

Estimation of Distant Cloud Cover by All-sky Image Data for Forecasting Amount of Solar Energy for Short Periods

Kazuto YUKITA*1‡ Katsuhiro ICHIYANAGI*2 Yasuyuki GOTO*3 Toshiro MATSUMURA*4
Katsunori MIZUNO*5 Masayuki MINOWA*6 Toshiya NANAHAHA*7

日射強度の短周期変動予測を目的とした 全天雲画像データによる遠方雲量推定の検討

雪田 和人 *1 ‡
水野 勝教 *5

一柳 勝宏 *2
箕輪 昌幸 *6

後藤 泰之 *3
七原 俊也 *7

松村 年郎 *4

Abstract

We estimated the distant cloud cover by the all-sky image data for forecasting amount of solar energy for short periods. It is confirmed that the time variation of estimated cloud cover is leading and having similar shape to the observed solar radiation. The main result in this study is as follows. (1) According to the image processing results of the cloud, the JPEG data almost similar to RAW data. Therefore, JPEG data file is small memory capacity, high resolution and it is superior as image data collection file format. (2) The ceilometer observes the cloud cover in $\pi/3$ rad around the zenith. To the observed solar radiation, the time variation of estimated cloud cover is similar, but also lagged. (3) We presented the estimating method of distant cloud cover by using saturation level of the all-sky cloud image. To the observed solar radiation, the time variation of estimated-distant cloud cover is similar and leading for several ten minutes from several minute. (4) The data to use for an estimate of distant cloud cover is obtained by all-sky image camera with the GPS timer. Therefore, the presented method will be feasible easily.

Keywords: Solar radiation, All-sky image, Distant cloud cover, Estimation, PV, Fish-eye lens

キーワード：日射強度，天空画像，遠方雲量，推定，PV，魚眼レンズ

1. はじめに

東日本大震災以後，電力供給が逼迫したことを契機として，太陽光や風力などの自然エネルギー利用による発電が注目されるようになった．太陽光発電(以下，PV という)の急峻な変動に伴う系統電圧の調整や周波数維持のための負荷調整(負荷周波数制御)や発電機の計画的な運用のためには，数分～20分程度の周期で変動するPV出力を予測することが重要である．しかしながら，電力系統の需給運

用において，PVに起因する20分程度以下の短周期の変動を予測する手法や計測技術等は確立されておらず実運用に適用された事例はない．これは従来の気象モデルやレーダデータの利用による出力変化予測では，急峻な雲量の変化や小さな雲の移動を捉えることができないためである．また，日射計だけでは，地域の特異な気象現象に伴う変動予測は困難である．反面，PV設備上空の全天雲画像は，急峻な雲量の変化や小さな雲の移動も直接的，かつ容易に捉えることができる．

*1 Professor, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology
1247 Yachigusa, Yakusa Cho, Toyota City, Aichi 470-0392, Japan
‡e-mail: yukita@aitech.ac.jp

*2 Professor Emeritus, Aichi Institute of Technology

*3 Professor, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology

*4 Professor, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology

*5 Professor, Faculty of Information Science Department of Information Science, Aichi Institute of Technology

*6 Professor, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology

*7 Prof. of E and E Eng. Tokyo Institute of Technology

Received: 25 Oct. 2019, Accepted: 18 Mar. 2020

*1 愛知工業大学工学部教授(〒470-0392 豊田市八草町八千草1247)
‡e-mail: yukita@aitech.ac.jp

*2 愛知工業大学名誉教授

*3 愛知工業大学工学部教授

*4 愛知工業大学工学部教授

*5 愛知工業大学情報科学部教授

*6 愛知工業大学工学部教授

*7 東京工業大学工学院電気電子系教授

(原稿受付：2019年10月25日，受理日：2020年3月18日)

気象データから日射強度を予測する手法として、衛星画像を用いる方法^(1~4)や気象庁が発表する地上データや予報情報を利用する方法^(5~8)などがある。しかし、衛星画像や気象庁の情報はデータ取り込みまでに相当時間を要する。

他方、天空画像を用いて日射強度を推定および予測する方法が報告されている。これらの方法は魚眼レンズカメラを PV サイトに設置することにより、天空画像を簡単に取り込み、瞬時に処理することが可能と言える^(9~13)。

本論文では PV 発電サイトで瞬時に、かつ容易にデータ収集可能な日射強度の予測法として、1ヶ所で撮影した天空画像から得られる遠方雲領域に着目し、その雲量を推定することにより、日射強度の短周期変動予測の可能性について検討している。雲量計による実測雲量値と日射計による日射強度値が、比較的相関性を有することから、雲画像から雲量推定する方法を提案し、雲量推定法の妥当性を検証する。さらに、雲の移動方向にもとづいて、天空画像解析範囲を適宜変更することによる遠方雲量推定法を提案している。雲量推定に関する研究の多くは、天空全体を対象とした画像解析により雲量を推定している^(9~13)。他方、本提案法による遠方雲量推定は、実測日射強度変化に対して、類似性と進み時間を有することから、短周期日射強度変動予測の重要な入力情報として利用可能性が確認できた。

2. 雲量推定のためのデータ収集

2.1 雲量・雲高計と日射計

雲量・雲高計(以下、シーロメータという)は視野角 (viewing angle) $\theta_z=60^\circ$ でその観測範囲を図1に示す。雲量値は低層 (lower layer), 中層 (middle layer) および高層 (upper layer) の各高度における観測範囲における雲領域の割合%で表し、サンプリング時間1分としてデータ収集されている。本論文ではシーロメータで観測される各高度雲量を合計し、実測雲量とする。

また、日射計は、「水平日射強度」、「傾斜日射強度」、「垂直日射強度」、「直達日射強度」の4種類の日射強度を同時観測し、サンプリング時間5秒でデータ収集している。本論文では「傾斜日射強度(傾斜角 30°)」を1分値データに変換し、実測日射強度とする。

2.2 GPS 同期全天雲画像撮影装置

本論文で使用する全天雲画像データは GPS モジュールと AVR マイコンにより構成した GPS 同期全天雲画像撮影装置により得られる。同装置に搭載されたカメラは汎用のデジタル一眼レフレックス、レンズは魚眼レンズを用い、30秒毎、6時~18時の12時間連続撮影(1452画像/日)している。撮影条件はシャッター速度 1/1000s, 絞り F10, 感度 ISO 100 で一定とした。

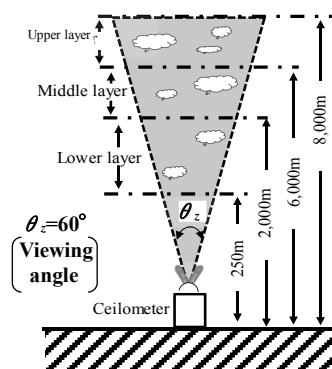


Fig.1 Ranges of ceilometer

図1 雲量・雲高計(シーロメータ)の観測範囲

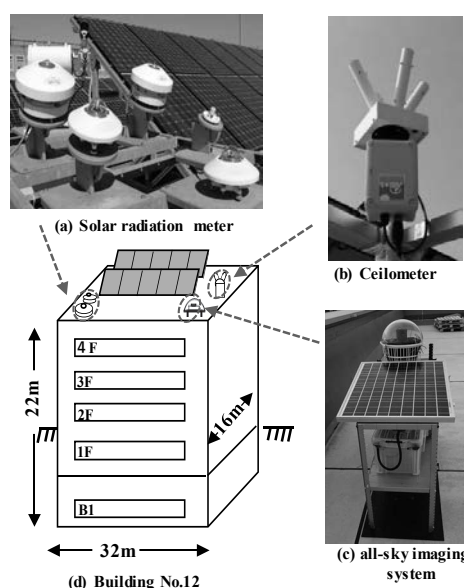


Fig.2 Setting situation of all-sky image system

図2 全天雲画像撮影装置の設置状況

全天雲画像撮影装置の設置状況は図2に示す様に、地上4階建屋の屋上に日射計、シーロメータ、PV パネルと共に太陽光の障害物とならないように設置されている。また、同装置は AC 電源、小型 PV パネル(最大出力 50W)および蓄電池により無停電電源構成としている。

なお、本装置により雲画像データを収集するにあたり、晴天下で太陽光の直射を常時受け、機材が高温環境下にさらされることになり、直射日光によるカメラの撮像素子の損傷を防止するための対策が必要である。また、全天雲画像の1日あたりの撮影回数が多く、短期間内のデータ回収や機器の保守管理が必須となる。

2.3 日射強度予測に用いる雲量観測データ

シーロメータにより観測される雲量は上層、中層、低層の各高度における雲領域における割合%で表されている。日射強度予測に用いる入力データとして、どの高度の雲量値が良いかについて検討した。

Table 1 Coefficient of solar radiation and cloud cover
表 1 日射強度と雲量データとの相関性

Case	Month / Day	Time	Coefficient of cloud cover and solar radiation			
			Lower layer	Middle layer	Upper layer	Total
1	9/24	12:00-13:40	0.00	0.58	<u>0.79</u>	<u>0.89</u>
2	10/2	12:00-13:00	0.00	0.12	<u>0.49</u>	<u>0.48</u>
3	10/31	13:30-14:15	0.13	0.09	<u>0.29</u>	0.08
4	11/3	12:35-13:40	0.40	<u>0.47</u>	0.15	<u>0.50</u>
5	11/9	9:30-11:15	0.45	<u>0.71</u>	0.36	<u>0.74</u>
6	11/13	10:00-11:30	0.25	<u>0.78</u>	0.25	<u>0.92</u>
7	11/13	11:30-13:00	0.10	<u>0.71</u>	0.35	<u>0.66</u>
8	11/19	12:35-13:40	<u>0.53</u>	0.12	0.27	0.02

各層の雲量および合計雲量(total cloud cover)を含む4種類の雲量データと実測日射強度との相関性を調べた。例として、日射強度が急変した8例について、実測雲量と日射強度との間の相関係数を表1に示す。同表において、合計欄(Total)は各層の雲量値の総和を雲量とした場合の日射強度との相関係数を示す。また、合計欄を含む各層の相関係数について最大値および最大値に準ずる値(最大値との差0.1以下)にアンダーラインを付した。その結果、シーロメータの観測値の合計値を雲量とした場合、8例中6例について、相関係数は最大または最大値に準ずる値を示すことが分かる。このことから、本論文で用いる雲量観測データとしては、合計雲量を用いて検討している。

なお、合計欄でアンダーラインを付さなかった例はシーロメータが天頂付近(天頂中心±30°の範囲)の雲量値を観測しているのに対し、天頂付近から外れた位置にある太陽付近の雲の状況と異なった場合であった結果、日射強度との相関性が低い結果であったと考える。このことに関連して、雲量観測域を太陽位置付近に変更し、相関性向上を目的として雲画像解析により検討した結果について、3章以降にて述べる。

2.4 撮影画像のデータメッシュ化

全天雲画像データ処理の前処理として、雲画像を一定枠のメッシュに区切り、各メッシュ内のデータ平均値を求めることにより、処理データの平滑化と実測雲量や実測日射強度との比較検討の容易さを図った。図3に全天空画像をメッシュ化した例を示す。同図は1500×1500ピクセルの原画像を用いて、メッシュ間隔50×50ピクセル毎のメッシュ画像を重ね表示してある。

2.5 本研究に用いたJPEGデータ

本研究で使用する雲画像データはJPEGのキャノンS1形式で、圧縮率(原画像データとの容量比)=3.3として保存される。したがって、JPEGデータは本来の原画像として保存されたRAWデータと色彩(彩度, 明度, 色相)の値が異なることが考えられる。しかし、JPEGデータを用

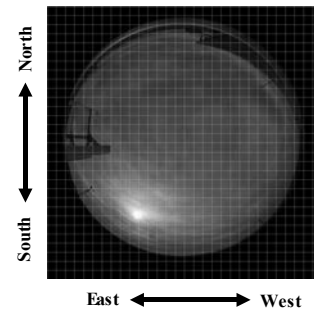
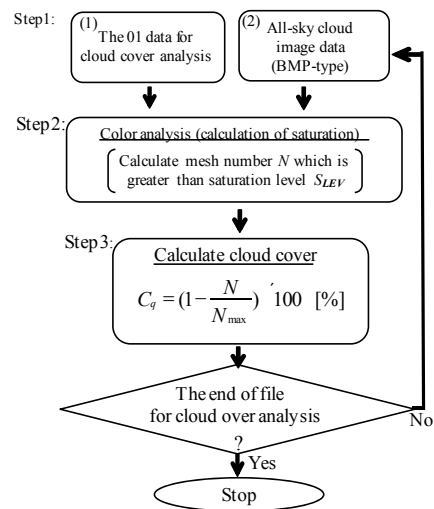


Fig. 3 Meshes of 50×50 pixels on cloud image
図 3 雲画像の50×50メッシュ化



C_q : Estimated value of cloud cover
 S_{LEV} : Threshold of saturation to distinct cloud or sky
 N : Mesh number which is greater than saturation level S_{LEV}
 N_{max} : Total mesh number in analysis area of cloud cover

Fig.4 Calculation flow for estimation of cloud cover by using all sky cloud image data

図 4 全天雲画像データによる雲量推定計算フロー

いて得られた画像処理結果はRAWデータを用いた場合に比べて、両データに殆ど差異がないことを確認し、発表している⁽⁴⁾。本論文ではJPEGデータを原画像のピクセル単位に対応したBMPデータに変換し、画像処理している。

3. 全天雲画像による天頂雲量推定

3.1 雲量推定計算

雲画像から雲量を推定するために、青空と雲領域は鮮やかさに違いがあることに着目し、雲画像解析による彩度値を用いて雲量算出を行う。図4に雲量推定の計算フローを示す。同図では、データ入力部、色彩処理部、雲量計算部の各計算ブロックに分かれている。雲量推定手順の概要を以下に示す。

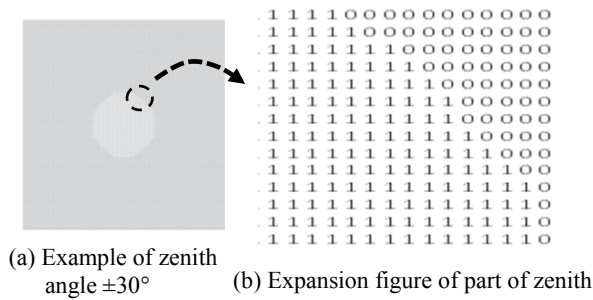


Fig.5 Mesh data presented by 0 and 1 for cloud cover analysis near zenith (150x150 meshes)

図5 天頂を雲量解析領域とする01メッシュデータ (150×150メッシュ)

Step1:データ入力

(1)色彩処理の有無を表す01データ読み込み

全天雲画像(BMPファイル)の雲量解析対象域を表すために、画像メッシュに解析の要否を0および1として読む。雲量解析対象領域の例として、天頂角±30°の場合の01データを図5に示す。同(a)はデータ処理の有無について全データを表示した(0:処理なし, 1:処理あり)。また、同(b)は図(a)の中央付近における一部分(破線○内の)拡大図を示す。

(2)解析データの読み込み

全天空撮影装置により得られたJPEG形式の雲画像データをBMP形式に変換し、解析データとして読み込む。

Step2:色彩処理部

画像データについてメッシュ毎に彩度値Sを算出する。全天雲画像の解析対象域(メッシュの値“1”で表した領域)における彩度値S_{LEV}より大きい値を示すメッシュ数Nをカウントする。ここで、S_{LEV}の値はS_{LEV}=1~16の範囲で与え、S_{LEV}の最良値の選定について、3.3節で述べる。

Step3:雲量推定計算

解析対象域全体のメッシュ数をN_{max}として雲量推定値C_qを次式により算出する。

$$C_q = \left(1 - \frac{N}{N_{max}}\right) \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

3.2 天頂雲量推定結果と実測雲量との相関

雲量推定は日射強度急変時前後を対象とした。2012年11月13日10:00~11:30において雲量・日射強度の実測と同時撮影した雲画像データを対象に天頂雲量の推定計算を行った。図1で示したシーロメータが天頂角θ_z=60°の範囲を観測していることから、画像の解析範囲も同一とした。具体的に、雲と空を区別する際の彩度のしきい値S_{LEV}の値を選定するにあたって、任意にS_{LEV}=6を与え、雲量推定の可能性を調べた。その結果、図6にシーロメータによ

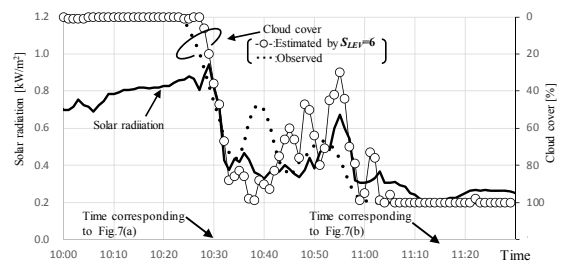


Fig. 6 Cloud cover and solar radiation on Nov. 13, 2012
図6 雲量および日射強度(2012年11月13日)

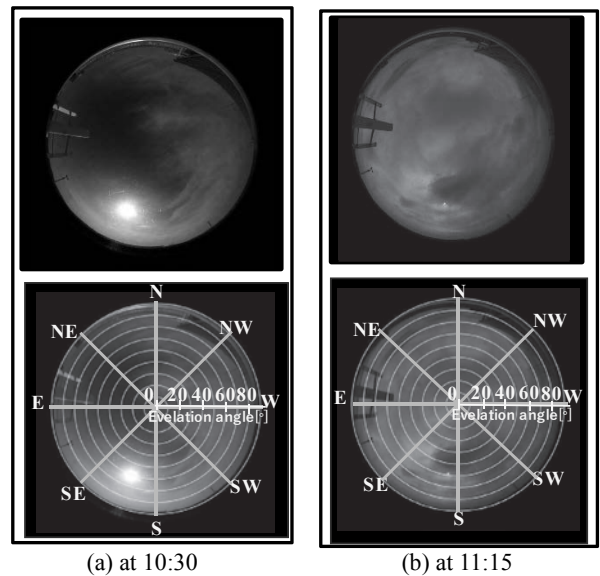


Fig. 7 Cloud images(Nov. 13, 2012)
図7 雲画像(2012年11月13日)

る実測雲量を・印、雲画像による雲量推定結果を○印で示す。同図から、両者の変化は日射強度変化(実線で示す)に比較的類似していることがわかる。

日射強度の急変時前後を雲画像により確認するために、日射強度急減の直前の雲画像を図7(a)に、急変後の一定状態時を同(b)に各々示す。両図の上段に原画像を、下段に原画像に方位と天頂角を追記した。両図と図6の比較から、10:30時点において太陽は薄雲に覆われて日射強度は0.8kW/m²程度を示していることが確認できる。また、11:15時点の画像において、太陽位置(小さい白い点)の周辺は暗い雲で覆われ、その結果として日射強度も0.2kW/m²に少ない値を示すものと推察できる。

3.3 彩度レベル設定値の雲量推定結果への影響

図6に示した雲量推定値はS_{LEV}値を任意に与えた結果であり、与えるS_{LEV}値に対して雲量推定結果も異なる。そこで、S_{LEV}値が雲量推定結果に与える影響について調べた。

具体的に、彩度レベルS_{LEV}=1~14に変化させて画像解析を行い、その結果を表2にまとめた。同表から、相関係数最大を与える最適彩度レベルS_{LEV}*=10に対する相関係数

Table 2 Correlation coefficient for various saturation levels S_{LEV} between estimated and observed cloud cover

表2 S_{LEV} に対する推定雲量と実測雲量の相関係数

Saturation Level S_{LEV}	Correlation coefficient C	Saturation Level S_{LEV}	Correlation coefficient C
1	0.652	8	0.962
2	0.785	9	0.968
3	0.863	10 ^{††}	0.970
4	0.907	11	0.965
5	0.932	12	0.931
6 [†]	0.942	13	0.861
7	0.951	14	0.771

†: Saturation level used in Fig.7($S_{LEV}=6$)
 ††: Optimum saturation level ($S_{LEV}^*=10$)

Table 3 Correlation coefficient of estimated cloud cover and observed ones (eight cases in 2012)

表3 推定雲量と実測値雲量の相関係数 (2012年の8例)

Case	Month / Day	Time	Saturation level S_{LEV}^*	Correlation coefficient C	Notes
					S_{LEV} ($C>0.85$)
1	9/24	12:00-13:40	3	0.93	1 to 10
2	10/2	12:00-13:00	16	0.74	----
3	10/31	13:30-14:15	6	0.95	2 to 17
4	11/3	12:35-13:40	4	0.89	2 to 10
5	11/9	9:30-11:15	6	0.95	4 to 10
6	11/13	10:00-11:30	10	0.97	5 to 15
7	11/13	11:30-13:00	10	0.99	3 to 16
8	11/19	12:35-13:40	12	0.85	12 to 16

S_{LEV}^* :Optimum saturation level

$C=0.97$, $S_{LEV}=3\sim 13$ に対して $C>0.85$ で、比較的高い相関性が確認できる。このように、比較的広い範囲の S_{LEV} 値に対して、相関係数 C の比較的大きい値が得られることは、雲量推定時における S_{LEV} 値の指定が容易と言える。

3.4 その他の天頂雲量推定結果と実測雲量との相関

2012年9月～11月に得られた雲画像データを用いて、日射強度急変時の総計8例について、天頂における雲量推定を行い、実測雲量と比較した。それらの結果を表3にまとめた。

同表から、相関係数最大を与える最適彩度レベル $S_{LEV}^*=3\sim 16$ と広範囲の値として得られものの、同表の Notes 欄に示す様に、8例中7例について、広範囲の S_{LEV}^* 値に対する相関係数は $C>0.85$ で、比較的高い値が確認できる。このことは、 S_{LEV} 値がその最適値 S_{LEV}^* と若干異なっても、雲量推定結果に影響が少なく、雲量推定に先立って必要な S_{LEV} 設定が容易であると言える。

なお、Case 2 の相関係数は $C=0.74$ と低い値となっているが、対象日時における雲画像とシーロメータの観測値を



From ① to ⑧: analysis area of cloud cover

Fig.8 Analysis area of cloud cover by using cloud images
 図8 雲画像の遠方雲量推定に用いた解析領域

調べた結果から、高層のすじ雲のみであり(高層 0~28%, 中層 0%, 低層 0%), 雲と空との区別が困難となり、相関係数 C は低い値となったと考える。

以上の結果から、雲画像の天頂 (仰角 90°) 付近における雲量推定値はシーロメータによる実測値との間に比較的良好な相関性を示しており、全天雲画像データを用いた雲量推定計算法の妥当性が確認できる。

4. 短周期日射強度予測のための遠方雲量推定

4.1 遠方雲量推定の特長と目的

全天雲画像による遠方雲量推定の特長として、

- (1)魚眼レンズ(画角 180°)を装着したカメラ1台を使用し、全方向における遠方の雲が1か所の観測点で撮影できること
- (2)日射強度予測に関して、太陽に接近中の遠方にある雲の移動状況は時間的に余裕を持った重要な入力情報として利用できること
- (3)日中(朝方、夕方を除く)における太陽位置は全天画像の周辺部から外れており、遠方の雲解析における太陽のハレーション現象の直接的な影響は少なく、無視できること

などが考えられる。そこで、雲量から日射強度の短周期日射強度予測を目的として、遠方の雲量推定値を用いた日射強度変動予測の可能性について以下に検討した。

4.2 遠方雲量推定のための全天雲画像解析領域

雲画像の遠方雲量解析対象領域として、全天画像の周辺部に設定する。遠方雲量の解析対象域として、全天画像周辺雲量の視野角 $\theta_z=60^\circ$ 、全天画像の魚眼ひずみを考慮し、図8に示す様に、雲量解析域を設定した。同図(a)において、天頂部を解析領域①の円形、周辺部を解析領域②～⑧の楕円とした。

ここで、雲領域②～⑧のうちから、太陽に向かう雲領域選定に関して、雲の移動方向を推定する。雲領域の移動方向推定は時間差 Δt で得られる2回の雲画像を用いる。太陽位置を起点とするピクセル距離で表した移動方向線上の彩度分布を求め、両者の相互相関係数から雲の移動状況を推定する。

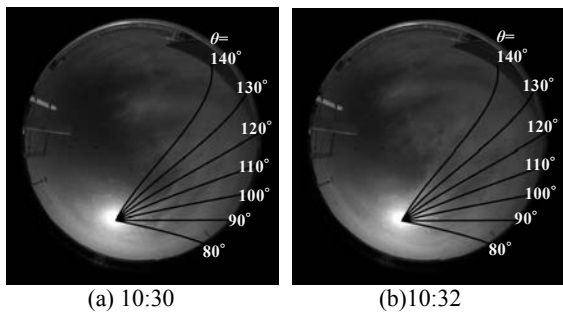


Fig.9 Azimuth lines to start from sun position(Nov. 13,2012)
 図9 太陽位置を起点とする方位線(2012年11月13日)

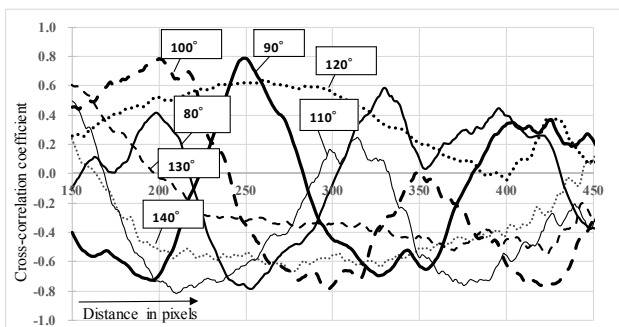


Fig.10 Cross-correlation of the saturation at 10:30 and 10:32
 (Nov. 13,2012)

図10 10:30と10:32における彩度の相互相関
 (2012年11月13日)

雲領域移動方向推定例として、図9に示すように、2012年11月13日の10:30および10:32に撮影された2枚の雲画像について、探査方向 $\theta=80^\circ \sim 140^\circ$ (同図の実線で示す)における彩度変化の相関を比較する方法⁽¹⁵⁾を適用した。その結果を図10に示す。同図から、探査方位 $\theta=90^\circ$ および 100° における相関係数最大値0.8で比較的大きい値となった。したがって、 $\theta=90^\circ \sim 100^\circ$ 方向の雲領域②を雲量解析領域として選定する。

4.3 一連の雲画像データによる遠方雲量推定

(1) 彩度レベルに対する雲量推定

対象日の2012年11月13日10:00~11:30における雲画像の1分間隔データを用いて、与えられた彩度レベル S_{LEV} に対して雲量を推定した。 $S_{LEV}=1 \sim 10$ の値に対する雲量推定結果を図11に示す。

同図に示すように、 S_{LEV} の値が大きくなると、全体的に雲量推定値も大きい値として得られることが分かる。このことは、同じ雲画像に対して、大きい S_{LEV} 値(空と判定するための彩度しきい値)を超える領域が少ない(1式のNの値が小さい)ことになることから、青空領域が少なく、雲領域が大きいことを意味している。

(2) S_{LEV} に対する各雲量推定値と日射強度との相互相関

彩度レベル $S_{LEV}=1 \sim 14$ の値に対して雲量を推定し、得られた推定雲量と日射強度との相互相関係数を求めた。結果のうち、 $S_{LEV}=1 \sim 5$ の場合の結果について、実測日射強度

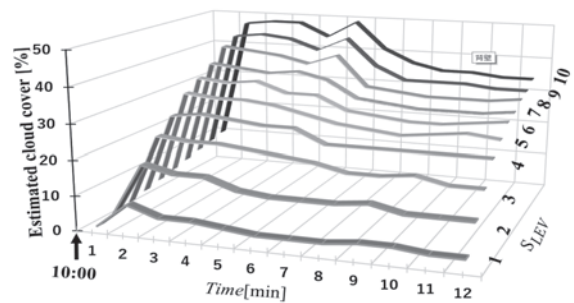


Fig.11 Estimated cloud cover for various kinds of S_{LEV}
 (Nov. 13, 2012)

図11 S_{LEV} に対する雲量推定結果(2012年11月13日)

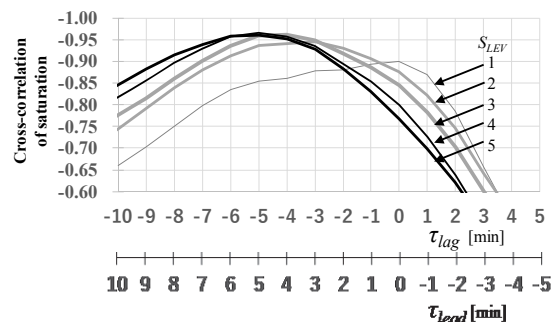


Fig.12 Cross-correlation of estimated cloud cover and observed solar radiation(Nov. 13, 2012)

図12 雲量推定と日射強度の相関性(2012年11月13日)

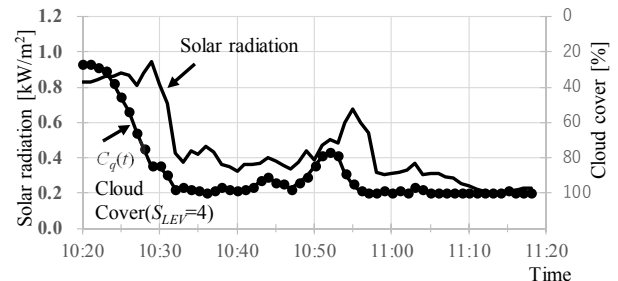


Fig.13 Time variation of estimated cloud cover $C_q(t)$ and observed solar radiation ($T_{lead}=5min$)

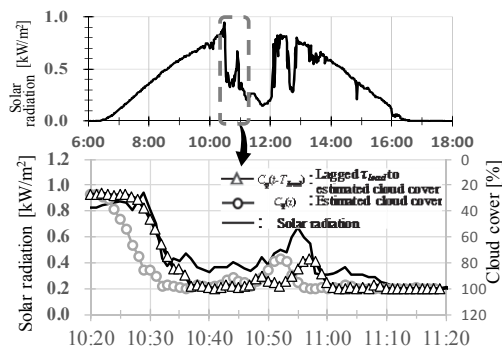
図13 雲量推定 $C_q(t)$ と日射強度の時系列比較($T_{lead}=5min$)

に対する進み時間 $T_{lead}[min]$ の関係を図12に示す。同図の遅れ時間を T_{lag} とすれば $T_{lead} = -T_{lag}$ の関係を表す。

同図から $S_{LEV}=4$ のとき、時間進み5分($T_{lead}=5min$)、相関係数の最大値 $Corr^*=0.97$ として得られている。なお、幅広い S_{LEV} 値($S_{LEV}=3 \sim 14$)に対して、いずれも $T_{lead}=5min$ のとき相関係数最大 $Corr^*>0.94$ が得られている。比較的幅広い S_{LEV} 値に対して日射強度変化との類似性が高い結果は、日射強度予測に用いる雲量を推定する際に必要な S_{LEV} 値選定が容易となる。

(3) 遠方雲量の推定値と日射強度の時間推移比較

$S_{LEV}=4$ に対する雲量推定値と日射強度実績値の時間推移を図13に示す。なお、両者の変化傾向を比較し易くするために、雲量の縦軸は反転表示してある。



Nov. 13, 2012 ($Corr^z = -0.97, T_{lead}=5min, S_{LEI}=4$)

Fig.14 Time variation of estimated cloud cover $C_q(t-T_{lead})$ and observed solar radiation

図 14 雲量推定 $C_q(t-T_{lead})$ と日射強度の時系列比較

一般に、太陽に接近中にある遠方の雲はその後(遅れ時間 $\tau_{lag}[\text{min}]$ 後)に太陽を覆うようになって、日射強度は減少させる。したがって、遠方の雲が上空の太陽を覆うまでの時間が $\tau_{lag}[\text{min}]$ に相当してる。図 13 から、推定雲量(●印)は日射強度(実線)に約 5 分先行して、類似変化している様子が確認できる。

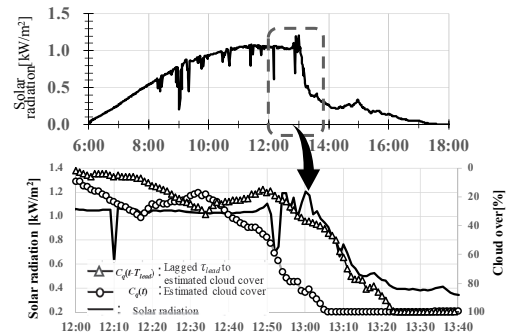
(4) 遠方雲量の進み時間考慮による日射強度との相関性

図 13 により、雲量推定値 $C_q(t)$ は日射強度に先行し、類似変化することから、両変化の類似性比較を容易にするために、雲量推定値を進み時間相当分($T_{lead}=5\text{min}$)遅らせた $C_q(t-T_{lead})$ と日射強度を図 14 に示す。同図の上段に対象日 6:00-18:00 の日射強度変化を示した。同図の下段に日射強度急減前後の時間帯を示し、日射強度を実線で、雲量推定値 $C_q(t)$ と $C_q(t-T_{lead})$ を○印および△印で各々示した。下段の図から、推定雲量は 5 分先行して日射強度変化に追従変化が確認できる。遠方雲量は日射強度の間に強い相関性(相関係数 $Corr^*=-0.97$)を有することから、雲量推定値は日射強度予測の入力情報として有効と考える。

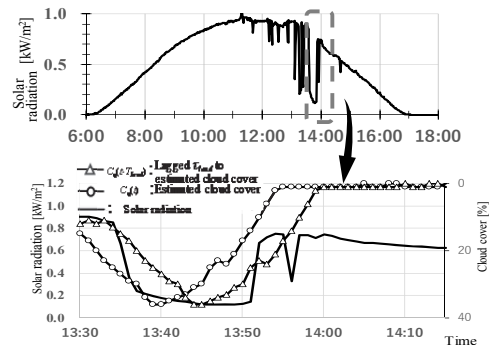
(5) その他の遠方雲量推定結果

日射強度および雲画像の両データが完備できた表 3 と同じ 8 ケースを対象に、前述同様の方法を用いて、遠方雲量推定を実施、実測日射強度との比較を行った。それらの結果のうち、9 月と 10 月の各 1 例を図 15(a)および 同(b)に示す。両図は図 14 と同様、雲量推定値○印はいずれも、 $lead$ 値に応じて日射強度変化に先行変化を示している。また、 T_{lead} 値に応じて時間推移させた雲量推定値△印の変化傾向は日射強度の平滑的変化に類似している。雲量値が日射強度の平滑的変化を表すことは、雲量が一定の範囲内(図 8 で設定した解析領域①~⑧)の平均化された彩度値によって得られることに関係しているものとする。

2012 年 9 月~11 月における計 8 例について実施した遠方雲量の推定結果を表 4 にまとめた。同表には、雲量推定の際に設定した解析領域(②や③で示す)に対して、日射強度との相関係数最大となる彩度レベル設定値 S_{LEI}^* を用い



(a) Sept. 24, 2012 ($Corr^* = -0.94, T_{lead}=17min, S_{LEI}=12$)



(b) Oct. 31, 2012 ($Corr^* = -0.93, T_{lead}=5min, S_{LEI}=3$)

Fig.15 Various time variations of estimated cloud cover and observed solar radiation

図 15 その他の雲量推定と日射強度の時系列比較

Table 4 Variation comparison of estimated cloud cover and observed solar radiation(eight cases in 2012)

表 4 推定雲量変化と実測日射強度変化の比較 (2012 年 9 月~同 11 月の 8 例)

Case	Month / Day	Time	Analysis area No. in Fig 8	Used S_{LEI}^*			Used average of S_{LEI}^* values		
				S_{LEI}^*	$Corr^*$	$T_{lead}^* [\text{min}]$	S_{LEI}^*	$Corr^*$	$T_{lead}^* [\text{min}]$
1	9/24	12:00-13:40	②	12	-0.94	17	7	-0.93	18
2	10/2	12:00-13:00	②	12	-0.77	17	7	-0.75	16
3	10/31	13:30-14:15	③	3	-0.93	5	7	-0.86	6
4	11/3	12:35-13:40	③	5	-0.88	20	7	-0.87	21
5	11/9	9:30-11:15	③	8	-0.78	9	7	-0.75	11
6	11/13	10:00-11:30	②	4	-0.97	5	7	-0.96	5
7	11/13	11:30-13:00	②	4	-0.96	8	7	-0.92	6
8	11/19	12:35-13:40	②	6	-0.70	11	7	-0.69	15
Average				7	-0.87		7	-0.84	

S_{LEI}^* : Optimum saturation level

$Corr^*$: Minimum correlation coefficient of estimated cloud cover and observed solar radiation

T_{lead}^* : Time at minimum value of $Corr^*$ obtained by using S_{LEI}^*

た場合の結果について、推定雲量と日射強度との相関係数 $Corr^*$ 、雲量推定値の日射強度に対する進み時間 T_{lead}^* を”Used S_{LEI}^* ”欄に併記した。

同欄を見ると、ケース毎の S_{LEI}^* に対応する $|Corr^*|$ は 0.7 以上(平均 0.87)の値で、遠方雲量 $C_q(t-T_{lead}^*)$ との日射強度 $I(t)$ との間に比較的良好な相関性が確認できる。しかし、

S_{LEV}^* がケース毎に異なることは、雲量推定に先立って、 S_{LEV} の設定が困難である。

そこで、 S_{LEV}^* の平均値($S_{LEV}^*=7$)を用いて、全ケースについて同じ S_{LEV} 値を与えて、雲量推定を実施した。その結果を”Used average of S_{LEV}^* values”欄に、 C_{corr} 、雲量推定値の日射強度に対する進み時間 T_{lead} を併記した。同欄から、 C_{corr} 、 T_{lead} の値は C_{corr}^* 、 T_{lead}^* の値に殆ど同じか、近い値を示すことが確認できた。以上の結果から、全天雲画像データにより、得られる遠方の推定雲量は日射強度の短周期変動予測のための入力情報として重要であり、容易に利用可能と言える。

5. まとめ

日射強度変化の短周期変動予測を目的として、雲量計、日射計および全天雲画像撮影装置の各データが完備した2012年9月～11月の日射強度の急変時を対象に、同時収集したデータの処理結果を比較検討した。その結果、日射強度変化に対し、得られた雲量推定値変化に類似性と先行性を有することが確認できた。本論文の主な内容は以下の通りである。

- (1) 雲量計(シーロメータ)は天頂を中心に視野角 60° の範囲を観測しており、その観測値は傾斜日射強度の時間的変化に類似性が認められる。
- (2) 雲画像の彩度値を用いた雲量推定法を提案し、雲量計と同じ観測範囲に対する雲量推定した結果、8例中7例について、雲量実測値との間の相関係数0.85以上を有しており、彩度値を用いた雲量推定法の妥当性を確認した。
- (3) 雲と空を区別する際の彩度しきい値 S_{LEV} の設定に関して、共通 S_{LEV} を与えた結果、遠方雲量推定値は8例中5例について日射強度観測値との間の相関係数0.8程度以上、雲量推定値の時間変化は日射強度の実績変化に対して5～17分、先行追従することが確認できた。
- (4) 遠方雲量推定はGPS同期による全天雲画像撮影装置1機をPV発電サイトに設置して得たデータを使用しており、容易に実現可能と言える。
- (5) 対象地点を他地点に変更した場合、全天雲画像および日射強度の両データを用いた雲量と日射強度との相関性の検討⁽¹⁵⁾から、本手法の適用が可能と考える。
 全天雲画像撮影装置により、雲画像データを収集する際に注意すべき点としては以下の事項が挙げられる。
- (6) 晴天時における高温環境下では装置の温度上昇対策が必要である
- (7) 1日あたりの撮影回数が多く、短期間内でのデータ回収と機器の保守管理が必須となる

以上の結果から、日射強度の数分～20分程度の短周期変動予測の入力情報として、全天雲画像から得られる遠方雲量推定の有用性が確認できた。さらに、全天雲画像撮影装置を2機以上に増設、利用することにより、時間的、空間的に余裕のある日射強度予測が期待される。

6. 謝辞

終わりに、河合竜児氏(現在、JR東海に勤務)ならびに子安拓夫氏(現在、JR東海に勤務)には大学院在学中、雲画像撮影装置の設置ならびに雲画像データの収集、整理に多大な協力を頂いた。ここに記して、謝意を表す。

7. 参考文献

- 1) M.Noia, C.F.Ratto and R.Festa : Solar Irradiance Estimation from Geostationary Satellite data I,II, Solar Energy **51**, 449-465(1993).
- 2) L.Qingyong,L.Weitao, and Y.Jun : A Hybrid Thresholding Algorithm for Cloud Detection on Ground-Based Color Images, Atmospheric & Oceanic Technol.,**28**(10), 1286-1296(2011).
- 3) 谷口浩成, 黒川浩助, 大谷謙仁, 気象衛星「ひまわり」画像から算出した雲移動ベクトルを用いた雲の自動推定, 写真測量とリモートセンシング, **39**(6), 4-12 (2001)
- 4) 上谷芳昭, 気象衛星画像を用いた住宅用太陽光発電システムの地域別発電量の実時間予測, 岩谷直治記念財団研究報告, **23**, 31-33 (2000)
- 5) S. Nakagawa, E. Kawamoto, Y. Kenmoku, T. Sakakibara, Proceedings of the Annual Conference of Power & Energy Society. IEE of Japan, **9**(1), 444-445(1998)
- 6) S. Nakagawa, S. Sugioka, Y. Kenmoku, T. Sakakibara, Effective Operation of Solar Photovoltaic/Heat Utilization System Using Insolation Forecasted from Precipitation Probability, Journal of Japan Solar Energy Society, **21**(4), 35-42(1995).
- 7) S. Nakagawa, S. Orita, Y. Kenmoku, T. Sakakibara, A Method of Estimating Daily Clearness Indexes from Phrases of General Weather Condition, Journal of Japan Solar Energy Society, **22**(2), 33-38(1998).
- 8) T. Shimada, K. Kurokawa, Insolation Forecasting Using Weather Forecast with Weather Change Patterns, IEEJ Trans. PE, **127**(11), 1219-1225(2007).
- 9) G. Pfister, R. L. McKenzie, J. B. Liley, and A. Thomas, Cloud Coverage Based on All-Sky Imaging and Its Impact on Surface Solar Irradiance, JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY, **42**, 1421-1434(2003).
- 10) S. Enrica, S. Fabrizio, H. T.Mathia, P. Mario, Local estimation of the global horizontal irradiance using an all-sky camera, Solar Energy, **173**, 1225-1235 (2018).
- 11) C. Cristian, H. Martin, M. Riyad, S. Gunther, One-Hour Prediction of the Global Solar Irradiance from All-Sky Images Using Artificial Neural Networks, Energies, **11**(11), 2906 (2018)
- 12) 戸田健太郎, 中村彰宏, 全天写真を用いた日射量推定プログラムの開発, 日本緑化工学会誌, **27**(1), 154-159(2001).
- 13) S. Yamamoto, M. T. Katagi, J. Park, T. Hashimoto, T. Hashimoto, A Basic Study to Forecast the Power Fluctuation of the Photovoltaic Power Generation by Image Processing of Clouds, T. IEEJ, **119**(8/9),909-915(1999).
- 14) 子安拓夫, 雪田和人, 後藤泰之, 一柳勝宏, 全天雲画像によるPVの出力変動予測に関する基礎研究—雲の移動状況及び日射強度変化予測—, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, 分冊5, PE-16-105, PSE-16125 (2016)
- 15) 河合竜児, 子安拓夫, 一柳勝宏, 水野勝教, 雪田和人, 後藤泰之, 小林和弘, 三輪靖, 太陽光発電に起因する短周期変動予測—日射強度変動予測に用いる全天雲画像データの検討—, 新エネルギー・環境メタボリズム社会・環境システム合同研究会資料, FET-15-006, MES-15-006, (2015)