目　次

A 編　基本事項

A.1 利用の手引き …… 1
1.1 このハンドブックの全体構成 …… 1
1.2 索引と換算表の使い方 …… 1
1.2.1 主要目次 …… 1
1.2.2 物質名索引 …… 1
1.3 利用上の参考事項 …… 1
1.3.1 用　語 …… 1
1.3.2 不確かさ …… 2
1.3.3 材料のキャラクタリゼーション …… 2
1.3.4 熱物性データの信頼性 …… 2
1.3.5 有効数字 …… 2
1.3.6 温度目盛 …… 2
1.3.7 その他 …… 2
1.3.8 文献 …… 2
1.3.9 受託測定機関一覧 …… 2
1.4 記号 …… 3

A.2 物性値の定義と単位 …… 5
2.1 単位系 …… 5
2.1.1 量と単位 …… 5
2.1.2 国際単位系の歩み …… 5
2.1.3 国際単位系（SI）の概要 …… 5
(a) SI 基本単位 …… 6
(b) SI 組立単位 …… 6
(c) 固有の名称と記号が与えられた SI 組立単位 …… 6
(d) 無次元量の単位 …… 7
(e) SI 接頭語 …… 7
(f) SI と併用される SI に属さない単位 …… 7
2.1.4 SI 単位の使い方 …… 9
2.1.5 量の値の表現方法と四則演算 …… 10
2.1.6 測定の不確かさに関する表現方法 …… 12
2.1.7 無次元量の値の記述方法 …… 12
2.2 物性値の定義 …… 13
2.3 単位の換算 …… 15

B 編　基本的物質の熱物性

B.1 元　素 …… 19
1.1 周期律表 …… 19
1.2 基本物性 …… 20

B.2 固　体 …… 23
2.1 純金属の熱物性値 …… 23
2.2 金属の熱伝導 …… 27
2.2.1 純金属の熱伝導 …… 27
(a) 熱伝導と電気伝導 …… 27
(b) 金属の熱伝導率の温度依存性 …… 28
(c) 欠陥や不純物の影響 …… 28
2.2.2 合金の熱伝導 …… 28
(a) マティーセンの法則 …… 29
(b) 侵入型固溶成分の影響 …… 29
(c) 置換型固溶成分の効果 …… 29
(d) ステンレス鋼の熱伝導率の温度依存性 …… 30
(e) 規則合金の熱伝導に対する予想 …… 31
2.2.3 金属薄膜の熱伝導 …… 31
2.3 非金属の熱伝導率・熱拡散率 …… 32
2.3.1 非金属の熱伝導率 …… 32
2.3.2 フォノン熱伝導率 …… 33
2.4 熱容量 …… 36
(a) 気体の熱容量 …… 36
(b) 固体の熱容量 …… 37
(c) 液体の熱容量 …… 38
(d) 合金および化合物の熱容量 …… 38
(e) 熱容量の温度表示式 …… 38
2.5 熱膨張率 …… 39
2.5.1 熱膨張率の定義 …… 39
2.5.2 熱力学的考察；熱膨張率の低温における振る舞い …… 39

2.5.3 格子振動の非調和項（とグリューナイゼンの関係）…… 39
2.5.4 代表的な固体材料の室温における線膨張率値 …… 40

B.3 流体（標準流体）…… 42

B.4 流体（広範囲表）…… 50
4.1 ヘリウムの熱物性値 …… 50
4.2 アルゴンの熱物性値 …… 53
4.3 水素の熱物性値 …… 56
4.4 窒素の熱物性値 …… 59
4.5 酸素の熱物性値 …… 62
4.6 空気の熱物性値 …… 65
4.7 一酸化炭素の熱物性値 …… 68
4.8 二酸化炭素の熱物性値 …… 70
4.9 水・水蒸気の熱物性値 …… 72
4.10 重水の熱物性値 …… 76
4.11 二酸化硫黄の熱物性値 …… 78
4.12 六フッ化硫黄の熱物性値 …… 81
4.13 メタンの熱物性値 …… 83
4.14 エチレンの熱物性値 …… 86
4.15 エタンの熱物性値 …… 89
4.16 プロピレンの熱物性値 …… 91
4.17 プロパンの熱物性値 …… 93
4.18 n-ブタンの熱物性値 …… 95
4.19 イソブタンの熱物性値 …… 96
4.20 トルエンの熱物性値 …… 99
4.21 メタノールの熱物性値 …… 100
4.22 エタノールの熱物性値 …… 101
4.23 湿り空気の熱物性値 …… 102

B.5 高温融体 …… 103
5.1 液体金属の熱物性値 …… 103
5.2 溶融塩の熱物性値 …… 105
5.2.1 はじめに …… 105
5.2.2 測定方法および測定値の確かさ …… 105
5.2.3 溶融塩の熱物性値 …… 105
5.3 溶融半導体の熱物性値 …… 111

C 編　応用分野別の熱物性

C.1 エネルギー …… 113
1.1 熱媒体および顕熱蓄熱材料の熱物性値 …… 113
1.1.1 有機熱媒体 …… 113
(a) 鉱油系熱媒体 …… 113
(b) アルキルベンゼン系熱媒体 …… 113
(c) ジフェニル系熱媒体 …… 113
(d) トリフェニル系熱媒体 …… 114
(e) アルキルナフタレン系熱媒体 …… 114
(f) ベンジル系熱媒体 …… 115
(g) シリコーン油系熱媒体 …… 115
(h) パーフルオロ系熱媒体 …… 115
(i) その他 …… 115
1.1.2 溶融塩（硝酸塩）…… 115
1.1.3 液体金属 …… 117
1.1.4 固体顕熱蓄熱材料 …… 117
1.2 蓄熱材料の熱物性値 …… 119
1.2.1 低温用潜熱蓄熱材料 …… 119
(a) 水和塩 …… 119
(b) 有機物 …… 121
1.2.2 高温用潜熱蓄熱材料 …… 121
1.3 リチウム電池および燃料電池材料の熱物性値（at 298 K）…… 125
1.3.1 リチウム二次電池材料の熱物性値 …… 125
1.3.2 燃料電池材料の熱物性値（SOFC, PEFC）…… 126
1.4 熱電材料の熱物性値 …… 128
1.5 水素貯蔵材料の熱物性値 …… 131
1.6 太陽電池用材料の熱物性値 …… 134
1.6.1 アモルファスシリコンの密度 …… 134
1.6.2 太陽電池用カルコパイライト型化合物半導体の熱物性値 …… 134
1.7 原子力材料の熱物性値 …… 137
1.7.1 核分裂 …… 137
(a) 核燃料 …… 137
(b) 構造材 …… 140
1.7.2 核融合 …… 142
(a) 増殖材 …… 142
1.7.3 核燃料サイクル …… 145
(a) レーザ濃縮 …… 145

(b) ガラス固化体 …… 146
1.8 耐火物および高温断熱材の熱物性値 …… 151
1.8.1 耐火物の特徴 …… 151
1.8.2 主要な耐火物品種 …… 151
1.8.3 耐火物の熱伝導率測定方法 …… 151
1.8.4 熱伝導率，比熱容量 …… 152
1.8.5 熱拡散率 …… 152

C.2 化学工学 …… 155
2.1 混合流体の熱物性値 …… 155
2.1.1 希薄混合気体 …… 155
(a) 密度 …… 155
(b) 定圧比熱 …… 155
(c) 粘性率 …… 155
(d) 熱伝導率 …… 156
(e) 拡散係数 …… 157
2.1.2 混合液体と溶液 …… 157
(a) 密度 …… 157
(b) 定圧比熱 …… 159
(c) 粘性率 …… 159
(d) 熱伝導率 …… 160
(e) 拡散係数 …… 160
2.1.3 高密度流体 …… 161
(a) 密度 …… 162
(b) 定圧比熱 …… 164
(c) 粘性率 …… 165
(d) 熱伝導率 …… 165
(e) 拡散係数 …… 165
2.1.4 潤滑油 …… 165
(a) 鉱油 …… 166
(b) 合成油 …… 167
2.1.5 相平衡性質 …… 169
(a) 気液平衡 …… 169
(b) 超臨界流体抽出 …… 171
(c) 固液平衡 …… 173
2.2 石油の熱物性値 …… 177
2.2.1 キャラクタリゼーション …… 177
(a) 沸点 …… 177
(b) 特性係数 …… 177
(c) 平均分子量 …… 177
(d) 臨界定数 …… 177
(e) 偏心係数 …… 177
(f) 流動点 …… 178
(g) 粘度比重定数 …… 178
(h) 屈析率截片 …… 178
(i) 相関指数 …… 178
2.2.2. 蒸気圧 …… 178
2.2.3 密度 …… 179
2.2.4 比熱 …… 179
2.2.5 エンタルピー …… 181
2.2.6 粘性率 …… 181
2.2.7 表面張力 …… 182
2.2.8 熱伝導率 …… 182
2.2.9 発熱量 …… 182
2.3 石炭の熱物性値 …… 183
2.3.1 石炭 …… 183
(a) 密度 …… 183
(b) 比熱 …… 183
(c) エンタルピーおよびエントロピー …… 184
(d) 熱伝導率 …… 184
(e) 有効熱拡散率 …… 184
(f) 発熱量 …… 185
2.3.2 液化 …… 185
(a) 臨界温度，臨界圧力および偏心係数 …… 185
(b) 分子量 …… 185
(c) 蒸気圧 …… 185
(d) 比重および密度 …… 185
(e) 比熱 …… 186
(f) 蒸発潜熱 …… 186
(g) 熱伝導率 …… 187
(h) 粘性率 …… 187
(i) 表面張力 …… 188
2.3.3 ガス化 …… 188
2.4 粉粒体の熱物性値 …… 189
2.4.1 まえがき …… 189
2.4.2 空隙率ほか …… 189
2.4.3 伝熱のモデルと解析 …… 190
(a) 粗な充填の場合 …… 190
(b) 密な充填の場合 …… 190
(c) その他 …… 191
2.4.4 推定の方法 …… 191
2.4.5 データ集 …… 191
2.5 多孔質物質の熱物性値 …… 195
2.5.1 多孔質物質 …… 195
2.5.2 多孔質物質の密度と比熱 …… 195

2.5.3 分散空孔を含む多孔質物質の有効熱伝導率 …… 195
2.5.4 焼結または固結型多孔質物質の有効熱伝導率 …… 196
2.5.5 高空間率多孔質物質および繊維型多孔質物質の有効熱伝導率 …… 197
2.5.6 自然対流が生じる多孔質物質内の伝熱 …… 197
2.6 燃焼 …… 198
2.6.1 燃焼ガス …… 198
(a) 燃焼ガスの組成 …… 198
(b) 燃焼ガスの熱力学物性値 …… 198
(c) 燃焼ガスの輸送物性値 …… 200
2.6.2 放射物性 …… 203
(a) ガス塊の有効厚さ …… 203
(b) ガスの放射率 …… 204
(c) ガスの吸収率 …… 206
(d) 輝炎の放射率 …… 206

C.3 金属材料・冶金 …… 208
3.1 純金属の熱物性値 …… 208
3.2 合金の熱物性値 …… 208
3.2.1 鋳鉄 …… 208
3.2.2. 炭素鋼および低合金鋼 …… 209
3.2.3 ステンレス鋼 …… 213
3.2.4 その他の合金鋼 …… 214
3.2.5 アルミニウム合金 …… 214
3.2.6 金属酸化物単結晶，アモルファス金属およびガラス類 …… 216
(a) 金属酸化物単結晶 …… 216
(b) アモルファス金属 …… 216
(c) ガラス類 …… 217
3.3 液体金属の熱物性値 …… 218
3.4 溶融スラグおよびシリケートの熱物性値 …… 218
3.4.1 密度 …… 218
3.4.2 粘度 …… 219
3.4.3 溶融スラグの表面張力 …… 220
3.4.4 比熱容量・融解熱 …… 221
3.4.5 熱伝導率 …… 223
3.4.6 光学的性質 …… 224
(a) 屈折率 …… 224
(b) 吸収係数 …… 224
(c) 放射率 …… 225

C.4 建築材料 …… 229
4.1 窯業系材料 …… 229
4.1.1 セメント・モルタル・コンクリート …… 229
(a) セメント …… 229
(b) モルタル …… 229
(c) コンクリート …… 229
4.1.2 ALC …… 230
4.1.3 けい酸カルシウム板 …… 231
4.1.4 せっこうボード …… 232
4.1.5 窯業系屋根葺き材料 …… 232
4.2 木質系材料 …… 233
4.2.1 木材 …… 233
(a) 比熱 …… 233
(b) 熱伝導率 …… 234
4.2.2 合板 …… 234
4.2.3 パーティクルボード …… 236
4.2.4 繊維板 …… 236
4.2.5 木質セメント板 …… 237
(a) 木毛セメント板 …… 237
(b) 木片セメント板 …… 237
4.3 繊維系材料 …… 238
4.3.1 ロックウール …… 238
4.3.2 グラスウール …… 238
4.3.3 セルロースファイバー …… 239
4.3.4 セラミックファイバー …… 240
4.4 発泡系材料 …… 241
4.4.1 硬質ウレタンフォーム …… 241
4.4.2 ポリスチレンフォーム …… 242
4.4.3 ポリエチレンフォーム …… 242
4.4.4 フェノールフォーム …… 243
4.4.5 その他の発泡系材料 …… 243
4.4.6 れんが類 …… 243
4.5 建築材料の熱伝導率と作用因子 …… 245
4.5.1 熱性能の宣言値および設計値 …… 245
(a) 宣言値 …… 245
(b) 設計値 …… 245
(c) 欧州規格（EN）における設計値の例 …… 247
4.5.2 硬質ウレタンフォームの気泡内ガスのエージングと熱伝導率 …… 247
4.5.3 含水と熱伝導率 …… 247
4.6 保温・断熱材の規格値 …… 250

4.6.1 人造鉱物繊維保温材（JIS A 9504）…… 250
(a) ウール …… 250
(b) 保温板 …… 250
(c) フェルト …… 250
(d) 波形保温板 …… 250
(e) 保温帯 …… 250
(f) ブランケット …… 250
(g) 保温筒 …… 250
4.6.2 無機多孔質保温材（JIS A 9510）…… 251
4.6.3 発泡プラスチック保温材（JIS A 9511）…… 252
(a) ビーズ法ポリスチレンフォーム保温材 …… 252
(b) 押出法ポリスチレンフォーム保温材 …… 252
(c) 硬質ウレタンフォーム保温材 …… 253
(d) ポリエチレンフォーム保温材 …… 253
(e) フェノールフォーム保温材 …… 253
4.6.4 セラミックファイバーブランケット（JIS R 3311）…… 253

C.5 エレクトロニクス …… 254
5.1 光・エレクトロニクス用結晶の熱物性値 …… 254
5.2 Siの熱物性値 …… 255
5.3 GaAsの熱物性値 …… 258
5.4 Ⅲ-Ⅳ，Ⅱ-Ⅵ，多元系化合物半導体の熱物性値 …… 260
5.5 配線用素材の物性 …… 263
5.6 封止用プラスチックス系素材の物性 …… 264
5.7 絶縁材の熱物性値 …… 268
5.8 半導体プロセスに多用される物質の蒸気圧 …… 269
5.9 超伝導材料の熱物性値 …… 270

C.6 セラミックス・ガラス …… 271
6.1 融点および比熱 …… 271
6.2 熱伝導率および熱拡散率 …… 274
6.3 セラミックスの熱膨張 …… 279
6.3.1 熱膨張係数の温度変化と異方性 …… 279
6.3.2 多結晶集合体および複合体の熱膨張 …… 279
6.3.3 熱膨張のデータ …… 282
6.4 ふく射性質 …… 288
6.4.1 ‘白い’セラミックス …… 288
6.4.2 ‘黒い’セラミックスと‘金属的な’セラミックス …… 289
6.4.3 内部構造と温度への依存性 …… 290
6.4.4 全放射率 …… 290
6.5 代表的なセラミックスの熱物性値 …… 290
6.6 ガラス …… 296
6.6.1 ガラスの熱伝導率 …… 296
6.6.2 ガラスの熱膨張率 …… 296
6.6.3 ガラス材料の熱物性値 …… 298
6.7 炭素材料 …… 300
6.7.1 黒鉛材料 …… 300
6.7.2 ダイヤモンド …… 303
6.7.3 フラーレン・カーボンナノチューブ …… 304

C.7 高分子材料 …… 305
7.1 樹脂固体のデータ利用上の留意点 …… 305
7.1.1 高分子（合成樹脂）の分類と種類 …… 305
7.1.2 熱物性値と文献 …… 305
7.1.3 熱物性値に影響する要因 …… 305
7.1.4 樹脂のP-$V(H)$-T関係 …… 306
7.1.5 新規樹脂 …… 308
7.2 熱可塑性樹脂 …… 309
7.3 熱硬化性樹脂 …… 309
7.4 エンジニアリングプラスチック …… 309
7.5 ゴムの熱物性値 …… 316
7.5.1 密度 …… 317
7.5.2 熱膨張率 …… 317
7.5.3 比熱容量 …… 317
7.5.4 熱伝導率 …… 318
7.5.5 転移温度 …… 319
7.6 複合材料およびフォームの熱物性値 …… 321
7.6.1 はじめに …… 321
7.6.2 密度 …… 321
7.6.3 熱膨張係数 …… 321
7.6.4 比熱容量 …… 322
7.6.5 熱伝導率 …… 322
(a) 複合材料の熱伝導率 …… 323
(b) 断熱材料の有効熱伝導率 …… 325
7.7 高分子融体のPVT性質 …… 327
7.8 高分子液体，インキおよび塗料の非ニュートン粘度 …… 329

C.8 新材料 …… 332
8.1 半導体および周辺材料 …… 332
8.1.1 層間絶縁膜材料 …… 332
8.2 光エレクトロニクス関連材料：光記録材料 …… 333
8.2.1 光記録材料とは …… 333
8.2.2 $Ge_2Sb_2Te_5$ 系について …… 334
8.2.3 熱拡散率・熱伝導率・比熱容量 …… 334
8.2.4 光学定数とその温度依存性 …… 334
8.2.5 界面熱抵抗 …… 335
8.3 カーボン系材料 …… 335
8.3.1 カーボンナノチューブ …… 335
8.3.2 フラーレン …… 337
8.3.3 ダイヤモンド薄膜 …… 337

C.9 航空・宇宙 …… 338
9.1 航空機機体 …… 338
9.1.1 構造・材料 …… 338
(a) 機体構造 …… 338
(b) 航空機機体要素の使用材料 …… 339
(c) 熱設計上のポイント …… 340
9.1.2 材料の熱物性値 …… 341
(a) 金属材料 …… 341
(b) 複合材料 …… 342
(c) 非金属材料 …… 343
9.2 航空機エンジン …… 345
9.2.1 エンジン構造・材料 …… 345
(a) エンジンシステム …… 345
(b) 使用材料 …… 346
9.2.2 材料の熱物性値 …… 346
(a) 金属材料 …… 346
(b) 複合材料 …… 348
9.2.3 燃料 …… 349
9.2.4 潤滑油 …… 350
9.3 ロケット …… 351
9.3.1 概要 …… 351
9.3.2 構造および材料 …… 352
(a) 金属材料 …… 352
(b) ハニカムパネル …… 353
(c) 複合材料 …… 354
(d) 断熱材 …… 355
9.4 ロケットエンジン …… 358
9.4.1 概要 …… 358
(a) 液体ロケットエンジン …… 358
(b) 固体モータ …… 361
9.4.2 構造および材料 …… 362
(a) 液体ロケットエンジン …… 362
(b) 固体モータ …… 364
9.4.3 断熱材料 …… 364
9.4.4 推進薬 …… 364
9.5 宇宙機 …… 366
9.5.1 概要 …… 366
9.5.2 本体部 …… 367
(a) 構造および材料 …… 367
(b) 推進系および姿勢制御系 …… 367
9.5.3 熱制御技術 …… 370
(a) 熱制御材料 …… 370
(b) 熱制御材料の劣化 …… 373
(c) 機能性材料 …… 381
(d) 断熱材，サーマル・ダブラおよびサーマル・フィラ …… 383
(e) 多層断熱材 …… 383
(f) 相変化物質 …… 387
(g) サーマル・ルーバおよび自律型吸放熱デバイス …… 388
(h) ヒートパイプ，ループヒートパイプ …… 389
(i) 流体ループ …… 390
9.5.4 低温装置の熱設計 …… 391
(a) 寒剤 …… 391
(b) 冷凍機 …… 392
(c) 断熱設計 …… 392
9.5.5 再突入飛翔体の熱防御 …… 395
(a) アブレータ …… 395
(b) 再使用型耐熱システム …… 397
9.5.6 熱設計用ソフトウェアツール …… 401

C.10 空調，冷凍およびヒートポンプ …… 404
10.1 アンモニアの熱物性値 …… 404
10.2 R11の熱物性値 …… 406
10.3 R12の熱物性値 …… 408
10.4 R22の熱物性値 …… 412
10.5 R13B1の熱物性値 …… 415
10.6 R32の熱物性値 …… 417
10.6.1 R32の熱力学性質 …… 417
10.6.2 R32の輸送性質 …… 418
(a) 粘性率 …… 418

(b) 熱伝導率 …… 419
10.7 R125の熱物性値 …… 420
10.7.1 R125の熱力学性質 …… 420
10.7.2 R125の輸送性質 …… 421
(a) 粘性率 …… 421
(b) 熱伝導率 …… 422
10.8 R134aの熱物性値 …… 423
10.8.1 R134aの熱力学性質 …… 423
10.8.2 R134aの輸送性質 …… 426
(a) 粘性率 …… 426
(b) 熱伝導率 …… 427
10.9 R143aの熱物性値 …… 428
10.9.1 R143aの熱力学性質 …… 428
10.9.2 R143aの輸送性質 …… 432
(a) 粘性率 …… 432
(b) 熱伝導率 …… 433
10.10 R152aの熱物性値 …… 434
10.10.1 R152aの熱力学性質 …… 434
10.10.2 R152aの輸送性質 …… 437
(a) 粘性率 …… 437
(b) 熱伝導率 …… 437
10.11 混合冷媒の熱力学性質・輸送性質 …… 439
10.12 その他の代替冷媒の熱物性値 …… 455
10.13 代表的な自然冷媒の熱物性値 …… 460
10.14 アンモニア水溶液の熱物性値 …… 464
10.14.1 飽和アンモニア水溶液の密度，定圧比熱，粘性率および熱伝導率 …… 465
10.14.2 気液平衡線図とエンタルピー濃度線図 …… 465
10.14.3 アンモニア水溶液の屈折率 …… 466
10.15 臭化リチウム水溶液の熱物性値 …… 467
10.15.1 臭化リチウムの一般的性質と水への溶解度 …… 467
(a) 一般的性質 …… 467
(b) 水への溶解度 …… 467
10.15.2 臭化リチウム水溶液の密度，定圧比熱，粘性率，熱伝導率，物質拡散係数および表面張力 …… 467
(a) 密度 …… 467
(b) 定圧比熱 …… 467
(c) 粘性率 …… 467
(d) 熱伝導率 …… 468
(e) 物質拡散係数 …… 468
(f) 表面張力 …… 468
10.15.3 臭化リチウム水溶液の沸点圧力，デューリング式，エンタルピー …… 468
(a) 沸点圧力 …… 468
(b) デューリング式 …… 468
(c) エンタルピー …… 468
10.16 湿り空気線図 …… 469
10.17 ケミカルヒートポンプ関係 …… 470
10.17.1 吸着剤系 …… 470
10.17.2 金属水素化物系 …… 471
10.17.3 アンモニア化合物系 …… 471
10.17.4 気体水和物系 …… 472
10.17.5 無機水酸化物系 …… 473
10.17.6 無機水和物系 …… 473
10.17.7 有機化合物系 …… 474

C.11 低温および極低温 …… 475
11.1 ブラインの熱物性値 …… 475
11.1.1 ブライン …… 475
11.1.2 無機塩類の水溶液 …… 475
(a) 塩化ナトリウム …… 475
(b) 塩化カルシウム …… 475
11.1.3 有機化合物の水溶液 …… 476
(a) エチレングリコール …… 476
(b) プロピレングリコール …… 476
11.1.4 有機化合物 …… 476
11.2 極低温流体の熱物性値 …… 481
11.2.1 ヘリウム4 …… 481
(a) Ⅰ-領域のヘリウム4 …… 481
(b) Ⅱ-領域のヘリウム4 …… 482
11.2.2 ネオン …… 482
11.2.3 アルゴン …… 482
11.2.4 クリプトン …… 482
11.2.5 n-水素 …… 482
11.2.6 窒素 …… 483
11.2.7 酸素 …… 483
11.2.8 空気 …… 483
11.2.9 メタン …… 483
11.2.10 エチレン …… 483
11.2.11 エタン …… 484
11.2.12 プロパン …… 484

11.3 低温および極低温機器金属材料の熱物性値 …… 504
11.3.1 純金属の比熱 …… 504
11.3.2 純金属の熱伝導率，温度伝導率および線膨張係数の推奨値 …… 504
11.3.3 各種合金の比熱および熱伝導率 …… 505
11.3.4 純金属および合金の放射率 …… 507
11.3.5 金属材料熱伝導率の近似的推定法 …… 507
11.4 低温および極低温関連機器非金属材料の熱物性値 …… 509
11.5 低温および極低温断熱材の熱物性値 …… 511
11.5.1 非排気多孔質断熱材 …… 511
11.5.2 真空粉体断熱材 …… 511
11.5.3 真空多層断熱材 …… 512

C.12 食品・農産物 …… 514
(a) 比熱 …… 514
(b) 熱伝導率 …… 514
(c) 温度伝導率 …… 514
12.1 穀物の熱物性値 …… 515
12.1.1 比熱 …… 515
12.1.2 熱伝導率および温度伝導率 …… 515
12.2 青果物の熱物性値 …… 518
12.2.1 比熱 …… 518
12.2.2 熱伝導率と温度伝導率 …… 518
12.2.3 呼吸熱 …… 519
12.3 食肉の熱物性値 …… 521
12.4 牛乳および乳製品の熱物性値 …… 522
12.5 加工食品の熱物性値 …… 523
12.5.1 比熱 …… 523
12.5.2 熱伝導率 …… 523
12.6 その他 …… 524
12.7 食品および農産物の熱物性の推算法 …… 527
12.7.1 比熱 …… 527
12.7.2 熱伝導率 …… 527
12.7.3 温度伝導率 …… 529
12.8 冷凍食品の熱物性と有効熱伝導率の推算法 …… 529
12.8.1 はじめに …… 529
12.8.2 凍結食品の氷結率 …… 529
12.8.3 凍結食品の密度 …… 530
12.8.4 凍結食品の比熱 …… 530
12.8.5 凍結食品の熱伝導率 …… 530
12.8.6 おわりに …… 533
12.9 参考文献 …… 533

C.13 生活関連物質 …… 536
13.1 食物の熱物性値 …… 536
13.1.1 食品の熱伝達 …… 536
(a) 熱伝導率と温度 …… 536
(b) 熱伝導率と水分 …… 537
13.1.2 加熱 …… 537
(a) 食品内部の熱移動 …… 537
(b) 熱伝導 …… 539
(c) 対流熱伝達 …… 539
(d) 熱放射 …… 539
(e) 状態変化を伴った熱移動 …… 539
13.1.3 冷凍 …… 540
(a) 貯蔵 …… 540
(b) 解凍 …… 541
13.1.4 調理器具 …… 542
(a) 鍋 …… 542
(b) オーブン …… 543
(c) 電子レンジ …… 545
(d) 電磁調理器 …… 545
13.2 衣料の熱物性値 …… 546
13.2.1 繊維素材 …… 546
13.2.2 集合体の有効熱伝導率 …… 547
(a) 繊維集合体の有効熱伝導率 …… 547
(b) 繊維束の熱伝導モデル …… 547
(c) 繊維集合体の有効熱伝導率のおよその範囲 …… 549
(d) わた（繊維束）の有効熱伝導率に及ぼす放射の影響 …… 549
13.2.3 繊維の有効熱伝導率 …… 550
13.2.4 衣服材料（布）の有効熱伝導率 …… 551
(a) 布の熱伝導率 …… 551
(b) 布のかさ密度と熱伝導率 …… 552
(c) 布の水分率と熱伝導率 …… 552
(d) 布の温度伝導率 …… 552
(e) 布の比熱 …… 552
13.2.5 着衣の伝熱 …… 553
(a) 着衣の伝熱と熱物性 …… 553
(b) 円筒モデルの着衣系熱伝達 …… 554

(c) ふく射伝熱 …… 555
(d) 透湿性 …… 556
13.3 住生活関連材料の熱物性値 …… 557
13.3.1 畳 …… 557
13.3.2 カーテン …… 558
13.3.3 カーペット …… 560
13.3.4 繊維，紙および皮革 …… 561
(a) 繊維 …… 561
(b) 紙 …… 561
(c) 皮革 …… 561

C.14 自　然 …… 563
14.1 雪層の熱物性値 …… 563
14.1.1 雪の密度 …… 563
14.1.2 雪の比熱 …… 563
14.1.3 雪の熱伝導率 …… 563
14.1.4 雪の温度伝導率 …… 564
14.1.5 雪層の光学特性 …… 564
14.2 一般氷の熱物性値 …… 565
14.2.1 一般氷の密度 …… 565
14.2.2 一般氷の比熱 …… 565
14.2.3 一般氷の熱伝導率 …… 565
14.2.4 一般氷の温度伝導率 …… 566
14.2.5 一般氷の吸収係数 …… 566
14.2.6 一般氷の潜熱量 …… 566
(a) 融解潜熱 …… 566
(b) 水溶液中における純氷の融解潜熱 …… 567
(c) 昇華潜熱 …… 567
14.3 海氷の熱物性値 …… 568
14.3.1 海氷の密度 …… 568
14.3.2 海氷の定圧比熱 …… 568
14.3.3 海氷の熱伝導率 …… 568
14.3.4 海氷の融解熱量 …… 569
14.4 海水の熱物性値 …… 570
14.4.1 海水の密度 …… 570
14.4.2 海水の比熱 …… 571
14.4.3 海水の熱伝導率 …… 572
14.5 霜層の熱物性値 …… 573
14.5.1 霜層の密度 …… 573
14.5.2 霜層の比熱 …… 573
14.5.3 霜層の熱伝導率 …… 573
14.6 岩石の熱物性値 …… 574
14.6.1 岩石の密度 …… 575
14.6.2 岩石の比熱 …… 575
14.6.3 岩石の熱伝導率 …… 576
14.7 凍土の熱物性値 …… 576
14.7.1 凍土の密度 …… 576
14.7.2 凍土の比熱 …… 576
14.7.3 凍土の熱伝導率 …… 577
14.8 土壌の熱物性値 …… 578
14.8.1 土壌の密度 …… 578
14.8.2 土壌の比熱 …… 578
14.8.3 土壌の熱伝導率 …… 579
14.9 石炭の熱物性値 …… 580

C.15 生体・バイオ・医学 …… 581
15.1 生体物質 …… 581
15.1.1 生体物質の熱物性値の解釈 …… 581
15.1.2 生体物質の熱物性値の測定法 …… 582
(a) 侵襲的方法 …… 582
(b) 非侵襲的方法 …… 583
15.1.3 生体物質の熱的性質 …… 583
15.1.4 生体物質のガス拡散係数 …… 583
15.1.5 生体物質の凍結に関連した熱物性値 …… 587
15.1.6 非侵襲温度計測を基にした熱物性計測：核磁気共鳴を応用した非侵襲温度計測 …… 590
(a) はじめに …… 590
(b) MRI の温度依存パラメータ …… 590
(c) 水プロトン化学シフトによる温度分布可視化 …… 591
15.2 生体物理 …… 593
15.2.1 タンパク質 …… 593
(a) タンパク質の熱変性 …… 593
(b) タンパク質の部分比容と部分圧縮率 …… 593
15.2.2 脂質の熱特性 …… 597
15.2.3 澱粉の糊化特性・多糖の熱転移 …… 599
(a) 澱粉の糊化特性 …… 599
(b) 多糖の熱転移 …… 601
15.2.4 植物体のガラス転移 …… 606

D 編　熱物性値の検索・推算・測定

D.1 熱物性値の不確かさ……609
1.1 不確かさの概念……609
1.2 不確かさの定義……609
1.2.1 標準不確かさ……610
(a) Aタイプの評価……610
(b) Bタイプの評価……610
1.2.2 偶然効果と系統効果の同等性……611
1.2.3 合成標準不確かさ……611
1.2.4 拡張不確かさ……611
1.3 表現方法の事例……612

D.2 材料のキャラクタリゼーション……613
2.1 化学組成……613
2.1.1 主成分の分析……613
2.1.2 微量成分の分析……614
2.1.3 物性測定による純度測定……614
2.1.4 マイクロビームアナリシス……615
2.2 結晶構造……615
2.2.1 代表的な計測法……615
(a) ラウエ法……615
(b) 粉末法……615
(c) 4軸回折計……615
(d) ラングカメラ……616
(e) Δdマシン……616
2.2.2 微組織と材料の性質……617

D.3 熱物性値の検索とデータベース……618
3.1 熱物性値のデータと文献の検索……618
3.1.1 学術論文誌……618
3.1.2 熱物性に関する汎用のデータブック……618
3.1.3 特定の物性値に対するデータブック……619
3.1.4 特定の物質に対するデータブック……619
3.2 熱物性値のデータベース……620
(a) 物質・材料に関する情報の共有……620
(b) 熱物性データ……620
(c) シミュレーションとデータベース……621
3.2.1 分散型熱物性データベース……621
(a) 分散型データベース……621
(b) グラフ表示……621
(c) 物質・材料の階層表示……621
(d) 検索機能……622
(e) 収録データ……622
(f) インターネット公開……623
3.2.2 高分子データベース PoLyInfo……623
(a) PoLyInfo について……623
(b) データベースの構成と収録データ……623
(c) PoLyInfo に収録されている熱物性データ……624
(d) 検索方法……624
(e) Pauling File（合金，金属間化合物および無機物質の基礎データベース）……624
3.2.3 プロパス……625
(a) PROPATH の概要……625
(b) P-PROPATH……626
(c) A-PROPATH……626
(d) M-PROPATH……626
(e) F-PROPATH……626
(f) I-PROPATH……626
(g) E-PROPATH……626
(h) W-PROPATH……627
(i) 他言語での使用……627
(j) PROPATH の入手方法……627
3.2.4 熱力学データベース……627
(a) 評価に定評のあるデータ集など……628
(b) 熱力学データベース……628
(c) 今後の展望……629
3.2.5 REFPROP……629
(a) 概　要……629
(b) 計算できる物質……630
(c) 計算モデル……630
(d) 線図の作成……631
(e) 計算精度……631
(f) あとがき……631
3.2.6 海外のデータベース……631
(a) NIST/TRC データベース……632
(b) DECHEMA データベース……634
(c) その他のデータベース……634
3.2.7 その他のデータベース……636

D.4 熱物性値の推算法の手引き …… 640
4.1 純粋液体および気体の熱力学的性質 …… 640
4.1.1 推算法の概要 …… 640
4.1.2 PVTおよび密度 …… 640
(a) 液体 …… 640
(b) 気体 …… 643
4.1.3 エンタルピー …… 647
(a) 液体 …… 647
(b) 気体 …… 648
4.1.4 熱容量および比熱 …… 649
(a) 液体 …… 649
(b) 気体 …… 652
4.1.5 まとめ …… 654
4.2 純粋液体および気体の輸送性質の推算法 …… 655
4.2.1 概要 …… 655
4.2.2 粘性率の推算法 …… 655
4.2.3 熱伝導率の推算法 …… 656
4.2.4 拡散係数の推算法 …… 656

D.5 分子シミュレーションの手引き …… 657
5.1 熱物性の分子シミュレーション …… 657
5.1.1 概　要 …… 657
5.1.2 モンテカルロ法 …… 657
5.1.3 分子動力学法 …… 657
5.1.4 分子間相互作用のモデル …… 658

D.6 熱物性値の測定法の手引き …… 660
6.1 温度測定 …… 660
6.1.1 温度計の種類と特徴 …… 660
(a) 抵抗温度計 …… 660
(b) 熱電対 …… 660
(c) 放射温度計 …… 662
(d) その他の温度計 …… 662
6.1.2 測定誤差の要因 …… 662
(a) 抵抗温度計 …… 662
(b) 熱電対 …… 662
(c) 放射温度計 …… 663
(d) ガラス製温度計 …… 664
(e) 圧力式温度計 …… 664
6.1.3 国際温度目盛 …… 664
(a) 1990年国際温度目盛(ITS-90) …… 664
(b) 0.65 Kから5.0 Kまで：ヘルウムの蒸気圧対温度式 …… 664
(c) 30 Kからネオンの三重点(24.5561 K)まで：気体温度計 …… 664
(d) 平衡水素の三重点(13.8033 K)から銀の凝固点(961.78 ℃)まで：白金抵抗温度計 …… 666
(e) 銀の凝固点(961.78 ℃)以上の温度領域：プランクの放射則 …… 667
6.1.4 トレーサビリティー …… 668
6.2 圧力測定 …… 669
6.2.1 圧力の定義 …… 669
(a) 静止流体の圧力 …… 669
(b) 運動流体の圧力 …… 669
6.2.2 圧力の種類 …… 669
(a) 圧力の変動 …… 669
(b) 圧力の表示方法 …… 669
(c) 圧力の単位 …… 669
6.2.3 圧力計の分類 …… 670
6.2.4 液柱形圧力計 …… 670
(a) 液柱形圧力計の測定原理 …… 670
(b) 液柱形圧力計の特徴 …… 670
(c) 液柱形圧力計の種類 …… 671
6.2.5 重錘形圧力てんびん …… 671
(a) 重錘形圧力てんびんの測定原理 …… 671
(b) 重錘形圧力てんびんの特徴 …… 671
6.2.6 弾性圧力計一般 …… 672
(a) 弾性圧力計の特徴 …… 672
(b) 弾性圧力計の種類 …… 672
(c) 弾性圧力計の選定方法 …… 672
6.2.7 機械式弾性圧力計 …… 672
(a) ブルドン管圧力計 …… 672
(b) その他 …… 672
6.2.8 電気式弾性圧力計 …… 672
6.2.9 高精度弾性圧力計 …… 673
(a) 石英ブルドン管圧力計 …… 673
(b) 振動式圧力計 …… 673
6.2.10 その他の圧力計 …… 674
(a) 電気抵抗線式圧力計 …… 674
(b) 圧電式圧力計 …… 674
6.3 固体の熱物性値の測定法の手引き …… 674
6.3.1 固体の比熱容量測定 …… 674

(a) 断熱法－断続加熱方式（ネルンスト法）……674
(b) 断熱法－連続加熱方式……675
(c) 熱緩和法……675
(d) ac法……675
(e) 示差走査熱量法－DSC……676
(f) 投下法……676
(g) 高速通電加熱法……677
(h) レーザフラッシュ法……677
6.3.2 固体の熱伝導率および熱拡散率……678
(a) 測定法の基本原理……678
(b) 測定法の種類……678
(c) 定常法による熱伝導率測定法……678
(d) パルス状加熱法による熱拡散率測定法……679
(e) ステップ状加熱法による熱拡散率測定法……680
(f) 周期加熱法による熱拡散率測定法……681
(g) 任意加熱法（ラプラス変換法）……681
(h) 細線加熱法およびプローブ法……682
(i) 直流通電加熱法……683
6.3.3 薄膜およびナノマテリアルの熱伝導率および熱拡散率の測定法……683
(a) 動的格子緩和法……683
(b) ACカロリメトリによる距離変化法……684
(c) 3ω法……684
(d) SThM（Scanning Thermal Microscope）……684
(e) 周期加熱サーモリフレクタンス法……685
(f)「表面加熱・表面測温」型超高速サーモリフレクタンス法……685
(g)「裏面加熱・表面測温」型超高速サーモリフレクタンス法……686
(h) 細線の熱伝導率測定……686
6.3.4 固体の熱膨張率測定法……686
(a) 光干渉法……687
(b) X線回折法……687
(c) 測微望遠鏡法……688
(d) 押し棒式膨張計……688
(e) 機械てこ法，光てこ法……689
(f) 電気容量法……689
(g) 歪みゲージ法……690
6.3.5 固体の放射性質……690
(a) 放射測定法……690
(b) 反射測定法……692
(c) 熱量測定法……694
6.4 流体の熱物性値の測定法……694
6.4.1 相平衡……694
(a) 固気平衡（吸着平衡）……695
(b) 低圧気液平衡……695
(c) 高圧気液平衡……695
6.4.2 蒸気圧……697
6.4.3 流体のPvT性質……698
6.4.4 流体の比熱およびエンタルピー……700
(a) 示差走査熱量計……701
(b) 断熱法……701
(c) 投下法……701
(d) 周期的加熱法……701
(e) 混合法……701
(f) 熱交換法……701
(g) フローカロリメトリー……701
6.4.5 流体の音速……702
(a) 音速と熱物性……702
(b) 音速測定法……704
6.4.6 流体の熱伝導率……704
(a) 流体の熱伝導率測定の留意点……704
(b) 流体の熱伝導率の測定方法……705
(c) 非定常細線法……705
(d) 定常法……708
(e) その他の測定方法……709
6.4.7 流体の粘性率（粘度）……710
(a) 細管法による粘度測定……710
(b) 振動法による粘度測定……713
(c) 落体法による粘度測定……714
(d) 回転法による粘度測定……714
(e) その他の方法による粘度測定……715
(f) 粘度計の校正……715
6.4.8 流体の拡散係数……715
(a) Loschmidt法（閉管法）・拡散セル法……716
(b) 二室法・隔壁セル法……716
(c) Stefan法（蒸発管法）・キャピラリ・リーク法……716
(d) キャピラリ法（開管法）……716
(e) Taylor法（クロマトグラフィ法）……716
(f) 点源法……716
(g) 拡散ブリッジ法……716

(h) 自己拡散係数の測定法 …… 716
6.4.9 表面張力および界面張力 …… 717
(a) 表面張力の定義 …… 717
(b) 毛細管法 …… 717
(c) 泡圧法 …… 717
(d) 懸滴法 …… 718
(e) 静滴法 …… 718
(f) 表面波法 …… 718
6.5 熱物性標準物質 …… 719
6.5.1 固体標準物質 …… 719
(a) 熱膨張率 …… 719
(b) 比熱 …… 720
(c) 熱伝導率および熱拡散率 …… 723
(d) 放射率 …… 726
6.5.2 流体標準物質 …… 729
(a) 密度 …… 729
(b) 液体および気体の熱伝導率の標準 …… 731
(c) 粘性率 …… 732
6.6 熱物性値測定法の規格 …… 735

D.7 伝熱の初歩 …… 738
7.1 伝導伝熱と対流伝熱 …… 738
7.1.1 伝導伝熱 …… 738
(a) 熱伝導 …… 738
(b) Fourier の法則 …… 738
(c) 熱伝導方程式 …… 738
(d) 伝導伝熱 …… 739
(e) 平板内の1次元定常伝導伝熱 …… 739
(f) 非均質媒質中での有効熱伝導 …… 740
(g) 熱伝達・熱通過 …… 740
(h) 伝導伝熱の無次元数 …… 741
7.1.2 対流伝熱 …… 741
(a) 対流伝熱 …… 741
(b) 強制対流と自然対流 …… 741
(c) (対流) 熱伝達率 …… 741
(d) 流れの無次元数 …… 742
(e) 熱伝達の無次元量 …… 742
7.2 ふく射伝熱 …… 743
7.2.1 ふく射伝熱 …… 743
(a) ふく射の放射・吸収・ふく射伝熱 …… 743
(b) 分光量と波長積分量 …… 744
(c) 指向量と半球量 …… 744
(d) ふく射強度とふく射流束 …… 744
(e) 黒体ふく射 …… 744
7.2.2 表面のふく射性質 …… 745
(a) 実在の物質のふく射性質 …… 745
(b) 灰色体の仮定と完全拡散の仮定 …… 745
(c) 放射率 …… 745
(d) 反射率・透過率・吸収率 …… 745
(e) Kirchhoff の法則 …… 746
(f) ふく射性質のデータ …… 746
(g) 固体表面間のふく射伝熱 …… 746
7.2.3 半透過性媒質の性質 …… 747
(a) 吸収係数・散乱係数と放射係数 …… 747
(b) 気体の放射率と吸収率 …… 747

索引 …… 748
物質名索引 …… 763
熱物性受託測定機関一覧 …… 767
ハンドブックリスト …… 773