

# α 4 編 流 体 工 学

企画・編集	井小萩 利明 新美 智秀	井上 雅弘 深野 徹	亀本 喬司 松本 洋一郎	辻 裕 望 月 修
執筆 者	青木 俊之 井小萩 利明 大島 まり 梶島 岳夫 木谷 勝 佐藤 恵一 瀬戸口 俊明 辻 裕 豊田 国昭 中村 喜代次 西山 秀哉 深野 徹 益田 重明 丸田 芳幸 矢野 猛	東 恒雄 井上 雅弘 岡島 厚 亀本 喬司 高曾 徹 佐野 正利 祖山 均 坪田 誠 中尾 晨一 南部 健一 禰津 家久 古川 明德 松尾 一泰 望月 修 山本 勝弘	新井 隆景 大楠 丹 岡本 孝司 川野 聡恭 小森 悟齋 澤田 雅 棚橋 隆彦 富田 侑嗣 中野 政身 新美 智秀 早瀬 敏幸 古川 雅人 松村 昌典 望月 信介 山本 誠	五十嵐 保 大島 伸行 小尾 晋之介 河村 哲也 齋藤 隆之彦 社河内 敏彦 田村 善昭 富田 幸雄 中橋 和博 西 道弘 速水 洋 前川 博 松本 洋一郎 森 教安 渡 辺 敬三

## 目 次

### 第 1 章 流体工学の概要と流体の諸性質

1・1 流体工学の歴史と発展 .....1	1・3・1 密度.....4
1・2 流体の諸性質 .....2	1・3・2 圧縮率・体積弾性係数・音速.....5
1・2・1 分子の状態から見た流体.....2	1・3・3 粘性.....6
1・2・2 連続体としての流体.....2	1・3・4 表面張力.....7
1・2・3 流体の状態を表す量.....3	1・3・5 比熱および比熱比.....7
1・2・4 流体の力学的性質.....3	1・3・6 気体の状態方程式とガス定数およ び圧縮係数.....7
1・2・5 気液界面における蒸発・凝縮と溶 解.....3	1・3・7 蒸気.....8
1・2・6 液体界面の力学的性質.....4	1・3・8 溶解度.....8
1・3 流体の物性 .....4	1・3・9 物性値の調べ方.....9

### 第 2 章 流体静力学

2・1 圧力.....10	2・3・2 大気中の圧力 .....10
2・1・1 圧力の定義と等方性 .....10	2・3・3 マノメータ .....11
2・1・2 圧力の伝達 .....10	2・3・4 液体中の平面壁に働く力 .....11
2・1・3 圧力の単位 .....10	2・3・5 液体中の曲面壁に働く力 .....11
2・2 圧力の平衡方程式.....10	2・3・6 浮力 .....11
2・3 重力場における圧力.....10	2・3・7 浮体の安定 .....11
2・3・1 液体中の圧力 .....10	2・4 相対的圧力平衡.....12

2・4・1 相対的静止	12	2・4・3 等角速度で回転運動する容器	12
2・4・2 等加速度直線運動をする容器	12		

### 第 3 章 流体力学の基礎式

3・1 流体運動の記述	13	3・6 巨視的保存則	17
3・1・1 流体運動を記述する式	13	3・6・1 連続の式	17
3・1・2 ラグランジュの方法とオイラーの方法	13	3・6・2 運動量の保存と物体の受ける力	17
3・2 流体運動に関する用語	13	3・6・3 角運動量の保存と物体の受ける力	18
3・2・1 層流と乱流	13	3・6・4 エネルギー積分とベルヌーイの式	18
3・2・2 定常流と非定常流	13	3・7 流れの相似則と無次元パラメータ	19
3・2・3 流線, 流跡, 流脈	13	3・7・1 相似の条件	19
3・3 流体の運動と変形	14	3・7・2 レイノルズ数	19
3・4 流体粒子に作用する力	15	3・7・3 マッハ数	20
3・4・1 外力	15	3・7・4 フルード数, グラスホフ数, ウェーバ数	20
3・4・2 内部応力	15	3・7・5 ストロークハル数	20
3・4・3 せん断変形速度とせん断応力の関係	15	3・7・6 ペクレ数, プラントル数, エッカート数	20
3・5 保存則	15	3・7・7 模型実験	20
3・5・1 連続の式	15		
3・5・2 運動方程式	16		
3・5・3 エネルギー方程式	16		

### 第 4 章 理想流体の流れ

4・1 理想流体の基礎式	21	4・6・2 流れの表示の例	26
4・2 ベルヌーイの式と渦なし流れ	21	4・6・3 物体を含む流れの例	26
4・2・1 ベルヌーイの式	21	4・7 不連続流れ	26
4・2・2 渦なし流れ	21	4・7・1 翼の場合	26
4・3 二次元渦なし流れ	21	4・7・2 翼列の場合	26
4・3・1 流れ関数と速度ポテンシャル	21	4・7・3 二次元噴流	27
4・3・2 複素ポテンシャルとその応用	22	4・8 三次元流れ	27
4・4 物体に作用する力	24	4・8・1 速度ポテンシャルとベクトル速度ポテンシャル	27
4・4・1 ブラジウスの第一および第二公式	24	4・8・2 パネル法	27
4・4・2 任意形状物体に働く力	24	4・9 渦運動	28
4・5 等角写像とその応用	24	4・9・1 渦の性質	28
4・5・1 等角写像	24	4・9・2 渦糸が誘起する速度	28
4・5・2 写像関数の例	24	4・9・3 渦の運動	29
4・6 特異点法とその応用	25	4・9・4 渦層	29
4・6・1 特異点分布	25	4・9・5 渦列	29

### 第 5 章 粘性流体の流れ

5・1 ナビエ・ストークス方程式の厳密解および近似解	30	5・2・1 境界層の概念と性質	33
5・1・1 平行流	30	5・2・2 層流境界層	33
5・1・2 非平行流	31	5・2・3 乱流境界層	34
5・1・3 遅い粘性流の近似解	32	5・2・4 境界層制御	36
5・2 境界層	33	5・3 噴流	37
		5・3・1 自由噴流	37

5・3・2 壁面噴流と衝突噴流	38	5・4・4 境界層中に埋没する物体の後流	43
5・3・3 液体噴流	39	5・4・5 後流の干渉	43
5・3・4 同軸噴流と環状噴流	39	5・4・6 後流の制御	44
5・3・5 横風噴流と対向噴流	39	<b>5・5 はく離</b>	44
5・3・6 非定常噴流	40	5・5・1 はく離の定義	44
5・3・7 噴流の制御	40	5・5・2 各種のはく離流れ	47
<b>5・4 後流</b>	40	5・5・3 はく離せん断層のかく乱に対する 応答特性	47
5・4・1 後流の基礎	40	5・5・4 はく離の制御	48
5・4・2 二次元物体の後流	41		
5・4・3 三次元物体の後流	43		

## 第 6 章 乱流理論と乱流拡散

<b>6・1 乱流の発生, 遷移</b>	50	6・4・2 運動量の輸送	52
6・1・1 線形安定論	50	6・4・3 熱量の拡散	53
6・1・2 非線形安定論	50	6・4・4 物質の拡散	53
6・1・3 かく乱の乱雑化とカオス理論	50	6・4・5 大気乱流	53
<b>6・2 基礎式</b>	50	6・4・6 圧縮性流体の乱流	53
<b>6・3 乱流の統計理論</b>	50	<b>6・5 乱流モデル</b>	53
6・3・1 確率分布とモーメント	51	6・5・1 レイノルズ平均 (RANS) モデル	53
6・3・2 相関とスペクトル	51	6・5・2 ラージエディシミュレーション (LES)	55
6・3・3 一様等方性乱流	51	<b>6・6 乱流の制御</b>	56
6・3・4 局所等方性乱流	52	6・6・1 壁乱流の制御	56
6・3・5 非等方性乱流	52	6・6・2 自由乱流の制御	57
<b>6・4 乱流拡散</b>	52		
6・4・1 乱流拡散と拡散係数	52		

## 第 7 章 圧縮性流体の流れ

<b>7・1 圧縮性流れの基礎</b>	59	7・3・4 ショックチューブ	63
7・1・1 気体の圧縮性と状態方程式	59	<b>7・4 二次元定常流</b>	64
7・1・2 音速とマッハ数	59	7・4・1 基礎式	64
7・1・3 圧縮性流れの特徴	59	7・4・2 ポテンシャル方程式の線形化	64
7・1・4 圧縮性流れの分類	59	7・4・3 プラントル・マイヤー流れ	64
<b>7・2 一次元定常流</b>	59	7・4・4 特性曲線法	64
7・2・1 基礎式	59	7・4・5 斜め衝撃波	65
7・2・2 等エントロピー流れ	60	<b>7・5 圧縮性境界層</b>	66
7・2・3 垂直衝撃波	60	7・5・1 層流圧縮性境界層	66
7・2・4 ショックトレンと擬衝撃波	61	7・5・2 乱流圧縮性境界層	66
7・2・5 先細ノズルとラバルノズル	61	7・5・3 回復温度	66
7・2・6 ファノー流れ	62	7・5・4 平板境界層	66
7・2・7 レイリー流れ	62	7・5・5 境界層と斜め衝撃波の干渉	66
<b>7・3 一次元非定常流と波動</b>	62	<b>7・6 二次元および三次元軸対称圧縮性オイ ラー方程式の数値解法</b>	67
7・3・1 波の種類	62	7・6・1 空間微分項の評価	67
7・3・2 微小振幅波と波動方程式	62	7・6・2 時間微分の評価	67
7・3・3 有限振幅等エントロピー波	63		

## 第 8 章 管路内の流れおよび流体中の物体に働く力

<b>8・1 管路内の流れ</b>	69	8・1・2 直管の管摩擦係数	70
8・1・1 管路内の流れと損失	69	8・1・3 管路の諸損失	71

8・1・4 管路内の二次流れ	77	く力	81
8・1・5 案内および整流装置	77	8・2・4 三次元物体に働く力	84
8・1・6 開きよの流れ	78	8・2・5 壁面の影響	84
8・2 流体中の物体に働く力	80	8・2・6 円柱群および角柱群に働く力	86
8・2・1 揚力, 抗力およびモーメント	80	8・2・7 種々の流れの中での物体に働く力	88
8・2・2 球に働く力	81	8・2・8 物体に働く力の軽減	90
8・2・3 円柱およびその他の柱状物体に働			

## 第9章 流体機械の流れ

9・1 ターボ機械の流動解析法	94	フューザ	102
9・1・1 一次元解析	94	9・4・2 ベーンレスディフューザ, ベーン ディフューザ	103
9・1・2 二次元解析	95	9・4・3 スクロール	104
9・1・3 三次元解析	96	9・4・4 吸出し管	104
9・2 軸流機械	97	9・4・5 円形ノズル	104
9・2・1 直線翼列	97	9・4・6 スクロールノズル	105
9・2・2 半径平衡条件と渦形式	97	9・4・7 中間案内通路	105
9・2・3 二次流れ	98	9・4・8 その他の固定流路	105
9・3 遠心機械・斜流機械	99	9・5 回転円盤の流れ	105
9・3・1 円形翼列, 円形翼列への写像	99	9・6 ラビリンスの流れ	106
9・3・2 滑り係数	100	9・6・1 ラビリンスの形態	106
9・3・3 インデューサ, エクスデューサ	100	9・6・2 ラビリンスシール内の流れパター ン	107
9・3・4 二次流れ	101	9・6・3 ラビリンスシールの設計	107
9・4 ディフューザ, ノズルなどの内部流れ	102		
9・4・1 円すいディフューザ, 二次元ディ			

## 第10章 非定常流れ

10・1 流体過渡現象, 管内流れの非定常現象	109	10・3・2 容器内の液体の液面振動, 非線 形スロッシング	119
10・1・1 管内の波動伝ば	109	10・3・3 U字円管内の液面振動	119
10・1・2 管内非定常流れの基礎理論	110	10・3・4 管で連結された液槽内の液面振 動	119
10・1・3 水撃・油撃	111	10・4 一様流中における物体の流力振動	120
10・1・4 脈動流	114	10・4・1 自励振動と強制振動	120
10・1・5 サージング	115	10・4・2 直角方向振動	120
10・2 各種物体に作用する非定常流体力	116	10・4・3 流れ方向振動	121
10・2・1 非定常流体力の基礎	116	10・4・4 配管内円柱状構造物の流力振動 に関する設計指針	122
10・2・2 静止流体中で振動物体に作用す る非定常流体力と付加質量およ び付加慣性モーメント	116	10・5 波および波動	122
10・2・3 一様流中で振動物体に作用する 非定常流体力	117	10・5・1 波の理論	122
10・3 容器内の液体の振動	118	10・5・2 沖合と海岸の構造物に作用する 波力	123
10・3・1 容器内の液体の固有振動数	118		

## 第11章 空力音響および水中音響

11・1 空力音響の基礎式	125	11・2 空力音響の基礎式の解	125
11・1・1 基礎方程式	125	11・2・1 一般解	125
11・1・2 空力音響の音源	125	11・2・2 遠距離場の条件	126

11・2・3 観測点での音の強さ	126	11・4・1 ジェット騒音	128
11・2・4 双極子音源と四極子音源のスケール則	126	11・4・2 固体物体まわり流れからの騒音	129
11・2・5 空力騒音の低減策	126	<b>11・5 自励音</b>	130
<b>11・3 回転音源による騒音</b>	126	11・5・1 カルマン渦励起音	130
11・3・1 移動音源による騒音の基礎	126	11・5・2 エッジトーン	131
11・3・2 プロペラ騒音	126	11・5・3 超音速流の自励音	133
11・3・3 軸流ターボ機械の離散周波数騒音	127	<b>11・6 水中音響</b>	133
11・3・4 ターボ機械の広帯域騒音	127	11・6・1 気泡音の基礎	133
11・3・5 騒音低減対策	128	11・6・2 気泡音の実際例	134
<b>11・4 乱流騒音</b>	128	11・6・3 水中超音波	134

## 第 12 章 キャビテーション

<b>12・1 キャビテーション現象の背景</b>	136	12・4 キャビテーション流れの諸特性	139
<b>12・2 キャビテーションの発生</b>	136	12・4・1 発生形態と発達過程	139
12・2・1 発生条件	136	12・4・2 翼型のキャビテーション特性	140
12・2・2 キャビテーション核	137	12・4・3 各種流体要素のキャビテーション特性	141
12・2・3 初生則と寸法効果	137	<b>12・5 キャビテーションによる壊食と騒音</b>	141
12・2・4 熱力学的効果	137	12・5・1 壊食の機構	141
<b>12・3 気泡の力学</b>	137	12・5・2 壊食に及ぼす諸因子とその予測	142
12・3・1 単一気泡の力学	137	12・5・3 騒音の発生と特徴	142
12・3・2 気泡運動に及ぼす圧縮性、気体拡散、熱拡散の影響	138	12・5・4 壊食および騒音の低減法	143
12・3・3 非球状気泡の力学と気泡崩壊	138		
12・3・4 気泡/界面/衝撃波との相互作用			

## 第 13 章 自由表面のある流れ

<b>13・1 開水路の流れ</b>	145	<b>13・3 表面波</b>	147
13・1・1 フルード数	145	13・3・1 表面波の基礎式	147
13・1・2 常流と射流	145	13・3・2 微小振幅波	147
13・1・3 比エネルギーと比力	145	13・3・3 有限振幅波	147
13・1・4 交代水深と限界水深	145	13・3・4 流速と運動軌跡	147
13・1・5 共役水深と跳水現象	145	13・3・5 波のエネルギーとエネルギー輸送	148
13・1・6 等流公式	145	<b>13・4 風波</b>	148
13・1・7 水面形方程式と不等流計算	145	13・4・1 風波の発達	148
13・1・8 開水路の乱流構造	145	13・4・2 風波の特徴	148
<b>13・2 液膜流れ</b>	146	13・4・3 風波の相似則	148
13・2・1 落下液膜流れ	146	13・4・4 風波のスペクトル	148
13・2・2 水平平板上の液膜流れ	146		
13・2・3 回転円板上の液膜流れ	147		

## 第 14 章 混相流

<b>14・1 基礎的概念</b>	150	14・1・4 流体中の粒子（固体、液滴、気泡）の運動	151
14・1・1 混相流の分類	150	14・1・5 混相流の数値モデル	151
14・1・2 各種変数およびパラメータの定義	150	<b>14・2 気液二相流</b>	151
14・1・3 相間相互作用	150	14・2・1 流動様式の定義	151

14・2・2	流動様式線図	152	度)	156	
14・2・3	各流動様式の特徴	153	14・3・4	流動様式	157
14・2・4	基礎式	154	14・3・5	圧力損失	158
14・2・5	ボイド率の推算法	155	<b>14・4 固気二相流</b>		158
14・2・6	圧力損失	155	14・4・1	流動様式	158
<b>14・3 固液二相流</b>		155	14・4・2	浮遊速度	161
14・3・1	スラリーの物性	155	14・4・3	流動化速度	162
14・3・2	沈降速度と抗力	156	14・4・4	圧力損失	162
14・3・3	遷移速度(堆積速度, 浮遊速				

## 第 15 章 非ニュートン流体

<b>15・1 非ニュートン流体の分類</b>	164	15・4・1	流動曲線による分類	166	
<b>15・2 基礎方程式</b>	164	15・4・2	各種の構成方程式	166	
15・2・1	連続の式	164	15・4・3	非ニュートン粘度の測定	166
15・2・2	運動方程式	164	15・4・4	べき乗則流体	167
15・2・3	エネルギー方程式	164	<b>15・5 塑性流体</b>	167	
15・2・4	構成方程式	164	<b>15・6 粘弾性流体</b>	168	
<b>15・3 基本的な流れ</b>	165	15・6・1	構成方程式	168	
15・3・1	単純せん断流れ	165	15・6・2	レオロジー関数	168
15・3・2	伸長流れ	165	15・6・3	粘弾性流体の特異現象	169
<b>15・4 純粘性流体</b>	166	15・6・4	液晶性流体	170	

## 第 16 章 希薄気体力学

<b>16・1 希薄気体流の分類</b>	172	16・4・4	長い円管の自由分子流コンダクタンス	177	
16・1・1	連続流	172	16・4・5	短い円管の自由分子流コンダクタンス	177
16・1・2	滑り流	172	16・4・6	種々の断面形状配管の自由分子流コンダクタンス	178
16・1・3	遷移(中間)流	172	<b>16・5 気体分子の固体表面との干渉</b>	178	
16・1・4	自由分子流	172	16・5・1	固体表面から散乱する気体分子の流束強度・速度分布	178
<b>16・2 ボルツマン方程式</b>	172	16・5・2	適応係数	178	
16・2・1	衝突断面積	172	16・5・3	速度滑りと温度飛躍	178
16・2・2	マクスウェル分布	173	16・5・4	気体分子と固体表面との干渉に関する実験	179
16・2・3	チャップマン・エンスコグ解	173	16・5・5	気体分子・固体表面干渉モデル	179
16・2・4	ボルツマン方程式の確率解法	174	16・5・6	分子動力学(MD)法による解析	180
<b>16・3 希薄気体の流れ</b>	175				
16・3・1	自由分子流と物体の受ける力	175			
16・3・2	超音速自由噴流	176			
<b>16・4 自由分子流コンダクタンス</b>	176				
16・4・1	コンダクタンスの定義	176			
16・4・2	コンダクタンスの合成	176			
16・4・3	オリフィスの自由分子流コンダクタンス	176			

## 第 17 章 特殊な環境下の流れ

<b>17・1 電磁流体力学</b>	182	17・2・1	液体金属	185	
17・1・1	基礎方程式	182	17・2・2	磁性流体, MR 流体	186
17・1・2	流れ場と電磁場の連成	183	17・2・3	ER 流体, 液晶	187
17・1・3	種々の流れ	184	17・2・4	プラズマ流体	189
<b>17・2 機能性流体</b>	185	<b>17・3 生体内の流れ</b>	189		

17・3・1	血液のレオロジー	189	17・5・2	化学反応を伴う流れの数値計算 と実験	192
17・3・2	血液と微小循環	190	<b>17・6</b>	<b>マイクロ流れ</b>	192
17・3・3	呼吸器系の流れ	190	17・6・1	MEMSにおける流れ	192
<b>17・4</b>	<b>超流動</b>	190	17・6・2	マイクロカプセル流体	192
17・4・1	超流動ヘリウムの性質	190	<b>17・7</b>	<b>無重力流体</b>	193
17・4・2	量子効果と特異な現象	191	17・7・1	微小重力下における流体现象	193
17・4・3	量子渦の力学	191	17・7・2	微小重力実験	193
<b>17・5</b>	<b>反応流れ</b>	191	17・7・3	微小重力実験の方法	194
17・5・1	化学反応を伴う流れの基礎式	191			

## 第 18 章 流体実験および計測

<b>18・1</b>	<b>相似則</b>	195	18・6・3	渦式流量計	203
<b>18・2</b>	<b>次元解析</b>	195	18・6・4	超音波流量計	203
<b>18・3</b>	<b>流体実験設備</b>	196	18・6・5	音速ノズル	203
18・3・1	風洞実験	196	18・6・6	コリオリ式流量計	203
18・3・2	水槽実験	197	18・6・7	その他の流量計	203
<b>18・4</b>	<b>圧力計測</b>	197	<b>18・7</b>	<b>騒音計測</b>	203
18・4・1	圧力計	197	18・7・1	音圧, 音の強さ, 音響パワー	203
18・4・2	圧力の測定	198	18・7・2	音響インテンシティ	204
<b>18・5</b>	<b>速度計測</b>	199	18・7・3	マイクロホン, 騒音計	204
18・5・1	ピトー管	199	18・7・4	周波数分析	205
18・5・2	熱線流速計	200	18・7・5	感覚特性	205
18・5・3	レーザ流速計	201	<b>18・8</b>	<b>流れの可視化</b>	205
18・5・4	PTV 法 (粒子追跡法)	201	18・8・1	水流における可視化	205
<b>18・6</b>	<b>流量計測</b>	202	18・8・2	気流における可視化	206
18・6・1	差圧式流量計	202	18・8・3	画像処理技術	207
18・6・2	熱式流量計	202			

## 第 19 章 流れの数値解析

<b>19・1</b>	<b>離散化手法</b>	210	19・4・5	LES の数値計算	220
19・1・1	差分法と有限体積法	210	19・4・6	レイノルズ平均の数値計算 (RANS)	221
19・1・2	有限要素法	212	<b>19・5</b>	<b>格子形成法</b>	221
19・1・3	渦法	214	19・5・1	格子形成手順	221
<b>19・2</b>	<b>非圧縮性流れ</b>	216	19・5・2	格子と計算精度	221
19・2・1	MAC 法による非定常解法	216	19・5・3	格子の種類	221
19・2・2	SIMPLE 法による定常解法	217	19・5・4	構造格子	221
19・2・3	密度変化のある流れの解法	218	19・5・5	非構造格子	223
<b>19・3</b>	<b>圧縮性流れ</b>	218	19・5・6	直交格子	225
19・3・1	圧縮性 NS 方程式	218	19・5・7	解適合格子法	226
19・3・2	その他の方程式	219	<b>19・6</b>	<b>可視化手法</b>	226
<b>19・4</b>	<b>乱流への適用</b>	219	19・6・1	スカラー量の可視化	226
19・4・1	解析可能なスケール幅	219	19・6・2	ベクトル量の可視化	227
19・4・2	乱流計算のための境界条件	220	19・6・3	画像ファイルと動画	228
19・4・3	直接数値シミュレーション	220			
19・4・4	数値粘性を用いた計算	220			