

輻輳海域シミュレータの マラッカ・シンガポール海峡への適用

酒井 史彦*・長谷川 和彦**・丹羽 量久***・畑 耕治郎****

Marine Traffic Simulation of the Straits of Malacca and Singapore

Fumihiko SAKAI, Kazuhiko HASEGAWA, Kazuhisa NIWA and Kojiro HATA

Abstract

Osaka University has developed "Marine Traffic Simulator" for long years. It reproduce realistic traffic flows according to the statistic data provided, including multiple origins and destinations, arbitrary waypoints, traffic density and ship specifications such as ship type, length, speed and manoeuvring ability. Further and unique feature of the simulator is automatic collision avoidance. Each ship is operated by a computerised captain/pilot, according to international regulation, local regulations and human's experience. In previous researches it was applied for world top congested area such as Tokyo Bay and Osaka Bay successfully. It was also revised for inland waterways and applied for an European river transportation. It has utilised for various safety assessment, influenced by navigational regulations such as lane and/or speed, traffic density, alternative plans, AIS usage etc. In this paper, it is applied at the Straits of Malacca and Singapore, another most congested waterway in the world, because of it's difficulties on its broadness and lack of statistic data. Analysing and synthesising several incomplete information available, the data necessary for the simulation was prepared. Safety assessment of this area was done, using nearmiss and collision indices. Nearmiss points distribute widely in the straits, and collision points concentrate near of Singapore port or crossing points. However, the number of collisions is larger than the real statistics. Future consideration is necessary of improve collision algorithm fitting for more congested area.

Keywords: Marine Traffic Engineering, Marine traffic flow, Simulation, Strait of Malacca, Strait of Singapore

キーワード: 海上交通工学, 海上交通流, シミュレーション, マラッカ海峡, シンガポール海峡

1. はじめに

1.1 研究背景および研究目的

近年、海上交通量の増加、船舶の大型化、高速船の増加に伴い、海上交通の複雑化や輻輳化が進んでいる。そのため、航海士や水先案内人の精神的負担や、船舶の衝突等による海難事故が増加することは容易に考えられる。ひとたび海難事故が発生すれば、船体の喪失や、荷物や燃料の流出により、地球環境

や経済に大きな影響を与えてしまう。より安全で効率的な航行環境を実現するためには、現在の、また今後の交通実態を把握することが重要である。

大阪大学で開発された「輻輳海域シミュレータ」は、大阪湾、東京湾、内陸河川等で海上交通流シミュレーションを行ってきた。本シミュレータを利用するには、詳細な通航船舶の統計データが必要であり、今までは実航行データをもとにした詳細な統計

* 学生会員 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

** 正会員 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

*** 正会員 長崎大学大学教育機能開発センター (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

**** 正会員 大手前大学 eラーニング推進センター (〒662-8552 兵庫県西宮市御茶家所町 6-42)

データを用いて海上交通流シミュレーションを行ってきた。しかし、本研究の対象海域であるマラッカ・シンガポール海峡では、詳細な統計データを得ることができず、収集目的や方法が違う断片的な統計データしか得られなかった。

そこで本研究では、それら統計データを分析し統合することで、本シミュレータの入力データを作成し、本シミュレータをマラッカ・シンガポール海峡に適用した。海上交通流シミュレーションを行い、シミュレーション結果からマラッカ・シンガポール海峡の安全性評価を試みた。

1.2 輻輳海域シミュレータ⁽¹⁾

本シミュレータは任意の海域での船舶の交通流を再現することができるシミュレータである。具体的には、各港湾から様々な航行特性を持つ船舶を発生させ、それらの船舶は定められた航路を自動航行することができ、さらに他船との衝突の危険を感じたら、自動で避航を行うことで交通流を再現している。これにより許容交通密度・船速、あるいは航路管制が提案された場合に本シミュレータを用いることで、それらの安全性評価を行うことができる。

2. マラッカ・シンガポール海峡の通航船舶に関する統計データ

以下に、本シミュレータの入力データを設定するために使用した統計データを示す。

2.1 マラッカ・シンガポール海峡の航路⁽²⁾⁽³⁾

マラッカ・シンガポール海峡では分離通航方式が用いられている。Fig. 1に本海峡の分離通航帯の位置を示す。分離通航帯の長さはおおよそ500kmに及ぶ。本海峡には多数の浅瀬が存在するため、深水深航路が設けられていたり、航路幅が狭い箇所がいくつか存在する。シンガポール海峡の東航路には、航路幅が約600mの深水深航路が存在する。

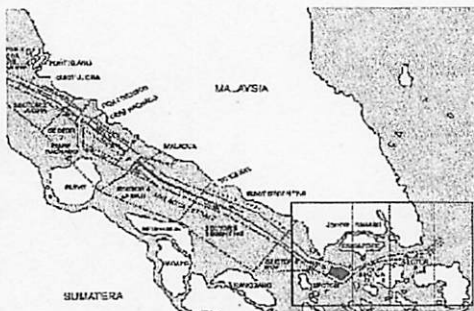


Fig.1 Map of the Straits of Malacca and Singapore⁽³⁾

2.2 マラッカ・シンガポール海峡の交通量

2.2.1 マレーシアのVTISへ通報した船舶⁽⁴⁾

マレーシア海事局統計による2003年の一年間におけるマレーシアのVTISへ通報した船舶数は約6万隻である。またFig. 2はその船種別の割合を示したものである。ここで横軸は船種を示しているが原典にはその定義は明確に示されていない。ここで言う「Tanker」にはVLCC、LNG/LPG船を含み、「Cargo ship」はタンカー、コンテナ船、バルクキャリア、RORO船以外の貨物船を指す。「Others」はその他の船舶を指す。(Fig. 3, Fig. 4も同様)

タンカー(内VLCC5%、LNG/LPG船5%、その他タンカー25%)とコンテナ船、またバルクキャリアとその他貨物船がほぼ同じ割合となっている。参考文献(4)によると、時間帯別の通報船舶数の割合は、0時から8時の8時間で約30%、8時から16時の8時間で約35%、16時から24時の8時間で約35%⁽⁴⁾となっており、時間帯によるばらつきはあまり見られない。また、季節ごとの通報船舶数は2月が若干少ないものの、年間を通して安定している。⁽⁴⁾

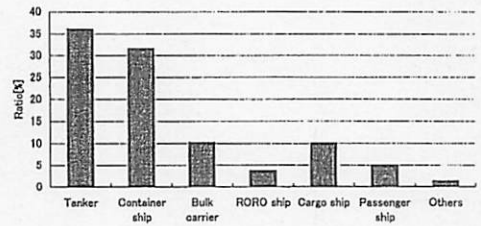


Fig.2 Ratio of ship types reporting to Malaysian VTIS (Original data from reference (4))

2.2.2 シンガポール海峡東部を通航した船舶⁽⁴⁾

次に、2000年に(財)日本海難防止協会シンガポール連絡事務所が行った目視による調査では、シンガポール海峡東部を通過した船舶数(二日間)は約2000隻である。そのときの船種別割合をFig. 3に示す。

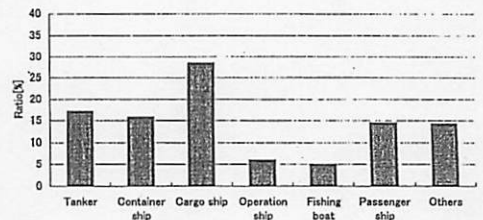


Fig.3 Ratio of ship types passing the East of the Strait of Singapore

(Original data from reference (4))

マレーシアのVTISへ通報した船舶と同様に、マラッカ海峡と隣接するシンガポール海峡の東部を通過する船舶数も年間を通して安定していると考えて、二日間の隻数を、年間合計船舶数に換算して約14万隻と推計した。

マレーシアのVTISへ通報した船舶との違いは、VTISに通報する義務のない小型船等のすべての船舶を含む点である。また、「Cargo ship」にはバルクキャリアとRORO船が含まれている。「Operation ship」は作業船を指す。先ほどと同様、各船種は明確には定義されていない。マレーシアのVTISへ通報した船舶と同様に、タンカーとコンテナ船との割合はほぼ同じである。

2.2.3 シンガポール港へ入港した船舶⁽⁴⁾

シンガポール海事港湾庁による2003年にシンガポール港に入港した船舶数は約14万隻である。Fig.4はそのときの船種別の割合を示したものである。「Cargo ship」にはRORO船が含まれている。先ほどと同様、各船種は明確には定義されていない。フェリー、タグ、バージが全体の過半数を占めている。それら船舶の多くが分離通航帯を横切るように南北に行き来する。⁽⁴⁾タンカー(VLCC、LPG/LNG船含む)、コンテナ船、バルクキャリア、その他貨物船(RORO船含む)の比率はおおよそ4:4:1:1と、マレーシアのVTISへ通報した船舶と類似している。

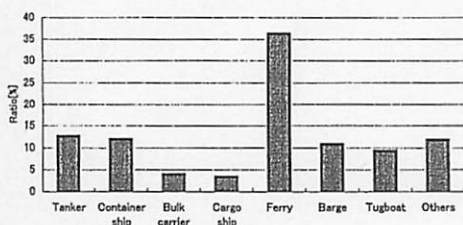


Fig.4 Ratio of ships entering the Singapore Port (Original data from reference (4))

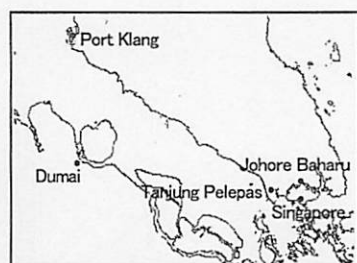


Fig.5 Main ports in the Straits of Malacca and Singapore

2.3 マラッカ・シンガポール海峡の主要港⁽²⁾

Fig.5が示すように、本海峡内には5つの主要港が存在する。

2.3.1 シンガポールの主要港(シンガポール港)

シンガポール海事港湾庁によると、2007年度のシンガポール港入港船舶数は約13万隻である。2003年度の入港船舶数と比べると減少しているが、入港総トン数は約10億トンから約15億トンへと大幅に増加しており、船舶の大型化がうかがえる。

2.3.2 マレーシアの主要港(ポートクラン港、ジョホール・バル港、タンジュン・プラパス港)⁽⁶⁾

シップ・アンド・オーシャン財団調べによると、ポート・クラン港とジョホール・バル港の1999年のマレーシアの主要港へ入港した外航船舶数は、年間5千隻から9千隻である。マレーシアの各港の入港船舶数に比べ、シンガポール港の入港船舶数の方が10倍以上多い。ただし、シンガポール港の入港船舶は全船舶を対象としているが、マレーシアの各港の入港船舶は外航船のみを対象としており、さらにデータも古いため、一概には比較できない。

2.3.3 インドネシアの主要港(ドマイ港)⁽⁶⁾

中部ジャワ中興統計局による2000年のドマイ港貨物取扱量は約400万トンである。ドマイ港に関しては、これ以上の詳しい統計データが得ることができなかったため、他の港との規模を比較することで、年間入港船舶数を推計した。

3. 輻輳海域シミュレータの入力データの設定

2.で述べた統計データをもとに、本シミュレータの入力データを設定した。

3.1 航路の設定

Fig.6に設定した航路を示す。分離通航帯に航路

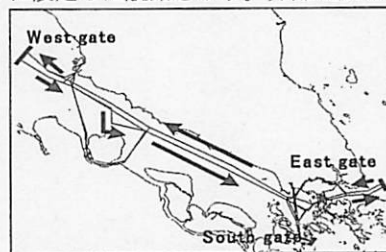


Fig.6 Setting routes in the Straits of Malacca and Singapore

を設定し、さらにシンガポール港付近を南北に航行するフェリー、タグ、バージの航路を設定した。また、マラッカ海峡西端部、シンガポール海峡東端部、シンガポール海峡南端部に海峡を入出するためのゲートを設け、それぞれを West gate, East gate, South gate とした。

3.2 船種とその操縦性能の設定

本海峡を航行する主要な船舶は、VLCC、タンカー、コンテナ船、バルクキャリア、RORO 船、貨物船、フェリー、タグ（とバージ）とした。Table1 に設定した各船種の船長や操縦性能等を示す。

Table1 Ship Type, Length and Maneuverability Indices etc.

Ship type	L	Cb	K'	T'	T V'	T E	K P	T D
VLCC	280	0.83	3.2	4	300	2	1	0.9
Tanker 1	250	0.8	3.2	4	230	2	1.5	0.9
Tanker 2	250	0.8	2.3	3.6	230	2	1	0.9
Container ship 1	220	0.58	1.7	3	200	2	1.5	0.9
Container ship 2	220	0.58	2.2	4	200	2	1.5	0.9
Bulk carrier 1	190	0.78	2.25	2.53	180	2	1.5	0.9
Bulk carrier 2	190	0.78	0.92	0.72	180	2	1.2	1.5
RORO ship	150	0.54	2.3	3	100	2	1.5	0.9
Cargo ship 1	150	0.66	1	1.22	100	2	1.5	0.9
Cargo ship 2	150	0.66	1.29	1.48	100	2	1.5	0.9
Ferry 1	20	0.54	1.69	2.77	20	2	1.5	0.9
Ferry 2	40	0.54	1.25	1.55	40	2	1.5	0.9
Tugboat/Barge	80	0.6	2.07	2.06	50	2	1.5	0.9
Others	100	0.6	2.07	2.06	50	2	1.5	0.9

3.3 OD データの設定

3.3.1 各港と海峡入口の単位時間当たり平均出航数の設定

Table2 は推計による各港と、マラッカ海峡西端部入口と、シンガポール海峡東端部入口と、シンガポール海峡南端部入口からの年間出航数である。一時間当たりの平均出航数を求めた。2.2.1 より、この海域では、時間による出航数にばらつきはないと考え、一時間当たりの平均出航数を求め、各時刻の平均出航数とした。

Table2 Number of Ships sailing from ports and gates

Port name	Number
Singapore	128000
Johore Baharu	5500
Tanjung Pelepas	6500
Port Klang	5300
Dumai	2100
West gate	21100
East gate	44000
South gate	5000

3.3.2 航路別船種配分率

2.2.1 のマレーシアの VTIS へ通報した船舶と、2.

2.2 のシンガポール海峡東部を通航した船舶をもとに、VLCC、その他タンカー、コンテナ船、バルクキャリア、RORO 船、その他貨物船、その他船舶の配分率は 1:5:6:2:1:4:1 とした。ただし、シンガポール港から出港する船舶の航路には、2.2.3 のシンガポール港へ入港した船舶の船種の割合を用いた。

4. シミュレーション結果と考察

以上の入力データをもとに、マラッカ・シンガポール海峡の海上交通シミュレーションを行った。始めに 0 時から 24 時の空回しを行い、シミュレーションの対象時間となる 0 時から 24 時の 24 時間のシミュレーションを行った。さらに、シミュレーション結果からこの海域における安全性評価を試みた。

4.1 船舶の衝突

Fig. 7 に船舶の衝突位置と衝突件数を示す。

Table3 は船種別のシミュレーション中に発生した船舶数、衝突船舶数、衝突した船種の割合 (RatioA)、船種別の発生した船舶のうちの衝突した割合 (RatioB) を示す。

Table3 Collision data

Ship type	Number of generated ships	Number of collision ships	RatioA[%]	RatioB[%]
VLCC	27	7	5.1	25.5
Tanker	150	33	24.3	21.9
Container ship	165	19	14.0	11.5
Bulk carrier	81	19	14.0	23.6
RORO ship	26	4	2.9	15.6
Cargo ship	165	28	21.6	16.9
Ferry	260	15	11.0	5.8
Tugboat/Barge	16	7	5.1	44.8
Others	28	4	2.9	14.3
Total	919	136	100.0	14.8

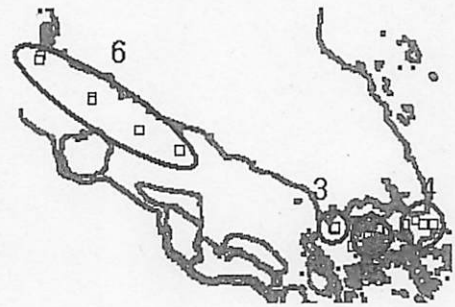


Fig.7 Collision points

4.2 ニアミス

ここでのニアミス定義は、「限界航路距離内を他船

が通過し、かつ衝突危険度が0.7以上」とした。限界航過距離の式は井上の式⁽⁷⁾を用いた。以下に井上の式を示す。

$$FA = (0.0015 \times Lt + 2.076) Lo$$

$$SP = (0.008 \times Lt + 0.667) Lo \quad (1)$$

ここで、FAは限界航過後距離[m]、SPは限界航過左右距離[m]、Loは自船長[m]、Ltは相手船長[m]である。衝突危険度は長谷川の式⁽⁸⁾を用いており、これはTCPAとDCPAを用いてファジィ推論したものである。Fig. 8にニアミス分布図を示す。

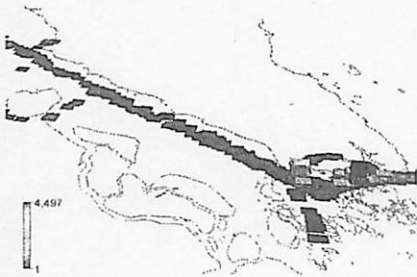


Fig. 8 Distribution map of nearmiss count

4.3 シミュレーション結果の考察

4.3.1 ニアミスに対する考察

Fig. 9は0.25度(15分)単位のメッシュに区分し、各区分海域におけるLNG船の航行隻数1年間(2001年)の密度を示したもの⁽⁹⁾であり、シンガポール港付近で最大となっているのがわかる。LNG船同様、他の船舶もマラッカ・シンガポール海峡を通る際は、分離通航帯を通航する必要があり、その結果、LNG船と似たような分布図になると考えられる。Fig. 8及びFig. 9から判断するのは危険であるが、船舶密度の高い区域でニアミスが多いのは当然と考えられ、シミュレーション結果はそれを表している。

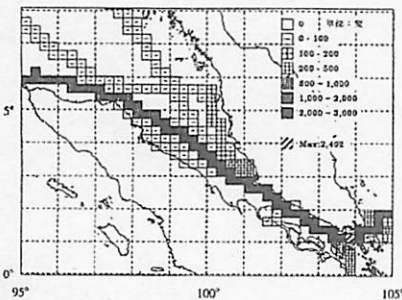


Fig. 9 Distribution map of LNG ship's navigation density⁽⁹⁾

4.3.2 衝突に対する考察

シミュレーション結果では、24時間でおおよそ70件の衝突が発生している。しかし、実際にマラッカ・シンガポール海峡で発生する衝突件数は年間十数件程度であり、シミュレーション結果と大きく異なる。

原因としては、本シミュレータには衝突に対する緊急回避を行うアルゴリズムが組み込まれていないため、ある危険度以上になると衝突と判断することが考えられる。

また、実船の航行中にはそれほど頻繁に緊急回避行動は行っていないであろう。今回は、東京湾、大阪湾において実際の航行データと符合するように、避航アルゴリズムをチューニングしてきたものを用いた。シンガポール港付近では、航路幅が狭い、交差航路がある等の理由により、チューニングが十分でないと考えられる。避航アルゴリズムでは船舶の大きさや速度を考慮しているものの、操縦性能の違いをアルゴリズムには反映させておらず、結果として、タンカー等で避航動作が遅れていることも原因と考えられる。

ニアミスは航路全体に発生しており、いかなる場所も衝突の危険があることを示しているのに対し、衝突はシンガポール港付近以外では、主に航路が交差する場所で発生している。逆に言うと、それ以外の場所ではうまく避航が行われており、シミュレーションが十分妥当ともいえる。

今回の結果で推定したニアミス数、衝突数そのものを安全性評価に用いることは適していないと思われるが、代替航路の提案等の場合には、その相対的な評価として有効であろう。

5. 結論

本研究では、「輻輳海域シミュレータ」を用いて、マラッカ・シンガポール海峡の海上交通流シミュレーションを行った。今までシミュレーションを行ってきた海域との違いは、

- ① シミュレーション範囲が広いこと
- ② 詳細な統計データがないこと

である。①は「輻輳海域シミュレータ」が対応できるかという技術的な問題であったが、問題なくシミュレーションを行うことができた。②に関しては、散在した統計データを分析し、統合することでシミュレーションを行うことができた。

本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

- 1) マラッカ・シンガポール海峡のように広い範囲の海域でも、「輻輳海域シミュレータ」が使用できる。

- 2) 「輻輳海域シミュレータ」の使用にあたり、十分な船舶航行統計データがない場合の適用方法について議論した。
- 3) 複雑な航路体系や高交通密度化における海域の安全評価手法として「輻輳海域シミュレータ」が有効である。
- 4) 今後、高密度の海域における避航のアルゴリズムのチューニングを検討していく必要がある。
- 5) 更に、操縦性能の違いによる避航アルゴリズムのチューニングも検討していく必要がある。

参考文献

- (1) 長谷川和彦、立川功二：輻輳海域シミュレータと海の ITS、計測自動制御学会関西支部シンポジウム、pp. 184-189, 2001
 - (2) 日本財団 図書館：マラッカ・シンガポール海峡白書 2007、
(<http://nippon.zaidan.info/index.html>)
 - (3) 日本財団 図書館：国際的海上保安業務能力向上の推進 事業報告書、2005
(<http://nippon.zaidan.info/index.html>)
 - (4) Nippon Maritime Center：マラッカ・シンガポール海峡の通航船舶数について、
(<http://www.nmc.com.sg/2004.05.01.pdf>)
 - (5) 日本財団 図書館：マレーシア造船業との産業協力に関する調査報告書、2002
 - (6) 独立行政法人 国際協力機構：円借款事業評価報告書、ドマイ港開発事業、2002
(<http://www.jica.go.jp/>)
 - (7) 井上欣三、宇佐美茂、柴田登紀子：制限水域における航過距離と隔離距離に関する操船者意識のモデル化、日本航海学会論文集、第 90 号、pp. 297-305, 1994. 3
 - (8) 長谷川和彦、藤田陽一：船舶自動航行エキスパートの狭水路航行アセスメントへの適用、関西造船協会誌、第 220 号、pp129-133, 1993
 - (9) 日本財団 図書館：危険物の海上輸送時の事故対応策の研究報告書(その 1)、2003
(<http://nippon.zaidan.info/index.html>)
- (1) シミュレーションにより発生した衝突場所及び船の種類等について、実際に発生している衝突事故データ（公表されているもの）との対比はされましたか。
 - (2) 操縦性能の悪いタンカーが衝突事故発生が多いとは言えない、と考える。

酒井史彦：

- (1) マラッカ・シンガポール海峡での年間衝突件数は約 10 件程度であり、シミュレーション結果とは大きく異なります。マラッカ・シンガポール海峡の衝突事故の場所は分離通航帯で発生することが多いようですが、シミュレーションのようにシンガポール港付近に集中しているわけはありませんでした。この原因については本論文の 4.3.2 で述べさせていただきました。
- (2) (講演会では) 言葉足らずの説明で申し訳ありません。他の船種と比べて操縦性が悪いタンカーという意味で申し上げました。本シミュレータは操縦性の良い悪いに関わらず同じ避航操船モデルを取り入れているため、操縦性の悪い船舶のほうが危険にさらされてしまいます。

白井英夫（神戸大学）：

- (1) 限界航過距離で前提条件になっている水域はどのような水域ですか。
- (2) なぜ「衝突」が発生するのでしょうか。どのような避航モデルを使用されているのでしょうか。

酒井史彦：

- (1) 参考文献(7)によると、防波堤内側の港内です。今回の海域では実際の状況は、それよりはやや大きいと思われます。
- (2) 避航モデルについては参考文献(8)を参照してください。シミュレーションでは東京湾等の輻輳海域における平均的な船長の避航判断基準を用いているので、それ以上の交通密度の海域では、本論文のような結果となります。4.3.2 にその考察をしております。

謝辞

本研究は、文部科学省 科学研究費補助金 基盤研究(C) (課題番号:19510172, 研究代表者:丹羽量久)の支援を受けた。

質疑応答

山田孝三郎（元日立造船株式会社）：