

傾斜地設置型/営農型/水上設置型

太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2023 年版

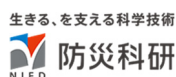
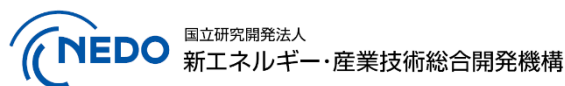
技術資料：

藤棚式営農型太陽電池アレイの風洞実験

(設計用風力係数の検討)

この成果物は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の長期安定電源化技術開発」事業の結果として得られたものです。

2023 年 4 月 28 日



藤棚式営農型太陽電池アレイの風洞実験（設計用風力係数の検討）

1. 実験概要

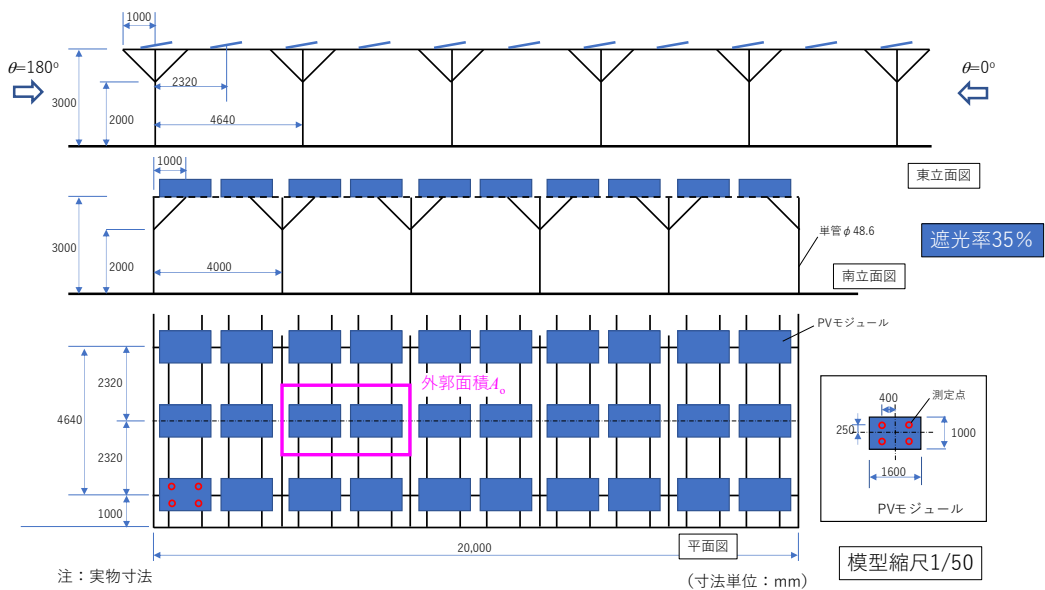
1.1 対象架台

営農型 photovoltaic (PV) は、モジュール下部において農作物を生育するために PV モジュールの遮光率が低く、かつ、農業機械を利用できるように架台の高さが高く、柱スパンが広いことが、地上設置型 PV との違いである。国内において使用される営農型 PV 架台としてはモジュールが独立して架台に設置されている藤棚式と、モジュールが東西方向に連続して配置されているアレイ式が主であり、本資料では藤棚式を対象としている。架台の柱スパンは $4\text{ m} \times 4.6\text{ m}$ 、地面から PV モジュール下端までの高さが 3 m であり、遮光率 (β) は約 35% と約 70% とした。それぞれの架台立面図・平面図を図 1-1 と図 1-2 に示す。遮光率の定義はモジュールの載る架台の外郭平面積に対する PV モジュール等（架台の部材等を含む）の水平投影面積の比率とすることが一般的であるが、ここでの遮光率は便宜的にモジュールの載る架台の外郭平面積 (A_0 : 図 1-1 および図 1-2 参照) に対する PV モジュールの設置角度を 0 度（水平）にしたときの水平投影面積の比率としており、図 1-1 と図 1-2 に示す架台における遮光率はそれぞれ

$$(1.6[\text{m}^2] \times 110[\text{枚}]) / (20[\text{m}] \times 4.64[\text{m}] \times 5.50[\text{スパン}]) = 34.5\%$$

$$(1.6[\text{m}^2] \times 210[\text{枚}]) / (20[\text{m}] \times 4.64[\text{m}] \times 5.25[\text{スパン}]) = 69.0\%$$

であるが、ここでは呼称としてそれぞれ簡単に 35%、70% と表現する。



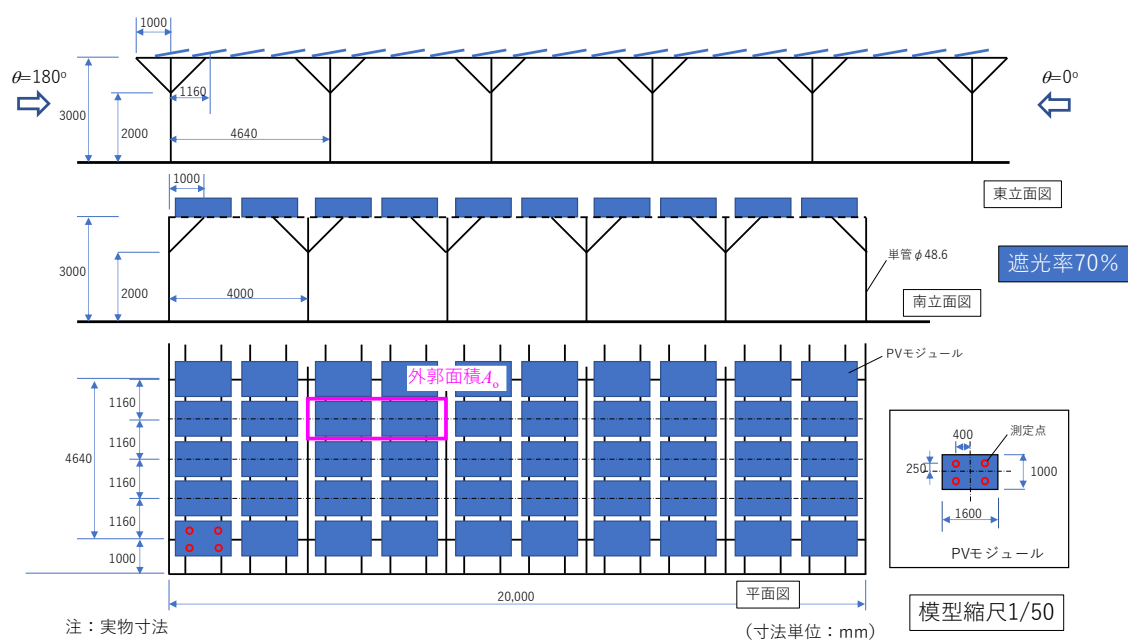


図 1-2 遮光率 $\beta = 70\%$ の架台立面図・平面図

1.2 対象モジュール

今回対象とする PV モジュールの寸法は 1.6 m × 1.0 m であり、モジュール勾配 θ は 10 度と 30 度である。

1.3 風洞実験詳細

風洞実験は大成建設株式会社技術センターで行われた。実験模型は縮尺 1/50 で作製し、これを建築物荷重指針・同解説（日本建築学会、2015 年：以後、「荷重指針」と称する）で規定されている地表面粗度区分 II に対応する気流中に配置され、モジュール面の風圧測定が行われた。モジュール 1 枚の上下面に 4 点ずつ圧力測定孔が配置されており、ここで記録される風圧データをサンプリング周波数 600 Hz、実時間換算で 50 分ほど計測した（風速縮尺が 1/3.5、時間縮尺が 1/14）。このとき、高周波数のノイズを取り除くためにカットオフ周波数 300 Hz のローパスフィルターを使用した。また、計測に用いたチューブによる圧力変動の位相遅れや振幅の歪みは計測システムの周波数応答関数を用いて補正した。こうして得られたモジュール上面および下面の風圧 P_e および P_i を以下の式で基準化し、風圧係数 C_{pe} 、 C_{pi} に変換した。

$$C_{pe} = (P_e - P_s) / q_{He} \dots\dots\dots (1.1)$$

$$C_{pi} = (P_i - P_s) / q_{He} \dots\dots\dots (1.2)$$

実験では0度（北）から355度までを5度刻みの風向(ϕ)で計測した。風向の定義を図1-3に示す。また本実験では架台に配置された全てのモジュールに圧力測定孔が設置されているわけではない。図1-3には $\beta=35\%$ と70%それぞれの架台に配置された圧力測定孔を有するモジュール（風圧測定モジュール）と有しないモジュール（ダミーモジュール）の配置関係を示す。加えて $\beta=35\%$ の場合のみ、モジュール下に人工芝を配置して、農作物の有無（実大500 mm相当）の影響も検討した。

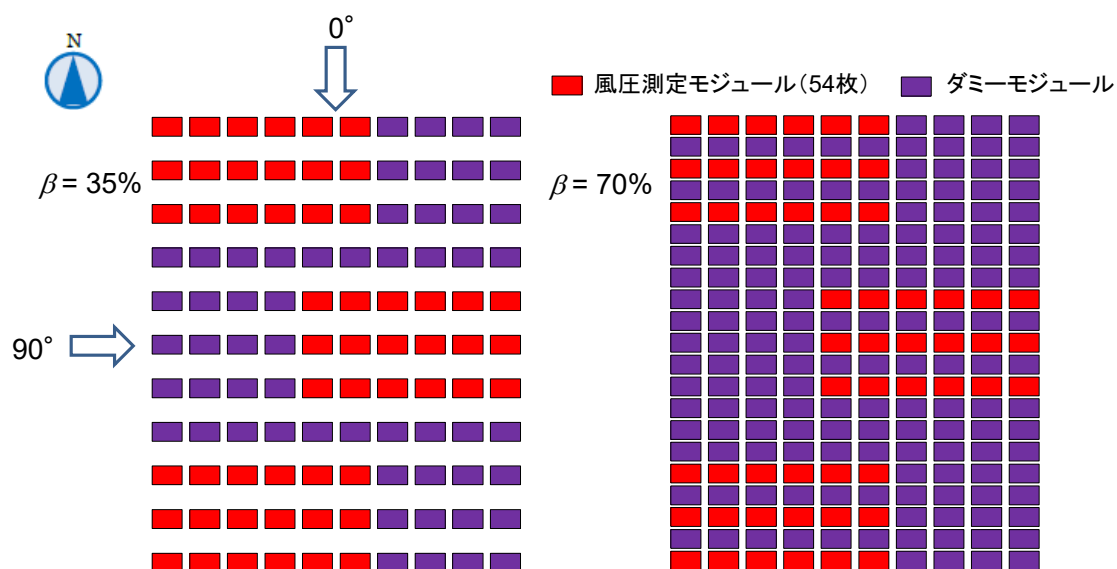


図1-3 風向の定義と架台におけるモジュール配置関係

2. 実験気流

2.1 風速・乱れの強さの鉛直分布

PV下に農作物がない場合における風方向の風速データを用いて、平均風速と乱れの強さの鉛直分布を作成し、荷重指針値との比較を行った。また海外の論文において比較としてよく用いられるESDU（Engineering Science Data Unit, 1987）との比較も加えた。その結果を図2-1に示す。ESDUに関しては荷重指針における地表面粗度区分IIはASCE7におけるopen countryに類似と仮定されることが多い。またopen countryをESDUで再現する際、研究者によって用いるroughness length, z_0 の値が異なるため、今回は $z_0=0.01$ mと0.03 mの両方で検討をした。風速プロファイルは荷重指針のプロファイルにあっている。5 m相当の高さ（模型上100 mm）以下における平均風速と乱れの強さは荷重指針より小さいのは、荷重指針では高さ5 m以下で一定の値を与えているためである。しかしESDUの規定値とは比較的良好対応を示している。

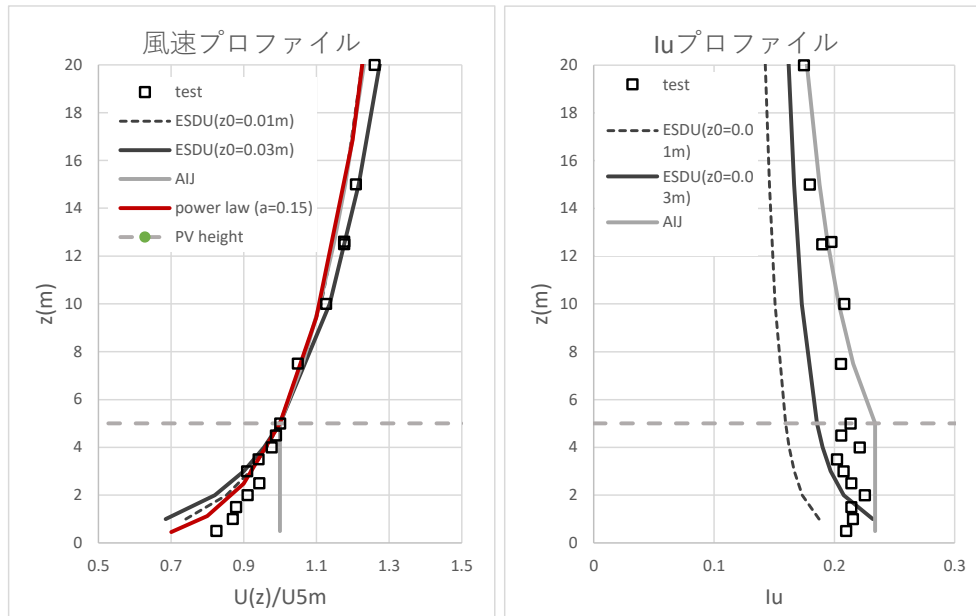


図 2-1 風速プロファイル（左）と乱れの強さのプロファイル（右）

2.2 変動風速のパワースペクトル

風速データ（風向方向、高さ 100 mm（5 m in FS）、サンプリング周波数 1000 Hz）を用いてパワースペクトルの計算を行った。この際、積分スケール L_x を自己相関関数から求める 0.81 m であり、荷重指針にある式から求めた積分スケール 41 m（模型スケールで 0.82 m）となり、実験気流で求めた積分スケールと良い対応を示している。

図 2-2 にパワースペクトルの比較を示す。図 2-2 右上図は一般的に国内の研究において提示されるパワースペクトル図において用いられる無次元化周波数で表示している。海外論文においては横軸に建物代表長さで無次元化した周波数を用いてパワースペクトル図を示すことが多く、これによって L_x を用いた場合に比べてカルマンスペクトルとの対応（＝模型スケールと気流スケールの対応）に差がみられることは、比較的大きな模型を用いた低層建物や PV モジュールの風洞実験では一般的である。PV を扱った論文においてパワースペクトル図を載せている論文は多くないが、周波数の無次元化のためには PV 高さ、もしくはモジュール短辺高さ（ L_{chord} ）が用いられている。そこで今回は L_{chord} （0.02m）を用いて無次元化したパワースペクトル図を作成した（図 2-2 左下図）。全ての図において実験気流より求めたパワースペクトルとカルマンスペクトルとの対応に大差はない。これは大きな渦が生成されており、模型のスケールと渦のスケールにあまり差が生じなかったためであると考えられる。よって気流は適切に生成されていると考えられる。

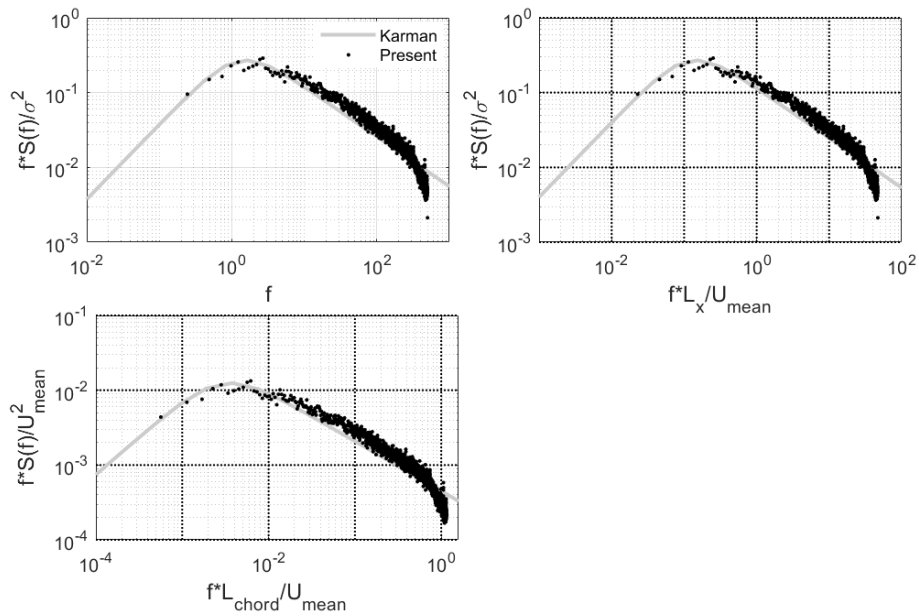


図 2-2 パワースペクトルの比較

3. データの妥当性確認

これまで行われた営農型 PV の風洞実験はないと思われるため、比較的形式に近い地上設置型 PV の実験結果並びに CFD 解析結果と比較をすることで、今回得られた実験データの妥当性を確認する。

比較を行う前に本報告書で用いる風力係数の定義を以下に示す。

$$C_{f,j} = (C_{pe,j} - C_{pi,j}) \dots \dots \dots (3.1)$$

ここで $C_{pe,j}$ 、 $C_{ie,j}$ はそれぞれ圧力測定孔 j における表面・裏面の外圧係数であり、モジュール表面を垂直に押す方向を正と定義する。

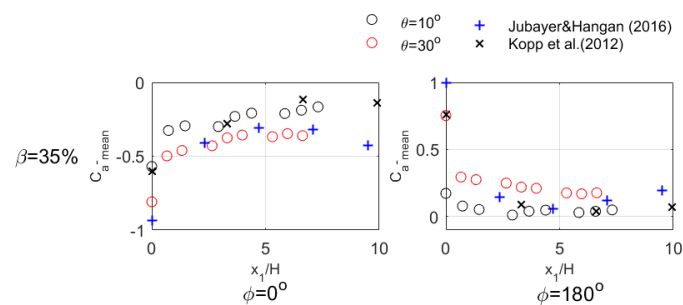
今回比較を行ったのは地上設置型 PV の実験を行った Kopp et al. (2012)¹⁾の結果と CFD 解析を行った Jubayer & Hangan (2016)²⁾の結果である。表 3-1 に比較結果を考察する上で参考となる実験・解析概要をまとめる。表において GCR とは Ground Coverage Ratio であり、モジュール列の間隔と L_{chord} との比率を示し、遮光率に対する別の表現方法ととらえることもできる。

表 3-1 3 研究の実験・解析概要

	Present	Kopp et al. (2012) ¹⁾	Jubayer & Hangan (2016) ²⁾
検討手法	風洞実験	風洞実験	CFD (RANS)
モジュール寸法	1.6 × 1 (m)	1.65 × 1 (m)	1.2 × 0.6 (m)

モジュール・アレイ列寸法	19.6 × 1 (m)	19.8 × 1 (m)	21.92 × 2.47(m)
モジュール勾配、 θ	10 度, 30 度	20 度	25 度
GCR	0.43 ($\beta=35\%$), 0.86 ($\beta=70\%$)	0.6	0.63
地面からモジュール上端までの高さ H	3.17 ($\theta=10$ 度), 3.5 ($\theta=30$ 度)	0.5	1.65
地表面粗度	粗度区分 II	Open country ($z_0=0.03$ m)	Open country ($z_0=0.03$ m)
計測精度	モジュール列当たりの圧力測定孔数: 40 (表面), 40 (裏面)	モジュール列当たりの圧力測定孔数: 36 (表面), 10 (裏面)	モジュール列当たりの計測箇所: 100 グリッド
模型縮尺	1:50	1:30	1:1

図 3-1 に今回の結果と、Kopp et al. (2012)¹⁾、Jubayer & Hangan (2016)²⁾のモジュール・アレイ 1 列当りに作用する平均揚力係数 $C_{a, \text{mean}}$ の南北方向の変化を示す。横軸は Jubayer & Hangan (2016)²⁾に倣い、 x_1 が最も風上に位置するモジュール列中央から該当するモジュール中央までの距離、 H がモジュール上端までの高さを示す。Jubayer & Hangan (2016)²⁾によると最も風上に位置するモジュールにおいて、風向 $\phi=0$ 度の場合は表面、 $\phi=180$ 度の場合は裏面の風上側モジュール端部で流れが剥離し、2 列目位以降のモジュール列はその後流域に入る。よって最も風上に位置するモジュールでは流れが剥離する面に大きな負圧、反対側の面に正圧が作用することで大きな風力を受けるが、2 列目以降のモジュール列においては比較的小さな風力が作用する。この傾向は 3 研究結果に共通している。最も風上に位置するモジュールでの風力の値にはばらつきがみられるが、モジュール勾配の違いや計測位置の違いによるものと考えら、全体的にはよく対応していると考ええる。



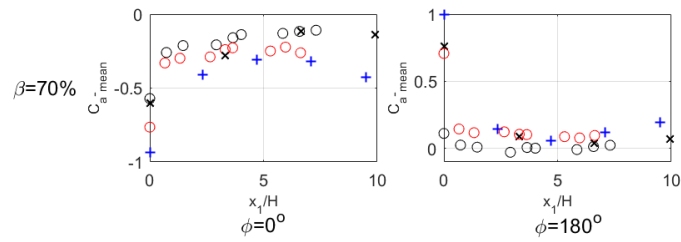


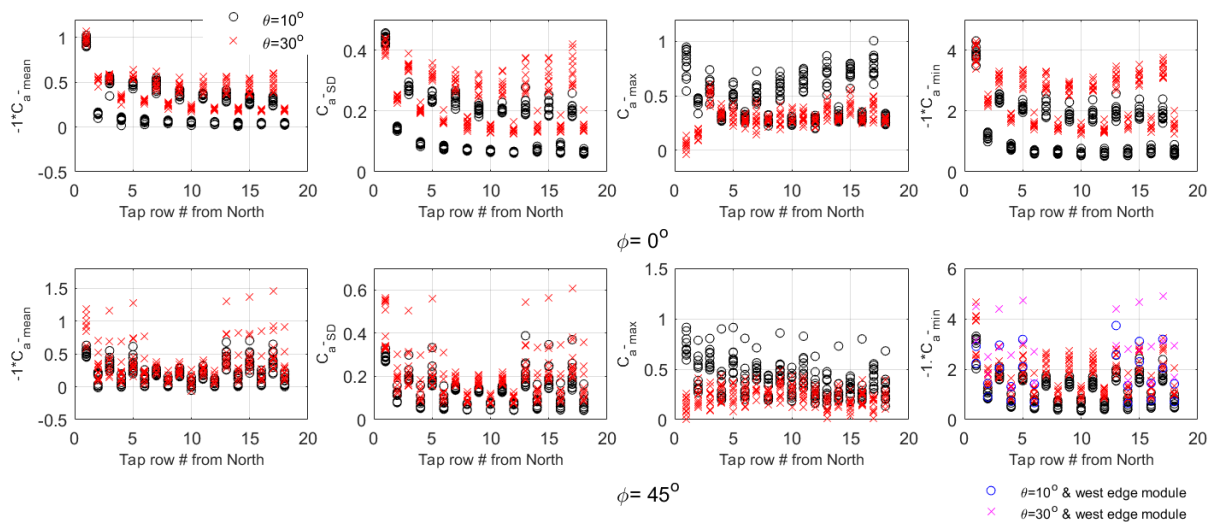
図 3-1 モジュール/アレイ列の平均風力係数比較

4. 風力係数

4.1 農作物・遮光率・モジュール勾配の影響

図 4-1～図 4-3 に、特定の風向において、各圧力測定孔で求めた風力係数 C_f の統計値の南北方向の変化を示す。ここで風力係数とは式(3.1)の定義に基づく。風向 $\varphi=0$ 度と $\varphi=45$ 度は大きな負圧の発生する風向であり、 $\varphi=140$ 度と $\varphi=180$ 度は大きな正圧の発生する風向である。

風向に関わらず、農作物の有無の影響が見て取れるのは $C_{f,min}$ であり、いずれの場合も農作物がない場合に絶対値の大きな負の風力が発生している。これは農作物があるために、モジュール下を通る流れが阻害されたことによるものと予想される。風向 45 度における表裏面の圧力測定孔に作用する平均風圧変化を見ると（付録 A）、表面での風圧には農作物の有無による影響が殆どないのに対し、裏面での風圧は特に $\theta=30$ 度で差が出ていることが分かる。他の統計値に関しては大きな差はみられず、 $C_{f,min}$ に関しても農作物なしの場合は、農作物ありの場合の結果に比べて絶対値が大きくなるため、農作物がない状態を基本として以降の解析を行うことが可能であると考えられる。



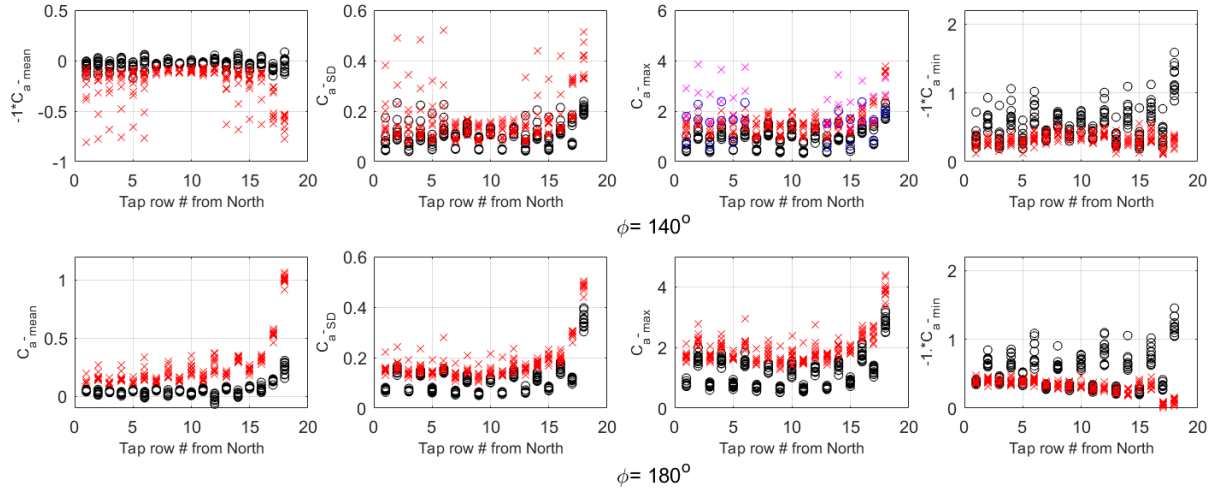


図 4-1 圧力測定孔における風力係数統計値の変化 ($\beta=35\%$ 、農作物あり)

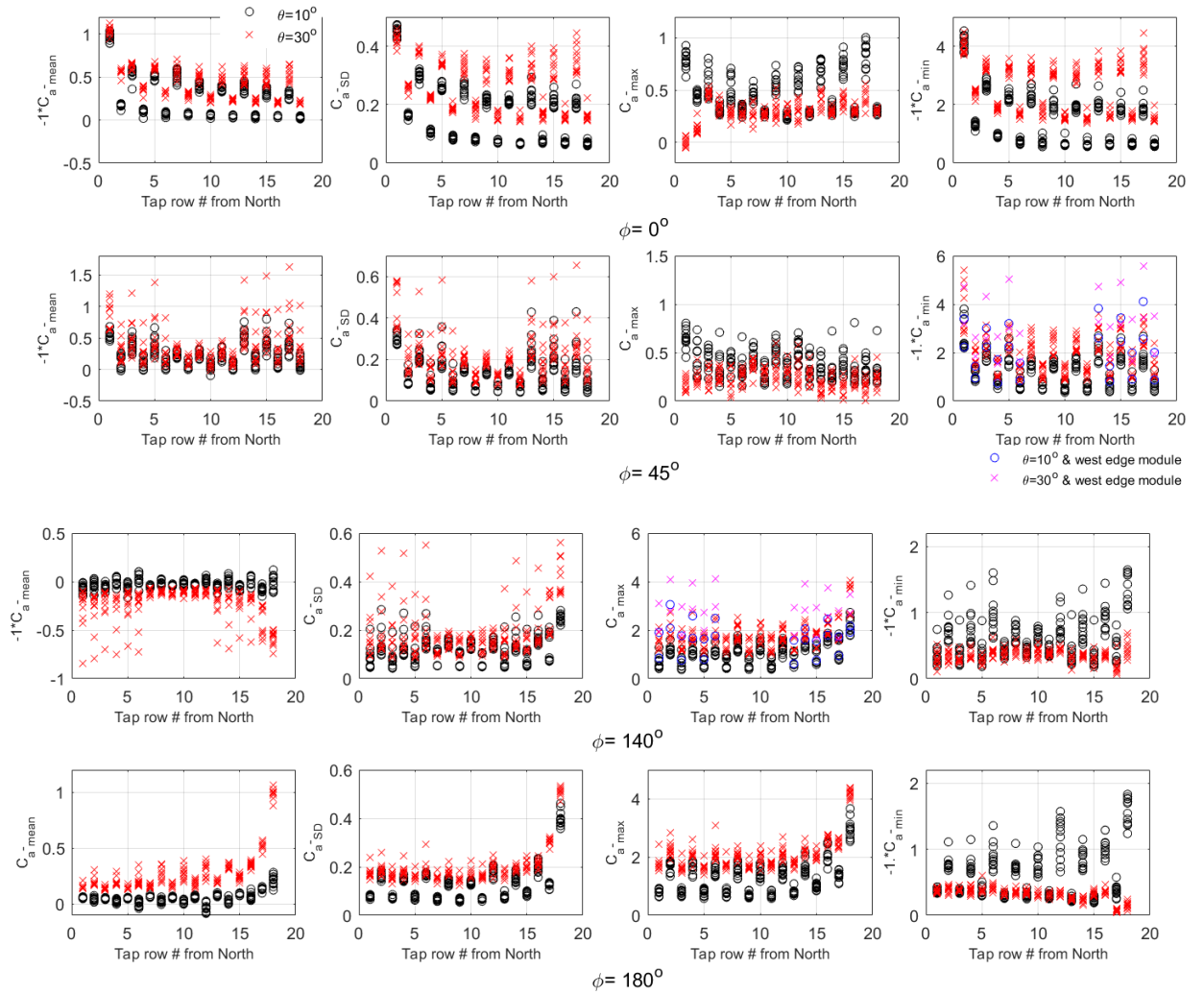


図 4-2 圧力測定孔における風力係数統計値の変化 ($\beta=35\%$ 、農作物なし)

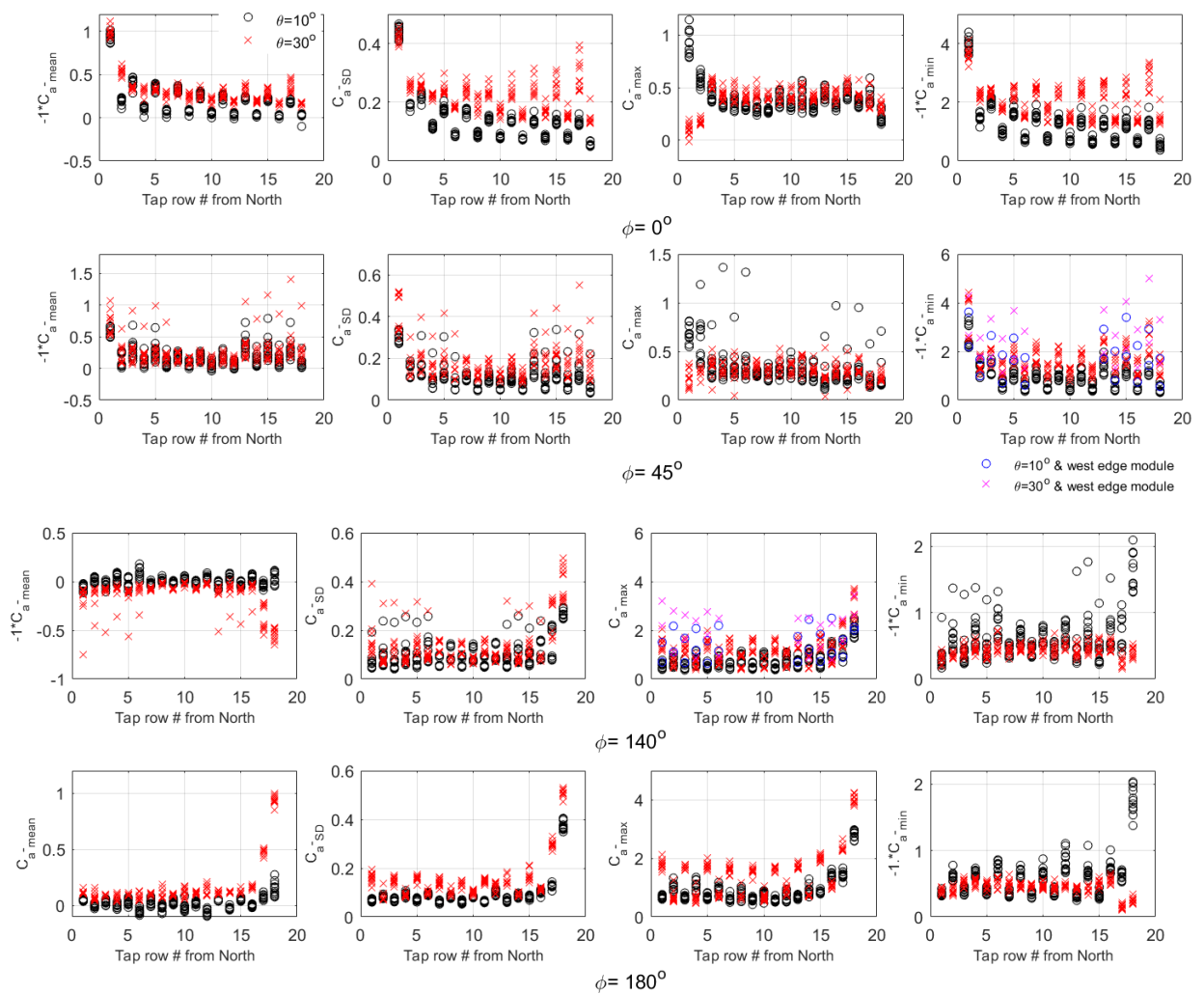


図 4-3 圧力測定孔における風力係数統計値の変化（ $\beta=70\%$ 、農作物なし）

次に遮光率（ β ）の影響であるが、図 4-2 と図 4-3 を比べると、モジュール勾配 $\theta=30$ 度において差が見られる。負の風力に関しては $\varphi=45$ 度の場合に最北端列と西側に位置するモジュールにて $\beta=35\%$ の場合に強い（絶対値が大きい）負の風力が発生している。 $\varphi=0$ 度、 45 度における表裏面の圧力測定孔に作用する風圧変化を見ると（付録 A）、 $\theta=30$ 度、 $\beta=35\%$ の表面に作用する負圧は該当箇所において $\beta=70\%$ の値に比べて絶対値が大きい。 $\varphi=0$ 度、 45 度ではモジュール表面の風上側端部・隅角部で流れが剥離し、 $\beta=35\%$ ではモジュール間隔が大きいいため、モジュールごとに明確な渦が形成され、よって $\beta=35\%$ の場合に強い負圧が発生すると考えられる。負圧に比べるとその程度は小さくなるが、正圧でも $\varphi=140$ 度、 180 度において $\beta=35\%$ の場合に強い正の風力が発生している。

$\varphi=10$ 度の場合、 $\theta=30$ 度に比べると遮光率の影響は明確には出ていない。負の風力に関しては $\varphi=30$ 度と同様に、 $\varphi=45$ 度時の風上側端部に位置するモジュールにて $\beta=35\%$ の場合に若干強い負の風力を記録している。正の風力に関しては、風向 $\varphi=180$ 度に最南端に位置するモジュールでも内部に位置するモジュールでも $\beta=35\%$ の場合に大きな正の風力が発生している。付録 A の風向 $\varphi=180$ 度時の結果をみると、表面に作用する正圧に遮光率 β の差は

殆どないが、裏面に作用する風圧は、 $\theta=30$ 度の場合には負圧であり、その大きさは $\beta=35\%$ で大きくなるため、そして $\theta=10$ 度の場合には主に正圧で $\beta=70\%$ の場合にやや大きな正圧が作用するため、結果的にいずれのモジュール勾配においても $\beta=35\%$ の方がモジュール位置によらず、大きな風力を記録している。 $\phi=180$ 度時にはモジュール裏面の風上側端部では流れが剥離するが、 $\beta=35\%$ の場合の方がより明確な渦が形成されるためであると考えられる。 $\theta=10$ 度における β の影響は付録 B に示す全風向中のモジュールに作用する最大・最小風力係数コンター図でも見て取れる。

最後にモジュール勾配 θ の影響であるが、正圧・負圧ともに大きな影響が現れている。遮光率とモジュール勾配の影響に関しては、次節以降でも考察を続ける。

5. モジュール・アレイに作用する風力係数

モジュール、もしくはアレイ全体に作用する風力は揚力と呼ばれることが多いが、ここでは JIS C8955 で用いられている表現と統一するために、風力と呼ぶことにする。ただし圧力測定孔における風力係数 C_f と分けるため、モジュール・アレイ全体に作用する風力係数の表記は C_a とする。正負の定義は C_f と同じく、表面を垂直に押す方向が正である。

図 5-1、5-2 にモジュール 1 枚に対して求めた C_a の正負のピーク値のコンター図とそのピーク値を発生させた風向を示す。ここではピークを発生させる風向に着目して考察を行う。

最も大きな正のピーク値は最南端に位置するモジュールにて風向 $\phi=180\pm20$ 度時に発生しているが、モジュール勾配 $\theta=30$ 度の場合、特に遮光率 $\beta=35\%$ の場合に、南東方向の風により東側端部に位置するモジュール、南西方向の風により西側端部に位置するモジュールでも大きなピーク値が発生している。負のピーク値も同様に、絶対値の最も大きなピーク値は最北端に位置するモジュールにて $\phi=0\pm40$ 度時に発生しているが、 $\theta=30$ 度の場合は東・西側端部に位置するモジュールでも絶対値の大きな負のピーク値が発生している。

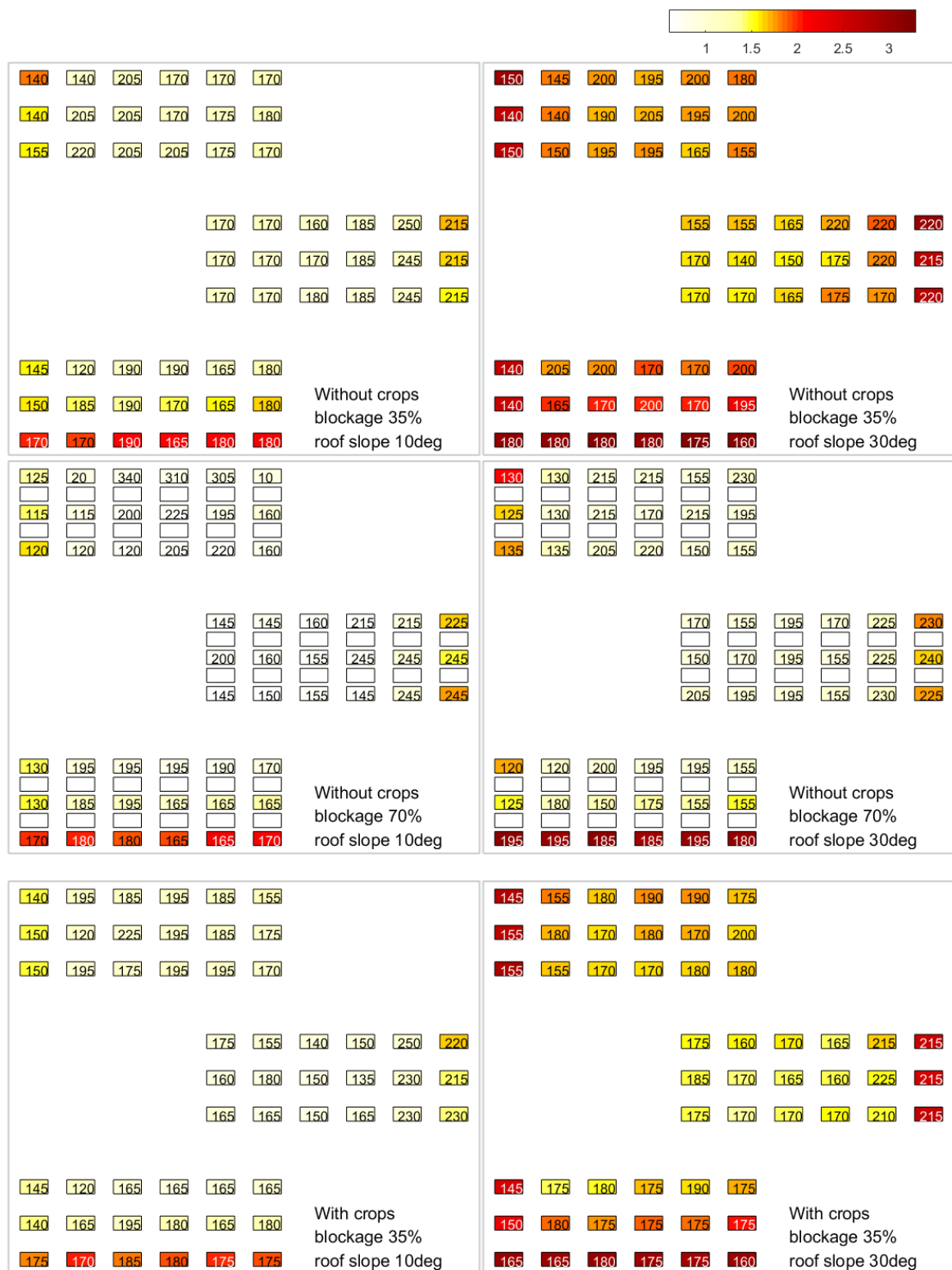


図 5-1 モジュール 1 枚における最大風力係数 C_{a_max} と発生風向

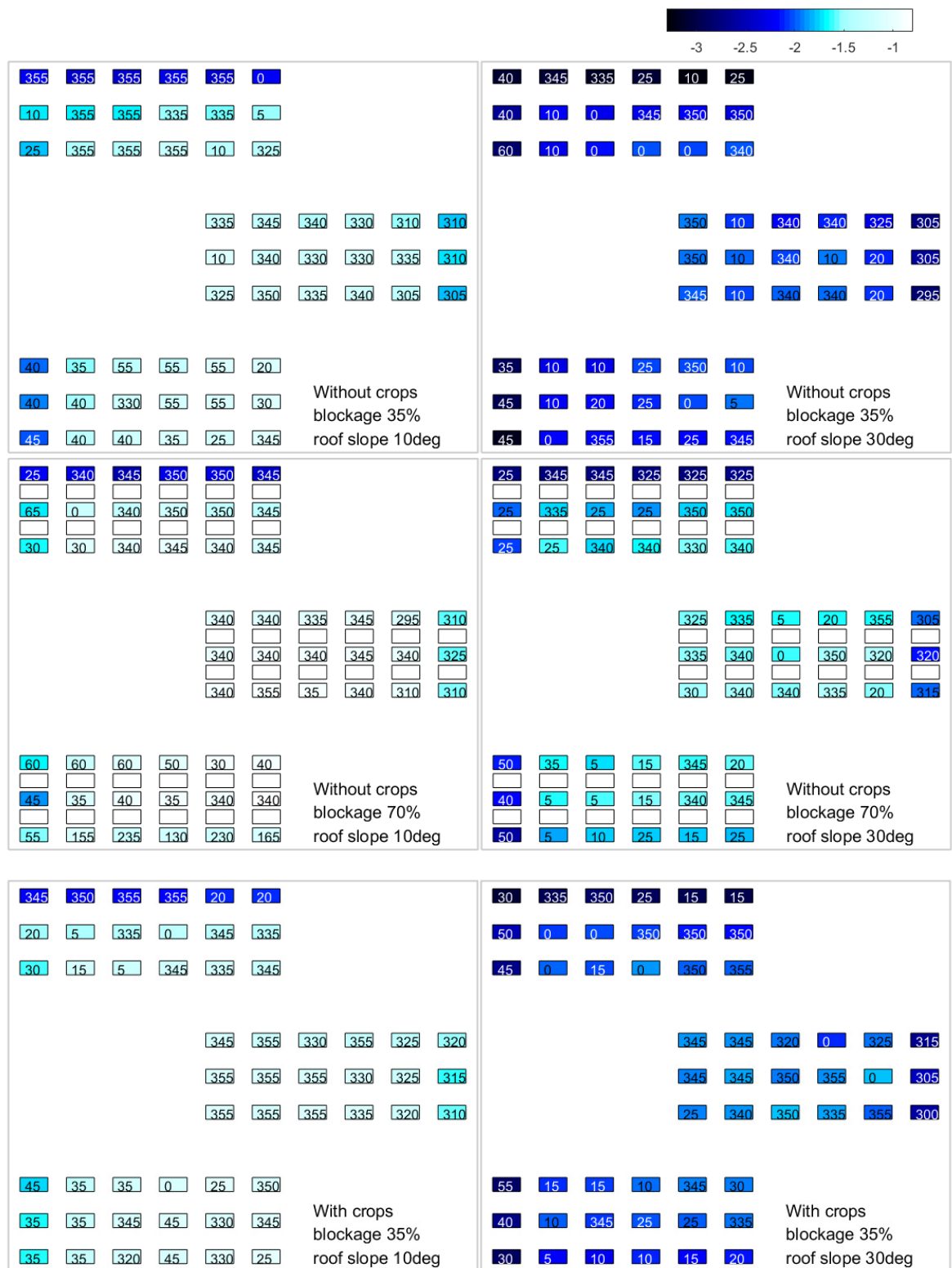


図 5-2 モジュール 1 枚における最小風力係数 $C_{a,min}$ と発生風向

5.1 現行 JIS における地上設置型アレイの設計用風力係数の適用

図 5-1、5-2 を見る限り、JIS C 8955:2017 の図 2 における端部・中央部アレイの定義が適用できそうである。さらに簡略化が可能であるかを検討するために、モジュールを図 5-3 に示すように領域分けし、それぞれの領域に該当するモジュールに作用する最大・最小風力係数 C_{a_max} , C_{a_min} を求めた (図 5-4 と図 5-5)。各図において風力係数は西側からの y 軸方向の並び (上段の図)、北側からの x 方向の並び (下段の図) で示している。また JIS の値はガスト影響係数 2.2 をかけた値として本実験から得た C_{a_max} , C_{a_min} と比較をしている。

負圧の場合、 $\theta=10$ 度、 $\beta=35\%$ のようにモジュール位置による風力の値にあまり差がない場合もあるが、基本的には現行の JIS による端部・中央部アレイの定義と地上設置型 PV の設計用風力係数で対応可能であると思われる。一方、正圧においては、状況が異なる。 $\theta=30$ 度の場合は端部・中央部アレイの区別をしなければ (中央アレイの設計用風力係数の低減を認めなければ)、現行の JIS で対応可能である。しかし、 $\theta=10$ 度ではいずれの遮光率においても最南端列のモジュールにおいて JIS 値を上回っている。最南端から 2 列目のモジュールにおいても比較的大きな値を示しており、JIS 値を超えている。JIS で設定されている風力係数は高森ら(2013)³⁾の風洞実験結果に基づいており、ここで風力係数を算定するために対象としているアレイの大きさは $6\text{ m} \times 4\text{ m}$ である。このアレイの大きさは今回実験で対象としたモジュール ($1.6\text{ m} \times 1\text{ m}$) に比べてかなり大きいため、今回の実験結果の絶対値の方が大きくなることは予想できる。

よって JIS にある地上設置型 PV 用の正圧の設計用風力係数を営農型 PV に用いる場合には、比較的小さなアレイ、もしくはモジュール単体の場合には JIS 値を設計値として用いるには注意が必要であり、JIS の値に割り増し係数 1.2 を乗じて用いることで今回の結果に対応することができる。また、南側から 2 列目までと、東西側から 1 列目のモジュールを端部領域とみなして、JIS 値を用いる必要がある。

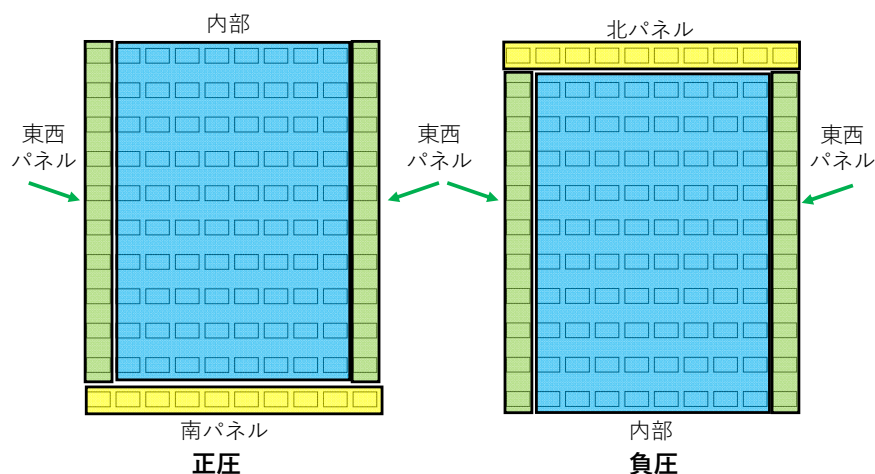


図 5-3 モジュールの領域分け

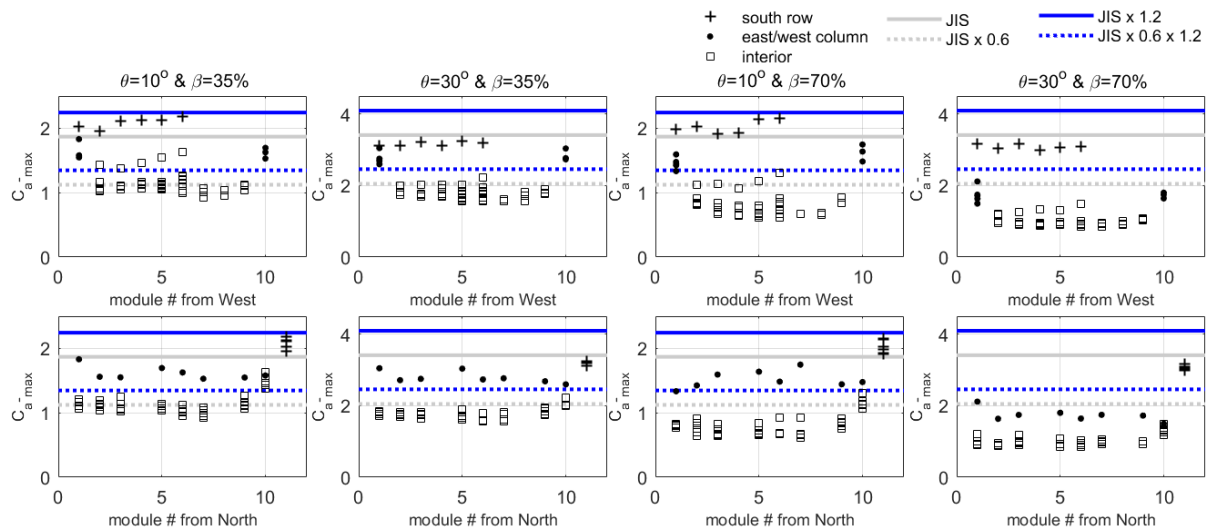


図 5-4 JIS との比較（正圧）

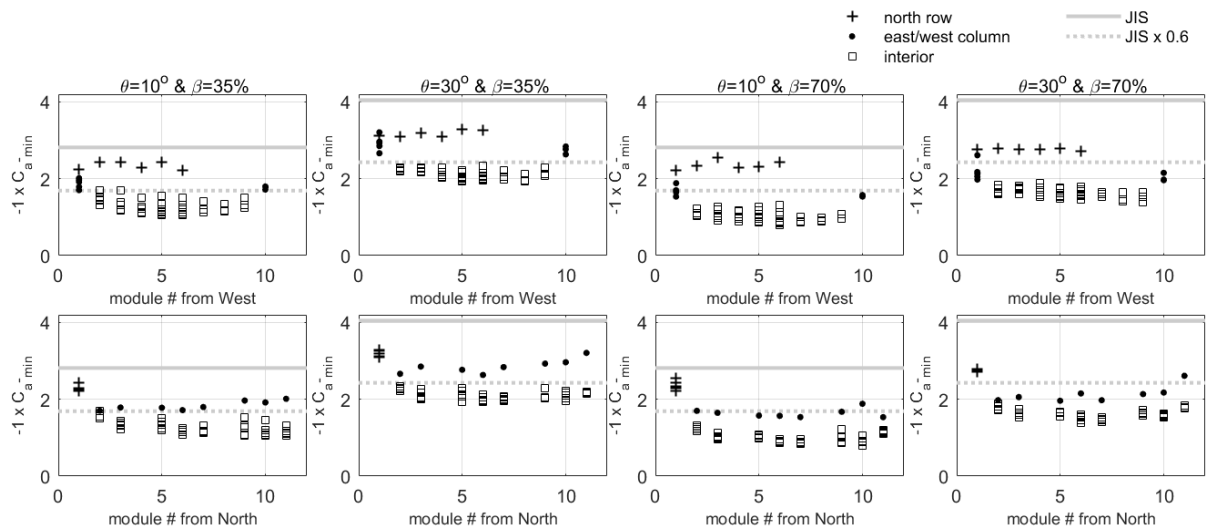


図 5-5 JIS との比較（負圧）

5.2 EUROCODE における独立上屋用の設計風力係数との比較

ヨーロッパにおいては営農型 PV の設置が活発に行われている。設計用の風荷重算定には主に Eurocode の独立上屋の設計用風荷重が用いられているということで、今回の実験結果 (C_{a_max} , C_{a_min}) との比較を行った。

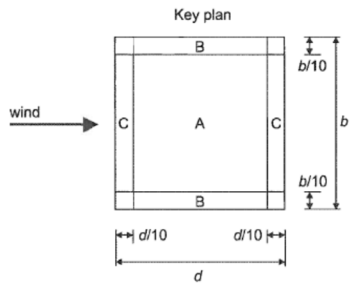
Eurocode では独立上屋に作用する風荷重算定のために overall force coefficient, C_f と net pressure coefficient, $C_{p,net}$ を用意している。前者は構造物全体に対する風力係数、後者は全風向中における最もクリティカルな局部風圧を表す、と説明がある。今回は両者を用いて求めたモジュール 1 枚に作用する風力（揚力）との比較を行った。

Eurocode による面に対して垂直に作用する力 F_w は以下のように表せる：

$$F_w = C_s \cdot C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} = C_s \cdot C_d \cdot C_f \cdot C_e(z_e) \cdot 0.5 \cdot r \cdot (C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0})^2 \cdot A_{ref} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで C_s 、 C_d は structural factor（高さ 15m 以下の場合は 1）、 C_f は独立上屋の風力係数、 $C_e(z_e)$ は高さ z_e における exposure factor であり、 z_e は PV の場合、モジュール上端高さである。 ρ は空気密度、 C_{dir} は directional factor（今回は 1）、 C_{season} は seasonal factor（今回は 1）、 $V_{b,0}$ は basic wind speed で、高さ 10m、open country（Eurocode における地表面区分の定義では II に該当）における 10 分間平均風速、 A_{ref} は reference area である。式(5.1)は C_f を用いた場合の風力算定式であるが、 $C_{p,net}$ を用いた場合も C_f を $C_{p,net}$ で置き換えるだけで求めることができる。与えられている C_f 、 $C_{p,net}$ の値を表 5-1 に示す。

表 5-1 Eurocode における独立上屋の設計用風力・風力差係数

モジュール勾配		C_f	$C_{p,net}$			
			Zone A	Zone B	Zone C	
10 度	Max	+0.5	+1.2	+2.4	+1.6	
	Min	-0.9	-1.5	-2.0	-2.1	
30 度	Max	+1.2	+2.2	+3.2	+2.4	
	Min	-1.8	-3.0	-3.8	-3.6	

式(5.1)によって計算される F_w と実験で得られたモジュールに作用する風力が等しいと仮定をすると、

$$C_f C_e(z_e) \cdot 0.5 \rho \cdot V_{10m,II,10min}^2 \cdot A = 0.5 \rho \cdot V_{3m,II,10min}^2 \cdot C_{a_peak} \cdot A$$

$$C_{a_peak} = C_f C_e(z_e) \cdot (V_{10m,II,10min}/V_{3m,II,10min})^2 = F_1 \cdot C_f \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

となる。よって $F_1 = C_e(z_e) \cdot (V_{10m,II,10min}/V_{3m,II,10min})^2$ を Eurocode の C_f 、 $C_{p,net}$ にかけることで、風洞実験で得られたモジュール 1 枚に作用する風力係数の最大値（最小値） C_{a_peak} と直接比較が可能となる。 $C_e(z_e)$ は Eurocode より 1.6 ($\theta=10$ 度)、1.7 ($\theta=30$ 度)と求まり、 $V_{10m,II,10min}/V_{3m,II,10min}$ は実験で得られた風速プロファイルより 1.24 と求まる。

比較結果を図 5-6 と図 5-7 に示す。 $C_{p,net}$ は C_{a_peak} や C_f と比べてかなり大きな値となるため、今回の比較には加えていない。モジュール勾配 10 度の正圧に関しては複数のモジュール位置で、負圧では最北端に位置するモジュールにて Eurocode は過小評価するが、その他では適切に設計値が与えられているようである。

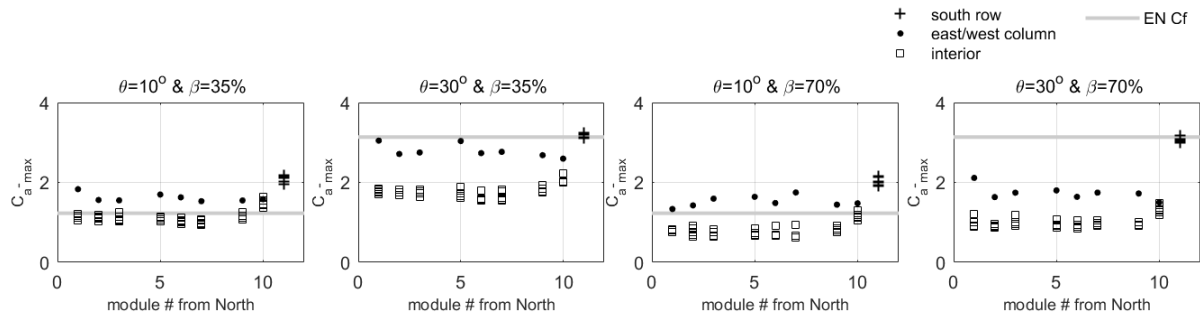


図 5-6 Eurocode との比較（正圧）

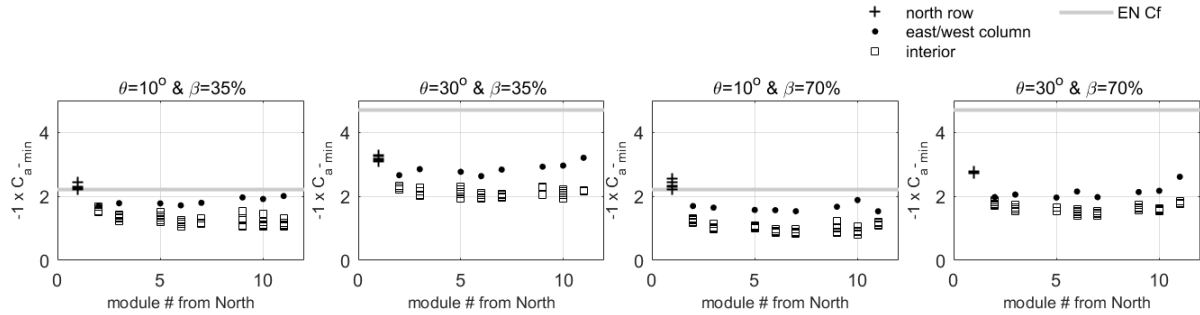


図 5-7 Eurocode との比較（負圧）

5.3 ASCE7 との比較

ASCE7(2022)では地上設置型 PV の設計用風力係数が提示されている。今回用いた営農型 PV では $0.5 \leq h/L_{\text{chord}} \leq 0.8$ （ここで h はモジュール平均高さ）が満たされないため（今回用いた営農型 PV では $h/L_{\text{chord}} > 3$ となる）、本来は比較すべきではないが、参考のために比較した。

ASCE7-22 では地上設置型 PV に作用する設計風力 F_n とモジュール中央に対する設計モーメント M_c を以下の式で設定している。

$$F_n = q_h K_d [\pm(GC_{gn})]A \quad (\text{N}) \quad \dots\dots\dots(5.3)$$

$$M_c = q_h K_d [\pm(GC_{gm})]AL_c \quad (\text{Nm}) \quad \dots\dots\dots(5.4)$$

ここに、

$$GC_{gn} = [\pm(GC_{gn_static}) \pm(GC_{gn_dynamic})] \quad \dots\dots\dots(5.5)$$

$$GC_{gm} = [\pm(GC_{gm_static}) \pm(GC_{gm_dynamic})] \quad \dots\dots\dots(5.6)$$

$$q_h = 0.613K_z K_{zt} K_e V^2 \quad \dots\dots\dots(5.7)$$

ASCE7-22 では静的効果のみではなく動的効果も考慮しているが、ここでは静的風力のみを対象とする。風洞実験で得た風力係数 C_{a_peak} を用いて計算される風力と式(5.3)で求まる F_n が等しいと仮定をすると、 C_{a_peak} と GC_{gn} の関係が求められる。

$$P_{design} = 0.5 \rho V_{3m,II,10min}^2 C_{a_peak} A = 0.613 K_z K_{zt} K_e V^2 K_d [\pm(GC_{gn})] A$$

$$C_{a_peak} = K_z K_{zt} K_e V^2 K_d [\pm(GC_{gn})] / V_{3m,II,10min}^2 = F_2 \times [\pm(GC_{gn})] \dots\dots\dots(5.8)$$

ここで K_{zt} (topographic factor) と K_e (ground elevation factor) は 1、 K_d (wind directionality factor) と K_z (velocity pressure exposure coefficient) は今回の営農型 PV の場合、0.85 (モジュール勾配によらず) である。 V (basic wind speed) は Exposure C、高さ 10m における 3 秒ガスト風速である。Exposure C と荷重指針における地表面粗度区分 II が同じと仮定をすると F_2 は

$$F_2 = 0.85^2 \times (V_{3sec,10m} / V_{10min,3m})^2 = 0.85^2 \times [(V_{3sec,10m} / V_{10min,10m}) (V_{10min,10m} / V_{10min,3m})]^2 = 2.27$$

となる。ここで $V_{10min,10m} / V_{10min,3m}$ は実験で得られた風速プロファイルより 1.24、 $V_{3sec,10m} / V_{10min,10m}$ は ASCE7-22 にある Durst curve より 1.43 と求まる。

また ASCE7-22 の定義に基づくと端部に位置するモジュールは北側・南側に位置する 3 列と東側・西側に位置する 2 列となる。加えて、今回のモジュールサイズに対する GC_{gn_static} を求めるとモジュール勾配 10 度では 1.5(interior), 2.5(edge)、モジュール勾配 30 度では 3.0(interior), 4.99(edge) と求まる。これに F_2 をかけると明らかに C_{a_peak} を超え、かつ、国内における架台の固有振動数や構造減衰に関する情報を把握できていないため、今回は $GC_{gn_dynamic}$ を考慮しないこととした。ただ渦励振の発生をパワースペクトルで確認した (付録 C)。

営農型 PV のモジュール 1 枚に作用するピーク風力係数と $F_2 \times [\pm GC_{gn_static}]$ の比較を図 5-8 と図 5-9 に示す。全ての場合において ASCE7-22 の値は実験値を大きく上回っている。ASCE7-22 にある GC_{gn} の値は Browne et al. (2020)⁴⁾ に基づいており、この論文におけるピーク風力係数は高さ 3m, open country における 1 時間平均風速で基準化されている。これを ASCE7 のフォーマットに合わせるため、 $0.34 (=1/2.9)$ をかけている。この計算においては $K_d = 1$ を仮定しており^{注 1}、 F_2 の計算においても同じように仮定をすると $F_2 = 2.97 = 1/0.34$ となり、Browne et al. (2020)⁴⁾ が用いた係数とよく対応する。よって F_2 の計算に間違いはないと思われる。さらに、この論文には既往研究との比較が載せられており、JIS 値に関して負圧はよく対応しているが、正圧は JIS 値が小さいと考察している。しかし、JIS 値との比較に関しては計算に誤りがあり、実際には Browne et al. (2020)⁴⁾ の結果は JIS 値よりもさらに大きいと思われる (詳細は付録 D)。

^{注 1} K_d であるが、ASCE7-22 に従うと 0.85 と設定することが正しいと思われる。実際、Browne et al. (2020)⁴⁾ は計算の具体例を載せているが、そこでは $K_d = 0.85$ としている。

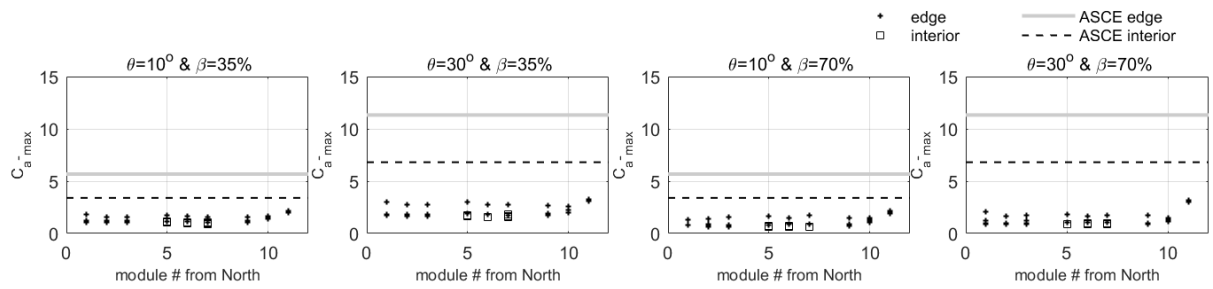


図 5-8 ASCE7-22 との比較（正圧）

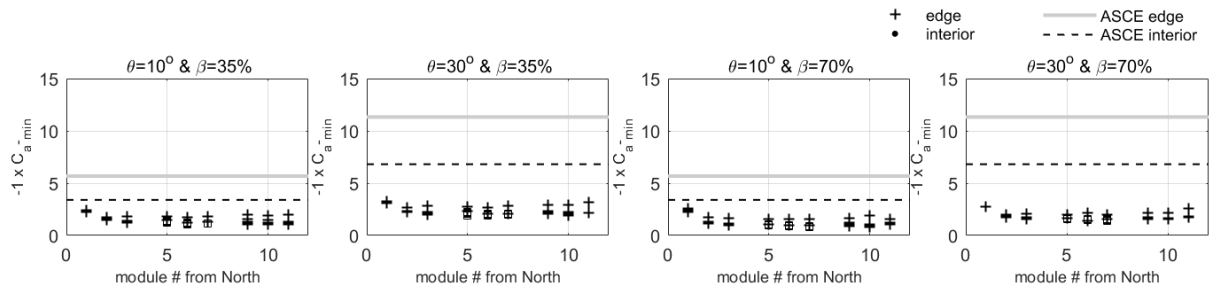


図 5-9 ASCE7-22 との比較（負圧）

GC_{gn} の値が大きい理由として考えられる以下について検討した。

- ①ピーク値評価法
- ②気流の縮尺
- ③モジュール短辺 長さ (chord length)

①に関して、Browne et al. (2020)⁴⁾の実験では 1 風向当たり 60 秒間計測を行い、これを 30－60 のブロックに分け、それぞれからピークを求め、ガンベル分布にフィットし、80%フラクタイル値を求めている。さらにこの 80%フラクタイル値を Cook&Mayne (1979)⁵⁾の手法を用いて評価時間 1 時間のピーク値に変換している。ピークの計算方法の違いによる影響を確認するために、モジュール勾配 30 度、遮光率 35%の結果に Browne et al. (2020)⁴⁾の手法を用いてピークを計算してみた。するとアンサンブル平均によるピーク値の 1.1-1.4 倍（平均 1.24 倍）となった。図 5-8、図 5-9 における差はこれ以上のものであるため、これだけが要因であるとは考えにくい。

②に関して、風洞実験で再現した気流に関しては Browne et al. (2020)⁴⁾も今回の実験でも全周波数に渡ってカルマンスペクトルによく対応している。よって模型と気流の縮尺の違いが原因ではないと思われる。

③に関して、北米の研究者に聞いたところ、これが主要因であるということである。表 5-2 に示すように Browne et al. (2020)⁴⁾では 2－4 m の L_{chord} を使用しており、 L_{chord} が長いほど大きな風圧がモジュールには作用する。しかしこの影響を考慮して設計用風力係数を提示していないため、比較的小さな L_{chord} を用いた今回の実験結果との比較では ASCE7-22 の値が大きく上回る結果となることである。

表 5-2 Browne et al. (2020)⁴⁾における風洞実験パラメータ

Parameter	Range covered within selected dataset
Model Scale	1:30 to 1:55
Number of rows within modeled array	7 to 9
Chord length (L_{chord})	2 m – 4 m
Aspect ratio of modeled rows (W/L)	11 to 41
Tilt angle (ω)	0°, 5°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°
Array height (h/L)	0.55 to 0.75
Row spacing (L/S)	0.29 to 0.60

* h : モジュール平均高さ S : モジュール列中央間距離

5.4 AS/NZS1170 における地上設置型の設計風力係数との比較

AS/NZS1170.2(2021)では地上設置型 PV の設計用風力係数を提示している。今回用いた営農型 PV ではモジュールのアスペクト比と高さの条件を満たしておらず、本来は比較すべきではないが、参考のために比較した。

Ginger et al. (2019)⁶⁾では風力係数 C_{peak} をモジュール平均高さ h における 10 分間平均風速 V_{h_mean} を用いて基準化している。そしてこの風力係数と 10 分間風速に基づく速度圧から求まる風圧と、AS/NZS1170.2 における aerodynamic shape factor, C_{shp} と design gust wind speed, V_h から求まる風圧が等しいとして、 C_{peak} と C_{shp} を関連づけている。

$$P_{\text{design}} = 0.5 \rho V_{h_mean}^2 C_{\text{peak}} A = 0.5 \cdot \rho \cdot V_h^2 C_{\text{shp}} \cdot A \quad \dots\dots\dots (5.9)$$

$$C_{\text{peak}} = C_{\text{shp}} \times (V_h / V_{h_mean})^2 \quad \dots\dots\dots (5.10)$$

そして V_{h_mean} と V_h の関係は以下の式に基づいている。

$$V_h / V_{h_mean} = (1 + g_u \cdot I_u) \quad \dots\dots\dots (5.11)$$

ここで I_u は高さ h における乱れの強さ、 g_u はピークファクターであり、Holmes et al. (2014)⁷⁾によると 0.2 秒平均ガストと 10 分平均風速に関係づけるのであれば $g_u=3.4$ が適切である。よって式(5.10)は以下になる。

$$C_{\text{peak}} = C_{\text{shp}} \times (1 + g_u I_u)^2 \quad \dots\dots\dots (5.12)$$

営農型 PV の風洞実験で得た風力係数 C_{a_peak} はモジュール下端高さの風速で基準化されているため、風速プロファイルを用いて、これをモジュール平均高さで基準化し直し、式 (5.13) を用いることで、今回の風洞実験結果と AS/NZS1170.2 における C_{shp} が比較可能となる。

$$(V_{3m}/V_{h_mean})^2 C_{a_peak} = C_{shp} \times (1+g_u I_u)^2$$

$$C_{a_peak} = C_{shp} \times (1+g_u I_u)^2 / (V_{3m}/V_{h_mean})^2 = F_3 \times C_{shp} \quad \dots\dots\dots(5.13)$$

営農型 PV のモジュール 1 枚に作用するピーク風力係数と $F_3 \times C_{shp}$ の比較を図 5-10 と図 5-11 に示す。正圧負圧とも基準値が実験で得られた最大値に概ね一致する。

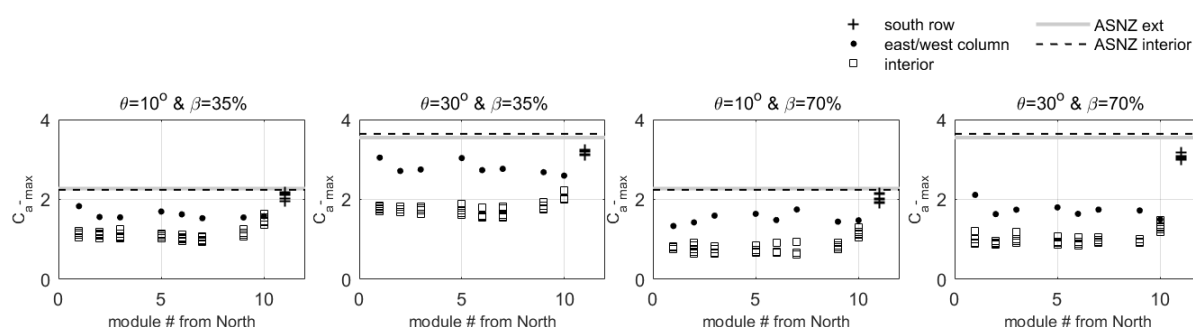


図 5-10 AS/NZS1170.2 との比較（正圧）

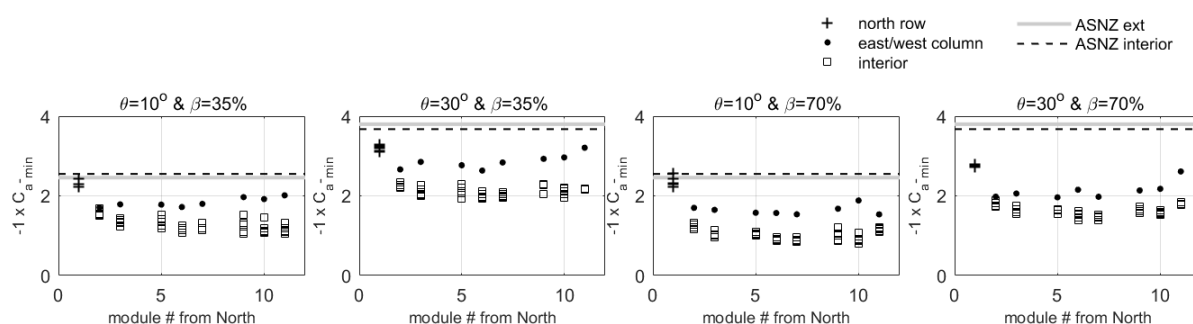


図 5-11 AS/NZS1170.2 との比較（負圧）

5.5 面平均の影響

モジュール 1 枚に加え、アレイ（モジュール 2、6 枚）の載る架台に作用する最大・最小風力係数 C_{a_max} , C_{a_min} を計算し、JIS の図 2 における端部・中央部アレイの定義を用いて分けた結果を図 5-12 と図 5-13 に示す。また検討したアレイ配置を図 5-14 に示す。遮光率 $\beta=70\%$ 、モジュール 6 枚が載る架台の場合、 x 軸方向にダミー模型を含む 5 つのモジュールが並ぶことになり、ダミー模型に作用する風力を予想して計算する必要がある。これは南北方向に位置する測定孔の風圧値を線形補間して求めた。

アレイの位置によらず、架台の外郭面積 A_o が小さい場合は C_{a_max} , C_{a_min} に大きな差は生じないが、 A_o が大きくなると正負共に C_{a_max} , C_{a_min} の絶対値が大幅に小さくなる。今回検討した架台寸法は一例であるため、すべての場合において適応できるわけではないが、複数枚のモジュールを載せた架台の場合は風力係数の低減が期待できる。

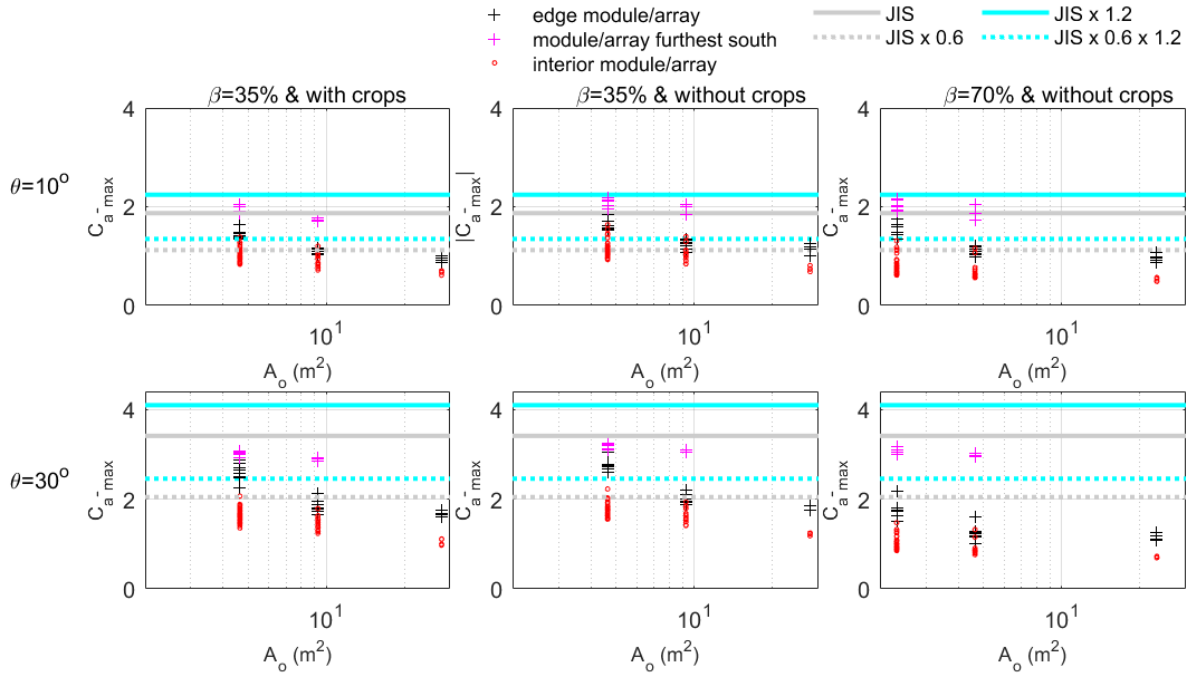


図 5-12 最大風力係数 C_{a_max} の架台外郭面積 A_o による変化

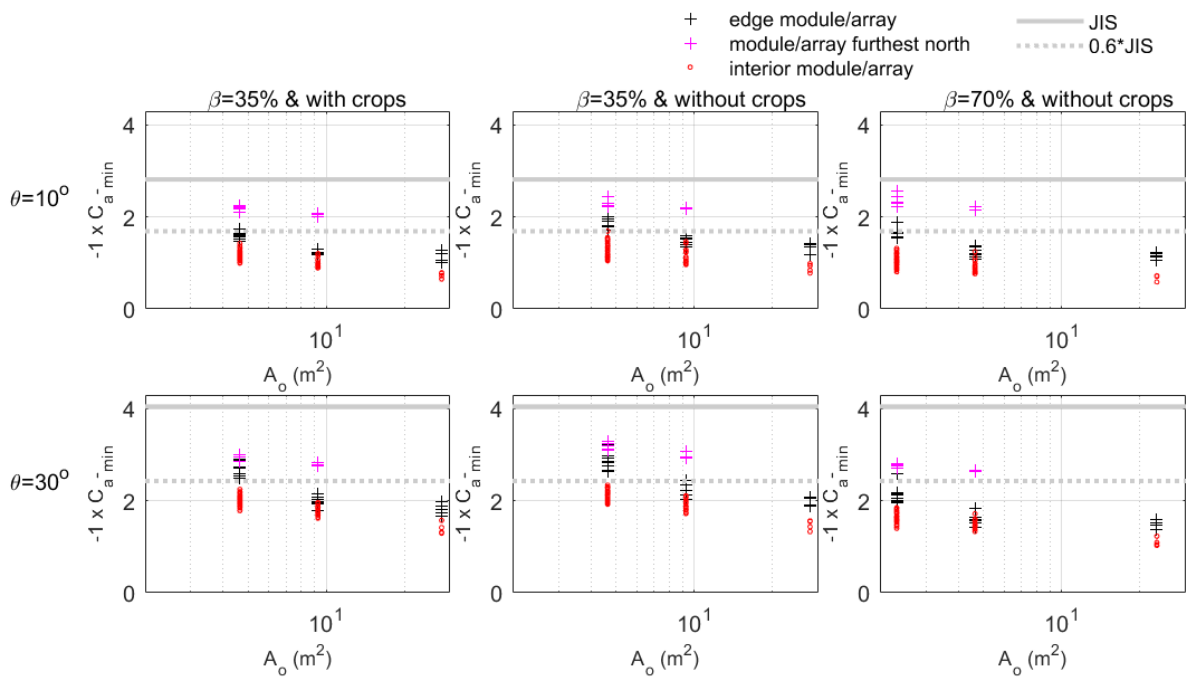


図 5-13 最小風力係数 C_{a_min} の架台外郭面積 A_0 による変化

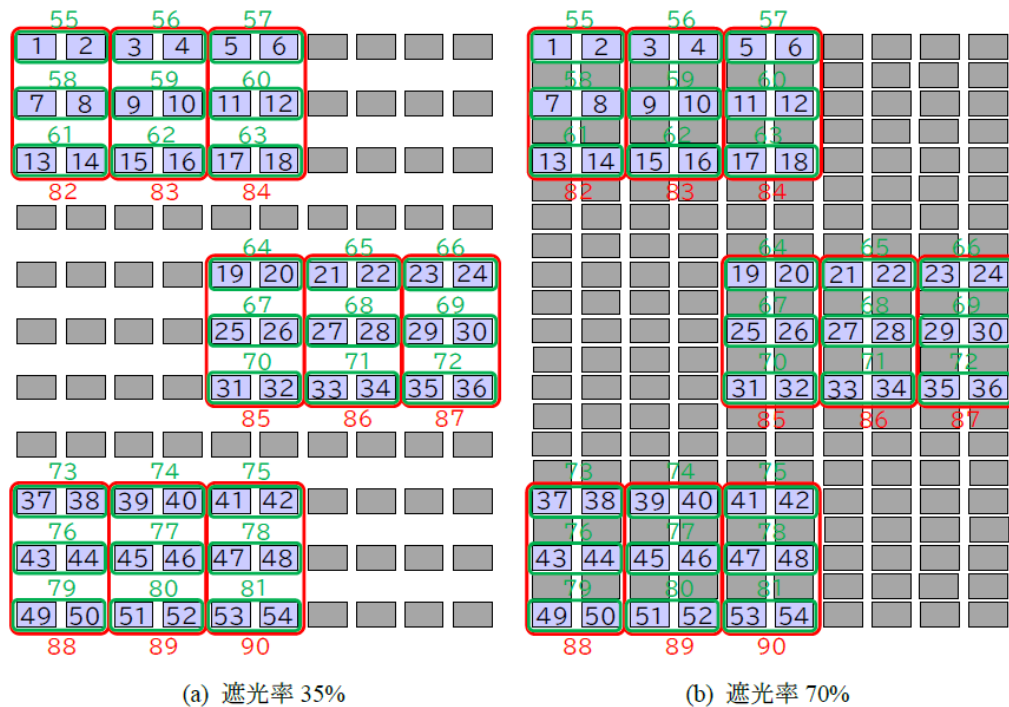


図 5-14 アレイの定義

5.6 風力係数の風向変化

図 5-15 に最大・最小風力係数の風向変化 $C_{a_max}(\phi)$ 、 $C_{a_min}(\phi)$ を示す。ここではある特定の風向に対し、全てのモジュール・アレイの最大・最小風力係数を求め、その中で最もクリティカルな値を生じたモジュール・アレイ位置における値を示している。 $C_{a_max}(\phi)$ は風向 $\phi=180$ 度付近で、 $C_{a_min}(\phi)$ は $\phi=0$ 度付近で生じるという傾向は全てのパラメータ・モジュール枚数で共通しており、パラメータ・モジュール枚数による影響としては $C_{a_max}(\phi)$ 、 $C_{a_min}(\phi)$ の大きさのみである。つまり、モジュール勾配が大きいほど、モジュール枚数が少ないほど、 $C_{a_max}(\phi)$ 、 $C_{a_min}(\phi)$ の大きさは大きい。遮光率の影響はモジュール勾配・枚数に比べると小さい。参考のために平均風力係数 ($\max(C_{a_mean}(\phi))$ 、 $\min(C_{a_mean}(\phi))$) の風向変化も同図に示す。これらは、ある特定の風向に対し、全てのモジュール・アレイにおける平均風力係数を求め、その中で最も正側・負側にクリティカルな値を生じたモジュール・アレイにおける値を示している。スパン間隔 $4\text{ m} \times 5.8\text{ m}$ の架台に載るアレイの結果に関してはダミー模型に作用する風力の影響を考慮してある。

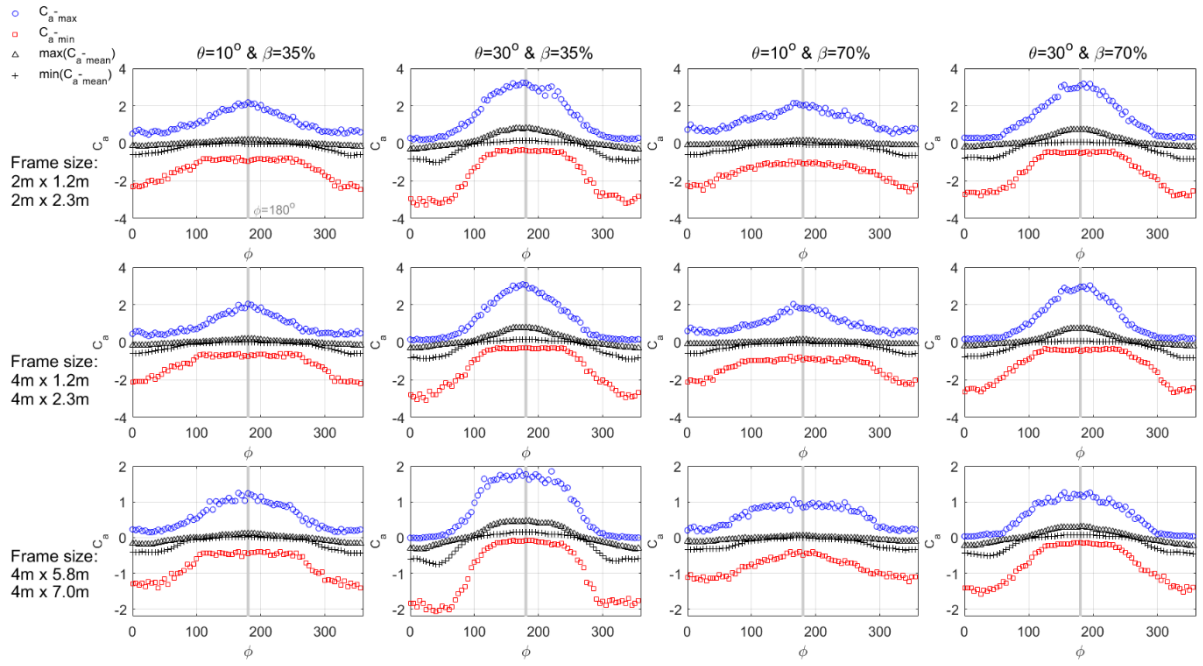


図 5-15 モジュール・アレイに作用する $C_{a_max}(\phi)$, $C_{a_min}(\phi)$, $\max(C_{a_mean}(\phi))$, $\min(C_{a_mean}(\phi))$ の風向変化

6. モーメント係数

6.1 モーメント係数の風向変化

図 6-1 に示す定義に基づき、モジュール・アレイに作用する x, y 軸周りのモーメント係数 C_{Mx}, C_{My} を計算した。具体的なモーメントの計算方法は C_{My} に関して図 6-2 に示す。また C_a と同様、遮光率 $\beta=70\%$ のスパン間隔 $4\text{ m} \times 5.8\text{ m}$ の架台の場合はダミーモジュールの影響を考慮している。各圧力測定孔に作用する風力係数時刻歴を用いて x, y 軸周りのモーメント C_{Mx}, C_{My} の時刻歴を求め、それぞれの最大値・最小値をアンサンブル平均で求めた ($C_{Mx_max}(\phi), C_{Mx_min}(\phi), C_{My_max}(\phi), C_{My_min}(\phi)$)。ここではある特定の風向に対し、全てのモジュール・アレイにおける最大・最小のモーメント係数を求め、その中で最もクリティカルな値を生じたモジュール・アレイでの値を示している。

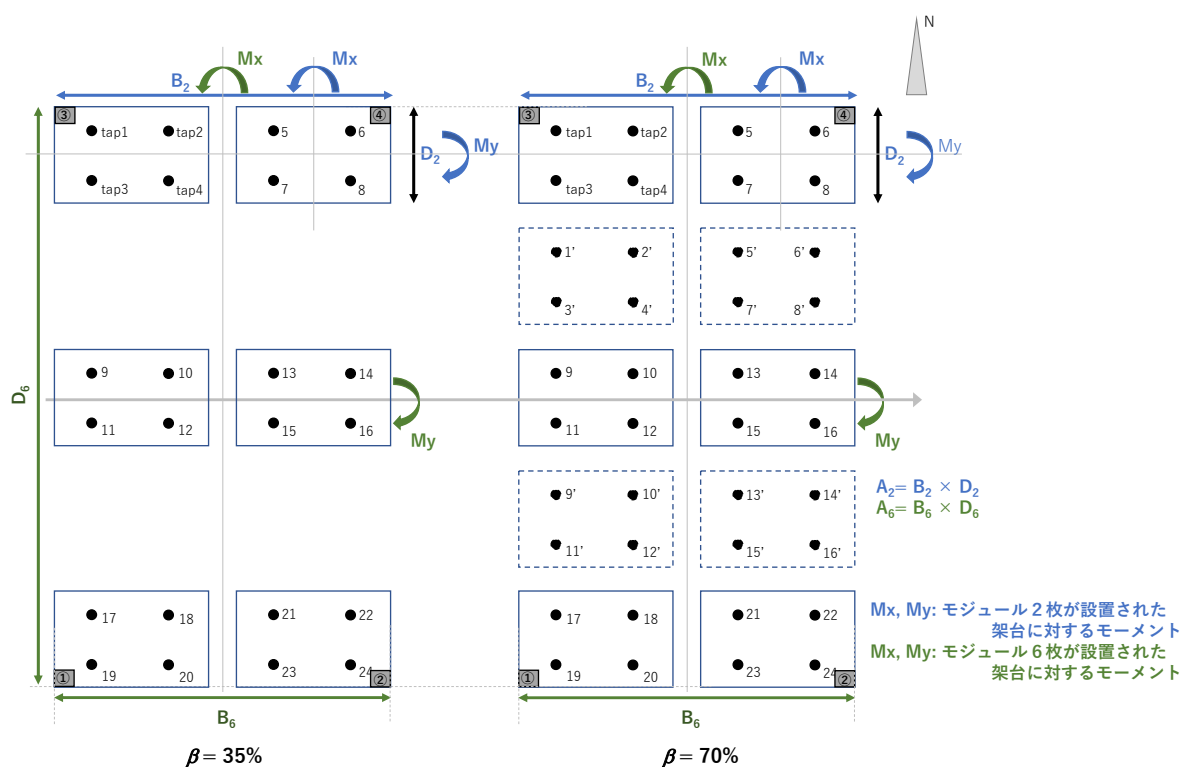
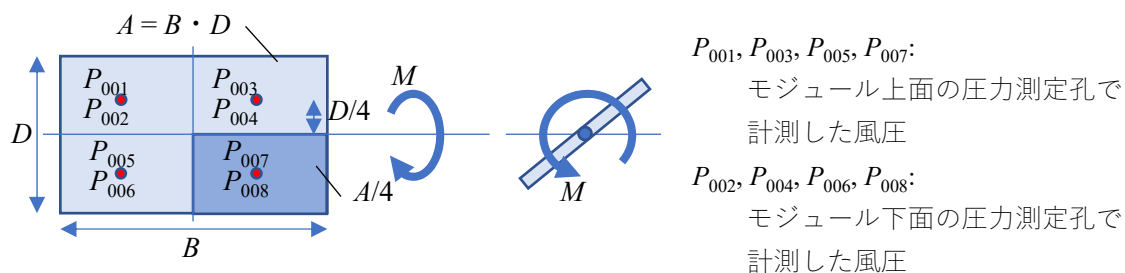


図 6-1 モジュール、アレイ（モジュール 2, 6 枚）の載る架台に対するモーメントの定義



$$C_M = M / (q \cdot A \cdot D)$$

$$M = -(P_{001} - P_{002}) \times A/4 \cdot D/4 - (P_{003} - P_{004}) \times A/4 \cdot D/4 + (P_{005} - P_{006}) \times A/4 \cdot D/4 + (P_{007} - P_{008}) \times A/4 \cdot D/4$$

$$= (-P_{001} + P_{002} - P_{003} + P_{004} + P_{005} - P_{006} + P_{007} - P_{008}) \times A/4 \cdot D/4$$

$$C_M = (-P_{001} + P_{002} - P_{003} + P_{004} + P_{005} - P_{006} + P_{007} - P_{008}) \times A/4 \cdot D/4 / (q \cdot A \cdot D)$$

$$= (-P_{001} + P_{002} - P_{003} + P_{004} + P_{005} - P_{006} + P_{007} - P_{008}) \times 0.0625/q$$

図 6-2 モーメント係数 (C_M) の定義

図 6-3 に $C_{Mx_max}(\phi)$, $C_{Mx_min}(\phi)$ と、各モジュール・アレイにおける最もクリティカルな平均値 $\max(C_{Mx_mean}(\phi))$, $\min(C_{Mx_mean}(\phi))$ の風向変化を示す。モジュール勾配・遮光率・モジュール枚数に関わらず、大きな $C_{Mx_max}(\phi)$, $|C_{Mx_min}(\phi)|$ は南北方向軸 ($\phi = 0$ 度、 180 度) に対して斜め方向から風を受ける際に発生している。

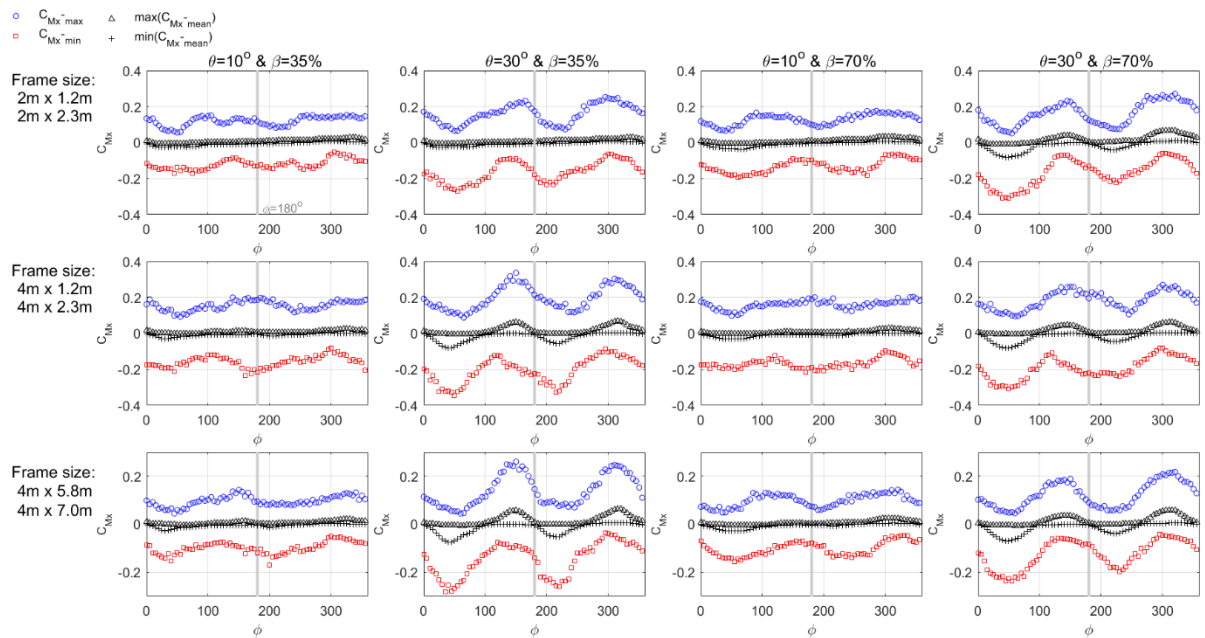


図 6-3 モジュール・アレイに作用する $C_{Mx_max}(\phi)$, $C_{Mx_min}(\phi)$, $\max(C_{Mx_mean}(\phi))$, $\min(C_{Mx_mean}(\phi))$ の風向変化

C_{My} に対して同様の結果を図 6-4 に示す。まず $C_{My_max}(\phi)$ であるが、遮光率 β ・モジュール勾配 θ の影響としては最大値を発生させる風向が挙げられる。比較的スパンが短い架台 (図 6-4 最上段、中段) では、最大値を記録する風向は、モジュール勾配 $\theta = 30$ 度の場合は風向 $\phi = 45$ 度付近であるのに対し、 $\theta = 10$ 度では 0 度付近である。そしていずれの場合も、モジュール高勾配側をモジュール裏面から押し上げる力 (uplift) により $C_{My_max}(\phi)$ が発生している。 $\phi = 180$ 度付近でもやや大きな $C_{My_max}(\phi)$ を記録する。これはモジュール低勾配側をモジュール表面から押す力 (downforce) によりモーメントが発生しており、その大きさは $\phi = 0$ 度、 45 度付近で記録する uplift による $C_{My_max}(\phi)$ に比べると小さい。この傾向が最もスパン

が長い架台（図 6-4 最下段）になると変化する。比較的スパンが短い架台と同様に $C_{My_max}(\phi)$ は W 字型の風向変化をするが、 $\phi=180$ 度付近における downforce による $C_{My_max}(\phi)$ が大きくなり、 $\theta=30$ 度の場合は、これが最大値を記録する風向となる。これは大きな C_{My_max} を生じる $\phi=45$ 度、 180 度におけるモジュールの圧力測定孔に作用する風力（表面圧力－裏面圧力）係数の空間相関が関係している。いずれの風向でも最北端（ $\phi=45$ 度時）、最南端（ $\phi=180$ 度時）の圧力測定孔で大きな C_{f_mean} を記録し、その 1 列内側の圧力測定孔では C_{f_mean} の大きさが急激に低下する（図 4-1～図 4-3 参照）。よってモーメントの計算において、対象とするモジュール枚数が少ない場合はこの風力差のために端部モジュールにて大きなモーメントが発生し、特に大きな風力差を生じる $\phi=45$ 度時の $C_{My_max}(\phi)$ が $\phi=180$ 度時の値に比べて大きくなる。一方、多くのモジュールを載せるスパンが長い架台の場合には、面平均の影響で風力が小さくなり、 $\phi=45$ 度と 180 度では $C_{My_max}(\phi)$ においてあまり差がなくなるものと考えられる。

次に $C_{My_min}(\phi)$ である。まず架台の大きさに関わらず、 $|C_{My_min}(\phi)|$ は $|C_{My_max}(\phi)|$ より小さい。 $C_{My_min}(\phi)$ の風向変化は遮光率・モジュール勾配に関わらず同様であり、 $\phi=180$ 度付近で、モジュール高勾配側をモジュール表面から押す力（downforce）が働き、大きなモーメントが生じる。ただ $C_{My_min}(\phi)$ を生じるモジュールの位置がモジュール勾配 θ により異なる。 $\theta=10$ 度の場合は最南端列に位置するモジュールで発生するが、 $\theta=30$ 度の場合はその一列北側のモジュールで発生し、これは比較的スパンが短い架台の場合に顕著にみられる（付録 E）。これは $\theta=30$ 度の場合、最南端モジュールにおいて x 軸方向に並ぶ 2 列の測定孔における C_{f_mean} の差が大きいためである。いずれの C_{f_mean} も正であるが、より南側の測定孔では倍近く大きい C_{f_mean} を記録する（図 4-1～図 4-3 参照）。よって正方向の C_{My} が発生しやすくなっていると考えられる（＝最南端のモジュールで大きな負の C_{My} は発生しにくい）。一方、 $\theta=10$ 度における最南端列や、 $\theta=30$ 度の最南端以外の列では 2 列の測定孔における C_{f_mean} の差があまりなく、正・負いずれの C_{My} も発生しうるため、 C_{My_min} も最南端に位置するモジュールで発生しうると思われる。また比較的スパンが短い架台の場合、 $\theta=30$ 度・ $\beta=70\%$ では、他に比べて大きな $C_{My_min}(\theta)$ を発生させている。これらは前述したように南から 2 列目以降のモジュールで発生している。これらのモジュールにおける圧力測定孔における風力係数の最大値 C_{f_max} を見てみると（図 4-3 における青四角部分）、 $\theta=30$ 度・ $\beta=70\%$ の場合のみ、同じモジュールにおいて北側に位置する圧力測定孔の方が、南側に位置する測定孔よりも大きな C_{f_max} を生じており、これが大きな $C_{My_min}(\phi)$ を生み出している。これは $\beta=35\%$ に比べて $\beta=70\%$ では、モジュール裏面の風上端部で剥離した渦が明確でないため、裏面に作用する負圧が小さくなり、そしてモジュール勾配が大きいことから、流れが当たるモジュール表面の北側ではより大きな正圧が作用するためであると考えられる。一方、スパンが長い架台の場合の $C_{My_min}(\phi)$ ではスパンが短い架台の場合に比べて風向による変化が乏しい。パラメータに関わらず $C_{My_min}(\phi)$ の風向変化がなくなるのは、 $\phi=180$ 度時には局所的に最南端モジュールにおいてのみ大きな正の C_{f_mean} が生じていたが（図 4-1～図 4-3 参照）、面平均をとると値自体が小さくなり風向の変化がなくなるためであると思われる。そしてパラメータの違いによる $C_{My_min}(\phi)$ の値の違いは単に C_{f_mean} の大きさの違いであると思われる。

また参考のために各モジュール・アレイにおける最もクリティカルな平均
 $\max(C_{My_mean}(\phi)), \min(C_{My_mean}(\phi))$ も図 6-4 に示す。

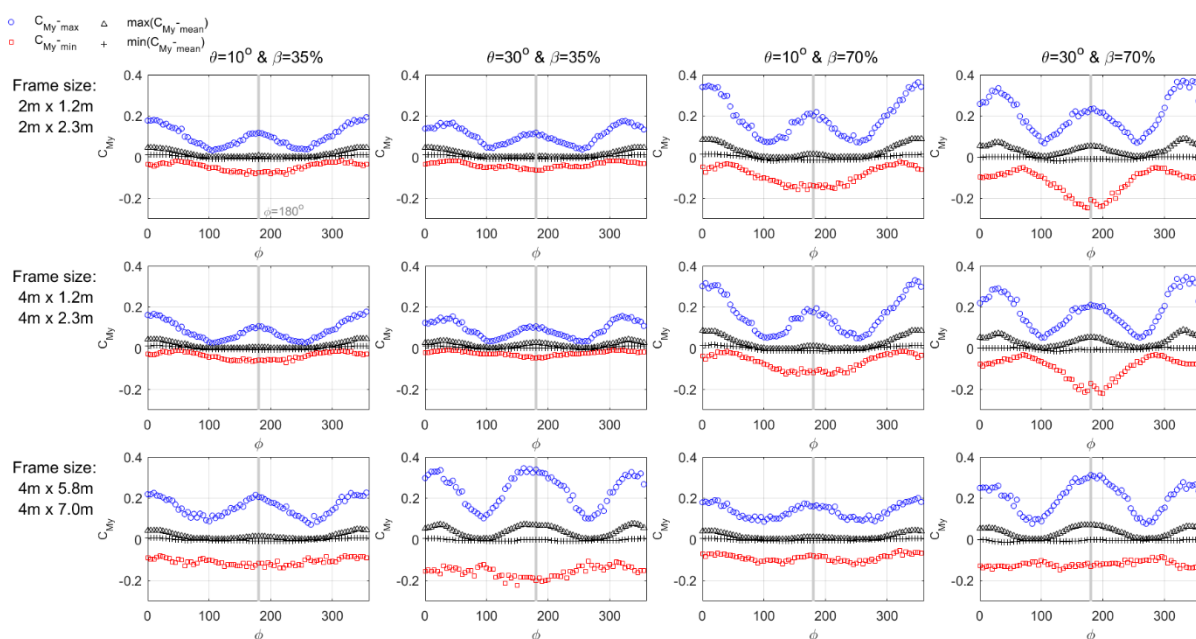


図 6-4 モジュール・アレイに作用する $G_{My_max}(\phi)$, $G_{My_min}(\phi)$, $\max(G_{My_mean}(\phi))$, $\min(G_{My_mean}(\phi))$ の風向変化

7. 設計用風力係数の算定

7.1 設計値算定手法の選定

柱に作用する軸力・水平力を指標とし、モジュール・アレイに作用する風力係数 C_a 、モーメント係数 C_{Mx} , C_{My} を用いて設計用風力係数の算定を試みる。

モジュール 1, 2, 6 枚分のアレイが設置されて 4 隅において柱に支えられている架台（遮光率 $\beta=35\%$ の場合はスパン間隔 2 m × 2.3 m、4 m × 2.3 m、4 m × 7.0 m、遮光率 $\beta=70\%$ の場合はスパン間隔 2 m × 1.2 m、4 m × 1.2 m、4 m × 5.8 m）を仮定した場合に（モジュール 6 枚の場合は図 6-1）、柱に作用する軸力 N と水平力 H とした場合、これらを速度圧 q とモジュールを地面に投影した面積(=1×1.6×cos(θ))で基準化した軸力係数 C_N と水平力係数 C_H を C_a , C_{Mx} , C_{My} から求める計算式は以下の通りである。

$$\text{柱位置①} \quad C_N = 0.25C_a + 0.5C_{Mx} + 0.5C_{My} \quad \dots\dots\dots(7.1)$$

$$\text{柱位置②} \quad C_N = 0.25C_a - 0.5C_{Mx} + 0.5C_{My} \quad \dots\dots\dots(7.2)$$

$$\text{柱位置③} \quad C_N = 0.25C_a + 0.5C_{Mx} - 0.5C_{My} \quad \dots\dots\dots(7.3)$$

$$\text{柱位置④} \quad C_N = 0.25C_a - 0.5C_{Mx} - 0.5C_{My} \quad \dots\dots\dots(7.4)$$

$$\text{柱位置①} \quad C_H = -\tan(\alpha) \times (0.25C_a + 0.5C_{Mx} + 0.5C_{My}) \quad \dots\dots\dots(7.5)$$

$$\text{柱位置②} \quad C_H = -\tan(\alpha) \times (0.25C_a - 0.5C_{Mx} + 0.5C_{My}) \quad \dots\dots\dots(7.6)$$

$$\text{柱位置③} \quad C_H = -\tan(\alpha) \times (0.25C_a + 0.5C_{Mx} - 0.5C_{My}) \quad \dots\dots\dots(7.7)$$

$$\text{柱位置④} \quad C_H = -\tan(\alpha) \times (0.25C_a - 0.5C_{Mx} - 0.5C_{My}) \quad \dots\dots\dots(7.8)$$

ここでは C_N は圧縮方向に作用する場合を、そして C_H は北から南に作用する場合を正としている。式から明らかなように C_N と C_H は比例関係にあるため、 C_N を最大・最小化する C_a , C_{Mx} , C_{My} の組み合わせは C_H を最小・最大化する C_a , C_{Mx} , C_{My} の組み合わせと同じになる。よって以降の検討は C_N に着目して行う。

独立上屋の設計用風力係数の提案手法に倣って、 C_a , C_{Mx} , C_{My} のピーク値（最大値 $\hat{C}_a$, $\hat{C}_{Mx}$, $\hat{C}_{My}$ 、最小値 $\check{C}_a$, $\check{C}_{Mx}$, $\check{C}_{My}$ ）とこれらが発生する瞬間における他の係数値（例えば $\hat{C}_a$ が発生した瞬間における C_{Mx} , C_{My} 、ピーク対応値と称する）を用いて計算することが可能かどうかを検討した。後に示すが、 C_N と C_H に対して C_L が最も支配的であることが分かっているため、ここでは $\hat{C}_a$, $\check{C}_a$ とこのピーク対応値の関係に関して考察する。

表 7-1 には $\hat{C}_a$, $\check{C}_a$ とそれらが発生した架台位置・風向、そしてこれらのピーク対応値($\hat{C}_{a_Mx}$, $\hat{C}_{a_My}$, $\check{C}_{a_Mx}$, $\check{C}_{a_My}$)を示す。加えて、ピーク対応値と、 $\hat{C}_{Mx}$, $\hat{C}_{My}$, $\check{C}_{Mx}$, $\check{C}_{My}$ の比率を計算した。例えば $\hat{C}_{a_Mx}$ の場合、 $\hat{C}_{a_Mx}$, $\hat{C}_{a_My}$ と、この $\hat{C}_a$ 発生時の架台位置における全風向中の C_{Mx} のピーク値 ($\hat{C}_{L_Mx}$ が正である場合は最大値、負である場合は最小値)との割合を計算し、表中に示した (E 列の値)。同様に、 $\hat{C}_a$ 発生時の架台位置・風向における C_{Mx} のピーク値との割合を計算し、表中に示した (H 列の値)。そしてこの割合が 80%を超える場合には赤字で示してある。 C_{Mx} に比べると C_a と C_{My} に比較的強い相関がみられる。 C_a と C_{My} の強い相

関は同じ架台位置・風向の場合（H 列の値）の場合に発生しており、架台位置が同じでも風向が異なると（E 列の値）相関は小さくなる。大きな架台に関してはその相関はさらに下がる。よって営農型 PV の場合、独立上屋の設計のように C_a , C_{Mx} , C_{My} の同時性を利用して設計値を求めることは適切ではないと考えられる。

表 7-1 C_a , C_{Mx} , C_{My} の関係

			モジュール勾配 θ		10		30		10		30	
			遮蔽率 β		35		35		70		70	
					max C_a	min C_a	max C_a	min C_a	max C_a	min C_a	max C_a	min C_a
架台寸法 2m x 1.2m/2m x 2.3m	対応する C_{Mx}		モジュール番号（架台位置）		54	2	53	5	54	3	51	2
		A	C_a 最大/最小値		2.18	-2.44	3.24	-3.29	2.15	-2.56	3.17	-2.80
		B	A を発生させた風向		180	355	175	10	170	345	185	345
		C	A 発生時の C_{Mx}		-0.05	0.03	0.04	-0.08	0.02	0.03	-0.01	0.12
		D	該当モジュールにおける全風向中でのピーク C_{Mx}		-0.14	0.14	0.15	-0.18	0.11	0.16	-0.16	0.20
		E	C/D		0.33	0.25	0.24	0.45	0.20	0.20	0.06	0.60
		F	D の発生風向		205	350	150	40	155	325	220	330
		G	該当モジュールにおける風向 B でのピーク C_{Mx}		-0.13	0.12	0.12	-0.18	0.09	0.14	-0.13	0.16
		H	C/G		0.38	0.27	0.30	0.45	0.25	0.22	0.07	0.72
	対応する C_{My}	I	A 発生時の C_{My}		0.11	0.17	0.09	0.11	0.16	0.27	0.21	0.26
		J	該当モジュールにおける全風向中でのピーク C_{My}		0.12	0.19	0.14	0.16	0.22	0.36	0.26	0.37
		K	I/J		0.93	0.91	0.69	0.64	0.72	0.73	0.83	0.69
		L	J の発生風向		180	355	20	45	185	350	10	330
		M	該当モジュールにおける風向 B でのピーク C_{My}		0.12	0.19	0.10	0.14	0.21	0.34	0.24	0.34
		N	I/M		0.93	0.91	0.90	0.77	0.75	0.79	0.91	0.74
架台寸法 4m x 1.2m/4m x 2.3m	対応する C_{Mx}		モジュール番号（架台位置）		81	55	81	57	81	56	79	57
		A	C_a 最大/最小値		2.05	-2.20	3.08	-3.08	2.04	-2.23	3.03	-2.66
		B	A を発生させた風向		180	355	175	25	165	350	195	325
		C	A 発生時の C_{Mx}		-0.01	0.04	0.03	-0.03	0.02	0.01	-0.02	0.05
		D	該当モジュールにおける全風向中でのピーク C_{Mx}		-0.23	0.20	0.22	-0.22	0.19	0.17	-0.31	0.21
		E	C/D		0.04	0.20	0.16	0.11	0.11	0.05	0.05	0.24
		F	D の発生風向		160	140	155	40	175	325	50	320
		G	該当モジュールにおける風向 B でのピーク C_{Mx}		-0.22	0.18	0.22	-0.22	0.16	0.17	-0.23	0.18
		H	C/G		0.04	0.22	0.16	0.12	0.13	0.05	0.07	0.27
	対応する C_{My}	I	A 発生時の C_{My}		0.10	0.15	0.09	0.12	0.14	0.29	0.16	0.18
		J	該当モジュールにおける全風向中でのピーク C_{My}		0.11	0.18	0.12	0.15	0.19	0.32	0.24	0.29
		K	I/J		0.94	0.83	0.76	0.76	0.71	0.89	0.66	0.63
		L	J の発生風向		180	355	35	45	185	350	5	30
		M	該当モジュールにおける風向 B でのピーク C_{My}		0.11	0.18	0.10	0.15	0.17	0.32	0.18	0.27
		N	I/M		0.94	0.83	0.90	0.80	0.82	0.89	0.86	0.68
架台寸法 4m x 5.8m/4m x 7.0m	対応する C_{Mx}		モジュール番号（架台位置）		90	83	90	82	90	84	88	82
		A	C_a 最大/最小値		1.25	-1.41	1.86	-2.07	1.06	-1.23	1.26	-1.58
		B	A を発生させた風向		165	355	170	40	165	345	155	25
		C	A 発生時の C_{Mx}		0.00	-0.01	0.04	-0.14	0.01	0.00	0.05	-0.07
		D	該当モジュールにおける全風向中でのピーク C_{Mx}		-0.12	-0.10	0.13	-0.23	0.08	0.09	0.17	-0.21
		E	C/D		0.03	0.12	0.34	0.64	0.16	0.00	0.31	0.35
		F	D の発生風向		160	40	175	50	155	345	115	25
		G	該当モジュールにおける風向 B でのピーク C_{Mx}		-0.09	-0.08	0.11	-0.22	0.06	0.09	0.15	-0.21
		H	C/G		0.04	0.14	0.37	0.65	0.19	0.00	0.36	0.35
	対応する C_{My}	I	A 発生時の C_{My}		0.10	0.12	0.18	0.09	0.13	0.12	0.24	0.11
		J	該当モジュールにおける全風向中でのピーク C_{My}		0.22	0.23	0.35	0.33	0.17	0.19	0.30	0.27
		K	I/J		0.45	0.53	0.51	0.29	0.74	0.63	0.79	0.40
		L	J の発生風向		175	10	160	335	165	340	185	350
		M	該当モジュールにおける風向 B でのピーク C_{My}		0.20	0.22	0.34	0.24	0.17	0.18	0.29	0.23
		N	I/M		0.50	0.54	0.52	0.39	0.74	0.65	0.80	0.46

考えられるピーク C_N の算定法としては、最も順当な方法である① C_a , C_{Mx} , C_{My} の時刻歴から式(7.1)-(7.4)を用いて C_N 時刻歴を求め、そこからピーク値 C_N を求める (☒ 手法 A)、② C_a , C_{Mx} , C_{My} のピーク値を式(7.1)-(7.4)に対して用いて C_N を求め、これをピーク値 C_N とする (手法 B ☒) ☒、が考えられる。そこでこれらの手法でピーク C_N を求めた。また設計値の簡易化の可能性を追求するために、手法 B にて C_{Mx} なし、 C_{My} なし、 C_{Mx} & C_{My} なし、でも計

算を行った。結果を図 7-1 図に示す。 C_a , C_{Mx} , C_{My} のピーク値を用いた場合（手法 B、○）は、手法 A の結果（-）を大きく上回っており、過大評価をしている。それに対し、手法 B の C_{Mx} なしの結果（×）は全ての場合に対して手法 A の結果と良く対応をしている。これは図 6-3 と図 6-4 にあるように C_{My} のピーク値の絶対値が C_{Mx} のそれよりも若干大きいためである。図 7-2 は手法 A でピーク C_N を求めた際の、 C_a , C_{Mx} , C_{My} 項のそれぞれのピーク C_N に対する寄与率を示したものである。これによると C_a の寄与が最も大きい。 C_{Mx} との差は大きくないが、次いで C_{My} の寄与が大きくなっている。この結果からも設計値の簡易化のために C_a と C_{My} を用いてピーク C_N を計算することが可能であると考えられる。

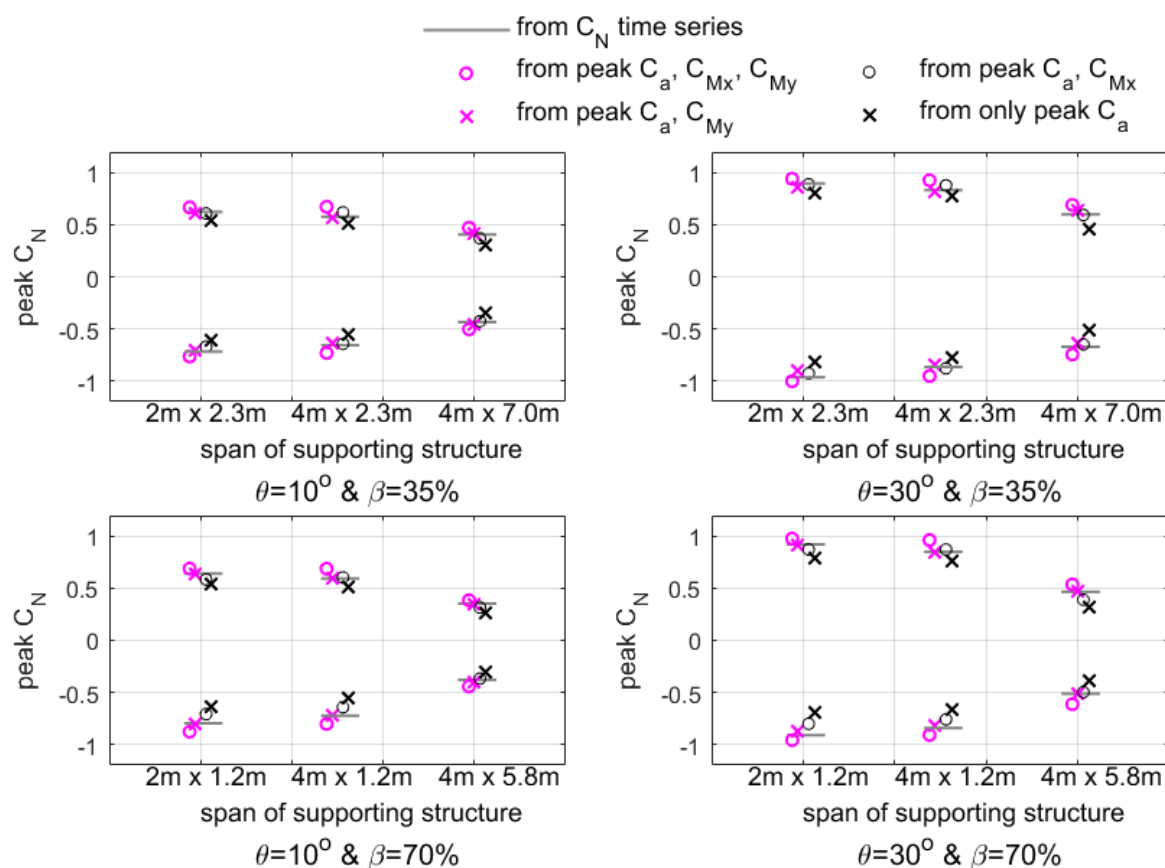


図 7-1 異なる手法で計算した架台を支える柱に作用するピーク柱軸力 G_N の比較

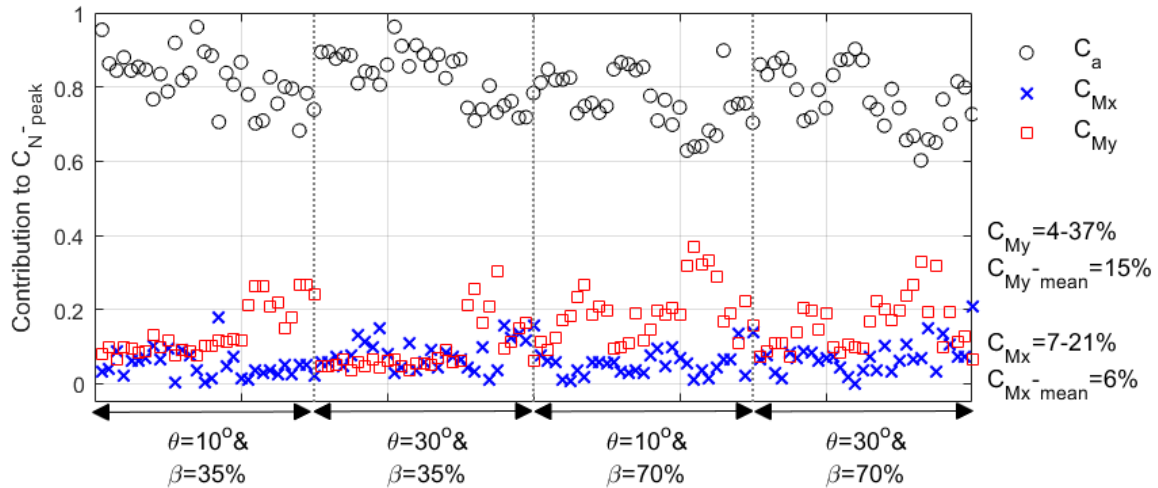


図 7-2 手法 A でピーク C_N を求めた際の、 C_a 、 C_{Mx} 、 C_{My} 項の寄与率

7.2 設計値の提案

提案する設計値はピーク C_N を生じさせる C_a と C_{My} である。これを求める手順を以下に示す。

- ①手法 A よりピーク C_N を架台位置に対して求め、アレイ全体における領域分けを検討する。
- ②各領域に該当する架台位置に対してピーク C_N を求め、それぞれの領域にて、該当する全架台・全風向中におけるピーク C_N を求める。
- ③②で求めたピーク C_N を生じさせる C_a と C_{My} を求める。
- ④遮光率・モジュール勾配などを考慮し、3 で求めた値を包含し、かつ簡素化できるような C_a と C_{My} を求め、これを提案する設計値とする。
- ⑤④で求めた C_a と C_{My} と以下の式を用いてピーク C_N 、 C_H を計算し、手法 A で求めたピーク C_N 、 C_H を上回るか確認する。

$$\text{最大柱軸力係数 } \hat{C}_N = 0.25 \hat{C}_a + 0.5 \hat{C}_{My} \quad \dots\dots\dots(7.9)$$

$$\text{最小柱軸力係数 } \check{C}_N = 0.25 \check{C}_a - 0.5 \check{C}_{My} \quad \dots\dots\dots(7.10)$$

$$\text{最大水平力係数 } \check{C}_N = -\tan(\theta) \times (0.25 \check{C}_a - 0.5 \check{C}_{My}) \quad \dots\dots\dots(7.11)$$

$$\text{最小水平力係数 } \hat{C}_N = -\tan(\theta) \times (0.25 \hat{C}_a + 0.5 \hat{C}_{My}) \quad \dots\dots\dots(7.12)$$

図 7-3～図 7-5 にモジュールが 1, 2, 6 (10)枚載った架台の柱に作用する最大・最小柱軸力係数 $\hat{C}_N$ 、 $\check{C}_N$ を手法 A で求めた結果を示す。モジュール内の数字は $\hat{C}_N$ 、 $\check{C}_N$ を発生させた風向を示す。この結果を見る限り、図 7-6 に示す領域ごとの値に有意差があるように見受けられるため、最南端列、最北端列、最東・西端列、その他（内部）の 4 領域それぞれにピーク C_N を振り分け、領域分けの適性を検討した。結果を図 7-7～図 7-9 に示す。これによると $\hat{C}_N$

($\check{C}_H$) に関しては①最南端列と最東・西端列、②それ以外(内部)、の2領域に、 $\check{C}_N$ ($\check{C}_H$) に関しては①最北端列と最東・西端列、②それ以外(内部)、の2領域に分けることが可能であると考えられる。以降、①の領域を端部領域、②の領域を内部領域と称す。

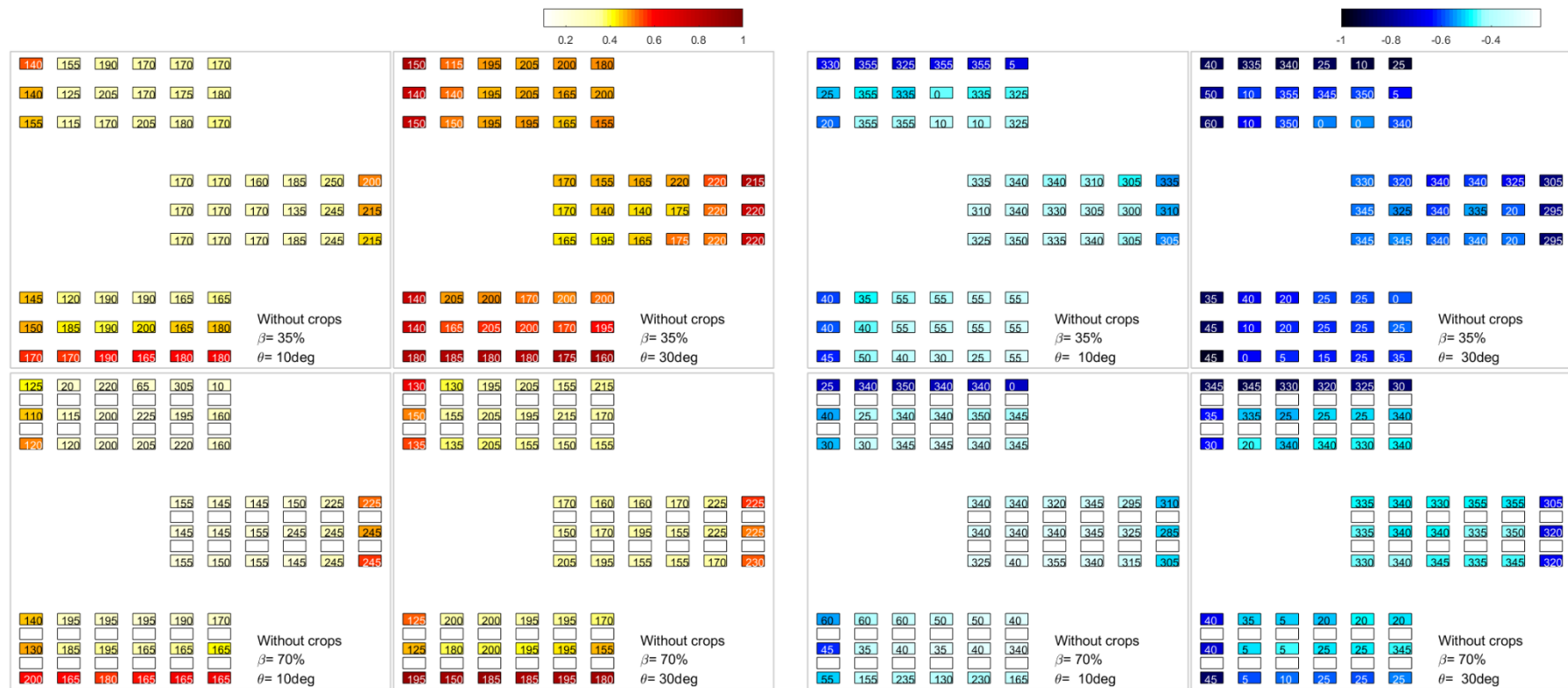


図 7-3 手法 A で計算した 2.0m x 2.3m ($\beta = 35\%$), 2.0m x 1.2m ($\beta = 70\%$) の架台を支える柱に作用する最大 $G_{\max}$ (左) と最小 $G_{\min}$ (右)

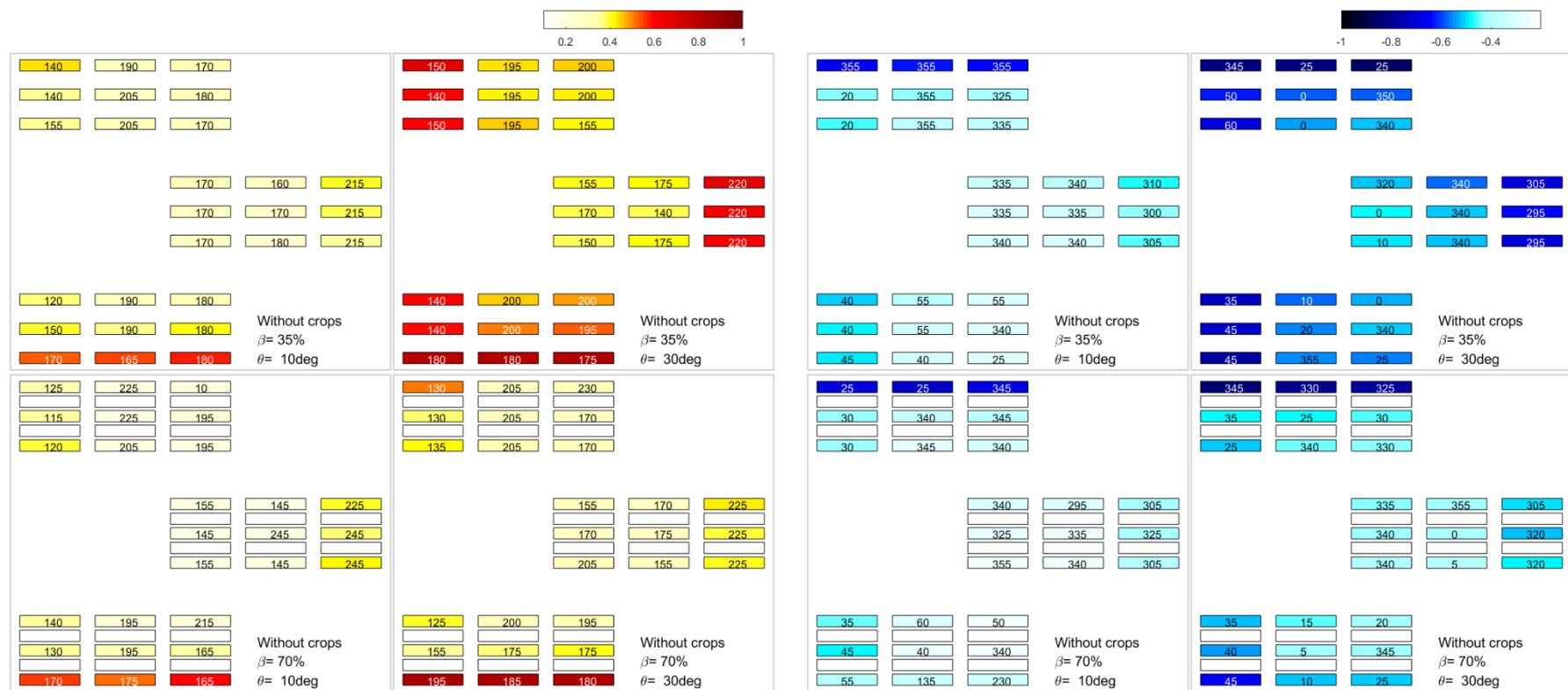


図 7-4 手法 A で計算した 4.0m x 2.3m ($\beta=35\%$), 4.0m x 1.2m ($\beta=70\%$) の架台を支える柱に作用する最大 G_k (左) と最小 G_k (右)

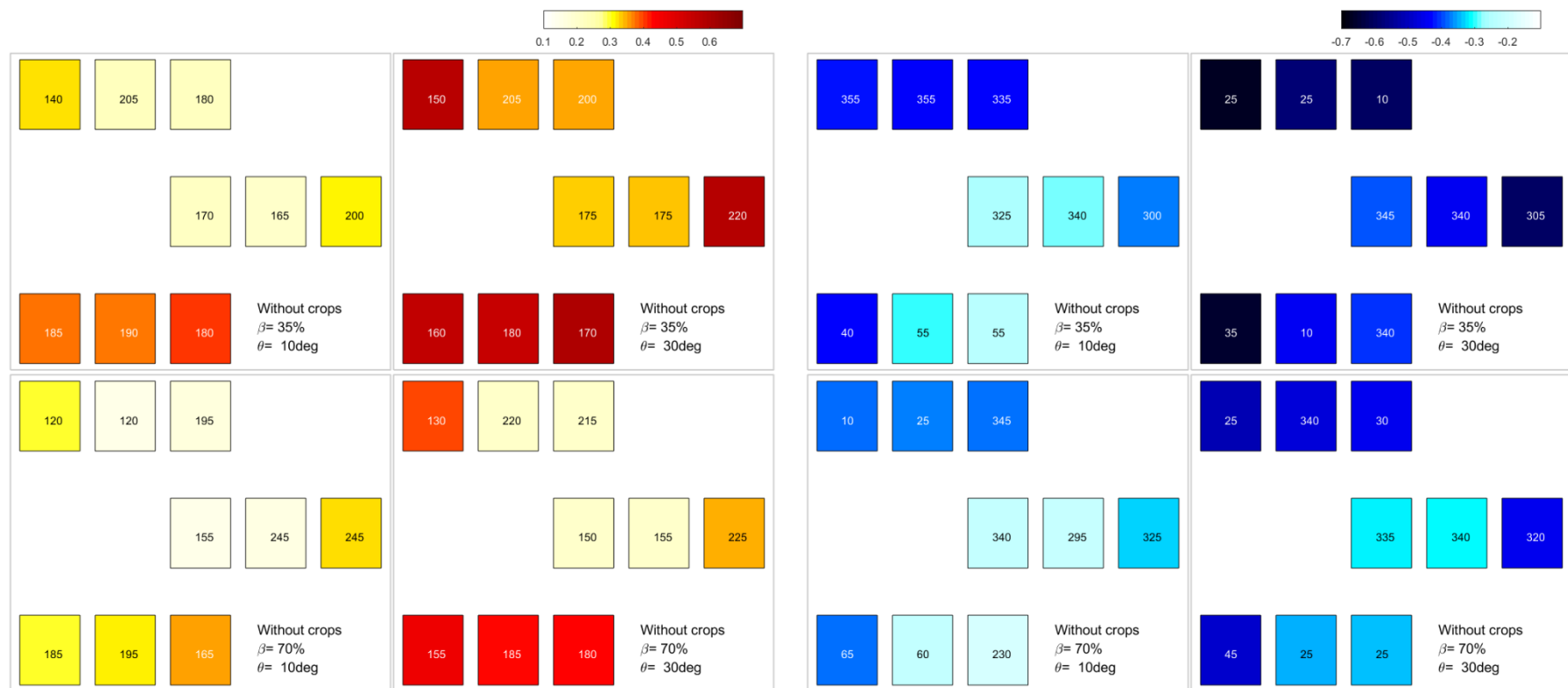
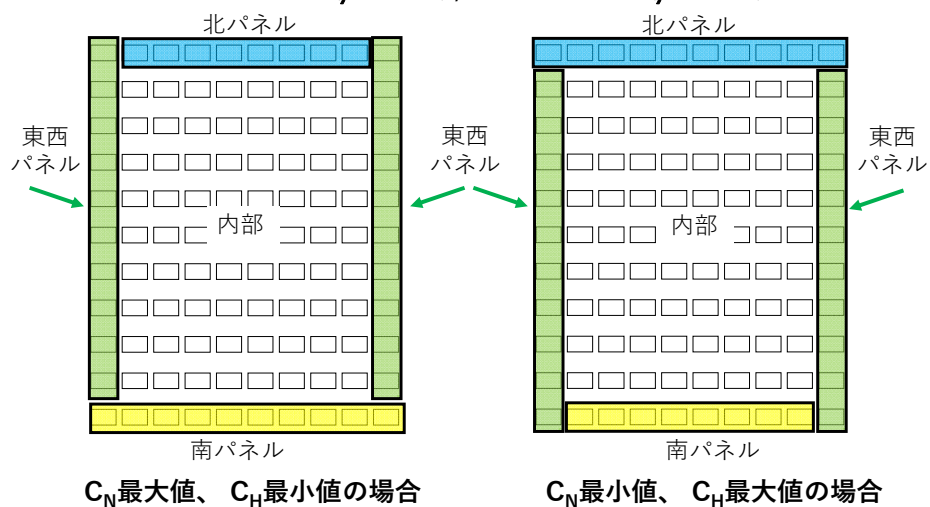
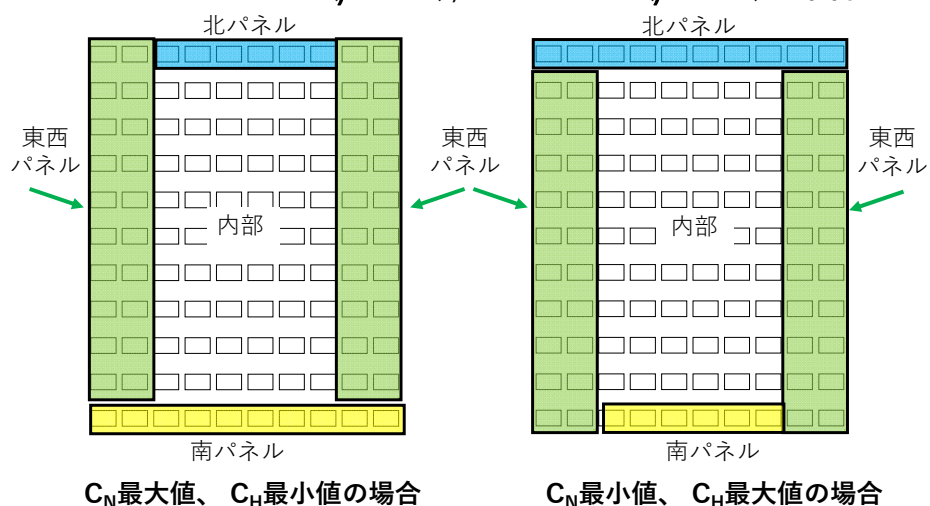


図 7-5 手法 A で計算した $4.0\text{m} \times 7.0\text{m}$ ($\beta=35\%$), $4.0\text{m} \times 5.8\text{m}$ ($\beta=70\%$) の架台を支える柱に作用する最大 G_k (左) と最小 G_k (右)

スパン2m x 2.32m ($\beta=35\%$), 2m x 1.16m ($\beta=70\%$)の架台



スパン4m x 2.32m ($\beta=35\%$), 4m x 1.16m ($\beta=70\%$)の架台



スパン4m x 6.96m ($\beta=35\%$), 4m x 5.8m ($\beta=70\%$)の架台

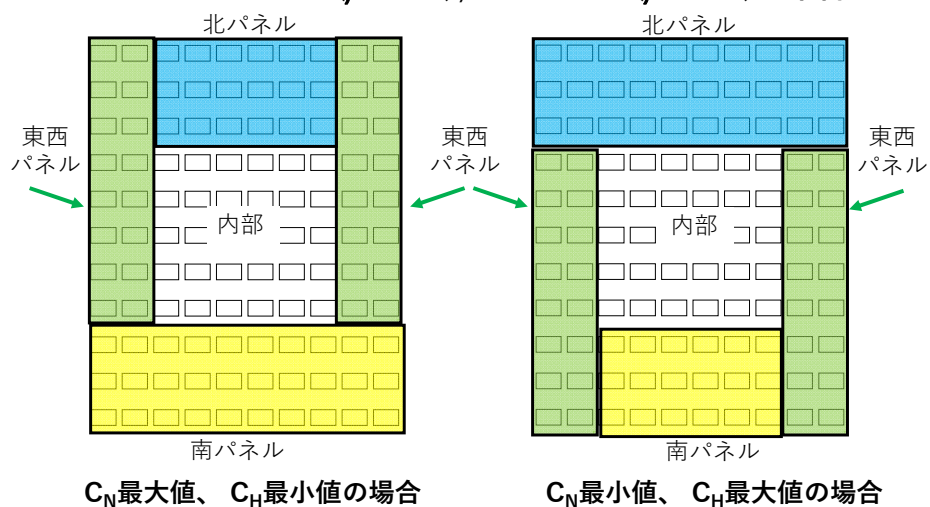


図 7-6 G_N と G_H の領域分け

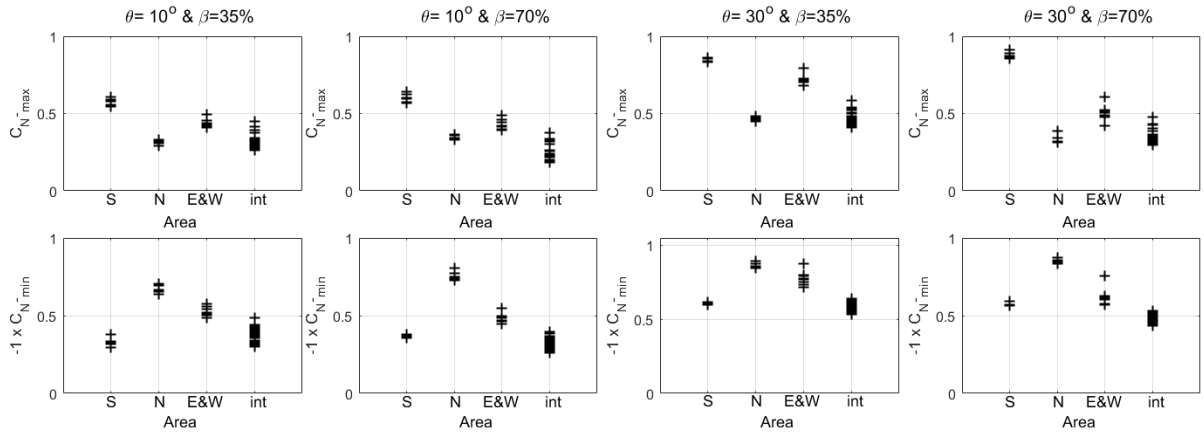


図 7-7 最大・最小 C_N (スパン $2.0\text{m} \times 2.3\text{m}$ ($\beta=35\%$), $2.0\text{m} \times 1.2\text{m}$ ($\beta=70\%$) の架台)

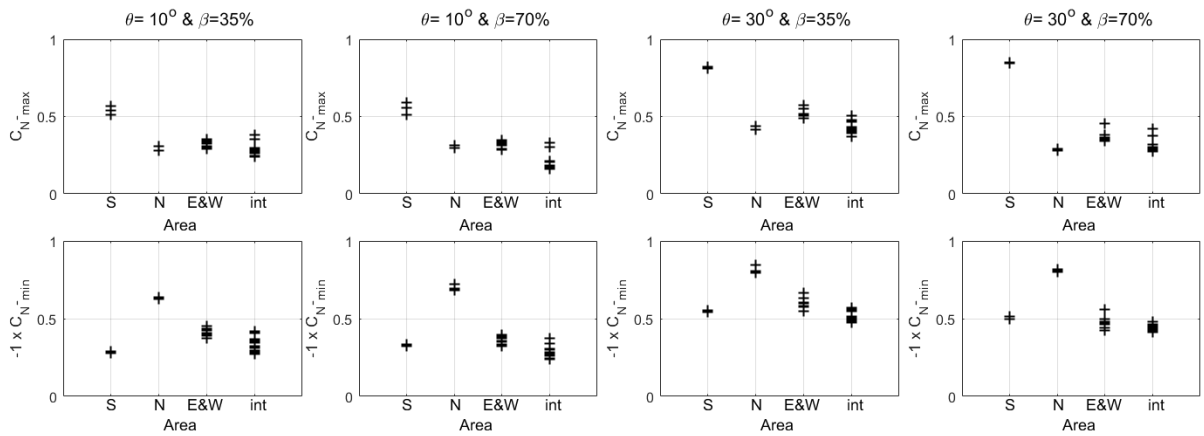


図 7-8 最大・最小 C_N (スパン $4.0\text{m} \times 2.3\text{m}$ ($\beta=35\%$), $4.0\text{m} \times 1.2\text{m}$ ($\beta=70\%$) の架台)

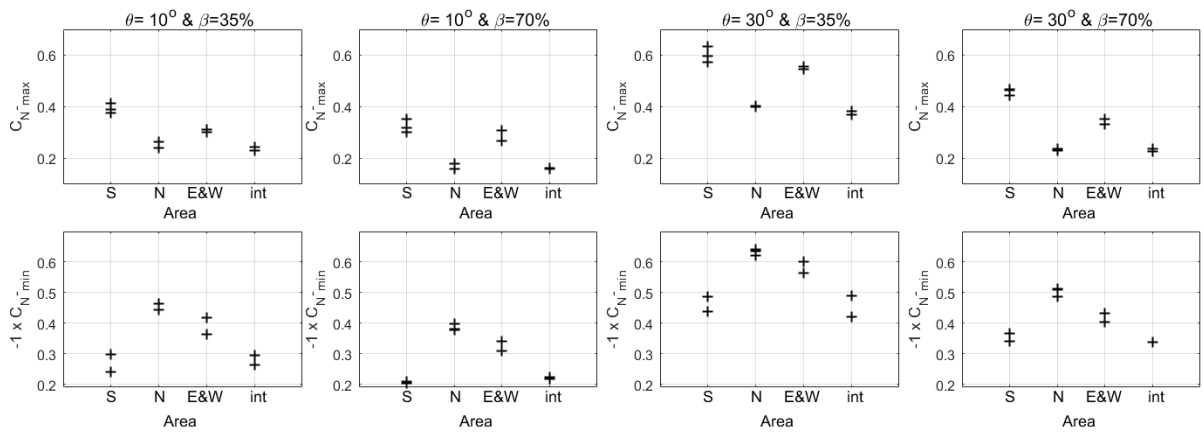


図 7-9 最大・最小 C_N (スパン $4.0\text{m} \times 7.0\text{m}$ ($\beta=35\%$), $4.0\text{m} \times 5.8\text{m}$ ($\beta=70\%$) の架台)

それぞれのモジュール勾配・遮光率・領域に対して、該当する全架台における最大・最小 C_N を生じさせる C_a , C_{My} を求めた (図 7-10)。遮光率・モジュール勾配に関わらず類似した値を示す場合がある。こういった場合は、同一の値を与え、かつ図 7-10 に示した C_a およ

び C_{My} に関する結果を適当に丸めた値として与えた設計値を表 7-2 に、それらの定義を図 7-11、図 7-12 に示す。

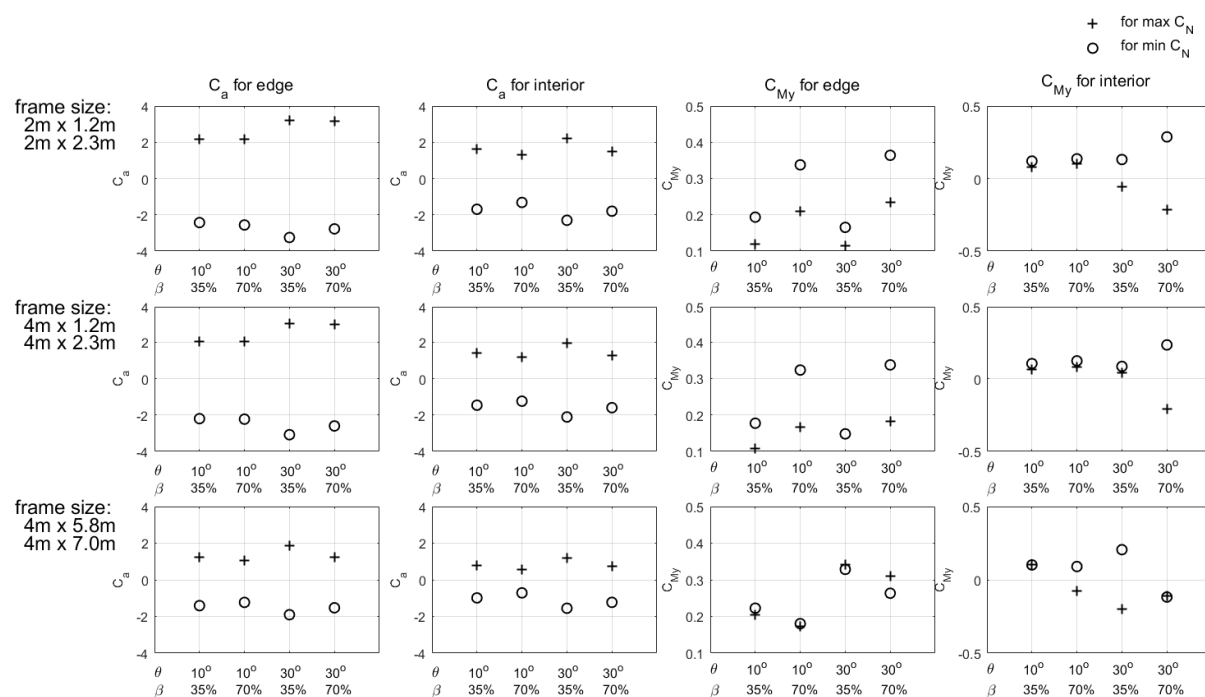
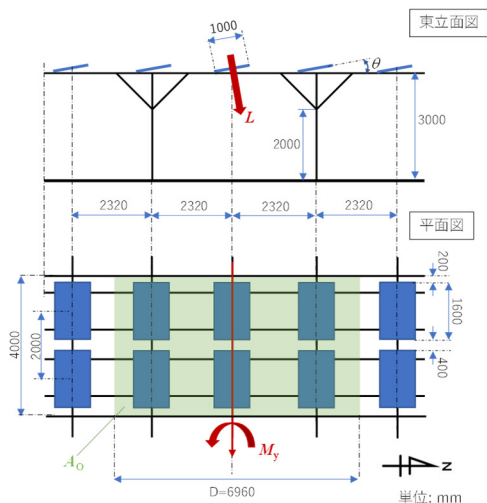


図 7-10 領域ごとの、 $\hat{C}_N$, $\check{C}_N$ を発生させる C_a , C_{My}

表 7-2 提案する設計用風力係数 C_a ・モーメント係数 C_{My}

モジュール勾配 θ		10	10	30	30	10	10	30	30
遮光率 β		35	70	35	70	35	70	35	70
	Frame size	端部領域・ C_N 最大				端部領域・ C_N 最小			
C_a	2m x 1.2m/ 2m x 2.3m	2.2		3.2		-2.5		-3.4	-2.9
	4m x 1.2m/ 4m x 2.3m	2.0		3.1		-2.3		-3.2	-2.7
	4m x 5.8m/ 4m x 7.0m	1.3	1.1	1.9	1.3	-1.4	-1.2	-2.0	-1.5
C_{My}	2m x 1.2m/ 2m x 2.3m	0.20			0.30	0.25	0.40	0.25	0.40
	4m x 1.2m/ 4m x 2.3m	0.20				0.20	0.35	0.20	0.35
	4m x 5.8m/ 4m x 7.0m	0.20		0.30		0.20		0.35	0.30
	Frame size	内部領域・ C_N 最大				内部領域・ C_N 最小			
C_a	2m x 1.2m/ 2m x 2.3m	1.7	1.3	2.3	1.5	-1.7	-1.3	-2.3	-1.8
	4m x 1.2m/ 4m x 2.3m	1.5	1.2	2.0	1.3	-1.5	-1.3	-2.2	-1.7
	4m x 5.8m/ 4m x 7.0m	0.8	0.6	1.3	0.7	-1.0	-0.7	-1.6	-1.2
C_{My}	2m x 1.2m/ 2m x 2.3m	0.10	0.20	0.10	0.20	0.20			0.30
	4m x 1.2m/ 4m x 2.3m	0.10			0.20	0.15		0.10	0.20
	4m x 5.8m/ 4m x 7.0m	0.10							



$$C_a = \frac{L}{q \times A} = \frac{L}{q \times A_o \times \beta}$$

$$= \frac{\frac{L}{A_o}}{\frac{q \times A_o \times \beta}{A_o}} = \frac{L}{q \times (1600 \times 1000 \times 6)} = \frac{L}{q \times (6960 \times 4000) \times 0.345}$$

$$C_{My} = \frac{M_y}{q \times D \times A} = \frac{M_y}{q \times D \times A_o \times \beta}$$

$$= \frac{\frac{M_y}{A_o}}{\frac{q \times D \times A_o \times \beta}{A_o}} = \frac{M_y}{q \times 6960 \times (1600 \times 1000 \times 6)} = \frac{M_y}{q \times 6960 \times (6960 \times 4000) \times 0.345}$$

ここで

L : 架台に作用する揚力

q : 設計用速度圧

β : 遮光率

A_o : 外郭面積

A : モジュールを水平においた場合の、架台におけるモジュール全面積

M_y : 架台に作用する y 軸周りのモーメント

D : M_y を計算するモーメント距離

モジュール1枚が設置された2m x 2.32m架台の場合:

$D=2320$

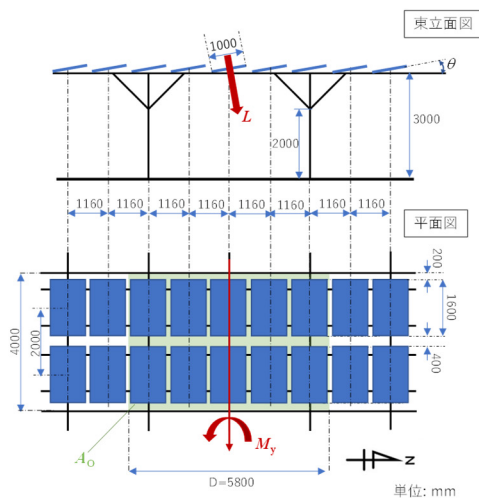
$A=1600 \times 1000$

モジュール2枚が設置された4m x 2.32m架台の場合:

$D=2320$

$A=1600 \times 1000 \times 2$

図 7-11 表 7-2 に示す設計値 C_a , C_{My} の算定方法
($\beta=35\%$ ・モジュールが6枚載る4.0m x 7.0m 架台)



$$C_a = \frac{L}{q \times A} = \frac{L}{q \times A_o \times \beta}$$

$$= \frac{\frac{L}{A_o}}{\frac{q \times A_o \times \beta}{A_o}} = \frac{L}{q \times (1600 \times 1000 \times 10)} = \frac{L}{q \times (5800 \times 4000) \times 0.690}$$

$$C_{My} = \frac{M_y}{q \times D \times A} = \frac{M_y}{q \times D \times A_o \times \beta}$$

$$= \frac{\frac{M_y}{A_o}}{\frac{q \times D \times A_o \times \beta}{A_o}} = \frac{M_y}{q \times 5800 \times (1600 \times 1000 \times 10)} = \frac{M_y}{q \times 5800 \times (5800 \times 4000) \times 0.690}$$

ここで

L : 架台に作用する揚力

q : 設計用速度圧

β : 遮光率

A_o : 外郭面積

A : モジュールを水平においた場合の、架台におけるモジュール全面積

M_y : 架台に作用する y 軸周りのモーメント

D : M_y を計算するモーメント距離

モジュール1枚が設置された2m x 1.16m架台の場合:

$D=1160$

$A=1600 \times 1000$

モジュール2枚が設置された4m x 1.16m架台の場合:

$D=1160$

$A=1600 \times 1000 \times 2$

図 7-12 表 7-2 に示す設計値 C_a , C_{My} の算定方法
($\beta=70\%$ ・モジュールが6枚載る4.0m x 5.8m 架台)

表 7-2 に示す設計値の妥当性を確認するため、手法 A から求めた $\hat{C}_N$, $\check{C}_N$ (—) と、手法 B により求めた $\hat{C}_N$, $\check{C}_N$ (●)、今回提案した C_a , C_{My} を用いて求めた $\hat{C}_N$, $\check{C}_N$ (✕) を比較し、提案値の妥当性を評価した。比較結果を図 7-13、図 7-14 に示す。架台が大きい場合、提案値から求めたピーク C_N が手法 A の値を過大評価する可能性があるが、手法 B により求めたピーク

ーク C_N に比べて手法 A の値にかなり近い値を取っており、適切に C_a , C_{My} が設定できていると思われる。

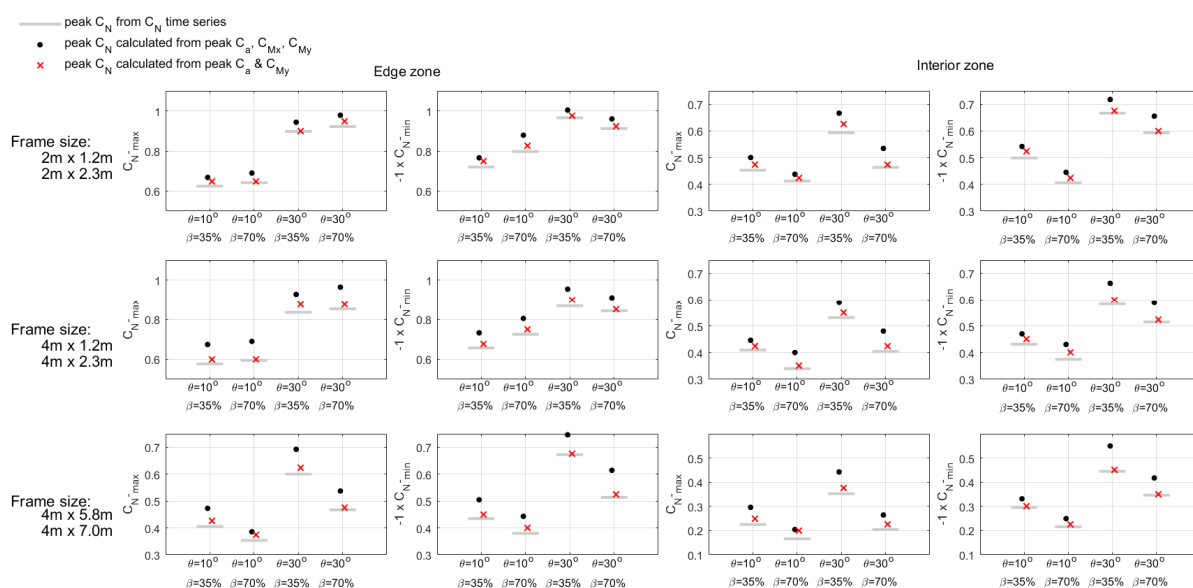


図 7-13 提案する設計値で求めたフレームを支える柱に作用するピーク C_N と異なる手法で計算したピーク C_N の比較

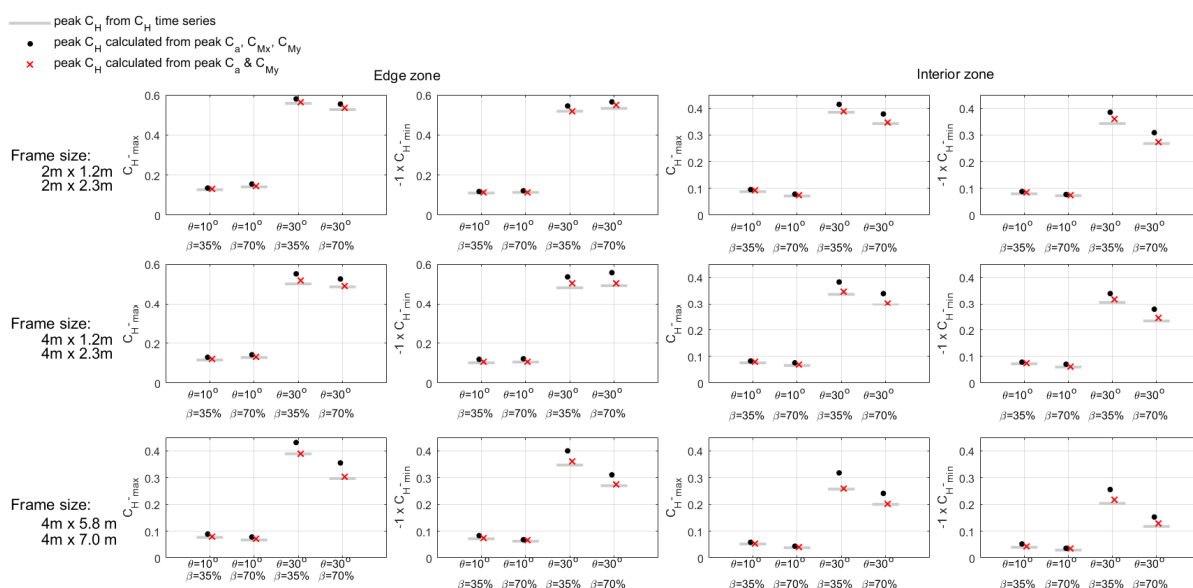


図 7-14 提案する設計値で求めたフレームを支える柱に作用するピーク C_H と異なる手法で計算したピーク C_H の比較

7.3 提案設計値に対する線形補間適用の可能性

表 7-2 に示す設計値は特定の遮光率・モジュール勾配・架台寸法に対する値である。よって他のパラメータに対する設計値を求めるために対象面積に対する線形補間が可能であるかどうかを検討した。ASCE7-22 では図 7-15 に示すように設計用風力係数とモーメント係数を対象面積に応じて提示しており、面積 0.93m^2 以下、 460m^2 以上では一定値を与えている。これらと同様の図を今回求めた C_a , C_{My} を用いて作成した（エラー！参照元が見つかりません。6）。

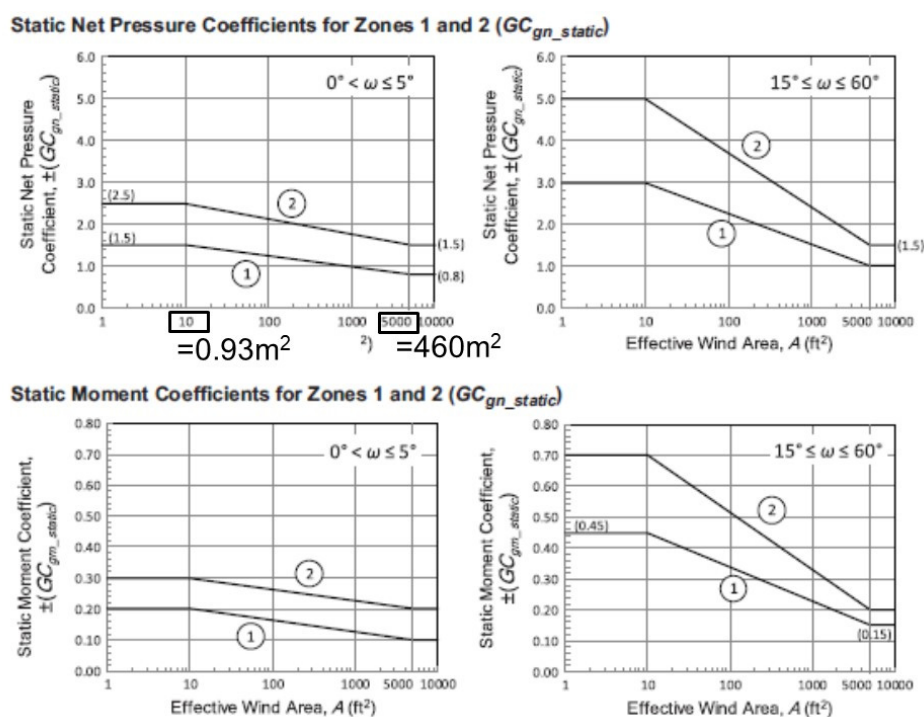


図 7-15 ASCE7-22 における設計用風力係数とモーメント係数

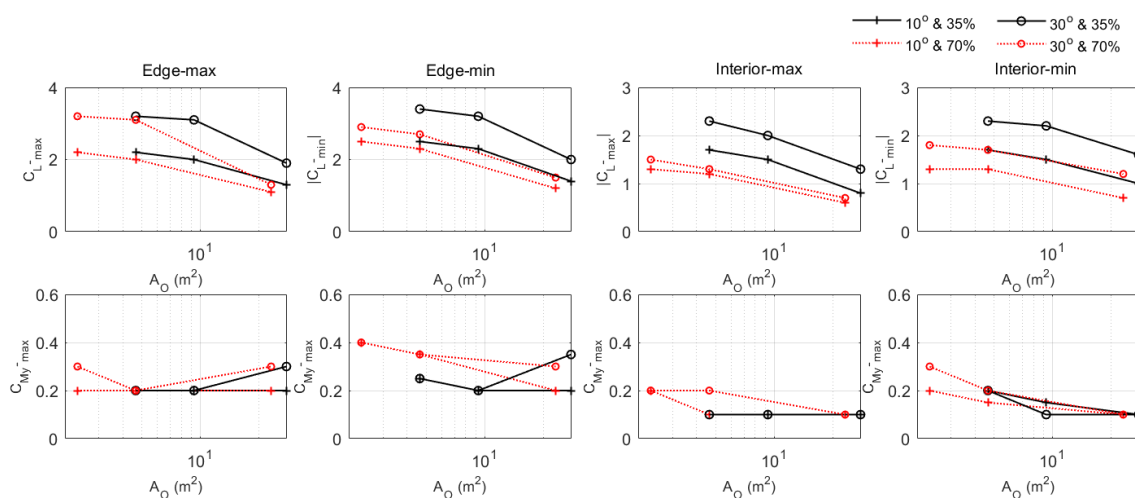


図 7-16 設計値 C_a , C_{My} と外郭面積 A_o の関係

7.4 本設計値の適用範囲

ASCE7-22 (2022)、AS/NZS1170.2 (2021)では地上設置型 PV の設計値を提示しており、その適応範囲が以下のように示されている。

ASCE7-22 :

- (a) $1.8\text{m} \leq L_c \leq 4.4\text{m}$
- (b) $W_g/L_c \geq 7$
- (c) $0^\circ \leq \omega \leq 60^\circ$
- (d) $0.5 \leq h/L_c \leq 0.8$
- (e) $0.20 \leq L_c/S \leq 0.60$
- (f) $s_p \leq 0.014 L_c$
- (g) $S_L \leq 0.25 L_c$
- (h) $S_T \leq 2S$
- (i) モジュール列数 ≥ 3

AS/NZS1170.2 :

- (a) $2 \leq d/h \leq 5$ and $b/d \geq 2$
- (b) $\alpha \leq 30^\circ$
- (c) $3.5 \leq s/h \leq 10$
- (d) $c/h \geq 0.2$

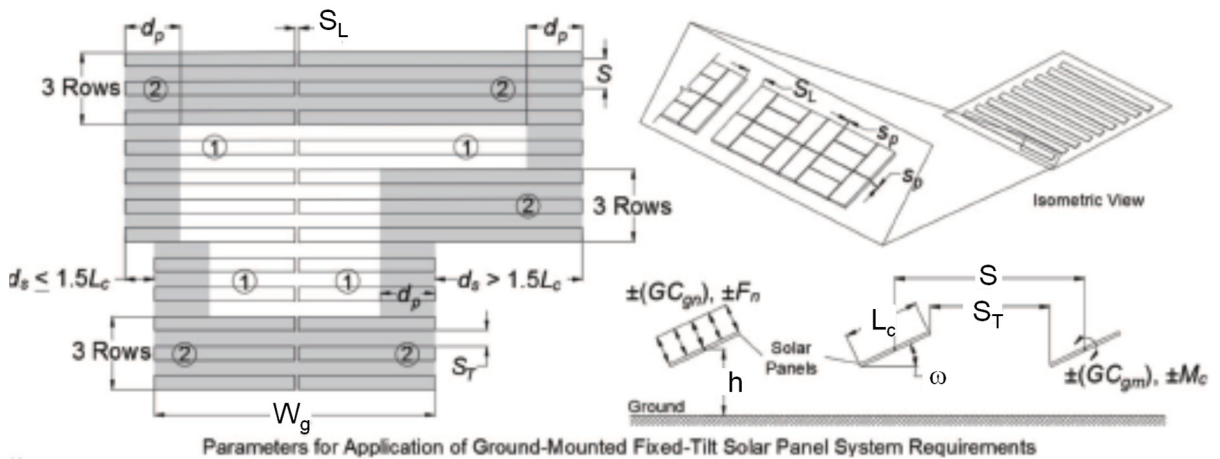


図 7-17 ASCE7-22 における、地上設置型 PV 設計値適用のために規定されているパラメータ

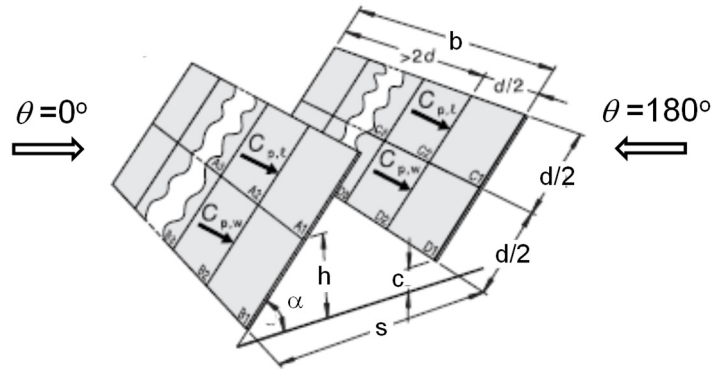


図 7-18 AS/NZS1170.2 における、地上設置型 PV 設計値適用のために規定されているパラメータ

これらのパラメータは実験結果に基づき、地上設置型 PV に作用する風力に影響を与えると考えられるものであり、パラメータの範囲の多くは設計値の基となった実験で用いたパラメータ範囲である。これらのパラメータを今回行った実験に当てはめると以下になる。パラメータがこれらの範囲を外れる営農型 PV とその架台の設計に対して、今回提案する設計値を適用する場合は十分に注意されたい。

ASCE7-22 でのパラメータに適用した場合：

- (a) $L_c = 1\text{m}$
- (b) $W_g/L_c = 20$
- (c) $10^\circ \leq \omega \leq 30^\circ$
- (d) $3.0 \leq h/L_c \leq 3.3$
- (e) $0.43 \leq L_c/S \leq 0.86$
- (f) $s_p = 0.4\text{m} = 0.4 L_c$
- (g) $s_L = 0.4\text{m} = 0.4 L_c$
- (h) $S_T = 1808, 1867 = 0.79-0.81 S (\beta=35\%)$
 $S_T = 668, 727 = 0.58-0.63 S (\beta=70\%)$
- (i) モジュール列数 = 14

AS/NZS1170.2 でのパラメータに適用した場合：

- (a) $0.31 \leq d/h \leq 0.32$ and $b/d = 20$
- (b) $\alpha \leq 30^\circ$
- (c) $0.36 \leq s/h \leq 0.75$
- (d) $0.92 \leq c/h \leq 0.97$

参考文献

- 1) Kopp, G.A., Farquhar, S., Morrison, M.J. (2012). Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted, solar arrays. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 111, p40-52.
- 2) Jubayer, C.M., Hangan, H. (2016). A numerical approach to the investigation of wind loading on an array of ground mounted solar photovoltaic (PV) panels. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 153, p60-70.
- 3) 高森ら(2013) 地上設置形太陽電池パネルの設計用風力係数(その1:風洞実験概要および単独パネルの風力係数)、AIJ 大会梗概集.
- 4) Browne et al. (2020). A wind load design method for ground-mounted multi-row solar arrays based on a compilation of wind tunnel experiments. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 205,104294.
- 5) Cook, N.J. Mayne, J.R. (1979). A novel working approach to the assessment of wind loads for equivalent static design. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 4(2),149-164.
- 6) Ginger et al. (2019). Wind loads on ground mounted solar panels. Research Report TR#64. Cyclone Testing Station, James Cook University.
- 7) Holmes, J.D., Allsop, A.C., Ginger, J.D. (2014). Gust durations, gust factors and gust response factors in wind codes and standards, Wind and Structures, 19(3), 339-352.
- 8) Stroble, K., Banks, D. (2014). Effects of vortex shedding in arrays of long inclined flat plates and ramifications for ground-mounted photovoltaic arrays. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 133, p146-149.

付録 A 特定の風向時の圧力測定孔における平均風圧係数統計値の変化

以下の図において x とは北側アレイ端部からの南北方向の距離を指す。

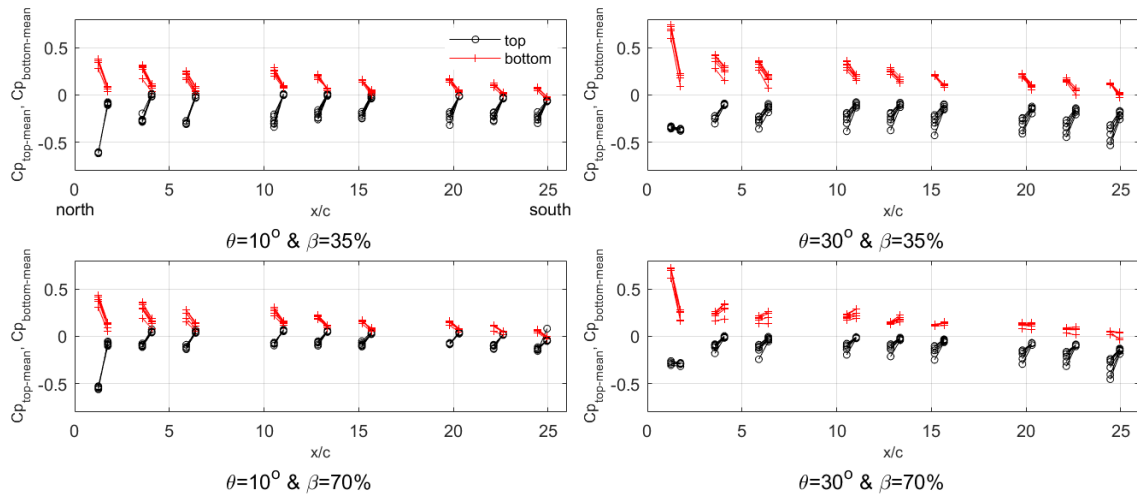


図 A-1 上下面圧力測定孔における平均風圧係数統計値の変化 ($\phi = 0$ 度)

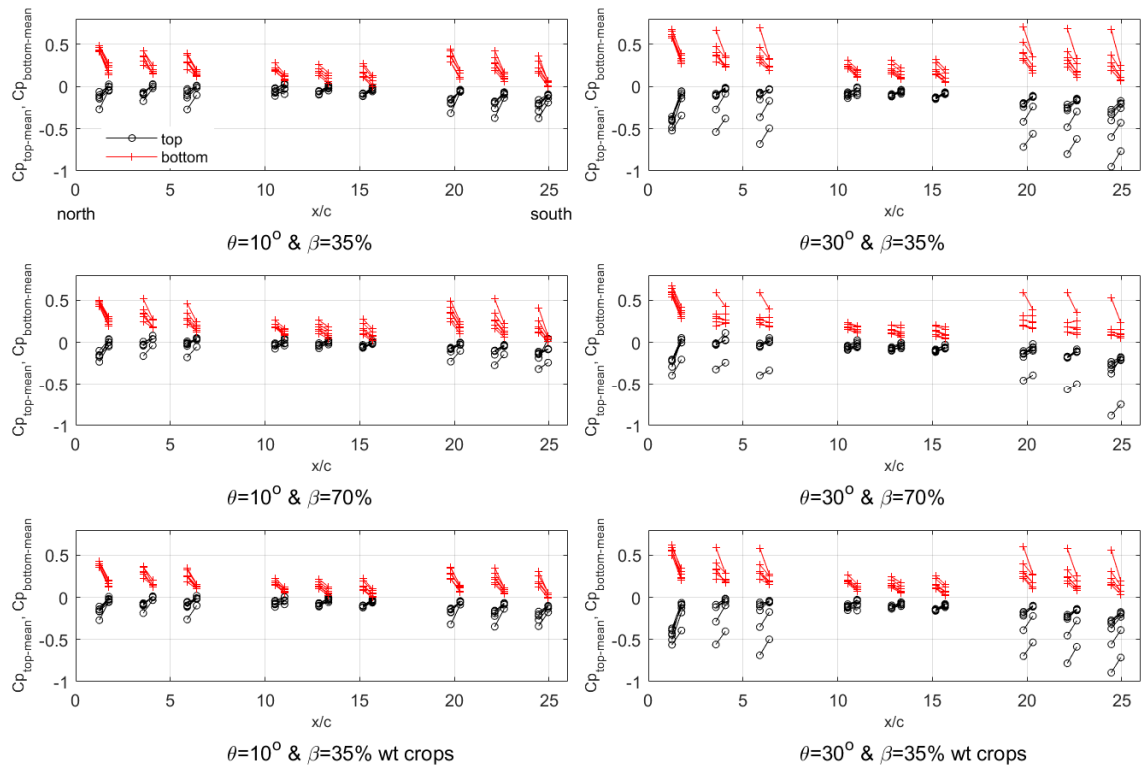


図 A-2 上下面圧力測定孔における平均風圧係数統計値の変化 ($\phi = 45$ 度)

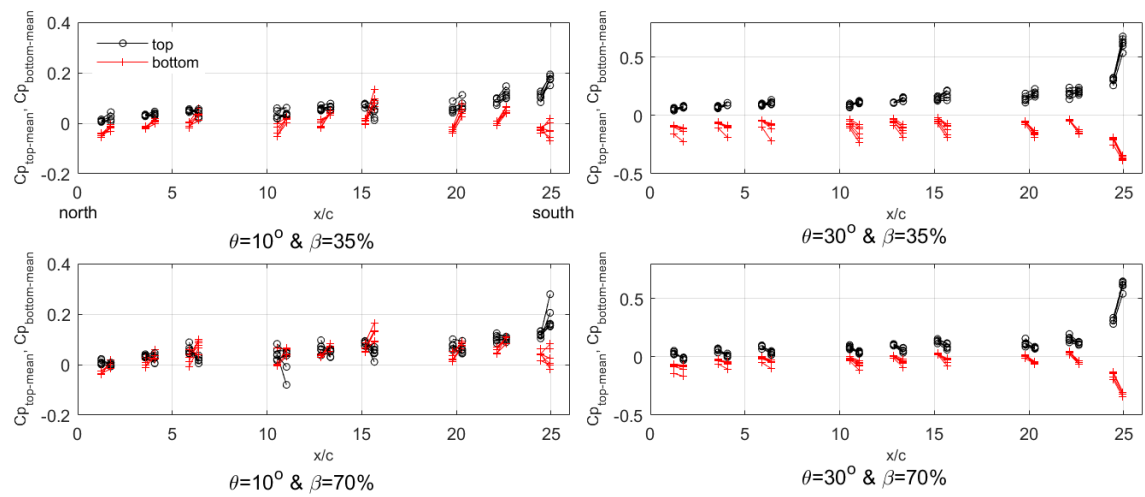


図 A-1 上下面圧力測定孔における平均風圧係数統計値の変化 ($\phi = 180$ 度)

付録 B 全風向中の圧力測定孔における最大・最小風力係数コンター図

図にはモジュール位置が長方形で示されている。遮光率 70%の場合、ダミー模型も同様に図示されているが、ダミー模型に作用する風力は考慮しないでコンター図を作成している。

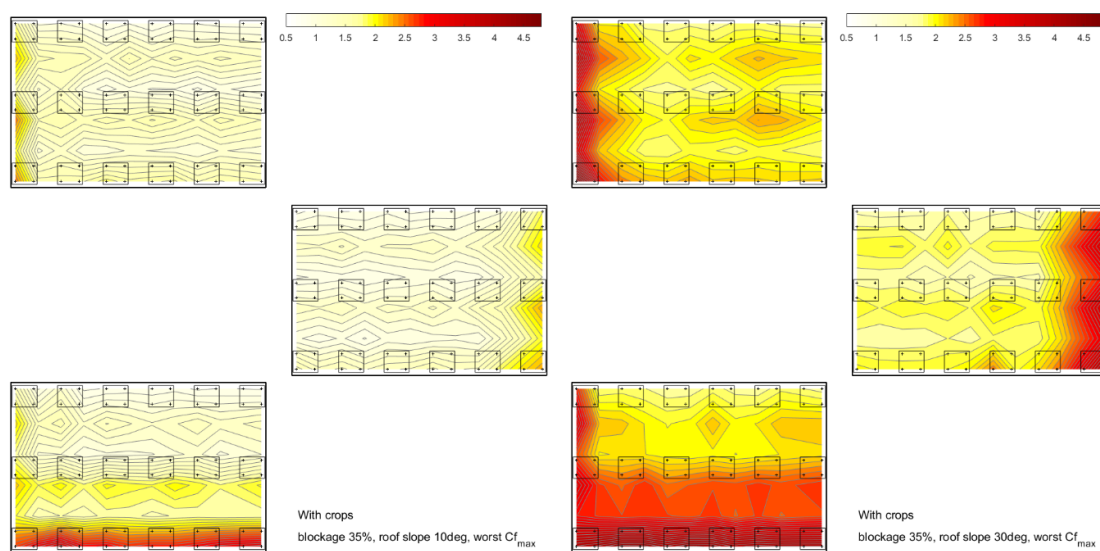


図 B-1 農作物有り・ $\beta=35\%$ の各圧力測定孔における $C_{a_{max}}$ のコンター図
(左: $\theta=10$ 度、右: $\theta=30$ 度)

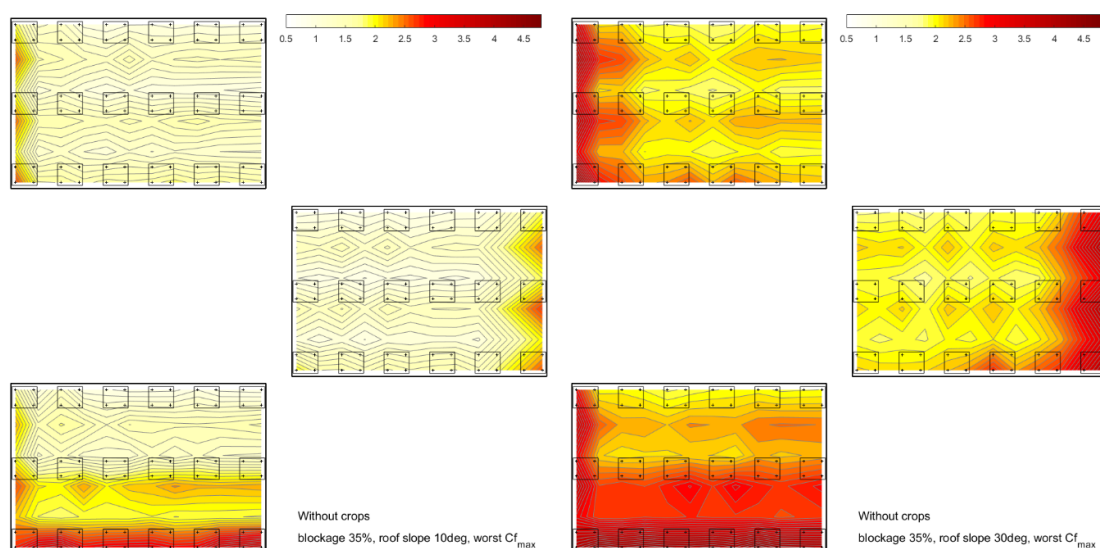


図 B-2 農作物無し・ $\beta=35\%$ の各圧力測定孔における $C_{a_{max}}$ のコンター図
(左: $\theta=10$ 度、右: $\theta=30$ 度)

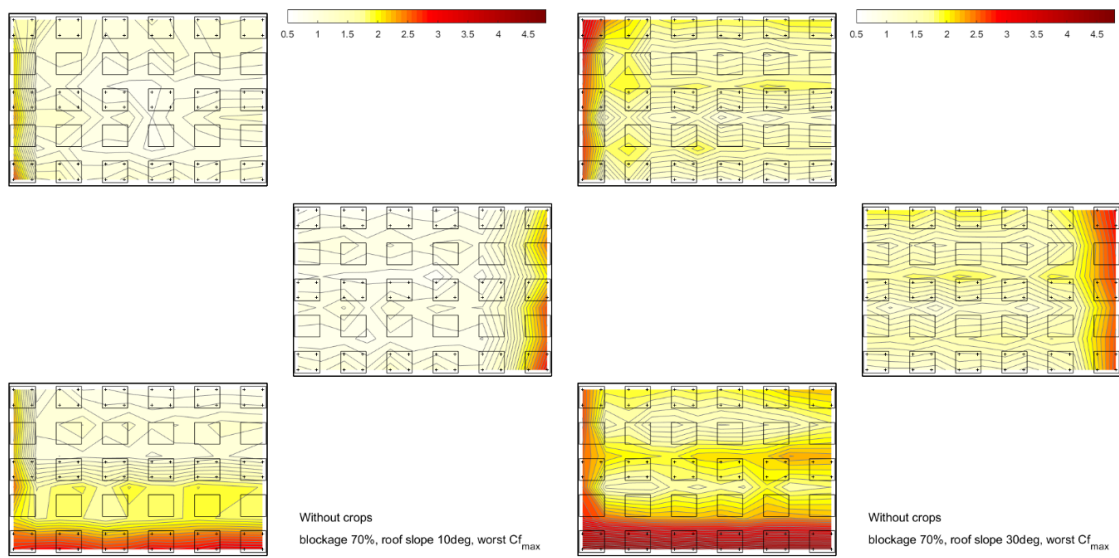


図 B-3 農作物無し・遮光率 $\beta=70\%$ の各圧力測定孔における $C_{a_{max}}$ のコンター図
(左 : $\theta=10$ 度、右 : $\theta=30$ 度)

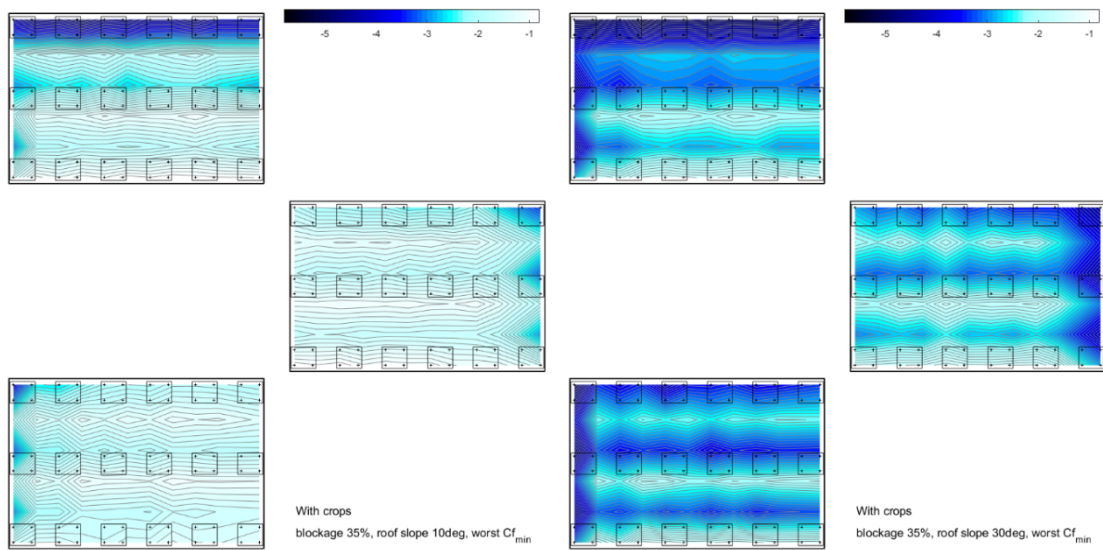


図 B-4 農作物有り・遮光率 $\beta=35\%$ の各圧力測定孔における $C_{a_{min}}$ のコンター図
(左 : $\theta=10$ 度、右 : $\theta=30$ 度)

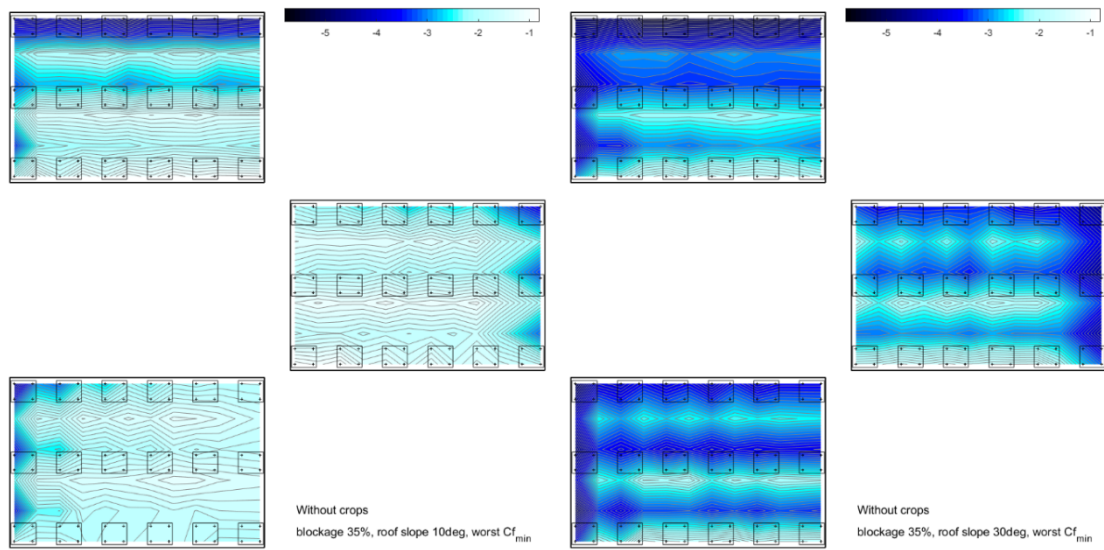


図 B-5 農作物無し・遮光率 35%の各圧力測定孔における C_{a_min} のコンター図
(左 : $\theta = 10$ 度、右 : $\theta = 30$ 度)

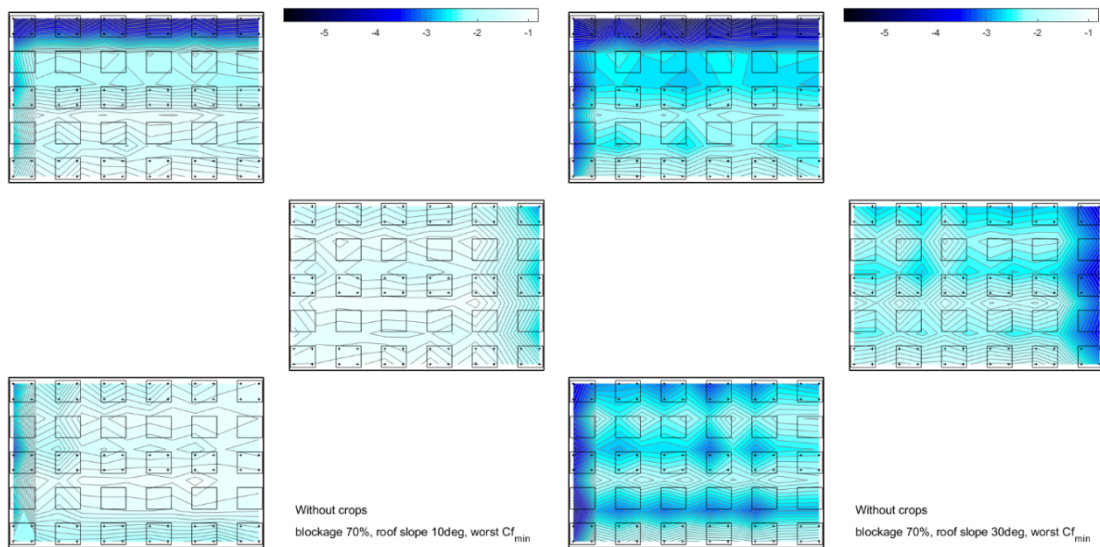


図 B-6 農作物無し・遮光率 70%の各圧力測定孔における C_{a_min} のコンター図
(左 : $\theta = 10$ 度、右 : $\theta = 30$ 度)

付録 C 渦励振の確認

モジュール勾配 $\theta=35$ 度における、風向 $\phi=0$ 度と 180 度時の、アレイ中央（図 C-1）に位置する南北方向列のモジュール 1 枚あたりに作用する C_{Mx} , C_{My} の時刻歴を用いてこれらのパワースペクトルを求めた。 $\phi=0$ 度の場合は最北端に位置するモジュールを 1 番目、 $\phi=180$ 度の場合は最南端に位置するモジュールを 1 番目と数える。参考のために、Stroble&Banks (2014)⁸⁾と Browne et al. (2020)⁴⁾に掲載されているモーメント係数のパワースペクトル図を図 C-2 と図 C-3 に載せる。

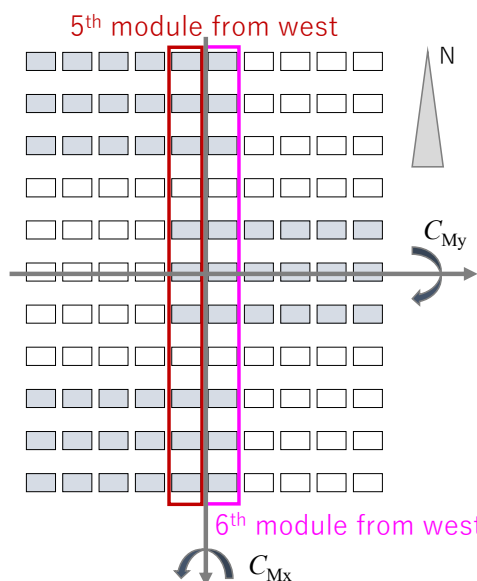


図 C-1 今回パワースペクトルを計算したモジュール位置

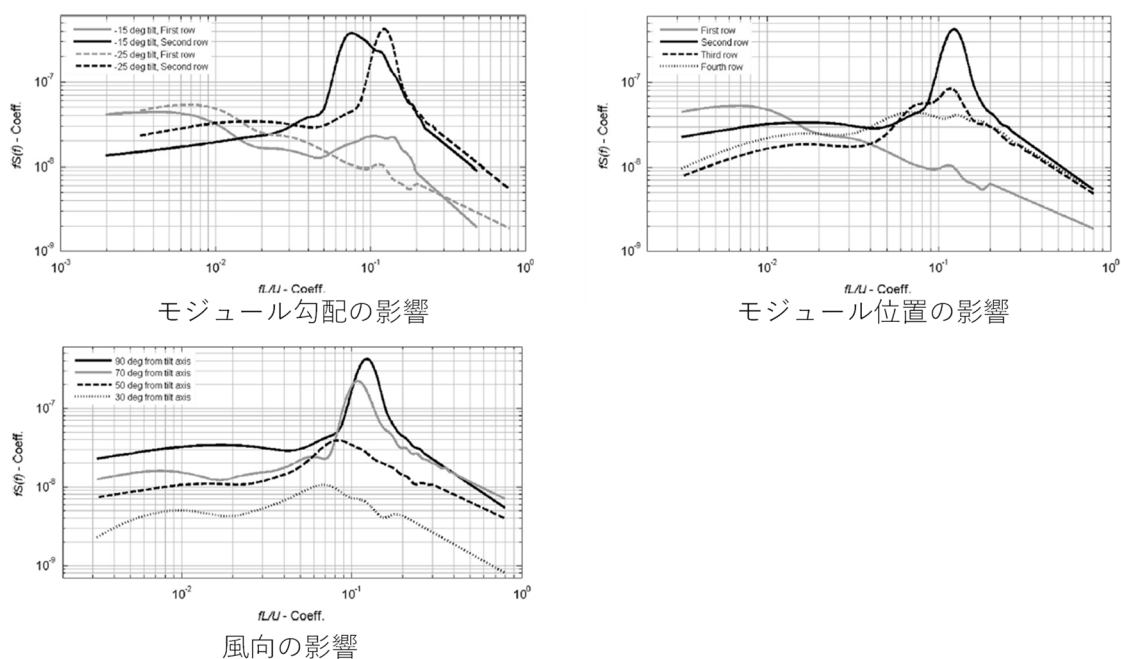


図 C-2 Stroble & Banks (2014)⁸⁾に掲載されているパワースペクトル図

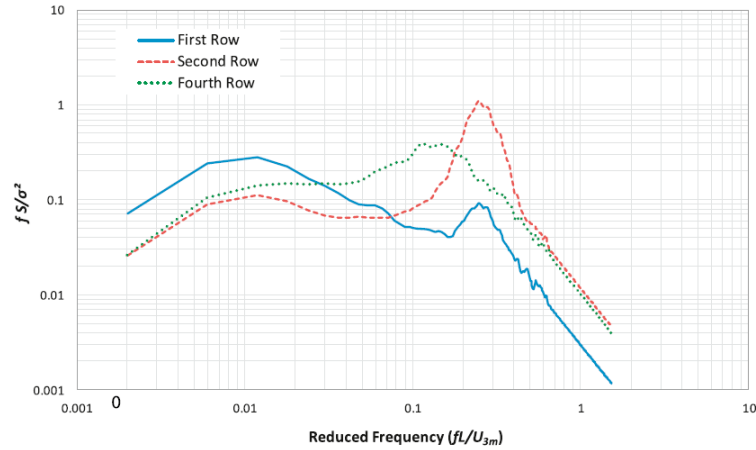


図 C-3 Browne et al. (2020)⁴⁾に掲載されているスペクトル図

図 C-4 から図 C-7 に結果を示す。図において横軸は周波数 f をモジュール短辺方向長さ L_{chord} と(ASCE7-22 の定義に合わせて)3 秒平均、高さ 10m、地表面粗度区分 II における風速 $U_{3\text{sec},10\text{m},\text{o.c.}}$ で無次元化している。また参考のために風洞実験で用いた流入風の風速のパワースペクトルを図 C-8 に示す。 C_{Mx} , C_{My} 共に $\beta=35\%$ の 2 列目以降で、 $f \times L_{\text{chord}}/U=0.2$ あたりで渦励振がみられ、この傾向は既往文献と一致している。また C_{My} の 1 列目のパワースペクトルと風速のパワースペクトルのピーク発生時の無次元化風速がほぼ一致していることから、1 列目に関しては準静的仮定が成立するようである。

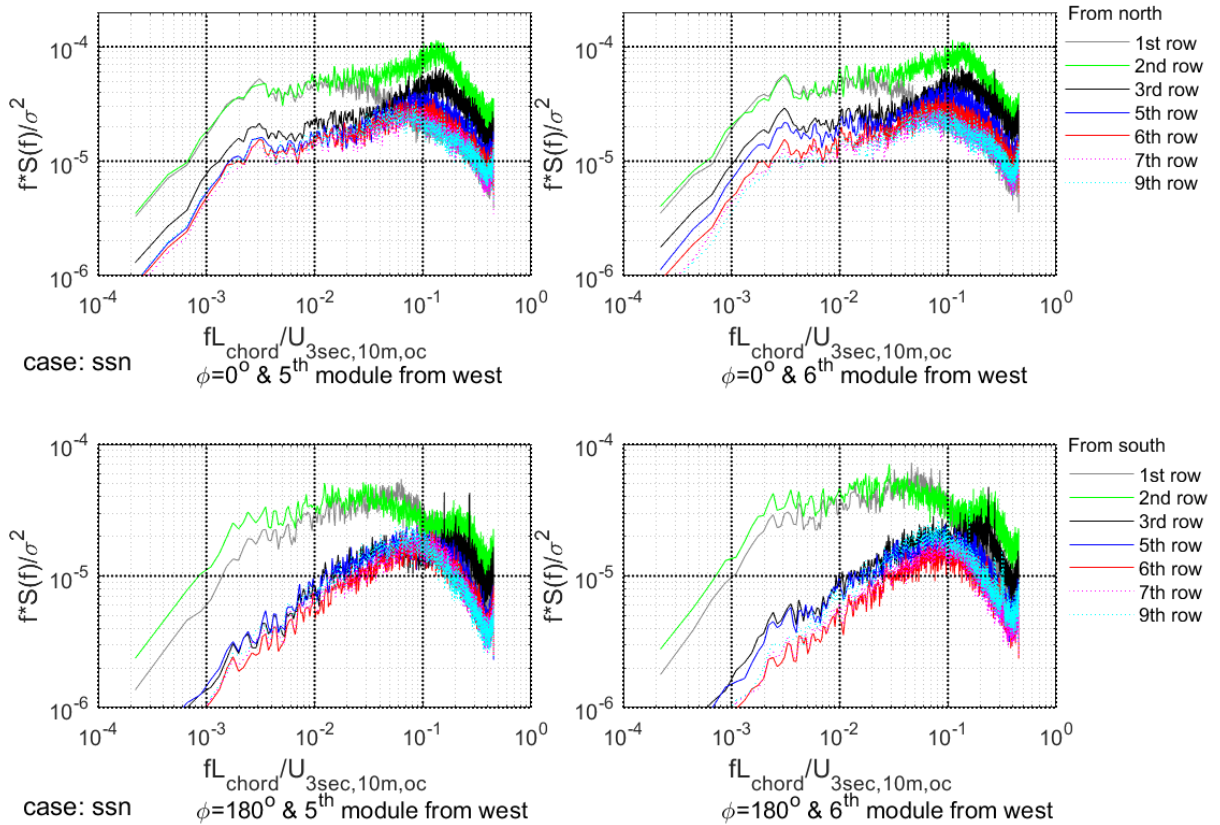


図 C-4 $\theta=30$ 度 & $\beta=35\%$ のモジュール 1 枚に作用する G_{Mx} のパワースペクトル図

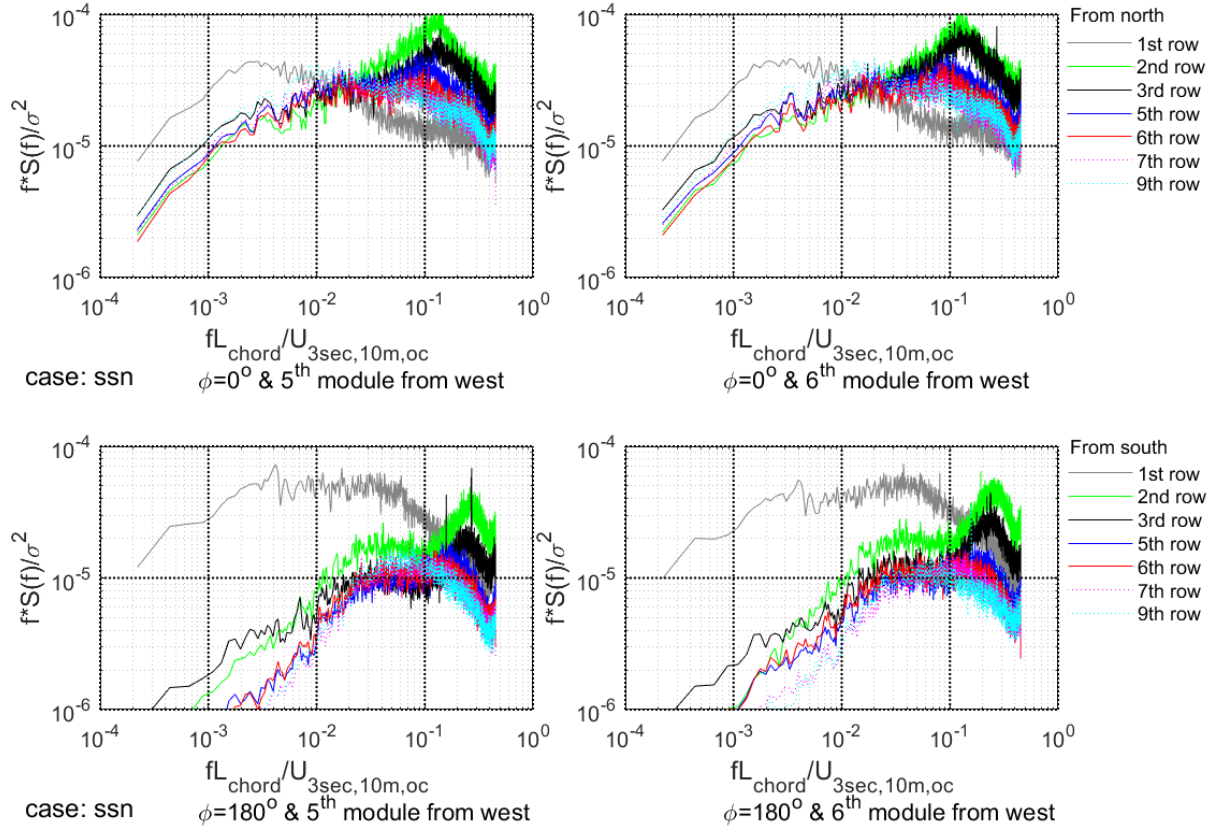


図 C-5 $\theta=30$ 度 & $\beta=35\%$ のモジュール 1 枚に作用する G_{my} のパワースペクトル図

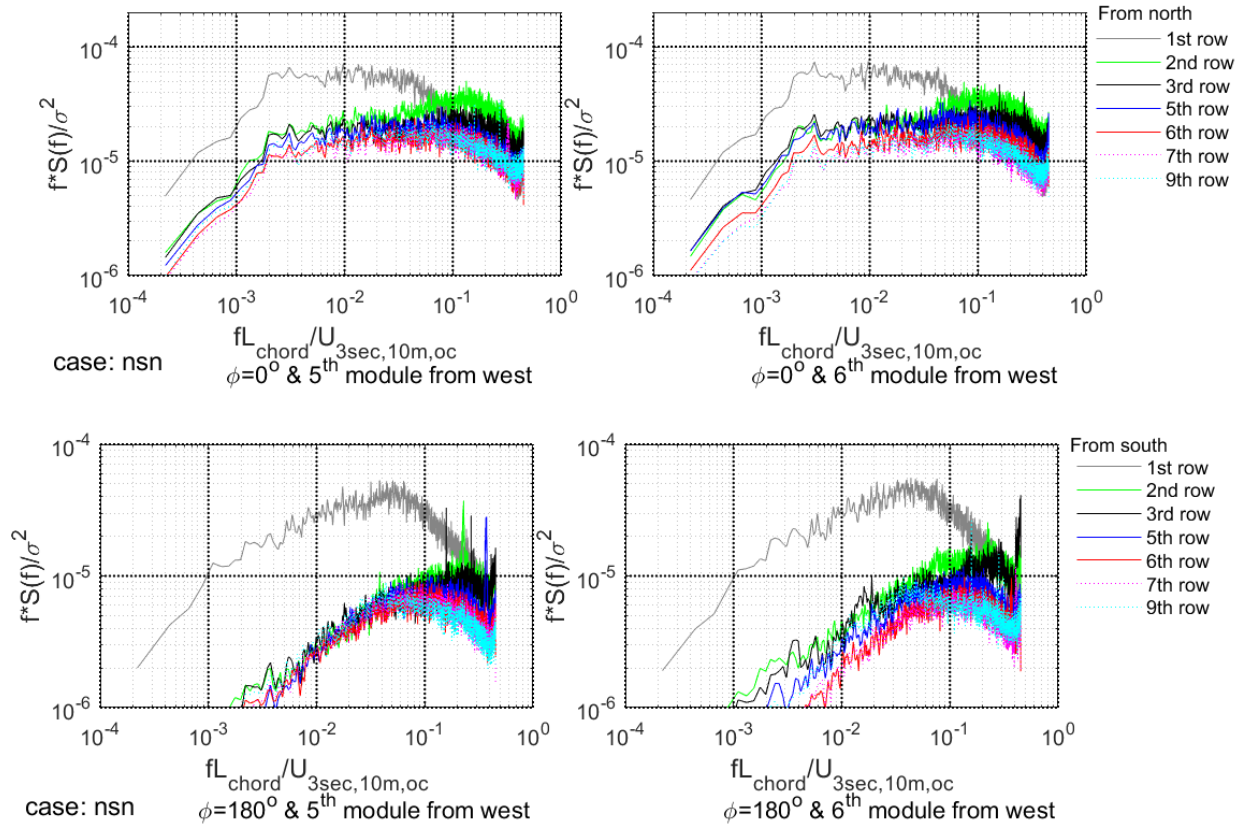


図 C-6 $\theta=30$ 度 & $\beta=70\%$ のモジュール 1 枚に作用する G_{mx} のパワースペクトル図

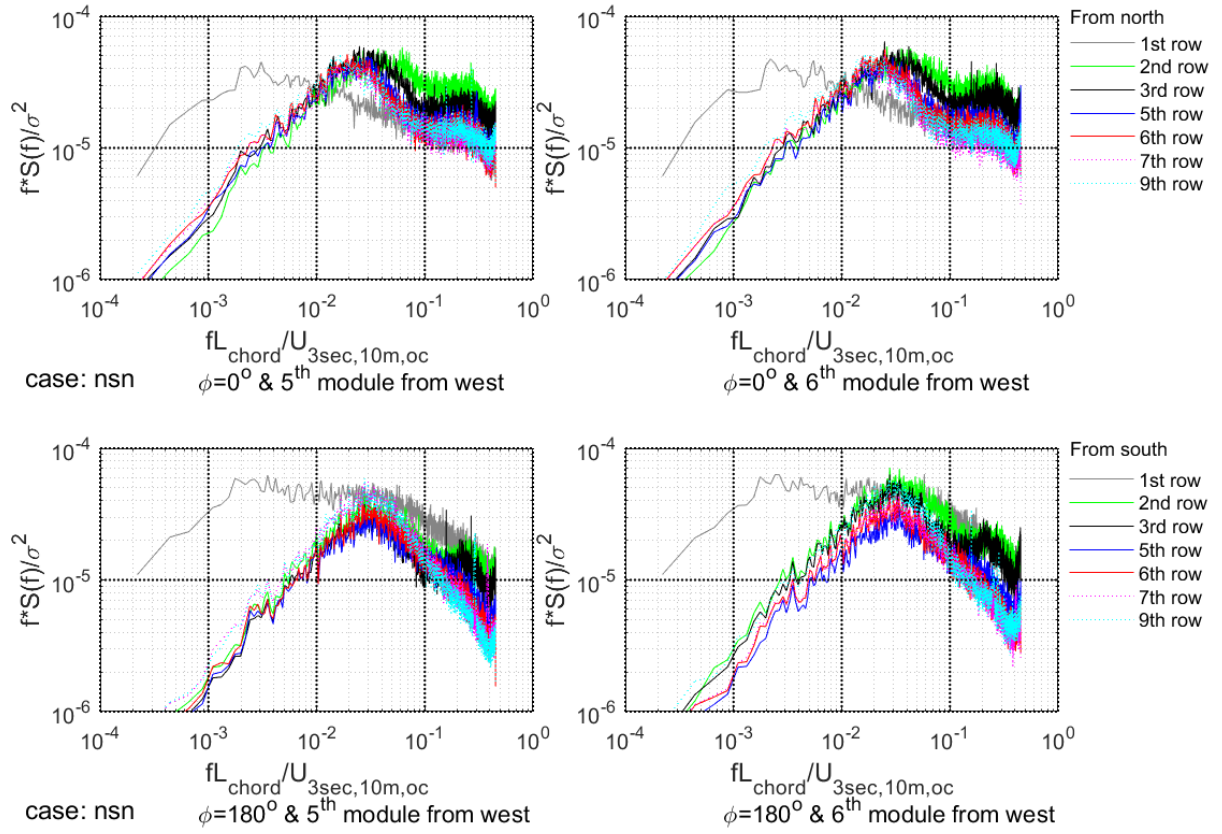


図 C-7 $\theta=30$ 度 & $\beta=70\%$ のモジュール 1 枚に作用する G_{Ly} のパワースペクトル図

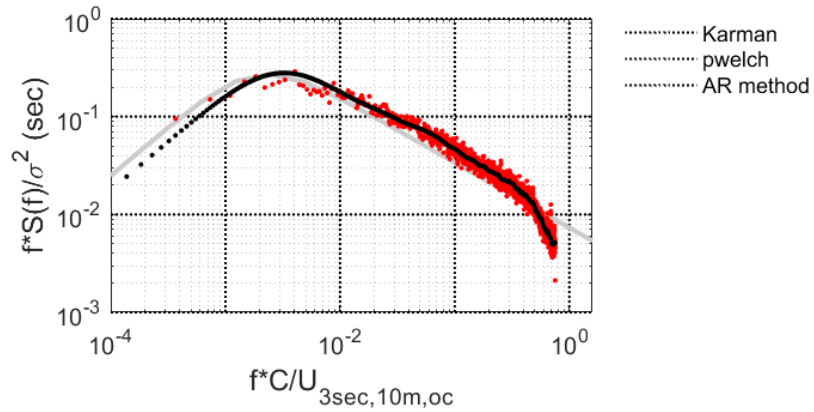


図 C-8 流入風の風速のパワースペクトル図

付録 D : Browne et al. (2020)⁴⁾における既往研究との比較結果に関して

Browne et al. (2020)⁴⁾では風洞実験結果と JIS 値、AS/NZS1170.2 における地上設置型 PV の風力係数を求めた Ginger et al. (2019)⁶⁾ との比較を行っている（図 D-1）。

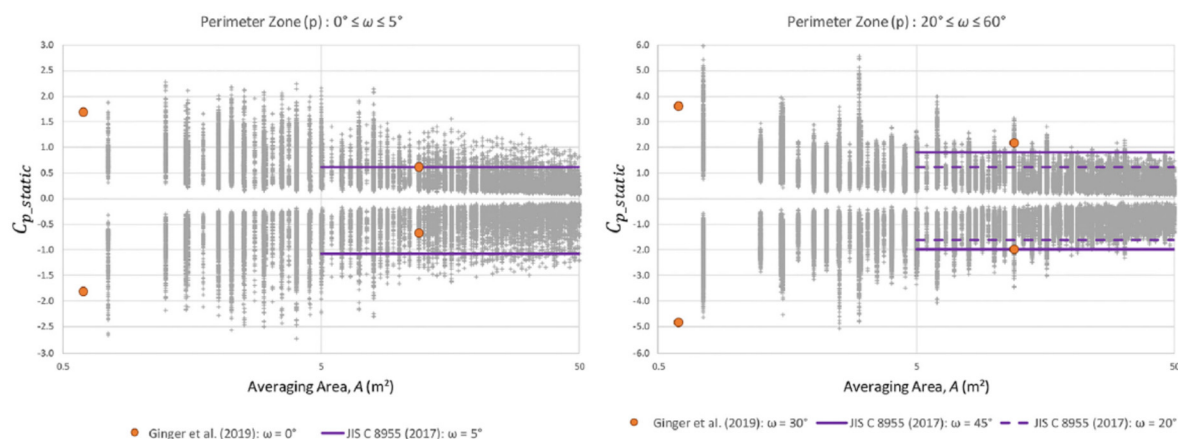


Fig. 19. Comparison of static normal force coefficients from present study to Ginger et al. (2019a,b) and JIS C 8955 (2017).

図 D-1 : Browne et al. (2020)⁴⁾において提案している設計用風力係数と既往研究との比較

その中で、JIS との比較に関して、正圧の JIS 値はかなり小さいと指摘している。この点に関して考察をする。図 D-1 において、縦軸は ASCE7 のフォーマットに換算された風力係数 C_{p_static} 、つまり高さ 10m、Exposure C における 3 秒ガスト風速で基準化された風力係数である。この論文では JIS C8955 にある値をガスト風速で基準化された風力係数であると理解し、JIS 値を C_{p_static} と直接比較をしている。しかし JIS 値は 10 分平均風速で基準化された平均風力係数であるため、 C_{p_static} と比較をするためにはガスト影響係数（地表面粗度区分 II を仮定すると 2.2）と平均化時間の影響（ $V_{10min}/V_{3sec}=1/1.51$ ）を考慮する必要がある。よって図 D-1 の JIS 値に $2.2 \times (1/1.51)^2 = 0.96$ 倍をすることが正しいことになる。すると正圧だけではなく、負圧に関しても、そして高勾配モジュールに関しても JIS の値はかなり過小評価をしていることになる（Browne et al. (2020)⁴⁾の結果が大きすぎる）。

また Ginger et al. (2019)⁶⁾との比較であるが、モジュール勾配が大きく（図 D-1 右）対象面積が小さい場合、Ginger et al. (2019)の負圧は大きく、正圧は小さい、そしてこの理由は圧力測定孔密度の違いであると考察している。Ginger et al. (2019)において提案された設計用風力係数と Browne et al. (2020)⁴⁾の結果を比較するためには、基準速度圧の評価時間の影響を考慮する必要がある、Ginger et al. (2019)の値に $(1.12)^2$ をかけることで、比較が可能としている。例えば Ginger et al. (2019)のモジュール勾配 30 度の結果を見る（図 D-2）と最

大・最小の値はそれぞれ 1.7 と -1.6 である。これに $(1.12)^2$ をかけると 2.1, -2.0 となり、図 D-1 右にある大きな面積の場合の値と対応する。面積が小さい場合、モジュール勾配が小さい場合も同様に検討をしたが、Ginger et al. (2019)の値は正しく比較されていると思われる。

TABLE F1. NET PRESSURE COEFFICIENTS ($C_{p,n}$) FOR SOLAR PANEL ARRAY - $\theta = 0^\circ$ (see Figure F1)

Panel pitch (α) degrees	$\theta = 0$ degrees							
	$C_{p,w}$		$C_{p,l}$		$C_{p,w}$		$C_{p,l}$	
	B1	B2, B3..	A1	A2, A3..	D1	D2, D3..	C1	C2, C3..
0	0.45	0.45	0.25	0.10	0.40	0.25	0.25	0.10
15	1.20	1.20	0.80	0.45	1.40	0.80	0.90	0.40
20	1.30	1.20	0.80	0.45	1.50	0.75	0.90	0.45
25	1.45	1.35	0.95	0.60	1.60	0.85	1.00	0.55
30	1.50	1.25	0.95	0.70	1.70	0.85	1.10	0.65

TABLE F2. NET PRESSURE COEFFICIENTS ($C_{p,n}$) FOR SOLAR PANEL ARRAY - $\theta = 180^\circ$ (see Figure F1)

Panel pitch (α) degrees	$\theta = 180$ degrees							
	$C_{p,w}$		$C_{p,l}$		$C_{p,w}$		$C_{p,l}$	
	A1	A2, A3..	B1	B2, B3..	C1	C2, C3..	D1	D2, D3..
0	-0.50	-0.55	-0.35	-0.20	-0.50	-0.35	-0.35	-0.15
15	-1.20	-1.40	-0.60	-0.85	-1.40	-1.45	-0.70	-0.65
20	-1.40	-1.45	-0.75	-0.90	-1.40	-1.40	-0.70	-0.70
25	-1.50	-1.45	-0.75	-0.95	-1.50	-1.35	-0.75	-0.80
30	-1.60	-1.50	-0.80	-0.95	-1.55	-1.30	-0.90	-0.85

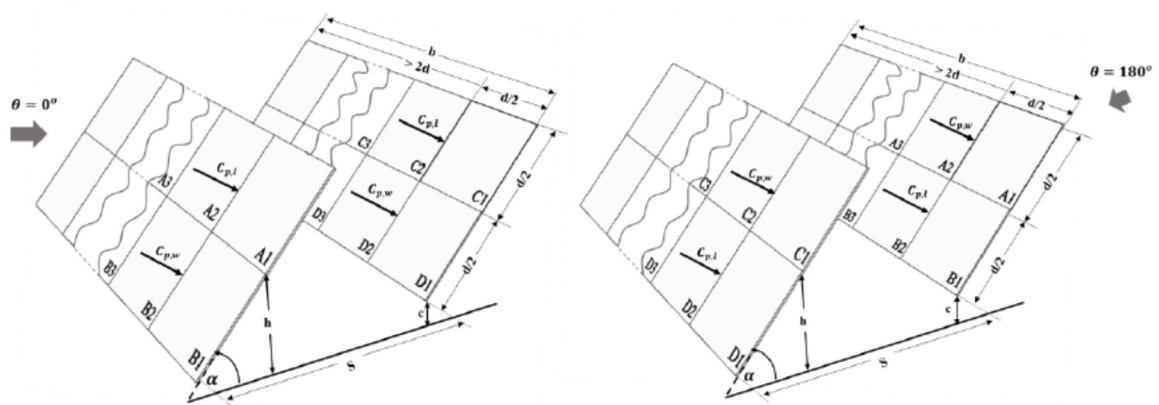


図 D-2 : Ginger et al. (2019) ⁶⁾における設計用風力係数の提案値と領域分け

付録 E 最大・最小モーメント係数の位置変化

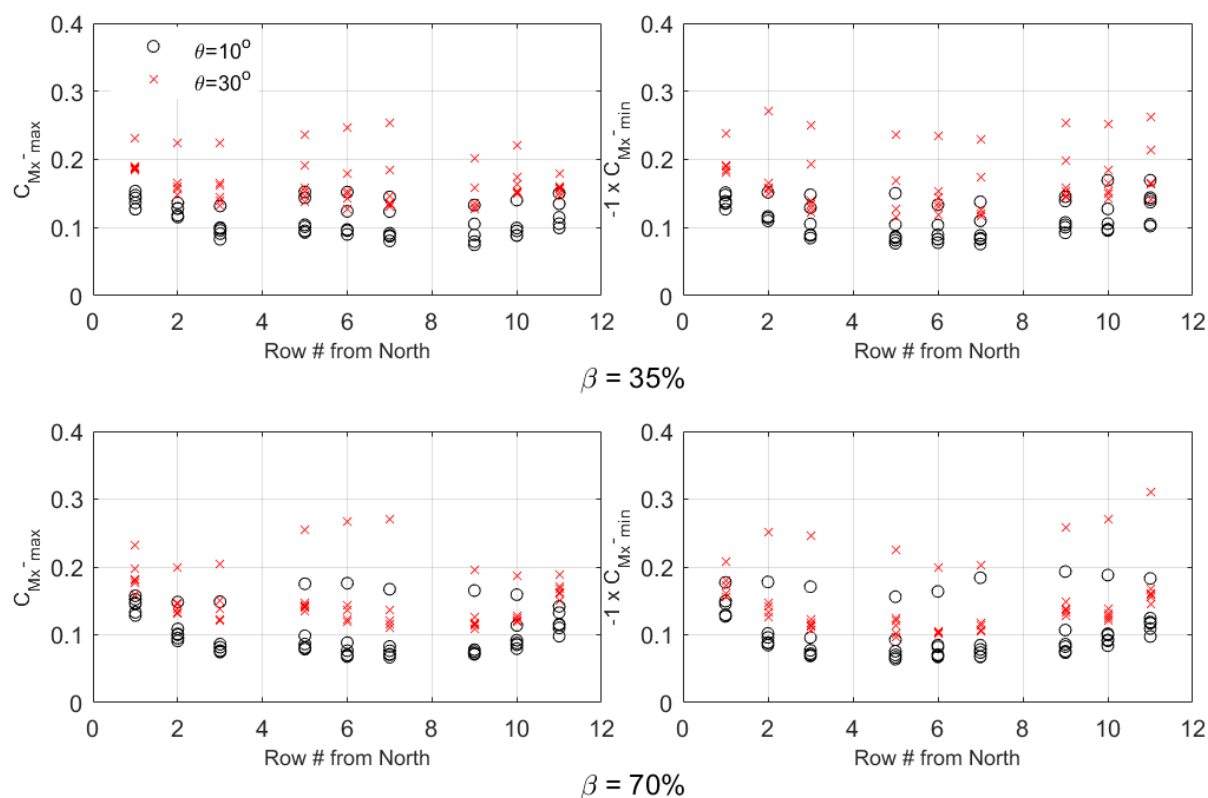


図 E-1 2.0m × 2.3m ($\beta=35\%$), 2.0m × 1.2m ($\beta=70\%$) の架台に作用する

G_{Mx_max} 、 G_{Mx_min} の南北方向の変化

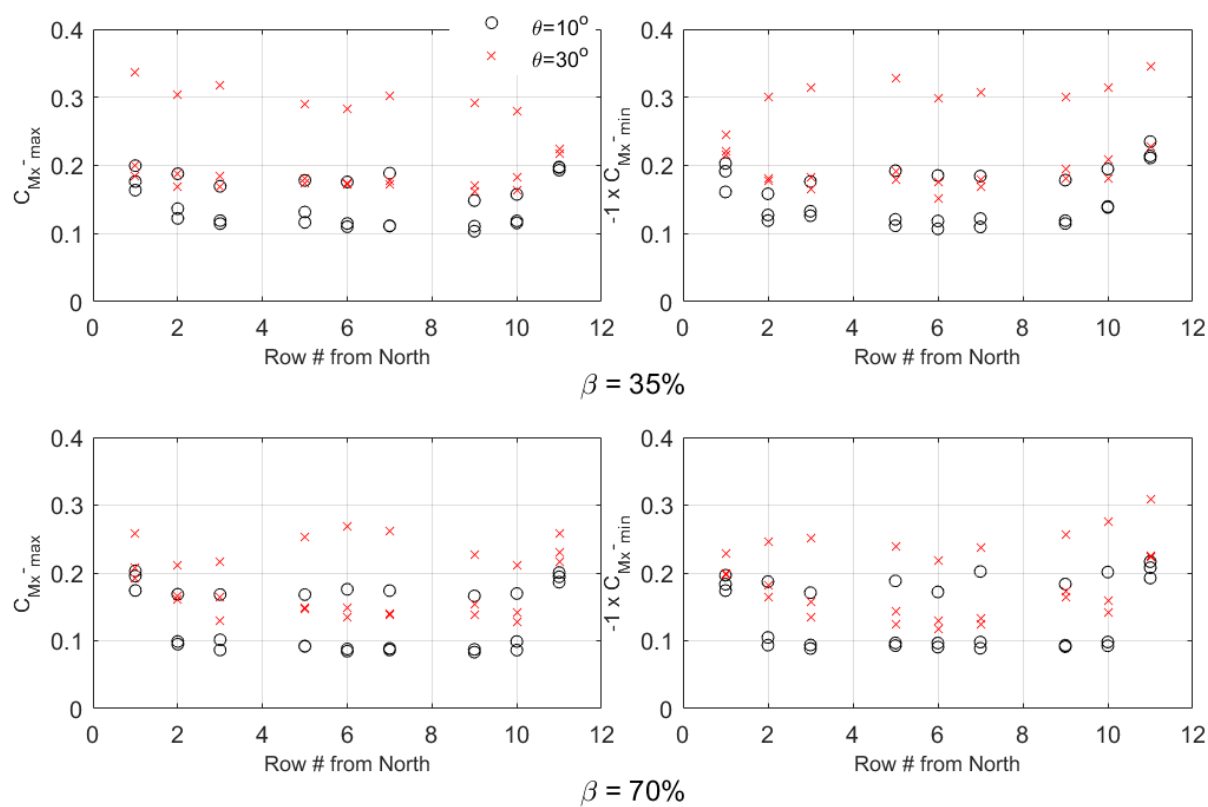
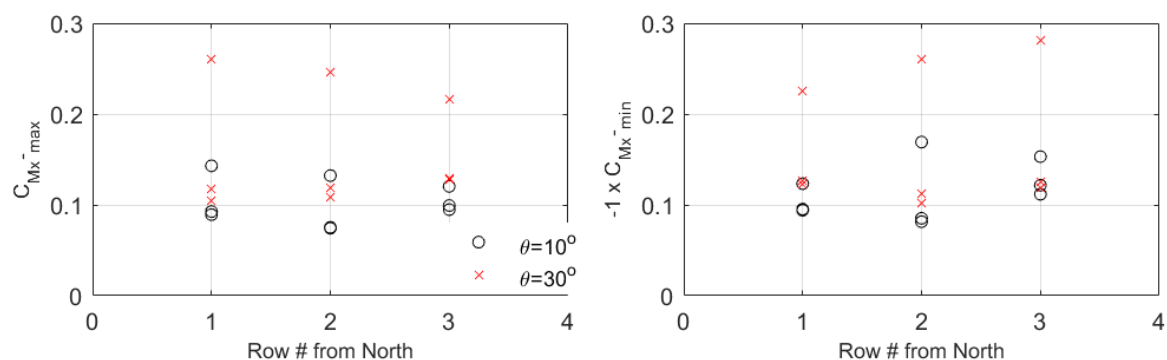
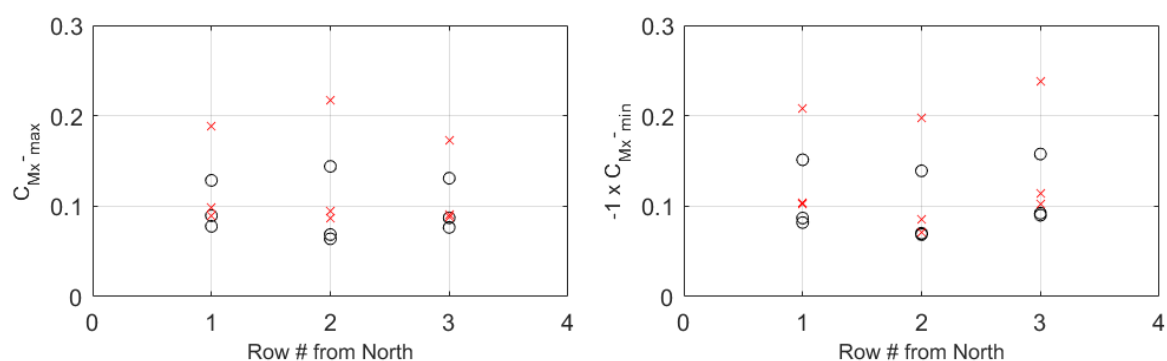


図 E-2 4.0m × 2.3m ($\beta=35\%$), 4.0m × 1.2m ($\beta=70\%$) の架台に作用する

G_{Mx_max} 、 G_{Mx_min} の南北方向の変化

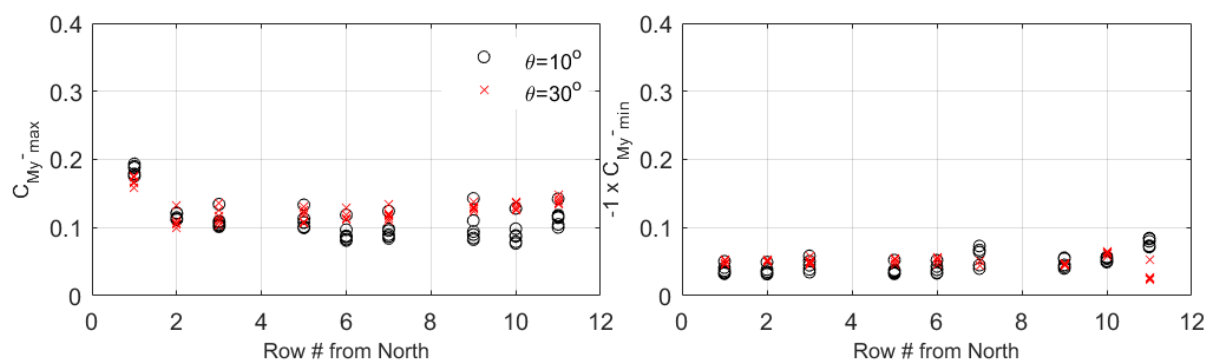


$\beta = 35\%$

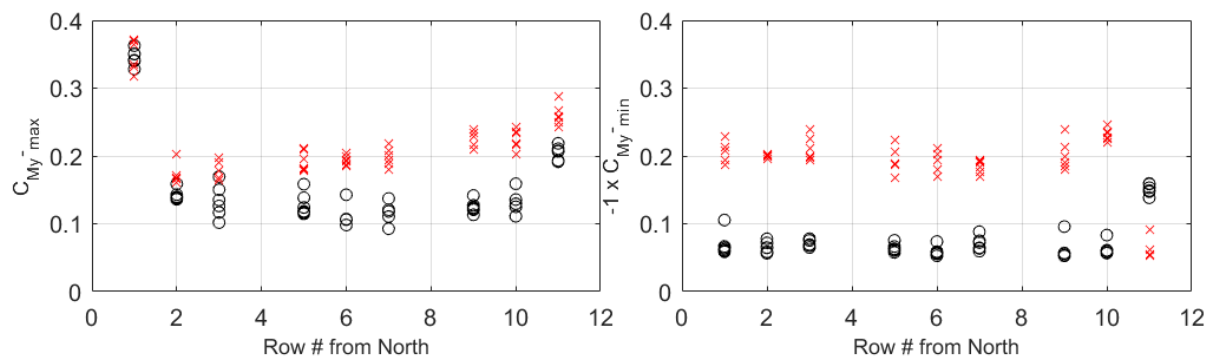


$\beta = 70\%$

図 E-3 4.0m × 7.0m ($\beta=35\%$), 4.0m × 5.8m ($\beta=70\%$) の架台に作用する G_{Mx_max} 、 G_{Mx_min} の南北方向の変化 ($\beta=70\%$ の場合はダミー模型に作用する風力を考慮して計算)



$\beta = 35\%$



$\beta = 70\%$

図 E-4 2.0m × 2.3m ($\beta=35\%$), 2.0m × 1.2m ($\beta=70\%$) の架台に作用する

G_{My_max} 、 G_{My_min} の南北方向の変化

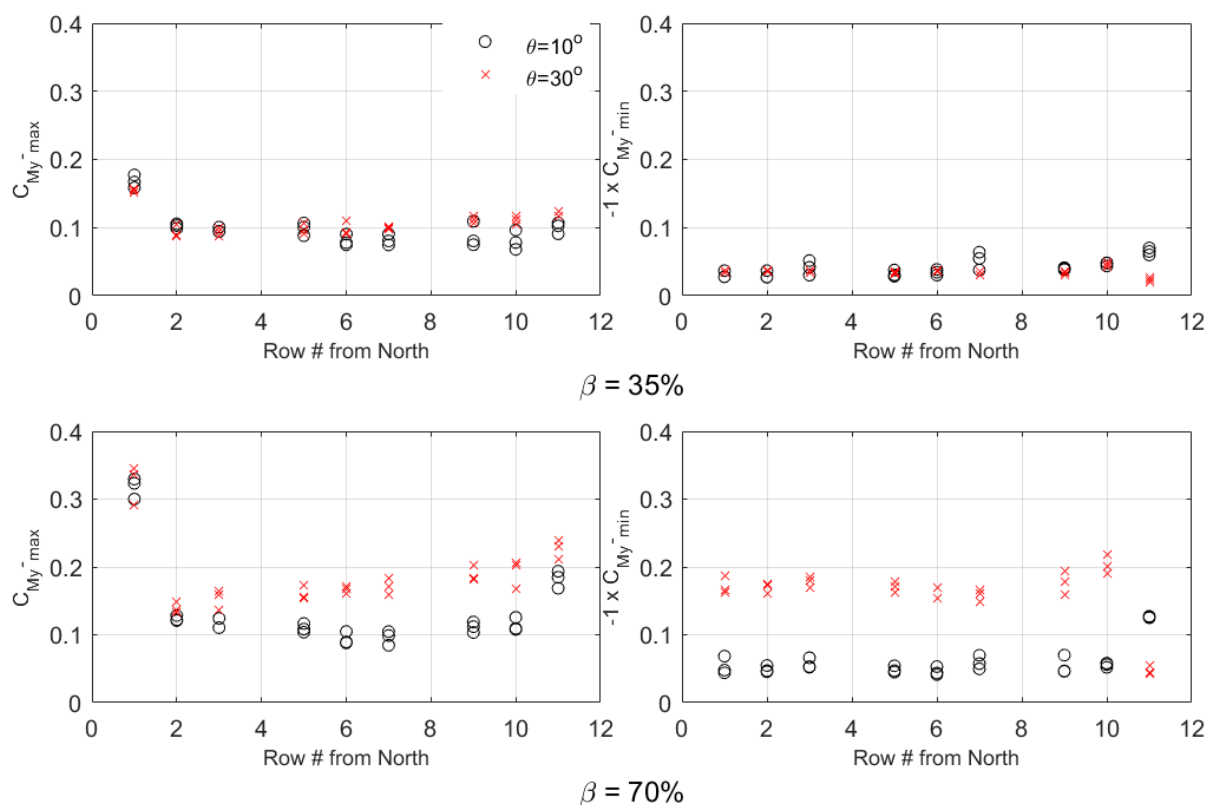


図 E-5 4.0m × 2.3m ($\beta=35\%$), 4.0m × 1.2m ($\beta=70\%$) の架台に作用する

G_{My_max} 、 G_{My_min} の南北方向の変化

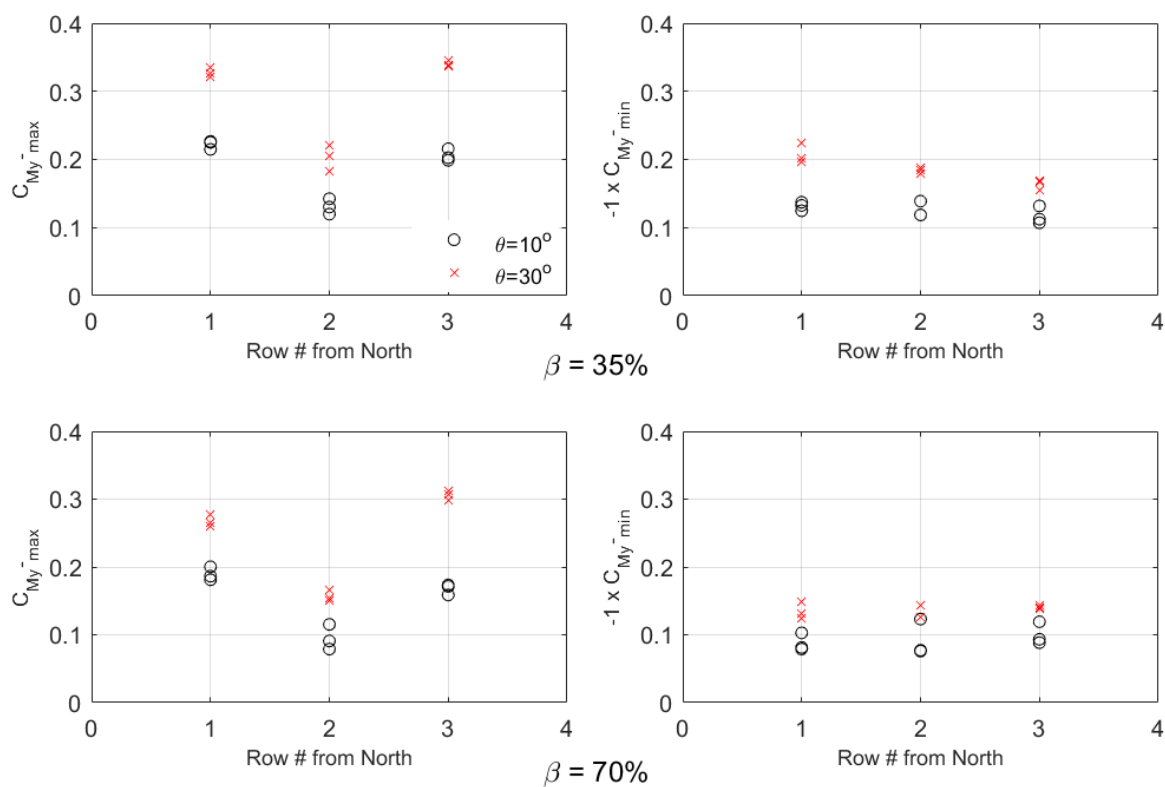


図 E-6 4.0m × 7.0m ($\beta=35\%$), 4.0m × 5.8m ($\beta=70\%$)の架台に作用する C_{My_max} 、 C_{My_min} の南北方向の変化 ($\beta=70\%$ の場合はダミー模型に作用する風力を考慮して計算)

この成果物は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の長期安定電源化技術開発」事業の結果として得られたものです。