

放射温度計の標準目盛の値付けと リモートセンシングへの応用

佐久間 史 洋

放射温度計は非接触で高速にしかも高い温度まで測定できることから、鉄鋼の圧延工程などで利用されている。また、2次元の温度分布を測る熱画像装置が普及してきている。最近では鼓膜温を測定する放射温度計の体温計も1万円程度で販売されるようになった。ここでは主に高温域の放射温度計の標準目盛の値付け方法について紹介する。

1990年国際温度目盛 (ITS-90) によれば、銀の凝固点 (銀点) 961.78°C 以上の温度域では基準とする温度と測定する温度との黒体の放射輝度の比を用いて目盛を実現する (分光応答度目盛)。このとき、基準とする温度は銀点、金点 (1064.18°C) あるいは銅点 (1084.62°C) のいずれを用いてもよい¹⁾。計量研究所では $0.65\ \mu\text{m}$ シリコン放射温度計に ITS-90 の目盛を実現した。しかし、定点から離れた 2000°C 以上の温度目盛の信頼性を確認するのは単一の機関ではほとんど不可能であり、外国の標準機関との国際比較が必要であった。1993年に計量研究所主導で、米国、英国、イタリア、ドイツの研究所と放射温度計目盛の第1回持ち回り比較を行った²⁾。

次に国内の放射温度計のトレーサビリティ制度では、 $400\sim 2000^{\circ}\text{C}$ を測定温度範囲として、銅、銀、アルミニウム (660.323°C) および亜鉛 (419.527°C) の4台の定点黒体により $0.9\ \mu\text{m}$ シリコン放射温度計を校正して目盛を実現している (多定点目盛)。この方法は $420\sim 1085^{\circ}\text{C}$ の補間領域での信頼性が高く、国際温度目盛の2次的実現方法として採用されている³⁾。

3番目は抵抗温度計などの接触式温度計を標準として温度分布のよい黒体、また放射率の十分高い黒体を用いて放射温度計を校正する方法である (標準黒体目盛)。銀点以下の温度で ITS-90 に基づく目盛を放射温度計に実現するのはこの方法であり、計量研究所では現在トレーサビリティを常温まで拡張する研究を行っており、常温付近はこの目盛を採用する可能性が高い⁴⁾。

以下ではまず、1章で分光応答度に基づく目盛の実現と国際比較について、2章で多定点黒体による目盛と国内のトレーサビリティについて、3章で標準黒体を用いた校正方法について、4章では、放射温度計校正の技術を利用したリモートセンシングへの応用について述べる。

1. 分光応答度目盛

1.1 シリコン単色放射温度計⁵⁾

計量研究所で用いるシリコン放射温度計は、中心波長 $0.65\ \mu\text{m}$ 、バンド幅 $14\ \text{nm}$ のものと、中心波長 $0.9\ \mu\text{m}$ 、バンド幅 $80\ \text{nm}$ のものがある。その光学系を図1に示す。測定対象の像を対物レンズの位置を調節して孔の開いた鏡に結び、その孔からの透過光が干渉フィルターを通り特定の波長の光が光検出器シリコンフォトダイオードに導かれる。検出器で光電流に変換された後、演算増幅器とその抵抗により電圧に変換されて出力信号となる。一方、孔あき鏡での反射光は、ファインダー系に導かれ標的の位置合わせに用いられる。 $0.65\ \mu\text{m}$ 放射温度計の測定距離は $200\ \text{mm}$ から ∞ であり、 $250\ \text{mm}$ のとき標的面積が直径 $1\ \text{mm}$ の円となる。測温範囲が $900\sim 2800^{\circ}\text{C}$ であり、 900°C での温度分解能が 0.1°C 、 1000°C で 0.01°C である。 $0.9\ \mu\text{m}$ 放射温度計の測定距離

計量研究所熱物性部 (〒305 つくば市梅園 1-1-4)
E-mail: fsakuma@nrlm.go.jp

は 400 mm から∞であり、400 mm のとき標的面積が直径 3 mm の円となる。測温範囲が 400~2000°Cであり、400°Cでの温度分解能が 0.1°C、500°Cで 0.01°Cである。大きさが 435 mmL×180 mmH×80 mmW、質量約 4 kg と小型で持ち運びが容易である。検出器は温度制御されておらず、付近の温度を IC 温度センサーで測定して補正に利用している。

1.2 定点黒体炉による校正

計量研究所で開発された定点黒体の構造を図 2 に示す⁶⁾。銅、銀、アルミニウム、亜鉛、錫 (231.928°C)、インジウム (156.5985°C) の 6 種類で、各定点に 1 台炉が用意されている。操作が簡単で、Ar ガスを流し電源

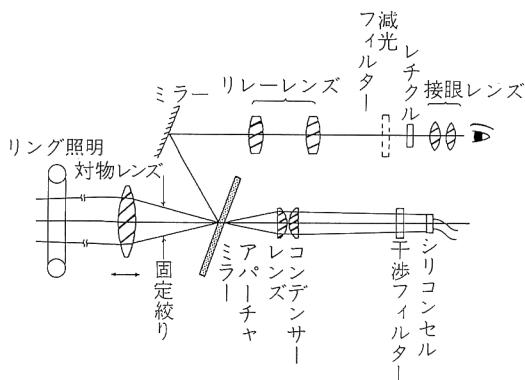


図 1 放射温度計の光学系。

と加熱のスイッチを入れて放っておくと、1~2 時間で凝固点の約 15°C 上の温度に保たれる。凝固点を実現したい時に加熱から徐冷にスイッチを切りかえれば、5 分後に図 3 のように過冷却を生じたあと、凝固のプラトーが 5~10 分持続する。プラトーの再現性は 0.1°C よりよく、他の同じ型の定点黒体との比較でも 0.1°C で一致する。放射率は 0.999 と評価されており、全体として 0.3°C よりよい不確かさである。

銅点および銀点黒体に対する 0.65 μm 放射温度計の出力の経年変化を図 4 に示す⁷⁾。銅点に対しては 1979 年から 90 年の 11 年間に 1.6% (1.4°C) の変化しかしておらず、放射温度計、定点黒体双方が安定であったことがわかる。この間、研究所の移転、黒体のつぼの交換等測定条件が変化したことも考慮すると、非常によい安定性であるといえる。84 年からの銀点についてのデータも同様な安定性を有し、出力の変化も銅点とよく対応している。そこで、両者の出力の比を図 5 に示す。6 年間のデータは 0.1% の範囲にあり、銅点を基準にした温度値に換算すると 0.1°C 以下の変化である。このことは、定点黒体炉の安定性は 0.1°C よりよく、測定条件を含めた放射温度計の安定性が図 4 に表れているといえる。

1.3 分光応答度測定

放射温度計の特性で定点校正の次に重要な点は、波長

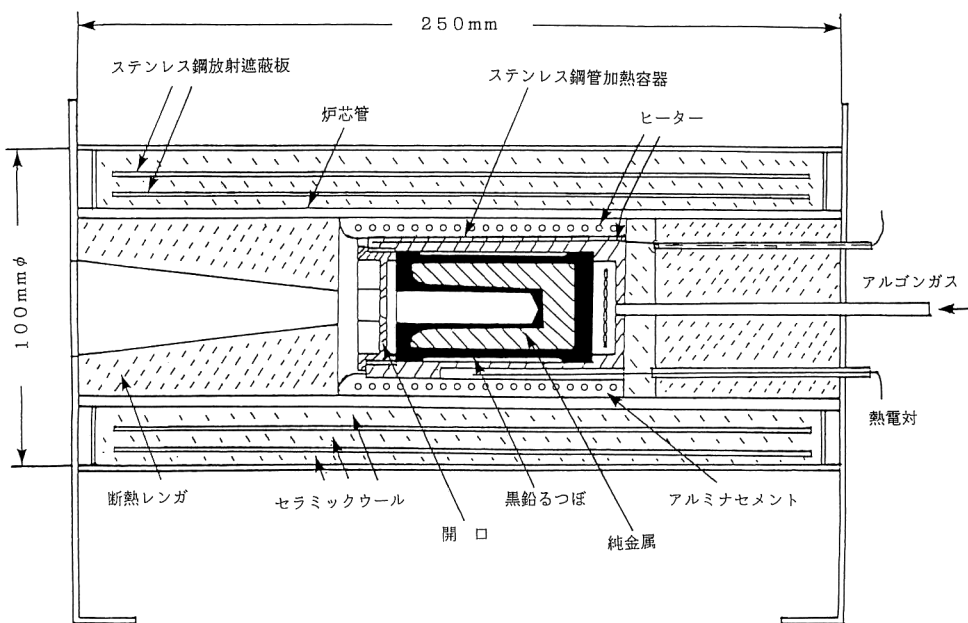


図 2 定点黒体の構造。

の評価である。主に干渉フィルターにより中心波長や幅が決まるが、検出器や他の光学系の影響も受ける。放射温度計の全体としての波長特性を調べるための分光特性評価装置⁹⁾は、図6に示すようにハロゲンランプを光源とし、焦点距離 25 cm のダブルの分光器を零分散で用いて迷光を減らしている。波長校正は水銀ランプの 11 の輝線を用いて 400~1100 nm まで 0.1 nm よりよい校正を毎測定日に行っている。標準検出器としては熱型検出器のサーモパイル、参照検出器にシリコンフォトダイオードを用い、最終的には放射温度計とサーモパイルの出力の比から放射温度計の分光応答度を求めている。分光応答度の測定値 $R(\lambda)$ から

$$V(T) = a \cdot \int L_b(\lambda, T) \cdot R(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

により温度 T における放射温度計の出力 V を計算する。ここで L_b はプランクの放射の式であり、係数 a は銅点黒体により値付ける。

図7にこの放射温度計の 0.4~1.2 μm の広い波長範囲の分光応答度のスペクトルを実線で示す²⁾。0.7~1.1 μm の領域までピークに対して 10^{-5} 程度の裾をひいている。この裾の部分からの銅点における放射温度計の出力全体への寄与は 1% であり、低温側でこの影響は大きくなり、目盛への影響は無視できない。そこで中心波長を決める干渉フィルターの他にバンド幅の広い干渉フィルターをもう 1 つ追加し、この裾を小さくした。図の点線で示したのが改造した結果であり、750 nm 以上でピークの 10^{-7} 以下に出力が下がっている。この結果放射温度計の実効的な波長の対象温度に対する依存性が小さくなり、波長を評価する精度が向上した。

1.4 リニアリティーの測定

式(1)が成り立つためには放射温度計の応答度の線形性がよいことが必要である。絞りを 2 つ用いて光を重ね合わせる方法を採用し、この放射温度計の非線形性の測定を行った。絞りの片方のみを開けたときの出力を A , B , 両方開けたときを $A \cdot B$, 両方閉じたときを Z とすると、非線形性 NL は次式で定義される。

$$NL = \frac{(A \cdot B - Z) - \{(A - Z) + (B - Z)\}}{A \cdot B - Z} \\ = \frac{A \cdot B + Z - (A + B)}{A \cdot B - Z} \quad (2)$$

図8に改良型の放射温度計の非線形性の測定結果を示す。光源には高輝度レベルでハロゲン電球および低輝度レベルで積分球を用いた。この 0.65 μm 放射温度計では 2700°C まで NL が $\pm 0.01\%$ 以下である。0.9 μm 放射温度計の場合 2000°C 以上で NL の絶対値が急速に大き

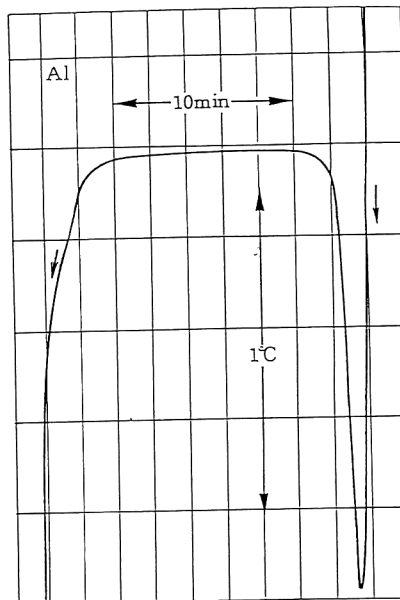


図3 アルミニウムの凝固点プラトーの測定例。

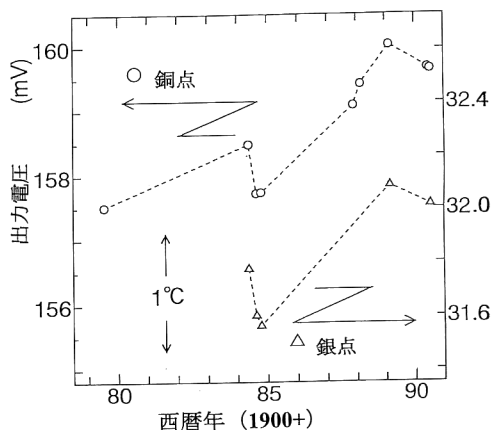


図4 経年変化 (定点)。

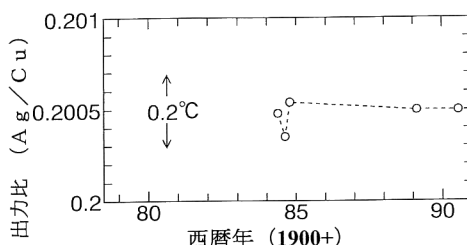


図5 経年変化 (定点の比)。

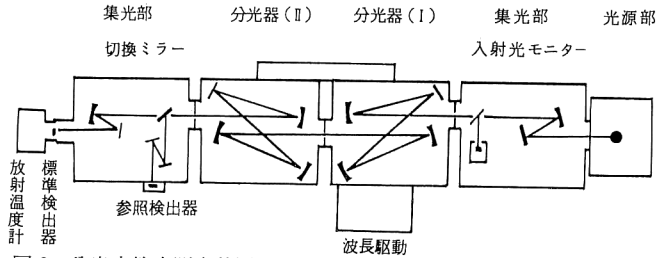


図6 分光応答度測定装置の光学系。

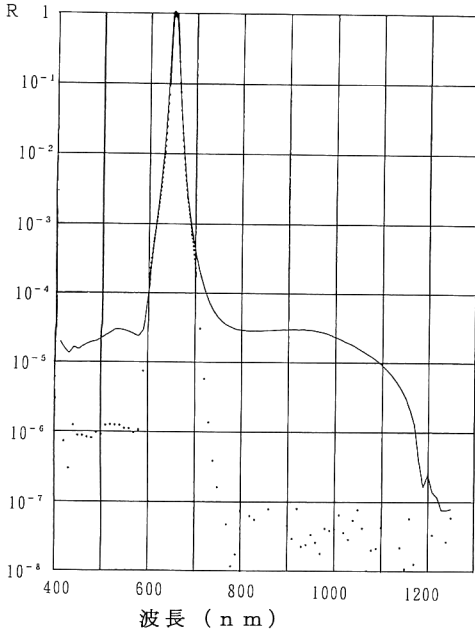


図7 分光応答度測定データの例。

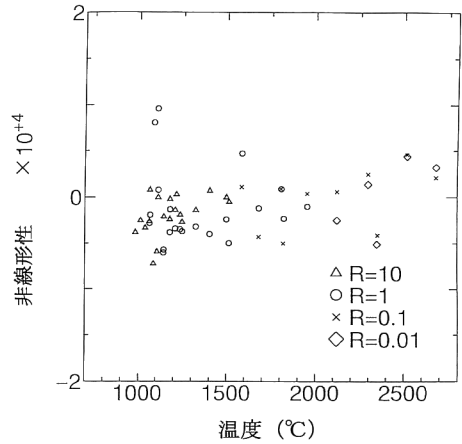


図8 リニアリティーの測定データ。

くなる。

1.5 特性式⁹⁾

式(1)の積分では出力信号 V から温度 T を直接求めることができず、複雑である。その精度を落とさず、少ない係数でこの関係を表すことが望ましい。ここでは

$$V = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right) - 1} \quad (3)$$

という3つの係数 A 、 B および C の特性式を用いた¹⁰⁾。ここで $c_2 = 0.014388 \text{ m} \cdot \text{K}$ は放射の第2定数である。 B がなければ A はプランクの式における波長を表しており、 B はバンド幅を有することから生ずる係数である。式(3)は持ち回りに用いた放射温度計の場合に $1000 \sim 2800^\circ\text{C}$ の範囲で、 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ よりよい一致で式(1)を近似する。

1.6 目盛の誤差評価

銅点黒体を用いた校正精度を $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 、分光応答度による実効波長の測定精度 $\pm 0.2 \text{ nm}$ 、非線形性を $\pm 0.01\%$ 、放射温度計出力の安定度を $\pm 0.3\%$ とすると、式(1)による温度目盛の不確かさは、 1085°C で 0.4°C 、 1500°C で 0.7°C 、 2000°C で 1.2°C 、 2500°C で 1.9°C 、 3000°C で 2.8°C であった。

1.7 国際比較

放射温度目盛の比較は従来は標準電球を用いて行われていた。外国の標準研究機関が所有する標準放射温度計は大型で重く、移送が困難であり、目盛は標準電球に、電流値に対する輝度温度の形で実現されていた。真空電球は 1700°C 以下で用いられ、安定であり再現性もよい。計量研究所での目盛付けの特徴は、持ち運び可能な小さな放射温度計に標準の目盛を値付けしたことである。この方法では黒体炉を用いて放射温度計相互を比較するので、標準電球の使えない 2700°C とした超高温域での比較も可能となった。

1回目の比較は平成5年5月から7月にかけて、放射温度計を携えて4機関を1週間ずつ訪問した。各研究機関の放射温度計は主として中心波長 $0.65 \mu\text{m}$ 、バンド幅 12 nm でシリコン検出器を用い、比較黒体炉は黒鉛

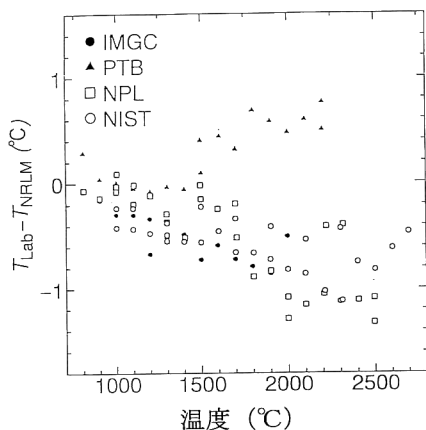


図9 相互比較結果，計量研究所の目盛からの差を示す。

の通電加熱炉で窓は使用しなかった。1000～2000°Cの範囲を共通して測定した。

米国国立標準技術研究所 (NIST) では、1000～2700°Cまでの比較を行った。NIST の放射温度計はバンド幅の狭いもので、光電子増倍管を検出器として用いていた。英国国立物理研究所 (NPL) では 1000～2500°Cまで黒鉛の通電加熱黒体を用い、800～1000°Cはインコネル黒体炉を用いた。イタリア・コロネッティ計量研究所 (IMGC) では標準の目盛を 0.65 μm と 0.9 μm で標準電球に値付けしており、0.9 μm の波長を今回の比較に用い、目盛は 2000°Cまでであった。ドイツ物理工学研究所 (PTB) では 900～1500°Cまで温度域は真空標準電球を、1500～2200°Cでは黒鉛黒体炉を窓を着けたまま用いた。

図9に国際比較の1回目の結果を持回り放射温度計の目盛 (計量研) からの差として示す。各機関とも 1000°Cで1°C、2000°Cで2°C以内で一致していた。2700°Cまで測った場合でも差は±2°C程度であった。NIST, NPL および IMGC の3機関の一致が非常によく、PTBは他と多少違う傾向を示した。いずれも持ち回り放射温度計の目盛の不確かさの範囲内であった。

2. 多定点目盛

平成5年に計量法が改正されトレーサビリティ制度が導入されるにともない、放射温度計のトレーサビリティも制度化された。国内のトレーサビリティ方式は、1章で述べた ITS-90 の実現とはやや異なる。各認定事業者が有する銅、銀、アルミニウムおよび亜鉛の4台の定点黒体により校正された 0.9 μm シリコン単色放

射温度計の目盛を 400～2000°Cまで用いる。特性式は式(3)を近似した次の式を用いる。400～1100°Cでは 1°C、1600°Cで 4°C、2000°Cで 8°Cの不確かさで目盛が実現できると評価される¹⁰⁾。

$$V = C \exp\left(-\frac{C_2}{AT+B}\right) \quad (4)$$

標準の流れとしては計量研究所の定点黒体群 (特定標準器) で指定校正機関の日本電気計器検定所 (日電検) の定点黒体群 (特定副標準器) の試験、日電検が認定事業者の定点黒体群 (特定2次標準器) の試験を行い、定点黒体間が 0.1°Cで一致するというを確認する。この方式の特徴は 400～1100°Cの温度域での認定事業者の実現する放射温度目盛の不確かさが小さい点である。認定事業者の技術の確認は 0.9 μm シリコン放射温度計を持ち回って、各参加機関が自ら値付けした自らの目盛と持回り放射温度計の目盛とを比較し、その一致の程度を調べることにより行われる。ブラインドテストであり、2年に1回行われ、現在までに4回の持ち回り測定が行われた。現在放射温度計メーカー4機関および日電検が放射温度計の認定事業者になっている。

計量研究所では持ち回り測定の前に 0.9 μm シリコン放射温度の分光応答度の測定を行って ITS-90 の目盛も実現しており、両者の目盛の差は銅点で係数を決めた後、他の3定点での偏差が±0.1°C程度である。このようにして多定点目盛と分光応答度目盛の間の差が小さいことを確認している。

近年 1.6 μm に感度のピークを有する InGaAs フォトダイオードの性能が向上し、シリコンに似た使い方が可能となった。計量研究所で試作した InGaAs 放射温度計では、低温側 150°Cまで測定可能であり、6台の定点黒体の校正による多定点目盛の定点における偏差が±0.05°C以内であった。また、分光応答度目盛との一致も±0.15°Cに収まっていた。価格、色収差および面積効果が課題であり、標準放射温度計としての性能の向上が期待される¹¹⁾。

3. 標準黒体目盛

150°C以下の温度域では常温の背景からの熱放射が無視できなくなる。また、波長も 3 μm 以上となり、検出器を低温に冷やす必要が生じるし、光学材料も制限されてくる。このような事情からこれまで常温域で性能のよい標準放射温度計が製作されていない。また、200°C以下の温度域では液体循環黒体およびヒートパイプ黒体の使用が可能であり、温度分布の一様で放射率の高い大型

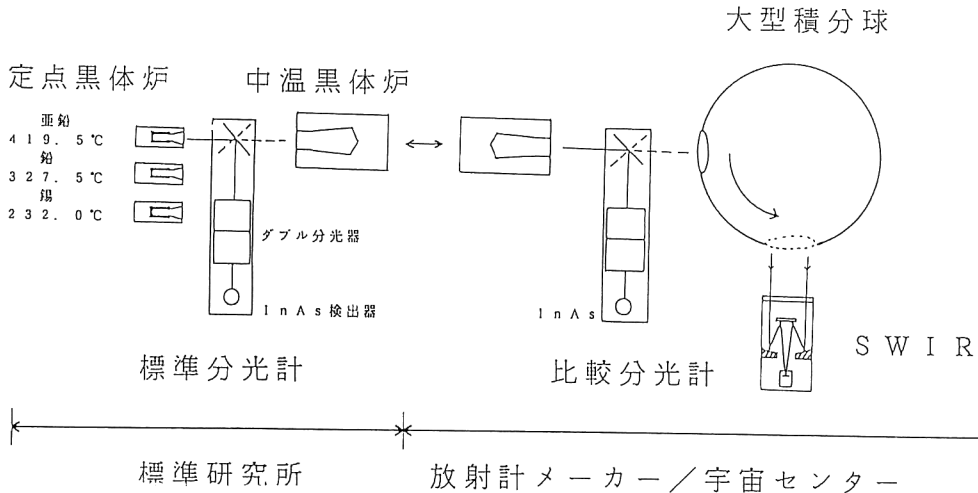


図10 JERS-1のSWIRの地上校正システム。

の標準黒体が製作できる。このため、200°C以下の温度域では白金抵抗温度計等を標準として標準黒体を用いたトレーサビリティが実現されると予想される。もちろん黒体相互の比較、性能評価のために性能のよい放射温度計の開発も必須である。

4. リモートセンシングへの応用

宇宙から地球を観測する人工衛星に搭載される放射計は、3 μmより短い波長では太陽光の反射、それより長い波長では地球からの熱放射を観測している。放射計は分光放射輝度を測定しており、その測定原理は放射温度計と全く同じである。これらの放射計の校正は、衛星打ち上げ前の地上校正と打ち上げ後の軌道上校正がある。後者はさらに放射計に付属する電球や黒体による校正(オンボード校正)と地上の砂漠などの標的を利用した校正(バイカリアス校正)に分かれる。ここでは、放射温度計の校正技術を応用した地上校正技術とその相互校正測定について紹介する。

4.1 地上校正システム

1992年に打ち上げられた芙蓉(JERS-1)の光学センサー(OPS: optical sensors)は0.5~0.8 μmに3バンドを有する可視近赤外放射計(VNIR: visible and near infrared radiometer)と1.6~2.5 μmに4バンドを有する短波長放射計(SWIR: short wave infrared radiometer)とからなる。SWIRの地上校正システム¹²⁾は図10に示すように、定点黒体を標準、温度可変黒体(中温黒体)をトランスファー標準、大型積分球を作業標準として放射計を校正する。NIST等の標準電球を用いる方法に比べて、手間がかかるが信頼性は高い。

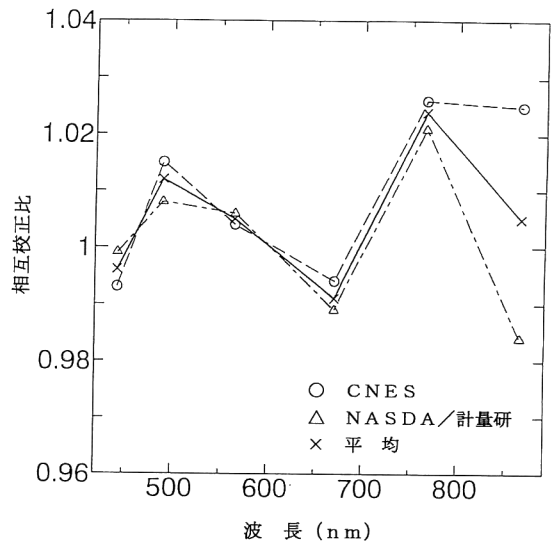


図11 OCTS-POLDERの相互校正の結果。両積分球の校正の整合性を示す。

技術的には黒体と積分球という輝度分布の異なる光源同士の比較が難しい。この校正システムは1996年に打ち上げられたADEOS (advanced earth observing satellite)の海色海温センサー(OCTS: ocean color and temperature scanner)および1998年にNASAから打ち上げ予定のEOS AM-1のASTER (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer)のVNIRおよびSWIRにも用いられている。

4.2 相互校正

最近いろいろな地球観測衛星が打ち上げられており、ADEOSのように1台に8つのセンサーを積むものもあ

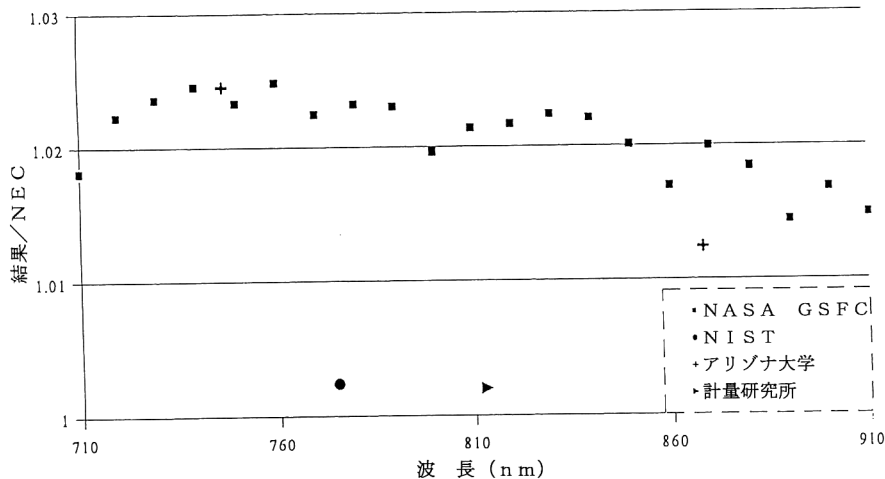


図12 ASTER VNIRの相互校正の結果。参加4機関の測定のNECの校正値からの差を示す。

る。地球環境観測では継続的な観測が重要であり、そのためにはセンサー間の校正の整合性をとることが必要となる。ADEOSのOCTSとフランスCNES (Centre National d'Etudes Spatiales)の提供したPOLDER (polarization and directionality of earth's reflectances; 地球反射光観測装置)とは可視近赤外域のバンドのうち6つのバンドで中心波長とバンド幅を同じにしてデータの複合利用を図った。OCTS-POLDER相互校正は当初CNES側から提案され、NASDA (宇宙開発事業団: National Space Development Agency of Japan)-計量研究所が、共同研究としてCNESとともに1994年3月から4月にかけてツールズと横浜で測定を実施した。図11はOCTS積分球とPOLDER積分球との校正の整合性を示したもので、860nmを除いた5つのバンドについてCNES側と日本側の相互校正測定がよく一致していた¹³⁾。また、比自身も±3%以内に収まっていた。

EOS AM-1衛星には5つのセンサーが搭載され、そのうち通産省が開発しているASTER, NASAのMODIS, JPL (Jet Propulsion Laboratory)のMISRの間の相互校正測定が行われている。参加機関はNASA・GSFC (goddard Space Flight Center), NIST, アリゾナ大学, そして計量研究所であり、図12には1995年2月に行われた第1回ASTERのVNIRの相互校正測定の結果をバンド3について示す¹⁴⁾。VNIRのメーカーNECの校正からの参加機関の測定の差を示しており、全機関の測定値が3%以内に収まっている。特に異なる標準, 異なる値付け方法からもよい一致が得られ

たことは、この地上校正の信頼性が高いことを示している。

放射温度計の標準目盛設定とリモートセンシングへの応用について紹介した。多少とも諸兄の参考になれば幸いである。

文 献

- 1) 計量研究所: "1990年国際温度目盛 (ITS-90)", 計量研究所報告, 40 (1991) 60-69.
- 2) F. Sakuma, H. Sakate, B.C. Johnson, C. Gibson, G. Machin, T. Ricolfi, M. Battuello, J. Fischer and H.J. Jung: "Intercomparison of radiation temperature scales among five national metrological laboratories using a transfer standard radiation thermometer," *Metrologia*, 33 (1996) 241-248.
- 3) R. E. Bedford, G. Bonnier, H. Maas and F. Pavese: *Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990*, CCT in BIPM (Progamon Press, Sevres, 1990) pp.104-106.
- 4) 石井順太郎: "赤外放射を用いた常温域の放射温度計測技術に関する調査研究", 計量研究所報告, 46 (1997) 178-189.
- 5) 佐久間史洋, 服部 晋: "シリコン単色放射温度計を用いた実用温度標準の確立のための検討", 計測自動制御学会論文集, 18 (1982) 482-488.
- 6) 佐久間史洋, 服部 晋: "実用形定点黒体炉の試作", 計測自動制御学会論文集, 18 (1982) 52-57.
- 7) 佐久間史洋, 小野 晃, 服部 晋: "0.65 μm シリコン放射温度計の目盛の安定性", 計測自動制御学会講演会予稿集, (1993) pp.329-330.
- 8) 小野 晃, 佐久間史洋, 服部 晋: "可視・近赤外域放射温度計の分光応答度分布測定", 計測自動制御学会論文集, 23 (1987) 407-409.
- 9) F. Sakuma and M. Kobayashi: "Interpolation equation of scales of radiation thermometers," *Proc. of 6th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science in Torino* (1996).

- 10) 佐久間史洋, 小野 晃, 服部 晋: “単色放射温度計による実用高温度標準”, 計測と制御, **33** (1994) 415-421.
- 11) 佐久間史洋, 小林正信, 石井順太郎: “InGaAs 放射温度計の製作と校正”, 計測自動制御学会講演会予稿集 (1997) pp. 277-278.
- 12) F. Sakuma and A. Ono: “Calibration of the EOS ASTER instrument,” *Metrologia*, **30** (1993) 231-241.
- 13) F. Sakuma, T. Bret-Dibat, H. Sakate, A. Ono, J. Perbos, J. -M. Martinuzzi, K. Imaoka, H. Oaku, T. Moriyama, Y. Miyachi and Y. Tange: “POLDER-OCTS preflight cross-calibration experiment using round-robin radiometer,” *SPIE Proc.*, **2553** (1995) 232-243.
- 14) F. Sakuma, B. C. Johnson, S. F. Biggar, J. J. Butler, J. W. Cooper, M. Hiramatsu and K. Suzuki: “EOS AM-1 preflight radiometric measurement comparison using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) visible/near infrared integrating sphere,” *SPIE Proc.*, **2820** (1996) 184-196.

(1997年9月1日受理)