

III

乱流および乱流拡散

乱流との戦い：流体力学は本書の付図（流体力学の発展）に示すように、ある意味では古い歴史をもつ学問である。しかし、その流れがある程度太くなり「流体力学」という体系が形造られてくるのは、19世紀に入ってからであり、それがさらに太い滔々たる流れになるのは20世紀に入ってからである。流体力学は、18世紀のオイラーや19世紀前半にかけてのラプラス、ラグランジュ、コーシーらの活躍した時代には、完全流体を対象とした（応用）数学的色彩の強い学問であった。しかし、19世紀も半ばになり産業革命が成長期に入るにつれて、社会からのさまざまな要請に刺激されて流れの研究が発展し、また逆に流体力学の原理を踏まえて流れに関する問題が解決されるようになってくる。たとえば、水力機械・蒸気機関・船舶等の機械類の設計・製作、上下水道等の都市施設・河川や港湾・運河の整備、さらには天気・海況など自然現象の予報など。このような流体力学における理論と実際問題との間の相補的關係は、20世紀に入っても間もなく始まる航空機の発達史の上にも明瞭に見ることができる。そしてこれらの実際上の問題の解決が要請される流れは、ほとんどの場合「乱流」である。したがって、近代・現代における流体力学の歴史は、もちろん超音速流、電磁流体、回転密度流体などの新しい問題が次々と出現したけれども、極言すれば乱流研究の歴史であり、乱流との戦いの歴史でもあった。多くの学問の展開がそうであるように、乱流研究の発展も不連続的であった。

乱流研究の歴史の扉は19世紀中頃以後のハーゲンやレイノルズによる“乱流の発見”によって開かれた。その後、プラントルの混合距離理論の提出とプラントル・カルマンの管路や平板上の流れの対数分布則やそれより導かれる抵抗の一般法則の確立あるいは噴流・後流の平均流速分布に関する理論の提出に見られる現象論の時代が続く。

力学の世界のパラダイムの考え方は、複雑な現象をまず単純な理想的な要素に分解しそれを解明したのち、その原理に基づいてさまざまな実際の現象を予測するということである。1935年イギリスのテイラーが“等方均一性乱流”の統計理論を引提げて華々しく登場し、乱流研究の新しい方向を指し示したときには、この理論こそ乱流問題を最終的に解決するものと、多くの人々が期待したのであろう。しかし、乱流統計理論もいたずらに数学的困難さの深みに嵌り込んで行った。古典的流体力学の集大成として1932年“Hydrodynamics”第6版（最終版）を完成したとき、老齢に達したラム（イギリス）が、“（ハイゼンベルク（行列力学、1925年）やシュレージンガー（波動方程式、1926年）らの若い物理学者によって誕生し、隆盛期を迎えつつあった）量子電気力学の将来に関しては自分は楽観的である。しかし、乱流の研究については悲観的だ”と述べたのは、1935年テイラーによる乱流統計理論提出の直前のことであつた。その後の流体力学のたどった跡を見ると、ラムはまさに正しく将来を見透していたように思う。

このような一種の行き詰まり状態に風穴を開けるように、しかも第二次世界大戦の最中（1941）に、本来は流体力学者ではなく近代確率論の創始者であつたソ連（現ロシア）のコルモゴルフが、全く違ったアイデアによって乱れに関する“局所等方性の理論”を打ち立てた。その後、コルモゴルフの考え方を発展させてモーニンとオブコフらソ連の気象学者の相似理論による大気乱流の研究（熱の影響を考慮した乱流の研究）が花開く。しかし、やがて1960年代後半までは低成長ないし休息の時代が続く。

こうした行き詰まりを打開したのが、アメリカのクライン達（1959, 1967）の苦節十年に及ぶ「乱流のバースティング」現象の研究であつた。このとき以来、つまり1960年代後半から乱流の秩序構造あるいは組織的構造に関する研究は爆発的流行となつた。これには、エレクトロニクスの進歩による新しい計測・記録およびデータ解析機器の開発、多くの実験データ解析手法の創出、さらには高性能のコンピューターによるそれらのデータの統計処理および乱流の数値シミュレーションの発達が不可欠であつた。これらの要因が相俟って、現在は乱流の真の姿をかなりの程度つかむことができるようになったと思われる。今後は、乱流諸過程の力学的数学的解析理論の発展が期待されるところである。

乱流の功罪：「乱」は「平安」「安定」の対立語であり、語義の上からして好ましくない感じを与える。事実、流れが乱流状態になると管路や壁面に沿う流れの

抵抗は著しく増加する。それゆえ、自動車、船舶、航空機のスピードや水道パイプ、石油輸送管における損失は抵抗との戦いである。加齢によって弾性を失った血管内の血流は抵抗の増加により高血圧をもたらす。また、乱流は砂塵、黄砂を運び、砂漠を拡大する。

しかし、実のところ乱流のおかげも大きい。いや乱流なしには地球上の動植物は生存できない。というのは我々が呼吸ができるのも、植物が大気中の二酸化炭素を取り込んで光合成を行い酸素の排出を効果的に行えるのも、周囲の大気の乱れが排出気体をいち早く拡散するためである。こう考えると、生命の誕生すら天地創造時の激しい攪拌作用によるものであり、乱流のおかげを被っているのではないだろうかと思えてくる。巨大なジャンボ・ジェット機の強力な推力も燃焼効率の高い乱流火炎燃焼技術によるものである。大気中への自動車や工場からの排ガスが一ヵ所に濃く留まらないのも、大気の大きな拡散能によるものである。しかし、かつては自然の大きな乱流拡散能に依存すればことたりたのであるが、人間の環境への廃ガス・廃水の放出は自然の能力を越えるようにさえなってきた。

地球環境と乱流：最近に至って、CO₂ ガスおよびその他の温暖化ガス増加による地球温暖化、それによる海面上昇と対策、陸地の乾燥化の進行と植物・穀物の減産、あるいは火山灰や原子力発電所事故による死の灰の地球規模の拡散による影響、石油タンカー事故や戦争によるオイル・スピル（海洋の石油汚染）、あるいは膨張する都市によるヒートアイランド現象の深刻化など地球環境の問題が急速にクローズアップされてきた。これらの問題は単に物理、化学、生物、生態学といった科学的方法による解決努力だけでは不十分で、計画・経済そして政治・外交といったさまざまな方向からのアプローチが必要である。しかし、現象の解明という点において、たとえば、大気や湖沼・河川あるいは海洋における物質の輸送・拡散状況の把握と予測、GCM (general circulation model) による全球的環境変化の予測などにおいて流体力学の知識は不可欠である。なかんずく乱流の研究はその基礎をなすものであり、期待されることは大きい。