航行シミュレーションにおける環境条件の設定

桐谷 伸夫*・不破 健*

A Study of Environmental Factors in Marine Traffic Simulation

Nobuo KIRIYA and Takeshi FUWA

Abstract

Numbers of computer simulation on ship navigation and control were presented, and various kinds of simulation models were proposed.

A ship on her voyage can not be free from the influences of environmental factors. Natural conditions, i. e., wind and tidal stream, affect ship motion as external forces, and geographical or traffic conditions are important for avoidance of collision or stranding.

In order to build up a practical computer simulation system for ship navigation with realistic environments, roles and effects of environmental factors were examined, and the methods to introduce these factors into the simulation were investigated.

A fundamental study using a proto-type system gives successful results for simulations in Tokyo Bay. In detail the followings become clear;

Electric charts by the Maritime Safety Agency is quite useful for the simulation, and water depth calculated as a mean value for about 500m square and material of the sea bottom are ready to be known by data from the Japan Ocean Data Center. When the time and position of the ship are given, wind, tidal stream and tidal level are calculated. Therefore the effects of these factors on ship motion are taken into the simulation. A method to produce a marine traffic flow based on transport data is also useful to set a realistic condition for the simulation.

1. はじめに

船舶の航行シミュレーションは、従来より種々多方面において、実施検討されている。例えば、自船の運動や操船に関するもの、あるいは海上交通流としての設定海域における航行シミュレーション等である。これまでに自船運動のシミュレーションモデルとしては、平水中の計算モデルとともに風や潮流中、あるいは浅水影響を考慮した運動モデルが提案されている⁽¹⁾。また海上交通流に関しても、実観測を含め港湾設計や航路設定の問題、あるいは海域の安全や評価を目的として各種の検討が実施されている⁽²⁾。このように船舶の航行シミュレーションは、目的の多様性により、多くの側面を持っているが、昨今では、より現実的な条件下での実際的なシミュレーションの実施も求められている。すなわち対象海域の設定を実際の港湾としたり、海上風や潮流などの条件を考慮し、航行中の船舶に直接働く外力として現実の値を用いたり、他船との遭遇など、船舶の航行状況も実情を反映したシミュレーションである。

船舶に対して外力となる自然環境要素を詳細に考慮した航行シミュレーションでは、対象海域の特定とともに、実施日時までも限定した条件設定が可能となることから、より有意義な評価が得られるものと考えられる。そこで、自然条件などの環境要素の影響を取り込んだ総合的な航行シミュレーションのために、船舶の航行に影響を

* 正会員 船舶技術研究所 (〒181 三鷹市新川 6-38-1)

与えるいくつかの要素について、その設定手法も含めた検討が求められている。

本論では、船舶の航行に影響を与える環境要素について基礎的な検討を行った。そして簡単な運動モデルにより、環境要素を考慮した船舶の航行シミュレーションを東京湾を対象として実施し、環境条件・要素をシミュレーションへ導入、設定する手法についての考察を試みたものである。

2. 海洋情報の現況とシミュレーションへの導入

特定な海域を航行する船舶に影響を及ぼす要素の概略を図1に示す。これらの環境要素を大別すると、自船の運動に外力として影響する要素、航行や運航に関係する自然要素および自船周囲の海上交通流と考えることができる。視点を変えるならば、設定海域固有の自然環境に依存した条件と自船と他船の航行状況による条件とも分けられる。この条件のうち自然環境条件の要素については、これまでの検討⁽³⁾より海上保安庁水路部や日本海洋データセンター（以下JODCとする）等の資料の利用が有効であることが判った。表1はJODCより刊行された「沿岸海域海洋データカタログ・東京湾」⁽⁴⁾の概要であるが、東京湾における自然環境要素を表す基礎資料として非常に有効である。また、磁気テープを媒体として一次資料を利用することも可能であるため、その意味でも利用価値の高いデータであると考えられる。

より現実的な航行シミュレーション実施のための環境設定の第一要件は、対象海域の特定である。海域の特定には水路部において作成された電子海図の活用が有効であることから、本研究においてもこれを利用している。

電子海図は、海岸線データを主たる情報として持つものであり、海岸線位置の緯度、経度が、いわゆる一筆書きデータとして地名と共に記録されたものである。また、20メートルの等深線と灯台等の固定物標データなどが記録されている。電子海図の情報概要と東京湾（海図・東京湾至犬吠崎）のグラフィック表示例を表2と図2に示す。水深データは、測定点の緯度、経度および水深値より構成されている。

図2 電子海図（東京湾至犬吠崎）の表示例

図1 環境要素の概念

表1 「データカタログ・東京湾」の概要

データ種類	内 容
東京湾関連海図類	海図解説
水深データファイル	一次、二次データ
底質データファイル	底質点 95600 点, 底質63種別
水質データファイル	水温, 塩分, 溶存酸素 量等
潮汐データファイル	実測潮高値, 調和定数
潮流データファイル	実測流向, 流速, 調和 定数
波浪データファイル	目視観測データ

東京湾の場合、湾内中部以北における水深は40～20メートルであるため、水深データは船舶の航行に関わる重要な要素となる。これは、触底や座礁などの安全面のみならず、大型船の航行においては浅水影響による船体抵抗の増加より船速の減少が生じるからである。従って浅水影響を運動モデルに考慮し、シミュレーションに航行海域の水深情報を取り入れることが必要となる。

図3 底質「岩」の分布状況

図4 底質「こまかい砂」の分布状況

底質データは、測定点の緯度、経度および底質名と水深値より構成されている。図3、図4に底質種別のうち「岩」と「こまかい砂」について、その分布状況を示した。東京湾内およびその周辺海域は、63種類の底質により構成されているが、図に示した「岩」と「こまかい砂」の占める割合の合計は全測定点の32%であり、湾内中部以北では「泥」がその大半を占めていて全体の30%となっている。また、東京湾の底質の状況として表3に各底質の割合を示す。

表2 電子海図の概要

データ種類	内 容
海岸線データ	緯度、経度、地名
等深線データ	緯度、経度
固定物標データ	緯度、経度、名称 灯質、光達距離、レーダ反射器有無
海交法適用海域データ	緯度、経度

表3 東京湾における底質の構成

底 質	測定点数	割合(%)
M どろ	29082	30.4
F. S こまかい砂	15625	16.3
R 岩	15361	16.1
S 砂	12482	13.1
C. S あらい砂	8732	9.1
S. S H 砂、貝殻	3022	3.2
その他	11370	11.9
63 種 類	95674	100.0

このような底質データは、航行船舶に対する情報として錨泊地の選定や投錨後の把駐力の推定などに有用であるろう。

潮汐および潮流データは、定時観測値と調和定数とからなる。この調和定数より測定点における任意時の潮汐、潮流の予測計算が可能となる。現在、これらのデータを利用して日本水路協会では東京湾における潮汐、潮流の予測計算プログラム⁽⁵⁾が作成されており、東京湾内における任意位置、任意時の予測計算が可能となっている。潮流の予測は航行操船に直接利用できるし、潮位の推定は大型船の入港計画には必要な要素である。

3. シミュレーションの概要

3.1 海域の設定

シミュレーションの対象とする海域として東京湾を特定した。設定した海域の状況を図5に示す。海域は、左下隅位置が北緯35度04分、東経135度10分、右上隅位置が北緯35度44分、東経140度10分の海域部分を電子海図（東京湾至犬吠崎）より切り出したものである。

東京湾内の港位置や航路標識位置より既設航路の設定を行った。

船舶航行は運動方程式を解くことにより表されるので、シミュレーションにおいてはMKS系を用いている。

図5 設定航路体系

図6 モデル船（湾口一千葉港）の航跡図

3. 2 航路体系

東京湾内を航行する船舶の航路として、図5に示した航路体系を設定した。この航路体系は、湾口および9ヶ所の港を含んでおり、湾内を横断する2系統のフェリーの航路も取り入れている。

各港は、後述する海上交通流の作成のために使用した港湾統計における貨物の移出入の対象港に対応させて決定している。

設定した航路系は、いわば各船に与えられる目標航路であるが、シミュレーションにおける航路航行ではさらにそれを加工して各船それぞれに航路幅方向への分布を持っている。各航路における航行制限としては、浦賀水道・中ノ瀬航路および中ノ瀬出口から千葉港までの航路部分において、一方向のみの航行制限を与えている。また、フェリー航路には全て一方向への航行制限を与えている。

3. 3 自船のモデル

自船のモデルとしては、湾口より中ノ瀬航路をへて千葉港へ至る船を対象とした。自船は、主機回転数一定で与えられた目標航路に沿って自動操船を行うものとしている。このような自動操船は、目標航路からの位置偏差をフィードバックに含む自動操舵系により実現できる。ここでは最適レギュレータとしての簡易手法に従って、最適操舵系を設計した⁽⁶⁾。

すなわち、状態方程式に相当する操縦運動方程式として応答モデルを用い、評価関数としては次式を用いている。

$$J = \frac{1}{T^*} \int_0^{T^*} \left\{ \left(\frac{y}{y_{max}} \right)^2 + \left(\frac{\delta}{\delta_{max}} \right)^2 \right\} dt \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 T^* は十分に長い評価時間、 y_{max} 、 δ_{max} は、位置偏差および許容最大操舵角、 y は航路からの横変位、 δ は舵角を表す。このとき、(1)式の評価を最小にする最適レギュレータとしての制御則は(2)式となる。

$$\delta = g_1 \cdot (r/u) + g_2 \cdot (\phi - \phi_i) + g_3 \cdot y \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 r は旋回角速度、 ϕ は方位角、 u は速度、 ϕ_i は目標航路の方位を示す。フィードバック係数 g_1 、 g_2 、 g_3 は、評価パラメータ $\varepsilon \equiv y'_{max}/\delta_{max}$ (は無次元値を示す) と操縦性指数 K 、 T 等により計算される。

3. 4 海上交通流の設定

東京湾内を航行する船舶交通流の作成には、港湾統計⁽⁷⁾を資料に使用し、貨物の流出入を基準として各港における出入港船舶数を推定する手法を利用している。

推定における基準を以下に示す。

- (1) 入港船舶表における外航船、漁船、その他の船舶は、全て湾口を通過する。
- (2) 自航船は、別集計とする。
- (3) 内航船において、総貨物量（移入＋移出貨物量）は入港船舶数に比例する。
- (4) 千葉港は、浦安港を含む。

このようにして、東京湾における各港での出入港船舶数を算出した。なお、湾内フェリーについては、実際の出港時刻に基づいて航行するものとしている。

上記の O/D 分布と各船ごとに設定する目標航路と船速とにより交通流が生成される。

4. シミュレーション結果の検討と考察

東京湾湾口より設定航路に従って千葉港へ航行するモデル船の航跡を図6に示す。航行船は、前述したように主機回転数を一定のまま操舵のみによる自動操船によって航路航行するものであり、図中の航跡プロットは2分毎の位置を示している。

図7 船速と船首方位の変化

図7は、船速と船首方位の変化を航行時間によって示したものである。船首方位の変化は、浦賀水道航路中部、中ノ瀬航路入口および出口における変針を示している。操船は、操舵でのみ行われるため直線航路部分での速度変化は表れないが、変針点通過に伴う転舵による船速の減少が見られる。

この航行は、平水中で環境要素の影響を全て無視した状況であるが、実際には、自然環境による外力や他の航行船舶との行合い条件などが、自船の航行を制限する要素として存在している。東京湾内では、船舶の輻輳度が高く、また巨大船の航行もあることから、他船の航行状況の影響は問題となる点である。特に湾口や航路の出入口付近など航行船舶の密度の高い海域においては、他船との行合い状況を含め、船舶交通流の状態が大きな問題であり、自船の航行に強く影響する要素である。

図8 船舶交通流のシミュレーション例

海上交通流のシミュレーションとして、港湾統計を資料に用いた例を図8に示す。図は、0時0分からシミュレーションを開始して3時間が経過した時点での東京湾の状況を表示したものである。設定した航路体系が単純なため、航路の交差部における航行船舶の密度が強調される傾向を持つが、東京湾における船舶交通流の模倣が可能であることが判った。図9に湾口における北航船と南航船それぞれの通過隻数を時刻別に示した。各港にお

図9 湾口における北航、南航船の設定通過隻数

ける船の出港時刻は、港湾統計より推定した出港船総数に基づき、出港間隔がポアソン分布に従うと仮定して決定しているが、さらに東京湾の特性を加味するために実観測における出港船舶数の時刻変動を重みとして各港に与えている。

東京湾における航行船舶の実態調査⁽⁸⁾の結果より換算した浦賀水道航路における時刻別の平均通航隻数を図10に示した。このように浦賀水道航路における時刻別の通過船舶数の状況は、北航船の場合、午前中に多く通過して、ピークは午前5時頃であり、南航船の場合は午後から夕刻に多いことが報告されている。シミュレーションに使用した船舶交通流は、実態調査の結果を十分に模擬できたものではない。これは、個々の船舶に対して、その固有な特性への考慮が不十分なためである。船種や船の大きさについては、港湾統計からも構成比率として与えられるが、航行速度などの要件については、対象とする海域の実態を十分に反映した調査観測結果によって設定することが必要である。このような航行船舶の特性の検討や航路体系の整理によって、さらに適切な船舶交通流が作成できるものと考えられる。

図10 実態調査による北航、南航船の通過隻数

図11 水深の変化

自船と船舶交通流との関係は、他船との出会い状況のみならず、海域の航行船舶の密度においても十分に評価することが重要であり、航路系の設定や船舶発生の手法を実情を考慮して検討する必要がある。

航行時間に対応させた水深の変化を図11に示す。水深値は、東京湾内を緯度、経度30秒のメッシュに分割して、それぞれのメッシュ内に対応する水深の測定値より平均水深を与えたものである。資料としては、JODCの水深データファイルと底質データに併記された水深値を加工して使用している。水深は既に述べたように、浅い海域においては浅水影響として船の運動に関わる要素であり、また安全の面からも重要な情報となる。

東京湾の場合、図11に見られるように、中ノ瀬航路付近より水深は30～20メートルの値を示している。通常、浅水影響を無視できる水深は喫水の約4倍以上とされているが、東京湾中部以北においては、浅水影響による速力損失を十分に考慮する必要がある、この場合、水深は重要な入力情報となる。

図12 底質「岩」の変化

図13 底質「こまかい砂+砂」および「泥」の変化

図12、図13に航行時間の経過による底質の変化を示した。底質情報は、湾内を緯度、経度2分のメッシュに分割して、対応するデータよりそれぞれのメッシュにおける底質の構成を与えたものである。

図12は「岩」の変化を示しており、図13は「こまかい砂+砂」と「泥」の変化の統合である。水深値の変化で

見られた傾向と同様に、東京湾においては中ノ瀬航路以北で底質の構成に変化が表れる。湾内中部、北部での底質はその大半が「泥」となっている。

メッシュデータとして使用した水深値および底質状況は、いずれも海域を格子分割することによってデータベースの構築をおこなったものである。このようなデータベースでは、データの階層化が重要となる。すなわち、データを利用する立場からは、水深値や底質状況を、使用する局面や必要とする精度により、階層の上位あるいは下位の情報を自由に利用できるからである。また、オーバーレイ手法により海図と水深情報や底質状況を同一面上に重ね合わせることによって、統合された情報を利用することが可能である。

図14 設定海上風

図14にシミュレーションにおいて設定した海上風の状況を示す。設定条件としては、湾内一風向で平均風速 5m/sec、標準偏差 1m/sec の変動風とした。図中、マイナス時間に対して風の設定が行われているのは、潮流の予測に使用するためである。

東京湾における気象海象の調査資料⁽⁹⁾によれば、東京湾地区で最も風が強いのは、全風向において東京灯標付近であり、次に京葉シーバースである。また、湾内各地に対する風速比や季節別の風資料などが整理されている。従って、これらの資料より容易に東京湾における風の状況をシミュレーションに対しても設定できると考えられる。

風をはじめとして天候や視程、波浪などの気象海象に関する自然環境条件は、シミュレーションを実施する目的に従って、任意に設定したり、対象時期を規定して典型的な

自然状況を設定する場合が必要になる。後者の場合には、対象時期に対応するモデル天気図を仮定して、前述調査資料などより、シミュレーション海域に特徴的な気象海象状況を設定することが適切な手法であると考えられる。

日本水路協会によって作成された東京湾の潮流予測プログラムを利用し、2001年1月1日0時0分より、モデル船を航行させた。この時、千葉沖でモデル船が遭遇する潮流の流向、流速値およびその時点で湾内を緯度、経度1分間隔で区切ったメッシュでの流向、流速を表すベクトルを図15に示した。

ここで、潮流計算は次式を用いている。

$$V_i(T) = V_{oi}(T) + \sum f_n \cdot V_{ni} \cdot \cos(\theta_{ni}t - K_{ni} + V_{on} + U_n) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$V_{oi}(t) = \sum (a_{ni} \cdot WN_n + b_{ni} \cdot WE_n) \quad \dots\dots\dots(4)$$

n は分潮を示すが、ここでは主要4分潮を用いた。 i は潮流の北方および東方成分、 f_n は天文因数、 V_{ni} 、 θ_{ni} 、 K_{ni} はそれぞれ分潮流の最大流速、角速度、遅角を示す。また $V_{on} + U_n$ は天文引数である。

このようにして東京湾における任意位置、任意時での潮流予測が可能である。ここで、船が航行中に遭遇した潮流の状況を航行時間に対して図16に示す。この場合、モデル船は湾口から浦賀水道航路付近において逆向きの流れに遭遇していることが判る。図中で流れの向きは絶対方位により表示してあるが、図7に示したモデル船の船首方位を取り入れ、船に対する相対方位を検討すること

図15 東京湾流況図

図16 潮流の流速と流向の変化

図17 潮位の変化

条件を考慮した総合的な航行シミュレーションを実施するために、これらの要素の設定手法や船舶に及ぼす影響について、基礎的な検討を行った。その結果、資料が整理されるとともにシミュレーションへ導入し、条件を設定する手法に関して多くの知見が得られた。本論では、実際に環境要素を運動モデルに取り込んだ航行シミュレーション例を紹介できなかったが、これまでの検討事項を十分に考慮してシミュレーションを実施することは可能である。

最後に、本研究の遂行にあたり貴重な資料の提供や有益な御助言を頂いた海上保安庁水路部、日本海洋データセンター、(財)日本水路協会の関係者に謝意を表します。

また交通流作成に関しては、浜島金司氏に負うところが大きく、改めて深謝します。

参考文献

- (1) 柏木 正：不均一潮流中での船舶操縦運動の計算法と鳴門海峡における適用例，日本航海学会論文集第75号，昭和61年9月
- (2) 日本航海学会：第80号航海，昭和59年6月
- (3) 桐谷伸夫：海上交通シミュレーションへの自然環境要素の導入，第46回船舶技術研究所発表会講演集，昭和

によって外力としての潮流力を評価することが可能である。

船に対する相対風と相対潮流値を求めることにより，航行船舶に対して外乱となる風圧力および潮流力が求まる。ここで，これらを運動方程式に外力項として取り入れることにより，船舶の航行に対する影響が検討できる。

図17に航行時間の経過と潮位の変化を示す。これにより航行中の水深に対する補正ができるので，浅水影響が大きい場合には有効である。

船舶の航行位置での潮位を一義的に決定することは困難なため，湾内を調和定数の取得点を含む海域で分割し，その検潮点における潮位より，航行位置での潮位を指定する手法を用いた。湾口付近の潮位としては，君津における潮位値を用いている。なお，設定日時は潮流と同様である。また，1月1日から7日までの潮位曲線も同時に示した。潮位は，次式によって予測計算を行っている。

$$H(t) = A_0 + \sum f_n \cdot h_n \cdot \cos(\theta_n t - K_n + V_{0n} + U_n) \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで， n は分潮を表す。計算には38分潮を使用した。

5. おわりに

水深をはじめとして風や潮流，潮汐，あるいは海域の船舶交通流など種々の環境条件

60年11月

- (4) 日本海洋データセンター：沿岸海域海洋データカタログ（東京湾），1984年 3 月
- (5) （財）日本水路協会：東京湾の流況及び漂流予測システム報告書，昭和61年 3 月
- (6) 不破 健，田中邦彦：自動航行に関する一考察，日本航海学会論文集，第73号，昭和60年 9 月
- (7) 運輸省運輸政策局情報管理部：港湾統計（年報），昭和53年
- (8) 海上保安庁：通航船舶実態調査報告書，昭和53年度
- (9) （財）日本気象協会，港湾気象海象要覧東京湾