船舶エージェントによる 東京湾海上交通流シミュレーション

稲石 正明*・近藤 逸人*・近藤 正樹*・川口 明**

Tokyo Bay Marine Traffic Simulation Using Ship Agents

Masaaki INAISHI, Hayato KONDO,

Masaki KONDO and Akira KAWAGUCHI

Abstract

This paper presents a simulation study of the characteristics of the northbound and southbound traffic in Tokyo Bay using various ship agents, and discusses these agents' capability of recapturing the marine traffic flow. Each ship agent consists of a sensor, a decision-making function, memory, and an effector. The decision-making function performs circumstantial judgments and makes course and speed adjustments utilizing a ship cluster behavior model. A maneuverability expression function using the TK model was newly incorporated into the effector. Simulations based on the actual traffic of the Uraga Suido Traffic Route revealed the following: (1) The maneuverability expression function has a larger influence on the passage deviation frequency than on the near miss frequency. (2) The near miss frequency increases with the increase in the number of navigation ships. (3) The passage deviation frequency is higher in the time-dependent traffic than in the fixed traffic. (4) When a group of ships (i.e. agents) have more uniform characteristics, the traffic flow becomes smoother, leading to smaller near miss and passage deviation frequencies.

Keywords: Marine Traffic Simulation, Ship Agents, Group Navigation, Complex System

キーワード: 交通流シミュレーション、船舶エージェント、群行動、複雑系

1. はじめに

船舶運航場において、船舶は運航環境からセンサを通して情報を収集し、その情報をもとに意思決定を行い、推進・操舵装置を通して運航環境に対して行動するというサイクルを繰り返していると考えることができる。運航場の構成要素に何らかの変化があると運航場が変化し、その変化が構成要素の行動に影響を及ぼすことになる。船舶運航場は構成要素の相互作用によって場が形成されていることになり、船舶運航場を複雑系と捉えることができる。すなわ

ち、船舶は複雑系を構成する要素の一つと見なすことができる。操船者（船長）と船体をエージェントと捉えるならば、船舶は知的エージェントとみなすことができる。著者らは、船舶交通流を船舶エージェントの集団運動と捉え、その集団運動を再現する自律型の船舶群行動モデルを提案^{(1), (2)}し、モデルの表現能力について検討を加え、改良を加えてきた^{(3) ~ (10)}。前報⁽¹¹⁾では、船舶群行動モデルを搭載したプリミティブな船舶エージェントを用いて、船舶群が東京湾を北航する交通流シミュレーションを行い、

* 正会員 東京海洋大学海洋工学部 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

inaishi@e.kaiyodai.ac.jp, hkondo@e.kaiyodai.ac.jp, mkondo@e.kaiyodai.ac.jp

** 非会員 The City University of New York (Convent Avenue at 138th Street New York, N.Y. 10031)

akira@cs.cuny.cuny.edu

船舶エージェントによる交通流の表現能力の検討を行った。

本研究では、船舶の操縦性能を表現できるエフェクタ機能を搭載した、多種類の船舶エージェントを用いて、東京湾の北航と南航の交通流の再現を試みる。船舶群行動モデルを搭載した船舶エージェントの行動特性から、複雑で多様な見合い関係が存在する実海域における、交通流の表現能力について検討を行う。

2. 船舶エージェントおよびシミュレーション方法

船舶エージェントの機能ブロック図を Fig.1 に示す。船舶エージェントは、前報⁽¹¹⁾と同様、センサ機能、意思決定機能、記憶機能およびエフェクタ機能の四つの機能から構成される。本研究では、前報のエフェクタ機能を操縦運動方程式に従った船体運動が表現できるように改良した。操縦運動方程式⁽¹²⁾、⁽¹³⁾

(TK モデル) の差分近似式から、舵角を 10° に設定し、0.5 秒毎の針路と船舶位置を計算する。針路が意思決定された針路と等しくなった時に変針動作を止めるという方法で船体運動を表現する。群行動や衝突回避のための針路調整においては、調整角（航海計画針路と意思決定針路の差）が 5° 以下の場合には変針動作を行わないようにした。時間駆動型のシミュレーションの場合、操縦性能指数（追従性指数 T 、旋回性指数 K ）の値によっては、シミュレーション時間間隔（1 分に設定）内に変針動作が完了しない場合がある。変針動作が未完了の場合はその状態を記憶し、次のシミュレーション時間では船舶群行動モデルによる意思決定を行わず、所定の針路まで変針動作を継続するようにした。

船舶エージェントに記憶させる航海計画は、運航実務者からヒアリング調査を行い、30 種類の航海計画を作成した。航海計画を Fig. 2 に示す。実線で示される北航の場合、大阪、豪州および北米の三方面から東京湾の主要五港（横須賀、横浜、東京、千葉、木更津）に入港する。破線で示す南航の場合、主要五港から三方面に出港する。三方面および主要五港の近くに、船舶エージェントが発生または消滅する海域を設定した。船舶エージェントはシミュレーションを行う海域から外れると消滅させる。船舶エージェントの発生と消滅を設定することにより、シミュレーションプログラムの空間と時間計算量を共に少なくすることができる。船舶エージェントの発生間隔は、東京湾の北航と南航の年間交通量⁽¹⁴⁾、主要五港の入港隻数^{(15)~(18)}をもとに設定した。具体的に

Fig. 1 Ship Agent

Fig.2 Navigation Plan

Table 1 Traffic and Ship Type

TIME	NORTHBOUND [%]				SOUTHBOUND [%]			
	Rate	Cargo	Tanker(f)	Other	Rate	Cargo	Tanker(b)	Other
12	3	40	40	20	6	60	30	10
13	4	60	30	10	6	40	50	20
14	4	80	0	20	6	50	50	0
15	3	80	0	20	6	60	30	10
16	5	60	30	10	8	60	30	10
17	3	70	20	10	9	70	30	0
18	3	80	0	20	10	70	30	0
19	3	60	0	40	10	90	10	0
20	3	90	10	0	6	60	20	20
21	4	80	20	0	3	60	20	20
22	3	40	60	0	2	20	80	0
23	4	50	50	0	3	70	30	0
0	5	90	10	0	1	50	0	50
1	3	50	50	0	2	70	0	30
2	3	70	20	10	1	100	0	0
3	4	90	10	0	1	100	0	0
4	9	90	10	0	1	100	0	0
5	8	70	30	0	1	100	0	0
6	4	80	10	10	3	60	20	20
7	6	70	20	10	3	50	30	20
8	12	70	20	10	8	70	20	10
9	6	80	10	0	5	40	40	20
10	5	60	30	10	6	80	10	10
11	5	40	50	10	5	40	40	20

Table 2 Maneuverability Index

	Cargo	Tanker(f)	Tanker(b)	Other
L [m]	150	192	192	51.5
Sp [knot]	18	16	16	13
$K=K/(Sp/L)$	1.25	1.7	0.87	1.66
$T=T \cdot Sp/L$	1.55	3.44	0.42	1.62

は、横須賀、横浜、東京、千葉および木更津港の入出港割合を 15:22:17:35:11 とした。また、大阪、豪州、北米方面の入出港割合は資料を入手できなかったため、1:1:1 とした。時間帯別交通量と船種構成割合を Table 1 に示す。発生する船舶エージェントの操縦性能指数⁽¹⁹⁾は、Table 2 に示す船種と積荷状態を考慮した四種類の指数の組から、乱数を用いて選択する。

船舶群行動モデルを構成する力およびシミュレーションパラメータ値は、前報と同じである。シミュレーションは、

- ①東京湾の交通実態に基づいた船舶エージェントの発生
- ②発生した船舶エージェントの航海計画と船種の決定
- ③センサ機能による航海環境からの情報収集、意思決定機能による状況判断と船舶群行動モデルに基づく針路と速力の決定
- ④エフェクタ機能による船舶エージェントの移動
- ⑤船舶エージェントの消滅判断

をシミュレーション終了時間まで繰り返す。

シミュレーションは北航または南航の年間の航行船舶数を 1 万隻から 30 万隻（東京湾の年間航行船舶数では 2 万隻から 60 万隻）に設定し、8 日間行った。船舶が一隻も存在しない状態からシミュレーションを開始することと時間帯別の交通量に従った船舶の発生を行うことから、航行特性の解析には 2 日目以降の 7 日間のデータを用いることとした。

3. シミュレーション結果および考察

3.1 ニアミスおよび航路逸脱

シミュレーション開始から 1 日経過した正午の船舶エージェントの位置を Fig.3 に示す。図中の○印は北航船舶、△印は南航船舶を表す。Fig.3 の左側は浦賀水道南端を通過する船舶交通量（1 時間あたりの北航と南航の合計船舶数） $U=25.23$ [ships/hour] の場合を、Fig.3 の右側は $U=37.86$ の場合を示す。 U が大きくなると、航路内だけでなく航路入口でも輻輳していることがわかる。東京湾口船舶航行調査結果⁽¹⁴⁾から平均交通量を推定すると約 18 [ships/hour] であり、 $U=37.86$ の図は、平均交通量が実態の 2 倍の時

Fig. 3 Simulation Result

Fig. 4 Near Miss Point

の状態に相当する。

船舶エージェントと船舶エージェントの異常接近（ニアミス）が発生した位置を Fig.4 に示す。本研究では、エージェント間の距離が 50[m] 以下になった時にニアミス発生と定義した。図中の○印は、7 日間のシミュレーション期間の全ニアミス位置を示している。 U が小さい時は、航路入口付近でニアミスが発生しているが、 U が大きくなると航路内でもニアミスが発生している。

船舶エージェントが航路から逸脱した位置（△印）を Fig.5 に示す。航路入口付近での逸脱は、航路に進入することができなかったことを示す。船舶エージェントが群れを形成して航路に進入する際、群れの幅が航路幅に対して大きい場合に航路逸脱が発生している。航路進入を想定した群れ形状が形成できるような機能を船舶エージェントに導入する必要があると考えている。 U が大きくなると、航路内でも航路逸脱が発生している。これは、航路航行中に船舶エージェント間の距離を確保しようとして起きたも

Fig. 5 Deviation Point

Fig. 6 Traffic

ので、通行船舶数と航路幅に関係する。

ニアミスや航路逸脱が発生する時期と交通量の関係を Fig.6 に示す。横軸はシミュレーション時間、左の縦軸は浦賀水道南端を通過する船舶交通量 U 、右の縦軸は航行中の船舶エージェント数 V [ships] である。浦賀水道の交通実態にあわせて船舶エージェントを発生させているため、 U と V は周期的に変動している。図中の●印はニアミス発生時期を、□印は航路逸脱時期を示している。航路逸脱は V が比較的多い時に発生する傾向があるが、ニアミスは V が少ない時でも発生している。また、ニアミス発生の周期性および航路逸脱の周期性はない。

3.2 操縦性能の影響

船舶エージェントのエフェクタ機能が、個々の船舶の操縦性能に基づく変針動作ができる場合と意思決定された針路に瞬時に変針できる場合の行動特性の違いを、Fig.7 に示す。図の横軸は浦賀水道南端を通過する船舶交通量 U 、左の縦軸はニアミス頻度 N

Fig. 7 Maneuverability Effect

[1/hour]と航路逸脱頻度 D [1/hour]、右の縦軸は航行中の船舶エージェント数 V である。 U が増加しても V の値は、●印の操縦性能に基づく変針動作の場合と□印の瞬時に変針できる場合に大きな違いはない。 $U < 60$ で N の値は、▲印の操縦性能に基づく変針動作の場合と△印の瞬時に変針できる場合に顕著な違いはない。しかし、 $U > 60$ になると N の値は、操縦性能に基づく変針動作の場合に比べて瞬時に変針できる場合のニアミス頻度が高くなる傾向がある。この傾向は U が 80 以上になっても見ることができた。 $U < 40$ で D の値は、▼印の操縦性能に基づく変針動作の場合と▽印の瞬時に変針できる場合に顕著な違いはない。しかし、 N の傾向とは異なり、 $U > 40$ になると瞬時に変針できる場合に比べて操縦性能に基づく変針動作の場合の D の値は大きな値を示す傾向があった。時間帯別の最大交通量は、東京湾口船舶航行調査結果⁽¹⁴⁾によると、16 時頃に北航と南航を合わせて約 45 [ships/hour] である。 $U < 45$ の範囲では N 、 D および V に操縦性能に基づく変針動作の場合と瞬時に変針する場合に大きな違いがない。このため、現状の東京湾の交通流を再現するには、時間計算量が大きい操縦性能に基づく変針動作の計算を必要としないと考えられる。

3.3 航海環境の影響

船舶の種類（操縦性能）を統一した時の行動特性を Fig.8 に示す。Fig.8(a)はニアミス頻度 N と浦賀水道南端を通過する船舶交通量 U との関係を示したものである。図中の●印は Table 2 に示した四種類の船舶を用いた場合、□印は貨物船だけにした場合、△印は満載のタンカーだけにした場合の結果を示す。

Fig. 8 (a) Ship Type Effect (Near Miss)

Fig. 9 Speed Effect

Fig. 8 (b) Ship Type Effect (Deviation)

タンカーだけの場合は N の変動が大きい。 N の値は、貨物船やタンカーだけに船種を統一すると、統一しない場合に比べて小さな値を示した。この傾向は U を 80 以上にしても同じであった。ニアミス頻度を減少させるには、船種を統一すること、すなわち操縦性能が同じ船舶を航行させることが効果的であることがわかる。Fig.8(b)は、 U に対する航路逸脱頻度 D と航行中の船舶エージェント数 V の変化を示したものである。図中の黒塗りの記号は D を、白抜きの記号は V を示す。 D の値はタンカーだけの場合が最も高い値を、貨物船だけの場合が最も低い値を示した。 D は、ニアミス頻度と異なり、船舶エージェントの操縦性能に大きく関係していると考えられる。 V は同じ U の値に対して、貨物船だけの場合、四種類の船舶の場合、タンカーだけの場合の順に大きな値を示しており、その傾向は U が大きくなるほ

ど顕著である。また、この大きさの順序は、設定した航海速力の大きさに反比例している。

浦賀水道航路などの速度制限がある航路に進入する前に、航海速力から制限速度まで減速を行い、航路から出てからは各船舶エージェント固有の航海速力に増速している。各船舶エージェントの航海速力を一様に 18 ノットまたは 13 ノットにした時の行動特性を、横軸に U を、左の縦軸に N と D を、右の縦軸に V を採って、Fig.9 に示す。図中の黒塗りの記号は航海速力が一様でない場合を、白抜きの記号は航海速力が一様の場合である。 V の値は、航海速力に反比例して、航海速力が遅いほど大きな値を示した。これは、速力が遅いため、船舶エージェントの発生から消滅までの時間が長いことによる。航海速力が一様でない場合に比べて、航海速力が一様の場合 (18 ノットと 13 ノット) の N と D の値は低い値を示した。速力の大きさではなく船舶エージェント集団の速力を一様にすることがニアミスや航路逸脱の頻度を低くする効果があることがわかる。

4. おわりに

船舶の操縦性能を表現できるエフェクタ機能を搭載した多種類の船舶エージェントを用いて、東京湾の北航と南航の交通流の再現を試みた。交通流表現の特性値として、船舶エージェント間のニアミス頻度、航路からの逸脱頻度および東京湾を航行している船舶数を採用し、浦賀水道南端の航行船舶数を変化させてシミュレーションを行った。そして、複雑で多様な見合い関係が存在する東京湾における、船舶エージェントによる交通流の表現特性について検討を行った。

船舶エージェント間のニアミスや航路からの逸脱

が発生する海域を示し、発生 of 時期に周期性がないことを示した。操縦性能に基づいて移動する場合と瞬時に変針し移動する場合の特性値の比較を行った。そして、船種を統一すること（操縦性能を統一することに相当）や航海速度を統一することは、ニアミスや航路逸脱の発生頻度を低下させる効果があることを示した。

船舶エージェントに関する今後の課題としては、障害物回避モデルの再検討による航路逸脱回数の改善、航路進入に適した群形状の創発モデルの開発、船舶エージェント間のコミュニケーションモデルの検討などがあげられる。船舶エージェント型の海上交通流シミュレーションシステムを、多目的で汎用的な研究ツールとして用いることができるように、インターネット上の公開、利用を前提に開発を進める予定である。

謝辞

航海計画のヒアリング調査に快く御協力いただいた、東京海洋大学の矢吹英雄教授、東京海洋大学練習船、汐路丸の木村昭夫船長に感謝の意を表します。なお、本研究の一部は科学研究補助金基礎研究（C）（課題番号 17560705）による。

参考文献

- (1) 稲石正明、今宿智仁：自律型群行動モデルによる海上交通流の再現ーモデルの提案と行動特性の検討ー、日本航海学会論文集、No.103、pp.103-110、2000.
- (2) M. Inaishi and A. Kawaguchi: "Ship group Navigation Assessment", Proc. 2003 International Conference on Computer, Communication and Control Technologies, pp.410-415, 2003.
- (3) 稲石正明、川口明：船舶群行動シミュレーションー自律型群行動モデルの出力特性ー、日本航海学会論文集、No.109、pp.89-96、2003.
- (4) M. Inaishi and A. Kawaguchi: "A Ship Behavior Cluster Model for Maneuverability and Marine Traffic", Proc. 2004 Hawaii International Conference on Computer Sciences, pp.53-60, 2004.
- (5) 稲石正明、近藤逸人、川口明：船舶群と船舶群の遭遇シミュレーション、日本航海学会論文集、No.110、pp.1-7、2004.
- (6) A. Kawaguchi, X. Xiong, M. Inaishi and H. Kondo: "A Computerized Navigation Support for Maneuvering Clustered Ship Groups in Close Proximity", Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics, Volume 3, Number 3, pp.1-11, August 2006.
- (7) 稲石正明、近藤逸人、川口明：予測型エージェントを用いた船舶の群行動に関する研究、日本航海学会論文集、No.111、pp.243-249、2004.
- (8) 稲石正明、近藤逸人、川口明：船舶群行動モデルにおける情報探索空間の影響、日本航海学会論文集、No.112、pp.29-34、2005.
- (9) 稲石正明、近藤逸人、近藤正樹、川口明：船舶群行動モデルによる障害物回避と航路航行、日本航海学会論文集、No.113、pp.17-23、2005.
- (10) 稲石正明、近藤逸人、近藤正樹、川口明：船舶群行動モデルによる群れの合流と離脱、日本航海学会論文集、No.114、pp.9-16、2006.
- (11) 稲石正明、近藤逸人、近藤正樹、川口明：船舶エージェント群による海上交通流シミュレーションー東京湾の北航交通流ー、日本航海学会論文集、No.115、pp.11-16、2006.
- (12) 橋本進、矢吹英雄：操船の基礎、pp.1-24、海文堂、2001.
- (13) 本田啓之輔：操船通論、pp.54-55、成山堂書店、2001.
- (14) 平成 6 年度東京湾口船舶航行調査報告書、東京商船大学 東京湾口船舶航行調査研究会.
- (15) 東京都港湾局東京港：東京港の港湾統計；
<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/yakuwari/toukei/index.html>.
- (16) ちばの港湾：千葉県港湾統計年報；
<http://www.pref.chiba.jp/business/kowan/toukeinpenpou-j.html>.
- (17) 横浜市港湾局横浜港：横浜港の統計；
<http://www.city.yokohama.jp/me/port/statistics/index.html>.
- (18) 横須賀市港湾企画課：港湾統計；
<http://www.city.yokosuka.kanagawa.jp/minato/kikaku/toukei.html>.
- (19) 航海便覧編集委員会、航海便覧、pp.634-635、海文堂、1991.

質疑応答

長澤明（海上保安大学校）：

運動方程式の導入が今回の改良点の一つかと思いますが、運動性能を考慮（折り込み済み）して制御するのか、制御（避航等の意思決定）の後、運動性能に応じて動作させるのかについては、どのように考えておられますか。

稲石正明：

航海計画に沿って変針する場合は運動性能を折り込んで変針するようにしています。しかし、群行動のための針路調整や衝突回避の場合は運動性能を考慮した針路修正を行っておりません。そして、針路修正が 5° 以上のときに修正を行い、針路修正の間は新たな意思決定を行わないようにしています。実際の船舶行動に近い動作を再現できる船舶エージェントの開発には、針路調整においても運動性能を考慮した調整時期の判断モデルの検討が必要であると考えております。