

令和二年度 修士論文

ウィンドファーム内の複雑地形が ダウンウィンド型風車に及ぼす影響

2021 年 1 月 29 日 提出

指導教員 前田 太佳夫 教授

鎌田 泰成 准教授

三重大学 大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

エネルギー環境工学研究室

牛草 拓巳

目次

第 1 章	緒言	1
第 2 章	記号および座標系	2
第 3 章	解析対象および解析方法	4
3.1	風況および風車運転データの観測内容	
3.1.1	観測項目および平均化時間	
3.1.2	研究対象サイト	
3.1.3	対象風車	
3.1.4	風向風速計の主要仕様	
3.1.5	評価方法	
3.1.6	代表風車について	
3.2	風況予測シミュレータ RIAM-COMPACT	
3.2.1	数値解析	
3.2.1.1	差分法	
3.2.1.2	解析モデル	
3.2.2	解析条件	
3.2.2.1	計算領域および地形標高データ	
3.2.2.2	解析メッシュ	
3.2.2.3	境界条件	
3.2.3	代表スケール	
3.3	風車後流考慮版 RIAM-COMPACT	
3.3.1	後流モデル	
3.3.2	解析条件	
3.4	OpenFOAM	
3.4.1	ナセルモデル	
3.4.2	解析条件	
3.5	ナセル風速計の風洞試験	
3.5.1	風洞	
3.5.2	実験条件	
第 4 章	風車出力に及ぼす地形および後流の影響	28
4.1	年間および月別の風向出現率	
4.2	風車出力に及ぼす地形の影響	
4.2.1	平均風速および発電量	
4.2.2	風向別の平均風速および発電量	

目次

4.2.3	風向別の乱流強度	
4.3	後流の影響	
4.3.1	着目風車	
4.3.2	風車 2 基の風速	
4.3.3	風車 2 基の乱流強度	
第 5 章	RIAM-COMPACT による解析結果	48
5.1	地形の影響	
5.1.1	風車上流の斜面および窪地の影響 (AI-9 および AI-22 の解析結果)	
5.1.2	風車上流の尾根の影響 (AT-3 の解析結果)	
5.1.3	風車上流の山の影響 (AI-12 および AI-24 における解析結果)	
5.2	後流の影響	
5.2.1	AI-2 (上流側) および AI-1 (下流側)	
5.2.2	AI-17 (上流側) および AI-16 (下流側)	
第 6 章	OpenFOAM によるナセル風速計まわりの流れ場解析	69
6.1	ナセル風速計基本性能試験	
6.2	ナセル風速計傾斜試験	
6.3	吹上風および吹下風における風速計位置の風速	
6.4	風速補正	
6.5	風速階級別発電量	
第 7 章	ウィンドファーム全機における年間発電量に及ぼす地形の影響	81
7.1	RIAM-COMPACT によるウィンドファーム全機のロータ面等価風速	
7.2	ウィンドファーム全機発電量評価	
第 8 章	結言	99
付録 A	風車上流地形の影響	101
付録 B	公称値による風速階級別発電量	105
参考文献		106
謝辞		109

第1章 緒言

日本の地形は欧米と異なり、国土面積の約7割を山岳が占め、高風速域はこれらの複雑地形上に多い。そのため、日本国内では風車を集中して設置するウィンドファーム方式で複雑地形上に多く設置されている。ウィンドファームでは事業の大規模化によりインフラ整備や単機当たりの風車建設コストの低減等が期待できる。また、風の強弱による風車の発電量のばらつきは、ウィンドファーム内の風車同士で補い合うことで安定的に発電量を確保することができる。複雑地形におけるウィンドファームの風況は、地形に起因した吹上風および吹下風を多く含む。吹上風への対応策として、ダウンウィンド型風車の設置が進められている。ダウンウィンド型風車のロータは従来のアップウィンド型風車と異なり、タワー下流側に設置されている。また、ブレードとタワー間の離隔が大きい上に、負のティルト角を有することができ、吹上風を効率的にとらえることができる⁽¹⁾。吹上風が吹く同じ位置にアップウィンド型風車を設置した場合と比較すると、アップウィンド型は吹上風に対して発電量低下を招く。それに対しダウンウィンド型は、発電量向上を見込める。

一方、風車ロータの下流側において、後流と呼ばれる減速した流れが形成され、その中で平均風速が低下するだけでなく、風速の変動が増加するなど流れの様相が変化することが知られている。ウィンドファームのように複数の風車が近接して存在する場合、下流側風車が上流側風車の後流を受けて運転を行う状態が生じる。このとき、後流中で運転される下流側風車の風速が減少し、出力の低下につながる。したがって、後流の特性を定量的に把握することは重要な課題であると言える。

また、ダウンウィンド型風車は、風向風速計をロータ前方に設置できる。そのため乱れない風向データが得られ、理想的なヨー制御を可能とする。ヨー制御でロータ軸と流入風向のずれを修正することは、吹上風への対応と同等の効果を発揮し、発電量の向上や変動荷重の低減に繋がる⁽²⁾。しかしナセル上の風速計に流入する風はロータの存在による誘導速度や風速計後方設置物の影響を受けるため風速計周りの流れ場について把握が必要である。

また地形に起因する複雑な気流への対応策として、数値シミュレーションを利用した手法が実用化されている。これらのシミュレーションは地形に起因した乱流を再現し発電量予測や疲労予測などに活用されている。その中でも非定常・非線形シミュレータの RIAM-COMPACT は、解析モデルに LES を採用している。LES は、地形に起因する非定常性が強い大きな剥離を伴う流れを再現するのに適している。

そこで本研究では、ウィンドファーム内の風車に対して一年間の風車運転データをもとに地形特性および後流が風車出力に及ぼす影響の考察を行った。そして、ナセル風速計の風速データの観測精度向上のために、風車ナセルに搭載されている三杯式風速計に関する実験的考察および風速計周りの流れ場解析を行った。また、ウィンドファーム内の地形に起因した複雑な気流を定量的考察するために、非線形風況予測ソフトウェア RIAM-COMPACT を用いて数値解析を行った。以上の実験および数値解析によりウィンドファーム内の複雑地形が風車出力に及ぼす影響を解明することを研究目的とする。

第2章 記号および座標系

A^+	: van Driest 関数における経験的定数 (=25) (式 (3.13))	
C	: クーラン数 (式 (3.18))	
C_s	: スマゴリンスキー定数 (式 (3.12))	
C_{RC}	: Wake モデル抵抗係数 (式 (3.17))	
D	: 風車直径 (=80 [m])	[m]
F_i	: Porous Disk における外力 (式 (3.17))	
h	: RIAM-COMPACT における代表長さスケール	[m]
h_x	: 主流方向フィルタ幅	
h_y	: 主流直交方向フィルタ幅	
h_z	: 鉛直方向フィルタ幅	
I	: 乱れ強度 (式 (3.3))	
k	: カットオフ波数	
l	: メッシュ長さ (式 (3.18))	[m]
\bar{p}	: グリッドスケール (GS) 圧力場 (式 (3.9))	
Re	: レイノルズ数 (式 (3.15))	
R	: ロータ半径 (=40 [m]) (式 (3.17))	[m]
$\overline{S_{ij}}$: ひずみ速度テンソル (式 (3.10))	
t	: 解析時間 (式 (3.18))	[s]
u	: 主流風速の瞬時値	[m/s]
u_x	: 風速の x 成分	[m/s]
u_y	: 風速の y 成分	[m/s]
\bar{u}	: 瞬間風速の 10 分間平均値 (式 (3.2))	[m/s]
\bar{u}_i	: 各方向のグリッドスケール (GS) 速度 (式 (3.8))	[m/s]
u'_i	: 各方向のサブグリッドスケール (SGS) 速度	[m/s]
$\overline{u'_k}$: サブグリッドスケール (SGS) 速度の平均値 (式 (3.10))	[m/s]
$\overline{u_x}$: 瞬時風速における x 成分の 10 分間平均値 (式 (3.1))	[m/s]
$\overline{u_y}$: 瞬時風速における y 成分の 10 分間平均値 (式 (3.1))	[m/s]
u_τ	: 壁面摩擦速度 (式 (3.14))	[m/s]
U_{RC}	: RIAM-COMPACT における代表風速スケール	[m/s]
U_z	: 高度 z [m]での風速 (式 (3.16))	[m/s]
U_{10}	: 高度 10m での風速 (式 (3.16))	[m/s]
u^*	: 風速変動 (式 (3.4))	[m/s]
v	: メッシュを通過する流速 (式 (3.18))	[m/s]
v_{eq}	: ロータ面内の等価風速 (式 (3.7))	[m/s]
x	: 風車間距離	[m]
x_i	: 直交座標系における主流方向位置 (式 (3.8))	[m]

第2章 記号および座標系

x_j	: 直交座標系における半径方向位置 (式 (3.9))	[m]
x_k	: 直交座標系における鉛直方向位置 (式 (3.9))	[m]
y_p	: 壁からの距離 (式 (3.14))	[m]
y^+	: 壁関数 (式 (3.14))	
Z_{\max}	: 解析領域内の最大標高	[m]
Z_{\min}	: 解析領域内の最小標高	[m]
α	: べき指数 (式 (3.16))	
Δ	: フィルタ幅	
Δt	: 解析時間刻み (式 (3.18))	
θ	: 風向の瞬時値	[°]
$\bar{\theta}$: 風向の 10 分間平均値 (式 (3.1))	[°]
θ_{upwash}	: 風車ロータ面に流入する角度	[°]
θ_{inflow}	: 風速計に流入する角度	[°]
ν	: 代表動粘度 (式 (3.9))	[m ² /s]
ν_{SGS}	: SGS 渦粘性係数 (式 (3.10))	
ρ	: 空気密度 (式 (3.9))	[kg/m ³]
σ	: 風の乱れ (式 (3.2))	
δ_{ij}	: 応力テンソル (式 (3.10))	
τ_{ij}	: SGS 応力 (式 (3.9))	

第3章 解析対象および解析方法

3.1 風況および風車運転データの観測内容

本研究では、ウィンドファーム内の風車 40 基（AI-1~32 および AT-1~8）の出力データおよび風車ナセル上部に設置されている風向風速計による風況データを 2017 年 2 月 1 日から 2018 年 1 月 31 日にわたって取得した。観測内容を以下に示す。

3.1.1 観測項目および平均化時間

主な観測項目を以下に示す。なお、観測期間中を通じて、観測データの 10 分間平均値が記録されている。

- 10 分区間電力量
- 風向（平均値，標準偏差）
- 風速（平均値，最大値，最小値，標準偏差）
- 3 次元加速度（平均値，最大値）
- ピッチ角
- ナセル外気温
- ナセル方位角
- 観測期間：2017 年 2 月 1 日 0 時 00 分~2018 年 1 月 31 日 23 時 50 分（1 年間）

3.1.2 研究対象サイト

図 3.1 にウィンドファーム内の風車配置図を示す。ウィンドファームには尾根を隔てて風車が 40 基設置されている。尾根の西側の風車は AI，東側の風車は AT と名づけられている。

図 3.2 に吹上風および吹下風の簡易図を示す。4.1 節で示す当サイトの主風向西（W），西北西（WNW），北西（NW）では尾根より西側に位置する風車（AI-1~32）に流入する風は斜面に沿って吹き上がる風（吹上風）となり，尾根より東側に位置する風車（AT-1~8）に流入する風は尾根越えの風（吹下風）となることが予想される。

3.1.3 対象風車

研究対象とするウィンドファームには、日立製作所製の3枚翼ダウンウィンド型水平軸風車が設置されている。図3.3に風車概要、表3.1に風車主要仕様を示す。図3.3よりダウンウィンドロータは、ロータとタワー間のクリアランスを確保するため、負のティルト角を有する。これにより、吹上風において風速の軸方向成分が大きくなるため、発電量が増加する⁽¹⁾。

表 3.1 風車主要仕様

翼枚数	3
ロータ直径	80 m
ハブ高さ	65.4 m
定格出力	2 MW
定格風速	13 m/s
定格回転数	17.5 min ⁻¹
回転速度	11.1~19.6 min ⁻¹
カットイン風速	4 m/s
カットアウト風速	25 m/s
ティルト角	-8 °
ヨーニング角	5 °

3.1.4 風向風速計の主要仕様

風車ナセル上の風速計はNRG SYSTEM社（米国）製の型式4718の三杯式風速計を使用し、風向計は型式4715の矢羽型風向計を使用した。図3.4（a）にナセル上面図、（b）にナセル側面図を示す。図3.4に示すように、風向風速計はナセル上部に2セット設置されており、風向風速計の下流側2.2m、高さ0.3m下に航空障害灯が設置されている。また吹上風や吹下風および航空障害灯による風速計の観測誤差に関しては第6章で述べる。風向計の測定可能範囲は0~360°、観測精度は±1°である。また、風速計の許容誤差は2%である。風速計の閾値は2m/s、耐風速は70m/sである。

3.1.5 評価方法

本項では風速、風向、乱流強度および風速の三乗値の評価方法について示す。

本研究では風速の評価方法として10分間平均データをスカラー平均する方法と風速階級別に平均する方法の二つを行った。風速計の計測精度の閾値である風速2m/s以上のデータを抽出し、比較を行った。風速階級は風速1m/s刻みに分けた。風速階級4m/sの場合はデータ整理を行う風速は3.5m/s以上であり4.5m/sより低い値である。

風力発電の分野では一般に風況観測を行う場合、風速および風向は瞬時値ではなく、10 分間平均値を用いる。しかしながら、風向については単純なスカラー平均を行った場合、真の平均風向が得られない。例えば風向 0° と 360° の平均は 0° となるべきところが平均値は 180° と正反対の値を示す。したがって、風向データを適切に平均化するため、ベクトル平均を行う必要がある。本研究では風速および風向の瞬時値を用いて、スカラー平均値およびベクトル平均値の両方を独自に算出し、風向計記録装置により演算された 10 分間平均風向値との比較を行った。ここで、比較対象とした瞬時データの観測期間は 2017 年 10 月 1 日 0 時 00 分 00 秒から 2017 年 10 月 14 日 23 時 59 分 59 秒である。また、瞬時データおよび 10 分間平均データは、いずれも風向計の計測精度の閾値である風速 2m/s 以上のデータを抽出し、比較を行った。図 3.5 にベクトル平均の概要図を示す。ベクトル平均ではまず、主流風速の瞬時値より、風速の x 成分 $u \sin \theta$, y 成分 $u \cos \theta$ を算出する。ここで、 u は主流風速の瞬時値、 θ は風向の瞬時値を示す。つぎに、各成分を 10 分間で平均して $\overline{u_x}$, $\overline{u_y}$ を計算し、式(3.3)を用いて風向の 10 分間平均値 $\bar{\theta}$ を算出する。

$$\bar{\theta} = \tan^{-1}(\overline{u_x}, \overline{u_y}) \quad (3.1)$$

図 3.6 に風向計記録装置により演算される 10 分間平均風向値および算術平均により算出した風向の 10 分間平均値の相関、図 3.7 に風向計記録装置により演算される 10 分間平均風向値およびベクトル平均により算出した風向の 10 分間平均値の相関を示す。図 3.6 より、スカラー平均値の風向は 0° 付近でばらつきを示し、風向計により演算される 10 分間平均風向値と一致しない。図 3.7 より、ベクトル平均の風向は、 0° 付近の風向のばらつきを示さず、風向計により演算される 10 分間平均風向値と一致する。したがって、本研究で用いた風向計はベクトル平均により、風向を適切に平均していると判定できるため、本論文では記録装置で演算された 10 分間平均値を考察に用いる。

風車に流入する風の評価方法は、平均風速や平均風向だけでなく風の変動も考慮する必要がある。ここで風速変動は風速標準偏差を用いて評価される。今回の考察では風車のナセル風速計の実測データ（10 分間平均データ）を用いて風の乱れ σ をその 10 分間平均値で割った乱流強度 I を定義する。以下の式（3.2）および式（3.3）に乱れおよび乱流強度の計算式を示す⁽³⁾。また各風速階級での乱流強度は、各風速階級内にある全データの 90% タイル値を使用している。90% タイル値は風速階級内の 10 分間乱流強度を小さい順に並べた時、小さいものから数えて全体の 90% に位置する値である。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad (3.2)$$

$$I = \frac{\sigma}{\bar{u}} \quad (3.3)$$

風車が風から得るエネルギーは風速の三乗に比例する．そこでエネルギーに関して定量的に評価するために乱流強度を考慮した風速の三乗値を用いた⁽⁴⁾．式 (3.4) に風速の定義を示す．

$$u = \bar{u} + u^* \quad (3.4)$$

風車が得るエネルギーであるため式 (3.4) 両辺を三乗する．ここで u^* は風速変動の大小が対称とすると式 (3.5) となる．式 (3.2) および式 (3.3) より乱流強度を考慮した風速の三乗値は式 (3.6) となる．

$$u^3 = \bar{u}^3 + 3u^{*2}\bar{u} \quad (3.5)$$

$$u^3 = \bar{u}^3(1 + 3I^2) \quad (3.6)$$

風車の大型化とロータの大径化に伴い，ロータ中心の風速が発電量評価において代表でなくなってきた．そこでロータ面等価風速を用いて評価した⁽⁵⁾．ロータ面等価風速はロータ面を水平に分割し，それぞれの風速を分割した面積に按分して算出する．式 (3.7) にロータ面等価風速の計算式を示す．

$$v_{eq} = \left(\sum_{i=1}^{n_h} v_i^3 \frac{A_i}{A} \right)^{1/3} \quad (3.7)$$

ここで n_h は分割数， v_i はある高さにおける風速， A は面積， A_i はある高さにおけるロータ面を水平に分割した面積である．

3.1.6 代表風車について

本項ではウィンドファーム全体の風特性を代表する風車について示す．ウィンドファームの主風向は地形および後流の影響を受けにくい風車で観測された風向を用いて決定する．そこでウィンドファーム内において地形および後流の影響を受けにくい風車を代表風車とした．

地形の影響を定量化するため，RIX (Ruggedness index) を算出した⁽⁶⁾．図 3.8 に AI-2 付近の地形図および AI-2 の地形断面図を示す．図 3.9 に AI-2 の地形断面図の拡大図を示す．RIX の算出方法は，風車を中心としたハブ高さの 10 倍の半径の範囲内で，各方位の直線と等高線の交わる点で断面図を求める (図 3.8)．それぞれの等高線の区間において勾配を求める (図 3.9)．等高線の全区間数に対する勾配の閾値 (30%勾配) 以上の区間数の割合を求めて RIX の値とする．RIX によって各風車の範囲の地形を評価し，風車はウィンドファーム全体において風向出現率の高い WNW, NW, W 方位において他の風車の後流の影響を受けにく

く、ロータ直径の10倍上流の範囲に風車がない風車を代表風車の候補とした。表3.2に各風車のRIXを示す。表3.2によりRIXの値が比較的lowく、標高が比較的高いAI-2を最終的に代表風車として選んだ。

表3.2 各風車のRIXおよび標高

Wind turbine	AI-2	AI-3	AI-5	AI-8	AI-10	AI-12	AI-13	AI-14	AI-24	AI-27
RIX[%]	33.3	59.1	47.8	38.1	43.5	50.0	63.0	60.0	63.0	36.0
Elevation[m]	705	705	680	690	703	675	663	658	665	670

3.2 風況予測シミュレータ RIAM-COMPACT

本研究においてウィンドファーム内の風車出力に及ぼす地形により受ける影響を明らかにするため、RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyusyu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain) を用いて風況解析を行った。

RIAM-COMPACT とは、実地形データを用いた非定常かつ非線形に基づいた風況シミュレータである。風に対する地形の効果を高精度に予測でき、また非定常に変化する風況特性を3次元アニメーション表示が可能である。

3.2.1 数値解析

取り扱う流体は非圧縮性・粘性流体を仮定しており、構造格子として一般曲線座標系コロケート格子に基づいた数値解析を行う。数値計算法は差分法(FDM; Finite-Difference Method)に基づき、解析モデルはLES (Large-Eddy Simulation) を採用する。

3.2.1.1 差分法

差分法では、対象としている領域をメッシュに分割し、支配方程式を離散化し、格子点上の値を未知数とする連立代数方程式を解くことで解を求める。流れの支配方程式は、フィルタ操作を考慮した連続の式(3.8)とナビエ・ストークス方程式(3.9)である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.9)$$

ここで、主流方向(x), 主流直交方向(y), 鉛直方向(z)として座標系は $x_i (x_i = f_1(x, y, z), x_j =$

$f_2(x, y, z), x_k = f_3(x, y, z)$ とする. なお, 重複する添字には総和規約が適用される. 速度場と圧力場のカップリングアルゴリズムには, オイラー陽解法に基づいた部分段階法 (fractional step method) を用いる. この離散化には, 対流項以外はすべて2次精度中心差分とし, 対流項は3次精度風上差分とする. また, 対流項を構成する4次精度中心差分には, 補間法を用いる. 3次精度風上差分の数値拡散項の重み係数は, 0.5 とする. 圧力については, 2段階に分けたナビエ・ストークス方程式 (3.8) のうち圧力勾配項を含む式を連続の式 (3.4) に代入して圧力のポアソン方程式を導き, SOR 法 (Successive Over-Relaxation method) により緩和計算する.

3.2.1.2 解析モデル⁽⁷⁾

低波数の大きな渦は流れ場によって異なるが, 高波数の小さな渦は流れ場の種類によらず普遍性をもつ. LES において, 高波数の渦は等方的でエネルギーを散逸する役割を担っているため小さな渦だけモデル化して, 流れ場の形態の影響を強く受ける低波数の大きな渦は直接計算する. 図 3.10 は, 様々なレイノルズ数の様々な乱流場におけるエネルギースペクトルを集めたものである. 数値はコルモゴロフスケールで整理されている. カットオフ波数よりも低波数側を直接計算される成分をグリッドスケール (GS: grid scale) という. 一方, カットオフ波数が高波数側を直接計算されない小スケール成分をサブグリッドスケール (SGS: sub grid scale) という. ここでカットオフ波数は計算で捕らえられる最小渦のことで波数 k は, $k = \pi/\Delta$ である. また, Δ は主流方向フィルタ幅 h_x , 主流直交方向フィルタ幅 h_y および鉛直方向フィルタ幅 h_z より算出したフィルタ幅 ($\Delta = \sqrt[3]{h_x h_y h_z}$) のことである.

LES においては, ナビエ・ストークス方程式に空間フィルタをかけて粗視化した式(3.9)が用いられる. また, SGS モデルには壁面減衰関数を併用した標準スマゴリンスキーモデルを用いる. 流れ場を特徴づけるレイノルズ数は代表長さスケール h と代表風速スケール U を用いて $Re = Uh/\nu$ と定義する. 式(3.10)の τ_{ij} は, フィルタ操作を加えることにより生じた付加的な応力 (SGS 応力) であり, 局所平衡と渦粘性を仮定すると次のように与えられる.

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \overline{u'_i u'_j} - 2\nu_{\text{SGS}} \overline{S_{ij}} \quad (3.10)$$

ここで $\overline{S_{ij}}$ はひずみ速度テンソルの GS 成分を示す.

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (3.11)$$

GS 速度成分にすべりなし条件を与えると, 壁では乱れの GS 成分が 0 になる.ところが, GS 速度に勾配がある限り, SGS 乱れが与えられるので打ち消さなければならない. そこで ν_{SGS} は壁面減衰関数法より次のように与えられる.

$$\nu_{\text{SGS}} = (C_S f_S \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (3.12)$$

ここで C_S はスマゴリンスキー定数を表しており、値は0.1とする。また f_S は次式の van Driest 関数を用いる。

$$f_S = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A^+}\right) \quad (3.13)$$

式(3.13)の y^+ (壁関数)は次式に示す。

$$y^+ = \frac{u_\tau y_p}{\nu} \quad (3.14)$$

これらの渦粘性を考慮すると、ナビエ・ストークス方程式は以下のように示される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + 2 \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{Re} + \nu_{\text{SGS}} \right) \bar{S}_{ij} \right] \quad (3.15)$$

3.2.2 解析条件

3.2.2.1 計算領域および地形標高データ

計算領域は主流方向 (x) に 20.0, 主流直交方向 (y) に 8.0, 鉛直方向 (z) に 3.884 km の空間を有する。計算領域内の最大標高は 836 m, 最小標高は 77 m である。解析方位は 16 方位とした。地形標高データは、国土地理院発行の空間解像度 50 m 標高データを用いた。図 3.11 に解析領域の鳥観図を示す。

3.2.2.2 解析メッシュ

解析メッシュ数は、主流方向 (x) に 200, 主流直交方向 (y) に 200, 鉛直方向 (z) に 40 であり総メッシュ数 1,600,000 点である。水平方向 (x 方向および y 方向) のメッシュ幅は各風車に対して密となる不等間隔であり、最小メッシュ幅が 19 m とし、鉛直方向 (z) のメッシュ幅は地面が密となる不等間隔であり、最小メッシュ幅が 2.2 m とした。

3.2.2.3 境界条件

流入境界面にはベキ法則（経験式）に従う風速分布を図 3.11 における赤枠部分に与えた．今回，ベキ指数 α は建築基準法の地表面粗度区分Ⅱに従う $\alpha = 0.15$ を用いた．流入風速は本サイトの年間平均風速に近い 8.0m/s を与えた．図 3.12 に流入境界面風速の鉛直分布を示す．図 3.12 より代表長さスケール（Height : 759m ）において風速 8.0m/s となるように設定した．

$$U_z = U_{10} \times \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad (3.16)$$

地表面には粘着条件，側方境界面と上部境界面には滑り条件，流出境界面には対流型流出条件を課した．また，解析領域から流出方向に代表スケールの 5 倍の袖領域を付加することにより計算が破綻せず安定に実行できるようにした．

3.2.3 代表スケール

代表スケールは図 3.13 に示す通りである．代表長さスケールは解析領域内の最大標高と最小標高との標高差を示し，今回の解析領域においては， 759m となる．また，代表風速スケールは流入境界面の最大標高位置における風速である．

3.3 風車後流考慮版 RIAM-COMPACT

風車後流の再現に関して，簡易的な抵抗モデルが開発されている．何十台もの風車群を対象として，アクチュエータディスクモデルを採用した数値風況シミュレーションを実施するのは，格子解像度が飛躍的に増大するため現実的ではない．こうした状況では，回転する風車ブレード領域に抵抗モデルを採用して後流を再現する方法が検討されている⁽⁸⁾．

3.3.1 後流モデル

本研究では後流を再現する抵抗モデルとして多孔円盤モデル（Porous Disk）を使用している．多孔円盤モデルは流れ方向に厚さのある円盤状の抵抗として表される．多孔円盤モデルでは空気抵抗が外力項式（3.17）として主流方向，主流直交方向，鉛直方向のすべての支配方程式に追加される．また風車の受風面領域には分布関数を乗ずることにより受風面内で空間分布が与えられる．

$$F_i = C_{RC} \cdot f(y/R, z/R) \cdot \bar{u}_i \cdot \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2} \quad (3.17)$$

3.3.2 解析条件

計算領域は主流方向 (x) に 10.0, 主流直交方向 (y) に 5.0, 鉛直方向 (z) に 3.894 km の空間を有する. 計算領域内の最大標高は 791m, 最小標高は 85m である. 図 3.14 に解析領域の鳥観図を示す. 解析メッシュ数は, 主流方向 (x) に 400, 主流直交方向 (y) に 100, 鉛直方向 (z) に 40 であり総メッシュ数 1,600,000 点である. 4.3 節で示す通り, 解析領域は風車後流の影響がある風車 2 基 (AI-2 および AI-1, AI-17 および AI-16) の内, 上流側風車 (AI-2, AI-17) を中心に設定した. 図 3.15 に風車離隔距離における C_{RC} について示す. 抵抗モデルは上流側風車に設定し, 抵抗係数 C_{RC} は風車 2 基の風車間距離に応じて変更する. なお, 風車後流考慮版 RIAM-COMPACT では, $x/D > 10$ の風車離隔距離に対する C_{RC} は検証中であり, $x/D > 10$ においては $x/D = 10$ の C_{RC} が用いられている.

3.4 OpenFOAM

吹上風および吹下風におけるナセル風速計周りの流れ場を明らかにするために OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) を用いて流れ場解析を行った.

3.4.1 ナセルモデル

ナセルモデルは対象風車のスケールモデルから形状計測して作成した. 図 3.16 にスケールモデルの外観を示す. 図 3.17 にナセルの 3 次元モデルを示す. 本解析ではナセル後方には風車運転状態のブレードの抗力を再現するために角柱を設置した. 図 3.18 に角柱を示す. 角柱は底面が正方形となっており 1 辺の長さが 0.2m, 高さが 1.0m である. ロータ回転時の抵抗係数はブレード全体において 1.0~1.5 程度である⁽⁹⁾. そこで抗力係数 1.30 の角柱をナセル後方に設置した.

3.4.2 解析条件

計算領域は主流方向に $5D$, 主流直交方向および鉛直方向に $2.5D$ の空間を有する. ここで, D はナセルモデルのロータ直径である.

図 3.19 に計算領域を示す. 解析メッシュ数は, 主流方向 (x), 主流直交方向 (y), 鉛直方向 (z) に $150 \times 75 \times 75$ であり総メッシュ数 843,750 点である. 解析ソルバーは非圧縮性非定常解析を用いた. 乱流モデルは $k - \omega$ SST モデルを設定した. 流入風速は本サイトの年間平均風速に近い 8.0m/s を与えた. 流出境界面は自然流出条件を設定し, 側方境界面は滑り条件を設定した. クーラン数は非定常計算において, 1 サイクルで流れが要素いくつ分進むかを示したものである. クーラン数は式 (3.18) によって求められる. 現象を精度よく予測するためにはクーラン数は 1 以下である必要があるためクーラン数は 0.9 として時間刻みを設定した⁽¹⁰⁾. 吹上風および吹下風における流れ場を検証するため, 流入風はナセルモデ

ルを傾けることで吹上風および吹下風を再現した．また吹上角 θ_{upwash} は -10° から 10° まで 5° 刻みで行った．図 3.20 に吹上角 θ_{upwash} の定義を示す．ここで吹上角 θ_{upwash} は流入境界面における水平面に対する角度である．

$$C = \frac{v\Delta t}{\Delta l} \quad (3.18)$$

3.5 ナセル風速計の風洞試験

正確な風車の発電特性を得るためには，ナセルに搭載されている三杯式風速計が本来の性能通りの機能を果たしていることが重要である．国際電気標準 IEC61400-1 (ed.4) 風車の設計案件⁽¹¹⁾によれば，吹上風・吹下風が $\pm 8^\circ$ の範囲を考慮して風車を設計することとなっている．そのため，風車用の風速計も吹上風・吹下風が $\pm 8^\circ$ の範囲では風速の絶対値の誤差は小さくなるように作られている⁽¹²⁾．しかし，本風車に使われている風速計は，台風等の強風に耐えられるような特殊な形状をしており，吹上風・吹下風に対する風速測定精度が確保されているか確認する必要がある．

そこで，本研究では風洞にてナセルに搭載されている三杯式風速計の性能評価を行った．

3.5.1 風洞

実験には，三重大大学卓越型研究施設に設置されている回流型風洞を用いた．図 3.21 に風洞の (a) 鳥瞰図，(b) 平面図および (c) 側面図を示す．風洞内の気流は，400 kW の軸流送風機により発生させられる．この軸流送風機はインバータにより可変速運転され、風洞風速は無段階に最大 30 m/s まで設定できる．また，風洞はハニカム・メッシュおよび，細目スクリーンを用いて吹出口での一様な風速分布を実現している．風洞の吹出口直径は 3.6 m であり，測定部の長さは 4.5 m である．また，測定部は開放型である．主流速度および主流温度は，風洞吹き出し口に設置したピトー管，室温用白金測温抵抗体により計測される．

3.5.2 実験条件

本実験で使用した風速計を図 3.22 に示す．検証対象のサイト内に設置されている風車は，吹上風や吹下風を受ける．流入角 θ_{inflow} は OpenFOAM による解析結果（第 6 章）を参考にして， -20° から 20° とした．図 3.23 に流入角 θ_{inflow} の定義を示す．ここで流入角 θ_{inflow} は三杯型風速計に流入する角度である．今回の実験は風速計を傾けながら流入角 θ_{inflow} を再現した．

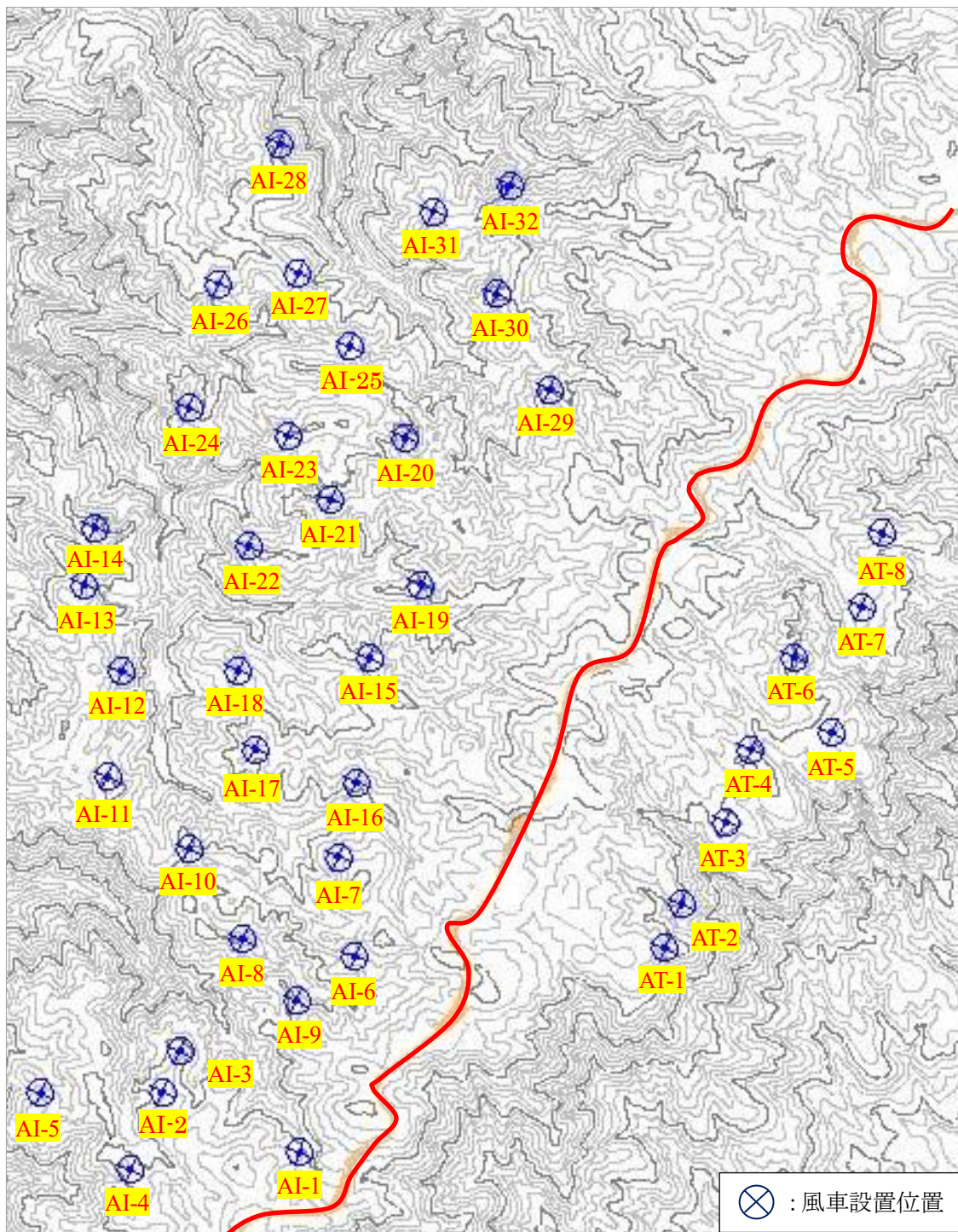


図 3.1 ウィンドファーム内の風車配置図

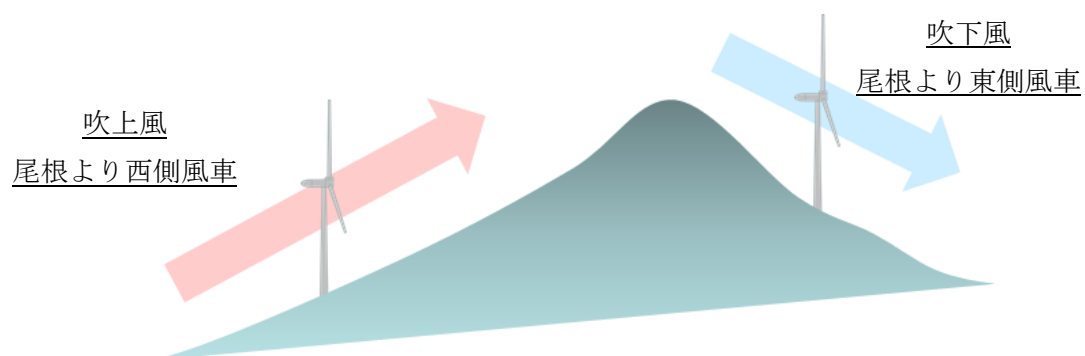


図 3.2 吹上風および吹下風の簡易図

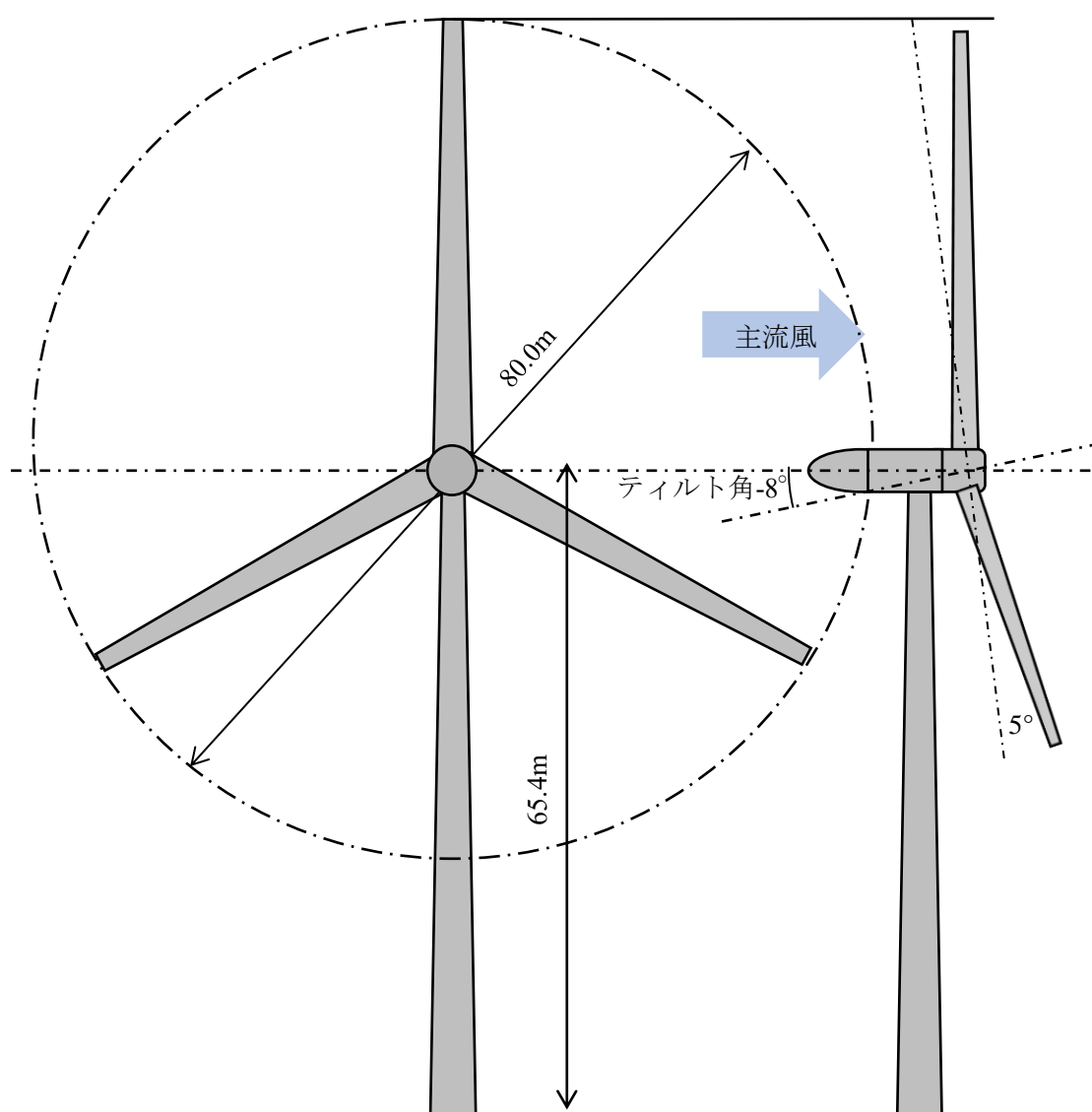
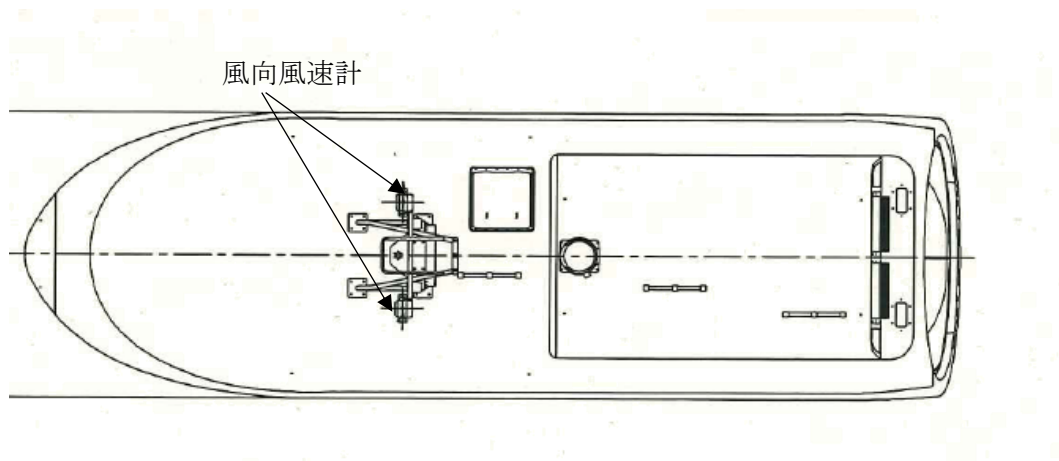
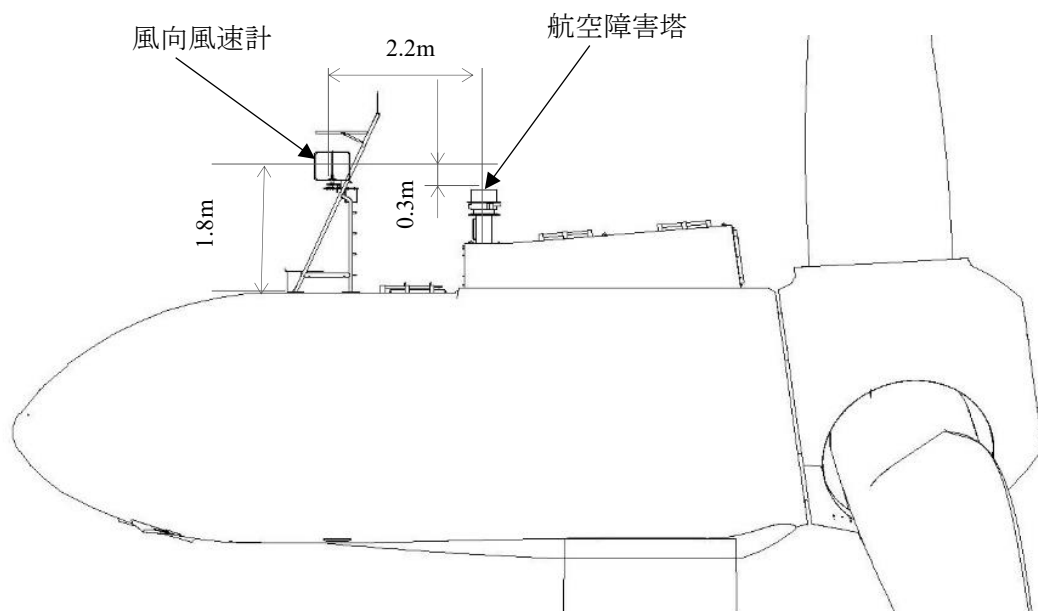


図 3.3 風車概要



(a) 風向風速計上面図



(b) 側面図

図 3.4 ナセル外観図

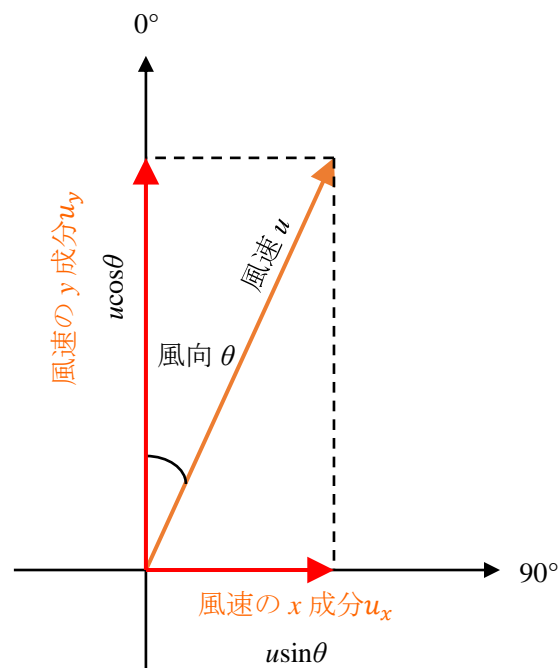


図 3.5 ベクトル平均の概要図

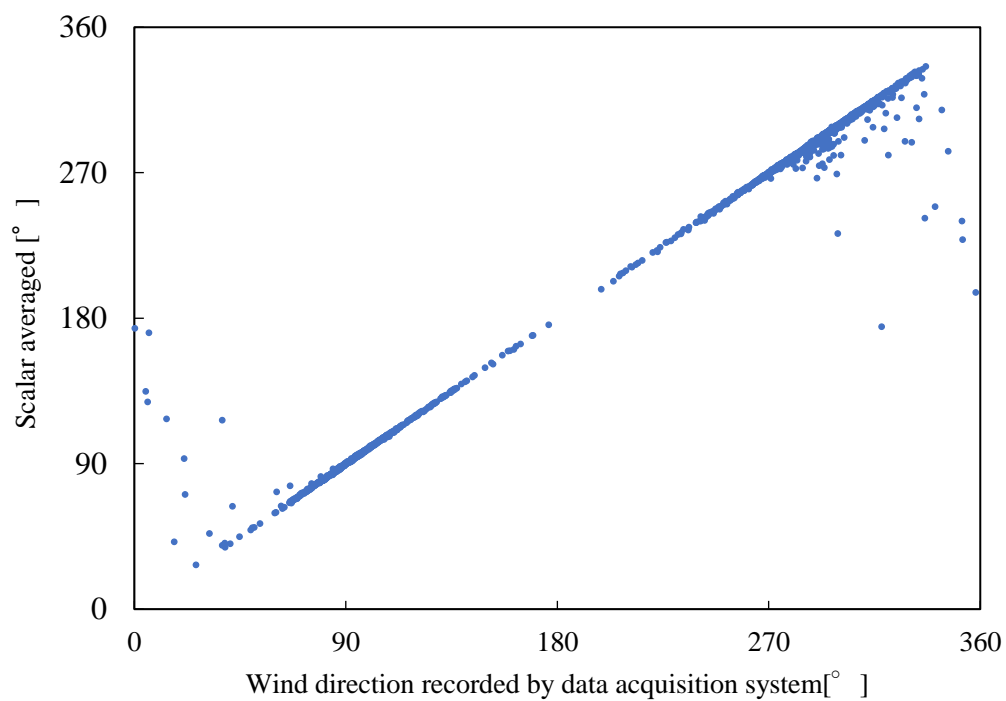


図 3.6 風向計内蔵の演算器による演算値と算術平均値の相関

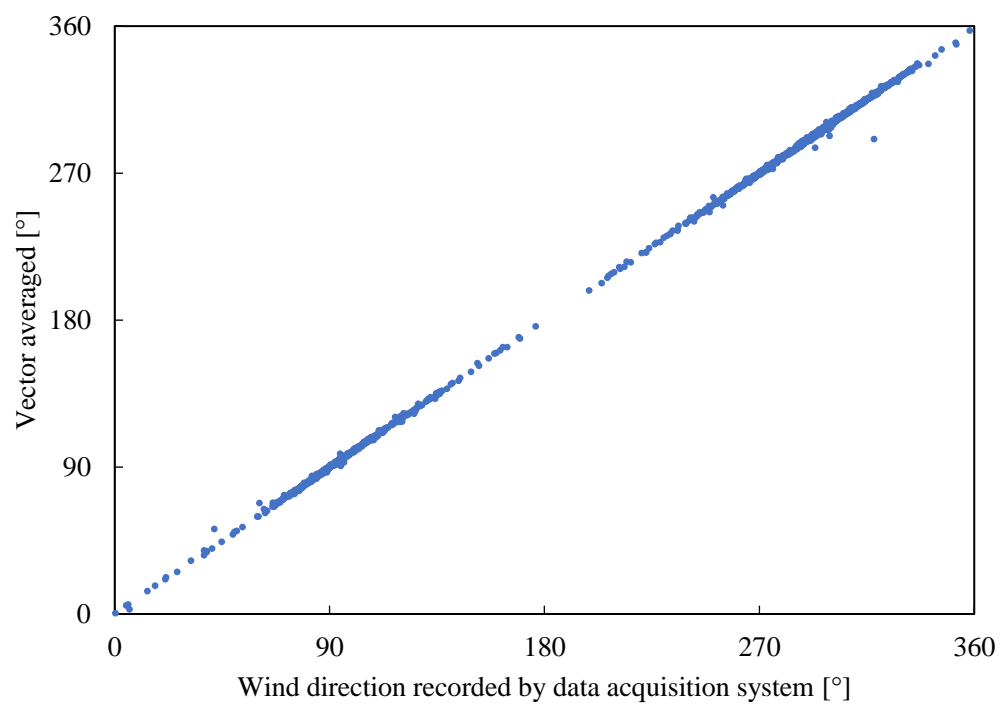


図 3.7 風向計内蔵の演算器による演算値とベクトル平均値の相関

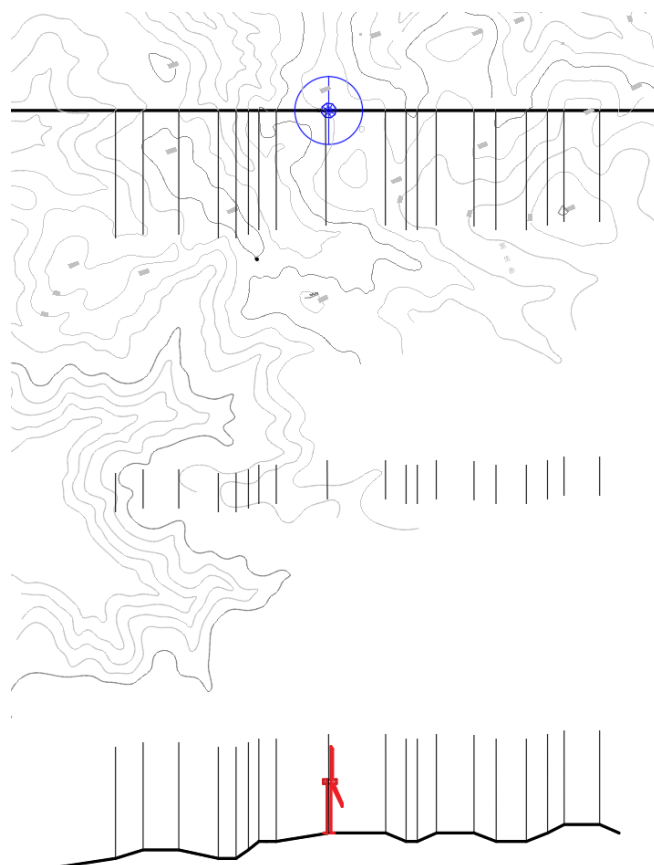


図 3.8 AI-2 付近の地形図および AI-2 の地形断面図

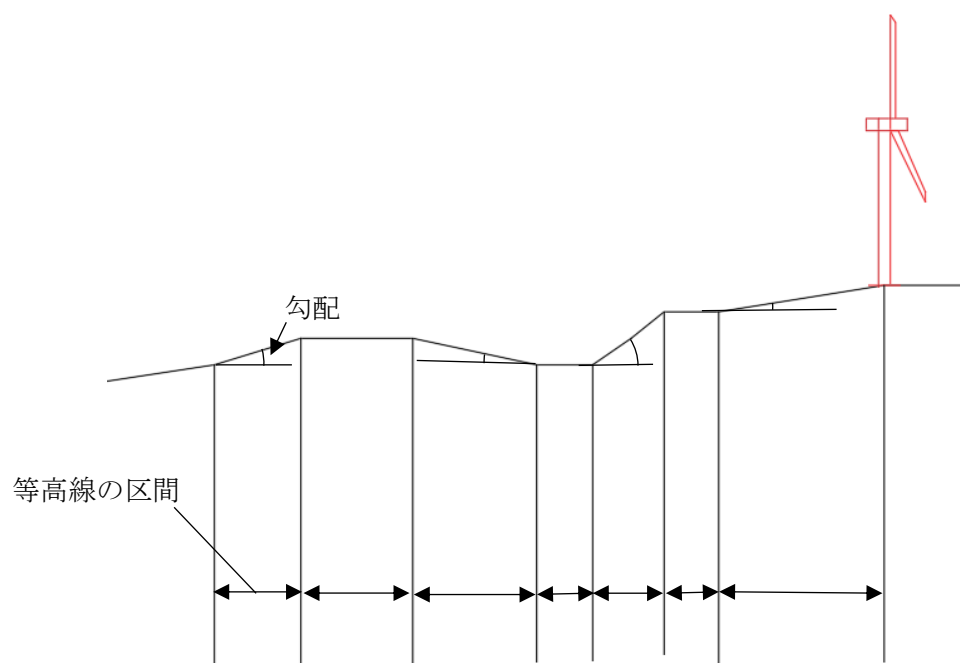


図 3.9 勾配について

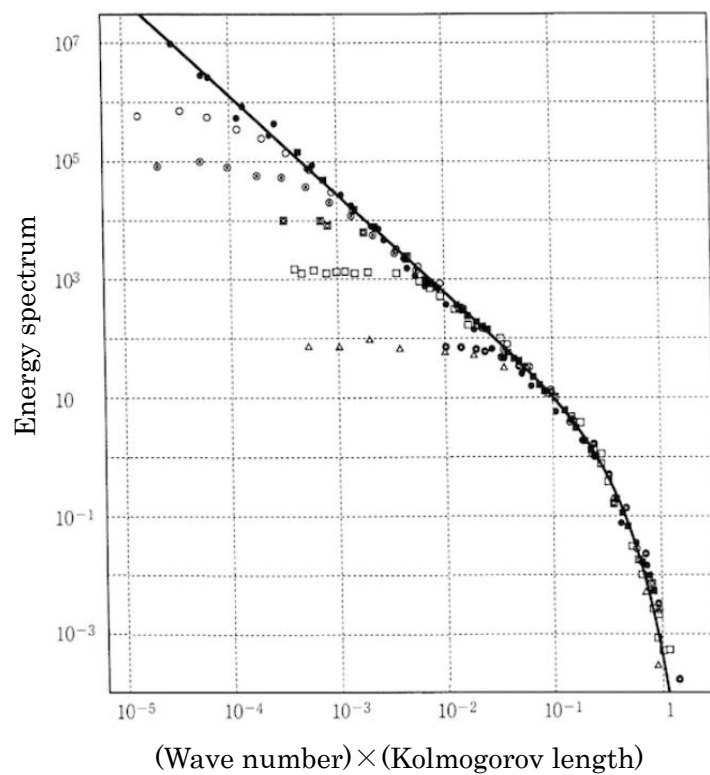


図 3.10 乱流のエネルギースペクトルの普遍則

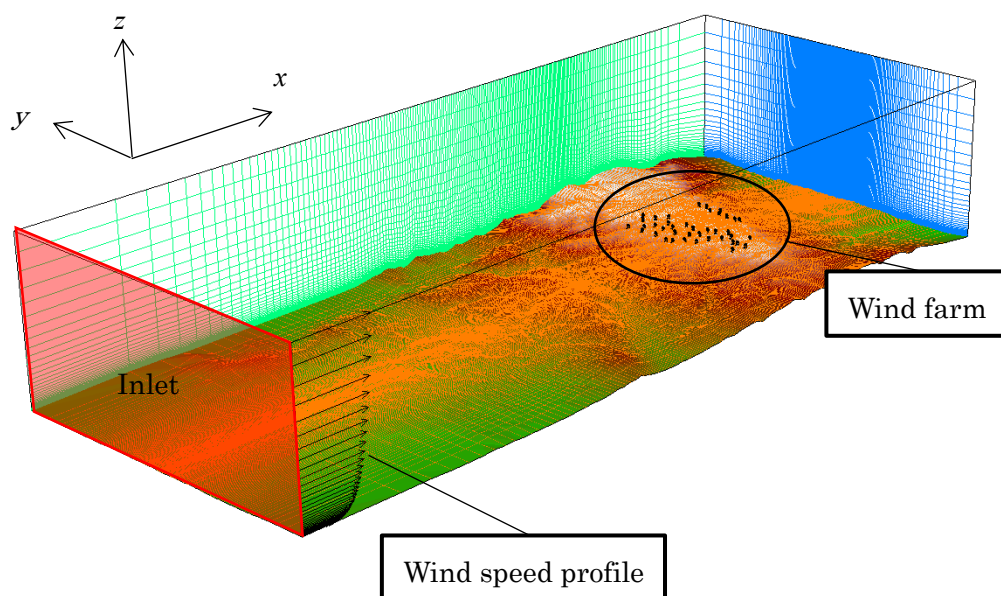


図 3.11 解析領域の鳥観図

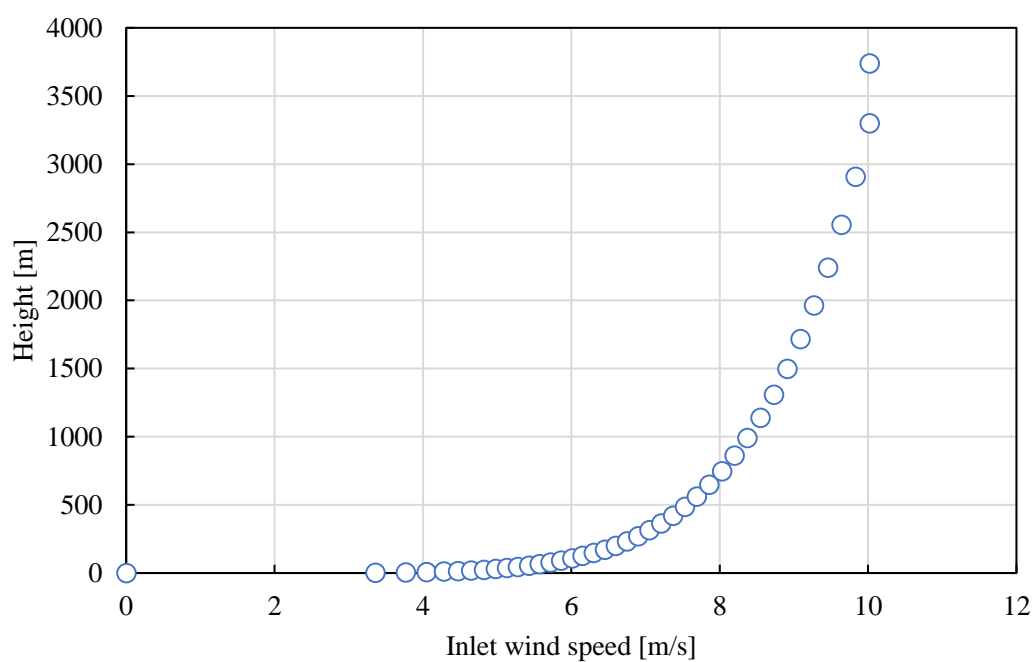


図 3.12 流入境界面風速分布

流入境界面（べき法則）

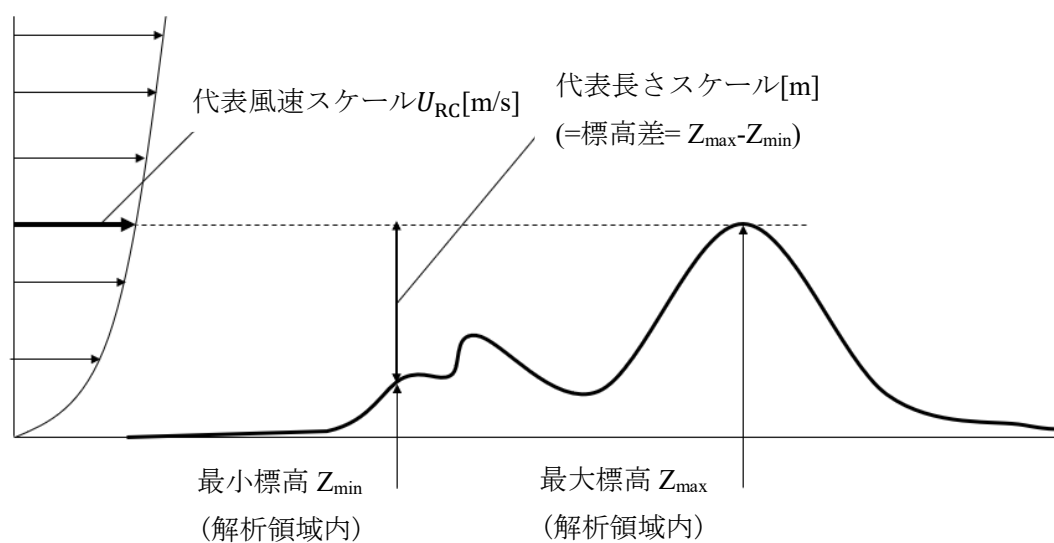


図 3.13 代表スケール

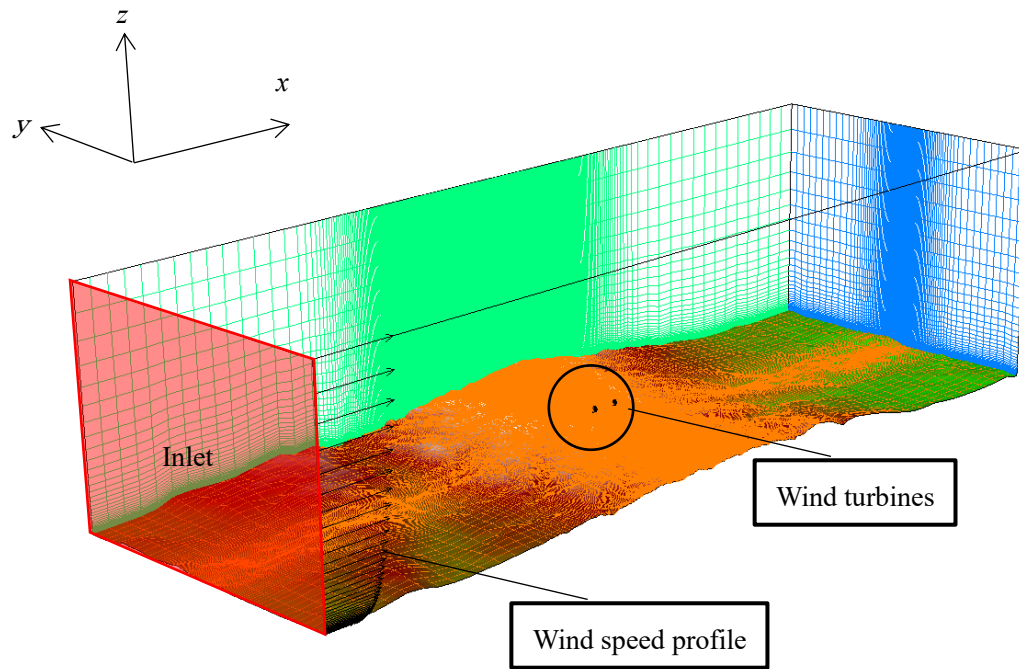


図 3.14 風車後流版 RIAM-COMPACT による解析領域

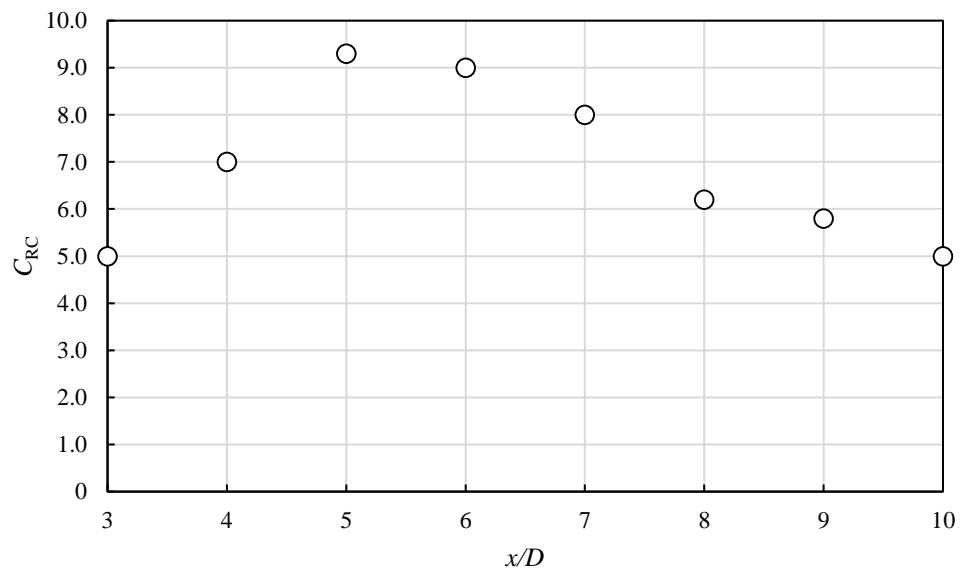


図 3.15 風車離隔距離における C_{RC}



図 3.16 ナセルスケールモデルの外観

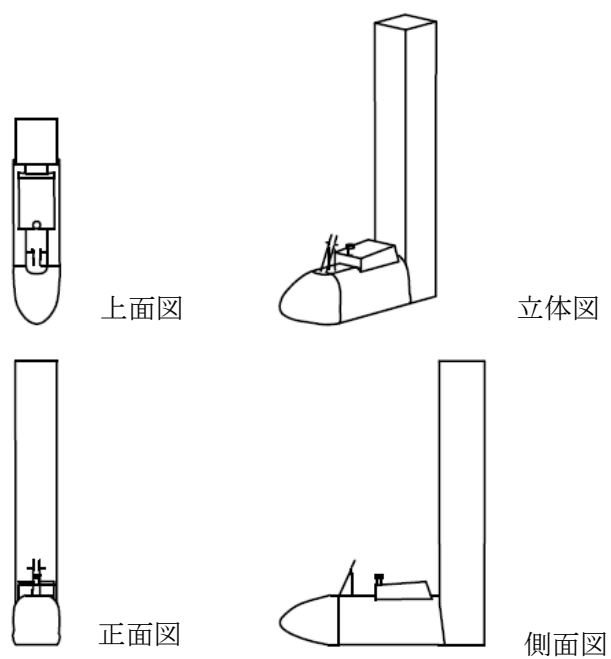


図 3.17 ナセル 3D モデル

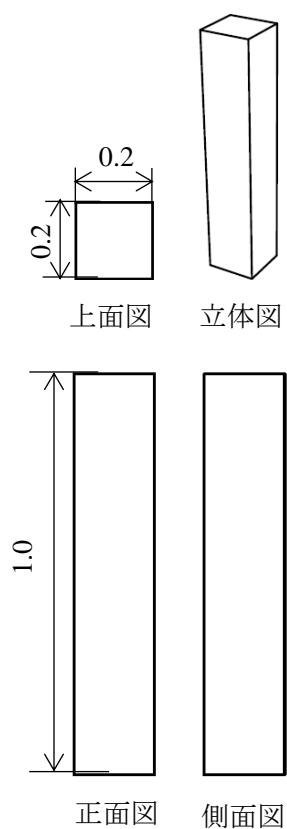


図 3.18 角柱

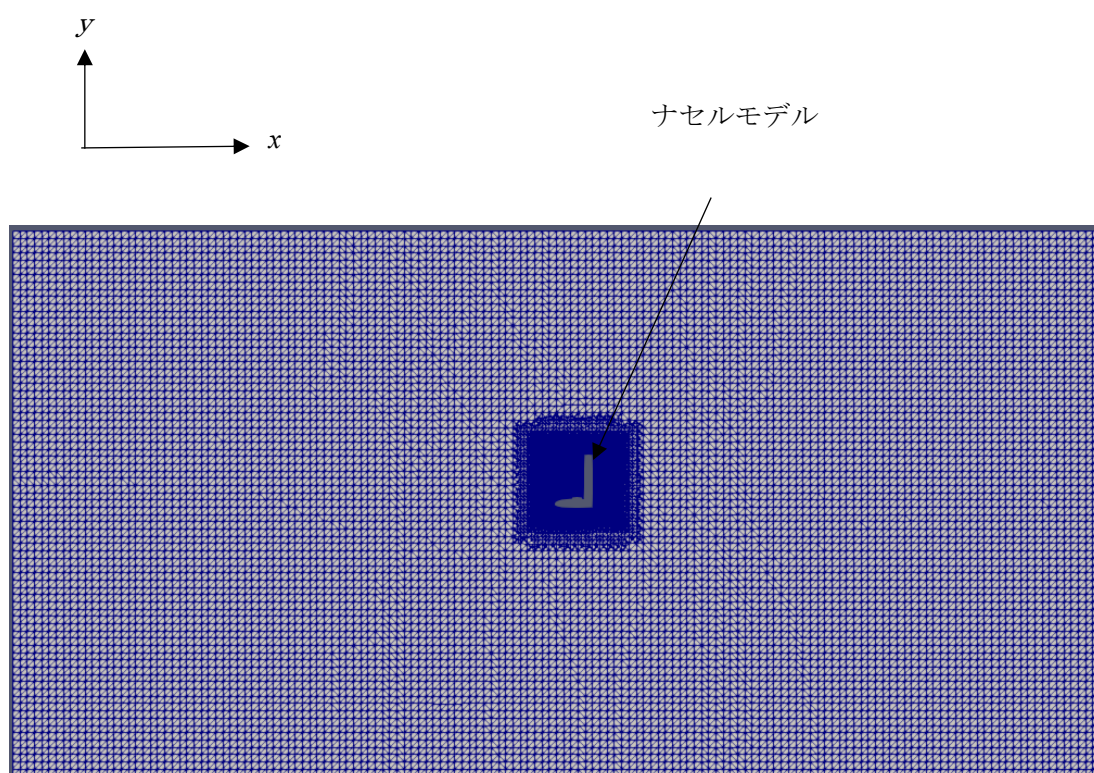


図 3.19 OpenFOAM における解析領域

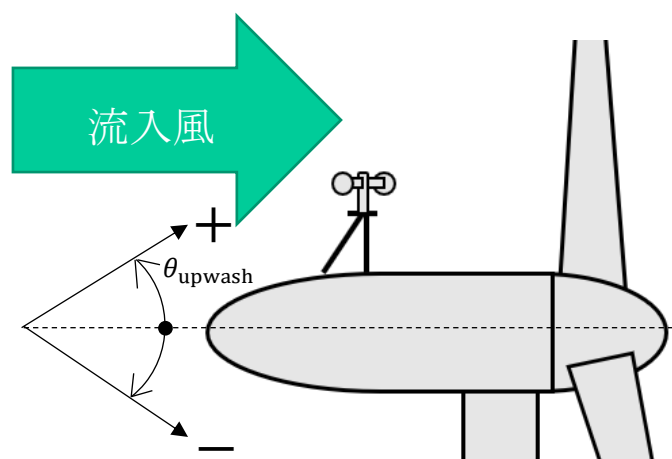
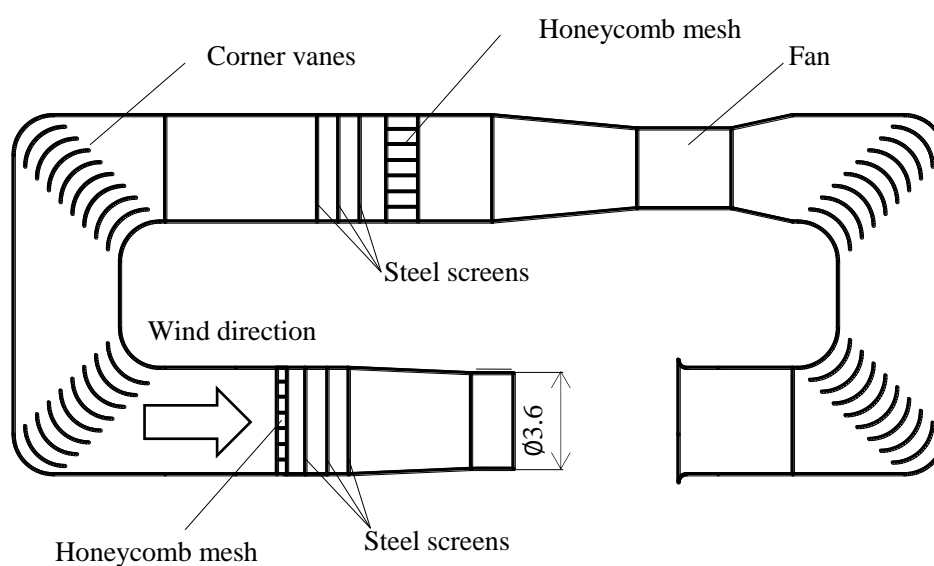


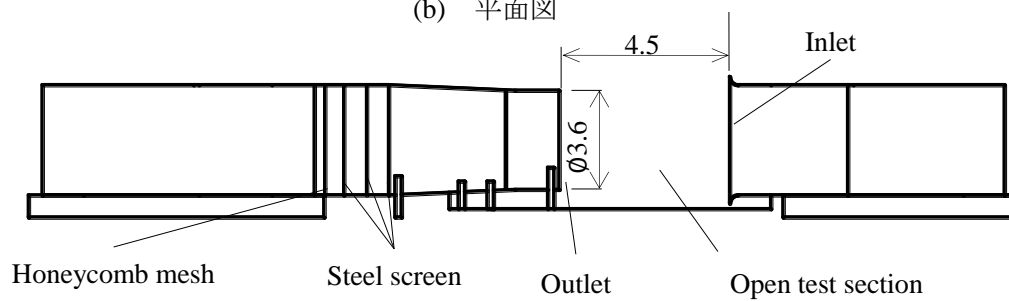
図 3.20 吹上角の定義



(a) 鳥瞰図



(b) 平面図



(c) 側面図

図 3.21 風洞



図 3.22 風速計

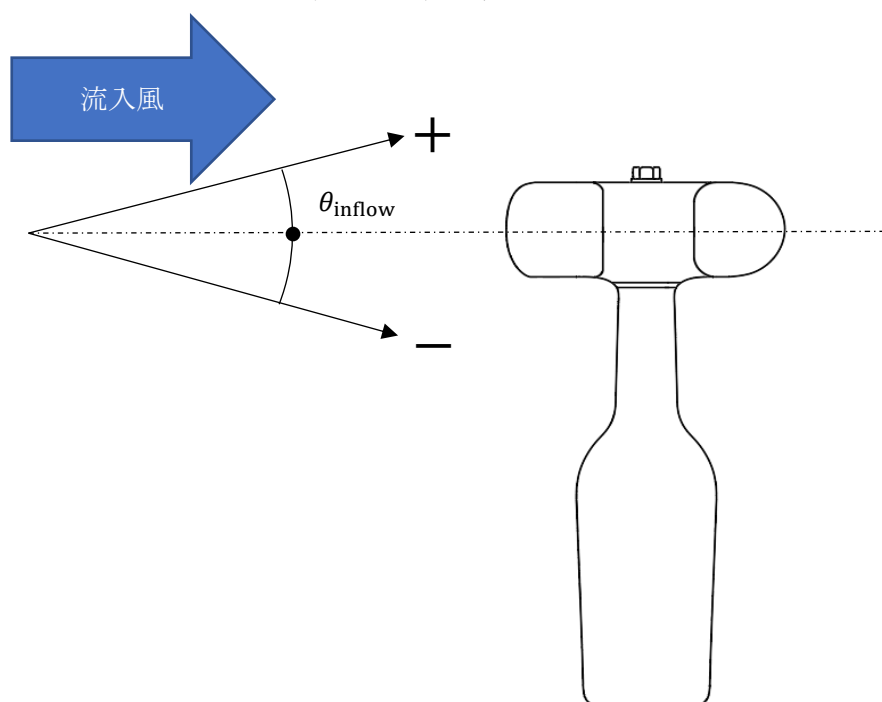


図 3.23 流入角の定義

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

本章では，風車運転データを用いて，ウィンドファーム内の風車出力に及ぼす地形および後流の影響について考察を行う．本章で示す結果は平均風速が高く，風向が安定している寒候期（2月）のデータを用いた．

4.1 年間および月別の風向出現率

本節では，風向の卓越状況について評価するため，実測データによる16方位の風の出現率と平均風速をまとめた．本ウィンドファームの主風向は，代表風車AI-2の観測風向により判定した．AI-2の月別および年間の風向出現率を図4.1(a)～(c)，表4.1に示す．年間の風向出現状況についてみると，西北西(WNW)(29.8%)が最も卓越しており，次いで，北西(NW)(13.7%)，東南東(ESE)(12.7%)，西(W)(12.6%)となっている．したがって，本研究では，西北西(WNW)を本サイトの主風向とする．一般に特定方位もしくは風軸*上の出現率が60%以上である場合，風力開発の観点から風向が安定していると評価される．本観測地点においては，風軸上の年間風向出現率が79.9%となっており，風向に関して非常に良好な条件下にあると言える．AI-2の月別および年間の風向別平均風速を図4.2(a)～(c)，表4.2に示す．

(注*) 風軸：180度の位置関係にある軸を形成する2方位と，その両隣の方位を加えた計6方位のこと（本観測地点の場合にはNW，WNW，W，SE，ESE，Eの6方位）

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

単位：風向出現率[%]

表 4.1 AI-2 の月別および年間風向出現率（2017 年 2 月 1 日～2018 年 1 月 31 日）

風向 \ 月	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	Ann
N	0.5	1.5	1.3	1.6	2.0	1.7	1.8	2.9	8.3	1.0	0.7	0.7	2.0
NNE	0.1	0.4	0.4	0.6	0.4	0.5	0.4	0.4	3.4	0.1	0.3	0.2	0.6
NE	0.0	0.3	0.1	0.3	0.3	0.5	0.0	0.3	2.5	0.1	0.2	0.1	0.4
ENE	0.1	1.0	0.2	1.0	0.3	0.9	0.3	0.5	2.7	0.1	0.1	0.1	0.6
E	1.0	5.7	7.9	16.1	12.7	15.1	14.9	11.0	15.5	2.9	1.1	1.0	8.8
ESE	3.6	7.4	14.0	16.9	15.8	20.9	20.2	21.5	16.8	10.3	2.6	2.3	12.7
SE	1.5	1.0	3.7	1.9	2.9	3.2	3.1	2.1	3.5	2.7	1.3	1.0	2.3
SSE	1.1	0.5	1.6	0.7	0.6	1.2	1.8	0.8	0.6	2.2	0.6	2.1	1.2
S	0.4	0.2	1.3	0.5	0.4	0.8	0.7	0.3	0.2	1.4	0.5	0.6	0.6
SSW	0.7	0.2	0.7	0.4	0.4	0.6	0.5	0.3	0.3	1.7	0.4	0.3	0.6
SW	1.7	0.5	2.2	1.1	0.7	1.0	1.1	0.7	0.4	2.9	0.8	1.0	1.2
WSW	3.9	2.3	9.2	3.3	3.2	3.3	2.2	2.1	1.1	3.4	2.9	2.0	3.2
WSW	16.1	11.1	13.4	12.4	8.0	13.9	11.5	7.3	1.9	11.3	20.2	24.4	12.6
WNW	43.8	35.3	18.6	21.6	18.1	26.1	17.1	15.8	12.4	41.7	55.2	52.1	29.8
NW	18.3	23.7	15.5	12.1	16.8	5.8	9.4	16.5	14.7	13.4	9.4	9.4	13.7
NNW	7.1	8.8	9.9	9.4	17.3	4.5	15.0	17.3	15.7	4.8	3.7	2.7	9.7

単位：風速[m/s]

表 4.2 AI-2 の月別および年間風向別平均風速（2017 年 2 月 1 日～2018 年 1 月 31 日）

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	Ann
N	3.6	4.8	4.6	3.1	4.4	2.7	5.0	4.4	3.8	3.1	3.1	3.4	3.9
NNE	3.0	2.8	2.5	2.1	1.9	1.5	2.7	2.1	2.8	1.4	2.9	2.5	2.5
NE	0.9	2.9	2.1	1.5	1.5	1.4	1.9	1.6	3.3	0.7	2.6	3.4	2.6
ENE	3.5	3.9	3.1	3.3	2.4	2.8	2.1	2.8	4.1	1.4	1.8	2.5	3.5
E	6.6	6.0	7.4	5.9	5.8	5.1	6.4	7.4	8.7	4.6	5.8	7.3	6.5
ESE	5.2	5.0	7.9	5.9	5.2	4.2	6.2	7.2	6.7	4.0	5.0	8.6	5.9
SE	5.4	3.5	4.1	3.9	3.9	3.0	3.3	3.8	3.6	3.3	4.2	4.8	3.7
SSE	4.7	3.3	3.6	2.8	3.0	2.4	3.0	3.9	2.6	3.0	4.3	5.1	3.6
S	4.4	3.1	3.1	2.5	3.1	2.0	2.9	2.7	2.7	2.8	3.0	4.6	3.0
SSW	3.7	2.9	2.5	2.7	2.6	1.7	2.9	4.1	1.6	2.7	3.8	3.3	2.8
SW	4.5	3.5	3.8	3.1	3.7	2.0	3.8	3.8	2.7	3.5	4.8	3.8	3.6
WSW	6.5	4.2	4.8	3.8	4.6	3.8	5.1	4.6	3.2	3.8	5.8	4.8	4.7
W	7.2	5.6	5.8	5.3	5.4	5.1	6.2	5.9	5.9	5.5	7.5	9.2	6.6
WNW	9.8	8.6	7.7	6.4	6.6	6.2	7.0	6.6	8.1	8.6	11.2	10.2	8.7
NW	8.8	8.2	7.9	6.1	6.8	4.6	5.9	7.4	8.0	8.5	7.9	7.3	7.5
NNW	7.1	6.2	7.0	6.0	6.4	4.3	6.4	6.3	5.7	4.8	5.5	6.2	6.1

4.2 風車出力に及ぼす地形の影響

本節では、実測データによる地形の影響について評価を行う。また、代表風車 AI-2 に流入する平均風向を代表風向と定義して、代表風向が WNW、NW および W となる風車出力データを比較した。

4.2.1 平均風速および発電量

本項では、月別の平均風速および発電量の比較を行う。ここで、3.1.2 節で述べたように本サイトの主風向 W、WNW、NW で尾根より西側の風車（AI-1～AI-32）に流入する風は斜面に沿って吹き上がる風（吹上風）となり、尾根より東側（AT-1～AT-8）の風車に流入する風は尾根越えの風（吹下風）となる。

図 4.3 に代表風向 WNW における平均風速を示す。図 4.2 は、縦軸に平均風速の無次元値、

横軸に風車を示す。ここで、各風車の風速は AI-2 の平均風速で無次元化してある。図 4.2 より、各風車に流入する風速はばらつきがある。これは地形の影響および後流の影響が起因していると考えられる。

図 4.4 に代表風向 WNW における発電量を示す。縦軸に発電量、横軸に風車を示す。ここで各風車の発電量は AI-2 の発電量で無次元化してある。図 4.4 に関しても図 4.3 と同様の傾向を示し、これらも地形の影響が起因していると考えられる。これらの地形の影響に関しては後述する 5 章の RIAM-COMPACT による解析から考察を行う。

4.2.2 風向別の平均風速および発電量

本項では、風向別に平均風速および発電量の比較を行う。

図 4.5 に各風車の風向 WNW, NW および W における平均風速を示す。図 4.5 は、縦軸に平均風速、横軸に風車を示す。各風車の風速は AI-2 の平均風速で無次元化してある。図 4.5 より各風車の風速は風向によって差が生じることがわかる。

図 4.6 に各風車の代表風向 WNW, NW および W における発電量を示す。図 4.6 は、縦軸に発電量、横軸に方位を示す。各風車の風速は AI-2 の発電量で無次元化してある。図 4.6 に関しても図 4.5 と同様に、各風車の発電量は風向によって差が生じる。この原因として、風向によって風車上流の地形が異なることが考えられる。

表 4.3 に AI-2 の代表風向 WNW, NW および W に対する各風車の流入風向を示す。表 4.2 より代表風向 WNW, NW および W において各風車に流入する風向は異なる。これは、風車に流入する風が地形の影響でゆがめられているからだと考えられる。これらの地形の影響に関しては後述する 5 章の RIAM-COMPACT による解析から考察を行う。

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

表 4.3 代表風向 WNW における各風車流入風向

代表風向	AI-1	AI-2	AI-3	AI-4	AI-5
WNW	WNW	WNW	WNW	W	WNW
NW	NW	NW	NW	NW	NW
W	WNW	W	W	W	W
	AI-6	AI-7	AI-8	AI-9	AI-10
WNW	W	WNW	WNW	WNW	WNW
NW	WNW	NW	NW	WNW	NW
W	W	W	WNW	W	W
	AI-11	AI-12	AI-13	AI-14	AI-15
WNW	W	WNW	WNW	WNW	WNW
NW	WNW	NW	NW	NW	NW
W	WSW	WNW	W	W	W
	AI-16	AI-17	AI-18	AI-19	AI-20
WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	WNW
NW	NW	NW	NNW	NW	NW
W	W	WNW	WNW	W	W
	AI-21	AI-22	AI-23	AI-24	AI-25
WNW	WNW	NW	WNW	WNW	WNW
NW	NW	NNW	NW	NW	NW
W	W	WNW	W	W	WNW
	AI-26	AI-27	AI-28	AI-29	AI-30
WNW	NW	WNW	NNW	WSW	NNW
NW	NNW	NW	N	W	N
W	WNW	W	NW	WSW	NW
	AI-31	AI-32	AT-1	AT-2	AT-3
WNW	NNW	NW	NW	WNW	NW
NW	NNW	NNW	NW	NW	NW
W	NW	NW	WNW	W	WNW
	AT-4	AT-5	AT-6	AT-7	AT-8
WNW	WNW	WNW	WNW	WNW	W
NW	NW	NW	NW	NW	WNW
W	WNW	W	W	W	W

4.2.3 風向別の乱流強度

本項では、風向 WNW における乱流強度を風速階級別に比較する。風車上流の地形によって流れが剥離すると風は乱れ、乱流強度が高くなる。乱流強度の高い風を受ける風車は、発電量の低下や寿命の低下などを招く。そこで、図 4.5 より風向によって発電量に差が生じる AI-9, AI-22 に着目する。

代表風向 WNW, W および NW の AI-9 の風車位置における乱流強度を図 4.7 に示す。図 4.7 より AI-9 の場合、WNW の乱流強度は他の風向 NW, W より低い。

代表風向 WNW, W および NW の AI-22 の風車位置における乱流強度を図 4.8 に示す。図 4.8 より AI-22 の場合、NW の乱流強度は他の風向 WNW, W より低い。これらから風向によって乱流強度に差が生じていることがわかる。また図 4.6 と比較すると、発電量は乱流強度の低い風向で高くなる傾向を示す。風向による乱流強度の差は地形に起因するものであり、図 4.5 に示すような風向による発電量変化の一因であると考えられる。

4.3 後流の影響

一般に風車の下流側において、後流と呼ばれる減速した流れが形成され、その中では平均風速が低下するだけでなく、風速の変動が増加するなど流れの様相が変化することが知られている。とくにウィンドファームのように複数の風車が近接して存在する場合、下流側風車が上流側風車の後流を受けて運転を行う状態が生じる。このとき、後流中で運転される下流側風車の風速が減少し、出力の低下につながる。したがって、後流の特性を定量的に把握することは重要な課題であると言える。

4.3.1 着目風車

主風向に対して概ね直線上に配置されている風車に着目し、後流の影響を評価する。着目風車は AI-2 および AI-1, AI-17 および AI-16 である。表 4.4 に AI-2 および AI-1, AI-17 および AI-16 の風車間距離および x/D , 地盤標高および標高差, データ整理した風向範囲を示す。一般に、風車を近接させて設置する場合、後流の影響を考慮し、風車間距離をロータ直径の 10 倍⁽¹³⁾にする必要があるとされている。しかしながら、表 4.4 に示すように AI-1 および AI-2 の風車間距離は $x/D=5.3$, AI-17 および AI-16 の風車間距離は $x/D=3.8$ と風車直径の 10 倍未満である。なお、AI-1 および AI-2 の標高差は 5m, AI-17 および AI-16 の標高差は 3m である。これは、ロータ直径が 80m ということを考慮すれば各組の風車は十分に後流の影響を受けると考えられる。また風車の後流域はロータ直径の 1.5 倍に拡大することが知られている⁽¹³⁾。そこで風車出力データ解析を行う風向は、風車距離と風車後流拡大を考慮し、表 4.4 に示す範囲を用いた。

表 4.4 後流評価を行った風車の組合せ

着目風車	風車間距離 [m]	x/D	地盤標高 [m]	標高差 [m]	風車出力データ解析を行った 風向範囲 [°]
上流側 AI-2	425	5.3	705	5	267～321
下流側 AI-1			700		
上流側 AI-17	302	3.8	708	3	250～326
下流側 AI-16			705		

4.3.2 風車2基の風速

表 4.5 に AI-2 および AI-1, AI-17 および AI-16 の平均風速を示す. 表 4.5 より下流側風車 (AI-1, AI-16) の風速は上流側風車 (AI-2, AI-17) に比べて低い. これは上流側風車のロータを通過した流れが下流側風車のロータ面に流入しているためであると考えられる. これらに関して第5章で風車後流考慮版 RIAM-COMPACT による解析結果から考察を行う.

表 4.5 着目風車の平均風速

着目風車	平均風速 [m/s]	風速差 [m/s]
上流側 AI-2	9.40	1.59
下流側 AI-1	7.81	
上流側 AI-17	8.00	1.20
下流側 AI-16	6.80	

4.3.3 風車2基の乱流強度

図 4.9 に AI-2 および AI-1 の風速階級別乱流強度を示す. また各風速階級での乱流強度は, 各風速階級内にある全データの 90%タイル値を使用している. 図 4.9 において, 定格風速 (13m/s) 以下において下流側にある AI-1 の乱流強度が AI-2 に比べ高いことが分かる. これは AI-2 のロータを通過した流れが AI-1 のロータ面に流入しているためであると考えられる. 定格風速以上においてはほぼ同値であると考えられる. これは定格風速領域において風車はピッチ制御を行い, 出力を定格に保つようになっているが, ピッチ制御により風車出

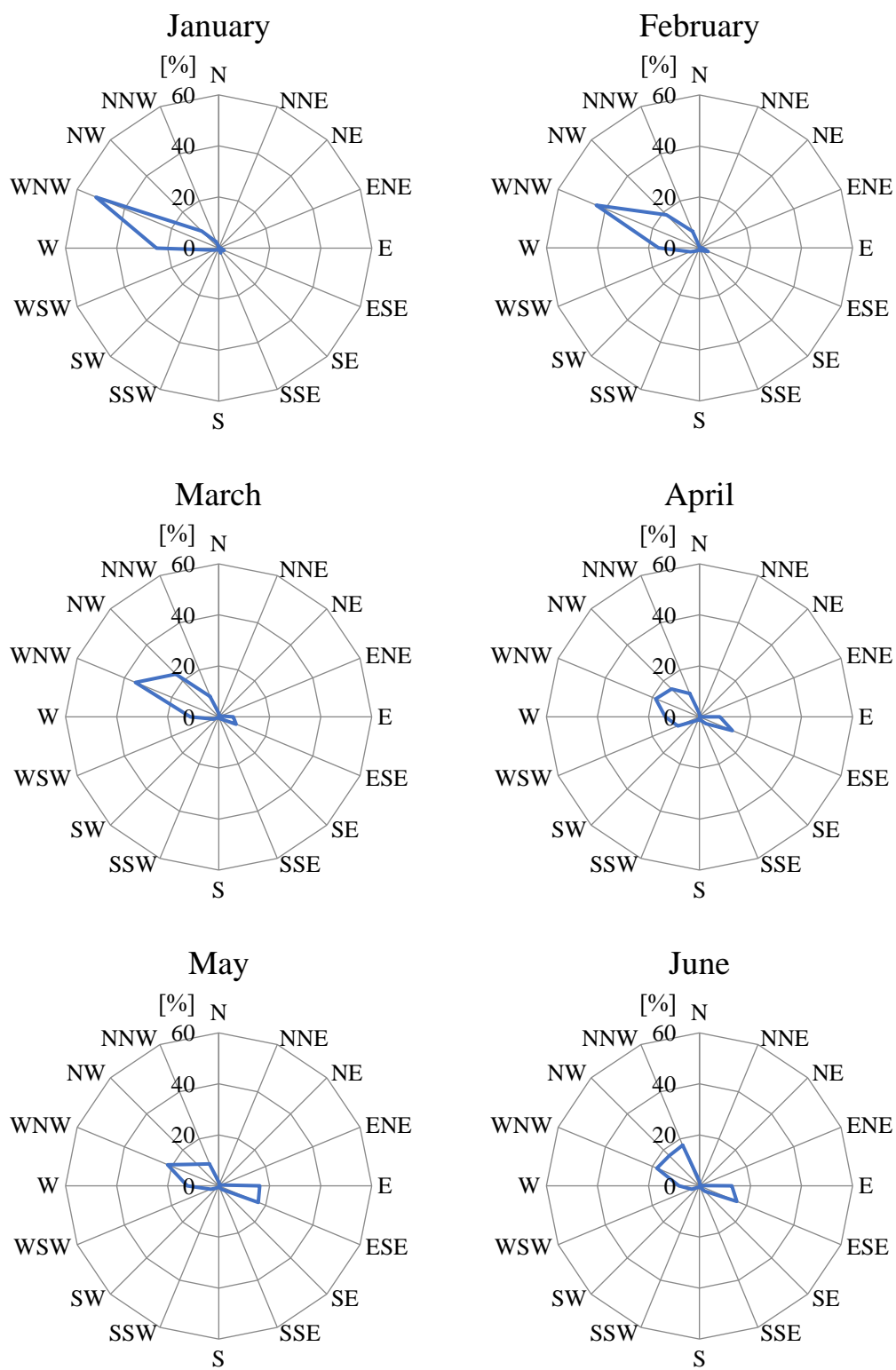
第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

力を低下させると同時に推力も低下し、後流の影響が小さくなるからだと考えられる。

図 4.10 に AI-17 および AI-16 の風速階級別乱流強度を示す。また各風速階級での乱流強度は、各風速階級内にある全データの 90%タイル値を使用している。図 4.10 においても、下流側にある AI-16 の乱流強度が AI-17 に比べて高いことが分かる。このことから、AI-16 は AI-17 の後流の影響を受けていると考えられる。

これらの後流の影響に関しては後述する 5 章の風車後流考慮版 RIAM-COMPACT による解析から考察を行う。

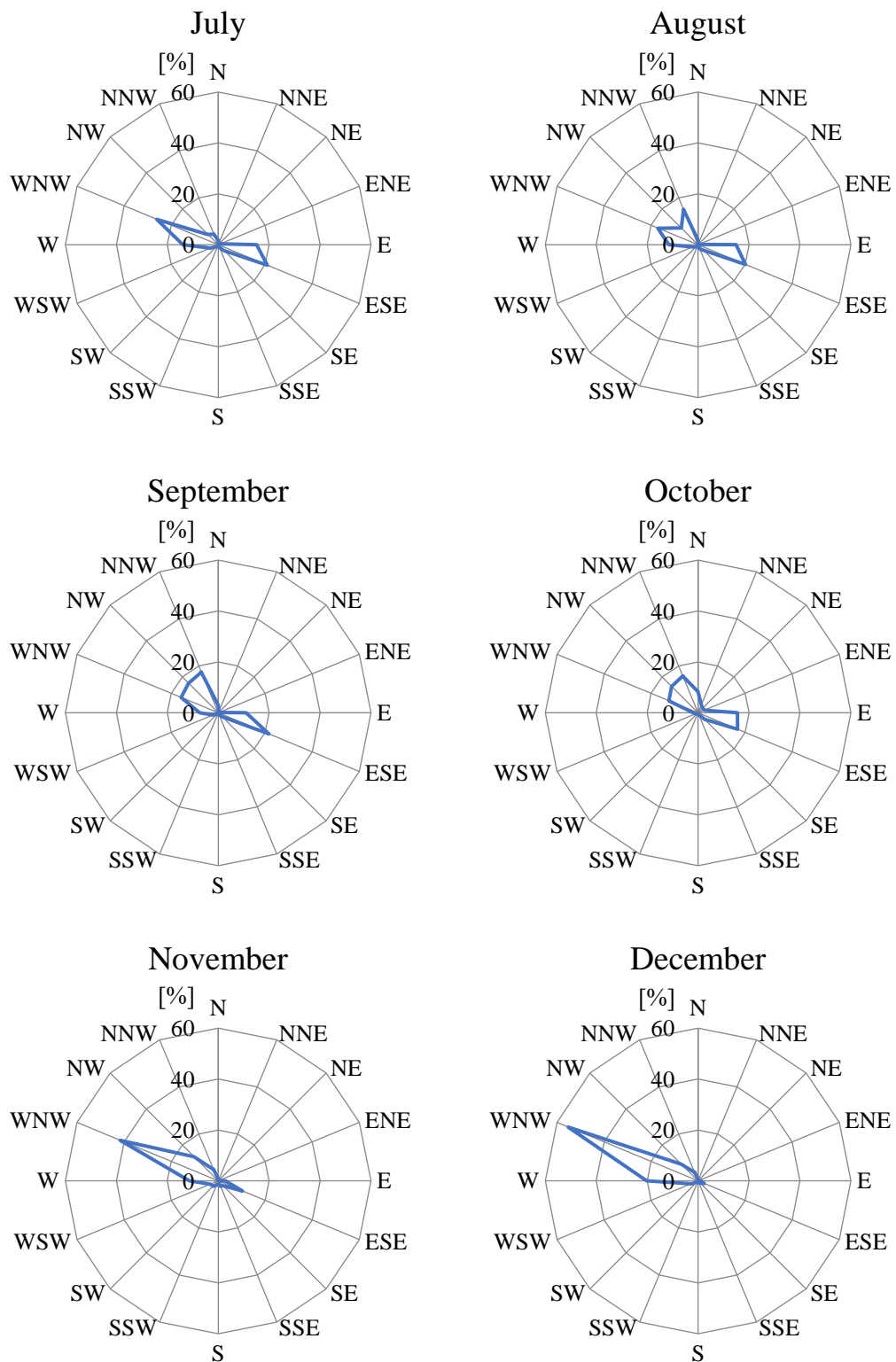
第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響



(a) 月別風向出現率 (1月～6月)

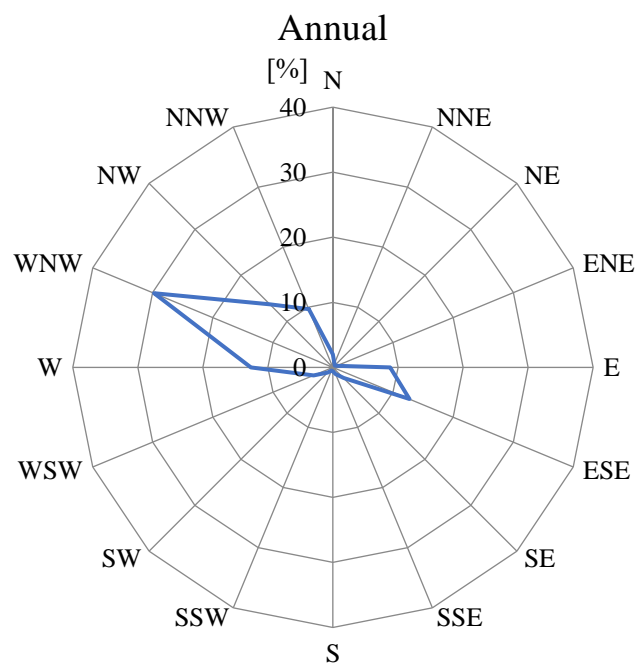
図 4.1 AI-2 の風況

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響



(b) 月別風向出現率 (7月～12月)

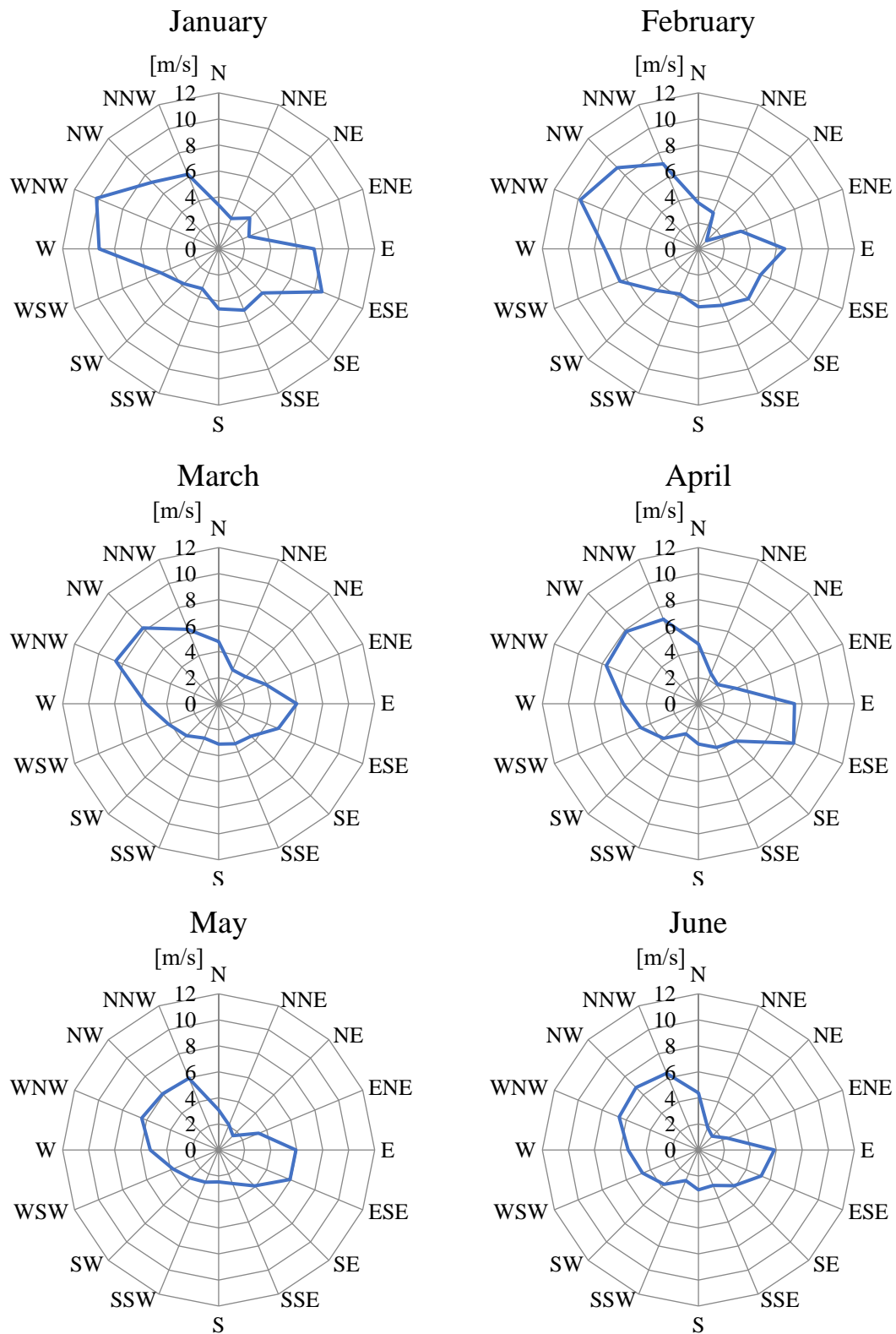
図 4.1 AI-2 の風況



(c) 年間風向出現率

図 4.1 AI-2 の風況

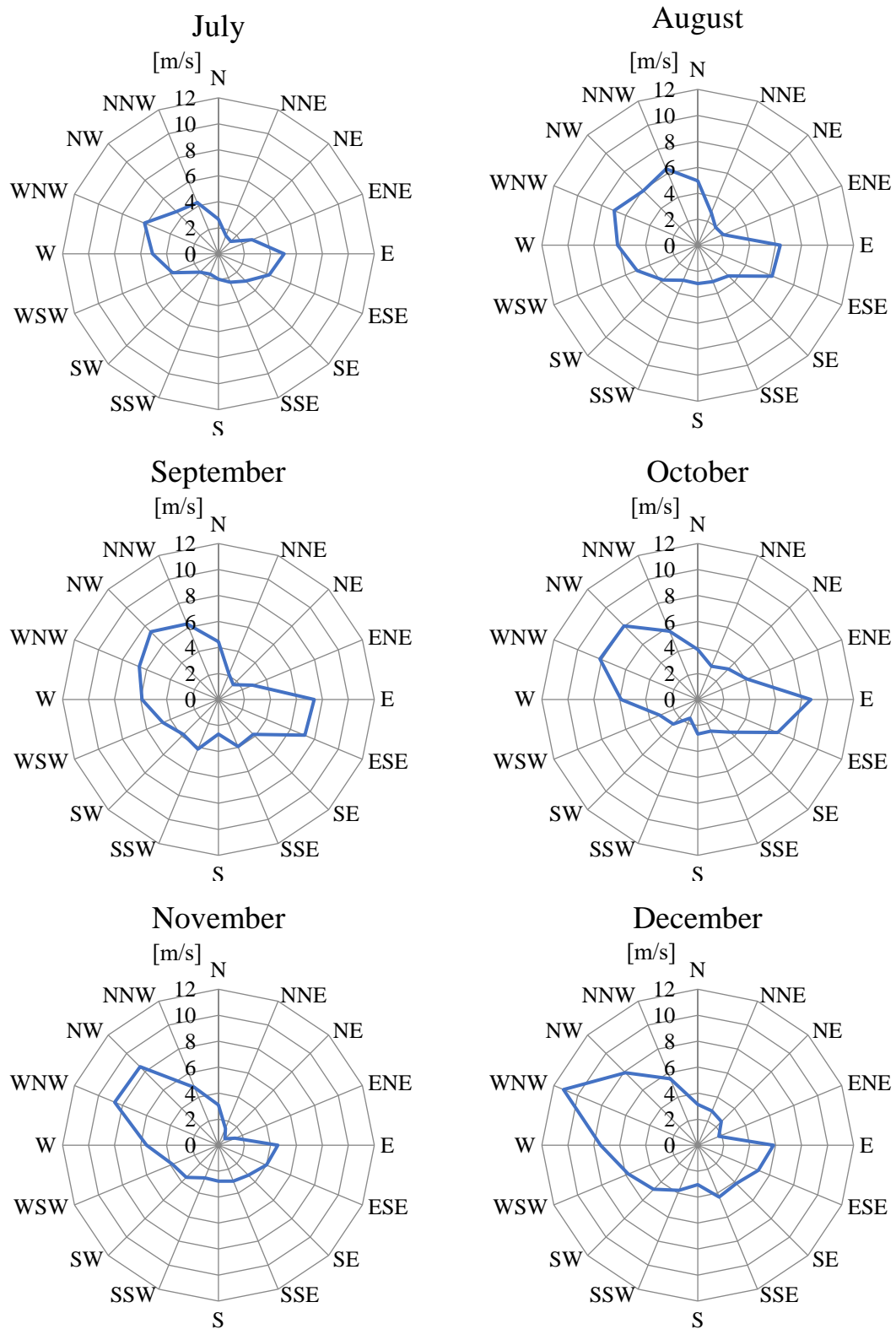
第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響



(a) 風向別平均風速 (1月～6月)

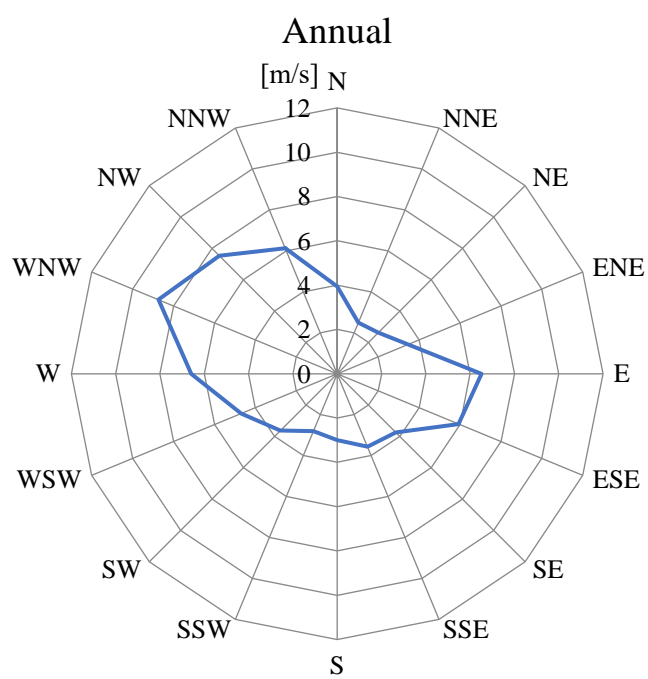
図 4.2 AI-2 の風況

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響



(a) 風向別平均風速 (7月～12月)

図 4.2 AI-2 の風況



(c) 風向別風速 (年間)

図 4.2 AI-2 の風況

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

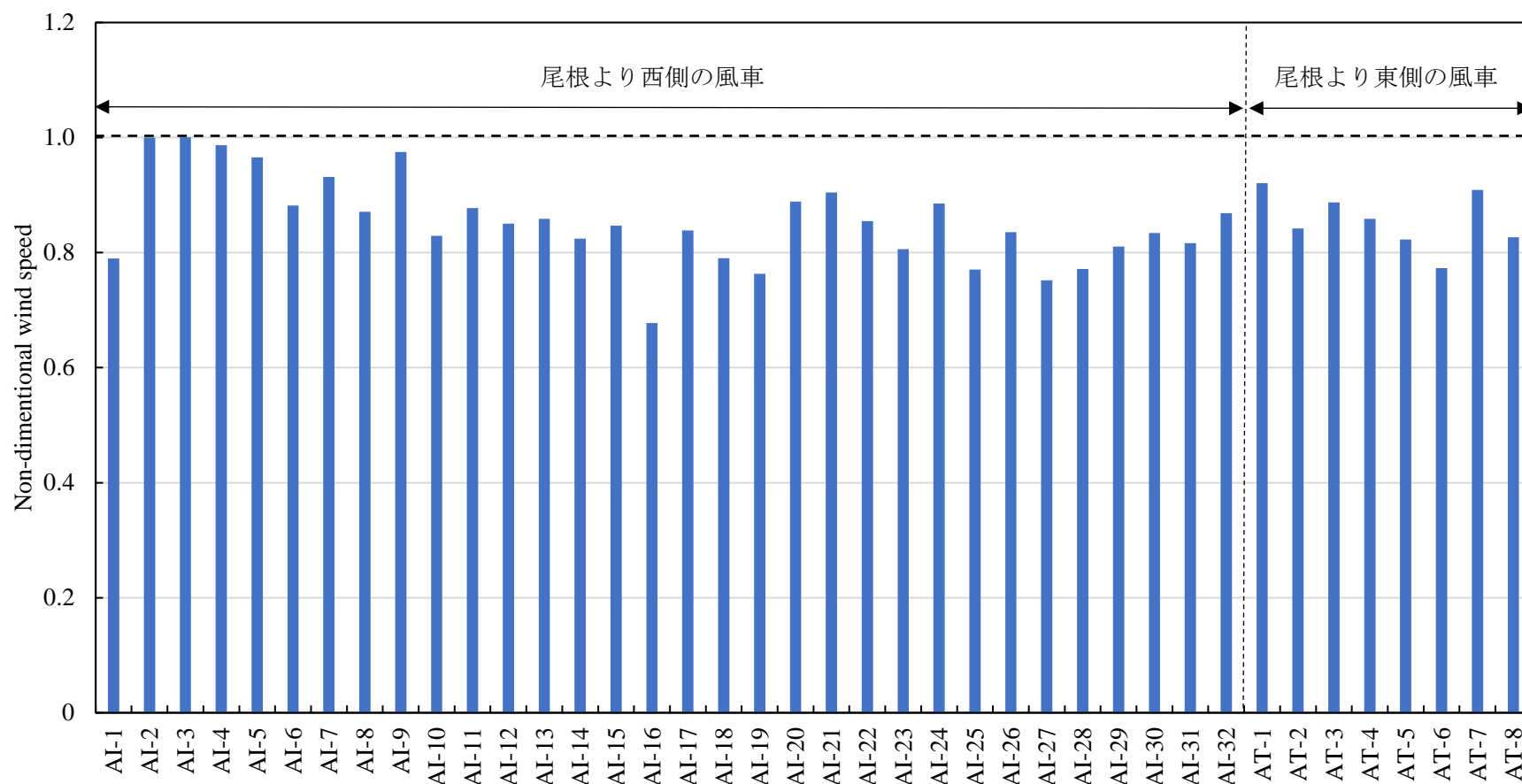


図 4.3 代表風向 WNW における各風車の平均風速

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

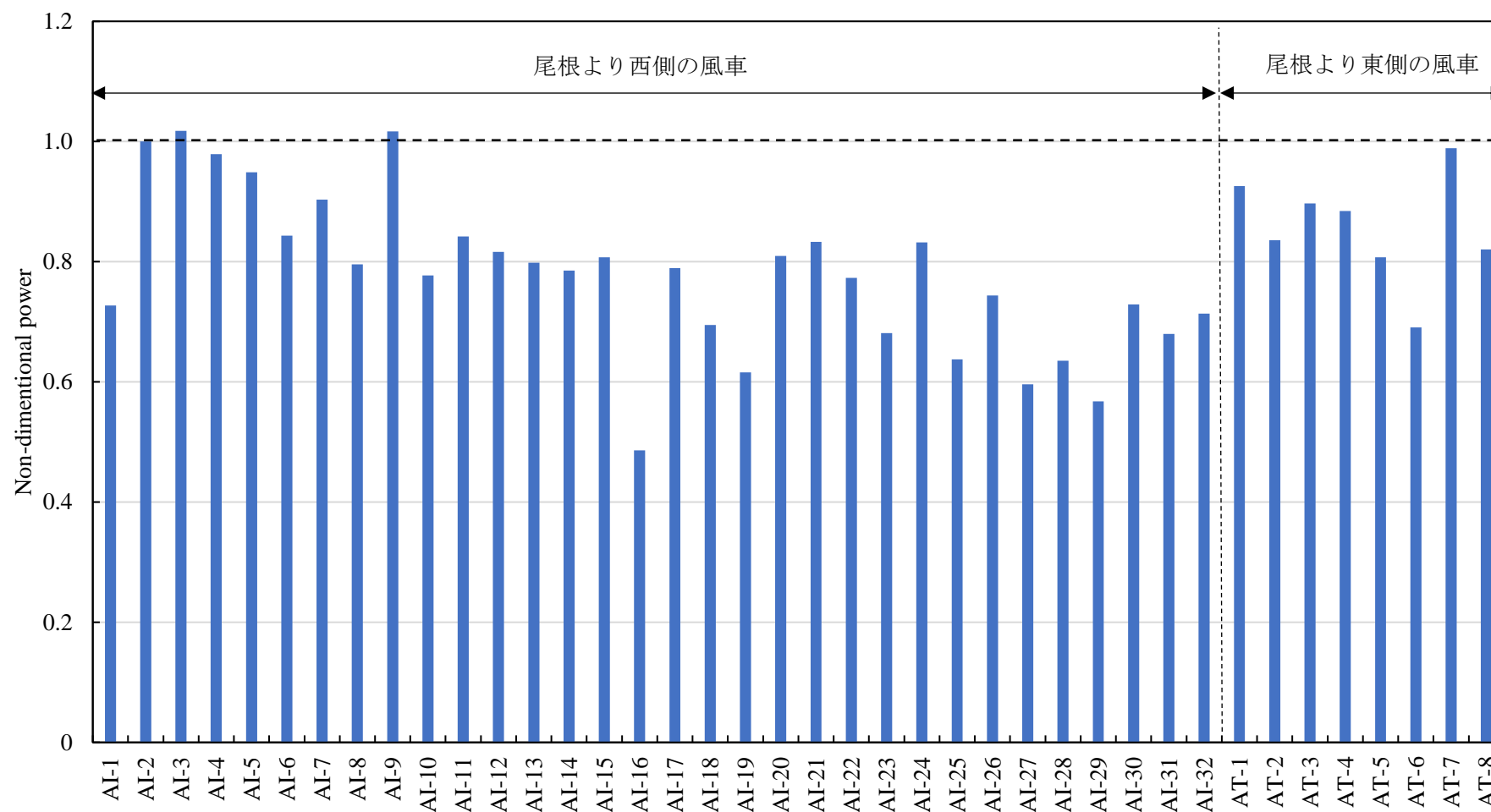


図 4.4 代表風向 WNW における各風車の発電量

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

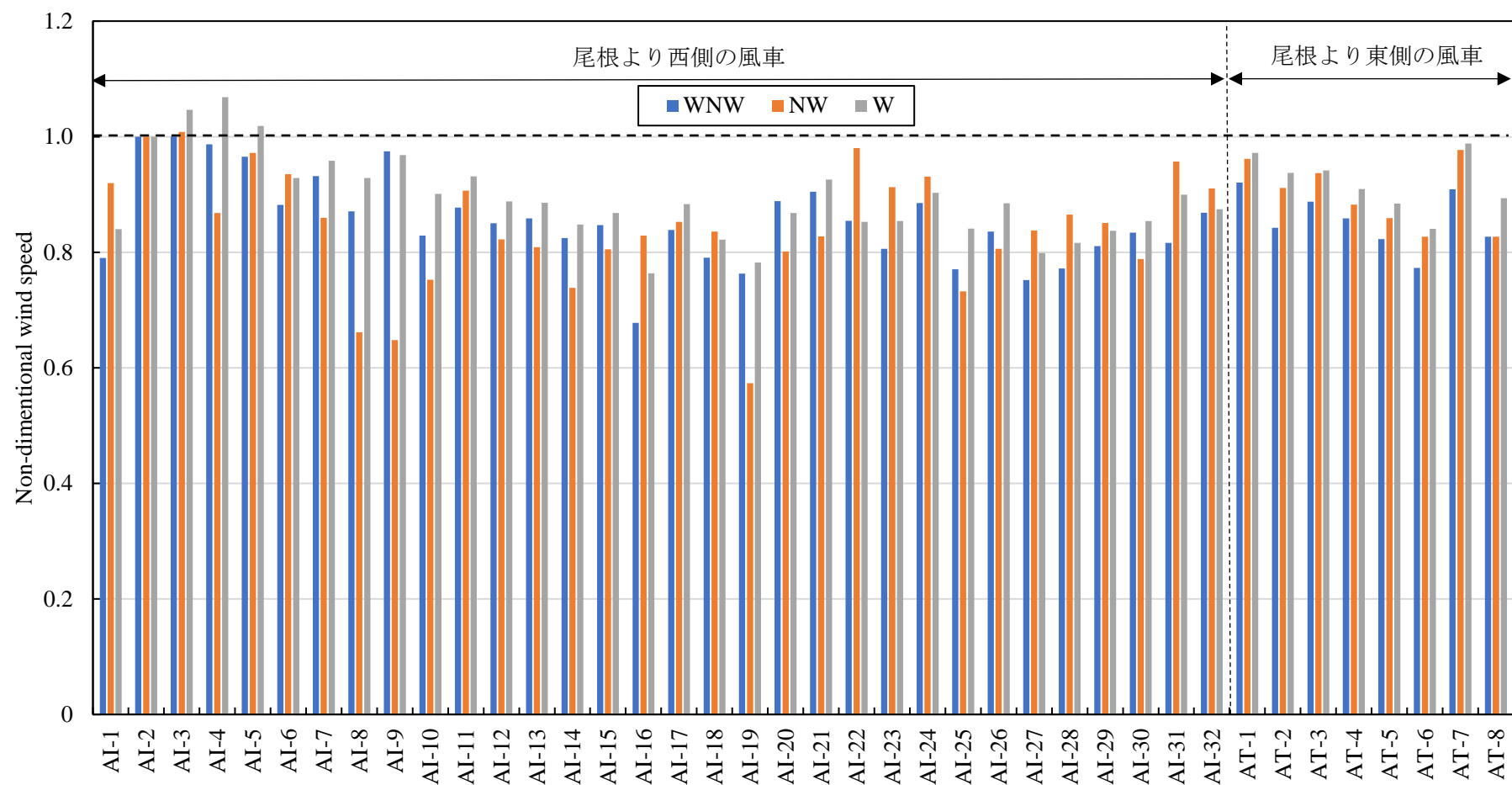


図 4.5 代表風向 WNW, NW および W における各風車の平均風速

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

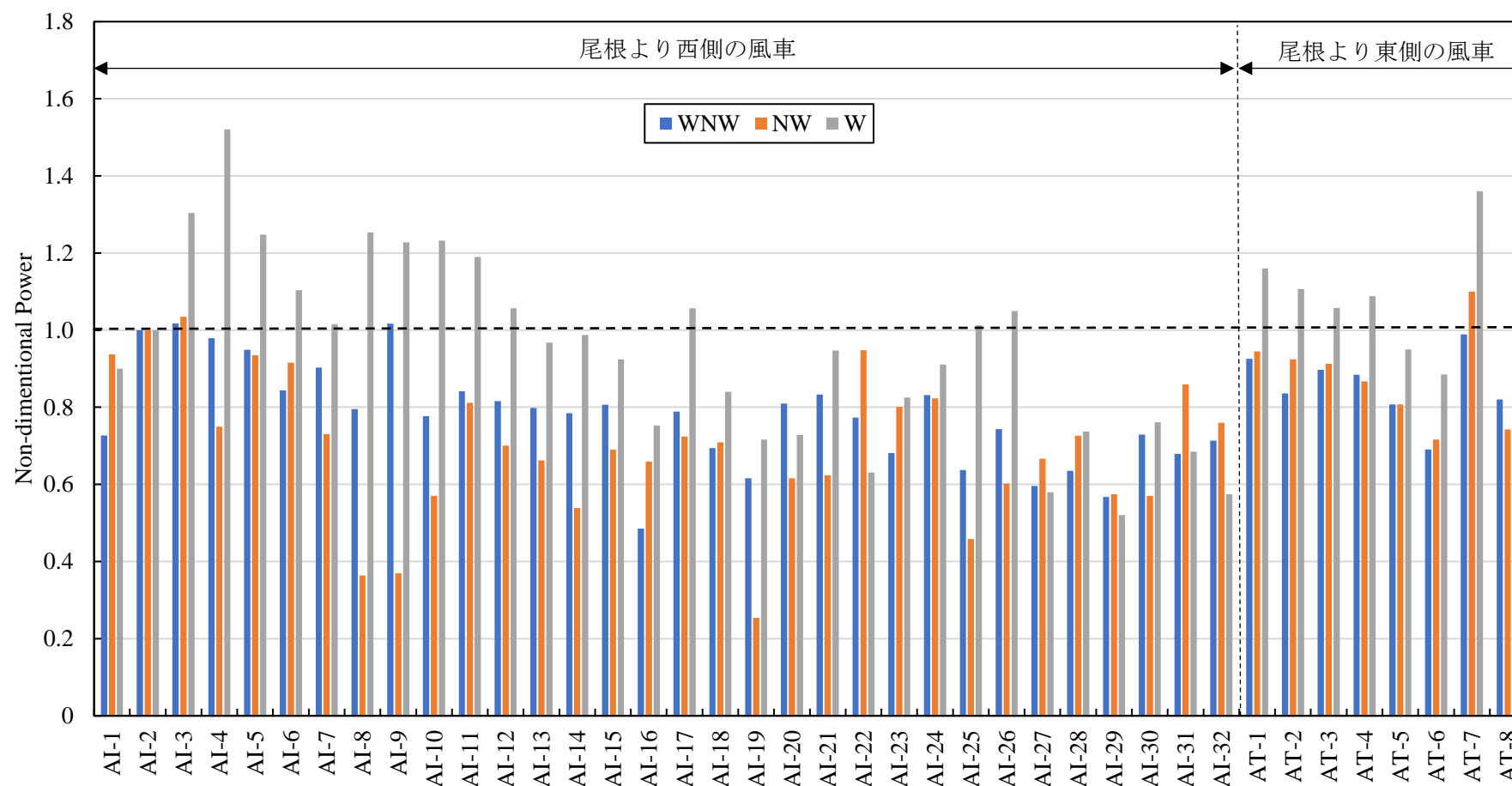


図 4.6 代表風向 WNW, NW および W における各風車の発電量

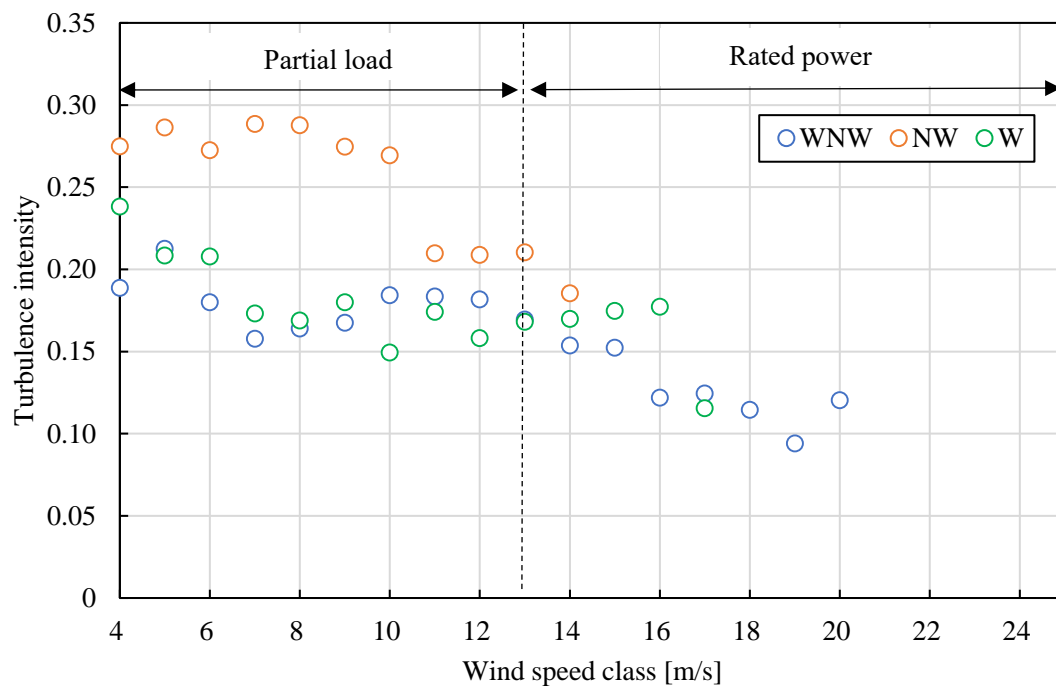


図 4.7 代表風向 WNW, NW および W における AI-9 の風速階級別乱流強度

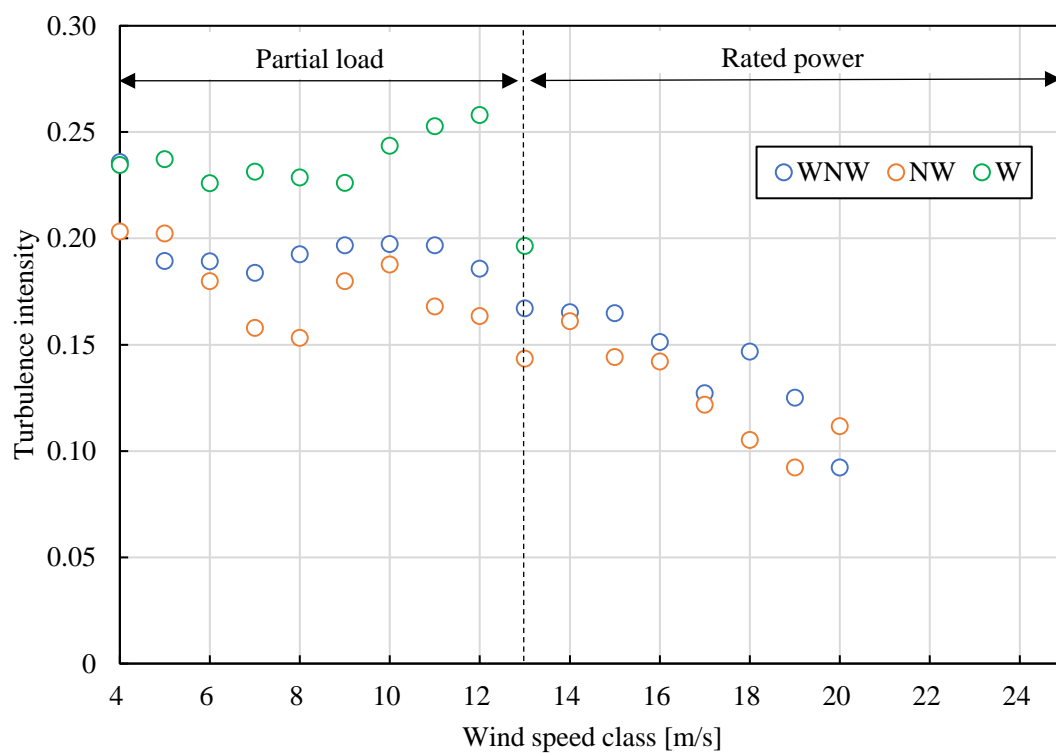


図 4.8 代表風向 WNW, NW および W における AI-22 の風速階級別乱流強度

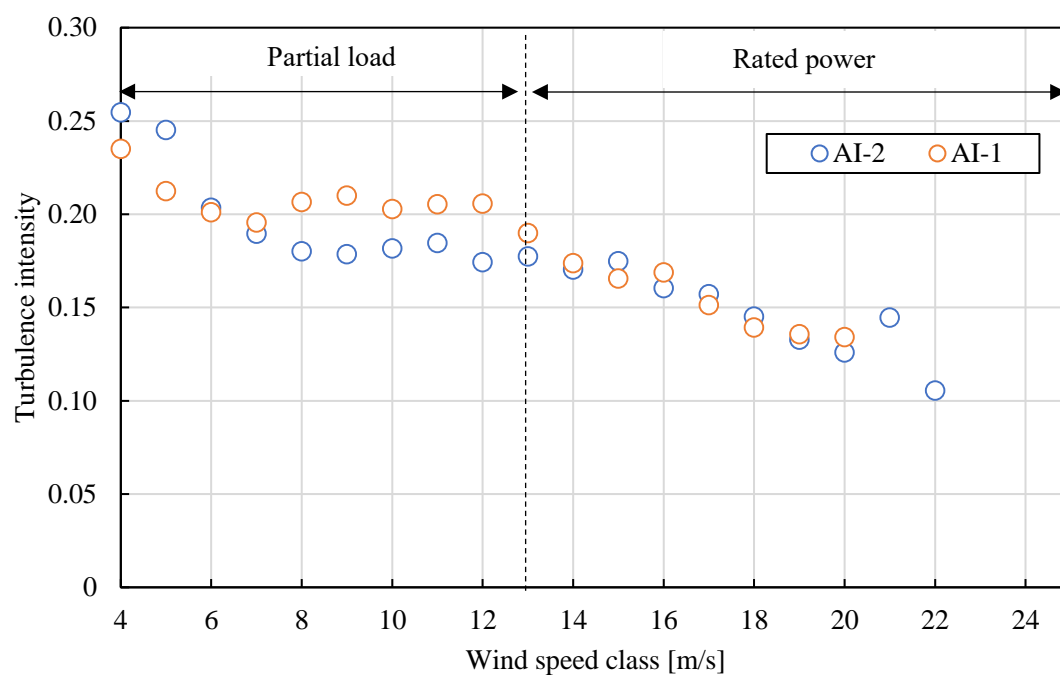


図 4.9 AI-2 および AI-1 の風速階級別乱流強度

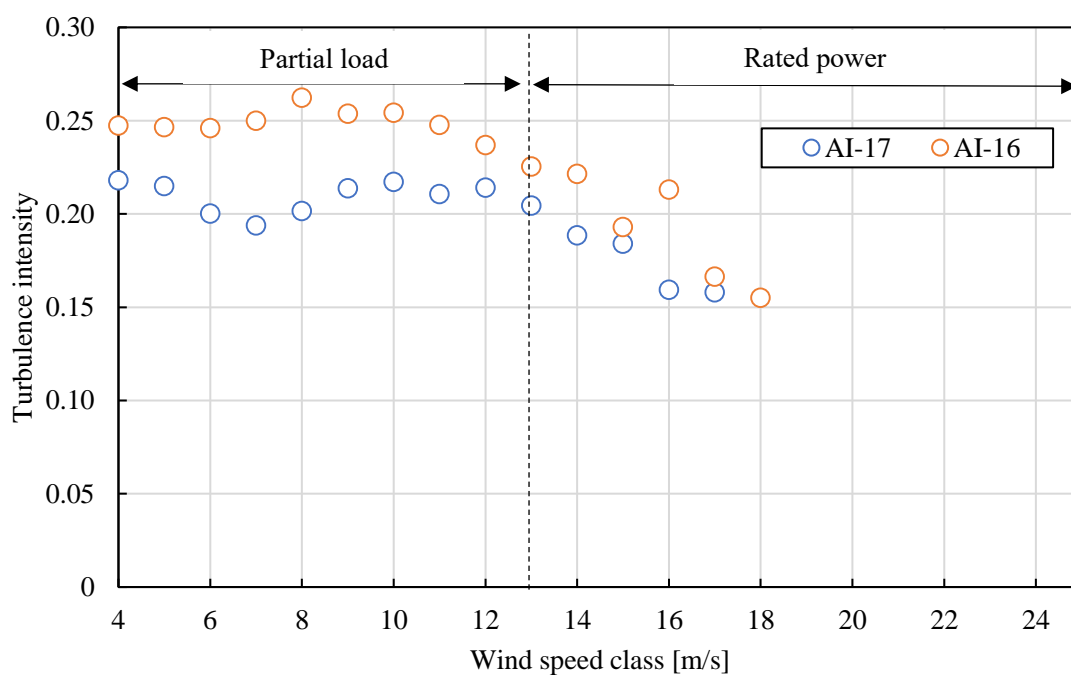


図 4.10 AI-17 および AI-16 の風速階級別乱流強度

第5章 RIAM-COMPACT による解析結果

本章では、非線形風況予測モデル RIAM-COMPACT により算定した研究対象サイトの風況に関して考察を行う。なお、比較方位は風向 WNW, NW, W 方位である。流入風速は本サイトの平均風速である 8m/s とした。以下にその結果を示す。

5.1 地形の影響

本節では、風車が存在しない地形のみの状態で解析結果をもとに、地形に起因した流れの考察を行う。風車ロータ部は図中に赤色で示している。

5.1.1 風車上流の斜面および窪地の影響 (AI-9 および AI-22 の解析結果)

図 5.1 に AI-9 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す。図 5.1 に示すのは風向 WNW に設定した解析結果である。また、色は風速の水平方向成分の大きさを示し、青色が 0m/s を意味し、赤色が 10m/s を意味している。この風向では風車上流地形が比較的なだらかな斜面であることが確認できる。図 5.1 より AI-9 に流入する風は風車上流斜面の影響で縮流により増速した風が流入していることが確認できる。

図 5.2 に AI-9 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す。図 5.2 に示すのは風向 NW を設定した解析結果である。また、色は風速の水平方向成分の大きさを示し、青色が 0m/s を意味し、赤色が 10m/s を意味している。また風車上流 12D の位置に窪地が存在していることが確認できる。図 5.2 より赤丸で示す AI-9 上流の窪地において流れが減速していることが確認できる。AI-9 に流入する風は上流地形の影響で減速した風が流入している。

図 5.3 に AI-9 上面のハブ高さの速度ベクトルを示す。流入境界面風向は WNW である。また、色は緑色が 0m を意味し、白色が 800m を意味している。また風車上流地形が斜面であることが確認できる。図 5.3 より AI-9 に流入する風は風車上流で谷に沿った斜面により増速していることが風車上面図からも確認できる。

図 5.4 に AI-9 上面のハブ高さの速度ベクトルを示す。流入境界面風向は NW である。また、色は緑色が 0m を意味し、白色が 800m を意味している。風車上流地形が窪地であることが確認できる（赤丸）。図 5.4 より AI-9 に流入する風は風車上流の地形により流れがゆがめられており、かつ減速していることが確認できる。

図 5.5 に WNW から AI-9 に流入する風速の鉛直分布を示す。図 5.5 は縦軸に高度、横軸に解析領域入口の設定風速に対する風車位置の流入風速の比を示してある。図 5.5 より AI-9 に流入する風はハブ高さにおいて 1.0 を超えており、流入境界面風速より大きい。これより AI-9 に流入する風は地形の影響で増速していると考えられる。

図 5.6 に NW から AI-9 に流入する風速の鉛直分布を示す。図 5.6 は縦軸に高度、横軸に解析領域入口の設定風速に対する風車位置の流入風速の比を示してある。図 5.6 より AI-9

に流入する風はロータ面全体において 1.0 より小さく流入境界面風速より小さい．これより AI-9 に流入する風は地形の影響で減速していると考えられる．

表 5.1 に風向 WNW および NW におけるロータ面における吹上角と流入風の吹上角とロータ軸の向きとの角度差を示す．表 5.1 より AI-9 に流入する風は吹上風である．なお風車のティルト角は -8° であり，吹上角が 8° の場合，流入風とロータ軸の方向が一致し，風はロータ面に対して垂直に流入する．風向 NW において AI-9 の流入風とロータ軸の向きの角度差が風向 WNW と比べて大きい．これは風車上流の青丸部分で剥離して再付着した流れが吹き上がっているためと考えられる．

発電量について定量的に評価するため式 (3.6) より乱流強度を考慮した風速の三乗値を算出した．乱流強度を考慮した風速の三乗値はロータ面に流入するハブ高さ風速成分から算出した．表 5.2 に風向 WNW および NW における AI-9 および流入境界面（風速 8m/s）の乱流強度を考慮した風速の三乗値を示す．表 5.2 より風向 WNW の乱流強度を考慮した風速の三乗値は風向 NW よりも高い．また風向 WNW の乱流強度を考慮した風速の三乗値は流入境界面より高いが，風向 NW の乱流強度を考慮した風速の三乗値は流入境界面より低い．

表 5.3 に式 (3.7) より算出したロータ面等価風速を示す．ロータ面等価風速は風車に流入する風のウィンドシアを考慮した風速評価を行う．表 5.3 より風向 WNW のロータ面等価風速は風向 NW より高い．そのため風向 WNW において AI-9 が風から受け取るエネルギーは風向 NW より大きいと考えられる．これは風向 WNW において AI-9 に流入する風は風車上流地形がなだらかな斜面であるのに起因して増速しているからだと考えられる．

これらより風車上流地形がなだらかな斜面の場合，風車に流入する風は縮流により増速した吹上風であり，ダウンウィンド型風車で捉えることによって効率的に発電できると考えられる．また風車上流地形が窪地の場合，風車に流入する風は剥離して減速した風が流入している．また風車に流入する風は剥離に起因した吹上風であるため，ダウンウィンド型風車で効率的に捉えることができないと考えられる．

表 5.1 風向 WNW および NW における吹上角 (AI-9)

風向	WNW	NW
吹上角 $^{\circ}$]	5.15	16.58
吹上角とロータ軸方向との差 $^{\circ}$]	-2.85	8.85

表 5.2 風向 WNW および NW における乱流強度を考慮した風速の三乗値 (AI-9)

	WNW	NW
AI-9	551.6	122.3
流入境界面（風速 8m/s）	512	

表 5.3 風向 WNW および NW におけるロータ面等価風速とハブ高さ風速の比較 (AI-9)

	WNW	NW
ロータ面等価風速[m/s]	8.11	4.81
ハブ高さ風速[m/s]	8.12	4.74

図 5.7 に AI-22 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す。図 5.7 に示すのは風向 NW を設定した解析結果である。また、色は風速の水平方向成分の大きさを示し、青色が 0m/s を意味し、赤色が 10m/s を意味している。この風向では風車上流地形が比較的なだらかな斜面であることが確認できる。図 5.7 より AI-22 に流入する風は風車上流斜面の影響で縮流により増速した風が流入していることが確認できる。

図 5.8 に AI-22 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す。図 5.8 に示すのは風向 W を設定した解析結果である。また、色は風速の水平方向成分の大きさを示し、青色が 0m/s を意味し、赤色が 10m/s を意味している。また風車上流 2.7D の位置に窪地が存在していることが確認できる。図 5.8 より赤丸で示す AI-22 上流窪地において流れが減速していることが確認できる。AI-22 に流入する風は上流地形の影響で減速した風が流入している。

図 5.9 に AI-22 上面のハブ高さの速度ベクトルを示す。流入境界面風向は NW である。また、緑色が 0m を意味し、白色が 800m を意味している。また風車上流地形は斜面であることが確認できる。図 5.9 より風車に流入する風は風車上流斜面で増速していることが風車上面図からも確認できる。

図 5.10 に AI-22 上面のハブ高さ速度ベクトルを示す。流入境界面風向は W である。また、色は緑色が 0m を意味し、白色が 800m を意味している。また風車上流地形が窪地であることが確認できる（赤丸）。図 5.10 より AI-22 に流入する風は風車上流において流れがゆがめられており、かつ減速していることが確認できる。

図 5.11 に NW から AI-22 に流入する風速の鉛直分布を示す。また図 5.11 は縦軸に高度、横軸に解析領域入口の設定風速に対する風車位置の流入風速の比を示してある。図 5.11 より AI-22 に流入する風はロータ面において 1.0 を超えており流入境界面風速より大きい。これより AI-22 に流入する風は地形の影響で増速していると考えられる。

図 5.12 に W から AI-22 に流入する風速の鉛直分布を示す。また図 5.12 は縦軸に高度、横軸に解析領域入口の設定風速に対する風車位置の流入風速の比を示してある。図 5.12 より AI-22 に流入する風はロータ面全体において 1.0 より小さく流入境界面風速より小さい。これより AI-22 に流入する風は地形の影響で減速していると考えられる。

表 5.4 に風向 NW および W におけるロータ面における吹上角と流入風の吹上角とロータ軸の向きとの角度差を示す。表 5.4 より AI-9 に流入する風は吹上風である。

発電量について定量的に評価するため式 (3.6) より乱流強度を考慮した風速の三乗値を算出した。乱流強度を考慮した風速の三乗値はロータ面に流入するハブ高さ風速成分から算出した。表 5.5 に風向 NW および W における AI-22 および流入境界面（風速 8m/s）の乱流強度を考慮した風速の三乗値を示す。表 5.4 より風向 NW の乱流強度を考慮した風速の

三乗値は風向 W よりも高い。また風向 NW の乱流強度を考慮した風速の三乗値は流入境界面より高いが、風向 W の乱流強度を考慮した風速の三乗値は流入境界面より低い。

表 5.6 に式 (3.7) より算出したロータ面等価風速を示す。表 5.6 より風向 NW のロータ面等価風速は風向 W より高い。そのため風向 NW において AI-22 が風から受け取るエネルギーは風向 NW より大きいと考えられる。これは風向 NW において AI-22 に流入する風は風車上流地形がなだらかな斜面であるのに起因して増速しているからだと考えられる。

これらより風車上流地形がなだらかな斜面の場合、風車に流入する風は縮流により増速した吹上風であり、ダウンウィンド型風車で捉えることによって効率的に発電できると考えられる。また風車上流地形が窪地の場合、風車に流入する風は剥離して減速した風が流入している。また風車に流入する風は吹上風ではあるが、剥離に起因した吹上風であるため、ダウンウィンド型風車で効率的に捉えることができないと考えられる。

表 5.4 風向 NW および W における吹上角 (AI-22)

風向	NW	W
吹上角 [°]	5.71	10.08
吹上角とロータ軸方向との差[°]	-2.29	2.08

表 5.5 風向 NW および W における乱流強度を考慮した風速の三乗値 (AI-22)

	NW	W
AI-22	661.8	173.5
流入境界面 (風速 8m/s)	512	

表 5.6 風向 NW および W におけるロータ面等価風速とハブ高さ風速の比較 (AI-22)

	NW	W
ロータ面等価風速[m/s]	8.73	5.55
ハブ高さ風速[m/s]	8.70	5.46

AI-9 および AI-22 の解析結果より風車上流地形がなだらかな斜面の場合、風車に流入する風は縮流によって増速している。また風車上流地形に窪地がある場合、風車に流入する風は窪地によって流れがゆがめられており、減速している。

5.1.2 風車上流の尾根の影響 (AT-3 の解析結果)

風向 WNW において尾根より東側の風車に関して尾根の影響について考察を行う。また本項で示す風速コンター図は瞬間場であり、1 分間 ($t \sim t+1\text{min}$) の流れの変化を評価した。

図 5.13 に風向 WNW における AT-3 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す。また、色は風速の水平方向成分の大きさを示し、青色が 0m/s を意味し、赤色が 10m/s を意味

している．なお風車上流 $6.9D$ の位置に尾根が位置している（赤丸）．図 5.13 より AT-3 流入する風は上流尾根の影響で減速している．また尾根において縮流していることが確認できる．

図 5.14 に図 5.13 の約 1 分後の風向 WNW における AT-3 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す．また、色は風速の水平方向成分の大きさを示し、青色が 0m/s を意味し、赤色が 10m/s を意味している．図 5.14 より AT-3 に流入する風は約 1 分前において尾根で縮流した高風速の風が AT-3 に流入している．

図 5.15 に 2 つの瞬間場における AT-3 に流入する風速の鉛直分布を示す．図 5.15 は縦軸に高度、横軸に解析領域入口の設定風速に対する風車位置の流入風速の比を示してある．AT-3 に流入する風は 1 分後の風速の方が高い．また、1 分後の瞬間場において AT-3 に流入する風はロータ面上部において流入境界面風速より高いため、地形の影響で増速している．一方、1 分前の瞬間場においてはロータ面全体で流入境界面風速より低いため、地形の影響で減速している．

表 5.7 に AT-3 および代表風車 AI-2 の乱流強度を示す．ここで示す乱流強度は平均場における値である．表 5.7 より AT-3 の乱流強度は地形の影響が小さい AI-2 より高い．これは尾根で剥離した風が AT-3 に流入しているからだと考えられる．これらより風車上流地形が尾根の場合、風車に流入する風は縮流による増速や剥離による減速があり、乱れが強い．

表 5.8 に式 (3.7) より算出したロータ面等価風速を示す．ロータ面等価風速は風車に流入する風のウィンドシアを考慮した風速評価を行う．表 5.8 より $t+1$ 分後の時のロータ面等価風速は t の時のロータ面等価風速より高い．これは $t+1$ 分後において AT-3 ロータ面に流入する風は風車上流尾根で縮流による高風速の風が流入しているからだと考えられる．

表 5.7 AT-3 および代表風車 AI-2 の乱流強度 (AT-3)

風車	AT-3	AI-2
乱流強度	0.24	0.12

表 5.8 AT-3 におけるロータ面等価風速とハブ高さ風速の比較 (AT-3)

	t	$t+1\text{min}$
ロータ面等価風速[m/s]	5.63	8.36
ハブ高さ風速[m/s]	5.22	8.64

5.1.3 風車上流の山の影響 (AI-12 および AI-24 における解析結果)

ウィンドファーム上流の山の影響について考察を行う．図 5.16 に風向 WNW におけるウィンドファームとウィンドファーム上流の山を示す．図 5.16 よりウィンドファーム内に流入する風は山を通過してから流入していると予測できる．これらに関して、風向 WNW, NW および W において解析を行い、山の影響に関して評価する．風向 WNW, NW および W に

においてウィンドファーム内で最上流側に位置する AI-12 および AI-24 に着目した。図 4.4 より風向 W における AI-12 の風速は風向 WNW, NW より高い。この原因として AI-12 に流入する風は風向 NW において山を通過すると考えられるが、風向 W において山を通過しないからだと考えられる。また図 4.4 より風向 NW における AI-24 の風速は風向 WNW, W より高い。この原因として AI-24 に流入する風は風向 W において山を通過すると考えられるが、風向 NW において山を通過しないからだと考えられる。これらについて解析結果から考察を行う。

図 5.17 に AI-12 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す。図 5.17 に示すのは風向 NW を設定した解析結果である。また、色は風速の水平方向成分の大きさを示し、青色が 0m/s を意味し、赤色が 10m/s を意味している。また風車上流およそ 48D の位置に山存在していることが確認できる。図 5.17 より AI-12 に流入する風は山（赤丸）において減速した風が流入している。

図 5.18 に AI-12 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す。図 5.18 に示すのは風向 W を設定した解析結果である。また、色は風速の水平方向成分の大きさを示し、青色が 0m/s を意味し、赤色が 10m/s を意味している。図 5.18 より AI-12 に流入する風は図 5.15 と比べて山（赤丸）の影響が少ない。

図 5.19 に AI-24 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す。図 5.19 に示すのは風向 WNW を設定した解析結果である。また、色は風速の水平方向成分の大きさを示し、青色が 0m/s を意味し、赤色が 10m/s を意味している。また風車上流 39D の位置に山存在していることが確認できる。図 5.19 より AI-24 に流入する風は山（赤丸）において減速した風が流入している。

図 5.20 に AI-24 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す。図 5.20 に示すのは風向 NW を設定した解析結果である。また、色は風速の水平方向成分の大きさを示し、青色が 0m/s を意味し、赤色が 10m/s を意味している。図 5.20 より AI-24 に流入する風は図 5.17 と比べて山（赤丸）の影響が少ない。

図 5.21 に AI-12 上面のハブ高さの速度ベクトルを示す。流入境界面風向は NW である。また、色は緑色が 0m を意味し、白色が 800m を意味している。風車上流地形に赤丸で示す山があることが確認できる。赤丸で示す山を越えた風は山頂部の風速より減速している。AI-12 に流入する風は山によってゆがめられた流れである。

図 5.22 に AI-12 上面のハブ高さの速度ベクトルを示す。流入境界面風向は W である。また、緑色が 0m を意味し、白色が 800m を意味している。AI-12 上流は風向 W に対して山が存在しないことが確認できる。AI-12 に流入する風は風車上流の斜面に沿った流れである。

図 5.23 に AI-24 上面のハブ高さの速度ベクトルを示す。流入境界面風向は WNW である。また、色は緑色が 0m を意味し、白色が 800m を意味している。風車上流地形は赤丸で示す山があることが確認できる。山を通過した流れは山頂部の風速より減速している。AI-24 に流入する風は山によって減速した流れが流入している。

図 5.24 に AI-24 上面のハブ高さの速度ベクトルを示す。流入境界面風向は NW である。また、色は緑色が 0m を意味し、白色が 800m を意味している。AI-24 上流は風向 NW に対

して山が存在しないことが確認できる．AI-24 に流入する風は上流の谷に沿っており赤丸で示す風車上流地形において増速している．

図 5.25 に風向 NW および W における AI-12 に流入する風速の鉛直分布を示す．また図 5.25 は縦軸に高度，横軸に解析領域入口の設定風速に対する風車位置の流入風速の比を示してある．図 5.25 より風向 W における AI-12 のロータ面に流入する風は風向 NW より高い．

図 5.26 に風向 NW および WNW における AI-24 に流入する風速の鉛直分布を示す．また図 5.26 は縦軸に高度，横軸に解析領域入口の設定風速に対する風車位置の流入風速の比を示してある．図 5.26 より風向 NW における AI-24 のロータ面に流入する風は風向 WNW より高い．これらより風車に流入する風はウィンドファーム上流の山の影響を受けていることがわかる．

表 5.9 に式 (3.7) より算出したロータ面等価風速を示す．表 5.9 より AI-12 において上流に山がない場合のロータ面等価風速は山がある場合より高い．これは風車上流に山がある時，AI-12 に流入する風は山を通過し，ゆがめられ，減速した流れであるからだと考えられる．また AI-24 に関しても上流に山がないとロータ面等価風速は山がある時より高い．これは風車上流に山がある時，AI-24 に流入する風は山を通過し，減速しているからだと考えられる．また風車上流に山がないと，AI-24 に流入する風は風車上流斜面により増速しているからだと考えられる．表 5.10 に風向 WNW，NW および W におけるウィンドファーム全号機のロータ面等価風速を示す．

表 5.9 AI-12 および AI-24 におけるロータ面等価風速とハブ高さ風速の比較

		上流に山	上流に山がない
AI-12	ロータ面等価風速[m/s]	6.45	6.90
	ハブ高さ風速[m/s]	6.49	7.33
AI-24	ロータ面等価風速[m/s]	6.02	8.65
	ハブ高さ風速[m/s]	6.04	8.65

第5章 RIAM-COMPACT による解析結果

表 5.10 風向 WNW, NW および W におけるロータ面等価風速

流入境界面 風向	AI-1	AI-2	AI-3	AI-4	AI-5
WNW	7.27	7.67	7.60	7.08	7.36
NW	8.11	7.38	7.82	6.90	6.84
W	8.66	7.10	7.23	8.67	7.21
	AI-6	AI-7	AI-8	AI-9	AI-10
WNW	6.20	6.50	6.25	8.11	6.75
NW	6.34	7.05	3.43	4.81	5.35
W	8.17	7.05	7.45	8.25	7.24
	AI-11	AI-12	AI-13	AI-14	AI-15
WNW	6.81	6.32	7.06	7.30	7.05
NW	6.01	6.45	6.36	5.77	8.49
W	7.08	6.90	7.11	6.52	6.12
	AI-16	AI-17	AI-18	AI-19	AI-20
WNW	6.24	6.61	6.16	6.41	6.32
NW	5.95	7.02	5.45	7.80	8.14
W	7.28	7.06	6.67	5.65	6.39
	AI-21	AI-22	AI-23	AI-24	AI-25
WNW	6.81	6.51	6.09	6.02	5.69
NW	8.96	8.73	8.65	8.65	7.41
W	7.35	5.55	6.19	5.49	7.23
	AI-26	AI-27	AI-28	AI-29	AI-30
WNW	5.99	6.09	5.63	5.92	6.31
NW	7.97	6.87	5.34	6.25	7.74
W	7.79	7.53	4.59	5.78	7.02
	AI-31	AI-32	AT-1	AT-2	AT-3
WNW	6.25	6.22	6.78	6.21	6.03
NW	8.11	7.68	6.77	7.29	6.18
W	6.04	4.08	6.03	6.54	6.71
	AT-4	AT-5	AT-6	AT-7	AT-8
WNW	6.71	5.85	5.52	6.23	6.43
NW	5.59	5.31	4.71	8.11	6.42
W	6.17	5.93	5.18	6.86	6.50

5.2 後流の影響

本節では、風車後流考慮版 RIAM-COMPACT から得られた解析結果をもとに、風車が近接して設置された場合に懸念すべき後流の影響に関して考察を行う。また、着目した風車は4.3節と同様に、AI-2 および AI-1、AI-17 および AI-16 である。

5.2.1 AI-2（上流側） および AI-1（下流側）

図 5.27 に WNW 方位の AI-2 のロータ面を通過した流跡線図（上面図）を示す。AI-2 と AI-1 との間の距離は $5.3D$ である。図 5.27 より AI-2 を通過した流れは下流側に位置する AI-1 に流入している。

図 5.28 に WNW 方位の AI-2 のロータ面を通過した流跡線図（側面図）を示す。図 5.28 より AI-2 を通過した流れは下流側に位置する AI-1 に流入している。

図 5.29 に AI-1 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す。また色は解析領域入口の設定風速を 1 として、これに対する風速の大きさを示してあり、青色が風速比 0 を意味し、赤色が風速比 1.0 を意味している。図 5.29 より AI-1 に流入する流れは AI-2 のロータ面を通過したため、減速している。

図 5.30 に AI-2 および AI-1 に流入する風速の鉛直分布を示す。また図 5.30 は縦軸に高度、横軸に解析領域入口の設定風速に対する風車位置の流入風速の比を示してある。下流側に位置する AI-1 のロータ面の風速は上流側の AI-2 のロータ面の風速より低い。これらより AI-1 は AI-2 の後流の影響を受けている。

表 5.11 に式 (3.7) より算出したロータ面等価風速を流入境界面風速で除した風速比を示す。表 5.11 より AI-1 の風速比は AI-2 より低い。これは AI-1 に流入する風は AI-2 の後流の影響により減速しているからだと考えられる。

これらより風向に対して風車間距離が $5.3D$ の直線上に配置された風車 2 機において、下流側に位置する風車に流入する風は上流側風車の影響により減速している。

表 5.11 AI-2 および AI-1 におけるロータ面等価風速とハブ高さ風速の比較

	AI-2	AI-1
ロータ面等価風速/流入境界面風速	0.88	0.83
ハブ高さ風速/流入境界面風速	0.89	0.83

5.2.2 AI-17（上流側） および AI-16（下流側）

図 5.31 に WNW 方位の AI-17 のロータ面を通過した流跡線図（上面図）を示す。AI-17 と AI-16 との間の距離は $3.8D$ である。図 5.31 より AI-17 を通過した流れは下流側に位置する AI-16 に流入している。

図 5.32 に WNW 方位の AI-17 のロータ面を通過した流跡線図（側面図）を示す。図 5.32

より AI-17 を通過した流れは下流側に位置する AI-16 にほぼ流入している。

図 5.33 に AI-16 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図を示す。また色は解析領域入り口の設定風速を 1 として、これに対する風速の大きさを示してあり、青色が風速比 0 を意味し、赤色が風速比 1.0 を意味している。AI-16 に流入する流れは AI-17 のロータ面を通過したため、減速している。

図 5.34 に AI-17 および AI-16 に流入する風速の鉛直分布を示す。図 5.34 は縦軸に高度、横軸に解析領域入口の設定風速に対する風車位置の流入風速の比を示してある。下流側の AI-16 のロータ面の風速は上流側の AI-17 のロータ面の風速より低い。これらより AI-16 は AI-17 の後流の影響を受けている。これらより風向に対して風車間距離が $3.8D$ の直線上に配置された風車 2 機において、下流側に位置する風車に流入する風は上流側風車の影響により減速している。

表 5.12 に式 (3.7) より算出したロータ面等価風速を流入境界面風速で除した風速比を示す。表 5.12 より AI-16 の風速比は AI-17 より低い。これは AI-16 に流入する風は AI-17 の後流の影響により減速しているからだと考えられる。図 5.30 および図 5.34 より AI-16 の受ける後流の影響は AI-1 の受ける後流の影響より大きい。これは AI-17 と AI-16 との風車間距離は AI-2 と AI-1 との風車間距離より大きいからだと考えられる。

表 5.12 AI-17 および AI-16 におけるロータ面等価風速とハブ高さ風速の比較

	AI-17	AI-16
ロータ面等価風速/流入境界面風速	0.90	0.82
ハブ高さ風速/流入境界面風速	0.91	0.82

表 5.10 より風向 WNW において AI-1 のロータ面等価風速は AI-2 より低い。また AI-1 のロータ面等価風速に対して AI-2 のロータ面等価風速で除した風速比は 0.95 である。それに対して 5.2.1 項において AI-1 は AI-2 の後流を受けていると考えられ、AI-1 のロータ面等価風速に対して AI-2 のロータ面等価風速で除した風速比は 0.94 である。後流考慮の解析結果における風速比は地形のみの解析結果よりも低いことから AI-1 は AI-2 の後流の影響を受けていると考えられる。これらより AI-1 に流入する風速は地形および後流の影響を受けて AI-2 よりも低いと考えられる。また表 5.10 より風向 WNW において AI-16 のロータ面等価風速は AI-17 より低い。また AI-16 のロータ面等価風速に対して AI-17 のロータ面等価風速で除した風速比は 0.94 である。それに対して 5.2.1 項において AI-16 は AI-17 の後流を受けていると考えられ、AI-16 のロータ面等価風速に対して AI-17 のロータ面等価風速で除した風速比は 0.91 である。後流考慮の解析結果における風速比は地形のみの解析結果よりも低いことから AI-16 は AI-17 の後流の影響を受けていると考えられる。これらより AI-16 に流入する風速は地形および後流の影響を受けて AI-17 よりも低いと考えられる。今回は、風向 WNW において後流の影響が考えられる風車間距離 $5.3D$ と $3.8D$ の 2 組の風車の風速を比較した。これらから地形の影響に加えて後流の影響を受けている風車が確認できた。そのため他の風向や異なる風車に対して検証を行う必要があると考えられる。

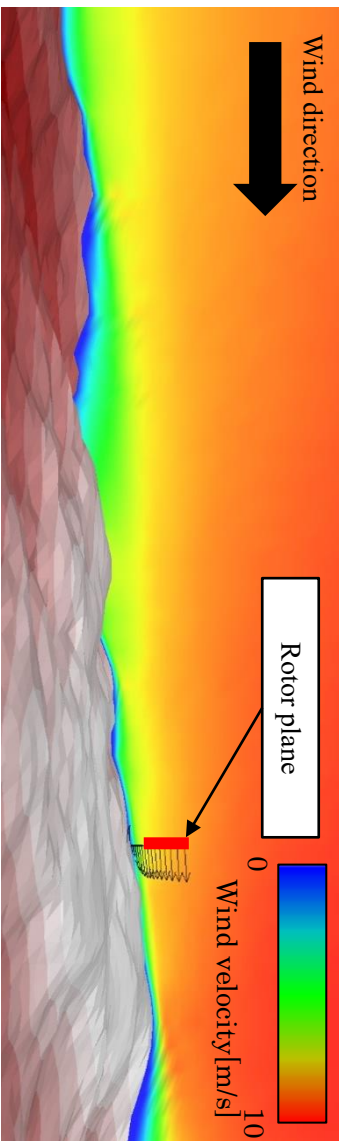


図 5.1 AI-9 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図 (風向 WNW, 風車上流地形が斜面の場合)

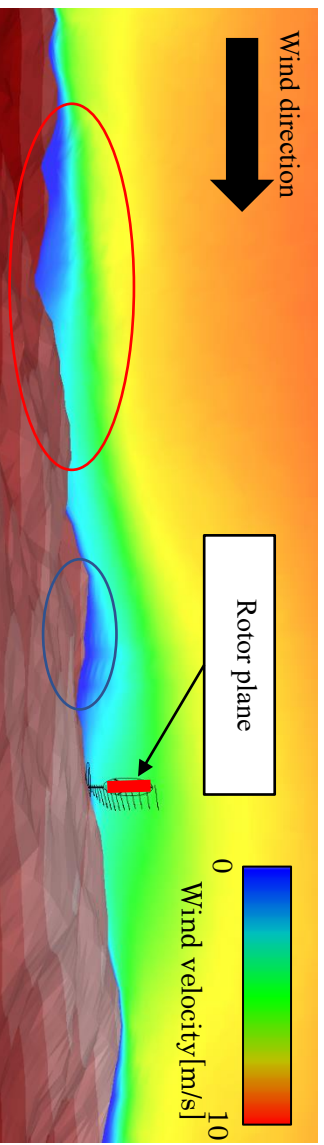


図 5.2 AI-9 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図 (風向 NW, 風車上流地形が窪地の場合)

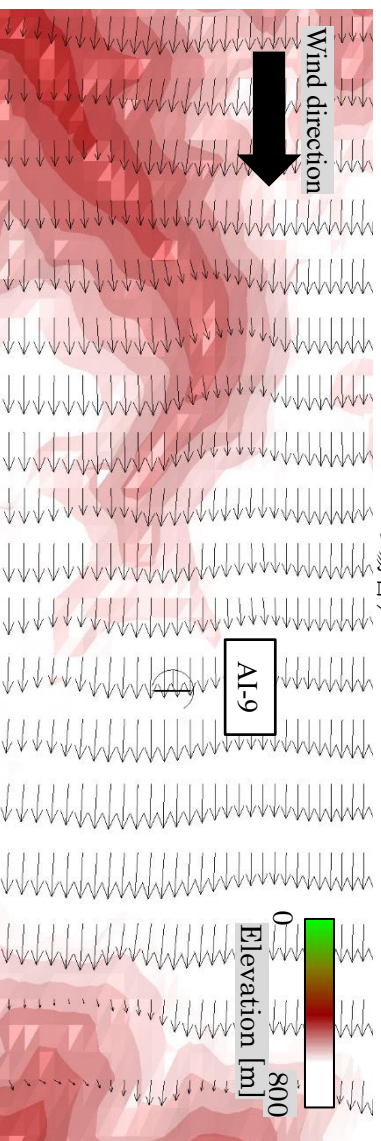


図 5.3 AI-9 上面のハズ高さの速度ベクトル (風向 WNW, 風車上流地形が斜面の場合)

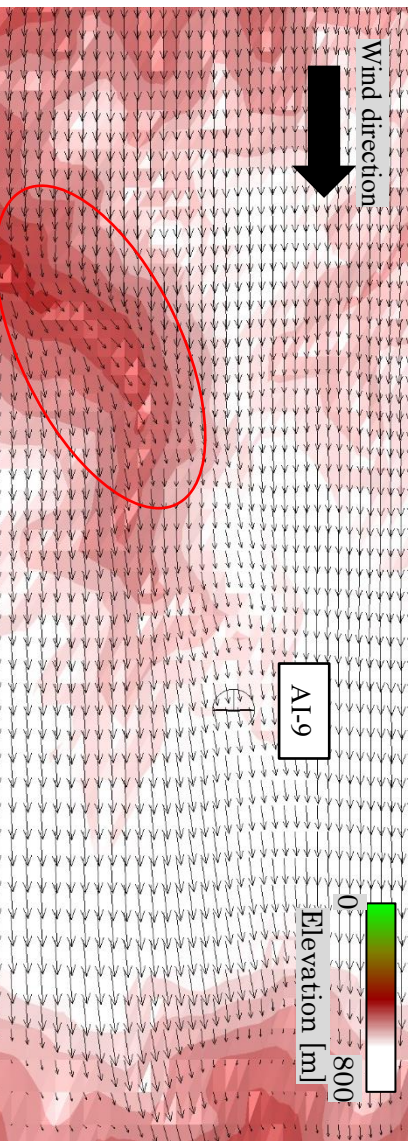


図 5.4 AI-9 上面のハズ高さの速度ベクトル (風向 NW, 風車上流地形が窪地の場合)

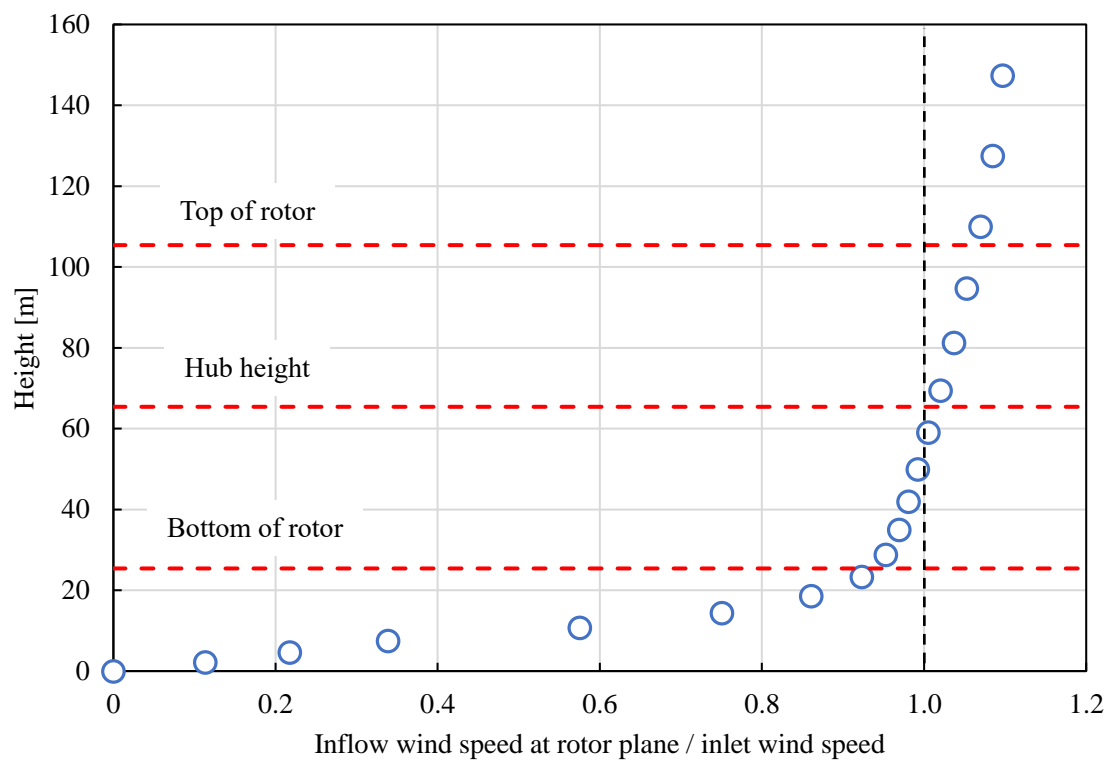


図 5.5 AI-9 の風速の鉛直分布 (風向 WNW)

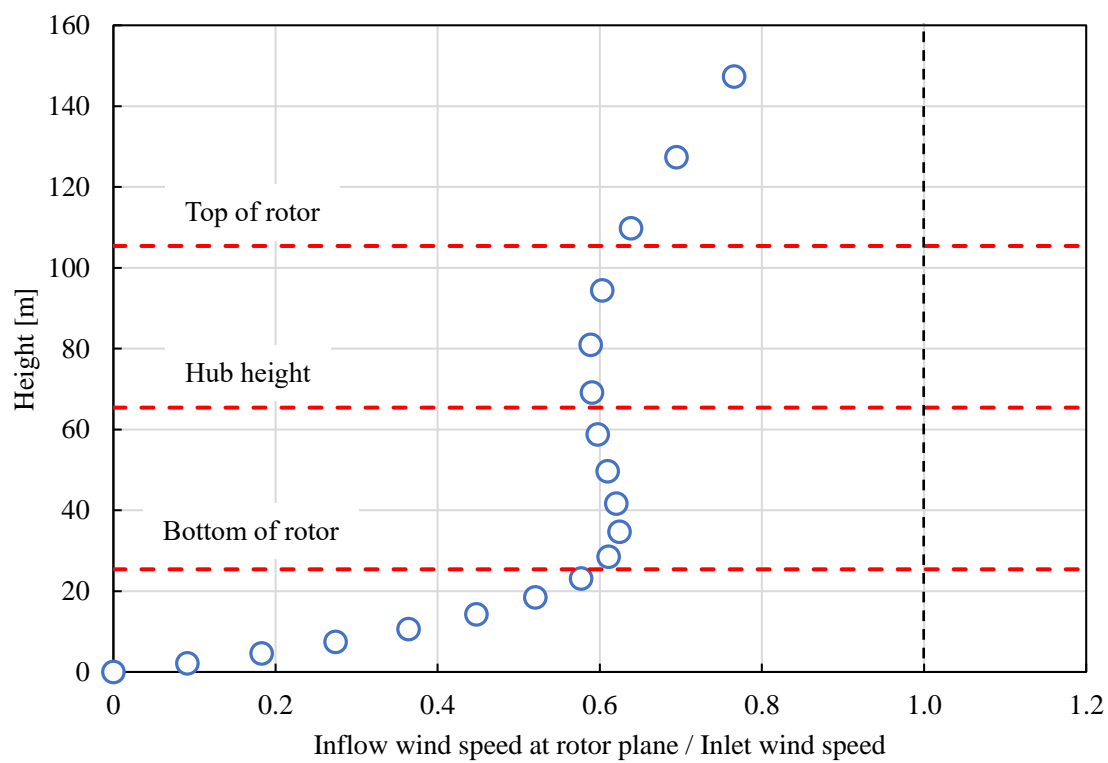


図 5.6 AI-9 の風速の鉛直分布 (風向 NW)

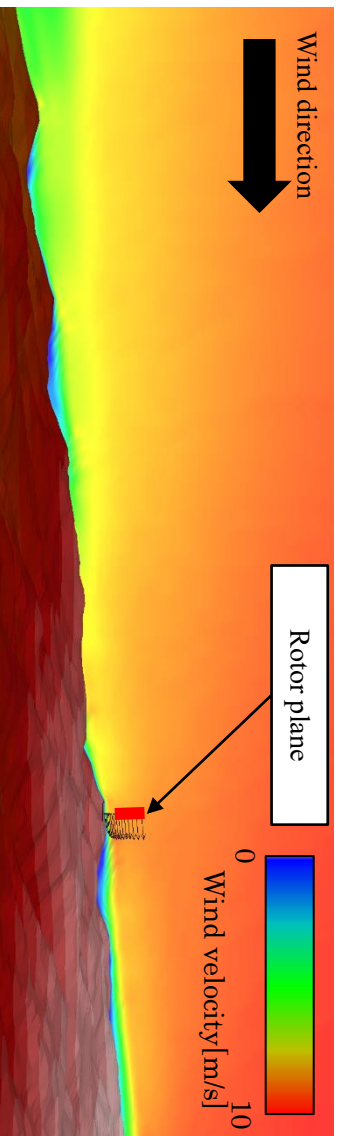


図 5.7 AI-22 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図 (風向 NW, 風車上流地形が斜面の場合)

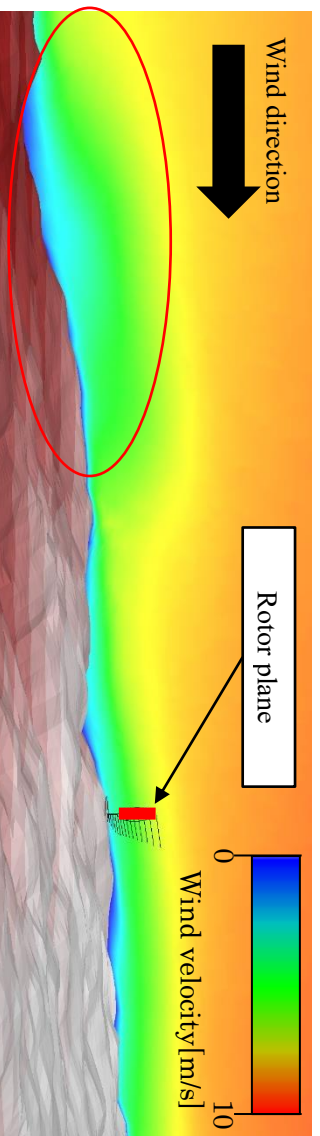


図 5.8 AI-22 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図 (風向 W, 風車上流地形が窪地の場合)

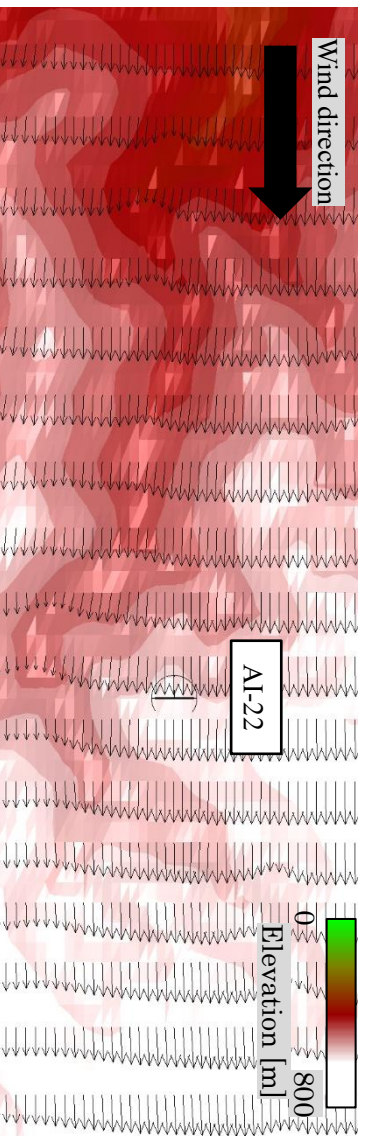


図 5.9 AI-22 上面のハズ高さの速度ベクトル (風向 NW, 風車上流地形が斜面の場合)

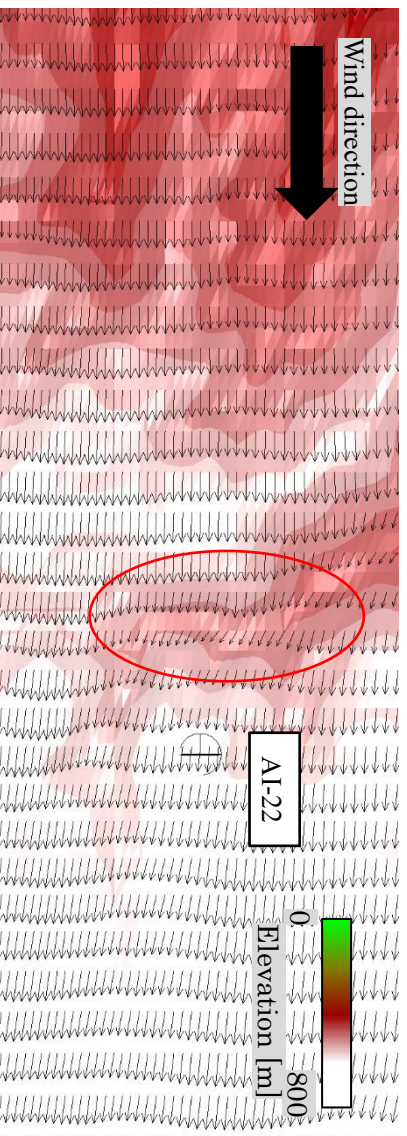


図 5.10 AI-22 上面のハズ高さの速度ベクトル (風向 W, 風車上流地形が窪地の場合)

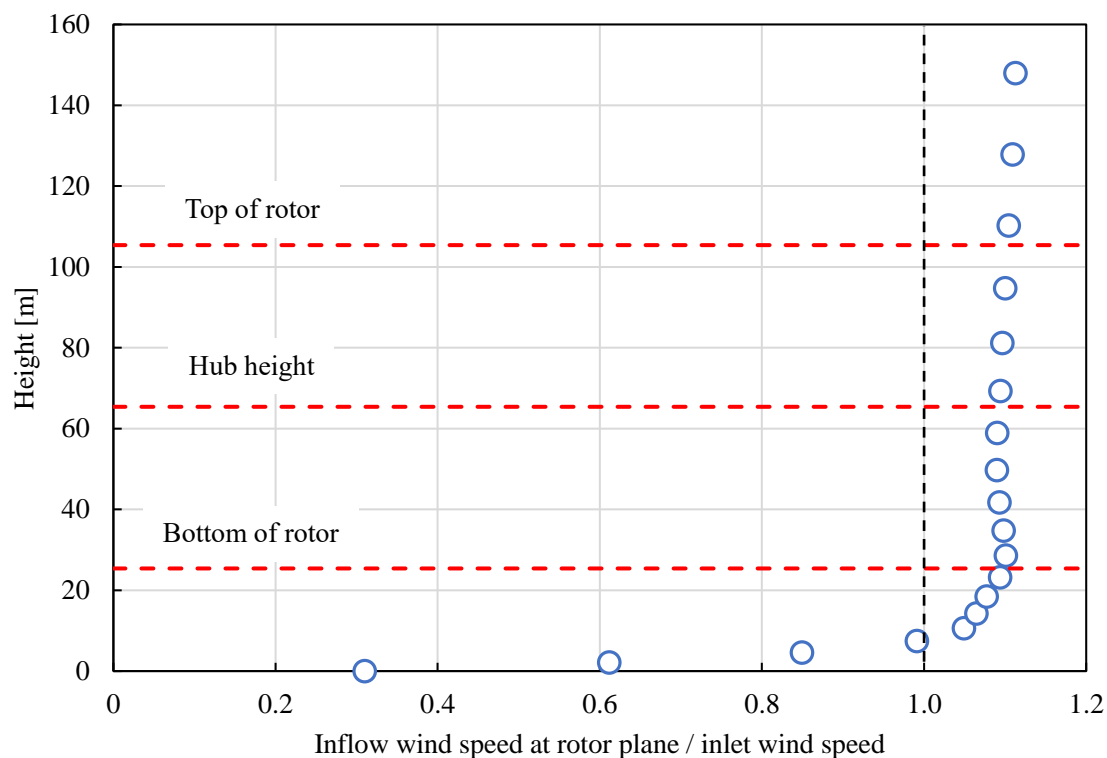


図 5.11 AI-22 の風速の鉛直分布 (風向 NW)

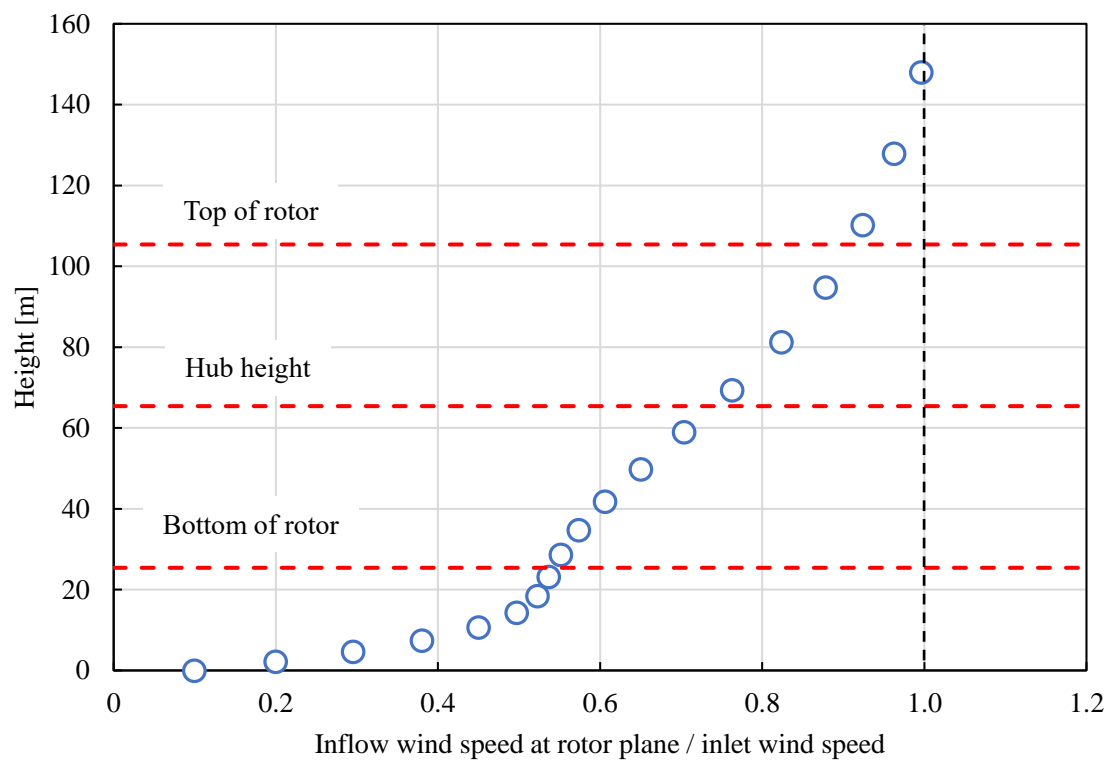


図 5.12 AI-22 の風速の鉛直分布 (風向 W)

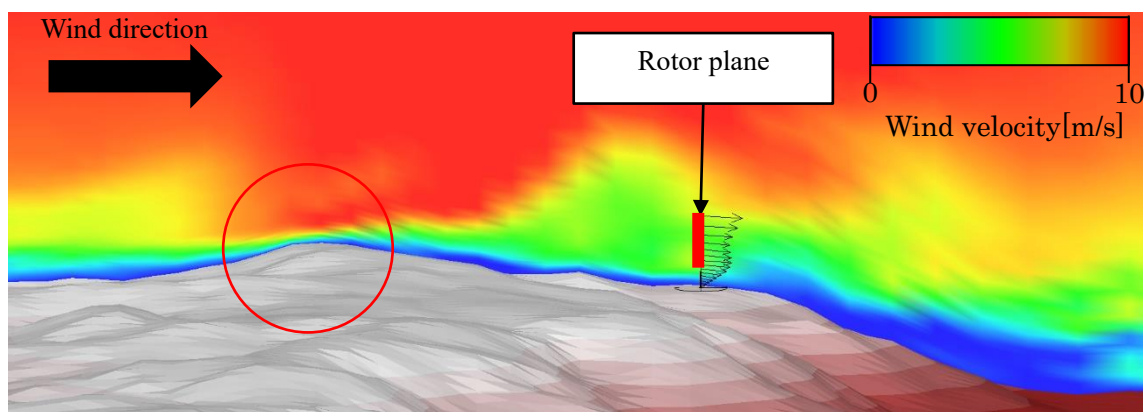


図 5.13 風向 WNW における AT-3 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図（瞬間場）

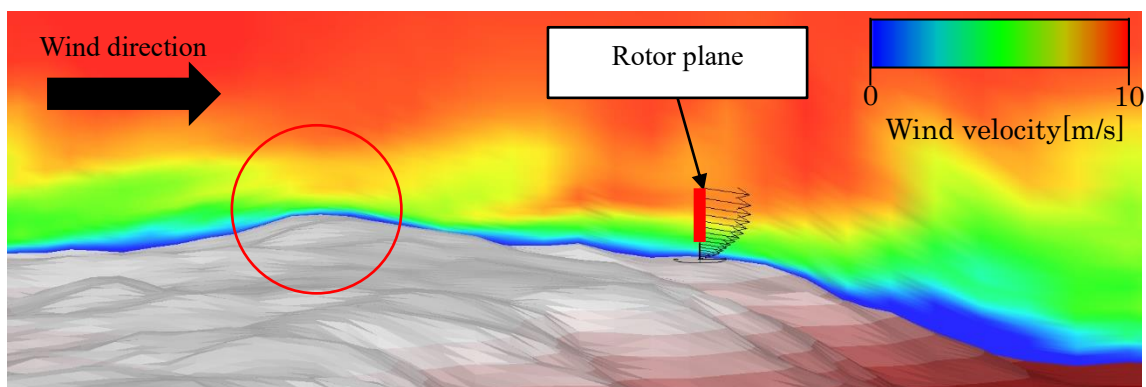


図 5.14 図 5.13 の 1 分後の風向 WNW における AT-3 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図（瞬間場）

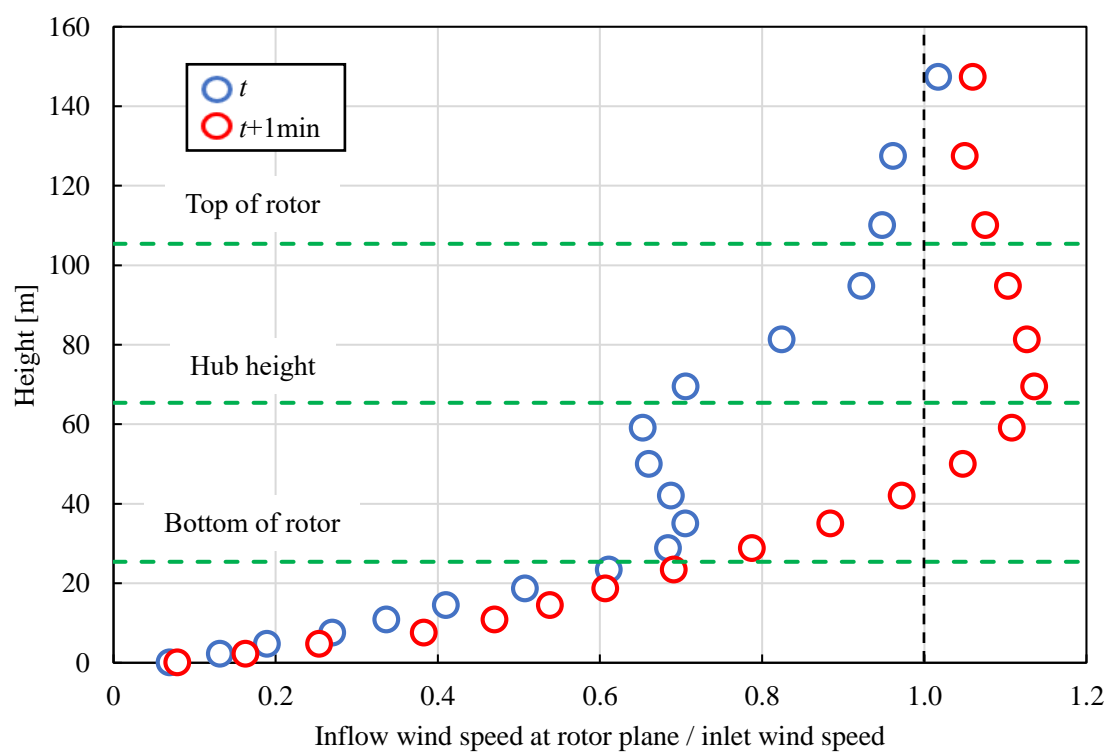


図 5.15 AT-3 の風速の鉛直分布

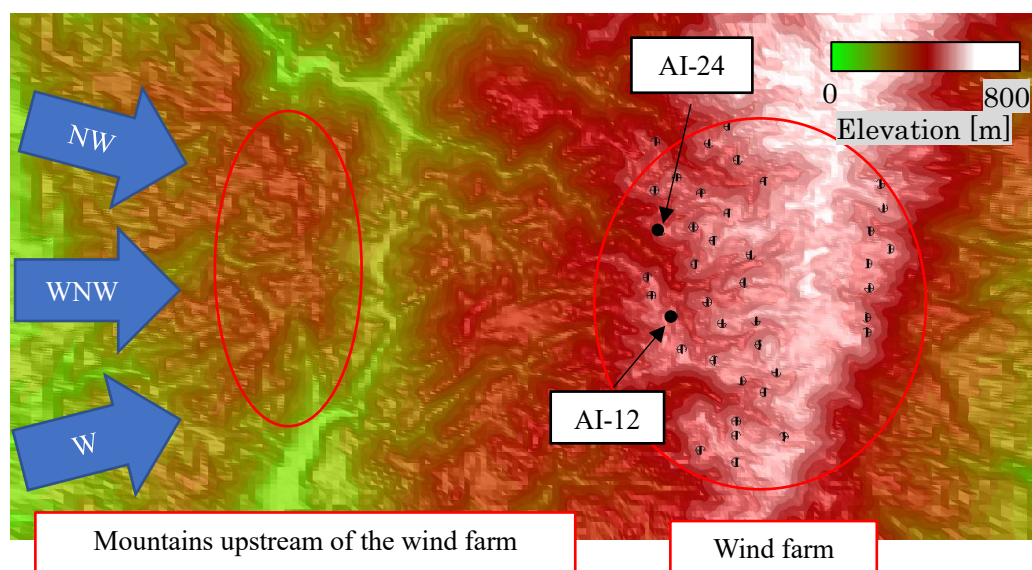


図 5.16 AI-12 および AI-24 上流の山

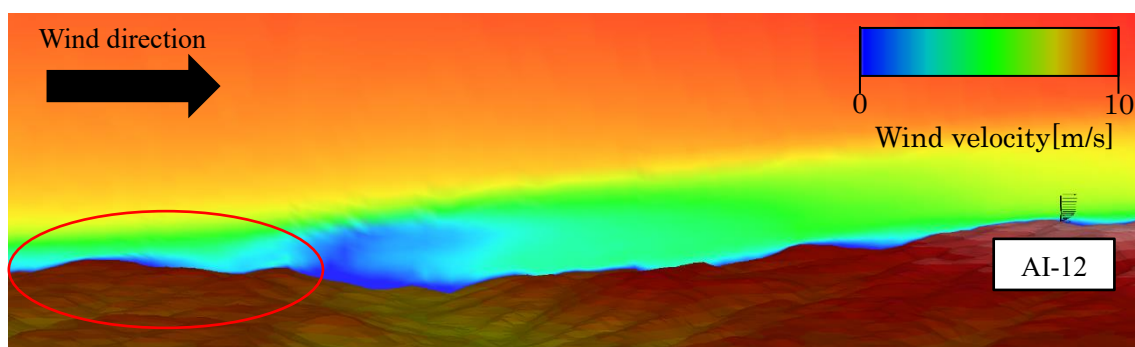


図 5.17 AI-12 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図（風向 NW，風車 upstream 地形が山の場合）

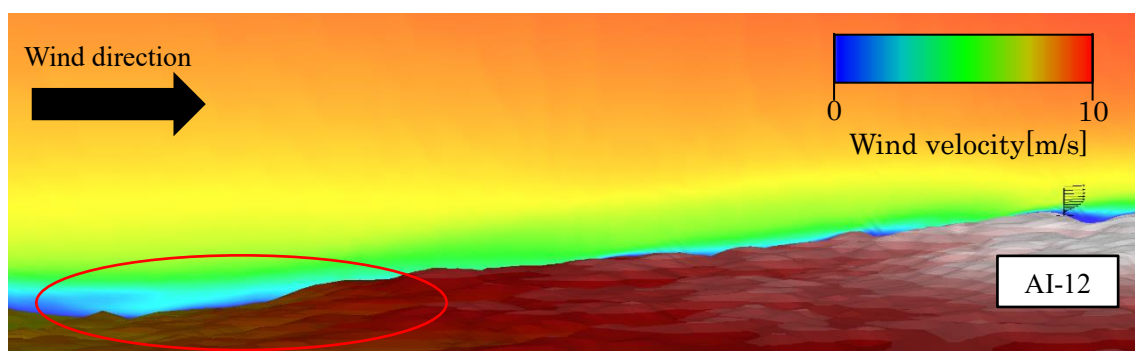


図 5.18 AI-12 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図（風向 W，風車 upstream 地形が山でない場合）

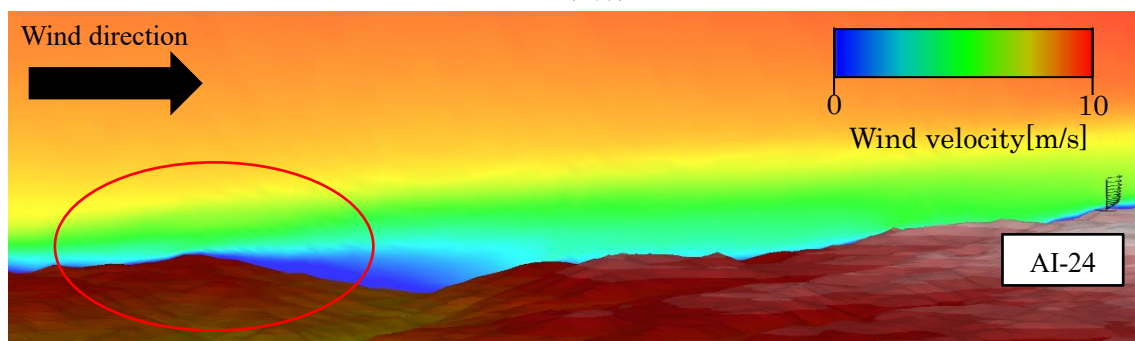


図 5.19 AI-24 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図（風向 WNW，風車 upstream 地形が山の場合）

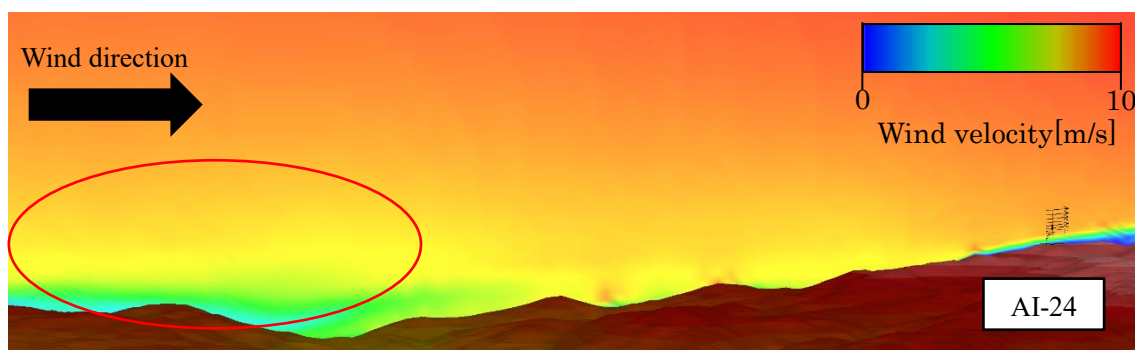


図 5.20 AI-24 の中心断面を通る鉛直面の風速コンター図（風向 NW，風車 upstream 地形が山でない場合）

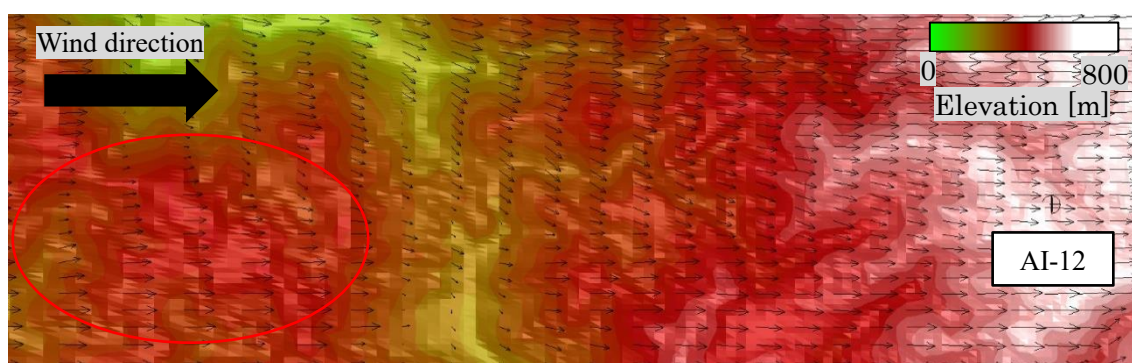


図 5.21 AI-12 上面のハブ高さの速度ベクトル（風向 NW，風車上流地形が山の場合）

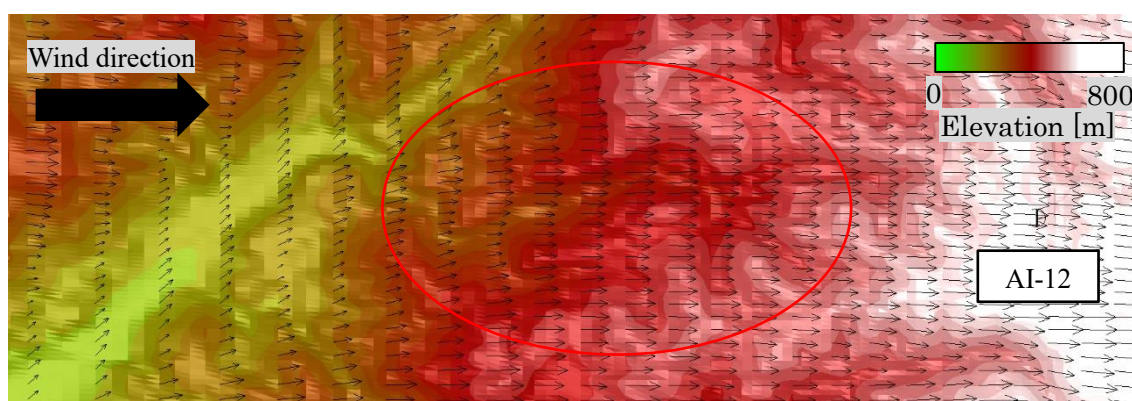


図 5.22 AI-12 上面のハブ高さの速度ベクトル（風向 W，風車上流地形が山でない場合）

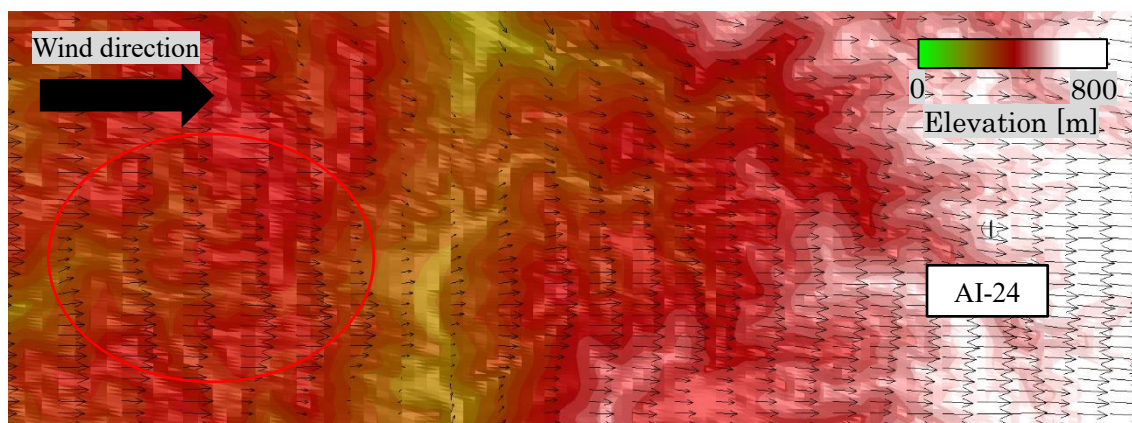


図 5.23 AI-24 上面のハブ高さの速度ベクトル（風向 WNW，風車上流地形が山の場合）

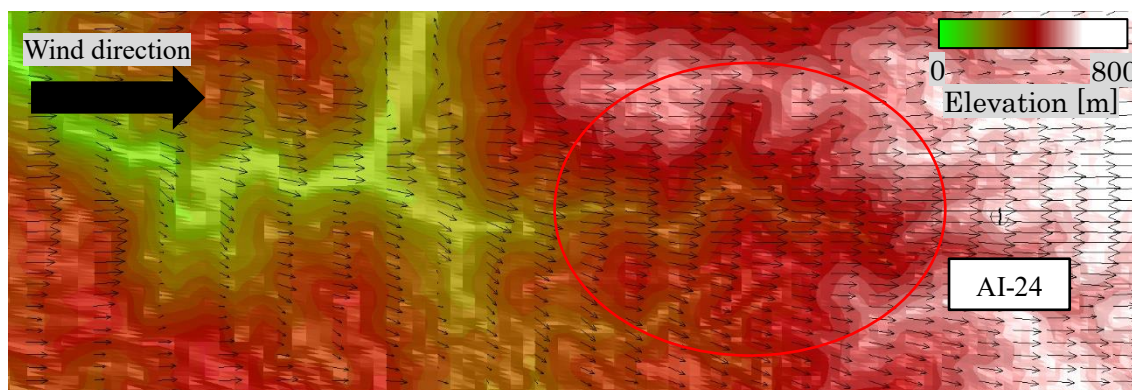


図 5.24 AI-24 上面のハブ高さの速度ベクトル（風向 NW，風車上流地形が山でない場合）

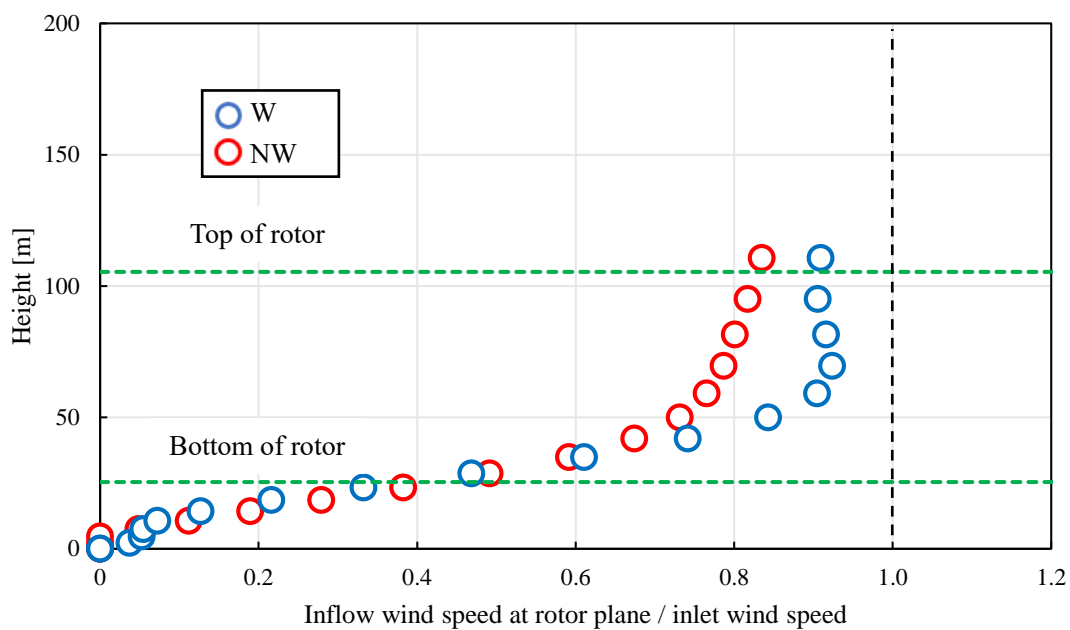


図 5.25 風向 NW および W における AI-12 の風速の鉛直分布

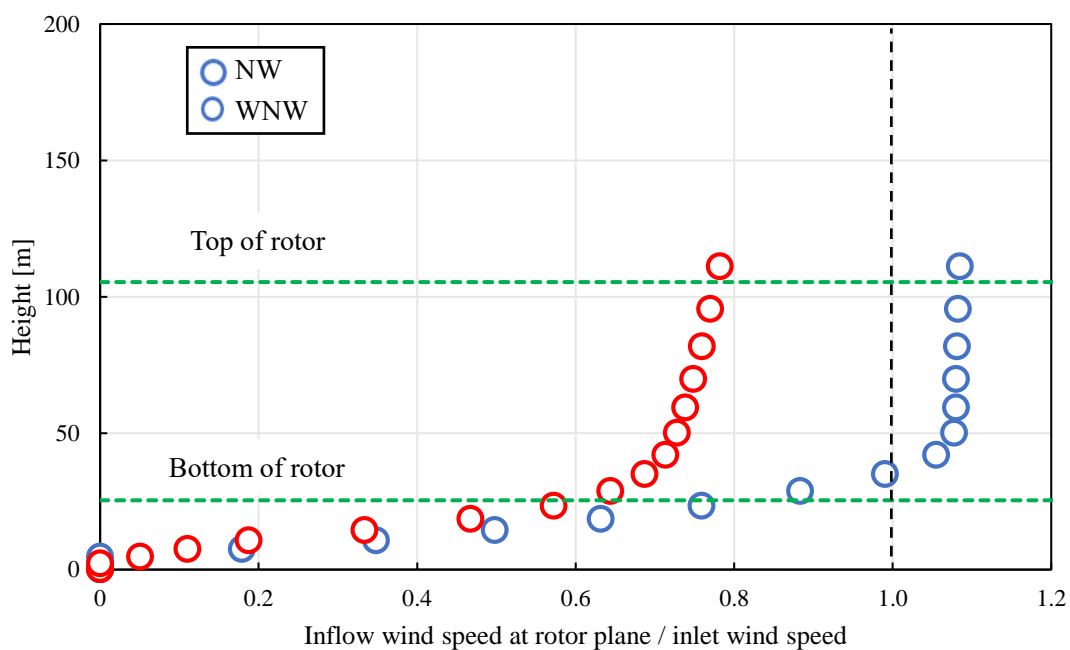


図 5.26 風向 NW および WNW における AI-24 の風速の鉛直分布

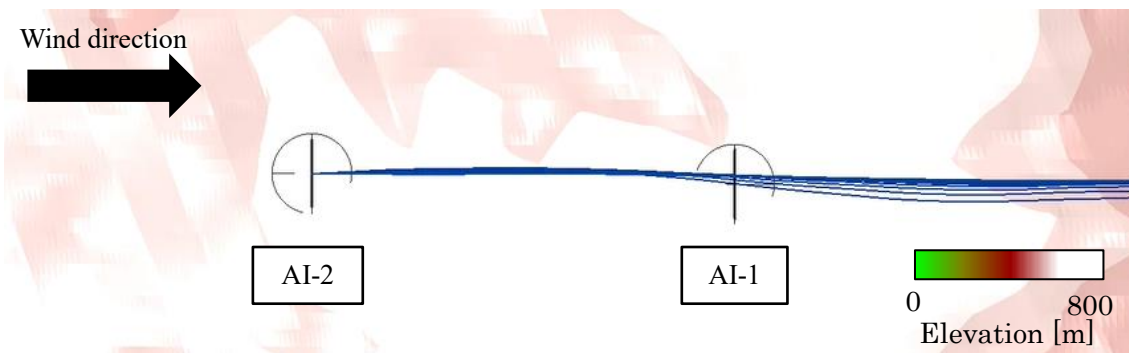


図 5.27 WNW 方位の AI-2 のロータ面を通過した流跡線図（上面図）

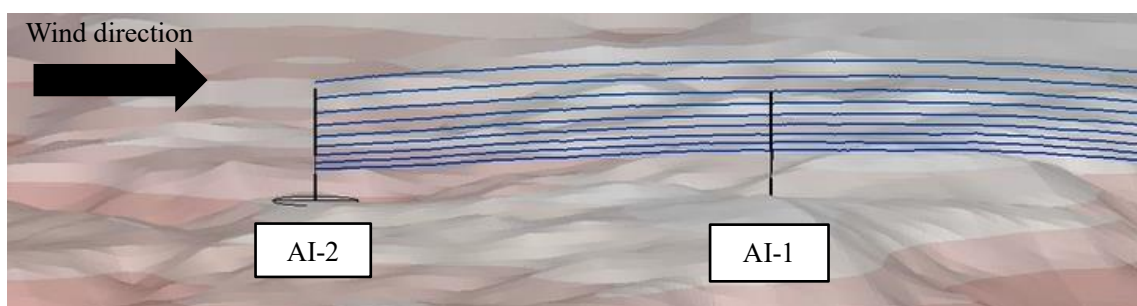


図 5.28 WNW 方位の AI-2 のロータ面を通過した流跡線図（側面図）

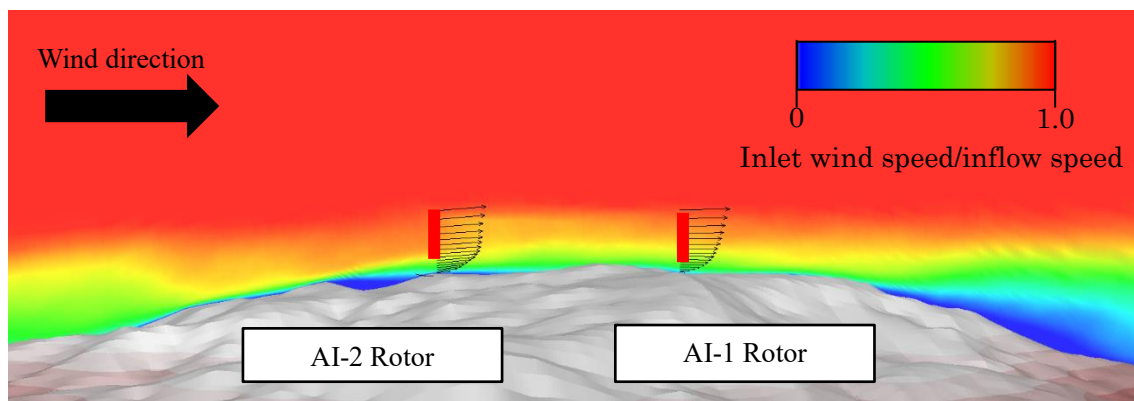


図 5.29 AI-1 中心断面を通る鉛直面の風速コンター図（風向 WNW）

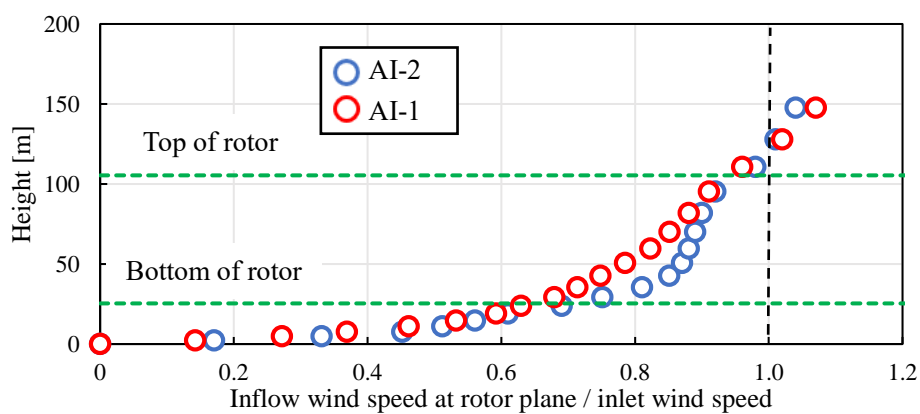


図 5.30 AI-2 および AI-1 の風速の鉛直分布（風向 WNW）

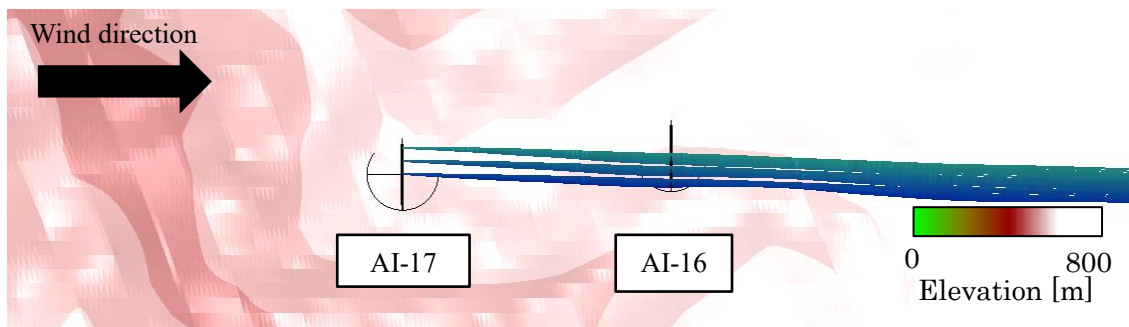


図 5.31 WNW 方位の AI-17 のロータ面を通過した流跡線図（上面図）

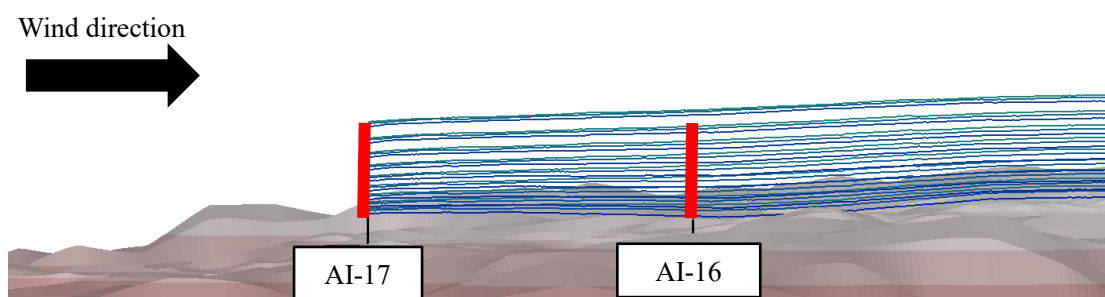


図 5.32 WNW 方位の AI-17 のロータ面を通過した流跡線図（側面図）

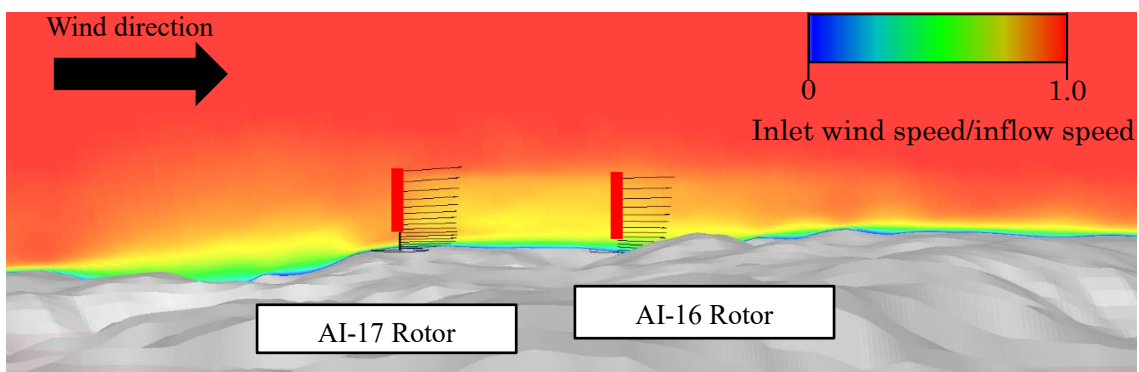


図 5.33 AI-16 中心断面を通る鉛直面の風速コンター図（風向 WNW）

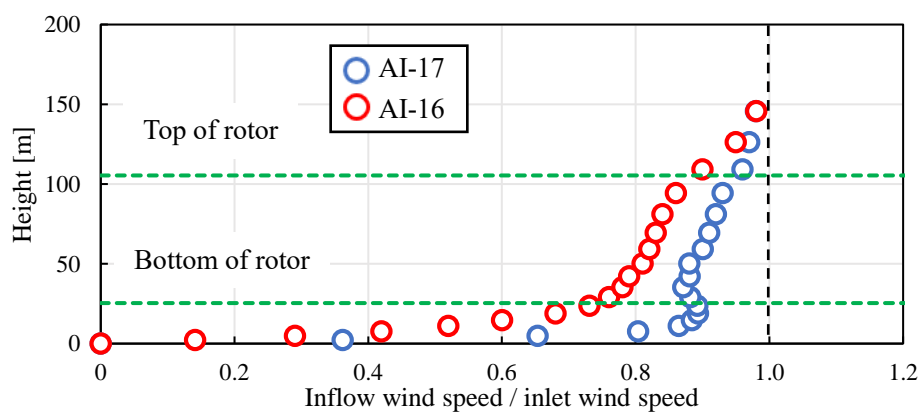


図 5.34 AI-17 および AI-16 の風速の鉛直分布（風向 WNW）

第6章 OpenFOAMによる風速計周りの流れ場解析

本章では、吹上風や吹下風がナセル上部に取り付けられている風速計に与える影響の考察を行う。風速計の流入角に対する特性を調査するため、風洞内で傾き角をつけて風速計を設置した。また、風速計が読み取った風速と風洞内に取り付けられているピトー管が読み取った風速を比較することで、吹上風や吹下風により三杯式風速計が読み取る風速の誤差を検証および考察した。

また OpenFOAM による解析からナセル風速計周りの設置物の影響について検証および考察した。風速計傾斜試験および OpenFOAM による解析結果から実測データの風速補正を行った。

6.1 ナセル風速計基本性能試験

本節では、ナセルに搭載されている三杯式風速計の基本性能を検証するために、風速計を風洞内に垂直（傾き角 0° ）に設置し、風洞内のピトー管が読み取った風速と三杯式風速計が読み取った風速を比較した。図 6.1 に三杯式風速計の上面図を示す。

図 6.2 に実験結果を示す。実験は風洞風速 6,8,12 m/s で行った。図は縦軸に三杯式風速計が読み取った風速を、横軸はピトー管が読み取った風速を示している。また近似直線式は $y = 0.9988x$ で表される。これからナセル風速計は風洞風速とほぼ等しい風速を読みとっており、誤差が約 0.1%と小さい。

6.2 風速計傾斜試験

本節では、風速計を風洞内に傾けて設置し、実験を行った結果について考察を行う。図 6.3 に流入角 $-20^\circ \sim 20^\circ$ の実験結果を示す。なお風洞で設定した風速は 6,8,12 m/s である。図は縦軸に風洞内のピトー管風速を三杯式風速計が読み取った風速で割った風速比を、横軸は流入角を示している。図 6.3 より流入角が変化すると三杯式風速計が示す値も変化する。とくに吹下風の $-10^\circ \sim 0^\circ$ の範囲において風速による依存性が大きい。

6.3 吹上風および吹下風における風速計位置の風速

本節では、OpenFOAM による吹上風および吹下風における風速計まわりの設置物の影響について考察を行う。ダウンウィンド型風車におけるナセル上風速計の測定値はロータスラストによる影響などによりロータ面に流入する風速より低く示すことが知られている⁽¹⁴⁾。図 6.4 に風車上流 2.5D における吹上角 $-10^\circ \sim 10^\circ$ に対するナセル風速計位置の風速を示す。図は横軸に吹上角を、縦軸に風速計位置における風速を示す。表 6.1 に風車上流 2.5D における吹上角 $-10^\circ \sim 10^\circ$ での風速計位置の風速および流入角を示す。図 6.4 より風速計位置で

は吹上風、吹下風によらず、風車前方の流入風速 (8m/s) より風速が低い。これはナセル風速計後方にあるロータや設置物の影響であると考えられる。また吹下風の場合、ナセル風速計位置の風速は吹上風の場合より低い。この原因として吹上風ではナセル風速計後方にロータのみが存在するのに対して、吹下風ではナセル風速計後方にロータに加えて障害物があるためと考えられる。これらについて風速分布および流線から考察を行う。

図 6.5 に吹上角 -10° の場合の風速分布および流線を示す。図は風速計位置での断面図を示す。図 6.5 よりナセル風速計を通過した流れは後方設置物近傍でゆがめられている。ナセル風速計に流入する流れは後方設置物の影響で風車前方の流入風速 (8m/s) より風速が低いと考えられる。

図 6.6 に吹上角 10° の場合の風速分布および流線を示す。図 6.6 よりナセル風速計を通過した流れは後方設置物に流入していない。そのため吹上風において後方設置物の影響はないと考えられる。

これらから吹下風の場合、ナセル風速計位置の風速はナセル風速計を通過する流れの後方に障害物があるため、吹上風の場合と比べて低いと考えられる。

表 6.1 風車上流 $2.5D$ における吹上角 $-10^\circ \sim 10^\circ$ での風速計位置の風速および流入角

風車上流 $2.5D$ における吹上角 $[\circ]$	風速 [m/s]	流入角 $[\circ]$
-10	7.04	-5.77
-5	7.05	-1.21
0	7.19	3.90
5	7.44	7.08
10	7.44	12.34

6.4 風速補正

本節では、風速計傾斜試験および OpenFOAM による解析結果から実測のナセル風速データの補正について示す。ナセル上設置物の影響に関する補正係数およびナセル風速計への流入角の影響に関する補正係数を実測データに乗ずることによって風速補正を行った。

図 6.7 に吹上角の定義を示す。図 6.8 に OpenFOAM による風速計位置の風速および流入角の定義を示す。図 6.9 に補正係数 α 、 β の算出手順を示す。以下にその算出手順を示す。

- (1). OpenFOAM により算出した風車上流 $2.5D$ での吹上角 $\theta_{\text{upwash}} = -10^\circ \sim +10^\circ$ に対するナセル風速計位置の風速 V_1 (表 6.1) を用いて、風車への流入風速 $V=8[\text{m/s}]$ をナセル風速計位置の風速 V_1 で除すことで風車上流 $2.5D$ での吹上角に対するナセル風速の補正係数 $\alpha = V/V_1$ を算出する (図 6.9 中①)。
- (2). RIAM-COMPACT により算出した各風車の上流 $2.5D$ の吹上角 θ_{upwash} より各風車におけるナセル風速の補正係数 α を算出する (図 6.9 中②)。
- (3). ナセル風速計の実測データに風速の補正係数 α を乗じて、風車上流 $2.5D$ の流入風速

V を算出する.

- (4). ナセル風速計への流入角の影響に関する補正係数は, 風速計傾斜実験で測定した各流入角 θ_{inflow} における三杯型風速計の測定結果より, 風洞風速 V_1 を三杯型風速計の測定値 V_2 で除すことで各流入角における補正係数 $\beta = V_1/V_2$ を算出する(図 6.9 中③).
- (5). OpenFOAM により算出した風車上流 $2.5D$ での吹上角 θ_{upwash} に対するナセル風速計位置の流入角 θ_{inflow} より各吹上角における風速の補正係数 β を算出する(図 6.9 中④).
- (6). RIAM-COMPACT により算出した各風車の上流 $2.5D$ の吹上角 θ_{upwash} より各風車における風速の補正係数 β を算出する(図 6.9 中⑤). これらの二つの補正係数を実測データに乗ずることで風速補正を行う.

6.5 風速階級別発電量

本節では, 風速補正前後の風向 WNW における発電量を風速階級別に比較する. ただし, 台風や暴風時等のフェザリング中のデータを除外するため, ピッチ角 85° 以下のデータのみを抽出した. 図 6.10 に代表風向 WNW における尾根より西側風車および尾根より東側風車の風速階級別発電量を示す. 図は, 縦軸に発電量, 横軸に風速階級を示す. ここで, 本ウィンドファームの主風向 WNW の場合, 尾根より西側風車は吹上風, 尾根より東側風車は吹下風を受ける. 図 6.10 より, 尾根より西側風車の風速階級別発電量は尾根より東側風車の発電量より低い. 本来, ダウンウィンド型風車は吹上風に対して優位性を有しており, 発電量の増加が予想される. しかしながら, 本サイトでは吹下風を多く受ける風車の発電量が, 吹上風を多く受ける風車を上回る結果となった. そこで 6.4 節に従い風速補正を行い, 吹上風および吹下風における発電量を比較した.

図 6.11 に補正係数 α , β による風速補正後の代表風向 WNW における風速階級別発電量を示す. 図 6.11 より, 尾根より西側風車の発電量は東側の風車よりやや低い. 図 6.10 と比較して西側風車と東側風車の発電量の差は補正後の方が小さい. 代表風向 WNW において尾根より東側風車は吹下風を受ける. そのため, 吹下風を受ける場合, 風速計の測定値は吹上風を受ける場合より観測誤差が大きいと考えられる.

図 6.12 に風速補正後の代表風向 WNW におけるロータ面等価風速による風速階級別発電量を示す. なお, ロータ面等価風速は実測によるハブ高さ風速と RIAM-COMPACT で算出した風速の鉛直分布から算出した. 図 6.12 より, 尾根より西側風車の発電量は東側の風車よりやや低い. 図 6.10 と比較して西側風車と東側風車の発電量の差は補正後の方が小さい. これは吹下風を受ける場合, 風速計の測定値は吹上風を受ける場合より観測誤差が大きい. 吹上風および吹下風における風速階級別発電量の差は補正前と比べて小さいと考えられる. ロータ面等価風速による発電量においても図 6.11 と同様の傾向を示しているが, 図 6.12 における風速階級別発電量は図 6.11 より高く, 図 6.12 における西側と東側の風車の発電量の差は図 6.11 より大きい. これは西側の風車に流入する風は複雑地形によりウィンドシアが大きくロータ面等価風速はハブ高さ風速よりやや下回っているためだと考えられ

る.

図 6.13 に補正係数 α , β による風速補正後の代表風向 WNW における風速階級別発電量とナセル風速計の観測誤差を考慮した公称値による風速階級別発電量を示す. ナセル風速計の観測誤差を考慮した公称値による風速階級別発電量に関しては付録 B に算出方法を示す. 図 6.13 より定格風速以下において尾根より西側の風車および尾根より東側風車の発電量は公称値の発電量より高い. これは吹上・吹下の風況下において水平風の場合より発電量が高くなると考えられる.

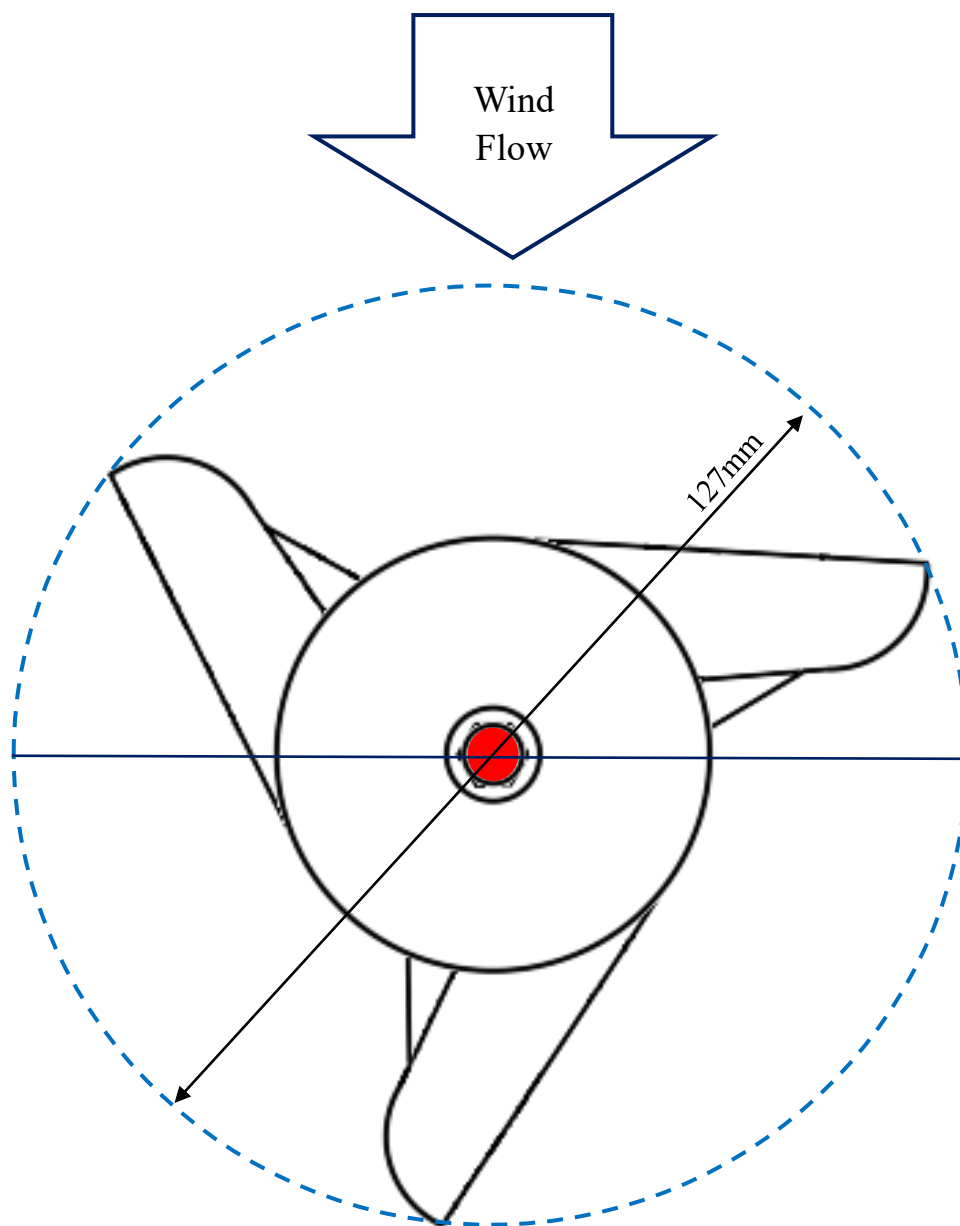


図 6.1 三杯式風速計上面図

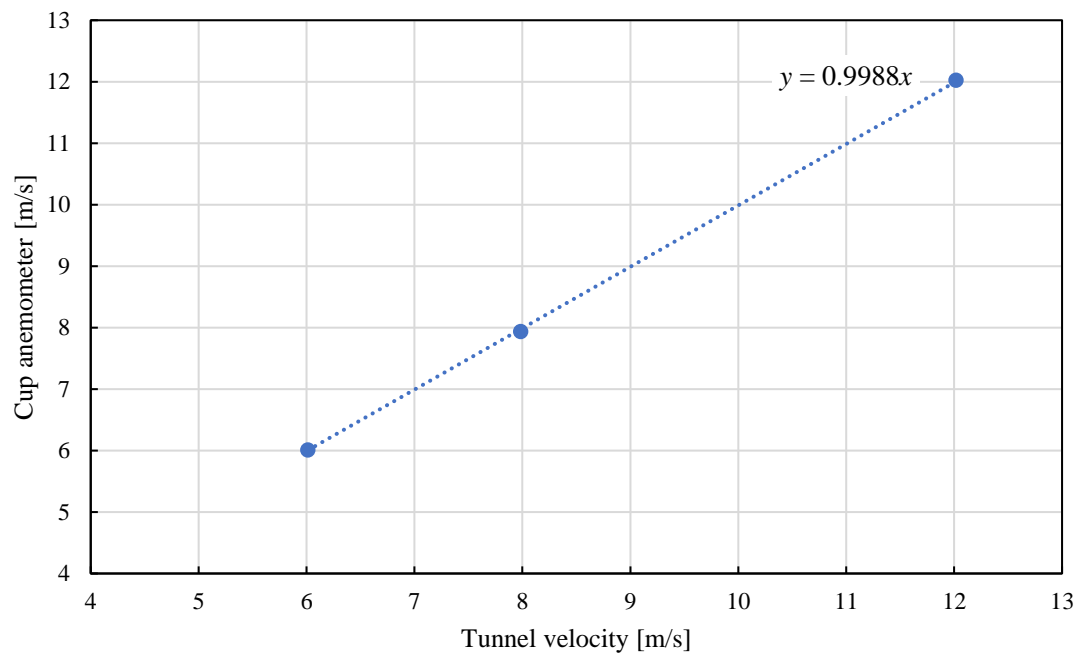


図 6.2 基本性能試験結果

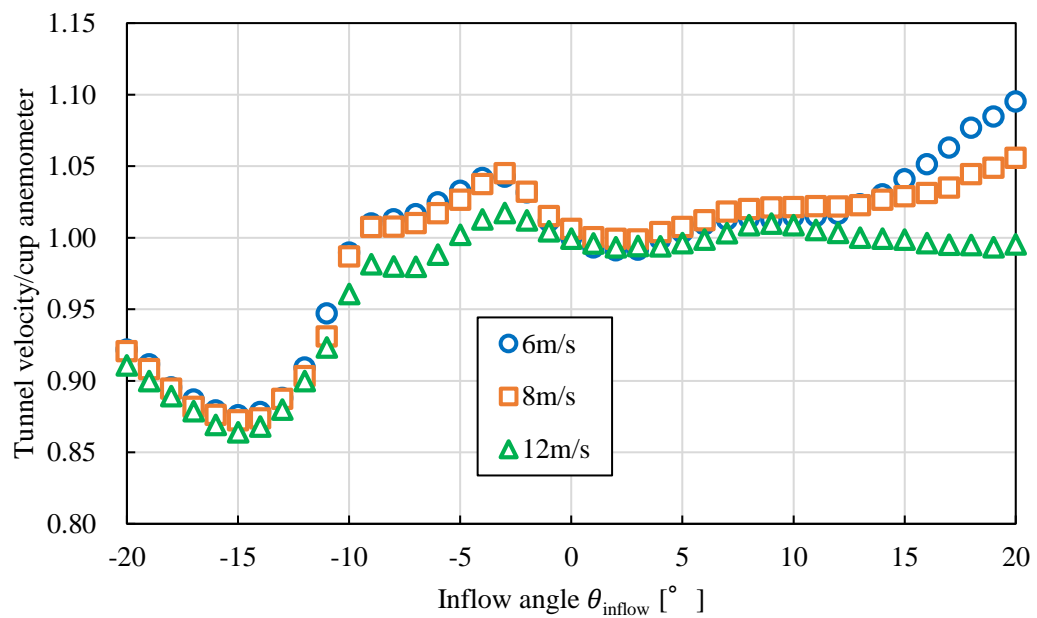


図 6.3 風速計傾斜試験結果

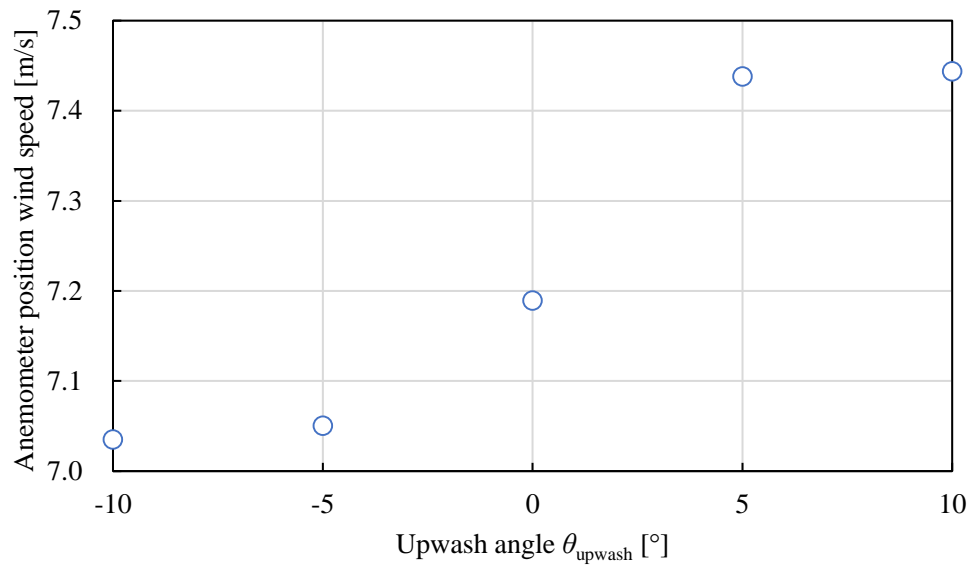


図 6.4 風車 upstream 2.5D の吹上角 $-10^\circ \sim 10^\circ$ に対する風速計位置の風速

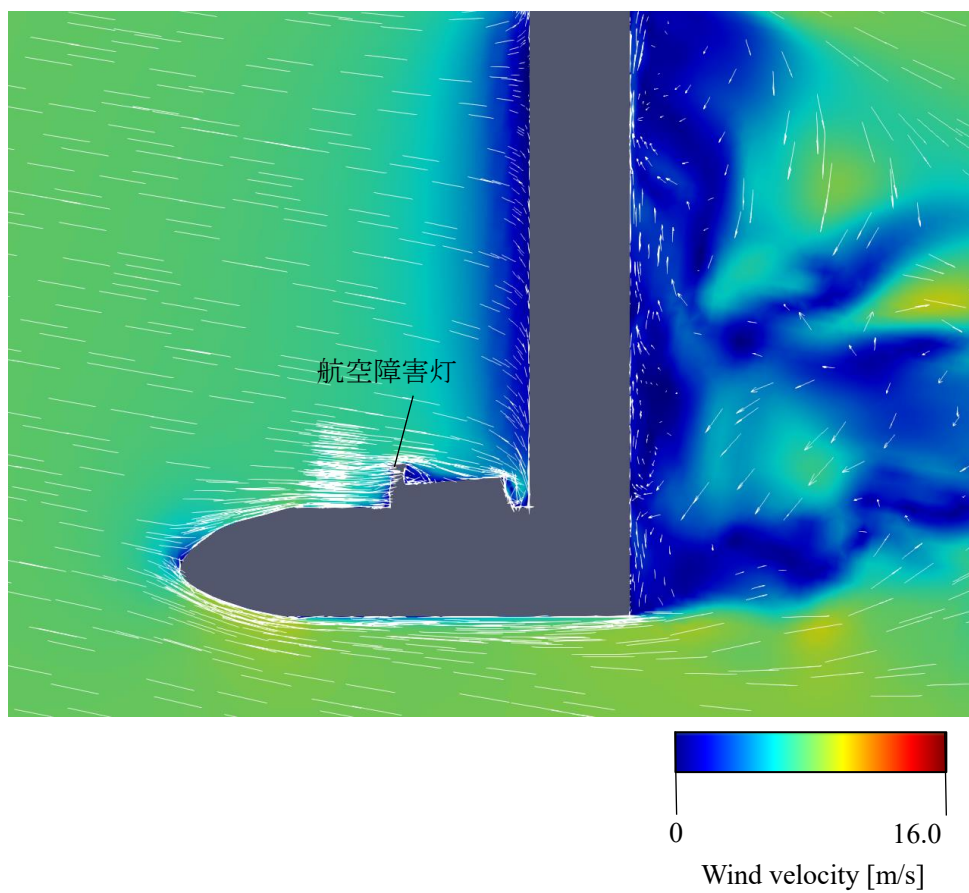


図 6.5 風車 upstream 2.5D の吹上角 -10° の場合の風速分布および流線（流入風速 8m/s）

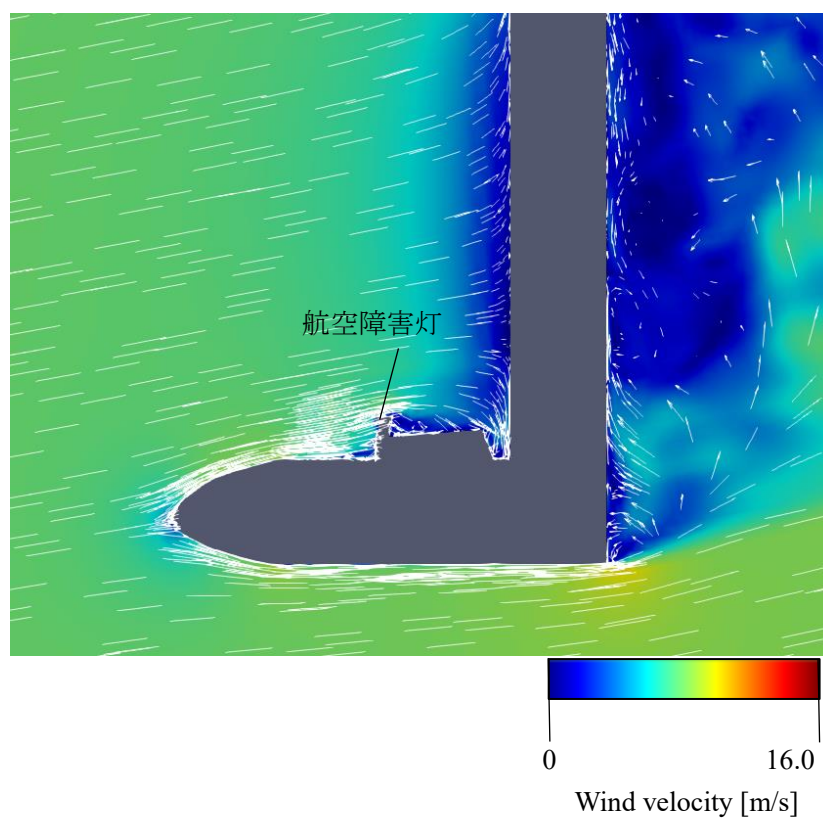


図 6.6 風車上流 2.5D の吹上角 10° の場合の風速分布および流線（流入風速 8m/s）

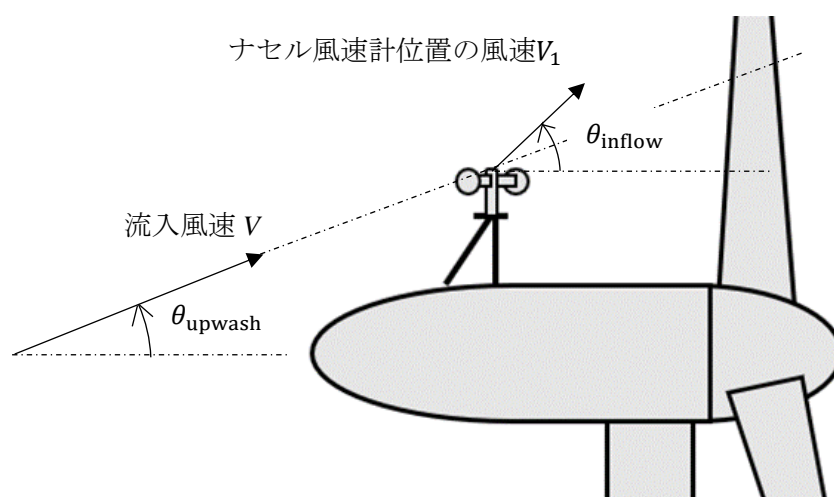


図 6.7 吹上角の定義

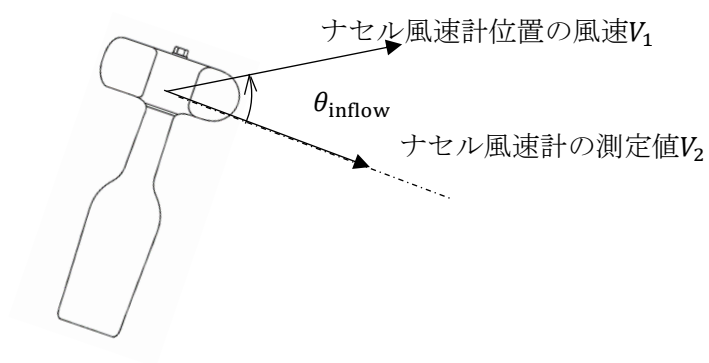
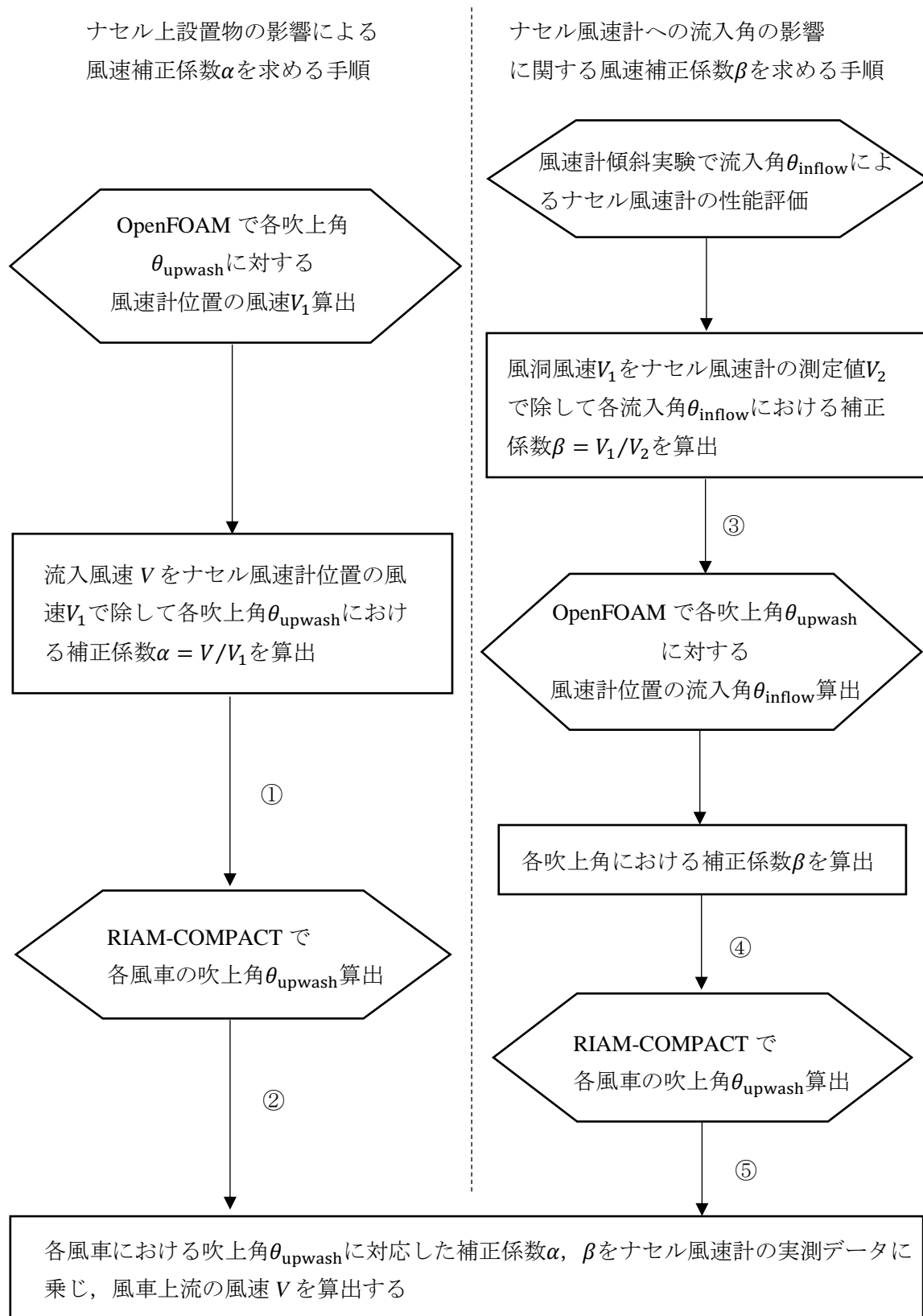


図 6.8 風速計傾斜実験における流入角の定義

図 6.9 風速補正係数 α , β の算出手順

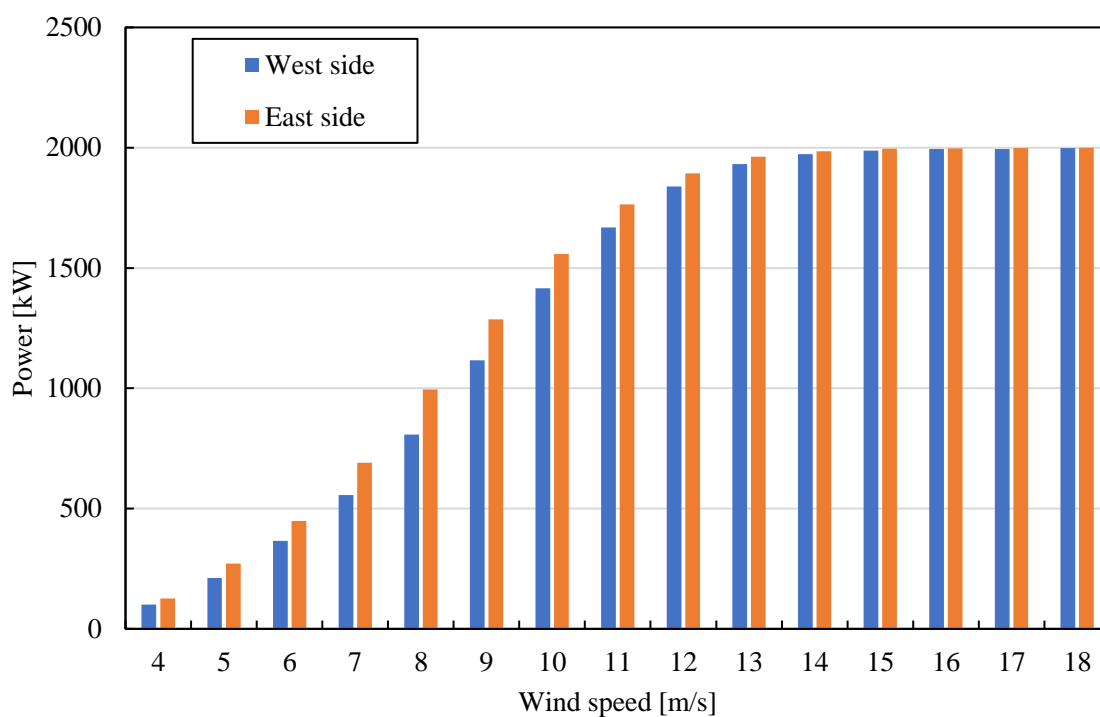


図 6.10 代表風向 WNW における尾根より西側風車および尾根より東側風車の風速階級別発電量（風速補正前）

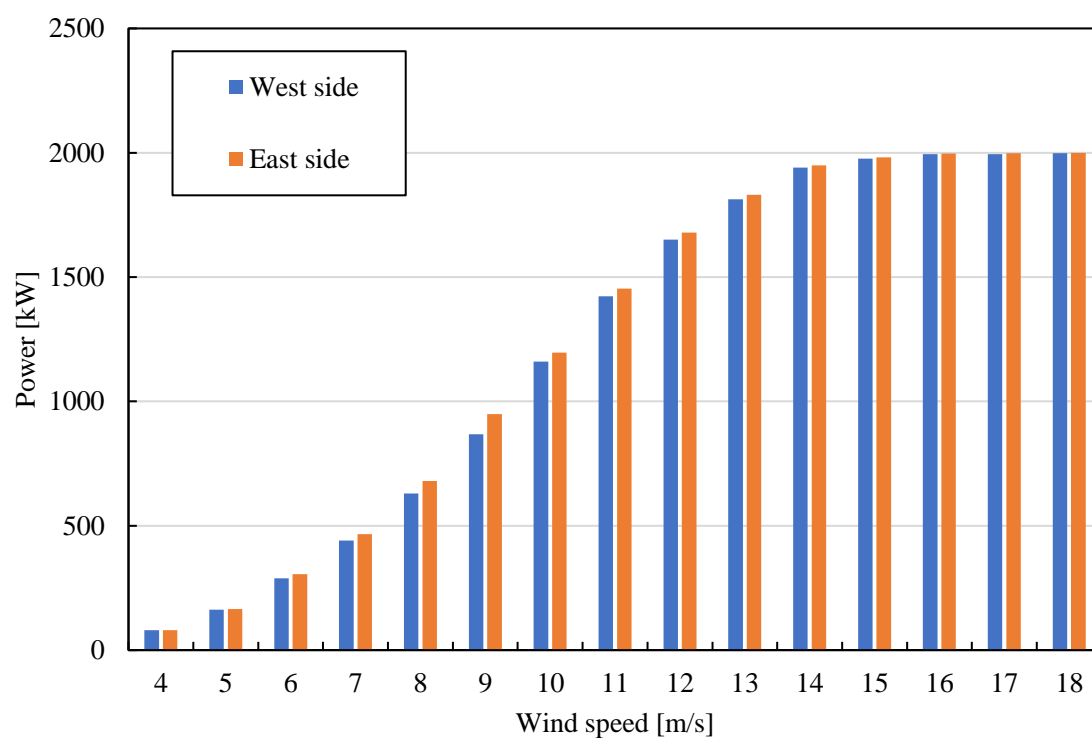


図 6.11 代表風向 WNW における尾根より西側風車および尾根より東側風車の風速階級別発電量（風速補正後）

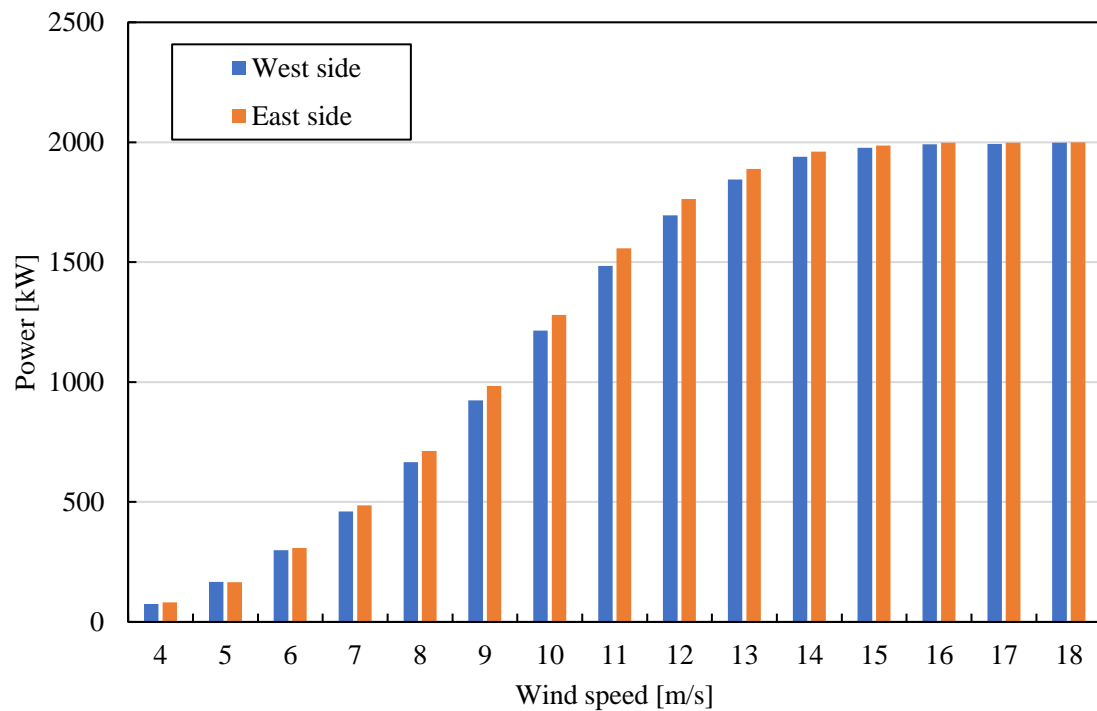


図 6.12 代表風向 WNW における尾根より西側風車および尾根より東側風車のロータ面等価風速による風速階級別発電量（風速補正後）

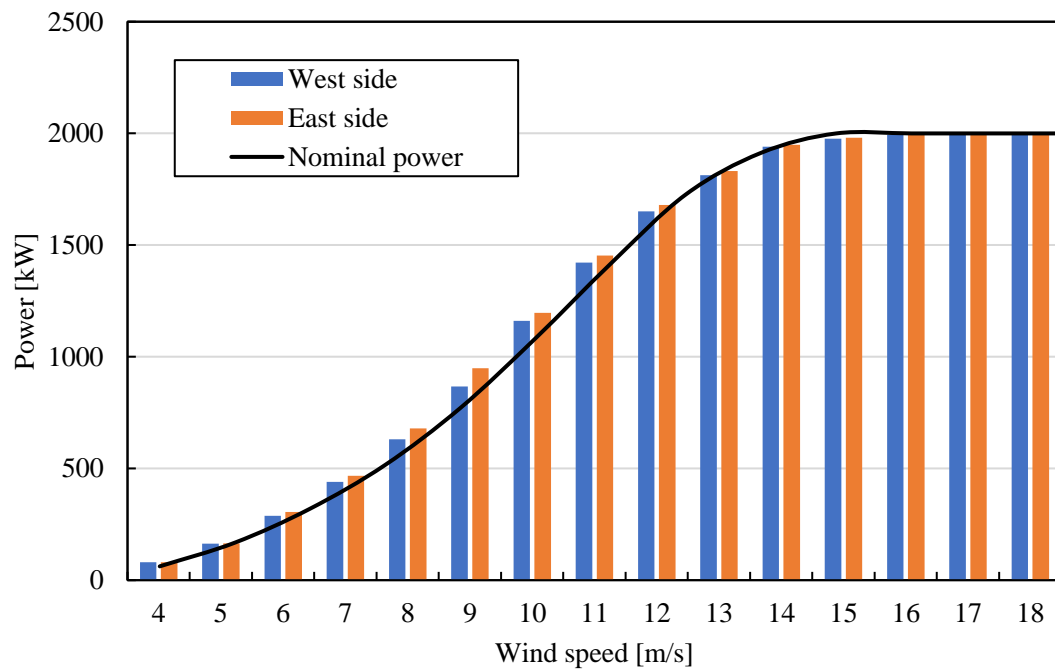


図 6.13 代表風向 WNW における尾根より西側風車および尾根より東側風車の風速階級別発電量と公称値の風速階級別発電量（風速補正後）

第7章 ウィンドファーム全機における年間発電量に及ぼす地形の影響

本章では、ウィンドファーム全体の年間発電量と地形の関係について考察を行う。4.2 節において 1 か月間の実測データから地形の影響について評価を行い、RIAM-COMPACT の解析結果より、風車に流入する風速は風向によって風車の上流地形が異なることが影響していることを確認した。そこで本章では 4.1 節および 5.1 節で得られた単機毎の実測および解析結果で得られた知見を基に年間のウィンドファーム全体の発電量を評価する。

7.1 RIAM-COMPACT によるウィンドファーム全機のロータ面等価風速

本節では、RIAM-COMPACT の解析結果を基にウィンドファーム全機において地形の影響により増速または減速している風車を区分した。また、区分基準は風車ハブ高さにおける流入境界面風速とした。

図 7.1 に風向 WNW におけるロータ面等価風速の無次元値を示す。図 7.1 は縦軸に解析領域入口の設定風速に対するロータ面等価風速の比、横軸に風車を示してある。図 7.1 より風車に流入する風が地形の影響により増速している風車は AI-9 のみである。5.1 節より AI-9 に流入する風は風車の上流地形に起因して増速している。その他の風車に関しては風車に流入する風が地形の影響により減速している。これは 5.1 節より風車の上流地形が窪地、山および尾根であることが原因だと考えられる。

図 7.2 に風向 NW におけるロータ面等価風速の無次元値を示す。図 7.2 は縦軸に解析領域入口の設定風速に対するロータ面等価風速の比、横軸に風車を示してある。図 7.2 より風車に流入する風が地形の影響により増速している風車は AI-1, AI-15, AI-19, AI-20, AI-21, AI-22, AI-23, AI-24, AI-31 および AT-7 である。これらの風車に流入する風は風車の上流地形に起因して増速している。表 7.1 に地形の影響により増速している風車の増速している要因と要因となる地形までの距離を示す。その他の風車に関しては風車に流入する風が地形の影響により減速している。これは 5.1 節より風車の上流地形が窪地、山および尾根であることが原因だと考えられる。

図 7.3 に風向 W におけるロータ面等価風速の無次元値を示す。図 7.3 は縦軸に解析領域入口の設定風速に対するロータ面等価風速の比、横軸に風車を示してある。図 7.3 より風車に流入する風が地形の影響により増速している風車は AI-1, AI-4, AI-6, AI-9 である。これらの風車に流入する風は風車の上流地形に起因して増速している。表 7.2 に地形の影響により増速している風車の増速している要因と要因となる地形までの距離を示す。その他の風車に関しては風車に流入する風が地形の影響により減速している。これは 5.1 節より風車の上流地形が窪地、山および尾根であることが原因だと考えられる。

表 7.1 風向 NW において地形の影響により増速している風車

	AI-1	AI-15	AI-20	AI-21	AI-22
増速の要因である上流地形	斜面	斜面	斜面	斜面	斜面
要因となる地形までの距離 x/D	6.7	3.1	7.1	5.6	5.7
ロータ面等価風速/ 流入境界面風速	1.01	1.06	1.02	1.12	1.09
	AI-23	AI-24	AI-31	AT-7	
増速の要因である上流地形	斜面	斜面	斜面	尾根	
要因となる地形までの距離 x/D	4.3	6.3	5.8	7.0	
ロータ面等価風速/ 流入境界面風速	1.08	1.08	1.01	1.01	

表 7.2 風向 W において地形の影響により増速している風車

	AI-1	AI-4	AI-6	AI-9
増速の要因である上流地形	斜面	斜面	斜面	斜面
要因となる地形までの距離 x/D	9.8	5.4	6.3	5.2
ロータ面等価風速/ 流入境界面風速	1.08	1.08	1.02	1.03

7.2 ウィンドファーム全機発電量評価

本節では RIAM-COMPACT で解析を行った流入境界面風速である 8m/s に相当する実測データを基に発電量評価を行う。また実測データは代表風車 AI-2 において風速階級 8 m/s である風速 7.5 m/s 以上かつ 8.5 m/s 未満の値を示す時刻のデータを使用した。

図 7.4 に風向 WNW における発電量比を示す。図 7.4 は縦軸に発電量、横軸に風車を示してある。各風車の発電量は AI-2 の発電量で無次元化してある。図 7.4 より AI-3, AI-4, AI-9, AT-1, AT-2, AT-3, AT-4 および AT-7 の発電量は 1.0 を超えており、AI-2 より高い。

図 7.5 に風向 WNW における風速比を示す。図 7.5 は縦軸に風速、横軸に風車を示してある。各風車の風速は AI-2 の風速で無次元化してある。図 7.5 より AI-3 および AT-1 の風速は AI-2 より高い。

図 7.6 に風向 WNW における乱流強度比を示す。図 7.6 は縦軸に発電量、横軸に風車を示してある。各風車の乱流強度は AI-2 の乱流強度で無次元化してある。図 7.6 より図 7.4 において発電量が 1.0 を超えており、尾根より西側の風車の乱流強度は 1.0 より低い。それに対

して図 7.6 より図 7.4 において発電量が 1.0 を超えており、尾根より西側の風車の乱流強度は 1.0 より大きい。

表 7.3 に風向 WNW における AI-2, AI-3, AI-4 および AI-9 の吹上角を示す。表 7.3 より AI-2, AI-3, AI-4 および AI-9 の吹上角は正であり吹上風が流入している。また AI-3, AI-4 および AI-9 の吹上角とロータ軸方向との差は AI-2 より低い。

表 7.3 風向 WNW における AI-2, AI-3, AI-4 および AI-9 の吹上角

風車	AI-2	AI-3	AI-4	AI-9
吹上角[°]	1.18	3.19	4.85	5.15
吹上角とロータ軸方向との差[°]	-6.82	-4.81	-3.15	-2.85

図 7.4 において発電量が 1.0 を超えている尾根より西側の風車は AI-2 より乱れが少ない吹上風が流入している。図 7.5 より風向 WNW における AI-9 の風速は AI-2 よりも低い。それに対して図 7.4 において発電量が 1.0 を超えており、AI-2 より高い。風向 WNW における解析結果より AI-9 に流入する風は風車上流のなだらかな斜面により縮流し、乱れが少なく、増速した吹上風である。また表 7.3 より AI-9 の吹上角が 5.1° であるのに対して、AI-2 の吹上角は 1.1° である。これらより AI-9 の発電量は吹上角とロータ軸方向との差は AI-2 より低く、風車が吹上風を効率的に捉えたため、AI-2 より高いと考えられる。

図 7.5 より風向 WNW における AI-4 の風速は AI-2 よりも低い。それに対して図 7.4 において AI-4 の発電量が 1.0 を超えており、AI-2 より高い。表 7.3 より AI-4 の吹上角が 4.8° であるのに対して、AI-2 の吹上角は 1.1° である。これらより AI-4 の発電量は吹上角とロータ軸方向との差は AI-2 より低く、吹上風を効率的に捉えたため、AI-2 より高いと考えられる。

AT-2, AT-3, AT-4 および AT-7 は図 7.5 において風速比が 1.0 より低く、図 7.4 において発電量比は 1.0 より高い。また図 7.6 より AT-2, AT-3, AT-4 および AT-7 の乱流強度比は 1.0 より高い。これは 5.1.2 項より尾根より東側の風車に流入する風は風車上流が尾根であり、尾根頂部での縮流による増速や剥離による減速があるからだと考えられる。また乱流強度が高いと平均風速に対する風速変動が大きいいため、それに起因して発電量も増加すると考えられる⁽⁴⁵⁾。また、図 7.4 および図 7.5 より AT-1 の発電量比および風速比は 1.0 より高く、図 7.6 より乱流強度比は 1.0 より高い。AT-1 に流入する風は尾根頂部により増速した風が流入しており、尾根通過後による乱流により発電量が増加していると考えられる。

また、図 7.4 において発電量が 1.0 より低い風車は風車に流入する風が地形および後流の影響により減速しているからだと考えられる。これは 5.1 節より風車上流地形が窪地、山および尾根であること、または風車後流の影響が原因だと考えられる。

図 7.7 に風向 NW における発電量比を示す。図 7.7 は縦軸に発電量、横軸に風車を示してある。各風車の発電量は AI-2 の発電量で無次元化してある。図 7.7 より AI-1, AI-3, AI-6, AT-1, AT-2, AT-3, AT-4, AT-5 および AT-7 の発電量は 1.0 を超えており、AI-2 より高い。

図 7.8 に風向 NW における風速比を示す。図 7.8 は縦軸に風速、横軸に風車を示してあ

る。各風車の風速はAI-2の風速で無次元化してある。図7.8よりAT-1, AT-2, AT-3およびAT-7の風速は1.0を超えており、AI-2より高い。

図7.9に風向NWにおける乱流強度比を示す。図7.9は縦軸に乱流強度、横軸に風車を示してある。各風車の乱流強度はAI-2の乱流強度で無次元化してある。図7.9よりAI-1, AT-2, AT-3, AT-4, AT-5およびAT-7の乱流強度はAI-2より高い。

表7.4に風向NWにおけるAI-1, AI-2, AI-3およびAI-6の吹上角を示す。表7.4よりAI-1, AI-2, AI-3およびAI-6の吹上角は正であり吹上風が流入している。またAI-1, AI-3およびAI-6の吹上角とロータ軸方向の差はAI-2より低い。

表7.4 風向NWにおけるAI-1, AI-2, AI-3およびAI-6の吹上角

風車	AI-1	AI-2	AI-3	AI-6
吹上角[°]	3.41	1.19	2.43	6.50
吹上角とロータ軸方向との差[°]	-4.59	-6.81	-5.57	-1.5

図7.7よりAI-3およびAI-6の発電量は1.0を超えており、図7.8および図7.9より風速および乱流強度は1.0より低い。また表7.4よりAI-3およびAI-6の吹上角とロータ軸方向の差はAI-2より低い。AI-3およびAI-6に流入する風は乱流強度が低いなだらかな斜面の吹上風であり、吹上角とロータ軸方向の差はAI-2より低いことから図7.7における発電量が1.0より高いと考えられる。

図7.7および図7.9よりAI-1の発電量および乱流強度は1.0を超えており、図7.8より風速は1.0より低い。風向NWにおいてAI-1に流入する風は風向NWに対して5.6D上流に位置するAI-3の後流の影響を受けてAI-2より乱流強度が高くなっていると考えられる。しかしながら地形のみ解析結果においてはAI-1に流入する風は風車の上流のなだらかな斜面により増速している。したがってAI-1の発電量はAI-3の後流の影響を受け乱流強度が高くなりつつも、上流斜面に沿った吹上風が流入するため代表風車AI-2より高いと考えられる。また7.1項においてAI-15, AI-20, AI-21, AI-22, AI-23, AI-24およびAI-31の流入する風速は上流斜面により増速することが予測されたが、実測データでは代表風車AI-2より低い。この原因はこれらの風車に流入する風は上流風車の後流などの地形以外の影響を受けているからだと考えられる。また5.2節において風車に流入する風は地形の影響に加えて後流の影響を受けていることが確認した。そのため後流の影響を加味した風況解析によって検証が必要であると考えられる。

AT-4およびAT-5は図7.8において風速比が1.0より低く、図7.7において発電量比は1.0より高い。また図7.9よりAT-4およびAT-5の乱流強度比は1.0より高い。これは5.1.2項より尾根より東側の風車に流入する風は風車の上流が尾根であり、尾根頂部での縮流による増速や剥離による減速があるからだと考えられる。また乱流強度が高いと平均風速に対する風速変動が大きいため、それに起因して発電量も増加すると考えられる⁽¹⁵⁾。また、図7.7および図7.8よりAT-1, AT-2, AT-3およびAT-7の発電量比および風速比は1.0より高く、図7.9より乱流強度比は1.0より高い。AT-1に流入する風は尾根頂部により増速した風が流入

しており、尾根通過後による乱流により発電量が増加していると考えられる。

また、図 7.7 において発電量が 1.0 より低い風車は風車に流入する風が地形および後流の影響により減速しているからだと考えられる。これは 5.1 節より風車上流地形が窪地、山および尾根であることまたは風車後流の影響が原因だと考えられる。

図 7.10 に風向 W における発電量比を示す。図 7.10 は縦軸に発電量、横軸に風車を示してある。各風車の発電量は AI-2 の発電量で無次元化してある。図 7.10 より AI-3, AI-4, AI-5, AI-6, AI-7, AI-8, AI-9, AI-10, AI-11, AI-12, AI-13, AI-14, AI-17, AI-21, AI-25, AI-26, AT-1, AT-2, AT-3, AT-4, AT-5, AT-7 および AT-8 の発電量は 1.0 を超えており、AI-2 より高い。

図 7.11 に風向 W における風速比を示す。図 7.11 は縦軸に風速、横軸に風車を示してある。各風車の風速は AI-2 の風速で無次元化してある。図 7.11 より AI-3, AI-4, AI-5, AI-6, AI-7, AI-8, AI-9, AI-10, AI-11, AI-12, AI-13, AI-17, AI-21, AI-25, AI-26, AT-1, AT-2, AT-3, AT-4 および AT-7 の風速は 1.0 を超えており、AI-2 より高い。

図 7.12 に風向 W における乱流強度比を示す。図 7.12 は縦軸に乱流強度、横軸に風車を示してある。各風車の乱流強度は AI-2 の乱流強度で無次元化してある。図 7.12 より AT-1, AT-2, AT-3, AT-4 および AT-7 の乱流強度は AI-2 より高い。

表 7.5 に風向 W における AI-1, AI-2 および AI-14 の吹上角を示す。表 7.5 より AI-2 および AI-14 の吹上角は正であり吹上風が流入している。また AI-14 の吹上角とロータ軸方向の差は AI-2 より低い。AI-1 の吹上角はほぼ水平風である。

表 7.5 風向 W における AI-1, AI-2 および AI-14 の吹上角

風車	AI-1	AI-2	AI-14
吹上角[°]	-0.50	3.36	5.92
吹上角とロータ軸方向との差[°]	-8.50	-4.64	-2.08

AI-4, AI-6 および AI-9 は図 7.10 および図 7.11 において発電量および風速が 1.0 を超えており、図 7.12 より乱流強度は 1.0 より低い。これは 7.1 節において AI-4, AI-6 および AI-9 に流入する風は風車上流のなだらかな斜面により乱れが少なく、増速しているからだと考えられる。また AI-14 は図 7.10 発電量および風速が 1.0 を超えており、図 7.11 および図 7.12 より風速および乱流強度は 1.0 より低い。これは 7.1 節において AI-14 に流入する風は地形により減速しているが、表 7.5 より AI-14 の吹上角とロータ軸方向との差は AI-2 より小さい。したがって AI-14 の発電量は AI-2 より風速が低い吹上角とロータ軸方向との差が小さいため AI-2 より高い。また AI-1 は図 7.10 および図 7.11 において発電量および風速が 1.0 より低い。しかし 7.1 項の地形のみの解析結果においては地形の影響により増速していることが確認されている。これは AI-1 に流入する風が風向 W に対して 6.0D 上流に位置する AI-4 の影響を受けているからだと考えられる。AI-1 の発電量は表 7.5 より AI-1 の吹上角とロータ軸方向との差は AI-2 より高く、後流の影響を受けているため AI-2 より低い。

AT-5 および AT-8 は図 7.10 において風速比が 1.0 より低く、図 7.11 において発電量比は

1.0 より高い。また図 7.12 より AT-5 および AT-8 の乱流強度比は 1.0 より高い。これは 5.1.2 項より尾根より東側の風車に流入する風は風車上流が尾根であり、尾根頂部での縮流による増速や剥離による減速があるからだと考えられる。また乱流強度が高いと平均風速に対する風速変動が大きいため、それに起因して発電量も増加すると考えられる⁽¹⁵⁾。また、図 7.10 および図 7.11 より AT-1, AT-2, AT-3, AT-4 および AT-7 の発電量比および風速比は 1.0 より高く、図 7.12 より乱流強度比は 1.0 より高い。AT-1, AT-2, AT-3, AT-4 および AT-7 に流入する風は尾根頂部により増速した風が流入しており、尾根通過後による乱流により発電量が増加していると考えられる。

また、図 7.10 において発電量が 1.0 より低い風車は風車に流入する風が地形および後流の影響により減速しているからだと考えられる。これは 5.1 節より風車上流地形が窪地、山および尾根であることまたは風車後流の影響が原因だと考えられる。

本節では代表風車 AI-2 に対するウィンドファーム全機の出力を比較し、地形のみの解析結果で得られた知見を基に、ウィンドファーム全機発電量を評価した。尾根より西側の風車に流入する風が上流のなだらかな斜面に起因した乱流強度が低い吹上風である場合、地形の影響が少ない風車より発電量が高い。また尾根より西側に流入する風は風車上流地形が窪地および山であること、または上流風車の後流に起因して減速している場合、代表風車より発電量が低い。尾根より東側風車に流入する風が上流の尾根頂部に起因して縮流による増速や剥離による減速があり、乱流強度が高い場合、代表風車より発電量が高い。

第7章 ウィンドファーム全機の年間発電量に及ぼす地形の影響

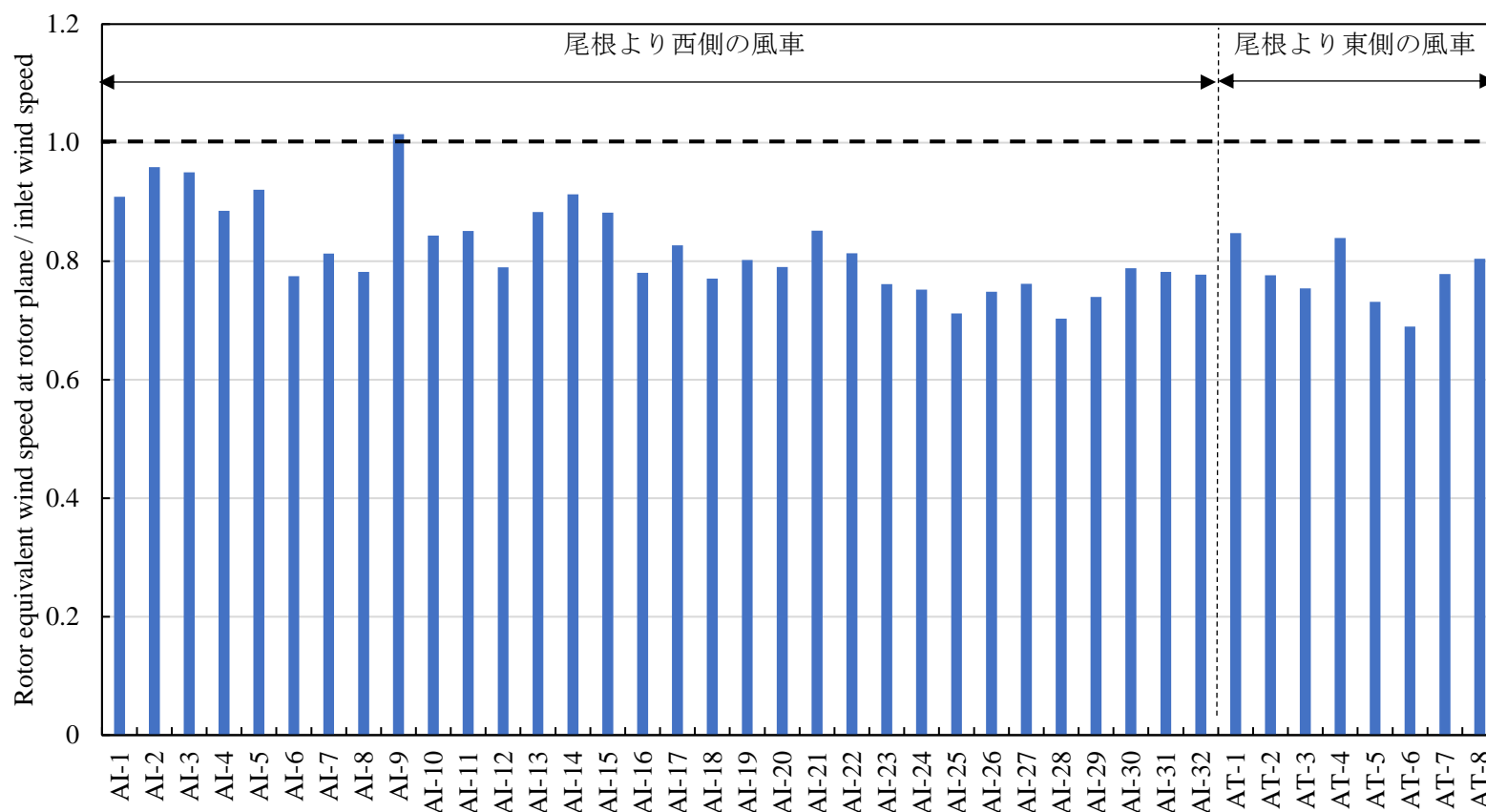


図 7.1 風向 WNW におけるロータ面等価風速

第7章 ウィンドファーム全機の年間発電量に及ぼす地形の影響

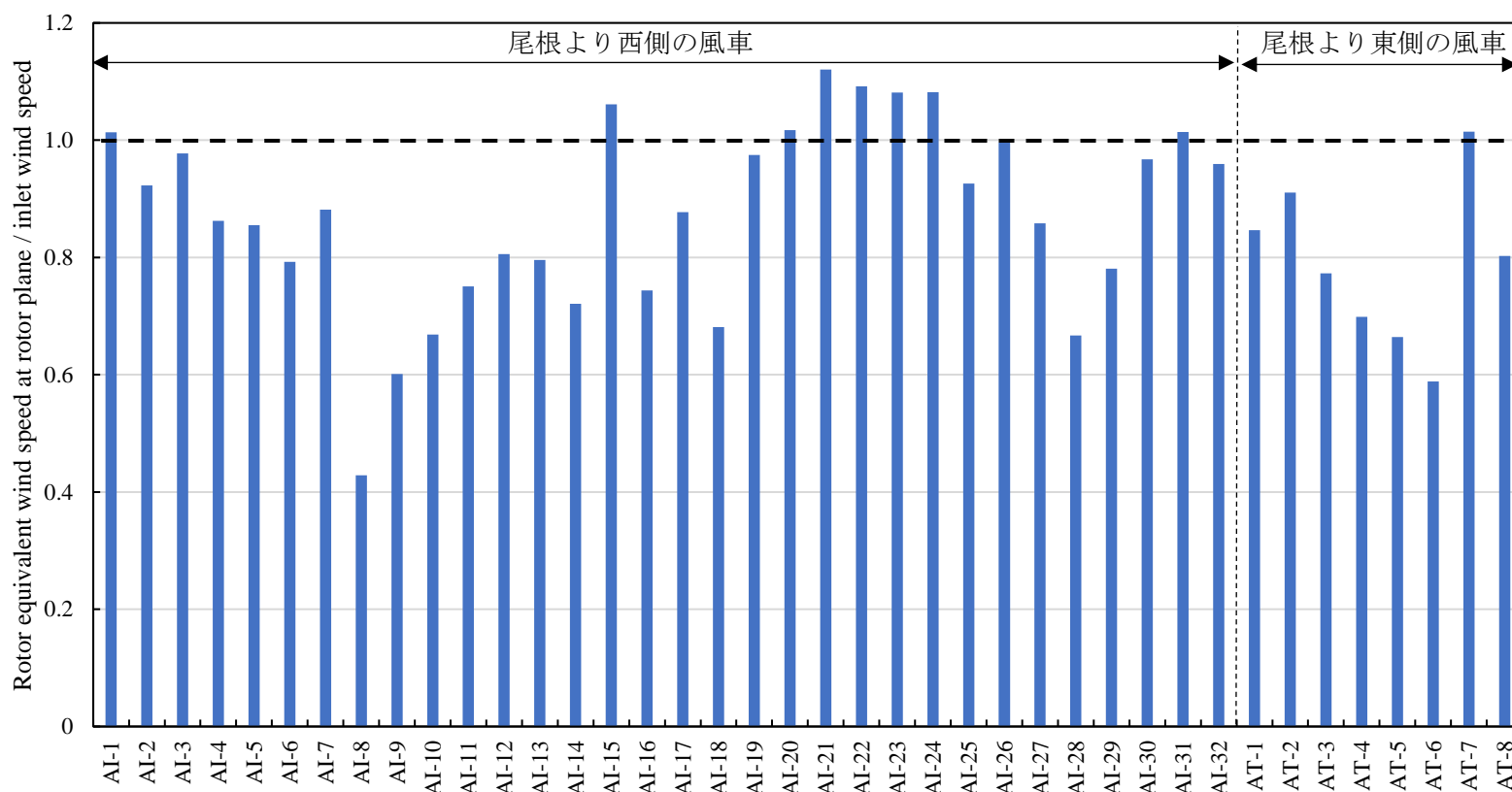


図 7.2 風向 NW におけるロータ面等価風速

第7章 ウィンドファーム全機の年間発電量に及ぼす地形の影響

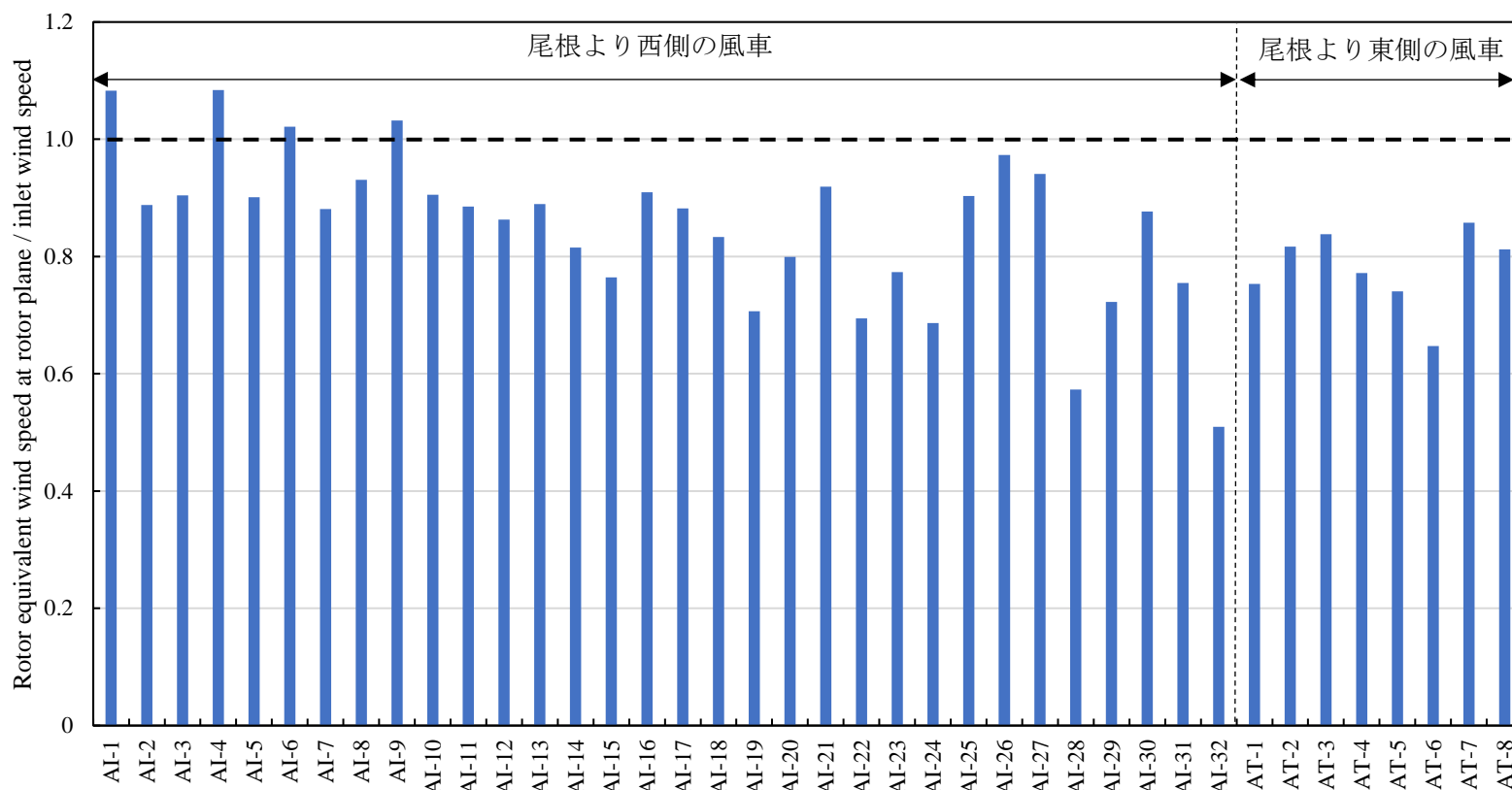


図 7.3 風向 W におけるロータ面等価風速

第7章 ウィンドファーム全機の年間発電量に及ぼす地形の影響

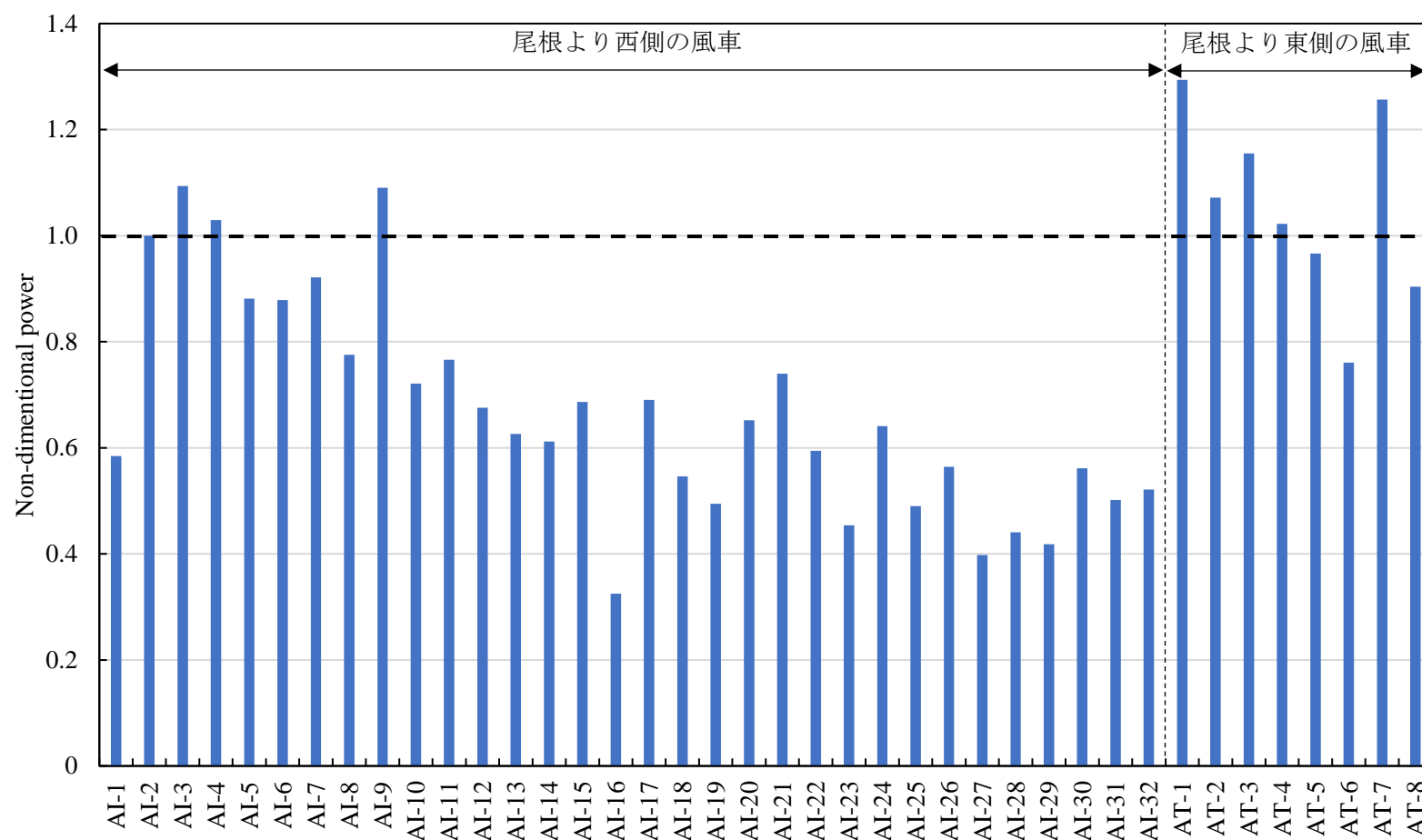


図 7.4 風向 WNW における発電量比

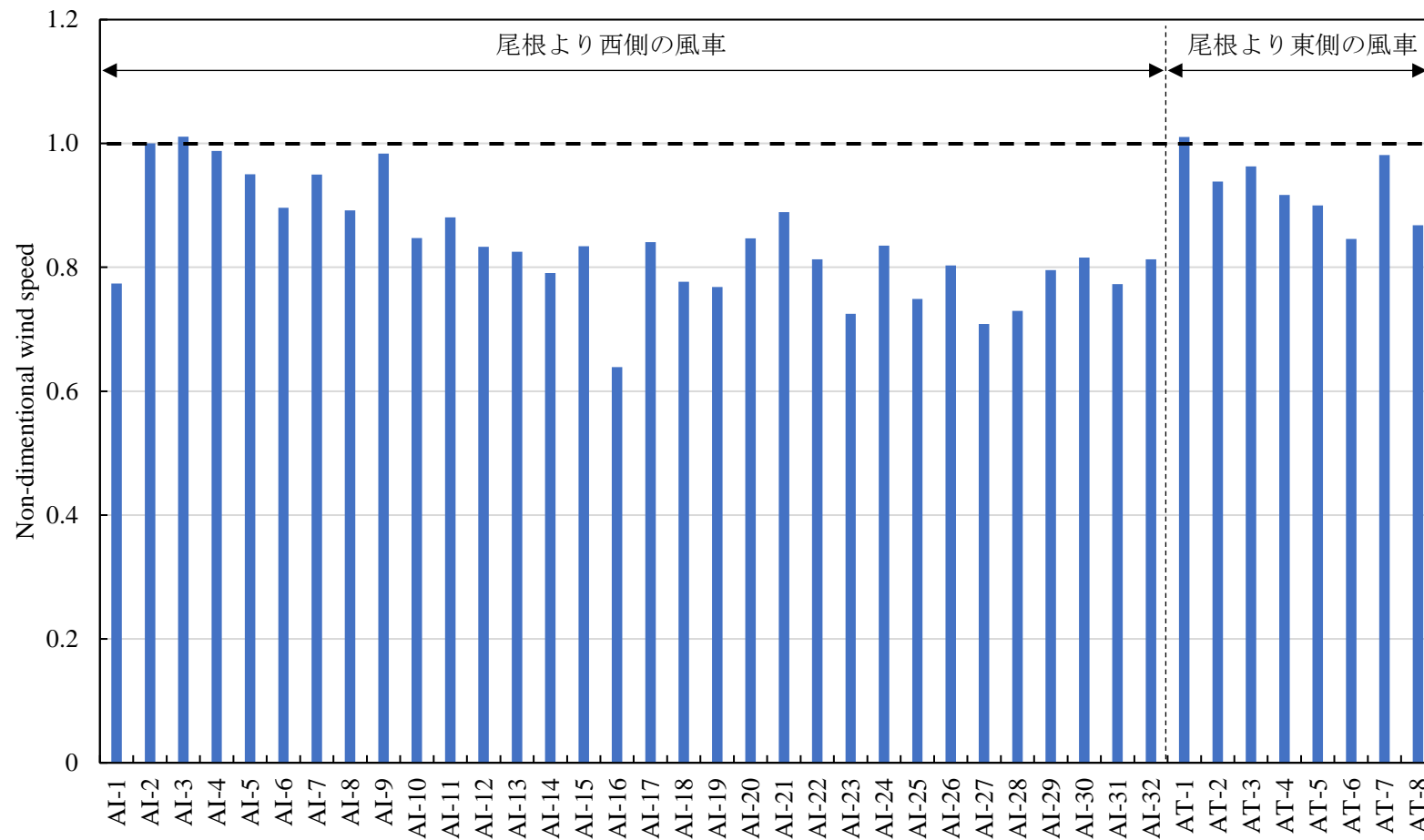


図 7.5 風向 WNW における風速比

第7章 ウィンドファーム全機の年間発電量に及ぼす地形の影響

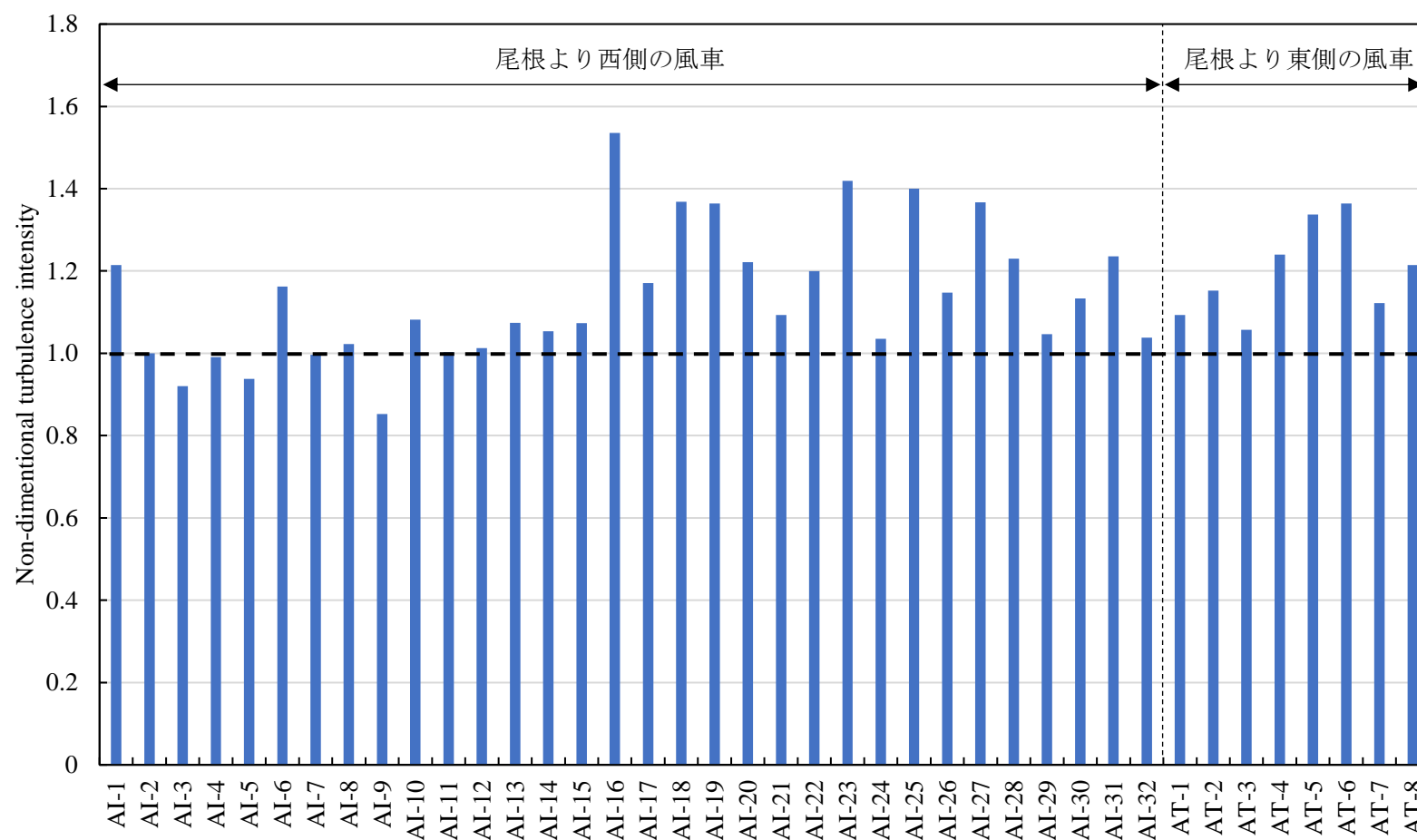


図 7.6 風向 WNW における乱流強度比

第7章 ウィンドファーム全機の年間発電量に及ぼす地形の影響

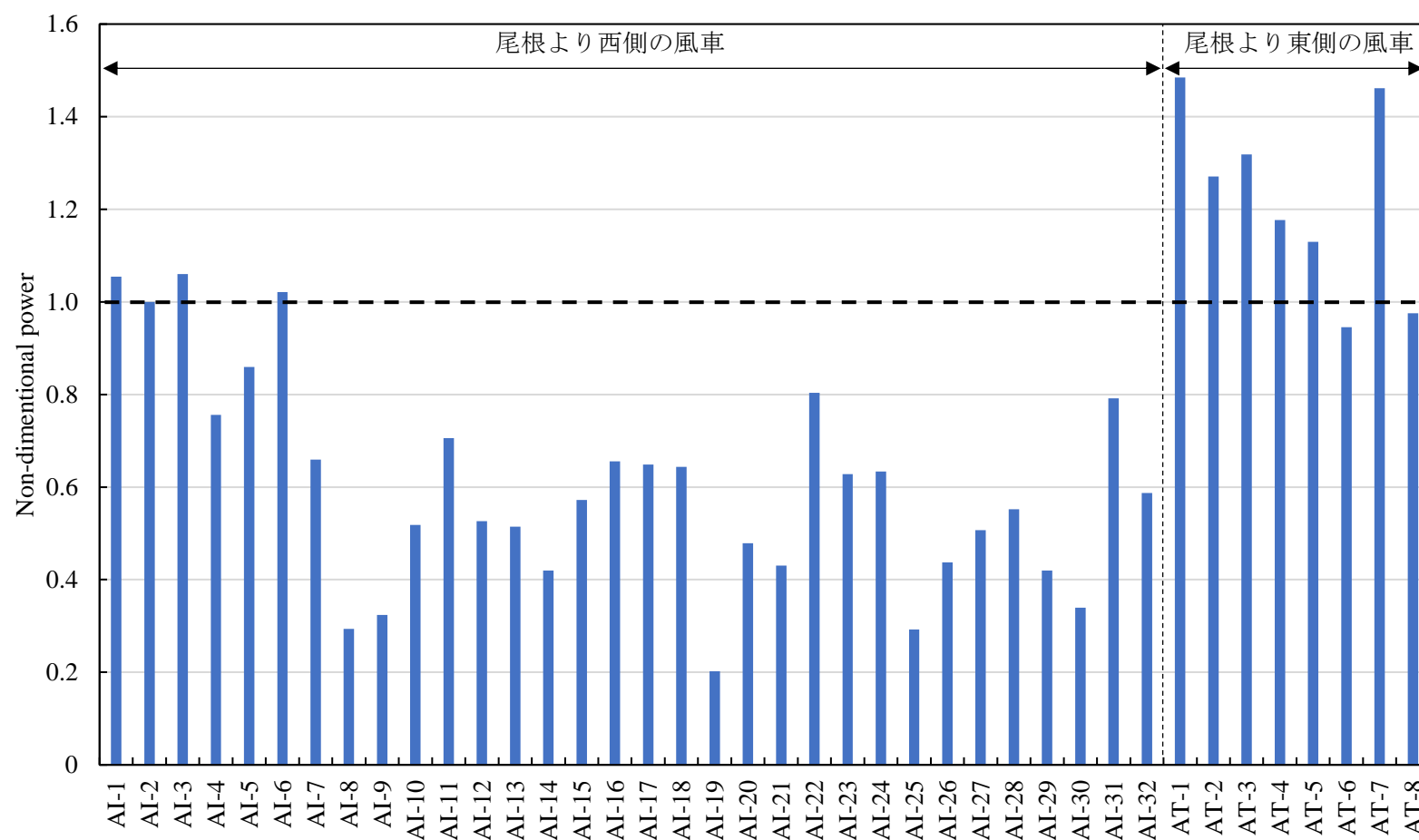


図 7.7 風向 NW における発電量比

第7章 ウィンドファーム全機の年間発電量に及ぼす地形の影響

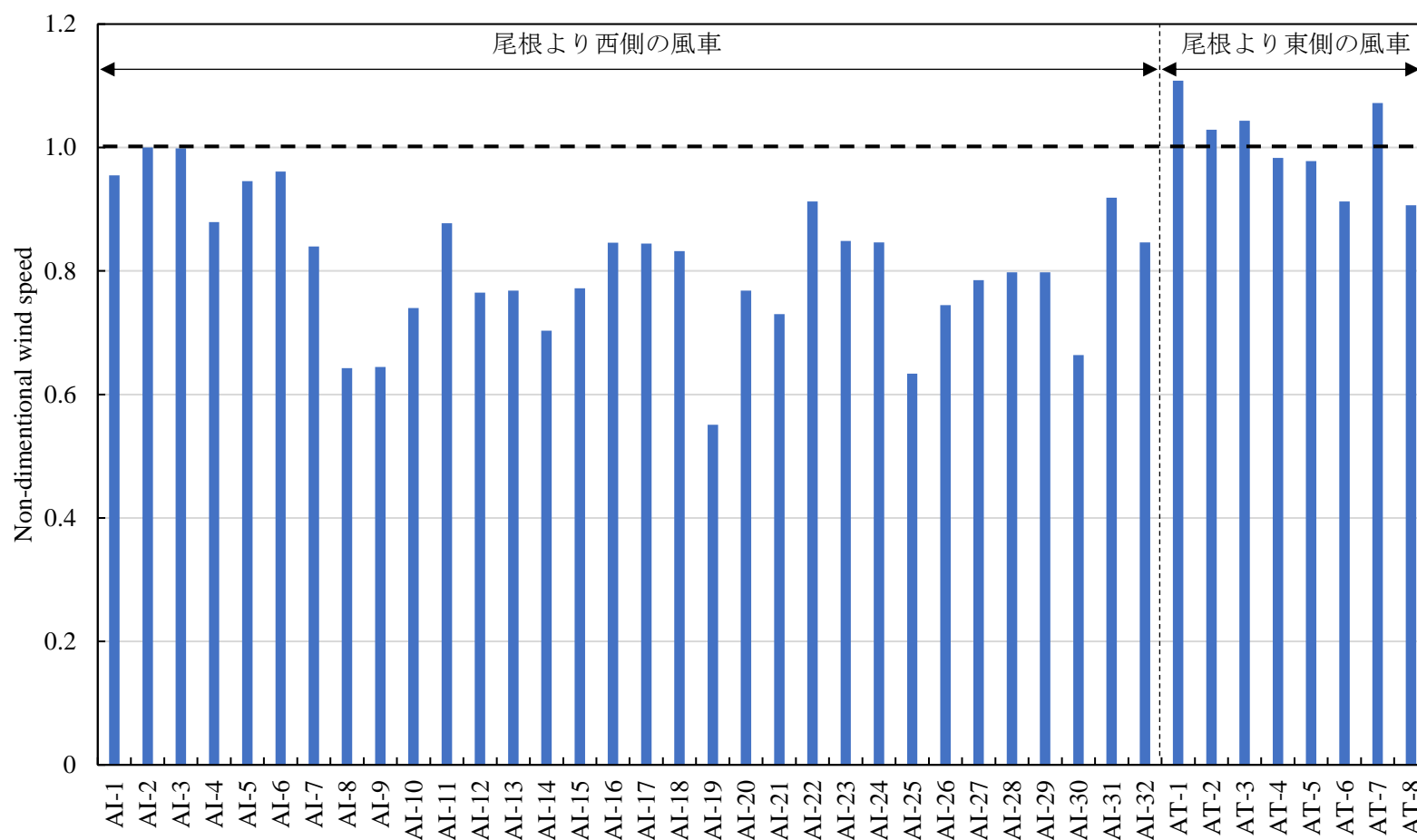


図 7.8 風向 NW における風速比

第7章 ウィンドファーム全機の年間発電量に及ぼす地形の影響

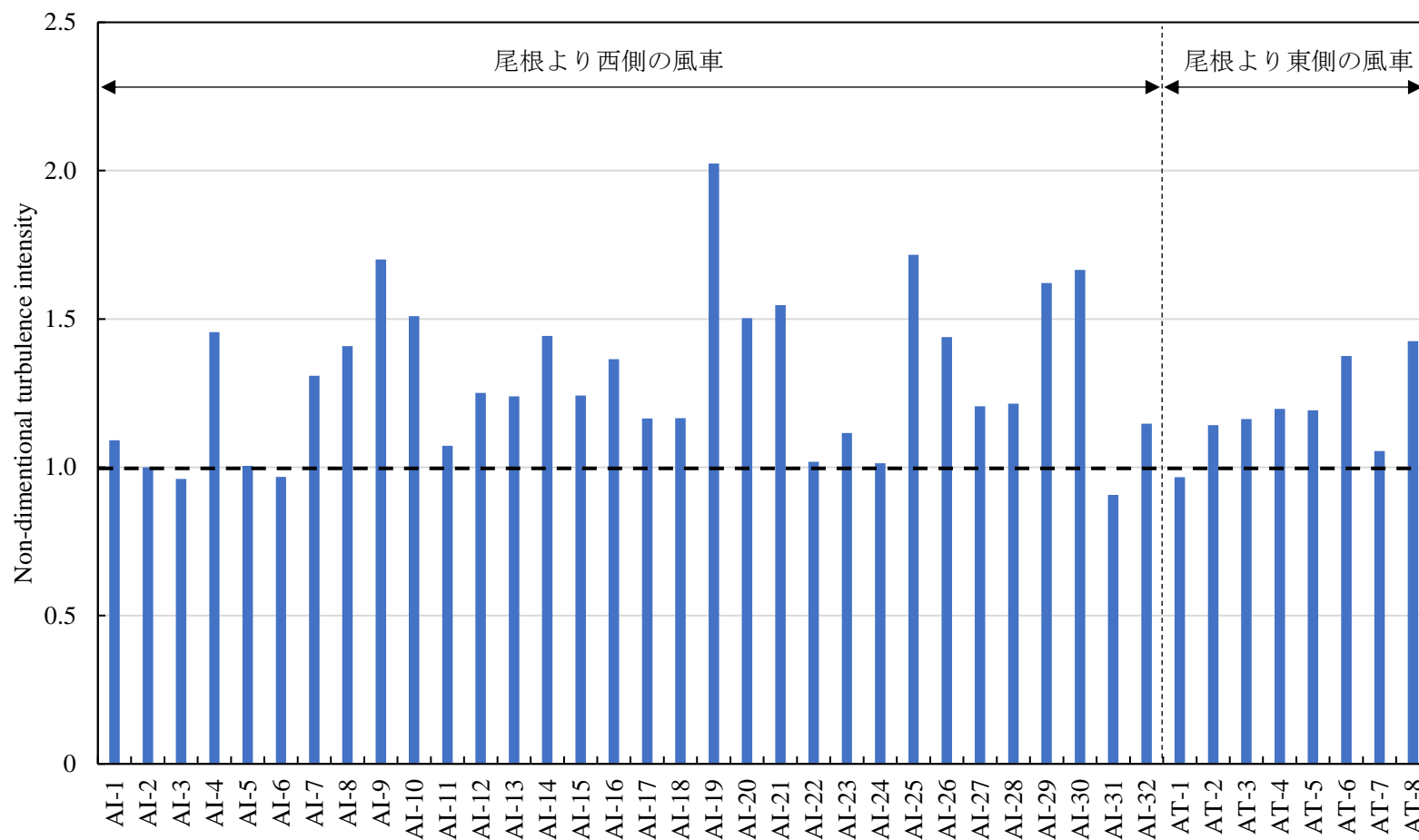


図 7.9 風向 NW における乱流強度比

第7章 ウィンドファーム全機の年間発電量に及ぼす地形の影響

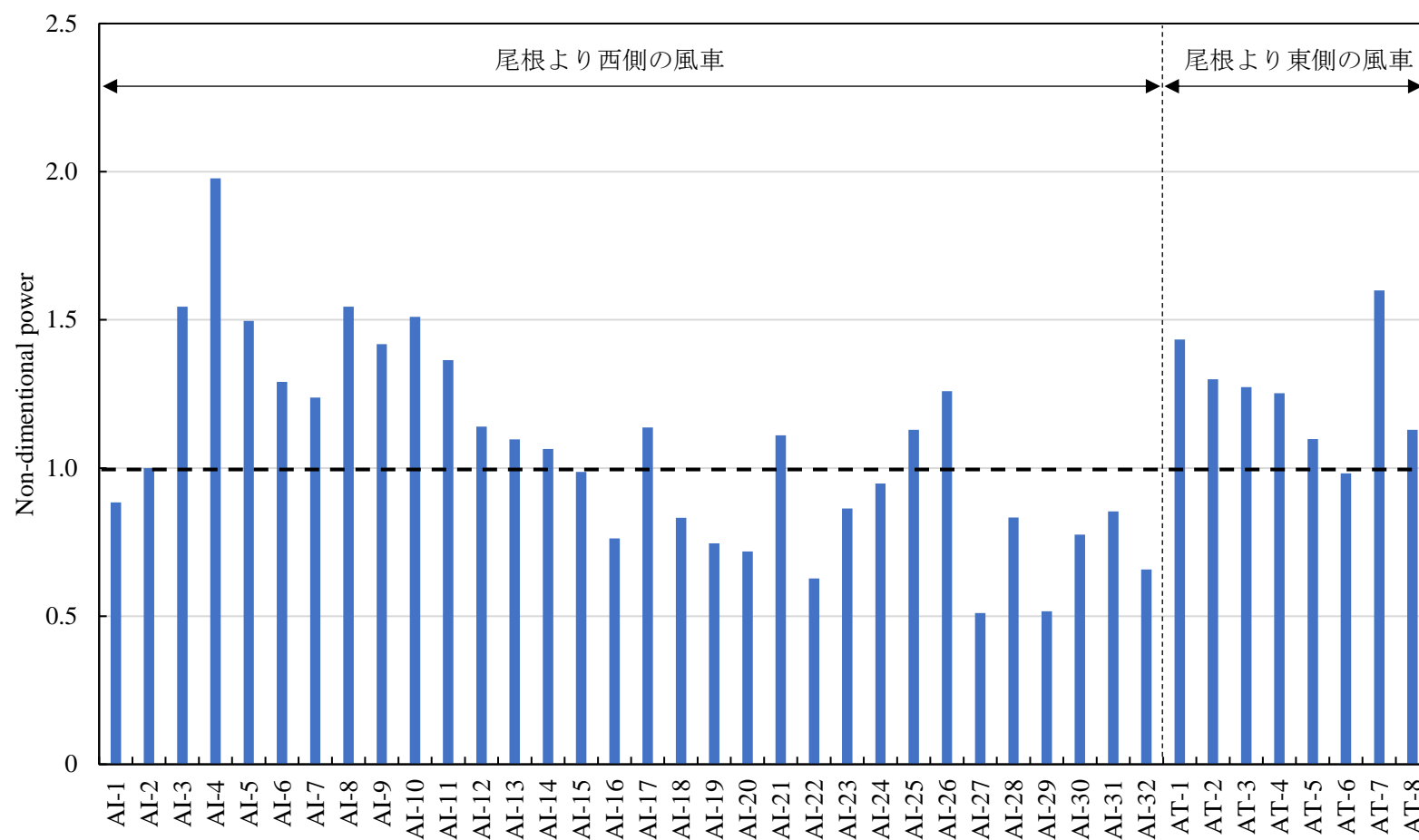


図 7.10 風向 W における発電量比

第7章 ウィンドファーム全機の年間発電量に及ぼす地形の影響

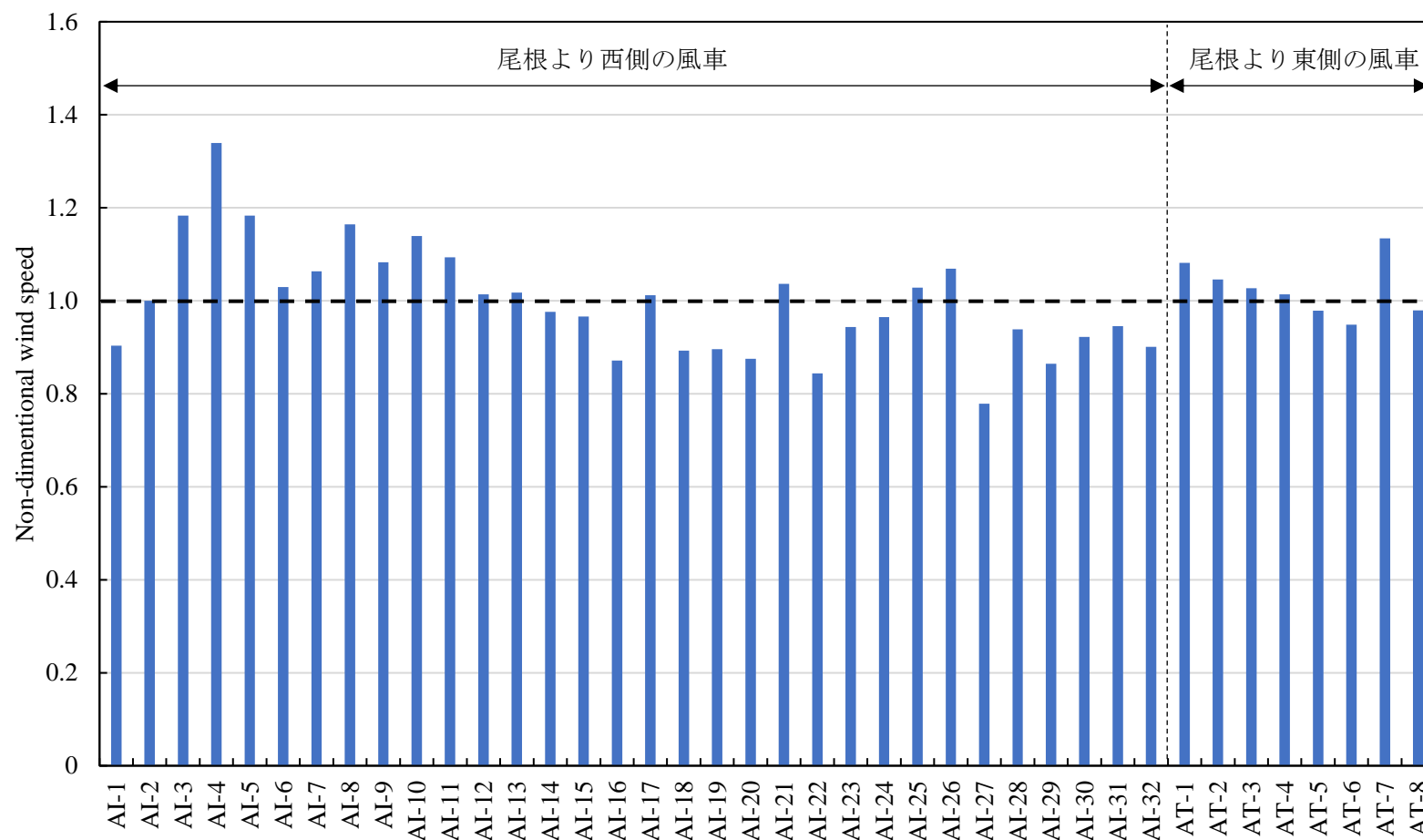


図 7.11 風向 W における風速比

第7章 ウィンドファーム全機の年間発電量に及ぼす地形の影響

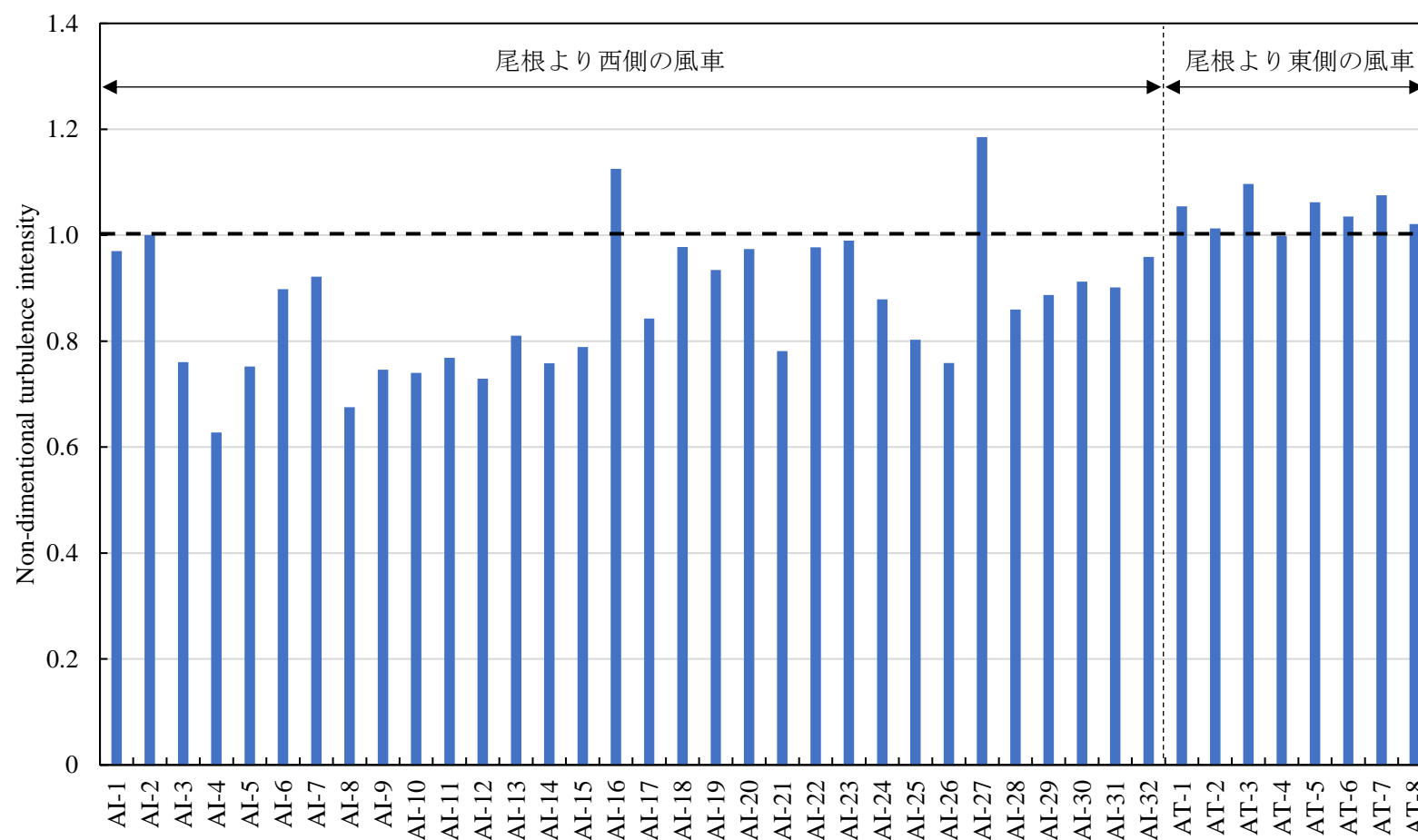


図 7.12 風向 W における乱流強度比

第 8 章 結言

本研究では、風車出力に及ぼす地形および後流の影響の解明を目的とし、ウィンドファーム内の風車実測データの検証ならびに非線形風況予測モデル RIAM-COMPACT を用いた風況解析を行った。またナセル風速計周りの流れ場解析を行い、吹上風および吹下風がナセル風速計観測値に及ぼす影響について考察した

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 風車上流地形がなだらかな斜面の場合、風車に流入する風は縮流により増速した吹上風となり、ダウンウィンド型風車で捉えることによって効率的に発電できると考えられる。
- (2) 風車上流地形が窪地の場合、風車に流入する風は剥離して減速している。また、風車に流入する風は剥離に起因した吹上風であるためダウンウィンド型風車で効率的に捉えることができないと考えられる。
- (3) 風向に対して風車間距離が $5.3D$ と $3.8D$ の 2 組の風車の風速を比較した結果、下流側に位置する風車に流入する風は上流側風車の後流の影響により減速している。
- (4) 風車上流風の吹上、吹下によって、対象風車に用いられているナセル上の三杯式風速計に流入する風は流入角（吹上、吹下）によって計測値に誤差が生じる。また吹下風における風速計の計測誤差は流入風速による依存性が大きい。
- (5) ナセル風速計位置での風速はロータや後方設置物の影響により風车上流の風速より低い。
- (6) 対象風車では、吹上風に対してナセル風速計後方に障害物がないが、吹下風に対して後方に障害物があるため、ナセル風速計位置の風速は吹上風よりも吹下風の方が低くなる。
- (7) ダウンウィンド型風車におけるナセル上設置物およびナセル風速計への流入角による風速計の観測誤差を補正した結果、吹上風および吹下風における風速階級別発電量の差は補正前と比べて小さい。これは吹下風の場合、風速計の測定値は吹上風を受ける場合より観測誤差が大きいためだと考えられる。

- (8) 吹上風を受けるダウンウィンド型風車に流入する風が上流のなだらかな斜面に起因した乱流強度が低い吹上風である場合、代表風車より発電量が高い。また吹上風を受けるダウンウィンド型風車に流入する風が風車上流地形の窪地および山または上流風車の後流に起因して減速している場合、代表風車より発電量が低い。
- (9) 尾根を通過する風が風車に流入するとき、上流の尾根頂部に起因して縮流による増速や剥離による減速があり乱流強度が高い場合には、代表風車より発電量が高い。

また、今後の課題を以下に示す。

- (1) 5.2 節では風向 WNW に対して風車間距離 $5.3D$ 、 $3.8D$ の 2 組の風車の評価を行った。風車後流解析を行った結果、風車に流入する風は地形の影響に加えて後流の影響を受けていることが確認できた。そのため他の風向や異なる複数の風車に関して後流解析を行う必要がある。
- (2) 6 章において OpenFOAM によるナセル風速計周りの流れ場解析の評価を行った。今回の解析では、角柱でロータスラストを模擬したが、ロータ回転に伴う抵抗の変化を模擬するために多孔質モデルや回転翼を設定する必要があると考えられる。また今回の解析ではヨー角と流入風の方法が一致している条件で行ったが、実際の風況下における実測データはヨーエラーによる左右風速計の観測誤差など考慮すべき点が包含している。そのため引き続き OpenFOAM によるナセル風速計周りの流れ場解析よりナセル風速計の観測誤差について検証が必要であると考えられる。
- (3) 7 章において風車上流地形をなだらかな斜面、窪地、山、尾根と 4 つに区分したが、定量的な区分基準でないため、風車上流地形を定量化して、発電量評価をすることで汎用性のある評価方法に繋がると考えられる。

付録 A 風車上流地形の影響

本章では、5.1 節で得られた知見を基に風向 WNW、NW および W における地形による増速および減速の要因となる地形について示す。

付録 A.1 風向 WNW における風車上流地形の影響

表 A.1 に風向 WNW における地形による増速および減速の要因および要因となる地形までの距離を示す。また地形による増速および減速の要因については 5.1 節で得られた結果を基にした。また増速および減速の要因となる地形までの距離はロータ直径に対する距離 (x/D) で評価した。なお風速比はロータ面等価風速を流入境界面風速で除した値である。AI-9 は風速比が 1.0 より高い。これは AI-9 に流入する風は風車上流のなだらかな斜面に起因して縮流し、増速しているからである。AI-11, AI-12, AI-13, AI-20, AI-21, AI-23, AI-24, AI-25, AI-26, AI-28 は風向 WNW に対してウィンドファーム内で上流側に位置しており、風車に流入する風は風車上流に山があるため、減速している。

付録 A.2 風向 NW における風車上流地形の影響

表 A.2 に風向 NW における地形による増速および減速の要因および要因となる地形までの距離を示す。また地形による増速および減速の要因については 5.1 節で得られた結果を基にした。また増速および減速の要因となる地形までの距離はロータ直径に対する距離 (x/D) で評価した。なお風速比はロータ面等価風速を流入境界面風速で除した値である。AI-1, AI-15, AI-19, AI-20, AI-21, AI-22, AI-23, AI-24, AI-31 は風速比が 1.0 より高い。これらの風車に流入する風は風車上流のなだらかな斜面に起因して縮流し、増速しているからである。AT-7 は風速比が 1.0 より高い。AT-7 に流入する風は尾根頂部での縮流による増速や剥離による減速があるからだと考えられる。AI-11, AI-12, AI-13, AI-14 は風向 NW に対してウィンドファーム内で上流側に位置しており、風車に流入する風は風車上流に山があるため、減速している。

付録 A.3 風向 W における風車上流地形の影響

表 A.3 に風向 W における地形による増速および減速の要因および要因となる地形までの距離を示す。また地形による増速および減速の要因については 5.1 節で得られた結果を基にした。また増速および減速の要因となる地形までの距離はロータ直径に対する距離 (x/D) で評価した。なお風速比はロータ面等価風速を流入境界面風速で除した値である。AI-1, AI-4, AI-6, AI-9 は風速比が 1.0 より高い。これらの風車に流入する風は風車上流のなだらかな斜面に起因して縮流し、増速しているからである。AI-28 は風向 W に対してウィンドファーム内で上流側に位置しており、風車に流入する風は風車上流に山があるため、減速している。

付録 A

表 A.1 風向 WNW における増速および減速の要因および要因となる地形までの距離

風車	AI-1	AI-2	AI-3	AI-4	AI-5
要因の地形	窪地	窪地	窪地	窪地	窪地
地形までの距離 x/D	6.64	2.65	3.56	3.56	11.63
風速比	0.91	0.96	0.95	0.88	0.92
	AI-6	AI-7	AI-8	AI-9	AI-10
要因の地形	窪地	窪地	窪地	斜面	窪地
地形までの距離 x/D	9.66	6.78	6.24	6.36	3.18
風速比	0.77	0.81	0.78	1.01	0.84
	AI-11	AI-12	AI-13	AI-14	AI-15
要因の地形	山	山	山	窪地	窪地
地形までの距離 x/D	47.00	46.39	46.80	13.86	8.11
風速比	0.85	0.79	0.88	0.91	0.88
	AI-16	AI-17	AI-18	AI-19	AI-20
要因の地形	窪地	窪地	窪地	窪地	山
地形までの距離 x/D	5.00	3.63	3.21	2.45	46.39
風速比	0.78	0.83	0.77	0.80	0.79
	AI-21	AI-22	AI-23	AI-24	AI-25
要因の地形	山	窪地	山	山	山
地形までの距離 x/D	46.41	11.18	43.10	39.64	40.25
風速比	0.85	0.81	0.76	0.75	0.71
	AI-26	AI-27	AI-28	AI-29	AI-30
要因の地形	山	窪地	山	窪地	窪地
地形までの距離 x/D	35.10	3.34	35.10	5.03	5.85
風速比	0.75	0.76	0.70	0.74	0.79
	AI-31	AI-32	AT-1	AT-2	AT-3
要因の地形	窪地	窪地	尾根	尾根	尾根
地形までの距離 x/D	3.69	7.80	6.41	8.10	6.90
風速比	0.78	0.78	0.85	0.78	0.75
	AT-4	AT-5	AT-6	AT-7	AT-8
要因の地形	尾根	尾根	尾根	尾根	尾根
地形までの距離 x/D	6.99	7.25	4.75	6.74	6.10
風速比	0.84	0.73	0.69	0.78	0.80

付録 A

表 A.2 風向 NW における増速および減速の要因および要因となる地形までの距離

風車	AI-1	AI-2	AI-3	AI-4	AI-5
要因の地形	斜面	窪地	窪地	窪地	窪地
地形までの距離 x/D	6.70	4.11	3.58	1.65	8.75
風速比	1.01	0.92	0.98	0.86	0.85
	AI-6	AI-7	AI-8	AI-9	AI-10
要因の地形	窪地	窪地	窪地	窪地	窪地
地形までの距離 x/D	8.95	1.76	8.35	11.06	1.74
風速比	0.79	0.88	0.43	0.60	0.67
	AI-11	AI-12	AI-13	AI-14	AI-15
要因の地形	山	山	山	山	斜面
地形までの距離 x/D	46.15	48.71	42.98	49.68	3.10
風速比	0.75	0.81	0.80	0.72	1.06
	AI-16	AI-17	AI-18	AI-19	AI-20
要因の地形	窪地	窪地	窪地	窪地	斜面
地形までの距離 x/D	9.61	4.90	4.10	4.00	7.10
風速比	0.74	0.88	0.68	0.97	1.02
	AI-21	AI-22	AI-23	AI-24	AI-25
要因の地形	斜面	斜面	斜面	斜面	窪地
地形までの距離 x/D	5.60	5.70	4.30	6.30	17.06
風速比	1.12	1.09	1.08	1.08	0.93
	AI-26	AI-27	AI-28	AI-29	AI-30
要因の地形	窪地	窪地	窪地	窪地	窪地
地形までの距離 x/D	1.49	13.70	8.53	20.74	1.86
風速比	1.00	0.86	0.67	0.78	0.97
	AI-31	AI-32	AT-1	AT-2	AT-3
要因の地形	斜面	窪地	尾根	尾根	尾根
地形までの距離 x/D	5.80	43.13	5.96	7.11	7.40
風速比	1.01	0.96	0.85	0.91	0.77
	AT-4	AT-5	AT-6	AT-7	AT-8
要因の地形	尾根	尾根	尾根	尾根	尾根
地形までの距離 x/D	9.15	12.21	7.73	7.00	5.16
風速比	0.70	0.66	0.59	1.01	0.80

付録 A

表 A.3 風向 W における増速および減速の要因および要因となる地形までの距離

風車	AI-1	AI-2	AI-3	AI-4	AI-5
要因の地形	斜面	窪地	窪地	斜面	窪地
地形までの距離 x/D	9.80	12.48	17.90	5.40	10.90
風速比	1.08	0.89	0.90	1.08	0.90
	AI-6	AI-7	AI-8	AI-9	AI-10
要因の地形	斜面	窪地	窪地	斜面	窪地
地形までの距離 x/D	6.30	2.25	3.69	5.20	18.93
風速比	1.02	0.88	0.93	1.03	0.91
	AI-11	AI-12	AI-13	AI-14	AI-15
要因の地形	窪地	窪地	窪地	窪地	窪地
地形までの距離 x/D	17.26	8.43	19.85	8.00	7.65
風速比	0.89	0.86	0.89	0.82	0.76
	AI-16	AI-17	AI-18	AI-19	AI-20
要因の地形	窪地	窪地	窪地	窪地	窪地
地形までの距離 x/D	6.29	3.69	3.23	8.61	20.30
風速比	0.91	0.88	0.83	0.71	0.80
	AI-21	AI-22	AI-23	AI-24	AI-25
要因の地形	窪地	窪地	窪地	窪地	窪地
地形までの距離 x/D	6.35	3.23	5.99	22.93	22.06
風速比	0.92	0.69	0.77	0.69	0.90
	AI-26	AI-27	AI-28	AI-29	AI-30
要因の地形	窪地	窪地	山	窪地	窪地
地形までの距離 x/D	7.14	9.84	42.05	2.20	3.51
風速比	0.97	0.94	0.57	0.72	0.88
	AI-31	AI-32	AT-1	AT-2	AT-3
要因の地形	窪地	窪地	尾根	窪地	尾根
地形までの距離 x/D	3.85	5.85	7.85	20.44	5.01
風速比	0.75	0.51	0.75	0.82	0.84
	AT-4	AT-5	AT-6	AT-7	AT-8
要因の地形	尾根	尾根	尾根	尾根	尾根
地形までの距離 x/D	6.99	10.59	7.30	5.25	6.76
風速比	0.77	0.74	0.65	0.86	0.81

付録 B 公称値による風速階級別発電量

本章では，OpenFOAM において算出した風速補正後の風速階級別発電量と公称値による風速階級別発電量との比較について示す．

B.1 OpenFOAM における水平風での上流風風速とナセル風速計位置の風速

本節では，OpenFOAM による解析結果より水平風における上流風風速とナセル風速計位置の風速について示す．図 B.1 に OpenFOAM による上流風風速とナセル風速計位置の風速を示す．図 B.1 より水平風においてナセル風速計位置の風速は上流風より低い．これはナセル上設置物やロータスラストの影響であると考えられる．

B.2 公称値による風速階級別発電量

本節では公称値による風速階級別発電量と B.1 節の解析結果を基に算出した風速階級別発電量について示す．図 B.2 に水平風における風速補正後の風速階級別発電量と公称値による風速階級別発電量を示す．公称値による発電量は水平風での風速補正後の発電量より高い．

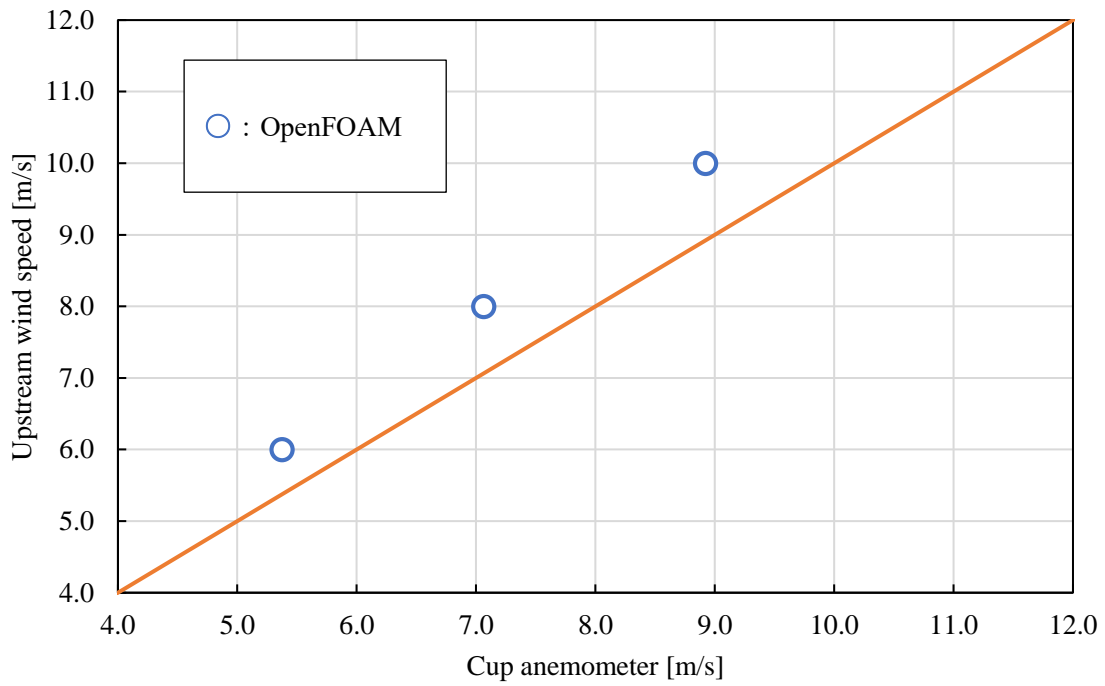


図 B.1 OpenFOAM による上流風風速とナセル風速計位置の風速（水平風）

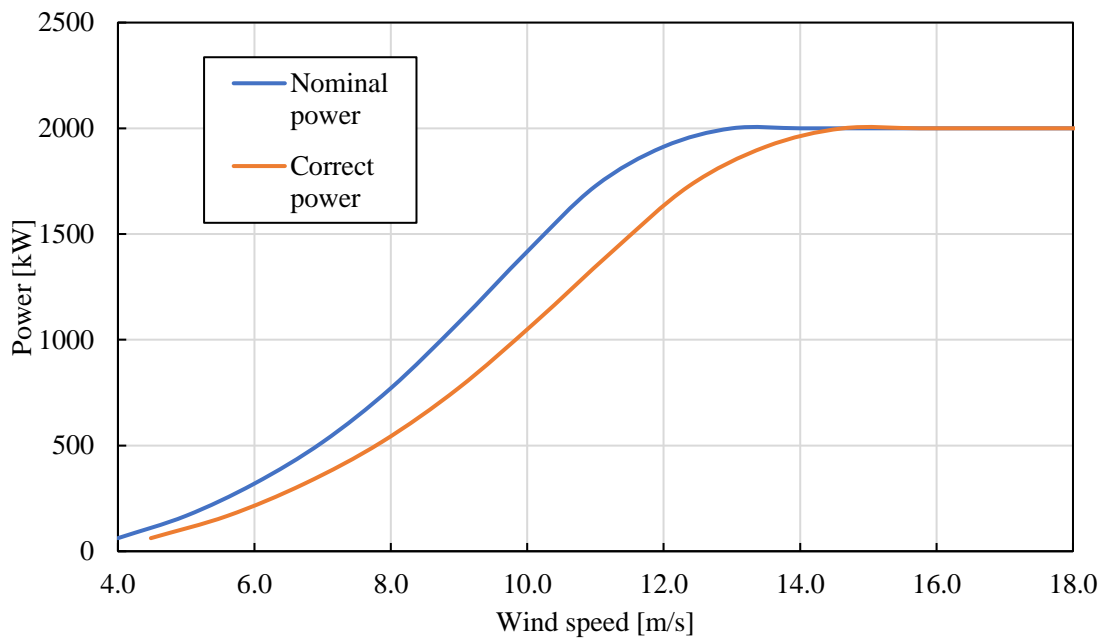


図 B.2 水平風における風速補正後の風速階級別発電量と公称値による風速階級別発電量

参考文献

- [1] 稲村慎吾, 繁永康, 清木荘一郎, 吉田茂雄, ダウンウィンド 2MW 風力発電システムの技術開発, 日立技報, 日立製作所, pp794-795, 2012.
- [2] 日立製作所 HP, 製品情報, HTW2.0-80, ダウンウィンドロータ, 2018. (アクセス 2020 年 1 月 6 日).
- [3] 谷垣三之介, ウィンドウズ オブ Wind (風の窓), 風況よもやま話日本風力発電協会 HP, pp79-88, 2010.
- [4] Tony Burton, Nick Jenkins, David Sharpe, Ervin Bossanyi, Wind Energy Handbook Second Edition, pp.198-199, 2011.
- [5] IEC, IEC61400-12-1 Wind energy generation systems – Part12: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, edition 2.0, pp39-40, 2017.
- [6] IEC, IEC61400-12-2 Wind turbines – Part12-2 Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry, edition 1.0, pp20-21, 2013.
- [7] 梶島兵夫, 乱流シミュレーション改訂版, 養賢堂, p207, 2014.
- [8] Takanori UCHIDA, Yoshihiro TANIYAMA, Yuki FUKATANI, Michiko NAKANO, Zhiren BAI, Tadasuke YOSHIDA and Masaki INUI, A New Wind Turbine CFD Modeling Method Based on a Porous Disk Approach for Practical Wind Farm Design, Energies, 3(12), pp12-24, 2020.
- [9] 寺田慎吾, 飯田誠, 荒川忠一, 数値モデリングの翼端損失に対する考察, 風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, 32 巻, pp225-228, 2010.
- [10] 株式会社ソフトウェアクレイドル, クーラン数, 計算ツール, <https://www.cradle.co.jp/calculation/01cn.html> (アクセス 2020 年 1 月 6 日).
- [11] IEC, IEC61400-1 Wind energy generation systems – Part1: Design requirements, edition 4.0, pp81, 2019.

[12] Friis Pedersen, Troels; Dahlberg, ACCUWIND-Classification of five cup anemometers according to IEC 61400-12-1, DTU Library, pp10-14, 2006.

[13] 篠崎陽介, 田辺安忠, 青山剛史, 松尾裕一, 荒川忠一, 大宮司啓文, 飯田誠, 風車後流シミュレーションによる後流拡大の考察, 注目研究 in 年会 2017, No.36, pp.403-408, 2017.

[14] 清水壮一郎, 吉田茂雄, ダウンウィンド風車のナセル風速計による乱流強度計測, 第 29 回 30 周年記念風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, pp.143-146, 2007.

[15] Allen Nicholas, A stochastic analysis of turbulence intensity influence over various sizes of HAWT, Master of Science in Renewable Energy System, pp36-41, 2016.

謝辞

本研究を遂行し、修士論文をまとめるに当たり、多くのご支援とご指導を受け賜りました前田太佳夫教授に心より感謝を申し上げます。研究室生活で複数の共同研究や学会発表など非常に充実した三年間を過ごすことが出来ました。恵まれた環境を与えてくださった前田先生に改めて厚くお礼申し上げます。そして、本研究の実験から解析まで幅広い分野でご指導を賜りました鎌田泰成准教授に深く感謝申し上げます。風車工学に関する理論をはじめ、プログラミング、機械工作や雑学など様々な分野における鎌田先生の豊富な知識や技術を学べたのは私の大きな財産です。鎌田先生から学んだ技術者としての考え方を軸に、鎌田先生のような技術者を目指し、日々精進致します。また、秘書として研究室を支えてくださった、赤松幸子秘書に深く感謝申し上げます。赤松さんのいつも明るい姿に元気をいただいていた。いつも優しく接してくださりととても癒されました。また、本論文の審査にあたり副査を担当してくださった高橋護助教に深く感謝申し上げます。ご多忙のところ審査を受諾していただきありがとうございます。そして、本研究を遂行するにあたり、風車観測データの提供、ナセル搭載三杯式風速計の提供やナセルスケールモデルの提供等で手厚いサポートを賜りました、青山高原ウィンドファーム株式会社の長谷祐児様、上地啓稔様、今井雄也様、長谷川祐基様、三上有沙様にも深く感謝を申し上げます。

また、本研究を共に遂行したウィンドファームチームの皆にも感謝の意を述べたいと思います。小林大記君はウィンドファームのデータ整理、OpenFOAM の解析やプラズマ実験の手伝いなど柔軟に対応してくれてありがとう。またどんな仕事を頼んでも一つも文句言わず仕事をこなしてくれてとても助かりました。今年は就活に研究に忙しくなると思いますが、この乱気流のような院生生活を柔軟な対応力で往なして行ってください。もし、一時停止してもきっと松田君がやさしく再生ボタンを押してくれると思います。松田武大君は頭の回転が速く、すぐ理解して実験やデータ整理等で色々と助けていただきました。私の至らなさからプラズマ実験を丸投げして申し訳ないです。松田君なら最良の結果を残せると確信しています。今年は就活に研究に忙しくなると思いますが、デューティ比を上げて最高効率運転状態で院生生活を頑張ってください。小林君が一時停止した時はすぐに再生ボタンを押してあげてください。大林幸生君は勉強熱心で一生懸命研究に取り組んでくれました。B4 ひとりでさみしかったと思いますが、先輩にも分け隔てなく接してくれてチームのムードを上げてくれてありがとう。そのマッスルなボデーで力仕事をこなしてくれる姿は頼もしかったです。これからも筋トレで培ったパッションとメンタルで院生生活を乗り切ってください。小林君が一時停止した時はすぐに早送りボタンを押してあげてください。まとめてになりますが、ウィンドファームチームの皆のお陰で修士論文を完成させることが出来ました。本当にありがとうございました。

研究室生活において、互いに協力し合い、励まし合った同期の仲間にも深く感謝を申し上げます。高井健太君は乃木坂の話でとても盛り上がりましたね。健太とはたくさんラーメンを食べに行きました。また美味しいラーメン紹介してね。まだまだ僕たちは工事中ですが、

謝辞

お互い切磋琢磨して社会人として頑張らしましょう。またライブ行こうね。多田哲史君はバイト先も同じでプライベートでもとても仲良くしてくれました。バイト先がつぶれても卒業しても俺たちの絆はだれにも切れないぜ。また飲み行こう。津村浩助君はウィンドファームチームとしてプラズマ実験を手伝ってくれてありがとう。これからも後輩をよろしく。ありがとう。花村真紘君は松葉君と津村君をいじって M2 を盛り上げてくれました。社会人になって津村君と松葉君の代わりを見つけても彼らのことを忘れないであげてください。松葉一真君は、松林晃平君は私の雑なボケに的確にツッコんでくれました。なんてなめらかなツッコみなんだと感心していました。

その他、ここで名前を挙げられなかったエネ環の先輩方、4 年生の時に研究室で苦楽を共にした同期、M1、B4 の皆様、本当にありがとうございました。最後に、これまで私を育てて頂いた家族に心から感謝の意を表します。

2021 年 2 月 12 日

牛草 拓巳