



基礎から学ぶ光学センサの校正

監修 小野 晃 / 松永恒雄

執筆 小野 晃 / 新井康平 / 小畑建太 / 久世暁彦
神山 徹 / 佐久間 史洋 / 土田 聡 / 外岡秀行 共著

基礎から学ぶ光学センサの校正

監修 小野 晃 / 松永恒雄

執筆 小野 晃 / 新井康平 / 小畑建太 / 久世暁彦
神山 徹 / 佐久間 史洋 / 土田 聡 / 外岡秀行 共著

目次

まえがき	1
------------	---

1 章 はじめに 3

1.1 計測物理量	3
1.1.1 放射輝度	4
1.1.2 反射率	4
1.1.3 放射率と温度	6
1.2 センサの入出力特性	6
1.2.1 応答度	7
1.2.2 中心波長	8
1.2.3 バンド幅	8
1.2.4 センサ出力	9
1.2.5 偏光特性	9
1.3 放射量計測のトレーサビリティ	10
1.3.1 分光放射輝度の標準	10
1.3.2 反射率の標準	12
1.4 打ち上げ前の地上校正	12
1.5 打ち上げ後の軌道上校正	12
1.5.1 機上校正	13
1.5.2 代替校正	13
1.5.3 月校正	13
1.6 軌道上での特性の変動	13
1.7 放射量校正データの使い方	14
1.8 まとめ	15

2 章 打ち上げ前地上校正 17

2.1 分光特性	17
2.1.1 フィルター分光方式と分散分光方式	17
2.1.2 フーリエ分光方式	19
2.2 太陽反射領域センサの線形性と応答度	19
2.2.1 積分球	19

2.2.2	応答の線形性	21
2.2.3	放射量の一次標準	23
2.2.4	トレーサビリティ	24
2.2.5	多素子センサの校正	28
2.2.6	視野外応答	29
2.3	地球放射領域センサの校正	29
2.3.1	黒体放射源	30
2.3.2	背景放射	31
2.3.3	入出力特性	31
2.4	まとめ	35

3章 機上校正 41

3.1	太陽反射領域	41
3.1.1	反射率トレーサブルな機上校正	42
3.1.2	放射輝度トレーサブルな機上校正	47
3.2	地球放射領域	52
3.2.1	搭載校正機器とその評価, 運用	52
3.2.2	ASTER/TIR の事例	54
3.2.3	GOSAT/FTS の事例	56
3.3	電氣的校正	57
3.3.1	校正方式	57
3.3.2	校正結果	57
3.4	まとめ	58

4章 代替校正 61

4.1	太陽反射領域における代替校正	61
4.1.1	反射率ベース法 (Reflectance-based method)	61
4.1.2	ターゲットサイト	61
4.1.3	地上測定	62
4.1.4	放射伝達	64
4.1.5	代替校正の不確かさ	65
4.1.6	ASTER/VNIR の事例	66
4.1.7	GOSAT/FTS の事例	68
4.2	地球放射領域における代替校正	72

4.2.1	背景	72
4.2.2	原理	72
4.2.3	ターゲットサイト	73
4.2.4	代替校正の実際	73

□ 5章 月校正 □ 81

5.1	月面反射率モデル	82
5.2	Disk integrated model を用いた月校正	83
5.3	Disk resolved model を用いた月校正	86
5.4	月校正における不確かさ	88
5.5	月校正の事例と活用	89
5.5.1	ASTER/VNIR の事例	90
5.5.2	GOSAT の事例	91
5.5.3	月校正利用の広がり	92
	付録	93

□ 6章 軌道上相互校正 □ 97

6.1	軌道上相互校正の原理	97
6.2	同一衛星内での相互校正	98
6.2.1	Terra の ASTER/VNIR と MODIS (事例その 1)	98
6.2.2	Terra の ASTER/VNIR と MODIS (事例その 2)	104
6.3	異なる衛星間の相互校正	106
6.3.1	GOSAT/FTS と OCO-2	106
6.3.2	GOSAT/FTS と Aqua/AIRS	106
6.3.3	Landsat 7号と Landsat 8号	108

□ 7章 校正データの統合解析 □ 111

7.1	軌道上校正の方法	111
7.2	軌道上校正の実例	112
7.3	校正データの統合方法	113
7.3.1	定性的統合方法	113
7.3.2	定量的統合方法	114
7.4	定量的統合解析の事例	117
7.4.1	回帰曲線のフィッティング	117

7.4.2 複数の代替校正データセットの統合解析	118
7.4.3 機上校正データの不確かさ	119
7.4.4 校正データ全体の統合解析	120
7.5 まとめ	121

8 章 おわりに 123

代表的な地球観測光学センサと搭載衛星	127
主要用語の英日対訳	128
索引	129

まえがき

本書は衛星搭載光学センサの放射量校正に関する基礎的事項から最新の事例までを、それぞれの専門家が記述したものである。本書の中心的概念は校正（calibration）である。校正とは、センサの特性値（応答度や分光特性など）を上位の標準に基づいて測定して決める作業のことをいう。センサにすでに特性値が与えられている場合、それと校正値が異なっていたときには補正を行う。

応答度（responsivity）と感度（sensitivity）はしばしば混同される概念である。本書では応答度をセンサの入力に対する出力の比と定義している。地球観測用センサへの入力通常は分光放射輝度であるので、単位の分光放射輝度を入力したときのセンサ出力が応答度である。狭義の校正とは応答度を決めることをいう。一方センサの感度とは、センサ出力の雑音レベルに等しい入力値をいい、応答度とは別の概念である。

誤差（error）と不確かさ（uncertainty）も混同しやすい概念である。誤差とは測定値から真の値を引いた値のことをいう。しかしながら通常真の値は分からない場合の方が多い。真の値は分からない中で、測定値が真の値にどの程度近いかを推定したものが不確かさである。不確かさにはランダムに変動する偶然成分と偏りとして現れる系統成分がある。

光学センサの軌道上校正方法のひとつに代替校正がある。本書では代替校正を、地上の特定の物体を使い、その分光放射特性を測定することによって軌道上のセンサを校正する手法と定義する。本書では月校正や軌道上相互校正は代替校正とは異なる概念として別の章で記述した。

本書では各章ごとに、まず放射量校正に関する一般的な説明を行い、その後で個別センサの事例紹介をしている。事例は日本が開発したASTERとGOSATが主要なものであり、それぞれの著者らの実経験に基づくものである。ASTERは日米共同プロジェクトとして経済産業省の委託を受け宇宙システム開発利用推進機構（JSS）が開発したものである。GOSATは環境省の委託を受け国立環境研究所（NIES）と宇宙航空研究開発機構（JAXA）が開発したものである。

衛星搭載光学センサにはしばしば略号が使われる。本書が扱っているセンサの略号とその正式名称、搭載衛星を一覧にして巻末にまとめた。また本書の図表は可能な限り日本語表記としたが、英文表記のものも含まれている。本書の中に記されている主要な英文用語はその英日対訳を巻末に付けたので参照されたい。

なお本書は日本リモートセンシング学会誌（第36巻第3号（2016年）～第37巻第4号（2017年））に掲載された「連載講義：衛星搭載光学センサの放射量校正」を改訂した原稿や新たに執筆した原稿から構成されている。本書の出版にあたってご協力いただいた日本リモートセンシング学会編集委員会の山野博哉委員長に感謝する次第である。

執筆担当表

- 1 章：小野晃、新井康平
- 2 章：小野晃、佐久間史洋、久世暁彦
- 3 章：小野晃、佐久間史洋、久世暁彦
- 4 章：土田聡、久世暁彦、外岡秀行
- 5 章：神山徹、久世暁彦
- 6 章：小畑建太、新井康平、久世暁彦
- 7 章：小野晃
- 8 章：小野晃

1 章 はじめに

人工衛星からの地球観測（リモートセンシング）には、数日から十数日で地球全体を反復して長期間観測できるという特徴がある。リモートセンシングの初期の頃は地域の精細で鮮明な画像に多く関心が持たれ、空間分解能と放射量分解能に重点をおいたセンサの開発が行われた。1990年代に入ると地球環境のグローバルな変動に関心が高まり、例えば地球環境の年間変動のような短期的変動を把握しようとする試みや、数年から10年にわたる長期的変動にも関心が向けられるようになった。そこでは経年変動を含む動的な地球科学的情報を把握することが中心的課題となり、センサに対して放射量データの定量性の要求が高まった。

また、多くの地球観測用センサのデータが利用可能になると、異なるセンサで取れた観測データを相互に比較したり、統合して解析したりすることも試みられるようになった。このような場合には、相互に比較解析可能な定量性が画像データに求められ、そのためにもセンサ特性の正確な校正の必要性が高まった。時間的安定性だけでなく、センサ特性の絶対値に対する要求も高まった。

センサのバンドごとに応答度を定めることを狭い意味での校正（キャリブレーション）と呼ぶが、本書では観測データの解析に必要となるセンサの諸特性を評価すること（キャラクターゼーション）を広義の校正と呼び、広く話題を取り上げる。波長域は300 nm 程度の紫外域から十数 μm の熱赤外域までを対象とする。定性的な意味を含む「観測」という用語に加えて、いくつかの箇所では定量性を強調した「計測」という用語を使うこととする。

本書では光学センサの校正に関する基本的事項全般を取り上げる。1 章「はじめに」に続いて2 章以降は打ち上げ前地上校正、機上校正、代替校正、月校正、軌道上相互校正、校正データの統合解析と続く。なおリモートセンシング全般の基礎的事項は引用文献1)を参照されたい。

1.1 計測物理量

地球からの放射を衛星で計測する場合、計測の対象量としては様々な物理量があるが、リモートセンシングで通常計測する物理量は放射輝度（radiance）である。一方、地球科学の観点からは地表や大気の反射率あるいは放射率、温度などが計測したいパラメータである。放射輝度の測定からこれらのパラメータを求めることになる。

1.1.1 放射輝度

人間の眼やカメラは対象物体に光学的な焦点を合わせることにより、放射輝度の二次元空間分布を計測し、画像として認識している。リモートセンシング用センサの動作原理も同様である。

(1) 放射輝度の定義

放射輝度は図1.1に示すように、ある平面から一定の方向に射出される放射の単位投影面積当たり (m^{-2})、単位立体角当たり (sr^{-1}) の放射束 (W) と定義される。単位は $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ である。放射輝度は人間の眼の感覚でいえば輝きの程度を表す。放射輝度 L は次式で表される。

$$L = d^2\Phi / \cos\theta \, dA \, d\omega \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで Φ は放射束、 A は面積、 ω は立体角、 θ は天頂角である。分光放射輝度 (spectral radiance) は放射輝度の波長ごとの密度と定義され、その単位は $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ である。

(2) 放射輝度の測定方法

センサは図1.2に示すように、光学系の焦点を観測対象物に合わせることで対象物の放射輝度を測定することができる。この関係はセンサから観測対象物までの距離が変わっても同じである。

地球からの放射は発生源によって2種類に分かれる。ひとつは太陽光の照射を地表や大気が照り返した反射光である。およそ300 nm から3 μm までは太陽反射光が主体であり、この波長域を太陽反射領域と呼んでいる。もうひとつは地球自体が熱的に射出する放射である。波長がおよそ2.5 μm を超えると太陽反射光強度は弱まり、逆に地球の熱放射が主体となる。2.5 μm から十数 μm の波長域を地球放射領域と呼ぶ。地球からの熱放射の分光放射輝度を測ることにより放射体の放射率と温度を推定することができる。2.5 μm から3 μm 程度までは太陽反射と地球射出の両方の放射が合わせて観測される。これらの観測状況を図1.3に示す。

1.1.2 反射率

太陽反射領域における観測対象物の特性として代表的なものは分光反射率 (spectral reflectance) である。地表の物

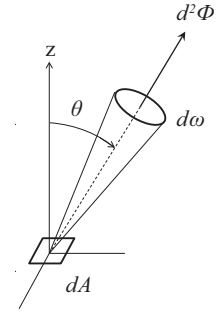


図1.1 放射輝度の定義

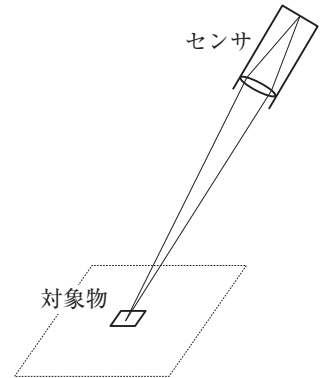


図1.2 センサによる放射輝度の測定

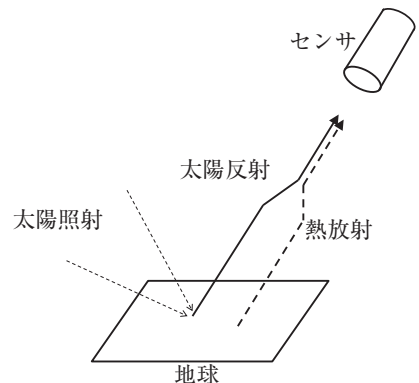


図1.3 太陽反射光と地球放射

体は、一般に拡散的な反射特性を示す。分光反射率のスペクトルは観測対象物ごとに特徴的な形を持つので、複数の波長で分光反射率を計測することにより対象物の種類とその状態を推定することができる。

(1) 反射率の定義

拡散的な表面の反射特性は、双方向反射率分布関数 (bidirectional reflectance distribution function) で表現することができる。双方向反射率分布関数 f_r は、ある面への入射ビームの放射照度 (E_i) に対する反射ビームの放射輝度 (L_r) の比として次式で定義される。その単位は sr^{-1} である。

$$f_r(\omega_i, \omega_r) = dL_r(\omega_r) / dE_i(\omega_i) \dots\dots\dots (2)$$

ここで ω_i と ω_r は、それぞれ入射ビームと反射ビームの空間方向を表す。

図1.4 (a) は双方向反射率分布関数の反射角依存性を模式的に表したものである。双方向反射率分布関数は通常入射角に対する鏡面反射方向で最も大きくなる。双方向反射率分布関数が反射角に依存せずに一定であるような反射面を完全拡散面と呼ぶ。図1.4 (b) はその反射角依存性を模式的に表したものであり、完全拡散面の双方向反射率分布関数はちょうど半円形となる。

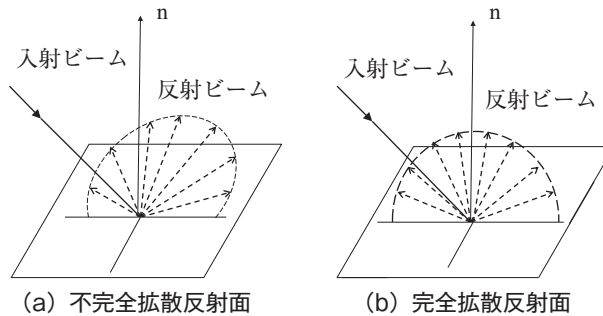


図1.4 双方向反射率分布関数

双方向反射率ファクター (bidirectional reflectance factor) とは双方向反射率分布関数 f_r に π を掛けたものである。入射の放射照度を同じにとれば、反射率が1の完全拡散面に対する対象表面の反射の放射輝度の比がその表面の双方向反射率ファクターとなる。双方向反射率ファクターが知られている白色標準拡散板を基準にして対象表面の反射の放射輝度の比を測定することにより、対象表面の双方向反射率ファクターを容易に得ることができるので、双方向反射率ファクターは測定現場でしばしば利用される実用的な量である。

(2) 反射率の測定方法

拡散反射性物体の双方向反射率分布関数あるいは双方向反射率ファクターを測定するのに一般的に行われる方法は、白色標準拡散反射板を用いた比較法である。この方法は簡便でかつ精度も高い。同一の入射角で入射する光ビームのもとで、対象物体と白色標準拡散反射板とを交互に置き替え、同一の反射角における分光放射輝度の比を測定する。白色標準拡散反射板の双方向反射率分布関数／双方

向反射率ファクターをあらかじめ校正しておけば、それを基にして対象物体の双方向反射率分布関数および双方向反射率ファクターが得られる。

1.1.3 放射率と温度

有限の温度にある物体は多かれ少なかれそれ自体で熱的に放射（熱放射）を射出している。室温付近の物体の熱放射は、波長がおよそ $10\mu\text{m}$ で最大になる分光放射輝度スペクトルを持つ。同じ温度にある種々の物体のうち熱放射を最も強く射出するのが黒体である。絶対温度 T の黒体の波長 λ における分光放射輝度 $L_b(\lambda)$ は次のプランクの式によって与えられる。

$$L_b(\lambda) = 2hc^2/\lambda^5 \{\exp(hc/\lambda kT) - 1\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで h はプランク定数、 c は光速、 k はボルツマン定数である。

温度 T の物体の波長 λ における分光放射率 $\varepsilon(\lambda)$ は、同じ温度の黒体の分光放射輝度に対する当該物体の分光放射輝度 $L(\lambda)$ の比で定義され、次式で表される。

$$\varepsilon(\lambda) = L(\lambda)/L_b(\lambda) \dots\dots\dots (4)$$

すべての物体の分光放射率は1以下の正の値を取る。

分光放射率は射出角に依存するが、通常は熱放射を発する面の法線方向に対して最大値を取る。放射率の放射角依存性を模式的に図1.5に示す。

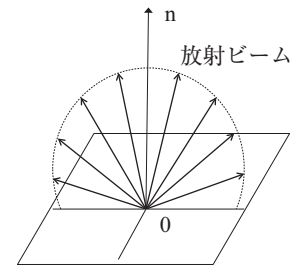


図1.5 放射率の角度分布

計測対象物体の分光放射輝度 $L(\lambda)$ から式（4）に基づいて物体の温度 T と分光放射率 $\varepsilon(\lambda)$ を分離して求めることはできない。測定波長を複数にしても状況は同じである。温度が分かれば分光放射率が求まり、逆に分光放射率が分かれば温度が求まるという関係にある。分光放射輝度 $L(\lambda)$ から分光放射率 $\varepsilon(\lambda)$ と温度 T を分離して求めるためには、分光放射率に関する何らかの情報を別途得たり、あるいは何らかの仮定を設けることが必要である。

1.2 センサの入出力特性

センサへの一定の入力に対する出力の関係を、センサの入出力特性という。本節ではセンサの入出力特性がいくつかのパラメータで記述できることを述べる。

分光放射輝度を計測するセンサは、それぞれの観測目的に応じて独自の分光応答特性を持つ。分光方式には代表的なものとして次の3種類がある。

- ①フィルター方式：放射の波長と同程度の厚さの透過性あるいは吸収性薄膜を多数重ねることにより光の干渉効果を利用して特定の波長帯の放射だけを透過あるいは反射させるもの。透過型のものは

バンドパスフィルタと呼ばれる。

- ②分散方式：放射の波長と同程度の間隔を持つ多数の直線状の格子（回折格子）を表面に持つもの（回折格子）、および透明材料で作られたプリズムがある。空間的に分散された特定の波長帯の光を検出素子に導く。
- ③フーリエ方式：マイケルソン干渉計と同様の原理で移動鏡と干渉光学系を備えた方式。検出器には広い波長帯の光が同時に入射し、インターフェログラムをフーリエ変換することでスペクトルが得られる。

いずれの分光方式をとるにせよ、あるバンドの分光応答度 $R(\lambda)$ は、波長 λ における単位の分光放射輝度の入力に対するセンサ出力（単位は任意）の比と定義される。センサの入出力特性はバンドの応答度、中心波長、バンド幅といったパラメータで表せる。あるバンドの分光応答度 $R(\lambda)$ と計測対象物体の分光放射輝度 $L(\lambda)$ を模式的に図1.6に示す。

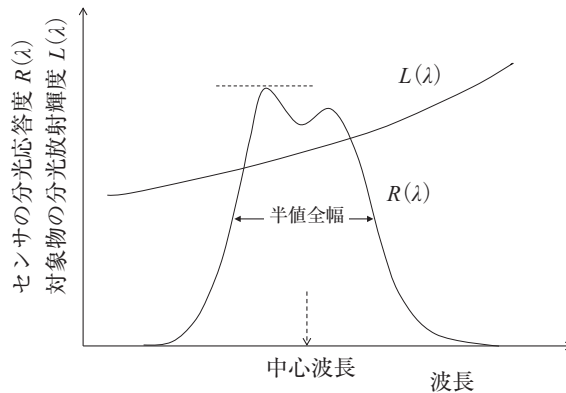


図1.6 センサの分光応答度と対象の分光放射輝度

分光放射輝度が $L(\lambda)$ の物体を観測したときのセンサ出力を V とすると、センサの応答が入力に対して線型であると仮定して、 V は次式で表される。

$$V = \int_0^{\infty} L(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots (5)$$

1.2.1 応答度

あるバンドの応答度 R_0 を次式で定義する。

$$R_0 = \int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots (6)$$

R_0 は分光応答度関数 $R(\lambda)$ の 0 次のモーメントであり、図1.6における分光応答度曲線と横軸との間の面積に相当する。狭義の校正とは R_0 の値を決定することを指す。

応答度はセンサ出力を計測対象物体の分光放射輝度に換算する重要なパラメータである。まず、打

ち上げ前に地上で正確に R_0 の値を決定する。センサが軌道上に投入されると様々な要因で応答度が変動する。そのために軌道上にあるセンサをその場で校正する手法がいろいろと開発されている（機上校正，代替校正，月校正など）。これらによってセンサの寿命いっぱいまでバンドごとに応答度を推定し，変動が大きい場合には観測データを補正することが行われる。

1.2.2 中心波長

バンドの中心波長を次式で定義する。

$$\lambda_c = \int_0^\infty \lambda R(\lambda) d\lambda / R_0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

この式は，バンドの中心波長が分光応答度関数 $R(\lambda)$ の正規化された一次のモーメントであることを示す。分光応答度曲線で重み付けた波長の平均値ともいえる。

センサを設計する際には，主たるデータ利用者がバンドの中心波長に関する要求仕様を提示する。例えば $A \text{ nm} \pm B \text{ nm}$ といった形で中心波長の許容範囲を表現する。これは製作したセンサのバンド中心波長がこの範囲に入ることを要求するものであり， $B \text{ nm}$ のことを制御精度（control accuracy）という。これに対して実際にセンサを製作した後バンドの中心波長がどこにあるかを測定して $A' \text{ nm} \pm B' \text{ nm}$ であったとする。 $B' \text{ nm}$ は測定評価の不確かさを表すものであり，これを知見精度（knowledge accuracy）という。データ利用者は観測データの解析に際して $A' \text{ nm} \pm B' \text{ nm}$ の情報を使うことができる。

バンドの中心波長は，観測データから地球科学的情報を抽出するために重要なパラメータである。打ち上げ前に地上でセンサを校正し A' と B' の値を決定する。打ち上げ後，センサが軌道上にあるとき中心波長が変化していないか，また変化しているとすればどの程度かを推定することは重要である。推定のためにいくつかの手法が試みられている。

1.2.3 バンド幅

バンド幅 W を次の式で定義する。ここではバンド幅として中心波長 λ_c の両側にまたがる全幅と定義する。

$$W = 2 \left[\int_0^\infty (\lambda - \lambda_c)^2 R(\lambda) d\lambda / R_0 \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

この式はバンド幅（半幅）が，分光応答度関数 $R(\lambda)$ の正規化された二次のモーメントの平方根であることを示している。全幅は半幅の2倍である。

実際にバンド幅を表現するときには簡便のために半値全幅（Full Width at Half Maximum：FWHM）が多く用いられる。半値全幅は分光応答度曲線のピークの値（最大値）の半分の値を取る2つの波長の間の間隔をいう（図1.6参照）。

センサを設計する際には，主たるデータ利用者はバンド幅に対する要求仕様を提示する。バンド幅

のみを規定する場合と、短波長側と長波長側の半値波長の許容範囲を別々に規定する場合とがある。

分光応答度曲線が鋭いほど特定の波長の放射だけを検出するので、観測対象物に特徴的なスペクトルに合わせてバンド幅を狭くすることが一般に好まれる。ところが、バンド幅を狭くしすぎると検出器への入射放射量が減り観測データのS/Nの低下を招く。この点を考慮したバンド幅の適切な選択が設計において重要である。

1.2.4 センサ出力

観測対象物の分光放射輝度 $L(\lambda)$ を $\lambda = \lambda_c$ においてテイラー展開し2次の係数を L'' とすると、センサ出力 V を表す(5)式は次のように近似される。

$$V = \{L(\lambda_c) + L''(\lambda_c)W^2/8\}R_0 \dots\dots\dots (9)$$

バンド幅 W が著しく広くなく、分光放射輝度 $L(\lambda)$ が比較的滑らかで L'' が大きくない場合は、{ } 内の第2項を第1項に対して無視することができる。分光放射輝度 $L(\lambda)$ が正確に分かっている標準放射源を用いて、式(9)からセンサの応答度 R_0 を求めることができる。これが狭義の校正である。センサの校正のための標準放射源としては太陽反射領域では通常積分球が用いられ、地球放射領域では空洞型の黒体放射源が用いられる。

1.2.5 偏光特性

放射の偏光状態には、直線偏光、円偏光、楕円偏光、部分偏光、自然偏光(非偏光)などがある。偏光方向は電磁波の電場の振動方向によって表す。例えば、放射が平面に斜めに入射するとき、入射面に平行な方向に電場が振動する直線偏光を p 偏光という。逆に入射面に垂直に電場が振動する直線偏光を s 偏光という。なお、太陽からの直達光や黒体放射は非偏光である。

地球観測用センサはその構造によって偏光特性を持つことがある。すなわち、入射する放射の偏光方向によって応答度が異なる。特にセンサの最前方に観測方向を選択する反射鏡があつて、観測放射が約90度折り曲げられる場合には、一般に p 偏光と s 偏光に対してセンサは異なる応答度を持つ。観測の様態によってはセンサの偏光特性を正確に把握してデータ解析を行わなければならないことがある。

偏光特性の重要性は太陽反射領域と地球放射領域のいずれにおいても同様である。太陽光は通常の観測条件では地表面に対して斜めに入射する。地表や大気成分で反射・散乱された放射は通常 p 偏光成分と s 偏光成分で異なる反射率や散乱係数を持つ。また観測も地表面に対して斜めの方向から行うことがしばしばであり、センサに偏光特性がある場合には、それをあらかじめ打ち上げ前に校正して正確に評価しておくことが重要になる。

センサの偏光特性は、通常積分球や黒体放射源のように非偏光の放射源の前方に直線偏光板を設置し、それを回転させつつセンサ出力を測定することで得られる。センサの光軸周りに楕円形に出力が変化する場合は、長軸と短軸の比の1からの差によって偏光特性を表す。

1.3 放射量計測のトレーサビリティ

分光放射輝度や分光反射率などの物理量を高い信頼性で計測するためには、国際標準や国家標準に基づいた計測，すなわち，トレーサブルな計測をすることが求められる。適切な経路を通して国際標準や国家標準に連鎖してセンサの校正ができていることをトレーサビリティがとれているという。

1.3.1 分光放射輝度の標準

図1.7は放射輝度測定のトレーサビリティ体系を太陽反射領域と地球放射領域とに分けて示す。どちらの場合でもセンサは実用標準を用いて校正されるが，実用標準はさらに上位の標準によって校正される。最上位の標準を一次標準という。一次標準は不確かさが最も小さい標準器であり，通常各国の国立標準研究所が保有し，これを用いて実用標準の校正を行う。

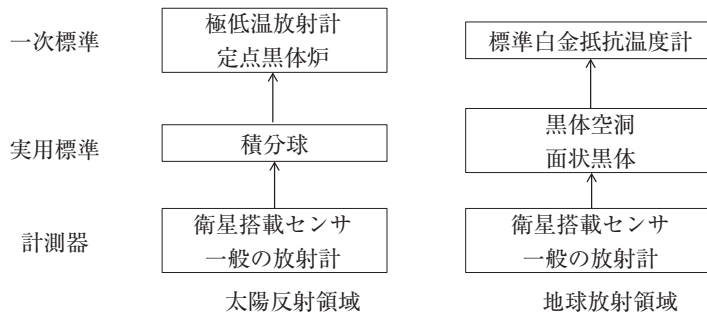


図1.7 分光放射輝度測定のためのトレーサビリティ

(1) 太陽反射領域

(a) 実用標準

センサの各バンドの応答度 R_0 は，分光放射輝度 $L(\lambda)$ が正確に分かっている標準放射源を使って式(9)により校正される。太陽反射領域における校正用の実用標準としては積分球と呼ばれる放射源が多く用いられる。

図1.8は積分球の原理を模式的に表したものである。積分球とは球殻構造の内壁表面を高反射率で拡散反射性の材料でコーティングし，その一部に開口を設けた放射源である。球殻の内部に複数の放射源（白熱電球など）を配置し，それらからの放射を球殻の内部で多数回反射させた上で開口から射出させる。このとき開口上で一様性の良い分光放射輝度が得られる。

積分球の分光放射輝度の値は一次標準に基づいて決定される。分光放射輝度の校正サービスは日本では産業技術総合研究

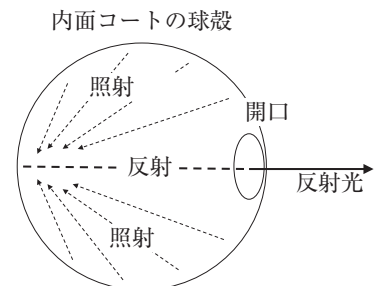


図1.8 積分球

所計量標準総合センター（NMIJ）が、米国では国立標準技術研究所（以下、NIST）が行っている。波長ごとに校正値が記された校正証明書が発行されるとともに、校正の不確かさとその要因が記された不確かさ評価表（バジェット表）が添付される。

(b) 一次標準

太陽反射領域において分光放射輝度の一次標準に用いられるものとして次の２種類がある。いずれも各国の国立標準研究所で開発し、保有しているものである。

第一は極低温絶対放射計と呼ばれる一次標準で、液体ヘリウム温度付近の極低温環境に保持された空洞型の熱型検出器を持つ。入射するビームのほとんどすべてを空洞が吸収して熱に変換し、その温度上昇を電気信号に置き換えて入射ビームのパワーを測定する。

第二は高温に保持された定点黒体放射源である。円筒型の黒体空洞を持ち、空洞を定点物質の凝固点（あるいは融解点）温度に保持することにより、その温度における黒体放射が得られる。紫外域から短波長赤外域まで使われる。ASTERの可視・近赤外域と短波長赤外域の放射計を校正した積分球の分光放射輝度はこのような定点黒体放射源を用いて産総研 NMIJ にトレーサブルに校正したものである。

(2) 地球放射領域

(a) 実用標準

地球放射領域の分光放射輝度の実用標準として表面を加工した面状黒体がしばしば用いられる。衛星に搭載し軌道上で定期的に熱赤外センサを校正するために使われる。図1.9は面状黒体の正面図と断面図を模式的に示す。面状黒体は熱伝導性の良い材料で作られ、例えばその表面に先端の尖ったV字型の溝を縦・横に切る。面状黒体

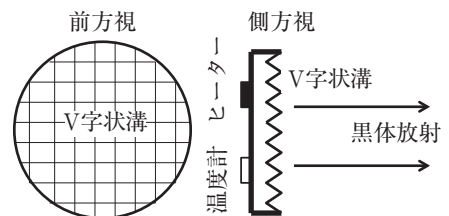


図1.9 面状黒体

の表面は四角錐が規則的に並んだ形状となり、多重反射の効果で高い放射率を得るようにしている。さらに表面を黒化処理することにより放射率を高める。面状黒体の放射率は波長域と黒化処理にもよるが、およそ0.95から0.99程度が得られる。面状黒体の温度を測定するための温度計は国家標準にトレーサブルに校正する。

面状黒体では放射輝度の精度が不足する場合には、図1.10に断面を示すような空洞を持つ放射源（黒体空洞）が実用標準として使われる。室温付近の温度であれば空洞壁の周りに温度制御した水などの流体を流して空洞壁の温度分布を一樣にする。空洞の内壁から射出された熱放射が空洞内で多数回反射と

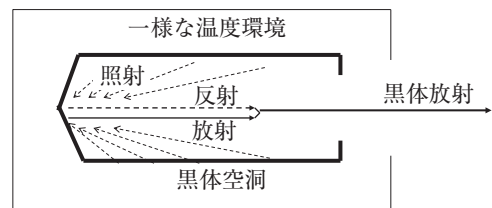


図1.10 黒体空洞

吸収を繰り返した後、空洞開口部で黒体放射に近い一樣な分光放射輝度が実現される。空洞壁の温度は温度計で測定するが、国家標準にトレーサブルに校正する。

(b) 一次標準

地球放射領域の分光放射輝度の一次標準としては、黒体空洞の温度を測るための標準白金抵抗温度計がある。あるいは国立標準研究所が保有する熱赤外域の放射温度計の校正用に開発された標準黒体放射源が利用できる場合がある。

1.3.2 反射率の標準

反射率測定の標準には実用的には白色標準拡散反射板が用いられる。白色標準拡散反射板の表面には反射率が高くかつ完全拡散に近い物質が選ばれる。波長域はおよそ250 nm から2.5 μm 程度まで反射率は0.95から0.99程度である。野外において太陽直達光を放射源として、地表物体の双方向反射率ファクターの測定を行うときにも白色標準拡散反射板がしばしば用いられる。

白色標準拡散反射板の双方向反射率ファクターは、国立標準研究所が所有する上位の標準拡散反射板によって校正される。

1.4 打ち上げ前の地上校正

打ち上げ前に地上で詳しくセンサの特性を調べることを打ち上げ前地上校正という。センサのバンドごとの応答度については太陽反射領域では通常積分球に対して校正して決定する。地球放射領域では通常空洞型の黒体放射源に対して校正する。

センサの分光応答度および中心波長とバンド幅に関しては、分光器から単色放射を出させてセンサの光学コンポーネントごとに分光透過率や分光反射率、検出器の分光応答度などを個別に測定する。それらの測定結果から計算でセンサ全体としての分光応答度、中心波長、バンド幅を求めるのが一般的である。

次章で述べる機上校正用機器（電球、白色拡散板、面状黒体、分光器等）を衛星に搭載する場合には、それらの特性も合わせて打ち上げ前に地上で正確に測定評価しておく。

1.5 打ち上げ後の軌道上校正

衛星が軌道に投入された後センサが正常に動作しているか、あるいは特性に変化が生じていないかを推定するのが打ち上げ後軌道上校正である。校正用機器を衛星に搭載するやり方を機上校正（on-board calibration）といい、地上のターゲットを用いるやり方を代替校正（vicarious calibration）という。また月をターゲットに用いた校正を月校正（lunar calibration）という。

1.5.1 機上校正

校正用機器を衛星に搭載する場合は、それらを軌道上で定期的に作動させてセンサ出力を監視する。搭載される校正用機器としては太陽反射領域では電球や太陽拡散板、分光器などがある。地球放射領域では面状黒体と温度計があり、さらにゼロ点校正のために深宇宙をターゲットとした校正が行われる。なお、衛星の打ち上げ時に激しい振動と温度変化にさらされるので、搭載された校正用機器の堅牢性には十分な配慮が必要となる。

なお、機上校正用機器自体もその特性が軌道上で経時変化する可能性があることには留意が必要である。

1.5.2 代替校正

放射特性が十分良く調べられている地上物体をターゲットとしてセンサを校正する方法が行われている。これを代替校正と呼ぶ。太陽反射領域では乾いた塩湖表面などが用いられ、地球放射領域では湖の水面などが用いられる。いずれも広い面積で反射率や放射率、温度が一様な場所を選び、現地に種々の地上用計測機器を持ち込んで反射率や放射輝度、温度等を測定する。衛星が上空を通過する時刻と同時に地上測定を行い、大気上端における地上物体の分光放射輝度を推定する。これをセンサ出力と比較して校正する。大気補正のために観測時刻における大気パラメータの測定も行われる。

1.5.3 月校正

月表面の反射率が非常に安定であること、また軌道上からの月観測では地球大気の影響を受けないことに着目し、月を放射輝度の標準として利用することができる。軌道上でセンサの視線ベクトルを月に振り向けることによってセンサの校正を行う。太陽反射領域において月の放射輝度の絶対値について十分正確なデータがある訳ではないが、月表面の反射率は非常に安定であることから、センサの応答度の時間的な変動を監視することが期待できる。

1.6 軌道上での特性の変動

これまで多くの光学センサが軌道に投入され運用されてきた中で、応答度の劣化に関する知見が積み重ねられてきた。おおよそ分かってきたことは、波長が短い紫外や青の領域のバンドで光学系の汚染と思われる原因で応答度がしばしば大きく低下することである。

1999年12月に打ち上げられたASTERでは、可視・近赤外域のバンドで応答度の低下が起きている。低下の速度は打ち上げ直後が最も大きく、1年、5年という単位で次第に緩やかな低下に移行していく傾向にある^{2),3)}。応答度の低下は緑の波長域のバンドで最も大きい。赤や近赤外域のバンドでは、応答度の低下は緑と比べると小さく、低下の速度も緩やかな傾向にある。

2 μm から 3 μm にかけての短波長赤外域は応答度に顕著な低下は見られず、大きな変動はなかつ

た。一方10 μm 帯の熱赤外域では、相当大きな応答度の低下が見られた。応答度の低下の程度はバンドごとに異なる。

応答度の変動に比べると中心波長やバンド幅の変動の可能性は低いと推測される。しかしながら変動が一定程度以下であろうと、直接あるいは間接の証拠を得ることは重要である。分光器をセンサに組み込んで定期的に中心波長やバンド幅の変動を監視することや、校正用搭載電球を点灯して間接的に監視することが行われている。

1.7 放射量校正データの使い方

リモートセンシングデータ供給機関から入手する太陽反射領域（可視・近赤外、短波長赤外）における観測データは、デジタルナンバー（Digital Number：DN）の形式で表現されている。このDNと入射放射輝度 L との関係は線形近似されている。

$$L = C_0 + C_1 DN \quad \dots\dots\dots (10)$$

これらの係数 C_0 および C_1 はそれぞれ、オフセット係数、ゲイン係数と呼ばれている。オフセット係数は打ち上げ前、あるいは軌道上において当該時点における無入力時の放射計出力によって生成する。また、ゲイン係数は打ち上げ前、あるいは軌道上において当該時点における最大入力放射輝度付近の入力時におけるセンサ出力によって生成する。軌道上では最大入射放射輝度は、前述のように搭載校正用機器（太陽拡散板、校正光源等）によってもたらされる。これらの係数は観測データとともにリモートセンシングデータ供給機関から提供される。以下にこれらの係数を用いてDNから L を求める例を示す。

観測データにはDN以外に、これを放射輝度に変換するための情報が付加されている。例えば、Terra/ASTER/VNIRおよびSWIRの場合、放射輝度補正されていない処理レベル1のDN形式のデータDNは観測放射輝度を8ビット量子化したものであり、これを打ち上げ前に計測した単位変換係数（Unit Conversion Coefficient）UCCを用いて放射輝度 L に変換する。

$$L = (DN - 1) UCC \quad \dots\dots\dots (11)$$

このUCCは前述の定点黒体放射源によって値付けされた積分球を入射放射輝度の標準として、これとセンサ出力（DN）との関係を打ち上げ前に計測して求めた係数である。通常は、UCCはメタデータとしてヘッダー情報に含まれている。しかし、これらの関係は軌道上で変化するものである。したがって、センサの機械的、温度等の環境の変化要因については衛星テレメトリデータに含まれる環境データによって補正するようにしている。これら以外にも、衛星部材からのアウトガス（漏れ出るガス）、軌道修正のための燃料噴出物によるコンタミネーション（汚染）、紫外線・宇宙線等の宇宙環境によるセンサ部材の特性変化等のモニタリングをしていない変化要因がある。これらの原因につい

では、搭載校正用機器を用いて変化をモニタリングしてその影響を除去したり、代替校正や他センサとの相互校正を行うなどして取り除くようにしている。これらの校正方法により、当該時点における放射量校正係数（Radiometric Calibration Coefficient：RCC）RCCを生成し、UCCと同様に適用して校正放射輝度を求めている。そのため、式(11)の左辺にこのRCCを乗じて校正放射輝度を得る。なお、UCCおよびRCCはセンサの最大入力放射輝度付近における係数であり、前述のゲイン係数に該当する。これら校正方法の詳細は2章以降に詳述する。

1.8 まとめ

1章では地球観測用光学センサの放射量校正に関する最も基本的事項を説明した。地球環境変動の監視⁴⁾の目的から衛星データに強い期待が持たれているが、そのなかで観測データの定量性に対する要求が高まっている。センサの放射量校正はそれに応えるものである。

本章では直接述べなかったが、放射量校正データの不確かさに関する考察は、今後、より重要になると思われる。データユーザからすれば放射量校正で補正を行った放射輝度データが、結果としてどの程度の信頼度を持っているかには関心があるところである。地球科学的解析をした結果の信頼度に直結するからである。放射量校正の不確かさの評価に関しては20年以上前から検討が始められているが未だに十分とはいえない。放射量校正によって応答度の補正を行ってもなお残る観測データの不確かさを評価して、観測データ全体の信頼度を示せるようにすることが今後の目標である。次章以降でもその点については可能な限り触れていく。

引用文献

- 1) 日本リモートセンシング学会編：基礎からわかるリモートセンシング，理工図書，東京，2011.
- 2) K. J. Thome, K. Arai, S. Tsuchida and S. F. Biggar：Vicarious calibration of ASTER via the reflectance-based approach, IEEE T.Geosci. Remote., 46(10), pp. 3285-3295, 2008.
- 3) K. Arai, N. Ohgi, F. Sakuma, M. Kikuchi, S. Tsuchida and H. Inada：Trend analysis of onboard calibration data of Terra/ASTER/VNIR and one of the suspected causes of sensitivity degradation, International Journal of Applied Science, 2(3), pp. 71-83, 2011.
- 4) 新井康平，独習リモートセンシング，森北出版，2004.

2 章 打ち上げ前地上校正

衛星の打ち上げ前に地上で行われる放射量校正はセンサの特性評価の最も基本的な部分である。その目的は地球科学的解析に必要なセンサの諸特性を正確に決めてデータユーザに提供することにある。本稿で放射量校正の対象として取り上げる特性には、観測バンドの分光応答度（相対値）、バンド中心波長、バンド幅、波長分解能、波数分解能、応答の線形性、応答度（絶対値）、入出力特性などがある。最近の衛星搭載光学センサはバンド内に多数の検出素子を持つことが多いが、校正はすべての素子に対して行う。

衛星搭載光学センサは打ち上げ前に地上で可能な限り詳細に校正が行われる。打ち上げ後に軌道上にあるセンサを改めて校正することは、技術的に大きな制約を伴うからである。また打ち上げ後に軌道上で校正を行うために、校正用機材を衛星に搭載することが行われる。これらの校正用機材の特性も打ち上げ前に地上で詳細に評価するが、この話題は3章「機上校正」で述べる。

2.1 分光特性

光学センサの最も基本的な特性は、どの波長帯で観測対象の放射輝度を計測するかである。これをセンサの分光特性という。分光特性を表すパラメータとして通常使われるものに分光応答度（相対値）、バンド中心波長、バンド幅、波長分解能、波数分解能などがある。

分光応答度（相対値）とはある観測バンドにおいてセンサがどの波長の放射輝度に対してどの程度の応答を示すかである。センサは通常多くの光学要素から構成されており、それらが多かれ少なかれ分光応答度に影響する。分光方式としてバンドパスフィルター方式、回折格子などを用いた分散分光方式、フーリエ分光方式がある。

2.1.1 フィルター分光方式と分散分光方式

バンドパスフィルターおよび分散分光方式のセンサの光学要素には、観測光の集光・結像のためのレンズおよび反射鏡、観測バンドに分けるためのビームスプリッタ、分光のためのバンドパスフィルターや回折格子、検出器等がある。この中で主としてセンサの分光特性を決めるのはバンドパスフィルターと回折格子である。

光学要素の分光透過率、分光反射率、分光応答度等を通常それぞれ単体で個別に測定したり、あるいは一部を組み合わせで測定したりする。分光特性の測定では、分光器から単色光を取り出し、波長ごとに光学要素それぞれの透過率、反射率、応答度などの測定を行う。検出器の分光応答度（相対値）

に関しては、分光応答度が波長に対して一定と見なせる基準検出器（受光面を黒化処理した熱型の検出器など）に対して波長ごとに出力の比を測定して求める。

すべての光学要素の分光特性を測定し、それらを掛け合わせてセンサ全体の分光応答度（相対値）を計算で得る。また光学要素を全部組み上げた後、センサ全体としての分光特性を改めて測定して、個別要素の測定結果から計算された分光特性と整合しているかどうかの確認が行われることもある。可視・近赤外域での分光応答度の測定例（ピークを1に正規化したもの）を図2.1に示す。この測定例は1999年12月に打ち上げられたASTERの可視・近赤外放射計（VNIR）における3つのバンドの分光応答度（相対値）である。

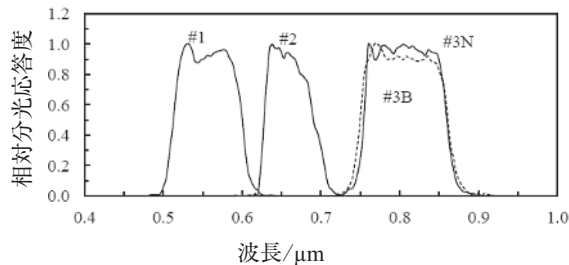


図2.1 可視・近赤外域におけるセンサの分光応答度

バンドの中心波長とバンド幅は1章で述べた定義に従って、図2.1の分光応答度曲線から計算する。センサの開発に当たっては、こうして得られた分光特性が要求仕様に合致しているかどうか確認する。測定された分光特性は不確かさを添えてユーザに提供することが望ましい。通常測定精度(知見精度)は要求仕様の許容値(制御精度)よりも良いからである。

図2.1に示したような100 nm程度の広いバンド幅を持つセンサでは問題になることは少ないが、バンド幅の狭いフィルターを使ったり、回折格子を使って波長分解能を高めたりした場合には、バンドの主たる帯域以外の放射に対するセンサの応答（帯域外応答）が問題になることがある。バンドパスフィルターや回折格子が完全でなく、意図しない波長域の放射が透過したり反射したり散乱したりして検出器に紛れ込むからである。帯域外応答が観測データの解析に悪影響を及ぼす可能性がある場合には、センサの設計時に帯域外応答のレベルを要求仕様に盛り込む。そして検出器が応答する可能性のある全波長域でセンサの分光応答度を測定することによって、帯域外応答が一定のレベル以下（例えば帯域内応答の0.1%以下）であることを確認する。帯域外における分光応答度の測定は、各光学要素の個別測定だけでなく、センサとして組み上げた後に単色光を入力して行うのが確実である。太陽反射領域におけるバンドパスフィルター方式のセンサに関する分光特性の測定方法と測定結果は、Landsat 8号に搭載されたOperational Land Imagerの詳細な報告があるので参考にされたい¹⁾。

索引

【欧文】

AERONET 64,100
AIRS 107
Alkali Lake 66
AMES 68
ASTER 1,11,18,47,65,83,97,112
BRDF 63
BRF 62
CAI 33,68,91
CIRC 72
Coyote Lake 73
Disk integrated model 82
Disk resolved model 86
Disk-equivalent Reflectance 84
DN 14
EOSプロジェクト 72
FieldSpec 64,69
FTS 33,42,68,91,98
GOSAT 1,20,42,66,91,107
HRV 52
HRVIR 52
Ivanpah Playa 66
JAXA 1,28,72,91,106
JPL 28,68,106
Lake Tahoe 73
Landsat シリーズ 72
MCT 34
Microtops II 64
MODIS 42,68,89,97,113
MODTRAN 65
MTI 72
NASA 28,68,99,111
NIST 11,25,63
NMIJ 11,25
NOAA 78
OCO-2 68,98
OLI 42,98,113
Oversampling 効果 83
PARABOLA 69
PC 型 32

PV 型 32
Radiance Factor 87
Railroad Valley 62,104
RCC 15,41,66,97,114
ROLO 88
ROLO モデル 83
Salton Sea 73
S-HIS 77
Spectral Profiler 83
SP モデル 83
SWIR 14,25,47,65,113,124
TANSO 33
TIR 54,73
VHRR 72
VIIRS 42,114
VNIR 18,47,65,117,124

【ア】

安定性 27,45,63,81,111
位相角依存性 87
インターフェログラム 7,32
打ち上げ前地上校正 12,17,106
エアロゾル 33,64,81,100
応答度 1,3,17,41,61,97,111
オゾン 64,100
温室効果ガス観測技術衛星 33
温度 3,23,49,61,107
温度ベース 72

【カ】

回帰曲線 104,114
カイ二乗検定 116
海洋プイ 72
可降水量 74
霞ヶ浦 73
完全拡散面 5,46
感度 1
疑似スペクトル 19
機上校正 3,12,41,72,90,111,123
気柱量 68

軌道上校正 12, 106, 111
 軌道上相互校正 1, 97, 111, 124
 客観解析 64
 極低温放射計 23
 空間解像度 101
 偶然成分 1, 101, 115
 グリーンランド 78
 系統成分 1, 115
 計量標準総合センター 11
 巻雲 33
 校正 1
 校正精度 90, 97, 111
 校正データ 33, 41, 111, 124
 校正データセット 113
 校正標準 103
 光路輝度 72
 黒体 6, 24, 56, 74
 黒体空洞 11, 23, 53
 黒体放射源 9, 30
 国立標準技術研究所 11, 25
 誤差 1, 22, 56, 73, 91, 106

【サ】

サハラ砂漠 71
 産業技術総合研究所 63
 サンフォトメータ 64
 ジェット推進研究所 28
 下向き放射照度 72
 実効放射率 30, 53
 視野外応答 29
 出力 1, 6, 18, 50, 85
 瞬時視野 29, 61, 97
 瞬時視野角 29, 91, 98
 深宇宙校正 53
 水蒸気 33, 64
 スペクトラロン 42, 69
 スペクトルバンド調整 99
 積分球 10, 19
 積分非線形性誤差 33
 絶対値 3, 19, 72, 85, 112, 123
 線形性 19
 ソイルライン方程式 100
 相互校正 15, 28, 56, 61, 90, 97
 相互校正係数 97

双方向反射率ファクター 12
 双方向反射率分布関数 45

【タ】

帯域外応答 18
 大気鉛直プロファイル 72
 大気透過率 72
 大気放射伝達モデル 100
 代替校正 1, 12, 46, 61, 90, 99, 111, 123
 代表性 49, 89, 119
 太陽位相角 82
 太陽拡散板 13, 42, 69, 111
 太陽反射領域 4, 19, 41, 61, 97
 太陽分光放射照度 41, 84
 ダブルディファレンス 77
 短期的変動 3, 123
 地球放射領域 11, 31, 52, 72, 106
 地表面温度 72
 地表面分光放射率 72
 中心波長 8, 18, 44
 長期的変動 3, 123
 直線偏光 9, 69, 92
 月校正 13, 55, 81, 111, 123
 デジタルナンバー 22
 定性的統合 113
 定点黒体炉 23
 定量性 3, 36, 123
 定量的統合 114
 電気の校正 57
 天空輝度 73
 統合解析 106, 113, 123
 搭載黒体 53, 56
 特性値 1
 トレーサビリティ 10, 24

【ナ】

入出力特性 6, 31

【ハ】

背景温度 56
 背景放射 31
 バジエット表 11, 65, 105, 113
 波数 19
 波数分解能 17, 19

パスラジアンズ 72
 バルク水温 72
 ハロゲンランプ 20,47
 反射率 4,17,41,61,81,100,111,124
 反射率校正 41
 半値全幅 8
 バンド幅 8,17
 非線形性 19,106
 非線形補正 34
 微分非線形性誤差 33
 標準 1,10,23,101
 標準不確かさ 114
 秤動 82
 表皮水温 72
 ブイ 74
 フィルター 18
 フーリエ分光器 19
 フーリエ変換赤外分光計 (FTIR) 72
 フォトダイオード 50
 不確かさ 1,8,18,42,65,81,98,111,123
 物理温度 72
 プランクの式 6,24
 分光応答度 7,17
 分光特性 17
 分光放射輝度 4,19,41,66,83,106,112
 分光放射計 63,92
 偏光 56
 変調効率 46
 変調成分 34
 放射温度計 75
 放射輝度 3,17,43,61,81,97,111
 放射輝度校正 41
 放射輝度ベース 72
 放射伝達計算 68
 放射率 4,30,53
 放射量校正 15,43,98,123
 放射量校正係数 15,41,121,123
 補正 1,8,32,41,63,89,97,114
 ほどよし 1号機 92

【マ】

マッチアップ条件 107
 面状黒体 11,31,41

【ヤ】

陽極酸化処理 56

【ラ】

ラジオゾンデ 68
 ランプ 20,47,112
 冷凍機 56,107
 劣化曲線 66

監修・執筆	小野 晃（おの あきら）	産業技術総合研究所
執筆	新井康平（あらい こうへい）	佐賀大学、アリゾナ大学
〃	小畑建太（おばた けんた）	愛知県立大学
〃	久世暁彦（くぜ あきひこ）	宇宙航空研究開発機構
〃	神山 徹（こうやま とおる）	産業技術総合研究所
〃	佐久間史洋（さくま ふみひろ）	宇宙システム開発利用推進機構（執筆時）
〃	土田 聡（つちだ さとし）	産業技術総合研究所
〃	外岡秀行（とのおか ひでゆき）	茨城大学
監修	松永恒雄（まつなが つねお）	国立環境研究所

基礎から学ぶ光学センサの校正

2020年4月24日 初版第1刷発行



検印省略

監	修	小	野		晃
執	筆	松	永	恒	雄
〃		小	野		晃
〃		新	井	康	平
〃		小	畑	建	太
〃		久	世	暁	彦
〃		神	山		徹
〃		佐	久	史	洋
〃		土	間		聡
〃		外	岡	秀	行

発行者 柴 山 斐 呂 子

発行所 理工図書株式会社

〒102-0082 東京都千代田区一番町 27-2
 電話 03 (3230) 0221 (代表)
 FAX 03 (3262) 8247
 振替口座 00180-3-36087 番
<http://www.rikohtosho.co.jp>

© 小野 晃 2020 Printed in Japan ISBN978-4-8446-0895-0

印刷・製本 丸井工文社

*本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上の例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも著作権法違反です。

★自然科学書協会会員★工学書協会会員★土木・建築書協会会員

ISBN978-4-8446-0895-0

C3055 ¥3000E

定価（本体 3000 円＋税）

工学

電子通信 / 光学センサ



9784844608950



1923055030008

