

追尾式太陽光発電システムの空力特性

山口靖之¹⁾・宮園真悟²⁾・小園茂平³⁾

Aerodynamic Characteristics of a Concentrator Photovoltaic System

Yasuyuki Yamaguchi, Shingo Miyazono, Shigehira Ozono

Abstract

Aerodynamic characteristics of a scale model of a concentrator photovoltaic system built near the ground were investigated for a wide range of yaw and attack angles. For smaller angles of incidence, aerodynamic forces are proportional to projected area in the transverse and lateral direction to the free stream. However, as the angles increase, separated shear layers reattach on the rear surface of the panel, and some deviations appear from the sine or cosine curve of the aerodynamic coefficients. Measurements revealed the effect of blockage by the ground on the aerodynamic forces and moment.

Key Words:

Concentrator photovoltaic system, Aerodynamic characteristics, Yaw and attack angle.

1. 序

化石燃料の枯渇や地球環境の温暖化防止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システムは有力な代替エネルギーの一つである。

2009年に追尾式・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レンズで太陽光を発電素子に収斂させて電気を得る発電方式である。高価な発電素子の面積が小さくて済むので効率的である。この原理のゆえに日変化する太陽の位置に直面するように発電パネルを動かす必要がありそのような発電方式を「追尾式」と呼ぶ。

追尾式システムでは大きなパネルを1本のシャフトで支える構造がとられることが多く、その形状からシャフトへの風力の負荷が大きいことが予想され、強風が発生する地域ではその耐風性が問題となる。

これまでに、追尾式ではないが地面に固定して設置する太陽光発電システムについての耐風性に関する実用的な研究が行われ¹⁾、追尾式システムに近い形状の模型周囲の流れ特性に関する研究^{2,3)}が行われているが実機の空力特性を詳細に検討したものは見あたらないようである。

流体力学の見地からは追尾式太陽光発電周囲流れは床面近くに置かれた矩形平板周囲流れとモデル化され

よう。床面に設置された矩形平板の周囲流れは系統的に調べられているが^{4,5)}、床面から離され空間に孤立した矩形平板の周囲流れの基本特性は古いものが多く^{6,7)}、最近では飛散物の軌跡に関する研究⁸⁾、ネットの空力特性^{9,10)}などの応用的な研究に限られている。

本研究では集光型太陽光発電システムの縮小模型を用いて、広範囲の偏揺れ角や迎角を変化させ空力特性を測定し、流れの構造を考察する。

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270mmで、縦11個×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。単体では、風速はモーターの回転数にほぼ比例し最大18m/sまで可能である。それぞれのファンで駆動された気体は、接続した矩形断面のダクトを通り縮流され、最終的には八ニカムで整流され測定部に吐き出される。ファンの吹き出し口から流下方向10.0mの位置において、平均風速は±2.0%以下の非一様性があり、乱れ強度は2.0%以下である。本風洞はそもそもが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

¹⁾ 応用物理学専攻 大学院生

²⁾ 材料物理工学科 学部生

³⁾ 材料物理工学科 教授

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 2.54m × 縦 1.80m である．それらを組み合わせて測定部長さ G を最大 15.5m まで延長できる．本実験の定常流の測定は，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¹¹を参照されたい．

図1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(1600mm × 1600mm)を風洞床面から上方に308mm離して設置した．このテーブルの下部に，下から順にH型鋼(幅175mm，高さ175mm，長さ175mm)，スチール板(幅150mm，厚さ6mm，長さ150mm)，3分力検出器(最大径88mm，高さ95mm)，ジグ(最大径75mm，高さ45mm)を設置した．テーブル中心には直径30mmの穴を開け，パネルのシャフトをジグと接続した．

3分力検出器(日章電機，LMC-3501)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2000Hz，サンプリングデータ長20000個で収録した．ローパスフィルターは100Hzをかけた．

図2に模型の透視図を示す．使用した模型は実際の追尾式太陽光発電システムを1/20に縮小した模型である．パネルの寸法は縦 $H = 358\text{mm}$ ，横 $W = 518\text{mm}$ ，厚さ $t = 12\text{mm}$ である．シャフト部の長さは188mm，直径は25mmある．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， θ と ϕ ともに 5° おきに測定した．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 と，パネル面に固定した座標系の水平中心線に直角な方向の力(横力) F_s ，モーメントを M_z とし以下の式で無次元化した．

$$\begin{aligned} C_x &= F_x / (0.5\rho U^2 A), & C_y &= F_y / (0.5\rho U^2 A) \quad (1) \\ C_s &= F_s / (0.5\rho U^2 A) \quad (F_s = F_x \cos\theta - F_y \sin\theta) \quad (2) \\ C_{mz} &= M_z / (0.5\rho U^2 AH) \quad (3) \end{aligned}$$

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， ρ は空気の密度である．見付面積 A は $A = WH$ と $A = WH|\cos\theta|\cos\phi$ の場合を計算した． $\theta = 90^\circ$ ， $\phi = 90^\circ$ のときはパネルが風向に平行になるので $A = tH$ + シャフト部(188mm × 25mm)で評価した．測定部吹き出し口からの流下距離5.5mに模型中心を設置した．使用した風速 U は $U = 8.14[\text{m/s}]$ (実測値)， H に基づくレイノルズ数 $\text{Re} = 1.93 \times 10^5$ であった．テーブル

高さと同様高さ($\phi = 0^\circ$)を合わせた閉塞率は37%であった．閉塞による影響は補正していない．

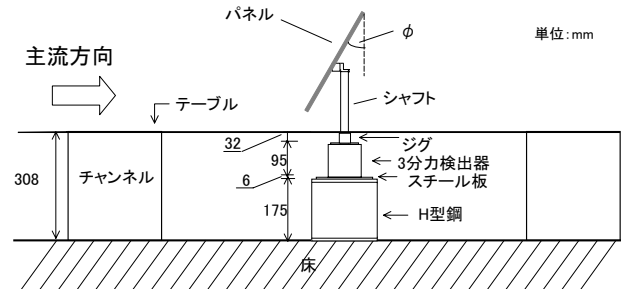


図1: 装置全体の側面図

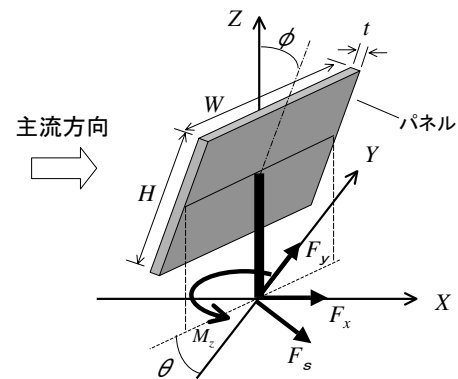


図2: 模型の透視図

2.2 パネル背面の圧力分布の測定方法

θ を変化させるとき模型の姿勢が次式を満たす鏡映の関係にある二つの偏揺れ角 θ_1, θ_2 が存在する．

$$\theta_1 + \theta_2 = 180^\circ, \quad 0^\circ \leq \theta_1 < 90^\circ < \theta_2 \leq 180^\circ \quad (4)$$

パネルが空間に孤立した状態ではこれら二つの角度のパネルの空気力は同じ値になると考えられるが，本実験ではシャフトや床面が存在し，さらにはパネル両面の粗度は同じ条件ではないので， θ_1 と θ_2 をとる二つの場合のパネルにかかる空気力は同等ではないと考えられる．本研究では $0^\circ < \theta_1 < 90^\circ$ と $90^\circ < \theta_2 < 180^\circ$ の範囲の空力特性を比較した．

偏揺れ角 θ が $90^\circ < \theta < 180^\circ$ の範囲では，凹凸の影響で圧力値に再現性が見られなかった．そのためシナベニア材を用いて両面とも滑らかなパネル模型を作成した．寸法などのその他の条件は前節の縮尺模型と同様である．片端を塞ぎ圧力孔を開けた真鍮管をテープで貼り付けて圧力を検出した．圧力孔の位置は図3のように横方向1～5，縦方向A～Eの10点である．測定点の間隔は横方向を100mm，縦方向を70mmとした．測定はデジタルマノメーター(コ

スモ計器, DM-3500) を使用し, ロガー (KEYENCE, NR-600) により AD 変換した. データはサンプリング周波数 100 Hz, サンプリングデータ長 6 000 個で収録した. 偏揺れ角 θ を 30° 刻み, 迎角 ϕ を 15° 刻みに測定した. 各圧力孔から得られた表面圧 p を以下の式で無次元化し, 平均圧力係数 C_p とした.

$$C_p = (p - p_\infty) / (0.5\rho U^2) \quad (5)$$

ここで, p_∞ は基準圧, p は表面圧である.

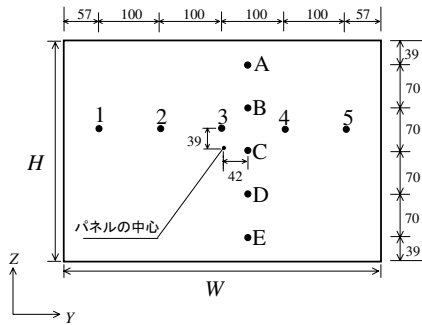


図 3: パネル背面の圧力測定点

3. 結果

3.1 空力特性の正弦・余弦曲線との比較

はじめに, 空力特性にとって基本的と思われる $\theta = 0^\circ$ の時の $C_x(\phi)$ と $\phi = 0^\circ$ の時の $C_x(\theta)$ の変化を調べた. 図 4 はそれらの結果である. 本節では見付面積 A は $A = WH$ として計算した. パネルが主流に直角に面している場合 ($\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$) には $C_x = 1.22$ である. 過去の研究^{6,7} のレイノルズ数が 1.0×10^4 以上の十分大きい場合の抗力より本研究の C_x が少し大きい. 風洞の乱れや床面の閉塞効果やシャフトの存在など様々な要因が考えられる. $C_x(\phi)$ と $C_x(\theta)$ をそれぞれ $C_x(\phi) = C_x(0) \cos \phi, C_y(\theta) = C_y(0) \cos \theta$ と比較すると θ や ϕ が小さい時はそれぞれの余弦曲線に非常に近い. このことは F_x は主流方向の見付面積に比例することを示している. しかし, 余弦曲線からの逸脱も観察される. 例えば, 図 4 では $C_x(\phi) = C_x(0) \cos \phi = 1.22 \cos \phi$ よりも小さな $C_x(\phi)$ の ϕ の範囲が存在する.

図 4 は $\phi = 0$ の時の $C_y(\theta)$ の変化もプロットしている. $0^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ の範囲ではほぼ $C_y(\theta) = C_y(0) \sin \theta = 1.12 \sin \theta$ に重なり, この間は F_y は主流直角方向の見付面積に比例することを示す. しかし, さらに大きな角度の $50^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲では正弦曲線から逸脱する. $\theta = 60^\circ$ のときに C_y が最大値をとりその後, ϕ とともに急速に 0 に近づく. $\theta = 50^\circ$

を越えるあたりから逸脱するのは, 単純な完全剥離型の流れではなくなったものと考えられる.

図 4 には立川他⁸ の実験結果もプロットしている. 彼らの実験では正方平板を風洞壁から離して設置し, 迎角を変えて空気力とモーメントを計測している. 立川他の C_x の変化はほぼ余弦曲線に重なっている. $\phi \sim 55^\circ$ で, わずかに急な増大が見られるが, このあたりの角度で流れ構造が変化したものと思われる. その他の過去の実験でもこのような急変が観察されているが^{2,6,9,10}, 本実験ではそのような特異性はあまり明瞭ではない.

図 5 には $\phi = 0^\circ$ の時の $C_{mz}(\theta)$ の変化を示している. $\theta = 55^\circ$ から C_{mz} が急に増大し, C_x や C_y の特異点の角度と対応している. 本実験と立川他⁸ のモーメントを比較すると, 両計測値は比例関係にあると思われる. しかし, その最大値は本実験のモーメントの方が 1.6 倍大きい. 本実験の縦横比は 1.44 で C_{mz} は長辺に直角な軸周りになる. いっぽう, 立川他の実験では正方平板であり縦横比は 1.0 である. 縦横比が平板のモーメントに及ぼす効果は二組の対面する剥離剪断層の相互干渉の態様や床面の閉塞などに依存するはずであるが今後の課題である.

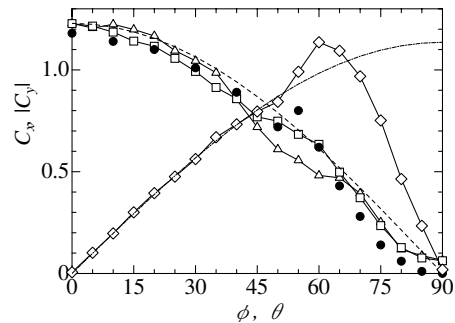


図 4: $C_x(\phi), C_x(\theta)$ の変化 ($A = WH$). $\square, C_x(\phi), \theta = 0^\circ$; $\triangle, C_x(\theta), \phi = 0^\circ$; $\diamond, C_y(\theta), \phi = 0^\circ$; broken line, $C_x = 1.22 \cos \theta$ or $1.22 \cos \phi$; solid line, $C_y(\theta) = 1.12 \sin \theta$; $\bullet, \text{Ref.}^8$

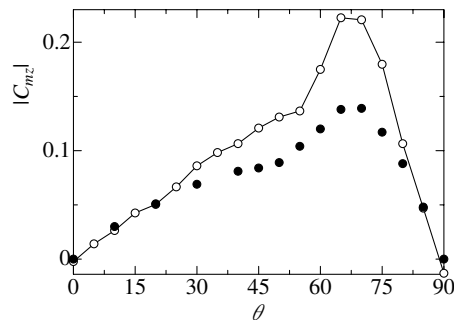


図 5: C_{mz} の変化 ($A = WH$). $\circ, C_{mz}(\theta), \phi = 0$; $\bullet, \text{Ref.}^8$

3.2 縮尺模型の空力特性

3.2.1 C_x の特性 図6と図7は迎角 ϕ に対する C_x の変化を示す．図6は偏揺れ角 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ ，図7は $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ の範囲を示す． $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ の時の C_x は $\theta = 50^\circ$ 前後で異なった特性を示している． $0^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ の範囲では $\phi \sim 70^\circ$ まではほぼ一定の C_x 値であるがその後急速に減少する．このように一定の C_x をとることは見付面積 $A = WH|\cos\theta|\cos\phi$ の $|\cos\theta|\cos\phi$ に比例して F_x が変化するためであり， $60^\circ \leq \theta < 90^\circ$ の範囲ではその比例関係から逸脱していることを示している．

図6と図7を比較すると，式(4)を満たす偏揺れ角 θ としては鏡映の関係にある姿勢をとるので同様な空力特性をとるはずであり，本実験の C_x の挙動はその関係を反映している．しかしながら，対応する姿勢 ($\theta_1 + \theta_2 = 180^\circ$) の C_x は異なる値を示している範囲があり興味深い．

3.2.2 C_y の特性 図8は迎角 ϕ に対する C_y の変化を示す．いずれの偏揺れ角 θ でも ϕ が 90° に近づくにつれ C_y は0に近づく． $0^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ の範囲では似たような傾向を持っており， ϕ の変化につれて，最初ほぼ一定の C_y 値をとるが，あるところから減少し， C_y は0に近づく．ほぼ一定の C_y をとるのは見付面積 $A = WH|\cos\theta|\cos\phi$ の $|\cos\theta|\cos\phi$ に比例して F_y が減少したためと考えられる． $60^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ の範囲では， ϕ とともに C_y は単調に減少し，0に近づく． ϕ が 90° に近づく時，パネル後方の渦構造は明らかではないが，流れに平行に置かれた平板のような状態になり，後流は板厚程度のスケールに縮小し C_y が0に近づくと思われる．

3.2.3 C_s の結果 図9は迎角 ϕ に対する C_s の変化を示す．図9は偏揺れ角 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ の範囲を示す． $0^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ の範囲では， C_s は最初一定の値を取った後，単調に減少する．例えば， $\theta = 50^\circ$ では $0^\circ \leq \phi \leq 55^\circ$ では C_s はほぼ一定であり，その後， C_s は減少している．ほぼ一定の C_x, C_y をとる範囲で C_s は次のように評価される．

$$C_x \propto \cos\theta \cos\phi, \quad C_y \propto \sin\theta \cos\phi \quad (6)$$

$$\therefore C_s = C_x \cos\theta - C_y \sin\theta \propto \cos\phi \quad (7)$$

したがって C_y が一定となる範囲では $\cos\phi$ に比例して F_s が変化するためと考えられる． $60^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ の範囲では ϕ とともに C_s は単調に減少する．

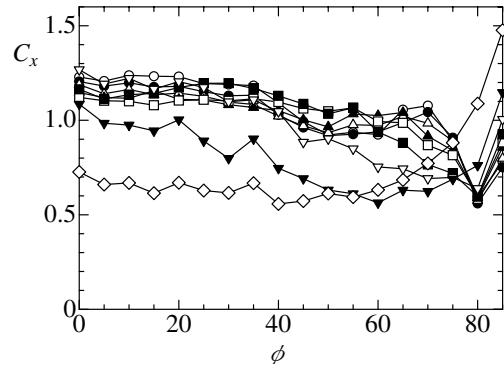


図6: C_x の変化 ($A = WH|\cos\theta|\cos\phi$) . $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$. $\circ, \theta = 0^\circ$; $\bullet, \theta = 10^\circ$; $\triangle, \theta = 20^\circ$; $\blacktriangle, \theta = 30^\circ$; $\square, \theta = 40^\circ$; $\blacksquare, \theta = 50^\circ$; $\nabla, \theta = 60^\circ$; $\blacktriangledown, \theta = 70^\circ$; $\diamond, \theta = 80^\circ$.

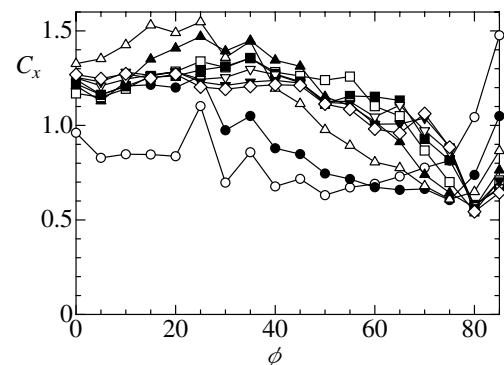


図7: C_x の変化 ($A = WH|\cos\theta|\cos\phi$) . $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$. $\circ, \theta = 100^\circ$; $\bullet, \theta = 110^\circ$; $\triangle, \theta = 120^\circ$; $\blacktriangle, \theta = 130^\circ$; $\square, \theta = 140^\circ$; $\blacksquare, \theta = 150^\circ$; $\nabla, \theta = 160^\circ$; $\blacktriangledown, \theta = 170^\circ$; $\diamond, \theta = 180^\circ$.

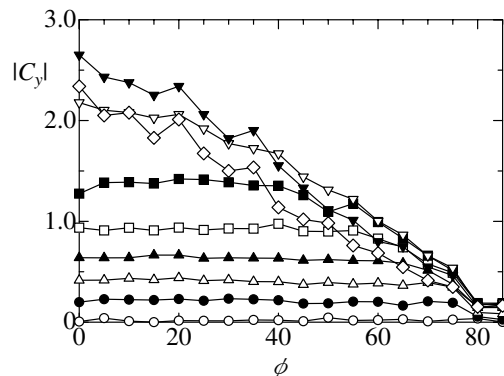


図8: C_y の変化 ($A = WH|\cos\theta|\cos\phi$) . $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. $\circ, \theta = 0^\circ$; $\bullet, \theta = 10^\circ$; $\triangle, \theta = 20^\circ$; $\blacktriangle, \theta = 30^\circ$; $\square, \theta = 40^\circ$; $\blacksquare, \theta = 50^\circ$; $\nabla, \theta = 60^\circ$; $\blacktriangledown, \theta = 70^\circ$; $\diamond, \theta = 80^\circ$.

3.2.4 C_m の結果 図10は迎角 ϕ に対する C_{mz} の変化を表わしている．当然ながら $\theta = 0^\circ$ では $C_{mz} \sim 0$ である． $10^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ の範囲では，最初 C_{mz} はほぼ一定で，その後ゆるやかに C_{mz} は減少する． $60^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ の範囲では C_{mz} は $\theta \leq 50^\circ$ の一群の曲線と比べて急

に大きな値をとり、 $\theta = 70^\circ, 80^\circ$ ではほぼ単調に減少する。

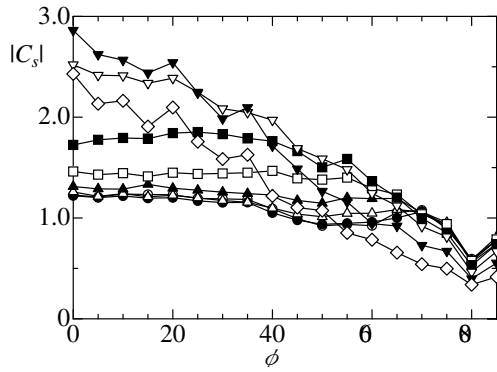


図 9: C_s の変化 ($A = WH|\cos\theta|\cos\phi$) . $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$. $\circ, \theta = 0^\circ$; $\bullet, \theta = 10^\circ$; $\triangle, \theta = 20^\circ$; $\blacktriangle, \theta = 30^\circ$; $\square, \theta = 40^\circ$; $\blacksquare, \theta = 50^\circ$; $\nabla, \theta = 60^\circ$; $\blacktriangledown, \theta = 70^\circ$; $\diamond, \theta = 80^\circ$.

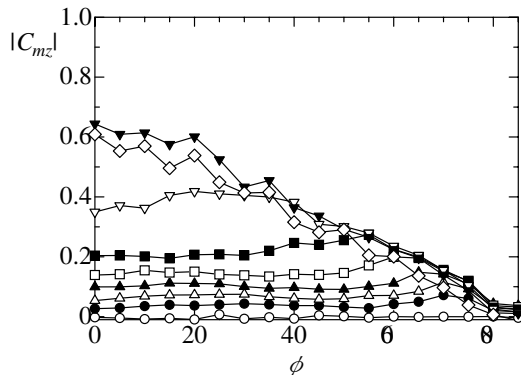


図 10: C_{mz} の変化 ($A = WH|\cos\theta|\cos\phi$) . $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$. $\circ, \theta = 0^\circ$; $\bullet, \theta = 10^\circ$; $\triangle, \theta = 20^\circ$; $\blacktriangle, \theta = 30^\circ$; $\square, \theta = 40^\circ$; $\blacksquare, \theta = 50^\circ$; $\nabla, \theta = 60^\circ$;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

4. 背面圧力分布

図 11, 12 はいろいろな迎角 ϕ に対するパネル背面の縦方向と横方向の圧力分布を示す．縦方向の圧力分布を見ると、 $\phi \leq 60^\circ$ ではほぼ様な圧力分布を示すが、 $\phi = 75^\circ$ では風上側 (点 E) で圧力が大きく低下し風下側に向かって回復するいわゆる剥離・再付着型の圧力分布を示している．図 4 によれば、 $C_x(\phi)$ の実測値は $C_x(\phi) = 1.22 \cos\phi$ にほぼ重なっている． $\phi = 75^\circ$ 付近の逸脱は図 11 の圧力分布の変化が示すように完全剥離型の流れから剥離剪断層が再付着するような流れモードに変化することによると思われる．

図 12 のパネル背面圧力分布を見ると、 $\theta = 60^\circ$ のとき風上側 (点 1) で圧力が低下しておりあまり明確ではないが剥離・再付着型の圧力分布に近い．これはパネルの上流側の縦の辺からの剥離剪断層が再付着したことを示唆している．図 4 の $C_y(\theta)$ と比較してみると、 $\phi = 60^\circ$ 付近で C_y は正弦曲線から逸脱し大きな値を

とっている．このような逸脱と図 12 の圧力分布の変化はよく符合している．

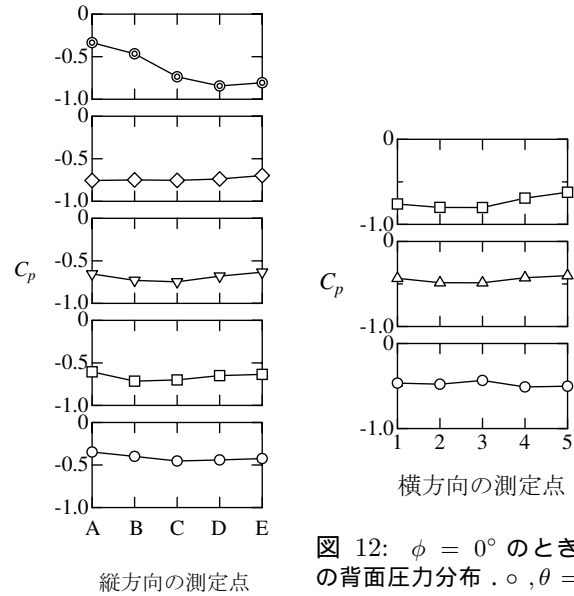


図 11: $\theta = 0^\circ$ のときの背面圧力分布 . $\circ, \phi = 0^\circ$; $\square, \phi = 30^\circ$; $\nabla, \phi = 45^\circ$; $\diamond, \phi = 60^\circ$; $\odot, \phi = 75^\circ$.

図 12: $\phi = 0^\circ$ のときの背面圧力分布 . $\circ, \theta = 0^\circ$; $\triangle, \theta = 30^\circ$; $\square, \theta = 60^\circ$.

5. 床面効果

図 13 は $\Delta C_x = C_x(\theta_2) - C_x(\theta_1)$ の $\phi - \theta$ 面での分布を示す． $55^\circ < \theta_1 < 80^\circ (100^\circ < \theta_2 < 125^\circ)$ 、 $15^\circ < \phi < 30^\circ$ の領域で大きな ΔC_x をとる領域が見られる．図 15 に示されているように、パネル下辺が風上に位置する時は、パネル下辺から剥離した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る．その結果、 $C_x(\theta_1)$ が小さくなり ΔC_x が増加することになる． ϕ が増加するとともに床と辺との距離が拡がり床面効果はあまり見られなくなる．

図 14 は $\Delta C_{mz} = C_{mz}(\theta_2) - C_{mz}(\theta_1)$ の $\phi - \theta$ 面での分布を示す． $75^\circ < \theta_1 < 85^\circ (95^\circ < \theta_2 < 105^\circ)$ の領域で大きな ΔC_{mz} が見られた．モーメント M_z はパネルの上下の辺からの剥離剪断層の巻き込みよりも、左右の辺からの一対の剥離剪断層の巻き込みが寄与すると考えられる．したがって図 14 のような領域で θ_2 の姿勢をとるパネルのほうが大きな C_{mz} 値をとるのはシャフト部や粗度などの床面以外の条件の影響と考えられる．

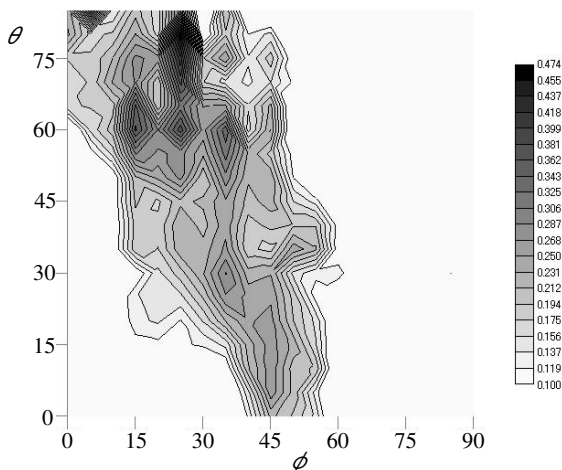


図 13: $\phi - \theta$ 面における ΔC_x の分布. $\Delta C_x \geq 0.1$.

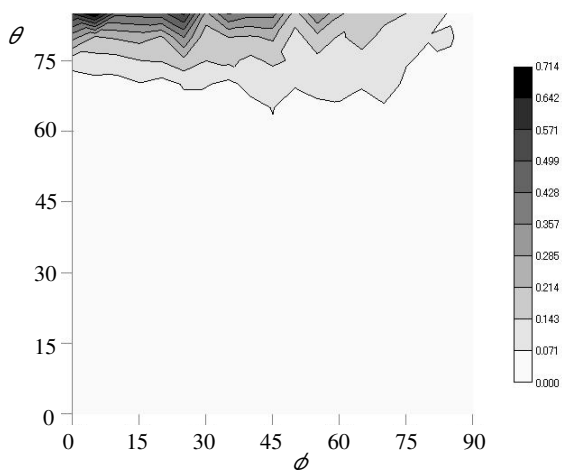


図 14: $\phi - \theta$ 面における ΔC_{mz} の分布. $\Delta C_{mz} \geq 0$.

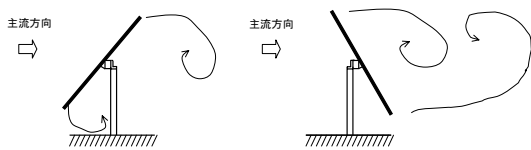


図 15: 地面効果.

7. 結論

広範囲の偏揺れ角 θ や迎角 ϕ に対して、追尾式太陽光発電システムの模型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) 偏揺れ角 $\theta = 0^\circ$ の時、 $C_x(\phi)$ (パネル面積を見付面積とする) は余弦曲線にほぼ重なる。迎角 $\phi = 0^\circ$ の時、 $C_y(\theta)$ は小さい θ で正弦曲線にほぼ重なる

が、 $\theta > 45^\circ$ では大きく逸脱し、 $\theta \rightarrow 90^\circ$ の時、 $C_y \rightarrow 0$ となる。

- 2) いろいろな偏揺れ角に対し迎角を変化させる時、空気特性曲線 (パネル面積の正射影を見付面積とする) は偏揺れ角によって二つのグループに大別される。 C_x, C_y, C_{mz} がある ϕ 以下までほぼ一定となる領域を持つ θ の範囲がある。 θ がある角度より大きくなるとこれら一群の曲線と離れた値を取り、明らかに異なる特性を示す。
- 3) 背面の圧力分布を調べ、 ϕ や θ が大きくなると再附着型の圧力分布に変化し、この変化は空気力係数が正弦曲線や余弦曲線から逸脱する角度に対応することが分かった。
- 4) 鏡映の関係にある空気力を比較し $\phi < 45^\circ$ で床面による閉塞効果が存在することが分かった。

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。平成 21 年度学部長裁量経費の経済的援助を頂きました。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] J. H. Strickland, R. R. Matty, G. H. Barton, "Vortex shedding from square plates perpendicular to a ground plane", AIAA Journal, Vol. 18, pp. 715-716 (1980).
- [4] 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).

-
- [5] 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).
- [6] S. F. Hoerner, "Drag of various types of plates" in "Fluid Dynamic Drag", 2nd Ed., Newyork, pp. 3-16 (1965).
- [7] R. Fail, J. A. Lawford, R. C. W. Eyre, "Low-speed experiments on the wake characteristics of flat plates normal to an air stream", Aero. Res. Coun. R. & M. no. 3120 (1959).
- [8] 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).
- [9] 丸山敬, 河井宏允, 樋本圭佑: 6分力天秤を用いた正方形平板の空気力特性の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp. 177-178 (2005).
- [10] 富阪和秀, 丸山敬: ネットの空力特性の測定, 日本風工学会論文集, 第32巻第3号 (通号第112号), pp. 103-112 (2005).
- [11] 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—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).