

第4章 操船シミュレータと その安全性評価への利用

小瀬 邦治*・長谷川 和彦**

目 次

4.1 まえがき.....	89	4.4 操船シミュレータ利用の現状.....	100
4.2 操船シミュレータの歴史と現状.....	90	4.4.1 船員の訓練のための利用.....	100
4.2.1 操船シミュレータ.....	90	4.4.2 港湾、水路の設計及び 評価のための利用.....	102
4.2.2 操船シミュレータの歴史と 現状.....	91	4.4.3 港湾基準のあり方と シミュレータの役割.....	107
4.3 シミュレータ技術の現状と 問題点.....	94	4.4.4 船舶の設計への応用.....	109
4.3.1 操縦運動の数学モデル.....	94	4.5 航行安全評価に対する操船 シミュレータ利用の展望.....	110
4.3.2 視界投影技術.....	97		
4.3.3 CGIシステムとその展望.....	99		

4.1 まえがき

今回のシンポジウムは、船の操縦性能はどうなるかという平素の中心的な問題ではなく、どのような操縦性能であれば安全かという問題に焦点をあてたものである。船舶の航行安全が重要視されてきた今日、時宜を得た試みであろう。海難で失われた船舶は1962年に、およそ125隻、525,000 G.T.であったが、1977年には約200隻、1,200,000 G.T.以上になったとされている。そして、こうした海難の多くは狭水路域で生じた乗上げや衝突等であり、その80%は何らかの人為的なミスが原因とされている¹⁵⁾。

こうした背景を考える時、船は人間によって操縦されていることを忘れることはできない。おそらく、船の操縦という仕事は、人間のなし得る制御と意志決定の中で最も困難かつ高度なものの一つで

* 広島大学 工学部

** 大阪大学 工学部

あろう。この人間の機能を制御装置の側に移す試みは始まっているが、容易ではなく、さしあたり、人間の役割に学ぶ必要があると言えるかもしれない。例えば、保針制御における操舵員のような、比較的単純な役割についてはある程度のモデルが得られている⁽⁴⁷⁾⁻⁽⁴⁸⁾が、航海士の機能については全く今後の課題である。

こうした現状において、人間によって操縦される船の安全性について検討しようとする、乗船調査か、操船シミュレータを用いた実時間シミュレーションによらざるを得ない。実船試験はコストもかかるし、そもそも、危険な状況を設定できないから、この分野の研究にとって操船シミュレータは基本的な手段である。純然たる研究のみではなく、港湾の開発とか、船型の性能評価、あるいは乗組員の訓練等に対しても操船シミュレータは広く利用されている。

もともと、シミュレーションという手法は科学あるいは技術の領域でよく利用されている。解析的な解が求めにくい複雑なシステムの場合でも、取り扱う現象を表現する何らかのモデルが得られると、シミュレーションという手法を介してある程度の解決が期待できる。実際、操縦運動は非線形性の強い現象であるから、その推定や評価はシミュレーション計算に依存せざるを得ない。操船シミュレータは、モデル化が難しい人間をも含む操縦運動のシミュレーションと、その総合的な評価を行なう手段である。

この章では、まず、船の操縦の問題におけるシミュレータの役割について概括するとともに、このシミュレータの歴史を簡単に紹介し、現在の活動状況について述べる。続いて、シミュレータ技術の中心となる操縦運動の数学モデルと視界投影技術の現状について検討する。さらに、操船シミュレータの応用分野について紹介する。まず、操船者の訓練に対するシミュレータの利用について、次に、港湾や水路の設計や改良におけるシミュレータの利用について、この分野における先駆的な役割を果たしているCAORFシミュレータの経験を中心に述べる。さらに、造船の立場から、具体的な運航条件の下で、操縦性能をも考えて最適な船型を設計する手段としての操船シミュレータについて触れ、最後に、今後の展望について述べる。

4.2 操船シミュレータの歴史と現状

ここでは、操船シミュレータの構成、利用目的あるいはその歴史と現状等について概述する。これらについては、すでに、いくつかの解説がある⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾から、簡単に述べることにする。

4.2.1 操船シミュレータ

操船シミュレータはおよそ二つの構成部分から成り立つ。その一つはある運航環境下で加えられた操作による船の操縦運動を時々刻々と計算する演算装置である。もう一つは計算された船の運動や運航環境の変化を操船者に伝え、かつ、操船者の操作を演算装置に伝達する機能をもつ一種のインターフェイスであり、船橋室内の種々の計装や操作レバー、さらには室外の視界等からなる。こうした構成で、研究室内に船の操縦の模様を再現することができる。航空機の模擬装置であるフライトシミュレータはすでに広く利用されており、航空機の開発や乗員の訓練に用いられている。

現在のところ、船はある環境の下で、人間による制御と意志決定により運航されている。したがっ

て、船が安全に運航されるためには、ある性能をもつ船と、ある能力をもつ人間及び運航環境の三者の間に十分な適合関係が確保されなければならない。操船シミュレータの役割を一言で言うと、この三者の間の適合関係を促進あるいは評価することであり、この関係を Fig. 1 に示す。操船者を船と港湾に適合させるのが訓練における操船シミュレータの利用である。操船者や船の性能を考慮して、港湾や水路を設計、改良する際、あるいは逆に、ある港湾に出入りする操船法を工夫する時にもシミュレータの活用が期待できる。

また、航路上の制約条件が指定されているような場合、それに最適な船型をするというのは造船設計の立場から大切な仕事であり、昨今はこのような要求が少なくない。模型試験等で船の操縦性能を推定することができるが、推定された性能をもつ船が無事にある港湾に入り得る可否かを評価するには操船シミュレータが有力な手段となる。

言うまでもなく、船の航行安全は、基本的には上記の三者の適合関係によって規定されるものであるから、操船シミュレータは航行安全性の評価にとって本質的に重要であると言える。この分野でのシミュレータの利用の現状については後に改めて論じる。

4. 2. 2 操船シミュレータの歴史と現状

オランダのNSMB（現MARIN）が本格的な操船シミュレータを建設したのは1970年のことであった²⁴⁾。種々の計装を備えた船橋室と広い円筒形のスクリーンを持ち、そのスクリーン上には港湾模型の影絵が投影され、港湾への船のアプローチの模様をリアルに再現することに成功した。このシミュレータの全体図をFig. 2に示す。操縦運動の数学モデルについても、また、あまり鮮明とは言えない視界画像にしても、今日から考えると不十分な点があるが、操船シミュレータの可能性を見事に証明したと言える。これ以後、多くの機関で操船シミュレータが建設されるに至った。



Fig. 1 操船シミュレータの役割

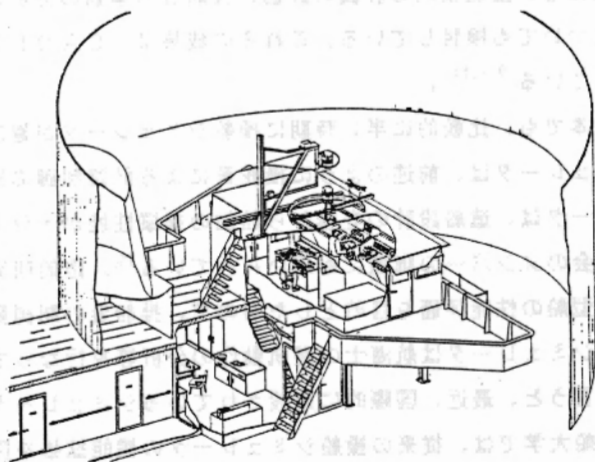


Fig. 2 NSMB 船舶操縦シミュレータ²⁴⁾

このNSMBのシミュレータに先だって、オランダの TNO Institute for Mechanical Construction (TNO-IWECO) は点光源-影絵方式の視界をもつシミュレータの着想を確かめるために、罐型的な装置を開発している。また、野本は、操舵員による針路制御を検討するため簡単なシミュレータを製作した²⁵⁾。実際には使用されなかったが、日本無線(株)は世界で最初の操船シミュレータを製作している。その後、視界装置

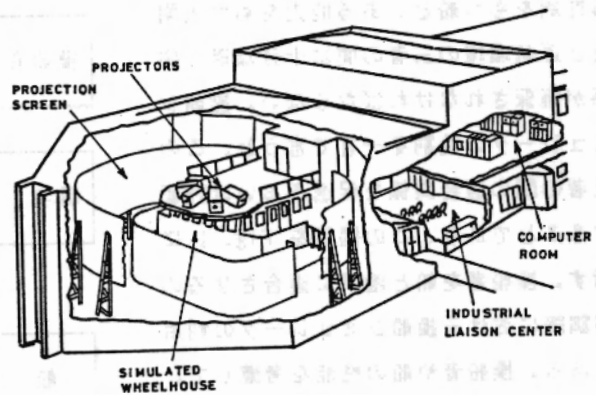


Fig. 3 CAORFシミュレータ

置等に多くの工夫をこらし、多数の操船シミュレータが建設された。今日、稼働している操船シミュレータとその特徴をTable 1 に示す²³⁾。紙面の都合で詳細な説明は省略せざるを得ないが、視界装置等については後で多少紹介する。その中で特筆すべきは、電子計算機によって作製した画像(CGI)を視界投影に用いた新しいシミュレータが、アメリカの Computer Aided Operations Research Facility (CAORF) に建設され、その後の操船シミュレータに多大の影響を与えたことである。このシミュレータの概要を Fig. 3 に示すが、Maritime Administration (MarAd)の政策に基づき、港湾等を改善して、経済の振興、エネルギー輸入の促進などを図るという目的の下で建設されたものである。したがって、このシミュレータは研究、開発を目的として運用され、種々の応用分野で先駆的で基礎的な多くの業績をあげている。今日の多くのシミュレータの主目的である訓練は行っていないが、操船シミュレータによる訓練の方法や効果についての研究は行なっている。また、港湾、水路あるいは航路標識等の設計、改良計画の評価は最近の研究の主力となっており、後に紹介する。その他にも、操舵室内の計装の評価、操船者の挙動の分析、さらにはシミュレータ自身の仕様のあり方等についても検討している。これらの成果は、CAORFシンポジウムやその他多くの報告書で公表されている⁹⁾⁻¹⁴⁾。

日本でも、比較的早い時期に操船シミュレータが建設された。野本の指導で作られた広島大学のシミュレータは、前述のように操舵員による針路制御の研究に用いられた²⁵⁾。IHIの建設したシミュレータは、造船設計の立場から船舶の操縦性能が十分であるか等の確認に用いられるとともに、船長協会のメンバーの訓練にも用いられている²⁶⁾。造船研究協会が大阪大学に設置したシミュレータは超大型船の性能評価を目的としたもので、操船者の制御動作の解析等を行なっている²⁷⁾。東京商船大学のシミュレータは航海士の避航動作の分析等を行なっている²⁸⁾。こうした日本のシミュレータは総じて言うと、最近、国際的に建設されているシミュレータと較べると旧式化した感がある。最近、神戸商船大学では、従来の操船シミュレータの機能拡張を図るために、視界投影装置を更新した。また、海技大学校では Computer Generated Imagery (CGI) 方式の視界装置をもつ訓練用シミュレータを建設中であり、これが完成すると、日本で最も規模の大きい装置となる。

Table 1 世界の操船シミュレーター一覧²³⁾

設置年 設置国 設置機関	船橋室寸法、視野、画像作成・投影方法 その他の特徴
1967年, スウェーデン SSPA	5m×5m, 120°×15°, 簡易CGI方式, TVブラウン管×7台
1968年, オランダ TNO Inst for Mech. Const.	3.5m×4.5m, 120°×28°, 港湾模型- 点光源-影絵方式
1970年, オランダ MARIN	10m×6m, 360°×40°, 港湾模型, 点光源-影絵方式
1971年, 日本, 広島大学	2m×2m, 90°×60°, カラーフィルム
1975年, 日本, 大阪大学	5m×3m, 240°×25°, 模型船 TVカメラ、投影機
1975年, オランダ	4.6m幅, 120°×30°, Light spot projector
1975年, 西ドイツ Hochschule fur Nautik Bremen	5m×4m, 120°×40°, Light spot projector
1976年, 日本, IHI	7m×4m, 100°×60°, スライド投影機×4台, Movie 投影機
1976年, 日本, 東京商船大学	5m×3m, 240°×27°, 模型船, 港湾模型 点光源-影絵方式
1976年, オランダ TNO Institute for Perception	7m×5m, 120°×30° 港湾模型 白黒TVカメラ、投影機
1976年, アメリカ CAORF	6m×4.2m, 240°×24°, CGI方式, Eidophor投影機×5台
1976年, アメリカ Marine Safety International	4.2m×8m, 140°, 模型船, 港湾模型, 白黒TVカメラ、投影機×3台
1977年, イギリス The College of Nautical Studies	4m×4m, 100°×49° Light spot projector
1978年, 西ドイツ Hochschule fur Nautik Bremen	2m×1.5m, 315°×25° Light spot projector
1979年, ノルウェー Statens Treningscenter for Skipsmanovr.	36square m, 240°×33°, 長尺フィルムによる投影システム
1980年, アメリカ Ship Analytics	4.2m×3.2m, 180°×20° CGI方式, TV投影機×7台
1982年, 西ドイツ Fachhochschule Hamburg	Octagonal 8m dia, 250°×19° CGI方式、TV投影機×10台, 動揺装置
備考 このTable はIMS F発行のMarine Simulator Characteristicsによった。この後 にも、アメリカのMaritime Institute of Technology and Graduate Studies (MITAGS)、オーストラリア及びフィンランドの商船大学等で本格的なシミュレータ が建設されている。神戸商船大学のシミュレータについては、本シンポジウムにあ るカタログ集（古野電機）を参照のこと。	

このような操船シミュレータの建設と利用の進展に伴って、この分野における情報交換等も広く組織されるようになった。1978年、英国のサザンブトンで、海事分野のシミュレーションに関する国際シンポジウム、MARSIM 78 が開催された⁶⁾。このシンポジウムは、第2回が1981年、米国のキングスポイント⁷⁾で、第3回が1984年、オランダのロッテルダム⁸⁾で開かれ、次回は1987年、ノルウェーのトロントハイムで予定されている。このシンポジウムも最近は大変な盛会で、MARSIM 84 では講演予定の3倍の論文応募があったと聞く。発表される論文の内容も、最初はシミュレータやその応用例とかの紹介が主であったが、昨今では色々な分野で相当に問題を掘り下げた論文が増えている。

また、MARSIM 78 の後で、4ヶ国、7機関の代表が協議して、恒常的な情報交換等をめざして、International Marine Simulator Forum (IMSF) を結成した⁴⁹⁾が、すでに8ヶ国、22機関が参加するに至っている。このIMSFはその後、前述のMARSIMシンポジウムを組織するとともに、操船シミュレータ技術やその応用の発展をはかるために、種々の活動を行なっている。

4.3 シミュレータ技術の現状と問題点

前述したように、操船シミュレータは次の二つの部分から成る。一つは外力や加えた操作が誘起する船の運動を演算する部分であり、さらに一つは、船橋室内の諸計装、操作レバーあるいは室周囲の視界等である。今日、電子計算機の急速な進歩、あるいはA/D、D/A変換器等の回路技術の発展によって、操船シミュレータを構成するための物的手段は容易に入手できるようになっている。そこで今日のシミュレータ技術の核心は操縦運動の数学モデルと視界作像技術であると考えてよい。以下、シミュレータ技術の現状について紹介したい。

4.3.1 操縦運動の数学モデル

操縦運動の演算には運動方程式つまり数学モデルと演算手段としての電子計算機を要する。初期には、アナログ計算機が主流であり、その素子数や精度の点から、数学モデルの簡略化を余儀なくされた。しかし、今日ではディジタル計算機の発展によって、この制約はまず考えなくてもよい。他方、操縦運動の数学モデルについては、今日までの多くの研究実績から相当複雑な局面まで計算できるようになってきたが、なお問題が残っている。

操縦運動の数学モデルには、基本的に二つのタイプがある。その一つはいわゆる応答モデルであり、野本のK、Tモデルに始まる³⁶⁾。簡略さの故に、一次型あるいは二次型の線形モデルは、海上交通シミュレーションや操舵シミュレーションに今日もなお利用されている。肥大船型の操縦運動を表現しうるように、非線形性を簡潔な形で取り入れたモデルも Clarke³⁷⁾, Norrbín³⁸⁾, Nomoto³⁹⁾そしてBech等⁴⁰⁾によって提案されている。また、船速変化を考慮した応答モデルもVan Leeuwen⁴¹⁾や芳村等⁴²⁾によって示されている。こうした応答モデルの特徴は簡略さであり、それぞれの項の意味も明瞭である。このモデルのパラメータは模型や実船の自由航走試験の結果から容易に求めることができるし、船型要素との関係も明らかである。しかし、このモデルが取り扱い得る範囲には限界があり、港湾の種々の条件や複雑な外力の下での操縦運動の計算は難しい。したがって、操船シミュレータ用の数学モデルとしては、比較的に単純な運動に限定して用いるべきであろう。

もう一つのタイプはよく流力モデルと呼ばれ、前進、横流れ及び旋回の三つの連成運動方程式を解くことによって操縦運動を求めるものである。

$$\left. \begin{aligned} m (\dot{u} - v r) &= X + X_e \\ m (\dot{v} + u r) &= Y + Y_e \\ I_{zz} \dot{r} &= N + N_e \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

この運動方程式の右辺の X 、 Y 及び N は船に作用する流体力を表わす。また、 X_e 、 Y_e 及び N_e は船に加わる外力を示す。

このモデルの問題点は、この船に作用する流体力をどのように表現するかにある。初期においては、運動と操作の状態を表わす諸変数を用いて、 $u=u_0, n=n_0, \dot{u}=\dot{v}=\dot{r}=v=r=\delta=0$ の周りで船に作用する全流体力を一括してテイラー級数表示してきた⁴³⁾。プロペラ回転数と前進速力がほぼ一定であるという条件下における船の操縦運動を取り扱う際には、このテイラー展開モデルは確かに有効な方法である。船はこの条件下で長時間、航海するものであるし、この条件下における操縦性能が船にとって基本となるから、こうして導かれた線形の運動方程式が船の操縦性能研究にとって最重要になるのは言わば当然であろう。

しかし、操船シミュレータが本格的に稼働するようになって15年の間に、取り扱われる操縦運動も大変複雑になってきた。例えば、主機は順転のみではなく、逆転されることになるし、船速も大幅に変化することになる。特に、最近の操船シミュレータでは、港内操船のような大変複雑な局面が重要になっているので、浅水影響、Bank suction、潮流や風圧力の影響、近接した通行船の影響等を考慮する必要があり、それに伴って数学モデルも次第に複雑化している。シミュレータによって、操船できるか否かを確認する必要があるのは、いずにせよ、自然的あるいは海上交通的に運航が困難になるような局面であろうから、シミュレータ用数学モデルの複雑化は、言わば、宿命のようなものである。

こうなると、船に作用する流体力に影響を与えるパラメータも増加せざるを得ない。既に述べたように、船に作用する全流体力を単純にテイラー級数表示する考えを採ると、展開すべき変数の数が増加するのみならず、表現しなければならない運動の範囲の増大によって高次の項をも採用しなければならないから、膨大な数の係数をもつ数学モデルにならざるを得ない。さらに、この膨大な数の係数は船に作用する流体力に対する船体各部の寄与をそれぞれ、分散された形で表現することになり、物理的な意味をほとんど失ってしまう。

このような数学モデルをどのようにして決めるかも問題になる。拘束模型試験がほとんど唯一の方法となろうが、この場合、状態を一つずつ変えて流体力を計測することになるから、試験工数の増加は避けられず、膨大な時間とコストが必要になる。また、試験工数以前に、拘束模型試験法自体のもつ本質的な問題があると言うべきかもしれない。拘束模型試験においては、運動状態を意識的に一つずつ変化させることによって、流体力と運動との関係を把握する。例えば、他の条件は固定しておい

て、舵角のみを変えた試験で、舵角の影響を表わす係数を求める等である。つまり、拘束模型試験においては、流体力と運動との関係を把握するために、ある意味で特殊な運動状態を作っていることになる。したがって、このようにして求めた流体力と運動との関係を重ね合わせて、多くの状態変化が複雑にからみあって生じる実際の運動の局面における流体力を本当にどこまで表わし得るかが問題となる。

以上に述べたような背景のもとで、操縦運動の数学モデルの改良と検証の問題がIMS F等でも重要な課題とされている。MARSIM 84 では、操縦運動の数学モデルに関するWorkshopがもたれ⁴⁵⁾、この二つの問題が主要なテーマとなった。このシンポジウムの参加者の主力はシミュレータの利用者であることを考えると、この問題が、各国のシミュレータにとって緊急事となっていることの現われであろう。

まず、数学モデルについては、将来、モジュール型モデルが望ましいとしている。モジュール型モデルというのは、船のそれぞれの部分の寄与が独立に表現されることを意味し、例えば、船体、プロペラ、舵、スラスター等の影響を別々に記述し、もし、別の舵を取りつけた場合、その部分だけを書き直せば良いようなモデルということになる。日本で開発された、いわゆるMMGモデル⁴⁴⁾は船の各部分の単独性能を基礎にし、簡単な形で相互干渉を取り入れて作られている。このMMGモデルは、MARSIM 84 で、モジュール型モデルの具体例として高い評価を得ている⁸⁾。このような形で流体力を記述しようとすれば、物理現象に沿った取り扱いを余儀なくされるから、テイラー級数モデルの複雑さを解決するのに役立つ。結局、MMGモデルを発展させる方向で、今日のシミュレータ用数学モデルの問題が解決されると期待できる。

しかし、現在のところ、このモデルが一応、確立しているのは、一定以上の船速で走っており、プロペラは順転しているという最も基本的な局面についてであり、今後の拡張が望まれる。造船技術者の立場から考えると、基本的な局面における性能でよいから、どんな船型に対しても推定できるようにしたい。一方、ここで課題としている航行安全性の評価とか、その他種々の応用研究にとって、数学モデルは不可欠であるから、少なくとも代表的な船型については必要な複雑さに応えられるようにすることが重要と言える。

続いて、シミュレータ用数学モデルの検証の重要性が指摘され、例として、Fig. 4のような結果が紹介された⁸⁾。この図によると、IMS Fの参加機関の数学モデルは通常の旋回試験の結果に対しては比較的一致した推定結果を与えるにもかかわらず、

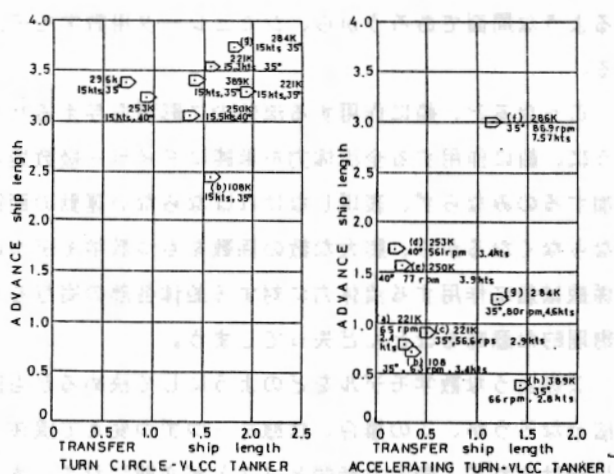


Fig. 4 各国の操船シミュレータの数学モデルによる
通常及び加速旋回の特性的比較⁸⁾

データの乏しい加速時の旋回運動については大幅に異なる推定値を与えていることがわかる。造船に携わっている研究者は一般に基本的な局面での操縦性能に関心をもつ。造船設計において、こうした局面における操縦性能と船型との関係が重要であり、当然のことと言える。そこで、こうした局面における操縦性能については多くのデータがそろっている。他方、操船シミュレータのメーカーや運用者は必ずしも船舶操縦性の専門家を有しているとは限らない。にもかかわらず、彼らは操船シミュレータの製作や運用上、操縦運動の数学モデルを必要とする。そこで、彼らは入手できる限られたデータを頼りに数学モデルのパラメータを決めることになる。その結果、データのある運動に対しては、比較的良い近似を与える数学モデルが、データの乏しい運動に対しては全然合わないというような問題を生じている。こうした背景には、今日のシミュレータに組み込まれているテイラー級数型の数学モデルがプロペラ荷重度の大幅な変化に対応しにくいことが指摘できる。

実際の港湾に於いては、船舶の運航環境はいっそう複雑である。こうした環境下における操縦運動は操船シミュレータにとっては、本質的に重要であるから、そのモデル化が行なわれている。複雑な海底地形の影響を調べるために、あるいは棧橋付近の地形や建物が風圧抵抗に及ぼす影響を求めるために、港湾の縮尺模型を作って試験するというような努力も特別な場合はなされている⁵¹⁾が、このような試験は実際には難しい。港湾の中に河川からの流れがあるような場合、不均一な流れの影響をモデル化する必要がある。しかし、このような実験も容易でない。こうした場合、なんらかの仮定において数学モデルを導かざるを得ない。こうして、運航環境と船の運動が複雑化するにつれ、数学モデルの検証問題はいっそう重要になる。

数学モデルを操船シミュレータに組み込み、実際の操縦運動に通じたベテランパイロットに操船させ、感想を聞くという形で数学モデルの検証を試みている例も多い。しかし、このような検証は定性的な結論を得るにとどまる。複雑多様な港内操船の結果をシミュレーションと比較することは、有力な方法ではあるが、その時の外力等を正確に把握するのも容易でない。したがって、ある程度以上に複雑化した操船の局面においては、数学モデルの完璧な検証は不可能であると考えざるを得ない。つまり、最終的には、シミュレーションはシミュレーションであり、実際ではないことを理解した上で、シミュレーション結果を評価する必要がある。しかし、それ以前に、数学モデルを可能な限り、物理現象に沿った形に改良し、操作や運動の変化をカバーしやすいものにする、さらに、実際の運航で多用される基本的な操船パターンについては、数学モデルの十分な検証を行なうことが重要であるのは言うまでもない。

4. 3. 2 視界投影技術

数学モデルを電子計算機に組み込むと、船の操縦運動は計算できる。この操縦運動は船橋室内の諸計装や視界の変化を通じて操船者に伝えられる。操船者の指令は各種の操作レバー等を通じて、計算機に入力される。この計算機と人間とを結ぶインターフェイスの内で視界は最も重要な情報源の一つであり、この投影技術が操船シミュレータの水準を基本的に規定する。ここでは視界投影技術の現状と課題について紹介する。

まず、どのようにして、視界画像を作るかという問題について考えよう。それには、現在までに多

くのシミュレータで採用されている方法が参考になるから、これらを整理することにする。

(1) 物理モデル方式

この方法は港湾等の模型を用いて、視界画像を作る。その一つの方法はオランダで開発された最初の操船シミュレータにも採用されたもので、点光源を用いて、港湾等の模型の影絵をスクリーン上に投影する。この点光源-影絵方式は極小で高輝度の点光源を用い、微細な港湾模型を組み合わせることによって、かなりリアルな画像の作成に成功している。現在、オランダのTNO-IWECO及びMARINでこの方式を採用している。問題は移動する物標、例えば、行き合い船等の投影が難しいことである。同様に港湾等の模型を用いて、それをTVカメラで撮影し、投影する方法もある。オランダのTNO, Institute for PerceptionあるいはアメリカのMarine Safety Internationalでこの方式を採用している。広い視界を得るために、特殊なプリズムを介して、複数のカメラで撮影するとかの工夫がなされている。点光源の場合と同様に移動する物標の投影は容易でないが、磁石を用いて、港湾模型の背面から行き合い船模型を動かし、撮影する等で困難を克服している。大阪大学のシミュレータの場合、物理模型をTVカメラで撮影し、上記とはやや違った方法で投影している。

(2) スライド方式

港湾あるいは海上の物標をあらかじめ種々の角度から撮影し、スライドを作っておき、大きい位置変化はスライドのかけかえで、小さいそれはスライドの移動やズームングで対応する形で投影する。ノルウェーのSMSシミュレータの場合、港湾の模型を撮影した長尺フィルムを用いて大視角で鮮明な視界を投影している。この場合、35mmフィルムの良い分解能が生かされているが、移動する物標の投影は難しい。IHIシミュレータの場合、移動する物標の投影にスライドを利用している。鮮明な画像が得られるというのがこの方法の最大の利点であるが、投影する物の数が増えるとシステムが複雑になり、かつ、スクリーン上の画像合成が難しくなるという問題が避けられない。あらかじめ撮影した画像を投影するという考えは、大容量の録画が可能で、しかも高速のアクセスができるビデオディスクの利用によって、今後大きな可能性が生じるであろう。画像はあらかじめ撮影してもよいし、後に述べる計算機作像の方法で作ってもよい。この場合、作像時間の制約がないから画素を細かく取り、鮮明な画像を得ることが可能になる。このように、ビデオディスクの利用は今後、有望な方法と見込まれる。実際、フライトシミュレータでは、この方式が積極的に検討されている。

(3) Light spot projector方式

夜間航行のみを模擬するのであれば、灯台やブイの光や船の航海灯のみを投影すればよいことになる。パルスモータ駆動のプロジェクターでスクリーン上に赤、緑等のスポットを投影するのがLight spot projector方式である。イギリス、サザンブトンの商船大学の操船シミュレータ、アメリカのMaritime Institute of Technology and Graduate Studies (MITAGS)の操船シミュレータ、さらに、西ドイツ、ブレーメン商船大学の操船シミュレータ、及びNavigation Light Simulator等がこの方式を採用している。MITAGSのシミュレータは360°の視界に、60台のプロジェクターを用いて、10隻の船と多数の航路標識等を投影できる。ブレーメンのNavigation Light Simulatorの場合も、315°の広い視界に多数の船や航路標識等を投影できる。この方法では、夜間の視界しか再現でき

ないが、その分解能の良い、鮮明な画像は抜群の臨場感を与え、双眼鏡を用いて、見張りをすること
さえできる。

(4) Computer Generated Imagery方式

1976年、アメリカのCAORFに設置されたシミュレータは電子計算機で作製した画像(Computer
Generated Imagery)を5台のEidophor Projectorで240°のスクリーン上に投影するという画期的な
方法を採用した。その後、CAORF程の規模ではないものの、多くのシミュレータでこの方式の視
界装置が採用されている。このCGI方式は、種々の航行環境画像をスクリーン上に作り出す際の柔
軟性の故に、今後の視界装置の主力と考えられる。そこで、このCGI方式について、やや詳しく紹
介する。

3.3 CGIシステムとその展望^{5),52)}

CGIシステムはFig.5に示
す3つの主要な部分から成り立
つ。視界画像データベースは港
湾の地形、投影すべき船や航路
標識等の形状を示すデータから
成り立つ。全ての投影すべき物
体は多面体で表現される。操船

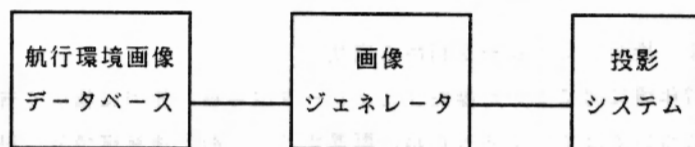


Fig. 5 CGIシステムの基本構成

上の目標になるような物体は多くの面で構成し、できるだけリアルな画像にするが、目立たない物体
は少数の面で構成し、計算時間を節約する。この多面体の辺をエッジと呼び、この数がデータベース
の規模を表わす。地形やそこに存在する物体がデータベース化されている範囲をしばしばゲーミング
エリアと称し、この範囲で船は航行できる。このデータベースがどの程度、簡単に作れるかという点
に、CGIシステムを採用したシミュレータの運用コストが大きく左右されることになる。実際には、
対話形式で、地形は海図からディジタイザーで入力した等高線等を用いて多面体近似をし、目標にな
るような物体は、あらかじめ蓄積している形状のデータを用いて配置のみですます等の方法が考えら
れる。画像ジェネレータは本船の位置から、投影すべき物標を抽出する。続いて、全ての抽出された
物標のエッジを物標、操船者の目及びスクリーンの相対位置関係から、二次元平面上に投影する。面
の遠近を判断して、見える面と見えない面が識別される。これに彩色すると、操船者から見た視界が
得られることになる。ここで、幾つかの特殊な処理を行なう。一つは陰影をつけ、エッジをぼかして、
曲面の感じをもたせることで、もう一つは水平線付近の物標を霞ませて、遠近感を出すことである。
こうした処理で視界画像を得ることができる。また、霧による視程の変化とか、夜明け、昼間、夕方、
夜間の様子の模擬もできる。

こうした画像作像は最近、急速に発展しつつあるコンピュータグラフィックスの技術を用いると、
パーソナルコンピュータでも可能であるが、この場合の問題は演算速度であり、動きをもったCGI
が滑らかに見えるためには毎秒数十回のリフレッシュが必要になる。そこで、この画像作像にはいわ
ゆる、パイプラインアーキテクチャに基づいて、複数のプロセッサを持つ専用のハードウェアを用い

ることになる。つまり、並列処理をフルに行なうことによりスピードを上げるわけである。広い視野の画像は幾つかに分割され、それぞれを別のチャンネルが処理する。各チャンネルはさらに並列に処理するパイプラインを持ち、各パイプラインのプロセッサが分担して演算する。このようにして、メモリー上に時々刻々の視界画像を得る。メモリー上の画像はTVディスプレイへ出力するために走査され、これをスクリーン上に拡大投影する。この拡大投影システムとして、CAORFではEidophor Projectorを用いているが、これは相当に高価であり、最近では高輝度ブラウン管の画像を拡大投影する方法が利用できる。

以上、CGIシステムによる視界作像の方法を簡単に報告した。データベースの管理方法が確立すれば、運用コストも問題にならないレベルになり、この方法の画像作像における柔軟性が生きてくる。計算機の処理速度の向上、メモリー等の低廉化といった事情から、このシステムが今後の操船シミュレータ用の画像作像の方法の本命となるであろう。

4. 4 操船シミュレータ利用の現状

1967年頃に緒についた操船シミュレータは今日、相当に幅広く普及した。このシミュレータの利用目的についてはすでに述べたが、再言すると、船、運航環境及び操船者の間の適合関係の確保、評価等を実現することである。ここでは、このシミュレータの利用の現状と課題について述べる。

4. 4. 1 船員の訓練のための利用^{15)・22)}

操船シミュレータの多くが船員養成機関に設置されていることから推察されるように、操船シミュレータは訓練目的に最も多く利用されている。IMSFは参加機関が開設している訓練コースのリストを作っている²²⁾が、それによると、種々の工夫をこらしたコースが準備されており、多年の実績をもっていることがわかる。このように、今日、操船シミュレータによる訓練が注目されるのは、一つには実船実習のコストの上昇という事情のもとで、シミュレータがその機能の一部を担い得るだけの技術的可能性をもつようになったためと言えよう。訓練の分野では、すでにレーダシミュレータが多年の実績をもつが、操船シミュレータの利用はその範囲を大幅に広げるものである。

こうした操船シミュレータによる訓練は従来の実船訓練との関係が問われることになる。すでに、航空機の分野では、フライトシミュレータの普及と高性能化に伴い実機訓練の項目が急激に減り、シミュレータ訓練が主体になっている¹⁵⁾。コスト等の問題はこの変化の大きな要因であるが、フライトシミュレータによる訓練が十分な臨場感をもつレベルに達したことが基本であり、同時に緊急時の訓練の容易さがあげられている。船舶の分野では、IMOが一年の乗船経験を航海士になるための要件とすることを勧告しているが、アメリカ等では6ないしは10ヶ月の乗船経験が普通であるところから、シミュレータによる訓練でその不足分を補いたいと言う直接的な動機がある。確かに、乗船経験は船員になるための言わば一種の一般教育という側面ももち、シミュレータによる訓練で置き換えてしまうことはできない。しかし、例えば、航海計器の取り扱いとか、船の運動特性の把握とかの一部は操船シミュレータで訓練可能と考えられる。こうした背景の下で、操船シミュレータによる訓練に関する総合的な検討がCAORFを中心に進められている。

Table 2 推奨される新人教育用操船シミュレータの仕様およびコストの例¹⁹⁾

Visual scene time of day	Night	Initial system procurement	
Visual scene geographic area	Coastal	Lowest cost	\$1.5M
Visual scene field of view	180°×20°		
Visual scene color	Multicolor		
Visual scene quality	Moderate	Highest cost	\$3.5M
Radar presentation	Low fidelity	Most likely cost	\$2.7M
Bridge configuration	Full	Annual Operating/Maintenance	
Ownship dynamics	Deep water	Lowest cost	\$180K
Exercise control	by instructor		
Traffic vessel control	Independently		
Training assistance tech.	Remote monitor	Highest cost	\$320K
Training assistance tech.	Feedback disp.	Most likely cost	\$220K

さて、訓練のあり方は、どのような相手にどのような能力を与えようとするかに依存する。したがって上記の検討は新人、上級の資格を求める航海士及びパイロットの場合に大別できる。ここでは、新人教育の場合の検討結果を見てみよう¹⁹⁾。この問題に対するCAORFのアプローチは新人に対して訓練すべき項目のリストアップから始められ、11分類、113項目を指摘している。続いて、これらの各項目が講義、小型船実習、大型船実習及び操船シミュレータという4つの手段でどの程度、効果的に訓練できるかを解析している。この詳細な結論は省略せざるを得ないが、要約すると以下のとおりである。つまり、多数の訓練項目は大型船実習で訓練可能であるが、それが最もよい手段であるとは限らない。操船シミュレータはある項目に対してはベストと考えられるが、乗船実習に代わるものではない。両者を適当に組み合わせて使用すると、大変訓練効果が上がる。したがって、両者は相補的なものと考えられ、訓練目的に応じて使い分けるべきである。この場合に使用すべきシミュレータの仕様は訓練目的に依存する。衝突回避操船等ではFull-missionのシミュレータが望ましいが、対費用効果を考えると、訓練用には沿岸域で夜間航行の様子を再現できる程度のシミュレータがよいとしている。この推奨された標準的なシミュレータの仕様をTable 2に要約して示す¹⁹⁾。また、この操船シミュレータによる訓練を、従来からの講義、乗船実習、レーダシミュレータ訓練等と如何に組み合わせ、効果的なカリキュラムを作るか等についても考察を加えている。

新人教育の場合、基礎的な航海術、運用術を教えることが目的であるから、比較的単純な運航の局面を模擬すればよい。しかし、航海士やパイロットの場合は、より複雑な状況を模擬する必要がある。CAORFでは、このような場合の訓練に対しても相当に詳しい検討を行なっている。本稿の目的は航行安全の問題であるから、訓練にあまり紙面を使うことはできないので、これ以上の詳細についてはCAORFのレポートを直接、参照されたい。

結論的に言うと、操船シミュレータが相当のレベルで、船舶の操船の局面を再現し得る能力を獲得したのであるから、それに依拠して効果的に訓練に利用すべきである。しかも、操船シミュレータのコストは急激に低下しており、今後は極めて一般的な訓練手段になるものと期待できる。

4. 4. 2 港湾、水路の設計及び評価のための利用

新しい港湾、水路を設計する場合や、すでにある港湾、水路に今までより大きい船や新しい種類の船が就航しようとする場合、船舶が安全に航行できるか否かを判断する必要性が生じてくる。もし、安全でないと判断される時は、設計を変更したり、適切な航海援助装置の併用、さらには航海管制等の施行、あるいは航行する船舶に制限を加えるなどの措置を講ずるのが普通である。こういった目的のためにシミュレータを活用するケースが欧米を中心に最近急増してきた。港湾システムの複雑化、船舶の大型化、特殊化に伴い、港湾や船舶の限界設計の要求は今後ますます高まるであろうし、その場合、シミュレータによるアセスメントは不可欠なものとなるであろう。

アメリカCAORFのシミュレータは、1976年に研究用として移動して以来、非常に多くの実験、研究を行っており、毎年、シミュレータに関するシンポジウムを企画するなど、操船シミュレータに関しては、ハードウェアのみならず、研究の面でも世界のトップレベルにあるといえる。Fig. 6

は、CAORFで行なわれたプロジェクトのうち、港湾及び水路に関するものの占める

比率の変遷を示したものであるが、1976年には0%であったものが年々増加し1985年には全体の65%にも達している。CAORFはアメリカ運輸省海事局（MarAd）管轄のシミュレータであり、行政面での指導、援助を受けているほか、沿岸での海上交通行政を直接行っているアメリカ沿岸警備隊（USCG）や、港湾域や河川等での水路の設計、施行、管理を担当しているアメリカ陸軍工兵隊（USACE）等との共同研究、資金援助もあり、港湾、水路設計のための研究プロジェクトが多い要因となっている。Fig. 7は、CAORFの研究プロジェクトを公表されているデータをもとに年代順に整理したもの¹²⁾であり、港湾関係のプロジェクトが多いとともに、上記行政、施工機関との協同研究が多いのが目につく。ここでは、その中から、数例の代表的なプロジェクトについてプロジェクトの概要、実験および解析の手法について紹介する。

（1）Valdez水道（アラスカ州）のVLCC航行安全のための調査研究⁹⁾

CAORFが行なった最初の港湾、水路に関するアセスメントである。アラスカ州で採取された原油をValdez港まで運ぶパイプラインが1977年8月完成するのに伴い、大型タンカーが環境条件の厳しい同港までの狭く切り立った水道を安全に航行できるか否かを検討したものである。極地気候に特有の強い風が吹きまくり、最大瞬間風速は75ノット、時にウィリウォーと呼ばれる100ノットを越す突風が吹く。さらに降雨や霧により冬から春先にかけて視界の悪い日が続く、水道中央にある標高約9メートルの小島が無灯火時にはほとんど見えない。一方、水深は、水道の両岸が切り立っているため

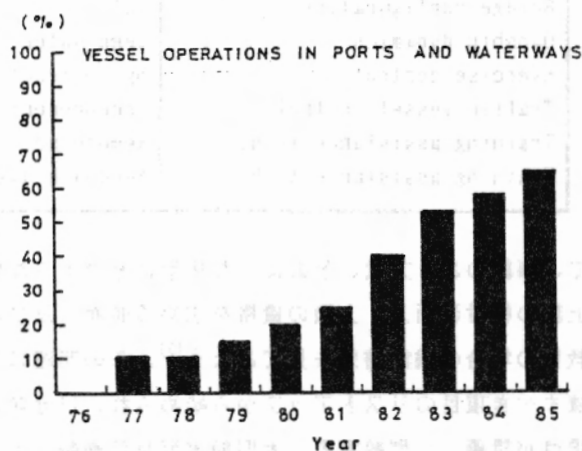
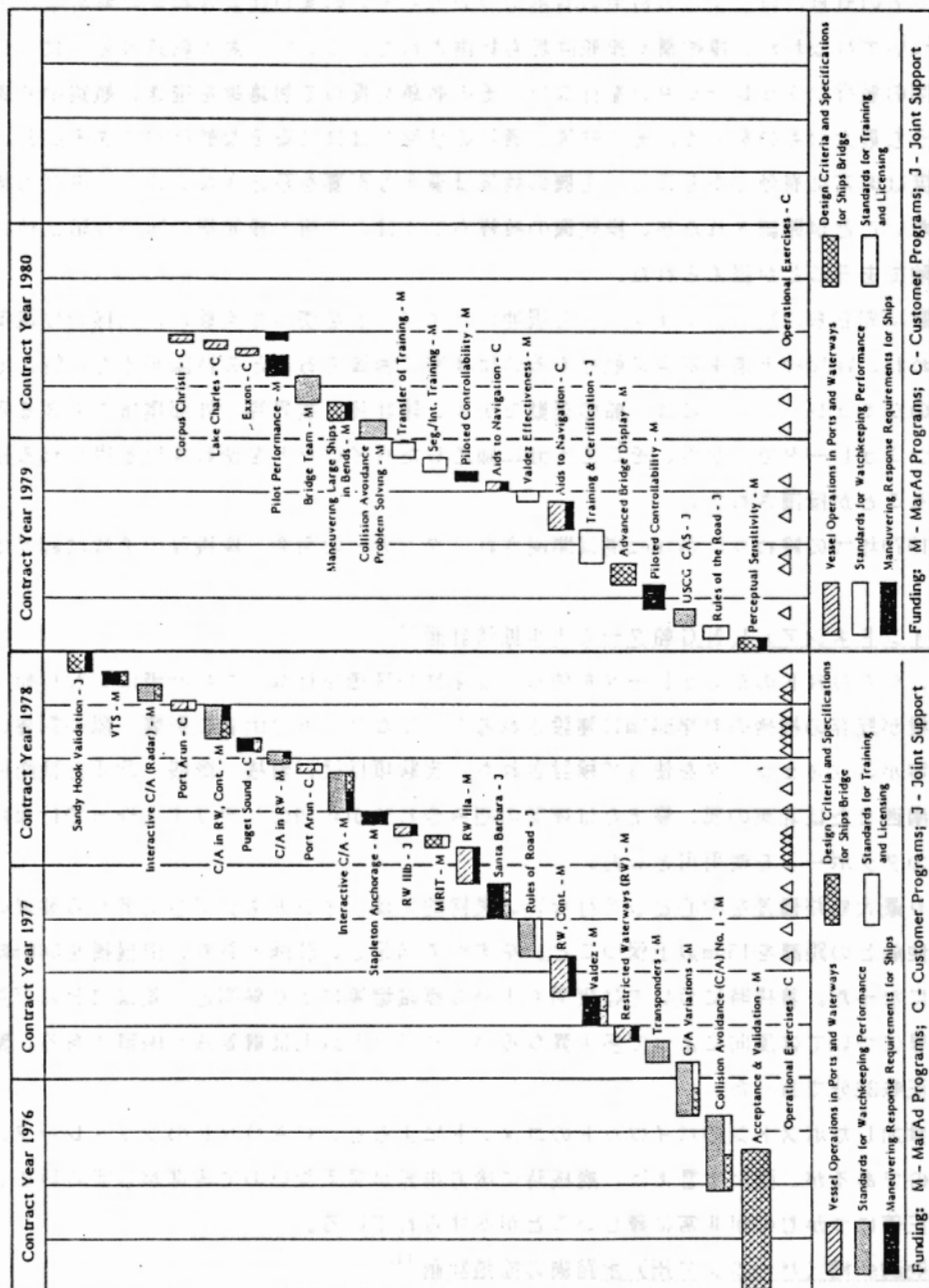


Fig. 6 CAORFにおける
港湾関係プロジェクトの占める割合¹⁴⁾



Simulator Usage, Research Areas, and Funding, CYs 1976 - Mid 1978

Simulator Usage, Research Areas, and Funding, CYs 1979 - Mid 1980

Fig. 7 CAORFプロジェクト一覧 (1976-1980)¹²⁾

深く、投錨停泊を困難にしている。

シミュレータ実験は、こうした背景をもとに環境条件を設定し、165,000WTのタンカーで満載、バラストの2状態、船速3状態(3, 6, 9ノット)の他に主機と操舵機の故障を想定して行なわれた。さらに、タグボートの有無、ロランCの併用の有無についてもその影響が調査された。解析は、主に最大航路偏差について行なわれ、操舵量や操舵回数も計測された。ここで、最大航路偏差とは、シミュレータで多数回の航行シミュレーションを行ない、その航跡を重ねて包絡線を描き、航路中心線から測った距離のうち最大のものをいう。その結果、通常の状態ではほぼ安全な航行ができること、適切な航海援助装置は非常に有効であること、主機の故障は重大な影響を及ぼさないこと、タグの種類による影響は少ないことが確認されたが、操舵機の故障もしくは、主機と操舵機の同時故障は特に高速時、非常に危険であることが認められた。

なお、この実験に先立ち、別のシミュレータで現地のパイロットを使った実験が、同様の環境条件を設定して行なわれ、Valdez水道を安全に航行するのは非常に困難であるとの結論がでた。特に港湾域や制限水路でのシミュレーションには、船の運動モデル、諸計装、視界等の外部環境をできる限り忠実に再現したシミュレータで、かつ、そこで十分に順応したパイロットを使わないと得られる結論の信頼性が欠けることが指摘された。

最終的には、1970年代の終わりにValdez港は開港され、タンカーの衝突、座礁等の事故は起きていない。

(2) Arun港(インドネシア) LNG 船ターミナル拡張計画¹³⁾

すでに1978年、CAORFのシミュレータを使って安全性の評価を行なったArun港のLNG船ターミナルに第2棧橋が既存の棧橋の対岸540mに建設されることになり、その両者の影響、風の影響、緊急時の出港時間等が、シミュレータを使って検討された。実験項目は、着棧、離棧、北または南棧橋、10~50ノットの南西または北東の風、昼または夜間の組み合わせから19のシナリオを作って行なわれた。また、4隻のタグボートを使用可とした。

解析は、やはり最大航路偏差を中心として行ない、最終的には、インドネシア当局者から要求のあった「接岸中の他船との距離を150m以上保つこと」をすべて満足し、計画どおり、南棧橋を540m離して建設することになった。着棧時については夜間も十分な標識燈等により昼間との差はほとんど見られない。風速限界については風向によって多少異なるが、30ノット以上は離着棧が困難である。緊急時の出港時間は正味32分であった。

なお、実験に参加したボストンのパイロットのコメントによると、CAORFのシミュレータは大変満足できるものであるが、強いて言えば、離棧時に後方視界が見えないので後進がしづらいこと、棧橋との距離を正確につかむのが非常に難しいことがあげられている。

(3) Hampton Roads 港(バーニジア州)水路網の拡張計画¹⁴⁾

Hampton Roads はチェサピーク湾の入口にあるアメリカ第一の石炭の積み出し港であるが、アメリカの他の多くの港同様、遠浅のため港に至るまでにいくつもの水路がある。そのため現在は10万トン以下のバラ積み船しか入港できない。それを10万トン~22万5千トン級のバラ積み船まで航行可能と

するための水路設計計画である。しかし、それには大量の土砂を浚渫する必要があり、莫大な時間と費用がかかる。したがって、船舶の航行の安全が保証される範囲内において極力、規模縮小を計らねばならない。アメリカでは、港湾、水路の設計及び施行、管理を陸軍工兵隊（USACE）が行っており、当然の如く、1981年よりCAORFのシミュレータを使った安全性評価実験を協同で始めた。ここには、Norfolk Harbor Reach Channel、Entrance Reach、Choal Channel、Newport News Channel の他、Atlantic Ocean Sea Lane、停泊地、旋回水域やさらに計画中の橋（中央部はトンネル）もあって（Fig. 8参照）、結局、9つのプロジェクトにわけて実施された。

実験の結果、各水路の幅、水深、長さがそれぞれ検討され実際の計画に反映された。なお、この実験を通じ、USACEは110万ドル（約2.7億円）の研究投資を行ない、浚渫費等として7,400万ドル（約185億円）が節約できたとのことで、今後も、USACEとCAORFの協同研究は盛んになっていくことと思われる。

（4）パナマ運河拡張計画¹⁴⁾

1983年、アメリカ運輸省海事局（MarAd）とパナマ運河委員会（PCC）はパナマ運河の拡張計画に関する研究をCAORFのシミュレータを使って行なうことに合意した。

パナマ運河は、大西洋と太平洋を結ぶ海上交通の要であり、よく知られたように、自然地形を利用しながら、いくつかの水門を経て航行するようになっている（Fig. 9参照）。今回の改修工事は運河中央の山岳地帯を地形に沿って屈曲しながら作られたGaillard Cutと太平洋側の入口の2ヶ所で1986年完成の予定である。Gaillard CutはFig. 10に示すように幅300フィート（約90m）で他の部分が500フィート（約150m）であるのに比べ大変狭く、また、 9° ～ 31° のカーブがいくつかあり、さらに、両側に切り立った山が迫っていて見通しの悪いパナマ運河最大の難所であった。1970年に幅を500フィートにする工事が完了したが、「170規則」と呼ばれる規則により、ここを船が行き合う場合、幅は最大90フィートでしかも行合船との幅の合計が170フィート以下と決められている。したがって、PANAMAXサイズ（950ft × 106ft）の船は現在、ここでは一方通行のみ許されている。今回、この幅をさらに広げて、PANAMAXサイズの船舶が行き合えるようにしようと計画された。

このプロジェクトはCAORFで行なわれたプロジェクトのうち最大級のもので、まだ継続中であるが、すでに120万ドル（約3億円）以上の経費がかかっている。また、制限水路でかつ、行合船があることから、スティーブンス工科大学（SIT）及びSSPA（スウェーデン）での拘束模型試験や、現地での大規模な実船実験も併せて行なわれている。使用した船の運動モデルのパラメータだけでも数百といわれている。また、シミュレータ実験の面でも多くの新しい試みがなされている。その一つが高速シミュレーションと呼ばれている手法で、操舵員はもちろん、パイロットや船長の判断をも計算機で模擬させ、実時間シミュレータを使わず、計算機シミュレーションを行なうものである。これは、大規模な実時間シミュレータのランニングコストが高いこと、Fig. 7にみられるように、シミュレータの稼働率が非常に高いことと関係が深い。水路設計等のように設計状態、範囲が広い場合、シミュレータによる実験ケースを絞る目的で行なわれている。この手法そのものは既に1978年ごろ開発されている。プロジェクトは継続中であり、最終的な結論はまだ出ていないが、PANAMAXサ

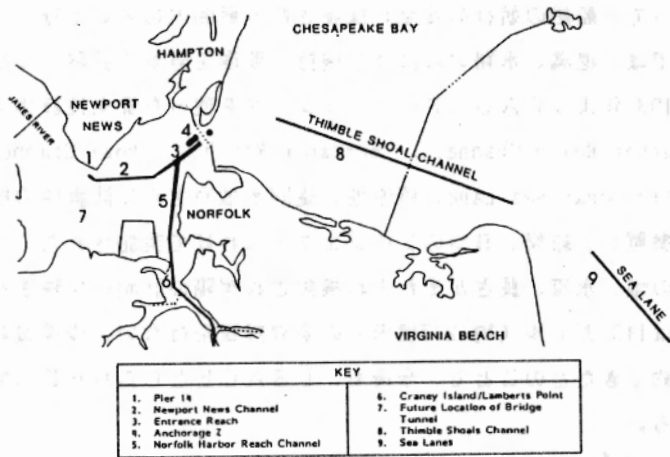


Fig. 8 Hampton Roads 地区¹⁴⁾

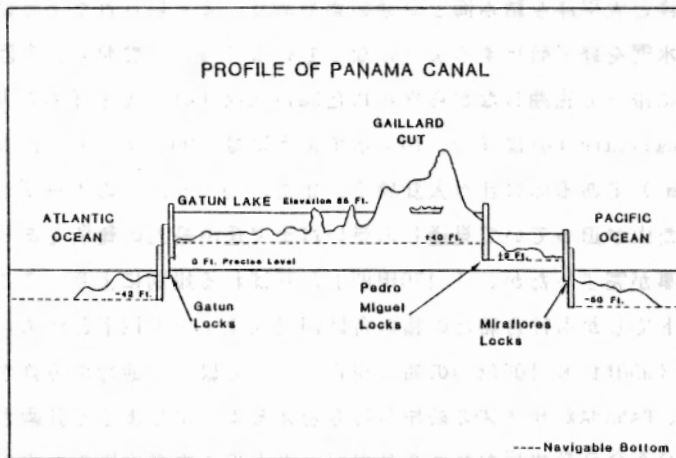


Fig. 9 パナマ運河断面図¹⁴⁾



Fig. 10 Gaillard Cut (パナマ運河)¹⁴⁾

Table 3 シミュレータ/シミュレーションを用いた
港湾関係プロジェクトの一部（除く日米）⁸⁾

実施年	実施機関（国）	プロジェクト名
1976	MARIN（オランダ）	Zeebrugge（フランス）港コンテナターミナル計画
1980-81		Eemshaven（オランダ）L N G 船ターミナル計画
1982-84	Dosbouw, DELTA Division（オランダ）	Eastern Scheldt Storm Surge Barrier計画
	Port Revel（フランス）	Kwang Yang（韓国）湾石炭運搬船ターミナル計画
		Montoir（フランス）港L N G 船ターミナル計画
		Mohammedia（モロッコ）港拡張計画
		Preussag（フランス）港新L N G 積出しターミナル計画
		Antifer（フランス）港V L C C 原油積出しターミナル計画

イズの船が Gaillard Cut で行き合うには 600～700 フィートの幅が必要であるとされている。

以上、CAORFでのプロジェクトの例を紹介したが、その他にヨーロッパや日本でも、いくつかの港湾、水路の設計に関するシミュレータの活用例が報告されている。ヨーロッパではオランダを中心にL N G 船ターミナルやコンテナターミナル等の建設計画に際してシミュレータが安全評価の手段として用いられる。フランスの Port Revel Centreはグルノーブル近くにある人工池で1/25縮尺模型を使った自由航走シミュレーションを行っており、同センターが所属している Sogreah（コンサルタント）社のシミュレーション計算とともに港湾の建設計画をいくつか手掛けている。Table 3 は、こうした港湾関係のプロジェクト（日米を除く）をまとめたものである⁸⁾。

日本では、日本海難防止協会が中心となり、昭和53年に苫小牧港（西港地区）、昭和54年に苫小牧港（東港地区）、昭和59年に塩釜港仙台港区の港湾計画などが実施され、主に計算機による運動シミュレーションや交通流シミュレーションによって答申がなされている³²⁾⁻³³⁾。パイロットによる実時間シミュレーションまで行なったものとしては、昭和58年に行なわれた坂出、番ノ州シーバース計画が我が国で初めてのものであり、広島大学において、広範な模型実験から浅水中、低速航行時の数学モデルを導き、小規模ながらタグボートによる操船も可能なシミュレータが開発され、安全性評価に供された³⁴⁾⁻³⁵⁾。これらについては、5. 2 節でも詳しく述べる。

4. 4. 3 港湾基準のあり方と操船シミュレータの役割

港湾や水路等の設計基準もまた、船舶の航行安全性に密接な関係があるので、この問題について考えてみよう。先に述べたように、船舶の航行安全のためには運航環境、船舶の操縦性能及び操船者の間に、適合関係が確保される必要がある。これを一般的に基準問題にあてはめて表現すると、港湾や水路の設計基準、船舶の操縦性能基準及び操船者の資格要件は三位一体の関係にあると言ってよい。したがって、港湾や水路の設計基準を確立するには、そこに出入りする船舶がもつ操縦性能とパイロットの能力が明確にされることが必要になる。また、後述するように、船舶に備えるべき操縦性能の

一般的な水準を規定する際には、港湾の基準が前提となろう。

Table 4 航路の幅員²⁹⁾

(Lは対象船舶の船長)

港湾や水路は莫大な建設費を必要とするから、その幅員、水深の決定は非常に重要である。もし、それらの設計基準が確立されていれば、それに従って要目を決めればよいのであるが、こ

航路の長さ	通 行 の 状 況	幅 員
比較的距離が長い航路	対象船舶どうしがひんばんに行きあう場合	2 L
	上記以外の場合	1.5 L
上記以外の航路	対象船舶どうしがひんばんに行きあう場合	1.5 L
	上記以外の場合	L

の現状はどうなっているのでしょうか。日本における設計基準は、航路の幅員については、Table 4 に示すとおりで、相当に幅のある規定に留まっている。水深に至っては「適切な深さ」としか規定されていない²⁹⁾のが現状で、一般的に、大雑把な経験的判断の段階のようにみえる。諸外国の例では、

Permanent International Association of Navigation Congress (PIANC)という国際機関の中に、International Committee for the Reception of Large Vessels (ICORELS)という委員会があり、その作業部会 IV が1973年頃より、港湾等の最適設計に関する調査、研究をかなり広範に行なっている³¹⁾。その結果によると、例えば航路の幅員について調査する際の方法論として、パイロット等からの意見聴取、実際の操船パターンから最大航路偏差を調査する方法、シミュレーション計算や実時間シミュレータを使った確率論的方法、そして、縮尺模型実験による方法等を取りあげている。そして、船の要目、性能、航海援助装置の種類・精度、海上交通量、潮流、人的要因等々に大きく影響されるとし、一般的条件を定めるには十分なデータがないとしながらも、航路を横切る潮流のない時の幅員は、船幅の5倍以上、潮流のある場合にはその強さに応じて増す、航路の屈曲部の半径は船長の5倍以上、幅員の増加については別途考慮するようにと答申している。

こうした港湾等の設計基準が十分に信頼でき、外力条件その他の変化に対応できるならば、港湾等の要目はそのとおりに決めればよいから、前項で述べたようなケーススタディの多くは不要になるはずである。しかし、現在の港湾等の設計基準はそうした段階には程遠く、個別の経験をやや安全側にまとめたものというのが実情であろう。日本の基準をまとめた「港湾の施設の技術上の基準・解説」のなかで、船舶の性能等が関係する部分は、強度その他の部分の詳細さと全く対称的である。ユーロポートの例では、計画吃水20.7mの船に対して、Table 5 のように、やや余裕をもった寸法を採用している³⁰⁾。つまり、大まかな規定をしておき、個別の設計例などの経験に基づいて最終的に決めているが、Table 4 のような大まかな規定の根拠はかなりあいまいである。

港湾の設計基準が今一つ、明らかでない最大の原因は、船の性能や操船者の能力が明瞭になっていないためである。船舶の操縦性能については、その数学モデルがある程度、確立したのに伴い、基本的な局面に

Table 5 ユーロポート航路の幅員と水深³¹⁾

Europort Channel Characteristics (Rijkswaterstaat)						
	Length (km)	Direction (degrees)	Width (m)	Channel Width Coefficient	Depth Below MSL (m)	Keel Clearance at High Water % of Draught
Eurochannel (outer channel)	30	082.5	1200	23	23.5 to 24.5	20
Maaschannel (inner channel)	12	112	600	11.5	23.5	15
Port entrance			400	7.7	22.5	10

についてはおよその知見が得られている。しかし、港内操船における船の性能については、今後の検討が必要で、特に代表的な操船パターンを抽出し、その場合の船の性能を明確にしなければならない。また、操舵員の針路制御能力についてはある程度、わかってきたが、航海士やパイロットの機能については今後の課題である。とくに、これらの性能がその平均値とバラツキでも示されれば相当効果的である。そして、操船シミュレータを用いた安全性評価等の研究が総合的に推進される必要がある。これについては、4.5で述べる。

4.4.4 船舶の設計への応用

シミュレータを使った研究があれば多いCAORFでも、船舶の設計へ応用した研究例となると以外に少ない。あっても、Bridge Designの最適化、ARPAなどの航海援助装置の開発や改良、あるいは、船の針路安定性の評価基準、といった項目である。これは、アメリカが造船国でないこと、CAORFが国の研究所であることなどが原因と思われる。一方、他のシミュレータは一部を除き、ほとんどが訓練用のシミュレータであるので、やはり、船舶の設計への応用例は少ない。唯一、造船所が所有、運用しているIHIシミュレータの研究プロジェクトの中にわずかに船舶への応用例が見られる⁸⁾。

(1) 45万トンタンカーの設計

当時、世界最大のタンカーとして注目をあびた45万トンタンカーの建造に先立ち、30mの大型模型試験によって基本的な操縦性能について検討された。しかし、本当に操舵員が安全に操船できるのか否かを確認するため、模型試験で得られたデータをもとにシミュレータ実験が行なわれ、20万トンタンカーと比較してもそう大差なく操船できることが確認された。

(2) 125,000m³ LNG船の設計

LNG船はその巨大な上部構造物のため、大きな風圧抵抗を受け、操縦性への影響が大きい。タンク形状(球形、自己支持角柱B形)、舵面積比(1/45、1/60)、船速(8、12ノット)を変えた実験が、15~20m/secの風速を想定してシミュレータを使って行なわれた。そして、実際に横風の中で保針したり、変針する実験で、当て舵量や舵角余裕が調査され、その結果が、実際のLNG船の設計に役立てられた。

これらの詳細は第5章で紹介されるので、ここではこの程度にとどめる。総じて言うと、船舶設計に対する操船シミュレータの利用例は予想以上に少ないようにみえる。この背景の一つは、主力の造船国である日本に本格的なシミュレータがなく、多数のシミュレータを運用している欧米諸国は必ずしも造船国ではなくなりつつあるという事情であろう。例えば、第2回の International Bridge Design and Operation Forum に日本からの応募論文は皆無であった。しかし、最近になって、港湾等の制約条件の下で安全性を確認し、最適船型を開発するような仕事が増えつつある。こうした安全性の確認が技術的に可能であることが次第に船主側で知られつつあり、第3回操縦性シンポジウムで提案された操縦性能をも考慮した初期設計が要求される趨勢にある。

4. 5 航行安全評価に対する操船シミュレータ利用の展望

船舶の航行安全の評価に操船シミュレータがどのように用いられているかについて紹介してきた。この中で、CAORFの活動はその中心になるもので、とりわけ、港湾や水路の開発計画の評価に用いられ、成果を上げている。操船シミュレータによる港湾や水路の検討は今日、Case Studyの形で行なわれているが、一般的な港湾の設計基準の確立も重要であり、この領域でも操船シミュレータの利用が期待される。他方、ある程度、港湾の条件等は決まっていて、そこに安全に出入港できる最適な船型を設計するというような仕事も次第に増えている。操船者を必要としない超自動化船を開発する場合にも、現在の操船者の機能を分析するための有力な手段が操船シミュレータであると言えよう。このように、今後、操船シミュレータに期待するところは多い。

一般的にいうと、使用目的によって、必要な操船シミュレータの仕様は異なる。先に述べたが、学生に対する訓練用シミュレータとしては、中規模のシステムがコスト面からも推奨できるであろう。しかし、本職のパイロットが特定の港湾に入港する際の操船法を把握するためにシミュレータを利用するような場合、できるだけ、本格的なものが良い。これと同様に、安全性を評価するために使用する操船シミュレータは、その仕事の性格上、大規模なものにならざるを得ない。これは、安全性が問われるのはいずれにせよ、港湾の形状、海上交通状況、外力条件等が複雑な場合で、しかも離着桟とか、狭水路航行のような操船の局面が問題だからである。

このようなシミュレータを実現する上で、二つの問題があろう。一つは視界投影の問題であり、柔軟性を持つCGIシステムが有効と思われる。離着桟の局面では、近接した物標の投影が必要になり、船橋から桟橋を見下ろすような状態を再現する必要がある。従来のシミュレータで採用している円筒型のスクリーンでは投影に限界があり、半球形化せざるを得ないかもしれない。また、このような場合、物標が近接するために画像が複雑化するから、必要なところだけを正確に作像するような工夫を要する。あるいは、最近、フライトシミュレータの分野で開発されているヘッドマウント式ディスプレイ等の採用も考えられる。この装置はパイロットの装着したヘルメットによって視野を検出し、必要な部分の画像のみを作り、眼前の半透明の鏡にグラスファイバーケーブル経由で投影するのである。このような視界投影技術は基本的にはすでにフライトシミュレータの分野で開発されつつある。

もう一つは操縦運動の数学モデルである。一般に使用されている数学モデルは、前進運動が大きいという条件下で得られているから、離着桟時には問題を生じる。このような離着桟の局面から一般の航行状態までカバーしうる数学モデルは、現在のところ、十分な実績のあるものがない。Crane⁵⁴⁾やNorrbin⁵⁵⁾あるいは小瀬等⁵³⁾の試みがあるが、多くの船型に適用できる数学モデルの確立は今日の操縦性研究の大きな課題である。また、従来の数学モデルは、船の操縦運動が十分に低周波域にあるとみなし、準定常問題と仮定して導かれているが、港湾内では頻繁な主機の操作等がなされるし、過去の運動によって攪乱された流体の中で船は動くから、流体力にメモリ影響を考慮する必要があるかもしれない。さらに、港内操船の手段である曳船のモデル化も必要になろう。結局、実際に近い必要な複雑さをもつ局面までカバーしうる数学モデルの開発が必要であり、これは船舶の操縦性研究にとっても重要な課題である。かつ、現在の研究水準から考えると、十分達成可能な課題と言えよう。

こうした操船シミュレータは、今日の計算機事情等から考えると、合理的な費用の範囲で十分、建設し、運用できると考えられる。すでに、日本でも操船シミュレータ建設懇談会によって、こうしたシミュレータの建設と運用の可能性が検討されている⁵⁾。また、諸外国の操船シミュレータの多くは自力運用されており、40～50億円の巨費を投じたと言われるCAORFシミュレータの場合、運用費の半ばは外部機関から得ていると聞く。Fig. 7に示したCAORFのプロジェクトには、資金提供者が紹介されているが、国家プロジェクトのために運用されるべきシミュレータであるにもかかわらず、年毎に共同研究、委託研究の割合が増えている。港湾や船舶の建設、建造は多額の経費を要するが、その改良により得られる利益も多く、民間ベースでもシミュレータは十分な成果が期待しうる。

シミュレータを利用した安全性評価を行なう場合、それなりの方法論が必要になる。やみくもにシミュレーションすれば良いと言うものではない。著者の一人は安全性評価の手順を提案している³⁵⁾が、それには、操船シミュレータによる総合的な評価の前に、合理的な操船計画の立案法やそれぞれの操船の局面における船の性能の把握が大切になる。詳しくはこのシンポジウムで別途報告されるので、その稿を参照していただきたい。また、何をもって安全とみなすかという安全性評価の方法も重要であるが、操船シミュレータはその検討にも役立つ。

以上に述べた事柄を通じて、造船の立場から、あるいは船舶の運航者や港湾の建設と管理の立場から、操船シミュレータのもつ意味が理解されよう。日本においても、操船シミュレータはこれら三分野で必要性が認められている。この稿で述べたとおり、安全性評価に用いるべきシミュレータは可能な限り、高性能なものが望まれるから、コストもかかり、現実的には共同利用の性格をもたざるを得ないかもしれない。この場合、安全性評価の研究はこれら三分野の協力で効果的に機能し得るものであるから、共同利用の操船シミュレータはむしろ積極的な意味をもつと考えられる。例えば、先駆的な活動をしているCAORFの場合、多くの分野の協力が効果的に組織されている。

また、次の事情にも注意したい。諸外国における操船シミュレータは運営主体の主力が船員の訓練機関となっている。訓練用シミュレータの場合、これは当然と言える。しかし、安全性評価用シミュレータの場合、視界投影技術がある程度確立しつつある現在、その効果的な活用はそれに組み込まれる操縦運動の数学モデルに多く依存せざるを得ないから、それを専門とする造船分野の役割が重要になる。先のMARSIM 84で操縦運動の数学モデルに関するWorkshopが開催されたのは、多年の操船シミュレータの運用の結果、数学モデルの重要性があらためてクローズアップされたためと言えよう。例えば、CAORFは船舶操縦性の専門家をもたない。これはおそらくCAORFの最大の弱点の一つであり、これを補うために、この機関はESSO OSAKAのプロジェクト⁴⁶⁾を始めとして、スティーブンス工科大学における多くの実験、パナマ運河プロジェクトに関連したSSPAにおける模型試験等、操縦運動の数学モデルの開発に多大の経費を投入しているのであろう。

最後に、最大の造船国であり、海運国であり、そして、貿易立国のために港湾の整備を重視せざるを得ない我が国に、本格的な操船シミュレータがないという事実注意到意を喚起したい。IMSFの会合等で、率直に日本の活動の進展に対する期待が聞かれるのは、無理からぬところであろう。近い将来、本格的な操船シミュレータの建設を期待したい。

参考文献

操船シミュレータに関する概説

- 1) 小瀬 : 船舶操縦シミュレータについて、日本造船学会誌、554 号、(1975)
- 2) 野本 : 操船シミュレータの現状と今後の展望、造船技術、(1979)
- 3) シミュレータ研究委員会 : 船員の技能向上のためのシミュレータ利用に関する調査研究、日本海難防止協会、(1972)
- 4) 日本船長協会操船シミュレータ研究委員会 : 世界の操船シミュレータの現状、(1983)
- 5) 操船シミュレータ懇談会 : 操船シミュレータ建設について、(1982)

海事分野のシミュレーションに関するシンポジウム

- 6) Proceedings of the First International Conference on Marine Simulation, The college of Nautical Studies, Southampton, (1978)
- 7) Proceedings of the Second International Conference on Marine Simulation, CAORF, Kings Point, (1981)
- 8) Proceedings of the Third International Conference on Marine Simulation, Rotterdam, (1984)

CAORFの活動全般に関するシンポジウム

- 9) Proceedings of the First CAORF Symposium, (1977)
- 10) Proceedings of the Second CAORF Symposium, (1978)
- 11) Proceedings of the Third CAORF Symposium, (1979)
- 12) Proceedings of the Fourth CAORF Symposium, (1980)
- 13) Proceedings of the Fifth CAORF Symposium, (1983)
- 14) Proceedings of the Sixth CAORF Symposium, (1985)

訓練に対するシミュレータの利用

- 15) T.J.Hammell, K.E.Williams, J.A.Grasso and W.Evans : Simulators for Mariner Training and Licensing, Phase 1 : The Role of Simulators in the Mariner Training and Licensing Process, Vol. 1 and 2, CAORF Technical Report, CAORF-50-7810-01, (1980)
- 16) T.J.Hammell, J.W.Gynther, J.A.Grasso and D.C.Lentz : Simulators for Mariner Training and Licensing, Phase 2 : Investigation of Simulator-Based Training for Maritime Cadets, CAORF Technical Report, CAORF-50-7915-01, (1981)
- 17) T.J.Hammell, J.W.Gynther, J.A.Grasso and M.E.Gaffney : Simulators for Mariner Training and Licensing, Phase 2 : Investigation of Simulator Characteristics for Training Senior Mariners, CAORF Technical Report, CAORF-50-7915-02, (1981)
- 18) P.Kayten, W.M.Korosh, W.C.Miller, E.J.Kaufman, K.E.Williams and T.A.King : Assessment of Simulator-Based Training for the Enhancement of Cadet Watch Officer Performance, CAORF Technical Report, CAORF-15-8110-02, (1981)

- 19) J.W.Gynther, T.J.Hammell, J.A.Grasso and V.M.Pittsley : Simulators for Mariner Training and Licensing : Guidelines for Deck Officer Training Systems , CAORF Technical Report, CAORF-50-8004-03, (1982)
 - 20) J.W.Gynther, T.J.Hammell, J.A.Grasso and V.M.Pittsley : Simulators for Mariner Training and Licensing : Functional Specification and Training Program Guidelines for a Maritime Cadet Simulator, CAORF Technical Report, CAORF-50-8004-03, (1982)
 - 21) J.W.Gynther, T.J.Hammell and V.M.Pittsley : Guidelines for Marine Pilot Simulator-Based Training Systems, Draft of CAORF Technical Report, (1984)
 - 22) IMSF : Ship Simulators Training Course Syllabi
- 操船シミュレータの仕様
- 23) IMSF : Marine Simulator Characteristics, (1981)
 - 24) J.P.Hooft and I. Oldenkamp : Construction, Operation and Capabilities of the NSMB Ship Manoeuvring Simulator, NSMB Publication, No. 382, (1971)
 - 25) 野本、小瀬 : 人間が操舵する船の操縦運動に関する実験的研究 (一)、日本造船学会論文集、第132号、(1968)
 - 26) 森 他 : 操船シミュレータの開発とその応用、日本造船学会論文集、第138号、(1975)
 - 27) 日本造船研究協会 : 大型化に対する船舶操縦システムの調査研究報告書、(1975, 1976, 1977)
 - 28) 小林他 : 船舶操縦シミュレータの解析——人間機械系の観点より——、航海学会論文集、第56号、(1976)

文献4)には、最近の操船シミュレータおよびトレーニングコースの詳しい表がある。

港湾の設計基準

- 29) 運輸省港湾局 : 港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、(1979)
- 30) Per Bruun : Optimal Layout Dimensions of Maritime Fairways in Shallow Seas, Sea Straits, and Maritime Waterways, Port Engineering, Third Edition, Gulf Publishing Company, (1981)
- 31) PIANC ICORELS Group IV : Optimal Layout and Dimensions of Maritime Fairways in Shallow Seas and Maritime Waterways, (1980)

日本の港湾における航行安全性評価の例

- 32) 苫小牧港海上安全防災対策調査委員会 : 昭和54年度海上安全防災対策調査報告書、日本海難防止協会、(1980)
- 33) 塩釜港仙台港区航行安全対策調査委員会 : 塩釜港仙台港区航行安全対策調査報告書、日本海難防止協会、(1984)
- 34) 坂出港番の洲シーバース安全問題調査特別委員会 : 坂出港番の洲シーバース安全問題調査報告書、神戸海難防止研究会、(1983)
- 35) 小瀬他 : 出入港操船の安全性に関するシミュレータスタディの例、日本造船学会論文集、第

船の操縦運動モデル

- 36) 野本他 : 船の操縦性について (1)、(2)、造船協会論文集、第99、101 号、(1956,1957)
- 37) D.Clarke : A New Non-linear Equation for Ship Manoeuvring, ISP, Vol.18, No.201, (1979)
- 38) N.H. Norrbin : The Technique and Analysis of the Zig-zag Test, with Preliminary Statistical Results, BSRA Trans. No.2588、(1965)
- 39) K.Nomoto: Approximate Non-Linear Analysis on Steering Motion, Proc. of 12th ITTC,(1969)
- 40) M.Bech and L.Wagner Smitt : Analogue Simulation of Ship Manoeuvres Based on Full-Scale Trials and Free-Sailing Model Tests, Hydro-and Aerodynamic Laboratory Report, Hy-14,(1969)
- 41) G.van Leeuwen : A Simplified Non-Linear Model of a Maneuvring Ship, DELFT Report No.262, (1970)
- 42) 芳村、野本 : 増減速を伴う操縦運動の取り扱いについて、日本造船学会論文集、第134 号、(1973)
- 43) M.A.Abkowitz: Lectures on Ship Hydrodynamics Steering and Manoeuvrability, Hy-5,(1964)
- 44) 第3回操縦性シンポジウム、日本造船学会、(1981)
- 45) C.C.Glansdorp and J.B.van den Brug : Workshop on Mathematical Modelling of Ships Manoeuvring Behaviour, MARSIM 84、(1984)
- 46) Proceedings of Workshop for Development of an International Joint Ship Maneuvering Program (IJSMP), National Maritime Research Center, (1981)

その他参考にした主要な文献

- 47) 小山、小瀬、長谷川 : 保針操舵における針路不安定の許容限界に関する考察、日本造船学会論文集、第142 号、(1977)
- 48) K.Nomoto : Simulator Studies from a Naval Architect's Point of View, MARSIM 78, Southampton, (1978)
- 49) J.J.Puglisi : The International Marine Simulator Forum, MARIN Report No.18、(1984)
- 50) Proceedings of Second International Bridge Design and Operation Forum, Hamburg, (1984)
- 51) DMI News, Danish Maritime Institute, (1984)
- 52) J.B.Tucker : 進歩したコンピュータ画像はフライトシミュレータのリアリズムを高めている (訳)、ASCII、(1985)
- 53) 小瀬他 : 低速で航行する船の操縦運動モデルについて、日本造船学会論文集、第155 号、(1984)
- 54) C.L.Crane : Response of Slowly Moving Ship to Propeller and Rudder Actions, Report No.1169, Davidson Laboratory, Stevens Institute of Technology, (1966)
- 55) N.H.Norrbin : Theory and Observations on the Use of a Mathematical Model of Ship Manoeuvring in Deep and Confined Waters, 8th Symposium of Naval Hydrodynamics, (1970) and SSPA Publication No.68, (1971)