分光放射計の校正手法の開発

居島 修* · 高野 松美*

Development of calibration method for the Spectroradiometer

Osamu IJIMA and Matsumi TAKANO

要旨

下向き放射及び反射日射の測定に使用している分光放射計について,温度特性,入射角特性及び検出器の 特性を調査し,これらの特性を補正する手法を開発した.次に分光放射計の測定値から波長別放射照度を算 出するための手順を作成した.さらに,これらの新たに開発した校正手法を適用し,高層気象台における 2017 年 1 月~2018 年 11 月の下向き放射の波長別放射照度を算出するとともに,広帯域型日射計の放射照 度と比較を行い,その精度評価を行った.これらの主な結果は以下のとおりである.

1) 分光放射計の特性調査及び補正手法の開発

分光放射計の温度特性及び入射角特性を調査し、それぞれの測器についてこれらの特性を補正する 手法を開発した.検出器の特性については,検出器の安定性及び直線性を調査し,検出器の安定性では、 バックグラウンドノイズの測定値への影響を評価した.検出器の直線性では、産業技術総合研究所の協 力を得て、検出器の直線性検査を実施し、非直線性を考慮した測定値の補正式を決定した.紫外域につ いては簡易的な迷光補正を行った.

2) 波長別放射照度の算出手順の作成

温度特性,入射角特性及び検出器の特性を考慮して分光放射計の測定値(count 値)を補正後,波長別 測器感度を用いて波長別放射照度を算出する手順を作成した.また,観測波長範囲の異なる3種類の分 光放射計の波長別放射照度を合成し,観測値の接続を試みた.

3) 新たに開発した校正手法を適用した観測値の精度

2)の手順で2017年1月~2018年11月の下向き放射の波長別放射照度(300nm~2500nm)を算出し,新たに開発した校正手法を適用した観測値について,広帯域型日射計で観測した放射照度との比較により精度評価を行った.その結果,分光放射計の全波長の積算値は,測定値を補正した場合,全天日射では0.7%,直達日射では1.0%改善された.

1. はじめに

高層気象台では、分光放射計の校正方法を確立するこ とを目的として 2011 年から校正に関する調査を実施して きた. 2011 年には可視域を測定する分光放射計について 温度特性及び入射角特性を調査し(居島: 2012), 2012 年に はブリューワー分光光度計用校正装置を用いて標準電球 (NIST にトレーサブルな 1000W タングステンハロゲンラ ンプ:以下, NIST ランプという)による校正を実施し、測 器常数の確定及び太陽光スペクトルの試験観測を開始し た(居島・島村: 2013). さらに, 2013 年には1台の分光放

*高層気象台 観測第二課

射計を用いて太陽光スペクトルの直達成分と散乱成分に 分離する試験観測を実施し(居島:2014),2015年には太陽 光スペクトルの近赤外域の試験観測を開始した(居島・高 野:2016).また,2017年には分光放射計専用の校正装置 を開発し,NIST ランプによる分光放射計の校正精度を詳 細に調査した(居島ほか:2018).

分光放射計で測定した太陽光スペクトルの A/D 出力 (count 値:以下,測定値という)は,通常 NIST ランプによ る校正によって決定した波長別測器感度を用いて波長別 放射照度[W/m²/nm]に変換する(居島・島村: 2013).

波長別放射照度[W/m²/nm]=

測定値[count] / 波長別測器感度[(count・m²・nm) / W]

型式	MS-711 (英弘精機社製)	MS-712 (英弘精機社製)	PGP-200NIR2 (プリード社製)	MS-710 (英弘精機社製)
測定波長範囲	$300\!\sim\!1100{\rm nm}$	$900\!\sim\!1700{ m nm}$	$900\!\sim\!2550{ m nm}$	$350\!\sim\!1000 { m nm}$
波長間隔	0.3~0.5nm	1.2~2.2nm	6.2~7.7nm	0.7~0.8nm
波長分解能	<7nm	<7nm	<20nm	< 8nm
検出器	Siフォトダイオード アレイ(2048ch)	InGaAsリニアイメージ センサー(512ch)	InGaAsリニアイメージ センサー(256ch)	Siフォトダイオード アレイ(1024ch)
ドーム材質	合成石英	BK7	合成石英	合成石英

表1 MS-711, MS-712, PGP-200NIR2 及び MS-710 の仕様

しかし,分光放射計には,温度特性,入射角特性及び検 出器の直線性等の特性があり,測定値にはこれらの特性 による不確かさが含まれている.本稿では,測定波長範囲 の異なる4種類の分光放射計について,①これらの特性 を調査して,測定値の各特性の補正手法を開発し,②測定 値を波長別放射照度に変換する手順を作成した.さらに, ③分光放射計の波長別放射照度と広帯域型日射計で観測 した放射照度を比較し,新たに開発した校正手法を適用 した観測値の精度を評価した.

2. 調査に使用した分光放射計

調査には英弘精機社製の MS-710, MS-711, MS-712 及 びプリード社製の PGP-200NIR2 を使用した. 各測器の性 能を表1に示す.また,下向き放射の測定に使用した3種 類の測器の外観を写真1に,反射日射の測定に使用した 測器の露場での設置状況を写真2に示す.なお,英弘精機 社製の測器(MS-710)の構造については,居島(2012)を参照 いただきたい.

使用した測器のシリアルナンバー及び屋外での測定に 使用した期間は次のとおりである.

[MS-711]

S/N: S15059.10	期間:2017/1/1 ~ 2017/11/17
S/N : S17024.06	期間:2018/1/6 ~ 2018/5/9
S/N: ES17340.01	期間:2018/5/10 ~ 2018/11/30
[MS-712]	
S/N : S14175.02	期間:2017/1/1 ~ 2017/12/1
S/N : S14175.01	期間:2018/1/6 ~ 2018/5/9
S/N : S17183.03	期間:2018/5/10 ~ 2018/11/30
[PGP-200NIR2]	
S/N : P305519784-	1 期間:2017/1/1 ~ 2018/11/30
[MS-710]	
S/N: S11027.02	期間:2017/1/1 ~ 2018/11/30

3. 分光放射計の特性調査及び測定値の補正手法の開発

分光放射計には,温度特性,入射角特性,検出器の安定



写真1 下向き放射観測測器の外観



写真2 反射日射用分光放射計の露場での設置状況 (2018年5月7日)

性及び直線性の特性がある.温度特性及び入射角特性に ついては、これらの特性を補正するための係数及び補正 方法を示し、検出器の安定性及び直線性の特性について は、調査した結果を報告する.なお、温度特性及び入射角 特性の各検査方法の詳細については、居島(2012)を参照い ただきたい.

3.1 温度特性

下向き放射及び反射日射の測定に使用した4種類(合計 8台)の測器について,温度特性検査を実施した.温度特性 を補正するための式を求める方法について,MS-710を例 に以下に示す.

① 温度特性の検査方法

温度特性検査装置の恒温槽の検査温度(以下, 槽内温 度という)を、-20℃、0℃、20℃、40℃の20℃毎の4点 に設定し、恒温槽内に入射した標準光源(キセノンラン プ)を各槽内温度について測定する. NIST ランプによる 校正時の室温(20℃±5℃)に最も近い 20℃の測定値を基 準とし、各槽内温度の測定値との比を全波長について 1nm 毎に求める. 各槽内温度における 350nm~1050nm の比を図1に示す. MS-710は, 600nm 付近より長い波 長では測定値が小さくなるため,350nm~590nmでは露 光時間 300msec の測定値を, 591nm~704nm では 500msec の測定値を、705nm~1050nm では 1000msec の測定値を 使用した. 815nm より長い波長では測定値が 3000count 以下となり、後述のノイズの影響によりばらつきが大き くなるため, 815nm より長い波長については, すべて 815nmの測定値を使用した.なお,20℃毎の検査により 測器の温度特性を十分表現できることは、10℃毎の検査 との比較により確認している.

温度補正係数の算出

図 1 に示した測器の温度特性について、1nm 毎の各 波長における温度補正係数を次式により求めた.

温度補正係数=(各槽内温度の測定値)/(20℃の測定値)

例として,図2に任意に選択した4波長(400nm,550nm, 700nm,815nm)における温度特性を示す.温度特性の補 正では,4点の温度補正係数を3次近似し,温度特性の 補正式を求め,この補正式を用いて実際の測定温度にお ける温度補正係数を算出する.図3は,図2の550nmの 温度補正係数(4点)を3次近似した結果である.図中の 3次式が550nmの温度特性を補正する式となる.350nm ~1050nmまでの波長範囲について1nm毎に補正する式 をそれぞれ求めた.

分光放射計の実際の観測時の温度補正では、気温を用いて基準温度(20℃)の測定値となるように温度特性を補正した.

【補正例】

例えば, 気温 0℃のときに 550nm の波長を補正する 場合, 図 3 の 3 次式に x=0 を代入して温度補正係数 0.9959 を算出し, 次式により測定値を補正する.



RDnew = RDold / 0.9959

ここで, RDnew は補正後の測定値, RDold は補正前の測定値を示す.

図 4~図 6 に, MS-711, MS-712, PGP-200NIR2 の観測 波長域の任意の 4 波長における温度特性検査結果を示す. なお, -20℃の検査において, 恒温槽の不具合により槽内 温度が-15℃しか下がらない場合があった.また, 図 4 の MS-711 については, MS-710 と測定波長範囲がほぼ同じ ことから, 測器の特性を比較するため, MS-710 と同じ 4 波長とした.図 6 の PGP-200NIR2 については, 縦軸のレ ンジを 0.96~1.04 としている.



3.2 入射角特性

下向き放射の測定に使用した3種類(合計7台)の測器に ついて,入射角特性を補正するため,入射角特性検査装置 を用いて検査を実施した.入射角特性の補正については, 直達日射と散乱日射の成分に分けて補正する.散乱日射 の補正については,天空の全ての方向の放射照度を把握 する必要があり実際の観測では難しいため,本稿では散 乱日射の補正は行わなかった.直達日射の補正について は,太陽追尾式遮蔽装置に分光放射計を搭載し(写真1), 常に同じ方向から直達日射を入射するため,直達日射が 入射する1方向のみの入射角特性に基づき補正を行う.

入射角特性は, 天頂角 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°の 13 点について検査した. 天頂角 0°を基準として, それぞれの天頂角について入射 角特性を補正する係数(以下, 入射角補正係数という)を 1nm 毎に次式で求めた.



入射角補正係数=(各Zの測定値)/(Z=0°の測定値×cosZ) ここで,Zは天頂角である.

各測器の入射角補正係数の例を図 7~図9に示す. 横軸 は天頂角,縦軸は入射角補正係数で,ここでは任意に選択 した4波長について示す.

【補正例】

例えば、図7(b)の天頂角 60°において、700nmの入射



角補正係数は 0.972 である.次式により直達日射水平面 成分の測定値を補正する.

DHnew=DHold/0.972

ここで,DHnew は補正後の直達日射水平面成分の測 定値,DHold は補正前の直達日射水平面成分の測定値を 示す.

検査した天頂角以外の角度における入射角補正係数に ついては直線内挿で求める.例えば図 7(b)において, 700nmにおける 45°の入射角補正係数は,40°の係数 0.988 と 50°の係数 0.980 から直線内挿で 45°の係数 0.984 を求 める.また,85°以上の天頂角については,85°の入射角 補正係数を使用することとした.

なお,反射日射は,地面の状態等で分光放射計の受光面 に光が入射する角度が複雑に変化するため,反射日射の 測定に使用した MS-710 については入射角特性の補正は 行っていない.



図 9 PGP-200NIR2 の入射角補正係数

3.3 検出器の特性

分光放射計は、受光面に入射した光を回折格子で分光 し、分光した光を検出器へ入射する.検出器では波長毎に 光量に応じた電荷量に変換する.さらに電荷量を A/D コ ンバーターによって count 値として出力する.この出力に はバックグラウンドノイズ(以下、ノイズという)が含まれ ている.

ここでは,検出器のノイズの変動による測定値の安定 性(以下,検出器の安定性という)を確認するため,ノイズ による測定値への影響を調査した.また、入射した光を count 値に変換する検出器の直線性についても調査した.

3.3.1 検出器の安定性

分光放射計の測定値はノイズを含んでおり,このノイズ の変動によって,測定値は常にばらついている. MS-711 を例に(1)その測定方法を示し,(2)ノイズの測定値への影 響を評価するとともに,(3)校正時におけるノイズの低減 について以下に述べる.

(1) MS-711 の測定方法

MS-711の測定方法は,次のとおりである.

① 機械的なシャッターを開け、光を入射する.

- ② 電子シャッター機能によって設定した露光時間の光 を測定(計測値 A)する.
- ③ 機械的なシャッターを閉じる.
- ④ 光を入射しない状態でノイズを測定(計測値 B)する.
- ⑤ 計測値 A から計測値 B を差し引き,測定値とする.
- (2) ノイズの測定値への影響評価

ノイズには、(1)項④の光を入射しない状態でのノイズ だけではなく,回路上の電気的なノイズも含まれており, さらにノイズの大きさは測器温度によっても常に変動し ている.特に入射する光が弱い場合,(1)項の計測値Aと 計測値 B の差が小さくなり、測定値はノイズの影響によ り大きく変動してしまう. ノイズの測定値への影響を調 査するため、分光放射計用校正装置(居島ほか:2018)の NIST ランプを光源として, 露光時間を 1000msec, 毎分の 計測回数を1回(1回/分)に設定して10分間測定した。そ の結果を図 10 に示す. 左縦軸は 10 分間の測定値の平均 (以下,10分平均値という)を基準として,各測定値との差 を百分率で示し、右縦軸には 10 分平均値を示している. MS-711 において、10 分間における各測定値と平均値との 差(以下, 測定値のばらつきという)は、10 分平均値が 3000count 以上において±0.5%の範囲内に収まっていた. また,他の分光放射計についても同様に調査した結果,

MS-710では 3000count 以上, MS-712では 8000count 以上, PGP-200NIR2 では 5000count 以上において±0.5%の範囲 内に収まっていた.

この測定値のばらつきは、NIST ランプを用いた校正に 伴う相対拡張不確かさ(居島ほか:2018)に比べて5分の1 と十分小さく、測定値への影響はほとんどないと考える. また、後術の5.において、基準地上放射観測網(Baseline Surface Radiation Network:以下,BSRNという)のつくばに おける日射データと比較するが、BSRN(McArthur:2005) では直達日射の目標精度を0.5%としており、分光放射計 のばらつきについても0.5%以内が望ましいと判断した.



(3) 校正時のノイズの低減

NIST ランプによる校正時において、ノイズによる影響 を低減するため、計測回数を増やすことを検討した. MS-711 は、10回を超える計測回数にした場合、計測に要する 時間が1分以上となるため、計測回数を10回/分とした.

(2)項と同様に, NIST ランプを光源として計測回数を10 回/分にした場合の測定値のばらつきを図11に示す.10回 /分の測定ではノイズが平均化されるため,3000count以上 における測定値のばらつきは±0.2%以下となり,1回/分 の半分以下に収まった.以上の結果から分光放射計の校 正時には,検出器の安定性を考慮し,計測回数を複数回に することによってノイズの影響を低減している.

3.3.2 検出器の直線性調査

(1) 検出器の直線性

検出器の直線性とは、「検出器に入射する光の強度」と 「検出器から出力される測定値(count)」との間の「直線関 係からのずれの程度」を言う.例えば、波長λにおける放 射照度が 0.5W/m²/nm のときに、測定値が 5000count だっ た場合、2 倍の 1.0W/m²/nm を測定したときの測定値も 2 倍の 10000count に近ければ、この分光放射計の検出器は 波長λにおいて直線性が良好であると言える.

NIST ランプ(距離:50cm)と太陽の波長別放射照度を図 12 に示す.この太陽の放射照度は,大気路程 1.5 の標準的 な大気における放射照度である(ASTM:2003).太陽の放射 照度は NIST ランプの放射照度に比べて強く,紫外域の 315nm では約 40 倍,可視域の 500nm では約 20 倍,近赤 外域の 1000nm では約 3 倍である.このため,検出器の直 線性が悪く,入射した光をリニアに測定値に変換できな い場合,例えば 500nm の測定値から NIST ランプの校正 で決定した同波長の測器感度を用いて放射照度を算出し ても 20 倍にはならない.このように測定値から波長別放 射照度を算出するときに不確かさが増すことになる.

本調査では、直線性の評価に全天日射計(Secondary standard クラス)の基準を用いた.国際標準化機構(ISO: International Organization for Standardization)の ISO9060 (ISO: 1990)では、100~1000W/m²の放射照度を測器に入射したときの感度と 500W/m²を入射したときの感度のずれ を 0.5%以内と定めている.例えば、500W/m²を入射したと きの全天日射計の出力電圧が 5mV の場合、測器の感度は 10mV/(kW/m²)となる.この測器に 1000W/m²を入射したと きの出力電圧が 10.05mV の場合、感度は 10.05mV/(kW/m²) となり、基準の 0.5%以内に収まっていることになる.

(2) 検出器の直線性調査

(1)項について調査するため、①MS-711 の露光時間を 100msec と 200msec に設定, ②外部標準ランプ(50W タン グステンハロゲンランプ)を照射して2種類の露光時間を 連続で測定, ③2 種類の測定値の比(200msec の測定値/ 100msec の測定値:以下,測定値の比という)を 1nm 毎に 算出した.その結果を図13に示す.横軸は波長,左縦軸 は測定値の比, 右縦軸は測定値である. 検出器の直線性が 良好であれば,測定値の比は2倍に近くなるが,調査に使 用した MS-711 では測定値が大きくなるほど測定値の比 は小さくなっており, 直線性が良好ではないことを示し ている. 例えば, 図 13 の 1000nm において, 200msec の 測定値は 20000count, 100msec の測定値は 10250count で あり、このときの測定値の比は 1.95 であった. 直線性が 良好な理想的な検出器場合,測定値の比(以下,理想的な 比という)は 2.00 であるが、1000nm における測定値の比 は理想的な比に比べて 2.5%小さかった. なお、本調査で は電子シャッターで制御する露光時間は正確であると仮 定した. また, 1500count 以下はノイズの影響によりばら つきが大きいため, 取り除いた.

測定値が大きくなった場合の検出器の直線性をさらに 調査するため,測定値の比を ratio_{DBS},理想的な比を ratio_{REF} とし,次式に示す測定値の比の理想的な比に対するずれ









(以下,測定値の比のずれという)を 1nm 毎に算出した.

測定値の比のずれ= (ratio_{OBS} / ratio_{REF}-1)×100 [%]

各波長における測定値の比のずれと測定値の関係を図 14に示す.横軸は長い露光時間(200msec)の測定値である. 波長依存性を確認するため,測定波長範囲を4分割し,色 分けして表示している.測定値の比のずれには負の相関 があり,20000countでは-2.6%であった.また,波長に関 係なく測定値が大きくなるほど比のずれは負の方向に大



きくなっていた.

図 14 と同様に MS-710(1000msec と 500msec の比), MS-712(60msec と 40msec の比)及び PGP-200NIR2(20msec と 10msec の比)についても,図 15,図 16 及び図 17 に測定値の比のずれを示す. MS-710 及び MS-712 については,測定値の比のずれは±0.5%以内に収まっており,PGP-200NIR2 については,最大で-8.0%であった.

(3) 複数光源切替え型照射光源による直線性試験

測定値の比のずれが±0.5%の範囲を超えた MS-711 及び PGP-200NIR2 について、検出器の直線性を正確に把握

するため、産業技術総合研究所太陽光発電研究センター の協力を得て、放射照度をリニアに変えることのできる 複数光源切替え型照射光源(猪狩ほか:2018)を用いて調査 することとした.しかし、PGP-200NIR2 については、付属 の水冷式冷却装置を輸送できなかったため、今後調査方 法を検討することとした.なお、(2)項の調査結果より検出 器の直線性には波長依存性がないことから、直線性試験 及び直線性の補正については波長依存性を考慮しない.

複数光源切替え型照射光源は、キセノンランプを用いた光源装置を4台組み合わせ、14段階(0.025 kW/m², 0.05 kW/m², 0.1~1.2kW/m²は 0.1 kW/m²毎)の放射照度を瞬時に切替えることができる装置である.なお、複数光源切替え型照射光源の精度について、猪狩ほか(2018)には図によって精度が示されているが数値として記述がなかったため確認したところ、0.025~1.2kW/m²における直線性は0.005%以内とのことであった.なお、0.025kW/m²及び0.05kW/m²については、フィルターにより減光しており、本調査ではフィルターを使用していない0.1~1.2kW/m²の放射照度を使用することとした.

- (4) 直線性試験の結果及び考察
- ① MS-711 の直線性の確認

調査する MS-711 の検出器について,製造メーカーで は直線性を保証する測定値の上限を 17700count として おり,上限付近までの測定値について直線性を調査した.

複数光源切替え型照射光源を用いた直線性試験は, MS-711の露光時間を 50msec, 200msec, 500msec の 3 種 類に設定し, 0.1~1.2kW/m^aの放射照度を 0.1 kW/m^a毎に 3 種類の露光時間で連続測定した.図 18 に, 200msec の 露光時間で測定した 0.1~1.2kW/m^aの測定値を示す. 20000count 以上では測定値の間隔が狭くなっており, 直 線性が低いことを示している.

1.2kW/mの測定値が, MS-711 の上限値に近い 18547countとなる 375nm(図 18, 青色縦点線)と, 1.2kW/ mの測定値が 6216countとなる 750nm(図 18, 赤色縦点 線)の放射照度と測定値との関係を図 19 に示す.図 14 において,測定値の比のずれが-0.5%となる測定値はお よそ 6000countであり,上限が 6000count付近となる放 射照度までの回帰直線を求めた.375nm では 0.1~ 0.4kW/m,750nm では 0.1~1.2kW/mの測定値で回帰直 線を計算している.750nmの回帰直線(図 19, 赤色実線) では 12 個の測定値はすべて直線上に乗っているが, 375nmの回帰直線(図 19, 青色実線)では,0.6kW/m以上 の測定値において回帰直線より小さい値を示していた. 検出器の直線性が良好な場合,750nmのように全てのデ ータは回帰直線に近い分布となるが,MS-711の検出器

分光放射計の校正手法の開発



図 18 露光時間 200msec における 0.1~1.2kW/m²の 測定値(青色縦点線:375nm 赤色縦点線:750nm)



図 19 放射照度と測定値の関係(測器: MS-711) 青色実線: 0.1~0.4kW/m²で求めた 375nm の回帰直線 赤色実線: 0.1~1.2kW/m²で求めた 750nm の回帰直線



破線(赤色): 1.0~1.2 kW/mの回帰直線

表2 1通り目の回帰直線の算出に用いた放射照度

調査する測定値 (1000count毎)	回帰直線の計算に 使用する放射照度
$3000 \sim 9000$ count	$0.6 \sim 0.8 \ \mathrm{kW/m^2}$
10000 count	0.5 \sim 0.7 kW/m ²
11000 count	0.4 \sim 0.6 kW/m ²
$12000 \sim 14000$ count	$0.3 \sim 0.5 \text{ kW/m}^2$
$15000 \sim 17000$ count	$0.2 \sim 0.4 \text{ kW/m}^2$

は、ある測定値以上になると理想的な測定値に比べて小 さい値になっていると考えられる.

② 直線性の判断方法

検出器の直線性を説明するため,高い放射照度におい て検出器の直線性が悪い(非直線的な)場合の概念図を図 20 に示す.□印は説明用に任意に作成したデータであ る.5000count までは直線性が高く,5000count 以上は極 端に非直線性を持つようにデータを作成した.図中の実 線(青色)は 0.3~0.5kW/m²の 3 点で求めた回帰直線,破線 (赤色)は 1.0~1.2kW/m²の 3 点で求めた回帰直線である. 検出器の直線性が良い場合,両者の回帰直線の傾きはほ ぼ同じとなり,両者の傾きの比は 1 に近くなる.図 20 では両者の傾きの比は 2500/10000=0.25 であり,この 値が小さいほど直線性が悪いことを示している.

図 20 のように放射照度の最大付近と中間付近において,2 通りの回帰直線を求め,両者の傾きの比によって, 直線性の上限を判断することとした.

③ 直線性の上限調査

a) 調査方法

調査する測定値の範囲は、下限については 1 回/分 の測定値におけるノイズの影響を考慮し、上限につい てはメーカーが示す上限付近までの 3000~17000count とし、この範囲について 1000count 毎に分けて調査し た.図 19に示すように、1 つの波長の測定値は、0.1~ 1.2kW/mの 12 個あり、この 12 個の測定値を 1 組のデ ータセットとする.データセットは、設定した 3 種類 の露光時間×800(300nm~1100nm)=2400 組となる.

3000~17000count のうち, ここでは 10000count を調 査した手順を述べる. ①2400 組のうち, 1.2kW/m²にお ける測定値が 10000count±2%=9800~10200count の 範囲に入るデータセットを抽出する. なお, キセノン ランプの輝線付近など, 隣接する測定値の変化が大き いデータについては取り除いた. ②抽出した個々のデ ータセットについて, 図 20 と同様に 2 通りの回帰直 線 y=Ax+B を求める. 1 通り目は, 0.2~0.8kW/m²の測 定値のうち, 上限が 6000count 以下となる 3 個の測定 値で回帰直線を求め, この傾きを A1 とする. 表 2 に

①データセットの抽出		②回帰直線		②同県直鎮	
		$1.2 \text{kW}/\text{m}^2$	の何	頁き	の係数比
露光時間	波長	の測定値 (count)	A1	A2	(A2/A1)
500msec	936nm	9816	8037.6	7943.2	0.9883
500msec	942nm	10097	8260.0	8150.0	0.9867
500msec	943nm	9956	8134.4	8083.2	0.9937
500msec	944nm	9928	8148.7	8102.4	0.9944
500msec	945nm	10005	8300.7	8213.3	0.9943
500msec	946nm	10166	8161.7	8120.3	0.9895
				④平均	0.9912

表3 直線性の調査結果(10000count)



 通り目の回帰直線の算出に用いた放射照度を示す.
 通り目は、1.0~1.2kW/m²の3個の測定値で回帰直線 を求め、この傾きをA2とする. ③A1を基準として両 者の比(A2/A1:以下、回帰直線の係数比という)を算 出する. ④抽出したすべてのデータセットの回帰直線 の係数比を平均する. 10000countの調査結果を表3に 示す. なお、表中の①から④の数字は、上記手順の① から④を示している.

b) 調査結果

3000~17000count の範囲について,1000count 毎に a)の①から④の手順に従って各測定値における回帰直 線の係数比を求めた.その結果を図 21 に示す.回帰直 線の係数比が±0.5%となる範囲は 0.995~1.005 であ り,この範囲に収まる測定値は 6000count 以下であっ た.以上の結果から MS-711 における直線性の上限を 6000count と判断した.また,複数光源切替え型照射光 源による直線性試験の結果は、3.3.2(2)の測定値 の比を用いた直線性試験の結果(図 14,±0.5%の範囲: 6000count 付近)とほぼ同じであり,測定値の比を用い た調査は検出器の直線性を確認する上で有効な方法 と言える.

(5) MS-711 の非直線性データの補正方法MS-711 の 6000count 以上の直線性が悪いと判断したデ



図 22 測定値の比のずれ(長い露光時間)の分布 及び非直線性の測定値を補正する近似式



(測器:MS-711 S/N ES17340.01)

ータについて、補正方法を次の手順により決定した.

- (1): 複数光源切替え型照射光源により測定した 3 種類の 露光時間の測定値について, 500msec/200msec, 500msec/50msec, 200msec/50msec の比を 1nm 毎(300nm ~1100nm)に算出.
- ②:ノイズの影響を除くため、短い露光時間の測定値については、1500count以下のデータを取り除いた.
- ③:②のデータについて,短い露光時間の測定値が直線性 を維持する 6000count までのデータを抽出.
- ④:③のデータについて長い露光時間の測定値が 19000count以下のデータを抽出.

上記の①から④までの条件に当てはまる 3 通りの比に ついて,図14と同様に測定値の比のずれに換算し,横軸 を長い露光時間の測定値,縦軸を測定値の比のずれとし た分布を図22に示す.6000count以上の全てのデータを 用いて,切片を0として3次近似曲線を当てはめ,この3 次式を用いて測定値を補正する.

【補正例】

例えば測定値が 17500count の場合,図 22 の 3 次式に x=17500 を代入し、-2.99%が得られる.これを比に変換 して 0.9701 を求め、次式により測定値を補正する. RDnew=RDold/0.9701 (=17500/0.9701=18039) ここで, RDnew は補正後の測定値, RDold は補正前 の測定値を示す.

図 22 の近似式を用いて,図 14 の測定値を補正した結 果を図 23 に示す.全ての波長においてほぼ±0.5%以内に 収まっており,MS-711 については,この近似式を用いて 測定値を補正することとした.なお,ここでは示していな いが,MS-711 は 19000count を超えると測定値は急激に小 さくなるため,補正する測定値の上限を 19000count とし た.また,PGP-200NIR2 については,検出器の直線性を調 査できなかったため,測定値はそのまま使用した.

3.4 紫外域の迷光補正

紫外域の短い波長については、分光器内部の迷光によって見かけ上測定値が大きくなる.このため、MS-711で 測定した紫外域の波長別放射照度について、ブリューワ ー分光光度計で観測した迷光の影響のない波長別紫外域 日射を用いて補正を試みた.なお、ブリューワー分光光度 計の国内準器は、世界準器との比較で1%以内の精度で観 測されている(上里ほか:2015).

両測器の入射角特性の影響を最小限にするため、太陽 天頂角が 20°以下の 5 月~6 月における 12 時の観測値(快 晴)を抽出した.抽出した日の 12 時±20 分において、紫 外域の波長別放射照度に影響を与えるオゾン全量の変動 は±1%未満であった.

MS-711 については、図 7(a)~(c)に示すとおり、天頂角 が 20°以下では入射角補正係数は 0.995~1.006(全波長)で ある.また、ブリューワー分光光度計の天頂角 20°以下の 入射角補正係数については、伊藤(2002)による報告では図 による確認ではあるが、MS-711 と同程度である.

両者の波長別放射照度の関係から以下の式により迷光 補正係数 Cuv を算出した.

 $C_1 = C_2 - \{C_3 \times (\lambda - 300)\}$

 $C_{UV} = 10^{(\lambda-315)}$

ここで, C₂, C₃は測器固有の係数であり, 任意に決定 した. 各測器の係数は以下のとおり.

 $S/N S15059.10 : C_2 = 0.0350, C_3 = 0.0030$ $S/N S17024.06 : C_2 = 0.0300, C_3 = 0.0030$ $S/N ES17340.01 : C_2 = 0.0325, C_3 = 0.0025$

【補正例】

 $IRRnew\!=\!IRRold\!\times\!Cuv$

ここで, IRRnew は補正後の放射照度, IRRold は補 正前の放射照度を示す.



迷光補正する波長範囲については、ブリューワー分光 光度計と分光放射計の放射照度の差が校正時の不確かさ を超える波長から補正することとした.居島(2018)による と、ブリューワー分光光度計の校正時の不確かさは 2.8%, MS-711 の校正時の不確かさは 2.6%であり、最大で 5.4% となる. 300nm~312nm の放射照度の差は 15%以上あり、 313nm は 5%未満であった.したがって、迷光補正する範 囲を 300nm~312nm とした.

S/N ES17340.01 の迷光補正係数を図 24 に, この補正係数を用いて補正した波長別放射照度の結果(2018 年 6 月 4 日 12 時)を図 25 に示す.この方法は簡易的な方法であり, 今後迷光補正の方法についてはさらに検討する必要がある.

4. 波長別放射照度の算出手順の作成

分光放射計は、温度特性、入射角特性及び検出器の直線 性等の特性を持っており、屋外で観測した測定値にはこ れらの特性による不確かさが含まれている.このため、測 定値を波長別放射照度(W/m²/nm)に変換する前に、測定値 を補正し、不確かさを最小限に抑える必要がある.本調査 では、次の①から⑧の手順により波長別放射照度を算出 し、⑨によって3種類(MS-711, MS-712, PGP-200NIR2)の 分光放射計の波長別放射照度を合成・接続した. ①温度特性の補正

- ②検出器の非直線性の補正(MS-711のみ)
- ③

 直達日射水平面成分の算出
- ④直達日射水平面成分の入射角特性の補正
- ⑤直達日射の算出
- ⑥合成全天日射の算出
- ⑦波長別放射照度への変換
- ⑧迷光補正(300nm~312nm)(MS-711のみ)

⑨3 種類の分光放射計の波長別放射照度の合成・接続

なお,各測器の波長間隔は異なるため,本稿では全ての 測定データを平滑・1nm毎に内挿処理している.例えば, MS-711では,出力されるデータの波長間隔は0.3~0.5nm と細かいが,波長分解能は7nmであることから,1nm毎 に内挿処理することに問題はない.測定値と平滑・内挿し た値との差は,3000count以上において測定値の±0.2%以 内に収まっており,3.3.1で述べた測定値のばらつき の半分以下である.平滑・内挿処理の詳細については,居 島・島村(2013)を参照いただきたい.

波長別放射照度算出手順の詳細は以下のとおりである. (1) 温度特性の補正

観測時の気温と図2及び図4~6に示した波長毎の温 度補正係数から3.1の図3の3次式により温度補正 係数を求め,測定値を補正する.

(2) 検出器の非直線性の補正(MS-711のみ)

3.3.2の図 22 で求めた近似式により補正する.
 (3) 直達日射水平面成分の算出

写真 1 では、太陽追尾式遮蔽装置は全天日射を測定 する位置にある.遮蔽装置を5分に1回作動させ、直達 日射を遮蔽して散乱日射を測定する.全天日射から散 乱日射を差し引き、直達日射水平面成分を算出する.な お、直達日射水平面成分の算出に関する詳細は、居島 (2014)及び居島・松元(2015)を参照いただきたい.

(4) 直達日射水平面成分の入射角特性の補正

直達日射水平面成分について,**3.2**で求めた入射角 補正係数により測定値の補正を行う.

(5) 直達日射の算出

以下の式を用いて直達日射水平面成分から直達日射 を算出する.

- $DR_{\lambda} = DH_{\lambda} / cosZ$
 - Z:太陽天頂角
 - DR_λ:波長 λにおける直達日射

DH_λ: 波長 λ における直達日射水平面成分

(6) 合成全天日射の算出(4)で補正した直達日射水平面成分と散乱日射を合成

し,合成した全天日射を算出する.

(7) 波長別放射照度への変換

今回使用した測器については、2~4か月毎に NIST ラ ンプ(S/N F-1376)による校正を実施しているが、測器の 感度変化は、全波長平均において年 1~3%低下してい た.このため日毎の波長別測器感度を直線内挿によっ て算出した.全天日射、直達日射、散乱日射及び反射日 射の測定値について、波長別測器感度を用いて波長別 放射照度を計算する.

【400nm 放射照度計算例(2018 年 9 月 12 日 10 時 30 分)】 校正日 2018 年 9 月 5 日 400nm の測器感度

: 266919 [(count $\cdot m^2 \cdot nm) / W$]

校正日 2018 年 9 月 19 日 400nm の測器感度

: 268140 [(count \cdot m² \cdot nm) / W]

9月5日と9月19日の測器感度から9月12日の測器 感度を直線内挿で求める.: 267529 [(count・m²・nm)/W]

9月12日10時30分の屋外における400nmの測定値 (露光時間50msec):14823[count]

NIST ランプによる校正時の露光時間は 1000msec の ため, 50msec で観測した測定値を 1000msec で測定した 場合の測定値に換算する.

 $14823 \times (1000/50) = 296460$ [count]

直線内挿した測器感度と 1000msec に換算した測定値 から波長別放射照度を算出する.

 $296460 / 267529 = 1.108 [W/m^2/nm]$

なお、計算例では測定値の補正を考慮していない.

(8) 迷光補正(300nm~312nm)(MS-711のみ)

MS-711の紫外域(300nm~312nm)について,**3.4**の 手法で迷光を補正する.

(9)3種類の分光放射計の波長別放射照度の合成・接続

下向き放射は 3 種類の分光放射計から算出した波長 別放射照度を合成し、300nm から 2500nm までの放射照 度に段差が生じないように接続を試みた. MS-711 と MS-712 及び MS-712 と PGP-200NIR2 の接続部分は、測 定値のばらつき及び波長分解能を考慮して決定した.

2018年5月22日の太陽天頂角60°における3台の測 定値を図26に示す.MS-711では、750nmより長い波長 において、測定値は年間を通して3000count以下であり、 図10に示すようにばらつきは0.5%以上となる.このこ とからMS-711とMS-712の測定値が重複する波長につ いては、MS-712の放射照度を使用することとし、放射 照度の変化が大きい892nm~897nmを利用して段差が 生じないように接続した.その結果(全天日射)を図27 に示す.なお、MS-712の測定波長範囲は900nmとなっ ているが(表1)、使用した測器(S/NES17183.03)について





は880nmから測定することが可能である.

MS-712 と PGP-200NIR2 の測定値が重複する波長に ついては,波長分解能の良い MS-712 の測定値を使用す ることとした.また, MS-712 の校正時のばらつきにつ いても考慮し, MS-712 の使用する波長範囲を決定した. MS-712 の校正において, 1640nm より長い波長では測 定値が 8000count 以下となり,ばらつきが 0.5%以上と なることから, 1640nm までに接続することした. 1600nm~1640nm については,段差が生じないように以 下の式により両者の加重の割合を変化させて接続した.

$$CD = MD \times \frac{(40 - N)}{40} + PD \times \frac{N}{40}$$

CD: 波長 λ における MS-712 と PGP200NIR2 の 合成した放射照度

- MD: 波長λにおける MS-712の放射照度
- PD:波長λにおける PGP200NIR2の放射照度 N:λ-1600 (波長λの範囲:1600~1640)

その結果(全天日射)を図 28 に示す.また,波長別放 射照度の接続例として,2018 年 5 月 22 日(快晴日)の全 天日射,直達日射,散乱日射の波長別放射照度(300nm~ 2500nm)を図 29 に,反射日射の波長別放射照度(350nm ~1050nm)を図 30 示す.



図 28 MS-712 と PGP-200NIR2 の放射照度の接続 (2018 年 5 月 22 日:太陽天頂角 60°)



300 500 700 900 1100 1300 1500 1700 1900 2100 2300 2500 Wavelength (nm)

(2018/5/22:太陽天頂角30°~80°)

(a)全天日射 (b)直達日射 (c)散乱日射



5. 新たに開発した校正手法を適用した観測値の精度

新たに開発した校正手法を適用した観測値の精度を確認するため、分光放射計の波長別放射照度と、BSRNのつくばにおける観測値を以下の手順で比較した. なお、 BSRNの観測に使用している測器は、世界気象機関の世界 放射センター(スイス連邦ダボス物理気象観測所)が維持 する日射計の世界準器群(型式の異なる絶対放射計で構成)によって校正された絶対放射計(アジア地区準器)を用 いて校正されている(間宮ほか: 2012).

4. の手順によって得られた全天日射,直達日射,散乱 日射の波長別放射照度について、300nm~2500nm の全波 長を積算し, BSRN の広帯域型日射計で観測した放射照度 と比較した.比較した期間は 2017 年1月から 2018 年11 月である.また、太陽天頂角によって入射角特性が異なる ため、比較には太陽天頂角が 15°と 20°~80°の 10°毎のデ ータを選択し、さらに快晴等で日射の変動が小さい観測 値のみを抽出した.抽出したデータについて、横軸を BSRN の放射照度(以下, BS rad という),縦軸を分光放射 計の波長別放射照度の積算値(以下, SPrad という)として 分布図を作成した.測定値の補正をしていない全天日射, 直達日射, 散乱日射を図 31~図 33 に, 測定値を補正した 全天日射,直達日射,散乱日射を図 34~図 36 に示す.こ れらの図から全天日射と直達日射については, BSRN との 差が小さくなり、測定値の補正によって改善されたこと を確認した.

抽出した全データについて,改善した割合を確認する ため,次式により分光放射計の観測値と BSRN の観測値 の差の割合(以下,BSRN との差という)を求め,全データ を平均した.

BSRN との差={(SPrad-BSrad)/BSrad}×100 [%]

各観測要素の全データについて, BSRN との差を平均した結果及びその標準偏差を表 4 に示す. 測定値の補正によって BSRN との差は,全天日射では 0.7%,直達日射では 1.0%改善され,散乱日射では 0.2%差が大きくなった.また,標準偏差については, 0.1~0.3 小さくなり,ばらつきは改善された.

BSRN で使用している直達日射計の測定波長範囲は, 200nm~4000nm(間宮ほか:2012)であり,分光放射計とは 異なっているため,双方を比較する際の参考値として,図 12 に示した大気路程 1.5 における全天日射データの 280nm~4000nm と 300nm~2500nm の積算値を比較した 結果,0.8%の差があった.この値を考慮してもBSRN と の差は,全天日射では-1.4%,直達日射では-2.1%となる.





(観測要素:散乱日射)

表 4 H	SSRN	と分光放射	計の観測値の差
-------	-------------	-------	---------

観測要素	補正なし[%] (括弧内は標準偏差)	補正あり[%] (括弧内は標準偏差)
全天日射	-2.8 (2.2)	-2.1 (1.9)
直達日射	-3.9 (2.1)	-2.9 (1.8)
散乱日射	0.6 (2.6)	0.8 (2.5)

6. まとめ

6.1 分光放射計の特性調査及び補正手法の開発

分光放射計の温度特性,入射角特性及び検出器の特性 について調査し,温度特性及び入射角特性については,補 正係数を 1nm 毎に算出した.

検出器の特性について,検出器の安定性及び直線性を 調査した.検出器の安定性については,バックグラウンド ノイズの測定値への影響を調査し,ノイズを平均化して 測定値のばらつきを抑える効果を確認した.検出器の直 線性については,MS-711の6000count以上の測定値にお いて,直線性が悪くなることを確認したため,産業技術総 合研究所の協力を得て,直線性試験を実施し,その結果を 基に測定値を補正するための近似式を作成した.MS-711 の紫外域については迷光補正を行った.

6.2 波長別放射照度の算出手順の作成

各特性の補正係数及び補正式を用いて分光放射計の測 定値(count 値)から波長別放射照度への算出手順を作成し た.また,3種類の分光放射計の波長別放射照度について, 合成・接続を試みた.

6.3 新たに開発した校正手法の精度

新たに開発した校正手法を適用した観測値の精度について,分光放射計の全波長の積算値と BSRN の広帯域型 日射計で観測した放射照度との比較を行った.その結果, 測定値を補正する前後では,全天日射では 0.7%,直達日 射では 1.0%改善されたが,散乱日射では BSRN との差が 0.2%大きくなった.

補正した分光放射計の積算値は,BSRNの放射照度に比べて,測定波長範囲を考慮しても全天日射では 1.4%,直達日射では 2.1%小さかった.

6.4 今後の課題

分光放射計の観測値と BSRN の観測値には,測定波長 範囲を考慮しても直達日射において 2.1%の差があった. 分光放射計で観測した波長別放射照度の精度を上げるた め, PGP-200NIR2 については,検出器の直線性を調査し, 補正方法を検討する.また,その他の分光放射計について も NIST ランプによる校正や各種特性の補正方法につい て再検討する必要がある.さらに,分光放射計の校正から 波長別放射照度を算出するまでの不確かさを数値として 表すことを試みる.

本調査で得られた波長別放射照度については,衛星デ ータを用いて推定される日射量の評価及び数値予報の放 射伝達モデルの計算結果(直達日射・散乱日射)の検証に活 用する予定である.

謝辞 辞

本調査は、宇宙航空研究開発機構、国立環境研究所及び 高層気象台における三者間共同研究契約「陸域生態系の 生産量推定に関する共同研究」及び気象研究所の「分光日 射観測とデータ同化によるエアロゾル・雲の地表面放射 収支に与える影響監視に関する研究(地球環境保全試験研 究費)」による成果の一部であり、本調査において下向き 放射観測に使用した分光放射計については気象研究所か ら借用し、NIST ランプについては宇宙航空研究開発機構 から貸与して頂いた.検出器の直線性の調査については、 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 太陽光発電 研究センター 評価・標準チームの猪狩真一主任研究員に 多大なご協力を頂いた.また、高層気象台観測第二課の皆 様には、高品質な観測データを取得するため、屋外機器の 日々の保守点検作業にご協力頂いた.ここに厚くお礼申 し上げます.

引用文献

- ASTM(2003), Standard tables for reference solar spectral irradiance at air mass 1.5: Direct normal and hemispherical for a 37° tilted surface, Standard G173-03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- 猪狩真一・小久保順一・周泓(2018):複数光源切り替え型 照射光源による分光放射計の直線性評価. 平成 30 年度 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会講 演論文集,165-168.
- 居島修(2012):分光型全天日射計(MS-710)の温度特性及び 入射角特性について.高層気象台彙報,70,37-42.
- 居島修・島村哲也(2013):分光型全天日射計(MS-710)の測 器常数較正とつくばにおける太陽光スペクトルの試験 観測.高層気象台彙報,71,11-20.
- 居島修(2014):分光型全天日射計(MS-710)を用いた太陽光 スペクトルにおける直達成分と散乱成分の試験観測. 高層気象台彙報, 72, 25-32.
- 居島修・松元誠(2015): つくばにおける太陽光スペクトル

の直達成分と散乱成分の季節変化.高層気象台彙報,73, 35-44.

- 居島修・高野松美(2016):分光型全天日射計(MS-712)を用 いた太陽光スペクトルの近赤外域における試験観測. 高層気象台彙報,74,27-36.
- 居島修・高野松美・山崎明宏・石田春磨・工藤玲(2018): 分光放射計用校正装置の開発及び分光放射計の校正精 度.高層気象台彙報,75,63-76.
- International Organization for Standardization (1990) : Solar energy –Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. ISO9060.
- 伊藤真人(2002):新型 NIST ランプ検定装置の開発と紫外 域日射観測装置(ブリューワー分光光度計)の高度角・方 位角特性.高層気象台彙報, 62, 53-66.
- 間宮嘉久・居島修・石井憲介・大河原望・辰己弘(2012): 新しい日射放射観測の開始について.測候時報,気象庁, 79.1-2, 16-37.
- McArthur L.J.B. (2005) : Baseline Surface Radiation Network (BSRN). Operations Manual. Version 2.1. WCRP-121, WMO/TD-No.1274, WCRP/WMO. 176pp.
- 上里至・清水悟・居島修・伊藤真人(2015): カナダ国トロ ントにおけるブリューワー分光光度計の国際相互比較 2014. 高層気象台彙報, 73, 55-61.