

# 温度計測

— 基礎と応用 —

計測自動制御学会 温度計測部会 編

コロナ社

---

---

会誌出版委員会（平成 29 年度）

出版ワーキンググループ

主 査 小 木 曾 公 尚  
委 員 天 野 晃  
(五十音順) 倉 本 直 樹  
小 林 洋  
中 荃 隆  
奈 良 高 明  
安 井 裕 司

---

---

# ま え が き

1981年（昭和56年）に計測自動制御学会温度計測部会編の学術図書『温度計測』が本学会より刊行され、10年以上を経た1992年（平成4年）に改訂版『新編 温度計測』が出版された。いずれも、刊行の目的は、温度計測に携わる人々に有益な指針を提供することであった。

『新編 温度計測』刊行以来22年が経過した2014年に、温度計測部会において新しい温度計測の学術図書の出版の機運が高まった。関係者の緻密な連絡のもとで原稿作成を進め、全面改訂版である本書が刊行されるに至った。

本書の特徴は、前書発行以来20年有余の間に展開されたさまざまな温度計測に関連する知見を取り入れたことに加え、読者層の広がりを考慮し、本書の内容を、温度計測の初学者を対象とした領域と、中・上級者向けの専門領域の二つに分けたことである。前者の領域を読み通すことによって、温度計測に関わる基本的・全体的な内容を把握でき、さらに専門領域において、必要に応じて高度な内容に習熟できるという構成である。

さらに、本書は、近年とみに高まった計測の不確かさ評価の重要性に鑑み、そのための独立した章を設けた。この章では、評価法の背後にある基礎理論を明確に記述し、不確かさ評価に対する理解を深めていただくとともに、温度計測に関連する不確かさ評価を具体的に例示することによって、評価手法に習熟できることを意図した。

ここで各章の内容について簡単に紹介しておく。1章は、初学者向けの通論である。2章は、上記のように温度計測の不確かさ評価に関する解説と評価の具体例を記述している。3章から5章は、温度計測の三つの代表的な専門領域を記述している。すなわち、3章は抵抗温度計、4章は熱電対による温度計測で、いずれも接触式温度計測法に関する。5章は、放射測温で非接触式測温の

代表的な手法である。6章は、3～5章の温度計測法以外のさまざまな手法や話題をまとめている。

各章末に、少数ではあるが演習問題を設け、巻末にそれらの詳解を記載した。その意図は、こうした出題を通じて読者にそのテーマの重要性に気づいていただき、あらためてその内容に習熟する機会を提供することである。したがって、これらの演習問題は、執筆者からの強いメッセージとして受け取っていただきたい。

各章の最後には「参考文献と解説」を記載した。読者が原著文献を直接参考にしたいときの便宜を考え、ほとんどの文献の内容を簡単に解説した。

本書の執筆分担はつぎのとおりである。

- 1章 井内徹, 新井優, 杉浦雅人, 山田善郎
- 2章 榎原研正, 浜田登喜夫, 杉浦雅人, 佐藤弘康
- 3章 池上宏一, 安田嘉秀, 浜田登喜夫
- 4章 浜田登喜夫, 池上宏一, 佐藤弘康, 安田嘉秀, 杉浦雅人
- 5章 山田善郎, 井内徹, 清水孝雄, 角谷聡, 杉浦雅人
- 6章 大重貴彦, 井内徹

本書がさまざまな形で温度計測に関わる人々の座右の書として活用されることを切望する。

最後に、本書の企画・出版にあたりご協力を賜った計測自動制御学会誌出版委員会、同学会事務局、コロナ社、ならびに貴重な資料を提供してくださった関係各社に厚く御礼申し上げたい。

2017年12月

著者一同

# 目 次

## 1. 温度計測通論

1.1 温度とはなにか	1
1.1.1 はじめに	1
1.1.2 さまざまな温度の定義	1
1.1.3 熱平衡の概念と温度	2
1.1.4 温度と熱とエネルギー	3
1.1.5 熱力学に基づく温度の概念：熱力学温度 $\Phi(\theta)$	5
1.1.6 理想気体における温度 $T$	7
1.1.7 エントロピと温度の関係	10
1.1.8 統計力学に基づくエントロピと温度の概念	10
1.2 温度標準と単位	15
1.2.1 国際単位系 (SI) と温度の単位	15
1.2.2 国際温度目盛	18
1.2.3 温度計測のトレーサビリティ	26
1.3 温度計の種類と選択	34
1.3.1 代表的な温度計	34
1.3.2 温度測定方法の選び方	36
章 末 問 題	38
参考文献と解説	38

## 2. 測定の不確かさ

2.1 不確かさとはなにか	42
2.1.1 不確かさの表現のガイド	42
2.1.2 不確かさと誤差	44
2.1.3 真値と測定値	46
2.2 統計的基礎	47
2.2.1 測定における母集団と標本	47
2.2.2 分散と標準偏差の計算	48
2.2.3 標本平均の統計的性質	49
2.2.4 相関係数	50
2.3 測定モデル化	51
2.3.1 測定の数学的モデル	51
2.3.2 誤差の構造モデル	52
2.4 標準不確かさの評価	54
2.4.1 標準不確かさのタイプ A 評価	54
2.4.2 タイプ A 評価の実際	55
2.4.3 標準不確かさのタイプ B 評価	56
2.4.4 タイプ B 評価の例	57
2.5 不確かさの合成	59
2.6 不確かさの表現と報告	63
2.6.1 合成標準不確かさと拡張不確かさ	63
2.6.2 拡張不確かさの計算	64
2.6.3 不確かさの報告	65
2.7 不確かさ評価の実際	65
2.7.1 記号の使い方	65

2.7.2	既知のかたよりを補正しない場合の不確かさ評価	66
2.7.3	入力量間に相関がある場合の伝播則	68
2.7.4	不確かさのバジェット表	71
2.7.5	$t$ 分布を用いた包含係数の計算	71
2.8	温度測定における不確かさの評価事例	74
2.8.1	熱電対による温度測定の不確かさ	74
2.8.2	工業用白金測温抵抗体の $0^{\circ}\text{C}$ における抵抗値の不確かさ	78
2.8.3	放射温度計を用いた銅板表面温度測定の不確かさ	84
章 末 問 題		90
参考文献と解説		91

### 3. 抵抗温度計測

3.1	原理と特徴	93
3.1.1	測温抵抗体	95
3.1.2	NTCサーミスタ	98
3.2	測温抵抗体の種類と構造	99
3.2.1	標準用白金抵抗温度計	100
3.2.2	工業用測温抵抗体の種類	103
3.2.3	工業用測温抵抗体の構造	108
3.3	サーミスタ測温体	114
3.3.1	サーミスタの材料と特性	115
3.3.2	サーミスタの構造	117
3.4	測温抵抗体の測定回路	117
3.4.1	測定回路の原理	118
3.4.2	測温抵抗体の結線方式	122
3.4.3	計測器の実例	124

3.5 使用上の注意と選択基準	128
3.5.1 自己加熱	128
3.5.2 導線による測定結果への影響	131
3.5.3 応答速度	132
3.5.4 故障と劣化	133
3.5.5 取り付け方法（挿入長さ）	133
3.5.6 選択基準	134
3.6 極低温用温度計	136
3.6.1 極低温用温度計の種類	138
3.6.2 磁場中での温度測定	140
3.7 抵抗温度計の校正	141
3.7.1 定点校正	142
3.7.2 比較校正	144
3.7.3 校正における留意事項	147
章末問題	148
参考文献と解説	149

## 4. 熱電対による温度計測

4.1 原理と特徴	155
4.1.1 熱電対の原理	155
4.1.2 熱電対の特徴	165
4.2 熱電対の種類と特性・選択基準	166
4.2.1 貴金属熱電対と卑金属熱電対	166
4.2.2 各種貴金属熱電対の種類と特徴	169
4.2.3 各種卑金属熱電対の種類と特徴	170
4.2.4 その他の熱電対	173



4.2.5	熱電対の選択基準	176
4.2.6	熱電対の特殊な応用例	179
4.3	熱電対の構造	182
4.3.1	保護管付熱電対	184
4.3.2	シース熱電対	188
4.3.3	サーモウエル	191
4.4	補償導線	193
4.4.1	補償導線の種類と特徴	194
4.4.2	補償導線の構造	197
4.5	熱電対の測定回路	200
4.5.1	基準接点補償	200
4.5.2	測定回路と計測器	203
4.5.3	熱電対測定の留意点	207
4.6	使用上の注意	210
4.6.1	熱接触	210
4.6.2	気体温度計測	215
4.6.3	表面温度測定	219
4.6.4	熱電対の不均質	222
4.6.5	シース熱電対のシャントエラー	226
4.7	熱電対素線の劣化と寿命	227
4.7.1	白金系熱電対の劣化	228
4.7.2	K熱電対の劣化	233
4.8	熱電対の校正	235
4.8.1	温度定点による校正	235
4.8.2	ワイヤブリッジ法によるパラジウム点	237
4.8.3	金属-炭素共晶点	240
4.8.4	比較法による校正	240
4.8.5	標準熱電対	242

章末問題	243
参考文献と解説	244

## 5. 放射测温

5.1 放射测温の原理	256
5.1.1 放射の諸法則	256
5.1.2 放射测温に関わる物理量と単位	265
5.2 放射温度計の構造	268
5.2.1 光検出器	268
5.2.2 放射温度計の構成	275
5.3 放射率	284
5.3.1 物質の放射特性・放射率	284
5.3.2 実用試料のオフライン放射率測定装置	299
5.4 特殊な放射温度計	301
5.4.1 熱画像装置	301
5.4.2 2色温度計	306
5.4.3 耳用赤外線体温計	309
5.5 放射测温の実用上の問題	310
5.5.1 放射温度計測の誤差要因	310
5.5.2 放射率変動とその対策	311
5.5.3 背景放射とその対策	316
5.5.4 測定放射束の減衰	318
5.5.5 放射温度計の感度特性： $n$ 値	320
5.5.6 放射温度計の選定	322
5.6 放射温度計の適用例	325
5.6.1 鍛造プレス工程の加熱温度測定	325

5.6.2	超高温炉の温度制御	326
5.6.3	コークス火残り検知・消火システム	327
5.6.4	硝子/フィルム製造工程	327
5.6.5	鋼板の連続焼鈍炉の測温システム	329
5.6.6	水滴飛散環境下における鋼板の放射測温	330
5.6.7	溶融金属を対象とした放射測温	332
5.6.8	半導体製造プロセスにおける放射測温	334
5.6.9	事例のまとめ	339
5.7	放射温度計の校正	339
5.7.1	放射温度目盛とトレーサビリティ	339
5.7.2	放射温度計校正用放射源	340
5.7.3	標準放射温度計の温度定点による ITS-90 目盛設定	349
5.7.4	放射温度計による熱力学温度測定	353
5.7.5	放射温度計の面積効果	354
	章末問題	358
	参考文献と解説	360

## 6. 温度計測法と温度計の広がり

6.1	プリンタブルなフレキシブル体温計	377
6.2	微小領域の温度計測	378
6.2.1	ナノ熱電対	378
6.2.2	走査型熱顕微鏡における能動的温度計測法	379
6.2.3	カーボンナノチューブ (CNT) 温度計	380
6.2.4	レーザー測温法	381
6.3	非線形光学現象の温度計測への応用	387
6.3.1	時間領域反射光測定法 (OTDR)	387

6.3.2	コヒーレント反ストークス・ラマン散乱 (CARS) 分光法	391
6.3.3	レーザ励起熱回折格子分光法 (LITGS)	392
6.4	光ファイバ温度センサ	393
6.5	蛍光測温法	396
6.5.1	医療・バイオテクノロジー分野における蛍光測温法	397
6.5.2	エンジン内における蛍光測定法	398
6.6	音響測温法	399
6.6.1	気体の音響測温	399
6.6.2	液体・固体の音響測温	400
6.6.3	地球環境測定における音響測温	401
6.6.4	1次温度計への応用	401
	章末問題	402
	参考文献と解説	402
	各種熱電対の基準関数	416
	章末問題解答	419
	索引	430



# 温度計測通論



本章は、温度計測に対して経験が少ない、あるいは慣れていない読者に、温度および温度計測に関わる基本的な内容を把握し、温度計測の基礎を習得してもらうことを目的としている。温度計測に関してある程度専門的な知識を有する読者も、本章を通読することによって温度計測全体像を把握する上で役立つと思われる。

## 1.1 温度とはなにか

### 1.1.1 はじめに

「温度とはなにか?」とあらためて問うと、温度に関わる科学・技術に従事している専門家でも即答に窮するであろう。温度の本質は、**熱力学温度**(thermodynamic temperature) という、物理学における最も深い基礎概念の一つに基づいている。本節で温度の本質について順を追って記述する。温度に関わるキーワードは以下のとおりである。

「状態量」, 「熱平衡」, 「カルノーサイクル (熱力学第 2 法則)」, 「エントロピー」

### 1.1.2 さまざまな温度の定義

熱力学・統計力学のテキストを開くと、以下のような温度に関する定義が記述されている。

- $n$  モルの理想気体における絶対温度：温度  $T$  は一定体積  $V$  のもとで気体の圧力  $p$  に比例し、これに基づいて気体温度計の原理  $pV = nRT$  ( $R$  :

## 2 1. 温度計測通論

気体定数) が成り立つ。

- 熱力学温度：温度  $T$  はカルノーサイクルにおける熱源の温度であり、熱機関の効率は  $\eta_c = 1 - T_2/T_1$  で表される。
- 分子の平均運動エネルギーが温度に対応する： $(1/2)m\langle v^2 \rangle = (3/2)kT$ 。ここで、 $m$ ：分子の質量、 $\langle v^2 \rangle$ ：分子の速度の2乗平均、 $k$ ：ボルツマン定数である。
- 水の三重点の熱力学温度：正確に 273.16 K である<sup>†1</sup>。

上記のさまざまな温度の定義は、結果としてそれ自体は間違っていない。それぞれにおいて定義される温度  $T$  が、じつはカルノーサイクルによって定義される熱力学温度と一致する。なぜそうなるのかを明確にするのが本節の目的であり、経緯に沿って話を進める。

### 1.1.3 熱平衡の概念と温度

17世紀初頭のヨーロッパは、さまざまな測定機器が発明された時代であり、望遠鏡、顕微鏡、温度計がその代表的な発明品である。かのガリレオ・ガリレイは、望遠鏡と温度計の発明、あるいはその応用におおいに寄与したことで歴史に名を留めている。しかし、温度計の発明に関しては、少なくともほかに3人の人物が候補者として挙げられる<sup>1)†2</sup>。

温度の概念は、冷たい、熱いというわれわれの感覚と深く関わっているが、温度を物理量として客観化して提示することは難しい。事実、温度の概念は熱力学と統計力学にその基礎を置いているので、これらの科学が発展する17世紀以降になるまで明確にすることはできなかった<sup>2)~4)</sup>。

物体系を断熱的な状態（熱の出入りがない状態）に保つと、やがて熱的に変化のない一定の熱的状态に落ち着く。この状態をわれわれは熱平衡状態（state of thermal equilibrium）と呼んでいる。温度の概念は、この熱平衡状態に基づ

---

<sup>†1</sup> この表現内容は「温度」の概念の定義というより、「温度の単位 (K) の大きさ」を定義している。

<sup>†2</sup> 肩付き番号は章末の引用・参考文献を示す。

いて定義することができる。いま A, B, C の物体があつて、A と B が接触して熱平衡 (A~B と表す) にあり、また B と C が同様に熱平衡 (B~C と表す) になっているとすると、A と C は熱平衡 (A~C) になっている。つまり、式 (1.1) のように記述できる。

$$A \sim B \cup B \sim C \implies A \sim C \quad (1.1)$$

熱平衡状態にある上述の三つの物体に共通する性質を温度と定義する。物体 B を利用すると、物体 A と物体 C を接触させなくても、両者の温度が等しいことを確認でき、温度によって熱平衡の状態を区別することができる。したがって、物体 B は熱平衡状態を区別する温度計の役割を果たしているということもできる。

熱平衡状態は、経験的事実として熱力学第 0 法則 (zeroth law of thermodynamics) と呼ばれている。熱平衡状態は、 $10^{24}$  程度の原子や分子を含む巨視的 (macroscopic) な物体系を対象として議論が成り立つ。したがって、温度という物理量も巨視的な物体に対して成り立つものであり、分子・原子の数が  $10^{24}$  よりきわめて少ない条件下では成り立たない概念であること、微視的 (microscopic) には熱平衡状態はわずかなゆらぎ (fluctuation) を伴っていることから、1.1.8 項に記述されるように、温度は分子運動の平均エネルギーに相当する統計的な物理量であるともいえる。

#### 1.1.4 温度と熱とエネルギー

巨視的な系、すなわち考える物体の熱平衡状態を特徴付ける定まった値をとる温度、体積、圧力などの物理量を状態量 (state quantity) という。

さまざまな物理量 (physical quantity) は、一般に示量変量 (extensive quantity) と示強変量 (intensive quantity) と呼ばれる量に区別される。示量変量は空間的な広がりを持ち、物質の量に関係し、熱やエネルギー、体積などはその範疇に入る。これらは足し算できる量である。「5 J と 15 J を足すと 20 J になる」という表現は物理的に意味がある。一方、示強変量は、場所における作用

の強さを示す量であり、温度や圧力などがその例である。温度は熱の移動する傾向の強さを示す量であり、圧力は体積が膨張する傾向の強さを表すものである。これらは熱や体積とは異なり、物質の量に比例した関係にはない。この観点から、明らかに温度と熱は明確に異なる物理量である。

1789年にドイツ・バイエルンのランフォード (C. Rumford) は大砲の切削作業中にたえず熱が生じることを考察し、力学的な仕事が熱の発生源であると断定した。1843年に英国のジュール (J. P. Joule) は、仕事当量に関する有名な実験により、仕事と熱が本質的に同じ物理量であることを明らかにした。このような実験に基づき、熱と仕事を取り入れたエネルギー保存則 (law of conservation of energy) として、式 (1.2) ないし式 (1.3) の熱力学第 1 法則 (first law of thermodynamics) が成り立つことが明らかになった。

すなわち、ある系が熱平衡状態 A のときに持つ全エネルギーを  $U_A$  とし、熱平衡状態 B のときの全エネルギーを  $U_B$  とする。この系が熱平衡状態 A から B に移ったとき、全エネルギーの増加量  $dU = U_B - U_A$  は、その系に外部から移動した  $\delta Q$  と外からなされる力学的仕事  $\delta W$  の和になり、式 (1.2) で表される。この全エネルギーの増加量  $dU$  を系の内部エネルギー (internal energy) と呼ぶ。

$$dU = U_B - U_A = \delta Q + \delta W \quad (1.2)$$

仕事  $\delta W$  を圧力  $p$  と体積  $V$  で表すと、式 (1.3) のようになる。

$$dU = \delta Q - pdV \quad (1.3)$$

ここで、 $dU$  は系の内部エネルギーの微小増加量、 $\delta Q$  と  $-pdV$  はそれぞれ系に与えられる微小な熱 (heat) と仕事 (work) である。内部エネルギー  $dU$  は状態量であるから、最初と終わりの内部エネルギーが決まれば、途中の経路のとり方には関係しない。d の記号はその意味合いを示す。一方、熱と仕事は状態量ではなく、エネルギーの移動、つまりエネルギーの流れを表す物理量である。それらは系の外部から作用する量であり、経路によってそれらの値が異なるので  $\delta$  の記号をつけて区別している。



### 1.1.5 熱力学に基づく温度の概念：熱力学温度 $\Phi(\theta)$

熱力学第2法則 (second law of thermodynamics) は、熱が高温から低温に一方的に流れ、その逆は生じないという自然現象を表している<sup>5)~8)</sup>。高温の熱浴 (熱源) (heat bath; heat reservoir) から  $Q_1$  の熱を吸収し、 $Q_2$  の熱を低温の熱浴 (熱源) に廃棄する熱機関の効率 (efficiency of heat engine)  $\eta$  は式 (1.4) で表される。 $Q_1 - Q_2$  は外部になす仕事に相当する。

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1.4)$$

1824年、カルノー (S. Carnot) は、図 1.1 の状態図で示す等温膨張・断熱膨張・等温圧縮・断熱圧縮からなる熱機関を考察した。

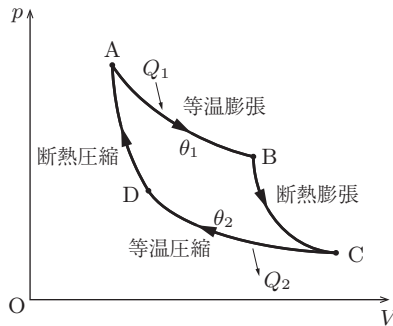


図 1.1 カルノーサイクル状態図

この結果、図 1.2 (a) に示すように、この機関の効率が最大の効率を持ち、かつ温度  $\theta_1$  の高温熱浴と温度  $\theta_2$  の低温熱浴の温度だけで決まることを示した。これをカルノーの定理 (Carnot theorem) という<sup>6)~8)</sup>。したがって、カルノーサイクル (Carnot cycle) では、式 (1.4) より熱の比  $Q_2/Q_1$  が  $\theta_1$  と  $\theta_2$  の関係となるから、次式で表すことができる。

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \varphi(\theta_1, \theta_2) \quad (1.5)$$

$\varphi(\theta_1, \theta_2)$  の形を見るために、図 (b) に示すような熱浴温度  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  ( $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$ ) からなる二つのカルノーサイクルを繋げると、最初のサイクルから式

# 索引

## 【あ】

亜鉛の凝固点 (freezing point of zinc) 143  
アナログ温度変換器 204

## 【い】

イリジウム・ロジウム熱電対 175  
色中心 (color center) 399

## 【う】

ウィーンの (Wien's)  
— 近似則 (— approximation) 260, 263  
— 変位則 (— displacement law) 264

## 【え】

エクステンション形 (extension cable) 193  
エタロン (etalon) 395  
エネルギー保存則 (law of conservation of energy) 4  
エリプソメトリ (ellipsometry) 383  
エリプソメトリック法 (ellipsometric thermometry) 381, 384  
エントロピー (entropy) 10  
— 増大の法則 (principle of increase of —) 14

## 【お】

応答速度 132, 135  
応答度 272  
音響 (acoustic)  
— 気体温度計 (— gas thermometer; AGT) 20, 401

— サーモグラフィ (— thermography) 399  
— 測温法 (— thermometry) 399  
温槽 141, 144  
温度可変黒体炉 343  
温度係数 (temperature coefficient) 96, 109, 115, 202  
温度勾配 (temperature gradient) 160, 226, 243, 423  
— 域 (— area) 222  
温度定点 (fixed point of temperature) 22  
温度定点実現装置 (apparatus for realizing the temperature fixed point) 29  
温度標準 (temperature standard) 22  
温度履歴センサ (thermal history sensor) 398

## 【か】

開口絞り (aperture stop) 275  
外部導線 102, 131  
拡張不確かさ (expanded uncertainty) 44, 63  
可動コイル式計測器 166  
過渡応答 211  
カプセル型 (capsule type) 101, 143  
カーボングラス抵抗温度計 (carbon glass resistance thermometer) 139  
カーボンナノチューブ (carbon nanotube; CNT) 378  
硝子封入抵抗素子 110  
カルノー (Carnot)  
— サイクル (— cycle) 5  
— の定理 (— theorem) 5  
過冷却 (supercooling) 236

感温部 213  
 感光性 (photosensitive) 389  
 干渉縞 (interference fringe) 382  
 干渉フィルタ (interference filter) 279  
 完全拡散的反射 291  
 完全鏡面的反射 290  
 カンチレバー (cantilever) 379  
 感度係数 (sensitivity coefficient) 60

【き】

機械加工中の温度上昇測定 181  
 貴金属熱電対 (noble-metal thermocouple) 166, 168  
 基準関数 (reference function) 167, 416  
 基準接点 (reference junction) 159  
 — 補償 (— compensation) 170, 181, 200  
 規準抵抗値 (reference resistance) 103  
 寄生熱起電力 (parasitic thermoelectromotive force) 121, 131, 235  
 気体温度計測 215  
 期待値 (expectation) 48  
 輝度温度 (radiance temperature) 282, 285  
 輝度信号 (radiance signal) 316, 319, 337, 349  
 基本単位 (base unit) 15  
 基本量 (basic quantity) 15  
 吸収端波長 (absorption edge wavelength) 393  
 吸収率 (absorptivity; absorptance) 287  
 キュリー (Curie)  
 — 温度 (— temperature) 114, 235  
 — 点 (— point) 171  
 凝固点実現装置 (apparatus for realizing the freezing point) 29  
 狭帯域放射温度計 (narrow band radiation thermometer) 280  
 許容差 (tolerance) 106, 176, 178, 194, 195  
 — クラス (— class) 107  
 距離効果 (distance effect) 355  
 キルヒホッフの法則 289  
 金属炭素共晶点 (metal-carbon eutectic point) 240

金属保護管 (metal protection tube) 186  
 金/白金熱電対 173

【く】

空洞の実効放射率 341, 428  
 組立 (derived)  
 — 単位 (— unit) 16  
 — 量 (— quantity) 15  
 くり抜き保護管 191  
 クロメル/金鉄熱電対 174

【け】

結像光学系 (image-forming optical system) 276  
 ゲルマニウム抵抗温度計 (germanium resistance thermometer) 139  
 原子間力顕微鏡 (atomic force microscope; AFM) 379

【こ】

工業用測温抵抗体 (industrial resistance thermometer) 99, 103, 108, 141, 147  
 光子 (photon) 268  
 公称抵抗値 (nominal resistance) 103  
 合成標準不確かさ (combined standard uncertainty) 44, 54, 60, 63  
 広帯域放射温度計 (wide band radiation thermometer) 280  
 光電子増倍管 (photomultiplier tube; PMT) 271  
 光導電型検出器 (photoconductive detector; PC) 272  
 交流ブリッジ 120  
 互換性 168  
 国際温度 (International Temperature) 19  
 国際計量標準 (international standard) 27  
 国際単位系 (International System of Unit; SI) 15  
 黒体空洞 340, 341, 346  
 黒体分光 (blackbody spectral)  
 — 放射輝度 (— radiance) 262  
 — 放射束 (— radiance flux) 261

— 放射発散度 (— radiance emittance)	262
黒体放射 (blackbody radiation)	256
誤差の構造モデル	62, 75
国家計量標準 (national standard)	27
コモンモードノイズ対策	207
固有放射率	341, 346, 359
コンペンセーション形 (compensating cable)	193

## 【さ】

作業物質 (working substance)	7
佐久間-服部の式 (Sakuma-Hattori's equation)	340, 351
雑音等価電力 (noise equivalent power; NEP)	273
差動熱電対	180
サーミスタ測温体	93, 114, 115
サーミスタボロメータ (thermistor bolometer)	271
サーモウエル (thermowell)	191
サーモパイル (thermopile)	270
サーモリフレクタンス法 (thermoreflectance thermometry)	381
酸化ルテニウム抵抗温度計 (ruthenium oxide thermometer)	140
三重点 (triple point)	16
暫定低温目盛 (Provisional Low Temperature Scale)	24
残留抵抗 (residual resistance)	95
— 比 (— ratio; residual resistivity ratio)	100

## 【し】

時間遅れ	212
時間領域反射光測定法 (optical time domain reflectometry; OTDR)	389
示強変量 (intensive quantity)	3
次元指数 (dimensional exponent)	16
次元 1 (dimension one)	16
自己加熱 (self-heating)	122, 128, 144, 147
— 係数 (— coefficient)	129
仕事 (work)	4

事後保全 (corrective maintenance)	390
シース測温抵抗体 (mineral insulated metal sheathed resistance thermometer)	109, 113, 133
シース熱電対 (mineral insulated metal sheathed thermocouple)	188
— の規格	190
— のシャントエラー	226
— の測温接点部分	189
— の特徴	190
実験標準偏差	48
実験分散	48
実効分光放射率	313
実効放射率 (effective emissivity)	292
時定数	212, 213
シート熱電対	180
視野絞り (field stop)	275
自由度 (degrees of freedom)	48, 55, 71
シュテファン-ボルツマンの法則	265
状態方程式 (equation of state)	7
状態量 (state quantity)	3
焦電効果 (pyroelectric effect)	270
消耗型浸漬熱電対	179, 332
ショットノイズ (shot noise)	380
示量変量 (extensive quantity)	3
シングアラウンド法 (sing around method)	400
信号対雑音比 (signal-to-noise ratio; SN 比; S/N)	273

## 【す】

ストークス・ラマン散乱 (Stokes Raman scattering)	387
---------------------------------------	-----

## 【せ】

生体組織 (living tissue)	378
静電容量式温度計 (capacitance thermometer)	140
石英 (quartz glass)	
— シース (— sheath)	101
— の失透 (devitrification of —)	101
絶縁管 (insulating tube)	185
— 付熱電対	183

— の形状・長さ 186  
 — の材料 185  
 — の特性 186  
 絶縁抵抗 (insulation resistance) 102, 131, 206, 208, 209  
 絶対 (absolute)  
   — 熱電能 (— thermopower) 156  
   — 放射温度計 (— radiation thermometer; ART) 21  
   — 1次温度計 (— primary thermometer) 354  
 接地形 (grounded junction) 189  
 ゼーベック (Seebeck)  
   — 係数 (— co-efficient) 156  
   — 効果 (— effect) 156  
 セラミック封入抵抗素子 110  
 セルシウス (Celsius) 18  
   — 温度 (— temperature) 17  
 セルノックス (Cernox<sup>TM</sup>) 139, 141

【そ】

相関係数 43, 50, 68  
 走査型熱顕微鏡 (scanning thermal microscope; SThM) 379  
 相対 (relative)  
   — 熱電能 (— thermopower) 156  
   — 1次温度計 (— primary thermometer) 354  
 挿入長 (immersion depth) 113, 133, 211, 219, 224-226  
 相補型 MOS (complementary metal oxide semiconductor; CMOS) 302  
 測温接点 (measuring junction) 159, 164, 173, 180, 181, 200  
   — の接続方法 182  
 測温抵抗体 (resistance thermometer) 93, 95, 103, 108  
 測定対象量 (measurand) 51  
 測定電流 122  
 測定の数学的モデル 51  
 測定モデル 51, 75, 79, 86

【た】

第一原理 (first principles) 19  
 ダイオード温度計 (diode thermometer) 140  
 大気圧プラズマコーティング (air plasma spraying; APS) 398  
 大気の窓 (atmospheric window) 280, 318  
 ダイナミックレンジ (dynamic range) 280, 323, 351  
 タイプ A 評価 43, 54  
 タイプ B 評価 43, 56  
 タイムラグ (time lag) 166  
 多重反射 (multiple reflection) 313  
 多チャンネル入力 206  
 多点式熱電対 181  
 多波長温度計 (multi-wavelength thermometer) 309  
 端子箱 113, 184  
 探針 (probe) 378

【ち】

窒化ジルコニウム温度計 139  
 窒素の沸点 (boiling point of nitrogen) 143  
 中心極限定理 49  
 超音波探子 (ultrasonic probe) 400  
 直流電流比較 (direct current comparator; DCC) プリッジ 119  
 チョップパ (chopper) 280  
 チョッピング (chopping) 280, 283

【て】

抵抗素子 109  
 抵抗値のドリフト (resistance drift) 133  
 デジタル電圧計 235  
 定常状態の熱流 210  
 定積気体温度計 (constant volume gas thermometer; CVGT) 20  
 定点校正 (fixed point calibration) 142, 235  
 定点黒体 (fixed point blackbody) 340  
   — 炉 (— furnace) 346  
 デュプレックス熱電対 183, 193  
 電位差計 121, 203

電荷結合素子 (charge coupled device; CCD) 277  
 電気双極子 (electric dipole) 256  
 電磁波 (electromagnetic wave) 256  
 伝播位相差 (propagation phase difference) 383

## 【と】

同位体 (isotope) 17  
 透過型電子顕微鏡 (transmission electron microscope; TEM) 378  
 同軸熱電対 180  
 導線抵抗補償回路 124  
 銅測温抵抗体 107  
 導電性物質 (conductive substance) 377  
 特定 (specified)  
 — 標準器 (— standard instrument) 29  
 — 2次標準器 (— secondary standard instrument) 31  
 ドップラー (Doppler)  
 — 効果 (— effect) 387  
 — 法 (— method) 400  
 トムソン効果 (Thomson effect) 161  
 ドリフト (drift) 280, 281  
 トレーサビリティ (traceability) 26

## 【な】

ナイキストの定理 (Nyquist's theorem) 21  
 内部エネルギー (internal energy) 4  
 内部導線 131  
 ナノ熱電対 (nano-scale thermocouple) 378

## 【に】

ニッケル測温抵抗体 107  
 入出力絶縁 209  
 入力量 (input quantity) 51  
 ニュートンの冷却の法則 (Newton's law of cooling) 212

## 【ね】

熱 (heat) 4

熱画像装置 (thermal imaging camera) 301, 316, 318, 324, 327, 341, 346, 355  
 熱機関の効率 (efficiency of heat engine) 5  
 熱起電力 (thermoelectromotive force) 156  
 — の積分 156  
 熱効果レンズ分光法 (thermal lens spectroscopy) 384  
 熱雑音温度計 (Johnson noise thermometer; JNT) 21  
 熱じょう乱 214  
 熱接触 210-214, 221, 423  
 熱電対 (thermocouple) 154  
 — の過熱使用限度 227  
 — の均質回路の法則 (law of homogeneous metals) 161  
 — の原理 155, 158  
 — の校正 235  
 — の材質による熱起電力の加算 164  
 — の種類 166  
 — の常用限度 227  
 — の選択基準 166, 176, 177  
 — の中間温度の法則 (law of successive temperatures) 162  
 — の中間金属の法則 (law of intermediate metals) 162  
 — の特性 166  
 — の特徴 165  
 — の不均質 (— inhomogeneity) 163, 222  
 — の3法則 161  
 熱電能 (thermopower) 156  
 熱平衡 (thermal equilibrium) 3  
 — 状態 (state of —) 2  
 熱放散定数 (dissipation factor) 130  
 熱放射 (thermal radiation) 215, 255, 256  
 熱浴 (熱源) (heat bath; heat reservoir) 5, 154, 219  
 — 温度 159  
 熱力学 (thermodynamics)  
 — 第0法則 (zeroth law of —) 3  
 — 第1法則 (first law of —) 4  
 — 第2法則 (second law of —) 5

熱力学温度 (thermodynamic temperature) 1, 7, 9  
 熱力学温度測定 353  
 熱 流 210, 217

【の】

能動的計測法 (active measurement method) 381  
 ノーマルモードノイズ対策 208

【は】

バイオテクノロジー (biotechnology) 397  
 背景放射 (background radiation) 300, 302, 311, 316, 321, 323, 324, 329, 335, 339, 345, 359  
 背光率 316  
 薄 膜 297  
 薄膜素子 (thin film resistor) 109  
 波数 (wave number) 258  
 裸熱電対 (bare thermocouple element) 182  
 白金系熱電対 230  
     — の汚染 230  
     — の高温クリーブ破壊 232  
     — の熱起電力変化 228  
     — の劣化 228  
 白金コバルト測温抵抗体 (platinum-cobalt resistance thermometer) 138  
 白金測温抵抗体 (platinum resistance thermometer) 99, 103  
 白金抵抗素子 (platinum resistor) 108  
 白金/パラジウム熱電対 173  
 バーンアウト検出 126  
 半球分光 (hemispherical spectral)  
     — 吸収率 (— absorptivity) 288  
     — 反射率 (— reflectivity) 313  
     — 放射率 (— emissivity) 287  
 反射損失 (reflection loss) 276  
 反ストークス・ラマン散乱 (anti-Stokes Raman scattering) 387  
 半値全幅 (full width at half maximum; FWHM) 279  
 バンドギャップエネルギー (bandgap energy) 271, 295, 298, 393

バンドパスフィルタ (bandpass filter) 279

【ひ】

比較校正 (comparison calibration) 142, 144, 240  
 光音響分光法 (photoacoustic spectroscopy) 384  
 光干渉法 (interferometric thermometry) 381  
 光起電力 (photovoltaic)  
     — 型検出器 (— detector) 272  
     — 効果 (— effect) 269  
 光検出器 (optical detector; optical sensor) 268  
 光高温計 (optical pyrometer) 268  
 光導電効果 (photoconductive effect) 269  
 光ファイバ (optical fiber)  
     — コア (— core) 387  
     — センサ (— sensor) 388  
 卑金属熱電対 (base-metal thermocouple) 167, 168  
 非金属保護管 (non-metal protection tube) 186  
 微視状態 (microscopic state) 12  
 微小領域 (local area) 378  
 非侵襲的測定 (non-invasive measurement) 400  
 非接地地形 (ungrounded junction; insulated junction) 189  
 ヒートパイプ 345  
 被覆熱電対 183  
 標準温度計 (reference thermometer) 141  
 標準不確かさ (standard uncertainty) 43, 54  
 標準放射温度計 (standard radiation thermometer) 340, 349, 356  
 標準用白金抵抗温度計 (standard platinum resistance thermometer; SPRT) 99, 100, 141  
 氷点 (ice point) 144, 159, 235  
     — 式基準接点 201  
 標本 (sample) 47  
 表面温度測定 219

- ビリアル係数 (virial coefficient) 20
- 【ふ】**
- ファイバブラッグ回折格子 (fiber Bragg grating; FBG) 388
- ファブリ-ペロ干渉 (Fabry-Perot interference) 395
- ファーレンハイト (Fahrenheit; 華氏) 18
- フェルミ-ディラック分布関数 (Fermi-Dirac distribution function) 157
- フォーカルプレーンアレイ (focal-plane array; FPA) 284
- フォトサーマル法 (photothermal thermometry) 381, 384
- フォノン励起 (phonon excitation) 378
- 複素屈折率 (complex refractive index) 295, 381
- 不確かさ (uncertainty) 43, 45
- の伝播則 (law of propagation of —) 60, 68, 75, 80, 87
- のバジェット表 71, 78, 84, 90
- 物理量 (physical quantity) 3, 4
- プラチネル II 熱電対 175
- プラトー (plateau) 236, 238
- プランク定数 (Planck constant) 260
- プランクの放射則 (Planck's law) 261, 263
- フーリエ赤外分光器 (Fourier transform infrared spectrometer; FTIR) 300
- フリーキャリア (free carrier) 394
- ブリッジ 118
- ブリュースター角 (Brewster angle) 298
- ブリルアン散乱 (Brillouin scattering) 387
- フレキシブル温度計 (flexible thermal monitoring device) 377
- プローブ光 (probe light) 382
- (分光)
- 放射エネルギー 265
- 放射輝度 265
- 放射強度 266
- 放射照度 265
- 放射発散度 266
- 分光放射率 (spectral emissivity; spectral emittance) 285, 287
- 分散 (variance) 48
- 分布型光ファイバ温度センサ (distributed-type optical fiber temperature sensor) 388
- 【へ】**
- 平均運動エネルギー (mean kinetic energy) 12
- ペルチェ効果 (Peltier effect) 161
- 【ほ】**
- ポアソンの式 (Poisson's equation) 9
- ホイートストーンブリッジ (Wheatstone bridge) 118
- 包含確率 (coverage probability) 64
- 包含係数 (coverage factor) 44, 63, 72
- 方向分光 (directional spectral)
- 吸収率 (— absorptivity) 288
- 放射率 (— emissivity) 287
- 放射温度計 (radiation thermometer) 268
- 放射シールド 216
- 付モデル 216
- なしモデル 215
- 放射率 (emissivity) 285, 286, 311
- 変動 (— variation) 285
- 補正 (— compensation) 282, 293, 309, 312
- 補間式 (interpolation function) 23
- 保護管 (protection tube) 184
- 付測温抵抗体 109, 112
- 付熱電対 184
- の材料 185
- の挿入長 211
- の直径 211
- 母集団 (population) 47
- 補償導線 (thermocouple extension cable)
- 193
- の規格 194
- の記号 195
- の構造 197, 198
- の種類 195
- の特徴 195
- ボックスカー積分器 (box-car integrator) 384



ボルツマン定数 (Boltzmann constant)  
7, 12, 21, 259

**【ま】**

マイカ巻抵抗素子 109  
マイクロタス (micro-total analysis systems;  $\mu$ -TAS) 397  
巻線素子 (wire wound resistor) 109  
マクスウェルの電磁方程式 (Maxwell's equations) 256

**【み〜も】**

水の三重点 (triple point of water) 10, 16  
耳用赤外線体温計 (耳式体温計; clinical infrared ear thermometer) 309  
無次元 (dimensionless) 16  
面積効果 (size-of-source effect) 354  
もんじゅ事故 192

**【ゆ】**

融解点実現装置 (apparatus for realizing the melting point) 30  
有効自由度 (effective degrees of freedom) 64, 72  
誘電率気体温度計 (dielectric constant gas thermometer; DCGT) 20  
ユニバーサル入力 205  
ゆらぎ (fluctuation) 3, 13

**【よ】**

予防保全 (preventive maintenance) 390

**【り】**

リオストップ (Lyot stop) 357  
理想気体 (ideal gas) 7  
リニアライズ 125  
量子仮説 (quantum hypothesis) 257, 260  
量子力学 (quantum mechanics) 257

**【れ】**

冷接点 (cold junction) 159, 235, 423  
レイリー-ジーンズの法則 259  
レーザー (laser)  
— 測温法 (— thermometry) 381  
— 誘起超音波 (— -induced ultrasound) 400  
— 励起蛍光 (— induced fluorescence; LIF) 395  
— 励起熱回折格子分光法 (— induced thermal grating spectroscopy; LITGS) 392

**【ろ】**

ロジウム鉄温度計 (rhodium-iron resistance thermometer) 138  
露出形 (exposed junction) 189  
ロックインアンプ (lock-in amplifier) 384  
ロングステム型 (long-stem type) 101

**【わ】**

ワイヤブリッジ法 (wire bridge method) 237, 239, 243, 423

**【B】**

B 定数 (B-value) 99, 115  
B 熱電対 170  
— の汚染 230  
— の断線 230  
bamboo-structure 169, 232

**【C】**

C 熱電対 172  
Callendar-Van Dusen の式 104  
CARS 分光法 (coherent anti-Stokes Raman scattering spectroscopy) 391  
CCD 302, 333

CNT 温度計 (CNT thermometer) 380  
CTR サーミスタ (critical temperature resistor thermistor) 114

## 【E】

E 熱電対 171

## 【F】

foil/workpiece thermocouple method 181

## 【I】

ITS-90 22, 339, 346, 348, 349, 353

## 【J】

J 熱電対 171

JCSS (Japan Calibration Service System) 28

JPt 104, 105

## 【K】

K 熱電対 170

—の異常劣化 233

—のグリーンロット 233

—の正常劣化 233

—の短範囲規則格子変態 (short-range ordering) 171, 234

—の熱起電力の可逆変化 234

—の不均質 (— inhomogeneity) 225

## 【L】

LAP (laser absorption pyrometer) 385

LART (laser absorption radiation thermometer) 386

LEFT (laser emissivity free thermometry) 385

## 【M】

MEMS (micro electro mechanical systems) 303

## 【N】

n 値 (n value) 285, 307, 321, 323, 359, 427

N 熱電対 172  
NTC サーミスタ (negative temperature coefficient thermistor) 93, 98, 114

## 【P】

pn 接合 (p-n junction) 269

PR 熱電対 168, 253

Pt 103

PTC サーミスタ (positive temperature coefficient thermistor) 114

Pt-40%Rh/Pt-20%Rh 熱電対 174

## 【R】

R 熱電対 166, 169

—の断線 232

—のドリフト 229

—の不均質 224

## 【S】

S 熱電対 170

SOI 305

Steinhart-Hart 式 116

## 【T】

T 熱電対 172

## 【数字】

1 次温度計 (primary thermometer) 19

1990 年国際温度目盛 (International Temperature Scale of 1990; ITS-90) 22

2 次温度計 (secondary thermometer) 19

2 色温度計 306

2 導線式 122

2 方向反射率分布関数 (bidirectional reflectance distribution function; BRDF) 291

3 導線式 123

4 導線式 124

—— 著者略歴 ——

新井 優（あらい まさる）

1984年 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了（エネルギー科学専攻）

1984年 通商産業省工業技術院計量研究所（現 産業技術総合研究所）勤務

現在に至る

井内 徹（いうち とおる）

1968年 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了（制御工学専攻）

1968年 八幡製鐵株式会社（現 新日鐵住金株式会社）勤務

1980年 理学博士（東京工業大学）

1991年 東洋大学勤務

2013年 東洋大学名誉教授

池上 宏一（いけがみ こういち）

1982年 名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了（大気水圏科学専攻）

1990年 林電工株式会社勤務

現在に至る

榎原 研正（えはら けんせい）

1978年 京都大学理学部物理学科卒業

1983年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了（物理学専攻），工学博士

1983年 通商産業省工業技術院計量研究所（現 産業技術総合研究所）勤務

2014年 産業技術総合研究所名誉リサーチャー，同計量研修センター招聘研究員

現在に至る

大重 貴彦（おおしげ たかひこ）

1991年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了（計数工学専攻）

1991年 日本鋼管株式会社勤務（現 JFE スチール株式会社）

現在に至る

角谷 聡（かどや さとる）

1986年 東京理科大学工学部電気工学科卒業

1986年 株式会社千野製作所（現 株式会社チノー）勤務

現在に至る

佐藤 弘康（さとう ひろやす）

1996年 成蹊大学大学院工学研究科修士課程修了（計測数理工学専攻）

1996年 日本電気計器検定所勤務

現在に至る

清水 孝雄（しみず たかお）

1976年 東京教育大学理学部応用物理学科卒業

1976年 株式会社千野製作所（現 株式会社チノー）勤務

現在に至る

杉浦 雅人（すぎうら まさと）

1992年 慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了（計測工学専攻）

1992年 新日本製鐵株式会社（現 新日鐵住金株式会社）勤務

現在に至る

2015年 群馬大学大学院理工学府博士課程修了（理工学専攻（電子情報・数理領域）），博士（理工学）

浜田 登喜夫 (はまだ ときお)

1981年 大阪大学基礎工学部物性物理工学科卒業

1981年 田中貴金属工業株式会社勤務  
現在に至る

1998年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了 (物理系専攻), 博士 (工学)

安田 嘉秀 (やすだ よしひで)

1986年 神戸大学大学院工学研究科修士課程修了 (計測工学専攻)

1986年 横河北辰電機株式会社 (現 横河電機株式会社) 勤務  
現在に至る

山田 善郎 (やまだ よしろう)

1985年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了 (計数工学専攻)

1985年 日本鋼管株式会社 (現 JFE スチール株式会社) 勤務

1998年 通商産業省工業技術院計量研究所 (現 産業技術総合研究所) 勤務  
現在に至る

## 温度計測 — 基礎と応用 —

Temperature Measurement — From Fundamentals to Applications —

© 公益社団法人 計測自動制御学会 2018

2018年2月23日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 公益社団法人  
計測自動制御学会  
温度計測部会  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 三美印刷株式会社  
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 <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-03226-0 C3053 Printed in Japan

(新宅) G



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。