第6章　操縦運動数学モデルの応用分野とその評価

小瀬 邦治*・長谷川 和彦**・本田 啓之輔***

目　　次

6.1　まえがき……225
6.2　操縦運動の数学モデルの応用分野の現状と問題点……227
6.2.1　船の操縦系の構成と数学モデルの応用分野……227
6.2.2　造船設計における利用……228
6.2.3　Manoeuvring Booklet における利用……232
6.2.4　自動運航システム開発における利用……233
6.2.5　港湾、水路開発における利用……234
6.2.6　今日の応用分野における数学モデルの課題……236
6.3　操縦運動の数学モデル評価の考え方……239
6.3.1　シミュレーションモデルの開発手法……240
6.3.2　シミュレーションモデルにおける評価の方法……245
6.3.3　操船シミュレータ用数学モデルの評価例……251
6.4　操船情報のあり方と予測精度……260
6.4.1　操船情報として望まれる操縦性能……260
6.4.2　操船情報として期待される操縦運動の推定精度……263
6.5　あとがき……268

6．1　まえがき

定常旋回時の力の釣合の問題に主たる関心をおいた操縦性研究は、１９４６年のDavidsonとSchiffの著名な論文 "Turning and Course Keeping Qualities" を転回点として[1]、動力学的立場から解明されるようになった。この場合、前進、横流れ、そして旋回という3自由度の操縦運動方程式、つまり、操縦運動の数学モデルを導き、操縦性能の表現、推定、評価等を考えることになる。この数学モデルを導くには、船に作用する流体力を推定する必要があり、その時の流体力推定技術の水準が利用できる数学モデルに関係する。このシンポジウムの主目的は、流体力推定法とそれが可能にする操縦

*)　広島大学工学部
**)　大阪大学工学部
***)　神戸商船大学商船学部

運動の推定技術、換言すれば操縦運動の数学モデルの今日の水準を明確にすることである。この意味で、操縦流体力がどの程度、正確に推定できるか、その流体力から定常旋回特性、Z試験結果、停止性能等の代表的な操縦運動がどの程度の精度で予測しうるか等、操縦運動の推定技術の直接的な評価は前章までに詳しく議論されている。

数学モデルの発展は多くの応用研究を可能にするし、応用研究はその目的に適した数学モデルを要求する。例えば、野本の提案した簡単な数学モデル[2]、つまり、KとTの二つの係数を持つ応答モデルは肥大船開発に重要な役割を果たした。船に作用する流体力についての情報が乏しい当時にあって、この応答モデルを自由航走時の操舵と旋回応答の記録に当てはめ、得られた操縦性指数の実績から針路安定性を評価し、舵面積の決定を可能にした[3][4]。この場合、モデルの簡略さが基本的に重要であった。しかしながら、今日、期待されるような、複雑な外力と航行環境、さらに多様な制御のもとでの操縦運動の予測には、この応答モデルは簡略で、自由度が不足する故に不十分となる。つまり、望ましい操縦運動の推定法、その手段としての数学モデルは、今日の応用分野の事情を考慮して、あらためて明確にしうるものである。本章では、種々の応用分野の事情を概括し、操縦運動の数学モデル、あるいは操縦運動の推定技術に対する評価と課題を摘出することを目的とする。

現在、操縦運動の数学モデルの利用分野は大変、広範であり、例えば港内操船や狭水路航行の自動化や安全性評価、定点保持操船システムの開発等の複雑な操縦の問題が重要になっている。この稿では、まず、操縦運動の数学モデルの利用分野の現状を概括し、その課題を明瞭にする。

今日、複雑なシステムの挙動を何等かの数学モデルで表現し、それを用いて計算機上でシミュレーションを行い、システムの評価や最適化を図るというアプローチが多方面で活用されている。このようなアプローチの成否は、一つにはこの数学モデルにかかっている。こうした背景のもとで、数学モデルの validation や verification 問題が議論されている。どんな場合にも役立つ方法があるわけではないが、数学モデルを評価する際に考慮すべき視点をこうした議論から摘出する。

操縦運動の数学モデルは操船シミュレータに組み込まれ、港内操船の安全性とか、港湾や水路の設計の評価に使われている。操船シミュレータが次第に、このような複雑な問題に利用されるようになると、数学モデルは複雑化し、それで推定した操縦運動と実際との対応が問われ、その validation や verification が重要になる[5]。そこで、CAORFで進められているパナマ運河改修案の評価研究の例を中心に、操縦運動の数学モデル評価の具体例を紹介する。

また、種々の操作下の操縦運動の推定が可能になると、操船者の必要とする情報の提供が可能になる。IMOは一定以上の新造船に対しては、その操縦性能を記載した Manoeuvring Booklet の装備を義務づける方向を打ち出しており[6]、近い将来、実施される見込みである。この Booklet に載せるべき操縦性能に関する情報の推定は、試運転経費の削減、あるいは推定によらざるをえない性能があるという意味で、数学モデルの重要な応用分野となる。この Manoeuvring Booklet が操船者に有益であるためには、どのような情報がどのような精度で提供されるべきかが問われ、操縦運動の数学モデルの課題を考える際に役立つ。そこで、本稿の最後には、操船者の立場から期待される操縦運動に関する情報のあり方について検討する。

6．2　操縦運動の数学モデルの応用分野の現状と問題点

今日、操縦運動の数学モデルの形とその諸係数の推定法は、ある程度、確立されつつあり[7)~14)]、相当に複雑な環境下の運動まで取り扱うことが可能になっている。モデルが利用できることになると、当然のことながら、それを利用した応用研究が広がることになる。ある意味では、種々の応用の必要性がそれに応じうる数学モデルの開発を促したと言うことも可能である。こうした応用が展開されると、その過程で数学モデルに対する評価がなされ、課題が明かにされる。この節では、操縦運動の数学モデルの応用分野の現状と課題を紹介する。

6．2．1　船の操縦系の構成と数学モデルの応用分野

操縦運動の数学モデルの応用分野の実情を紹介する前に、多少、船の操縦系全体を把握しておくことにする。船の操縦問題においては、ある操縦性能をもつ船と航行環境とコントローラが一つの制御系を構成し、この三者間の関係が基本となる[15)]。これらの間の適合関係が運航の安全性や経済性を規定するからである。ここでの課題である船の操縦運動を推定するための数学モデルの評価も、他の二者と密接な関係をもつ形でなされることになり、他の構成部分との整合性が問われる。したがって、この三つの構成要素について簡単に紹介しておく。

第一の船の操縦性能というのは、船自体の性能の他に、舵やプロペラ、そして曳船といった操縦手段の特性をも含むと考えられる。まず、船体と制御手段の流体力学的特性が第一の要素である。この他に、操縦手段の挙動の記述が含まれる。操舵速度制限と一次遅れで表現される操舵機特性、可変ピッチプロペラの油圧制御機の特性、エンジンと軸系の運動特性、さらには曳船やサイドスラスターの動特性等のモデル化が必要になる。

第二の航行環境は自然的なものと交通的なものとを考慮する必要がある。自然的なものとしては、地形の他、潮流、風等がある。水深、水路幅等は制限水路影響の形で船の運動に効いてくる。潮流影響は一様な場合のみではなく、狭水路や港内では場所的な不均一が顕著となるから、その影響のモデル化[16)]も必要になる。もう一つの交通的な環境については、海上交通に関わる種々の法規、慣習、各種の航行援助、港湾管理上の指示、自身の運行スケジュール等の他に、交通流のランダム性が問われることになる。

第三の構成要素はコントローラである。このコントローラとして、パイロット等の人間と自動化装置がある。保針、変針のように単純な制御は自動化装置が開発されたり、人間の制御特性もある程度、明らかになっているが[17)18)]、パイロットや航海士の専門知識と経験に基づく判断のモデル化は困難で、今後、人工知能技術等を取り入れた形で検討されるべきであろう[19)]。このコントローラの情報処理と意志決定を容易にするセンサーや各種の支援システムもまた、この部分に含まれる。

さて、船の操縦問題に関わりあう三つの要素を簡単に紹介した。船の操縦問題に関連した種々の研究開発課題を考える際、この三つの要素がどの様な形で位置づけられるかが問題になる。一般的に言って、これらの要素の内、あるものが主たる位置づけをされ、他のものが従たる役割を与えられると、それに応じてモデルに要求される正確さとか、許容される複雑さとかが決まる場合が多い。

まず、船の操縦運動性能自体が主たる検討課題となる場合である。これは主に造船設計の問題であ

り、仕様の要求する操縦性能の確保が課題となる。また、船の操縦性能をいかに予測するかという問題も、要求性能を確保する設計を実現する上で、あるいは建造された船の性能を操船者に示すために重要になる。

続いて、航行環境が主要な検討項目となるのは、港湾や水路、航行援助施設等の設計と評価が問題となる場合である。港湾や水路の設計において、いわゆる水域施設、つまり操船上で必要な水域に関しては[20)~22)]、今日も手探りの段階にある。 最近、操船シミュレータを用いて、各地の港湾の改良計画等を評価するような仕事が盛んに実施されている。米国のＣＡＯＲＦは[23)] この分野の研究の中心になっており、最近の巨大プロジェクトとしてパナマ運河の改修計画の評価研究[24)] を推進している。

最後のコントローラに関しては、実績のあるオートパイロットの開発は天候調整等を適応機能で実現しうるレベルに達している[25)]。現在の開発は船位保持、誘導システム[26)]、自動避航システム[19)27)28)]、自動離着桟システム[29)~31)] 等のように、３自由度の運動を制御し、しかも相当に高度の判断機能を必要とするようなコントローラに焦点が移っている。日本で推進されている知能化船の開発はその代表的なものである。

以下、これらの問題について具体的に検討し、操縦運動の数学モデルに課せられた課題について検討する。

６．２．２　造船設計における利用

（１）Manoeuvrability Standards の問題

船に安全上、運行経済上で必要とされる操縦性能を与えることは、造船設計の重要な課題である。先に述べたように、この目的のために野本の提案した一次系近似の応答モデル[2)]を用いる方法が多くの実績をあげていることはよく知られている。この方法は船の性能を表す指標と船型との関係を、実績の解析から求め、利用するものであり、船に作用する流体力の推定方法が十分でない当時、きわめて画期的なものであった。

さて、この方法は針路安定性という必要条件の一つを満たすような船型設計を実現するものである[3)]。しかし、当然のことながら、船に要求される性能は針路安定性のみではない。最近、ＩＭＯでは Manoeuvrability Standards の検討を開始しており、１９９０年までに具体案をうるべく討議を進めることになっている。この Manoeuvrability Standardsが制定されることになると、船はこれによって規定される性能を確保することを要求される、換言すると、この性能を確保できない船は船として認められないことになる。針路安定性を考慮して舵面積を決めるという今日までの立場は、著しく針路不安定な船は保針、変針の操縦が困難になり、実際に運行が難しくなるから、そのような船は船主がそのままでは受け取らないという事実から造船設計で重視されたのである。しかし、この場合には、基準として規定されている訳ではないから、その性能の程度や種々の事情から、廃船にされたり、性能改善工事を要求されたり、最悪の場合は極端に慎重な運転で、言わば、騙し騙し運航されるされるという選択が採られることになる。事実、Fig. 6.2.1に示す、２５度もの不安定ループ幅を有した小型タンカー[32)] は人間の制御能力の限界を越えていたために、大きな蛇航を余儀なくされ、運航がき

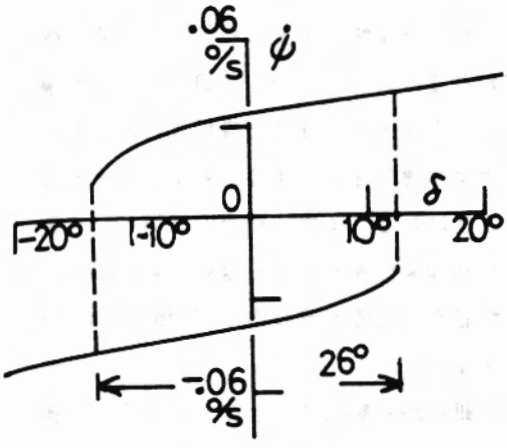


Fig. 6.2.1 Turning characteristics of a quite unstable small tanker

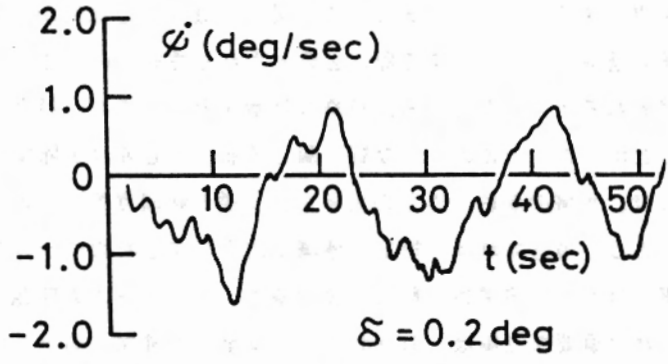


Fig. 6.2.2 Self-oscillating yawing of a fishing boat with unusual phenomenon

わめて困難であった。そして、たびたびのトラブルに伴い、性能改善の試みがなされたが、結局、廃船にされている。Fig. 6.2.2は異常現象の名で知られる特異な操縦性能を持つ船の自励発振のタイムヒストリーである[33]。 ほぼ、舵中央のままで、このような蛇航をする本船は、航路上で船に遭遇すると停止し、それが航過した後に前進を発令するような極度に慎重な運航を強いられ、後に改造された。

基準が制定されると、それを満たさない船は性能改善するか、それが不可能ならば運航できないことになり、騙し騙し運航されることによる危険は排除されることになる。 これは Manoeuvrability Standards 制定の直接的な効果であるが、間接的な好影響も重要である。例えば、港湾域の操船指揮を担当するパイロットの操船の問題である。彼らは港湾の事情には通じているが、船長と違い、個々の性能については詳細な情報を持たない。パイロットが知っているのは、船種に応じた平均的な性能であり、平均値からのばらつきに関する多少の経験であろう。少なくとも、初めて操船する現在の船の性能の特殊性については知らないで当然とも言える立場にある。Manoeuvrability Standards の適用は船の性能のばらつきを縮小することになり、パイロットが自船の運動予測をするのを容易にし、安全性向上に役立つ。また、狭水路中の避航操船の安全性は、遭遇船との相互連携の信頼性に依存するところが多い。Manoeuvrability Standards の適用は相手船の運動予測を容易にするから、避航操船の安全にも寄与すると考えられる。

所定の性能を持つように設計できなかった場合、その船は運航できない結果となるから、造船設計上でManoeuvrability Standards を達成することは現在の復原性と同様な意味を持つことになる。このように、Manoeuvrability Standards は実施されると相当に大きな影響を与えるものとなるから、制定に際しては、基本となる立場を明瞭にし、慎重な検討が要求される。 ここで、Manoeuvrability

Standards に関する基本的な考え方を整理しておきたい。

まず、最初に主張すべきことは、Manoeuvrability Standards は操縦性に関する最小限の必要性能を規定するという点である。この場合、最小限とは何かが問われることになるが、普通の操船者が普通の港湾等に出入りする際に必要とされる性能ということになろう。また、普通の操船者とは何かが問われるが、少なくとも、特殊な技量を要求したり、特別に慎重な運航を要求する必要がないと言うことができ、上述のような騙し騙し運航する必要は排除することになる。また、普通の港湾という意味は、水域の制約、外力の大きさ、交通の輻輳度等における特別な条件を前提にしないということになろう。換言すれば、特定の港湾に出入りするために十分な性能を与えると言うのは Standardsの立場ではなく、港湾毎、船毎の運用基準、個別ルールの問題である。

次に重要な立場は、Standards は安全性の確保、向上という観点から制定すべきことであろう。操縦性能の悪い船は、経済運航という点でも問題を持つ。例えば、針路安定に欠ける船はオートパイロットによる保針が困難となり、しばしば大きな蛇航を生じるから、それによる馬力損失が無視できいことはよく知られている。しかし、運航経済性にかかわる性能は船主の選択の問題であり、安全性から規定されるStandards とは区別して扱うべきであろう。安全性という観点から考えた場合、海難事故の多くが生じている港内とか狭水路における航行が最も重要である。したがって、一般航行時のみではなく、港湾域で船が発揮すべき性能に踏み込んだ性能基準が求められることになる。

港湾域の操船を考えて操縦性能を規定するには、ベテランの操船者にどのような性能が安全上重要かを聞くとか、不安全であった例、つまり海難事例を分析し、性能との関係を洗いだすとかの方法が考えられる。しかし、多少、系統だった力学的検討をするとすれば、まず、港湾域でどのような操船がなされるかを把握し、その場合の制御の可否を数学モデルを用いて検討することが必要になろう。港湾域で船が行う運動について調査するために、小瀬らは瀬戸内海域の港湾について、その建造基準を確立するための安全性検討の報告書を収集し、桟橋毎の離着桟操船計画、９０例余を分析した。その結果から、離着桟時の一連の操船計画を分解すると、比較的に単純な意図を持つ要素的な操船の組合せと見なせることを指摘した[34]。Table 6.2.1は用いられる要素操船の種類と使用頻度を示す。港湾域の操船の安全性に配慮する立場から Standards を考える場合、このような要素操船時の制御限界の分析がまず、試みられるべきと指摘できる。

Table 6.2.1 Frequencies of element manoeuvres during berthing (from 95 case studies)

単位：ケース

	要素操船性能の種類		入港時	出港時
1	保　針	一定速	42	0
		加　速	0	46
		減速(停止を含む)	64	0
2	変　針	一定速	10	1
		加　速	0	29
		減　速	25	0
3	その場回頭	船首中心	28	18
		船尾中心	0	20
		重心中心	4	24
4	横移動	真横	39	36
		斜航	0	1

続いて、船の操縦性能を表すどの様な指標を用いて、Standards を規定するかが問題になる。港湾内の安全性にまで配慮した形で、船に必要な性能を規定することは容易ではなく、上述のように今後の検討課題とするが、ここでは用いる指標と操縦性能推定法との関連を考えておきたい。設計時に、Standards を満足するか否かを推定することは、建造後の大幅な性能改善が困難な場合もあるから、実際上、極めて重要である。また、Standards を満たしているか否かを、試運転等で容易に確認できることも必要になる。ここで、こうした性能の推定や確認の容易さは、用いる指標によってかなり違うことを指摘したい。

例えば、Pull-out Manoeuvre[35] は、初期に旋回運動を与えた後に舵中央を発令し、直進に戻るかどうかを調べる試験であり、左右の初期旋回がいずれもゼロに戻らない場合には、針路不安定で、いわゆるループを持っていることになる。しかし、試験時、外力の介在は普通のことであり、例えば風圧力が舵角にして数度程度の旋回モーメントを与えるのは稀ではないから、この試験結果の評価は容易でないことが多い。この目的ではスパイラル、逆スパイラル試験で得られる定常旋回特性の推定、あるいは計測の方がはるかに良い結果を与えると期待される。日本造船研究協会ＲＲ７４２分科会では、ＩＭＯの要請で、各造船所が持つ推定法による運動計算結果と試運転成績の比較を試みた[36]。この検討から、定常的な運動の推定精度は良いが、過渡特性は難しいこと、クローズドループ的なものに較べて、オープンループ的な運動の推定精度が劣ることが指摘できる。

以上、Manoeuvrability Standards を考える際に重要と考えられる三つの観点について述べた。この Standardsの確立は船の運航安全の向上に極めて重要なものであるから、人間による港湾域における操船の安全性を考慮した形で、この問題について精力的な検討が必要になろう。この場合、港内操船を扱いうる数学モデルが基本となる検討手段となり、この確立が急務となる。

（２）特定の港湾条件を考慮した操縦性設計

Manoeuvrability Standards の適用は今後のことであるが、最近では船の具体的な運行条件を考慮して、十分な操縦性能の確保を要求される事例が次第に増加している。例えば、具体的に出入りする港湾等が指定され、そこで安全が確保しうる最適船型を選ぶとか、必要な操船手段の仕様を決めるとかの設計が要求されることになる。こうした傾向と、それへの対応については、既に日本造船学会の第３回操縦性シンポジウムで小山ら[37]が議論をしている。また、同学会運動性能研究委員会第３回シンポジウムでは、田中[38]が操船シミュレータを利用して、そうした設計を実施した経験を紹介している。また、安全性に対する極度の配慮を必要とするＬＮＧ船の安全運航の問題についても、葛西[39]が詳細な検討結果を紹介している。 したがって、全般的な問題はそれらの論文を参照いただくことにする。

多少、目的は違うが、大型タンカーの特定の桟橋への出入の安全性を検討する試みもなされている[40)~42)]。 この場合、安全性の確認に次のような手順が採用されている。（１）自然的、交通的条件を考慮して、専門家により操船計画を立案する。（２）一連の操船計画を要素操船に分解し、それぞれに船の性能が適応しうるかを評価する。（３）パイロットの指揮下で、実時間シミュレーションを行い、専門家による総合評価を試みる。こうした評価を行う上で、操縦運動の数学モデルは基本とな

る道具である。この際に重要なことは、大型船の場合には曳船をフルに活用し、その場旋回とか、横移動のような操船がなされることで、こうした運動を取り扱いうる数学モデルは確立されておらず、操縦性研究の重要な課題となる。

今後、個々の船の運航条件を考えて、それに十分な性能を保障するという設計要求は次第に増加すると予想しうる。海上輸送も極限までの効率を追求せざるをえないとすると、港湾等の資源を最大限に活用するような船型が課題となるからである。

６．２．３　Manoeuvring Booklet における利用

第１章で、ＩＭＯにおける Manoeuvring Booklet[6)43)] をめぐる最近の情勢が紹介されている[44)]。操船者に船の性能に関する情報を効果的な形で提供することは、安全性向上という立場から見て、大変、重要なことである。この意味で、ＩＭＯが Manoeuvring Booklet を実際に操船者の必要に応える形で改訂し、提案したことは意義深いことである。この Booklet に含まれるべき情報は造船所のみが提供するものではなく、運航者自身も自らの経験を記載し、次第に豊富なものにするへきものである。しかし、実際的には、情報の提供者として、造船所に対する期待が大きくなることは避けられないと見込まれる。

この Booklet に載せる情報は試運転等で計測するか、推定するかのいずれかで得る必要があるが、コスト等を考えると主力を推定に頼らざるを得ないと考えられる。特に、船の種類によっては実際に運航される載荷状態での試験が困難となるから、推定技術に対する期待が大きくなる。ＭＭＧモデルとして知られている今日の数学モデルはこうした要求に十分応えうるものであり、その現状はこのシンポジウムでは別に議論されるはずである。

本章の最後に、操船者の立場から望まれる操船情報のあり方について述べるが、こうした情報提供に数学モデルを利用する際の問題点について、次の指摘をしておきたい。

（１）定性的な情報は、定量的な精度以前に重要になる。例えば、逆転停止時に左旋するか、右旋するかは、その間は運動制御ができないだけに操船者にとって重要な関心事となる。しかし、この推定は困難であり、系統的なデータの収集等が必要になる。針路不安定な場合の初期旋回運動の影響も同様である。条件次第で左旋したり、右旋したりするような場合は、推定精度をあげると共に、操船者が一方的な誤解をしないような情報提供法が求められる。

（２）操船する立場からは、定常的な運動よりも、過渡的な性能の情報が重要になるが、その推定は容易でない。Manoeuvrability Standards の議論においては、推定の容易さという観点も考慮して、可能ならば定常的な指標を選択すべきと述べた。もちろん、その指標で必要な操縦性能が規定しうるという前提のもとでである。しかし、操船情報は操船者が必要とする形で提供されることが最も重要であるから、推定精度の確保は容易でないが、過渡特性の情報の提供が望まれる。こうした情報の推定のためには、時々刻々の運動状態の変化に応じた流体力の正確な記述が必要になり、結局のところ、流体現象に沿った流体力のモデル化が重要になる。ＭＭＧモデルはこうした主旨に沿うものであり、一層の精密化が必要になる。

将来は、操船者が使いやすいインターフェイスの開発と、数学モデルの完成度の向上とを通じて、

操船者が必要とする任意の操作による応答を直ちにシミュレーションしうるようなコンピュータシステムの形で操船情報を提供するのが理想的かも知れない。

6．2．4　自動運航システム開発における利用

船の運航の自動化の歴史は古く、非線形制御のテキストには著名なミノルスキィの自動操舵の安定性に関する論文が紹介されている[45]。以前には、こうした運航自動化の試みは主として、針路制御、つまりオートパイロットの研究に向けられており、これらの成果は第３回操縦性シンポジウムで大津、長谷川によって詳細に紹介されているので[25]、それを参照していただくことにする。少なくとも、最近のオートパイロットは極端に悪い性能の船でなければ、蛇航も操舵量も過大になることなしに保針が可能になっている。また、人間の調整に期待することなしに、海象等に応じた適切な操舵をする適応パイロットも普及段階に達しており、自動操舵については一応の完成度に達したと言えよう。

このようなオートパイロット自身に組み込まれる、あるいは、その開発に使用される数学モデルは、目的には操舵に対する旋回応答を記述する機能を持てばよいから、いわゆる応答モデルで間に合うと考えてよい。しかし、この場合には、外力の影響等の正確なモデル化は容易でなく、操舵による運動との連成を無視したり、別のモデルで計算した外力による運動をノイズの形で加えるとかの便宜的な方法が利用できる[46]。

最近の運航自動化の課題は、単なる船首方位の制御から船位の保持や誘導へ、一入力一出力から多入力多出力システムへ、そして操舵員ではなく、航海士によって担われている相当に高度の判断機能を含むシステムの開発へと変化している。

その一つは海洋開発等で重要になる定点保持システムである。また、作業船の位置制御等では、最終的には人間の判断で位置制御するが、二軸二舵に船首スラスター等の操作手段を連動させる必要があり、これを容易にするための補助パイロットであるジョイスティックコントローラ（ワンレバーコントローラ）の開発も各所で行われている。

自動運航システムとしては、大洋航行中はもとより、港湾や狭水路内の操船が対象になっている。安全性の一層の向上、船員数の削減による運航コストの低減を実現する上で、この局面の自動化は避けて通ることができないものであるが、高度のセンシング、情報処理と意志決定を必要とするために、ソフトとハードの両面での最近の計算機技術が初めて現実的な開発の着手を可能にしたと言うことができる。現在、日本で推進されている高度自動運航システム、略称、知能化船の開発はこの一例である[47][48]。

こうした知能化船は相当に高度な種々の要素システムを必要とし、それらが当面の開発課題である。狭水路等で遭遇船等の障害物を避けつつ、目的地に至る自動避航システム[19][27][28]、あるいは港湾内のある場所から桟橋まで船を誘導する自動離着桟システム[29]~[31]等について多方面で開発が進められつつある。これらの避航や離着桟のシステムは大きく分けると、障害物等を回避しつつ、目的の位置に至る運動軌跡を設計する機能と、設定された軌跡に応じて船を誘導する機能から成り立つと考えてよい。前者は、交通規則、慣例、船の性能、操船方法等に関わる知識に基づいて、適切な操船計画を立案する、極めて論理的で創造的な機能であり、最近、急速に普及しつつあるエキスパートシス

テム等の人工知能技術の応用が期待されるものである[19]。

さて、こうした自動化システムを開発する上で、操縦運動の数学モデルが果たす役割は大きい。こうした場合の数学モデルの役割は二つあり、それぞれに応じて適切なモデルが考えられる。一つはシステムに組み込まれて、適切な制御を遂行するために用いられるものであり、可能な範囲で簡略化されたものが用いられる。もう一つは、こうした自動化システムを開発、評価する際の手段として用いられるものであり、いわゆるシミュレーション用のモデルである[48]。開発するシステムが複雑化すると、制御方式の選択、制御パラメータの調整、システムの評価等において、解析的なアプローチが困難になり、シミュレーションを通じて総合的な判断をするという方法が採られる。この場合のシミュレーションは実機試験の代わりという意味で、できる限り正確であることが望まれ、数学モデルも複雑化することが多い。

こうした制御システムの開発に利用される数学モデルは、一般的には制御目的に規定されると言える。システム開発時のシミュレーションには、現在では、前進、横流れ、旋回の運動方程式を連成せる形のものが推奨できる。このモデルの場合、使用目的に応じて流体力の記述が自由に選択でき、外力の影響が考慮し易いこともあいまって、具体的な航行環境下の操縦運動を効果的に表現しうるからである。外洋における定点保持システムのシミュレーションの場合は、風や潮流の影響の他に、波浪による外力の表現がポイントになる。また、港湾内の離着桟のシミュレーションにおいては、複雑な潮流や地形の中を、低速で、縦横方向に運動するような場合の流体力の記述が重要になる。これらの詳細は別の所で議論されるので、ここでは指摘にとどめる。

制御システムに組み込まれるモデルとしては、問題によっては簡略型が利用できる。例えば、避航操船時の船の誘導には、制御計算の簡略さが期待できるから、操舵対旋回の応答モデルの利用も便利である。避航操船時には、ほとんどの状態で前進速力が支配的であるから、船首方位によって船位の大方が決まるからである[26]。しかし、簡略型モデルはその限界を考慮して採用すべきである。今日、開発対象になっている操船システムの多くは、基本的に多入力多出力システムであるから、多くの場合は連成方程式型のモデルを組み込むのが実際的であろう。

6．2．5　港湾、水路開発における利用

船の操縦性、航行環境、コントローラとしての人間の三者間の適合関係が安全性を考える際の基本となることは既に述べた。この三者に基準が確立されると、この適合関係の評価は容易になるが、現在のところ、操縦性基準、港湾等の水域施設の設計基準、船員に対する資格付与基準のいずれも、明確になっていない。こうした状況下で、港湾や水路の新設、改良計画の安全性を評価し、合理化するのは容易でないが、それらの開発には莫大な経費を必要とするから、各所で多くの試みがなされつつある。これらの詳細は既に紹介したことがあるので[15]、ここでは省略する。この港湾や水路の評価の問題は、先に述べた特定の運航条件に適合した性能設計とほぼ、同様な検討を要求される。

港湾や狭水路中の船の安全性を評価するためには、現在のところ、航行環境と船とコントローラとしての人間の制御特性を組み合わせて、操船状況のシミュレーションをするという方法が採用されている。こうした研究の中心となっているＣＡＯＲＦでは、Fig. 6.2.3 に示すような手順[49]で各種の

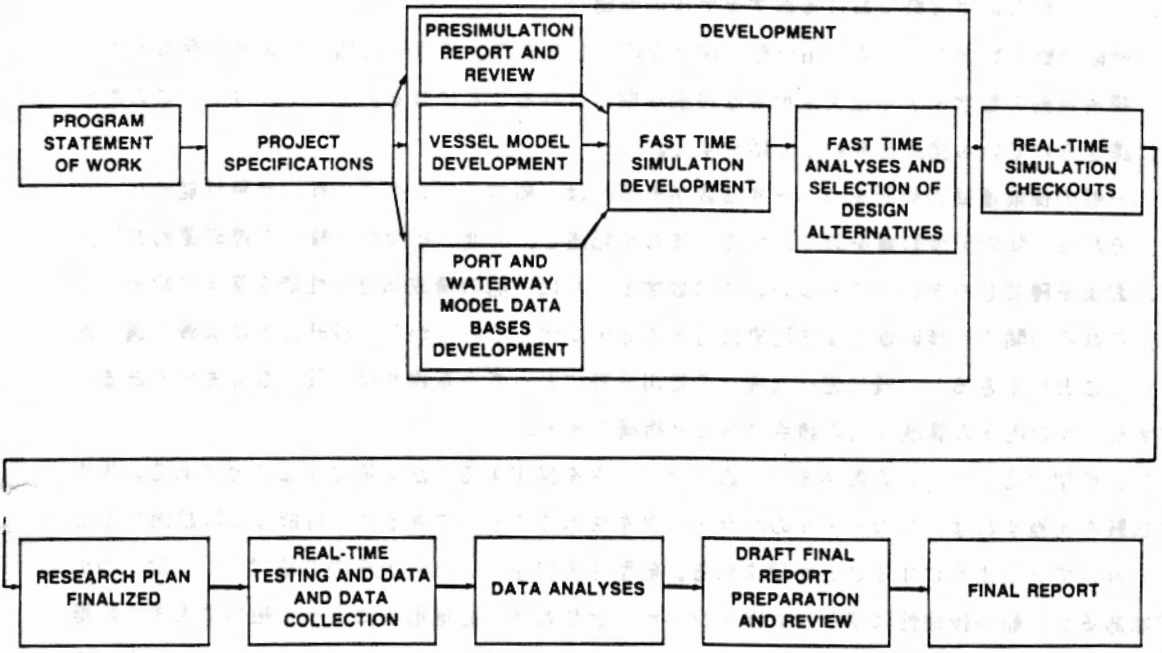


Fig. 6.2.3 Validation procedures of safety assessment in CAORF

港湾開発のプロジェクトが進められている。最終的な安全性の評価には、人間の制御特性のモデル化が困難なところから、操船シミュレータを用いて、実際の人間の操船下でシミュレーションするわけである。操船シミュレータを用いた総合シミュレーションで、安全性を確認することになる。

このシミュレーションで船の操縦性能を記述するのが数学モデルの役割である。したがって、この数学モデルの評価は、それを用いて計算される運動がどのようなものであるかに依存することになる。

この意味で、まず、Table 6.2.1 に示した要素操船時の運動を十分な精度で推定しうることが必要になる。そのためには、プロペラ、舵さらに曳船といった操作手段を臨機応変に使用した場合の過渡的な運動の推定がまず、重要になる。また、浅水、風、潮流等の影響を単純化された条件下で考慮する必要がある。

港湾内の操船の総合シミュレーションを行うには、さらに複雑な条件下の運動が対象となる。その場旋回や横移動時には、場合によっては、過去の操縦運動によって撹乱された流体運動がその後の船に無視できない影響を与えるという流体力の過渡特性の考慮が必要になるが、現在の数学モデルではこのような操縦運動の正確な予測は困難である。また、港湾内の地形や潮流等の環境が複雑になると、これを正確に考慮しようとする程、数学モデルは複雑になり、多数のパラメータを持つことになり、これをいかに求めるか、個々のパラメータの影響をいかに評価するかが問題となる。こうした問題については、次節であらためて議論することにしたい。

６．２．６　今日の応用分野における数学モデルの課題

さて、操縦運動の数学モデルの利用分野の現状を紹介してきた。こうした種々の領域の発展を支える上で、操縦運動の数学モデルは大変重要な役割を期待されることになる。ここで、今日、この数学モデルに課せられている諸点を要約して紹介する。

まず、一般の操縦運動の局面をカバーする数学モデルは、船体、プロペラ、舵の単独性能をベースにして、それらの間の干渉影響を取り入れて流体力を記述し、前進、横流れ、旋回の連成運動方程式の形で、およそ確立したといってもよい。この数学モデルは、船の構成部分の性能を基本に組み立てており、それらの間の干渉影響も流体現象に沿ってモデル化しているから、設計目的には最も適したものということができるし、既に述べた種々の応用分野にとっても基礎的な手段となるものである。この数学モデルの現在の課題は次の諸点にあると指摘できる。

第一に、船型に応じて、この数学モデルのパラメータを推定する方法を確立することである。拘束操縦性試験を実施すれば、このモデルのパラメータを決めることができるが、可能ならば試験することなしに推定できるようにすることが望まれる。船型主要目を用いた井上らの方法[50)~53)]は一つの解決ではあるが、船の操縦性はフレームラインの形、とりわけ、船尾形状によって相当に大きく影響を受けることが知られている。船体に作用する流体力の理論計算の可能性は、フレームライン形状の影響が取り入れられるという点でも着目すべきであるが、問題は推定精度であり、一般的に実用の精度の確保は現時点では容易でないと考えられる。最近、種々の工学分野でデータベースの概念が幅広く導入され、設計に利用されており、データベースの使い方について種々の方法が提案されつつある。井上らの方法は理論の成果から、流体力が依存するパラメータ、例えば、アスペクト比　２ｄ／Ｌ等を選択し、最終的には実績による回帰直線を用いて流体力を推定しており、データベースの利用法の一つである。しかし、多数の拘束操縦性試験データが蓄積されつつある現在、よりきめの細かいデータベースの活用法が課題となる。例えば、数隻の実績を用いて、新船型の操縦性を推定する場合、新船型と実績船型の間の操縦性からみた類似度をまず、評価する。続いて、実績船型の流体力特性をデータベースから推定し、類似度に応じて、加重し、新船型の流体力特性はそれらの加重平均の形で求めるというのも一つの方法である。類似度の評価に、フレームライン形状の特徴を取り入れると、それを考慮した流体力推定法が得られる。また、細長体理論により、フレームライン形状が流体力特性に及ぼす影響を推定し、その推定結果をデータベースの検索に利用することも考えられる。要するに、多くのコストを負担して得たデータベースを最大限に利用することも、現在、有効な流体力推定法であり、その活用法は重要な検討課題である。

また、現在の数学モデルに適応した形で、実船の試験データを活用する方法を確立することも重要である。現在の操縦性推定は拘束模型試験の流体力データを用いる形で行われるが、実船の実績はＺ試験成績のような運動結果の形で得られ、両者は直接には比較できない。実船の実績を流体力微係数等の形で蓄えられたデータベースにフィードバックする方法の確立が重要である。

第二に、種々の応用分野の実状から考えると、代表的な船種の操縦特性の標準モデルが一般の利用に供しうる形で提供される必要が指摘できる。この標準モデルは特性の平均値とばらつきに関する正

確な情報を含んでいることが望まれる。最大舵角の旋回試験、緊急停止試験、あるいはZ試験等の成績の形では、代表的な船種の実績は知られているが、MMGモデルのような形のパラメータとしてはほとんど役立つものが応用領域に提供されていない。例えば、操船シミュレータを用いて、船員の訓練とか、港湾や水路における安全性の評価等に携わっている機関は、操縦性試験等が可能な施設も、操縦性の専門家も有さない場合が多く、操縦運動の数学モデルは外部の専門機関に提供を依頼するとか、シミュレータメーカの提供するものを使うという実状にある。現在のところ、操縦運動の数学モデルのパラメータのデータを豊富に持っているのは、試験水槽を持つ試験研究機関や造船所であり、いわば数学モデルのユーザであるシミュレータ運用機関等は限られた情報しか持っていないことが多い。限られた種類の試験成績を合わせるように数学モデルのパラメータを推定するという方法は、こうした場合によく採られている方法であるが、しばしば、合わさなかった運動については相当に違った推定結果を与えていることが多い。MARSIM84で、操縦運動の数学モデルに関するワークショップが開催され、各機関の操船シミュレータの数学モデルで計算された操縦運動の比較がなされた。それによると、Fig. 6.2.4に示すように[54]、通常の旋回運動については各機関のシミュレータはある程度、一致した結果を与えているが、加速しながらの旋回の結果については驚くほど不一致である。種々の応用研究の発展を促す上で、代表的な船種について、いわば標準数学モデル提供が検討されるべきであろう。

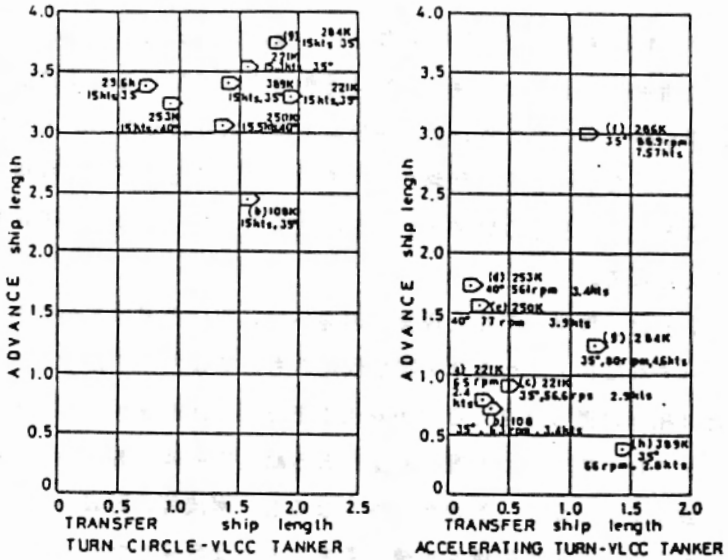


Fig. 6.2.4 Comparison of turning circles with constant speed and under accelerating among various simulators

第三には、現在、ある程度の確立を見た一般航行時の数学モデルを、浅水中、有限幅の水路中、さらに欲張ると、任意の水路形状下に適用できるべく拡張することである。個々の船の運航条件を考えて、それに耐えうるような性能を保障するという観点は、先進国の造船業にとって、現在でも、そして、今後は一層、重要性を増すと予想される。このシンポジウムでは、この問題に対する現在の到達点が紹介されるはずであるが、一般航行時の数学モデルの基本型がそのままで適用できる限界を明らかにすること、限界を越えた場合のモデル化の方向等が課題となる。

第四には、前進運動に較べて、横運動が小さくないという状況下の数学モデルである。事故の可能性が最も懸念される桟橋付近における操船の安全性を考える場合、この状況下の数学モデルが重要に

なる。しかし、このような運動中では、従来のモデルが前提としている準定常の仮定、つまり、その時々の船の速度と加速度の関数として流体力が表現しうるという仮定は、場合によっては問題を持つ。先に指摘したように、過去の船体運動によって生じる流体運動が現在と将来の船に作用する流体力に影響を持つからである。この現象を正確に取り扱うためには、船と流体の運動を連成して解く必要があるが、数学モデルの簡略さの重要性を考えると、容易に採用し難いことになる。したがって、準定常の仮定のもとでの数学モデルを開発すること、その適用限界を明瞭にすることが現時点での課題と考えられる。

第五に、数学モデルと現実との違いをいかに表現するかである。航行環境と船の流体力特性の表現はいずれにせよ、かなり大胆な仮定のもとでなされており、こうしたモデルで推定される運動と現実とは相当に違うと考えるのが妥当である。前進船速が大きいときには、潮流等の影響が相対的に小さくなるし、スケール影響の考慮もある範囲で可能であるから、推定された運動は現実に相当程度まで一致する。しかし、船速が小さくなると、潮流等の影響が相対的に大きくなるが、場所的にも時間的にも変化するその影響を正確に考慮するのは容易でない。細心の注意を払って実施された、"ESSO OSAKA"実船試験の結果[55]には、複雑な潮流の影響が現れており、試験目的のスケール影響の究明を困難にしている。こうした問題を解決するには、モデルの精度の一層の向上が必要になるが、港湾内の運動等を扱う際にはある程度の誤差は避けられない。とすると、誤差をあらかじめ含んだ形のモデル化が考えられる。コントローラとしての人間は、応答特性のばらつきや非線形性等が顕著であり、その制御特性を表現するために Fig.6.2.5 のようなモデル[17]が用いられる。つまり、この場合には、人間の基本となる平均的な制御特性を線型の記述関数で表現し、それで表現できない部分は人間の発生するノイズという扱いをしていることになる。人間を含む制御システム全体の挙動を解明する際は、この線型記述関数を用いればよいが、レムナントと呼ばれるノイズ成分にも人間の制御状態を表す情報が含まれている。船の制御系を構成するそれぞれの部分がこのように不確実なノイズを含む形で表現されると、系全体の挙動を解明するのに役立つ。例えば、潮流変化が激しい港湾では、その分だけ、環境モデルの発生するノイズが大きいという扱いがなされ、平均的な特性の他に、ノイズの影響も評価の対象とできることになる。

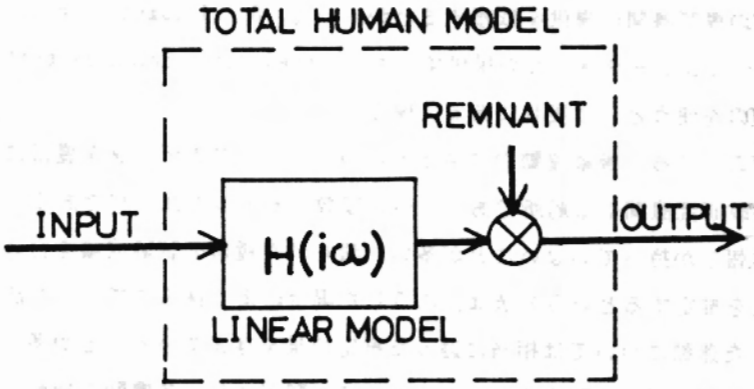


Fig. 6.2.5 A concept of human model using average characteristics and remnant

6．3　操縦運動の数学モデル評価の考え方

数学モデル（ここでは、操縦運動）を工学的に評価する手法は残念ながら現在のところない。しかし、現実には、各種のシミュレーション計算やシミュレータ等において前節で述べたように、操縦運動の数学モデルが種々提案され、使用者自身によりその評価が行われ、使用されている。現在提案されている操縦運動の数学モデルは、それ自体がすでに、こういった評価のなされた検証済みのモデルと言える。その検証には、旋回特性やZ試験といった標準化された試験方法が用いられ、別途実施された実船あるいは模型試験との比較を行うことによりその有効性や妥当性が確認されている。

ところが近年、提案された数学モデルの適用範囲を超えるような応用分野が増え、本シンポジウムでも見られるように、さらに、低速航行時や浅水域でも使える数学モデルが提案されつつある。しかも、特にシミュレータを用いた港湾や水路設計等においては、さらに潮流の影響や曳船の援用、水路幅や近接船舶の影響なども加味した、一説によると、200～300 の係数をもつ非常に複雑な数学モデルが用いられている。こうした複雑な数学モデルでは、もはや、標準化した試験法はなく、その評価、係数の同定手法、同定した係数の検証はとたんに難しくなる。前節で述べた加速旋回モデル（Fig.6.2.4)はその一例である。すでに十分検証済みの数学モデルのパラメータを増やして船速が大きく変わるようにしただけで、これだけモデルの挙動がばらつくのである。逆にいうと、200 以上もパラメータをもつ数学モデルが、たとえ、それが力学的な構造のモデルであるにせよ、正しく実世界を表しているかと、疑ってみるのが自然であろう。そして、モデルが複雑になるとその評価は、その数学モデルの一面をとらえただけであって、決して、数学モデルの全表現空間を評価したものではない。さらに、その数学モデル自体がまた、実世界をあるフィルター（流体力学等の理論や自由表面条件なりの仮定）を通してながめた姿のある絵かきによるスケッチである。フィルターによっても違ってくるし、スケッチする人のタッチによっても違ってくる。ハーバード大学の W.Lawance 教授は、「安全とは当事者が許容できる危険性である」と述べたが、同様に「数学モデルとは当事者が許容できる実世界のロウ細工である」。安全も数学モデルも追求すればきりがないし、決してそのものにはなれない。

この大難題に正面からとりくんだ（とりこまざるを得なかった）のが操船シミュレータの運用機関であり、その筆頭がＣＡＯＲＦである。やみくもに、実世界とシミュレーションモデルを比べていたらきりがない。さらに、システムの中に人間が組み込まれた形で利用される、操船シミュレータ用の数学モデルでは、人間の挙動を含めたモデルの検証を行わなければならない。そこで、システムの開発から評価、運用までを工学的に取り扱う手法──ソフトウェア工学──が大規模で複雑なシミュレーションモデルの開発、評価に用いられるようになった。この手法が直ちに、すべての操縦運動の数学モデルの開発、評価に役立つとは思えないが、もう少し大きな視野で操縦運動をみる場合、あるいは、操縦運動を含むシステムを開発する際に、今後ますます重要になってくると思われる。

したがって、本節では、少し本題からはずれるが、まず、ソフトウェア工学における一般的なモデル開発手法を紹介する。次に、その手法の中で検証や評価がどう取り扱われているか、どういった方法が用いられているかを主にシミュレーション分野の研究例から紹介する。最後に、操船シミュレータにおける評価手順をＣＡＯＲＦの研究やＩＭＳＦの活動より紹介する。

６．３．１　シミュレーションモデルの開発手法

シミュレーションは元来、実世界でおこる諸問題を効率よく解決するためにとられる手法であり、過去何百年にわたって行われてきた。その使われ方には大きく分けて三つある。一つは、対象とする現象に影響を与えるパラメータに変化がおこった時、現象そのものにどのような変化がおこるのかを予測するためのシミュレーションであり、大は、ローマ・クラブの「成長の限界」で有名となったForrester の「世界モデル」[56]から、小は、スーパーや駅、高速道路等のいわゆる「窓口問題」まで広く行われている。もう一つは、航空機や船舶、自動車等のシミュレータであり、基礎訓練から緊急訓練まで乗組員の養成に大いに役立っており、70年代に行われたアポロ計画で、まだ一度も行ってみたことがない場所へ見事一回で軟着陸できたのもこのシミュレータのお陰といえる。第三の用途は上述の二つのシミュレーション双方に関係するものであるが、見方をもう少し広くして、システムそのものの設計や性能の決定、政策決定等に利用するものでる。アメリカでは、大統領の施策に多くのシミュレーションが行われ、また、ＮＡＳＡのアポロ計画やスペースシャトル計画でも大規模なシミュレーションが行われている。船舶の分野でも近年、港湾や水路設計に際して、シミュレータを使った大規模なシミュレーションが数多く行われている[15]。シミュレーションのこの分野での活用は、今後ますます社会やシステムが複雑になるにつれ増加してくるものと思われる。

以上述べたシミュレーションのいずれの用途でも、実世界(real world)にシミュレーションモデルが如何に似せて作ってあるかという忠実度ないし再現性(fidelity)がその結果に大きく影響する。

ここで、一つの実話を紹介しよう[57]。アメリカでオペレーション・リサーチが研究されはじめた頃、最適な意志決定のモデル化に取り組んでいたランド研究所のある研究者が、よくカクテルパーティーなどの社交の場で、あのベールに包まれたランド研究所で何をしているのか、コンピュータが計算だけでなく意志決定もくだせるというのは本当か、などと質問攻めにあうことがよくあった。そんな時、彼はもっぱら車の買い替えを例にとって説明する。これから30年間、車に乗り続けるとして、何度ぐらい車を買い替えることになるだろうか。古くなった車を維持する費用と新車を買う費用を見積り、安全性や原価償却や快適さなどの要因も加えて、それぞれに適当な重みをつければコンピュータが最適な買い替えのタイミングをはじき出してくれる。ある晩のパーティーで彼がいつものこの質問にいつもの答えをすると、いつもなら質問者は彼に礼をいって去るのだが、この晩の質問者はなにげなく「なるほど。では、ご自分が車を買い替えるときもそうなさるわけですな」と聞いてきた。彼は「とんでもない」とあっさり答えた。「いまの話はあくまでも、形式化の一例です。車を買い替えるのは私にとって重大なことですから、数学モデルにまかせてはおけませんよ。しばらくあれこれ考えて、やはり替えどきだと感じたら買い替えるんです。」次の日、彼は前の晩のやりとりが気にかかりはじめた。自分の私生活で使おうとも思われないような意志決定法を、軍やビジネスや行政のトップに勧めるのは正しいことだろうかと。

この実話には二つの意味が含まれている。一つは数学モデルはあくまでも実世界を似せて作ったものであって実世界ではない。その数学モデルを作った本人はそのモデルが実世界を模擬する最高のものであると確信していても、いざ、そのモデルを使用する側にまわるとその適用限界を知っている故、

その結果をうのみにはしない。もう一つは、特にこの例のような人間の意志決定問題はそのモデル化が非常に難しい。本節では、船の操縦運動の数学モデルを対象としており、比較的、動特性のはっきりした物理的な数学モデルが可能なシミュレーション分野ではあるが、今後、前節で述べたように、自動運航システム等ではシステムの中の人間(man-in-the-loop)、すなわち、航海士や操舵手の特性をモデル化したシミュレーションが必要となってくるわけであり、あながち、この実話が笑い話ですまされなくなってきている。従来は、しかるべき専門家がしかるべき理論と多くの仮定と、大胆な着想で求めていた数学モデルであるが、対象となるシステムが複雑になるにつれ、ひとりで守備できる範囲を超え、また、開発に伴う費用は膨大な額となり、ここに至って「ソフトウェア危機」("software crisis")が叫ばれるようになった。

こういった背景のもとに登場してきたのがソフトウェア工学(software engineering)と呼ばれる新しい工学分野である。ここでは、ソフトウェア工学の中で用いられているモデル開発法を紹介する。

(1) Software life cycle

ソフトウェア・ライフ・サイクルとは、ソフトウェア製品を計画してから開発し、客先にて運用するまでの一連の作業の総称であり、1970年に Royce[58] により始めて提案され、その後、多くの人により改良や変化が加えられている。しかし、いずれのモデルもマクロ的には次の五つの段階より成っている[59]。

1．システム要件の定義

システムのユーザと協議してシステムのサービス範囲、制限及び最終目標を双方合意の上、かつ、両者にとってわかりやすい形で決定する。

2．システム及びソフトウェア設計

システム要件が決まればそれを各ハードウェアとソフトウェアに分割する作業（システム設計）と各ソフトウェアシステムを計算機プログラムに書き下せるようにするために機能分析する作業（ソフトウェア設計）より成る。

3．プログラミング(Implementation)と機能テスト(unit test)

各機能を計算機で実行可能なプログラムに書き下す作業とその機能が満たされているかどうかのテストを行う。

4．システムテスト

個々のプログラムを統合して、システム要件が満たされているかテストする。テスト終了後に客先に引き渡される。

5．運用と保守

通常（必ずしもそうとは限らないが）最も期間の長いサイクルの段階である。システムが客先に設置され実用に供される。また、以前のライフ・サイクルの各段階で発見できなかったエラーを正したり、プログラムの改良や新しいシステム要求に対応させるための機能追加等を行う。

(2) ソフトウェア進化論(Software evolution)

このようなソフトウェア・ライフ・サイクルを通じて開発されたソフトウェアは、しかし、進化していく。さもないとそのシステムはだんだん使われなくなる。これをソフトウェア進化論と呼んだのはLehman[60]であり、彼によるとソフトウェア進化には五つの法則がある。

1．変化はたえず起こる

実世界で使われるプログラムは変化しなければ、その環境下では徐々に使われなくなる。

2．だんだん複雑になる

よほどプログラム構造を効率的にしておかないかぎり、プログラムの変化はその構造をより複雑とする。

3．プログラム進化

プログラムの変化は自己調整されるものである。システムの属性すなわち、プログラムのサイズ、バージョンアップの期間、バグ・レポートの数等は統計的にみて有意な傾向と不変性を示す。

4．組織安定性の保存

プログラムの一生において、プログラムの開発の度合いは、システム開発に投じた資源に無関係にほぼ一定である。

5．習熟性の保存

システムの一生において、各バージョンにおけるシステムの追加機能はほぼ一定である。

（３）システム開発言語

以上のようなシステム開発の過程で、実はすでに、システムの評価や検証が並行して行われている。そのために、各段階において、それぞれに適した言語が種々提案されている。その中で、特に、アメリカ国防省のプロジェクトとして開発されたＡＤＡは近年特にその構造性、移植性のよさからプログラム言語としてだけでなくシステム開発言語としても注目を集めている。ただし、この場合、ＡＤＡそのものではなく、いくつかの文法上の制約を緩めたもの(Ada-like)が使われる。プログラム設計言語(PDL；Program Design Language)としてのＡＤＡ／ＰＤＬもその一つであり、特定の計算機や高級言語(FORTRAN, PASCAL 等)にとらわれない記述ができるため、最近では多くの成書でアルゴリズムの記述用に用いられている。

一方、ＰＳＬ／ＰＳＡ[61]、ＳＡＤＴ[62]、ＲＳＬ[63]といったソフトウェア要求自動記述言語も提案されている。ミシガン大学で開発されたＰＳＬ(Problem Statement Language)とＰＳＡ(Problem Statement Analyzer)はセットで用いられるようになっており、一旦、ＰＳＬで記述されたシステムをＰＳＡが解析し、自動的に各種のレポートを出力するようになっている。ＳＡＤＴ(Structure Analysis and Design Technique)は構造解析(Structure Analysis)と呼ばれる一種のシステム分析法をもとにしており、やはりシステム設計やソフトウェア設計を上位レベルで自動的に行うように設計されている。ＲＳＬ(Requirements Statement Language)は時間の制約のあるリアルタイムシステムの設計用に開発されたものであり、ＲＳＬで記述されたシステムを計算機が自動的に解析してＡＳＳＭ(Abstract System Semantic Model)と呼ばれる一種のデータベースを作成し、それをもとに

PASCAL でシステム・シミュレータを作成したり、各種レポートや整合性のチェック、要件の完成度等が出力される。

また、ワークステーションの標準ＯＳとして定着したＵＮＩＸの Shell（ＯＳレベルのコマンド言語）は、それ自体がシステムのプロトタイプ記述用としても威力を発揮する。ある情報検索システムをこの Unix Shell を用いてたった１日で作った例がそれを示している。 そして、最終システムは PASCAL で記述され３週間かかって作成された。

（４）ソフトウェア設計

ソフトウェア設計というのは創造的な作業である。つい最近までは、通常自然言語で書かれた要求書をもとに、非形式的な設計、しばしばフローチャートの形が作成される。それをもとにコーディングされて、デバッギングにより改良が加えられる。そのうちに最初の設計書は役立たなくなる。最近のソフトウェア工学の手法ではプログラム言語に近いフローチャートはシステムの記述には不十分であり、かわりに、いくつかの設計手法が提案されている。

１．トップ・ダウン機能設計(Top-down functional design)

システムを機能面からとらえ、上位層から始めて徐々に詳細部を記述していく方法であり、ＳＤ(Structured Design)[64] や step-wise refinement[65] といった手法が提案されているし、そういった具体的な手法によらずに無意識的に設計されているソフトウェアの多くがこの方法によっている。Fig. 6.3.1はコンパイラーというシステムを例にとったトップ・ダウン機能図である。

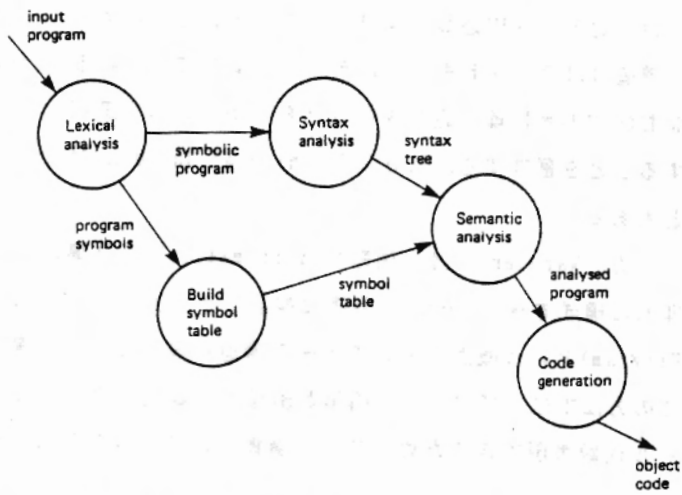


Fig. 6.3.1 Functional view of a compiler

２．オブジェクト指向設計

システムを機能ではなくオブジェクト(物)の集まりとみなし、オブジェクトからオブジェクトへメッセージが伝えられる

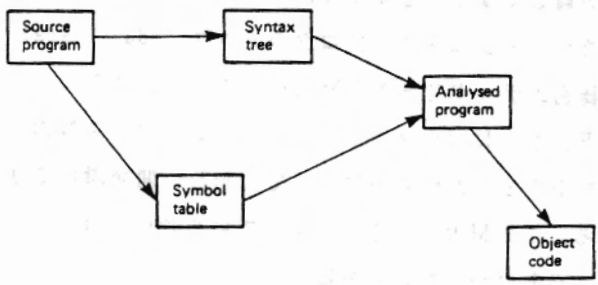
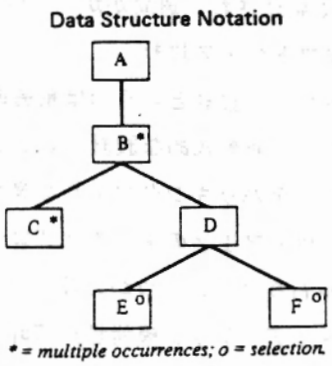


Fig. 6.3.2 Object-oriented view of a compiler

とみなす設計手法である。Parnas[66]の考えをもとに最近になって Robson[67]や Booch[68]により詳しく記述されてきた手法で、これからのソフトウェア設計手法として有望視されている。Fig. 6.3.2 にオブジェクト指向的に表現したコンパイラーを示す。

3．データ駆動設計 (Data-driven design)[59] または、 データ構造指向設計 (Data sturucture-oriented design)[69]

Jackson[70]は「すべての問題は三つの構造形よりなる階層構造よりなる」 と考えた。 その三つの構造形 (structural form) とはシーケンス、条件と繰り返しである。 そして、これらよりデータ［階層］構造図 (data structure[hierarchical] diagram) をデータの入出力関係として規定した。Fig. 6.3.3がその一例であり、データＡはデータ構造Ｂの繰り返しにより表され、データ構造Ｂ自体は、さらにデータ構造Ｃの繰り返しとデータ構造Ｄにより成っている。さらにデータ構造ＤはデータＥもしくはデータＦより成っている。Fig. 6.3.3 Data structure diagram なお図中の＊は繰り返しを○はどちらかひとつを選択することを意味する。ＭＪＳＤ (Michael Jackson Stuructured Design method)と呼ばれることもある。



一方、Warnier[71]は「情報学(informatics) より導かれる手法を用いれば、プログラムは論理的に構成でき、 かつ、 厳密に検証できる」 として、ＬＣＰ (Logical Construction of Program)という概念を用いてデータ構造を表した。この構造図は Warnier diagramと呼ばれる。この方法では、プログラム構造が論理的に表現できているので、プログラム構造そのものをブール代数表現できるため、ブール演算によりプログラムの複雑な論理構造を簡単化できる。

以上の手法は概念的ではあるが、システムを開発する際の比較的上位レベルでの設計手法であり、システムが大規模で複雑になるにしたがって、プログラム構造がわかりにくく、また、プログラムの評価や検証が難しくなるのを除くのに大いに役立っている。ここでは下位レベルでの手法については述べなかったが、モジュール・プログラミング、Ada、Pascal、Ｃ、Ratfor 等の構造言語の採用から、ＵＮＩＸの総合エディタであるＥＭＡＣＳや、プログラム・インスタレーション・ユーティリティであるＭＡＫＥ、さらにはウィンドウ・システムやマウス等のプログラム開発支援環境に至るまで、まさしく、ソフトウェア進化の中にあって、新しい開発環境では、さらに、新たな開発環境が生まれてくるのである。ＩＢＭカードをパンチしていた時代では、決してスクリーン・エディタは生まれてこなかったし、必要なかったのである。

アメリカにおけるソフトウェアにかかる費用は500億ドル(1977年)で同年のＧＮＰ比３％以上[60]、現在は、たぶん倍以上となっているであろう[59]。 ハードウェアにかかる費用は対性能比で安くなる

一方なので、ますます、ソフトウェアの効率より開発が必要となる。Boehm[72]によれば、大規模ソフトウェアでは、全ソース・コードの95%がユーザの要求の変化により書換えられ、しかも、３年間にみつかるエラーの12%は初期のシステム要件によるものである。したがって、ある航空機システムではソース・コード１行当りの開発費が 30ドルであるのに対し、保守費は１行当り 4000ドルにも達する[73]。アメリカの国防省が先頭となって Ada を開発したのもうなづける。

６．３．２　シミュレーションモデルにおける評価の方法

大企業ではその生産性向上のためその企業モデルを持っている。それらは通常、高級言語で１万行以上、時には10万行を超えるものもある。大きなモデルの例としては、アメリカ合衆国政府のもつ国家経済モデルやエネルギーモデルがある。また、軍事関係でも、こういうモデルを用いたシミュレーションを政策決定や戦闘計画、武器調達等に利用している。こういった軍事シミュレーションでは20万行以上の非常に大規模なモデルが用いられている。こういったシミュレーションの技術面での進歩とはうらはらに、そのシミュレーションの妥当性についてはほとんど検討されていない。

上のパラグラフは実は、コンピュータシミュレーション学会(ＳＣＳ、San Diego、Ｕ.Ｓ.Ａ.)が本年4月6～9日に開催した the Conference on Methodology and Validation の中で発表された Banks らの論文[74] の冒頭の一節である。確かにこの分野の研究はまだ序についたばかりである。後に述べるように、この種の論文では用語の定義自体が論文の一部になっているケースがままある。しかし、ＳＣＳの主催するシンポジウムでは、前述のように validation を全面的なテーマとするケースや、少なくとも一つのセッションとして独立して設けてあるケースがすでに筆者の知るところ４～５回あり、アメリカにおけるこの分野での活動を知ることができる。ここでは、この Banks らの論文(シミュレーションモデルの評価に関するよい展望を与えている)を中心にして、シミュレーションモデルの評価方法について紹介する。

Banks らによれば、「シミュレーションモデルの評価は 'validation' と 'verification' の双方から行うべきである。現在のところ、複雑なシミュレーションモデルを評価するための手法として広く受け入れられているものはない。」ところで 'validation' と 'verification' はどう違うのか。ソフトウェア工学者である Boehm[75] によれば、

Verification : Are we building the product right?

Validation : Are we building the right product?

となるし、シミュレーション分野で 'validation' 問題を多く手がけ、前出のＳＣＳシンポジウムの予稿集の編者でもある Balci[76] によれば、

Model verification refers to building the model right.

Model validation refers to building the right model.

ということになる。つまり、(ソフトウェア)製品なり(数学)モデルの正しさを確かめる(verify)のが 'verification'であり、正しい(valid)製品なりモデルを作るのに主眼をおいたのが'validation' ということになる。この語呂あわせは、日本語のニュアンスとしてはわかりにくいが、ここでは一応、'verification'を「検証」、'validation' を「妥当性」、また、両者を合わせて「評価」と呼ぶこ

とにする。

ＣＡＯＲＦのスタッフで心理学者でもある D'Amico[77]は、もう少しわかりやすく説明している。

'Verification' というのは、シミュレーションモデルが ——そのモデルが概念的に正しい(valid)か否かにかかわらず—— 予期されたとおり正確に働いているか否かを決定することであり、早い話が、デバッグ作業である。そして、validation と関係しており、そのモデルは verify されないかぎり validate できない。もし、verification が正しく行われないと、validation 作業はそのシミュレーションモデルの誤りを見つけられない。

'Validation' というのは、シミュレーションシステム全体(あるいはサブシステム)において研究なり訓練なりの目的に合った結果を生み出し、そうして得られた結果が、さらに、そのシミュレーション環境を超えて一般化できるかどうかの自信に対応するものである。海事関係ではしばしば、validation というのは実世界にいかに対応しているかという意味で使われている。正確には、実世界といかに対応しているかという validity は "external validity" と呼ばれるものである。いずれにしても、シミュレーションによる研究や訓練による成果が実世界でも通用するかどうかの自信につながるものである。

それと同じくらい重要なのが "internal validity" [78]と呼ばれるもので、これは、シミュレーションによって得られた結果は、現実には、パラメータを操作した結果であるという認識にたつものである。例えば、港湾開発の研究では、桟橋の位置や水路の幅等が違えば、船の動きが違っていることを考慮しなければならない。External validity が結果の適用に関係するのに対し、internal validityは結果の解釈に関係する。実験パラメータと関係する要素はすべて'internal validity' を脅かす。

D'Amico はさらに、'calibration' についても言及している。

'Calibration' とはある特定のシミュレーションモデルとある特定の実世界(ここでは実船)もしくは縮率モデルのデータとの一致度をいう。多くの人が考えるように、モデルの出力が実世界のデータと全く一致すれば、validation は達成される。これはわかりきった結論ではない。ある特定のデータのセットで calibrate されたシミュレーションモデルが違うデータのセットに対してもうまく合うとは限らない。このようなことは、calibration で使用したデータが正当でないとおこりうる。また、calibration データに合わせるための "tuning" がモデルのある一面のみの修正に終始したような時にもおこる。このような tuning は calibration データとの整合性には貢献する一方で、他のデータ・セットに合わせることは事実上不可能となる。堅実な方法としては、この二つのデータ・セットを用意し、そのうちの一つを用いて calibration を行い、他の一つは、calibration が終った段階で、モデルの再テストに用いるのがよい。

その他にも、シミュレーションモデルの評価を行う上で、あるいは、その関連の文献を読む上で必要な用語があるが、詳しくは文献[78),79)] を参照いただきたい。

さて、アメリカにおけるこの分野での研究発表は前出のコンピュータシミュレーション学会の機関誌'Simulation'や同学会主催のシンポジウム、それに、'Operations Research'、'Management Science'、

'Decision Science'、'Behavioral Science' といった経営工学系の雑誌が中心であるが、その基礎となる研究を行っているアメリカの機関が二つある。 一つが、 アメリカ議会に属する U. S. General Accounting Office(U.S.GAO；アメリカ会計検査院)である。日本の会計検査院に相当する機関であり、その目的は、議会を助けて国家収入、支出、及び民間の資金に対して合法的なコントロールを行うことである。そして、国家的プログラムが効率よく、しかも、議会の意図したように行われているか、他にもっと経済的、効率的な方法はないかを検討して議会に報告する。そして、これは国家的プログラムに限らず、国家援助を受けているすべての機関に対しても行われる。

もう一つの機関が、商務省 National Bureau of Standards (基準部)である。その目的は、国家の科学と技術を押し進め、 広く国民の利益となるような効果的応用を促進することである。 そして、(1) 国家の物理計測システムの基礎、(2) 産業界及び政府に対する科学的、技術的サービス、(3) 貿易平衡のための基礎技術、(4) 国民に安全を周知させるための技術サービス、(5) 技術情報サービス、の五つの研究なり情報提供を行っている。このうち、計算機科学技術センターが中心になって、データ収集、データ処理装置や技術、計算機言語に関する標準化の研究を行っている。

この二つの機関がほぼ時期を同じくして1970年代の終わりから、1980年代の初めにかけて、大規模なシステムの開発手法や評価手法について有識者を集めて研究を行い、報告書を提出している[80)~84)]。これは全くの偶然ではなく、また、故意でもない。前項で概説したソフトウェア工学の手法が完成していったのも同時期であるし、「ソフトウェア危機」が叫ばれだした直後でもある。アメリカの国家予算が縮小され、人件費は急騰し、失業者が急増するという「悩めるアメリカ」が「強いアメリカ」を目指そうとした時期である。

（１）モデル化の手法

複雑なシミュレーションモデルを作るのに決まった手順はないが、無意識的にも、次の五つの段階(phase)を含んでいるようである。第一のフェーズは問題設定(initialization)であり、ここでは、シミュレーションの必要性と可能性を決め、問題を十分に定義しておく。次に行うのが計画(plan)であり、客先とシミュレーショニストが協議して問題のとりくみ方をねる。そして、シミュレーションモデルの詳細設計 (detailed design)を行う。ここでは、実際に計算機を動かすためのコーディングも行う。次に、できあがったシミュ

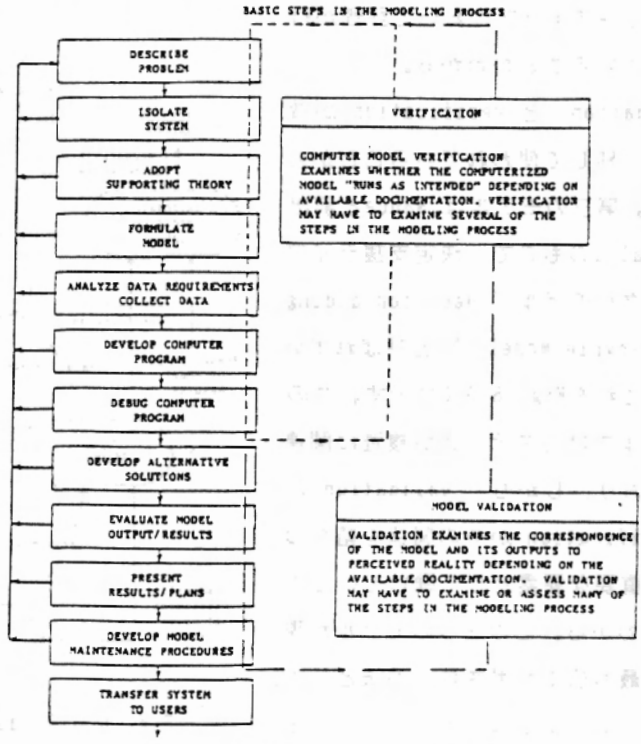


Fig. 6.3.4 GAO's guidelines for model evaluation

レーションモデルをテスト(test)し、運用と保守（operation and maintenance)を行う。ここで、留意すべきことは、何もテストフェーズのみでなく全フェーズを通じて、シミュレーションモデルの評価(verification and validation)を行うべきである。

ＧＡＯのモデル化手法（Fig. 6.3.4)[81]は、上に述べた五つのフェーズを含んでおり、かつ、評価も各ステップを通じて行われている。同様なモデルとして前出のソフトウェア工学者 Boehm の滝モデル (waterfall model of the software life-cycle)[75]と呼ばれるモデル化手法を Fig. 6.3.5 に示す。やや表現は違うものの、同様に五つのフェーズと各ステップにおいて評価が行われていることがわかる。しかも、validation と verification が微妙に区別して使われていることがわかる。第三のモデルは Nanceと前出の Balciのもので、決定支援ライフサイクルモデル（decision-aiding life-cycle model)[85]と呼ばれている。これをFig. 6.3.6に示す。このモデルでは各ステップが複雑に関連しており、しかも、validation と verification がその関係を結びつける重要な要素として働いていることがわかる。この三つのモデルが現在、最も広く利用される手法として、シミュレーショニストとソフトウェア工学者双方から認められている。

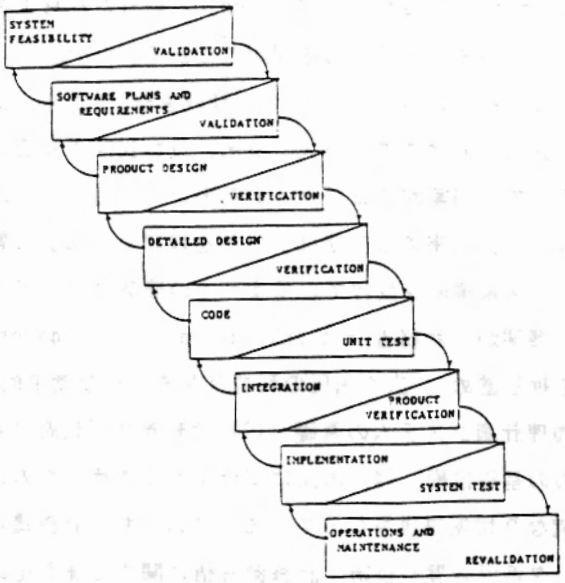


Fig. 6.3.5 Boehm's waterfall model of software life-cycle

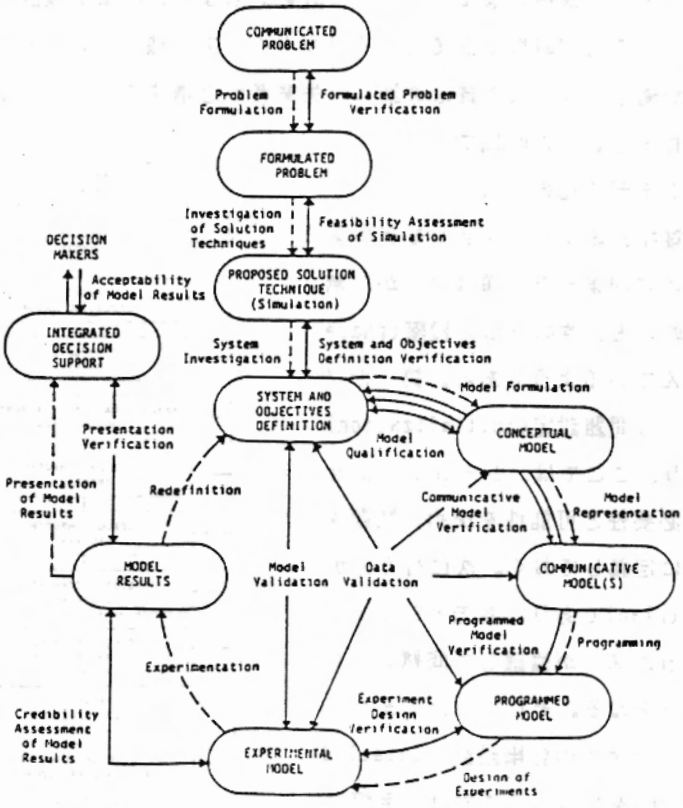


Fig. 6.3.6 Balci and Nance's decision-aiding life-cycle model

（２）モデル化手法における評価

シミュレーションモデルの利用が盛んになるにつれ、大規模で複雑なモデルを評価する種々の方法論が提案されている。しかし、シミュレーションモデルの多様化に伴い、標準的なモデルの評価法を確立することは困難である。例えば、社会科学のモデルを評価するのに軍事モデルの評価方法を流用するのは無理がある。ここでは、大規模で複雑なシミュレーションモデルの評価法の一般的部分について述べる。

Table 6.3.1 Minimum set of criteria for model evaluation

- Documentation
- Validity
  - Theoretical validity
  - Data validity
  - Operational validity
- Computer Model Verification
- Maintainability
  - Updating
  - Review
- Usability

ＧＡＯによるモデル評価の最小必要条件を Table 6.3.1 に、そして、それらがモデル化の各フェーズ（には直接対応していないが）とどう関係しているかを Fig. 6.3.7 に示す。Sargent[86]も同様な評価手順を示している。それによると,theoretical validation(Sargent は conceptual model validation と呼んでいる)はモデルを裏付ける理論や仮定に基づき、数学的、確率的解析により行うべきである。そして、モデルはモジュール化しておき、全体及び各モジュール毎に所要の目的を達しているか否かを評価しなければならない。それには、face validation[87] と trace を行うべきである。

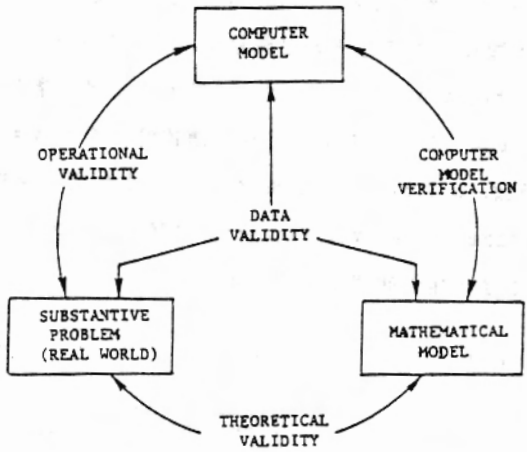


Fig.6.3.7 Relationship among validation, verification and modeling phases

Data validity は特にシミュレーションモデルを成功させるために重要である。しかし、そこに多くの方法があるわけでなく、データの収集のためのよい方法をみつけ、収集したデータを何らかの方法でテストした上で、そのデータを維持・活用する(maintain)のに適したよい方法を開発することである。

Computerized model verification については、top-down design、structured programming 等前項で述べたソフトウェア工学の手法を用いる。

Operational Validity とは実システムとモデルの予測との一致度を調べるものであり、シミュレーションモデルの評価の大半を費やす部分である。

最後に、Sargent は model validation の必要最小限のステップとして以下のものを推薦している。

1．モデルを開発する前にモデリングチームとモデルスポンサーと（できれば）ユーザの間で validation の基本技法について合意を得ておく。

2．可能ならば、モデルのもととなる仮定や理論を検査する。

3．Mathematical model において少なくとも face validity を実施する。

4．Computerized model を用いてモデルの挙動を検査する。

5．少なくとも最後にモデルの修正をする時、二つ以上の実験状態に対してモデルとシステムの挙動を比較する。

6．モデルの documentation において validation を議論する。

その他にも、validation についてはたくさんの手法、技法が提案されているが、そのうち、共通している手法としては face validity[87]、historical method[88] と sensitivity analysis[87)89)~91)] の三つがあげられる。その他の手法については、文献[87)76)] に詳しい。また、文献[76)] には validation に用いる各種統計手法とその出典論文についても述べてある。

モデルの verification については、ソフトウェア工学で用いられる手法が有効である。

最後に、シミュレーションモデルの総合信頼性とでも言える credibility assessment の階層構造的表示[76)] を Fig. 6.3.8 に示す。Balci[76)] によれば、今までの研究はほとんど model validation あるいは programmed model verification に関するもので、他のＣＡＳ（Credibility Assessment Stage）に対しては今後の研究が望まれる。

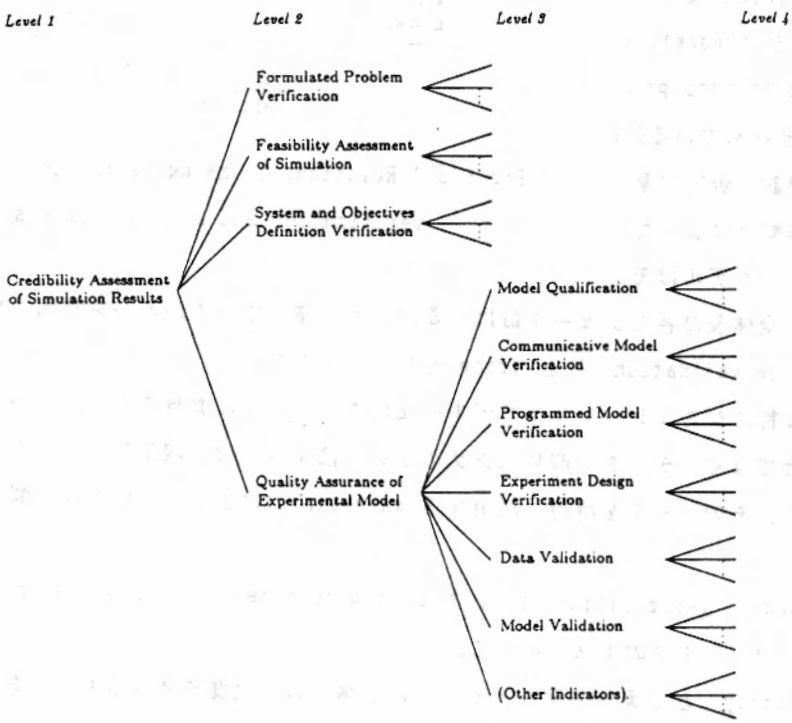


Fig. 6.3.8 A hierarchy of the credibility assessment

6．3．3　操船シミュレータ用数学モデルの評価例

この分野における評価例として最も大規模で、しかも、論文に発表されたものとしてはアメリカのＣＡＯＲＦにおけるパナマ運河の改修工事に関連したシミュレータ・プロジェクトがあげられる。これについては、後で、やや詳しく述べることとし、まずは、操船シミュレータ関係における model validation のとらわれ方、問題意識等をみるため、MARSIM'81の時にひらかれたシミュレータの評価に関するワークショップ[92]での発言より、いくつかをひろってみよう。

このワークショップはシミュレータによる訓練を主題とした、validation 問題についてであり、出席者は次のとおりである。Mr.I.Millar(N.M.I.)、Dr.M.W.Smith、Mr.B.Bertsche(Ship Analytics)、Mr.P.E.Reeve(U.W.I.S.T.)、Dr.H.Eda(S.I.T.)、Mr.B.McIlroy(CAORF).

Millar：シミュレータがなかった頃、『人的エラーによって事故が発生するのを訓練によりどのようにして防ぐことができるだろうか？』、そして『どのようにすれば、ある国の一連の船舶がある一定の標準的な性能を発揮できるだろうか？』という二つの質問があった。（その答の一つがシミュレータであって、）シミュレータができた現在は、『シミュレータによって本当に良い訓練ができているか？』あるいは、『実船ではできない訓練を行えるであろうか？』という質問に変わった。後の質問に対しては『できる』と答えることができよう。すると次は、『この訓練は十分にリアリティをもったものであろうか？』となる。リアリティというのは技術もさることながら費用の関数である。したがって、次の質問は費用ないしは対費用効果の問題となる。そして、その質問に答えるためには、何らかの評価基準が必要となる。つまり、既存のシミュレータに対する評価(validation)が必要となる。シミュレータの評価方法にいくつかの方法が知られている。最も興味深いのはアメリカ空軍で行われた“優美なる退化”(graceful degradation)と呼ばれる手法である。この手法は、まず、大変手のこんだシミュレータを作っておき、少しずつ(bit by bit)機能を落としていき、影響が出はじめる所でやめる、というものである。この方法の欠点は、最初に、大変手のこんだシミュレータが必要な点である。シミュレータの validation は大きく分けて三つのカテゴリーに分類できる。航海計器等の機器、流体方程式と訓練プログラムに対する validation である。流体力モデルの評価は結局は模型船データと実船データの相関の問題となるし、訓練プログラムの評価は、訓練後にそのまま実船で有効な成果を得ているかどうかという問題となる。

その後、有効なシミュレーションのためには、シミュレータ用の実験もうまく選ばないといけないこと、一つのプロジェクトの validation が他のプロジェクトに対しても適正か否かはわからないこと等の発言があった後、simulator validation とは何かとの問いに対して、

Smith：Validation というのは必ずしもリアリズムとか忠実性ではない。１人の船員をシミュレータに呼んであるシナリオをやらせたとしよう。彼はその“船”を操船しながら言う『そうそう、この旋回はあそこだ。これはまさしく Narraganset 湾の旋回だし、潮も全くこのとおりだ』そこの旋回はあなたがいくつかの状態といくつかの変数を選んで組合せ

て作ったものだということを彼は納得できないだろう。これがリアリズムであり、しばしば我々は“face validity”と呼ぶ。そして、それはすばらしい、validation の最初の大事なステップである。しかし、彼がよく似ていると言ったところで、モデルが正しいとは言えない。翌日にくる別のメンバーが、似てないというかもしれない。その船員にとって、どのくらい実船と似ているかということは、彼がシミュレーションの条件下で、実世界で彼がとるであろう行動と同じかよく似た挙動をとるか否かできまる。シミュレータと実船での結果の類似性、これが私の定義する validation である。

KING(フロアより)：少し非科学的な見方をしてみてよろしいか？ 私が海運会社の部長だとして、自社の船員をできるだけうまく訓練させることを考えるとする。彼らのうち半分に何らかの訓練をさせ、残り半分にはさせないとする。1年後に、訓練したチームの方が残りのチームよりはるかにうまくなっているかどうかみる。もし、そうだったら、私は喜ぶし、訓練のために使った費用は役立ったといえよう。しかし、もし、両者に差がなかったら、訓練は役立たなかったといえるし、二度と訓練にお金を費やさないだろう。シミュレータによる訓練サービスを提供している我々としては、誓って、その部長に対して、シミュレータ訓練は確実に効果がありますよと言えるかどうか、自分に正直になって考える必要がある。もし、言えなければ validity も realism もくそもない。私は、我々が本当に、その質問に答える立場にあるのか否か疑問に思う。

船員の評価（訓練が有効だったかどうか）を針路偏差の自乗平均値ではできない。Seamanship をどう測るかという話、そして、イギリスではシミュレータ訓練の効果は、ある船会社の船長が主観的にseamanship を測って較べたところ、有効であったという意見があった。

Eda： 議論を聞いてきて、一つ忘れている点があるように思う。それは、船の動的な挙動の validation である。船を操船する船員に個性があるように、船にも個性がある。また、深水中か、浅水中か、狭水路か、氷海かによっても全く違ってくる。シミュレータ・シンポジウムではあまり、船の動的挙動については議論されないが、簡単な仕事ではない。我々の所では、今、実船の、しかも、制限水路中の実験から正しいモデルを得る試みをしている。五大湖は冬期、薄い氷が張るが、その中でのモデルについても検討中である。

ＩＭＳＦ中にあって、常に、validation 問題に正面から取り組んできたのがＣＡＯＲＦである。ＣＡＯＲＦにおけるシミュレータの validation の検討対象とその項目をFig. 6.3.9 に示す[93)94)]。ＣＡＯＲＦでは主に次に示す五つの方法が検討され、システム同定による方法以外の方法が実際使われている。

Ａ．従来の方法による客観的な validation： 基本的な運動に対して実船試験のデータとシミュレータのデータを舵の動きと針路データを較べて、同じになるように、シミュレーションモデルを変える。最もよく、用いられている方法である。

Ｂ．実船実験の一部分を比較する客観的 validation： 実船試験の一部分を取り出して、同じ状態のシミュレーションを行い、舵の動きと針路を比べる。この場合、初期条件が重要な要素となるので、

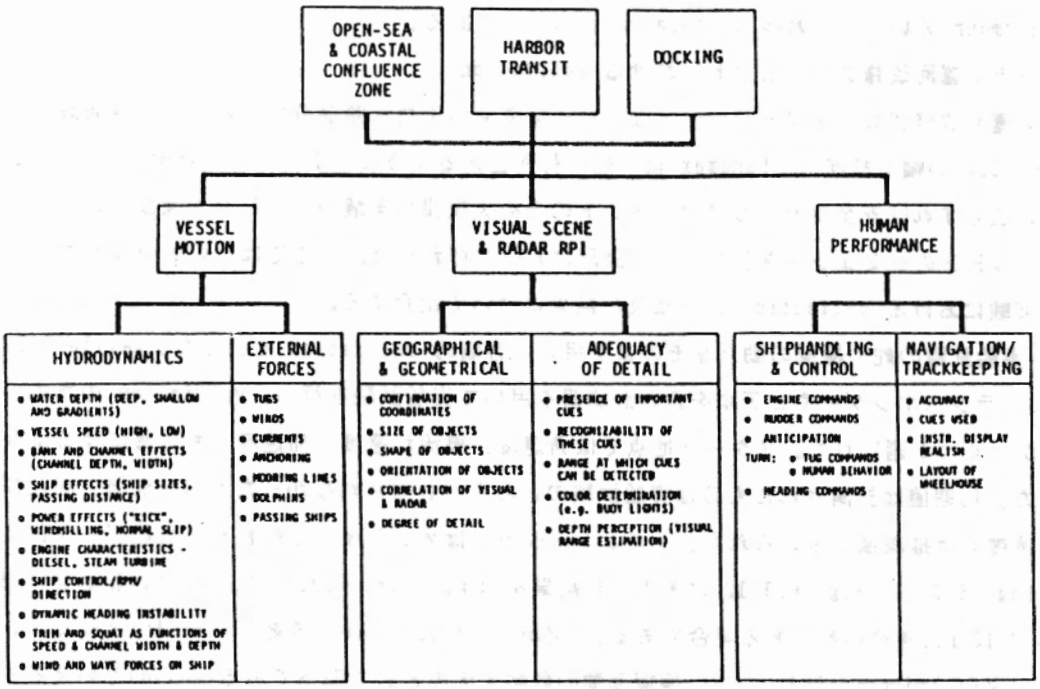


Fig. 6.3.9 Validation areas

できるだけ定常状態から始める。

C．実船実験の舵や機関の動きをそのまま用いる客観的 validation： 実船試験の一部分を取り出して、完全にオフラインで、実船試験の舵や機関の動きをそのまま用いてシミュレーションを行い、航路や針路を比べる。この場合は初期条件が決定的となるので、できるだけ定常状態から始める。

D．システム同定による客観的 validation： まず、モデル構造を想定して実験状態を設定して実船試験データを集録し、指定アルゴリズムを決め、モデルの係数を推定してそれを使ったシミュレーションを行って実船データと比較しながら、モデルあるいはその係数を修正する。

E．主観的 validation： Fig. 6.3.10 に示すようにあるシナリオを選んでシミュレーションを行った後、経験の深いパイロットや船長の主観的意見を聞いて、もし、彼らの感覚と合わなければ、水

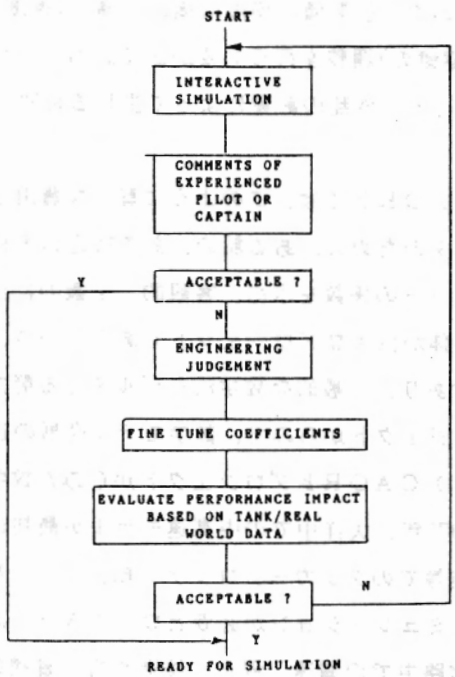


Fig.6.3.10 Subjective validation

槽実験や実船試験の結果をにらみながら、何らかの形での“engineering judgement”を行う。これは、Hermann のいう、いわゆる、face validation である。

（１）パナマ運河改修プロジェクトにおける validation[93]

パナマ運河改修プロジェクト[95][15]とは、パナマ運河の天然水路部分であるパナマ運河最大の難所 Gaillard Cut の幅を拡げて、Panamax 級の船が行き合えるようにしようという計画であり、どこをどのぐらい広くすれば安全かというアセスメントのため大規模な実験が、ＳＳＰＡ及びＳ．Ｉ．Ｔ．の水槽、ＣＡＯＲＦのシミュレータ及びパナマ運河において行われた。ここでは、ＣＡＯＲＦでのシミュレータ実験における validation の方法及び結果について紹介する。

まず、実船試験の舵や機関の動きをそのまま用いる客観的 validation を行った。Gaillard Cut において、トランスポンダーやビデオを含む計測器を用いて実船試験を行い、validation のための区間データがいくつか選ばれた。スタート地点では角速度、横流れ速度、加速度ともに零になるように考慮された。初期値は計測されたものは実船試験のとおり、計測されなかったもの（前後方向及び横方向の加速度）は推測値が用いられた。シミュレーションはオンラインで行われ、実船データと比較された。Fig. 6.3.11、Fig. 6.3.12 にその比較結果を示す。 Fig. 6.3.11 は行き合い船がない場合、Fig. 6.3.12は行き合い船がある場合である。 図が少し見にくいが、実船データ(R)とシミュレーションデータ(C)がほぼ一致しており、操縦運動の数学モデルとして妥当である(valid)といえる。また、パナマ運河のパイロットによる主観的 validation も行い、有効であることがわかった。

一つ克服しなければならないのは初期値の設定である。今回行った validation は open loop であるので、初期値の感度は極めて高く(速度で±０．１ft/sec)、実船試験の航跡と合わすのに何回も(初期値の)調整を行う必要がある。もう一つの問題は、わずかの船速の差やその他の特性の差（舵特性など）、外乱の影響によって生じる時間のずれである。

ＣＡＯＲＦでは、このように莫大な費用と時間をかけて、あるプロジェクトのための、あるシミュレータのための、ある船の、ある特定の水路における、非常に「正しい振舞いをする」数学モデルと１セットの係数を求め、客観的、主観的に評価したわけでる。これは、パナマ運河の改修プロジェクト自体が巨大なプロジェクトであり、かつ、その安全性が国際的に問われる、という特殊な状況の結果であり、一般的な数学的モデルを作る努力を怠っていたわけでない。そこで、次に、ＣＡＯＲＦのプロジェクトからみた、数学モデル発展の過程を追ってみよう。

（２）ＣＡＯＲＦプロジェクトからみた数学モデル発展の過程[94]

1977年、大洋中での中高速モデルが最初に用いられた。しかし、当時は、船の大型化に伴い、制限水路等でのタンカー、コンテナ船、ＬＮＧ船の安全性に重点が置かれていたから、次第に複雑な状況のシミュレーションが必要となってきた。高速用数学モデルを修正して低速でも使えるようにし、制限水路中での減速、停止、後進や特に着桟時の横移動が行えるようになった。また、これに伴い、低速時に機関回転数を上げて早く旋回する("kick effect"、日本ではブースティングと呼ばれる)操作も再現できるようになり、パイロットにも満足してもらえるモデルとなった。次に重要となるのは、機

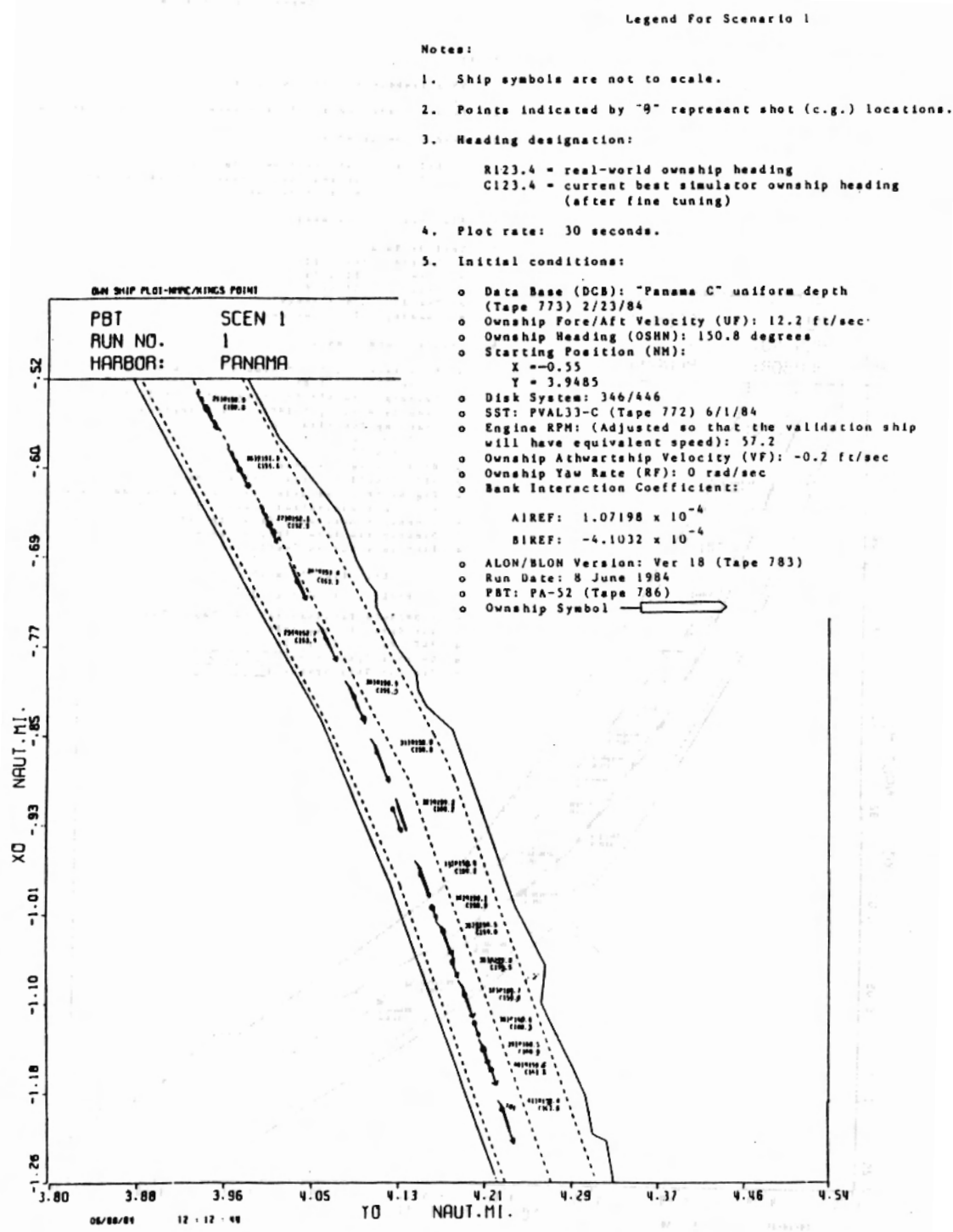


Fig. 6.3.11 Validation of simulation model at Gaillard Cut

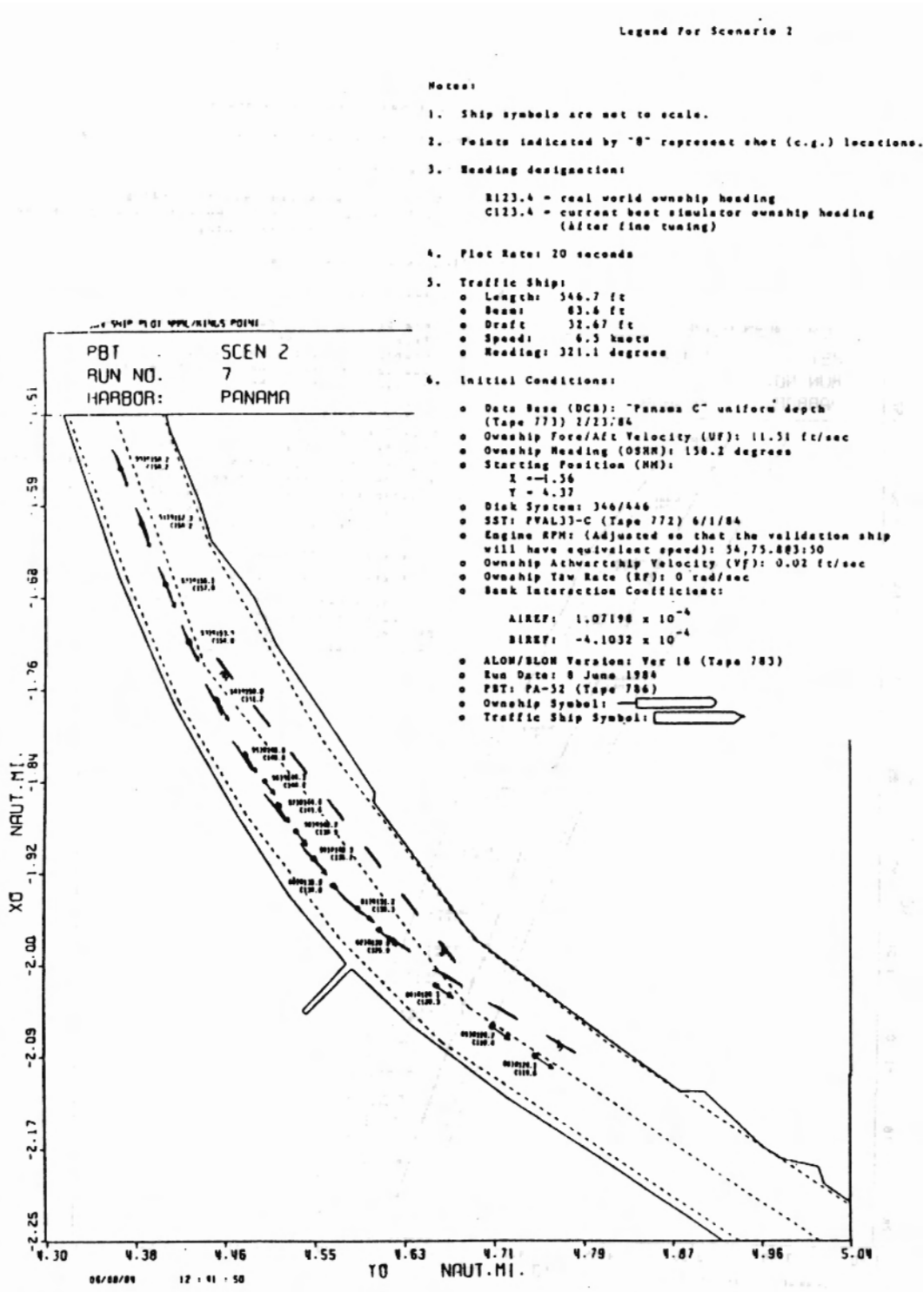
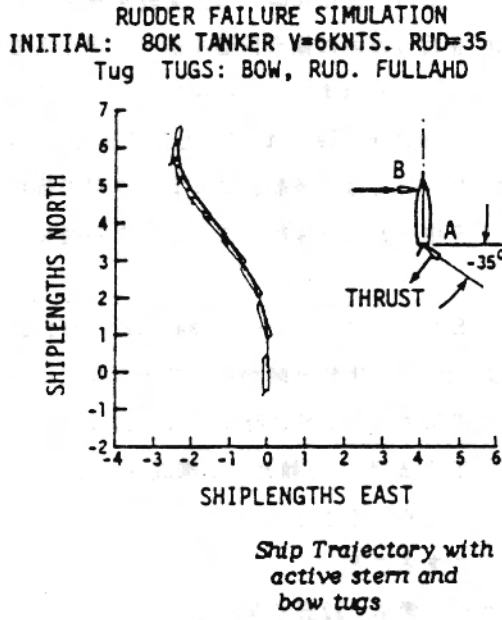


Fig. 6.3.12 Validation of simulation model at gaillard Cut (meeting)

関の特性であり、現在、ＣＡＯＲＦでは、ディーゼルか、スチームかあるいはガバナーの制御の有無にも応じられるようになっている。次は、低速時のタグ支援の問題がでてくる。必要最少限のタグの数、そのタイプや馬力等の基準作りがある。そのために、まず、タグと本船の干渉を考えないモデル（「単純タグ」モデル）が考えられ、タグ支援アセスメントに用いられた。

しかし、実際には、本船の船速等の影響を受ける（タグー本船干渉）。この問題を調査するため、ＭａｒＡｄ(ＣＡＯＲＦの所轄機関、商務省海事局)と U.S.Coast Guard (アメリカ沿岸警備隊)が共同で実船実験を行った。最初の実験は1978年にチェサピーク湾で行われ、静的及び動的ボラード・プル、そして、曳航角や本船の船速、伴流の影響が調べられた[96]。その後、1978年[97]、1981年[98]にも同様の実船試験が行われ、くのタグー本船干渉問題に多くの知見が得られた。Fig. 6.3.13 にはこれらの実験で得られたモデルにより計算した６ノットで航行中の８万トンタンカーのタグ支援シミュレーション結果を示す[94]。

一方、シミュレーションモデルに必要な実船データは、シミュレーションを必要とするような状態（制限水路や浅水中）のものがＥＳＳＯ　ＯＳＡＫＡぐらいしかない。したがって、こ、いった状況でのシミュレーションモデルの評価は、経験を積んだ船員による主観的判断に頼らざるを得ない。また、必要な流力微係数は、拘束模型試験や自由航走模型試験で求めることになる。その際、問題となるのは常に縮率影響である。結局、実船の十分な情報がないと、validation は非常に困難となる。



Ship Trajectory with active stern and bow tugs

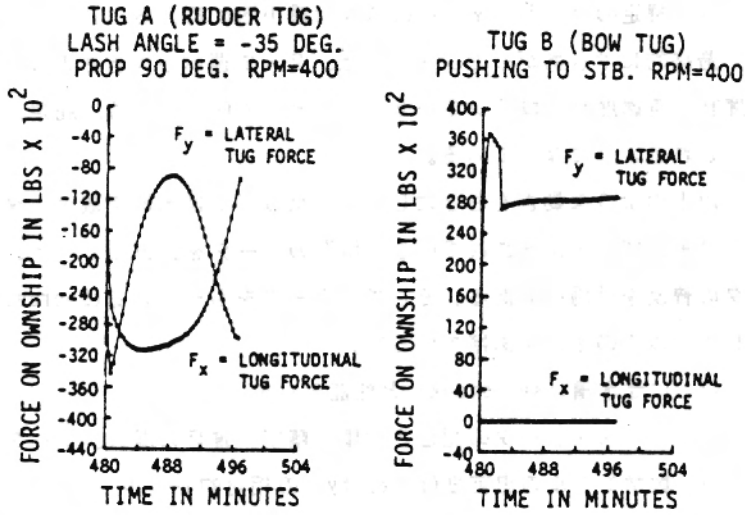


Fig. 6.3.13 Simulation of tug-ship interaction

（３）国際的協力体制と数学モデルの標準化

日本ではすでに、標準的な数学モデルとしてＭＭＧモデル[7)~11)]がすっかり定着し、現在、今回のシンポジウムでもその成果が発表されているように、浅水時や制限水路、あるいは、低速時の操縦運動モデルが提唱され、標準化しつつある。ＭＭＧモデルはその後、“ＥＳＳＯ　ＯＳＡＫＡ”を用いた国際的プログラム Joint International Maneuvering Program(ＪＩＭＰ)[99)] に協力するために設けられたＪＡＭＰプログラムにより改良され[14)]、現在に至っている。

ＪＩＭＰでは、“ＥＳＳＯ　ＯＳＡＫＡ”の浅水域での実船実験[55)]及び“ＥＳＳＯ　ＯＳＡＫＡ”の種々の縮率模型を用いた世界規模の模型実験を種々の条件下で行い、一般的な操縦運動の数学モデルの validation を行うために縮率影響を調べ、現在ある数学モデルの延長として、入渠、出渠を含めた数学モデルのガイドを示す[5)]ことを目的としている。 その成果の一部は、第１８回ＩＴＴＣ の Manoeuvrability Committee Report[100)] としてまとめられている。

また、MARSIM'84[101)] では、操船シミュレータ用の操縦運動数学モデルに関するワークショップをひらき、ＩＭＳＦを中心とした操船シミュレータ各機関内での共通の数学モデルの確立に対する努力を続けている。

（４）ＭＡＲＣＩＳ[93)94)102)] ——— Marine Coefficient Identification System

ＣＡＯＲＦでは、さらに、実船実験からシステム同定によるモデルの係数決定までを行うシステムを開発中である。このＭＡＲＣＩＳと呼ぶシステムは、ＭＩＴで開発された拡張カルマンフィルターを用いたシステム同定手法[103)] を軸として構成されており、次のような点が考慮されている。

◇　どんな船にでも使えること
◇　ポータブルであること
◇　簡単に、かつ、素早く設置できること
◇　船の通常の運航をさまたげないこと
◇　特定のハードウェアへの依存は最小限に抑えること

最終的にできあがったシステムは、２人で運べる大きさのコンソールに収まっており、３軸の加速度計と角速度計、ロランＣをセンサーとして使っている。舵角とプロペラ回転数は船橋のレピーターらとれるようになっている。

以上のような動きをもとにして、ＩＭＳＦでは水槽実験データ及び世界各地にある操船シミュレータでインプリメントされている“船”のデータを公表して、どこの操船シミュレータでも使えるデータの普及を計画中である。そして、データをもっている(Source)機関が提出するために必要な情報として、以下のものをあげている[5)]。

◇　にせ水槽(pseudotank) と性能データ
◇　ソース・データの記述と評価（精度、雑音の混入、データの広がり、理解のしやすさ）
◇　数学モデルの忠実度(fidelity) の相対的レベル
◇　評価手順(validation process) の記述
◇　ソース・データとの相関の有効性

◇　係数導出プロセスの有効性

◇　性能評価指標の一致度の有効性

◇　すでにわかっている数学モデルの制限

◇　ソース側の性能の情報と評価

このうち、pseudotank というのは、一種の数値シミュレーションによる水槽試験であり、ある数学モデルにおいてある係数をもつ“船”で数値的に行う標準的な水槽試験のことである。

Fig. 6.3.14は、…報提供を行おうとする機関がどういった手順で、上に述べた一連の情報（Standard Package of Information）を求めるかを示したものである[5]。

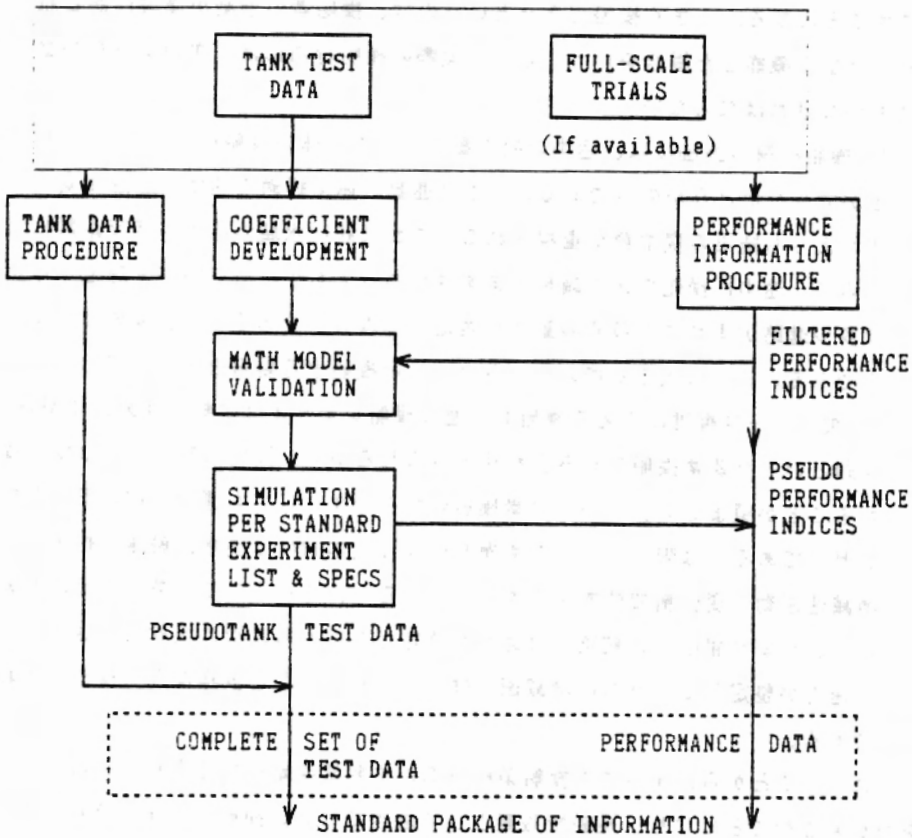


Fig. 6.3.14 Procedure to make standard package of information

操船シミュレータを運用する機関にとって、操縦運動の数学モデルは命であり、何隻の“船”をもっているか、どのような状況のシミュレーションができるかは大変重要なセールスポイントである。そして、それ以上に重要なのが、その数学モデルなり、係数なりが実船をどのくらい再現しているか、その数学モデルの限界は何か、といった問題である。そこで、操縦運動数学モデルの validation の問題が熱心に研究され、検討されてきた。ＪＩＭＰやＭＡＲＣＩＳといった操縦運動数学モデルの標準化、精度よい推定、そして、システム同定による係数の決定に関するプロジェクトを先頭に立って推進してきたのが操縦性の研究所ではなく操船シミュレータ機関であるのも、こういう切実な状況による。操船シミュレータには操縦運動の数学モデルだけでなく、 Fig. 6.3.9 に示すように船橋内の諸計器や視界情報、人的要素等の validation 問題もあるが、ここでは触れない。

6．4　操船情報のあり方と予測精度

ここでは操船者の立場から、操船情報として望ましい操縦性能のとり上げ方と、数学モデルによる操縦運動の推定精度の好ましい許容範囲について考える。

はじめに、操船行為にみられる二、三の特徴について触れておこう。

船の操縦システムは操船者と船で機能を分担し合っているから、熟達した操船者でも船の操縦性能を超えて操船することはできない。また船の動きを誤ると、ときには衝突や乗揚げの海難事故を起こすことになる。うまく操船できたというのは、操船者の予測が操縦性能と航行環境の状況に合わせてうまく機能した場合をいう。しかし実際の操船行為には、次のような特徴があることを指摘しておかなければならない。

(1)　操船技量の評価には、途中の船の動きよりも全体の操船行為の中で、船を円滑に進ますことができたかどうかの点である。つまり運動の途中経過の速度、加速度変化にみられる細かいずれよりも結果の変位量が重視される。これは航行水域の広さ、残存距離に大きく影響されるからで、途中に操舵や速力調整のまずさがあっても予定点で船が予想通り停止するなら、或いは多少進路がずれても最終の動きが満足すべきものであるなら、操船はうまくいったとする見方である。これは人工知能のコントローラが操船する場合と大きく違う点であろう。

(2)　次に、一見複雑にみえる操船も一連の操船シナリオは変針、保針、増減速、停止、その場回頭といった要素操船の組み合わせとみられるから、操船情報としては要素操船性能で提供されることが望ましい。しかし要素操船性能を示すにしても運動の初期条件が常に速度、加速度がゼロであるとは限らない。要素操船性能は具体的には浅水、船速、舵角に対する回頭運動、増減速運動の変位量で性能を表すことになるが、これらの変位量は前段の要素操船の影響をうける。つまり屈曲した航路では運動が整定しないうちに次の操舵がなされ、アプローチ操船では速力が整定しないうちに増減速の操作をくり返すなど多様な入力操作が重ね合わされるからである。

これらのことから、すべての操船条件を満たす要素操船性能を取り入れることは大変なデータ数をかかえこむことになり、操船情報量として適当でない。操船の全体の流れの中で、操縦運動の予測に連なる適当なデータ数と内容のものを選び出す必要があり、それらの推定精度が操船上の予測にかなう範囲のものであることが期待される。次にこれらの例示を操船行為の事例から述べることにする。

6．4．1　操船情報として望まれる操縦性能

(1)　操船者からみた操縦性能のとらえ方

造船設計では、操縦性能を設計した船の運動制御機能の成績を知るという視点から、機能の上限で試運転し、得られた性能データを設計面にフィードバックさせている。これに対し、操船者は様様な航行環境のなかでも容易に対応できる操船のしやすさで評価するので、頻度の高いスタンバイ速力下における操縦運動の性能データが望まれる。

大洋航走中はオートパイロットにゆだねた保針操船であり、相手船と見合い関係が生じた場合は

早い目に小角度変針して避航する。Sea speed で航走中に最大舵角をとって旋回避航するケースはほとんどどない。荒天航行中は、やむをえずマニュアル操舵に切りかえて大舵角の保針操舵をしたり、大舵角による小刻み変針したりするが、操縦性を云々するような用法ではない。ましてや大洋航行中にCrash astern で急停止するといった事態になることは、操船の常識からみてきわめて稀なケースといえよう。

操船を意識する航行水域は、行き合い船の交通量が多い、視界が悪い、水路が屈曲している、風潮の強い制限された水域の場合である。減速などの主機使用を予測するときは、S/B Eng.（Stand by Eng）を発令してまず、Sea speed からスタンバイ速力(Manoeuvring speed、S/B speed, Harbour speed)に落とす。実務面では航海速力から必ずスタンバイ速力に落として半速、微速、後進といった変速を指令する。とくに操船に神経を使うバース付近の港内操船では、浅水域における低速時の操縦性能が問題となる。

低速時の保針性能では、ＣＰＰの場合が問題で、ピッチ角０°では保針しながらの惰性前進はむずかしい。少しプロペラ後流の出るピッチ角２～３°をとりながら舵で保針しなければならない。この補正にはサイドスラスターの使用も有効であるが、現在の操縦性能のデータにはＣＰＰ船の低速時の操縦特性についての評価が欠除している。横移動、その場回頭のバース前面の操船ではサイドスラスターの外、タグ支援による操縦運動があり、これらの研究成果が少ない。期待される研究分野である。

(2)　操船情報としての操縦性能評価のあり方

すでに述べたように要素操船における船の動きは、常に初期条件がゼロでスタートしないから前段の操船行為の影響が波及する。したがって旋回径のように単独操作による評価値でなく、多様な操作が組み合さった場合、その表現に工夫が必要である。

以下に操船者向けに利用しやすい操縦性評価のあり方を例示する。

①　変針時の新針路距離

狭水道を大型船が変針する場合変針点に至る手前のどれ位の距離（新針路距離という）で舵をとるべきかが問題である。Ｆig. 6.4.1 に示すように、変針角ψが一定でも舵角のとり方で新針路距離は変わる。このとき操舵される舵角は喫水や航行環境に応じて操船者の判断にまかせられる。このため操船ブックレットのの新針路試験では試験状態を変針操船の実情に合わせ、δ＝1'5°だけでなく、最大舵角についても実施し、満載、バラスト状態におけるψ＝３０°～６０°変針時の新針路距離を示す必要がある。

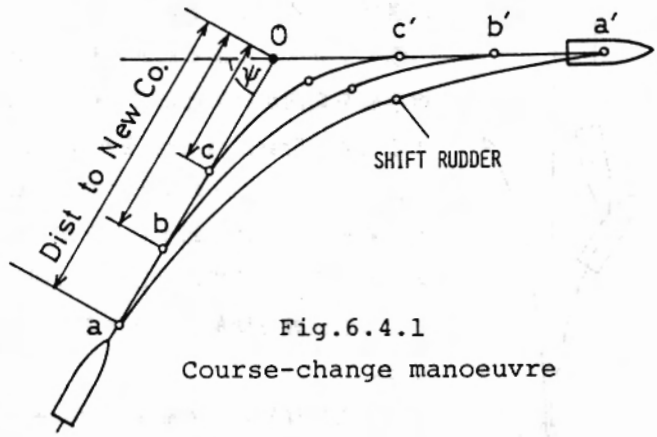


Fig.6.4.1
Course-change manoeuvre

② ウイリアムソンターンと針路反転後の横ずれ

ウイリアムソンターンは、船外に転落した者を救助するために船を１８０°コースを反転して元の進路上を逆に進める操船法である。Ｆig. ６.４.２の(A)ように、できるだけ早く船を転落者の地点に船を戻すため舵角は３５°がとられ、６０°回頭したときに舵を反対舷に切り返し、元の進路と２０°の交角になったところで舵中央に戻し、元のコースと１８０°反転したとき、あて舵をとりながら船を元の進路上に逆に航走させる。

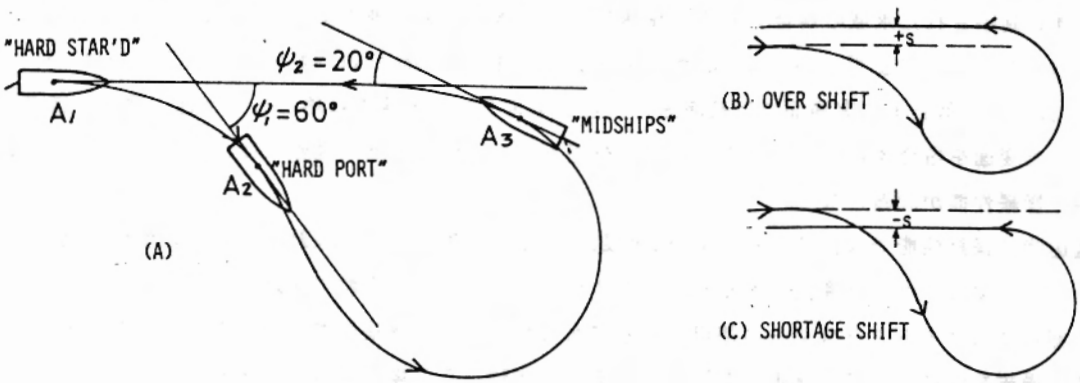


Fig.6.4.2 Williamson-turn manoeuvre

しかし実際は、Ｆig. ６.４.２ (A)のようにうまく乗らず、図の(B)か(C)のように横ずれを生ずるものである。これは旋回が左右非対称で、喫水状態、トリム状態で変化する理由による。このため試験方法は Ｆig. ６.４.２(A)の要領の$\psi_1 = 60°$、$\psi_2 = 20$ $\delta = \pm 35°$で実施し、その結果生じた横ずれをこの操船法による操縦性能の評価値とするならば、これを基準に操船者はＳ＝０になるようなψ_1、ψ_2の選び方を考えることになろう。

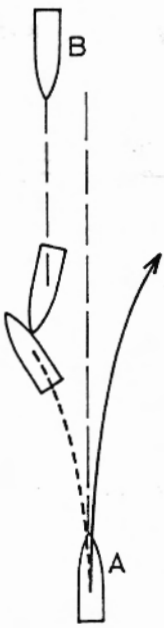


Fig.6.4.3
CRASH ASTERN

③ プロペラによる前進制動時の頭振り現象

相手船を真向かいに近い右側航行のとき、突然前面に発見した障害物を回避するため、Crash astern をかけたとする、このとき右に回頭するなら良いが、Ｆig. ６.４.３のように左に回頭すると他船と衝突するおそれが出る。もし初めから左に回頭することがわかっておれば予め右のあて舵をとって抑えられようが、予想に反して右に回るとなれば、初めから右舵をとっておくことは右回頭を助勢し、狭水道では乗揚げなど、あらたな危険を招くことになる。

また着桟操船のため船を進める場合、後進をかけたため思わぬ方向に船首が振ったのでは、自力操船の場合、姿勢の立直しが困難である。

Ｆig. ６.４.４に示す着桟操船の３様において

(A):強い後進力で制動をかけたとき

(B):弱い後進力で制動をかけたとき

（C）:桟橋前で一旦停止しその後ゆっくり着桟する

の場合をみると、強い前進制動は（A）と（C_1）で行い、弱い前進制動は（B）と（C_2）でかけることになる。（A）の場合は前方に距離的余裕がないので、船首が大きく振れることは好ましくない。（B）の場合は弱い後進力で減速させながら接近することになるから、頭振りがなく保針できる船速と前進制動力の関係が必要である。（C_2）では微速前進、微速後進の操作のくり返しとなろうが、頭振りの心配よりも風潮の影響をうけやすい速力の範囲である。

したがって 操船ブックレットには、深水における逆転停止性能のデータはあるが、やはり水深喫水比H／d＝1.2，1.5 浅水域におけるデータも必要で、このとき発生する回頭角を併記しておくことが望ましい。そして後進力をかけたとき、針路不安定となる頭振れの現象を抑える方法の解決がされるなら、入港操船は楽になり、操船者にとって最も期待されるものである。

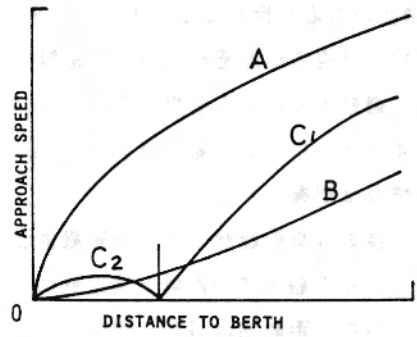


Fig. 6.4.4 Berthing alongside manoeuvre

④ タグ支援時の操縦性能

現在、大型化する船に比べ港湾施設の実態は必ずしも船型に適合した規模のものばかりとはいえず、港湾設計基準に照らして見ても大型船の港内操船水域は余裕が少ない。船速３～４ノット付近の低速になると舵がきかなくなり、ＶＬＣＣなど大型船の着離桟操船には強力なタグの支援に頼らざるをえない。

操縦性能を操縦のしやすさの度合と言うならば、横移動時のタグ押し力と横速度、横移動距離の関係、そしてタグ押し力とその場３６０° 回頭の難易度といったものが浅水域におけるデータとして提供されるなら、操船者には有難い操船情報である。

６．４．２　操船情報として期待される操縦運動の推定精度

数学モデルによって操縦性能を推定する場合、その精度を操船者がどこまで要求するのか、これを明確に答えることは容易ではない。操船者の予測には、海上経験から培われた勘によるケースが多いので、その知覚判断は主観的で個人差があり、表現量にはあいまいさを含むからである。

そこで、推定の許容精度は、操船者の操作ミスや錯覚といった人間のエラーでなく、知覚上誰もが持つであろうと思われる視覚上の誤差を超えないものという設定の下に考察することにする。

上手な操船には、まず、注意深い見張りとコンパスやレーダの的確な使い方が肝要である。船橋前面に広がるパノラマ場景の中で、操船上注目すべき目

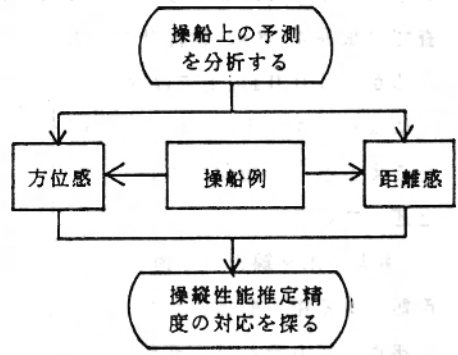


Fig. 6.4.5 Functional factors of prediction

標物には距離と方位で追跡し、それらの相対変位量から感覚的に「遠いか近いか」、「速いか遅いか」そして「避航しなくても安全か危険か」を捉える。さらにレーダ映像の鳥かん図に見られる相対的位置関係から、より正確な距離と方位を観測し、これらを一つの操船情報として操舵や速力調整の操船行為に連携されるのである。

このため、操船者がもつ操船上の予測に対し、その予測を分析する評価の指標を、ここでは操船者が注視する対象物標への「方位」と「距離」とし、いくつかの操船事例をあげながら、操縦性能の推定精度の対応を探ることにする。　Fig. 6.4.5は考え方の構図を示す。

(1)　目視の距離感からみた実距離の予測精度

避航するにしろ着岸するにしろ、目標物までの距離感は、操船では重要である。「右舷50°、4マイルに横切り船あり」と報告をうけたとき、その方向、距離はいずれもあいまいであるが、情況は把握できる。

長畑は乗船履歴のある船舶職員25名の海上における目視の距離感についてアンケート調査し、相手船までの距離と遠近感についてFig. 6.4.6の結果を示した[104]。

目視の距離感は眼高、明暗、動静、対景形状などによって変わることが知られているので「遠い、近い」の遠近感から距離判断へ移行するとき、実距離に対する目視距離のあいまいさは免れない。

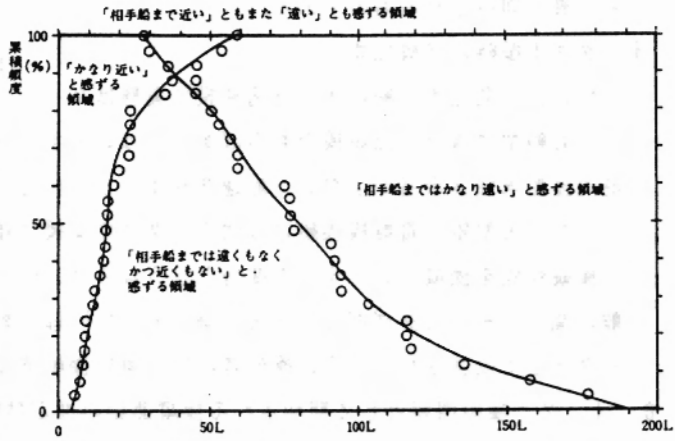


Fig.6.4.6 Visual sense of far and near

Fig. 6.4.7から、目視距離5,000mは実距離でいえば3,000m～8,000mの範囲のものを判断していることを示す。そして距離が近くなるほど実距離の存在範囲は狭められることがわかる。また別な調査では眼高4.8m、視程9浬のおだやかな海上では、500m付近までは比較的正確に目視できるが、500m以上では過大になりやすく1,000mをこえるとその傾向が強いと述べている。

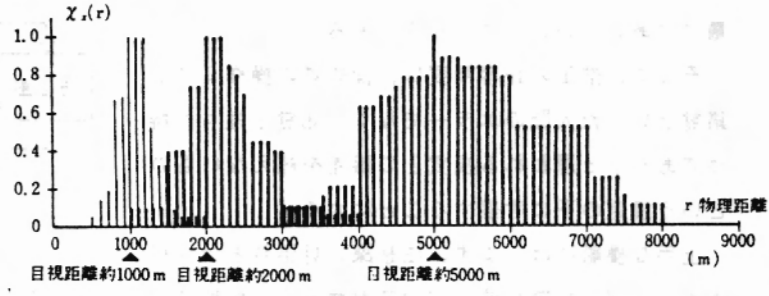


Fig.6.4.7 Visual sense judging distance

事実、水平線近くの遠距離にある相手船は、かなり接近してもそれほど変化したようには見えず、逆にある程度まで接近してくる

と、より速く接近してくるように見える。いよいよ避航を開始するときは近いと感ずるときで、そのときの操船措置として最大舵角の旋回径＝３Ｌ～４Ｌ、急速停止距離＝８Ｌ～１６Ｌを考えるなら、Ｌ＝３００ｍのＶＬＣＣの場合では目視距離１～５Ｋｍの操船であり、Ｌ＝２００ｍの大型船では目視距離０．６～３Ｋｍの操船範囲の問題となる。遠近感でみるならば この程度の距離が近いと感ずる範囲であろうし、操縦性能が云々される操船水域でもある。目視距離と実距離とはベキ関数による近似が強い相関をもっているようであるから、目視距離は実距離に対しＦｉｇ．６．４．７を参考にすると、１Ｋｍ以下では２０％、それをこえる２Ｋｍまでは２５％、５Ｋｍ以下では３０％とみられ、この目測精度を超える推定精度は好ましくないようである。

(2) 操船者の方位感覚からみた動きの予測精度

大型船が船首の振れを感じさせない程の保針中でも、その水域を帆走中のヨットは波に叩かれてyawing が大きく、これを抑える操舵も荒い。船は小型になるほど慣性量は小さいから、コースを保持することは楽でない。

千石船が日本沿岸を走っていた江戸時代では、十二支で表示した方位盤が使用されていた。１目盛りは３０° でその中間に1/2 の目盛があった。当時の船頭はこの程度の目盛で、大ざっぱに船の進行方向を定め、あとは沿岸ずたいの山、岬、島など、著名な物標を探しながら航海を続けていたようである。

他方、１６世紀に西欧で使い始めた全周３２分割の点数式コンパスは、２０世紀に入っても小型船には使用されている。そして現在の３６０° の度数表示になると保針、船位決定、他船との相対位置の精度が格段と向上してきたのである。

Table 6.4.1 Historical compass cards

コンパスの種類	全周の分割方式	１目盛の度数	対象船	利用方法
十二支表示の磁気コンパス	１２分割 (細分割1/2)	３０° (15°)	千石船 (和船)	針路方位用
ＮＥＳＷによる点数表示の磁気コンパス	３２点 (1/4点細分割)	11° −15′ (約２．８°)	西欧の 帆船汽船	針路方位用 物標方位用
度数表示のコンパス	３６０分割 (1/10度細分割)	1° (0.1°)	現代の 船舶	針路方位用 物標方位用 船位決定用

航行中に船位を決定する場合、物標の方位精度は１～２° の範囲であるが、操船における他船の動静、物標の方位の視認感覚では、右５０° の方位にあるものを右４点とみようが右５点と見ようが、あるいは右４点のものを４０° に見ようが５０° に見ようが、方位感覚としてこの程度の読み幅は許される。つまり感覚的な方位誤差に1/2点(約５．５°)のずれを考えると横の動きのずれは対物距離の sin(1/2 点)＝0.098、約１０％でも許されよう。

ただし,避航操船に入るときはレーダの距離レンジを３浬に切換えて情況判断するケースが多いから、これ以上の遠距離にある船の動きに対する方位感覚とみて差し支えない。避航を意

識する近距離ではさらに方位感覚の予測は細やかなものとなり、コンパスによる方位精度に近ずくものと思われる。

(3) 方位と距離による船位誤差

視覚による方位の誤差は、最大で±1.7°程度、レーダによる物標の方位、距離を測定する場合、距離の観測誤差は真方位では±2%、相対方位では±4%、距離誤差は測定距離の約3%であるといわれる。

実際に船位測定のためにレーダを利用する次ぎの2ケースをとりあげると

① 視方位とレーダ距離観測では、船位の最大誤差は距離の4%程度

② 1物標のレーダ方位とレーダ距離による場合、真方位のときの船位の最大誤差は距離の約5%、相対方位のときは距離の約8%程度とみられる。

船の操縦性能が適用される操船水域の広さで船位を決定するときは、それ以上の距離にある物標を選択することになろうし、レーダ使用の頻度の高い現状を考えるとき、3～5%程度の船位誤差があるものとみられる。

(4) 港内操船における方位感覚と距離感覚

港内では操船上の目標物標はとりやすいが、狭いため操船水面の利用に神経を使う。入港するときの保針操船では、船首から左右1点範囲前面の情況に注意しながら直進する。船首方向に操舵目標をとる場合は、操舵手の視覚による方位誤差±1.7°を超えると、保針のための当て舵操作が行なわれるとみてよい。港内に入れば操舵目標は手近な物標を選ぶことが多いから、着岸点までの残存距離を1浬の操船を考えると、方位誤差による横ずれは55m程度、つまり およそ船幅B～2Bを超える船の動きのずれは好ましくない。

また大型船になるほど、船首前方にしろ側方にしろ、操船者が船橋から視認できない広い水面部分が生ずる。つまり、死角範囲あるいは遮視範囲とみられるBlind zone（Fig.6.4.8）で、着岸直前では距離感にずれが生ずる。船の全長 Loa に対する船首前方の死角距離 Xb を置点すると Fig. 6.4.9のようなバラツキをもち、およそ Loa の 0.5 ～1.5 倍の範囲である。満載コンテナー、LPG船、PCCになると前方の水平視野にも死角が Fig.6.4.10のようにひろがるので、前方の死角距離感のずれはさらに大きくなるものと思われる。[185]

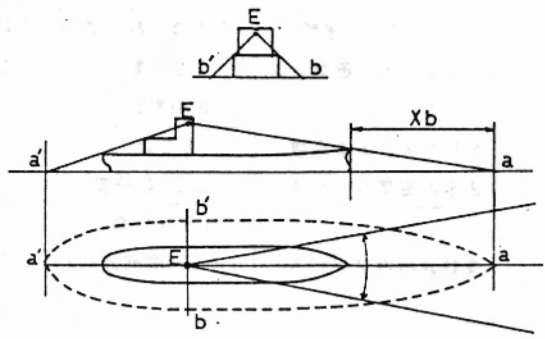


Fig. 6.4.8 Blind zone

実距離を見誤るため、操船者はできるだけ船橋ウイングに立ち操船の指揮をとる。概して眼高が高くなるほど視距離は実距離よりも短く感ずるもので、実距離の20～30% 程度の差があろうか、定かでない。

(5) 操船情報として望ましい推定精度

しかしながら操縦システムの中にコントローラとして占める人間要素の役割は、人間の知覚判断機能にいまだ未知な部分が多い。[188)]

速度の早い自動車運転に関しては心理学的にも人間工学的にも調査研究された文献は多いが、速力の遅い、しかも眼高の高い船舶に関するこの方面の研究は寡聞で少ない。

船の動きの予測は、海上経験から蓄積された知覚判断であるので、各人各様であり、このように主観性の強い予測を客観的なものとして表現することは、いまのところデータ不足である。

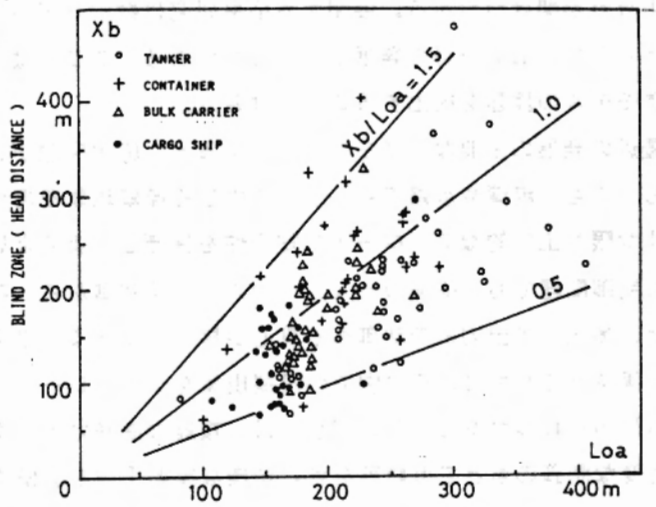


Fig.6.4.9 Blind zone head distance to ship's length over all

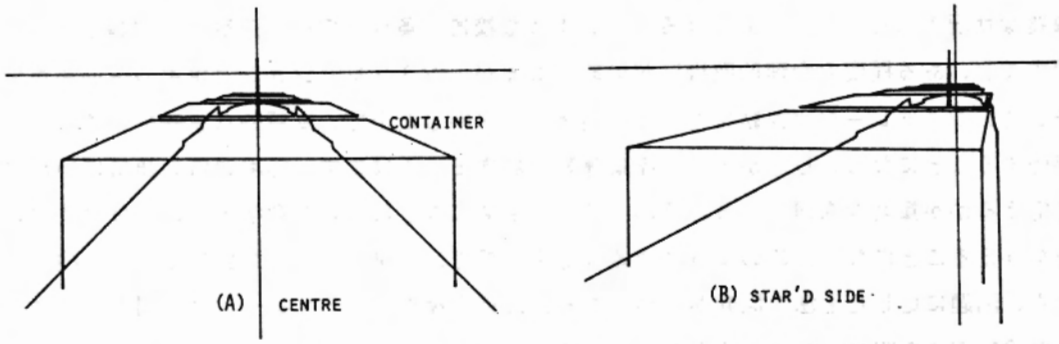


Fig.6.4.10 View from container bridge

しかしながら、操船者が船の動きを予測する操縦運動の性能データを操船情報として提供するに際しては、航行上の安全な余裕をとる意味で、データの推定を underestimate せず、むしろ幾分 overestimate の方がよい。そして強いて推定精度を云々するならば、回頭運動に生ずる横ずれは、出来うればB程度、直進運動ではLoaのずれ、さらに操船者のイメージとして概括的にいうならば船橋から見た場合、船体Blind zoneの水面上で占める範囲と船の全長Loa、全幅Bで示した間隔の距離的ずれ、この程度が、船の縦運動、横運動に対する変位量推定の許容値といえるのではなかろうか、と思うのである。

この節で取り上げた操船者の予測からみた操縦運動の推定精度の問いかけには、漠として正鵠をえた答えにならなかったが、操船ブックレットをより良く整備する意味においても、今後の課題としてさらに研究を進める必要がある。

６．５　あとがき

操縦運動の数学モデルがある程度の確立をみて、そして、計算機技術の発達に助けられて、種々の応用分野が開けつつある。展開する応用研究は数学モデルに対する新たな要請を提起し、互いに刺激をえる形で、この分野の発展が実現しつつある。ここでは、最近の応用分野の状況について紹介し、数学モデルの課題を摘出することを試みた。

最近の発展の主要な特徴をあげるとすると、応用問題がきわめて複雑になってきたことである。船においても、港湾や水路でも、そこで生じる操縦現象を再現し、単なる専門家の経験や勘ではなく、可能な限り工学的なアプローチで安全性を評価し、よりよい設計への試みがなされている。例えば、船の制御問題でも、従来の一入力一出力の針路制御から、複雑な情報処理と意志決定を含む制御の知能化、多入力多出力系の制御へと重心が移りつつある。港湾開発においても、最小の投資で、最大限の効果をうるために、その中での操縦現象をシミュレーションし、安全性の評価を試み、設計案の改良がはかられつつある。この場合には、複雑な海底地形、潮流や風の分布や変動を考慮し、人間の臨機応変な制御のもとで曳船等を含む多様な操船手段を駆使する状態での操縦運動の推定が必要になる。

こうした応用分野の要請に応えるためには、深水域を一定の速度で航行する場合から進んで、制限水路影響を考慮して、低速で自在な操船がなされる場合の数学モデルが当面の課題となり、さらに一層、複雑な状況下のモデルが求められる。このような複雑な条件下の操縦運動は、理論と実験の成果を活用すると、ある程度の合理的取扱いが可能になるが、シミュレーションと現実の区別も重要になる。そこで、シミュレーション結果を一度、現実から区別した上で、本質的な意味で現象の再現を試み、評価することになる。したがって、操縦運動の数学モデルはまず、応用領域の要請にいかに踏み込んで応えるかが重要な課題となる。その上で、片手間になされていた数学モデルの評価問題に必要な地位を与えることになる。このように複雑な応用分野では、決まりきった数学モデルの検証方法もないから、問題に応じた手法の開発が必要になる。最近の種々のシミュレーション問題における数学モデルの検証方法を紹介したのはそのためである。

他方、数学モデルが複雑な現象の扱いを必要とするにつれて、その基礎を固めることが重要になる。問題が複雑になるほど、流体力学的に解決しうることを明瞭にして、未解決の問題の取扱を検討する必要があるからである。操船シミュレータが基本となる操船法の訓練に用いられていた時期には、数学モデルも、その検証もほとんど問題にされていない。しかし、複雑な応用問題を手掛けるに至って、シミュレータ関係者の間で数学モデルが重要な位置づけを与えられ、流体力学的背景を整理して導いたＭＭＧモデルの評価が高くなっている。これは複雑な応用に挑む際には、一層、基礎的な詰めが重要であるということを示す事例である。

著者らの不勉強と限られた紙面によって、意を尽くせなかったことも多いが、操縦運動の数学モデルの最近の応用分野の実状とその課題を報告した。操縦性研究は必要な課題が明瞭になると、それなりの解決を提案しうる段階に達していると考えられ、操縦運動の数学モデルに関係する者とその利用者の間の連携が今後、重要になると予想される。本稿が両者の協力の強化に役立てば望外の幸いである。

参考文献

1) Davidson,K.S.M. and Schiff,L.I. : Turning and Course Keeping Qualities, Trans. SNAME, Vol. 54 (1946), pp.152-200

2) 野本謙作、田口賢士、本田啓之輔、平野 進 : 船の操縦性に就いて（１）、造船協会論文集、第９９号 (1956), pp.75-82

3) 山田孝三郎：大型船の操縦性判定と舵面積の決定、関船誌、第１３４号 (1969), pp.33-41

4) 野本謙作、元良誠三：操縦性研究の船舶設計に対する応用、第２回操縦性シンポジウム、日本造船学会 (1970), pp.151-167

5) Puglisi,J.J., Case,J.S. and Hwang,H.-Y.: Direction of International Effort for Development of Mathematical Models and Ship Performance Data for Marine Simulation Applications, Proc. 1st Interc. Maritime Simulation Symposium, Munich (1987), pp.89-98

6) IMO, Sub-committee on Ship Design and Equipment : Manoeuvrability of Ships—Review of Resolution A.209(VII), IMO Document DE 29/WP.4 (1986)

7) 小川陽弘、小山健夫、貴島勝郎 : ＭＭＧ報告－I、操縦運動の数学モデルについて、船誌、第５７５号 (1977), pp.22-28

8) 浜本剛実 : ＭＭＧ報告－II、操縦性数学モデルの理論的背景、船誌、第５７７号 (1977), pp.322-329

9) 葛西宏直、湯室彰規：ＭＭＧ報告－III、舵に作用する力と船体、プロペラとの干渉、船誌、第５７８号 (1977), pp.358-372

10) 小瀬邦治、貴島勝郎：ＭＭＧ報告－IV、拘束操縦性試験の方法及び試験装置、船誌、第５７９号 (1977), pp.404-413

11) 小川陽弘、長谷川和彦、芳村康男：ＭＭＧ報告－V、操縦運動数学モデルの実験的検証と改良、船誌、第６１６号 (1980), pp.565-576

12) 小川陽弘、浜本剛実：操縦運動数学モデルの基礎、第３回操縦性シンポジウム、日本造船学会 (1981), pp.9-26

13) 小瀬邦治、湯室彰規、芳村康男：操縦運動の数学モデルの具体化——船体、プロペラ、舵の相互干渉とその表現法を中心に——、第３回操縦性シンポジウム、日本造船学会 (1981), pp.27-80

14) 運動性能研究委員会操縦性能推定専門委員会（JAMP W.G.）: 船の操縦性能の推定、船誌、第６６８号 (1985), pp.1-81

15) 小瀬邦治、長谷川和彦：操船シミュレータとその安全性評価への利用、運動性能委員会第２回シンポジウム、日本造船学会 (1985), pp.89-114

16) 柏木正：不均一潮流中での船舶操縦運動の計算法と鳴門海峡における適用例、航海論 第７５号 (1986), pp.55-67

17) 小山健夫、小瀬邦治、長谷川和彦：保針操舵における針路不安定の許容限界に関する考察、船論第１４２号 (1977), pp.119-126

18) Nomoto,K.: Simulator Studies from a Naval Architect's Point of View, Proc. First Intern. Conference on Marine Simulation (MARSIM 78), Southampton (1978), pp.353-382

19) Koyama,T. and Jin,K.: An Expert System Approach to Collision Avoidance, Proc. 8th Ship Control Systems Symposium, The Hague, Oct. 6-9 (1987)

20) 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)

21) Bruun,P. : Optimal Layout Dimensions of Maritime Fairways in Shallow Seas, Sea Straits, and Maritime Waterways, Port Engineering, Third Ed., Gulf Publishing Company (1981)

22) PIANC ICORELS Group IV: Optimal Layout and Dimensions of Maritime Fairways in Shallow Seas and Maritime Waterways (1980)

23) Puglisi,J.J.: CAORF Research for the Maritime Industry, Proc. MARSIM 81, New York, N.Y. (1981), pp.A1.1-A1.20

24) Puglisi,J.J., D'Amico,A.D. and van Hoorde,Jr.,G.: The Use of Simulation at CAORF in Determining Criteria for Increased Throughput of Ship Traffic in the Panama Canal, Proc. MARSIM 84, Rotterdam (1984), pp.239-247

25) 大津皓平、長谷川和彦：オートパイロットの評価と展望、第３回操縦性シンポジウム、日本造船学会 (1981), pp.243-279

26) Koyama,T. and Shimizu,K.: Fundamentals of Automatic Harbor Manoeuvring, Proc. 7th Ship Control Systems Symposium, Vol,3 (1984), pp.3.123-3.145

27) 岩崎寛希、原 潔： あいまい推論を用いた避航操船モデル、 航海論、 第７５号 (1986), pp.69-77

28) Hasegawa,K. : Automatic Collision Avoidance System for Ships Using Fuzzy Control, Proc. 8th Ship Control Systems Symposium, The Hague, Oct. 6-9 (1987)

29) 小瀬邦治、日當博喜、音野賢治、赤木 茂、原田美秀子：船の自動離着桟システムに関する研究 船論、第１６０号 (1986), pp.103-110

30) Kose,K. : Study on a Computer Aided Manoeuvring System in Harbours, Proc. 8th Ship Control Systems Symposium, The Hague, Oct. 6-9 (1987)

31) Takai,T. and Yoshihisa,H.: An Automatic Manoeuvring System in Berthing, ibid. (1987)

32) 村田良雄、多田納久義：小型鋼船の進路不安定とその対策、関船誌、第１１３号 (1964), pp.9-14

33) 仲渡道夫、小瀬邦治、長谷川和彦、多田納久義：漁船船型の特異な操縦性能とその改善について、船論、第１４３号 (1978), pp.225-232

34) 小瀬邦治、日當博喜： 出入港時の要素操船性能について－Ⅰ －－出入港操船と要素操船性能－－、日本航海学会論文集、第７４号 (1986), pp.29-34

35) Manoeuvrability Committee Report, Proc. 14th ITTC (1975)

36) 日本造船研究協会第７基準研究部会７４２分科会：国際規則と船舶設計等との関連に関する調査研究報告書（別冊）、船舶の操縦性能に関する研究、造研資No.１５０R,１５９R,(1986,1987)
37) 小山健夫、葛西宏直、山上順雄：造船設計への操縦運動モデルの応用Ⅰ－初期設計と操縦性－、第３回操縦性シンポジウム、日本造船学会 (1981), pp.81-100
38) 田中稔：船舶設計における操縦性能評価と操船シミュレータの利用、運動性能研究委員会第２回シンポジウム、日本造船学会 (1985), pp.115-127
39) 葛西宏直：ＬＮＧ船の安全航行と操船性能、同上 (1985), pp.143-162
40) 神戸海難防止研究会：坂出港番の州シーバースに着離桟する大型タンカーの安全性に関する調査研究報告書 (1983)
41) 小瀬邦治、日當博喜、菅野賢治、本田啓之輔：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、船論、第１５６号 (1984), pp.193-200
42) 本田啓之輔：ＶＬＣＣ入港計画における操船設計の例、運動性能研究委員会第２回シンポジウム、日本造船学会 (1985), pp.128-142
43) 貴島勝郎：操縦性能基準とManoeuvring Bookletに関する国際動向、 運動性能研究委員会第２回シンポジウム、日本造船学会 (1985), pp.1-40
44) 藤野正隆 ： 操縦性能推定法概説、 運動性能研究委員会第４回シンポジウム、 日本造船学会 (1987), pp.1-20
45) Minorsky,N.: Directional Stability of Automatically Steered Bodies, ASME, Vol. 34 (1922)
46) 長谷川和彦、石山忠治、梅田宏規：オートパイロットによる針路不安定船の許容限界に関する考察（第１報）、船論、第１４８号 (1980), pp.92-100
47) Nagata,S., Yagi,Y. and Koyama,T.: Onboard-Shore Integrated Ship Navigation System in Harbour, Proc. 8th Ship Control Systems Symposium, The Hague, Oct. 6-9 (1987)
48) Fuwa,T., Ono,T. and Nishioka,T.: Evaluation Simulator for Automatic Ship Navigation Systems, ibid. (1987)
49) Puglisi,J.J.: The Requirements and Application for the Use of Similation Techniques at CAORF as an Engineering Design Tool in the Ship Navigation, Channel Design and Maintenance Optimization Process, IMSF Member Documentation and Tutorial (1987)
50) 井上正祐、平野雅祥、平川雄二、向井一浩：等喫水船体の操縦微係数について、西船誌、第５７号 (1979), pp.13-19
51) 井上正祐、貴島勝郎、森山文雄：トリム時の船体操縦微係数の推定、西船誌、第５５号 (1978), pp.127-139
52) 井上正祐、平野雅祥、向井一浩：操縦時船体に働く横力、モーメントの非線型項について、西船誌、第５８号 (1979), pp.153-160
53) Inoue,S., Hirano,M. and Kijima,K.: Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring,

ISP, Vol.28, No.321 (1981), pp.112-125

54) Case,J.S., Puglisi,J.J. and van den Brug,J.B.: A Comparitive Look at the Performance of Simulator Mathematical Models and Future Consideration, Proc. MARSIM 84, Rotterdam, June 19-22 (1984), pp.399-411

55) Crane,Jr.,C.L.: Manoeuvring Trials of the 278,000 DWT ESSO OSAKA in Shallow and Deep Water, Trans. SNAME, Vol.87 (1979), pp.251-283

56) Forrester,J.W.: World Dynamics, 2nd Ed., MIT Press (1973), 小玉陽一訳「ワールド・ダイナミックス」、日本経営出版会 (1977)

57) Drefus,H.L. and Drefus,S.E.: Mind over Machine, The Free Press(1986), 椋田直子訳「純粋人工知能批判」、アスキー出版(1987)

58) Royce,W.W.: Managing the Development of Large Systems : Concept and Techniques, Proc. Western Electoronic Show and Convention (WESCON) (1970)

59) Sommerville, I.: Software Engineering, Addison-Wesley, Second Ed. (1985)

60) Lehman,M.M.: Programs, Life Cycles and Laws of Software Evolution, Proc.IEEE, Vol.68, No.9 (1980), pp.1060-76

61) Teichroew,D. and Hershey,E.: PSL/PSA : A Computer Aided Technique for Structured Documentation and Analysis of Information Processing Systems, IEEE Trans. on Software Engineering, Vol.3, No.1 (1977), pp.41-48

62) Ross,D. and Schoman,K.: Structured Analysis for Requirements Definition, ibid., Vol.3, No.1 (1977), pp.6-15

63) Bell,T.E., Bixler,D.C.and Dyer,M.E.: An Extendable Approach to Computer Aided Software Requirement Engineering, ibid., Vol.3, No.1 (1977), pp.49-60

64) Constuntine,L.L. and Yourdon,E.: Structured Design, Prentice-Hall (1979)

65) Wirth,N.: Program Development by Stepwise Refinement, Communication on Association for Computer Machinery (Comm.ACM), Vol.14, No.4 (1971) pp.221-227

66) Parnas,D.: On the Criteria to be Used in Decomposing Systems into Modules, ibid., Vol. 15, No.12 (1972), pp.1053-1058

67) Robson,D.: Object-oriented Software Systems, BYTE, Vol.6, No.8 (1981), pp.74-79

68) Booch,G.: Software Engineering with Ada, 2nd Ed., Addison-Wesley (1987)

69) Pressman,R.S.: Software Engineering: A Practitioner's Approach, McGraw-Hill (1982)

70) Jackson,M.A.: Principles of Program Design, Academic Press (1975)

71) Warnier,J.D.: Logical Construction of Programs, Van Nostrand (1974)

72) Boehm,B.W.:Some Step toward Fomal and Automated Aids to Software Requirements Analysis and Design, IFIP74, North-Holland (1974), pp.192-197

73) Boehm,B.W.: The High Cost of Software, in "Practical Strategies for Developing Large

Software Systems" Addison-Wesley (1975), pp.3-14

74) Banks,J., Gerstein,D. and Searles,S.P.: Modelling Process, Validation, and Verification of Complex Simulation: A Survey, Proc. the Conference on Methodology and Validation, Orlando, Fl., April 6-9 (1987), pp.13-18

75) Boehm,B.W.: Software Engineering Economics, Prentice-Hall (1981)

76) Balci,O.: Credibility Assessment of Simulation Results: The State of the Art, Proc. the Conference on Methodology and Validation, Orlando, Fl., (1987), pp.19-25

77) D'Amico,A.D.: Validity Issues in Simulation, 出典不詳

78) Schlesinger,S. et al.: Terminology for Model Credibility, Simulation, Vol.34, No.3, (1979), pp.103-104

79) Balci,O. and Sargent, R.G.: A Bibliography on the Credibility Assessment and Validation of Simulation and Mathematical Models, Simuletter, Vol.15, No.3 (1984), pp.15-27

80) U.S. General Accounting Office: Report to the Congress: Ways to Improve Management of Federally Funded Computerized Models, LCD-75-111, U.S.G.A.O., Washington D.C. (1976)

81) U.S. General Accounting Office: Guidelines for Model Evaluation, PAD-79-17, U.S.G.A.O. Washington D.C. (1979)

82) Gass,S.J., Editor: Utility and Use of Large-Scale Mathematical Models, Special Publication 534, National Bureau of Standards, Washington D.C. (1979)

83) Gass,S.J., Editor: Validation and Assessment Issues of Energy Models, Special Publication 569, Nat. Bur. of Standards, Washington D.C. (1980)

84) Gass,S.J., Editor: Validation and Assessment of Energy Models, Special Publication 616, Nat. Bur. of Standards (1981)

85) Nance,R.E. and Balci.O.: The Objectives and Requirements of Model Management, in "Systems and Control Encyclopedia: Technology and Applications", Singh.M., Editor, Pergammon Press (1987)

86) Sargent,R.G.: An Expository on Verification and Validation of Simulation Models, unpublished update of "Tutorial on Verification and Validation of Simulation Models", Proc. the 1984 Winter Simulation Conference, Dallas, Tx., Nov.28-30 (1984), pp.115-121

87) Hermann,C.F.: Validation Problems in Games and Simulations with Special Reference to Models of International Politics, Vol.12, No.3 (1967), pp.216-231

88) Naylor,T.H. and Finger,J.M.: Verification of Computer Simulation Models, Management Science, Vol.14, No.2 (1967), pp.B92-B101

89) Miller,D.R.: Model Validation through Sensitivity Analysis, Proc. the 1974 Summer Computer Simulation Conference, Houston, Tx., July 9-11 (1974), pp.911-914

90) Van Horn,R.L.: Validation of Simulation Results, Management Science, Vol.17, No.5

(1971), pp.247-258

91) Shannon,R.E.: System Simulation: The Art and Science, Prentice-Hall (1975)

92) Workshop on Validation of Simulators - Ⅰ, Proc. MARSIM 81, Vol.Ⅱ, Kings Point, N.Y., June 1-5 (1981), pp.4.27-4.37

93) Puglisi,J.J., Case,J.S. and Hwang, W.-Y.: The Process of Validation in Simulation Research, Proc. the Sixth CAORF Symposium, Kings Point,N.Y., May 29-30 (1985), paperB1

94) McIlroy,W., Eda,H. and Shizume,P.: Validation Procedures for Ship Motion and Human Perception, IMSF Documentation (1987), pp.18.1-18.30

95) D'Amico,A.D.: Determination of the Optimal Channel Design for Gaillard Cut of the Panama Canal, Proc. the Sixth CAORF Symposium, Kings Point, N.Y., (1985), paper B6

96) Kelley,J.R. and Drasin,D.H.: Tanker Berthing Evaluation, Full-Scale Trial Results Employing the MSC Tanker Yukon and a Rotatable, Right-Angle Drive Tugboat Tina, DTNSRDC Report, DTNSRDC-79/066 (1979)

97) Lancaster,J.: Preliminary Report of Exploratory Tanker-Tug Maneuvering Tests, Office of Marine Environment and Systems, USCG (1978)

98) Altman,R.: Full Scale Trials to Examine Tugboat Utilization in the Control of Large Tankers, Hydronautics Inc., Technical Report 8011-4 (1981)

99) National Maritime Research Center: Proc. Workshop for Development of an International Joint Ship Maneuvering Program (IJSMP), Nat. Maritime Research Center, Kings Point, N.Y. (1981)

100) Report of Manoeuvrability Committee, Proc. 18th ITTC, Vol.Ⅰ, Kobe, Oct. 19-24 (1987), pp.367-376

101) Workshop on Mathematical Modelling of Ships Manoeuvring Behaviours, Proc. MARSIM 84, Rotterdam, June 19-22 (1984), pp.317-411

102) Systems Control Inc.: A System for Estimation of Hydrodynamic Coefficients for Full-Scale Ship Tests, National Maritime Research Center, Kings Point,N.Y., NMRC-207 (1981)

103) Abkowitz,M.A.: Measurement of Hydrodynamic Characteristics from Ship Maneuvering Trials by System Identification, Annual Meeting SNAME, New York,N.Y., Nov.13-15 (1980)

104) 長畑　司：あいまい情報と海上における目視距離の確率的推定、海技大学校研究報告、第２４号 (1981), pp.1-14

105) 魚谷彰一郎：船の死角範囲に関する研究、神戸商船大学卒業論文 (1982)

106) Sutton,R. and Towill,D.R.: The Helmsman as a Man-Machine Element, J. of Navigation, Vol.19, No.1 (1986)