

# 水 理 学

—試験対策から水理乱流現象の Charakteristikまで—

博士(工学) 山上 路生 著

コ ロ ナ 社

# まえがき

水理学で扱う水は流体で、その運動には変形を伴うため、力学的な扱いが難しい。またアプローチ法もさまざまで、種々の仮定や近似を使ったり、複雑な微分方程式も用いる。このことが初学者の理解や学習意欲を阻む一因となっている。完全流体の仮定、渦なし、粘性や抵抗の考慮など、場面によって与えられる条件が異なるため、「水理学の中で、自分がどこの何を勉強しているのかわからない」といった学生の悲痛な叫びをよく聞く。著者自身も学生時代に苦労したから、気持ちは大変よくわかる。

本書は、著者が大学の学部・大学院で教育した多くの学生から受けた質問や要望を反映させた教科書である。本書を手にする読者の目的はさまざまであろう。とにかく水理学の単位がほしい学生から、現象の本質まで詳しく知りたい学部生や大学院生、そして水工学の研究や実務の参考としたい研究者や技術者までさまざまな読者層を想定している。

そこで図(a)のように2部構成とした。第I部は「水理学の試験対策編」である。水理学のポイントを整理し、例題と演習問題によって理解を深められるよう工夫した。暗記事項を随所に明記するなど、自習しやすい内容とした。第I部で水理学の全体像をつかむことが期待できる。第II部は「水理学のカラクリ編」として、流体力学的な視点から水理学で扱う公式や現象を詳しく解説した。図(a)には第I部と第II部の各章のつながりを示したので参考にしてほしい。

単位取得が主目的の学生は第I部のみの勉強でよいが、それに物足りない読者は第II部の関心のある章だけでも読んでほしい。ベルヌーイの定理など通常は暗記で済みます式形も、第II部ではその導出や学術背景について述べ、水理学の理解をさらに深める内容とした。また第II部は乱流の基本的な考え方につい

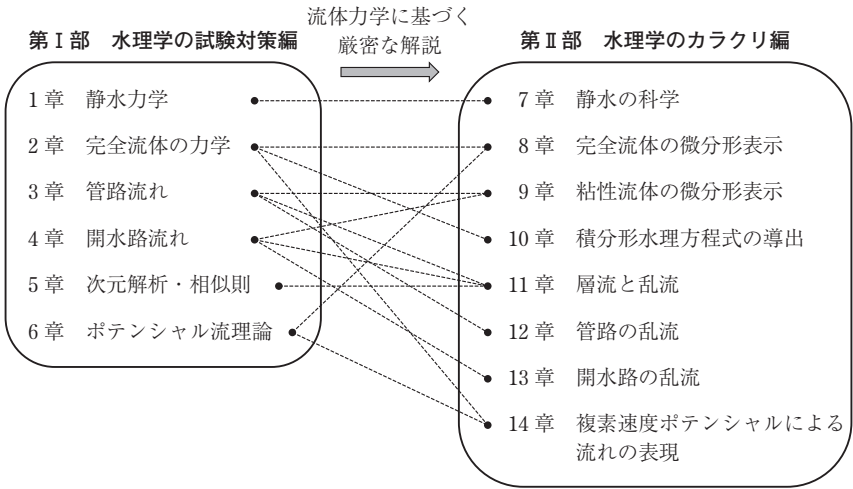
て、基礎方程式やその発生メカニズムなどについても扱った。とくに付録も含めて式展開も記載しているので、卒業研究や修士論文の一助にもなるだろう。

図(b)に水理学および関連する流体力学の体系と本書の構成をまとめた。ここには各章の位置づけも示すので、読者が勉強している箇所が水理学のどこに位置づけられているのかが一目でわかる。見通しがよく不安なく学習できると期待できる。本書が、水理学そして関連する流体力学の魅力を知るきっかけとなることを切に願っている。

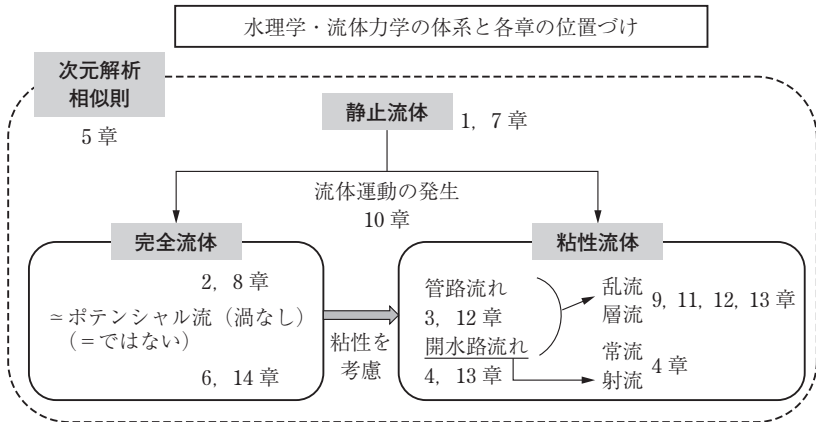
著者が自身の研究で行っている水理実験の経験も、本書の執筆に大きな影響を与えた。所属研究室の京都大学工学研究科教授・戸田圭一先生、同助教の岡本隆明先生には、心より感謝したい。また、学生時代から基礎水理学や乱流力学を親身になってご指導頂いた恩師の京都大学工学研究科名誉教授・欄津家久先生、名古屋工業大学名誉教授・富永晃宏先生、九州工業大学工学部教授・鬼束幸樹先生には、深甚なる謝意を表したい。さらに所属研究室の修士課程・松本知将君には原稿の校正確認をお願いした。最後に本書の出版については、コロナ社に大変お世話になった。併せて感謝したい。

2021年8月

山上路生



図(a) 本書の構成 (1)



図(b) 本書の構成 (2)

# 目 次

## 第 I 部 水理学の試験対策編

### 1 章 静 水 力 学

1.1 静 水 圧	1
1.1.1 静水圧とは	1
1.1.2 鉛直平板に作用する静水圧	2
1.1.3 曲面に作用する静水圧	4
1.2 相 対 的 静 止	6
1.3 浮 体 の 安 定	8
1.3.1 浮体の傾きと傾心（メタセンター）	8
1.3.2 浮体安定性の判定式	9
演 習 問 題	12

### 2 章 完全流体の力学

2.1 完全流体とは	14
2.2 完全流体の 3 大保存則	14
2.2.1 完全流体の保存則	14
2.2.2 連続式（質量保存則）	15
2.2.3 ベルヌーイの定理（エネルギー保存則）	16
2.2.4 運動量式（運動量保存則）	18
演 習 問 題	21

### 3章 管路流れ

<b>3.1</b>	管路流れとは	24
<b>3.2</b>	定常管路流れの基礎式	24
3.2.1	連続式	24
3.2.2	エネルギー式	25
3.2.3	運動量式	26
<b>3.3</b>	損失水頭	27
3.3.1	形状損失	27
3.3.2	摩擦損失	30
<b>3.4</b>	壁面せん断応力とエネルギー勾配	34
<b>3.5</b>	流速公式	35
<b>3.6</b>	並列管路	36
	演習問題	36

### 4章 開水路流れ

<b>4.1</b>	開水路流れとは	41
<b>4.2</b>	基礎方程式	41
4.2.1	開水路の連続式	41
4.2.2	比エネルギーとエネルギー損失	42
4.2.3	比力と運動量保存則	43
<b>4.3</b>	等流	45
4.3.1	等流とは	45
4.3.2	抵抗則と流速公式	45
<b>4.4</b>	不等流 I — 漸変流と水面形 —	47
4.4.1	水面形方程式	47
4.4.2	等流水深	48
4.4.3	限界水深	48
4.4.4	常流と射流	49
4.4.5	限界水深と水面形の分類	50

4.5 不等流 2 —急変流と跳水— ..... 53  
 演習問題 ..... 56

## 5章 次元解析・相似則

5.1 次元解析 ..... 58  
 5.1.1 レイリーの方法 ..... 59  
 5.1.2 バッキンガムの  $\pi$  定理 ..... 61  
 5.2 相似則 ..... 63  
 5.2.1 実物と模型の相似 ..... 63  
 5.2.2 水理学でよく使う無次元数 ..... 65  
 演習問題 ..... 67

## 6章 ポテンシャル流理論

6.1 流れの可視化と流線 ..... 68  
 6.2 渦度と速度ポテンシャル ..... 69  
 6.3 流れ関数と連続式 ..... 69  
 6.4 複素速度ポテンシャルによる流れの表現 ..... 71  
 6.4.1 複素速度ポテンシャルの定義 ..... 71  
 6.4.2 極座標表示 ..... 72  
 演習問題 ..... 74

## 第Ⅱ部 水理学のカラクリ編

### 7章 静水の科学

7.1 静水に作用する力 ..... 75  
 7.2 静水圧の大きさと方向 ..... 75  
 7.3 表面張力 ..... 77

7.3.1	界 面	77
7.3.2	ぬれと接触角	77
7.3.3	毛細管現象	78

## 8章 完全流体の微分形表示

8.1	流体運動の微視的表現	80
8.2	連続式の微分形表示	80
8.2.1	縮約表記と座標系	80
8.2.2	連続式の微分形表示	81
8.3	運動方程式の微分形表示 (オイラー方程式)	83
8.3.1	流体運動の観察と加速度の表現	83
8.3.2	運動方程式の微分形表示	85

## 9章 粘性流体の微分形表示

9.1	粘性流体の運動方程式	87
9.2	せん断応力	87
9.3	垂直応力	89
9.4	微小流体塊に作用する粘性応力	91
9.5	ナビエ・ストークス方程式	92
9.6	粘性係数と動粘性係数	94
9.7	粘性と渦なしの解釈	94

## 10章 積分形水理方程式の導出

10.1	ベルヌーイ式の導出	96
10.1.1	質点系のエネルギー保存則に基づく方法	96
10.1.2	運動方程式からの導出 (定常仮定)	97
10.2	水深積分方程式 (浅水方程式) の導出	98
10.2.1	準備	99
10.2.2	浅水方程式の導出	100



10.2.3 非定常ベルヌーイ式の導出	103
参 考 文 献	105

## 11 章 層 流 と 乱 流

11.1 層流と乱流について	106
11.2 乱流の基本的特性	107
11.2.1 乱流の性質	107
11.2.2 乱流の発生	109
11.2.3 乱流の拡散	110
11.2.4 乱流のスケーリング事例	111
11.2.5 マルチスケール特性と最小渦	113
11.3 乱流の運動	115
11.3.1 エネルギー勾配と流速の関係	115
11.3.2 乱流の運動方程式 (RANS 方程式)	116
11.3.3 レイノルズ応力	117
11.3.4 渦動粘性モデル	119
11.4 境界層理論 1 —壁面の影響がどこまで及ぶか?—	120
11.4.1 レイリーの問題 (一定速度で動き出す平板上の流れ)	120
11.4.2 層流境界層への応用	123
11.5 境界層理論 2 —境界層近似—	124
11.5.1 境界層厚さの定義	124
11.5.2 境界層近似と境界層方程式	126
11.5.3 カルマンの積分方程式	128
11.6 境界層理論 3 —乱流境界層と乱れの発生—	134
11.6.1 層流境界層から乱流境界層への遷移	134
11.6.2 乱流境界層の発達	135
11.6.3 乱流の発生 —オア・ゾンマーフェルド方程式とレイリーの変曲点 不安定理論—	137
11.6.4 ケルビン・ヘルムホルツ不安定理論	142

## 12章 管路の乱流

<b>12.1 管路の流速分布</b> .....	145
12.1.1 層流の場合 .....	145
12.1.2 乱流の場合 .....	146
<b>12.2 乱れによる摩擦損失</b> .....	148
12.2.1 層流の場合 .....	148
12.2.2 乱流の場合 .....	149
<b>12.3 乱れによる形状損失</b> .....	150
12.3.1 急拡の場合 .....	151
12.3.2 急縮の場合 .....	152

## 13章 開水路の乱流

<b>13.1 開水路と境界層</b> .....	153
<b>13.2 開水路乱流の基礎式 (鉛直2次元)</b> .....	154
<b>13.3 混合距離モデル</b> .....	155
<b>13.4 流速分布</b> .....	156
13.4.1 壁法則 .....	157
13.4.2 内層 .....	157
13.4.3 外層 .....	158
<b>13.5 乱れの構造</b> .....	159
13.5.1 乱れ統計量の水深方向分布 .....	159
13.5.2 平均流と乱れの輸送方程式 .....	160
13.5.3 水深方向の乱れエネルギー平衡 .....	163
<b>13.6 組織構造</b> .....	165
<b>参考文献</b> .....	169

## 14章 複素速度ポテンシャルによる流れの表現

<b>14.1 流れの数学的表現</b> .....	170
----------------------------	-----

<b>14.2</b>	<b>複素関数とコーシー・リーマンの関係</b> .....	170
14.2.1	あらためて複素数とは？.....	170
14.2.2	数直線.....	170
14.2.3	複素平面.....	171
14.2.4	オイラーの公式.....	173
14.2.5	複素関数の描画.....	173
14.2.6	複素関数の微分可能性とコーシー・リーマンの関係式.....	175
<b>14.3</b>	<b>流線の定義と流れ関数</b> .....	178
<b>14.4</b>	<b>渦度の定義と速度ポテンシャル</b> .....	180
14.4.1	渦度の概念.....	180
14.4.2	速度ポテンシャル.....	181
14.4.3	渦度と速度ポテンシャルの関係.....	182
14.4.4	等ポテンシャル線と流線の関係.....	183
<b>14.5</b>	<b>複素速度ポテンシャルによる流れの表現</b> .....	184
14.5.1	複素速度ポテンシャル.....	184
14.5.2	基本的な流れ場の例.....	185
14.5.3	重ね合わせによる複雑流れの例.....	189
<b>付 録</b>		
<b>A.1</b>	<b>断面2次モーメント</b> .....	191
<b>A.2</b>	<b>せん断応力とひずみ角の関係</b> .....	193
<b>A.3</b>	<b>ライプニッツ則</b> .....	194
<b>A.4</b>	<b>ケルビン・ヘルムホルツ不安定理論</b> .....	195
<b>A.5</b>	<b>レイノルズ分解</b> .....	198
A.5.1	レイノルズ平均.....	198
A.5.2	連続式のレイノルズ平均.....	199
A.5.3	ナビエ・ストークス方程式のレイノルズ平均 (RANS 方程式の導出).....	199
A.5.4	縮約表記.....	201
<b>演習問題解答</b> .....		202
<b>索 引</b> .....		212

# 第 I 部 水理学の試験対策編

## 1 章 静 水 力 学

### 1.1 静 水 圧

#### 1.1.1 静水圧とは

水が完全に静止しているときの圧力を**静水圧** (hydrostatic pressure) と呼ぶ。水面には大気圧が作用するが、水理学や河川工学では大気圧を基準とする**ゲージ圧** (gauge pressure) を採用するため、水面での水圧はゼロとする。ここでは **図 1.1** のように水深  $h$  の水槽を考えて、水深方向座標  $y$  は底面を原点として上向きを正とする。底面からの任意高さ  $y$  の点 (深さ  $h-y$  の点) には、その点から水面までの水の重量に相当する水圧  $p(y)$  が発生する。これは深さに比例し、水の密度  $\rho$ 、重力加速度  $g$  を用いて式(1.1) のように三角形分布として表せる。1 点に全方向から等しい水圧が生じる。

$$p(y) = \rho g(h - y) \quad (1.1)$$

水深平均圧力  $\bar{p}$  は式(1.1) を水深方向に平均して

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \rho g h \quad (1.2)$$

と表せる。またこの領域の紙面に垂直方向の長さを 1 とすると (本書では、以後単位奥行幅と呼ぶ)、全水深領域に作用する**全水圧** (total water pressure)[ $P$ ]

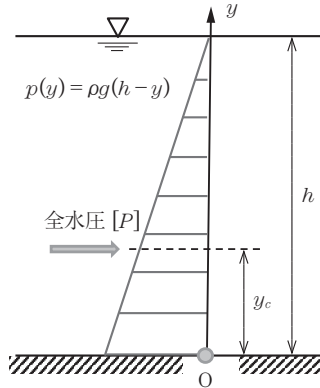


図 1.1 静水における水圧分布

は,

$$[P] = \int_0^h \rho g(h - y) \times 1 \times dy = \frac{1}{2} \rho g h^2 \quad (1.3)$$

となる。全水圧  $[P]$  は集中荷重であり、この作用点  $y_c$  をモーメントの計算式から求める。点  $O$  周りのモーメント分布を水深方向に積分したものと、全水圧  $[P]$  の点  $O$  周りの集中モーメントは等しいから次式で計算される。

$$\int_0^h \rho g(h - y) \cdot y dy = [P] \cdot y_c \leftrightarrow y_c = \frac{h}{3} \quad (1.4)$$

### 1.1.2 鉛直平板に作用する静水圧

水圧は平板に垂直に作用する。したがって、水圧  $p(y)$  の大きさと向きは図 1.2 のように分布する。図 1.1 のように集中荷重として全水圧  $[P]$  を考えるとその作用点は底から水深の  $1/3$  の高さとなる。

もし平板が底面に対して斜めに沈んでいると、水圧と水平方向と鉛直方向、あるいは平板に垂直、平行の 2 方向について考える必要がある。これについては 1.1.3 項の曲面に作用する水圧と同様の方法で解ける。

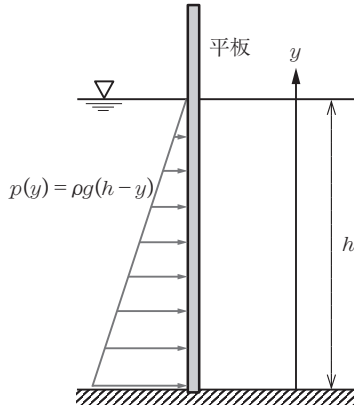


図 1.2 鉛直平板に作用する水圧分布

例題 1.1 図 1.3 のように仕切板の両側の水位がそれぞれ  $h_1$  と  $h_2$  であった。水圧による点 O 周りのモーメントを計算せよ。水の密度を  $\rho$ 、重力加速度を  $g$  とする。

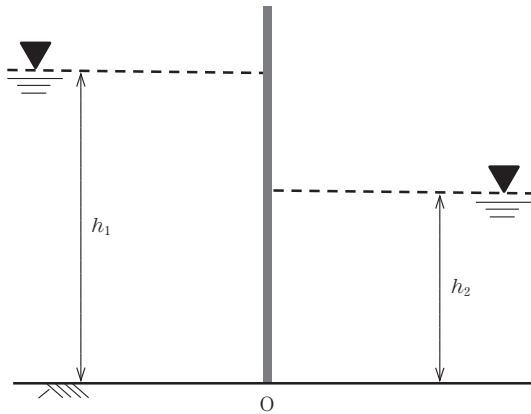


図 1.3

【解答】 図 1.4 のように式(1.3)および式(1.4)より仕切板の両側には、それぞれ底から水位の  $1/3$  の高さに全水圧が作用する。時計回りを正とすれば、点 O 周りのモーメントは、 $\frac{1}{2} \rho g h_1^2 \times \frac{h_1}{3} - \frac{1}{2} \rho g h_2^2 \times \frac{h_2}{3} = \frac{1}{6} \rho g (h_1^3 - h_2^3)$  となる。 ◆

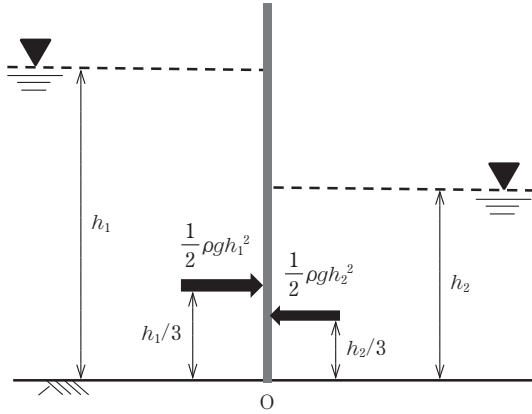


図 1.4

### 1.1.3 曲面に作用する静水圧

図 1.5 に示すドラム缶やローラーゲートのような曲面をもつ物体に作用する水圧は、水平方向と鉛直方向に分けて考える。まず水平方向については、平板と同様に線形分布を考えればよい。

鉛直方向については、図 1.6 のように水が上側にある面 AB (図(a)) と水が下側にある面 BC (図(b)) を分けて扱う。AB には水面までの水塊 AA'B'B の

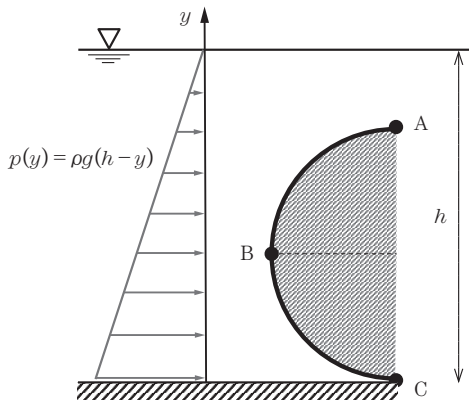


図 1.5 曲面に作用する水平方向の水圧

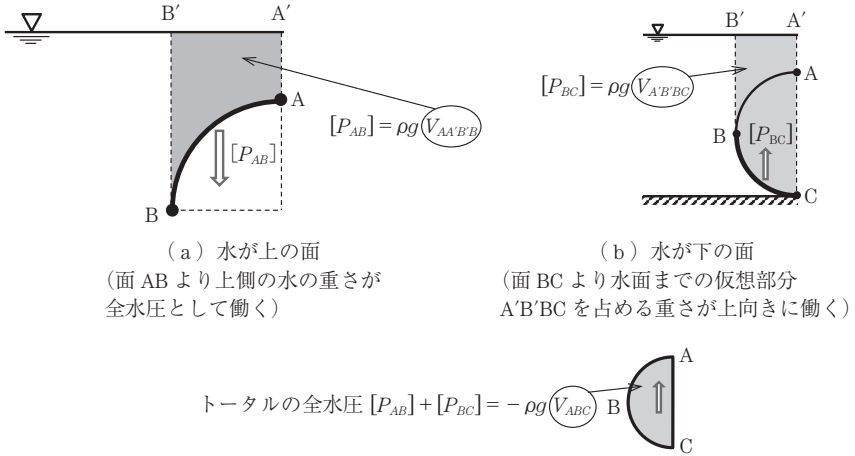


図 1.6 曲面に作用する鉛直方向の水圧

重さが全水圧  $[P_{AB}]$  として下向きに作用する。したがって、この水塊の体積を  $V_{AA'B'B}$  とし下向きを正とすると  $[P_{AB}] = \rho g V_{AA'B'B}$  と表せる。BC 面については、ここより水面までの領域  $A'B'BC$  を占める水の重さが上向きに作用する。つまり  $[P_{BC}] = -\rho g V_{A'B'BC}$  と表せる。結局、曲面  $ABC$  に作用する鉛直方向の全水圧は、 $[P_{AB}] + [P_{BC}] = -\rho g V_{ABC}$  となり、浮力に対応する。

**例題 1.2** 図 1.7 のように直径  $a$  のローラーゲートで水を堰き止めている。鉛直および水平方向の全水圧と作用点を計算せよ。ゲートの紙面に垂直方向の

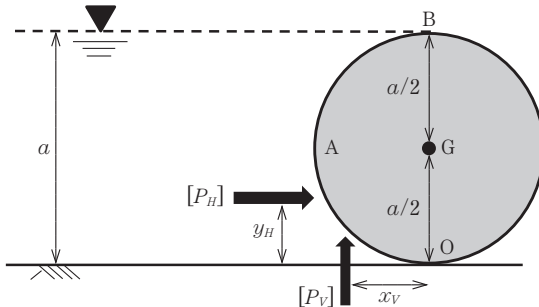


図 1.7



# 索 引

<b>【あ】</b>	
アインシュタインの縮約表 記	81
圧力水頭	16
<b>【い】</b>	
位置水頭	16
一様流	72, 185
移流項	85, 93
<b>【う】</b>	
ウェーバー数	64
渦 糸	181, 188
渦 度	69, 180, 181
運動学的相似	63
運動量厚さ	125
運動量式	18
運動量補正係数	26
<b>【え】</b>	
エジェクション	166
エネルギー勾配	26, 34, 43, 45
エネルギー線	26
エネルギー補正係数	25
<b>【お】</b>	
オア・ゾンマーフェルト方 程式	137, 139
オイラー的観測	83
オイラーの公式	173, 186
オイラー方程式	6, 86
<b>【か】</b>	
開水路流れ	41

外 層	157
カスケード過程	93, 109
渦動粘性係数	119
壁法則	157
カルマン定数	157
カルマンの積分方程式	128
緩勾配水路	50
完全流体	14, 80
管路流れ	24
<b>【き】</b>	
幾何学的相似	63
擬似等流	45
逆勾配水路	52
キャピテーション	33
急勾配水路	50
急変流	47
境界層	111
境界層厚さ	112
境界層近似	128
境界層方程式	127
<b>【け】</b>	
形状損失	27, 151
形状損失係数	28
形状損失水頭	28
径 深	34
ゲージ圧	1
ケルビン・ヘルムホルツ不 安定理論	142
限界勾配	50
限界勾配水路	52
限界水深	48

<b>【こ】</b>	
コーシー・リーマンの関係 式	170, 177, 184
コールブルック・ホワイト 式	150
コルモゴロフスケール	114
混合距離	147
混合距離モデル	147, 156
<b>【さ】</b>	
サイフォン	32
散逸率	95
<b>【し】</b>	
シェジー係数	35
シェジー式	35
次元解析	59
次元行列	61
支配断面	53
射 流	49
潤 辺	34
常 流	49
<b>【す】</b>	
すい込み	187
垂直応力	87, 89
スイープ	166
水平勾配水路	52
水面形	47
水面形方程式	47
ストークス式	59
ストリーク	168
<b>【せ】</b>	
静水圧	1

全水圧	1
全水頭	16
浅水方程式	99
せん断応力	65, 87
全微分	6, 182
漸変流	47

【そ】

相対的静止	6
層流	31
層流境界層	111, 134
速度ポテンシャル	69, 182, 184

組織構造	165
速度水頭	16
損失水頭	25

【た】

対数層	158
ダランベールのパラドック	
ス	74, 211
ダルシー・ワイズバッハ式	31
単位幅流量	50
断面2次モーメント	11, 191

【ち】

中立安定	143
跳水	53

【て】

底面せん断応力	102
---------	-----

【と】

動水勾配線	26
動粘性係数	32, 94
等ポテンシャル線	183
等流	45
等流水深	48
トルミン・シュリヒティン	
グ波	141, 167

【な】

内層	157
流れ関数	69, 184
ナビエ・ストークス方程式	87, 93

【に】

ニクラゼの式	149
二重わき出し	188
ニュートンの粘性法則	65

【ぬ】

ぬれ	77
----	----

【ね】

襴津の式	159
襴津・ロディ曲線	158
粘性	14
粘性係数	32, 94
粘性底層	158
粘性流体	14

【は】

排除厚さ	124
ハーゲン・ポアズイユ流れ	31, 32, 146
パスカルの原理	75
バースティング	107
バッキンガムの $\pi$ 定理	61
バッファ層	158

【ひ】

ピエゾ水頭	26
比エネルギー	43
非定常ベルヌーイ式	105, 195
ピトー管	21
表面張力	75, 77
比力	44

【ふ】

複素速度ポテンシャル	71, 184
浮体	8
浮体の安定性	8
物質微分	85
ブラジウスの式	149
プラントル数	111
フルード数	49, 54, 64
フルード相似則	65

【へ】

ヘアピン渦	168
壁面せん断応力	30, 34
並列管	36
ベルヌーイ式	17, 25, 96
ベルヌーイの定理	16

【ほ】

ポテンシャル流理論	68
ボルダ・カルノー式	151

【ま】

摩擦速度	34
摩擦損失	27
摩擦損失係数	31
摩擦損失水頭	30
マッハ数	64
マニング式	35
マニングの粗度係数	35

【み】

乱れエネルギー	119, 163
乱れエネルギー散逸率	114, 164
乱れ強度	159

【む】

ムーディ線図	31
--------	----

	<b>【め】</b>	乱流拡散	108	レイノルズ相似則	66
		乱流拡散係数	111	レイノルズ分解	116
メニスカス	78	乱流境界層	111, 134	レイノルズ平均	107
	<b>【も】</b>	乱流モデル	119	レイリーの変曲点不安定性理論	141
毛細管現象	78			レイリーの方法	60
	<b>【や】</b>	力学的相似	63	レイリーの問題	120
ヤングの式	78	流管	24	連続式	15, 24, 41
ヤング・ラプラス式	79	流線	15, 68, 178	連続式 (微分形式)	70
	<b>【ら】</b>	流速シア	109		
ライブニッツ則	99, 194	流量	16	<b>【わ】</b>	
ラグランジュ的観測	83			わき出し	187
乱流	31, 109	<b>【れ】</b>			
		レイノルズ応力	117		
		レイノルズ数	31, 32, 64		

	<b>【A】</b>	Chezy formula	35	doublet	188
adverse slope channel	52	Chezy's coefficient	35	dynamic similarity	63
	<b>【B】</b>	coefficient of minor head loss	28	<b>【E】</b>	
bed shear stress	102	coherent structure	165	eddy viscosity	119
Bernoulli's equation	17	Colebrook-White formula	150	Einstein convention	81
Bernoulli's theorem	17	complex velocity potential	71	ejection	166
Blasius formula	149	continuity equation	15	energy correction coefficient	25
Borda-Carnot equation	151	continuity equation in differential form	70	energy grade line	26
boundary layer	111	control section	53	energy gradient	26
boundary layer approximation	128	convection term	85	equipotential lines	183
boundary layer equations	127	critical depth	48	Euler equation	6, 86
boundary layer thickness	112	critical slope	50	Eulerian specification	83
Buckingham's Pi theorem	61	critical slope channel	52	Euler's formula	173
buffer layer	158			<b>【F】</b>	
bursting	107	<b>【D】</b>		floating object	8
	<b>【C】</b>	D'Alembert's paradox	74	friction energy loss	27
capillary action	78	Darcy friction factor	31	friction head loss	30
cascade process	93	Darcy-Weisbach equation	31	friction velocity	34
Cauchy-Riemann equations	170, 177	dimensional analysis	59	Froude number	49, 64
cavitation	34	dimensional matrix	61	Froude similarity	65
		discharge	16		
		displacement thickness	124		
		dissipation rate	95		

- |  |     |                                 |        |  |         |
|--|-----|---------------------------------|--------|--|---------|
| <b>[G]</b>                                   |     | material derivative             | 85     | <b>[Q]</b>                               |         |
|  |     | meniscus                        | 78     | quasi uniform flow                       | 45      |
| gauge pressure                               | 1   | mild slope channel              | 50     | <b>[R]</b>                               |         |
| geometric similarity                         | 63  | minor energy loss               | 27     | RANS 方程式                                 | 98, 117 |
| gradually varied flow                        | 47  | minor head loss                 | 28     | rapidly varied flow                      | 47      |
| gradually varied flow equation               | 47  | mixing length                   | 147    | Rayleigh problem                         | 120     |
|  |     | mixing length model             | 147    | Rayleigh's inflection point theorem      | 141     |
| <b>[H]</b>                                   |     | momentum equation               | 18     | Rayleigh's method                        | 60      |
| Hagen-Poiseuille flow                        | 31  | momentum correction coefficient | 26     | relative rest of fluid                   | 6       |
| hairpin vortex                               | 168 | momentum thickness              | 125    | Reynolds-averaged Navier Stokes equation | 98, 117 |
| head loss                                    | 25  | Moody chart                     | 31     | Reynolds averaging                       | 107     |
| horizontal bed channel                       | 52  | <b>[N]</b>                      |        | Reynolds decomposition                   | 116     |
| hydraulic grade line                         | 26  | Navier Stokes equation          | 87     | Reynolds number                          | 31, 64  |
| hydraulic jump                               | 53  | neutrally stable                | 143    | Reynolds similarity                      | 66      |
| hydraulic radius                             | 34  | Newton's law of viscosity       | 65     | Reynolds stress                          | 117     |
| hydrostatic pressure                         | 1   | Nezu-Rodi curve                 | 158    | <b>[S]</b>                               |         |
| <b>[I]</b>                                   |     | Nezu's universal function       | 159    | second moment of area                    | 11      |
| inner layer                                  | 157 | Nikuradse formula               | 149    | shallow water equation                   | 99      |
| <b>[K]</b>                                   |     | normal depth                    | 48     | shear stress                             | 65, 87  |
| Kelvin Helmholtz instability                 | 142 | normal stress                   | 87     | sink                                     | 187     |
| kinematic similarity                         | 63  | N-S 方程式                         | 87, 93 | siphon                                   | 32      |
| kinematic viscosity                          | 32  | <b>[O]</b>                      |        | source                                   | 187     |
| Kolmogorov scale                             | 114 | open-channel flow               | 41     | specific energy                          | 43      |
| $k-\varepsilon$ モデル ( $k-\varepsilon$ model) | 119 | Orr-Sommerfeld equation         | 137    | specific force                           | 44      |
| <b>[L]</b>                                   |     | outer layer                     | 157    | stability of floating object             | 8       |
| Lagrangian specification                     | 83  | <b>[P]</b>                      |        | steep slope channel                      | 50      |
| laminar boundary layer                       | 111 | parallel pipes                  | 36     | Stokes' law                              | 59      |
| laminar flow                                 | 31  | Pascal's principle              | 75     | streak                                   | 168     |
| law of the wall                              | 157 | perfect fluid                   | 14     | stream function                          | 69      |
| Leibniz rule                                 | 99  | piezometric head                | 26     | stream line                              | 68      |
| logarithmic layer                            | 158 | pipe flow                       | 24     | stream tube                              | 24      |
| <b>[M]</b>                                   |     | Pitot tube                      | 21     | subcritical flow                         | 49      |
| Mach number                                  | 64  | potential flow theory           | 68     | supercritical flow                       | 49      |
| Manning formula                              | 35  | potential head                  | 16     | surface tension force                    | 75      |
| Manning's roughness coefficient              | 35  | Prandtl number                  | 111    | sweep                                    | 166     |
|  |     | pressure head                   | 16     |  |         |

<b>【T】</b>		<b>【U】</b>		<b>【W】</b>	
Tollmien–Schlichting wave		uniform flow	45, 185	wall shear stress	30
	142	unit-width discharge	50	water surface profile	47
total derivative	6	unsteady Bernoulli's equation		Weber number	65
total head	16		105	wetting	77
total water pressure	1	<b>【V】</b>		wetted perimeter	34
TS 波	142, 167	velocity head	16	<b>【Y】</b>	
turbulence intensity	159	velocity potential	69, 182	Young Laplace equation	79
turbulence model	119	velocity shear	109	Young's equation	78
turbulent boundary layer	111	viscosity	14, 32	<b>【Z】</b>	
turbulent diffusion	108	viscous fluid	14	zero-equation model	119
turbulent diffusion coefficient	111	viscous sublayer	158	<b>【数字】</b>	
turbulent energy dissipation rate	114	von Karman constant	157	0 方程式モデル	119
turbulent flow	31	von Karman momentum integral equation	128	99 % 厚さ (99 % boundary layer thickness)	124
turbulent kinetic energy	119	vortex filament	181, 188		
		vorticity	69		

— 著者略歴 —

1999年 京都大学工学部交通土木工学科卒業  
2001年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了（土木工学専攻）  
2003年 京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了（環境地球工学専攻）  
博士（工学） 京都大学  
京都大学大学助手  
2007年 京都大学大学助教  
2009年 京都大学准教授  
現在に至る

水理学 — 試験対策から水理乱流現象のカラクリまで —

Hydraulics

— From exam preparation to study on turbulence phenomena in hydraulics —

© Michio Sanjou 2021

2021年10月21日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 山 上 路 生  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 美研プリンティング株式会社  
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131 (代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-05277-0 C3051 Printed in Japan

(森岡)



**JCOPY** <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。

配本順	水工・水理学分野			頁	本 体
D-1 (第11回)	水	理	学	竹原 幸生著	204 2600円
D-2 (第5回)	水	文	学	風間 聡著	176 2200円
D-3 (第18回)	河	川	工 学	竹林 洋史著	200 2500円
D-4 (第14回)	沿	岸	域 工 学	川崎 浩司著	218 2800円

土木計画学・交通工学分野															
E-1 (第17回)	土	木	計	画 学	奥村 誠著 204 2600円										
E-2 (第20回)	都	市	・	地 域 計 画 学	谷下 雅義著 236 2700円										
E-3 (第22回)	改	訂	交	通 計 画 学	金子 雄一郎 有石 村坂 幹治 共著 石 坂 哲 宏	236 3000円									
E-4	景	観	工	学	川崎 雅史 久保田 善明 共著										
E-5 (第16回)	空	間	情	報 学	須崎 純一 畑 山 滴 共著	236 3000円									
E-6 (第1回)	プ	ロ	ジ	ェ	ク	ト	マ	ネ	ジ	メ	ン	ト	大津 宏康著 186 2400円		
E-7 (第15回)	公	共	事	業	評	価	の	た	め	の	経	済	学	石横 倉松 智樹 共著 横 松 宗 太	238 2900円

環境システム分野								
F-1	水	環	境	工	学	長岡 裕著		
F-2 (第8回)	大	気	環	境	工	学	川上 智規著 188 2400円	
F-3	環	境	生	態	学	西山 村田 修 中 野 一 裕 共著 和 典		
F-4	廃	棄	物	管	理	学	島岡 隆行 共著 中 山 裕 文	
F-5	環	境	法	政	策	学	織 朱 實著	

定価は本体価格+税です。

定価は変更されることがありますのでご了承下さい。



図書目録進呈◆

