

Estimation of the spectral solar irradiance by using total solar radiation, sunshine ratio and solar altitude – Characteristics of the spectral solar irradiance under non-rainfalling weather conditions –

Hiromu BABA^{*1‡}Kimio KANAYAMA^{*2}

全天日射量, 日照率及び太陽高度による 分光日射量の推定 – 無降水天候下における分光日射量の特徴 –

馬場 弘^{*1‡}金山 公夫^{*2}

Abstract

Based on the spectral irradiance database (ver-3) for all weather conditions published by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), the relationships among spectral irradiance, total solar radiation, sunshine rate, and solar altitude were investigated. These data are recorded by Japan Weather Association (JWA) every 10 minutes from sunrise to sunset. The data processing method is the same as before report. For each of the five stations (Naganuma, Tsukuba, Gifu, Tosu and Okinoerabu), the spectral solar radiation was estimated by using normalized spectral solar radiation ($HYSt$), weather factor (F_w), and peak wavelength spectral insolation $I_p(\lambda_p)$. The peak wavelength spectral solar radiation (I_p) is estimated from the total solar radiation (HQH) using a regression equation. As a result, under non-rainfalling weather conditions, the estimated of the spectral solar radiation and the estimated errors for twelve months at five stations were clarified.

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

分光日射特性は太陽エネルギー利用の根幹をなす重要な特性である。しかしながら分光日射特性を測定するためには高価で精密な分光器が必要であり, 天体観測, 大気における光の吸収, 散乱現象, 植物の光合成作用の解明, 人工衛星によるリモートセンシングなど, 高度な物理的機構の研究に用いられて来た。

一方, 季節, 時間, 天候によって常に変動する分光日射量を全天候下において観測する事が出来る分光放射計¹⁾が開発された事から, (国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) は (一財)日本気象協会に日射スペクトルの連続観測を委託し, 2010年12月以降, 一連の日射スペクトルデータ²⁻⁴⁾が公開されて来た。同データベース (VER-2)²⁾を用いて, 板垣⁵⁾らは高度な統計的手段を駆使してエアマス, 可降水量, 散乱比, 晴天指数等を考慮した日射スペクトルモデルを作成し長沼, つくば, 岐阜,

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

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

*2 Prof. Em. Kitami Institute of Technology

Received: June 10 2022, Accepted: September 2 2022

*1 元北見工業大学 (〒090-0804 北見市桜町 6-42)

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

*2 北見工業大学名誉教授

(原稿受付: 2022年6月10日, 受理日: 2022年9月2日)

鳥栖及び沖永良部の 5 地点について、推定値と観測値を比較検討している。曾我⁶⁾は分光放射計を用いて鹿児島における日射スペクトルを観測しエアマス、晴天指数等をパラメータとして、詳細な検討を行っている。著者らはこれまで行ってきた太陽エネルギー利用の一連の研究経験⁷⁾から、公開された日射スペクトルデータベース⁴⁾及びアメダスデータ⁸⁾を用いて分光日射量、全天日射量、降水量、日照率及び太陽高度の関係について報告⁹⁻¹¹⁾を行って来た。本報告では前報⁹⁻¹¹⁾の結果をふまえて、全天候下に於ける日射スペクトルの推定を、全天日射量、日照率、太陽高度及び降水量から容易に推定する方法を述べる。但し、降雨時のデータ数は統計解析を行うには少なく、日射量も小さい事から、降雨時の分光日射量を推定する記述は省略した。この方法を用いて推定した 5 地点の日射スペクトルの月平均誤差率 $ERRM(M)$ は岐阜の 7 月の 3.9% を最小に、長沼の 1 月が最大値、9.0% を示した。

2. 観測データとその処理

NEDO から公開された日射スペクトルデータベースに関する詳細は板垣ら⁵⁾の論文に紹介されており省略する。日射スペクトル ($W/(m^2\mu m)$) は 1 日毎に纏めた分光データファイルに 10 分毎に、波長 350~1700 nm、波長間隔 1nm で収録されている。気象データファイルには地点、年月日、時間に続いて、日照時間 (s)、水平面日射強度 (W/m^2) 等 22 項目のデータが 10 分毎に収録されている。これらのファイルから必要データを毎正時の水平面全天分光日射量 $HX(\lambda, IT, IJ)$ ($Wh/(m^2\mu m)$)、水平面全天日射量 $HQH(IT, IJ)$ (Wh/m^2)、日照率 $R_{ss}(IT, IJ)$ (-)、平均太陽高度 $sh(IT, IJ)$ ($^\circ$) 及び降水量 $P_{rep}(IT, IJ)$ (mm/h) の関係を整理した。但し降水量のデータはアメダスに困った。データは観測年にかかわらず、各月毎に纏めて整理した。データ処理の手法は前報⁹⁻¹¹⁾と同じであるが、日射スペクトル ($W/(m^2\mu m)$) や日射強度 (W/m^2) 等の瞬時値から 1 時間の平均値である $HX(\lambda, IT, IJ)$ 、 $HQH(IT, IJ)$ 及び $sh(IT, IJ)$ 等は、観測・記録されるデータを N 時から (N+1) 時迄の 1 時間に、7 個ある 10 分毎のデータから平均値を求める。一方、積算データとして水平面全天日射量の 10 分間積算日射量 (kJ/m^2)、日照時間 (s) 及び降水量 (mm) は、同時刻内での積算データを 6 個合計し、単位換算等を行って積算全天日射量 $HQHJ(IT, IJ)$ (Wh/m^2)、日照率 $R_{ss}(IT, IJ)$ (-) とした。降水量 $P_{rep}(IT, IJ)$ は 1 時間毎の値でありそのまま用いた。全天日射量の平均値と積算値の違いを $R_{hij}(IT, IJ) = HQH(IT, IJ) / HQHJ(IT, IJ)$ で評価し、全天日射比と呼称した。また水平面全天分光日射量を簡略化して分光日射量と呼称した。

分光日射量 (= 日射スペクトル) $HX(\lambda, IT, IJ)$ の波長積分値 $S_HX(IT, IJ)$ は式(1)で与えた。

$$S_HX(IT, IJ) = \int_{350}^{1700} HX(\lambda, IT, IJ) d\lambda$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{IR=1}^{1351} (HX(IR) + HX(IR + 1)) d\lambda \quad (1)$$

$$d\lambda = \lambda(IR + 1) - \lambda(IR) \quad (2)$$

収録されている日射スペクトルの単位は ($W/(m^2\mu m)$) であり、波長 λ (IR) は (nm) 単位である事から、式(2)の $d\lambda$ は 1nm、即ち $0.001\mu m$ となる。

ここで $R_RX(IT, IJ) = S_HX(IT, IJ) / HQH(IT, IJ)$ とおいてこれを分光日射比と呼称する。 $R_RX(IT, IJ)$ は全天日射量から分光日射量を推定した時に与える誤差の要因の一つである。日数を示す変数 IJ は 2012 年の各月の初日を 1 として 2015 年の各月の末日迄、通し番号で与えた。以降、 λ, IT, IJ は適宜省略する。

なお 5 地点の各月について得られた特性は、地点により気象条件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概略一致している。

3. 結果及び考察

3.1 全天日射量、分光日射量、日照率及び太陽高度の関係

解析は 5 地点の各月について行ったが、全般的特性は類似している事から、地点は岐阜、季節は 6 月と 12 月について示す。始めに全天日射量と分光日射量は同一の物理量であり分光日射量の波長積分値 $S_HX(IT)$ は全天日射量 $HQH(IT)$ と 1 対 1 に対応する。従って全天候下における 1 日の時刻変化を $S_HX(IT)$ と $HQH(IT)$ の関係で説明し、

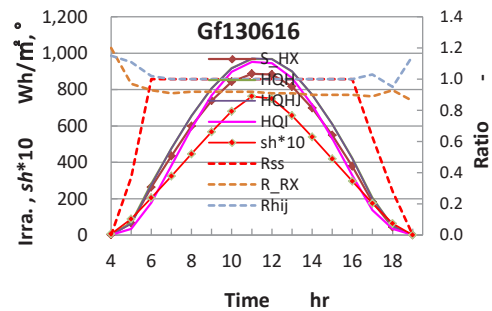


Fig.1 Hourly change of global solar radiation ($HQH, HQHJ, S_HX$), solar altitude sh , sunshine ratio R_{ss} , insolation ratio R_{hij} and spectral insolation ratio R_RX at Gifu in June 16, 2013 (Fine sky day).

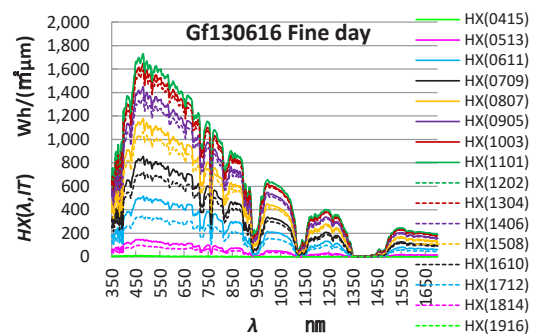


Fig.2 Hourly change of solar spectra at Gifu in June, 16, 2013 (Fine sky day).

次いで分光日射量の時刻変化を波長特性と共に示した。

図1は快晴日の例として、2013年6月16日の各日射量 HQH , $HQHJ$, S_HX , HQI , 太陽高度 sh , 日照率 R_{ss} , 分光日射比 R_RX , 全日射比 R_{hij} の時刻変化を日の出から日没迄を示す。傾斜面全日射量 HQI は、傾斜角 30° で設置されており HQI の季節変化の影響を現す参考値として提示した。この日は平均日射量 $HQH(IT)$, 積算日射量 $HQHJ(IT)$, 波長積分日射量 $S_HX(IT)$ は4~11時迄と12~19時迄、時刻変化に伴って午前と午後で時刻対称な変化を示す。これは岐阜の経度が $136^\circ 44'$ で日本標準時の 135° より $1^\circ 44'$ 東寄りであり南中時刻は11時53分で午前と午後の太陽高度が $sh(11)=76.3^\circ$, $sh(12)=75.0^\circ$, $sh(10)=68.1^\circ$, $sh(13)=65.7^\circ \dots sh(5)=8.9^\circ$, $sh(18)=6.4^\circ$ と南中時を境に午前と午後で時刻対称になり、 $sh(IT)$ の時刻変化に従って日射量 $HQH(IT)$, $S_HX(IT)$ 等も変化していく。

図2は同日の分光日射量 $HX(\lambda, IT)$ 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ために凡例に4桁の数値を用いた。上2桁が時刻を、下2桁が曲線の大小順を示す。 $HX(IT)$ は11時に最大値を示し、これを $HX(1101)$, 2番目の12時を $HX(1202)$, 以下同様に4時~19時までを表記した。更に、11時と12時は緑色、以下、(10:13)は茶色、(9:14)は紫色、(8:15)は黄土色、(7:16)は黒色、(6:17)は青色、(5:18)は桃色、(4:19)は黄緑色に色分けし、午前を実線、午後を破線とした。晴天日の分光日射量 $HX(\lambda, IT)$ は図1で示した $sh(IT)$ の時刻変化に従って推移する事が分かる。この特性は全波長域 ($\lambda: 350 \sim 1700 \text{ nm}$) に亘って変わらない。

図3は2012年6月20日曇天日について、日射量 HQH , $HQHJ$, S_HX , HQI , 日照率 R_{ss} , 分光日射比 R_RX 及び全日射比 R_{hij} の時刻変化を示す。この日は4時から10時迄と12時、13時の日照率は $R_{ss}=0(-)$, そして11時の $R_{ss}(11)=0.06$, 以下、 $R_{ss}(14)=0.04$, $R_{ss}(15)=0.19$, $R_{ss}(16)=0.40$, $R_{ss}(17)=0.13$, $R_{ss}(18)=0.18$ として $R_{ss}(19)=0(-)$ を示す。この時、各日射量 $HQH(IT)$, $HQHJ(IT)$, $S_HX(IT)$ の時刻変化は $HQH(IT)$ に追随しているが、詳細に見ると日差しが有る11時及び14時以降 ($R_{ss}(IT) > 0(-)$) の範囲で3種の日射量の大小関係は異なり、雲がある場合、日射量に影響する因子を R_{ss} , sh の二つに特定する事は出来ない。これは快晴日を除く晴天日についても同じである。

図4は2012年6月20日曇天日の $HX(\lambda, IT)$ を示す。日射スペクトル形状は図2の快晴時と比較して全体に小さく、特に $\lambda > 950 \text{ nm}$ の波長域での $HX(\lambda, IT)$ が小さい。

図5は12月の快晴日の例として、2012年12月13日の各日射量、日照率等を示す。12月は $sh \leq 31^\circ$ であり、傾斜面日射量 $HQI(IT)$ が水平面日射量 $HQH(IT)$ の1.8倍となり、 sh が低い冬期の傾斜面効果を示す一例である。

図6は2012年12月13日の $HX(\lambda, IT)$ の時刻変化を示す。 $HX(11)$ と $HX(12)$ のスペクトルは互いに接近しているが、 $HX(10)$ と $HX(13)$, $HX(9)$ と $HX(14)$ と時刻が南中時刻

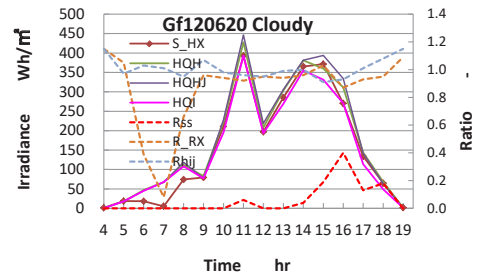


Fig.3 Hourly change of HQH , $HQHJ$, HQI , S_HX , R_{ss} , R_{hij} and R_RX at Gifu in June 20, 2012 (Cloudy day).

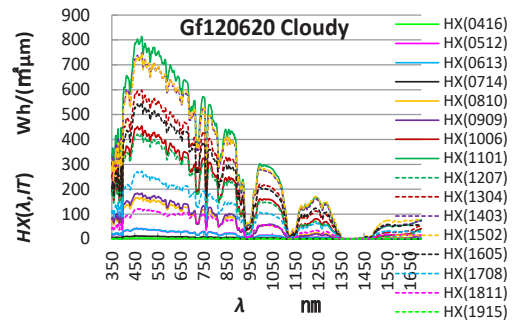


Fig. 4 Hourly change of solar spectra at Gifu in June, 20, 2012 (Cloudy day).

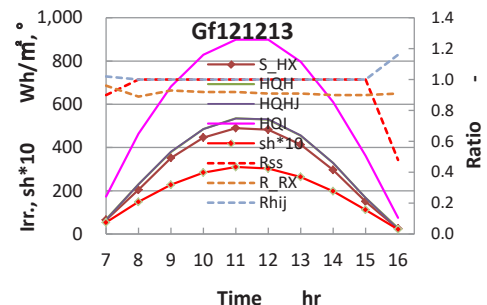


Fig.5 Hourly change of HQH , $HQHJ$, HQI , sh , S_HX , R_{ss} , R_{hij} and R_RX at Gifu in December 13, 2012 (Fine sky day).

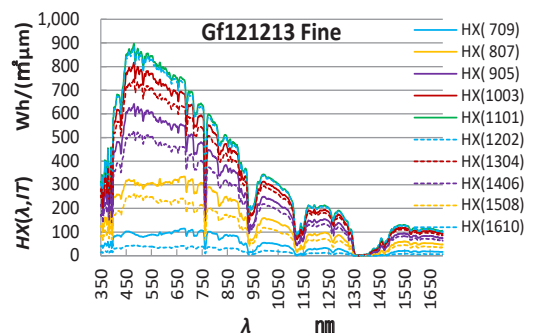
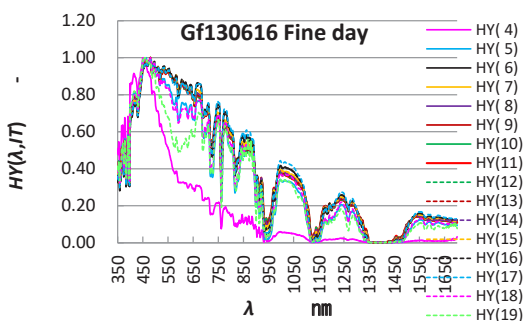
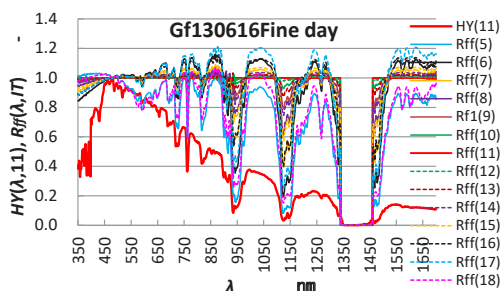


Fig.6 Hourly change of solar spectra at Gifu in December 13, 2012 (Fine sky day).

から離れると、時刻に因る $HX(\lambda, IT)$ の差は大きくなる。図2, 4, 6に示した様に、分光日射量は各時刻の日射量と天候状態の二つの因子によって変化する。種々の天候下におけるスペクトル形状を比較する際、日射量の影響を避けるために、各時刻の日射スペクトルを同時刻のピーク波長日射量 $I_p(\lambda_p, IT)$ で無次元化して規格化分光日

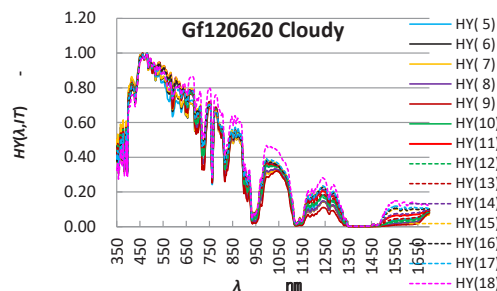


(a) Hourly change of normalized spectra $HY(\lambda, IT)$

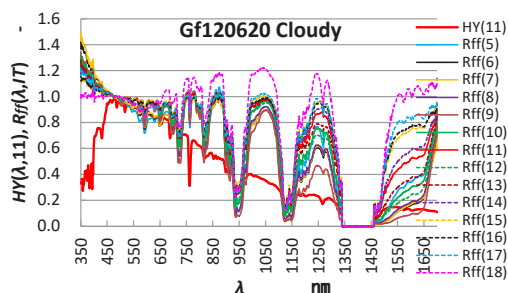


(b) Hourly change of spectra ratio $R_{ff}(\lambda, IT)$, and normalized spectrum $HY(11)$.

Fig.7 Hourly change of normalized spectra $HY(IT)$ and $R_{ff}(IT)$ at observation station of Gifu in June 16, 2013 (Fine sky day).



(a) Hourly change of normalized spectra $HY(\lambda, IT)$



(b) Hourly change of spectra ratio $R_{ff}(\lambda, IT)$, and normalized spectrum $HY(11)$.

Fig.8 Hourly change of normalized spectra $HY(IT)$, and $R_{ff}(IT)$ at observation station of Gifu in June 20, 2012 (Cloudy day).

射比 $HY(\lambda, IT)$ を求めた。次に、1 日を通して雲が無い安定した晴天日の最大日射量を示す時刻(南中時を含む時刻(=IT_s))の $HY(IT)$ と比較する事によって日射スペクトルの波長特性を簡単に把握する事が出来る。

図 7 は 2013 年 6 月 16 日の時刻毎の規格化分光日射比 $HY(\lambda, IT)$ (図 7(a)) と、これらを同日の最大日射量を示す 11 時の $HY(11)$ で除した分光日射特性比 $R_{ff}(\lambda, IT)$ を図 7(b) に示す。ここで波長域 1340~1460nm の $HX(\lambda, IT)$ はほぼ 0 Wh/(m²μm) である事から、この波長域の $R_{ff}(\lambda, IT)$ を 0 とした。 $I_p(\lambda, IT)$ で規格化した $HY(\lambda, IT)$ は $HX(\lambda, IT)$ から各時刻の日射量の影響を除く事が出来るが、 $HY(\lambda, IT)$ の時刻変化に伴う波長特性への影響を把握出来ない(図 7(a))。一方、図 7(b) の $R_{ff}(\lambda, IT)$ は $HX(\lambda, IT)$ の時刻変化に伴う波長特性への影響が明確に現れる。

図 8 は、図 4 の曇天日について、図 7 と同じ処理をした結果を示す。図 8(b) の基準となる $HY(\lambda, IT_s)$ は図 7(b) の 2013 年 6 月 16 日 11 時の $HY(\lambda, 11)$ を用いた。図 7(b) と図 8(b) を比較すると晴天日と曇天日の日射スペクトルの違いが明確に現れる。即ち $R_{ff}(\lambda, IT)$ は分光日射量の時刻変化と天候変化の影響を示す指標として有効であり、これを分光日射特性比と呼称した。

図 7 及び図 8 に基づいて、月毎に 1 日を通して安定した晴天日を原則として 3 日選び、選択した日の南中時を含む時刻とその前後 1 時間、計 3 時間の規格化日射スペクトルの平均値を求めて、当該月の標準晴天日の規格化

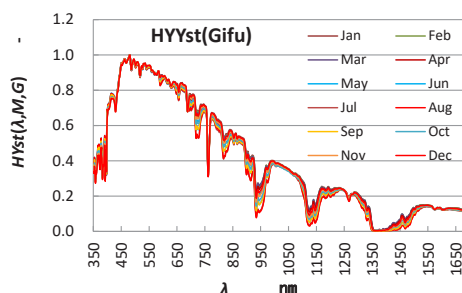


Fig.9 Normalized standard solar spectra ratio in each month at Gifu.

分光日射比(略称：標準分光日射比)と呼称して記号 $HY_{st}(\lambda, M, L)$ で表示した。ここで M : 月, L : 地点である。

図 9 は岐阜の 1 月~12 月の標準分光日射比 $HY_{st}(\lambda, M, L)$ を示す。各月間にスペクトルの大きな違いは見られないが、この僅かの違いは各月の水蒸気量、エアロゾル等の大気状態の違いを示す因子の差として重要な意味を持つが、ここでは考察の対象から除外した。

規格化分光日射比 $HY(\lambda, IT)$ から元の分光日射量 $HX(\lambda, IT)$ に戻す場合、全天日射量 $HQH(IT)$ と $I_p(\lambda, IT)$ の関係を求めておく必要がある。

図 10 は岐阜の 6 月について、3 種の日射量 HQH , S_{HX} , I_p を S_{HX} に着目して降順に並べて示す。同時に天候因子である日照率 R_{ss} , 降水量 P_{rtp} とピーク波長 λ_p も表示した。 S_{HX} に着目した理由は分光日射量に関する有意な観測データが存在する日時に限って解析の対象とした為である。同時に S_{HX} が 50Wh/m²未満のデータは解析の対象

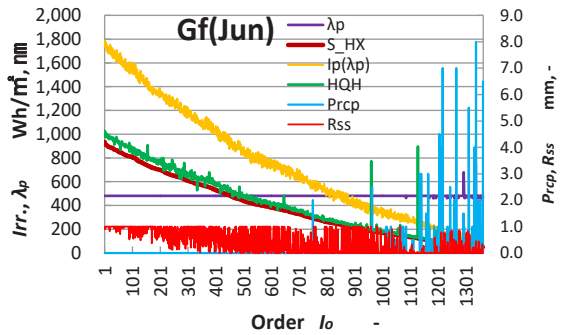


Fig.10 Relation among HQH , $I_p(\lambda_p)$, S_{HX} , λ_p , R_{ss} , P_{rcp} when S_{HX} ordered from large to small, at Gifu in June.

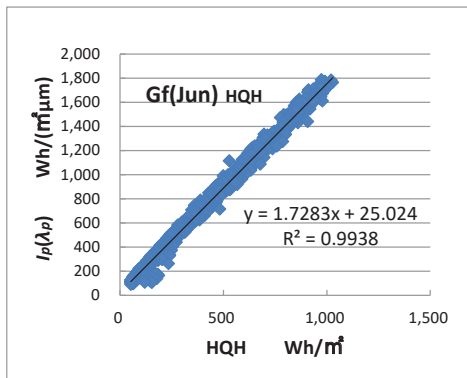


Fig.11 Scattered plots of HQH versus $I_p(\lambda_p)$ at Gifu in June, 2012, 2013, 2014 and 2015.

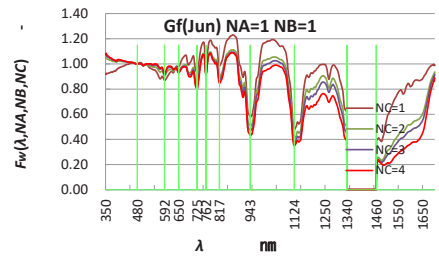
から除外した。 S_{HX} が最大である序列 1 番 ($I_0=1$) は $I_f=94$ (2015/6/4), $IT=11$ (時), $S_{HX}(I_0=1)=934.2 \text{ Wh/m}^2$, $HQH(I_0=1)=1028.4 \text{ Wh/m}^2$ であり, 序列最終番 ($I_0=1362$) は, $I_f=111$ (2015/6/21), $IT=9$ (時), $S_{HX}(1362)=50.0 \text{ Wh/m}^2$, $HQH(1362)=52.1 \text{ Wh/m}^2$ である。 S_{HX} は波長域が 350~1700 nm であり HQH より 5~8% 小さい。 I_p , HQH , 及び S_{HX} は滑らかな曲線を示す。 $I_0=960$ と 1135 に見られる HQH の異常値は 2013/6/1 の 14 時及び 13 時に分光日射データが一部欠測した事による影響である。 図 10 は関連するデータを俯瞰的に把握出来る。 他の月にも同様の関係が見られる。 なお I_p の単位は $\text{Wh}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$ である。

図 11 は 6 月の HQH と I_p の関係を散布図にして示す。 両者には強い一次の相関関係が見られ決定係数 R^2 は 0.994 の高い値を示す。 回帰方程式の勾配 a は 1.728, Y の切片 b は 25.024 である。

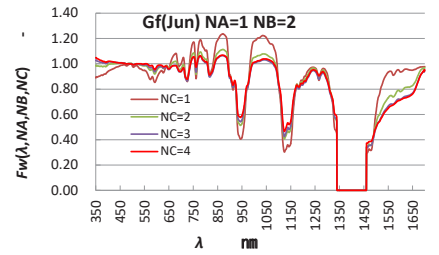
図 7(b) 及び図 8(b) で示した様に, 分光日射特性比 $R_{ff}(IT)$ が分光日射量に与える気象条件と太陽高度の影響を顕著に示す事から, 各月の 1 時間毎に纏めた分光日射比 $HY(\lambda, IT, I_f)$ と同月の, 標準晴天日の $HY_{st}(\lambda, M, L)$ との比 $R_{ff}(\lambda, IT, I_f)$ を求めた。 これを以下に示す条件の基に整理して, 天候係数 $F_w(\lambda, NA, NB, NC)$ と定義した。

基準となる晴天時スペクトルは図 9 に示した標準分光日射比 $HY_{st}(\lambda, Jun, Gf)$ で 6 月の無次元分光日射量 $HY(\lambda, IT_{all})$ を除した $R_{ff}(\lambda, IT_{all})$ を下記に示す天候条件もとに整理したものである。

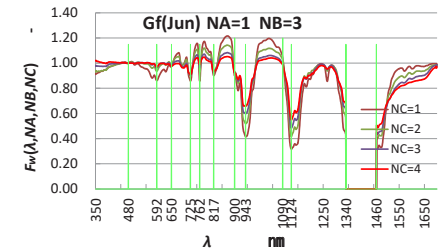
① 降水条件: 降水無し $NA=1$, 降水時: $NA=2$



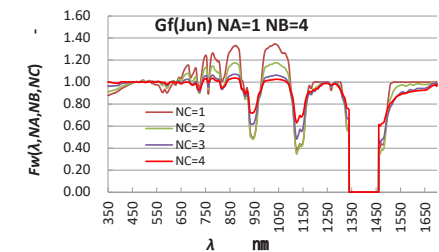
(a) In case of $NA=1, NB=1$ (Cloudy : $R_{ss}=0$)



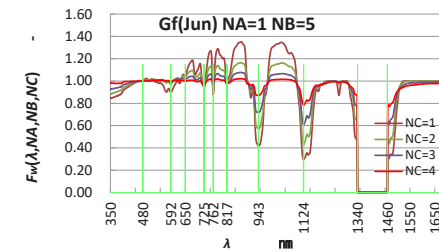
(b) In case of $NA=1, NB=2$ (Cloudy : $0 < R_{ss} \leq 0.2$)



(c) In case of $NA=1, NB=3$ (Fine : $0.2 < R_{ss} \leq 0.5$)



(d) In case of $NA=1, NB=4$ (Fine $0.5 < R_{ss} \leq 0.7$)



(e) In case of $NA=1, NB=5$ (Fine : $R_{ss} > 0.7$)

Fig.12 Weather factor on June at Gifu.

- ② 日照率 R_{ss} : $NB=1$ ($R_{ss}=0$), $NB=2$ ($0 < R_{ss} \leq 0.2$), $NB=3$ ($0.2 < R_{ss} \leq 0.5$), $NB=4$ ($0.5 < R_{ss} \leq 0.7$), $NB=5$ ($R_{ss} > 0.7$) の 5 段階
- ③ 太陽高度 sh : $NC=1$ ($sh \leq 15^\circ$)

$NC=2$ ($15^\circ < sh \leq 30^\circ$), $NC=3$ ($30^\circ < sh \leq 45^\circ$)
 $NC=4$ ($sh > 45^\circ$) の4段階

図12は岐阜の6月の天候係数 $F_w(\lambda, NA, NB, NC)$ を示す。図12(a), (c)及び(e)の横軸には吸収帯等の波長を表示した。図12(a)は直達日射量がない曇天時 ($R_{ss}=0$) の $F_w(\lambda, 1, 1, NC)$ を $NC=1\sim 4$ の条件下で示す。 F_w は大気に含まれるオゾン, 水蒸気, 炭酸ガス等の吸収性気体により, 波長 λ が 592nm(O_3), 650, 725nm(H_2O), 762nm(O_2), 817, 943, 1124nm(H_2O), 1350nm(H_2O, CO_2)に吸収帯がある。波長650~1124nmにある透過帯では F_w は1.0より大きい値を示し, 波長域1124~1340nmにある透過帯では F_w は1.0を超える事はない。また, 350~480nmの波長域では, 波長350nmにおいて F_w は0.92($NC=1$), 1.06($NC=2$), 1.07

($NC=3$), 1.08($NC=4$), そして $\lambda = \lambda_p (=480nm)$ で1.0となる。なお, $NC=1$ ($sh \leq 15^\circ$)区分されるデータは朝夕の sh が低い時間帯にあり, データに疑問値を示すリマーク値3が付与されている場合が多く, 信頼性に欠ける。また, 降雨時の天候係数 $F_w(\lambda, 2, NB, NC)$ は, 降水時のデータ数が統計解析には少なく, 日射量も小さいことから省略した。

図12(b)は $NB=2$ ($0 < R_{ss} \leq 0.2$) で僅かに直達日射成分がある曇天時の $F_w(\lambda, 1, 2, NC)$ を示す。各吸収帯の吸収割合は図12(a)と比較して同程度の値を示す。波長帯350~480nmに見られた F_w の増加現象も殆ど見られない。

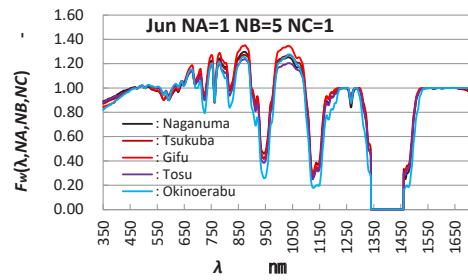
図12(c)は $NB=3$ ($0.2 < R_{ss} \leq 0.5$) の $F_w(\lambda, 1, 3, NC)$ を示す。 $NC=1$ では波長域 λ が 350~480nmの天候係数 F_w は $\lambda = 350nm$ で0.91($NC=1$)~1.02($NC=4$), $\lambda_p = 480nm$ で $F_w = 1.0$ となる。 λ が 650~1124nmの間に見られる透過帯では F_w は1~1.2であり, $NC=1$ の時, F_w は値が大きく, $NC=2, 3$ 及び4と sh が高くなるに伴って透過帯に見られる F_w のそれぞれのピーク値は1に近づく。

図12(d) ($NB=4$), 図12(e) ($NB=5$)と $F_w(\lambda, 1, NB, NC)$ は NB が増すに伴って晴天時の特性が顕著に表れる。透過帯における F_w の特性に大きな違いはみられない。

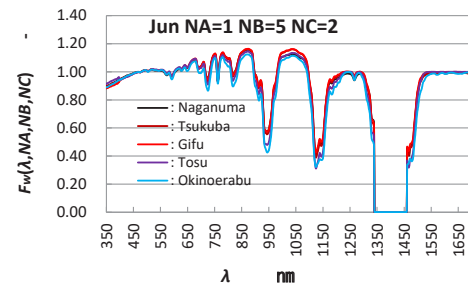
図13は長沼から沖永良部まで5地点の F_w を6月について示す。天候条件は $NB=5$ の晴天時で $F_w(\lambda, 1, 5, NC)$, NC は1~4である。沖永良部が他の4地点より吸収帯が少し深い事を除いて, 全般に大きな地域差は見られない。他の月に付いても同様の傾向を示す。

3.2 全天日射量 HQH , 日照率 R_{ss} , 太陽高度 sh による分光日射量の推定と推定誤差

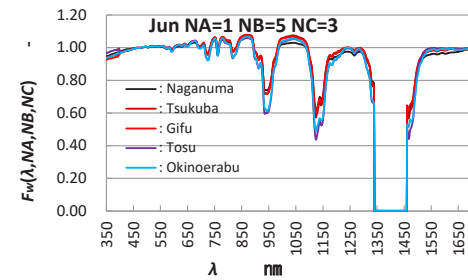
以上の結果を基に任意の日時の分光日射量を全天日射量, 日照率 R_{ss} 及び太陽高度 sh から推定する事が出来る。図9で示す標準分光日射比 $HY_{st}(\lambda, M, L)$ に, 図11で示した $HQH(IT)$ と $I_p(\lambda, IT)$ の回帰式から推定した I_p を求めて $HY_{st}(\lambda, M, L)$ に I_p を掛ける事によって任意日時 (IT, IJ)の晴天時の分光日射量の推定値 $SS(\lambda, IT, IJ)$ が求まる。これに天候係数 $F_w(\lambda, 1, NB, NC)$ を掛ける事によって目的とする日時 (IT, IJ)の分光日射量の推定値 $SSS(\lambda, IT, IJ)$ が求められる。 NB, NC は目的とする日時 (IT, IJ)の $R_{ss}(IT, IJ)$ と $sh(IT, IJ)$ から分光日射量の推



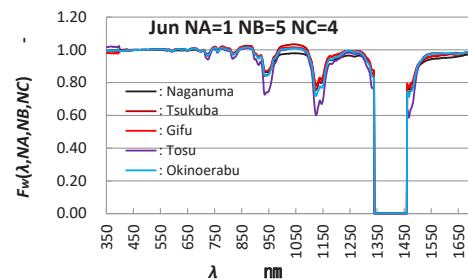
(a) In case of $NA=1, NB=5, NC=1$ ($R_{ss} > 0.7, sh < 15^\circ$)



(b) In case of $NA=1, NB=5, NC=2$ ($15^\circ \leq sh < 30^\circ$)



(c) In case of $NA=1, NB=5, NC=3$ ($30^\circ \leq sh < 45^\circ$)



(d) In case of $NA=1, NB=5, NC=4$ ($sh \geq 45^\circ$)

Fig.13 Comparison of weather factor F_w at five observation stations.

定値 $SSS(\lambda, IT, IJ)$ が求められる。

これを数式によって示すと以下ようになる。

$$I_p(IT, IJ) = a * HQH(IT, IJ) + b \quad (3)$$

ここで a, b は表-1から月, 地点を選ぶ

$$SSS(\lambda, IT, IJ) = SS(\lambda, IT, IJ)$$

$$* F_w(\lambda, 1, NB(IT, IJ), NC(IT, IJ)) \quad (4)$$

ここで推定誤差を以下の式で定義した。日付を示す変数 IJ は省略した。

Table-1 Coefficients a and b of regression equation, for to estimate I_p from HQH and the coefficient of determination R^2 at five observation stations.

	Naganuma			Tsukuba			Gifu			Tosu			Okinoerabu		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
Jan	1.5232	49.416	0.9304	1.6419	2.091	0.9849	1.5959	11.252	0.9845	1.5757	18.626	0.9861	1.5866	25.814	0.9841
Feb	1.5786	46.813	0.9465	1.5742	41.513	0.9875	1.5956	16.843	0.9895	1.5732	36.126	0.9874	1.6241	33.709	0.9874
Mar	1.6193	47.418	0.9733	1.6451	19.756	0.9927	1.6022	15.798	0.9911	1.6153	18.188	0.9904	1.6075	34.619	0.9895
Apr	1.6065	27.038	0.9858	1.6699	25.596	0.9915	1.6344	17.795	0.9932	1.6420	27.207	0.9906	1.6370	47.154	0.9886
May	1.6727	17.593	0.9924	1.7230	18.526	0.9906	1.6741	13.519	0.9935	1.6868	21.887	0.9932	1.6865	44.480	0.9873
Jun	1.7079	22.249	0.9930	1.7669	30.847	0.9923	1.7283	25.024	0.9938	1.7424	39.891	0.9907	1.7579	36.803	0.9902
Jul	1.7310	19.792	0.9933	1.8136	22.369	0.9928	1.7616	25.516	0.9941	1.8010	31.126	0.9912	1.7214	31.225	0.9635
Aug	1.7286	18.270	0.9928	1.8147	19.299	0.9916	1.7611	21.788	0.9936	1.7909	29.269	0.9941	1.7657	16.917	0.9856
Sep	1.6876	18.598	0.9909	1.7885	26.058	0.9900	1.7176	20.260	0.9936	1.7431	28.345	0.9933	1.7287	20.394	0.9811
Oct	1.5902	20.442	0.9871	1.7110	23.730	0.9847	1.6913	10.564	0.9929	1.6640	24.847	0.9886	1.6827	27.067	0.9856
Nov	1.5321	28.907	0.9784	1.6364	21.903	0.9868	1.6384	20.686	0.9916	1.6191	26.280	0.9917	1.6561	21.867	0.9812
Dec	1.5202	43.544	0.9620	1.6029	17.097	0.9903	1.6051	16.346	0.9897	1.5606	27.522	0.9879	1.5773	28.522	0.9853

$$Err(\lambda, IT) = (SSS(\lambda, IT) - HX(\lambda, IT)) * 100 / HX(\lambda, IT)$$

$$= (SSS(IR, IT) - HX(IR, IT)) * 100 / HX(IR, IT) \quad (5)$$

$$Err1(IT) = \sum \{ |Err(IR, IT)| \} / 1230 \quad (6)$$

$$Err2(IT) = |T_SSS(IT) - S_XH(IT)| * 100 / S_XH(IT) \quad (7)$$

ここで $T_SSS(IT)$ は式(8)から求めた。誤差率の単位は%。

$$T_SSS(IT, IJ) = \int_{350}^{1700} SSS(\lambda, IT, IJ) d\lambda$$

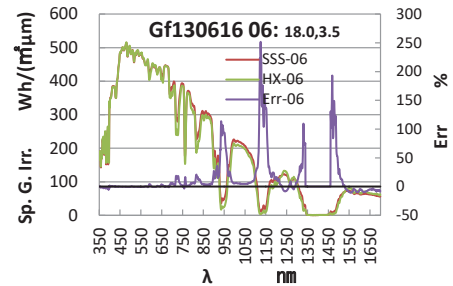
$$= \frac{1}{2} \sum_{IR=1}^{IR=1351} (SSS(IR) + SSS(IR + 1)) d\lambda \quad (8)$$

(2)式と同様に

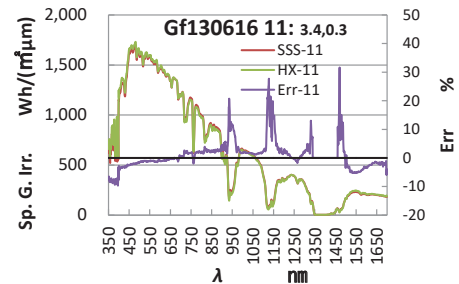
$$d\lambda = \lambda(IR + 1) - \lambda(IR) \quad (9)$$

図 14(a), (b), (c) は 2013 年 6 月 16 日 ($I_f=46$) 快晴日、岐阜の 6 時、11 時及び 16 時の分光日射量の観測値 $HX(\lambda, IT)$ と推定値 $SSS(\lambda, IT)$ 及び波長毎の誤差率 $Err(\lambda, IT)$ を示す。図の上部に示す数値は式(6)及び式(7)から求めた全波長域 350~1700nm に亘る二つの平均誤差 $Err1(IT)$, $Err2(IT)$ を示す。 $Err1(IT)$ は波長毎の推定値 $SSS(\lambda, IT)$ と観測値 $HX(\lambda, IT)$ と誤差率の平均値を示し、 $Err2(IT)$ は推定値と実測値の面積比 [波長範囲 (350~1700nm)] で求めた誤差率を示す。日付と時刻は図のタイトルに表記した。なお図 14 において $HX(\lambda, IT)$ を $HX-IT$, $SSS(\lambda, IT)$ を $SSS-IT$ そして $Err(\lambda, IT)$ を $Err-IT$ と表記した。

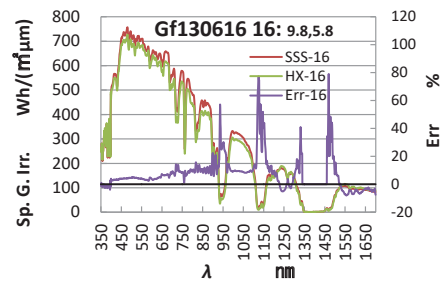
図 14(a) は早朝 6 時の観測値 $HX-06$ と推定値 $SSS-06$ 及び波長誤差 $Err-06$ を示す。 $Err-06$ は分光日射量が小さくなる吸収帯において誤差率が大きくなる傾向がある。波長、592, 725, 762, 817, 943, 1124, 1340~1460nm において 7 つの吸収帯があり、 $Err-06$ が大きくなるのは吸収帯が深くなる 817, 943, 1124nm 及び 1340~1460nm の近傍である。特に $\lambda=1124nm$ の $Err-06$ は 254%と大きく全体を表示するために Err 軸を 300%と大きく設定した事により吸収帯以外の波長域における $Err-06$ は埋没している。分光日射量のエネルギー密度が高い波長 350~900nm の $Err-06$ の平均誤差率は 3.2%, 最大誤差率は 27.1%, 最小誤差率は-5.4%であった。 λ が 943nm 及び 1124nm にある吸収帯において $Err-06$ は 114%及び 252%を示す。これは分光日射量が $HX(943)=16.6 Wh/(m^2\mu m)$, $HX(1124)=3Wh/(m^2\mu m)$ と小さいことに起因する。従ってこれらの誤差が波長積分値



(a) Time is six o'clock (6:00~7:00)



(b) Time is eleven o'clock (11:00~12:00)



(c) Time is 16 o'clock (16:00~17:00)

Fig. 14 Comparison between the measured and the estimated spectral solar radiation on horizontal plane for June 16, 6:00, 11:00 and 16:00, in 2013, at Gifu (Fine sky day).

$T_SSS(IT)$ に与える影響は小さく、全波長域に与える平均誤差率 $Err1(06)$ は 18.0%, $Err2(06)$ は 3.5%であった。

図 14(b) は南中時の 11 時について示す。日射量が大きく ($HQH=968Wh/m^2$), 波長 1124nm の吸収帯においても $HX(\lambda, IT)$ は $58.2Wh/(m^2\mu m)$ あり、 $Err(1124)$ は 27.7%と小さい。一方、350~400nm の $Err-11$ は平均値で-7.9%であり、400~450nm 平均値は-3.2%と波長 400nm において不連続な部分が見られるが、その原因は不明である。全波長域

に対する平均誤差 $Err1(11)$ は 3.4%, $Err2(11)$ は 0.3% であった。なお波長域(350~900nm)における $Err-11$ の平均誤差率は 2.2% であった。

図 14(c) は 16 時について示す。波長帯 350~900nm の平均誤差は 6.2% であり, 943nm, 1124nm の吸収帯において $Err-16$ の最大値は 57.2%, 77.4% を示す。全波長域での誤差率は $Err1(16)$, $Err2(16)$ は 9.8% 及び 5.8% である。

図 15 は 2013 年 6 月 16 日の 5 時から 17 時までの時間毎の日射量 $HQH(IT)$, $S_HX(IT)$ と推定日射量の波長積分値 $T_SSS(IT)$, 日照率 $R_{ss}(IT)$, 及び $Err1(IT)$, $Err2(IT)$ を示す。5 時から 17 時まで日射量は時刻変化と共に変化する。 $HQH(IT)$ と $S_HX(IT)$ は 11 時に 968Wh/m² と 887.1Wh/m² で 81Wh/m² の差がある。一方, $S_HX(IT)$ と $T_SSS(IT)$ の間には 5 時, 6 時及び 16 時, 17 時には両者に 7.5, 9.2, 22.2 及び 16.7Wh/m² の日射量の違いが見られるが, ほぼ 1 日を通して両者は一致している。 $Err1(IT)$ は, $HQH(IT)$ と $S_HX(IT)$ から評価した推定誤差率であり, 検出する波長範囲の違いから $Err1(IT)$ から評価した誤差率は大きくなる。また, 波長域(350~1700nm)が同じである $S_HX(IT)$ と $T_SSS(IT)$ により評価した誤差率 $Err2(IT)$ は, 早朝 5 時の日射量が小さい($S_HX(5)=66.3Wh/m^2$) 時刻の $Err2(5)$ は 11.2% で, 以降 6 時の 3.5% から 17 時の, 9.0% 迄緩やかに推移する。特に日射量の多い 8 時から 14 時迄の $Err2$ は 1.4% 以下の低い値を示す。

表-2 に同日の 5 時~17 時までの日射量 $HQH(IT)$, $S_HX(IT)$, 推定日射量の波長積分値 $T_SSS(IT)$, 日照率 $R_{ss}(IT)$ 及び推定誤差 $Err1(IT)$, $Err2(IT)$ を計算式と共に示す。

図 16 は 2013 年 6 月 30 日, 曇天日 11 時の分光日射量の観測値 $HX(\lambda, IT)$ と推定値 $SSS(\lambda, IT)$ 及び推定誤差 $Err(\lambda, IT)$ を示す。曇天時は, 日射量 $HQH(IT)$ が小さく(約 400Wh/m² 未満), 太陽高度の影響が見られない。また, 曇天日の分光日射量の時刻変化は, 雲の状況によって変化する。更に式(3)から推定するピーク波長分光日射量 $I_p(\lambda_p)$ は日射量 $HQH(IT)$ が小さい範囲では誤差が大きくなる。その結果, $SSS(\lambda, IT)$ は波長域 480~720nm のエネルギー密度が大きい範囲での誤差が生じる事から曇天時の誤差が大きくなる。他の時刻においても同様の傾向が見られる事から他の時刻の図示は省略した。

図 17 は 2013 年 6 月 30 日, 曇天日の 6 時から 17 時までの日射量(HQH, S_HX, T_SSS) と推定誤差率($Err1, Err2$) の時刻変化を示す。この日は 12 時から 14 時の日照率 R_{ss} が 0.06, 0.03, 0.47 と僅かに日射があり, 14 時は NB=3 の晴天時になる。それ以外の時刻は $R_{ss}=0$ であった。 $Err1$ は 13 時の 4.7% から 16 時の 15.5% まで時刻と無関係に変化し $Err2$ は 12 時の 0.5% から 6 時の 6.1% まで, いずれも時刻に無関係に変化している。6 時から 17 時まで, 2 種の誤差率の時刻平均値は 9.3%, 3.8% となる。

表-3 は 2013 年 6 月 30 日, 曇天日の 5 時から 17 時までの日射量と日照率及び推定誤差率を数値で示す。

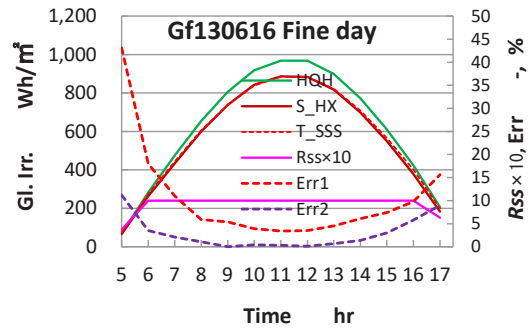


Fig.15 Hourly change of global solar radiation HQH, S_HX and T_SSS , sun shine ratio R_{ss} and estimated error $Err1, Err2$ for June 16, 2016 at Gifu.

Table-2 Relationship among estimated errors($Err1, Err2$) and observed data HQH, S_HX, R_{ss} and estimated value T_SSS in June 16, 2013 at Gifu(Fine sky day).

13/6/16	Wh/m ²			$R_{ss} \times 10$	%	
Time	HQH	S_HX	T_SSS	$R_{ss} \times 10$	$Err1$	$Err2$
5	68.7	66.3	73.7	3.7	43.1	11.2
6	283.0	263.4	272.5	10.0	18.0	3.5
7	475.9	434.6	443.8	10.0	11.0	2.1
8	655.0	599.4	606.2	10.0	5.9	1.1
9	806.0	738.7	738.5	10.0	5.4	0.0
10	918.0	843.2	839.5	10.0	3.9	0.4
11	968.0	887.1	884.6	10.0	3.4	0.3
12	967.6	883.5	884.2	10.0	3.5	0.1
13	899.1	817.1	822.5	10.0	4.5	0.7
14	771.9	698.2	707.7	10.0	6.1	1.4
15	610.9	549.5	566.1	10.0	7.4	3.0
16	423.1	378.9	401.0	10.0	9.8	5.8
17	206.4	183.3	199.9	6.3	15.6	9.0

$$Err1(IT) = \sum \text{ABS}(SSS(\lambda, IT) - HX(\lambda, IT)) / 1230$$

$$Err2(IT) = \text{ABS}(T_SSS(IT) - S_HX(IT)) / S_HX(IT)$$

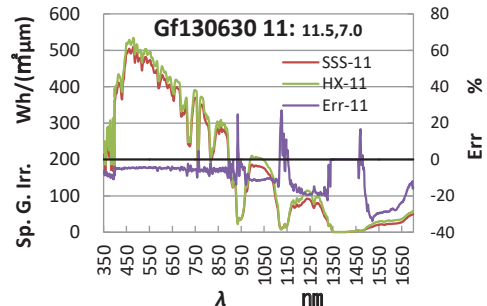


Fig.16 Comparison between the measured and the estimated spectral solar radiation on horizontal plane in June 30, 11:00, 2013, at Gifu (Cloudy day)

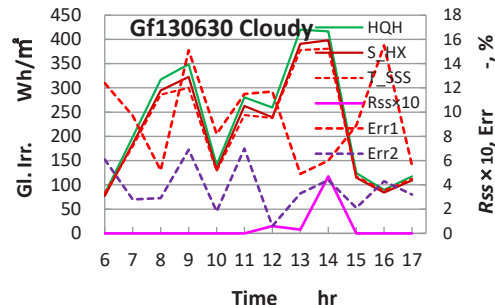


Fig.17 Hourly change of global solar radiation HQH, S_HX and T_SSS , sun shine ratio R_{ss} and estimated error $Err1, Err2$ in June 30, 2013 at Gifu. (Cloudy day).

図 18 は 2015 年 12 月 7 日快晴日の分光日射量の観測値 $HX(\lambda, IT)$ と推定値 $SSS(\lambda, IT)$ を 11 時について示す。波長毎に評価した誤差 $Err-11$ は $\lambda=943, 1124\text{nm}$ 及び 1350nm の吸収帯で最大誤差率が -28.9% ($\lambda=1470\text{nm}$) を示

Table-3 Relationship among estimated errors($Err1$, $Err2$) and observed data HQH , S_HX , R_{ss} and estimated value T_SSS at Gifu in June 30, 2013 (Cloudy day).

'13/6/30 Time	Wh/m ²			$R_{ss} \times 10$	%	
	HQH	S_HX	T_SSS		$Err1$	$Err2$
6	82.0	77.5	82.2	0.0	12.4	6.1
7	198.4	184.6	179.3	0.0	9.7	2.8
8	317.3	294.8	286.1	0.0	5.2	2.9
9	348.6	322.6	300.3	0.0	15.1	6.9
10	141.1	131.0	128.7	0.0	8.2	1.8
11	280.7	262.5	244.1	0.0	11.5	7.0
12	259.6	239.4	238.1	0.6	11.7	0.6
13	420.4	390.8	377.9	0.3	4.9	3.3
14	416.7	398.3	380.8	4.7	6.0	4.4
15	124.6	114.7	117.1	0.0	8.9	2.1
16	89.7	84.1	87.7	0.0	15.5	4.3
17	117.6	109.1	112.5	0.0	5.6	3.2

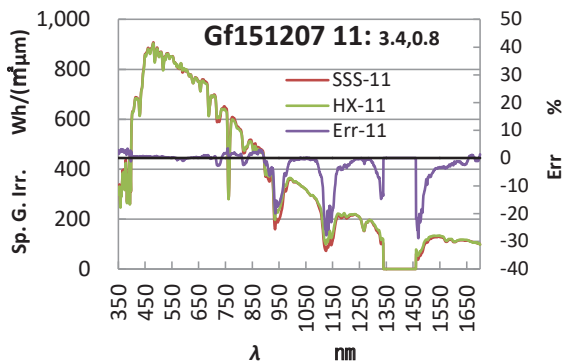


Fig.18 Comparison between the measured and the estimated spectral solar radiation on horizontal plane in December 7, 2015 at Gifu (Fine sky day)

す。全波長域の誤差率 $Err1(11)$ は 3.4%, $Err2(11)$ は 0.8% である。

図 19 は 2015 年 12 月 7 日快晴日の 7 時から 15 時までを示す。12 月は太陽高度も低く ($sh \leq 31^\circ$), 7 時と 15 時の日射量 HQH は 87.3 及び 158.3 Wh/m² と小さく、 $I_p(\lambda_p)$ が少し大きく推定される事からこの時刻の推定誤差 $Err1$ 及び $Err2$ は大きくなる。この日は 1 日を通して安定した快晴日で観測値と推定値は良く一致している。

図 20 は $Err2(IT, I_t)$ を基に算出した岐阜の月平均推定誤差率 $ERRM(M)$ を晴天時 F_n , 曇天時 $C1$ 及び月平均値 Ave について示す。 $ERRM(M)$ の平均値 (Ave) は 6 月の 5.8% を最大に、1 月の 5.0% から 12 月の 4.0% まで変化する。また曇天時 ($C1$) の $ERRM(M)$ は 1 月から 6 月が約 7% 前後と大きく、7 月以降に見られる月間変動も大きい。一方、晴天時 (F_n) には月間変動も緩やかで 1 月の 4.5% から 4 月、5 月の 3.4% を最小に 12 月の 3.8% まで変化している。

図 21 は長沼から沖永良部までの月平均誤差率 $ERRM(M)$ を示す。 $ERRM(M)$ が大きい地点は長沼で、1 月の 9% を最大に、2 月、3 月、12 月と 7% 以上の値を示す。原因は冬期の日照時間が短い事、観測器機への着霜、積雪の影響が考えられる。年間を通して $ERRM(M)$ の大きい順に沖永良部、長沼、岐阜、鳥栖してつくばとなる。つくばは晴天日が多いことが $ERRM(M)$ を小さくする原因と思われる。これに対し沖永良部の $ERRM(M)$ は 2 月と 3 月が約 6%, 4 月が 6.6%, 5 月が最大値 6.8% と前半の誤差率が大きい。これは沖永

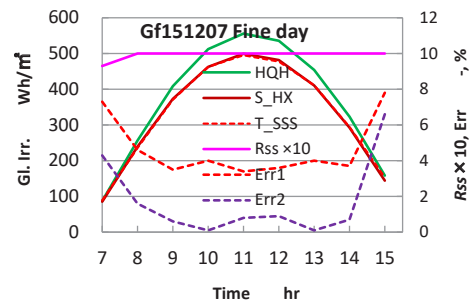


Fig. 19 Hourly change of global solar radiation HQH , S_HX and T_SSS , sun shine ratio R_{ss} and estimated error in December 7, 2015 at Gifu (Fine sky day).

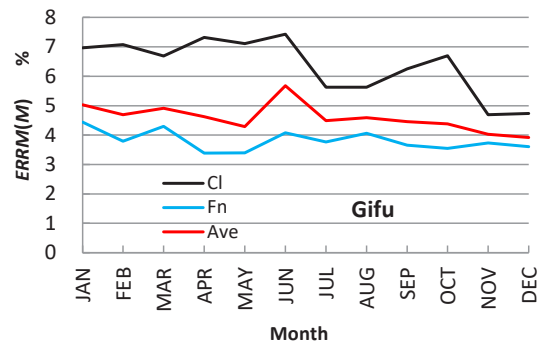


Fig. 20 Monthly change of estimated errors which are monthly average on all days (Ave), fine days (F_n) and cloudy days ($C1$).

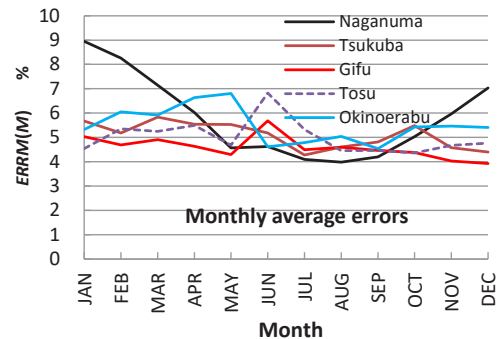


Fig.21 Comparison among the five observation stations of the monthly averaged error ($ERRM(M)$).

良部の晴天日が少ないことが原因である。

4. むすび

NEDO から公開された日射スペクトルデータベース (ver-3) を整理して、3 種の全天日射量 HQH , $HQHJ$, S_HX と分光日射量 $HX(\lambda, IT)$, 日照率 $R_{ss}(IT)$, 分光日射比 $R_{RX}(IT)$, 全天日射比 $R_{hi_j}(IT)$, 降水量 $P_{rcp}(IT)$ を 1 日毎に日の出から日没まで時刻変化を 2012 年~2015 年迄の 4 年間について毎月に取り纏めて、以下のことを明らかにした。

- (1) 分光日射量 $HX(\lambda, IT)$ をピーク波長日射量で無次元化した規格化分光日射比 $HY(\lambda, IT)$ は日射量の影響を除去出来る。
- (2) 南中時を含む時刻 ITs の規格化分光日射比

$HY(\lambda, ITs)$ と各時刻の $HY(\lambda, IT)$ の比 $R_{ff}(\lambda, IT)$ は全天候下における分光日射特性を比較出来る。

- (3) 各月の全分光日射比 $R_{ff}(\lambda, IT)$ に対し降水量 $P_{rcp}(=NA)$, 日照率 $R_{ss}(=NB)$, 太陽高度 $sh(=NC)$ をパラメータにした天候係数 $F_w(\lambda, NA, NB, NC)$ を求めた。
- (4) 全天日射量 HQH からピーク波長分光日射量を推定する回帰式を求め, 5 地点, 12 ヶ月の係数 a , b と決定係数 R^2 を示した。
- (5) これを用いて岐阜の晴天日と曇天日について分光日射量の観測値 $HX(\lambda, IT)$ と推定値 $SSS(\lambda, IT)$ 及び分光誤差率 $Err(\lambda, IT)$ と波長平均誤差率 $Err1(IT), Err2(IT)$ を示した。晴天時の 10~15 時における $Err(\lambda, IT)$ は概略 5%以内であるが, 波長 943nm, 1124nm に見られる吸収帯の影響で $Err1(IT)$ は $Err2(IT)$ より 4%程度大きくなる傾向がある。
- (6) 5 地点, 12 ヶ月について平均誤差率 $ERRM(M)$ を求めた。 $ERRM(M)$ は長沼の 1 月の 9%を最大に, 2 月, 3 月, 12 月と 7%以上の値を示す。原因は冬期の短い可照時間と, 観測器機への着霜, 積雪の影響が考えられる。年間を通して $ERRM(M)$ の大きい順に沖永良部, 長沼, 岐阜, 鳥栖そしてつくばとなる。晴天日の多い地点と月の $ERRM(M)$ は小さい。

記号および単位

- $HQH(IT, IJ)$: 10 分毎の日射強度から求めた水平面
全天日射量 Wh/ m^2 , kJ/(m^2 h)
- $HQHJ(IT, IJ)$: 10 分毎の積算日射量から求めた水平面
全天日射量 kJ/(m^2 h), Wh/ m^2
- $R_{hij}(IT, IJ)$: 全天日射比 —
 $R_{hij}(IT, IJ) = HQH(IT, IJ) / HQHJ(IT, IJ)$
- $HX(\lambda, IT, IJ)$: 分光日射量(日射スペクトル)
Wh/($m^2 \mu m$)
- $HY(\lambda, IT, IJ)$: ピーク波長日射量で無次元化した
規格化分光日射比 —
- $S_{HX}(IT, IJ)$: 分光日射量の波長積分値 Wh/ m^2
- $R_{ff}(\lambda, IT, IJ)$: 分光日射特性比 —
 $R_{ff}(\lambda, IT, IJ) = HY(\lambda, IT, IJ) / HY(\lambda, ITs)$
- $HY_{st}(\lambda, M, L)$: 各地点, 各月の標準晴天時の
規格化分光日射比 —
- $I_p(\lambda_p, IT, IJ)$: ピーク波長分光日射量 Wh/($m^2 \mu m$)
- $R_{RX}(IT, IJ)$: 分光日射比 —
 $R_{RX}(IT, IJ) = S_{HX}(IT, IJ) / HQH(IT, IJ)$
- $F_w(\lambda, NA, NB, NC)$: 天候係数 —
- $SS(\lambda, IT, IJ)$: 分光日射量の一次推定値 Wh/($m^2 \mu m$)
- $SSS(\lambda, IT, IJ)$: 任意天候下での推定分光日射量
Wh/($m^2 \mu m$)
- $T_{SSS}(\lambda, IT, IJ)$: 推定日射量の波長積分値 Wh/($m^2 \mu m$)
- $Err(\lambda, IT, IJ)$: 波長毎の推定誤差率 式(5) %
- $Err1(IT, IJ)$: 波長域 350~1700nm の平均推定誤差率 %
- $Err2(IT, IJ)$: S_{HX} に対する T_{SSS} の誤差率 式(7) %

- $ERRM(M, L)$: $Err2(IT, IJ)$ の月平均誤差率 %
- NA : 降水量から決まるクラス(此処では $P_{rcp}=0$ mm/h : $NA=1$)
- NB : 日照率 R_{ss} によって決まるクラス (NB : 1~5)
- NC : 太陽高度 sh から決まるクラス (NC : 1~4)
- λ : 波長 nm λ_p : ピーク波長 nm
- IR : 波長変数 —
- IT : 時刻または時間変数 —
- ITs : 南中時を含む時刻の時間変数 —
- IJ : 日にち又は日付変数(2012 年の各月初めを 1 とし
2015 年の各月末までの通し日数) —
- Io : 序数 —
- $P_{rcp}(IT, IJ)$: 降水量 mm $R_{ss}(IT, IJ)$: 日照率 —
- $sh(IT, IJ)$: 太陽高度 °

参考文献

- 1) T. Kato, Y. Xue, T. Aoshima, T. Hasegawa, Development of spectroradiometer with wide spectral range, JSES/JWEA Joint conference (2007), 35-38, Sapporo, Japan.
- 2) NEDO, Solar spectral irradiance database (ver-1).
- 3) NEDO HP (accessed December 4th 2016)
<http://www.nedo.go.jp/library/nissyaryou.html>
- 4) NEDO HP (accessed July 28th 2020)
<http://www.nedo.go.jp/library/nissyaryou.html>
- 5) 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).
- 6) K. Soga, T. Oku, Simplified estimation method for spectral diffuse solar irradiance, JSES/JWEA Joint conference (2016), 129-132, Matsuyama, Japan.
- 7) 金山公夫, 馬場弘, ソーラーエネルギー利用技術, (2011), 森北出版, 東京.
- 8) JMA HP (accessed July 28th 2020)
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php#>
- 9) H. Baba, K. Kanayama, Investigation on the spectral solar irradiance under all weather condition. – Relationship among the solar irradiance, sunshine ratio, solar altitude and precipitation-, Journal of Japan solar energy society, **46** (4) 46-54, (2020).
- 10) H. Baba, K. Kanayama, Relationship among the solar irradiance(Total and Spectral), sunshine ratio, solar altitude and precipitation based on NEDO database(VER-3), JSES/JWEA Joint conference (2020), 251-254, on line.
- 11) H. Baba, K. Kanayama, Investigation of spectral irradiance based on observed data – Estimated of spectral solar irradiance from sunshineratio, solar altitude and precipitation based NEDO database (ver-3) at Tsukuba –, JSES/JWEA Joint conference (2021), 65-68, on line.