

Physical fluid dynamics
second edition

トリトン流体力学
第2版

D. J. Tritton 著
河村哲也 訳

©D.J.Tritton 1988.

"Physical Fluid Dynamics Second Edition was Originally Published in English in 1988. This translation is published by arrangement with Oxford University Press."

「流体力学第2版」の原本は、英語版により1988年に出版された。
本書の翻訳はオックスフォード大学出版社との取り決めにより出版されたものである。

第 2 版の序文

初版は今までにあった流体力学の教科書の範囲を広げた興味深い本であるというコメントを多くの読者から頂いてうれしく思っている。その主な理由は、私が初版を特徴あるアプローチで著したためだと思われる。第 2 版ではこういったアプローチを踏襲しながらも、初版を準備した後に重要性をもつようになった話題も紹介している。

主だった変更と追加点は以下のとおりである。流れの剥離の議論を拡張して、説明をより完全なものとし、境界層剥離だけでなく剥離のすべてをカバーするために新たな章 (13 章) を設けた。不安定性の取り扱いについては実質的に構成しなおした。すなわち現象論的な記述と線形安定性理論を合わせてひとつの章 (17 章) とした。ベナール対流は、不安定性の議論の主な題材としては使わず、4 章で簡単な紹介を行ったあと、22 章で詳しく取り扱った。初版での取り扱いはかなり断片的であったが、その後、ベナール対流の理解に実質的な進展があったからである。23 章でその議論を拡張して、二重拡散対流を取り入れた。こういった変更のため、4 章と 14 章にあった他の対流の題材を配置しなおしたが、題材自体は初版とまったく同じものを使った。乱流運動の構造 (21 章) に関する議論では、大きなスケールの運動 (コヒーレント構造) に関連する部分を完全に書き換えた。24 章では「カオス」—これは厳密に言えば流体力学の話題ではなく流体力学を学ぶ学生にとって必要な話題であるが一—に関する最近の考え方について議論した。

本文ではないが、主な変更として問題のヒントと解答を付け加えた。この点に関して私は少し複雑な気持ちである。なぜなら、学生が早くヒントを見たいという誘惑は避け難いものがあるからである。しかし、多くの読者の要望があったのでとりあえずヒントをつけたが、全体のバランスを考えたとき、このようにしてよかったと思っている。

小さな変更点は数多くある。わかりやすくしたり書き改めたりすることが必要かどうか考えながら、また読者から頂いた有用なコメントを心に留めながら、本全体を見直した。図は、より適当なものが利用できるものについては入れ替えたが、多くのものはそのままにしておいた。旧版との連続性と新版の変更の間にうまくバランスがとれていることを望んでいる。

非常に多くの人に何らかの形で手助けして頂いたため、それらの人々すべてを列挙することは不可能であり、その中で何人かをあげることはかなり恣意的になってしまう。しかしあえて言うならば、26 章のいくつかの節では専門的な助言を以下の人々から受けた。それらの人々はハノーバー大学の D.Etling 教授 (26.2 節) ネゲフ・ベングリオン大学の H.Tsoar 博士 (26.4 節)、ダンディ大学の P.A.Dawthorpe 博士 (26.7 節)、ダービーにある鉄道技術センターの R.G.Gawthorpe 氏 (26.10 節)、英国石油サンパリアリ研究センターの A.D.W.Jones 博士 (26.11 節)、ロンドン王立カレッジの M.E.J.Holwill 博士 (26.12 節)、ハーローにある M.R.C. 臨床医学研究センターの R.P.Clark 博士 (26.13 節) である。

本書のそれ以外の部分で助言してくれた人々も私の心からの感謝を受け取ってくれると思う。多くの人々からオリジナルな写真や図表の提供を受けたが、私はこのことに最も感謝している。写真やデータの原著者、原作者は図の説明文や引用文献に挙げている。著作

権のある著作物の複製を許可してくれた方々への謝辞もそれぞれ別途記している。

本書を準備にあたって D.Cooper さん（新しい図表の作成）、J. Hunter 氏、G.Robb 氏に技術的な支援を受け、また L.Whiteford さんには秘書的な支援を受けた。

最後に、オックスフォード出版のスタッフの親身で効果的な協力に感謝している。

D. J. トリトン

ニューキャッスル

1987年8月

初版の序文から *1

一般に本を「理論的な本」というよりは「実験的な本」、あるいは「応用的な本」というよりは「基本的な本」というように分類してしまうと、それはしばしば架空の現実的でない分類になってしまう。しかし、潜在的な読者がその本を必要としているかどうかを判断するためにはある種の判断基準が必要であろう。このような精神からは、本書は流体力学を応用数学や工学の一分野というよりも物理学の一分野として取り扱っている。私は、そのような本が必要であるということを耳にすることが多かったし、自分の教育現場でもそう感じてきた。

私は本書を主として物理学や物理を基本とする応用科学の学生を念頭において著したが、他の分野の学生にも役に立つことを願っている。本書は実験室での実験とその解釈から明らかになることに重点を置き、数式による定式化にはあまり重点をおかなかった。このことが、本書と既存の「基礎的な本」の相違点である。また本書は、題材に、実用的な重要性よりも流体運動の振る舞いになんらかの知見を与えるものを選んだ。本書はこの点で既存の「応用的な本」とも異なっている。さらに、流体力学の興味の対象が近年変化してきたことを反映して、既存の流体力学の本とは取り扱った題材も異なっている。特に、地球物理学と天体物理学への応用上、熱対流や密度成層流そして回転流体の力学などの話題に重要で基本的な発展があったが、今までの教科書にはこれらの話題のごく限られた部分だけが載せられていたにすぎない。

本書の大部分はニューキャッスル大学物理学科の最終学年の学生に対して行った講義に基づいているが、ある題材に対してはかなり加筆している。私はまた、初学者や逆に地球物理学や天体物理学の大学院生に対して流体力学を教えた経験からも多くの教示を受けてきた。種々の話題をどのように教えれば学生たちに最も効果的であるかをいつも考えてきたが、この経験が本書の意図したところに役立っていることを期待している。

予備知識として何を読者に想定するかを決めるにあたって、私は最終学年の物理学科の学生を念頭においた。本書で使っている数学的な手法はすべてそのような学生にとって馴染み深いものである。(ただし、本書の重要な部分は初歩的な数学の知識だけでも理解できるだろう。) さらに、本書は物理学科の学生を想定しているが、他の流体力学の教科書に比べて(関連する熱力学などの)基礎物理に対する説明がほとんどない。しかし、こういった知識をある程度仮定しているため、このことはあまり不思議ではないと思う。

それにもかかわらず、私は本書が広範な読者にも有用であることを願い、本来の目的を損なわない程度に本書の有用性を広げようと努めた。応用科学の種々の分野に携わる人にとって流体现象の理解は必要不可欠である。私は、もちろんそれだけではないが、特に地球物理学や天体物理学を専門とする人(天体内部構造に興味ある学生のみならず気象学や海洋学を専門とする人も含めて)を念頭においており、おそらく私はこういった人たちの必要性を最も直接的に理解している。流体力学の題材が地球物理学のコースの一部に入っている大学では、本書は適当な教科書になるであろう。流体力学に関係するプロジェクト

*1 この初版の序文において、章と節の番号は第2版のものに変えている。

に直面している大学院生や他の研究者も本書に価値を見出すであろう。流体力学の概念をその重要性に対して誤解を生むような形で使ってしまったため、その他の部分では興味深い地球物理学の論文が台無しになっていることが珍しくない。しかし、このような誤解は有用な情報源がない状況を考えれば驚くにあたらない。こういった読者は、流体現象を理解する上で容易な近道があると期待すべきではない。しかし、本書を読めば、長い道のりを行くのに、比較的少ない努力ですむかも知れない。

この種の本では、題材の選び方に議論が多いに違いない。取り扱う主題の範囲は広いいためなんらかの形で多くの省略が必要になる。本書には何が含まれ、なにが省略されているのかを知りたい読者は目次のみならず 1.2 節も参照して欲しい。最大の制約は非圧縮性流れに限ったことである。このような制限を行ったため、本書がいくつかのコースで不適当になることは承知している。しかしながら、圧縮性流れはそれだけでも一冊の本が必要なほど大きな話題であるため、おそらく不完全な 1 章を書くよりは全体を省略する方がよいと思われる。非圧縮性流れに限っても、ある読者にとっては残念と思われるような省略も行っている。私が本書によって成し遂げようとしたことは、学生に流体力学の基礎概念の知識を十分に与えることと、一連の概念に対して十分な洞察を与えることによって、本書で省略した話題を別の（おそらくより高度の）本から得られるようにすることである。

題材の系統だった議論は 5 章から 24 章で行う。1 章で導入を行ったあと、2~4 章では記述的に（あまり表面的になりすぎないようにして）3 つの特別な話題を取り扱う。系統だった議論の前にこれらの話題を置くのには 2 つの理由がある。主な理由は後で調べる種類の現象に対して読者にいくらかの知識を与えるためである。5~8 章の基礎概念は、もしそれらが何のために必要なのかを知らなければ長いものとなるだろう。もうひとつの理由は勉強し始めるの学生にとってこの本が取り付きやすいものになることを期待しているからである。

25 章では実験方法を考える。実験結果をあげるたびにその方法を議論するよりはまとめて議論する方が便利である。26 章は地球物理学、生物物理学、工学などへの流体力学の応用である。それらがどういったものであるかは 26.1 節でもっと詳しく述べている。ある意味でこの章は「楽しみ」のために入れているが、読者がもつ流体力学に対する認識にこういった応用範囲の知識も加えるべきである。

本書全体を通して例になるような多くの題材は研究論文からとられている。簡単に見える話題の詳細が複雑で、未だに完全に理解されていないということは、おそらく物理の他の分野に比べて流体力学がもつ特質である。（大学院を卒業した学生に対して研究のために与えた題材が古くから完全に理解された題材ではないことを確信させることが難しいという経験が私にはあるが、他の人もそういった経験があると思う。）それゆえ、現在でも研究対象になっている話題を、導入的な目的（たとえば 2~4 章）に使うことが適当であることが多い。こういった話題の性質によって、このような本が大学の教科書としても研究者の情報源としても使えるようになる。

図の説明文にはしばしば学生が読み飛ばしたくなるような細かいことが書かれている。これらを記したのは、専門的な読者が実際にデータを得るためには特定の条件が必要にな

るからである。しかし、学生がこういった詳細から実験流体力学の雰囲気のようなものを感じ取ることを期待している。

本書は大学の多くの教科書よりも完全な形で文献の引用を行っている。文献のいくつかは本書の図や本書の考え方のもとになっている。(私は特定のポイントに対して引用文献をあげるのは適当であると思う。なぜなら、ある題材について初心者に対して正当な簡略化を行っても経験豊富な読者からは「どういう意味ですか?」と尋ねられるだろう。)他の文献は、本書を情報源として、さらに話題の詳細を知りたいという読者のためのものである。しかし完全を期すということはしなかった。もしそうするのであればずっと多くの文献を含める必要があるからである。文献では、初期の先駆的な研究よりは最近のレビューや重要な論文を多く取り上げ、話題に上がった文献に対して導入的な説明を与えることを試みた。一般に、それぞれの文献の役割は文脈から明らかであると思う。特定の文献に加えて、関連した本やフィルムの目録も載せておいた。

本書の主要目的は教育にあるため、学生が解くべき練習問題も選んでおいた。ただし、実験に基づいたことがらを強調することは、必ずしもすべての題材が演習問題向きであるとは限らないことを意味している。いくつかの問題は異なった章の考え方も含むため、すべての練習問題は巻末に集めている。問題毎に難易度にかなり差があるため、学生がそのまま解くのではなく、教師がいくつか選んだ後で解くことを想定している。2, 3の問題は方程式に数値を代入するだけのものである。数値の値は物理的に現実味があるものを選んでいるため、学生は機械的に代入するのではなく、現実の状況を想像して欲しい。これとは逆に、2, 3の問題は本書で使われていない数学の知識をもった学生だけが解けるようなものである。またいくつかの問題はニューキャッスル大学の物理の学生に対する試験問題をもとにしたものである。これらの問題を含めることを大学が許可してくれたことに感謝する。

6.2節を書くにあたっては特別の援助が必要であった。S.C.R.Dennis 教授には速度場の詳細な数値を提供していただいた。さらに教授は親切にも文献 [140] よりももっと正確にまたより適当な形で再計算した。これらの計算はジェノバの CERN データ処理センターで行われた。図 6.3~6.6 の一連の計算は、ニューキャッスル大学の計算研究室において、S.Hofmann さんによってなされたもので、彼女の興味と技量に対して深く感謝する。

謝辞

著作権がある図版の再製を許可して頂いた以下の人たちに感謝します。

Academic Press (図 18.3)

American Geophysical Union (図 23.4)

American Institute of Aeronautics and Astronautics (図 21.1)

American Institute of Physics (図 4.10, 16.9)

American Society of Mechanical Engineers (図 15.1)

Annual Reviews Inc. (図 15.3)

Artemis Press (図 26.6)

Barth, J. A. Verlag (図 18.6)

Basil Blackwell Ltd. (図 26.3)

Cambridge University Press (図 4.3, 4.4, 4.5, 4.9, 15.4, 15.7, 17.12, 18.1, 18.4, 18.5, 21.10, 21.18, 21.19, 21.22, 22.3, 22.4, 22.5, 23.2, 23.3, 23.7, 23.8, 24.10)

Central Electricity Generating Board (図 26.12, 26.13)

Chapman and Hall Ltd. (図 26.18)

Company of Biologists Ltd. (図 26.20)

Her Majesty's Stationery Office, by permission of the Controller (図 19.1)

Hydraulics Research Ltd. (図 26.8 and 26.9)

Indian Association for the Cultivation of Science (図 22.13)

Les Editions de Physique (図 24.9)

Macmillan Magazines Ltd. (図 23.5, 26.2)

New York Academy of Sciences (図 24.8)

Pergamon Journals Ltd. (図 3.12)

Physical Society of Japan (図 3.4, 12.1, 12.6, 12.7, 17.20)

Royal Meteorological Society (図 16.14, 16.17)

Royal Society (図 17.11)

Sedimentology (図 26.5)

Springer Verlag (図 2.10(a), (b), 3.7, 14.6, 22.6, 22.7, 22.8)

VDI Verlag (図 14.2, 14.5, 22.14)

Those silent waters weave for him
A fluctuant mutable world and dim,
Where wavering masses bulge and gape
Mysterious, and shape to shape
Dies momentarily through whorl and hollow,
And form and line and solid follow
Solid and line and form to dream
Fantastic down the eternal stream;
An obscure world, a shifting world,
Bulbous, or pulled to thin, or curled,
Or serpentine , or driving arrows,
Or serene slidings, or March narrows.

Rupert Brooke の 'The Fish' (魚) から

訳者序文

本書はD. J. トリトン著の *Physical Fluid Dynamics* 第2版の全訳である。本書の最大の特徴はこの書名からもわかるように、流体力学を「物理的な」視点から解説したところにある。したがって、著者の序文にも書かれているが、数式が中心の数学的な流体力学の本や、取り扱う対象が応用に主眼がおかれた工学的な流体力学、流体工学の本とはかなり異なった本になっている。このことから、この訳本の書名も「物理的視点にたった流体力学」とするのがおそらく原著の趣旨に最もあっているが、書名としては長すぎるため、少しニュアンスは異なるかも知れないがあえて簡潔に「流体力学」とした。

本書の翻訳を思い立ったのは以下の3つの理由からである。第一に、上にも述べたように本書は通常の流体力学の本とはかなり異なったアプローチをとっていて、またそれが見事に成功しているからである。世の中に流体力学の本はあふれているが、類書はほとんどないと思われる。第二に、自分自身ももし流体力学の本を書けと言われても、このようなアプローチでは絶対を書くことができないからである。原著者の深い物理的な洞察に感心せざるを得ない。第三に、取り上げられた題材が、他の流体力学の本では詳しく取り扱われないものが多く含まれているからである。特に熱対流、成層流体や回転流体、不安定性などが非常に詳しくまた物理的に明快に著されている点も本書の魅力であると思われる。

本書とは、初版を訳者が大学院生のときに研究室で輪講したときに会った。そのとき素晴らしい本であることがわかったが、怠慢な学生であったため一部を読んだだけで全部を読み通さなかった。その後、流体力学の数値計算法などに興味に移ったためにそのままこの本の存在を忘れていたが、現在の研究室の大学院生の輪講に使う本を探しているうちにこの本を思い出した。もう一度読んで見て、この本のすばらしさを再認識するとともに学生のところに全部読んでおけばその後の勉強や研究のために役立ったと思い後悔した。そして一人でも多くの人にこの本を読んでもらいたいと思った。これが本書を翻訳した、もうひとつの隠れた理由である。

2001年12月

20年以上前に *Physical Fluid Dynamics* 第2版を訳したがページ数の関係で上下2巻になった。今回インデックス出版から読者の便宜を考えて合本して1冊にするという話があり、これをよい機会として、ミスプリントなどを修正した。

2022年8月
河村 哲也

目次

第 1 章	序章	1
1.1	はじめに	1
1.2	本書の範囲	2
1.3	記法と定義	4
第 2 章	管内流れと溝内流れ	6
2.1	はじめに	6
2.2	層流理論: 溝内流れ	7
2.3	層流理論: 管内流れ	9
2.4	レイノルズ数	11
2.5	助走長さ	12
2.6	乱流遷移	13
2.7	流量と圧力勾配の関係	16
第 3 章	円柱まわりの流れ	18
3.1	はじめに	18
3.2	レイノルズ数	19
3.3	流れのパターン	19
3.4	抵抗	27
第 4 章	平行壁内での自由対流	29
4.1	はじめに	29
4.2	レイリー数とプラントル数	30
4.3	鉛直な隙間内の対流 (文献 [243, 343])	31
4.4	水平層内の対流	33
4.5	表面張力の変動による対流 (文献 [47])	37
第 5 章	運動方程式	39
5.1	はじめに	39

5.2	流体粒子と連続体力学	39
5.3	オイラー座標とラグランジュ座標	42
5.4	連続の方程式	42
5.5	実質微分 (ラグランジュ微分)	43
5.6	ナビエ・ストークス方程式	45
5.7	境界条件	50
5.8	非圧縮性の条件	53
	付録 : 運動方程式の粘性項の導出	57
第 6 章	高度な基礎概念	60
6.1	流線, 流管, パーティクルパス, 流脈 (文献 [388])	60
6.2	円柱まわりの流れに対する比較	62
6.3	流れ関数	66
6.4	渦度 (文献 [24])	66
6.5	循環	69
6.6	渦度方程式	70
第 7 章	力学的相似性	73
7.1	はじめに (文献 [27, 28])	73
7.2	力学的相似性の条件: レイノルズ数	74
7.3	従属量	77
7.4	他の支配無次元パラメータ	78
第 8 章	低レイノルズ数と高レイノルズ数	80
8.1	レイノルズ数の物理的な重要性	80
8.2	低レイノルズ数	81
8.3	高レイノルズ数流れ	82
第 9 章	粘性流れの方程式のいくつかの解	87
9.1	はじめに	87
9.2	ポアズイユ流	87
9.3	回転クウェット流	88
9.4	球のまわりのストークス流	89
9.5	円柱まわりの低レイノルズ数流れ	91
第 10 章	非粘性流れ	92
10.1	はじめに	92
10.2	ケルビンの循環定理	92
10.3	非回転運動	93

10.4	ベルヌーイの方程式	95
10.5	非粘性流中の抵抗 (ダランベールのパラドックス)	96
10.6	ベルヌーイの方程式の応用	97
10.7	いくつかの定義	99
第 11 章	境界層, 後流, 噴流	100
11.1	高レイノルズ数流れにおける粘性領域	100
11.2	境界層近似 (文献 [23])	100
11.3	境界層の分類	103
11.4	圧力勾配がない場合の解	103
11.5	後流	106
11.6	噴流	107
11.7	粘性流中の運動量とエネルギー	111
第 12 章	剥離と付着	114
12.1	剥離現象	114
12.2	剥離の条件	116
12.3	低レイノルズ数の剥離	119
12.4	境界層剥離	121
12.5	高レイノルズ数流れに置かれたにぶい物体と流線形物体	122
12.6	付着と再付着	123
第 13 章	揚力	125
13.1	はじめに (文献 [13])	125
13.2	2 次元翼	126
13.3	3 次元翼	129
13.4	回転物体	130
第 14 章	対流	132
14.1	はじめに	132
14.2	対流の方程式 (文献 [7, 37])	133
14.3	濃度変化による流れ	136
14.4	強制対流	137
14.5	自由対流: 基礎概念 (文献 [37])	140
14.6	断熱温度勾配	144
14.7	熱機関としての自由対流	146
14.8	自由対流: 境界層型流れ	147
付録:	自由対流でのブジネスク近似	152

第 15 章	成層流	161
15.1	基礎概念 (文献 [37, 38])	161
15.2	ブロッキング	164
15.3	風下波	169
15.4	内部波	171
第 16 章	回転流体中の流れ	176
16.1	はじめに (文献 [39, 201])	176
16.2	遠心力とコリオリ力	176
16.3	地衡流とテイラー・プラウドマンの定理	177
16.4	テイラー柱	179
16.5	エクマン層	184
16.6	固有安定性と慣性波	189
16.7	ロスビー波 (文献 307)	190
16.8	回転と成層	195
16.9	回転同心円筒内の対流 (文献 [198])	196
第 17 章	不安定性	198
17.1	はじめに	198
17.2	流体柱の表面張力不安定性	199
17.3	ループ内の対流とローレンツ方程式の安定性	201
17.4	流体力学の線形安定性理論の原理 (文献 [42, 43])	208
17.5	回転クウェット流 (文献 [145])	211
17.6	せん断流の不安定性	218
17.7	境界層に対する安定性理論	220
17.8	渦列	223
第 18 章	せん断流中の乱流遷移	226
18.1	はじめに	226
18.2	境界層遷移	227
18.3	管内流れの遷移	231
18.4	噴流の遷移	235
第 19 章	乱流	240
19.1	乱流運動の性質 (文献 [98, 244])	240
19.2	乱流運動の統計的記述	243
19.3	乱流方程式	245
19.4	相関の解釈	248
19.5	スペクトル	250

19.6	乱流中の渦塊	252
第 20 章	一様等方性乱流	253
20.1	はじめに (文献 [44, 45])	253
20.2	空間相関と完結問題	253
20.3	スペクトルとエネルギーカスケード	255
20.4	エネルギーカスケードの力学過程	259
第 21 章	乱流せん断流	261
21.1	レイノルズ数相似性と自己保存	261
21.2	間欠性とエントレインメント	263
21.3	乱流後流	267
21.4	秩序構造：一般的なものと後流	269
21.5	壁近くの乱流 (文献 [328])	273
21.6	境界層内の秩序構造	279
21.7	乱流成層流	284
21.8	逆遷移 (文献 [287])	290
第 22 章	水平層内の対流	292
22.1	はじめに (文献 [47, 105, 106, 292])	292
22.2	対流の開始 (文献 [42])	293
22.3	開始直後の対流	295
22.4	レイリー数が増加したときの変化：一般的な注意	296
22.5	欠陥のない自由対流の変化	297
22.6	欠陥をもった対流の変化 (文献 [83])	301
22.7	高いレイリー数での対流と乱流	302
第 23 章	2 重拡散対流	306
23.1	はじめに (文献 [37, 206, 395])	306
23.2	塩が引き起こす対流	307
23.3	温度駆動対流	311
23.4	層状化	316
第 24 章	力学的カオス	318
24.1	はじめに (文献 [88, 134, 340, 361, 378])	318
24.2	ローレンツ方程式 (文献 [259, 353])	319
24.3	外力が加わった球状振り子のカオス的な運動	324
24.4	カオスに至る道すじ	326
24.5	流体力学におけるカオス	330

24.6	乱流に対する関係	331
24.7	乱流遷移に対する関係	332
	付録：ローレンツ方程式と完結問題	335
第 25 章	実験方法	338
25.1	実験流体力学の一般的な見地	338
25.2	速度の測定（文献 [51]）	340
25.3	圧力と温度の測定	344
25.4	流れの可視化（文献 [25, 36, 68, 409]）	344
25.5	数値実験	347
第 26 章	流体力学の応用	349
26.1	はじめに	349
26.2	雲のパターン	349
26.3	大気循環の波動	351
26.4	砂丘の形成と動き（文献 [71, 191]）	352
26.5	大陸移動と地球マンツルの対流	354
26.6	太陽の粒状構造（文献 [99, 178]）	356
26.7	流出物のまきちらし（文献 [160,220]）	357
26.8	構造物に対する風の影響	359
26.9	境界層制御：渦発生器	361
26.10	列車の空気力学	362
26.11	結晶成長（文献 [47, 77]）	364
26.12	うねりを利用した泳ぎ方（文献 [100, 251]）	366
26.13	人体からの対流	368
26.14	ブーメランの飛行	369
	表記法	372
	問題	379
	ヒントおよび問題の解答	397
	図書目録と参考文献	405
	索引	418

第 1 章

序章

1.1 はじめに

日常の観察から、運動状態にある液体や気体は非常に多彩に、またしばしば複雑に振る舞うことはよく知られている。液体や気体を実験室の制御された条件のもとで観察する場合、たとえ実験装置が単純であっても、流れのパターンの多様性や複雑性が現れることに気づく。流体力学とはこれらの現象を研究する学問であり、流体力学の目的は、与えられた状況で何が起り、またそれがなぜ起きるのかを理解することにある。

運動状態にある流体の振る舞いを支配する基本的な物理法則は通常よく知られた力学の法則、すなわち本質的には質量の保存則とニュートンの運動法則であり、またある種の問題に対しては、熱力学の法則が加わる。現象の複雑さはこれらの法則の結果として起きる。観察された流れのパターンを支配方程式から導く方法は通常は適切ではない。一方では基本法則に基づいてもう一方では実験的な観察に基づいて、壮大な理論的、概念的な学問が構築されてきたが、それらをつなぎ合わせる必要がある。

ほとんどの流体力学の研究では流体の物性、すなわち密度、粘性率、圧縮率などが既知であるとする。もちろんこういった物性の研究、あるいは種々の流体の分子構造に基づく物性値の説明は、物理学の他の重要な分野を形成している。しかし、多くの場合、これらと流体力学との重なりはわずかである。これは本質的にはほとんどの流れが流体の分子構造まで遡らなくてもマクロ的な見方で完全に理解できるからである。

したがって、大部分の流体力学の問題は、既知の法則のもとで、特定の条件および特定の性質をもった流体がどのように振る舞うかということに關係している。たとえば、管の両端にかけた圧力差のもとで管の中の油に何が起きるかを知りたいかも知れないし、熱源の上で熱い空気の柱が上昇するとき何が起きるのか、また回転しているテーブルの上に置かれたタンクの中で固体の球を動かしたとき何が起きるのかを知りたいかも知れない。このような問題を、支配法則を適切に数学的に定式化して解く。その上で、実験はそのようにして得られた解が現実と合うかどうかチェックするというのが理想である。しかし実際には数学的な取り扱い是非常に難しく、理論は実験観察や測定を補足するだけであったり、場合によってはそれらにとって代わられたりすることが多い。流れに対して数学的に完全

に正しい記述が得られた場合でさえ、実験の方からどのような理論が必要とされるのかが示されたあとではじめて理論が可能になってきた。こういったことがらには理論と実験の間の相互理解が含まれる。流れの振る舞いを理解するために理論および実験が役立つ割合は題材によって大きく変化する。本書は実験が特に重要な役割を果たす話題を重点的に取り上げた。

一方で、本書は主として応用的な流体力学よりは「純粋な」流体力学を取り扱っている。そして実際の応用にとって重要になるような複雑な現象よりは、簡単な—ここで簡単というのは課される条件が簡単ということであるが—状況のもとでの流体现象の理解を深めることを意図している。応用が流体力学の発達に大きな影響を及ぼしていることを否定しているわけではない。流体力学には工学や地球・天体物理学そして生物物理学に多方面にわたる重要な応用がある。もし読者がこの点に疑問をもたれるのならば、26章を少し読めば疑問はなくなるであろう。たとえ基礎的な研究であっても、研究のために選ばれる題材は、現在重要と見なされている応用面に負うところが多い。たとえば、流体全体が回転するとき起きるような内部の現象は、天体や海洋の運動に現れる場合には非常に重要である。そしてもしそのことがなければ現在のよな注目を受けたかどうかは疑問である。

1.2 本書の範囲

流体力学にはいろいろな側面がある。どのような本であっても取り扱う題材になんらかの制約を加える必要があるが、本書には以下に述べる6つの制限がある。

1. 古典力学の法則を適用する。他のところでも考察するが、流れを低速に限るという制約をつける。したがって、相対論的な効果は重要ではない。量子力学的な効果を排除するという事は、単に液体ヘリウムを取り扱わないことを意味するにすぎない。
2. 流れのスケールは分子の平均自由行程に比べて常に長いとする。すなわち、流体は連続体として取り扱う。この点に関してより正確な意味付けは5.2節で行う。このことは、非常に低圧の気体（希薄気体）は考察しないことを意味する。
3. 非圧縮性流れだけを考える。すなわち、圧力変動によって重要な密度変動がもたらされないような流れを考える。このことは、等温の流れでは、密度が一定であることを意味する。等温でない流れでは、密度は温度だけの関数であることを意味する。

この条件を満足する状況は2つある。ひとつは、流体の圧縮性が非常に小さく（体積弾性率が非常に大きく）たとえ大きな圧力変動があるとしても、わずかな密度変動しか起こさないような状況である。もうひとつは圧力変動が十分小さくて、たとえ圧縮性があまり小さくなくても、密度変動が小さいようなケースである。液体はふつう、前者の理由から非圧縮性として取り扱う。さらに驚くべきことに、気体の流れも5.8節で見るように流れの速さが音速に比べて小さいとき、常に後者の理由から非圧縮性として取り扱うことが多い。したがって、この制限から気体の高

速流れ（圧縮流れ）の現象を取り扱うことはできない。それでも、液体と同様に気体の力学でも興味ある広範囲の状況が残されている。

4. ニュートン流体だけを考える。これは、応力に影響する流体の物理的な性質に関することがらである。ここで応力とは流体の運動により生じ、その結果、流体力学に入ってくる力である。ニュートン流体の意味することを見るため、図 1.1 に示すような簡単な状況を考えよう。このような簡単な場合ではなく、一般的な流れの状況に対するニュートン流体の関係式、すなわちニュートン流体のもっと厳密な定義は 5.6 節で考える。図 1.1 は、向きは同じであるが垂直方向に大きさが変化するような速度で運動している流体を示している。この場合、速度の x 成分が唯一の 0 でない成分 u であり、この u は座標 y のみの関数になっている。 y 軸に垂直な流体内の任意の面 AB を横切って応力が働く。図 1.1 に示したように、面 AB の上側の速い流体が下の流体を前に引きずり、下側の遅い流体が上側の流体を後ろに引きずる。このとき図のように流体の上下には大きさが等しくて逆向きの力が働く（矢印は力が働く流体の側面に描かれているが、力の作用線は実際には分割面 AB 内にある。）この内力の生成は粘性作用として知られている。ニュートン流体では、応力は速度勾配に正比例する。もし τ を単位面積あたりの力とすれば

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1.1)$$

となる。ここで μ は流体の粘性係数であり、しばしば粘性率と呼ばれる。ニュートン流体の別の定義は、ニュートン流体とは一定の粘性率をもつ流体であるということができる。ここで一定というのは、速度に依存しないという意味である。ニュートン流体の粘性率は（通常は）温度に依存し、また（まれに）圧力にも依存する。

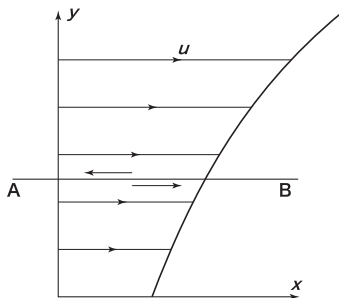


図 1.1: 単純な速度変化 $u(y)$ によって発生する粘性応力の概念図。短い矢印は A B 面に働く力を表しているが、力を受ける流体側に描かれている。

単純な形で相互作用する小さな分子からなるすべての気体や液体はニュートン流体に近い。非ニュートン流体的な振る舞いは以下のような場合に起こり得る。それらは、長い分子（高分子）からなる液体、高分子の溶液、通常に比べて秩序だった構造で分子が集まる傾向にある液体、サスペンションや懸濁液（前者は固体の小物質

が液体の中に混ざっているときに使われ、後者は液体の粒が他の液体に混じっている場合に使われる) などである。したがって、実験室でふつうに使われる流体は、多くの重要な応用に現れる流体と同様にニュートン流体である。しかし、ニュートン流体に話を限ると、生物物理(細い血管を通る血液の流れ)、工業的な応用(塗装など)、化学工学に現れる重要な種々の流体を除外することになる。

5. 自由表面をもった流れ(ただし、4.5 節と 17.2 節の 2 つの例外を除く)は考えない。水面上の波、水路、泡や水滴といった話題は本書の範囲外である。
6. 電磁気学的な影響が重要な問題、これは純粋に電磁流体力学的な問題(たとえば電場のなかで誘電率が変化するような流れの振る舞い)と磁気流体力学的な問題(たとえば磁場中での導電性の流体の流れ)の両方を含むが、それらの問題は考えない。

上述の制限のすべては、程度の差はあっても、重要で興味深い問題を省いてしまうことを意味している。しかし、本書の範囲内でも、現象の範囲は広くて変化に富んでいる。課された圧力勾配のもとで起きる流れ、境界間や境界とまわりの流体間の相対的な運動により生じる流れ、対流すなわち温度変動に関係する流れやそれによって誘導される流れ、そして全体の系の回転や強い密度成層に大きく影響される流れなどを本書では主に取り扱う。これは、少し見ただけでは、広範囲にわたる話題ではないかも知れないが、それぞれの流れには多様な側面がある。なぜなら、ある種の流れを変化させて別の流れにするような不安定性が発生することが多いからである。本章に続く 3 つの章では、流体に現れる現象の多様性や複雑性、特に、非常に単純な条件のもとでも複雑性が起こり得ることを示す。26 章で取り上げる流体力学の応用例は、応用科学の広い分野から引用されたものである。しかし、本書の範囲内で少なくとも部分的には理解できる話題が選ばれていることに注意しておこう。

特定の実験装置に関連する部分を除いて、本書の大部分では、液体と気体の区別はせずに、流体として議論する。これは、上の制限の範囲内で液体と気体が(7 章で見られるように、定量的に正しい方法で比較されていると仮定するならば)全く同じ現象を示すからである。6. を除いていかなる制限も適用されない状況では、流体を液体としても気体としてもよい。3. と 4. は特に重要である。多くの流れにおいて気体があたかも非圧縮性として振る舞ったり、多くの液体と気体に同じ粘性の法則が適用できたりするという事実があるため、液体と気体という 2 つの相に対して共通の枠組みで力学的な記述ができるのである。

1.3 記法と定義

本書で使う記号のリストは巻末(372~378 頁)にある。本文ですでに定義された記号が再度現れたとき、このリストが役に立つ。

ここでは、本書全体を通して現れる基本的な流体力学量の記号についてのみ注意しておく。流体の速度を \mathbf{u} (その直角座標における (x, y, z) 方向成分を (u, v, w) とする)、流体の圧力を p 、温度を T 、密度を ρ 、粘性率(すでに 1.2 節で導入した)を μ 、動粘性率(μ/ρ)を ν 、そして時間を t とする。