

屋外照明環境を考慮した風力発電所の景観シミュレーション

Landscape simulation of the wind-power plant with considering outdoor illumination environment

宇田紀之・渡辺大二郎・清水幸丸

UDA Noriyuki, WATANABE Daijirou, SHIMIZU Yukimaru

Abstract: An illumination condition to have an impact on the landscape formation of an outdoor building can think about natural light namely direct sun light, skylight and a ground borrowed light. In this study, we used a portable measurement of calculating outdoor illumination to estimate brightness of each source of light. By appointing time and position, landscape image of wind power plant with considering the illumination condition. It was able to express real landscape windpower plants of tendering to be looked up from a short distance by considering impact of ground borrowed light.

Keywords: landscape, simulation, wind power plants, sunlight, skylight, outdoor illumination environment

1.はじめに

建設予定の風力発電所が周辺の自然景観に及ぼす影響を事前検討する景観アセスメントでは、実写した景観画像と建設予定の仮想建造物の画像とを合成した景観モンタージュ（景観シミュレーション）による事前評価が用いられる。違和感のない景観画像合成は、コンピュータグラフィックス技術が実用化されはじめた1980年代以来の研究課題あるが、時間や天候条件によって刻々変化する自然光の状態を正確に把握し表現することは、コンピュータ性能が飛躍的に発達した現在でも困難な課題のひとつとされる。

屋外建造物の景観形成に影響を及ぼす照明条件は、自然光、すなわち、太陽直射光と天空光、そして、地上反射光の3つを考慮することができる。本研究では、天空照度の推計式を用いて、各光源の輝度を定める簡易型の野外照明モデルを提案し、風力発電所の景観画像生成を試みた。地上反射光の挙動を考慮することにより、近距離から見上げられることが多い風力発電所の景観をうまく表現できたと考える。

2. 屋外照明環境のモデル

屋外建造物や景観影響評価では、実写した景観画像と建設予定の仮想建造物の画像とを合成した景観モンタージュ（景観シミュレーション）による事前評価が行なわれる。景観シミュレーションの品質は、現実環境と仮想環境の3次元空間上の位置や姿勢が一致していること（幾何学的整合性）と、仮想環境にお

ける照明環境や陰影が現実世界と一致していること、すなわち、光学的整合性によって決まる。特に、光学的整合性は、画像のリアリティーを決める重要なポイントである。実写した景観画像から建設予定位置の照明環境に関する情報を抽出して、仮想建造物を照射できればいいが、これは、現在の技術をもってしても難しい。照明環境を操作して、実写画像と仮想建造物の整合することが必要となる。仮想環境の照明条件を操作する方法として、擬似天空モデルがある。これは、半球体の巨大なドームを仮定して、その中心部に仮想建築物を置き、光源を調整して陰影を決める。

野外の照明環境の光源は、基本的に、太陽直射光と天空光、そして、地上反射光の3つに区分される。地球大気圏の上端部に入射した太陽光は、大気状態による散乱・吸収・反射を繰り返して地表に届く。大気散乱した太陽光（天空光）は、さまざま方向から建造物を照射する。地表に届いた光は、地表面で反射して下方から建造物を照射し天空に向かう。一部は雲の下層面に反射して、また、地表方向に向かう。リアルな景観シミュレートには間接光源を含む太陽光のシミュレートがある。概念図を図1に示した。大気混濁係数は、大気状態によって地表に届く太陽光エネルギーの減衰の比率を示すものである。太陽光の減衰は、大気経路によっても定義される。アルベドは、地表入射光エネルギーと反射光エネルギーの差を示すものである。アルベドは、地表植生状態や土地利用状況など地上被覆情報によって変化する。

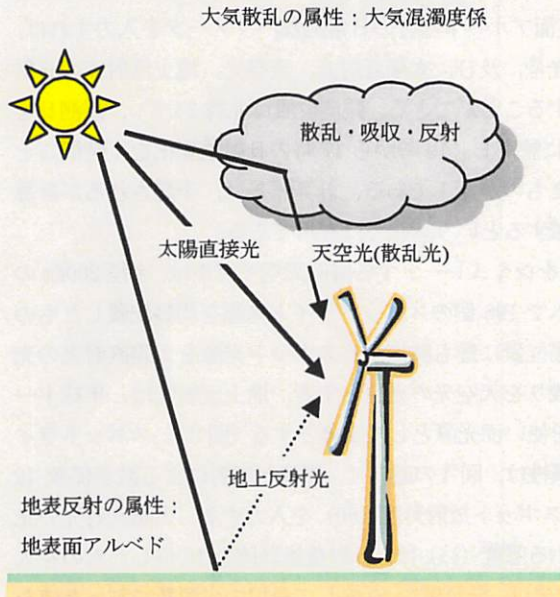


図1：景観に影響する屋外照明の概念図

野外照明環境における光エネルギーを考える場合には、日射量 (Wm^{-2}) に使う。天空照度を定義する照度 (IX) とは線形関係にあることによる。

2.1 大気による光の散乱モデル

地球を取り巻く大気には窒素や酸素、オゾンなどの分子や、水蒸気、細かな塵などのエアロゾルがある。分子のように可視領域の波長より小さい物体による散乱をレイリー散乱、エアロゾルのように可視領域の波長と同程度の大きさの物体による散乱をミー散乱という。

レイリー散乱光の強度は波長のほぼ4乗に反比例する。これにより、短波長である青い光は、長波長である赤い光より多く散乱することがわかる。日中の空が青いのは青い光が多く散乱するため、眼に入りやすく、赤い光はあまり散乱しないため、眼に入りにくいからである。この時、水平線方向の光が白っぽく見えるのは、水平線方向の光は大気層を多く通るため、赤い光も散乱するためである。一方、日が沈むころになると、太陽光は日中より大気層を長く通るため、青い光は多く散乱し、地表にはあまり到達しなくなる。それに対し、赤い光は適度に散乱し、多く眼に入る。夕方の空が赤くなる理由である。

レイリー散乱だけでは、空が赤くなるということはない。赤い夕焼けはミー散乱が多く起こっているときに見える。ミー散乱は水蒸気や塵によって起こる散乱であるため、その日の天候によって散乱確率が異なる。これが日によって、空の色が変わる理由である。ミー散乱は波長依存性が低く、指向性が高いという特徴を持ち、同じサイズの粒子が揃ったときに、光に色がつ

くという性質がある。

野外の照明環境は、分子による散乱であるレイリー散乱とエアロゾルによる散乱であるミー散乱が天空光照度に大きく寄与している。レイリー散乱光の強度 I は、強度 I_0 の光が1個の大気分子に入射した時、以下の式でされる。

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{\tilde{\alpha} k^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2r^2} \quad (1)$$

ただし、 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

ここでの $\tilde{\alpha}$ は大気分子の分極率、 ϵ_0 は真空の誘電率、 k は光の波数、 λ は波長、 r は散乱光を観測するまでの距離である。分極率 $\tilde{\alpha}$ は大気を構成している分子の種類によらずほぼ一定であるため、散乱光の強度は波長のほぼ4乗に反比例する。

レイリー散乱は、光子の波長ごとの振る舞いが大きく異なる。

一方、ミー散乱は波長依存性は低く、指向性が高いという特徴をもっている。特に、後方指向にくらべて前方指向が強い。ミー散乱の一回散乱による位相関数は式 (2) (3) になる。

$$\frac{I}{I_0} = \frac{|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2}{2k^2} \quad (2)$$

前方指向の散乱強度は、

$$I = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{l=1}^{\infty} (2l+1) \left[|a_l|^2 + |b_l|^2 \right] \quad (3)$$

ここでの a_l は散乱確率の近似する楕円体の長半径、 b_l は短半径である。このパラメータは、エアロゾルによって異なる。ミー散乱は、散乱回数が増加することにより前方散乱性は弱くなくと考えられる。ミー散乱の強度分布を図示したのが図2である。

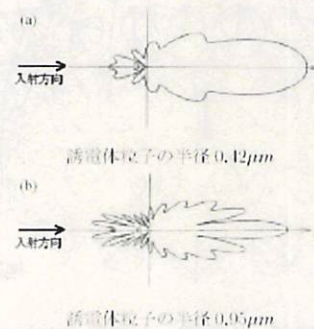


図2. 波長542nm のミー散乱強度分布

3. 天空光の照明シミュレーション

コンピュータグラフィックスで屋外景観を作成する場合、太陽直接光を再現する面光源と天空光を再現する一様環境光が用いられてきたが、これでは、晴天・曇天などの気候条件や雲の分布を考慮した微妙な天空状態を表現することはできない。天空光を考慮した全方向の照明情報を持つ天空光源が景観シミュレーションの光源として用いられるようになってきた。

西田らの提案した方法は、天空を大きな半球ドームと考え、それを帯状に分割して、それぞれの帯光源の照度を積分することによって計算点における天空照度の計算するものである。この方法はCG制作に有効な方法であるが積分計算に時間がかかる。その後、級数展開により天空照度を計算する手法(2)や、多重散乱を考慮した空色の表現手法(3)が開発された。

P.Debevesらの方法は、魚眼レンズカメラで撮影した全天空画像を利用する方法である。全天空画像から直接、天空輝度分布を求め、それを天球モデルの各光源の輝度値に写像する、光源からCG物体に照射される光を追跡して画像を生成する。この方法は、間接光も追跡することにより、現実感のある景観画像を作成できる。

3.1 風力発電所の景観表現

風力発電所の景観表現と評価において、ロータ回転運動は不可欠の要素であり、アニメーション表現を必要とする。マルチスペクトルモデルの適用は計算負担が大きく、アニメーションにはそぐわない。天空光モデルは地上反射光の挙動を取り込めていない。このため、近距離から見上げられることが多い風力発電所の景観をうまく表現できない。以上の理由から、風力発電所の景観表現のための独自の照明モデルが必要であると考えた。

4. 景観シミュレーション

4.1 簡易型天空照明モデル

大気拡散の計算時間を節約するために近藤の天空光源モデルを使うことにした。近藤モデルは、大気圏上端部に届く日射量

を基点にして、大気経路の変化を観測データを用いて簡略化したものである。大気放射計算負担を大幅に軽減できる。推計プログラムは、観測位置、観測日時、気温、水蒸気圧、大気混濁係数、地表面アルベドなどの日常的なパラメータを入力すれば、天空の総光量、及び、太陽直射光、天空光、地上反射光の日射量を計算することができる。観測位置は北緯 34.5°、観測日を10月1日に設定し、12時から17時の日射量変化を1時間ごとに計算したものが表1である。計算誤差は、予想されるが計算負担を軽減するという意味では有用である。

照明環境をシミュレートする擬似天空モデルは、半径 200Km の半球ドームで 196 個のスポットライト光源を均等配置したものがある。太陽位置に最も隣接するスポット光源を太陽直射光の光源とし、残りを天空光の光源とする。地上反射光は、半球ドームの底円を使い面光源として定義とする(図3)。スポットライトの光源属性は、図4の通りで、照度と反射による減衰係数(2次関数)、スポット放射角度(60)を入力する。太陽直射光の光源に設定する照度(1x)は、日射量推計値を10倍したものを入力し、天空光は、計算値を50倍して分担の光源数で割った値をそれぞれの光源に設定した。地上反射光は計算値を25倍してある。

4.2 画像生成

画像生成には、SHADE-7 と、SkyLightV2.2(擬似天空プラグイン)を用いた。モデル設定は、半球ドーム底円の中心に発電所を設置し、カメラは南東方向に50m離れた位置から地上60mのロータ中心部分を見上げる。14時の太陽位置は、東南東方向で天頂角 1.473 である。

図5は、太陽直射光、天空光、地上反射光それぞれの成分によって表現した画像である。地上反射光成分を強調して加えることにより、マッピングした天空画像との違和感が減少し、天空画像天空発電所を見上げる感覚が表現できるようになった。

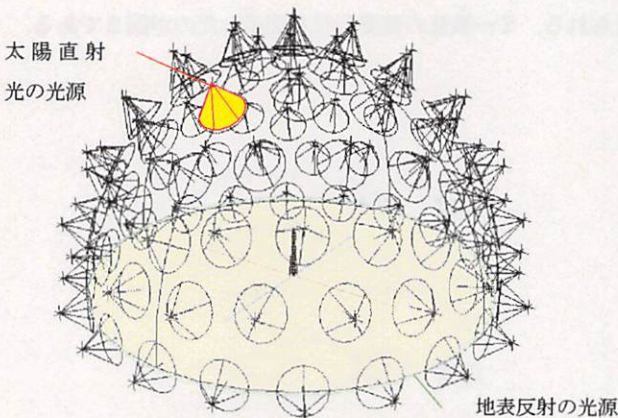


図3：半球ドームを使った擬似天空モデル



図4：スポット光源の属性設定 (SkyLight2.2)

表 1 : 近似式を用いた日射量の推計 (Wm^{-2})

地方時	天頂角	直射光	天空光	地上反射光
12	1.267	889	50	150
13	1.314	880	49	144
14	1.473	852	47	125
15	1.825	793	43	96
16	2.650	676	35	58
17	5.593	409	21	19

観測位置:北緯 34.5

観測日:10月1日

日平均気温=20℃、日平均水蒸気圧=15hPa、

大気混濁係数=0.05、

地表面アルベド=0.2

図 6 に、ナセル部分に注目して、天空光源だけの画像(a)と、地上反射光源を加えた画像(b)を表示した。地上反射光源によって、ナセルの底部が鮮明に見えるようになり、近距離から見上げることの多い風力発電所の景観をリアルに表現できたと考える。天空の雲は、魚眼レンズカメラで撮影した全天空写真を半球ドームの内側にマップして表現した。図 7 には、図 4 (C) と同じ照明環境で、高圧送電線鉄塔を表現したものである。発電所が自然光を強く反射して存在感を強調するのに比較して、トラス構造の鉄塔は、背景の天空に馴染んで存在感が希薄である。同様の環境にあっても、発電所と鉄塔では極めて異なる印象を与える。



a.太陽直射光と天空光の画像



b.地上反射光を加算した画像

図 6. 50m地点から見上げたナセル付近の画像



c.太陽直射光源



b.太陽直射光+天空光



c.太陽直射光+天球光+地上反射

図 5 : 天空光源と画像生成

近年、風力発電所は観光資源として積極的な評価が得られるようになってきたのは、風力発電所の独自の形状と反射性能に原因があるのかもしれない。本研究は、そうした印象形成のプロセスを解明するためのツールとしても期待される。

4. まとめ

本研究では、天空照度の推計式を用いて、各光源の輝度を決める簡易型の野外照明モデルを提案し、風力発電所の景観画像生成を試みた。この方法は、計算負担がなく簡単にリアルな画像生成が可能である。アニメーション生成や画像合成に応用の可能性が期待される。

参考文献

1. R.Klassen: Modeling the Effect of Atmosphere on Light, ACM Transactions on Graphics, Vol.6 (No.3), pp.215-237
2. T. Nishita and E. Nakamae: Continuous Tone Representation of Three Dimensional Objects Illuminated by Sky Light, Computer Graphics, Vol.20 (No.3), pp.125-132, (1986)
3. 土橋宣典・西田友是: 天空照度の基底関数表現を用いた屋外環境下における高速レンダリング手法, 画像電子学会誌, Vol.24, (1995)
4. 吉本恵子: 景観画像生成のための大気状態を反映した照明環境合成, 奈良先端科学技術大学院大学大学院修士論文 (2003)
5. P. Debevec: Image Based Lighting, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.22 (No.2), pp.26-34 (2001)
6. 渡辺大二郎: 擬似天空光モデルを用いた塔状建造物の景観表現に関する研究, 名古屋産業大学卒業論文 (2005)
7. 近藤純正: 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版会, 2000

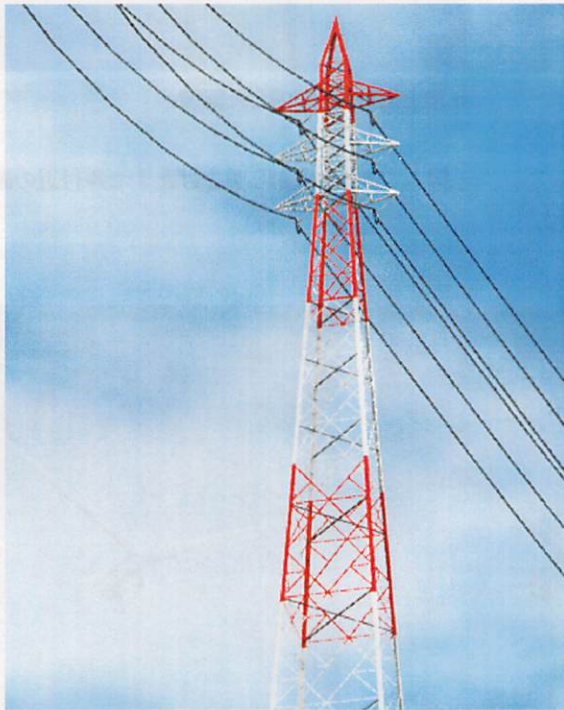


図7: 送電線鉄塔の表現