

発電風車がつくる日影像のシミュレーション

Shadow Image Simulation for Analyzing Environmental Effects of Wind Turbines

張 仲文^{*1} 白 曉紅^{*2} 佐藤 建吉^{*3} 木村 徹^{*4}
 Zhongwen ZHANG Xiaohong BAI Kenkichi SATO Toru KIMURA

Abstract

The wind power is a representative of the typical renewable energy and markedly developed as a clean energy against the global environmental problems. There is, however, the local environmental effect produced the wind turbines, such as the shadow casting and shadow flicker. The shadow casting is an environmental effect taken place by the geological relationship among a wind turbine, the sun, and the ground. In this paper, a computer program for simulating shadow castings through data input of wind turbine size, time, day, month, the latitude and longitude at the site, etc., has been developed. This program is also applicable to evaluate the shadow flickers.

キーワード: シャドウ・キャスティング, シャドウ・フリッカー, 日影, 風力発電, 環境影響, シミュレーション

Key Words: Shadow casting, Shadow flicker, Wind generation, Environmental impact, Simulation

1. はじめに

風力発電は、資源が無尽蔵であることや地球温暖化の原因となる二酸化炭素(CO₂)を排出しないなどにより積極的な開発・導入が進められている新エネルギーである¹⁾。また風力発電は、安全でクリーンな実用段階にある発電システムであるが、最近、本題で取り上げる環境影響も指摘されている。日影は、晴天の日に、太陽光線が風車により遮られ、風車の羽根、ナセルおよびタワー後方の空間や地表面にできる照度の低い部分で、太陽の移動(実際には地球が回転)とともに、地面に作られた影をいう。この日影が農地で起きれば野菜の成長に影響し、居住地で起これば人の心の落ち着きに影響する可能性がある。前者は、日影の位置や面積が問題になり、シャドウ・キャスティング(Shadow casting)と呼ばれ、後者は、影が回転して明暗をつくるのでシャドウ・フリッカー(Shadow flicker)と呼ばれている。また、太陽光線が羽根で反射すると、自動車の運転を眩惑するという影響も指摘されている。

本論文では、シャドウ・キャスティングについて、風車設置位置の緯度・経度、月日、時刻、風況(風速と風向など)により、生じる日影の大きさと形状、その面積などについて、またシャドウ・フリッカーの周期などについて、計算し、分析し、表示することができるコンピュータ・シミュレーション・プログラムを作成したので報告する。

風力発電の実施に当たり、シャドウ・キャスティングおよびシャドウ・フリッカーについて事前に検討することにより、利用できればと考えている。

2. 日影シミュレーションプログラムの開発

本論文で用いる主な記号とその意味を以下にまとめる。

- ϕ : 緯度(deg)
- λ : 経度(deg)
- α : 太陽方位角(deg)
- β : 太陽の高度角(deg)
- θ : 風向(deg)
- θ_0 : 時刻(hour)
- N_d : 1月1日からの通し日数(day)
- δ : 太陽赤緯(deg)
- E_q : 均時差(deg)
- h : 太陽の時角(deg)
- a, b : 楕円の長軸, 短軸(m)
- X_1, Y_1 : 日影像の中心座標(m)
- X_a : 楕円長軸の座標(m)

2.1 太陽の方位角 α と高度角 β の定義

Fig.1に2004年3月27日に三重県青山高原で撮影された日影像の例を示す(白色点線内に翼の影がある)。駐車場と樹海の上にタワーと風車の羽根の影が生じている。風車の羽根とタワーがつくる日影の大きさと形状は、設置場所・月日・時刻により、太陽の位置、すなわち太陽の方位

*1 千葉大学自然科学研究科大学院生(〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33) e-mail: zzw0906@yahoo.co.jp

*2 千葉大学自然科学研究科大学院生

*3 千葉大学工学部助教授

*4 研究当時千葉大学工学部研究員、現在(株)MFCソフトウェアに勤務
(原稿受付: 2005年4月28日)

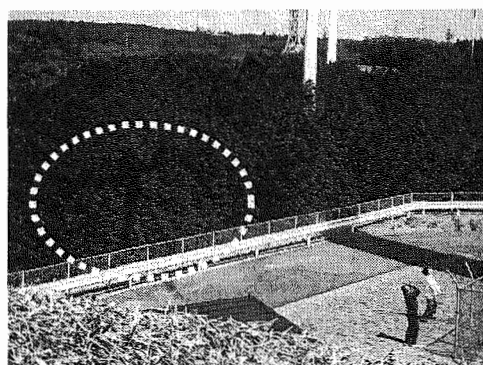
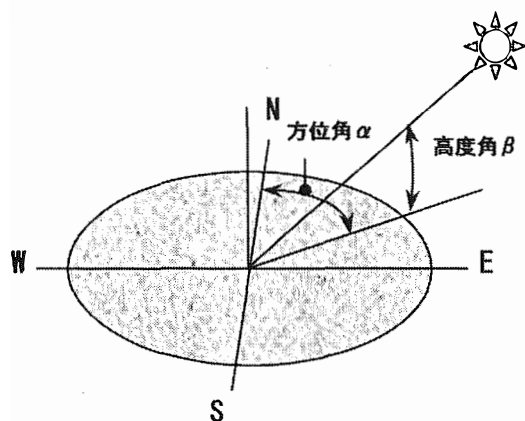


Fig.1 An example of shadow casting by a wind turbine.

Fig.2 The definition for azimuth α and advanced corner β of the sun.

と高度が異なるので、これらを定式化しておく必要がある。風車の羽根の向きは、風向に正対するので、日影の位置は風向にも関係する。任意地点、任意時間のその方位角は、Fig.2のように、水平面上の子午線北方位を基準として、太陽を通る鉛直面となす角度 α をいう。また太陽高度角は、水平面と太陽を通る鉛直面上の直線となす角度 β をいう。

2.2 太陽の方位角 α 、高度角 β の計算

任意地点（緯度 ϕ 、経度 λ ）における、任意時刻の太陽の方位角 α と高度角 β を、以下のように計算できる¹⁾。ただし、時刻 θ_0 は、1月1日（元旦）からの通し日数 N_d に基づいて定められる^{2,3,4)}。

$$\theta_0 = 2\pi(N_d - 1)/365 \quad (1)$$

当該日(N_d)の太陽赤緯 δ 、均時差 E_q は以下の式により求められる。式2は球面三角法の公式より

$$\begin{aligned} \delta &= 0.006918 - 0.399912\cos\theta_0 + 0.070257\sin\theta_0 - \\ &0.006758\cos(2\theta_0) + 0.000907\sin(2\theta_0) - \\ &0.002697\cos(3\theta_0) + 0.001480\sin(3\theta_0) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_q &= 0.000075 + 0.001868\cos\theta_0 - 0.032077\sin\theta_0 - \\ &0.014615\cos(2\theta_0) - 0.040849\sin(2\theta_0) \quad (3) \end{aligned}$$

このとき、ある時間における太陽の時角 h は、日本標準時間 JST から、次式で与えられる³⁾。

$$h = (\text{JST} - 12)\pi/12 + \text{標準子午線からの経度差 (日本の場合 } 135 - \lambda) + \text{均時差}(E_q) \quad (4)$$

したがって、太陽の方位角 α 、高度角 β は、太陽赤緯 δ 、緯度 ϕ 、時角 h の値が既知であるので、

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos h] \quad (5)$$

$$\beta = \tan^{-1}[\cos\phi\cos\delta\sin h / \{\sin\phi\sin\alpha - \sin\delta\}] \quad (6)$$

から求めることができる³⁾。

2.3 日影像シミュレーションの方法

入力データとしては、風車の設置地点（緯度 ϕ 、経度 λ ）と時刻（月日、時分）、風車の高さ、羽根の半径、風向である。風車高さは、ハブ高さで H (m)、羽根の半径は R (m)表示される。さらに風車タワーと風車ロータ（羽根の取り付け位置）のオフセットを L (m)として考慮する。

日影像を考える上で、太陽と風車の羽根が正対して、東に向いているときには太陽高度角 β のために、楕円となる。その楕円の中心（羽根の回転中心の影の座標）を (X_1, Y_1) とすると、日影像を与える、楕円の式は

$$(x - X_1)^2/a^2 + (y - Y_1)^2/b^2 = 1 \quad (7)$$

となる。ここで、 a 、 b は、楕円の長軸、短軸である。

$$a = R \cot \beta \quad (8)$$

$$b = R \quad (9)$$

次に、太陽光が東から角度 γ ($=90^\circ - \alpha$) だけ移動した場合には、日影像も回転する。この場合にも羽根も太陽光に正対している場合には、以下ようになる。

$$\begin{aligned} \{((x - X_1) + (y - Y_1)\tan\gamma)^2 / \{a^2(\cos\gamma + \sin\gamma\tan\gamma)^2\} + \\ \{(y - Y_1) - (x - X_1)\tan\gamma\}^2 / \{b^2(\cos\gamma + \sin\gamma\tan\gamma)^2\} = 1 \end{aligned} \quad (10)$$

実際には、太陽方位と風車の羽根が正対しておらず、両者に δ の角度差がある場合には、この影響は、式(10)の楕円を太陽光の方位角方向、すなわち x 軸方向に $\tan\eta$ だけのゆがみをつくる。 η は、風向 θ も方位角 α とともに北から測定した場合に $\delta = \theta - \alpha$ となる。

$$c = \tan\eta = \tan(\theta - \alpha) \quad (11)$$

となるので、日影像の楕円は次の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \{[(x - X_1) + (y - Y_1)\tan\gamma] + c[(y - Y_1) - (x - X_1)\tan\gamma]\}^2 / \\ \{a^2(\cos\gamma + \sin\gamma\tan\gamma)^2\} + \\ \{(y - Y_1) - (x - X_1)\tan\gamma\}^2 / \{b^2(\cos\gamma + \sin\gamma\tan\gamma)^2\} \\ = 1 \quad (\alpha = 90^\circ - \gamma) \quad (12) \end{aligned}$$

このとき、式(9)の短軸 b は

$$b = R |\cos(\theta - \alpha)| \quad (13)$$

と変形される。

式(12)は、日影像シミュレーションの基本式であるが、以下の x の範囲についての y を計算すればよい。

$$X_1 - Xa \leq x \leq X_1 + Xa \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Xa = [a^2 + b^2 + b^2 c^2 + a^2 \cos(2\alpha) + \\ b(-1 + c^2) \cos(2\alpha) + 2b^2 c \sin(2\alpha)]^{1/2} / 2^{1/2} \quad (15) \end{aligned}$$

日影像の基本について検証するため、Fig.3にExcelで

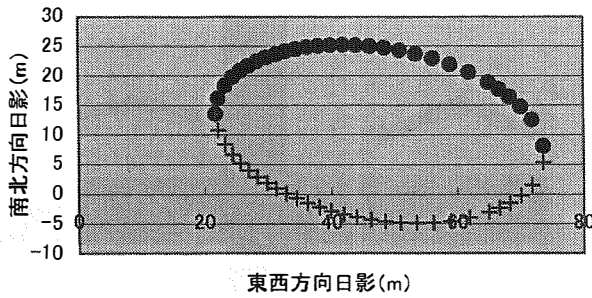


Fig.3 Size and shape of shadow image by rotating wind turbine blades for blade diameter of 20m, height of 40m, direction of 45deg, at 3pm on 15 August, Tokyo.

検証に求めた計算結果を示す。日影像は、Fig.3に示されるように、楕円を基本図形として描画することができる。

2.4 日影像のシミュレーション

以上により、任意地点の太陽の赤緯 δ と緯度 ϕ 、任意の月日、時間が与えられれば、太陽の高度角 β 、方位角 α が計算でき、日影像が計算できる。コンピュータプログラムは、Visual Basic で作成した。日影像のシミュレーション結果の一例を Fig.4 に示す。計算したい地点の経度・緯度、月・日・時間を入力すると、太陽の方位角と高度角、さらに日出、日没時間を計算しボックスに表示する。次に、風車の仕様として L : タワー中心と翼回転面のオフセット距離 (m)、 H : ハブ高さ (m)、 R : 翼半径 (m) を入力し、 α : 方位角 (deg)、 β : 高度角 (deg)、 θ : 風向 (deg) をボックスに数値またはバーにより指定すると、太陽の位置 (オレンジ色)、風車の大きさ (白色)、日影 (黒色) として描画する。風車と日影の大きさは、Zoom のバーを左右にずらすことにより、表示する拡大率の大きさを

変えることがリアルに調整して表示できるようにしてある。日影像は楕円形状になっている。そのウインドウ内には、太陽の方位と風車の羽根も表示されており、全体の様子がわかる。

2.5 一日における日影像の移動

次に、日出時間から、日没時間まで、一日中の日影像の移動状況についてのシミュレートするプログラムに拡張した。日出・日没時の太陽高度角はゼロとなるので、日出・日没時の太陽の時角 h は、

$$\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h = 0 \quad (16)$$

とおくことにより、次式より求められる。

$$\cos h = \tan \phi \tan \delta \quad (17)$$

また、日出・日没時の太陽の方位角 α は、日出・日没時の太陽の時角 h から、次式となる。

$$\tan \alpha = -\cos \phi \sin h / \tan \delta \quad (18)$$

これから、日出・日没時間は、

$$h = \sin^{-1}(-\tan \alpha \tan \delta / \cos \phi) \quad (19)$$

から計算できる。

日出から日没までの一日中の日影像の移動状況についてのシミュレーション結果を Fig.5 に示す。同図は、1時間ごとの日影像を連続して表示したものである。一日の連続の日影は、Fig.6 のように北側に弓形の帯として日影ができることがわかる。この日影像の帯のパターンは、月日 (季節)、風向により変化することになる⁵⁾。その概略を知るため Fig.7 に 12 ヶ月を 1 月から 4 ヶ月ごとに日影像の変化の様子を示す。冬至 (12 月) において最も深い逆 V 型の日影帯を描いた後、年明けとともに逆 V 型は角度を大きくした浅い形になり、春分の日 (3 月) には水平な帯となる。夏至 (6 月) には V 型の最も深い日影帯となる。その後、秋分の日 (9 月) に再び水平帯となり、逆 V 型と

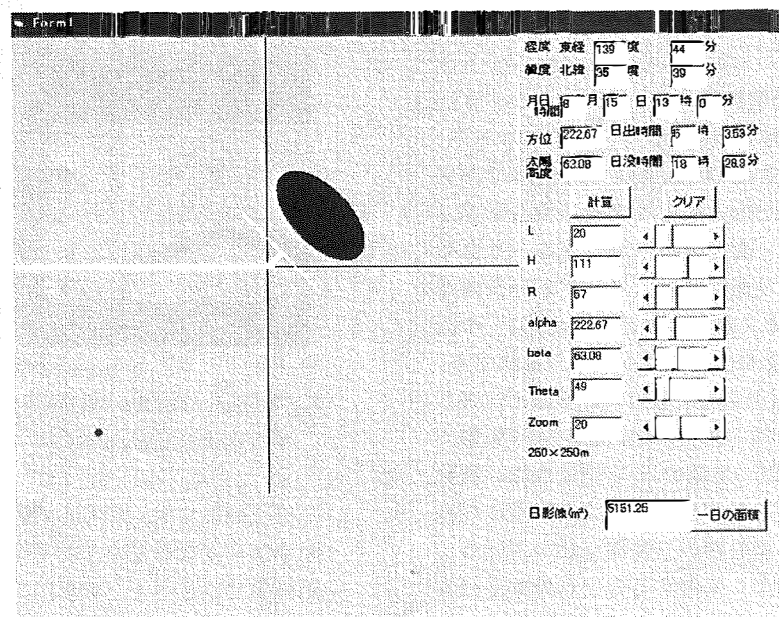


Fig.4 An example of the simulated shadow casting for the specified conditions; site, date, time, turbine sizes, and direction.

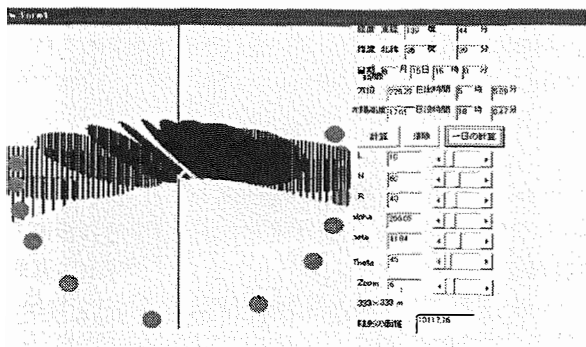


Fig.5 Local of the shade image by time step in a day
(Northeast wind, tower height of 60m, blade radius of 40m,
on August 15 in Tokyo)

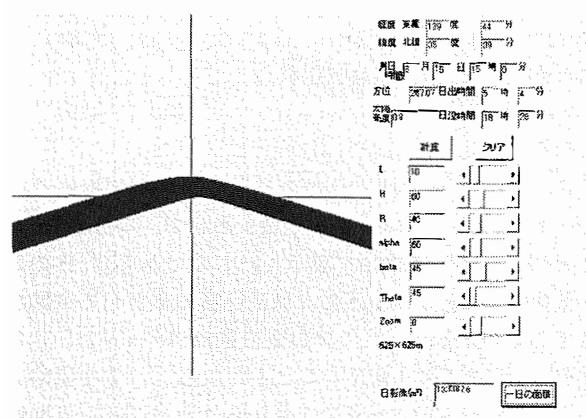
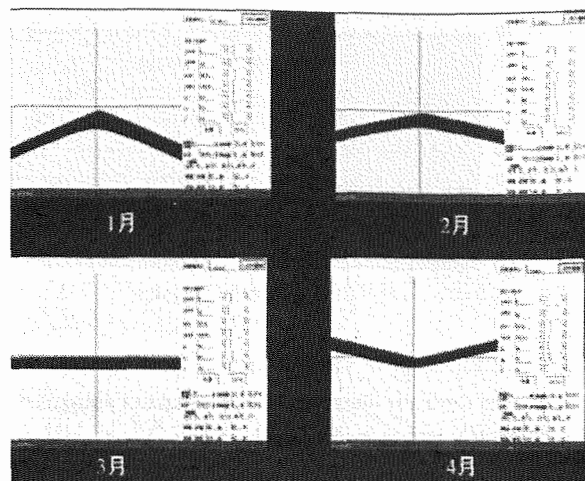


Fig.6 The V-shape shadow belt formed by wind turbine
blades during a day in August at a site in Tokyo.

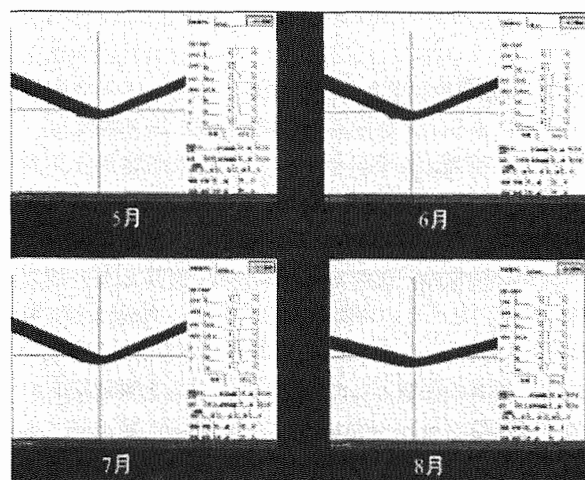
なり，冬至にいたる．このような，季節による日影の面積変化を知ることが，シャドウ・キャストの重要な点であると考えられる．

2.6 一日の日影像の面積計算

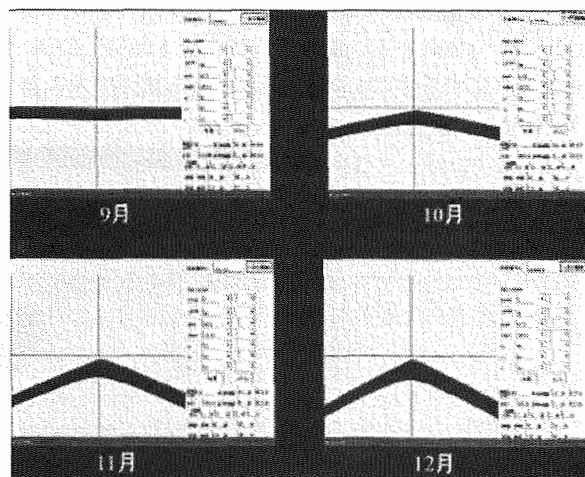
風車中心から矩形の地面領域で，シャドウ・キャストによって，ある一日に生じる日影面積を計算できるプログラムを作成した．Fig.4 に示した上境界と下境界の極地をつないで日影面積は計算できる．日影面積を計算できる矩形の地面領域は，コンピュータ画面の Zoom 機能で設定された領域である．Fig.6 に，一例を示す．このV型の日影帯の形は季節により変化する．Fig.7 はその例として各月の 20 日前後日影像を代表として計算した結果を示す．春分の時直線から正 V 型になって，夏至の時は谷が一番深い正 V 型になる．秋分になるとまた直線になるが，その以後は逆 V 型になって，冬至の時には逆 V 型の谷が一番深くなっている．このように日影帯季節より変化することが分かる，日影帯の面積もその特徴で計算する．



a) January to April



b) May to August



c) September to December

Fig.7 Changes of the shadow images with month for North
Kyushu during a day.

以上のように，本プログラムでは，一日のシャドウ・キャストによってできた V 型の日影帯とその日影面積が計算できるので，日影による影響・被害などの見積もりに役立てることができる．この評価は，風車設置の前に行うことができるので，有用であろう．

2.7 シャドウ・フリッカー現象の検討

風車翼の回転につれてその日影像も回転する。この現象は、シャドウ・フリッカー（日影による暗明の周期的繰り返し）と呼ばれている。本プログラムでは翼の回転につれて日影像が回転する様子もシミュレーションされる。ただし、回転速度は、風速とは関連付けておらず、固定されている。Fig. 8 には、回転している日影像の静止画を示す。

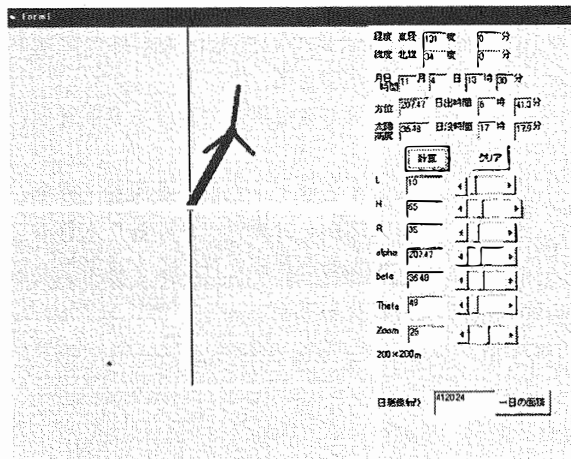


Fig. 8 An example of rotating shadow image

日影像の回転は、季節、時間、風向によって大きく影響される。冬季や朝夕は影が伸びるので、日影像の移動速度は速い。例えば、太陽に正対した翼の半径が30m、回転速度が20rpmのとき、200m地点にできた翼先端の日影像の移動速度は、140km/h（実際の羽根の回転速度は62km/hである）である。

また、逆に、ある時刻、風向などの条件においては、日影像が長く停留する場合もある。すなわち、暗い影が1周期の間で、一箇所に長く停留することである。開発されたシミュレーションプログラムではそうした現象も確かめることができる。例えば、Fig. 9 に示した写真は、北九州市響灘に設置されている風車において観測された日影像が停留する場合の風車翼と太陽の位置関係である。この位置関係について日影像をシミュレーションした結果がFig. 10である。地面にできた翼の影は等速度で回転するのではなく、したがって影の像は等ピッチにはなっていない。影はある位置では長く留まり、そしてその時間を取り戻すようにその後急速に移動する。これは、風車翼の回転中に、翼の半径方向が太陽高度角、さらに方位角に近い場合に起こる現象である。

このような日影像の特徴的な面は、シャドウ・キャスティングの場合における楕円の日影像の縦横比や非対称性などに関係して起こり、本プログラムを用いるとこれらの特徴を容易にシミュレーションから見出すことができる。北九州市の場合は、Fig. 10 のように 15

時 10 分前後、風向はほぼ西、太陽方位角は南から 52 度前後で起こったが、このような現象は、風向が東、太陽高度が南から東よりに 52 度となる、9 時 50 分ごろにも起きることが、このプログラムを用いると確かめられる。このとき、その地点では日影が移動しないので、そこに住宅があれば長い時間にわたって暗い日影が停滞することになる。このような現象は、場所と時間（方位角 α 、高度角 β ）、それに風向 θ との組み合わせで起こることは明確である。

3. 日影像シミュレーションプログラムの実用化へ向けた課題

3.1 風向による日影像の影響

発電風車の翼面は、ヨー制御によって風向きに正対されるので、時刻による太陽の移動とともに、風向による翼の向きによって日影像の形状と大きさ、そしてそれが形成される位置が異なる。実際の日影像のシミュレーションには風向の変動について取り入れる必要がある。

風向の変動の割合は、風配図（別名、ウインドローズ）としてまとめられているが、日影像のシミュレーションにおいては、時間ごとの風向についての統計のデータを必要とする。ウインド・キャスティングの農作物への影響を考慮する場合には、作柄の成長時期における風向データが基本として必要になる。このデータがあれば、本プログラムによって、日影位置とその面積が計算できる。

3.2 年間における日影の影響の評価

上述の農作物への日影の影響を検討するには、農業科学からのアプローチが必要であるが、風向変化による日影面積の計算には、天候変化による日射強度、さらに光の回折による日影強度の実際の値を計算する必要がある。

3.3 シャドウ・フリッカー現象の検討

風車の日影による環境影響にはシャドウ・キャスティングのほかに、シャドウ・フリッカーがあるが、後者は動的現象であり、心理的な不快感をつくる原因であるので、風力発電に対するイメージを左右する重要なものである。そのためには、シャドウ・キャスティングの起こる領域の把握と同時に、フリッカーの周期、明暗に対する心理的な反応、許容性など、心理学、精神医学的な側面からのアプローチと連携する必要がある。

これらについては、今後の継続した研究テーマとする。

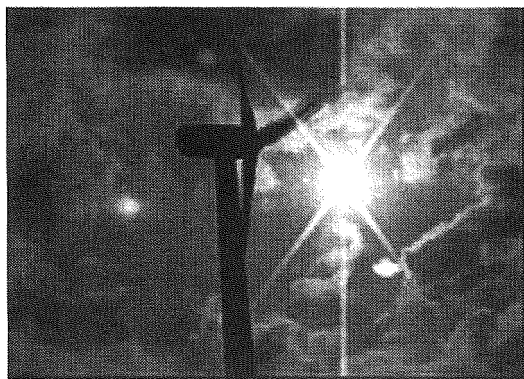


Fig.9 A photograph of a wind turbine at Hibikinada

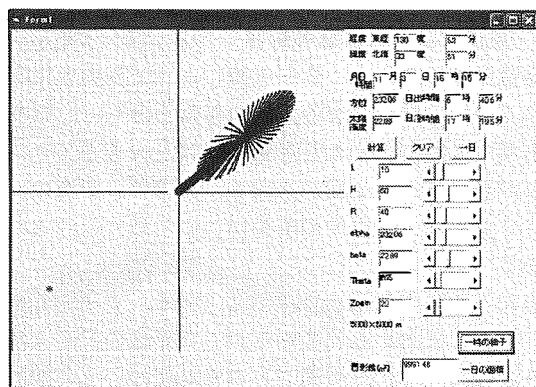


Fig.10 An example of stationed shadow image that moves slowly at the position.

4 結言

風力発電での環境影響として取り上げられている、シャドウ・キャスティング、シャドウ・フリッカーを検討するため、日影像のコンピュータ・シミュレーション・プログラムを作成し、その適用性について示した。

- (1) 本論文では、日影像をシミュレーションする手法について論じている。
- (2) 本プログラムでは、任意地点で、任意の月日・時間におけるシャドウ・キャスティングとしての日影像を、風車の大きさと、風向を考慮して作図することができる。
- (3) また、設定領域内での一日に生じる最大の日影面積を計算できる。
- (4) シャドウ・フリッカー現象において、日影像が停留する場合についてもシミュレーションから知ることができる。
- (5) これらは、風力発電実施における事前評価に利用できる。
- (6) なお、検討するサイトにおける風速・風向、天候（日射強度）を計算データに取り入れることにより、現実的な評価を可能なプログラムに向上することができる。

参考文献

- 1) 太田時男編：「環境にやさしい新エネルギーの開発」、太陽・風力・水素、東京、同文書院、1993.2
- 2) WEC, New Renewable Energy Resources, 1994
- 3) 浜川圭弘著：「太陽光発電入門」、東京、オーム社、1981.6
- 4) 牛山泉 [ほか] 共著：「風と太陽と海」、さわやかな自然エネルギー、東京、コロナ社、2001.9
- 5) 清水幸丸著：「風力発電技術」、100年目の飛躍、東京、パワー社、1990.3