

## 生研公開講演

## 計算流体力学・研究と実用のギャップ

A Gap Between the Academic Research and the Industrial Application in Computational Fluid Dynamics

小 林 敏 雄\*

Toshio KOBAYASHI

ご紹介いただきました小林でございます。きょうは、朝早くからおいでいただきまして、ありがとうございます。

計算流体力学と申しますか、Computational Fluid Dynamics と呼ばれておりますものの研究を1980年代のごく初めのほうから開始しておりまして、16年とか17年ぐらいたったきょう、私の思っておりますところ、あるいは現在研究室でどういうことをやっているか、あるいはやろうとしているかということをお話させていただく機会を得まして、大変ありがたく思っております。

計算流体力学というのは、ご存知のようにナヴィエ・ストークスの運動方程式をどうやって解くかということになるわけですが、それを、きょうは、式を全然使わずにお話させていただこうと思っております、大変私にとっては難しい話になります。

CFD の歴史を簡単に振り返ってみますと、どうしてもコンピュータの発展と切り離して考えることはできません。図1をみますといちばん左側に1960年代から現在に至るまでの特徴的なコンピュータがどの時期に現れてきたかというのを記してあります。

紹介にありましたように私は昭和40年（1965年）の学部卒業ですが、その当時東大の大型計算機センターに入ってきましたコンピュータが Hitac 5020 E というコンピュータです。それからいろいろなコンピュータを使ってきました。

CFD にとりましての画期的なコンピュータの出現は、たぶん Cray 1 というコンピュータであったのではないかと思っております。Cray 1 が出現してから CFD が市民権を得てきたといえますか、たくさんの流体力学の研究者が従事できるようになってきたと思っております。

2 列目にありますのは、計算法とかアルゴリズムとか、あるいは乱流モデルという CFD にとっての特徴的な出来事を示したものであります。

CFD は連続の式とナヴィエ・ストークスの運動方程式

\*東京大学生産技術研究所 第2部（講演当時）



図1 CFDの歴史

を連立させて解くわけですが、その方法にもいろいろあります。いちばん基本的な MAC 法という方法が1960年代の中頃に現れています。一方、きょうの話の主体となりますラーゼ・エディ・シミュレーションという方法が1970年のはじめに Deardorff によって発表されております。

それより前に、k-ε モデルとか、レイノルズ平均型のモデルを使います乱流計算というのが行われているわけですが、Lauder, Spalding が k-ε モデル乱流計算法をほぼ完成したのは1972、3年のことで、この頃に、今最も実用面で使われています乱流計算法の k-ε モデルというのが出来上がっているという形になります。

それから、MAC 法という計算法に関しましては、その後いろいろと進展があります。例えば1970年代後半に Patankar によって Simple 法が提案され、多くの人に使われるようになっております。

一方、計算機が大型化してくると、ナヴィエ・ストークス運動方程式で、しかもレイノルズ数が比較的高い乱流を直接解いてやろうという考え方が当然出てきます。ダイ

レクト・ニューメリカル・シミュレーションと呼ばれている方法がそれですが、1970年代の後半に NASA-Ames の Kim 博士や Moin 博士、いずれも現在は大学に所属していますが、チャンネル乱流の直接シミュレーション結果が発表された。これは私ども乱流計算を行うものにとっては非常に大きな業績であったと思っております。

もう少し別の面で見ますと、流れの場というのは、私たち大学では比較的単純な形状の流れ場を取り扱うことが多いわけですが、工業界で CFD を使う場合には、形状自体もっと複雑な流れ場を計算することになるわけです。そういうときには流れ場の形状をどうやってつくるかというのが問題になります。このグリッド・ジェネレーションに対しては1980年代の中頃に Thompson がこの分野の研究をまとめています。

乱流の数値解析の面でどういうエポックメイキングな出来事があったかを振り返ってみますと、スタンフォード会議というのがございまして、ここでいろいろなモデルの比較とか、将来性が検討されております。さらに日本では1987年と、1993年と2回にわたりまして CFD 関係の文部省科学研究費重点領域研究が活動しております。

したがって一言で言うと、1970年代後半から日本にも CFD というのが出てまいったわけでございますので、まだ20年ぐらいの歴史しか持っていないということになるのかなと思います。

CFD というのは何か。まず質量の保存則を示す連続の式が一つあります。それから、運動量の保存則を表す運動方程式というのが空間の X 方向、Y 方向、Z 方向にそれぞれに対して計3つある。それから、圧力と密度との関係を表す式が一つ、さらに、もし温度を問題とする場合は、温度に関係する方程式一つを加えることになります。そうしますと、合計6つの式があることになり、求めなければならないのは、速度  $U$ ,  $V$ ,  $W$  と圧力  $p$ , 密度  $\rho$ , 温度  $t$  の6つということになりますから、境界条件を与えて、これらの式をうまく連立させて解くことになります。どうやって精度よく、どうやって速く解くかというのが問題になります。

こういう方程式を使いますと、例えばカルマン渦や乱流、あるいは音波や衝撃波というものもすべて流れの方程式を解くことによって求めることができます。ですから CFD はうまく使うと非常に有効なツールであるということになるわけでありす。

うまく CFD のツールを使うためにはどういうことが必要かというのが図2に示されています。例えば実用的な面を重視して考えてみますと、流れ解析コードというものが市販されています。この流れ解析コードは格子生成とソルバーそれにポストとから構成されています。まず、流れの形状を、あるいは流れの中に物体が置かれたときに、その

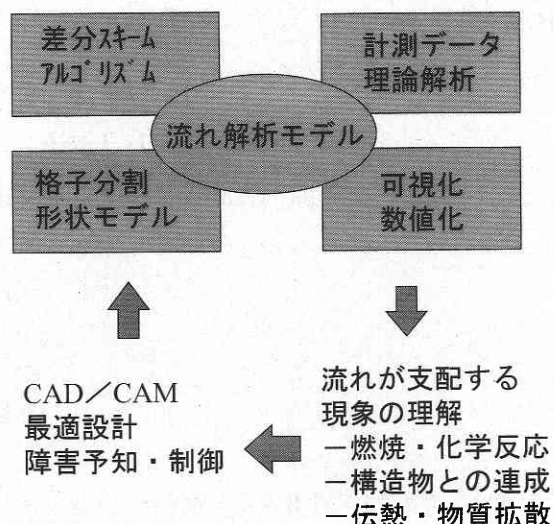
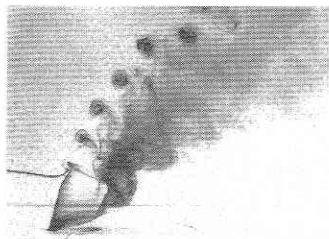


図2 CFDの課題

物体の形状をどうやって計算機の中に取り込むか、あるいは流れ場をどのように格子分割するかが格子生成の課題ですが、重合格子、解適合座標等実用上の工夫は進んでおり、研究は、非構造格子の経済的作成方法や数値解析結果の精度に及ぼす影響に重点が移っているように思います。次にソルバーにおける計算手法に関して、どのようなアルゴリズムを採用するか、あるいは差分スキームを選択するかが以前は課題でしたが、それらは研究面では多くのノウハウが蓄積されており、現在の関心事は高次精度差分スキームの性質の解明にあります。実用面では計算の安定性に重点が置かれすぎており、不安に思っています。ソルバーの中には例えば乱流の場合には乱流モデルも含まれますが、それについては後にお話します。ポストとよばれるものはあるソルバーを適用して計算し、その数値化された計算結果を可視化して流れが支配する現象を理解しやすくするものです。その間に計測データとか、あるいは理論解析から求められる結果との比較によって、この流れ解析モデルを検証することになります。

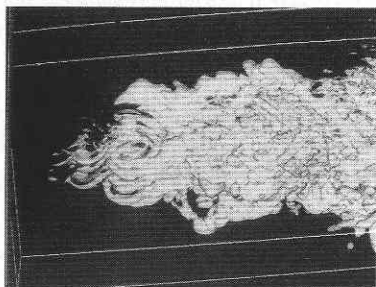
ポストに関しては実用面での進歩は著しく、流体力学の研究者にとっての関心事はどういう物理量が現象を理解するのに適当であるかを知ることです。さて、燃焼とか化学反応を伴うもの、あるいは構造物との流れの連成問題、伝熱、物質拡散というような問題に関しましては、流れというのが根本にありますので、その流れの CFD をうまく行うことによってこのような問題に対応することができ、その結果最適設計、あるいは具合の悪いところを予知する、起こる障害を予知する、あるいは現象を制御することが可能になるはずのものであります。

私たちの研究室の興味の対象のひとつに渦があります。図3は壁面からの噴流と主流との干渉を可視化した写真で



クロスフロー・ジェット  
の渦構造  
(可視化実験)  
R.M.Kelso et.al.  
Album of Visuali-  
zation,9(1992)

2次元噴流  
の渦分布  
(数値シミュ  
レーション)  
H5科学研究費



流れ方向渦度の3次元分布

図3 流れの解 一渦—

す。平面に沿って流れが左から右に流れております。境界層を制御する目的で、壁面の穴から噴流を吹き出すと、それが、もともと存在する主流との干渉によってどういう流れが見えるかというのを示したものです。非常に複雑な流れになっており強い渦度の存在が可視化によって観察されています。この種の流れを CFD を使って解くことができます。図3の下図は、2次元のスリットを通して比較的速い噴流が吹き出されたときに、下流の渦の構造がどうなるかというのを CFD を使って解いたものです。CFD を使うことによって、こういう渦の構造とか挙動とかいうものを当然解けることになります。

機械工学の分野で扱う流れというのは、非圧縮性流体を仮定することができるが、レイノルズ数が高い領域を対象にするケースが多いため、そういう場合はほとんど流れは乱流状態になっています。いままでお話しました CFD を低いレイノルズ数、層流の場に適用することは現在のところほとんど問題ないと思われます。次なる問題は、乱流の場に CFD を適用したときに、どのくらいの精度になっているのか、どういう問題点があるのかということです。すでにたくさんの市販のプログラムが存在しております。その市販のプログラムが、どういう性能を持っているのかというようなことを調べてみるのも非常に重要なことかと思ひます。しかし今日は、具体的に市販のプログラムのことについてお話する時間はないと思ひます。私たちはどういふところを問題にして、どういふことをやろうとしていふのかをまずお話させていただきます。

乱流をシミュレートする場合に大きく分けて3つの方法があります。DNS, LES, RANS とよばれています。例

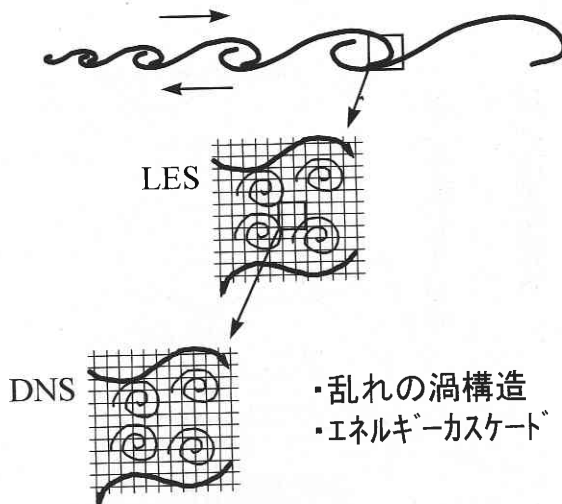


図4 乱流渦(Eddy)のシミュレーション

えばカルマン渦というのはよくご存じだと思いますが、乱流の場合は構造規模の大きい渦と、その大きな構造の渦の中の小さな構造の渦が存在していることが観察されます。DNS というのは、空間的に小さな渦を、それが意味のあるように分割する、つまり非常に細かいメッシュで分割して、小さな渦の運動自体をナビエ・ストークスの運動方程式から解いてやろうというのが考え方です。それを示したのが図4です。上方が速い流れで下方が遅い流れ、あるいは上方の流れと下方の流れが相対的に逆方向を向いています。そのような流れを想定してみますと、その境界面に存在します渦の構造は大きい渦の一部を拡大すると同じような渦構造が存在するというフラクタル的な構造となっています。図の一番小さい渦が乱流の渦の中で一番小さいと仮定いたします。DNS というのはこの渦を分解するような細かい格子を使って計算するということになります。DNS を工学・工業の場に、しかもレイノルズ数の大きいところに持ち込んでくるというのは、コンピュータのパワーからいって相当無理があるように思われます。したがって、コンピュータの負荷を緩和させるような工学的なモデルをつくる必要がある。それが乱流モデルです。では RANS と LES はどう異なるのか。それは乱れを見る目が違う。一口でいって乱れの間をマクロで見ているかミクロで見ているかという違いになると思ひます。

マクロな目で眺めると、どういふ乱流モデルを作りうるかというもののいちばん基本的なものが勾配拡散型モデルと呼ばれているもので、乱流運動を分子運動とのアナロジーとしてとらえたものです。

例えば壁に平行な流れがあったとしますと、分子粘性というのは速度勾配に比例することが実験的、統計理論的に確かめられています。乱流渦があった場合も、その考え方

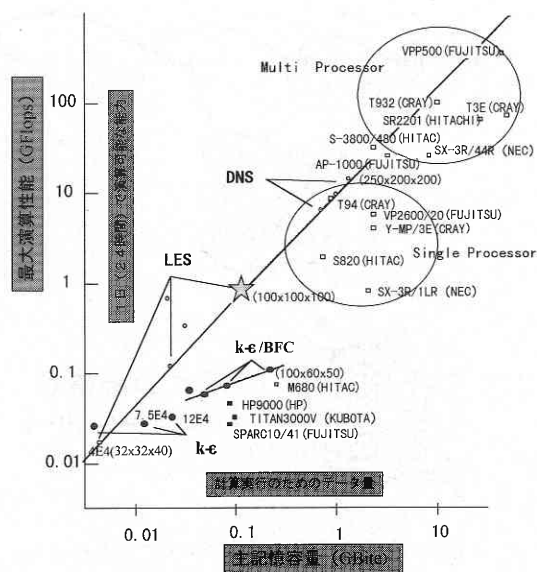


図5 コンピュータ性能の推移

を適用して乱流にも渦粘性というものが存在し、それが空間の速度勾配に比例するという考え方で進めていく方法が勾配拡散型モデルで、 $k-\epsilon$ モデル等もこれに属します。RANSは比較的大きな乱流構造を表現するモデルといえます。

それに対してラージ・エディ・シミュレーションは乱流構造をもう少しミクロにみる方法です。いちばんミクロにみるとDNSになる。DNSでは、計算機の容量と計算時間が非現実的になるということで、もう少し粗くみることになる。ですから、大きい渦構造はナビエ・ストークスの運動方程式で分解できるとして、それより小さい渦については、RANS型モデルと同じように乱れの統計理論を使って重ね合わせてやろうというものです。大きい渦とその中にある小さい渦の構造が比較的似ている。つまり、ある程度細かく格子を切つてやると、その格子で考えられる渦の構造と、それよりも細かくして、細かい渦を考えたときの渦の構造というのは相似的であるというような性質を利用して乱流モデルを組み立てていくというのがラージ・エディ・シミュレーションの考え方です。

さて、私たちの研究室で行っておりますいろいろな流体計算を例にとって、どういうコンピュータを使えばどのくらいの規模の計算がどのくらい速くできるのかということを示してみます。図5は横軸に記憶容量が、縦軸に最大演算性能が示されています。ここに□印がコンピュータ性能で、○印が計算例です。例えば $100 \times 100 \times 100$ というメッシュで、あるラージ・エディ・シミュレーションを行おうと考えます。そうすると、☆印よりも右側にあるコンピュータを使えば容量的には大丈夫だということになります。それに対して計算例における縦軸は24時間で演算可能

な能力を意味しています。非常に大まかな話ではありますが、例えば☆印レベルのコンピュータを使い、 $100 \times 100 \times 100$ 程度の格子の計算をしますと、24時間で結果が戻ってくる。そういう規模の計算ということになります。ですから、この計算を1日以内に計算結果を得たいと思う場合には、これよりも右、☆印よりも右上のコンピュータを使えばいいということになるわけです。

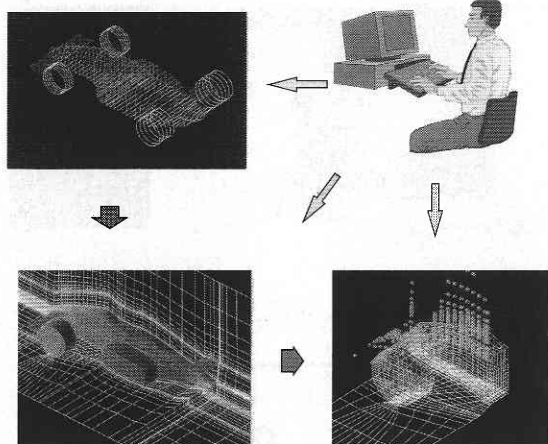
ただ、その評価が非常に難しい、DNSとかLESというのは、本来時間的に変動する流れ場を対象としているものであり、一方、工業的に必要な量というのは時間平均値である場合が多いわけです。ですからどれだけ長い計算をして平均値をとったら、意味のある値を得られるかということが問題です。上図は大まかにいって、どの計算方法でどの程度の格子規模の計算をどのコンピュータを使ったらどのくらいの時間でできるというノウハウが蓄積されているということになります。たとえば、LES、曲線座標系による $k-\epsilon$ モデル、直交直角座標系による $k-\epsilon$ モデルに関する私どもの研究室のコードを使うと、格子数がどれだけ増えたらどのくらい計算時間が必要になるかということが、だいたい推定することができることになります。

図にはDNSの例も記入されています。例えば $250 \times 200 \times 200$ ぐらいの計算は、現在でも可能であります。速いコンピュータを使いますと、1日で計算結果が返ってくる、そういう規模で可能です。それではDNSも工業的、あるいは工学的なセンスで、近い将来に使い得るかということになりますと、それはなかなか難しいということを先刻申し上げました。それはどうしてかということ、つまり $250 \times 200 \times 200$ ぐらいの格子数で切った計算がDNSとして意味を持ってくるかどうかというのは、現象の渦のいちばん小さい渦のサイズとの関係になってくるというわけです。その渦のサイズというのは、レイノルズ数に依存します。レイノルズ数が高くなると渦のサイズは小さくなる。つまりレイノルズ数が高くなると、メッシュを細かく切つていってやらなければいけないということになります。例えばレイノルズ数が $10^4$ の流れをDNSで意味ある結果を得ようとすると、1方向に少なくとも $10^3$ の格子を切つてやらなければいけない。つまり $1000 \times 1000 \times 1000$ ぐらいの格子を切つてやると、 $10^4$ という比較的工学の場では低いレイノルズ数の計算が、DNS直接計算として可能になるということになります。ですからそれを、 $10^6$ のレイノルズ数のほうに到達させるには相当大きなコンピュータが必要になってくるというわけで、現在のところでは、なんらかのモデルを使うというのが乱流計算の工学的利用に関しては一般的になっているわけです。ここで、そういうものを使ってどういう計算をしているかという例を少しお話しします。CFDを非常に早くから導入している業界というのは、例えば原子力とか、自動車とか建築とか幾つかありますが、





## CADデータ



## 格子生成 適合性評価

図9 フォーミュラーカー流れ解析と格子生成

が現場ではなされているわけです。ですから、1対1に対応いたしませんけれども、5年前に苦労して計算していたものが、一度企業のほうに、これは使えそうだということが入りますと、5年あれば十分に咀嚼され、ずっと立派なツールとして設計手段になっている一つの例です。

もっと顕著な例をお話いたしますと、1980年代の後半、研究室で自動車の車体周りの流れを数値計算いたしました。図9はその一例です。これも古いのを拾ってまいりました。自動車を、こういう単純な形で置き換え、計算しまして、圧力分布とか速度ベクトルあるいは抗力係数等を求めます。当時は、例えば抗力係数で50%違うとか100%違うとかいうような話をしておりました。

ごく最近、日産自動車から計算結果を入手いたしました。これはドアミラーを含む車体流れの解析で、k-kスキームというスキームを使っているデータです。形状には、ダンパーも車輪もついている。特に、図10はドアミラーの周辺の流れを注意深く計算した例で、拡大すると下図のようになります。ある瞬間の圧力の分布と、カラーで示してありますものがドアミラーの表面の圧力の、瞬間値、細線が空間の等圧線図、それに対して渦まいています線はトレーサー・パーティクルと呼ばれておりますもので、上流からトレーサーを発生させたら、ドアミラーの後ろではどういう流れになるかというのを示したものです。これをビデオで見いただきます。この研究では流れの計算結果を用いて流れがひき起こす音を計算しています。どうやって音が計算できるかということは省略しますがCurleの式というのを使って音の計算もできます。この計算の規模は車体部分が200万格子弱、合計で260万格子という非常に大きな規模の計算です。

今日は自動車の例をお話しましたが、研究の進展という

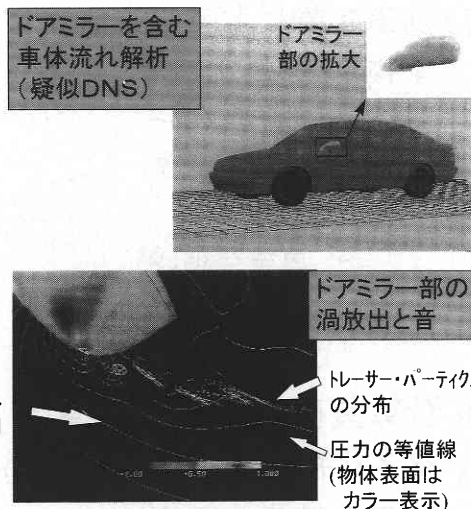
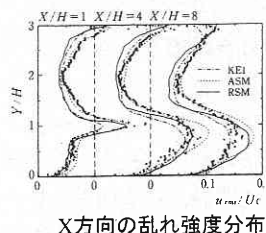


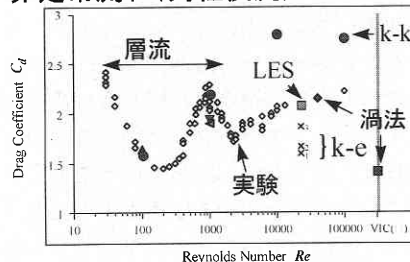
図10 車体周り流れによる流体騒音のシミュレーション



X方向の乱れ強度分布

剥離領域での  
乱れの予測

## 非定常流れ(角柱後流)



抗力係数の  
予測

図11 乱流モデルの予測精度

のは5年ぐらいの間にもものすごく進むものでそれでは大学でどういう研究をしたらいいかという最後のところを少しお話してみたいと思います。

特に乱流計算の場合には、その計算がどのくらいの精度を持っているかということのをわれわれは気にします。図11は正方形柱に働く抗力係数を計算で出し、実験と比較したものです。横軸がレイノルズで、縦軸にその抗力を無次元化した値が出ています。

例えばレイノルズ数が $2 \times 10^4$ ぐらいの乱流領域になっている部分について、k-εモデルとか、LESとか、k-kスキームの計算結果とか、渦法による計算結果を比較してみます。それぞれ異なる。抗力係数というマクロな量を計算するにも、手法によっていろいろな値が出てくるということがおわかりになるとと思います。この場合、幸いにも

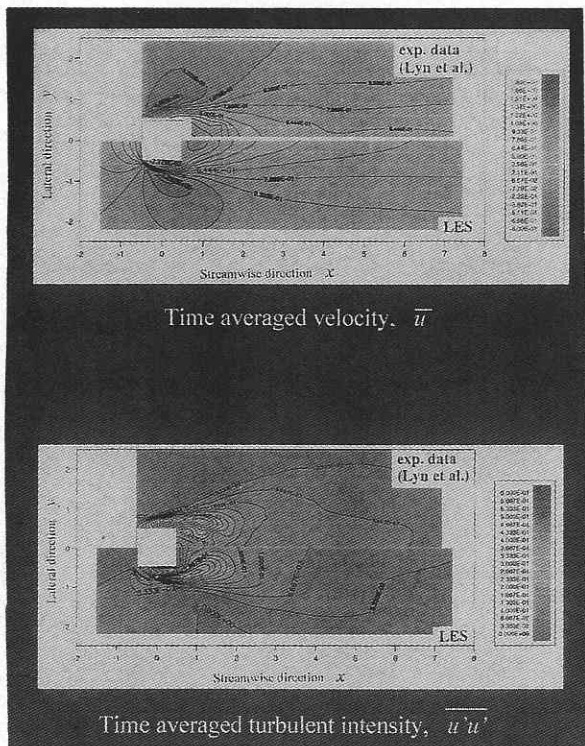


図12

LES で計算した値というのは実験結果に近かったわけがあります。でも、本当にそれだけでいいのか、こういうマクロな量の比較だけでいいのかというのは問題になるわけです。

では、もっと細かく比較してみると、LES 計算の例が図12で、上が時間平均をした速度、先ほどお話ししたようにカルマン渦が発生していますから、時間的に変動するわけですが、時間変動を長時間にわたって平均化した流れ方向の流速の等値線図で、その上側が実験結果、下側が計算結果で良く合っています。しかしこれも時間平均ですからマクロな、しかも流速であります。例えば流れ方向の速度変動のRMS値、つまり乱流の強さに関係する量を示したのが図12の下側の図です。こちらのほうが下よりも少し細かい比較になります。こういう変動分のRMS値も実験と計算でよく合っているということがおわかりいただけると思います。

さらにこれを位相平均、つまり正方形柱の後ろの渦は振動しているわけですが、そのある位相の部分のところだけ積分平均して実験と計算とを比較するというも行われています。LESという乱流計算法を使いますと、比較的实验をうまく記述することができています。私たちがいま行っております計算関係の研究の主力はLESですが、従来実用面でよく使われております $k-\epsilon$ モデルは、流れのはく離とか回転場とか、あるいは非定常な状況に弱点を持っており、そのために、RANSモデルでも高度のモデ

## ■ 乱流モデルの改良と検証

- ◆ 流れの剥離、回転場、非定常
- ◆ Zonalモデル

## ■ LES

- ◆ 境界条件 ～ 流入、流出、壁面
- ◆ 複雑形状 ～ BFC、FEM格子
- ◆ 非定常 ～ 流体関連振動
- ◆ SGSモデル ～ ダイナミック・モデル

図13 乱流シミュレーションの研究展開

ルが導入されています。非等方 $k-\epsilon$ モデルやZonalモデルも提案されていますが、そういうので完全にうまくいくかというと、必ずしもまだうまくいっていない。特に問題が非定常な現象になったときに、従来のRANSにおける平均化操作の意味がどういう意味を持ってくるのかというのが問題になります。ですから、私たちは計算負荷は少々高いかもしれませんが、コンピュータの能力というのはまだ上がっていくとして、LESをもう少し発展させて工学の分野に寄与するようにしたほうがいいのではないかと考えているわけです。

ただ図13にありますようにいくつか問題がございます。それは、境界条件についての問題とか、複雑形状に対応させるためにBFCを導入する、あるいはFEM格子をつくってFEM-LESを構成したときの問題点、精度の問題、時間の問題等々。それからLESにも乱流モデルが必要でして、通常SGSモデルと呼ばれております。そのモデルが、普通はスマゴリンスキーモデルという比較的単純なモデルが使われておりますが、モデル定数をどう選んだらいいのかがいくつかの問題があります。そういう問題を全部解決しなければいけないわけがあります。

既にお話ししたように、LESというのはいくつかの課題を持っていないが、しかし非定常の現象に非常に強いとか、あるいは従来RANS型モデルで弱点とされておりました旋回流とか、きょうは例をお見せしませんでした、2次流れがある流れとか、圧力勾配がある流れ等については比較的強いので、それをどうやって構成していくか、実用化のほうに向けていくかというのをここ数年のターゲットとしております。図14はLESを工学上のターゲットとしてとらえたとき、あるいは工業・実用上のターゲットとしてとらえたときの緊急の課題を示したものです。

最後に、私たちの研究室の最近の論文が、どういう方向を向いているかを示したのが図15です。横軸が年度、縦軸



図14 LES のこれから

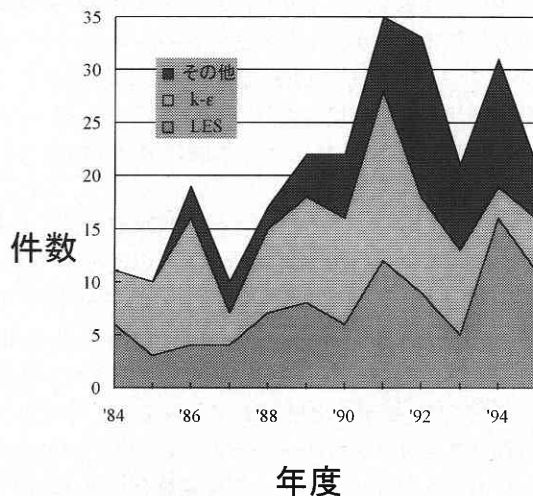


図15 CFD 研究の推移

がLES,  $k-\epsilon$  モデル, その他の論文件数です。

何を申し上げたいかというと, 凹凸がありますが, LES の発表例が, 私たちの研究室では増加している。ある年に発表しすぎると次の年, 苦しくなっているという傾向はあ

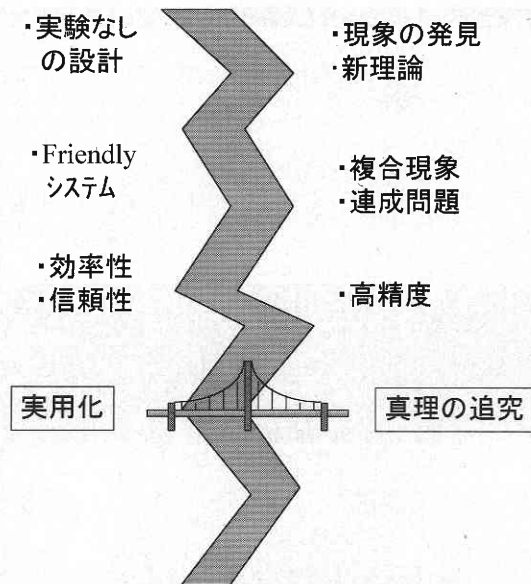


図16 CFD —研究と実用—

りますけれども, それはちょっと目をつぶっていただきまして, 研究の主方向はLESにあります。

一方,  $k-\epsilon$  モデルの論文が多く出るときは, 実用上の研究が多いという感じがしますが, LESが多くなるに比例して, 同時にその他の論文が多くなっています。これはLESをうまく構成するための周辺の技術の開発がやはり必要というか, だんだんと整備しておかなければいけないことがわかってきたというのが現状です。CFDに関して実用の面からいえば目指している方向は効率性, コストパフォーマンス, friendly system から最終的には実験なしの設計ということになると思います。一方, 研究面では精度の検討, 複合現象, 連成現象への適用を通して新しい現象の発見とか現象制御の方法の開発が最終の目標になると思われます。大学の研究と実用化の間には当然ギャップが存在するわけですが, もととのターゲットが違うことだし, ギャップは当然あってよく, そのギャップが大きければ大きいほど私たちのやりがいも大きくなる。そのギャップを埋める橋というのが当然必要であり, 大きいギャップをどうやってうまくつなげるかということを目指したいと考えております。

ご清聴ありがとうございました。

(1996年6月6日講演)