潮流シミュレーションを用いた 航海への潮流の影響の調査について

夏 海波*・塩谷茂明**・万田 敦昌***

・小林 英一**・若林 伸和**

On Examination of Tidal Effects on Sailing Ship Using Tidal Simulation

Haibo Xia, Shigeaki SHIOTANI, Atsuyoshi MANDA
Eiichi KOBAYASHI and Nobukazu WAKABAYASHI

Abstract

This paper deals with the simulation of navigation based on the tidal current for the purpose of the optimum routing of a small vessel which sails in the relatively narrow sea area such as the bay. In former part of this paper, the computer simulation of tidal currents of Osaka Bay was explained. The tidal current was calculated using M_2 tide by numerical model of POM. In latter parts of one, the simulation of navigation in the bay was carried out.

The effects of tidal currents to navigation by a small vessel were examined. As results, it was recognized that effects of tidal currents to navigation are very large and that the tidal simulation for the weather routing of a small vessel is very effective.

Keywords: navigation system, weather routing, navigation simulation, simulation of tidal currents, current effects to a sailing ship

キーワード: 航法システム、ウエザー・ルーチング、航海シミュレーション、潮流シミュレーション、流圧影響

1. はじめに

大洋航海中の大型船舶に限らず、沿岸海域が航行域である一般の小型船舶も、航海中に気象・海象の影響を絶えず受け、計画航路からの偏位や船速低下等に遭遇する。状況次第では、衝突や座礁等の海難発生の要因となり得る。逆に、気象・海象を適切に把握でき、さらに予測することが可能となれば、高波高域や強風域を伴う発達した低気圧等を事前に避航できる操船が可能となり、海難防止に役立つ。さらに適切な航路選定の結果、潮流や海流を利用しな

がら、航海時間の短縮や気象・海象に伴う海難を回避する、安全性と経済的効果を追求した最適航法が実現できる。本研究の最終目的は、湾内や沿岸域等の比較的狭い海域が航行海域である船舶に対し、出航前から航海中に遭遇する気象・海象の時々刻々の変化の数値予測を行い、さらに航海中に必要な様々な航海情報を逐次取得し、安全性と経済的効果の高い最適航法のシステムを構築することである。

これまで著者らは航行船舶の船位を逐次正確に予測可能な方法として、船舶操縦性能理論を導入した

*学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

**正会員 神戸大学海事科学部 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

***非会員 長崎大学水産学部 (〒852-8521 長崎市文教町 1-1-4)

手法を確立し、実船試験との比較から、その有効性について論じた。また、船舶の針路から潮流の流向または風向の相対方位が異なる場合の流圧または風圧影響の調査を実船実験で行い、船舶操縦性能理論に基づいた船舶運動シミュレーション結果との比較から、船舶の横流れによる船位の設定針路からの偏位量および航程の増減量が十分な精度で予測可能であることを示した⁽¹⁾⁽²⁾。さらに、出航時前に潮流および風による船位の偏位量を予測して、航海計画で定めた航路上を逸脱しないように航行する方法を提案し、その妥当性について論じた⁽³⁾。

しかし、これまでの研究では実船実験と航海シミュレーションとの比較研究のみであったが、本研究では気象・海象を考慮した最適航法を構築するための基礎的研究として、今後高度な最適航法システムの確立を目指すために重要であり、かつ気象・海象の中で最も航行船舶に影響を与えると思われる流れ（潮流）の数値予測を行い、その推定潮流の船舶への影響調査のための航海シミュレーションを行ったので、その概要を論じる。航海シミュレーションは航行海域内の潮流の予測を数値シミュレーションで行い、その海域を模擬船舶が航行する際の潮流の影響を調査するものである。本研究により、潮流の予測が可能となり、さらに航海シミュレーションの結果から航海への潮流の影響が大きいことが解ったので、ここに報告する。

2. 数値ナビゲーションシステム

従来の最適航法では、計画航路周辺海域の気象・海象に関する航海情報は紙媒体である航路誌に記載された航海情報、各種天気図、海流図および波浪図などの静的航海情報を利用するものであった。

しかし、沿岸域を主な航海域とする沿岸航海の場合では、地形の影響などにより、短時間に気象海象が変化するため、気象・海象を考慮した最適航法を行うためには、数分単位の短い間隔でこれらの変化に関する情報が要求されることがある。しかも、もし出航前に事前に航海中に遭遇すると予測される気象・海象の時間変化の予測が可能であれば、それらの影響による船位の偏位量や航程の変化量がわかり、最適な航法を行うための措置が可能となる。このように時間変動する気象・海象に基づいた最適航法の予測に関する研究は過去に前例がなく、著者らは本研究を「数値ナビゲーションシステム」と称す。

Fig. 1 は数値ナビゲーションシステムの概略を示す。航海に影響する気象・海象の中で、海流や潮流の流れ、風および波浪の数値予測を 1, 2 日程度先ま

で事前に行う。この気象・海象が逐次変化する海域内を対象船舶が様々な設定条件で航海する。各時間毎の船位は船舶操縦性能理論に基づいて求め、船舶の横流れ量や航程の変化量を推定する航海シミュレーションを行う。これら航海シミュレーションの結果から最適な航海を実現すると考えられる航路を推定する。この推定航路を航海計画とし、実際にこれに基づいて出航する。航海中はリアルタイムに航海の安全性に必要な航海情報を自動収集しながら、当初の航海計画通りに運航しているかを絶えずチェックする。もし、事前に予測できなかった気象・海象の変化に遭遇した場合、設定の航海計画が実際には最適とならない場合、即座に収集データに基づいた最適航法の再予測を行い、逐次航海計画の変更・修正を施す。

Fig.1 Outline of numerical navigation system

本研究では、Fig. 1 に示す気象・海象の予測の中で、潮流(Tidal current)の数値予測を行う手法を構築し、潮流による航行船舶への影響を調査するものである。

3. 潮流の数値シミュレーション

潮流の数値シミュレーション・モデルは POM (Princeton Oceanography Model) である。これはプリンストン大学で開発された海洋モデルであり、現在世界中で多くの研究者らに利用されており、高い評価を得ている。

POM では、一般に z 軸方向の座標は σ 座標を採用しているため、次式で与えられる。

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}, \quad D \equiv H + \eta \quad (1)$$

ここに、 H は平均水面からの水深、 η は潮汐による潮位である。 D は海底から水面までの距離である。

σ 座標を用いた潮流シミュレーションの基礎方程式は、連続の式と運動方程式 (Navie-Stokes 方程式) である。

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UVD}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V\omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 (U, V) は潮流の水平速度成分、 ω は σ 面上の法線方向の速度成分である。 D は(1)式で表される潮位を考慮した水深、 f はコリオリ係数、 g は重力の加速度、 F_x 、 F_y は水平方向の粘性拡散係数、 K_M は海底の摩擦係数である。

POM では潮流の基礎方程式には(2)~(4)式の他にも、熱、塩分および乱流運動エネルギー量などの計算が可能な基礎方程式が含まれているので、より一層複雑な自然現象に即した数値計算が可能である。しかし、本研究では航行船舶の航海シミュレーションが目的の計算のため、潮流の速度成分のみを計算するとよい。

潮流のシミュレーションの基礎方程式(2)~(4)式

Fig.2 Grid topology in Osaka Bay

は比較的安定した計算結果が得られるリープ・フロッグ法の差分法で行った⁽⁴⁾。

Fig.2 は航海海域の一例である大阪湾の計算格子を示す。大阪湾への海水の流出入口は明石海峡と友島水道であるが、両水道の幅は狭く、そこでは潮流が大きく変化する。そのため、潮流計算の精度の安定性向上のため、計算領域の開境界の位置を両水道でなく、太平洋側の入り口である友島の南方の十分遠方と、瀬戸内海側の入り口である明石海峡の西方の播磨灘及びさらに西方の備讃瀬戸東部まで拡張した。

格子生成に必要なデータとして、水深データは日本海洋データセンター(JODC)が公表する日本周辺の 500m メッシュ海底地形データを、海岸線の地形データは米国国家地理データセンター(NGDC)の地形データを使用した。これらのデータをウェブから取得可能な格子生成用のフリーソフトである GMT(Generic Mapping Tools)に入力して生成した。本研究の潮流計算では、最適航海に必要な潮流は湾全域の平均流のみであり、局所的な渦や乱れ等の詳細な流れは要求されないため、 x - y 面の水平方向の格子は物体適合座標でなく、一定間隔格子のレギュラー格子を用いた。 z 方向は水深が場所により変化するため、 σ 座標を採用したので、格子は不等間隔格子である。格子数は x 、 y 、 z 方向に 293, 221, 10、格子間隔は水平の x 、 y 方向は一定間隔で角度表示の 0.25 分 (約 463m)、 z 方向は不等間隔である。

計算領域の開境界では、簡単のため M_2 潮の潮位を入力した。境界条件は海岸線で no-slip 条件を課した。計算のタイムステップは 60sec、計算時間は M_2 潮の約 5 周期分を計算した。

Fig.3 は Fig.2 に示した計算領域内の特定地点における潮流の速度ベクトルの時系列を示す。和歌山、小松島、鳴門、明石、家島および友島である。縦軸は南北、横軸は東西方位を示す。各地点の潮流ベクトルの流向は Fig.2 に示すとおり、海域の地形から予想される方位とおおよそ一致し、流速は M_2 潮の周期と同様に規則的に変化している。このことから、今回は潮流の観測を実施していないので、詳細な検証はできないが、およそ良好な潮流計算が出来ていることが解る。

Fig.4 は計算領域内の任意地点における潮汐の潮位の時系列を示す。明石、小松島、和歌山および家島である。図の実線は数値シミュレーションによる結果、点線は各地点における M_2 潮の調和常数から計算した正弦波である。両者を比較すると、明石および和歌山はほとんど一致するが、小松島では位相

Fig.3 Numerical time series of velocity of tidal current

Fig.4 Numerical time series of tidal elevation

差は見られないが潮位はシミュレーション結果の方が大きく見積もられている。また、家島では潮位に有意差がないが、位相差に若干の相違が見られるものの、両者の周期はほとんど一致している。これらの差異は、小松島が開境界地点に近く、簡略計算として境界条件に和歌山よりの境界値を一律に設定し、また家島も同様に開境界地点に近く、備讃瀬戸よりの境界値を設定したため、開境界値の僅かなずれが影響が現れたと考えられる。これらの位相差は1時間程度であり、潮位差は10~30cm程度と小さく、航海中において大きな潮流の影響を与えない。これらの比較から、計算領域内の任意地点の潮汐は十分な精度で計算が行われていると思われる。

Fig.5 Simulated tidal velocity vector in Osaka Bay

Fig.5 は計算海域全体の潮流の流速ベクトルを示す。(a)図は上げ潮、(b)図は下げ潮時である。上げ潮時は太平洋から友島水道を大阪湾に、また鳴門海峡

を播磨灘に潮流が流入している。下げ潮時はその逆流となり、それらの流れに追従して明石海峡の潮流が東西方向に転流している。沿岸の浅瀬での流れがほとんど小さくなるが、POM の計算で幾分改良を要する項目と思われる。しかし、航行船舶の航海シミュレーションの場合、大局的な影響はない。

以上、POM を用いた大阪湾全域の潮流のシミュレーションの計算結果から、大阪湾全域の M_2 潮による潮流および潮汐の計算が十分な精度で再現できることが解った。

4. 潮流場での航海シミュレーション

POM を用いた潮流の数値シミュレーションによる大阪湾全域の潮流の予測が可能となったので、この潮流場で模擬船舶を航海させ、潮流の航行船舶への影響の調査のための航海シミュレーションを行った。時々刻々と変化する大阪湾の潮流場で、事前に航海計画で設定の航路上を一定時間だけ航行した時の、潮流による横流れ量と速力の変化量を計算した。航海計画で設定の航路は Fig.2 に示す実線であり、航路上を模擬船舶は出航時間をそれぞれ変えて針路を真北に、速力が12ノット、航海時間が1時間30分だけ航行した。速力12ノットは模擬船舶として神戸大学海事科学部の付属練習船「深江丸」を想定している。これは今後、実船実験による本研究で提案の航海シミュレーションの検証を行うためである。

Fig.6 は計画航路に対し、潮流の影響を受けながら航行する模擬船舶の航海シミュレーションによって得られた航跡の二例を示す。実線は計画航路、点線が逐次時間的に変化する潮流場内を航行する模擬船舶の航跡を示す。30分毎に航行船舶の周辺の航海中の潮流を矢印で表示し、流向及び流速を記述した。航行船舶が潮流の流向および流速に追従し、横流れと速力の増減が生じていることがよくわかる。

Fig.7 は M_2 潮の潮流の変化に応じ、模擬船舶が出航時間を変えて、計画航路を航行する航海シミュレーションにおいて、横流れ量と航程の変化量を示す。 M_2 潮の1周期分の潮流の時系列を9分割した時刻に、模擬船舶が出航している。実線は潮流がない場合の計画航路の航程と実際に航海シミュレーション結果によって航走した航程との差、点線は計画航路とシミュレーションによって航走した航跡との角度差で評価した横流れ量を示す。潮流の変化に追従し、横流れ量と航行距離が M_2 潮の周期に等しく変化することがわかった。

Fig.6 Simulated track of a ship in tidal currents

Fig.7 Drift angle and distance of a sailing ship by simulation of navigation

4. 結論

沿岸域における航行船舶を対象とした最適航法システムの構築のための基礎的研究として、潮流のシミュレーションを用いた航海シミュレーションを行い、航海中の船舶の潮流の影響調査を行った。潮

流のシミュレーションは大阪湾内における M_2 潮である。航海シミュレーションでは船舶操縦性能理論から模擬船舶の船位を計算した。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

(1) POM を用いた潮流のシミュレーションから、船舶への潮流の影響予測が可能な精度で潮流の計算が可能になった。

(2) 航海中の潮流の変化に対応し、航行船舶の横流れ量および速力変化が順応することがわかった。

(3) 潮流影響下の推定船位を求める方法として船舶操縦運動理論を導入し、出航する前に潮流の影響の予測が可能となった。

(4) 航海への潮流の影響調査を行った結果、本研究で実施した航海シミュレーションによって、航海中の横流れ量と速力変化の予測から、最適航海が可能な航海計画ができることがわかった。

本研究は、平成 18 年度科学研究費基盤研究 (B) の補助金からなることを付記する。

参考文献

- (1) 夏海波、塩谷茂明、小林英一、若林伸和：リアルタイム気象海象データを考慮した沿岸海域航行船舶のウエザー・ルーティングに関する研究、—船舶操縦性能を考慮した船位決定の基礎的シミュレーションと実船実験—、関西造船協会論文集、第 243 号、pp.159-166、2005
- (2) 夏海波・塩谷茂明・小林英一・若林伸和：実小型船舶を用いた風圧による横流れの計測実験とシミュレーションについて、日本航海学会論文集、第 113 号、pp.171-177、2005
- (3) Haibo Xia, Shigeaki Shiotani, Eiichi Kobayashi and Nobukazu Wakabayashi : Estimation of Ship's Course for Sailing on Route by Navigation Simulation in Coastal Water, The Journal of Japan Institute of Navigation, No.115, pp.51-57, 2006
- (4) George L. Mellor : Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model, <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom.>, p.56, 2004

質疑応答

石田廣史 (神戸大学) :

興味ある発表ありがとうございました。ナビゲーションモデルの中で、POM の予測流と実測流とのすり合わせは、非線形による違いなど、今後ど

のようにお考えですか。

塩谷茂明：

御討論ありがとうございます。通常の航海では湾内全体の流れの大勢でよく、非線形性などはそれほど顕著に影響しないと考えます。しかし、狭水道など非線形性が強く複雑に変化する流れの中を航行する場合は、格子を細かくする、モデルの改良、境界条件の検証等を行い、さらに実観測データとの詳細な比較検討が必要であると思われます。これらの点は発展的問題として、今後の課題と考えています。

岩崎寛希（大島商戦高等専門学校）：

計算された潮流中を、テスト的に机上で船を航走される際、リーウエイあるいは偏位が生じたとき、そのコースへの復帰をどれくらいの時間毎に修正なさっているのか伺いたい。

塩谷茂明：

御討論ありがとうございます。本研究では逐次変化する潮流のある海域を、出航時間を変えて航海したときのリーウエイあるいは偏位がどの程度あるかを比較することにより、潮流の影響調査を行っています。従いまして、コースの復帰をしていません。今後、現実的な航海をする場合、コースの復帰などを考慮しなければいけないと思います。これまでの研究では5分間の風潮流は一定であるとしてシミュレーションした場合、実船実験での結果をよく再現していることを確認しています。しかし、オートパイロットで航走中、このような時間間隔でコースの変更をすることは困難であり、今後の検討課題にしたいと考えています。