



研究室紹介

機械工学科第三講座 (流体力学)

三宅 裕*

1. 研究室の概要

当研究室は1933年4月大阪帝国大学工学部の発足時に設置された27講座の1つとして誕生した。以来機械工業に現れる流れ現象を対象とした研究を通じて教育ならびに産業界への寄与を続け、多くの研究者・技術者を世に送りだし、それぞれに第一線で活躍中である。

現在は教授三宅裕が4代目の講座担当教授として1982年11月以来その任にあたり、講師稲葉武彦、助手板東潔、技官北田義一とともに教育ならびに後期課程学生1名(D3)、前期課程学生6名、4年生9名、計16名の講座配属学生の研究指導を行っている。研究の対象としては広く流体に関する諸現象に関心が向けられているが、具体的なテーマの選定にあたっては基礎的研究と産業界に直接寄与できる応用研究とのバランスを考慮している。

2. 研究概要

毎年10余りのテーマが平行して進められているが、その主力は大規模数値計算とターボ形流体機械の非定常現象に関する実験的研究である。つまり

乱流の数値シミュレーション (LES, 直接シミュレーション)

パネル法による流れの完全三次元解析

ターボ形流体機械の不安定現象の解明およびその対策

超音速静圧気体軸受

で、このほかキャビテーションの状態同定のための基礎的研究も始めている。

乱流の数値シミュレーション ニュートン流体の運動はナビエ・ストークスの式(N-S式)

で記述され、乱流の場合も各瞬間においてこの式が成り立つとされている。したがって原理的にはこの N-S 式を連続の式、エネルギー式などと連立させて、考える領域全体にわたって時間毎に積分すれば、流れ場は完全に求まることになる。ところがこの原理的手法を実行するには多くの障害があるので、もっぱら N-S 式に何らかの制約を設けて解く方法—これをモデル化と呼ぶ—が採用されてきた。これまでに N-S 式を平均化処理したレイノルズ方程式と、その際現れるレイノルズ応力と呼ばれる、乱れに基づく応力を評価する補助方程式とを連立させて解く方法が発達してきていて、流れ場の平均的な量は精度よく予測できるようになってきている。さらにこの補助方程式の数を増やして予測の精度を上げるとともに、対応できる流れの型を増やしモデルとしての普遍性を増やすことが可能であるが、計算量の著しい増大が避けられず、またこの方法では乱流の構造などの議論に立ち入ることができない。

この間の計算機の飛躍的な発達により、始めからもっと計算機に頼り、その代わりモデル化を最小限に留める方法が考えられるようになった。そのような手法の一つに Large Eddy Simulation (LES) があり、当研究室でも5年前から取り上げている。乱流は大小さまざまなスケールの渦からなり、小さい渦である高周波成分は一般に流れの状態にあまり依存せず、かつレイノルズ数が高いと等方性をもつことが知られている。LES はこの実験事実に基づき、流れ場を大小のスケールの流れに分離し、普遍的な性質をもつ小さいスケールの渦に対してはモデル化(サブグリッドモデル)を行い、大きいスケールの渦は N-S 式で直接計算する方法である。このような分離を行うことにより、あらゆるスケールの渦を直接 N-S 式から計算す

*三宅 裕 (Yutaka MIYAKE), 大阪大学, 工学部, 機械工学科, 教授, 工学博士, 流体力学

るのに比べ、計算に必要な格子の数を大幅に減らすことが可能になる。普遍性のある小さいスケールの渦に対してのみモデル化を行うのであるから、あらゆるスケールの渦を一括して平均化して扱う前述のレイノルズ方程式に基づく方法に比べ、対応できる流れの型も大幅に増え、モデルとしての普遍性に富むことが期待できる。しかしモデル化により必要とする格子数が大幅に少なくなるとはいえ、工学的に興味ある複雑な流れの解析に LES を適用するには、その数はなお非常に大きく、現状では一様流れや平行平板間流れのような比較的単純な流れに対してのみ適用され、主に乱流の構造の解明に用いられている。当研究室でも平行平板間の流れに LES を適用することから始め、次いで回転流路内の流れに適用し、コリオリ力が乱れに及ぼす効果を含め、乱れの構造の詳細な解析、これまでに提案されているサブグリッドモデルの適用性などを調べた。

さて一切モデルを用いない、初めに述べた原理的な手法は直接シミュレーションと呼ばれ、当研究室でも一部採用を始めている。現状でこの手法が適用できるのは低いレイノルズ数の流れに限られているが、クエット流れという比較的単純な流れの乱流遷移域に適用し、遷移レイノルズ数域の流れに特徴的な乱れの構造のシミュレーションに成果を収めた。

この研究は計算機に負うところが非常に大きく、当初 ACOS 900 そして 1000 を用いてスタートした計算も HFP の導入で計算時間は約 $\frac{1}{2}$ に、その後京都大学に導入された VP 100 を用い、ベクトル化率 99.9% でさらに約 $\frac{1}{4}$ になり、ACOS 1000 に比べると $\frac{1}{4}$ 以下となった。本学に 4 月から導入される SX 1 に対する期待は非常に大きい。

パネル法による流れの完全三次元解析 微分方程式を積分方程式に変換して解く方法の一つに境界積分法、あるいは境界要素法と呼ばれる方法があり、流体力学の分野ではこれをパネル法と呼ぶことが多い。一般に非粘性非圧縮流れは“形式的に”ポアソンの式で記述され、グリーンの公式により面積分と体積積分を含む形の表現に変換でき、境界面上に分布された吹き

出し、渦、高次吹き出しで流れ場全体を記述できる。ここで“形式的に”と言ったのは、右辺の関数が何らかの方法で既知として扱える場合を想定しているためである。例えば渦あり流れでは、渦度による非線形性が弱く、繰り返し計算によって線形化でき、収束解が得られる場合を想定している。特に渦無し流れ—ポテンシャル流れ—の場合には体積積分の項がなく、境界面上の流れだけを考えることにより三次元の流れ場全体を表現できる。このためパネル法は航空機やスペースシャトルの開発などの外部流れの解析におもに用いられてきた。

当研究室では以前からターボ形流体機械の内部流れの解析を進めてきている。ターボ機械内の流れは非粘性流体を仮定した解析で多くのことがわかる。ターボ機械の設計に際して、以前は設計点と呼ばれる、機械にとって一番都合のよい状態での性能に対してのみ仕様が決められていた。しかし最近是非設計点での性能に対しても仕様が課せられ、従来の二次元解析、あるいはそれを基にした準三次元解析では性能予測の精度が保てなくなってきている。このため完全三次元解析が必要となってきたが、内部流れでは考える領域が限られているためか、これまで場全体を計算する方法が採用されてきていた。流体力学の分野ではもともと二次元流れの解析法として特異点法と呼ばれる、境界線上に分布させた吹き出し、渦などで流れ場を表現する方法があり、パネル法はその三次元流れへの拡張と考えることもでき、数年まえから内部流れの解析への適用に踏み出した。

これまでに軸流形および遠心形ターボ機械内の非設計点を含む流れ場の解析に成功し、あらかじめ与えられた速度分布や圧力分布を満たす翼型を決める逆問題にも適用できるようになり、新しい羽根車の開発に際しての設計計算に用いることができる。さらに流体管路要素を通る非定常流れの解析、粘性流体の流れの解析にも適用を試みている。

ターボ形流体機械の不安定現象の解明およびその対策 ターボ形流体機械で吐出し流量を絞っていくと、流れが翼面あるいは流路壁面から剥がれ、部分的に逆流が生じ、その逆流域が

羽根車の回転方向に移動する、旋回失速と称する現象が起こる。旋回失速が生じると、ターボ機械の圧力が突然急低下し、激しい振動・騒音を伴う、いわゆる不安定状態に陥り、運転不能となる。この問題は古くからの問題で、当研究室では軸流送風機に対して、不安定現象の除去法としてこれまでに提案されたどの方法より効果的なエア・セパレータと称する付加装置について研究してきていて、その最適形状・寸法を決定するとともに、その作動機構を解明した。その過程において、軸流送風機の旋回失速発生に至る機構解明も試み、あるモデルを提案し、現在その裏付けのための実験を進めている。軸流送風機では、動翼先端とそれを覆う静止壁であるケーシングとのすきまを通り、翼圧力面から負圧面へ周り込む漏れ流れが生じる。この漏れ渦は翼に対する相対速度が小さい。送風機流量を絞っていくと、この漏れ渦が次の翼の後縁圧力面側に蓄積し、何らかの原因で翼に剝離が生じたとき、その剝離域とこの蓄積流体とがつながり、翼先端近くの翼間流路を塞ぎ、剝離が次の翼に伝播するため旋回失速に至ると考えている。

一方、遠心形ターボ機械の場合には、羽根車で起こる旋回失速とディフューザ一速度エネルギーを圧力エネルギーに変換するため羽根車の後ろに設置される減速流路一で起こる旋回失速とがあり、その発生機構は軸流形の場合とは異なっているようである。羽根車の旋回失速は旋回速度が速く、ディフューザ形のは旋回速度が遅い。またディフューザに案内羽根を設けた場合と案内羽根がない場合とでも現象は異なり、軸流形の場合に比べ、その解明は大幅に遅れている。

超音速静圧気体軸受 流体軸受は従来、作動流体の粘性を利用してきた。つまり、非常に狭い流路を流体が流れるときには、流路壁面で

の摩擦抵抗のため下流にむかって大きな圧力勾配が生じる。例えば平行円板からなる気体スラスト軸受の場合、軸受内部に供給された高圧の気体は軸受出口で周囲圧力に一致するよう、軸受すきまの大きさに応じた流量で流れ、その際生じる圧力差で支持力を発する。しかし軸受すきまを一定に保ったまま給気圧力を上げていくと、ある給気圧力までは支持力が增大するが、それ以上給気圧力を上げると支持力はかえって低下してしまうという現象が起きる。これは軸受内部に超音速域が生じ、その下流で衝撃波が生じ再び亜音速流れとなり、出口で周囲圧力に一致するよう流下していく。その際超音速域では周囲圧力より低圧になるため、支持力が低下する。

しかし気体の場合、流れを制約するのは何も粘性に頼らなくても、高速気流の閉塞現象を利用することによっても可能である。そして軸受すきまの大きさに応じて、閉塞する位置が変化し、すきまの大きさが低下したとき支持力が増大するよう設計すれば軸受として成り立つ。この考えを実現したのが超音速気体軸受である。これは所定の位置で流れが音速に達し、超音速あるいは音速で軸受出口から周囲に流出するよう工夫された流路形状をもつ軸受であり、出口で周囲圧力より高くてもかまわず、支持力は給気圧力に正比例していくだけでも大きくすることができる。初め、理論的にその可能性を確かめ、その結果を参考に設計した軸受で理論の正当性を検証し、静特性についての理論値と実験値の一致は予想をはるかに上回るものであった。現在、実験により動特性を解析している。

気体軸受の考えは現在では軸受本来としてだけでなく、磁気ヘッドの作動安定性などの問題とも深く関係し、今後ますます重要になるものと予想される。