航路体系設計手法の開発—II. —交通環境評価への適用—

小林 弘明*・阪口 泰弘*
岡田健一郎**

Design Technique for Fairway System —II. —Application for Assessment of Marine Traffic—

Hiroaki KOBAYASHI, Yasuhiro SAKAGUCHI
and Kenichiro OKADA

Abstract

In the previous report, the new investigation method on the marine traffic condition was proposed. The main structure is that the marine traffic situation is analyzed from view point of the effect of the factors that compose the marine traffic.

In this report, the way of estimation for the real marine traffic condition using the proposed analyzing method is discussed. The contents of estimation are follows;

1. The form of fairway which means ship's track, the traffic density, ship's length and ship's speed are selected as they are main factors of traffic condition.
2. The traffic form is classified into three types, crossing fairway, merging fairway and converging fairway.
3. The real traffic density, the ship's length and speed are examined for every classified fairway type and the evaluation values are calculated using the stock data.

The real traffic condition are estimated using the above standard procedure. We got the satisfied results. Furthermore when we need more exact estimation for the local area, it is possible to improve the estimation accuracy as a result of taking account of the influence affected by crossing point or merging point to the surrounding area.

1. まえがき

前報において、著者らは、海上交通現象の新しい解析方法を提案した。その内容は海上交通現象を、構成する要素の影響度の観点から整理する方法である。個々の要素について、その影響度を系統的に蓄積し、これを対象に従って統合化することによって、任意の海上交通現象を推定する方法である。

この手法を用いることにより、個々の検討対象に対し、従来行われていたシミュレーションを実施する必要がなくなり、蓄積されたデータの統合作業のみで評価が達成できることとなる。莫大なシミュレーション時間から解放されることによって、検討対象の範囲の拡大が可能となり、より合理的な検討が実行できることとなる。

さらに、本手法の利点は検討に要する大幅な時間短縮のみにあるわけではなく、要素と現象との関係が明確になるために、目的に合わせた要素の組み合わせを選択することが可能になる。すなわち、全体の構成結果を推定しつつ要素の組み合わせができることとなり、演繹的設計手法が可能となる。

* 正 会 員 東京商船大学 (〒135 東京都江東区越中島2-1-6)

**学生会員 東京商船大学大学院 (〒135 東京都江東区越中島2-1-6)

本報では、前報で提案した解析手法に基づいて現実の交通現象の評価への利用方法を検討している。検討内容は現象要素の抽出方法、蓄積データの統合による評価結果についてである。検討に当たって、要素の一つである航路の形状については前報の交差航路に引き続いて、合流航路、集中航路について詳しく検討している。また、現実の現象の多様性を考慮し精度向上を計る手法について検討している。

2. 海上交通現象の構成要素の抽出と検討

前報⁽¹⁾で提案した、解析手法の骨子の概略を説明し、続いて、本論の主題である現実交通流の評価への利用について検討する。

提案した手法は、まず、代表的な交通状況（例えば航路の交差部の交通状況）を取り上げ、その状況がいかなる要素によって構成されているかを考える。次に、各構成要素が変化した時に、状況はどのように変化するかを考える。要素が結果に及ぼす影響は未知であり、解析的に求めることが困難であるから、要素変化が結果へ及ぼす影響はシミュレーションにより求めることとなる。このシミュレーションにおいて、要素変化の影響を明確にするために、一つ一つの要素を単独に変化し、それぞれの影響を求める。続いて、二つの要素を同時に変化し、その影響を求め、各要素が単独に変化する時との相違量を抽出する。続いて、三要素を同時に、さらに四要素を同時にと次々に変化することによって、複数の要素が同時に変化する影響をそれぞれ求める。

以上のデータを系統的なシミュレーション作業を実行し、蓄積することによって次式の右辺の各項の関数を得ることになる。

$$\begin{aligned}
 F(\rho, L, \theta, V, \dots) = & F(\rho_0, L_0, \theta_0, V_0, \dots) \\
 & + dF(\rho, L_0, \theta_0, V_0, \dots) + dF(\rho_0, L, \theta_0, V_0, \dots) + \dots \\
 & + d^2F(\rho, L, \theta_0, V_0, \dots) + d^2F(\rho, L_0, \theta, V_0, \dots) + \dots \\
 & \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

ここで、左辺は、交通現象の統合評価値を意味し、右辺各項が、各要素の変化に伴う評価量の変化を示し、上記のシミュレーションをとおして蓄積されたデータに該当する。

右辺第一項は各要素の値として、基準となる状況の交通状況における評価値を示している。右辺の二行目の各項、 dF の項は基準状態から一変数のみが変化したとき、これに対応する評価値の変動量をそれぞれの変数について表現した項である。右辺三行目以降は二変数あるいは三変数のように、複数の変数が同時に変化することによって生ずる評価値の変動量を示している。

以上が、本論で提案し、本報における海上交通の評価で用いる解析手法の骨子である。

2.1 海上交通の構成要素の抽出

シミュレーションの結果が現実の交通現象をどれ程正確に再現しているかは、その利用目的によって、妥当性を判断する必要がある。現在、シミュレーションの利用目的は、海上交通としての危険位置の分布、危険の程度、そして、それに伴う、操船の困難度評価等である。これらの評価のためには、全て正確に現実を再現することの困難さを多少簡略化しても、その傾向をみることに価値がおかれている。このことは、問題解決の基本姿勢として、妥当な対処であり、影響度の小さい要因の省略や評価目的に合わせての合理化として、操縦性能や操船者特性を一定としていることもこれに対応するものと理解される。

さて、本論においても、これと同様な観点から、要求の目的、精度に対応して、重要となる構成要素の抽出を実施する。重要な要素か否かの判断は、目標とする評価量にどれほどの影響度を与えるかによって判断できる。前報において検討したところによれば、海上交通問題として重要な評価量として、船舶間の干渉度合を取り上げた時、この評価量に大きな影響を与える要素として航行密度、航行船の船長、そして交差航路においては交差角度があげられることが判った。また、これらの要素に対し、航行船の船速が評価量に与える影響は小さいことが検証された。

そこで、本論では、まず、主要要素として、航行密度、航行船の船長、そして航路形状を採用して議論を進めることとする。

交差航路におけるこれらの要素が評価量へ与える影響については前報においてくわしく検討している。しかし現実の交通流は交差航路のみで形成されているのではなく、様々な形態を成している。交通流のOD

と主要交差点を抽出すると、交通流中に複数の航路帯を決定することができる。航路帯間の相互の関係を検討した結果、航路形状を交差、合流、集中の三種の形で大別することとした。

そこで、次節においては、前報における交差部の検討と同様な手法により、合流航路、集中航路についてその特性を検討することとする。

なお、分岐航路、綾織り航路等、さらに別な形状として抽出できる航路形状もあるが、これ等については、船舶間の干渉を代表する評価量への寄与度が小さいこと、また、上記三形状の合成形状と理解することにより、対処できる場合も多くあるために、今回の検討では、三形状を対象とすることとした。

2.2 航路形状の分類と評価

前報において、交差航路に対して、航行密度、航行船舶長、航行船舶速、そして航路交差角度を変数として、評価値の変動を検討した。評価値の変動は(1)式の各項に該当する形式で、グラフ化し提示した。

本報においては、前報と同様な評価値、すなわち、航行船舶間の干渉度合を代表する避航対象船隻数を評価値として、合流航路、集中型航路の特性を検討する。

2.2.1 合流航路の特性の関数表現

想定する合流航路の形状を表1に示す。評価値に影響を与える主要要素として、船舶密度、合流角度、航行船舶長、航行船舶速を、取り上げ検討を行った。(1)式の形式に従い、基準状態を次のように設定した。

船舶密度：0.5隻/km²

合流角度：60°

航行船舶長：70m

航行船舶速：10ノット

この状態に対する評価値は0.58を得た。交差航路においては、同様の条件で交差角60°の評価値の値は2.0であり合流は交差に比べ、干渉の度合がかなり減少することが判った。

次に、各変数に対する一次項((1)式における第二項目に相当する各項)の特性を求めた。密度、合流角度に関する一次項を図1、図2に示す。図1において横軸は密度の基準状態からの差を示している。1.5は $\rho=2.0$ 隻/km²を意味する。縦軸は評価値を示し、図中の●印は基準状態を示している。基準状態の評価値0.58に本図の評価値を加えることにより評価値の総計が得られることになる。図2も同様な表現方法を取っている。横軸の合流角度、評価値は、基準状態からの差を示している。

さらに、船長、船速に対する一次項の特性を検討した結果、前報に示した、交差航路とはほぼ同一の特性であったので、掲載は省略する。また、各変数の二次項、三次項については、合流角と密度の組み合わせにおいて、若干の修正量を示すが、他の組み合わせは、一次項に比べ小さいので、二次項は省略することも、可能であると判断した。

2.2.2 集中型航路の特性の関数表現

集中型航路の形状を表1に示す。集中型航路は、同航路において針路方向に沿って航路幅が縮小しているものとし、航路両側線が延長線上で交差する角度を ω (deg)とする。集中型航路では航路幅縮小にともない航行密度が上昇するので特性の表現方法を、次に示す考え方に従って表現することとした。

図1 合流航路の航行密度に関する一次修正項

図2 合流航路の合流角度に関する一次修正

表1 航路形状の分類

	<形状の分類>	<要素の分類>
交差型		ρ :船舶密度 θ :交差角度 L :航行船長 V :航行船速
合流型		ρ :船舶密度 α :合流角度 L :航行船長 V :航行船速
集中型		ρ :船舶密度 ω :集中角度 L :航行船長 d :最狭部からの距離

図3 集中型航路の概要図と評価値の表現方法

航路幅の最小となる地点における航路幅を1000mとし、その延長上は1000m幅の航路へ接続するものとする。図3の上図に概要を示す。接続点から逆方向へは、 ω (deg)の開き角で航路が形成され、その端部より、設定する船舶数が発生するものとした。

航行船は最狭部の幅方向内の一定点へ向かう針路をとることとし、その地点は乱数によりランダムに与えている。発生点より最狭部へ進行するに従い、航行密度は増加し、船舶間の干渉頻度も上昇することになる。同一の集中形状で、同一の船舶数においても、場所により、干渉の程度が変化することになるので集中型航路のデータの整理は次の形式を採用することとした。

航路最狭部から発生点方向へ向けて、距離を設定し、距離方向へ評価値の累積分布曲線を求める(図3下図参照)。これにより、任意点から、最狭部までの範囲内を対象とした評価値が得られる。最狭部から離れた2点間(d_1, d_2)で与えられる海域内における評価値は両地点の累積評価値の差、 $F_s(d_2) - F_s(d_1)$ で求められる。

以上の考え方のもとに、本解析手法の表現法を適用する。先ず基準状態として以下の状態を設定する。

集中角度: 30°

船舶発生数: 230隻/日

航行船長: 70m

航行船速: 10ノット

最狭部からの距離: 3000m

すなわち、 $d=3000$ mにおける値を基準状態に対する累積評価値とする。なお、基準状態の累積評価値は0.4となった。これより、1000mの航路へ接続する地点から、3000m地点までに含まれている海域における評価値は0.4となる。(1)式に該当する変数としては集中角度と最狭部からの距離を取り上げ、一次項としてその特性を図4、図5に示す。また、集中角度と距離との二次項の特性を図6に示す。任意の2点間に含まれる海域の評価値は2点における評価値の差として得ることができる。

なお、船舶の発生数の変化については、前報の示した知見により、発生数を n とすると、 $(n/230)^{1.5}$ をここで求まる評価値に乗ずることにより求めることとした。航行船長についても同様に平均船長を lm とすると $(lm/70)^{1.5}$ を乗じることにより修正すること

図4 集中型航路の距離に関する一次修正項

図5 集中型航路の集中角度に関する一次修正項 図6 集中型航路の距離と集中角度に関する二次修正項
とした。平均船長については後述する。

3. 実海域への基準データの適用法

本評価手法で用いる基準データ群は、現実の海上交通と比較して、基本的な要素により構成されている。当然海上交通に含まれる全ての要素についてのデータ取得を行えば、評価精度の向上は望める。しかし、要素の組み込みによる要素分類項目の増加や項目増加による評価手法自身の複雑化について、新たな問題が生ずる。本論の当初の目的は、海上交通に対する評価作業を可能な限り単純化し、簡便に評価を行うことであった。そのような観点に立ち、本節ではさらに精度の向上を計るに当たっての、要素の付加を検討する。評価値へ与える影響が大きい要素である以下の3項目について検討を行った。

3.1 多船種の混在

航行船の船種を船長を代表量として表現する方法が一般的である。本項では、多船種混在状況を評価に反映する手法を検討する。

前報において、航行密度と航行船長が船舶間の干渉の程度を示す評価量に与える影響は次式でよく近似できると指摘している。

$$F(\rho, L, \theta_0, V_0) = 2.0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1.5} * \left(\frac{l}{l_0} \right)^{1.5} \dots\dots\dots (2)$$

ここに

ρ : 船舶密度(隻/km²)

l : 航行船長(m)

ρ_0 : 基準となる航行密度(隻/km²)

l_0 : 基準となる航行船長(m)

本式の近似の根拠は、船舶間の干渉は海域に対する船舶の占める領域の大きさによって決定すると仮定したものである。本式が、現象を良く近似できている点から、異なる大きさの船が混在する時も総和としての占有面積によって、船舶間干渉が表現できることが予想される。よって、次式により平均船長を求め合計密度を乗じることによって、評価値が得られることになる。

$$(\text{平均船長}) : l_m = \frac{\rho_1 l_1 + \rho_2 l_2}{\rho_1 + \rho_2} \dots\dots\dots (3)$$

ここに

ρ_1 : 船長 l_1 の船の航行密度

ρ_2 : 船長 l_2 の船の航行密度

以上の換算の可能性を検証した結果を図7に示す。70mの船と140mの混合率を3種変化し、さらに合計密度を変化した各状態について、シミュレーションで得られた値と平均船長を用いた推定結果を比較した

ものである。各シンボルは次の混合状態を示している。

白丸(○) : 140m船75%、70m船25% :
平均船長122.5m

黒三角(▲) : 140m船50%、70m船50% :
平均船長105.0m

白三角(△) : 140m船25%、70m船75% :
平均船長87.5m

平均船長を用いて推定したものはシミュレーション値とよく一致していることが確認された。したがって、船長の異なる船舶が混在する時は、各船長の船の密度で重み付けされた、平均船長を用い、密度は合計密度を用いて推定することとした。

3.2 密度差

交差する二航路の航行密度が均等でない場合、船舶間干渉の発生率は密度比に応じて異なった傾向を示すことが考えられる。特に交差部において、権利船側航路と義務船側航路の航行密度が異なる場合、例えば、航路交差部内において権利船側航路が 0.7 (隻/ km^2)と義務船側航路が 0.3 (隻/ km^2)である場合と、その逆である場合とでは、交差部における干渉度が異なると考えられる。このような差が生じる原因は、海上衝突予防法の権利義務の関係によるものであり、権利船側航路の密度が上がるに従い、義務船側が頻繁に避航動作を取るようになるためである。

航行密度の基準データには、二航路の航行密度は同一として求めている、両航路に航行密度の差がある場合は密度差による修正を行うことにより推定精度を向上できる。その修正値を得るために行った、シミュレーション結果を図8に示す。なお、シミュレーションは交差部内航行密度が 1.0 (隻/ km^2)となるように、権利船側航路、義務船側航路の航行密度を設定している。

図中、縦軸は評価値修正率、横軸は権利船側航路と義務船側航路の航行密度比である。また、図中の実線はその評価値修正率を表している。修正方法は、航行密度の基準データより求めた評価値にその修正率を掛けることにより達成できる。

また、図9は任意に設定した航行密度に対する修正済み評価値と実際にシミュレーションを行って得た結果の比較である。図中、縦軸はシミュレーション結果であり、横軸は修正済み評価値である。また、図

図7 平均船長換算の検証結果

図8 航行密度差に関する評価値修正率

図9 密度差修正とシミュレーション結果の比較

中の数字はその設定航行密度を示している。密度差修正の修正精度は、航行密度が0.80程度の範囲までは良いと言えるが、さらに航行密度が上昇すると修正済み評価値がシミュレーション結果より低くなる傾向がみられる。これは、修正率を求めるシミュレーションの設定を交差点内航行密度1.0(隻/km²)としたことより、その範囲内における精度は補償されるが、範囲外のものについては完全には補償されないことになる。航行密度が大きい場合には、さらに航行密度の高い状況における密度差修正率を求めることにより精度の向上を計ることができる。

3.3 針路分布

航路形状のパターン化において、航路の基本針路を航路に沿った方向として求めている。完全に整流がなされた状況では、航路内航行船舶間の干渉は最も少ない。しかし、航路内針路分布が大きくなるにつれ船舶間の干渉は多くなる。本評価手法では、評価を行う際に各航路の基本針路を用いるため、実際に航路内に針路分布が存在している場合、評価値の修正を行う必要がある。図10に示す修正率を基準データにより求めた評価値に掛けることにより推定値の修正ができる。

同図は同航、反航状態における基本針路からの針路分布量による評価値の修正率を表している。図中、縦軸は評価値、横軸は針路分布量であり、実線が同航、破線が反航を表す。

図10 針路分布に関する評価値修正率

4. 実海域への適用例

3節までに述べた評価手法の検証例として、実海域への適用を行った。対象とした海域は明石海峡付近であり、評価に用いた実態観測データは本州四国連絡橋架橋以前のものである⁽²⁾。

図11(a)に12時間の航跡図を示す。また、交通状態に対し、その抽出された航路帯を図11(b)に示す。図中のメッシュは、各区分内の平均的評価値を求めるために設定したものである。

海上交通の分類法の一例として、図中の太線内の海域について説明する。海域内には、東西主航行路と合流部、分岐部が存在する。合流部の交通状況は、その合流角度が26(deg)、航行密度1.0(隻/km²)、平均船長100(m)、平均速力10(kts)となる。以下、本論で述べた推定手順に従い分析し、累積データを用いて、推定を行った。

図12には従来のシミュレーション手法による評価結果(a)、本評価手法による評価結果(b)が示してある。メッシュの大きさは1.0(km²)であり、その濃淡によって評価量を示す。また、従来のシミュレーションで用いている評価指標は避航発生率であるが、本論で採用している評価量と内容的に類似しているため比較、検証が可能であると判断した。双方を比較すると、危険度の高い海域の特定や危険度の全体的な分布がほぼ同様に評価されていることがわかる。一例として、本手法による評価結果では明石海峡航路と

図11(a) 実態調査航跡図(明石海峡)

図11(b) 航路帯抽出図

図12(a) 従来のシミュレーションによる評価結果

図12(b) 提案する推定法による評価結果

南北へ航行するフェリー航路の交差部に該当するメッシュ及び、明石海峡航路の東側出口付近でのメッシュが非常に濃くなっており、危険度が高いことが推定されている。これは、従来のシミュレーションによる評価結果でも同様の評価がなされている。

一方、メッシュ濃淡の傾向を詳細に検討すると、本評価手法では従来のシミュレーションによるものと比較して交差部中央にそのメッシュの濃淡が集中する傾向がみられる。これは、本評価手法が主に交差部中央を評価対象とするためである。

これまでに述べた、航路交差部に対する評価の考え方は航路交差部を含む周辺海域全体を一括評価する方法であった。これに対し、評価の目的がより局所的な状況の評価することになった場合、評価対象区域が交差部内とその外側に区分される場合がある。このように局所的评价を必要とする時には、次に述べる考慮が必要となる。

図13に示す交差航路についてメッシュの大きさによる評価結果の比較を行う。図14(a)、(c)はシミュレーションにより得られた結果であり、(b)、(d)、(e)は本推定法により得られた結果である。図14(a)、(b)に示すように、メッシュの大きさが大きい場合にはほぼ同一の値を取り、十分な推定精度が得られている。図14(c)、(d)は、そのメッシュの大きさをさらに小さくした評価結果の比較である。交差部近傍において双方の評価結果に違いが認められる。これは、船舶交通流が交差する場合、その影響は交差部内に集中するのではなく、交差部手前にも影響を及ぼすこととなるためである。推定は簡略化ために交差の影響を交差部に集中して評価を行っている。そのために、従来のシミュレーション評価結果と異なる傾向が得られる。評価するメッシュの大きさを細かくすることは、より局所的な状況を知る必要があるためであり、その様な場合推定精度の向上の為に交差部がその周辺海域に及ぼす影響を考慮にいれる必要がある。図14(e)はこの影響を考慮した評価結果であり、メッシュを細かく取った場合にも、良好な推定結果を得ることができた。

図13 設定交差部概要図

図14(a) シミュレーション結果(メッシュ:大)

図14(b) 本推定法による推定結果
(メッシュ:大)

図14(c) シミュレーション結果(メッシュ:小)

図14(d) 本推定法による推定結果
(メッシュ:小)

5. まとめ

本研究をとおして、次の結論を得た。

1. 提案した解析手法に基づく海上交通環境の評価手法は、従来の精密なシミュレーションの膨大な計算時間を必要とせず、大変簡便に評価でき、その精度も妥当であることが実海域の評価結果より確認された。
2. 海上交通の評価手法を提案した。その内容は海上交通現象を評価目的に

合わせ海域を分割し、各区分毎に航路形状、航行密度、航行船の船長の要素を抽出し、蓄積データより対応評価量を推定するものである。なお、求められる推定精度に対応して、船種の混在、航路形状の分類、航行密度の差等、に対する修正方法を示した。

3. 評価メッシュの取り方は評価目的により決定されるものである。本評価手法は要求精度に応じて精度を選択することが可能であり、推定法を適時変更することにより妥当な評価結果を得ることができる。

最後に、計算機環境設定及びその使用のために御尽力頂いた東京商船大学石橋篤先生に深く感謝いたします。

図14(e) 本推定法による推定結果
(メッシュ：小)
交差部干渉を考慮したもの

参 考 文 献

- (1) 小林弘明他：海上交通の安全評価に関する研究，日本航海学会論文集，第79号，昭和63年9月。
- (2) 藤井弥平他：海上交通工学，海文堂。
- (3) (社)日本海難防止協会：平成元年度 本州四国連絡橋航行安全調査報告書(航行安全調査その1)。

質 疑 応 答

広野康平(㈱郵船海洋科学)：最終的な評価を得るための要素（交差角と針路分布）について、針路分布がある程度偏ってくると、交差角と同じ扱いになるのではないのでしょうか。交差角と針路分布の違いをお教えください。

岡田健一郎：提案した評価手法では、航路形状抽出の過程で各航行船舶のODの相対的位置関係により基本針路を、航行位置分布により航路幅を求めております。この基本針路からの針路分布がある程度偏っているものは、それ自身一つの航路帯として扱うこととなります。

長岡 栄(電子航法研究所)：評価量の関数形がわからないと、提案されている簡易推定法が使えないように思われますが、関数形はわかっているのでしょうか。通常は関数形が未知だからシミュレーションを行うのだと思いますが、どのようにして推定を行うのかご説明をお願いします。

岡田健一郎：本文にも記載しましたとおり、関数形は未知でありますからシミュレーションにより、関数形を求めることになります。しかし、従来行われてきた、シミュレーションとは観点を異にし、各要素に対する評価値の変動を求めるためのシミュレーションを実施することになります。そのため、一度、シミュレーションにより関数形を知れば、その後はシミュレーションの必要がなくなります。

長澤 明(海上保安大学校)：差分等を算出するための評価値について、関数式等、具体的な内容を教えてください。

岡田健一郎：本論では評価値として、避航対象船隻数を用いており、これは航行船舶間の干渉発生率を表すものであります。その算出方法は、ある海域内における干渉船舶数をその海域内に存在した船舶数で除して求めます。通常、用いられる評価値として、避航発生頻度や操船困難度等があります。これらの評価は基本的に船舶間の干渉度と強い関係があると思われます。ですから、今回の検討結果は、他の評価値に対しても、同等の結果が得られると考えております。