

傾斜地設置型/営農型/水上設置型

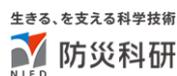
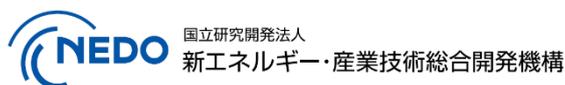
太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2025 年版

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
に関する数値流体解析

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。

2025 年 4 月 11 日



更新・修正履歴

・ 2025/04/11 公開：2025 年版

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数値流体解析

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。本報告書では、斜面に設置された太陽光発電パネル周囲の風速場と、太陽光電池アレイに加わる風圧力を明らかにするために数値流体計算（以下、CFDと記述する）を用いた解析を行い、風洞実験結果との比較を行い、計算手法や計算結果やについて検討・考察する。

具体的には、2023 年度に実施した傾斜地PVの風洞実験と同様の仕様についてCFDを行い、風洞実験結果とCFD解析結果の比較検証を行う。また、CFDにおける解析上の注意点について検討・考察をおこなう。

2. 風洞実験及び解析ケース

2.1 風洞内の模型の設置状況

比較対象となる実験は、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て行われた。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。写真 2.1-1、図 2.1-1、2.1-2 に示すように、太陽電池アレイ模型を設置した幅 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、粗度の後流側の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。太陽電池アレイ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）及び下流端（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アレイ模型の傾斜角度は 0° 、 15° 、 30° の 3 種類を用意した。



写真 2.1-1 風洞内模型設置状況（下流側から見る）

りで、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。

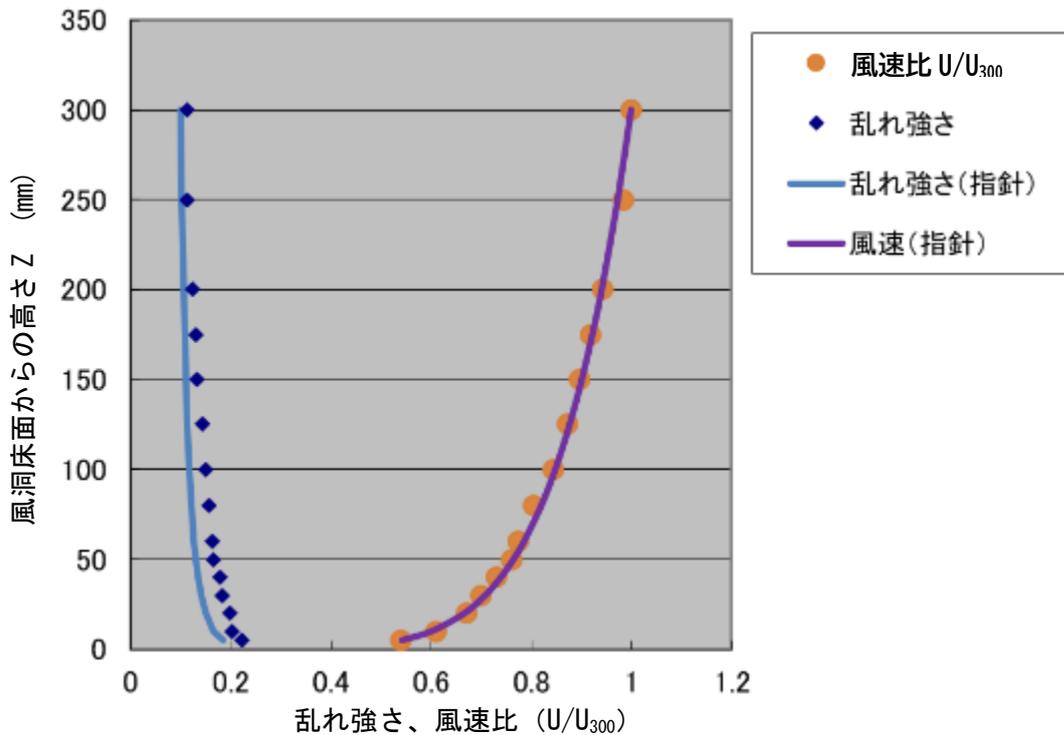


図 2.2-1 模型設置位置における平均風速及び乱れの強さの鉛直分布

図中実線は粗度区分 II、べき指数 $\alpha=0.15$ に対応する平均風速及び乱れの強さの鉛直分布
 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

2.3 風圧測定

風圧測定孔は太陽電池アレイ模型の幅方向の中央付近の表と裏の各 3 箇所に設けており、アレイの風力は図 2.3.1 のようにアレイの表と裏の風圧の差として風力を求めた。

各測定孔に作用する風圧は、直径 1mm の測定孔から導圧パイプ（真鍮パイプ）、及び導圧チューブ（ビニールチューブ）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 のサンプル周波数でコンピュータに取り込んだ。風圧測定に使用した圧力計は、オールデバイス株式会社製 1INCH-D2-4V-MINI（非直線性 1.245Pa 以下）である。

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、圧力変動にひずみが生じ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、河井の方法¹⁾によって風圧測定値の補正を行った。風圧測定の測定条件を表 2.3.1 に示す。

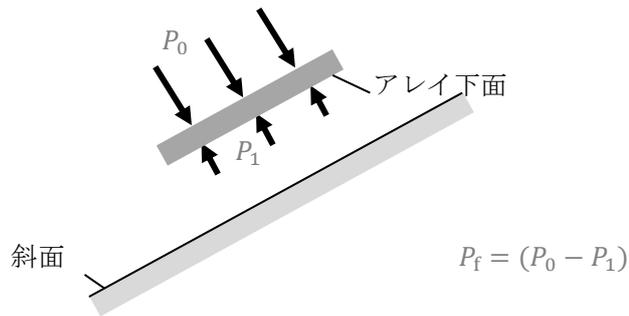


図 2.3-1 アレイに作用する風力係数 P_f の定義
 パネルの表及び裏の測定孔で測定された風圧 P_0 及び P_1

表 2.3-1 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、模型風上端前方 800mm、模型中心、模型床面から高さ $H=290\text{mm}$ 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 (2.1) で求めた。

$$C_p = \Delta p / q_H \quad (2.1)$$

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。太陽電池アレイの風力係数 C_f はパネル上下面の測定孔で求めた風圧係数の差として求めた。

2.4 解析ケース

解析は図 2.4-1 に示すように、地盤の勾配 (水平 : 勾配 0° と斜面 : 勾配 15°) とアレイ面の傾斜角 (順風(風下側が上がる)と逆風(風下側が下がる)で、いずれも角度は地盤に対して 15°) を組み合わせた 6 ケースとする。

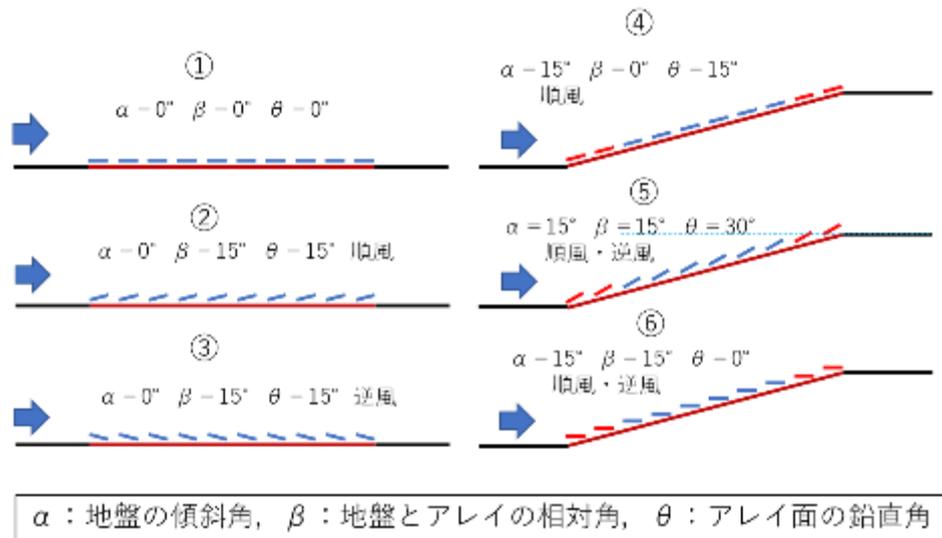


図 2.4-1 解析ケース

3. 数値解析

3.1 解析方法

太陽光発電パネル模型上の変動風圧を求めるために、非定常な乱流場を再現することができるラージ・エディ・シミュレーション (LES) を用いて解析を行う。前章で述べた風洞実験に対応する計算を行うために、上流側の風洞内粗度上に発達した乱流境界層を LES で再現して流入変動風 (地表面粗度区分II相当) を作成する。得られた変動風速場を流入境界条件として与え、斜面及び太陽光発電パネル模型が設置された領域を解析エリアとして再現する。

解析に用いた数値計算手法は、RIAM-COMPACT²⁾を改変したもので、流れの支配方程式にフィルタ操作を施した非圧縮流体の連続の式と、ナビエ・ストークス方程式を有限差分法に基づき離散化した方程式系を解いている。計算アルゴリズムには部分段階法に準じた方法³⁾を用い、時間積分はオイラー陽解法で、圧力に関するポアソン方程式はSOR法により数値的に解いている。空間項の離散化には2次精度中心差分を用いた。ただし、対流項は補間法⁴⁾に基づいた3次精度風上差分を用いており、3次精度風上差分の数値拡散項の重みは河村-桑原スキームタイプ⁵⁾の $\alpha=3.0$ に対して $\alpha=0.5$ としている。また、LESのサブグリッドスケール (SGS) モデルには渦粘性近似モデル⁶⁾を用いた。

3.2 流入変動風の作成

太陽電池アレイ模型のスケールに対して、接近流の乱れのスケールが大きいため、接近流の変動性状はパネルに加わる風圧力の変動に影響を及ぼすと考えられる。したがって、数値解析にあたっては、接近流の変動風速場も実験に対応するように設定する必要がある。ここでは、図 3.2-1、3.2-2、3.2-3 に示すように粗度を含む実験に用いた風洞内の形状を再現した

解析領域を用いて、接近流を作成した。図 3.2-4 に示すように粗度ブロックの風下縁では、目標とする実験値よりも風速が床面近くで小さくなっている。模型は粗度の風下側に設置されており、粗度ブロックの風下縁から、滑面状の床面が実験模型まで約 2m 続いているので、床面付近において風速が回復して速度が上がる。これを再現するために粗度下流側に図 3.2-2 のように粗度を配置しない床面の解析領域を設けて計算を行った結果、図 3.2-5 に示す通り粗度下流の滑面上を流下した流れは、床面付近で風速が回復し、速度勾配も実験結果に近づいた。

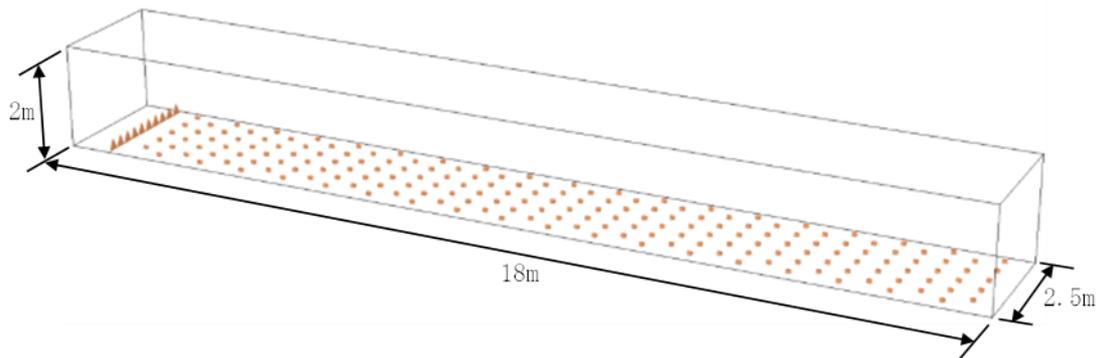


図 3.2-1 接近流を作成するために用いた解析領域
 格子分割（風洞全域）：x 方向 901、y 方向 252、z 方向 76
 格子間隔：x 方向等間隔 20mm、y 方向等間隔 10mm
 z 方向不等間隔：最小 10mm、最大 76mm

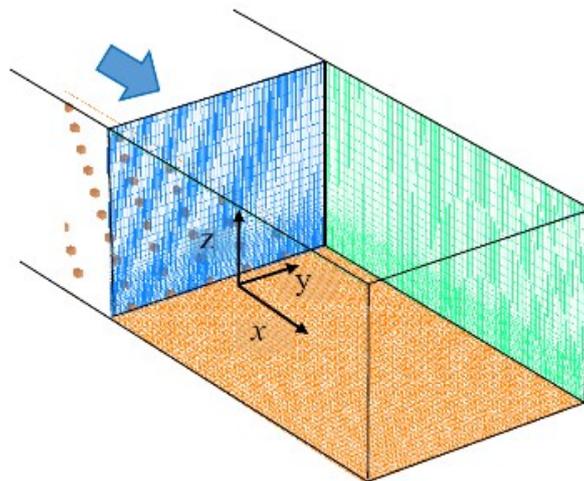


図 3.2-2 接近流を作成するために用いた格子形状（粗度後流側滑面の範囲）
 粗度ブロックの風下側の粗度がない計算領域における計算格子の形状
 格子分割（風洞全域）：x 方向 111、y 方向 252、z 方向 76
 格子間隔：x 方向等間隔 20mm、y 方向等間隔 10mm
 z 方向不等間隔：最小 10mm、最大 76mm
 上流側の粗度を敷き詰めた部分も、同様な細かさの格子分割が続いている。

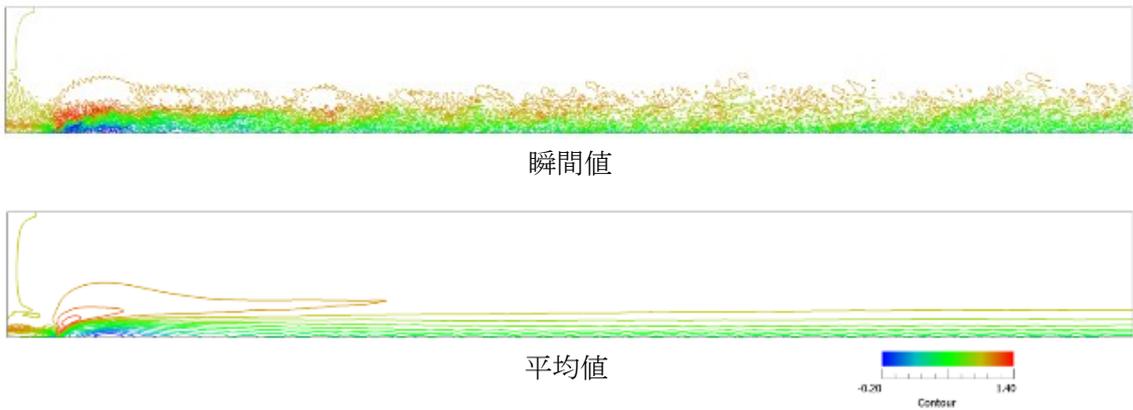


図 3.2-3 生成された風洞内の乱流境界層内気流
鉛直中央鉛直断面における風速分布：主流（x 軸）方向成分

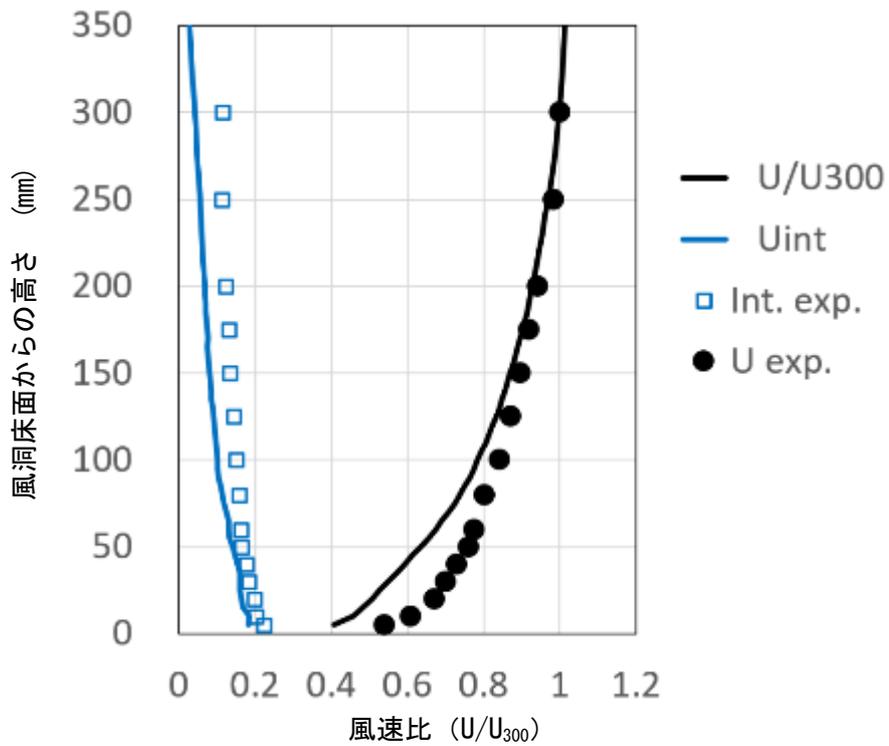


図 3.2-4 計算により作成された接近流の気流性状
粗度ブロック領域の風下縁中央における平均風速と乱れの強さのプロファイル

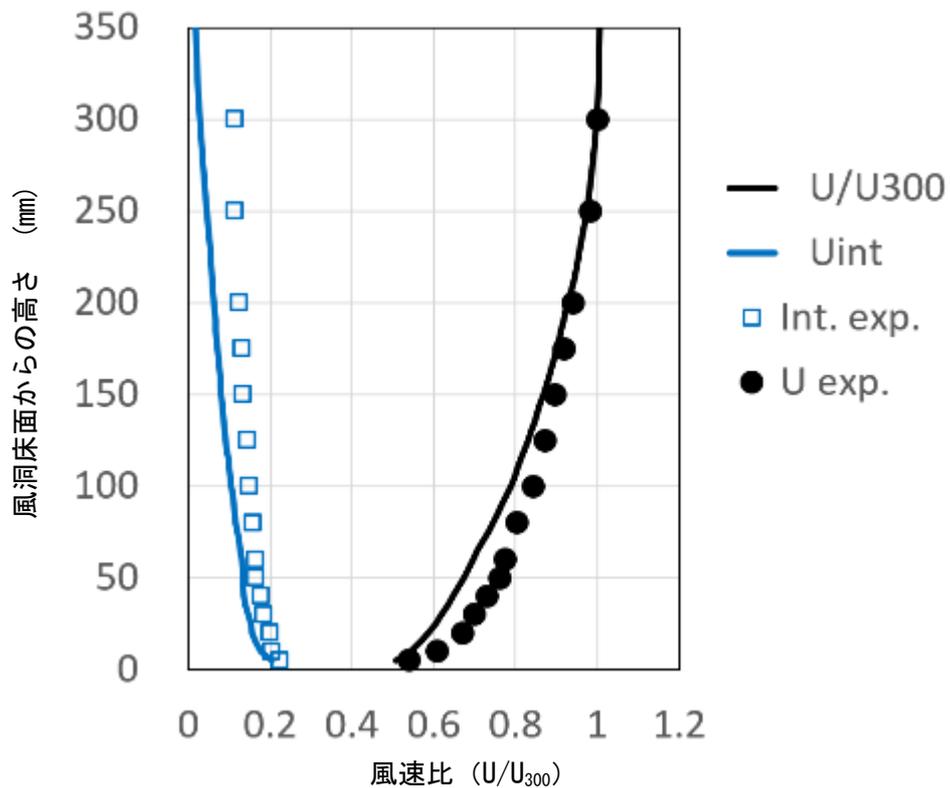


図 3.2-5 計算により作成された接近流の気流性状
 粗度ブロックの風下側の粗度がない計算領域において
 実験と同じ測定位置である粗度後縁から 1.8m、ターンテーブル中央における値

3.3 計算領域と格子

太陽電池アレイに加わる風圧力を求めるための解析領域は、太陽電池アレイ模型を用いて風圧測定をおこなった領域、写真 3.3-1 に示すベニヤの端板で囲まれた範囲とした。



写真 3.3-1 太陽電池アレイ模型を用いて風圧測定をおこなった領域

対応する計算領格子は図 3.3-1、3.3-2 に示すように、解析領域全体をカバーするもの：全体領域（図 3.3-2a）と、太陽電池アレイ付近で細かな格子間隔を与えて詳細な流れを再現できるような領域：詳細領域（図 3.3-2b）を設定した。アレイ付近の計算格子の詳細を図 3.3-3、3.3-4 に示す。全体領域の計算の際には前節 3.2 に述べたように、風洞実験に対応した接近流を流入風として与えて計算を行った。詳細領域の流入条件には全体領域の対応する位置の計算結果を与えて、ダウンスケーリングを行いながら計算した。

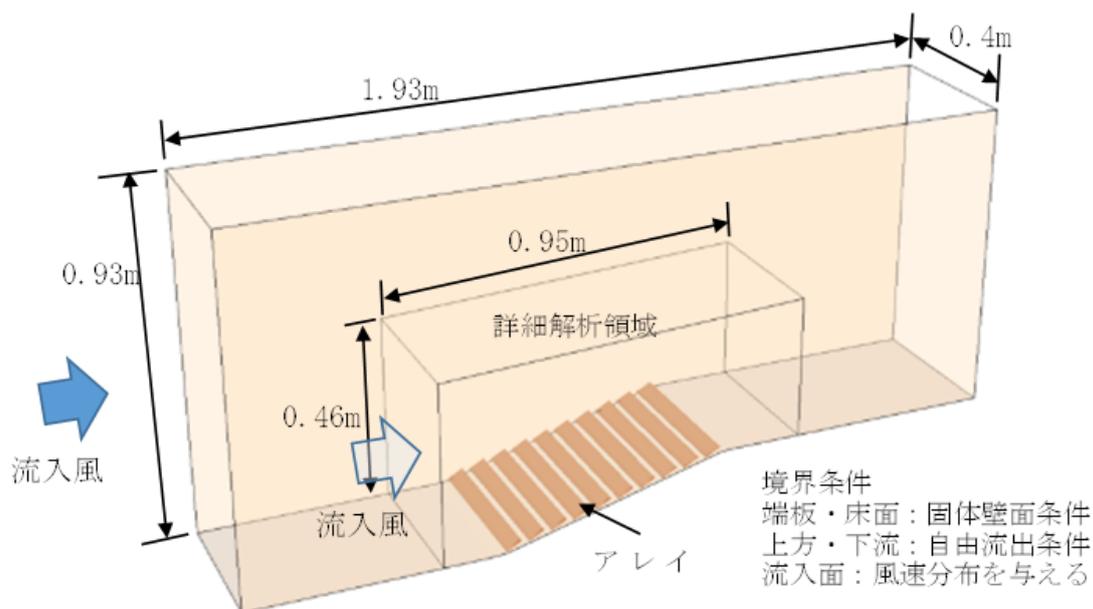
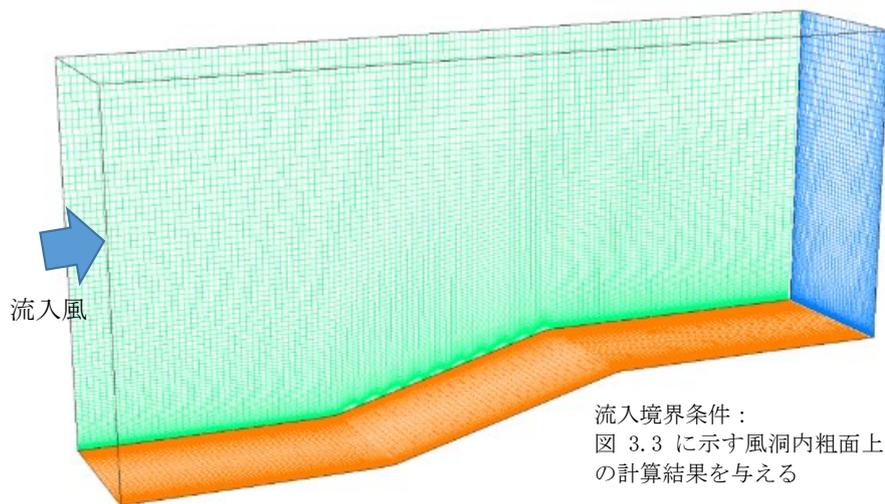
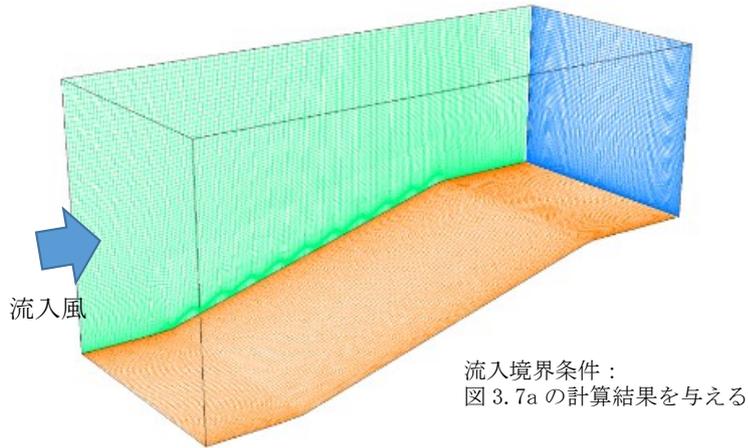


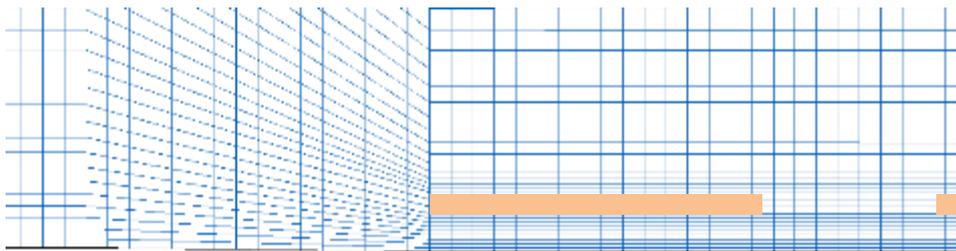
図 3.3-1 風洞実験に対応した計算の解析領域（外側：全体領域、内側：詳細領域）
斜面角度 15° 、アレイ面の傾斜角（順風 15° ）の場合



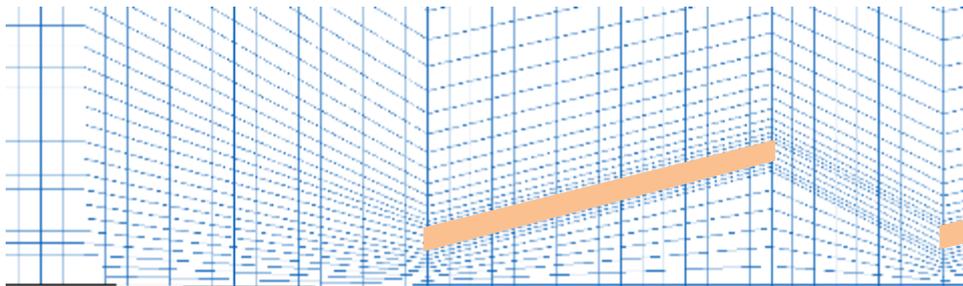
- a. 解析領域全体計算用の領域（全体領域）における計算格子
 格子分割：x 方向 368、y 方向 84、z 方向 92。
 格子間隔：x 方向不等間隔最小 5mm、最大 9mm、
 y 方向不等間隔：最小 2mm、最大 8mm、z 方向不等間隔：最小 1mm、最大 21mm



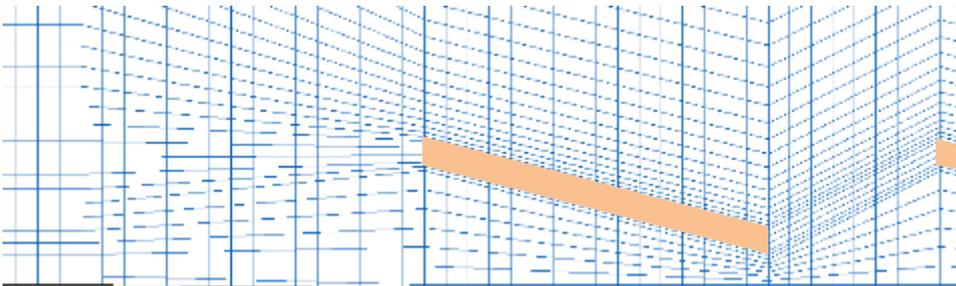
- b. 内側の詳細計算用の領域（詳細領域）における計算格子
 格子分割：x 方向 364、y 方向 84、z 方向 92.
 格子間隔：x 方向不等間隔最小 1mm、最大 6mm、
 y 方向不等間隔：最小 2mm、最大 8mm、
 z 方向不等間隔：最小 1mm、最大 18mm
 図 3.3-2 解析領域内の計算格子



a. 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 0^\circ$

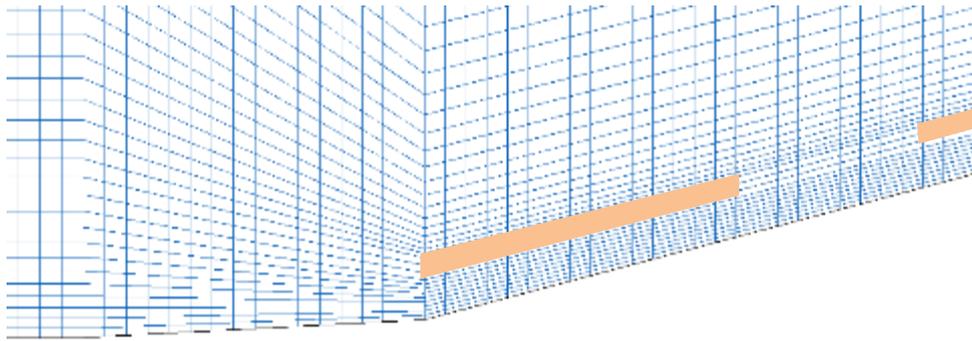


b. 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$

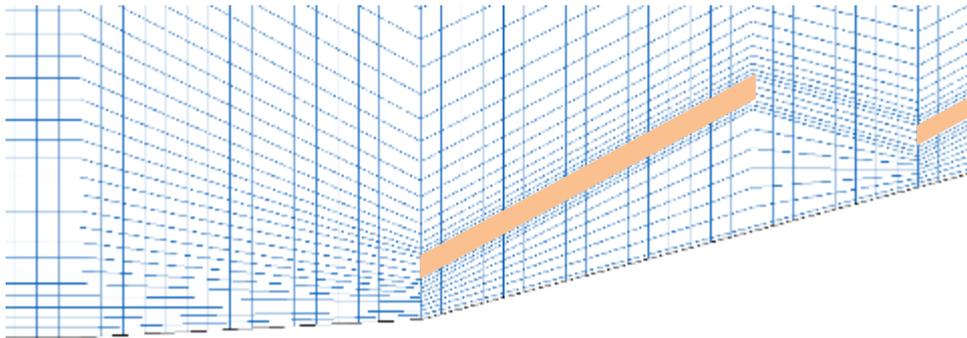


c. 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = -15^\circ$

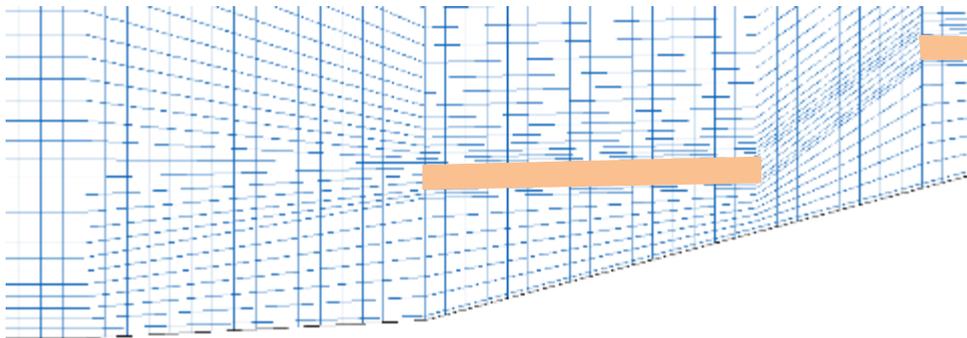
図 3.3-3 内側の詳細計算用の領域（詳細領域）における計算格子
 風上側第 1 アレイ付近を拡大



a. 地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 0^\circ$



b. 地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$



c. 地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = -15^\circ$

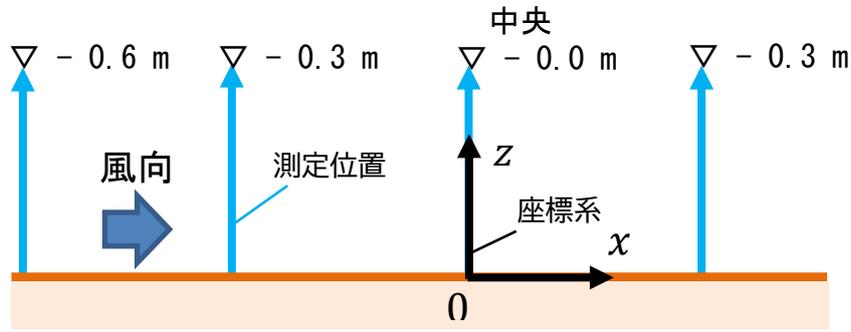
図 3.3-4 内側の詳細計算用の領域（詳細領域）における計算格子
風上側第 1 アレイ付近を拡大

4. 計算結果

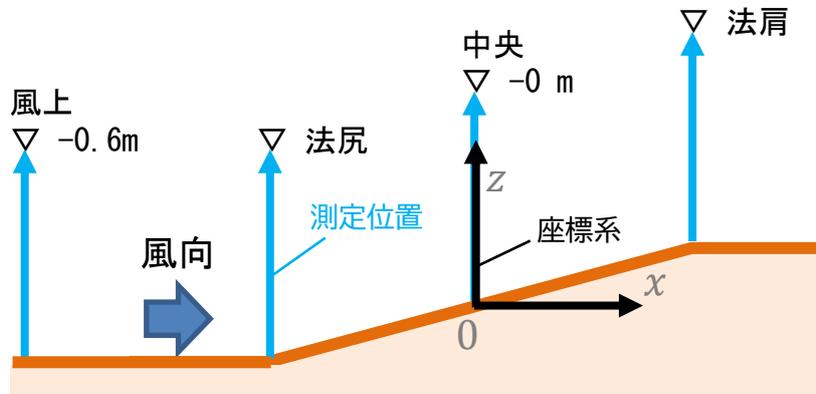
4.1 風速分布（実験）

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、粗度区分 II 相当の風速分布をもった気流を作り出して流入風とした。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、太陽電池アレイの模型を設置しない斜面だけの場合の風速変化を測定した。風速の鉛直プロファイルを図 4.1-1 に示すように、異なる傾斜角度をも

った斜面（傾斜角度 0° 、 15° ）に対して流れ方向に4地点（斜面中央、及び、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、水平主流方向の平均風速と乱れの強さの測定結果を図4.1-2、4.1-3に示す。



a. 地盤の傾斜角度 $\alpha = 0^\circ$



b. 地盤の傾斜角度 $\alpha = 15^\circ$

図4.1.1 風速測定位置

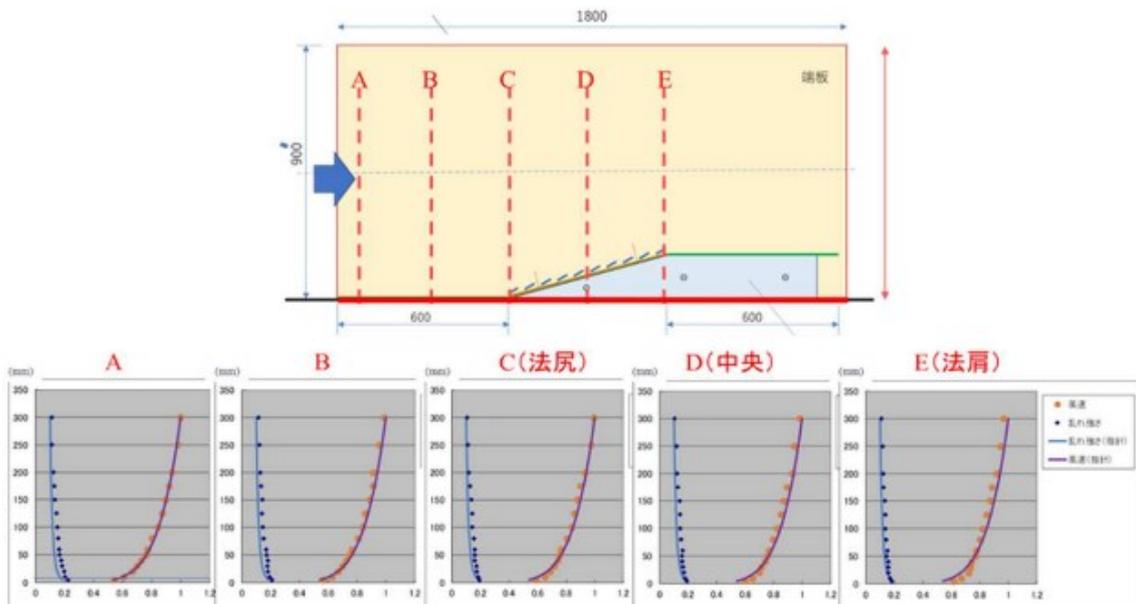


図4.1-2 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ の場合の平均風速と乱れの強さの流れ方向の変化

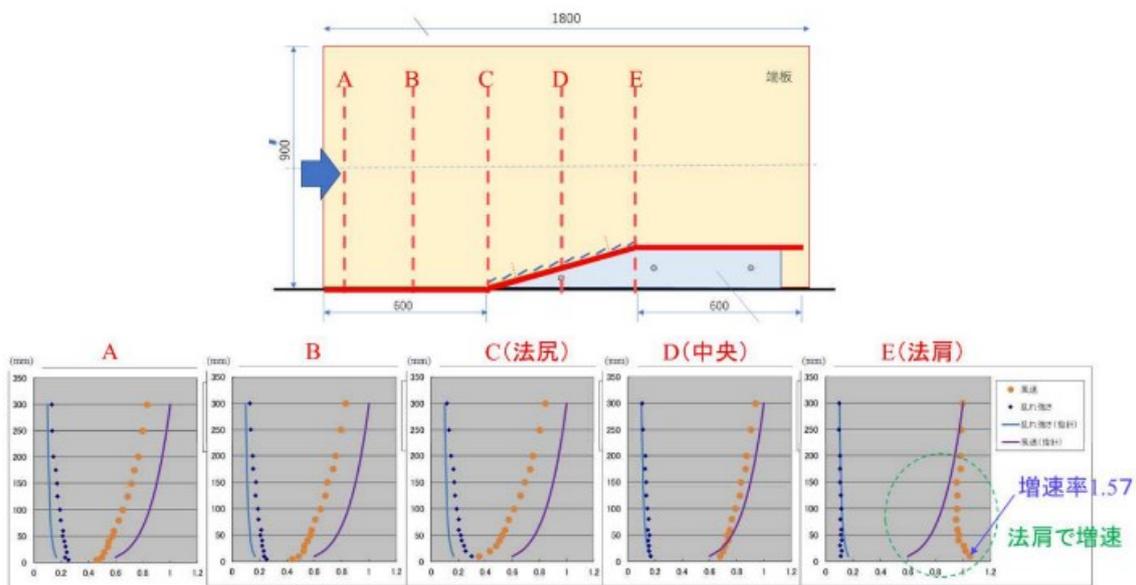


図 4.1-3 地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ の場合の平均風速と乱れの強さの流れ方向の変化

4.2 風速分布（計算結果）

計算で求めた風速分布を以下に示す。計算された風速は実験結果と対応させるために、実験における基準風速の測定位置に対応した解析領域（実験領域全体）の流入面の中央、高さ 290mm の主流（x 軸）方向平均風速（ $=U_0$ ）で基準化した。なお、全体領域から詳細領域へのダウンスケーリングにおいて、詳細領域の上流側流入境界面には、全体領域の該当部分の風速を時々刻々与えているが、詳細領域の上方及び下流流出境界面には移流流出条件を与えて流れを自由に流出させている。これは、詳細領域の計算格子が全体領域に比べて細かくなっているために、周りの流れ場も全体領域のものとは少し異なるものとなることが予想されるために、その流れ場を上方及び下流境界面で拘束しないようにするためである。

(1) 地盤の傾斜 $\alpha=0^\circ$ 、アレイなしの場合

図 4.2.1 に示す通り、前節に示した実験結果と同様に、床面付近でわずかに風速が回復（増速）するが、実験領域内では風速分布はほとんど変化しない。

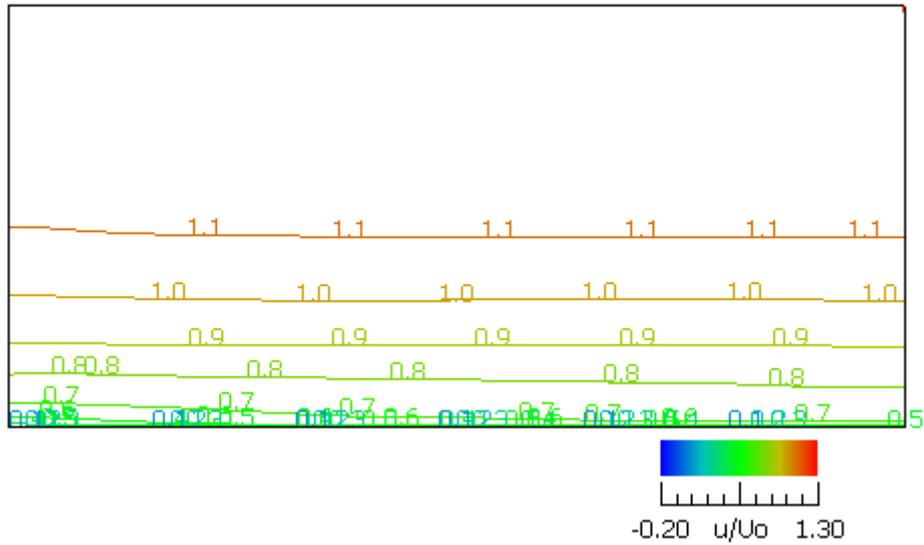
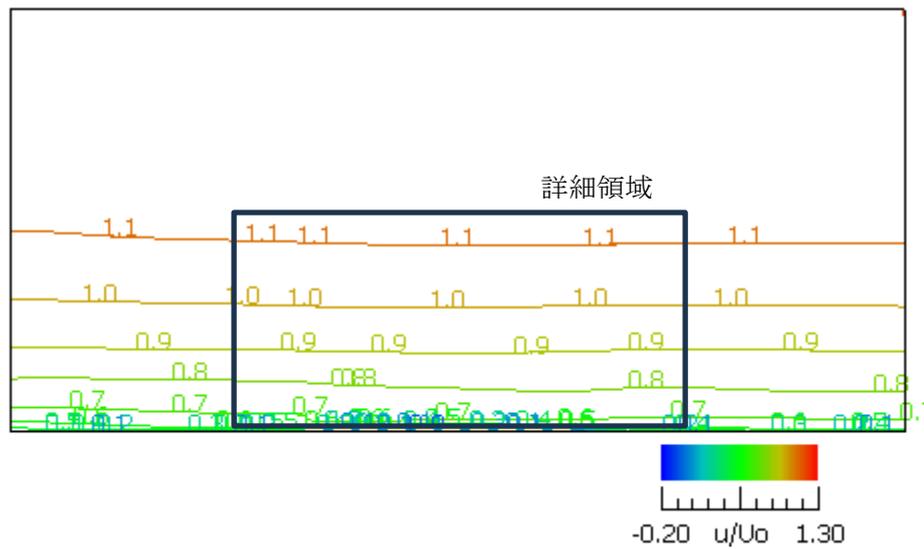


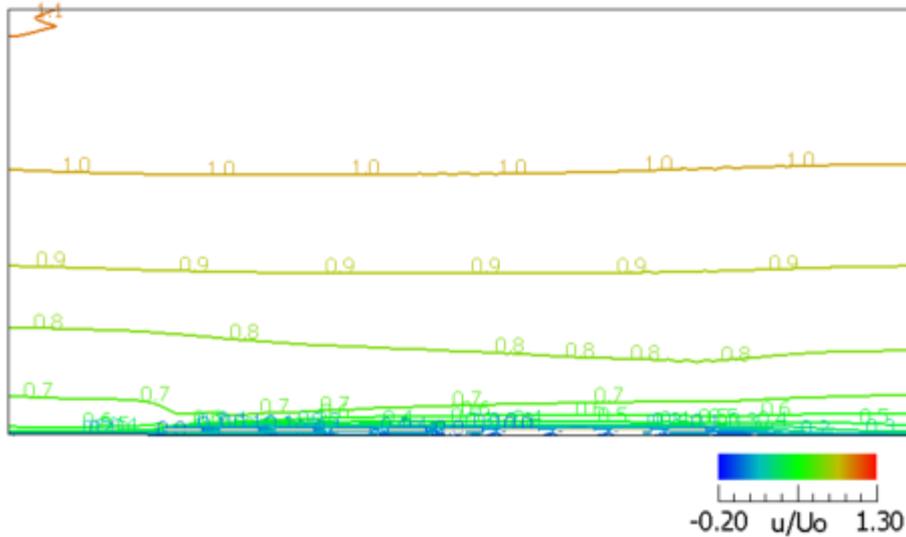
図 4.2-1 平均風速主流 (x 軸) 方向成分の中央 (y=0) 鉛直断面内の分布
実験領域全体、地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、アレイなし

(2) 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 0^\circ$ の場合

図 4.2-2 に示す通り、アレイ設置付近のアレイ上部で、アレイがない場合よりもわずかに風速が増速するが、実験領域内全体ではアレイがない場合と風速分布はほとんど変化しない。



a. 実験領域全体

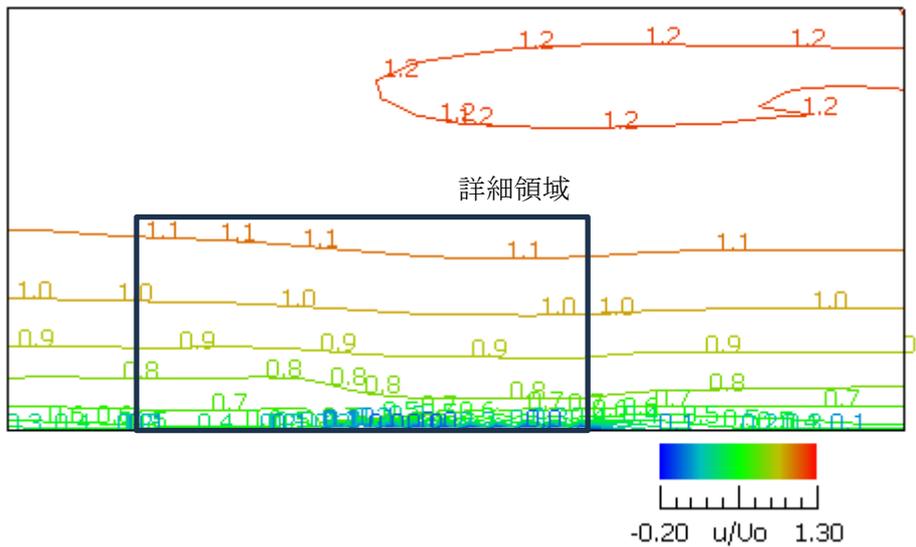


b. アレイ付近（詳細領域）

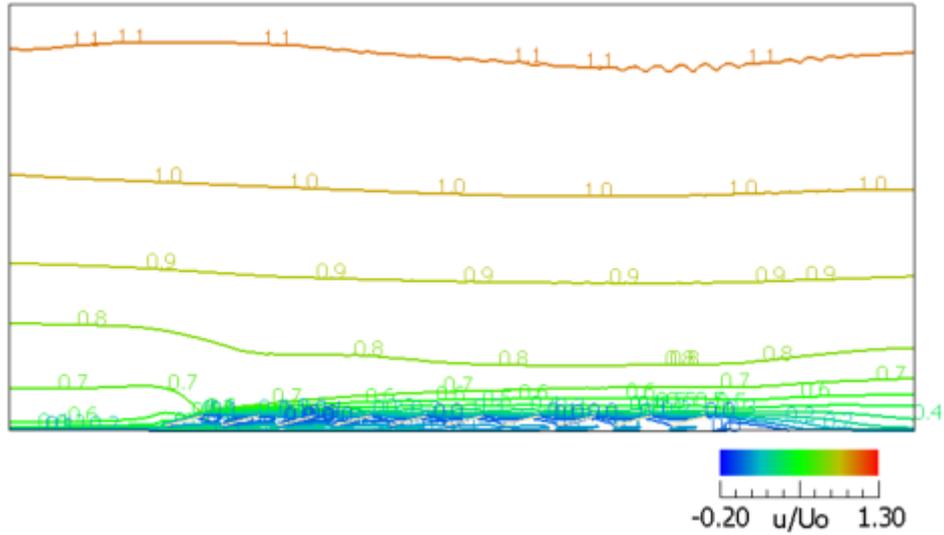
図 4.2-2 平均風速主流（x 軸）方向成分の中央（y=0）鉛直断面内の分布
地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 0^\circ$

(3) 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$ の場合

図 4.2-3 に示す通り、アレイ設置付近のアレイ前縁上部及び上空で、地盤とアレイの相対角 $\beta = 0$ の場合よりもさらに風速が増速する。アレイの下流側では地面付近の風速は低下する。



a. 実験領域全体

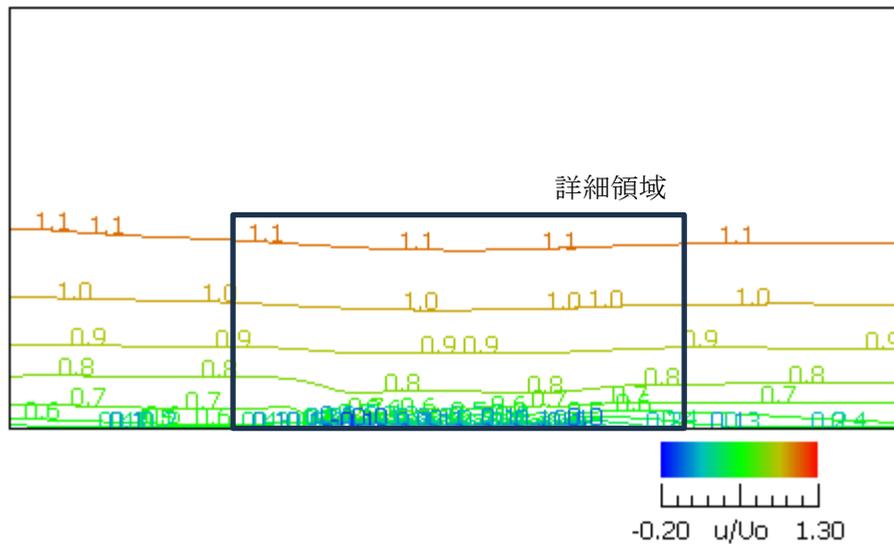


b. アレイ付近（詳細領域）

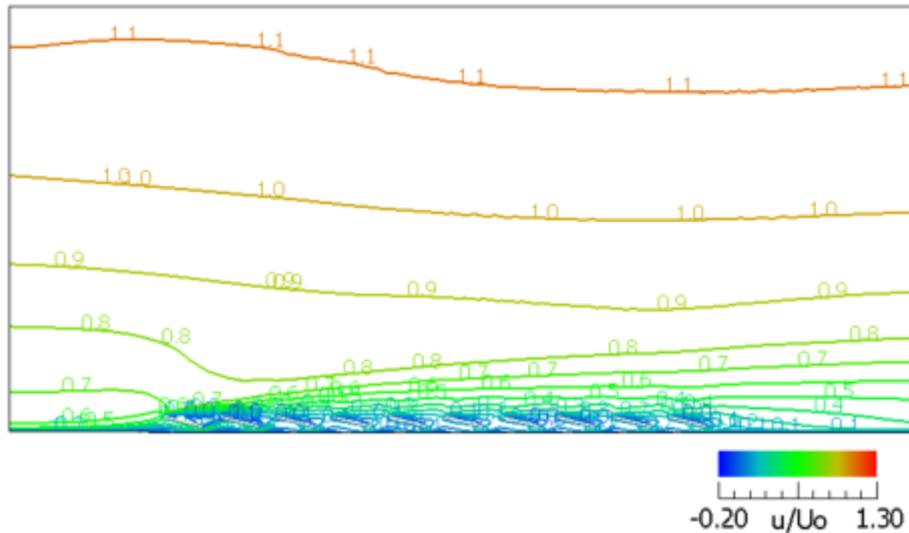
図 4.2-3 平均風速主流（x 軸）方向成分の中央（y=0）鉛直断面内の分布
地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$

(4) 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = -15^\circ$ の場合

図 4.2-4 に示す通り、地面付近では地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$ の場合と同様に、アレイ設置付近のアレイ前縁上部で相対角 $\beta = 0^\circ$ の場合よりも風速が増速し、アレイの下流側では地面付近の風速は低下する。アレイ付近の風速減少は相対角 $\beta = 15^\circ$ の場合よりも大きい。



a. 実験領域全体



b. アレイ付近（詳細領域）

図 4.2-4 平均風速主流（x 軸）方向成分の中央（y=0）鉛直断面内の分布
地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = -15^\circ$

(5) 地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ 、アレイなしの場合

図 4.2-5 に示す計算結果を見ると、前節に示した実験結果ほど斜面前方で風速は減少していない。一方、斜面の中央付近から法肩にかけては、実験結果と同様に床面付近で風速が増速した。

計算結果が実験結果ほど斜面前方で風速が減少しない理由としては以下のように考えられる。実験では風洞内に端板で囲まれた実験模型を挿入しているために、風は模型と風洞の隙間に逃げるように流れる。このため実験模型領域に流入する風量は減り、模型領域内の風速も減少すると考えられる。一方、計算では、模型流入境界面位置において模型がない場合の風速場を強制的に与えているので、模型領域に風が強制的に押し込まれることになってしまい、風速は周りの風洞壁面との隙間がある場合ほど斜面前方で減速していないと考えられる。

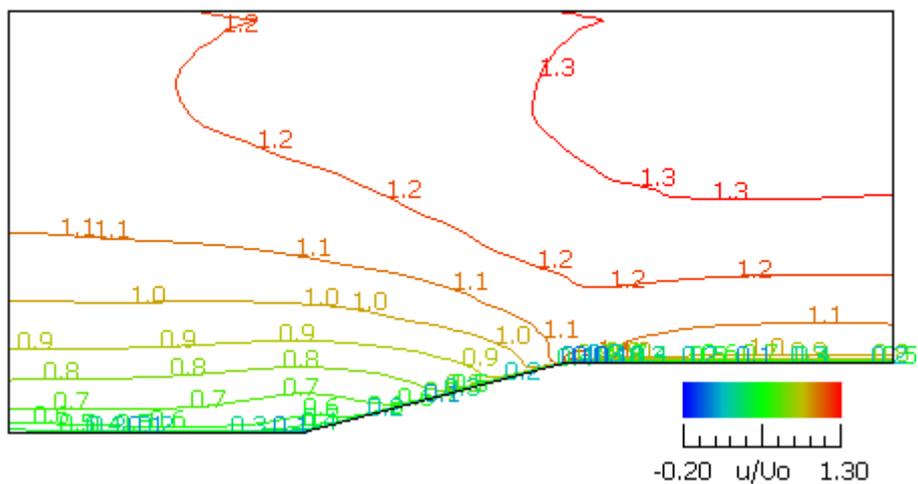
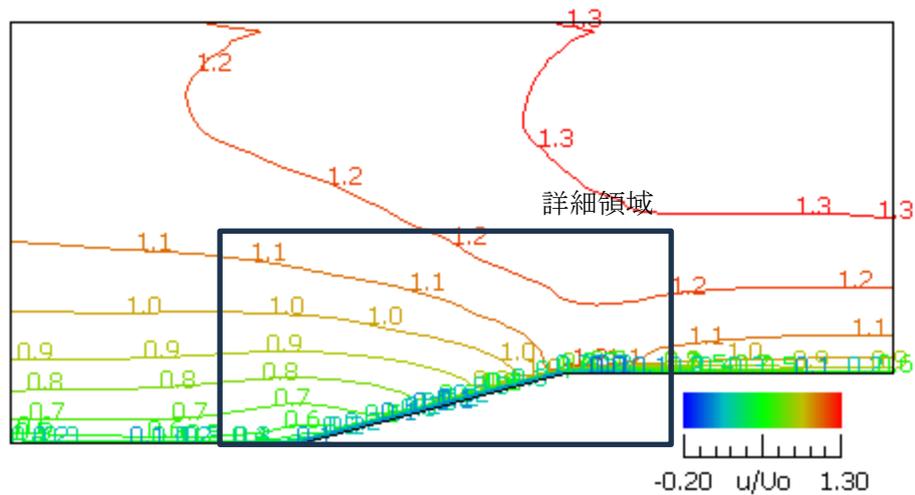


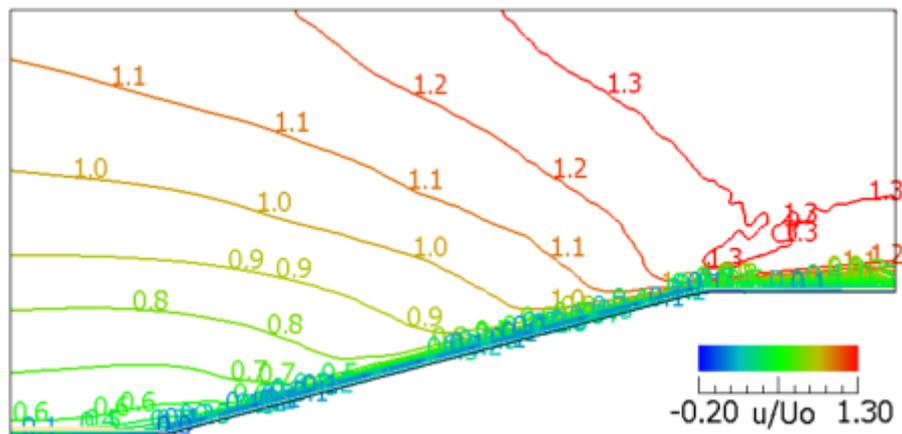
図 4.2-5 平均風速主流（x 軸）方向成分の中央（y=0）鉛直断面内の分布
実験領域全体、地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ 、アレイなし

(6) 地盤の傾斜角 $\alpha=15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta=0^\circ$ の場合

図 4.2-6 に示すように、全体領域の計算では、法肩から下流にかけて、地面付近でアレイがある場合よりも風速が減少することを除けば、アレイがない場合とほぼ同様な風速分布を示す。詳細領域の計算では、法肩の上空での風速増加が全体領域の計算よりも大きくなっている。これは、詳細領域のほうがより細かな格子を用いているため、アレイの表面における風速変化がより細かくとらえられ、アレイ表面からの抵抗を受ける範囲も小さくなり、その結果として上方に及ぼす抵抗が小さくなって、全体領域の計算よりも風速の減少が抑えられるためと考えられる。



a. 実験領域全体

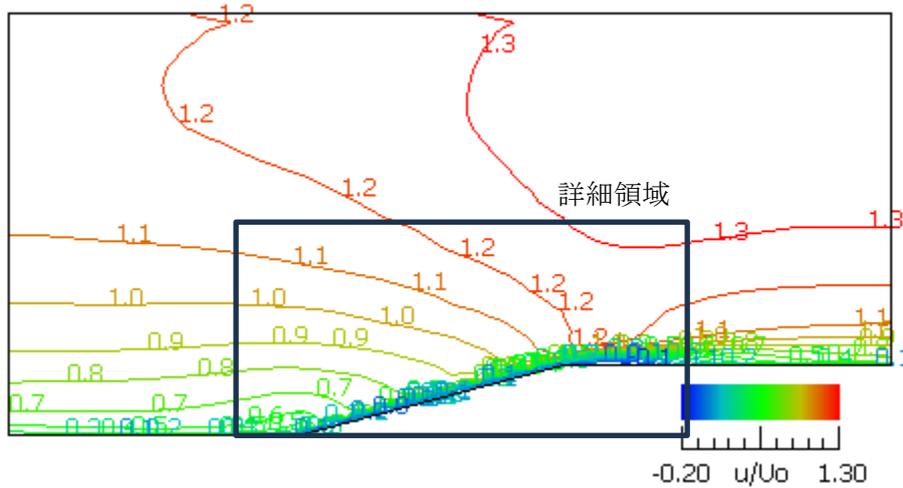


b. アレイ付近（詳細領域）

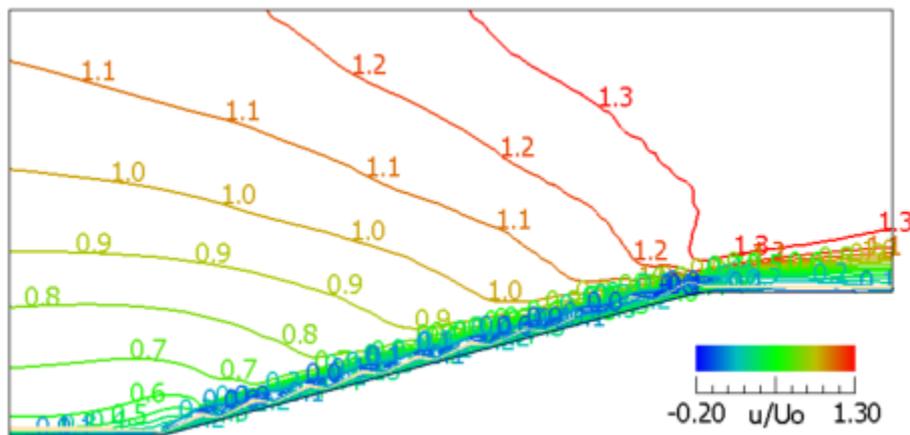
図 4.2-6 平均風速主流（x 軸）方向成分の中央（ $y=0$ ）鉛直断面内の分布
流入境界面上空の平均風速で基準化した値、地盤の傾斜角 $\alpha=0^\circ$ 、
アレイの相対角 $\beta=0^\circ$

(7) 地盤の傾斜角 $\alpha=15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta=15^\circ$ の場合

図 4.2-7 に示すように、全体領域の計算では、法肩から下流にかけて、アレイの相対角 $\beta=0^\circ$ の場合よりも地面付近で風速が減少する。さらに法肩付近の上空では風速が増加する。詳細領域の計算では、法肩の上空での風速増加が全体領域の計算よりも大きくなっている。これは、詳細領域のほうがより細かな格子を用いているため、アレイの表面における風速変化がより細かくとらえられ、アレイ表面からの抵抗を受ける範囲も小さくなり、その結果として上方に及ぼす抵抗が小さくなって、全体領域の計算よりも風速の減少が抑えられるためと考えられる。



a. 実験領域全体



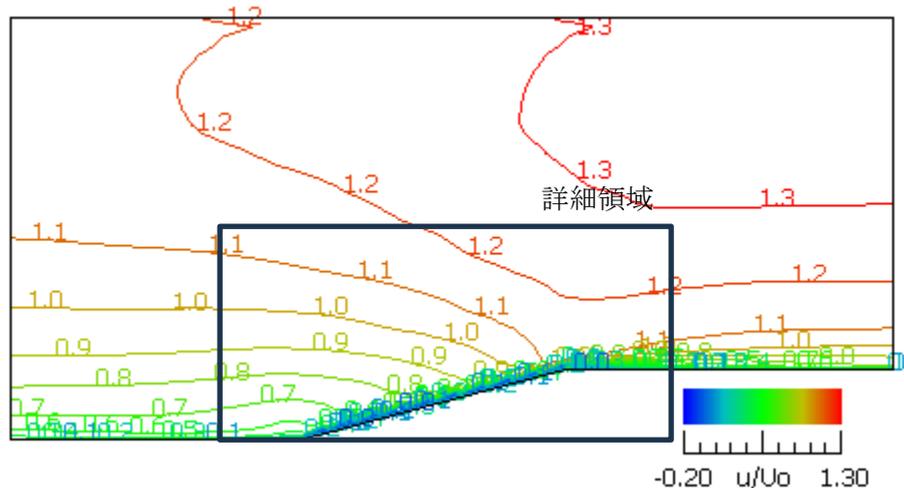
b. アレイ付近（詳細領域）

図 4.2-7 x (主流) 方向平均風速成分の中央 ($y=0$) 鉛直断面内の分布：
流入境界面上空の平均風速で基準化した値、地盤の傾斜角 $\alpha=15^\circ$ 、
アレイの相対角 $\beta=15^\circ$

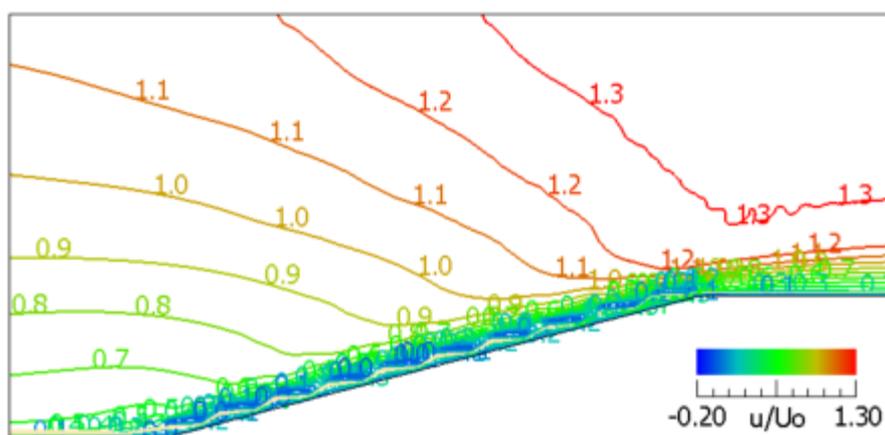
(8) 地盤の傾斜角 $\alpha=15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta=-15^\circ$ の場合

図 4.2-8 に示すように、全体領域の計算では、アレイ及び法肩の地面付近で風速の減少が少し大きい点を除けば、地盤の傾斜角 $\alpha=15^\circ$ 、アレイの相対角 $\beta=0^\circ$ の場合とほとんど同じ

風速分布を示す。詳細領域の計算では、法肩の上空での風速増加が全体領域の計算よりも大きくなっている。これは、詳細領域のほうがより細かな格子を用いているため、アレイの表面における風速変化がより細かくとらえられ、アレイ表面からの抵抗を受ける範囲も小さくなり、その結果として上方に及ぼす抵抗が小さくなって、全体領域の計算よりも風速の減少が抑えられるためと考えられる。



a. 実験領域全体



b. アレイ付近（詳細領域）

図 4.2-8 x（主流）方向平均風速成分の中央（ $y=0$ ）鉛直断面内の分布：
流入境界面上空の平均風速で基準化した値、地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ 、
アレイの相対角 $\beta = -15^\circ$

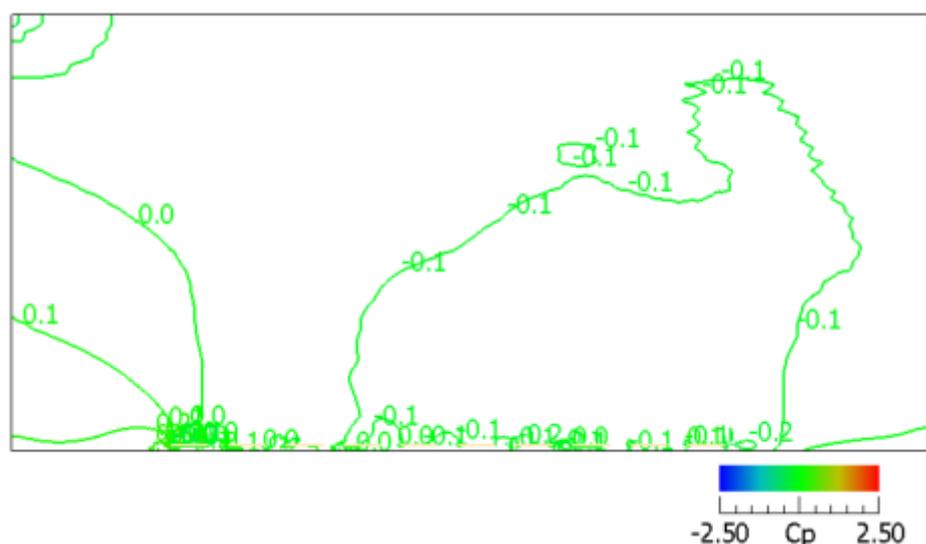
4.3 風圧分布

実験と対応する風圧係数の詳細領域の計算結果について、 x - z 鉛直断面内の分布を以下の図 4.3-1 から図 4.3-6 に示す。計算結果から風圧係数を求めるのに際して、基準速度圧を実験のピトー管高さの基準速度圧に合わせるために、計算で得られた風圧から、全体計算領域の流入面における基準高さの平均風速に基づく速度圧で風圧係数を求めた。その後さらに、2023 年度の報告書に倣い、アレイの下面高さにおける速度圧に変換する係数（地面の傾斜

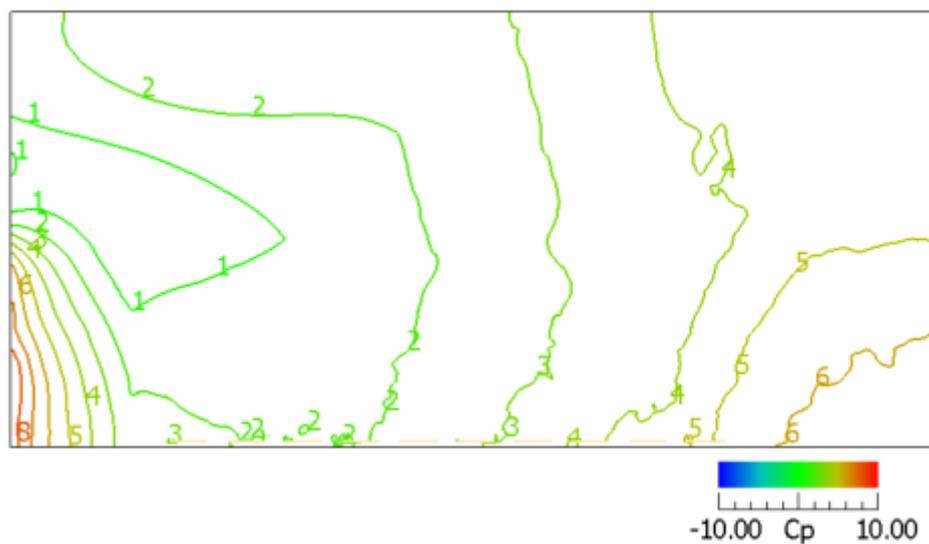
角が 0° のとき $1/0.434=2.304$ 倍、地面の傾斜角が 15° のとき $1/0.365 = 2.740$ 倍) を用いてアレイの下面高さにおける接近風の世界速度圧を基準とした風圧係数として求めた。

(1) 地盤の傾斜角 $\alpha=0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta=0^\circ$ の場合

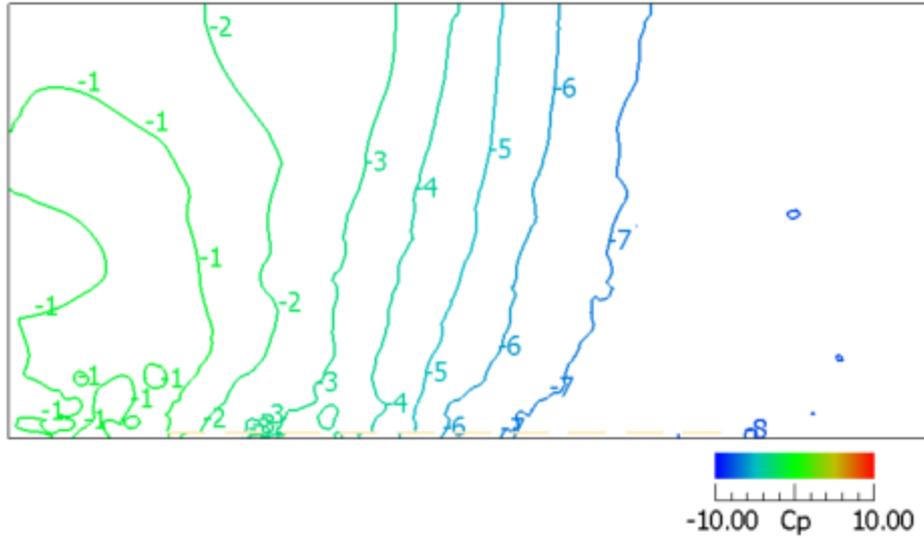
図 4.3-1 に示す通り、平均風圧係数はアレイ上方でアレイ風上側で流れ方向に減少しているが、アレイ上ではほぼ一定、風下側後縁より風下側では回復し、アレイ上空における平均風速の加減速に対応する。最大風圧係数（各計算点における瞬間最大値）はアレイ上で流れ方向に増大し、最小風圧係数（各計算点における瞬間最小値）は流れ方向に減少している。



a. 平均風圧係数



b. 最大風圧係数

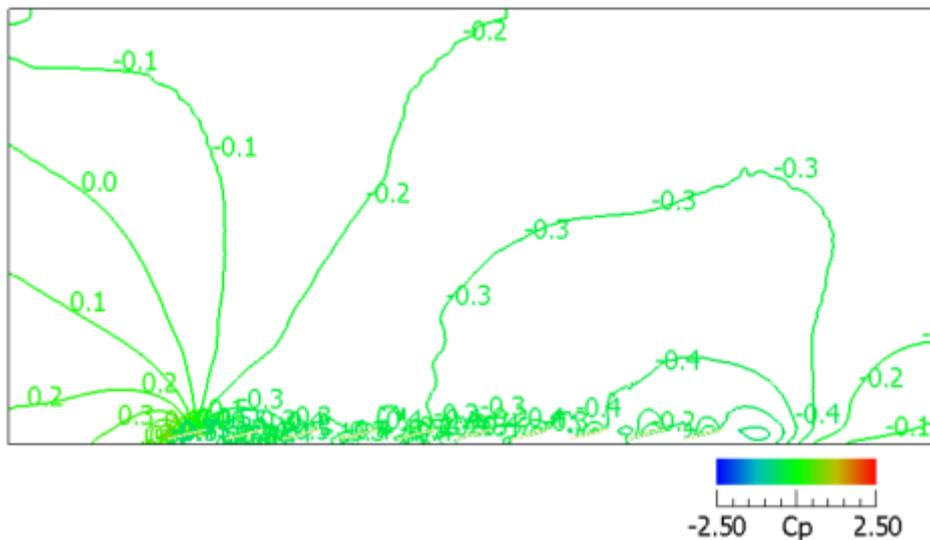


c. 最小風圧係数

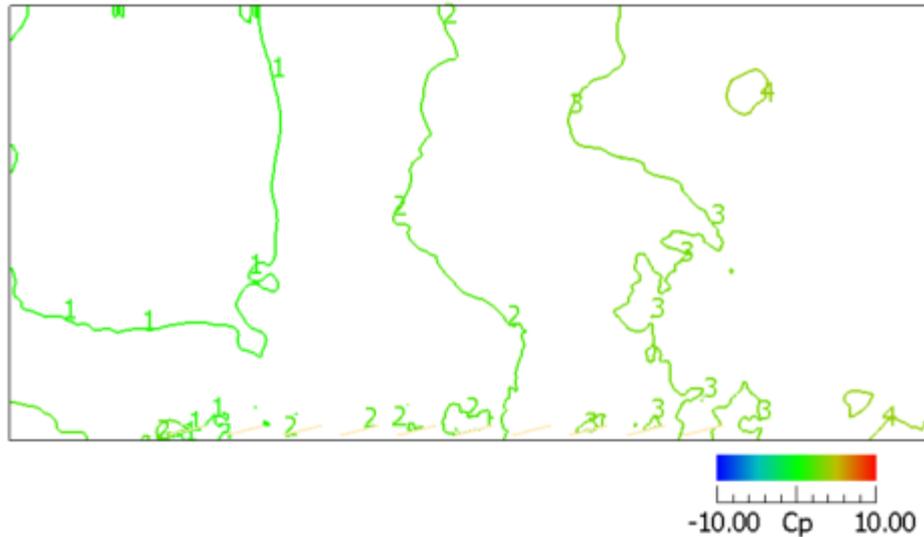
図 4.3-1 x-z 鉛直断面内の風圧係数の分布
地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 0^\circ$

(2) 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$ の場合

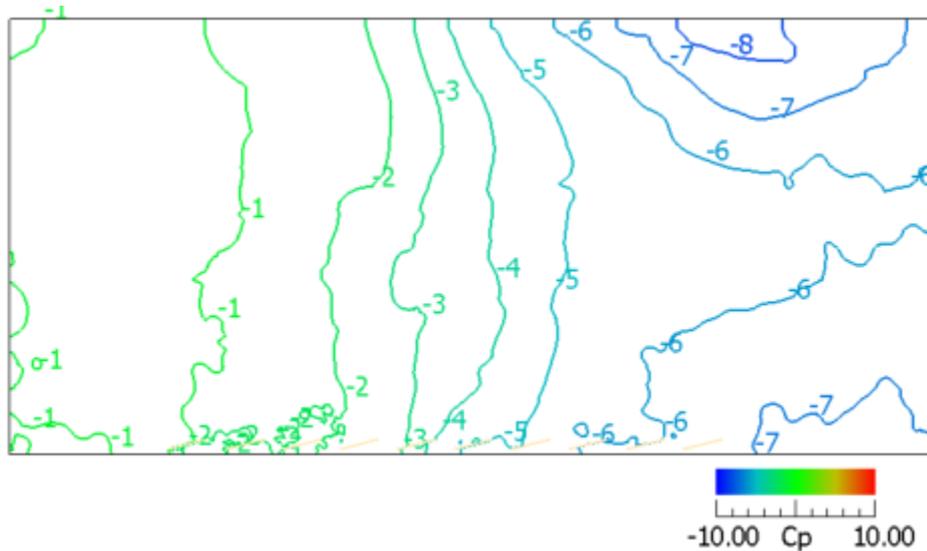
図 4.3-2 に示す通り、平均風圧係数はアレイ上方でアレイ風上側で流れ方向に減少し、その風圧勾配は $\beta = 0^\circ$ の場合よりも大きい。風下側後縁より風下側では回復し、アレイ上空における平均風速の加減速に対応する。最大風圧係数（各計算点における瞬間最大値）はアレイ上で流れ方向に増大し、最小風圧係数（各計算点における瞬間最小値）は流れ方向に減少している。



a. 平均風圧係数



b. 最大風圧係数



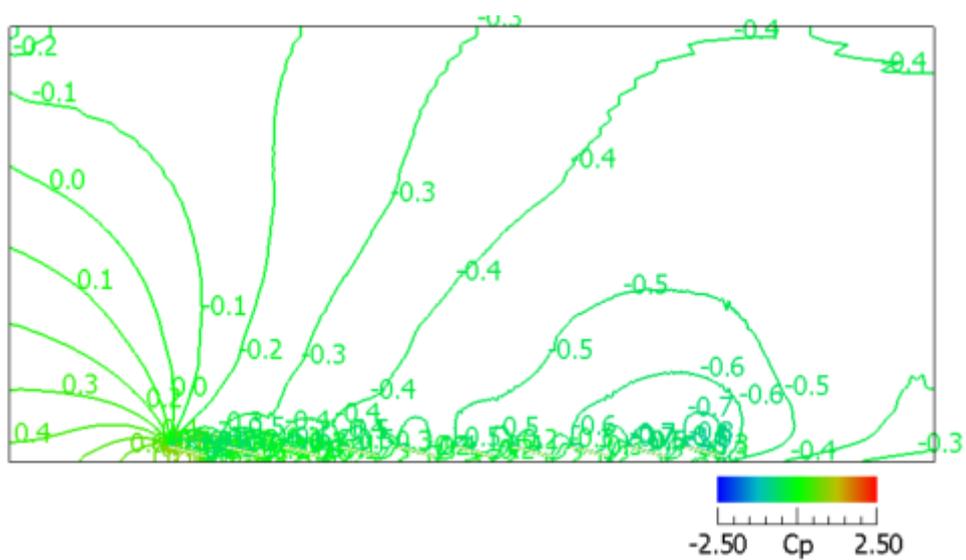
c. 最小風圧係数

図 4.3-2 x-z 鉛直断面内の風圧係数の分布
地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$

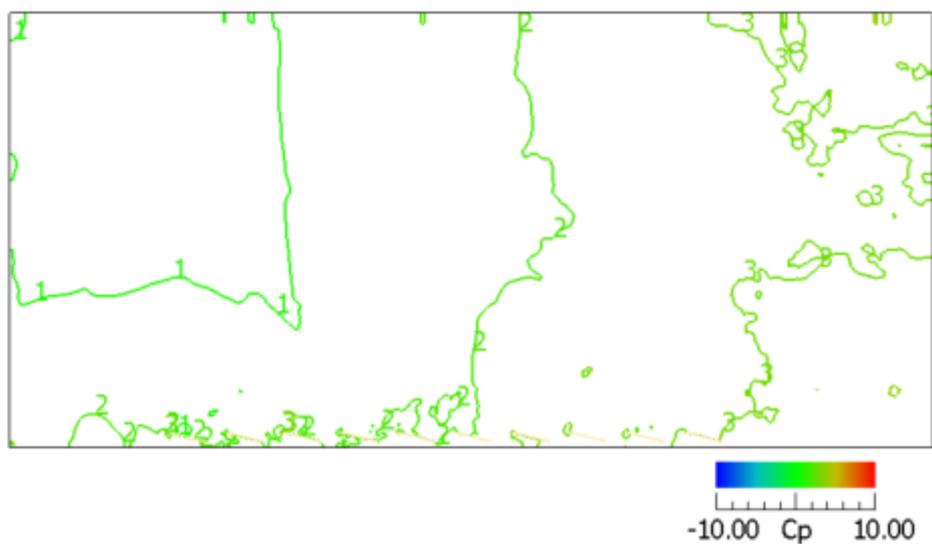
(3) 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = -15^\circ$ の場合

図 4.3.3 に示す通り、平均風圧係数はアレイ上部で流れ方向に減少し、その風圧勾配は $\beta = 15^\circ$ の場合よりも大きい。最大風圧係数（各計算点における瞬間最大値）は流れ方向に増大し、最小風圧係数（各計算点における瞬間最小値）は流れ方向に減少する。

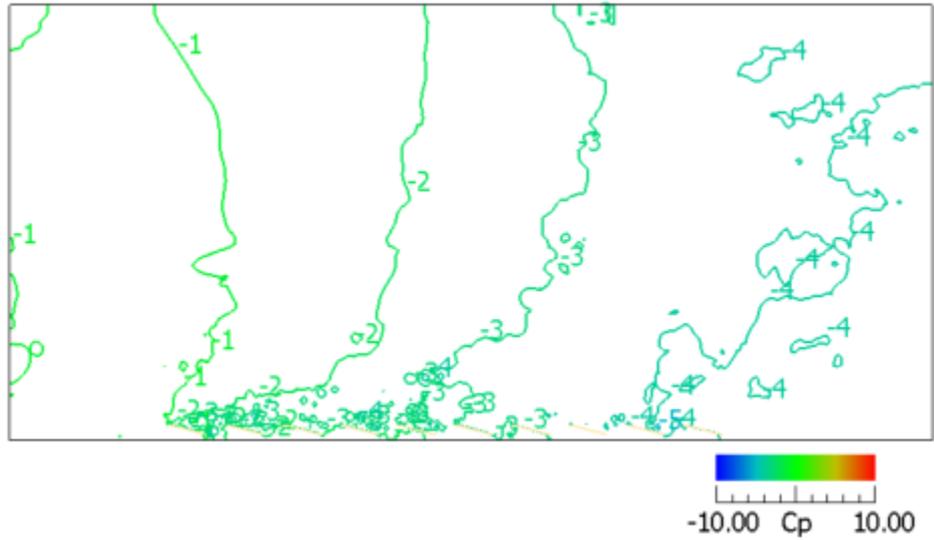
アレイ周辺の風圧分布に関しては、風上側の 1 枚目のアレイの後縁において最も強い正圧が生じており、上面における風圧変化（正の風圧勾配）が大きい。最も風下側のアレイの前縁において最も強い負圧が生じている。



a. 平均風圧係数



b. 最大風圧係数

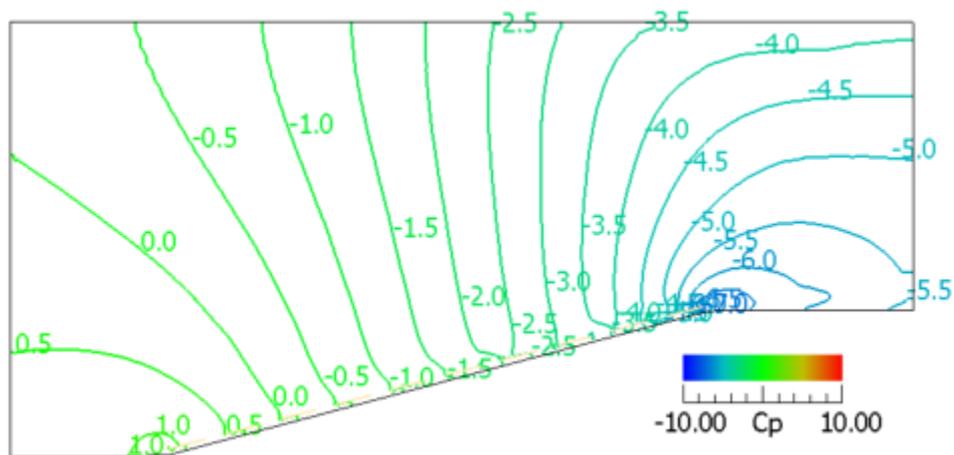


c. 最小風圧係数

図 4.3-3 x-z 鉛直断面内の風圧係数の分布
地盤の傾斜角 $\alpha=0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta=-15^\circ$

(4) 地盤の傾斜角 $\alpha=15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta=0^\circ$ の場合

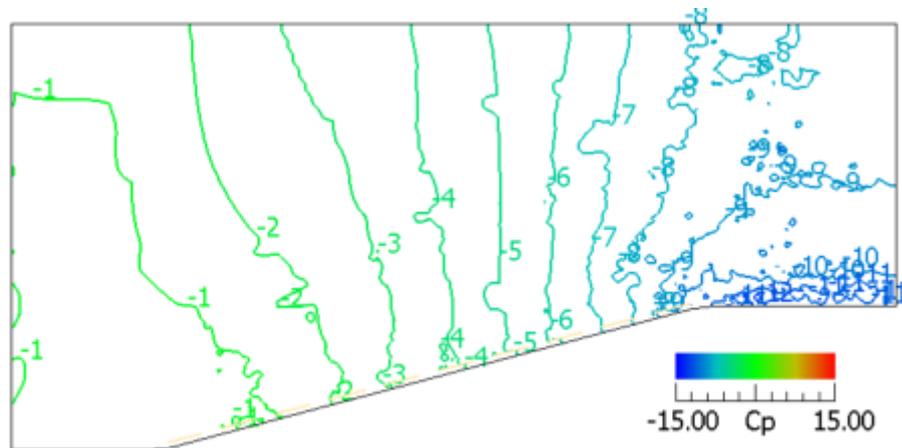
図 4.3.4 に示す通り、平均風圧係数はアレイ上部で流れ方向に減少しており、アレイ上部で平均風速が加速するのに対応する。最大風圧係数（各計算点における瞬間最大値）はアレイ上部で全体としては流れ方向に減少するが、中央部ではほぼ一定値をとる。最小風圧係数（各計算点における瞬間最小値）も流れ方向に減少しており、その変化は最大風圧係数の流れ方向の変化よりも大きい。



a. 平均風圧係数



b. 最大風圧係数

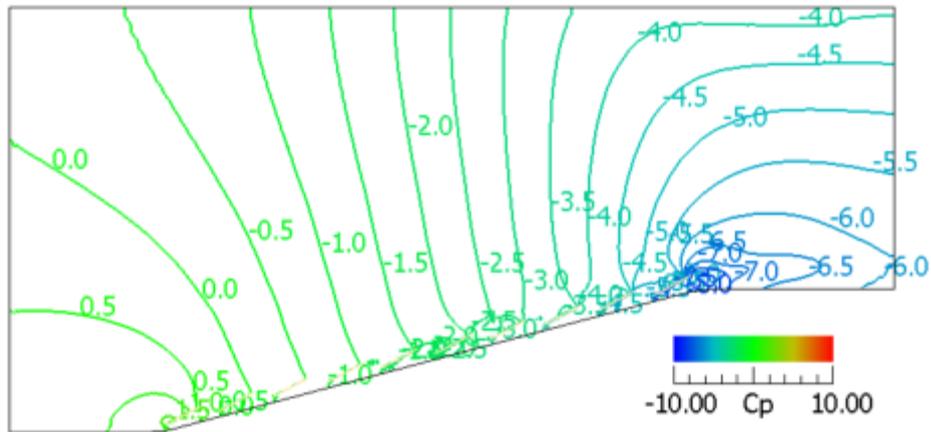


c. 最小風圧係数

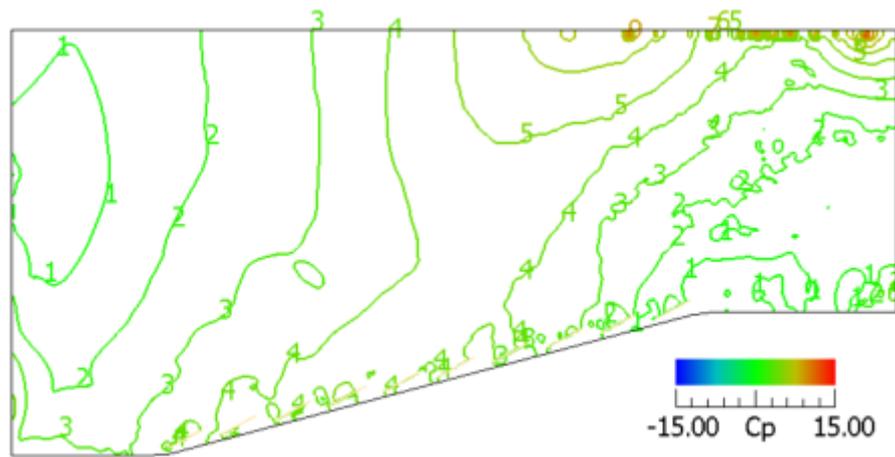
図 4.3-4 x-z 鉛直断面内の風圧係数の分布
地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ アレイの相対角 $\beta = 0^\circ$

(5) 地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$ の場合

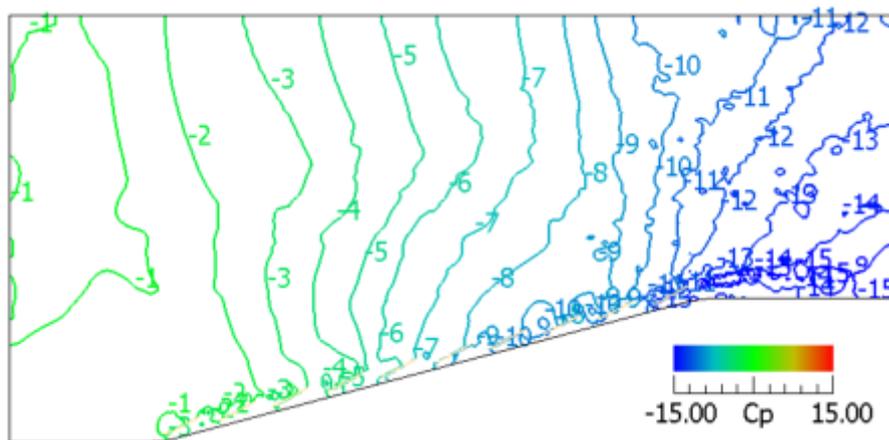
図 4.3-5 に示す通り、平均風圧係数はアレイ上部で流れ方向に減少しており、アレイ上空で平均風速が加速するのに対応する。最大風圧係数（各計算点における瞬間最大値）もアレイ上部で全体としては流れ方向に減少するが、中央部ではほぼ一定値をとる。最小風圧係数（各計算点における瞬間最小値）は流れ方向に減少し、その変化は最大風圧係数の流れ方向の変化よりも大きい。



a. 平均風圧係数



b. 最大風圧係数

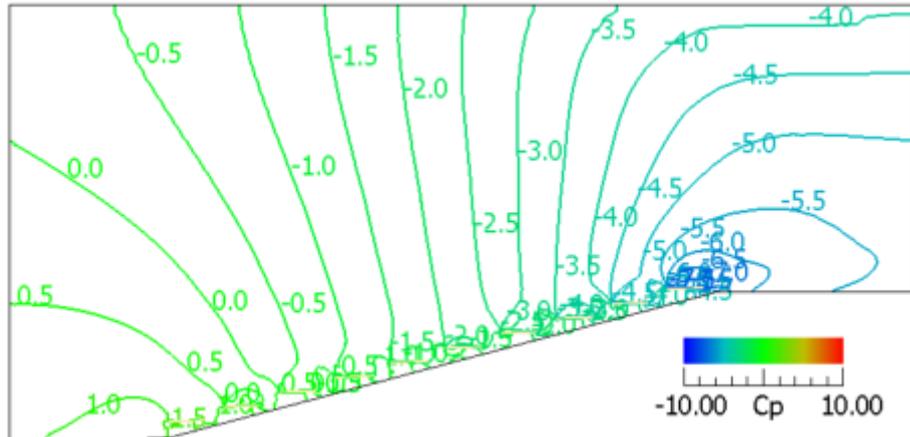


c. 最小風圧係数

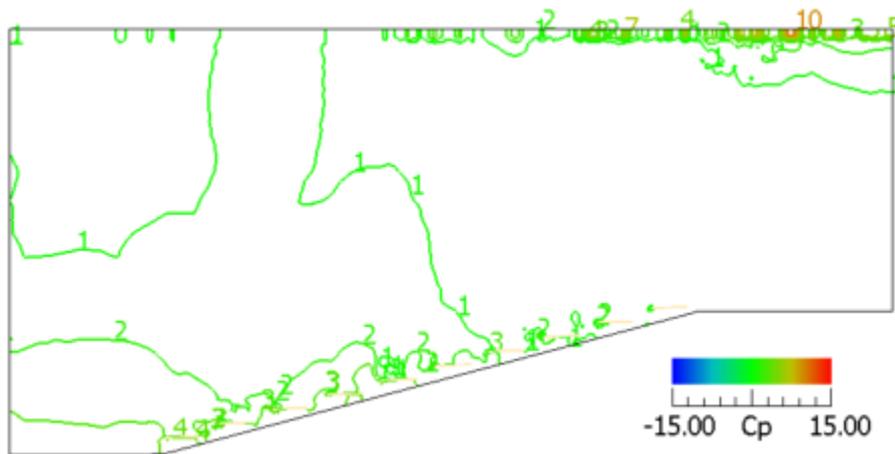
図 4.3-5 x-z 鉛直断面内の風圧係数の分布
地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ アレイの相対角 $\beta = 15^\circ$

(6) 地盤の傾斜角 $\alpha=15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta=-15^\circ$ の場合

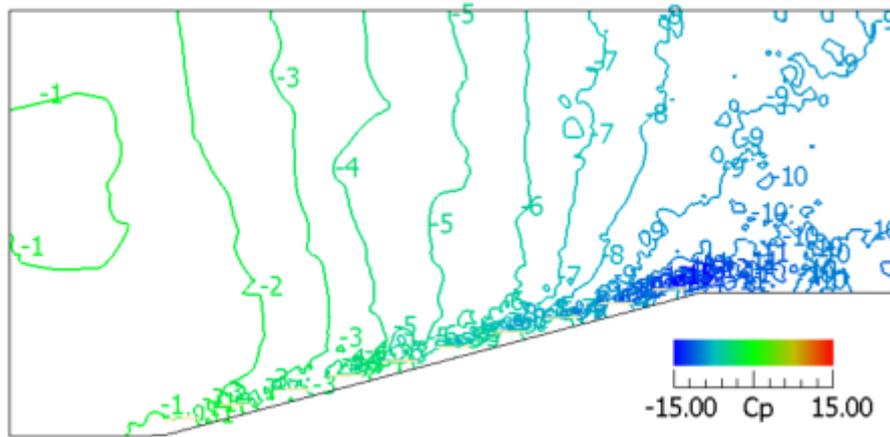
図 4.3-6 に示す通り、平均風圧係数はアレイ上部で流れ方向に減少しており、アレイ上空で平均風速が加速するのに対応する。最大風圧係数（各計算点における瞬間最大値）はアレイ上部で全体としては流れ方向に減少するが、アレイの相対角 $\beta=-0^\circ$ の場合と同様に中央部ではほぼ一定値をとる。最小風圧係数（各計算点における瞬間最小値）は流れ方向に減少し、その変化は最大風圧係数の流れ方向の変化よりも大きい。



a. 平均風圧係数



b. 最大風圧係数



c. 最小風圧係数

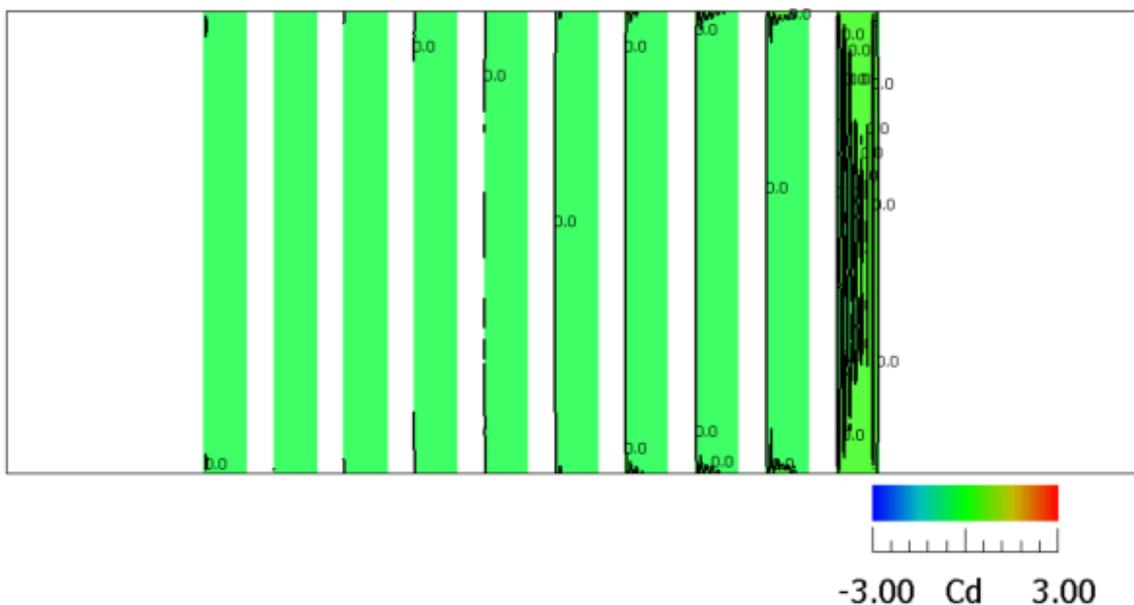
図 4.3-6 x-z 鉛直断面内の風圧係数の分布
地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ アレイの相対角 $\beta = -15^\circ$

4.4 風力係数

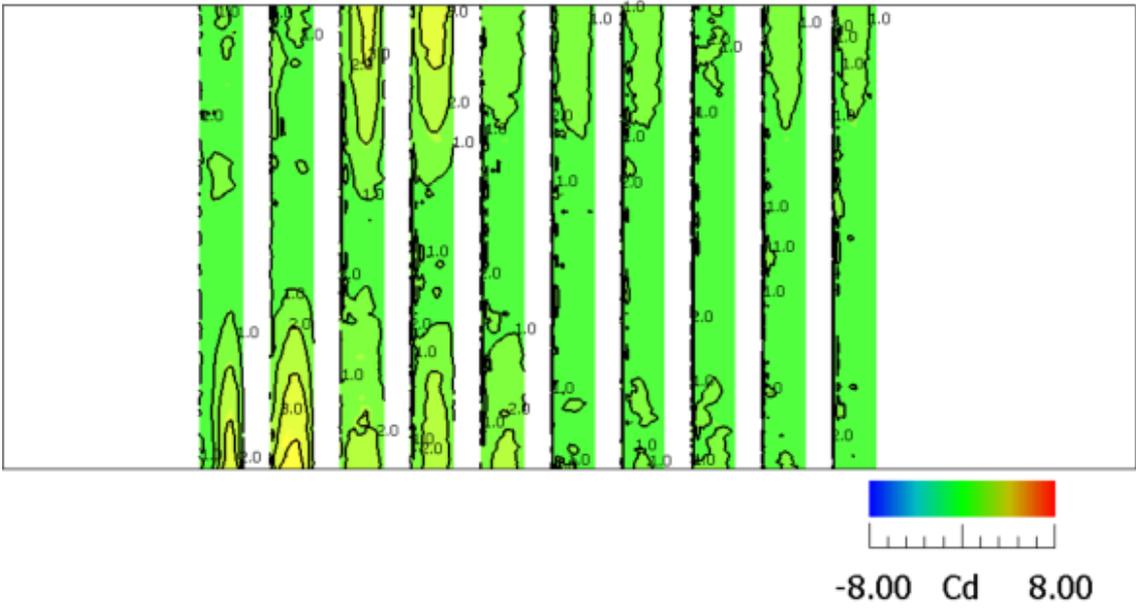
実験と対応する風力係数 C_d を、前節で示した詳細領域の計算結果におけるアレイ周りの風圧係数を用い、アレイの上面に接するセルの風圧係数から、その真下であり、アレイの下面に接するセルの風圧係数を引くことによって求めた。得られた結果を図 4.4-1 から図 4.4-6 に示す。

(1) 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 0^\circ$ の場合

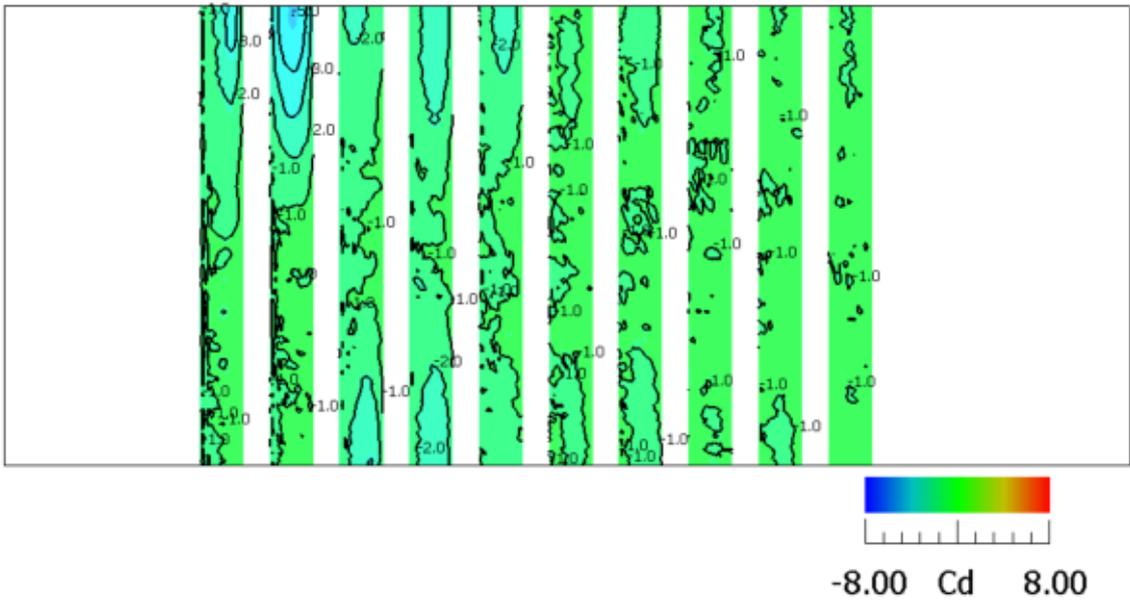
図 4.4-1 に示すように、アレイ上の風力係数は実験値、計算値ともに 0 付近の値を示している。最大値、最小値は計算値のほうが絶対値が大きくなるが、分布の傾向は同じである。



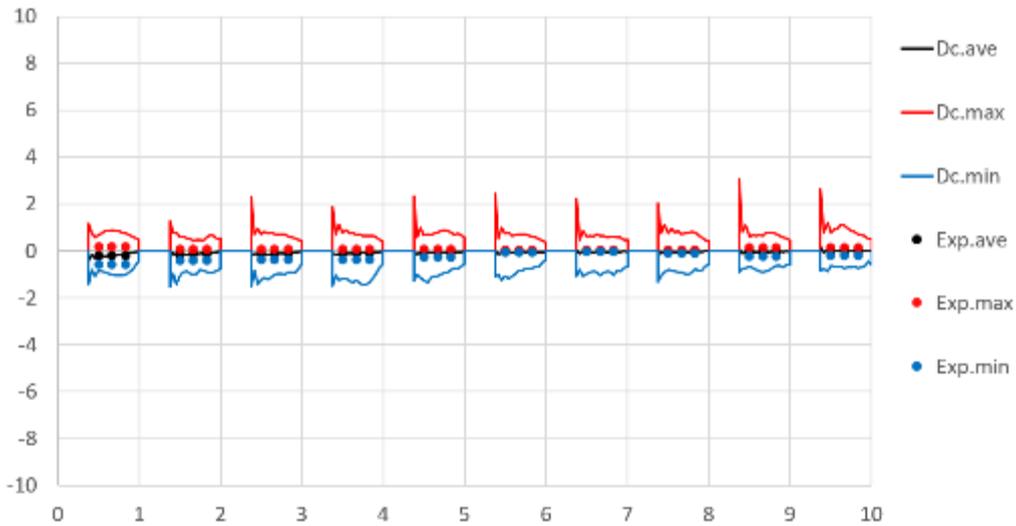
a. 平均風力係数



b. 最大風力係数



c. 最小風力係数

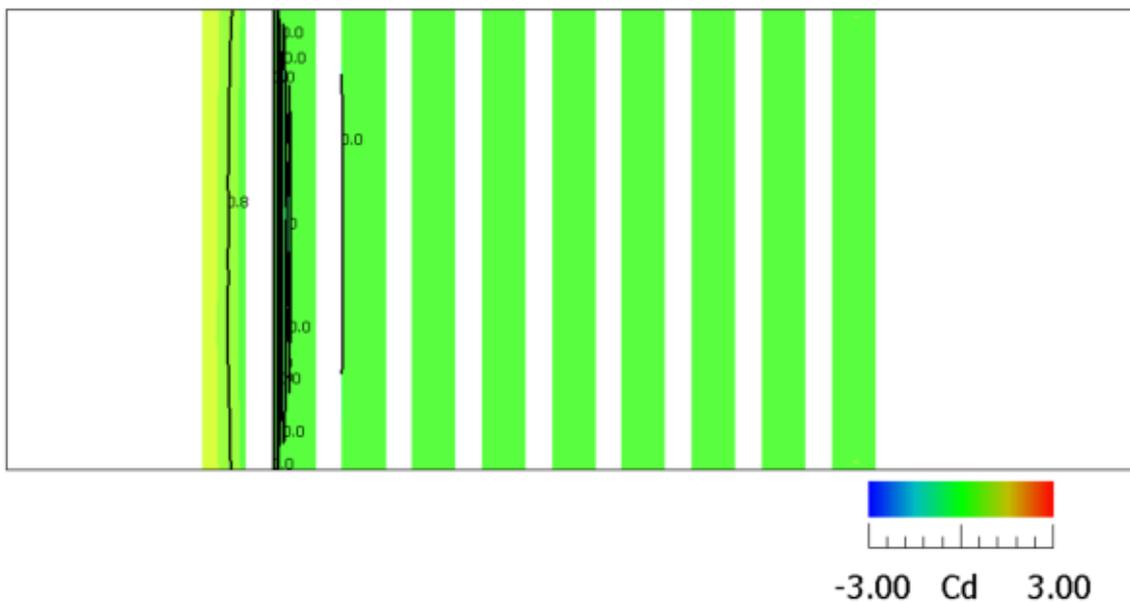


d. 実験結果との比較

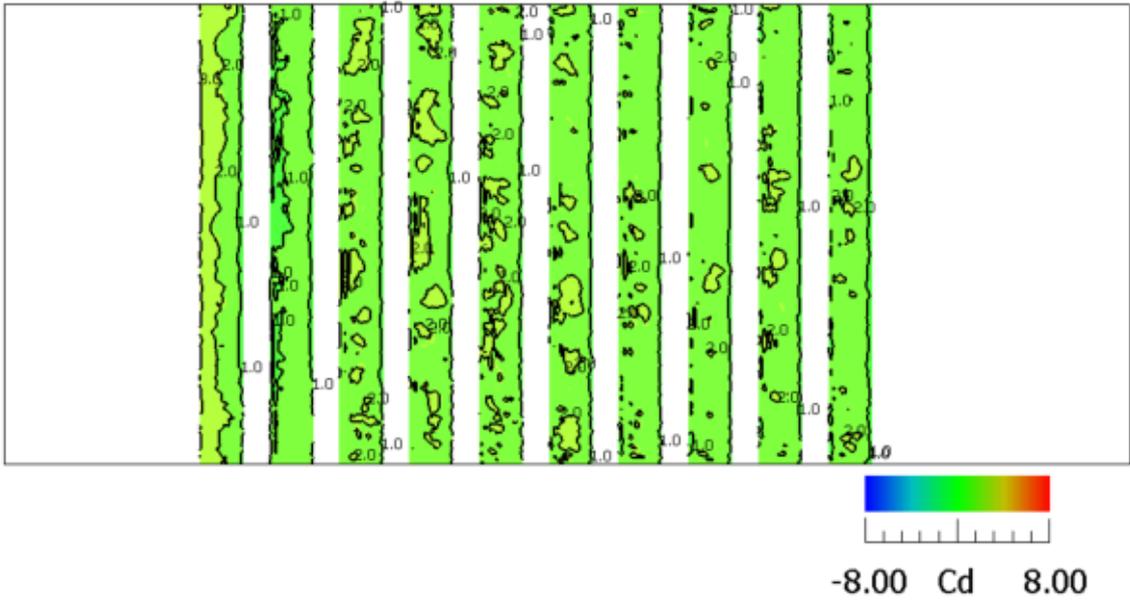
図 4.4-1 アレイ部分の風力係数風力係数の分布
 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 0^\circ$

(2) 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$ の場合

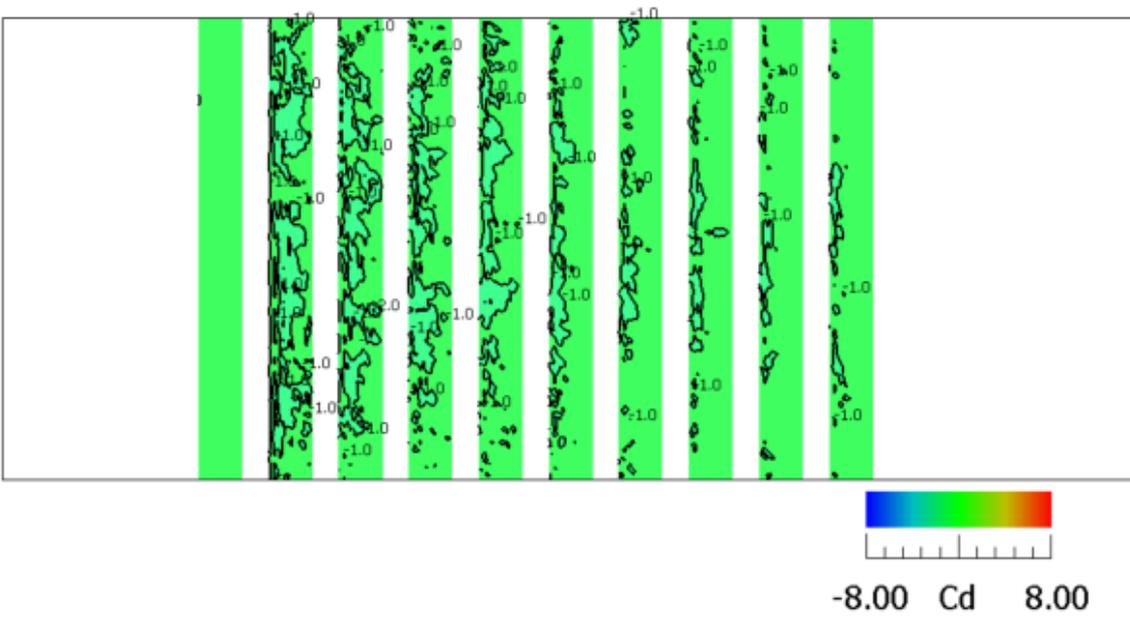
図 4.4-2 に示すように、アレイ上の平均風力係数に関して計算値は実験値をよく再現している。最大値、最小値は計算値のほうが絶対値が大きく、アレイ中央部で実験値との差が大きい。



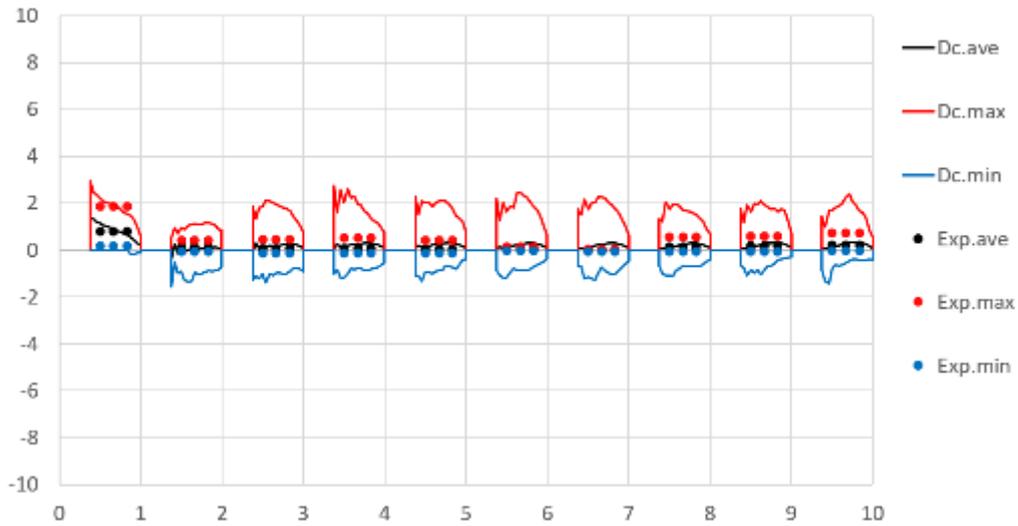
a. 平均風力係数



b. 最大風力係数



c. 最小風力係数

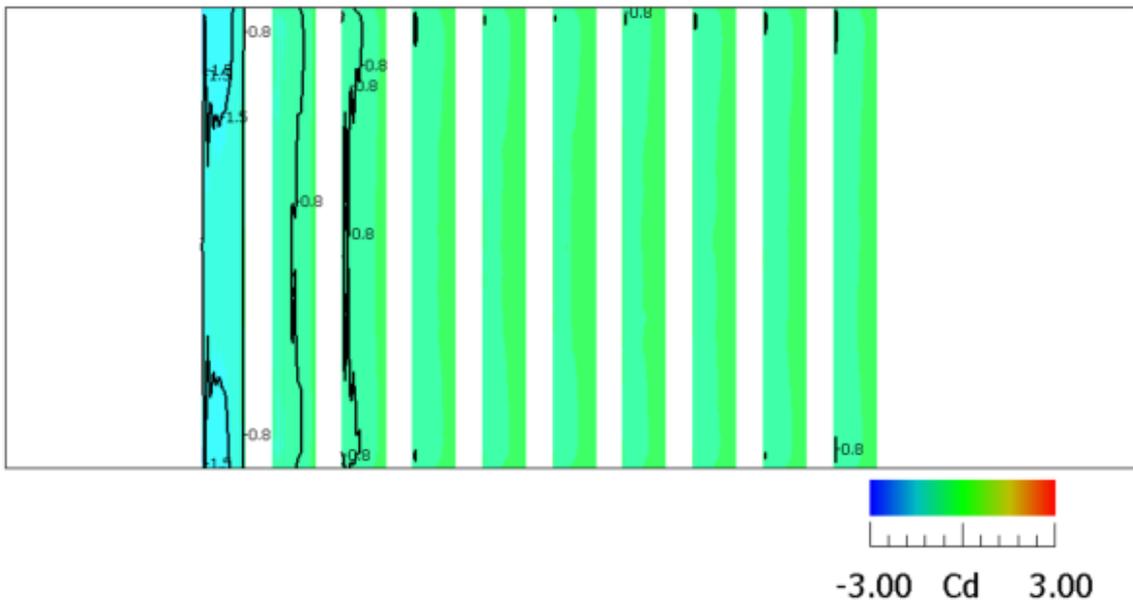


d. 実験結果との比較

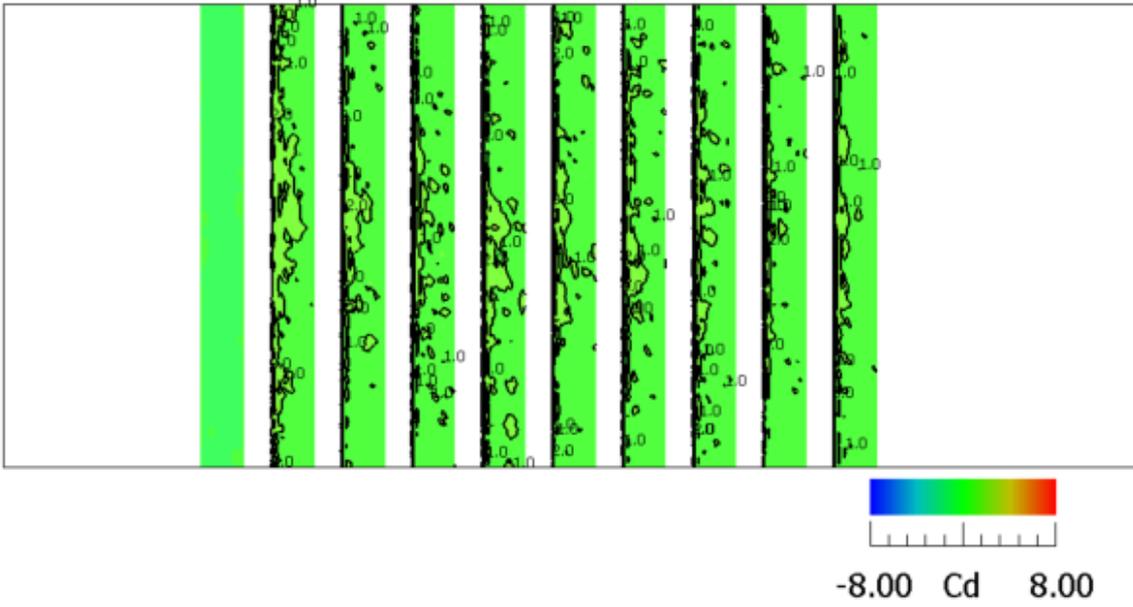
図 4.4-2 アレイ部分の風力係数風力係数の分布
 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$

(3) 地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = -15^\circ$ の場合

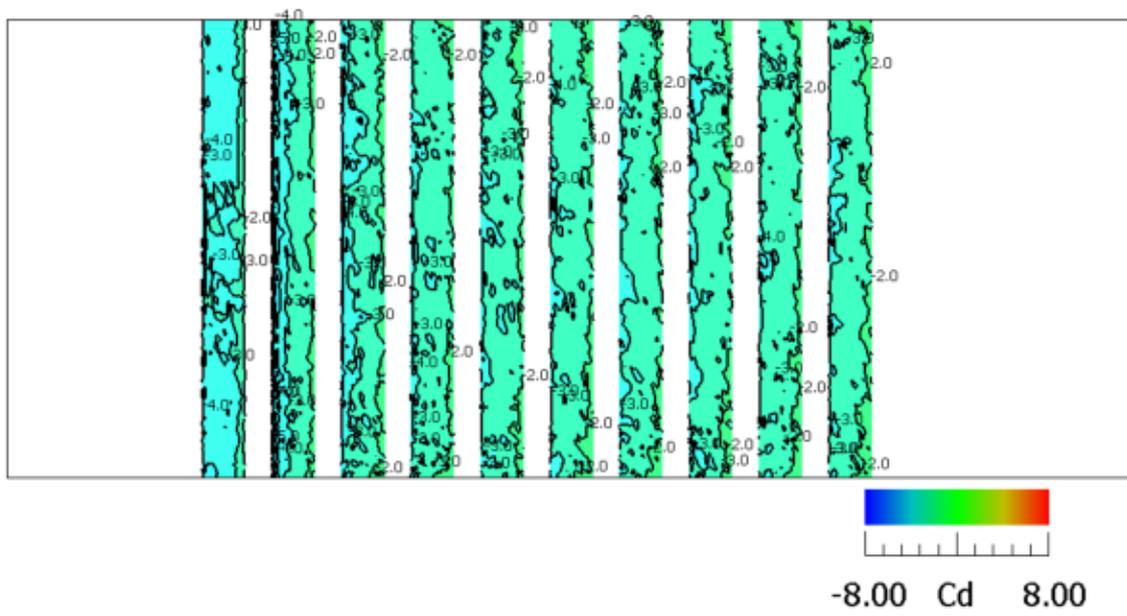
図 4.4-3 に示すように、アレイ上の平均風力係数は風上側 1 列目のアレイで計算値は実験値より小さく、風下側最後の列で計算値は実験値より少し大きい、おおむね計算値は実験値を再現している。最大値、最小値は計算値のほうが絶対値が大きい、分布の傾向は同じである。ただし、アレイ中央部で実験値との差が大きい。



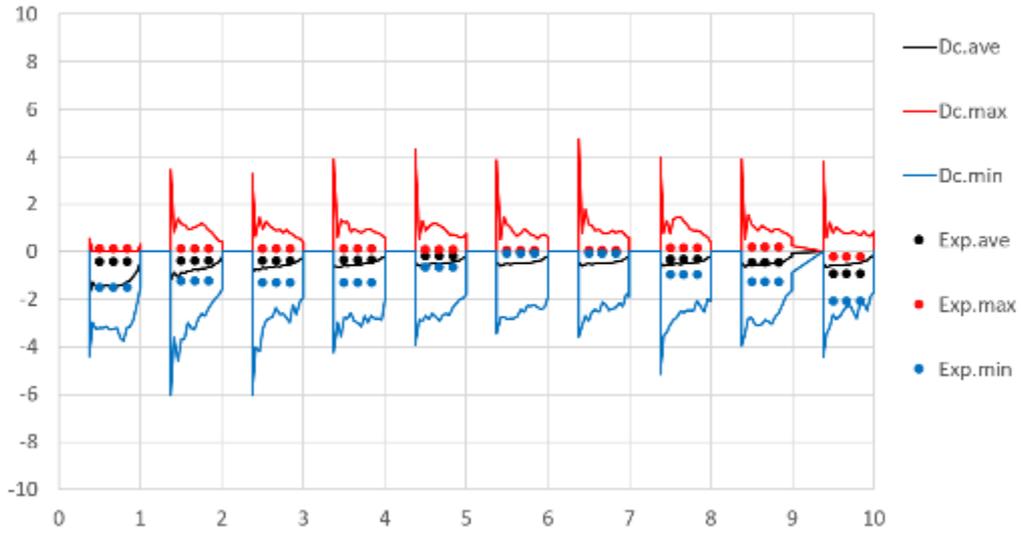
a. 平均風力係数



b. 最大風力係数



c. 最小風力係数

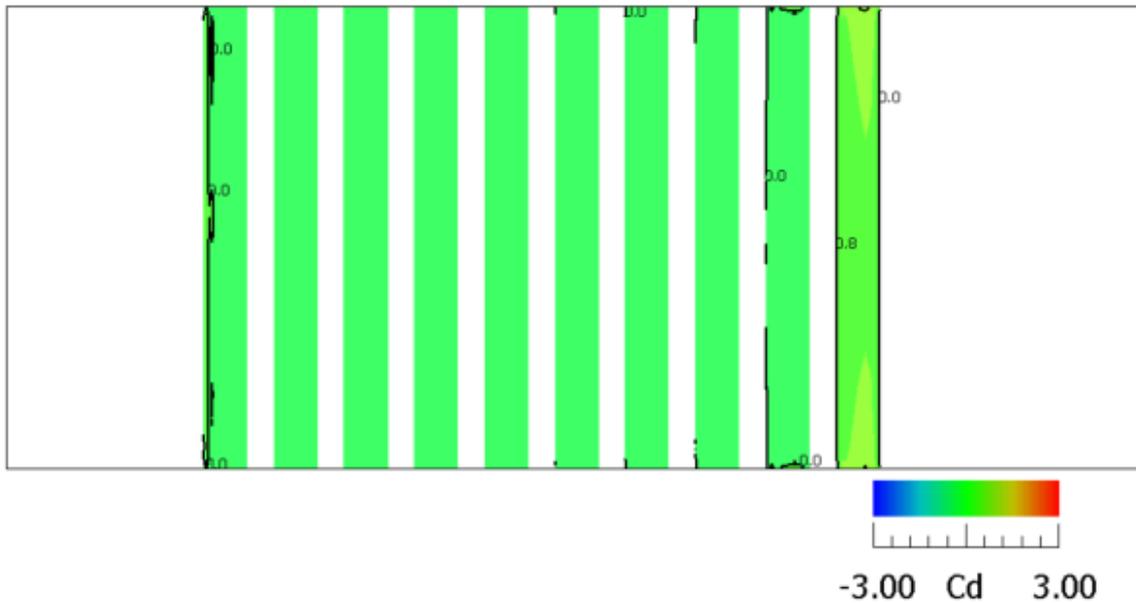


d. 実験結果との比較

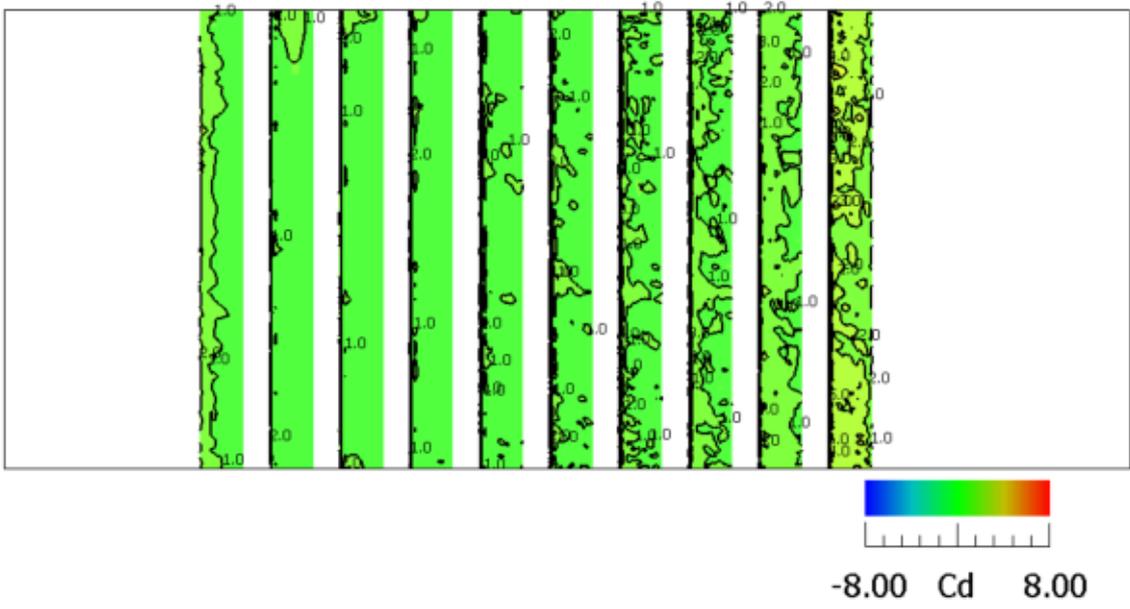
図 4.4.3 アレイ部分の風力係数風力係数の分布
地盤の傾斜角 $\alpha = 0^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = -15^\circ$

(4) 地盤の傾斜 $\alpha = 15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 0^\circ$ の場合

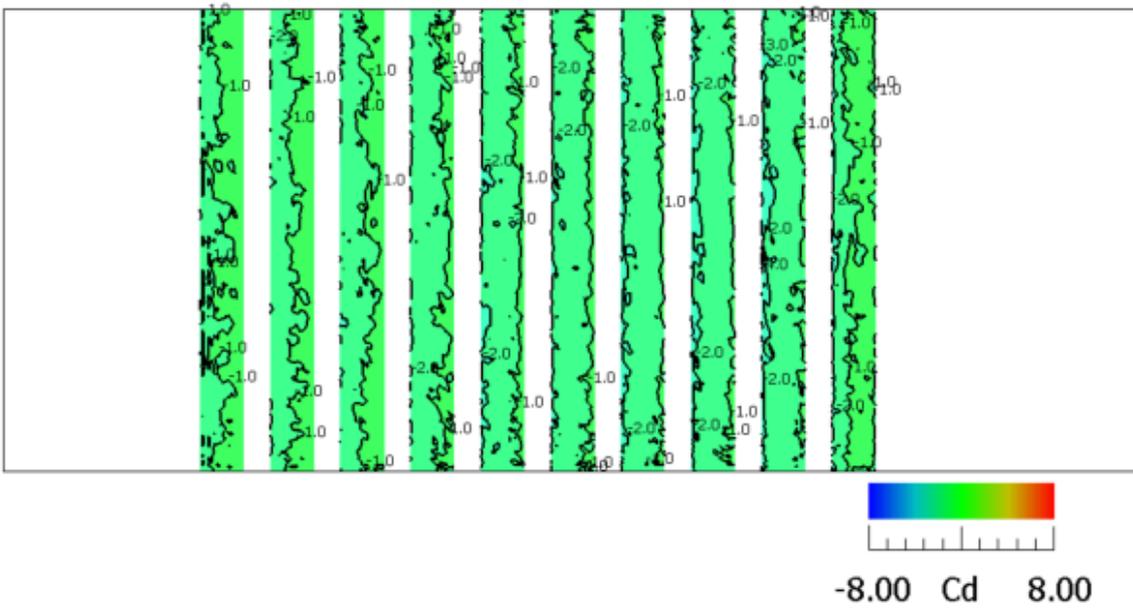
図 4.4-4 に示すように、アレイ上の平均風力係数に関して計算値は実験値をよく再現している。最大値、最小値は計算値のほうが絶対値が大きく、アレイ中央部から下流側のアレイで実験値との差が大きい。



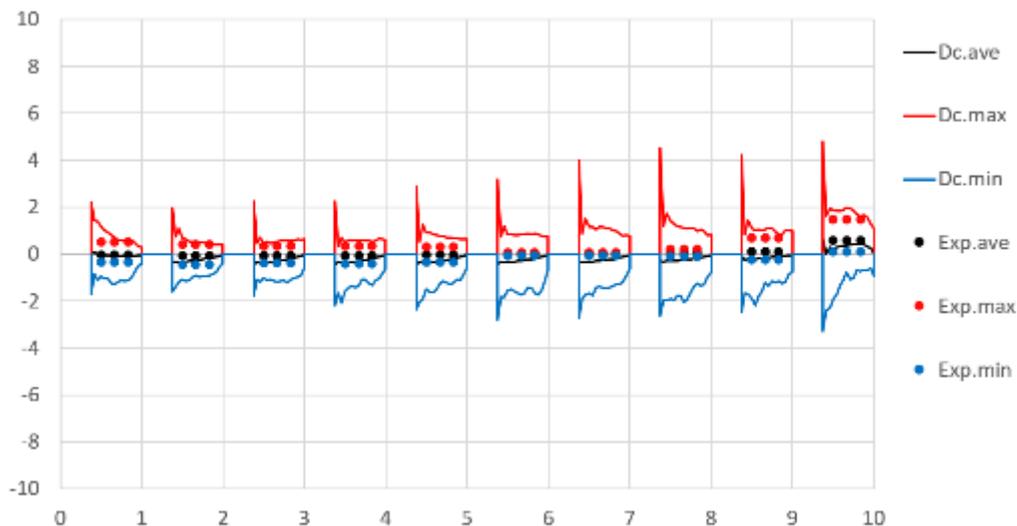
a. 平均風力係数



b. 最大風力係数



c. 最小風力係数

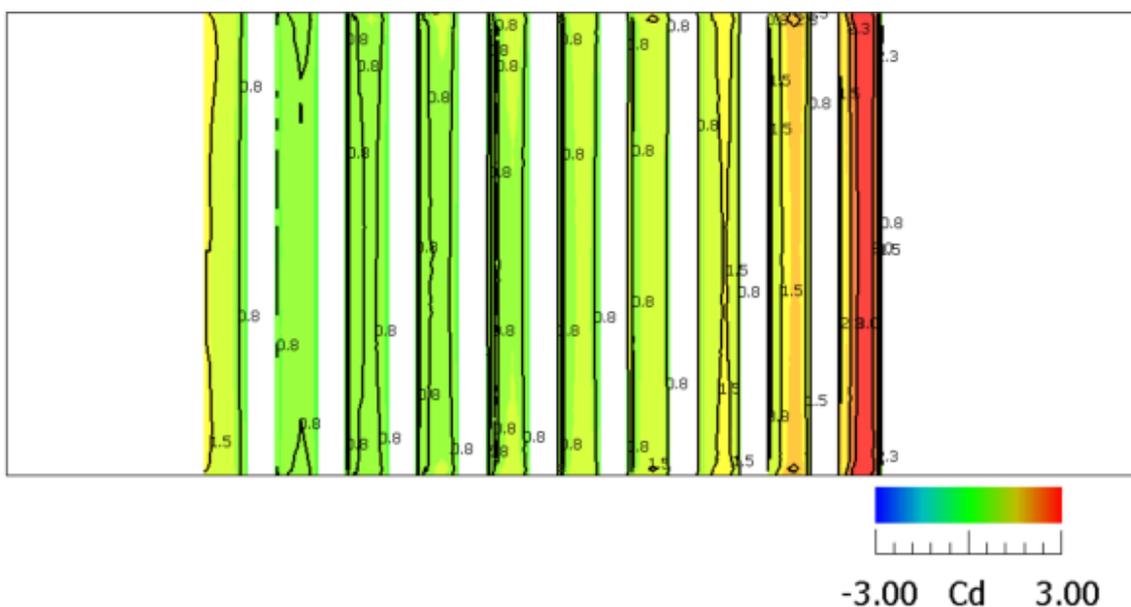


d. 実験結果との比較

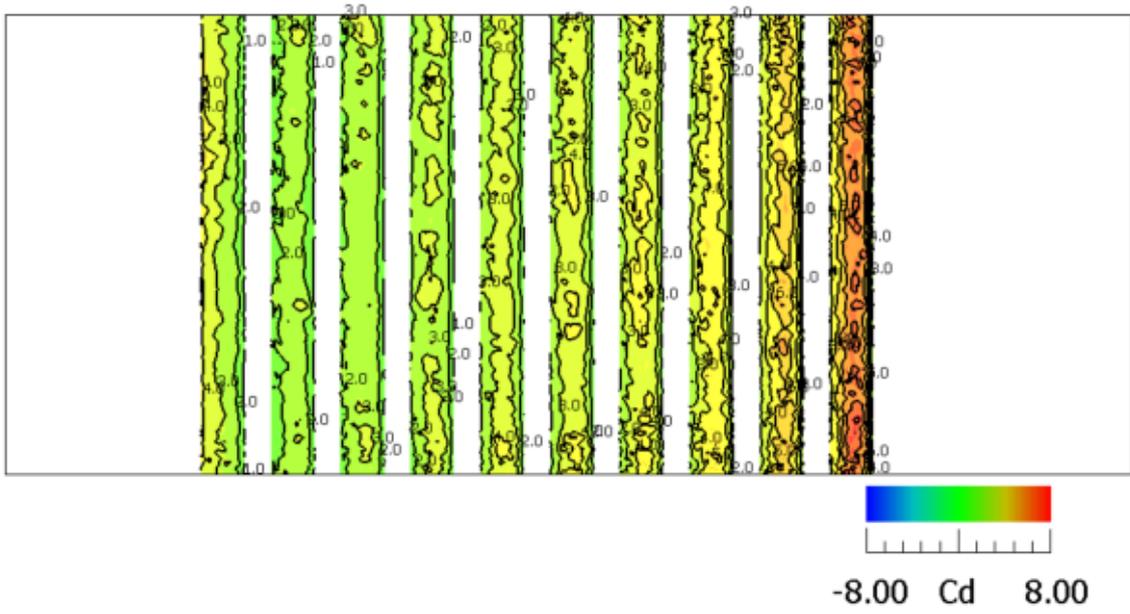
図 4.4-4 アレイ部分の風力係数風力係数の分布
地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = 0^\circ$ の場合

(5) 地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ ・地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$ の場合

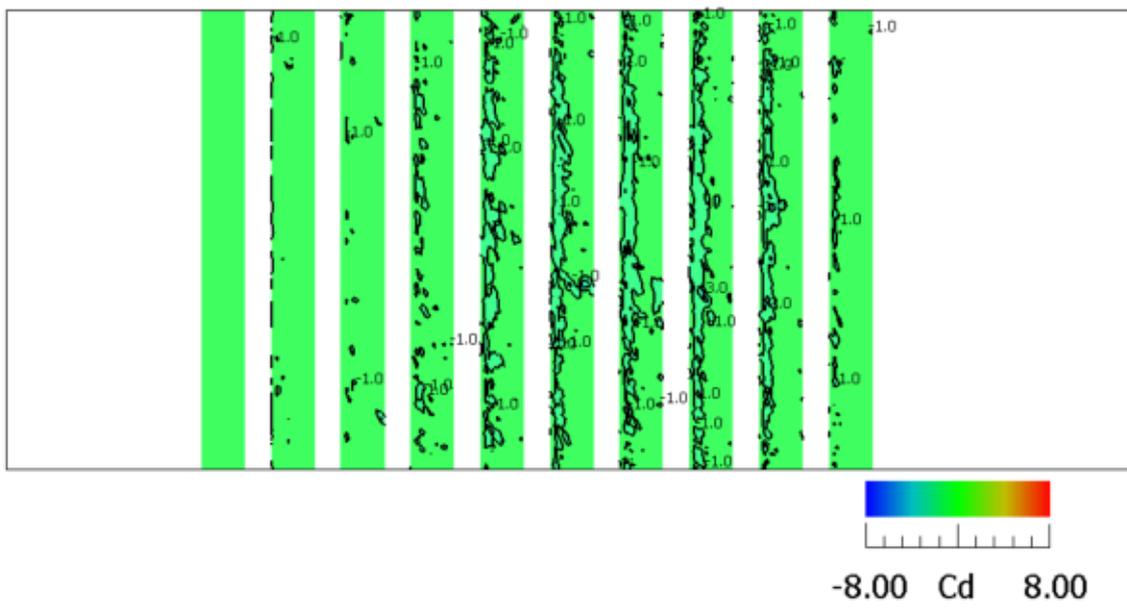
図 4.4-5 に示すように、アレイ上の平均風力係数は風上側 1 列目のアレイで計算値は実験値より少し大きく、中央部から風下側で計算値は実験値より少し大きい、おおむね計算値は実験値を再現している。最大値、最小値は計算値のほうが絶対値が大きいが、分布の傾向は同じである。ただし、アレイ中央部から風下側のアレイで計算結果の最大値は実験値との差が大きい。



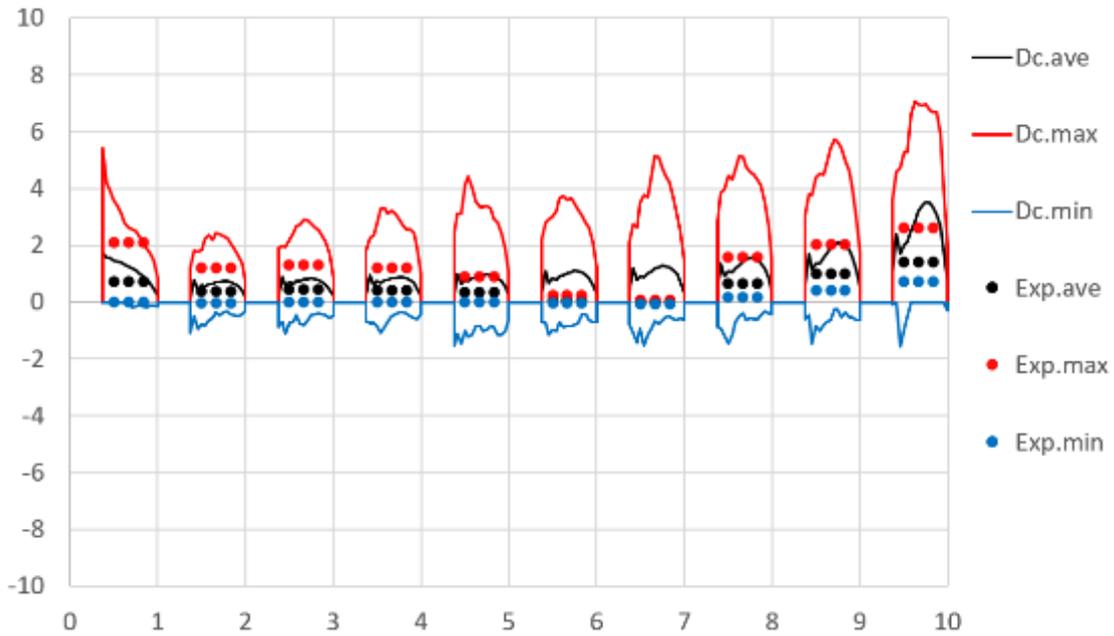
a. 平均風力係数



b. 最大風力係数



c. 最小風力係数

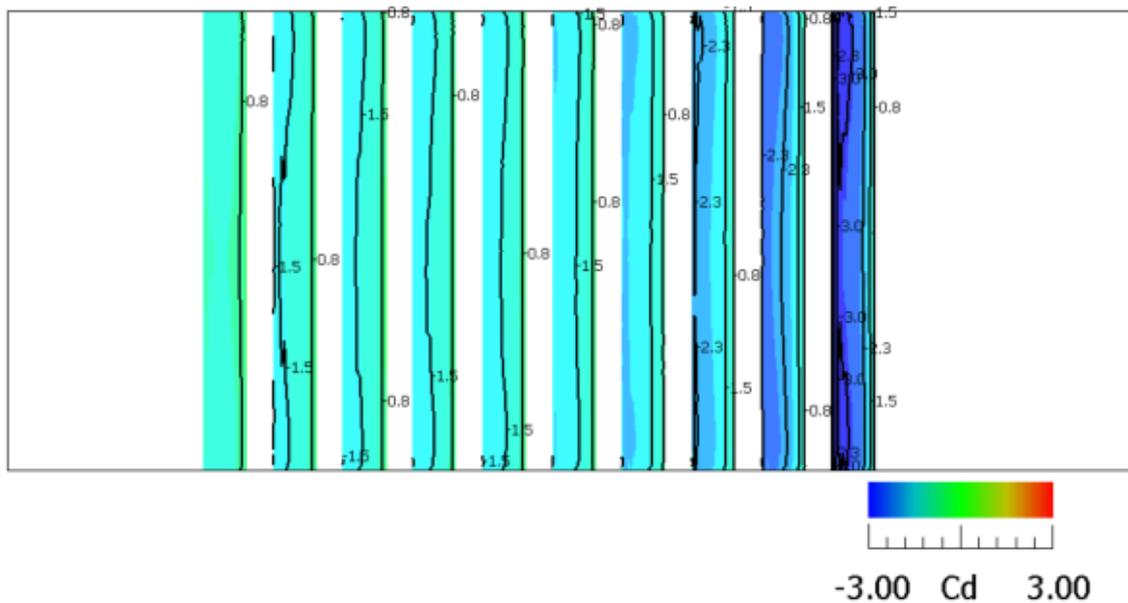


d. 実験結果との比較

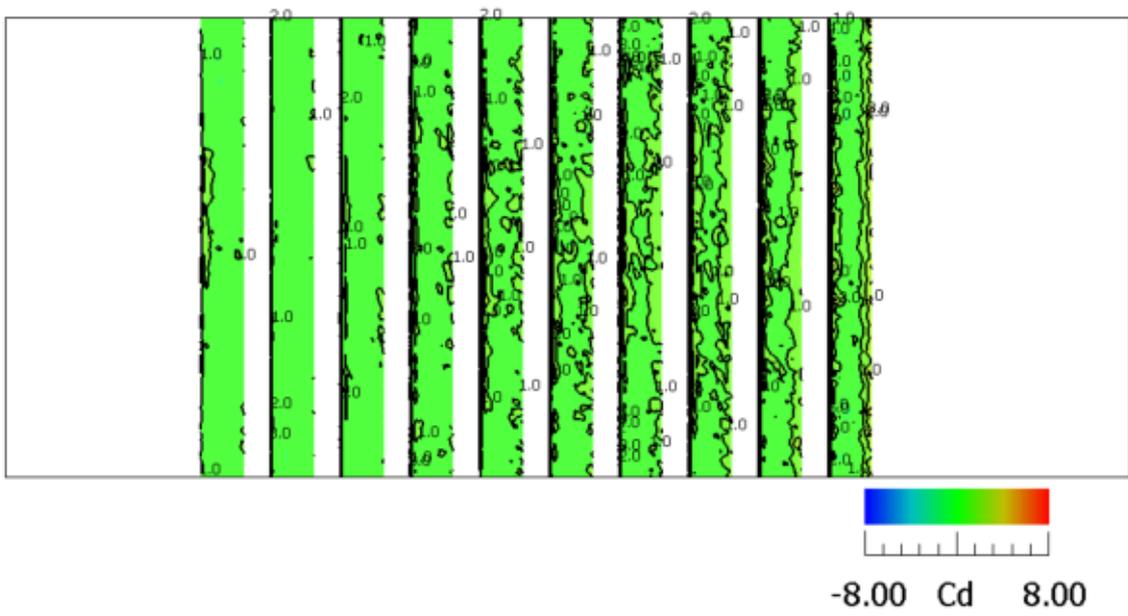
図 4.4-5 アレイ部分の風力係数風力係数の分布
地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ ・地盤とアレイの相対角 $\beta = 15^\circ$

(6) 地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ ・地盤とアレイの相対角 $\beta = -15^\circ$ の場合

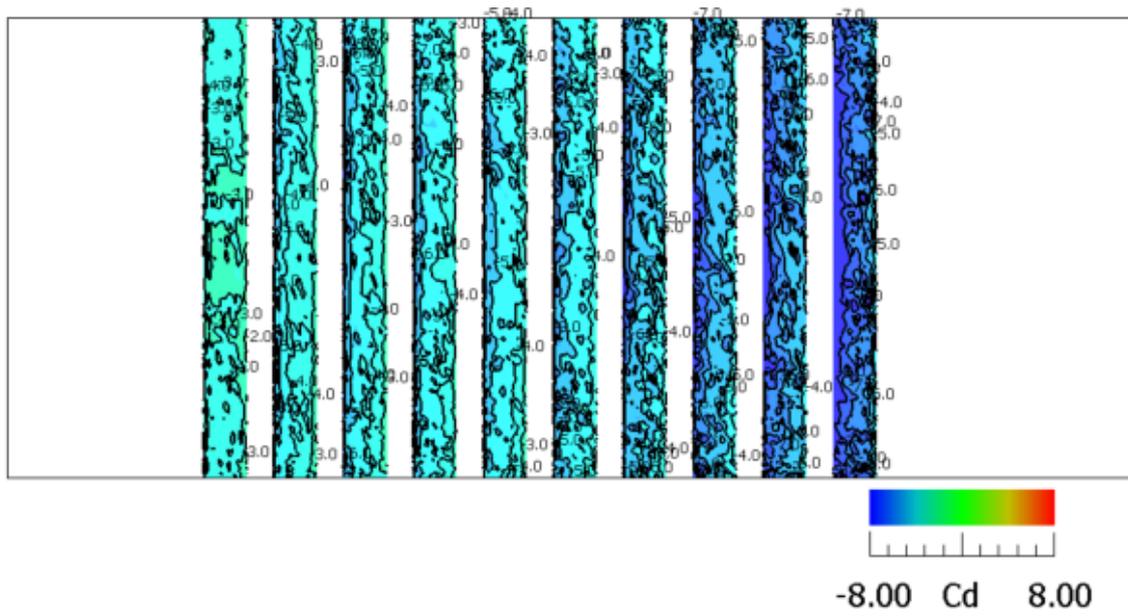
図 4.4-6 に示すように、アレイ上の平均風力係数は風上側 1 列目のアレイで計算値は実験値より大きく、アレイ中央部から風下側の列で計算値は実験値より小さくなる。最大値、最小値は計算値のほうが絶対値が大きい。最大値については、各アレイの風上側先端での値が大きく、最小値に関しては、アレイ中央部から風下側の列で計算値は実験値よりかなり小さくなる。



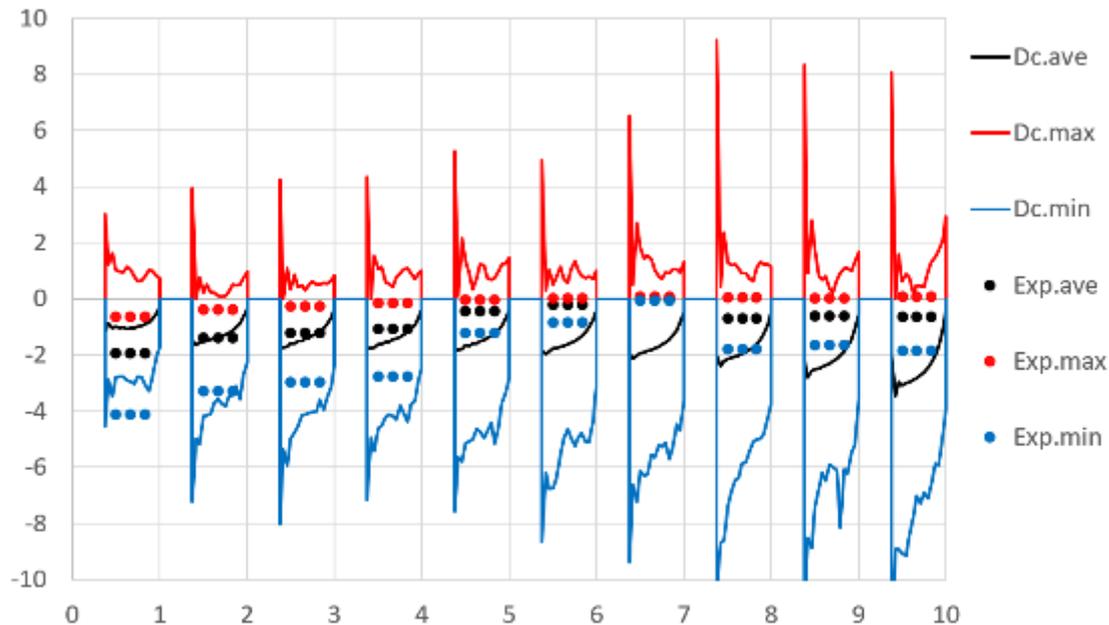
a. 平均風力係数



b. 最大風力係数



c. 最小風力係数



d. 実験結果との比較

図 4.4-6 アレイ部分の風力係数風力係数の分布
 地盤の傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ 、地盤とアレイの相対角 $\beta = -15^\circ$

5. 考察

数値流体計算を用いて、斜面上に設置された太陽電池アレイに加わる風力分布を求める風洞実験を再現する際に考慮・検討しなければならない点に関して考察する。

太陽電池アレイに被害を生じさせるような自然風の条件としては、地面付近の乱れた強風を想定しなければならない。そのため、風洞実験においては、模型風上側床面に粗度ブロックを敷き詰めるなどして、所定の平均風速勾配と乱れ強さを持った気流を作成し、その中で実験を行う必要がある。本報告書が解析対象とした風洞実験では、模型に接近する気流は図 2.3 に示すように日本建築学会建築物荷重指針・同解説で示される地表面粗度区分 II、べき指数 $\alpha = 0.15$ に対応する平均風速及び乱れの強さの鉛直分布を目標値とした。実験に用いた太陽電池アレイの縮尺模型は、模型床面上に最低高さ 5mm で風向水平直角（スパン）方向に 2 次的に設置され、厚さが 2.5mm、奥行き 40mm、幅はスパン方向に 400mm である。

5.1 計算手法の選定

風速変動場を解析するために、非定常乱流場を再現できる流体解析手法を選ぶ。高レイノルズ数流れの乱流場を数値的に解くためには、通常乱流モデルを用いる。乱流モデルとしては、 $k-\epsilon$ 乱流モデルとラージエディシミュレーション（LES）が実用上よく用いられる。 $k-\epsilon$ 乱流モデルはレイノルズ平均に基づいて、流体の基礎方程式を粗視化（平均化）した乱流モ

デルであり、計算された変動風速場の乱れ時間スケールの物理的な解釈が不明なので、現実（実験）の時間スケールとの対応・評価が困難なため、実験結果とは長い時間の平均（低周波数）成分の比較しかできない。一方、LESは空間平均により流体の基礎方程式を粗視化した乱流モデルであるので、計算で得られた変動場は計算格子程度の空間スケールを持った変動風速であると評価できる。したがって、求めたい変動の空間スケールよりも小さな計算格子を用いる必要がある。また、計算結果も格子の大きさに対応した空間スケールの平均値であるので、計算結果は計算格子幅に対応した周波数特性を持っており、大きな計算格子付近では、高周波成分は減衰することになる。

5.2 計算格子の取り方

変動風荷重を得るために模型に与える変動風速場は、アレイ模型の長さスケールに対応する風速変動成分を与える必要がある。模型アレイの最小長さスケールは厚さ方向なので、計算格子の最小幅は最低でもアレイ厚さよりも小さくとる必要がある。すなわち、今回の解析ではアレイの厚さ方向である鉛直方向には、アレイ厚さ 2.5mm よりも小さく、2 分割とした。さらに、アレイと地面との間の空間変動を再現するための格子分割数が必要となるので、5 分割とし、最小で 1 mm の格子分割を用いている。

一方、解析領域は高さ 900mm、幅 400mm、奥行き 1800mm なので、この範囲すべてを詳細な格子で分割することは計算負荷が非常に大きくなる。したがって、高さ方向に地面・アレイから離れるにしたがって格子間隔を大きくする。風上・風下側でアレイ周辺の変動風に影響を及ぼさない範囲では、アレイから離れるにしたがって、格子間隔を大きくする不等間隔格子を採用するなどして計算格子数を減らせば、計算負荷を軽減することができる。さらに、本解析で用いたように、解析対象であるアレイ付近の領域をより細かな計算格子を持った内側の解析領域として設定し、外側の解析結果を境界条件として与える（ダウンスケーリングする）ことにより、計算負荷を減らすとともに時空間分解能を上げることができる。

流入境界には、次節で説明するような方法で作成し、実験に対応した変動風速場を与えるが、解析で必要となる時間・空間スケールの変動が模型まで届くように、模型アレイから風上方向、流入境界面までの計算格子は、作成された流入風を持つ空間スケールと同等か、より小さな格子を用いる必要がある。もし、それより粗い格子を用いると、高周波成分が減衰して所定の変動を与えることができなくなってしまう。

今回の解析では解析領域に与える流入変動風速場は流れ方向に 20mm の等間隔格子で作成しているので、解析領域の流れ方向の格子間隔はそれより小さくとして、外側の解析領域で 5mm、内側の解析領域で 2.5mm とし、アレイに接近するまでに、アレイの最小スケールと同程度のスケールを持った風速変動を解析領域内において計算で発生させるようにしている。このように、計算格子を必要に応じて細かく設定すると、計算を行う際の時間積分間隔もそれに伴って短くなるため、計算時間・コストも増大することになる。

最終的な計算格子形状・分割数は上記のような点を考慮したうえで、計算機的能力と計算負荷を計算時間や経費と勘案して決定することになる。今のところ、計算格子形状・分割数

を決めるうえで決定的な方法はなく、領域・格子の形状・間隔を変化させて、必要な精度以上に変化しない、あるいは、実験・観測値をほしい精度の情報が得られる程度に再現できていることを確かめる以外にないのが現状である。

5.3 流入変動風の作成

風上側の流入境界面に与える変動風速場には、実験条件と同等な時空間変動を持ったものが必要となる。変動風速場を作成する方法には、1. 統計量が同じであるような変動風速場を数値的に発生させる方法と、2. 対応する上流側の流れ場を再現した流体計算を行って発生させる方法に大別できる。

1. の方法として、いくつかの方法が提案されているが、必要となる統計量、たとえば風速変動の時空間相関の3次元分布などを知ることは通常困難であることが多い。また、風速の3成分が運動方程式を満たすように作成されない場合、乱れの時空間分布が流れ場に対応していないため、解析領域に流入した後、下流に進むとすぐに乱れが減衰し、与えた乱れが解析対象付近まで届かないことが多い。もし、解析対象までに十分な吹送距離を取ることができるのであれば、計算で乱れを回復することができる場合もあるが、希望する特性を持たせることは難しいことが多く、最近では2. の方法が採用されることが多い。特に、風洞実験のように上流側の乱れの発生条件がわかっている場合には、床面粗度などを含めた風洞の形状を再現した解析領域を別途設けて、変動風速場を計算で作成すればよい。計算機の性能向上に伴い、上流側の再現計算による流入変動風場の生成方法は、今後の主流となると考えられる。本報告でも、上流側の風洞内流れ場の再現計算を行って実験と同等の乱流境界層を発達させて流入変動風速場を作成した。以下にその概要を解説する。

5.4 風洞内変動風の作成

乱流境界層を発生させるために設置されたバリアーや粗度ブロックを含む解析領域上流側の風洞内形状は、できるかぎり実物と同様に再現した。実験では上流側18mにわたって6cm立方体粗度ブロックが敷き詰められており、少なくとも粗度ブロックスケールの乱れが再現されるように、最小計算格子分割は粗度ブロックより小さく取り、一辺の1/6である1cmとして再現した。さらに、粗度ブロック下流から、実験模型の設置位置までの粗度ブロックが敷き詰められていない部分では滑面上の計算を行った。

粗度ブロックのない床面、すなわち、滑面上の乱流境界層流れをLESで再現する際には、床面境界条件の取り方に注意を要する。風速場の応力は風速勾配と粘性の積で決まるが、乱流場の粘性は流体の持つ物性値としての粘性だけではなく、乱流混合による粘性の寄与が大きくなる。通常、この乱流粘性のモデル化、すなわち、乱流モデルは一様等方な乱流場に対してモデル化されたものが用いられるが、壁面付近では乱れの等方性が成り立たない。床面に近づくると乱れが小さくなって、乱流粘性の寄与が小さくなる。ため、その影響を取り込む壁関数を用いて乱流モデルを補正している。この壁関数に関して、平面に対する実用的な

ものが提案されている。しかし、通常風洞床面にはわずかな凹凸があり、床面のすぐ近傍の乱れはそれらの小さな凹凸に影響されて変化する。そのため、完全に平滑でない風洞床面上の乱流境界層を、床面付近の乱れを含めて正確に再現するための境界条件の与え方は容易ではなく、不明なことも多い。

粗度のない風洞床面に対する実用的な（単純な）壁面境界条件として、壁関数を用いない **no-slip** 条件が挙げられる。しかし、**no-slip** 条件、すなわち、床面（個体壁面を含む計算格子点）で風速を 0 とする条件を用い、壁関数を用いなくてもよい距離に第 1 計算格子を取って計算を行うと、実際の床面からの摩擦よりも大きな応力を与えることになり、床面付近の風速は実験値よりも小さくなることが多い。床面摩擦の大きさを制御することを目的に対数法則やべき法則を用いて、床面上の風速勾配を与える方法では、摩擦の大きさを制御するために与える粗度長やべき指数の値に対する物理的な根拠を求めるのが難しいため、経験値を用いることになる。粗度長もべき指数も一様な表面形状を持つ壁面上に十分発達して定常状態になった乱流境界層内の壁面から少し離れた上空の領域における平均風速勾配に対する経験値しか知られていないので、瞬間値に対してそれらの値を用いることの物理的な意味が不明である。

そこで、本解析では風洞床面は完全な平面（凹凸のない表面）ではなく、微妙な凹凸があるために、それらによる抵抗をパラメータの値で取り込んで制御する方法を採用した。具体的には、床面境界の風速勾配に対しては **slip** 条件（床面法線方向に風速が変化しない）を与え、風速勾配によって床面からの応力は与えず、床面の凹凸による抵抗として応力を与えることにした。すなわち、床面第 1 計算格子における床面からの抵抗は、キャノピーモデルを用いて床面の凹凸を代表する面積と、凹凸の形状に対応したモデル係数の積として求めた抗力項を運動方程式中に付加することとした。測定値が存在する実験の場合は、キャノピーモデルに用いられるモデル係数の値は測定値を再現するように最適化することができるので、対応する最適値を求めることができ、床面の摩擦力を実験結果にあうように調整することができる。これにより、複雑で微妙な凹凸をもった実際の床面の形状を再現する必要はなくなり、計算負荷を軽減することができる。

6. まとめ

2023 年度に実施した斜面に設置された太陽光発電パネル周囲の風速場と、太陽光発電パネルに加わる風圧力に関する風洞実験に対応した数値流体計算（CFD）を行い、風洞実験結果との比較を行った。また、CFDにおける解析上の注意点について検討・考察をおこなった。以下に要点をまとめる。

・計算手法の選定

風速変動場を解析するために、高レイノルズ数流れの非定常乱流場を再現できる流体解析手法として、空間平均により流体の基礎方程式を粗視化した乱流モデルであるラージエ

ディシミュレーション (LES) を用いた計算手法を採用した。これにより、計算格子程度の空間スケールを持った変動風速が得られる。

・計算格子の取り方

アレイに加わる変動風荷重を得るために、アレイ模型の長さスケールに対応する風速変動成分を与える必要があると考え、最小格子幅はアレイの最小長さスケールである厚さの2分割とし、アレイから離れるにしたがって格子幅を大きくする不等間隔格子を用いた。これにより、計算負荷を減らすとともに必要な部分の時空間分解能を上げることができる。また、模型アレイから風上方向、流入境界面までの計算格子は、流入風の時間・空間スケールの変動が模型まで届くように、流入風の持つ空間スケールと同等か、より小さな格子を用いた。

最終的な計算格子形状・分割数は上記のような点を考慮したうえで、計算機的能力と計算負荷を計算時間や経費と勘案して決定した。

・流入変動風の作成

風上側の流入境界面に実験条件と同等な時空間変動を与えるために、上流側の風洞内の形状を計算格子に再現して気流場を再現した。その際、床面粗度の摩擦の効果を再現するためにキャノピーモデルを用いて、凹凸の効果を取り込んで風洞内に発達した乱流境界層を再現した。再現された気流性状は、実験値をほぼ再現できたが、床面付近の風速は実験値よりも低く、また乱れの強さも境界層内全域で小さかった。

・計算で得られた風速分布

模型床面の傾斜がない場合の風速分布は解析領域内で床面付近の風速がわずかに増加し、風洞実験結果と同様な結果が得られた。一方、傾斜が15°の場合は、実験で得られたような斜面上流側での風速の減少は見られなかった。これは、実験では風洞内に端板で囲まれた実験模型を挿入しているために、風は模型と風洞の隙間に逃げるように流れるため、実験領域に流入する量が減って風速も減少するが、計算では、模型流入境界面位置において模型がない場合の風速場を強制的に与えているので、模型領域に強制的に押し込まれることになり、風速は周りの風洞壁面との隙間がある場合ほど斜面先方で減速しないと考えられる。

・計算で得られた風力

アレイ中央に加わる風力について、以下にまとめる。

平均風力係数に関しては、計算値は地面の傾斜が大きくなるにつれて、また、地面とアレイの相対角が大きくなるにつれて、風上側1列目のアレイと風下側後縁で計算値と実験値との差が大きくなる。また、アレイ中央部では地面の傾斜が大きく、地面とアレイの相対角が大きい場合に、計算値と実験値の符号は同じながら、計算値の絶対値は実験値よりも大きな値をとる。

最大及び最小風力係数については、計算値はいずれの場合も、絶対値が実験値よりも大きくなっている。地面とアレイの相対角が 0° 及び 15° の場合は、アレイの風上側縁付近でピーク値を持つ。

参考文献

- 1) 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
- 2) Uchida, T. and Takakuwa, S., Large-Eddy Simulation-Based Assessment of the Risk of Wind Turbine Failures Due to Terrain-Induced Turbulence over a Wind Farm in Complex Terrain, *Energies*, 12(10), 1925,2019.
- 3) Kim, J. and Moin, P., Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier- Stokes Equations, *J.Comput. Phys.*, Vol.59, pp.308-323, 1985.
- 4) 梶島岳夫, 乱流の数値シミュレーション改訂版, 養賢堂, 2014.
- 5) Kawamura, T., Takami, H. and Kuwahara, K., Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, *Fluid Dyn. Res.*, Vol.1, pp.145-162, 1986.
- 6) Smagorinsky J., General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. The Basic Equations., *Mon. Weather Rev.*, Vol.91, pp.99-164,1963.

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。