

紫外域日射観測装置の入射角特性に関する 観測値への補正の試み

斎藤篤思*

The Correction of Global Ultraviolet Radiation by Brewer Spectrophotometers over Japan for the Directional (Cosine/Azimuth) Responses

Atsushi SAITO

要旨

高層気象台において 2002 年に開発された新型 NIST ランプ検定装置を用いて、紫外域日射観測装置(ブリュワー分光光度計)の特性試験を行った結果、詳細な入射角特性が明らかになった。本稿ではこの結果を基に、ブリュワー分光光度計 MKIII により国内 4 官署(札幌、つくば、鹿児島、那覇)で観測された 2002 年以降のデータを見直し、その入射角特性に関する補正手法の開発を試みた。

入射角特性の補正において、①天頂角 $\theta > 60^\circ$ で測器感度が大きく変化するため、光の入射方向を考慮して補正すること、②日射環境や天気の状態を考慮して補正すること、③各測器の光学特性が異なるため、測器に応じた補正をすること、の 3 項目が重要である。

その補正の結果、次のようなことが明らかになった。1) 時別値に対する補正率は、快晴日には太陽天頂角が大きい朝夕の時間帯に高く、曇天日には散乱成分に対する補正率と等しくなる(測器毎に異なり 5.8～7.9%)。ただし 2) その補正量は快晴、曇天いずれの場合においても紫外域日射量の多い時間帯に大きく、特につくばの夏期、南中時には、UVB 量で最大 123.80 W/m^2 (2003 年 6 月 27 日 11JST)に達した。また 3) 日別値(日積算値)に対する補正率は、太陽天頂角が大きい冬期に高く(極値は地点毎に異なり月平均で 8.3～10.9%)、4) 日積算値補正量は紫外域日射量の多い夏期に大きかった(月平均で $0.83 \sim 1.90 \text{ kJ/m}^2$)。

1. はじめに

気象庁による波長別紫外域日射観測は、紫外域日射観測装置(以下ブリュワー分光光度計と呼ぶ)を用いて 1990 年から順次観測が開始され、これまで国内 4 官署(札幌、つくば、鹿児島、那覇)で実施されている。ブリュワー分光光度計については、米国の国立標準技術研究所(NIST: National Institute of Standard and Technology)の照度付き 1000W 標準ランプ(以下 NIST ランプと呼ぶ)を使用し、基準感度を検定しており、気象庁ではこれにより測器の感度変化の監視体制を構築している。高層気象台では 2002 年に新型の NIST ランプ検定装置の開発を行い、測器の入射角特性などの精確な光学特性を把握することが可能となった。

本稿では、この新型の NIST ランプ検定装置を使用して

行われた詳細な入射角特性試験結果(伊藤: 2002)を基に、国内 4 官署に整備されているブリュワー分光光度計 MKIII の観測データを見直し、その補正手法についての検討を行った。

2. 補正手法

伊藤(2002)は新型の NIST ランプ検定装置を開発し、詳細な入射角特性試験を行った。この結果、入射角特性は波長に依存しないことが示され、測定された値に対して、特性を求める際と逆の手法により真の観測値を導出することが可能となった。天頂角 θ 、方位角 ϕ から入射する光の測定値を $I_{\text{obs}}(\theta, \phi)$ 、測定値に対する入射角特性を $C(\theta, \phi)$ とすると、真の観測値 I_{ideal} は式(1)のように表すことができる。

$$I_{\text{ideal}} = \frac{1}{C(\theta, \phi)} I_{\text{obs}}(\theta, \phi) \quad (1)$$

* 高層気象台 観測第三課

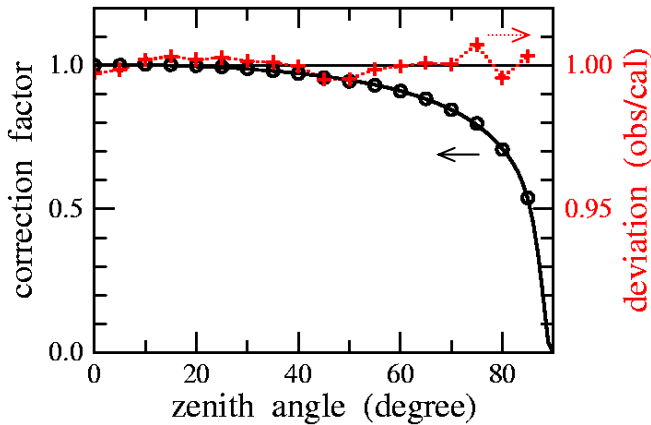


図1 直達成分に対する入射角特性

直達成分の入射する天頂角(横軸)と入射角特性(縦軸)との関係。図中の○は特性試験による入射角特性の検定結果を、実線は近似曲線で定式化した入射角特性を示し、点線は検定結果の近似曲線に対する比を示す。

本稿では、伊藤(2002)による入射角特性 $C(\theta, \phi)$ の試験結果に基づいて、これを定式化し、光の入射方向(天頂角・方位角)を考慮し、測定値の補正を行う簡便な方法を導出する。

全天型のブリューワー分光光度計により、測定される紫外域日射 I は、式(2)のように直達成分 D と散乱成分 F の2つに大きく分けて考えることができる。

$$I = D + F \quad (2)$$

また太陽の位置は、観測地点の緯度・経度、時刻により異なるため、各官署で取得された観測データ毎に入射角特性に関する補正を行う。

2.1 直達成分に関する補正[手法 a]

ブリューワー分光光度計は、方位追尾装置により常に太陽を追尾するので($\phi=180^\circ$)、測器の方位角特性については考慮する必要がない。したがって直達成分の測定値を $D_{obs}(\theta)$ とすると、真の直達成分観測値 D_{ideal} は式(3)のように表すことができる。

$$D_{ideal} = \frac{1}{C_d} D_{obs}(\theta) \quad (3)$$

ここで入射角特性 C_d は測器毎に特性が異なるため、測器番号に応じ、 θ の関数として定式化する。具体的に定式

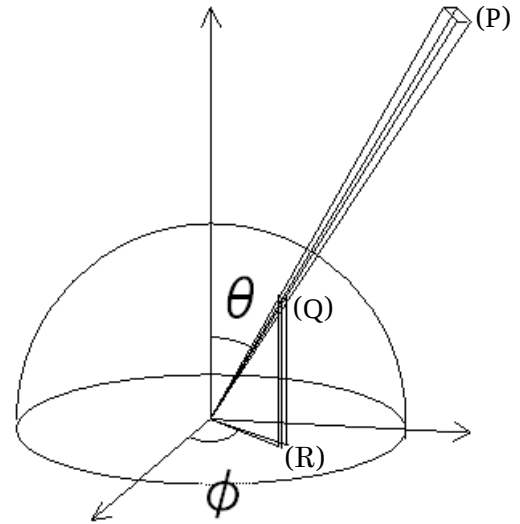


図2 荷重ファクターを求める模式図

化とは、光の入射する天頂角に関して、検定結果に対する近似曲線(天頂角に関する正割(セカント)の指数関数と三次式の積)を求めることを指す。図1には国内4官署に整備されたMKIII(#169,#173,#174,#175)のうち、つくばに設置されている#174について、特性試験による $\phi=180^\circ$ の検定結果と定式化した入射角特性の例を示す。このように図1は入射角特性の定式化によって、特性試験による検定結果を大変よく表現しており、検定結果に対して±1%以内の精度で補正できることを示している。また図は示さないが他の測器に対しても同様の結果が得られている。ただし $\theta > 88^\circ$ に対する補正量は試算の結果、快晴日南中時観測値の0.1%に満たない量であり、数 W/m^2 以内で極めて微小であることから、このときの入射角特性は本稿における補正には適用しない。

2.2 散乱成分に関する補正[手法 b]

全天からの散乱成分に関して、入射角特性を考える場合、測定する全天に対するある特定の視野の寄与する割合を荷重ファクターとして考慮する。図2に示すとおり、この荷重ファクターは、ある視野の領域(P)を単位球面に投影(Q)し、またさらにこれを単位円面に投影した領域(R)の全天に占める割合から求められる。

すなわち、光の入射する天頂角が小さければ寄与率は高くなり、天頂角が大きければ低くなる。また同時に天頂角が小さければ単位円面に占める面積は狭く、天頂角が大きければ広くなる。この兼ね合いから入射する光の天頂角に応じて全体の視野に占める割合が変わり、散乱成分の測定値に対して異なる割合で寄与する。散乱成分

表 1 散乱成分に対する入射角特性

BREWER MKIII	C_f
#169	0.942
#173	0.935
#174	0.921
#175	0.933

を等方的と仮定して考える場合、散乱成分に対する入射角特性 C_f は荷重ファクターを考慮して次の式(4)のように表され、 $\theta=45^\circ$ 付近の入射角特性が最も大きく寄与することになる。

$$C_f = \frac{\iint C(\theta, \phi) \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi}{\iint \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi} \quad (4)$$

表 1 は測器毎にまとめた散乱成分に対する入射角特性 C_f である。これらの入射角特性 C_f は、検定結果のない入射方向については周囲の値から内挿により計算し、全方位に渡って荷重ファクターを考慮して、算出している。

このように散乱成分の補正では、入射角特性 C_f が測器毎に異なり、表 1 によれば約 5.8～7.9%の幅をもっている。

こうして散乱成分に関する入射角特性を C_f 、散乱成分の測定値を F_{obs} とすると、真の散乱成分観測値 F_{Ideal} は、式(5)で表すことができる。

$$F_{Ideal} = \frac{1}{C_f} F_{obs} \quad (5)$$

2.3 測定値への補正[手法 c]

前述のように、直達成分と散乱成分について、光の入射する方向(天頂角・方位角)を考慮すると、測定値への補正は式(6)のように表すことができる。

$$I_{Ideal} = D_{Ideal} + F_{Ideal} \quad (6)$$

ただし、この補正において紫外域日射の直達成分と散乱成分を区別して同時刻に観測したデータを利用できればよいのだが、これまで国内においては紫外域日射についての直達成分と散乱成分の観測データを取得していない。そこで常時観測している全天日射・直達日射観測のデータを利用する。ここで日射観測に基づく直散比(全天日射量に対する散乱日射量の割合)を、全天日射量 G_L と直達日射量 D_R を使って、 $(G_L - D_R)/G_L$ と表し、式(7)のように近似的に同値と仮定して紫外域日射に適用する。

$$C_g = \frac{F_{obs}}{I_{obs}} = \frac{I_{obs} - D_{obs}}{I_{obs}} \approx \frac{G_L - D_R}{G_L} \quad (7)$$

一般に直散比には波長依存性があり、短波長ほど散乱の割合が大きい(Blumthaler *et al.* : 1996)。このため直達成分による C_d が散乱成分による C_f に比べて大きい場合、補正結果が真の値に比べ過小となる。この点における正確な補正量の評価は紫外域日射観測における直達成分・散乱成分について詳細な成分毎の観測成果が必要であり、今後の課題である。

以上により、直達成分と散乱成分の入射角特性を考慮して補正を行うと、式(3), (5), (6), (7)により次の式(8)が得られる。

$$\begin{aligned} I_{Ideal} &= \frac{1}{C_f} C_g \times I_{obs} + \frac{1}{C_d} (1 - C_g) \times I_{obs} \\ &= \frac{1}{C_d} \left\{ \left(\frac{C_d}{C_f} - 1 \right) \times C_g + 1 \right\} \times I_{obs} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)を用いて入射角特性の補正を行い、次節にその考察結果を述べる。

3. 補正結果

本稿では、290～315nm まで波長積算した有害紫外域日射(UVB)量、観測波長(290～325nm)を全て積算した紫外域日射(TUV)量、そして DNA への影響を考慮した紅斑紫外域日射(CIE)量について、入射角特性の補正を行う。ここで補正量とは、補正後の量と補正前の量の差 $I_{Ideal} - I_{obs}$ を示す。また補正率とは、補正前の量に対する補正量の割合 $(I_{Ideal} - I_{obs})/I_{obs}$ を示し、時別値については瞬間値、日別値については日積算した値に対するそれぞれの値を示すこととする。

前述の通り、補正手法として、太陽の方向と同じ入射

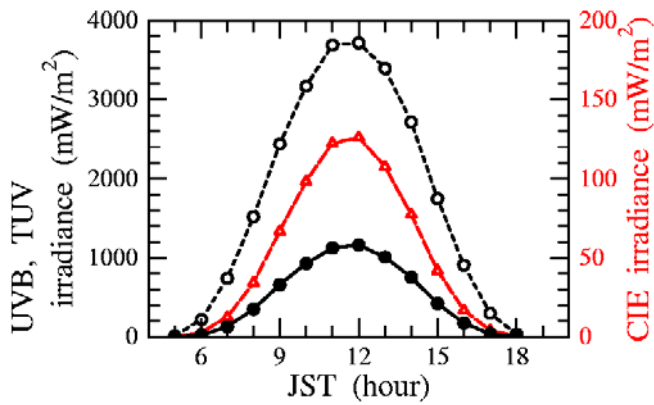


図3 紫外域日射量の日変化(2003年5月1日)

図中の●はUVB量, ○はTUV量, △はCIE量を示す。

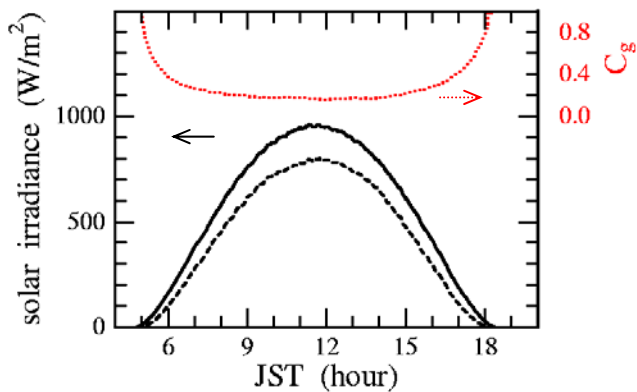


図4 全天日射・直達日射量と直散比の日変化

図中の実線は全天日射量, 破線は水平面直達日射量, 点線は直散比を示す。

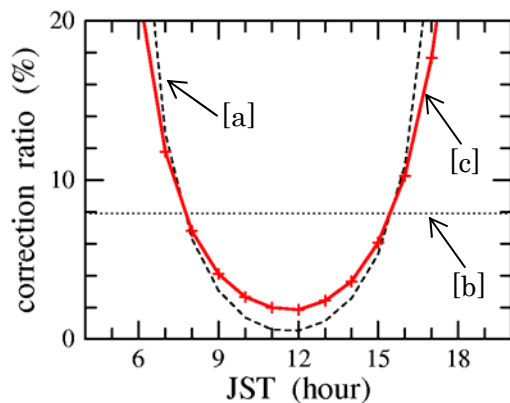


図5 補正率の日変化

図中の実線は[手法c], 破線は[手法a], 点線は[手法b]による補正量を示す。

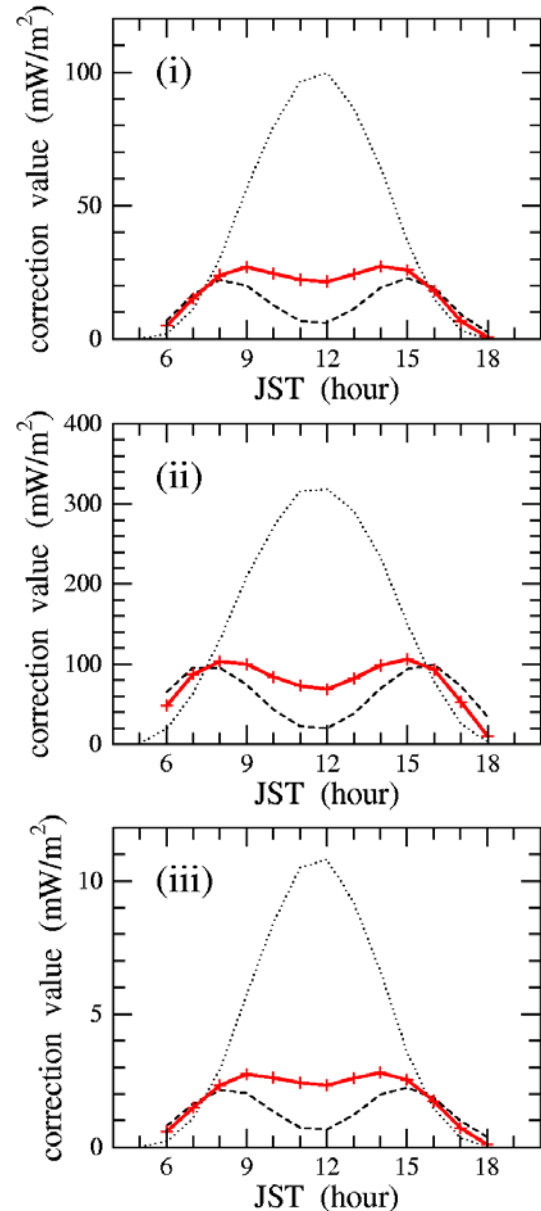


図6 補正量の日変化

上から(i)UVB量, (ii)TUV量, (iii)CIE量に対する補正量を示す。図中の表記は図5と同じ。

表2 波長積算の方法, 補正手法の違いによる

補正率と補正量 (2003年5月1日の日積算値)

	Method a		Method c	
	Correcting ratio	Correcting value	Correcting ratio	Correcting value
TUV	3.4 %	2.96 kJ/m ²	4.1 %	3.62 kJ/m ²
UVB	2.6 %	0.63 kJ/m ²	3.6 %	0.87 kJ/m ²
CIE	2.5 %	0.07 kJ/m ²	3.5 %	0.09 kJ/m ²

方向で測定された入射角特性 C_d を直達成分と散乱成分に対して一律に用いて補正する[手法 a], 散乱成分に関する入射角特性 C_l を直達成分と散乱成分に対して一律に用いて補正する[手法 b], そして直達成分・散乱成分それぞれに対して入射角特性を考慮して補正する[手法 c]の方法を取り入れ, それぞれの補正結果について考察を行う。

3.1 時別値への補正

図 3 にブリューワー分光光度計による代表的な観測例として, つくばにおける 2003 年 5 月 1 日の観測値(UVB 量, TUV 量および CIE 量)を示す。またこの日の日射環境を評価するため, 図 4 に地上気象観測および直達日射観測による全天日射・直達日射量とそれらによる直散比を示す。この日は一日を通じて雲がない大気の安定した快晴日であり, オゾン全量の日代表値は 356 m atm-cm, 直達日射観測によるエーロゾルの光学的厚さ τ は日平均で 4.8 であった。一般に τ と C_g との間には密接な関係があり, これを利用することで日射環境を簡便に表現できると考えられるが, 詳細な検討は今後の課題である。

図 5 と図 6 はこの日の観測値に対する補正結果であり, 図 5 は補正率, 図 6 (i)~(iii)は UVB, TUV, CIE それぞれについての補正量を示している。ここで時別の補正率は UVB, CIE, TUV といった波長の積算方法に依存しない。図 5 のとおり, 太陽天頂角の小さい昼間の時間帯には[手法 b], [手法 c]の補正率はともに低いが, 太陽天頂角の大きい朝夕の時間帯にはいずれも高くなっている。ところが補正量は[手法 a]については一日に 2 つのピークが見られ, [手法 b], [手法 c]については概ね観測値の大きい時間帯に同様に大きくなっている。また観測値・補正率の関係から, 波長の積算方法によって, 天頂角が大きいときに僅かな $TUV < UVB < CIE$ という補正率では現れない日変化の傾向が見られている。このことは直達成分・散乱成分の割合が波長に依存しており, 波長積算の方法の違いにより補正量に違いが見られることを示しており, より精確な日射環境の測定を行うことの重要性を示唆している。

快晴日で太陽天頂角の小さい昼間の時間帯において[手法 a], [手法 c]の補正結果は, とともに低い補正率をとる。太陽天頂角が大きく, かつ直散比が大きくなると補正率は高くまたその差も大きくなっているが, その補正量はやはり紫外域日射量の多い時間帯に大きくなっている。この日の補正率, 補正量を日別値(日積算値)に換算すると, 表 2 のようになる。

直散比を用い入射角特性を考慮した方が, 日射環境を精確に表現できていると考えられることから, [手法 a]に

表 3 国内 4 官署における月別の平均補正率と平均補正量の極値(最大, 最小)

Station (MKIII)	Correcting ratio		Correcting value	
	Max (Date)	Min (Date)	Max (Date)	Min (Date)
Sapporo (#169)	9.0 % (Dec.02)	3.8 % (Jun.02)	0.83kJ/m ² (Jul.02)	0.16 kJ/m ² (Dec.02)
Tsukuba (#174)	10.9% (Dec.03)	5.7% (Aug.02)	1.50kJ/m ² (Jul.02)	0.41 kJ/m ² (Dec.02)
Kagoshima (#173)	8.3% (Dec.03)	4.4% (Aug.02)	1.39kJ/m ² (Jul.02)	0.49 kJ/m ² (Dec.02)
Naha (#175)	8.9% (Dec.03)	5.1% (Jul.03)	1.90kJ/m ² (Jul.03)	0.80 kJ/m ² (Jan.02)

比べると[手法 c]は, 日積算値に換算して 1%程度正しく見積もられることになる。またこれらは快晴日の一般的な補正結果であるが, 曇天日については観測される紫外域日射があらゆる方向から照射され, 快晴日の散乱成分に対する補正と同じに考えられるため, [手法 b]と[手法 c]の補正結果は同じになる。したがって, これらは[手法 c]のように日射観測に基づいて補正することにより, 一年を通じて快晴日, 曇天日いずれの条件においても観測された紫外域日射量の入射角特性に関する補正を精確に行うことが可能であることを示唆している。

以後の検討では, 波長積算の方法によって補正量・補正率の傾向は大きく変化しないので, UVB 量について考察を行う。

3.2 日別値への補正

ブリューワー分光光度計 MKIII による国内 4 官署におけるこれまでの観測値に, [手法 c]により入射角特性と天気の状態を考慮して補正を行い, このうち UVB 量の日別値(日積算値)に対して月別平均値をまとめると次のようになる。図 7 は 2002 年 1 月から 2003 年 12 月までの国内 4 官署における MKIII による月平均 UVB 量(i)とこれに対する補正率(ii), 補正量(iii)を示している。このうち実線と誤差棒は[手法 c]による補正結果と日々の標準偏差, 点線は[手法 a], 破線は[手法 b]による補正結果であり, ○と●はそれぞれ, 一日を通じて快晴日であった日の[手法 a]と[手法 c]による補正結果を示している。

また表 3 に月別の平均補正率と平均補正量のそれぞれの極値(最大, 最小)を示す。入射角特性が波長依存しないため, 補正率においては時々刻々の補正結果に, UVB, CIE, TUV といった波長の積算方法による違いはない。し

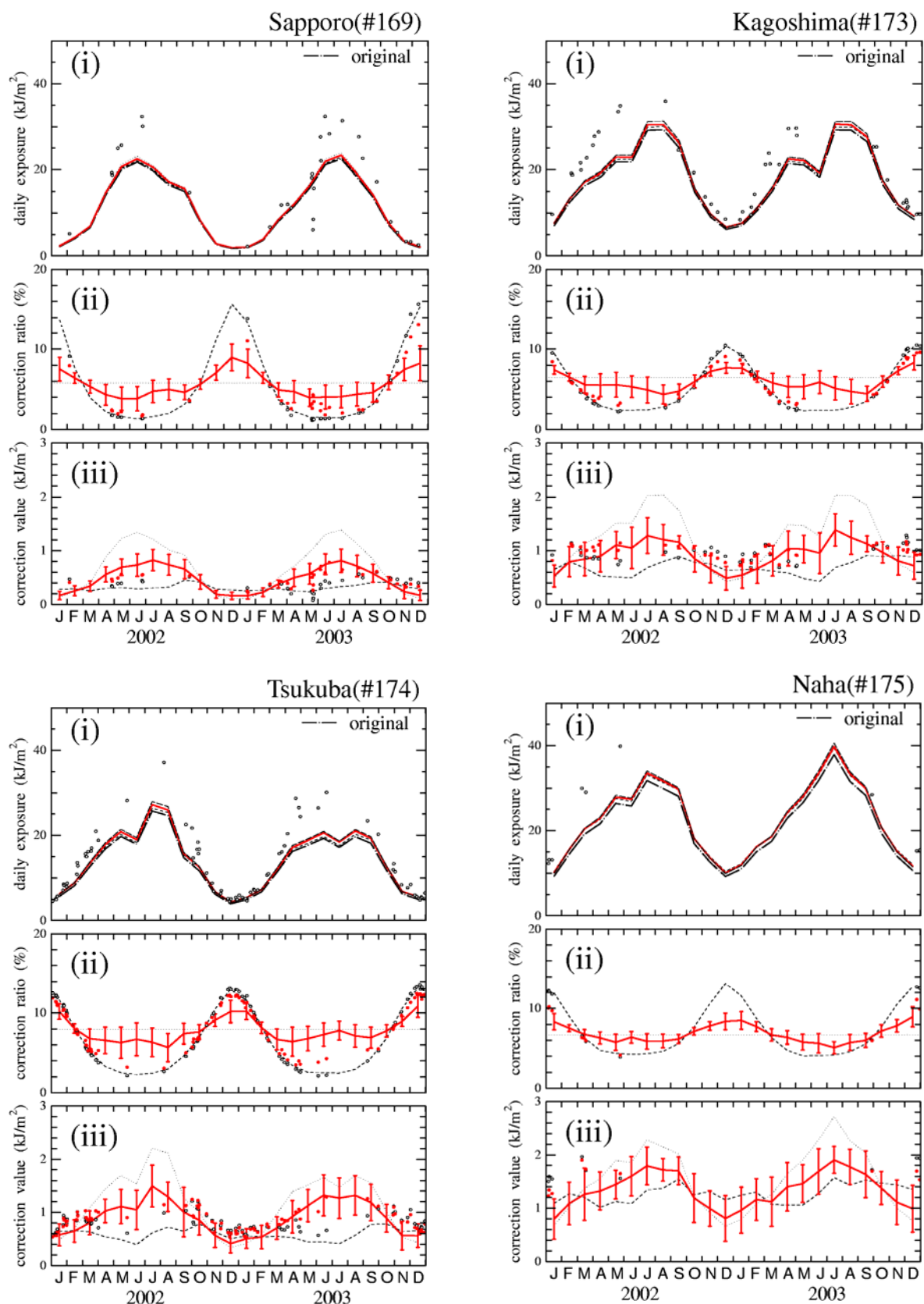


図7 ブリューワー分光光度計 MKIII による月平均 UVB 量(i), 補正率(ii), 補正量(iii)の経年変化
 図中の実線と誤差棒は[手法 c]による補正結果と日々の標準偏差, 破線は[手法 a], 点線は[手法 b]による補正結果であり,
 ○と●はそれぞれ, 一日を通じて快晴日であった日の[手法 a]と[手法 c]による補正結果を示す。

かし、一日の積算値を算出した場合、またその月平均した補正量においては、大気路程中のオゾンやエアロゾルなどによる散乱・吸収の影響により、波長の積算方法の違いが無視できなくなるため、補正結果に違いが見られる。このように補正に当たってはその他の気象条件によって補正結果に影響があることに注意が必要である。

図7から、[手法c]による補正結果について各官署の年変化傾向を見ると、概ね太陽天頂角の大きい冬～春期(10月～2月)にかけて、月平均した補正率が散乱成分に対する[手法b]による補正率を上回り、直達成分に対する入射角特性の補正の効果が散乱成分に対して優位となっていることがわかる。また太陽天頂角の小さい夏～秋期(3月～9月)にかけては、補正率が低くなっているものの、補正量としては一年の中で最も大きくなっている。この補正率の年変化は、太陽天頂角が季節的に変化することが主な要因である。またこの補正率は太陽天頂角のほかにも天気の状態の影響を受け、特に曇天日となる日数の多い梅雨期(札幌を除く5月～7月)には前後の月に比べて補正率が高く、散乱成分に対する[手法b]による補正率に近くなっている。このことは入射角特性の補正に対して、日射環境を示す天気の状態も重要なパラメータであることを示唆している。また、同様に測器毎の入射角特性の違いも重要なパラメータである。これは同じ太陽高度、同じ天気の状態においても、補正率が各測器の光学特性に大きく依存するためであろう。

4. まとめ

前節の結果によれば、ブリューワー分光光度計 MKIII の入射角特性の補正において考慮すべき要素は、以下の3項目である。

- ① 天頂角 $\theta > 60^\circ$ で測器感度が大きく変化するため、直達成分・散乱成分といった光の入射方向(天頂角・方位角)を考慮して、補正を行うこと。
- ② 直達成分と散乱成分といった分類で、日射環境や天気の状態を考慮して補正を行うこと。
- ③ 各測器の光学特性が異なるため、測器に応じた補正を行うこと。

上記に基づき、国内4官署(札幌、つくば、鹿児島、那覇)で観測された2002年以降のデータを見直し、入射角特性の補正を行った結果、時別値に対する補正率は、快晴日には太陽天頂角が大きい朝夕の時間帯に高く、曇天日には散乱成分に対するそれと等しくなる(測器毎に異なり5.8～7.9%)。ただし、その補正量は快晴、あるいは曇天い

ずれの場合においても紫外域日射量の多い時間帯に大きく、特につくばの夏期、南中時には、UVB量で最大123.80 W/m²(2003年6月27日11JST)に達した。日別値(日積算値)に対する補正率は、太陽天頂角が大きい冬期に高くなる(極値は地点毎に異なり月平均で8.3～10.9%)。しかしその補正量は紫外域日射量の多い夏期に大きくなる(月平均で0.83～1.90 kJ/m²)。

本稿における補正に用いた直達成分・散乱成分の配分は、全天日射・直達日射観測データの結果を近似的に用いているが、さらに精度の良い入射角特性に関する補正を行うためには、紫外域日射に関する直達成分・散乱成分の詳細な観測データを取得し、これに基づいた検討を行う必要がある。

またブリューワー分光光度計ばかりでなく、全天型紫外域日射計についても入射角特性のあることが確認されている(伊藤：2003)。これら複数の測器に対し、同一の手法で光学的な特性試験が行われた例は過去に少なく、現在まで、観測されたデータに入射角特性の補正は行われていない。今後これら複数の測器の観測データに入射角特性の補正を施し、その結果を比較することによって、各測器の光学特性に関わる問題点の検証がさらに前進し、その検証結果がまた、補正手法や測器の改良に役立つことが期待される。

謝 辞

本稿で使用した地上気象観測データは観測部観測課統計室により編集された気象庁月報データを、直達日射観測データは観測部環境気象課輻射係により編集されたものを使用しました。紫外域日射観測データの編集では、札幌管区気象台技術部気候・調査課能登美之統計係長の手を煩わせました。本稿をまとめるにあたり、当台観測第三課の伊藤真人主任研究官には絶えず懇切丁寧な指導をいただきました。また気象庁オゾン層情報センター諸氏には多くの助言をいただきました。これらの協力に厚く感謝の意を表します。

引用文献

- Blumthaler M., Gröbner J., Huber M. and W. Ambach (1996) : Measuring spectral and spatial variations of UVA and UVB sky radiance. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 547 - 550.
- 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(2003): 全天型(広帯域)紫外域日射計の高度角・方位角特性. 高層気象台彙報, **63**, 41 - 50.