

## 写真測量法による太陽光発電システムの日照障害特性の推定

学生員 登守 利征 (東京農工大学)  
会 員 作田 宏一 (電子技術総合研究所)

会 員 大谷 謙仁 (電子技術総合研究所)  
会 員 黒川 浩助 (東京農工大学)

### Estimation of shading characteristics of PV systems by using photogrammetry

Toshiyuki Tomori\*, Kenji Otani\*\*, Koichi Sakuta\*\* and Kosuke Kurokawa\*

\*Tokyo University of Agriculture & Technology  
2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan  
E-mail: Toshiyuki@cc.tuat.ac.jp

\*\*Electrotechnical Laboratory  
1-1-4 Umezono, Tukuba, Ibaraki, 305-8568 Japan

#### ABSTRACT

In order to decide the place to install PV systems or to estimate their performance, the effect of shadow on PV arrays should be considered. However, there were no qualitative methods for the estimation of shading characteristics of PV systems to be able to perform easily at the on-site. The authors have developed a new method of estimating the shape and position of shadowing obstacles by using the trigonometrical survey with two fisheye (hemispherical) photographs. The errors of the estimation are less than 6% for the length of shadow and less than 3.5% for the direction.

## 1. はじめに

### 1.1 背景

筆者らのグループが開発した太陽光発電 (PV) システムの性能分析手法、SV 法<sup>[1][2]</sup> (Sophisticated Verification method) によって、NEDO フィールドテストプログラムの PV システムを解析した結果、1997 年度の日本全国 104 サイトにおける運転実績は、等価システム稼働時間 (システムの定格容量当たりの発電量) で 1,007 [kWh/kWp]、システム出力係数 (システムの発電性能) で 71.6% であった。システムの発電損失の中で日影の影響による損失が平均で 4.7% を占め、中には 13.1% にまで達するシステムが存在し

た。日影損失はシステムが置かれた周囲日射環境に依存するローカルな発電損失であり、PV セル効率の温度上昇による低下やインバータの損失などシステム構成機器に起因する発電損失とは異なり、オンサイトで評価する必要が出てくると考えられる。PV システムに入射する傾斜面日射強度を周囲環境も考慮して正確に算出することは、発電性能の評価に役立つ他、システム設計の最適化に貢献する。

### 1.2 日射環境測定法の概観

日射環境を評価する手法としては、建築家が日照計画に用いる日影図の方法や CAD ツールの支援による方法などがあり、このような手法による PV システムのシミュレーションツールとして、(株)ラプラスシステムの Solar Pro や Maui Solar Energy Software Corporation の PV-DesignPro 等がある。一方で、周囲日射環境を簡単に取り込む方法として魚眼レンズを用いる方法があり、主に農業・森林学系の研究に用いられてきた。Evans らが 1959 年に林内の日射を推定するための理論と方法論を最初に開発し<sup>[3]</sup>、Anderson が日射を散乱光と直達光に分けて評価するなど更なる改良を行った<sup>[4]</sup>。その後これらの手法のコンピュータ化が進み、Becker らによる事例がある<sup>[5]</sup>。ソフトウェアも開発されており、代表的なものでは HEMIPHOT<sup>[6]</sup>、HEMIVIEW、SOLARCALC がある。例えば、HEMIPHOT では、魚眼写真から直達日射と散乱日射を推定し、年間日射量や林冠植被率、LAI (葉面積指数)、PAR (光合成有効放射) 等の計算ができる。国内では、石川県林業試験場の矢田による林内光環境測定法の検討に用いられた<sup>[7]</sup>。魚眼写真の PV システムへの応用事例としては、(株)きんでんによる発電量予測<sup>[8]</sup>や、筆者らによる日影補正係数の算出がある<sup>[9]</sup>。

### 1.3 目的

魚眼写真を用いて撮影点の日射量を評価する手法のメリットは、周囲日射環境を入力する操作の簡便性である。しかし、PV システムの場合にはアレイ全面に入射する日射量を評価する必要があるため、撮影点を増やして (例えばモジュール全枚数) 面的な解析を

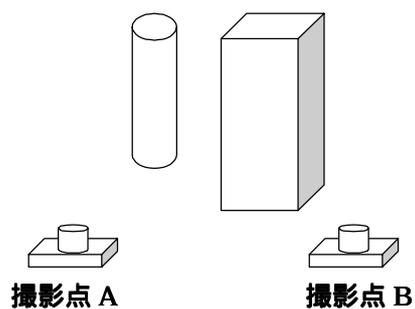
行う必要がある。実際のオンサイトでの撮影作業では、時間や人手の制約から撮影できる魚眼写真の枚数が限られ、また、立地条件によっては足場の問題などで必要十分な写真が撮れない可能性がある。そこで本研究では、少数枚の魚眼写真から三角測量法により周辺の障害物を高さ、位置を把握し、影を面的に評価する方法を検討している。

## 2. 予測方法

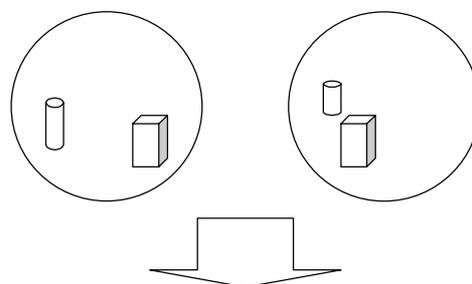
### 2.1 予測処理の流れ

処理の流れについて概念図を図 1 に示す。魚眼写真を 2 地点で撮影し( )、2 枚の写真において同一と判別した物体の特徴点のずれから、三角測量法を用いて注目物体の位置、高さを求める( )。これを撮影地点周辺の各障害物で行い、任意時間における太陽の位置を計算し<sup>[9]</sup>、撮影地点周辺にいつどのような影がかかるかを予測する( )。以下、計算方法について詳細に示す。

### 2 地点において周辺環境の撮影



### 2 枚の魚眼写真のずれから注目点の位置を算出



### 太陽と障害物の位置から影を予測

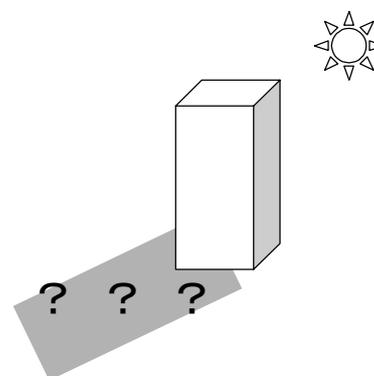


図 1. 影予測方法の概念図

### 2.2 魚眼写真の特徴

等距離射影<sup>[11]</sup>方式による魚眼レンズを用いて撮影すると、図 2 のような天球全体が映し出される写真が得られる。



図 2. 魚眼写真（東京農工大学構内で撮影）

等距離斜影では、天球上の任意の点 P の射影点 P' は次式が満足されるように決められる。(図 3)

$$\frac{r}{R} = \frac{0.5\pi - h_p}{0.5\pi} \quad (1)$$

(但し、 $h_p$  は点 P の太陽高度[rad])

このように等距離射影は高度の差が射影図上の距離に比例するという特徴を持つ。つまり、魚眼写真から対象物の高度角が割り出せることがわかる。また、全方位を撮影できるので方位角も割り出せる。

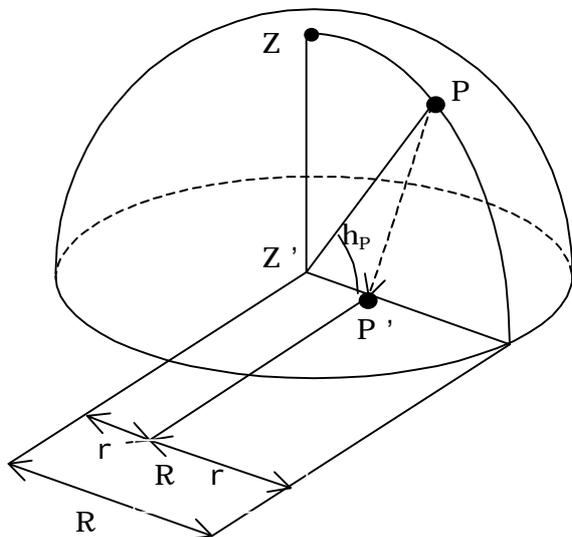


図 3. 天球上の点 P の等距離斜影 P'

### 2.3 魚眼写真 2 枚による注目点位置の算法

注目点 P の位置を求めるために図 4 のような空間を考える。点 P が注目点、点 A、B が撮影位置である。点線の部分はアレイを設置する平面上に存在していることを表す。点 A、B が存在するそれぞれの直線は平行であり、魚眼レンズを解析する基準の方向にのびている。上の条件を満たせば、点 A、B は任意の場所がかまわない。2.2 節より魚眼写真から高度角、方

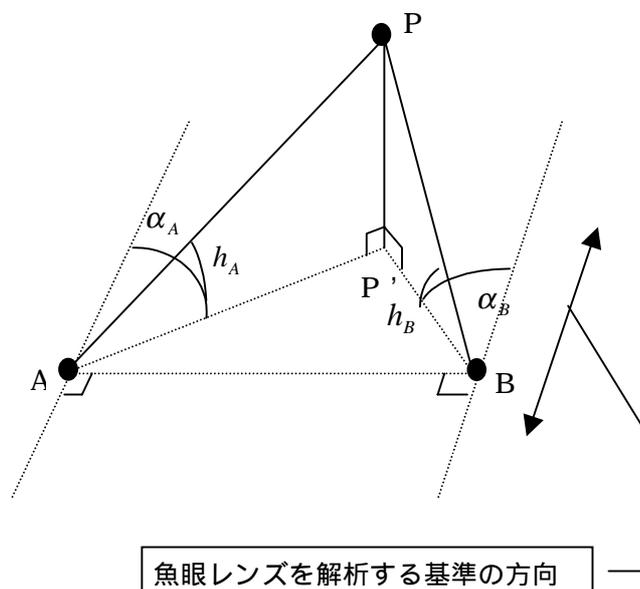


図 4. 2 枚の魚眼写真による測定点、位置の算出

まずは点線の平面だけで考える。以下の式が成り立つことがわかる。

$$AB = |P'A \sin \alpha_A - P'B \sin \alpha_B| \quad (2)$$

$$P'A \cos \alpha_A = P'B \cos \alpha_B \quad (3)$$

上記の 2 式より

$$P'A = \frac{AB}{\left| \sin \alpha_A - \frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} \cos \alpha_A \right|} \quad (4)$$

$$P'B = \frac{AB}{\left| \sin \alpha_B - \frac{\sin \alpha_A}{\cos \alpha_A} \cos \alpha_B \right|} \quad (5)$$

ここで

$$PP' = P'A \tan h_A = P'B \tan h_B \quad (6)$$

であるので、

$$\begin{aligned} PP' &= \frac{AB}{\left| \sin \alpha_A - \frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} \cos \alpha_A \right|} \tan h_A \\ &= \frac{AB}{\left| \sin \alpha_B - \frac{\sin \alpha_A}{\cos \alpha_A} \cos \alpha_B \right|} \tan h_B \end{aligned} \quad (7)$$

よって、測定点 P と撮影点 A、B との位置関係、P の高さ PP' が求まった。

## 2.4 影の形状予測<sup>[11]</sup>

まず、写真の撮影地点における任意時間の太陽の高度角  $h$ 、方位角  $\alpha$  を計算により求める。それと併せ、2.3 節で算出した注目点の高さ  $PP'$  を併せて考えると図 5 が書ける。

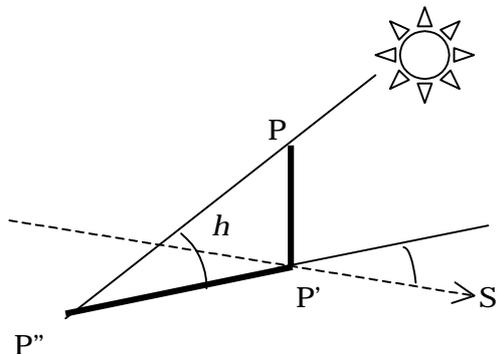


図 5. 影形状推定概念図

図 5 より  $P'P''$  は

$$P'P'' = \frac{PP'}{\tan h} \quad (8)$$

$P'$  を中心に東西方向に  $X$  軸、南北方向に  $Y$  軸をとると、式(8)より  $P'$  の座標は次式で表せる。

$$X = \frac{\sin \alpha}{\tan h} PP' \quad (9)$$

$$Y = \frac{\cos \alpha}{\tan h} PP' \quad (10)$$

上記までのことを各障害物の各特徴点ごとで行えば、その影が予測できる。

## 3. 実験方法

ビルなど建造物を想定し、障害物として  $94[\text{cm}] \times 34[\text{cm}] \times 19[\text{cm}]$  の直方体を用意した。これを東経  $139^\circ 31'$ 、北緯  $35^\circ 41'$  に配置し、魚眼写真を違う位置（撮影点間距離  $40[\text{cm}]$ ）からカメラの高さ  $13.2[\text{cm}]$  で 2 枚撮影した。その 1 枚が図 6 である。



図 6. 実験に用いた魚眼写真

## 4. 実験結果

1999 年秋における予測結果と実測の影を併記したものが図 7 である。画面は障害物とその影を真上から見ている。丸の部分が撮影位置である。画面上の左上の白抜きの長方形が障害物、そこから伸びる網掛けの多角形は予測した影、それとすこしずれている灰色の直線で囲んだ部分が実測の影である。誤差があるものの影の時間的変化がよく再生できている。

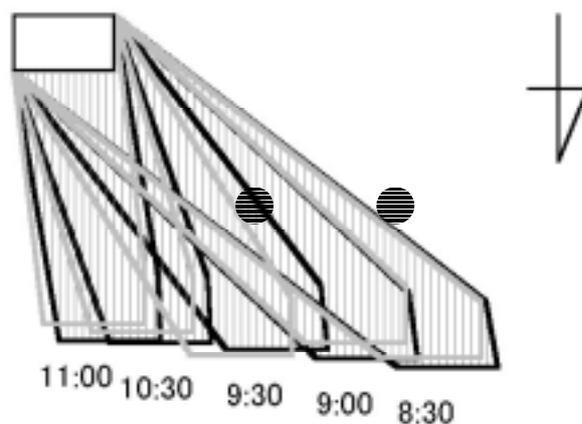


図 7. 日陰形状の実測と予測の比較図

影の長さについては表 1 のように誤差の平均が  $4.12[\%]$  になった。

表 1. 影の長さの値の比較

時間	影の長さ (予測)[cm]	影の長さ (実測)[cm]	誤差[%]
8:30	162.5	158	3.15
9:00	140.2	135	3.85
9:30	117.9	114	3.45
10:30	97.2	93	4.48
11:00	91.9	87	5.69

角度は 2.4 節で示したように太陽の高度角、方位角に依存している。これは計算でほとんど誤差がなく求められるので、表 2 における角度の誤差については計算値よりも実測値の方にあると思われる。これは実測をコンパスで行ったためだと思われる。より正確な測定方法を模索する必要があると考えられる。

表 2. 影の方位角の比較

時間	影の方位角 (予測)[deg]	影の方位角 (実測)[deg]	誤差[%]
8:30	128	128	0.00
9:00	134	133	0.60
9:30	143	148	-3.41
10:30	161	163	-1.41
11:00	171	173	-1.43

## 5. 終わりに

4

2 枚の魚眼写真から三角測量法により日影障害物の形状・位置を推定する方法を考案し、実際に直方体を用いてその影を予測した。その結果、筆者らの考案した計算法で良好な予測ができた。今後はオンサイト測定方法の確立、相互同定の自動化、そして、複雑な物体の影予測を行う予定である。

## 参考文献

- [1] Kurokawa K. et al. (1999) Realistic PV performance values obtained by a number of grid-connected systems in Japan, 8th International Conference on Solar Energy in High Latitudes (North Sun'99).
- [2] Uchida D. et al. (1999) Evaluation of effective shading factor by fitting a clear-day pattern obtained from hourly maximum irradiance data, 11th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-11)
- [3] Evans, G.C. and Coombe D.E. (1959). Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. *Journal of Ecology* 47: 103-113.
- [4] Anderson, M.C. (1964). Studies of the woodland light climate 1. The photographic computation of light conditions. *Journal of Ecology* 52: 27-41.
- [5] Becker, P.E. et al. (1989). Analysis of forest light environments Part I. Computerized estimation of solar radiation from hemispherical canopy photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* 44: 217-232.
- [6] Steege, Hans ter (1994). HEMIPHOT, a programme to analyze vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs. *Tropenbos Documents* 3, The Tropenbos Foundation, Wageningen, the Netherlands. Pp. 44 + diskette.
- [7] 矢田豊、(1992)「林内光環境の測定法の検討( ) 全天光の測定条件」, 石川県林業試験場研究報告第 23 号
- [8] 野川保次、(1999)「魚眼レンズによる日影および反射光の影響評価」, 第 16 回太陽光発電システムシンポジウム
- [9] Otani, K. et al. (1998). A simple monitoring method for estimation of shading loss of photovoltaic systems, EuroSun98 The Second ISES-Europe Solar Congress
- [10] 日本太陽エネルギー学会、「太陽エネルギー利用ハンドブック」, pp1 - 4
- [11] 宿谷昌則、(1993)「数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学」, 丸善、pp211 - 212、pp214 - 215