定されるほぼ同時刻の対地風(毎時 25 分と 55 分に発表される)との比較を行った。AIS 信号所との比較は、往復航行比較とは違いほぼ同時刻の観測結果に基づき実施できるが、その測定条件は不明であり、「かなや丸」と測定条件は一致するかどうかわからない。このことから、本論文では AIS 信号所の結果との比較

表—3.1 ミスアライメント及び風速の倍率の時間変動の検証のための期間と航行ペア数。

名称	解析期間		航行ペア数
	開始	終了	
TERM0	2019/02/05	2019/06/30	1,380
TERM1	2019/07/01	2019/10/31	1,285
TERM2	2019/11/01	2020/04/30	1,565
TERM3	2020/05/01	2020/09/30	1,594

は、往復比較で検証した精度の妥当性の確認の位置づけとしている。

(4) 評価指標

比較評価においては、一般的に相関と二乗平均平方根誤差(Root Mean Squared Error, R.M.S.E.)がよく用いられる。ここでは、風向と風速の2つの相関と風速の R.M.S.E. による3つの複数の指標を用いて評価した。風速の相関と風速の R.M.S.E. は、それぞれ、以下の式に基づき評価した：

$$r_{\text{velo}} = \text{Cov}(|\mathbf{v}_{\text{wout}}^*|, |\mathbf{v}_{\text{wret}}^*|) / (\text{Var}(|\mathbf{v}_{\text{wout}}^*|) \times \text{Var}(|\mathbf{v}_{\text{wret}}^*|))^{1/2}, \quad (9)$$

$$\text{R.M.S.E.} = (|\mathbf{v}_{\text{wout}}^*| - |\mathbf{v}_{\text{wret}}^*|)^2)^{1/2}. \quad (10)$$

ここに、 $|\mathbf{v}_{\text{wout}}^*|$ と $|\mathbf{v}_{\text{wret}}^*|$ は、それぞれ、往路と復路で推定される対地風の一航行の平均風速であり、式(9)における Cov と Var はそれぞれ共分散と分散を表している。

風向の相関に関しては、ドーナツ型の座標に基づく特殊な相関となり¹²⁾、以下の式で算出することができる：

$$\hat{\rho} = \frac{4(AB - CD)}{\{(n^2 - E^2 - F^2)(n^2 - G^2 - H^2)\}^{1/2}}. \quad (11)$$

ただし、

$$A = \sum_{j=1}^n \cos \theta_{\text{wout}}^* \cos \theta_{\text{wret}}^*, \quad B = \sum_{j=1}^n \sin \theta_{\text{wout}}^* \sin \theta_{\text{wret}}^*,$$

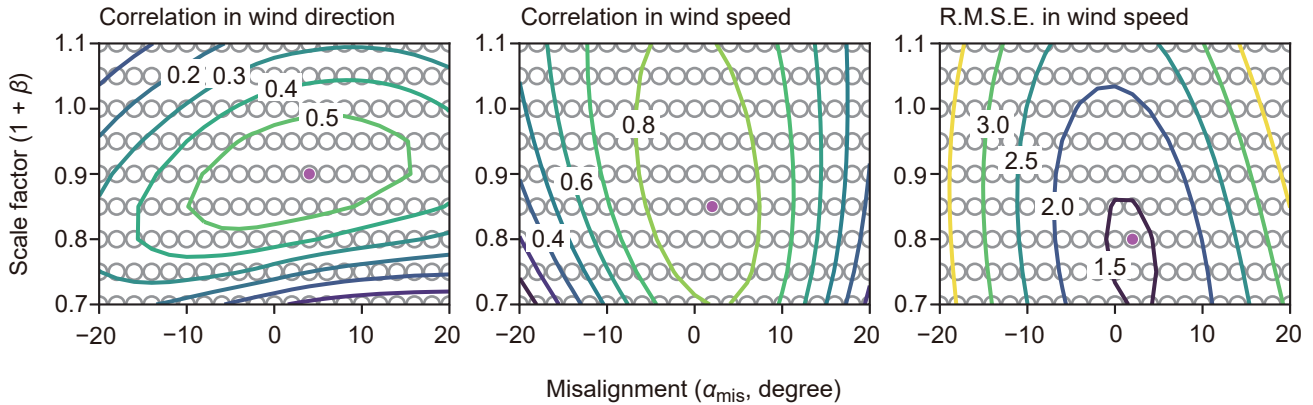
$$C = \sum_{j=1}^n \cos \theta_{\text{wout}}^* \sin \theta_{\text{wret}}^*, \quad D = \sum_{j=1}^n \sin \theta_{\text{wout}}^* \cos \theta_{\text{wret}}^*,$$

$$E = \sum_{j=1}^n \cos(2\theta_{\text{wout}}^*), \quad F = \sum_{j=1}^n \sin(2\theta_{\text{wout}}^*),$$

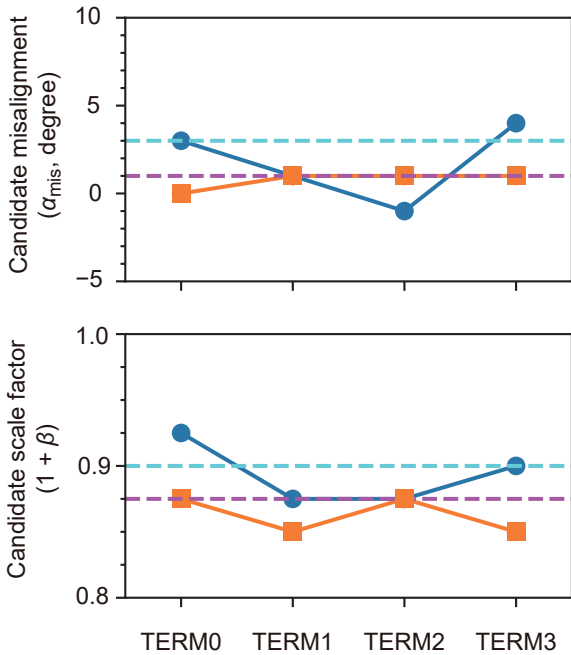
$$G = \sum_{j=1}^n \cos(2\theta_{\text{wret}}^*), \quad H = \sum_{j=1}^n \sin(2\theta_{\text{wret}}^*).$$

ここに、 θ_{wout}^* と θ_{wret}^* は、それぞれ、往路と復路で推定される対地風の一航行の平均風向であり、添え字の j は省略している。 n は往復航行のペア数である。なお、風向の R.M.S.E. については定義が難しいことから採用していない。

往復航行によって推定された対地風を比較する場合、船舶に対する対地風の風向と風速に依存して評価指標の適否が



図—3.3 パラメータスイープによるミスアライメント角と倍率の最適な組み合わせの抽出（概略解析）．往復航行によるペアを比較して，風向の相関，風速の相関，風速の二乗平均平方根誤差（R.M.S.E.）を評価指標として最適な組み合わせの候補を探索している．全往復航行ペア（5,824 ペア）を対象として解析している．



図—3.4 ミスアライメント角と倍率の最適な組み合わせの時間変動．(a) ミスアライメント角と (b) 倍率に関して，風向の相関（丸）と風速の相関（四角）が最大になった結果を示している．

決まることから（付録 C），評価する指標は1つに定めずこれら3つの指標から得られる結果を総合的に評価することで精度検証を行った．

3.3 結果と考察

(1) 往復航行による検証

往復航行のうち，約1時間程度の差の航行ペア数は 5,824 であった．以下では，このデータ数に基づき解析を実施して

いる．

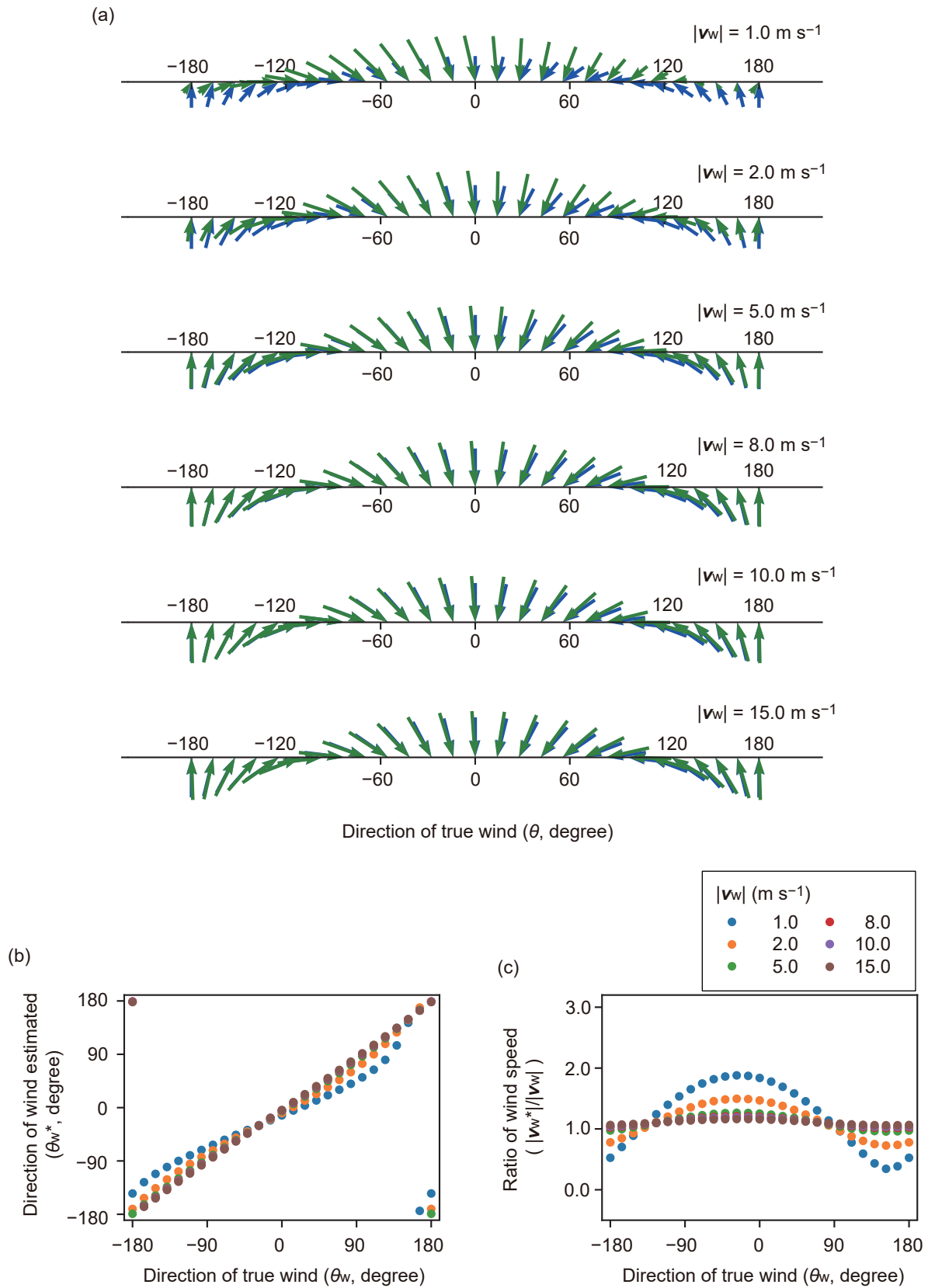
概略解析の結果，風向の相関と風速の相関より，ミスアライメント角については 0° よりやや正の付近，倍率については 0.9 付近に最適値があることが示された（図—3.3）．しかし，風速の R.M.S.E. を評価指標とした場合，倍率の候補値が他の2つの評価指標に基づいて評価された倍率よりも小さい点に最適値が示された．このことから，風速の R.M.S.E. では正しく評価できていない可能性があり，詳細解析では風速の R.M.S.E. は評価指標から外した．

概略解析の結果を受けて詳細解析では，パラメータスイープする区間をミスアライメント角で $[-5^\circ, 10^\circ]$ と倍率で $[0.8, 1.0]$ とし，間隔は概略解析の半分である 1° 及び 0.025 とした．この結果，風向の相関はミスアライメント角 3° ，倍率 0.900 において最も高く，風速の相関はミスアライメント角 1° ，倍率 0.875 において最も高くなった（図—3.4）．それぞれ，期間ごとにややばらつきがあるものの，ミスアライメント角は概ね 0° ，倍率は 1.0 よりやや小さい辺りに最適値がある点において一貫性がある．

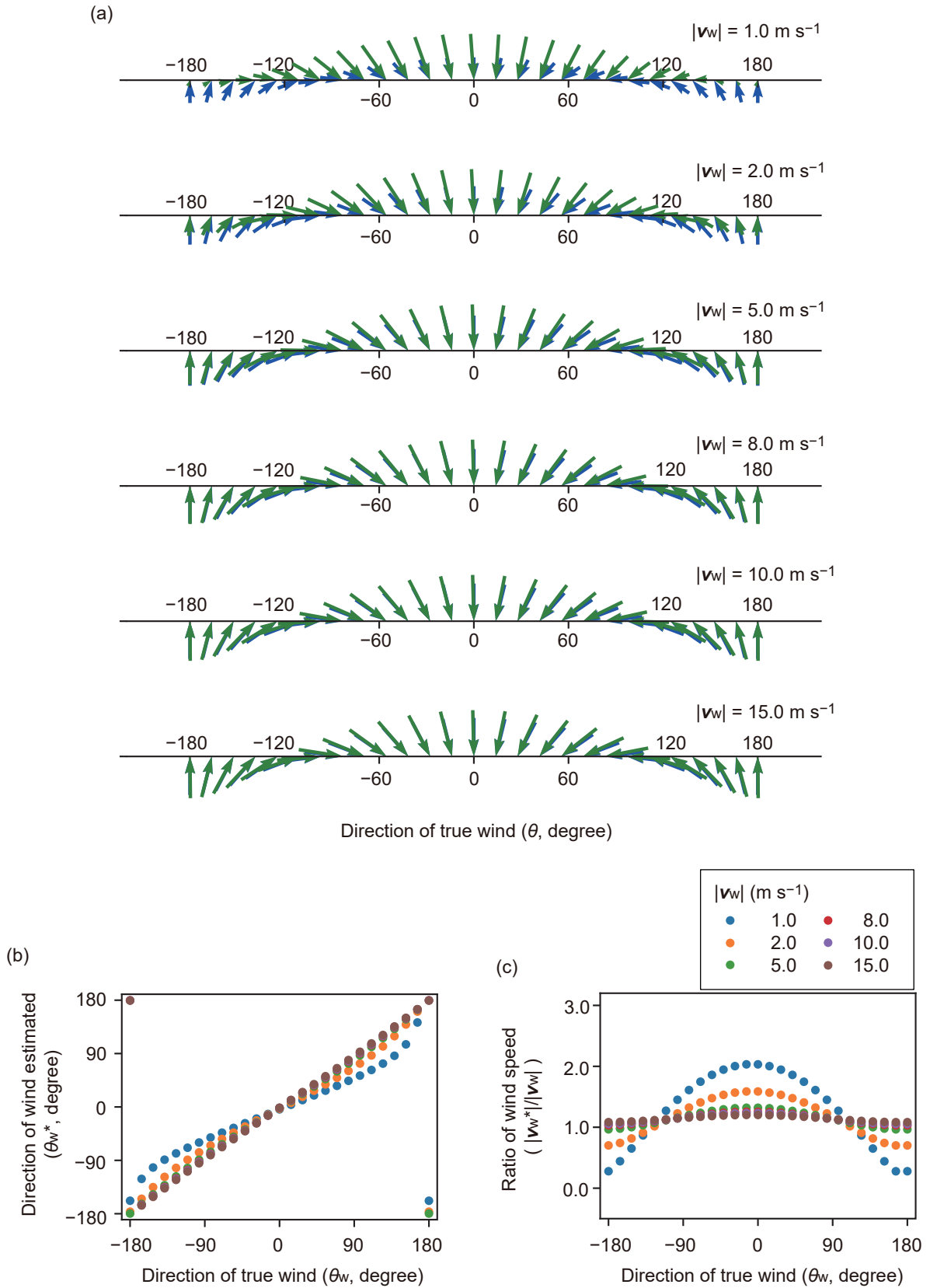
2つのミスアライメント角と倍率の候補は，ほとんど同じ推定結果を示しており，これまで対地風が小さい場合に風速が大きく推定されていたことが明らかとなった（図—3.5 及び図—3.6）．しかし，対地風の風速が大きければ推定結果は真値に近づき，対地風の風向が「かなや丸」の側方で風速が 5 m s^{-1} であれば大きな誤差はなく，「かなや丸」の運航の目的においてはどちらも実用上の問題は無い程度であると考えられる．

(2) 補正候補値の検証

往復航行によって推定した風向の比較では，補正なしの場合，往路の進行方向に対して反時計回り方向で，かつ，復路で推定する風向と1対1の関係よりも下側（復路から見



図—3.5 「かなや丸」のキャリブレーションを行う前の対地風が含んでいる誤差のシミュレーション。ミスアライメント角 (α_{mis}) と倍率 ($1+\beta$) が、それぞれ、 3° と 0.900 である場合。(a) 真の風向風速のベクトル (v_s , 青色) と推定された風向風速のベクトル (v_s^* , 緑色), 真の風向に対する (b) 推定値と (c) 風速の真値に対する比率を示している。「かなや丸」の船速は 6.2 m s^{-1} として計算している。



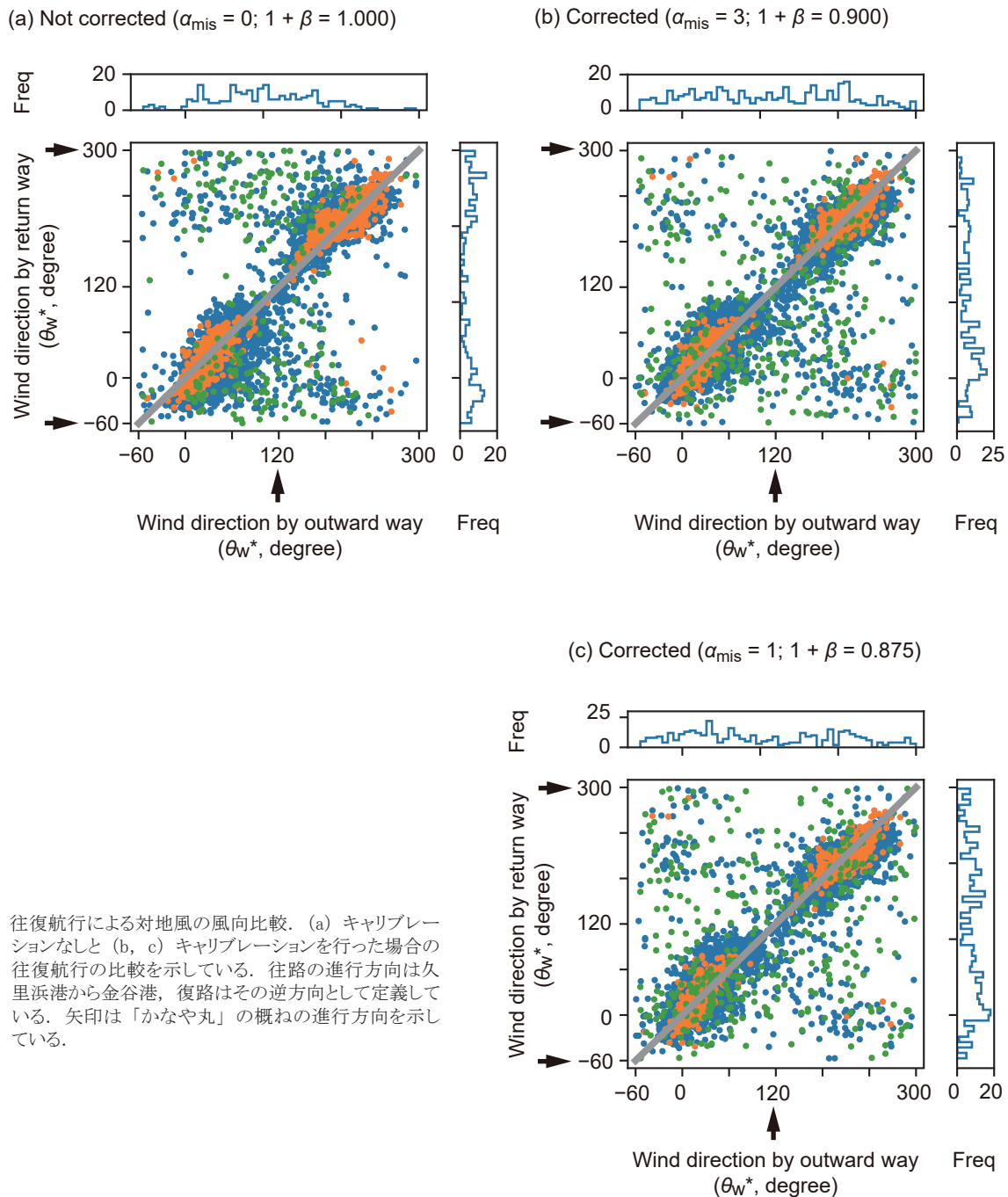
図—3.6 「かなや丸」のキャリブレーションを行う前の対地風が含んでいる誤差のシミュレーション。ミスアライメント角 (α_{mis}) と倍率 ($1+\beta$) が、それぞれ、 1° と 0.875 である場合。その他の説明は図—3.5 と同じ。

て1対1の関係よりも時計回り側)の辺りに対地風の風速が 2 m s^{-1} よりも小さなデータが偏って分布する傾向が見られた(図—3.7a)。この傾向は、倍率が1以下の場合において見られることが理論からも予測されており(付録C参照)、倍率が1以下である可能性が視覚的にも確認できる。

この補正なしの結果に対して、2つの補正の候補値に基づいて推定した風向を往復比較すると、分布の偏りは解消された(図—3.7bとc)。この結果は、これらの組み合わせによる

補正が補正なしに比べて妥当であることを示している。なお、対地風の風速が小さいデータは、内在する変動成分が強くなるものの(2.3)、補正の効果が明確に現れる点には疑問が残る。この点については、第4章においてさらに検討及び考察する。

2つの補正の候補値に基づいて推定した対地風とAIS信号所の風向風速と比較した結果、補正により、風向及び風速の相関と風速のR.M.S.E.のすべての指標が改善されること



図—3.7 往復航行による対地風の風向比較。(a) キャリブレーションなしと(b, c) キャリブレーションを行った場合の往復航行の比較を示している。往路の進行方向は久里浜港から金谷港、復路はその逆方向として定義している。矢印は「かなや丸」の概ねの進行方向を示している。

表—3.2 「かなや丸」で推定した風向風速と浦賀水道航路中央第一号 AIS 信号所における風向風速の比較結果.

	相関係数		風速の R.M.S.E.
	風向	風速	
補正なし	0.658	0.886	1.87
補正あり			
$\alpha_{\text{mis}} = 3.0, 1+\beta = 0.900$	0.684	0.900	1.56
$\alpha_{\text{mis}} = 1.0, 1+\beta = 0.875$	0.682	0.894	1.52

が示された (表—3.2). これら2つの候補値に基づいた補正では, AIS 信号所に対して大きな風速でやや過小推定になる傾向にあるものの, 全体的によい一致を見せている (図—3.8).

3.4 まとめ

本章では, 約1年半の間に蓄積されたデータに基づき「かなや丸」の風向風速計のミスアライメント角と倍率の候補となる2つの組み合わせを抽出した. 対地風の推定精度は, 現状のものでも「かなや丸」の運航において実用的に問題ない程度ではあったものの, これらの候補に基づいて補正することで明らかに改善された.

しかし, ミスアライメントと風速の倍率を検証するための評価指標の選択については課題が残った. 風速の R.M.S.E. を評価指標とすれば倍率の候補値は小さく偏り, 風向の相関を評価指標とすれば等値線がミスアライメント角方向に広く分布する傾向が見られた. これらの原因については第4章で考察する.

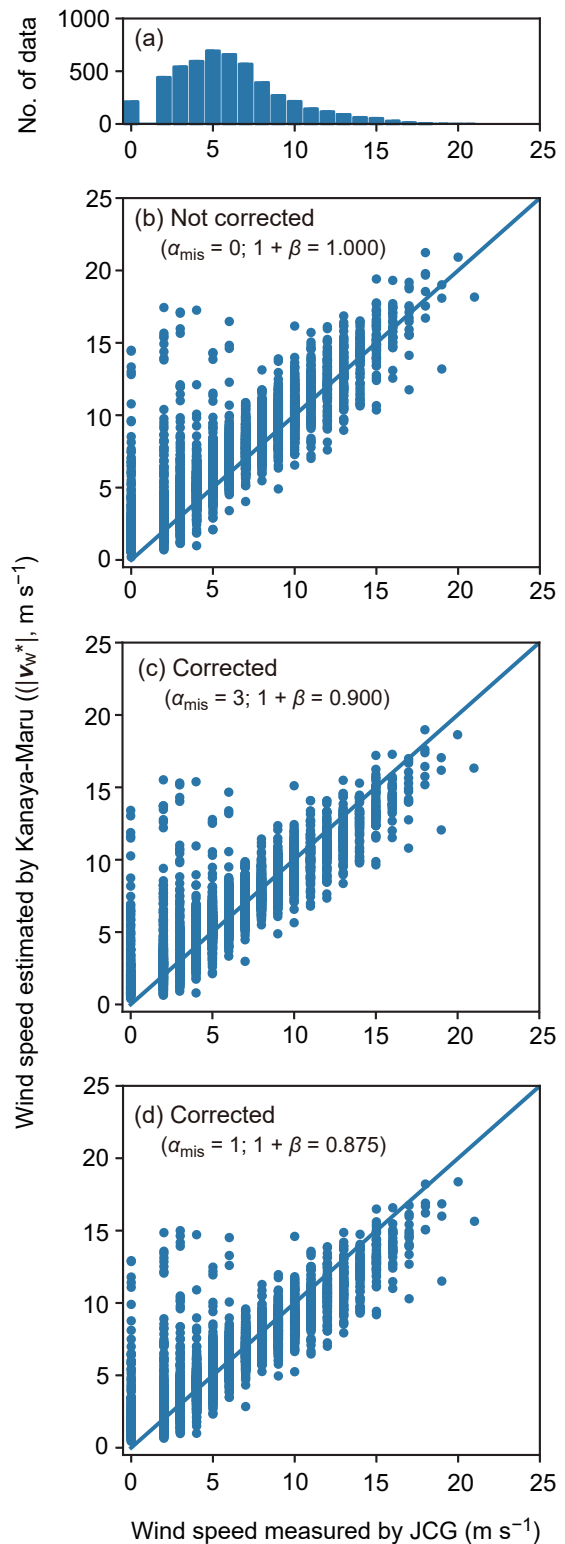
4. 一般船舶における風向風速計の精度検証方法

4.1 概要

一般船舶の船速は, 例えば内航 RORO 貨物船であれば平均で 7.2 から 11.7 m s^{-1} (26 から 42 km hr^{-1}) であり¹⁸⁾, 「かなや丸」よりも倍近く速い船舶もある. このことから, ミスアライメントや風速の倍率は, 「かなや丸」よりも強く影響し, 風観測を行う上では厳しい条件である可能性がある.

風向風速計の現地での精度検証とキャリブレーションの方法としては, 他の観測所の結果を参照する方法があり, もし, 観測条件が適切であれば, その方法が適している. しかし, 近くに観測所が無い場合や観測所があったとしても観測条件が大きく異なるために参照できなければ, 前章で採用した自船の往復航行の比較による方法を採用せざるを得ない.

しかし, 「かなや丸」のように通常の運航で精度検証用のデータが取得できる船舶は限られており, 一般船舶ではそのためだけに多くの時間を割くことはできない. このことから,



図—3.8 「かなや丸」の風向風速計のキャリブレーションの検証. 浦賀水道航路中央第一号 AIS 信号所における風速と「かなや丸」による推定風速の比較. (a) 浦賀水道航路中央第一号 AIS 信号所における風速の頻度分布, (b) キャリブレーションなしと (c,d) キャリブレーションを行った場合の比較. それぞれの線は, 1対1の関係を示している.

一般船舶ではより効率的なデータの取得が重要となる。

本章では、風向風速計の精度検証の方法として自船の往復航行の比較による方法を採用する場合の効率的なデータ取得方法の知見の整理を目的とし、必要な対地風の条件及びデータ数について、「かなや丸」で得られたデータを活用して検討した。また、精度検証に用いる評価指標に関して、その応答特性を検証し、前章で課題として残した評価が偏る原因の究明を試みた。最後に、これらの検討結果をとりまとめ、自船の往復航行の比較による風向風速計の精度検証のための指針を示した。

4.2 方法

(1) 概略

一般船舶のための風向風速計の精度検証及びキャリブレーション方法を示すためには、個々の船舶でデータを収集し解析することが望ましいが現実的ではない。一方で、船舶による対地風の観測に関しては、対地風の風速は船速で無次元化して考えることができる（付録 B）。すなわち、「かなや丸」で得られたデータであっても、対地風をその船速で無次元化することで一般化した検証が可能となる。

ここでは、「かなや丸」で得られた往復航行ペア（5,824 ペア）から無次元化した対地風の条件の下でサブデータを抽出し、一般船舶のための風向風速計の精度検証に必要な条件及びデータ数を検討した。また、これらのすべての検討では、風向の相関、風速の相関、風速の R.M.S.E. の3つの評価指標の応答特性を分析し、風向風速計の検証に適した評価指標の適用方法を検討した。

(2) 対地風の条件の検討

a) 風速の大きさ

往復航行による推定風向の比較では、対地風の風速が小さいほど、ミスアライメントと風速の倍率の影響を鋭敏に受けることから（付録 C）、対地風の風速が精度検証に与える影響について検討した。この検討では、評価指標として風向の相関を選定すれば、小さい風速ほどミスアライメントと風速の倍率が明確に見られることが期待される。

ここでは、風速の条件として、 1.8 m s^{-1} より小さい場合 ($|\mathbf{v}_w^*|/|\mathbf{v}_s| < 0.3$)、 3.1 m s^{-1} から 6.2 m s^{-1} までの場合 ($0.5 \leq |\mathbf{v}_w^*|/|\mathbf{v}_s| < 1.0$)、 9.3 m s^{-1} 以上の場合 ($1.5 \leq |\mathbf{v}_w^*|/|\mathbf{v}_s|$) を選定した。これらの対比として、条件なしの下での結果とも比較した。サブデータ数は 10（10 往復）とした。

b) 風向の偏り

対地風の風向が偏っている場合、推定風速の往復比較が直線的になり、風速の相関では正しく検証できない可能性がある（付録 C）。ここでは、風向の条件として、 -180° から -90° までの偏りを与え、風向が偏る場合を模擬した検証を行った。この風向は、東京湾の湾口における特徴的な対地

風であり（図—2.2）、場所特有の風向として十分に起こり得るものである。

一方、風向に偏りがある場合、往路と復路の定義を取り扱うことで上述の問題が解消されることが期待される。本論文では、久里浜港から金谷港へ向かう航行を往路、その逆を復路として定義しているものの、ここでは、往路と復路をランダムに混合させて、模擬的に対地風の風向に偏りを解消させ、その効果について検討した。

これらの比較として条件なしの下で検証結果との比較も行った。サブデータ数は 10（10 往復）とした。

(3) データ数

以上の検討により、ミスアライメントと風速の倍率の検証に適した対地風の条件を選定し、必要となる往復航行数を検討した。この検討は、サブデータ数を 10, 20, 30, 40, 50 とし、条件なしの下で検証結果との比較も行った。

(4) 評価方法

上述のすべての検証では、1 回の試行ごとにパラメータスウィープによりミスアライメント角と倍率の最適な組み合わせを抽出した。この抽出は各指標で実施した。なお、ここでは最適解を見出すことは目的としていないため、組み合わせについては前章の概略解析で用いたものとした。この試行を 100 回行い、適していると評価される組み合わせが選択される頻度を求めた。この結果に基づき、風向風速計の検証に適した条件、必要となるデータ数、評価に適した指標について検討した。

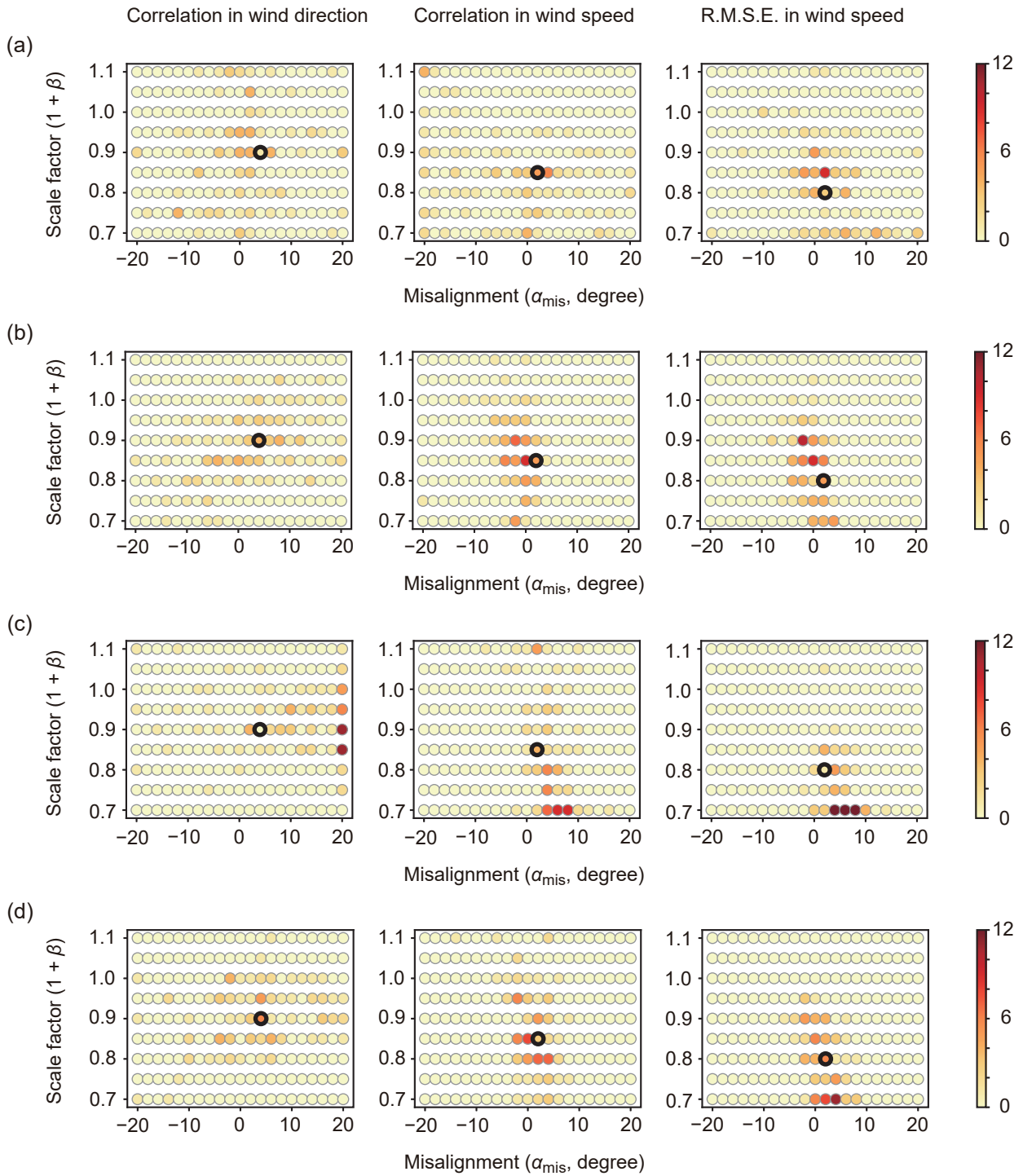
4.3 結果と考察

(1) 風速の大きさ

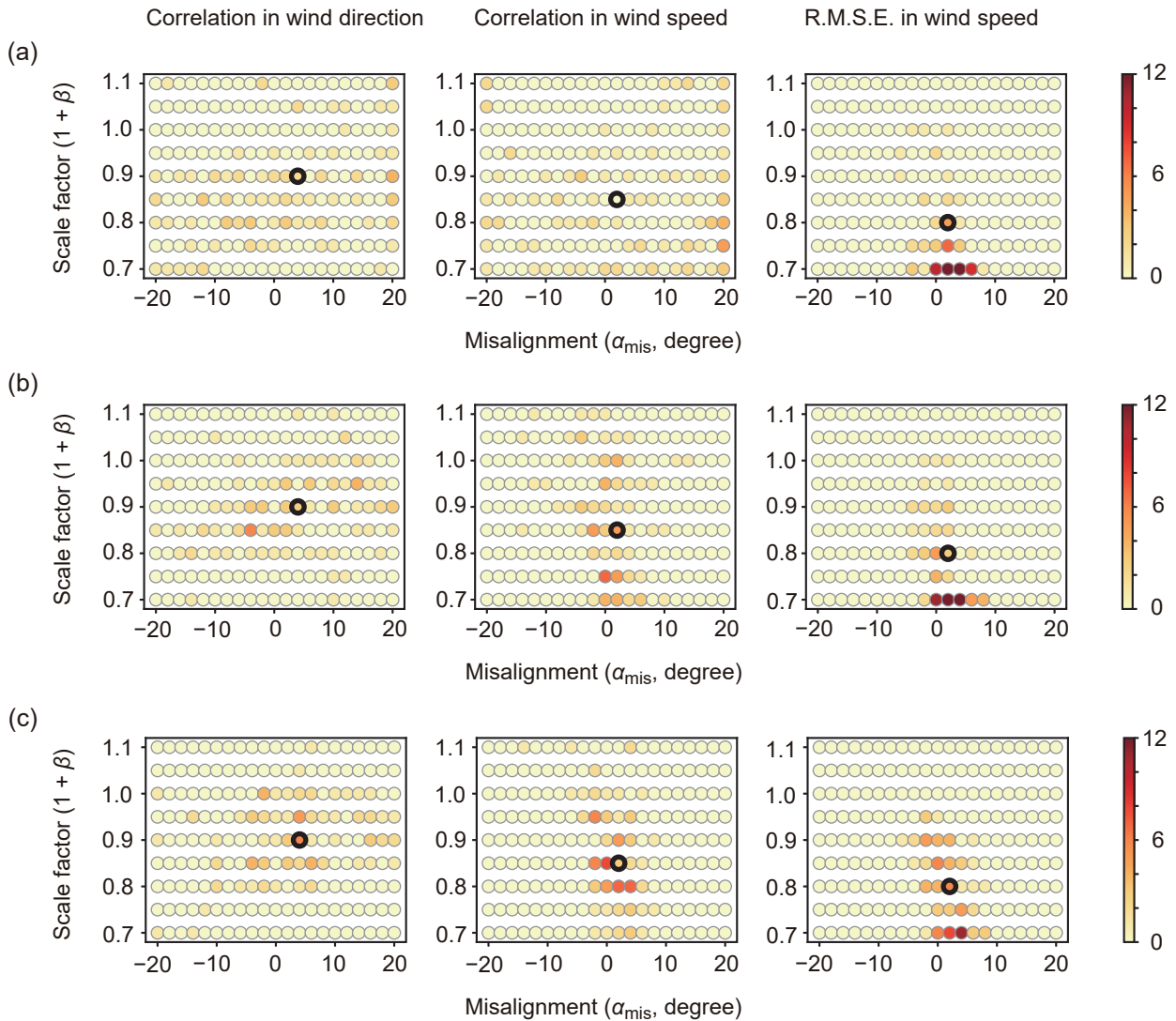
各風速の条件の下でサブデータを抽出した結果、風速の大きさと評価指標の種類によって、選択されるミスアライメント角と倍率の組み合わせの分布が異なる結果が得られた（図—4.1）。風速の相関に基づいて評価した結果に着目すると、風速が $0.5 \leq |\mathbf{v}_w^*|/|\mathbf{v}_s| < 1.0$ となる条件の下でサブデータを抽出した場合（図—4.1b）と条件なしで抽出した場合（図—4.1d）に高い頻度で選択された組み合わせが、3.3 で抽出された組み合わせと比較的類似していた。

風速の条件が $|\mathbf{v}_w^*|/|\mathbf{v}_s| < 0.3$ である場合、すべての指標において明確な選択の傾向は見られなかった（図—4.1a）。事前の理論的な検討では、風向の相関を評価指標とすれば、その推定精度に対する鋭敏さからミスアライメント角と倍率の抽出に適していると予想されたものの（付録 C）、対地風の風速が弱ければその推定精度が低下し（2.3）、明確な結果が得られにくくなったものと考えられる。

風速が $1.5 \leq |\mathbf{v}_w^*|/|\mathbf{v}_s|$ となる条件の下で風向の相関に基づいて選択した場合、ミスアライメント角は正側に偏り、風速の R.M.S.E. に基づいて選択した場合には倍率が小さい側に偏



図—4.1 ミスアライメント角と倍率の組み合わせのシミュレーション結果。「かなや丸」の全往復航行ペア (5,824 ペア) から条件に基づいて 10 データを抽出し、ミスアライメント角と倍率の最適な組み合わせを選択する試行を 100 回実施した。色は 100 回の試行の中で最も適しているとして評価された回数を示している。組み合わせを選択するための評価指標は、(左) 風向の相関、(中) 風速の相関、(右) 風速の二乗平均平方根誤差 (R.M.S.E.) とした。抽出した条件は以下のとおり：(a) $|v_w^*/|v_s| < 0.3$ の条件の下でランダム、(b) $0.5 \leq |v_w^*/|v_s| < 1.0$ の条件の下でランダム、(c) $1.5 \leq |v_w^*/|v_s|$ の条件の下でランダム、(d) 条件なしでランダム。黒丸は全往復航行によって選定された組み合わせを示している (第 3 章参照)。



図—4.2 ミスアライメント角と倍率の組み合わせのシミュレーション結果。抽出した条件は以下のとおり：(a) 風向 -180° から -90° までの範囲でランダム、(b) aと同じ条件だが往復の定義はなし、(c) 条件なしでランダム (図—4.1cと同じ)。その他の詳細については、図—4.1を参照。

る傾向が見られた (図—4.1c)。このように選択されるミスアライメント角と倍率が傾向が偏った理由として、それぞれの評価指標における特異的な応答が影響している可能性が考えられる。例えば、船速に対して対地風の風速が大きい場合、ミスアライメントがあったとしても風向の往復比較は1対1の関係になりやすいことから、風向の相関を評価指標とすれば、ミスアライメント角や倍率の影響が見えにくくなるのが理論的に分かっている (付録 C)。このことは、風向の相関に基づいた評価でミスアライメント角が正側に偏った原因の1つである可能性がある。風速の R.M.S.E. において倍率の小さい側へ偏ったことについては、後で詳細に検討する。

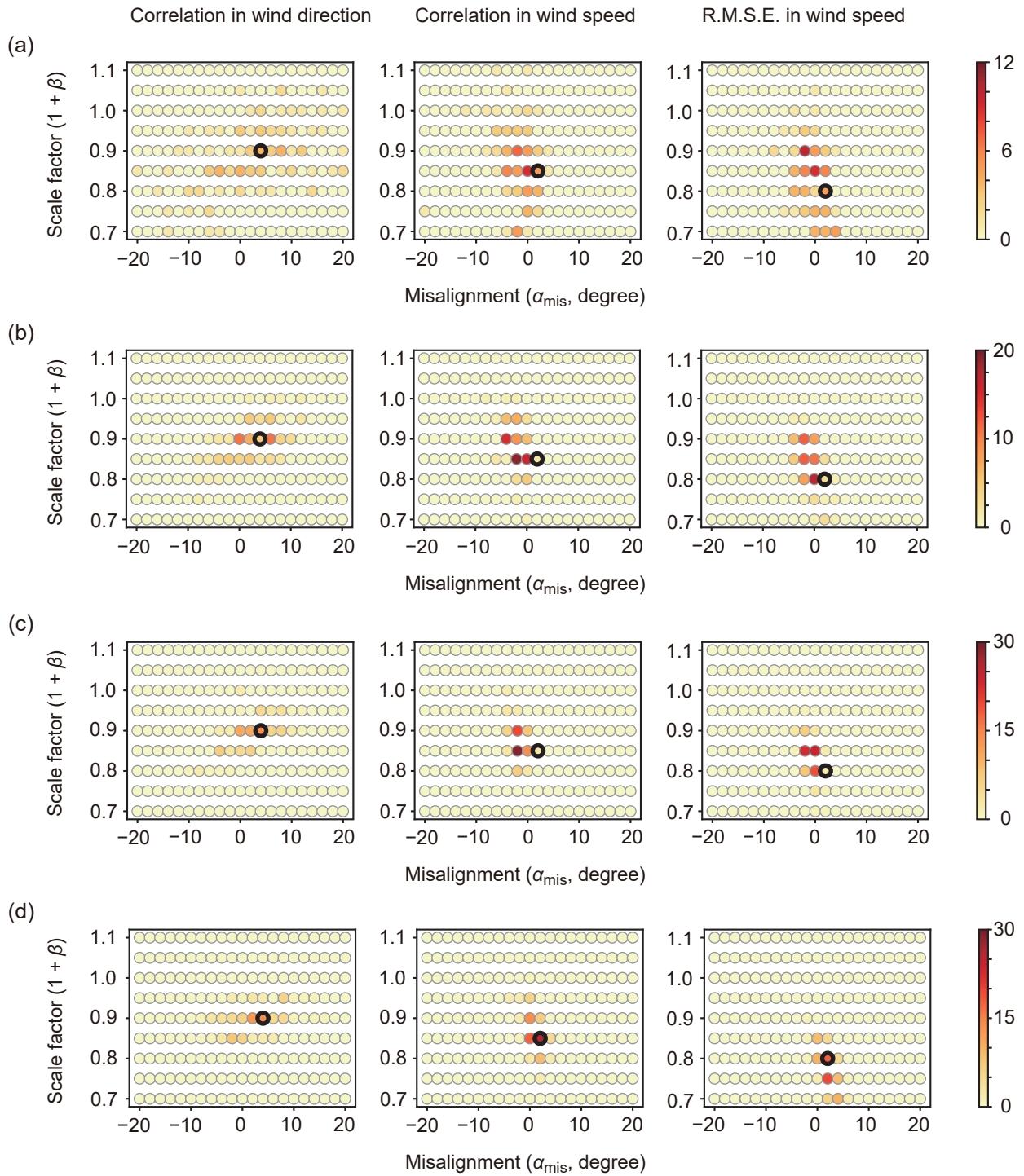
(2) 風向の偏り

対地風の風向に偏りがある場合、風向がランダムな条件に

比べて、風向の相関と風速の相関に基づいた評価では明確なミスアライメント角と倍率の組み合わせは見られなかった (図—4.2a)。往復航行の定義を無視した場合、風速の相関に基づいた結果にやや改善される傾向が見られるものの、やはり、条件なしに比べて選択の明確さが劣る (図—4.2b)。風速の R.M.S.E. を評価指標とした場合、倍率が小さく偏った評価となった (図—4.2a, b)。

風向に偏りがある場合に風速の相関を評価指標として用いると、ミスアライメントと風速の倍率の有無に係わらず相関が高くなってしまふことが理論的に分かっている (付録 C)。本検討で明確な選択傾向が見られなかった理由としては、このことが影響した可能性がある。

対地風が船舶の側方から吹く場合、風速の倍率があったと



図—4.3 ミスアライメント角と倍率の組み合わせのシミュレーション結果。「かなや丸」の全往復航行ペア (5,824 ペア) から条件に基づいて $0.5 \leq |v_w^*/|v_s| < 1.0$ の条件の下でランダムに (a) 10 データを抽出, (b) 30 データを抽出, (c) 50 データを抽出した結果と (d) 条件なしでランダムに 50 データを抽出した結果を示している. その他の詳細については, 図—4.1 を参照.

しても往復航行の比較は 1 対 1 の関係になってしまうことから, 風速の R.M.S.E. を評価指標としてもその影響は検出しにくくなる (付録 C). しかし, 本検討で倍率が小さく偏った理由については, 後述するとおり, このこととは関係がない.

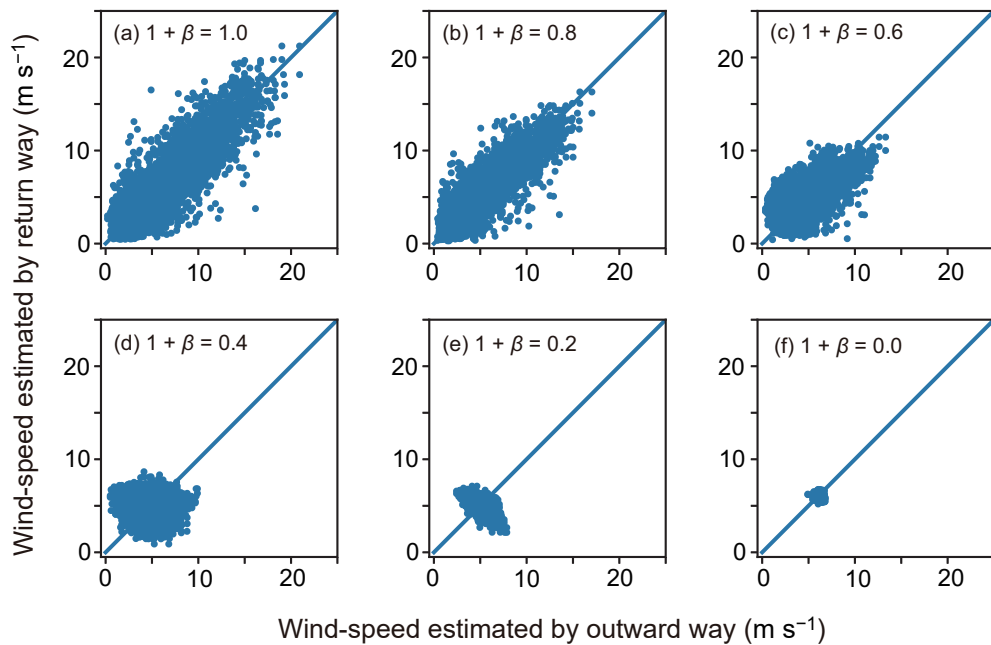
風向に偏りがある場合に評価指標として風向の相関を採用しても正確な評価ができないことは自明である.

(3) データ数

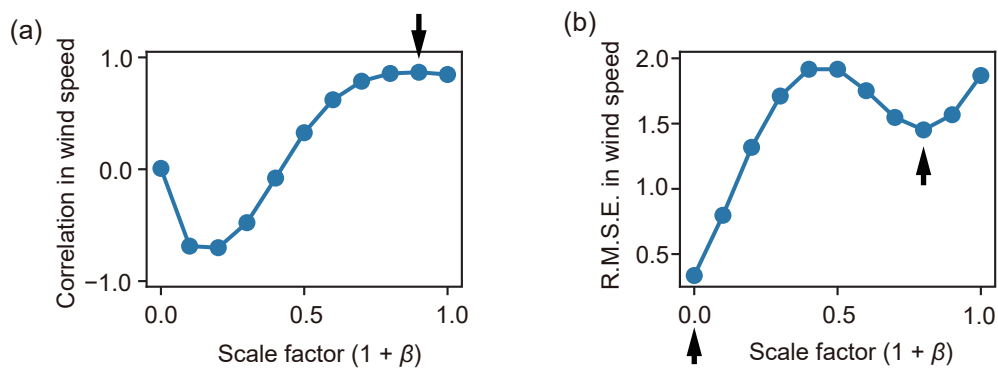
データ数の検討は, ミスアライメント角と倍率の選択におい

表—4.1 往復航行によるキャリブレーションのシミュレーション結果。「かなや丸」による測定結果から対地風の風速 $0.5 \leq |\mathbf{v}_w^*|/|\mathbf{v}_s| < 1.0$ の条件の下で抽出したペアの下で、風向の相関、風速の相関、風速の R.M.S.E. で評価して最適と見出されたミスアライメント角と倍率の組み合わせを示している。比較として、条件なしで抽出した 50 データに基づき最適と見出された組み合わせも示している。

条件	航行ペア数 (サブデータ数)	風向の相関			風速の相関			風速の R.M.S.E.		
		選択回数	α_{mis}	$1+\beta$	選択回数	α_{mis}	$1+\beta$	選択回数	α_{mis}	$1+\beta$
$0.5 \leq \mathbf{v}_w^* / \mathbf{v}_s < 1.0$	10	4	-4	0.85	9	0	0.85	10	-2	0.90
		4	0	0.85						
		4	4	0.90						
		4	8	0.90						
	20	10	-4	0.85	12	0	0.85	12	-2	0.85
	30	11	0	0.90	19	-2	0.85	17	0	0.80
11		6	0.90							
40	14	4	0.90	17	-2	0.85	17	0	0.80	
		17	0				0.85			
条件なし	50	14	4	0.90	29	-2	0.85	24	0	0.85
	50	14	4	0.90	26	2	0.85	20	2	0.75



図—4.4 倍率を変動させた場合の往復航行による対地風の風速比較。ミスアライメントが無い条件 ($\alpha_{\text{mis}} = 0$) で全往復航行ペア (5,824 ペア) を対象として解析している。直線は 1 対 1 の関係を示している。



図—4.5 倍率と風速の相関及び風速の二乗平均平方根誤差 (R.M.S.E) との関係。ミスアライメントが無い条件 ($\alpha_{\text{mis}} = 0$) で全往復航行ペア (5,824 ペア) を対象として解析している。風速の相関の矢印は極大値、風速の R.M.S.E. の矢印は局所的な極小値と大域的な最小値を示している。

て偏りが見られなかった $0.5 \leq |v_w^*|/|v_s| < 1.0$ の条件の下で行った。この結果、データ数を増やすほど、特定の組み合わせの選択頻度が高くなる事が示された (表—4.1)。具体的には、10 データの場合で 1 割程度 (100 回中 10 回)、50 データで 3 割程度の頻度で選択されており、データ数が増加することで精度検証の信頼性が向上する過程が確認できる。

風速の相関と風速の R.M.S.E. に基づいた評価では、風速が $0.5 \leq |v_w^*|/|v_s| < 1.0$ の条件の下でサブデータを抽出してもデータ数の違いにより選択されるミスアライメント角と倍率の組み合わせの傾向に大きな差は見られない (図—4.3a, b, 及び c)。しかし、条件なしで 50 データを抽出した場合、 $0.5 \leq |v_w^*|/|v_s| < 1.0$ の条件の下で抽出した組み合わせよりもやや異なる組み合わせが選択されている (図—4.3d)。風速の R.M.S.E. に基づいた評価結果に関しては、第 3 章の結果と同様に小さい倍率が選択される偏りが見られる。これは、風速に条件をつけていないことで大きな風速のデータが含まれ、これによる偏りの影響を受けた可能性が考えられる。

以上より、船舶の風向風速計の精度検証においては、データ数を増やすことは選択される組み合わせの信頼性を向上させる効果があるものの、その前提としては良い条件の下でのデータ取得が重要であることが示された。このことは、また、逆に、データの多さに頼って深く検討せずに無条件で精度検証することの危険性も示している。

(4) 評価指標

風向の相関は、他の指標に比べて、ミスアライメントと風速の倍率の選択の傾向が見えにくい評価指標であった。また、風速の R.M.S.E. を評価指標とすると、風速が大きな場合や風向に偏りがある場合に選択される倍率が小さい方へ偏る傾向が見られた。

風速の相関は、これら 2 つの評価指標に比べて、組み合わせの偏りが少なく、選択の傾向を見出しやすい評価指標であった。ただし、風速の相関は、風向に偏りがある場合にミスアライメントと風速の倍率の影響を検出しにくい欠点があることが理論的に分かっており (付録 C)、本検討でもその傾向が見られた。

3 つの評価指標のうち、風速の R.M.S.E. は倍率が小さく偏った評価結果を示す点で他の 2 つの指標に比べて特徴的であった。風速の倍率が小さくなるほど、往路と復路で推定される対地風の風速も小さくなり、最終的にはいずれの推定風速も船速に収束する (図—4.4)。倍率が 0 から 1 の範囲においては、風速の相関は 1 つの極大値を取るものの (図—4.5a)、風速の R.M.S.E. は、局所的な極小値を取りつつも、この船速に収束する傾向の結果として、倍率 0 において大域的な最小値となる (図—4.5b)。この影響を受ける範囲まで広げてパラメータスイープしてしまえば、局所的な極小値を選択する可能性は下がってしまう。このことは、風速の

R.M.S.E. を評価指標とする場合の注意点であり、また、大きな欠点と言える。

4.4 まとめ

(1) 本章の結論

本章では、自船の往復航行の比較による風向風速計の精度検証に関して、効率的なデータ取得を行うために必要な対地風の条件とデータ数、評価指標について検討した。この結果、以下の結論を得た。

風向風速計の現地での精度検証を効率的に行うためには、適度な風速 ($0.5 \leq |v_w^*|/|v_s| < 1.0$) で、かつ、風向に偏りがない条件の下でデータ取得を行うことが望ましい。もし、対地風に偏りがある場所でしか検証を行えない場合、風向に対して様々な方向で船舶を往復航行させてデータを取得する等の工夫が必要である。

精度検証に必要なデータ数に関しては、対地風の条件が良ければ、10 データ (10 往復) であっても尤もらしいミスアライメント角と倍率の組み合わせを選択できる可能性がある。しかし、より信頼性のある結論を見出すためには、可能な限り、データ数を増やすことが望ましい。

3 つの評価指標のうち、風速の相関は、比較的有用な指標ではあったが、対地風の風向が船舶側方からに偏っている場合にミスアライメントと風速の倍率を見落とす可能性がある。この見落としを回避するためには、風速の R.M.S.E. を併用して多角的に評価することが推奨される。風速の R.M.S.E. は、往復比較特有の問題として、倍率が小さく偏る評価結果を生みやすいことから、これのみを評価指標とすることは推奨されない。風向の相関については、全体的に明確な選択傾向は見られにくく、評価指標としては特筆できる利点はない。ただし、第 3 章で示したとおり、風向の往復比較のプロットは、精度の原因を視覚的に示すことができることから有用である。

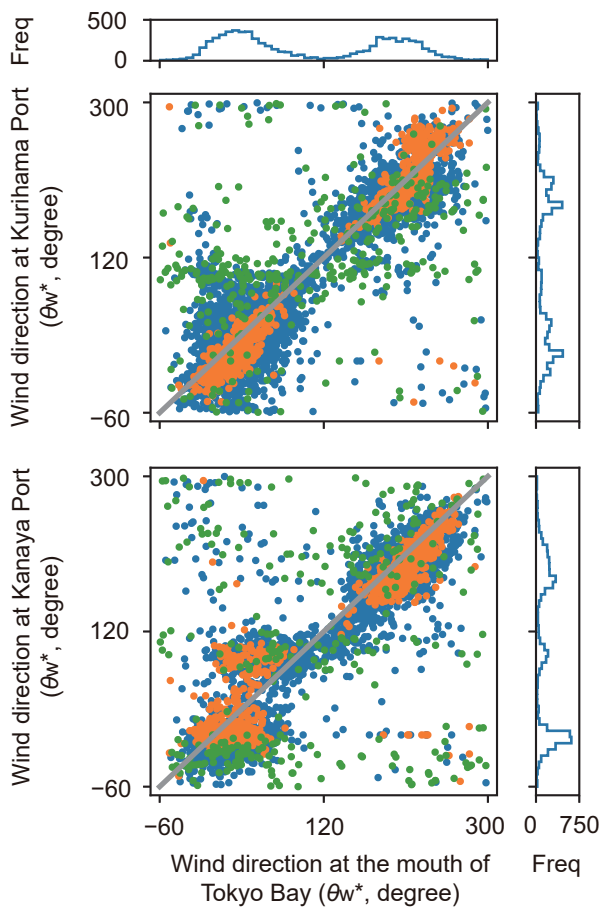
(2) 往復比較による精度検証の指針

自船の往復比較による風向風速計の精度検証を行うためには、本章で示した対地風の条件の下でデータを取得し、風速の相関だけでなく多くの評価指標に基づいてミスアライメントと風速の倍率を検証する必要がある。また、データ数が多いほど評価結果の信頼性が向上することから、航行の制約の下で可能な限り多くのデータを取得することが望ましい。

5. あとがき

5.1 本論文の結論

本論文では、船舶における風観測のための現地における精度検証とキャリブレーションに主眼を置き、「かなや丸」の精度検証及びキャリブレーションの実施、及び、一般船舶が精度検証するための考察を行った。



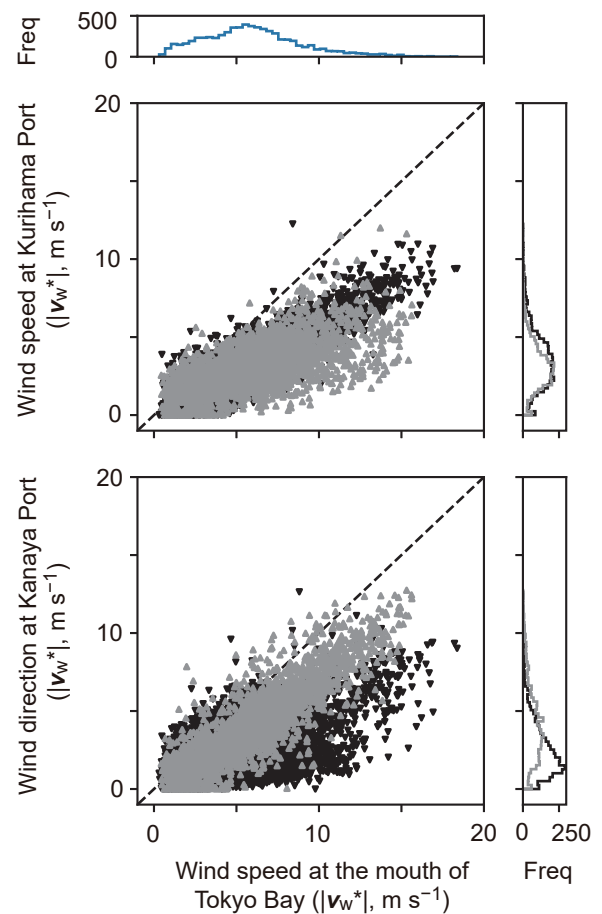
図—5.1 「かなや丸」で観測した東京湾湾口に対する（上）久里浜港及び（下）金谷港における対地風の風向の比較。それぞれの港の風向風速は、測定風から、かなや丸の航行中の進行方向（Heading navigation）を差し引いて求めた。ただし、停泊中の進行方向については、かなや丸に設置しているGPSの船首方向（Heading GPS）から推定した。進行方向とGPSの船首方向の差（Heading navigation - HeadingGPS = $-2.5^{\circ} \pm 4.2^{\circ}$ ）は、航行中に測定した結果を用いている。直線は1対1の関係を示している。

「かなや丸」における精度検証では、ミスアライメント角と倍率に関して2つの組み合わせを抽出した。これらの影響による対地風の推定誤差は大きなものではなかったが、キャリブレーションを実施することで推定精度は明らかに改善された。

一般船舶による風向風速計の精度検証の検討では、適度な風速の条件の下で、かつ、風向に偏りが無い条件でデータを取得し、条件に応じた適切な評価指標に基づいて検証することの重要性を示した。また、データ数を増やすことで、検証結果の信頼性が向上することも示した。

5.2 今後の展望

本研究で整理した船用風向風速計の精度検証及びキャリブ

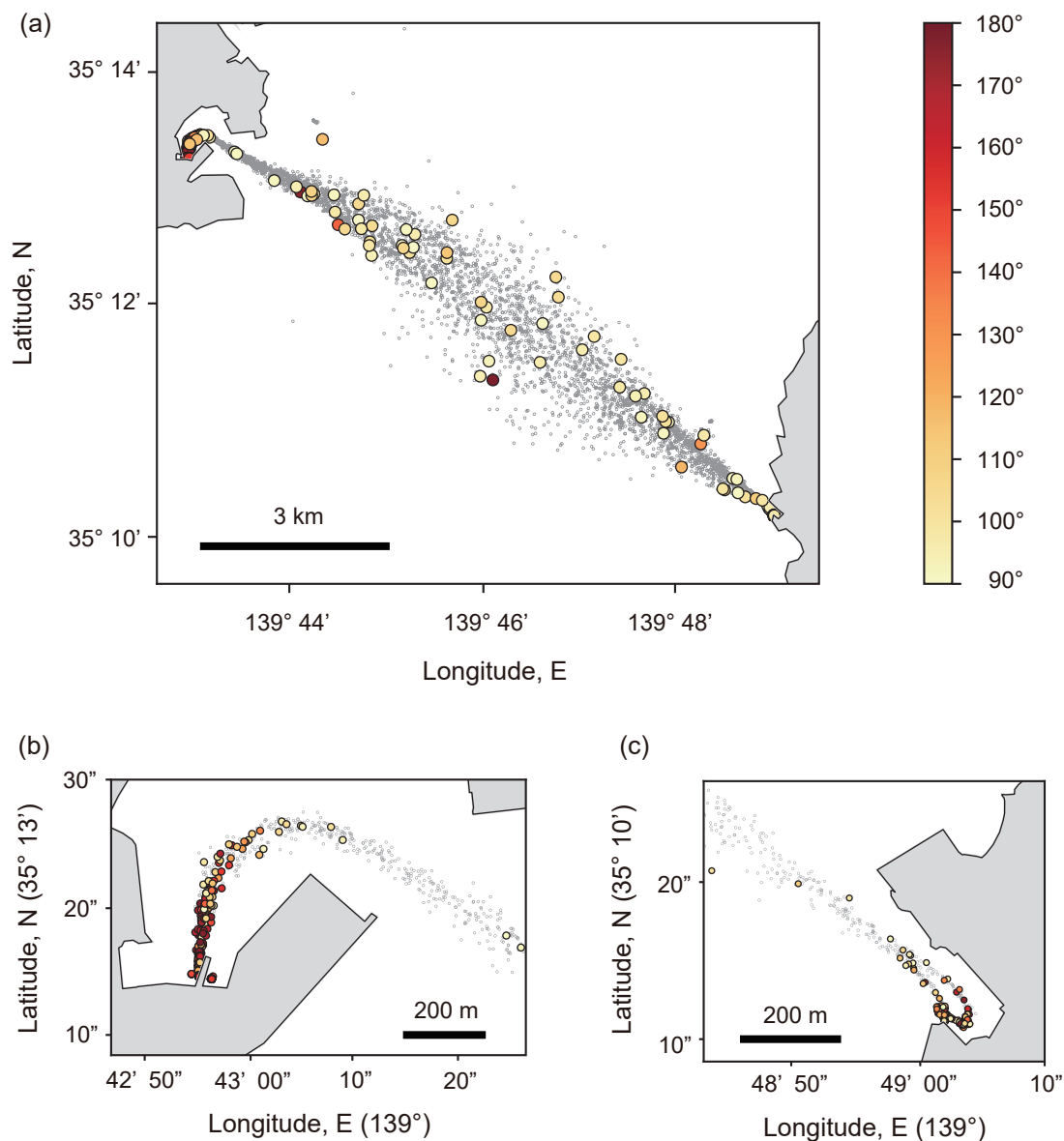


図—5.2 「かなや丸」で観測した東京湾湾口に対する（上）久里浜港及び（下）金谷港における対地風の風速の比較。黒色の三角は湾口で北風の場合、黒色の三角は湾口で南風の場合を示しているその他の説明については図—5.1と同じ。破線は1対1の関係を示している。

レーションに関する考察は、一般船舶が今後現地で実施する上で参考になるものと期待される。一方、「かなや丸」におけるキャリブレーションの結果は、「かなや丸」に特有のものであるため他への波及は期待できないものの、以下の2つに応用できる。

(1) 対地風の移動観測としての応用

「かなや丸」は久里浜港から金谷港を移動することから、風観測の移動局として利用することができる。これまでに蓄積されたデータから、東京湾の湾口付近では、対地風は概ね南北の軸に沿って吹いているのに対し（2.1）、久里浜港内と金谷港内ではそれぞれの周辺の地形の影響を受けて、風向が変動する（図—5.1）。例えば、金谷港内では湾口では北東から吹く風（風向 0° から 60° ）が局所地形の影響を強く受けて北からもしくは東からの風となる。



図—5.3 「かなや丸」の船上風の風向。(a) 航行中と停泊中における風向と船上風が側方(±90°)から後方(±180°)から吹く場合をプロットしており、側方よりも前方から吹く場合(船上風風向の絶対値が<90°)は点で示している。全データ(1,490,417データ)からランダムに抽出した10,000データの結果を示している。

風速については、湾口に比べてそれぞれの港で低減している(図—5.2)。久里浜における風速は湾口の風速の半分程度にまで低減しており、既報の傾向とも一致している¹¹⁾。金谷港においては、湾口で北から吹く風の低減が著しく、風向によって風速の低減の程度に差が見られる。

(2) 船上大気観測

東京湾周辺は環境省の大気観測網が充実した場所であるものの、東京湾湾口はその空白域となっている(<http://soramame.taiki.go.jp/>)。「かなや丸」はこの空白域を連続的

につなぐ大気観測局としての活用が期待できる。「かなや丸」を大気観測局とする場合、自船の排気ガスを観測しないよう排気口から離れた場所(船首付近)にセンサーを設置する必要があるものの、それでも船上風の風向によってはその影響を受ける可能性がある(図—5.3)。特に、久里浜と金谷のそれぞれの港内では、速度の低減や旋回の影響、もしくは対地風の風向の影響により、高い割合で後方から船首に向かって船上風が吹くことから、港内の観測データの取り扱いには注意が必要である。しかし、航行中に後方から風を受け

ることはほとんどないことから、湾口においては、大気観測局としての安定的な活用が期待される。

(2021年3月10日受付)

謝辞:本研究は、「かなや丸」の風向風速計の活用に関して、東京湾フェリー株式会社にご協力いただいた。風向風速データの取得から転送までのシステム構築やデータ解析にあたっては、元非常勤職員の椎葉直子氏に多大なる貢献をしていただいた。浦賀水道航路中央第一号 AIS 信号所のデータについては、海上保安庁の「海の安全情報」から取得した。部内討議では、みなさまからは活発に貴重な意見を頂いた。また、本論文を査読していただいた宮井真一郎特別研究主幹から有益なコメントをいただいた。みなさまに対して、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 坂間智子, 大野浩史: 港湾気象業務について, 測候時報, 第 82 卷 (特別号), S99-S104, 2015.
- 2) 小平翼, 和田良太, 和田大門, 渡邊省吾, 北祐樹, 早稲田卓爾: 低コスト沿岸域海上風観測システムの構築と実証, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 29 号, 163-169, 2019. URL https://www.jstage.jst.go.jp/article/jinnavi/172/0/172_KJ00006396953/_article/-char/ja
- 3) 後本学: 船舶上での最適な気象観測場所の選定についての研究—数値流体モデルを用いた船舶海上風観測の誤差評価—, 東京商船大学大学院修士学位論文, 2003. URL <https://core.ac.uk/download/pdf/70317324.pdf>
- 4) 徳長航: 船舶における風と波の計測特性, 東京商船大学大学院修士学位論文, 2000. URL <https://core.ac.uk/download/pdf/70317512.pdf>
- 5) Joyce T: On in situ ‘calibration’ of shiboard ADCPs. J Atmos Ocean Technol 6: 169-172, 1989.
- 6) 金子新, 伊藤集通: ADCP の普及と海洋学の発展, 海の研究, Vol. 3, No. 5, 359-372, 1994. URL https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaiyou1992/3/5/3_5_359/_article/-char/ja/
- 7) 気象庁: 船舶気象観測指針, 改訂第 8 版, 2019.
- 8) 鈴木高二朗, 加藤英夫: フェリーによる東京湾口の流況計測, 港湾空港技術研究所資料, No. 1075, pp11, 2004. URL <https://www.pari.go.jp/search-pdf/no1075.pdf>
- 9) 海上保安庁: 海の安全情報 URL https://www6.kaiho.mlit.go.jp/info/mics_terms.html
- 10) 田中昭喜, 中川拓朗, 千葉元, 古山彰一, 横井幸治: 船載型 ADCP 計測について, 日本航海学会誌, 第 171 巻, 63-72, 2010. URL https://www.jstage.jst.go.jp/article/jinnavi/172/0/172_KJ00006396953/_article/-char/ja
- 11) 藤田勇, 松崎義孝, 永井紀彦: 風杯式風速計の応答特性と線形補償, 港湾空港技術研究所資料, No. 1250, pp15, 2012. URL <https://www.pari.go.jp/search-pdf/no1250.pdf>
- 12) 清水邦夫: 角度データのモデリング, ISM シリーズ: 進化する統計数理, 近代科学社, 216p, 2018.
- 13) Koener R, Bassett: Resregression quantiles. Econometrica 46: 33-50, 1978.
- 14) Koener R, Hallock K: Quantile regression, J Economic Perspectives 15: 143-156, 2001.
- 15) Koener R, Portnoy S, Ng P, Zeileis A, Grosjean P, Ripley B: Quantile Regression Package 5.11, 2015.
- 16) 堀内一敏, 加納敏幸, 宮澤泰正, 佐藤圭二, 村田暁紀: 内航船舶で観測した偏流情報を用いた海流予測の高精度化, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 21 号, 2015A-OS2-7, 2015. URL https://www.jstage.jst.go.jp/article/conf/21/0/21_67/_article/-char/ja/
- 17) 江崎貴裕: データ分析のための数理モデル入門—本質をとらえた分析のために—, ソシム, 283p, 2020.
- 18) 鈴木武: コンテナ船および RORO 貨物船の燃料消費量と長距離内航 RORO 貨物船輸送における燃料価格上昇の影響, 国土技術政策総合研究所資料, No. 494, pp15, 2009. URL http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tn_nilim.htm#400

付録 A 標本平均合成ベクトル長の特性

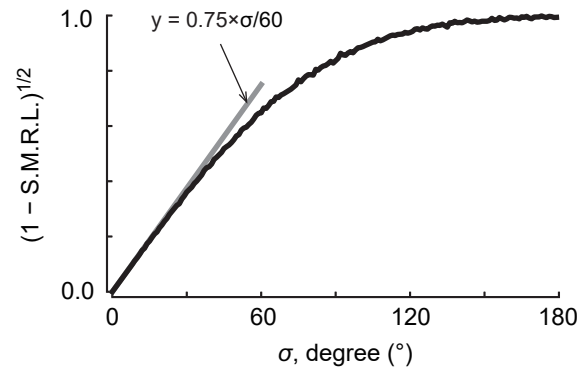
本文では標本平均合成ベクトル長 (Sample Mean Resultant Length, S.M.R.L.) を用い, $1 - \text{S.M.R.L.}$ を角度分散として, さらにこれを平方根としたものを風向の変動の指標としている. ここでは, この指標の特性について, 風向が滑らかにばらついている場合を例題として把握する.

検討する風向は, 平均と分散がそれぞれ 0° と σ^2 の正規分布 (式 (A.1)) に従って変動するものとした.

$$\theta \sim N(0, \sigma^2) \quad (\text{A.1})$$

σ を変数とした正規分布に従う 10,000 個の擬似乱数を生成させ, 風向の変動を求めた (図—A.1). これより, 風向の変動は, σ が 60° 付近まで直線的に増加し, σ が 60° 付近以上になると 1.0 に漸近する曲線を描くことが分かる. ここでは, 仮に σ が 60° で風向の変動が 0.75 となる直線を合わせて示しているが, 風向の変動は σ が 30° 辺りまではこの直線によく一致している.

実際の風向の分布によって風向の変動が与える意味は異なる. しかし, 正規分布は様々な現象でよくみられる分布であり, 本研究で対象とする船上風, 対地風, 「かなや丸」の進行方向でも正規分布をイメージして, 風向の変動の意味を捉



図—A.1 風向が $N(0, \sigma^2)$ の正規分布に従って分布する場合の風向の変動 (角度分散の平方根). 正規分布から 10,000 個の擬似乱数を生成させ, 本文の式 (4) から角度分散 ($1 - \text{S.M.R.L.}$) を求めた.

えても大きな支障はないものと考えられる.

なお, 風向を -180° から 180° の範囲で定義していることを考えると正規分布の表記は正しくないが, 数値的には計算でき実用上問題無い.

付録 B 船上風の測定精度と対地風の推定精度の関係

(1) はじめに

船上風の測定精度は、対地風の推定精度に影響する。その影響のメカニズムとして、測定値の変動による平均値の代表性の低下と風向風速計の設置誤差等により正しく測定できていないことが考えられる。測定値の変動と風向風速計の設置誤差の時間スケールは大きく異なるものの、それらの影響については共通した考え方に基づいて考察することができる。

ここでは、真の船速ベクトルに対し、船上風の風向及び風速に真値からのずれがあった場合の対地風の推定結果について示し、船上風の平均値の代表性の低下と風向風速計の設置等誤差が対地風の推定精度に及ぼす影響について考察する。

(2) 定義

a) ベクトルの定義

真の船速 (\mathbf{V}_s)、船上風 (\mathbf{V}_r)、対地風 (\mathbf{V}_w) は以下の関係となる：

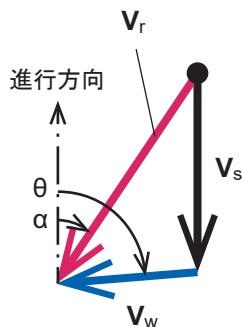
$$\mathbf{V}_w = \mathbf{V}_r - \mathbf{V}_s \quad (\text{B.1})$$

ここに、 \mathbf{V} は、進行方向に U 、時計回りの直角方向に V の成分を有する速度ベクトルである。本文とは異なり、進行方向を基準方位としている（進行方向が北を向いていると考えればよい）。ベクトルの表記について、本文では測定された実現値を取り扱っているため小文字で記述しているのに対し、ここでは理論を扱っているため大文字で記述して使い分けている。

船速を真値とみなせるものとし船上風が測定値であることを考えると、式 (B.1) は以下となる：

$$\mathbf{V}_w^* = \mathbf{V}_r^* - \mathbf{V}_s \quad (\text{B.2})$$

ここに、 \mathbf{V}_r^* は船上風の測定値、 \mathbf{V}_w^* は船速と船上風の測定値から推定される対地風である。船上風の真値と測定値の



図—B.1 3つのベクトルの関係。 \mathbf{V}_s 、 \mathbf{V}_r 及び \mathbf{V}_w は、それぞれ、船速、船上風、対地風を表している。

大きさの関係は、Joyce (1989)¹⁾ に倣うと以下となる：

$$|\mathbf{V}_r| = (1 + \beta) \times |\mathbf{V}_r^*| \quad (\text{B.3})$$

ここで、 β は測定される船上風の真値からのずれである。本文では $1 + \beta$ を倍率とし、風向風速計の設置と風速の出力の劣化が原因と考えている。

b) 角度の定義

船舶の進行方向に対する船上風の風向を α 、対地風の風向を θ とする (図—B.1)。本文と同様に、基準の方位から時計回りを正の角度、反時計回りを負の角度とする。

(3) 対地風の推定値に影響する要因の整理

a) 準備

対地風の風向と風速の推定値に影響する要因を理解する準備として、船上風の風速と他の因子の3つの関係を整理する。まず、進行方向の関係から、船上風の風速は、船速と対地風によって以下で表される：

$$|\mathbf{V}_r| = (|\mathbf{V}_w| \times \cos \theta + |\mathbf{V}_s|) / \cos \alpha \quad (\text{B.4})$$

また、同様に、進行方向から時計回りに直角方向の関係から、以下となる：

$$|\mathbf{V}_r| = |\mathbf{V}_w| \times \sin \theta / \sin \alpha \quad (\text{B.5})$$

さらに、式 (B.4) と (B.5) より以下の関係が得られる：

$$|\mathbf{V}_r|^2 = |\mathbf{V}_w|^2 + 2 \times |\mathbf{V}_w| \times |\mathbf{V}_s| \times \cos \theta + |\mathbf{V}_s|^2 \quad (\text{B.6})$$

b) 対地風の風向の推定値

対地風の風向の推定値 (θ^*) は、測定される船上風の風向 ($\alpha^* = \alpha - \alpha_{\text{mis}}$) より以下となる。ただし、 α_{mis} は風向の真値からのずれ、 U_w^* と V_w^* は、それぞれ、対地風の推定風速の進行方向成分と時計回りに直角方向成分としている：

$$\begin{aligned} \theta^* &= \arctan(V_w^*/U_w^*) \\ &= \arctan\left(\frac{|\mathbf{V}_r^*| \times \sin \alpha^*}{|\mathbf{V}_r^*| \times \cos \alpha^* - |\mathbf{V}_s|}\right) \\ &= \arctan\left(\frac{|\mathbf{V}_r| \times \sin \alpha^*}{|\mathbf{V}_r| \times \cos \alpha^* - (1 + \beta) \times |\mathbf{V}_s|}\right) \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

これに、式 (B.4) 及び式 (B.5) を代入することで船上風の風速成分を消し、以下で表すことができる：

$$\begin{aligned} \theta^* &= \arctan\left(\frac{|\mathbf{V}_r| \times (\sin \alpha \times \cos \alpha_{\text{mis}} - \cos \alpha \times \sin \alpha_{\text{mis}})}{|\mathbf{V}_r| \times (\cos \alpha \times \cos \alpha_{\text{mis}} + \sin \alpha \times \sin \alpha_{\text{mis}}) - (1 + \beta) \times |\mathbf{V}_s|}\right) \\ &= \arctan\left(\frac{|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s| \times \sin \theta \times \cos \alpha_{\text{mis}} - (|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s| \times \cos \theta + 1) \times \sin \alpha_{\text{mis}}}{(|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s| \times \cos \theta + 1) \times \cos \alpha_{\text{mis}} + |\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s| \times \sin \theta \times \sin \alpha_{\text{mis}} - (1 + \beta)}\right) \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

これより、対地風の風向の推定値は、風向及び風速のずれだけでなく、船速に対する対地風の風速の比 ($|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|$) の影響も受けていることが理解できる。

さらに、推定される対地風の風速 ($|\mathbf{V}_w^*$) は、真値と測定誤差のパラメータ (本文) で記述すると以下となり；

$$\begin{aligned} |\mathbf{V}_w^*|^2 &= (|\mathbf{V}_r^*| \times \cos \alpha^* - |\mathbf{V}_s|)^2 + |\mathbf{V}_r^*|^2 \times \sin^2 \alpha^* \\ &= |\mathbf{V}_r^*|^2 - 2 \times |\mathbf{V}_r^*| \times |\mathbf{V}_s| \times \cos \alpha^* + |\mathbf{V}_s|^2 \\ &= |\mathbf{V}_r|^2 \times (1 + \beta)^{-2} - 2 \times |\mathbf{V}_r| \times |\mathbf{V}_s| \times (1 + \beta)^{-1} \times \\ &\quad (\cos \alpha \times \cos \alpha_{\text{mis}} + \sin \alpha \times \sin \alpha_{\text{mis}}) + |\mathbf{V}_s|^2, \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

これに、式 (B.4), (B.5), 及び (B.6) を代入することで、以下となる：

$$\begin{aligned} |\mathbf{V}_w^*|^2 &= (|\mathbf{V}_w|^2 + 2 \times |\mathbf{V}_w| \times |\mathbf{V}_s| \times \cos \theta + |\mathbf{V}_s|^2) \times (1 + \beta)^{-2} \\ &\quad - 2 \times |\mathbf{V}_s| \times (1 + \beta)^{-1} \times [(|\mathbf{V}_w| \times \cos \theta + |\mathbf{V}_s|) \times \cos \alpha_{\text{mis}} \\ &\quad + |\mathbf{V}_w| \times \sin \theta \times \sin \alpha_{\text{mis}}] + |\mathbf{V}_s|^2 \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

これより、対地風の風速の真値と推定値の比は以下となる：

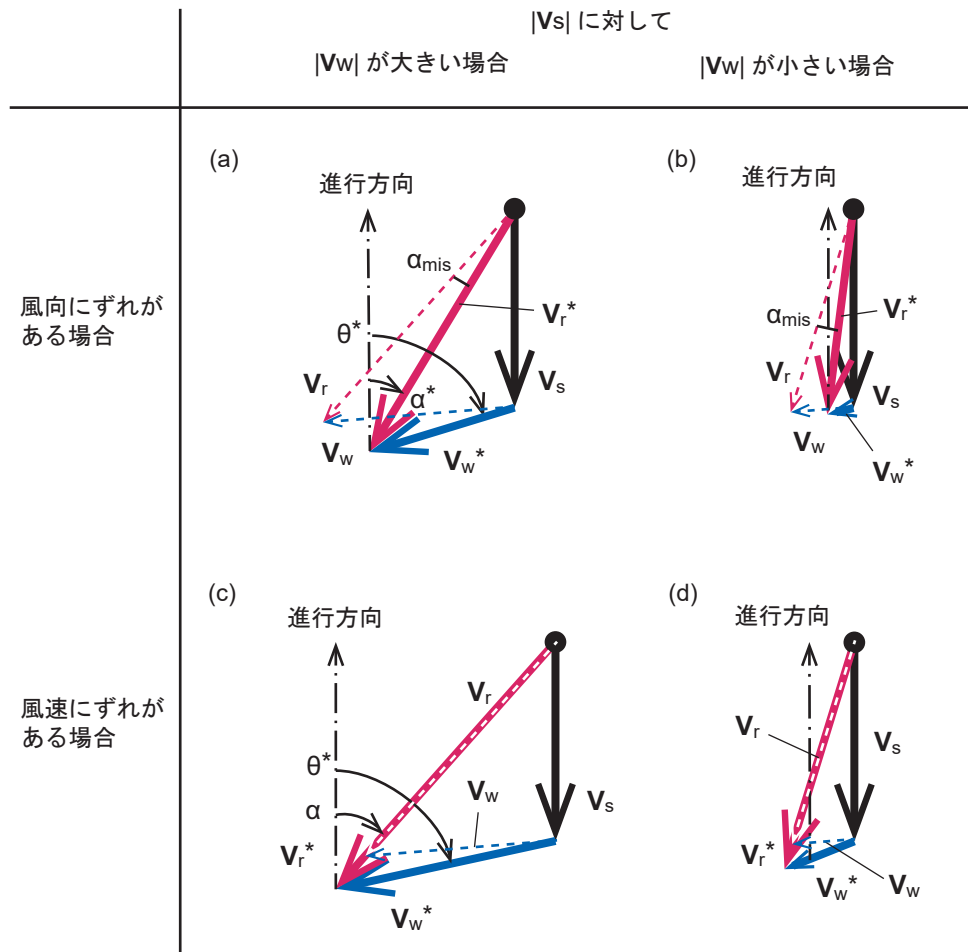
$$\begin{aligned} \left(\frac{|\mathbf{V}_w^*|}{|\mathbf{V}_w|} \right)^2 &= (1 + \beta)^{-2} \\ &\quad + \frac{2 \times [\cos \theta \times (1 + \beta)^{-2} - \cos (\theta - \alpha_{\text{mis}}) \times (1 + \beta)^{-1}]}{|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|} \\ &\quad + \frac{(1 + \beta)^{-2} - 2 \times \cos \alpha_{\text{mis}} \times (1 + \beta)^{-1} + 1}{(|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|)^2} \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

これより対地風の風速の推定値も船速に対する対地風の風速の比 ($|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|$) の影響を受けていることが分かる。

以上より、対地風の風向と風速の推定精度は、測定風の風向及び風速のずれだけでなく、 $|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|$ の影響も受けることが理解できた。また、このことは、数式からだけでなく視覚的にも容易に理解することができる (図—B.2)。

(4) 数値に基づく検討

船上風の風向及び風速のずれが対地風の推定結果に及ぼす影響について、一桁異なる6段階の船速に対する対地風の風速の比 ($|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s| = [0.1, 0.15, 0.2, 0.4, 1.0,$



図—B.2 船上で測定される風向と風速にずれがある場合の3つのベクトルの関係。V_s、V_r及びV_wは、それぞれ、真の船速、船上風、対地風、V_r*は船上風の測定値を表し、V_w*は船速と船上風の測定値から推定される風速を表している。

2.0])に基づき考察した。ここに、0.1は「かなや丸」によるADCPによる流動観測²⁾、1.0及び2.0は風観測を想定している。船上風の風速のずれ $(1 + \beta)$ は1.0であるが風向のずれ (α_{mis}) が 2° 及び 10° の場合、及び、船上風の風向のずれは 0° であるが風速のずれが0.9及び1.1の場合の対地風の推定結果を比較した。

a) 対地風の推定値の概要

対地風の推定結果は、 $|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|$ が2.0になると概ね真値に近づくものの、 $|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|$ が0.1では真値から大きくずれることが示された(図—B.3a-B.6a)。興味深い点として、 $|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|$ が0.1では、真の対地風はいずれの方角から吹いたとしても、倍率が0.9の場合の推定結果は前方から吹くように誤って推定され、倍率が1.1の場合は後方から吹くように推定されている点である。これは、ADCPによる流動観測でよく見られる現象と類似している。

b) 推定風向の特徴

対地風の風向の推定値の真値からのずれは、 $|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|$ が小さくなるほど大きい(図—B.3b-B.6b)。しかし、そのずれの位相は、船上風の風向のずれによるものか、風速のずれによるものか、原因によって異なる。

対地風が限りなくゼロに近い場合 $(|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s| \approx 0)$ 、風向の真値と推定値が一致する角度 $(\theta = \theta^*)$ は式(B.8)より以下となる：

$$\theta = \arctan\left(\frac{-\sin \alpha_{mis}}{\cos \alpha_{mis} - (1 + \beta)}\right) \quad (\text{B.12})$$

船上風の風向のずれがない場合 $(\alpha_{mis} = 0)$ 、 β の大きさに係わらず、対地風の推定値は、風向が 0° 及び 180° において真値と一致し、 0° を軸とした軸対象で真値からずれる(図—B.5b-B.6b)。一方、船上風の風速のずれがなく $(\beta = 0)$ 、風向のずれが小さい範囲(ただし、 $\alpha_{mis} \neq 0$)においては、対地風の風向の推定値は、 90° もしくは -90° 付近で真値に一致することが分かる。 $|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|$ がある程度の大きさを持っていても、船上風の風向のずれが 2° の場合においては風向が 90° と -90° 付近(図—B.3b)、 10° の場合においては風向が -90° 付近で推定値と真値は一致する(図—B.4b)。

c) 推定風速の特徴

対地風の風速の推定精度 $(|\mathbf{V}_w^*|/|\mathbf{V}_w|)$ は、船速がゼロの場合 $(|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|$ が無限大であり、停泊中等の場合)に式(B.11)より $(1 + \beta)^{-1}$ となることが分かり、 $|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|$ が小さくなるに従って対地風の風向に応じて変動する(図—B.3c-B.6c)。対地風の風速の真値に対する推定値の変動は、船上風の風向のずれがある場合 $(\alpha_{mis} \neq 0)$ 、対地風の風向 90° もしくは -90° 付近を軸とした軸対象となり(図—B.3c-B.4c)、船上風の測定風速にずれがある場合 $(\beta \neq 0)$ 、風向 0° を軸とした軸対象となる(図—B.5c-B.6c)。

(5) まとめ

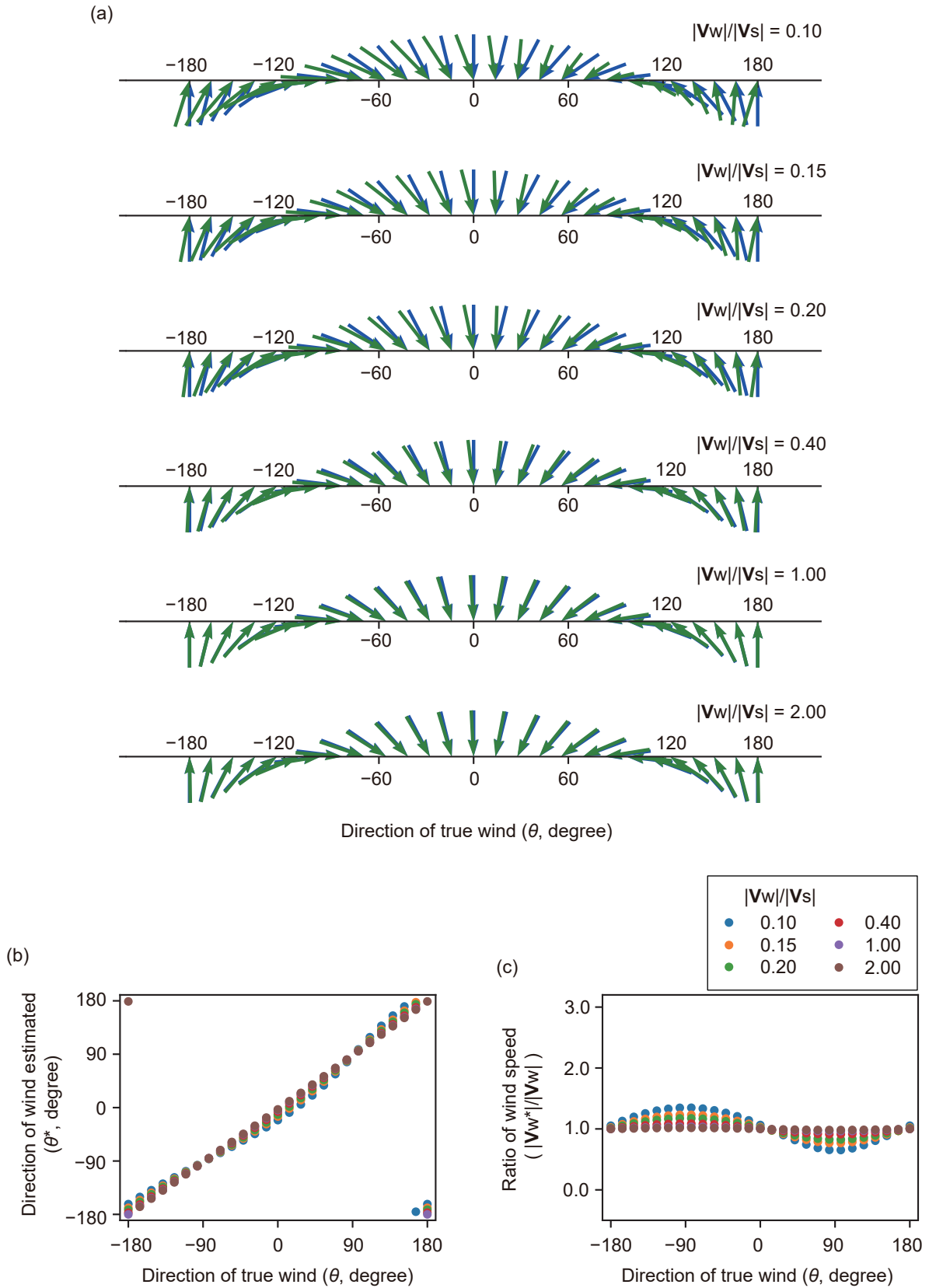
本付録では、測定される船上風の風向及び風速のずれ及び対地風の条件がその推定精度に影響すること、また、その影響のメカニズムを示した。この検討結果は、船上風の測定値を平均した値の代表性が低下した場合や風向風速計に設置誤差等がある場合に対地風の推定精度を制御する方法についての示唆を与えている。

精度の高い観測を目的とした場合、対地風の風速に対して船速を小さくすること $(|\mathbf{V}_w|/|\mathbf{V}_s|$ を大きくすること)が重要となり、次に、対地風に対する船舶の進行方向が重要となる。しかし、進行方向は、風向の推定精度を優先するか、風速の推定精度を優先するかのトレードオフの下で適した方向が異なる。また、風観測を目的としていない船舶では、進行方向を自由に設定すること自体が難しい場合もある。このことから、悪い条件の下でも高い精度で対地風を観測できるようにするため、精度検証とキャリブレーションが重要となる。

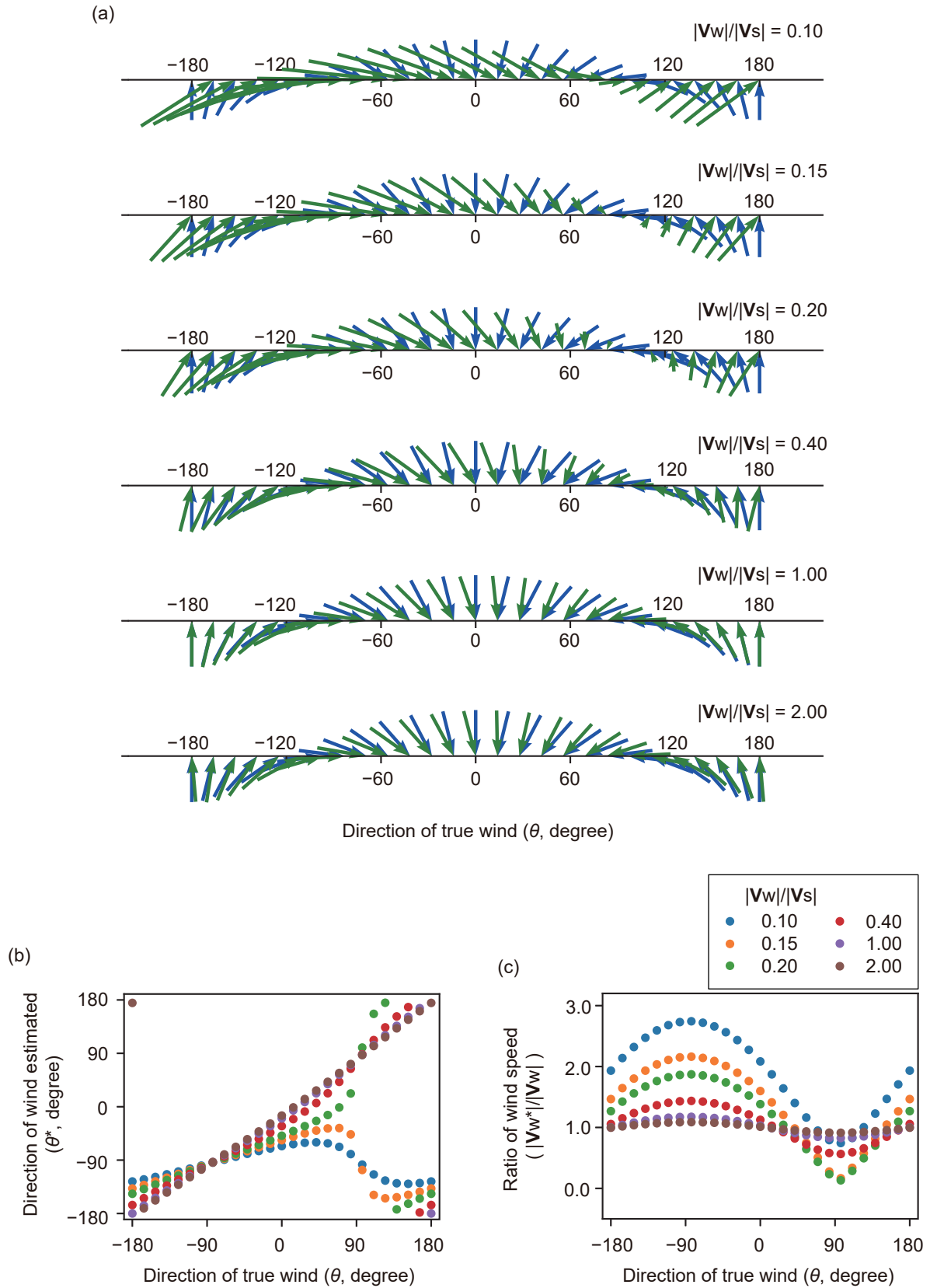
精度検証においては、対地風の推定精度が悪くなりやすい条件の下で分析した方がその原因を究明しやすい。このことから考えると、風向と風速の推定値が真値からずれる条件の下、もしくはこのような条件になるよう、船速及び進行方向を設定して検証を実施することが重要となる。

参考文献

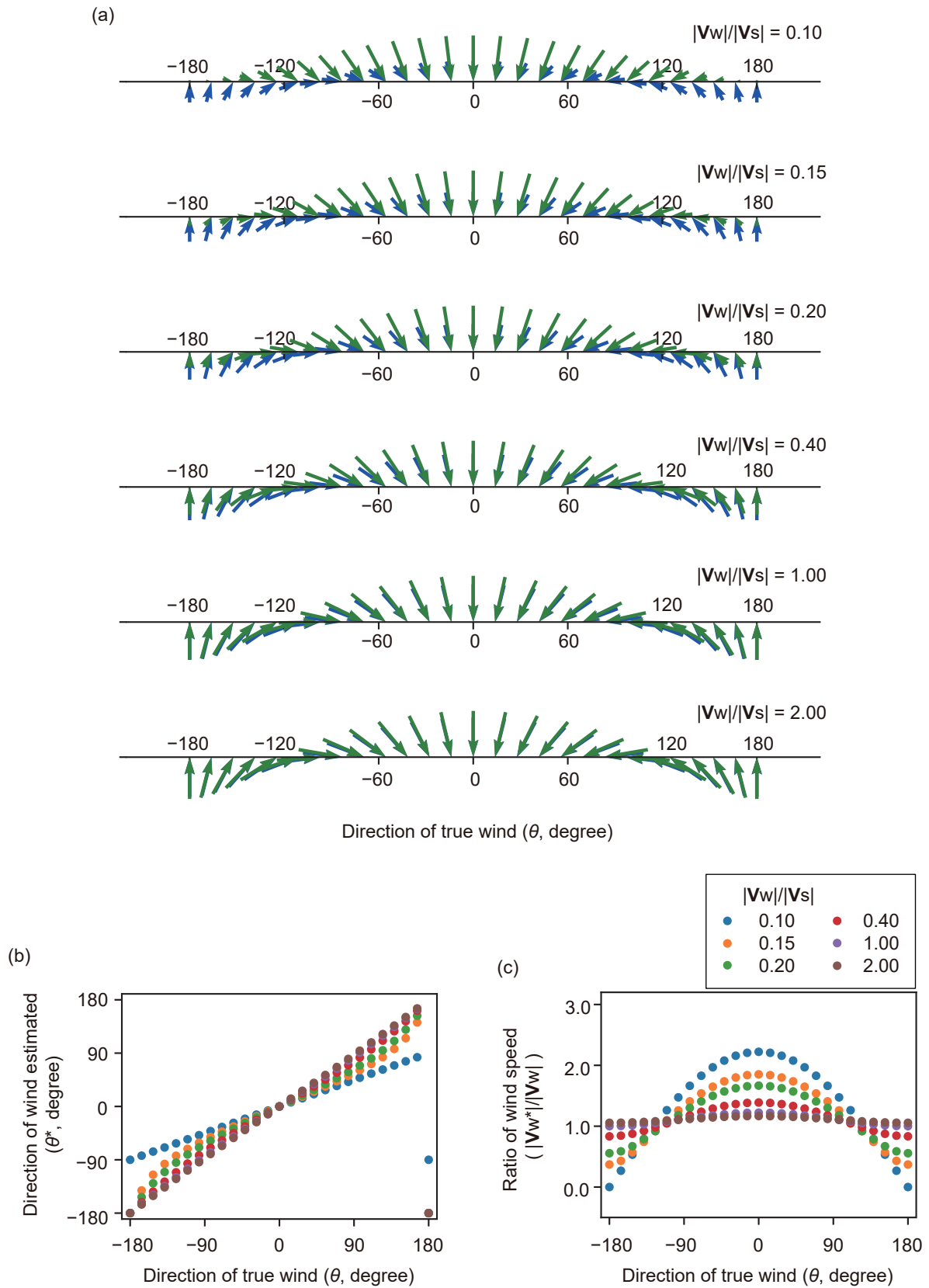
- 1) Joyce T: On in situ ‘calibration’ of shiboard ADCPs. J Atmos Ocean Technol 6: 169–172, 1989.
- 2) 鈴木高二朗, 加藤英夫: フェリーによる東京湾口の流況計測, 港湾空港技術研究所資料, No. 1075, pp11, 2004. URL <https://www.pari.go.jp/search-pdf/no1075.pdf>



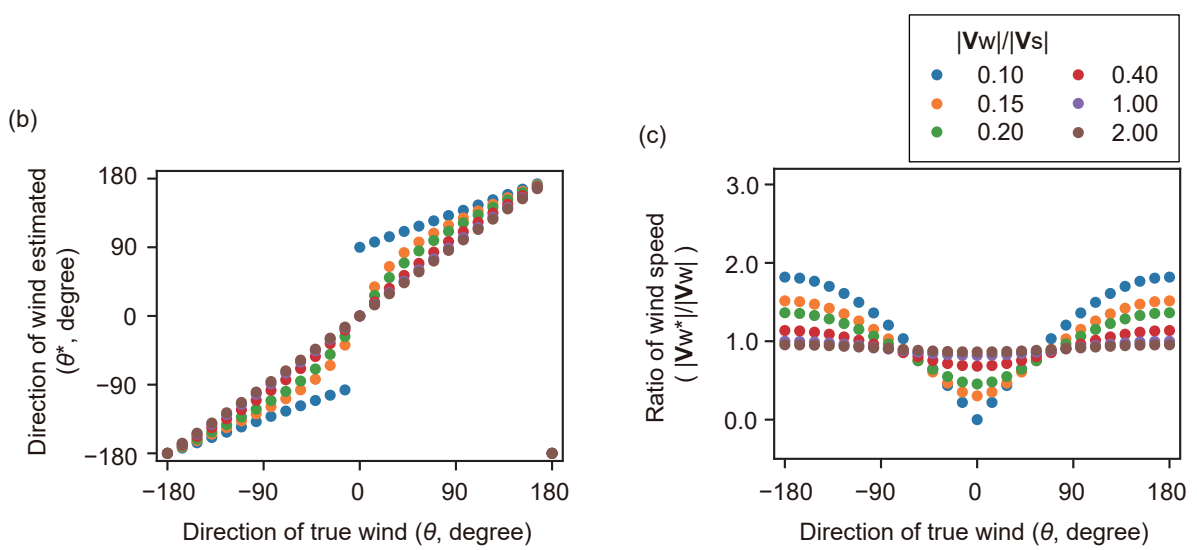
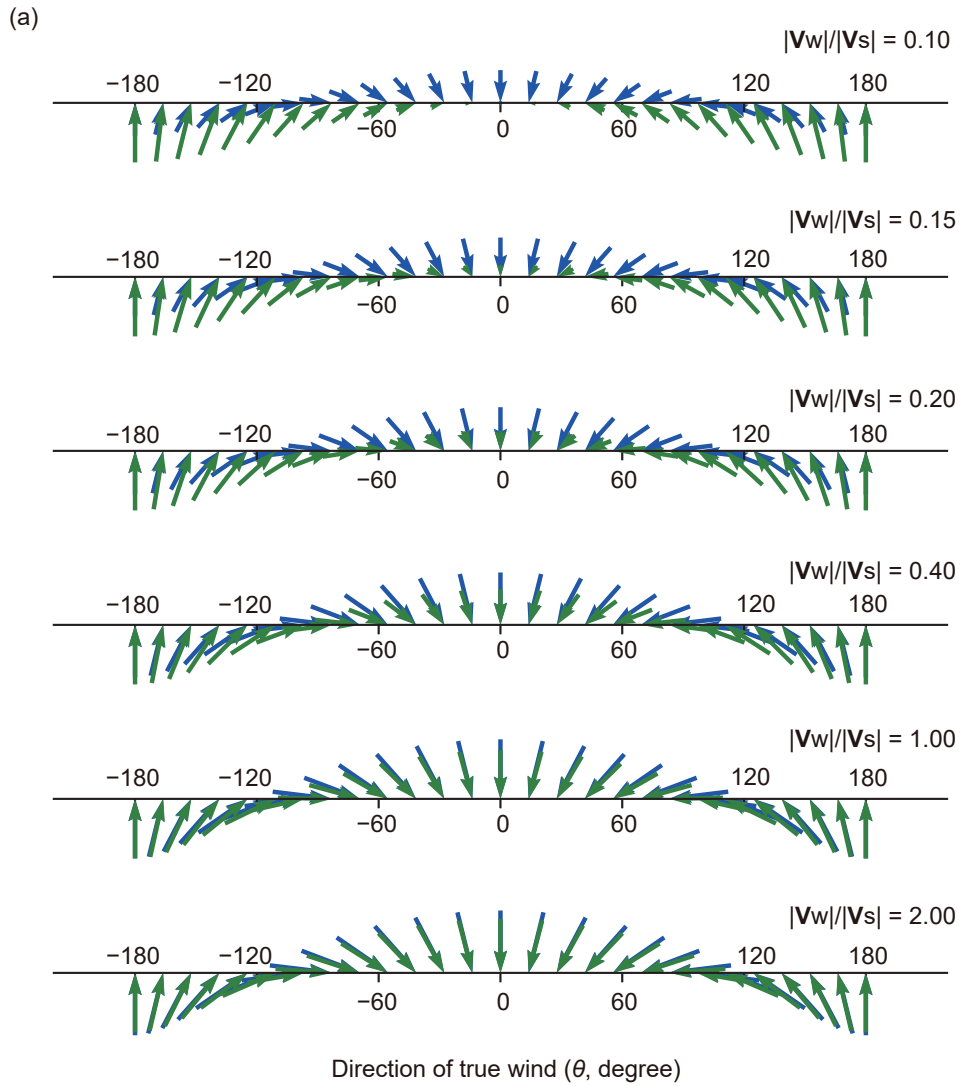
図—B.3 船上で測定される風向のずれが船の進行方向から時計回りに 2° ある場合 ($\alpha_{\text{mis}} = 2$) の風向風速。(a) 真の風向風速のベクトル (V_s , 青色) と推定された風向風速のベクトル (V_{s^*} , 緑色), 真の風向に対する (b) 推定値と (c) 風速の真値に対する比率を示している。



図—B.4 船上で測定される風向のずれが船の進行方向から時計回りに 10° ある場合 ($a_{\text{mis}} = 10$) の風向風速. 各パネルの説明は図—B.3 と同じ.



図—B.5 船上で測定される風速のずれが0.9の場合 ($1+\beta=0.9$) の風向風速. 各パネルの説明は図—B.3と同じ.



図—B.6 船上で測定される風速のずれが 1.1 の場合 ($1+\beta=1.1$) の風向風速. 各パネルの説明は図—B.3 と同じ.

付録 C 推定される風向風速の往復比較

(1) はじめに

移動する船舶による対地風の推定精度に関して、付録 B では取り付けられた風向風速計のミスアライメント及び風速の倍率に加え、船速に対する対地風の風速の比 ($|V_w|/|V_s|$) の影響を受けることを示した。

ここでは、ミスアライメント及び風速の倍率の検証方法として、同じ対地風を往復航行により測定することを想定し、往復で推定される風向及び風速がどのように比較されるのかを示した上で、そのための条件及び評価指標について検討する。

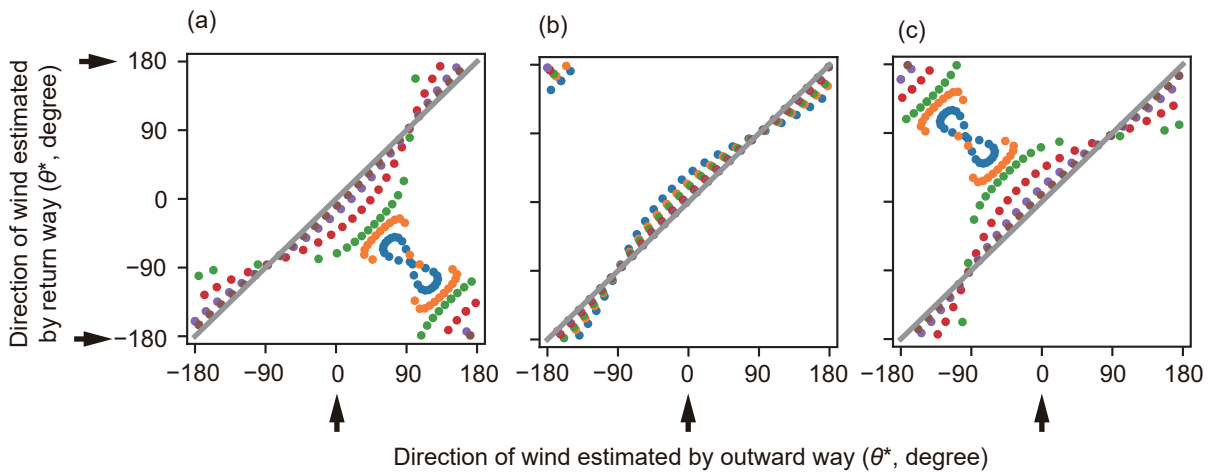
(2) 推定風向の往復比較

往復航行によって推定される風向の比較は、ミスアライメント角の正負、大きさ、及び風速の倍率によって明瞭に違った

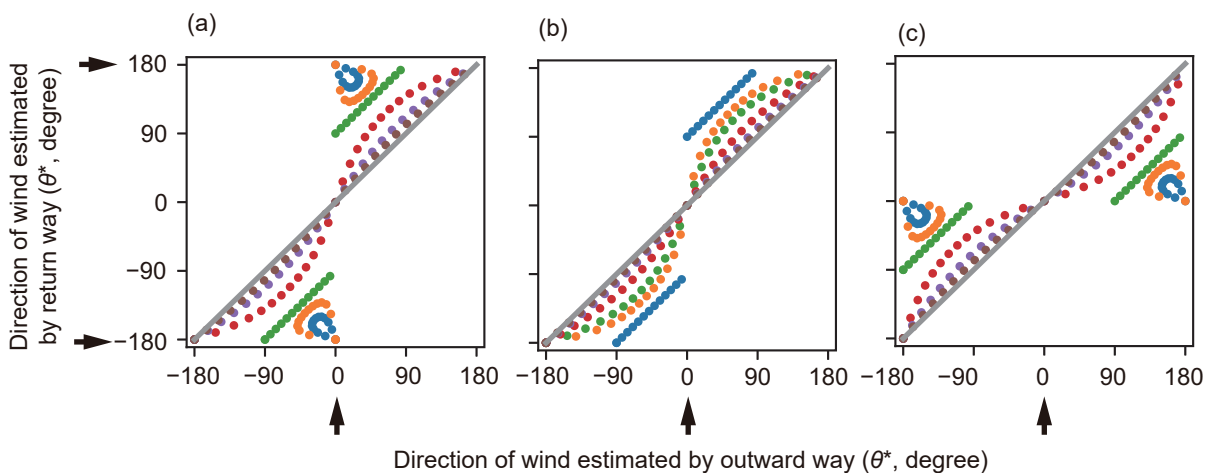
分布を見せる。

ミスアライメント角が大きい場合、風向が -90° と 90° 付近で推定値は真値に近づくことから (図—B.4), 推定風向の往復比較では、風向が 90° 付近において 1 対 1 に近い関係となるものの、それ以外の風向では往復間で 1 対 1 から外れた関係を示す (図—C.1)。一方、風速の倍率がある場合、推定風向は進行方向に対して対象になることから (図—B.5, B.6), 風向が 0° もしくは 180° において往復比較で 1 対 1 の関係となるものの、それ以外の風向で 1 対 1 から外れた関係となる (図—C.2)。

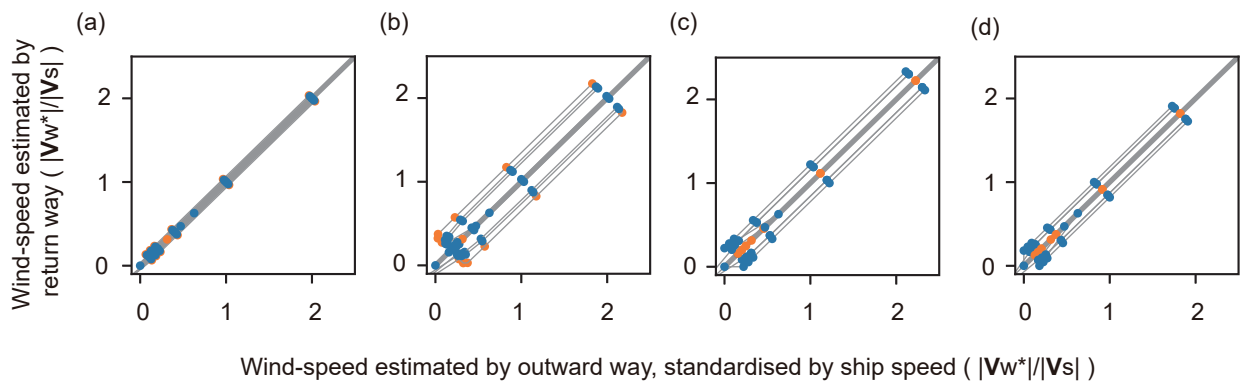
推定される風向が往復比較で 1 対 1 から外れた関係となるのは、船速に対する対地風の風速が小さい場合である (例えば、 $|V_w|/|V_s| = 0.1$)。しかし、船速に対する対地風の風速



図—C.1 ミスアライメントがある船舶により往復航行で推定した風向の比較。それぞれ、ミスアライメント角 (α_{mis}) が (a) -10° の場合、(b) $+2^\circ$ の場合、(c) $+10^\circ$ の場合を示している。矢印は船舶の進行方向を示している。プロットの色の意味は、図—B.3-6 と同じ。



図—C.2 風速の倍率がある船舶により往復航行で推定した風向の比較。それぞれ、倍率 ($1+\beta$) が (a) 0.8 の場合、(b) 0.9 の場合、(c) 1.2 の場合を示している。矢印は船舶の進行方向を示している。プロットの色の意味は、図—B.3-6 と同じ。



図—C.3 船舶により往復航行で推定した風速の比較. 対地風の風向は, -135° , -90° , -45° , 0° , 45° , 90° , 135° , 180° とし, それぞれの風向において推定された風速の往復航行比較を線で結んでいる. ミスアライメント角 (α_{mis}) が (a) $+2^\circ$ の場合及び (b) $+10^\circ$ の場合と倍率 ($1+\beta$) が (c) 0.9 の場合及び (d) 1.1 の場合を示している. オレンジ色は, -90° と 90° の場合を示しており, 青色はそれ以外を示している.

が大きい場合は, ミスアライメントと風速の倍率があっても往復航行の比較は 1 対 1 に近くなる.

推定される風向が往復比較で 1 対 1 の関係となることは, ミスアライメントと風速の倍率の検証においては不利に働く. すなわち, ミスアライメントもしくは風速の倍率があるにも関わらず 1 対 1 の関係が示されれば, その検証はできないことから, 船速に対して対地風の風速が大きい条件は風向風速計の精度検証には不向きである. 一方で, 船速に対する対地風の風速が小さい条件の下で往復比較すると, 風向風速計にどのようなずれがあるのか判別しやすく, 精度検証に適していると言える.

(3) 推定風速の往復比較

ミスアライメントと風速の倍率がある場合, 往復比較による推定風速の関係は 1 対 1 から外れる可能性があるものの, 同じ対地風の風向の下であれば, 直線に近い関係となる (図—C.3).

この直線的な関係は, 特定の対地風の風向の下で検証すれば, ミスアライメントと風速の倍率があったとしても推定風速の往復比較で高い相関が得られてしまうことを意味している. すなわち, この条件の下で精度検証する場合, 風速の相関

を評価指標として採用することには注意が必要であり, 1 対 1 の関係を評価する風速の二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error, R.M.S.E.) の方が有利であると考えられる. ただし, 対地風の風向が -90° と 90° であれば推定される風速の往復比較は 1 対 1 の関係になることから (図—C.3), 風速の相関と R.M.S.E. の両方を評価指標として採用したとしてもその影響を検証することはできない.

(4) まとめ

本付録では, 推定される対地風の風向と風速の往復比較が示す傾向を示し, この傾向に基づいてミスアライメントと風速の倍率の検証のための条件及び評価指標の検討を行った. この結果, 風向と風速のいずれで往復比較を評価する場合でも, その関係が 1 対 1 になる条件の下では精度検証が行えない可能性を示した. すなわち, 風向で評価する場合, 船速に対する対地風の風速が大きい条件は検証に不向きであり, 風速で評価する場合は対地風の風向が船舶の進行方向に対して -90° と 90° となる条件は不向きである. また, 対地風の風向に偏りがある場合は, 風速の相関だけでは評価できない可能性がある.

港湾空港技術研究所資料 No.1382

2021.3

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。