ウェザールーティングにおける海洋モデル解像度の依存性 - 北太平洋航路における海流 -

嶋田 陽一*・塩谷 茂明*・高橋 桂子**

Dependence of Ocean Model Horizontal Resolution on Weather Routing -Ocean Currents in the North Pacific Route-

Yoichi SHIMADA, Shigeaki SHIOTANI and Keiko TAKAHASHI

Abstract

In this paper, we examine the influence of ocean model horizontal resolution on weather routing which is the optimum navigation using weather and oceanic conditions. Higher resolution ocean model succeeds to simulating more realistic strong currents such as the Kuroshio and Kuroshio extension. Although the weather routing in this study does not significantly save the passage time of the minimum time route, higher resolution ocean model has the possibility of decreasing the passage time of the minimum time route. It has also the possibility of changing the structure of the minimum time route significantly. These suggest that detailed current structure has influence on the minimum time route.

Keywords : route selection, weather routing, ocean model, horizontal resolution, North Pacific Route

キーワード : 航路選定、ウェザールーティング、海洋モデル、水平解像度、北太平洋航路

1. 緒言

ウェザールーティング(以下、WR)とは、「航海中の気象・海象状態をできる限り正確に予測し、当該船舶の耐航性を考慮して、ある評価基準に対する最適な航路を選択すること」と定義されている⁽¹⁾。

最近注目される燃料費の高騰、温室効果ガス排出量の増加、世界各地で発生する船舶の衝突、油流出などの航海中の様々な問題を解決するために、WRは有効な航法の1つと考えられる。例えば、船舶がWRを用いて波浪状態の悪い海域を避けることにより、制御不能による衝突、大波による破損及びそれらによって発生する油流出事故を防ぐことができると考えられる。しかし、船舶が波浪状態の悪い海域

を避けるとき、航海時間の損失をできるだけ抑えて航行することは経済的に重要である。それにより、燃料費及び温室効果ガス排出量の削減にも繋がる。それゆえ、これらの問題を解決するために具体的な理解しやすい目標の1つとして航海時間の短縮をあげることができる。過去の研究においては、WRによって大圏航法より航海時間を節約することができるという報告があるので⁽²⁾、WRはその目標を達成するために有効である。

気象・海象を利用した航法であるWRを高精度化にするためには、高解像度の気象・海象モデルを用いたほうがよい。なぜならば、より高次のオーダーの気象・海象現象は、小さな空間スケールの渦に支

* 正会員 神戸大学自然科学系先端融合研究環

(勤務先〒236-001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25 海洋研究開発機構)

** 正会員 神戸大学自然科学系先端融合研究環 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

*** 非会員 海洋研究開発機構

配されているからである(例: Smith et al. ⁽³⁾)。海洋では、中規模渦と呼ばれる 100 km 程度の空間スケールを持つ渦が代表的である。しかし、過去の多くの研究において WR に用いる海流データは、観測値を統計処理して求めたデータセットであり、解像度は著しく低い。例えば、JODC の海流統計データ(緯度経度 1 度)⁽⁴⁾、パイロットチャート(緯度経度 5 度)⁽⁵⁾ を使用している。空間解像に注目すると、これらの低い解像度のデータでは、黒潮流域など急激に変化する海域や解像度より小さいスケールの海流を把握することができない。高解像度の海流データを取得するために、観測体制を構築することは 1 つの方法であるが、莫大なコストがかかるので高解像度のモデルを利用するほうが現実的である。

近年、計算機性能の向上により、北太平洋などの大規模スケールにおいて 1 度未満の解像度の海洋モデル計算が標準となりつつある(例: Guo et al. ⁽⁶⁾)。しかし、あまりにも高解像度の計算では計算時間、費用などの負担がかかり、その一方で低解像度の計算では、中規模渦などの小さな空間スケールの現象が再現されないために WR へ影響を与える黒潮などの海象現象が再現されない可能性がある(例: Guo et al. ⁽⁶⁾)。海洋モデルから得た海流データが WR へ与える影響についての研究は WR の研究開発へ寄与する基礎研究に位置付けられると考えられるが、これまでほとんど知見がない。本研究では、そのような基礎研究の一環として解像度に注目し、異なる解像度(1 度、0.5 度、及び 0.25 度。詳細は 2.1 節で述べる。)で設定した海洋モデルの対照実験を行い、海洋モデルの解像度が WR へ与える影響を調べ、WR の高精度化のために海洋モデルの高解像度化の必要性を議論する。

2. 実験概要

2.1 海流データ及び波浪データ

本研究では海洋モデルを計算して得た海流データを航海シミュレーションに採用した。用いたモデルは地球シミュレータセンターマルチスケールモデリング研究グループで開発された海洋モデル(MSSG-O: Multi-Scale for Geoenvironment: Ocean component)である。このモデルは、地球シミュレータで高解像度に設定したモデルを高速に計算できるようにチューニングされている。このモデルの方程式は、静水圧近似、ブジネスク近似のもとプリミティブ方程式から成る。詳細は嶋田他⁽⁷⁾を参照されたい。

本研究で設定した海域は北太平洋を含む海域(南緯 5 度から北緯 65 度、東経 120 度から西経 80 度)、層数は 41 層とした。水平解像度 1 度、0.5 度及び

0.25 度の 3 つの海洋モデル実験を実施した。この 3 つの解像度を採用した理由は、水平解像度 1 度及び 0.5 度の場合、緒言で述べた中規模渦の解像(100 km 程度)が難しいが、0.25 度の場合、その解像がある程度できるようになり、現実的な黒潮などの海流の再現が期待されるからである。

水平粘性・拡散係数は Smagorinsky 型を用いて計算した。Smagorinsky 定数は、水平解像度 1 度、0.5 度の場合で 0.45、0.25 度の場合では 0.2、プラントル数は全ての場合において 1 に設定した。

用いた海底地形については ETOPO5 (Earth Topography 5 minute gridded elevation data set)を参考にした。WOA98(World Ocean Atlas 1998)の水温、塩分の気候値をモデル計算の初期値とし、静止状態から NCEP (National Centers for Environmental Prediction)/NCAR(National Center for Atmospheric Research)再解析データの風応力(月気候値)で 19 年間駆動させ、月気候値の海流データを作成した。WR の計算に、19 年目の各月のスナップショット(1 日目)の海流データを用いた。実際に WR の計算の際、船位から最も近い海洋モデルの格子点の値を空間について線形内挿をして用いた。なお、WR における海洋モデル解像度の影響について簡単に比較するため、本実験では時間の内挿を行わず一定値とした。

波浪データについては、ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 40 Year Re-analysis (ERA-40、ERA: Ecmwf Re-Analysis)の有義波高及び波向を用いた。解像度は緯度・経度 2.5 度である。航海シミュレーションでは、1 日毎にデータを更新して用いた。

2.2 船速の推定式

船速は Hagiwara⁽²⁾及びウェザー・ルーティング研究グループ⁽¹⁾で用いたタンカーのモデル(帆装なし)を参考にして、最大速度 14knots (前述した船舶のサービススピードに相当する)にして高嶋他⁽⁵⁾の推定式を援用して算出した。この推定式は、北太平洋航路を航行するコンテナ船に装備された航海自動記録装置のデータから求められたものである。詳細は嶋田他⁽⁷⁾を参照されたい。Fig. 1 に本研究で用いた波浪中の速力曲線を示す。速力曲線の全体像を確認するために、Padhy et al. ⁽⁸⁾の Fig.2 の速力曲線と比較して、本研究の速力曲線は概ね同様な傾向を示す。対象とする船種は概ね Hagiwara⁽²⁾を参考にしたタンカーであるが、本研究の速力曲線の船速の範囲より同じ程度の船舶の大きさであるば積み貨物船(10 から 15 knots)も対象に含んでよいと思われる。本研究は海

Fig. 1 Performance curves of container ship used in the simulation (excerpted from Shimada et al. ⁽⁷⁾).

洋モデルの解像度が WR へ与える影響を調べることを主目的としており、詳細な船体運動を計算するモデルを用いた研究は今後の課題である。

2.3 航路探索方法

本研究の最適航路は、後述する航海シミュレーションによって、最短時間で目的地に到着した航路である最短時間航路(以下、MTR: Minimum Time Route)とする。航路の計算方法は、等時間曲線法を用いた。等時間曲線法の詳細は、ウェザー・ルーティング研究グループ⁽¹⁾及び Hagiwara ⁽²⁾、等時間曲線法のパラメータ等は嶋田他⁽⁷⁾を参照されたい。

本研究では、過去の研究(例: Hagiwara ⁽²⁾)で行われた東京からサンフランシスコまでの北太平洋航路を採用した。この航路を採用した主な理由は、実際に多くの船舶が利用している他に、東西距離が長い、航海中における航路の選択可能海域が広いという WR に有効な自然条件を満たすからである(ウェザー・ルーティング研究グループ ⁽¹⁾)。さらに、WR 対して海流の影響を調べるために比較的速い海流(黒潮、黒潮続流など)が大圏航法による航路の周辺にあり、本研究の航海シミュレーションで得た航路を大圏航法による航路(大陸、島などの影響がほとんどない)と簡単に比較するためにこの航路を採用した。MSSG-O による北太平洋のシミュレーションを上記の異なる解像度で実施して得た海流データ、ECMWF の波浪データ及び推定式から得た船速を用いて、出発間隔は 5 日毎、合計 74 回の WR を実施し、3 つの対照実験の結果を比較した。

3. 結果

3.1 海洋モデルで計算された海流

異なる解像度の海洋モデルで計算された海流をみ

るために、解像度 1 度、0.5 度及び 0.25 度の海洋モデルで計算されたそれぞれの 4 月の表層(5 m 深)の水平流速ベクトル及び大きさを Fig. 2 に示す。ベクトルは流速の向きと大きさ、トーンは海流の大きさを示す。ベクトル表示を見やすくするために、解像度 0.25 度の場合のベクトルの大きさは、他の解像度の場合と異なることに注意されたい。解像度 1 度及び 0.5 度の場合、黒潮及び黒潮続流は弱く本州の東へ拡大していない。一方、解像度 0.25 度の場合、黒潮及び黒潮続流は他の解像度の場合と比較して強く、日付変更線まで強く流れる。

Fig.2 Horizontal velocity vector and magnitude (m/s) at 5 m depth in April (See text for a further description).

Fig.3 As in Fig.2 but for January, July and October with the horizontal resolution of 0.25 degrees (See text for a further description).

このようにモデルの解像度が高くなるにつれて、黒潮及び黒潮続流は強まり東へ拡大し、さらにその周りに小さな空間スケールの渦が解像され、全体的により現実的な海流に近づいている。特に解像度 0.5 度から 0.25 度に変更することで、海流の状況が著しく変化する。この原因の 1 つは、海洋モデルが中規模渦(100km 程度)をうまく解像することができるからと考えられる。上記の異なる解像度における海洋モデルの計算結果の違いのようにモデルの解像度が高くなると、黒潮、黒潮続流等の流れが現実によく傾向は、従来の傾向(例: Guo et al.⁽⁶⁾)と同様である。Fig.3 に 1 月、7 月及び 10 月における解像度 0.25 度

の水平流速ベクトル及び大きさ(5m 深)を示す。図のように、解像度 0.25 度の場合、黒潮続流は 1 年を通して日付変更線辺りまで達し現実的な流れに近い。また、季節変化において、黒潮続流は夏季(7 月)に強まり冬季(1 月)には弱まることも現実と対応している。以上より、高解像度の海洋モデルだと、中規模渦を解像することでき、より現実的な海流の再現が可能であることがわかる。

3.2 1 年を通しての最短時間航路

異なる解像度の海洋モデルで計算された海流が MTR に与える影響をみるために Fig.4 に 1 年を通しての MTR の分布を示す。1 度及び 0.5 度の場合、MTR は大圏航路を中心にして同程度南北方向の変化幅がみられる。一方、0.25 度の場合、MTR は低解像度より南北方向の変化幅が大きく、全体的に東へ行くにつれてその変化幅が大きくなる傾向を示す。

Fig.4 Minimum time route by isochrone method through one year.

Table 1 Annual average (ave) and standard deviation (std) of difference of the passage time of GCR from MTR

	GCR-MTR (hr)		
resolution (deg)	1.00	0.50	0.25
ave	2.20	2.14	3.63
std	0.96	1.06	1.80

Fig. 5 Histogram of the difference of the passage time of GCR from MTR.

航海時間を評価基準とした WR の効果を調べるために、Table 1 に各解像度において大圏航路(以下、GCR: Great Circle Route)の航海時間から MTR の航海時間を引いた時間差(以下、GCR-MTR)の 1 年間の平均及び標準偏差を示す。本研究では、WR の評価として GCR-MTR が大きいほど WR の効果が大きいことを意味する。解像度 1 度と 0.5 度の場合においてはあまり差がみられないが、解像度 0.25 度の場合において、低解像度の場合よりも GCR-MTR の平均及び標準偏差が高い。

GCR-MTR の全体像を把握するために Fig.5 に 1 年を通しての GCR-MTR の頻度分布を示す。解像度 0.5 度の場合、解像度 1 度の場合より GCR-MTR が幾分大きい分布の傾向を示す。解像度 0.25 の場合、GCR-MTR の頻度のピークは低解像度よりも GCR-MTR の大きい方向に位置し、その区間の範囲は大きい方向へ拡大している。

3.2 季節毎の最短時間航路

MTR に対して異なる解像度の海洋モデルで計算された海流の影響をさらに詳しく見るために Fig.6 から Fig.9 にかけて季節毎の MTR の分布を示す。冬

季(1 月、2 月及び 3 月)において、解像度 0.25 度の場合、日本沖合で MTR は一旦収束され、東に行くにつれて南北方向の変化幅が大きくなる。この変化幅の程度は解像度 1 度及び 0.5 度の場合よりも大きい。春季(4 月、5 月及び 6 月)において、MTR の南北方向の変化幅は解像度 1 度及び 0.5 度の場合では概ね変わらないが、0.25 度の場合、特に日本沖合から日付変更線にかけて MTR の分布の偏りがみられ、MTR の南北方向の変化幅は解像度 1 度及び 0.5 度の場合よりも大きい。夏季(7 月、8 月及び 9 月)において、波浪状態が他の季節より穏やかであり、解像度 1 度及び 0.5 度の場合も MTR の南北方向の変化幅は他の季節よりも小さい傾向を示すが、解像度 0.25 度の場合、日本沖合で MTR は一旦収束され、東に行くにつれて南北方向の変化幅が大きくなる。秋季(10 月、11 月及び 12 月)において、春季と同様な傾向を示すが、解像度 0.25 度の場合の MTR の分布の偏りの程度は春季の場合より小さい。

Fig. 6 As in Fig.4 but for winter.

Fig. 7 As in Fig.4 but for spring.

Fig. 9 As in Fig.4 but for autumn.

Fig. 8 As in Fig.4 but for summer.

Table 2 As in Table 1 but for each season.

		GCR-MTR (hr)		
resolution (deg)		1.00	0.50	0.25
winter	ave	2.37	2.26	5.51
	std	1.00	1.18	1.89
spring	ave	2.57	2.35	3.54
	std	0.94	1.07	1.24
summer	ave	1.70	1.51	2.18
	std	0.84	0.80	1.03
autumn	ave	2.14	2.42	3.20
	std	0.85	0.91	0.95

解像度によってさらに高まる可能性を示唆する。ただし、この効果は海流が直接の原因ではなく海流によって選定された航路の形状の違いによる間接の原因の場合も含むことに注意されたい。本研究の MTR の分布より、WR の効果を高めた理由の 1 つは、海流によって船舶は東へ航行する傾向が高まり、波浪状態が悪い海域(特に冬季)である GCR より北の海域への航行が幾分抑えられたからかもしれない。

各季節の GCR-MTR の全体像を把握するために Fig.10 から Fig.13 にかけて各季節の GCR-MTR の頻度分布を示す。冬季においては、解像度 0.5 度の場合の分布は解像度 1 度の場合よりも GCR-MTR がわずかに大きい区間がみられる。一方、解像度 0.25 度の場合、GCR-MTR の分布は解像度 1 度及び 0.5 度の場合よりも GCR-MTR が大きい傾向を示す。春季及び秋季においては、概ね冬季と同様な傾向を示す。

各季節の WR の効果を調べるために、Table 2 に GCR-MTR について各季節の平均及び標準偏差を示す。各季節において、解像度 0.25 度の場合、GCR-MTR の平均及び標準偏差が最も高い。最も平均が高い季節は解像度 0.25 度の場合の冬季である。これは波浪状態が悪い季節に WR の効果が高いことを示し、本研究の設定ではその効果は海洋モデルの

Fig. 10 As in Fig.5 but for winter

Fig. 12 As in Fig.5 but for summer.

Fig. 11 As in Fig.5 but for spring.

Fig. 13 As in Fig.5 but for autumn.

夏季において解像度 1 度の場合の GCR-MTR の分布は、解像度 0.5 度の場合よりも GCR-MTR が大きい傾向を幾分示すが、一方、解像度 0.25 度の場合、明らかに GCR-MTR の分布は GCR-MTR が大きい傾向を示す。

4. 結論

海洋モデルの解像度が WR に及ぼす影響を調べるために対照実験を実施した。過去の知見の通り高解像度の海洋モデルによるシミュレーションの結果では、黒潮、黒潮続流等の海流が強化され現実的な海流を再現できることを確認し、それらの海流データを用いて MTR を計算した。より高解像度の海洋モデルで得た海流データを用いると、GCR-MTR は大きくなり、MTR は南北方向の変化幅が大きくなる傾向を示した。この傾向はモデルの解像度が海流を詳細に捉え、その海流の詳細状況が MTR に大きく影響を与えることを示している。

解像度 0.25 度の場合において、空間スケールの小さい渦を解像することができたため、現実に近い海流を再現することができた。一方、解像度 1 度及び 0.5 度の場合において、解像度 0.25 度の場合と比較して海流は現実的ではなく、解像度 1 度及び 0.5 度の場合の海流の状況はそれほど違いがなかった。それゆえ、解像度 1 度及び 0.5 度の場合において、GCR-MTR と解像度の対応があまり明確でなかったと考えられる。しかしながら、解像度 1 度及び 0.5 度の低解像度の場合と解像度 0.25 度の高解像度の場合を比較すると、前述した海流の詳細状況が MTR に与える影響についての説明は変わらない。

一般的に船速は、沖合の海域の海流よりも波浪の影響が大きい傾向にある。しかし、高解像度の海洋モデルより再現された現実的な海流によって、黒潮及び黒潮続流などが流れる海域において、MTR の変化が可能であることが本研究の対照実験で明らかになった。

以上より、本研究では、海洋モデルを高解像度化することにより現実的な海流を再現し、その海流データが MTR に大きく影響を与える可能性を示した。それゆえ、高精度の WR を実施するために、高解像度の海洋モデルの海流データが必要であると考えられる。

謝辞

MSSG-O の利用については、NEC 後藤浩二氏、NEC 情報システムズ 上弘光氏、等時間曲線法について

は、東京海洋大学 庄司るり先生、東海大学 高嶋恭子先生の助力を頂いた。波浪データは ECMWF から提供された。本研究は、文部科学省特別教育研究推進「輸送の三原則を統合した国際海上輸送システム創出の研究」(研究代表者：塩谷茂明)及び(財)日本科学協会 笹川科学研究助成によって行われた。

参考文献

- (1) ウェザー・ルーティング研究グループ：ウェザー・ルーティングー気象情報に基づく最適航法ー，pp.281，成山堂書店，1992.
- (2) Hagiwara, H., Weather Routing of (Sail-assisted) Motor Vessels, Ph.D.thesis, Delft Univ. Tech., 1989.
- (3) Smith, R. D., M E. Maltrud, F. O. Bryan, M. W. Hecht: Numerical Simulation of the North Atlantic Ocean at $1/10^\circ$, J. Phys. Oceanogr., Vol.30, pp.1532–1561, 2000.
- (4) 福田人意、萩原秀樹、菅井和夫、日下祐三：高速船のウェザールーティングに関する研究，日本航海学会論文集，NO.99，pp.37-46，1998.5
- (5) 高嶋恭子・萩原秀樹・庄司るり：ウェザールーティングによる燃料節約ーコンテナ船の航海データを用いたシミュレーションー，日本航海学会論文集，No.111，pp.259-266，2004.5
- (6) Guo, X., H. Hukuda, Y. Miyazawa, T. Yamagata, A Triply Nested Ocean Model for Simulating the Kuroshio -Roles of Horizontal Resolution on JEBAR, J. Phys. Oceanogr., Vol.33, pp.146-169, 2003
- (7) 嶋田陽一・高橋桂子・塩谷茂明：日本～北米間のウェザールーティングー航海時間に注目した国際ハブ港湾ー，日本航海学会論文集，No. 123, pp. 21-28, 2010.9
- (8) Padhy, C. P., D. Sen, P. K. Bhaskaran, Application of wave model for weather routing of ships in the North Indian Ocean, Nat Hazards, Vol. 44, pp. 373–385, 2008

質疑応答

高嶋恭子(東海大):

今回使用したデータは解析値ということですが、予報値を利用した場合、解像度を小さく(細かく)したらその分子報誤差の影響も大きくなると思いますがいかがでしょうか。

嶋田陽一：

ご質問ありがとうございます。海洋モデルの設定

にもよりますが、海洋物理学の過去の研究において海洋モデルが高解像度だと、小さな空間スケールの渦を再現することができ、黒潮等の流れがより現実に近づけることが可能と考えられますので、海洋モデルの高解像化によって予報誤差は相対的に小さくなると思います。海洋モデルの高解像度化に付随しますが、海底地形、陸岸地形等の高解像化も重要と思います。例を述べますと、津軽海峡を解像できるほどの高解像度の海洋モデルの場合、その海峡を流れる海流である津軽暖流を再現できます。一方、低解像度の海洋モデルの場合、海底地形データに手を加えなければ、津軽海峡は閉じて津軽海峡周辺海域の流れを再現できません。それゆえ、陸岸及び海底地形からみても、海洋モデルの高解像化が、予報誤差を小さくする要因の1つになると思います。

小林英一(神戸大):

格子をどの程度小さくしていくか、これから様々なシミュレーションを通じて検討が必要と思います。

嶋田陽一:

コメントありがとうございます。より高解像度になれば計算コストもかかりますし、他のモデル計算もありますので、使用できる計算資源を考慮して解像度について検討する必要があります。本研究では海洋モデルの高解像度化がWRにどのように影響するかを議論し、現実的な海流を再現する解像度の必要性を提示させて頂きました。