港内交通シミュレーションモデルの開発

恩田 裕治*・楠永 秀樹**・原 潔***

The Simulation Model of Harbor Traffic

Yuji ONDA, Hideki KUSUNAGA and Kiyoshi HARA

Abstract

Authors proposed the simulation model of the traffic in the congested harbor. The purpose of this model is to get the overall information for activities in a harbor. Using these information, we can study the schedules of arriving time of vessels or the traffic control system there etc. The model includes such parameters concerned with harbor activities as cargo quantity handled, number of entering vessels and their particulars for each berth.

This simulation model is composed of such sub models as ship generating, traffic control, collision avoidance, ship's anchoring and berthing etc. And we proposed some evaluation index for safety and efficiency on the activities in a harbor. The model was verified by applying the model for Hamadera harbor of Osaka Bay and got the reasonable result.

1. はじめに

船舶が輻輳する港内で将来の取扱い貨物量や入港船舶数、総トン数の変化に伴うバース、錨地の増設、変更などの港のハード機能、さらにバースごとの配船計画、航路管制の新設、変更などの港のソフト機能を評価するためのシミュレーションモデルを開発し、その有効性を検証した。

本シミュレーションモデルでは、港域内の地理的条件と操船状況、係留時間などの特性を知るための実態調査を基礎にして船舶の港外到着から接岸、係留、離岸、出港までの時間経過に応じた船舶の動静をシミュレートし、その結果を安全性と効率性から評価する諸指標を提案している。

適用例として約 50 のバース数をもつ堺泉北浜寺港区を対象にして本シミュレーションを実施し、その有効性を示した。

2. シミュレーションの構築過程

本モデルは図 1 に示すように、対象港域の実態調査とバース利用データを基に航路、泊地、係留施設の要素を加味してバースごとの操船モデルを作成し、それを集積して港内交通シミュレーションモデルとしている。本モデルは船舶の発生サブモデル、航行サブモデル、管制信号サブモデル、係留施設モデルなど 7 種のサブモデルから構成している。

図 1 シミュレーション構築過程フロー図

* 正会員 ㈱郵船海洋科学(〒140 東京都品川区南品川 2-3-6)

** 正会員 ㈱郵船情報開発(〒104 東京都中央区新川 1-28-25)

*** 正会員 神戸商船大学(〒658 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

2.1 港内利用状況の実態調査

2.1.1 調査項目

港内の交通の実態を把握するためにレーダ観測と目視観測を併用し、港内での交通量、操船方法、速力の増減等に関する調査を堺泉北港浜寺泊地において行った。

一方、港内の利用状況を把握するためには、各係留施設ごとにその利用状況を知る必要があることから、同泊地内の各係留施設管理者(各企業)に対してアンケート調査を行った。アンケート調査の内容は次に示すとおりである。

- ① 着岸船舶数の総トン数別の実績
- ② 停泊時間帯
- ③ 総トン数別の停泊時間
- ④ 総トン数別の離着岸操船所要時間
- ⑤ 総トン数別の入出港経路
- ⑥ 総トン数別の入出港速力
- ⑦ 係留方向
- ⑧ 港内での総トン数別錨泊地
- ⑨ その他係留施設利用に係わる事項

この中で①着岸船舶数の総トン数別の実績については、港湾局による入航船統計を解析しアンケート調査結果を補足した。また、⑤、⑥の入出港速力、経路については、阪神水先区水先人会に対しヒアリング調査も実施した。

2.1.2 実態調査の解析方法

これらの実態調査の結果として、各係留施設ごとに次のような項目に整理し、各項目がシミュレーションに反映できるシステム構成とした。

- ① 総トン数別船舶入港隻数および一日当りの入港隻数分布
- ② 受け入れ許容隻数および係留施設の延長
- ③ 初期入港時刻
- ④ 入港時間帯
- ⑤ 総トン数別船舶停泊時間、離着岸操船時間
- ⑥ 係留施設の稼働時間
- ⑦ 係留施設の着岸許可時間帯
- ⑧ 係留施設の共有関係
- ⑨ 係留施設間のシフト関係
- ⑩ 総トン数別入出港別の航行ルートおよび離着岸ルート
- ⑪ 総トン数別入出港別の航行速力

項目の中で総トン数別、入出港別の航行速力については、レーダによる実態観測から得られた出入港船の1分ごとの位置データを解析し、速力と目標バース付近(3L手前)までの距離との関係を求め、その結果を入出港別、総トン数別に対数又は直線で回帰してシミュレーションに用いることとした。

使用する速力変化パターンは8段階のトン階に分類されており、各々入港と出港に分類されている。回帰の一例として速力変化曲線例を図2~5に示す。

2.2 港内航行用モデルの概要

港内交通流を表現するに当たり必要と思われる機能について考察した結果、次のようなサブモデルを作成した。

- ① 船舶の発生モデル
- ② 航行モデル
- ③ 航行管制信号モデル
- ④ 港外待ちモデル
- ⑤ 港内待ちモデル

入 港 (500 GT~1,000 GT)

図2 速力変化曲線例1

出 港 (500 GT~1,000 GT)

図3 速力変化曲線例2

入 港 (20,000 GT以上)

図4 速力変化曲線例3

出 港 (20,000 GT以上)

図5 速力変化曲線例4

⑥ 係留施設利用モデル

⑦ シフト船モデル

これらの航行モデルを基に、船舶の発生から消滅までのフローを図6に示す。このフロー図は、港内を航行する船舶がどのように表現されるかを示したもので、概要は以下のとおりである。

2.2.1 船舶の発生モデル

船舶の発生に関しては、単純に平均到着時間間隔ごとに船舶を発生させるのではなく、係留施設ごとの事情を考慮して船舶を発生させている。これは、各係留施設において大別して次のような2種類の船舶の到着形態が存在する事実から、これを表現するために考慮したものである。

図7に船舶の発生フロー図を示す。

(1) 先行船の停泊時間を考慮した到着

これは、1日に多数の隻数を離着岸させる場合で、このような係留施設では、指数到着による表現をせず、先行船の港外到着時刻と停泊所要時間を用い港外到着時刻を決定している。

図6 船舶の発生から消滅までのフロー図

(2) 周期到着

大型船の到着など1日に1隻未満の到着頻度の船舶や、係留施設又は定期船、フェリーなどの到着の表現には、平均到着時間間隔や平均到着時間間隔に一定のばらつきを与えた到着の表現が適当であることから、到着周期を用いた港外到着時刻の決定を行っている。

2.2.2 航行モデル

(1) 航行ルート

着岸する船舶については、原則として対象となる港内（又は泊地）の外で船舶が発生し入港から着岸、その後一定の停泊時間を経て離岸、再び航行状態となり泊地外へ出航する動作をとるものとする。

船舶ルートについては、大きく分けて航行用ルートと離岸用ルートの二つにより構成されている。航行用ルートは港外の発生点、消滅点と目標点から表現され、目標点の設定により屈曲したルートについても設定が可能である。自船位置と目標点から針路を計算することにより、変針動作を行うものとしている。また、離岸ルートは船首尾方向のデータを航行ルートに付加し、複雑な離着岸操船時の動きの表現も可能にしている。

ほかに、法規上の優先関係の設定や管制信号実施の際に利用するため、図8に示すように、航行海域別に入港時5状態、出港時5状態に分類し、

図7 船舶の計画発生フロー図

図8 ルート構成概念図

表1 航行状態による自船、他船の優先関係表

他船航行状態 \ 自船航行状態	1 港外 (入港)	2 防波堤外 (入港)	3 防波堤内 (入港)	4 港内 (入港)	5 着岸中	6 停泊	7 離岸中	8 港内 (出港)	9 防波堤内 (出港)	10 防波堤外 (出港)	11 港外 (出港)
1 港外 航行中 (入港)	*	*	*						*	*	*
2 防波堤外 航行中 (入港)	*	*	*	*				*	*	*	*
3 防波堤内 航行中 (入港)			*	*				*	*		
4 港内 航行中 (入港)			*	*				*	*		
5 着岸中					*						
6 停泊					*	*					
7 離岸中							*				
8 港内 航行中 (出港)			*	*				*	*		
9 防波堤内 航行中 (出港)			*	*				*	*		
10 防波堤外 航行中 (出港)	*	*	*	*				*	*	*	*
11 港外 航行中 (出港)	*	*	*	*				*	*	*	*

(*: 自船が避航を考慮する)

停泊状態を含め合計 11 状態に分類している。表 1 は各船の航行状態による自船、他船間の優先関係を表現したもので、船舶の航行位置から導かれる航行状態の組み合わせから、避航動作の考慮の有無が表現できる。また、これら避航動作の考慮に際しては、自船と他船の見合い関係、速力針路差、航法上の航路位置等から、海上衝突予防法(13, 14, 15, 18 条)、海上交通安全法(3 条)、港則法(14, 15, 18, 36 条)についての判定を合わせて行っている。

(2) 避航操船

操船の難易の程度を表現するものとして、避航操船による操船負担と衝突危険度のトレード・オフ関係により自船の周囲の船舶交通環境を評価する長澤氏の手法⁹⁾を用いた。本モデルにおいては、このモデルを避航モデルとして組み込み、航行中の避航操船を行わせており、小型船(1,000GT 未満)と大型船(1,000GT 以上)に分け、小型船については変針変速が大型船に比して取りやすく、操縦性上での事実を表現されるよう改良している。また、防波堤等の障害物との干渉も存在するため正横離隔距離や前方離隔距離を考慮するため、陸岸バンパー⁹⁾を図 9 に示すように設定した。

(3) 離着岸作業中の避航動作について

離着岸する船舶は、一般に横移動、その場回頭など複雑な動きをする。また、離着岸中の船舶は速力も低速であり、変針による避航より速力変更による避航(移動の停止)が主体であると考え、離着岸船の避航動作は前述の避航モデルによらず次の二条件により処理をしている。

1. 自船が離着岸動作に入る前に、他の離着岸する他船が一定距離以内に存在する際は停止する。
2. 自船が離着岸船で他船が航行船の場合は、航行船が避航動作をとる。

2.2.3 航行管制モデル

航行管制信号の実態を表現するために、港則法に従って管制官が行う判断、指示を次のようにモデル化した。まず、シミュレーション上の管制者は、入港予定船、出港予定船の総トン数、入出港時刻を把握し、それによって発令する信号の内容を選択する。次に、信号の発生時にすでに航路内や港内を移動中の船舶、又は他の入出港予定船について動静を確認し、信号の発令タイミングを決定する。

また、管制信号の発令により影響を受ける船舶については、その船舶のルート上に設定された航行位置から導かれる航行状態を利用し、信号による制御を受けることとしている。さらに、実際の管制信号の発令と解除は、それが時間情報により行われる場合と、信号発令の原因となる船舶の位置情報により行われる場合がある。具体的には、一定時間間隔で信号が変更される場合、航行船舶のある地点の到着、通過により信号が変更される場合、さらに信号の切り替えに対して一定の制限時間を与えている場合等である。

本シミュレーションでは、これら表現するため、信号の ON/OFF については船舶の位置情報と時刻情報の双方を組み合わせ、信号の制御を行う機能を備えている。

2.2.4 港外待ちおよび港内(泊地内)待ちモデル

入港船舶は事情により管制水路内又は泊地内に入入できないことがあり、港外での待ちが発生する場

図9 陸岸用バンパー概念図

図10 錨地からの新ルート決定概念図

合がある。これらは、自船の目的バースが占有されている場合や、夜間入港制限による場合、そして信号所管制信号により入航制限を受ける場合があげられる。

港外、港内の錨地の位置および大きさについては、錨泊地が判明したものについては、種々の大きさをもった円形の錨泊エリアを用意した。錨泊する船舶は、既存の係留施設へ向かう航行ルートから、錨泊地へ向かうための新しい航行ルートを障害物を回避するよう計画し、錨泊地へ向けルート変更をする機能と、錨泊地付近で目標地点に船舶が存在している場合は、その船舶と一定距離をおいて停泊する機能を持っている。さらに、先船による係留施設の占有が終了し、錨地から自船係留施設へ向かう際も、錨泊地へ向かう場合と同様に、係留施設の位置と障害物の存在を考慮し、航行ルートを計画し航行する(図10参照)。

2.2.5 係留施設利用モデル

このモデルでは、係留施設への着岸の可否の判定と係留施設間の共有関係について処理を行っている。前者の着岸の可否判定については、係留施設の運用面と係留施設の大きさによる制限を考慮している。

具体的には、運用面では各係留施設ごと、曜日、時間帯による着岸の可否判定を行い、ほかに荷役作業の中断、再開についても同様な設定が可能なものとした。

係留施設の大きさによる判定とは、係留施設長と船舶の長さの関係等によるもので、各係留施設に対して同時に受け入れられる着岸隻数の最大地：

$N_{\max}$ と係留施設長さ値： L を与え、係留施設に着岸している船の隻数を i とし、各々の着岸船の船長を $sl(i)$ として与えることとする。ここで、新たな船舶の発生によるその船舶の着岸可能条件は次の方法で判別するものとした。

式中の定数 1.1 は最大着岸隻数と船の長さとその長さの 1 割の安全距離の考慮を意味している。

$$(1 < i < N_{\max}) \text{ and } \{(\sum sl(i) \times 1.1) - L < sl(m+1)\}$$

後者の係留施設の共有関係とは、当初の目的係留施設が占有されていた場合、他の係留施設に着岸する場合を意味しており、この関係についてはアンケートおよびヒアリング実態調査によりその関係を求めている。シミュレーションでは自船の目的バースを入港事前に占有状況を確認し、必要に応じて航行ルートを変更する処理をしている。

2.2.6 シフト船モデル

係留施設に着岸した船舶は、一般的には荷役終了後、防波堤外に出港していくが、荷役の都合等により同一泊地内で別の係留施設に移動し再度着岸する場合があります、このような動きをシフトと呼ぶ。これを図11に示すように、各係留施設ごとにシフトの発生とシフト先の関係を用意しシフト船モデルとした。シフト元とシフト先の分岐関係は、百分率で表現している。今回の例では、この関係をアンケート調査と港湾統計データベースを処理することにより求めている。

図11 シフト船モデル図

3. モデルの再現性

構築過程で示した内容に従ってそれぞれのサブモデルを作成し、これらを組み合わせてシミュレーションを行い、その結果を実態観測結果と比較をしモデルの再現性について考察した。

対象海域は大阪湾堺北港浜寺泊地で、年間の入港隻数は14,000隻である。泊地内に約50の係留施設が存在し、防波堤入口に6,800mの管制水路である浜寺航路が接続する、海上交通が輻輳する海域である。

図12は本モデルを用いて求めた入港時の航跡と実態観測時の航跡の一例を比較しており、両者がほぼ対応していることがわかる。

図13は実態観測とシミュレーションによる24時間分の航跡の比較である。ここで、シミュレーションの航跡図には曳船の航跡が含まれていない。しかしながら、各係留施設に向かう航跡が実態とシミュレーションが対応しており、各係留施設に入港する船舶の港内での行動が再現されていることが分かる。

図 14 はある係留施設における船舶の到着および係留施設占有時の待機する船舶の様子を出力したもので、2 隻の収容能力で 188m の係留施設長さの岸壁に船舶が離着岸する様子が表現されている。

そして図 15 は、時間帯別総トン数別入港隻数をシミュレーションモデルにより計算したものと実態観測による隻数を比較したものである。隻数、総トン数については、ほぼ一致している。ここで、入港時刻に差異が生じているが、この差は初期入港時刻や小型船の待機錨地の設定が、アンケートによる実態調査資料と

実態との間に隔たりがあるために発生したものである。従って、入力値を変更することで実態を再現することが可能であり、シミュレーションの実行目的に応じて入力値を選択することで対応することになる。

このように、シミュレーションモデルによって港内交通流および係留施設の時間的、空間的な利用状況が再現できている。

図 12 入港操船比較図

図 13 24 時間航跡の比較図

図 14 係留施設利用状況図

図 15 時間帯別入港隻数の変化比較図

4. シミュレーション結果の評価指標

シミュレーション結果を評価するために、安全性と効率性に関する次の指標を作成した。

安全性：海域利用率、船舶間相互干渉率、操船上の閉塞度

効率性：係留施設利用率、港内外の仮泊船数、航行時間

(1) 海域利用率

各船に速力、船の長さを考慮した可変の閉塞領域を与え、海域がこれに占有される延べ時間の割合を示している。すなわちこの指標は各船に領域をもたせた航行密度に相当する。海域利用率は次の式で表現した。

$$S = \sum t(i) / T \times (60)^2$$

$t(i)$ ：船舶ごとの占有時間（秒）

T ：シミュレーション時間（時）

(2) 船舶間相互干渉率

干渉とは他船に対する避航動作、信号管制による待機、係留施設占有による待機を意味し、干渉率とは自船以外の船舶の行動により自船が干渉を受け他船避航や、待機を行った延べ時間や延べ隻数の割合を海域ごとに示したものである。

(3) 操船上の閉塞度

避航空間上に与えられたすべての操船方法に対して、自船が操船をとった場合に生ずる各々のリスク値を用いて、自船位置からみた周囲の航行困難度を表現するものである⁽²⁾。

この指標は次式により表現される。

$$\text{避航空間の閉塞度} = \left\{ \sum \sum (\text{リスク値})_{ij} \times \left(\frac{\text{操船方法に関する好み}}{\sum \sum (\text{操船方法に関する好み})_{ij}} \right)_{ij} \right\}$$

$$i: \text{変針操船手段} \quad j: \text{変速操船手段}$$

この指標は例えば、いずれの避航操船手段によっても時間的余裕もなく完全衝突する場合が1、近い将来に衝突のおそれが全くない場合は0としている。

(4) 係留施設利用率

海域利用率と同様に船舶により係留施設が占有されている延べ時間の割合を示しており、係留施設単位で表現する。

(5) 港内外の仮泊船数

事情により港内外の仮泊船の隻数を時間帯別に又は総トン数別に集計し、港内外の船舶の存在状況を把握する。

(6) 航行時間

港外の防波堤付近の地点から着岸までの所要時間や任意の区間、入出での航行所要時間を分布として取り出すことにより、その港の航行時間の特性を表現する。

5. 計算例

計算結果の一例を次に示す。

図16には、対象海域における18時から24時までの海面利用率を示している。これは、10日間のシミュレーション結果を18時から24時の時間帯について集計したものである。海面利用率からは、泊地全体の多くは2%以下で、防波堤付近について6%になっていることがわかる。また、いくつかの係留施設の前面又はその付近の海域で、15%ほどの海面利用率が生じている。

図17は同一の条件での干渉時間を計算したものである。この図から、他船の干渉が生じている海面が把握できる。また、干渉原因について分類して出力することにより、その詳細の把握も可能である。

6. おわりに

本シミュレーションは、港内の係留施設配置と港内交通を一体として評価する方法を提案するものである。この方法を用いることにより、今までの航跡図や係留施設ごとの入港隻数など個別の情報では得られなかった港内の利用状況を、これら要素を複合的に表現することで新たに把握できることが確認された。これによって現状の港内交通問題を抽出できるだけではなく、係留施設数、交通量、荷役時間などの港のハード、ソフト両機能を構成する諸要素を変更することが、どの程度港内交通、係留施設の利用にどのような影響を与えるか事前に評価できるので、今後の港湾計画、港内交通計画の立案に役立つと考えられる。

また、評価に当たっては現状では比較データはなく、利用率、干渉率について、安全と危険を決定できるしきい値を与えていない。しかし、それぞれの港、泊地のもつ事情や特殊性を理解している各係留施設管理者や港湾管理者がこれらの数値を手にし、より具体的な内容について詳細な将来計画を策定する場合の道具となることが、当面このシミュレーション実行の方向性と考えている。

最後に、本研究に当り貴重な助言を頂いた海上保安大学の長澤明教授、神戸商船大学の井上欣三教授、阪神パイロット組合の今野修殿、および郵船海洋科学の川瀬雅勇己君、煤田英史君、また、大量の係留施設資料の解析を行って頂いた石川和美さんに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 原：操船者の知覚モデルによる入港時の減速パターン 日本航海学会論文集 55 号，昭和 51 年 8 月，P.53～61
- (2) 長沢他：避航操船環境の困難度Ⅱ 日本航海学会論文集 88 号，平成 4 年 10 月，P.137～144
- (3) 長沢：避航を考慮した海上交通シミュレーション 航海 80 号，昭和 59 年 6 月，P.28～34
- (4) 福井：図説海上衝突予防法 海文堂
- (5) 福井：図説港則法 海文堂
- (6) 福井：図説海上交通安全法 海文堂
- (7) 岩井：新訂 操船論 海文堂
- (8) 原：海上交通工学 海文堂

図 16 18 時から 24 時の利用率 10 日間平均値分布図

図 17 18 時から 24 時の干渉時間 10 日間積算値分布図

質 疑 応 答

井上欣三(神戸商船大学): 港内で他船を避航する際に用いられたバンパーモデルの妥当性について教えて下さい。また特に港内であることの特徴について工夫された点があれば教えて下さい。

恩田裕治: 現状において港内におけるバンパーモデルの妥当性を明確に論じ得る系統的な実験や観測による資料は存在しないと考えております。

そこで今回のシミュレーションで用いた衝突判定領域の大きさは、平均 11 ノットのスタンバイ速力における避航領域の前方長さは $6.4L$ 、後方と側方は $1.6L$ という観測結果を利用しています。またこれに衝突判定領域の大きさは急速停止距離と同じ性格のものと考え、減速した場合に船の長さ L と船速の 2 乗に反比例し、長径、短径を変化させています。さらに他のルールの影響から近距離で 2 船が避航動作を取ることが想定されることや、低速での衝突判定領域の縮小により、2 船が船の全長や幅を無視し接近することを防ぐため、仮定値として長径が 2 船の全長の 1.1 倍の和を 2 分割した値、および短径が幅の 1.1 倍の和を 2 分割した値よりそれぞれ小さくならぬよう衝突判定領域に下限を設けております。