国際海上輸送のための 気象・波浪大規模予測システムの構築

嶋田 陽一*・高橋 桂子**・塩谷 茂明*

Construction of the Weather and Wave Global Forecast System for International Maritime Transport

Yoichi SHIMADA, Shigeaki SHIOTANI and Keiko TAKAHASHI

Abstract

To aim for effective passage time and fuel consumption with safe navigation, we need to construct the weather routing system which is the optimum navigation system integrated by a variety of numerical models. We have constructed the basis of weather and wave global forecast system as one of basic studies of weather and ocean-phenomena global forecast models which are the weather routing system components. The weather and wave global forecast models have calculated. In spite of low resolution models, there is some possibility that the wave model forecast for about three days in our study can offer useful weather and ocean-phenomena information for navigation. However, there are some significant differences between the wave model results using our wind forecast data and those using wind reanalysis data in some offshore regions such as eastern offshore regions of Japan and western shore regions of Middle and South America.

Keywords : *weather, oceanic phenomenon, international maritime transport, global calculation, forecast calculation*

1. 緒言

新興国の急速な経済成長により、国際海上輸送における船舶の必要性は年々高まっている。国際海上輸送に関する著しい発展の例として、シンガポール、香港、上海及び釜山等の主要ハブ港を利用した国際海上輸送ネットワークが年々強化されていることを挙げることができる。

このような状況から安全かつ航海時間・燃料消費量に関して効率的な航海を行う方法の 1 つとして、ウェザールーティング⁽¹⁾を挙げることができる。ウェザールーティングを行うために、はじめに気象・海象モデルの計算を行い、次に気象・海象データを用いて船体運動モデル等を計算し船速及び耐久性等を評価し、最後に気象・海象及び船体運動データを

用いて航路探索モデルを計算し最適航路を選択する。本研究では、このような様々な分野のモデルを統合したウェザールーティングシステムの構築を目指す。また、このシステムは、国際海上輸送に関する油流出モデル、排気ガス拡散モデル及び物流モデル等の計算のために、気象・海象データ提供のプラットフォームとしての役割を目指す。

本研究では、ウェザールーティングシステムのコンポーネントである気象・海象大規模予測計算の基礎的研究として、気象・波浪モデル大規模予測システムの土台を構築し、簡単なモデル設定であるが、その結果を報告する。

2. モデル計算概要

* 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（〒236-001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25）

2.1 気象モデル

本研究では、海洋研究開発機構地球シミュレーター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気象モデル MSSG-A(Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment: Atmosphere component)を用いた。このモデルは、自然災害を中心とした気象・海象現象の再現及び予測計算の精度を向上させることへの貢献を目指して、地球シミュレーターで高解像度のシミュレーションを高速に実行できるようにプログラミングされており、完全圧縮 Navier-Stokes 方程式、非静力学バランスを解く。水平方向の座標系は Yin-Yang 格子による球面座標系、鉛直方向の座標系は Z*座標系である。Yin-Yang 格子により、通常の緯度経度格子のように極域において格子間隔が狭くなることを回避できるので、CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)条件を緩和し気象モデルを高速に計算することができる(CFL 条件:モデルの格子間隔と現象の波動伝播速度より計算したモデル計算の時間ステップ)。また、全球における格子間隔の変化幅が小さくなるので、同程度の空間スケールで気象現象を計算することが期待できる。放射過程は CAM3 を用いた⁽²⁾。気象モデルの詳細については過去の研究(例えば、Takahashi et al.⁽³⁾)を参照されたい。

計算領域は全球であり、水平解像度 172.5 km、東西、南北及び鉛直方向の格子数はそれぞれ 234、117 及び 56 である。計算期間は 2010 年 6 月 25 日～2010 年 7 月 7 日(13 日間)であり、各日 3 日間の予測計算を行った。例えば、2010 年 6 月 25 日 0 時から 3 日間予測計算を行い、次に 2010 年 6 月 27 日 0 時から同様に予測計算を行う。したがって、全計算期間(13 日間)において予測日毎(予測 1 日目～3 日目)のデータの日数は各々 13 日となる。そのデータを用いて後述する波浪モデル(2.2 節)の計算を行った。このように別々にモデル計算を行った理由は、予測計算 3 日間程度では、気象・波浪間の相互作用は少ないと推察したからである。初期値は NCEP/NCAR (National Oceanic and Atmospheric Administration/National Centers for Environmental Prediction) Reanalysis (Kalnay et al.⁽⁴⁾)の温度、相対湿度、風速、ジオポテンシャル高度、地表面温度等を用いた。

側面境界などを予測データ(例:気象機関から取得した予測データ)で緩和させる領域モデルの予測計算のように、計算開始以降の本研究の全球モデルの予測計算は入力データの更新は行わないことに注意されたい。過去の気象データを考慮してモデルの値を修正するデータ同化を取り入れた気象モデルがあるが、本研究では過去のデータに依存せず、運動方

程式に基づく予測計算を行った。

2.2 波浪モデル

本研究では NOAA/NCEP で開発された第 3 世代波浪モデル WAVEWATCHIII(以下、WW3)を用いた(Tolman⁽⁵⁾)。嶋田他⁽⁶⁾と同様に計算対象域は両極域を除く全球(南緯 77 度から北緯 77 度)である。水平解像度は緯度方向 1 度、経度方向 1.25 度である。波向分割数は 24 分割、周波数分割数は 25 分割(0.418 から 0.4114 Hz)である。波浪モデルの計算期間は気象モデルと同様である。気象モデルから 10m 風速データ(1 時間毎)を用いて波浪モデルを計算した(出力間隔は 1 時間)。予測計算をするための波浪モデルの初期値は NCEP/NCAR Reanalysis (以下、NCEP)の 10m 風速データを用いて波浪モデルをスピニングさせた値を用いた。この波浪モデルの計算開始日は 2010 年 1 月 1 日、初期スペクトルは Fetch-limited JONSWAP(Hasselmann et al.⁽⁷⁾, Tolman⁽⁵⁾)を用いた(フェッチはモデルの水平解像度)。本研究の波浪モデル予測計算結果を全球規模で比較するために、前述した NCEP の 10m 風速データを用いた波浪モデルの計算結果を用いた。

3. 結果

3.1 気象・波浪モデルの予測計算

MSSG-A 及び NCEP の風速を単純に比較するために、Fig.1 に 2010 年 6 月 25 日からの 3 日間予測計算した MSSG-A の風速、Fig.2 に同期間の NCEP の風速の分布を示す。MSSG-A と NCEP の風速は計算 1 日目及び 2 日目ではよく対応している。計算 3 日目では日本東沖合、中南米西沖合において MSSG-A の風速が NCEP の風速よりも強くみられる。Fig.3 に MSSG-A の風速を用いて WW3 により計算した有義波高の分布を示す。全体的に風速が強い海域において有義波高が高い傾向を示し、有義波高は局所的な風に応答しやすいことがわかる。

Fig.1 Daily mean 10m-wind speed (m/s). The upper, middle and lower panels show the model results from MSSG-A on forecast 1st-, 2nd- and 3rd-day, respectively.

Fig.2 As in Fig.1 but for NCEP reanalysis 10m-wind speed.

Fig.3 Daily mean significant wave height (m). The upper, middle and lower panels show the model results from MSSG-A on forecast 1st-, 2nd- and 3rd-day, respectively.

3.2 MSSG-A の風速を用いた波浪モデルと NCEP の風速を用いた波浪モデルの比較

MSSG-A の風速を用いた波浪モデル結果を NCEP の風速を用いた波浪モデル結果と単純に比較するために、Fig.4 に 2010 年 6 月 25 日からの 3 日間予測計算した MSSG-A の風速を用いた場合の有義波高と同期間 NCEP の風速を用いた場合の有義波高差の日平均の分布を示す。計算 1 日目ではカムチャツカ半島の南沖合、北大西洋北西部等を除いて有義波高差はほとんどない。計算 2 日目及び 3 日目だと前述した海域の他に日本東沖合、太平洋・インド洋の赤道域、南太平洋の南部において有義波高差が顕著にみえる。しかし、計算 3 日目でも北太平洋東側、大西洋の亜熱帯海域等において、有義波高差が 0.4m 以下の海域がみられる。

全計算期間で MSSG-A の風速を用いた波浪モデル結果を NCEP の風速を用いた場合と比較するために、Fig.5 に計算日毎(各データ日数は 13 日)に MSSG-A を用いた場合の有義波高と NCEP の風速を用いた場合の有義波高の相関分布を示す。計算 1 日目は日本東沖合を除いて相関 0.8 以上の海域が多くみられる。計算 2 日目及び 3 日目には日本東沖合及び太平洋・大西洋熱帯域において相関が低い海域がみられる。しかし、計算 3 日目でも北太平洋東側、南太平洋、北大西洋北東部、南大西洋東側及びインド洋南部等のように相関 0.6 以上の海域が多くみられる。

両者の波浪モデル結果から有義波高について系統的な違いを調べるために、Fig.6 に MSSG-A を用いた場合の有義波高から NCEP の風速を用いた場合の有義波高差の分布を示す。計算 1 日目及び 2 日目では、日本東沖合を除いてその差は顕著ではないが、計算 3 日目では、相関分布(Fig.5)のように相関が低い海域辺りでその差が顕著にみられる。しかし、計算 3 日目でも北太平洋東側、南太平洋、大西洋及びインド洋等のように、その差が 0.4m 以下の海域が多くみられる。

Fig.4 Daily mean significant wave height difference between the wave model result by MSSG-A wind data and that by NCEP/NCAR wind reanalysis data. The upper, middle and lower panels show the model results from MSSG-A on forecast 1st-, 2nd- and 3rd-day, respectively (Contour interval = 0.4 m).

Fig.5 Correlation between the wave model result (significant wave height) by MSSG-A wind data and that by NCEP/NCAR wind reanalysis data. The upper, middle and lower panels show the correlations on forecast 1st-, 2nd- and 3rd-day, respectively (Contour interval = 0.2).

Fig.6 As in Fig. 4 but for mean significant wave height difference of every forecast day for the calculation period.

両者の波浪モデル結果から有義波高について標準的な違いを調べるために、Fig.7 に MSSG-A を用いた場合の有義波高から NCEP の風速を用いた場合の有義波高差の標準偏差の分布を示す。計算 1 日目及び計算 2 日目では、日本東沖合等を除いて標準偏差が大きい、計算 3 日目では、相関分布(Fig.5)及び有義波高差(Fig.6)のように、相関が低く有義波高差が大きい海域辺りで標準偏差が大きくみられる。しかし、計算 3 日目でも中南米東沖合を除く太平洋東側、高緯度を除く北大西洋、南大西洋東側及びインド洋中央部等のように、標準偏差が 0.4m 以下の海域が多くみられる。

Fig.7 Standard deviation on significant wave height difference between the wave model result by MSSG-A wind data and that by NCEP/NCAR wind reanalysis data. The upper, middle and lower panels show the model results from MSSG-A on forecast 1st-, 2nd- and 3rd-day, respectively (Contour interval = 0.4 m).

4. 結論

モデル領域の境界を気象機関(例えば、ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)の予測値で緩和した気象領域モデルの予測計算は多々あるが、これはモデル境界値の依存度が大きく、実際の予測計算とは言い難い。このような予測計算は上記の予測値を再解析値に変更した場合、再現計算となるが(例えば、曾田他⁽⁸⁾)、両者の計算過程は同じである。一方、計算開始以降の入力データの更新はなく、気象モデル及び波浪モデルについて全球規模の予測計算の構築は、気象庁(全球波浪数値予報モデル GPV)など世界主要国の気象機関で行われているようであるが、本研究のように独自で全球規模の気象・海象予測計算システムの構築はみられない。そのために、国際海上輸送に注目したあらゆる海域における気象・波浪の予測データを迅速に自由自在に出力することができる。その一方、気象機関等で提供される予測データでは、その時間間隔(6時間間隔のデータが多い)及び空間解像度等で自由に対応できない。それゆえ、本研究の国際海上輸送のための気象・波浪大規模予測計算の構築は新規性があると考えられる。

本研究では、ウェザールーティングシステムのコンポーネントである気象・波浪大規模予測計算の基礎的研究として、気象・波浪モデルの大規模予測システムの土台を構築し、気象・波浪モデル予測計算の一部を報告した。代表的な再解析データであるNCEP及びECMEFの風速は、様々な観測データをデータ同化させたモデル計算の結果であり、観測値とよく対応するという報告がある(例えば、NCEPでは笠原他⁽⁹⁾、ECMWFではSuzuki⁽¹⁰⁾)。一方、異なる再解析風速データ(NCEP及びECMWF)を用いた北太平洋におけるWW3の計算結果は日本東沖合を除いて観測点の値とよく対応するという報告がある(嶋田他⁽⁶⁾)。それゆえ、本研究の波浪モデルの結果を全球規模で検証するために、NCEPの風速を用いた波浪モデルの結果と比較することは妥当と思われる。

以上のことから、NCEPの風速を用いた波浪モデルの結果が観測値に近いと仮定すると、MSSG-Aを

用いた場合の有義波高からNCEPの風速を用いた場合の有義波高差の平均は平均誤差、その有義波高差の標準偏差はRMSE(Root Mean Square Error、2乗平均平方根誤差)を意味する。この仮定から判断すると、気象・波浪モデルの解像度が低いにもかかわらず、本研究における3日間程度の予測計算は海域によって運航に有益な気象・海象情報を提供できる可能性を示した。3日程度の予測計算期間は、太平洋など国際海上輸送航路における全航海期間よりも短い、航海中の低気圧等の回避、入港前の沖待ち時間の削減、そして、油流出及び貨物の落水事故による被害状況の把握(風圧流などの計算に必要)のように、多様な面で国際海上輸送に貢献できると考えられる。

しかしながら、日本東沖合、熱帯域及び太平洋・大西洋西側では本研究における予測計算3日目でNCEPの風速を用いた場合の波浪モデルの結果との差が顕著にみられる。そのような海域は主に陸域付近から発生しているので、その原因は気象モデル解像度が粗いこと、モデルの陸・海の境界面におけるデータの精度が低いことが挙げられるかもしれない。今後は、長期的に予測計算(3日程度)を行ってモデルの検証を行い、その一方、気象・海象モデルのさらなる高精度な予測計算を目指すために高解像度化、高精度な初期値データの作成等を行う予定である。さらに、海洋モデルを用いて、表層流速及び表面水温等を気象・波浪モデルに入力し気象・海象の相互作用を考慮した予測計算を行う予定である。

謝辞

MSSG-Aの利用において、NEC 後藤浩二氏、NEC情報システムズ 淵上弘光氏の助力を頂いた。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」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) William D. Collins, Philip J. Rasch, Byron A. Boveille, James J. Hack, James R. McCAA, David L. Williamson, and Bruce P. Briegleb: The Formulation and Atmospheric Simulation of the Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3), Vol.19, No.1, pp.2144-2161, 2006.

- (3) Takahashi, K., X. Peng, K. Komine, M. Ohdaira, K. Goto, M. Yamada, H. Fuchigami, T. Sugimura: Non-hydrostatic atmospheric GCM development and its computational performance, Use of High Performance computing in meteorology, Walter Zwiefelhofer and George Mozdzynski Eds., World Scientific, pp.50-62, 2005.
- (4) Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol.77, No. 3, pp.437-470, 1996.
- (5) Tolman, H. L.: User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22., NOAA/NWS/NCEP/OMB, Tech. Note 222, 133pp, 2002.
- (6) 嶋田陽一・塩谷茂明・高橋桂子: 異なる再解析データを用いた波浪モデルの比較 - 北太平洋 -, 日本航海学会論文集, Vol.126, pp.245-253, 2012.
- (7) Hasselmann K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Miller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell, and H. Walden : Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project(JONSWAP), Deutsche Hydrogr. Zeit., Reihe Vol.A8, No.12, 95pp, 1973.
- (8) 曾田泰介・塩谷茂明・大澤輝夫・牧野秀成: 航海シミュレーションのための海上風及び波浪の数値計算, 日本航海学会論文集, Vol.124, pp119-127, 2011.
- (9) 笠原実・轡田邦夫・青木邦弘・武田諭: 衛星散乱計データを用いた全球洋上における海上風／海面応力格子プロダクトの作成及び精度検証, 東海大学紀要海洋学部, 「海－自然と文化」, Vol.1, No.1, pp.79-92, 2003.
- (10) Suzuki, Y.: Development and application of a global ocean wave prediction model including nonlinear interactions and dissipation. Dr. Thesis, University of Tokyo, pp.182, 1995.

質疑応答

武田誠一(東京海洋大):

初期スペクトルとして Fetch-limited JONSWAP を

用いた理由は何でしょうか?

嶋田陽一:

ご質問ありがとうございます。この初期スペクトルを用いた理由は過去の文献を参考にしました。本研究では、波浪モデルの予測計算前までの計算期間が半年以上なので、初期スペクトルの依存性はほとんどありません。

天井治(電子航法研究所):

NCEP のデータとの比較を行っていますが、NCEP のデータは観測値でしょうか?

嶋田陽一:

ご質問ありがとうございます。NCEP の再解析値は観測値ではなく、観測値等を利用して気象モデルを計算した値です。