

# 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

居島 修\*・高野 松美\*

## Observation of the Near-Infrared Spectral Solar Radiation using the Grating Spectroradiometer (MS-712)

Osamu IJIMA and Matsumi TAKANO

### 要旨

分光型全天日射計(MS-712)は、太陽光スペクトルの近赤外域のうち、900~1700nmの波長範囲を観測する測器である。本稿では、MS-712について、以下の調査を行った。

#### 1) 温度特性及び入射角特性の把握

MS-712の温度特性には波長依存性がみられ、全波長範囲における温度特性は20℃を基準とした場合、-13.0℃では0~+4%、1.3℃では-1~+2%、13.8℃以上では±0.5%であった。入射角特性は、天頂角60~65°において、実際の光の強さの0.94倍であった。なお、入射角特性には波長依存性はみられなかった。

#### 2) 測器常数の決定及び測器感度変化の把握

標準光源による校正により測器常数を決定した後、測器常数の変化を把握するため、外部標準ランプ点検を定期的実施し、日々の測器常数を決定した。測器感度は、2013年12月から2016年2月までの2年3ヶ月の期間において、2014年は安定に推移し、2015年は季節変化がみられたが、全期間では-1.2~+0.3%の範囲内に収まっていた。

#### 3) 近赤外域における試験観測

2015年1月、4月、7月、10月の快晴日において、太陽光スペクトルの近赤外域における変化特性を調査した。太陽天頂角の変化に伴う直達日射照度(1000nm)の減衰する割合は、1月と7月ではほぼ等しく、減衰する割合が大気中の水蒸気量に依存していないことを確認した。また、エアロゾルの光学的厚さの増加に伴い散乱波長別日射照度が増加すること、さらに、エアロゾルの光学的厚さ(862nm)と散乱率(1000nm)に高い相関があることを確認した。

### 1. はじめに

太陽光スペクトルの可視域から近赤外域までの高精度な測定は、気候システムの解明、陸域生態系の炭素循環の研究、太陽光発電の評価や衛星データを利用した太陽光スペクトルの推定の評価等に必要とされている。近年、全天日射計と同等な大きさで、回折格子を用いて太陽光スペクトルを連続に測定する分光型全天日射計が開発されている。しかし、この種の測器は歴史が浅く、校正の基準についても世界的に定められていない。このことから高層気象台では、分光型全天日射計の校正方法の確立

を目指し、2011年から校正に関する調査を開始した。

この調査と並行して、高層気象台では、2012年から宇宙航空研究開発機構(JAXA)及び国立環境研究所(NIES)と「陸域生態系の生産量推定等に関する共同研究」を行っている。また、2014年からは、気象研究所と「分光日射観測とデータ同化によるエアロゾル・雲の地表放射収支に与える影響監視に関する研究」について共同研究を開始しており、高層気象台は分光型全天日射計の光学特性等の把握及び校正方法を確立するための調査を担っている。

本稿では、これらの研究で使用する近赤外域用の分光

\*高層気象台観測第三課

型全天日射計(英弘精機社製 MS-712, S/N:S07034.01, 変換器 S/N:ES13064.C1, 測定波長範囲 900~1700nm: 以下, MS-712 という)について, 1)温度特性及び入射角特性の把握, 2)標準光源を用いた校正による測器常数の決定及び測器感度変化の把握, さらに 3)近赤外域における試験観測結果について述べる。

なお, 本調査で使用する MS-712 は, JAXA 及び NIES との共同研究において, 研究協力者でもある筑波大学の奈佐原顕郎准教授から借用した測器である。また, この測器は, 日本學術振興会若手研究(A)「植生キャノピーの生理・生態・光学特性に関する統合モデルと衛星観測(代表: 奈佐原顕郎)」で整備されたものである。

## 2. MS-712 の概要

MS-712 のセンサー部の構造やシステム構成については MS-710 とほぼ同じで(居島: 2012), 外観を写真 1 に, 仕様を表 1 に示す。仕様では波長範囲は 900~1700nm となっているが, 実際には 881~1710nm について測定が可能であった。また, 波長間隔は仕様とは異なり 1.4~2.0nm であった。露光時間は, 任意の時間に固定, または太陽光の強さに応じて自動調整(10~5000msec: 9 段階)される。

## 3. 温度特性及び入射角特性

### 3.1 温度特性検査

温度特性検査は, 広帯域型全天日射計用に製作された温度特性検査装置を使用した。この装置は, 光源にキセノンランプを使用し, 照度を一定にするためのフィードバック機能を有する。また, 温度特性検査は, 約 8 時間要するため, 長時間安定した光量を維持できるキセノンランプが使用されている。

温度特性検査の方法は, 温度特性検査装置の恒温槽に MS-712 を水平に設置し, 光源(キセノンランプ)の照度を一定に保った状態で測器上方から照射する。恒温槽内の温度(以下, 槽内温度という)を約-15~40℃まで 10~15℃毎に変化させ, 各槽内温度における測定出力(A/D Count)の変化を求める。この出力の変化が温度特性となる。なお, 検査に用いた温度特性検査装置及び次項で述べる入射角特性検査装置の詳細については, 居島(2012)を参照されたい。

#### (1) 波長ずれ調査

温度特性検査では, 波長別に温度特性を調べることを目的としているが, 槽内温度の変化に伴って波長ずれが生じた場合, 精確に温度特性を求めることができない。このため, キセノンランプの輝線を利用して波長ずれの有無について調査した。

図 1 に, キセノンランプの測定例を示す。キセノンランプの測定波長のうち, 図に示す①から⑧の輝線付近について 10 個前後のデータを抽出し, 最小二乗法(6 次近似)によって輝線のピークを推定した。表 2 に, ①から⑧の近似に使用した波長範囲, 6 次近似で推定したピーク波長及び波長ずれを示す。また, 槽内温度については, -13.0℃, 13.8℃, 39.0℃の 3 点について調査した。その結果, 波長ずれは 0.3~0.6nm であった。このずれ幅は, 波長間隔 1.4nm の 1/3 程度であり, 測定に影響のない範囲と考える。

#### (2) 温度特性検査結果

図 2 に, 900~1700nm について, 200nm 毎に温度特性検査の結果を示す。標準光源による校正時(4 項)の室内温度が約 20.0℃であることから, 20.0℃を基準とした。このため, 各波長の 20.0℃における温度補正係数は 0%となる。図 2 の 900nm において, 同じ強さの光を-13.0℃と 20.0℃で測定した場合, -13.0℃では 20.0℃に比べて 4%大きく測定されることを示している。MS-712 は, 同じ温度でも波長によって温度特性が異なる波長依存性がみられ, 全波長範囲において, -13.0℃では 0~+4%, 1.3℃では -1~+2%, 13.8℃以上では ±0.5%であった。この結果について, 仕様の範囲(±5%以内)に収まっていることを確認した。

図 3 は, 広帯域型全天日射計(Kipp & Zonen 社製 CMP-21: S/N 090231)の温度特性を示し, -15~+40℃の温度範囲において温度特性は-0.6~0.5%であった。MS-712 の-15~0℃の範囲と比較した場合, CMP-21 の温度特性は 5 分の 1 程度であり, 低温域において温度特性の改良が望まれる。なお, CMP-21 の温度特性については, 0℃を基準としている。

### 3.2 入射角特性検査

日射を観測する測器は, 太陽光の入射する角度によって実際の光の強さよりも一般に小さく測定される特性を持ち, これを入射角特性と言う。入射角特性の検査方法は, 入射角特性検査装置の設置台に MS-712 を固定し, 光源(キセノンランプ)の照度を一定に保った状態で設置台を指定した角度に傾ける。このときの MS-712 の測定出力(A/D Count)と実際の光の強さとの比がその角度における入射角特性となる。

検査した天頂角は, 0~30° では 10° 毎, 35~85° では 5° 毎, さらに 87° について検査を行った。なお, 天頂角とは, 測器を水平に設置した状態で, 真上が 0°, 水平方向が 90° となる。また, MS-712 の屋外での観測は, 太陽追尾装置に搭載するため, 太陽直射光は常に南側から入射する。このため, 入射角特性検査は南側のみ実施した。



写真 1 : MS-712 外観

表 1 MS-712 仕様

波長範囲	900~1700nm
波長間隔	1.2~2.2nm
波長分解能	< 7nm
波長精度	±0.2nm
温度依存性	±5% (全波長平均)
温度制御	-5°C ±0.5°C
露光時間	10~5000msec, 自動調整
検出器	InGaAs リニアイメージセンサー(512ch)
ドーム材質	BK7
通信	センサー部:RS422, 電源部:RS232C

表 2 MS-712 波長ずれ調査

槽内温度	-13.0°C	13.8°C	39.0°C	波長 ずれ (nm)	
近似波長範囲 (nm)	6次近似から求めたピーク波長 (nm)				
①	913 - 923	918.0	917.7	917.4	0.6
②	990 - 998	993.9	993.7	993.4	0.5
③	1107 - 1118	1111.9	1111.7	1111.4	0.5
④	1173 - 1181	1176.9	1176.7	1176.5	0.4
⑤	1262 - 1269	1265.3	1265.1	1264.9	0.4
⑥	1365 - 1372	1368.4	1368.2	1368.0	0.4
⑦	1472 - 1480	1476.1	1476.0	1475.8	0.3
⑧	1541 - 1549	1544.9	1544.8	1544.6	0.3

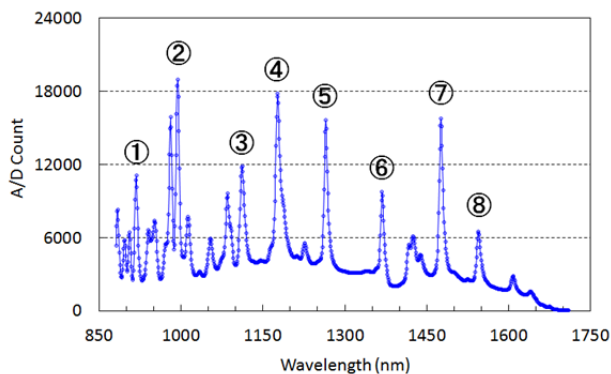


図 1 キセノンランプの測定例(MS-712)

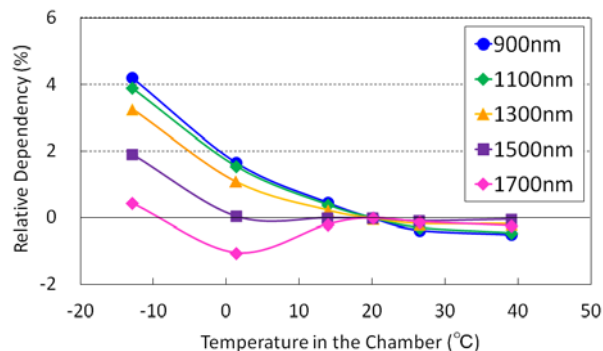


図 2 温度特性検査結果(MS-712)

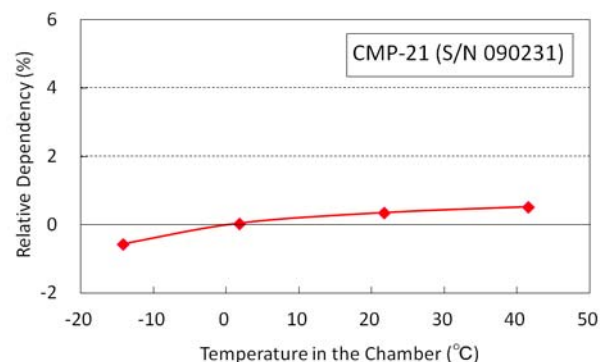


図 3 CMP-21 の温度特性(参考)

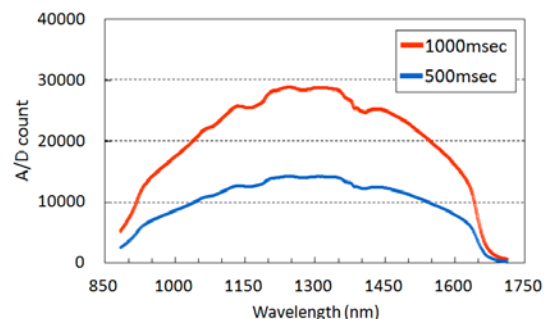


図 4 タングステンハロゲンランプの測定例(MS-712)

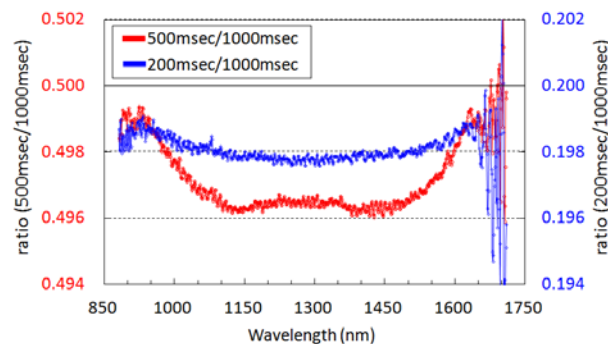


図 5 露光時間のリニアリティ調査結果(MS-712)

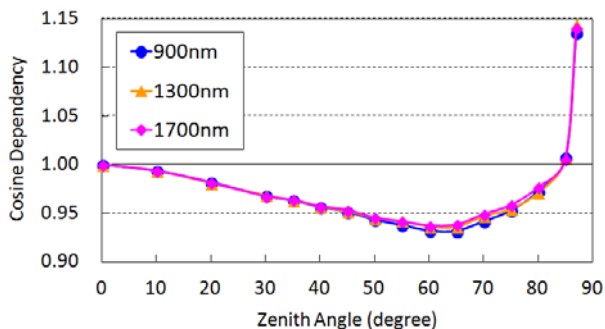


図 6 入射角特性検査結果(MS-712)

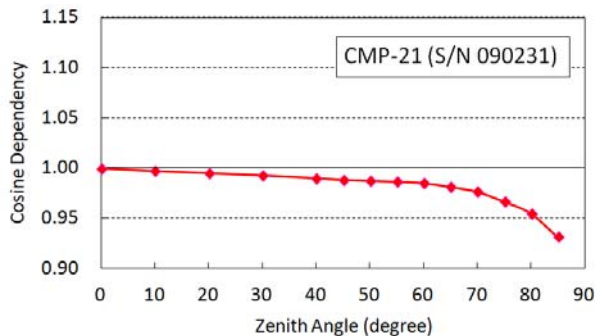


図 7 CMP-21 の入射角特性(参考)

(1) 露光時間のリニアリティ調査

MS-712 は測定する光の強さに応じて露光時間を自動調整する。入射角特性検査において MS-712 を傾けて測定した場合、測定値が小さくなるため、MS-712 は露光時間を長くする自動調整を行う。しかし、露光時間に対する測定出力には リニアリティ(直線性または線形特性)がなく、測定の不確かさの要因となっている。例えば、同じ強さの光を 1000msec と 500msec の露光時間で測定した場合、1000msec の測定値は必ずしも 500msec の 2 倍とならない。

この原因については、露光時間を決定する電子シャッター速度の不確かさ、シリコンフォトダイオードに溜まった電荷を電圧に変換する際、電荷量に対する電圧変換効率の不確かさなどが考えられるが、原因については調査中である。

今回の入射角特性検査では、200msec、500msec、1000msec の 3 段階の露光時間を使用したことから、1000msec を基準として、露光時間のリニアリティを調査した。なお、キセノンランプは図 1 に示すように輝線が多く、すべての波長についてリニアリティ調査ができないため、図 4 に示す輝線のないタングステンハロゲンランプを使用した。調査の方法は、200msec と 500msec、500msec と 1000msec を連続で測定し、それぞれの比を求めた。

図 5 に、1000msec を基準として、500msec と 200msec の出力比を示す。露光時間に直線性がある場合は、500msec と 1000msec の出力比は 0.5、200msec と 1000msec の出力比は 0.2 となるが、調査結果は図 5 にみられるように出力比が最大で 200msec では 1%、500msec では 0.8% 小さくなった。リニアリティ調査で得られた出力比を用いて、入射角特性検査の測定値を補正した。なお、図 5 では、1625nm より長い波長において出力比にバラツキがみられるが、この原因は、図 4 でも見られるように波長が長くなるほど検出器の感度も低くなり、実際のタングス

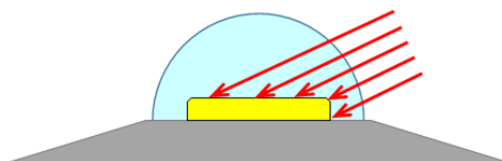


図 8 受光面の模式図

(黄色部分：拡散板、赤色矢印：太陽直射光)

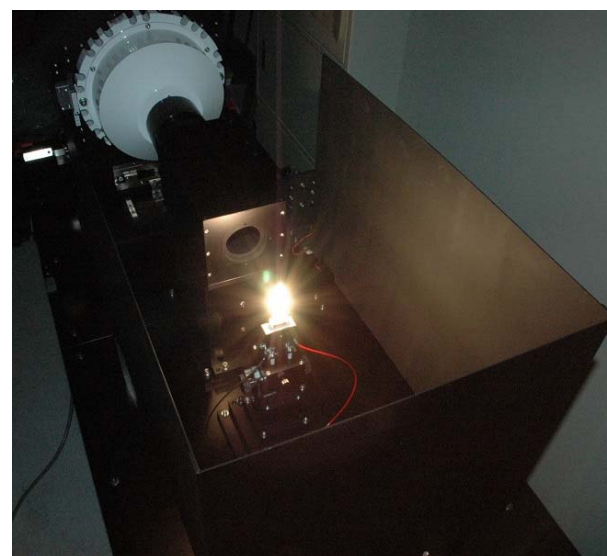
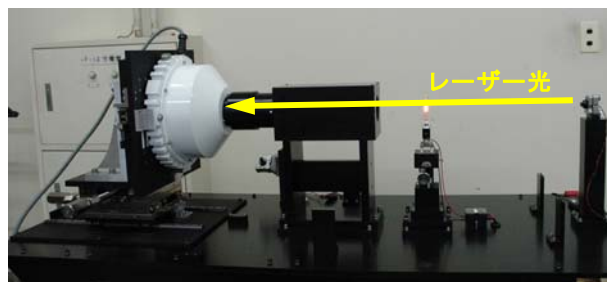


写真 2：分光型全天日射計用校正装置

写真上：レーザー光を用いてランプの中心と測器

受光面の中心位置を決定する

写真下：標準光源を用いた MS-712 の校正

テンハロゲンランプの照度よりも測定出力は小さく、S/N比が悪くなったためと考えられる。このため、1625nmより長い波長については、1625nmの出力比を用いて補正した。また、観測値へのリニアリティの補正については、今後すべての露光時間のリニアリティを調査し、実施する予定である。

#### (2) 入射角特性検査結果

図6に、入射角特性検査の結果(900, 1300, 1700nm)を示す。横軸は天頂角、縦軸は入射角補正係数を示し、この係数は、次式で計算される。

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(Zenith Angle)。

MS-712の入射角特性は、天頂角60~65°において、実際の光の強さの0.94倍であった。各波長において、入射角補正係数はほぼ等しく、波長依存性はみられなかった。メーカーの仕様には入射角特性のスペックが記載されていないため、今回の結果と広帯域型全天日射計の入射角特性を比較した。図7は、広帯域型全天日射計(Kipp & Zonen社製CMP-21:S/N 090231)の入射角補正係数を示す。CMP-21では、65°において0.98であり、MS-712の0.94に比べて小さいことが分かる。MS-712では、受光面に拡散板を使用しており、CMP-21に比べて入射角特性が悪くなる。このため、入射角補正係数を用いて測定値の補正が必要となる。

また、MS-712の受光面(拡散板)は、図8の模式図に示すように厚みがあり、天頂角が80°以上では拡散板の側面からも太陽直射光が入射するため、入射角補正係数は1よりも大きくなる。

#### 4. MS-712の校正及び測器感度変化

MS-712は、2015年2月まではブリューワー分光光度計用に開発されたNISTランプ検定装置(伊藤：2002)を用いて校正を行い、測器常数を確定した(居島・島村：2013)。なお、この装置の標準光源にはNIST(National Institute of Standards and Technology)に準拠した1000Wのタングステンハロゲンランプ(以下、標準光源という)を使用している。

2016年2月には、新たに開発した標準光源を用いた分光型全天日射計用校正装置により校正試験を実施した。また、標準光源による校正を実施しない期間については、外部標準ランプ点検装置(伊藤・高野：2006)を用いて月1~2回点検を実施し、測器感度の変化を監視した。

写真2に、新たに開発した校正装置を示す。新たに開発した校正装置では、レーザー光を用いて標準光源の中心位置と測器の受光面の中心位置及び標準光源から受光面までの距離を±0.5mmの精度で合わせることが可能となった(写真上)。また、これまでは標準光源の光が天井等で散乱し、わずかではあるが受光面に入射していたと考えられる。新しい校正装置では、散乱した光が入射しないように、受光面にフードを取り付ける構造となっている。

図9に、2013年12月~2016年2月の標準光源による校正及び外部標準ランプ点検の結果から得られた測器感度変化を示す。なお、ここで示す測器感度変化は900~1600nmの平均値である。図9において、2014年は±0.5%以内に安定していたが、2015年は夏季に-1.2%まで低下し、その後、2016年2月には-0.2%まで測器感度が変化した。

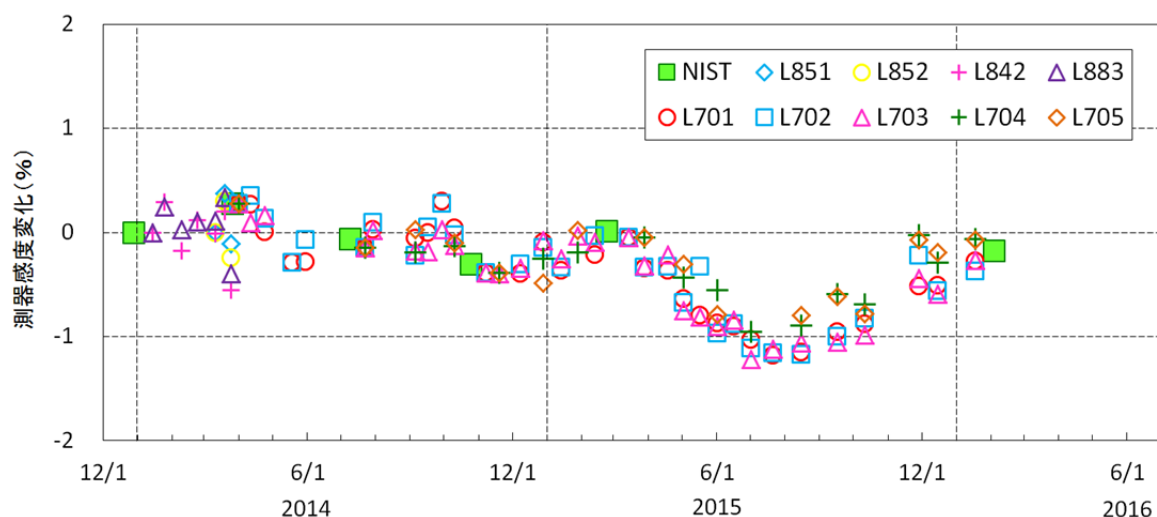


図9 標準光源による校正及び外部標準ランプ点検による測器感度の変化(900~1600nmの平均値)

NIST：標準光源，Lnnn：外部標準ランプ(nnnはランプ番号)

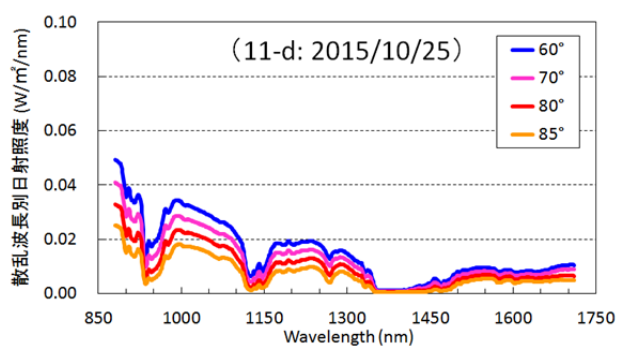
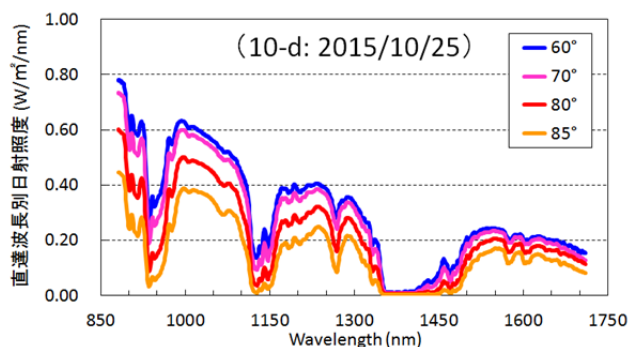
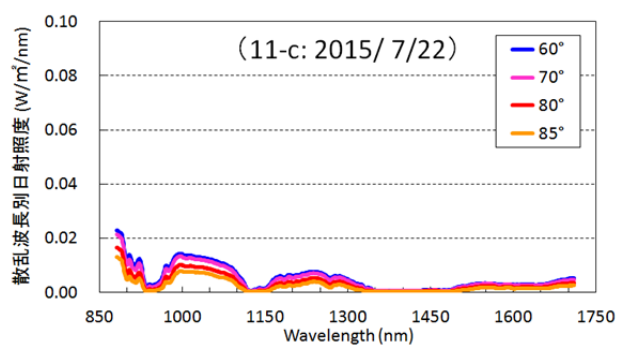
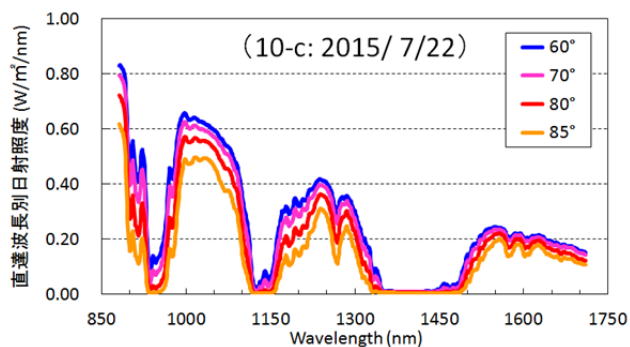
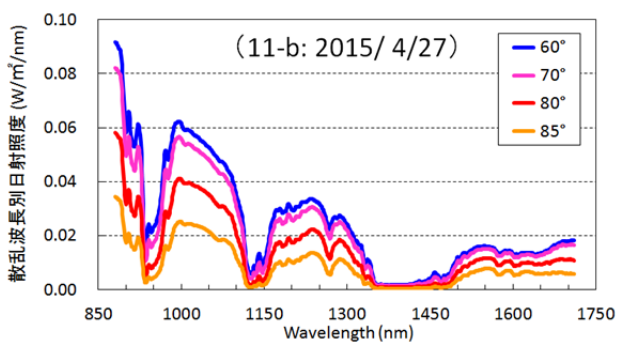
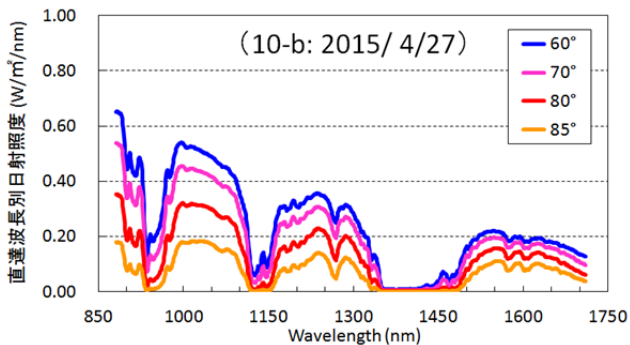
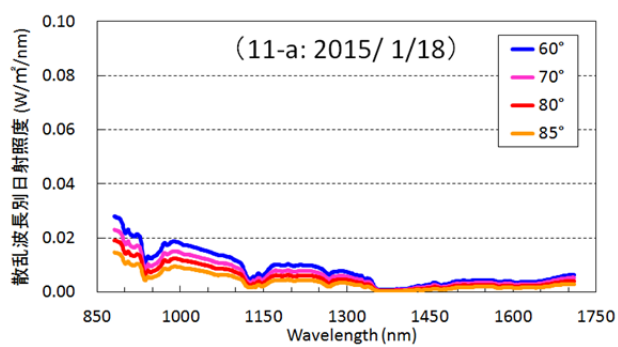
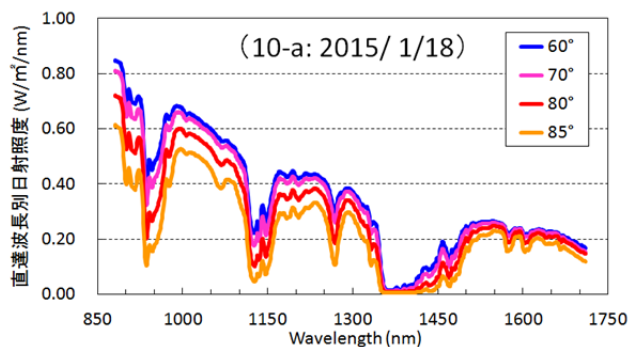


図 10 太陽天頂角別の直達波長別日射照度

- (10-a) 2015年 1月 18日
- (10-b) 2015年 4月 27日
- (10-c) 2015年 7月 22日
- (10-d) 2015年 10月 25日

図 11 太陽天頂角別の散乱波長別日射照度

- (11-a) 2015年 1月 18日
- (11-b) 2015年 4月 27日
- (11-c) 2015年 7月 22日
- (11-d) 2015年 10月 25日

表3 測器感度変化(基準日:2013年12月28日)

標準光源を用いた校正実施日	測器感度変化 (%) 波長範囲:900~1600nm			
	平均値	最大値	最小値	S.D.
2014/3/26	0.3	0.9	-0.3	0.1
2014/7/9	-0.1	0.5	-2.3	0.4
2014/10/25	-0.3	0.2	-2.8	0.5
2015/2/23	0.0	0.3	-0.9	0.2
2016/2/3	-0.2	1.8	-1.7	0.8

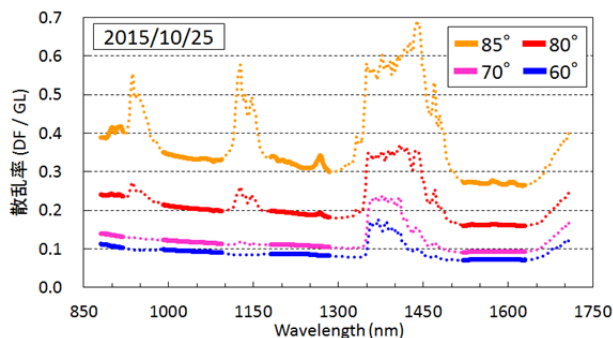


図12 2015年10月25日の散乱率(DF/GL)  
(実線:2次近似に使用する波長)

ここで、CMP-21における2009年と2013年に実施した部内検査では、測器感度はS/N090231では-1.7%、S/N090232では-0.8%変化していた。MS-712の測器感度は、2013年12月~2016年2月の2年3ヶ月の期間において、測器感度は-1.2~+0.3%の範囲内に収まっており、広帯域型全天日射計と同程度で、測器感度の変化は小さいと言える。

表3に、2013年12月28日の校正結果を基準とした900~1600nmの測器感度変化について、平均値、最大値、最小値、標準偏差を示す。測器感度変化は、波長毎に異なっており、測器常数については波長別の測器感度変化から求め、測定値(A/D count)から波長別日射照度に変換している。この測器感度変化には、校正を実施した時の不確かさ(例えば、測器の設置位置、標準光源と受光面までの距離、周辺の散乱光など)の他に、標準光源の校正値そのものに含まれる不確かさも加わっている。

引き続き新たに開発した校正装置を用いて検定を実施し、校正に伴う測器常数の不確かさを詳細に把握する必要がある。

### 5. 太陽光スペクトルの近赤外域における試験観測

2015年に実施した太陽光スペクトルの近赤外域における試験観測のうち、1月、4月、7月、10月の各季節にお

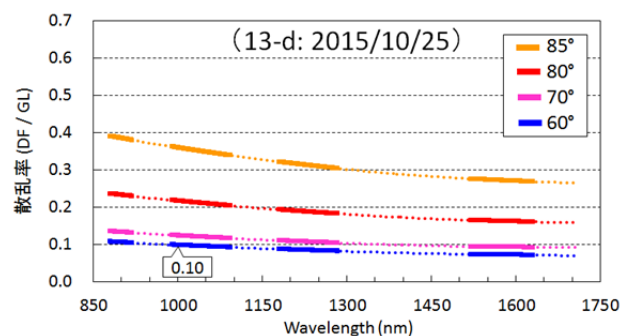
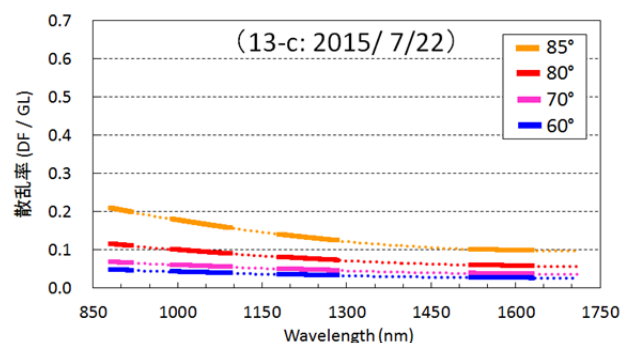
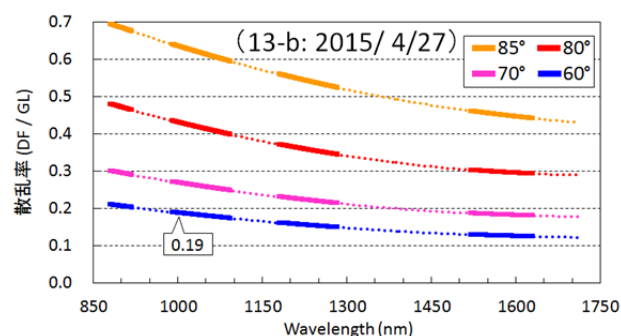
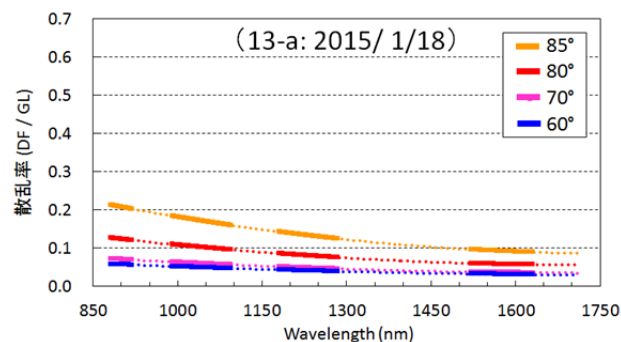


図13 太陽天頂角別の散乱率(DF/GL)  
(13-a):2015年1月18日  
(13-b):2015年4月27日  
(13-c):2015年7月22日  
(13-d):2015年10月25日

表 4 1000nm の太陽天頂角 60° における直達(散乱)日射照度と各太陽天頂角における日射照度との比

1000nmにおけるSZA 60°と各SZAの直達(散乱)日射照度の比		70/60	80/60	85/60	AOD 862nm (09時)	GPS 可降水量 (kg/m <sup>2</sup> ) (09時)
2015/ 1/18	直達	0.97	0.88	0.78	0.03	5.5
	散乱	0.81	0.66	0.51		
2015/ 4/27	直達	0.84	0.59	0.33	0.14	14.0
	散乱	0.91	0.66	0.41		
2015/ 7/22	直達	0.95	0.87	0.75	0.03	44.6
	散乱	0.93	0.71	0.56		
2015/10/25	直達	0.95	0.80	0.62	0.07	7.3
	散乱	0.84	0.69	0.53		

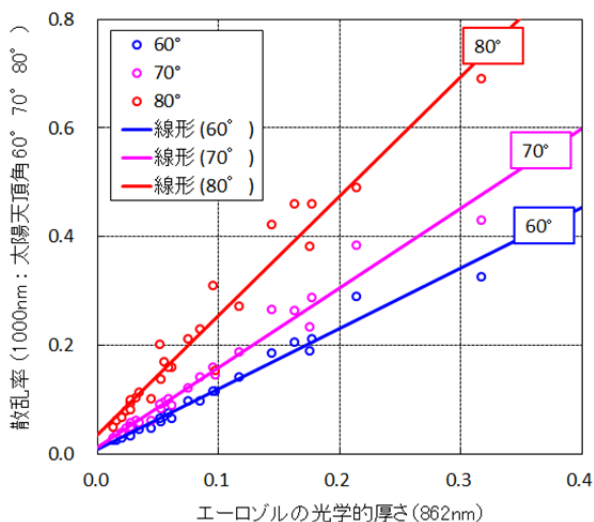


図 14 AOD(862nm)と散乱率(DF/GL)の関係 (波長：1000nm SZA：60°，70°，80°)

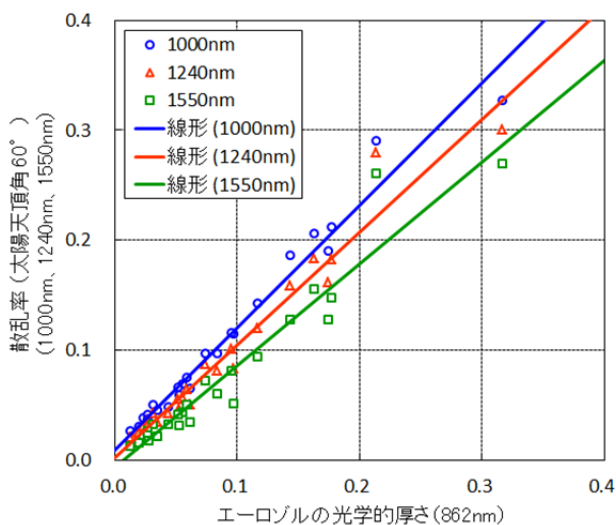


図 15 AOD(862nm)と散乱率(DF/GL)の関係 (太陽天頂角：60° 波長：1000nm, 1240nm, 1550nm)

ける快晴日を抽出し、太陽天頂角(Solar Zenith Angle：以下、 $SZA$ という)60, 70, 80, 85°について、太陽光スペクトルの変化特性を調査した。図 10 及び図 11 に、2015 年の代表例として冬季(1月 18 日)、春季(4月 27 日)、夏季(7月 22 日)、秋季(10月 25 日)における  $SZA$  別の直達成分及び散乱成分の波長別日射照度を示す。

なお、観測値は、温度特性及び入射角特性を補正している。また、直達成分と散乱成分の波長別日射照度の測定及び算出方法については、居島(2014)を参照されたい。

(1) 水蒸気による直達波長別日射照度の減衰

太陽光スペクトルの近赤外域は、水蒸気によって吸収され、特に 940, 1120, 1380nm 付近には水蒸気の強い吸収帯が存在する。一般に気温が高くなるほど大気中に含まれる水蒸気は多くなる。図 10 の直達波長別日射照度において、1月 18 日(図 10-a)と 7月 22 日(図 10-c)を比較すると、7月 22 日は 940, 1120, 1380nm 付近の吸収帯において顕著に減衰していることが確認できる。

ここで、 $SZA$  の変化に伴う日射照度の減衰を把握するため、 $SZA$  60°における 1000nm の直達・散乱日射照度を基準として、各  $SZA$ (70, 80, 85°)における 1000nm の日射照度との比(以下、日射照度比という)を調査した。その結果を表 4 に示す。日射照度比は、 $SZA$  の変化に伴う日射照度の減衰する割合を表し、数値が小さくなるほどその割合が大きいことを示している。また、表中には、862nm におけるエアロゾルの光学的厚さ(Aerosol Optical Depth：以下、 $AOD$  という)及び水蒸気量の指標となる GPS 可降水量(Precipitable Water Vapor：以下、 $PWV$  という)も掲載した。なお、 $AOD$  と  $PWV$  は、09 時の観測値を使用した。09 時の観測値を使用した理由は、 $PWV$  に異常値があった場合、09 時のラジオゾンデデータを用いて可降水量を確認できるからである。また、 $PWV$  については、観測部観測システム運用室において、国土地理院の電子基準点等観測データ及びカリフォルニア工科大学によるソフトウェア GIPSY-OASIS II を使用して算出した値である。

表 4 において、1月 18 日と 7月 22 日の  $AOD$ (862nm)は 0.03,  $PWV$  については 1月 18 日では 5.5kg/m<sup>2</sup>, 7月 22 日では 44.6 kg/m<sup>2</sup>であった。両日の 1000nm における直達成分の日射照度比は、各  $SZA$  においてほぼ等しいことから、 $SZA$  の変化に伴う 1000nm の直達成分が減衰する割合は、大気中の水蒸気量に依存していないことを確認した。

(2) エアロゾルの増減に伴う波長別日射照度の変化

一般に  $AOD$  の増加は、太陽光スペクトルの直達成分を減衰させ、散乱成分を増加させる要因となっている。

$AOD$  に注目すると、4月 27 日 09 時の  $AOD$ (862nm)は 0.14 であり、抽出した日の中で最大であった。図 11 の散



乱波長別日射照度の  $SZA60^\circ$  において、4月27日は他の日と比較して1000nmの値が2~4倍であった。また、表4において、各  $SZA$  における直達成分の日射照度比は、4月27日のみ散乱成分より小さく、減衰の割合が大きいことを示す。このことは、図10-bからも確認することができる。

### (3) AODと散乱率の相関

図12に、2015年10月25日の散乱率(散乱日射DF/全天日射GL)を示す。図10-dの直達波長別日射照度の940, 1120, 1380nm付近は、水蒸気の吸収帯により出力が小さく、図12においてもこの波長付近では正確に散乱率を表していない。図12の点線部分を除き、実線の波長の散乱率を用いて2次近似を当てはめ、全波長の散乱率を求めた。その結果を図13に示す。

4月27日(図13-b)の1000nm( $SZA60^\circ$ )の散乱率は0.19で、10月25日(図13-d)の散乱率0.10の約2倍であった。また、AOD(862nm)においても2倍(0.14/0.07)であったことから(表4)、両者には相関があると判断できる。そこで、2015年の試験観測において、各月の快晴日を2~3日抽出し、AOD(862nm)と散乱率との相関を調べた。散乱率については1000nmにおける  $SZA 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$  の値を使用した。その結果を図14に示す。決定係数  $R^2$  は  $60^\circ$  では0.98,  $70^\circ$  では0.97,  $80^\circ$  では0.95であり、AOD(862nm)と散乱率(1000nm)には高い相関があることを確認した。

また、同様に  $SZA60^\circ$  における1000nm, 1240nm, 1550nmの散乱率とAOD(862nm)についても相関を調べた。その結果を図15に示す。決定係数  $R^2$  は1000nmでは0.98, 1240nmでは0.96, 1550nmでは0.94であり、この3波長の中では、1000nmの散乱率が最もAOD(862nm)と相関が高かった。

## 6. まとめ

近赤外域用の分光型全天日射計MS-712について、温度特性及び入射角特性を把握した。標準光源による校正及び外部ランプによる点検を定期的実施し、測器常数の確定及び測器感度変化を把握した。2015年の1月, 4月, 7月, 10月の各月から快晴日を抽出し、太陽光スペクトルの近赤外域の変化特性について調査した。その結果は以下のとおりである。

### 1) MS-712の温度特性及び入射角特性の把握

MS-712について温度特性検査及び入射角特性検査を実施し、それぞれの特性の把握及び補正係数を求めた。全波長範囲における温度特性は、 $20^\circ\text{C}$ を基準として、 $-13.0^\circ\text{C}$ では0~+4%,  $1.3^\circ\text{C}$ では-1~+2%,  $13.8^\circ\text{C}$ 以上では $\pm 0.5\%$ となり、波長依存性がみられた。入射角特性は、天頂角  $60\sim 65^\circ$  において、実際の光の強さ

の0.94倍であった。また、全波長範囲において入射角特性の差異はほとんどなく、波長依存性はみられなかった。

### 2) MS-712の校正及び測器感度変化

2013年12月から2015年2月までは、ブリューワー分光光度計用に開発されたNISTランプ検定装置を用いてMS-712を校正した。2016年2月には、新たに開発した分光型全天日射計用校正装置を用いて校正を実施し、測器常数を確定した。測器感度は、2013年12月から2016年2月までの2年3ヶ月の期間において、2014年は安定に推移し、2015年は夏季に測器感度が低下する季節変化がみられたが、全期間について測器感度の変化(900~1600nmの平均値)は-1.2~+0.3%の範囲内に収まっていた。

### 3) 太陽光スペクトルの近赤外域における試験観測

2015年1月, 4月, 7月, 10月の各季節について快晴日を抽出し、 $SZA$ 別( $60, 70, 80, 85^\circ$ )の太陽光スペクトルの近赤外域における変化特性を調査した。7月の直達波長別日射照度において、水蒸気の吸収帯による顕著な減衰がみられ、1月と7月における1000nmの直達日射照度の比較では、太陽天頂角の変化に伴う直達日射照度の減衰する割合が、大気中の水蒸気量に依存していないことを確認した。また、AODの増加に伴う散乱波長別日射照度の増加を確認し、AOD(862nm)と散乱率(1000nm)に高い相関があることを明らかにした。

今後は、校正に伴う測器常数の不確かさを詳細に把握するとともに、太陽光スペクトル(直達成分, 散乱成分)の近赤外域における観測データを蓄積し、季節変化等を明らかにする。また、数値予報モデルの放射計算の検証、水蒸気の光学的厚さから可降水量の推定などを行う予定である。

## 謝 辞

本稿を草するに際し、国立大学法人 筑波大学 生命環境科学研究科 奈佐原顕郎准教授には、MS-712を長期にわたり借用させて頂いた。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 猪狩真一主任研究員には、校正装置の開発、標準光源の値付け及び校正に伴う不確かさについてご助言やご協力を頂いた。また、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等にご協力頂いた観測第三課の皆様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.