

## CFD協奏曲 第222番 “船と渦と波と” (その1)

野澤和男\*

### 第1楽章 アダージオ

#### 一序論一

六甲の美しい山並が赤や黄の秋色に一段と彩られた晩秋の頃であった。SR事務局のO氏から「SR222についての原稿はそろそろ出来ましたか？」との電話が入った。「ああ、あれ、無期延期になったと思ってたのですが…」という、「いやですよ。そんな予感がしたから電話したんですよ。頼みますよ」ということになり、一文書かないと代表幹事の役目を解いてくれぬ風であった。

船舶へのCFD(数値流体力学)の応用をめざした第222研究部会“大型肥大船舶尾流場推定法の高度化”は平成5年から3年間研究として実施された。全委員の熱気あふれる努力の結果、所期の目標を達成し、平成8年6月の成果発表会をもって無事終了、代表幹事としての大任を果し、肩の荷をおろしたのだが、その後、O氏からCFDの展望としてSR222の成果、回顧等を含めた随想的なものをという依頼があったが、多忙にかまけてははっきりした返事をしなかったのである。

しかし考えてみると代表幹事として、いままでのSRとちがった機能主義にもとづく研究分担で思う存分(無理な)タクトを振らせて頂いたこと(にも拘らず)、最終委員会では「こんな楽しいSRはなかった」とお互い満足して閉会できたこと、成果報告会後の懇親会では造研専務理事を初め多くの先輩諸氏から「CFDの現状と課題が良く分ったよ」との感想を頂いたことなどの代表幹事として受けた光栄に対する

報告の義務、さらに、筆者が約10年前から参加してきたCFD関連の研究会の成果が本SRにどのように反映されてきたかをまとめておく義務の2つを全うしておきたいという気持ちも心の片隅にあり、気長に待って頂いたO氏の依頼に感謝して乱流(我流)に執筆させて頂くことになった次第である。

「CFD」という言葉は現在かなり定着してきたが、その開発や実用化がいかに大変なものか(人・物・金の面で)、にも拘らず何故やらねばならないのかなど、きちんと理解している人は以外と少ない。これは検証されたCFDシステムを構築することは多くの人が経験した従来の数値計算プログラムの作成と異なり、単独では達成できないマクロ科学的、学際的要素もっているために関連する人々(特に、スポンサーとしての上層部)に説明すること、さらに理解してもらう事のむづかしい側面もっているためと筆者は感じている。

この拙文がこれらの理解、さらに少壮CFD研究者の研究環境の向上に少しでも役立つとすれば幸いである。

以下、「川の流れのように」考えながら歩んできた道をたどりつつSR222研究部会完了までの出来事を随想的に述べることにするが、その前に自問自答的基調討論を行って以降の理解の助けとしたい。

Q: 乱流とはどんな流れか?

A: 工学的に重要な流れは殆んど乱流である。例えば、直径 $D=1\text{ cm}$ の管内を流体が $1\text{ m/s}$ で流れるとレイノルズ数は $Rn=10^4$ となり層流の不安定領域から乱流の領域に入る流れとな

\* 川崎重工工業(株)明石技術研究所流体技術研究部

る。有名なレイノルズの実験によると、横たえた管の入口に流出したインクは低速においては一筋の直線を書いて滑らかに長く伸びるが、ある流速（レイノルズ数）以上になると色の線は途中で乱れ、その下流の範囲を一樣に染めるようになる。一直線状に隣り合う層が互に滑って滑らかに秩序正しく流れる状態を層流、流体部分が不規則に混合しながら流れる状態を乱流と説明される。流れが乱れはじめると、管の圧力損失の増大が認められるようになる。

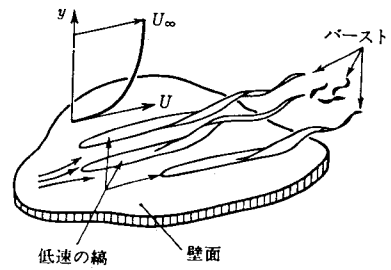
乱流とは平均流と同程度の空間、時間スケールで起る流体塊の不規則運動（乱動）である。この乱動の中で生成された大きな渦は中くらいの渦へ、中くらいの渦はより小さな渦へとカスケードのように引延されながらエネルギーが伝えられ、最小スケールの渦で粘性散逸によって熱エネルギーに変換されて消滅する。よって、乱流現象が持続するためには常にエネルギーの補給が必要となる。船体壁面剪断乱流では空間的に大きな速度勾配をもつ平均流場（境界層）からこのエネルギーが定期的に分給され、これが船体抵抗の発生と結びつく。

Q：船のまわりは乱流か？

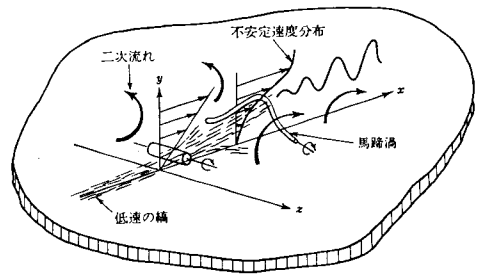
A：例えば、船長320m、船速15ktsの船のレイノルズ数は  $Rn = 2.1 \times 10^8$ 、6mの相似模型船でも、 $Rn = 5.6 \times 10^6$ であり、いずれも乱流である。特に実船では極めて高レイノルズ数となり乱動が激しい。

Q：乱動はどんな挙動をしているか？

A：乱流境界層内の乱動挙動は場所的、時間的に極めて複雑な現象であることが、境界層内の水素気泡法などによる可視化実験により明らかにされてきた。その状況の概念図が図1.1に示されるが、速度の遅い流れが、幾筋も壁のごく近傍に現われ、下流に向かってゆっくり移動しながら上昇し、壁からの距離  $y^+ = 8 \sim 12$  の範囲で激しく振動した後、 $y^+ = 10 \sim 30$  で、突然、乱流状態に変化する。これをバースト (burst) と呼ぶ。低速の縞 (ストリーク Streak) の横方向間隔は  $z^+ = 100$  程度で高速域と低速域が交



(a) バーストの形状



(b) バーストの発生と馬蹄渦

図1.1 乱流境界層内の乱動挙動

(谷一郎; 流体力学の進歩 乱流, 丸善)

互に並んではためいているが、発生 の位置や時刻は全く不規則で非定常な3次元構造をもっている。なお、 $y^+, z^+ = 10$  は模型船で  $300 \mu$ 、実船で約  $100 \mu$  程度で非常に小さい。

バースト発生 の直前に壁面近く ( $y^+ = 30$ ) に低速の流体塊が現われ、その後から高速の流体塊が追いかけるように侵入してきて低速流体塊の一部を押し上げるような状態 (放出過程: イジェクション, ejection phase) が起る。放出過程の後、侵入してきた高速流体塊が低速の流体塊を運び去る掃引過程 (sweep phase) が続いて起り、バースト現象が終了する。これらの2つの過程では流体塊が激しく上下に乱動するためレイノルズ応力 (後述) 発生 の主な原因となる。

以上は2次元 的概観だが、さらに馬蹄渦 (horseshoe vortex) に発展して、より複雑な3次元 的挙動を示すようになる。

船のまわり の流れは、一見滑らかに流れているように見えるが、微視 的には極めて非定常的であり、CFDで流場を計算するという事は、乱動をいかにモデル化できるかにかか

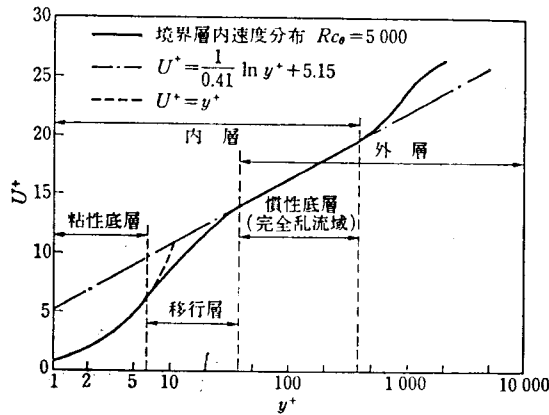
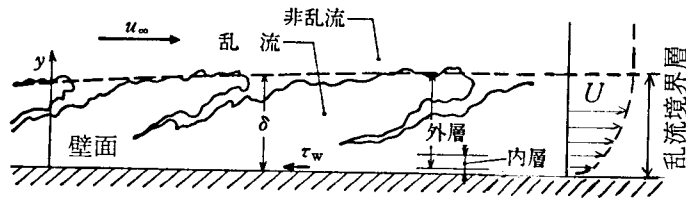


図 1.2 平板乱流境界層と乱動

(日本流体力学会編；流体力学ハンドブック，丸善ほか)

Q：乱流境界層と乱動はどんな関係にあるのか？

A：簡単のために平板の境界層を例にとって壁近傍の境界層内速度分布をみると図1.2のようである。すなわち，乱流境界層は壁のごく近くにあつて壁面の状態量だけに依存し流れの形には無関係な内層（inner layer）と，流れの型によって決まる外層（outer layer）とからなる。

内層はさらに粘性の影響をうける粘性層（viscous layer）と完全な乱流状態でレイノルズ応力だけが作用する慣性底層（inertial sublayer）とに分けられる。粘性層のうち，壁面に近い部分では壁面に垂直な変動の成分が著しく制限されるため，これによるレイノルズ応力（後述）の成分は小さく，粘性応力が支配的となる。この領域は粘性底層（viscous sublayer）と呼ばれる。厚さは $y^+ = 7$ 程度と非常に薄い。

粘性底層と慣性底層の間には移行層（buffer layer）とよぶ層があり，乱れの発生に極めて重要な役割をもつ部分で乱動エネルギーの最大値は，厚さ $y^+ = 7 \sim 70$ （模型船で $0.2 \sim 2 \text{ mm}$ ）程度であるこの層の中にある。

CFDによる計算では計算格子（grid）のサイ

ズをこれらの現象を十分に説明できる程細かくとる必要がある。

Q：こんな複雑な船体まわりの流れをどのようにして計算するのか？

A：乱流計算法の種類を図1.3に示す。

ここで，あらゆる粘性流場の挙動を支配する非定常3次元ナビエ・ストークス方程式（NS方程式：Navier-Stokes Eq.）は次式で与えられる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} \quad \dots (1.1)$$

ここで， $i = 1, 2, 3$ ， $k = 1, 2, 3$ で $k$ の総和をとる。その他， $u$ ；速度， $x$ ；座標， $p$ ；流体圧力， $\nu$ ；動粘性係数， $\rho$ ；流体密度， $t$ ；時間

まず，直接計算とは，これらの式を近似化せずにそのまま直接，数値的に解く方法で，直接シミュレーション（Direct Numerical Simulation, 略してDNS）と呼ばれる。DNSが可能か否かは乱動の最大長さスケールを十分に収容で

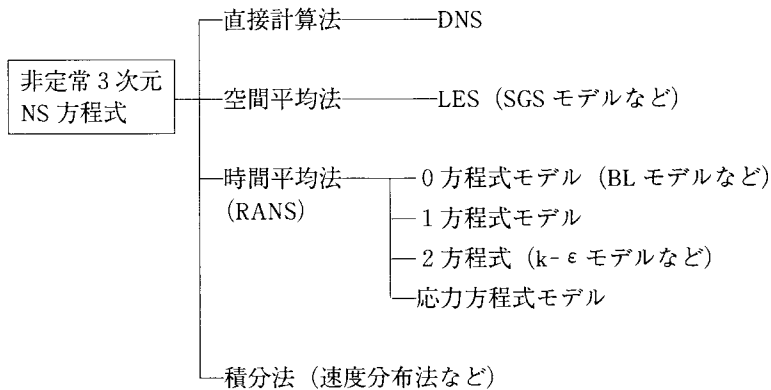


図1.3 乱流計算法と乱流モデル

きる計算領域の設定およびコルモゴロフ (Kolmogorov) による乱動現象の最小長さスケールを解像できる細かな計算格子の配備が可能かどうか依存する。さらに乱れの時間スケールを満す Time Step 数も必要となる。これら2つの大きさはレイノルズ数  $Rn$  に依存するため、乱動現象を把えることのできる時空間の計算量は乱流学者によると最小  $N = Rn^{11/4}$  と云われている。例えば、 $Rn = 10^4$  で  $N = 10^{11}$ 、 $Rn = 10^6$  で  $N = 10^{16.5}$ 、 $Rn = 10^8$  で  $N = 10^{24.8}$  となる。現在のスーパーコンピュータ能力によっても  $Rn = 10^4$  程度までが DNS の限度であり、実際、実験で計測が困難な流場やパラメータを変えた流場の計算にこの方法が適用され、乱流モデル構築に利用されている。模型船や実船のレイノルズ数などの高レイノルズ数になると、格子のサイズは分子レベルとなり、計算量は膨大となって近い将来のスーパーコンピュータ能力をもってしても、實際上遂行は不可能であると云われるのはこのためである。この難点を打解するために考えられた近似的方法がこれからの話の主人公となる時間平均法 (RANS) であり、これを解くために「乱流のモデル化」が必要となる。

**Q** : RANS とかレイノルズ応力とはどんなものか？

**A** : RANS は時間平均的レイノルズ方程式 (Reynolds Averaged Navier-Stokes Eq.) の略である。

乱流が流体粒子の乱動運動に基づく非定常現象であることに着目し、レイノルズの仮定により乱流速度  $u_i$  を平均流速  $U_i$  と速度変動  $u'_i$  の和、即ち、 $u_i = U_i + u'_i$  として (1.1) 式に時間平均操作を施すと、RANS 方程式を得る。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial P}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \underbrace{\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - \rho \overline{u'_i u'_k}} \right) \right] \quad \dots\dots (1.2)$$

この式の右辺第2項には形の異なる2種類の項が含まれている。即ち、

$$\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_k} = \tau : \text{流体粘性 (物理量) に基づく摩擦応力 (ニュートンの摩擦則による) で、層流ではこの項のみ存在するため数値計算により解が求められる。}$$

$-\rho \overline{u'_i u'_k} = \tau_w$  : これがレイノルズ応力と呼ばれるものである。物体周囲の各場所の速度変動の存在により生じる見掛けの粘性応力成分で対称テンソル (6成分) で構成される。物体の存在 (形や位置) によって異なる分布をもち、一意的に与えられないから、RANS 方程式に変形したことにより6つの不定項が生じたことになる。乱流場を解くためには、何らかの方法でこのレイノルズ応力あるいはスカラー量である乱動エネルギー  $k$ 、エネルギー散逸  $\epsilon$  を与える関係式を作る作業が必要となる。この作業が「乱流のモデル化」と云われるもので近似の順に0方程式モデル、1方程式モデル、2方程式モデル、

ル、応力方程式モデル等が提案されている。

**Q：**船体の周囲流場 CFD 解析には何が必要となるのか？

**A：**まず“CFDとは”を説明すると次の様である。

従来の解析解が全領域を単一の連続関数で近似するのに対し、CFD では局所的に別々の関数や値で近似するもので、まず、RANS 方程式を数値スキーム（差分法等）を用いて近似的に代数方程式に変換し、数値計算法を用いてコンピュータコード化する。そして、各種乱流モデルとともに数値的に解を求める訳だが、計算を行うにあたって、物体を含む計算領域（船の場合は外部領域）で格子生成（grid generation）を行って入力する。EWS やスーパーコンピュータで計算し、計算結果はCG処理して見やすい形にカラー表示してまとめる。これを、前後の処理（プリ・ポスト処理）という。従って、CFDシステムの構成要素として

- ① 数値解析技術（NSコードと格子生成法）
- ② 乱流モデルの設定
- ③ コンピュータ（EWS やスーパーコンピュータとCG技術）

の3つが必要となる。さらに、実用的システムとして構築するためには模型試験による十分な検証が必要であるとともに、種々の物体への幅広い適応性検討が重要なポイントとなる。先述のようにCFD構築には理論研究者、数値解析者、実験研究者、電算関係者、コード利用者（設計者）及びこれらを有機的にまとめてゆく強力なコーディネータとともに電算設備の導入、維持する費用の調達等多くの人、物、金に関連する訳である。

**Q：**CFD解析がなぜ必要なのか？

**A：**今迄、計算が不可能であった設計上大切な場所の流体現象がこれによってのみ可能となることが第1にあげられる。例えば、肥大船船尾の流れや渦、波、プロペラとの干渉など……。実験により時間と費用をかければその船についてのデータは得られる。しかし、短時間に、多

くの現象を効率よく推定できれば船型と流場と性能との関連をみながら性能設計の最適化が出来るようになる。即ち、今後の新しい「流場解析的船型計画法」の構築には不可欠な技術であるからである。詳細は次号第三楽章を御覧願いたい。

## 第二楽章 アレグロ マノン トロッポ

### — SR222への道 —

#### 〈数値水槽開発構想とCFD〉

“数値水槽（Numerical Tank）”という聞きなれないが、何か魅力的な言葉が使われ始めたのは造船の構造不況が深刻化した1985年、つくば科学万博が開催された頃であった。世界の新造船建造実績が年々減少し、日本造船業に大打撃を与え始めた（図2.1）。この背景の中で数値水槽構想は21世紀を志向した我国造船業の中核とすべき造船CIMSをささえるCAEの1つと位置付けられ、多大の期待を背負って生まれたもので、産学官の種々の研究会で熱心に討論し始められた。この開発に不可欠なブレイクスルー技術がCFDによる数値解析技術である。筆者が関連した委員会も2年間にわたって構想策定の検討が続けられ、航空分野の数値風洞開発やその利用形態を参考にしつつ、KJ法などを使って船舶数値水槽のあるべき姿やその構成要素を分析、抽出し、概念の構築を行った。これらはN開発目録見として纏められた。

これらは後述のSR210でさらに検討が加えられ、さらに、SR222ではその数値解析技術のいくつかの詳細に研究されることになった。

航空業界では既に“数値風洞（Numerical Wind Tunnel）”という言葉がポピュラーとなっていた。数値水槽を考えるに際して、数値風洞開発の考え方が非常に役に立ち、また興味のあるものであった。米国NASAや航空宇宙技術研究所の資料によると、当時の数値風洞の定義は、“新型機一機の開発にかかる膨大かつ高価な風洞試験の代替のみならず、大気圏からの脱出や突入など重力や熱がからみ実験が不可能なものを可能にする”ために不可欠なものと位置付けし、CFD技術とこれを検証する風洞技術およ

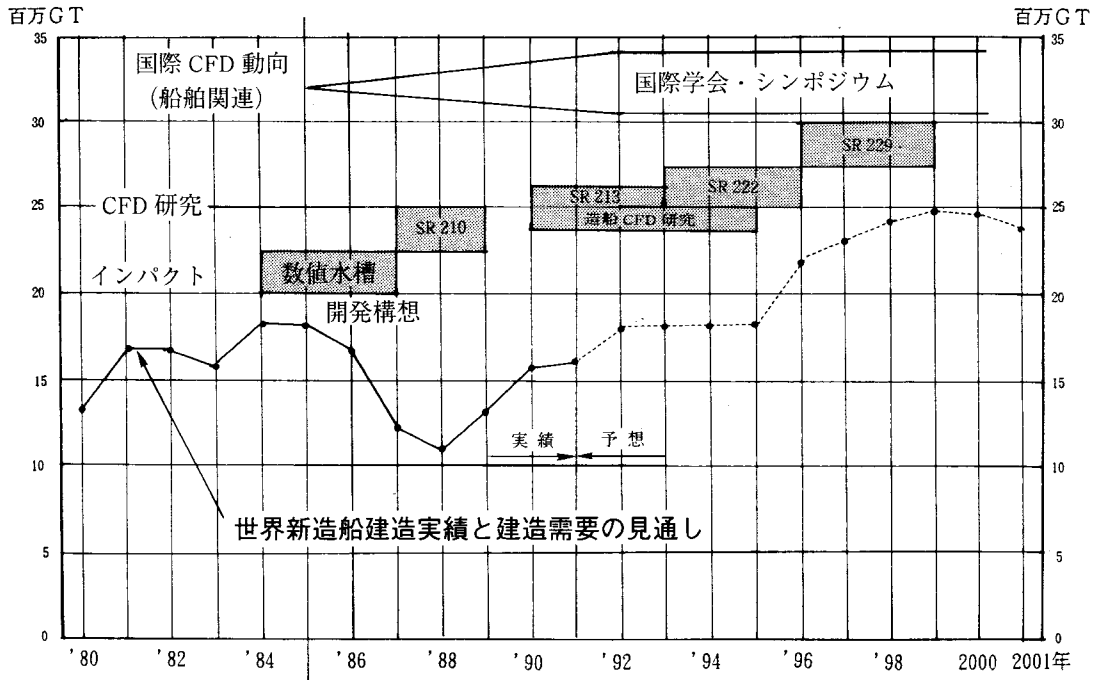


図 2.1 CFD 研究の歩みと周辺環境 (1991年での状況)

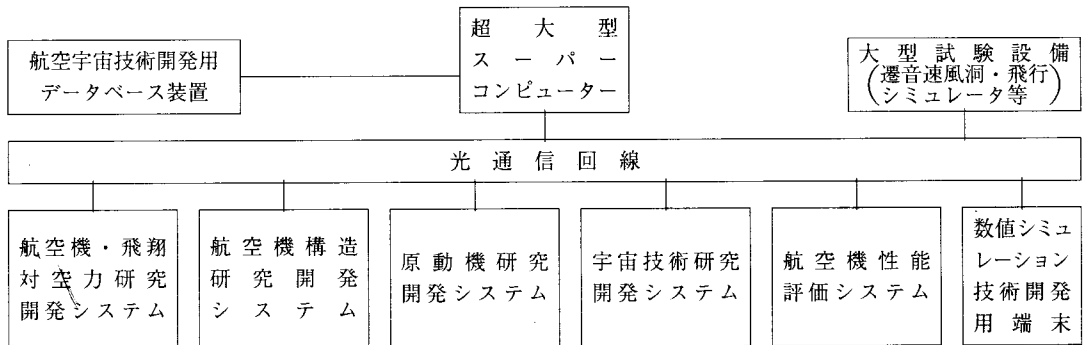


図 2.2 数値シミュレータ (概略)

(花岡達郎; 航空宇宙技術研究所の数値シミュレータ計画, 造船研究 Vol. 17 No. 3, 1985年10月)

びスーパーコンピュータシステムなどで構成される“数値シミュレータ”とされていた(図2.2)。

通常設計時の利用形態としては、次の様であった。即ち安全性を第一に重視する航空機では、まず第一に定常・非定常時の揚力特性(抵抗に比べて数十倍も大きく、粘性影響が少なく計算が比較的容易)を推定することに主眼を置き、設計の初期段階で膨大な機体パラメータを数値風洞(CFD)で絞り込む。設計が進むにつれて風洞試験も漸次併用され、最終段階では推

定のむづかしい抵抗特性を風洞で実験し巡航速力を決めると云うように数値水槽と風洞試験を見事に相互補完する形で数値風洞開発のメリットを説明しており、なるほどうらやましく思いながら感心したものであった。

一方、数値水槽の方は、浮力で水上に浮んでいる船舶の数値水槽に対する期待は、数値風洞でも半ばあきらめている推定のむづかしい抵抗性能が主眼となり、船尾粘性流場の複雑さにも拘らず要求精度が極めて高くなる。航空の場合

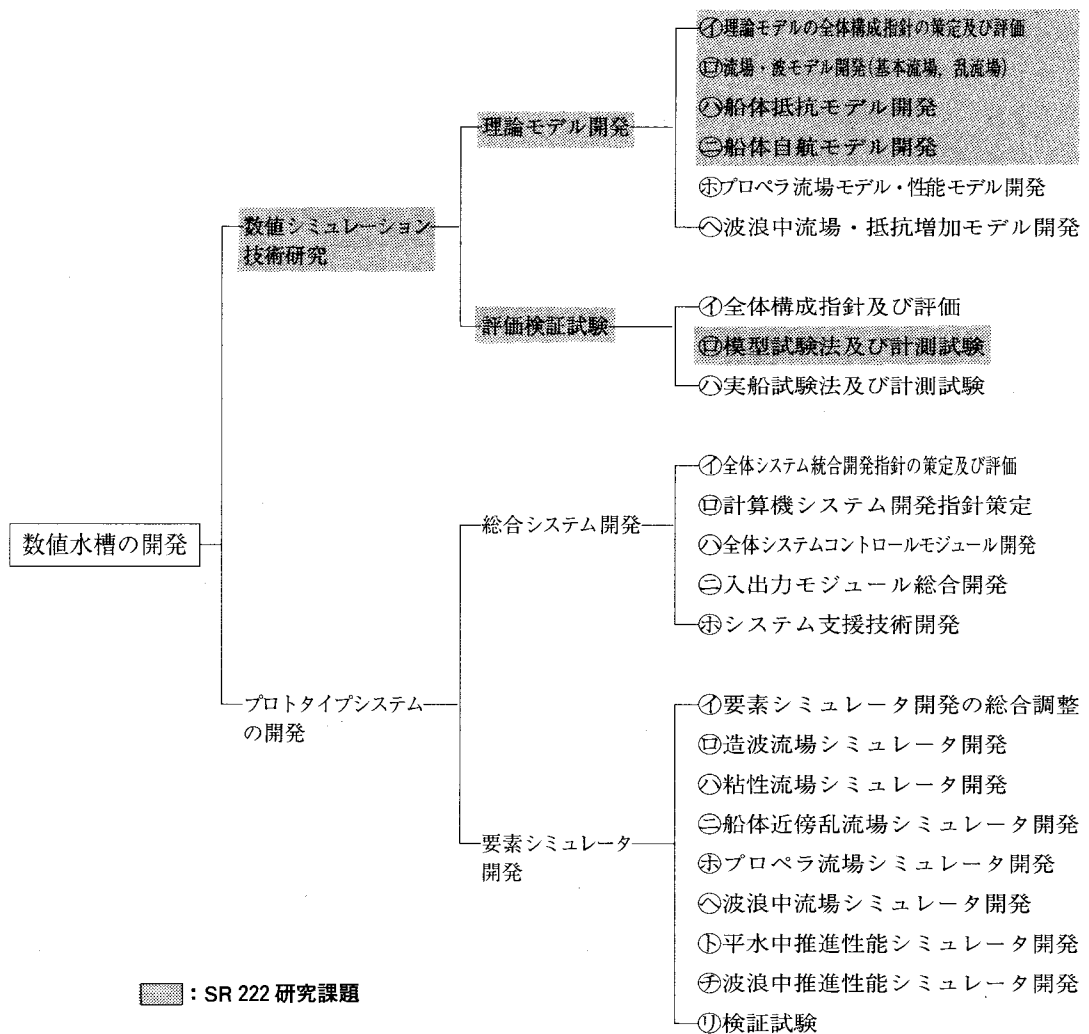


図 2.3 数値水槽開発研究課題  
(SR 210 研究部会第 3 分科会報告書)

ほど明るく、すっきりと数値水槽開発のメリット（費用対効果を考えた）を断言する材料がなく、委員一同開発のセールスポイントをどこに置くか頭をしぼって討論したものであった。

このようにして得られた開発目録見は公表されていないが、その考え方が、文献〔第13回造船学会夏季講座「新しい造船学」、昭和62年、杉村泰〕の「数値水槽の開発」に示されている。そこでは数値水槽の役割を次のように位置付けている。即ち、船体性能（抵抗）は船体周囲の流場の積分値であることに着目し、

船体形状 ↔ 周囲流場 ↔ 性能  
の関連をつかむことが出来れば、従来経験や勘

に頼っていた改良のポイントが明確になり、新しい船型の開発や改良に大いに役立てることが出来る。この考え方は SR222において「流場解析的船型計画法」という名称で引継がれ、この構築をめざして研究が進められることになる。

#### 〈SR210：新世代造船システムに関する調査研究と数値水槽調査研究〉

1987年から1988年の2年間研究としてSR210“新世代造船システムに関する調査研究”が発足した。これは我国造船業を魅力ある基幹産業として高品質・高効率な船舶を建造する近代産業へと脱皮させるための新世代造船システム構

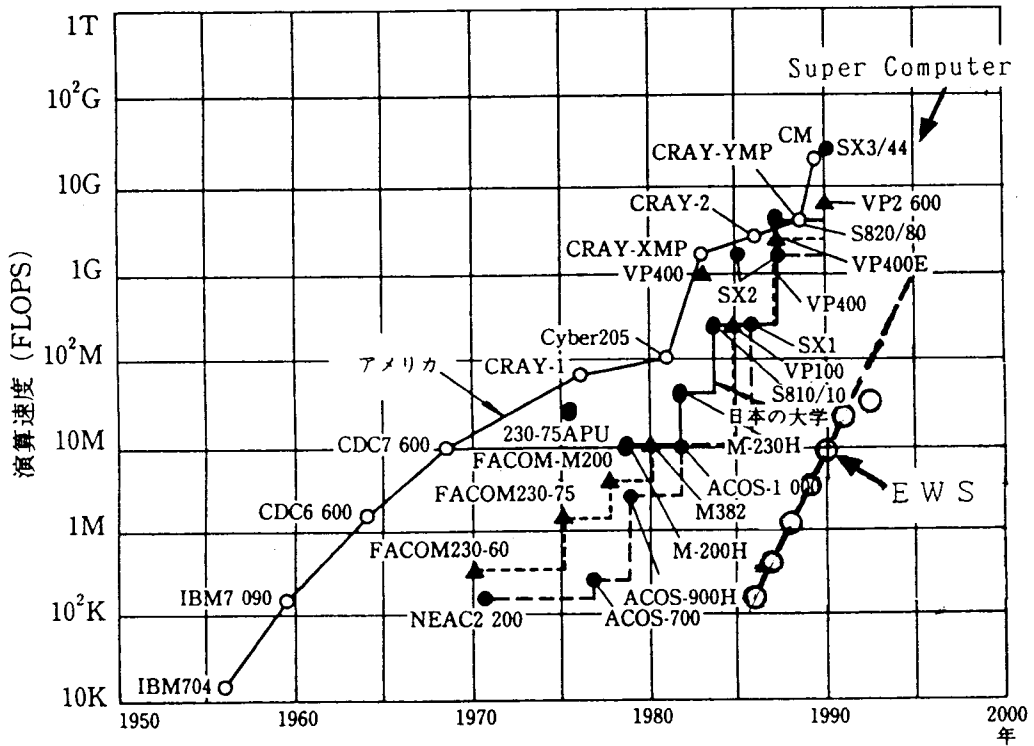


図 2.4 コンピュータ環境  
 —スーパーコンピュータとEWS, 1992年頃の状況—  
 (野澤: “CFD はどこまでやれるか”, 関西造船協会シンポジウム, 1993年)

築を目的としたものであり、造船 CIMS, 新船体構造設計法および数値水槽に関する三つの調査研究で構成されていた。

第3分科会として、数値水槽の開発に向けて必要な船体、プロペラ周囲流場の数値解析法の調査研究が行われ、CFDの現状精度と問題点の抽出および数値水槽開発課題の策定が行われた。最終的に抽出した研究開発課題総括を図2.3に示し、その基本的考え方をレビューする。

数値水槽の研究開発課題は大別して①数値シミュレーション技術研究と②プロトタイプシステムの開発で構成される。数値シミュレーション技術 (CFD 技術) は数値水槽開発の break-through 技術であり、全ての基本となる船体 (物体) 周囲流場や船型性能を正確に表わす各種の理論モデルの開発と、評価検証のための試験技術 (模型試験) の両輪で構成される。

一方、数値水槽プロトタイプシステム開発は、理論モデルをシステムとして取りまとめ、波浪中を含む実船推進性能推定のための実用的な解

析手段としての具体的可能性を確認することを主目的としたもので、総合システム開発とシステムを構成する要素シミュレータ開発研究で構成される。更に、将来の数値水槽の本格的開発のためには実船スケール精密計測の実施が必要であるとした。また、船型設計技術の革新的高度化のためには、推進性能のみならず、操縦、耐航性能評価技術の研究開発も重要となるが、これは推進性能関連の成果を利用することが効率的であるとして、次のステップの研究課題とした。

数値シミュレーション技術研究課題の各モデルの調査研究により、船体周囲流場・波モデルについてはさらなる研究を行い、少なくとも現状の模型試験結果 ( $R_n = 1 \times 10^6$  レベル) を定性的に説明できる程度のモデルの早期構築が必要であること。そのためには RANS 方程式による計算コードの基礎開発としてその中核となる計算スキーム、加えて乱流モデルおよび格子生成法の要素研究とこれを基盤とした船体抵抗モ



デル、自航モデル、プロペラ性能モデルの開発を行い、平水中推進性能モデルとして組み上げることが必要であるとした。

また、理論モデル開発の支援として、高密度試験技術を開発し、船型要目・形状・サイズを変化させた系統的模型試験データ（流場、波、渦、圧力、抵抗、馬力等）を取得し、データベースとして構築することが必要である。

プロトタイプシステムの開発研究課題としては、統合システムのあり方の研究として、計算機システム、入出力モジュール（プリ・ポスト）システム支援技術及び理論モデルのコード化とシステム化による要素シミュレータの開発がある。

以上がいくつかの計算事例と調査結果からまとめた数値水槽開発課題と考え方であったが、当時は①数値解析技術、②乱流モデルの評価技術、③コンピュータ環境（特に、CFDに必要なCPUが1G FLOPSレベルのスーパーコンピュータを保有する機関は1～2であり、かつ購入するにも高価（約30億円）でレンタル費も高かった）のいずれもが発展途上であり、誰れもがCFD研究へアクセスできる状態でなかったため、計算事例が極めて少なく評価がむづかかった事、さらに数値水槽の開発目標の高さと研究規模の大きさからみて未だ世界に先例を見ない開発であった事などのために全方向にわたって十分な評価が出来た訳ではなかった。さらにもう一段基礎的研究を組織的に実施し、その進展をみながら開発研究に着手する必要性があるとSR210部会は結論している。しかし残念な事には、諸般の理由によりSRによる継続研究が不可能となり、共同研究が一年ほど跡絶えてしまった。

#### 〈CFD 習得と国際学会〉

1990年頃になると、CFDを取り巻く環境（コ

ンピュータ、ニーズ、研究者）が徐々に変化してきた。“待てば海路の日和あり”である。即ち、  
1) コンピュータ環境の充実化：

従来、CFDの大規模計算には極めて高価なスーパーコンピュータが不可欠と考え、CFD研究の普及を阻んでいたがPre/Post処理能力（コンピュータグラフィック能力）が優れ、比較的安価なEWSの急速な発展により（図2.4）、これを中核としたCFDの計算が手近なものとなりCFDの発展・研究者の増加を促した。また、大規模計算のTurn Around Timeを短縮するために、EWSとSCを有機的にLinkさせることが重要であることも認識され、CFDにおけるコンピュータ観が変化してきた。

2) CFDへの期待と発展：

ITTC87 & 90, INC, SSPA workshop等の国際学会を経て船型研究や設計をめざしたCFDの関心がたかまり、NSコードの高度化と応用への期待が向上していった。CFDに関して、①Where are we now?, ②Where should we go?, ③How can we speed up等の討論が行われ、向上を加速させる気運が出てきた。

3) CFD研究者の増加：

国内外のCFDの研究が活発になり、船型、翼、プロペラ等の計算例が出され、より定量的にCFDの現状と今後の課題が研究者や設計者に共通して認識されるようになった。このような環境の中で、運輸省船舶技術研究所の御指導のもとに造船大手の若手を中心としたCFD勉強会を発足させることができた。

与えられたNSコード（NICE法等）ではあるがEWSを自分達で操作して計算手法の習熟と実用船型を使用した適応性計算を行うことにより、CFD計算の実情と問題点を共通の土俵の上で肌で感じ、熱心に議論できる状態になったのである。「船舶CFDの夜明け」であった。

（次号へ続く）

# CFD協奏曲 第222番 “船と渦と波と” (その2)

野澤和男\*

(前号から続く)

## 第3楽章 ワルツ アンダンティーノ — SR222共同研究 —

### (1) 研究の目的・目標

21世紀に向かって我国造船業が国際競争力を維持していくための課題が提案されている。その一つとして、船舶の性能向上と性能設計・開発の効率化があり、最適化に時間と費用がかかる水槽模型試験を中心とした船型計画法から理論・実験に支援された数値計算を中核とする新しい船型計画法への転換が叫ばれてきた。このブレイクスルー技術として数値流体力学(CFD)による計算技術の応用が強く要望されてきた。近年の数値解析、コンピュータ、計測可視化などの高度先端技術の飛躍的發展の中で、平成5年度からSR222研究会「大型肥大船尾流場

推定法の高度化」がその第1歩として歩みだすこととなった。

肥大船の流場特性の把握は性能設計上極めて重要である。しかし、船尾流場の剥離や縦渦の発生、さらに造波やプロペラの影響などにより他の製品に類を見ない複雑な粘性流場となるために船舶流体力学分野の中で最も難しい課題の1つとされ、模型試験に頼らざるを得なかった。CFDによりこの推定法を開発し、将来の「流場解析的船型計画法」の構築に役立てようとするのがSR222の目的である。

「流場解析的船型計画法」の概念図とSR222研究の位置付けを図3.1に示す。従来の実験的方法では特別な方法をとらない限り船体の抵抗値(積分値:結果)しか得られない。このため情報量が少なく、どこに改良のポイントがあったのか判然としない場合が多かった。新しい流

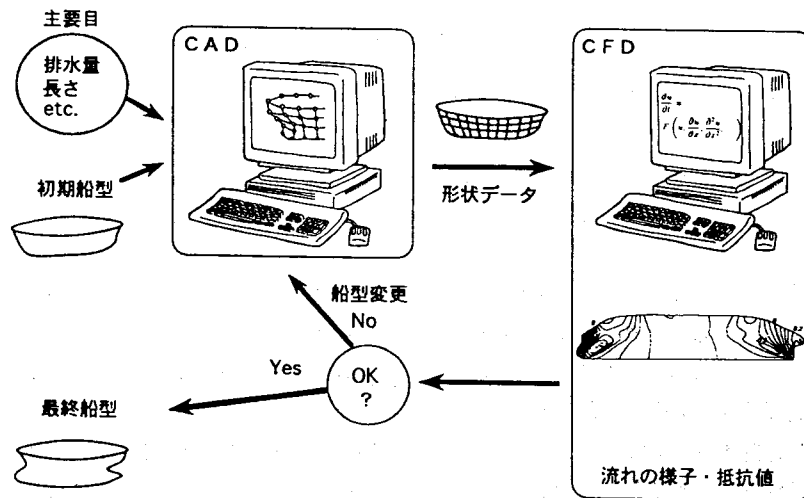


図3.1 流場解析的船型計画法の概念図

\* 川崎重工業(株)明石技術研究所流体技術研究部  
参与 (SR222代表幹事)

場推定法が完成すれば、途中で周囲流場という“因果関係を握る豊富なデータ”を計算、CG表示できる。「船体のどの部分が抵抗を増加させているのか？、その改良のポイントは何か？」など改良のための情報が短時間に大量に提供されるから、設計者の知見を加味することにより船型改良や開発に有効に役立たせることができる。

「流場解析的船型計画法」という言葉だが、これは本SRの幹事であった東大宮田教授、船舶技術研究所（SRI）児玉室長と筆者が本研究の進め方に関し討議をした際に考え出したものである。“研究のターゲットを示す新しい名前を付けよう”ということになった。さきに学士院賞を受賞され、昨年、学士院会員になられた東京大学乾崇夫名誉教授が提唱された「波形解析的船型計画法」に話が及んだ。これは船型と積分値である抗抵値の間に波形（造波）を介在させ、

船型 → 波形 → 造波抵抗  
(波形分析)

振幅関数を通して造波特性が把握できることを利用して、造波抵抗の少ない船型の開発に役立てようとするもので、造波抵抗理論が華やかだった昭和40年代、我々こぞって研究し、船舶設計に応用を試みたものであった。当時では不可能であったNS計算による船体周囲流場（造波・粘性流場）計算法を本SRでは研究し船型設計に応用しようとしている。そこで「流場解析的船型計画法」と名前をつけた訳である。

推進性能関連の設計情報として、①抵抗要素、②効率要素、また起振力の見地から③プロペラ位置伴流分布が要望される。これらの優劣が評価できる船体周囲流場（速度、圧力、摩擦応力、波、抵抗値、各種効率等）が計算できる3つの推定法（1.基礎粘性流場推定法 2.造波粘性流場推定法 3.自航時粘性流場推定法）の開発を目標としたのである。

(研究の優先順位)

まず推定法の基盤となる基礎粘性流場推定法開発に全力投球した。これは波の発生を考慮しない状態、2重模型船流れの仮定（自由表面を固定壁と仮定、波の発生を考慮しない）で船体周囲流場（流速、圧力分布 $p$ 、剪断摩擦力 $\tau$ 、伴流分布、伴流値 $1-w$ ）、粘性抵抗係数 $C_v$ （圧力係数 $C_p$ と摩擦抵抗係数 $C_f$ の和）を正確に解く。本来、自由表面を持つ水上船は、波を起し、プロペラの作用を受けて航走するから、これらを全て考慮して解くのが正統であるが複雑である。肥大船では粘性抵抗が全抵抗のほぼ95%以上と大部分を占めており粘性流場の解明が最も重要であることから、波の影響をとりあえず無視した基礎粘性流場の計算法をめざした。本推定法の成果の例を先に図3.2に示そう。肥大船の船尾流場計算結果である。このような複雑な流れと渦が計算できることを目標とした訳である。この開発に合わせて造波影響とプロペラの影響の研究を行い機能を付加した。

(流場推定法の持つべき必要条件)

RANS（レイノルズ平均ナビエ・ストークス）方程式を差分法で解く。計算コードはNICE法、WISDAM法を基準として改良した（後述）。設計に役立たせる条件として、計算コードの高精度/適応性/ロバストネス（堅牢性、容易には発散しない）、計算システムの簡便性、拡張性、短いCPU（EWS：1日、スーパーコンピュータ：1H程度）、CGによる計算結果のポスト処理などを念頭に置いた。

## (2) 研究の三本柱と推進

(土俵づくり)

造研企画部会の下に発足準備のための第四分科会がつくられたのが平成4年夏であった。宮田教授、SRI児玉室長から委員参加の約束頂き“鬼に金棒”の気持ちではあったが実用的推定法を限られた期間で構築するためには、何を、誰が、どのようにやるのが最も効率的なのか十分な議論ができていた訳ではなかった。大学、SRI、造船7社のメンバーに今までの経緯と現状をレビューしてもらい、アンケートを持参願

い、酷暑8月、川重神戸で議論したのが始まりであった。出された意見、要望を 1)要素技術、2)応用技術、3)詳細模型試験 に分類して纏めたものをSR 222研究の礎石とした。本SR が終始熱気溢れた議論と調和の研究の遂行ができたのもこの共通土俵構築のお陰である。

(研究の3本柱)

本研究の部会長を梶谷尚教授(当時：東京大学、現在：熊本工業大学)にお願いした。3つの柱を設定し図3.3のフローに沿って研究を進めた。キーワードとしては、

①要素技術の高度化

- 乱流モデル/造波流場/自航時粘性流場/碎波計算法、高精度格子生成法

②実用的計算法：

- 基礎粘性流場推定法：コードの追従性/格子依存性/乱流モデル改良/適応性検討
- 造波粘性流場推定法：自由表面波計算法
- プリ・ポスト技術：CGによる前・後処理技術、設計パラメーターの表示法

③模型試験：

- 乱流計測システム/風洞試験/レイノルズ応力計測/造波計測/可視化情報数値化

(3) 流場計算法

流場計算法は計算スキーム、格子生成、乱流モデル等で構成される。実用的なレベルまで高度化するためには図3.4に示すような計算精度を左右する沢山のパラメータについて適応性を検討して改良を加えた。

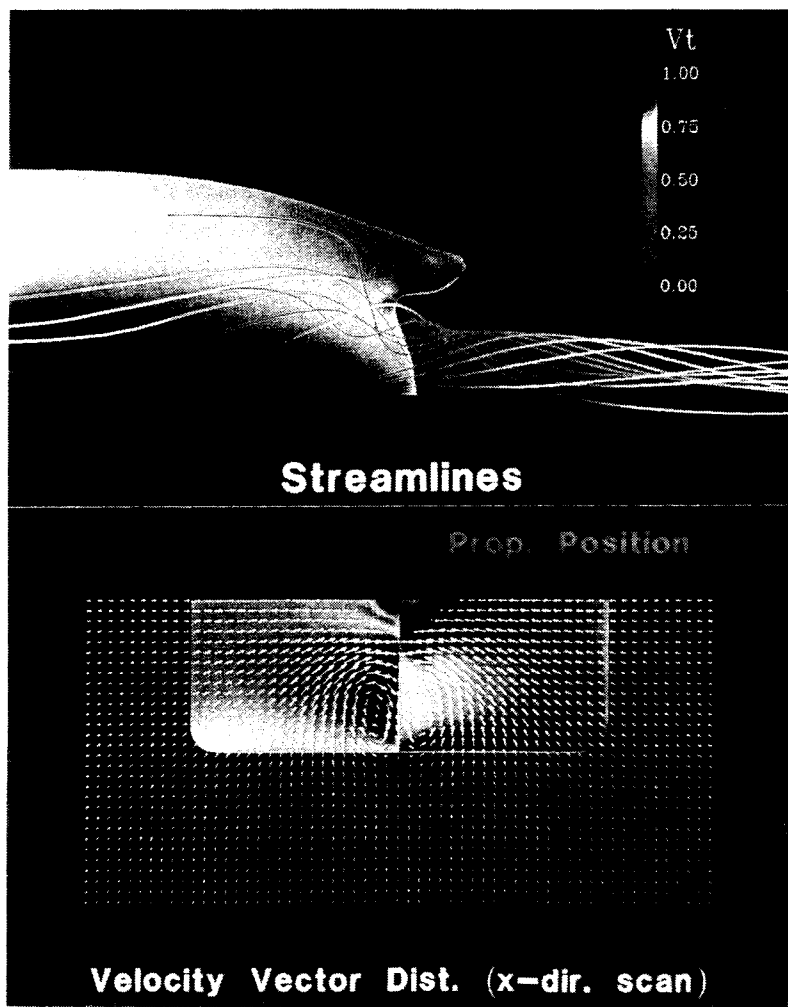


図3.2 プロペラチップを通過する流線と一對の船尾縦渦の計算

(計算スキーム)

流体運動の支配方程式である RANS 方程式を空間および時間方向に離散化して数値計算ができるようにしたものである。計算法の種類は大きく分けて BIM (境界積分法), FEM (有限要素法), FDM (有限差分法) と 3 つある。後の 2 つが一般に CFD といわれている。SR 222 で使用した計算法は FDM に属するもので NICE 法と WISDAM 法である。NICE (Navier-Stokes Implicit Computation Using Cell-Centered Formulation) とは船舶技術研究所で開発したもので質量保存則に人工的に圧縮性を付加し、あたかも圧縮性流体であるかのように解く擬似圧縮法を用いている。乱流モデルは BL モデルを用いている。一方, WISDAM (Wave

viscous flow Difference Accurate Method) とは, 東京大学で開発, 質量保存則を満たす MAC 法の系列のスキームである。時間発展的に解くため非定常計算にも適用可能。乱流モデルは BL モデルと SGS モデルの混合を用いている。

(格子生成とパラメータ・スタディ)

構造物の強度やタンク内の流動の解析では部材自身や内部だけが計算格子の領域となる。しかし, 外部流問題である船舶の場合には外側に無限に広がる領域が対象となるから格子数が増加する。図 3.4 に示すように格子の領域の広さや, 船体表面へのひきつけを含む細分度が計算精度を左右する。即ち, 全格子点数  $N_p (=i \times j \times k)$  を増加させれば計算精度は向上するが,

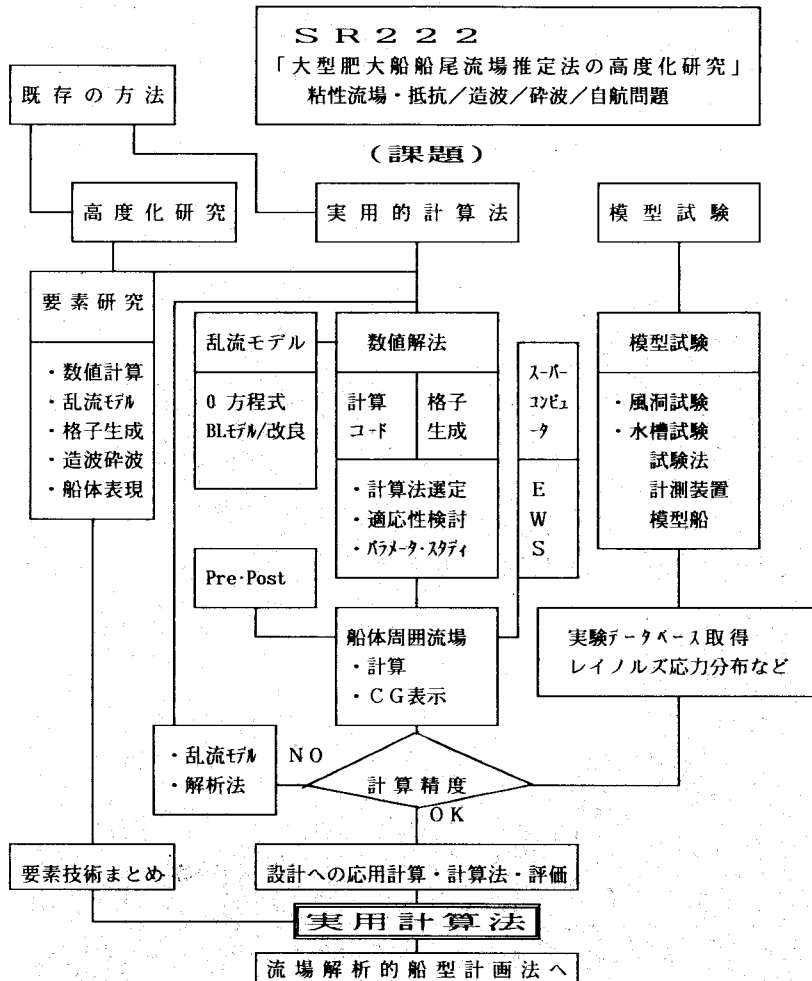


図 3.3 SR222 研究フローチャート

計算時間はほぼ3乗に比例してしまう。格子生成の仕方では計算精度が変る(格子依存性という)のでは困る。精度と計算時間の両面から格子生成の標準化が重要となるゆえである。第1年度では格子パラメータを10数種選定し、SR196A 船型 ( $C_b=0.80$ ) を対象として大規模な

パラメータ・スタディを分担で行い、格子点数や計算領域の大きさに依存しない計算効率の良い格子生成条件を研究した。その結果、ほぼ一定の抵抗値を得るための全格子数は少なくとも10万点~20万点は必要であることがわかり、以後の研究では約15万点が目安となった。このようにして模型船レベルのレイノルズ数では、船体抵抗係数は、ほぼ実験値に近い推定が出来るようになったが、船体後端領域 (S.S.1からプロペラ位置) の船体流場の分布については図3.5に示すように、オリジナルBLモデルの計算値は実験値とかなり異なっていることが明らかになった。即ち、プロペラ位置での軸方向伴流分布については「hook 状のくびれ」が、2次流

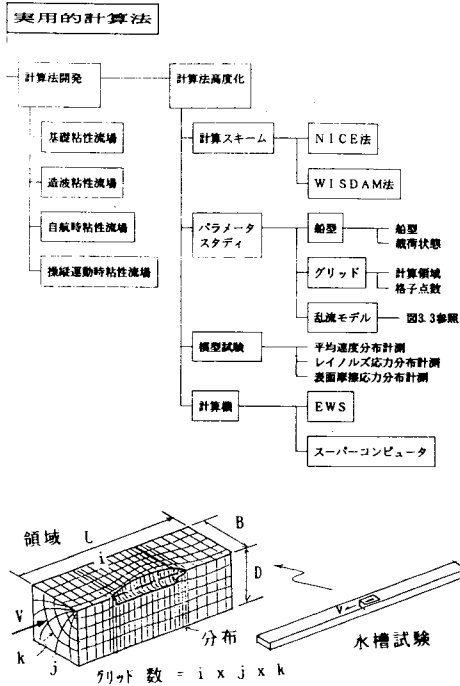


図3.4 CFD改良課題と計算パラメータ

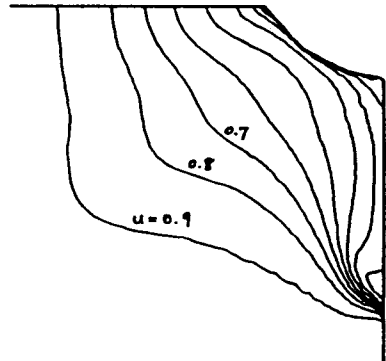


図3.6 特大計算によるSR196船型のプロペラ面伴流分布

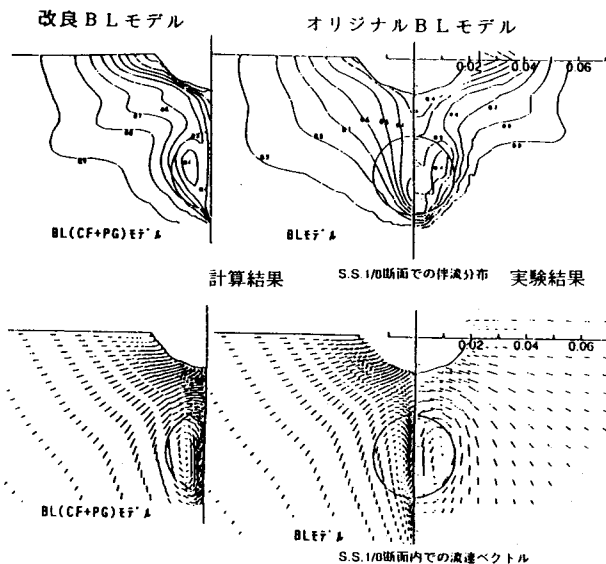


図3.5 乱流モデル改良の検証 (SR196A 船の伴流分布と2次流れ: 計算と実験  $R_n=4 \times 10^6$ )

れ分布については船尾縦渦が表現できていない。

船尾流場の計算精度が悪化する原因として格子点数が不足して細かい現象が表現できないことも考えられたので全格子点数  $N_p$  を94万点と通常の約10倍と多く取った「特大計算」を行ってみた。ところが、図3.6にみるようにわずかなくびれが得られたものの実験で得られた分布とはほど遠く格子数を増加させただけでは（格子数100万点ではスーパーコンピュータで数時間を要する）実際の現象が再現できないことがわかった。

#### (乱流モデルの問題点抽出と改良)

第一報に述べたように、RANSの中に付加的に生じたレイノルズ応力をいかに与えるかは種々のモデルがあるが、実用的観点からは比較的単純なモデルが重要となる。その1例としてレイノルズ応力を船体周囲の平均速度勾配で置き換える Boussinesque 近似がある。これは  $\kappa$  を乱動エネルギー、 $\delta_{ij}$  をクロネッカーのデルタとして、

$$-\overline{u_i u_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} \quad (3.1)$$

で表わされる。比例定数である渦粘性係数 (Eddy viscosity coefficient)  $\mu_t$  について、様々な提案があるがゼロ方程式モデルでは渦粘性係数を平均速度場の関数として代数的に定める。その1つがSR 222研究部会で中心的に使用された Baldwin-Lomax モデル (略称、オリジナル BL モデル) であり、薄い境界層に対して良好な結果を与えるとの定評があった。

前述の実験値との不一致の原因として以下のことがわかってきた。つまり、オリジナル BL モデルは2次元翼など比較的薄い境界層に関する実験データに基づいたモデルであるため、船尾境界層のように強い逆圧力勾配によって厚く発達し、しかも縦渦によって捻れた3次元性の高い流場では、渦粘性係数  $\mu_t$  が過大評価され、見かけ上粘性が増大するため船尾縦渦が生長せず、結果として伴流分布のくびれや船尾縦渦が十分に表現できない。乱流モデルの改良 (チューニング) 法の研究と次節に述べる模型試験 (レ

イノルズ応力の計測) が第2年度以降の中心課題となった。

乱流モデルの改良にあたっては、理論、計算、実験の各グループの研究者が一体となって熱のこもった議論の末、考案されたモデルの適応性計算を行っては持ち寄り再び議論といったことを繰り返し行い、少しずつ高度化をはかった。この結果として BL (CF+PG) モデル (強制・減衰・圧力勾配修正付 BL モデル) を作り上げた。これは①船体摩擦応力ベクトルおよび縦渦成分による修正と②船尾部の正の圧力勾配の影響を考慮して先述の過大に評価される渦動粘性係数  $\mu_t$  を合理的に減少させるモデルである。数種類の肥大船への適応性検討によりこの改良が妥当であることがわかった。

#### (4) 模型実験

##### (風洞におけるレイノルズ応力計測)

肥大船模型でレイノルズ応力を直接計測し、計算で推定されるレイノルズ応力と比較すれば流場の不一致の原因がわかり乱流モデルの改良の方向付けが得られる。これがレイノルズ応力計測の動機である。肥大船の船尾流場は強い3次元性をもっていて計測がむづかしく、詳細なレイノルズ応力の計測例は世界的に殆んど皆無といってよい。SR 222では大阪大学鈴木教授を中心とした試験グループの努力によりトリプルワイヤ熱線流速計計測システムを構築し計測に使用することが出来た。

船体近傍の乱流現象の変動は数百 Hz の激しい変動成分をもつ。このような現象に追従できる計測器はいまのところ熱線流速計以外にない。熱線流速計とはプローブの先端に熱容量の小さい極めて細い線 (直径5  $\mu\text{m}$  程度の白金線) を張ったもので、電流で加熱した熱線に流れが当たると抵抗が変化する性質を利用したものである。3次元流場を計測するためには3本の熱線を互に直交させたトリプルワイヤ熱線流速計を使用する。

この流速計の原理は図3.7に示すように3本の直角に張られた熱線の出力  $U_{th,i}$  ( $i=1,2,3$ ) が計測されると、

$$U_{\text{eff},i} = \left. \begin{aligned} &|\bar{U}|^2 (\cos^2 \alpha_i + K^2 \sin^2 \alpha_i) \\ &\sum_i \cos^2 \alpha_i = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

を解くことにより、 $U$ 、 $\alpha_i$ が得られ、その点での流れの速さと流向が求められる。3本の熱

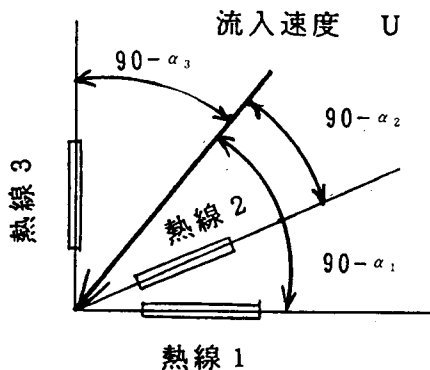


図 3.7 3次元熱線流速計

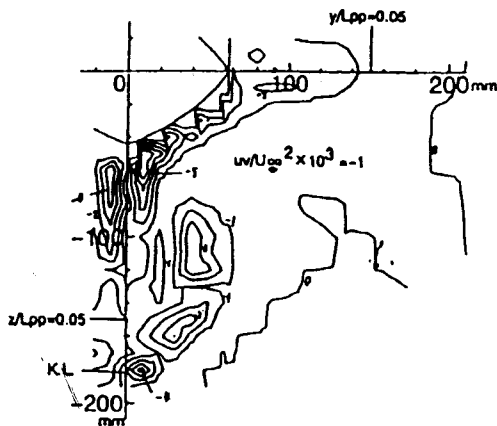


図 3.8 SR196A 船型のプロペラ面におけるレイノルズ応力 $uv$

線の直交性や出力感度の非線型性のために実験前の検定試験や計測後の修正など非常に時間のかかるむづかしい計測であった。3次元トラバース装置を作って沢山の計測点を効率よく計測できるシステムを作り、肥大船2隻のレイノルズ応力を計測した。図3.8に一例としてSR196A 船型のプロペラ面内のレイノルズ応力 $uv$ 分布（6成分のうちの一つ）を示す。この分布が図3.5に示す船尾流場を作り出していることになる。計算で推定される分布と比較し、実験値に近づくように乱流モデルの改良を進めた。写真3.1はレイノルズ応力の計測が行われた大阪大学工学部試験風洞の横で試験立会后撮影したワーキンググループのメンバーの記念写真である。第1年度目の11月末、計測法も一応確立し、計測結果も順調に解析され始めた頃で、各人の顔も明るく「順風満帆」で航行中という雰囲気を感じられてほほえましい。

#### (曳航水槽における自由表面波形の計測)

レイノルズ応力の計測とともに肥大船の自由表面波形の計測を行った。肥大船での波形の計測、特に、満載とバラストの両状態での計測はめずらしい。造波研究には不可欠であったため横浜国大の池畑教授に計測をお願いしたものである。サーボ式波高計4台を曳引車に直結した計測架台の上に並べて、一航走に4点ずつ5cmの間隔の格子点上で計測して波高分布を求め、最終的に波紋等高線図を得た(図3.10 11頁参



写真 3.1 SR222 WG のメンバー (阪大風洞横にて)



照)。満載状態とバラスト状態で波紋分布が著しく異なり、肥大船型の自由表面波形の複雑さを目のあたりにした。これらのデータは造波粘性流場推定法の検証データとして有効に使用された。

(5) 研究で得たもの

(1) 「流場解析的船型計画法」を目指した流場推定法の構築

a) 流場推定法開発：

NICE 法, WISDAM 法を基盤とした数値計算法, 格子生成法, 乱流モデルの研究により, 1)基礎粘性流場, 2)造波粘性流場, 3)自航時粘性流場の3つの推定法が開発できた。

b) 設計応用法の開発：

多種類の船型への計算法を応用し, 流場, 渦, 波, 抵抗値等の推定精度を評価した。計算情報のポスト処理法を研究し, 設計への応用を志向した流場推定法を構築した。

c) 模型試験法開発と検証用データベースの構築：

肥大模型船のレイノルズ応力を計測, 乱流モデルの改良に役立てた。

d) 将来に向けた CFD 要素技術の高度化：

高次乱流モデル, 格子生成法, 碎波モデ

ル, 可視化情報定量化の研究を行った。

(2) CFD 技術者の育成

本共同研究により多数の有能な CFD 技術者が育成し, CFD 研究の基盤ができた。

以下に, 研究成果の数例を紹介する。

(基礎粘性流場推定法)

先に示した図3.2の船尾流場のシミュレーション結果は改良乱流モデルによって得られた成果である。これは SR196C 船型 ( $L/B=6.0$   $C_b=0.8$ ) 船尾流場の推定結果である。何の変哲もなく滑らかに流れていると思われがちな船尾流場はこのように複雑に捩れ巻き込み, 一対の船尾縦渦を形成して後方に流れ出ている。

EWS を使用し, CPU 約 2 日で再現できるようになった。さらに図3.5中左側の改良 BL モデルにみるように船尾伴流の不均一性 (hook 状分布) や縦渦の目玉が精度よく捉えられるようになった。図3.9のように船体表面圧力分布もうまく捉えている。約 8 隻の肥大船型への適応性が確認でき, 「流場解析的船型計画法構築」(図3.1)へと一歩前進することができた。

(造波粘性流場推定法)

基礎粘性流場推定法を基盤とし, 自由表面条件 (圧力一定という動力学的条件と表面を波粒子が貫通しないという運動学的条件) を課して計算する。計算のイメージは抵抗試験と同一で, 船が発進, 加速, 波が時々刻々変化して定常に至る過程を数値的に計算する。波の発達と変形に従って動く移動格子系の計算となるため, 格子の歪, ねじれによる解の発散など計算上解決すべき問題が沢山あったが計算グループの努力と多くの適応性検討を経て今後の基盤となる推定法を作成することができた。

図3.10に SR 196C 船型の満載状態の船体まわりの計算波紋を実験結果と比較して示す。船体近傍での船首波, 船首肩波, 船尾肩波, 船尾波の形は良くシミュレートされ, 船側波

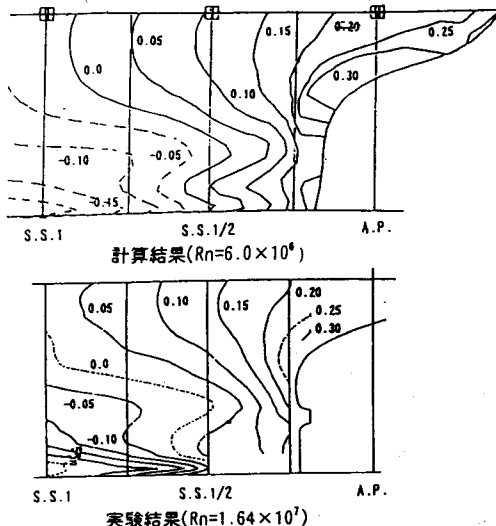


図 3.9 「だいおう」船体表面圧力分布 (計算結果と実験結果の比較)

形分布は船首から粘性影響の強い船尾に至るまで実験と良く一致しており、船体表面圧力分布が実際の現象と良く一致していることがわかる。

#### (自航時粘性流場推定法)

船の本来の流場は船尾にプロペラを装備し、その推力により推進している状態の流場である。従って、この自航状態の流場推定法構築こそが最終的に残された最も重要な課題である。本研究では、今後発展するであろう船体全体（船体+プロペラ+舵）のNS計算については複雑さのために今後の課題とし、近似手法としてプロペラ流体力の影響を従来使用されてきた無限翼数理論によって計算し、これを外力項  $S$ （体積力：Body Force）として基礎粘性流場を支配するNS方程式（1.2）式（前号17頁）の右辺に導入して、プロペラの吸引作用下での粘性流場を計算するいわばハイブリッド的な方法を研究した。

この方法により得られたプロペラ作動時の船尾圧力分布は実験値と比較され、現象を良く捉えていることが明らかになった。これを利用すれば抵抗時と自航時の差として船尾表面上の  $\Delta C_p$  や  $\Delta \tau_w$  の分布が計算できるから

従来推定がむづかしかった推力減少率  $t$  が及ぶ範囲と大きさが明瞭になり、自航時の伴流分布とともに自航要素の見地から船尾形状の明確な改良指針が得られる見通しがついた。自航時粘性流場の計算法の骨格が得られ、今後の船体・プロペラ全体 RANS 等さらなる高度化のための推定法構築の基礎が得られた。

## 第4章 コーダ

### 一 結言一

（流場解析的船型計画法への基盤として）

数値水槽構想から SR 222 研究に至るまでの約10年の川を下ってきた。SR 222では肥大船の複雑な粘性流場の推定法構築に挑戦した。大学、SRI の多大な支援をうけることにより、WIS-DAM 法や NICE 法という基礎基盤の明らかな（市販ソフトのようなブラックボックスがない）NSコードを中核として、造船所の若手メンバーの手により実用に向けた推定法を構築、SR という共通の土俵の上で開花させることができた事は今後の船舶 CFD の大いなる発展性を秘めているという事を含め、特記すべきことである。SR 222で取扱ったのは図2.3（前号20頁参照）に示した数値水槽構想や船舶をとりま

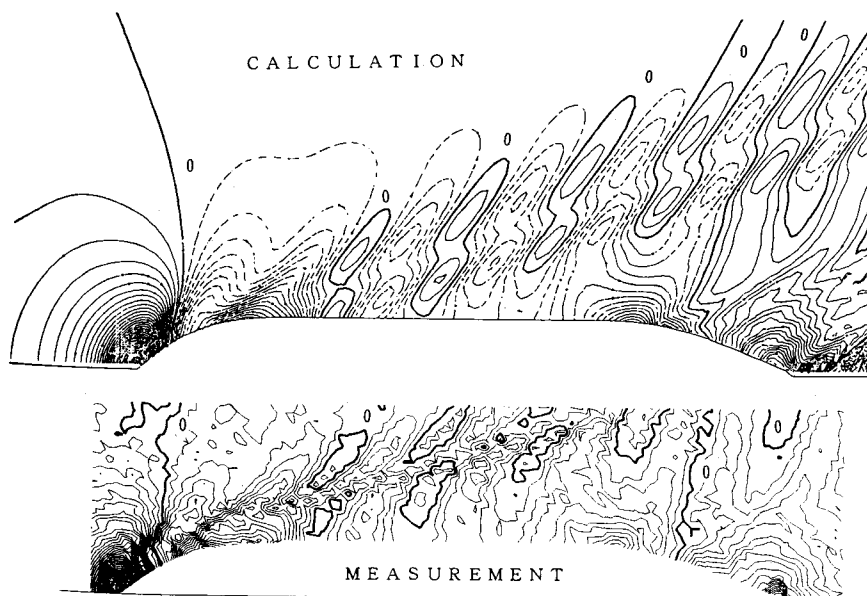


図 3.10 SR 196 C 船型（満載状態）の波紋の比較 ( $\Delta \xi = 0.2$ )

く諸流体力学的課題のうちの一部（推進性能問題）ではあるが、まず、出来る所から行うとし理論、解析、実験等の研究者と設計者間の緊密な連携のもとに地道に改良、保守してゆくことが重要である。SR 222の成果はSR 229へと引継がれ、図3.1の「流場解析的船型計画法」にも示したように船型形状-CAD-CFD-性能のサイクルを考慮した実用化へと進んでおり今後の成果を期待したい。

以上、専用コードとして開発したSRコードについて述べたが、船舶・海洋の多種多様のニーズ（形状・現象）にも対応できる汎用コードの所有も重要である。これを逐一、開発することは必ずしも効率的ではないであろう。市販CFDソフトの導入やソフト開発会社の利用を上手に行い、「開発技術」と「導入ソフトの利用技術」を両輪として船舶CFD技術開発の負担を分担することも必要になろう。ここで大切なのはいずれの場合についても計算結果を分析・評価できる流体力学的能力を保持することであり、研究者、設計者の絶え間ないポテンシャルアップが重要となる。

#### （これからのCFDの役割）

本原稿を執筆しているうちに本年1月2日約20,000klを搭載したロシアの老朽オイルタンカー「ナホトカ」の原油流出という大事故が発生した。折断した船首部から大量の油が流出、美しい日本の海洋、海浜を著しく汚染、「ひしゃくによる人海戦術」、「遅延の油回収船」「海象に左右された重油ぬきとり作業」を経て、2月末やっと一段落した。しかし2,000mの海底深く沈んだ主船体には、なお約13,000klの油が残っておりそこから無気味に流出する油が無人探査機「デープ・トウ」や「ドルフィン3K」により認められ、今後の海洋汚染が大変心配されている。1日70万バレルもの多量の原油を輸

入する日本向タンカーのみならず「ナホトカ」のような他国の輸送タンカーが日本近海を沢山航行しているが、このような近代科学の道具に支えられた我々の幸福はまさに「ダモクレスの剣」であるという事を再認識するとともに船舶・海洋分野のなすべきことが多いという実感も新たにした事件であった。

前置が長くなったが、このような事故が示すように、今後の製品開発（船舶海洋には限らないが）においては、性能向上・安全性・環境評価の3つの分野を考えた研究開発がますます重要となり、「・」の結びつき、相互作用が強くなってきたように感じる。これらを満して初めて信頼にたる優秀な製品となる。これに対応する流体分野の課題としては、流体力学/流体・構造連成/流況・生態系等の解析が基盤の研究となる。これらを解析するにはCFDによるシミュレーションが極めて有効になってくる。この分野へのCFDの活用・発展を期待したい。

以上、21世紀に向けた国際競争力強化の手段としてCFDを使用した技術力向上の期待を述べたが、加うるに、世界に希にみる「ホモジニアスな民族」として我々技術者に今後、増々必要となるものは「ヘテロジニアスな世界観」であろう。自己を主張でき異人と「親しく」もまた「厳しく」共存しうる力を養ってゆく必要性を特に、最近、痛感する。本随想のテーマに一例をとれば、誰れでも容易にアクセスできるインターネットの時代、CFDという「学際・国際」色の豊かな研究に携わる若い研究者は国内にとどまらず国際間の研究者と自己の技術のみならず人文科学・社会科学的意見交換も行いつつ、目標とする技術を大いに発展させ、21世紀に向けて飛翔して頂きたいものと思う次第である。