



入門講座

実験テクニック編(流体計測)基礎概説-2

温度測定

Fundamentals of Thermometry

松浦清隆

北海道大学 大学院工学研究科
物質工学専攻 助手

Kiyotaka Matsuura

井口 学

同上 教授

Manabu Iguchi

1 はじめに

工業プロセスにおいて最も多く計測される項目は温度で、全体の約半数近くを占める。続いて流量、圧力の順に計測点数が多い。鉄鋼業におけるセンサー技術の報告数を見ても、寸法計測と成分計測と並んで温度計測は多く研究開発されている¹⁾。

本稿では温度測定の基礎事項に限って記述する。本入門講座シリーズは流体計測をテーマとしている。しかし、圧力、流速、流量など他項目の測定と比較して、温度測定の基礎事項においては流体か非流体の測定対象を問わず共通の原理や方法を用いることが多い。それゆえ、本稿の記述は必ずしも流体の温度測定のみ限定していないことをお断りしておきたい。また、鉄鋼業の現場における温度測定の応用および事例については、後日このシリーズの中で別の記事が掲載される予定であることを記しておく。

1.1 温度の定義

温度測定について記述する前に、温度の定義について触れる。温度は、日常的には皮膚で感じる温冷の程度を表す数値のことを指す。しかし、物理学的には熱平衡を特徴づける尺度として使われる。つまり、温度とは熱流の方向を決定する性質を表す指標で、互いに接触する二つの物体間に熱の移動が起こらないとき二者は同じ温度を持つといい、また、熱移動が起こるとき移動の源に当たる物体を高温とし、移動先の物体を低温と決める。温度を数値で表す際の日盛り付けは国や科学分野によって異なり、Celsius(°C)、Fahrenheit(°F)、Reaumur(°Re)、Rankine(°R)、Kelvin(K)などがある。各日盛りの換算は以下の式で行われる。

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$t(^{\circ}\text{F}) = 9/5t(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$T(^{\circ}\text{R}) = 9/5 T(\text{K}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$t(^{\circ}\text{Re}) = 4/5 t(^{\circ}\text{C}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

本稿では、温度の単位として基本的に°Cを用いる。ただし便宜上、部分的にKを用いることを許されたい。例えば、概数で約100Kとしたいところを約-173°Cとすると有効数字の意味で誤解を招くからである。

1.2 温度計がない時代の测温

温度計がない時代にはどうやって温度を測ったのだろうか。太古、冬の寒さは池の氷の厚さで比較したかも知れないし、土器を焼く火の温度は炎の色から判断したかも知れない。感覚に頼っての温度評価は何も太古の昔だけのことでなく、ごく最近の時代まで、パン焼き職人や鍛冶屋は燃える炭や焼けた鉄の色から諸工程の最適温度を推測していたであろう。

視覚を通して温度を推測することは経験により得た後天的能力であるが、生き物である人間には触れて温度を知るセンサーが先天的に皮膚に備わっている。すなわち皮膚内に温感器と冷感器があり、皮下を流れる血液と皮膚表面の間の温度勾配によって上記いずれかの器官が興奮し、脳にその信号が送られる²⁾。そして、反射的に危険物から離れたり冷却のための汗を出したりして、自己防衛をしている。この感温機能があるゆえに、昔の医者患者の額に触れて病気の程度を判断したであろうし、また、見つければ腕を切り落とされる危険を冒しても刀鍛冶の弟子は焼き入れ桶の湯に密かに手を入れたであろう。

1.3 温度計発明への夜明け

長さ、重さ、時間などの基本物理量は古代エジプトの昔から身近の様々なものを尺度にして数量化され、幾何学や天文学の発展に役立ってきた。しかし、人類が温度の数量化に成功するには、何と紀元後17世紀まで待たなければな

らなかった。

温度計らしきものを初めて作ったのはフランスの医者 Jean Reyで、1631年、患者の熱病の進行を調べるためガラス管に水を入れたものを用いた³⁾。初めて定量的温度測定を行ったのはタスカン大公Ferdinand IIで、彼は1641年ガラス中にアルコールを入れた測温器を作り厳冬期と盛夏期におけるその容積差を等分して目盛りとした。しかしこれでは温度値に普遍性がないので、不変の基準値(温度定点)を設ける必要があった。初めて温度定点を用いたのは Dalenceで、彼は1688年に雪の融点を -10 度、バターの融点を $+10$ 度とした。

1714年、オランダ在住ドイツ人の工具職人Gabriel D. Fahrenheitは高精度のアルコール温度計を作り、塩の凍結物によって得られる当時の最低温度を 0 度とし健康人の体温を 24 度として目盛り付けをした。ただし、後になってこの目盛りは粗いとして人体温度を 96 度に変更した。彼はこの定義により水の氷点と沸点を測定して、それぞれ 32 度と 212 度であるとした。そして、1724年これら 2 点をFahrenheit目盛りの定点とした⁴⁾。これを日本で華氏目盛りと呼ぶのは、彼の名が中国で華倫海と書かれたことによる。後述の摂氏目盛りは、やはり中国でCelsiusの名が摂爾修と書かれたことによる⁵⁾。つまり、近世ヨーロッパで発達したこの種の科学は、中国経由で日本に伝わったようだ。

今日最も広く使われている摂氏目盛り($^{\circ}\text{C}$)は、スウェーデンのウプサラ大学天文学教授のAnders Celsiusに由来する。彼は1742年、水の沸点と氷点を 100 等分して上の温度を 100 度、下を 0 度とした温度計を発表した²⁾。

1.4 絶対温度の発見

フランスのJoseph Gay-Lussacは1802年から1808年にわたって定圧下での気体の容積と温度の関係について研究し、熱膨張率が気体の種類によらず 1°C 当たり $1/267$ と一定であることを発見した。その後、多くの実験値を整理すると正確にはこの熱膨張率は $1/273.15$ であることがわかった。すなわち、理想気体が冷却されて容積を持たなくなる温度は -273.15°C となる。英国のグラスゴー大学物理学教授William Thomsonはこの温度を基点とした目盛りで表される温度を絶対温度とした(1848年)。すなわち、従来の温度目盛りが物質の相転移温度との相対値であるのに対し、この温度目盛りは絶対的な温度値を与えるからである。因みに、絶対温度の単位がKelvinであるのは、Thomson教授が爵位を賜って以来、大学キャンパスを流れる川の名に因んで自らをLoad Kelvin(ケルビン卿)と名乗ったことによる⁶⁾。

1948年Celsius目盛りの 0 度は水の三重点より 0.0100 度

Table1 Defined constant points of ITS-90⁷⁾

番号	温度 (K)	($^{\circ}\text{C}$)	物質	状態
1	4.2221	-268.927	^4He	沸点
2	13.8033	-259.3467	e-H_2	三重点
3	17.035	-256.115	e-H_2	33321.3Paの蒸気圧点
4	20.27	-252.88	e-H_2	101292Paの蒸気圧点
5	24.5561	-248.5939	Ne	三重点
6	54.3584	-218.7916	O_2	三重点
7	83.8058	-189.3442	Ar	三重点
8	234.3156	-38.8344	Hg	三重点
9	273.16	0.01	H_2O	三重点
10	302.9145	29.7646	Ga	融点
11	409.7485	156.5985	In	凝固点
12	505.078	231.928	Sn	凝固点
13	692.677	419.527	Zn	凝固点
14	933.473	660.323	Al	凝固点
15	1234.93	961.78	Ag	凝固点
16	1337.33	1064.18	Au	凝固点
17	1357.77	1084.62	Cu	凝固点

低い値と決められたので、1954年に熱力学温度の目盛りがKelvinとされて以来、水の三重点は 273.16K とされている。

1.5 基準温度としての定義定点

温度計の目盛りを共通化するためには、統一された目盛り付けが必要になる。P. Chappuisは1880年代後半にフランス製の良質ガラスを用いて水銀温度計を作り、 0 から 100°C までの目盛りを正確につけた。これが共通目盛りとして多くの国で利用された。1887年に国際度量衡総会が開かれ、標準気圧下での水の融点と沸点をそれぞれ 0°C および 100°C とすることが決議された。1900年代の初頭に、H. L. Callenderは 550°C までの目盛りを白金抵抗温度計につけた⁴⁾。

初めて国際温度目盛りが制定されたのは1927年のことで(ITS-27)、1948年にその改訂版が採用され(IPTS-48)、以後1968年のIPTS-68、1976年のEPT-76と修正が続けられ、現在では1990年に改訂されたITS-90(Table 1)が用いられている。

2 種々の測定法

2.1 温度測定に利用される諸原理

物体の温度が変化すると、機械的、電氣的、磁氣的、または光学的性質が変化することがある。これらの現象を利用することで温度を測ることができる。主な原理と温度測

Table2 Principles and sensors used in thermometry⁸⁾

物性	原理	センサー	出力
機械的	液体の体積変化	ガラス管温度計	液位
機械的	液体または気体の体積変化	ブルドン管	変位
機械的	熱膨張	二種の金属片	変位
機械的	固有振動数の変化	水晶振動子	周波数
電氣的	ゼーベック効果	熱電対	電圧
電氣的	電気抵抗の変化	白金など金属	電気抵抗
電氣的	電気抵抗の変化	酸化物焼結体	電気抵抗
電氣的	電圧変化	トランジスタ	電圧
磁氣的	磁気特性の変化	フェライト	磁気特性
磁氣的	核四重極共鳴周波数の変化	KClO ₃	周波数
光学的	光励起の蛍光の変化	蛍光体	蛍光
光学的	半導体の光吸収	GaAs	光強度
光学的	光のエネルギー	シリコンセル	電圧・抵抗

Table3 Comparison between contact-type and uncontact-type measurements(after JIS Z 8710)

	接触式	非接触式
対象物の温度変化	起こる	起こらない
運動中の対象物	測定困難	測定可能
対象物内の測定位置	任意	表面
測定温度範囲	-270~2400℃	-50~3500℃
測定精度	±0.1℃程度	±10℃程度
指示遅れ	大きい	小さい
価格	安価	高価

定センサーをTable 2 にまとめた。

温度測定の方式は接触式と非接触式に大別される。接触式ではセンサーを対象物に接触させ、熱平衡に達したときのセンサー自身の温度を計る。多くの温度計はこの方式である。一方、非接触式では主として対象物からの熱放射によってその表面温度を測る。Table 3 に両者の特徴を示す。

2.2 温度計の種類

温度計にはガラス製温度計、熱電対温度計、抵抗温度計、放射温度計などの他に、蒸気圧温度計やバイメタル温度計などもある。鉄鋼業で最も多く使用されているのは放射温度計で、続いて熱電対、抵抗温度計の順に多く使われる¹⁾。主な温度計について以下に述べる。

(1)熱電対温度計

1821年にドイツのT. J. Seebeckによって発見された金属の熱電流現象(Seebeck効果)が温度計に利用されてき

Table4 Several types of thermocouples

型	+側の材料	-側の材料	測定温度範囲(℃)
B	Pt-30%Rh 合金	Pt-6%Rh 合金	0 - 1800
R	Pt-13%Rh 合金	Pt	0 - 1700
S	Pt-10%Rh 合金	Pt	0 - 1700
K	Ni-Cr 合金	Ni 基合金	-200 - 1300
E	Ni-Cr 合金	Cu-Ni 基合金	-200 - 1000
J	Fe	Cu-Ni 基合金	-200 - 1200
T	Cu	Cu-Ni 基合金	-200 - 400

た。すなわち、Seebeck係数の異なる2種の導体を用いて、熱起電力により両端の接点間の温度差を測定する。感温部が小さいことが最大の特徴で、測温対象物の温度を乱さずに応答の速い測定ができる。素線を0.1mm程度まで細くすることができるし、箔を使えばさらに小さい感温部が得られる。Table 4 に示すように、広い用途に利用できる素線の組み合わせがJIS規格で定められている。

Table 4 では、-200℃から1800℃までの範囲内の様々な温度で使われる熱電対の種類をまとめたが、1800℃以上の高温を測定できるものとしてIr-40%Rh/Ir熱電対(600~2000℃)、W-5%Re/W-26%Re熱電対(0~2400℃)がある。また、-200℃以下の低温を測定できるものとしてNi-Cr基合金/Au-0.07%Fe熱電対(1~300K)、Ag-0.37Au/Au-0.03Fe(1~40K)がある。

原子炉では1000~1350℃のガス温度を測定する要求がある。温度域からはPt-Rh系の熱電対が選ばれるべきであるが、ロジウムの中性子放射化断面積が大きいためにこれらは不適切である。この用途ととして、Pt-5%Mo/Pt-0.1%Mo熱電対が検討されている。また、熱雑音を利用して、原理的に中性子線の影響が全くない高温用熱雑音温度計が開発されている。

(2)抵抗温度計

19世紀末にドイツのE. W. von Siemensが白金抵抗温度計を提案して以来、高温まで精度良く温度測定ができるようになった。高純度白金線を用いたものはあらゆる接触温度計の中で最も正確である。抵抗と温度の関係はほとんど直線で、注意深く取り扱えば0.1~0.001℃の再現性が数年にわたり可能である。測定範囲も約10K~1000℃までと広い。白金以外の感温材料も多くある。サーミスター(Thermistor, Thermally Sensitive Resistor)は金属酸化物の複合焼結体で、抵抗値の対数と絶対温度の逆数が直線関係にあり、0.01℃程度の精度が得られる。指度の安定性も0.01℃/年と優れている。

(3)放射温度計

すべての物体は表面から熱放射エネルギーを放出しており、その大きさは物体の温度と一定の関係があるので、熱放射エネルギーの大きさを測定すると温度が知れる。以下に放射温度計の種類と特徴を述べる。

単色放射温度計では光学フィルターにより測定波長幅を狭くして(単色化)、シリコン製検出素子を用いて放射エネルギーの大きさを測定している。**光温度計**では、これと原理は同じであるが検出素子を使わずに、赤色に相当する波長のエネルギーを人間の目で簡易的に測る。つまり、温度計に備えられた電球フィラメントの輝度と測定物体の輝度を比較して、両者が同じに見えるときのフィラメント電流から対象物の温度を知る。**部分放射温度計**では比較的広い範囲の測定波長幅の放射エネルギーを検出する。**全放射温度計(赤外線温度計)**では赤外線による輻射熱を検出素子を用いて測定し、その温度上昇から物体の温度を知る。**2色温度計**では2種類の波長における放射エネルギーの関係を利用して温度を測定する。3種類以上の波長を利用する試みもあり総合して多色放射温度計と呼ぶ。

上記の放射温度計では放射エネルギーが測定対象物から空間を介して検出器まで伝えられるが、**光ファイバー放射温度計**ではこのエネルギー伝達経路に光ファイバーを用いる。この場合、電磁場やマイクロ波の影響を除けるし、障害物の裏側の温度も測れる。また、これまで述べた放射温度計では集光面内の平均温度が測定されるが、**走査放射温度計(サーモグラフィー)**では走査機構を用いて対象物の温度分布を測定し、それを画像表示できる。

放射温度計に用いられる種々の検出素子をTable 5に示す。検出素子は最も重要な構成要素で、温度計の性能を左右する。検出素子は、放射エネルギーを熱として感知し電気信号に変換するもの(熱電式)と、光としてとらえて光电効果を利用して検出するもの(光电式)に大別される。他に、二色式と走査式がある。

Table5 Sensor elements used for radiation thermometers^{8,9)}

種類	波長 (μm)	温度 (℃)	原理
サーモパイル	1.0~20	-50~500	多数の熱電対を直列接続
集電素子	1.0~30	-50~1000	温度変化で発生する電荷を測定
Si	0.6~1.1	400~3000	光起電力
Ge	0.8~2.0	200~800	光起電力
PbS, PbSe	0.8~3.0	150~800	光導電
HgCdTe, InSb	2.0~20	-30~1000	光導電, 光起電力



温度測定上の留意点

3.1 温度計の選択と使用上の工夫

どの程度の精度を求めるのかをあらかじめ見極めておくことは、計測の種類を問わず重要である。実用温度計の精度は一般に $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 程度が限度と考えればよいが、これより高い精度が必要なときや長期にわたっての温度変化を問題にするときには、標準温度計や温度定点装置などで目盛り校正や指度の確認を定期的に行う必要がある。また、代表温度が目的精度の範囲で安定するよう工夫したり、センサーの接触などによる熱的乱れの程度も考慮しておく必要がある。一方、温度制御用のサンプリング測定などのように短時間の温度変化を問題にするときには、温度計の感度、応答性、短期安定性などに注意する必要がある。接触式温度計の場合に必ず伴う指示遅れは、センサーの熱容量を小さくしたり対象物を流動させたりすることによってある程度軽減できる。例えば空気温度測定では、流動があると指示遅れは1/4程度に軽減できる。

対象物が発熱吸熱や物質移動を伴う場合には、多チャンネル式測定器を用いて多くの位置で測定し対象物内部の温度分布を把握すると、現象の理解に役立つ。ただし、この場合には変化中の状態を測定するので対象物とセンサーの熱平衡が得にくいこと、多くのセンサーの挿入が対象物の温度分布を乱すことなどに注意しなければならない。

対象物の温度がかなりの高速で変化するときには、測定温度の追随性を考慮しなければならない。1.1で触れたように、温度は本来熱平衡にある系で定義されるものなので、変動があまりに大きいときには測温の意味や目的を再検討する必要がある。このような条件下では放射温度計が推奨されるが、精度よく測定するためには、次に述べるように、放射率の扱いが重要になる。

3.2 放射率の扱い

黒体(完全放射体)から放射されるエネルギーは、Planckの法則により、物体の温度とそこから発する放射光の波長の関数で記述される。しかし、実際の物体は黒体ではなく、そこからの放射エネルギーは理論値より常に小さい。理論値に対する実測値の比を放射率という。放射率は波長に依存し、また物質の種類と温度によって異なる。さらに、同じ物質および温度であっても光沢や凹凸などの表面性状によって変化する(測定状態での放射率を実効放射率という)。放射率の扱いはかなり厄介ではあるが、実測放射エネルギーから理論放射エネルギーを推測して、それをもとに温度を算出するためには、どうしても実効放射率の値を必要とする。以下に、放射率の扱いの例を紹介する。

(1)実効放射率の値を1とみなせる条件

一般に、穴の底の温度を測るとき実効放射率は大きくなる。このとき穴が深いほど、また穴が細いほど、実効放射率は増加して1に近づく。例えば表面での実効放射率が0.5であっても、穴の深さ／半径比が10のときには実効放射率は0.99となる。この原理を利用して、NKKの山田ら¹⁰⁾やヘリオスの山中ら¹¹⁾は溶融金属の温度を測定するための消耗型光ファイバー放射温度計を開発した。すなわち、直径125 μ mという細い光ファイバーを溶鋼中に浸漬し、その先端部からの放射エネルギーを測定した。

これと同じ原理を用いた接触式測温器として、オプ्टカップル方式とサファイヤロッド方式の光ファイバー放射温度計がある。前者では光ファイバー先端に付けた閉端管内部の放射エネルギーを測定し、後者では直径1.27mmのサファイヤロッド表面にスパッタリングした白金膜内面の放射エネルギーを測定する。いずれの場合も先端を対象物に接触させて測温する。

(2)実効放射率の値が既知の条件

通常、放射率の値は未知なので、あらかじめ測定しなければならない。すなわち、熱電対などの方法により真の温度を測定し一方で放射温度計で測定して、両者を比較して放射率を求める。市販の放射温度計には放射率補正のつまみがあるので、これを回して真温度に合わせると、そのときの目盛りから放射率が知れる。ただし、ここで得られる放射率の値には一般性がなく、用いた放射温度計についてのみ有効である。最近、オンラインで放射率を実測する検討も行われている¹²⁾。

(3)実効放射率の値が再現可能である条件

工業現場においては、真の温度値が不明であってもそれとの差が一定である測定値が再現性をもって得られれば目的を達するという条件がある。例えば時間経過に連れて表面酸化が連続的に起こる場合には、それに伴って実効放射率の値が連続的に変化する。その条件が毎回同じであれば、その実効放射率の値は再現可能といえる。このような場合、測定温度でプロセスの管理を行うことができる。

3.3 データ採取

2.1で触れたように、直接の測定量は電気抵抗や電圧であり、温度値はこれらから換算して得られる。多くの温度測定器ではデータ処理のプログラムが組み込まれているので、換算前のデータの測定精度の他に換算式の適用範囲や誤差範囲に注意することが大切である。

測定に際して、何の目的で何を計ろうとしているのか、重要視する測定量は何であるのかなどについて、あらかじめ検討しておくことは重要である。Table 6 に測定に際し

Table6 Items to be examined before measurement
(after JIS Z 8710)

検討事項	検討内容
対象の状態	固体、液体、気体 温度域の概略 運動（流動）の速度 温度変化の速度 発熱・吸熱の有無 熱流の有無
採取情報の種類	局部温度、代表温度 表面温度、内部温度 瞬間温度、平均温度 絶対値、相対値 温度値、温度差、温度変化
その他	温度計の選択と設置方法 温度計が測定対象に及ぼす影響 環境因子が測定に及ぼす影響

での基本的検討事項を示すので参考にされたい。

炉内に置かれた測温対象物の表面温度を放射温度計で測定する場合、炉壁などの高温物体があってそこからの放射光が測温対象物に反射して測定機器に入光すると、測定誤差の原因となる（迷光雑音）。このような場合、耐火物で断熱した水冷プローブを放射シールドとして用いるなどの工夫が必要である^{1,9)}。

炉内の雰囲気温度を熱電対で測定するとき、差し込み誤差¹³⁾が生じる。これを防ぐためには保護管外径の15～20倍以上の差し込み深さが必要である。管内を流れる気体や液体の温度を測定するときも同様であるが、この場合、管の内径によっては十分な差し込み深さが得られないことがある。このようなときには、熱電対を管の側面から斜めに差し込んだり管の曲がり部を利用して管の軸方向に差し込んだりすると、十分な差し込み深さが得られる。

流体の温度を測定する際、通常、温度計は静止している。この時の測定値は、流体の真の温度と異なる。流れをせき止めると流体の運動エネルギーが熱エネルギーに変換されて温度が上昇するからである。このときの温度上昇分は動温と呼ばれ¹⁴⁾

$$\Delta T = v^2 / (2C_p) \dots\dots\dots (5)$$

で表される。ここで、 v は流速(m/s)、 C_p は比熱(J/(kg・K))である。高速で流れる気体の温度を測定する際には大きな誤差の原因となるので、注意を要する。

4 おわりに

以上、温度測定の基礎事項について記述した。気楽に読めるようにという編集者からの要望を入れて書いたので、一部の専門家諸兄は読後に物足りなさを感じたかも知れない。他に多くの優れた著述があるので^{1,15-20)}、高度で専門的内容について深く知りたい読者はこれらを参考にして頂きたい。

4.1 発展を続ける温度測定技術

温度測定技術の歴史はまだ浅く、以下に最近の研究例をあげるように、現在でも多くの測定法が開発され続けている。

1990年、東京大の前田ら²¹⁾は一酸化炭素の振動回転スペクトルの形状から温度を測定する方法を提案した。

1994年、名古屋大の原ら^{22,23)}はラマンスペクトル形状の温度による変化を利用して、CARS(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering)による温度計測を提案した。

1995年、九州大の藤井ら²⁴⁾は物体に超音波を照射して物体内の音速分布を計測し、音速と温度の関係を利用して物体内部の温度分布を求める方法を提案した。

1996年、東洋大の鶴川屋ら²⁵⁾は放射率の入射角依存特性と偏光特性を利用して、表面酸化による金属表面の放射率変動を補正できる温度測定法を提案した。

1997年、大阪大の桃瀬ら²⁶⁾やクラリオンの森本ら^{27,28)}は、感温液晶内層間のピッチが温度に対応して変化し反射波長のスペクトルが変化する現象に着目し、伝熱面の二次元温度分布の可視化および定量化にこの現象を応用した。

1998年、大阪大のSatoら²⁹⁾は紫外線領域の放射光を利用して、溶鋼中の温度分布を測定した。

1998年、広島大の吉崎ら³⁰⁾はディーゼル燃料に蛍光材(ピレン)を混合し、燃焼室内に照射したレーザー光によるピレンの蛍光を面計測することにより、燃料噴霧内の液相温度分布を測定した。

1998年、名古屋大の中山ら³¹⁾は酸素のレーザー誘起前期解離蛍光法(Laser-Induced Predissociative Fluorescence Method, O₂-LIPF)を用いて、高温空気自由噴流の流れ場における二次元温度計測を行った。

1996年、大阪大の小宮山らは微小時間差を持つ2枚のレーリ-散乱強度画像からその強度むらの移動速度を測定して、速度と温度の瞬時2次元分布を同時に検出するRIV法(Rayleigh Scattering Image Velocimetry)を開発し³²⁾、さらに1999年、これにレーザー誘起蛍光法によるOH濃度2次元測定を組み合わせる乱流拡散火炎の温度・速度・濃度の二次元同時計測ができる方法を提案した³³⁾。

1999年、東京工大の井下田ら³⁴⁾は試料表面に高熱膨張率

を持つPMMAポリマー(polymethylmethacrylate)を被覆し、その熱膨張信号から試料表面温度を求める方法を開発した。この方法を用いると分解能20nmのサブミクロンスケール試料の測温が可能になり、接触熱抵抗が大きくなるため測温プローブの使用が困難な場合に应用できる。

今後、工学が対象とする温度範囲が拡大するにつれて、また工業における温度制御が高度化および多様化するにつれて、温度測定技術はますます重要になるので、温度測定技術のさらなる発展が望まれる。

本稿をまとめるに当たり、北海道大学大学院工学研究科教授工藤昌行先生には有益な助言を多く賜った。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田村洋一：鉄と鋼，79(1993)，750.
- 2) 世界大百科事典4，下中邦彦編，平凡社，(1980)，559.
- 3) W. J. Moore著，藤代亮一訳：物理化学第4版—上—，東京科学同人，東京，(1976)，11.
- 4) The Encyclopedia of Physics 3rd. Ed, ed. by R. M. Besancon, 池田光男，大沼 甫，深井 有記，朝倉書店，東京，(1989)，91.
- 5) 岩波理化学辞典第3版，玉虫文一編集，岩波書店，東京，(1976)
- 6) 後藤憲一：新しい物理へのアプローチ基礎から最先端まで—，共立出版，東京，(1991)，38.
- 7) 第4版実験化学講座1基本操作I，日本化学会編，丸善，東京，(1990)，72.
- 8) 松山 裕：省エネルギー技術実践シリーズ—温度の測定と制御—，省エネルギーセンター，東京，(1989)，3.
- 9) Y. Tamura, M. Tatsuwaki, T. Sugimura, T. Yokoi, M. Sano and M. Koriki: Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, 5 (1982), 505.
- 10) 山田善郎，大角 明，旗手崇文，前田浩史，松倉 孝，若井 造：NKK技報，150(1995)，22.
- 11) 山中善吉，山田善郎，山田健夫：鑄造工学，72(2000)，225.
- 12) 真鍋知多佳，赤松 勝，柳井敏志，鈴木紀生，寺井克浩，藤本真平：鉄と鋼，79(1993)，759.
- 13) 日本機化学会：技術資料流体計測法，日本機化学会，(1985)，747.
- 14) 谷 一郎，小橋安次郎，佐藤 浩：流体力学実験法，岩波書店，東京，(1977)，161.
- 15) 井内 徹：ふえらむ，2 (1997)，23.

- 16) 鈴木久夫, 大野二郎: 鉄と鋼, 64(1978), 1236.
- 17) 芹生浩之, 増野豈彦, 中島康久, 小川博之: 鉄と鋼, 79(1993), 765
- 18) 田中富三郎, 大平 尚, 増田正宏, 丸山孝一, 大浜光正: 鉄と鋼, 79(1993), 772.
- 19) 山本俊行, 平本一男, 植松千尋, 上田 潤: 鉄と鋼, 79(1993), 779.
- 20) 村田敏廣: 軽金属, 49(1999), 569.
- 21) 前田正史, 勝山雅則, 雀部 実: 鉄と鋼, 76(1990), 1474.
- 22) 原 豊, 藤本哲夫, 新美智秀, 大羽浩幸, 伊藤 智: 日本機化学会論文集(B編), 60(1994), 1035.
- 23) 原 豊, 伊藤 智, 新美智秀, 藤本哲夫: 日本機化学会論文集(B編), 61(1995), 622.
- 24) 藤井丕夫, 張 興, 熊森 徹: 日本機化学会論文集(B編), 61(1995), 1888.
- 25) 鶴川屋智之, 田添 晃, 井内 徹: 東洋大学工学部研究報告, 32(1996), 85.
- 26) 桃瀬一成, 本間康嗣, 木本日出夫: 日本機化学会論文集(B編), 63(1997), 683.
- 27) 森本俊一, 秋野詔夫, 一宮浩市: 日本機化学会論文集(B編), 63(1997), 2473.
- 28) 森本俊一, 秋野詔夫, 一宮浩市: 日本機化学会論文集(B編), 63(1997), 2480.
- 29) T. Sato, A. Okubo, T. Oji and Y. Hirata: Welding Int., 12(1998), 627.
- 30) 吉崎拓男, 竹村裕二, 久枝季文, 西田恵哉, 廣安博之: 日本機化学会論文集(B編), 64(1998), 2141.
- 31) 中山 浩, 石田敏彦, 児玉康司, 新美智秀: 日本機化学会論文集(B編), 64(1998), 4031.
- 32) 小宮山正治, 宮藤 章, 高城敏美: 日本機化学会論文集(B編), 62(1996), 3494.
- 33) 小宮山正治, 宮藤 章, 矢津田 修, 高城敏美: 流れの計測, 15(1999), 109.
- 34) 井下田真信, 井上剛良, J. Varesi, A. Majumdar: 日本機化学会論文集(B編), 65(1999), 457.

(2000年4月27日受付)