

目的志向型海上交通シミュレーションの開発

鳥取大学工学部 正会員 ○奥山 育英
原子燃料工業株式会社 正会員 永田 泰章
鳥取大学大学院 学生員 近藤 一

1. はじめに

近年、産業の発展にともない輸送貨物の増大、大型船、高速船の就航多量化などで、我が国の港湾とそれに通じる狭水道の内航ならびに外航の船舶交通量が飛躍的に増大している。このため、年を追って航行船舶の輻輳化が著しくなり、操船者の負担も著しく増大し、航路整備計画が迫られている。

航路整備計画、航路、水路の規模、形状の変更、さらに交通流に占める船種、船型の構成比の変化に伴い航行の安全性及び効率性がどの程度変化するかを把握することは重要な問題であり、船舶の航行水域の規模、形状の変更が交通量、安全性に及ぼす影響を明確に捉えることが要求される。

船舶の交通現象は非常に複雑な現象であるため、これを扱う手段も多岐にわたる。実態観測の結果から解析する方式や船舶交通に関する多くの資料の分析によって解明する方法等があるが、最近では目覚ましい電子技術の発展により、船舶交通流を電子計算機でシミュレートして交通現象を検討する方法がよく用いられている。シミュレーションでは、現象の把握による真似の仕方と入力データで、結果はいかようにも変えることができる。また、1つのシミュレーションのみであらゆる面から評価しようとする実際の現象をすべて忠実に真似して数式化しなければならず、無理が生じてくる。そのため実際にシミュレーションをする場合には、計画目的に応じて、忠実に真似する部分と荒い近似ですませる部分をうまく組み合わせてシミュレーションを作成することが大切である。しかし、既存の海上交通シミュレーションの多くは1つの計画目的の専用に設計されている。そのため計画目的によって要求される入力データの質と量、現象の把握による数式化手段等の差異にシミュレーションを対応させるのが困難であり、他の計画目的に用いるにはすぐわない場合があった。

本研究では、シミュレーションモデルをサブモデルに分解し、それぞれモジュールにまとめた海上交通シミュレーションを提案する。入力データの質と量、現象の数式化手段に応じたモジュールを作成しておき、それを適宜選択することにより計画目的や入力データに最適なシミュレーションを作成できる。本研究ではこれを目的志向型海上交通シミュレーションと呼ぶ。

2. 海上交通シミュレーションの展望

海上交通シミュレーションは、海上交通に変化が生じたり、変化を生じさせようといった場合に、その変化を予測するために用いられる。シミュレーションの方法としては船舶を動かすことが基本となるが、その動かし方は大別すると次の3つの型に分類することができる。

①ミクロシミュレーション

各々の船舶の操船性能を決めてあらかじめ与えられた運行判断基準に従って、舵による変針や機関による増減速を行なって、海上交通を忠実にシミュレートするというシミュレーションである。

②マクロシミュレーション

海域をブロックに分け、各ブロックには方向別に通過船舶に応じた通過時間とブロック内に存在可能な船舶隻数（容量）が与えられており、通行船舶はそのブロックを次々に通過していくシミュレーションである。この場合、航路の交差部分に相当するブロックでは容量の制約のほかに、他方向船舶の有無もブロックへの進入条件となる。

③操船シミュレータ

交通流のシミュレーションとは少々異なるが、自船1隻のみを取り扱い、操船の部分をもっと精密にしたものである。

海上交通シミュレーションの発展過程を見ると、まず、マクロシミュレーションから始まり、それでは現象の細部を精密に真似できなくなることからミクロシミュレーションへと移行した。ミクロシミュレーションを実施すると、正確な入力データをすべて同程度の精度で準備する手間と、長時間の演算時間に直面して入力データの画一化とシミュレーションの場を狭くする方向に向かい、その結果再びマクロシミュレーションが見直しされることになった。

過去に発表された主なシミュレーションには、杉崎、木俣のミクロシミュレーション^{11)・21)}、奥山のマクロシミュレーション³¹⁾、長澤のミクロとマクロの中間のシミュレーション⁴¹⁾がある。杉崎のシミュレーションは、操船に関しては野本の式の操縦性係数 K 、 T を用い、航路の決定に関しては微分方程式を解いている。木俣のシミュレーションは、操船に関しては野本の式を用いるが、航跡の決定には直線と円でこれを近似している。長澤のシミュレーションは、運行判断に重点を置いて、判断の結果この方向へこれだけ船舶が進めればよいとなったなら、所要の時間後にはその場所へ船舶が動いているとしたものである。

シミュレーションは、目的に応じて作成されることから、目的を遂げると用済みとなり、再利用されないことも多く、これは模型実験が終ると模型は壊してしまうことが多いのと似ている。しかしシミュレーションの場合、磁気テープ、ディスク等に保管すればかさばらないし、必要なときが来ればいつでも使用できる。海上交通シミュレーションの目的は、海上交通流に関する検討が多いことから、ある程度汎用的に作成しておけば、入力データを変更することにより再利用が可能であるが、目的に対し最適のシミュレーションかどうかは疑問である。

本研究で開発するシミュレーションは、計画目的の変更に影響を受けない船舶の経路を扱う部分をベースとして固定し、影響を受ける部分は、それらの部分をあらかじめモジュール化したシミュレーションを作ろうというものである。これによりモジュールの変更で計画目的に最適なシミュレーションを行なうことが可能となる。すなわち、モジュールの取り替えにより様々な計画目的のシミュレーションをカスタマイズすることができるのである。

3. シミュレーションの設計

3. 1 目的志向型海上交通シミュレーションの概念

海上交通シミュレーションモデルは、

- ・船舶サブモデル

海上交通流の基本的な構成要素である船舶をどのように見ていくかを定める。

- ・場のサブモデル

シミュレーション上で船舶が航行する航路をどのようにとらえるかを決定する。

- ・船舶の行動サブモデル

シミュレーション上での船舶の動きをどのようにして表わすかを決定する。

の3つのサブモデルに分けて考えることができる。

これらのサブモデルは、シミュレーションが実行されているときはモデル間で連絡をとりあっているものの、モデルとしてはそれぞれ独立したものとして考えることができる。

本シミュレーションは上記のそれぞれのサブモデルをプログラムモジュールとしてまとめ、ベースとなる部分に組み込む形式の海上交通シミュレーションである。この形式をとることにより、それぞれのモデルを変更した場合でも、モデル間のインターフェースをあらかじめ決めておけば、新しいモデルが提案された場合にも、そのインターフェースに沿ったモジュールを作成することにより、現在のモデルから新モデルへの

変換を容易に行なうことができるのである。

3. 2 モジュール

本シミュレーションでは以上をふまえ、計画目的や入力データの変化により柔軟に対応できるよう、プログラムを以下のモジュールに分割した。

・経路ネットワーク生成モジュール

本シミュレーションでは船舶経路をネットワークで表現する。本モジュールでは、ノード座標と経路情報をもとに経路ネットワークを生成する。これは場のサブモデルに相当する。

・操船性能モジュール

船舶の経路情報と船舶発生量及びシミュレーション終了時刻をもとにシミュレーション上で発生する船舶データを作成する機能を持ち、船舶サブモデルに相当する。

以上の2つのモジュールは、シミュレーションの実行に必要な入力データを作るモジュールであるので、シミュレーション実行部とは切り放し、入力プログラムとして独立させ、シミュレーション本体を動かす前に入力データを作成しておくことにした。こうすることによりシミュレーション本体の負担が軽くなり、シミュレーション実行時間も短縮される。

・運行判断モジュール

事象（後述する）が起きるごとに各船舶の運行を判断する。これは船舶の行動サブモデルに相当する。

・操船性能モジュール

船の操船性能に従って船を進めるモジュールで、船舶の行動サブモデルに相当する。

・避航方法モジュール

船舶の行動サブモデルに相当し、避航方法の決定を行なう。

これらのモジュールと入力プログラムで作られたデータとの関係を図1に示した。シミュレーションの実行中は、各モジュールは他のモジュールとデータのやりとりを絶えず行なっている。これらのモジュール間を行き来するデータ（モジュールの引数）を適切に決めることは、モジュールの規格化の

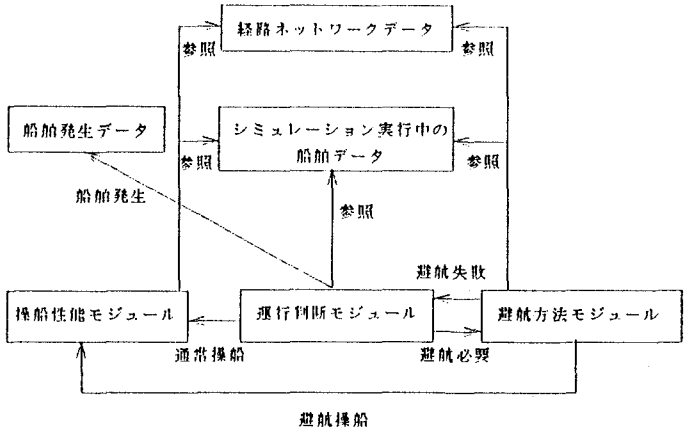


図1 モジュールとデータ間の関係概念図

表1 モジュールの引数

モジュール名	引数リスト
運行判断モジュール	・ 最早事象の発生時刻 ・ シミュレーションの時刻 ・ 最早事象が起こる船舶のシミュレーション上の番号 ・ シミュレーション上にいる船舶の総数 ・ シミュレーションで扱った船舶の総数 ・ 船舶がすべて発生したかを示すフラグ ・ 最早事象が船舶の発生かを示すフラグ ・ 最早事象が吸収ノードへの到着かを示すフラグ
操船性能モジュール	・ 現在いるリンクの始点ノードの座標 ・ 船舶の角度 ・ 船舶の座標 ・ 船舶の回転方向 ・ 船舶の回転半径 ・ 現在いるリンクの角度 ・ 直線操船時に目標となる位置の座標 ・ 操船時間 ・ リンク上に投影した船舶の座標
避航方法モジュール	・ 変針角 ・ 避航の程度を判定する指標 ・ 船舶の角度 ・ 船舶の座標 ・ 船舶の回転方向 ・ 船舶の回転半径 ・ 現在いるリンクの角度 ・ 直線操船時に目標となる位置の座標 ・ 操船時間 ・ リンク上に投影した船舶の座標 ・ 船舶の速度

為に必要である。本研究ではモジュールの引数を表1に示すように定めた。また特に、避航方法、運行判断モジュールには避航方法をすべて試み、それでも満足のいく避航ができないと判断したときには、避航失敗を運行判断基準モジュールに知らせる引数を設けた。運行判断モジュールにこれが伝わると、時間を微小時間戻すことにした。

3.3 シミュレーションの構成

本シミュレーションは、シミュレーションデータを読み込んで加工する入力プログラムと、実際にシミュレーションを行なう実行プログラムの2つのプログラムで構成されている。

船舶は、ネットワーク上を経路ごとに与えられている確率分布によって発生し、当該船舶のタイプによる速力でノードからリンクへ、リンクからノードへと次々に経路上を進んでいく。図2は船舶交通ネットワークの例である。

シミュレーションを実行していく際の時計の進め方は、従来の海上交通マイクロシミュレーションで用いられてきた、 Δt 時間に時計を進めるタイムスライシングメソッド (Time Slicing Method) ではなく、運行判断モジュールによって定義される事象の変化ごとに時計を進めるイベントシーケンシャルメソッド (Event Sequential Method) を用いている。

海上交通マイクロシミュレーションの多くは、タイムスライシングメソッドを用いているが、この方法は Δt の間に何も起こらないときも無駄な計算を続けることにな

り、よほど輻輳しているとき以外は能率が悪い。これに対し、イベントシーケンシャルメソッドは、事象発生時刻を求めるのに複雑な計算を必要とする場合もあるが、事象が起こらない間は計算をしないため、シミュレーション実行時間はタイムスライシングメソッドより短くて済む場合が多い。

事象の定義は運行判断モジュールによって異なる。

実行部の具体的な内容は、各経路毎に次々に発生する船をそのシミュレーションプログラムに組み込まれた運行判断基準モジュールの判断に従い経路上を操船性能モジュールによる操船性能で進ませ、最早事象が船舶の発生ときは船を発生させ、また吸収ノードへ到着するときはその船をシミュレーション上から取り除く。さらに運行判断モジュールが必要と判断したときは避航判断モジュールに従い避航することにした。

3.4 シミュレーションの視覚化

本シミュレーションでは、シミュレーションの途中経過が理解できるように、シミュレーション実施中の過程をグラフィックス化してディスプレイに表示できる機能を設け、静的な式や数値に加えて、視覚による動的な理解を試みた。これは、従来のシミュレーションの多くが、シミュレーションの仮定とフローチャートと結果から構成されており、途中経過の詳細は電子計算機内で行なわれ見ることが不可能であることから比較的ブラックボックス的な色彩を帯び、科学的に幾分不明瞭な点を伴いがちであったことを打開するために行なったものである。この試みはシミュレーションの内容が『専門的すぎる』とか『理解し難い』といった欠点をいくらかでも軽減しようという意図もこめられている。

3.5 シミュレーションの開発環境

本研究ではシミュレーションプログラムをNEC製PC-9801RAを用いて作成した。使用ソフトウ

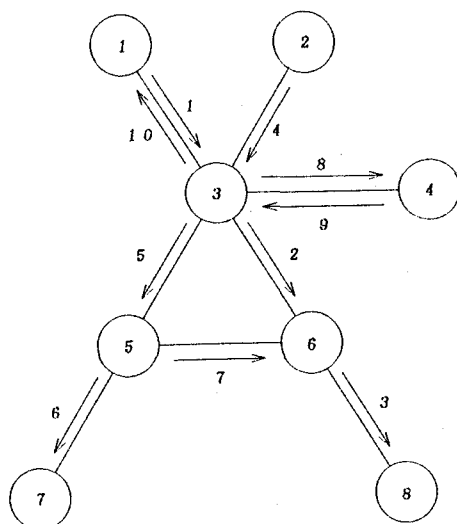


図2 経路ネットワークの例

ェアとしては、シミュレーションのデータ入力プログラムには Microsoft FORTRAN Optimaizing Compiler を、シミュレーション本体にはMicrosoft Quick BASIC を用いた。Quick BASIC を用いた理由としては、以下の点が挙げられる。

- ①BASIC はほとんどのパーソナルコンピュータに用いられているのでプログラムされた内容を理解するのが容易である。
- ②数値データ、文字列データの扱いが容易である。
- ③構造的で見易いプログラムを書くことができる。
- ④サブルーチン間のデータ授受は引数渡しなので、独立性の高いサブルーチンを作成できる。
- ⑤プログラムの修正に便利なインタプリタと実行速度の速いコンパイラを使い分けることができる。
- ⑥グラフィック処理のためのステートメントが用意されており、グラフィックスライブラリを特別に必要としない。

本シミュレーションは操船性能、運行判断、避航方法をシミュレートするサブルーチンパッケージは計画目的に応じて適宜新規作成、変更するので、①③④⑤の特徴はパッケージ製作者にとって好都合である。またシミュレーションの経過を視覚的にとらえるためには、⑥は必要な条件である。

4. 今回試作したモジュール

4. 1 船舶発生モジュール

入力データとして対象船舶の船種、船型については、例えば3タイプある場合には次のように与える。

- ・船舶タイプ1、全長200m、速力10ノット
- ・船舶タイプ2、全長100m、速力12ノット
- ・船舶タイプ3、全長50m、速力8ノット

さらに、各経路ごとに船種・船型に応じた船舶交通量を与える。原はレーダ観測から得られる航跡データを用い、船舶の発生時間間隔については指数分布でモデル化できることを示した。このモジュールでは原のモデル⁵⁾を用い、各経路ごとの船舶の発生の際に発生時間間隔を指数乱数を用いて与えている。当該経路の交通量に等価な平均値の指数乱数を用いれば、実態に近い交通流を模擬することができ、また乱数の平均値を操作すれば交通量の増減による影響を推定することが可能となる。

実際に船舶が経路を航行するときには、操船者は経路の形状、他船との関係、外力との影響など自船をとりまく様々な外界条件を総合的に判断し、与えられた航行環境に応じた適切な操船を行なう。井上はレーダ観測から得られる航跡データに着目し、様々な航行環境のもとで航跡のばらつきの様子は、図3のようなモデルで表わされ、一方通行、行合い航行いずれの場合にも、正規分布 $N(X, \sigma^2)$ で近似できることを示した⁶⁾。このとき、航跡分布の平均値位置の航路中央線からのずれ X は交通形態によって異なり、航路幅 W との関係は、

- ・一方航行航路では $X = 0$
- ・中央線表示のない行合い航路では $X = 0.1W$
- ・中央線表示のある行合い航路では $X = 0.2W$

となる。また個々の航跡のばらつきの程度を示す標準偏差 σ は、次の重回帰式で表わされる。

$$\sigma = -9.485 + 0.106W + 3.329Q, \quad \text{重相関係数 } R = 0.992$$

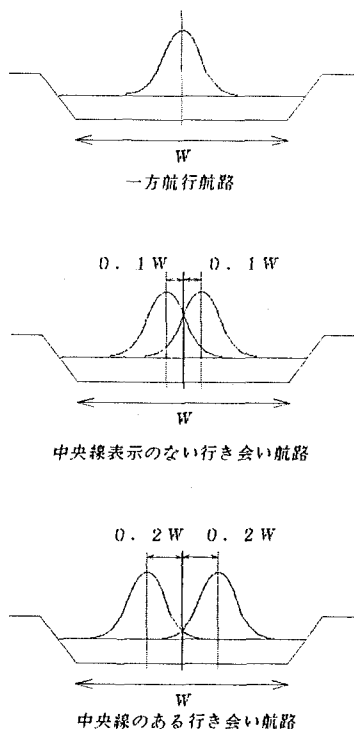


図3 航跡分布モデル

ここに、 σ は標準偏差 (m)、 W は経路幅 (m)、 Q は時間あたりの交通量 (隻/時) である。

本モジュールでは、このモデルを用い、船舶発生時に経路中央線からの偏差を正規乱数を用いて与えている。また、経路幅は変数として可変にし、経路幅は中央線のない行合い経路としている。当然ながら、これらも可変であって任意の分布に対応できる。

4. 2 操船性能モジュール

船舶の運動を直線操船と直線-円旋回と一定速度で旋回する変針操船で近似した。操船は現在いるリンクに沿う方向に、当該船のタイプによる速力と回転半径で行なわれる。しかし避航の場合はその限りでない。図4に船舶運動の概念図を示す。

4. 3 運行判断モジュール

船舶の運行過程においては、しばしばこれからどのように操船すればいいかを判断しなければならない場面が生じる。実際の操船では操船者がまわりの状況をもとにして判断するわけであるが、今回作成したモジュールでは事象の変化ごとに判断し次の行動を決定する。ここでいう事象とは、

- ・ 船舶の発生、消滅
- ・ 交差ノードへの到着
- ・ 避航操船の開始、終了

のことである。

船舶の発生が事象のときは、操船性能モジュールによって定まる操船性能で航行したときに次の交差ノードあるいは吸収ノードへ到着する時間を求め、それを次の事象の発生時刻とする。

船舶の消滅が事象のときは、その船舶をシミュレーションから取り除く。

交差ノードへの到着が事象のときは、その次のリンクへ沿うように、操船性能モジュールによって定まる操船性能で航行し、船舶の進行角が次のリンク角と同じになる時刻を次の事象の発生時刻とする。

しかし、これだけでは他の船舶との衝突を考慮していないので、船舶どおしが衝突することがあり得る。そこで、最早事象が起こって時刻が更新されるごとに、他の船舶との衝突危険を評価し、それ以上そのまま進めは危険という時刻を求め、その時刻も事象の発生時刻とし、その時刻になってもそのまま進むのは危険であると判定されたときは避航方法モジュールによって定まる避航方法で避航することにした。

船舶における衝突回避とは、船舶が避航対象物と異常接近することを避けるため、航海計画に基づく行動を一時的に変更することである。この避航は、自船舶と目標との間に衝突の可能性があるときには必要となり、避航行動の結果、衝突の可能性は低くならなければならない。

通常の視程における船舶間の見合い関係は、相手船を視認することから始まる。その後動静が観察され、衝突もしくは異常に接近すると判断されれば必要な避航措置が講じられる。船舶の衝突は自船と避航対象物とが安全に航過できる距離的余裕 (安全航過距離) 以下に避航対象物が接近することによって発生する。避航対象物の、自船に接近する運動は、自船と避航対象物の運動が合成された相対運動である。このように、ある避航対象物が自船と衝突するためには、避航対象物の相対位置、相対運動、それに安全航過距離が関係している。図5は自船、相手船の運動と衝突

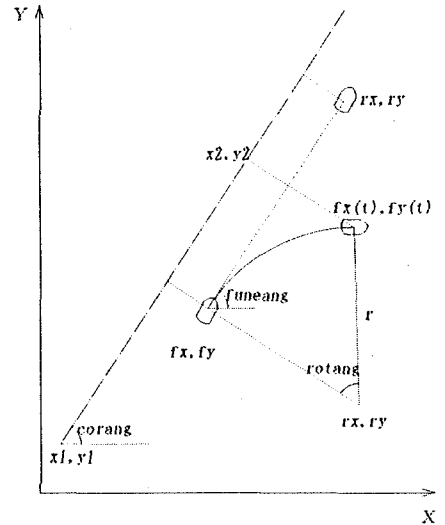


図4 操船性能モジュールの概念図

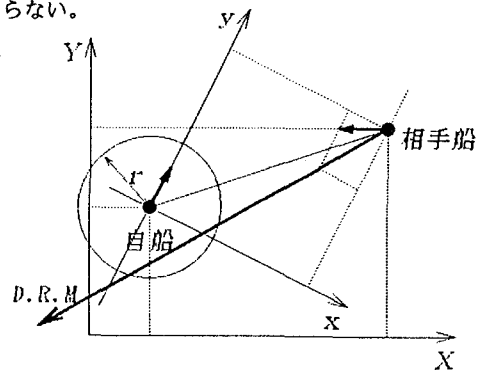


図5 衝突判定の概念図

判定との関係を表わしている。図において、 XY 軸は絶対座標軸を、 xy 軸は相対座標軸を、 r は自船の安全航過距離を、 D 、 R 、 M は相対運動のベクトルの方向を表わしている。図の場合、 D 、 R 、 M が自船の安全航過距離の円を横切っているので衝突の可能性があると判断する。

衝突危険評価が正しく行なわれ、それに基づいて避航措置が行なわれていれば、ほとんどの人的原因による衝突は回避できるはずである。しかし現状において完全な衝突危険評価ができるといえば、種々の問題があり不可能である。その原因は避航は衝突が起こる前に衝突の可能性を予測し、その予測に基づいて行動することにある。すなわち衝突危険を評価するために使われる情報は完全情報ではなく不完全情報であり、そのため将来を完全に予測できないのである。

衝突には前述のように避航対象物との安全航過距離、避航対象物の相対位置と相対運動が関係している。避航対象物と自船との距離が安全航過距離より小さくなると、衝突の危険が近い将来に存在するか否かを相対運動ベクトルと自船の周囲に設定された『ある領域』との交差の有無によって判定する。この領域は、衝突の危険をなくすために他船舶の侵入を認めない排他的な領域であって、一般に避航領域と呼ばれている。避航領域に関する解析結果をとりまとめていえば、自船舶の船舶長を L としたとき、前方に数 L ～十数 L 、後方に $3L$ ～数 L 、左右に $3L$ ～ $4L$ の範囲とされており、形状については楕円とするものが多い。このモジュールでは避航領域を半径が安全航過距離の円とした。

このモジュールでは、こうした情報が正確に求められたときに現在行なわれている衝突危険評価方法⁷⁾を用いた。これは避航対象物が現在の位置から、観測あるいは予定された相対運動で進むとしたとき、自船に最も接近する距離 (Distance of Closest Point of Approach : DCPA) とその時間 (Time to Closest Point of Approach : TCPA) を用いて衝突の危険を評価する方法である。図6において、自船から点 α までの距離がDCPAであり、避航対象船が点 α に到着するまでの時間がTCPAである。評価方法は以下のとおりである。

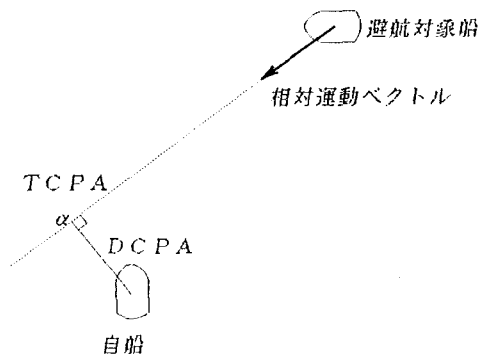


図6 最接近距離と最接近時間

- ①目標と自船の運動から相対運動を求める。
- ②現在の目標値から目標がその相対運動で進むとした場合の、DCPAとTCPAを予測する。
- ③DCPAおよびTCPAが小さいほど衝突の危険が高いと評価する。

4. 4 避航方法モジュール

避航とは、衝突発生の可能性をあらかじめ知り、もし衝突の可能性が高いときには航行の効率面を犠牲にして、衝突の可能性を減ずるよう行動することである。すなわち衝突に関係している要素のうちの相対運動を、自船の行動を変化させることによって変化させ、結果として目標との最接近距離を安全航過距離以上とすることである。

ここで行なわれる自船の行動変化には、進路の変化と速力の変化があり、大きな変化が短時間でなえる船舶ほど避航行動の種類を多く持っていることになる。また行動の種類が少なく、また不十分な行動変化であると、安全に航過できる行動が存在しないということである。

また避航動作は安全に航過できる複数の行動の中から、行動変化に伴う損失や航海条件、それに法規や慣習を考慮

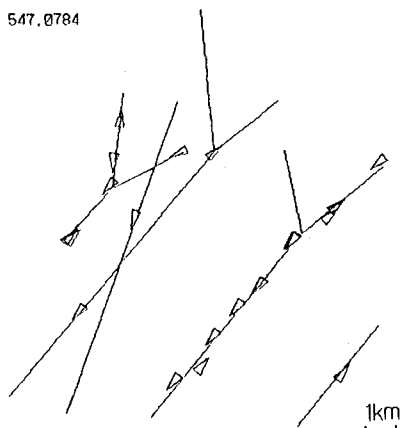


図7 試作したモジュールによるシミュレーション例

して決定される。

本モジュールでは、避航の必要があっても今までどおりの運行をする指示を出すようにした。この指示の出された回数を数えると輻輳度を示す指標となる。

4. 5 試作したモジュールを用いた適用

これらの試作したモジュールを用いて東京湾中央海域でのタンカーの航行をシミュレートした例を図7に示す。船舶は進行方向が分かるよう縦方向4倍で表示している。

5. おわりに

本研究では、船舶の発生とその経路を与える部分をベースとし、操船性能、運行判断、避航方法をシミュレートする部分をモジュールとして付け加える形式の海上交通シミュレーションを提案し開発した。これを用いることにより、計画目的に応じて異なってくる入力データの質や量、現象の数式化手段等の差異にシミュレーションを容易に対応することができるようになった。

実際の現象を忠実に表現しようとして入力データを多く取り、現象の数式化手段を複雑にすればするほどシミュレーションの仮定は少なくなるが、シミュレーションの目的によっては、あまり関係のない事柄も含まれているであろう。このような部分に力を注ぐのはある意味で労力の無駄遣いともいえる。入力データの収集には手間がかかり、計算時間も無限にはないからである。

様々なモジュールを作成し、それを適宜選択することにより最小限のデータ、計算量と労力で適切なシミュレーション結果を得ることができると考えられる。

実際、運行判断、避航方法の判断部分は、操船者の思考（避航の場合は避航対象船の操船者も含まれる）が関与してくるため、シミュレーション作成者により数式化手段が異なり、現在でもよりよい考え方が模索されている状況である。新しい現象の表現方法にもモジュールの部分のみを新しく作ることによりその考え方に対応したシミュレーションが容易に作成できるのである。

本シミュレーションで用いた入力データの船舶タイプごとの経路や航行速力の決定は実態観測結果なくしては絶対に不可能である。我が国の海上交通工学で著しく発展した海上交通実態調査のおかげで海上交通シミュレーションが可能になったことを忘れてはならない。

今後の課題として、入力データや数式化の考え方によって異なる様々なシミュレーションを作成していくことが重要であり、モジュールが揃ってくればこのシミュレーションの有用性もますます高まってくるであろう。

参考文献

- 1) 杉崎昭生：ミクロの海上交通流シミュレーション、航海，第80号，pp.14~19,1984.
- 2) 木俣昇・石崎肇士：シミュレーションによる航路計画の研究，土木学会論文報告集，第194号，pp.113~126,1971.
- 3) 奥山育英：ネットワークシミュレーション，航海，第80号，pp.20~27,1984.
- 4) 長澤明：避航を考慮した海上交通シミュレーション，航海，第80号，pp.28~34,1984.
- 5) 原潔：船舶交通の統計的特性-I，日本航海学会誌，第35号，pp.77~83,1966.
- 6) 井上欣三：直線航路における航跡分布のモデル化と航路分離に関する一考察，日本航海学会論文集，第58号，pp.103~115,1977.
- 7) 今津隼馬：衝突危険の評価について，航海，第35号，pp.55~62,1984.