

# 目次

## 序編

### 第1章 序論

1.1 本技術資料の内容 .....	1
1.2 用語その他について .....	1
1.3 流体, 流量および連続	
1.3.1 流体 .....	1
1.3.2 流量および連続 .....	2

### 第2章 流体摩擦と損失ヘッドおよび流量

2.1 流体摩擦一般	
2.1.1 層流と乱流 .....	3
2.1.2 流体摩擦 .....	3
2.1.3 運動方程式 .....	4
2.1.4 管内の流れ .....	4
2.1.5 相似則 .....	5
2.2 管路における損失ヘッド	
2.2.1 損失ヘッド .....	6
2.2.2 各種の損失 .....	6
2.3 管路の総損失ヘッドと流量	
2.3.1 管路の総損失 .....	7
2.3.2 管路の流量 .....	7
2.4 管路で流体を送るときの動力	
2.4.1 管路で非圧縮性流体を送る場合 .....	7
2.4.2 管路で圧縮性流体を送る場合 .....	10
2.4.3 重力のもとでの流れ .....	11
2.5 管路の流速	
2.5.1 管路の経済的口径 .....	12
2.5.2 基準流速 .....	14
2.6 非定常管内流	
2.6.1 非圧縮流体の場合(層流) .....	15
2.6.2 非圧縮流体の場合(乱流) .....	17
2.6.3 圧縮性流体の場合 .....	18

## I編 気体・液体の一般の流れ

### 第3章 直管の損失

3.1 円形断面の直管 .....	22
3.1.1 円管内の層流 .....	22
3.1.2 層流から乱流への遷移 .....	23

3.1.3	なめらかな円管内の乱流	25
3.1.4	あらい管壁を有する円管	27
3.2	円形以外の断面を有する直管	
3.2.1	層流の場合	37
3.2.2	臨界レイノルズ数	46
3.2.3	乱流の場合	47
3.3	実用公式	50
3.3.1	ガンギエ・クッター (Ganguillet-Kutter) の公式 (1870)	50
3.3.2	マニング (Manning) の公式 (1889)	50
3.3.3	ヘーゼン・ウィリアムス (Hazen-Williams) の公式 (1905)	51
3.3.4	ミセス (Mises) の公式 (1914)	51
3.3.5	材質に応じた実用公式	51

## 第 4 章 各種の管路要素の抵抗

4.1	管路の入口	53
4.2	断面積が急に变化する場合	
4.2.1	広くなる場合	54
4.2.2	狭くなる場合	55
4.2.3	穴を通る場合	55
4.3	断面積がゆるやかに变化する場合	
4.3.1	広がり管 (ディフューザ)	56
4.3.2	細まり管 (ノズル)	62
4.4	重ね継手の管	64
4.5	弁およびコック	64
4.5.1	仕切弁	64
4.5.2	玉形弁	65
4.5.3	ちょう形弁	65
4.5.4	コック	66
4.5.5	その他の弁	66
4.6	ダンパ	67
4.7	曲り管	
4.7.1	らせん管	68
4.7.2	ベンド	72
4.7.3	エルボ	79
4.7.4	案内羽根入りベンド	81
4.7.5	ねじ込み式エルボ	84
4.7.6	曲りディフューザ	85
4.8	分岐・合流管	
4.8.1	分岐・合流損失係数の定義	86
4.8.2	分岐・合流管におけるエネルギー損失特性の統一的表示	88
4.8.3	面積比が1以上の値をとる T 形管	88
4.8.4	Y 形管	89
4.8.5	実用 T 形配管	89
4.8.6	12 in 角断面をもつ正方形ダクト	94
4.8.7	一部盲管とした T 形管	95

4.9	分配管	96
4.9.1	分配管内圧力分布	96
4.9.2	連続分配管による近似	96
4.9.3	連続等分布分配管	97
4.9.4	支管の抵抗が均一の分配管	97
4.10	集合管	98
4.10.1	集合管内圧力分布	98
4.10.2	連続集合管による近似	98
4.10.3	連続等分布集合管	98
4.10.4	支管の抵抗が均一の集合管	99
4.10.5	分配・集合管	99
4.11	管の出口	100
4.12	損失の干渉	100
4.12.1	バンド-バンドの干渉	101
4.12.2	バンド-広がり管(ディフューザ)の干渉	104
<b>第5章 管路網</b>		
5.1	樹枝状管路網と網目状管路網	106
5.2	網目状管路網の流量計算法	
5.2.1	ハーディ・クロス(Hardy-Cross)法	106
5.2.2	連立一次方程式により補正流量を求める方法	107
5.2.3	節点圧力を仮定して補正していく方法	108
5.2.4	等価電気回路網による方法	108
<b>第6章 整流装置の抵抗</b>		
6.1	整流装置の基礎	109
6.2	金網および多孔板の特性値	110
6.2.1	抵抗係数 $K$	110
6.2.2	流出角係数 $\alpha$	112
6.3	整流装置の実例	113
<b>第7章 絞り流量計の抵抗</b>		
<b>第8章 回転管</b>		
8.1	管軸のまわりに回転する直管	117
8.2	管軸まわりに回転する二重円管	117
8.2.1	同心回転二重円管のモーメント係数(軸流なし)	118
8.2.2	同心回転二重円管の管摩擦係数	119
8.2.3	同心の場合のモーメント係数(軸流あり)	120
8.2.4	偏心の場合のモーメント係数(軸流なし)	121
8.2.5	偏心の場合の管摩擦係数	122
8.3	管軸に直交する軸のまわりに回転する直管	123
8.3.1	円形断面の回転直管の層流の管摩擦係数	123
8.3.2	円形断面の回転直管の臨界レイノルズ数	124
8.3.3	円形断面の回転直管の乱流の管摩擦係数	124
8.3.4	長方形断面の回転直管	124
8.4	回転 U 字管	125

## Ⅱ 編 各種の流体の流れ

### 第 9 章 圧縮性流体および蒸気の流れ

9.1 圧縮性流れの基本	
9.1.1 圧縮性流体における運動方程式	127
9.1.2 連続の式, 状態方程式	127
9.1.3 流動する気体のエネルギー式	128
9.1.4 等エントロピ流れ	128
9.1.5 マッハ数による整理	128
9.2 一次元等エントロピ流れ	131
9.2.1 等エントロピ流れ	131
9.2.2 先細ノズル	132
9.2.3 先細末広ノズル	132
9.2.4 圧力係数	133
9.3 等断面管路流れ	
9.3.1 摩擦損失のある断熱流れ (ファノー流れ)	133
9.3.2 外部と熱授受のある摩擦のない流れ (レーレー流れ)	135
9.3.3 等温流れ	135
9.4 広がり管内の流れ	136
9.4.1 衝撃波上流の流れ	136
9.4.2 擬似衝撃波	138
9.4.3 衝撃波下流の流れ	139
9.5 蒸気の流動	
9.5.1 蒸気の流動の特徴	140
9.5.2 一般の管路の抵抗の式やデータが使える場合	141
9.5.3 自然凝縮が生じる場合	143
9.5.4 管内凝縮流	143
9.6 曲り管, 急拡大・急縮小管等の流れ	
9.6.1 まえがき	144
9.6.2 配管系各要素についての解析	144
9.7 ラビリンス流路	
9.7.1 ラビリンス流路の概要	151
9.7.2 ラビリンス流路の流量 (漏れ量) の計算	152
9.7.3 ラビリンス流路の形状	154
9.7.4 ラビリンス流路計画上の注意	155

### 第 10 章 非ニュートン流体の流れ

10.1 流動様式による流体の分類	156
10.2 基礎方程式系	
10.2.1 応力運動方程式	156
10.2.2 連続の方程式	156
10.2.3 レオロジー方程式 (構成方程式)	156

10・3	純粘性流体	
10・3・1	流動曲線による分類	156
10・3・2	各種のレオロジー方程式	157
10・3・3	細管法によって流動曲線を求める方法	157
10・3・4	べき乗則流体	157
10・3・5	エリス流体	160
10・4	塑性流体	
10・4・1	塑性流体の分類とレオロジー方程式	160
10・4・2	ビンガム流体	160
10・5	粘弾性流体	
10・5・1	レオロジー方程式	163
10・5・2	相似則	164
10・5・3	円管内層流	164
10・5・4	円管内乱流	165
10・6	物性値の測定法	
10・6・1	粘度測定	166
10・6・2	降伏値 $\rho_y$	166
10・6・3	法線差応力	167
<b>第11章 混相流</b>		
11・1	固気二相流	
11・1・1	粉粒体の流動様式	169
11・1・2	粉粒体の浮遊速度	169
11・1・3	粉粒体群の運動方程式	170
11・1・4	粉粒体の加速抵抗	170
11・1・5	直管路における固気速度比	171
11・1・6	等速運動における粉粒体の管路抵抗	172
11・1・7	曲り管路における粉粒体の流動抵抗 (90° 曲り管)	174
11・1・8	最小輸送速度 (限界流速)	174
11・2	固液二相流	
11・2・1	スラリの流動様式	175
11・2・2	粒子の濃度分布と液体の速度分布	176
11・2・3	粒子の沈降速度と抗力係数	177
11・2・4	限界速度	177
11・2・5	直管路における粒子速度	178
11・2・6	圧力損失 (水力こう配)	179
11・3	気液二相流	
11・3・1	流動様式	180
11・3・2	基礎方程式	181
11・3・3	ポイド率	181
11・3・4	加速損失	183
11・3・5	直管中の摩擦損失	183
11・3・6	らせん管中の摩擦損失	185
11・3・7	管列の摩擦損失	187
11・3・8	各種の局所損失	188

11・4 カプセル輸送	
11・4・1 水力式カプセル輸送	190
11・4・2 カプセルの空気輸送	191

### Ⅲ 編 管路・ダクト系の計画・設計例

#### A. プラント関係

A・1 都市ガスの高圧長距離輸送幹線	196
A・2 都市ガスの中圧導管網	198
A・3 都市ガス管路の経済設計	200
A・4 煙道ダクト	202
A・5 冷却器の圧力損失	204
A・6 空気冷却器への分岐配管	206
A・7 給水の分岐配管	208
A・8 ガス捕集配管	210
A・9 消火線の配管網	212
A・10 ポンプまわりの配管	214
A・11 パイプライン	216
A・12 加熱炉および塔配管	218
A・13 凝縮水ヘッダー	220
A・14 自然流下する管路	222
A・15 粒体の空気輸送	222
A・16 スラリ輸送	226

#### B. 建築・土木関係

B・1 空調用低速ダクト（単一ダクト定風量方式）	228
B・2 空調用高速ダクト（単一ダクト変風量方式）	230
B・3 冷温水配管の設計例	232
B・4 直接暖房用低圧蒸気配管	234
B・5 地域暖房用高圧蒸気配管	236
B・6 温水配管の最適化設計	238
B・7 冷媒配管	240
B・8 建物内給水配管	242
B・9 建物内排水および通気配管	244
B・10 上水道送配水管の経済的設計例	246
B・11 ハーディ・クロス法による上水道管網の流量計算例	248
B・12 下水管きょ網	250
B・13 汚てい（スラッジ）の管路輸送	252
B・14 自動車トンネルの換気ダクト	254

付録・計算図表（詳細目次は195ページ参照）	256～269
------------------------	---------

## 目次

## CONTENTS

はしがき*	.....	i
1. 緒言*		
1.1 概論	.....	4
1.2 量記号および単位	.....	8
1.3 単位換算	.....	8
1.4 基本物理定数	.....	9
1.5 略語	.....	9

\*英文併記

### 2. 水および水蒸気の熱物性

2.1 飽和表 (温度基準)	.....	11
2.2 飽和表 (圧力基準)	.....	11
2.3 圧縮水および過熱蒸気の比体積、 比エンタルピー、比エントロピー	.....	11
2.4 高温過熱蒸気の比体積、比エンタルピー、 比エントロピー	.....	11
2.5 準安定状態の過冷却蒸気の比体積、 比エンタルピー、比エントロピー	.....	12
2.6 臨界域および超臨界域の比体積、 比エンタルピー、比エントロピー	.....	12
2.7 定圧比熱	.....	12
2.8 定積比熱	.....	12
2.9 音速	.....	13
2.10 等エントロピー指数	.....	13
2.11 表面張力およびラプラス定数	.....	13
2.12 屈折率	.....	14
2.13 静的誘電率	.....	14
2.14 粘性率	.....	14
2.15 動粘性率	.....	14
2.16 熱伝導率	.....	14
2.17 プラントル数	.....	15
2.18 イオン積	.....	15
2.19 pH	.....	15
2.20 飽和状態の熱物性値	.....	15

### 3. 実用国際状態式および国際補間式

3.1 実用国際状態式	.....	176
3.2 表面張力の国際補間式	.....	188
3.3 屈折率の国際補間式	.....	188

Foreword*	.....	i
1. Introduction*		
1.1 Outline	.....	4
1.2 Quantities and Units	.....	8
1.3 Conversion Factors of Units	.....	8
1.4 Fundamental Physical Constants	.....	9
1.5 Abbreviations	.....	9

\* English explanation is available.

### 2. Thermophysical Properties of Water and Steam

2.1 Saturation Tables (Temperature Base)	.....	11
2.2 Saturation Tables (Pressure Base)	.....	11
2.3 Specific Volume, Enthalpy, and Entropy of Compressed Water and Superheated Steam	.....	11
2.4 Specific Volume, Enthalpy, and Entropy of Superheated Steam at High Temperatures	.....	11
2.5 Specific Volume, Enthalpy, and Entropy of Metastable Subcooled Steam	.....	12
2.6 Specific Volume, Enthalpy, and Entropy in the Critical Region and Supercritical Region	.....	12
2.7 Specific Heat Capacity at Constant Pressure	.....	12
2.8 Specific Heat Capacity at Constant Volume	.....	12
2.9 Speed of Sound	.....	13
2.10 Isentropic Exponent	.....	13
2.11 Surface Tension and Laplace Constant	.....	13
2.12 Refractive Index	.....	14
2.13 Static Dielectric Constant	.....	14
2.14 Viscosity	.....	14
2.15 Kinematic Viscosity	.....	14
2.16 Thermal Conductivity	.....	14
2.17 Prandtl Number	.....	15
2.18 Ion Product	.....	15
2.19 pH	.....	15
2.20 Thermophysical Properties at the Saturation	.....	15

### 3. IAPWS-IF97 and Internationally Recommended Interpolating Equations

3.1 IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam	.....	176
3.2 Recommended Interpolating Equation of Surface Tension	.....	188
3.3 Recommended Interpolating Equation of Refractive Index	.....	188

3・4 静的誘電率の国際補間式 ..... 188  
3・5 粘性率の国際補間式 ..... 189  
3・6 熱伝導率の国際補間式 ..... 189  
3・7 イオン積の国際補間式 ..... 190

4. 国際水・蒸気性質協会と国際標準

4・1 はじめに ..... 191  
4・2 IAPS 設立以前の経緯 ..... 191  
4・3 IAPS の創設 ..... 192  
4・4 IAPWS への改組とその活動 ..... 193  
4・5 IAPWS によって制定された国際標準 ..... 194  
4・6 おわりに ..... 197

文献 ..... 198

折込みの線図

- 水および水蒸気のエンタルピー・エントロピー線図 ( $h-s$  線図)
- 水および水蒸気の温度・エントロピー線図 ( $T-s$  線図)
- 水および水蒸気のエンタルピー・圧力線図 ( $h-p$  線図)

付録

CD-ROM

3・4 Recommended Interpolating Equation of Static Dielectric Constant ..... 188  
3・5 Recommended Interpolating Equation of Viscosity ..... 189  
3・6 Recommended Interpolating Equation of Thermal Conductivity ..... 189  
3・7 Recommended Interpolating Equation of Ion Product ..... 190

4. The IAPWS and the International Standards

4・1 Introductory Remarks ..... 191  
4・2 Earlier History prior to the IAPS ..... 191  
4・3 Foundation of the IAPS ..... 192  
4・4 Reorganization into the IAPWS and Its Activities ..... 193  
4・5 International Standards Adopted by the IAPWS ..... 194  
4・6 Concluding Remarks ..... 197

Bibliography ..... 198

Appended Charts

- Enthalpy-Entropy Chart for Water and Steam ( $h-s$  Chart)
- Temperature-Entropy Chart for Water and Steam ( $T-s$  Chart)
- Enthalpy-Pressure Chart for Water and Steam ( $h-p$  Chart)

Attachment

CD-ROM





## 表一覧

表 1	飽和表 (温度基準) .....	29
表 2	飽和表 (圧力基準) .....	34
表 3	圧縮水および過熱蒸気の比体積、 比エンタルピー、比エントロピー .....	39
表 4	高温過熱蒸気の比体積、比エンタルピー、 比エントロピー .....	101
表 5	準安定状態の過冷却蒸気の比体積、 比エンタルピー、比エントロピー .....	109
表 6	臨界域および超臨界域の比体積、 比エンタルピー、比エントロピー .....	114
表 7	定圧比熱 .....	120
表 8	定積比熱 .....	124
表 9	音速 .....	128
表 10	等エントロピー指数 .....	132
表 11	屈折率 .....	136
表 12	静的誘電率 .....	138
表 13	粘性率 .....	142
表 14	動粘性率 .....	146
表 15	熱伝導率 .....	150
表 16	プラントル数 .....	154
表 17	イオン積 .....	158
表 18	pH .....	162
表 19	飽和状態の熱物性値 .....	166

## 図一覧

図 1	定圧比熱 .....	16
図 2	定積比熱 .....	17
図 3	音速 .....	18
図 4	等エントロピー指数 .....	19
図 5	表面張力 .....	20
図 6	ラプラス定数 .....	20
図 7	屈折率 .....	21
図 8	静的誘電率 .....	22
図 9	粘性率 .....	23
図 10	動粘性率 .....	24
図 11	熱伝導率 .....	25
図 12	プラントル数 .....	26
図 13	イオン積 .....	27
図 14	pH .....	28

## List of Tables

Table 1	Saturation Table (Temperature Base) .....	29
Table 2	Saturation Table (Pressure Base) .....	34
Table 3	Specific Volume, Enthalpy, and Entropy of Compressed Water and Superheated Steam ...	39
Table 4	Specific Volume, Enthalpy, and Entropy of Superheated Steam at High Temperatures .....	101
Table 5	Specific Volume, Enthalpy, and Entropy of Metastable Subcooled Steam .....	109
Table 6	Specific Volume, Enthalpy, and Entropy in the Critical and Supercritical Region .....	114
Table 7	Specific Heat Capacity at Constant Pressure ...	120
Table 8	Specific Heat Capacity at Constant Volume ...	124
Table 9	Speed of Sound .....	128
Table 10	Isentropic Exponent .....	132
Table 11	Refractive Index .....	136
Table 12	Static Dielectric Constant .....	138
Table 13	Viscosity .....	142
Table 14	Kinematic Viscosity .....	146
Table 15	Thermal Conductivity .....	150
Table 16	Prandtl Number .....	154
Table 17	Ion Product .....	158
Table 18	pH .....	162
Table 19	Thermophysical Properties at the Saturation ...	166

## List of Figures

Figure 1	Specific Heat Capacity at Constant Pressure ...	16
Figure 2	Specific Heat Capacity at Constant Volume ...	17
Figure 3	Speed of Sound .....	18
Figure 4	Isentropic Exponent .....	19
Figure 5	Surface Tension .....	20
Figure 6	Laplace Constant .....	20
Figure 7	Refractive Index .....	21
Figure 8	Static Dielectric Constant .....	22
Figure 9	Viscosity .....	23
Figure 10	Kinematic Viscosity .....	24
Figure 11	Thermal Conductivity .....	25
Figure 12	Prandtl Number .....	26
Figure 13	Ion Product .....	27
Figure 14	pH .....	28