1

パネル分割型太陽光発電システムの周囲流れの可視化

中原直人¹⁾ ·小園茂平²⁾

Visualization of the Flow around a Concentrator Photovoltaic System of a Subdivided-Panel Type

Naoto NAKAHARA, Shigehira OZONO

Abstract

This paper describes the flow around a concentrator photovoltaic system of a subdivided panel type for a wide range of yaw (θ) and attack (ϕ) angles. The experiments were conducted in a vertical circulating water channel, using a simplified scale model. The flow was visualized using dye tracers and flow patterns were compared for two attitudes for which each other was mirror images. It is found that reattachment occurs at $\theta = 60^{\circ}$ when the front (i.e., light-receiving) surface faces upstream and $\theta = 130^{\circ}$ when the rear surface. Furthermore, we examined the relationship of the flow patterns and the behavior of moment.

Key Words: Concentrator photovoltaic system, Visualization, Vortex shedding frequency

1. 序論

化石燃料はエネルギーとして我々の生活に欠かせな いものだが、有限であり温室効果ガスを排出するなど の問題がある.そのため、新しいエネルギーとして安 全且つクリーンな自然エネルギーが注目されている. なかでも太陽光発電は最も有力な代替エネルギーの一 つである.

図1は宮崎大学に設置されているフラット型と分割 型の追尾式集光型太陽光発電システムの写真である. このシステムはフレネルレンズで太陽光からの放射光 を集光し,高性能発電素子に照射することで電気エネ ルギーを得ており,高価な発電素子の面積を節約でき るのでコストの面で優れている.

一般的な太陽光発電システムとの大きな違いは設置 形態である.パネルを屋根や地上に固定するタイプが 多く見られるが,追尾式集光型太陽光発電システムの 場合,パネルを常に太陽に正対して動かす必要がある ので動力系統によってパネルは支えられる.大きなパ ネルを1本のシャフト(柱)で支える構造をとられる ことが多く,台風や突風を受けた際の耐風性が大きな 課題となる.

追尾式太陽光発電システムはパネル主体の構造であり、パネルは有限スパン長の矩形平板としてモデル化

1) 応用物理学専攻 大学院生

され、シャフトによって床面近くに支持され、主流に 対して様々な姿勢を取る.有限スパン長平板を過ぎる 流れは周辺からの剥離剪断層の巻き込みにより後流の 構造は2次元平板よりさらに複雑である.これまで床 面に接して設置されたいろいろなスパン長矩形平板の 周囲流れ¹⁾、傾斜角を持つ有限スパン長平板周りの流 れ²⁾、テーパー角を設けた傾斜角を持つ2次元平板周 りの流れ³⁾などが調べられている.

本研究で考察する分割型太陽光発電システムはフ ラット型と異なり、三つ部分のパネルから構成されて いる.これらの部分を接続する部位に隙間が設けられ ており、そこから気流が抜けるので耐風性を改善する 効果が期待できる.パネルの偏揺れ角θを変化させる とき鏡映の関係にある二つの偏揺れ角が存在し、集光 型太陽光発電システム周りの流れを調べる上でこれら のパネル姿勢の空気力の比較は重要な要素となる.木 村⁴⁾により、分割型パネルはパネル背面が受風面と なるとき、パネル前面が受風面となる場合やフラット 型パネルと比べてモーメントが非常に小さくなるとい う結果が報告されている、しかしながら、分割型パネ ルは複雑な構造であり周囲流れの挙動の推測は困難で ある. そこで我々はパネル分割型太陽光発電システム の縮小模型を用いて周囲流れの可視化を行い、鏡映の 姿勢においての隙間の効果やそれに伴う流れがモーメ ント係数にどのような影響を与えているのかを検討し た、さらに、渦放出周波数から分割型パネルの流れ特

²⁾ 材料物理工学科 教授

性が変化する角度を調べ可視化の結果との対応を比較 し考察した.

本論文では水槽に分割型太陽光発電システムを単純 化した縮小模型を設置し,主流と相対的に姿勢を変化 させ可視化と渦放出周波数の計測を行った.第1節で は過去の研究を概観し本研究の動機を述べた.第2節 では実験に用いた水槽装置の概要,使用模型と実験方 法を説明しパラメータを定義した.第3節では模型の 鏡映関係と C_{mz} との関係を述べた.第4節では偏揺 れ角 θ ,迎角 ϕ を各々変化させた際の流れパターンを 鏡映関係に着目して記述した.また,渦放出周波数の 計測から無次元渦放出周波数を算出し流れパターンと の比較を行った.第5節で本研究の結論を述べた.



図 1. (a) フラット型, (b) 分割型.

2 実験装置と方法

2.1 可視化実験

本実験では鉛直回流型水槽を使用した.測定部は長 さ4.0 m,幅0.4 m,水深0.4 m,高さ0.6 mである. 流れはインペラーによって駆動され,流速Uは0.09~ 1.00 m/sの範囲でコンピューターによって制御可能で ある.整流のために多孔板(縦1000mm×横400mm) とステンレスメッシュ(縦1000mm×横400mm)が設 置されている.面内の流速を一様化するためにインペ ラーの回転数に応じてローターで水面の速度を加速さ せている.また,水面波を起こさないように測定部入 り口に制波板が設置してある.水表面,壁から50mm 以上離れた領域での乱れの強さは1.0 %以下である.

本実験では、表面塗布法による可視化を行った.図 2に装置の側面図を示す.測定部入り口から流下距離 1200mmの位置に模型中心を設置した.境界層の発達 を抑えるためテーブル(380mm×600mm)を4本の 柱で支え水中深さ120mmの位置に設置した.テーブ ルの上流側縁には15度のテーパー角を設けた.模型 はステンレス棒によりテーブルから水中深さ70mmの 位置にパネル中心がくるように設置した.

図3に使用した模型の透視図をを示す.本実験で用 いた模型は実際の分割型太陽光発電システムを単純化 した 1/60 縮小模型である. 1:2:1 の水平辺の比を持つ 3 枚のアクリル板を接続して作製した. 組み立てられ たパネルは高さ H = 114mm, 幅 W = 181mm であ り, 3 枚のアクリル板の厚さは 5mm, 接続部を合わせ た模型の総厚さは t = 15mm である. シャフトは直径 6mm, 長さ 70mm のステンレス製の円管を使用した. パネルとシャフトを接続する支持部には全ネジを使用 し, 両側のナットを締めることで角度を固定した.

図4,5に可視化位置についての概略を示す.パネ ル表面の斜線部位置にトレーサーとして水彩絵具(白 色)を塗布した.90°< $\theta \le 180^{\circ}$ の範囲ではパネル上 流面の相当する位置に水彩絵具を塗布した.水中に模 型を設置した後に一様流を流し側面または水槽底面か らスライドプロジェクター(MASTER 製)により白 線部の位置に主流方向に平行なシート光を照射し,そ の断面内の流れを水槽底面または側面からビデオカメ ラ(Panasonic 製 HDC-TM70)で撮影した.水彩絵 具は平均して 30 秒程度で溶出してしまうのでビデオ カメラによる撮影時間もその程度であった. $\phi \ge \theta$ は次のような場合を調べた.

- (1) 迎角φを固定して, 偏揺れ角θにともなう流れの 変化を可視化する場合:φ=0°,0°≤θ≤180°
- (2) 偏揺れ角 θ を固定して、迎角 ϕ にともなう流れの 変化を可視化する場合: $\theta = 0^{\circ}, 0^{\circ} \le \phi \le 90^{\circ}$
- (3) (2) の鏡映にある姿勢の迎角 φ にともなう流れの 変化を可視化する場合: θ = 180°,0° ≤ φ ≤ 90°

使用した一様流は流速U=0.107m/sであり、このときのレイノルズ数は $\text{Re}=UD/\nu = 1.8 \times 10^4$ である.





図 4. 可視化位置とトレー
サー塗布位置.(偏揺れ角
0° ≤ θ ≤ 180°で変化す
る時)

図 5. 可視化位置とトレー サー塗布位置.(迎角 0° ≤ φ ≤ 90°で変化する時)

2.2 渦放出周波数の計測

本実験では,可視化の結果から得られた情報をもと に分割型パネル後方の渦放出周波数の計測を行った. 図6は装置の側面図である.模型後方からI型熱線プ ローブを斜めに設置し計測を行った.床面として水中 に設置されたテーブルは熱線流速計による計測を行う ために可視化実験に用いたテーブルより短いものを使 用した. 図7に計測位置の概要を示す. 渦放出周波数 の計測は可視化実験と同様に $\phi = 0^{\circ}$ に固定して θ を 10° 刻みで変化させた場合と、 $\theta = 0^{\circ}$ に固定して ϕ を 10° 刻みで変化させた場合,また $\theta = 180^{\circ}$ に固定し て ø を 10° 刻みで変化させた場合について行った. 偏 揺れ角θを変化させる際にはパネル側辺中心から H/4 上方でパネル側端から側方に w = 7.5~45mm, 下流 側にr = 45mm, 迎角 ϕ を変化させる際はパネル上端 中心から上方に h = 15~45mm, 下流側 r = 45mm の地点でトラバース計測した.

また,計測した渦放出周波数をもとに無次元渦放出 周波数 St を算出し可視化の結果と比較することでパ ネルの特性を調べた.無次元渦放出周波数 St は以下 の式で表される.

$$St = \frac{f_v D}{U} \tag{1}$$

ここで f_v は渦放出周波数, D は代表長さ, U は流速 である. D は以下のように定義した.

$$D = \begin{cases} W|\cos\theta| & (偏揺れ角 0^{\circ} \le \theta_{1} \le 80^{\circ}, \\ 100^{\circ} \le \theta_{2} \le 180^{\circ}) \\ H\cos\phi & (迎角 0^{\circ} \le \phi \le 80^{\circ}) \\ t & (偏揺れ角\theta = 90^{\circ}\text{or } 迎角\phi = 90^{\circ}) \end{cases}$$
(2)

実験に使用した一様流は流速*U*=0.107m/sであり,熱 線流速計により得られた電圧はロガー(KEYENCE 製 NR-600)により AD 変換された.サンプリング周 波数 100Hz,サンプリングデータ長 18000 個でデータ を収録した.







図 7. 計測位置. (a) 偏揺れ角 θ 変化, (b) 迎角 φ 変化.

3.鏡映関係にある分割型パネルの空気力 *C_{mz}* との比較

本実験で使用した模型は θ を変化させる際に鏡映の 関係にある2つの偏揺れ角が存在する.図8,9に θ に伴う受風面の変化を示す.パネル前面が受風面とな る場合の偏揺れ角を θ_1 (0° $\leq \theta <$ 90°),パネル背面 が受風面となる場合の偏揺れ角を θ_2 (90° $< \theta \leq 180$ °) とすると次の関係が成り立つ.



受風面の変化. 図 9. 受風面の変化.
$$\theta_1 < 90^\circ$$
) $(90^\circ < \theta_2 \le 180^\circ)$

$$\theta_1 + \theta_2 = 180^{\circ} (0^{\circ} \le \theta_1 \le 90^{\circ} \le \theta_2 \le 180^{\circ})$$
 (3)

 $(0^{\circ} \leq$

壁面から十分に離れた平板を過ぎる流れであればこれ らの角度における空気力は同じになると考えられる. しかし,本実験で使用した模型はパネルを支えるシャ フトや床面が存在し,パネルも平板ではなく表裏で段 差の形状が異なる分割型パネルである.そのためθ」と $\theta_2 をとる二つの場合の空気力は同等ではない.図10$ は木村ら⁴⁾により得られた分割型太陽光発電システ $ムの1/20縮小模型のモーメント係数<math>C_{mz}$ と山口⁵⁾、 立川ら⁶⁾のデータと比較したものである.この結果 からパネル背面が受風面となる90° $\leq \theta_2 \leq 180^\circ$ では 0° $\leq \theta_1 \leq 90^\circ$ や他のフラット型と比べて非常に小さ い値をとることが分かる.以上のことに着目し流れパ ターンと渦放出周波数との関係を考察した.



4 実験結果と考察

4.1 偏揺れ角 θ の変化に伴う流れパターンの変化

図 11, 13, 15, 17, 19 に ϕ = 0°の時の θ_1 = 0°, 10°, 50°, 60°, 80° についての可視化を示す.図 12, 14, 16, 18, 20 に鏡映の関係にある ϕ = 0°の時の θ_2 = 180°, 170°, 130°, 120°, 100° についての可視化を示した. それぞれの写真の下部には流れの概要をスケッチした 図を示した.

図 11, 12 を見るとパネルの両側端からの剥離剪断 層は K-H 不安定による渦を形成しながら流下し後流 に拡がった. $\theta_1 = 0^\circ$ の場合,両側端から放出された渦 が周期的に双子渦のように並列に並んで流下する現象 が見られた.隙間からの吹き抜けにより噴流化した流 れがパネル背面に沿って進み中央で合流し混合したこ とで背面近くは非常に乱れた構造になった. $\theta_2 = 180^\circ$ では,隙間からの噴流がパネル背面に沿って外側に進 み両側端からの剥離剪断層に合流した.剥離剪断層は 隙間からの噴流により流下方向と直交する向きに大 きな速度の変動を受けるので剥離角を外側に向け, θ_1 = 0°に比べて剥離剪断層の巻き込む地点が下流側に 移行した.

図13,14を見るとパネルが流れに対して傾きを持っ たことで剥離剪断層の概形が両側で異なるものとなっ た. パネル側端で上流側を前端,下流側を後端とする. 前端からの剥離剪断層はパネル背面に向かって大きく巻 き込み,後端からの剥離剪断層は主流方向に K-H 不安 定による渦を放出しながら流下した. $10^{\circ} \le \theta_1 \le 30^{\circ}$ では両端からの渦が周期的に見られ,後流幅は流下に 伴い増加した. $150^{\circ} \le \theta_2 \le 170^{\circ}$ では剥離剪断層は 初め隙間からの噴流を受け大きく弧を描いて巻き込む が,後流幅は下流側で減少するように見える.

図 11~14の流れと C_{mz} の対応を考えると,主流方向に対する θ_2 が 140° $\leq \theta_2 \leq 180°$ の範囲では隙間からの噴流がパネル背面に沿って外側に流れ,剥離剪断層の角度を変えることが特徴的である.この可視化の結果からも隙間からの噴流が側端からの剥離剪断層の巻き込み地点を下流側に移行させるので有害なモーメントを抑制していると考えられる.

図 15, 16 を見ると $\theta_1 = 50$ では $0^\circ \le \theta_1 \le 40^\circ$ に 比べて下流側の隙間からの逆流が弱くなり,上流側隙 間からの噴流が前端からの剥離剪断層の巻き込みを阻 害しているように見える.流下につれて後流幅はやや 増加した. $\theta_2 = 130^\circ$ では,前端からの剥離剪断層が 中央のパネル近くまで巻き込み剥離再付着を起こして いるように見える.剥離再付着を起こした後,後流幅 は減少した.

図 17, 18 を見ると $\theta_1 = 60^\circ$ では下流側の隙間から の逆流がさらに弱くなった.流れに対する偏揺れ角の 増加により上流側隙間からの噴流が前端からの剥離剪 断層の巻き込みと合流しながら流下,もしくはパネル 背面に巻き込み,再付着と見られる動きを見せた.流 下につれて後流幅はやや増加した. $\theta_2 = 120^\circ$ では,前 端からの剥離剪断層は上流側の隙間からの噴流の影響 を受けつつも巻き込み,中央のパネル中心付近に再付 着した.後端からの剥離剪断層は剥離が弱くなり直線 的に流下し,後流幅は減少した.

図 19,20 を見ると $\theta_1 = 80^\circ$ では下流側の隙間から の逆流はなくなった.この角度では下流側の剥離点が 模型の側端から中央のパネルの後端に移行する.前端 からの剥離剪断層は流下してすぐに巻き込み上流側の パネルに再付着した.下流側の中央パネル後端からの 剥離剪断層は巻き込みが弱くなり直線的に流下した. $\theta_2 = 100^\circ$ では前端からの剥離剪断層が流下してすぐ にパネルに再付着する.この角度においても上流側隙 間からの逆流が見られた.

図 15~20 での C_{mz} への流れの影響を考えると主流 方向に対する θ_2 が大きい時, 130° $\leq \theta_2 \leq 180$ ° では 前端からパネル背面への剥離再付着が強く起きる.ま た, θ_2 が大きい時でも上流側隙間からの逆流が起きる のでこの 2 つの要因により θ_1 の姿勢に比べてモーメ ントは抑制され C_{mz} は小さくなると考えられる.



4.2 迎角 φ の変化に伴う流れパターンの変化

図 21, 23, 25, 27 に $\theta_1 = 0^\circ$ の時の $\phi = 0^\circ$, 40°, 60°, 80° についての可視化を示す. 図 22, 24, 26, 28 に鏡映の関係にある $\theta_2 = 180^\circ$ の時の $\phi = 0^\circ$, 40°, 60°, 80° についての可視化を示す.

図 21,22 を見ると $\theta_1 = 0^\circ$ の姿勢の場合,いずれも 上端からの剥離剪断層が大きく巻き込んでいる.下端 からの剥離剪断層も巻き込みは見られるが,剥離した 後にシャフトの影響と床面による閉塞効果を受けるの で流れは非常に乱れたものとなる. $\theta_2 = 180^\circ$ の姿勢 の場合,上端からの剥離剪断層は $\theta_1 = 0^\circ$ と同様に大 きく巻き込んだ.下端からの剥離剪断層は床面とパネ ルが及ぼす閉塞効果により流下方向の速度成分が大き くなるので,剥離角度が小さくなり床面と平行に流下 した後にパネル背面へ引き込まれる様に巻き込んだ.

図 23, 24 を見ると $\theta_1 = 0^\circ$ の場合,上端からの剥離 剪断層は周期的に渦を放出しながら流下した.下端か らの剥離剪断層は $\phi = 0^\circ$ と同様に非常に乱れたもの となった. $\theta_2 = 180^\circ$ では,上端からの剥離剪断層は 大きく巻き込んだ後にパネルの迎角に沿うように床面 側に流下した.下端からの剥離剪断層は閉塞効果の影 響が弱まったことで剥離角度が外側へやや拡がり巻き 込みの地点が上流側に移行した.

図 25, 26, 27, 28 を見ると $\theta_1 = 0^\circ$ の場合, $60^\circ \le \phi \le 80^\circ$ のいずれも上端からの巻き込みが弱くなった ことで,パネル背面に沿って平行に流れる 2 次流れが 発生した.下端からの剥離剪断層はシャフトにより塞 き止められパネル背面に近接する渦が時折見られた. 逆流と下端からの乱れた剥離剪断層の合流によりシャ フトの下流側パネル近傍は淀んで停滞するような流れ になった.後流は剥離が弱まり直線的に流下した. θ_2 = 180°の場合は $60^\circ \le \phi \le 70^\circ$ の範囲で背面に沿っ て平行に流れる 2 次流れが見られた.下端からの逆流 はパネル背面に沿って上端まで達し,上端からの剥離 剪断層の角度を変えるような動きを見せた.上端から の巻き込みは $\phi = 70^\circ$ 辺りからパネル背面に近接し始 め, $\phi = 80^\circ$ では上端からの剥離剪断層が下端近くの パネル背面に再付着するので後流幅が急激に減少した.





 \boxtimes 27. $\phi = 80^{\circ}, \theta_1 = 0^{\circ}$





 \boxtimes 28. $\phi = 80^{\circ}, \theta_2 = 180^{\circ}$

4.3 渦放出周波数の特性

図 29 に偏揺れ角 θ に伴う無次元渦放出周波数 St の 変化を表したグラフを示す. 熱線流速計による気流変 動のスペクトルピークの計測から渦放出周波数 f_vを 求め式, (1) を用いて St を算出した. $0^{\circ} \le \theta_1 \le 40^{\circ}$ と 140° < θ_2 < 180° では θ_2 の姿勢の方が θ_1 に比べ て非常に小さい St の値をとった. これは θ_2 をとる時, パネルの隙間からの噴流により剥離剪断層の巻き込み が角を変え下流側に移行するため渦の発生が抑制され たからであると考えられる. $\theta_1 \leq 90^\circ$ の範囲で見る と $\theta_1 = 60^\circ, \ \theta_2 > 90^\circ$ の範囲で見ると $\theta_2 = 130^\circ$ で Stの値が大幅に変化する.この角度は可視化の結果か ら,流れに対する姿勢が異なる場合での剥離再付着の 起き始めていると考えられる角度である. この結果か らも再付着の起きる前後で流れパターンが変化するこ とが分かる. $60^\circ \le \theta_1 \le 80^\circ$ と $100^\circ \le \theta_2 \le 130^\circ$ の 範囲では St の値はよく似た挙動を示した. これは両 範囲において再付着による後流の乱流化が進みパネル の姿勢 θ_1 と θ_2 の時で差がなくなるためであると考え られる.

図 30 は迎角 ϕ に伴う St の変化を表したグラフで ある. グラフを見ると $\phi = 60^{\circ}$ まで $\theta_1 = 0^{\circ}$ の方 が $\theta_2 = 180^{\circ}$ より St が 3 倍以上大きな値をとった. $\theta = 0^{\circ}$ では ϕ の増加に伴って St は緩やかに減少する. $\theta_2 = 180^{\circ}$ では $\phi = 60^{\circ}$ 辺りから St のばらつきが見 られる. これはパネル背面への再付着や逆流の影響に より後流の乱れが強くなるためと思われる.

モーメント係数 C_{mz} や無次元渦放出周波数 St の変 化から $\theta = 60^{\circ}$ 辺りで急変が生じている.これは再付 着を伴なう流れパターンへの移行と対応している.



図 29. 偏揺れ角 θ に伴う St の変化. ($\phi = 0^{\circ}$ 固定)



図 30. 迎角 ϕ に伴う St の変化.

5. 結論

偏揺れ角 θ や迎角 ϕ に対して,パネル分割型太陽光 発電システムの周囲流れを調べ,次のようなことが分 かった.

- C_{mz}と周囲流れの特徴を比較すると, θ₂の範囲で はパネル背面に沿って側方に進む隙間からの噴流 が剥離剪断層に突き当たり混合し,それによって 放出される循環が弱められるのでパネルに生ずる 有害なモーメントを抑制していると考えられる.
- 2) $\phi = 0^{\circ}, 0^{\circ} \le \theta \le 180^{\circ}$ で姿勢を変化させる時 パ ネル前面が上流を向く時は $\theta = 60^{\circ}$ で剥離再付着が 起きる.パネル裏面が上流を向く時,この θ に対 応する偏揺れ角は $\theta = 120^{\circ}$ であるが,これよりや や大きい $\theta = 130^{\circ}$ から剥離再付着が起き始める.
- 3) $\phi = 0^{\circ}, 0^{\circ} \le \theta \le 180^{\circ}$ で姿勢を変化させる時, $\theta = 60^{\circ}$ 辺りで St が急変しており,再付着を伴う 後流構造の変化に対応している. この $\theta = 60^{\circ}$ 辺 りでの再付着が模型の空力特性に大きな影響を与 えていると思われる.

謝辞

本研究を進めるに当たり宮城弘守助教,修士1年生 の堀内佑太氏,三原将功氏の助力を頂いたことに深謝 申し上げる.

参考文献

- H. Sakamoto, M. Arie, "Flow around a normal plate of finite width immersed in a turbulent boundary layer", Transactions of the ASME, Vol. 105, 98-104 (1983).
- 岡本,加賀谷,田邊,久保田,平面壁上の有限幅 傾斜平板まわりの流れ,日本機械学会論文集,B 編,73巻,725号,pp.94-102 (2007).
- Jerry M. Chen, Yuan-Cheng Fang, "Strouhal numbers of inclined flat plates", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 61, 99-112 (1996).
- 木村憲二:パネル分割型太陽光発電システムの空 力特性,宮崎大学工学研究科2011年修士論文.
- 5) 山口靖之:追尾式太陽光発電システムの耐風性, 宮崎大学工学研究科 2010 年修士論文.
- 6) 立川正夫,福山雅弘:台風時の飛散物の軌跡と速度 に関する研究 (その1 平板の空力特性と運動方程 式),日本建築学会論文報告集第 302 号,pp. 1-11 (1981).