

船の自動航行と海上交通管理のための  
シミュレーションシステムについて  
(その3)ー海上交通流のシミュレーションー

不破 健\*、桐谷伸夫\*\*、奥住恵子\*\*、  
沼野正義\*\*\*、金湖富士夫\*\*、田中邦彦\*\*  
福戸淳司\*\*、染谷 実\*\*

**Simulation of Automatic Ship Navigation  
and Vessel Traffics  
(3rd Report : Hierarchical Structure of  
Simulation System and Marine Traffic  
Simulation)**

By

Takeshi FUWA, Nobuo KIRIYA, Keiko OKUZUMI,  
Masayoshi NUMANO, Fujio KANEKO, Kunihiko  
TANAKA, Junji FUKUTO and Minoru SOMEYA

**Abstract**

For the investigation of VTS and ship navigation in future, a new style of simulation system is proposed. It has a hierarchical structure and it is consisted of macroscopic network model for marine traffics and microscopic ship operation model. By this system it enables to take the effects of precise ship behavior as well as traffic control into the simulation for marine traffics in a large sea area. Simulation by means of the prototype system is performed for Tokyo Bay.

1. はじめに

高信頼度知能化船の開発プロジェクトと関連した研究報告として(その1)ではシミュレーションシステムの構成と設計概念について述べ、(その2)では知識ベースシステムの応用として航行シミュレーションの例を示した。[8、9]ここでは(その3)として海上交通流のシミュレーションについて述べる。この交通流は知能化船の航行を検討する場合には航行環境を規定するものとして重要である。交通流発生を念頭にお

いて設計したシミュレーションシステムの特徴やシミュレーションモデルの詳細はすでに発表しているので[4、5]、それらは概要のみ記述した。また、本論文は文献[7]の邦訳に加筆したものである。

日本近海はヨーロッパや北アメリカとならぶ海上交通の輻輳域である。海は海運のみならず、漁業、マリッジャー、ときには地下資源の鉱区としても重要な領域であり、海域や海岸部の安全はそれ自身が重要であるだけでなく国家経済の安全保障とも強い関連をもっている。現在、そのような交通錯綜域の安全は、海域に設置された種々の航行支援装置とともに専門知識に裏づけられた操船者の熟練した技量と経験にもとづく能力により維持されているといっても過言ではない。船舶交通管理システム(VTS)の設置は、これらの支援装置の中で最も有効なものであり、その重要性は

\* 推進性能部

\*\* システム技術部

\*\*\* 機関動力部

原稿受付：平成2年2月13日

年々増大している。しかしながらVTSの設置には莫大な費用が必要となる。それ故に交通管理システムの効率化は重要な問題であり、費用便益の解析等により常に追求されている。[1]

船の航行や交通管理方式の具体的な評価のためにはシミュレーションはほとんど唯一の、また最も有効な手法である。海上交通流の解析のためにはネットワークシミュレーションが有効であり、このシミュレーションは過去にも数多くの実際のプロジェクト計画、港湾設計、あるいは交通管理方式や交通法規の評価に応用されてきた。[2]

将来における次世代VTSの要件としては以下の2点があげられる。[3]第一にVTSにカバーされる領域の大規模化とそれによるシステムの系統的な運用である。第2点としてはサービスレベルの向上である。すなわち、現在、日本のVTSは大型船に対し弱い規制を行うとともに必要に応じて操船に関する指導相談等の情報提供サービスを行っている。次世代の交通管理システムは海域の安全で有効な利用をはかるだけでなく、各船に最適な操船法を指示する。また当然のことながら将来システムではそれらの信頼性と精度はさらに厳しく要求される。さらには直接陸上から操船を行うことが考えられる。このような局面を想定し検討するためには、船およびシステムの微視的な挙動も取り扱う必要がある。従来のネットワークシミュレーションの枠組みではこのような微視的な視点に欠けるところがあり不十分で、新しい方法論が強く求められている。ここで提案した階層的なシミュレーションシステムはマイクロとマクロのシミュレーション手法の両立と統合を可能ならしめた。従って、それは、次世代VTSの検討のための有力なツールとなる。

## 2. シミュレーションシステムの構成と特徴

シミュレーションシステムは様々な特徴をもつ複数の異なった種類のコンピュータからなるローカルエリアネットワーク上に、マルチプロセス方式のシステムとして設計・構築されている。[4] Fig. 1にその構成概念図を示す。このシステムには、4階層のプロセス群があり、それぞれはレベルごとに異なった時間間隔でスケジューラにより起動され管理される。第0レベルのプロセスは画像表示やコンピュータ間のデータ通信に用いられる。第1から第3のレベルまでのプロセスはシミュレーションモデルに用いられている。たとえば船の運動は第1レベルであり、航行判断は、第

2レベル、ネットワークシミュレーションは第3レベルとしている。各プロセスはコモンデータ領域上の共有データテーブルのデータを通して連携している。そして前述のスケジューラと後で説明する動的シミュレーション管理プロセスにより起動が管理されている。また、GPSS-fortranのプログラムや知識ベースシステムは非同期のプロセスとして稼働する。

Fig. 2 に示したように、船舶の移動を規定する方法としては2通りある。まず、第1にはマイクロモデルによるもので、操船を模擬するモデルである。もう1つの方法はネットワークシミュレーションのアルゴリズムに従って動く交通流の構成要素である船の運動として求める方法である。シミュレーションに用いるコンピュータの性能、すなわちCPUの能力と記憶容量は、多数の船の運動をマイクロモデルにより精密に計算する場合の制約条件となり、実際問題として常にこの手法を用いる訳にはいかない。

Fig. 3 には海上交通のシミュレーションを行うときの流れ図を示す。[5]マイクロシミュレーションとマクロシミュレーションがスケジューラの管理の下で異なった時間間隔で並行的に実行される。そして動的シミュレーション管理プロセスの機能によりそれぞれの結果をシミュレーションの状況に応じて適切に組み合わせ切り換えることにより、最終的な結果が得られる。海上交通流を扱うマクロシミュレーションは第3レベルのプロセスであり、CPUに過度の負荷を与えることができず、海域のすべての船の動きを十分にカバーすることができる。マクロシミュレーションの結果はGPSSにおけるファシリティでの「待ち時間」として計算されるので、それを船速の調整量に換算し「指令船速」が得られる。すなわち、マクロシミュレーションの計算結果は、それぞれの船に対する「指令船速」としてマイクロシミュレーションに反映される。一方、マイクロシミュレーションの結果は、船の位置と速度としてマクロシミュレーションに取り入れられる。例えば、遭遇船を避航した結果生じた時間遅れおよび偏位は、交通管制や大局的特性を表現しているネットワークシミュレーションにも反映される。このようにマイクロシミュレーションとマクロシミュレーションとを有機的に結合し、それぞれの長所を活用することができる。

マルチプロセス形式のシミュレーションシステムにおける階層的な構造および、動的シミュレーション管理プロセスの機能により、上記のマイクロおよびマクロシミュレーションの融合が必要に応じて自動的に行わ

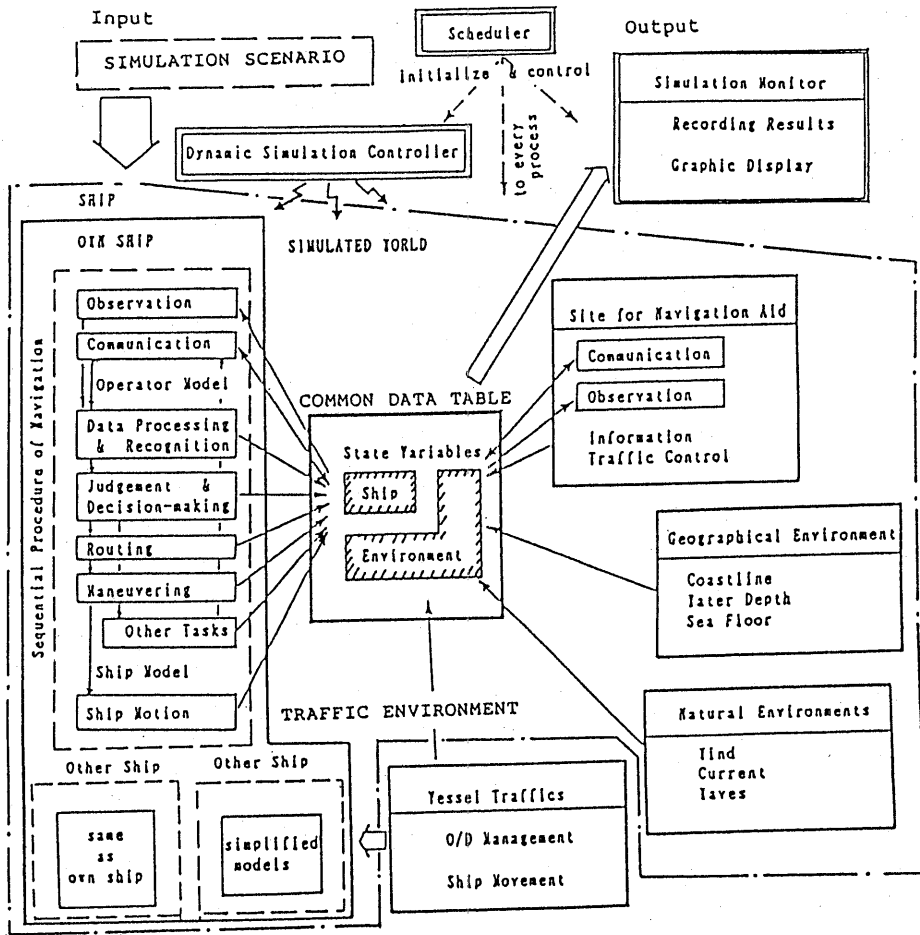


Fig.1 シミュレーション・システムの概念図

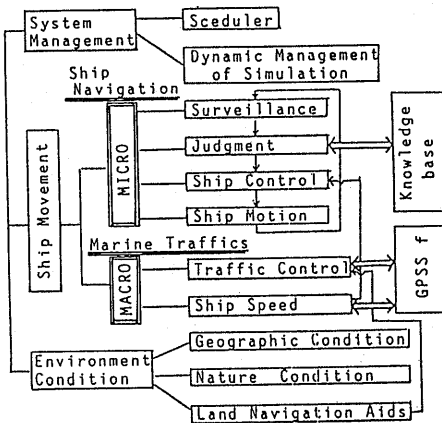


Fig.2 マクロおよびマイクロシミュレーションの関係

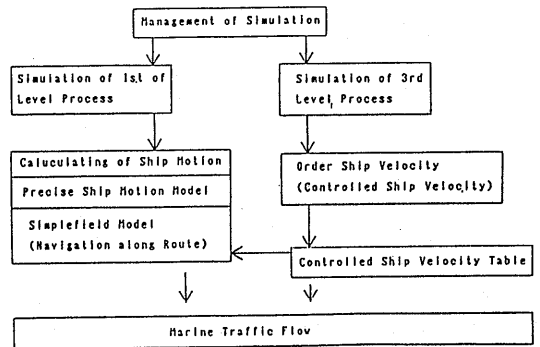


Fig.3 海上交通シミュレーションの流れ図

れる。たとえば、特定の船とその近傍の船に注目したシミュレーションや、航路交叉部分など特定の海域を航行する船の挙動に注目したシミュレーションは、シミュレーションシナリオのパラメータとして動的シミュレーション管理プロセスにそのような指示を与えることにより、全海域のシミュレーションの中で効率的に実行される。この指定された船は他の大多数の船に比べると制御、航行判断、船体運動についても精密なモデルにより短い時間間隔で計算されミクロ的にも有意な運動が得られる。

### 3. シミュレーションモデルの概説

**3.1 操船に対するミクロシミュレーション** ミクロシミュレーションにおける船の動きは、(その1)および(その2)で述べたように[8, 9]「操船に関するモデル」で計算される。この操船の過程はFig. 1およびFig. 2に示されている。すなわち、海域の状況をレーダ等で監視し情報を得る、そして他船との衝突の危険度を判断し、必要な場合には適切な避航動作をとり、主機および舵の操作により船の制御を行なう。実際には、混雑した海域の航行は経験を積んだ操船者の専門的知識による判断と技量により、ほぼ以上の手順に従い実現されている。最近発展の目ざましい人工知能や知識工学分野の技法は、この判断機能のモデル化にとっても有用である。本研究でもシミュレーションシステムにおいて非同期に作動する知識ベースシステムが判断プロセスにおいて重要な役割を演じている。

精密な船体運動モデルは船体、舵、プロペラに働く流体力により組み立てられたものである。このモデルを用いて浅水状態や風・潮流等の外乱の影響まで含めた操縦運動を精密に推定することができる。また、動的シミュレーション管理プロセスの機能により、状況とシミュレーションの目的に照して最もふさわしいモデルが、システムの船体運動の計算モデルの中から自動的に選択され利用される。この選択方式はシミュレーションシナリオとしてシステムへ入力される。このようにして各船の運動がシミュレーションの目的に対して有意に十分精密に模擬される。このようなミクロシミュレーションの結果は遭遇状態における避航動作およびその交通流に及ぼす影響を検討する上できわめて重要である。

**3.2 海上交通に対するマクロモデル** 海上交通のマクロ的な特性を検討する場合にはネットワークシミュレーションのモデルが有効である。このネットワークモ

デルは海域全体を扱い比較的長い時間間隔で解かれ各船の平均的な位置と動きを与える。ネットワークモデルは、自動車、鉄道など交通問題一般の有力な検討ツールとして広く用いられ、海上交通でも基本的な手法は同様である。しかし、海上交通に特有な性格と周辺条件も存在する。その一つは航路設定および航行の自由度がきわめて高いことであり、他の特徴はトランザクションである船の運動特性にある。船は一般に大きな慣性を持ち制御力が小さいため応答特性が劣る。また、海上には大小様々な船が混在し、特性の分布がきわめて幅広いところに特徴がある。ここでネットワークシミュレーションに利用したGPSS-fortranは、待ち行列問題によく用いられる汎用プログラム言語であるGPSS (General Purpose Simulation System) をfortranのサブルーチン形式で記述したものであり、容易に拡張・改変して利用することができる[6]。今回の検討においても交通管制アルゴリズムをfortranで記述し、容易にシミュレーション組み込み交通管制の効果を調べることができた。船は交通流におけるトランザクションとしてモデル化され、交通渋滞等による遅れは航路要素であるファシリティにおける「待ち時間」として扱われる。またトランザクションの発生は海域の船のO/Dデータ表により規定される。O/Dデータ表の作成は港湾統計による各港での荷動きにもとづく既存の手法に従い、交通量調査のデータとも比較し修正を加えている。この手法に従えば、21世紀の交通状況など将来のシミュレーションを実行するとき、適当な経済モデルの採用によりそのO/Dデータ表を合理的に作成することができる。

東京湾に適用したGPSSのモデルをFig. 4に示す。航路は交叉部と結合部に分けてモデル化した。東京湾全域は4ヶ所の交叉部、北部海域を表わす大きなストレージおよび結合部を表わすストレージとで構成されている。Fig. 5. 1とFig. 5. 2に交叉部と結合部のモデルの詳細をそれぞれに示す。結合部は容量をもった1つのストレージとしてモデル化され、容量は航路長から定めた。また、ストレージのサービス時間は航路長と平均的な船速から規定される。交叉部はFig. 5. 1に示す6つのファシリティから構成される5叉路を標準的なモデルとしてすべてに使用した。ファシリティには1つのトランザクションの存在しか許容されず、入口のゲート文の記述とともに船の交叉部進入ルールを表現する。この進入ルールは各船の操船者が交叉部における衝突を予防するために行う進入調整の

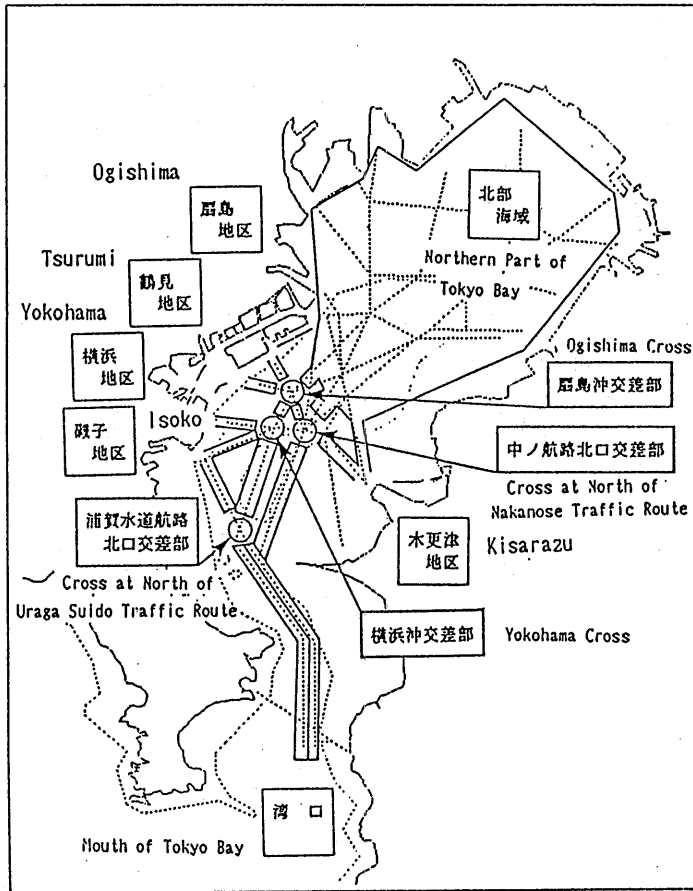


Fig.4 東京湾のGPSSモデル

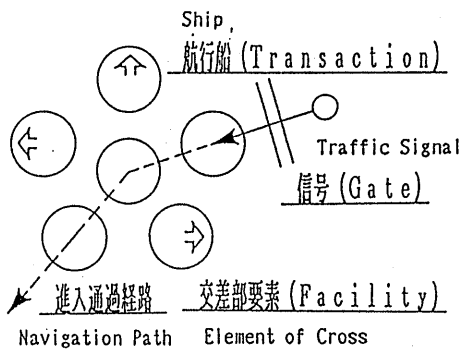


Fig.5.1 交差部の詳細図 (GPSSモデル)

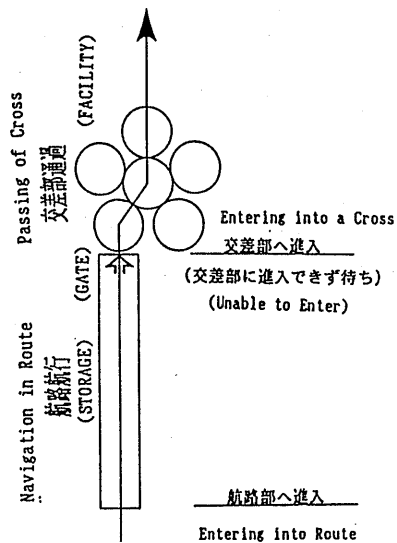


Fig.5.2 航路部および交差部のGPSSモデル

モデルに相当する。また、ゲートはVTSによる交通信号としても利用した。

GPSSのプログラムは非同期プロセスとしてシミュレーションシステムのバックグラウンドで作動する。第3レベルの交通流作成プロセスはGPSSプログラムによる計算の結果を船速に換算してシミュレーションにとり込む役割を行なう。すなわち、Fig. 6に示す簡単なアルゴリズムにより各ファシリティにおける「待ち時間」が船速調整量に変換される。船の運動特性から停船、再発進にはきわめて大きな困難が伴うため、実際の航行においても交差点や航路の混雑が大きいときには十分前方から船速を低下させ混雑海域への進入時間を調整するが、前述のアルゴリズムはこの船速調

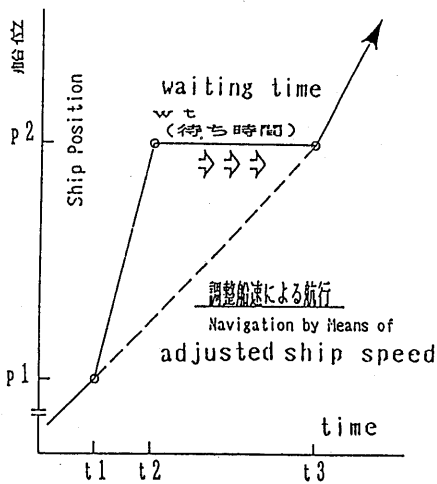


Fig.6 「待ち時間」から「指令船速」を求めるアルゴリズムの説明

整過程のモデルである。調整された船速は操船者の判断結果に基づく操船制御プロセスに対する「指令船速」となるが、この「指令船速」は、VTSによる指令のモデルとしても扱うことができる。

4. シミュレーション例

小船を除いて1日700隻以上の船舶の交通がある東京湾についてシミュレーションが行われた。港、出入口等24のO/D地点で船が発生するモデルによりTable 1に示す1983年の船のデータを用いて行なった。Fig. 7には東京湾の湾口を通航する船舶隻数を示すが、北航、南航とも隻数の分布やピーク等から合理的な結果と考えられる。Fig. 8にはGPSSのシミュレーションによる3ヶ所の交差点における「待ち時間」を示す。「待ち時間」の最大値は扇島付近の交差点における北航船の15分である。これらの結果も既存の研究結果と比べて整合性があるものと考えられる。Photo 1はシミュレーションモニターの画面であり、東京湾全体の航路より交通状況の概要を知ることができる。Fig. 9の航跡図は16時20分から17時20分のシミュレーション結果である。この航跡はFig. 8のマクロシミュレーションとマイクロシミュレーションとも結合したもので変針、避航など船のミクロ的な挙動がみとめられる。以上のように、階層的な構造をもつシミュレーションシステムは良好に機能し、広域の海上交通シミュレーションの中に必要な各船の詳細な挙動を取り込むために非常に有効であることが示された。

Table 1 シミュレーションに用いた船舶データ

ship kind	G. T.	100	500	1000	3000	6000	10000	20000	30000	60000	100000	
		100	500	1000	3000	6000	10000	20000	30000	60000	100000	
general cargo		15.2	385.5	42.5	30.7	29.9	19.9	27.9	9.1	7.3	1.6	0.2
dagerous cargo		106.5	404.3	102.8	38.0	1.8	0.2	1.4	0.9	4.2	1.1	1.4
passenger ship		0.0	8.4	42.0	44.0	3.7	6.8	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0
fishing boat		0.5	1.5	0.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
others		549.8	170.4	15.6	9.8	7.5	1.5	2.8	0.8	1.8	0.4	0.3

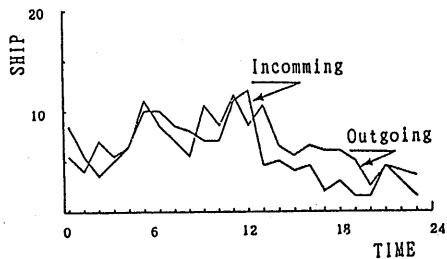


Fig.7 東京湾口のゲートラインを通過する船の分布

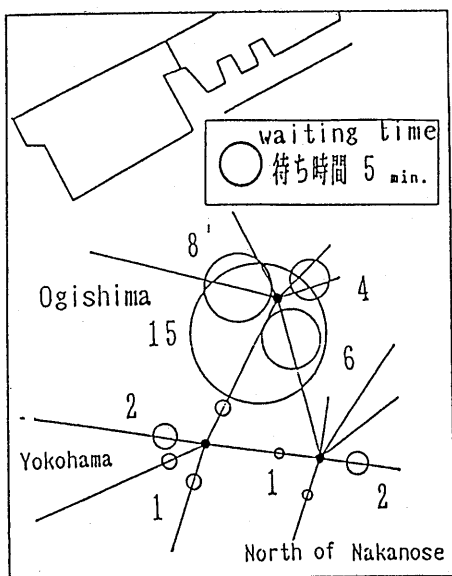


Fig.8 GPSSにより得られた「待ち時間」

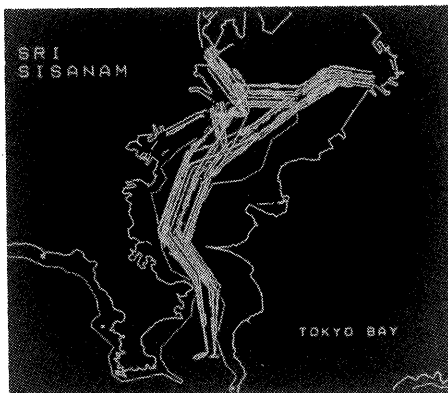


Photo 1 東京湾における航跡図 (シミュレーションモニター)

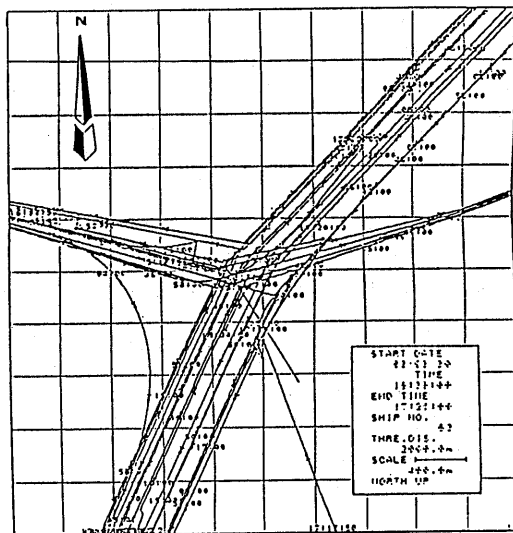


Fig.9 ミクロモデルの航跡図

5. 結 論

以下の結論を得た。

- (1) マルチプロセス方式のシミュレーションシステムに階層的な構造を導入することにより、いわゆるマクロシミュレーションとマイクロシミュレーションを融合した海上交通流の検討が可能となった。
- (2) このようなシステムにより、遭遇状況における避航動作など船の詳細な挙動やVTSによる交通管制の効率を海域全体について考察することができる。
- (3) プロトタイプとして構築したシミュレーションシステムによる実時間シミュレーションにより、このようなシステムが十分に作動し良好な結果を与えることが確認された。また今後の改良点に関する情報も得ることができた。

参考文献

- 1) Fujii, Y., Yamanouchi, H., Matui, T. : Survey on vessel traffic management systems and brief introduction to marine traffic studies, Elec. Navig. Res. Inst. Pap., No. 45., (1984).
- 2) 小山健夫, 荒井 誠: 東京湾航路体系のシミュレーションによる評価について, 日本造船学会論文集, 第140号, (1976)

- 3) Hara, K. : Progress of VTS and its studies in Japan, Proc. VTS-88 Symp., (1988).
- 4) Fuwa, T., Ono, T., Nishioka, T. : Evaluation simulator for automatic ship navigation system, Proc. 8th Ship Cont. Sys, Symp., Vol 3, 192-218., (1987).
- 5) 桐谷伸夫 : 海上交通シミュレーションによる船舶交通流の検討、日本航海学会春季講演会、(1989)
- 6) Schmidt, B. : GPSS-fortran, John Wiley & Sons., (1980).
- 7) Fuwa, T., Kiriya, N. : A HIERACHICAL STRUCTURE OF SIMULATION SYSTEM FOR SHIP NAVIGATION AND MARINE TRAFFICS, Proceeding of Beijing International Conference on System Simulation and Scientific Computing
- 8) Fuwa, T., Numano, M. and others : SIMULATION OF AUTOMATIC SHIP NAVIGATION AND VESSEL TRAFFICS (1st Report : Design of Simulation System), PAPERS OF SHIP RESEARCH INSTITUTE Vol.24 No. 4 (船舶技術研究所報 24 卷 4 号) (1989), 345-362.
- 9) Fuwa, T., Numano, M. and others : SIMULATION OF AUTOMATIC SHIP NAVIGATION AND VESSEL TRAFFICS (2nd Report : A Knowledge-based System Applied to an Automatic Ship Navigation), PAPERS OF SHIP RESEARCH INSTITUTE Vol. 27 No. 2 (船舶技術研究所報告 第 27 卷 2 号) (1990), 127-153.