太陽エネルギー利用のための分光日射量の測定と整理*

(第1報, Bird のモデルに基づく分光日射特性の比較)

馬 場 弘^{*1}, 金 山 公 夫^{*1}
遠 藤 登^{*1}, 金 澤 浩 志^{*2}

Measurement of Spectral Insolations and Processing the Data for Solar Energy Utilization

(1st Report, Comparison of Spectral Insolation Based on "Bird's Model")

Hiromu BABA, Kimio KANAYAMA,
Noboru ENDOH and Hiroshi KANAZAWA

Since August 1994, spectral measurements of the global and direct insulations have been carried out by the authors. According to the intensity of the insolation, the results measured were arranged by classifying into rank of 100 W/m² each; then, comparing the insolation with Bird's model, the factors of solar altitude, turbidity of atmosphere, precipitable water and albedo of the earth were investigated. Consequently, on a clear day on which cloud amount was less than six, the spectra corresponding to the global and direct insulations could be estimated. Different shapes of the spectra in summer and winter depended on the precipitable water; the spectrum of the direct insolation was affected by the turbidity and precipitable water, while the spectrum of global insolation was hardly affected by these factors. In addition, on the basis of Bird's model the direct insolation and transmittance of atmosphere were calculated under several atmospheric conditions, and the influence of solar altitude to the transmittance of atmosphere was clarified.

Key Words: Solar Energy, Thermal Radiation, Spectral Insolation, Global and Direct Insulations, Solar Altitude, Turbidity of Atmosphere, Transmittance of Atmosphere, Albedo of Earth, Precipitable Water

1. ま え が き

太陽エネルギー利用技術は給湯および暖冷房用としての熱利用から、太陽電池、バイオマスおよびソーラポンドなど多岐にわたる方法が開発され発展してきた。特に太陽電池の製造方法の発達による低コスト化は、太陽エネルギーによる電力供給源として注目され、化石燃料の消費に伴う大気環境汚染を防止する一手段として期待されるに至った。ところで、太陽エネルギーの量としての特性は、全天日射量および法線面直達日射量の観測データを基に両者の相関関係や日照時間による日射量の推定式等が明らかにされてきた^{(1)~(4)}。しかし、太陽エネルギーの波長特性については、いくつかの重要な報告^{(5)~(10)}が見られるが、種々の天候下で行われる太陽エネルギー利用の立場からは十分とはいえない状況にある。また分光日射のデータは大気汚染の状況を監視して解析するためにも重要である。

著者らはこうした観点に立つて、1994年8月から北見工業大学において分光日射の測定を開始した。ここでは1995年8月までのデータを整理して報告する。

記 号

C : 散乱修正係数
 h : 太陽高度 °
 I : 日射エネルギー W/m², W/(m²・μm)
 m : エアマス
 P : 大気圧 hPa
 T : 透過率
 W : 可降水量 cm
 λ : 波長 μm
 $\tau_{0.5}$: 波長 0.5 μm における混濁度指数
 ρ : 反射率(アルベド)

添 字

H : 全天成分
 N : 直達成分
 S : 散乱成分
 a : エアロゾルによる影響
 g : 地表面の影響

* 原稿受付 1995年11月20日。

*¹ 正員, 北見工業大学工学部(〒090 北見市公園町165)。

*² 北見工業大学大学院。

- o : オゾンによる影響
 r : Rayleigh 散乱による影響
 u : 組成ガスによる影響
 w : 水蒸気による影響
 λ : 波長特性

2. Bird のモデルによる分光日射特性

分光日射特性を与えるモデル式は、大気圏外の分光日射測定および高層気象観測などの技術の進歩に伴って進展してきたが、現在のところ種々の大気条件に対応できるものとして、Bird⁽⁹⁾ のモデル式が最も具体的に扱いやすいと考えられる。一般に大気圏外に到達した太陽エネルギーは、大気層を通過する間に大気による吸収と散乱を受けて減衰し、地上に到達した日射エネルギーの波長分布は非常に複雑な形を示すことはよく知られている。こうした分光日射のうち法線面直達日射成分のスペクトル分布は式(1)によって示される。

$$I_{N\lambda} = I_{0\lambda} T_{r\lambda} T_{a\lambda} T_{o\lambda} T_{w\lambda} T_{u\lambda} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、

- $I_{0\lambda}$: 大気圏外分光日射量
 $T_{r\lambda}$: Rayleigh 散乱による透過率
 $T_{a\lambda}$: エアロゾルによる透過率
 $T_{o\lambda}$: オゾン層による透過率
 $T_{w\lambda}$: 水蒸気による透過率
 $T_{u\lambda}$: 気体成分による透過率

である。

透過率に影響を与える大気経路(エアマス) m は式(1)で与えられる。

$$m = [\sin h + 0.15(h + 3.885)^{-1.253}]^{-1} P / 1013 \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、

h : 太陽高度

P : 大気圧

である。

地表面における散乱日射成分のスペクトル分布は式(3)で求められる。

$$I_{s\lambda} = (I_{r\lambda} + I_{a\lambda}) C_{\lambda} + I_{g\lambda} \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、

$I_{s\lambda}$: 分光散乱日射量

$I_{r\lambda}$: 地表面における Rayleigh 散乱成分

$I_{a\lambda}$: エアロゾルによる散乱成分

$I_{g\lambda}$: 地表面と大気との間の反射成分

である。 C_{λ} は散乱成分の修正係数で波長 0.5 における大気の混濁度 τ_{05} をパラメータとして 0.1, 0.27, 0.37 および 0.51 の 4 種類について与えられている。

全天日射のスペクトル分布は $I_{H\lambda}$ は式(4)で求められる。

$$I_{H\lambda} = I_{N\lambda} \sin h + I_{s\lambda} \quad \cdots \cdots (4)$$

全天日射量、法線面直達日射量および散乱日射量はそれぞれ式(4)、(1)および式(3)を波長 0 μm から ∞ まで積分することによって求められる。

図1は式(1)および式(3)によって求めた法線面直達日射量と散乱日射量の波長分布を示す。大気の状態は 1 atm で大気の透明度を表す指標として用いられる波長 0.5 μm における大気の混濁度 τ_{05} を 0.1、大気中の水蒸気量を示す可降水量 W を 0.1 cm、地表面の反射率 ρ_g を 0.0 としたものである。エアマス $m=0$ は大気圏外の日射スペクトルであり、以下太陽高度 h をパラメータとして 90° ($m=1$)、60、45、…5° について示す。細い実線は法線面直達成分を、太い実線は散乱成分を示す。Bird のモデルでは、エアロゾルによる散乱と吸収の影響を τ_{05} をパラメータとして波長帯を 0.3~0.5 μm と 0.5~4.0 μm の二つに分割して評価している。これに Rayleigh 散乱と大気中の水蒸気および O_3 、 CO_2 などの混合ガスによる吸収の影響が加わって分光日射スペクトルが形成される。太陽高度に対する $I_{N\lambda}$ の積分値 I_N および $I_{H\lambda}$ の積分値 I_H を図1

Fig. 1 Direct and diffuse components of the spectral insolation calculated by Bird's model ($\rho_g=0.0$)

Fig. 2 Direct and diffuse components of the spectral insolation calculated by Bird's model ($\rho_g=1.0$)

Fig. 3 Direct and diffuse components of the spectral insolation calculated by Bird's model ($\tau_{05}=0.51$)

Fig. 4 Direct and diffuse components of the spectral insolation calculated by Bird's model ($W=1.5$ cm)

中の表に示す。図1で与えた計算条件は、大気が最も透明であり、さらに地面の反射率 ρ_g を0.0としたために、散乱成分のスペクトルは小さく、エネルギーが分布する波長域も0.3~1.0 μm で、0.6 μm 以上の波長域にある吸収帯も非常に小さい。そして、法線面直達成分はエネルギー密度が最大となるピーク波長が太陽高度の低下に伴って長波長側にずれるのに対し、散乱成分はピーク波長が約0.480 μm のほぼ一定値を示す。

図2は日射スペクトルに与える地面の反射率の影響を検討するために、図1と同じ大気条件で地面の反射率のみを1.0としたものを示す。結果として、直達成分 I_N は図1と同じであるが散乱成分は大気と地面との多重散乱効果により増加し、その影響は全天日射量にして6~8%増大することがわかる。

図3は大気の混濁度の影響を見るために、 $\tau_{05}=0.51$ 、地面の反射率を1.0としたものを示す。この場合法線面直達日射成分 I_N は図2の場合と比較してピーク波長で $m=1$ に対して約65%に減少し、全波長エネルギー I_N に対しては h の減少に伴って23~68%も減少する。しかし太い実線で示される散乱成分が極めて大きくなっている。この結果 I_H の値は図2の場合と比較

Fig. 5 Relationships between altitude of sun and spectra of the global insolation calculated by Bird's model

して4~25%減少するにすぎない。このことから地面が雪に覆われる冬期間において散乱成分の重要性が増加することがわかる。

図4は大気中に含まれる水蒸気の影響を示すために図2の条件から可降水量 W を1.50 cmに増加したものである。 W は地域の気象状態によって異なるがグローバルな視点では低緯度地域では大きく、高緯度地域では小さい。そして中緯度地域の緯度45°付近では $W=0.9$ cm(冬期), 2.9 cm(夏期)と報告⁽⁸⁾されている。 W の増加は水の吸収帯である波長0.593, 0.823 μm および0.940 μm 付近において分光エネルギーが小さくなることである。しかし全波長にわたる積分値に与える影響は、図2に示される I_N および I_H と比較して $m=1$ において約4%小さくなることがわかる。

図5は式(4)より求めた10月15日の全天日射スペクトルを示す。大気条件は図1の場合と同じで $\rho_g=0.3$ とした。パラメータの太陽高度 h は10月15日の日の出の時刻から日没の時刻まで1hごとの平均太陽高度で、晴天日の分光日射スペクトルの1日の推移を示す。

3. 測定方法

測定に用いた分光計は回折格子形多目的分光放射計(MSR-7000/00, オプトリサーチ社)で、測定波長範囲は0.280~2.500 μm 、分解能0.005 μm で、測定値は0.001 μm ごとにフロッピーディスクに収録される。検出器は波長0.280~0.800 μm までは光電子増倍管、0.800~1.100 μm まではシリコンフォトダイオード(Si), 1.100~2.500 μm までは硫化鉛(PbS)が用いられている。光学系、波長コントロール、検出器の切換え等はパーソナルコンピュータによって自動的に行われる。

図6は分光計のシステムブロック線図を示す。

図7は全天日射および直達日射の分光測定の方法を

Fig. 6 Block diagram of spectroradiometer for measurement of spectral insolation

Fig. 7 Measurement method of the spectral insolation

示す。全天日射の分光測定は分光計の光導入用の光ファイバの先端に反射型拡散板ユニットを取付けて水平に固定して行う。一方法線面直達日射の測定はフード付き積分球に光ファイバを取付け、三脚上に固定した積分球のフードを太陽に直面させて行う。1回の測定には約2minを要するため、この間雲によって日射強度が急変することがないように注意が肝要である。

測定は日の出の時刻から日没まで、毎正時を見当に1hごとに行い、必要に応じて30、20min間隔でも行った。同時に測定した項目は天候、雲量、全天日射量、気温、湿度、風速および天空の写真撮影を行った。さらに自然エネルギー実験室で測定している全天日射量および法線面直達日射量のデータを参照した。

データ処理は光磁気ディスクを装備した2台のパーソナルコンピュータで行っている。

4. 測定結果および考察

図8は1994年10月28日の分光日射測定値の時刻変化を示す。図8(a)は全天日射の分光値を、8(b)は法線面直達日射の分光値を、時刻をパラメータとして9時から16時まで毎正時の値を示す。この日は晴天日で気温13~16°C、湿度45~55%、風速0~1.0m/s、雲量0~3であった。各時刻の全天日射量は9時が

(a) Hourly change of spectra of the global insolation measured and comparison between the measurements and calculations

(b) Hourly change of spectra of the direct insolation

Fig. 8

427.0 W/m²、以後 526.6(10:00)、561.4(11:00)、544.6(12:00)、485.8(13:00)、362.5(14:00)、194.4(15:00)、そして16時の値が37.0 W/m²であり、これに対応する各時刻の太陽高度 h は24.2°(9:00)、30.0、32.3、31.7、28.0、21.8、13.8°および4.5°(16:00)であった。

このように晴天日の分光日射量の時刻変化は太陽高度の時刻変化と対応する。図8(a)の○、×、△および□印はBirdのモデルより計算した測定日の9、10、11時および15時の全天日射の分光スペクトルを表し、測定値とその傾向および値がよく一致する。そしてエネルギーのピーク値を示す波長がおおよそ0.48μmの一定値を示すことがわかる。

図8(b)の法線面直達日射のスペクトルは、その積分値である法線面直達日射量は9時の720.0 W/m²から15時の535.1 W/m²まで変化しており、全天日射量の場合よりも時刻変動の幅は小さい。これは法線面直達日射が太陽高度の変化に伴うエアマスの変化の影響のみを受けることによるもので、その影響は波長0.3~0.7μmまでのエネルギー密度の大きい波長域に現れる。そして最大のエネルギー密度を与えるピーク波長も11時および12時の約0.5μmから15時の0.65

μm まで時刻とともに変化する。この傾向は図1～4に示す Bird のモデルと一致している。16時のデータは日没直前のデータで大気の低い位置にかすみのようなものが濃くなびいており、その影響を受けたものと思われる。

ところで分光日射特性は、Bird のモデルに示されるように、太陽高度と大気混濁度および可降水量などの影響を受ける。太陽エネルギー利用の立場から、これらのパラメータを推定することはかなり厄介なことである。一方、全天日射量はこれらのパラメータの種々の値のもとで得られた積分値であり、これをパラメータとして使用することが最も扱いやすい。図1～4に示すように τ_{05} を 0.1～0.51, $W=0.1\sim4.0\text{ cm}$, h を $5\sim90^\circ$ まで変化させて全天日射量を求めて検討した結果、全天日射量を 100 W/m^2 でランク分けして示す方法が有効と考えられる。直達日射についても同様なことがいえる。

図9は1995年1月の晴天時の測定された日射スペクトルを全天日射量および法線面直達日射量で 100 W/m^2 ごとにランク分けして示す。ここで晴天時とは測定時に法線面直達成分を観測できることを示す。気象条件は気温 $-10\sim10^\circ\text{C}$, 湿度 20%以下, 風速 $0\sim2\text{ m/s}$, 雲量 $0\sim5$ であった。図9(a)に示す全天日射量は 100

$\sim200\text{ W/m}^2$ から $400\sim500\text{ W/m}^2$ の4ランクしかない。各ランクともピーク波長は $0.48\mu\text{m}$ で一致しているが、全波長にわたる各ランク間の関係は、波長 $0.8\sim1.4\mu\text{m}$ の間ではほぼ各ランクに比例した対応が見られる。波長 $0.5\mu\text{m}$ 以下と $1.4\mu\text{m}$ 以上の範囲ではこうしたきれいな関係は見られない。これは、この季節の日射量が小さく、したがって分光エネルギーが小さい両端の波長域で誤差が大きく現れたものと思われる。

$300\sim400\text{ W/m}^2$ 以下のランクで見られる $0.5\sim0.7\mu\text{m}$ の波長域のたるみ形状は太陽高度が低いときに現れる。図9(b)は法線面直達日射スペクトルを示す。直達日射は全天日射と異なり太陽高度の影響を受けないことからランクは $800\sim900\text{ W/m}^2$ までの6ランクが存在する。

図10は、図9と同様にランク分けした1995年7月の測定結果を示す。7月の気象条件は気温 $21\sim28^\circ\text{C}$, 湿度 $60\sim85\%$, 風速 $0\sim2\text{ m/s}$, 雲量 $0\sim6$ であった。図8(a)の全天日射量は $0\sim100\text{ W/m}^2$ から $900\sim1000\text{ W/m}^2$ まで10ランク、図10(b)の法線面直達日射量は $800\sim900\text{ W/m}^2$ までの9ランクが存在する。直達日射量の $0\sim100\text{ W/m}^2$ のランクを除いて、全天日射スペクトルおよび直達日射スペクトルはいずれ

(a) Spectral global insolation classified into every rank in January

(b) Spectral direct insolation classified into every rank in January

Fig. 9

(a) Spectral global insolation classified into every rank in July

(b) Spectral direct insolation classified into every rank in July

Fig. 10

Fig. 11 Relationships between solar altitude and I_N , T , $T(h)/T(90^\circ)$

も全波長域にわたって各ランクと対応した整った関係が見られる。図 10 (b) と図 9 (b) とを比較して留意すべきことは、7 月は h が高く $I_{N\lambda}$ の値もピーク値でおよそ $1600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ あり、一方 1 月のそれは $1050 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ であるにもかかわらず、 I_N が同じランクに属することである。この現象は主として大気中に含まれる水分に起因する。夏は絶対湿度が高く空気中の水分が多いため、図 10 (b) の、波長 $0.593, 0.823, 0.940 \mu\text{m}$ および $1.15 \mu\text{m}$ に見られる吸収は図 9 (b) と比較して大きいことがわかる。

このような点をふまえて Bird のモデルを用いて可降水量 W 、大気懸濁度 τ_{05} および太陽高度 h による $I_{N\lambda}$ と積分値 I_N との関係、さらに大気の透過率を求める。すなわち、大気の透過率 T は式 (5) から求められる。

$$T = (I_N/I_0)^{1/\sin h} = \left(\int_0^\infty I_{N\lambda} d\lambda / \int_0^\infty I_{0\lambda} d\lambda \right)^{1/\sin h} \dots\dots\dots (5)$$

図 11 は $\tau_{05}=0.1$ 、 W を $0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 \text{ cm}$ および 4.5 cm とおいて求めた h と I_N および T との関係を示す。北見市の 1 月における 10 時から 13 時の平均太陽高度は約 25° 、7 月は約 60° 、 $\tau_{05}=0.1$ として W を冬期 0.5 cm 、夏期 3.0 cm とすると I_N の最大値は 1 月は約 $800 \text{ W}/\text{m}^2$ 、7 月は約 $900 \text{ W}/\text{m}^2$ となり、図 9 および図 10 に示した値はほぼ妥当なものと思われる。このとき式 (5) より T を求めると 1 月は 0.80 、7 月は 0.72 となる。

ところで大気の組成が同じであるならば、 T は h に対して不変であり、式 (5) から求められる T は見掛けの透過率を与えるにすぎない。すなわち 1 月の透過率 0.80 の真の値は 0.75 、7 月のそれは 0.71 と考えられる。このような観点に立って種々の太陽高度で求めた大気の透過率から真の透過率を求めるために $T(h)/T(90)$ を示す。

$\tau_{05}=0.1$ の場合 $h=45^\circ$ で $T(h)/T(90)$ はすべての W に対して 5% 以内であるが、 $h=20^\circ$ では T は 7~13% 大きく推定されることがわかる。ちなみに著者らが行ってきた 17 年間の法線面直達日射量の観測値から求めた 1 月の大気透過率は $0.76 \sim 0.84$ で平均値は 0.80 、7 月は $0.66 \sim 0.74$ で平均値は 0.68 であり、真の平均透過率は 1 月が 0.74 、7 月は 0.67 と推定される。

5. む す び

1994 年 8 月から開始した分光日射量の測定結果を取りまとめ Bird のモデルと対応させて整理した。この結果以下のことが明らかとなった。

(1) τ_{05} および W の増加は $I_{N\lambda}$ および I_N を減少させる。 τ_{05} の影響は $0.5 \mu\text{m}$ 付近の波長域を中心に全波長にわたって大きく作用する。大気中の水蒸気 W が、全波長に与える影響は τ_{05} よりも小さいが、夏期と冬期のスペクトルの違いを与える因子として重要である。

(2) $I_{S\lambda}$, $I_{H\lambda}$, I_H は τ_{05} , W および ρ_g の影響を受ける。 τ_{05} および ρ_g の増加は $I_{S\lambda}$ を増加させる。この結果 $I_{H\lambda}$ および I_H が受ける影響は $I_{N\lambda}$, I_N の場合より小さい。

(3) 晴天時の $I_{H\lambda}$ は h の時刻変化に伴って変化し、その傾向は Bird のモデルで示されるものとよく一致する。

(4) 各月の $I_{H\lambda}$ および $I_{N\lambda}$ を全天日射量および法線面直達日射量でランク分けして整理することにより、雲量 6 以下の晴天時の全天日射量および法線面直達日射量からそれらの日射スペクトルを推定することができる。

(5) Bird のモデルを用いて、種々の大気条件下における h に対する I_N および T を算出し、さらに太陽高度の影響を修正する係数を明らかにした。

本研究を行うに当たり分光日射量の測定およびデータ整理に多大の助力をいただいた本学学生・藤川淳、松井稔、大野弘樹、川上正紀の諸君に感謝の意を表す。

本研究は文部省科学研究費一般研究(B)、課題番号 06452178 によった。

文 献

- (1) 馬場 弘・金山公夫, 機論, **51**-467, B(1985), 2191-2201.
 - (2) 吉田作松・篠木誓一, 太陽エネルギー, **7**-2(1981), 37-53.
 - (3) 馬場 弘・金山公夫, 機論, **53**-496, B(1987), 3780-3784.
 - (4) 近藤純正・中村亘・山崎剛, 天気, **38**-1(1991), 41-48.
 - (5) Moon, P., *J. Franklin Inst.*, **230**(1940), 583-617.
 - (6) Thekaekara, M. P., *Solar Energy*, **14**(1973), 109-127.
 - (7) Leckner, B., *Solar Energy*, **20**(1978), 143-150.
 - (8) Bird, R. E., Hulstrom, R. L. and Eldering, H. G., *Appl. Opt.*, **21**-8(1982), 1430-1436.
 - (9) Bird, R. E., *Solar Energy*, **32**-4(1984), 461-471.
 - (10) Riordan, C., Myers, D., ほか5名, *Solar Energy*, **42**-1(1989), 67-79.
-