

直達日射計を用いた全天日射計の校正方法の比較 (遮蔽法とコリメーションチューブ法)

居島 修*・島村 哲也**・押木 徳明***・能登 美之****

Comparison on the pyranometer of calibration methods using the pyrhelimeter (Alternating sun-and-shade method and Collimation tube method)

Osamu IJIMA, Tetsuya SHIMAMURA, Noriaki OSHIKI and Yoshiyuki NOTO

要旨

一般的に直達日射計を用いた二次標準全天日射計の校正は、簡便な器具を使用する遮蔽法を用いることが多いが、気象庁では、短期間で校正が行えるコリメーションチューブ法を採用している。これまで、遮蔽法とコリメーションチューブ法を系統的かつ詳細に比較した資料がほとんどないため、両者の校正方法について、手順や測定値の特徴及びコリメーションチューブの改良した点を取りまとめた。その結果は以下のとおりである。

1) 遮蔽法及びコリメーションチューブ法の特徴

遮蔽法では、直達日射照度の変動している場合、または、天頂などに雲があり、散乱日射照度の変動している場合には、求める器械定数がばらつくため、校正の精度が低下する。一方、コリメーションチューブ法では、全天日射計を直達日射計と同じ構造にするため、直達日射照度の変動しても比較すべき値が同じ傾向となることから、求める器械定数がばらつくことはなく、良好な校正データを連続で得ることができ、校正日数を短くすることができる。

2) コリメーションチューブの改良

同じ仕様の4本のコリメーションチューブについて比較観測を実施した結果、器械定数にわずかながら差があった。このうち差が大きい1本のコリメーションチューブについては、内部の迷光を確認した。迷光を低減する改良を行った結果、器械定数を改良前に比べて0.9%小さくすることができた。

3) 遮蔽法とコリメーションチューブ法で求めた器械定数の比較

遮蔽法とコリメーションチューブ内部の迷光を低減する改良前後でのコリメーションチューブ法で求めた器械定数を比較した。その結果、遮蔽法の器械定数は、改良前の器械定数と比べて-0.9%、改良後の器械定数と比べて-0.1%となり、改良によって両者の器械定数はほぼ同じ値となった。

コリメーションチューブ法は、遮蔽法に比べて取得できるデータ数が多く、また、直達日射照度の変動している場合でも、高い精度で全天日射計を校正できる方法であることを確認した。

1. はじめに

直達日射計を用いた二次標準全天日射計の校正方法については、世界気象機関(WMO: World Meteorological Organization)測器観測法委員会(CIMO: Commission for Instruments and Methods of Observations)の指針(CIMO Guide)(WMO:2014)及び国際標準化機構(ISO: International

Organization for Standardization)のISO9846(ISO:1993)に定められており、(1)直達日射計で測定した直達日射照度の水平面成分と全天日射計で観測した散乱日射照度を合成して全天日射照度を算出し、校正する全天日射計の測定値とを比較する方法(以下、直散合成法という)、(2)水平に設置した1台の全天日射計に遮蔽ディスク(直達日射を遮る円板)を用いて全天日射と散乱日射の測定値を交互に観測し、両者の測定値を差し引いて直達日射水平面成分の測定値を求め、基準となる直達日射計で観測した直達日

*高層気象台 観測第二課 **地磁気観測所 観測課
気象測器検定試験センター *釧路地方気象台

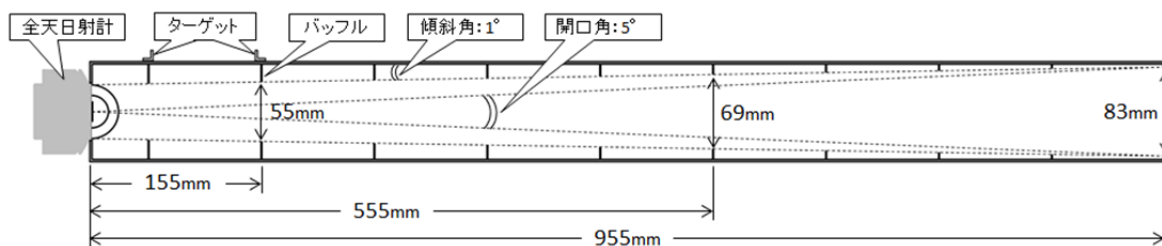


図1 コリメーションチューブの概念図 (ガラスドーム直径: 50mm)

射照度の水平面成分とを比較する方法(以下、遮蔽法という)がある。また、遮蔽法には、全天日射計の受光面を直達日射に対して垂直に設置する方法もある。

気象庁における直達日射計を用いた二次標準全天日射計の校正は、1985年までは遮蔽法を、1986年から1992年までは直散合成法を、1993年以降はコリメーションチューブを用いた方法(以下、コリメ法という)を採用している。コリメ法とは、図1に示すようにコリメーションチューブの底に全天日射計を取り付け、全天日射計を擬似的に直達日射計と同等の構造(開口角 5°、傾斜角 1°)にして、基準となる直達日射計と比較校正する方法である(Hirose: 1994)。

コリメ法に変更した理由は、(1)直散合成法及び遮蔽法(校正する全天日射計を水平に設置した場合)では、校正する全天日射計の入射角特性が校正結果に不確かさとして加わる。(2)遮蔽法では、天頂に雲がある場合には散乱日射照度に変動し、器械定数にばらつきが生じる。これらの課題を解決するためにコリメ法を採用した。なお、全天日射計の入射角特性の詳細については、間宮ほか(2012)を参照いただきたい。

これまで、遮蔽法とコリメ法を系統的かつ詳細に比較した資料がほとんどないことから、本稿では、これらの校正方法について、手順、測定値の特徴及び改良した点を取りまとめたので、その結果を報告する。

2. 遮蔽法及びコリメ法

2.1 遮蔽法

2.1.1 全天日射計を遮蔽する器具

1985年まで使用した遮蔽器具と同等の構造を図2に示す(ISO: 1993)。Cの固定台にA、Bのターンテーブルを載せ、Aに全天日射計Dを取り付け、Bには弧状の支持棒F及び遮蔽ディスクEを取り付けている。支点Gで遮蔽ディスクを上下に動かし、全天日射と散乱日射を交互に観測した。

次に、全天日射計の受光面を直達日射に対して垂直に設置し、遮蔽を行う器具の概念図を図3に示す(ISO: 1993)。

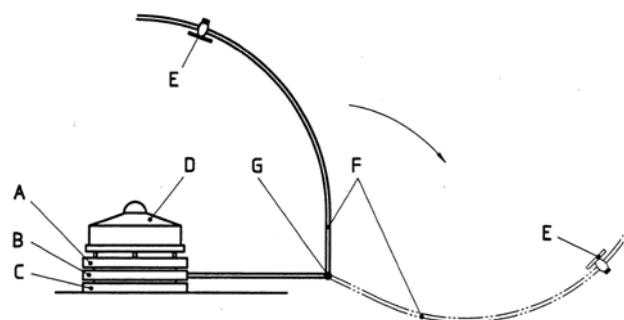


図2 遮蔽に用いた器具 (ISO9846より転記)

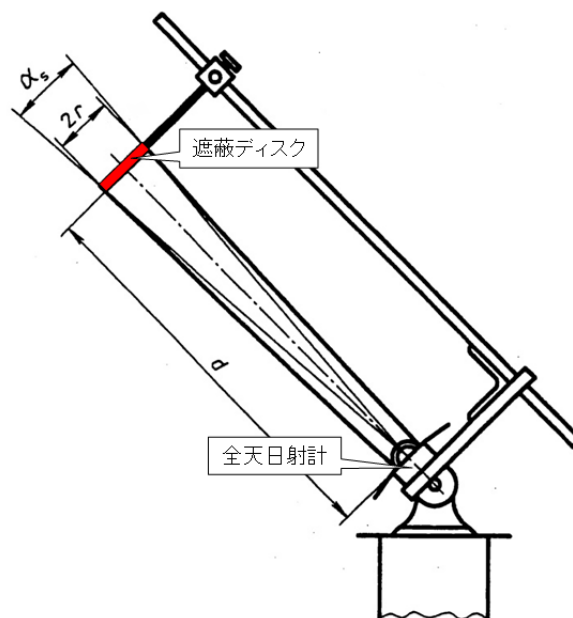


図3 調査に使用した遮蔽器具の概念図 (ISO9846より転記)

この方法は、入射角特性を考慮する必要がなく、図 2 の器具より精度が高い。遮蔽ディスクの半径を r 、全天日射計受光面から遮蔽ディスクまでの距離を d とした場合、開口角は $\alpha_s = \arctan(r/d)$ となる。また、遮蔽ディスクの直径は、図 1 と同様に全天日射計のガラスドームの直径、開口角 5° 、傾斜角 1° で決まる。本調査で遮蔽法に用いた遮蔽器具は、入射角特性の影響を受けない図 3 と同じ機構の装置を用いた。

実際の調査に使用した遮蔽器具を写真 1 に示す。全天日射計は、直達日射計と同様に受光面を直達日射に対して垂直になるように設置する。

写真 1(a)：遮蔽ディスクを取り付け(以下、遮蔽ディスクを閉じるという)、全天日射計受光面に直達日射が入射しないように遮り、散乱日射を観測する。全天日射計のガラスドームの直径が 50mm の場合、受光面から遮蔽ディスクまでの距離は 955mm 、遮蔽ディスクの直径は 83mm となる。

写真 1(b)：遮蔽ディスクを折り畳み(以下、遮蔽ディスクを開けるという)、半球日射を観測する。全天日射計感部周辺を覆う白いカバーの内部には通風ファンを取り付け、空気をカバー後面からガラスドーム周囲の隙間を通してカバー前面へ通風している。これによりガラスドームへの塵の付着と測器温度の上昇を防ぐと共に測器温度についても同様となるようにしている。

2. 1. 2 遮蔽法の手順

ISO9846 に準拠した遮蔽法における遮蔽ディスクの開閉及び計測のタイミングを図 4 に示す。器械定数を求める手順は次の①から⑥である。なお、本調査で使用する全天日射計(散乱日射・半球日射)の測定値は電圧(単位： mV)である。

- ① 遮蔽ディスクを閉じ、散乱日射の測定値を観測(Δ 印、以下、散乱日射測定値という)
(測定は遮蔽時間の最後に読み取る)
- ② 遮蔽ディスクを開け、半球日射の測定値を観測(\circ 印、以下、半球日射測定値という)
- ③ 遮蔽ディスクを閉じ、散乱日射測定値を観測(Δ 印)
- ④ ①と③の散乱日射測定値を内挿し、②の測定時刻における散乱日射測定値(内挿値)を求める。
- ⑤ ②の半球日射測定値と④の散乱日射測定値(内挿値)を差し引き、直達日射の測定値(以下、遮蔽法直達日射測定値(単位： mV)という)を求める。
- ⑥ ⑤の遮蔽法直達日射測定値と基準の直達日射計で観測した直達日射照度(\diamond 印)から器械定数を算出。

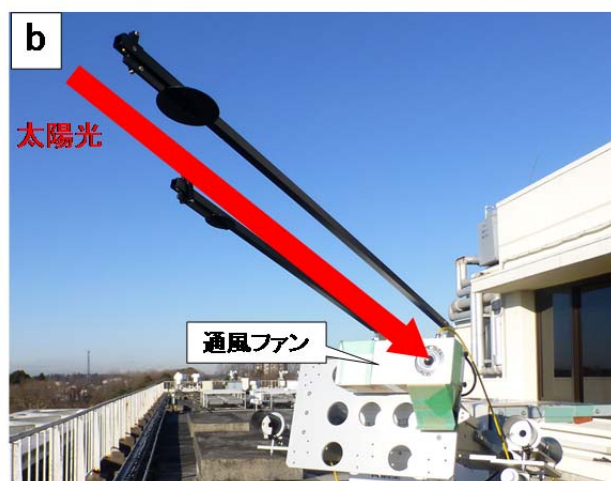
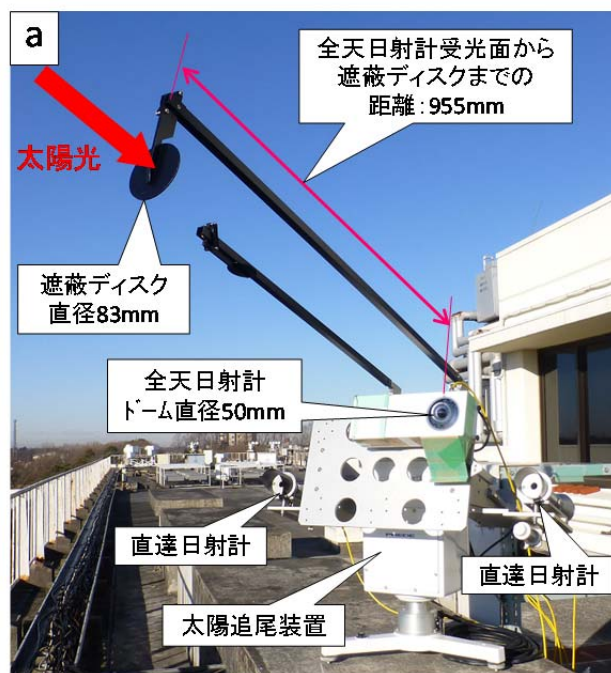


写真 1 遮蔽法用太陽追尾装置及び遮蔽ディスク
(a) 遮蔽ディスクを取り付け、散乱日射の出力値を測定
(b) 遮蔽ディスクを折り畳み、半球日射の出力値を測定

遮蔽ディスク	閉	開	閉	開	閉
測定時刻	0	t_0	$2t_0$	$3t_0$	$2n \cdot t_0$ ($(2n+1) \cdot t_0$)
散乱日射照度		Δ		Δ	Δ
半球日射照度		\circ		\circ	
直達日射照度		\diamond		\diamond	

図 4 遮蔽ディスクの開閉及び計測のタイミング
 \circ ：半球日射測定値[mV] Δ ：散乱日射測定値[mV]
 \diamond ：直達日射照度[kW/m²]

器械定数[mV/(kW/m²)]

= 遮蔽法直達日射測定値[mV] ÷ 直達日射照度[kW/m²]

- ⑦ ①～⑥を n 回繰り返し、n 個の器械定数を平均する。
- ⑧ n 個の器械定数のうち、⑦の平均値から 1%以上外れた器械定数を取り除き、1%未満のみを採用する。
- ⑨ ⑧の処理で採用した器械定数を平均し、そのシリーズの器械定数とする。なお、⑧の処理で取り除いた個数が n/2 個以上の場合は、そのシリーズの器械定数は使用しない。

ISO9846 では、測定する時間間隔(図 4: t₀)や 1 シリーズのデータの個数(n)を次のように定めている。

- a) 測定間隔 t₀ : 1～4 分
 - b) 1 シリーズの時間 : (2n+1)t₀ が 36 分を超えないこと
 - c) データの個数 n : 3 以上
 - d) 期間, 必要データ数 : 3 日以上, 10 シリーズ以上
- なお、遮蔽法の詳細については、ISO9846 を参照いただきたい。

2. 2 コリメ法

2. 2. 1 コリメーションチューブ

コリメーションチューブは、直達日射計と同じ開口角 5°及び傾斜角 1°となるように、穴の直径が異なる複数のバッフルを内部に設けており、底には全天日射計を取り付ける(図 1)。全天日射計 CMP-21 及び CMP-22(Kipp & Zonen 社製, ガラスドーム直径: 50mm)を校正するために使用するコリメーションチューブ(ブリード社製)を写真 2 に示す。

写真 2(a): コリメーションチューブを太陽追尾装置に搭載し、直達日射計と同様にターゲットを用いて全天日射計受光面に直達日射が垂直に入射していることを確認する。また、通風ファンによってコリメーションチューブ内部の温度を一様に行っている。

写真 2(b): コリメーションチューブの底に全天日射計を隙間なく取り付けられる構造となっている。

写真 2(c): コリメーションチューブ内部のバッフルを示す。参考までに全天日射計のガラスドーム直径が 50mm の場合について、全天日射計受光面からの距離とバッフルの穴の直径との関係(理論値)を表 1 に示す。

留意点として、コリメーションチューブ及びバッフルの穴の寸法は、ガラスドームの直径によって一義的に決まるため、全天日射計の機種別に専用のコリメーションチューブを製作しなければならない。

2. 2. 2 コリメ法の手順及び校正条件

コリメ法は、二次標準直達日射計を用いた観測用直達

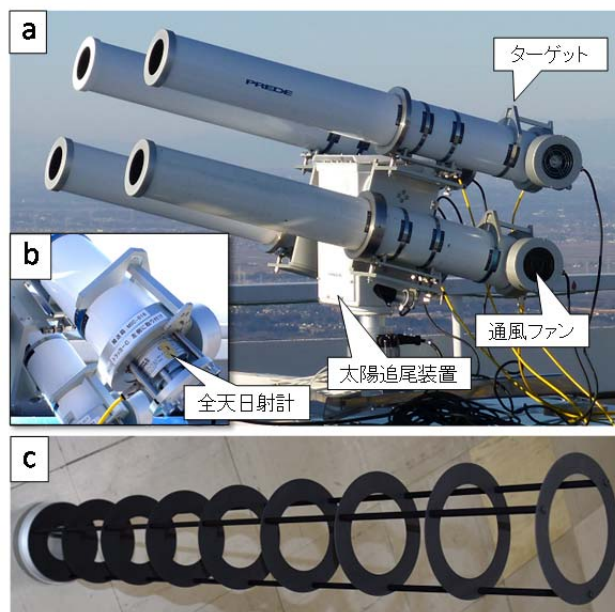


写真 2 コリメーションチューブ
 (a) コリメーションチューブ外観
 (b) 全天日射計の取り付け位置
 (c) コリメーションチューブ内部のバッフル

表 1 全天日射計受光面からの距離とバッフルの穴の直径との関係(ガラスドーム直径: 50mm)

全天日射計受光面から バッフルまでの距離 (mm)	バッフルの穴の 直径 (mm)
955	83
855	80
755	76
655	73
555	69
455	66
355	62
255	59
155	55
55	52

日射計の校正と同等であり、一般的には ISO9059(ISO : 1990a)及び CIMO Guide に準拠して校正をする。

気象庁における二次標準直達日射計を用いた観測用直達日射計の校正については、直達電気式日射計部内検査指針(気象庁: 2005)に以下のとおり定めている。

- a) 直達日射照度 : 700W/m²以上
- b) 太陽高度角 : 25°以上
- c) 太陽面及びその周辺(太陽の中心から約 15° 以内)に雲や煙霧がなく、天空状態が一様(雲量 1/8 以下)であること
- d) ホイスナー・デュボアの混濁係数 : 4 以下

- e) 3 日以上かけて、少なくとも 100 個のデータを選別すること
- d) 選別データのうち 2/3 以上が器械定数 $\pm 1.0\%$ の範囲内であること
- f) 日射計感度の変動係数(標準偏差/器械定数)が 0.010 未満であること

通常、校正の基準となる直達日射照度は、一次または二次標準直達日射計(絶対放射計)で観測した直達日射照度を使用する。気象庁では PMO-6(スイス連邦, PMOD 製)及び AHF(米国, エプリー社製)の 2 種類の絶対放射計を保有しており、1 シリーズ(18 分間)に得られる直達日射照度の個数は、PMO-6 では 6 個、AHF では 13 個である。

器械定数は、基準となる直達日射照度(kW/m^2)と同時刻に観測した観測用直達日射計の測定値(mV)から求める。

コリメ法では、全天日射計を疑似的に直達日射計とみなすので、コリメーションチューブに取り付けた全天日射計の測定値が観測用直達日射計の測定値(以下、コリメ法直達日射測定値という)に相当する。また、器械定数は以下の式で求める。

器械定数 $[\text{mV}/(\text{kW}/\text{m}^2)]$

$= \text{コリメ法直達日射測定値}[\text{mV}] \div \text{直達日射照度}[\text{kW}/\text{m}^2]$

最終的な器械定数は、直達電気式日射計部内検査指針の a) から f) の条件を満たす 100 個の器械定数を平均して求める。

参考までに、(1)ISO9059 及び(2)CIMO Guide における二次標準直達日射計を用いた観測用直達日射計の校正条件等について以下にまとめた。

(1) ISO9059

- a) 直達日射照度：300 W/m^2 以上、700 W/m^2 を超えることが望ましい
- b) 校正中の風速は、特に太陽の方角から吹いているときは、低くなければならない
- c) 太陽の中心から 15°以内に雲がないこと
- d) 雲量：全天の 12.5%未満
- e) リンケ混濁係数：6 未満
- f) 太陽追尾装置の照準ずれは、傾斜角から 0.25°を引いた値より小さくなければならない
- g) 測定時間：最低 10 分、20 分が望ましい
- h) 各測定シリーズにおいて最低 10 回の瞬間値または少なくとも 1 つの積算値を取得すること
- i) シリーズ内の各測定値の器械定数を平均し、平均値との差が 2%以上外れた測定値を取り除く

(2) CIMO Guide

- a) 絶対放射計以外のすべての直達日射計は、太陽を放射源とした絶対放射計との比較により校正する必要

がある

- b) すべての日射計は、世界放射基準(WRR : World Radiometric Reference)と直接または間接的に比較されなければならない
- c) 絶対放射計は、それ自身の器械定数ではなく、世界標準器群と比較して決定された校正係数のみを使用する
- d) 国際日射計比較で校正された直達日射計(絶対放射計)は、太陽を放射源とした比較により、二次標準及び観測用直達日射計を校正するための一次標準直達日射計として使用できる

なお、世界放射基準、国際日射計比較等の詳細については、間宮ら(2012)または居島(2016)を参照いただきたい。

3. 観測機材及び測器

本調査で使用した観測機材は、写真 1 に示す遮蔽器具、写真 2 に示すコリメーションチューブの他に、データロガー及びノートパソコンである。以下に(1)太陽追尾装置、(2)データロガー及び(3)測器の性能を示す。

(1) 太陽追尾装置

プリード社製 ASTX-2 を使用した。仕様は以下のとおり。
追尾精度：日差 0.15 度以下

角度分解能：0.005 度未満(方位角、高度角)

時刻校正：GPS 信号を受信し、自動に時刻を校正

(2) データロガー

江藤電気社製の CADAC3 を使用した。データロガーは、全天日射計及び直達日射計からのアナログ出力電圧をデジタル電圧値に変換し、1 秒毎にサンプリングをする。サンプリングされたデータはノートパソコンで収録した。仕様は以下のとおり。

・直流電圧

測定対象： $\pm 64\text{mV}$

分解能：1 μV 未満

測定精度： $\pm 0.02\%$ of rdg + 6 μV 未満 (0~64mV)

9mV における測定精度：

$$\pm (9 \times 0.0002 + 0.006) = \pm (0.0018 + 0.006)$$

$$= \pm 0.0078 [\text{mV}]$$

測定精度が 0.0078mV の場合、1 kW/m^2 における器械定数は 0.0078mV / kW/m^2 となる。この測定精度の確率分布を矩形分布と仮定すると、標準不確かさは $0.0078 / \sqrt{3} = 0.0045 \text{ mV} / \text{kW}/\text{m}^2$ となる。なお、標準不確かさの詳細については、NITE(2014)を参照いただきたい。

・白金測温抵抗体

測定対象：Pt100 (4 線式)

分解能 : 0.01°C未満

測定精度 : ±0.02% of rdg + 0.05°C未満(-200°C ~ 150°C)

(3) 測器

直達日射計は Kipp&Zonen 社製 CHP-1 を 2 台(S/N 090149, 090150), 全天日射計は Kipp&Zonen 社製 CMP-22 を 3 台(S/N 090108, 090109, 090110)使用した. CHP-1 と CMP-22 は, ISO9060 (ISO : 1990b)が定めた Secondary Standard クラスの測器である. 表 2 に測器の性能を示す.

日射計は, 温度によって感度に変化する温度特性を持っているため, 温度センサー(Pt100)を内蔵している. 本調査を実施する前に, 温度特性検査装置を用いて各測器の温度特性を調べた. CHP-1 及び CMP-22 の温度特性検査結果を図 5 に示す. 0°Cの出力を基準として, 各測器温度の出力との比を表している. 例えば, 図 5(a)の測器では, 20°Cにおける比は 0.998 であり, 同じ日射照度を観測しても 0°Cに比べて 20°Cでの出力は 0.2%小さくなることを示している. 本調査では温度特性検査の結果を用いて, 各測器の測定値を 0°Cにおける測定値に補正し, この測定値を使用することにより, 測器温度の変化による器械定数への影響をなくした.

なお, 温度特性検査装置及び検査方法の詳細については, 居島(2012)を参照いただきたい.

4. 遮蔽法及びコリメ法の測定値の特徴及び比較

測定値の特徴及び両者の測定値を比較には, 2 台の全天日射計(CMP-22 : S/N 090108, 090109)を使用して 2 台の測器を交換しながら遮蔽法とコリメ法を同時に行った. 調査は 2013 年 3 月から 5 月にかけて校正条件が合致する快晴時に 4 回実施した. また, 測定値の特徴の詳細な調査には, 2013 年 4 月 8 日 11 時 30 分から 11 時 40 分までの 1 秒値と 1 分値を使用した.

4. 1 遮蔽法の特徴

遮蔽法の調査に用いた遮蔽ディスクの開閉及び計測のタイミングを図 6 に示す. 遮蔽ディスクを開けた状態から開始し, 1 分毎に遮蔽ディスクを開閉した. データは 1 秒サンプリングとし, 1 分値は毎分 41 秒から 55 秒の 15 秒平均値とした. 遮蔽法については, 半球日射測定値と散乱日射測定値のそれぞれの前後 1 分値から内挿値を求め, 同時刻における両者の差を遮蔽法直達日射測定値とした.

基準となる直達日射照度は, 直達日射計を 2 台(CHP-1 : S/N 090149, 090150)使用し, 器械定数及び温度特性検査結果を用いて直達日射照度(kW/m²)を算出した後に 2 台の平均値を使用した.

表 2 使用した測器の性能

測器名		直達日射計 Kipp & Zonen CHP-1	全天日射計 Kipp & Zonen CMP-22
測定波長範囲 (nm)		200-4000	200-3600
応答時間	95%応答	5秒	5秒
ゼロオフセット	200W/m ² 正味熱放射での応答(通風時)	/	±3W/m ²
	周囲温度5K/h変化での応答		±1W/m ²
安定性	変化量/年	±0.5%	±0.5%
非直線性	0~1000W/m ²	±0.2%	±0.2%
温度依存性	-20~50°C	±0.5%	±0.5%

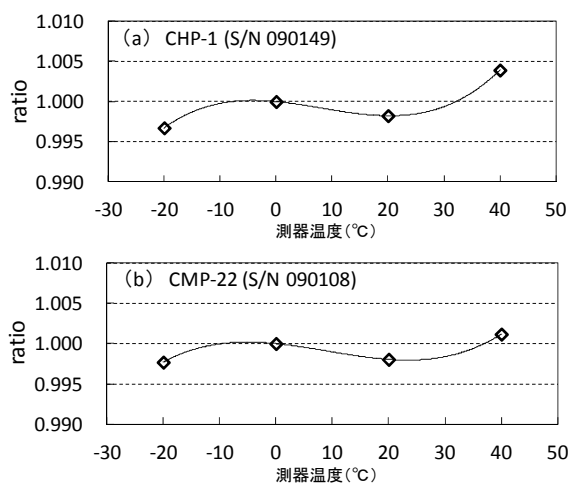


図 5 測器の温度特性
(a) 直達日射計(CHP-1 S/N 090149)
(b) 全天日射計(CMP-22 S/N 090108)

遮蔽ディスク	開	閉	開	閉	開	
測定時刻	0	t ₀	2t ₀	3t ₀	4t ₀	5t ₀
半球日射照度	○	●	○	●	○	
散乱日射照度		△	▲	△		
半球-散乱		■	■	■		
直達日射照度		◇	◇	◇		

図 6 本調査における遮蔽法の計測のタイミング
(例 : 遮蔽ディスクを閉じる回数が 2 回の場合)

- : 半球日射測定値(実測値)
- : 半球日射測定値(内挿値)
- △ : 散乱日射測定値(実測値)
- ▲ : 散乱日射測定値(内挿値)
- : 半球日射と散乱日射の差(遮蔽法直達日射測定値)
- ◇ : コリメ法直達日射測定値(実測値), 基準の直達日射計で測定した直達日射照度

遮蔽法により観測した全天日射計の測定値 (mV)を図7に示す。■印は遮蔽法直達日射測定値である。また、図7の半球日射測定値の拡大図を図8(a)に、散乱日射測定値の拡大図を図8(b)に示す。散乱日射測定値の変動幅はおおよそ0.02mVと小さく、半球日射測定値については、直達日射照度の変化に伴い大きく変動しており、変動幅もおおよそ0.1mVと散乱日射測定値の5倍であった。

4.2 コリメ法の特徴

コリメ法直達日射測定値についても、1秒サンプリングとし1分値は毎分41秒から55秒の15秒平均値とした。直達日射計による直達日射照度を図9(a)に、コリメ法直達日射測定値を図9(b)に示す。両者の変化傾向は一致しており、このことからコリメーションチューブが直達日射計と同等の構造であることを確認できる。

4.3 測定値等の比較

遮蔽法とコリメ法の測定値を比較するため、図10に遮蔽法直達日射測定値(左縦軸)とコリメ法直達日射測定値(右縦軸)を重ね合わせた。なお、使用した2台の全天日射計の器械定数が異なっており、測定値の変化を同等にするため、縦軸のレンジを左右に分けて表示した。遮蔽法直達日射測定値は、前後1分値から内挿した値を使用するため、直達日射照度の変動が小さい場合には遮蔽法とコリメ法の1分値はほぼ同じ値となる。しかし、11時31分と35分の前後に直達日射照度が大きく変動している場合には、遮蔽法とコリメ法の測定値には差が生じる。次に遮蔽法及びコリメ法により算出した器械定数の比較を図11に示す。図10と同様に器械定数についても遮蔽法はコリメ法に比べてばらつきがあり、直達日射照度が変動している場合は、遮蔽法の校正精度は大きく低下する。このため、実際の比較校正の手順では、変動が大きい場合の観測値を用いないようにするためデータ選別を行う。

4.4 器械定数の比較

遮蔽法とコリメ法の器械定数を表3に示す。器械定数は各観測時刻に得た観測値の個数の平均である。また、器械定数下段の括弧内の数値は、平均した器械定数の標準偏差である。コリメ法の標準偏差は、遮蔽法の半分以下であり、遮蔽法に比べてばらつきが小さいことを示す。また、表中の①から⑤について以下に解説する。

- ① 平均：4日間に得られた各方法の器械定数の平均値
- ② 差：遮蔽法－コリメ法
遮蔽法とコリメ法との差
- ③ 標準不確かさ： SD/\sqrt{n}

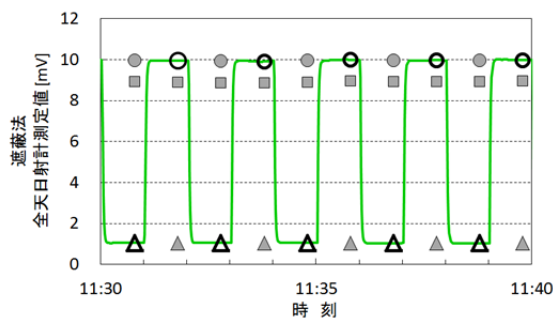


図7 遮蔽法により測定した全天日射計の測定値 (実線：1秒値，●○■▲：15秒平均値) (各印の観測要素は図5に同じ)

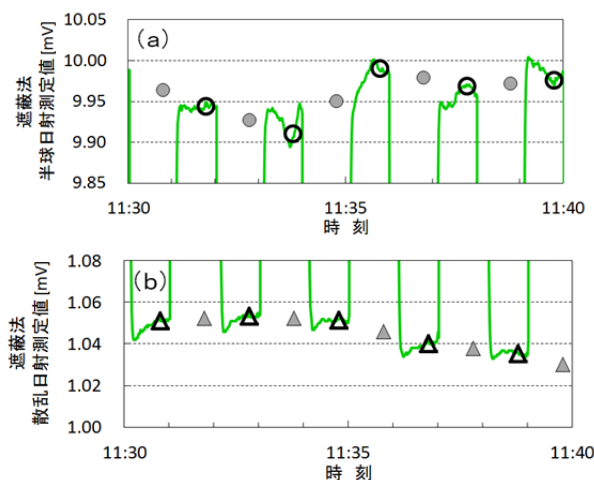


図8 半球日射測定値と散乱日射測定値の比較 (a) 半球日射測定値[mV] (b) 散乱日射測定値[mV] (○△：実測値 ●▲：内挿値)

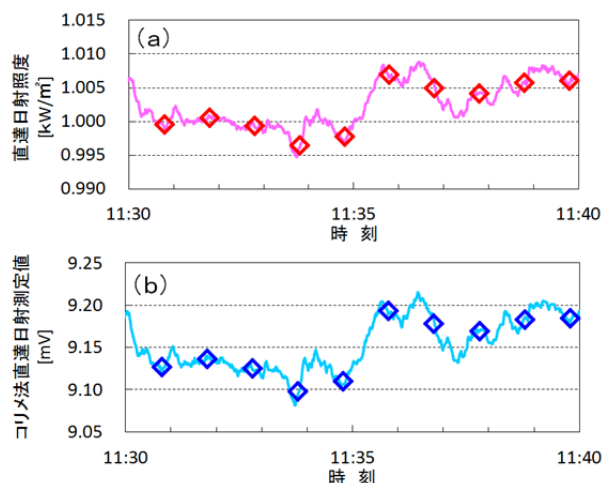


図9 直達日射照度とコリメ法直達日射測定値の比較 (a) 直達日射計による直達日射照度[kW/m²] (b) コリメ法直達日射測定値[mV] (実線：1秒値，◇印：15秒平均値)

SD：各方法の4日間に取得した器械定数の標準偏差
 n：各方法の4日間に取得した器械定数の個数

④ 合成拡張不確かさ： $k \times \sqrt{A^2 + B^2}$

k：包含係数 (k=2)

A：③の標準不確かさ

B：データロガーの標準不確かさ 0.0045 [mV/kW/m²]

⑤ (遮蔽法/コリメ法-1)*100：コリメ法を基準とした遮蔽法とコリメ法の比の百分率

コリメ法を基準とした場合、遮蔽法の器械定数はコリメ法の-0.6%であった。これは、遮蔽法の直達日射測定値がコリメ法に比べて0.6%小さいことを示している。この原因等については5. で述べる。

⑤の結果は1%未満と小さい数値であるが、この値の有意性について評価を行った。例えばCMP-22(090108)において、コリメ法の①平均(8.925)に対する②差(-0.050)の割合は-0.6%、同様に④合成拡張不確かさ(0.014)の割合は0.2%であり、-0.6%は有意と判断できる。なお、合成拡張不確かさの詳細については、NITE(2014)を参照いただきたい。

4.5 特徴のまとめ

以上の結果から遮蔽法及びコリメ法における測定値の特徴について以下に取りまとめた。

4.5.1 遮蔽法の特徴

- 直達日射照度の変動に伴い半球日射照度変動している場合、内挿によって求める遮蔽法直達日射測定値は実際の直達日射照度と差が生じ、正確な器械定数を求めることができず、比較校正に使用できる観測値が少なくなる。
- 天頂などに雲がある場合には、散乱日射照度変動するため、(1)と同様に観測値が少なくなる。
- 安定した天空状態でも内挿値を使用するためにコリメ法に比べてばらつきが大きくなる。

4.5.2 コリメ法の特徴

- 全天日射計にコリメーションチューブをつけることにより直達日射計と同じ構造にするため、直達日射照度変動しても比較すべき値が同じ傾向となることから、器械定数のばらつきが小さくなり比較校正に使用できる観測値が多くなる。
- 太陽の中心から15°以内に雲がない状態であれば、良好な校正データを連続で得ることができ、校正日数を短くすることが可能となる。

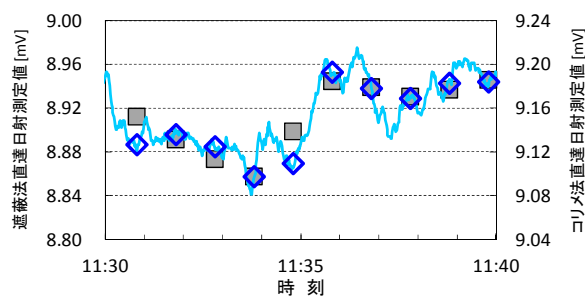


図10 各方法によって得られた直達日射測定値
 遮蔽法(S/N 090108)：■印(左縦軸)
 コリメ法(S/N 090109)：実線、◇印(右縦軸)

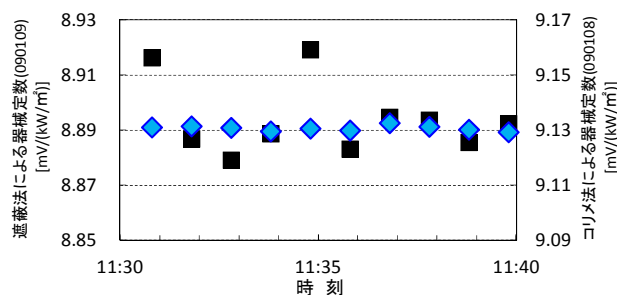


図11 各方法の直達日射測定値と直達日射照度から計算した全天日射計の器械定数
 遮蔽法(S/N 090108)：■印(左縦軸)
 コリメ法(S/N 090109)：◆印(右縦軸)

表3 遮蔽法とコリメ法の器械定数の比較

年月日	観測時刻 (個数)	CMP-22(090108) 器械定数 [mV/(kW/m ²)]		CMP-22(090109) 器械定数 [mV/(kW/m ²)]	
		コリメ法 (標準偏差)	遮蔽法 (標準偏差)	コリメ法 (標準偏差)	遮蔽法 (標準偏差)
2013/3/21	14:47-15:33 (46個)	8.935 (0.004)	—	—	9.079 (0.017)
2013/3/26	9:27-9:49 (22個)	—	8.868 (0.010)	9.111 (0.004)	—
2013/4/8	10:31-12:09 (95個)	—	8.886 (0.015)	9.128 (0.007)	—
	13:59-14:56 (57個)	8.925 (0.008)	—	—	9.063 (0.015)
2013/5/24	8:58-10:05 (67個)	8.919 (0.005)	—	—	9.060 (0.021)
	10:22-11:31 (66個)	—	8.871 (0.012)	9.111 (0.005)	—
	13:02-14:33 (89個)	8.919 (0.008)	—	—	9.061 (0.013)
①平均 [mV/(kW/m ²)]		8.925	8.875	9.117	9.066
②差: 遮蔽法-コリメ法 [mV/(kW/m ²)]		-0.050		-0.051	
③標準不確かさ [mV/(kW/m ²)]		0.004	0.006	0.006	0.004
④合成拡張不確かさ(k=2) [mV/(kW/m ²)]		0.012	0.014	0.014	0.013
⑤(遮蔽法/コリメ法-1)*100 [%]		-0.6		-0.6	

表 4 コリメーションチューブの比較

年月日	シリーズ回数	CL-R (REF)	CL-1 (A)	CL-2 (B)	CL-3 (C)	遮蔽法 (D)
2016/11/4	8	9.041	9.022	9.070	9.043	8.995
2016/11/25	8	9.040	9.025	9.070	9.037	8.994
2016/11/29	5	9.039	9.033	9.076	9.038	8.986
器械定数平均 [mV/(kW/m ²)]		9.040	9.027	9.072	9.039	8.992
差: (A~D)-REF [mV/(kW/m ²)]			-0.013	0.032	-0.001	-0.048
標準不確かさ [mV/(kW/m ²)]		0.001	0.003	0.002	0.002	0.003
合成拡張不確かさ(k=2) [mV/(kW/m ²)]		0.009	0.011	0.010	0.010	0.011
[(A~D/REF)-1]*100 [%]			-0.1	0.4	0.0	-0.5

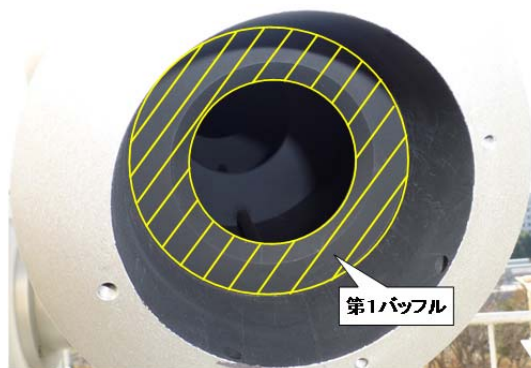


写真4 コリメーションチューブの第1バッフル



写真5 遮光シートによるコリメーションチューブ内部の反射低減

5. コリメーションチューブの比較及び改良

5.1 コリメーションチューブの比較

4. のコリメ法と遮蔽法との比較において、両者の器械定数には0.6%の差があった。この原因の一因を調査するため、4. で使用したコリメーションチューブと同じ仕様(CMP-22用)のコリメーションチューブをさらに3本用いて、比較観測を行った。4. で使用したコリメーションチューブをCL-R、他3本をCL-1、CL-2、CL-3とした。製作した年は、CL-1とCL-2は平成21年、CL-3とCL-Rは平成22年である。また、参考として遮蔽法についても同時に観測を行った。

調査方法は、1台の全天日射計(CMP-22: S/N 090110)を順番に4本のコリメーションチューブに取り付け、4分間ずつ測定した後、遮蔽法(遮蔽ディスク開閉間隔: 2分、閉じる回数: 4回)による観測を行った。この一連の観測を1シリーズとし、同時に2台の直達日射計(CHP-1: S/N 090149, 090150)を用いて直達日射照度を観測した。直達日射照度については2台の平均値を用いた。

比較結果から算出した器械定数等を表4に示す。また、平均等については表3の①~⑤と同様の処理を行った。CL-Rの器械定数を基準とした場合、CL-1とCL-3についてはほぼ同じ結果となったが、CL-2についてはCL-Rに比べて0.4%大きかった。これは、CL-2の直達日射測定値が0.4%大きいことを示しており、同じ構造のコリメーションチューブでも差があることを確認した。

5.2 コリメーションチューブの改良

CL-2は、他の3本のコリメーションチューブに比べて直達日射測定値が0.3~0.4%大きい値であった。この要因としてコリメーションチューブ内部の迷光が影響してい

表 5 第1バッフル及び内部反射の改良結果

年月日	シリーズ回数	CL-R (REF)	CL-2 (B)	遮蔽法 (D)
2017/11/24	5	9.039	9.049	8.996
2017/11/25	4	9.044	9.076	8.995
2017/11/29	2	9.046	9.067	8.989
2017/12/6	6	9.044	9.060	8.992
2017/12/11	5	9.047	9.060	8.999
2017/12/12	5	9.043	9.059	8.992
2017/12/14	6	9.056	9.067	9.006
器械定数平均 [mV/(kW/m ²)]		9.046	9.063	8.996
差: (B or D)-REF [mV/(kW/m ²)]			0.017	-0.050
標準不確かさ [mV/(kW/m ²)]		0.002	0.003	0.002
合成拡張不確かさ(k=2)[mV/(kW/m ²)]		0.010	0.011	0.010
[(B or D/REF)-1]*100 [%]			0.2	-0.6

ると推測した。CL-2内部の反射箇所を特定し、CL-2の改良を試み、改良後にCL-R及び遮蔽法と比較を行った。

5.2.1 第1バッフル及び内部の反射

全天日射計に最も近い第1バッフルに着目した(写真4)。第1バッフルと全天日射計受光面までの距離は43mmと

近いため、太陽光が全天日射計のガラスドームに反射し、その反射光が第1バップルに反射して受光面に入射していると推測した。

CL-2の第1バップルを取り除き(写真4, 黄色斜線), さらに内部の反射を低減するため, 写真5に示すように, 第2バップルまでの内部全体に遮光シート(ファインシャットSP: 光陽オリエンツジャパン社製)を貼り付けた。ファインシャットSPの反射率は, 紫外域から近赤外域まで約1%である(丹羽ほか: 2012)。

改良した結果を表5に示す。CL-RとCL-2との差は0.2%となった。また, CL-Rと遮蔽法との差は, -0.6%であり, 表3, 表4とほぼ同等の結果となった。

5. 2. 2 バップルのエッジによる反射

CL-2を太陽方向に向け, 全天日射計を取り外して内部を確認したところ, 写真6のようにバップルの縁が光っていることを確認した。通常, バップルの縁は太陽光を反射しないように, ナイフの刃のようにエッジ加工を施しているが, エッジが十分に鋭角的になっておらず, 太陽光がエッジに反射し, 受光面に入射していると推測した。このため, エッジの反射を低減する改良を試みた。

CL-2の第1バップルを元に戻し, すべてのバップルについて写真7のようにエッジ部分に遮光シートを貼り付けた。また, 全天日射計受光面から第1バップルまでの内部についても遮光シートを貼り付け, 内部の反射を低減した。なお, 遮光シートの厚さは0.25mmであり, バップルの直径は0.5mm小さくなるが, 開口角5°及び傾斜角1°は変わらない。

改良した結果を表6に示す。CL-RとCL-2との差は-0.5%となり, 5. 2. 1の結果(表5)に比べ, 器械定数は0.7%小さくなった。また, 遮蔽法との差は0.1%となり, ほぼ同じ値となった。

以上の結果からコリメーションチューブのバップルのエッジに反射した光によって, 直達日射測定値が増加し, 器械定数が見かけ上大きくなったと判断できる。また, CL-R, CL-1, CL-3についても同じメーカーで製造した同じ仕様(CMP-22用)のコリメーションチューブであることから, バップルのエッジによる反射光の影響があるものと考えられる。

6. 遮蔽法とコリメ法の器械定数の比較

表4~6の遮蔽法, CL-R及びCL-2の器械定数を表7に取りまとめ, 遮蔽法とコリメ法の器械定数を比較した。

(1) 遮蔽法とCL-Rの比較

比較期間①~③において, CL-Rに比べて遮蔽法の器

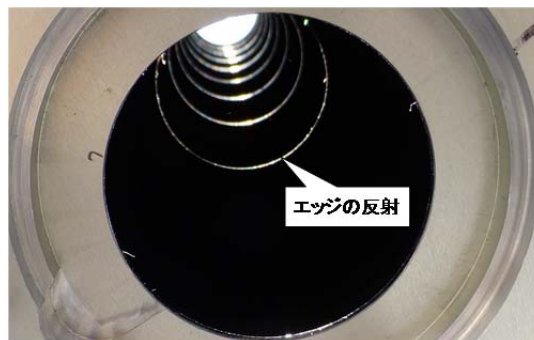


写真6 バップルのエッジによる反射



写真7 遮光シートによるエッジの反射低減

表6 バップルのエッジ反射の改良結果

年月日	シリーズ回数	CL-R (REF)	CL-2 (B)	遮蔽法 (D)
2018/1/4	4	9.050	8.999	8.998
2018/1/10	4	9.045	8.996	8.979
2018/1/11	2	9.055	9.006	9.000
器械定数平均 [mV/(kW/m ²)]		9.050	9.000	8.992
差: (B or D) - REF [mV/(kW/m ²)]			-0.050	-0.058
標準不確かさ [mV/(kW/m ²)]		0.004	0.004	0.009
合成拡張不確かさ(k=2)[mV/(kW/m ²)]		0.012	0.012	0.019
[(B or D/REF)-1]*100 [%]			-0.5	-0.6

表7 遮蔽法とコリメ法(CL-R, CL-2)の比較結果

比較期間 (シリーズ回数)	①(表4)	②(表5)	③(表6)
	2016/11/4 ~ 2016/11/24 (21回)	2017/11/24 ~ 2017/12/14 (33回)	2018/1/4 ~ 2018/1/11 (10回)
器械定数 [mV/(kW/m ²)]			
遮蔽法 器械定数	8.992	8.996	8.992
CL-R 器械定数	9.040	9.046	9.050
[遮蔽法/CL-R]-1 *100 [%]	-0.5	-0.6	-0.6
CL-2 器械定数	9.072	9.063	9.000
[遮蔽法/CL-2]-1 *100 [%]	-0.9	-0.7	-0.1

械定数は-0.5~-0.6%であり、両者には系統的に差が生じていた。また、参考までに表4のコリメーションチューブの比較観測において、CL-RとCL-1及びCL-3の器械定数はほぼ同じであり、CL-1及びCL-3についても遮蔽法との差は-0.5%程度あった。

(2) 遮蔽法とCL-2の比較

バッフルの改良をしていない比較期間①、②では、CL-2に比べて遮蔽法の器械定数は-0.7~-0.9%であった。バッフル改良後の比較期間③では、CL-2に比べて遮蔽法の器械定数は-0.1%となり、コリメーションチューブのバッフルを改良することによって両者の器械定数はほぼ等しい値となった。

7. まとめ

一般的に直達日射計を用いた二次標準全天日射計の校正は、入射角特性の影響を受けにくく、簡便な器具を使用する遮蔽法を用いるが、気象庁では短時間で高精度に校正が行えるコリメ法(全天日射計にコリメーションチューブをつけて全天日射計を疑似的な直達日射計として校正を行う)を採用している。これまで両者を系統的かつ詳細に比較した資料がほとんどないことから、これらの校正方法の特徴等について調査を行った。その結果は以下のとおりである。

(1) 遮蔽法及びコリメ法の特徴

遮蔽法では、直達日射照度の変動している場合、散乱日射量に対して直達日射量の変動の比率が大きく寄与することから、求める器械定数にばらつきが生じる。また、天頂などに雲がある場合には散乱日射照度の変動するため校正精度が低下する。一方、コリメ法では、コリメーションチューブ(コリメーションチューブ:全天日射計のガラスドームに合わせた開口角が5°で傾斜角が1度となる筒)の底に全天日射計を取り付け、構造的に直達日射計と同じにするため、直達日射照度の変動しても比較すべき値が同じ傾向となることから、器械定数にばらつきが生じない。また、太陽の中心から15°以内に雲や煙霧がない状態では、良好な校正データを連続で得ることができ、校正日数を短くすることが可能である。

(2) コリメーションチューブの改良

同じ仕様の4本のコリメーションチューブ(CL-R, CL-1, CL-2, CL-3)について比較観測を実施した結果、基準としたCL-RとCL-1及びCL-3は、器械定数の比較で±0.1%の範囲に収まっていたが、CL-2はCL-Rに比べて器械定数が0.4%大きく、コリメーションチューブに差があることを確認した。CL-2の差の要因につい

ては、コリメーションチューブ内部の迷光によって直達日射測定値が増加し、器械定数が見かけ上大きい値となっていたと推測した。このため内部の反射及びバッフルのエッジの反射を低減する改良を行った結果、CL2の器械定数は改良前に比べ0.9%小さくなった。

コリメーションチューブを製作する際には、バッフルのエッジを鋭角的にするなど、内部の迷光を防ぐことが重要になる。

(3) 遮蔽法とコリメ法の器械定数の比較

遮蔽法の器械定数はCL-R, CL-1及びCL-3に比べて、系統的に-0.4~-0.6%の差があった。また、遮蔽法とCL-2との比較では、遮蔽法の器械定数は改良前のCL-2と比べて-0.9%、改良後のCL-2と比べて-0.1%となり、改良によって両者の器械定数はほぼ同じ値となった。

コリメ法は、遮蔽法に比べて取得できるデータ数が多く、エーロゾルや周囲に雲がある場合など、直達日射照度や散乱日射照度の変動していても、高い精度で校正することができる方法であることを確認した。

謝 辞

本稿を草するに際し、調査に使用したコリメーションチューブ、太陽追尾装置等の観測機材及び測器については、気象測器検定試験センターから借用した。また、観測第二課の高野研究官には解析結果の確認をして頂いた。ここに厚くお礼申し上げます。

引用文献

- Hirose, Y.(1994) : Determination of genuine directional characteristics of pyranometer; INSTRUMENTS AND OBSERVING METHODS REPORT No.57 TECO-94, WMO/TD-No.588, World Meteorological Organization (WMO).
- 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(2016) : 第12回国際日射計比較. 高層気象台彙報, **74**, 口絵.
- International Organization for Standardization (1990a) : Solar energy – Calibration of field pyrheliometers by comparison to a reference pyrheliometer. ISO9059.
- International Organization for Standardization (1990b) : Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. ISO9060.
- International Organization for Standardization (1993) : Solar energy – Calibration of a pyranometer using a pyrheliometer.

ISO9846.

気象庁(2005) : 直達電気式日射計部内検査指針. 気象庁,
pp6.

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.

丹羽佳人・鹿島伸悟・矢野太平・宇都宮真・田村友範・
安田進(2012): JASMINE の迷光技術 II. 遮光材料と反射
率測定. 第二回 可視赤外線観測装置技術ワークショッ
プ.

NITE (2014) : 不確かさの入門ガイド(認定-部門
-ASG104-05). 独立行政法人製品評価技術基盤機構認定
センター, pp34.

WMO (2014) : Guide to Meteorological Instruments and
Methods of Observation, 2014 edition updated in 2017.
WMO-No.8, World Meteorological Organization (WMO).