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 -東京湾の北航交通流-

稲石 正明*・近藤 逸人*・近藤 正樹*・川口 明**

Marine Traffic Simulation Using Ship Agent Clusters -Northbound Traffic in Tokyo Bay-

Masaaki INAISHI, Hayato KONDO,

Masaki KONDO and Akira KAWAGUCHI

Abstract

This paper presents a simulation study of the characteristics of the northbound traffic in Tokyo Bay using ship agents. A ship agent has four functions, i.e., sensor, decision-making, memory and effector functions. The decision-making function performs circumstantial judgments and makes course and speed adjustments utilizing a ship cluster behavior model. We simulated the navigation characteristics of ship agent clusters in Tokyo Bay by manipulating the initial interval size among ships that formed a ship cluster. We found that when ship clusters enter the Uraga Suido Traffic Route from different directions, the initial interval size has little impact on the successful entry into the passage. Regardless of the interval size, the width of the new cluster was always smaller than the passage width. However, the simulation revealed that when the initial interval is small, ship agents sometimes deviate from the traffic route after entering. We also found that the initial interval size changed the point of heaviest congestion. When the interval is small, the congestion point emerged further south of the traffic route, but the point moved up north as the interval size was increased. No collision, congestion, or passage deviation was observed when the interval size was sufficiently large. However, the traffic (vessels/hour) under this “safe” condition in the simulation was smaller than the actual traffic volume. We conclude that the cluster condition before entering the passage has a large impact on the later navigation characteristics in the passage.

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、その情報による意思決定を行い、エフェクタ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を形成していることになり、船舶運航場を複雑系と捉えることができる。船舶は複雑系

* 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

を構成する要素の一つである。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、群の創発、航路航行特性、群れの合流と離脱特性などについて検討を行い、モデルの改良を加えてきた^{(3)~(10)}。

本研究は、複数の船舶エージェント群を用いて、交通量が多い東京湾の浦賀水道航路や中ノ瀬航路を北航する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、運航場の表現能力について検討を行うものである。

2. シミュレーション

2.1 船舶エージェント

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。センサ機能は、運航環境を情報源として船舶エージェントの意思決定に必要な他船情報、障害物情報、物標情報などを収集する。記憶機能は、航海状態の遷移情報、意思決定能力を規定するための設定パラメータ値、航海計画などを記憶する。意思決定機能は、状況判断機能および船舶群行動モデルから構成される。状況判断機能は、船舶エージェントの航海状態（大洋・沿岸航海中、航路接近中または航路内航行中）を航海計画やセンサ情報をもとに判断する。船舶群行動モデルの基本コンセプトは前報⁽¹⁰⁾と同じであるが、浦賀水道航路のように屈曲した航路の航行が行えるように、改良したモデルを用いる。エフェクタ機能は、意思決定結果に基づいて船舶エージェントを移動させ、環境に対して行動をとる機能である。

本研究では、シミュレーションの時間制御方式に時間駆動型を採用し、シミュレーションの時間間隔 ΔT を $1/60[\text{hour}]$ に設定した。時間駆動型の場合、エフェクタ機能で船舶の操縦性能を表現するには、 ΔT の間に変針動作が完了するように、 ΔT を長く設定する必要がある。 ΔT を長くすると、変針点を大きく通過してから変針動作を行うような状況が発生するので、屈曲した航路を航行することができない。本研究では、屈曲した航路を航行できるように変針の判断サイクルを短くし、エフェクタ機能に前報⁽¹⁰⁾と同様、操縦性能の表現機能を持たせていない。

2.2 シミュレーションモデル

船舶群行動モデルを構成する力は、基本的な群行

Fig. 1 Ship Agent

動を行う力として達成力 f_0 、収縮力 f_1 、膨張力 f_2 および群回避力 f_3 を、障害物を回避する力として障害物回避力 f_4 を、航路航行するための力として縦列力 f_5 および均衡力 f_6 を用いた。合成力ベクトル F は、船舶エージェントが大洋・沿岸を航海中の場合は式(1)、航路に接近中の場合は式(2)、航路内を航行中の場合は式(3)で定義する。合成力 F の x 、 y 成分は式(4)で表す。達成力ベクトル f_0 の x 、 y 成分は、達成力の重み m_0 と設定針路 $Co[\text{rad}]$ から式(5)で与える。その他の六種類の力の x 、 y 成分は、重み m_i とベクトルの大きさ w_i および力の向き θ_i から式(6)で与える。 w_i はシグモイド関数⁽⁷⁾ で、式(7) で定義する。式(7) の a_i と b_i はシグモイド関数を規定する係数で、 $L[\text{nautical mile}]$ は力を及ぼす対象までの距離を表す。 f_0 から f_4 までの力は、前報⁽¹⁰⁾と同様の方法で求める。

本研究で新たに導入した力は、縦列力と均衡力である。縦列力 f_5 は、船舶エージェントが航路に接近する時に働く力で、航路に進入しやすい群れ形状（進行方向に一直線に並んだ状態）にするための力である。 f_5 は、船舶エージェントの位置とコースラインとの距離 L_5 およびコースラインへの向き $\theta_5 = Co \pm \pi/2$ を用いて、式(6)、(7)から求める。均衡力 f_6 は、船舶エージェントが航路内を航行するときに働く力で、航路の境界に近づかないようにする力である。 f_6 は、船舶エージェントの位置と航路の境界線との距離 L_6 と境界線への向き $\theta_6 = Co \pm \pi/2$ を用いて、式(6)、(7)から求める。

合成力ベクトルの向き φ は、北を 0° に時計回りに角度を取ると、 F の x 、 y 成分から式(8)で与える。シミュレーションの時間間隔 ΔT 時間後の船舶エージェントの位置は、式(9)で与えられる。7種類の力の重みやシグモイド関数の係数の値を、式(1)~(7)の添え字 i と対応させて、Table 1 に示す。

群れの帰属認識⁽¹⁰⁾は、意思決定距離⁽⁸⁾内で自船と設定針路が同じ船舶は同一の群れであるという針路ルール⁽¹⁰⁾を用いる。変針は船舶エージェントが記憶している航海計画をもとに、変針目標を正横に見た時に行う。速度調整⁽¹⁰⁾（設定速力からの減速と設定速力までの増速）は、自船の設定針路 $Co \pm 45^\circ$ 以内で距離が 0.3 マイル以内の領域に他船が存在する時に減速動作を行う。減速量は、減速惰力係数⁽¹¹⁾を $150[\text{sec/knot}]$ として求めた。減速を判断する領域に他船が存在しなくなれば、設定速力まで増速動作を行う。シミュレーション時間間隔あたりの増速量は減速量と同じとした。

各船舶エージェントの航海計画は、針路や速力、主要な変針目標などについて運航実務者からヒアリング調査を行って作成した。Fig.2 は大阪、豪州、北米方面からの船舶群が東京湾口で合流した後、浦賀水道航路を北航して、一部の船舶は横浜港へ、残りは中ノ瀬航路を航行して、東京港と千葉港に入港する典型的な航海計画を示したものである。

Fig.2 Navigation Plan

$$F = f_0 + \sum_{i=1}^4 f_i \quad \text{at ocean / coastal} \quad (1)$$

$$= f_0 + \sum_{i=1}^4 f_i + f_5 \quad \text{at approach} \quad (2)$$

$$= f_0 + \sum_{i=1}^3 f_i + f_6 \quad \text{at passage} \quad (3)$$

$$= (F_x, F_y) \quad (4)$$

$$f_0 = (m_0 \cdot \sin(Co), m_0 \cdot \cos(Co)) \quad (5)$$

$$f_i = (m_i \cdot w_i \sin \theta_i, m_i \cdot w_i \cos \theta_i) \quad (i=1 \sim 6) \quad (6)$$

$$w_i = 1 / (1 + \exp(-a_i(L_i - b_i))) \quad (i=1 \sim 6) \quad (7)$$

$$\Psi = \sin^{-1}(F_x / \sqrt{F_x^2 + F_y^2}) \quad (8)$$

$$(x_{i+1}, y_{i+1}) = (x_i + Sp \cdot \sin \Psi \cdot \Delta T, y_i + Sp \cdot \cos \Psi \cdot \Delta T) \quad (9)$$

Table 1 Simulation Parameter

i	FORCE f_i		m	a	b
0	f_0	Goal Attainment	10.0	-	-
1	f_1	Contracting	1.0	10.0	2.0
2	f_2	Expanding	1.0	-10.0	1.0
3	f_3	Cluster Avoidance	5.0	-10.0	3.0
4	f_4	Obstacle Avoidance	200.0	-10.0	4.0
5	f_5	Column	3.0	20.0	0.2
6	f_6	Balance	3.0	-50.0	0.1

三方面の船舶エージェント群の初期形状は、船舶間の間隔が一定で、一列に並んだ形状とした。シミュレーションは、船舶の初期間隔 $\Delta x[\text{nautical mile}]$ を 0.25 から 7.0 まで 0.25 マイルきざみで 28 通りに変化させて行った。また、各方面の船舶群の初期位置は、避航動作を行わなければ、それぞれの船舶群の先頭の船舶が合流点で衝突するように設定した。船舶数は、各方面から 50 隻、全体で 150 隻とした。シミュレーション開始時の船速を 18 ノットに設定し、Fig.2 の「Approach-2」の海域で 18 ノットから 12 ノットに減速し、浦賀水道航路に進入するものとした。

3. シミュレーション結果および考察

船舶数 150 隻、船舶の初期間隔 $\Delta x=3.0$ マイル、意思決定距離(Decision-Making Distance)⁽⁸⁾ $DMD=3.0$ マイルの時のシミュレーション結果の一例を Fig.3 に示す。大阪、豪州および北米方面からの三つの船舶集団が東京湾口で合流し、横浜港、東京港および千葉港に入港する状況を表示したものである。シミュレーション開始から 300 クロック後（実時間で 5 時間後）の船舶位置を示したものである。船舶エージェントによる群れの合流と離脱、変針、衝突回避や障害物回避動作を行いながら北航し、それぞれの港に入港する様子を確認することができた。

三方面からの船舶集団が東京湾口で合流し、全ての船舶が浦賀水道航路および中ノ瀬航路を通過して、

Fig.3 Simulation Result (Hard Copy)

Fig.4 Cluster Width

東京港と千葉港に入港する時の船舶集団の横幅の変化を Fig.4 に示す。縦軸は船舶集団の横幅を、横軸は北を y 軸方向にとった時の距離である。ただし、y 軸の値は便宜的な値である。図には船舶の初期間隔 Δx が 0.25、0.75、1.5、3.0 マイルの場合の例を示している。また、図中に示す「Approach-1」などの範囲は、Fig.2 に示す領域と対応している。

三つの船舶集団が合流する「Approach-1」では、集団の横幅は最大値を示すが、群れを形成する力と縦列力の効果で徐々に減少する。「Approach-2」の領域では、浦賀水道航路に進入できるように、縦列力と障害物回避力の効果により横幅はさらに減少する。浦賀水道航路入口では船舶集団の横幅は航路幅よりも小さく、初期間隔 Δx に値に関係なく航路内に進入することができた。初期間隔 Δx は航路内の船舶数に関連し、一般に Δx が小さいほど船舶数が多い。しかし、「Approach-1」では $\Delta x=0.25$ よりも $\Delta x=0.75$ の横

幅が大きな値を示した。これは、 $\Delta x=0.25$ の場合はシミュレーション開始時から減速が行われ、初期設定の船舶間の距離より長い集団形状となって進む。このため、 $\Delta x=0.75$ よりも航路進入前の船舶間の間隔が大きくなり、合流が容易に行われるので集団の横幅が小さくなっている。

初期間隔が $\Delta x \leq 2.0$ マイルの場合、浦賀水道航路の屈曲部を通過後に航路からの逸脱が発生するが、 $\Delta x \geq 2.25$ マイルであれば、浦賀水道航路および中ノ瀬航路での逸脱は発生しない。しかし、船舶との衝突（船舶間の距離が 100m 以下の時に衝突したと判断）は、Table 2 に示すように、 Δx が小さい場合には航路の入口（Fig.2 の「Approach-1」、「Approach-2」）や航路内で発生する。衝突回数の最大を示す海域は、 Δx の増加と共に北上し、 $\Delta x=1.5$ マイルでは中ノ瀬航路で最大を示した。しかし、 $\Delta x \geq 2.25$ になれば、船舶との衝突、航路からの逸脱も発生しない。

交通量と船舶の初期間隔の関係を Fig.5 に示す。縦軸は 1 時間あたりの通過船舶数を、横軸は船舶の初期間隔である。通過船舶数の計数は、Fig.2 の「Approach-1」の入口、「Approach-2」の入口、浦賀水道航路の入口と出口および中ノ瀬航路出口に計画針路に垂直なゲートラインを設け、1 時間あたりの通過船舶数を求めた。

初期間隔 Δx が小さい場合、航路に進入しようとする船舶数に比べて航路を航行できる船舶数が少ないため、航路接近領域と航路内の交通量が異なる。航路接近領域と航路内の交通量が異なる場合は、渋滞が発生していることになる。

Fig.5 の A の範囲では、初期間隔が短いために、シミュレーション開始時から減速動作が起こり、船舶発生点付近で渋滞が発生する。このため、 $\Delta x=0.25$ よりも $\Delta x=0.5$ の航路接近領域の交通量が多い。 $\Delta x=0.25$ の時のシミュレーション表示例を Fig.6(a) に示す。Fig.5 の A と B の範囲では、航路の手前に渋滞が発生し、船舶間の衝突も発生する。 $\Delta x=0.75$ の時のシミュレーション表示例を Fig.6(b) に示す。Fig.5 の C の範囲では、航路内で渋滞が発生し、船舶間の衝突も発生する。 $\Delta x=1.5$ の時のシミュレーション表示例を Fig.6(c) に示す。Fig.5 の D の範囲では、渋滞は発生しないが、船舶間の衝突が発生する。A～D の範囲

Table 2 Ship Collision and Route Deviation

SECTION	$\Delta x=0.25$		$\Delta x=0.75$		$\Delta x=1.5$		$\Delta x=3.0$	
	Ship	TR	Ship	TR	Ship	TR	Ship	TR
Approach-1	1	-	2	-	0	-	0	-
Approach-2	32971	-	49414	-	0	-	0	-
URAGA-1	295	0	51	0	0	0	0	0
URAGA-2	112	4	10	4	5931	2	0	0
NAKANOSE	5	14	1	9	93115	0	0	0

Ship : Ship Collision

TR : Deviate from Traffic Route

Fig.5 Ship Traffic

Fig.6 Simulation Result

では航路からの逸脱が発生するが、Fig.5 の E の範囲では、船舶間の衝突も航路からの逸脱も発生しない。 $\Delta x=3.0$ の時のシミュレーション表示例を Fig.6(d)に

示す。

初期間隔が小さいと渋滞が発生し、渋滞が発生する海域は、初期間隔が増すにつれて北上する傾向がある。初期間隔が $\Delta x \geq 1.75$ では、渋滞は発生しない。

Fig.5, 6 は意思決定距離 $DMD=3.0$ マイルの結果であるが、 DMD の値を大きくすると、E の範囲が狭くなる傾向がある。すなわち、 DMD の値を大きくすると、安全に航行できる初期間隔は大きくなり、航路を通過できる交通量が少なくなる傾向があった。

平成 6 年の東京湾口船舶航行調査報告書⁽¹²⁾によると、東京湾を北航する船舶の最大交通量の実測値は 35[vessel/hour]程度である。この交通量をシミュレーションで得るには、Fig.5 の C の範囲の初期間隔を設定することになる。しかし、C の範囲では渋滞の発生や船舶との衝突、航路からの逸脱が発生する。一方、初期間隔が 2.25 マイル以上になれば、船舶との衝突、航路からの逸脱、渋滞が発生しないが、浦賀水道航路北航の最大交通量の実測値に比べて交通量が約 10[vessel/hour]少ない。

渋滞の発生は、渋滞が発生する海域近くでの船舶集団の位置関係でなく、船舶集団が合流する時の位置関係が影響していると考えている。すなわち、東京湾口での合流状態がその後の浦賀水道航路や中ノ瀬航路の航行する時の特性に影響を及ぼすことになる。交通量の増加は、船舶エージェントの減速モデルの改良、状況の判断と行動計画機能の改良、エージェント間のコミュニケーション機能の付加などを行い、合流状態を改良することによって可能であると考えている。

4. おわりに

複数の船舶エージェント群を用いて、東京湾を北航し、浦賀水道航路や中ノ瀬航路を通過する交通流の再現を試み、実海域での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について検討を行った。

船舶エージェント群が船舶集団の合流と離脱、変針や衝突回避動作、障害物の回避、屈曲した航路の航行を行いながら北航し、横浜、東京および千葉の港に入港する様子を確認した。船舶の初期間隔を変化させたシミュレーションを行い、群れの横幅、交通量に及ぼす影響、船舶との衝突が発生する海域、航路からの逸脱が発生する海域について議論した。初期間隔が小さいと渋滞が発生し、その渋滞海域は初期間隔が増すにつれて北上する傾向があった。初期間隔が 2.25 マイル以上になれば、船舶との衝突、

航路からの逸脱、渋滞は発生しない。

船舶エージェントに関する今後の課題は、減速モデルの改良、状況判断と行動計画機能の改良、エージェント間のコミュニケーションモデルの検討や船舶の操縦性能を反映したエフェクタ機能の開発があげられる。操縦性能を表現できるエフェクタ機能の導入には、特別のシミュレーション時間制御機構が必要になるだけでなく、時間計算量の増大も考えられ、今後の重要な検討課題と考えている。東京湾の北航と南航の同時シミュレーションなどを行い、多目的で汎用的な利用が可能な、船舶エージェント型のシミュレーションシステムの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", Proc.2004 International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications, pp.313-318, 2004.
- (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) 本田啓之輔：操船通論、pp.54-55、成山堂書店、2001.
- (12) 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.

質疑応答

広野康平 (神戸大学) :

混み合う交通量と円滑になる交通量との差は、現実では東京マーチス(等)による管制の影響ではないか。貴モデルでは全く別のアプローチによる現実現象の写像なので、そこで現れた結果はそのまま逆写像しても現実と乖離する可能性がありそうです。ただし、その乖離が管制の必要性を示していると解釈すれば、管制の要否を評価する方法として使うことはできないでしょうか。

稲石正明 :

船舶エージェントを用いた海上交通流シミュレーションシステムは、多目的で汎用的な利用が可能と考えております。ご指摘のような、管制効果の評価だけでなく航行環境評価、不審船探索、操船訓練などへの応用も可能であると考えております。本研究の船舶エージェントはプロトタイプモデルであり、改良の指針を得るために浦賀水道航路の交通量と比較しました。今後、シミュレーションの目的に適した船舶エージェントの開発も進める予定です。