

— ま え が き —

水理学は水の運動を扱う学問で、管路の流れ、開水路の流れ、地下水の流れ、波動、流体力、乱流拡散、密度流、流砂などの分野があり、対象とする現象は水路、ダム、堰、ゲートなどの人工構造物における流れや自然の河川の流れ、地下水の流れ、海岸の波など多岐にわたっている。

本書は水理学の入門的な教科書という性格から扱う対象を水理学の基礎である静水力学、完全流体の力学、粘性流体の力学、および水理学の古典的な分野である管路の定常流、開水路の定常流、波動（水の波）に限定した。本書は序章を含めて10章で構成した。序章では水理学が対象とする現象を例示し、水理学を学ぶことの必要性和水理学の歴史について略述した。第1章では水理学で扱う物理量の次元と単位、および水の物理的性質を示した。第2章では静水中に作用する圧力（静水圧）の性質と計算法について述べた。第3章～第5章では水の運動を理論的に解析する際に用いられる法則および基礎方程式について説明し、水の運動の理論的な解析法を示した。第6章では水の運動の特性を実験的に解明する際に用いられる次元解析の方法および模型実験の相似則について述べた。また、電子計算機による数値シミュレーションを効率的に行うための基礎方程式の無次元化の方法について述べた。第7章～第9章では、第6章までに述べた水理学の基礎理論をふまえて、古くから水理学の対象とされてきた管路の定常流、開水路の定常流および水の波の解析法、および流れと波の基本的な性質について説明した。

本書の執筆に当たっては、水理学の基礎理論の体系を把握しやすくするために、理論の筋道を明確にするように記述することに努めた。また、水の運動の解析法を理解しやすくするために、文章や式の誘導に飛躍がないようにできるだけ丁寧な記述するように心掛けた。水の運動の種々の現象の解析法を説明する際には、一貫して連続方程式と運動方程式あるいは運動量方程式に基づく解析法を示し、水理学における理論的な解析法を会得しやすいようにし、例題お

よび演習問題により理解を助けるように配慮した。

大学のときからの友人で、本土木系大学講義シリーズの編集委員である西谷隆巨法政大学教授には原稿を詳細に検討していただき、有益な助言をいただきました。記して感謝の意を表します。

1987年1月

鮎 川 登

目 次

序 章 水理学の分野と研究の流れ

1. 水 理 学	1
2. 水理学の研究の流れ	4

第1章 水の物理的性質

1.1 次元と単位	7
1.2 密度と単位重量	9
1.3 圧 縮 性	11
1.4 粘 性	12
演 習 問 題	13

第2章 静 水 力 学

2.1 静 水 圧	15
2.2 水 圧 の 測 定	18
2.3 平面に作用する静水圧	21
2.4 曲面に作用する静水圧	25
2.5 水中の物体に作用する静水圧 (浮力)	27
2.6 浮 体 の 安 定	28
演 習 問 題	31

第3章 完全流体の力学

3.1 流体運動の表示	33
3.1.1 流 体	33
3.1.2 流体運動の記述のしかた	34
3.2 完全流体の運動の基礎方程式	35

3.2.1 Euler の連続方程式	35
3.2.2 Euler の運動方程式	37
3.3 静止流体の力学	40
3.4 非回転運動	42
3.4.1 非回転運動と回転運動	42
3.4.2 速度ポテンシャル	45
3.4.3 非回転運動の基礎方程式	45
3.4.4 2次元定常非回転運動の解析	47
3.5 定常流の1次元解析	56
3.5.1 連続方程式	57
3.5.2 運動方程式——Bernoulli の定理——	58
3.5.3 Bernoulli の定理の適用例	60
演習問題	65

第4章 粘性流体の力学

4.1 非圧縮性粘性流体の運動の基礎方程式	68
4.1.1 連続方程式	68
4.1.2 Navier-Stokes の運動方程式	69
4.2 粘性によるエネルギー散逸	73
4.3 層流と乱流	75
4.4 層流	77
4.4.1 斜面上の層流	77
4.4.2 円管内の層流	79
4.5 乱流	84
4.5.1 Reynolds の運動方程式	84
4.5.2 Reynolds 応力	86
4.5.3 Reynolds 応力のモデル	87
4.5.4 斜面上の乱流	89
4.5.5 円管内の乱流	93
4.6 境界層	98
4.6.1 物体のまわりの流れ	98
4.6.2 境界層のはく離	99

4.6.3 物体に作用する抗力	100
演習問題	103

第5章 運動量の法則とその応用

5.1 運動量方程式	105
5.2 運動量の法則の適用例	108
5.2.1 物体に作用する抗力	110
5.2.2 噴流による力	111
5.2.3 水路壁面に作用するせん断応力	113
5.2.4 断面変化部の流れ	114
演習問題	118

第6章 次元解析と相似則

6.1 次元解析	120
6.2 相似則	125
6.3 無次元変数に関する連続方程式と運動方程式	127
演習問題	129

第7章 管路の定常流

7.1 管路の流れの分類	131
7.2 管路の非圧縮性粘性流体の定常流の基礎方程式	132
7.2.1 連続方程式	132
7.2.2 運動方程式	132
7.3 管路の流れの摩擦損失	135
7.3.1 摩擦損失水頭	135
7.3.2 円管内の流れの流速分布	136
7.3.3 円管内の流れの平均流速	141
7.3.4 円管内の流れの抵抗係数	143
7.4 管路の流れの形状損失	148
7.4.1 入口の損失水頭	149

7.4.2	出口の損失水頭	149
7.4.3	断面変化による損失水頭	149
7.4.4	曲がりおよび屈折による損失水頭	150
7.4.5	分岐・合流による損失水頭	151
7.4.6	バルブによる損失水頭	151
7.5	管路の定常流の計算	152
7.5.1	管路の定常流の計算	152
7.5.2	サイフォンの計算	155
7.5.3	発電機・ポンプの出力の計算	157
7.5.4	分岐管路・合流管路の計算	160
7.5.5	並列管路の計算	161
7.5.6	管網の計算	162
	演習問題	164

第8章 開水路の定常流

8.1	開水路の流れの分類	167
8.2	常流と射流	168
8.2.1	Froude 数	168
8.2.2	比エネルギー	170
8.2.3	限界水深	172
8.2.4	常流・射流と水面形	174
8.3	等流	182
8.3.1	等流の流速分布	182
8.3.2	等流の平均流速	183
8.3.3	等流の計算	185
8.3.4	経済断面	188
8.3.5	限界勾配	189
8.4	不等流（漸変流）	190
8.4.1	不等流の基礎方程式	190
8.4.2	一様断面水路の不等流	191
8.4.3	断面が変化する水路の不等流	197
8.5	流量が場所的に変化する不等流	200
8.5.1	流下方向に流量が増加する流れ	200

8.5.2 流下方向に流量が減少する流れ	201
8.6 急 変 流	202
8.6.1 断面急変部の流れ	203
8.6.2 ゲートから流出する流れ	204
8.6.3 堰を越える流れ	206
演 習 問 題	208

第9章 水 の 波

9.1 波の諸元と分類	213
9.2 波の運動の基礎方程式と境界条件	214
9.3 微小振幅波理論	217
9.3.1 基礎方程式	218
9.3.2 速度ポテンシャル	218
9.3.3 波速および波長	219
9.3.4 水粒子の速度と運動の軌跡	220
9.3.5 波動下の圧力	222
9.3.6 波のエネルギー	223
9.3.7 波のエネルギーの伝達と群速度	224
演 習 問 題	226

付 録

演習問題略解

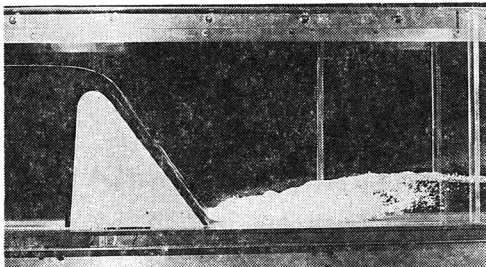
索 引

水理学の分野と研究の流れ

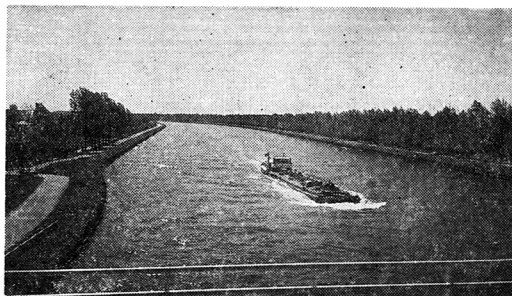
1. 水 理 学

水理学 (hydraulics) は水の運動を扱う学問で、水資源工学、河川工学、海岸工学、発電工学、上水道工学、下水道工学などに関連をもつ土木工学の一分野である。

われわれは自然界に存在する水を飲み水として使用するほか、生活用水、農業用水、工業用水、発電用水などとして利用する。このように水を各種の用水として利用するためには、河川に堰^{せき}やゲートを設けたり、地下水をポンプで汲み上げたりして取水し、水路を建設して導水することが必要になる。そのため、堰またはゲートの流量制御特性やそれらが流れから受ける力および河川の流れや河床変動に及ぼす影響、地下水の揚水可能量やポンプによる揚水が周囲の地下水位に及ぼす影響などを知ることが必要になる。用水を供給するためにダムを建設し、貯水する場合には、ダムで水位を高められて大きなエネルギー



・跳水の実験



・運河

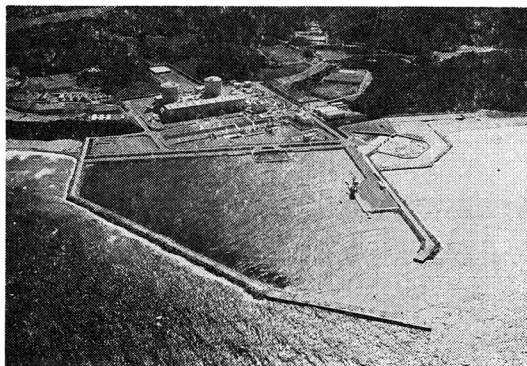
をもつようになった水を洪水時に安全に流下させる方法、貯水池にたまる土砂の量を予測する方法や堆積した土砂を排除する方法、農業用水として利用するときには、貯水池の上層の温かい水を取水する方法などを工夫することが必要になる。河口付近で堰を設けずを取水する場合には、河川水と海水の混合のしかたを調べ、塩分を含まない淡水を取水できる地点を選んで取水することが必要になる。

水路の建設に当っては、所要の流量の水を流せるように水路の断面と勾配を決定しなければならない。

河川を航路として利用したり、運河を開削して舟運の便を図り、人間や物資の輸送に役立てる場合には、船舶の航行に必要な水路幅と水深を確保するように航路を維持したり、運河の断面を決定しなければならない。

河川に家庭や工場からの排水や火力・原子力発電所の冷却水を放流する場合には、排水や冷却水（温排水）が河川水によってどのように混合希釈されるかを検討することが河川の水質を維持・保全するために必要になる。

われわれは河川から種々の恩恵を受ける反面、ときには洪水により人命、家屋、農作物などに被害を受ける。洪水による被害を軽減させるために、河道を整理し、堤防を築き、放水路を開削して洪水が氾濫はんしないように安全に流下させたり、ダムや遊水池をつくって洪水を調節したりする。これらの洪水防御対策を計画する際には、河道の流下能力を算定したり、ダムや遊水池の洪水調節効果を算定することが必要になる。さらに、河道の整理や放水路の開削などが河床変動に及ぼす影響を検討し、河床変動を緩和させる対策を立てることも必



・防波堤

要になる。

海岸は港湾として利用されたり、海岸の平野、干拓地および埋立地は農地、宅地、工場用地などとして利用されている。また、海中に構造物を建設し、海上を利用する試みも行われている。海岸をこれらの利用に供するために建設される防波堤、海岸堤防あるいは各種の海洋構造物を設計するためには、構造物が高波、高潮、津波などから受ける力を算定したり、構造物の効果や構造物が波浪、海浜流、潮流などや周辺の家浜変形に及ぼす影響などを検討することが必要になる。侵食の激しい海岸では侵食対策として海岸堤防、護岸、突堤、離岸堤などが建設されるが、それらの計画に当っては侵食防止効果や周辺に及ぼす影響を検討することが必要である。また、家庭や工場からの排水や火力・原子力発電所の冷却水を海中に放流する場合には、排水や温排水が海中でどのように混合希釈されるかを検討することが必要である。

以上に例示したような諸課題にこたえるためには、河川、水路あるいは地中における水の流れを解明し、流速、水深、圧力、せん断力などを求めたり、海における波動現象を解析し、波の運動特性を明らかにし、波による水粒子の速度や波圧、波力などを求めることが必要である。さらに、河川や海域における物質の拡散混合現象、淡水と海水や温排水と周囲水の混合など密度の異なる水の混合現象を解明したり、河川や海岸における土砂の移動とそれに伴う河床や海浜の変化に関する現象を解明することが必要になる。

水理学はこのような水の運動（流れと波）およびそれに関連した現象を扱う学問であり、その対象とする分野には、管路の流れ、開水路の流れ、地下水の流れ、拡散混合、密度流、流砂、波動、静水力学、流体力などがある。

2. 水理学の研究の流れ

水理学の研究は開水路や管路の流量を算定するために開水路や管路の流れの平均流速を求めることから始められた。エジプト、メソポタミヤ、中国などでは古代においてすでに灌漑用水路が建設され、ローマでは水道水の輸送のために石造の水路、鉛管や陶管の給水管路が建設された。これらの開水路や管路が水理的にどのように設計されたかは明らかでないが、ギリシャ時代には流量は流水断面積と流速に関係することが認識されていた。その後、Leonardo da Vinci（レオナルド ダ・ビンチ）により流れの連続の原理が記述されるなど、流速に関する認識が深められたが、定性的な知識にとどまっておき、18世紀中葉までは流れを定量的に把握することができなかった。18世紀後半に平均流速を算定するための式が提案された。その後、開水路や管路の流れに関する系統的な実験および河川や実際の水路における観測が行われ、それらの実験データや観測データに基づいて種々の平均流速式が提案され、平均流速式の実用化が進められた。

開水路の流れでは平均流速のほかに水深あるいは水位を求めることが課題であったが、19世紀中葉に開水路の流れの水面形の分類がなされ、幅の広い長方形断面水路の流れの水面形の解析解が導かれた。その後、多くの人々によって開水路の流れの水面形を計算する方法が提案された。

水路や運河の建設と関連して水路の洗掘や土砂の堆積などが問題になり、19世紀後半には土砂の移動限界や流砂量に関する実験が行われ、流砂量式が提案された。また、河川改修に関連して河床変動が問題になり、移動床模型実験が行われた。19世紀末から各国の大学や研究所に水理実験室がつくられ、土砂の移動限界、流砂量、河床形態、移動床流れの抵抗などに関する系統的な実験が行われるようになった。

その他の分野の研究としてはオリフィスからの流出に関する研究が古くから行われた。18世紀中葉には堰の越流に関する研究が行われ、刃形堰や広頂堰の流量式が提案された。19世紀には段波や洪水流という開水路の非定常流に関する研究が始められ、19世紀中葉には地下水流の分野でDarcy（ダルシー）の法則が提唱され、井戸のまわりの流れの解析解が導かれた。19世紀末から20世紀の初頭にかけては管路の非定常現象である水撃作用やサージ現象に関する優れた研究成果が発表された。

水の運動を扱う学問には水理学のほかに流体力学（hydrodynamics, fluid mechanics）がある。流体力学は物理学の一分野で、流体の運動を力学的・理論的に解明する学問である。流体力学の分野では、17世紀における数学および力学の進歩をふまえて、18世紀にBernoulli（ベルヌーイ）の定理、Euler（オイラー）の運動方程式、Lagrange（ラグランジュ）の運動方程式の誘導や速度ポテンシャルおよび流れ関数の導入などにより粘性を無視する完全流体の力学の基礎が確立された。19世紀には偏微分方程式の解法や複素関数論、等角写像理論などを適用した完全流体の基礎方程式の解法が種々の問題に対して示された。粘性流体の力学の分野では19世紀にNavier-Stokes（ナビエ・ストークス）の運動方程式、Reynolds（レイノルズ）の運動方程式が誘導され、また粘性流体の流れが層流と乱流に分類され、層流に関して円管内の流れの流速分布やStokesの法則が導かれた。

上述したように19世紀末までは水理学では実験や現地観測に基づいて実用的な実験式を導くことに主眼が置かれた。一方、流体力学では数学的解析が可能な完全流体の解析に重点が置かれ、水理学が対象とする粘性流体の乱流についてはほとんど研究は行われなかった。しかし、20世紀に入ると、航空学において飛行機の翼の設計のための必要性から実際の流れを解析しうる理論が要請され、流体力学の分野でも物理的基礎に基づいて粘性流体の運動を解析するための努力がなされるようになり、境界層理論が提案された。また、次元解析や模型実験の相似則の概念が導入され、流体力学の分野でも風洞を使用した基礎的実験や模型実験が行われるようになった。そして、熱線流速計により乱流の

速度が測定され、乱れの現象の解析が進められ、乱流や乱流拡散の理論が発展した。

流体力学の分野におけるこのような研究成果は水理学の分野にもとり入れられ、混合距離モデルにより円管内の乱流の流速分布および流れの抵抗係数の表示式が導かれた。また、流砂の運動の解析に乱流理論が応用され、土砂の移動限界式や掃流砂および浮流砂に関する新しい流砂量式が提案されたり、流れによる物質の拡散混合現象の解析に乱れの理論が応用されるようになった。さらに、水理学の分野においても流体力学の解析法が導入され、水の運動が基礎方程式に基づいて解析されるようになり、また実験式の誘導においても物理的な考察が重視されるようになった。

現在の水理学では先に述べたように管路の流れ、開水路の流れ、流体力、地下水流、密度流、乱流拡散、流砂、波動など多岐にわたる多様な現象が対象とされ、実験的方法、理論的解析法あるいは数値解析法によりそれらの現象が解析されている。理論的解析法および数値解析法では水理現象を記述する基礎方程式に基づいて水の運動が解析されるが、基礎方程式に含まれる係数については不明な点があることが多く、また、従来のような1次元解析では十分でなく、2次元あるいは3次元の解析を必要とする問題も増えている。水理学の現在の課題は実験や現地観測に基づいて水理現象を解明し、基礎方程式に含まれる係数の特性を定量的に把握すること、2次元あるいは3次元の解析法を確立することなどである。

〔あ〕	
Archimedes の原理	28
圧縮性	11
——流体	33
圧縮率	11
圧力応答係数	222
圧力水頭	59
圧力方程式	47
圧力補正係数	171
〔い〕	
1 次元解析法	57
一様断面水路	191
一般化した Bernoulli の式	47
入口の損失係数	149
〔う〕	
Weber	
——数	124
——の相似則	126
渦運動	44
渦点	53
渦度	44
渦なし運動	44
運動量方程式	107
運動量補正係数	109
〔え〕	
SI	8
LFT 系の次元	7
LMT 系の次元	7
エネルギー勾配	135
エネルギー線	135
エネルギー補正係数	134, 171
円管内の乱流の抵抗係数	145
円管内の乱流の流速分布	141

〔お〕	
Euler	40
——の運動方程式	40
——の方法	34
オリフィス	61
〔か〕	
Kármán 定数	96
開水路の流れ	167
回転運動	44
回転の角速度	44
角変形の数	44
滑面	140
渦動粘性係数	87
緩勾配水路	189
完全越流	207
完全流体	33
管網	162
管路の流れ	131
〔き〕	
規則波	213
逆勾配水路	194
キャピテーション	156
急拡の損失係数	149
急勾配水路	189
急縮の損失係数	150
急変流	167
境界層	98
——のはく離	100
共役水深の関係	178
〔く〕	
Couette の流れ	103
屈折の損失係数	151
群速度	224
群波	224

〔け〕	
経済断面	188
ゲージ圧力	18
形状損失	149
径深	76
傾心	29
限界勾配	189
限界水深	173
限界 Reynolds 数	75
限界流	170
〔こ〕	
Colebrook	145
control volume	108
工学単位系	8
広頂堰	207
高度水頭	59
合流管路	161
抗力	100
抗力係数	101
国際単位系	8
混合距離	89
〔さ〕	
Safranez の式	178
差圧マノメーター	19
サイフォン	155
散逸関数	75
三角堰	207
〔し〕	
Chézy の式	142, 185
四角堰	207
次元	7
——解析	124
—— LFT 系の——	7
—— LMT 系の——	7
質量輸送	222
支配断面	176
射流	168

周期	213	速度ポテンシャル	45		
収縮係数	62, 204	粗度係数	147, 185		
自由流出	204	粗面	140		
重力単位系	8	損失係数	149		
重力波	214	入口の—	149		
灣辺	76	急拡の—	149		
衝撃波	180	急縮の—	150		
正の—	182	屈折の—	151		
負の—	182	漸拡—	150		
常流	168	出口の—	149		
助走区間	137	バルブの—	151		
進行波	214	曲がり—	150		
伸縮の速度	43				
深水波	214				
		[た]			
		d'Alembert の背理	54		
		Darcy-Weisbach の式	136		
		体積弾性率	11		
		単位重量	9		
		段波	208		
		断面係数	192		
		[ち]			
		跳水	177		
		波状—	178		
		長波	214		
		重複波	214		
		[つ]			
		通水能	192		
		[て]			
		低下背水曲線	193		
		抵抗係数	136		
		円管内の乱流の—	145		
		定常流	131, 167		
		出口の損失係数	149		
		[と]			
		Torricelli の定理	61		
		動圧	63		
		動水勾配	135		
		—線	135		
		動粘性係数	13		
		等流	167		
		—水深	186		
		[な]			
		Navier-Stokes の運動方程式	72		
		流れ関数	43		
		ナップ	206		
		波のエネルギー	223		
		[に]			
		Newton			
		—の摩擦法則	12		
		—流体	12		
		2重湧出し	52		
		[ね]			
		粘性			
		—係数	12		
		—底層	99, 138		
		—流体	34		
		[は]			
		Hardy-Cross 法	163		
		Buckingham の π 定理	124		
		刃形堰	206		
		波高	213		
		波状跳水	178		
		波長	213		
		発散	58		
		発電力	158		
		バルブの損失係数	151		
		[ひ]			
		非圧縮性流体	33		
		ピエゾ水頭	59		
		比エネルギー	171		
		非回転運動	44		
		微小振幅波理論	217		
		非定常流	131, 167		
		ピトー管	62		
		非 Newton 流体	12		
		表面張力波	214		
		表面波	214		
		[ふ]			
		Blasius の式	144		
[す]					
Stokes の法則	102				
Smetana の式	178				
吸込み	51				
水深	213				
[せ]					
静圧	63				
静水圧	15				
正の衝撃波	182				
堰上げ背水曲線	193				
絶対圧力	18				
漸拡損失係数	150				
全水頭	59				
浅水波	214				
全幅堰	207				
漸変流	167				
[そ]					
総圧	63				
相似則	125				
Weber の—	126				
Froude の—	126				
Mach の—	126				
Reynolds の—	126				
相似律	125				
相当粗度	145				
層流	75				
速度欠損則	92, 97, 141				
速度水頭	59				

—著者略歴—

- 1962年 東京大学工学部土木工学科卒業
1964年 東京大学大学院修士課程修了
1968年 東京大学工学部講師
1971年 早稲田大学助教授
1976年 早稲田大学教授（理工学部土木工学科），現在に至る

水 理 学

Hydraulics

© Noboru Sukegawa 1987

1987年 3月 25日 初版第1刷発行
2009年 10月 20日 初版第17刷発行

検印省略

著 者 鮭 川 登
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛来真也
印 刷 所 富士美術印刷株式会社

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 <http://www.coronasha.co.jp>



ISBN 978-4-339-05045-5 (平河工業社，愛千製本所)
Printed in Japan

無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします