

# 目 次

まえがき

<b>第1章 序 論</b>	(巽 友正)
1.1 乱流現象とは何か	1
1.2 乱流現象と流体力学	2
1.3 乱流現象の記述	4
1.3.1 流体力学的基礎 (4)	
1.3.2 乱流の統計的記述 (7)	
<b>第2章 流れの安定性と攪乱の非線形挙動</b>	(後藤金英)
2.1 線形安定性	14
2.1.1 初期値問題 (16)	
2.1.2 固有値問題 (18)	
2.1.3 連続固有値 (21)	
2.1.4 Squire の定理 (23)	
2.2 周期流の安定性	25
2.2.1 平行周期流 (25)	
2.2.2 長波長攪乱 (26)	
2.2.3 中立曲線 (28)	
2.2.4 非平行周期流 (31)	
2.3 非線形理論	33
2.3.1 準臨界問題 (36)	
2.3.2 Stewartson-Stuart 方程式 (37)	
2.3.3 超(亜)臨界問題 (39)	
2.3.4 数値シミュレーション (41)	
<b>第3章 非線形波動</b>	(矢嶋信男)
3.1 非線形性, 分散性, 孤立波	47
3.1.1 非線形効果 (47)	

3.1.2	分散効果 (49)	
3.1.3	孤立波 (51)	
3.2	KdV 方程式	53
3.2.1	初期値問題とソリトン (53)	
3.2.2	KdV 方程式の多ソリトン解 (54)	
3.3	ソリトン共鳴	58
3.3.1	Kadomtsev-Petviashvili 方程式 (58)	
3.3.2	2-ソリトン解とソリトン共鳴 (60)	
3.3.3	ソリトン共鳴の役割 (62)	
3.3.4	ソリトン共鳴の実験例 (68)	
3.4	不安定系とソリトン	69
3.4.1	ソリトン・モード (70)	
3.4.2	ソリトン・モードの安定性 ( $a < 2/3$ ) (71)	
3.4.3	爆発モード (72)	
3.4.4	拡張 Boussinesq 方程式 (74)	
3.4.5	拡張 Boussinesq 方程式—続き ( $\epsilon > 0$ ) (78)	

#### 第4章 カオスの発生とその機構

(蔵本由紀)

4.1	はじめに	83
4.2	カオス発生の実験的検証	88
4.2.1	Fenstermacher らによる Couette-Taylor 系の実験 (88)	
4.2.2	Rayleigh-Bénard 系の実験 (90)	
4.2.3	実験で見出されたカオスへの道筋 (94)	
4.3	模型方程式の数値解析	95
4.3.1	Couette-Taylor 系 (97)	
4.3.2	Rayleigh-Bénard 系 (97)	
4.4	周期軌道の不安定化	99
4.4.1	力学系の離散化 (99)	
4.4.2	不安定化の三つのタイプ (100)	
4.4.3	分岐点近傍のダイナミックス (101)	
4.5	2 <sup>n</sup> 分岐によるカオスの発生	105
4.5.1	1次元模型の妥当性の根拠 (105)	
4.5.2	1次元写像に関する予備的概念 (107)	
4.5.3	Feigenbaum の繰込み理論 (108)	
4.6	位相ロッキングの微細構造と自己相似性	113
4.6.1	円写像とトーラス運動 (113)	
4.6.2	トーラス運動の臨界現象 (115)	

## 第5章 カオスの臨界現象と統計的性質

(森 肇・岡本寿夫)

5.1	奇妙なアトラクターと1次元縮約写像	121
5.2	1次元写像のダイナミクス	126
5.2.1	窓とバンド分裂 (126)	
5.2.2	周波数ロックとカオス (132)	
5.2.3	時間相関関数とパワー・スペクトル (136)	
5.2.4	区分的に線形な鞍点結節点分岐 (142)	
5.3	間欠的カオスの臨界現象	148
5.3.1	バーストによる振幅と位相のランダムなジャンプ (148)	
5.3.2	位相のジャンプ (150)	
5.3.3	振幅変調 (154)	
5.3.4	非振動的時系列の間欠性 (156)	
5.3.5	2次の鞍点結節点分岐 (156)	
5.4	おわりに	161

## 第6章 乱流の統計理論

(巽 友正)

6.1	乱流の現象論と統計理論	165
6.2	一様乱流の統計理論	166
6.2.1	一様乱流 (166)	
6.2.2	速度場の Fourier 解析 (167)	
6.2.3	エネルギー・スペクトル (168)	
6.2.4	特性汎関数 (169)	
6.2.5	モーメントとキュムラント (172)	
6.2.6	等方性乱流 (174)	
6.3	3次元等方性乱流	176
6.3.1	局所平衡理論 (177)	
6.3.2	乱流の間欠性 (180)	
6.3.3	解析的統計理論 (186)	
6.4	3次元乱流の相似則	197
6.4.1	エネルギー・スペクトルの相似則 (198)	
6.4.2	各種統計量の相似則 (204)	
6.5	2次元等方性乱流	207
6.5.1	非粘性エンストロフィ散逸 (207)	
6.5.2	エネルギー・スペクトルの相似則 (208)	
6.5.3	エンストロフィ減衰則 (211)	
6.6	平均流を伴う一様2次元乱流	212

6.6.1	せん断乱流 (213)	
6.6.2	平均流を伴う一様乱流 (213)	
6.6.3	平均流を伴う一様2次元乱流 (214)	
6.6.4	軸対称伸長流を伴う2次元等方性乱流 (215)	
6.7	結 語	216

## 第7章 渦運動の力学

(橋本英典)

7.1	渦分布による流れ	223
7.1.1	集中渦 (224)	
7.1.2	局在渦分布 (226)	
7.1.3	遠方場 (227)	
7.1.4	2次元のばあい (229)	
7.2	渦運動の力学	230
7.3	2次元渦糸群の力学	233
7.3.1	相似解 (235)	
7.3.2	流れの中の渦糸群 (236)	
7.3.3	流れの中の渦 (239)	
7.3.4	境界のあるばあい (243)	
7.3.5	半円の中の渦対 (249)	
7.3.6	多数の渦糸 $N \rightarrow \infty$ (252)	
7.4	渦糸の力学	253
7.4.1	円形の渦輪 (256)	
7.4.2	軸対称領域での渦輪の軸対称運動 (257)	
7.4.3	3次元渦糸の運動 (259)	
7.4.4	渦糸の形を変えない運動 (261)	
7.5	む す び	263

## 第8章 乱流の数値解析

(高見穎郎)

8.1	数値解析の方法	267
8.1.1	乱流の数値シミュレーションの重要性 (267)	
8.1.2	Navier-Stokes 方程式の直接数値シミュレーション (268)	
8.1.3	乱流モデルを用いたシミュレーション (268)	
8.1.4	渦糸モデルによるシミュレーション (269)	
8.2	ラージ・エディ・シミュレーションの方法	269
8.2.1	ラージ・エディ・シミュレーション (LES) (269)	
8.2.2	平行平板間の乱流場のシミュレーション (271)	
8.3	Navier-Stokes 方程式の直接シミュレーション	277

8.3.1	短波長成分の悪影響を除く差分表式 (277)	
8.3.2	表面に粗さをつけた円柱のまわりの流れの遷移 (279)	
8.3.3	平行平板間の乱流と遷移 (283)	
8.4	渦糸モデルによるシミュレーション	287
8.4.1	渦糸近似法 (287)	
8.4.2	2次元流への応用 (288)	
8.4.3	3次元流への応用 (291)	
8.5	その他の研究	293
8.5.1	数式処理による Padé 近似の応用 (293)	
8.5.2	乱流の数値解析の数学的基礎づけ (293)	

## 第9章 層流—乱流の遷移

(佐藤 浩)

9.1	遷移現象のあらまし	297
9.2	流体境界流の乱流への遷移	298
9.3	固体境界流の乱流への遷移	304
9.4	乱流斑点	314
9.5	乱流の制御	318

## 第10章 渦の生成・崩壊

(松井辰弥)

10.1	はじめに	333
10.2	渦輪	333
10.2.1	一对の渦輪の相互追抜き (333)	
10.2.2	渦輪列の干渉 (334)	
10.2.3	渦輪と固体壁との干渉 (340)	
10.3	渦対	346
10.3.1	2組の渦対の相互追抜き (347)	
10.3.2	渦対と円柱との干渉 (348)	
10.4	円柱背面の剝離渦	349
10.4.1	渦度分布 (349)	
10.4.2	渦度分布と乱れの発生 (350)	
10.5	Kármán 渦列の再配列	352
10.5.1	円柱の伴流 (353)	
10.6	軸対称渦の安定と崩壊	359
10.6.1	基礎関係式 (359)	
10.6.2	微小擾乱流の解 (360)	
10.6.3	中立安定の解 (360)	

- 10.6.4 中立安定の速度場と流れの形 (363)
- 10.6.5 むすび (366)

## 第 11 章 せん断乱流

(小橋安次郎・丸尾 孟)

11.1 乱流拡散 .....	369
11.1.1 乱流拡散と拡散係数 (369)	
11.1.2 Prandtl の混合距離仮定 (370)	
11.1.3 一様流中での拡散 (371)	
11.1.4 せん断乱流中での拡散 (374)	
11.2 せん断乱流の一般的性質 .....	375
11.2.1 自由せん断乱流 (375)	
11.2.2 壁乱流 (377)	
11.2.3 摩擦抗力 (380)	
11.2.4 乱流エネルギー (381)	
11.2.5 せん断乱流における圧力勾配および壁面の影響 (384)	
11.2.6 浮力を伴う熱拡散 (388)	
11.3 物体伴流と剝離 .....	389
11.3.1 伴流の構造 (389)	
11.3.2 剝離の形態 (401)	
11.3.3 伴流中の乱れ (404)	
11.4 せん断乱流の組織構造 .....	420
11.4.1 乱流界面の間欠性とせん断乱流の 2 重構造 (420)	
11.4.2 組織運動と乱れ (422)	
11.4.3 大規模運動とバースト (423)	
11.4.4 組織運動とパターン認識 (428)	
11.4.5 壁乱流におけるバースト現象 (431)	
11.4.6 組織運動と圧力の変動 (433)	
11.4.7 組織運動の構造と成因 (436)	
11.4.8 乱流の制御 (440)	

## 第 12 章 乱流と音

(坂尾富士彦・神部 勉)

12.1 はじめに .....	447
12.2 渦音の理論 .....	450
12.2.1 渦音の一般公式 (450)	
12.2.2 軸対称渦運動からの放射音 (非粘性) (452)	
12.2.3 粘性渦運動による放射音 (453)	
12.3 渦音の実験 .....	455

12.3.1	装置とデータの記録 (455)	
12.3.2	実験結果 (456)	
12.4	噴流による音と剝離点の変動による音 .....	459
12.5	自由乱流による音の吸収 .....	467
12.6	乱流による音の散乱 .....	470
12.6.1	乱流による散乱 (470)	
12.6.2	渦による散乱 (471)	
<b>第 13 章 密度成層乱流</b>		<b>(荻野文丸)</b>
13.1	密度成層流における乱れの発生 .....	475
13.1.1	Kelvin-Helmholtz の不安定 (475)	
13.1.2	攪乱方程式 (475)	
13.1.3	攪乱方程式の解 (477)	
13.1.4	乱流への遷移 (479)	
13.2	密度成層乱流における輸送現象 .....	480
13.2.1	輸送方程式 (480)	
13.2.2	スペクトル方程式 (482)	
13.2.3	Monin-Obukhov の相似理論 (485)	
13.2.4	乱流拡散係数 (487)	
13.2.5	乱流運動量流束および乱流熱流束 (491)	
13.2.6	密度成層流の乱流構造と輸送現象 (494)	
13.3	熱対流 .....	498
13.3.1	鉛直面に沿う自然対流 (498)	
13.3.2	水平加熱平板上の自然対流 (499)	
13.3.3	浮力噴流 (500)	
<b>第 14 章 河川・振動流の乱れ</b>		<b>(林 泰造・日野幹雄)</b>
14.1	河川乱流と縦渦 .....	507
14.2	河川の縦渦構造 .....	508
14.2.1	河川の縦渦研究の水工学的意義 (508)	
14.2.2	固定床開水路の縦渦 (509)	
14.3	振動流の乱れ .....	524
14.3.1	振動流の安定問題 (524)	
14.3.2	変調振動流境界層の組織的乱れ (530)	
14.3.3	純振動流の乱れ (531)	
14.3.4	拍動流 (539)	
14.4	波の乱れ .....	541

- 14.4.1 振動流と波 (541)
- 14.4.2 波による砂漣上の乱れ (543)
- 14.4.3 碎波の乱れ (549)

## 第 15 章 大気中の大規模な乱流

(木村龍治)

- 15.1 大規模な大気乱流の実態 .....561
  - 15.1.1 乱流プローブとしての人間 (561)
  - 15.1.2 大気循環の構造 (561)
  - 15.1.3 天気図に見る乱流の実態 (563)
- 15.2 実験室内の傾圧不安定 .....567
  - 15.2.1 Hide の発見 (567)
  - 15.2.2 傾圧不安定波の構造 (568)
  - 15.2.3 循環様式の分類 (569)
  - 15.2.4 地衡流乱流への遷移 (571)
- 15.3 大気中の傾圧不安定 .....573
  - 15.3.1 温帯低気圧のライフ・サイクル (573)
  - 15.3.2 傾圧不安定の役割 (575)
  - 15.3.3 帯状流と渦の相互作用 (Lorenz のモデル) (577)
- 15.4 大気の長周期変動 .....578

## 第 16 章 大気境界層内の乱流

(山元龍三郎・塚本 修)

- 16.1 大気境界層と乱流 .....581
- 16.2 大気境界層内の乱流 .....583
  - 16.2.1 大気境界層の観測 (583)
  - 16.2.2 乱れの水平方向の一様性 (583)
  - 16.2.3 平均風速の鉛直分布 (584)
  - 16.2.4 乱れのスケール (585)
  - 16.2.5 空間相関および乱れの伝播速度 (586)
  - 16.2.6 条件付採集法による運動量輸送の解析 (586)
  - 16.2.7 大気境界層における乱流特性の日変化 (588)
  - 16.2.8 対流混合層の発達過程 (589)
  - 16.2.9 静圧変動の測定 (591)
  - 16.2.10 乱流運動エネルギー収支 (592)
- 16.3 大気境界層の乱流の風洞実験 .....594
  - 16.3.1 風洞実験 (594)
  - 16.3.2 大気境界層の平均風速の鉛直分布を風洞内に得るための手法 (594)
  - 16.3.3 自然風と風洞実験との乱流特性の鉛直分布の比較 (596)

16.4 作物成育層の乱流 .....	597
16.4.1 作物成育層の特性 (597)	
16.4.2 水稻群落上の乱流の特性 (597)	
16.4.3 植物群落モデルの風洞実験 (599)	
<b>第17章 海の表層の乱流</b> .....	(鳥羽良明)
17.1 風波における乱流 .....	605
17.1.1 風波現象研究の現況 (605)	
17.1.2 風波上の気流の構造 (609)	
17.1.3 風波の中の乱流の構造 (614)	
17.2 海洋混合層 .....	617
17.2.1 Langmuir 循環 (618)	
17.2.2 回転成層流体における連行 (618)	
17.3 海の総観規模の乱流 .....	620
17.3.1 海の表面水温分布の可視化 (620)	
17.3.2 海の乱流のスペクトル構造 (621)	
17.3.3 総観規模乱流による海の熱輸送 (622)	
<b>第18章 実験技術</b> .....	(菰田広之)
18.1 Lagrange 計測 .....	627
18.1.1 トレーサー粒子自動追尾法 (627)	
18.1.2 水素気泡線追跡法 (628)	
18.2 レーザー・ドップラー流速計 .....	629
18.2.1 単一粒子追尾法 (629)	
18.2.2 光ファイバーの利用 (631)	
18.2.3 熱発色性を利用した流速と渦度の同時測定 (632)	
18.3 圧力および濃度測定 .....	634
18.3.1 気流中の変動圧力測定 (634)	
18.3.2 電極法による変動濃度測定 (635)	
18.4 核磁気共鳴による乱流計測 .....	636
18.5 多点データ処理装置 .....	638
18.6 レーザー・ホログラフィによる流速計測 .....	640
18.6.1 Bénard 対流の測定 (641)	
18.6.2 流速と密度の同時測定 (642)	
18.7 トレーサー画像の処理 .....	643
18.7.1 流れ場の連続断面撮影法 (643)	
18.7.2 トレーサー画像の自動定量化 (645)	

18.7.3 光照度を利用する流れ場の3次元計測 (646)	
18.8 可視化法 .....	648
18.8.1 カラー・スリット法 (648)	
18.8.2 人工衛星赤外放射計資料の利用 (648)	
索引 .....	653