

## パネル分割型太陽光発電システムの平均空力特性

木村憲二<sup>1)</sup>・小園茂平<sup>2)</sup>

## Aerodynamic Characteristics of a Concentrator Photovoltaic System of a Divided-Panel Type

Kenji Kimura, Shigehira Ozono

## Abstract

This study deals with the aerodynamic characteristics of a concentrator photovoltaic system of a divided-panel type constructed on the ground for a wide range of yaw( $\theta$ ) and attack( $\phi$ ) angle. The experiments were conducted in a wind tunnel, using a scale model of similar shape to a real photovoltaic system. The characteristics were compared with those of a flat-plate type. Comparison of the aerodynamic forces in two attitudes for which each other was mirror images indicated significant decrease in the magnitude of moment for the divided-panel type.

Key Words: Concentrator photovoltaic system, Aerodynamic characteristics, Yaw and attack angle

## 1. 序論

地球温暖化防止による温室効果ガス削減のために新しいエネルギーの創出が渴望されている。なかでも太陽光発電は地球環境と調和する持続可能な代替エネルギーの一つと考えられている。

2009年から追尾式・集光型・太陽光発電システムが宮崎大学に設置された。この太陽光発電システムは屋根や地上など傾斜面に固定するタイプとは異なり、発電パネルを常に太陽に正対して動かさなければならないので動力系統によってパネルは支えられている。大きな発電パネルを1本のシャフトで支える構造であるので台風や竜巻などの強風時にその耐風性が問題となる。

これまでに地面に接して固定して設置された太陽光発電システムの耐風性<sup>1)</sup>、太陽熱発電のヘリオスタット周辺流れの渦放出特性<sup>2)</sup>などの研究が行われてきたが、追尾式太陽光発電システムの耐風性に関する研究はいまだ十分に行われていない。

現在のところ宮崎大学には二種類の追尾式太陽光発電システムが建設された。フラット型太陽光発電システムは一枚のパネルで集光する方式で過去の研究<sup>3)</sup>では基本的な空力特性が調べられた。これと異なりパネル分割型は3枚のパネルに分割され互いに段差をつけてある。このような構造は次のような効果を期待し

て考案されたものである。第一に、フラット型ではパネルが直立に近い姿勢をとる時、パネルの重心が偏り、重力の方向がシャフト軸を通過しないので常時、有害なモーメントが生じる。分割型では中央のパネルが左右のパネルより奥まっているので直立に近い姿勢でも重力の方向がシャフトの軸に重なるようになる。第二に、フラット型では局所的なパネルの剛性が十分ではなく荷重によるパネルの撓みが生じやすい。一方、分割型ではブレースなどで小パネルを組立てているので補強がなされている。第三に、分割型はパネル間の接続部に隙間があるので、そこから気流が抜けるので耐風性の改善が期待できる。しかし、全く新規の構造であるので空力特性に不明の部分が多い。この流体力学的効果を本論文で対象とした。

着目する点は主に次の二点である。まず、ブラフボディは形状が同一でも主流に相対的な置き方で周囲流れが大きく変化し、その結果、空気力も大きく変わりうる。Roshkoはこれをブラフネス (bluffness) という概念で考察した<sup>4)</sup>。例えば図1(a),(b)に示すような半円柱は主流が曲面に当たる場合のほうが平面に当たる場合よりも抵抗係数大きい。本研究の太陽光パネルは図1(c),(d)に示すような二つの姿勢をとりうるが、このようなブラフネスの違いがどのような空力特性の違いを産むかに着目した。

次に、集光型太陽光発電システムのフラット型と分割型モデルの空力特性の比較を行い、形状による空力特性の違いを検討する。文献<sup>3)</sup>によると、理想的

<sup>1)</sup> 応用物理学専攻 大学院生

<sup>2)</sup> 材料物理工学科 教授

な正方平板の特性<sup>5)</sup>と同様に、フラット型では偏揺れ角や迎角が小さいとき ( $50^\circ$  以下) は平板に垂直な成分の風圧係数がほぼ一定になった。迎角が  $50^\circ$  を越えると流れの様子が変わり圧力分布の不均衡が生じると考えられ、モーメント係数は  $70^\circ$  辺りで最大になった。鏡映の関係にある二つの姿勢の空気力を比較し  $\phi < 50^\circ$  で床面による  $C_x$  への閉塞効果が存在することが分かった。パネル下辺が風上に位置する時は、そこからの剥離剪断層の巻き込みが床面の存在により阻害され、上下の剥離剪断層の干渉が弱まると考えられた。これらの特性が分割型モデルではどのように変化するかに着目する。この二点に着目しパネル分割型の長短を論じることが本報告の目的である。

本実験では風洞内に太陽光発電システムの縮小モデルを置き、主流と相対的に姿勢を変化させ空力特性を測定した。3節では迎角  $\phi$  あるいは偏揺れ角  $\theta$  のどちらか一方を変化させ基本的な空力特性を調べ、4節では  $\phi$  と  $\theta$  を同時に変化させ、分割型のモーメント係数の絶対値が著しく減少することを示し、5節では鏡映関係にある姿勢どうしの空力特性を比較して迎角と偏揺れ角の効果を考察した。

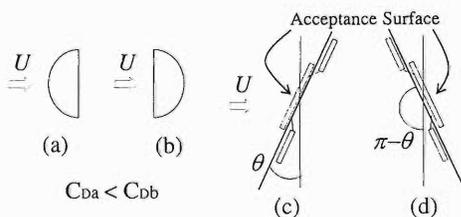


図 1: ブラフネス。

## 2 実験装置と方法

### 2.1 空力特性の測定方法

本実験では室内開放型押込式 (エッフェル型) のマルチファン型風洞を使用した。この風洞の特徴は、気流を複数のファンで駆動することである。ファンの直径は  $270\text{ mm}$  で、縦  $11$  個  $\times$  横  $9$  個 = 合計  $99$  個配置されており、それぞれ独立に制御することができる。ファンの吹き出し口からの流下距離  $X = 10.0\text{ m}$  において入力信号を調整し一様流を生成した。平均風速は  $\pm 2.0\%$  以下の非一様性があり、乱れ強度は  $2.0\%$  以下であり、風速は  $16\text{ m/s}$  まで設定可能である。本風洞はそもそも乱流生成を目的に製作されており一様流を生成しようとしても通常の低乱風洞に比べると乱れのレベルが少し高い。したがって結果の解釈にはその点も考慮しなければならない。本風洞は  $8$  個の可搬洞をそなえており、測定部の断面の大きさは横  $2.54\text{ m}$

$\times$  縦  $1.80\text{ m}$  である。それらを組み合わせて測定部長さ  $G$  を最大  $15.5\text{ m}$  まで延長できる。本実験では、 $3$  個の可搬洞を組み合わせて  $G=9.25\text{ m}$  に設定した。その他の風洞の詳細は文献<sup>6)</sup>を参照されたい。

図 2 に使用した装置の側面図を示す。風洞上流で発達した境界層の影響を避けるため、正方形の木製テーブル ( $1600\text{ mm} \times 1600\text{ mm}$ ) を風洞床面から上方に  $308\text{ mm}$  離して設置した。このテーブルの下部に  $3$  分力検出器 (日章電機, LMC-3501) を設置し、テーブル中心には直径  $30\text{ mm}$  の穴を開け、パネルのシャフトをジグで接続した。 $3$  分力検出器で空気力とモーメントを検出し、その信号は直流型歪増幅器 (日章電機, DSA-100A) で増幅され、ロガー (KEYENCE, NR-600) により AD 変換された。データはサンプリング周波数  $500\text{ Hz}$ 、サンプリングデータ長  $60000$  個で収録した。ローパスフィルターは  $100\text{ Hz}$  をかけた。

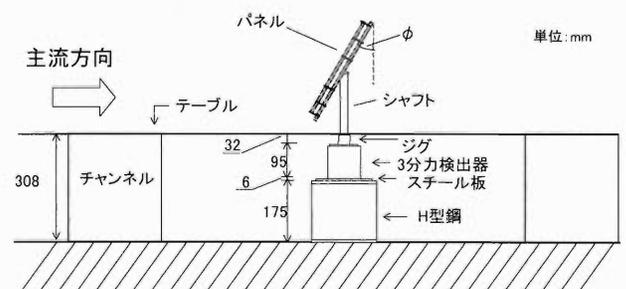


図 2: 装置全体の側面図。

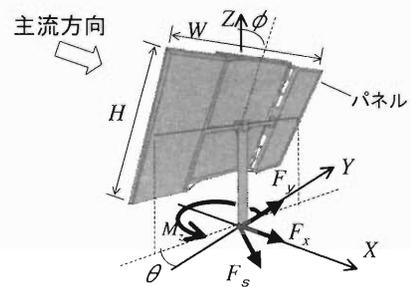


図 3: 模型の透視図。

図 3 に模型の透視図を示す。使用した模型は実際のパネル分割型太陽光発電システムを  $1/20$  に縮小した模型である。模型はパネル部と支持部に分けられる。パネル部は中央に縦  $341\text{ mm} \times$  横  $266\text{ mm}$  とその左右に縦  $341\text{ mm} \times$  横  $132\text{ mm}$  の計  $3$  枚のパネルから構成されており、全体の大きさは縦  $H = 341\text{ mm}$ 、横  $W = 538\text{ mm}$ 、厚さ  $t = 18\text{ mm}$  である。中央のパネルと左右のパネルとの接続部には  $21\text{ mm}$  の段差があり、それぞれには  $4\text{ mm} \times 38\text{ mm}$  の隙間が  $8$  個、 $14\text{ mm} \times$

38 mm の隙間が6個あり気流が抜けうる。パネルどうしは直径3 mm、長さ74 mmの4本のブレースにより補強されている。支持部は主に垂直のシャフト（円柱直径25 mm、長さ $G = 218$  mm）と水平梁（円柱直径12 mm、長さ266 mm）からなっている。シャフトの頂部から水平に梁が差し渡され左右のパネル部を支えている。パネルを水平に支持する時、床面からパネル支持位置までの鉛直距離 $Z_0 = 222$  mmであり、 $H$ で無次元すると $Z_0/H = 0.62$ であった。

図3に示すように偏揺れ角を $\theta(0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ)$ 、迎角を $\phi(0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ)$ とし、 $\theta$ と $\phi$ ともに5°おき姿勢について測定した。主流方向にかかる力 $F_x$ 、主流と直角方向にかかる力 $F_y$ 、 $F_x$ 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（水平横力） $F_s(= F_x \cos \theta - F_y \sin \theta)$ 、 $Z$ 軸まわりのモーメントを $M_z$ とし以下の式で無次元化した。

$$C_x = F_x / (0.5 \rho U^2 A) \quad (1)$$

$$C_y = F_y / (0.5 \rho U^2 A) \quad (2)$$

$$C_s = F_s / (0.5 \rho U^2 A) \quad (3)$$

$$C_{mz} = M_z / (0.5 \rho U^2 A W) \quad (4)$$

ここに、 $C_x$ は $F_x$ 係数、 $C_y$ は $F_y$ 係数、 $C_s$ は横力係数、 $C_{mz}$ はモーメント係数である。 $U$ は平均風速、 $\rho$ は空気密度である。見付面積 $A$ は $A = WH$ とした。測定部吹き出し口からの流下距離 $X = 5.5$  mに模型中心を設置した。使用した風速 $U$ は $U = 8.16$  m/s、 $H$ に基づくレイノルズ数は $Re = 1.84 \times 10^5$ であった。模型を直立させた時( $\phi = \theta = 0^\circ$ )の閉塞率は以下の式で計算し4.9%であった。閉塞による影響は補正していない。

$$\begin{aligned} \text{閉塞率} &= \frac{A}{\text{テーブルより上側の風洞の断面積}} \times 100 \\ &= 4.9\% \end{aligned}$$

### 3. パネルの基本的姿勢変化による空力特性

#### 3.1 空力特性の正弦・余弦曲線との比較

空力特性は迎角 $\phi$ と偏揺れ角 $\theta$ の関数であり、ここでは $C_x(\phi, \theta)$ などと記す。はじめに、空力特性にとって基本的と思われる分割型とフラット型の $C_x(\phi, 0^\circ)$ の変化を調べた。図4はその結果である。パネルが主流に直角に面している場合には $C_x(0^\circ, 0^\circ) = 1.22$ である。この値はフラット型の $C_x(0^\circ, 0^\circ)$ とほとんど同じである。過去に計測された正方形平板の抗力係数はHoerner<sup>5)</sup>では1.17であり、本研究の $C_x$ がわずかに大きい。フラット型の $C_x(\phi, 0^\circ)$ を $f(\phi) = 1.22 \cos \phi$

と比較すると $\phi$ が小さい時( $\leq 35^\circ$ )は余弦曲線に近い挙動をとる。このことは $F_x$ は主流方向に射影された見付面積にはほぼ比例することを示している。しかし、分割型では $f(\phi) = 1.22 \cos \phi$ よりも $\phi$ の全域で有意に小さい。

図4は直立した時の分割型とフラット型の $C_y(0^\circ, \theta)$ の変化もプロットしている。分割型は $0^\circ \leq \theta < 45^\circ$ の範囲ではほぼ $g(\theta) = 1.12 \sin \theta$ に重なり、この間は $F_y$ は主流直角方向に射影された見付面積に比例することを示す。いずれの型も $45^\circ \leq \theta$ の範囲では正弦曲線から逸脱するが、分割型の方がフラット型より明らかに小さい。分割型は $\theta = 55^\circ$ で $C_y$ があまり明瞭でない最大値をとりその後、 $\phi$ とともに急速に0に近づく。

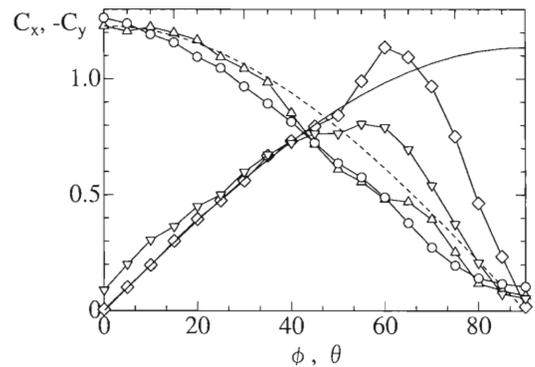


図4:  $C_x, C_y$  の変化 ( $A = WH$ ).  $\circ, C_x(\phi, 0^\circ)$ (分割型);  $\nabla, C_y(0^\circ, \theta)$ (分割型);  $\triangle, C_x(\phi, 0^\circ)$ (フラット型<sup>3)</sup>);  $\diamond, C_y(0^\circ, \theta)$ (フラット型<sup>3)</sup>); 破線,  $f(\phi) = 1.22 \cos \phi$ ; 実線,  $g(\theta) = 1.12 \sin \theta$ .

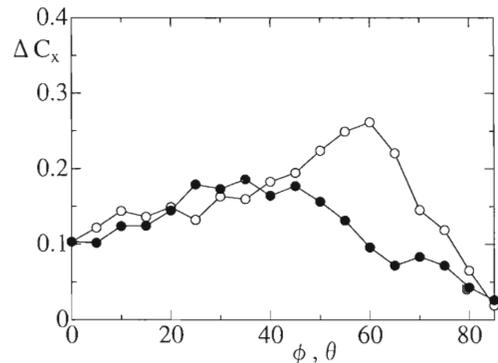


図5:  $\Delta C_x$  の変化.  $\circ, \Delta C_x(0^\circ, \theta)$ ;  $\bullet, \Delta C_x(\phi, 0^\circ)$ .

図5は分割型の $\Delta C_x(0^\circ, \theta) = C_x(0^\circ, 180^\circ - \theta) - C_x(0^\circ, \theta)$  (但し、 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ ) の変化を示している。上流に凹面が向く場合から上流に凸面が向く場合の $C_x$ を差し引いたもので偏揺れ角 $\theta$ を変化させた時のものである。 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ の全範囲で $C_x(\text{上流凹}) > C_x(\text{上流凸})$ となっており、 $\theta = 60^\circ$ で最大値をとっている。同図には $\Delta C_x(\phi, 0^\circ) = C_x(\phi, 180^\circ) - C_x(\phi, 0^\circ)$ の変化も示してある。やはり上流に凹面が向く場合

から上流に凸面が向く場合の  $C_x$  を差し引いたもので、迎角  $\phi$  を変化させた時のものである。この時も  $C_x(\text{上流凹}) > C_x(\text{上流凸})$  となっており、 $\phi = 30^\circ$  辺りに緩やかなピークが認められ、 $\theta$  が変化するときの特性とは少し異なっている。これらの  $\Delta C_x$  の変化は  $\theta$  と  $\phi$  の基本的な効果を示すもので後に示す図 16 や 18 のような  $\theta$  と  $\phi$  が同時に変化する場合はこれらの効果が重畳されるものと思われる。

図 6 には直立した時の分割型とフラット型の  $C_{mz}(0^\circ, \theta)$  (但し、 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ) の変化を示している。分割型はフラット型と同様な傾向を示し、いずれも  $\theta = 55^\circ$  辺りから  $C_{mz}$  が急に増大し、偏揺れ角が  $\theta = 70^\circ$  辺りで最大値をとる。しかるに、分割型の受光面が下流に向く  $\theta \geq 90^\circ$  では  $-C_{mz}$  (符号が逆転する) の最大値はフラット型に比べて半分くらいに減少している。また、フラット型では  $\theta = 90^\circ$  で  $C_{mz} \approx 0$  であるのに対し、分割型では有限値をとる。これは分割型の段差や隙間の影響によるものと思われる。

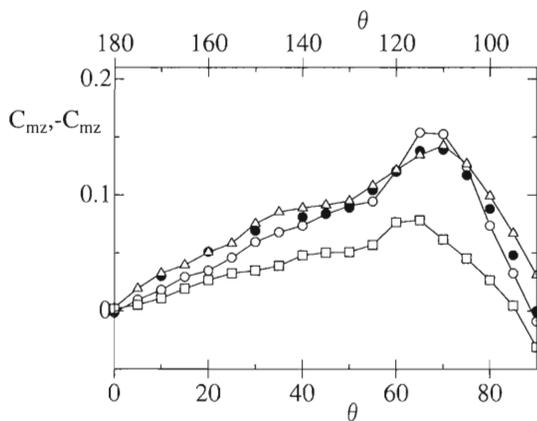


図 6:  $C_{mz}$  の変化 ( $A = WH$ ).  $\Delta$ ,  $C_{mz}(0^\circ, \theta)$ , 分割型,  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ;  $\square$ ,  $C_{mz}(0^\circ, \theta)$ , 分割型,  $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ;  $\circ$ ,  $C_{mz}(0^\circ, \theta)$ , フラット型<sup>3)</sup>;  $\bullet$ , 正方平板<sup>7)</sup>.

### 3.2 パネルの法線方向にかかる空気力

壁面と切り離された理想的な正方平板の研究は古くからなされており、その法線方向にかかる空気力特性もよく知られている。Hoerner<sup>5)</sup> に基づき図 7 にその一般的特性を示す。はじめ迎角の増加にもかかわらず約 1.17 の一定値をとり、 $\phi = 50^\circ$  辺りで急に増加して最大値をとり、その後は迎角の増加とともに線形に減少する。

平板の空気力特性を調べるために姿勢を変化させる方法は二つある。迎角  $\phi$  を  $0^\circ$  に保ち偏揺れ角  $\theta$  を変化させる方法と偏揺れ角  $\theta$  を  $0^\circ$  に保ち迎角  $\phi$  を変化させる方法とである。壁から十分離れて置かれた正方平板の場合は両者は同等であり全く同じ特性が得られる

はずである。しかるに本研究の模型では両者は同等ではない。文献<sup>3)</sup> で調べたフラット型太陽光発電システムでは、シャフトも風を受けること、パネルが床面に比較的近く設置されていること、パネルは真四角でないこと、受光面に粗度があることなどから、二つの姿勢変化法による特性の相違は起こりうる。両方を調べる意味がある。本節では、分割型パネルについて迎角  $\phi$  を  $0^\circ$  に保ち偏揺れ角を変化させる方法 (即ち  $C_n(0^\circ, \theta)$ ) と偏揺れ角  $\theta$  を  $0^\circ$  に保ち迎角を変化させる方法 (即ち  $C_n(\phi, 0^\circ)$ ) で法線方向の空気係数を比較する。

パネル法線方向に加わる力  $F_n$  はその水平成分との間に次の関係がある。

$$F_n(\phi, 0^\circ) = F_x / \cos \phi \quad (0 \leq \phi < 90^\circ)$$

$$F_n(0^\circ, \theta) = F_s$$

したがって、法線方向の空気力係数は次の式で求まる。

$$C_n(\phi, 0^\circ) = F_x / (0.5 \rho U^2 A \cos \phi) \quad (0 \leq \phi < 90^\circ) \quad (5)$$

$$C_n(0^\circ, \theta) = F_s / (0.5 \rho U^2 A)$$

図 7 にこれらの変化をフラット型も含めて示す。分割型の  $C_n(\phi, 0^\circ)$  は  $\phi = 0^\circ$  では  $C_n \approx 1.2$  であり  $\phi = 50^\circ$  辺りまでわずかに減少するもののほぼ一定値をとっている。 $\phi$  がさらに増加する時、 $C_n$  も少し増加するが、フラット型の  $C_n$  よりも小さな値をとる。 $\phi$  が  $50^\circ$  以上では理想的な正方平板の挙動から大きな逸脱が見られる。 $\phi$  が  $90^\circ$  に近づく時は式 (5) の分母の  $\cos \phi$  も小さな値になるのでこの辺りの挙動は微妙である。姿勢設定の誤差などによってはわずかな差異が増幅するおそれがあるので計測に当たっては注意を要する。

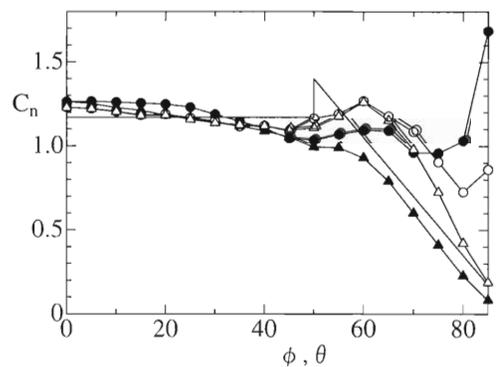


図 7:  $C_n$  の変化.  $\bullet$ ,  $C_n(\phi, 0^\circ)$ (分割型);  $\blacktriangle$ ,  $C_n(0^\circ, \theta)$ (分割型);  $\circ$ ,  $C_n(\phi, 0^\circ)$ (フラット型<sup>3)</sup>;  $\Delta$ ,  $C_n(0^\circ, \theta)$ (フラット型<sup>3)</sup>; 実線, Hoerner.<sup>5)</sup>

分割型やフラット型の  $C_n(\phi, 0^\circ)$  は  $\phi > 50^\circ$  では理想的な正方平板の挙動から大きく逸脱する。一方、 $C_n(0^\circ, \theta)$  は  $\theta > 50^\circ$  では理想的な正方平板の結果に

比較的近い。  $C_n(\phi, 0^\circ)$  の逸脱は、  $\phi$  の増加とともにシャフトが気流にさらされる面積が大きくなりシャフトにかかる空気力が  $F_x$  に付加されることによるものと思われる。

#### 4. パネルの迎角と偏揺れ角が同時に変化する時の空力特性

##### 4.1 $C_x$ の特性

図8はいろいろな偏揺れ角を持つ分割型パネルの迎角に伴う  $C_x$  の変化を示す。  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$  のいずれの偏揺れ角でも同様な傾向を示し、  $\phi$  の増加とともに余弦曲線的に単調減少している。本論文では示さないがフラット型パネルの迎角に伴う  $C_x$  の変化もほぼ同様な傾向が見られた。

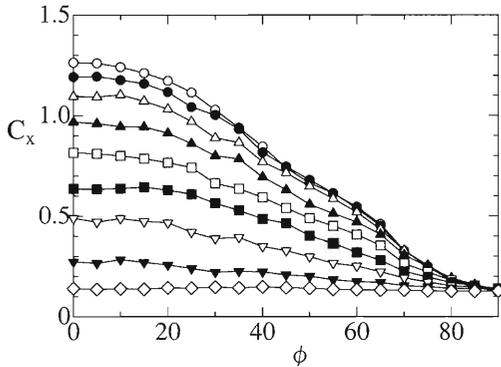


図8:  $C_x$  の変化(分割型).  $\circ, \theta = 0^\circ$ ;  $\bullet, \theta = 10^\circ$ ;  $\triangle, \theta = 20^\circ$ ;  $\blacktriangle, \theta = 30^\circ$ ;  $\square, \theta = 40^\circ$ ;  $\blacksquare, \theta = 50^\circ$ ;  $\nabla, \theta = 60^\circ$ ;  $\blacktriangledown, \theta = 70^\circ$ ;  $\diamond, \theta = 80^\circ$ .

##### 4.2 $C_n$ の特性

図9はいろいろな偏揺れ角を持つ分割型パネルの迎角に伴う  $C_n$  の変化を示す。  $C_n$  は次のように水平横力  $F_s$  から求めた。

$$F_n = \frac{F_s}{\cos \phi}, \quad C_n = \frac{F_s}{\frac{1}{2}\rho U^2 W H \cos \phi}$$

$\phi \leq 50^\circ$  では  $\theta \leq 50^\circ$  のいずれの偏揺れ角でもほぼ一定で、  $C_n \approx 1.2$  前後に線が集中している。すなわち、少なくとも  $\phi \leq 50^\circ$  の範囲で図7の理想的な正方平板の挙動に近いが  $\phi > 50^\circ$  では逸脱しておりこれはシャフトの影響によるものと思われる<sup>3)</sup>。

そこでシャフトの影響が比較的少ないと思われる偏揺れ角  $\theta$  を変化させた場合の  $C_n$  の変化を調べた。図10はその特性を示す。  $\theta = 50^\circ$  辺りのピークは見られないが  $C_n$  は1.2前後の一定値をとったあと  $\theta = 40^\circ \sim 60^\circ$  から0に近づいている。これは分割型パネルの空力特

性も理想的な正方平板の  $C_n$  の特性でかなりの部分が特徴づけられることを示している。

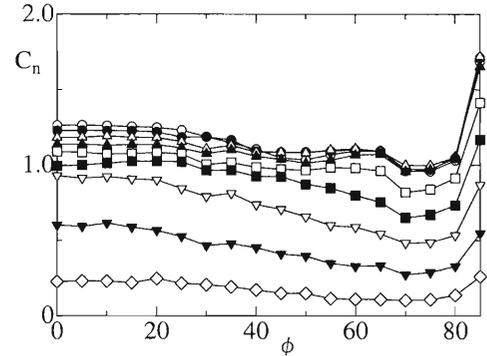


図9:  $C_n$  vs.  $\phi$ (分割型).  $\circ, \theta = 0^\circ$ ;  $\bullet, \theta = 10^\circ$ ;  $\triangle, \theta = 20^\circ$ ;  $\blacktriangle, \theta = 30^\circ$ ;  $\square, \theta = 40^\circ$ ;  $\blacksquare, \theta = 50^\circ$ ;  $\nabla, \theta = 60^\circ$ ;  $\blacktriangledown, \theta = 70^\circ$ ;  $\diamond, \theta = 80^\circ$ .

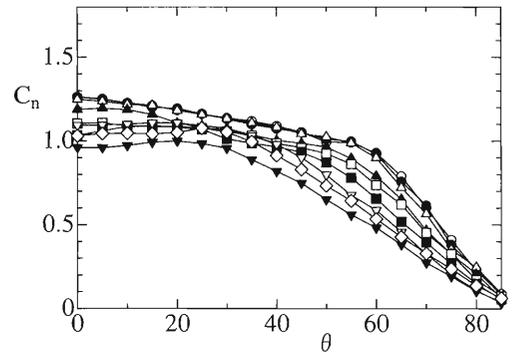


図10:  $C_n$  vs.  $\theta$ (分割型).  $\circ, \phi = 0^\circ$ ;  $\bullet, \phi = 10^\circ$ ;  $\triangle, \phi = 20^\circ$ ;  $\blacktriangle, \phi = 30^\circ$ ;  $\square, \phi = 40^\circ$ ;  $\blacksquare, \phi = 50^\circ$ ;  $\nabla, \phi = 60^\circ$ ;  $\blacktriangledown, \phi = 70^\circ$ ;  $\diamond, \phi = 80^\circ$ .

##### 4.3 $C_{mz}$ の特性

図11と図13は分割型パネルの迎角  $\theta$  に対する  $C_{mz}$  の変化、図12と図14はフラット型のそれを示す。図11と図12は受光面が上流を向いているとき ( $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ )、図13と図14は受光面が下流を向いている時 ( $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ ) である。図11と図12を比較するとグラフの挙動は同様であり、いずれの  $\phi$  に対しても  $\theta$  とともに増加し  $\theta > 50^\circ$  で最大値をとり、さらに  $\theta$  が増加すると減少に転じている。これらは基本的には図6の  $C_{mz}$  の挙動によく似ている。興味深いのは図13と図14の違いである。ピークの値を比べるとその差は歴然であり、分割型はフラット型よりも4割程度小さな値をとっている。おそらくは分割型では気流がパネル間の隙間を抜けることにより左右の圧力の差が均一化されることによると考えられる。変動気流についても検証が必要であるが時間平均特性からはフラット型より分割型が優位であることを示している。

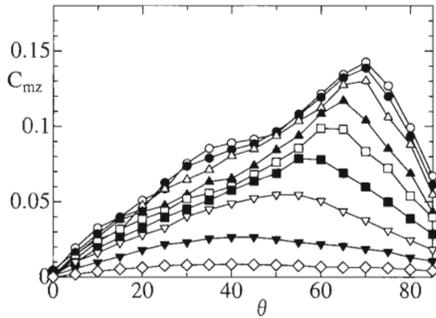


図 11:  $C_{mz}$  の変化 (分割型) ( $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ ).  $\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ ;  $\bullet$ ,  $\phi = 10^\circ$ ;  $\triangle$ ,  $\phi = 20^\circ$ ;  $\blacktriangle$ ,  $\phi = 30^\circ$ ;  $\square$ ,  $\phi = 40^\circ$ ;  $\blacksquare$ ,  $\phi = 50^\circ$ ;  $\nabla$ ,  $\phi = 60^\circ$ ;  $\blacktriangledown$ ,  $\phi = 70^\circ$ ;  $\diamond$ ,  $\phi = 80^\circ$ .

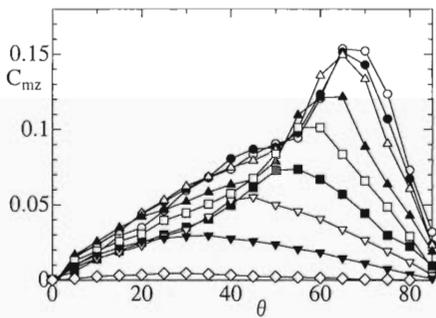


図 12:  $C_{mz}$  の変化 (フラット型<sup>3)</sup>) ( $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ ). 記号は図 11 に同じ.

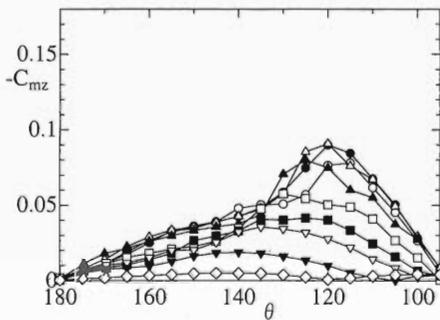


図 13:  $C_{mz}$  の変化 (分割型) ( $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ ).  $\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ ;  $\bullet$ ,  $\phi = 10^\circ$ ;  $\triangle$ ,  $\phi = 20^\circ$ ;  $\blacktriangle$ ,  $\phi = 30^\circ$ ;  $\square$ ,  $\phi = 40^\circ$ ;  $\blacksquare$ ,  $\phi = 50^\circ$ ;  $\nabla$ ,  $\phi = 60^\circ$ ;  $\blacktriangledown$ ,  $\phi = 70^\circ$ ;  $\diamond$ ,  $\phi = 80^\circ$ .

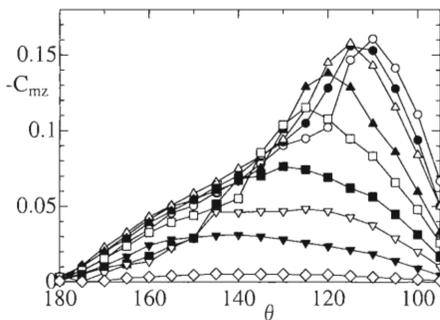


図 14:  $C_{mz}$  の変化 (フラット型<sup>3)</sup>) ( $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ ). 記号は図 13 に同じ.

### 5. 鏡映関係

図 15(a)(b) に示すように  $\phi$  を一定にして  $\theta$  を変化させる時, 模型が鏡映の関係にある二つの偏揺れ角が存在する. パネル受光面が上流を向く場合の偏揺れ角を  $\theta_1$ , パネル受光面が下流を向く場合の偏揺れ角を  $\theta_2$  とすると次のような関係が成り立つ.

$$\theta_1 + \theta_2 = 180^\circ, \quad 0^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ \leq \theta_2 \leq 180^\circ \quad (6)$$

あるいは  $\theta_1 = \theta$  ( $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ) の時,  $\theta_2 = 180^\circ - \theta$  とも表示できる.

床面から十分離れた理想的な平板であればこれら角度の空気力は同じになると考えられる. しかし, 本実験ではシャフトや床面が存在し, パネルは平板で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  $\theta_1$  と  $\theta_2$  をとる二つの場合の空気力は同等ではない. そこでこれらの姿勢の空気力とモーメントの差を比較した.

図 16 は  $\Delta C_x = C_x(\phi, \theta_2) - C_x(\phi, \theta_1) = C_x(\phi, 180^\circ - \theta) - C_x(\phi, \theta)$  の  $\phi - \theta$  面での分布を 3次元表示したもので, 図 17 は等高線表示したものである.  $30^\circ \leq \theta_1 \leq 60^\circ$  ( $120^\circ \leq \theta_2 \leq 150^\circ$ ),  $5^\circ \leq \phi \leq 35^\circ$  の領域で大きな  $\Delta C_x$  をとる領域が見られる.  $\phi - \theta$  の全領域で  $C_x(\phi, \theta_2) > C_x(\phi, \theta_1)$  となる理由はパネルの上流に凹面が面することによるものと思われる.  $5^\circ \leq \phi \leq 35^\circ$  で  $\Delta C_x$  が大きな値をとる理由は次のようなことが考えられる. 図 15(c) に示すように受光面が上流を向きかつ  $\phi$  が小さい時は, パネル下辺から剥離した剪断層 ( $S_1$ ) の巻き込みが床面の存在により阻害される. 一方, 同じ  $\phi$  でも図 15(d) のように受光面が下流を向く時は剥離剪断層 ( $S_2$ ) は自由に巻き込み後流域の圧力が低下して抵抗を増す. その結果  $\Delta C_x$  も増加すると考えられる.  $30^\circ \leq \theta_1 \leq 60^\circ$  の大きな値は上流に凸面が向く時と凹面を向く時とで剥離再付着が始まる  $\theta$  が異なることによるものと思われるが本実験のデータだけでは明らかではない.

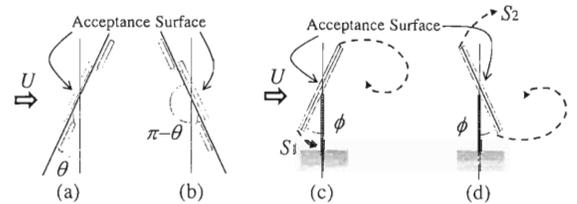


図 15: 鏡映関係にある二つの姿勢.

図 18 は  $\Delta C_{mz} = C_{mz}(\phi, \theta_1) - C_{mz}(\phi, \theta_2) = C_{mz}(\phi, \theta) - C_{mz}(\phi, 180^\circ - \theta)$  の  $\phi - \theta$  面での分布を 3次元表示したもので, 図 19 は等高線表示したものである.

$\theta_1 \leq 20^\circ$  の範囲はあまり有意な差は見られなかったが、 $\theta_1 \geq 30^\circ$  の範囲は意外なことに  $C_{mz}(\theta_1) > C_{mz}(\theta_2)$  となり凹面が上流に面する時の方がモーメントが小さくなった。凹面が上流を向く姿勢をとるパネルのほうが小さな  $C_{mz}$  の値をとるのは、隙間から抜ける気流の影響により左右の平均的な空気力分布がならされて剥離剪断層の巻き込みが弱くなったものと考えられる。また、 $70^\circ \leq \theta_1 \leq 80^\circ (100^\circ \leq \theta_2 \leq 110^\circ)$  の範囲で大きな  $\Delta C_{mz}$  をとる峰が見られ、それより小さな  $50^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$  の範囲には谷が続いている。 $\theta$  に伴う  $\Delta C_{mz}$  の変化はパネル側面からの剥離再付着流れが関わっていると思われるが詳細は不明である。

### 6. 結論

広範囲の偏揺れ角  $\theta$  や迎角  $\phi$  に対して、追尾式太陽光発電システムのモデルの空気力特性を風洞実験で調べ、次のようなことが分かった。

(1) いろいろな迎角を持つ分割型パネルの偏揺れ角に伴う  $C_n$  の変化では  $\theta = 50^\circ$  辺りのピークは見られないものの  $C_n$  は 1.2 前後の一定値をとったあと  $\theta = 40^\circ \sim 60^\circ$  から 0 に近づいている。これは分割型パネルの空力特性も理想的な正方平板の  $C_n$  の特性でかなりの部分が特徴づけられることを示している。いろいろな偏揺れ角に対して迎角を変化させた  $C_n$  の変化では  $\phi > 50^\circ$  でシャフトの影響によるものと思われる大きな逸脱が見られた。

(2) いろいろな偏揺れ角  $\theta$  に対する  $\phi$  に伴う  $C_{mz}$  の特性曲線のピークの値を比較すると、凹部を上流に向けた場合は凸部を上流に向けた場合より 4 割程度小さな値をとっている。分割型では気流がパネル間の隙間を抜けることにより左右の圧力の差が均一化されることによると考えられる。時間平均特性からはフラット型より分割型が優位のように思われる。

(3) 鏡映の関係にある姿勢どうしの差  $\Delta C_x$  と  $\Delta C_{mz}$  の分布を調べた。 $\Delta C_x$  では  $\phi$  が比較的小さく  $\theta \approx 60^\circ$  の領域で大きな  $\Delta C_x$  が見られた。 $\phi$  が小さいときは床面の影響と思われる  $\Delta C_x$  の増大が見られた。 $\phi - \theta$  全領域で  $\Delta C_{mz}$  の値は凹部を上流に向けた場合は凸部を上流に向けた場合に比べると小さな値をとることが確かめられた。 $\theta \approx 70 \sim 80^\circ$  で大きな  $\Delta C_{mz}$  が見られた。左右の辺からの剥離再付着流れの状況の差異によるものと思われるが詳細はさらなる検討が必要である。

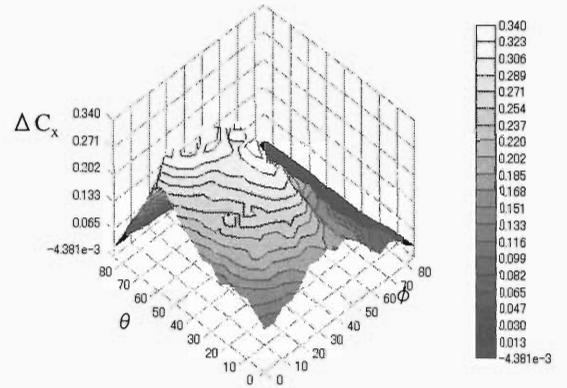


図 16:  $\phi - \theta$  面における  $\Delta C_x$  の分布。

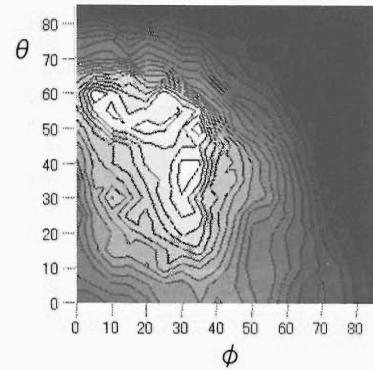


図 17:  $\Delta C_x$  の等高線。

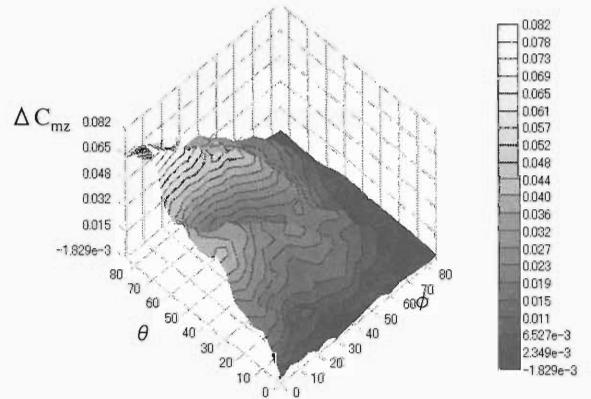


図 18:  $\phi - \theta$  面における  $\Delta C_{mz}$  の分布。

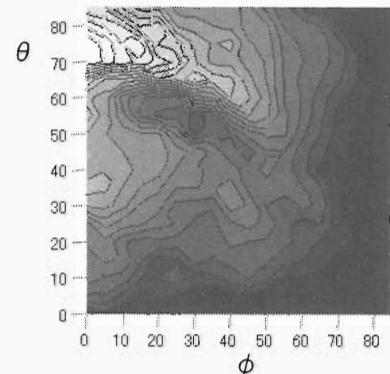


図 19:  $\Delta C_{mz}$  の等高線。

## 謝辞

本研究を進めるに当たり，大同特殊鋼の荒木建次氏，宮崎大学工学部材料物理工学科の西岡賢祐准教授には多大なご援助を頂きました。ここに深謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 松本，白石，白土他：太陽光発電パネル支持台に作用する風圧力の性状に関する風洞実験と現地観測との比較解析，第11回風工学シンポジウム論文集，329-334 (1990).
- [2] R. R. Matty, "Vortex shedding from square plates near a ground plane: an experimental study", Master Thesis to Texas Tech. University (1979).
- [3] 山口靖之，小園茂平，松尾祐樹，木村憲二：追尾式太陽光発電システムの平均空力特性，第21回風工学シンポジウム論文集，pp. 351-356 (2008).
- [4] A. Roshko, "On the wake and drag of bluff bodies", J. Aeronaut. Sci. 22, 124 (1955).
- [5] S. F. Hoerner, "Drag of various types of plates" in "Fluid Dynamic Drag", 2nd Ed., Newyork, pp. 3-16 (1965).
- [6] 小園茂平，西亮，宮城弘守他：マルチファン型大型風洞の開発—一様アクティブ法により生成される乱流の特性，日本機械学会論文集，B編，70巻，690号，pp. 311-318 (2004).
- [7] 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).