

日射量から昼光照度、PAR、UV-A、UV-B への変換

恒常的な気象観測所の実測情報から環境シミュレーションのために必要なすべての気象要素のデータを入手することは困難である。たとえば、通常の気象官署では日射量は測定されていても、昼光照度や光合成有効放射量 PAR や A 領域紫外放射量 UV-A や B 領域紫外放射量 UV-B は測定されていない。このため、室内の光環境の計画や予測のために必要である昼光照度は、日射量から推定されて使用される例が多く、これまでも多くの発光効率モデルが提案されている^{1),2),3),4)}。また、日射量と PAR⁵⁾や UV-A⁶⁾、UV-B^{7),8)}の関係については、いくつかの試みが見られるが、一般的に利用可能と考えられる高精度な手法が確立されているとは言い難い。PAR は植物の育成などに不可欠な要素であり、紫外放射量は生体影響や建築部位の劣化などに関連して非常に重要な環境要素である。日射量から照度や PAR、UV-A、UV-B が推定できれば環境予測の精度向上や対象範囲の拡大につながる。

ここでは、大阪での実測データを基にして開発された、日射量からあらゆる地域に適用可能な昼光照度や PAR を推定する方法⁹⁾や UV-A、UV-B を推定する方法について述べる¹⁰⁾。

1. 天空状態を表す指標

日射量は各種の気象要素を推定するときの天空状態を表すための指標の基本要素として有用な基礎資料である。日射量から照度や PAR、UV-A、UV-B を推定するために日射量を基に天空状態を表す。

Igawa は晴天時の全天日射量を基準全天日射量と称し、これに対する検討時の全天日射量から晴天指標 Kc を定義し、晴天時のクラウド・レイショと検討時のクラウド・レイショから澄清指標 Cle を定義している¹¹⁾。

$$Kc = Eeg/Seeg \quad (1)$$

$$Cle = (1-Ce)/(1-Ces) \quad (2)$$

$$Seeg = 0.84 \cdot Eeo/m \cdot \exp(-0.054 \cdot m) \quad (3)$$

$$Ces = 0.08302 + 0.5358 \cdot \exp(-17.394 \cdot \gamma_s) + 0.3818 \cdot \exp(-3.2899 \cdot \gamma_s) \quad (4)$$

ここで、 Eeg : 水平面全天日射量 [W/m^2]、 $Seeg$: 基準全天日射量 [W/m^2]、 Ce : クラウド・レイショ(= Eed/Eeg)、 Ces : 基準クラウド・レイショ、 Eeo : 大気外法線直達日射量 [W/m^2]、 m : 大気路程¹¹⁾、 Eed : 水平面天空日射量 [W/m^2]、 γ_s : 太陽高度 [rad]。

Kc と Cle により晴天空から曇天空まで連続的に変移する天候状態を分類することができる。天空状態が分類できれば、そこでの日射量に対する照度や PAR、UV-A、UV-B の関係が把握できる。

2. 日射量から推定する昼光照度

気象官署において昼光照度は恒常的な測定が行われていないため、日射量から昼光照度を推定し、昼光照明設計などに活用することが一般的になっている。日射から照度を推定するためのモデルは、これまでも多く発表されている。それらの中で、Olseth^{1),2)}のモデルはヨーロッパを中心とした Satel-Light などの気象データにおける日射量の照度変換に利用されており、Perez³⁾のモデルは米国を中心として TMY2 などの気象データにおける日射量の照度変換に使用されている。いずれも推定精度の評価は高い。これまで「拡張アメダス気象データ」では、日射量から照度を推定するためにいくつかの変遷を経て Igawa_C⁴⁾を使用しているが必ずしも十分とは言えない。このため、さらに推定精度を向上させるため大

阪における測定データを基にして開発された日射量を照度に変換する基本式を次のように定める。

$$\eta = a \cdot Kc + b \cdot Cle + c \cdot \ln(Kc) + d \cdot \exp(Cle) + e \cdot W + f \tag{5}$$

ここで、 η : 発光効率[lm/W] ($\eta \geq 0$)、 W : 可降水量[cm]。

$$W = \exp(0.07 \cdot dp - 0.075) \tag{6}$$

ここで、 dp : 露点温度[°C]。

全天、天空、直射の η を ef_Evg 、 ef_Evd 、 ef_Evs とし、全天日射量 Eeg 、天空日射量 Eed 、法線直達日射量 Ees を乗じて全天照度 Evg 、天空照度 Evd 、法線直射照度 Evs が得られる^{注2)}。

Kc と Cle と可降水量 W の関数とする日射量と照度との関係は、係数 $a \sim f$ を太陽高度[rad]の関数として $x = A \cdot \gamma_s^2 + B \cdot \gamma_s + C$ で表すことができる。得られた係数 $A \sim C$ を表 1 に示す。

式(5)を $Igawa_D$ と称し、 $Igawa_C$ 、 $Perez$ 、 $Olseth$ のモデルを基にして日射量から推定した全天照度、天空照度、法線直射照度を実測値と、また、天空照度と直射照度と太陽高度により計算できる全天照度を合成全天照度 Evg_S とし、要素ごとの推定値の一致度を確認した比較の一例として 2008 年の大阪における測定例をモデル別に図 1 から図 4 に示す。

表 1 日射量から昼光照度を推定するための係数

		A	B	C
ef_Evg	a	31.777	-36.903	20.341
	b	-84.690	152.80	-86.306
	c	-16.534	20.942	-20.828
	d	40.441	-76.504	45.149
	e	-2.7163	4.0230	0.6567
	f	-60.423	99.559	45.919
ef_Evd	a	4.1472	21.852	-28.685
	b	35.775	-42.243	25.986
	c	-4.6244	-2.3053	-6.5705
	d	-11.192	-2.8112	26.243
	e	-3.4999	4.1531	1.1250
	f	11.216	-13.942	94.711
ef_Evs	a	100.75	-287.25	171.56
	b	-178.92	321.04	-205.49
	c	-17.329	120.47	-95.215
	d	141.02	-257.77	151.91
	e	-1.5475	4.2673	-0.3197
	f	-302.24	661.76	-275.27

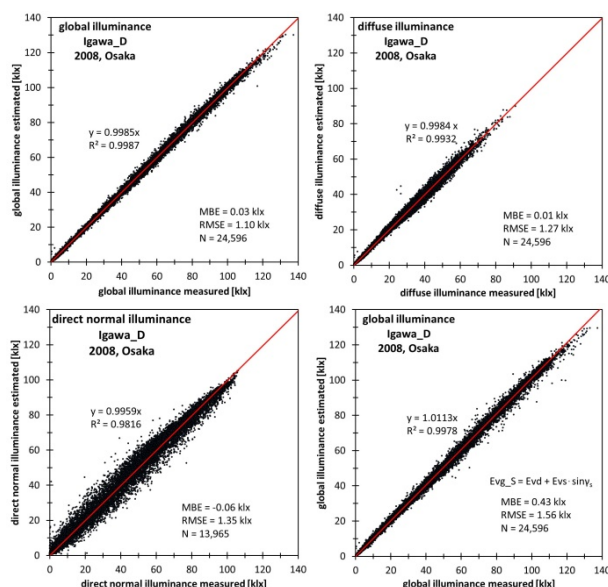


図 1 昼光照度の測定値と推定値の比較 (by Igawa_D)

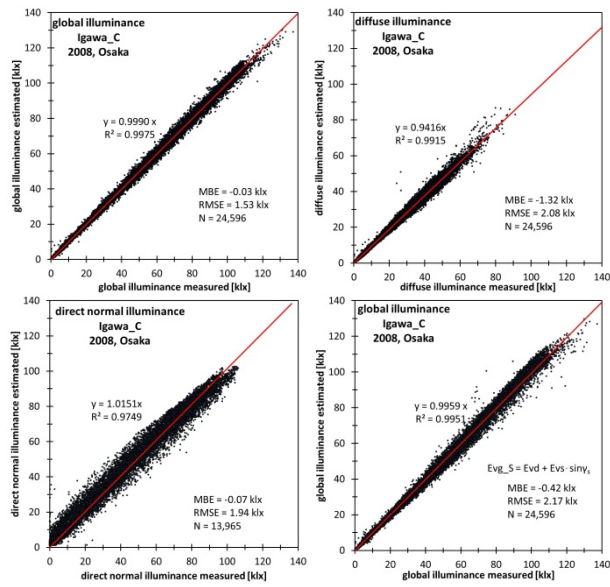


図2 昼光照度の測定値と推定値の比較 (by Igawa_C)

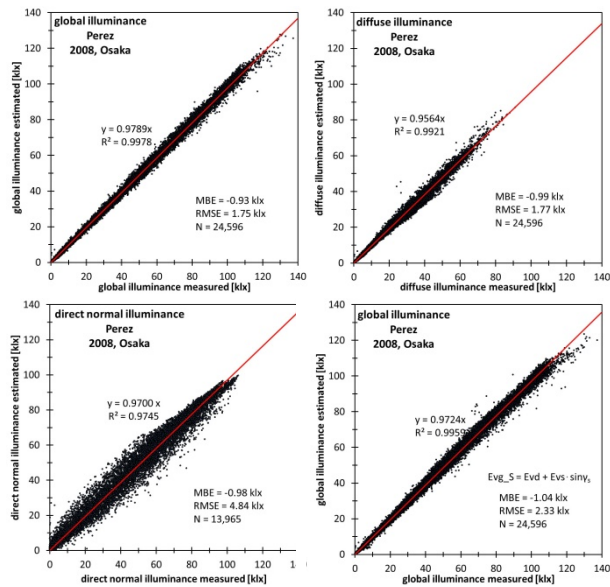


図3 昼光照度の測定値と推定値の比較 (by Perez)

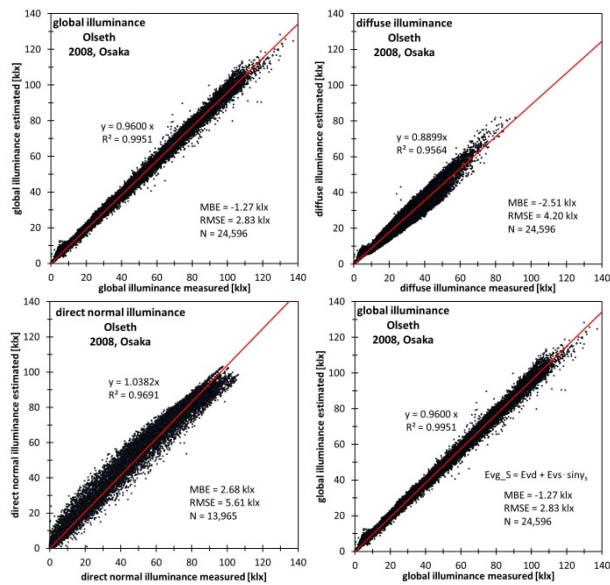


図4 昼光照度の測定値と推定値の比較 (by Olseth)

なお、図中には全天照度（左上）、天空照度（右上）、法線直射照度（左下）、天空照度と法線直射照度から合成した全天照度（右下）の4種の実測値と推定値の比較を示している。

2006年から2011年の照度推定値のMBEとRMSEを表3に示し、全期間のMBEとRMSEを図5と図6に示す。ここで使用したデータは2006年から2011年の6年間の実測値を10分間隔に整理されたものでデータ数は140,722個であった。直達日射の有無の基準はWMOでは120W/m²とされるが、本研究では法線直達日射量が10W/m²未満のデータを除外して検討した。6年間の直達成分のデータ数は79,630個となった。

ここで、比較検討に使用したモデルはいずれも推定精度が高いものであるが、新たに提案したIgawa_DはMBEが最も小さく、RMSEも他のモデルに比べて小さいことが確認できた。また、合成全天照度も実測全天照度とよく一致している。

以上のような結果から、新たに提案したIgawa_Dは日射量から昼光照度を推定する有用なモデルであると考えられる。

表3 昼光照度の推定値のモデル別のMBEとRMSE [klx]

models	year	data number		Evg		Evd		Evs		Evg_S	
		global diffuse	direct	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
Igawa_D	2006	24,689	12,512	-0.04	1.55	-0.09	1.45	0.43	5.20	0.26	2.25
	2007	24,762	13,834	-0.06	1.35	0.05	1.60	0.10	4.35	0.80	1.97
	2008	24,596	13,965	-0.03	1.10	0.01	1.27	0.14	3.98	0.43	1.56
	2009	19,042	11,053	-0.23	1.21	0.04	1.30	-0.57	4.06	-0.03	1.52
	2010	24,750	15,016	-0.22	1.18	0.25	1.37	-1.17	4.41	-0.29	2.08
	2011	22,883	13,250	-0.17	1.31	0.57	1.72	-0.86	4.79	-0.12	1.96
	2006-2011	140,722	79,630	-0.12	1.30	0.13	1.46	-0.33	4.48	0.19	1.92
Igawa_C	2006	24,689	12,512	-0.12	1.89	-1.38	2.32	1.92	5.71	-0.59	2.83
	2007	24,762	13,834	-0.07	1.94	-1.67	2.49	1.70	5.09	-0.06	2.61
	2008	24,596	13,965	-0.03	1.53	-1.32	2.08	1.60	4.67	-0.42	2.17
	2009	19,042	11,053	-0.20	1.59	-1.45	2.13	1.18	4.64	-0.89	2.50
	2010	24,750	15,016	-0.13	1.58	-1.04	1.94	0.39	4.64	-1.04	2.79
	2011	22,883	13,250	0.05	1.81	-0.98	1.98	0.62	4.64	-0.73	2.75
	2006-2011	140,722	79,630	-0.08	1.74	-1.31	2.17	1.22	4.90	-0.61	2.62
Perez	2006	24,689	12,512	-1.01	2.10	-1.05	1.99	-0.91	5.74	-1.20	3.00
	2007	24,762	13,834	-1.00	2.07	-1.06	2.06	-0.96	5.50	-1.11	2.84
	2008	24,596	13,965	-0.93	1.75	-0.99	1.77	-0.98	4.84	-1.04	2.33
	2009	19,042	11,053	-1.16	1.97	-1.12	1.90	-1.62	5.08	-1.64	2.83
	2010	24,750	15,016	-1.07	1.80	-0.75	1.61	-2.16	5.40	-1.71	3.28
	2011	22,883	13,250	-0.94	1.85	-0.57	1.82	-1.84	5.73	-1.86	3.18
	2006-2011	140,722	79,630	-1.02	1.93	-0.92	1.86	-1.42	5.39	-1.41	2.93
Olseth	2006	24,689	12,512	-1.32	3.42	-2.43	4.22	3.13	6.58	-1.32	3.42
	2007	24,762	13,834	-2.28	3.65	-4.49	5.51	2.78	6.06	-2.28	3.65
	2008	24,596	13,965	-1.27	2.82	-2.51	4.20	2.68	5.61	-1.27	2.82
	2009	19,042	11,053	-1.72	3.17	-2.56	4.14	2.05	5.10	-1.72	3.17
	2010	24,750	15,016	-1.94	3.94	-2.17	3.75	1.04	5.26	-1.94	3.94
	2011	22,883	13,250	-3.10	4.35	-3.85	4.74	1.56	5.38	-3.10	4.35
	2006-2011	140,722	79,630	-1.93	3.60	-3.01	4.47	2.18	5.69	-1.93	3.60

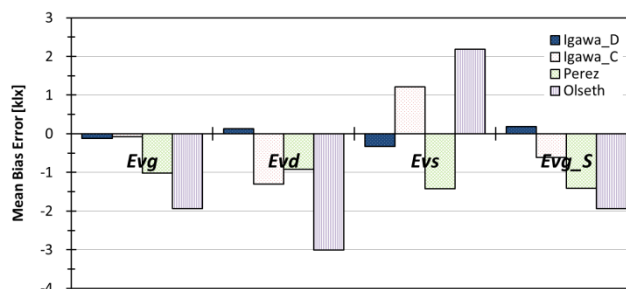


図5 昼光照度の推定値のモデル別のMBE (2006-2011)

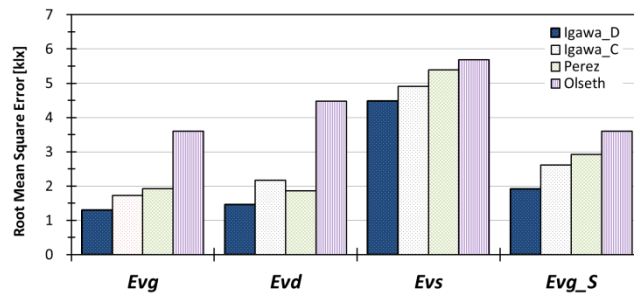


図 6 昼光照度の推定値のモデル別の RMSE (2006-2011)

3. 日射量から推定する光合成有効放射量

日射量から光合成有効放射量 PAR を推定する方法は黒沢ら⁸⁾による試みがあるが、全天成分のみの推定であり、天空成分や直達成分の推定ではない。ここでは、PAR を日射量で除した値を PAR 効率と定義して式(7)で表し、2008 年の大阪における測定データを基に、成分別日射量から全天光合成有効放射量 PAR_g 、天空光合成有効放射量 PAR_d 、法線直達光合成有効放射量 PAR_s を推定する式を開発した。

$$\eta_{PAR} = a \cdot Kc + b \cdot Cle + c \cdot \ln(Kc) + d \cdot \exp(Cle) + e \cdot W + f \tag{7}$$

ここで、 η_{PAR} : PAR 効率 [$\mu\text{mol/s/W}$] ($\eta_{PAR} \geq 0$)、 W : 可降水量[cm]。

PAR を推定するための係数を表 3 に示す。全天、天空、直射に関する η_{PAR} を ef_PAR_g 、 ef_PAR_d 、 ef_PAR_s と表して算出し、これらに Eeg 、 Eed 、 Ees を乗じると PAR_g [$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$]、 PAR_d [$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$]、 PAR_s [$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$] が得られる。日射量から推定した PAR を実測値と比較した例を図. 7 に示す。

また、2007 年から 2009 年の大阪における実測データを基に推定した PAR の MBE と RMSE を表 4 に示す。データ総数は 68,400 個であり、直達成分の対象となるのは 38,852 個である。3 年間の MBE と RMSE を図. 8 と図. 9 に示す。3 年間の PAR_g 、 PAR_d 、 PAR_s の RMSE は 28.0 [$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$]、37.5 [$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$]、99.7 [$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$] であり、 PAR_g 、 PAR_d よく一致しているが PAR_s の推定値の RMSE はやや大きい。 PAR_d と PAR_s の合成による PAR_{g_S} の RMSE は 43.5 [$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$] であり PAR_s の RMSE より小さい。

表 3 日射量から PAR を推定するための係数

		A	B	C
ef_PAR_g	a	0.4151	-0.3182	0.0813
	b	-1.4625	2.2942	-1.0973
	c	-0.2187	0.2054	-0.2251
	d	0.8737	-1.4343	0.6820
	e	-0.0227	0.0246	0.0268
	f	-1.0550	1.5337	1.1074
ef_PAR_d	a	-0.2619	0.8413	-0.9706
	b	-1.7849	3.2528	-1.7157
	c	0.0344	-0.2609	0.0920
	d	1.4030	-2.7081	2.0784
	e	-0.0409	0.0453	0.0380
	f	-0.9346	1.6815	0.4484
ef_PAR_s	a	5.7572	-14.942	5.8316
	b	5.6121	-16.432	1.9635
	c	-4.0169	11.626	-4.2015
	d	-2.3316	7.1358	-0.6008
	e	0.1351	-0.1849	0.0301
	f	-5.6432	13.352	-4.9219

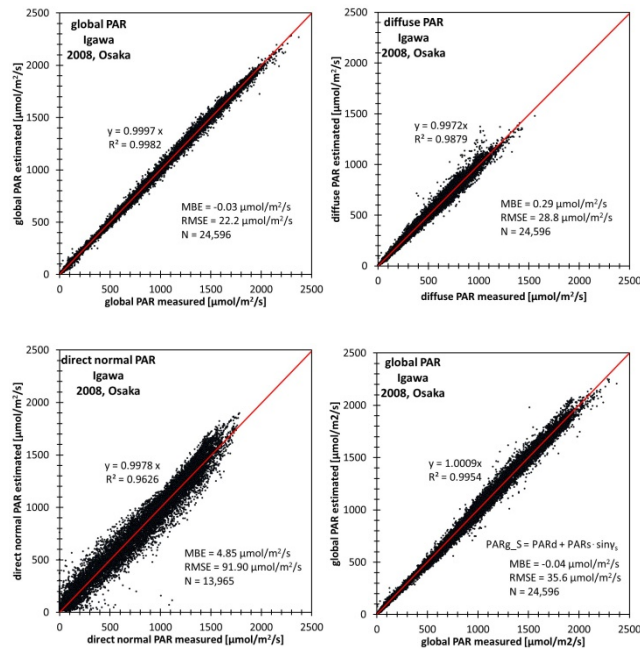


図7 PARの測定値と推定値の比較

表4 PARの推定値のMBEとRMSE [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]

year	data number		PAR _g		PAR _d		PAR _s		PAR _{g_S}	
	global diffuse	direct	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
2007	24,762	13,834	-17.6	29.2	-9.7	47.8	-23.3	107.4	-21.9	47.9
2008	24,596	13,965	0.0	22.2	0.3	28.8	4.8	91.9	0.0	35.7
2009	19,042	11,053	-15.2	32.5	-9.8	32.2	-21.7	99.2	-19.4	46.7
2007-2009	68,400	38,852	-10.6	28.0	-6.2	37.5	-12.7	99.7	-13.3	43.5

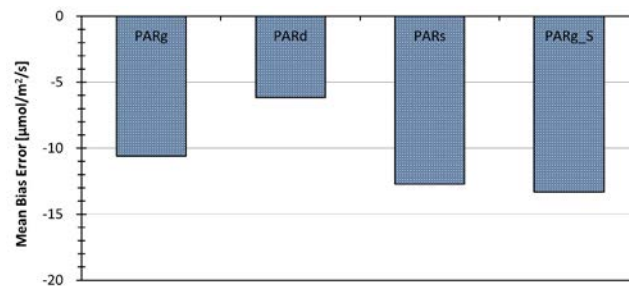


図8 PARの推定値のMBE (2007-2009)

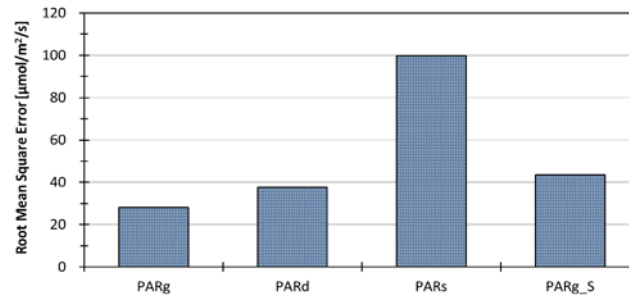


図9 PARの推定値のRMSE (2007-2009)

4. 日射量から推定する UV-A

既往の日射量から UV-A を推定する式⁹⁾は係数が多くかつ現象を説明するためのパラメータが十分と思えない。このため、日射量から UV-A を推定する簡易な方法の開発を試みる。

UV-A を日射量 (Ee) で除した値を η_{UVA} として次式のように表し、回帰分析により各係数を求める。なお、この式は、既報における日射量から昼光照度や PAR を推定する式と同じ構成である。

$$\eta_{\text{UVA}} = a + b \cdot Kc + c \cdot Cle + d \cdot \ln(Kc) + e \cdot \exp(Cle) + f \cdot W \quad (8)$$

ここで、 η_{UVA} : UV-A/Ee、W : 可降水量[cm]。

2012 年の大阪における実測データを基に、回帰分析により式(8)の係数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f を求める係数 $a \sim f$ は、 $x = A \cdot \gamma_s^2 + B \cdot \gamma_s + C$ で表せる。

表 5 に、2012 年の大阪における実測データを基にした回帰分析により得られた、日射量から UV-A を推定するための係数を示す。

全天、天空、直射の η_{UVA} を ef_UVAg 、 ef_UVAd 、 ef_UVAs とし、それぞれに水平面全天日射量 Eeg 、水平面天空日射量 Eed 、法線直達日射量 Ees を乗じて、水平面全天 UV-A 放射量 (UVAg)、水平面天空 UV-A 放射量 (UVAd)、法線直達 UV-A 放射量 (UVAs) が得られる。

図 10 に 2012 年の大阪における UV-A の実測値と日射量の実測値から推定した UV-A との関係を示す。この図では、左上から全天成分 (UVAg)、天空成分 (UVAd)、直達成分 (UVAs) の推定値と実測値との関係を示し、右下には推定した天空成分と直達成分を合成して得られた全天成分 (UVAgS) の推定値と全天成分の実測値との関係を示す。

日射量から推定する UV-A について、提案式と既往式の実測値との MBE と RMSE を比較して表 6 ならびに図 11、図 12 に示す。

提案式による UV-A の推定値の MBE と RMSE は、全天成分では -0.075W/m^2 と 1.925W/m^2 となっており、既往式の -0.178W/m^2 、 2.046W/m^2 に比べて小さくなっている。

表 5 日射量から UV-A を推定するための係数

		A	B	C
ef_UVAg	a	-1.922E-03	1.578E-02	6.934E-02
	b	-3.374E-02	6.453E-02	-6.230E-02
	c	-4.183E-02	1.033E-01	-4.273E-02
	d	-2.506E-03	2.463E-03	-5.686E-03
	e	2.208E-02	-5.354E-02	2.562E-02
	f	1.066E-04	1.639E-03	7.695E-04
ef_UVAd	a	3.535E-01	-6.769E-01	8.661E-02
	b	-1.071E-02	2.199E-02	-8.758E-02
	c	4.379E-01	-8.780E-01	2.901E-02
	d	-1.093E-02	2.376E-02	-3.023E-03
	e	-3.371E-01	6.619E-01	1.921E-02
	f	-7.992E-03	1.231E-02	2.910E-04
ef_UVAs	a	1.391E-01	-4.033E-01	2.142E-02
	b	-9.908E-02	3.228E-01	-1.217E-02
	c	2.135E-01	-4.924E-01	3.174E-02
	d	1.193E-01	-3.168E-01	1.479E-02
	e	-1.049E-01	2.397E-01	-1.691E-02
	f	1.164E-03	1.017E-03	-3.908E-04

$$ef_UVAx = a + b \cdot Kc + c \cdot Cle + d \cdot \ln(Kc) + e \cdot \exp(Cle) + f \cdot W$$

$$a \sim f = A \cdot \gamma_s^2 + B \cdot \gamma_s + C$$

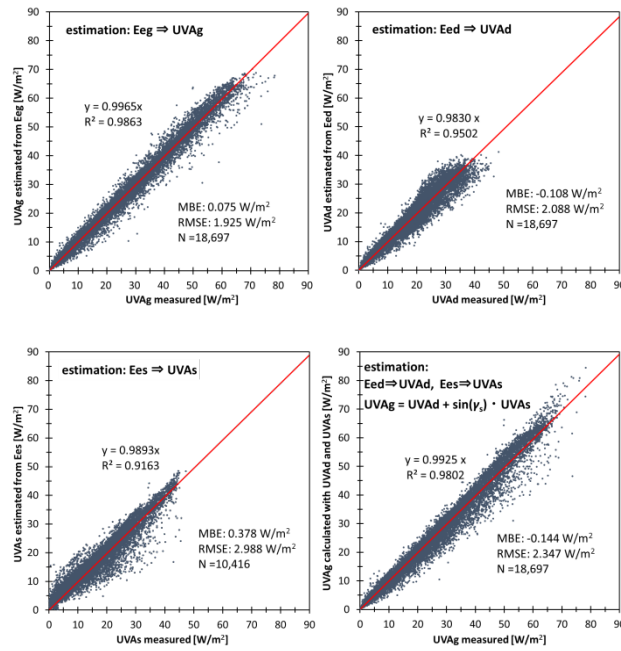


図 10 日射量から推定した UV-A の実測値との比較

表 6 UV-A を推定する提案式と既往式の MBE と RMSE [W/m²]

	UVAg		UVAd		UVAs		UVAgS	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
Proposed	0.075	1.925	-0.108	2.088	0.378	2.988	-0.144	2.347
Previous	-0.178	2.046	0.147	1.769	0.056	3.202	0.119	2.385

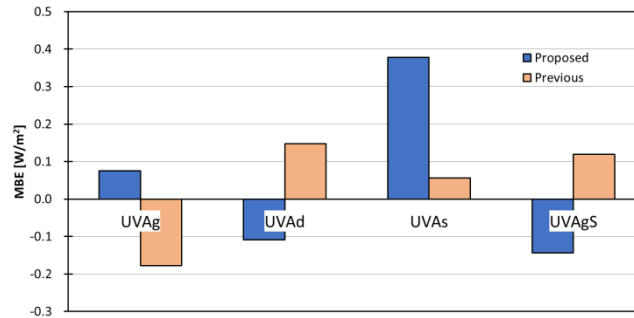


図 11 提案式と既往式で推定した UV-A の MBE の比較

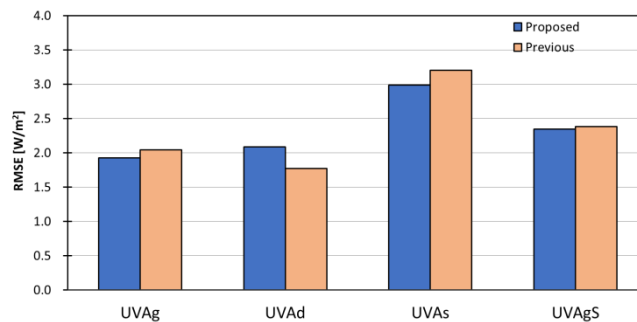


図 12 提案式と既往式で推定した UV-A の RMSE の比較

天空成分に関する MBE と RMSE は、提案式では -0.178W/m^2 と 2.088W/m^2 で、既往式では 0.147W/m^2 と 1.769W/m^2 になっており、提案式の RMSE が僅かに大きくなっている。

直達成分に関する MBE と RMSE については、提案式では 0.378W/m^2 と 2.988W/m^2 で、既往式では 0.056W/m^2 と 3.202W/m^2 になっており、MBE は提案式が大きく、RMSE は提案式が小さくなっている。

天空成分と直達成分を合成した全天成分の MBE と RMSE は、提案式では -0.144W/m^2 と 2.347W/m^2 で、既往式では 0.119W/m^2 と 2.385W/m^2 となっている。両式の推定値に極端な違いは見られない。

日射量から UV-A を推定する式は、係数を少なくした提案式とやや冗長な既往式とに大きな差異はないとも言える。ここでは、係数の少ない式(8)を実用的な式として推奨する。

5. 日射量から推定する UV-B

5.1 UV-A から推定する UV-B

日射量と UV-B の関係、UV-A と UV-B の関係については、それぞれの波長域から、日射量から UV-B を推定するより UV-A から UV-B を推定する方が比較的容易と考えられる。

UV-B はオゾンにより吸収され地上に到達するまでの透過率が小さくなる。一例として、Smarts2¹³⁾と SPCTRAL2¹⁴⁾によるオゾンによる波長別透過率の例を図 13 示す。UV-A 領域では少しオゾンの影響が見られる程度であるが、UV-B 領域については、波長が短くなるにつれて透過率が低下し、300nm 以下になると透過率が 0 となっている。すなわち、UV-B のかなりの波長域の部分は地表に到達するまでにオゾンによって吸収されていることになる。

ここでは、オゾン全量の推定値をパラメータの一つとして、大阪における 2012 年の実測 UV-A から UV-B を推定することを試みる。

日射がオゾン層を通過するとき、その透過距離が長くなると透過による減衰が大きくなる。したがって、当該日の天頂オゾン全量が得られると、太陽の位置により太陽放射が通過するオゾン層の距離が決定され、これによりオゾンによる減衰を考慮することができる。

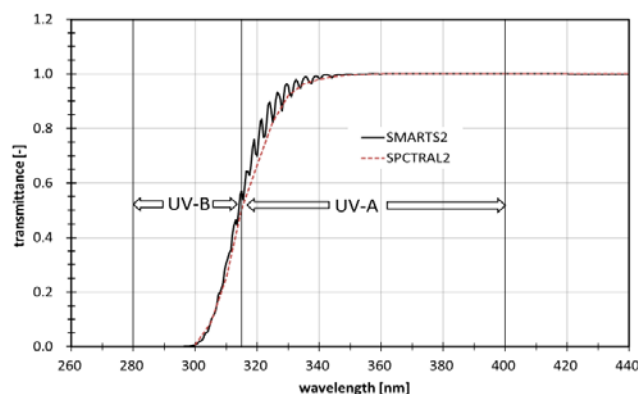


図 13 オゾンによる日射の分光透過率

UV-B を UV-A で除した値 η_{UVB} について、天空状態を表せる Kc 、 Cle と大気路程 m を考慮して、次式のように表す。得られた η_{UVB} に UV-A を乗じると UV-B が得られる。

$$\eta_{UVB} = a + b \cdot \ln(m \cdot O_3) + c \cdot Kc + d \cdot Cle \quad (9)$$

ここで、 Kc : 晴天指標²⁾、 Cle : 澄清指標²⁾、 η_{UVB} : UV-B/UV-A、 O_3z : 当該日の天頂オゾン全量[DU]。

2012年の大阪における実測値と OMI による同年のオゾンの推定値から、回帰分析により式(9)の係数 a 、 b 、 c 、 d を求める。係数 $a \sim d$ は、 $x = A \cdot \gamma_s^2 + B \cdot \gamma_s + C$ で得られる。

回帰分析により得られた、UV-A から UV-B を推定するための係数を表 7 に示す。

全天、天空、直達に関する η_{UVB} を ef_UVBg 、 ef_UVBd 、 ef_UVBs として表 7 を基に算出して、それぞれに水平面全天 UV-A 放射量、水平面天空 UV-A 放射量、法線直達 UV-A 放射量を乗じると、水平面全天 UV-B 放射量[W/m²]、水平面天空 UV-B 放射量[W/m²]、法線直達 UV-B 放射量[W/m²]の推定値が得られる。

図 14 に 2012 年の大阪における UV-B の実測値と UV-A から推定した UV-B との関係を示す。図中の 4 枚のグラフは、左上から全天成分 ($UVBg$)、天空成分 ($UVBd$)、直達成分 ($UVBs$) の推定値と実測値との関係を示し、右下は推定した天空成分と直達成分で合成された全天成分 ($UVBgS$) の推定値と実測値との関係を示す。いずれのグラフも、横軸が実測値、縦軸が推定値を示す。いずれの成分もかなり良くまとまって推定されていると考えられる。

以下、これまでの推定式⁹⁾を既往式 (Previous)、今回提案する推定式¹⁰⁾を提案式 (Proposed) と記して、提案式の妥当性について検討する。

提案式で UV-A から推定した UV-B と、既往式で日射量から直接推定した UV-B について、実測値との MBE と RMSE を比較して表 8 ならびに図 15、図 16 に示す。

提案式による UV-B の推定値の MBE は、全天で -0.0044W/m²、天空で 0.0030W/m²、直達で -0.0019W/m² となっている。全天、天空、直達のいずれの成分についても、既往式による推定値の MBE よりその絶対値は小さく、天空と直達で合成された全天 UV-B の MBE も -0.0034W/m² と小さな値となっている。提案式による UV-B の推定値の RMSE は、全天で 0.0513W/m²、天空で 0.0446W/m²、直達で 0.0226W/m² となっており、どの成分も既往式のそれらに比べてかなり小さく安定している。また、合成された全天 UV-B の RMSE も 0.0562W/m² と小さな値となっている。

以上のような結果から、オゾンの影響を考慮して UV-A から UV-B を推定する方法は、日射量から UV-B を推定する既往の方法よりも適切な方法であると判断できる。

表 7 UV-A から UV-B を推定するための係数

		A	B	C
ef_UVBg	a	-8.056E-02	2.519E-01	-6.322E-03
	b	9.493E-03	-3.608E-02	3.304E-03
	c	5.093E-03	-1.425E-03	-4.400E-03
	d	-1.593E-03	8.375E-04	7.752E-04
ef_UVBd	a	-8.449E-02	2.915E-01	-9.679E-03
	b	9.793E-03	-4.246E-02	3.990E-03
	c	1.990E-03	-1.885E-04	-4.691E-03
	d	-5.199E-03	1.437E-02	-1.489E-03
ef_UVBs	a	-2.190E-01	4.011E-01	-8.255E-02
	b	3.469E-02	-6.183E-02	1.435E-02
	c	2.425E-03	-7.437E-03	3.316E-03
	d	1.211E-03	6.572E-04	-1.952E-03

$$ef_UVBx = a + b \cdot \ln(m \cdot O_3z) + c \cdot Kc + d \cdot Cle$$

$$a \sim d = A \cdot \gamma_s^2 + B \cdot \gamma_s + C$$

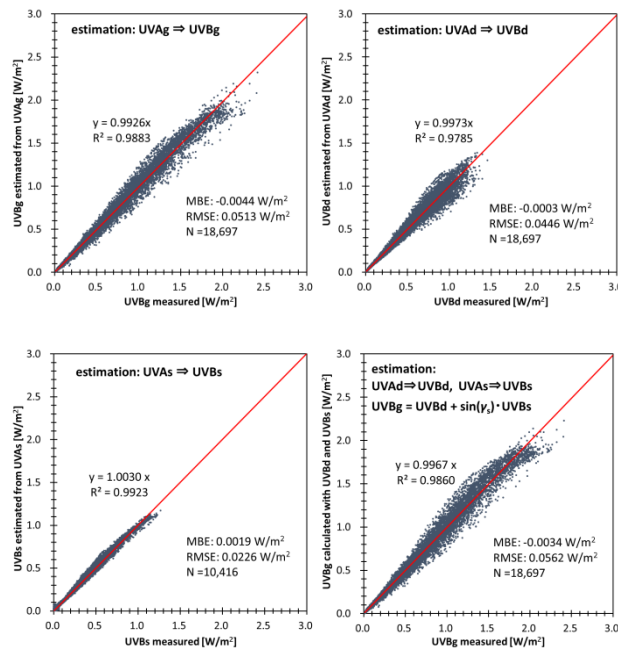


図 14 UV-A から推定した UV-B の実測値との比較

表 8 UV-B 推定の提案式と既往式の MBE と RMSE [W/m²]

	UVBg		UVBd		UVBs		UVBgS	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
Proposed	-0.0044	0.0513	0.0030	0.0446	0.0019	0.0226	-0.0034	0.0562
Previous	0.0169	0.1192	0.0039	0.0740	0.0180	0.0879	0.0047	0.0941

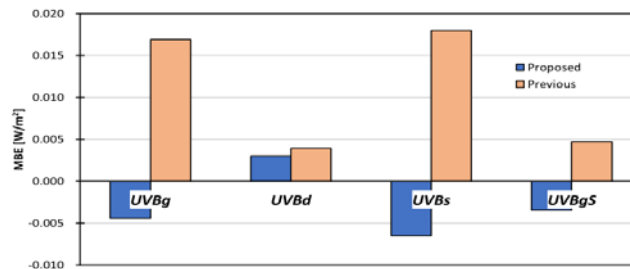


図 15 提案式と既往式で推定した UV-B の MBE の比較

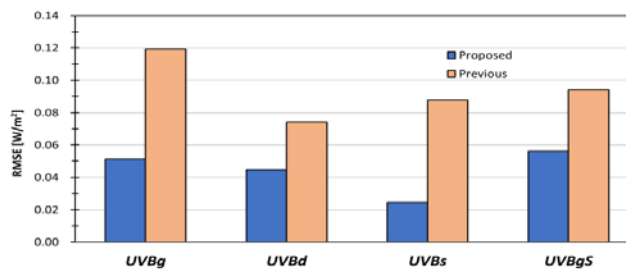


図 16 提案式と既往式で推定した UV-B の RMSE の比較

5.2 日射量から推定した UV-A により推定する UV-B

ここまでに、UV-A から UV-B を高精度に推定できることが確認され、日射量から UV-A を推定する手法も確認された。ここで、実用的な利用を考慮して、日射量から推定された UV-A を基に UV-B を推定する方法を確認する。

まず、式(8)の η_{UVA} を基に日射量から UV-A を推定し、次に、式(9)の η_{UVB} を基に推定した UV-A から UV-B を推定する。

2012 年の大阪のデータを基に推定した UV-A から推定した UV-B について、実測 UV-B との関係を図 17 に示す。全天、天空、直達のいずれの成分も、推定値と実測値の関係は良好にまとまっている。

表 9 に推定 UV-A から推定した UV-B と既往式で推定した UV-B との MBE と RMSE を示す。図 18 と図 19 に、推定 UV-A から推定した UV-B と、実測 UV-A から推定した UV-B と、既往式による UV-B の MBE と RMSE を示す。推定 UV-A から推定する UV-B は、実測 UV-A から推定する UV-B より劣るが、日射量から直接推定した UV-B より優れており、実用的な推定方法と考えられる。

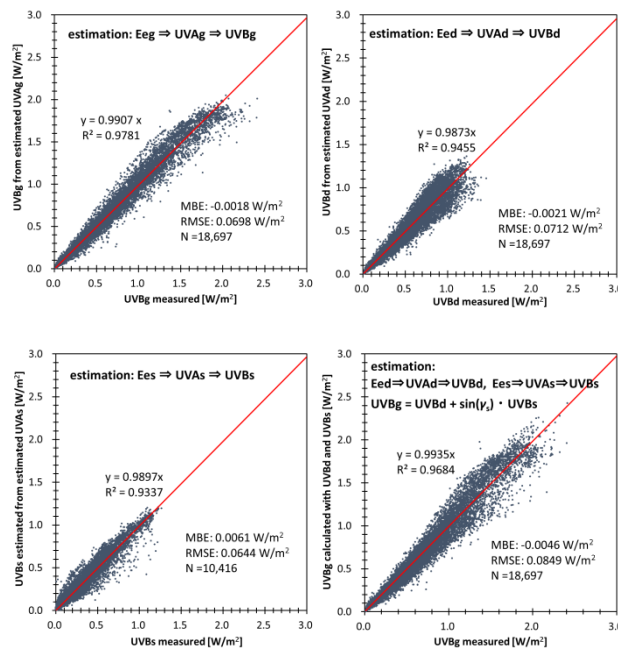


図 17 推定 UV-A から推定した UV-B の実測値との比較

表 9 推定 UV-A から推定した UV-B と既往式との MBE と RMSE [W/m²]

	UVBg		UVBd		UVBs		UVBgS	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
Proposed	-0.0018	0.0698	-0.0021	0.0712	0.0061	0.0644	-0.0046	0.0849
Previous	0.0169	0.1192	0.0039	0.0740	0.0180	0.0879	0.0047	0.0941

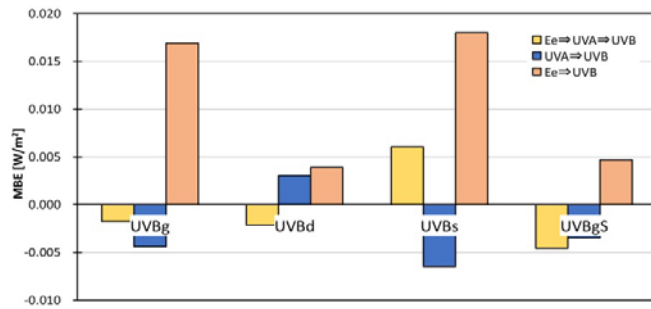


図 18 推定 UV-A で推定した UV-B と実測 UV-A から推定した UV-B と既往式の UV-B の MBE

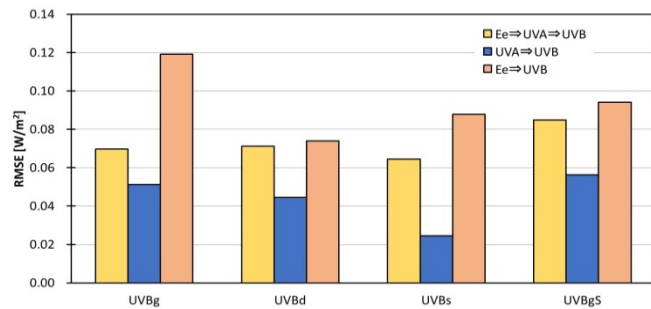


図 19 推定 UV-A から推定した UV-B と実測 UV-A から推定した UV-B と既往式の UV-B の RMSE

5.3 日射量から UV-A を推定して、これを基に UV-B を推定する手法の長期観測データによる確認

2012 年の実測日射量から UV-A を推定し、推定 UV-A とオゾン全量の推定値から UV-B を推定する手法が確立されたので、表 10 に示すような実測データ数となる 2012 年から 2016 年までの 5 年間の実測値を基に推定法を検証した結果を表 11 から表 13 に示す。この時の RMSE を図 20～図 22 に示す。

表 10 2012 年から 2016 年の日射量、UV-A、UV-B の実測データ数

year	2012	2013	2014	2015	2016
global, diffuse	18,697	21,086	16,294	19,609	20,481
direct	10,416	12,574	8,940	10,114	11,268

表 11 日射量から推定された 5 年間の UV-A の MBE と RMSE

year	UVA estimated from Eeg, Eed, Ees							
	UVA _g		UVA _d		UVA _s		UVA _{gS}	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
2012	0.075	1.925	-0.108	2.088	0.378	2.988	-0.144	2.347
2013	0.285	2.043	-0.154	2.135	1.077	3.166	0.226	2.606
2014	0.318	2.222	0.127	2.249	0.835	3.587	0.264	2.982
2015	0.479	2.146	0.366	2.116	0.700	3.432	0.459	2.775
2016	-0.220	2.311	0.068	2.176	0.036	3.547	-0.126	2.986
total	0.182	2.133	0.056	2.151	0.608	3.341	0.133	2.745

表 12 UV-A から推定された 5 年間の UV-B の MBE と RMSE

year	UVB estimated from UVAg, UVAd, UVAs							
	UVBg		UVBd		UVBs		UVBgS	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
2012	-0.0044	0.0513	-0.0003	0.0446	0.0019	0.0226	-0.0034	0.0562
2013	-0.0063	0.0458	-0.0010	0.0391	0.0024	0.0210	-0.0026	0.0481
2014	-0.0083	0.0436	-0.0036	0.0368	0.0015	0.0208	-0.0064	0.0459
2015	-0.0153	0.0620	-0.0109	0.0511	-0.0012	0.0293	-0.0148	0.0649
2016	-0.0159	0.0505	-0.0119	0.0396	-0.0024	0.0234	-0.0167	0.0524
total	-0.0101	0.0512	-0.0056	0.0426	0.0001	0.0231	-0.0089	0.0540

表 13 推定 UV-A から推定された 5 年間の UV-B の MBE と RMSE

year	UVB estimated from estimated UVAg, UVAd, UVAs							
	UVBg		UVBd		UVBs		UVBgS	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
2012	-0.0018	0.0698	-0.0021	0.0712	0.0061	0.0644	-0.0046	0.0849
2013	-0.0003	0.0693	-0.0037	0.0744	0.0193	0.0663	0.0022	0.0904
2014	-0.0006	0.0664	0.0008	0.0730	0.0126	0.0727	0.0011	0.0906
2015	-0.0034	0.0830	-0.0012	0.0772	0.0100	0.0758	-0.0017	0.1010
2016	-0.0197	0.0760	-0.0089	0.0724	-0.0040	0.0754	-0.0159	0.0945
total	-0.0054	0.0734	-0.0032	0.0737	0.0089	0.0709	-0.0039	0.0925

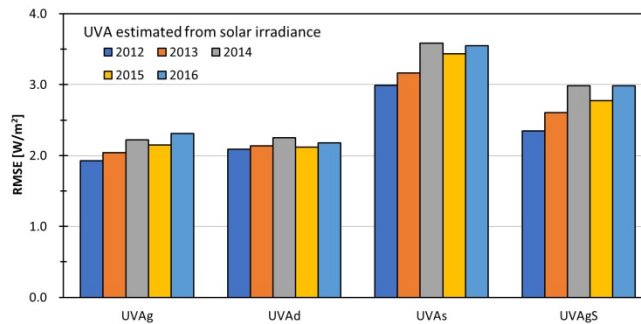


図 20 日射量から推定された 5 年間の UV-A の RMSE

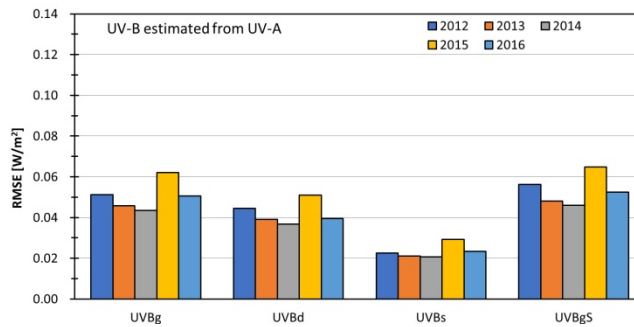


図 21 UV-A から推定された 5 年間の UV-B の RMSE

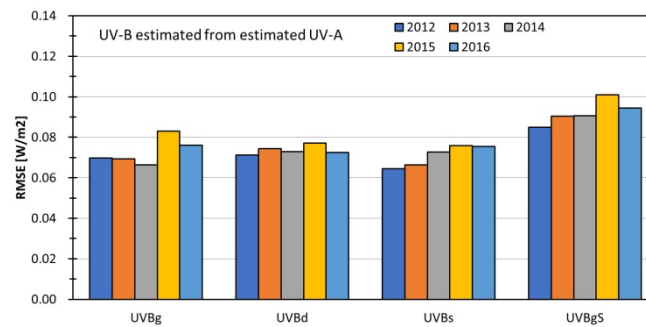


図 22 推定 UV-A から推定された 5 年間の UV-B の RMSE

いずれの年においても MBE に若干の差異があり、RMSE は年毎に僅かに大きくなっている傾向があるが、極端な相違は見られない。図 12 には、年と共に RMSE が僅かに大きくなる傾向が見られる。

本研究では、センサーの日射暴露による出力変化の可能性についても配慮して、出力変化の可能性が小さい 2012 年の測定値により推定式を作成して、5 年間の測定値で推定手法の妥当性を確認した。この間における UV センサーの出力変化は比較的小さく、推定モデルの妥当性も確認することができた。

ここでは、日射量から推定した UV-A から UV-B を推定する方法を提案する。この方法は現実的で実用的な方法であると考えられる。

8. まとめ

日射量を基に昼光照度、PAR、UV-A、UV-B を推定することを試み、実用的に使用可能と考えられる推定式を提案した。

拡張アメダス気象データでは日射量が基本データとして提供されている。また、オゾン全量の基礎データも提供されている。これらのデータを活用すれば全国各地の昼光照度や PAR、UV-A、UV-B を推定できるため、広範な気象データの活用が可能になると考える。

なお、太陽高度が 5°未満の場合、大気の影響や測定上の余弦則の影響が大きいため推定値がやや不安定になる場合があるため、太陽高度 5°の発光効率、PAR 効率、UV 効率の適用を推奨する。

注

注1) International Daylighting Measurement Programme の略。CIE (国際照明委員会) が昼光と日射の基礎データ取得と標準資料作成のため、1991 年から世界各地で長期測定を実施。

注2) これまで光環境分野で使用されている全天空照度の「全」は、周辺に全く障害がない天空という意味とされているが、全天日射量の「全」は直達と天空の和という意味であり、両者の表記において「全」の意味が異なり混乱が生じやすい。このため、昼光照度についての表記は、全天日射量に対応する全天照度、天空日射量に対応する天空照度、法線直達日射量に対応する法線直射照度としている。

参考文献

- 1) Olseth, J.A., Skartveit, A.; Observed and Modelled Luminous Efficacies under Arbitrary Cloudiness, Solar Energy, Vol. 42, pp. 221-233, 1989
- 2) Skartveit, A., Olseth, J.A.; Luminous Efficacy Models and Their Application for Calculation of Photosynthetically Active Radiation, Solar Energy, Vol. 52, No. 5, pp. 391-399, 1994
- 3) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J. and Stewart, R.; Modeling Daylight Availability and Irradiance

Components from Direct and Global Irradiance, Solar Energy, Vol.44, No.5, 271-289, 1990

- 4) 井川憲男; 天空輝度・放射輝度分布モデルの改良, 日本建築学会光環境シミュレーション小委員会公開研究会資料, 2013.2
- 5) 黒澤良太, 曾我和弘; 光合成有効放射量の推定法に関する基礎的研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 47 号, pp.173-176, 2008.3
- 6) 富板崇, 檜野紀元, 高根自充, 松村宇; 水平面での A 領域紫外線量の推定とマップの更新, 日本建築学会構造系論文集, 第 602 号, pp.81-86, 2006.4.
- 7) 高橋悠美子, 松本真一, 長谷川兼一, 源城かほり: 紫外域日射データの推定法の開発に関する基礎的研究 その 5 3 地点の長期観測データに基づく推定方法の検討, 日本建築学会東北支部研究報告会, pp.35-38, 2007.6.
- 8) 中山哲士, 石野久弥: 地上観測における紫外放射量の特性研究 その 2 紫外放射量の簡易推定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1415-1416, 2007.8.
- 9) 井川憲男, 永村一雄, Craig Farnham: 日射量による昼光照度、PAR、UV-A、UV-B の推定, 日本建築学会環境系論文集, 第 726 号, pp.679-685, 2016.8.
- 10) 井川憲男, 野澤宏大, 武田和大, ファーナム クレイグ, 永村一雄: 日射量と UV-A、UV-B の関係について, 日本建築学会環境系論文集, 第 817 号, pp.154-159, 2024.03.
- 11) Igawa, N; Improving the All Sky Model for the luminance and radiance distributions of the sky, Solar Energy, Vol. 105, (2014), pp. 254-372, 2014.6
- 12) Kasten, F., Young, A.T.: Revised optical air mass tables and approximation formula. Applied Optics 28 (22), 4735-4738, 1989.
- 13) Gueymard, C.: SMARTS2, A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment, Florida Solar Energy Center, 1995.
- 14) Bird, R. and Riordan, C., Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres, NREL Technical Report, 1984.