昼光と日射の測定機器[†]

三宅 行美*

1. ま え が き

昼光と日射を総称した自然光を全天候下で連続的にかつ精度よく計測することは大変むづかしいことである。簡単に言うと、昼光の計測は可視部の自然光を比視感度曲線に合せて照度および輝度として計測することを意味し、日射は波長域 $0.3 \sim 3.0 \mu\text{m}$ の全放射量を計測することを意味する。従って、両者の違いは測定対象は同じで単に分光特性が異なるだけである。しかしながら、両者の計測技術の歴史は全く別々の過程を辿り今日に至っている。その結果として、現在は機器の原理、性能の評価法やその表示方法も大変違ったものとなっている。一つの理由は照度、輝度の計測は人工照明の計測が実用的にも重要視されたため自然光の計測技術が十分とり入れられていないからではないかと考えられる。よって、今回の国際昼光測定年に使用される機器については、全く異った発展をした両者の計測技術の一つのシステムの中に同じレベルの精度で取入れる必要があった。規格を例にとってみても WMO（世界気象機構）、ISO と CIE の 3 つの勧告と規格があり、これ等を整合して測定機器の中に組入れて行く必要があった。

以上の背景より、昼光と日射の計測機器の共通点とその違いを、構造、性能、校正方法等の項目について説明したい。

2. 構 造

測定対象である自然光の特長は経時的にその分光分布と空間分布がランダムに変化することである。従ってこれを計測する機器はこれに十分対応できるものでなければならない。特に後者の空間分布の変化に対応できる計測機器の特長は、他の光量測定機器にあまり例をみないもので、この計測精度に非常に大きい影響を与える。次に環境温度の変化として 50°C を考慮に入れ、その他の気象条件として、風、雪等の条件があり全天候下での連続計測に十分耐える堅牢さが要求される。さらに一般的な計測器に要求される

直線性、感度の経時変化、零点の安定性等の各性能が兼ねそなわっていないなければならない。

以上与えられた条件に対する昼光と日射計測のセンサの部分の基本的な構造を図 1 (A)、(B) に示す。図 1 (A) は照度を計測する場合の例であり、均一な厚さのガラスドームにより覆われている。このドームはちり、霜、雨等からその下に備えられた受光面である拡散板を保護する。この拡散板により $\cos$ 特性（斜入射角特性）を満足させる構造となっている。昼光を照度として計測する場合と日射計測の場合最も重要視されるのが $\cos$ 特性であり、 $0 \sim 90^\circ\text{C}$ の入射角に対し入射角の $\cos$ に比例した出力が取出せなければならない。次に、比視感度曲線にマッチさせるためのフィルタ群が備えられる。光電素子としては通常経時変化が少なく、かつ電気信号への変換効率の高い量子型の Si ダイオードが採用される。

図 1 (B) に示される日射計測の場合は Si ダイオードが分光特性として赤外部に感度がないことと可視部でも感度が均一でないことから、変換効率は低い日射の全波長域 $0.3 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 間で均一の分光感度を有し、かつ安定性のある熱電堆がセンサとして使われる。この熱型センサは $3.0 \mu\text{m}$ 以上の赤外放射（夜間輻射）も一緒に検知するので $3.0 \mu\text{m}$ 以上の放射を完全にカットするガラスドームが不可欠となる。またガラスドーム自体からの 2 次的な放射もカットするためもう一つのガラスドームが備えられる。言いかえると現実的には赤外放射や風の影響による出力の零

I: 入射光 I': 日射 G1, G2: ガラスドーム D: 拡散板 S: センサ
G: 基板 R: 受光面 C: 熱コンダクタンス F: フィルタ

図 1 照度、日射計測のセンサの基本構造

[†] Requirement of instrument for the measurement of daylight and solar radiation

* 英弘精機株式会社 Yukiharu Miyake

R:反射板 W:ウインドウ I:断熱筒 B:バッフル A:照準器
S:センサ H:外装 D:乾燥剤 C:コネクタ

図 2 直達日射計受光器の構造

α_1 :半開口角 α_2 :傾斜角 r :センサ半径
 R :開口半径 h :筒長

図 3 直達日射計の開口部

B:遮蔽バンド P:日射計(照度計) T:固定台 H:高さ 位置調節
D:赤緯目盛 DI:赤緯指標 L:緯度目盛 LI:緯度指標 A:赤緯調節
V:水準器 G:基板 F:緯度固定ボルト

図 4 遮蔽バンドの構造(拡散光測定用)

点の変動を最少に押える工夫であり、照度計のドームの役割の上にもう一つの機能を持たせたことが日射計測の場合のドームの大きな特長である。

日射計測の場合拡散面としては黒化された受光面がその

役割をはたす。図 2 B に示されている全天日射計の構造では面積の異なる 2 枚の受光面の温度差が日射量に比例して取出せる構造となっている。全天日射計では日射に比例した出力を取出す種々な構造が実現されているが、この方式が現在では一番進んだものである¹⁾。図 1 (A), (B) には示されていないが、いずれの場合もガラスドーム内の結露を防ぐために乾燥剤が容器に収められている。

次に直射照度と直達放射照度(直達日射量)を計測する計測器の受光器(受感器)の部分の構造を図 2 に示す。自然光や風による急激な表面部分の温度変化をセンサになるべく影響を及ぼさないように断熱筒の中にセンサは収納されている。直射照度と直達放射照度(直達日射量)を計測する場合重要なことはその開口部の角度関係である。太陽の光球を見込む視直径は 32' であるが、連続測定には受光器部を常に太陽に正対させるための赤道儀に搭載しなければならない、この追従精度が問題となるため通常半開口角として 2.5°~4.0° の範囲で受光器は設計されている。この角度関係の規定を図 3 に示す²⁾。即ち角度関係は半開口角と傾斜角の 2 つの角度により規定されている。この開口角の大きさは太陽の周辺光もある程度含んで計測することを意味し、大気条件(混濁係数、太陽高度)によって周辺光量が変化するので計測誤差の要因となる。その大きさは太陽高度が 20° で、500 nm における混濁係数が 0.4 で都市型の浮遊粒子の粒径分布が与えられる場合では直達日射量の約 4% にも及ぶ³⁾。また、開口角よりも大きい角度より入射する周辺光を含む拡散光の混入を防ぐため 4 段のバッフルが備えられている。

次に、拡散光(天空照度、散乱放射量)の計測には $2\pi Sr$ よりの入射光を測定する前記の照度計や全天日射計をしゃへいバンドにより直射光からしゃへいすることにより行われる。この構造の大略を図 4 に示す。しゃへいバンドは太陽の赤緯の率化により 1~2 日に 1 回バンドの高さを調整する必要がある。また、しゃへいバンドは直射光以外の拡散光もしゃへいすることになるのでこの補正が必要となる。この補正法はバンドの直径とその幅等より下記の式が今回の昼光測定年の計測には採用された²⁾⁴⁾。

$$f = \frac{2b}{\pi r} \cos^3 \delta \sin h \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 f はバンドでさえぎられている拡散光の全体の拡散光に対する割合を示している。また δ は赤緯を、 b はバンドの幅、 r はバンドの直径、 h は太陽高度をそれぞれ示す。しかしこの式は拡散光の角度分布が均一であることを仮定しているのでは完全なものではない。そこで、直射光のみをさえぎるディスクを赤道儀に装備して計測する方法もあるが、装置が高価になること、メンテナンスが多少不便になる等の理由により連続計測にはあまり使われていない。この補正の量は中緯度地方での計測で冬期には 5%、夏期には太陽高度が高いので 15% 位のオーダとなる。

今回の国際昼光測定年の計測には輝度の計測も含まれているが、天頂輝度については全開口角を 11° で計測するこ

とになっておりセンサの構造は開口角を除き図2と同じである。また、日照時間の計測は専用計測器によるが、日照時間の定義は直射日射量が120 W/m²以上の時間帯となっているので²⁾、直射日射量の計測値を加工することにより得ることもできる。専用の機器についての詳細については本稿の範囲を越えると思われるので他にゆずりたい⁵⁾。

3. 性能とその表示方法

照度、輝度と日射計の出力は多くの場合、電圧出力*V*として取出され、常数*K*を介して測定量*E*に変換される。即ち

$$E = V / K \cdots \cdots (2)$$

と表現できる。この*K*の価は多くの計測器、特に照度、輝度計では計器の中で電氣的に処理され、測定量が各々の単位で直接表示または記録される。日射量の高精度の測定の場合には、日射量への換算は事後処理されることが多い。本項で取上げることがは2項の測定条件が与えられた時、*K*はもはや常数でなく変数であるということである。即ち*K*は、

$$K = f(S, D, T, \cdots) \cdots \cdots (3)$$

各種放射量				
表示	種別	大気経程	混濁係数 (0.5)	可降水分
点線	拡散	1.5	0.27	5.0 cm
一点破線	全天	1.0	0.10	5.0 cm
二点破線	直射	4.0	0.50	5.0 cm

図5 分光分布と分光特性

表1 各種大気条件による分光特性インデックス

No.	種類	大気条件		R	R/R ₂
		大気経程	混濁係数		
1	直射	4	0.50	0.851	0.952
2	全天	1.0	0.10	0.894	1.000
3	全天	4.0	0.50	0.889	0.994
4	拡散(散乱)	1.5	0.27	0.915	1.023
5	曇天	～	～	0.873	0.982

アルベド：0.2 可降水量：5.00 cm

の如く各種要素の関数として与えられることを示す。S, D, Tはその要素の例として分光特性、角度特性、温度特性を各々示している。これ等の特性は性能として表現される。以下、自然光計測上特に重要な特性について説明したい。

3.1 分光感度特性

自然光を照度、輝度として計測する場合、先にも述べた通り自然光の分光分布は時間と共に、又大気条件により大きく変る。この変化の中でセンサーの相対分光感度*S_λ*と標準比視感度曲線*V_λ*のミスマッチに起因して、(4)式に与えられるインデックス*R*がどのように変るかを評価すればよい。即ち

$$R = \int_{400}^{700} I_{\lambda} \cdot V_{\lambda} d\lambda / \int_{400}^{700} I_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda \cdots \cdots (4)$$

として示される。ここで*I_λ*は自然光の相対分光分布である。*I_λ*の変化の程度は次のように考えることができる。すなわち、最も短波長側にずれた場合として快晴時の拡散光を想定し、一方最も長波長側にずれた場合は太陽高度が低く(例えば大気経程4.0、太陽高度14.5°)かつ混濁係数が大きい場合(例えば0.5μmにおいて0.5)直射光を想定すればよい。また、中間的には曇天時を想定しほぼ分光分布が均一な場合を取上げる。図5に各々の場合における分光分布*I_λ*を日射モデルにより計算した結果を示す⁶⁾。この結果を利用し、式4によるインデックス*R*の計算結果を表1に示す。センサの相対分光感度としては今回の国際昼光測定年の観測に使用された照度計の相対分光感度を用いた。この結果によると最大誤差として約7%が予想される。そこで誤差を少なくする工夫として照度、輝度計を全天、直射用と拡散用に別々の重みをつけたデータ処理をすることが考えられる。この場合の誤差は約4%に減る。

各種の規格によると照度、輝度計の相対分光感度と標準A光源を使った場合のインデックスを与えている⁷⁾⁸⁾。またインデックスの内容も多少異なる。ここでは温度2856 Kの黒体に相当するA光源でなく、自然光そのものの分布を与え、実用に直接結びつけた。また、前記規格の中には紫外線、赤外域の分光感度特性も規定しているが、自然光を対象として考える時、通常の照度、輝度計では問題になるような誤差とはならない。

次に全天日射計についても基本的には同じことがいえるが、波長0.3～3.0μm間の分光特性に関係するガラスドームの透過率と黒色塗料の吸収率のみで分光特性は決まるので、大きな誤差とはならず約0.2%のオーダーである。WMOとISOの全天日射計についての分光感度特性の規定も(透過率)×(吸収率)が波長範囲0.3～3.0μm間で±5.0%の偏差を1級の全天日射計に規定しているに過ぎない²⁾⁹⁾。今後の課題として、センサに斜入射した光に対する分光感度特性を実測し、さらに実用的なデータとすることが残されている。

図 6 cos 特性

3.2 cos 特性

前記分光特性と共に重要視される特性でありながらこの評価は大変むづかしい。cos 特性は通常下記の式で示される。

$$D_{(\theta)} = \left(\frac{V_{\theta}}{V_{(0)} \cos \theta} - 1 \right) \cdot 100\% \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $D_{(\theta)}$ は cos 特性、 $V_{(0)}$ 、 $V_{(\theta)}$ はそれぞれ入射角度 0° と θ° におけるセンサの出力である。式 5 より容易にわかることは入射角度が大きくなった時の $V_{(\theta)}$ は非常に小さい値となり必然的に誤差の百分率が大きくなる。よって結果として与えられる cos 特性 $D_{(\theta)}$ も大きな誤差となる。また、実際的にもこの特性が問題となるのは入射角度が大きくなった時である。一方、自然光の空間分布（角度分布）は晴天時には 3.1 に述べた同じ取扱いで日射計算モデルで与えられるが、雲のある場合は実測に頼る以外に方法がない。種々な天空状態における分布の実測値の統計的な処理により分類できるかもしれないが将来に残された問題である。ここでは輝度の角度分布 $I_{(\theta)}$ が与えられたとした場合の cos 特性にもとづくインデックス $R_{(\theta)}$ を示す。

$$R_{(\theta)} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\theta} (1 + D_{(\theta)}) \sin 2\theta d\theta / \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\theta} \sin 2\theta d\theta \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $I_{(\theta)}$ は入射角 θ において全方位角で平均した輝度を示す。

図 6 に照度計と全天日射計の cos 特性を参考までに示す。CIE の規格ではセンサとしてのこの特性の表現法として下記を採用している⁸⁾。

$$f_2 = \int_0^{85} D_{(\theta)} \sin 2\theta d\theta \dots \dots \dots (7)$$

ここで f_2 は、cos 特性にもとづく、誤差の程度を一つのインデックスで示したものである。この方法で前記照度計、全天日射計について与えられる f_2 の値はそれぞれ 1.9 % と 0.42 % となる。

また、ここまでの説明では方位角の特性については触れていないが、当然これも問題となる。自然光計測の場合先

にも述べたごとく、角度分布について現在情報とぼしいのでこれ以上の検討は今後に残されている。

一方、全天日射計についての ISO の規格⁹⁾による cos 特性の表現方法は入射角 0° の方向から 1000 W/m^2 のビームを与えた時、あらゆる入射角（含む方位角）に対しての誤差が 1 級の全天日射計で最大 $\pm 20 \text{ W/m}^2$ を許容している。この表示法は大変合理的でユーザはこの数字より日射量がいくらであっても最大 $\pm 20 \text{ W/m}^2$ の入射角（含む方位角）による誤差を予測することができる。ちなみに、これを前記 cos 特性 $D_{(\theta)}$ を入射角 80° で換算してみると、 $D_{(80)} = \pm 11\%$ となる。また、参考までに JIS 規格では、AA 級の照度計（最高）で、 $D_{(80)} = \pm 25\%$ を許容しているがこの規格では自然光の連続観測には不適ではないかと思われる。以上の説明の通り、別々の発展の歴史をたどった、照度計と全天日射計の cos 特性のとらえ方と表現方法の違いについてご理解いただけるものと思う。

3.3 温度特性

2 項で述べたごとく、通常の屋外観測では 50°C の温度幅の中で使用されると考え、この間でセンサの出力がどれ位変わるかで表現すればよい。また、温度係数として与えることもできる。この特性は気温が測定されておればこの係数によって出力を補正すれば測定の精度は非常に上る。通常使用されている照度計、全天日射計の温度係数はそれぞれ $0.15\%/^\circ\text{C}$ と $0.06\%/^\circ\text{C}$ の程度である。

3.4 その他の特性

次に、取上げる特性は零点の安定性の問題であるが、照度、輝度計については問題はない。全天日射計については 2 項でも説明した通り、風や赤外放射の影響により少なからず零点が移動する。今 IEA* の日射計測部会で準備されているユーザズマニュアルでは 1 週間程夜間（日射がない時）の全天日射計の出力の平均値を測定値よりさし引く手法が提案されている。ただ今回の国際日光測定年に使用された全天日射計ではこの変動が極めて少なく、 2.5 W/m^2 (1000 W/m^2 に対し 0.25%) 程度であるので、補正の必要はない。

次に感度常数の経年変化を取上げると全天日射計では最大で年に約 1 % 位である。照度、輝度計については使用する光電素子とフィルタの光学的特性により判断すると経年変化は殆んど考えられないが、実測の結果を待たねばならない。直線性については光電素子の性質上 3 桁までは保証できるので、他の誤差に比較し非常に少なく 0.1 % のオーダーである。また全天日射計については 0.2 % を越えることはない。さらに全天日射計を垂直面にとりつけて使用する場合、この傾斜特性が問題となるが、0.15 % 以下である。一方照度計、輝度計ではこの問題はない。これらの取上げた特性の他に偏光に対する問題、応答速度の問題等がある

* International Energy Agency

図 7 日射計の校正流れ図

がこの稿では割愛させていただく。

以上がセンサについての特性であるが、次にセンサの出力を処理するデータ集録装置について一番大切なことは分解能である。分解能としては $1\mu V$ が望ましく、その他の不確かさを合計しても $5\mu V$ 以下であることが望ましい。

また、データのサンプリング速度は測定の目的に依存するが、一時間の平均値を得るには 1 分ごとのサンプリングで十分である。

4. 校 正

自然光を対象とする時、計測機器の特性と共に校正の問題はさけて通ることはできない。全天日射計については図 7 の流れに従って気象庁で行われている¹⁾。この方法は WRR (世界放射基準) を基準としている²⁾。WRR は WMO でその価が維持され、5 年に 1 回各国の準器を持ち寄り比較観測により準器の価の見直しが行れる。しかし、これは直達日射量についてであり、全天日射量は各種の方法により直達日射量より移し変えられる¹⁾²⁾。この間で生ずる誤差もかなりあり、現在は $\pm 2.5\%$ を一つのめどとして考えることができる。この誤差については現在非常に議論があり近い将来改善されるであろう。

次に照度の目盛づけの方法はすべての規格において標準 A 光源を利用して行うことになっているが、これをそのまま自然光の計測に適用するのは問題があると考えられる。

何故なら、校正用の前出の A 標準光源と自然光の分光分

布と角度分布が異なるからである。校正するセンサの分光感度特性、したがって、A 標準光源に正対させて校正した値をそのまま自然光に適用することは極めて危険である。と、いって、現在照度については自然光による校正方法が確立していないので、JIS AA 級の照度計を使用して以下の方法で校正を行った。JIS AA 級の照度計と、被校正照度計を晴天時太陽に正対させ、両者を各々の形状に対応した同じ開口角のデイクで直射光をしゃべいした時としない時の出力の差、すなわち準器 AA 級で与えられる直射照度を基準にして校正を行った。この校正精度については、今後の検討課題である。将来は全天日射計で取入れられているような方法を検討する必要がある。

5. 結 語

以上昼光および日射の計測機器について、構造、性能、校正方法の概略について解説したが、全天輝度分布の計測、日照時間等の計測は割愛させていただいた。また、今後検討すべき問題点として角度特性の検討と校正法の問題等がある。日進月歩のこの分野では今後これらの問題は十分解明されて行くものと思う。本稿に対する読者の批判、意見がこの分野における技術の進歩につながるので、ご批判いただくと共に、今後共一層のご指導をお願い致したい。

参 考 文 献

- (1) 柴田和雄, 内嶋善兵衛編: 太陽エネルギーの分布と測定, 学会出版社 (1987) 37
- (2) Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO No. 8. 5th edition (1983) 97
- (3) Solar Energy-Calibration of Field Pyrheliometers by comparison to a Reference Pyrheliometer, ISO 9059 (1990)
- (4) Drummond, A.J.: On the Measurement of Sky Radiation, Archive. Met. Geophys. Biokl. Serie B. (1956) 413
- (5) Ikeda, H. Aoshima, T. and Miyake, Y.: Development of a Sunshine Duration meter, J. Met. Soc. JAPAN 64-6 (1986) 987
- (6) Miyake, Y. Shimokawa, R. Nakanishi, Y. and Hamakawa, Y.: Global Radiation model and Angular Distribution of the Diffuse Irradiance. Solar cells 20 (1987) 127
- (7) 照度計: JISC 1609-1983, JIS ハンドブック. 光学 日本規格協会 (1985) 599
- (8) Methods of Characterizing Illuminance and Luminance meters. Publ. CIE No. 69 (1987)
- (9) Solar Energy-Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation. ISO 9060 (1990)
- (10) 三宅行美: 日射計測の最近の動向, 太陽エネルギー, 14-5 (1988) 34

(受付1991年5月13日)