流体工学における数値シミュレーション

大阪大学工学部　三宅　裕，梶島岳夫

1. はじめに　　風洞 vs コンピューター

昨年暮れ（1982. 12. 9）、NASAのAMES研究所で世界最大の低速風洞の破損事故がありました（日経メカニカルNo.134）。損害額は1000万ドルにも達する模様で、修復には1年以上要するといいます。これは実験に傾倒した研究・開発の危険性を物語る極端な事例ですが、コンピューター・シミュレーションへの移行は世界的な趨勢のようです。その理由はまず、風洞等の装置の建設・運用費の増加と、計算コストの相対的な低下でしょう。また、測定によって得られる情報の制約が挙げられます。勿論計算でも無制限にデータを抽出することは叶いませんが、実測し難いデータを容易に入手できること、数値を少し操作すれば多様な条件下でシュミレートできるメリットは魅力です。

しかし100年以上の歴史をもつ風洞が蓄積してきたデータと、これに寄せられる信頼は決して揺らぐものではありません。数値シミュレーションがこれを凌駕する為には経済性と共に信頼性の実証が不可欠です。“風洞　vs　コンピューター”の議論や“計算機風洞”などという術語の出現の背景には計算機ならびに計算技術の急速な発達があることは指摘するまでもありません。この小文では流体工学（主として航空機と流体機械）における数値シミュレーションの発達の経緯と現状を我々の研究の紹介も兼ねて述べたいと存じます。

2. 非粘性流れまで

計算流体工学の発達をChapmanのレビューに習って4段階に大別すると別表のようになります。流体の重要な性質である粘性と圧縮性をどの程度考慮するかを問題にしているのです。

数値シミュレーションの発達（航空工学、文献[1]の表1より）

計算法	解析できる事項	航空機の三次元計算	要求される計算機性能
1. 非粘性線形	圧力分布など	1960'S	
2. 非粘性非線形	＋遷音速・超音速流	1970'S	現スーパーコンピューター
3. PDE	＋剥離・総抵抗など	1980'S	NASクラス
4. LES	＋騒音・遷移・圧力振動など	1990'S	NAS × 100

第１段階は非粘性・亜音速流れの計算で基礎式は線形となります。数々の方法の興亡を経て現在このレベルで最先端に位置するのがパネル法（境界要素法）で、物体表面をパネルで覆って個々の要素で境界条件を満たすように全体の流れを求める方法です。図１はシャトルとB７４７の結合体を約１０００枚のパネルで解析したもので、風洞実験との一致は良好です。このように外部流れに関しては概ね完成の域に達しています。ターボ機械内部の流れについては我々の研究室で完成しつつあります。

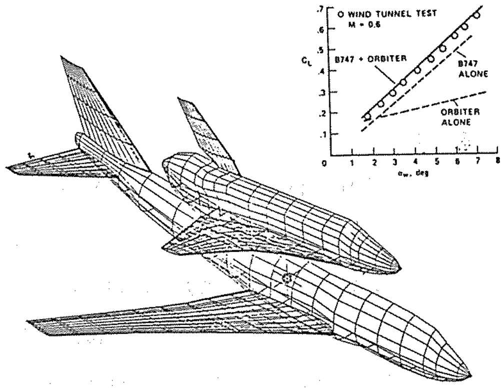

図１　スペースシャトルとB747の結合体へのパネル法の応用（文献〔2〕より転載）

翼の周りの流れを扱う場合の大きな問題はKuttaの条件（例えば、カルマン「飛行の理論」岩波P43）です。非粘性ですから流れは物体の表面ですべっても良いのですが、過ぎ去る点（翼の後縁）では上下面から出合う流れが滑らかにつながらなければなりません。この部分の扱いが難しいところです。

流体機械の場合、内部流れであるが故の複雑さ、単独翼でなく翼列を対象とすることの困難に加えて、人命の危険と条件の苛酷さがないことも外部流れの研究の後手に回らざるを得ない原因となっているのかも知れません。内部流れでは場が有限であることで有限要素法も有力な手段となり得るため、境界要素法との優劣が現在も論争の的になっています。各々に利害得失がありますが、変化の大きい三次流れでは後者に分があるようです。

第２段階では遷音速あるいは超音速の非粘性流れを扱います。このとき圧縮性が問題となり、非線形計算となります。航空機産業では既にこのレベルが導入されており、翼形の最適設計、即ち数値シミュレーション技術を駆使して抵抗を軽減するように再設計すること、で威力を発揮しています。B757やエアバス310の翼はこのような計算によって設計されているそうです。

流れの中の物体には様々な抵抗が加わりますが（「飛行の理論」P59）、第１段階では誘導抵抗、第２段階ではこれに加えて造波抵抗（同、P108）までしか解析できず、摩擦抵抗を含めた全抵抗を求める為には次のステップへ立ち入らなければなりません。

３．乱　流　へ

流れには層流と乱流の２つの状態があることは周知のとおりですが、我々が日常経験する流れ、

あるいは工学上重要な流れは殆ど例外なく乱流です。ところが親近性と理解度は一致せず、乱流は流体力学の代表的な未解決問題なのです。従って以下に述べる乱流計算は限りなく不透明に近い半実験理論に立脚しているものです。話は発達した乱流に限定し、Navier−Stokes の運動方程式がNewton流体の乱流にも適用できることを前提とします。もう少し慎重に言うと、適用できると期待するのです。N−S式が現在知られている形にまとまったのは前世紀半ばですが、未だに純解析的な計算は実現されておりません。その第1の理由は、純数学的な研究によればこの方程式の初期値・境界値問題は十分に適切(well posed)でないことです。更に乱流は広域のスケールに及ぶ三次元非定常現象であるため、計算には時間的・空間的に高い解像度を必要とし、現在のコンピューターの手に余るのです。そこで問題の本質を損わない範囲で方程式に或る種の限定を加えて、計算を可能にすること、モデル化、を考えなければなりません。

O.Reynoldsの研究以来、乱流を平均流れとこれからの変動に分離して扱ってきました。(例えば、Hinze "Turbulence,2nd ed." MaGRAW−HILL,P4) N−S式の時間平均をとったものをReynolds方程式といい、この式の変動速度の相関項(変動に伴う見掛けの応力)をReynolds応力とよびます。相関項の輸送方程式を考えると更に高次の相関が顕れ、これは延々と続きます。

第3段階ではReynolds方程式系を対象とします。或るレベルで相関項を何らかの方法で決定してやり、系を閉じさせなければなりません(closure)。そのレベルにより零方程式モデル。1方程式モデル、2方程式モデル、応力方程式モデルと分類され、後のもの程複雑になります。乱流計算ではKlineのオリンピック(1968)以来これらの方法(総称して微分法、PDE)が主流となってきました。Closureモデルとして経験的な定数や関数形を与えるのですが、この数はモデルの複雑化と共に増加します。PDEで計算すれば流れの剥離の問題や全抵抗の評価が解決する筈で、最近のコンピューターの発達をみますとこれも時間の問題でしょう。

4. Large Eddy Simulation(LES)

乱流は数桁のスケールの幅に及ぶ大々さまざまの渦から構成されており、乱流渦はその大きさによって性質が異なります。大きい渦は全体的な流れの形状の影響を強く受けて多様に変化し、乱流輸送の主役となります。これに対して小スケール(高波数域)の挙動は普遍的で等方的な性質をもち、殆ど乱れエネルギーの消散の役割しか果たしません。実際には渦は連続的に分布し、乱れのエネルギーはより小スケール渦へと伝達されてゆきます(カスケード過程)。前述のReynolds方程式系では全てのスケールの変動を一括して扱ってしまうので一般性のあるモデルはできず、Closureモデル中の定数は流れの種類によって定めなければなりません。

LESというのは乱流の性質に注目して小スケール(格子スケール以下、SGS)の渦をモデ

ル化して、大スケール挙動を三次元非定常で直接に計算しようというものです。大小のスケールを識別する為にN－S式に“フィルター”をかけた式が基礎式になります。格子を細かくとればモデルの普遍性が期待され、このことは冒頭に述べた経済性・信頼性と共に重要な点です。

第４段階は以上のような乱流の数値計算法となります。ＬＥＳでは乱流渦を時々刻々追跡するので物体表面の圧力変動までシミュレートでき、安全と騒音の問題への寄与が可能となります。また、計算により抽出される情報量は飛躍的に増加し、流体計算を10倍楽しめる方法といえるでしょう。

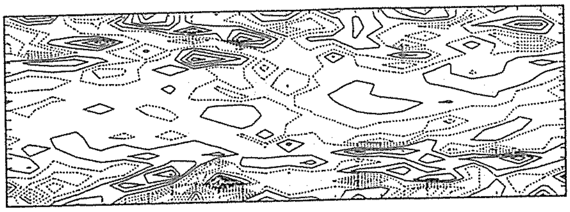

図2.　等渦度線図

図２は著者が平板間乱流にＬＥＳを適用して或る断面の渦度変動を等渦度線図で表わしたものです。このような実測困難な情報を容易に取り出せることは数値シミュレーションの利点です。

現在ＬＥＳの適用はごく基礎的な流れに限られている状態ですが、図３に示す計算例は境界付近の挙動（図４）を鮮やかにシミュレートしており、この計算法の威力を印象づけております。しかし例えば航空機の周囲に密な格子網を張り巡らした計算が実現するのは、理論の成熟度と計算機の能力からみて未だ先の話です。

有難いことにＬＥＳによれば、格子点を比較的粗くとっても密にしても定性的には同傾向の流れが得られる性質がわかっており、計算のテーマによってはそれで十分なことが多いのです。そこで我々は流体機械の内部流れへの応用を究極の目的として、曲がり流路や回転する流路の数値シミュレーションを試みております。愛すべきＡＣＯＳを修羅場に登場させるに忍びないこと、研究室の懐具合、プログラムの実用性を考慮して粗い格子網を用いております。この場合ＳＧＳ挙動と雖も幾分普遍性を失い、この取扱いが問題となります。現在知られているＳＧＳモデルはあらゆる座標系・格子系に適応できるかは未確認です。来るべき実用化の時代に備えて解析すべき緊急の課題は、①モデルの整備　②最適計算法の開発　③格子の生成法　に集約できると思います。ＬＥＳはモデルの普遍性から乱流現象の解明のための手段としても有望視されていることも付記しておきます。

格子を非常に密に配置してN－S式を直接計算しようという野心的な試みも無いわけではありません。この場合には基礎式の非線形性に由来する高→低波数域のエネルギーの逆流が生じるなどの困難があるようで、高波数挙動には消散だけを課したＬＥＳとは本質的に異なるものです。

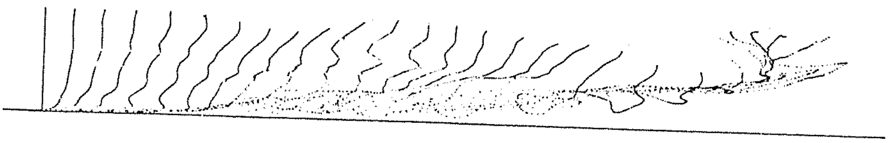

図３　固体壁近傍の乱流の挙動
（Moin & Kim " J.Fluid Mech. 118 (1982) P341 " より転載）

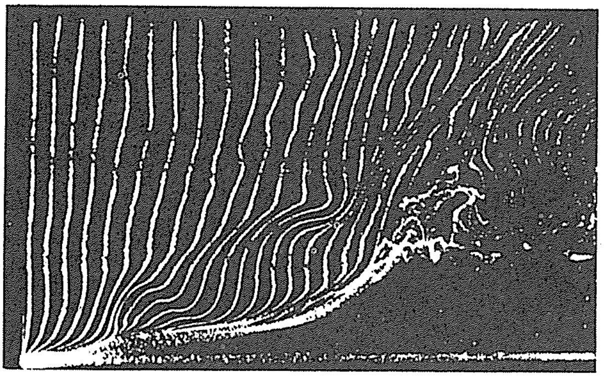

図４　H_2気泡により可視化されたバースト
（Kim et al. " J:Fluid Mech. 50 (1971) P133 " より転載）

5．むすび

流体工学における数値シミュレーションを４段階に分けて述べました。風洞等による実験も含めて、多少の淘汰はあるでしょうが、目的に応じて使い分ければ良いのであって、仮に第４段階に属する方法が実用レベルで完成しても、それ以前のものが消滅するなどとは考えられません。流行の言葉で" エントロピーの増大を最小限にする方法が選択されるであろう " という差し障りのない展望でむすびとします。

なお、本文中では個々の記述に際して詳細に文献を示しませんでしたが、全般的なレビューには主として

〔1〕 D.R.Chapman　AIAA J.17−12 (1979)　P1293

〔2〕 R.A.Graves,Jr.　Astronautics & Aeronautics 20−3 (1982)　P20

乱流モデルに関しては

〔3〕 W.C. Reynolds　Ann. Rev. Fluid Mech. 8 (1975)　P183

〔4〕 日本航空宇宙学会誌　28−313 (1980)　大路 (P48)　石田 (P56)　廣瀬 (P67)

を参考にしました。ＬＥＳについては以上の文献と共に

〔5〕 P.Moin　Lecture Notes in Physics No.170　Springer (1981)　P55

〔6〕 桑原、高見　　数理科学　No.233 (1982-11)　P62

などをご覧下さい。