

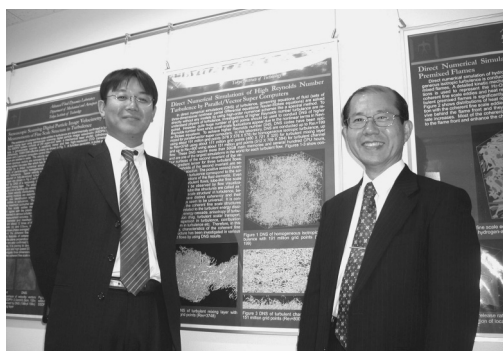


In Laboratory Now

研究室訪問 4

流れを知り、流れを操る

宮内・店橋 研究室～機械宇宙システム専攻



店橋 護 助教授

宮内 敏雄 教授

読者の皆さんの中に墨流しをしたことがある人はいるだろうか。水面に墨を垂らしかきまぜると不思議な模様が顕れる。複雑に揺らめくこれらの流れを乱流と呼ぶ。流れるものを扱う流体力学の世界において乱流の振る舞いは長い間の大きな謎だった。しかし最近の技術の進歩はこの乱流の研究に大きな飛躍をもたらした。

今回御紹介する宮内・店橋研究室では謎の多い乱流の正体をコンピューターやレーザーといった最新技術を用いて明らかにし、乱流のより細かく正確な制御を可能にすることを目指している。



流体、形無きもの

気体や液体は定まった形を持たない流体である。これらの運動を扱う流体力学とは、中学、高校で私たちが習ってきたニュートン力学の延長線上にある学問なのだが、比較的歴史が浅く、研究が始まってからまだ180年ほどしか経っていない。なぜか、それには理由が二つある。

一つは空気や水といった流体は透明で目に見えずその動きを把握しにくかったからだ。1883年に英国の科学者レイノルズが染料を用いて流れを可視化するアイデアを発売して流れを観察し、流体の運動を大きく二つに分けたことから流体のより詳しい研究が始まった。レイノルズはこの実験の中で流れには一様で滑らかな流れである層流と時間的にも空間的にも乱れた流れである乱流の二つがあることを発見した。レイノルズ数と呼ばれる流体の慣性力と粘性力の比が大きいほど(流体がさらさらで粘性の影響が小さいほど)その流れは複雑な乱流になったのだ。

そして流体の研究があまり進まなかったもう一つの理由がこの乱流のためなのである。乱流とは、文字通り向きも速さもその変化さえも時間とともに複雑に変わっていく乱れた流れである。レ

イノルズ数の大きな流れは乱流となり、私たちの周りの風や水の流れもその多くは乱流である。その運動は海流や大気の循環といった極めて大きな領域から私たちの息や血流のような小さな領域にまで及び、時間とともに逐次変化するため乱流の研究が始まって以来120年経った現在でもはっきりした乱流の構造はわかっていなかった。

しかし目に見えないところで乱流は深く私たちの生活に関わっている。乱流には抵抗を大きくしたり、エネルギーや物質を攪拌、混合し運搬していく作用がある。その影響は広範囲に及び、風や水の抵抗を受ける乗り物の設計や、毎日の天気予報、建物の空調設備や上下水道の処理など例を考えると枚挙に暇がない。さらには今、大きな課題になっている環境やエネルギーの問題においても、温暖化のプロセスやその影響、少ない燃料を有効活用する高効率エンジンの開発、バイオマスなどの新エネルギー源の確保等、ありとあらゆる場所で乱流に関する詳しい知識が必要となる。

そこで宮内・店橋研究室では、この複雑で不思議な乱流の本当の姿を確かめ、応用への道を拓こうと研究を進めている。



コンピューターで探る乱流構造

流体の運動を支配している運動方程式、これはニュートン力学から導かれる。一つは運動量保存則から、もう一つは質量保存則からである。もっとも流体においては剛体の力学とは異なり、質点を追跡することが困難なので、ある特定の空間領域に対してそこを出入りする流れから運動を考える。こうして得られた式はそれぞれ、ナビエ・ストークスの式、連続の式と呼ばれている。

複雑な流れが組み合わさった乱流もこれらの数式を解くことで導くことが出来るはずなのだが、このナビエ・ストークスの式は数学的には非線形分散系と呼ばれる形の式で厳密には解を求めることが出来ないのだ。流れの持つ勢い(非線形性)のためにこの方程式の解析は著しく難しいものになり、流体は特異な振る舞いをする。さらに熱力学のような統計学的な手法も通用しないのだ。

そのため天気予報のような流体の運動を予測するシミュレーションでは数百m～数kmごとに格子点を取り、その格子点までについてはナビエ・ストークスの式を解くが、点と点の間の空間では適当な乱流モデルを適用することによって解の近似値を求め、その答えを得ている。しかし、宮内・店橋研究室は安易なモデルに逃げることを良しとせず、乱流の真の姿にこだわっていた。

流体の運動も最後には熱に変わる。ナビエ・ストークスの式では厳密解は得られないが、運動エネルギーが熱エネルギーに変わり流れが流れでなくなるところまで計算すれば、流体としての運動

は限りなく正確に知ることが出来るはずだ。つまり流体のシミュレーションをする際にとる格子点の間隔をコルモゴロフスケール(※注)以下まで狭めてやるのだ。そうすればモデルを導入する必要がなくなり計算で流体の運動を完璧に求められる。こうして今までにない精密なシミュレーション、流体の直接数値計算(DNS)を試みたのだ。

だが言うは易く行うは難しである。このDNSをするにあたって宮内・店橋研究室は約十億個もの格子点を想定し、その一つ一つについて流体の運動方程式を解かねばならなかった。この計算には250GBのメモリーと数百個のCPUを持つ数千Gフロップスの計算速度を誇るスーパーコンピューターが用いられたが、それでもその計算におよそ一年を費やすという世界で最も大きな乱流のDNSであった。そうして得られた結果が図1である。

このDNS結果を分析しているうちに宮内・店橋研究室は新しい発見をした。なんと何の規則も無く混沌とした流れでしかないと考えられていた乱流の中に、ある普遍的な共通の微細構造が存在することを突き止めたのである。コヒーレント微細構造(図1)と名づけられたそれは細長い渦巻き状の流れで、その直径の最頻値はコルモゴロフスケールの8倍程度。そして渦の最頻最大周方向速度はコルモゴロフ速度の約1.2倍である。この小さな渦が乱流中には無数に存在し複雑な流れを構成して乱流の間欠性やエネルギー散逸率といった流体の性質を左右していたのだ。



図1 DNS結果(左)とコヒーレント微細構造(右)

※注 流体の大きさが小さくなっていても粘性力は変わらないが、慣性力はどんどん小さくなる。やがて流れが粘性に捕まり殺されてしまう微小領域にたどり着く。この大きさのことをコルモゴロフスケールという。



乱流を見るレーザーの眼

乱流のDNSによって、宮内・店橋研究室は乱流の中にコヒーレント微細構造という乱流の普遍的な構造を発見したが、実際の乱流の中ではどうなっているのかを確かめなくてはならなかった。しかしこれがまた難題であった。コヒーレント微細構造はその名のとおり微細な構造である。さらに乱流は刻一刻とその動きを変え、一瞬たりとも同じ姿で留まることはない。近年のレーザー測定技術の発達によって、乱流の動きも測定出来るようにはなっている。しかし、それらの測定器は測定周期がせいぜい30Hz、しかも平面上の動きを追うので精一杯で、とてもコヒーレント微細構造を捉えられるようなものではなかった。そこで、宮内・店橋研究室はコヒーレント微細構造の存在を証明しその振る舞いを観察するべく、新しいレーザー測定器の開発と乱流の測定に取り組んだのだ。

そうして開発されたレーザー測定装置が右上の**写真**である。流体に観測粒子を混ぜレーザーを当てて散乱した光からその動きを測定するこの装置は測定周期27.3kHzで同時に三次元方向の動きを測ることが出来る。この測定装置によって測定された流体の運動が次の**図2**である。矢印の向き、長さが流れの方向、速さを示している。これを見てもらうとわかると思うが観測面の中に渦状の流れが見えるだろう。これがコヒーレント微細構造の断面なのだ。

こうした乱流の微細構造が判明したことで、より高度な流体の制御が可能になってくる。その一例が流体の抵抗低減だ。宮内・店橋研究室では乱流の微細構造を理解したうえで流れの構造に対して効果的に界面活性剤、高分子、マイクロファイバーなどを混ぜることで5割程度、巧い組み合わせならば最大8割もその抵抗を削減出来る事を実験によって確かめた。

さらに騒音の低減や、より精度の高い流体のシミュレーションのためのモデル作りへの応用など、コヒーレント微細構造の解明は乱流についての理解を深め、流体を扱う様々な分野に対して今まで存在した限界を越えるための大きな足がかりとなっている。

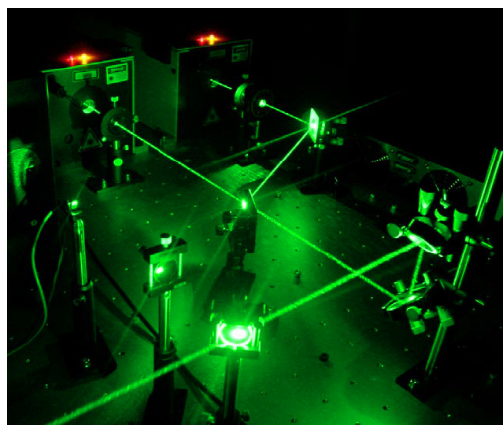
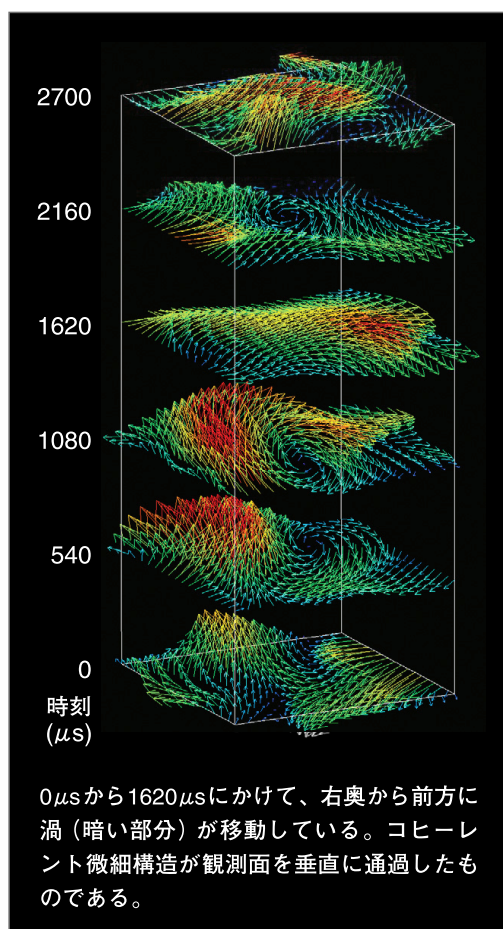


写真 レーザー測定器



0 μ sから1620 μ sにかけて、右奥から前方に渦（暗い部分）が移動している。コヒーレント微細構造が観測面を垂直に通過したものである。

図2 レーザー測定で捉えた乱流の姿



乱流を制するものは炎を制す

乱流の構造が解明されることがどのように私たちの生活に関わってくるのか、ここではその具体的な例を見てみよう。

炎、それは私たちの最も身近にある乱流の一つである。料理をしたり、風呂を沸かししたりするのに私たちは火を使う。それ以外にも動力源としてエンジンやガスタービンなどで火を利用しているにもかかわらずものが燃える詳しい様子は知られていない。そのため燃焼器やエンジンは経験に頼った改良が進められてきたが、宮内・店橋研究室では、優れたコンピューターシミュレーション、レーザー測定技術を生かし、未知のバールに包まれていた炎の構造を世界で初めて明らかにした。

右の図3は水素と空気の燃焼のDNSの結果である。水素と空気の燃焼といっても単純に二個の H_2 と一個の O_2 から二個の H_2O が出来るわけではない。実際の化学反応はより複雑であり十二種類の化学種と27の素反応が組み合わせられ、酸化によってエネルギーが放出された部分(炎)では、1500Kもの温度差が起きる。流体の運動方程式とあわせて、燃焼の化学反応式、気体の状態方程式を同時に解くという膨大な計算をすることによってこの結果は得られるのだ。ここでも乱流の中に無数のコヒーレント微細構造が見られる。気体の混合や運搬などの作用によって火炎構造が乱流運動の影響を受け、燃焼面に対して垂直なコヒーレント微細構造によって火炎面が盛り上がるスパイク構造、燃焼面に対して平行なコヒーレント微細構造が太陽のプロミネンスのように浮き上がるハンドグリップ構造などの変化していることがわかる。図の明るい部分が燃焼面で酸化反応が起きている場所である。燃焼速度は燃焼面の面積にほぼ比例していて、乱流が複雑になり燃焼面が増えるほど燃焼のスピードは速くなっていく。

こうした燃焼の原理を詳細に知ることによって、経験に頼らずとも理詰めでもより高効率、低騒

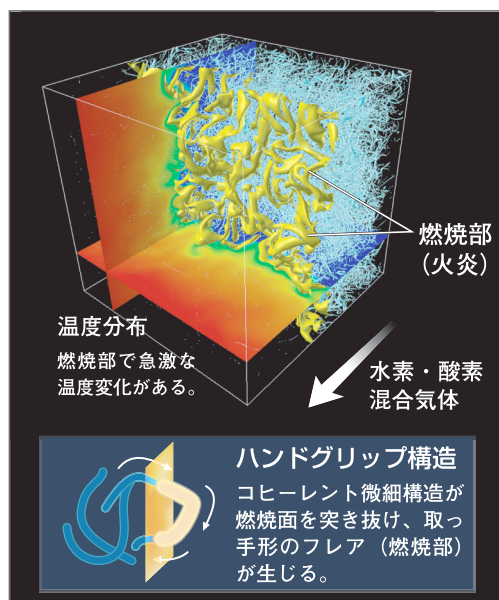


図3 火炎のDNS結果

音、低環境負荷な燃焼器やエンジンの開発をすることが可能になるのだ。いまだ化石燃料に変わるエネルギー源が確保されていない現在、燃焼の分析そして正確な燃焼モデルの構築は限りある化石燃料の有効活用のためにも欠かせない重要な研究である。ここでは燃焼という現象に着目したが、他にも乱流は多くの事柄の根幹となる部分に関わり、その応用範囲はきわめて広いのだ。

レイノルズが乱流を発見した実験から120年、ようやく乱流に対する理解が深まってきた。宮内・店橋研究室はコンピューターやレーザーという最先端の技術で、人にとって最も身近で、最も謎に満ちた領域であった「流れ」の世界に飛び込んでいる。流れを知り、流れを操る。言葉にすればたったそれだけのこともかもしれない。しかしそれはこの世界の深遠に眠る定律を呼び覚ますことなのだ。

あのボーアをして量子論より難しいと言わしめた乱流の世界。この記事を書くにあたって宮内・店橋両先生には大変お世話になりました。

この場を借りて御礼申し上げますとともに、研究室の更なる御発展をお祈りしています。どうもありがとうございました。(鐘ヶ江 俊輔)