中東・北太平洋航路における 全球数値予報モデルの海上風予測精度検証

種本 純¹・大澤 輝夫²・香西 克俊³・塩谷 茂明⁴

Verification of Ocean Wind Forecasts from Global Numerical Prediction Models in the Middle-East and North Pacific Routes

Jun TANEMOTO, Teruo OHSAWA, Katsutoshi KOZAI and Shigeaki SHIOTANI

Abstract

In this study, accuracy and characteristics of three global numerical weather prediction models, JMA-GSM, NCEP-GFS and ECMWF-IFS, were verified in the Middle-East and North Pacific Route. Because of very few in situ observations and heterogeneity of ship observations in both routes, wind observations from the QuikSCAT satellite were used for verification. We found two general tendencies of global numerical prediction models; 1) long range forecasts are not accurate in the North Pacific route, and 2) forecasts become especially accurate for a specific season in the Middle-East route. As the result of model intercomparison, it is found that wind forecasts from ECMWF-IFS are more accurate than JMA-GSM and NCEP-GFS for both all seasons and most areas in these routes. Although ECMWF-IFS forecasts are better than others in strong wind cases, it tend to underestimate observed wind speeds slightly.

Keywords : navigation and earth environment, meteorology, weather routing, ocean wind, forecast accuracy

キーワード: 航海・地球環境, 気象, ウェザールーティング, 海上風, 予測精度

1. 諸言

輸出入の多くを船舶輸送に依存する我が国では、船舶輸送の安全・効率化が多大な利益をもたらすことは明白であり、その手段の一つとして、気象・海象予測を考慮することにより最適航路を選出するウェザールーティング（以降、WR）という手法が用いられている。高嶋ら⁽¹⁾は内航で、西山ら⁽²⁾は大洋航路で気象庁の気象・海象予測データを用いたWRにより燃料消費量が削減可能であることを示している。気象・海象の予測値は誤差を含むものであるが、萩原は⁽³⁾それらの予測誤差を基に航海時間や燃料消費量の標準偏差を推定する確率的なWR手法を考案し、予測精度の認識及び改善がWRの正確さを向上さ

せることを示した。

一方で、気象・海象の予測精度についてはBidlotら⁽⁴⁾が欧州中期予報センター（European Centre for Medium range Weather Forecasts, ECMWF）、イギリス気象庁、米国海軍数値気象海洋センター、カナダ気象庁及び米国環境予測センター（National Centers for Environmental Prediction, NCEP）の波浪モデルの相互比較を行っている。その結果によれば、気象機関によって予測精度には差が見られ、初期値における風速、有義波高のRMSE（Root Mean Squared Error）はそれぞれ1.42-1.96m/s、0.43-0.55m、48時間予報では2.37-2.79m/s、0.60-0.76mであることが報告されている。林と杉本

¹ 学生会員 東京大学大学院工学系研究科（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）tanemoto@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

² 正会員 神戸大学大学院海事科学研究科

³ 非会員 神戸大学大学院海事科学研究科

⁴ 正会員 神戸大学自然科学系先端融合研究環

⁽⁵⁾ は、荒天時における低気圧位置と高波高域について、米国環境予測センターの予測値を用いて予報時間別の誤差を検証しており、船舶が半日の航行で回避できるなら許容範囲という仮定のもとで、72 時間予報では殆どの予測誤差は許容範囲であるが、120 時間予報以降では 50%以上が許容範囲を超える結果となることを示した。またメザウィら⁽⁶⁾ による気象庁 (Japan Meteorological Agency, JMA) 全球モデルの精度検証では、予測値には顕著な季節変動が見られ、初期値における風速、有義波高の RMSE は夏季が最も小さくそれぞれ 2.2m/s, 0.6m 程度、冬季が最も大きく 2.6m/s, 0.9m 程度であったものが、48 時間予報になると、夏季はそれぞれ 3.8m/s, 1.0m 程度、冬季は 4.7m/s, 1.6m 程度となることが報告されている。これらの先行研究から、予測値の予報時間による精度の低下、季節による精度の変化、気象機関による精度の違いを認識できる。一般の気象予報においては ECMWF の予測精度が最も高いことが知られており、例えば佐藤⁽⁷⁾ は、気象予報に重要な 500hPa 高度の 2 日間予報と 5 日間予報の RMSE について JMA, NCEP, ECMWF の世界を代表する 3 つの気象機関で相互比較し、ECMWF が最も高精度であることを定量的に示している。しかしながら、WR では一般的な気象・海象の予測精度というよりはむしろ特定の航路上での予測精度に関心が向けられる。先行研究においては中東航路や北太平洋航路などの主要航路上での予測精度の検証は行われておらず、航路上での予測精度及び傾向を明らかにすることにより、更なる WR の開発・発展につながると考えられる。

そこで、本研究では、気象・海象の中でも特に風

圧、海流、風浪など様々な形で船舶の航行に影響を及ぼす海上風について、日本の船舶の主な航行航路である中東航路と WR の既存研究が多く見られる北太平洋航路における精度検証を行う。具体的には、予報時間別、季節別及び強風時において、世界を代表する気象機関である JMA, NCEP 及び ECMWF の全球数値予報モデルの予測値の検証を行い、3 つの気象機関の予測値を相互比較することで海上風の予測傾向を明らかにするとともに、航路上で最も精度が高い予測値を明らかにする。

2. 使用データの概要

2.1 全球数値予報モデル GPV データ

海上風の予測値として、JMA Global Spectral Model⁽⁸⁾ (JMA-GSM), NCEP Global Forecast System⁽⁹⁾ (NCEP-GFS) 及び ECMWF Integrated Forecast System⁽¹⁰⁾ (ECMWF-IFS) の全球数値予報モデルの格子点値 (Grid Point Value, 以降, GPV) を用いる。これらの GPV では、10m 高度の風速が $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ の格子点上に配列された形で配信される。

本研究は著者らの研究プロジェクト「輸送の三原則を考慮した国際海上輸送システム創出の研究」が採択された年に開始されており、検証はその初年度にあたる 2008 年 1 月 1 日から 2008 年 12 月 31 日の 1 年間を対象とした。12 UTC 初期値の 6 時間毎の予測値 (JMA-GSM 96 時間予報以降については 12 時間毎) を使用して精度検証を行った。2008 年における気象予報モデル概略を Table 1 に示す。尚、現在では各気象機関の予測モデルに改良が加えられており、本研究の結果より予測精度が若干改善されていると

Table 1 Description of the atmospheric forecast models (operated at 2008)

	JMA-GSM	NCEP-GFS	ECMWF-IFS
Orography / Vegetation	GTOPO30 / GLCC	GTOPO30 / GCIP	GTOPO30 / GLCC
Horizontal domain / resolution	Global / TL959 (20km)	Global / T382 (35km)	Global / T799 (25km)
Horizontal representation	Spectral (spherical harmonic basis functions) with Gaussian grid	Spectral (spherical harmonic basis functions) with Gaussian grid	Spectral (spherical harmonic basis functions) with reduced Gaussian grid
Vertical domain / resolution	Surface to 0.1hPa / 60 levels	Surface to 0.27hPa / 64 levels	Surface to 0.01hPa / 91 levels
Vertical representation	Finite difference scheme Sigma-p hybrid coordinate	Finite difference scheme Sigma-p hybrid coordinate	Finite element scheme Sigma-p hybrid coordinate
Time step	600 seconds	450 seconds	720 seconds

考えられる。

2.2 海上風実況値データ

本研究では、上記 GPV 予測値を精度検証するための海上風実況値として、QuikSCAT (Quick Scatterometer) 衛星による海上風推定値を用いる。QuikSCAT は 1999 年 6 月に NASA により打ち上げられた太陽同期極軌道衛星である。SeaWinds と呼ばれるマイクロ波散乱計を搭載しており、1800km の観測幅で同一地点を 1 日 2 回観測し、1 日で海水を除く海面の 90% 以上を観測する。周波数 13.4GHz のマイクロ波を海上に照射することで海面から得られる後方散乱係数を観測し、中立の大気安定度を仮定した上で、モデル関数により 10m 高度の風速・風向を推定している。QuikSCAT による風速及び風向の推定精度は RMSE で 1-2m/s 程度及び 20-30° 程度⁽¹¹⁾⁽¹²⁾とされている。尚、QuikSCAT 衛星は 2009 年 11 月に運用を停止しており、今日では、MetOp (Meteorological Operational) 衛星が QuikSCAT と同じ役割を担い、海上風を観測している。

QuikSCAT にはデータの処理段階により Level があるが、本研究では $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ に格子点化された Level 3 product⁽¹³⁾ のデータを使用した。また、降雨域、弱風 (3m/s 未満) 及び強風 (20m/s 以上) 域では推定精度が落ちる⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾ ため、降雨域を特定する Rain Flag を利用して、検証に使用するデータは降雨域を除き、かつ風速 3m/s 以上 20m/s 未満のものに限定した。QuikSCAT / SeaWinds 及び Level 3

product の概要を Table 2 に示す。

QuikSCAT から得られる海上風の推定値は、中立の大気安定度を仮定して求められた Equivalent Neutral Wind⁽¹⁵⁾ (以降、ENW) と呼ばれるものである。これに対し数値予報モデルでは大気安定度が考慮された 10m 高度の風速が予測値として算出されている (Stability Dependent Wind, 以降、SDW)。ここでは、数値予報モデルの予測値である SDW を QuikSCAT から得られる ENW に合わせるために、LKB コード⁽¹⁵⁾ を用いて大気安定度補正を行った。大気安定度補正には風速の他に気温、相対湿度、海面水温のデータが必要であるが、ここでは予測値との整合性をとるために、気温、相対湿度 (ECMWF は露点温度) には JMA, NCEP 及び ECMWF それぞれの予測値を用いた。海面水温データは、それぞれの気象機関が作成している JMA-MGDSST⁽¹⁶⁾ (Merged satellite and in situ data Global Daily Sea Surface Temperatures), NCEP-RTGSST⁽¹⁷⁾ (Real Time Global Sea Surface Temperature) の解析値を予報時間の間変化しないものとして使用し、ECMWF については ECMWF-IFS の予測値を使用した。

2.3 検証海域

本研究では、中東航路として東京-スエズ運河を結ぶ航路、北太平洋航路として東京-サンフランシスコを結ぶ航路を想定して世界港間距離図表⁽¹⁸⁾ を参考に検証を行う航路を決定した。中東航路をアラビア海、ベンガル湾、南シナ海、フィリピン海の 4 海域、北太平洋航路を西太平洋、北太平洋、東太平洋の 3 海域に分け、その海域での統計値の平均をとることにより、各海域における風速の予測精度を評価した。各海域の航路の両端の緯度経度を Table 3 に、検証海域及び検証格子点数を Fig. 1 に示す。

衛星の通過時刻が日により異なるため、本研究で

Table 2 Outline of QuikSCAT / SeaWinds and Level 3 product.

QuikSCAT	
Launch date	19 June 1999
Type of orbit	Sun-synchronous
Recurrent period	4 days (57 orbits)
Orbit period	101 minutes (14.25 orbits / day)
Local sun time at crossing the equator	6:00 A.M. $\pm$ 30minutes 6:00 P.M. $\pm$ 30minutes
Altitude above equator	803 km
Inclination	98.616°
Sea Winds scatterometer	
Frequency	13.402 GHz (Ku-band)
Horizontal resolution / Swath width	25km / 1800 km
Level 3 product	
Horizontal resolution	0.25 x 0.25 degree latitude/longitude

Table 3 Longitude-Latitude at both edges of Middle East and North Pacific route.

Route	Area	West edge	East edge
Middle East route	Arabian Sea	22° 39N 59° 57E	5° 50N 80° 10E
	Bay of Bengal	5° 50N 80° 10E	6° 00N 95° 20E
	South China Sea	1° 24.5N 104° 27E	20° 20N 122° 10E
	Philippine Sea	20° 20N 122° 10E	28° 20N 130° 10E
North Pacific route		34° 50N, 140° 00E	38° 00N 123° 20W

Fig. 1 7 areas for verification. Parenthetical values are the number of grid points for verification.

は予測値を日々の衛星の通過時刻に合わせて線形内挿した。また、観測値は、予測値の格子点に最も近いものを参照した。

3. 検証結果

3.1 予報時間別の精度

予報時間別及び季節別の予測精度検証において、予測誤差の評価を(1)式で示す RMSE で行った。但し、風速の統計値は平均風速の大小に影響を受けるため、(2)式で示される、RMSE を平均風速で正規化した百分率を用いて予測精度の評価を行った。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (F - O)^2} \quad (1)$$

$$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 F 、 O 、 N はそれぞれ、予測値、観測値、サンプル数であり、 $\bar{O}$ は各海域で平均した観測値の年平均又は季節平均風速である。予測誤差は概ね正規分布に従うため、RMSE を評価指標として用いることで、「検証期間における予測値の 60-70%程度が観測値 $\pm$ RMSE の範囲の風速を予測している」と言える。

各海域における予報時間別の風速の RMSE と QuikSCAT による年平均風速を Fig. 2 に示す。全海域において、予報時間とともに RMSE の値は大きくなっていることがわかる。24 時間後の予測値と 168 時間後の予測値の RMSE に最も差が出たのは北太平洋

Fig. 2 RMSEs for wind speed in the 7 areas and the average for the Middle East (ME) and North Pacific (NP) routes, as a function of forecast time. Parenthetical value is annual mean wind speed in each area.

であり、風速で 30%以上低下している。その他の太平洋海域でも概ね 25%以上の低下が見られた。中東航路ではフィリピン海が最も RMSE の低下が大きい、そこを含めても概ね 20%以下であり北太平洋に比べて全体的に差が小さい事が示された。航路別の平均値では、予報時間前半では北太平洋航路の RMSE は中東航路と殆ど同じであったが、96 時間予報以降は中東航路の精度が上回り 168 時間予報では中東航路は北太平洋航路より 8%程度精度が高いという結果が得られた。

海域別に見て相対的に精度が高かったのは、予報時間前半では東太平洋とアラビア海であり、RMSE はそれぞれ 16%程度と 17%程度であった。予報時間の後半においてはアラビア海の RMSE が最も小さく、その値は 30%程度であった。また、RMSE が大きい値を示したのは予報時間前半では南シナ海とベンガル湾で 20%以上であり、予報時間後期では西太平洋と北太平洋において 45%以上であった。

JMA, NCEP 及び ECMWF を比べてみると、西太平洋の 168 時間予報において JMA が ECMWF より小さい RMSE を示したが、それ以外では ECMWF が JMA 及び NCEP の予測精度を上回った。また、アラビア海では NCEP, それ以外の海域では JMA が ECMWF に次いで高い精度を示した。各気象機関の RMSE に最も差が出た海域は南シナ海であり、NCEP と ECMWF の RMSE に最大 11%程度の差が見られた。

3.2 季節別の精度

予測精度の季節変化の傾向を見るために、年間の予測値を春 (3-5 月), 夏 (6-8 月), 秋 (9-11 月), 冬 (1, 2, 12 月) の 4 つの季節に分けて精度検証した。

全予報時間を平均した季節別の風速の RMSE と QuikSCAT による季節平均風速を Fig. 3 に示す。季節別の比較では、中東航路 4 海域で平均風速が 1 年間で最も大きい季節に、他の季節より風速の RMSE が小さくなる傾向が見られた。アラビア海、ベンガル湾の夏は 20%, 22%程度、南シナ海、フィリピン海の冬は 23%, 26%程度と、中東航路の 4 海域では、各海域のモンスーンの卓越期に最も小さい RMSE を示している。北太平洋 3 海域では、季節による特徴は中東航路ほど顕著に表れず、各海域の RMSE が最も小さい季節と大きい季節の差が最も大きい所でも 10%程度であった。

JMA, NCEP 及び ECMWF を比べてみると、3.1 節の結果と同様に、ほぼ全ての海域及び季節で ECMWF の精度が最も高い結果となった。また、各気象機関に特に差が出たのは、夏と秋の南シナ海で ECMWF の RMSE がそれぞれ 28%及び 35%程度であったのに対し、JMA は 35%及び 43%, NCEP は 41%及び 45%と、7%以上大きくなった。

3.1 節及び本節での結果について、航路別の予測精度の差異については一般的な気象現象から説明で

Fig. 3 RMSEs for wind speed (bars) and mean wind speed (line) for four seasons.

きる．中東航路は低緯度に位置するため，その場で発生し消滅する対流性の擾乱が多い．一方，北太平洋航路は，中緯度に位置するため，温帯低気圧による移動性の擾乱を予測する必要がある．現在の全球数値予報モデルでは，北太平洋航路で中期予報を行う際に，大きく予測精度が低下することから，移動性の擾乱の再現性が低いと考えられる．また，中東航路では，陸と海の比熱の違いから生じる温度傾度により，モンスーンと呼ばれる卓越風が形成される．モンスーンの卓越期は，アラビア海及びベンガル湾では夏，南シナ海及びフィリピン海では冬であり，その季節には風速及び風向の日々変動が小さくなり，他の季節より相対的に予測精度が向上すると考えられる．

気象機関別の予測精度の差異については，各気象機関の全球数値予報モデルにおいては，力学過程，物理過程の扱いが完全に同じものは存在せず，あるプロセスから生じた予測誤差が次の予測誤差を生むため，その原因を特定することは困難である．しかし，数値予報においては，理論上格子解像度が高いモデルが予測精度も高くなるため，JMA と ECMWF の予測精度は NCEP を上回ると考えられる．また，気象モデルでは初期値の正しさが予測精度の鍵を握るが，NCEP は初期値化に 3 次元変分法を用いているのに対し，JMA と ECMWF はより高度な 4 次元変分法を用いている．また，JMA は 4 次元変分法の同化窓を 6 時間に設定しているが，ECMWF は 12 時間に設定しており，初期値において大気の流れをより正確に再現できていると考えられる．著者らの見解として，以上のような格子解像度や初期値化手法の違いが，各モデルの予測精度の違いを生む一因となるのではないかと考えている．

3.3 強風時の精度

気象庁では，日本近海の海上において風速が 28 ノット（約 14m/s）以上に現在達しているまたは 24 時間以内に達する恐れがある場合，海上風警報を発表している．船舶の航行には強風時の風速がより重要であるため，ここでは 14m/s 以上の強風を対象を絞って議論を進める．

Fig. 4 に 1999 年 11 月 1 日から 2009 年 10 月 31 日までの 10 年間の QuikSCAT 観測値による 14m/s 以上の強風出現頻度マップを示す．中東航路では，フィリピン海や南シナ海は冬季モンスーン，アラビア海では夏季モンスーンに伴うソマリジェットの続流による強風が見られる．しかしながら，全体的に出現頻度が低く，航路上ではほとんど 5%未満である．これに対し，北太平洋航路では 14m/s 以上の強風速の出現頻度は最も多い所で 16%以上であり，その後も航路上のほとんどで 10%以上となる．

強風時の船舶の航行の観点からは，予測風速誤差だけでなく，海上強風警報の当たり外れについても検討する必要がある．ここでは風速 14m/s 以上の強風を対象に，その現象の有無から算出される (3) 式のスレットスコア TH により検証を行う．

$$TH = \frac{FO}{FX + XO + XX} (0 \leq TH \leq 1) \quad (3)$$

ここで， FO ， FX ， XO ， XX は Table 4 に示す事象であり， TH の値が大きい事は精度が高い事を意味する．

北太平洋航路上の 3 海域における，全予報時間を平均した年間のスレットスコアを Fig. 5 に示す．3 海域の中では，北太平洋のスコアが最も小さく，JMA，NCEP 及び ECMWF のスレットスコアはそれぞれ 0.31，0.34 及び 0.35 であった．西太平洋においてはそれ

Fig. 4 Frequency of occurrence (%) of winds above 14m/s from 10 years of QuikSCAT observations.

Table 4 Contingency table used to compute the score. *FO*, *FX*, *XO* and *XX* mean the number of combinations

Event = Wind speeds above 14m/s		Event observed	
		Yes	No
Event forecast	Yes	<i>FO</i>	<i>FX</i>
	No	<i>XO</i>	<i>XX</i>

Fig. 5 Threat scores for West, North and East Pacific areas.

ぞれ 0.37, 0.41 及び 0.41, 東太平洋では 0.34, 0.35 及び 0.37 であり, 西太平洋では ECMWF と NCEP が同程度のスコアを示し, それ以外の海域では ECMWF が NCEP と JMA のスコアを上回った. また, 3.1 節で ECMWF に次いで JMA の精度が高い結果となったが, 強風時には 3 海域全てで NCEP が JMA のスコアを上回る結果となった.

Fig. 6 に北太平洋航路の 3 海域における JMA, NCEP, ECMWF 及び QuikSCAT の風速出現頻度の平均値を示す. 14m/s 以上の強風に関して, NCEP が最も出現頻度が高く, QuikSCAT による観測値と良く一致している. 一方, JMA と ECMWF は 7m/s-13m/s での出現頻度が高く, 15m/s 以上では QuikSCAT による観測値の出現頻度より低い値を示している. Fig. 7 に, インド洋-北太平洋における各気象機関の初期値の風速出現頻度から予測値の風速出現頻度を引いた偏差を示す. 正(負)の値は初期値より予測値の出現頻度が多い(少ない)ことを示している. 本来なら初期値と予測値の風速出現頻度は同じであるべきだが, JMA は, 予測値において 0-5m/s の風速帯の出現頻度が初期値に比べて高く, 逆に 5-14m/s の風速帯では予測値の出現頻度が下がっていることから, 全体的に予測風速は初期値に比べて小さくなる傾向がある. また ECMWF は予測値において 0-3m/s 及び 8-14m/s の風速帯の出現頻度が初期値に比べて低く, 4-8m/s の風速帯では予測値の出現頻度が高い. NCEP は予測値において 5-14m/s の風速帯の出現頻度が初期値に比べて低く, 0-5m/s 及び 14-23m/s の風速帯では初期値より高くなっている. このことは, NCEP の予測の過程

Fig. 6 Wind speed distributions from JMA-GSM, NCEP-GFS, ECMWF-IFS and QuikSCAT in the averages West, North, and East Pacific areas.

Fig. 7 Difference in frequency of occurrence for forecasted wind speed, for all Indian and Pacific Oceans; 24h, 96h and 168h forecast (FT) minus analysis (FT0).

Fig. 8 Miss rates for West, North and East Pacific areas.

Fig. 9 False alarm rates for West, North and East Pacific areas.

で14m/s以上の風速が出やすくなっていることを示唆している。

Fig. 8 及び Fig. 9 に、(4)式及び(5)式で表される見逃し率 (M) 及び空振り率 (F) を示す。

$$M = \frac{XO}{FO + XO} (0 \leq TH \leq 1) \quad (4)$$

$$F = \frac{FX}{FO + FX} (0 \leq TH \leq 1) \quad (5)$$

見逃し率は海上風警報発表時に予報が出来ていない確率、空振り率は現象が起こらないときに予報を出している確率であり、ともに値が小さいほど予報が優れていることを示す。Fig. 8 及び Fig. 9 より、NCEP の予測値は強風出現頻度が高いことにより警報を良く捉えることができ、見逃し率が低くなるが、空振り率も高く、無駄に警報を多く出すという傾向が見て取れる。逆に、ECMWF の予測値において、見逃し率は高いが空振り率が低いことで補っており、警報が外れる事象 (FX) を考慮したスレツスコアでの評価では、ECMWF が最も精度が高いという結果となった。

4. 結言

本研究では中東航路及び北太平洋航路において、

JMA, NCEP 及び ECMWF の全球数値予報モデルの海上風予測値の精度検証及び比較を行った。主要な結論を以下に示す。

- ・ 中東航路及び北太平洋航路における海上風予測値についても、既存研究と同様に ECMWF の予測精度が最も高いことを明らかにした。
- ・ 予報時間別の検証において、予報時間に伴う風速予測精度の悪化傾向は、中東航路よりも北太平洋航路で顕著であった。
- ・ 季節別の検証において、中東航路ではモンスーンの卓越期に同海域の他の季節より顕著に精度が良くなる傾向が見られた。
- ・ 強風時の検証において、ECMWF は強風の出現頻度が低く、NCEP は予測値が強風側にシフトし、観測値に見られない強風を多く予測する傾向が見られた。

本研究では、2008 年における 1 年間の検証から上記の結論を得たため、結論の一般性には注意が必要である。しかしながら、多田⁽¹⁹⁾ が対流圏内の気象予測精度の代表的な指標となる 500hPa の高度場を検証した結果、ECMWF の予測精度は 1995 年以降から 2013 年現在までの 18 年間に渡って JMA や NCEP より優れていることを考えると、航路上における海上風に特化した精度検証により得られた本研究の結論はある程度一般性を持っていると言える。従って、著者らは今後のウェザールーティングに関する研究において ECMWF の海上風予測値を使うことを考えている。また、2.1 節に述べたように、各機関の全球数値予報モデルは改良され続けており、今日では海上風の予測精度が若干改善していることが予想される。今後は MetOp 衛星の観測値を利用して最新の全球数値予報モデルによる海上風の予測精度を定量的に評価し、モデルの改良に伴う予測精度の改善幅を明らかにする必要がある。

謝辞

本研究は平成 20 年度に文部科学省で採択された運営費交付金特別教育研究推進「輸送の三原則を考慮した国際海上輸送システム創出の研究」の一環として実施された。

参考文献

- (1) 高嶋恭子, 加納敏幸, 小林充: 高精度の気象・海象予測データに基づく内航船の省エネルギー運航について, 日本航海学会論文集, 第 113 号,

- pp. 99-106, 2008.
- (2) 西山尚材, 庄司るり, 大津皓平, メザウィブラヒム: ウェザールーティングによる大洋航路の検討, 日本航海学会論文集, 第 125 号, pp.153-164, 2011.
- (3) 萩原秀樹: 気象・海象の予測精度に基づく確率的なウェザールーティング, 日本航海学会論文集, 第 83 号, pp.155-167, 1990.
- (4) Bidlot, J.-R., D. J. Holmes, P. A. Wittmann, R. Lalbeharry, and H. S. Chen: Intercomparison of the Performance of Operational Ocean Wave Forecasting Systems with Buoy Data, *Wea. Forecasting*, Vol. 17, pp.287- 310, 2002.
- (5) 林美鶴, 杉本真吾: 気象航法に用いられる気象・海象予測値の予報日による差異, 日本航海学会論文集, 第 122 号, pp.201-207, 2010.
- (6) メザウィブラヒム, 庄司るり, 田丸人意: ウェザールーティングに使用する気象・海象情報の精度向上についての一考察, 日本航海学会論文集, 第 122 号, pp.209-217, 2009.
- (7) 佐藤清富: 全球数値予報モデルの国際比較, 平成 20 年度数値予報研修テキスト, pp.104-106, 2008.
- (8) 気象業務支援センター: トップページ, <http://www.jmbc.or.jp/>
- (9) NOAA National Operational Model Archive and Distribution System: Top page, <http://nomads.ncdc.noaa.gov/>
- (10) European Center for Medium-Range Weather Forecasts: Top page, <http://www.ecmwf.int/>
- (11) Ebuchi, N., H. C. Graber, M. J. Caruso: Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 19, pp.2049- 2062, 2002.
- (12) 久保田雅久, 南大介, 大木崇史, 鈴木聡: QuikSCAT/SeaWinds と船舶観測海上風データとの比較, 海の研究, 第 12 巻(第 6 号), pp.551-563, 2003.
- (13) Jet Propulsion Laboratory: SeaWinds on QuikSCAT Level 3 Daily, Gridded Ocean Wind Vectors (JPL SeaWinds Project). *Physical Oceanography DAAC*, 39 pp., 2001.
- (14) B. R. Furevik, L.-A. Brevik and F. Tveter: QuikSCAT Validation Report. Met. No. Report, No. 3/2008, 43 pp. 2008.
- (15) Tang, W., and W. T. Liu: Equivalent Neutral Wind. Jet Propulsion Laboratory Tech. Rep, Vol. 96-17, 22 pp., 1996.
- (16) Japan Meteorological Agency: NEAR GOOD Regional Real Time Data Base page, <http://goos.kishou.go.jp>
- (17) National Centers for Environmental Prediction: RTG_SST page, <http://polar.ncep.noaa.gov/sst/>
- (18) 日本航海士会: 世界港間距離図表 (2 訂版), 海文堂出版, 170p., 1990.
- (19) 多田秀夫: 気象庁数値予報の現状と展望, http://www.ogimotolab.iis.u-tokyo.ac.jp/html/workshop/20140325/20140325_12.pdf