
流体力学

日野幹雄 著

朝倉書店

Introduction to Fluid Mechanics

新版にあたって

人生における偶然ということを思う。この本の執筆がそうであった。そしてもしこの本を書かなかったなら、流体力学についての私の考え方は私の研究生活の方向が今と同じであったかどうかとさえ思われる。当時（昭和40年代の前半の頃）は東工大は一学部で教官数も少なく、教授会は結構実のあるものであった。ある日、教授会が終わってから、機械工学科の谷口修先生が近づいて来て「流体力学の本を書きませんか？」といわれた。「機械工学科には有名教授がたくさんおられるではありませんか」と私が答えると、谷口先生は「某教授も某某教授も最近すでに本を書いてしまった」とおっしゃる。数日考えて、力不足とは思ったけれどもお引き受けをした。

改訂について

というわけで、この本の初版が刊行されたのは私が40歳になったばかり、したがって執筆は30代後半のことで、しかも大学に職を得てから5年と経っていなかった。このときは、細部の式などはもちろん後で参考書に当たって正確さを期したものの、大筋はあまり他の本を覧ることもなく割に気楽にしかも短時日のうちに書いた記憶がある。にもかかわらず、今回改訂版を出すに当たって改めて読み返してみると、自分ながら良く書いたものだと思う。

とはいうものの、講義で（私の場合2年生後期のちに前期に変更）長い間使っているうちに、あちこちの頁に書き込みやメモの付箋が付されて、そろそろ手を入れなければと思ってからだいぶ時間が経ってしまった。最近になってこの書き込みや書き溜めておいたノート類の整理・清書を始めたが、なかなかまとまった時間がとれず、この点でも以前は良くやったなと思い返している。

改訂の程度をどうするかは大きな問題であった。流体力学はその先端的な部分（特に乱流の大規模構造、成層あるいは回転流体とか非線型波動）や応用面での進歩は著しいが、本書で扱っている初歩的基礎の範囲では大枠の変更は必要がな

いであろう。朝倉書店の担当者にも大幅な改訂は初期の熱情を損ないかねないという負の面もあることを話しておいた。こういうわけで小幅な改訂に止めようか、大幅な改訂にしようか方針を立てるのにだいぶ迷った。

結局、全体的な考え方や構成は変えなかったし難しい数学を持ち込まないという方針も引き継いだが、所によって流れのメカニズムについてやや突っ込んだ考察や検討を加えた所がある。たとえば、粘性の作用についての節などである。これは、普通ならば流速分布とか摩擦抵抗とか具体的な結果を導き、その特徴を知ることによって十分と考えられるが、そうした個々の流れの具体的な結果をもたらす流体に共通の作用というかメカニズムにまで踏み入ってみることの重要性を示したかったからである。

最後から二つ目の章である第21章「乱流の組織構造」はなかなか書けなかった。原稿を渡すときも、他のすべての章の初校ゲラができ上がったときでも書けなかった。「知らないから」ではなく、矛盾するようであるが「良く知っているから気が重く、教科書・入門書としては書けなかった」のである。

親しみやすく読みやすいという点から二つの新しい試みもした。それは流れの美しさの理解の一端にと思い「流れの世界」の章を最初に設けたこと、流体力学についての関心を高めるために、また理論の誕生の背景を知って理解を深めるために「流体力学を創った人々」のエピソードを付したことである。「流れの世界」には、狭い実験室での写真のみならず、日常町角で見かける風物や、宇宙からの眼の写真もおめに掛けたのは流体力学と社会との関連の深さをも知って欲しかったからである。

なぜ流体力学を学ぶのか

われわれは、なぜ、何の為に流体力学を学ぶのであろうか。

実のところ、たとえ大学で流体力学を学んだとしても、その内の何人が流体力学に直接的に関係する職業に就くであらうか。その率は必ずしも高くはないかもしれない。(このことは何も流体力学だけに限らずに問われることであらう。)とすれば、最初に挙げた疑問に対する解答を良く考えてみる必要がある。

その答は人によりさまざまであらうが、私は次のように考える。

流体力学を学ぶ目的は、実際問題への応用や設計ないしは計算にのみあるのではない。また、単なる学問的な興味から特別な目的なしに問題を解いているわけ

ではない。理論にのる単純な条件のもとでの解，したがってそのままでは現実に起こりそうもない問題の解を求めるのは，それから流れの本質を探り出し，理解しようとするからである。

したがって、「問題が与えられ，解の式が求まるとそれで終わり」というものではない。むしろ重要なのはその後である。解の図表を作成し式の具体的な様子をつかむことも大切であるが，それにも増して，解の式の意味する内容を理解することが重要である。流体力学を学んだり教えたりする目的を分析すれば，次のようになるだろう。

- (1) 基礎方程式を解いて，解析解を導く（数学的興味，解析力の鍛錬）
- (2) 解の結果の式を明示し，解の図示を通して，流れの特徴を理解する（流れ現象の理解）
- (3) 流れの本質・メカニズムを議論する（論理的考察力の鍛錬）
- (4) 実際問題への応用
- (5) 流れの真と美への共感

これらの点について，少々述べてみたい。

(1) 少数の基礎法則から順序立てて論理をすすめ，さまざまな流れの現象を表す理論体系を構築する思考法と解析法を修得すること，つまり，論理的な思考力と解析力を鍛錬することは，流体力学を学ぶ目的の一つである。このことを，球のまわりの流れおよび抵抗の問題を例にとれば，(1)は基礎方程式から解析解を導くことである。これは，学部程度の学力では少々難しいし，理解するのに時間を要する。また，逆に数学好きの学生には数学の応用（偏微分方程式の解法）を学ぶには手頃な問題であろう。

この過程である場合には高度の数学手法を駆使して解が求められる場合があったり，あるいはプラントルの境界層理論や乱流の流速変動に関するコルモゴロフの局所等方性理論のように，ゴリ押しの数学の適用ではなく，現象の本質を見きわめることから新しい解法が発見される場合もあることを知るであろう。

(2) 次に，こうして導かれた理論式に具体的に数値を当てはめて図示し，現象の具体的特徴を知ることが第2の目的である。これは現象を実感するという意味で重要である。たとえば，クエット-ポアズイユ流れでは「流れは圧力勾配と壁面の運動により起こされ，流れは前者の作用による放物線型の流速分布と，後者による直線型の流速分布の和であり」，「圧力勾配が壁面による流れと逆方向に

流れを起こす方向に働くときは、流速分布に逆流部分が生じうる」ことなどを理解することである。また、渦がどんな形をしているのか、境界層の発達はどうなるのか、開水路や管路の流速分布や抵抗損失はどうなるのか等々である。これはさまざまな問題の解を求めるのにも応用される。

また、ストークス解の流線は流れの上下流で対称であるが、オセーン解ではこれが非対称で後流域が見られることなど流れの特性を理解することが重要であり、流体力学学習の目的としてはゆるがせにできないと思う。

(3) 多くのテキストは以上の点で終わっている。しかし、こうした現象の特徴やそれをもたらすメカニズム(メカニズム)を、式を用いずに普通の言葉でいい表すことが必要である。これができて初めて現象を理解したといえる。流れは慣性力と粘性力と圧力のつりあいとして成り立つこと、クエット-ポアズイユ流れの解から流れを生じさせる駆動力は圧力差が流体を押す力と壁面の剪断力であると知ること、波がポテンシャル流として表されるのは流向の変化に応じて底面から発生する正負の渦が互いに消し合うためであること、圧力は回転運動(渦あり流れ)を生じさせえないこと、粘性は渦度を熱のように伝達させる性質をもつこと、粘性はエネルギーの消耗による乱れの減衰作用のみではなく、流れにエネルギーを供給し流れを不安定化する作用も持つこと等を読み取ることである。

また、球のまわりの遅い粘性流については、しからばなぜストークス解とオセーン解でこのような違いが生じるのかの議論を通して、基礎方程式(N-S方程式)の各項の意味と役割を理解することである。こうしたことはなかなか大変なことで、現象に対する深い考察、読み取り力が必要である。また、その説明を聞き、流れのメカニズムを理解するとき、流体力学という学問のすばらしさに感動するのである。

(4) また、実際に生じる実用的な問題に対して、理論結果を応用して合理的な解答を与えること、つまり設計への応用は流体力学の本来の重要な目的である。

(5) 最後に、流れの美しさ(美術的意味での美しさはもちろんであるが、それとともに自然の摂理の美しさ)と不思議さを理解し、自然を愛する心情を育てることである。

従来、工学系の学科ではややもすれば、(4)の実用・設計目的が強調される傾向があったし、学生の側にも演習時間などでそれを望む空気が強い。しかし、

(4) の立場は決して看過しえないにしても初めに挙げた観点からすれば、ここにあまり力点を置くことはできない。

一方、数学の得意な学生は(1)の観点から流体力学を理解しようとする。たしかに流体力学には応用数学的な一面があるけれども、数学のみですべての流体の問題が解決するわけではなく、むしろ現象の本質を見透す透徹した心の目こそ必要である。数学が必ずしも得手ではないように見えるのに、素晴らしい研究業績を挙げた研究者を幾人も見出すことができる。

大抵の場合は(1)と(2)そして(4)の段階で終わりである。しかし、流体力学では、(3)のなぜこんなことが起こるのかを説明しえて初めて問題を理解したといえる。

今この本の初版を読み返してみるとやさしく読みやすく書かれてはいるが、「なぜか」「どう解釈すれば良いのか」の精神が貫かれていると思う。流体力学におけるこういう考え方が私を魅了したのである。しいていえば、大学4年生のときに流体力学を教えてくださった内田茂男先生の講義と今井功先生の著書(岩波全書、当時は「流体力学(前編)(裳華房)」は未刊行)に導かれたものであろう。

我が国にはあまたの流体力学の教科書があり、それぞれの著者は渾身の努力で執筆されていることであろう。ここに新たに本書を問うのは、流体力学にはいろいろな考え方や見方があると思うからである。したがって、世の中にはいろいろな流体力学の本があるであろう。「役に立つ流体力学」「難しい(難解な)流体力学」「楽しい流体力学」「つまらない流体力学」など。

もし、この本にニックネームを付けるとしたら、私は「やさしい考える流体力学」が良いのではないかと思う。初版(旧版)のそれは「やさしい流体力学」であろうか。口絵に載せた多くの写真や画もやはり「考える」ための素材である。また、そのためには記述の多少の重複は厭わないことにした。

この本を教科書に用いる場合の講義進行の目安の一例を次に述べよう。東京工業大学・土木工学科では、第2年次の学生の前学期(夏学期)にこの本を用いて基礎流体力学の講義を行っている。一応、完全流体と粘性流体の平行流、球のまわりの流れ、境界層と乱流の流速分布まで講義をしている。(各章の内容を逐一教える必要はなく、むしろ必要に応じて飛ばすのがよいであろう。)しかし、特に第2年次前期の学生は数学(手法)の学習の進捗度も浅く、さらに流体力学的

思考に不慣れなこともあって、実のところかなり苦しい。(以前は第2年次後期で教えていたが、これならばあまり問題はない。)それゆえ、新しく出てくる解析のための数学については、「もともと数学は、数学者が作って科学者や技術者がこれを利用するというよりも、彼らが新しい実際の問題を解くのに四苦八苦して考え出したものも多いのだから、流体力学の時間に新しい数学をおぼえるように」といって講義をすすめている。

謝 辞

今回も多くの方々の協力と助力を受けた。著作や論文を参考にさせていただいた方々、「流れの世界」の写真や図版の引用を許可し、あるいは提供された方々である。(なお、引用時の氏名の敬称は省略させていただいた。)また、流体力学の巨人達のプロフィールを付したが、こうしたエピソードを綴ったものは出典を示せといわれても、あっちこっちからいろいろな折りに溜め込んだ話であるから今さら無理である。そのためこの小伝の一部については、その人達を間接的にもより詳しく知っておられる方々に原稿や初校ゲラを送って読んでいただき、内容の正確さを期した。ここにこれらの方々に厚く感謝したい。

本書には、東工大・水工学研究室の教授・助教授も含むメンバー一同による長年の輪講とディスカッションの成果も多く取り入れられている。さらに、演習や勉強のためと称して結果的には図版の作成を手伝わされたそのときどきの助手や学生の諸君にも謝意を表する。とほいうものの、もし本書に誤りや誤解があれば、これは著者の責任である。

朝倉書店編集部の方々の支持と編集の努力にも深く感謝したい。

もし、本書がいささかの評価を受けることがあるとすれば、この方々の支持と協力のおかげである。

本の序文というものはあまり読まれないようだ。しかし、私はかなりの重点を置いて、執筆中に考えたことや思い付いたことを初版の序文に書いた。それゆえ、初版の序文を次に再録する。

1992年11月

日野 幹雄

序

流体力学はその生い立ちからすれば、古い学問である。しかし、流体力学の方法や考え方や対象は時代とともに次々と拡がって行き、現在では理学と工学のほとんどすべての分野の基礎学問の一つとなっている。現在問題とされている重大問題（例えば、公害・環境・異常気象・海洋開発・宇宙開発・医学・生命科学等々）のどれをとりあげても直接間接流体力学と無縁のものはないといえる。

現在多くの大学では、流体力学はそれぞれの分野の流体関係の応用的科目の学習をおえたのち、最終学年で履修するようになってきているようである。著者の勤務する大学の土木工学科では、数年前から流体力学を専門教育の最初の学年（2年生）に行うようにした。この試行は多少の冒険でもあったが、これまでのところ成功であったと評価されている。4年時に卒論につくとき、あるいは大学院にすすむときに、流体力学の講義はおもしろかったといわれるのは教師冥利というものであろう。

入門書を書く場合、あらゆることをやさしく書くというのも一つの行き方であるが、本書では高度な学習への第一ステップということを重視し、流体力学は二、三の基本法則より導かれる論理体系であるとの立場より基本的な理論をやさしくかつ十分に説明するという態度を方針とした。従って、本書の全体を通じて系に組み入れられていない事項は省略した。

完全流体の力学は、古典的な流体力学の本では頁数の大部分をこれにあてているのに反し、最近の殊に工学関係の学生を対象として書かれた教科書では、完全流体の力学をほんの簡単な取扱いに止めているものもある。それは完全流体の力学が応用数学的色彩が強くなりがちな反面、波とか翼の理論を除けばそのまま実用に結びつかないためであろう。しかし、本書では完全流体の力学もかなり重視して取り扱った。それは、“闇があるから光がある”といった哲人の考えのように、実在の粘性流体の力学をより深く理解するためには粘性のない流体の挙動の理解が必要であると考えたからであり、また完全流体の力学における渦は粘性の

作用を抽象したものとして解釈しうるから、完全流体は非現実的仮想流体ではなく、むしろ実在流体の力学の最も単純化されたモデルと考えたからである。

粘性流体の力学に関する第2章、第3章では、遅い流れと層流境界層および乱流境界層の三つの流れの領域を取り扱った。境界層理論こそは Prandtl による今世紀の近代流体力学の成立の金字塔である。すなわち、式を種々の数学手法を駆使してやみくもに解くのではなく、基本式の表わす物理的意味の解釈をもとにした解法の展開がここに始まる。読者は単に境界層理論の数学的手法を修得するだけではなく、境界層の概念に達するまでの現象への深い洞察と基礎方程式の物理的解釈の方法とを理解して欲しい。

層流から乱流への遷移のメカニズムや乱流の微細構造等のすすんだ議論については第2章、第3章の現象論的取扱いと切り離し、章をあらためて第4章として述べた。また、最近環境問題と関連して重要性を増して来た乱流拡散は、これまでの流体力学の教科書ではほとんど取りあげられていないが、本書では数式的取扱い以前の現象の理解に重点をおいて、相当に突込んで述べた。それゆえ、第4章の後半（乱流拡散）だけ切り離して読んでも乱流拡散について充分の理解が可能であろう。

さて、しばしば流体力学は応用数学であるかのような誤解を与えている。たしかに、流体力学においては数学が有力な武器であるが、このことが流体力学への親しみをさまたげているむきさえある。しかし、それと同等に、むしろそれ以上に流れの観測と実験とは流体力学にはかかせない方法である。私は数学ずきの学生には数学だけでは流体力学はわからないとよくいう。一方、数学の不得手な学生には数学ができないからといって、流体力学がわからないものではないといっけかせている。

本書では、数式を用いるにせよ、あるいは式を使わないにせよ、一つの現象を深く理解しうるよう心がけた。その結果、例えば、Navier-Stokes の方程式の導入では、厳密な式の展開はより高度の参考書にゆずり、単純な場合の模式的拡張ということで説明を工夫した。こうすることにより、式のもつ意味をつかんで欲しいと願ったからである。また、二次元噴流や後流について述べてあるが、軸対称の場合については省略したし、境界層の剝離についてもその原理のみ述べた。ブルームの蛇行のような複雑な問題では、定式化する以前の現象の理解に重点をおいて解説した。

さらに高度の学習を志す諸君のために、巻末に参考書を多数挙げておいた。それぞれ皆秀れた著者によるものであるから、どの書を読むかは、読者の自主性にまっつことにする。読者諸君の学習度や興味、また各著書との相性を考えて決めるべきであろう。

流体力学への興味を高めるには、格式ばった教科書、参考書以外に、身近かの具体的問題を対象として書かれた啓蒙書を読むことをお推めしたい。著者の書架にあるものからいくつか書き出してこれを参考書欄の最後に付け加えた。

本書を執筆するにあたり、非常に多くの内外の書を参考にさせていただいた。なかんずく、流体力学の考え方については今井功博士（東京大学教授）の書より教えられることが多かった。ここに深く感謝の意を表したい。

本書では多くの図や写真を用いて読者の理解を助けるよう心がけた。著者の工夫したものその他内外の良書からこれを補った。図版の引用を許可して下さった S. Corrsin 教授（米、ジョンズホプキンス大学）、J. W. Daily 教授（米、ミシガン大学）、合田良実博士（運輸省港湾技術研究所）、D. R. F. Harleman 教授（米、MIT）、A. T. Ippen 教授（米、MIT）、岸 力教授（北海道大学）、H. Schlichting 教授（独、ブラウンシュバイク大学）、H. Tennekes 教授（米、ペンシルバニア大学）および出版社の Addison-Wesley Publishing Co. Inc., Cambridge University Press, McGraw-Hill Book Co. Inc., The MIT Press, Springer-Verlag, 彰国社に厚く感謝したい。

また、これまで著者の流体力学の考え方の形成に強い影響を与えられた谷一郎博士（東京大学名誉教授）、著者を流体力学の世界へ導き入れられた本間仁博士（東京大学名誉教授）、本書の執筆をすすめて下さった谷口修博士（東京工業大学名誉教授）、常に御指導をいただいている吉川秀夫教授をはじめとする東京工業大学水工学研究室の諸氏、また、綿密な参考文献調べに協力してくれた沢本正樹君（東工大助手）、細部に注意して校正作業に協力してくれた池田駿介君（東工大助手）、筆の遅い著者をしんぼう強くはげまし編集の労をとられた朝倉書店の各位に深じんの謝意を表したい。

昭和49年1月

著者しるす

目 次

はじめに	1
流れの世界	4

I 完全流体の力学

1. 基礎方程式と基礎原理	28
1.1 基礎方程式	28
a. 流れの記述法	28
b. 流れを記述する未知変数は何か	29
1.2 実質微分・実質加速度	30
1.3 オイラーの運動方程式	33
1.4 オイラーの連続の方程式	36
1.5 流体運動における変位と変形	38
a. 流体における変形と応力	38
b. 運動の基本要素	39
c. 変位・変形運動の基本要素による表示	41
d. 渦度のベクトル表示	43
e. 渦なし流れと速度ポテンシャル	44
1.6 過度と渦	45
a. 渦とうず巻き	45
b. ランキン渦モデル	46
c. “うず”に見えない渦	48
1.7 循環と渦度	48
a. 循環の定義	48
b. 循環と渦度	49
c. クッター-ジュ-コフスキーの定理	50

1.8	渦度方程式	53
2.	ベルヌーイの定理および運動量保存則とその応用	57
2.1	ベルヌーイの定理	57
a.	運動方程式の積分によるベルヌーイの定理の導入	59
b.	圧力方程式——ベルヌーイの定理Ⅱ——	62
c.	二つのベルヌーイの定理の比較と注意	63
2.2	ベルヌーイの定理の応用	66
a.	トリチュリーの定理	66
b.	ピトー管	67
c.	ベンチュリー管	68
d.	管のくびれ部の圧力	69
2.3	運動量保存則	70
a.	流体における運動量保存則	70
b.	運動量方程式の一般的な導き方	71
c.	運動量束とフロー・フォース	72
2.4	運動量保存則の応用	73
a.	平板に衝突する噴流	73
b.	曲管部に働く力	74
c.	管の急拡部での損失	74
d.	物体に働く抗力と運動量束	75
e.	底面に低い盛りをもつ開水路流	77
3.	流関数と速度ポテンシャル	80
3.1	流線と流関数	80
a.	流線の定義	80
b.	流関数	82
3.2	速度ポテンシャル	86
a.	速度ポテンシャルの定義	86
b.	速度ポテンシャルの満たすべき式——ラプラスの方程式——	86
c.	速度ポテンシャルの存在条件	91

d. 非圧縮性流れの速度ポテンシャルについての考察	93
3.3 流線と等ポテンシャル線	94
a. 流線と等ポテンシャル線の直交性	94
b. 速度成分の積分と Φ および Ψ	95
4. 二次元ポテンシャル流れ	98
4.1 複素速度ポテンシャル	98
a. 複素平面	98
b. 複素速度ポテンシャル	99
c. コーシー-リーマンの関係式——複素関数の微分と正則関数——	100
d. 速度ベクトル	101
4.2 等角写像	101
a. 等ポテンシャル線と流線の直交条件	101
b. フロー・ネット	102
c. 等角写像	102
4.3 複素関数で表される基本的な流れ	104
a. 一様流	104
b. 角を回る流れ	105
c. 渦糸	110
d. 湧出し	112
e. 二重湧出し	112
f. 循環と湧出し	114
4.4 完全流体中の円柱	115
a. 一様流中の円柱	115
b. 循環を伴う円柱まわりの流れ	116
c. 静止した完全流体中を運動する円柱	118
4.5 ミルン-トムソンの円定理	120
4.6 円柱に働く力	122
a. 定常流中の円柱の場合	123
b. 非定常流中の円柱あるいは加速度運動をしている円柱に働く力	124

4.7	平板まわりの流れ	126
	a. 平板に斜めにあたる流れ	126
	b. 循環をもつ平板に斜めにあたる流れ	128
4.8	シュバルツ-クリストッフェルの定理	130
	a. 定理の発見的誘導	131
	b. 壁面に湧出しをもつ水路内の流れ	134
	c. ダム下の砂礫層内の地下水流	136
4.9	自由流線をもつ流れ	140
	a. スリットからの不連続流	141
	b. 平板に衝突する噴流	146
5.	渦 (うず)	149
5.1	渦線・渦管・渦糸	149
5.2	ケルビンの循環不変定理	151
5.3	ヘルムホルツの渦定理	152
5.4	不連続面と渦層	156
5.5	翼に働く揚力と渦	158
5.6	渦の誘導する速度	160
5.7	二次元の渦糸群の運動	161
	a. 二本の渦糸の運動	162
	b. 一本の渦糸列の安定性	163
	c. 渦糸群の運動の一般法則	164
5.8	カルマン渦列	166
5.9	プラウドマン-テイラーの定理	169
6.	波	172
6.1	波の運動方程式	172
6.2	微小振幅の進行波	173
	a. 微小振幅波の基礎方程式	173
	b. 微小振幅波の速度ポテンシャル	174
	c. 波の分類	176

d. 水粒子の軌道	178
6.3 微小振幅波のエネルギーと群速度	180
a. 波のエネルギー	180
b. 群速度	181
6.4 重複波	184
a. 重複波の波形	184
b. 重複波の軌道	185
c. 容器内の静振波	187
6.5 有限振幅の波	189
a. ストークス波	189
b. ゲルストナーのトロコイド波	190
c. KdV 方程式	191
問 題	194

II 粘性流体の力学

7. 粘性流体の基礎方程式	200
7.1 ナビエ-ストークスの方程式	200
a. 粘性係数	200
b. 応力記号と応力テンソル	201
c. ナビエ-ストークスの方程式の導入	202
7.2 レイノルズ数およびレイノルズの相似則	207
a. レイノルズ数	207
b. レイノルズの相似則	209
8. ナビエ-ストークス方程式の厳密解	213
8.1 平行流	213
8.2 平行平板間のクエット-ポアズイユ流	214
8.3 管内流・ハーゲン-ポアズイユ流れ	215
8.4 瞬間的に運動を始めた平板上の流れ——レイリーの問題——	219
8.5 振動平板による流れ	224

9.	低いレイノルズ数域の流れ	229
9.1	球のまわりの遅い流れ——線型近似解——	229
a.	ストークス近似	230
b.	オセーン (Oseen) 近似	235
9.2	ストークス近似とオセーン近似の意味と比較	236
a.	C_D および流線に対するレイノルズ数の影響	237
b.	流線のパターン	237
c.	オセーンの伴流	238
d.	ストークスのパラドックス	239
9.3	粘性の作用についての一般的考察	240
a.	粘性の拡散作用	240
b.	粘性のエネルギー消散作用	241
c.	粘性流体とポテンシャル流	245
10.	層流境界層	253
10.1	境界層概念の成立	253
10.2	プラントルの境界層方程式の導出	255
10.3	プラントルの境界層方程式への変換が意味する流れの性質の変化	258
11.	平板に沿う層流境界層方程式のブラジウス解	261
11.1	境界層方程式の解析解	261
11.2	境界層方程式の数値解	268
11.3	境界層厚さ	269
11.4	壁面に働く粘性摩擦力	271
12.	境界層の運動量方程式	275
12.1	境界層方程式の積分	275
12.2	相似流速分布を仮定する場合の運動量方程式	277
12.3	平板に沿う境界層の近似解	278
12.4	計 算 例	279

13. 境界層の剥離	285
13.1 楔形を過ぎる流れ	285
13.2 境界層の剥離	286
問 題	288

Ⅲ 乱流および乱流拡散

14. 乱流におけるレイノルズ応力	294
14.1 乱流の発生とレイノルズ応力	294
a. レイノルズの実験	294
b. レイノルズ応力	296
c. レイノルズ方程式	297
14.2 レイノルズ応力に関する仮説	298
a. プシネスクの渦動粘性係数	298
b. プラントルの混合距離	299
c. カルマンの力学的相似の仮説	299
d. 乱れのエネルギー方程式に基づく方法	300
15. 管路の乱流	301
15.1 滑らかな管路	301
a. 管の流入部の流れと十分に発達した流れ	301
b. “壁法則” と “速度欠損則”	302
c. 流速分布	302
d. 粘性底層の厚さと普遍定数の意味	306
e. 流速分布の領域区分	306
15.2 円管路の摩擦抵抗	309
15.3 粗い管路	311
a. 流速分布	311
b. 壁面の粗滑	312
c. 粗い管の摩擦抵抗	313
15.4 ベキ乗流速分布式とブラジウスの抵抗公式	316
15.5 ま と め	317

16. 乱流境界層	318
16.1 平板に沿う乱流境界層流れ	318
a. 乱流への遷移	318
b. 乱れの間欠性	319
c. 乱流境界層の流速分布	319
16.2 滑面平板に沿う乱流境界層の発達と抵抗則	323
a. 1/7乗則による抵抗則	323
b. 対数則による抵抗則	325
16.3 粗面平板の抵抗則	328
17. 噴流と後流	330
17.1 壁面のない境界層としての噴流と後流	330
a. 境界層方程式	331
b. 渦動粘性係数	331
17.2 二次元噴流	332
17.3 二次元後流	336
a. 後流の形成	336
b. 後流の流速分布	337
18. 乱流の発生	342
18.1 なぜポアズイユ流れの理論式が成立しないか?	342
18.2 平板に沿う層流境界層の安定問題	343
a. オア-ゾンマーフェルトの方程式	343
b. レイリーの変曲点不安定定理	345
c. 平板に沿う層流境界層の安定問題	347
18.3 乱流への遷移	348
a. 平板境界層の乱流への遷移	350
b. 後流の乱流への遷移	353
18.4 ケルビン-ヘルムホルツの安定問題	356
18.5 テイラー渦とゲルトラー渦	357

19. 乱流の統計理論	363
19.1 乱流の定義と表現	363
a. 乱流の定義	363
b. “渦”と“波”	363
c. 相 関 係 数	365
d. スペクトル	366
e. ウィナー-ヒンチンの定理	369
19.2 等方性乱流	370
a. 相関係数テンソル	371
b. 最小渦径と平均渦径	373
c. 相関係数の伝播方程式	374
19.3 乱流におけるエネルギーの移行過程	375
19.4 コルモゴロフの局所等方性の理論	377
a. エネルギー・スペクトルに関するコルモゴロフの $-5/3$ 乗則	377
b. 慣性小領域におけるその他の物理量のスペクトル	379
c. 二次元乱流の慣性小領域のエネルギー・スペクトル	380
20. 非等方性乱流	381
20.1 円管流の乱れ	381
a. 軸対称流れのレイノルズ方程式	381
b. 円管乱流の乱れの分布	383
c. 乱れエネルギーの生産	384
d. 乱れのエネルギー方程式	385
20.2 壁に沿う乱流境界層	386
20.3 噴流および後流	388
21. 乱流の組織構造	391
21.1 乱流の実態	391
a. 組織構造発見の発端	392
b. 実験・解析手法	395
21.2 壁面領域の乱流構造——組織構造の多重性——	398

a.	バッファー域の低速渦	398
b.	イジェクションとスウィープ	398
c.	外層（対数—後流域）の組織構造	400
d.	内層域と外層域の関係	402
e.	低圧域と高圧域	402
21.3	開水路流の縦渦とボイル	402
21.4	自由剪断流の乱流構造	404
a.	混合層流れ	404
b.	軸対称噴流	408
21.5	乱流の予測と制御	409
22.	乱流拡散	413
22.1	フィックの拡散方程式	413
a.	拡散におけるフィックの法則	413
b.	乱流拡散の方程式	415
c.	ロバートの解	416
d.	勾配型表示の限界	417
22.2	テイラーの拡散理論	417
a.	乱流拡散とラグランジュ相関	417
b.	テイラーの拡散理論式の変形——Kampé de Fériet の表示——	420
c.	広がり幅・拡散係数と距離の関係——テイラーの拡散理論の解——	421
d.	乱流拡散のスペクトルによる表現	423
e.	濃度と観測時間	425
22.3	相対拡散	426
a.	相対拡散への乱れ成分の寄与	426
b.	慣性小領域の相対拡散	427
22.4	拡散における蛇行運動	430
a.	テイラー型拡散と相対拡散	430
b.	瞬間濃度と平均濃度の比——流下距離との関係——	432

22.5 分 散	433
問 題	438
流体力学をきずいた人々	441
参 考 文 献	443
問題のヒントと解答	455
索 引	459

はじめに

われわれの身近に見られる流れの現象で、普段なにげなしに見過ごしているが、いざ説明を求められると惑ったり、常識や直感と逆であったりする事柄が多い。いくつか例をあげよう。

(i) ゴルフのボールと、ピンポンの球とは大きさがほぼ同じである。重さはゴルフボールの方が遥かに重し、飛ぶ距離も比較にならないくらい長い。ところで、ゴルフのボールの表面は滑らかではなくたくさんの凹み（ディンプル）があり、流体力学的には粗い面となっている。もし、表面に粘土でもつめて滑らかにしたらボールはより遠くに飛ぶであろうか。否、実は逆にボールの飛距離は短くなってしまふ。なぜであろうか。

(ii) 図1に示すような二つの異なった断面形の柱がある。一つは流線形翼であり、他の一つは円柱である。流れは左から右に流れている。もし、二つの柱の大きさ（円の径と流線形翼の厚さ）が同じ程度のものならば当然流線形の翼の方の受け

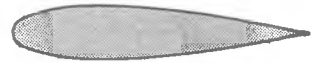


図 1

る抵抗は少ないが、図のように円柱の径が極端に小さい場合には、どうであろうか。実は二つの柱体の受ける抗力は同じくらいなのである。こんなに大きさが違うのにいいかげんと思われるであろうが、うそではない。なぜこんな常識的でないことが起こるのだろうか。

(iii) 図1に示すような流線形の物体が流れの中を進行するとき、左に進むのと右に進むのとでは流れから受ける抵抗が異なる。ちょっと考えると、たとえば波をけたてて進む快速船とか弾丸とかの連想から、尖った先端で流体をかきわけて右に進んだ方が抵抗が少ないように思われるが、実は逆である。それはなぜだろうか。

(iv) 図2は、離着陸時のジェット機（ボーイング707）の翼を座席から見た図である。ジェット機は低速での離着陸時には、高速航行中は主翼内に引き込ま

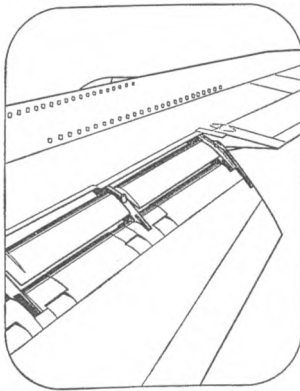


図 2

れているフラップをおろす。このフラップはどんな働きをするのであろうか。また、主翼とフラップの間にはかなりの隙間がある。これをふさぐのはなんでもないことなのに、なぜわざわざ隙間をあけておくのだろうか。また、主翼の上面の中ほどには二列に小さな翼列が配列されている。これは、ボルテックス・ジェネレーターと呼ばれている。小さいといっても高さは数 cm もあろう。なぜ、わざわざ抵抗を増やすようなものを翼面に固定して配置してあるのだろうか。

(V) 勇壮豪快なヨット・セーリングは若者の心躍る夏の楽しみである。ところでヨットは、風の間にも間に風下に押されていく帆掛け船とは違う。帆の操作により、風上方向にもヨットをセールすることが可能である。この原理を説明できるであらうか(図3)。

(vi) 夏緑の芝生に水をまくのは気持ちのよい仕事である。ところで、ホースで水をまくときに水を遠くへあるいは垂直に高く飛ばそうとすると経験的にホースの口を指でつぶして、流出口の面積を小さくすればよいことを知っているだろう。しかし、こうするとホース断面の急縮によりエネルギー損失が大きくなるはずなのに、なぜ水は遠くに飛びあるいは高く上るのであろうか。

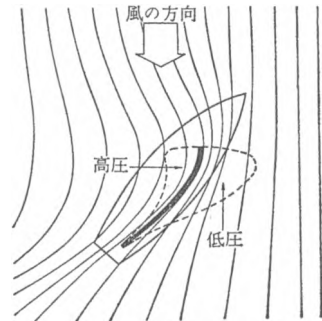


図 3

(vii) 高い煙突や観光タワーなどは、風の強い日には風の力で振動する。この振動の方向はほとんどの場合風と直角方向に揺れる。煙突やタワーは軸対称な断面形をしており、流れに対して左右のつりあいがないから風向に直角方向には力が働いてはいないはずなのに、どうして流れの抵抗力の方向ではなく、これと直角の方向に振動を起こすのだろうか。

(viii) 室の戸や窓を閉め切り、ストーブやクーラーも停めて室の空気の動きをなくする。そこで、おもむろにタバコに火をつけて、立ちのぼる煙を見てみよう。タバコの火口からまっすぐに立っていく煙は 5~10 cm 上るとゆらゆら揺れ

出し渦となってしまう。どんなに静かにしても煙を真直に立ちのぼらせることはむずかしい。なぜなのだろうか。

(ix) 静かな海もひとたび風が吹き出すと荒れくるう波浪の海となる。ところで、もし空気にも水にも粘性がなければ、波は発生しないだろうか。波は生じないと考えそうであるが、この場合にも風波は発生する。それならば、どちらの場合の波高が大きいであろうか。

このほかにもいろいろと流体力学の現象の不思議やパラドックスがあるが、本書の範囲外のことにもなるのでこのくらいにしよう。

ところで、上にあげた問題について何問まで答えられたであろうか。おそらく、意外に身近なところに流体力学的に不思議な問題があるのに、気づいていなかったのではないだろうか。さて、本書を読み終えたのちこのうちの何問に正しく解答しうるであろうか。

流れの世界

流体力学を学ぶ目的は、簡単にいえば力学の基礎原理の上に築き上げられた流れの現象に関する論理体系を理解し、理論的考察あるいは実験結果の正しい解釈により、現実のさまざまな具体的な問題の解決に、合理的な答えを導き出すことであるといえよう。いま一つの大きな目的は、流れという現象のもつ美しさや不思議さを知ることである。従来の流体力学の教育では、この面が忘れられ、なおざりにされてきたきらいがある。

空気や水の流れは、通常は無色透明でその様子がわからないが、最近はさまざまな可視化技術の発達によって、その意外な動きと美しさを見ることができるようになってきた。あるいは、コンピューターの高性能化とCG(コンピューター・グラフィックス)などの利用技術、そして計算理論およびアルゴリズムの進歩が実験室での実験以上にきれいな流れと詳細なデータの取得を可能にし、また実験では実現しえない流れをも実現し、流体力学を楽しくしている。さらに、人工衛星による宇宙からの目は大気や海洋などの大自然のもつスケールの大きな流れを眺めることを可能にした。

ここには、本書で述べられている現象を中心に、実験室での流れや自然界で見られる流れの写真、空や宇宙からのリモート・センシングデータの解析図あるいはコンピューター・シミュレーションの結果を多数あげた。読者諸氏も身のまわりの流れの中から美や真を発見して欲しい。

I. 完全流体の流れ

(1) 翼形まわりの流れ 現実の流体は粘性をもち、その流れの状況は非粘性流体（完全流体）とは異なる。物体の形がいわゆる流線形で、流れが物体から剥がれない場合には、速度の速い（レイノルズ数 $(Re=UD/\nu; U: \text{流速}, D: \text{物体の大きさ}, \nu: \text{動粘性係数})$ の大きい）流れが完全流体の流れとなる。図1は煙風洞での翼形まわりの流れである。翼の上面の反りの大きい所で流線の間隔が狭く、下面では逆にその間隔が広がっている。これが500人もの乗客をのせ最大離陸重量（貨客満載総重量）が350tもあるジャンボ・ジェット機を空中に浮かせ音速に近い速度で飛ばせる原理である。

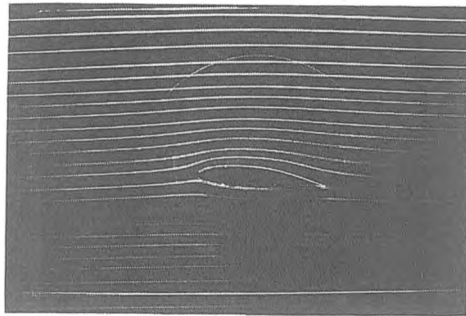


図1 翼形まわりの流れ（ポテンシャル流れ）

(2) 円柱まわりのポテンシャル流れ (Hele-Shaw 流れによる) 流線形の物体の場合には完全流体の理論は流速が速い流れで成立するが、円柱や球のような鈍い形の物体では、速い流速では粘性の作用により流れは物体の後方で剥がれ完全流体の流れとは全く異なった流れとなる。ところが、間隔の狭い二枚の平行平板の間にゆっくりと、つまり低いレイノルズ数で粘性流体を流すと、二次元の鈍い物体まわりのポテンシャル流れを作ることができる（図2）。このような流れを Hele-Shaw（ヒール・ショー）流れという。土粒子や小さなガラス球などの詰まった多孔質層内の遅い流れも Hele-Shaw 流れと同様ポ

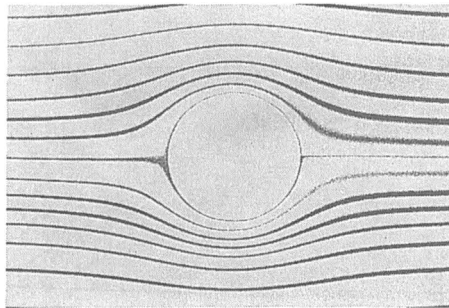


図2 円柱まわりの完全流体のポテンシャル流れ（Hele-Shaw 流れ）

テンシャル流れとなる。狭い間隙内や多孔質内の流れは、現実の粘性流体の場合とは逆に遅い低レイノルズ数域でポテンシャル流れになることは注意すべき点である。

円柱のまわりの粘性流体の流れ（もちろん、Hele-Shaw 装置は用いない）は、流速の小さい範囲では円柱の背後に一对の双子渦を作り、流速を増すにつれて（レイノルズ数が40～200の範囲で）、次に示すカルマン渦列を作る（図5）。

(3) ウォーター・ベル 黒海の東岸に位置するグルジア共和国（旧ソ連）の首都トビリシのレストランの小さな前庭で見かけた可愛いウォーター・ベル。噴水を小さな円板に当てると水は方向を変え薄い水膜となって重力の作用で落下しつつ周囲に広がる。このような流れは、完全流体の自由流線をもつ流れ（あるいは不連続流）として、ポテンシャル流れの理論で計算することができる（図3）。

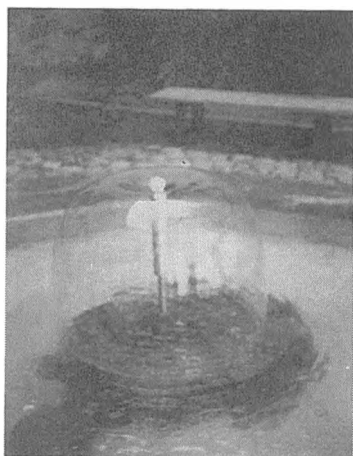


図3 ウォーター・ベル（自由流線をもつ流れ）

(4) 台風の目と渦巻き 孤立型の渦は日常いたる所に見ることができる。洗面槽の排水時、洗濯機の中、コーヒークップを掻き交ぜたときなど。その最も大きいものが台風である。普通、渦と呼ばれているこれらの流れは、多くの場合剛体的に回転する流体力学的な渦の領域はその中心部だけで、その周囲は“渦度”ゼロの流れ（ただの渦巻き）である（図4）。

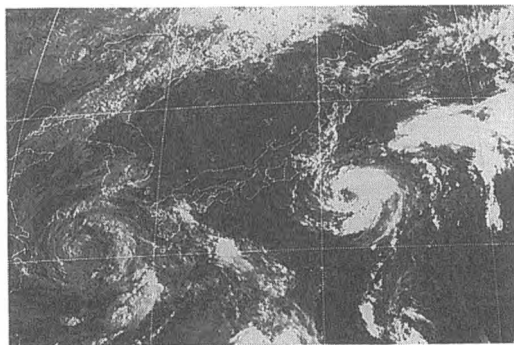


図4 気象衛星「ひまわり」からの1978年7号と8号台風の渦巻き

(5) カルマン渦 円柱とか角柱とか鈍い形の物体の後には、レイノルズ数がある値を超えると ($Re=UD/\nu \geq 40$; U : 流速, D : 円柱の直径, ν : 動粘性係数), 物体を通る流れの中心軸の上下二列に互いに逆方向に回転する渦が交互にきれいに配列して流下する(図5)。物体から渦が交互に離脱するのはⅢで述べる粘性流体の流れの安定問題であるが、この渦列の配列の規則は完全流体の理論で説明することができる。この渦列の配列理論を提出したカルマン(1911)にちなんで、この渦列はカルマン渦列と呼ばれる。図5のカルマン渦列の室内実験の写真は、直径 $D=1$ cm の円柱を速度 $U=1.4$ cm/s という極鈍速で引っ張って撮られた。

このようなカルマン渦列は、自然界のいたる所に見られる。人工衛星が打ち上げられ宇宙から地球を見ることができるようになって、実験室規模より遥かにスケールの大きい孤立峰の背後にもカルマン渦が発生していることが発見された(図6)。

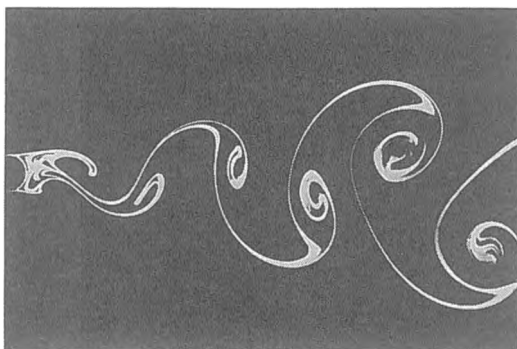


図5 カルマン渦列

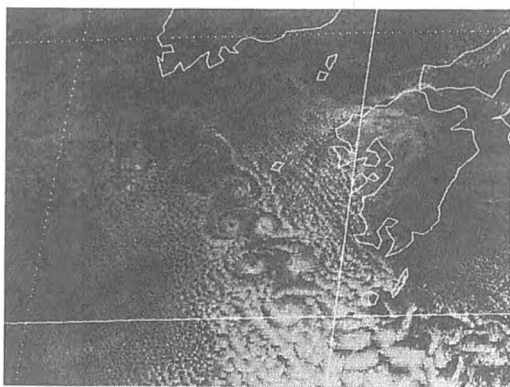


図6 海中の孤立峰からのカルマン渦

(6) 渦輪 タバコの煙を口の中にいっぱいに含んで、頬を軽く叩いてつぼめた口先から次々と煙の輪を吐き出す名人がいる。渦定理によれば、渦は流体の中で終わることがなく、それ自身閉じて渦輪を形成するか、境界面にくっついていなければならない(図7)。

(7) 竜巻きき どんよりとした空の雲底から地表あるいは海上に足を延ばし、足早に通って行く竜巻きも、渦定理にしたがっている(図8)。ときには軸の曲がりくねった竜巻きもある。

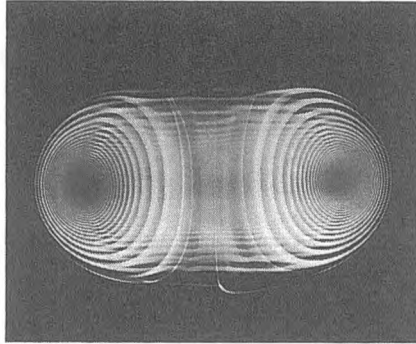


図 7 渦輪の断面（渦定理）



図 8 天竜川河口に発生した竜巻き（渦定理）

(8) 波 波は完全流体の理論がそのまま適用しうる典型的な実現象である。波とは媒質は移動しないのに媒質中の変位が伝播する現象である。図9中のたくさんの楕円形の模様は泡粒ではなく、比重

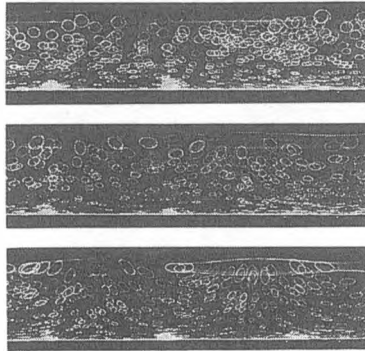


図 9 波の楕円軌道

を水と同じに調整して水中に浮かせた微細な油滴が画いた波の楕円軌道である。

波は水深が浅くなってくると、形が突っ立ち砕波してエネルギーを消費する。図 10 に示す雄大な砕波は巻き波型砕波 (plunging type breaker) と呼ばれる。波は相対波高が高くなっても、その基礎方程式 (速度ポテンシャルに関するラプラスの方程式) は線型である。ただし、表面での境界条件の非線型性は無視しえなくなる。最近話題のソリトンは 1844 年にイギリスのスコット・ラッセルが運河で発見した '孤立波' に由来する。



図 10 巻き波砕波

写真提供・出典

- 図 1: 高木正平 (科学技術庁・航空宇宙技術研究所)
- 図 2: 安藤常世 (慶応大) (「写真集 流れ」, 丸善, 1984)
- 図 3: 日野幹雄 (1983)
- 図 4: 気象庁
- 図 5: 種子田定俊 (九大名誉教授) (「画像から学ぶ流体力学」, 朝倉書店, 1988)
- 図 6: 気象庁 (気象衛星「ひまわり」からの画像)
- 図 7: Magarvey, R. H. and MacLachy, C. S. (*Can. J. Phys.*, **42**, 678-683, 1964)
- 図 8: 安川照男 (浜松市), 新野 宏 (気象庁・気象研究所) (1991)
- 図 9: Wallet, A. and Ruellan, F. (*Houille Blanche*, **5**, 483-489, 1950)
- 図 10: 佐藤秀明 (「彼は海へむかう」, 東京書籍, 1991)

Ⅱ. 層流の流れ

(9) ハーゲン-ポアズイユ流れ 径の一樣な管路あるいは平行な二平板の間の粘性流体の流れの速度分布には端麗な美がある。コンピューター・グラフィックスによる表示(図11)。

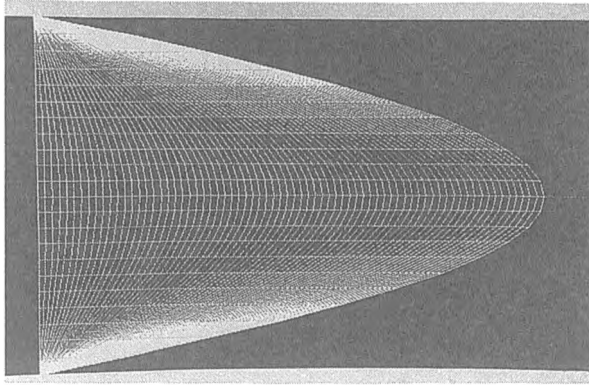


図 11 ハーゲン-ポアズイユ流れ

(10) 振動流 流体を振動させるかわりに、平板を振動させたときの半周期間の速度分布のCG(図12)。振動平板の影響は粘性によって流体の内部に伝えられるが、その影響範囲は十分時間が経過した後も平板付近の薄い層内に限られ、それより遠くには及ばない。つまり平板で作られる渦度は遠くへは拡散しない。このことが水の波をポテンシャル流として取り扱うことを可能にしている。

粘性は壁面の動きの情報を少し遅れて徐々に弱く遠くに伝える。何やら人の噂話のように。

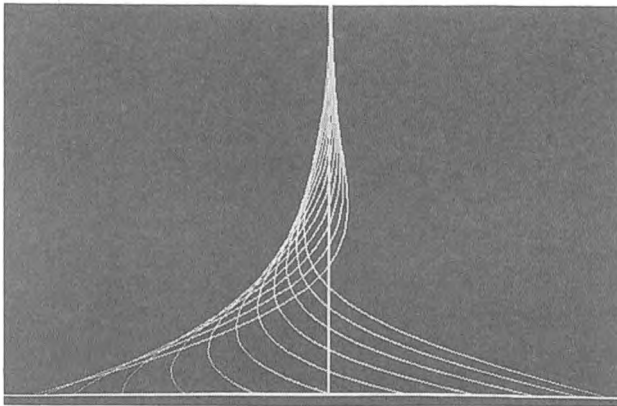


図 12 振動平板上の流れ

(11) 振動流の作る模様 波形壁面上の振動流では、波形の上に二次流の渦対が形成される(図13)。静止した粘性流体の中で物体を振動させると、二次流により花模様がかかる(図14)。

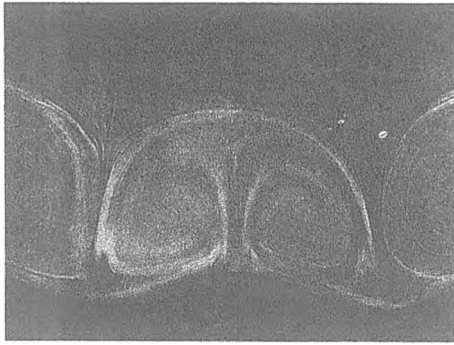


図 13 波形壁面上の振動流による二次流
(作動流体は高粘性のグリセリン)

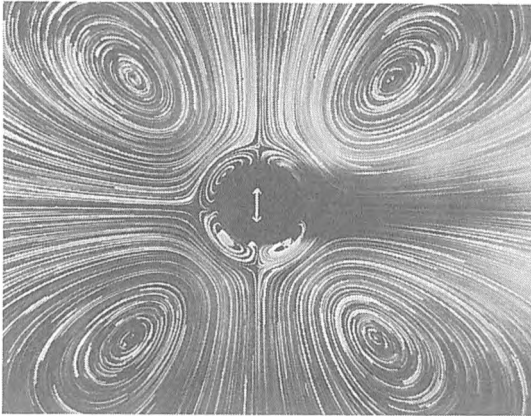


図 14 振動円柱による二次流

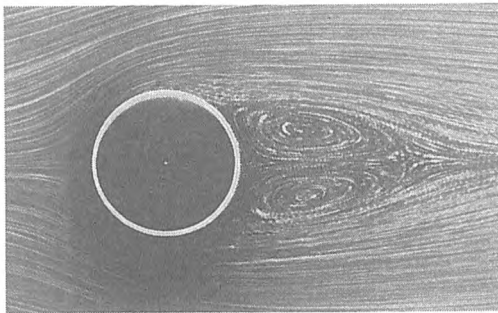


図 15 円柱背後の双子渦

(12) 円柱背後の双子渦 円柱背後の流れはレイノルズ数によってさまざまに変化する。ストークス近似が成立する前後対称な流れ、オセーン近似で表しうる剥離域のない前後非対称な流れから、レイノルズ数が $5 \leq Re \leq 40$ の範囲では後流域に上下対称な双子渦が形成される(図15)。さらに、レイノルズ数が増加すると $Re \geq 40$ から渦が交互に後流中に離脱してカルマン渦列となる。

(13) 運動を開始した円柱からの渦の発生 静止流体中の円柱が急に加速度運動を始めると、その瞬間の流れはポテンシャルで表される非粘性流である。しかし、すぐに円柱表面に境界層が発達し、後方で剥離し渦を形成する(図16)。

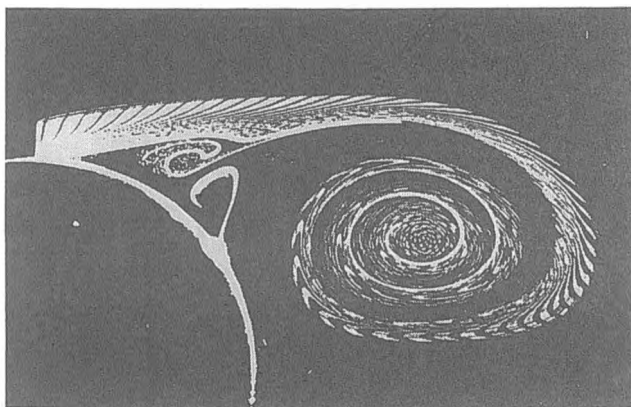


図 16 運動を始めた円柱からの渦の発生

(14) 境界層とその剥離 平面あるいは曲面上に発達した層流境界層は、圧力勾配が正に転じる斜面頂部や曲面の後方で、壁面から剥離する(図17)。

流路幅が漸拡するディフューザー内の流れも、逆圧力勾配のため壁面で境界層が剥離し、逆流域が生じる(図18)。流れが一方の壁面にくっつく現象をコアンダ効果という。

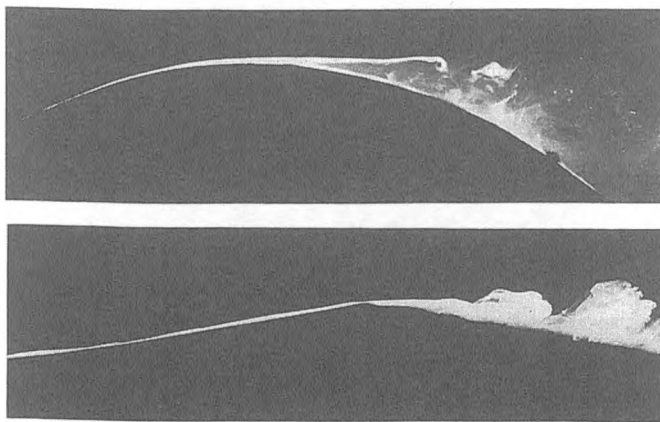


図 17 流れの剥離

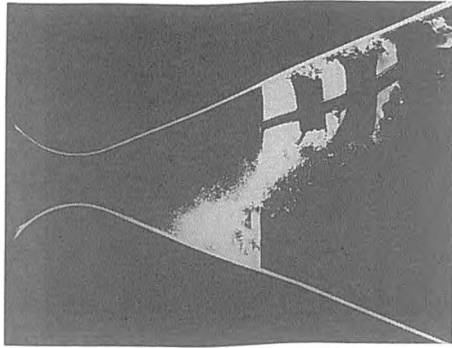


図 18 ディフューザー中の流れ

写真提供・出典

- 図 11 : 小林智尚 (東京理科大) (1986)
- 図 12 : 小林智尚 (東京理科大) (1986)
- 図 13 : 日野幹雄・藤崎治男 (Int. Symp. on Flow Visualization, 229-234, 1977)
- 図 14 : 辰野正和 (九大・応用力学研究所)
- 図 15 : 種子田定俊 (九大名誉教授) (*J. Phy. Soc. J.*, **11**, 302-307, 1956)
- 図 16 : 永田 拓 (岐阜大) (1983)
- 図 17 : Head, M. R. (*Flow Visualization II*, ed. Merzkirch, 399-403, Hemisphere, 1982)
- 図 18 : Kline, S. J. (1963)

Ⅲ. 流れの安定問題

(15) ベナール対流 十分に広い底の平らな容器に流体を張り、容器の底面から一様に加熱すると六角形の対流セル（細胞）がきれいに容器いっぱいに整列する（図 19）。これは 1900 年にフランスのベナール（Benard）によって発見された現象である。最近、地球物理学に革命をもたらした大陸移動を説明するプレートテクトニクスの原動力は、地球内部のマグマの熱対流であると考えられている。

漆塗りのお碗の中の朝餉（アサゲ）の味噌汁の模様もベナール対流である。寺田寅彦のエッセイにあるように、ウェーゲナーの大陸移動説（1912）を身近な現象で実感するのも楽しいではないか。

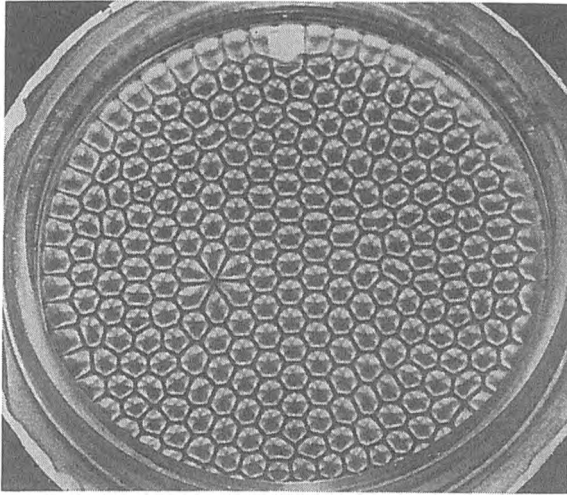


図 19 ベナール対流セル

(16) 平板間の対流細胞 上を冷やし下を熱した二枚の水平平板の間に流体を流すと、流下方向に軸をもつ回転方向が互いに逆の渦細胞が配列する（図 20）。この現象は寺田寅彦（1929）によって初めて見出された。

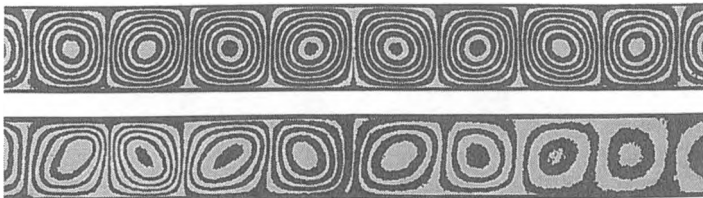


図 20 平行平板間の二次元対流

(17) ケルビン-ヘルムホルツの界面不安定 速度の異なる二つの相接する流れの界面にはいっせいに渦が発生し、その渦は一瞬にしてくずれ二つの流体の混合が起こる。この現象を K-H (ケルビン-ヘルムホルツ) 型不安定という。水平にした長細い容器の半分に塩水を入れ、その上に淡水の層を作る。

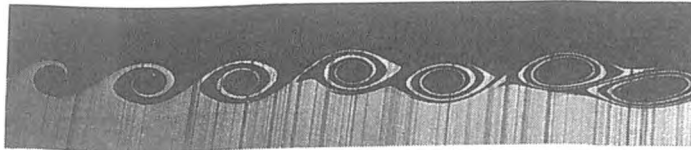
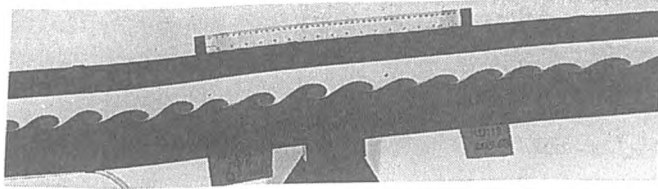


図 21 ケルビン-ヘルムホルツ型不安定

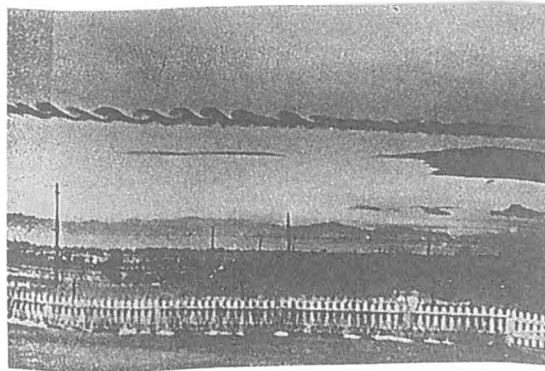


図 22 大気中の K-H 不安定によるビロー

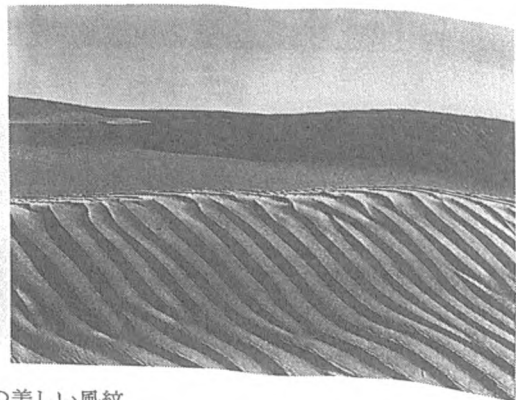
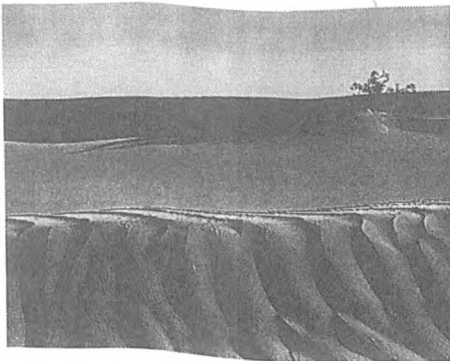


図 23 砂丘の美しい風紋

容器をわずかに傾けたのちすぐ元の位置に戻すと、重力の作用で互いに逆向きの流れが生じ、一瞬の間に K-H 波が発生し混合する (図 21)。

図 22 は大気中に現れた K-H 波で、このようにはっきりとしたビロー (billow, 大波の形) が見られるのはめずらしい。

風によって水面に発生する風波も砂丘に画かれる風紋も、砂の河床に見られる砂漣も、さらに青空に浮かぶ雲の列も、原理的には二つの流れの境界面に起こる流体力学的な不安定という皆同じメカニズムによって作られている (図 23)。自然がもっている造形美創造のネタの種類はあまり多くはなさそうだ。

(18) 鳴門の渦潮 潮位差によって鳴門海峡を押し出される噴流の外縁に沿って渦列が発生する (図 24)。噴流は速い流れと遅い流れの境界に渦を生み出す。

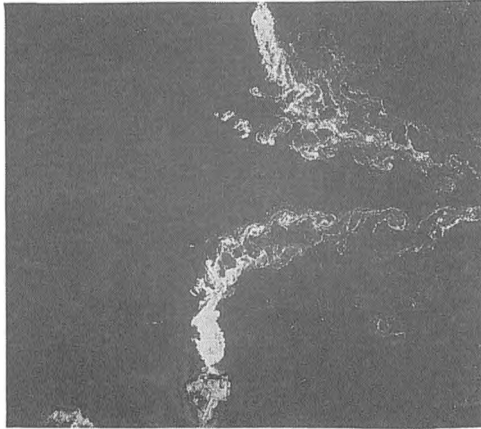


図 24 鳴門の渦潮

(19) 回転同軸二重円筒間のテイラー渦 同軸二重円筒の隙間に液体を満たし、内側の円筒を回転させると、円筒のまわりにドーナツ状の渦が鉢巻き状に上下に並ぶ。隣合った渦の回転方向は互いに逆になっている (図 25)。

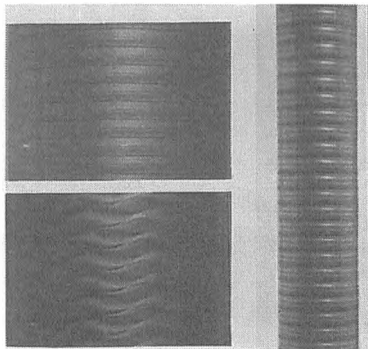


図 25 回転同軸二重円筒間のテイラー渦

(20) 回転物体上の境界層の遷移 円板や円錐あるいは球面を軸のまわりに回転させると、その上の境界層流れの不安定化のために、螺旋状の渦列が発生する(図26)。

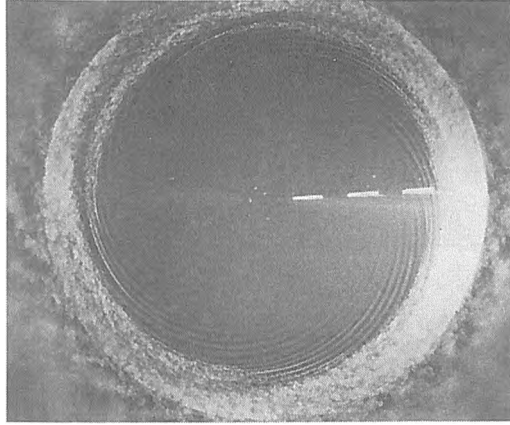


図 26 回転物体上の境界層のスパイラル状の渦

(21) 衝突噴流による水膜の分裂 はてな、この写真(図27)は何だろう。魚の骨か? 芸術家のモダン作品か? 否々。これも立派な流れの実験である。二本のノズルからの噴流を正面衝突させると、水は薄い膜となって広がる。噴流を斜めに衝突させ、かつある周期でノズルを軸方向に振動させると、薄い水膜上に波が生じ、それによる光の濃淡が骨の形の模様を作る(図27)。

水道の水を勢いよく出しスプーンの凹面に受けると、スプーンから水膜が広がり、水面に円弧状の波が生じ、その先で波は水滴に分裂する(図28)。(また、水を平板上に落下させると円形に薄く広がり、中心からある半径の所から盛り上がる。この現象は円形跳水(circular hydraulic jump)と呼ばれる。一度試みてはどうだろう)。

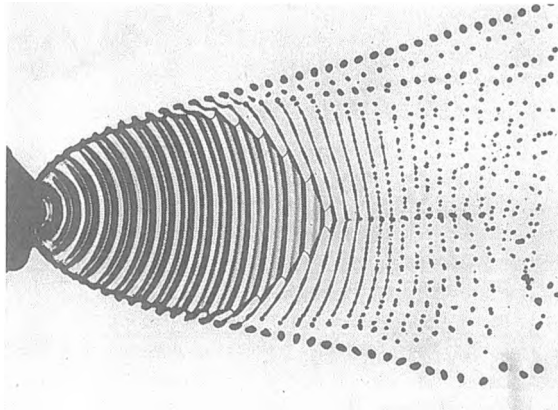


図 27 衝突噴流の水膜の分裂

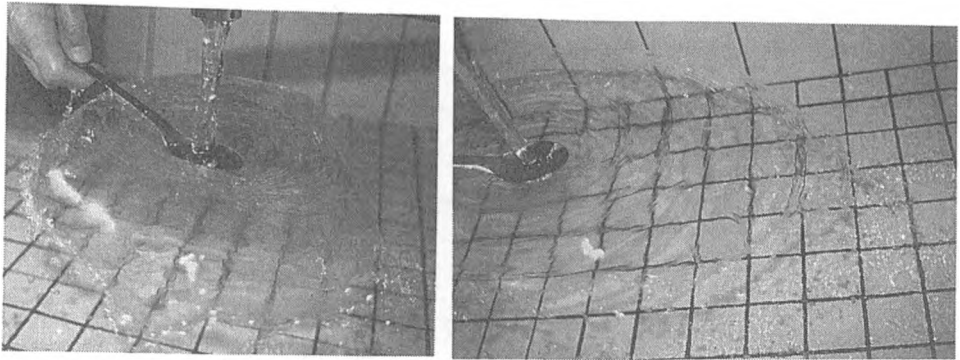


図 28 スプーンで作られた水膜の分裂

(22) 落水膜の横縞 断崖から落下する滝や、もっと身近な所では噴水から流れ落ちる水膜を、水の落下する速さで目で追ってみよう。水膜は一様に落下するのではない。落下方向に等間隔の横縞模様が見えるであろう。これは風やまわりの騒音などが引金となって起こる表面張力が関与する水膜の不安定現象である。図 29 は、ある JR の駅前広場で見つけた水すだれの横縞模様である。設計者が意図したとも思われませんが、共鳴条件がよいのか実にみごとに水膜上に横波が発達している。

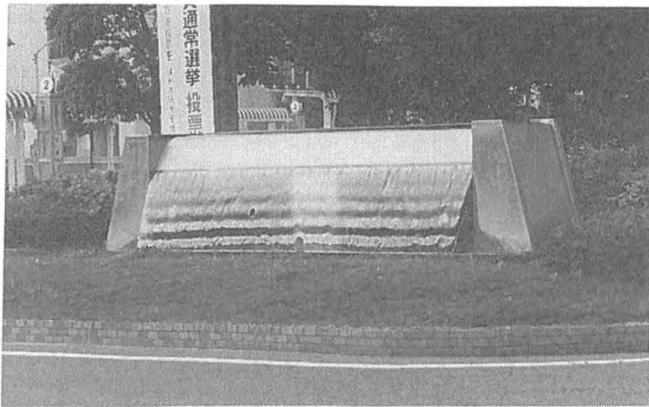


図 29 落水膜の横縞模様

(23) ロスビー波 これも新芸術か。否、やれ異常気象だ、異常寒波だ、暖冬だと騒々しい昨今であるが、この正体の一つがジェット気流の大蛇行を引き起こすロスビー波である。いま一つがエル・ニーニョ (El Niño) 現象 (ペルー沖の海水温が上昇し、それに関連する海洋・大気の変化が太平洋域全体に生じる)。これらは大気の地球的規模での変動の要因である。

内側を冷やし外側を暖かくした円筒に水を入れ、この装置全体を回転台上に載せて回転すると、地球大気の大循環のシミュレーションができる (球面上ではないが本質的にはこれでよい) (図 30)。大きく曲がりくねる大循環の流れ (ロスビー波) は、こうした流れ場の安定問題である。ロスビー波が発達すると、これにより南の暖かい空気が北に、極の冷たい空気が南に輸送される。ロスビー波はゆっくりした速度でしか移動しないから、この波 (流れ) が卓越すると異常気象となる。

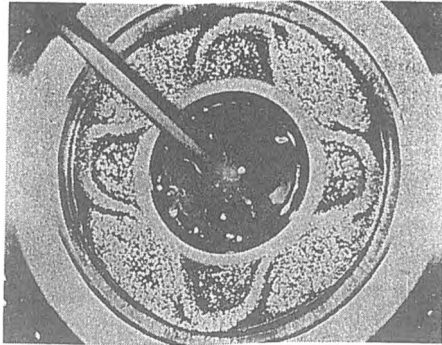


図 30 ロスビー波の模型実験

写真提供・出典

- 図 19 : Koschmieder, E. L. (*Adv. Chem. Phys.*, **26**, 177-212, 1974)
- 図 20 : Oertel, H. Jr. and Kirchartz, K. R. (*Album of Fluid Motion*, ed. Van Dyke, 1982)
- 図 21 : Thorpe, S. A. (*J. Fluid Mech.*, **46**, 299-319, 1971)
- 図 22 : Drazin, P. G. and Reid, W. H. (*Hydrodynamic Stability*, Cambridge Univ. Press, 1981)
- 図 24 : 大西外明 (東京理科大)
- 図 25 : Koschmieder, E. L. (*J. Fluid Mech.* **93**, 515, 1979)
- 図 26 : 小林稜二・小浜泰昭 (東北大) (1980)
- 図 27 : Dombrowski, N. (*Album of Fluid Motion*, ed. Van Dyke, 1982)
- 図 28 : 日野幹雄
- 図 29 : 小林智尚 (東京理科大)
- 図 30 : 瓜生道也 (*天気*, **20**, 1973)

IV. 乱流

(24) 層流から乱流への遷移 この水素気泡法による可視化写真(図 31)をお借りするとき、浜良助(R. F. Hama: 在ドイツ)先生は「これは芸術写真です」といわれた。この写真は二重の意味で記念碑的榮譽をもっている。一つはもちろん、層流から乱流への遷移の研究の初期にその過程を明確にとらえたこと。そして、いま一つは流れの可視化技術の重要性を認識させたことである。浜先生は第二次大戦後間もなく米国に渡り、長く Johns Hopkins 大学で研究され、その後ドイツに移られた。最近は年に一度「乱流シンポジウム」に出席のために帰国することを楽しみにされている。

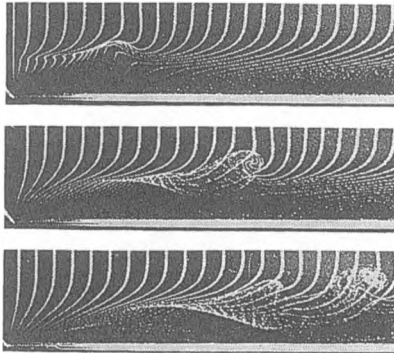


図 31 平板に沿う層流境界層の乱流への遷移

(25) 等方性乱流 等方性乱流の統計理論の研究は、複雑な現象も単純で理想的な素過程の研究からという思考から、テイラー (Taylor, 1935) によって始められた。乱流格子の後にできる“等方均一性乱流”(図 32)の統計理論は、久しく乱流研究の世界を風靡した。

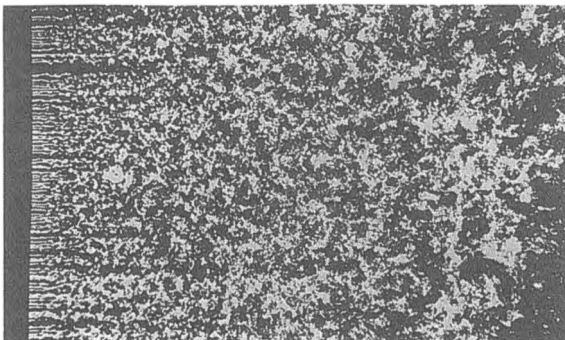


図 32 乱流格子で作られた等方均一性乱流

(26) 乱流の特性が単に時間的空間的不規則性にあるのではなく、瞬間的には乱流領域と非乱流域の間に明確な境界があり、それは時間的な平均境界のまわりに大きく変形し、今日でいう大規模構造をなしていることが、Corrsin (1943) や Corrsin と Kistler (1954) によって指摘された。図 33 は乱流の大規模構造の研究の上の記念碑的歴史的写真である。

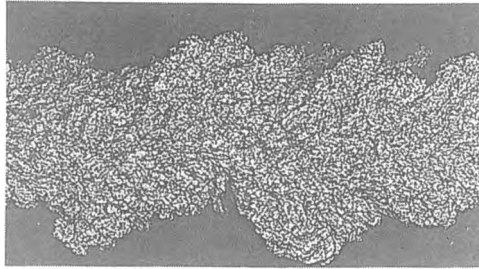


図 33 弾丸後流の大規模構造

(27) ストリーク構造とバースティング 乱流の本質が不規則性だけでないことは、クラインと彼の仲間 (Kline et al., 1959, 1967) によっても、平板上の乱流境界層のストリーク構造 (図 34) やバースティング現象 (図 35) の重要性として指摘され、以来広く認識され支持されている。

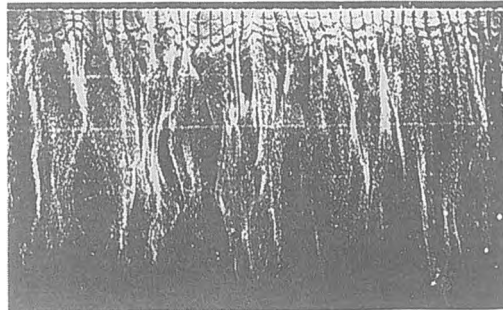


図 34 平板上の乱流境界層のストリーク構造

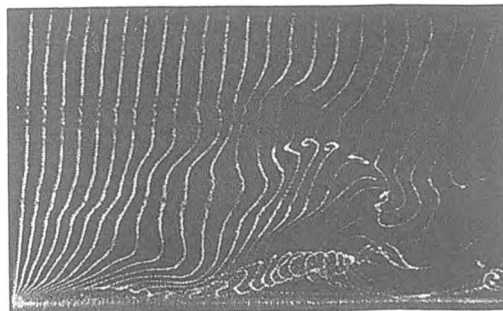


図 35 平板上の乱流境界層のバースティング

(28) 乱れの組織構造 私達を取り巻く流れは、大気の流れも、川の流れも、水道管内の流れも、ほとんどすべて乱流という時間的にも空間的にも不規則に変化する流れである。しかし、ここ20年ほどの間の研究によって、乱れはある共通の組織的構造ないしは秩序構造をもつことが明らかにされた。

図36の左上の挿入図は、11本のx型熱線計と呼ばれる微細な流速変動を計測する測定装置によって測られた、ごく短い100ms間の流速変動の同時記録である。この記録だけでは流れがどうなっているかを想像できないであろう。この図36の中央に示す鳥瞰図(パースペクティブ)は、これら11個の記録を理論的に処理して流れの平均速度で流下するときに見える流れの状態を求めたものである。この図から流れの底面近傍から舞い上がる渦の存在がはっきりとわかる。

また、図37は、流れの場のメッシュ上のすべての点の流速がこのようにして確定できたので、コンピュータで水素気泡法方式の流れの可視化を行って作図したものである。

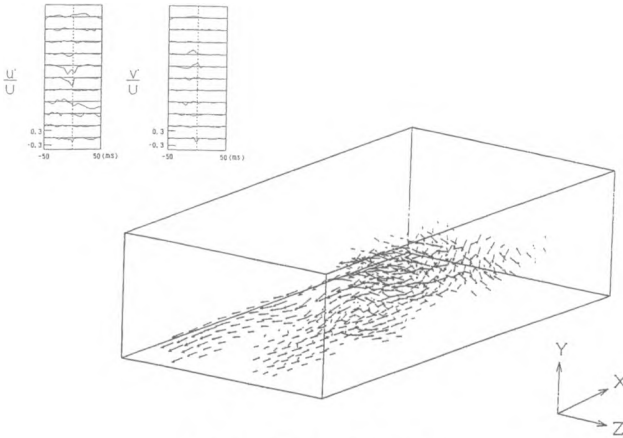


図 36 乱流の組織構造 (1)

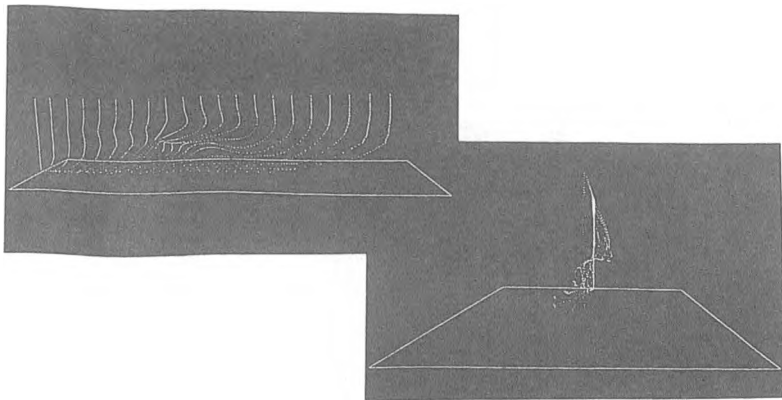


図 37 乱流の組織構造 (2)

(29) **ジェットの大規模構造** 壁面乱流だけではなく、噴流や後流などの自由剪断流も瞬間的に見れば、大規模な組織構造・秩序構造をもっている (図 38)。

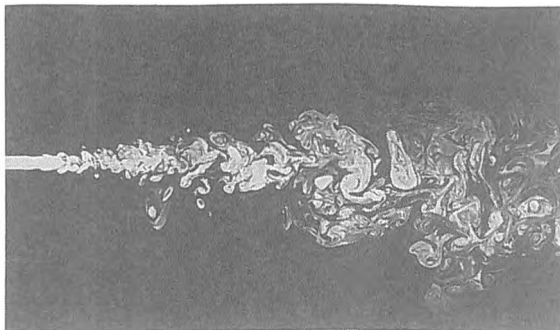


図 38 ジェットの大規模構造

(30) **後流の大規模構造—タンカーから流出した油の帯** 座礁したタンカーの後流の組織構造が、奇しくもタンカーから流出した油によって可視化されている (図 39)。

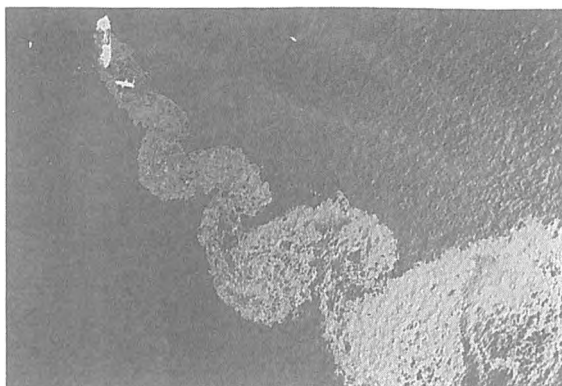


図 39 タンカーからの油の帯—後流の大規模構造

(31) **自由剪断乱流の大規模構造** 速度の異なる二つの平行な流れの境界には速度分布の遷移領域すなわち自由剪断流が形成される。この流れの乱れも大規模構造をもっている (図 40)。

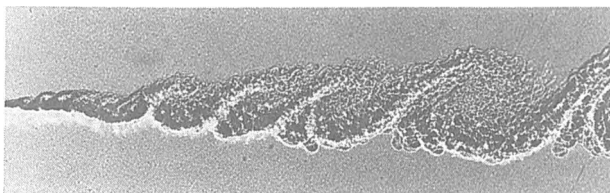


図 40 自由剪断乱流の大規模構造

(32) ビル風と自動車まわりの流れ 風はビルの背後で割れ、激しく渦巻き、複雑な流れ場を作る(図41)。この図はコンピューターによる流れのシミュレーション。

スピードと燃費のよさを競う自動車では、後流の渦領域を小さくするよう、車のデザインにもコンピューター・シミュレーションが活躍する(図42)。

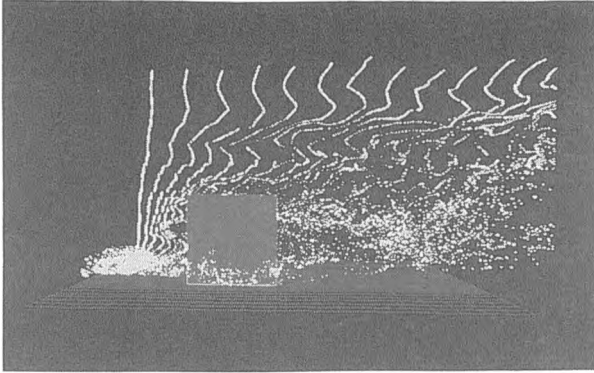


図 41 ビル風のコンピューター・シミュレーション

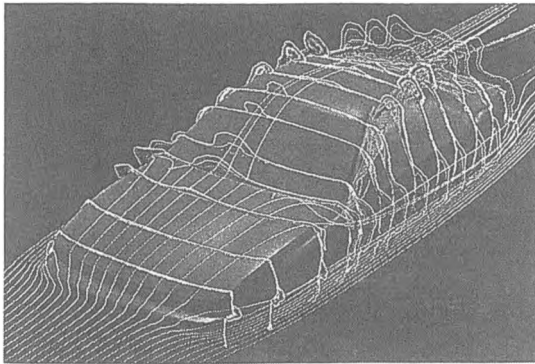


図 42 自動車の車体まわりの流れ

(33) 夏の煙と冬の煙の拡散 仁徳天皇以来、民の竈(カマド)の煙は善政や経済発展のシンボルであった。しかし、人類の活動が大きくなりすぎ、今や環境汚染のシンボルである。煙の拡散は大気の流れ、乱れの強さの目印である(図43)。

(34) 河口ブルーム 海水より軽い河川水や、温度の高い火力発電所からの温排水は、海水の上にブルームとして広がる。密度の異なる二つの流れの間の K-H(ケルビン-ヘルムホルツ)不安定が広がるブルームに貝殻状の模様を画く(図44)。

(35) 海へ流出した洪水流の拡散 川から海へ流れ出た洪水の濁水は流量によっても異なるが、すぐ海水と混合してしまうわけではない。図45は、LANDSATによる衛星画像で、台風時の大雨で浮遊砂のために黄色く濁った大量の河川水が駿河湾に流れ出し、伊豆半島の南や西に大きな渦巻きを作っている様子がわかる。

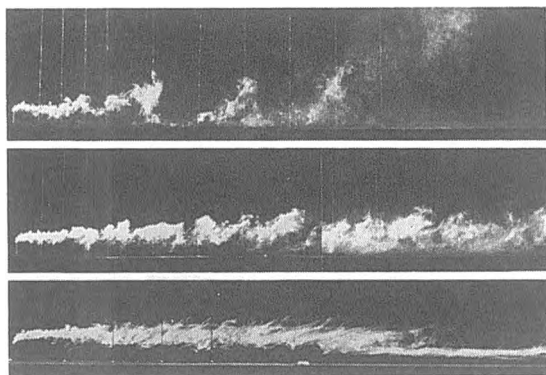


図 43 夏の煙と冬の煙の広がり方



図 44 河口ブルーム



図 45 海へ流出した洪水 (1979.10.22の LANDSAT 衛星画像)

(36) 植生層界面の乱流の組織構造 大気と植物層との界面近傍の流れには、光合成のために必要な大気-植生層間の物質 (CO_2 , O_2 , H_2O) の輸送・交換や拡散を効果的にすると考えられる三次元の組織的渦構造の発達が見られる。図 46 は植生層境界の流れのコンピューターによる三次元シミュレーションである。秋の台風シーズンには稲穂を渡る“穂波”がよく観られる。これは植生層界面の流速分布が変曲点をもつことに基づく不安定現象とも考えられる。

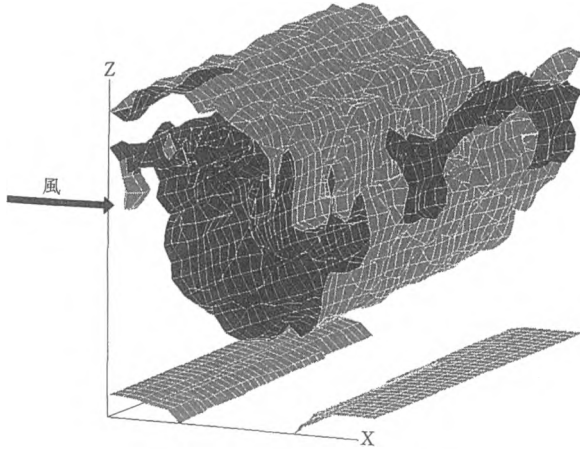


図 46 植生層界面の乱流の組織構造

写真提供・出典

- 図 31 : 浜 良助 (ドイツ, Stuttgart) (Hama, F. R. and Nutant, J.; Proc. 1963 Heat Transf. and Fluid Mech. Inst., 1963)
- 図 32 : Corke, T. and Nagib, H. (Album of Fluid Motion, ed. Van Dyke, 1982)
- 図 33 : Corrsin and Kistler (NACA TN-3133, 1954)
- 図 34, 35 : Kline 他 (Stanford 大) (*J. Fluid Mech.*, **30**, 741-773, 1967; **50**, 133-160, 1971)
- 図 36, 37 : 日野幹雄・孟 岩 (1992)
- 図 38 : Dimotakis, P. E., Lye, R. C. and Papantoniou, D. Z. (1981)
- 図 39 : Griffin, O. M., Naval Research Laboratory, (NASA Photograph) (Album of Fluid Motion, ed. Van Dyke, 1982)
- 図 40 : Brown, G. L. and Roshko, A. (*J. Fluid Mech.*, **64**, 775-816, 1974)
- 図 41 : 村上周三 (東大・生産技術研究所)
- 図 42 : 藤谷克郎・姫野龍太郎 (日産自動車(株)総合研究所車輛研究所) (1989)
- 図 43 : 植田洋匡 (九大・応用力学研究所) (天気, **31**, p.102, 1984)
- 図 44 : 大西外明 (東京理科大)
- 図 45 : 宇多高明 (建設省・土木研究所) (1979)
- 図 46 : 神田 学・稲垣 聡・日野幹雄 (1992)