

# 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

居島 修\*

## Observation of the Direct and Diffuse Spectral Solar Radiation using the Grating Spectroradiometer (MS-710)

Osamu IJIMA\*

### 要旨

改良した太陽追尾式遮蔽装置に分光型全天日射計を搭載し、全天波長別日射照度と散乱波長別日射照度を交互に測定した。全天波長別日射照度と散乱波長別日射照度を用いて、直達波長別日射照度を算出し、太陽スペクトルの直達成分と散乱成分の観測を試みた。その結果は以下のとおりである。

- 1) 1台の分光型全天日射計を用いて太陽光スペクトルの直達成分と散乱成分を観測するため、太陽追尾式遮蔽装置の遮蔽球を、指定した時刻に上下動する改良を行った。全天波長別日射照度と散乱波長別日射照度を交互に観測し、直達波長別日射照度を算出した。
- 2) 快晴日における太陽光スペクトルの直達成分及び散乱成分の日変化を調査した。その結果、直達成分では、最大となる波長は、太陽天頂角の増加とともに、短波長側から長波長側へシフトするが、散乱成分では、太陽天頂角に関係なく、最大となる波長は400nm～450nmであった。全天成分に対する散乱成分の割合(散乱率)は、短波長側ほど大きく、また、太陽天頂角が大きくなるほど、各波長における散乱率は増加した。
- 3) 観測波長範囲を5つの波長帯に分け、全波長の日射照度に対する各波長帯の日射照度の割合について、エアロゾルの光学的厚さ(AOD)が異なる快晴日を抽出し、調査した。直達成分では、AODの増減に関係なく、各波長帯の割合はほぼ同じであった。散乱成分では、AODが小さい場合、最も短い波長帯の割合が顕著に増加した。
- 4) 算出した直達波長別日射照度を用いて、回折格子型サンフォトメータの測器感度変化の監視を試みた。回折格子型サンフォトメータの直達波長別日射照度を求め、両者を比較した結果、1～3%で一致しており、測器感度変化の監視に利用可能であることを確認した。

### 1. はじめに

高層気象台では、太陽光スペクトルを観測するため、2011年に分光型全天日射計(英弘精機社製 MS-710:以下、MS710という)を1台整備し、当測器の温度特性及び光学特性(波長分解能、高度角特性)を明らかにした(居島:2012)。また、標準光源を用いた測器常数の校正方法を確立し、測器感度の経年変化及びつくばにおける太陽光スペクトルの試験観測を行い、全天成分における波長別日射照度(以下、全天波長別日射照度という。)の季節変化等

を調査した(居島・島村:2013)。

気候システムの解明、生態系炭素循環の研究、太陽光発電の評価、衛星に搭載している分光測器の検証等において、太陽光スペクトルの直達成分(または、直達波長別日射照度)と散乱成分(または、散乱波長別日射照度)を分離(以下、直散分離という。)し、それぞれの波長別日射照度を精確に観測することが課題となっている。

太陽光スペクトルの直散分離の方法については、2台の分光型全天日射計を用いた例がある(秋津ほか:2012)。この方法は、1台の測器にコリメーションチューブと呼ばれる筒を装着して直達成分を観測し、もう1台を太陽追尾

\*高層気象台 観測第三課

式遮蔽装置に搭載して散乱成分の観測を行う。

紫外域日射の領域では、2台のブリューワー分光光度計を利用し、1台は全天(GL)波長別紫外域日射照度を、もう1台は散乱(DF)波長別紫外域日射照度を測定し、同時に観測したそれぞれの波長別紫外域日射照度から散乱率(DF/GL)を求めた例がある(伊藤：2005, 2006)。

1台の分光型全天日射計を用いた直散分離の方法では、シャドーバンドを利用した報告(Khatri *et al*：2012)がある。この方法は、シャドーバンドの測定誤差や測器の方位角特性の誤差など、これらの誤差の補正が複雑となる。

本稿では、太陽追尾式遮蔽装置を改良し、2013年9月15日から、1台のMS710を用いて、太陽光スペクトルの直散分離を試みた。その結果を以下に報告する。

## 2. MS710の測器感度変化

試験観測に用いたMS710は、2012年6月以降、NISTランプによって、2~3カ月ごとに検定を行い、波長別測器感度を決定している(居島・島村：2013)。

2012年6月~2013年12月におけるMS710の測器感度変化を、図1(上)に示す。横軸のJulian Dayは、2012年12月31日を0とし、2012年はマイナスで表記している。定期的な検定によって、MS710の測器感度は、1年6カ月の間に37%低下したことを確認した。なお、測器感度の変化量は、波長によって異なるため(-37%±3%)、450nm~900nmの平均をプロットした。大幅な感度低下の原因は、受光面から分光器に光を取り込む光ファイバーの一部が破断したためと考えられ、構造の改良が強く望まれる。

2013年7月20日以降、NISTランプ検定を実施しない約2ヶ月間については、外部標準ランプ点検装置を用いて、測器感度の監視を行った。図1(下)に、NISTランプ及び外部標準ランプによるMS710の測器感度変化を示す。また、外部標準ランプ点検装置の外観を、写真1に示す。外部標準ランプによる測器感度変化は、NISTランプと2%以内で一致しており、外部標準ランプによる測器感度変化の監視は有効であることを確認した。なお、外部標準ランプ点検装置については、広帯域紫外域日射計用に開発された装置を改良し、製作した(伊藤・高野：2006)。

## 3. 直散分離の方法

### 3.1 太陽追尾式遮蔽装置の改良

太陽追尾式遮蔽装置(ブリード社製：ASTX-1)は、散乱日射観測に使用する装置である。本装置は、太陽を自動で追尾し、本装置に搭載した全天日射計の受光面を、遮蔽装置(遮蔽球)によって常に太陽直射光を自動で遮蔽する。本調査では、1台のMS710を用いて直散分離を行う

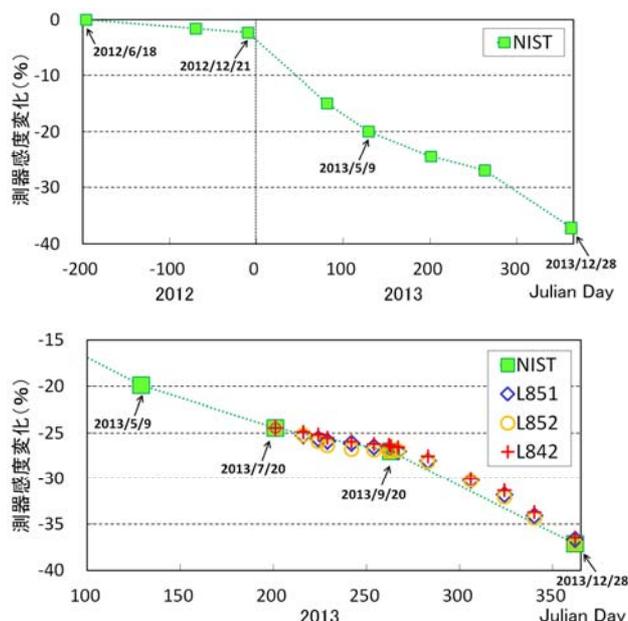


図1 測器感度変化

上：NISTランプによる測器感度変化(2012/6/18~2013/12/28)

下：NISTランプ及び外部標準ランプ(L851, L852, L842)による測器感度変化(2012/5/9~2013/12/28)

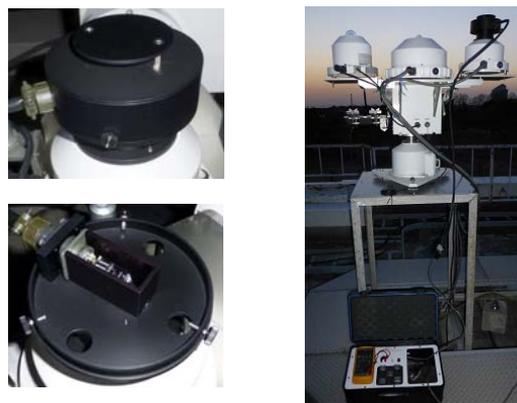


写真1 外部標準ランプ点検装置

左：外部標準ランプハウス及びハロゲンランプ

右：外部標準ランプ点検装置(ランプハウス装着時)

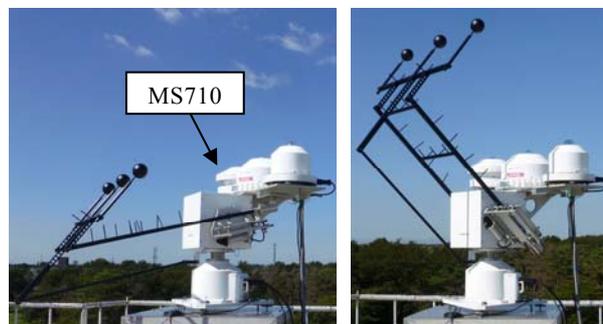


写真2 改良した太陽追尾式遮蔽装置

左：遮蔽なし(全天波長別日射照度観測時)

右：遮蔽あり(散乱波長別日射照度観測時)

ため、遮蔽球を指定した時刻に上下動させ、全天波長別日射照度と散乱波長別日射照度を交互に観測できるように改良を行った。写真 2(左)は、遮蔽球を下げて(以下、「遮蔽なし」という。)全天波長別放射照度を、写真 1(右)は、遮蔽球を上げて(以下、「遮蔽あり」という。)MS710 の受光面を太陽直射光から遮蔽し、散乱波長別日射照度を観測している。

### 3. 2 観測方法

MS710 は、1 分毎に観測を行っている。遮蔽球を上下動させる時間間隔については、8 分間を「遮蔽なし」、2 分間を「遮蔽あり」とした。この合計 10 分間の上下動を繰り返し、全天波長別日射照度と散乱波長別日射照度を交互に観測した。なお、8 分に設定した理由については、3.

#### 3①で述べる。

図 2 に、2013 年 9 月 19 日 7 時 00 分から 7 時 30 分までの 600nm における日射照度の観測例を示す。この時間帯の天気は快晴であった。図 2 の上矢印(↑)は、「遮蔽あり」(散乱波長別日射照度)の観測値で、太陽直射光を遮蔽しているため、出力が小さくなっている。

### 3. 3 データ処理

#### ① データの補間

全天波長別日射照度と散乱波長別日射照度を、交互に観測するため、それぞれの波長別日射照度を観測しない時刻については、直線内挿によってデータを補間した。なお、内挿した散乱波長別日射照度が、全天波長別日射照度より大きい場合は、全天波長別日射照度を散乱波長別日射照度とした。

図 3 に、2013 年 9 月 19 日 12 時 30 分から 12 時 55 分までのデータの補間例を示す。12 時 45 分以降は、雲の通過があり、全天日射照度は変動していた。1 分毎の観測では、雲の通過による変動が不明瞭なため、図中には広帯域型全天日射計を用いて観測した 1 秒毎の全天日射照度(青点線)及び散乱日射照度(赤点線：広帯域全天日射計の受光面を遮蔽)を参考としてプロットしている。12 時 45 分以降に見られるように、雲の通過などで直達日射が遮られた場合、全天波長別日射照度は、散乱波長別日射照度に比べて大きく変化する。このため、遮蔽球の上下動のタイミングは、データの再現性を考慮し、全天波長別日射照度の観測値を多く取得する設定(8 分間)とした。

#### ② 直達波長別日射照度の算出

全天波長別日射照度から散乱波長別日射照度を差し

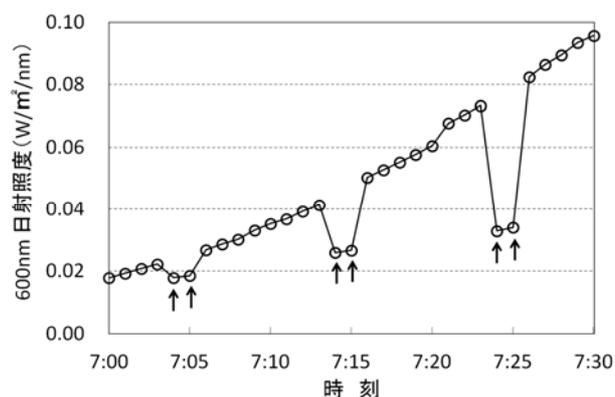


図 2 遮蔽球の上下動による波長別放射照度の観測例 (2013 年 9 月 19 日 : 600nm)

↑の付いた観測値は散乱波長別日射照度(遮蔽あり), その他の観測値は全天波長別日射照度(遮蔽なし)を示す。

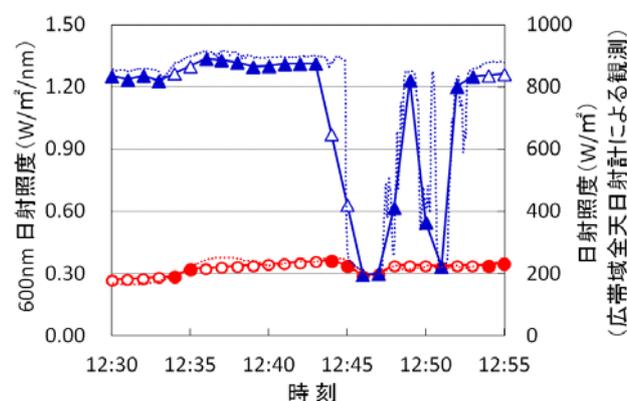


図 3 データの補間例 (2013 年 9 月 19 日 : 600nm)

- ▲ : 600nm の全天波長別日射照度
- △ : 内挿で求めた 600nm の全天波長別日射照度
- 青点線 : 1 秒毎の全天日射照度(広帯域全天日射計の観測値)
- : 600nm の散乱波長別日射照度
- : 内挿で求めた 600nm の散乱波長別日射照度
- 赤点線 : 1 秒毎の散乱日射照度(受光面を遮蔽した広帯域全天日射計の観測値)

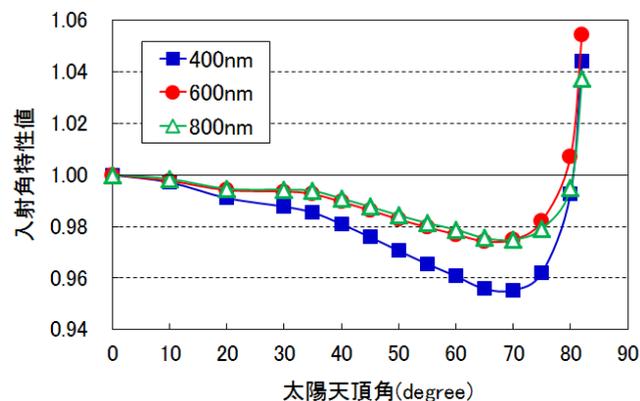


図 4 入射角特性 (400nm, 600nm, 800nm)

引くことで、直達波長別日射照度の水平面成分が得られる。ただし、実際に観測される直達波長別日射照度の水平面成分は、入射角特性の影響を受け、太陽直射光が測器の受光面に入射する角度によって真の値よりも減少または増加する。

図 4 に、MS710 の入射角特性を示す。400nm では、太陽天頂角 70 度における入射角特性値は 0.955 であり、真の値より 4.5% 小さく観測されることを示している。なお、MS710 の入射角特性検査及び入射角特性の補正方法等については、居島・島村(2013)を参照されたい。

直達波長別日射照度の水平面成分に入射角特性の補正を施した後、以下の式で直達波長別日射照度を求めた。

【直達波長別日射照度の計算】

$$DR_{\lambda} = DH_{\lambda} / \cos Z$$

$DR_{\lambda}$  : 波長  $\lambda$  における直達日射照度

$DH_{\lambda}$  : 波長  $\lambda$  における直達日射照度の水平面成分

Z : 太陽天頂角

#### 4. 太陽光スペクトルの直達・散乱成分の観測例

##### 4.1 直達・散乱成分の日変化

図 5 に、12 月 31 日の観測例を示す。5-a は 4 波長(400nm, 550nm, 700nm, 850nm)における直達成分の日変化、5-b は 4 波長の散乱成分の日変化、5-c は広帯域型日射計で観測した直達日射照度及び散乱日射照度の日変化、5-d は 500nm のエアロゾルの光学的厚さ(以下、AOD という。)の日変化(5-d)である。なお、12 月 31 日の天気は終日快晴であった。

直達波長別日射照度の日変化(5-a)の特徴として、短波長(400nm)では、太陽天頂角の増加にともない漸減したが、長波長(850nm)では、日の出または日没の直近までほとんど変化しなかった。散乱波長別日射照度(5-b)の場合、直達成分ほど波長による顕著な違いは見られなかったが、太陽天頂角の増加にともない、短波長ほど急激な減少傾向を示した。

広帯域型日射計で観測した直達日射照度の日変化(5-c: 赤線)は、太陽天頂角に対する変化率で見ると、700nm の直達波長別日射照度の日変化に近似しており、また、散乱日射照度の日変化(5-c: 青線)は、550nm のそれに近似している。

12 月 31 日の AOD(5-d)は、11 時から 13 時に増加しており、AOD の増加にともない、直達波長別日射照度は概して減衰したが、850nm の減衰は僅かであった。また、散乱波長別日射照度については、逆に同時刻に増加しており、中でも 550nm の増加が最も大きかった。

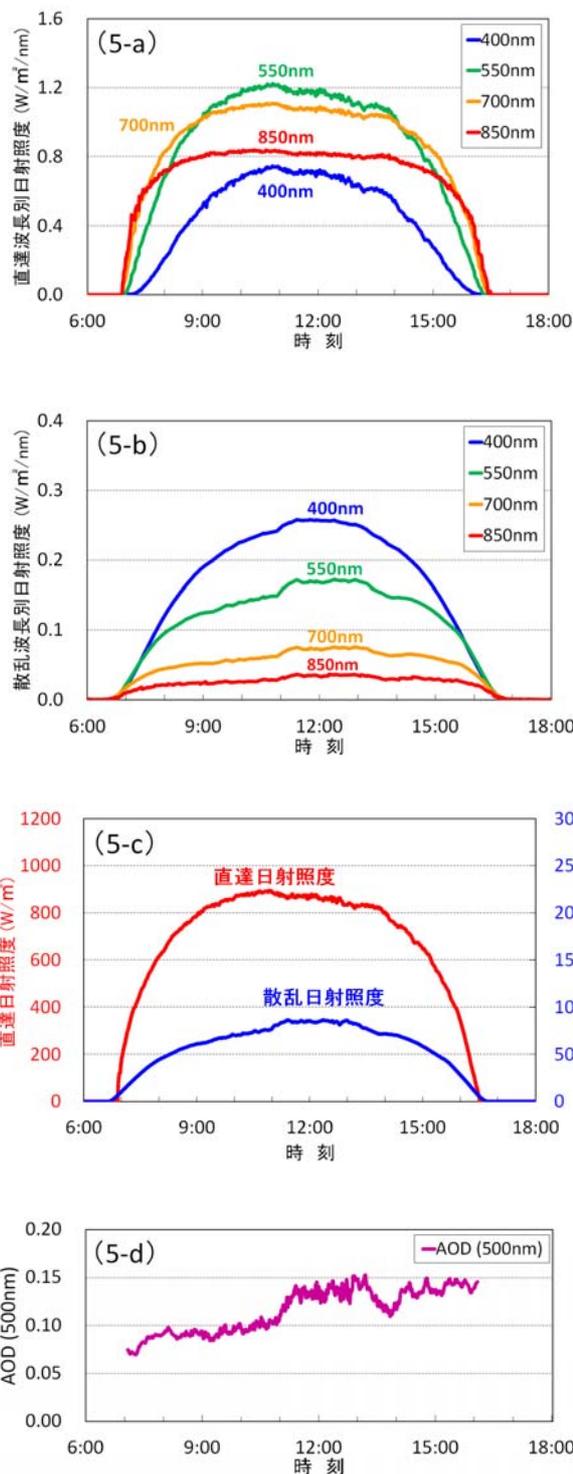


図 5 直達成分と散乱成分の日変化(2013 年 12 月 31 日)  
 (5-a) 直達波長別日射照度(400nm, 550nm, 700nm, 850nm)  
 (5-b) 散乱波長別日射照度(400nm, 550nm, 700nm, 850nm)  
 (5-c) 直達日射照度(広帯域型直達日射計)及び散乱日射照度(広帯域型全天日射計)  
 (5-d) エアロゾルの光学的厚さ(500nm)

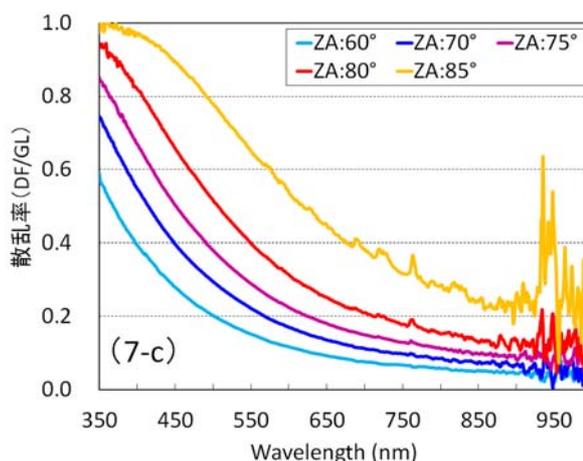
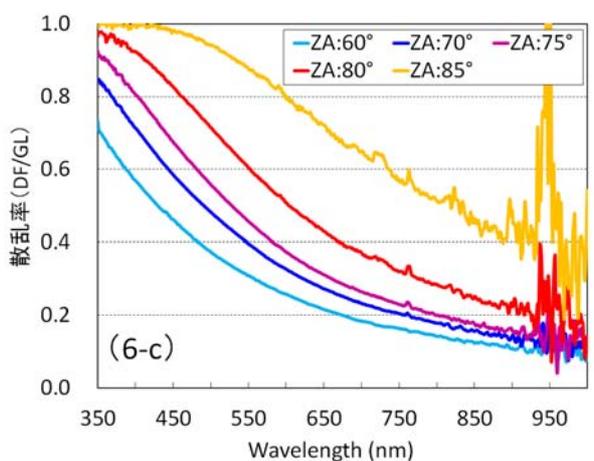
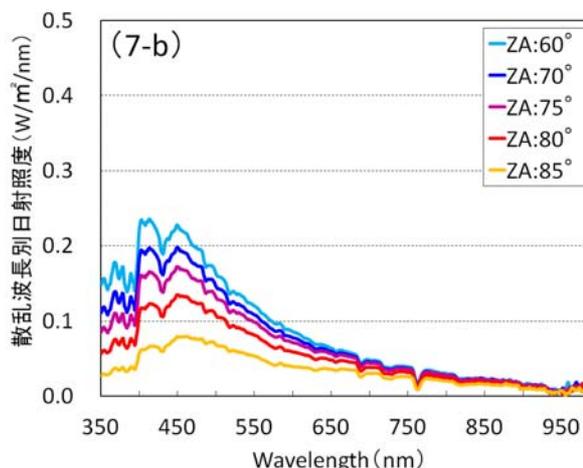
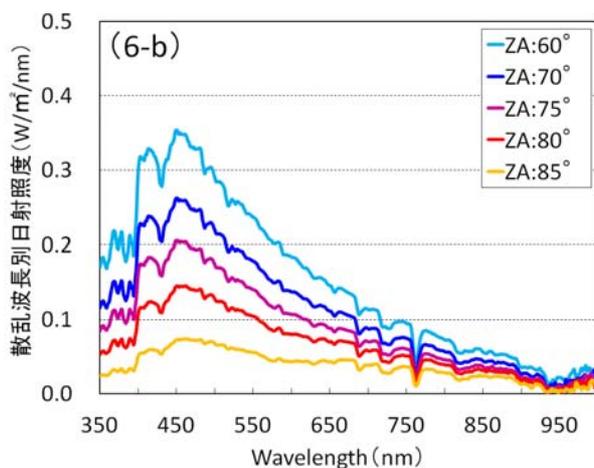
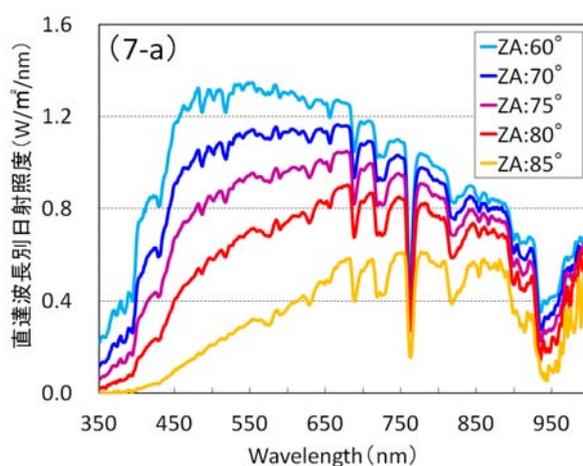
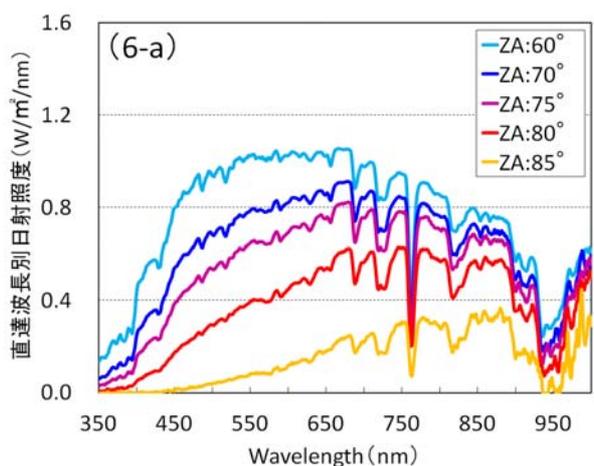


図6 直散分離の観測例(2013年12月2日午後)

AOD(500nm)=0.20(日平均)

- (6-a) 各太陽天頂角における直達波長別日射照度
- (6-b) 各太陽天頂角における散乱波長別日射照度
- (6-c) 各太陽天頂角における散乱率(DF/GL)

図7 直散分離の観測例(2013年12月15日午後)

AOD(500nm)=0.05(日平均)

- (7-a) 各太陽天頂角における直達波長別日射照度
- (7-b) 各太陽天頂角における散乱波長別日射照度
- (7-c) 各太陽天頂角における散乱率(DF/GL)

### 4.2 太陽天頂角の変化に伴う直達・散乱成分の変化

AODの異なる快晴日(2013年12月2日午後, 2013年12月15日午後)を抽出し, 両日の直達波長別日射照度及び散乱波長別日射照度を比較した. 500nmのAODの日平均値は, 12月2日は0.20, 12月15日は0.05であった.

両日について, 太陽天頂角 60°, 70°, 75°, 80°, 85° における直達波長別日射照度を図6(6-a)及び図7(7-a)に, 散乱波長別日射照度を図6(6-b)及び図7(7-b)に示す.

直達波長別日射照度では, 太陽天頂角が大きくなるとともに, 最大となる波長は, 短波長側から長波長側ヘシ

フトした. この要因は, 太陽天頂角が大きくなり, 大気路程が長くなると, 短波長側ほどエアロゾルに散乱され, 減衰したためと考えられる.

散乱波長別日射照度では, 太陽天頂角に関係なく, 最大となる波長は 400nm~450nm 付近であった.

12月2日の直達日射照度は, 12月15日に比べて, 約30%小さかった. 12月2日のAODは, 12月15日の4倍であり, 直達日射照度の減衰は, エアロゾルの増加が原因のひとつと考えられる. 逆に, 散乱波長別日射照度は, エアロゾルの増加により増加したと考えられる.

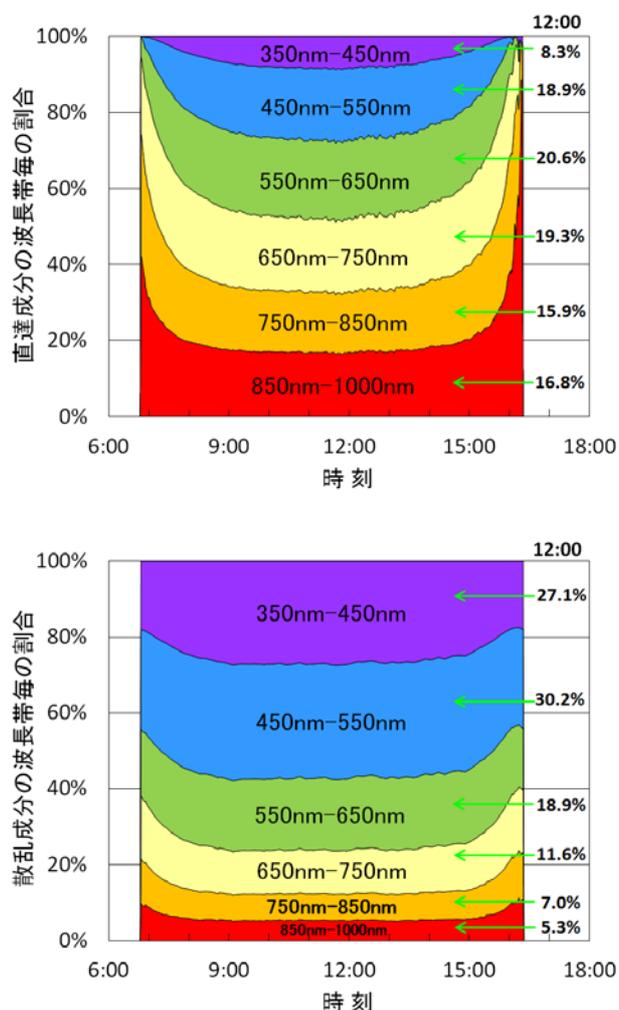


図8 直達成分及び散乱成分の波長帯毎の割合 (2013年12月2日)

AOD(500nm)=0.20(日平均)

上図: 直達成分における波長帯毎の割合

下図: 散乱成分における波長帯毎の割合

グラフ右側の数値は, 12:00における各波長帯の割合を示す.

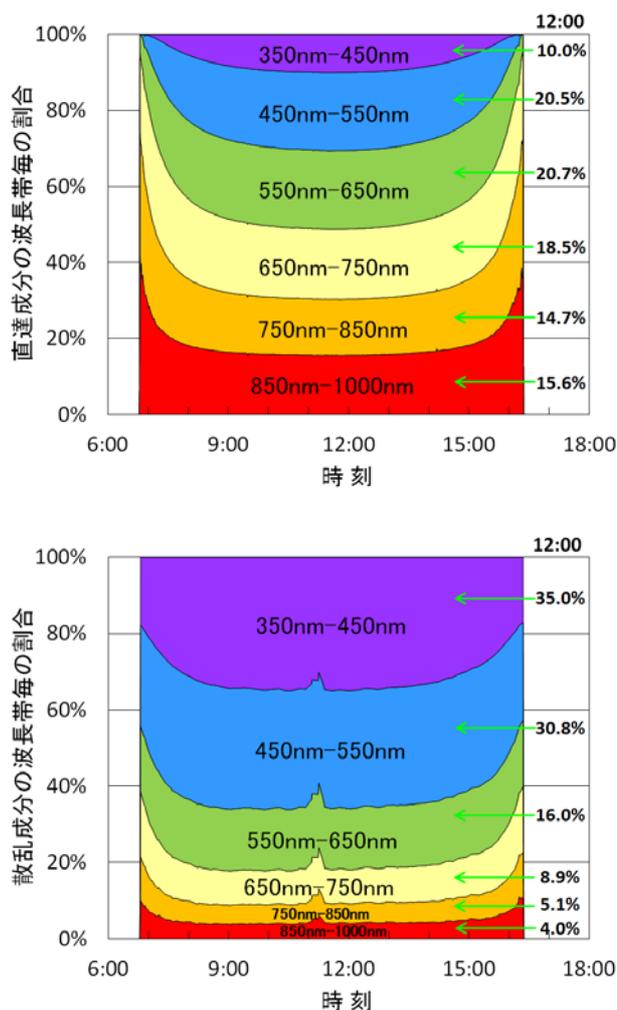


図9 直達成分及び散乱成分の波長帯毎の割合 (2013年12月15日)

AOD(500nm)=0.05(日平均)

上図: 直達成分における波長帯毎の割合

下図: 散乱成分における波長帯毎の割合

グラフ右側の数値は, 12:00における各波長帯の割合を示す.

### 4.3 太陽天頂角の変化に伴う散乱率の変化

全天成分(GL)に対する散乱成分(DF)の割合(DF/GL:散乱率)が、紫外域では可視域に比べ、非常に大きいことを伊藤(2007)は報告している。MS710の観測波長範囲について、太陽天頂角の変化に伴う散乱率の変化を、4.2と同日の観測値を用いて、図6(6-c)、図7(7-c)に示す。なお、散乱率は、値が大きいほど散乱成分の割合が多いことを示す。

両日ともに、短波長ほど散乱率は大きく、また、太陽天頂角が大きくなるほど、各波長における散乱率は増加する。また、AODが大きい12月2日では、短波長側において散乱率の増加が顕著であった。

### 4.4 直達成分及び散乱成分の波長帯毎の割合

直達成分と散乱成分の各波長における日射照度の日変化を調べるため、観測波長範囲(350nm~1000nm)を5つの波長帯に分け、全体の日射照度に対する各波長帯の割合を求めた。その結果を、図8(12月2日, AOD500nm:0.20)、図9(12月15日, AOD500nm:0.05)に示す。なお、図の右側の数値は、12:00における各波長帯の割合である。

直達成分では、両日の各波長帯の割合は、2%未満で一致しており、AODが異なっても各波長帯の割合はほとんど変わらなかった。散乱成分については、AODの小さい12月15日は、12月2日に比べ、短波長側の割合が多くなり、350nm~450nmの割合では8%多くなった。今後、観測事例を増やし、このような波長別日射照度の変化について、その要因を調査する予定である。

## 5. MS710を用いた回折格子型サンフォトメータの測器感度監視の試み

3.3②で算出した直達波長別日射照度を用いて、回折格子型サンフォトメータ(プリード社製 PGS-100:以下、PGS100という。)の測器感度変化の監視を試みた。なお、PGS100の光学特性については、MS710とほぼ同等である(居島:2003,2004)。

2013年9月27日午前のデータを用いて、以下の手順でPGS100の測器感度の変化を確認した。

#### ① PGS100の波長別測器感度の決定

太陽天頂角40度におけるPGS100の観測値(count数)及びMS710の波長別日射照度を用い、以下の式によりPGS100の波長別測器感度を求めた。

$$\begin{aligned} & \text{PGS100の波長別測器感度}[\text{count} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{nm} / \text{W}] \\ & = \text{PGS100のcount数} / \text{MS710の直達波長別日射照度} \\ & \text{本来、太陽高度が最も高い南中時を基準とすることが望ましいが、9月27日は南中時(太陽天頂角:37.7度)} \end{aligned}$$

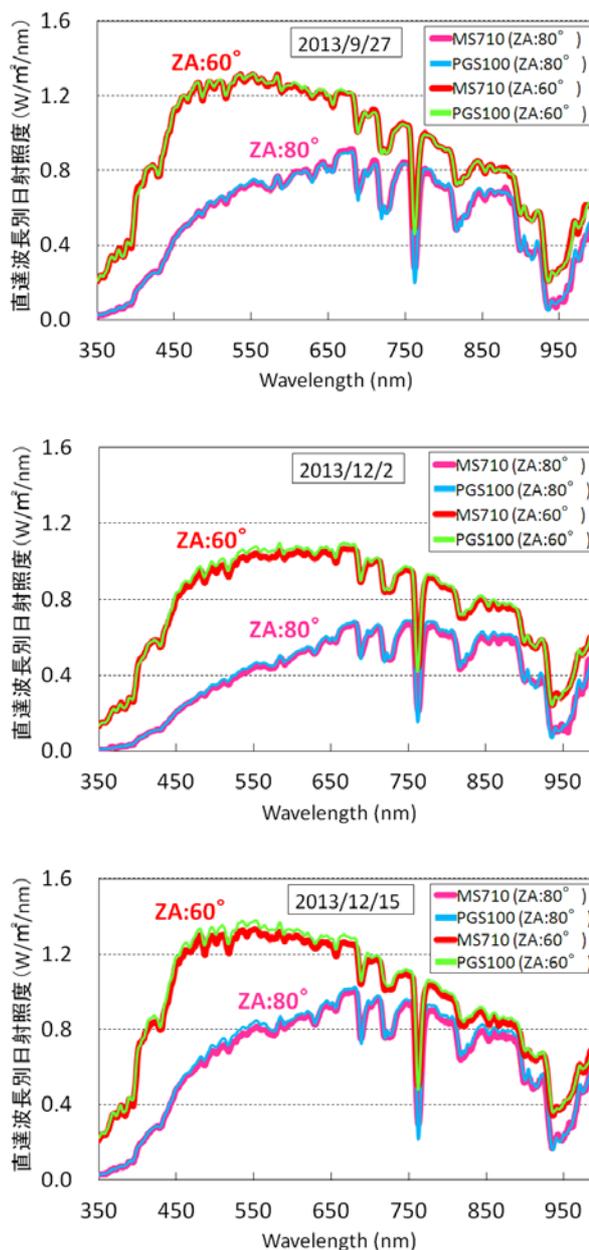


図10 MS710及びPGS100を用いて観測した直達波長別日射照度の比較結果(ZA:60°, ZA:80°)  
(上:2013/9/27午前, 中:2013/12/2午前, 下:2013/12/15午前)

に雲がかかっていたため、太陽天頂角40度のデータを基準とした。

#### ② PGS100の直達波長別日射照度の算出

PGS100の直達波長別日射照度については、①の波長別測器感度を用いて、以下の式で算出した。

$$\begin{aligned} & \text{PGS100の直達波長別放射照度}[\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}] \\ & = \text{PGS100のcount数} / \text{PGS100の波長別測器感度} \end{aligned}$$

#### ③ MS710とPGS100の直達波長別日射照度の比較

MS710とPGS100について、太陽天頂角60°及び80°

における直達波長別日射照度の比較結果を、図 10 に示す。比較を行った日は、2013 年 9 月 27 日、12 月 2 日、12 月 15 日である。3 日間の比較では、MS710 及び PGS100 による直達波長別日射照度は、1~3%で一致した。

以上の結果から、MS710 で算出した直達波長別日射照度を用いることにより、PGS100 の測器感度を確認することができた。なお、サンフォトメータの開口角は、直達日射計と異なるため、太陽周辺光の変化によって比較結果は影響を受けるが、データを選別することにより感度変化の監視には十分に利用可能と考えられる。

## 6. まとめ

太陽追尾式遮蔽装置を改良し、1 台の MS710 を用いて太陽光スペクトルの直散分離を試みた。その結果は、以下のとおりである。

- 1) 1 台の MS710 を用いて太陽光スペクトルの直達成分と散乱成分の観測を行うため、太陽追尾式遮蔽装置の遮蔽球を、指定した時刻に上下動する改良を行った。全天波長別日射照度と散乱波長別日射照度を交互に観測し、これらの波長別日射照度から直達波長別日射照度の水平面成分を求め、入射角特性の補正を行った後、直達波長別日射照度を算出した。
- 2) 太陽光スペクトルの直達成分と散乱成分の日変化等について調査を行った。その結果、直達成分では、最大となる波長は、太陽天頂角が大きくなるとともに、短波長側から長波長側へシフトしているが、散乱成分では、太陽天頂角に関係なく、最大となる波長は 400nm~450nm であった。また、散乱率は短波長ほど大きく、また、太陽天頂角が大きくなるほど、各波長における散乱率は増加した。
- 3) 観測波長範囲を 5 つの波長帯に分け、全体の日射照度に対する各波長帯の割合を求めた。AOD の異なる日を抽出し、各波長帯の割合について調査した。直達成分では、AOD に関係なく、両日の各波長帯の割合はほぼ同じであった。散乱成分については、AOD が小さい 12 月 15 日は、12 月 2 日に比べ、最も短い波長帯の割合が 8%多くなった。
- 4) 算出した直達波長別日射照度を用いて、回折格子型サンフォトメータの測器感度変化の監視を試みた。回折格子型サンフォトメータの直達波長別日射照度を求め、両測器の直達波長別日射照度を比較した。その結果、1~3%で一致し、測器感度の変化の監視に利用することが可能であることを確認した。

以上のように、1 台の分光型全天日射計によって太陽光スペクトルの直達成分と散乱成分の観測が可能となっ

た。

今後は、直達波長別日射照度及び散乱波長別日射照度を引き続き観測し、それぞれの波長別日射照度の季節変化などを調査する。また、観測データを用いて、数値予報モデルの放射計算結果の検証を行う予定である。

## 謝 辞

本稿を草するに際し、分光型全天日射計の NIST ランプによる測器常数校正、外部標準ランプ点検装置の開発及び直散分離の方法については、伊藤真人観測第三課長(当時)に多大なご協力をいただいた。また、太陽追尾式遮蔽装置の改良では、(株)プリードの古賀陽庸氏と河井和弘氏にお世話になった。屋外機器の保守作業にご協力いただいた観測第三課の皆様にも厚くお礼申し上げます。

## 引用文献

- 秋津朋子・久米篤・廣瀬保雄・奈佐原顕郎(2012): 全天日射に対する光合成有効放射の比率はどのくらい一定か。日本生態学会大会講演要旨集 D2-17.
- 居島修(2003): 回折格子型サンフォトメータ PSG-100 について(第一報)。高層気象台彙報, **63**, 25 - 30.
- 居島修(2004): 回折格子型サンフォトメータ PSG-100 について(第二報)。高層気象台彙報, **64**, 63 - 68.
- 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)の測器常数校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.
- 伊藤真人(2005): ブリューワー分光光度計を利用した散乱波長別紫外域日射の精密観測。高層気象台彙報, **65**, 23 - 36.
- 伊藤真人(2006): ブリューワー分光光度計用自動遮蔽装置による散乱波長別紫外域日射の定常観測。高層気象台彙報, **66**, 47 - 56.
- 伊藤真人・高野松美(2006): 広帯域(全天型)紫外域日射計用外部ランプ標準ランプ点検装置の開発とその精度。高層気象台彙報, **66**, 57 - 64.
- 伊藤真人(2007): ブリューワー分光光度計による地面反射・散乱波長別紫外域日射の年変化。高層気象台彙報, **67**, 19 - 32.
- Khatri, Pradeep, Tamio Takamura, Akihiro Yamazaki, Yutaka Kondo (2012): Retrieval of Key Aerosol Optical Parameters from Spectral Direct and Diffuse Irradiances Observed by a Radiometer with Nonideal Cosine Response Characteristic. *J Atmos. Ocean. Technol.*, **29**, 683 - 696.