

風力発電用風車の日影による環境影響シミュレーション

Simulation of Shadow Images Produced by Wind turbine

08TM0305 小川 主水
Mondo Ogawa

指導教員 佐藤 建吉

SYNOPSIS

This paper concerns about a solution for eliminating environment problems in wind power utilization. The author focused into an issue that related to shadow casting and shadow flicker of wind turbines. The approach to that is to develop a computer program for simulating shadows on the ground generated through a wind turbine's tower and blades by light rays traveled from the sun. By inputting data of the time and location and the characteristic size and dimensions for the wind turbine, the shadows of tower and blades are illustrated on a computer monitor after calculations according to the optical theory based on relations among sun, turbine, and ground. The size and shape of the simulated shadow agreed to that of the real shadows. As a summary the program is available to a prior simulation of shadow casting and flicker in wind turbines for faultless and accountable wind power development.

1. はじめに

1.1 背景

風力発電は、化石資源代替エネルギーとして、さらにCO₂排出が少ないエネルギー源として、再生可能エネルギーを利用した競争力のある発電方法である。欧米、そして中国・インドなどでは風力発電の導入が盛んである。しかし、わが国では風力発電に関する環境影響が取りざたされ、その導入が遅速となっている。風力発電の環境影響には、設置場所に関わるものが多く、ブレードの回転による騒音やバードストライク、そして大型化する風車に対するビジュアルアタック、そしてそれに原因する風車の日影の大きさや移動などがある。これらの問題の解消には、その環境影響について設置以前に十分に見積もり、定量化しておくことが必要である。

1.2 風車の日影の問題

風車の日影がもたらす問題には、風車全体の日影像（シャドウキャスティング、shadow-casting）と、ブレード（翼、羽根）の回転による影の周期的運動（シャドウフリッカー、shadow-flicker）が挙げられる。

シャドウキャスティングは、風車の設置地点付近にタワーやブレードの日影が形成されることに由来する問題であり、具体的には農地での野菜などへの日照量減少に対する補償協議などがあげられる。この問題は、風車仕様や設置地点の地理条件、さらに風向や天気、季節や時間などの気象・季節条件により、日影の位置や大きさが移動・変化するという複雑な側面を持っている。

また、シャドウフリッカーは、ブレードの影の回転周期や移動速度などに対する人間の心理や感覚に影響するという問題であり、風向や風速、さらに時間や季節により異なる影響を持っている。例えば道路では、一瞬の明滅が自動車運転手や歩行者などの視覚に影響し、交通事故の一因ともなり得る可能性がある。図1は、回転する風車翼の影が道路を横切るところを撮影した写真である。

1.3 本研究の目的と目標

本論文の目的は、風車設置による日影像の大きさや影響範囲を把握し、設置後に問題が生じないようにすることであり、設置者・住民・環境団体などが、風車の日影像を簡易に事前検討ができるようなコンピュータシミュレーションソフトウェアを開発することを目標にしている。



図1 道路を横切る風車翼の日影像
(江東区若洲 2008.10.16)

2. 入力データと計算

2.1 入力データと関係する特性値

風車の日影像を図示するシミュレーションには日射条件と風車仕様を規定する値が入力データとして必要である。

日射の条件に関するデータ

入力データには、後述する風車データのほか、当該日時[月、日、時、分]、風車設置地点の経度と緯度（東経 λ [度]、北緯 ϕ [度]）、風車地点と射影地点（観測地点）の位置関係（距離[m]、方角[度]）、および当該日時の日射量 Q [W/m²]

が必要であり、これらを手入力する。

これらの入力データから、風車地点からみた太陽の位置を表す太陽高度角 α [度]と太陽方位角 β [度]、および表示する影の濃さ(陰影度)を計算する。なお、太陽高度角 α は、図2-1の角度 α のように、観測点から地平線を0度、天頂を90度として太陽の位置を定めた角度である。方位角 β は、南を基準にすることもあるが、本シミュレーションでは、風向などのデータとの統一のために、図2の角度 β のように、地平面において真北を0度として時計回りに測った太陽の角度とした。

太陽高度角 α と太陽方位角 β は、太陽赤緯 δ や均時差 E_q 、太陽時角 h などの計算を経て、求めることができる。

太陽赤緯 δ は、天球上で太陽の位置を表す値で、日単位で変動するものとして計算する。春分及び秋分の日に0度、夏至の日に23.27度、冬至の日に-23.27度となる。

均時差 E_q とは、視太陽時と平均太陽時の差のことである。視太陽時は、視太陽日(観測位置から見て、太陽が子午線を通過してから、次に子午線を通過するまでの時間間隔)に基づく時間である。平均太陽時は、1年を通して24時間で一定の平均太陽日に基づく時間である。

太陽時角 h とは、太陽が観測地の子午線を通過してから太陽時で何時間経過したかを表したものである。

日射量は、全天日射量、直達日射量、散乱日射量の3つに分類される。直達日射量は、直射日光による日射量、散乱日射量は、直射日光以外の反射・屈折・回折等の影響による間接的な日射量である。したがって全天日射量は、直達日射量と散乱日射量の和となる。

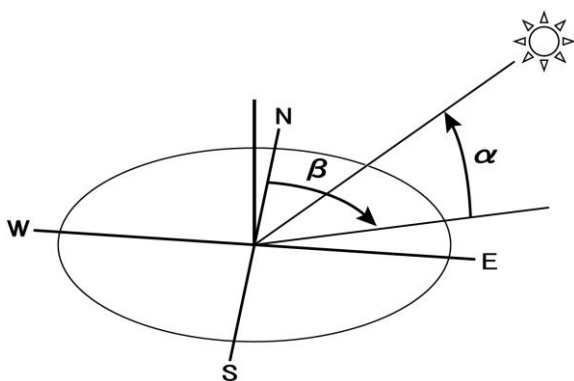


図 2-1 太陽高度角 α と太陽方位角 β

風車仕様に関するデータ

風車の形状と大きさに対する入力データは、風車の寸法に関するデータと各種角度に関するデータである。風車の寸法に関するデータは、①ロータヘッド、②ブレード、③ナセル、④タワーの4つのパーツにモデル化した。その入力データは、シミュレーションプログラムの操作の簡易さのため、一般的な風車を規定できる必要最低限の範囲に留め、風車の形状を表現するために必要な寸法のデータは、入力されたデータから計算して定めることとした。

① ロータヘッド

タワー中心からロータ回転面中心までの水平距離 L_o [m] (オフセット距離)、ロータ回転面中心の地表からの高さ H_h [m] (ハブ高さ)、ロータヘッドの長さ L_h [m]、ロータヘッドの直径 D_h [m] を入力データとした。

② ブレード

ブレードの長さ L_b [m] (ブレード回転面の半径)、ブレード

の最大弦長 C_b [m] (ブレードの幅)を入力データとした。

③ ナセル

ナセルの長さ L_n [m]、幅 W_n [m]、高さ H_n [m] を入力データとした。幅と高さについては、長さ方向に前部、中部、後部に分け、前部についてはロータヘッドの寸法に合わせ、中部と後部についてのみ入力するものとした。

④ タワー

タワーの形状は、一般的な風車タワー形状である円錐台に限定し、タワーの高さ H_t [m]、頂部と基部それぞれについてのタワーの直径 D_t [m]を入力するものとした。

各種角度に関する入力データは、風向 θ [度] (風車の向き)、上方偏向角度 ξ [度]、ブレードのピッチ角 ϕ [度]とした。

風向 θ は、方位角 β と同様に、北から時計回りの角度を正とした。

上方偏向角度 ξ は、回転するブレードがタワーにぶつからないよう、ブレード回転面を上方に傾けた角度で、回転面が水平方向を向いているときを0度とした。

ブレードのピッチ角 ϕ は、回転速度の制御のために、相対的な風に対するブレードの向かい角を調節するための角度で、回転方向に対して水平なときを0度とした。

また、風車静止状態の日影像表示用にブレードの回転位置角度 ω [rad]、風車回転時の日影像表示用に風車の回転数 F [rpm]をそれぞれ入力する。

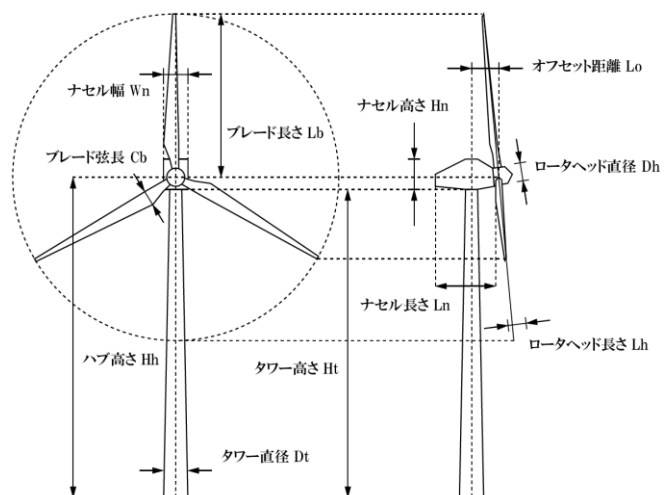


図 2-2 風車の入力データ

2.2 太陽高度角、太陽方位角の計算

図2-3は、データ入力から日影像図示までの計算のフローチャートである。当該日の日付[月、日]は、1月1日からの通し日数 N_d [日]として、時刻(日本標準時間 JST [時、分])は、当該日0時からを通し時間 T [時] (分は小数として扱う)に変換する。

当該日時(通し日数 N_d [日]、通し時間 T [時])において、任意地点(東経 λ [rad]、北緯 ϕ [rad])から見た太陽の位置(高度角 α [rad]、方位角 β [rad])を、以下のようにして求める。

地球の公転周期を1年間とすると、当該日において、地球は、元旦を基準として太陽の周りを角度 τ [rad]だけ回転することになる。1年間の日数が365日(閏年の場合は366日)のとき、角度 τ [rad]は、次のように計算できる。

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

この角度 τ を用いて、太陽赤緯 δ [rad] 及び均時差 E_q [rad] を求めることができる。

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

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

太陽時角 h [rad] は、通し時間 T [時]、経度 λ [度]、日本標準子午線の東経 135 [度]、均時差 E_q [時間] を用いて、次のように計算する。

$$h = (T - 12) \pi / 12 + (\lambda - 135) \pi / 180 + E_q \quad (4)$$

よって、太陽高度角 α [rad]、太陽方位角 β [rad] は式(5)、(6)のように計算できる。

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

$$\beta = \tan^{-1} \{ \cos \phi \cos \delta \sinh / (\cos \phi \sin \alpha - \cos \delta) \} + \pi \quad (6)$$

また、日出、日没の時には太陽高度角 $\alpha = 0$ となることから、日出、日没、南中の時刻も求めることができる。これらの時刻データは、1 日の日影の軌跡を描画するための計算等に使用する。

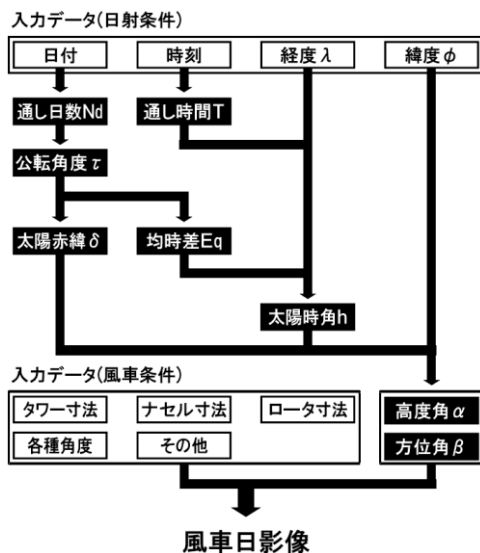


図 2-3 計算のフローチャート

2.3 日影の計算

地平面に定めた x - y 座標において、当該地点の位置を (0,0) とし、平面的に日影を图示する。簡単のために、角度 β [rad] および θ [rad] は、 x - y 平面上において y 軸の正方向を北として x 軸（東）から反時計回りの値に変換して計算に用いる。また、太陽光線は、無限遠からの平行光線として取り扱うものとした。

風車の輪郭頂点座標 (X_p, Y_p, Z_p) は、風向 θ 、上方偏向角度 ξ 、ブレードのピッチ角 ϕ がすべて 0 のときを基準として風車寸法データに基づいて設定した各輪郭頂点を、それぞれの角度について座標を回転移動させることにより計算することができる。

太陽高度角 α [rad]、太陽方位角 β [rad] の下で、任意の点 (X_p, Y_p, Z_p) が高さ Z_{sp} における x - y 平面上につくる影点の位置座標 (X_{sp}, Y_{sp}) は、以下のようにして計算できる。

$$X_{sp} = X_p + \{(Z_p - Z_{sp}) / \tan \alpha\} \cos(\beta - \pi) \quad (7)$$

$$Y_{sp} = Y_p + \{(Z_p - Z_{sp}) / \tan \alpha\} \sin(\beta - \pi) \quad (8)$$

風車のタワー、ナセル、ロータヘッド、およびブレードの輪郭をなす頂点それぞれについて同様の計算をし、各パーツの各面をなす頂点の構成と同様に、射影平面上で各影点を再構成することで、任意の高さ Z_{sp} における x - y 平面上につくる風車の日影の位置、形状、大きさを計算することができる。

日影の濃さについては、理想的に、全天日射量は直達日射量と等しいとき、つくられる日影には一切の光が届かないものとし、このときの日影を不透明度 0 の黒で描画するものとした。すなわち、全天日射量から直達日射量を差し引いた値である散乱日射量の大きさに応じて黒影の不透明度を決定した。

3. シミュレーション

以上の計算式をもとに、ビジュアルベシックにより、風車の日影を图示するシミュレーションプログラムを製作した。図 3-1 に示す操作画面内のテキストボックス内に各種データを入力し、コマンドボタンをクリックすることにより、ピクチャーボックス内に図が描画される。下地となる地図は、Google マップ（航空写真）を利用した。

風車の日影は、右のピクチャーボックス内の地図上に平面で描画する。操作画面内中央下には、入力した風車の正面図と側面図を表示する。

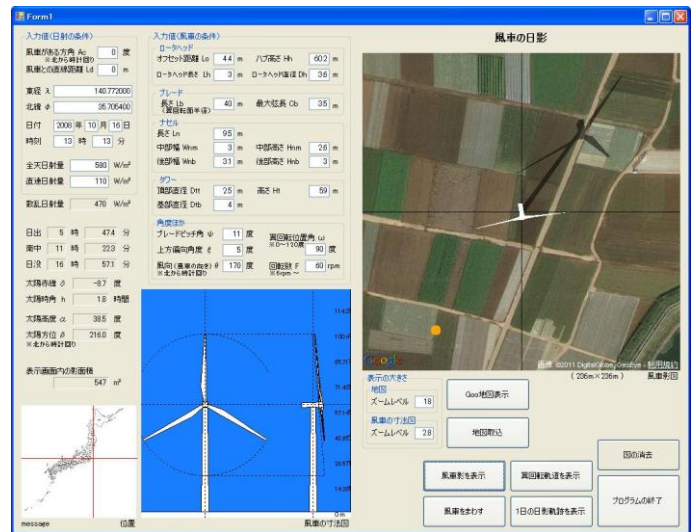


図 3-1 操作画面

3.1 風車のシャドウキャストイング

図 3-2 は、銚子市屏風ヶ浦における風車に対する適用例を示す。右側の白い風車と黒い風車の日影は、航空写真に写っている実際それらである。この図の左側にある風車とその日影は、開発されたシミュレーションプログラムにより描画されたもの（スーパーインポーズしたもの）である。航空写真の風車本体は真上から撮影されたものではないため、シミュレーションによる風車本体とはやや比較しづらいが、地面にはよく一致した日影を描画されていることがわかる。

図 3-3 は、上述の地域において同じ仕様の風車による 1 日の日影軌跡を季節ごとに描画したものである。周辺に広がる農地のうち、時期によって風車日影の内部に入りうる畑と、常に日影には入らない畑を特定することができる。

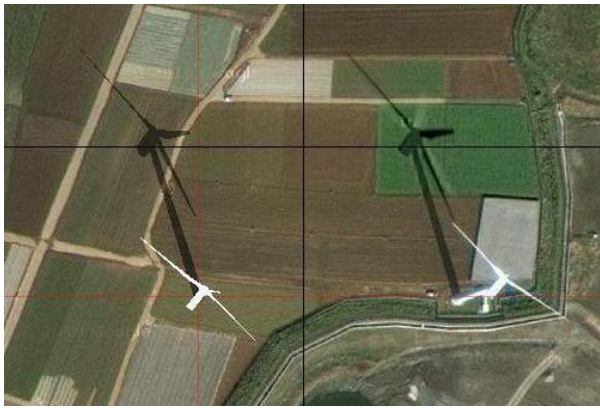


図 3-2 静止した風車日影像（銚子市屏風ヶ浦）
 (左: シミュレーションにより描画された風車と日影
 右: 航空写真に写る実際の風車と日影)



図 3-5 航空写真（江東区若洲）



図 3-6 描画した風車日影像（江東区若洲 2008.10.16）



図 3-7 風車日影像の回転軌道



図 3-3 日影像の軌跡
 (左上: 春分の日(2010.3.21), 右上: 夏至の日(2010.6.21)
 左下: 秋分の日(2010.9.23), 右下: 冬至の日(2010.12.22))

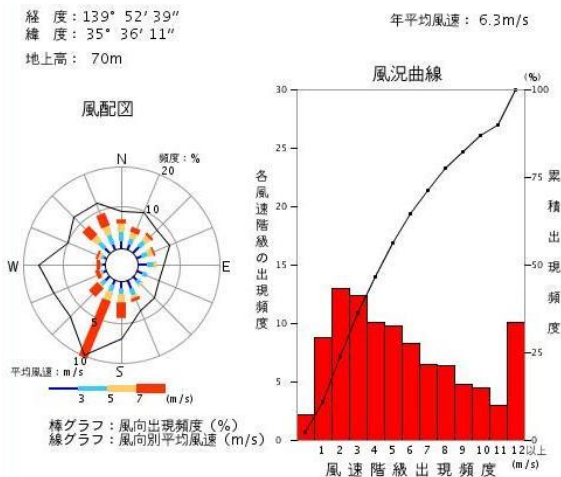


図 3-4 風況データ（江東区若洲）

3.2 風車のシャドウフリッカー

図 3-5 は、図 1 の写真を撮影した江東区若洲における航空写真である。実際の風車と同仕様の風車を、NEDO が公開する風況データ（図 3-4）に基づき、同地域において風向出現頻度の高い南南西に風車が向いている場合を想定し、図 1 写真撮影日時である 2008 年 10 月 16 日 14 時 13 分の日影像を描画した（図 3-6）。ブレードの影が道路にも伸びていることがわかる。

また、風車を回転させるコマンドボタンをクリックすることで、入力された回転数に従う速度で変化するシャドウフリッカーの状況を再現することができる。

図 3-7 は、ブレードの回転軌道を楕円で表示したものであり、シャドウフリッカーが起こる範囲を示している。

4. おわりに

以上のように、風車の翼とタワーが地平面上につくるシャドウキャスティング及びシャドウフリッカーをシミュレーションできるコンピュータプログラムを作成した。

風車の日影像を視覚的に明示することにより、事前説明や用地交渉、さらに既設の風車についての事後評価などに利用できる。こうして、本手法は環境負荷の問題が生じない風車設置・推進のために有効ではないかと考える。