Research Paper 研究論文

# Sensor Signal Variations during Shadow Passing in Cloud-Shadow-Behavior Estimation Method with **Original Solar Irradiation Sensors**

Yuto TAKEUCHI<sup>\*1</sup>

Toru HARIGAI<sup>\*2‡</sup> Kazuhiko ITO<sup>\*4</sup>

Hiroki KOBAYASHI<sup>\*1</sup> Hirofumi TAKIKAWA<sup>\*3</sup> Motohisa HIRATSUKA<sup>\*4</sup>

## 多点日射計測に基づいた雲影挙動把握法における 雲影通過時のセンサ信号の変化

竹内 悠人 1

針谷 達<sup>\*2‡</sup> 伊藤和彦\*4 小林 宏規 1 平塚 元久\*4 滝川浩史\*3

## Abstract

For photovoltaic power generation prediction, it is necessary to calculate a cloud shadow vector before the arrival of a cloud shadow. The cloud shadow vector is calculated based on the difference of timing for the signal intensity changes of solar radiation sensors arranged on the ground. In this study, signal intensity changes and cloud shadow shapes are measured using some solar radiation sensors and a camera, and the change patterns of the sensor signals are analyzed. The determination value of the sensor signal for the shadow-in and shadow-out of a cloud is proposed based on the change pattern of the signals. The change patterns of sensor signals were categorized into three types. The calculation accuracy of the cloud shadow vector improved by using the 5-min moving-average value of measured solar radiation intensity as the determination value for the shadow-in and shadow-out of a cloud compared with the theoretical solar radiation intensity.

Keywords: Solar power generation, Power generation prediction, Solar irradiation intensity, Cloud shadow キーワード:太陽光発電,発電量予測,日射強度,雲影

## 1. はじめに

太陽光発電において,雲の影(以下,雲影)の通過は, 急激な発電出力変動を引き起こす(1-3). そのため,太陽光 発電施設の増加は,発電量の不確実性を増大する(4-6).

発電量の不確実性増大は,電力の需給調整を困難にす る.この解決策のひとつとして、太陽光発電の発電量予測 がある.

太陽光の発電量予測には,予測対象となる太陽光発 電施設(以下,予測 PV 施設)の日射強度予測が重要に なる. 日射強度予測は, 衛星画像を用いた手法が, これ までの主流であった. A. Hammer らは, 最大 2 時間先の 日射強度を予測した(7). E. Lorenz らは, 衛星画像と, 確 率に基づく統計的方法を組み合わせて,最大6時間先の 日射強度予測を行った(8).しかし、衛星画像をもとにした

<sup>\*1</sup> Development of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology

<sup>\*2</sup> Assistant Professor, Development of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

<sup>‡</sup>e-mail: harigai.toru.un@tut.jp

<sup>\*3</sup> Professor, Development of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology

<sup>\*4</sup> AIM Co.,Ltd.

Received: 5th January 2020, Accepted: 16th June 2020

<sup>\*1</sup> 豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学専攻

<sup>\*2</sup> 豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 助教 (〒441-8580 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1) ‡e-mail: harigai.toru.un@tut.jp

<sup>\*3</sup> 豊橋技術科学大学 電気·電子情報工学系 教授

<sup>\*4</sup> (株) エイム

<sup>(</sup>原稿受付: 2020年1月5日, 受理日: 2020年6月16日)

予測では、データの取得と処理が複雑であるため、予測 間隔が 5 分程度と広い.そのため、個々の雲に強く依存 する短期の出力変動の予測では、地上から測定したデー タを用いる方が有利である<sup>(9)</sup>.

予測 PV 施設の周辺に、日射センサを配置し、雲影到 来による日射強度変化から、雲影の挙動(速さ・方向・濃 さ・大きさ・形状変化)を算出し、日射強度を予測できる.2 つの日射センサを用いた雲影の速さの算出や、太陽光発 電施設を日射センサに見立て、雲影の速度ベクトルを導 出することで、日射強度を予測する<sup>(10,11)</sup>.また、L. Bosch らは扇形に配置した 9 個のフォトトランジスタを用いて、雲 影の挙動を導出し、雲影の動きを予測している<sup>(12)</sup>.

我々の以前の研究では、日射センサを用いて、雲影を 捕捉することで、予測対象地点の日射強度を予測し、精 度の良い予測結果を得た<sup>(13)</sup>.日射センサの信号強度が、 一定値を下回った際に雲影がセンサ上へかかった(以下、 入影)と判断し、その後、その値を上回った際に雲影が通 り過ぎた(以下、出影)と判断する.このとき、入影および 出影を判断する一定値が、雲影判断レベルであり、そのレ ベル設定の基準となる値が、雲影判断基準値である.雲 影の入出判断時の日射センサの出力変化時間差に基づ いて、雲影ベクトルを算出する.

本研究では、雲影挙動把握のための日射センサを数 十m四方に配置し、雲影形状とセンサ信号の強度変化を 観測することで、センサ信号の変化パターンを分析した. また、センサ信号の変化パターンから、地上日射計測に 基づいた雲影挙動の把握方法における雲影の入出判断 基準値の設定方法を提案する.

#### 2. 日射計測による雲影挙動の算出方法

Fig. 1(a)のように, 日射センサ 3 台を地上に設置し, 雲 影の通過を計測する<sup>(11)</sup>. 例えば, 雲影が北西から南東へ 移動したとき, 日射センサの出力は, センサ C, B, A の順 に低下する. センサ C と B の時間差をt<sub>BC</sub>, センサ B と A の時間差をt<sub>AB</sub>とし, 雲影がセンサ C-B 間およびセンサ B-A 間を同じ速さ, 同じ方向へ移動したと仮定すれば, その 雲影ベクトルは式(1)のように表すことができる.

$$v = v_{AB} = v_{BC} = \frac{l_{AB}\cos(\beta - \theta)}{t_{AB}} = \frac{l_{BC}\sin(\alpha - \theta)}{t_{BC}}$$
(1)

したがって, 雲影の速さυと方向θ'は式(2), および式(3)と なる.

$$v_{ABC} = \sqrt{\frac{l_{BC}^{2} l_{AB}^{2} (1 - \cos^{2}(\alpha + \beta))}{l_{AB} t_{BC}^{2} + l_{BC} t_{AB}^{2} + 2 l_{AB} l_{BC} t_{AB} t_{BC} \cos(\alpha + \beta)}}$$
(2)

$$\theta' = tan^{-1} \left\{ \frac{\gamma_{AB} c_{BL} Cosp}{-l_{AB} t_{BC} cos\beta} - l_{BC} t_{AB} cos\alpha \right\}$$
(3)

ここで求まったθ'と、センサ配置角度から、雲影の 進行方向θが得られる.

$$\theta = 180 - \theta' \tag{4}$$

Journal of Japan Solar Energy Society



Fig. 1 (a) Calculation principle of cloud-shadow vector and (b) four-sensor-type system.



Fig. 2 (a) Cross-section schematic diagram and (b) topview photograph of cloud-shadow sensor.



Fig. 3 Position of cloud-shadow sensors and sky camera for cloud shadow observation.

雲影の進行方向における長さは、日射センサ出力の 低下時間から算出できる.また、Fig. 1(b)のように、日射 センサを4台用いることで三角形を4つ形成し、それぞれ の三角形から得られるベクトルを平均することで、導出ベ クトルの精度が向上する<sup>(13)</sup>.

#### 3. 地上日射計測による雲影挙動の観測

#### 3.1 雲影センサ

本研究では, Fig. 2 に示すような雲影挙動観測用日 射センサ(以下, 雲影センサ)を自作した. 雲影センサの 受光部には, 小型太陽電池を用いた<sup>(14-16)</sup>. 防水のため に, 太陽電池上面に薄いフッ素系樹脂を取り付けた. ま た, 太陽電池出力の温度依存性を抑えるため, 出力 抵抗に負特性サーミスタを組み合せた<sup>(17)</sup>.

#### 3.2 地上日射計測

地上日射計測による雲影挙動の観測は,豊橋技術科 学大学自然エネルギー棟の屋上で行った. Fig. 3 に雲影 センサの配置図を示す. 雲影センサ4 台を長方形に配置



Fig. 4 Output of cloud-shadow sensors during the day and three patterns of sensor outputs, cloud, and cloud shadow. (a) Output of cloud-shadow sensors on August 20, 2019. (b) Sensor output patterns on the shadow-in of a cloud. (c) Photograph of cloud taken with the sky camera at b-1, b-2, and b-3. (d) Relationship of sensor output patterns and cloud-shadow density.

し,各雲影センサにはデータロガーを組み合せ,センサ出 力を記録した.サンプリング速度は100 msとした.日射計 測と同時に,上空の雲の様子を観察するため,タイムラプ スカメラ(brinno, TLC200Pro)に魚眼レンズを装着して動 画を撮影した.雲影挙動の観測は,2019 年 8 月 1 日から 2019 年 8 月 20 日までの快晴と雨天を除いた 10 日間で 行った.観測時間は,10 時から15 時までとした.

## 4. 雲影センサ信号の変化と雲影形状

#### 4.1 入影時

Fig. 4(a)に, 8月20日の雲影センサ4台のそれぞれの 出力を示す.この日は,複数の雲影が雲影センサ間を通 過した.動画から雲影は,南西から到来し,北東へ通過し ていた.この場合,雲影の到来に対して,雲影ベクトルの 算出が可能な雲影センサの出力低下順は,センサ A→B→D→CまたはA→D→B→Cである.これ以外の出 力低下順では,正しい雲影ベクトルが得られない.しかし, 雲影によっては,4台の雲影センサの出力低下順が, 途中で入れ替わる場合があることが判明した.

Fig. 4(a)の入影時の例を Fig. 4(b)に示す. B-1 は,各 雲影センサの出力低下順が,出力低下開始から一定値 に落ち着くまで変わらない. B-1 の場合は,出力が低下傾 向にある間,どの時点においても雲影ベクトルを算出でき る. B-2 と B-3 は,出力低下順が途中で変わる場合である. そのうち, B-2 の場合では,出力が低下し始めた直後であ



Fig. 5 Output of cloud-shadow sensors during the day and three patterns of sensor outputs, cloud, and cloud shadow. (a) Output of cloud-shadow sensors on August 19, 2019. (b) Sensor output patterns on the shadow-out of a cloud. (c) Photograph of cloud taken with the sky camera at b-1, b-2, and b-3. (d) Relationship of sensor output patterns and cloud-shadow density.

れば, 雲影ベクトルを求められる. B-3 は, B-2 に分類でき ない出力低下パターンであり, 正しい雲影ベクトルを算出 できない.

Fig. 4(b)に示した各出力低下パターン時の雲の様子を, Fig. 4(c)に示す. 図中の矢印は, 動画で確認した雲の進 行方向である. また, 図中の破線は, 雲進行方向の雲の 端を表す. C-1とC-2では, 端のはっきりとした雲が南西か ら太陽にかかった. C-3 では, 小さく不均一な雲が集まり, 徐々に太陽にかかる様子が観察された. Fig. 4(b)および 4(c)から得た各出力低下パターンにおける雲影と雲影セ ンサの位置関係をFig. 4(d)に模式的に表す. C-1のような 端がはっきりした雲の場合, 4 台の雲影センサの信号低下 傾向は同一であった. どの程度信号が低下するかは, 対 象とする雲影の濃さが影響していると考えられる.したがって,信号の低下傾向が同一であったことは,D-1 に示すように,雲影の移動にともない,センサにかかる雲影の濃さが一様に濃くなるような雲影の入影を表していると考えられる.D-2 の雲影は,C-2 のように,雲の端は明確に確認できるが,雲内部に濃い箇所や薄い箇所などの濃さの偏りがある場合を表す.雲内部に濃さの偏りがあることで,雲

Table 1 Appearance number of sensor output patterns in Fig. 4(b) and 5(b).

	Pattern A	Pattern B	Pattern C
Shadow-In	47	61	40
Shadow-Out	25	74	49

影の濃さも変化する.この場合,雲影センサはひとつの雲

影の入影を捉えているにも関わらず,出力の上昇が生じ, 雲影の入影判断を困難にする. D-3 に示す雲影は,雲が 薄く,雲影の端が明確でない場合や,進行方向先端の雲 の形状が不均一な場合である. C-3 に示すような多数の 小さな雲の集合体をひとつの雲として捉えた場合,雲の隙 間によって雲(および雲影)内部に大きな濃さの変化が生 じる. この一様でない雲影の濃さが, B-3 のような複雑な信 号変化の原因であると考えられる.

4 台の雲影センサの出力低下の順番が,出力低下開 始から低下した出力が一定値に落ち着くまで変わらない 雲影をパターン A,出力低下の途中で順番が入れ替わる 雲影をパターン B,出力低下開始もしくは直後から順番が 入れ替わる雲影をパターン C として,10 日間に入影した 雲影 148 個に対し,パターン分けを行った.雲影数は, Fig. 4(a)のようなセンサ出力信号のグラフから,急激な信 号変化を目視で読み取ることにより得た.この結果を Table 1 に示す.入影判断に理想的な出力低下傾向であ るパターン A は,148 個中 47 個であった.

#### 4.2 出影時

Fig. 5(a)に, 8月 19日の雲影センサ4台のそれぞれの 出力を示す. 雲影の出影は, 低下していた雲影センサの 出力上昇によって判断できる. 代表的な出影時のセンサ 出力変化をFig. 5(b)に示す. B-1, B-2, B-3 に示すように, 出影時においても3つの出力上昇パターンが確認できた. また,それぞれの出力上昇パターン時の雲の様子を Fig. 5(c), センサ出力および雲の様子から考えられる雲影とセ ンサの関係を Fig. 5(d)に示す. 出影時におけるセンサ出 力上昇パターンと雲および雲影の関係は、入影時の雲の 形状と雲および雲影の濃さの関係と同様に考えられる.4 台の雲影センサの出力上昇の順番が,出力上昇開始か ら上昇した出力が一定値に落ち着くまで変わらない雲影( B-1)をパターン A, 出力上昇の途中で順番が入れ替わる 雲影 (B-2)をパターン B, 出力上昇開始もしくは直後から 順番が入れ替わる雲影(B-3)をパターンCとして分類する. 入影時と同様に、10日間で通過した雲影148個に対し、 パターン分けを行った結果を Table 1 に示す.

## 5. 雲影判断基準値の検討

#### 5.1 入影時の基準値

雲影センサ配置地点の理論日射強度を雲影判断基準 値とし,判断基準値の 60%から 100%をそれぞれ雲影判 断レベルとした際の雲影センサ出力との関係を, Fig. 6 に 示す.理論日射強度には,快晴時に想定される水平面日



Fig. 6 Determination level of shadow-in based on theoretical solar irradiation intensity for B-2 output pattern of cloud-shadow sensors.

Table 2 Calculation number of cloud-shadow vectors at the shadow-in with different determination level based on theoretical solar irradiation intensity, and number of matches with actual cloud motion.

Determination level (%)	Calculation number of	Number of
Determination level (%)	cloud-shadow vectors	matches
95	61	3
90	61	12
85	61	24
80	61	30
75	61	39
70	61	28
65	61	16
00	64	-7



Fig. 7 Determination level of shadow-in based on 5-min moving-average intensity of sensor outputs for B-2 output pattern of cloud-shadow sensors.

Table 3 Calculation number of cloud-shadow vectors at the shadow-in with different determination level based on 5-min moving-average intensity, and number of matches with actual cloud motion.

Determination lovel (%)	Calculation number of	Number of
Determination lever (%)	cloud-shadow vectors	matches
95	61	39
90	61	56
85	61	41
80	61	27
75	61	17
70	61	12
65	61	5
60	61	2

射強度の計算値を用いた.理論日射に基づいたそれぞ れの判断レベルを用いて,入影時センサ出力パターン B の雲影 61 個の雲影ベクトルを算出した.パターン A は, センサ出力低下傾向がほとんど変わらないため,幅広い 雲影判断レベルにおいて,実際の移動方向と同じ,もしく は移動方向に近い雲影ベクトルを算出できる.したがって, センサ出力傾向に変化のあるパターンBを対象とし,雲影 判断レベルおよび雲影判断基準値による算出雲影ベクト ルの違いを調べた.

動画より導出した雲の移動方向に対して,算出した雲 影の移動方向が±25°以内であった雲影を,実際の移動 方向と算出した移動方向が一致した雲影とし,その数を Table 2 に示す. 移動方向が最も一致した雲影判断レベ ルは, 雲影判断基準値の 75%とした場合で, 61 個の雲影 中, 39 個が一致した. しかし, パターン B に属する雲影は, 雲影の端が明確であることから, 雲影がセンサにかかり, センサ4台のすべての信号出力が低下し始めた時点,つ まり雲影判断レベルが高いほど,算出移動方向は一致す ると考えられる. Table 2 において, 最も雲影の移動方向が 一致した雲影判断レベルが、90%付近の高いレベルでは なく,75%になった要因として,雲影判断基準値に理論日 射強度を用いたことが考えられる.薄い雲が一様に広がっ ているような空模様のとき,実日射強度は,理論日射強度 より低くなる。理論日射強度より実日射強度が低いことで、 雲影判断レベルが下がったと考えられる.また,雲による 日射増強効果(18)の影響などにより,実日射強度が理論 日射強度と著しく異なる場合も,雲影移動方向の算出を 困難にした.

雲影判断基準値を実日射強度に近づけるため, Fig. 7 に示すように, 雲影到来から 5 分前まで 5 分間の移動平 均センサ出力を, 理論日射強度に代わる雲影判断基準 値とした. 5 分前移動平均を雲影判断基準値として, 雲影 の移動方向を算出し, 動画方向と比較した結果を Table 3 に示す. 5 分前移動平均の 90 %を判断基準値とした場合, 61 個の雲影中 53 個の雲影で移動方向が一致し, 最も一 致した雲影の数が多かった. したがって, 雲影判断基準 値には, 理論日射強度より, 5 分前移動平均日射強度を 用いた方が適切であることがわかった.

#### 5.2 出影時の基準値

Table 4 に, 理論日射強度を雲影判断基準値とした雲 影判断レベルを用いて, 出影時の雲影移動方向を算出し, 動画の移動方向と比較した結果を示す. 出影時のセンサ 出力パターン B において, 最も移動方向が一致した雲影 判断レベルは, 理論日射強度の 80%とした場合で, 74 個 の雲影中 45 個が一致した. 出影時の場合でも, 雲影が 通過し過ぎ去る直前, つまり雲影判断レベルが高いほど,

natenes with actual cloud motion.					
	Determination	Calculation number of	Number of		
	level (%)	cloud-shadow vectors	matches		
	95	74	6		
	90	74	15		
	85	74	36		
	80	74	45		
	75	74	24		
	70	74	14		
	65	74	8		
	60	74	2		

Table 4 Calculation number of cloud-shadow vectors at the shadow-out with different determination level based on theoretical solar irradiation intensity, and number of matches with actual cloud motion

Table 5 Calculation number of cloud-shadow vectors at the shadow-out with different determination level based on 5-min moving-average intensity at the shadow-in, and number of matches with actual cloud motion.

Determination	Calculation number of	Number of
level (%)	cloud-shadow vectors	matches
95	74	46
90	74	66
85	74	48
80	74	29
75	74	16
70	74	9
65	74	5
60	74	0

より正確な雲影ベクトルを算出できると考えられる. 出影時 でも,入影時と同様,理論日射強度と実日射強度の違い により,低い雲影判断レベルになったと考えられる. また, 雲影が過ぎ去る5分前まで5分間の移動平均,つまり出 影時の5分前移動平均では,平均値の中に,入影時の 低下出力を含む場合があるため,基準にできない.

Table 5 には、対象とする雲影の入影時に用いた 5 分前移動平均値を、出影時にも用いて雲影の移動方向を 算出し、動画移動方向と一致した雲影数をまとめた.入影時 5 分前平均値を雲影判断基準値とした場合、雲影判 断レベル 90%において、雲影 74個中、66個が一致した. したがって、出影時においても、理論日射強度に基づい た判断基準値より、入影時と同じ 5 分前移動平均日射強 度に基づいた判断基準値を用いた方が適切であることが わかった.

#### 6. まとめ

地上に配置した複数台の日射センサの出力変化の時 間差から雲影のベクトルを求める場合,そのセンサ出力変 化から,雲影の入出を正確に判断する必要がある.セン サ出力変化は雲影によって,出力低下開始から低下した 出力が一定値に落ち着くまで変わらない場合,出力低下 の途中で順番が入れ替わる場合,出力低下開始もしくは 直後から順番が入れ替わる場合の3パターンに分けられた.出力低下順が入れ替わると,雲影ベクトルを算出できない.雲の観測動画から,センサの出力低下中に,その低下順が入れ替わる原因が,雲影の濃度にあることがわかった.

より多くの雲影のベクトルを得るために,雲影の入出を 判断するための雲影判断基準値を検討した.雲影判断 基準値に,入影から5分前までの5分間の移動平均値を 用いることで,理論日射強度を基準値とした場合より,多 数の雲影ベクトルを算出できた.雲影判断基準値の設定 には,より実日射強度に近い値を用いることが適切である ことがわかった.

## 7. 謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー ・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援を受けて 行われた.

## 8. 参考文献

1) K. Lappalainen, S. Valkealahti, Recognition and modelling of irradiance transitions caused by moving clouds, Solar Energy, **112**, 55-67 (2015).

2) M. Lave, J. Kleissl, Solar variability of four sites across the state of Colorado, Renewable Energy **35**(12), 2867-2873 (2010).

 L. M. Hinkelman, Differences between along-wind and cross-wind solar irradiance variability on small spatial scales, Solar Energy 88, 192-203 (2013).

4) F. Belhachat, C. Larbes, Modeling, analysis and comparison of solar photovoltaic array configurations under partial shading conditions, Solar Energy **120**, 399-418 (2015).

5) H. Patel, V. Agarwal, MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics, IEEE Trans. Energy Convers. **23**(1), 302-310 (2008).

6) C.W. Chow, B. Urquhart, M. Lave, A. Dominguez, Intra-hour

forecasting with a total sky imager at the UC San Diego solar energy testbed, Solar Energy **85**(11), 2881-2893 (2011).

7) A. Hammer, D. Heinemann, E. Lorenz and B. Luckehe, Short-term forecasting of solar radiation: a statistical approach using satellite data, Solar Energy **67**(1-3), 139-150 (1999).

8) E. Lorenz, A. Hammer and D. Heinemann, Short term forecasting of solar radiation based on satellite data, In: Proceedings of ISES Europe Solar Congress EUROSUN2004 (2004).

9) J.L. Bosch, Y. Zheng, J. Kleissl, Deriving cloud velocity from an array of solar radiation measurements, Solar Energy **87**, 196-203 (2013)

10) J.L. Bosch, J. Kleissl, Cloud motion vectors from a network of ground sensors in a solar power plant, Solar Energy **95**, 13-20 (2013)

11) K. Lappalainen, S.Valkealahti, Analysis of shading periods caused by moving clouds, Solar Energy **135**, 188-196 (2016).

12) V. Fung, J. L. Bosch, S. W. Roberts, and J. Kleissl, Cloud shadow speed sensor, Atmos. Meas. Tech. 7, 1693-1700 (2014).

13) R. Nomura, T. Harigai, Y. Suda and H.Takikawa, Second by second prediction of solar power generation based on cloud shadow behavior estimation near a power station, AIP Conf. Proc., 1807, 020024-1-10, (2017).

14) S. Oke, S. Sugiyama, Y. Suda, H. Takikawa, K. Kawashima, Development of simple pyranometer using PV array for solar irradiance measurement in greenhouse, Journal of JSES, **35**(5), 71–76 (2009).

15) S. Sugiyama, M. A. Farizul, H. Tanoue, Y. Suda, H. Takikawa, S. Oke, K. Kawashima, PV-Array pyranometer with 4 sensors in greenhouse and Study on temperature correction, Journal of JSES, **37**(3), pp.55–61 (2011).

16) A. Bilguun, T. Nakaso, T. Harigai, Y. Suda, H. Takikawa, H. Tanoue, Development of simple band-spectral pyranometer and quantum meter using photovoltaic cells and bandpass filters, AIP Conf. Proc., 1709, 020025-1–020025-11 (2016).

17) T. Harigai, T. Hiraiwa, Y. Suda, H. Takikawa, Development of Photovoltaic Simple Pyranometer with Temperature Compensation, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, **137**(11), 674-675 (2017).

18) R. Inman, Y. Chu Carlos, F. M. Coimbra, Cloud enhancement of global horizontal irradiance in California and Hawaii, Solar Energy **130**, 128-138 (2016).