

# Investigation on the spectral solar irradiance under all weather conditions – Relationship among the solar irradiance, sunshine ratio, solar altitude and precipitation –

Hiromu BABA

Kimio KANAYAMA

## 全天候下における分光日射特性の検討 – 日射量, 日照率, 太陽高度, 降水量の関係 –

馬場 弘<sup>\*1 ‡</sup>

金山 公夫<sup>\*2</sup>

### Abstract

Based on the database (ver-1, ver-2) of a spectral irradiance for all weather conditions, which was released by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), the solar spectral irradiance from the relation among spectral irradiance, global irradiance, sunshine ratio, solar altitude and precipitation was investigated. The data were recorded from sunrise to sunset, at each time interval of 10 minute JST. These data were divided by an one-hour datum, as average of the seven original data by per one hour. By mean of normalized spectral irradiance the peak energy of the solar spectral irradiance, it can made of expect global solar irradiance and weather conditions on solar spectral irradiance. The normalized solar irradiance of stable fine day was defined as a standard normalized spectral irradiance (*HYst*). By this additional method, it was cleared that the correlation between the global solar radiation and the peak energy of solar spectral irradiance.

**Keywords:** Solar radiation, Solar spectral irradiance, Solar altitude, Sunshine ratio, Precipitation

キーワード: 全天日射量, 分光日射照度, 太陽高度, 日照率, 降水量

### 1. はじめに

分光日射特性は、PV セルやソーラーポンドの性能評価を始め、温水器、農業用ビニルハウス等広く太陽熱利用の為の基礎データとして重要な特性である。現在、分光日射特性の研究には Bird<sup>(1)</sup>のモデルが用いられているが、大気状態を適切に表すパラメータを選択する事が必要であり、曇天時には適用できない等の問題がある。著者ら<sup>(2-6)</sup>は以前、太陽温水器やソーラーポンドの研究に携わった経験から全天候下での日射スペクトルデータの必要性を

痛感し、'94年、分光放射計を入手し、'94～'96年に掛けて日射スペクトル測定を行って、晴天日と曇天日の日射スペクトルの推定を行った<sup>(7-9)</sup>。

'10年12月、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から、全国4地点(長沼、岐阜、鳥栖、沖永良部)の'08年及び'09年の全天候下における日射スペクトルの連続観測結果が日射スペクトルデータベース(ver-1)<sup>(10)</sup>として公開されたことを機会に、著者らは全天候下での日射スペクトルの特性について一連の報告を行ってきた<sup>(11-16)</sup>。

その後'16年3月、上記4地点に、つくばを加えた5地点の'11年、'12年の日射スペクトルデータベース

\*1 Formerly, Kitami Institute of Technology (6-42 Sakura-machi Kitami-shi Hokkaido 090-0804 Japan)

‡e-mail: hiromu.baba@mb6.seikyoku.ne.jp

\*2 Prof. Em. Kitami Institute of Technology

Received: 13th June 2019, Accepted: 7th May 2020

\*1 元北見工業大学 (〒090-0804 北見市桜町 6-42)

‡e-mail: hiromu.baba@mb6.seikyoku.ne.jp

\*2 北見工業大学名誉教授

(原稿受付: 2019年6月13日, 受理日: 2020年5月7日)

(ver-2)<sup>(17)</sup>が公開された事から、著者らはそれを用いて5地点の水平面日射スペクトルについて従来の手法を用いた結果を報告した<sup>(18)</sup>。‘11年以降、日射スペクトルの推定に関連する報告は、幾つか行われている<sup>(19,20)</sup>が、‘17年板垣ら<sup>(21)</sup>は日射スペクトルデータベース(ver-2)の‘12年の1年分のデータを基に、高度な統計的手法を用いて全国に展開する為のモデル式を提案し、推定誤差が5~12%である事を示している。また小林ら<sup>(22,23)</sup>は種々の気象条件下の日射スペクトルについて計算と解説を行っている。本論文では二つの日射スペクトルデータベースを纏めて全天日射量、分光日射量、日照率、太陽高度及び降水量の関係を算出整理して、晴天日、曇天日等代表的な天候状態におけるこれらの関係を示した。分光日射量をそのピーク波長エネルギーで無次元化した無次元分光日射率は太陽高度が15°以上ならば、日射量に関わらず1本のスペクトル線に収束する事から、全天日射量から分光日射量を簡便に推定する手法を検討した。

## 2. 観測データとその処理

解析の対象としたデータは NEDO から公開された日射スペクトルデータベース(ver-1)及び(ver-2)に関する全てである。日射スペクトルデータベースに関する詳細は板垣ら<sup>(21)</sup>の論文で紹介されており省略する。データは観測年にかかわらず、各月毎に整理した。‘11年に公開されたデータベース(ver-1)のスペクトルデータは、波長間隔が一定しておらず、補完法によって(ver-2)の波長間隔と同じに調整した。データ処理は4地点について1月~12月まで行い同様の結果を得ているが、紙面の関係で長沼の6月を中心に12月の一部について報告する。本論文に用いる記号の説明を末尾に記載した。

観測値は日の出から日没まで10分毎に全天日射強度(W/m<sup>2</sup>)及び分光日射強度(W/m<sup>2</sup>/nm)が記録されている。これを毎正N時からN+1時までの10分毎の値を7個平均して1時間毎の値に纏めて、平均日射量HQI(IT, IJ)(Wh/m<sup>2</sup>)、分光日射量HX(IR, IT, IJ)(Wh/m<sup>2</sup>/nm)とした。同時に、全天日射計からは10分毎の積算日射量(kJ/m<sup>2</sup>)が記録されており、これを同時刻内で6個合計し、積算全天日射量HQIJ(IT, IJ)(Wh/m<sup>2</sup>)とした。両者の違いをR<sub>ij</sub>(IT, IJ)=HQI(IT, IJ)/HQIJ(IT, IJ)で評価し、全天日射比と仮称した。日照時間及び降水量は10分間毎の値から1時間毎の値を算出した。なお、鳥栖を除く降水量のデータは観測地点のアメダスに依った。降水量の観測値が無い鳥栖は佐賀のデータを用いた。

日射スペクトルHX(IR)の波長積分値S<sub>HX</sub>(IT, IJ)は式(1)で与えた。

$$S_{HX}(IT, IJ) = \int_{350}^{1700} HX(IR, IT, IJ) dRX$$

$$= \sum_{IR=1}^{IR=1351} (HX(IR) + HX(IR + 1)) dRX / 2 \quad (1)$$

$$dRX = RX(IR + 1) - RX(IR) \quad (2)$$

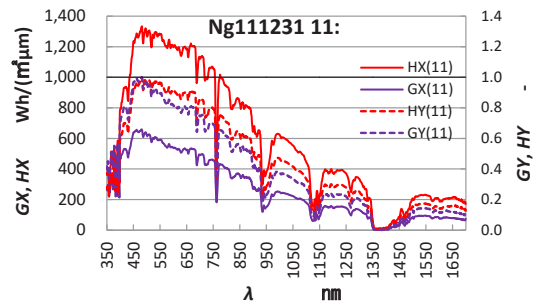


Fig.1 Comparison between global spectral irradiance and tilted surface spectral irradiance at Naganuma December 31, 2012. Time: Eleven hour(11:00~12:00).

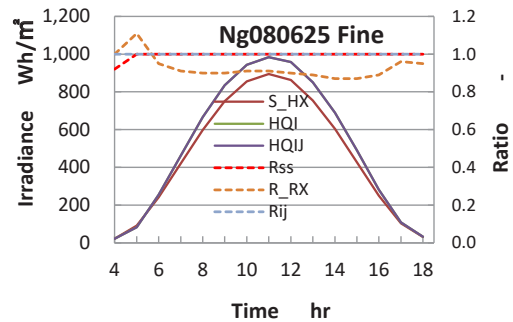


Fig.2 Hourly change of global solar radiation (HQI, HQIJ, S<sub>HX</sub>), sunshine ratio R<sub>ss</sub>, insolation ratio R<sub>ij</sub> and spectral insolation ratio R<sub>RX</sub> at Naganuma in June, 25, 2008 (Fine sky day).

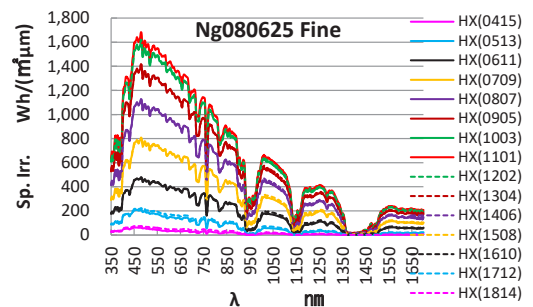


Fig.3 Hourly change of solar spectra at Naganuma in June, 25, 2008 (Fine sky day).

ここでHX(IR)：分光日射量(Wh/m<sup>2</sup>/nm), RX(IR)：波長(nm), S<sub>HX</sub>：HXの波長積分値(Wh/m<sup>2</sup>)。収録されている日射スペクトルの単位は(W/m<sup>2</sup>/nm)であり、式(1)に1/1000を掛けて調整した。S<sub>HX</sub>(IT, IJ)とHQI(IT, IJ)の比R<sub>RX</sub>(IT, IJ)を分光日射比と仮称する。ここで日数を示す変数IJは‘08年の各月の初日を1として‘12年の各月の末日迄、通し番号で与えた。以降、IJは省略する。なお4地点、各月について得られた特性は、地点による平均的天候及び設置角度の影響から固有の傾向が見られるがその違いは僅かで基本的特性は一致している。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 全天日射量、分光日射量、日照率、太陽高度及び降水量の関係

始めに、ここで対象とした日射特性は全て傾斜面日射

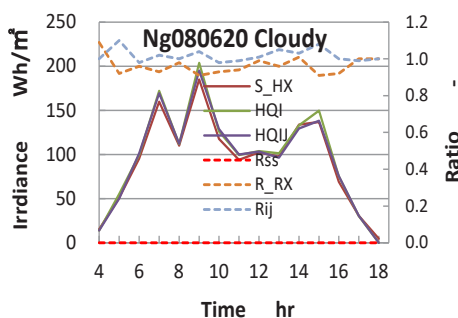


Fig.4 Hourly change of  $HQI$ ,  $HQIJ$ ,  $S_{HX}$ ,  $R_{ss}$ ,  $R_{ij}$  and  $R_{RX}$  at Naganuma in June, 20, 2008 (Overcast sky day).

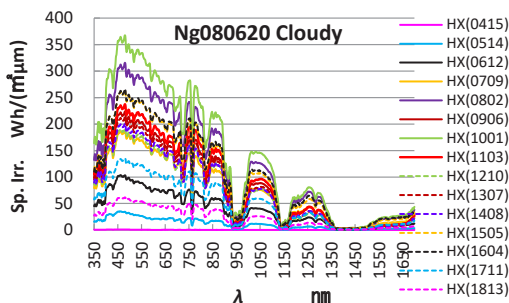


Fig.5 Hourly change of solar spectra at Naganuma in June 20, 2008 (Overcast sky day).

特性である。両者の違いを示す一例として、長沼の‘11年12月31日11時(晴天時)の傾斜面分光日射量  $HX$ 、同無次元分光日射率  $HY$  と水平面分光日射量  $G_X$ 、同無次元分光日射率  $GY$  を比較して図1に示す。 $G_X$  と  $HX$  はその値が大きく異なり480nmのピーク波長より長波長域で  $HX$  が  $G_X$  より1.2~2.5倍大きく、同波長域で  $HY$  は  $GY$  より1.0~1.4倍程大きくなる。

図2は長沼について、‘08年6月25日快晴日の日射量  $HQI$ 、 $HQIJ$ 、 $S_{HX}$ 、日照率  $R_{ss}$ 、分光日射比  $R_{RX}$ 、全天日射比  $R_{ij}$  の時刻変化を示す。この日は快晴日で平均日射量  $HQI(IT)$ 、積算日射量  $HQIJ(IT)$ 、波長積分日射量  $S_{HX}(IT)$  は4時から18時まで時刻に伴って南中時を中心にして午前と午後で対称な変化を示す。 $HQI(IT)$  と  $HQIJ(IT)$  は、快晴日であり不規則な変動もなく一致している。全天日射比  $R_{ij}(IT)$  の値も1日を通して1.0を示す。 $S_{HX}(IT)$  は、時刻7時~16時の間では、 $HQIJ(IT)$  よりも小さく、分光日射比  $R_{RX}(IT)$  は0.87~1.11を示す。日射計のガラスドームの透過率<sup>(24)</sup>は波長0.30~3.0µmの間で約1.0であり、分光日射の波長域が0.35~1.70µmであることから、 $R_{RX}(IT)$  を大気条件(混濁度  $\tau_{05}=0.1$ 、0.51可降水量  $W=0.1$ 、1.5cm)を与えてBirdのモデル式を用いて計算してみると0.94~0.96となるが、 $R_{RX}(IT)$  は観測値による結果が計算値による結果よりも小さくなる。太陽高度が低い朝夕には  $R_{RX}(IT)$  は1に近づく。この日の  $R_{ss}(IT)$  は1日を通して1.0であった。

図3は同日の1日を通してみた分光日射量  $HX(\lambda, IT)$  の時刻変化を示す。各曲線が互いに接近し識別が困難であり曲線を識別する凡例に4桁の数値を用いた。上2桁

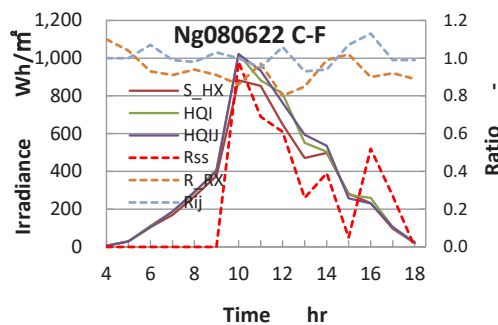


Fig.6 Hourly change of  $HQI$ ,  $HQIJ$ ,  $S_{HX}$ ,  $R_{ss}$ ,  $R_{ij}$  and  $R_{RX}$  at Naganuma in June, 22, 2008 (Partly fine sky day).

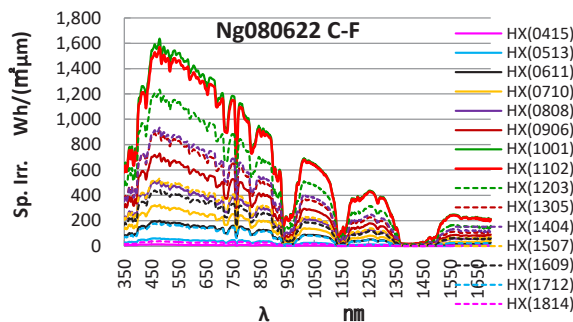


Fig.7 Hourly change of solar spectra at Naganuma, in June, 22, 2008 (Partly fine sky day).

が時刻を、下2桁が曲線の大小順を示す。 $HX(IT)$  は11時に最大値を示すが、これを凡例では  $HX(1101)$  と表記した。 $HX(IT)$  は4時~18時まで時刻と共に変化する。

図4は長沼の、‘08年6月20日の曇天日について示す。この日は1日を通して曇りで、日照率も  $R_{ss}(IT)=0$  である。日射量  $HQI(IT)$ 、 $HQIJ(IT)$  及び  $S_{HX}(IT)$  は1日を通して互いに近い値を示す。日射量は大きい順に9時、7時15時、14時、10時、8時、12時、13時、6時、11時、16時は、126~75Wh/m²と互いに似通った数値を示し、以下5時、17時、4時、18時と時刻変化に伴って小さくなる。9時には  $HQIJ(9)$  が195.1Wh/m²、 $HQI(9)$  が203.8Wh/m²で  $R_{ij}(9)=1.05$ 、すなわち  $HQI$  が  $HQIJ$  より5%大きい。9時の  $S_{HX}(9)$  は184.8Wh/m²で  $R_{RX}(9)=0.91$  で  $HQI(9)$  の91%である。7時、15時の特性もほぼ同じである。雲の影響が強い11~13時は  $R_{RX}(IT)$  が0.94~0.99、 $R_{ij}(IT)$  は0.99~1.05と比較的安定した値を示す。

図5は、図4に示した曇天日の分光日射量  $HX(\lambda, IT)$  の時刻変化を示す。 $HX(\lambda, IT)$  の時刻変化は図3と同じである。図3の晴天時の  $HX(\lambda, IT)$  と比較すると  $HX(\lambda, IT)$  は  $\lambda$  が480~730nmまでは急勾配で減少し、 $\lambda$  が730~850nmの波長域で  $HX(\lambda, IT)$  は急に大きな値を示し、突出した形状を示す。以降の勾配も急で1500nm以降の  $HX(\lambda, IT)$  は50Wh/(m²µm)と小さい。

図6は‘08年6月22日の晴天と曇天が入り交じった日の例を示す。9時までは曇天で、10時から晴天に急変している。その後、雲の状況によって  $R_{ss}(IT)$  が0.98~0.95まで変化する。 $R_{ij}(IT)$  は、14時に0.94、16時が1.13と変化する。14時の日射量は平均値が積算値より6%小さ

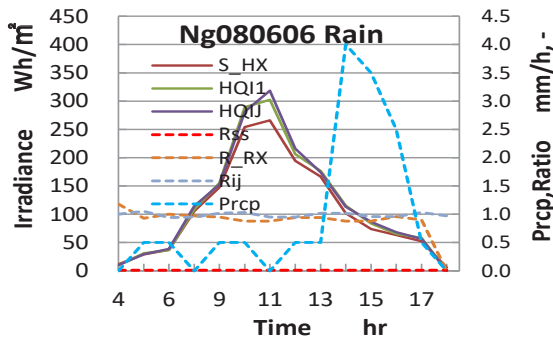


Fig.8 Hourly change of  $HQI$ ,  $HQIJ$ ,  $S_HX$ ,  $R_{ss}$ ,  $R_{ij}$  and  $R_{RX}$  at Naganuma in June, 6, 2008 (Rain day).

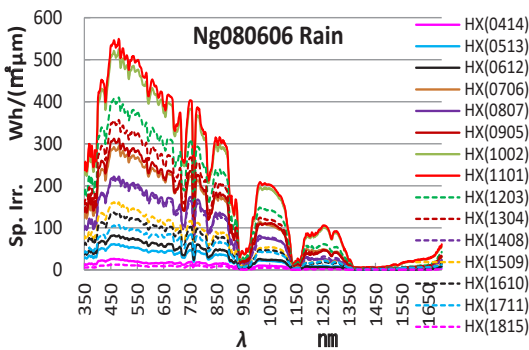


Fig.9 Hourly change of solar spectra at Naganuma in June, 6, 2008 (Rain day).

く 16 時は 13% 大きい。  $R_{ij}(IT)$  は 0.81~1.19 の範囲で変化し、  $R_{RX}(IT)$  は 0.85~1.1 を示す。

図 7 は同日の分光日射量  $HX(\lambda, IT)$  の時刻変化を示す。  $HX(\lambda, IT)$  は 10 時, 11 時, 12 時, 14 時, 13 時, 9 時, 8 時, 15 時, 16 時, 7 時の順に小さくなる。

図 8 は '08 年 6 月 6 日の雨天日について示す。 5 時, 6 時, 9 時, 10 時, 12 時及び 13 時に 0.5mm/h の降水量  $P_{rcp}(IT)$  があり, その後 14 時に 4mm/h, 15 時に 3.5mm/h, 16 時に 2.5mm/h として 17 時に 0.5mm/h の  $P_{rcp}(IT)$  が見られた。 この日の  $R_{ss}(IT)$  は 1 日を通して 0.0 であり, 雨が止んだ 11 時を挟んで 10, 11 時の日射量  $HQI(IT)$  が約 300Wh/m² と大きく, それ以外は 220Wh/m² 以下と小さい。  $R_{RX}(IT)$  と  $R_{ij}(IT)$  も 1 日を通して 1.0 近くにあり大きな変化は見られない。

図 9 は図 8 と同日の  $HX(\lambda, IT)$  を示す。 大きさの順は図 8 の  $HQI(IT)$  と同じである。  $HX(\lambda, IT)$  の波長特性は図 5 の曇天時と類似しているが  $\lambda$  が 1350nm より長い波長域で  $HX(\lambda, IT)$  は小さい。

図 10 は冬期の一例として '09 年 12 月 4 日の晴天日について  $HQI(IT)$ ,  $R_{ss}(IT)$ ,  $R_{ij}(IT)$  等の関係を示す。 各項目の時間変化の特性は図 2 に示した挙動と同じであるが, 12 月は日照時間が短く 1 日のデータ数は 7 時~15 時迄の 9 個である。 各日射量は丸みを帯びた形状を示す。

図 11 は同日の  $HX(\lambda, IT)$  の時刻変化で, 7 時~15 時まで 9 本のスペクトルがある。 12 月の波長特性は  $\lambda_p$  より長波長域で  $HX(\lambda, IT)$  は大きく緩やかな曲線を描く。 10

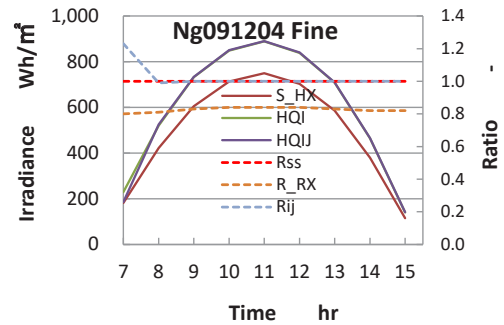


Fig.10 Hourly change of  $HQI$ ,  $HQIJ$ ,  $S_HX$ ,  $R_{ss}$ ,  $R_{ij}$  and  $R_{RX}$  at Naganuma in December, 4, 2009 (Fine sky day).

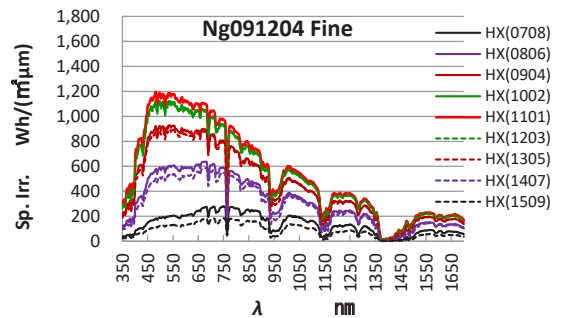


Fig.11 Hourly change of solar spectra at Naganuma in December, 4, 2009 (Fine sky day).

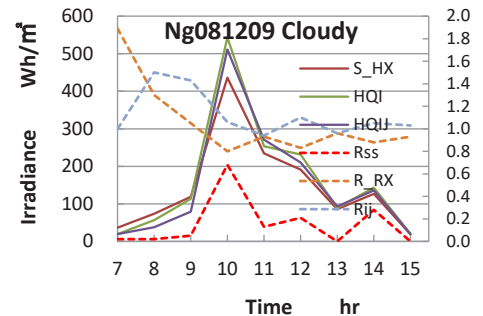


Fig.12 Hourly change of  $HQI$ ,  $HQIJ$ ,  $S_HX$ ,  $R_{ss}$ ,  $R_{ij}$  and  $R_{RX}$  at Naganuma in December, 9, 2008 [Cloudy day(a few fine time)] .

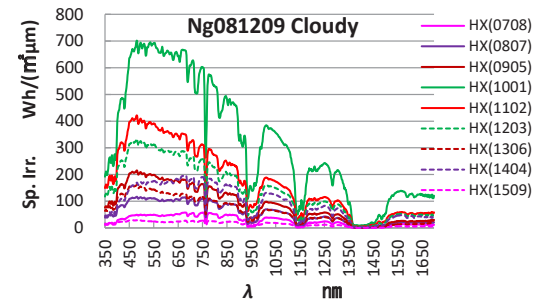


Fig.13 Hourly change of solar spectra at Naganuma in December, 9, 2008 [Cloudy day(a few fine time)] .

~12 時の  $\lambda_p$  は 482nm, 9 時と 13 時の  $\lambda_p$  は 537nm, 8 時と 14 時は 680nm で, 時刻変化に応じて長波長側にずれていく。  $HX(\lambda, IT)$  は斜面に入射する直達日射の影響が大きく太陽高度  $sh$  が低い冬期はエアマスが大きく直達日射の短波長成分が大気に散乱・吸収される事が理由である。 その結果,  $HX(\lambda, IT)$  のピーク値が長波長側にずれる特

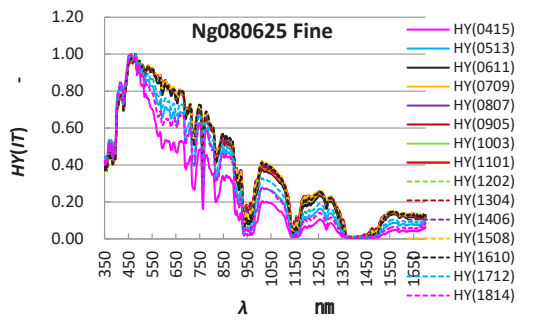


Fig.14 Hourly change of normalized solar spectra at Naganuma in June 25, 2008.

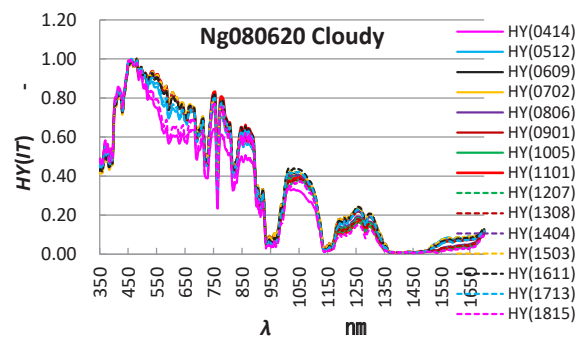


Fig.16 Hourly change of normalized solar spectra at Naganuma in June 20, 2008 (Cloudy day(Overcast sky)).

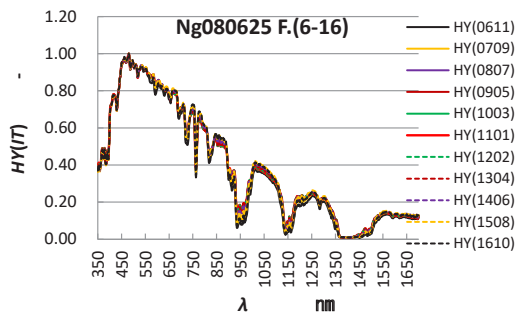


Fig.15 Hourly change of normalized solar spectra time interval from 6:00 to 16:00 at Naganuma in June 25, 2008.

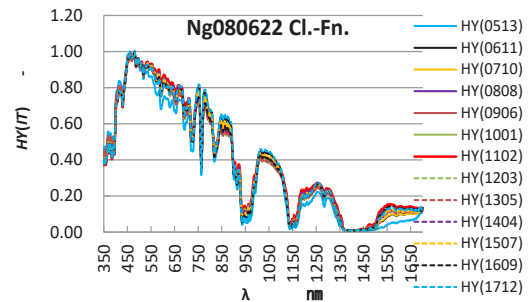


Fig.17 Hourly change of normalized solar spectra at Naganuma in June 22, 2008 (from Cloudy to partly Fine).

性を持つ。shが低い12月 ( $sh \leq 25.2^\circ$ ) はエアマスも2.4以上あり、その影響が大きい。一方、shが高い6月 ( $sh_{max}=70^\circ$ ) はエアマスも1.1であり  $\lambda_p$  は6時~17時が480nm, 5時と18時が462nmと  $\lambda_p$  は変わらない。

図12は冬の曇天日の例として'08年12月9日について日射量, 日照率, 降水量の時刻変化を示す。この日は10時までが曇天で, 10時には  $R_{ss}(10)=0.68$  の日射があり, 10時以降は僅かに晴れ間のある曇天が混在する。6月と異なり, 12月の  $R_{ij}(IT)$  は0.7~1.56の範囲で変動する。原因は降雪や計器に付着する霜等の影響である。

図13は同日の分光日射量  $HX(\lambda, IT)$  を示す。  $R_{ss}(IT)$  が0.68の10時の  $HX(\lambda, IT)$  は最大で晴天時と同じスペクトル形状を示す。その他の時刻の  $HX(\lambda, IT)$  は雲の多い晴天時と晴れ間の少ない曇天時の混合で  $HX(\lambda, IT)$  の大きな違いは見られない。7時, 8時と14時, 15時は太陽高度の影響で  $\lambda_p$  が680nmにずれた緩やかな曲線を示す。

### 3.2 天候状態と無次元日射スペクトル

図3で示したように晴天日の分光日射量  $HX(\lambda, IT)$  は, 時刻と共に変化する太陽高度  $sh(IT)$  及び全天日射量  $HQI(IT)$  に対応して, ほぼ同じ形で変化する。

図14は, 図3に示した  $HX(\lambda, IT)$  をピーク波長  $\lambda_p$  480nmのピーク日射量  $I_p(\lambda_p, IT)$  で無次元化した無次元分光日射率  $HY(\lambda, IT)$  の時刻変化を示す。  $sh(IT)$  が  $15^\circ$  より低い早朝の4時, 5時及び17時, 18時の  $HY(\lambda, IT)$  は, ピーク波長  $\lambda_p$  より長波長全域で対応する時刻の  $sh(IT)$  と共に減少する。また6~16時の時間帯では  $HY(\lambda, IT)$  は互いに接近する。このことから全天日射量  $HQI(IT)$  とピーク波長分光日射量  $I_p(\lambda_p, IT)$  の関係を求め

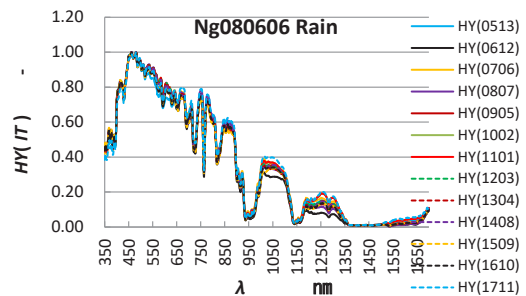


Fig.18 Hourly change of normalized solar spectra at Naganuma in June 6, 2008 (Rain day).

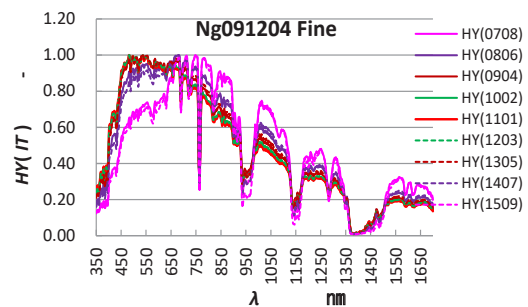


Fig.19 Hourly change of normalized solar spectra at Naganuma in December 4, 2009 (Fine day).

ておく事によって, 各月の標準となる無次元日射スペクトル  $HY_{st}(\lambda)$  と全天日射量  $HQI(IT)$  から, 任意の時刻の晴天時の分光日射量を簡単に推定する事が出来る。図15は図14から早朝と夕方を除いた6時~16時の無次元分光日射率  $HY(\lambda, IT)$  の時刻変化を示す。  $HY(\lambda, IT)$  の揺れは大気状態の揺らぎに因るものと考えている。

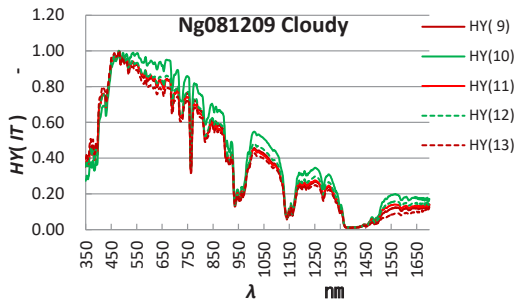


Fig.20 Hourly change of normalized solar spectra at Naganuma in December, 9, 2008 (Cloudy day).

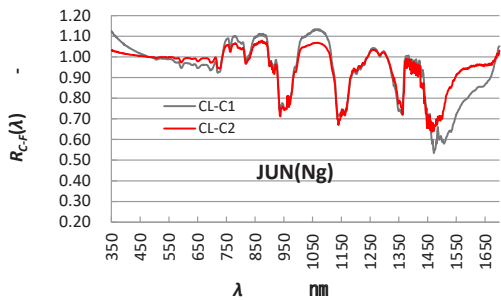


Fig.21 Comparison of weather factor  $R_{C-F}(\lambda)$  between two cloudy type CL-C1 and CL-C2 at Naganuma in June.

図 16 は 図 5 で示した天空全体が雲に覆われた曇天日の無次元分光日射率  $H\lambda(\lambda, IT)$  を示す。太陽高度が低い 4 時, 18 時を除いて  $H\lambda(\lambda, IT)$  の時刻変化は見られない。この日は 1 日を通して  $R_{ss}(IT)$  が 0 であり太陽高度の影響はない。 $H\lambda(\lambda, IT)$  は、波長 725~870nm の透過帯波長域で図 15 に示す晴天時の値より最大 23%大きい。

図 17 は、図 7 の曇天時から日射のある曇天時へと変わった日を示す。この日の  $H\lambda(\lambda, IT)$  の特徴はピーク波長 480nm から 725nm の範囲で図 15 の晴天日に近く、725nm より長波長域では図 16 の  $H\lambda(\lambda, IT)$  に近い様に見られるが、このままでは天候の時刻変化に伴う  $H\lambda(\lambda, IT)$  の違いは判別出来ない。

図 18 は、図 9 に示した雨天日の  $H\lambda(\lambda, IT)$  を示す。波長域 725~830nm の透過帯で  $H\lambda(\lambda, IT)$  は晴天時の値と比較して約 21.0%大きく、波長  $\lambda > 1150\text{nm}$  で  $H\lambda(\lambda, IT)$  は晴天時より小さい。

図 19 は、図 11 に示した晴天日の  $H\lambda(\lambda, IT)$  を示す。6 月と異なり、7 時, 8 時, 14 時そして 15 時と太陽高度  $sh(IT)$  が低い ( $sh(IT)=5.6, 13.6, 12.0, 3.7^\circ$ ) 時刻には 350~650nm の波長域での  $H\lambda(\lambda, IT)$  が 0.6~0.8 と落ち込みが大きい。この結果、夏期と異なり冬期は  $H\lambda(\lambda, IT)$  を無次元化する事によって分光日射量を近似出来る時間帯は南中時刻を中心に 3~4 時間程度になる。

図 20 は、図 13 に示した冬期曇天日の  $H\lambda(\lambda, IT)$  を示す。この日は 10 時と 14 時に日照率  $R_{ss}(IT)$  が 0.68 と 0.28 であり晴れ間のある曇天日である。7 時, 8 時, 14 時及び 15 時の  $sh(IT)$  が  $15^\circ$  より低い事から、9 時~13 時の  $H\lambda(\lambda, IT)$  を表示した。 $R_{ss}(IT)$  が大きい 10 時を除いて

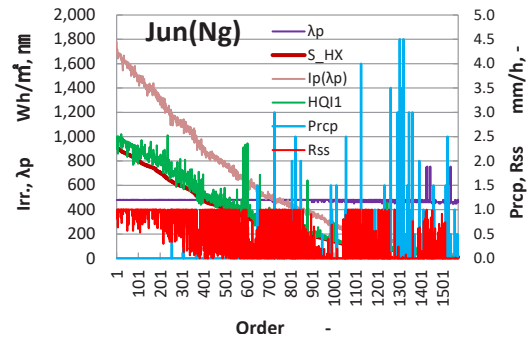


Fig.22 Relation among  $HQI, I_p(\lambda_p), \lambda_p, S_{HX}, R_{ss}, P_{rcp}$  When  $S_{HX}$  is ordered from large to small, at Naganuma in June.

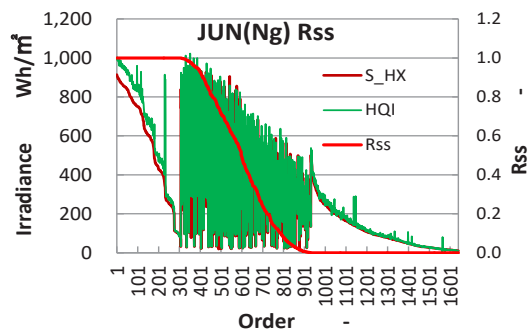


Fig.23 Relation among  $HQI, S_{HX}, R_{ss}$ , when  $R_{ss}$  is ordered from large to small, at Naganuma in June.

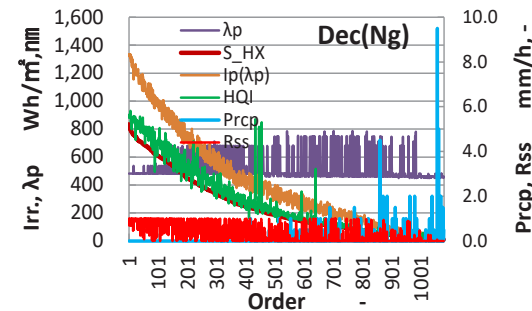


Fig.24 Relation among  $HQI, I_p(\lambda_p), \lambda_p, S_{HX}, R_{ss}, P_{rcp}$  When  $S_{HX}$  is ordered from large to small, at Naganuma in December.

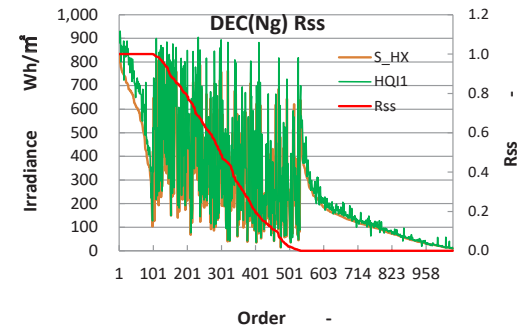


Fig.25 Relation among  $HQI, S_{HX}, R_{ss}$ , when  $R_{ss}$  is ordered from large to small, at Naganuma in December.

$H\lambda(\lambda, IT)$  は纏まった形を示す。これは図 16 に示した夏期の曇天日の形状と同じであり、直達日射が無い曇天日の  $H\lambda(\lambda, IT)$  は季節の影響を受けないことが分かる。

分光日射量を無次元化する事によって太陽高度  $sh$  が

15°以上の時刻では各時刻の日射量の影響を除外出来る事が明らかになったが、天候が  $HY(\lambda, IT)$  に及ぼす影響を把握することは難しい。そこで晴天日の無次元分光日射率  $HY_F(\lambda, IT)$  を基準にとり、雲がある天候状態での無次元分光日射率  $HY_C(\lambda, IT)$  との比を求めて比較した。

図 21 は '08 年 6 月 22 日の曇天日の  $HY_C(\lambda, IT)$  と '08 年 6 月 25 日の快晴日の  $HY_F(\lambda, IT)$  をそれぞれ対応する同時刻の比を求めて  $R_{C-F}(\lambda, IT)$  とし、これを天候係数と仮称する。次に図 6 から、 $R_{SS}(IT)$  が 0 である時刻、6~9 時までと  $R_{SS}(IT)=0.05$  の 15 時を全天空が雲に覆われた曇天時として記号 C1 を、13 時を除く 10 時~16 時を、日射がある曇天時として記号 C2 を与えて計算した二つのグループの平均値  $R_{C1-F}(\lambda)$ 、 $R_{C2-F}(\lambda)$  を CL-C1、CL-C2 で示す。曇天時 C1 の CL-C1 は、波長域 350~480, 725~760, 760~850 及び 908~1060nm の透過帯において、 $HY_F(\lambda)$  よりも最大 13%大きく、波長が 1350nm より長い波長域で小さい。曇天時 C2 の CL-C2 は波長帯 350~480nm で増加率は極めて小さく 725~760, 760~850nm の透過帯の CL-C2 も最大 7%と CL-C2 よりも小さい。波長 1350nm より長波長域での CL-C2 の減少率は CL-C1 よりも小さい。

### 3.3 月間の日射特性と標準日射スペクトル

図 22 は長沼の 6 月について、4 年間の 1 時間毎の日射量  $HQI$ ,  $S_{HX}$ ,  $I_p(\lambda_p)$ , ピーク波長  $\lambda_p$ , 日照率  $R_{SS}$ , 降水量  $P_{rep}$  の全データを、分光日射量の積分値  $S_{HX}$  に着目して最大値から最小値 ( $S_{HX} > 10 \text{Wh/m}^2$ ) まで降順に並べた時の各データの関係を示す。元のデータは '08 年 6 月 1 日の 4 時から '12 年 6 月 30 日の 19 時まで、1 日のデータ数 16 時間で 120 日間、総数 1920 時間のデータを整えた。この内、観測器機のメンテナンスやトラブルによって欠測データが生じるのでデータ数はより少なくなり、データに乱れが生じる。図 22 で重要な関係は  $S_{HX}$  と  $HQI$  が横軸(順序)の全てに亘って近似している。 $S_{HX}$  と  $I_p(\lambda_p)$  の関係も横軸に対して一定の関係を示している事である。横軸の 585, 593, 598 番目等に見られる  $HQI$  の異常値は分光日射量の観測値の欠測が原因である。 $R_{SS}$  は横軸が 300 番近辺までは 1.0 から 0.5 の間にバラツキているが 300 番以降 900 番の間は 1 と 0 の間をバラツキている。そして 1400 番以降では  $R_{SS}$  は 1 になることはない。 $\lambda_p$  は 480nm で一定であり、1400 番以降で 780nm まで長波長側にずれるが、これは日の出、日没間際に生じる希な現象である。 $P_{rep}$  は 200 番, 300 番近くに 0.5mm/h があり、700 番近辺で 3mm/h の降水がある。図 22 は各要素の全体の様子を俯瞰する事が目的である。

図 23 は図 22 において日照率  $R_{SS}$  が全体にバラツキている事から  $R_{SS}$  に注目して降順に並べた時の  $S_{HX}$  と  $HQI$  の関係を示す。 $R_{SS}$  が 1 を示す範囲は横軸が 300 番迄でこの間に 1 日を通して快晴であった日と任意の時刻に快晴となった  $S_{HX}$ ,  $HQI$  が集まり、次の 300~900 番の間に部分的晴天日の  $S_{HX}$  と  $HQI$  が最大値(≒1000Wh/m<sup>2</sup>)から最小値(≒400Wh/m<sup>2</sup>)の間で  $R_{SS}$  の減少と共に激しく変動した

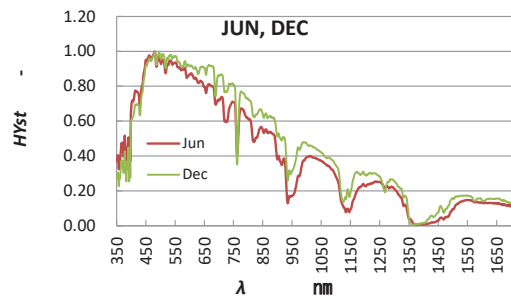


Fig.26 Comparison between normalized solar spectra of standard fine day  $HYst(\lambda, 6)$  and  $HYst(\lambda, 12)$  at Naganuma .

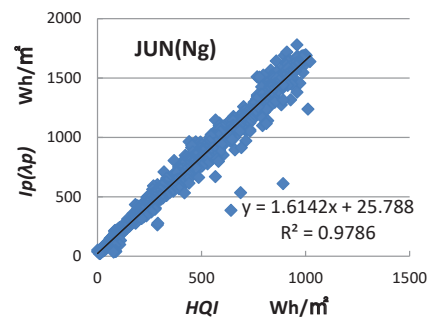


Fig.27 Scatter plot of  $HQI$  versus  $I_p(\lambda_p)$  at Naganuma in June, 2008, 2009, 2011 and 2012.

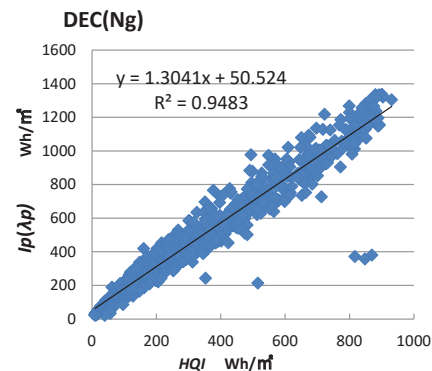


Fig.28 Scatter plot of  $HQI$  versus  $I_p(\lambda_p)$  at Naganuma in December, 2008, 2009, 2011 and 2012.

が減少している。日射がない曇天時、 $R_{SS}=0$  では横軸が 900 番の時  $S_{HX}$ ,  $HQI$  は共に約 400Wh/m<sup>2</sup>であり、これ以降順序の増加と共に緩やかな曲線を描いて減少している。 $R_{SS}$  が 1~0 の間で  $S_{HX}$  と  $HQI$  は共に激しく変動するが、互いに接近した関係を示す。図 6 において、曇天時から雲がある晴天時と晴れ間がある曇天時の識別を日照率で行った ( $R_{SS} \geq 0.2$ : 雲がある晴れ,  $R_{SS} < 0.2$ : 晴れ間のある曇り)が、その根拠となる現象であると考えている。

図 24 は、12 月の全データを、 $S_{HX}$  に注目して降順に並べて示す。一つの項目のデータ数は 1116 で 6 月のデータ数の約 58%である。 $HQI$ ,  $S_{HX}$ ,  $I_p(\lambda_p)$  の傾向は 6 月と同じである。横軸 434, 447, 641 番目にある見られる  $HQI$  の異常値は 6 月と同じ  $S_{HX}$  の欠測である。12 月の顕著な違いは分光日射量のピーク波長  $\lambda_p$  が 480nm を基準に 537, 680, 747 及び 783nm と変化する。これは図 11 で述べた様に、12 月の太陽高度が低く ( $sh < 25.2^\circ$ )、南向

き  $36^\circ$  の傾斜角で設置された傾斜面へ入射する直達日射光は短波長域において大気粒子による散乱(レーリー散乱)の影響を受けて大きく減衰する事が原因である。著者ら<sup>(7)</sup>は Bird のモデルを用いて、一定の条件下での直達日射光及び散乱日射光の波長特性と太陽高度との関係を提示している。更に小林ら<sup>(22)</sup>は種々の傾斜面に入射する日射スペクトル特性について解説している。著者らは詳細な観測データを整理した結果、ピーク波長の時刻変化を具体的に明示する事が出来た。順序 850 番以降では降雨(降雪)の頻度も多く日射量も  $70\text{Wh}/\text{m}^2$  以下である。

図 25 は 12 月の  $R_{ss}$ ,  $HQI$ ,  $S_{HX}$  を,  $R_{ss}$  で降順に並べて示す。データ数が少なく日射量の変動が大きい。理由は 12 月は可照時間が少ない事と、図 24 で見られる様に分光日射量の欠測にある。

これまで述べてきた結果に基づいて晴天時の分光日射量  $HX(\lambda, IT)$  を  $HQI(IT)$  から推定する事が出来る。そこで、各月について観測期間中のデータから最も安定した快晴日 3 日間のデータを選び出し、それらの日の南中時を含む 3 時間の無次元分光日射率  $HY(\lambda, IT)$  を求めてそれらの平均値を標準晴天日の規格化分光日射率(=規格化日射スペクトル)  $HYst(\lambda, M, L)$  と定義した。ここで  $M$ : 月,  $L$ : 観測地点を示す。

図 26 は長沼の 6 月及び 12 月の標準日射スペクトルを示す。選択した晴天日は 6 月が '08 年 6 月 25 日, '09 年 6 月 25 日及び '12 年 6 月 30 日の 3 日間の南中時刻(11 時)を中心にした 3 時間である。12 月は '09 年 12 月 4 日, '11 年 12 月 21 日及び '11 年 12 月 31 日の 3 日間である。6 月と 12 月を比較すると 12 月の  $HYst(12)$  は  $350\sim 480\text{nm}(\lambda \leq \lambda_p)$  の短波長域では 6 月の  $HYst(6)$  よりも小さいが、 $\lambda > \lambda_p$  の長波長域では 12 月が全般に大きい。特に吸収帯での吸収は 12 月が小さい。これは 12 月の大気が乾燥している事によるものと考えられる。

次に、期間全体の全天日射量  $HQI$  とピーク波長分光日射量  $I_p(\lambda_p)$  について散布図を描き相関係数と回帰式を求める。次に求めた回帰式から  $HQI(IT, IJ)$  に対する  $I_p(\lambda_p, IT)$  を求め、 $HYst(\lambda, M, L)$  に  $I_p(\lambda_p, IT)$  を掛ける事によって、 $HQI(IT, IJ)$  から晴天時の  $HX(\lambda, IT, IJ)$  を求める事が出来る。ただし曇天時を含む全天候下に適応するためには図 21 で説明した天候係数  $R_{c-f}(\lambda, IT)$  を日照率, 降水量及び太陽高度の 3 因子について統計的に整理して求めておく必要がある。

図 27 は長沼の 6 月の日射量  $HQI$  とピーク波長日射量  $I_p(\lambda_p)$  の散布図を示す。両者に一次の強い相関関係がある。図中に一次の回帰式を示す。

図 28 は 12 月の  $HQI$  と  $I_p(\lambda_p)$  の関係を示す。6 月同様両者は一次の強い相関関係を示す。

#### 4. むすび

NEDO から公開された分光日射量, 全天日射量とそれに関連する気象データを整理して以下のことを明らかにし

た。

- (1) 10 分毎に記録された全天日射量, 分光日射量のデータから毎正時毎の時間平均値を求めた。これを平均日射量  $HQI(IT, IJ)$ , 分光日射量  $HX(\lambda, IT, IJ)$ , 波長積分日射量  $S_{HX}(IT, IJ)$  とした。同時に 10 分毎の積算日射量, 日照時間, 降水量のデータから 1 時間毎の積算日射量  $HQIJ(IT, IJ)$ , 日照率  $R_{ss}(IT, IJ)$  及び降水量  $P_{rop}(IT, IJ)$  を整理した。これを 4 地点の全観測期間に亘って各月について時間毎に整理した。
- (2) (1) で整えた 1 時間データを基に, 全天日射量  $HQI$  と分光日射量のピーク日射量  $I_p(\lambda_p)$  には強い相関関係があり  $HQI$  から  $I_p(\lambda_p)$  を推定するための一次回帰式を提示した。
- (3) 天候による分光日射量の波長分布特性は太陽高度が  $15^\circ$  より高く, 日照率が 0.2 より大きければ同じである。
- (4) 分光日射量をそのピーク値で無次元化した無次元分光日射量は(3)で示した条件下で 1 本に収束する。
- (5) この結果, 全天日射量から分光日射量を推定する手法の概略を示した。

#### 記号および単位

- $HQI(IT, IJ)$ : 10 分毎の日射照度に基づく平均日射量  
 $\text{Wh}/\text{m}^2, \text{MJ}/(\text{m}^2 \text{h})$
- $HQIJ(IT, IJ)$ : 全天日射計による積算日射量  
 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \text{h}), \text{Wh}/\text{m}^2$
- $HX(IR, IT, IJ)$ : 日射スペクトル(分光日射量)  
 $\text{Wh}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$
- $HY(IR, IT, IJ)$ : ピーク波長日射量で無次元化した規格化日射スペクトル  
 (=無次元分光日射量) —
- $S_{HX}(IT, IJ)$ : 日射スペクトルの積分値(波長積分日射量)  
 $\text{Wh}/\text{m}^2$
- $HYst(IR, M, L)$ : 標準晴天日の規格化日射スペクトル —
- $I_p(\lambda_p)$ : ピーク波長日射量  $\text{Wh}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$
- $R_{ij}(IT, IJ)$ : 全天日射比  
 $R_{ij}(IT, IJ) = HQI(IT, IJ) / HQIJ(IT, IJ)$  —
- $R_{RX}(IT, IJ)$ : 分光日射比  
 $R_{RX}(IT, IJ) = S_{HX}(IT, IJ) / HQIJ(IT, IJ)$  —
- $R_{c-f}(\lambda, IT)$ : 天候係数, 快晴時の  $HY_f(\lambda, IT)$  に対する曇天時の  $HY_c(\lambda, IT)$  の比  
 $R_{c-f}(\lambda, IT) = HY_c(\lambda, IT) / HY_f(\lambda, IT)$

$\lambda, RX(IR)$ : 波長  $\text{nm}, \mu\text{m}$

$\lambda_p$ : ピーク波長  $\text{nm}$  または  $\mu\text{m}$

$IR$ : 波長変数 —

$IT$ : 時刻または時間変数 —

$IJ$ : 日または日付変数('08 年の各月初めを 1 とし '12 年の各月末までの通し日数) —



$P_{rep}(IT,J)$  : 降水量 mm/h

$R_{ss}(IT,J)$  : 日照率 -

$sh$  : 太陽高度 °

## 5. 謝辞

本研究を行うに当たり長期間に亘ってパーソナルコンピュータのメンテナンスを行って頂いた北見工業大学技術部、長谷川稔氏に感謝申し上げます。

## 6. 参考文献

- 1) R. E. Bird, Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres, *J. Climate Applied meteorology*, **5**(1), 88-97 (1986).
- 2) K. Kanayama, H. Baba and H. Ebina, Performance of a Flat Type Solar Collector composed of the Selective Transparent and Absorbing Plates, *Alternative Energy Sources II*, *Solar Energy I*, 101-110, (1979).
- 3) K. Kanayama and H. Baba, analysis and Experiment of the Performance of a Flat-Plate Solar Collector Considering the Wavelength Dependency, *Solar and Wind Technology*, **6**-1, 51-58(1989).
- 4) K. Kanayama and H. Baba, Transmittance of Distilled Water and Sodium-Chloride-Water Solution, *Journal of Solar Energy Engineering*, **110 May**, 113-119 (1988).
- 5) K. Kanayama, H. Baba and N. Endoh, Measurement of the Spectral Transmittance of Four kinds of Salt Water Solution, *Proceeding of the Fourth Asian Thermophysical Properties Conference*, (Sep.-1995), 381-384, Bejin.
- 6) Xiang-yi LI, K. Kanayama, H. Baba et. all, Experiment Indoors on the Performance of a Solar Pond under Solar Simulator, *Journal of Japan Solar Energy Society*, **24**-6(1998), 49-54.
- 7) H. Baba, K. Kanayama, N. Endoh and H. Kanazawa, Measurement of Spectral Insolation and Processing, the Data for Solar Energy Utilization, (1<sup>st</sup> Report, Comparison of Spectral Insolation Based on Bird's Model), *J. Trans. ASME*, (**62**-599B), 1996-7, 2847-2853.
- 8) H. Baba, K. Kanayama, N. Endoh and H. Kanazawa, Measurement of Spectral Insolation and Processing, the Data for Solar Energy Utilization, (1<sup>2nd</sup> Report, Arrangement of Spectral Insolation Ranked by Normalization), *J. Trans. ASME*, (**63**-605B), 1997-1, 299-305.
- 9) H. Baba, K. Kanayama, N. Endoh, Estimation of Spectral Solar Radiation Based on Global Insolation and Characteristics of Spectral Solar Radiation on a tilt surface, *JSME/JWEA Joint Conference* (1996), 257, Sakata.
- 10) NEDO, Solar spectral irradiance database(ver-1), (Nov. 2010)
- 11) H. Baba, K. Kanayama, Investigation on spectral solar radiation for all weather condition –Distribution of spectral solar radiation on the fine and the cloudy days-, *JSME/JWEA Joint Conference* (2011), 201, Wakkanai.
- 12) H. Baba, K. Kanayama, Investigation on spectral solar radiation for all weather condition –Analysis on the spectral distribution of solar radiation through one year-, *JSME/JWEA Joint Conference* (2012), 401, Kitakyusyu.
- 13) H. Baba, K. Kanayama, Investigation on spectral solar radiation for all weather condition –Effect of solar altitude and weather conditions on the spectral solar radiation-, *JSME/JWEA Joint Conference* (2013), 531, Naha.
- 14) H. Baba, K. Kanayama, Investigation on spectral solar radiation for all weather condition –The spectral solar radiation assumed from solar altitude and weather conditions-, *JSME/JWEA Joint Conference* (2014), 317, Iwaki.
- 15) H. Baba, K. Kanayama, Investigation on spectral solar radiation for all weather condition –The spectral solar radiation simulated by Bird's model-, *JSME/JWEA Joint Conference* (2015), 217, Miyazaki.
- 16) H. Baba, K. Kanayama, Investigation on spectral solar radiation for all weather condition –A comparison among the coefficient to estimate to the spectral solar irradiance on four observations -, *JSME/JWEA Joint Conference* (2016), 125, Matsuyama.
- 17) NEDO HP (accessed December 4<sup>th</sup> 2016), <http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>
- 18) H. Baba, K. Kanayama, Investigation on spectral solar radiation for all weather condition –The characteristics of a horizontal total S. R. on the five points due to VER-2-, *JSME/JWEA Joint Conference* (2017), 75, Nagaoka.
- 19) K. Soga, Simplified Estimation Method of spectral solar radiation under all weather conditions, *JSME/JWEA Joint Conference* (2014), 321, Iwaki.
- 20) S. Oke, K. Hoashi, and M. Yamamoto, A simple model using Global Irradiance for Estimate of solar spectral irradiance in any place, *Journal of Japan Solar Energy Society*, **42**(3), 37-43, (2016).
- 21) A. Itagaki, J. Sasaki and K. Utsunomiya, Development of an estimate for spectral irradiance from meteorological data, *Journal of Japan Solar Energy Society*, **43**(2), 49-58,(2017).
- 22) T. Kobayashi, H. Tamura, A. Hashimoto and H. Hiraguchi, Theoretical studies of the solar spectral irradiance on arbitrary oriented plane for various meteorological conditions, *Journal of Japan Solar Energy Society*, **41**(5), 53-65,(2015).
- 23) T. Kobayashi, H. Tamura, K. Nishizawa and H. Hiromaru, Spectral irradiance simulations for various atmospheric conditions, *JSES/JWEA Joint Conference* (2014), 325, Iwaki.
- 24) T. Katoh, Pyranometer principle and structure, *Journal of Japan Solar Energy Society*, **39**(3), 11-14,(2013).