

# 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

居島 修\*・松元 誠\*

## The Seasonal Variations of Direct and Diffuse Spectral Solar Radiations at Tsukuba

Osamu IJIMA\* and Makoto MATSUMOTO\*

### 要旨

高層気象台では、2013年9月から直達成分及び散乱成分の波長別日射照度について試験観測を開始した。本稿では、これまで実施した NIST ランプ検定及び外部標準ランプ点検による測器感度変化の推移、また、2014年12月までの1年3カ月の試験観測データを解析し、各波長別日射照度の季節変化等を調査した。その結果は以下のとおりである。

#### 1) 分光型全天日射計の測器感度変化

当測器は、定期的に NIST ランプ検定及び外部標準ランプ点検を実施し、測器感度の確定及び感度変化の監視を行っている。検定等の結果、測器感度は、2年6カ月で78%低下した。

#### 2) 直達及び散乱波長別日射照度(日積算値)の季節変化

直達成分は、日照時間と同様な季節変化を示し、散乱成分は、概ね可照時間及び大気混濁係数と同様な季節変化を示した。

#### 3) 太陽天頂角ごとの直達及び散乱波長別日射照度(瞬間値)の季節変化

直達成分は、日照時間に左右されるものの、概ね冬季に最大、夏季に最小となる季節変化を示し、散乱成分では、夏季に最大、冬季に最小となる季節変化を示した。快晴日についても同様な調査をした結果、エアロゾルの光学的厚さの増減に合わせて変化した。

#### 4) 太陽天頂角ごとの波長別散乱率(散乱成分/全天成分)

波長別の散乱率は、6~7月に最大、12月~1月に最小となった。また、短い波長ほど散乱率は大きく、400nmでは、太陽天頂角80°において、全期間85%以上であった。同様に快晴日の散乱率は、4月と9月に最大、12月~2月に最小となり、エアロゾルの光学的厚さの増減と同様な変化を示した。

以上のように、本調査では、つくばにおける直達成分と散乱成分の波長別日射照度及び散乱率について、季節変化の概要を明らかにした。

### 1. はじめに

高層気象台では、分光型全天日射計(英弘精機社製 MS-710: 以下、MS-710 という)を用いて、2011年9月から全天成分の波長別日射照度(以下、全天波長別日射照度という)の試験観測を開始した(居島: 2012)。また、標準光源(NIST ランプ)を用いた測器常数の較正方法を確立し、MS-710の温度特性及び入射角特性についても検査を行い、観測データの補正を行った(居島・島村: 2013)。

2013年9月からは、改造した太陽追尾式遮蔽装置を用いて、全天波長別日射照度と散乱成分の波長別日射照度(以下、散乱波長別日射照度という)を交互に観測する試験を開始した。これらの波長別日射照度を用いて、直達成分の波長別日射照度(以下、直達波長別日射照度という)を算出し、前報において各波長別日射照度の日変化等を調査した結果を述べた(居島: 2014)。

本稿では、2013年9月から2014年12月までの1年3カ月間の試験データを用いて、各波長別日射照度の季節変化等を調査した。その結果を、以下に報告する。

\*高層気象台 観測第三課

## 2. MS-710 の測器感度変化及び遮蔽間隔の変更

### 2.1 MS-710 の測器感度変化

MS-710 の較正は、ブリューワー分光光度計用 NIST ランプ検定装置(伊藤：2002)を用いて行った。2012年6月以降、2~3カ月ごとに NIST ランプ検定を行い、MS-710 の波長別測器感度を確定している。また、2013年7月以降、NIST ランプ検定を実施しない期間については、外部標準ランプ点検装置を用いて、月に2~4回測器感度の監視を行った(居島・島村：2013)。なお、外部標準ランプ点検装置は、広帯域紫外域日射計用に開発した装置(伊藤・高野：2006)であり、この点検装置のランプハウスを改造して MS-710 に使用した。

図1に、2012年6月~2014年12月までの MS-710 の測器感度変化を示す。定期的な NIST ランプ検定及び外部標準ランプ点検により、MS-710 の測器感度は、2年6か月間に78%低下したことを確認した。この大幅な測器感度の低下は予想外であり、受光面から分光器に光を取り込む光ファイバーの劣化により、引き起こされたものと考えられる。また、2014年7月から8月にかけて、測器感度が-70%から-67%に変化する段差がみられるが、これは MS-710 を点検のため、屋内に取り込んだ時に生じたものである。原因は不明だが、この段差についても光ファイバーの不具合により生じた可能性が考えられる。なお、測器感度の変化量は、波長によって異なるため、ここでは450nm~900nmの平均値をプロットした。

以上のように、本調査で使用した MS-710 は、感度が大幅に変化したため、太陽光スペクトルを正確に観測するためには、NIST ランプ検定及び外部標準ランプ点検を定期的に行い、測器感度を常に監視する必要があった。

### 2.2 遮蔽間隔の変更

試験観測に使用した太陽追尾式遮蔽装置(ブリード社製：ASTX-1)は、本来は全天日射計の受光面を太陽直射光から常に遮蔽し、散乱日射を観測するための装置である。本試験観測では、遮蔽装置の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造を行った(居島：2014)。受光面を遮蔽する時間は、遮蔽装置の駆動部の負荷を考慮し、10分間のうち2分間としていたが、半年間の動作を確認し、異常が見られなかったことから、2014年3月からは5分間のうち1分間を遮蔽するように遮蔽間隔を変更した。

図2に、波長別日射照度の観測例を示す。図2-aは10分間のうち2分間を遮蔽した場合、図2-bは5分間のうち

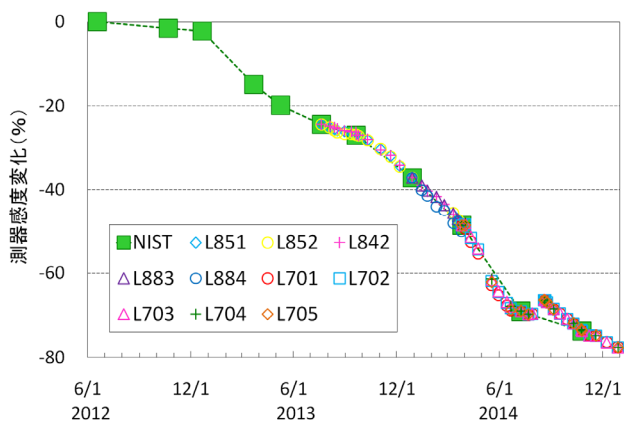


図1 NIST ランプ及び外部標準ランプによる MS710 の測器感度変化(450nm~900nm の平均値を使用) (2012年6月~2014年12月)

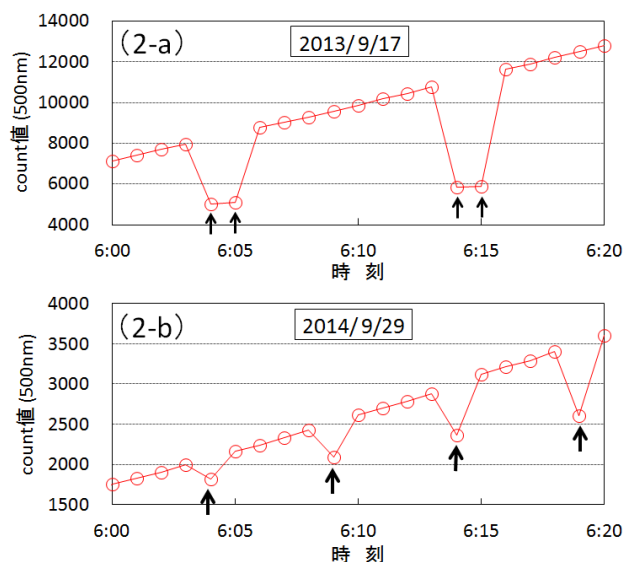


図2 遮蔽球の上下動による波長別日射照度の観測例  
(2-a) 2013年9月17日：10分間のうち2分間遮蔽  
(2-b) 2014年9月29日：5分間のうち1分間遮蔽  
↑の付いた観測値は散乱波長別日射照度(遮蔽あり)，その他の観測値は全天波長別日射照度(遮蔽なし)を示す。

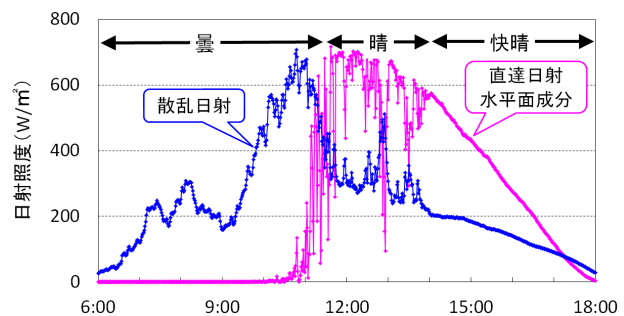


図3 広帯域型日射計で観測した直達日射水平面成分及び散乱日射の日変化(2012年4月28日)

1分間を遮蔽した場合の観測例である。遮蔽間隔を短くし、それぞれの波長別日射照度の内挿時間を短くした。

### 3. 波長別日射照度及び散乱率の季節変化

#### 3.1 波長別日射照度(日積算値)

2013年9月から2014年12月までの1年3カ月間について、波長別日射照度等の季節変化を調査した。

調査結果の前に、直達日射及び散乱日射の特徴を解説する。図3に、広帯域型日射計(直達日射計, 全天日射計)で観測した直達日射水平面成分と散乱日射の日変化を示す。直達日射は太陽面の雲の有無によって顕著に増減し、散乱日射は上層雲のような薄い雲や隙間のある雲に覆われた場合(図3の11時頃)などに増加する。

直達及び散乱波長別日射照度について、400nm, 550nm, 700nm, 850nmの4波長を選択し、波長ごとに日積算値を求めた。日々のデータを時系列にした場合、季節変化は日々の変化の中に埋もれてしまうため、日積算値を15日移動平均した。図4に、直達成分・散乱成分・全天成分の波長別日射照度(15日移動平均)を示す。また、図5に、日照時間・可照時間・大気混濁係数を示す。

直達成分は、雲量によって大きく変化するため、太陽高度によって季節変化する可照時間よりも、天候(雲量の変化など)に左右される。直達成分の季節変化(図4-a)は、季節に関係なく、天候に左右される日照時間の変化(図5-a)と同様な変化を示した。散乱成分の季節変化(図4-b)は、概ね可照時間(図5-b)と同様な変化を示した。また、散乱成分は、水蒸気やエアロゾルの増減によっても変化するため、大気混濁係数の季節変化(図5-c)と同様な季節変化を示し、7月～8月に最大、12月～1月に最小となった。なお、大気混濁係数とは、広帯域型直達日射計で観測された直達日射瞬間値(太陽面に雲のない観測値を使用)から計算した「ホイスナー・デュボアの混濁係数」を示し、水蒸気やエアロゾルなど、大気に浮遊するすべての成分によって大気が混濁している度合いを表す指標である。直達成分についても、水蒸気やエアロゾルの増減によって変化するが、大気混濁係数と同様な季節変化は確認できなかった。これは、大気混濁係数による直達成分の変化が、日照時間の変化に比べてはるかに小さいことが要因と考えられる。

図4-cに、参考として全天成分の季節変化を示す。全天成分は、直達成分を水平面に換算した値に、散乱成分を加えたものである。全天成分は、可照時間に影響されるため、散乱成分と比較した場合、4月～5月の値が大きく、また、6月は可照時間が長いものの、梅雨などによって日照時間の減少し、値は顕著に小さくなっている。

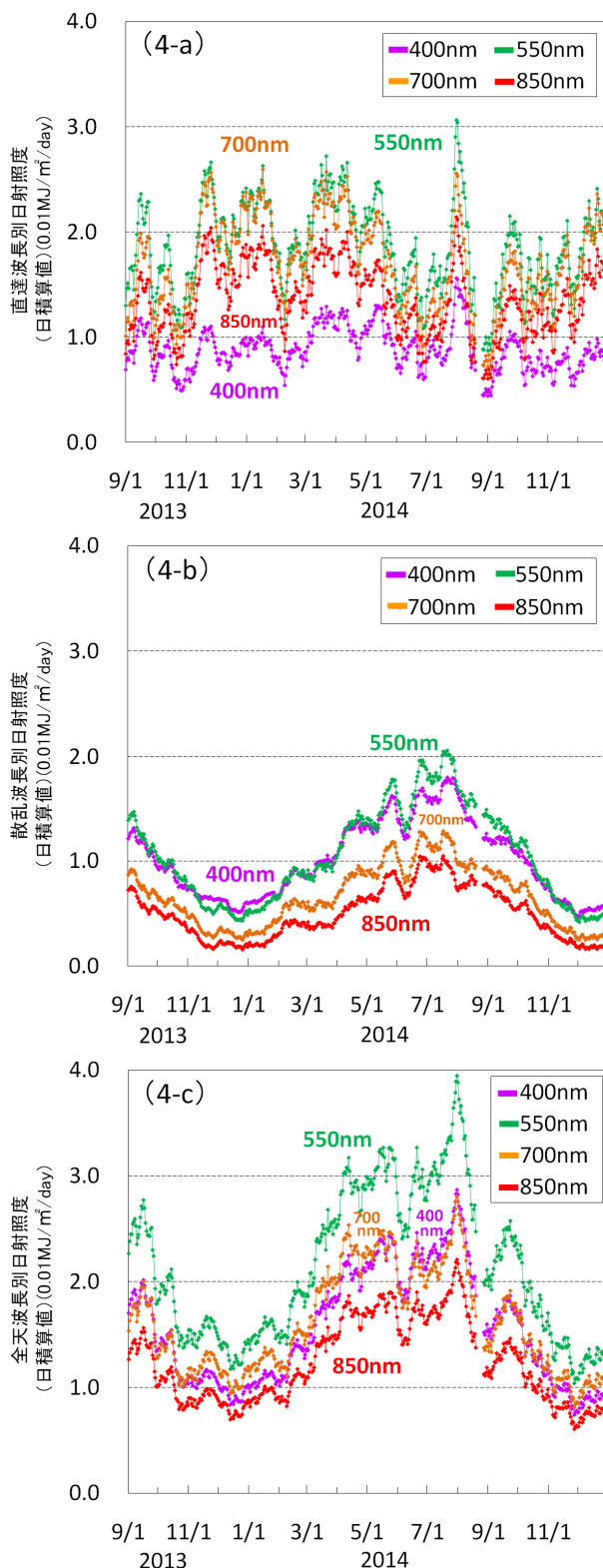


図4 直達成分・散乱成分・全天成分の波長別日射照度(15日移動平均)  
 (4-a) 直達波長別日射照度(日積算値)  
 (4-b) 散乱波長別日射照度(日積算値)  
 (4-c) 全天波長別日射照度(日積算値)

### 3.2 太陽天頂角ごとの波長別日射照度(瞬間値)

つくばにおける南中時の太陽天頂角は 12.6°(夏至)から 59.5°(冬至)まで変化し、また、可照時間は 14.5 時間(夏至)から 9.6 時間(冬至)である。図 4 の日積算値を用いた季節変化には、可照時間の季節変化が含まれており、可照時間以外の季節変化の要因が不明瞭となっている。可照時間の季節変化を取り除くため、日々の波長別日射照度(瞬間値)について、太陽天頂角(solar zenith angle : SZA)が、60°, 70°, 80°に観測時刻が最も近いデータを抽出し、各太陽天頂角について季節変化を調べた。選択した波長は、3.1 と同じ 4 波長である。なお、つくばでは、冬至における南中時の太陽天頂角は 59.5°であることから、60°以上の太陽天頂角を選択した。

各太陽天頂角について、午前と午後の直達波長別日射照度(瞬間値)を抽出し、大きい値を日代表値とした。散乱成分については、直達成分の日代表値と同じ観測時刻のデータを日代表値とした。日代表値については、3.1 と同様に 15 日移動平均した。

図 6 に直達成分、図 7 に散乱成分の各太陽天頂角における波長別日射照度(瞬間値)を示す。直達成分は、全般に冬季に最大、夏季に最小となる季節変化を示した。太陽天頂角ごとに比較した場合、60°(図 6-a)では、最大となる波長は 550nm であったが、80°(図 6-c)では 700nm または 850nm であった。一方、散乱成分(図 7-a, b, c)では、夏季に最大、冬季に最小となる季節変化を示し、また、最大及び最小となる波長は、太陽天頂角によって変化はなかった。

太陽天頂角の変化に伴い、波長別日射照度が減衰する割合について、60°の波長別日射照度(瞬間値)を基準とし、70°及び80°との比を調べた。図 8 に直達成分、図 9 に散乱成分の波長別日射照度比を示す。直達成分では、波長によって減衰する割合が異なり、400nm は減衰する割合が最大であった。散乱成分では、直達成分に比べて日々の変化が小さく、減衰する割合は 4 波長ともに同様な比を示した。

### 3.3 太陽天頂角ごとの波長別散乱率

散乱率とは、全天(GL)波長別日射照度(瞬間値)に含まれる散乱(DF)波長別日射照度(瞬間値)の割合である(DF/GL)。図 10 に、太陽天頂角ごとの波長別の散乱率を示す。また、選択した波長は、3.1 と同じ 4 波長である。

散乱率は、すべての太陽天頂角において、6~7 月に最大、12 月~1 月に最小となった。また、短い波長ほど、散乱率は大きく、400nm では 80°において、全期間 85% 以上であった。図 3 に示したように、直達日射は、雲量

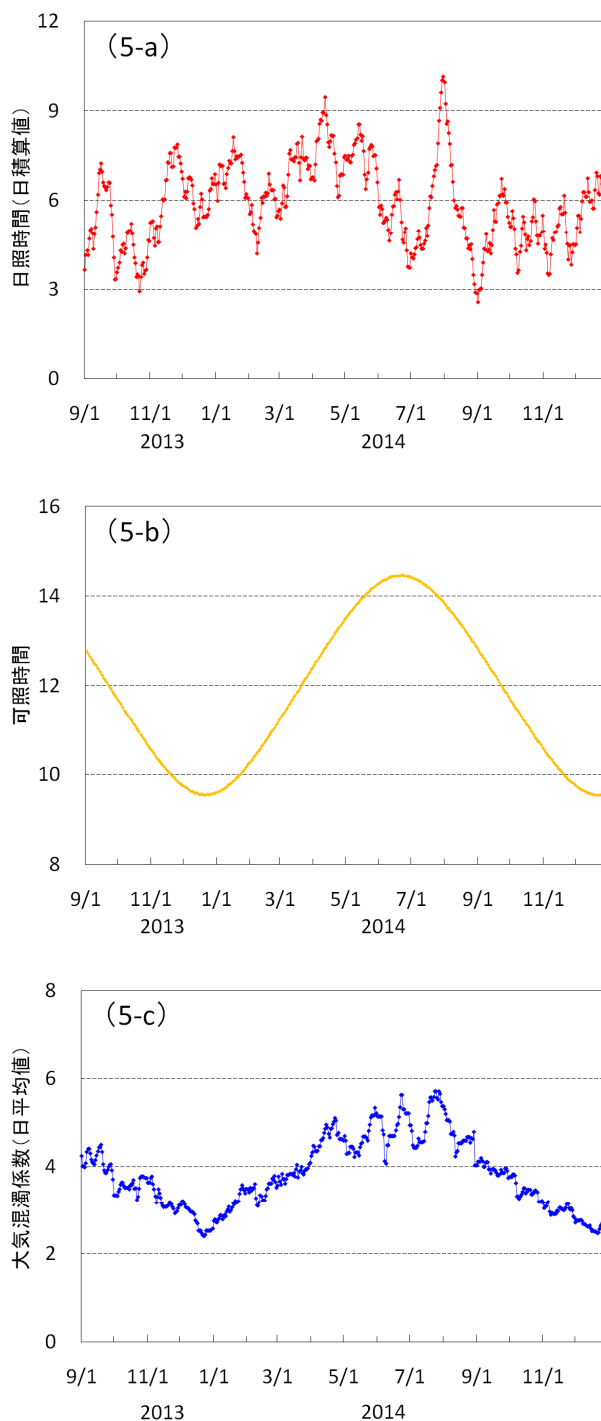


図 5 日照時間・可照時間・大気混濁係数(つくば)  
 (5-a) 日照時間(日積算値 : 15 日移動平均値)  
 (5-b) 可照時間  
 (5-c) 大気混濁係数(日平均値 : 15 日移動平均値)

の増加や大気混濁係数の増加によって減少し、逆に散乱日射は増加するため、梅雨や秋雨前線が停滞する季節は散乱率は大きくなり、晴天の多い冬季には散乱率が小さくなる季節変化を示した。

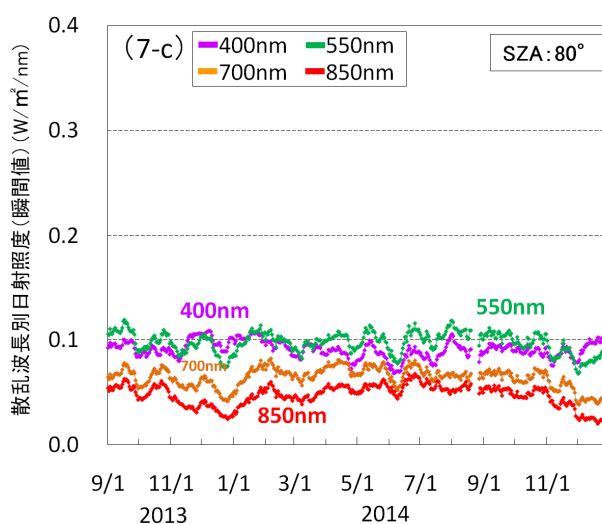
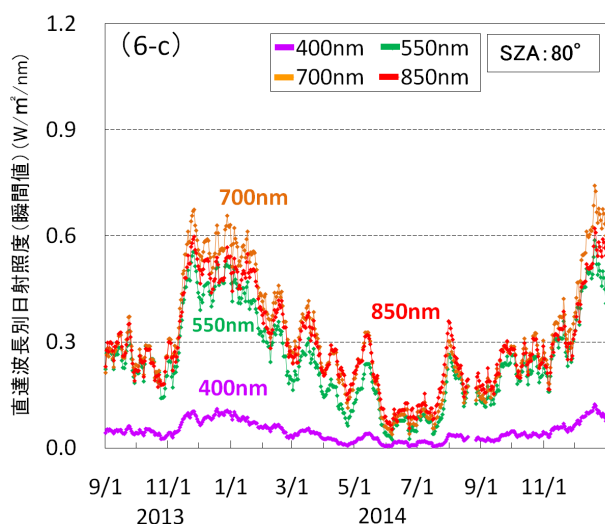
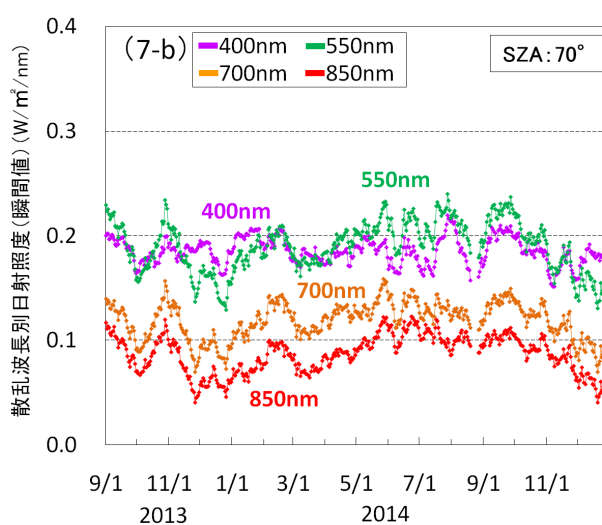
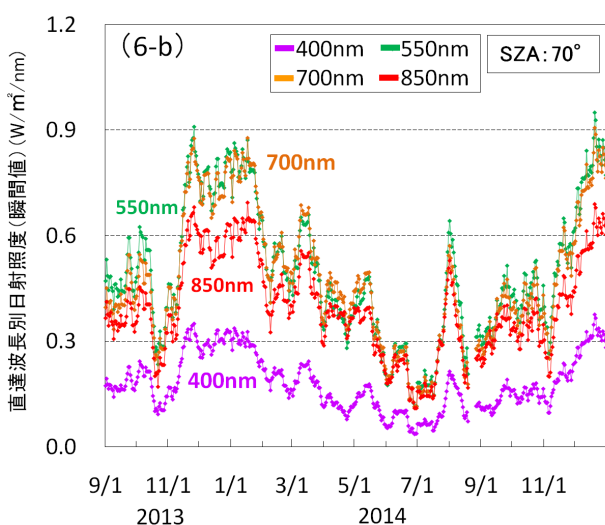
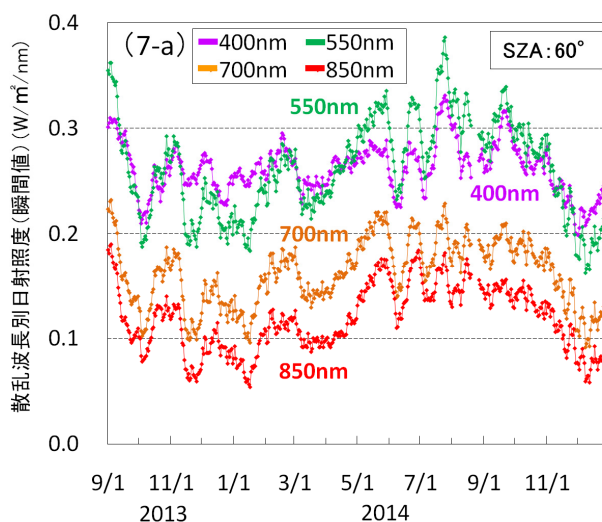
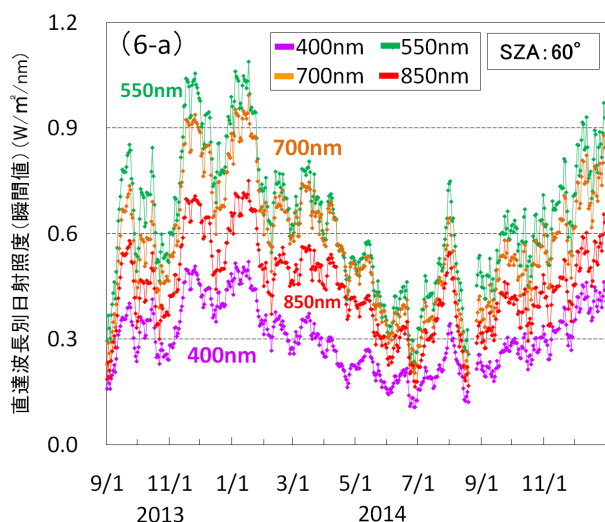


図 6 太陽天頂角ごとの直達波長別日射照度(15 日移動平均値)

(6-a) 太陽天頂角 60°の直達波長別日射照度(瞬間値)

(6-b) 太陽天頂角 70°の直達波長別日射照度(瞬間値)

(6-c) 太陽天頂角 80°の直達波長別日射照度(瞬間値)

図 7 太陽天頂角ごとの散乱波長別日射照度(15 日移動平均値)

(7-a) 太陽天頂角 60°の散乱波長別日射照度(瞬間値)

(7-b) 太陽天頂角 70°の散乱波長別日射照度(瞬間値)

(7-c) 太陽天頂角 80°の散乱波長別日射照度(瞬間値)

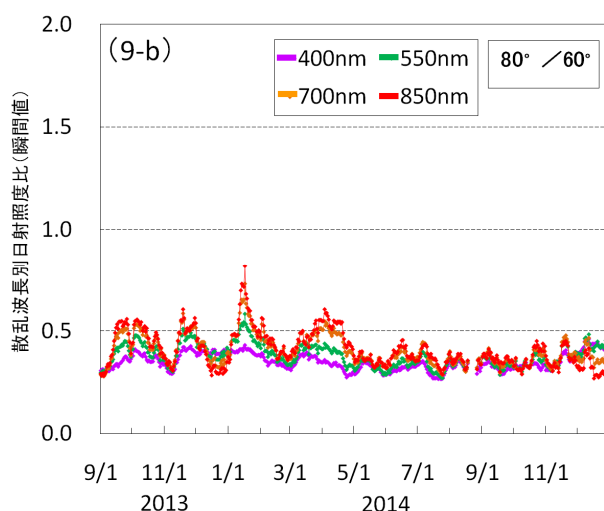
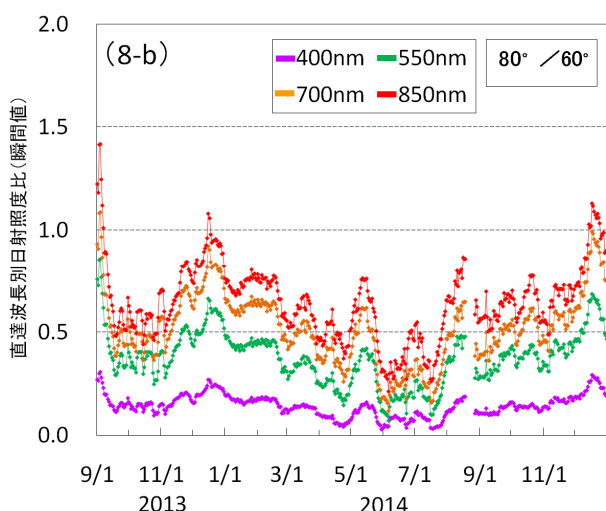
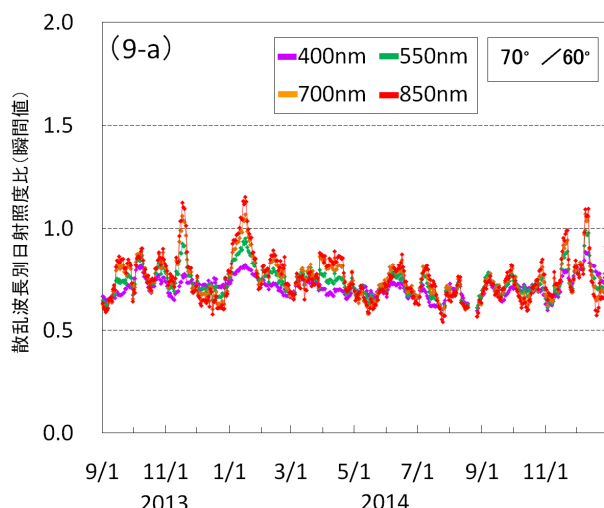
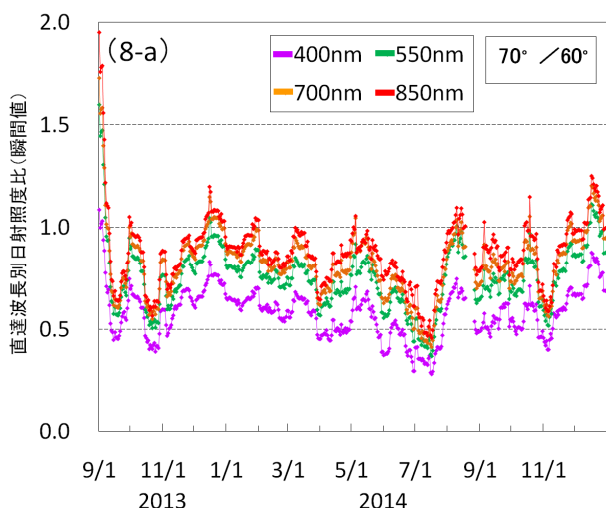


図8 太陽天頂角60°を基準とした70°及び80°の直達波長別日射照度比(15日移動平均値)  
 (8-a) 60°と70°の直達波長別日射照度比(70°/60°)  
 (8-b) 60°と80°の直達波長別日射照度比(80°/60°)

図9 太陽天頂角60°を基準とした70°及び80°の散乱波長別日射照度比(15日移動平均値)  
 (9-a) 60°と70°の散乱波長別日射照度比(70°/60°)  
 (9-b) 60°と80°の散乱波長別日射照度比(80°/60°)

### 3.4 快晴日における太陽天頂角ごとの波長別日射照度(瞬間値)

3.2の季節変化の調査では、天候の変化(雲量や日照時間の変化など)によって、波長別日射照度が大きく変化したことから、天候の変化による影響を取り除くため、快晴日における太陽天頂角ごとの波長別日射照度について調査した。調査した波長は、3.1と同じ4波長を、太陽天頂角は、60°、70°、80°を選択した。

日の出から南中時まで、または、南中時から日没まで快晴となった日について、各太陽天頂角の波長別日射照度(瞬間値)を抽出し、各月の快晴日の中で、550nmの直達

日射照度(瞬間値)が最大となった日を、その月の代表日とした。図11に直達成分、図12に散乱成分の快晴日(代表日)における太陽天頂角ごとの波長別日射照度(瞬間値)を示す。直達成分は、12月～2月に最大、4月または9月に最小となり、一方、散乱成分は、8月～9月に最大、12月～1月に最小となる季節変化を示した。

図16に、月の代表日と同日のエーロゾルの光学的厚さ(Aerosol Optical Depth: AOD)及びオンゲストローム波長指数 $\alpha$ を示す。エーロゾルの光学的厚さは、2014年4月と9月に0.2を超え、散乱成分についても4月と9月に高い値を示した。

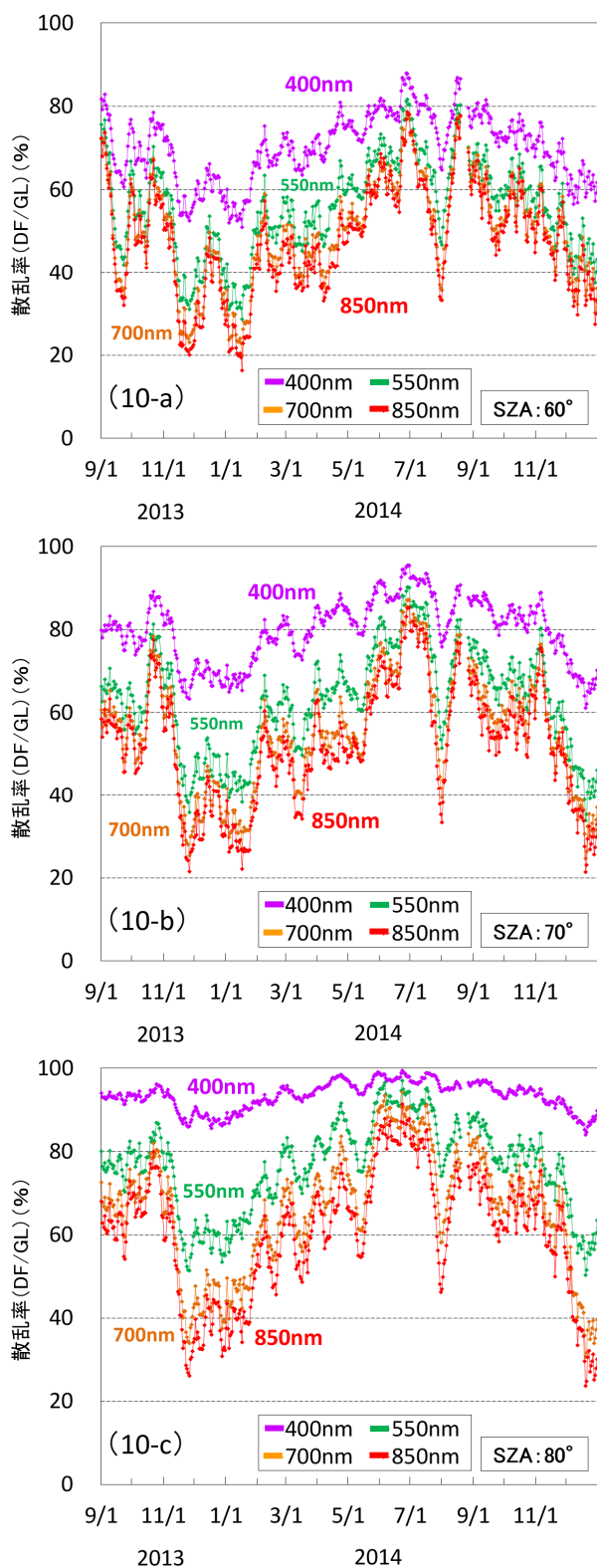


図 10 太陽天頂角ごとの波長別の散乱率(15 日移動平均値)  
 (10-a) 太陽天頂角 60°の散乱率  
 (10-b) 太陽天頂角 70°の散乱率  
 (10-c) 太陽天頂角 80°の散乱率

快晴日における直達成分と散乱成分について、**3. 2**と同様に、60°の波長別日射照度(瞬間値)を基準とし、70°及び80°の比を調べた。図 13 に直達成分、図 14 に散乱成分の波長別日射照度比を示す。直達成分は、短い波長ほど波長別日射照度比が小さくなり、400nm では、60°と70°の比(図 13-a)は 0.6 倍~0.7 倍、60°と 80°の比(図 13-b)

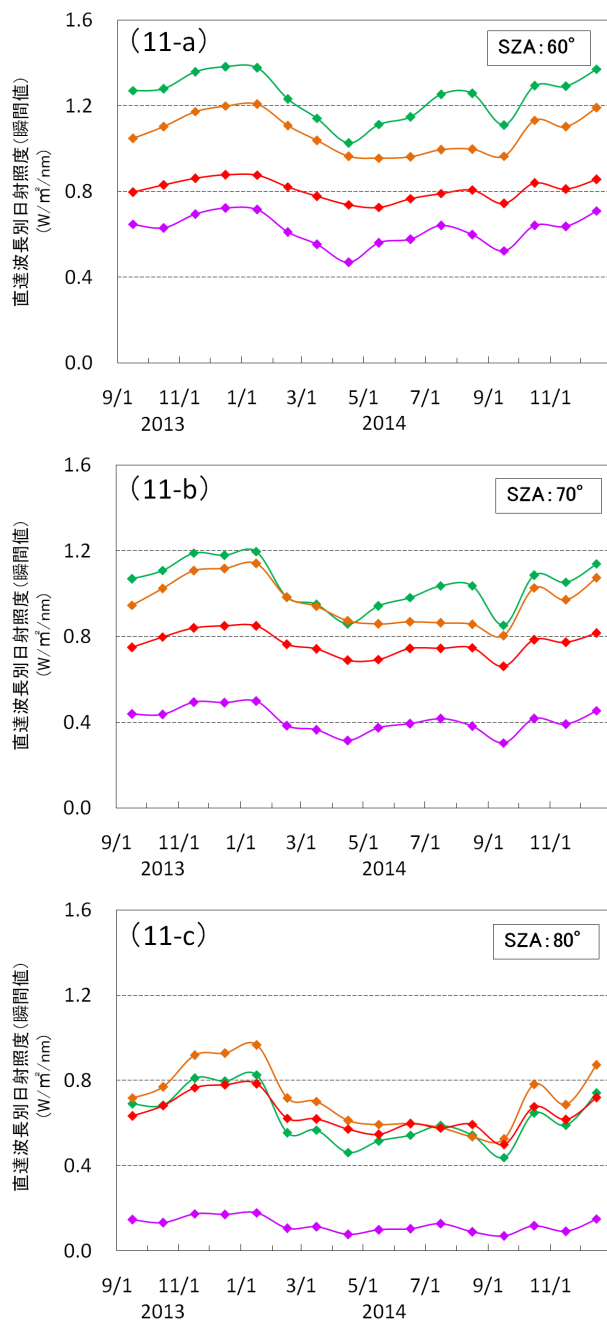


図 11 快晴日における太陽天頂角ごとの直達波長別日射照度  
 (11-a) 太陽天頂角 60°の直達波長別日射照度(瞬間値)  
 (11-b) 太陽天頂角 70°の直達波長別日射照度(瞬間値)  
 (11-c) 太陽天頂角 80°の直達波長別日射照度(瞬間値)

は 0.1~0.2 倍であった。散乱成分においても、直達成分と同様に、短い波長ほど波長別日射照度比は小さくなった。また、400nm では、60°と70°の比(図 14-a)は、0.7 倍~0.9 倍、60°と80°の比(図 14-b)は、0.4~0.5 倍となり、直達成分と比較して、散乱成分の減衰する割合は小さかった。

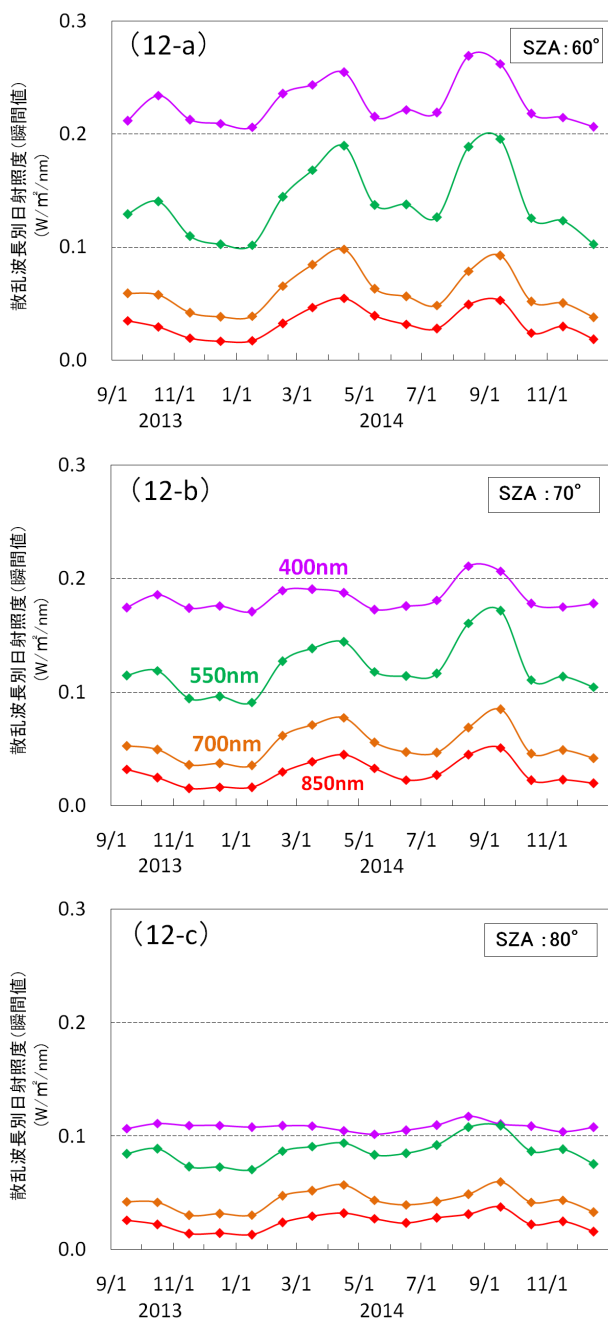


図 12 快晴日における太陽天頂角ごとの散乱波長別日射照度  
 (12-a) 太陽天頂角 60°の散乱波長別日射照度(瞬間値)  
 (12-b) 太陽天頂角 70°の散乱波長別日射照度(瞬間値)  
 (12-c) 太陽天頂角 80°の散乱波長別日射照度(瞬間値)

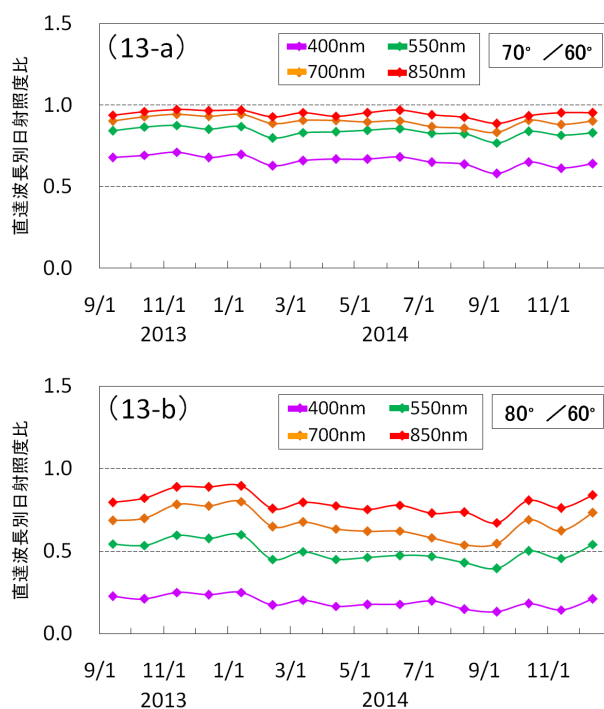


図 13 快晴日における太陽天頂角 60°を基準とした 70°及び 80°の直達波長別日射照度比  
 (13-a) 60°と 70°の直達波長別日射照度比(70°/60°)  
 (13-b) 60°と 80°の直達波長別日射照度比(80°/60°)

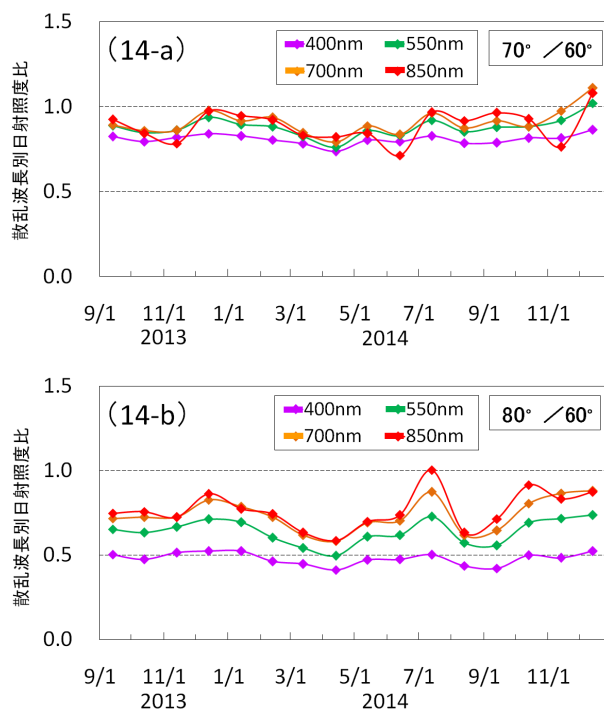


図 14 快晴日における太陽天頂角 60°を基準とした 70°及び 80°の散乱波長別日射照度比  
 (14-a) 60°と 70°の散乱波長別日射照度比(70°/60°)  
 (14-b) 60°と 80°の散乱波長別日射照度比(80°/60°)



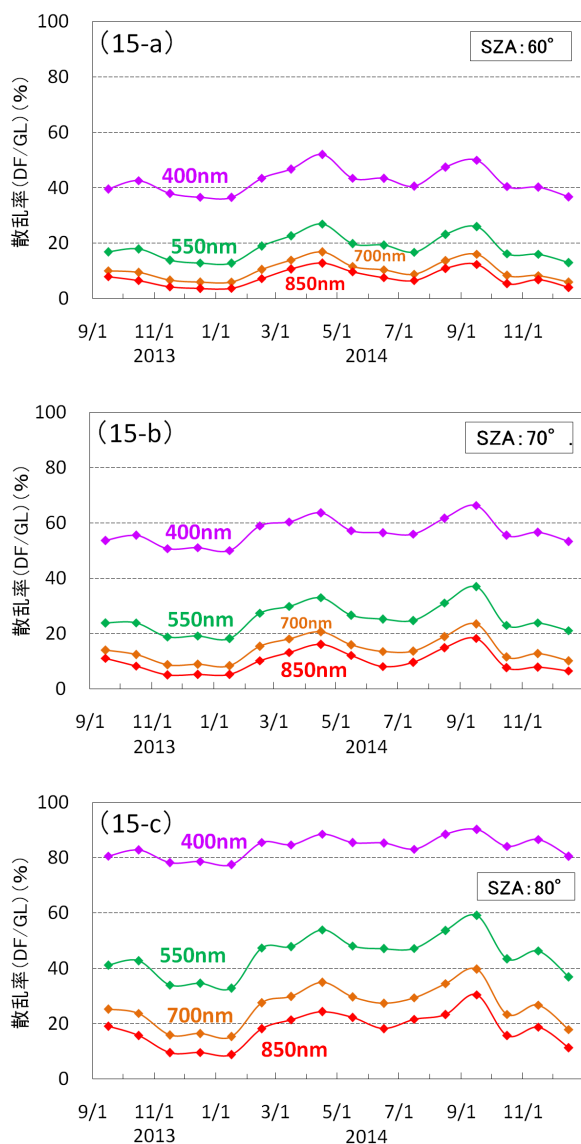


図 15 快晴日における太陽天頂角別の散乱率  
 (15-a) 太陽天頂角 60°の散乱率  
 (15-b) 太陽天頂角 70°の散乱率  
 (15-c) 太陽天頂角 80°の散乱率

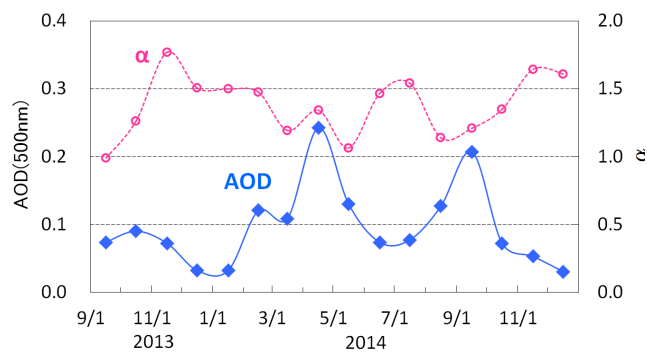


図 16 快晴日におけるエアロゾルの光学的厚さ(AOD)及びオングストローム波長指数 $\alpha$ の季節変化

### 3. 5 快晴日における太陽高度角ごとの波長別散乱率

図 15 に、快晴日における太陽天頂角ごとの波長別の散乱率を示す。散乱率は、4月または9月に最大、12月～2月に最小となり、図 16 に示すエアロゾルの光学的厚さ(AOD)の増減と同様な変化を示した。また、3. 1の散乱率と快晴日の散乱率を比較した場合、全般に快晴日の散乱率は小さく、例えば、2014年1月の快晴日の散乱率は、3. 1の散乱率に比べて、60°は0.7倍、70°は0.8倍、80°は0.9倍であった。

### 4. まとめ

2013年9月から2014年12月に試験観測で得られた直達波長別日射照度と散乱波長別日射照度を用いて、各波長別日射照度の季節変化及び散乱率を調査した。また、MS-710について、定期的にNISTランプ検定及び外部標準ランプ点検を実施し、測器感度の変化を確認した。その結果は以下のとおりである。

#### 1) 分光型全天日射計の測器感度変化

MS-710は、2012年6月以降、定期的にNISTランプ検定を行い、測器感度を確定した。また、2013年7月からは外部標準ランプ点検装置を用いて測器感度の変化を監視している。測器感度は、2年6カ月間に78%低下しており、受光面から分光器に光を取り込む光ファイバーが劣化したためと考えられる。

#### 2) 直達及び散乱成分の波長別日射照度(日積算値)の季節変化

直達成分と散乱成分の波長別日射照度(日積算値)を用いて、各波長別日射照度の季節変化を調査した。その結果、直達成分は、日照時間と同様な変化を示し、季節変化を明らかにするのは困難であった。散乱成分の季節変化は、概ね可照時間及び大気混濁係数と同様な季節変化を示し、7月～8月に最大となり、12月～1月に最小となった。

#### 3) 太陽天頂角ごとの直達及び散乱成分の波長別日射照度(瞬間値)の季節変化

太陽天頂角60°、70°、80°における直達成分と散乱成分の波長別日射照度(瞬間値)を用いて、それぞれの波長別日射照度の季節変化を調査した。その結果、直達成分は、冬季に最大、夏季に最小となり、散乱成分は、夏季に最大、冬季に最小となる季節変化を示した。

同様に快晴日についても調査した結果、直達成分は、12月～2月に最大、4月または9月に最小となり、散乱成分は、8月～9月に最大、12月～1月に最小と

なった。快晴日では、エーロゾルの光学的厚さの増減の影響を受け、エーロゾルの光学的厚さの増加に伴い、直達成分は減少、散乱成分は増加する変化を示した。

#### 4) 太陽天頂角ごとの波長別散乱率

太陽天頂角ごとの散乱率は、6～7月に最大、12月～1月に最小となった。また、短い波長ほど散乱率は大きく、400nmでは、太陽天頂角80°において、全期間85%以上であった。

同様に快晴日の散乱率では、4月または9月に最大、12月～2月に最小となり、エーロゾルの光学的厚さの増減と同様な変化を示した。

以上のように、直達成分と散乱成分の波長別日射照度の季節変化について調査を行った。なお、日々の天候や大気混濁係数の変化など、年によって季節変化の要因が異なると考えられることから、季節変化を調べるためにはさらに数年間の観測データが必要と考える。

今後も、引き続き直達及び散乱波長別日射照度の試験観測を行い、また、これまで観測したデータを用いて、数値予報モデルの放射計算結果の検証、衛星データを用いて推定された太陽スペクトルの評価、可降水量の推定、エーロゾルなどの光学的厚さの算出などを行う予定である。

## 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較正、外部標準ランプ点検装置の開発及び太陽追尾式遮蔽装置の改造等について、観測第三課伊藤真人研究官に多大なご助言とご協力をいただいた。また、観測精度を維持するため、屋外機器の日々の保守点検作業等にご協力いただいた観測第三課の皆様には厚くお礼申し上げます。

## 引用文献

- 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.
- 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.
- 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**, 47- 56.