

化学工学ポケットブック

岡田 功

荻野典夫
共編

R
81.17073
342

化学工学ポケットブック

岡田 功

工学博士
萩野 典夫
共編



化学工学ポケットブック

① 岡田功・荻野典夫 1974

昭和49年1月25日 第1版第1刷発行

定価 4500 円

OHM・OHM・OHM・O
MHO・MHO・MHO・O
編者承認
検印省略

編者

岡田功
荻野典夫

発行

株式会社 オーム社
郵便番号 101
東京都千代田区神田錦町3ノ1
代表者 三井正光

発売所

株式会社 オーム社書店

101 東京都千代田区神田錦町3ノ1 (振替東京 20018)
604 京都市中京区河原町通り四条上ル (振替京都 31080)
530 大阪市北区堂島・毎日大阪会館 (振替大阪 10884)

印刷 日東紙工 製本 三水舎

書丁・乱丁本はお取替えいたします

は し が き

化学工学に関する便覧類としては、「化学工学便覧」(化学工学協会編)と Perry の「Chemical Engineers' Handbook」が双璧であり、詳細にして権威あるハンドブックとして、古くから多くの方々に愛用されてきている。しかし、この両者は版を重ねるごとに大型化し、かつ内容も非常に高度なものとなってきている。

筆者らはかねてより「化学工学便覧」の特長を生かしたハンディな書籍の出現を期待していたのであるが、たまたま同様の主旨で企画化を考えていた出版元があり、強い要望もあって執筆することになった。いざ当事者となって、この編集・執筆に携わってみると、あの化学工学全般に及ぶ大冊のエッセンスを限られた紙面に盛り込むことは難事中の難事であることを思い知らされた。それとともに、難事を少しでも克服し、わかりやすく、読みやすい内容を盛り込んで読者の便に供することができるならば、筆者らの望外の幸せとして編集にとりかかったのである。

主たる編集方針として次の諸点に留意した。

- (1) 工業高校あるいは高専や大学の初年級の方々が容易に理解できることを旨とし、あまり高度の理論や複雑な事項はできるだけ省くこと。
- (2) 例題を豊富に載せ、実際の数値計算に役立たせること。
- (3) つとめて実用的なグラフや数表を取り入れること。
- (4) 表解形式を大幅にとり入れ、比較や違いなどをわかりやすくすること。

しかし、以上の諸点は、各章ごとに分担執筆のため、記述に多少の精粗や程度の差が見受けられることをお許し頂きたい。

また最近、化学工学の境界はますますあいまいとなり化学工学への根源的問いかけもないではないが、一方において本書のような基礎に忠実な単位操作を中心とした基本書が多年の要望にもかかわらず出版されていない現状を見ると、たとえ公害・安全問題に携わる方々であっても、基礎学習は生涯勉学の必要な今日、とくに重要なものではあるまいか。

本書が化学工学を学ぶ方々をはじめ、化学工学に携わる方々、さらには土木・建築などの化学工学関連技術者の方々に少しでも役立てられれば幸いである。

終りに、筆者らの浅学菲才のゆえに、不備・脱落・誤謬も少なくないと思われる。利用者の方々の忌憚ない御指摘を望む次第である。

昭和 48 年 12 月

編者らしるす

DNB105

《執筆者》

武蔵工業大学工学部助教授	井口 昭洋
東京都立航空工業高等専門学校教授	岡田 功
関東学院大学工学部教授・工博	荻野 典夫
足利工業大学工学部教授	依田 昇

50音順

目 次

1. 伝 熱

1.1 熱の移動の仕方..... 1	[7] 複 合 伝 熱 係 数..... 9
[1] 伝導による伝熱..... 1	1.2 伝 熱 装 置.....11
[2] 対流による伝熱..... 3	[1] 熱交換器の分類と特徴.....12
[3] ふく射(熱放射)による伝熱... 4	[2] 多管式熱交換器.....16
[4] 熱 貫 流..... 4	[3] 境膜伝熱係数および圧力損失...20
[5] 平 均 温 度 差..... 6	[4] 伝 熱 媒 体.....26
[6] 流体が管内を流れる場合..... 7	

2. 蒸 発

2.1 蒸発操作の関係式.....27	[1] 多重効用蒸発.....31
[1] 原液温度の影響.....28	[2] 多重効用蒸発の近似的な 考え方.....31
[2] 加熱スチーム・ドレーン の温度.....28	[3] 蒸発かんの分類.....36
[3] 沸 点 上 昇.....28	2.3 自己蒸気圧縮法による蒸発.....39
2.2 多重効用蒸発.....31	

3. 拡 散

3.1 拡 散 操 作.....41	[1] 階 段 接 触.....43
[1] 単位操作の種類.....41	[2] 微 分 接 触.....43
[2] 物質移動装置.....42	[3] 理 想 段.....43
3.2 基本的な物質移動装置の形式.....43	

4. 蒸 留

4.1 気-液平衡関係50	4.2 単蒸留と平衡蒸留.....54
[1] 理想溶液と蒸気圧.....50	[1] 単蒸留(微分蒸留).....54
[2] 比 揮 発 度.....52	[2] 平衡蒸留(フラッシュ蒸発).....55
[3] 平 衡 係 数.....52	4.3 その他の蒸留.....60

[1] 共 沸 蒸 留.....	60	[8] 塔 径 の 算 定.....	67
[2] 抽 出 蒸 留.....	60	[9] 段塔のフラッシング.....	68
4・4 2成分系の精留理論.....	61	[10] 充てん塔による精留.....	71
[1] 物 質 収 支.....	61	4・5 多成分系の精留.....	78
[2] 原料の熱的状态.....	63	[1] カ ギ 成 分.....	78
[3] マッケーブシーラの段数決定 法.....	64	[2] 最小理論段数.....	79
[4] 最小還流比.....	65	[3] 最小還流比.....	79
[5] 最小理論段数.....	65	[4] ギリランドの相関.....	80
[6] 最適還流比.....	56	[5] 原料供給段.....	80
[7] 段 効 率.....	66	[6] 逐次段計算 (Lewis-Matheson の方法)	81

5. ガ ス 吸 収

5・1 ガス吸収の基礎.....	93	[1] 塔高(充てん高さ).....	106
[1] ガス吸収の気-液平衡関係 (ガス溶解度).....	93	[2] H_G, H_L の実験式.....	106
[2] ガス溶解度の実験式.....	97	[3] 段塔による吸収段数.....	108
[3] 物 質 収 支.....	98	[4] HETP.....	108
[4] 最小液量と最適液量.....	99	[5] 吸収係数と理論段数.....	110
[5] 物質移動速度式.....	100	[6] 充てん塔の直径.....	115
[6] 容量係数による物質移動 速度.....	101	[7] 充てん塔の圧力損失.....	117
[7] 移動単位高さ.....	102	[8] 最小ぬれ液量.....	117
[8] 移動単位数.....	103	[9] 充 て ん 物.....	119
5・2 吸 収 装 置.....	105	[10] フラッシングと圧力損失 との関係.....	121

6. 抽 出

6・1 抽 出 操 作.....	126	[2] 抽出操作の物質収支.....	131
[1] 液-液平衡の表わし方	126	6・2 抽 出 装 置.....	141

7. 調 湿

7・1 湿 度.....	146	[1] 増 湿 操 作.....	152
[1] 湿度図表.....	148	[2] 減 湿 操 作.....	156
[2] エンタルピー-温度線図	148	[3] 冷 水 操 作.....	159
7・2 増 湿 と 減 湿.....	152		

8. 乾 燥

8.1 恒率乾燥期間と減率乾燥期間	168	支	171
[1] 恒率乾燥期間	168	8.2 乾燥装置	176
[2] 減率乾燥期間	170	[1] 乾燥装置の種類	176
[3] 連続乾燥の物質収支と熱収		[2] 乾燥機の選び方	178

9. 流体の取扱い

9.1 流体の基礎	179	[1] 気体の輸送	210
[1] 流体の挙動	179	[2] 液体の輸送	220
[2] 流体の粘度	181	9.3 流量の測定	230
[3] 流体の流れ	185	[1] いろいろな測定方法	230
[4] 流れの理論式	192	[2] 流量計	230
[5] 物体の受ける流体抵抗	196	9.4 流体貯槽	238
[6] 圧縮性の気体の流れ	199	[1] 貯槽の設計	238
[7] 非ニュートン流体	201	[2] 気体の貯槽	240
9.2 流体の輸送	207	[3] 液体の貯槽	241

10. 固体の取扱い

10.1 粉粒体の基礎	243	10.3 粉粒体の輸送	267
[1] 粒径分布の表わし方	244	[1] 固体の輸送装置	269
[2] 形状係数	246	[2] 造粒について	273
[3] 流体中の粒子の運動	248	10.4 混合とかきまぜ	276
10.2 粉 碎	252	[1] 混 合	276
[1] 粉碎の目的	253	[2] かきまぜ	281
[2] 粉碎操作	256	[3] 捏和(ねりまぜ)	295
[3] 粉碎機の種類	260		

11. 機械的分離

11.1 機械的分離の基礎	298	11.3 集 じ ん	311
[1] 分離効率	298	[1] 集じん性能	313
[2] ふるい分け	299	[2] 集じん性能の測定法	313
11.2 分 級	305	[3] 重力集じん	316
[1] 湿式分級器	305	[4] 慣性集じん	316
[2] 乾式分級器	310	[5] 遠心力集じん	317

[6] 洗浄集じん.....	320	11・5 遠心分離.....	348
[7] ろ過集じん.....	323	[1] 遠心沈降機.....	348
[8] 電気集じん.....	325	[2] 遠心ろ過機.....	353
[9] 音波集じん.....	327	11・6 沈降分離.....	357
11・4 ろ過.....	328	[1] 懸濁液粒子の沈降.....	357
[1] ろ過の基礎.....	328	[2] 濃縮装置.....	359
[2] ろ塊ろ過器.....	332	[3] 連続向流澄清法.....	362

12. 反応工学の基礎

12・1 化学反応の分類.....	367	[1] 回分式反応装置.....	383
12・2 反応速度式.....	368	[2] 連続式反応装置.....	384
12・3 反応速度と物質移動速度.....	370	12・9 均一系反応装置.....	386
12・4 総括反応速度の温度による 影響.....	372	[1] 均一液相反応装置.....	386
12・5 反応操作の方式.....	373	[2] 均一気相反応.....	387
12・6 反応装置の形式とその選定.....	373	12・10 不均一系反応装置.....	388
[1] 装置の構造形式.....	373	[1] 不均一液-液反応装置.....	388
[2] 装置の選定に当たって考慮 する事項.....	375	[2] 不均一気-液反応装置.....	389
12・7 反応の物質収支に基づく装 置容積の計算.....	378	[3] 不均一気-固反応装置.....	391
[1] 回分式反応装置.....	378	12・11 固定層反応装置.....	391
[2] 押し出し流れの装置.....	379	[1] 等温層式反応装置.....	391
[3] 完全混合の装置.....	380	[2] 断熱層式反応装置.....	391
[4] 多段槽式装置.....	381	[3] 外部熱交換式反応装置.....	392
12・8 熱収支に基づく装置容積の 計算.....	383	[4] 自己熱交換式反応装置.....	393
		12・12 流動層反応装置.....	394
		[1] 流動化現象.....	394
		[2] 流動層の長所と欠点.....	394
		[3] 反応完結度.....	395

13. プロセスとプラント

13・1 フローシート.....	397	[1] 予備業務.....	406
[1] 計装用記号.....	397	[2] 計画の要点.....	406
[2] フローシートで表現される 情報.....	404	13・3 プラント設計, 建設および 運転.....	415
[3] フローシートとブロック線 図の関連.....	406	[1] プラント設計に関連する 事項.....	415
13・2 プロセス計画.....	406	[2] 装置設計.....	416

[3] 装置建設	418	[2] 制御の役割	434
[4] 建設のための業務	419	[3] 制御の方法	435
[5] プラントの運転	423	[4] 計測と制御装置	437
[6] 建設費用	425	[5] 計装システムの構成とダイ ナミックス	449
13・4 装置材料と防食	426	[6] 主要な例	449
[1] 装置材料選定に関連する 要因	426	13・6 工場の安全と整備	454
[2] 腐食	426	[1] 安全のための組織	454
13・5 計測と制御	434	[2] 安全保守計画	455
[1] 計測の役割	434	[3] 公害の問題	455

14. 公害と化学工学

14・1 公害の種類	457	14・3 公害の処理	461
14・2 公害の規制基準	460		

15. 付 録

15・1 次元解析と相似法則	463	15・6 水の蒸気圧・空気の飽和湿度・ 飽和エンタルピー	482
[1] 次元解析	463	15・7 充てん物の特性	485
[2] 相似法則	464	15・8 単位換算表, 対数表および逆 対数表	486
15・2 蒸留における気-液平衡値	465	[1] 単位換算表	487
15・3 抽出における液-液平衡値	470	[2] 対数表	490
15・4 全還流時の N_{OG} (メタノール 水系)	476	[3] 逆対数表	492
15・5 メタノール水溶液の濃度 換算	479		

索 引

.....	495
-------	-----

1. 伝 熱

蒸発・蒸留・乾燥などの単位操作 (unit operation) には、いろいろな熱の移動 (つまり、伝熱機構) が取り入れられている。その熱の伝わり方には、伝導 (conduction)・対流 (convection)・ふく射 (熱放射, radiation) の3種があり、それらの伝熱機構は、それぞれ別個にあらわれる場合と、複合*してあらわれる場合とがある。

1.1 熱の移動の仕方

〔1〕 伝導による伝熱 いま、時間 $d\theta$ の間に移動する熱量 dQ がつねに一定である定常状態 (steady state) の場合に、伝熱速度 q は次のような式 (フーリエの法則) で表わすことができる。

$$q = \frac{dQ}{d\theta} = -\lambda A \frac{dt}{dl} \quad [\text{kcal/hr}] \quad (1.1)$$

単一層の場合は

$$q = \lambda A \left(\frac{t_1 - t_2}{l} \right) = \left(\frac{\lambda A}{l} \right) (t_1 - t_2) \quad [\text{kcal/hr}] \quad (1.2)$$

記号は表 1.1 のとおりである。

* 一般に 300°C 以下の低温状態においては、おもに伝導と対流によって熱が伝わり、500°C 程度になると対流とふく射によって同じ程度の熱が伝えられ、さらに 1000°C 以上の高温状態になると、ふく射による伝わり方が支配するようになる。

表 1・1 本章で使う記号 (その1)

使用区分	記 号 [単位]	内 容
共 通	Q [kcal]	伝 熱 量
	q [kcal/hr]	伝 熱 速 度
	θ [hr]	時 間
	A [m ²]	伝 熱 面 積
	A_1 [m ²]	円筒の外面積 ($=\pi D_1 L$)
	A_2 [m ²]	円筒の内面積 ($=\pi D_2 L$)
	t [°C]	温 度 (T [°K] $=t+273$)
伝 導	l [m]	壁や層の厚さ
	dt/dl [°C/m]	温度こう配
	λ [kcal/m·hr·°C]	熱伝導度 [表 1・2] (熱伝導率ともいう)
対 流	h [kcal/m ² ·hr·°C]	境膜伝熱係数 [表 1・3] (熱伝達係数ともいう)
ふく射 (熱放射)	A_1 [m ²]	第1面の面積
	ϵ_1	第1面の黒度 (ふく射能) [表 1・4]
	ϵ_2	第2面の黒度 (ふく射能) [表 1・4]
	ϕ_{12}	第1面から発した熱ふく射のうち第2面に吸収される割合 (総括吸収率・有効放射黒度)
	F_{12}	第1面から第2面を見る角関係 (形態係数)
その他	U [kcal/m ² ·hr·°C]	総括伝熱係数 (熱貫流係数ともいう)
	h_{1d} [kcal/m ² ·hr·°C]	管外面の汚れ係数 [表 1・5]
	h_{2d} [kcal/m ² ·hr·°C]	管内面の汚れ係数 [表 1・5]
	F	熱交換器の温度差補正係数

多層壁 (図 1・1) の場合は

$$q = \frac{dt_1 + dt_2 + dt_3}{\frac{l_1}{\lambda_1 A_1} + \frac{l_2}{\lambda_2 A_2} + \frac{l_3}{\lambda_3 A_3}} \quad [\text{kcal/hr}] \quad (1 \cdot 3)$$

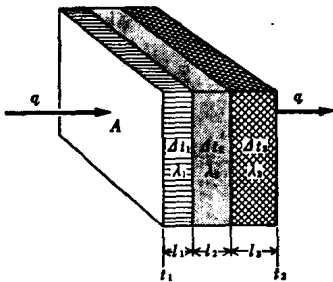


図 1・1 多層壁

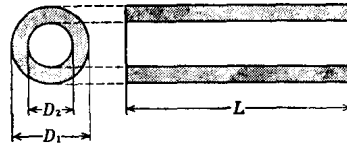


図 1・2 円筒壁

円筒壁 (図 1.2) の平均面積 (外面積 = A_1 , 内面積 = A_2) は
 $A_1/A_2 < 2$ ならば (相加平均)

$$A_m = \frac{A_1 + A_2}{2} = \frac{\pi(D_1 + D_2)L}{2}$$

$A_1/A_2 > 2$ ならば (対数平均)

$$A_m = \frac{A_1 - A_2}{\ln \frac{A_1}{A_2}} = \frac{A_1 - A_2}{2.3 \log \frac{A_1}{A_2}}$$

(1.4)

表 1.2 熱伝導度の値

(a) 熱伝導度 λ [kcal/m·hr·°C] の値

空 気 の λ			25% NaCl 水溶液の λ		18-8 鋼の λ	
温 度 [°C]	圧 力 [kg/cm ²]		温 度 [°C]	[kcal/m·hr·°C]	温 度 [°C]	[kcal/m·hr·°C]
	1	200				
0	0.0210	0.0340	-20	0.340	0	12.5
100	0.0276	0.0358	-10	0.350	50	13.0
200	0.0338	0.0398	0	0.360	100	13.5
300	0.0396	0.0444	10	0.375	150	14.0
400	0.0448	0.0487	20	0.395	200	14.5
500	0.0494	0.0527	30	0.410	250	15.0
600	0.0536	0.0565	40	0.420	300	16.0
700	0.0577	0.0602	50	0.430	350	16.5
800	0.0617	0.0640	60	0.450	400	17.0
900	0.0656	0.0676	70	0.465	450	18.0
1000	0.0694	0.0712	80	0.475	500	18.5

(b) 温度 20°C における熱伝導度 λ [kcal/m·hr·°C] の値

気 体	熱 伝 導 度	液 体	熱 伝 導 度	固 体	熱 伝 導 度
空 気	0.0220	水	0.305	Cu	340
CH ₄	0.0275	メタノール	0.175	Al	175
Ne	0.0425	エタノール	0.145	Fe	62
Kr	0.0075	グリセリン	0.247	Sn	55
H ₂	0.1500	液化炭酸ガス	0.070	Pb	30

[2] 対流による伝熱 固体 (solid) と流体 (fluid) との間に生ずる熱の移動で、ここで境界膜の存在が重要となってくる。

$$q = hA \Delta t = \frac{\Delta t}{\left(\frac{1}{hA}\right)} \quad [\text{kcal/hr}] \quad (1.5)$$

表 1・3 境膜伝熱係数 h の値

流 体 の 状 態	流 体 の 種 類	h [kcal/m ² ・hr・°C]
相変化のない場合	水	1500~10000
	ガ ス	15~250
	有 機 溶 剤	300~2500
	油	50~600
凝縮する場合	水 蒸 気	5000~15000
	有 機 溶 剤	750~2500
	軽 油	1000~2000
	重油 (減圧)	100~250
	ア ン モ ニ ア	2500~5000
蒸発する場合	水	4000~10000
	有 機 溶 剤	500~1500
	軽 油	750~1500
	重 油	50~250
	ア ン モ ニ ア	1000~2000

(Coulson: Chemical Engineering vol. 1 による)

〔3〕 ふく射 (熱放射) による伝熱 この場合の熱の移動は伝導や対流と異なり, エネルギーが波動によって四方八方に伝わる現象である。

$$q = 4.88 A_1 \phi_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ [kcal/hr]} \quad (1 \cdot 6)$$

無限大の平行 2 面の場合には式 (1・7) があてはまる。

$$\frac{1}{\phi_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \quad (1 \cdot 7)$$

第 1 面 A_1 が第 2 面 A_2 に完全に囲まれている場合には式 (1・8) があてはまる。

$$\frac{1}{\phi_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \quad (1 \cdot 8)$$

とくに, $A_1 \ll A_2$ ならば $\phi_{12} \doteq \varepsilon_1$ としてよい。

〔4〕 熱貫流 実際の装置において, 壁および両境膜の全体にまたがる係数 U を考えて, これを総括伝熱係数とよぶ。この値は, 処理する流体の種類・温度・流速などによって異なる。

$$q = UA \Delta t = \frac{\Delta t}{\left(\frac{1}{UA} \right)} \text{ [kcal/hr]} \quad (1 \cdot 9)$$

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{l}{\lambda A_m} + \frac{1}{h_2 A_2} \quad (1 \cdot 10)$$

(1) 外面積 A_1 を基準とする場合は

$$q = U_1 A_1 \Delta t$$

$$\frac{1}{U_1} = \frac{1}{h_1} + \frac{l}{\lambda} \left(\frac{A_1}{A_m} \right) + \frac{1}{h_2} \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \quad (1 \cdot 11)$$

表 1・4 固体表面の黒度 ε (熱放射率)

金 属				非 金 属			
物 質	ε	温度 [°C]	表面状態	物 質	ε	温度 [°C]	表面状態
金	0.018~0.035	227~628	純金, 高度研磨	ガラス	0.94	22	平滑面
鉄	0.87~0.95	928~1118	鉄, インゴット	コンクリート	0.63	1000	タイル
クロム	0.08~0.36	38~600	粗面	セッコウ	0.903	21	厚さ 0.5 mm
鉛	0.057~0.075	127~227	純金属面, 酸化せず	氷	0.626	—	—
亜鉛	0.045~0.053	227~527	市販, 研磨面	赤レンガ	0.93	21	粗面
水銀	0.09~0.12	0~100	純水銀, 清浄面	土壌	0.40~0.44	63~193	鉱物
モリブデン	0.096~0.202	727~2600	フィラメント	陶磁器	0.92	22	うわ薬がけ
ニッケル	0.045~0.087	21~371	純ニッケル, 研磨面	雲母	0.747	—	鉱物
白金	0.054~0.104	227~627	純白金, 研磨面	アスベスト	0.93~0.94	38~370	紙
タングステン	0.032~0.35	26.7~3320	長く使ったフィラメント	炭素	0.526	1040~1406	フィラメント

表 1・5 各種流体の汚れ係数 h_d の値

	$R_d = 1/h_d$ (汚れ抵抗)	h_d [kcal/m ² ·hr·°C]
燃料油	0.0010	1000
機械油, 変圧器油	0.0002	5000
植物油	0.0006	1700
一般有機液体	0.0002	5000
冷媒液	0.0002	5000
ブライン (塩水)	0.0002	5000
一般有機蒸気	0.0001	10000
水蒸気	0.0001	10000
廃蒸気	0.0002	5000
冷媒蒸気	0.0004	2500
空気	0.0004	2500
海水	0.0001~0.0002	10000~5000
水道, 井戸水	0.0002~0.0004	5000~2500
河水	0.0002~0.0004	5000~250
硬水	0.0006~0.0010	1700~1000
ボイラー給水	0.0001~0.0002	10000~5000
蒸留水	0.0001	10000

(Kern: Process Heat Transfer, その他による)

(2) 内面積 A_2 を基準とする場合は

$$q = U_2 A_2 \Delta t$$

$$\frac{1}{U_2} = \frac{1}{h_1} \left(\frac{A_2}{A_1} \right) + \frac{l}{\lambda} \left(\frac{A_2}{A_m} \right) + \frac{1}{h_2} \quad (1 \cdot 12)$$

(3) $A_1 = A_2$ の場合は

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (1 \cdot 13)$$

なお、汚れ係数を考慮する場合には式 (1.14) のようになる。

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1}{h_{1d} A_1} + \frac{l}{\lambda A_m} + \frac{1}{h_2 A_2} + \frac{1}{h_{2d} A_2} \quad (1 \cdot 14)$$

(外面の汚れ抵抗) (内面の汚れ抵抗)

[5] 平均温度差 $\Delta t_1 / \Delta t_2 < 2$ ならば (相加平均)

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}$$

$\Delta t_1 / \Delta t_2 > 2$ ならば [対数平均 (図 1.3)]

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2.3 \log \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

(1.15)

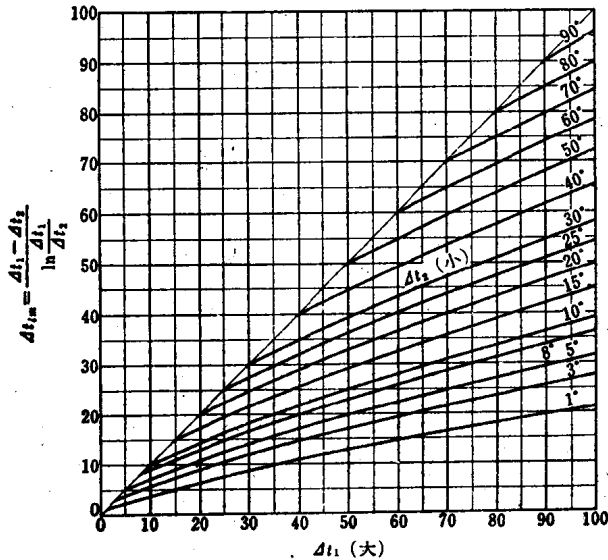


図 1.3 対数平均温度差 (LMTD)

表 1・6 本章で使う記号 (その2)

記 号	意 味	単 位, そ の 他
h	管内面の境膜伝熱係数	$[\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}]$
D	管の内径	$[\text{m}]$
L	管の長さ	$[\text{m}]$
G	質量速度	$[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}]$ ($G=u\rho$) u : 流速 $[\text{m}/\text{hr}]$, ρ : 密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$
λ	流体の熱伝導度	$[\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}]$
C_p	流体の定圧比熱	$[\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}]$
μ	流体の粘度	$[\text{kg}/\text{m} \cdot \text{hr}]$ ただし, $1\text{cP}=3.6\text{ kg}/\text{m} \cdot \text{hr}$, $1\text{P}=360\text{ kg}/\text{m} \cdot \text{hr}$
Nu	ヌッセルト数	$Nu=hD/\lambda$
Pr	プラントル数	$Pr=C_p\mu/\lambda$
Re	レイノルズ数	$Re=Du\rho/\mu=DG/\mu$
St	スタントン数	$St=h/C_pG=Nu/RePr$

〔6〕 流体が管内を流れる場合 たとえば、ガスや液体が管内を通過する間に、外部から加熱または冷却される型の装置などがこの例にあてはまる。

Re (レイノルズ数*) が 10 000 以上の乱流の場合、ガス・水・油などの流体に対して、一般に式 (1・16) があてはまる。ここで使用する記号は、表 1・6 のとおりである。

$$\frac{hD}{\lambda}=0.0225\left(\frac{Du\rho}{\mu}\right)^m\left(\frac{C_p\mu}{\lambda}\right)^n \quad (1 \cdot 16)$$

さらに $Pr=0.7\sim 120$, $Re=10000\sim 120000$, $L/D>60$ の場合について次に述べる。

(a) 低粘性液 (約 2 cP 以下)・ガスに対する式

(1) Dittus-Boelter の式

$$\frac{hD}{\lambda}=0.0225\left(\frac{DG}{\mu}\right)^{0.8}\left(\frac{C_p\mu}{\lambda}\right)^n \quad (1 \cdot 17)$$

ただし、加熱の場合 $n=0.4$, 冷却の場合は $n=0.3$, 他の物性値は流体本体の温度における値である。

(2) Colburn の式

$$\left(\frac{hD}{\lambda}\right)_f=0.0225\left(\frac{DG}{\mu}\right)_f^{0.8}\left(\frac{C_p\mu}{\lambda}\right)_f^{\frac{1}{3}} \quad (1 \cdot 18)$$

ただし、物性値は境膜温度 (流体本体温度と管壁温度との相加平均) における値である。

(3) Sieder-Tate の式 高粘性液 (温度差が大で粘度変化の大きいもの) に対して式 (1・19) があてはまる。

* レイノルズ数については第 9 章の流体の取扱いのところで詳述してある。