[短報]

# 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

居島 修*

# The Temperature and Directional(Cosine) Responses of the Grating Spectroradiometer (MS-710)

Osamu IJIMA


## 要旨

平成23年度高層気象台に導入された分光型全天日射計(MS-710)は,350nm～1000nmの波長範囲について,約1nm毎に全天日射のスペクトルを観測する測器である．MS-710について，1)温度特性検査及び2)入射角特性検査を行い，3)これらの特性検査結果を用いて測定値の補正方法を検討した．なお，800nmより長い波長では測定値が小さくばらつきがあり，温度特性及び入射角特性を精確に調べることは困難であった．

1) 温度特性検査では,400nm～750nmのそれぞれの波長において,測器周囲の温度が10℃上昇した場合,測定出力が0.1%増加し，-20℃～40℃の温度範囲において測定出力はほぼ線形に増加した．
2) 入射角特性検査では，短い波長ほど入射角特性が悪く，400nmでは天頂角60～70°において，測定値の変化は-5%であった．広帯域の全天日射計に比べて入射角特性が劣ることが分かった．
3) 2つの特性の検査結果を基に補正方法の検討を行った．温度特性では400nm～650nmまでの6波長の温度特性係数を各槽内温度別に平均し，温度特性の補正値とした．入射角特性では3方位(東，西，南)の各天頂角における入射角特性係数を波長別に平均し，入射角特性の補正値とした．これらの補正値を用いて測定値を補正することにより，測定誤差を最小限に抑えられる．


## １．はじめに

気象庁における全天日射観測は，1931年からバイメタル式全天日射計，1971年から(高層気象台は1957年から)熱電堆式全天日射計が使われてきた．これらの測器は300nm～3μmの波長範囲の全天日射を測定する広帯域の全天日射計である．近年，太陽スペクトルを観測できる分光型全天日射計が開発され，太陽光発電の評価や光合成有効放射の研究等に利用されており，気象分野においては数値予報モデルの放射スキームの検証等に利用が期待されている．しかし，分光型全天日射計の精確な校正方法については確立されておらず，大きな課題となっている．また，温度特性及び入射角特性についても補正方法が確立されていない．本稿では，平成23年度高層気象台に導入した分光型全天日射計について，温度特性及び入射角特性を検査した．各特性について波長別に調べ，検査結果を基にそれぞれの特性における補正方法を検討した．その概要を以下に報告する．

*高層気象台 観測第三課

## ２．分光型全天日射計の概要

分光型全天日射計(英弘精機社製MS-710：以下，MS-710という)のシステム構成，仕様及びセンサー部の構造等について説明する．

### ２．１ システム構成

MS-710は，センサー部，電源部，パソコンから構成される．パソコンからセンサー部へコマンドを送ることにより，測定及びデータ送信が行われる．

図1にシステム構成を，写真1にセンサー部を示す．

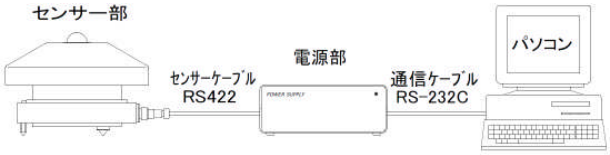



図1 システム構成(英弘精機：2011)

写真1 分光型全天日射計（MS-710）

## ２．２ 仕様及びセンサー部の構造

表 1 に MS-710 の仕様を，図 2 にセンサー部の構造を示す．分光器は回折格子を用いており，分光された光は検出器(Si フォトダイオード・アレイ：1024 素子)によって 350nm～1000nm の波長範囲を約 0.73nm 毎に測定する．波長毎の全天日射照度に応じた検出器の出力(count 値)は計測用基板でデジタル信号に変換され，パソコンへ送信される．また，検出器の温度を保つため，ペルチェ素子が取り付けられており，温度を 25℃(±3℃以内)に制御している．

センサー部の構造は，ドーム，拡散板，太陽光及び dark の測定時に用いるシャッター，分光器(検出器を含む)，ペルチェ素子，計測用基板から構成される．ここで，dark とは，太陽光を遮断(シャッターを閉じた)した状態での測器内部の迷光等の影響による測定値で，シャッターを開けたときの測定値から dark の値を差し引くことにより観測値が得られる．

MS-710 は 1 回の観測において次の①～④の手順で連続に測定し，①から②を引いた値を露光時間 200msec の測定値，③から④を引いた値を露光時間 2000msec の測定値としている．なお，ファイルには①～④のすべての測定値が 1 分毎に保存される．

① 露光時間 200mseec 測定(シャッター開)
② dark 200msec 測定(シャッター閉)
③ 露光時間 2000msec 測定(シャッター開)
④ dark 2000msec 測定(シャッター閉)

ここで，露光時間を 2 段階としている理由は，200msec の測定では，400nm より短い波長及び 900nm より長い波長において測定値が小さく，測定値とノイズの判別がつかなくなるため，2000msec の測定値を用いて測定値の小さい波長域をカバーするためである．

なお，市販の MS-710 は，光の強さに応じて露光時間を自動調整(10msec～5000msec：数段階)，又は 1 つの露光時間のみに固定する仕様となっているが，露光時間の自動調整には問題点がある．例えば，2 倍の露光時間であっても必ずしも測定値が 2 倍にならない場合がある(居島：2004)．この特性を線形特性と言い，露光時間の自動調整を使用する場合は，露光時間と測定値の線形性を調べておく必要がある．しかし，露光時間の補正は複雑なことから誤差要因を除くため，高層気象台で整備した MS-710 については，露光時間の自動調整を使用せず，2 段階の露光時間を連続で測定するように仕様を変更している．

## ２．３ 水銀ランプを用いた波長検査

回折格子で分光した光は，検出器で波長別に測定され

表 1　MS-710 仕様

| | |
|---|---|
| 波長範囲 | 350nm～1000nm |
| 波長間隔 | 約 0.73nm |
| 波長分解能 | ＜8nm |
| 波長精度 | ±1.5nm |
| 波長再現性 | ±0.2nm |
| 温度依存性 | ±5% (－10℃～+40℃) 全波長平均 |
| 温度制御 | 25℃±3℃ (ペルチェ素子使用) |
| 露光時間 | 200msec, 2000msec<br>(1 分毎に 2 段階の露光時間で測定) |
| 検出器 | Si ﾌｫﾄﾀﾞｲｵｰﾄﾞ・ｱﾚｲ(1024 素子) |
| ドーム材質 | フィルターガラス |
| 通信 | センサー部：RS422, 電源部：RS232C |

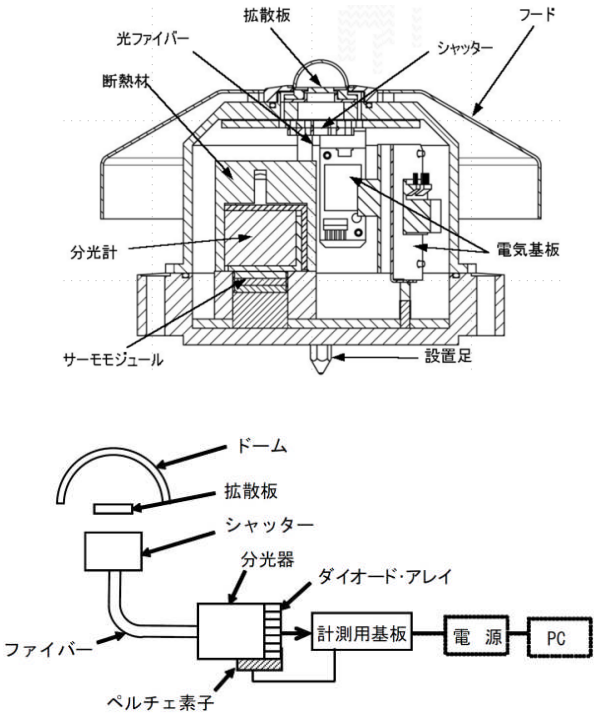



図 2　センサー部　上：MS-710 断面図
下：内部構造
(英弘精機：2011)

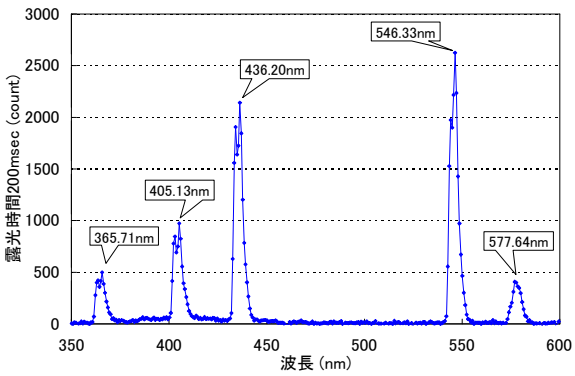



図 3　水銀ランプの波長測定

るが，分光器の波長精度を確認するため，低圧水銀ランプ(浜松ホトニクス社製：L937-02)を用いた検査を行った．図 3 に水銀ランプの輝線スペクトルを測定した結果を示す．水銀ランプの輝線スペクトルは 5 本検出され，この 5 本の波長のピーク(スペクトルの最大値)と水銀ランプの輝線波長(理科年表)を比較した．その結果を表 2 に示す．5 本の輝線スペクトルにおいて，測定した波長のピークと水銀ランプの輝線波長との差は 0.7nm 未満で，この差は検出器の波長間隔(0.73nm)以下であり，的確に波長を検出していると判断できる．

### ２．４　観測例

図 4 に 2012 年 1 月 5 日 11 時 00 分(上図)及び 16 時 00 分(下図)の観測例を示す．MS-710 の測定値は，拡散板の波長透過特性などにより，実際の太陽光スペクトルとは異なる．実際の分光放射を求めるためには測定値に測器常数を掛けて太陽光スペクトルに変換するが，測器常数については測器の校正方法を検討・確立する必要があり，本稿では述べないこととする．

測定値は，900nm より長い波長では一日を通して測定値が小さく，また，早朝や夕方のように大気路程が長くなると，400nm より短い波長において小さくなる．

11 時 00 分の観測において，露光時間 2000msec の 400nm～760nm の値が 0 となっているのは，測定レンジの上限である 24000count を超えたため測定値は 0 として出力される．

### ３．MS-710 の特性検査

MS-710 の光学的特性として次の特性が考えられる．

①温度特性：光源の照度が一定であっても，検出器の温度変化によって，検出器の感度が変化し，測定出力が変化する特性．

写真 2　温度特性検査装置

表 2　水銀ランプ測定と輝線波長との比較

| 測定結果 (nm) | 水銀ランプ輝線波長(nm) (理科年表) | 測定と輝線との差(nm) |
|---|---|---|
| 365.71 | 365.02 | 0.69 |
| 405.13 | 404.66 | 0.47 |
| 436.02 | 435.84 | 0.18 |
| 546.33 | 546.07 | 0.26 |
| 577.64 | 576.96 | 0.68 |

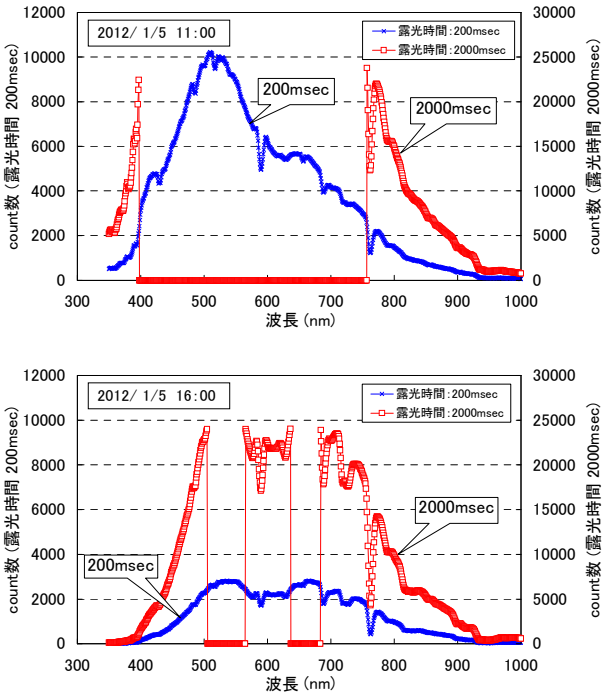



図 4　観測例　上：2012 年 1 月 5 日 11 時 00 分
下：2012 年 1 月 5 日 16 時 00 分

写真 3　入射角特性検査装置
(気象測器検定試験センター所有)

表 3　波長ずれ検査結果

| 槽内温度 (℃) | 482.12nm，712.53nm，882.53nm 付近の推定したピーク（nm） | | |
|---|---|---|---|
| -20 | 482.15 | 712.56 | 882.31 |
| -10 | 482.16 | 712.55 | 882.34 |
| 0 | 482.15 | 712.59 | 882.36 |
| 10 | 482.17 | 712.57 | 882.35 |
| 20 | 482.16 | 712.58 | 882.33 |
| 30 | 482.16 | 712.58 | 882.33 |
| 40 | 482.17 | 712.57 | 882.34 |

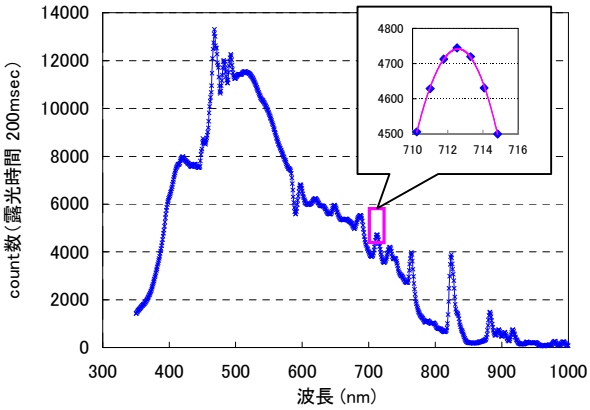
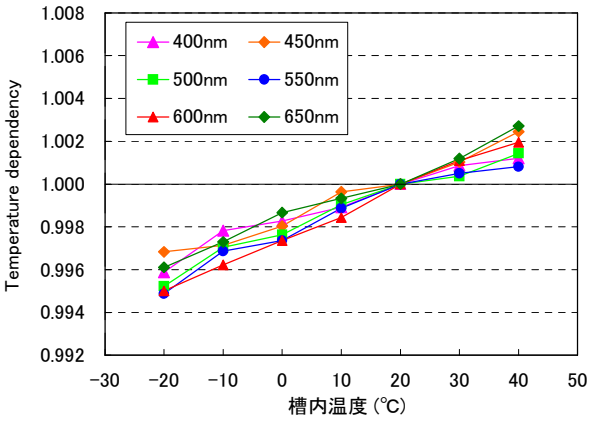



図 5　キセノンランプの波長測定(例)



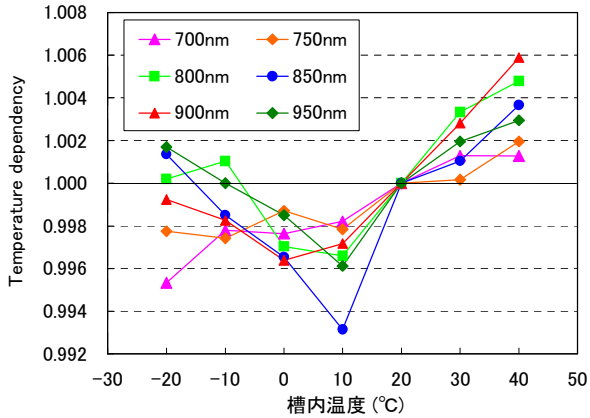
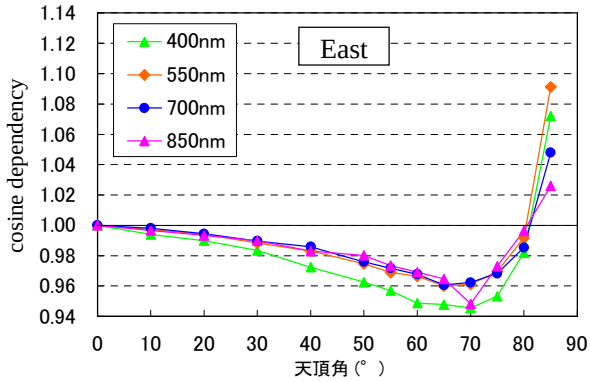
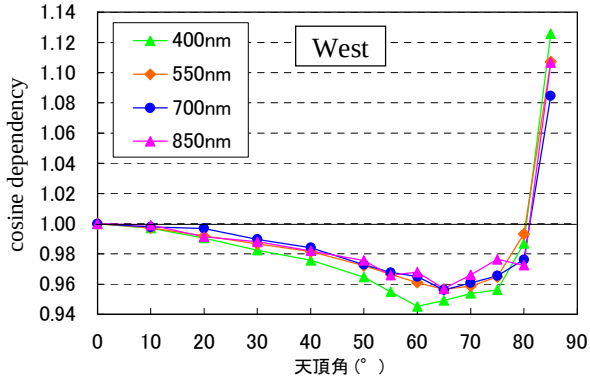




図 6　温度特性検査結果（上：400nm～650nm）
（下：700nm～950nm）

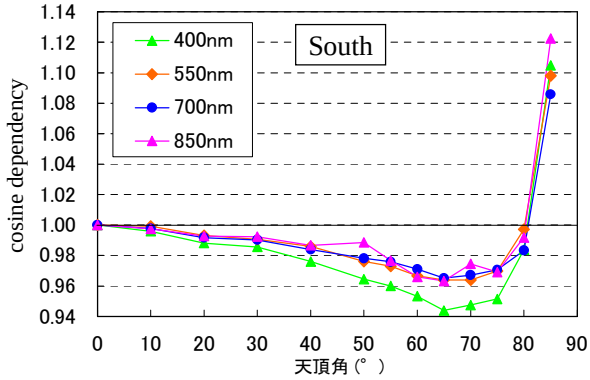
a）東（90°）



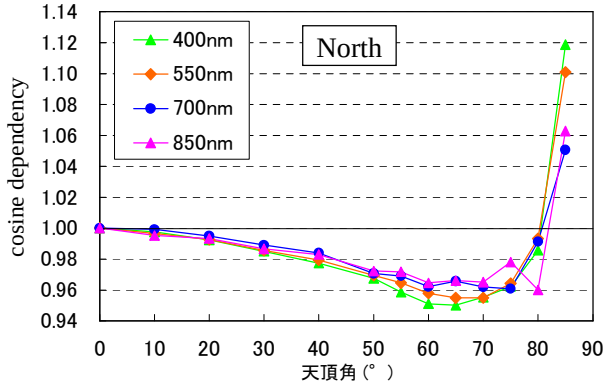

b）西（270°）




c）南（180°）




d）北（360°）



②入射角特性：全天日射計に天頂角 Z，方位角φの方向から日射が入射する場合に，全天日射計の測定出力が Z とφに依存する特性.

その他に線形特性(2.2 項参照)や傾斜角特性(測器を傾けて測定する場合，傾斜角に依存する特性)など(廣瀬：1986)あるが，本稿では①温度特性と②入射角特性について報告する．検査に用いた装置は，温度特性検査装置(写真 2)及び入射角特性検査装置(写真 3)である.

### ３．１ 温度特性検査

温度特性検査は，温度特性検査装置の恒温槽に MS-710 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恒温槽内の温度(以下，槽内温度という)を−20℃～40℃まで 10℃毎に変化させ，各槽内温度における測定値の変化を調べるものである.

(1) 周囲温度の変化に伴う波長ずれ検査

分光型の測器における温度特性検査は，波長別に温度特性を調べることが目的である．このため，測器温度の変化に伴って波長ずれが生じた場合，正確に温度特性を検査することができない．過去に回折格子を用いたサンフォトメータにおいて，温度変化に伴い波長ずれが起こった事例(居島：2006)があったことから，温度特性検査の他にキセノンランプの輝線スペクトルを利用して波長ずれの調査も同時に行った.

図 5 にキセノンランプを光源にして波長測定した例を示す．測定波長のうち，482.12nm，712.53nm，882.53nm 付近の輝線スペクトルについて，その前後のデータを数個用いて最小二乗法(3 次近似)により輝線スペクトルのピークを推定した．図 5 において吹き出し内のグラフの曲線は，712.53nm 付近のピークについて 3 次近似した例である．槽内温度を変化させ，各槽内温度における推定したピークを表 3 に示す．その結果，推定したピークは，最大で 0.05nm のずれしかなく，MS-710 では−20℃から 40℃の温度変化において波長ずれが波長間隔の 7%未満であった.

(2) 温度特性検査結果

図 6 上図に 400nm～650nm，下図に 700nm～950nm について 50nm 毎に温度特性検査の結果を示す．400nm～750nm は 200msec の測定値を，800nm～950nm は 2000msec の測定値を使用した．縦軸は温度特性係数を示し，次式で計算される．なお，つくばの年平均気温 20℃であることから，槽内温度 20℃の測定値を基準とした.

温度特性係数=(各槽内温度の測定値) / (20℃の測定値)

400nm～650nm では，槽内温度の上昇と伴に測定値も大きくなっており，検出器の感度が上がっていることが分かる．また，この波長範囲では，−20℃～40℃の温度変化で測定出力の変化が−0.5～0.3%(基準温度 20℃)であった．精密日射放射観測装置に搭載されている高精度の全天日射計(CMP-22 SN090099：Kipp&Zonen 社製)は，同様の検査で−0.4～0.5%(基準温度 0℃)であり，MS-710 の温度特性は検出器の温度コントロールにより高精度の全天日射計と同程度であった.

700nm～950nm(図 6 下)では，700nm と 750nm は 400nm～650nm(図 6 上)のように線形性は見られなかったが，測定出力の変化は−0.5～0.2%の範囲内であった．800nm より長い波長は測定値が小さく，照度及び温度が同じ条件であっても測定値にばらつきがみられるなど，精確に温度特性を検査することは困難であった．また，測定値が小さい場合，測定値に占める dark の割合が大きくなる．キセノンランプを光源とした場合，850nm における 2000msec の測定値は dark が 3 割占めていた．測定値の温度特性と dark の温度特性は一致しないため，dark の割合が多い場合は，dark の温度特性の影響を受け，精確に検査ができないが図 6(上)と同様の傾向を示している.

### ３．２ 入射角特性検査

入射角特性検査は，入射角特性検査装置の設置台に MS-710 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傾け，MS-710 の受光面への入射角度を変化させ，測定値の変化を調べるものである.

検査は，東西南北の 4 方位において，天頂角が 0～50°は 10°毎，55～85°は 5°毎に行った．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°となる角度のことを言う.

図 7 に a)東，b)西，c)南，d)北の各方位における入射角特性検査の結果を示す．縦軸は入射角特性係数を示し，天頂角 0°で測定した値を基準として次式で計算される.

入射角特性係数=(各 Z の測定値) / (Z=0°の測定値×cosZ)

ここで，Z は天頂角である.

図から短い波長ほど入射角特性が悪く，400nm では天頂角 60～70°において入射角特性係数は−5～−6%であった．また，どの方位においても 0°～65°付近まで徐々に入射角特性係数がマイナス側に大きくなり，70°付近から改善していくが，85°ではプラス側に最大で 12%であった.

85°がプラス側に大きくなる理由として，拡散板が本来の受光面よりも若干上側に取り付けられており，拡散板の側面からも光が入射することが推察される．4 方位の入射角特性係数を比較した結果，各方位の入射角特性は一致せず，拡散板表面の特性や取り付け状態などによっ

て各方位を一致させることは難しいと考えられる．なお，850nm については，温度特性検査と同様にばらつきがみられ，入射角特性係数の変動幅が若干大きかったが傾向としては他の波長と同様であった．

また，CMP-22 で実施した同様の検査では，0°～60°までの入射角特性は–0.05%程度であった．MS-710 の入射角特性係数は高精度の広帯域全天日射計と比べて大きいが，次に述べる補正方法を用いて入射角特性を補正することができる．

### ３．３ 温度特性及び入射角特性の補正

温度特性検査及び入射角特性検査の結果を基に各特性の補正方法を検討した．

(1) 温度特性

温度特性の補正については，400nm～650nm までの 6 波長の温度特性係数を各槽内温度別に平均し，つくばの年平均気温 20℃を基準として温度特性の補正値を決定した．槽内温度を地上気温に置き換え，以下の補正式で温度補正を行う．

$I_{\lambda 0} = I_{\lambda} / \{1 + 0.00010 * (T - 20)\}$

$I_{\lambda 0}$：波長λにおける真の count 数

$I_{\lambda}$ ：波長λにおける実測の count 数

T ：地上気温

なお，650nm より長い波長の温度特性の補正については，補正値と 650nm より長い波長の温度特性が同じと仮定して補正する．図 8 に温度特性係数の補正値を示す．

(2) 入射角特性

ここでは太陽方向からの日射について入射角特性の補正を検討した．3 方位(東，西，南)の各天頂角における入射角特性係数を波長別に平均し，入射角特性の補正値とした．図 9 に入射角特性の補正値を示す．なお，真北からは太陽光の入射がないため，3 方位での平均とした．また，700nm より長い波長については，700nm の平均値と同じ入射角特性を持つと仮定した．

実際の補正には約 1nm 毎に入射角特性係数を調べ，すべての波長について補正値を求める必要があり，今後の課題である．

### ４．まとめ

(1) 温度特性：MS-710 は検出器をペルチェ素子で温度制御しているため，温度特性が良い測器であった．また，温度変化に伴う波長ずれもなかった．

(2) 入射角特性：MS-710 は，広帯域の全天日射計に比べて入射角特性は劣るが，入射角特性を補正することで，測定誤差を小さくすることが可能である．

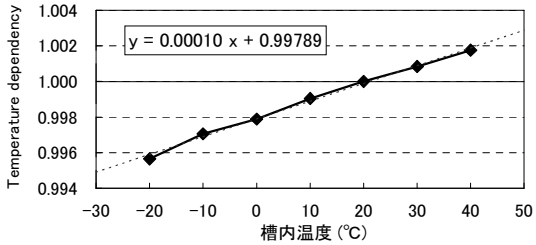



図 8　温度特性係数の補正値

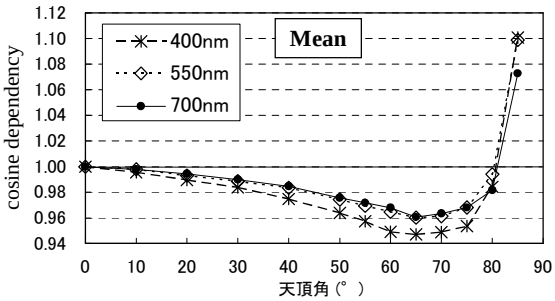



図 9　入射角特性の補正値

(3) 課題

2 段階の露光時間で測定するように仕様を変更したが，800nm より長い波長では，2000msec の露光時間でも測定値が小さく，温度特性及び入射角特性を調べることが困難であった．長い波長の出力を大きくするためには，検出器の測定レンジの幅を広げ，拡散板を薄くするなど，測器の改良が望まれる．また，実際の全天日射は太陽方向に加えて，全立体角から散乱光が受光面に入ってくるため，入射角特性の補正については，散乱光を含めた補正方法の検討が必要である．今後は分光型全天日射計の校正について検討を行う予定である．

### 謝　　辞

本稿を草するに際し，入射角特性検査装置は気象測器検定試験センター所有のものを借用した．助言を賜った観測第三課の伊藤主任研究官(当時，現観測第三課長)，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厚くお礼申し上げます．

### 引 用 文 献

居島　修(2004)：回折格子型サンフォトメータ PGS-100 について(第二報)．高層気象台彙報, **64**, 63 - 68.

居島　修(2006)：回折格子型サンフォトメータ PGS-100 の改良およびその効果．高層気象台彙報, **66**, 71 - 80.

英弘精機(2011)：広帯域分光放射計　可視・近赤外域 MS-710(取扱説明書 Ver.2.01), 英弘精機, 1 - 37.

廣瀬保雄(1986)：全天日射計の特性を考慮した全天日射強度の算出の試みについて．測候時報, **38**, 141 - 150.