

# 流れの予測



三宅 裕\*

## Computational Flow Dynamics

**Key Words** : Chaotic Field, Flow simulation, High Performance Computer.

### 1. ま え が き

「夢」となればもう少し大仰な表題をと考えてみたが、誇大広告も憚られて平凡なタイトルに落ち着いた。小川のせせらぎ、大木を揺する大風と、流れは大昔からあまりにも身近な自然の一部なので、今さら勿体ぶった体裁はとり難いのである。当然ギリシャの時代にも既に流れの科学の芽生えはあったが、中世の暗黒の時代に、他の科学と共に長い停滞を続けてしまった。産業革命で人々が都市に集まるようになって否応なく上、下水道網の整備を迫られ、流れを定量的に扱う必要が生じて工学が誕生した。Civil Engineering、今で言う土木工学である。流れ学はこうして工学の先駆けとなったのであるが進歩は遅く、後で生まれてすっかり成熟した科学、工学の領域が他に数多くあるにもかかわらず、今日なおいたく技術者を悩ませ続けているのである。しかし、コンピュータの出現が事情を大いに変えようとしている。最近の気象予報がかつてに比べて大幅に信頼できるようになったことは多くの人の認めるところであろう。

### 2. 複 雑 系

工学の大きな割合を力学を基盤とする領域が占めている。工学の領域が細分化して共通言語が失われる中で、「複雑系」と呼ばれるコンセプトが最近、力学に携わる人々の共通の関心になっている。複雑系は最近の言葉で、同じ様な概念ではカオスの方が古い。人によっていくらかづつ想定する内容は異なるが、手に負えないややこしい事象というほどの概念であろうか。

線形事象は境界条件、初期条件を与えれば必ず解くことができる。簡単な数式表現が出来るとは限らないが、数値的には必ず解けるし、そのときの収束性も保証されている。これを、少々乱暴な譬えをお許し頂くとすれば、今までの経過がわかればその先は確実に予見できると言うことになる。線形でない事象は非線形事象という。この乱暴な言い方をすれば、これまでのことが解っても先のことは解らないということになる。株式の変動は予見できない。人間の社会行動は互いが複雑に作用しあって強い非線形性を示すからである。

それでも少しは予見できることもある。非線形性の弱い、弱非線形事象ならば、である。物理現象は弱非線形である場合が多い。人間が聞く弱い音の伝播は線形で、「ア」と発音されたのに、「イ」と聞こえることはない。形が崩れないことは線形性の別の言い方でもある。音が強くなると非線形に変わるが、強い音である衝撃波は非線形でもかなりの程度解析に乗る。

流体運動は、身近に見る普通の流体(ニュートン流体)ならばナビエ・ストークスの式で記

\*Yutaka MIYAKE  
1938年9月19日生  
昭和66年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了  
現在、大阪大学工学研究科、機械物理工学専攻、教授、工学博士、流体工学  
TEL 06-879-7248  
FAX 06-879-7250  
E-Mail miyake@mech.eng.osaka-u.ac.jp



述される。この式は場の中で質量と力(運動量)とエネルギーがそれぞれに釣り合うことを述べるものであるが、これらの釣り合い式に含まれる流れによる輸送の項が強い非線形性を示す。このことが流体運動の理解と予測を長く妨げ、はじめに述べたように300年以上を経て今日なお流体力学が科学、工学の未知の分野として生き続けている理由である。流体運動は強い非線形現象であるから複雑な振る舞いをする。海流、気象、環境汚染、星の生成、プラズマなど、いずれも予測や制御を困難にするのは流体運動の複雑さのためである。音の伝播は流体運動の一つの場合であるが弱い音は非線形性を示す項が働かないから振る舞いは単純になる。

複雑系は流れに関連した自然現象に限られたものでなく、株価の変動のように社会現象にも頻繁に現れる。計り知れない混沌には不安と畏れを感じるから混沌の性質を見極めたいとするのは自然な願いであろう。流れが複雑系の一つであることから、複雑系の解明のために流体力学に大きな期待が寄せられるのもまた自然の成り行きと言えよう。とりわけ、流体運動は本質的には決定論的であることが期待を大きくする。つまり、先に述べたように流体運動を支配する式は明快に解っている。そして粘性の効果を除いた、本質的な非線形部分に対する基礎式(オイラーの式)の解も少しづつ解明が進んでいる。決定論的でありながら、流れはかなりの秩序性を示すこともあるしひどくカオス的になることもある(乱流)。経済事象など人間の振る舞いを記述する基礎式は得られていない。様々な計量経済モデルが景気変動の予測に大きくは貢献しないゆえである。現象を記述する式が特定されない系の議論はむづかしい。流れの解析はそれ自身幅広い工業の需要に応えるものであるが、複雑系の解明を目指す最も説得力ある近道でもある。

### 3. 流れのシュミレーション

非線形性の強いナビエ・ストークスの式を解いて流れを求めるにはスーパーコンピュータが不可欠である。解析的に解くためには一般には何かの線形化を施さなければならないが、この

処理は複雑系の本質に合わないからである。流れは様々なスケールの渦の組み合わせで成っているが、数値シュミレーションによって流れの機構を知るためには、少なくとも最も小さなスケールの渦を解像できることが必要である。その基準は流れの性質を特徴づけるレイノルズ数  $Re = Ud/\nu$  ( $U$ : 流れ場の代表速度,  $d$ : 流れ場の代表寸法,  $\nu$ : 動粘性係数)によって決まり、最小渦の体積は流れ場の代表寸法の体積の  $Re^{-9/4}$  程度になる。したがって、少なくとも  $Re^{9/4}$  個の格子が必要になる。普通、機器の流れのレイノルズ数は  $10^5 \sim 10^6$  であるが、連続体の流れとして取り扱うことができる流れは機器などの流れだけでなく、太陽内のガスの対流、大気の流れなど、宇宙規模の流れも含まれている。太陽内対流の完全なシュミレーションには  $10^{30}$  個、地球大気の流れには  $10^{18}$  個程度の格子が必要と見積もられているが、一つの格子点には数十個の記憶が必要であるから前者の場合、 $10^{32} \sim 10^{33}$  byte ほどの主記憶容量が必要になる。現在、大阪大学に設備されているスーパーコンピュータ、SX-4の主記憶の容量が最大で、 $1.28 \times 10^{11}$  byteであることを考えると、このシュミレーションは遠い夢であることが分かる。

流れの数値シュミレーションでは時々刻々変化する。非定常流れを扱うが時間進行の間隔  $\Delta t$  は、格子点での流れの速度  $u_s$  で流れる情報が隣の格子点を超えないこと、すなわち  $u_s \Delta t \leq \Delta s$  ( $\Delta s$ : 格子点間距離)の条件が必要であるから、格子数が増えれば時間間隔は小さくとらなければならない。そこで、主記憶容量が大きいだけでなく高速の計算速度が要求される。

しかし、コンピュータの発達はとどまるところを知らない。図1<sup>1)</sup>はスーパーコンピュータの誕生以後の計算速度の推移で、縦軸は毎秒あたりの演算回数(flops)である。ちなみにスーパーコンピュータは日米政府間では演算速度が  $5 \times 10^9$  flops 以上の計算機となっている。演算素子の高速化は既に飽和に近いが並列化の進歩がさらに高速化を実現しうると期待されている。図中□印はSX-4-256 CPUでほぼ日本の現在の最高速マシンであるが、我が国のスーパーコンピュータは現在、ハードウェアとして

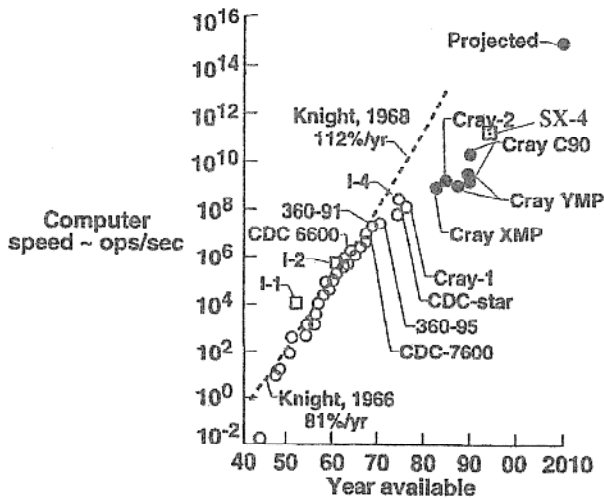
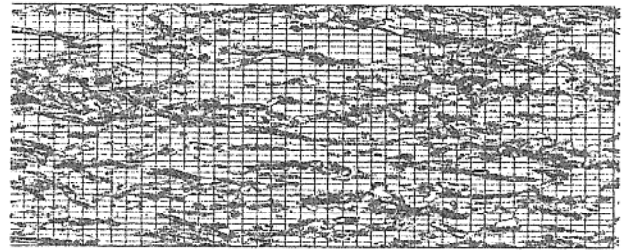


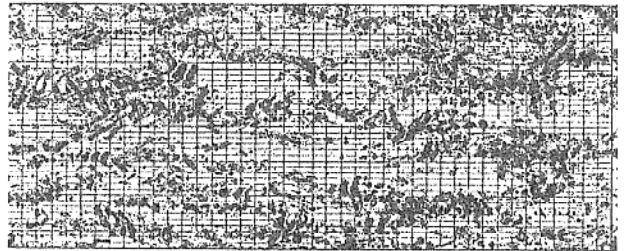
図1 スーパーコンピュータの計算速度の変遷

は既に世界の最高水準であり設置台数も世界で群を抜いている。米国では2010年頃を目途として $10^{14}$ flops程度の速さの計算機を完成させる計画になっている。航空機全機周りの流れの完全なシミュレーションは $10^{18}$ flops程度の計算機で可能となると見積もられているが、計算技術の改良によって実用的には2010年頃のマシンは航空機の計算機による全機設計を可能にすると期待されている。我が国の対応が急がれるところである。

現在筆者らは2CPUながら、SX-4を研究室に設置し、さまざまな流れ解析と取り組んでいる。図2は他に先駆けて筆者らが求めた壁近くの流れから発する乱流音の音源分布の計算例であるが、(a)は壁近くの乱れを支配する縦渦の瞬時分布、(b)はこのときの音源分布である。



(a) 縦渦分布



(b) 音源の分布

図2 壁乱流の乱流騒音の音源分布

音源は壁近くの乱流に特有な微細渦に対応することがわかる。これらの微細渦は複雑系としての乱流の中に現れる秩序性の一つで、カオスの中に見いだされる秩序性を捉えて制御を実現することが期待できる例である。

参 考 文 献

1) Joslin, R., "Discussion of DNS : Past, Present, and Future", in *Advances in DNS / LES*, eds. C. Liu, Z. Liu, Greydon press, Columbus, p.1-12, 1997.

