追尾式太陽光発電パネルまわりの流れに関する 数値シミュレーション

宇士 貴丈^{a)}•菊地 正憲^{b)}

Numerical Simulation of Flow around tracking Type Solar Panels

Takahiro UTO, Masanori KIKUCHI

Abstract

Recently, the innovation of new energy is desired in order to reduce greenhouse gas emissions to prevent global warming. In particular, solar power is considered as one of the alternative energy sustainable harmony with the global environment. Currently, two types of tracking type solar panels have been built in the University of Miyazaki. One is a flat panel, which is an apparatus consists of a single panel. The another type is split panel, which is divided into three panels. This structure is designed to improve the rigidity of the panel and the resistance to wind. The resistance to wind becomes a serious problem during high winds, because this is supported by only a single shaft to track the sun. Therefore, we simulated the flows past the solar panels using thermo-fluid numerical analysis software FLUENT. As a result, we got the velocity and pressure distributions in the three dimensional flow field, and the aerodynamic forces on the solar panels.

Keywords: Numerical simulation, Aerodynamic characteristics, Yaw and attack angle

1. はじめに

近年、様々な環境問題が急速に深刻化している中、特に 地球温暖化防止を目的とした温室効果ガス削減のために 新しいエネルギーの創出が渇望されている。温室効果ガス 削減のために注目されているものの一つに太陽光エネルギーが ある。太陽の表面温度は 5800[K]であり、中心温度は 15000[K] といわれている。このような高温状態をもたらしているのは太 陽内部における水素が融合してヘリウムが生成される核融合反 応である。太陽からは様々な波長の光や太陽風と呼ばれる荷電 粒子などが放出されている。地球は太陽から約1億5千万[km] 離れているため直接高温にさらされず、また、磁気圏が荷電粒 子を阻止し、海水を暖め、植物の光合成のためのエネルギー源 になっている。化石燃料である石炭及び原油はそれぞれ太古に 太陽光エネルギーを得て生育した植物及び微生物が変性してで きたものであり、地球における大気の移動、水の蒸発及び大気 中での移動は太陽からのエネルギーによって生じている。した がって、火力、水力、風力の源は太陽であり、原子力や地熱を 除いて地球上で利用されるエネルギーのほとんどは太陽に由来 すると言える。太陽から定常的に地球に届いている太陽光エネ ルギーは、枯渇が心配される化石燃料とは異なり、ほぼ永久的 に利用可能なエネルギーであり、二酸化炭素などの温室効果ガ スを排出することのないクリーンなエネルギーである。また、

a)機械システム工学専攻大学院生 b)機械設計システム工学科教授 地表におけるエネルギー密度が緯度によって異なるものの、世界のどの地域においても利用できる。このようなことから、太陽光エネルギーを利用した太陽光発電は地球環境と調和する有効な持続可能な代替エネルギーの一つと考えられている^{1,2)}。

このような背景から、現在、宮崎大学には4種類の固定式の 太陽光発電設備と二種類の追尾式太陽光発電パネルが設置され ている。多種類の太陽光パネルを同一敷地内の設置することで、 同一条件での発電量比較等の研究を推進することができ、かつ、 環境教育にも役立てることも目的としている 3)。本研究では追 尾式太陽光発電パネルのみを数値計算の対象としている。なぜ なら、この追尾式太陽光発電パネルは、大きなパネルを一本の シャフトで支える構造であるため、強度上の観点から空気力の 評価をすることが必要となる。本装置は最適な角度で太陽光を 受けられるようにパネルを動かし太陽を追尾する方式で、パネ ルと地面の成す角度は時々刻々変化する。このため、パネルに 働く揚力、抗力及びモーメントの空力特性を、様々な風向、風 速に対して解明する必要がある。そこで、本研究では、太陽光 パネルを過ぎる空気流の数値シミュレーションにより、空力特 性を解明すると同時に、太陽光パネル周辺の構造物への流れの 影響や太陽光パネルが複数台設置した時の流体力学的な干渉を 予測するため、太陽光パネルまわりの速度や圧力分布等の流れ の特性を明らかにする。

二種類の追尾式太陽光発電パネルは、一つがフラット型パネ ルであり、これは、一枚のパネルで集光する方式である。もう 一方は、パネル分割型パネルで、3枚のパネルに分割され互い に段差をつけてある。このような構造は、パネルの剛性、耐風 性の改善などの効果を期待して考案されたものである。



図1. 追尾式太陽光発電パネル.

2. 解析方法

本研究では ANSYS 社製の有限体積法汎用熱流体解析 ソフトウェア FLUENT、流体解析プリプロセッサー GAMBIT 及び Tgrid を用いた。FLUENT は全ての流れに対 して質量保存則と運動保存則に関する支配方程式が有限 体積法により解かれ、質量保存則に関しては連続の式、運 動量保存則に関しては Navier-Stokes 方程式が解かれる。 乱流の場合、追加で乱流モデルが解かれる。本解析の太陽 光パネルまわりの流れは乱流なので、太陽光パネルまわり の流れに適した、Realizability *k-ε* モデルを用いた。

3. 解析モデルとメッシュ構造

3.1 計算領域

図 2 に示すように、本解析の計算領域は、フラット型 パネルの高さ方向 H を基準として、計算領域断面は、パ ネルの幅方向に 7H、高さ方向に 5H であり、計算領域長 さは主流方向に 19H に設定した。また、座標系に関して は、直交座標系として一般的な右手系を用いた。座標原点 は太陽光パネル中心部に設定した。



図 2. 計算領域.

3.2 太陽光パネル仕様

本解析では追尾式太陽光発電パネルのフラット型パネ ル及び分割型パネルを解析対象にし、用いた太陽光パネル は実物の 1/20 スケールである。図 3(a)に示すフラット型 パネルは高さ方向 *H*=360mm、幅方向 *W*=516mm、厚さ t=9.5mmであり、図 3(b)に示す分割型パネルは中央に高さ 方向 341mm×幅方向 266mm とその左右に高さ方向 341mm×幅方向 132mmの計 3 枚のパネルから構成されて おり、領域全体の大きさは、高さ方向 H=341mm、幅方向 W=538mm、厚さ t=18mm である。



3.3 メッシュ構造

本解析では計算領域を2つに分割し、メッシュ数の削減 を図った。総メッシュ数は約2,300,000である。

4. 数值解析条件

4.1 解析パラメータ

本解析における解析パラメータを表1に示す。主流速度 は実験⁴⁾と一致させて解析を行った。なお、空気は15℃の 物性値を用いた。レイノルズ数は分割型パネルの *H*[mm] を代表長さとした。

flow velocity	U	[m/s]	8.16
density	ρ	[kg/m ³]	1.225
kinematic viscosity	v	$[m^2/s]$	1.4607×10 ⁻⁵
Reynolds number	Re	[-]	1.9×10 ⁵

表 1. 解析パラメータ.

4.2 解析パターン

本解析では、図 4 に示すように迎角を $\phi(0^{\circ} \leq \phi \leq$ 180°)、偏揺れ角を $\theta(0^{\circ} \leq \theta < 180^{\circ})$ とし、迎角 ϕ は 10°おきの姿勢について、偏揺れ角 θ は 20°おきの姿勢 について解析を行った。主流方向の力を F_x 、主流と直角 方向の力を F_y 、z軸方向の力を F_z 、 F_x と F_y を水平面で座 標変換しパネルの上下辺方向に直角な成分(以下、「水平横 力」という)を F_s 、z軸まわりのモーメントを M_z とした。



図4. 太陽光パネルの基準座標系及び全体図.

結果及び考察

5.1 主流方向の空気力

フラット型パネル、分割型パネルともに迎角 ϕ が大き くなりパネルが地面に対して水平になるにつれて C_x は小 さくなっていくことがわかる。また、偏揺れ角 θ が 80° と 100°のときに C_x が小さくなる。分割型パネルにおい て受光面が上流側を向いている(0°< ϕ <90°, 0°< θ <90°)ときよりも下流側を向いている(0°< ϕ <90°, 90°< θ <180°)ときの方が C_x が大きいことがわかる。

図 6 よりフラット型パネルと分割型パネルを比較して みると、迎角 ϕ が小さく偏揺れ角 θ が大きいときに分割型 パネルの方が C_x が小さく、本装置の効果が表れているこ とがわかる。





図 6. C_xの比較(-:フラット型、…:分割型).

5.2 主流と直角方向の空気力

図 7 よりフラット型パネルと分割型パネルともに θ =60°,120°の場合が最も大きな力が働いていることがわ かる。また、図8より分割型パネルの方がフラット型パネ ルよりも *C*,は小さいことがわかる。



5.3 z 軸方向の空気力

図9よりどの偏揺れ角θにおいてもφ>50°の場合に最大となる。また、図10より、受光面が下流側を向いている場合はフラット型パネルと分割型パネルにほとんど違いは見られなかったが、受光面が上流側を向いている場合は分割型パネルの方がフラット型パネルよりも*C*₂が小さいことがわかる。



図 10. C_zの比較(-:フラット型、…:分割型).

5.4 パネル法線方向の空気力

図 11 は Hoerner⁵⁾が計測した壁面の影響を受けない理想 的な正方平板(以後、「正方平板」という)の法線方向にか かる空気力の一般的特性とフラット型パネル及び分割型 パネルに働く法線方向の空気力を比較したグラフである。 本解析はアスペクト比γ=1の正方平板とは異なり $F_n(\phi, 0^\circ)$ と $F_n(0^\circ, \theta)$ はアスペクト比がそれぞれ約 1.5、 約 0.67 と異なるため両者を調べる必要がある。ここで、 F_nはパネル法線方向に加わる力とする。図 11 を見てみる と、アスペクト比の違いにより値は異なっているが、 C_n(ϕ ,0°)は正方平板の挙動から大きな逸脱が見られるの に対して、アスペクト比が 0.67 の C_n(0°, θ)は比較的同様 な傾向を示した。また、 $C_n(\phi, 0^\circ), C_n(0^\circ, \theta)$ は全体的に 分割型パネルの方がフラット型パネルよりも小さいこと がわかり、流体力を受けにくいことが理解できる。また、 分割型パネルはフラット型パネルと異なり、アスペクト比 に依らず正方平板の挙動から大きく逸脱し、*C*,は小さく なるので本システム特有の効果が作用していると考えら れる。



図 11. *C_n*の変化.○:*C_n*(ϕ ,0°)(フラット型), Δ :*C_n*(0°, θ) (フラ ット型), \bullet :*C_n*(ϕ ,0°)(分割型), Δ :*C_n*(0°, θ)(分割型),□:Hoerner⁵)

5.5 z 軸まわりのモーメント係数の特性

モーメント係数 Cmzに関しては説明のため横軸を φ→ θ 、パラメータを $\theta \rightarrow \phi$ に変更したグラフを載せている。 フラット型パネル及び分割型パネルに働くモーメント係 数 Cmzをそれぞれ図 12 の(a),(b)に示す。また、図 13 に迎 角 φ = 0°, 30°, 60°におけるフラット型パネルと分割型パ ネルの Cmcの比較を示す。結果のグラフを見ると、受光面 が上流側を向いているとき、モーメント係数はフラット型 パネルと分割型パネルに大きな差がない。しかし、受光面 が下流側を向いているときの差はピーク値がフラット型 パネルよりも分割型パネルの方が明らかに小さい値を取 っている。



80 偏揺れ角 θ [deg] 図 13. Cmzの比較(-:フラット型、…:分割型).

60

100 120 140 160 180

5.6 太陽光パネルの合力

図14にフラット型パネルと分割型パネルの合力Ctの比 較のグラフを示す。フラット型パネルの場合、 偏揺れ角θ <60°まで合力はほとんど変化しない。しかし、分割型パ ネルの場合、偏揺れ角θが大きくなるにつれ合力は漸減し ている。このことより、太陽光パネルを支えるシャフトに 働く力がフラット型パネルよりも小さいことがわかる。



図 14. C_tの比較(-:フラット型、…:分割型).

5.7 太陽光パネル面の圧力係数

太陽光パネル面の圧力係数コンター図及び圧力係数分 布図を図 16~19 に示す。パネル面の圧力係数分布図表示 する際に、計算領域座標とは別にパネル面に座標軸を設定 して、示している(図15)。



図 15. パネル面座標及び圧力係数分布測定位 図 16 と図 17 を見てみると、(ϕ , θ) = (0°, 0°)の場合と (φ,θ) = (60°,0°)の場合では、フラット型パネル及び分割 型パネルに働く圧力係数はスリット以外のところではほとんど 同じであることがわかる。したがって、5.1~5.6節までで示し てきたパネルに働く力においてもこの両者は近い値を示してい る。図 18 $\mathcal{O}(\phi, \theta) = (0^{\circ}, 60^{\circ})$ 場合を見てみると、正圧面 においては大きな違いはないが、負圧面においてフラット型パ ネルは左右の圧力差が大きいのに対して、分割型パネルは左右 の圧力差がフラット型パネルに比べて少ないことがわかる。こ れにより、図8で示したC,の比較においてフラット型パネルと 分割型パネルで大きな違いが生じたと考えられる。図19はモー メント係数においてフラット型パネルと分割型パネルで 顕著な違いが出た(φ,θ)=(0°,120°)について示したもの である。分割型パネルはフラット型パネルに比べて負圧面の左 右の圧力差が小さいためにが Cmm減少したと考えられる。













図 17. (ϕ , θ) = (60°, 0°)におけるコンター及び分布.





å

図 18. (ϕ , θ) = (0°, 60°)におけるコンター及び分布.





図 19. (ϕ , θ) = (0°, 120°)におけるコンター及び分布.

5.8 パスライン

図 20、図 21 及び図 22 は、モーメント係数においてフ ラット型パネルと分割型パネルで大きな違いが見られた (ϕ , θ) = (0°,120°)における x = -300, z/H = 0, 0.25,-0.25, -200 < y < 200 の線上から出発した粒子のパスラインを示す。 これを示すことにより、分割型パネルのスリットを通過する流 れをみることができる。また、z/H = 0.25,-0.25 では流れが正圧 面から負圧面にまわり込み、パネルの背面に縦渦が作られてい ることがわかる。分割型パネルは三枚の板が段違いになってい るため、図に示すように、流れが隙間を通過する。このことに よりパネルが受ける力が軽減されると考えられる。これはどの 迎角 ϕ 、偏揺れ角 θ においても言えることであり、今まで示し てきた力全てに影響すると考えられる。



図 20. z/H=0におけるパスライン.



図 21. z/H=0.25 におけるパスライン.



図 22. z/H=-0.25 におけるパスライン.

5.9 y-z 平面における速度ベクトル

5.8節で観察された縦渦を別の角度から見るため、図23 にパネル後縁位置、図24、25にそれぞれ1弦長後方位置 及び2弦長後方位置におけるy-z平面内の速度ベクトルを 示す。図を見てみると、フラット型パネル及び分割型パネ ルともに縦渦が発生していることが確認でき、縦渦はパネ ル後縁位置と2弦長後方位置においてもあまり変化がない。



図 25. 2 弦長後方位置における速度ベクトル.

5.10 後流における速度の回復

図26において、フラット型パネル迎角 φ= 0°で偏揺れ角 θ を変化させた場合のパネル後縁位置から8弦長後方位置までの 各x位置におけるy-z平面内の速度の最小値を主流速度で無次 元化した値を示していく。これを示すことにより、どれくらい 離れれば流れが主流に回復するかわかる。投影面積が小さい場 合には、約4弦長後方位置で主流まで回復するが、太陽光パネ ルが徐々に流れに対して垂直に立っていき、投影面積が大きく なる場合には、8弦長後方位置でも主流と同じにはならず、太 陽光パネルの影響を受けていることがわかり、また、主流速度 への回復の仕方は非常に緩やかである。



図 26. フラット型パネルの後流における速度の回復.

6. 結論

本研究では、迎角 φ や 偏揺れ角 θ を変化させ、宮崎大学に 設置してある太陽光発電パネルの三次元数値解析を行い、空力 特性及び流れの様相を考察し、以下の知見を得た。

- 迎角 φ が小さく 偏揺れ角 θ が大きいときに分割型パネ ルの方が主流方向の力(C_x)が小さく、本装置の効果が表 れている。
- フラット型パネルと分割型パネルともに偏揺れ角 θ =60°、120°の場合が最も主流と直角方向の力(C_y)が働いている。また、フラット型パネルより分割型パネルの 方が主流と直角方向の力(C_y)が小さい。
- 3) z 軸方向の力において、受光面が下流側を向いている場合は フラット型パネルと分割型パネルにはほとんど違いは見ら れなかった。しかし、受光面が上流側を向いている場合は分 割型パネルの方がフラット型パネルよりも小さい。
- 4) C_n(φ,0°)は正方平板の挙動から大きな逸脱が見られるのに対して、C_n(0°,θ)は比較的同様な傾向を示した。C_n(φ,0°), C_n(0°,θ)は全体的に分割型パネルの方がフラット型パネルよりも小さい。また、分割型パネルはフラット型パネルと異なり、正方平板の挙動から大きな逸脱が見られ、本システム特有の効果が作用している。
- 5) モーメントは、受光面が上流側を向いているときはフ ラット型パネルと分割型パネルは共に大きな差はない。 しかし、受光面が下流側を向いているときは分割型パネ ルの方が小さい。
- 合力は、フラット型パネルでは偏揺れ角θ<60°まで はあまり変化しないが、分割型パネルは偏揺れ角が大き くなるにつれ、漸減する。

7) 投影面積が大きい場合には、8弦長後方位置でも主流速 度まで回復せず、太陽光パネルの後流の影響が残る。

参考文献

- 1) 浜川 圭弘, 桑野 幸徳 偏:「アドバンス エレクト ロニクス - 3 太陽エネルギー工学」, 培風館, 1997.
- 2) 山本 敏和,小松 昌太郎,佐藤 明博:太陽追尾型 光発電システムの製作・運転,第47号福島工業高等専 門学校研究紀要,2006.
- 3) 宮崎大学太陽光発電プロジェクトホームページ: http://www.cc.miyazaki-u.ac.jp/pvproject.
- 三原 将功, 松尾 祐樹, 木村 憲二, 小園 茂平: パ ネル分割型太陽光発電システムの空力特性, 宮崎講演 会講演論文集, No.118-3, pp.61-62, 2011,
- 5) S.F.Hoenor: "Fluid-Dynamic Drag". 2nd Ed., Newyork, pp.3-16., 1965.