

生命情報基礎論（地球流体力学, 波動物理学）
2016 年度講義ノート

岩山隆寛

目次

第 1 章	序論	5
1.1	連続体	5
1.2	流体粒子	6
1.3	応力	6
1.4	流れの記述	8
第 2 章	運動学と構成方程式	13
2.1	Helmholtz の基本定理	13
2.2	Pascal の原理	15
2.3	構成方程式	17
第 3 章	流体力学の基礎方程式	19
3.1	連続の式	19
3.2	運動方程式	22
3.3	エネルギー論	27
3.4	熱力学的エネルギーの方程式	28
3.5	まとめ	30
第 4 章	状態方程式	33
4.1	理想気体の状態方程式	33
4.2	順圧流体の状態方程式	34
4.3	Boussinesq 流体の状態方程式	36
第 5 章	流体力学の基礎方程式の応用 (1): 静力学平衡	39
5.1	大気鉛直構造	39
5.2	Archimedes の原理	42
第 6 章	流体力学の基礎方程式の応用 (2): 音波	45

6.1	問題設定	45
6.2	線形近似	46
6.3	波動方程式	48
6.4	分散関係式	48
6.5	縦波・横波と圧縮条件の関係	49
6.6	波動解の種類	50
第 7 章	流体力学の基礎方程式の応用 (3):浅水系	53
7.1	はじめに：問題設定	53
7.2	浅水方程式	54
7.3	重力波	56
第 8 章	回転系上の運動方程式	59
8.1	Coriolis の力	59
8.2	回転系における運動方程式	63
8.3	球座標系	64
8.4	実効重力	64
8.5	球座標系での運動方程式	67
8.6	デカルト座標近似された運動方程式	68
第 9 章	回転系上の運動方程式の簡単な応用	73
9.1	問題設定	73
9.2	バランスした流れ：傾度風平衡	73
9.3	傾度風平衡の吟味	75
9.4	幾つかの特別な場合	77
9.5	温度風平衡	79
第 10 章	渦	81
10.1	渦度	81
10.2	渦度方程式	82
10.3	Lagrange の渦定理 (渦の不生不滅の定理)	83
10.4	循環	84
10.5	循環定理	85
10.6	渦位の保存則	86
10.7	Bernoulli の定理	88

第 11 章	回転系上の流体中の波動:Rossby 波	91
11.1	問題設定	91
11.2	渦度方程式	92
11.3	線形近似	93
11.4	平面波解	94
11.5	Rossby 波の特性	94
11.6	Rossby 波の伝播の機構	95
11.7	エネルギー論	95
第 12 章	成層流体の特性	99
12.1	温位	99
12.2	乾燥大気の静的安定性	101
第 13 章	成層流体中の波動:内部重力波	107
13.1	問題設定	107
13.2	線形近似	108
13.3	Boussinesq 近似	109
13.4	平面波解	111
13.5	Boussinesq 近似の妥当性	112
13.6	内部重力波の特性	113
13.7	Boussinesq 近似におけるエネルギー論	114
第 14 章	相似性	117
14.1	序	117
14.2	Reynolds の相似法則	118
14.3	Reynolds 数の物理的意味	119
14.4	その他の無次元数	119
第 15 章	水の波	121
15.1	はじめに	121
15.2	水の波の境界値問題: 問題設定	121
15.3	微小振幅波	123
15.4	一様な深さの海 (1 次元波)	124

ガイダンス

授業のテーマと目標

この授業では流体力学の基礎を講義する。^{*1} 物質の三態、即ち、気体、液体、固体のうち、気体と液体は力を加えると変形し、流れるという共通の性質を持っている。そこで、気体と液体を総称して流体（fluid）と呼び、その運動を調べる学問分野が流体力学（fluid mechanics）である。流体力学は基礎方程式が1800年代には提出され学問が体系化されたので、物理学の中では力学、熱力学、電磁気学などの分野と同じように古典物理学に分類される。しかしながら、日本の大学の理学部では力学、熱力学、電磁気学は必須の科目であるのに対して、流体力学は必須科目どころかあまり開講されていないようである。そこで、この授業は流体力学を学ぶ貴重な機会である。

流体力学は、小さなスケールでは血管の中の血液の流れから、大きなスケールでは星間空間物質から星や惑星が形成される過程など、時間的にも空間的にも非常に幅広いスケールの現象に適用され、応用範囲が広い。例えば、地球惑星科学関連の学問分野では、気象学、海洋学、宇宙物理学で流体力学が応用されている。流体力学のこれらの分野への応用例は、他の授業に譲る。この授業では理学部や発達科学部の学生として持つておくべき流体力学の基礎知識について解説する。

成績の評価方法

学期末に行う試験により評価する。

教科書・参考書

幾つか推薦図書を挙げておく。流体力学のテキストを一冊ぐらいは手元に持つておくことを勧める。また、できれば「研究者向け」と紹介されている本は、一度は手に取って眺め

^{*1} 受講する学生の所属学部、学科によって異なる授業科目名が割り当てられているが、いずれ流体力学もしくは地球流体力学というような名前に変更される。

て欲しい。

1. 木田重雄, 「なっとくする流体力学」(講談社)【初学者向け】

講談社の“なっとくするシリーズ”の1冊。著者は流体力学, 特に乱流理論の世界的に有名な研究者であり, 近年「乱流力学」という450ページの大著も著している。他の“なっとくする”シリーズと同様に, 難しい数式を極力減らし, 基本的な考えを丁寧に解説している。またベクトル解析の詳しい説明が付録についていることも特徴で, ベクトル解析の教科書としても適当である。

2. 巽友正, 「流体力学」(培風館, 新物理学シリーズ21)【一般向け】

著者は乱流理論の専門家で, 準正規理論と呼ばれる乱流の解析的理論のひとつを提唱した。次に述べる今井功著「流体力学」との大きな違いは, 粘性流体の運動方程式から説き起こし, 比較的早い章で波の運動を扱っている点である。また, 今井著「流体力学」では書かれていない「乱流への遷移」や「乱流の統計理論」についての章が設けられていることも特徴のひとつである。実在の流体は少なからず粘性を持っているために, まず実在する流体としての粘性流体を記述する上での概念や基礎方程式の導出を行い, 数学的に扱いやすい理想的な非粘性流体の運動は粘性流体の近似として位置づけている。この本に準じた内容で初学者向けの“巽友正, 「連続体の力学」(岩波書店, 岩波基礎物理シリーズ)”も出版されている。

3. 谷一郎, 「流れ学 第3版」(岩波書店, 岩波全書136)【初学者～一般向け】

流体力学の入門書を意図して書かれた本で, 多くの流体力学の教科書が数学的側面を強調して, 書かれているのに対し, 本書は物理的な解釈に重点を置くように書かれたている。1967年の出版以来いまだに読みつがれている名著である。

4. 今井功, 「流体力学(前編)」(裳華房)【一般～研究者向け】

著者は航空力学の専門家で, 文化勲章受賞者である。著者は応用数学にも強く, 超関数の本も執筆している。今井先生は誠に残念ながら2004年秋に亡くなったので, 流体力学(後編)は未完となった。この本では粘性のない流体(完全流体)の力学から説き起こし, 渦のない流れ, 渦運動の力学, そして粘性流体へと議論を進めている。渦運動の章は特に詳しく, 世界的に見てもこの本ほど詳しく渦運動を詳しく扱っている本はない。^{*2} 波を扱った章は残念ながら(後編に掲載される予定であった)。なお, この書籍のコンパクトなもの(全書版)として, “今井功, 「流体力学」(岩波書店)”が出版されている。(私は大学2年生のときにまずこの全書版で流体力学の勉強をした。)

5. G. K. Batchelor, 「An Introduction to Fluid Mechanics」(Cambridge U. P.)

^{*2} P.G.Saffma, “Vortex Dynamics”, Cambridge Univ. Press. を除いて。

【一般～研究者向け】

著者は乱流理論の大家で、流体力学で現在最も権威ある雑誌 Journal of Fluid Mechanics の創始者である。残年ながら 1999 年に亡くなった。日本語訳が電機大学出版会から発行されている（訳者：橋本英典, 松信八十男）。

6. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, 「Fluid Mechanics」 (Pergamon Press) 【一般～研究者向け】

物理学を学ぶ者は必ず手にする Landau - Lifshitz 理論物理学教程の 1 冊。Landau は 1962 年のノーベル物理学賞受賞者。東京書籍から翻訳が出版されている。

7. S. H. Lamb, 「Hydrodynamics」 (Cambridge U. P.) 【一般～研究者向け】

1879 年に初版が発行された流体力学の教科書の古典中の古典。著者は Sir の称号を持つ。現在手に入る版は第 6 版。東京書籍から翻訳が出版されている。

連絡先

授業に対する質問や要望がある人は遠慮なく授業中にしてください。講義を中断してもかまいません。講義が終わった後で気付いたことは、私の居室（自然科学総合研究棟 3 号館 502 号室）に来て指摘してくれても結構ですし、

e-mail: iwayama@kobe-u.ac.jp

へ電子メールを送ってもかまいません。なお、今までの講義ノートや今年度の講義ノートは私のホームページ

<http://www2.kobe-u.ac.jp/~iwayama/>

からたどれるページに掲載しています。必要な人はダウンロードしてください。