

船舶海上風観測値の誤差評価

著者	岩坂 直人
雑誌名	東京商船大学研究報告. 自然科学
巻	54
ページ	23-30
発行年	2003
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00000569/

船舶海上風観測値の誤差評価

海洋工学講座 岩坂直人

Error analysis of true surface wind estimated from wind measurement aboard a ship

Iwasaka Naoto (Marine Science and Technology)

要旨

船舶での風向風速観測値から求めた真風向風速値に含まれる誤差を船上での風向風速それぞれの計測誤差と船速及び船の移動方位の計測誤差が互いに独立なランダム誤差のみであると仮定して見積もった。誤差の大きさは船速、見かけの風速、風向の関数として以下のように与えられる。

$$\delta W = \left\{ \frac{R^2 + S^2 \cos^2 \alpha - 2RS \cos \alpha}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} (\delta R)^2 + \frac{S^2 + R^2 \cos^2 \alpha - 2RS \cos \alpha}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} (\delta S)^2 + \frac{(RS \sin \alpha)^2}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} (\delta \alpha)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\delta \theta = \frac{1}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} \left\{ (S \sin \alpha)^2 (\delta R)^2 + (R \sin \alpha)^2 (\delta S)^2 + R^2 (R - S \cos \alpha)^2 (\delta \alpha)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

ここで R、S、 α はそれぞれ見かけの風速、船速、見かけの風向で、W、 θ は真風速、真風向である。

Abstract

Estimation errors of true wind speed and direction above sea surface are analytically evaluated, assuming that observation errors of wind speed and direction aboard a ship and measurement errors of speed and direction of ship's motion are random and independent of one another. The error of true wind speed δW and that of true wind direction $\delta \theta$ are given by the following formulae;

$$\delta W = \left\{ \frac{R^2 + S^2 \cos^2 \alpha - 2RS \cos \alpha}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} (\delta R)^2 + \frac{S^2 + R^2 \cos^2 \alpha - 2RS \cos \alpha}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} (\delta S)^2 + \frac{(RS \sin \alpha)^2}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} (\delta \alpha)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\delta \theta = \frac{1}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} \left\{ (S \sin \alpha)^2 (\delta R)^2 + (R \sin \alpha)^2 (\delta S)^2 + R^2 (R - S \cos \alpha)^2 (\delta \alpha)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

where W and θ are the true wind speed and direction, S, R and α are the ship's speed, apparent wind speed and direction aboard, respectively.

1.はじめに

船舶気象観測項目のうち風向風速観測は、海面状態を目視によって観測し真風向風速を推定する方法と船舶に設置してある風向風速計の観測値に対して船速、船の移動方位を補正して求める方法とに大別できる(気象庁 1994)⁽¹⁾。岩坂(2003)⁽²⁾によれば、現在でも大西洋で約半数、インド洋や南大洋では 70%程度が目視観測である。しかし、気象通報数の減少防止と質の向上のために今後自動気象観測装置を普及させようとする計画もあり(例えば

VOSclim 計画、<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/vosclim/vosclim.html>）、また船員の負担軽減や気象観測と通報の省力化などのためにも観測の機械化は欠かせない。

ところで風向風速計での観測は運動する船体に対する見かけの風向風速を計測しているため、船舶自体の運動を補正して真の風向風速を求める必要がある。この計算自体は容易であるが、求めた真風向風速にどれだけの誤差が含まれるかを把握しておく必要がある。そこで、まず風向風速および船速と船の移動方位^{*}の計測値にそれぞれ独立なランダム誤差だけを含むと想定した場合の真風向風速算出値の誤差を評価する。

2.見かけの風と真の風ベクトルの関係

図1のように風向を計測する基準を船舶の移動方位に取り、時計回りに角度を計る。真風速を W 、真風向を θ 、船舶の速度ベクトルの大きさ(船速)を S 、船上で計測される見かけの風速を R 、見かけの風向を α とおく。また真の風ベクトルと見かけの風ベクトルのなす角を φ とおく。

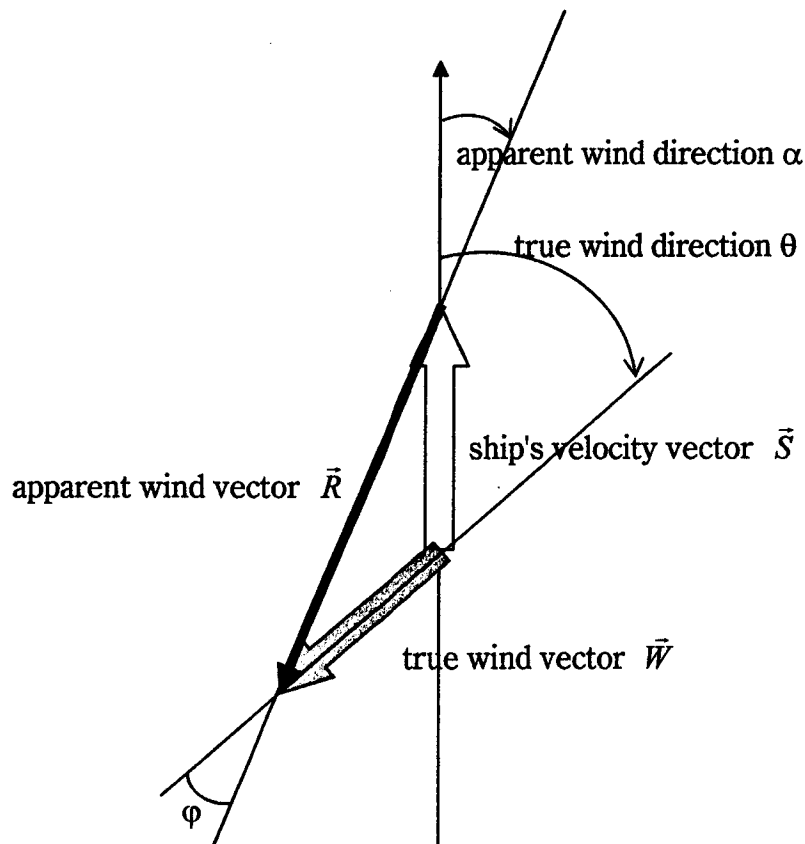


図1：見かけの風向風速と真風向風速の関係

このとき、真の風ベクトルと船速ベクトルおよび船上でのみかけの風のベクトルの関係は

$$\vec{R} + \vec{S} = \vec{W} \quad (1)$$

^{*} 移動方位と船首方位(針路)は、実際上はほとんど変わらない場合が多いが、横風を受けたり強い海流又は潮流のある海域では有意な差を生じ得る。

となり、従って真風速はベクトルの内積あるいは余弦定理から

$$W = \{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

また真風向と見かけの風向の関係は正弦定理から

$$R \sin \varphi = S \sin(\pi - \theta)$$

ここで、 $\varphi = \pi - (\pi - \theta + \alpha) = \theta - \alpha$ であるので

$$R(\sin \theta \cos \alpha - \sin \alpha \cos \theta) = S \sin \theta$$

$$R \left(\cos \alpha - \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \sin \alpha \right) = S$$

よって、

$$\tan \theta = \frac{R \sin \alpha}{R \cos \alpha - S} \quad (3)$$

となる。

3. 真風速、真風向推定誤差

航走している船舶上での風速観測では、船速と針路および見かけの風向風速が計測され、そこから(1)式で表される関係式によって真風速風向を求める。従って、真風向風速のランダム誤差要因としては、見かけの風向、風速の計測に伴うランダム誤差、船速、船の移動方位および船首方位計測誤差が挙げられる。また、船が船首方位とは角度を付けて移動している場合、バイアス誤差を生じるが今は考慮しない。また船体上部構造物による気流の乱れなどもバイアス誤差要因であるが考慮しない。

誤差要因のうち船の移動方位の誤差と船首方位誤差は見かけの風向誤差に含めて考えることが出来る。そこで、船速の計測誤差(δS)、見かけの風速の計測誤差(δR)、および見かけの風向の計測誤差($\delta \alpha$)が与えられたとき、真風向風速の誤差がどの程度になるか見積もる。

3.1 真風速算出誤差

一般的な誤差推定方法(例えば一瀬、1953⁽³⁾)に従うと、

$$\delta W = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial R}\right)^2 (\delta R)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial S}\right)^2 (\delta S)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \alpha}\right)^2 (\delta \alpha)^2} \quad (4)$$

と表せる。

ここで(2)より

$$\frac{\partial W}{\partial R} = \frac{R - S \cos \alpha}{W}, \quad \frac{\partial W}{\partial S} = \frac{S - R \cos \alpha}{W}, \quad \frac{\partial W}{\partial \alpha} = \frac{RS \sin \alpha}{W}$$

となるので(4)式は

$$\begin{aligned} \delta W &= \left\{ \frac{R^2 + S^2 \cos^2 \alpha - 2RS \cos \alpha}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} (\delta R)^2 + \frac{S^2 + R^2 \cos^2 \alpha - 2RS \cos \alpha}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} (\delta S)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{(RS \sin \alpha)^2}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} (\delta \alpha)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= \left\{ \frac{1 + \left(\frac{S}{R}\right)^2 \cos^2 \alpha - 2\frac{S}{R} \cos \alpha}{1 + \left(\frac{S}{R}\right)^2 - 2\frac{S}{R} \cos \alpha} (\delta R)^2 + \frac{\left(\frac{S}{R}\right)^2 + \cos^2 \alpha - 2\frac{S}{R} \cos \alpha}{1 + \left(\frac{S}{R}\right)^2 - 2\frac{S}{R} \cos \alpha} (\delta S)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{(RS \sin \alpha)^2}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} (\delta \alpha)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

$$\left. + \frac{(S \sin \alpha)^2}{1 + \left(\frac{S}{R}\right)^2 - 2 \frac{S}{R} \cos \alpha} (\delta \alpha)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

となる。

(2)式から明らかなように、船速 S が与えられるとき、真風速 W が大きくなるほど見かけの風速 R も大きくなるので、真風速が大きくなると $\left|\frac{S}{R}\right| \rightarrow 0$ 、よって真風速が大きいとき(5)式から

$$\delta W \rightarrow \sqrt{(\delta R)^2 + (\delta S)^2 + (S \sin \alpha)^2 (\delta \alpha)^2}$$

となる。

与えられた船速 S に対して、見かけの風向別の風速推定誤差を見かけの風速毎に表したのが図2である。なお、船速 12knot、船速計測誤差 δS を 1ms^{-1} 、見かけの風速の計測誤差 δR を 1ms^{-1} 、および見かけの風向の計測誤差 $\delta \alpha$ を 10度と仮定した。なお見かけの風速0では風向は定まらないはずであるが与えて求めた。

見かけの風速が小さいとき誤差分布に見かけの風向依存性が顕著である。図からは分かり難いが高風速でも若干の見かけの風向依存性はある。

相対風向/相対風速別 風速誤差

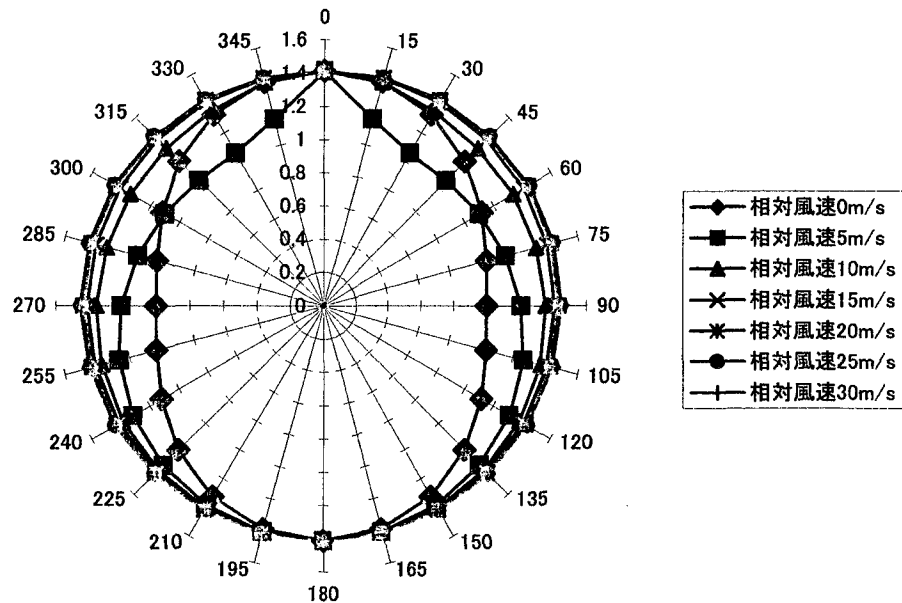


図2：見かけの風向、風速別、真風速推定誤差。移動方位基準の見かけの風向 15度毎、見かけの風速 5m/s 毎に見積もられる真風速のランダム誤差を表示している。誤差の単位は m/s である。

3.2 真風向算出誤差

(3)式より、真風向推定誤差 $\delta\theta$ を船速計測誤差 δS 、見かけの風速計測誤差 δR 、見かけの風向計測誤差 $\delta\alpha$ で表すと、

$$\delta\theta = \sqrt{\left(\frac{\partial\theta}{\partial R}\right)^2 (\delta R)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial S}\right)^2 (\delta S)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial \alpha}\right)^2 (\delta \alpha)^2} \quad (6)$$

ここで、

$$\frac{\partial\theta}{\partial R} = \frac{-S \sin \alpha}{(R \cos \alpha - S)^2} \cos^2 \theta, \quad \frac{\partial\theta}{\partial S} = \frac{R \sin \alpha}{(R \cos \alpha - S)^2} \cos^2 \theta, \quad \frac{\partial\theta}{\partial \alpha} = \frac{R^2 - RS \cos \alpha}{(R \cos \alpha - S)^2} \cos^2 \theta$$

であるので、(6)式は

$$\delta\theta = \frac{\cos^2 \theta}{(R \cos \alpha - S)^2} \left\{ (S \sin \alpha)^2 (\delta R)^2 + (R \sin \alpha)^2 (\delta S)^2 + (R^2 - RS \cos \alpha)^2 (\delta \alpha)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

ところで(3)式より

$$\tan^2 \theta = \left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}}{\cos \theta} \right)^2 = \left(\frac{R \sin \alpha}{R \cos \alpha - S} \right)^2$$

よって

$$1 - \cos^2 \theta = \left(\frac{R \sin \alpha}{R \cos \alpha - S} \right)^2 \cos^2 \theta$$

見かけの風向風速別 風向誤差

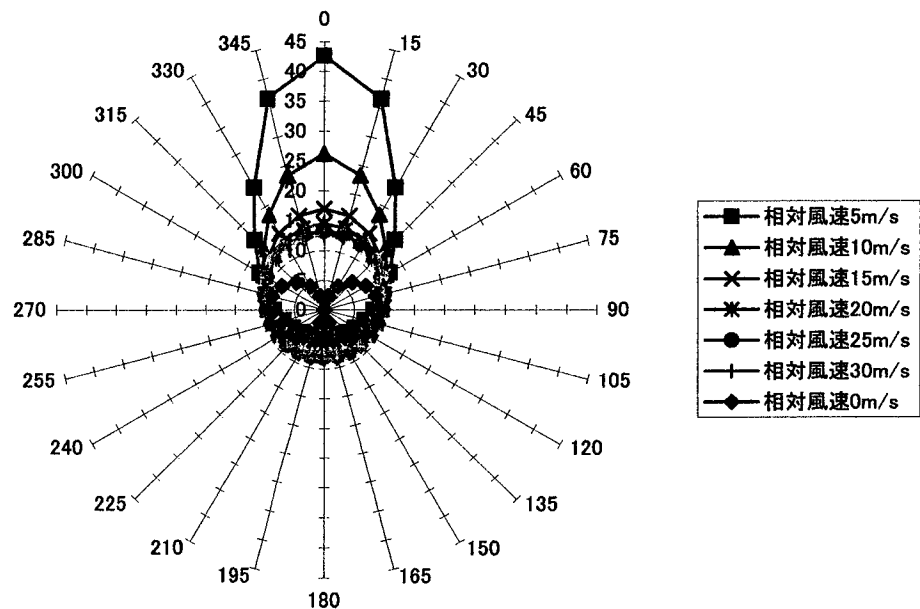


図 3a : 図 2 と同様、但し真風向推定誤差

見かけの風向風速別 風向誤差

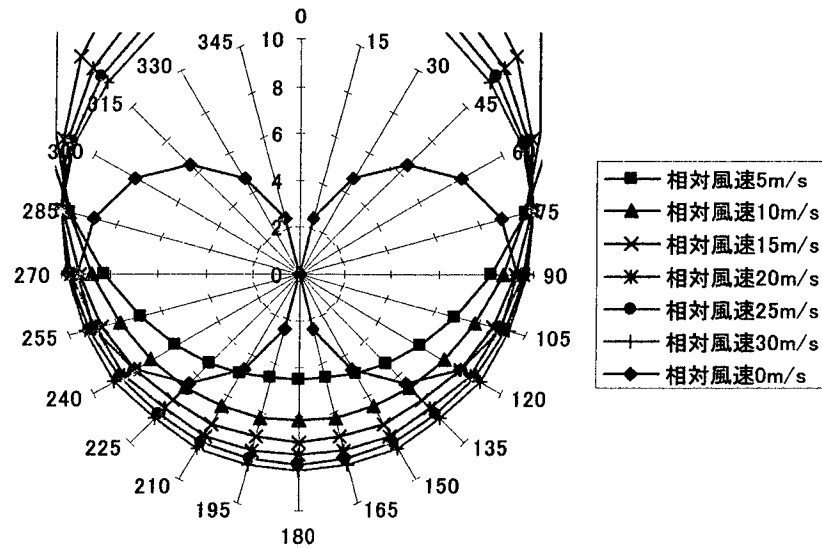


図 3b : 図 3a と同じ、ただし風向誤差 0 度～10 度の範囲だけ拡大した図

$$\cos^2 \theta = \frac{(R \cos \alpha - S)^2}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha}$$

結局

$$\begin{aligned} \delta\theta &= \frac{1}{R^2 + S^2 - 2RS \cos \alpha} \left\{ (S \sin \alpha)^2 (\delta R)^2 + (R \sin \alpha)^2 (\delta S)^2 + R^2 (R - S \cos \alpha)^2 (\delta \alpha)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{1 + \left(\frac{S}{R}\right)^2 - 2\frac{S}{R} \cos \alpha} \left\{ \left(\frac{S}{R} \sin \alpha\right)^2 (\delta R)^2 + (\sin \alpha)^2 (\delta S)^2 \right. \\ &\quad \left. + (R - S \cos \alpha)^2 (\delta \alpha)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7) \end{aligned}$$

となる。

風速が大きいとき(7)式から

$$\delta\theta \rightarrow \left\{ (\sin \alpha)^2 (\delta S)^2 + (R - S \cos \alpha)^2 (\delta \alpha)^2 \right\}$$

となる。

与えられた船速 S に対して、見かけの風向別の風向推定誤差を見かけの風速毎に表したのが図 3 である。なお、船速の計測誤差 δS を 1ms^{-1} 、見かけの風速の計測誤差 δR を 1ms^{-1} 、および見かけの風向の計測誤差 $\delta \alpha$ を 10 度と仮定した。なお見かけの風速 0 では風向は定まらないはずであるが与えて求めた。

船速とほぼ同じ見かけの風速を示す風を移動方位から受けるとき風向誤差が大きいことが分かる。この時真風速は極めて小さくなるので真風向算出に与える各計測誤差の影響が相対的に大きくなるためである。

4. 見かけの風の算出

これまでは船上での観測値から真風向風速を求める問題であったが、気象庁などに通報された船舶海上風データを詳細に解析する場合、船体の影響によるバイアス誤差を考慮するために、通報された真風向風速と船舶の移動ベクトルなどから見かけの風向風速を求める必要がでてくる。

図1より見かけの風速は

$$R^2 = W^2 + S^2 + 2SW \cos \theta$$

見かけの風向は正弦定理より

$$W \sin \varphi = W \sin(\theta - \alpha) = W(\sin \theta \cos \alpha - \sin \alpha \cos \theta) = S \sin \alpha$$

よって

$$W \sin \theta \cos \alpha = (W \cos \theta + S) \sin \alpha$$

$$\tan \alpha = \frac{W \sin \theta}{W \cos \theta + S}$$

となる。

ところで、移動方位あるいは近似的に船首方位の誤差、または記述上の角度分解能の低下に伴う誤差は、真風向を移動方位を基準に計っているのが真風向 θ の誤差としてこの式では現れる。そこで、船速計測精度を δS 、船首方位計測誤差を $\delta \theta$ とおくと、それに伴う相対風速推定誤差 δR は

$$\delta R = \left\{ \left(\frac{1}{W + S \cos \theta} \right)^2 \left[(S + W \cos \theta)^2 (\delta S)^2 + (WS \sin \theta)^2 (\delta \theta)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\delta \alpha = \frac{1}{W^2 + S^2 + 2WS \cos \theta} \left\{ (W \sin \theta)^2 (\delta S)^2 + (WS \cos \theta + W^2)^2 (\delta \theta)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

と表せる。

5. さいごに

ここでの解析は各誤差要因が独立であるとの前提にたっている。しかし、見かけの風向と風速、船速と船首方位の誤差はそれぞれ計測方法によっては独立ではなくなる可能性がある。その場合は、二つの誤差要因の共分散が現れてくるためここで求めた誤差より大きくなる可能性がある。

ランダム誤差は計測精度の向上で低減できるが、船舶上での風観測の誤差要因としては、ここで取り上げたランダム誤差要因以外に、前述のようないくつかのバイアス誤差要因が考えられる。すなわち、移動方位と船首方位の系統的な不一致、風速計設置高度が基準より高いことによる高風速の観測、船体の存在による気流の乱れなどである。このうち移動方位と船首方位の不一致は、移動方位と船首方位を常時監視することで補正できるため、バイアス誤差を除去できる。

風速計設置高度の問題は次のようなことである。船舶に取り付けられている風向風速計は通常メインマスト先端に設置されているが、海上気象観測においては海面上10mにおける風を計測することになっている(気象庁1994)⁽¹⁾。メインマストの先端の高さは大型船では40~50m程度にも及ぶため、大型船のマスト先端部の風速では基準の高さでの風速より10~数十%過大になることが指摘されている(Kutsuwada, 1994, 2000)⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これは海面での摩擦により高度が低いほど風速が小さくなるためである。このバイアス誤差については、風速計設置高度、気温、湿度、海面水温の情報があれば、大気境界総理論に基づく補正方法(例えばLiu et al., 1979⁽⁶⁾)によってある程度補正が可能である。

しかし、船体の存在による風の場の乱れについては事情は複雑である。障害物を乗り越えようとする流れにより、メインマスト上では風速が増速することがモデル計算で示されて

いる。他方、低い高度のより低風速の流れが船体の存在で持ち上げられることも考えられるが、これは風速を下げる要因となりうる。これらについては、数値実験や解析モデル、風洞実験などで調べられている(Kahma and Lepparanta, 1981⁽⁷⁾; Thiebaut, 1990⁽⁸⁾; Yelland et al., 1998, 2002⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾等)ものの、調査研究船を対象としたものに限られ一般の商船については詳しく調べられていない。

船舶での気象通報が気象庁などで重要な気象観測データとして生かされるためには、ここで検討した風観測を含めてより高い精度で適切に観測され通報されることが必要である。また、精度向上のために誤差解析と誤差の低減を計る方法を開発する必要もある。

参考文献

- (1)気象庁：船舶気象観測指針改訂第5版、気象庁、153頁(1994)
- (2)岩坂直人：マイクロ波散乱計データを用いた船舶海上風観測値の誤差評価、海の研究、12, 375-394, (2003)
- (3)一瀬正巳、誤差論、培風館、(1953)
- (4)Kutsuwada, K.,: On problems of ships-of-opportunity wind data on open ocean. *Sora-to-Umi*, 14,49-53. (1994)
- (5)Kutsuwada, K.,: On problem of long-term surface wind variation using voluntary observing ship's data. *Proc. of Internat. WS on Prep., Processing & Use of Histor. Mar. Meteor. Data in Nov. 2000*, Tokyo, Japan. Japan Meteorological Agency and Ship and Ocean Foundation, 27-31. (2000)
- (6)Liu, W. T., K. B. Katsaros, and J. A. Businger,: Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface. *J. Atmos. Sci.*, 36, 1722-1735. (1979)
- (7)Kahma, K. K., and M. Lepparanta,: On errors in wind speed observations on R/V Aranda, *Geophysica*, 17, 155-165. (1981)
- (8)Thiebaut, M. L., 1990: Wind tunnel experiments to determine correction functions for shipborne anemometers. Canadian Contractor Report of Hydrography and Ocean Sciences, 36, Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, NS, Canada, 57pp.
- (9)Yelland, M. J., B. I. Moat, P. K. Taylor, R. W. Pascal, J. Hutchings, and V. C. Cornell,: Wind stress measurements from the open ocean corrected for airflow distortion by the ship. *J. Phys. Oceanogr.*, 28, 1511-1526. (1998)
- (10)Yelland, M. M., B. I. Moat, P. W. Pascal and D. I. Berry,: CFD model estimates of the airflow distribution over research ships and the impact on momentum flux measurements. *J. Atmos. Ocean Tech.*, 19, 1477-1499. (2002)