

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

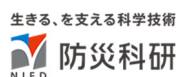
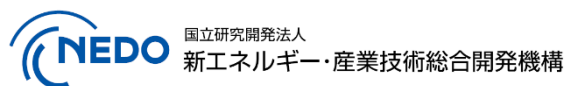
技術資料：

傾斜地に設置された太陽電池アレイの

風力係数に関する風洞実験

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



傾斜地に設置された太陽電池アレイの風力係数に関する風洞実験

1. 概要

斜面に設置された太陽電池アレイの強風被害が報告されている。本資料では、斜面に設置された太陽電池アレイ周囲の風速場と、アレイ面に加わる風圧力を明らかにし、設計用風力係数に関するデータの取得を目的とする。そのために、傾斜地に設置された太陽電池アレイの模型を用いた風洞実験を行い、以下にその結果をまとめる。

2. 風洞実験

斜面に設置された太陽電池アレイに作用する風力を明らかにするために風洞内にアレイ面の風圧力を測定できる模型を設置し、斜面の傾斜角度、太陽電池パネル（複数枚の太陽電池を構造的に結合したもの）の傾斜角度を変化させた実験を行い、周囲の風速場および太陽電池モジュールに作用する風圧力の変化を測定した。対象とした傾斜地は単純な上り傾斜とし、風洞実験は既往の文献¹⁾に倣って2次元模型実験とした。得られた測定値は模型と圧力センサーをつなぐ導圧チューブの圧力伝達特性を用いて補正を行い、風圧の変動値を求めた。以下に測定の方法の概要をまとめる。

2.1 風洞と実験気流

実験には、京都大学防災研究所のエッフェル型吹出し式境界層風洞を用いた。測定部の断面は幅 2.5m×高さ 1.8～2.3m（可変）で、測定部は 21m である。模型の上流側にはスパイヤーと粗度ブロックを設置し、粗度区分 II におおむね相当する平均風速分布を発生させた。模型を設置する測定部の風上側から約 16.5m 地点において、模型がない状態に平均風速分布は図 2-1 に示す通り、平均風速の鉛直分布のべき指数は $\alpha=0.15$ 程度、乱れ強さは床面付近で約 20%であった。

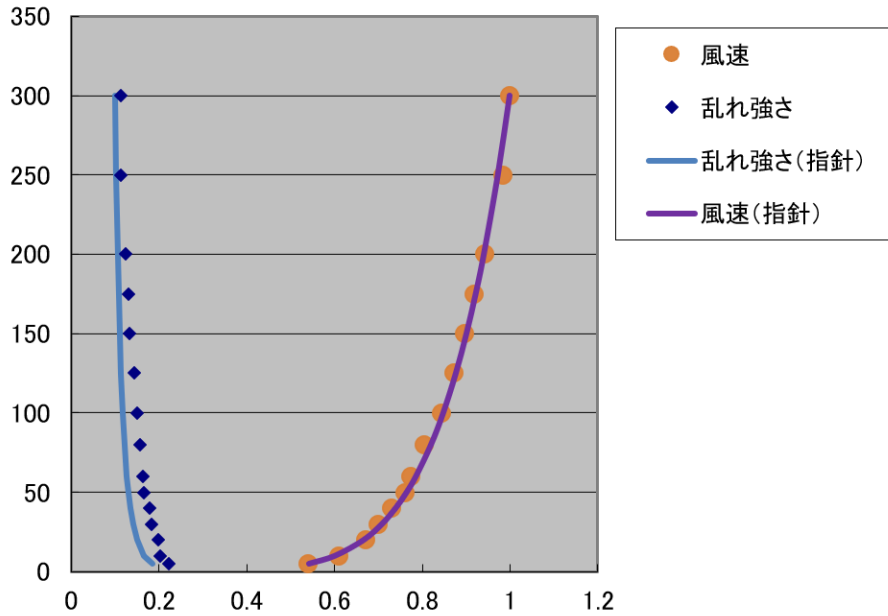


図 2-1 模型設置位置における平均風速 V_z および乱れの強さ I_u の鉛直分布
 (図中実線は地表面粗度区分 II、べき指数 $\alpha = 0.15$ に対応する平均風速の鉛直分布)
 模型前縁から 0.8m 風上側の床面中央、平均風速は高さ 0.3m の値で基準化

2.2 実験模型

実験に用いた傾斜地模型は、写真 2-1、図 2-2、2-3、2-4 に示すように、太陽電池パネル模型を設置した幅 400mm、長さ 600mm の傾斜地板の両側端を高さ 900mm の端板で挟み、溝状の流路としたものを風洞床面上に設置した。傾斜地板は角度調整用治具を用いて、流路内で斜面の傾斜角度を調整できるようになっている。太陽電池パネルの模型は傾斜地板上に、流路に対して直角方向に、流路幅を持ったものを等間隔に 10 列並べ、斜面上流端（法尻）および下流端（法肩）2 列分は取り外せるようになっている。地面に対する太陽電池パネル模型の傾斜角度は 0 度、15 度、30 度の 3 種類を用意した。



写真 2-1 風洞内模型設置状況

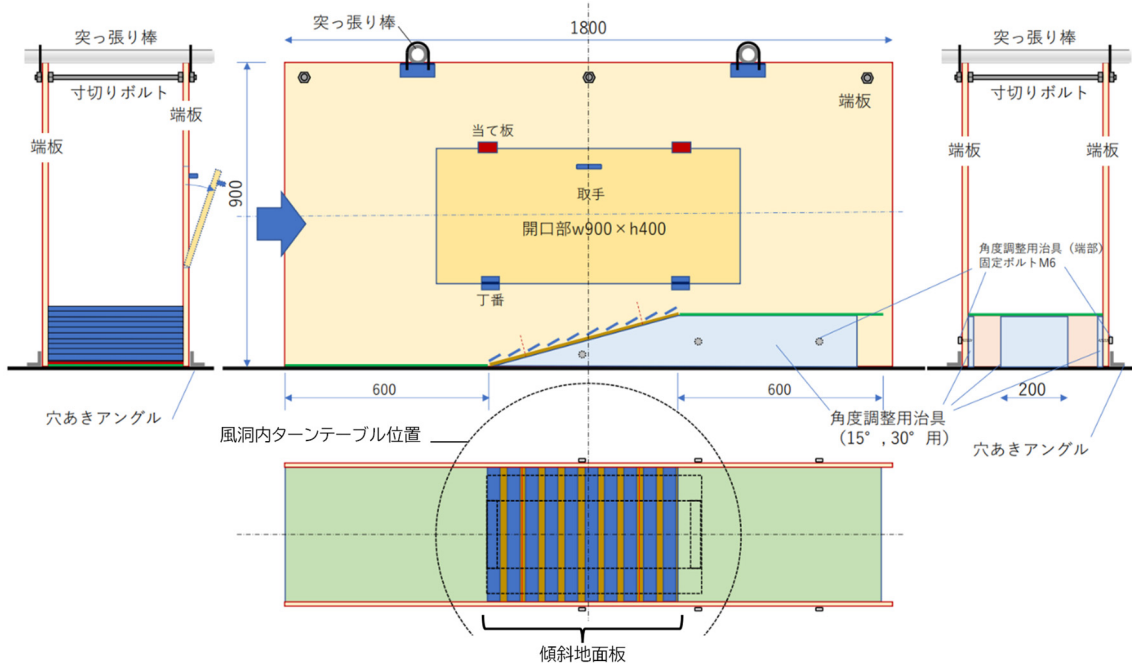


図 2-2 測定に用いた模型

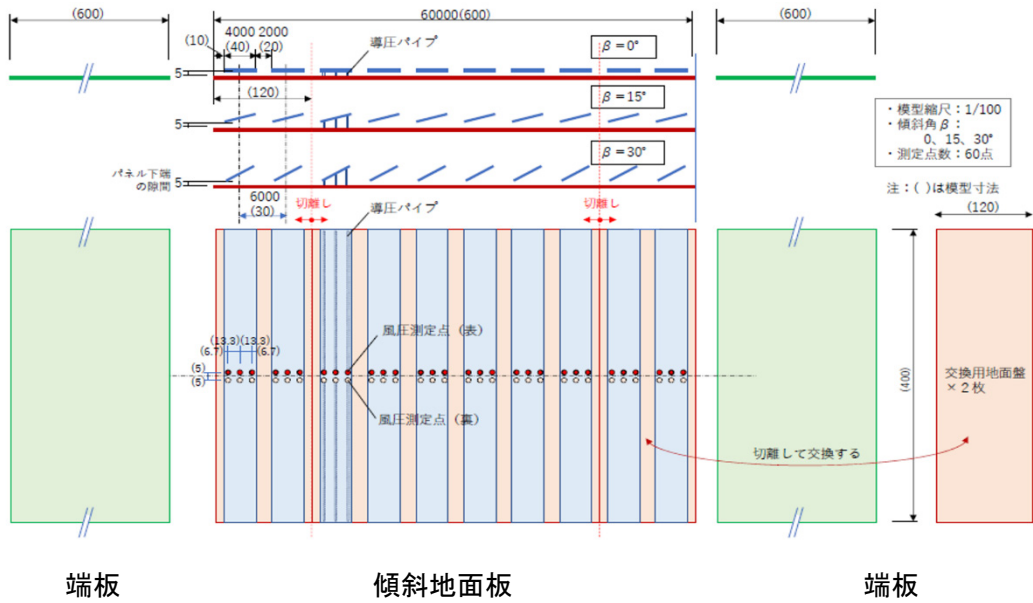


図 2-3 傾斜地面板と斜面調整用の端板

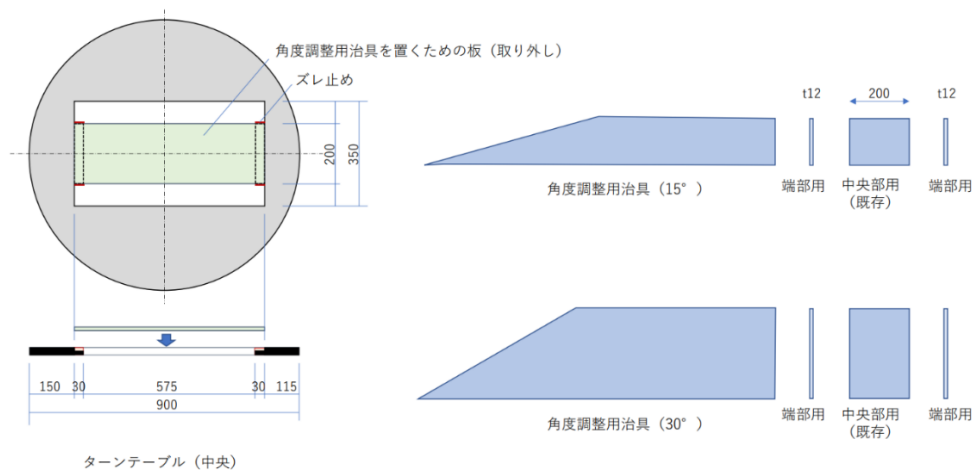


図 2-4 斜面角度調整用治具

2.3 圧力測定

圧力測定用の孔を太陽光パネル模型の中央付近の表と裏に開け、導圧パイプにより模型端まで導いたうえで、導圧チューブを用いて、圧力センサーに導いている。風圧測定に使用した圧力計には、オールデバイス株式会社製 1INCH-D2-4V-MINI (非直線性 1.245Pa 以下) を用いた。

各測定点に作用する風圧は、風圧測定点の位置に設けられた直径 1mm の測定孔から導圧パイプ (真鍮パイプ: 内径 1 mm、長さ 50mm)、および、導圧チューブ (ビニールチューブ: 内径 1.5mm、長さ 800mm) を介して圧力計に導いて測定した。圧力計からの電気信号は、A/D 変換器により 200Hz のサンプリング周波数でコンピュータに取り込んだ。

風圧測定孔は図 2-5 に示すように太陽電池パネルの表と裏でほぼ同じ位置にあけてあり、表と裏の風圧の差として風力を求めた。模型内の導圧パイプと導圧チューブの接続部、測定孔の位置によるセンサーまでの導圧チューブの長さの違い等が、圧力変動の伝達特性の違いを生じさせる可能性があるため、実際に測定に用いたシステムに変動風圧を周波数を変えて与え、伝達特性を調べたうえで、河井²⁾の方法に従い測定値を補正したうえで、解析に用いた。風圧測定の測定条件を表 2-1 に示す。

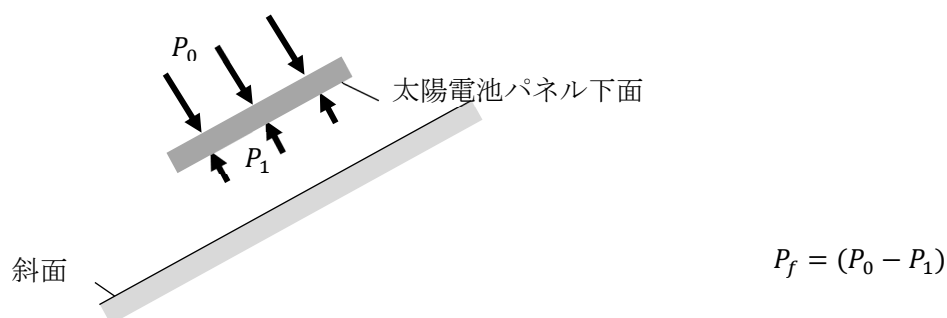


図 2-5 太陽電池パネルに作用する風力係数 P_f の定義
太陽電池パネルの表および裏の測定孔で測定された風圧 P_0 および P_1

表 2-1 風圧測定の測定条件

| | |
|------------|----------|
| 実験風速 | 10m/s |
| サンプリング周波数 | 200Hz |
| ローパスフィルター | 100Hz |
| データ数 | 36,000 個 |
| アンサンブル平均回数 | 6 回 |

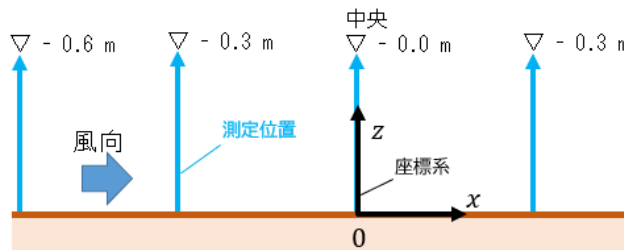
各測定点の風圧係数 C_p は、模型風上端より前方 800mm、模型中心、高さ $H=300\text{mm}$ に設置したピトー管で測定された平均速度圧 q_H で基準化した式 (3.1) で求めた。

$$C_p = \Delta p / q_H \dots\dots\dots (3.1)$$

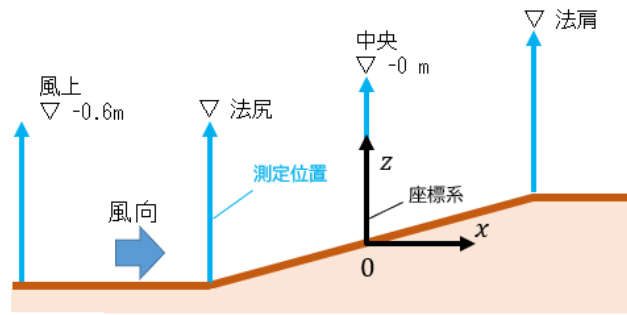
ここで、 q_H は高さ H での平均速度圧 (N/m^2)、 Δp は各測定点における圧力のピトー管位置での静圧からの偏差 (N/m^2)、である。太陽電池パネルの風力係数 C_f は太陽電池パネル上面の測定孔で求めた風圧係数の差として求めた。

2.4 風速の測定

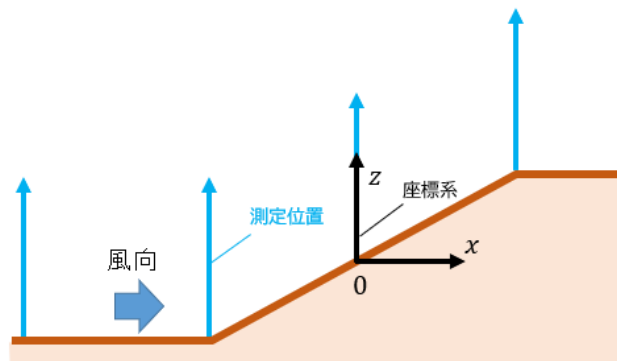
実験に際しては模型設置部の上流側に粗度ブロックを敷き詰め、地表面粗度区分 II 相当の風速分布をもった気流を作り、流入風とした。また、斜面の傾斜角度によって、模型周辺で風速分布も変化するため、風力評価用の風速の基準位置による変化も知る必要がある。今回の実験では、風圧の測定に先立ち、風速の鉛直プロファイルを図 2-6 に示すように、異なる傾斜角度をもった斜面（傾斜角度 0 度、15 度、30 度）に対して流れ方向に 4 地点（斜面中央、および、風上側 2 地点、風下側 1 地点）で測定し、傾斜角度による変化を調べた。測定には x 型の熱線風速計を用いて、水平主流方向および鉛直方向の風速変動成分を測定した。



a. 地盤の傾斜角度 $\alpha=0$ 度

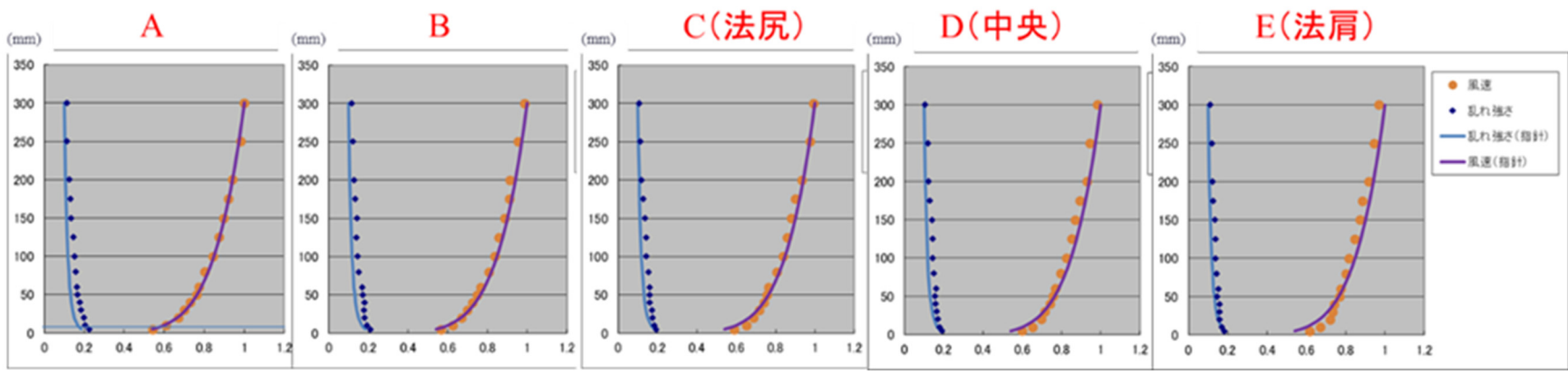
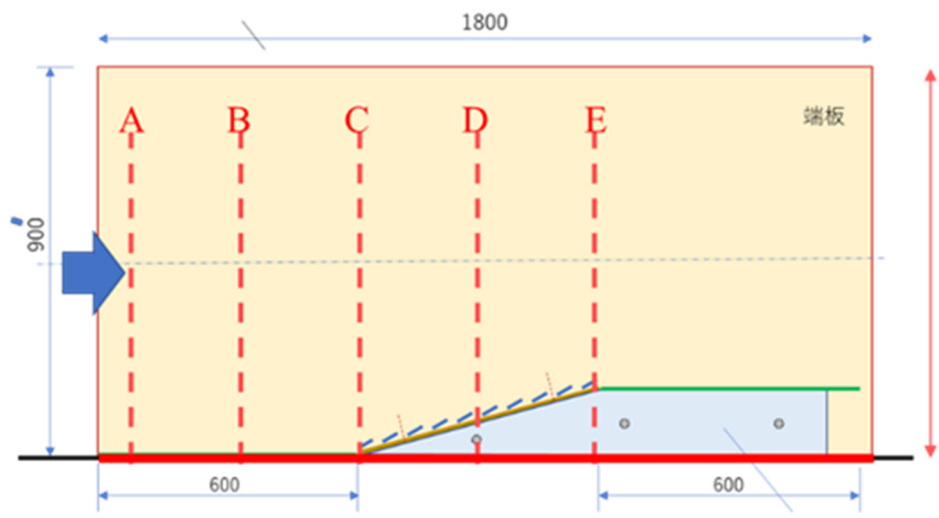


b. 地盤の傾斜角度 $\alpha=15$ 度

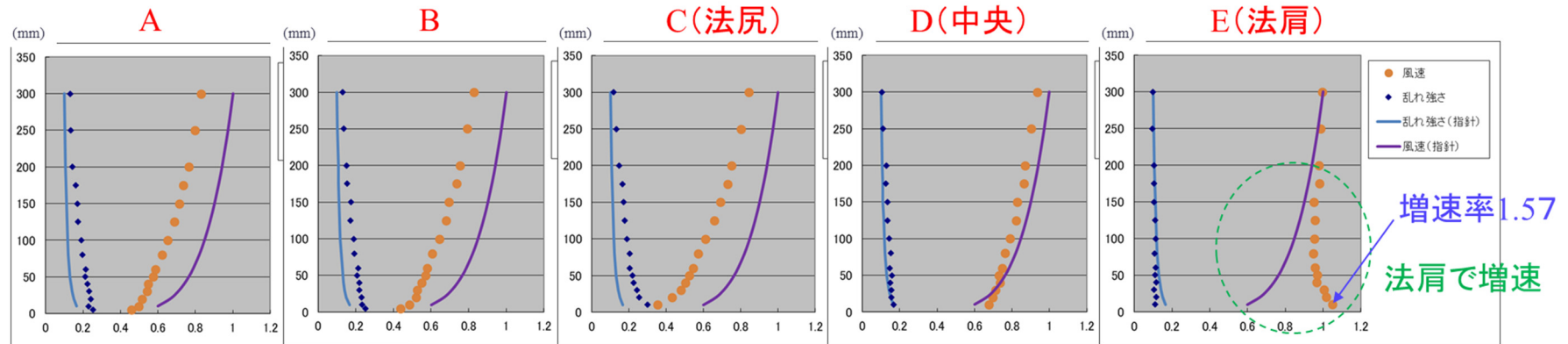
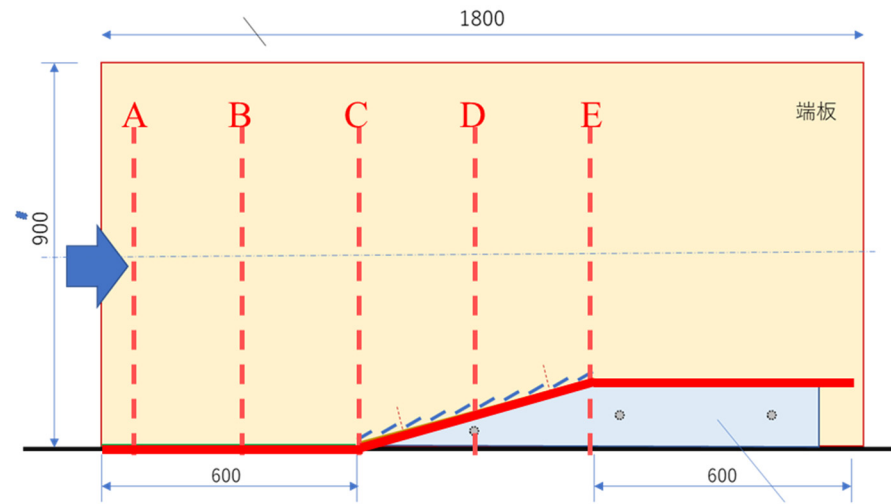


c. 地盤の傾斜角度 $\alpha=30$ 度

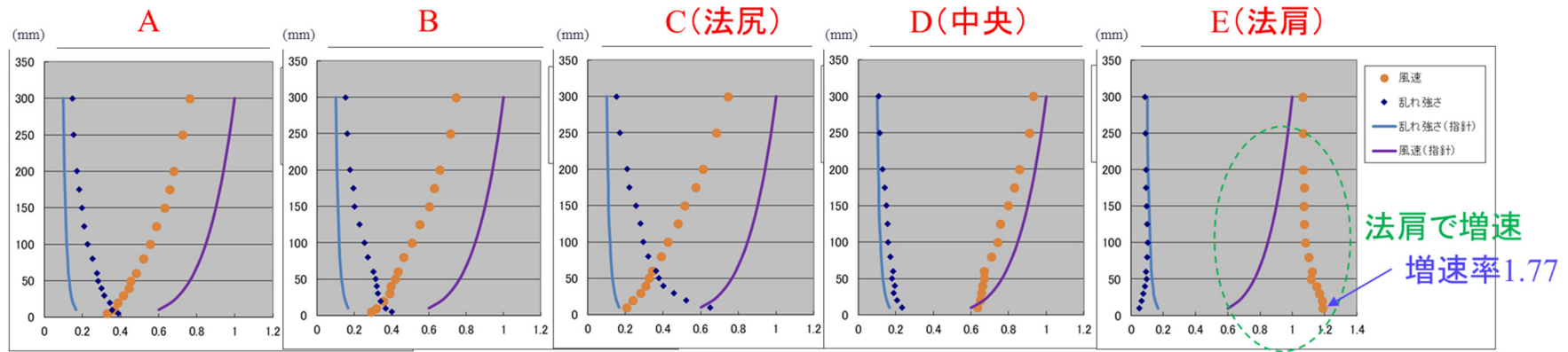
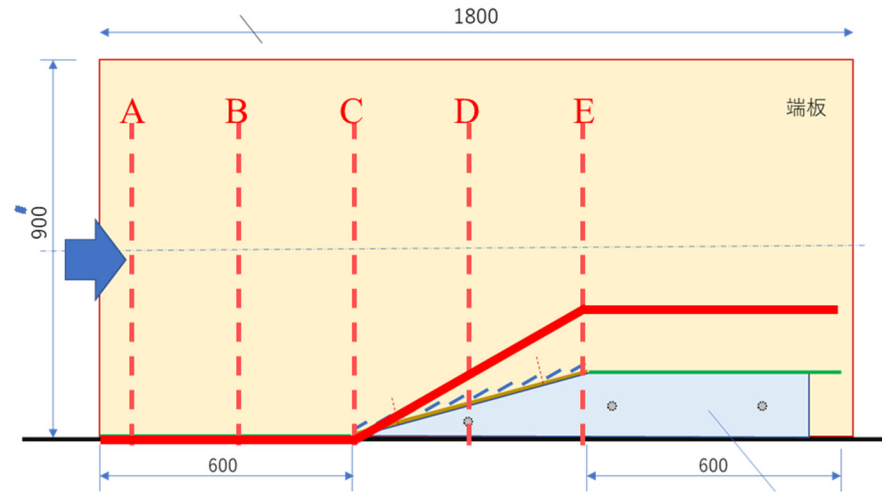
図 2-6 風速測定位置



(a) 風速測定結果 (地盤傾斜角 $\alpha=0$ 度)



(b) 風速測定結果 (地盤傾斜角 $\alpha=15$ 度)



(c) 風速測定結果 (地盤傾斜角 $\alpha=30$ 度)

図 2-7 風速測定結果

3. 実験ケース

実験は、地盤の傾斜角 α 、地盤と太陽電池アレイの相対角 β 、太陽電池アレイ面の鉛直方向の角度 θ 、および、風向を変化させて行い、図 3-1 および表 3-1 に示す合計 21 ケースの測定を行った。

- ・ 地盤の傾斜角 α : 0 度、15 度、30 度の 3 種類
 - ・ 地盤と太陽光アレイの相対角 β : 0 度、15 度、30 度の 3 種類
 - ・ 太陽光アレイ面の鉛直方向の角度 θ : 0 度、15 度、30 度の 3 種類
 - ・ アレイの方向 : 順方向 (太陽電池パネルの低いほうから風が吹く風向)、逆方向 (太陽電池パネルの高いほうから風が吹く風向)
- * 太陽電池パネルの設置された板の向きを変えることにより、太陽電池パネルに対する風向を逆にした。

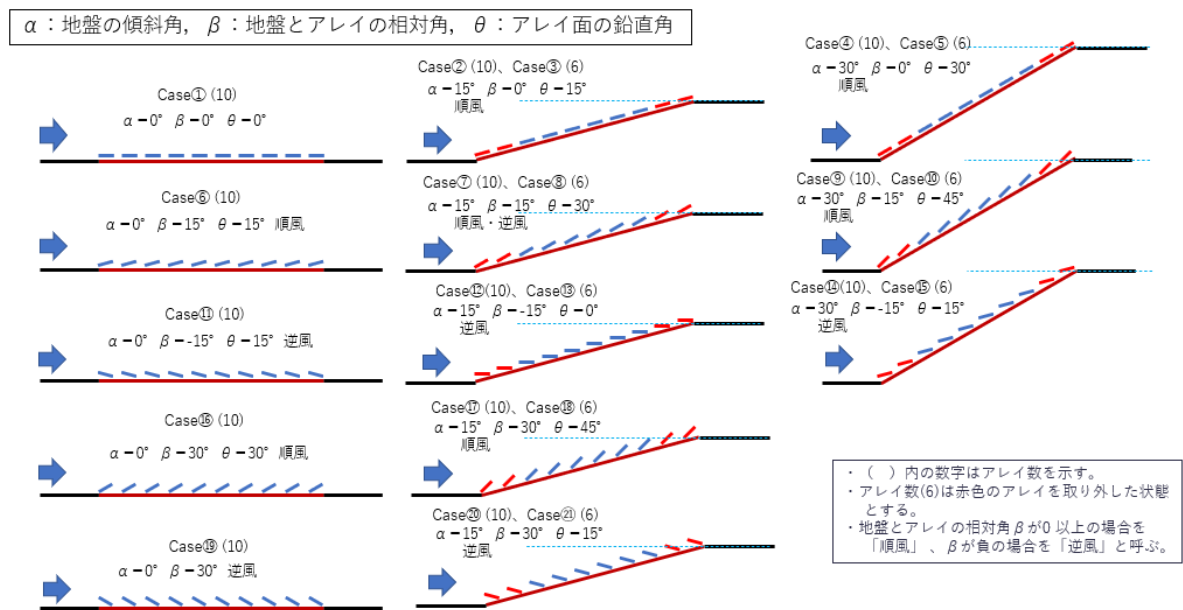


図 3-1 測定ケース

表 3-1 実験ケース

| ケース番号 | 地盤の 傾斜角 α (deg) | 地盤とアレイ 面の相対角 β (deg) | アレイ面の鉛 直角 (deg) | アレイの 列数 | 順風 逆風 |
|-------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------|----------|
| ① | 0 | 0 | 0 | 10 | 順風 |
| ② | 15 | 0 | 15 | 10 | 順風 |
| ③ | 15 | 0 | 15 | 6 | 順風 |
| ④ | 30 | 0 | 30 | 10 | 順風 |
| ⑤ | 30 | 0 | 30 | 6 | 順風 |
| ⑥ | 0 | 15 | 15 | 10 | 順風 |
| ⑦ | 15 | 15 | 30 | 10 | 順風 |
| ⑧ | 15 | 15 | 30 | 6 | 順風 |
| ⑨ | 30 | 15 | 45 | 10 | 順風 |
| ⑩ | 30 | 15 | 45 | 6 | 順風 |
| ⑪ | 0 | -15 | -15 | 10 | 逆風 |
| ⑫ | 15 | -15 | 0 | 10 | 逆風 |
| ⑬ | 15 | -15 | 0 | 6 | 逆風 |
| ⑭ | 30 | -15 | 15 | 10 | 逆風 |
| ⑮ | 30 | -15 | 15 | 6 | 逆風 |
| ⑯ | 0 | 30 | 30 | 10 | 順風 |
| ⑰ | 15 | 30 | 45 | 10 | 順風 |
| ⑱ | 15 | 30 | 45 | 6 | 順風 |
| ⑲ | 0 | -30 | -30 | 10 | 逆風 |
| ⑳ | 15 | -30 | -15 | 10 | 逆風 |
| ㉑ | 15 | -30 | -15 | 6 | 逆風 |

* : 地盤とアレイの相対角 β が 0 以上の場合を「順風」、 β が負の場合を「逆風」と呼ぶ。

4. 実験結果

アレイの風力・風圧係の測定値を図 4-1 から図 4-21 に示す。

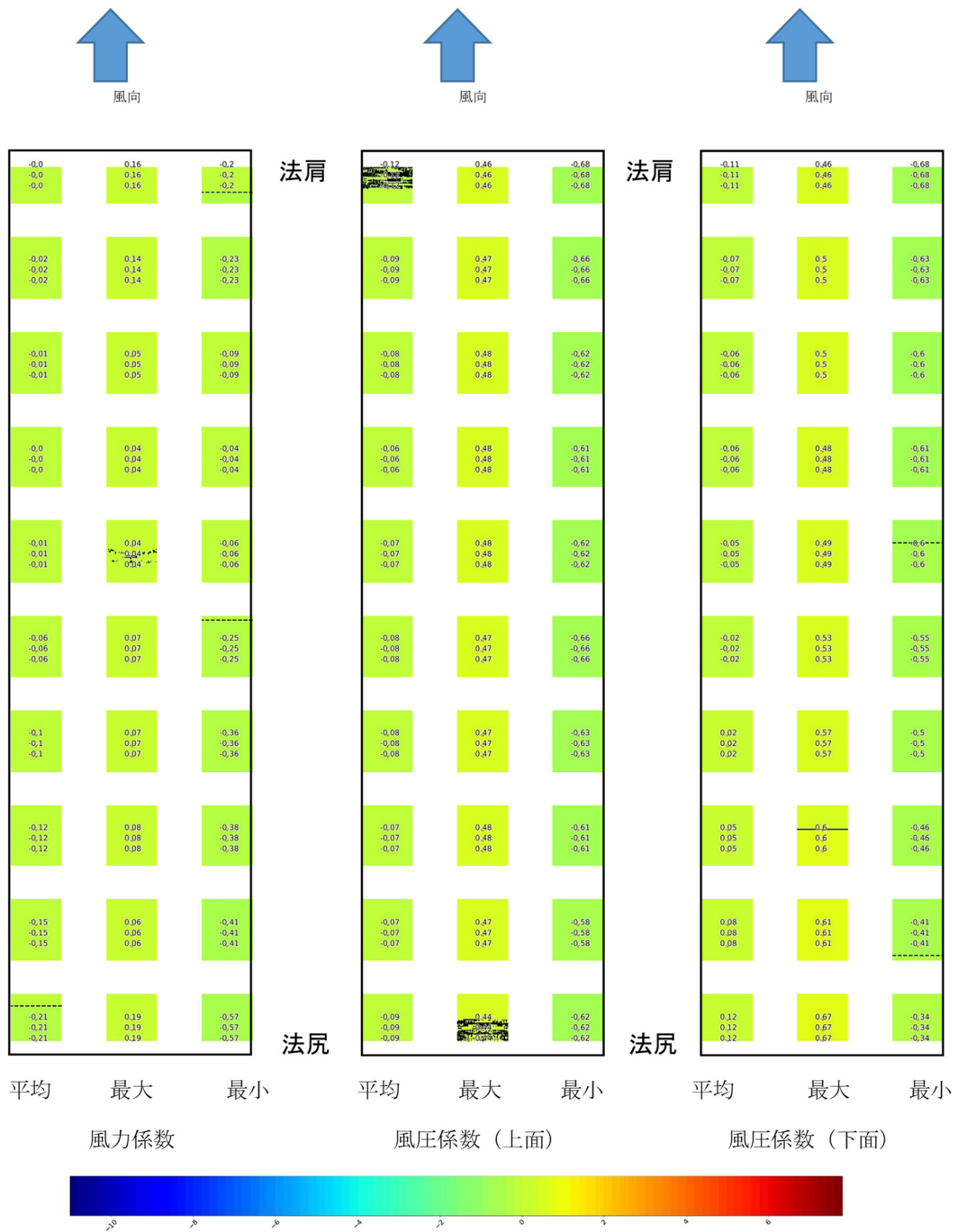


図 4-1 風力係数と風圧係数の分布 Case①

$\alpha=0$ 度、 $\beta=0$ 度、 $\theta=0$ 度、順風、10 列

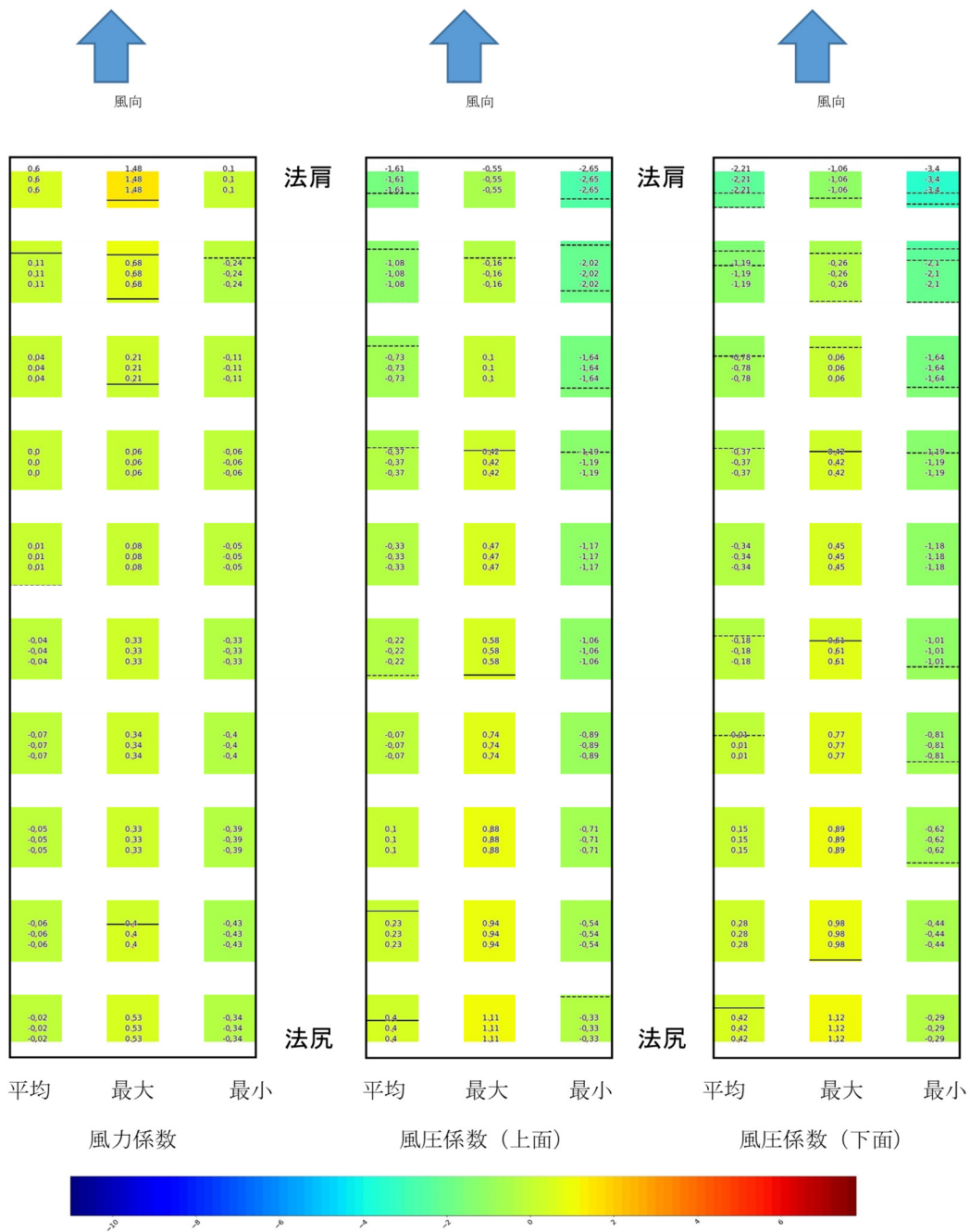


図 4-2 風力係数と風圧係数の分布 Case②
 $\alpha=15$ 度、 $\beta=0$ 度、 $\theta=15$ 度、順風、10 列

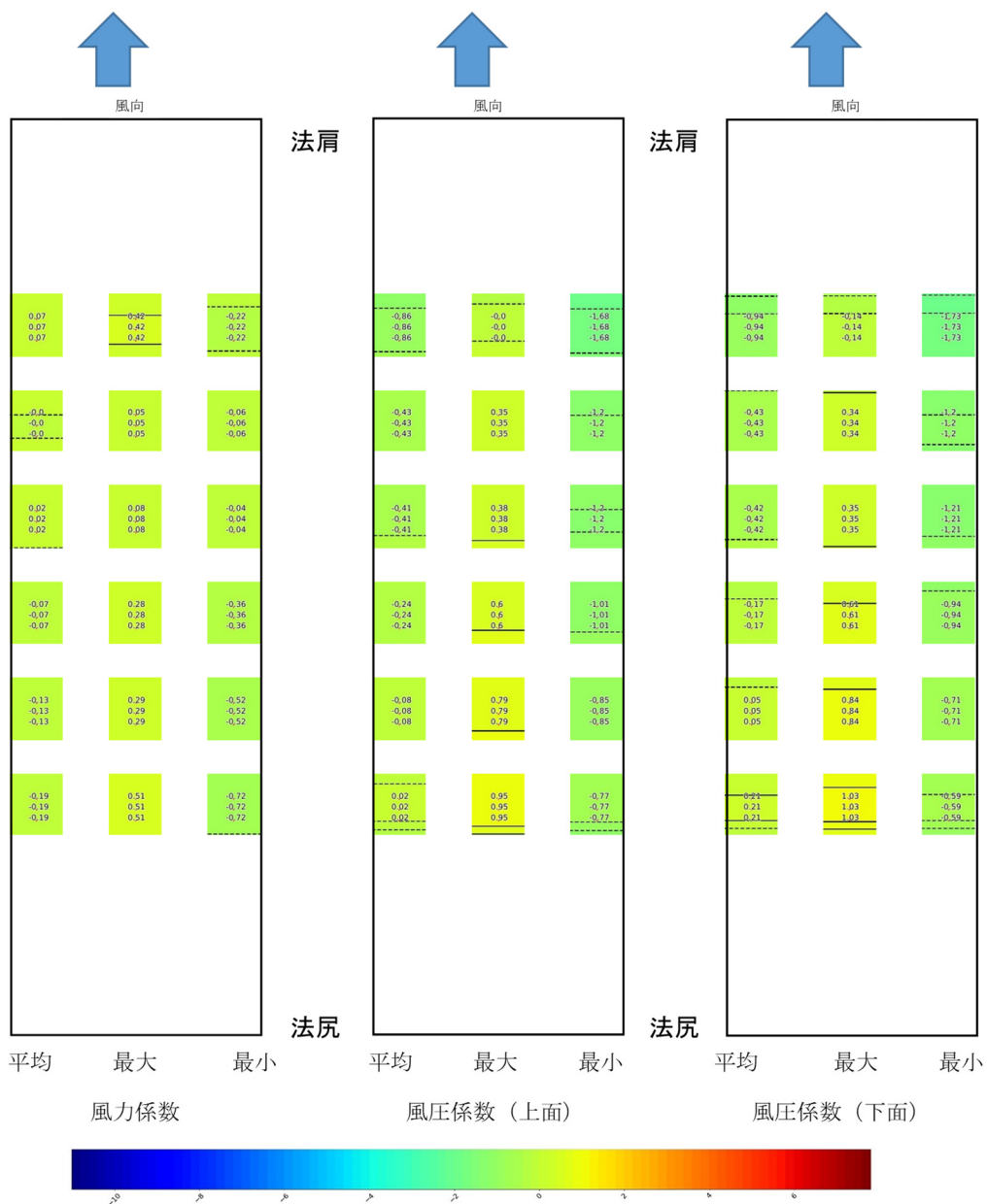


図 4-3 風力係数と風圧係数の分布 Case③

$\alpha=15$ 度、 $\beta=0$ 度、 $\theta=15$ 度、順風、6 列

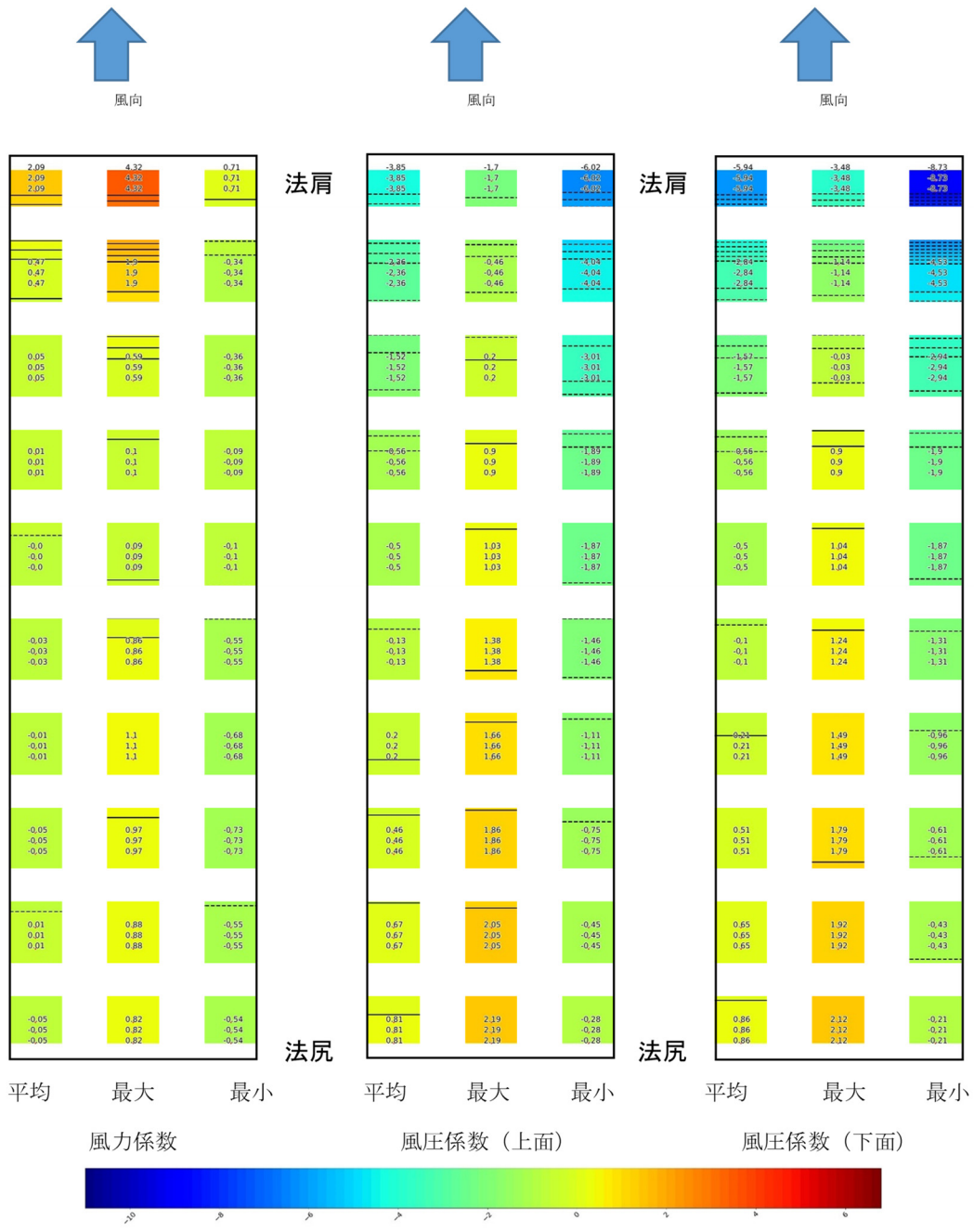


図4-4 風力係数と風圧係数の分布 Case④
 $\alpha=30$ 度、 $\beta=0$ 度、 $\theta=30$ 度、順風、10列

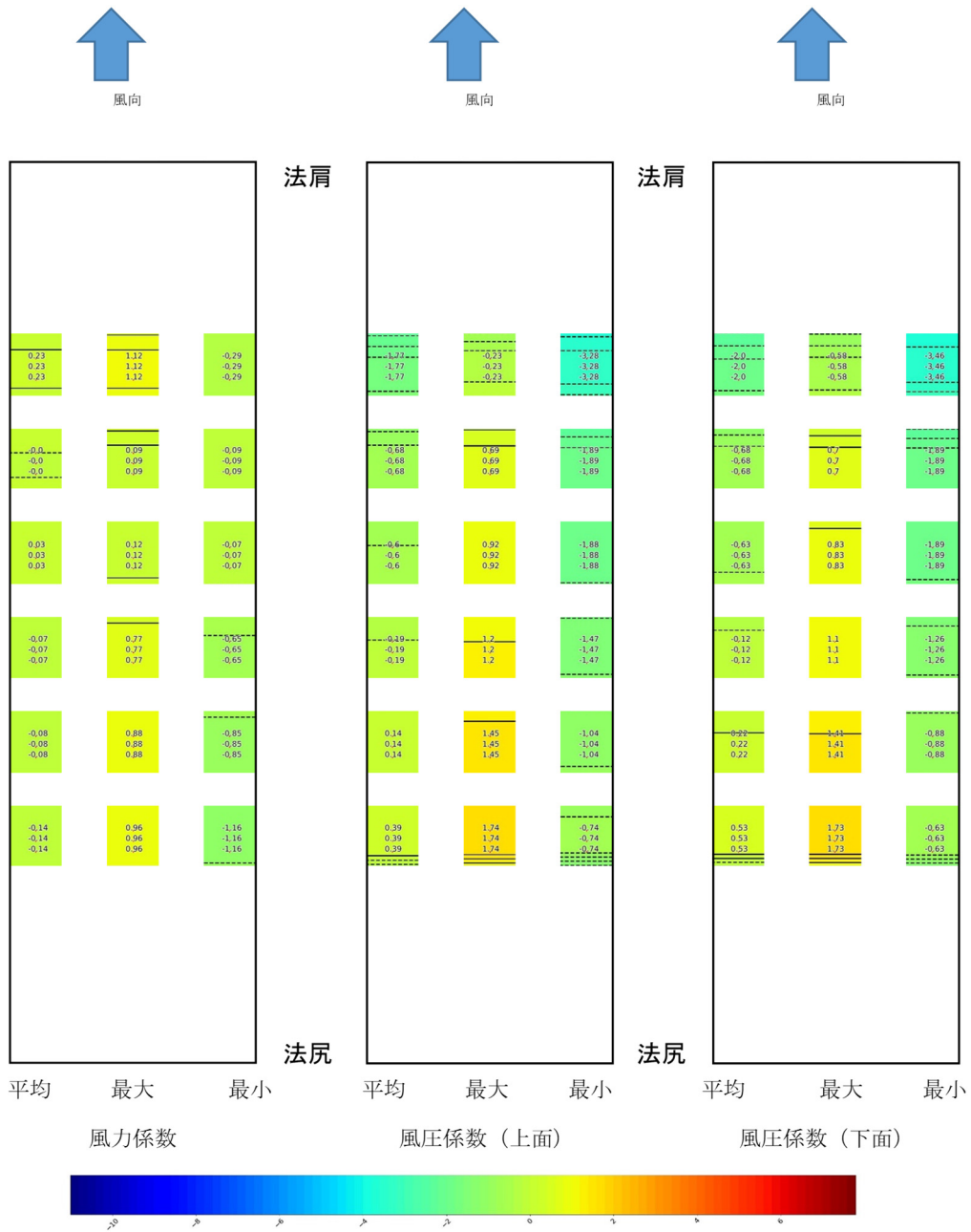


図 4-5 風力係数と風圧係数の分布 Case⑤

$\alpha=30$ 度、 $\beta=0$ 度、 $\theta=30$ 度、順風、6 列

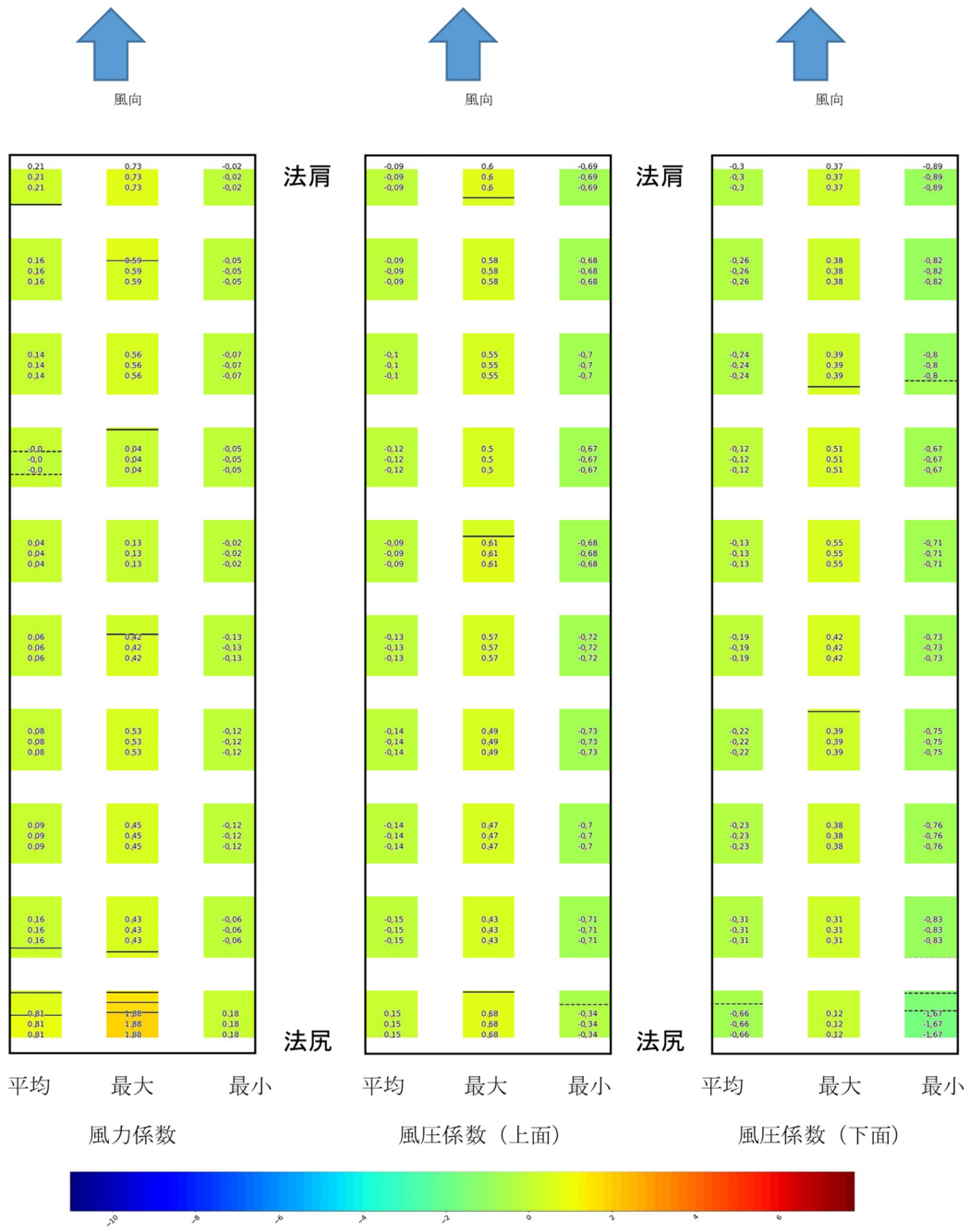


図4-6 風力係数と風圧係数の分布 Case⑥
 $\alpha=0$ 度、 $\beta=15$ 度、 $\theta=15$ 度、順風、10 枚

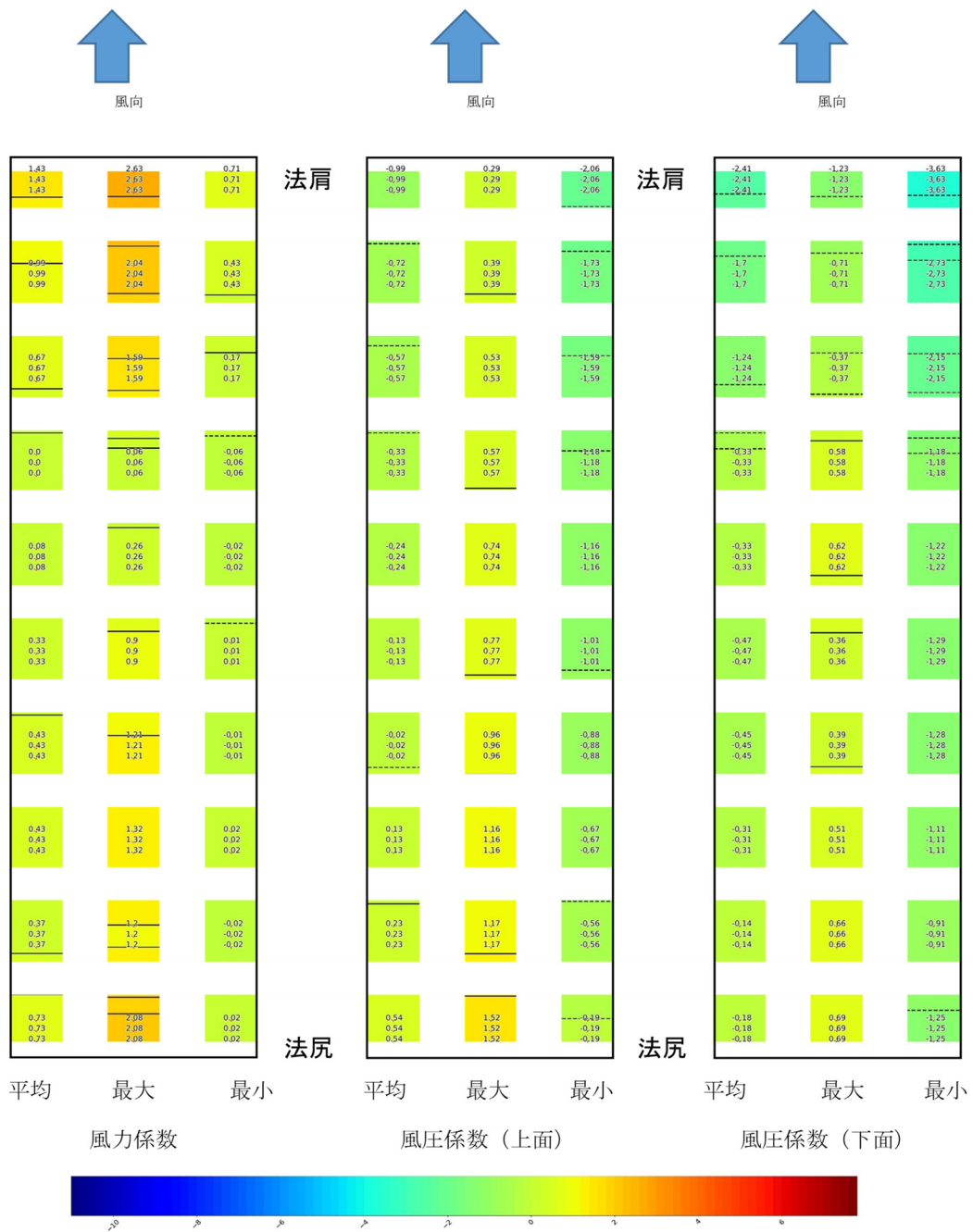


図4-7 風力係数と風圧係数の分布 Case⑦
 $\alpha=15$ 度、 $\beta=15$ 度、 $\theta=30$ 度、順風、10列

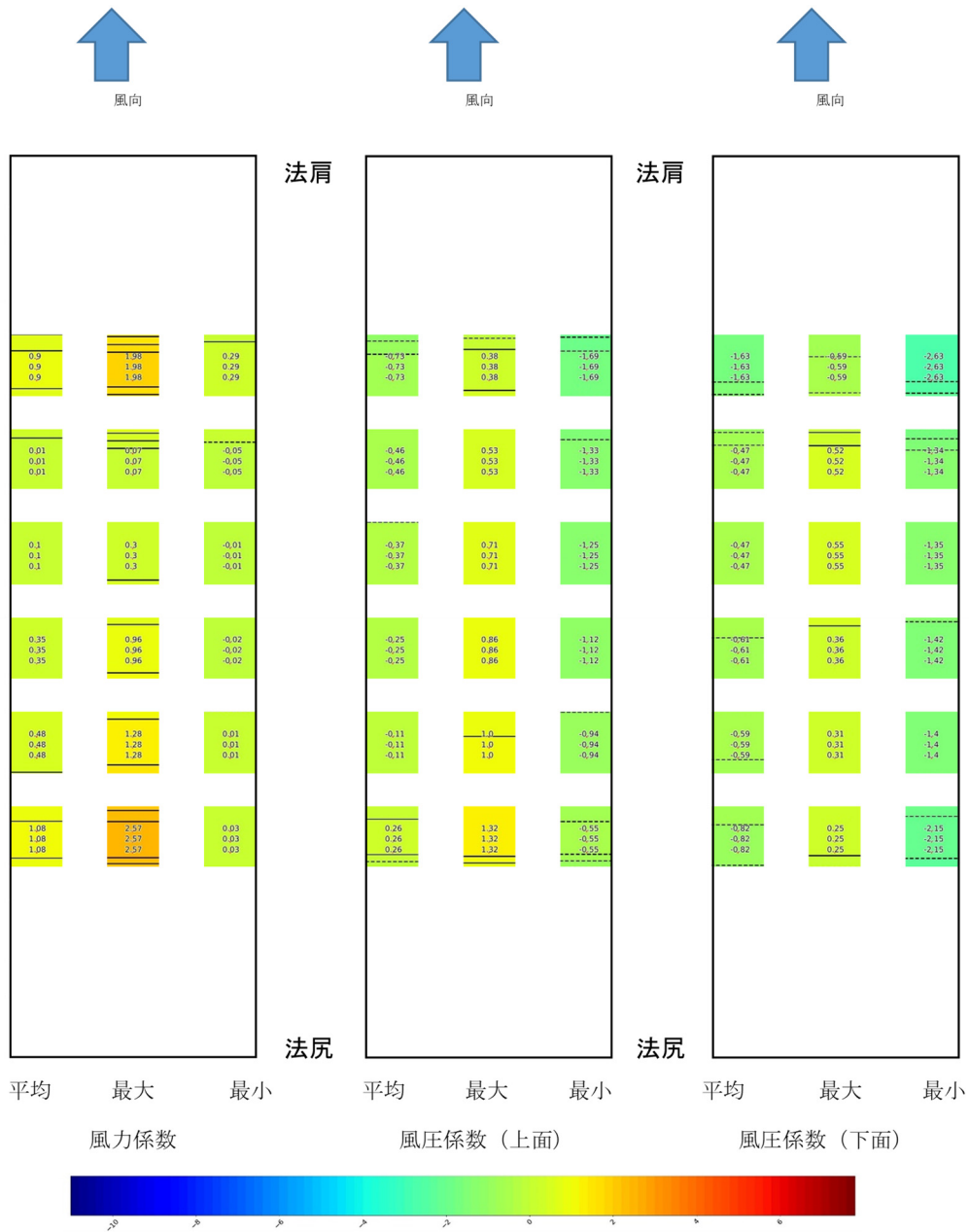


図 4-8 風力係数と風圧係数の分布 Case⑧

$\alpha=15$ 度、 $\beta=15$ 度、 $\theta=30$ 度、順風、6 列

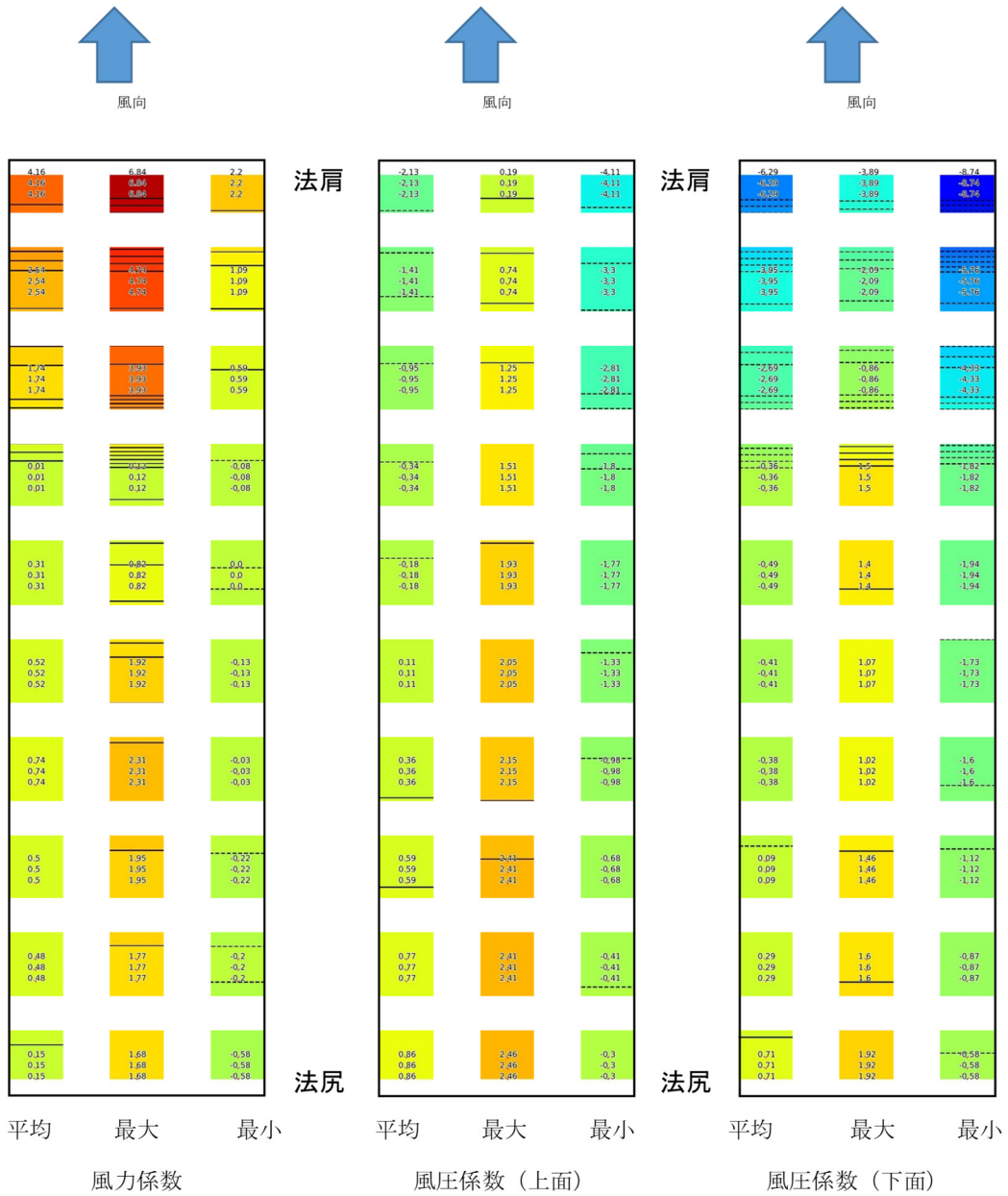


図4-9 風力係数と風圧係数の分布 Case⑨
 $\alpha=30$ 度、 $\beta=15$ 度、 $\theta=45$ 度、順風、10 列

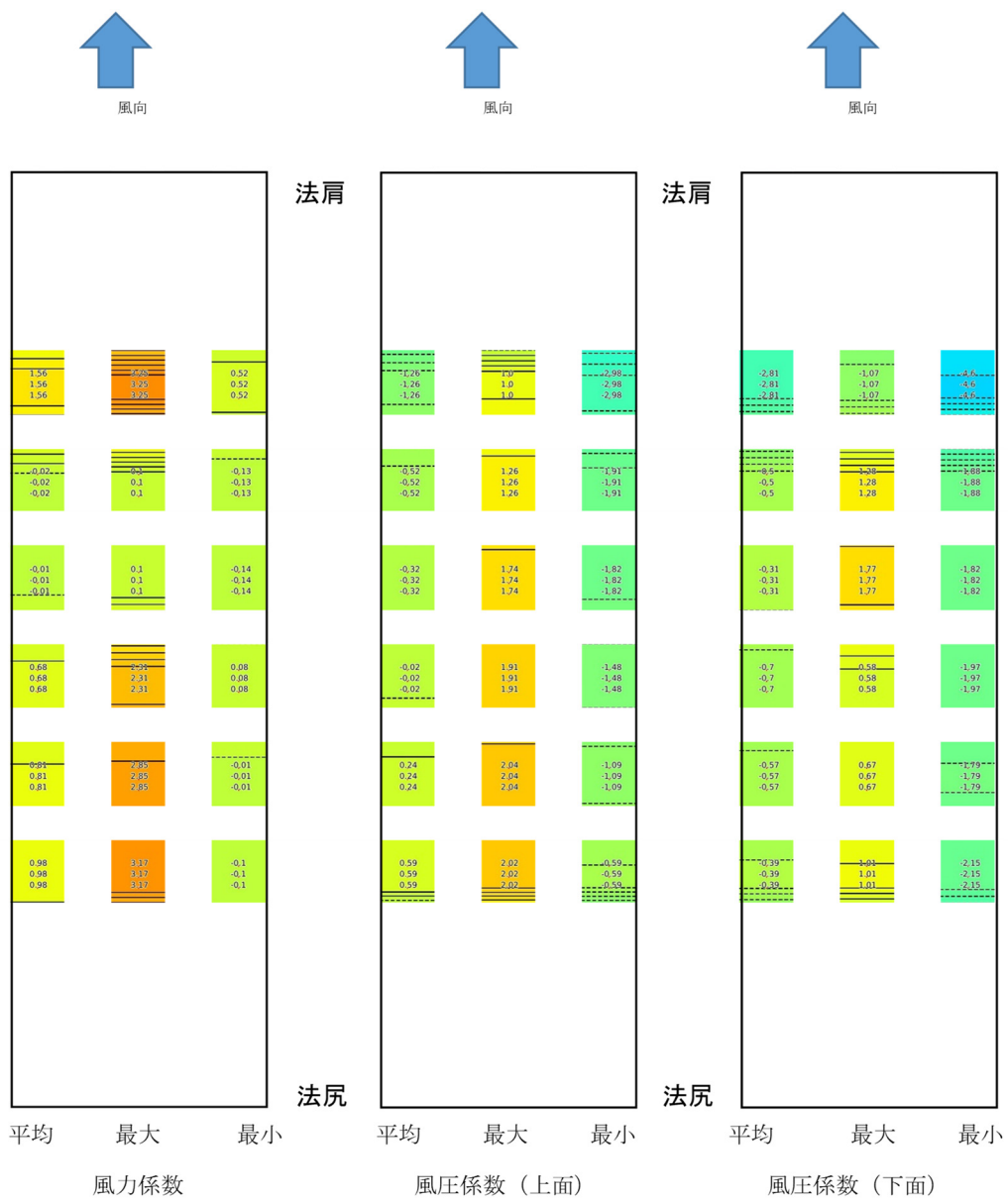


図 4-10 風力係数と風圧係数の分布 Case⑩

$\alpha=30$ 度、 $\beta=15$ 度、 $\theta=45$ 度、順風、6 列

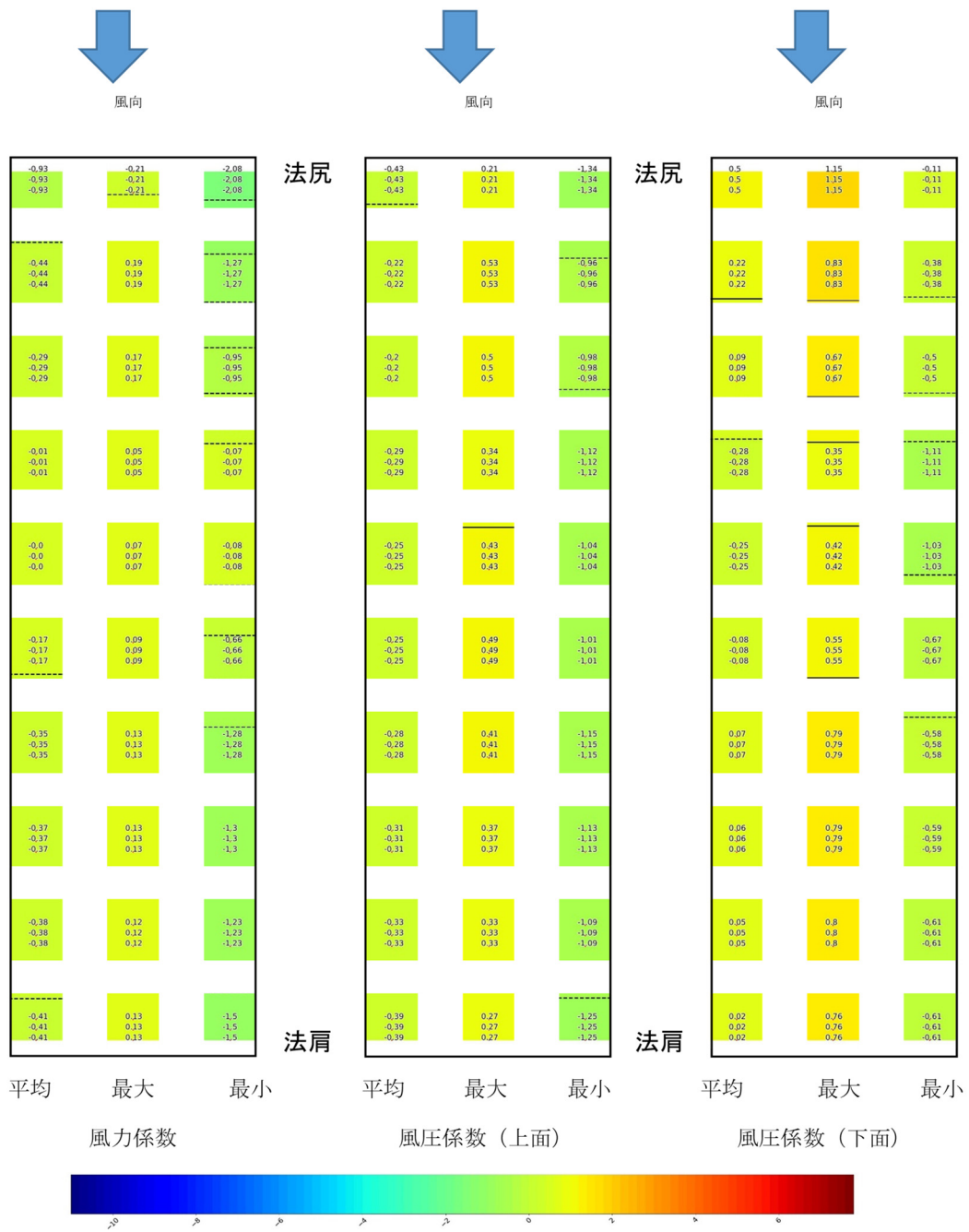


図 4-11 風力係数と風圧係数の分布 Case⑪

$\alpha=0$ 度、 $\beta=15$ 度、 $\theta=15$ 度、逆風、10 列

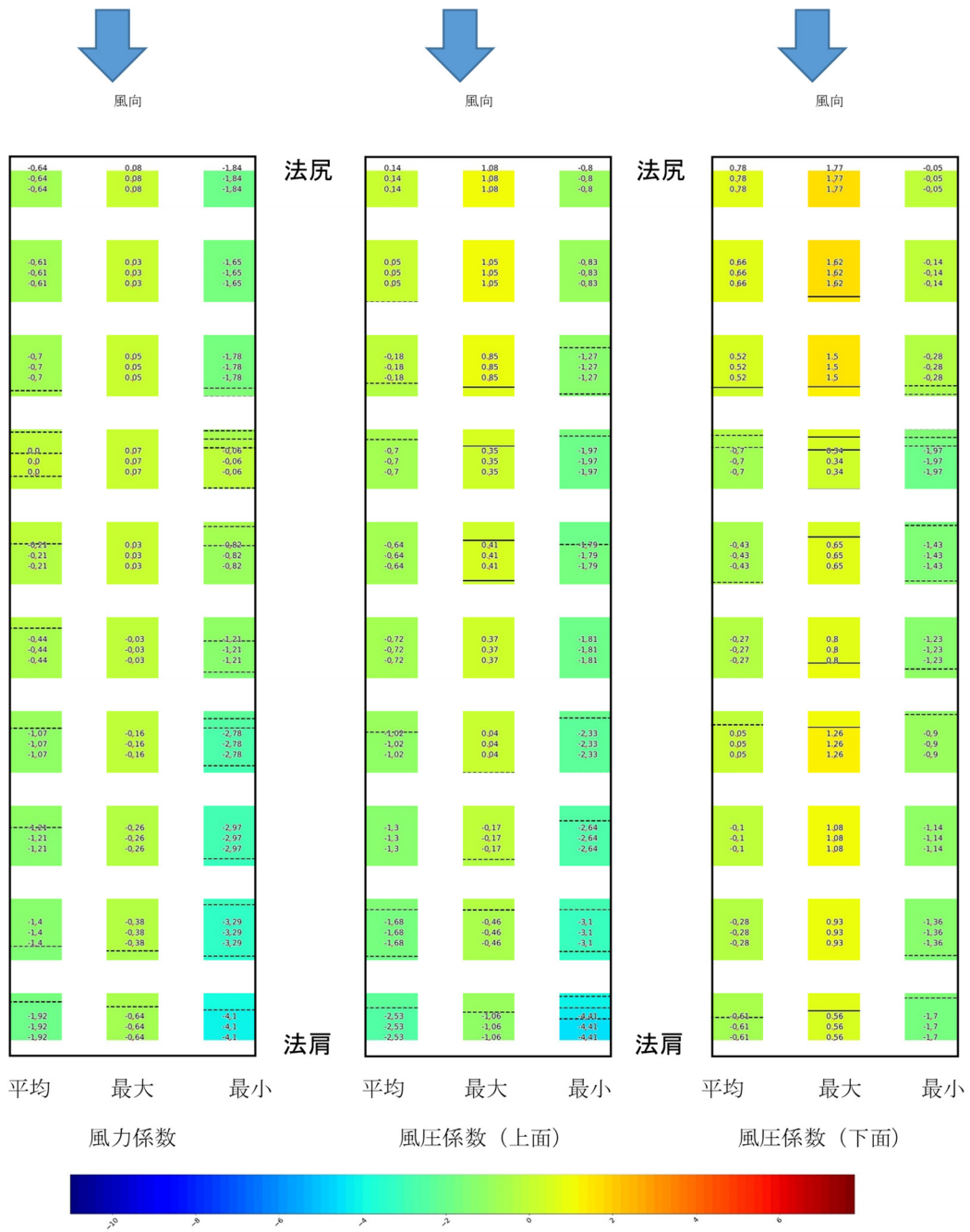


図 4-12 風力係数と風圧係数の分布 Case⑫

$\alpha=15$ 度、 $\beta=15$ 度、 $\theta=0$ 度、逆風、10 列

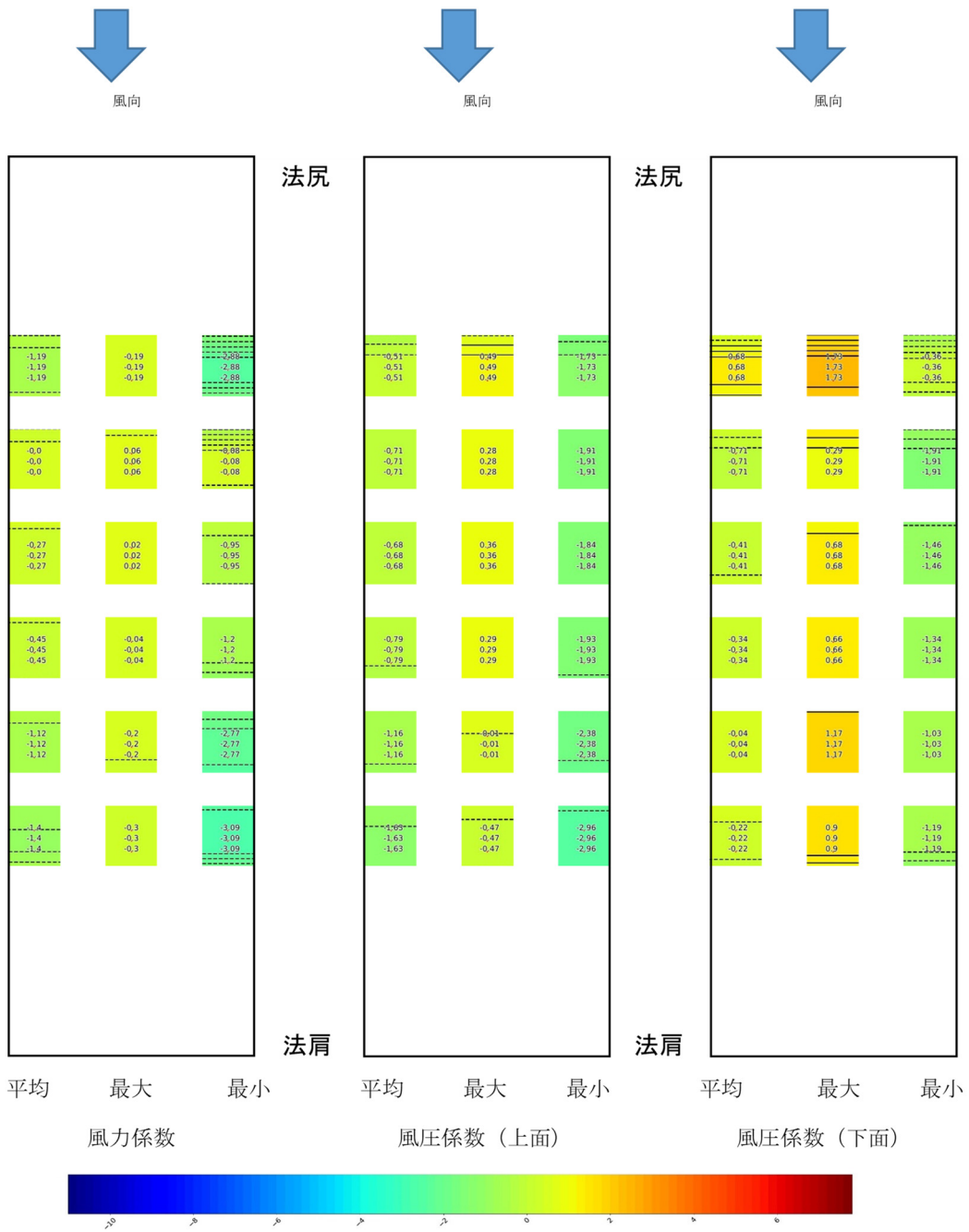


図 4-13 風力係数と風圧係数の分布 Case⑬

$\alpha=15$ 度、 $\beta=15$ 度、 $\theta=0$ 度、逆風、6 列

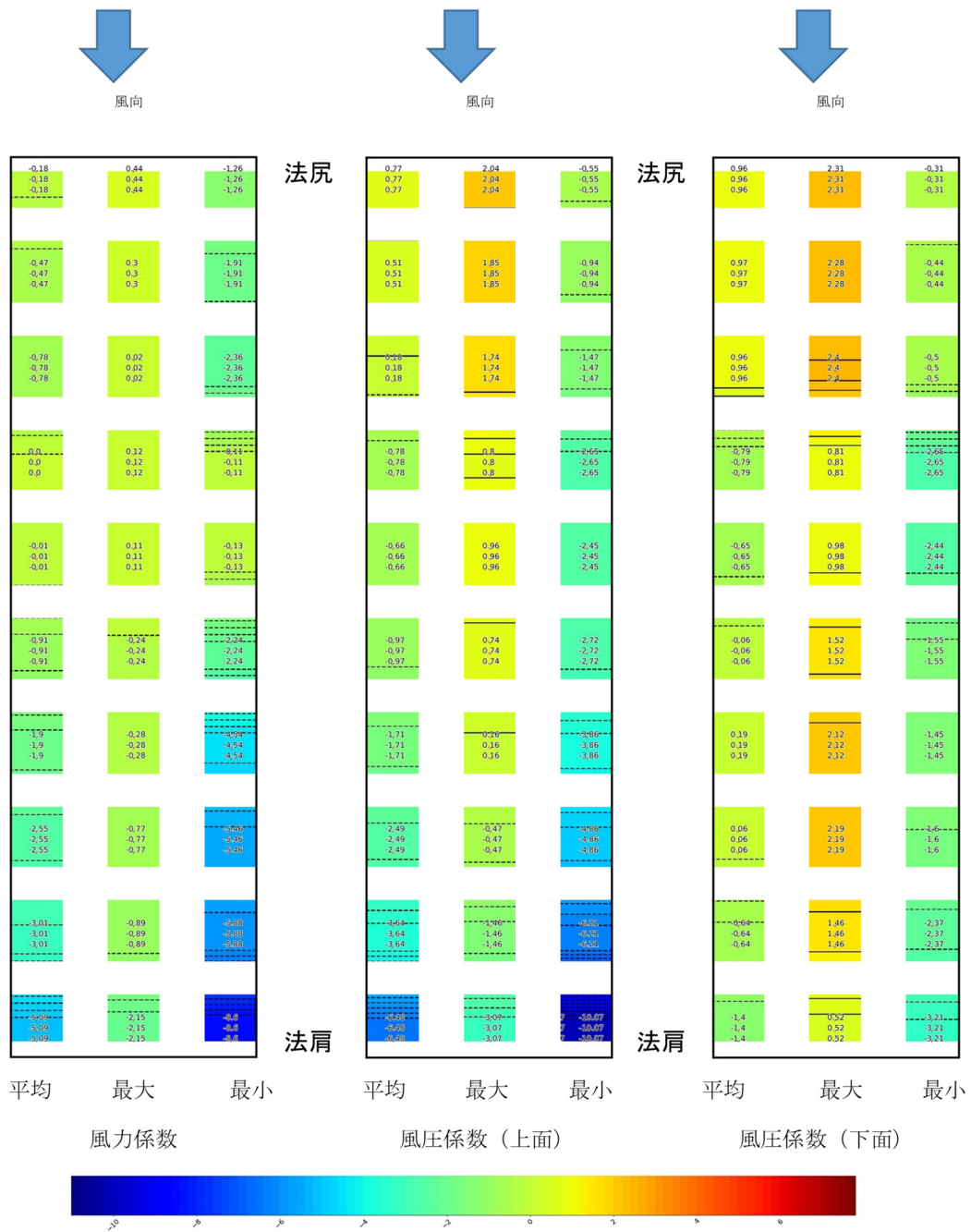


図 4-14 風力係数と風圧係数の分布 Case⑭
 $\alpha=30$ 度、 $\beta=15$ 度、 $\theta=15$ 度、逆風、10 列

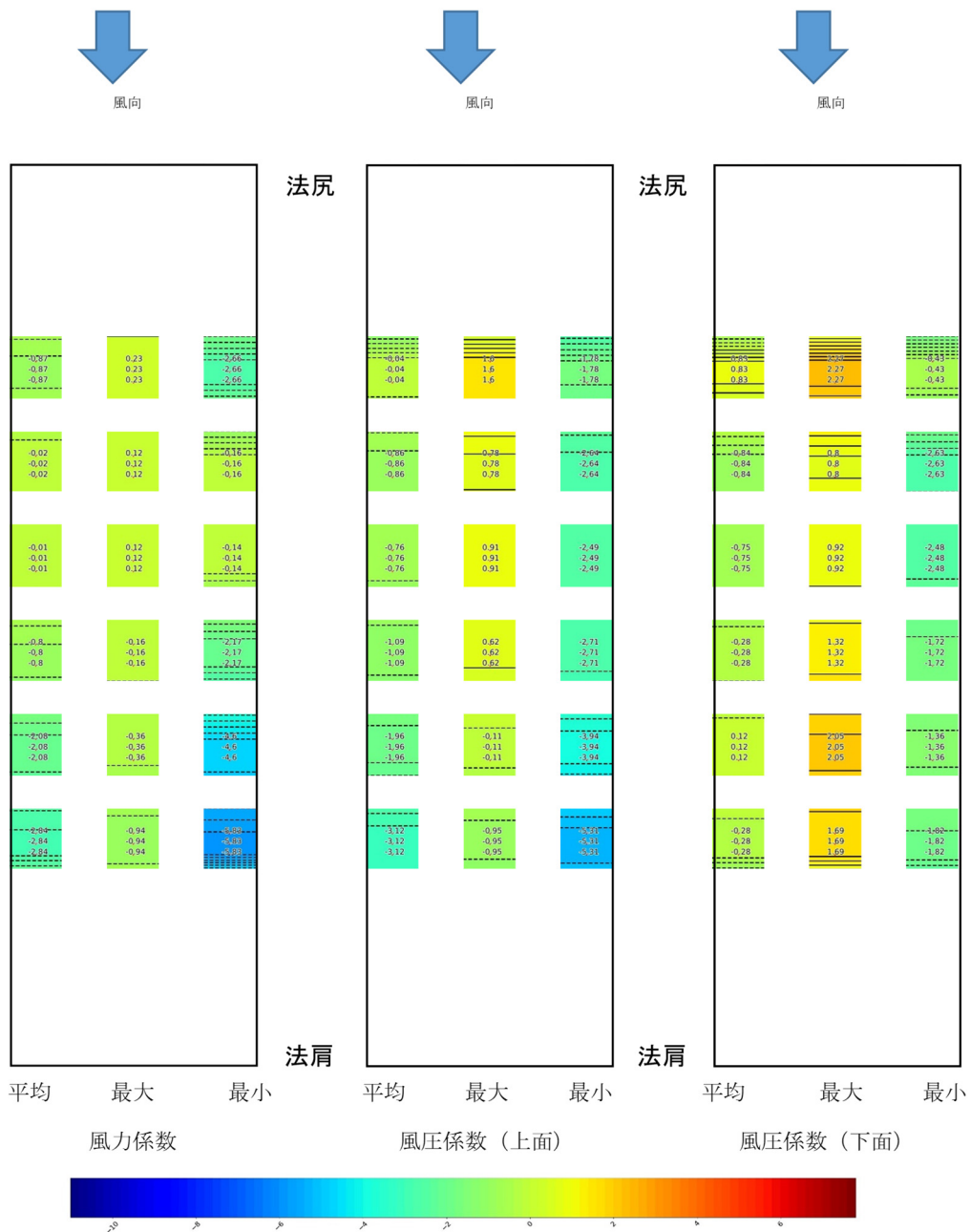


図 4-15 風力係数と風圧係数の分布 Case⑮

$\alpha=30$ 度、 $\beta=15$ 度、 $\theta=15$ 度、逆風、6 列

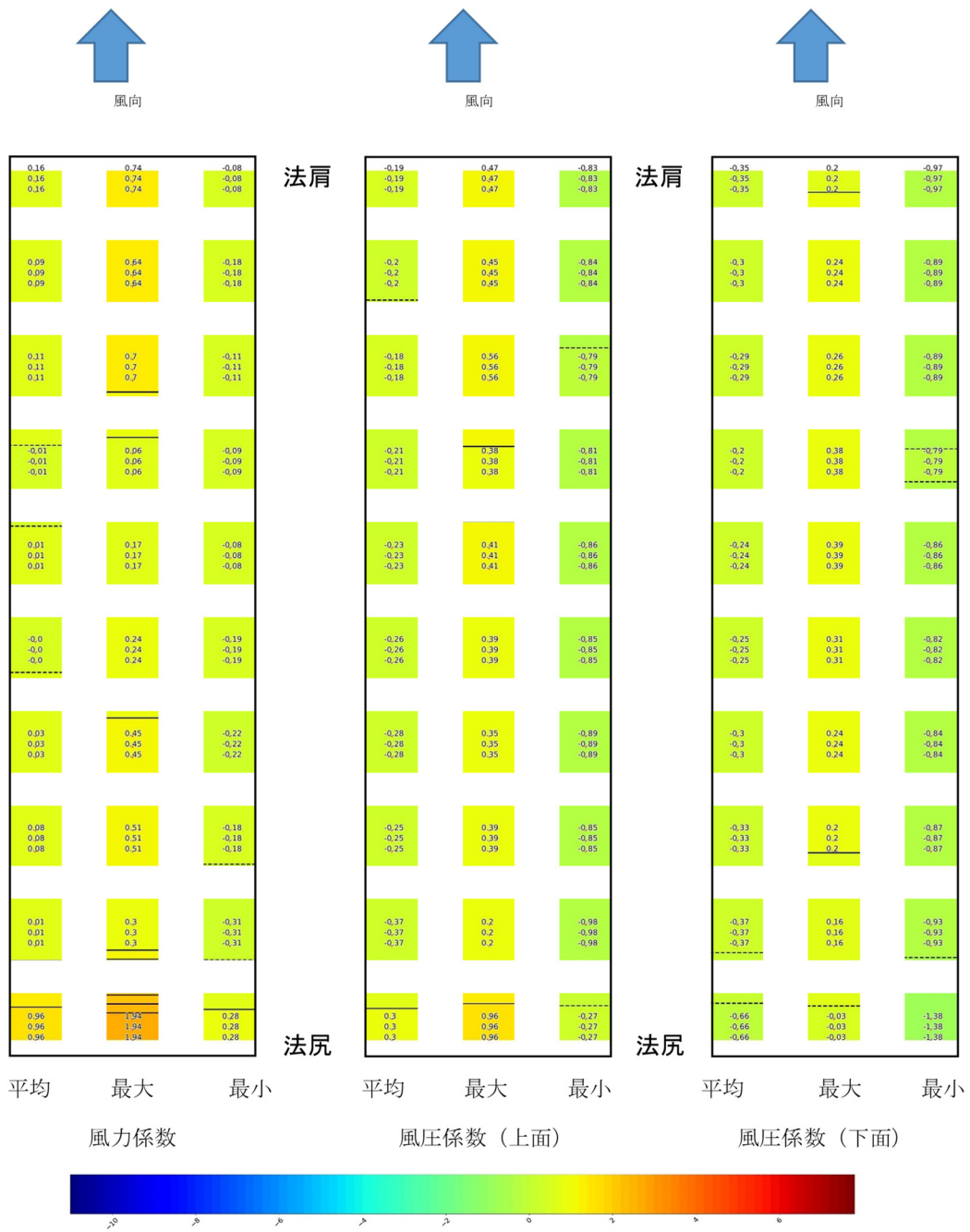


図 4-16 風力係数と風圧係数の分布 Case⑩
 $\alpha=0$ 度、 $\beta=30$ 度、 $\theta=30$ 度、順風、10 列

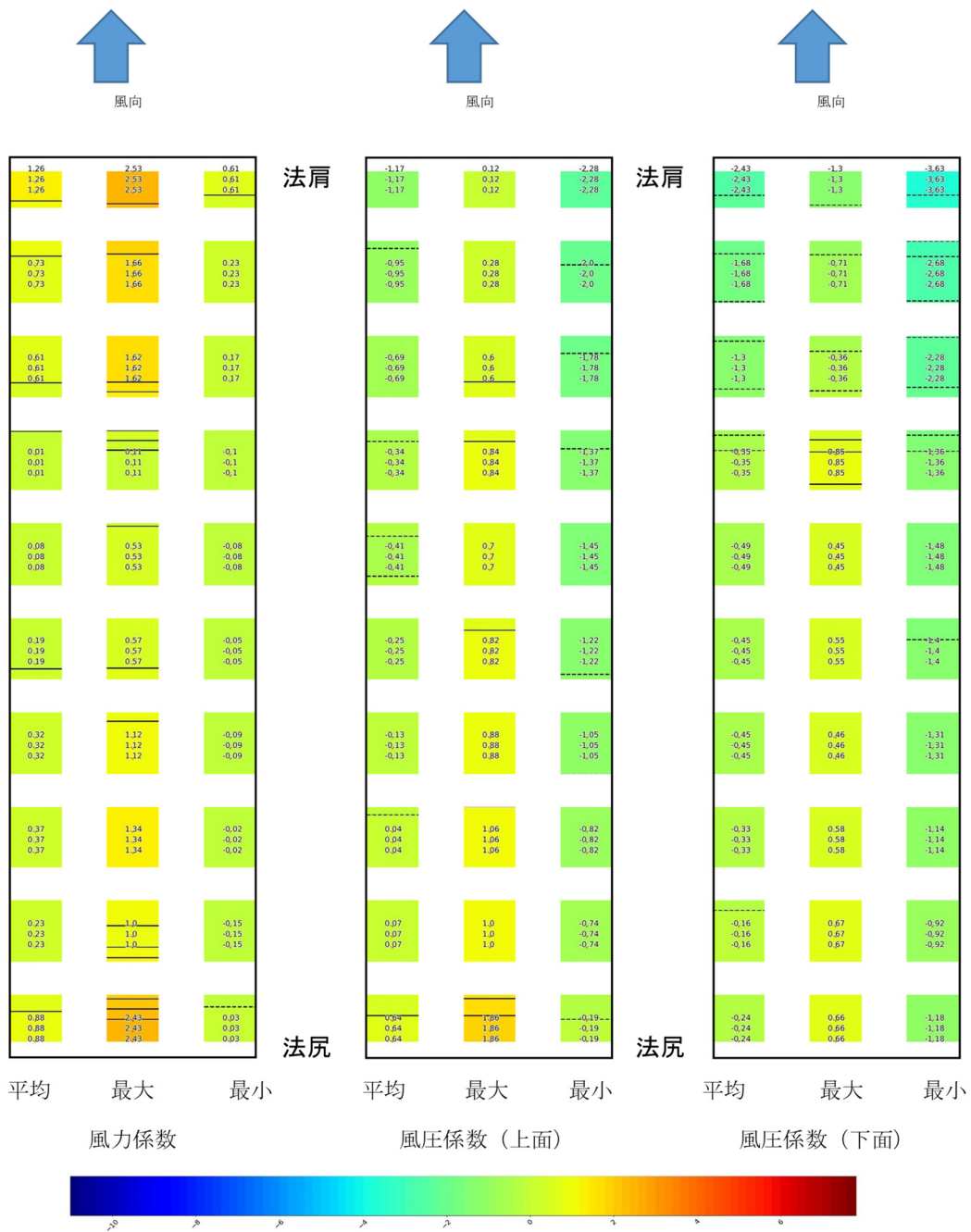


図 4-17 風力係数と風圧係数の分布 Case⑰
 $\alpha=15$ 度、 $\beta=30$ 度、 $\theta=45$ 度、順風、10 列

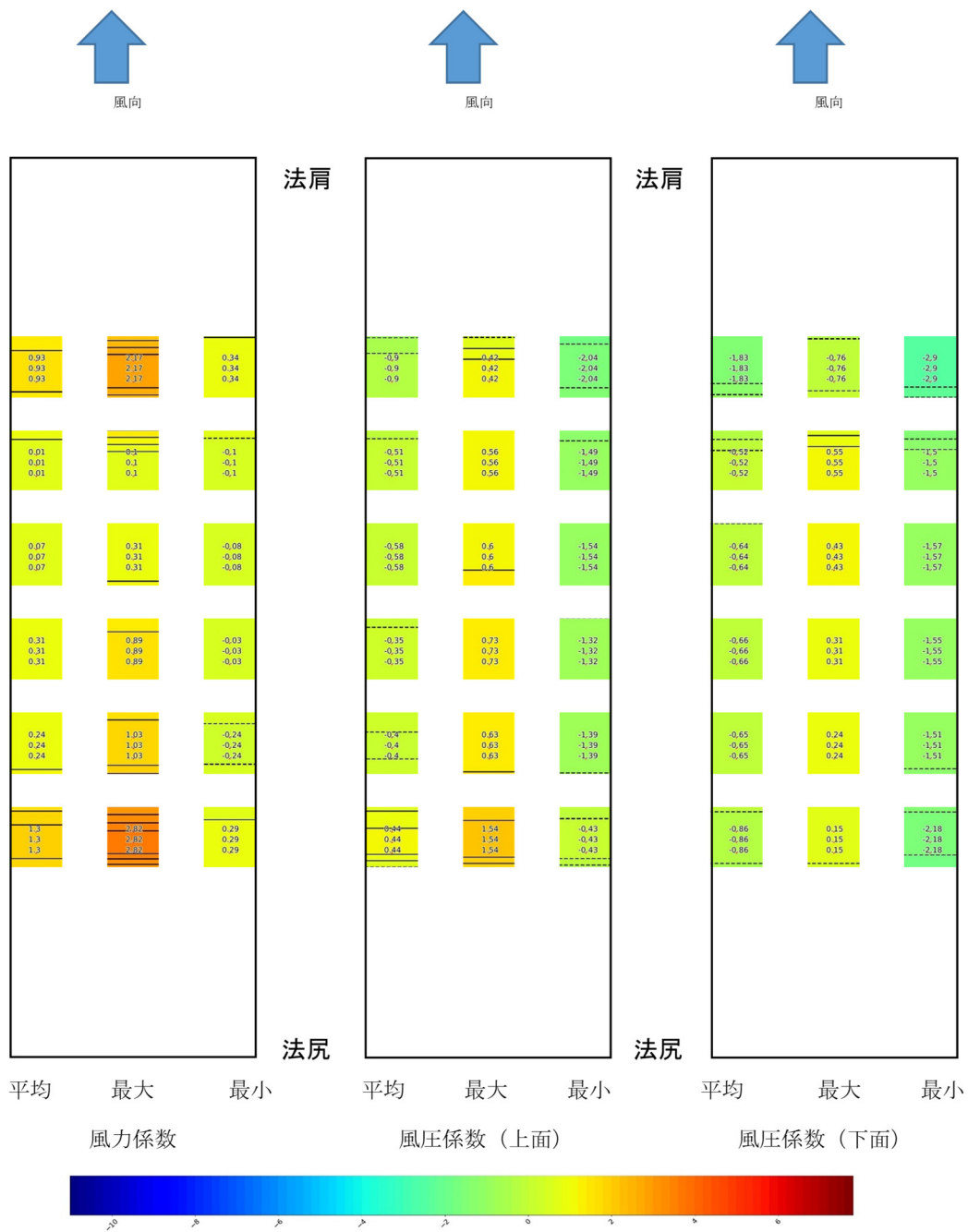


図 4-18 風力係数と風圧係数の分布 Case⑩

$\alpha=15$ 度、 $\beta=30$ 度、 $\theta=45$ 度、順風、6 列

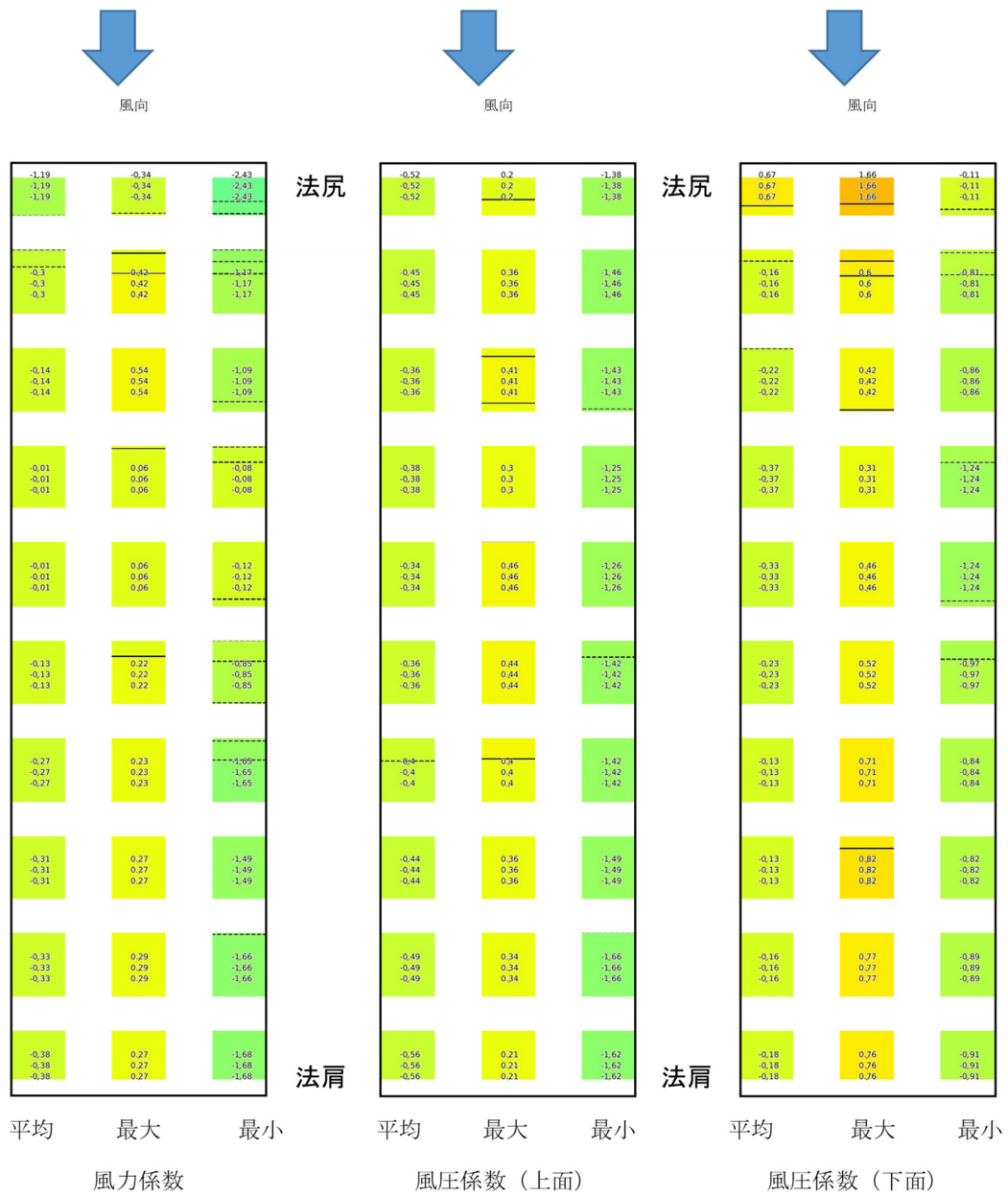


図 4-19 風力係数と風圧係数の分布 Case⑱
 $\alpha=0$ 度、 $\beta=30$ 度、 $\theta=30$ 度、逆風、10 列

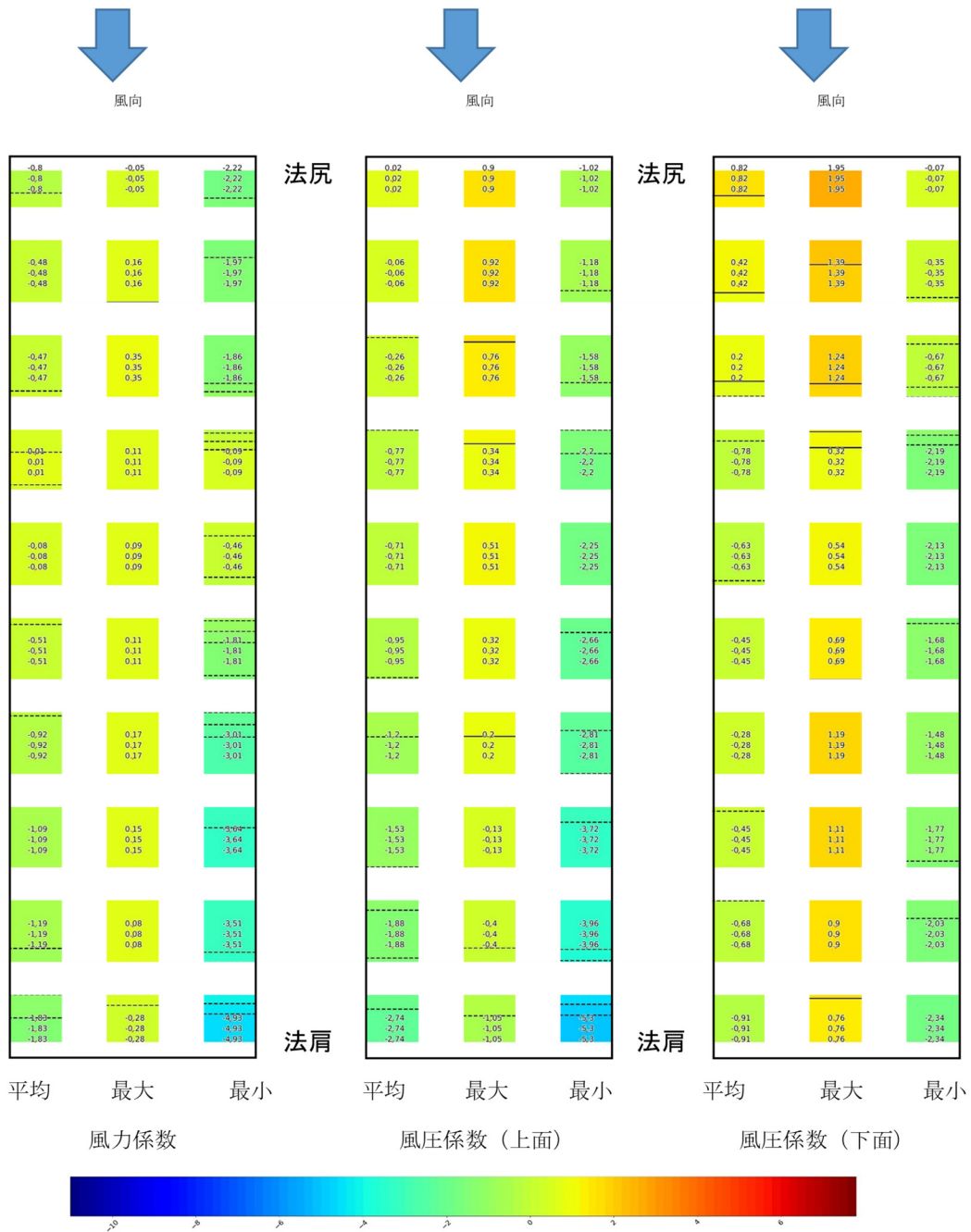


図 4-20 風力係数と風圧係数の分布 Case⑳
 $\alpha=15$ 度、 $\beta=30$ 度、 $\theta=15$ 度、逆風、10 列

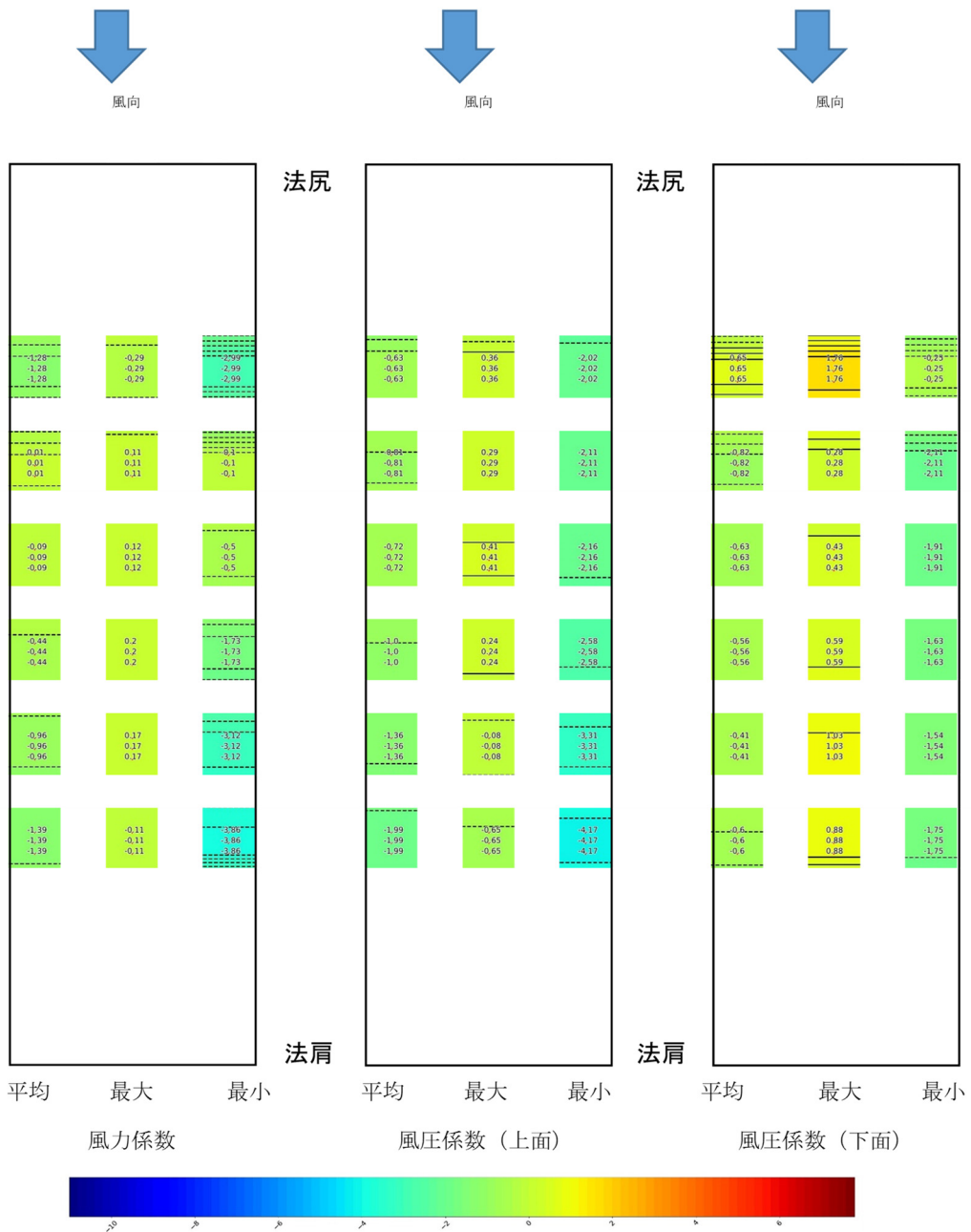


図 4-21 風力係数と風圧係数の分布 Case②

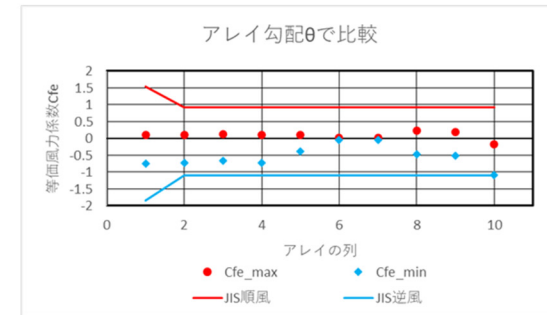
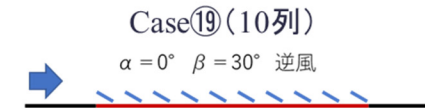
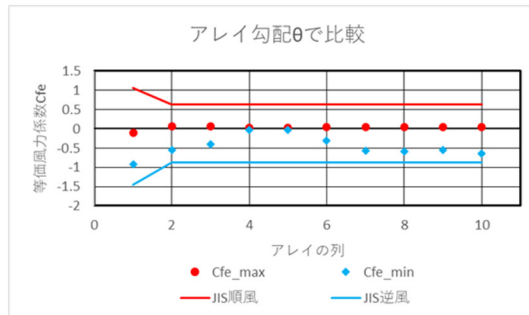
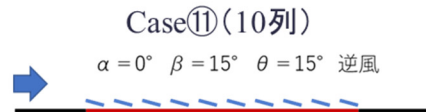
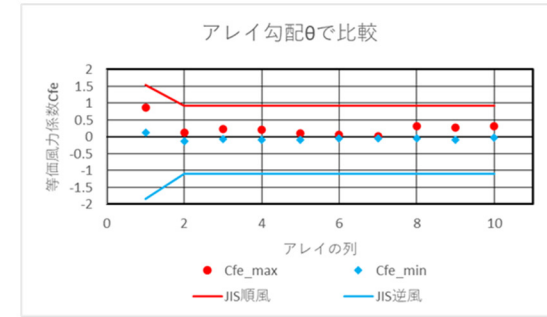
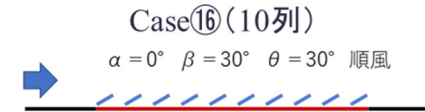
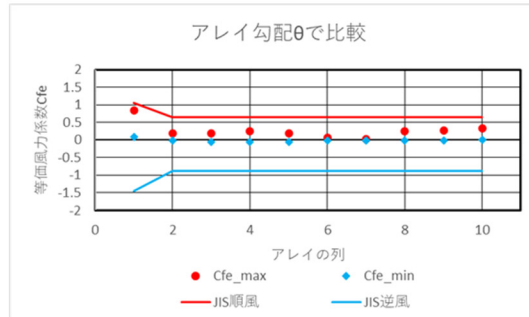
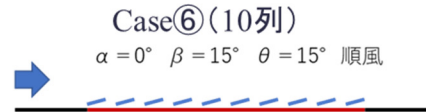
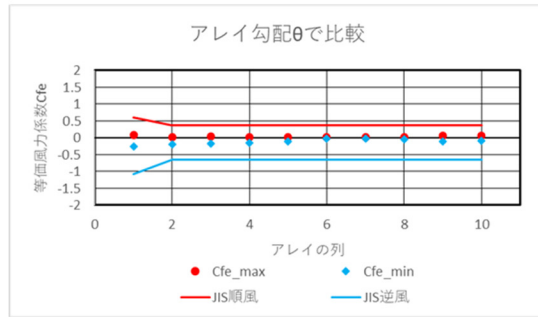
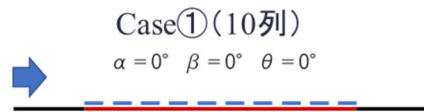
$\alpha=15$ 度、 $\beta=30$ 度、 $\theta=15$ 度、逆風、6 列

5. 設計用風力係数の検討

5.1 JIS C 8955:2017 との比較

風洞実験により得られたアレイ面の最大および最小の風力係数を地表面粗度区分Ⅱのガスト影響係数 $G_f (=2.2)$ で除し、等価風力係数を求め、それらの値を JIS C 8955:2017 での順風（正圧）および逆風（負圧）の風力係数と比較した結果を図 5-1～図 5-4 に示す。同 JIS の風力係数は、いずれも絶対値で表しているが、ここでは風洞実験結果と比較しやすいように順風（正圧）での値を正（+）、逆風（負圧）での値を負（-）で表している。また、「傾斜地設置型太陽光発電システム的设计・施工ガイドライン 2021 年版」（以後、ガイドラインと称する）では、傾斜地に設置された太陽電池アレイのアレイ面の風力係数は、地盤面とアレイ面の相対角 β を用いて JIS C 8955:2017 での風力係数の計算式に当てはめることによって設計用風力係数を与えることができるとしていることから、ここではその風力係数を破線で表している。

風洞実験の結果のうち地盤の傾斜角 $\alpha=0$ 度のケース（Case①、⑥、⑪、⑯、⑲）では、いずれも JIS の規定値を超える結果はみられない。地盤の傾斜角 $\alpha=15$ 度のケース（Case ②、③、⑦、⑧、⑫、⑬、⑰、⑱）では、法尻および法肩付近に設置されたアレイで JIS やガイドラインの規定値を超える場合があり、ガイドラインの規定値でも危険側の設計荷重を与える懸念がある。特に、逆風となるケース（Case⑫、⑳）では法尻付近のアレイでガイドラインの規定値を大幅に超える場合がある。地盤の傾斜角 $\alpha=30$ 度のケースでは、その傾向が顕著となり、JIS やガイドラインの規定値の 3 倍を超える値を示す。また、法尻、法肩のアレイを除いたケース（6 列のアレイのケース）においても、JIS やガイドラインの規定値を超える場合がある。また、法肩および法尻付近のアレイを取り外した場合においても、風上端部や風下端部のアレイで JIS やガイドラインの規定値を若干超えている場合もみられる。

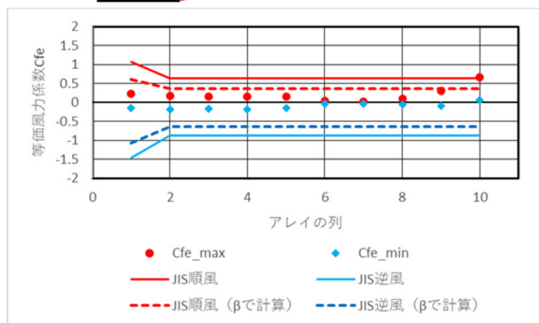


α : 地盤の傾斜角
 β : 地盤とアレイ面の相対角
 θ : アレイ面の鉛直角

図 5-1 最大・最小等価風力係数と JIS 規定値との比較 ($\alpha = 0$ 度 : Case①、⑥、⑪、⑯、⑲)

上段: Case②(10列)、下段: Case③(6列)

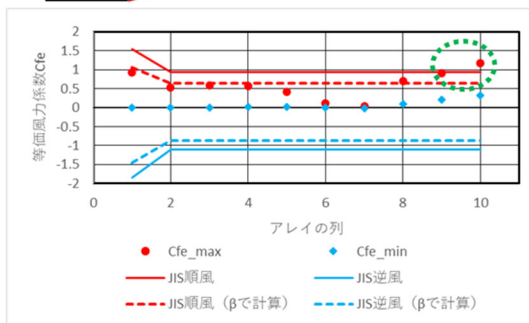
$\alpha = 15^\circ$ $\beta = 0^\circ$ $\theta = 15^\circ$



上段: Case⑦(10列)、下段: Case⑧(6列)

$\alpha = 15^\circ$ $\beta = 15^\circ$ $\theta = 30^\circ$

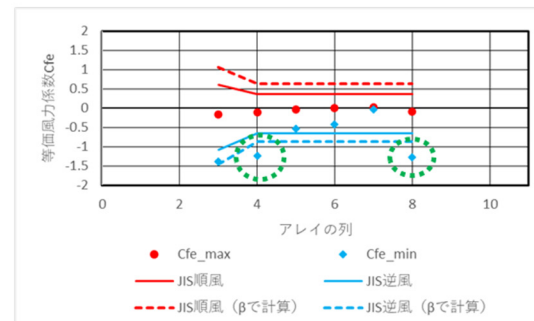
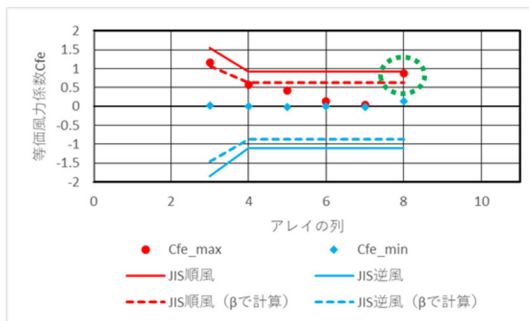
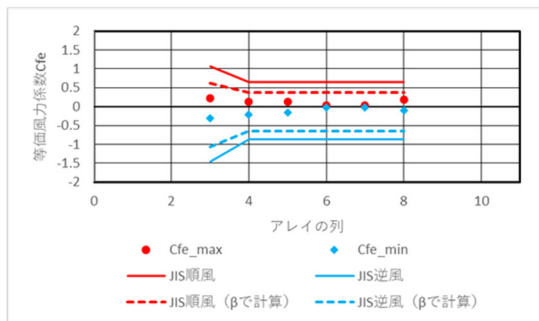
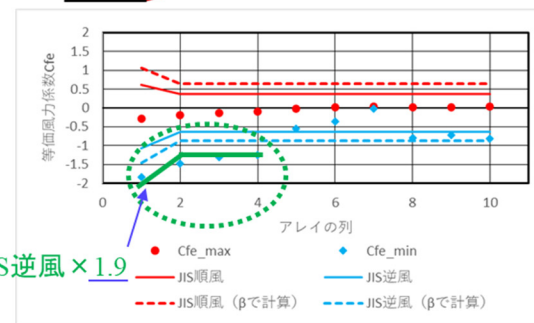
順風



上段: Case⑫(10列)、下段: Case⑬(6列)

$\alpha = 15^\circ$ $\beta = 15^\circ$ $\theta = 0^\circ$

逆風

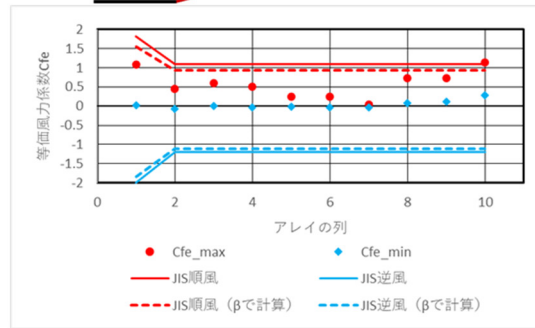


α : 地盤の傾斜角, β : 地盤とアレイ面の相対角, θ : アレイ面の鉛直角

図 5-2 最大・最小等価風力係数と JIS 規定値との比較 ($\alpha = 15$ 度: Case②、③、⑦、⑧、⑫、⑬)

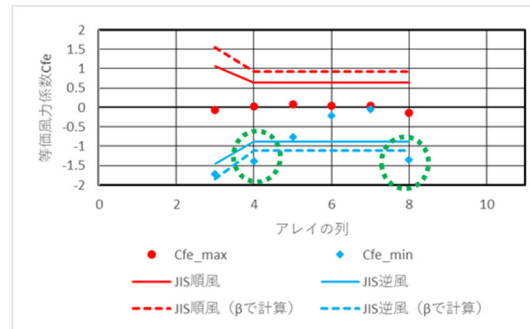
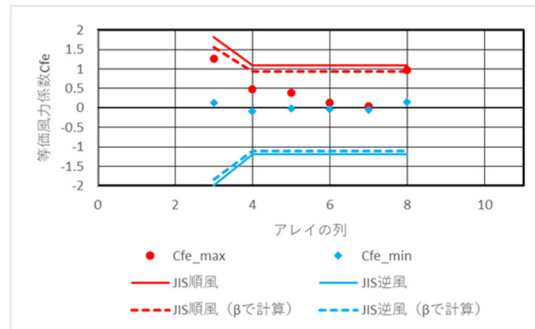
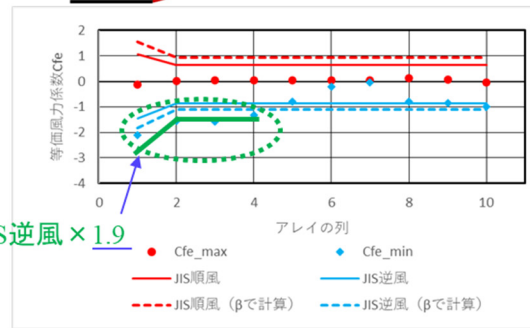
上段: Case⑰(10列)、下段: Case⑱(6列)

$\alpha = 15^\circ$ $\beta = 30^\circ$ $\theta = 45^\circ$
順風



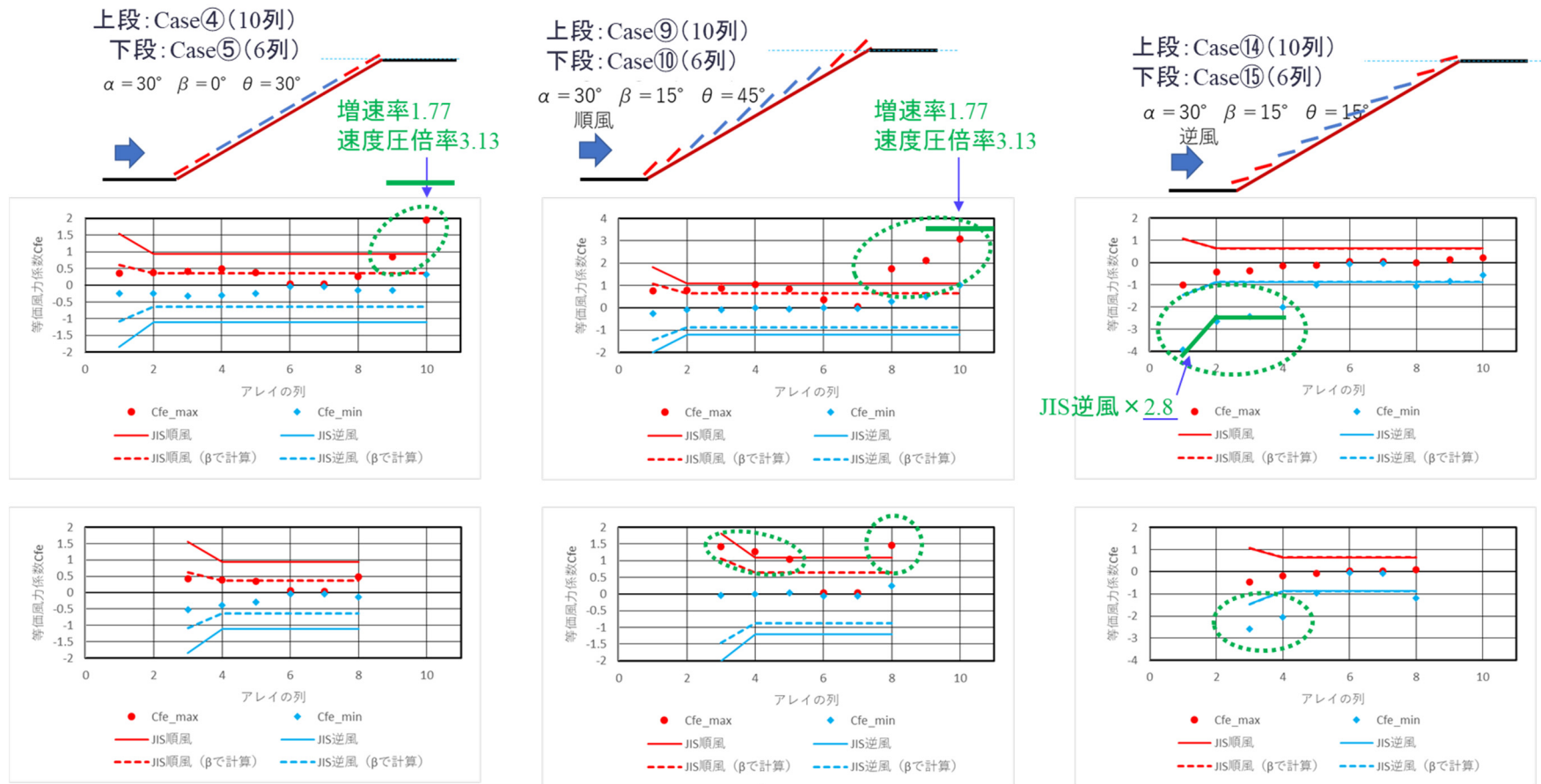
上段: Case⑳(10列)、下段: Case㉑(6列)

$\alpha = 15^\circ$ $\beta = 30^\circ$ $\theta = 15^\circ$
逆風



α : 地盤の傾斜角, β : 地盤とアレイ面の相対角, θ : アレイ面の鉛直角

図 5-3 最大・最小等価風力係数と JIS 規定値との比較 ($\alpha = 15$ 度: Case⑰、⑱、⑳、㉑)



α : 地盤の傾斜角, β : 地盤とアレイ面の相対角, θ : アレイ面の鉛直角

図 5-4 最大・最小等価風力係数と JIS 規定値との比較 ($\alpha = 30$ 度 : Case④、⑤、⑨、⑩、⑭、⑮)

5.2 設計用風力係数の検討

法尻および法肩付近のアレイにおいて JIS やガイドラインの規定値を超える場合について、風力係数を補正する方法を検討した。

法尻付近のアレイについては逆風となるケースにおいて負の風力係数（の絶対値）が大きくなり、地盤の傾斜角 α が大きくなるほどその傾向が顕著になることから、地盤の傾斜角 α の関数で補正係数を与えることを検討した。地盤の傾斜角 15 度の Case⑫、Case⑳の結果によれば、JIS の規定値を 1.9 倍することでおおむね実験結果を包含することができる（図 5-2 および図 5-3 参照）。また、地盤の傾斜角 30 度の Case⑭の結果によれば、JIS の規定値を 2.8 倍することでおおむね実験結果を包含することができる（図 5-4 参照）。地盤の傾斜角 0 度は補正する必要がないので JIS の規定値の 1.0 倍とすると、風力係数の補正係数 A は下式で与えられる（図 5-5 参照）。

$$A = 0.06\alpha + 1 \quad \dots\dots\dots(5.1)$$

ここで、 α : 傾斜地の勾配 (deg)

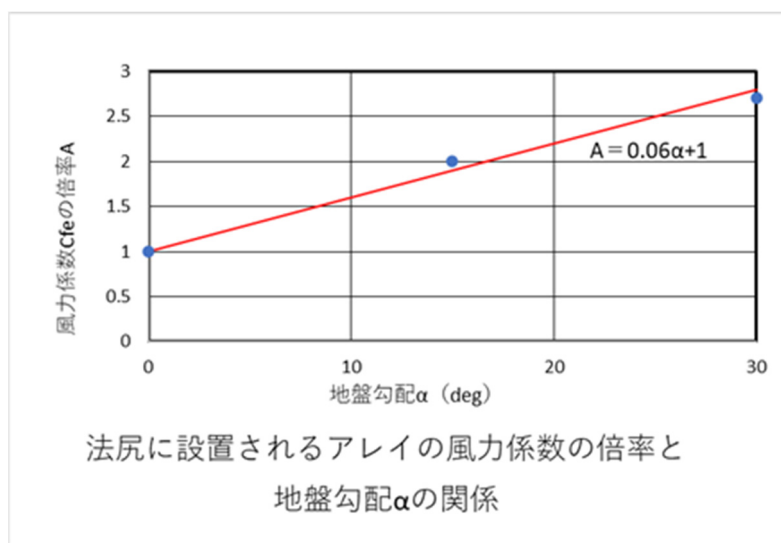


図 5-5 風力係数の補正係数 A

一方、法肩付近の正の風力係数は、傾斜地における風速増加の影響が大きいと考えられることから、風速の割り増し係数（増速率）を用いて補正係数を検討した。検討の対象は風力係数が JIS の規定値を大幅に増加している地盤の傾斜角 θ が 30 度（15 度を超える）のケース（Case④、⑨）とした。アレイ面に作用する風力は、速度圧（風速の二乗）に比例することから、風力係数の補正係数を増速率の二乗で与えると、図 5-4 に示すとおり法肩の風力係数は安全側に評価することができることが分かる。なお、ここでの増速率は図 2-7.2 に示す値（1.77）を用いている。

6. まとめ

ここに示した風洞実験結果の適用性は十分に検証されている訳ではないので、その都度適切な風洞実験を行って風力係数を評価することが望ましい。しかしながら、そのような風洞実験を行うことは設計者にとって大きな負担となる。そこで、本実験結果を参考に風力係数の補正を行ううえでは、ここでの補正方法があくまで便宜的な方法であることを認識したうえで利用し、必要に応じて更なる割り増しを検討することを推奨する。

また、法尻および法肩付近のアレイを取り外した場合においても、風上端部や風下端部のアレイで JIS やガイドラインの規定値を若干超えている場合もみられるので、法尻および法肩のアレイとして位置づける範囲は比較的広い範囲で設定しておく必要がある。

参考文献

- 1) 染川大輔、小泉達也、田畑侑一、谷口徹郎、谷池義人: 傾斜地に設置した太陽電池アレイの風力係数 (その 2) アレイの風力係数、平成 25 年度日本風工学会年次研究発表会、日本風工学会誌、Vol.38, No.2 (No.135)、2013.
- 2) 河井宏允: チューブ系圧力測定システムの応答特性のデジタル補正について、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp1433-1434, 1987

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。