

平成 30 年度 修士論文

ウインドファーム内の風車出力に及ぼす  
地形及び後流の影響に関する研究

2019 年 2 月 6 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

北川 慎吾

## 目次

第1章 緒言 .....	1
1.1 研究背景	
1.1.1 再生可能エネルギー	
1.1.2 世界の風力発電	
1.1.3 日本の風力発電	
1.2 本研究の目的	
第2章 記号および座標系 .....	7
第3章 解析対象および解析方法 .....	9
3.1 風況観測内容	
3.1.1 観測項目および平均化時間	
3.1.2 研究対象	
3.1.3 風向風速計の主要仕様	
3.1.4 風向の平均化手法	
3.2 MASCOT	
3.2.1 力学統計的局所化手法	
3.2.2 数値モデル	
3.2.2.1 基礎方程式	
3.2.2.2 乱流モデル	
3.2.2.3 数値解法	
3.2.3 境界処理法	
3.2.3.1 上流緩衝領域	
3.2.3.2 下流緩衝領域	
3.2.3.3 側面緩衝領域	
3.2.3.4 付加領域	
3.2.4 流入風の設定	
3.2.5 粗度変換	
3.2.6 解析条件	
3.2.6.1 地図標高データおよび地表面粗度区分	
3.2.6.2 計算条件	
3.2.6.3 解析領域高さの設定	
3.2.7 平均風速の割増係数ならびに吹上角の算定	

## 目次

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響 .....	31
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 年間および月別の平均風速ならびに発電量	
4.2.2 風向別の平均風速および発電量	
4.2.3 風向別風力エネルギー密度	
4.2.4 風向風速階級別の発電量	
4.3 後流の影響	
4.3.1 月別の平均風向	
4.3.2 月別の平均風速および発電量	
4.3.3 風向別の平均風速および発電量	
第5章 MASCOTによる解析結果 .....	54
5.1 平均風速の割増係数	
5.2 吹上角	
第6章 結言 .....	58
参考文献 .....	60
謝辞 .....	62
付録A 乱流強度 .....	64
付録B 風速の鉛直分布 .....	73

## 第1章 緒言

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 再生可能エネルギー

近年、地球温暖化の深刻化が社会的な問題となっており、地球環境に様々な変化や影響が生じることが懸念されている。地球温暖化の原因となる温室効果ガスの種類は様々だがなかでも二酸化炭素は最も温暖化への影響度が大きい。IPCC（国連気候変動に関する政府間パネル）第4次評価報告書によれば、温室効果ガス別の地球温暖化への寄与は、二酸化炭素 76.7%、メタン 14.3%、一酸化二窒素 7.9%、オゾン層破壊物質でもあるフロン類（CFCs, HCFCs） 1.1%となっている<sup>(1)</sup>。つまり、石油や石炭など化石燃料の燃焼等により排出される二酸化炭素が最大の温暖化の原因と言える。図 1.1 に温室効果ガス総排出量に占めるガス別排出量を示す。化石燃料の大量消費による二酸化炭素排出量は、人為起源の温室効果ガス総排出量の 65.2%を占めている。産業革命以降、化石燃料の消費量増加に伴い、大気中の二酸化炭素濃度も上昇している。図 1.2 に大気中の二酸化炭素濃度の推移を示す。二酸化炭素濃度は産業革命前 1750 年の 280ppm から 2013 年に 400ppm を超え、40%以上も増加している。IPCC は大気中の二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素が過去 80 万年間で前例のない水準まで増加していると報告している<sup>(2)</sup>。また、世界気象機関（WMO）は 2018 年の世界平均気温が過去 4 番目に高くなり、2015 年から 4 年連続の高温となる見通しだと発表した<sup>(3)</sup>。地球温暖化の進行に伴い、平均気温は 2016 年に観測史上最高を記録するなど上昇の一途を辿っている。

これらの影響を受け、発電時や熱利用時に二酸化炭素をほとんど排出しない再生可能エネルギーの導入が急務となっている。再生可能エネルギーは「エネルギー源として持続的に利用することができる」と認められるもの<sup>(4)</sup>として政令で定義されており、太陽光、風力その他非化石エネルギー源が当てはまる。再生可能エネルギーは一度利用しても比較的短期間に再生が可能であり、資源が枯渇しないエネルギーである。エネルギー資源に乏しい我が国はエネルギー供給のうち、石油や石炭、天然ガス等の化石燃料が 8 割以上を占めており、そのほとんどを海外に依存している。東日本大震災後、エネルギー自給率は 10%を下回っており、自給エネルギーの確保と低炭素社会の実現の観点から純国産で持続可能な再生可能エネルギーの導入の意義は大きい。日本では再生可能エネルギーの導入加速のため、2012 年 7 月に固定価格買い取り制度が施行された<sup>(5)</sup>。この制度は再生可能エネルギー源を用いて発電された電気を一定期間、固定価格で電気事業者が買い取ることを義務付けるものである。この制度により再生可能エネルギーを用いて発電された電力が一定価格で買い取られることが約束され、設備導入費用の回収の見通しが立てやすくなった。また我が国では東日本大震災での原発事故を受け、原子力発電は社会的信頼を失い、電力供給に安全性が強く求められるようになった<sup>(6)</sup>。発電時の環境負荷を最小限にでき、万が一の際に

爆発や汚染物質を撒き散らさない発電方法として今後も再生可能エネルギーの導入が進むと考えられる。

### 1.1.2 世界の風力発電

風力発電は再生可能エネルギーの中でも発電採算性や賦存量において有望なエネルギー資源であり、世界の主要国で導入が拡大している。2015年の世界全体での風力発電電力量は年間84万GWhと世界の年間総発電量の3.4%<sup>(7)</sup>を占め、再生可能エネルギーの中で最大規模の発電量を誇る。図1.3に世界の再生可能エネルギー発電比率を示す。再生可能エネルギー総発電量を1とした場合、風力発電電力量は約半数の49%を占める<sup>(7)</sup>。図1.4に世界の風力発電設備容量を示す。風力発電の設備容量は、2001年から平均20%以上の年間成長率で増加しており、今後も2020年まで約13%<sup>(7)(8)</sup>の成長率で拡大することが予測されている。風力発電市場の急成長は、2008年頃までドイツやスペイン等の欧州一部の国や米国が牽引していたが、2010年以降は中国が風力発電市場を先導し、欧州各国やインドやブラジル等の新興国でも導入が進んでいる。中国の国内での2017年の風力発電の年間導入量は約2000万kWだったが、2014年以降は毎年2000万kWを超えている。世界全体の風力発電の年間導入量5300万kWの約4割を占め、日本国内での年間導入量18万kWの100倍以上に達する。また、2017年末には累積導入量が約1億8800万kW<sup>(8)</sup>に達し、風力発電導入世界一となると共にEUに加盟する全28か国の累積導入量1億7800万kWを上回っている。これは日本の累積導入量340万kWの50倍以上に相当する<sup>(9)</sup>。

### 1.1.3 日本の風力発電

日本でも風力発電の導入拡大が進んでいる。図1.5に日本における風力発電導入量の推移を示す。日本における風力発電は1990年代から急速に導入されており、東日本大震災以降、伸び悩んでいた導入量も再び拡大している。2018年3月末時点までの累積の設備容量は前年度比4.3%増の約350万kW、設置基数は同2.5%増の2253基となった<sup>(10)</sup>。しかしながら、世界の動向をみると中国や米国等の世界各国が風力発電の総量を大きく増加させている中で日本の数値は目立って低い。風力発電の累積導入量も世界第19位にとどまっている。

これらの要因として、風力発電が盛んな欧米諸国と異なる日本の地形特性が挙げられる。日本は国土面積の約7割を山岳が占め、高風速域もこれらの複雑地形上に多い。そのため、日本国内で風車は複雑地形上に設置されることが多く、風車に流入する風は吹上げや吹下しを多く含む。これらへの対応として、吹上風を有効利用する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は従来のアップウィンド型風車と異なり、風車ロータがタワー後方に設置されており、ブレード・タワー間のクリアランスが大きい<sup>(11)</sup>。これにより、負のティルト角を有することができ、吹上風を効率的に捉えることができる。そのため、仮に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効率が下がるのに対し、ダウンウィンド型は逆に発電効率

## 第1章 緒言

が向上する。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、乱れのない風向データが得られ、理想的なヨー制御が可能となる。ヨー角の制御上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、発電効率の向上に繋がり変動荷重も低減する<sup>(12)</sup>。また、複雑地形上で高風況域は尾根部分に集中するため、風車を一定の敷地内に集中させるウィンドファーム方式が多く採用されている。局地的に不安定な風の影響を受ける個々の風車の発電量は風況により大きく変動するが、ウィンドファーム全体では発電量の変動を抑制することが可能である。その反面、ウィンドファームでは風車が密接して配置されるため、後流の影響が大きい。一方、複雑地形の風車発電量の評価には、地形に起因する複雑な気流の定量的な把握が必要となる。

### 1.2 本研究の目的

近年、世界各国で風力発電の普及が進んでいるが、日本のような複雑地形上に設置された風力発電に対する高精度な性能評価法は未だ確立されていない。また、複雑地形に起因して日本の風特性は乱れが強いとされているが、その詳細は明らかになっていない。

そこで本研究は、ウィンドファーム内の代表的な風車 8 基を対象とし、地形特性および後流が風車性能に及ぼす影響を解明した。その方法として、1年間の風車出力データの解析を行い、当該地点の発電状況および後流の影響を定量的に評価した。また、非線形風況予測ソフトウェア MASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain) を用いた風況解析を行い、吹上げや吹下しを含む風特性を考察した。

## 第1章 緒言

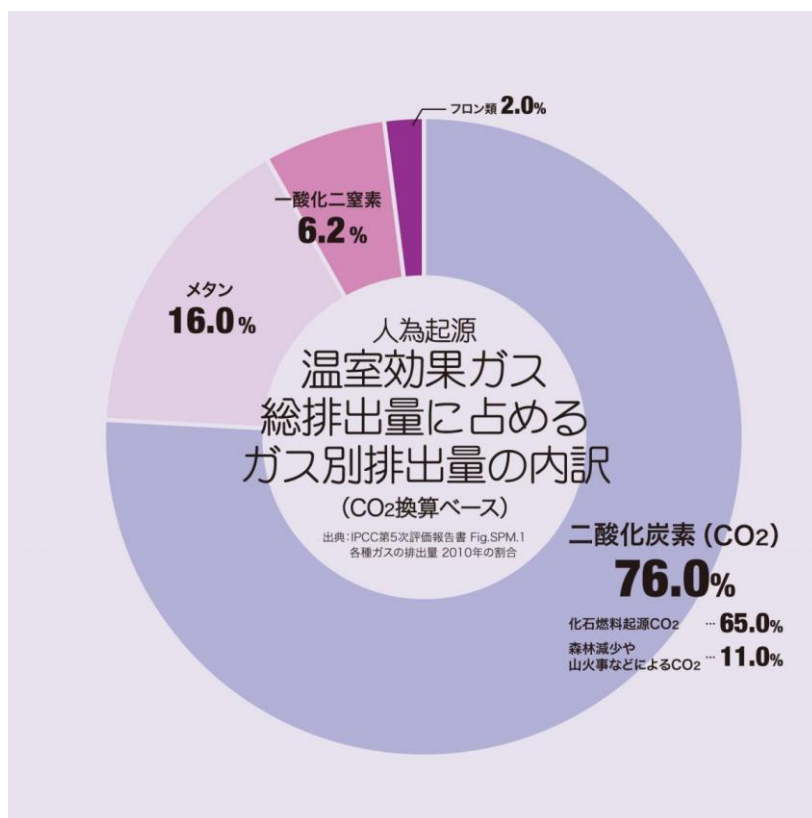


図 1.1 温室効果ガス総排出量に占めるガス別排出量  
(出典：IPCC 第5次評価報告書)

## 大気中の二酸化炭素濃度の推移 (緯度別)

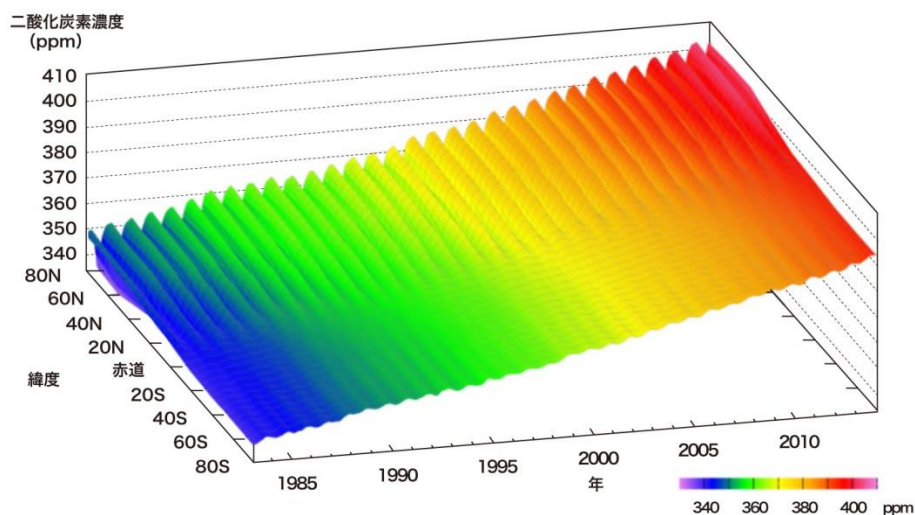


図 1.2 大気中の二酸化炭素濃度  
(出典：気候変動監視レポート 2014)

世界の再生可能エネルギー発電比率（2015年）

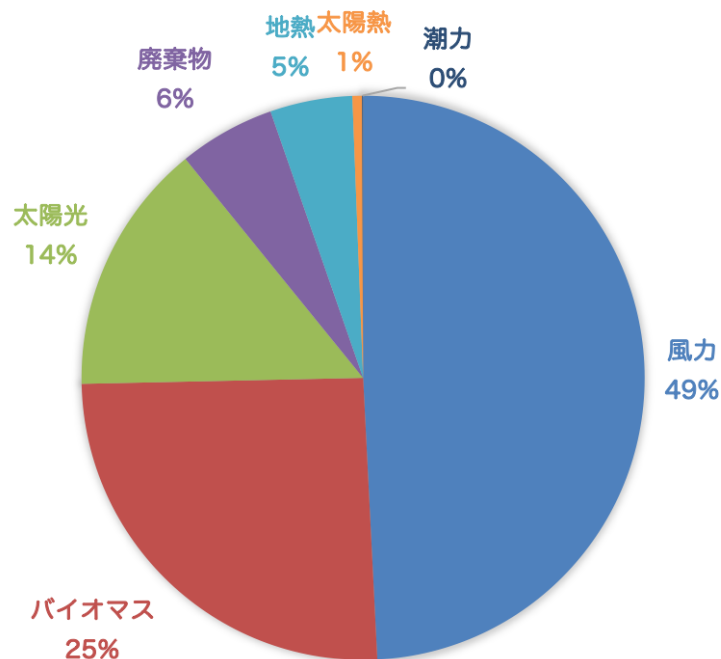


図 1.3 世界の再生可能エネルギー発電比率  
 (出典：IEA 再生可能エネルギー2015)

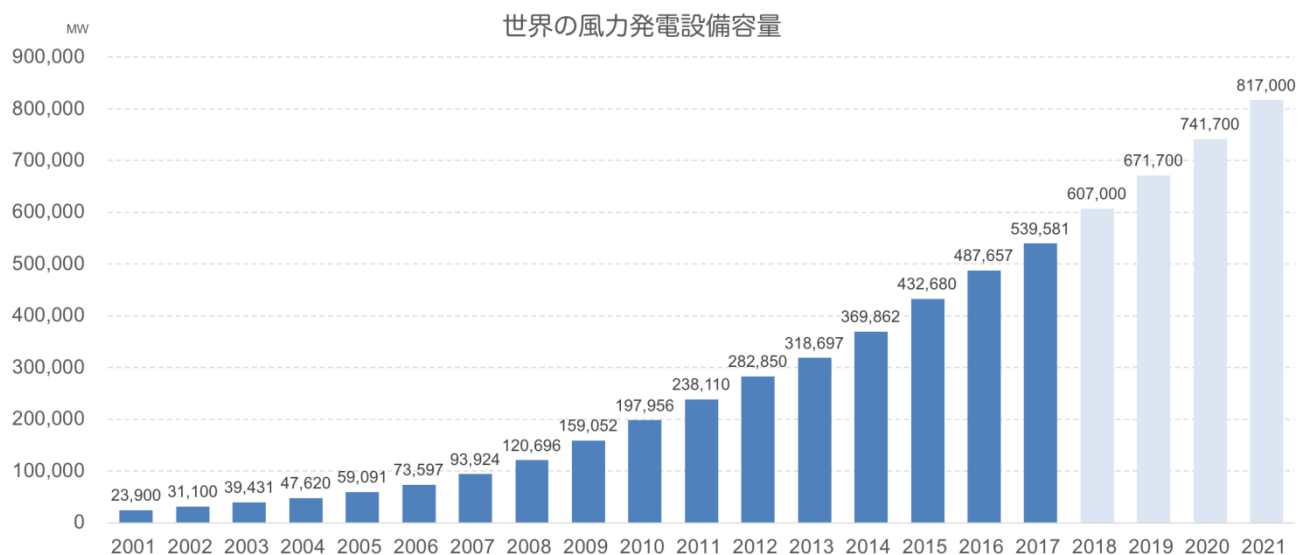


図 1.4 世界の風力発電設備容量  
 (出典：Global Wind Report 2017)



第1章 緒言

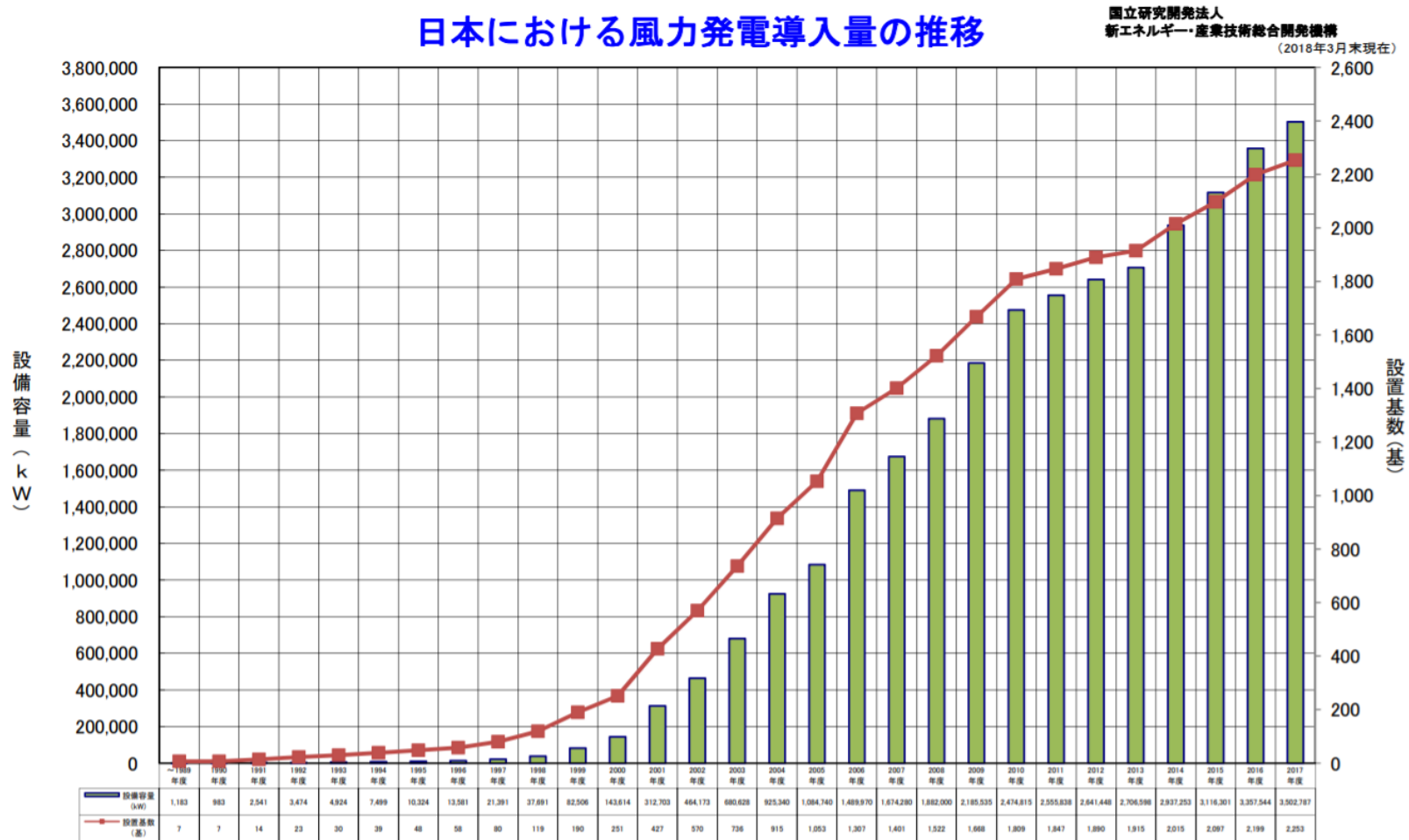


図 1.5 日本における風力発電導入量の推移  
(出典：日本における風力発電設備導入実績，NEDO)

## 第2章 記号および座標系

$a_p$	: 質量保存式における対流項の係数	
$a_{nb}$	: 質量保存式における拡散項の係数	
$b_\phi$	: 離散化した質量および運動量保存式における外力項	
$C_\mu$	: $k - \varepsilon$ モデルのモデル定数	
$h(x, y)$	: 境界処理前の地形	[m]
$\hat{h}(x, y)$	: 境界処理後の地形	[m]
$H$	: 風車ハブ高さの標高	[m]
$H_{db}$	: 下流緩衝領域の下流側半分での標高	[m]
$H_{sb}$	: 緩衝領域外側での標高	[m]
$H_{ub}$	: 主流方向および鉛直方向に一定な標高	[m]
$H_{max}$	: 解析領域内の最大標高値	[m]
$H_{min}$	: 解析領域内の最小標高値	[m]
$J$	: 直交座標系から一般座標系への変換のヤコビアン	
$k$	: 乱流エネルギー	[J]
$L_c$	: 解析領域および付加領域の幅	[m]
$\bar{p}$	: 圧力	[Pa]
$P_{hub}$	: 風車のハブ高さの標高における大気圧	[Pa]
$P_0$	: 風力エネルギー密度	[W/m <sup>2</sup> ]
$P_{ref}$	: 2017 および 2018 年津市の月別平均大気圧	[Pa]
$R$	: 気体定数	[J/(kg · K)]
$S_\phi$	: 一般座標系における質量および運動量保存式の外力項	
$T$	: ナセル外気温	[°]
$u$	: 主流風速の瞬時値	[m/s]
$\bar{u}_i'$	: 物理空間での $x_i$ 方向速度成分の平均値	[m/s]
$\bar{u}_j'$	: 物理空間での $x_j$ 方向速度成分の変動値	[m/s]
$\bar{u}_x$	: 瞬時風速における $x$ 成分の 10 分間平均値	[m/s]
$\bar{u}_y$	: 瞬時風速における $y$ 成分の 10 分間平均値	[m/s]
$U$	: 風速の主流方向成分	[m/s]
$U_j$	: 反射速度成分	[m/s]
$V$	: 風速の半径方向成分	[m/s]
$W$	: 風速の鉛直方向成分	[m/s]
$x_a$	: 付加領域と上流緩衝領域の境界	[m]
$x_{c1}$	: 計算領域の $x$ 方向上端部	[m]
$x_{c2}$	: 計算領域の $x$ 方向下端部	[m]
$x_i$	: 直交座標系における主流方向位置	[m]
$x_j$	: 直交座標系における半径方向位置	[m]

## 第2章 記号および座標系

$x_{m1}$	: $x_a$ と $x_{c1}$ の midpoint	[m]
$x_{m2}$	: $x_{c2}$ と $x_{t2}$ の midpoint	[m]
$x_{t1}$	: 対象領域と付加領域の境界	[m]
$x_{t2}$	: 対象領域と下流緩衝領域の境界	[m]
$y_{c1}$	: 計算領域の $y$ 方向上端部	[m]
$y_{c2}$	: 計算領域の $y$ 方向下端部	[m]
$y_{t1}$	: 対象領域と側面緩衝領域の境界上端部	[m]
$y_{t2}$	: 対象領域と側面緩衝領域の境界下端部	[m]
$y_{m1}$	: $y_{c1}$ と $y_{t1}$ の midpoint	[m]
$Z_{agl}$	: 各メッシュの地表面からの高さ	[m]
$Z_H$	: 解析領域高さ	[m]
$\Gamma_\phi$	: 拡散係数	
$\delta_d$	: 下流緩衝領域の奥行き	[m]
$\delta_u$	: 上流緩衝領域の奥行き	[m]
$\delta_s$	: 側面緩衝領域の奥行き	[m]
$\varepsilon$	: 乱流エネルギー散逸率	
$\theta$	: 風向の瞬時値	[°]
$\bar{\theta}$	: 風向の 10 分間平均値	[°]
$\theta_{flow}$	: 吹上角	[°]
$\mu$	: 分子粘性係数 (粘性係数)	
$\mu_t$	: 乱流粘性係数 (渦粘性係数)	
$\rho$	: 空気密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi$	: 従属変数	

## 第3章 解析対象および解析方法

### 3.1 風況観測内容

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の風況データを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分区分電力量
- 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

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風車が設置されている。図3.1にウィンドファーム内の風車配置図、図3.2に風車概要、表1に風車主要仕様を示す。風車の出力制御は可変速およびピッチ制御であり、ピッチ角はハブ内部に取り付けられているピッチモータにより調整される。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、吹上風においてロータ軸の角と吹上角との差が小さくなるため、発電量が増加する<sup>(1)</sup>。

本研究では、主風向において風車へ流入する風が吹上風および吹下風となるウィンドファーム内の風車4基（AI-27 および AT-8，AI-15 および AT-3）に着目し、風車出力に及ぼす地形の影響を考察した。本研究では、図3.1に示すように風車出力に及ぼす地形の影響を調査するため、AおよびB断面を設けた。図3.3にAおよびB断面の簡易図を示す。図3.4にA断面図、図3.5にB断面図を示す。図3.3より、4.1節で示す当サイトの主風向W，WNW，NWでAI-15 および AI-27 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、AT-3 および AT-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。

### 第3章 研究対象および手法

ここで、本ウィンドファームの主風向は、図 3.1 に示す比較的に地形および後流の影響を受けにくい AI-2 の観測風向により判定した。図 3.4 より、AT-8 のロータ中心標高は 780.4m であり、尾根の標高 786.3m とおよそ同程度である。図 3.5 より、AT-3 のロータ中心標高は 767.4m であり、尾根の標高 774.2m とおよそ同程度である。また、上流風車の後流による下流側風車への影響については主風向に対して概ね直線状に配置されている風車 4 基 (AI-1 および AI-2, AI-16 および AI-17) に着目し、評価を行った。

表 1 風車主要仕様

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

#### 3.1.3 風向風速計の主要仕様

風向風速計は NRG SYSTEM 社 (米国) 製の NRG システムを使用した。同システムのセンサー部は三杯型風速計および矢羽型風向計により構成されている。図 3.6 にタワーヘッド構造図を示す。図 3.6 に示すように、風向風速計はナセル上部に 2 機設置されており、風向風速計の後方 2.2m、高さ 0.3m 下に航空障害灯が設置されている。航空障害灯が風速計の読みに与える影響については 4.2.3 節で述べる。風向計の測定可能範囲は 0~360°、観測精度は ±1°である。また、風速計の閾値は 2m/s、耐風速は 70m/s である。

#### 3.1.4 風向の平均化手法

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算術平均を行った場合、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、算術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3.7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， $\theta$ は風向の瞬時値を示す．つぎに，各成分を10分間で平均し，式(3.1)を用いて風向の10分間平均値を算出する．

$$\bar{\theta} = \tan^{-1}(\bar{u}_x, \bar{u}_y) \quad (3.1)$$

ここで， $\bar{u}_x$ は $x$ 成分の10分間平均値， $\bar{u}_y$ は $y$ 成分の10分間平均値， $\bar{\theta}$ は風向の10分間平均値を示す．図3.8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3.9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3.8より，算術平均値との比較では $0^\circ$ 付近の風向にばらつきがみられ，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3.9より，ベクトル平均値との比較では， $0^\circ$ 付近の風向のばらつきが改善され，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．

### 3.2 MASCOT

本研究では，ウィンドファーム内の風車出力に及ぼす地形の影響を明らかにするため，非線形風況予測モデルMASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain)<sup>(13-15)</sup>を用いて風況解析を行った．MASCOTは従来欧州等で使われてきたWaSP等の線形モデルに比べ，以下の特徴を持つ．

1. 一般座標系を採用し，任意傾斜角度をもつ地形に対応でき，また鉛直方向に不等間隔格子，水平方向にズームング格子を採用することにより，必要な領域に格子を集中させることができる<sup>(14)</sup>．
2. 離散化手法としては質量および運動量の保存則を満足する有限体積法を用い，数値解法には安定性の高い半陰解法SIMPLE法を採用している<sup>(14)</sup>．
3. 複雑地形における局所風況を予測するため，新しい境界処理手法が提案されており，境界処理が内部領域に与える影響が最小限に低減されている．
4. 乱流モデルとしては標準 $k-\varepsilon$ または修正 $k-\varepsilon$ モデルを用いることにより，平均風速場

のみならず、剥離を含む複雑流れ場の変動風速の標準偏差を精度よく予測することが可能である<sup>(14)</sup>。

5. MASCOT は標高 (50m 分解能) と地表面粗度 (100m 分解能) に関するデータベースを備えており、任意地点における緯度、経度を入力すれば、風況解析が可能となる<sup>(15)</sup>。
6. 大規模線形連立方程式を高速かつ安定的に解くための手法が適用されており、100 万格子を用いた 10km 四方の風況予測は 1 台のコンピュータで 1 時間以内に解析することが可能である。
7. 対象領域内の 1 地点における風速および風向の時系列データ (観測または気象予測から) が得られていれば、年平均風速、平均風速の日変化や月変化、または平均風速のワイブル分布が得られる。

### 3.2.1 統計力学的局所化手法

風力開発を行う際には、建設地点の風況を事前に把握することが重要である。現在、全国をカバーする風況マップは十数 km に 1 点の気象観測データを内挿して作られたものであるため、局所地形の影響を反映しておらず、詳細な風況マップとして使うことができない。そのため、現状では最低 1 年間の風観測による風況精査を行う必要がある。風況精査は多くの時間を要するため、迅速な風況精査手法の確立が急務と言える。

観測を行わずに気象モデルを用いて風況精査を行うための方法としてはネスティング (Nesting method) と呼ばれる方法と統計力学的局所化 (Statistical Dynamical Downscaling) と呼ばれる方法が提案されている。ネスティング手法では、気象予測モデルの結果を境界条件として、順次、高解像度の小さな領域をネスティングさせることにより、局所風況を予測する。NEDO が開発を進めている風況予測モデルは、地域気象モデルと工学モデルを用いて最小格子間隔 10m のグリッドまで 5 段にネスティングさせることによって、局所風況予測を行う。この方法ではネスティングされた全領域に対し、最低 1 年分の時系列計算を行う必要があり、計算時間が膨大となるため、6 日おき、1 日 4 回の計算のみを行っている。このように予測された風況は実際の風況と異なる恐れがある。谷川ら<sup>(16)</sup>は同様に気象モデルを最小格子間隔 500m までネスティングさせることによって風況精査を行っている。しかし、日本のような急峻地形上の流れ場を正しく予測するためには最低でも 50m の格子を用いる必要があり、500m の格子間隔では明らかに不十分である。一方、統計力学的局所化手法として、Frank et al.<sup>(17)</sup>は全球モデルの解析結果を統計処理し、それぞれのケースに対し、力学的に地域風況を予測し、さらに局所的な地形、地表面粗度の影響を考慮に入れた局所風況への変換のために、線形風況予測モデル WAsP を用いた。しかし、この手法は、海陸風や山谷風などの局地循環を再現できず、また局所風況の予測に線形モデル WAsP を用いているため、急峻な地形が多い日本には適用できないという問題点がある。

気象モデルを利用した従来の風況精査手法の問題点を解決するために、本研究で用いた MASCOT では統計力学的局所化手法が適用されている。本手法では、まず、気象モデルで用いた 1~2km 程度の解像度を持つ粗い地形と粗度を用い、MASCOT による風況シミュレーションを行い、地域風況から仮想領域の風況への変換を行う。次に、10m~50m 程度の解像度を持つ細かい地形と地表面粗度を用いた風況シミュレーションを行い、仮想領域の風況から対象地点での実風況へと変換する。すなわち、本手法では、まず仮想領域での標準風況を求め、次に対象地点の実風況に変換する。

### 3.2.2 数値モデル

MASCOT では、流体力学の基礎方程式である質量保存の式と運動量保存の式を有限体積法により数値的に解くことによって流れ場の数値解を求める。乱流モデルとしては  $k - \varepsilon$  モデルと呼ばれる 2 方程式モデルが用いられている<sup>(14)</sup>。

#### 3.2.2.1 基礎方程式

非圧縮の流れに対して、直交座標系における質量および運動量のレイノルズ平均方程式は式(3.2)および式(3.3)で与えられる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (3.3)$$

ここで、 $\bar{u}_i$  と  $\bar{u}'_j$  は物理空間での  $x_i$  方向の速度成分の平均値と変動値を表わす。そして、 $\bar{p}$  は圧力、 $\rho$  は流体の密度、 $\mu$  は粘性係数を表す。また、レイノルズ応力  $\rho \overline{u'_i u'_j}$  は線形渦粘性型モデルにより近似すると、式(3.4)となる。

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.4)$$

$\mu_t$  は乱流粘性係数であり、乱流エネルギー  $k$  と乱流エネルギー散逸率  $\varepsilon$  により、式(3.5)で表すことができる。

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

標準  $k - \varepsilon$  モデルを用いる場合には、 $C_\mu$  の値を 0.09 とする。



### 3.2.2.2 乱流モデル

MASCOT では、 $k - \varepsilon$ モデルを用い、乱流エネルギー $k$ および乱流エネルギーの散逸率 $\varepsilon$ を以下の式(3.6)および式(3.7)を解くことにより求める<sup>(18)</sup>。

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (3.7)$$

式(3.6)および式(3.7)中の定数は、標準 $k - \varepsilon$ モデルの値を用い、 $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.0$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ とした。

### 3.2.2.3 数値解法

上記の保存式は、従属変数を $\phi$ として直交座標系 $x_j$  ( $j = 1, 2, 3$  for  $x, y, z$ )で書くと、式(3.9)となる。

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (3.8)$$

ここで、 $\Gamma_\phi$ は拡散係数、 $S_\phi$ は外力項を表す。解析はコロケート格子 (collocated grid) に基づく有限体積法を用いて行う。壁面近傍の解析精度を確保するために、一般曲座標系 $\xi_j$  ( $j = 1, 2, 3$  for  $\xi, \eta, \varsigma$ )を用い、一般曲線座標における保存式は式(3.9)で表される。

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j \phi}{\partial \xi_j} = \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left( \Gamma_\phi J q_{jk} \frac{\partial \phi}{\partial \xi_k} \right) + J S_\phi \quad (3.9)$$

ここで、 $U_j$  ( $j = 1, 2, 3$  for  $U, V, W$ ) は反変速度成分であり、式(3.10)で表され、保存式の離散化は Patankar の方法に従って行う。

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \xi_x & \xi_y & \xi_z \\ \eta_x & \eta_y & \eta_z \\ \varsigma_x & \varsigma_y & \varsigma_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

加えて  $J$  は直交座標系から一般座標系への変換のヤコビアンであり、式(3.11)で表される。

$$J = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(\xi, \eta, \varsigma)} = \begin{bmatrix} x_\xi & y_\xi & z_\xi \\ x_\eta & y_\eta & z_\eta \\ x_\varsigma & y_\varsigma & z_\varsigma \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

また,  $q_{jk}$ は式(3.12)で定義される.

$$q_{jk} = \frac{\partial \xi_{jk}}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial \xi_k}{\partial x_i} \quad (3.12)$$

最終的に離散化した保存式は式(3.13)のように表される.

$$a_P \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b_\phi \quad (3.13)$$

ここで,  $a$ は保存式の対流項, 拡散項, 非定常項の係数を表し,  $b_\phi$ は外力項,  $nb$  (neighbor point) は図 3.10 に示す各要素 (中心  $P$ ) を示す. 数値解法は Patankar により提案された SIMPLE 法に準じる. また, 数値的な振動を防ぐために, Rhie & Chow により提案された圧力加重補間法を用い, 圧力と速度との結合が強化されている. 対流項の差分近似については速度に対して QUICK, 乱流特性量である  $k, \varepsilon$ に対して一次風上差分が使用されている. 線形方程式の解法としては RCM 法が用いられている.

### 3.2.3 境界処理手法

境界の影響が対象領域に伝わらないように境界付近に緩衝領域を設ける手法がこれまで用いられてきた. Maurizietal et al.<sup>(19)</sup>は対象領域の端点の標高をそのまま水平方向に延長し, 緩衝領域とした. また風洞実験では, 対象領域の端点から標高 0 の高さ, すなわち風洞床面の高さまで地形を直線的に下げ, この直線部分と風洞の側面までの床面とを合わせて緩衝領域としている. これらの手法で作成された緩衝領域を用いる場合, 境界処理前後で緩衝領域内の地形の断面積や体積が変化し, 結果的に対象領域内の平均風速が変化するという問題がある<sup>(20)</sup>. 本研究で用いた MASCOT では, 実地形の一部を取り出して解析する場合に対象領域の側面と上下流に緩衝領域を設置し, 緩衝領域内での地形の体積を一定とする境界処理手法<sup>(17)</sup>が採用されている. 境界処理手法を用いる場合, 元の地形上の流れ場に近い流れ場が再現され, 従来の手法による風速の過大または過小を解消することができる. また, 上流の地形の影響を考慮するため, 対象領域の上流側の境界には緩衝領域のほかに対象領域と同じ大きさの付加領域を設けることにより上流の地形の影響を考慮でき, 対象領域内の流れ場の予測精度が向上する. 図 3.10 には解析の対象とする各領域を示し, 図中に斜線で示す正方形が風況予測の対象領域, その上流に付加領域, さらにその周囲に緩衝領域が設けられている. 計算領域はこれら全ての領域を含む領域となる. また  $x$ は風が進む方向,  $y$ は風と直角方向を表す.

### 3.2.3.1 上流緩衝領域

図 3.12 に上流緩衝領域の定義を示す．ここでは $x_{c1}$ 地点が計算領域の端部を表し， $x_a$ が緩衝領域と付加領域の境界を示す．上流緩衝領域内の地形の体積が元の地形の体積と同じになるように設定する．上流緩衝領域の上流側半分では，風方向にも風直角方向にも一定の標高 $H_{ub}$ とし，残り半分では対象領域の標高と直線で結ぶ．境界処理後の地形 $\hat{h}(x, y)$ は境界処理前の地形 $h(x, y)$ に基づき式(3.14)のように求められる．

$$\hat{h}(x, y) = \begin{cases} H_{ub} & (x_{m1} \leq x \leq x_a) \\ H_{ub} + \frac{2(x - x_{m1})}{\delta_u} [h(x_a, y) - H_{ub}] & (x_{c1} \leq x \leq x_{m1}) \end{cases} \quad (3.14)$$

ここで， $x_{m1}$ は $x_a$ と $x_{c1}$ の midpoint である．また， $H_{ub}$ は地形処理前後で緩衝領域内の地形の体積が一定となるように式(3.15)から求める．

$$H_{ub} = \frac{1}{3\Delta y} \int_{y_{c1}}^{y_{c2}} \left[ \frac{4}{\delta_u} \int_{x_{c1}}^{x_a} h(x, y) dx - h(x_a, y) \right] dy \quad (3.15)$$

$\Delta y (= y_{c1} - y_{c2})$ は，緩衝領域の幅， $\delta_u (= x_a - x_{c1})$ は緩衝領域の奥行きを表す．上流緩衝域の大きさは，対象領域の 0.3 倍とし，その最小値は 1km と設定されている．本研究では，MASCOT の基本設定に準拠し，上流緩衝域の大きさを対象領域の 0.3 倍とした．

### 3.2.3.2 下流緩衝領域

下流緩衝領域も上流領域と同じ考え方に基づいて設定する．図 3.13 には，下流緩衝領域の定義を示す．ただし，上流領域と異なり，下流緩衝領域の下流側半分での高さ $H_{db}$ は風と直角方向に変化するよう設定されている．境界処理後の地形 $\hat{h}(x, y)$ は境界処理前の地形 $h(x, y)$ に基づき式(3.16)のように求める．

$$\hat{h}(x, y) = \begin{cases} H_{db}(y) & (x_{c2} \leq x \leq x_{m2}) \\ H_{db}(y) + \frac{2(x - x_{m2})}{\delta_d} [h(x_{t2}, y) - H_{db}] & (x_{m2} \leq x \leq x_{t2}) \end{cases} \quad (3.16)$$

ここで， $x_{m2}$ は $x_{c2}$ と $x_{t2}$ の midpoint である．また， $H_{db}(y)$ は地形処理前後で緩衝領域内の地形の面積が一定となるように式(3.17)から求められる．

$$H_{db}(y) = \frac{1}{3} \left[ \frac{4}{\delta_d} \int_{x_{c2}}^{x_{t2}} h(x, y) dx - h(x_{t2}, y) \right] \quad (3.17)$$

ここで、 $\delta_d (= x_{t2} - x_{c2})$ は、下流緩衝領域の奥行きを表す。本研究では、MASCOTの基本設定に準拠し、下流緩衝領域の大きさを対象領域の0.3倍とした。

### 3.2.3.3 側面緩衝領域

図3.14には、側面緩衝領域の定義を示す。ここでは $y_{c1}$ が計算領域の側面端部を表し、 $y_{t1}$ が対象領域と緩衝領域の境界を示す。緩衝領域外側での標高 $H_{sb}(x)$ は、緩衝領域の半分のところまで一定とし、そこから対象領域境界での標高 $h(x, y_{t1})$ まで直線で結ぶ。境界処理後の地形 $\hat{h}(x, y_{t1})$ は式(3.18)に示す。

$$\hat{h}(x, y) = \begin{cases} H_{sb}(x) & (y_{c1} \leq y \leq y_{m1}) \\ H_{sb}(x) + \frac{2(y - y_{m1})}{\delta_s} [h(x, y_{t1}) - H_{sb}(x)] & (y_{m1} \leq y \leq y_{t1}) \end{cases} \quad (3.18)$$

ここで、 $y_{m1}$ は $y_{c1}$ と $y_{t1}$ の midpoint である。また、高さ $H_{sb}(x)$ は、元地形と断面積が等しくなるように、式(3.19)から求める。

$$H_{sb}(x) = \frac{1}{3} \left[ \frac{4}{\delta_s} \int_{y_{c1}}^{y_{t1}} h(x, y) dx - h(x, y_{t1}) \right] \quad (3.19)$$

$\delta_s (= y_{t1} - y_{c1})$ は、側面緩衝領域の幅を表す。本研究では、MASCOTの基本設定に準拠し、側面緩衝領域の大きさを対象領域の0.3倍とした。

### 3.2.3.4 付加領域

一般に対象領域内の流れ場はその上流の地形の影響を強く受けるため、上流境界に緩衝領域を設けるだけでは上流の地形の影響を正確に反映することができない。MASCOTでは図3.10に示すように対象領域の上流に付加領域が設けられている。付加領域の大きさの目安は、対象領域と同じ大きさを取り、その最小値は3kmと設定されている。本研究では、MASCOTの基本設定に準拠し、付加領域の大きさを対象領域の1倍とした。

### 3.2.4 流入風の設定

局所地形における風速と乱れを予測する際には、風洞実験と同様に、対象地形の上流側における気流の鉛直分布を与える必要がある。2方程式乱流モデルを用いて流れ場を求める場合には平均風速 $\bar{u}$ 、乱流エネルギー $k$ とエネルギー散逸率 $\varepsilon$ を地表面の状態に応じて定めなければならない。MASCOTでは、気流解析から得られた地表面粗度毎の鉛直分布を用い、上流側の緩衝領域内の平均粗度に内挿した鉛直分布をデフォルト値としている。

### 3.2.5 粗度変換

地表面の粗度は、一般に粗度長で表す。粗度長を区分する基準としては土地利用に対応させる方法があり、風工学の分野で多く使用されているのが、日本地図センターから発行されている国土数値情報で定められた区分である。MASCOT では、従来の区分に手を加え独自に定義した粗度区分が使用されている。表 3.2 に MASCOT における粗度区分を示す。

### 3.2.6 解析条件

#### 3.2.6.1 地図標高データおよび地表面粗度区分

本研究では、基本標高のデータファイルは、MASCOT に付属されている国土地理院発行の数値地図 50m メッシュデータを用いて作成した。地表面粗度区分は、実地形および平坦地形ともに表面粗度区分Ⅱに設定した。

#### 3.2.6.2 計算条件

本節では、MASCOT の解析条件を示す。本研究では、地形により吹上風および吹下風を受ける風車 4 基 (AI-27 および AT-8, AI-15 および AT-3) を対象とし、MASCOT による風況解析を行った。風車 2 基は、解析中心から半径 2km の範囲に設置されている。図 3.15 に解析領域の概要図を示す。解析モデルは Reynolds Averaged Numerical Simulation (RANS)、乱流モデルは  $k-\varepsilon$  モデルである。地図標高データは、国土地理院発行の数値地図 50m メッシュデータを用いた。地表面粗度区分は、実地形および平坦地形ともに表面粗度区分Ⅱに設定した。解析方位は 16、解析領域は 6.0km × 6.0km であり、付加領域および緩衝領域を含めると 8.2km × 8.6km である<sup>(13)(14)</sup>。本研究における付加領域および緩衝領域を含めた総解析領域の概要図を図 3.16 に示す。水平方向の最小メッシュサイズは 20m、鉛直方向の最小メッシュサイズは 5m、最小メッシュサイズでの解析領域は半径 2000m、総解析メッシュ数は 3,258,900 である。メッシュの伸び率は水平方向で 1.15、鉛直方向で 1.2 とした。対象領域に対する各領域の比率は、MASCOT の基本設定に準拠し、付加領域を 1、緩衝領域を 0.3 とした。風速の評価高さは、ハブ高さ 65.4m とした。また流入風の設定は、MASCOT の気流解析から得られた地表面粗度毎の鉛直分布を用い、上流側の緩衝領域内の平均粗度に内挿した鉛直分布を使用した。

#### 3.2.6.3 解析領域高さの設定

解析領域高さが解析結果に影響を与えないためには、解析領域の閉塞率を 5%以下とする必要があるとされている。解析領域内の最大標高差の 20 倍に解析領域内の最低標高値を加えた数値を解析領域高さとして設定することによって、閉塞率 5%以下の条件を満たすこと

ができる。ただし、大気特性上、成層圏界面（高度約10km）を超える解析領域の高さを取ることは現実的でないため、解析領域高さの上限を10kmとする。すなわち、解析領域高さ $Z_H$ は、式(3.20)で表すことができる。

$$Z_H = \min(20(H_{\max} - H_{\min}) + H_{\min}, 10000\text{m}) \quad (3.20)$$

ここで、 $H_{\max}$ は解析領域内の最大標高値、 $H_{\min}$ は解析領域内の最低標高値である。また、式(3.15)にある20は、地形が2次元であると仮定し、閉塞率5%の条件（ $1/20=0.05=5\%$ ）を満たすように設定した数値である。本研究では、解析領域内の最大標高値 $H_{\max} = 840\text{[m]}$ 、解析領域内の最低標高値 $H_{\min} = 4\text{[m]}$ とし、解析領域高さ $Z_H = 10000\text{[m]}$ に設定した。

### 3.2.7 平均風速割増の係数ならびに吹上角の算定

本研究では、非線形風況予測モデル MASCOT により、予測地点における平均風速の割増係数および吹上角の算定を行った。ここで平均風速の割増係数について述べる。MASCOT ではまず3.2.1節で述べたように1~2km程度の解像度を持つ粗い地形と粗度を用いた仮想領域（平坦地形）の風況シミュレーションを行う。つぎに10m~50m程度の解像度を持つ細かい地形と地表面粗度を用いた実風況（実地形）の風況シミュレーションを行い、仮想領域の風況から対象地点での実風況へと変換する。平均風速の割増係数はこの仮想領域と実地形の対象地点における風速比を表したものである。本研究では風速の評価高さをハブ高さ65.4mとした。また吹上角はMASCOTにより算出した基本座標系に基づく風軸上6方位における風速の鉛直分布より、予測地点における方位別の吹上角 $\theta$ を算定した。図3.17に基本座標系を示す。鉛直分布では、各メッシュの地表面からの高さ $Z_{agl}$ 、風速の主流方向成分 $U$ 、半径方向成分 $V$ および鉛直方向成分 $W$ が算出される。吹上角 $\theta_{\text{flow}}$ は風速の主流方向成分 $U$ および鉛直方向成分 $W$ を用いて、式(3.21)により算定した。

$$\theta_{\text{flow}} = \tan^{-1}(W/U) \cdot 180/\pi \quad (3.21)$$

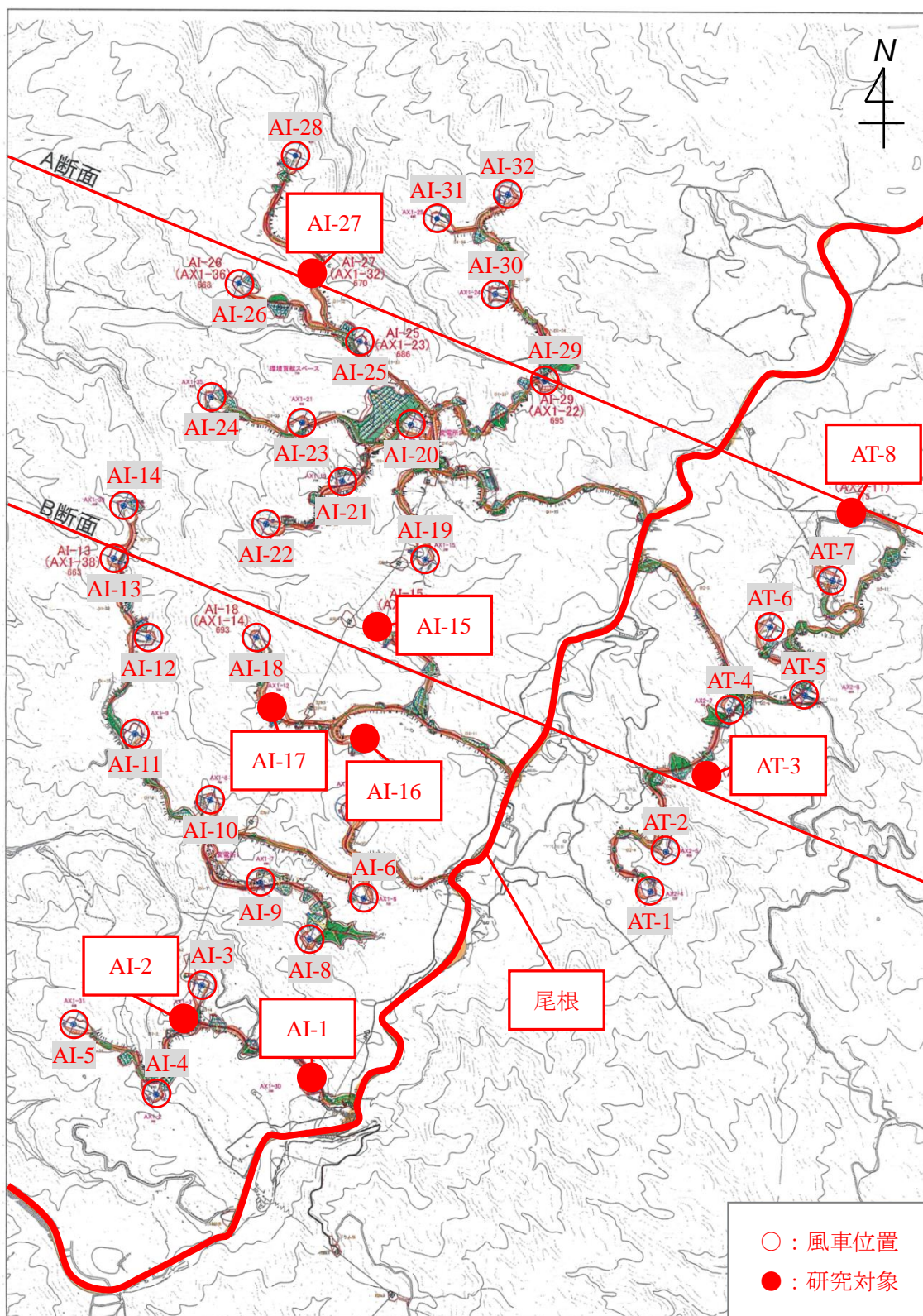


図 3.1 ウィンドファーム内の風車設置図

## 第3章 解析対象および解析方法

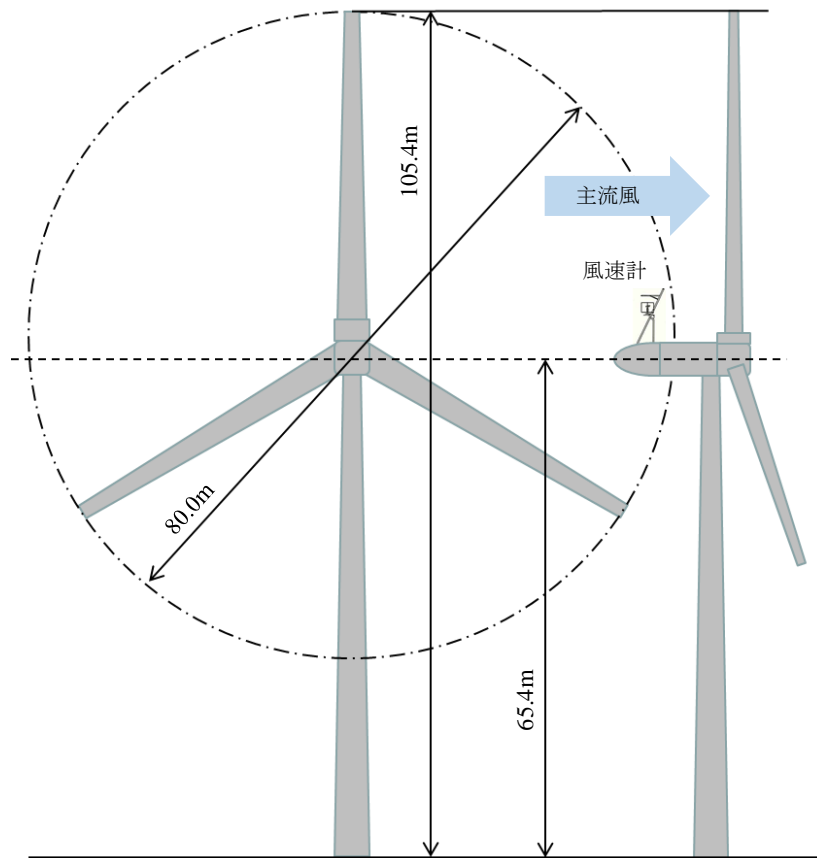


図 3.2 風車概要

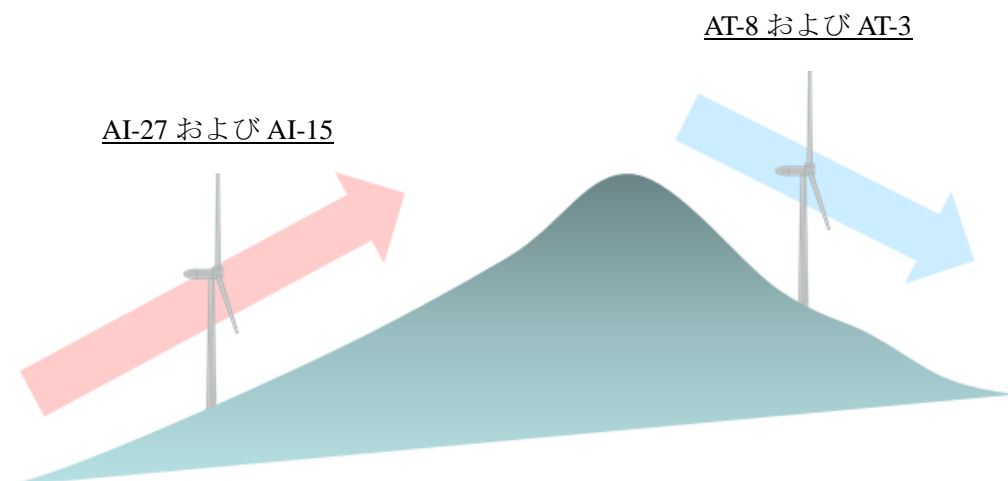


図 3.3 A および B 断面の簡易図



## 第3章 解析対象および解析方法

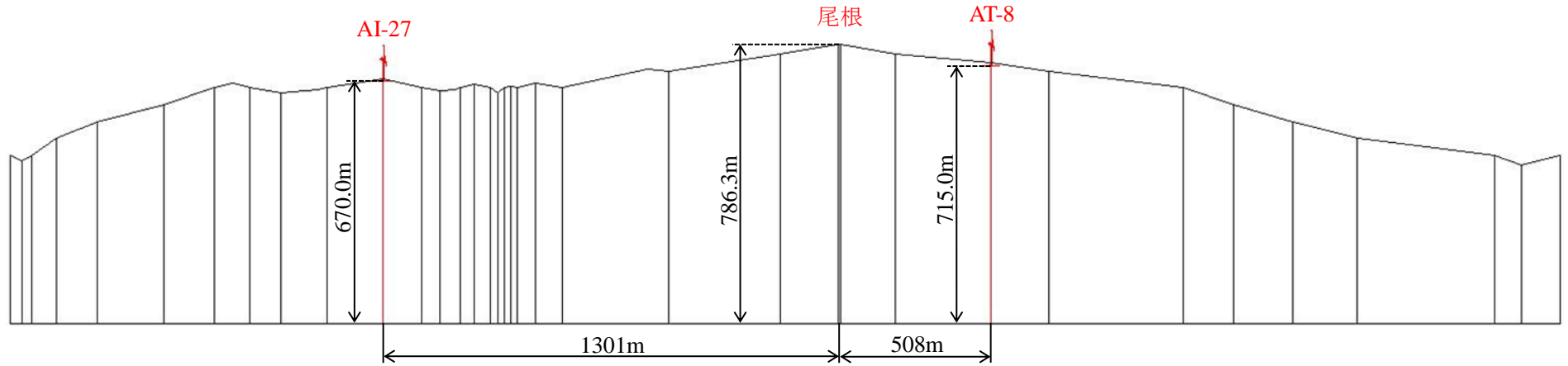


図 3.4 A 断面図

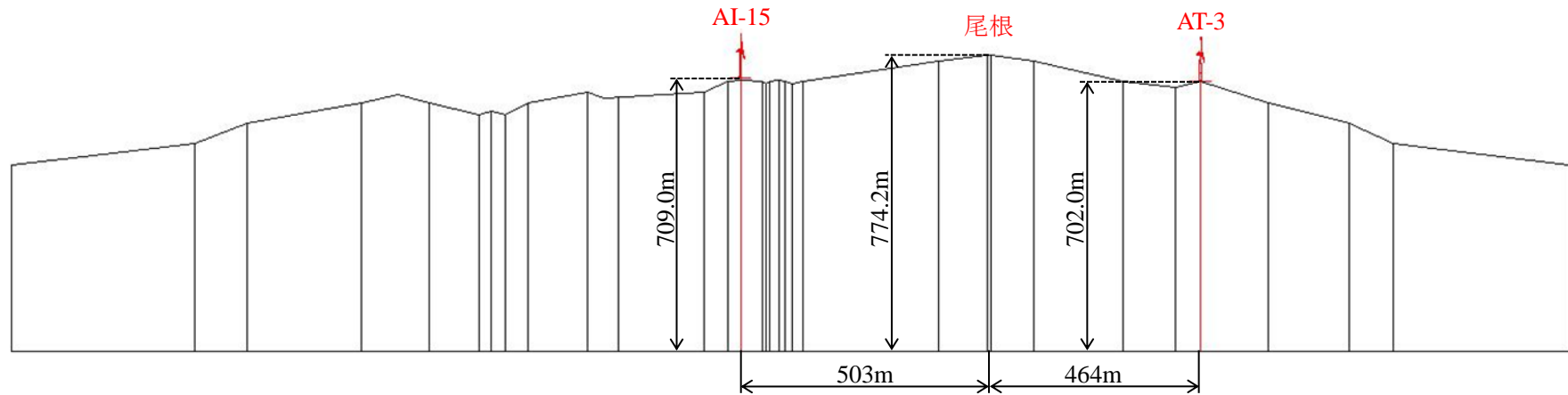


図 3.5 B 断面図

## 第3章 解析対象および解析方法

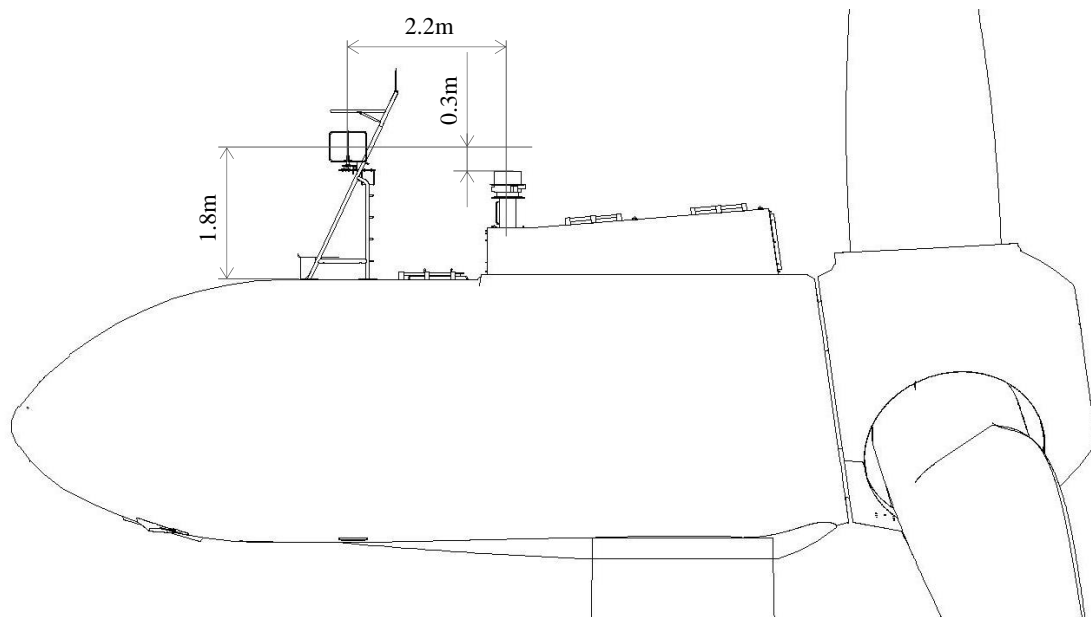


図 3.6 タワーヘッド構造図

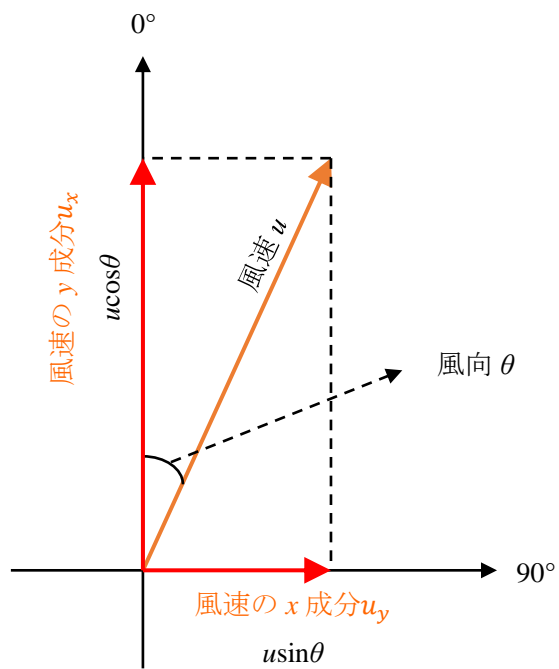


図 3.7 ベクトル平均の概要図

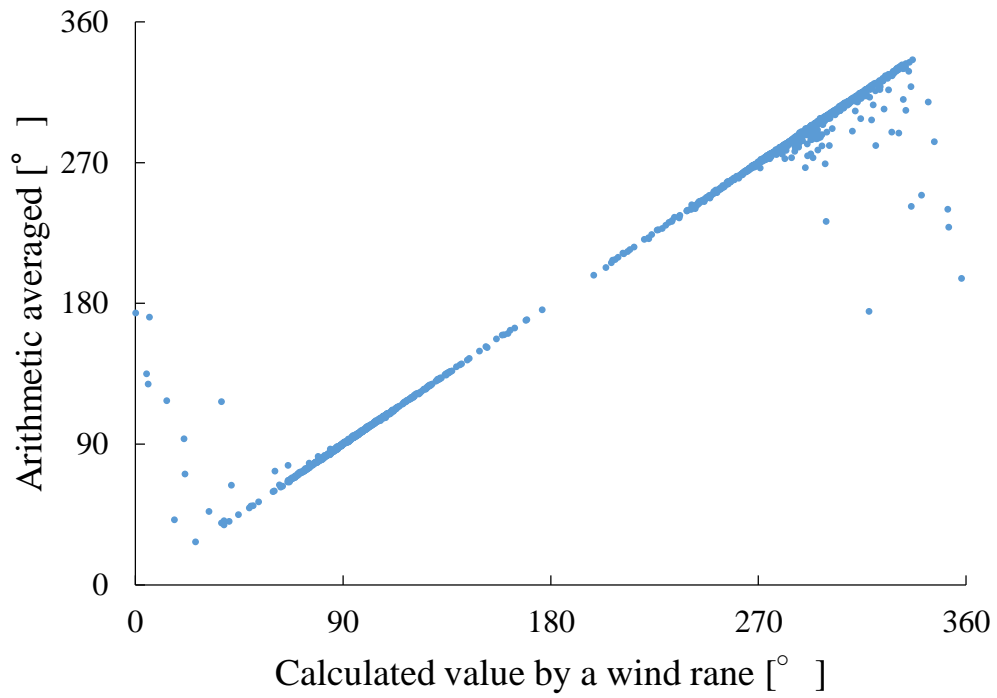


図 3.8 風向計内蔵の演算器による演算値と算術平均値の相関図

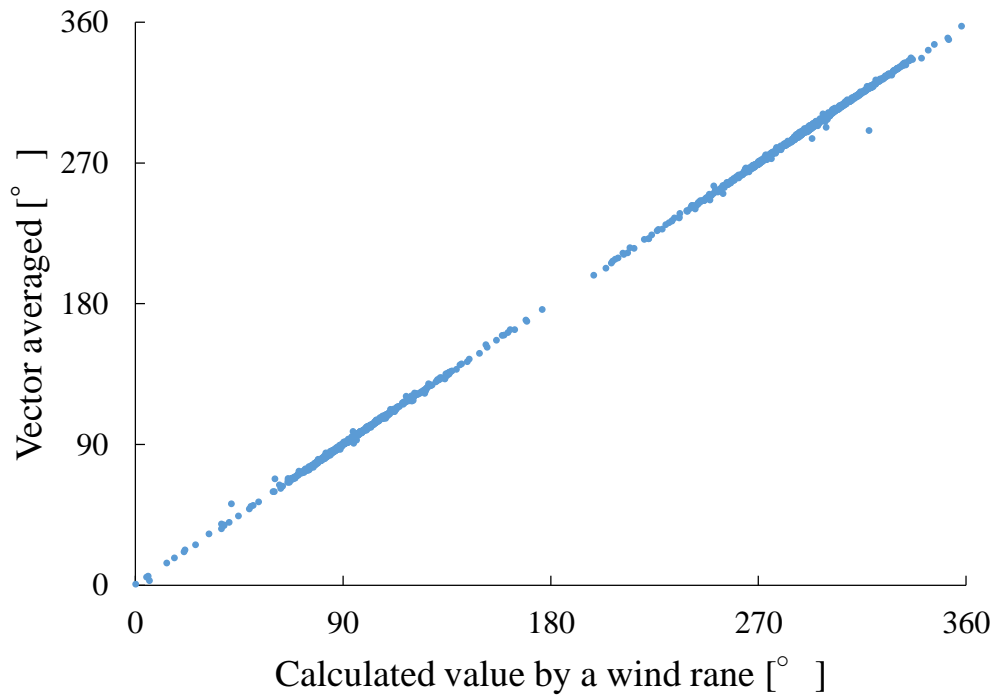


図 3.9 風向計内蔵の演算器による演算値とベクトル平均値の相関図

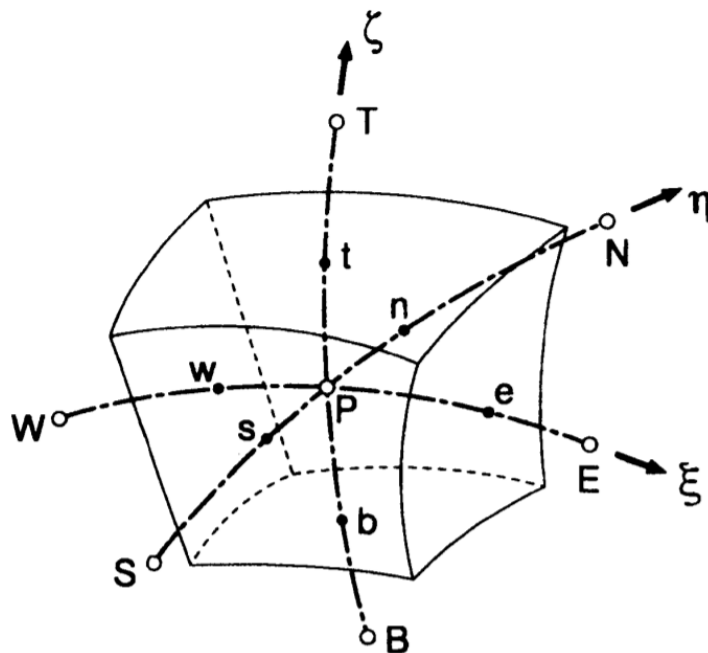


図 3.10 典型的なコントロールボリューム

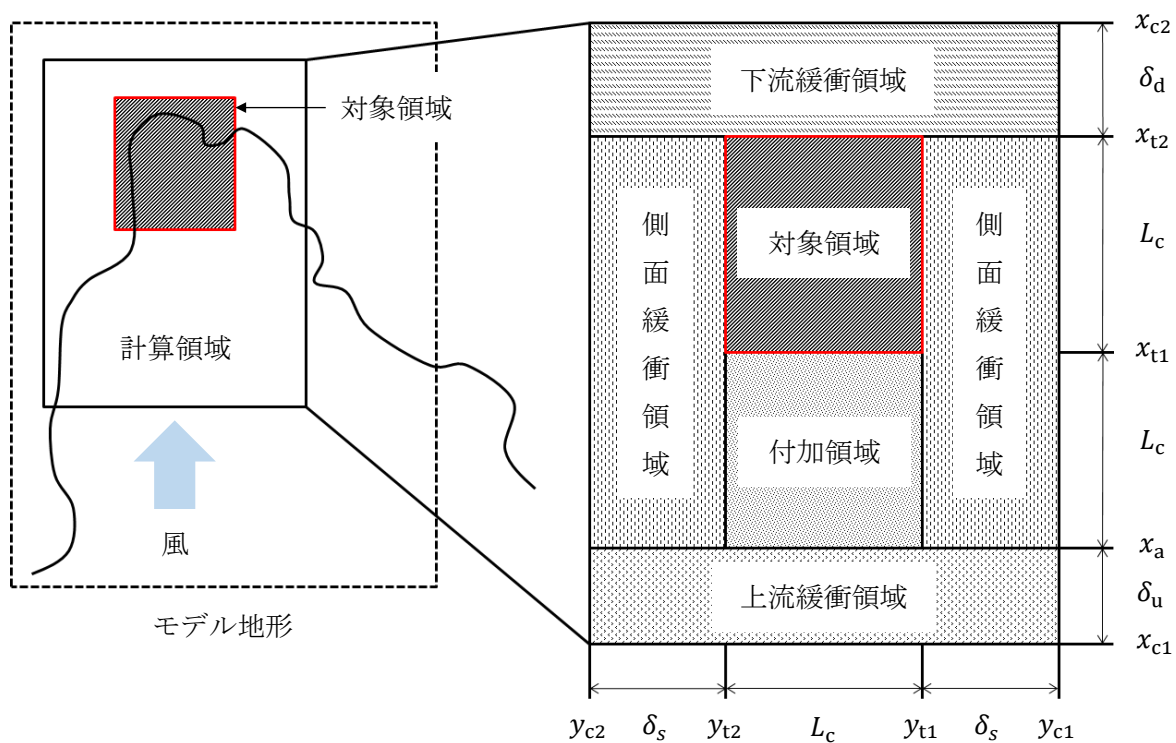


図 3.11 解析対象とする各領域の定義

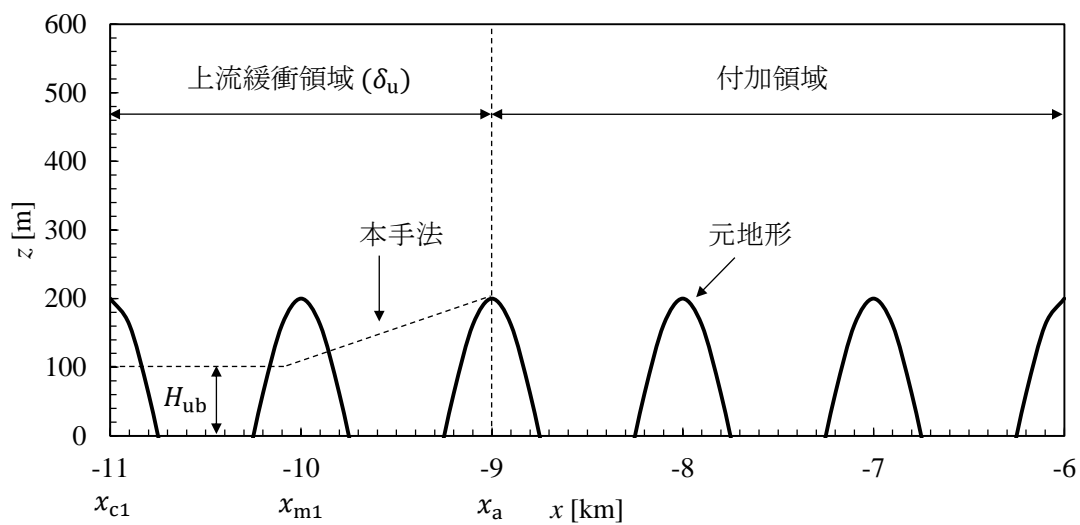


図 3.12 上流緩衝領域の定義

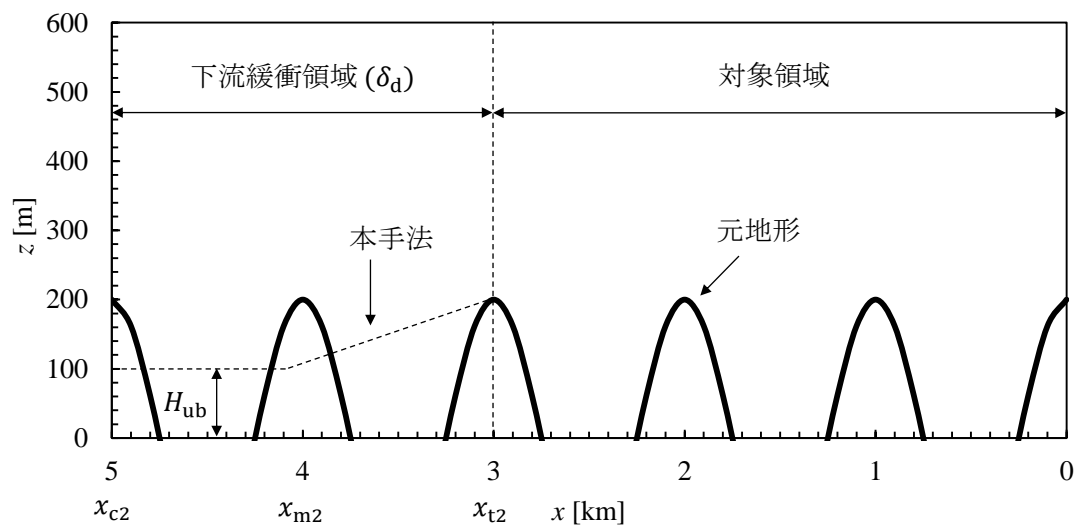


図 3.13 下流緩衝領域の定義

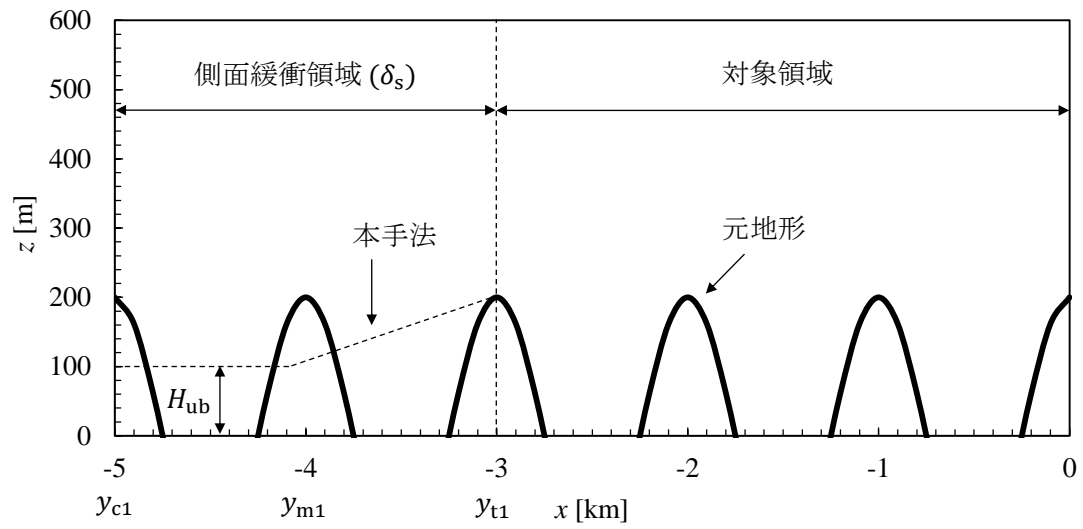


図 3.14 側面緩衝領域の定義

## 第3章 解析対象および解析方法

表 3.2 MASCOT における粗度区分

区分	説明		デフォルト値
Rice field (Tanbo)	田	湿田, 乾田, 沼田, 蓮田	0.03
Field	畑	麦, 陸稲, 野菜, 牧草等の栽培地	0.1
Orchard	果樹園	林檎, 梨, 桃, 葡萄等の栽培地	0.2
Other wood field	その他の樹木畑	桑, 茶等の栽培地, 苗木畑	0.1
Forests	森林	高さ 2m 以上の多年生植物の密生地	0.8
Wasteland	荒地	篠地, 雑草地, 裸地, 崖, 岩, 湿地等	0.03
High buildings	建物用地 [A]	建物密集地, 工場, 学校, 高層建物	1.0
Low buildings	建物用地 [B]	独立建物 (小), 民家等	0.4
Transportation area	幹線交通用地	道路, インターチェンジ, 鉄道, 操車場等	0.1
Other area	その他の用地	空き地, ゴルフ場, 空港, 運動場	0.03
Lakes and ponds	湖沼	自然湖, 人造湖, 池, 養魚場	0.0002
River [A]	河川敷 [A]	河川区域の河川敷, 人工用地は含まない	0.001
River [B]	河川敷 [B]	河川敷内の人工利用地	0.001
Beach	海浜	海岸に接する砂, れき, 岩の区域	0.03
Sea	海水域	隠頭岩, 干潟を含む海水域	0.0002

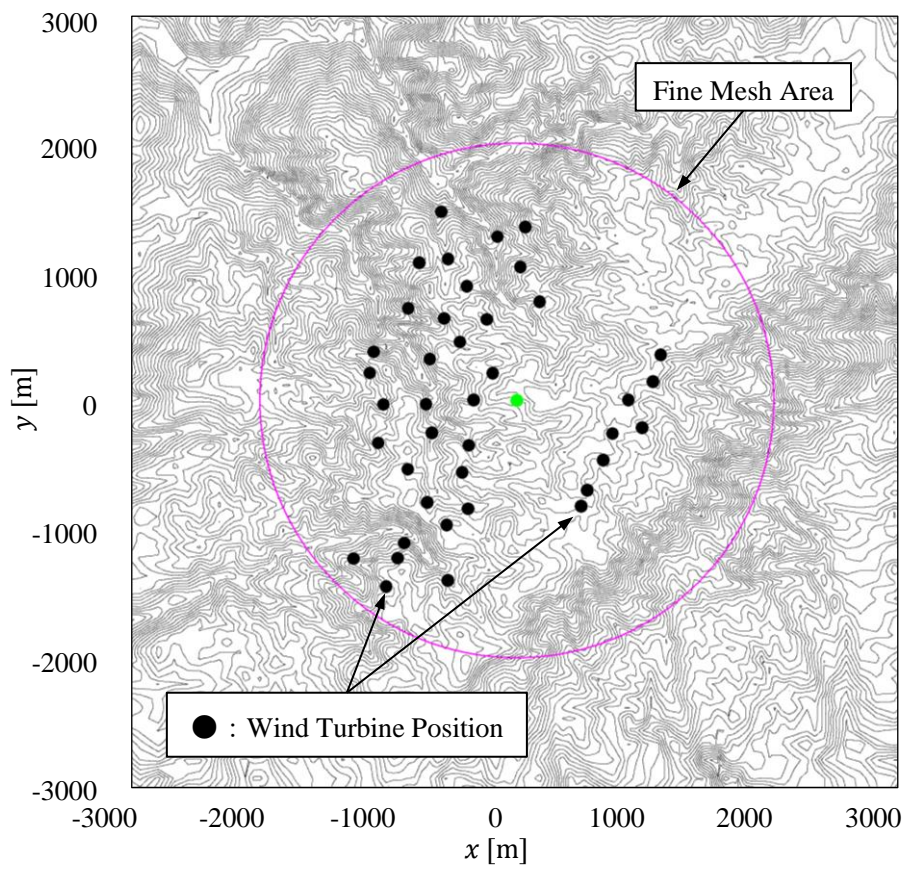


図 3.15 解析領域の概要図



## 第3章 解析対象および解析方法

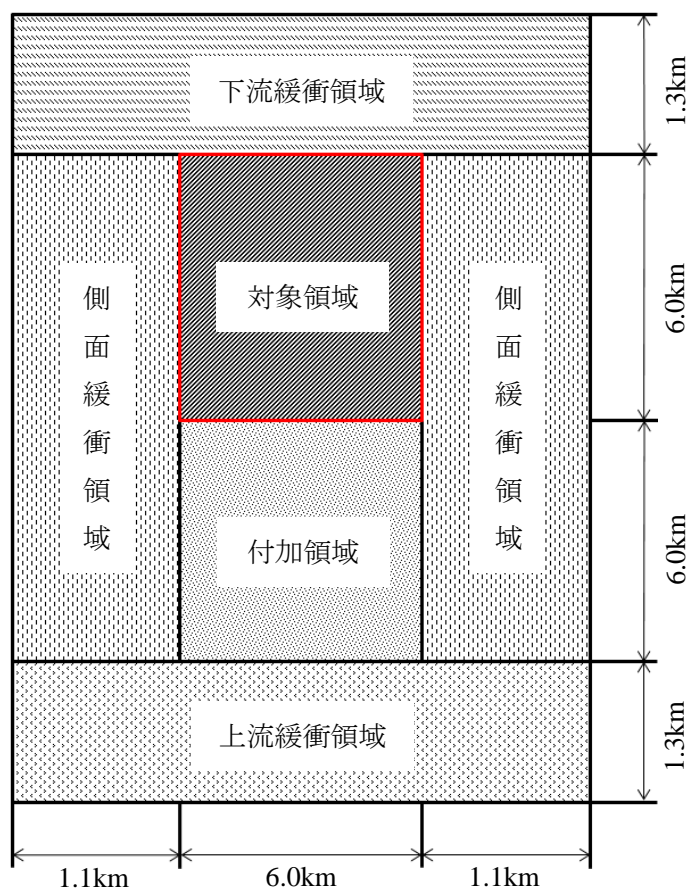


図 3.16 付加領域および緩衝領域を含めた総解析領域

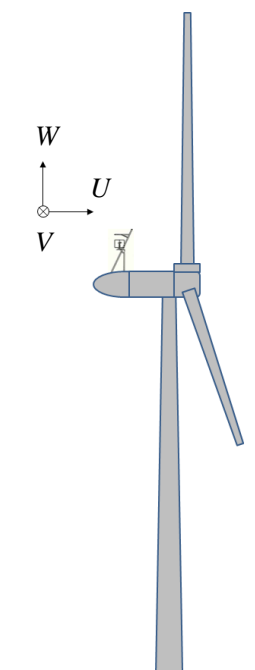


図 3.17 基本座標系

## 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、風車実測データを用いて、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の比較・考察を行う。風車出力に及ぼす地形の影響を明らかにするため、主風向において風車へ流入する風が複雑地形に起因する吹上・吹下風となる風車4基（AI-27およびAT-8, AI-15 および AT-3）に着目した。また、風車出力に及ぼす後流の影響を明らかにするため、主風向に対して概ね直線上に配置されている風車4基（AI-1 および AI-2, AI-16 および AI-17）に着目し、後流の影響を評価した。

### 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、16方位の風の出現率についてまとめた。本ウィンドファームの主風向は、比較的、地形および後流の影響を受けにくいAI-2の観測風向により判定した。AI-2の年間および月別の風向出現率を図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、WNW（29.8%）が最も卓越しており、次いで、NW（13.7%）、ESE（12.7%）、W（12.6%）となっている。したがって、本研究では、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。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。

（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（当該観測地点の場合にはNW, WNW, W, SE, ESE, Eの6方位）

### 4.2 風車出力に及ぼす地形の影響

本節では、主風向において風車へ流入する風が吹上・吹下風となる風車4基（AI-27およびAT-8, AI-15 および AT-3）に着目し、実測データによる比較を行う。

#### 4.2.1 年間および月別の平均風速ならびに発電量

本節では、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AI-27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、AT-8に流入する風は尾根越えの風（吹下風）となる。図4.2にA断面の月別平均風速、図4.3にA断面の月別発電量を示す。図4.2は、縦軸に平均風速、横軸に月を示す。図4.3は、縦軸に発電量、横軸に月を示す。ここで、図4.3に示す発電量はAT-8の年間総発電量を1とし、無次元化したものである。図4.2より、観測期間中を通して吹下風を多く受けるAT-8の風速は、吹上風を多く受けるAI-27より年間を通して高い。図4.3より、

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

観測期間中を通して吹下風を多く受ける AT-8 の発電量は、吹上風を多く受ける AI-27 より年間を通して多い。

図 4.4 に B 断面の月別平均風速，図 4.5 に B 断面の月別発電量を示す。図 4.4 は縦軸に平均風速，横軸に月を示す。図 4.5 は，縦軸に発電量，横軸に月を示す。ここで，図 4.5 に示す発電量は AT-3 の年間総発電量を 1 とし，無次元化したものである。図 4.4 より，観測期間中を通して吹下風を多く受ける AT-3 の風速は，吹上風を多く受ける AI-15 より年間を通して高い。図 4.5 より，観測期間中を通して吹下風を多く受ける AT-3 の発電量は，吹上風を多く受ける AI-15 より年間を通して多い。

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 AT-8 および AT-3 の発電量が，吹上風を多く受ける AI-27 および AI-15 を上回る結果となった。この一因として，AT-8 および AT-3 のロータ中心高さが尾根頂部と同程度\*であり，周囲（AI-27 および AI-15 を含む）に比べ標高が高いため，風速が高く，発電量が多くなると考えられる。

また一般に，吹上風は流路の断面積が縮小し，縮流となるため，風速の増大が予想される。5.1 節で示す MASCOT の解析結果においても，平均風速の割増係数は吹下風に比べ，吹上風で大きい。しかしながら，本サイトでは吹上風を受ける AI-27 および AI-15 の風速は吹下風を受ける AT-8 および AT-3 より小さい。この要因として風速計の読み誤差が考えられる。本ウィンドファームの風車は複雑地形に起因する吹上・吹下風を受けており，風速計に流入する多くの風は水平ではない。これにより，風速計は真値を示さず，風速を過大あるいは過小評価していると考えられる。また，風速計の後方 2.2m，高さ 0.3m 下に設置されている航空障害灯近傍の失速流れが影響し，風速計の読み誤差を引き起こしている可能性がある。以上の理由から風速計の読み誤差は，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一因と考えられる。

(注\*) AT-8 のロータ中心標高：780.4m，尾根の標高：786.3m

AT-3 のロータ中心標高：760.0m，尾根の標高：774.2m

### 4.2.2 風向別の平均風速および発電量

本節では，風向別に平均風速および発電量の比較を行う。図 4.6 に A 断面の風軸上 6 方位における平均風速，図 4.7 に A 断面の風軸上 6 方位における発電量を示す。図 4.6 は，縦軸に平均風速，横軸に方位を示す。図 4.7 は，縦軸に発電量，横軸に方位を示す。図 4.7 に示す発電量は AT-8 の風軸上 6 方位における総発電量を 1 とし，無次元化したものである。ここで，風向 E，ESE，SE で AI-27 および AI-15 は吹下風，AT-8 および AT-3 は吹上風を受ける。風向 W，WNW，NW で AI-27 および AI-15 は吹上風，AT-8 および AT-3 は吹下風を受ける。図 4.6 より，AT-8 の風速は吹下風を受ける風向 W，WNW で，AI-27 に比べ高い。このとき，AI-27 は吹上風を受ける。一方，AI-27 の風速は吹下風を受ける風向 ESE，SE で，AT-8 に比べ高い。このとき，AT-8 は吹上風を受ける。図 4.7 より，AT-8 の発電量は吹下風

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

を受ける風向 W, WNW で, AI-27 に比べ多い. 一方, AI-27 の風速は吹下風を受ける風向 ESE, SE で, AT-8 に比べ多い.

図 4.8 に B 断面の風軸上 6 方位における平均風速, 図 4.9 に B 断面の風軸上 6 方位における発電量を示す. 図 4.8 は, 縦軸に平均風速, 横軸に方位を示す. 図 4.9 は, 縦軸に発電量, 横軸に方位を示す. 図 4.9 に示す発電量は AT-3 の風軸上 6 方位における総発電量を 1 とし, 無次元化したものである. 図 4.8 より, AT-3 の風速は吹下風を受ける風向 WNW, NW で, AI-15 に比べ高い. このとき, AI-15 は吹上風を受ける. 一方, AI-15 の風速は吹下風を受ける風向 E, ESE で, AT-3 に比べ高い. このとき, AT-3 は吹上風を受ける. 図 4.9 より, AT-3 の発電量は吹下風を受ける風向 NW で, AI-15 に比べ多い. 一方, AI-15 の発電量は吹下風を受ける風向 E, ESE で, AT-3 に比べ多い. なお, 各風車で風向により風速の傾向が異なる要因に関しては, 尾根による増速効果, 尾根と風車高さの関係, 後流の影響, 吹上・吹下風がナセル風速計に及ぼす影響等が挙げられ, 今後の課題として検討が必要である.

### 4.2.3 風向別風力エネルギー密度

本節では, 全方位および風軸上 6 方位の風力エネルギー密度の比較を行う. 式(4.1)に風力エネルギー密度の定義式を示す.

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (4.1)$$

ここで, 式中の  $P_0$  は風力エネルギー密度 [ $W/m^2$ ],  $\rho$  は空気密度 [ $kg/m^3$ ],  $U$  は 10 分間平均風速 [ $m/s$ ] である. また, 空気密度を求める際には国土交通省気象庁より開示されている 2017 および 2018 年三重県津市の気象データを参照した. 本研究では, 津市の月別平均大気圧に基づき, 高度補正を行うことにより, 風車ハブ標高における大気圧を算出し, 空気密度の算定を行った. 表 4.2 に 2017 および 2018 年三重県津市の月別平均大気圧を示す. 式(4.2)に大気圧の高度補正式を, 式(4.3)に空気密度の定義式を示す.

$$P_{hub} = P_{ref} (1 - 0.0065H/P_{ref})^{5.257} \quad (4.2)$$

$$\rho = \frac{P_{hub}}{RT} \quad (4.3)$$

ここで,  $T$  はナセル外気温 [ $^{\circ}C$ ],  $P_{hub}$  は各風車のハブ高さの標高における大気圧 [ $P_a$ ],  $H$  は各風車のハブ高さの標高 [ $m$ ],  $R$  は気体定数 [ $J/(kg \cdot K)$ ],  $P_{ref}$  は 2017 および 2018 年津市の月別平均大気圧 [ $P_a$ ] である.

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

表 4.2 2017 および 2018 年三重県津市の月別平均大気圧  $P_{ref}$ 

年	月	気圧 [hPa]
2017	2	1015.8
	3	1014.3
	4	1011.7
	5	1010.9
	6	1006.9
	7	1007.5
	8	1005.1
	9	1009.5
	10	1015.5
	11	1017.6
	12	1017.7
	2018	1

図 4.10 に A 断面における 16 方位別風力エネルギー密度, 図 4.11 に B 断面における 16 方位別風力エネルギー密度を示す.

図 4.10 より, 吹下風を多く受ける AT-8 の風力エネルギー密度は主風向 W, WNW で AI-27 より高い. また, 全方位の風力エネルギー密度を比較すると AT-8 は  $270.8 \text{ W/m}^2$  であり, AI-27 の  $212.7 \text{ W/m}^2$  より高い.

図 4.11 より, 吹下風を多く受ける AT-3 の風力エネルギー密度は主風向 WNW, NW で AI-15 より高い. また, 全方位の風力エネルギー密度を比較すると AT-3 は  $364.4 \text{ W/m}^2$  であり, AI-15 の  $259.2 \text{ W/m}^2$  より高い.

これらの結果から吹下風を多く受ける AT-8 および AT-3 は吹上風を多く受ける AI-27 および AI-15 と比べ, 高風況下に設置されていると言える. この要因としては, 4.2.1 節で上述したように AT-8 および AT-3 のロータ中心高さが尾根頂部と同程度であり, 周囲に比べ標高が高いため, 風力エネルギー密度が高くなる一因と考えられる. それに加えて, 4.2.1 節で述べた風速計の読み誤差が考えられる. 吹上・吹下風, 航空障害灯近傍のゆがめられた流れが影響し, 風速計は真値を示さず, 風速を過大あるいは過小評価していると考えられる. 風速計の読み誤差は吹下風を多く受ける AT-8 および AT-3 の風力エネルギー密度が吹上風を多く受ける AI-27 および AI-13 を上回る一因と考えられる.

#### 4.2.4 風向風速階級別の発電量

本節では, 風向 WNW, ESE 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  $85^\circ$  以下のデータのみを抽出した. 図 4.12 に AI-27 の風速階級別発電量, 図 4.13 に AT-8 の風速階級別発電量, 図 4.14 に

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

AI-15の風速階級別発電量、図4.15にAT-3の風速階級別発電量を示す。図4.12~4.15は、縦軸に発電量、横軸に風速階級を示し、黒の実線はメーカー公表値を示す。ここで、本ウィンドファームの主風向WNWの場合、AI-27およびAI-15は吹上風、AT-8およびAT-3は吹下風を受ける。風向ESEの場合、AI-27およびAI-15は吹下風、AT-8およびAT-3は吹上風を受ける。

図4.12~4.15より、AI-15、AI-27、AT-3およびAT-8の風速階級別発電量は吹上風で小さく、吹下風で大きくなる。また吹下風を受ける場合、AI-15、AI-27、AT-3およびAT-8の出力がメーカー公表値を上回っている。吹上風を受ける場合、AI-27およびAT-8の出力はメーカー公表値に比べ、同程度以下となっているのに対し、AI-15およびAT-3の出力は同程度以上となっている。これらの要因として、4.2.1節で述べた風速計の読み誤差が考えられる。吹上・吹下風、航空障害灯近傍のゆがめられた流れが影響し、風速計は真値を示さず、風速を過大あるいは過小評価していると考えられる。したがって、風車出力は風速の真値に対し、異なる値を示していると考えられる。

### 4.3 後流の影響

一般に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、その中に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。

本節では、主風向に対して概ね直線上に配置されている風車4基(AI-1およびAI-2、AI-16およびAI-17)に着目し、後流の影響を評価する。表4.3に本研究で対象とした風車の組合せを示す。ここで、表4.3の基準方位は、風下に設置された風車から風上に設置された風車に向かう方位を表す。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<sup>(21)</sup>にする必要があるとされている。しかしながら、表4.3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-16およびAI-17の風車間距離は $x/D=3.8$ と風車直径の10倍未満である。図4.16にAI-1およびAI-2の地形断面図、図4.17にAI-16およびAI-17の地形断面図を示す。なお、AI-1およびAI-2の標高差は5m、AI-16およびAI-17の標高差は3mと各組の風車は概ね標高が等しい。

表4.3 後流評価を行った風車の組合せ

前	後	基準方位 [°]	風車間距離 [m]	$x/D$	地盤標高		標高差 [m]
					前 [m]	後 [m]	
AI-2	AI-1	293	425	5.3	705	700	5
AI-17	AI-16	288	302	3.8	708	705	3

### 4.3.1 月別の平均風向

本節では、AI-1 および AI-2, AI-16 および AI-17 の各組で月別の平均風向を比較することにより、後流内に下流側風車が位置しているかを確認する。図 4.18 に AI-1 および AI-2 の月別平均風向, 図 4.19 に AI-16 および AI-17 の月別平均風向を示す。図 4.18 および 4.19 は、縦軸に平均風向, 横軸に月を示す。ここで、図 4.18 および 4.19 の縦軸に示す平均風向は各組の基準方位を  $0^\circ$  とし、オフセットしたものである。

図 4.18 より、AI-1 および AI-2 の風向は年間を通じて概ね一致している。また、主風向に対して AI-2 の風下に位置する AI-1 の風向は 1, 2, 12 月で  $0^\circ$  近傍となる。そのため、1, 2, 12 月は風向に対して風車位置が重なるため、後流の影響を受けやすくなると考えられる。

図 4.19 より、AI-16 および AI-17 の風向は年間を通じて僅かに差があり、最大  $15^\circ$  のずれが生じている。しかしながら、ロータ直径が  $80\text{m}$  であることを考慮すれば、AI-16 は十分に AI-17 の後流の範囲内にあると考えられる。また、主風向に対して AI-17 の風下に位置する AI-16 の風向は 1, 2, 12 月で  $0^\circ$  近傍となる。そのため、AI-1 および AI-2 と同様に 1, 2, 12 月は風向に対して風車位置が重なるため、後流の影響を受けやすくなると考えられる。

### 4.3.2 月別の平均風速および発電量

本節では、AI-1 および AI-2, AI-16 および AI-17 の各組で月別の平均風速および発電量を比較する。図 4.20 に AI-1 および AI-2 の月別平均風速, 図 4.21 に AI-1 および AI-2 の月別発電量を示す。図 4.20 は、縦軸に平均風速, 横軸に月を示す。図 4.21 は、縦軸に発電量, 横軸に月を示す。ここで、図 4.21 に示す発電量は AI-2 の年間総発電量を 1 とし、無次元化したものである。図 4.20 より、年間を通じて下流側に位置する AI-1 の風速は、上流側に位置する AI-2 より低い。さらに、4.3.1 節で上述した後流の影響を受けやすいと考えられる 1, 2, 12 月では AI-2 と比べ、AI-2 の後流内に位置する AI-1 の風速の低下が顕著である。図 4.21 より、後流内に位置する AI-1 の発電量は 12 月を除いて AI-2 より少ない。さらに、1, 2 月は AI-1 の発電量の低下が顕著である。なお、AI-2 の 12 月の発電量が低下した要因は 2017 年 12 月 7 日から 2017 年 12 月 15 日までの 9 日間、風車が稼働していないためである。

図 4.22 に AI-16 および AI-17 の月別平均風速, 図 4.23 に AI-16 および AI-17 の月別発電量を示す。図 4.22 は、縦軸に平均風速, 横軸に月を示す。図 4.23 は、縦軸に発電量, 横軸に月を示す。ここで、図 4.23 に示す発電量は AI-17 の年間総発電量を 1 とし、無次元化したものである。図 4.22 より、年間を通じて下流側に位置する AI-16 の風速は、上流側に位置する AI-17 より低い。さらに、後流の影響を受けやすいと考えられる 1, 2, 12 月では AI-17 と比べ、AI-17 の後流内に位置する AI-16 の風速の低下が顕著である。図 4.23 より、年間を通じて後流内に位置する AI-16 の発電量は AI-17 より少ない。さらに、1, 2, 12 月は AI-16 の発電量の低下が顕著である。

### 4.3.3 風向別の平均風速および発電量

本節では、AI-1 および AI-2, AI-16 および AI-17 の各組で風向別に平均風速および発電量を比較する。図 4.24 に AI-1 および AI-2 の風向別平均風速および発電量、図 4.25 に AI-16 および AI-17 の風向別平均風速および発電量を示す。図 4.24 および 4.25 は、左縦軸に発電量、右縦軸に平均風速、横軸に風向を示す。ここで、横軸に示す風向は基準方位を  $0^\circ$  とし、 $\pm 30^\circ$  の範囲を  $5^\circ$  刻みで表示したものである。

図 4.24 より、下流側に位置する AI-1 の風速は  $\pm 30^\circ$  の全範囲で上流側に位置する AI-2 より低い。また、AI-1 の発電量は  $25^\circ$  を除く全風向で AI-2 より少ない。

図 4.25 より、下流側に位置する AI-16 の風速は  $-10^\circ$  から  $20^\circ$  の範囲で上流側に位置する AI-17 より低い。また、AI-16 の発電量は  $-5^\circ$  から  $20^\circ$  の範囲で AI-17 より少ない。

これらの要因として、後流の影響が挙げられる。風向に対して風車位置が重なることにより、風上側の風車の後流が風下側の風車に流入し、風速および発電量が低下すると考えられる。

ここで、下流側に位置する AI-16 の風速は  $-30^\circ$  から  $-15^\circ$  の範囲および  $25^\circ$  と  $30^\circ$  で上流側に位置する AI-17 より高い。また、AI-16 の発電量は  $-30^\circ$  から  $-10^\circ$  の範囲および  $25^\circ$  で AI-17 より多い。この要因として、AI-17 が AI-11 および AI-12 の後流の影響が挙げられる。表 4.4 に AI-17 に対する AI-11 および AI-12 の位置関係を示す。

表 4.4 AI-17 に対する AI-11 および AI-12 の位置関係

前	後	基準方位 [ $^\circ$ ]	風車間距離 [m]	$x/D$	地盤標高		標高差 [m]
					前 [m]	後 [m]	
AI-11	AI-17	259	426	5.3	695	708	13
AI-12		300	438	5.5	675		33

表 4.4 に示すように AI-11 および AI-17 の風車間距離は  $x/D=5.3$ 、AI-12 および AI-17 の風車間距離は  $x/D=5.5$  と風車直径の 10 倍未満である。なお、AI-11 および AI-17 の標高差は 13m、AI-12 および AI-17 の標高差は 33m と各組の風車は概ね標高が等しい。AI-17 の風速および発電量が低下した  $-30^\circ$  から  $-15^\circ$  の範囲および  $25^\circ$  と  $30^\circ$  は、AI-16 および AI-17 の基準方位  $288^\circ$  より  $258^\circ$  から  $273^\circ$ 、 $313^\circ$ 、 $318^\circ$  の範囲である。それに対し、AI-11 および AI-17 の基準方位は  $259^\circ$ 、AI-12 および AI-17 の基準方位は  $300^\circ$  である。したがって、AI-17 の風速および発電量が低下した  $-30^\circ$  から  $-15^\circ$  の範囲では AI-11、 $25^\circ$  と  $30^\circ$  の範囲では AI-12 の後流の影響を受けていると考えられる。



## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

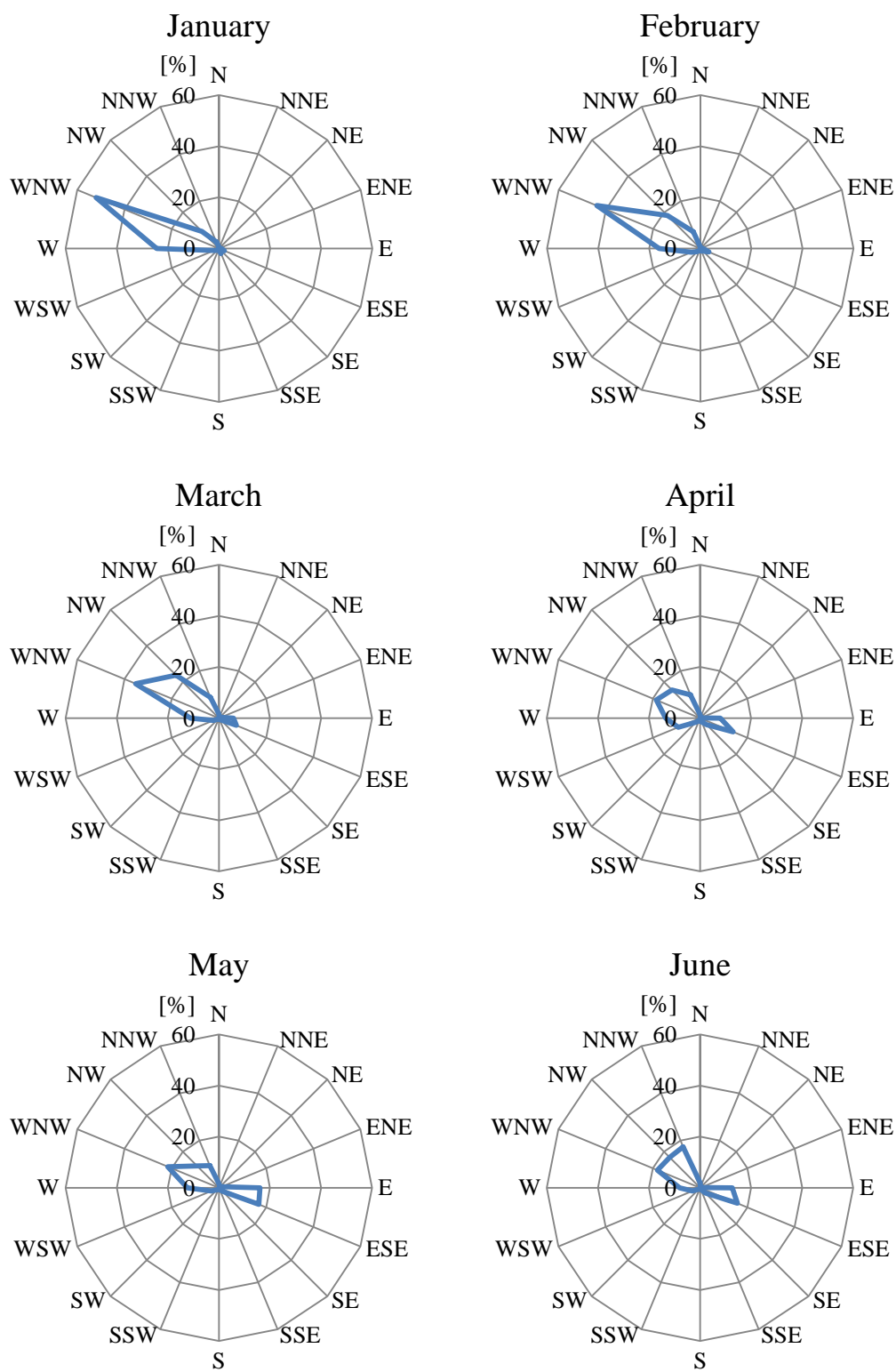


図 4.1(a) AI-2 の月別および年間風向出現率

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

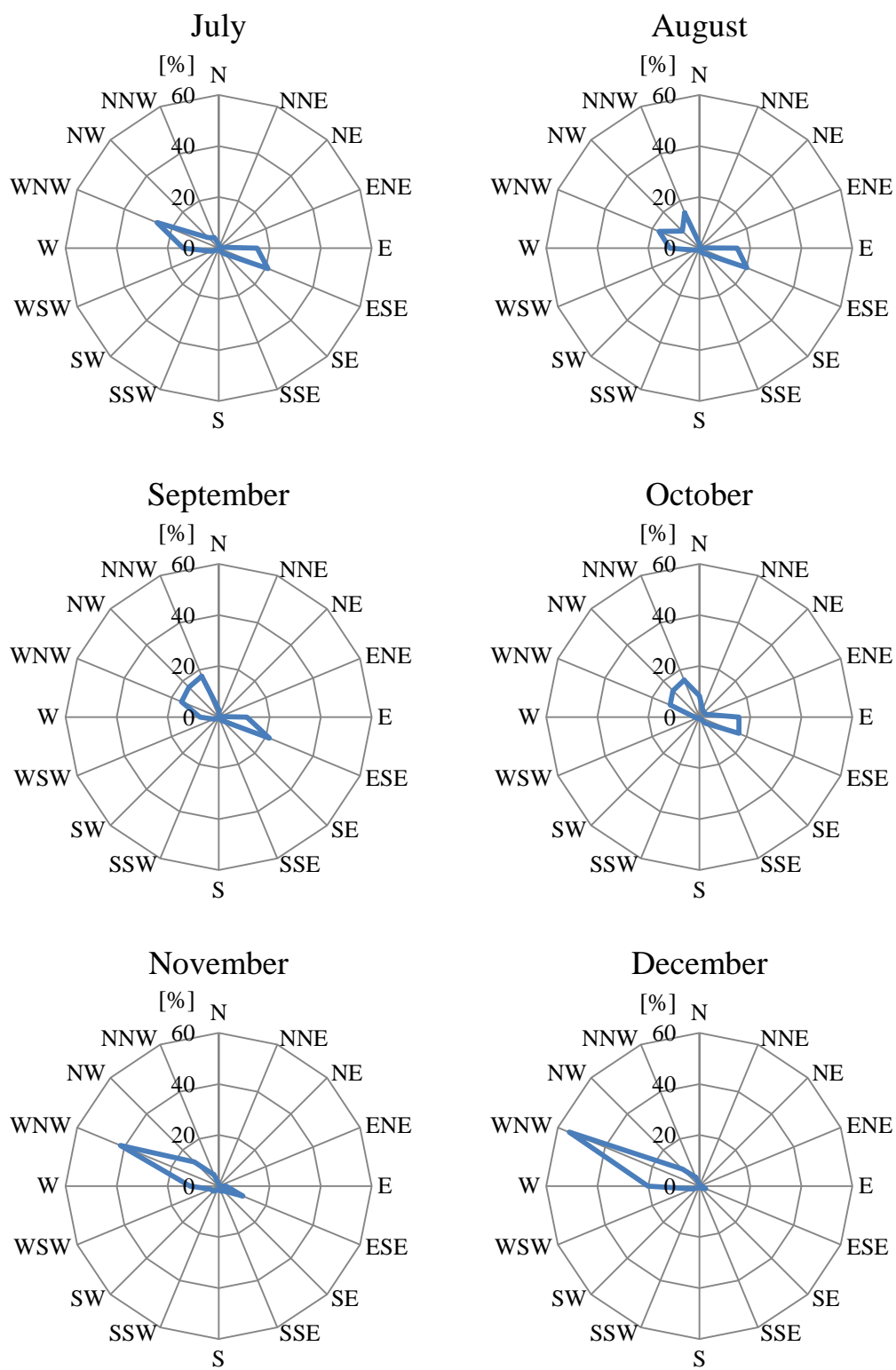


図 4.1(b) AI-2 の月別および年間風向出現率

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

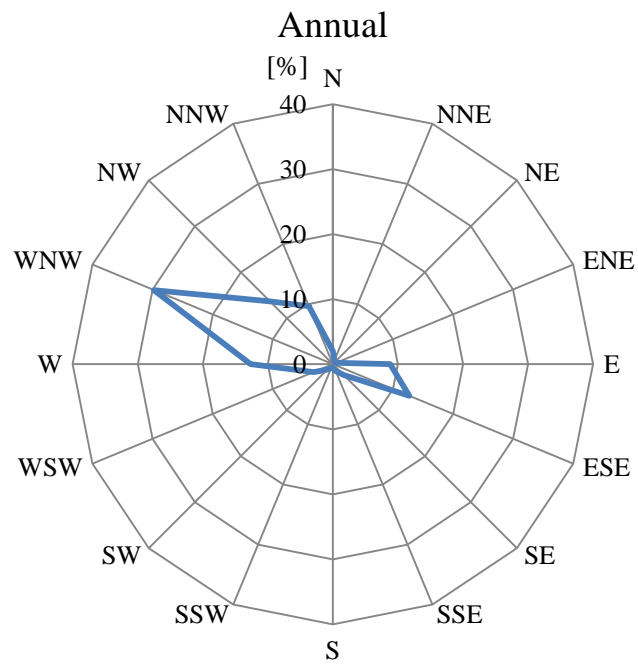


図 4.1(c) AI-2 の月別および年間風向出現率

## 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）

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

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

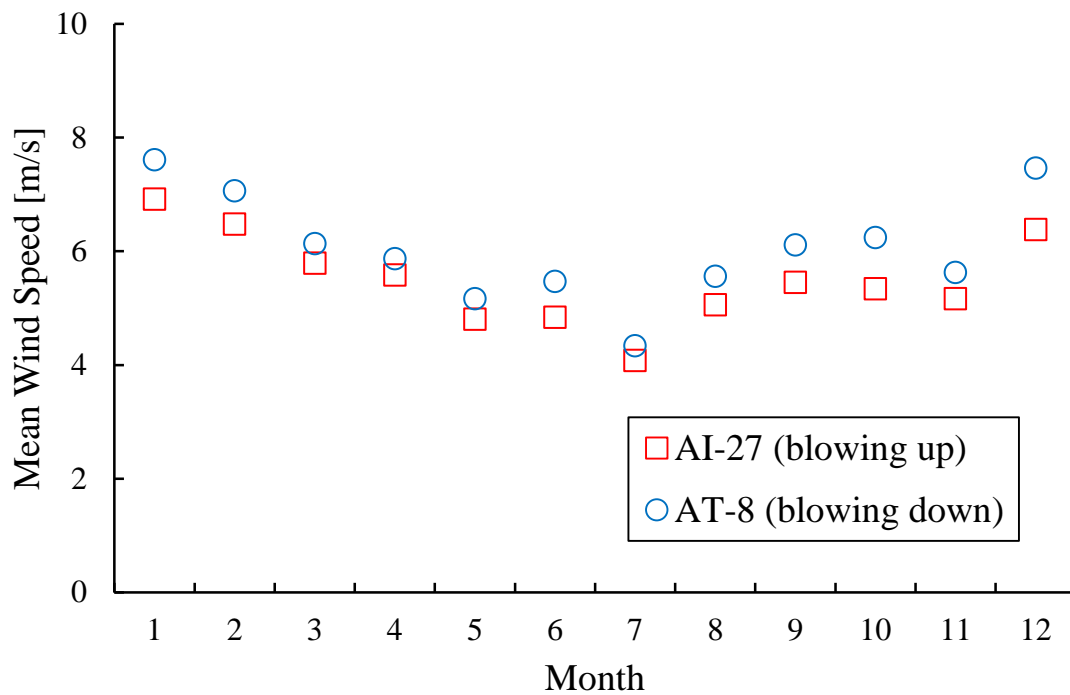


図 4.2 A 断面の月別平均風速

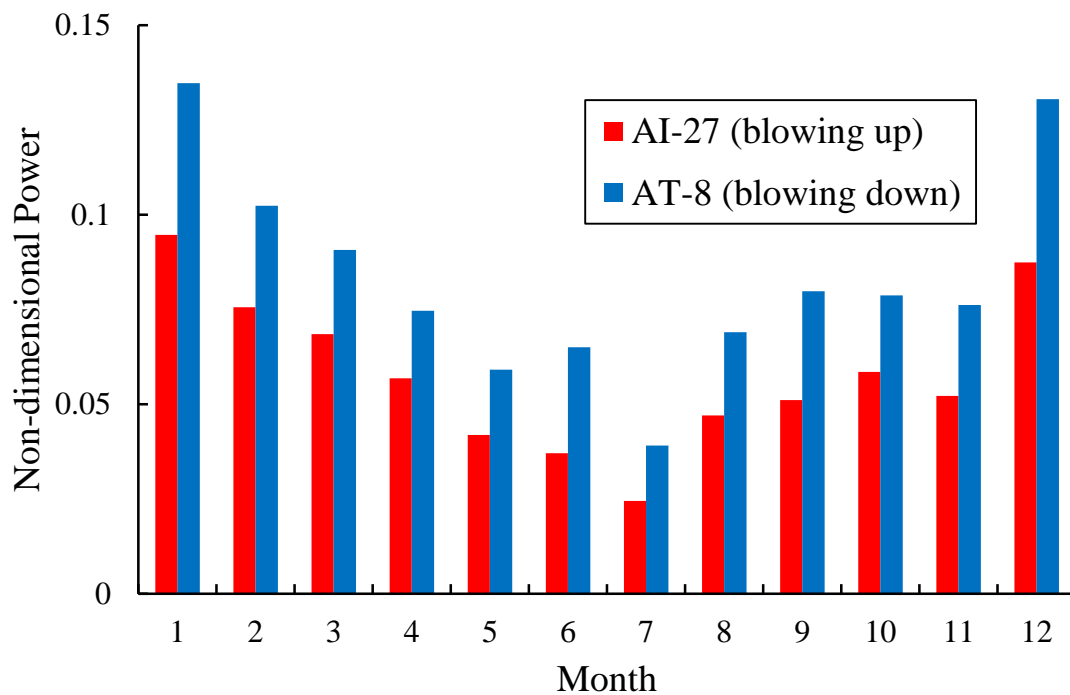


図 4.3 A 断面の月別発電量

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

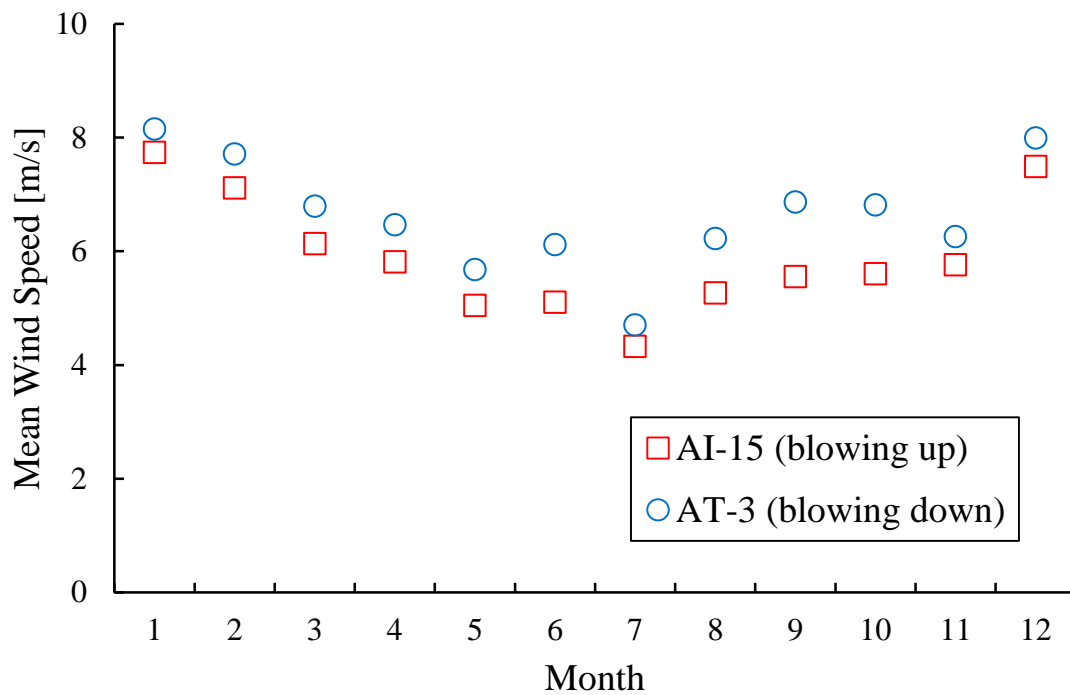


図 4.4 B 断面の月別平均風速

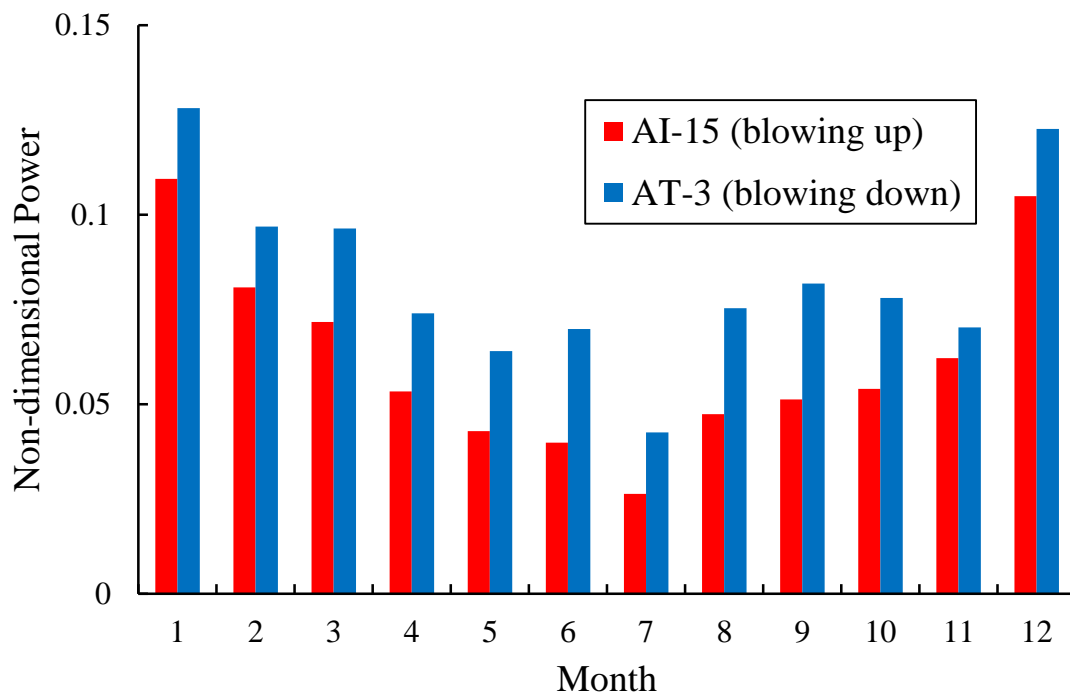


図 4.5 B 断面の月別発電量

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

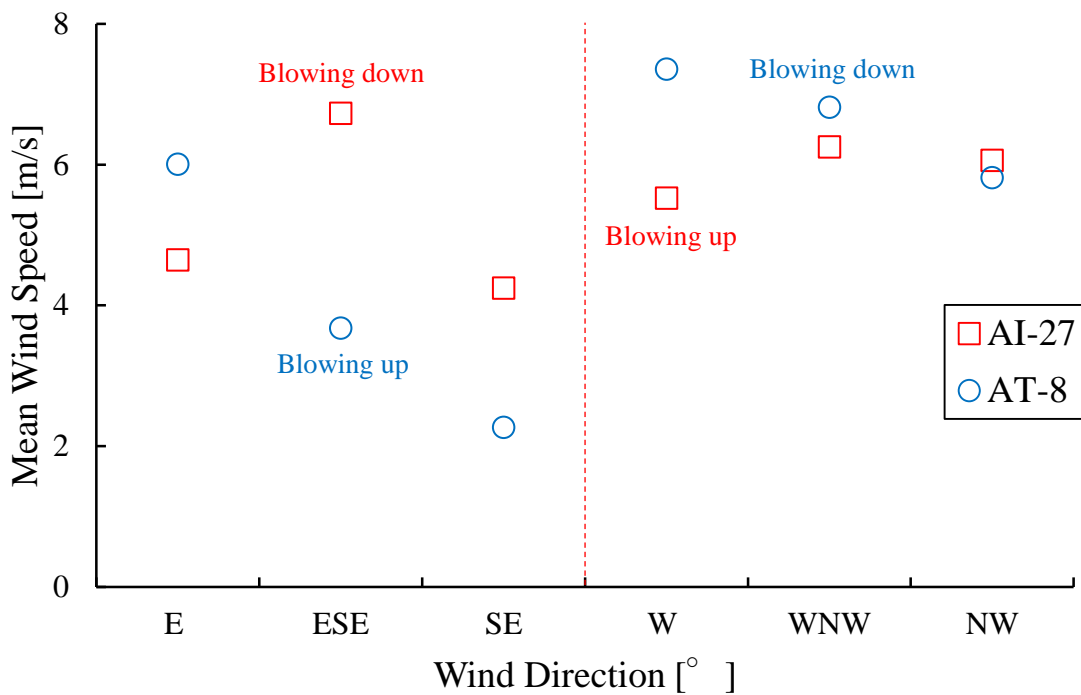


図 4.6 A 断面の風軸上 6 方位における平均風速

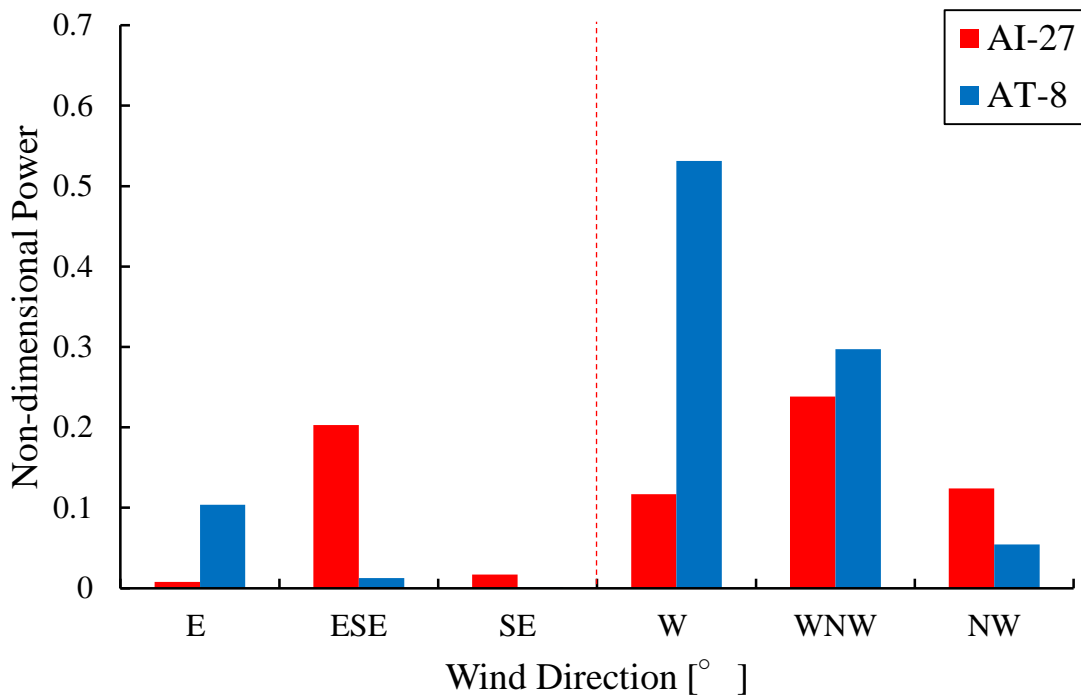


図 4.7 A 断面の風軸上 6 方位における発電量

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

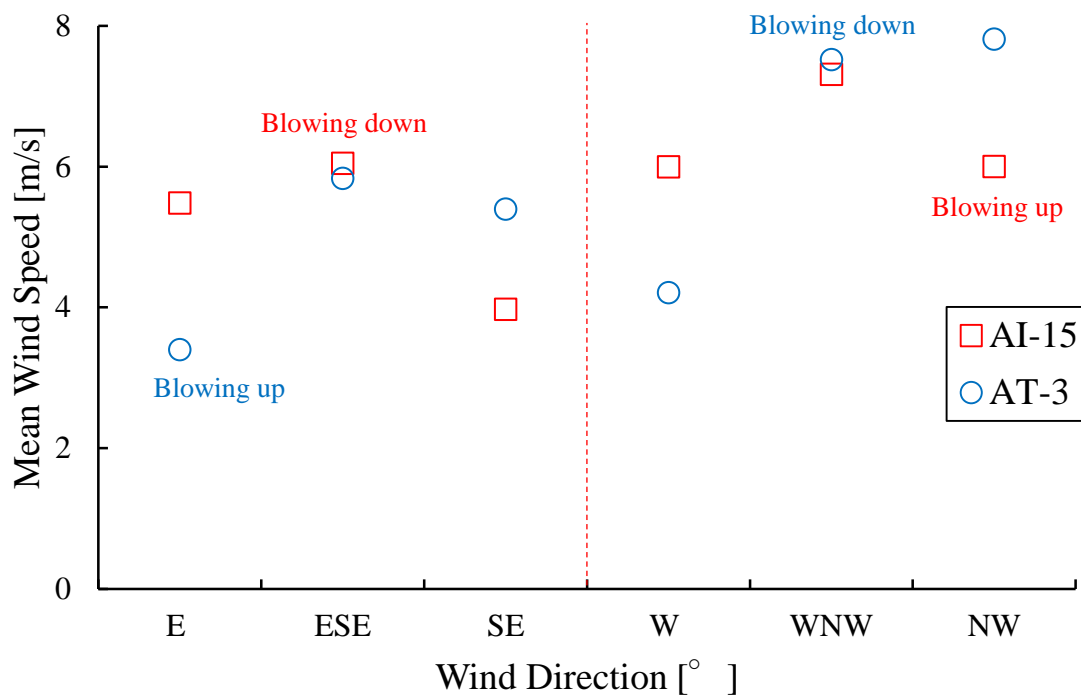


図 4.8 B 断面の風軸上 6 方位における平均風速

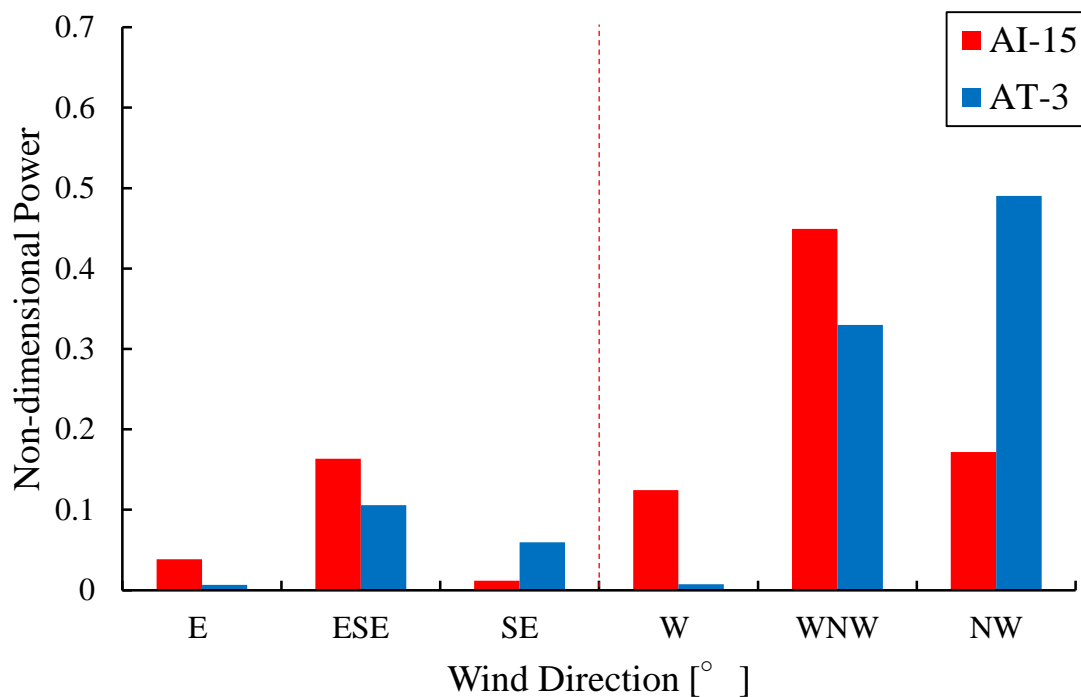


図 4.9 B 断面の風軸上 6 方位における発電量



## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

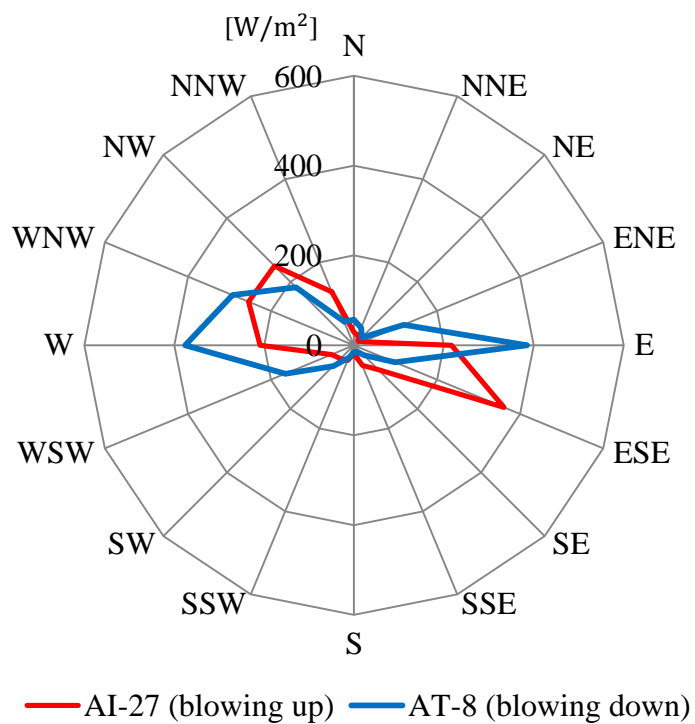


図 4.10 A 断面における 16 方位別風力エネルギー密度

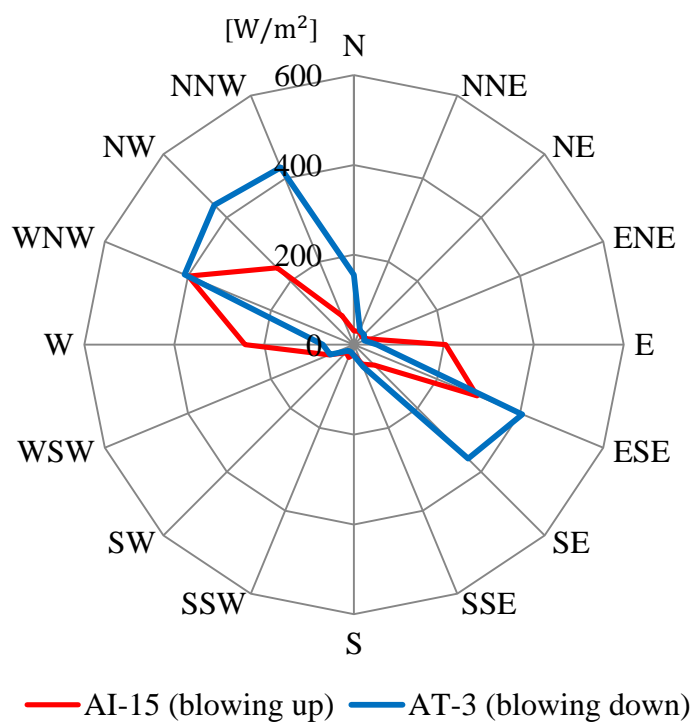


図 4.11 B 断面における 16 方位別風力エネルギー密度

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

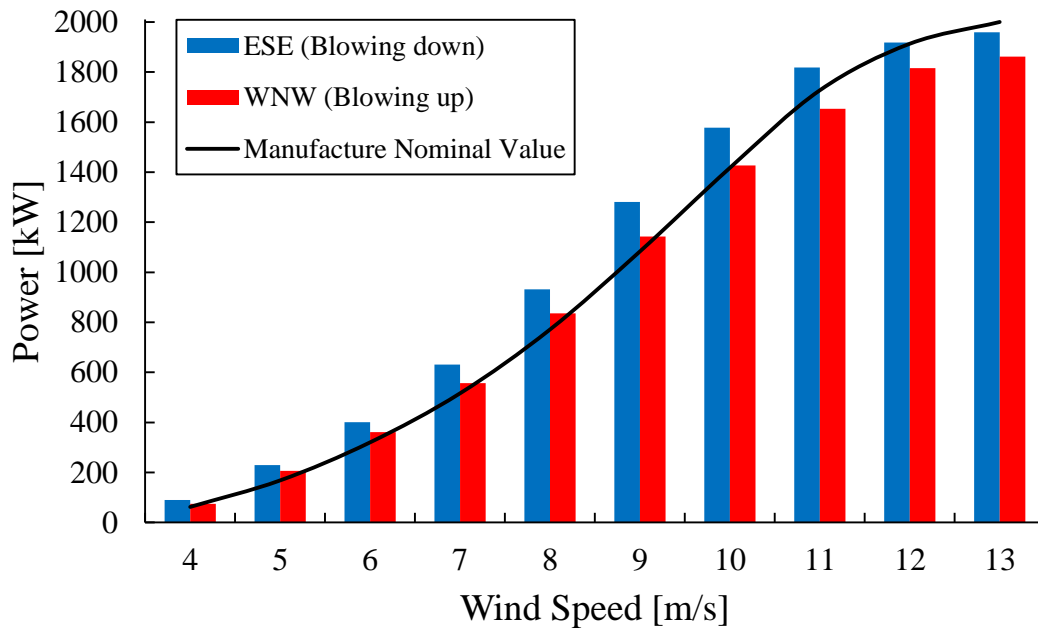


図 4.12 AI-27 の風速階級別発電量

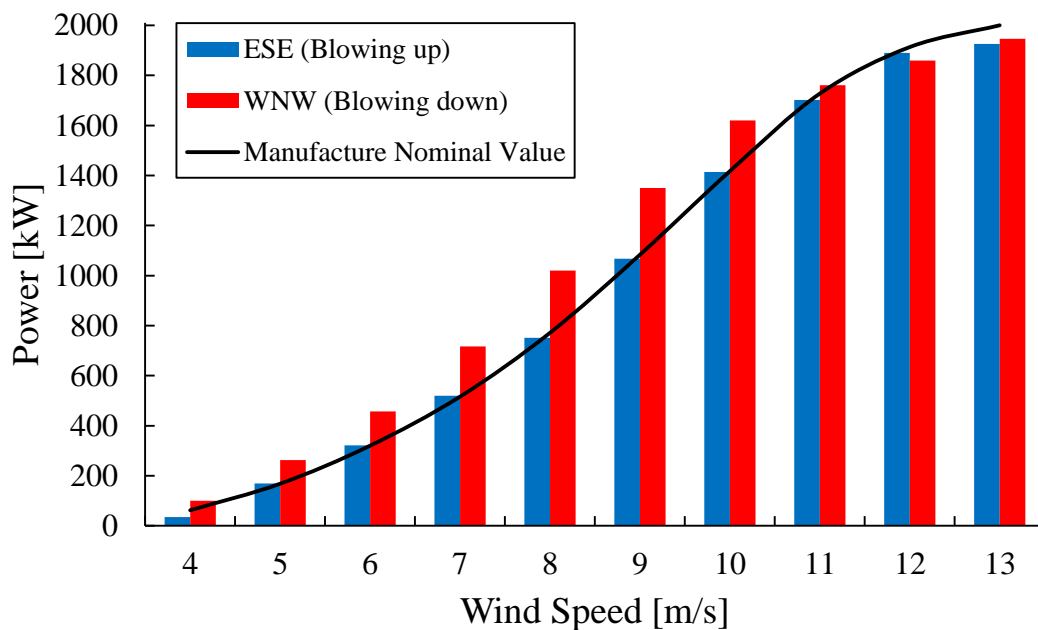


図 4.13 AT-8 の風速階級別発電量

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

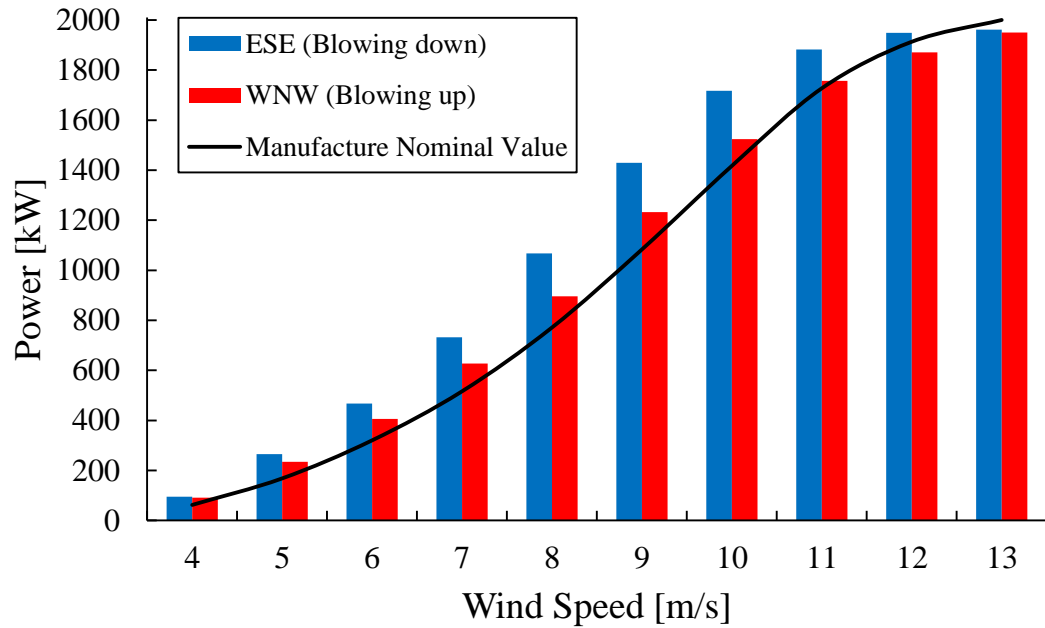


図 4.14 AI-15 の風速階級別発電量

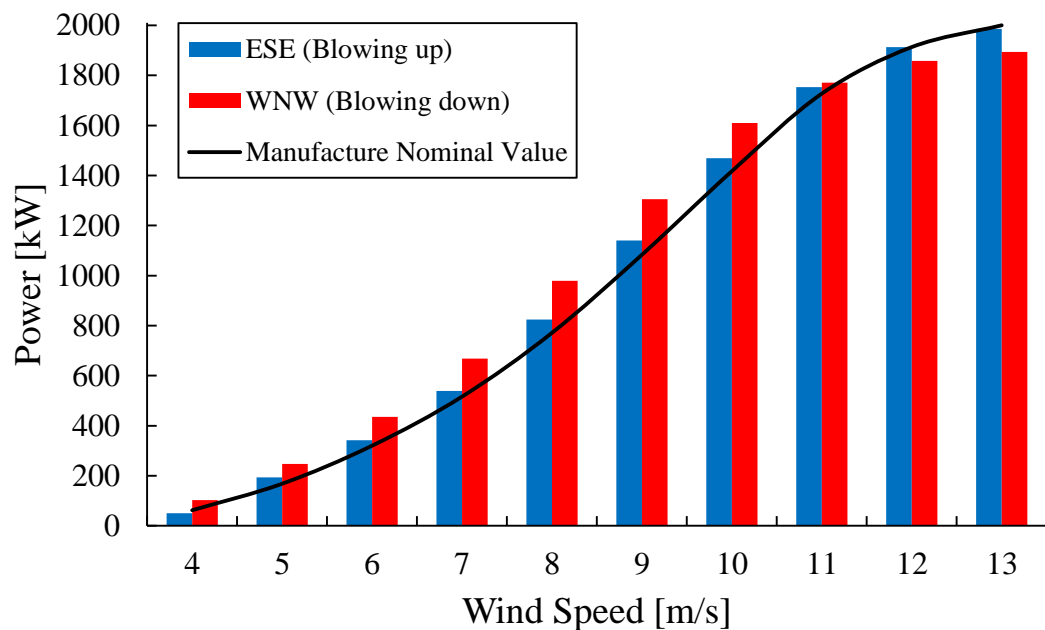


図 4.15 AT-3 の風速階級別発電量

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

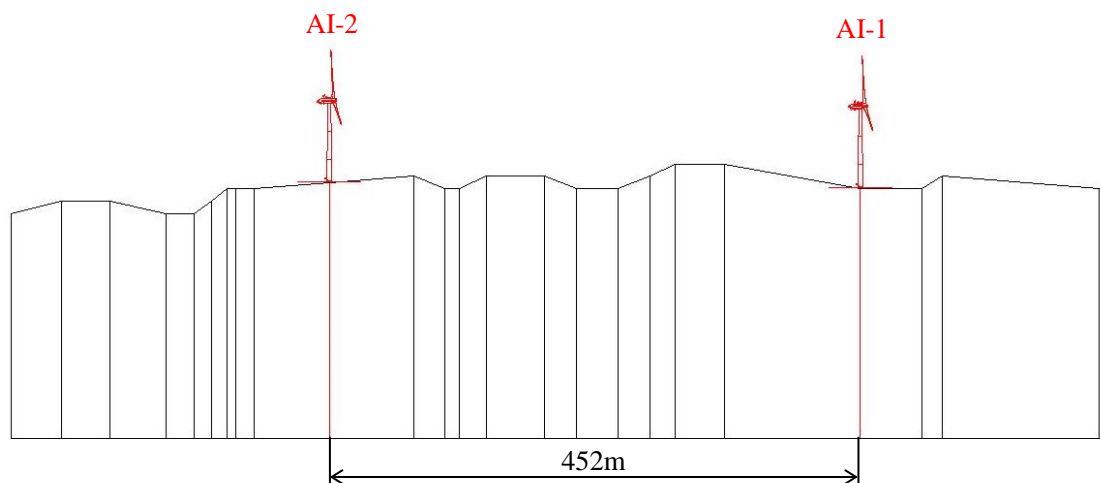


図 4.16 AI-1 および AI-2 の地形断面図

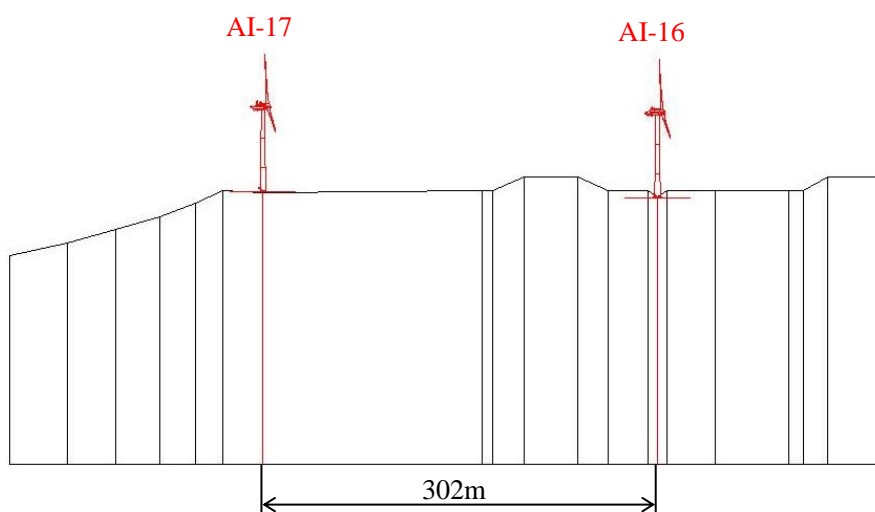


図 4.17 AI-16 および AI-17 の地形断面図

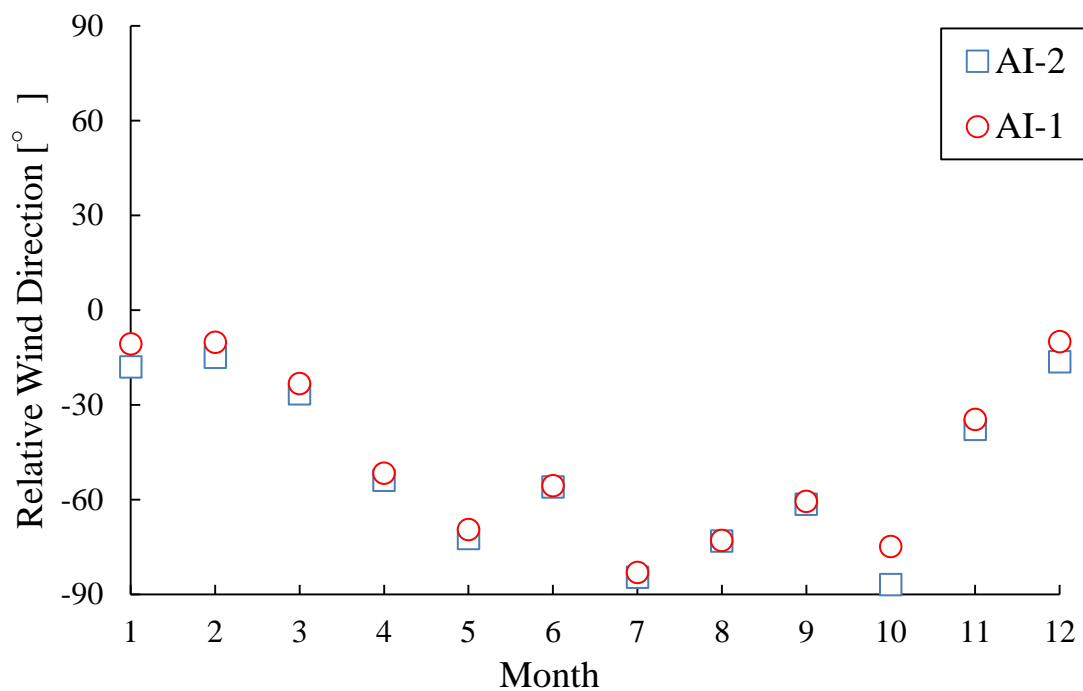


図 4.18 AI-1 および AI-2 の月別平均風向

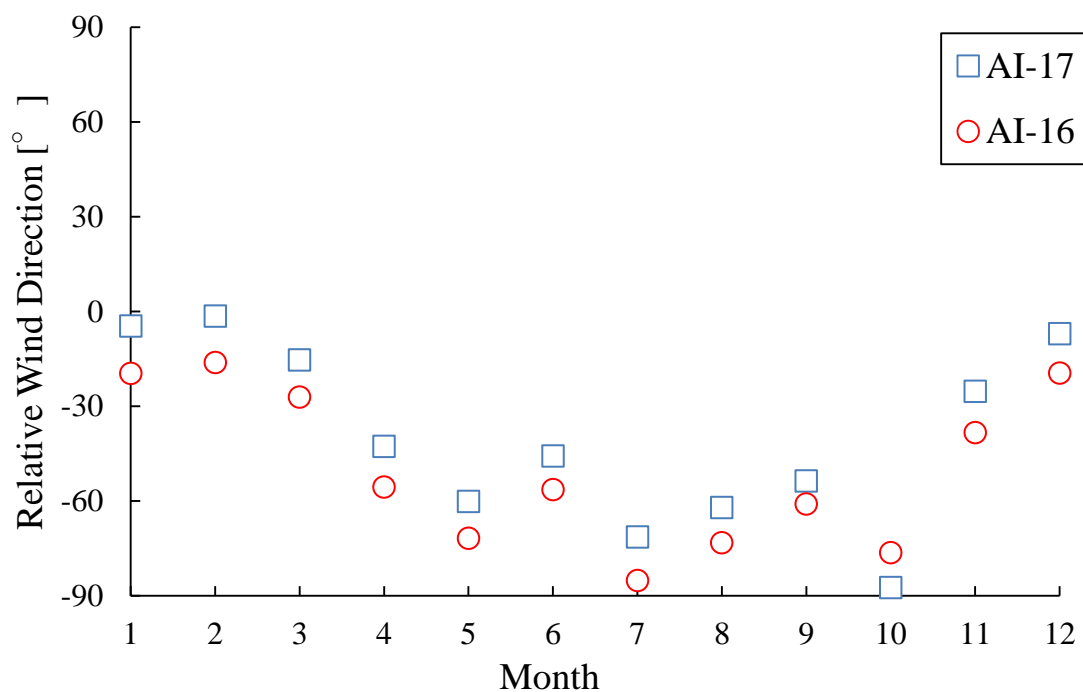


図 4.19 AI-16 および AI-17 の月別平均風向

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

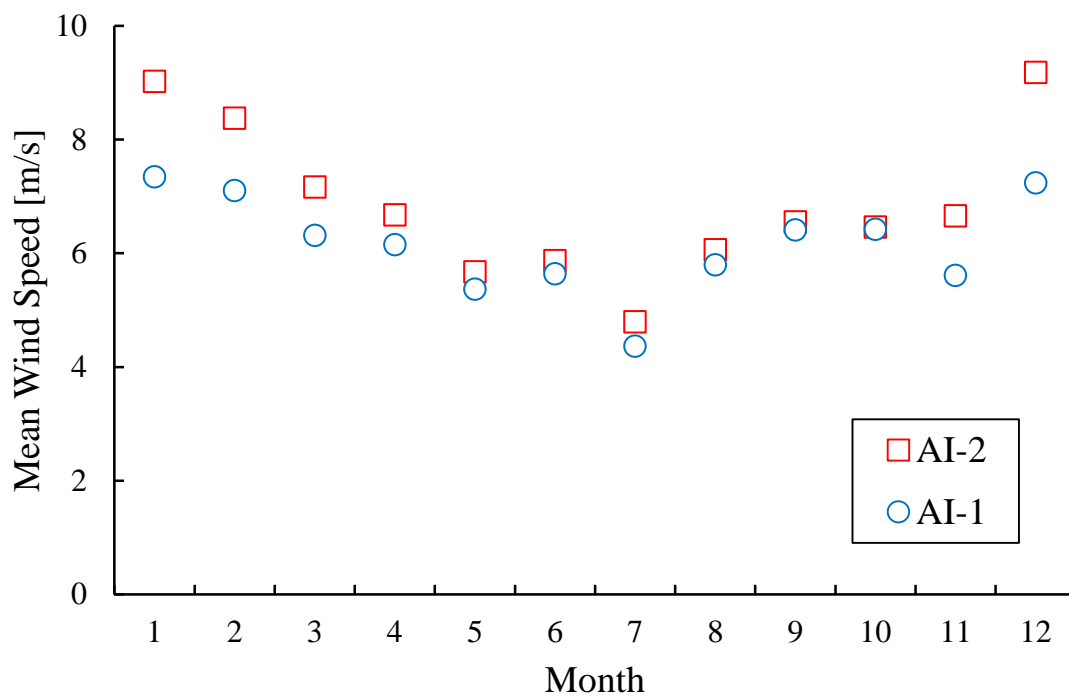


図 4.20 AI-1 および AI-2 の月別平均風速

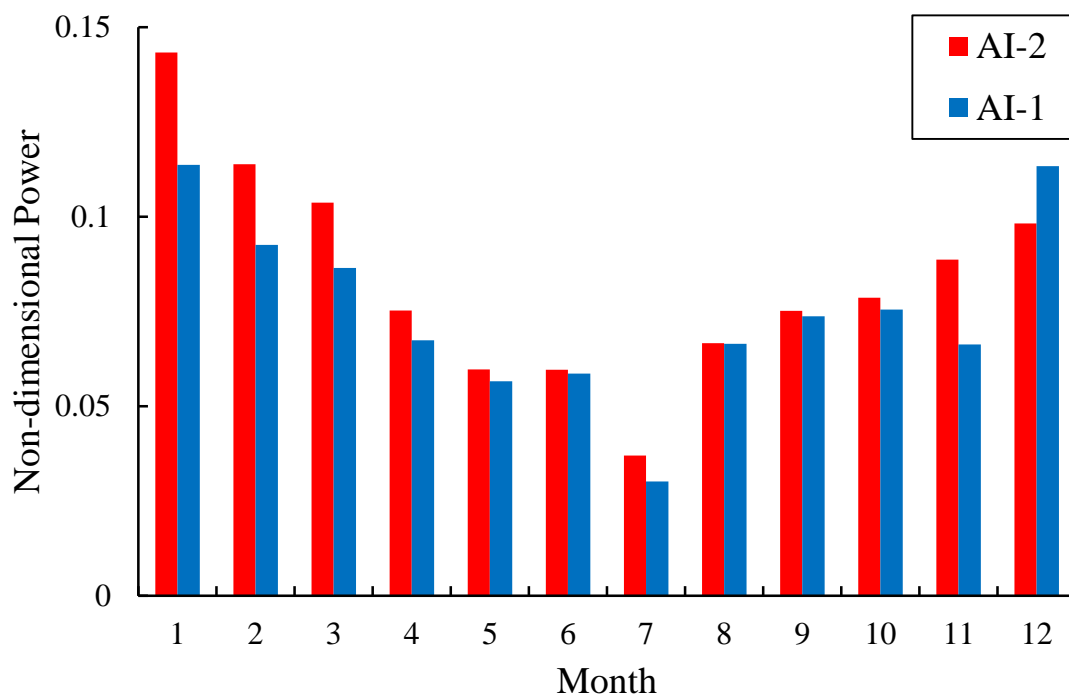


図 4.21 AI-1 および AI-2 の月別発電量

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

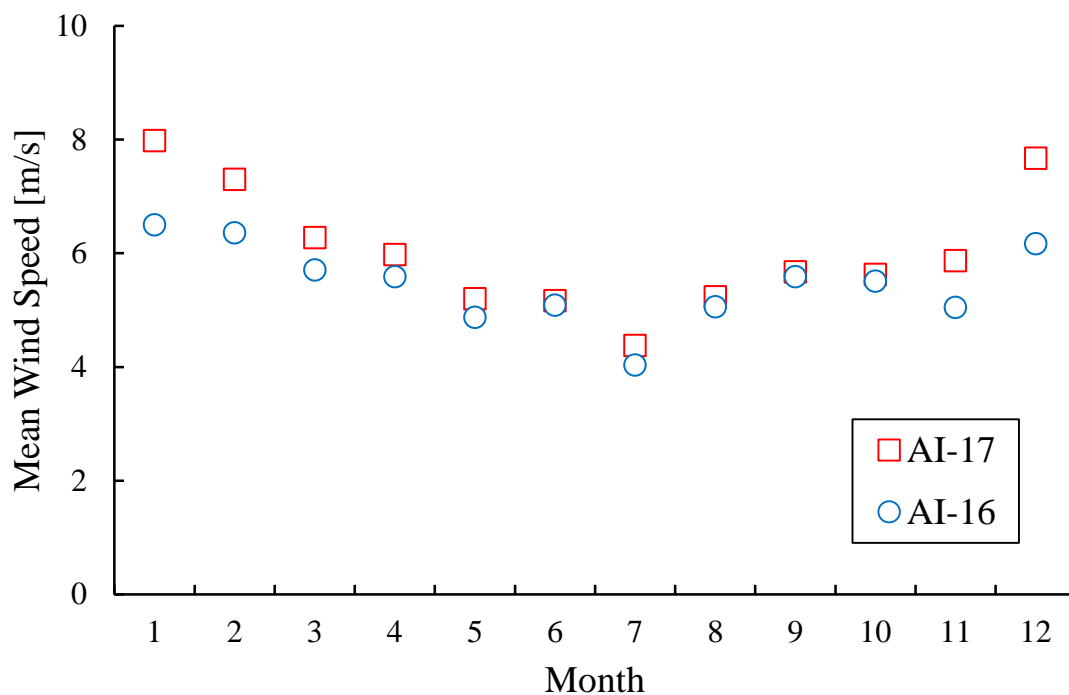


図 4.22 AI-16 および AI-17 の月別平均風速

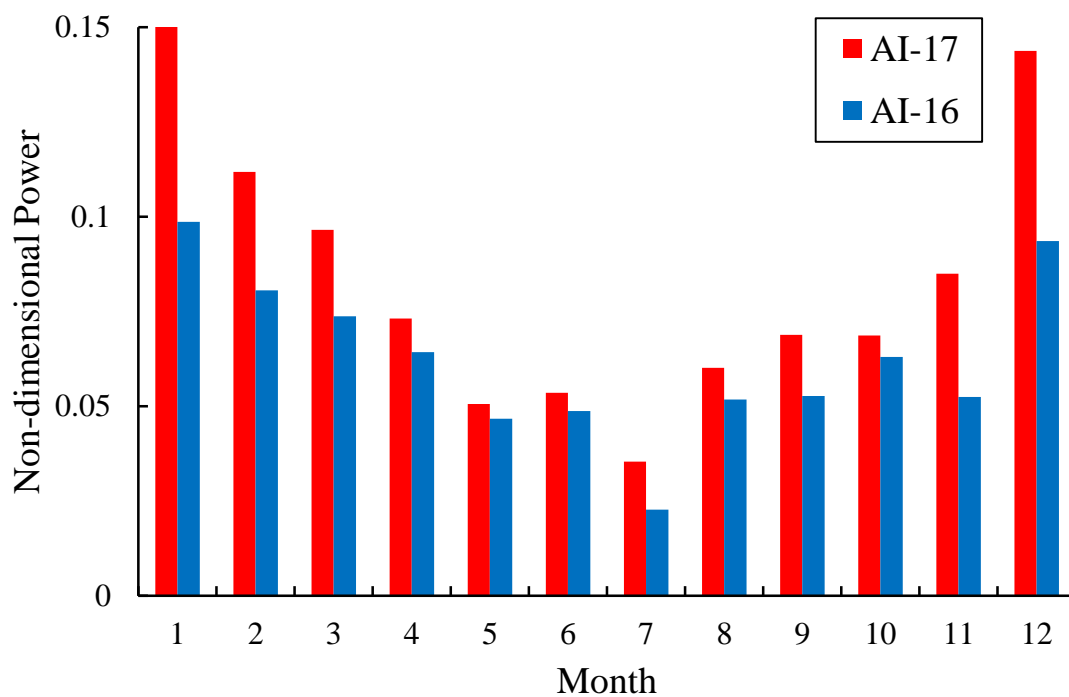


図 4.23 AI-16 および AI-17 の月別発電量

## 第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

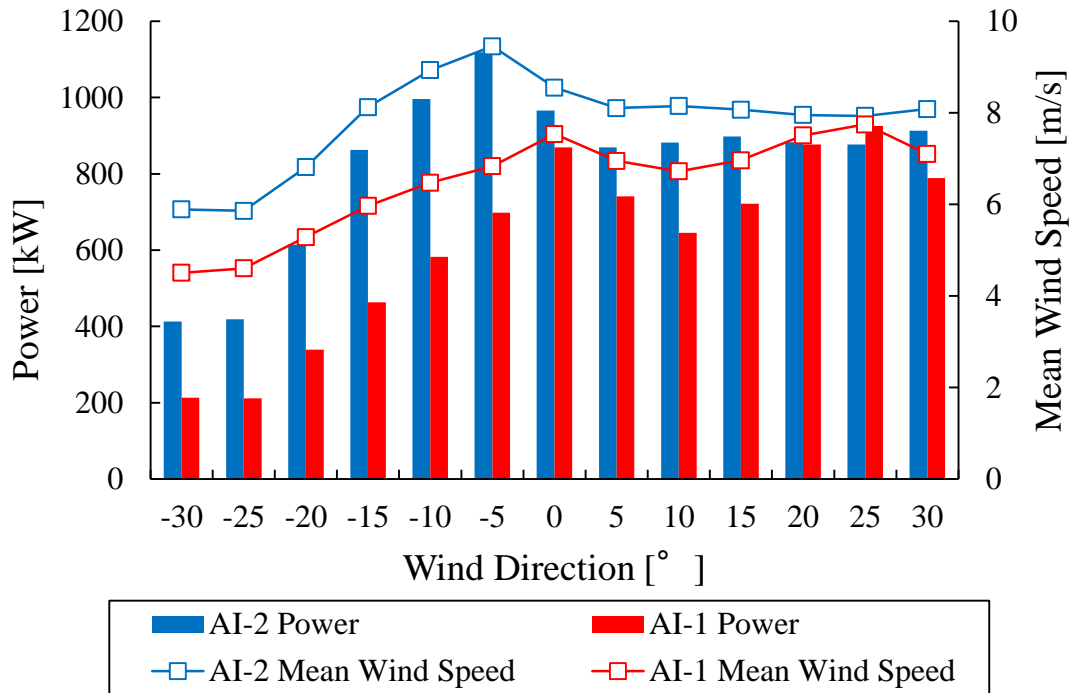


図 4.24 AI-1 および AI-2 の風向別平均風速及び発電量

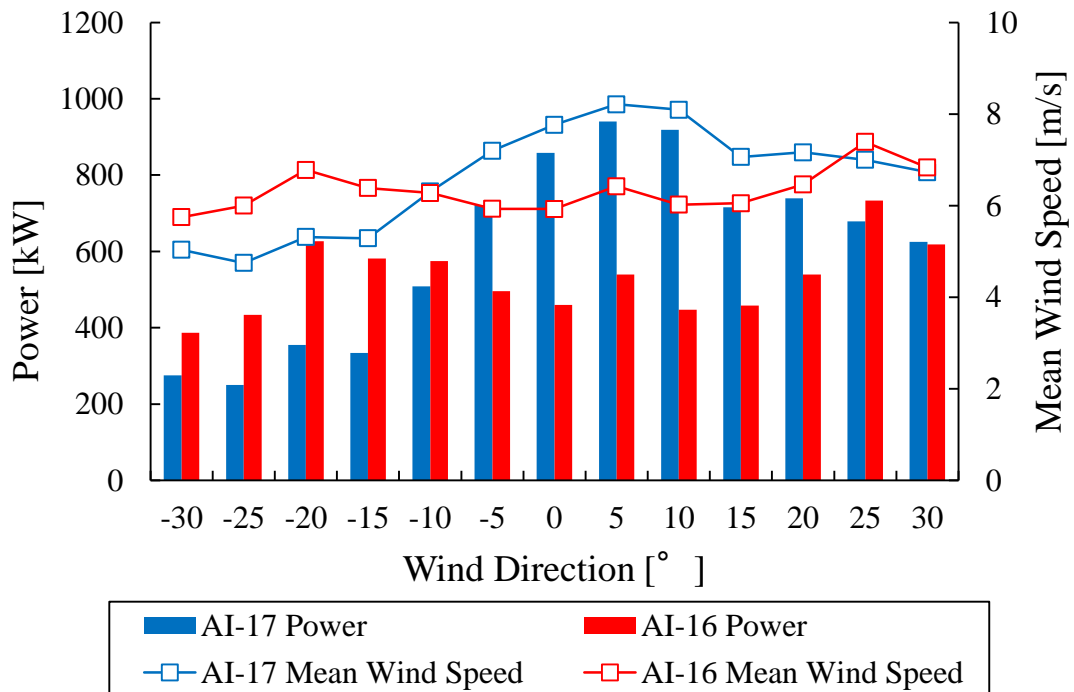


図 4.25 AI-16 および AI-17 の風向別平均風速及び発電量



## 第5章 MASCOT による解析結果

本章では、非線形風況予測モデル MASCOT により算定した A および B 断面の風車 4 基における平均風速の割増係数および吹上角の比較・考察を行う。なお、比較方位は風軸上方位 6 方位とし、風速の評価高さはハブ高さ 65.4m である。以下にその結果を示す。

### 5.1 平均風速の割増係数

本節では、風軸上 6 方位における平均風速の割増係数の比較を行う。表 5.1 に A 断面における風軸上 6 方位の平均風速の割増係数、表 5.2 に B 断面における風軸上 6 方位の平均風速の割増係数を示す。ここで風向 E, ESE, SE で AI-27 および AI-15 は吹下風を受け、AT-8 および AT-3 は吹上風を受ける。風向 W, WNW, NW で AI-27 および AI-15 は吹上風を受け、AT-8 および AT-3 は吹下風を受ける。

表 5.1 A 断面における風軸上 6 方位の平均風速の割増係数

	E	ESE	SE	W	WNW	NW
AI-27	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6
	吹下風			吹上風		
AT-8	1.2	1.2	1.2	1.0	1.1	1.1
	吹上風			吹下風		

表 5.2 B 断面における風軸上 6 方位の平均風速の割増係数

	E	ESE	SE	W	WNW	NW
AI-15	0.7	0.8	0.9	0.7	0.8	1.2
	吹下風			吹上風		
AT-3	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1
	吹上風			吹下風		

表 5.1 より、AT-8 の平均風速の割増係数は風向によらず AI-27 に比べ大きい。AT-8 のロータ中心高さが尾根頂部と同程度であり、周囲 (AI-27 を含む) に比べ標高が高いため、増速されていると考えられる。また、AI-27 の平均風速の割増係数は、吹下風 (E, ESE, SE) に比べ吹上風 (W, WNW, NW) で高くなる。AT-8 の平均風速の割増係数も、吹下風 (W, WNW, NW) に比べ吹上風 (E, ESE, SE) で高くなる。

表 5.2 より、AT-3 の平均風速の割増係数は NW を除く各風向で AI-15 に比べ大きい。AT-3 のロータ中心高さが尾根頂部と同程度であり、周囲 (AI-15 を含む) に比べ標高が高いため、増速されていると考えられる。また、AI-15 の平均風速の割増係数は、吹下風 (E, ESE,

SE) に比べ吹上風 (W, WNW, NW) で高くなる. AT-3 の平均風速の割増係数も, 吹下風 (W, WNW, NW) に比べ吹上風 (E, ESE, SE) で高くなる.

しかしながら, これらの結果は 4.2.3 節で示した風速階級別発電量の比較結果と整合しない. この要因として, 4.2.1 節で述べた風速計の読み誤差が考えられる. 吹上・吹下風, 航空障害灯近傍のゆがめられた流れが影響し, 風速計は真値を示さず, 風速を過大あるいは過小評価していると考えられる. そのため, 風速計による実測データと解析結果が整合しないと考えられる.

## 5.2 吹上角

本節では, 風軸上 6 方位における吹上角の比較を行う. 吹上角は, 風軸上 6 方位における風速の鉛直分布から内挿し求めたハブ高さにおける主流方向速度  $U$  および鉛直方向速度  $W$  を用いて算出した (3.2.7 節参照). なお, 風速の鉛直分布は付録 B に示す. 表 5.3 に A 断面の風向 E, ESE, SE のハブ高さにおける主流方向速度  $U$  および鉛直方向速度  $W$ , 表 5.4 に A 断面の風向 W, WNW, NW のハブ高さにおける主流方向速度  $U$  および鉛直方向速度  $W$  を示す. ここで風向 E, ESE, SE で AI-27 および AI-15 は吹下風を受け, AT-8 および AT-3 は吹上風を受ける. 風向 W, WNW, NW で AI-27 および AI-15 は吹上風を受け, AT-8 および AT-3 は吹下風を受ける.

表 5.3 A 断面の風向 E, ESE, SE における主流方向速度  $U$  および鉛直方向速度  $W$

	E		ESE		SE	
	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]
AI-27	4.8	-0.5	5.0	-0.5	5.0	-0.5
	吹下風					
AT-8	9.7	0.5	10.0	0.8	9.8	0.8
	吹上風					

表 5.4 A 断面の風向 W, WNW, NW における主流方向速度  $U$  および鉛直方向速度  $W$

	W		WNW		NW	
	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]
AI-27	6.0	0.7	6.0	0.6	4.9	0.6
	吹上風					
AT-8	8.1	-0.2	8.8	-0.3	9.3	-0.3
	吹下風					

表 5.3 より, AT-8 の主流方向速度  $U$  は風向によらず AI-27 に比べ高い. また, 風向 E, ESE, SE において吹下風を受ける AI-27 の鉛直方向速度は負の値を有し, 吹上風を受ける

## 第5章 MASCOT による解析結果

AT-8 は正の値を有する。

表 5.4 より，AT-8 の主流方向速度  $U$  は風向によらず AI-27 に比べ高い。また，風向 W，WNW，NW において吹下風を受ける AT-8 の鉛直方向速度は負の値を有し，吹上風を受ける AI-27 は正の値を有する。

AT-8 の主流方向速度  $U$  が風向によらず AI-27 に比べ高くなる要因は，5.1 節で述べた標高差によるものだと考えられる。AT-8 のロータ中心高さが尾根頂部と同程度であり，周囲（AI-27 を含む）に比べ標高が高いため，増速されていると考えられる。しかしながら，これらの結果は 4.2.3 節で示した風速階級別発電量の比較結果と整合しない。この要因として，4.2.1 節で述べた風速計の読み誤差が考えられる。また，鉛直方向速度  $W$  から地形および風向により吹上・吹下風を受けることが数値的に確認できる。

表 5.5 に B 断面の風向 E，ESE，SE のハブ高さにおける主流方向速度  $U$  および鉛直方向速度  $W$ ，表 5.6 に B 断面の風向 W，WNW，NW のハブ高さにおける主流方向速度  $U$  および鉛直方向速度  $W$  を示す。

表 5.5 B 断面の風向 E，ESE，SE における主流方向速度  $U$  および鉛直方向速度  $W$

	E		ESE		SE	
	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]
AI-15	5.7	-0.6	6.5	-0.6	7.5	-0.7
	吹下風					
AT-3	8.6	0.5	9.3	0.5	8.9	0.7
	吹上風					

表 5.6 B 断面の風向 W，WNW，NW における主流方向速度  $U$  および鉛直方向速度  $W$

	W		WNW		NW	
	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]	$U$ [m/s]	$W$ [m/s]
AI-15	5.4	0.7	6.5	0.9	9.6	1.1
	吹上風					
AT-3	7.9	-0.3	8.3	-0.4	8.9	-0.5
	吹下風					

表 5.5 より，AT-3 の主流方向速度  $U$  は風向によらず AI-15 に比べ高い。また，風向 E，ESE，SE において吹下風を受ける AI-15 の鉛直方向速度は負の値を有し，吹上風を受ける AT-3 は正の値を有する。

表 5.6 より，AT-3 の主流方向速度  $U$  は風向によらず AI-15 に比べ高い。また，風向 W，WNW，NW において吹下風を受ける AT-3 の鉛直方向速度は負の値を有し，吹上風を受ける AI-15 は正の値を有する。

AT-3 の主流方向速度  $U$  が風向によらず AI-15 に比べ高くなる要因は，5.1 節で述べた標高

## 第5章 MASCOT による解析結果

差によるものだと考えられる。AT-3 のロータ中心高さが尾根頂部と同程度であり、周囲（AI-15 を含む）に比べ標高が高いため、増速されていると考えられる。しかしながら、これらの結果は4.2.3節で示した風速階級別発電量の比較結果と整合しない。この要因として、A断面と同様に風速計の読み誤差が考えられる。また、鉛直方向速度  $W$  から地形および風向により吹上・吹下風を受けることが数値的に確認できる。

表 5.7 に A 断面における風軸上 6 方位の吹上角を示す。表 5.8 に B 断面における風軸上 6 方位の吹上角を示す。

表 5.7 A 断面における風軸上 6 方位の吹上角

	E	ESE	SE	W	WNW	NW
AI-27	-5.6	-6.2	-5.5	6.6	5.7	7
	吹下風			吹上風		
AT-8	2.9	4.6	4.9	-1.5	-1.8	-1.8
	吹上風			吹下風		

表 5.8 B 断面における風軸上 6 方位の吹上角

	E	ESE	SE	W	WNW	NW
AI-15	-5.8	-5.5	-5.5	7.8	7.6	6.6
	吹下風			吹上風		
AT-3	3.3	3.3	4.4	-2.3	-2.9	-3.5
	吹上風			吹下風		

表 5.7 より、本サイトの主風向  $W$ 、 $WNW$ 、 $NW$  において、AI-27 は各風向で吹上角  $6.6^\circ$ 、 $5.7^\circ$ 、 $7.0^\circ$  の吹上風を受ける。AT-8 はこれらの風向で吹上角  $-1.5^\circ$ 、 $-1.8^\circ$ 、 $-1.8^\circ$  となり吹下風を受ける。また、風向  $E$ 、 $ESE$ 、 $SE$  において、AI-27 は各風向で吹上角  $-5.6^\circ$ 、 $-6.2^\circ$ 、 $-5.5^\circ$  となり吹下風を受ける。AT-8 はこれらの風向で吹上角  $2.9^\circ$ 、 $4.6^\circ$ 、 $4.9^\circ$  の吹上風を受ける。

表 5.8 より、当サイトの主風向  $W$ 、 $WNW$ 、 $NW$  において、AI-15 は各風向で吹上角  $7.8^\circ$ 、 $7.6^\circ$ 、 $6.6^\circ$  の吹上風を受ける。AT-3 はこれらの風向で吹上角  $-2.3^\circ$ 、 $-2.9^\circ$ 、 $-3.5^\circ$  となり吹下風を受ける。また、風向  $E$ 、 $ESE$ 、 $SE$  において、AI-15 は各風向で吹上角  $-5.8^\circ$ 、 $-5.5^\circ$ 、 $-5.5^\circ$  となり吹下風を受ける。AT-3 はこれらの風向で吹上角  $3.3^\circ$ 、 $3.3^\circ$ 、 $4.4^\circ$  の吹上風を受ける。

以上のように、地形および風向により風車に流入する風は吹上・吹下風となることが数値的に確認できた。

## 第6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（観測期間1年）の解析ならびに非線形風況解析モデル MASCOT を用いた風況解析を行った。

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 本ウィンドファームにおける風向出現率は、WNW (29.8%) が最も卓越しており、次いで、NW (13.7%)、ESE (12.7%)、W (12.6%) となることから、良好な風向出現状況であると評価できる。風軸上の年間風向出現率も 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。また、本ウィンドファームの風速は寒候期に高く、暖候期に若干低くなるという日本の一般的な傾向を示した。
- (2) 風車ロータの中心高さが尾根頂部と同程度である場合、尾根越えの吹下風は、周囲に比べて増速され、吹下風を受ける風車の発電量は大きくなる。
- (3) ナセル風速計に基づく風速階級別の発電量は、吹上風で小さく、吹下風で大きくなる。また吹下風を受ける場合、定格運転までの全ての風速階級で風車出力がメーカー公表値を上回った。検討対象の風車の風速計は、複雑地形に起因する吹上風および吹下風を受けており、流入する多くの風は水平ではない。これにより、風速計は真値を示さず、風速を過大あるいは過小評価していると考えられる。また、風速計の後方 2.2m、高さ 0.3m 下に設置されている航空障害灯近傍のゆがめられた流れが影響し、風速計の読み誤差を引き起こしていると考えられる。
- (4) 標高が概ね等しく、風車間距離が  $10D$  ( $D$ : 風車直径) 未満の 2 組の風車の発電量を比較した結果、風車後流の影響による発電量の低下が確認できた。

また、今後の課題を以下に示す。

- (1) 本ウィンドファームでは、風車ロータの中心高さが尾根頂部と同程度である場合、吹下風を受ける風車の風速および出力が高くなることが確認できた。しかしながら、尾根による流れの剥離の影響やナセル風速計の読み誤差を考慮しておらず、これらの条件を加味したより詳細な風況解析を行う必要がある。
- (2) 自然風況下での風車後流には、流入風や風向、乱流強度や風車の運転状態に加えて、地形特性等の要素が複雑に関係しているため、解析条件の細分化が求められる。
- (3) 本研究では、吹上・吹下風に起因するナセル風速計の読み誤差の可能性を示したが、その要因の解明には至っていない。そのため、マストやドローンを用いた流入風の測定、風洞実験による風速計の性能評価を行う必要がある。

## 参考文献

- [1] 国土交通省, 気象庁, IPCC 第4次評価報告書, 2007.
- [2] 全国地球温暖化防止活動センター, 地球温暖化の原因と予測,  
[http://www.jccca.org/global\\_warming/knowledge/kno02.html](http://www.jccca.org/global_warming/knowledge/kno02.html), 2018年12月参照.
- [3] 国土交通省, 気象庁, 世界の年平均気温の偏差の経年変化, 2018.
- [4] 経済産業省, 資源エネルギー庁, エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律関係条文集, 2010.
- [5] 経済産業省令第一九号, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H24/H24F15001000046.html>, 2018年12月参照.
- [6] 経済産業省, 資源エネルギー庁, 福島事故を踏まえた現状認識と今後の課題, 2013.
- [7] 夫馬賢治, 世界の風力発電導入量と市場環境, 株式会社ニューラル,  
<https://sustainablejapan.jp/2018/02/20/wind-power-market-2017/30714>, 2018.
- [8] 世界風力エネルギー会議, Global Wind Report, 2017.
- [9] 松原弘直, 世界の風力発電市場の成長と日本の課題, 環境エネルギー政策研究所,  
<http://www.energy-democracy.jp/2313>, 2017.
- [10] 石塚博昭, 日本における風力発電設備・導入実績, NEDO,  
[http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100984.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100984.html), 2018.
- [11] 稲村慎吾, 繁永康, 清木荘一郎, 吉田茂雄, 日立技報, ダウンウィンド2MW風力発電システムの技術開発, 日立製作所, 2012.
- [12] 日立製作所HP, 製品情報, HTW2.0-80, ダウンウィンドロータ, 2018.
- [13] 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 日比一喜, 非線形風況予測モデルMASCOTの開発とその応用, 第24回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.91-94, 2002.

## 参考文献

- [14] 石原孟, 日比一喜, 急峻な山を越える乱流場の数値予測, 日本風工学論文集, No.83, pp.175-188, 2000.
- [15] 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 土木学会論文集, No.731-763, pp.195-221, 2003.
- [16] 谷川亮一ほか, 風力発電機位置決定方法及び風力発電量予測方法に基づく風況評価, 第24回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.119-122, 2002. 9.
- [17] H. P. Frank et al., The Numerical Wind Atlas - the KAMM/WAsP Method, Risoe National Laboratory, 2001.
- [18] 石原孟, 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, pp.387-396, 2003.
- [19] 石原孟, 山口敦, 藤野陽一, 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 日本風工学会誌, No.83, pp.175-186, 2000.
- [20] 山口敏, 清水仁, 檜山和男, 地形風大規模解析のための並列有限要素解析システム, 第12回数値流体力学シンポジウム, pp.535-536, 1998.
- [21] 関西電力株式会社, 財団法人日本気象協会, 風力発電所設計のための風車配置支援システム (LAWEPS-Planner) の開発, 2005.



## 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。時に応じて、厳しくご指導頂いたこと、優しく励まして下さったこと、私自身の至らなさを実感できたことは今後の努力の糧となるものであります。鎌田泰成准教授には実験装置の治具製作やトラブル対応、研究環境の改善、作業・データ整理法の助言など多くのご助力を頂き感謝致しております。また、就職活動や休日のカヌー等でも大変お世話になりました。来年度からエンジニアとして、より一層専門知識を身に付け、鎌田先生のような偉大な技術者を志し、日々精進致します。廣田真史教授には本研究の審査を受諾して頂き、大変感謝しています。そして、いつも体調を気にかけて差し入れをして下さった寺川智子秘書にも感謝の意を表します。明るく暖かい寺川様の人柄にいつも救われ、研究を進める大きな励みとなりました。そして、本研究を遂行するに当たり、風車観測データの提供や現場見学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江本邦夫様、坂武彦様、今井慎吾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。山口竜司君は、その豊富な知識量で研究室配属当初から乱流格子や風車設置作業の即戦力として活躍してくれました。深夜耐久ナセルカバー製作も本当にありがとう。また研究で行き詰った際も、明るく元気な山口君に私だけでなく、研究室の皆が力をもらっていたと思います。毎日欠かさず、2人で佐藤涼太君の“治療”をしたことも大変慎ましい思い出です。今年は就職活動と研究で忙しくなると思いますが、山口君なら最良の結果を残せると確信しています。牛草拓巳は、私の至らなさから本当に苦勞をかけました。RIAM-COMPACTによる風況解析も良く頑張ってくれました。来年度も山口君と協力し、和気藹々としたチームを作ってください。松本一真君は、手間のかかるデータ整理等を快く引き受けてくれて、大変頼りになりました。松本君の朗らかな笑顔に甘えて、その他多くの苦勞をかけましたが、1年間ついてきてくれて本当にありがとう。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。河合慶一郎君は、カヌーのゴールデンペアとして大変お世話になりました。毎年カヌーマラソンで躍進できたことを誇りに感じています。来年度から半年間静岡県に住み込む理由が、天竜川で練習がしたいからと聞いたときは感嘆の念を禁じ得ませんでした。これまでに引き続き、仲良くやりましょう。櫻井優輝君は、いつもマイペースではありましたが、着実に研究を進めていました。また BBQ や呑み会の櫻井君は中々見応えがあり、楽しませてもらいました。また皆で呑みに行きましょう。鶴見豊君は、大学院からの編入ということで当初苦勞したこともあったと思いますが、その能力の高さで無事に研究を遂行していました。またプログラミング能力が高く、私も見習って勉強したいと思います。

## 謝辞

佐藤涼太君は、同じ高専からの編入組ということで、最も多くの時間を共にしました。気分屋な私の性格にも怒らず、暖かく接してくれました。充実した大学生活を送れたのは間違いなく佐藤君がいたからだと思います。来年度からは勤務地が近いので、休みの日は定期的に呑みに行きましょう。これからもよろしく。星野雄平君は、いつも私の研究に関する相談に優しく対応してくれました。来年度からも星野君の優しさで農家の人たちに寄り添い、農業の大きな発展に貢献して下さい。

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。

2019年2月6日

北川 慎吾

## 付録 A 乱流強度

風の乱れは風車の寿命とエネルギー取得量に影響を及ぼす可能性がある。本調査では JIS C 1400-1 : 2010 (IEC 61400-1 : 2005) で示される乱流強度の定義に基づき、10 分平均風速とその標準偏差から方位毎に乱流強度を算出し、吹上・吹下風を受ける AI-27 および AT-8, AI-15 および AT-3 の風車 4 基における風の乱れの状況について検討した。表 A.1 に JIS C 1400-1 : 2010 で規定される風車クラスの基本パラメータを示す。

表 A.1 風車規格の風条件 (IEC 61400-1 : 2005)

風車クラス		I	II	III	S
$V_{\text{ref}}$	m/s	50	42.5	37.5	設計者が規定する数値
A	$I_{\text{ref}}$	0.16			
B		0.14			
C		0.12			

ここで、 $I_{\text{ref}}$  は風速が 15 m/s の場合の乱流強度の期待値を表す。また、10 分間平均風速の再現期間 50 年の極値  $V_{\text{ref}}$  を基準風速と呼び、IEC 規格において風車設計の基礎となっている。IEC 61400-1 (2005) では、風車の設計に用いた基準風速によって、風車を I, II, III の 3 クラスに分けており、さらにこれらの標準的なクラスに入らないものを「クラス S」としている。なお、クラス S は、設計に用いた基準風速が高い風車を指すだけでなく、それが低いものや、乱流強度、風速頻度分布、運転温度、空気密度その他の設計条件が、標準とは異なる風車全てを指す可能性があることに留意しなければならない。表 A.2 に乱流カテゴリに対応した風速標準偏差および乱流強度を示す。

表 A.2 乱流カテゴリに対応した風速標準偏差および乱流強度

乱流カテゴリ	$I_{\text{ref}}$	ハブ高さにおける風速 15m/s での値	
		風速標準偏差	乱流強度
A	0.16	2.696	0.180
B	0.14	2.359	0.157
C	0.12	2.022	0.135

本章では、乱流強度を式(A.1)によって算出した。また、算出条件として 10 分平均風速が風車カットイン風速 4.0m/s 以上のデータを対象として算出した。

$$\text{乱流強度} = \frac{\text{風速標準偏差}}{10 \text{ 分間平均風速}} \quad (\text{A.1})$$

なお、本章では、乱流強度および風速標準偏差の比較において、風車設計の判定基準とな

## 付録 A

る 90%分位値を用いた。

**付録 A.1 風速階級別風速標準偏差（号機別）**

図 A.1 に AI-27 の風速階級別風速標準偏差，図 A.2 に AT-8 の風速階級別風速標準偏差，図 A.3 に AI-15 の風速階級別風速標準偏差，図 A.4 に AT-3 の風速階級別風速標準偏差を示す。図 A.1~A.4 の縦軸は風速標準偏差，横軸は風速階級を表す。また，図 A.1~A.4 では，特異な風により風速標準偏差が不連続な値を示す可能性も考慮して 90%分位値の一次関数による近似直線を示す。

図 A.1~A.4 より，風速の増加に伴い，風速標準偏差が増加している。また，風車 4 基の風速標準偏差は低風速域では，カテゴリ B あるいは C 程度である。それに対して，中・高風速域における近似値による比較では AT-3 以外の風車 3 基はカテゴリ A を超過している。

**付録 A.2 風速階級別乱流強度（号機別）**

図 A.5 に AI-27 の風速階級別乱流強度，図 A.6 に AT-8 の風速階級別乱流強度，図 A.7 に AI-15 の風速階級別乱流強度，図 A.8 に AT-3 の風速階級別乱流強度を示す。図 A.1~A.4 の縦軸は乱流強度，横軸は風速階級を表す。また，図 A.5~A.8 では，図 A.1~A.4 で得られた風速標準偏差の 90%分位値の近似値から求めた乱流強度も示す。

図 A.5~A.8 より，風速の増加に伴い，乱流強度が減少している。また，風車 4 基の乱流強度は低風速域では，カテゴリ B あるいは C 程度である。それに対して，中・高風速域における近似値による比較では AT-3 以外の風車 3 基はカテゴリ A を超過している。

**付録 A.3 風速階級別風速標準偏差（断面別）**

図 A.9 に A 断面における風速階級別風速標準偏差，図 A.10 に B 断面における風速階級別風速標準偏差を示す。図 A.9 および A.10 の縦軸は風速標準偏差，横軸は風速階級を表す。

図 A.9 より，AI-27 および AT-8 の風速標準偏差は，低風速域では概ね同程度である。また，高風速域はばらつきが大きくなるものの，近似値による比較では吹上風を多く受ける AI-27 の乱流強度が吹下風を多く受ける AT-8 を上回る。

図 A.10 より，AI-15 および AT-3 の風速標準偏差は A 断面と同様に，低・中風速域では概ね同程度である。また，高風速域はばらつきが大きくなるものの，近似値による比較では吹上風を受ける AI-15 の乱流強度が吹下風を多く受ける AT-3 を上回る。

**付録 A.4 風速階級別乱流強度（断面別）**

図 A.11 に A 断面における風速階級別乱流強度，図 A.12 に B 断面における風速階級別乱流強度を示す。図 A.9 および A.10 の縦軸は乱流強度，横軸は風速階級を表す。

## 付録 A

図 A.11 より，AI-27 および AT-8 の乱流強度は，低・中風速域では概ね同程度である．また，高風速域はばらつきが大きくなるものの，近似値による比較では吹上風を多く受ける AI-27 の乱流強度が吹下風を多く受ける AT-8 を上回る．

図 A.12 より，AI-15 および AT-3 の乱流強度は A 断面と同様に，低・中風速域では概ね同程度である．また，高風速域はばらつきが大きくなるものの，近似値による比較では吹上風を多く受ける AI-15 の乱流強度が吹下風を多く受ける AT-3 を上回る．

## 付録 A.5 まとめ

吹上・吹下風を受ける AI-27 および AT-8，AI-15 および AT-3 の風車 4 基と乱流カテゴリの風速階級別風速標準偏差ならびに乱流強度を比較した．その結果，中・高風速域では AT-3 を除く風車 3 基の風速標準偏差ならびに乱流強度はカテゴリ A を超過した．

また，断面別に風速階級別風速標準偏差ならびに乱流強度を比較した．その結果，吹上風を多く受ける AI-27 および AI-15 の風速標準偏差ならびに乱流強度が吹下風を多く受ける AT-8 および AT-3 を上回った．

以上のことから，当ウィンドファームにおける風速標準偏差ならびに乱流強度は，カテゴリ A 相当ないしは超過しており，地形に起因する非常に複雑な流れが風車へ流入していると考えられる．これは，風速計の過大あるいは過小評価を引き起こす一因であると考えられる．

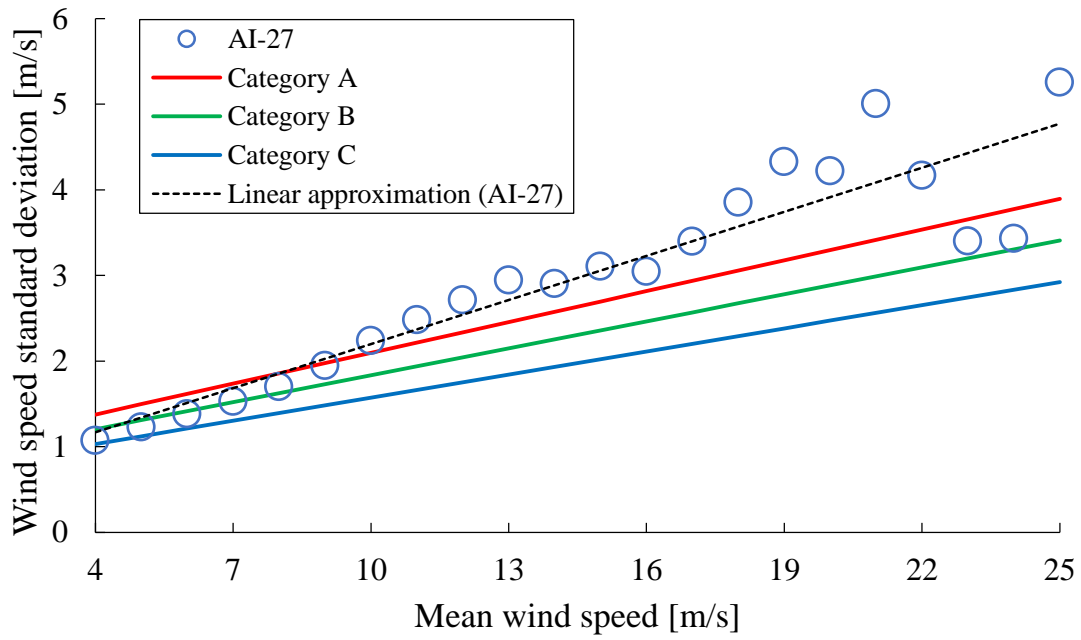


図 A.1 AI-27 の風速階級別風速標準偏差

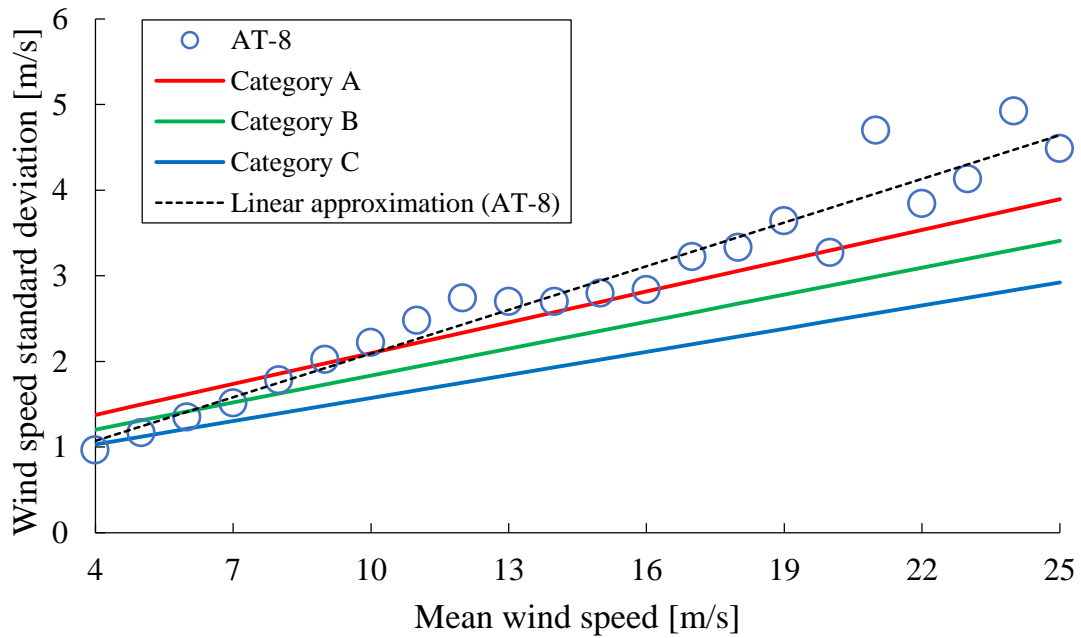


図 A.2 AT-8 の風速階級別風速標準偏差

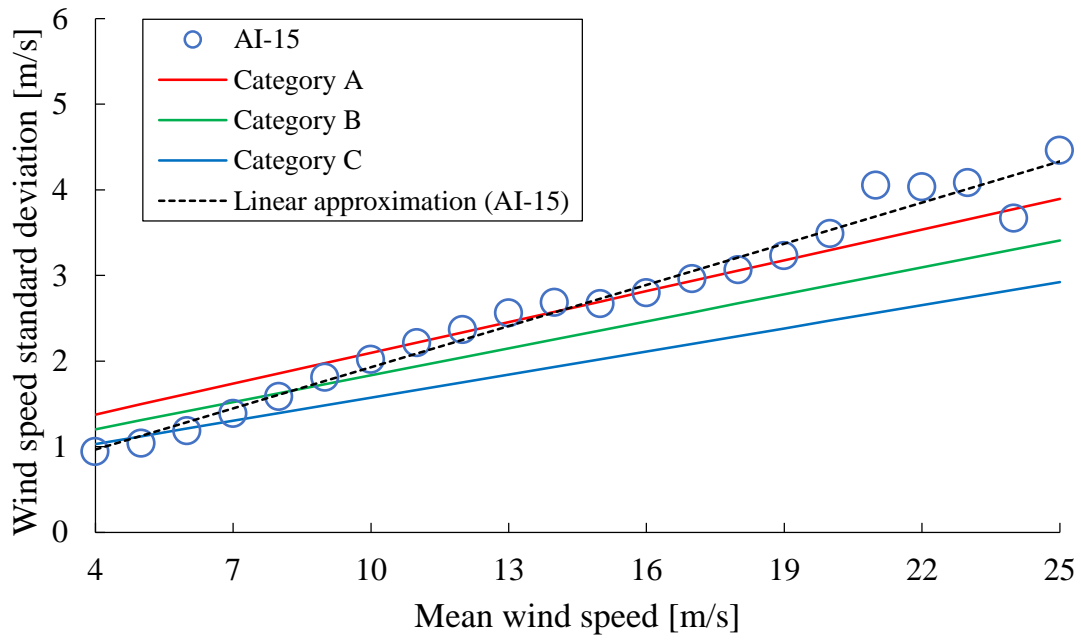


図 A.3 AI-15 の風速階級別風速標準偏差

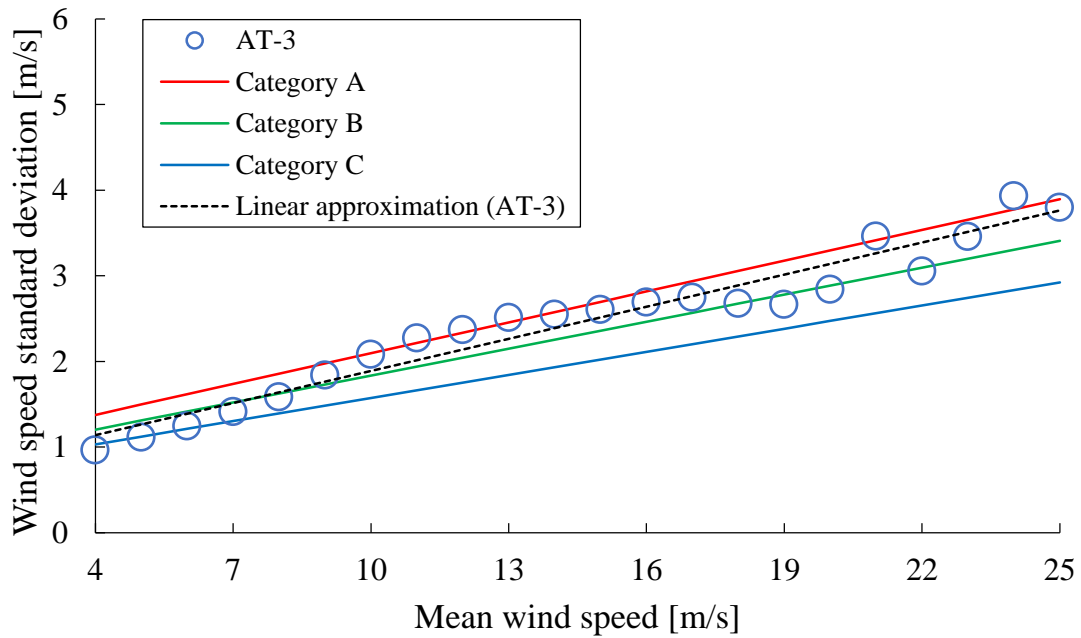


図 A.4 AT-3 の風速階級別風速標準偏差

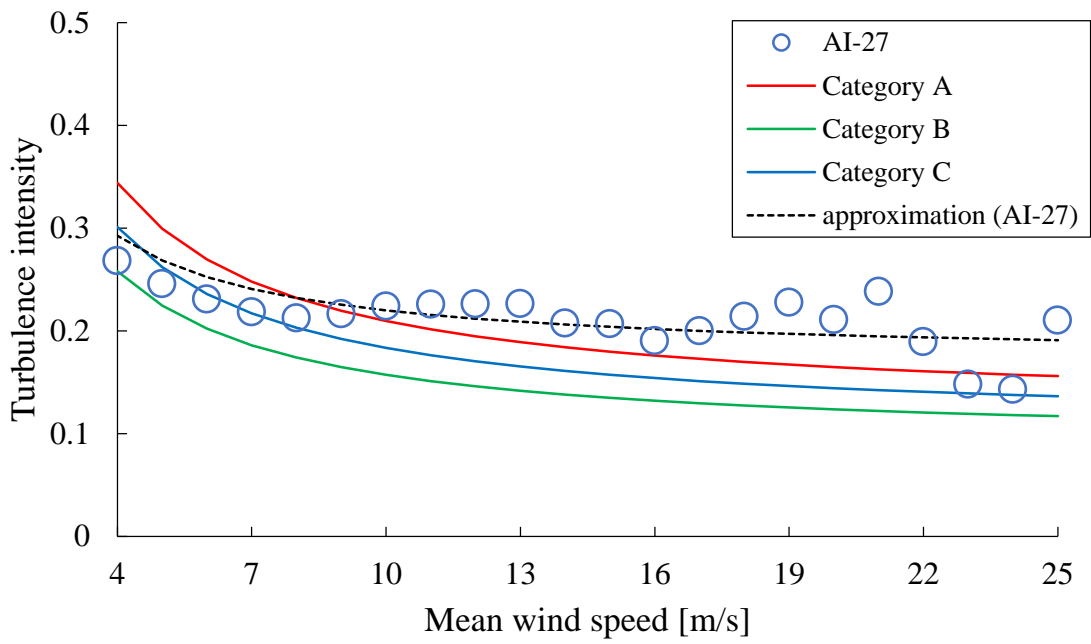


図 A.5 AI-27 の風速階級別乱流強度

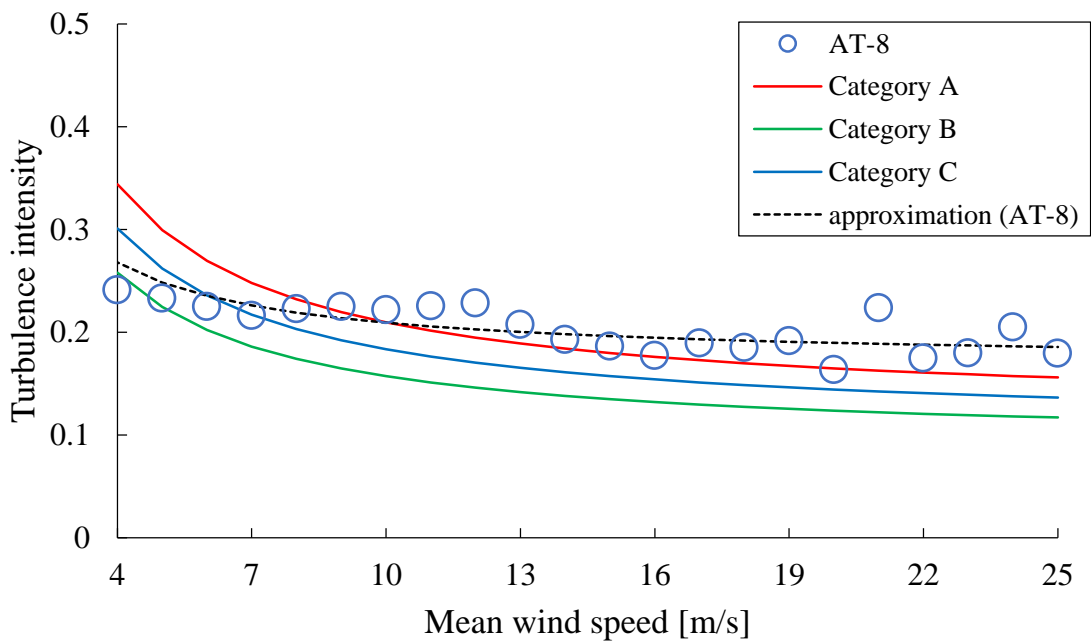


図 A.6 AT-8 の風速階級別乱流強度



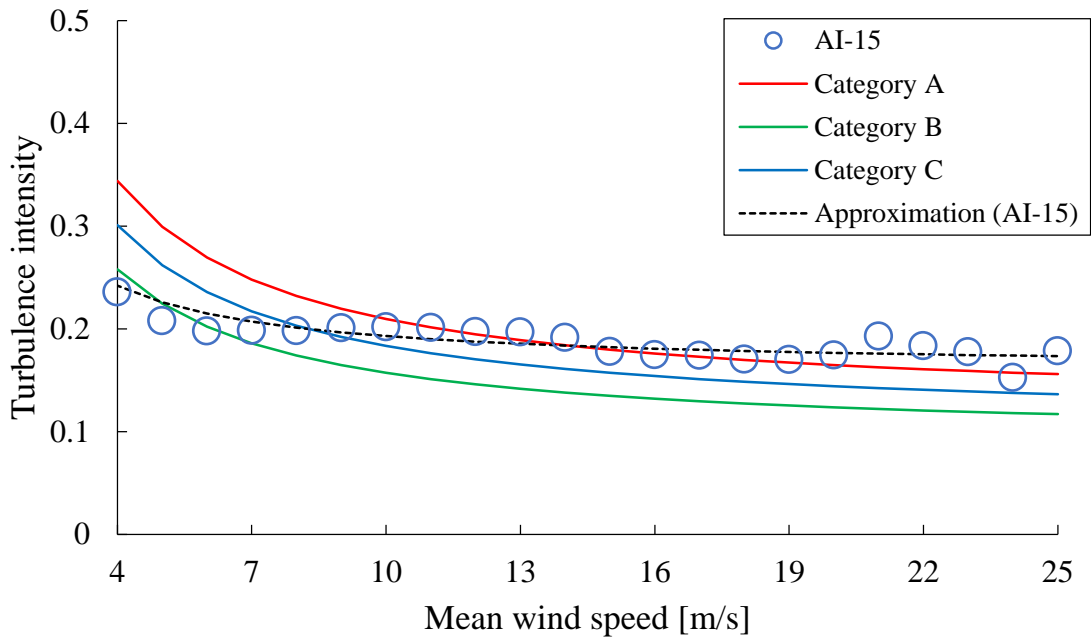


図 A.7 AI-15 の風速階級別乱流強度

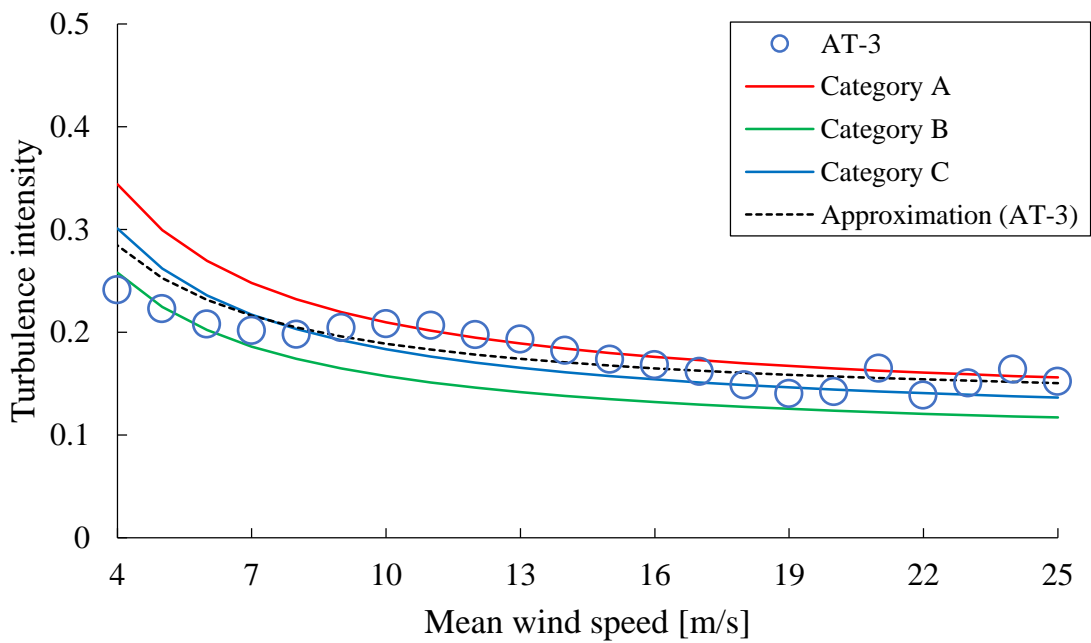


図 A.8 AT-3 の風速階級別乱流強度

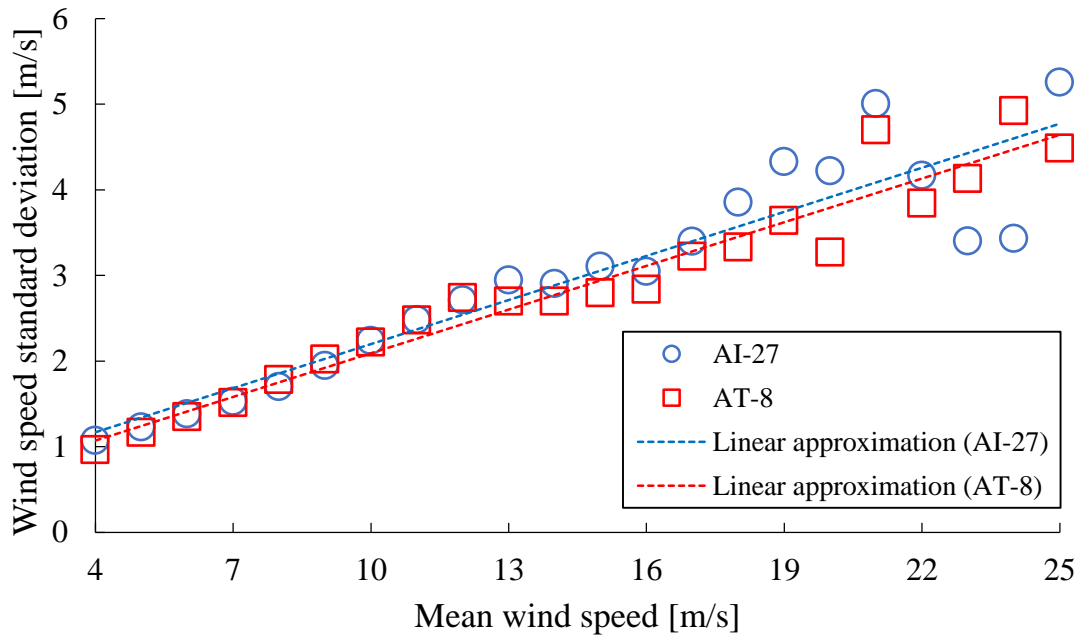


図 A.9 A 断面における風速階級別風速標準偏差

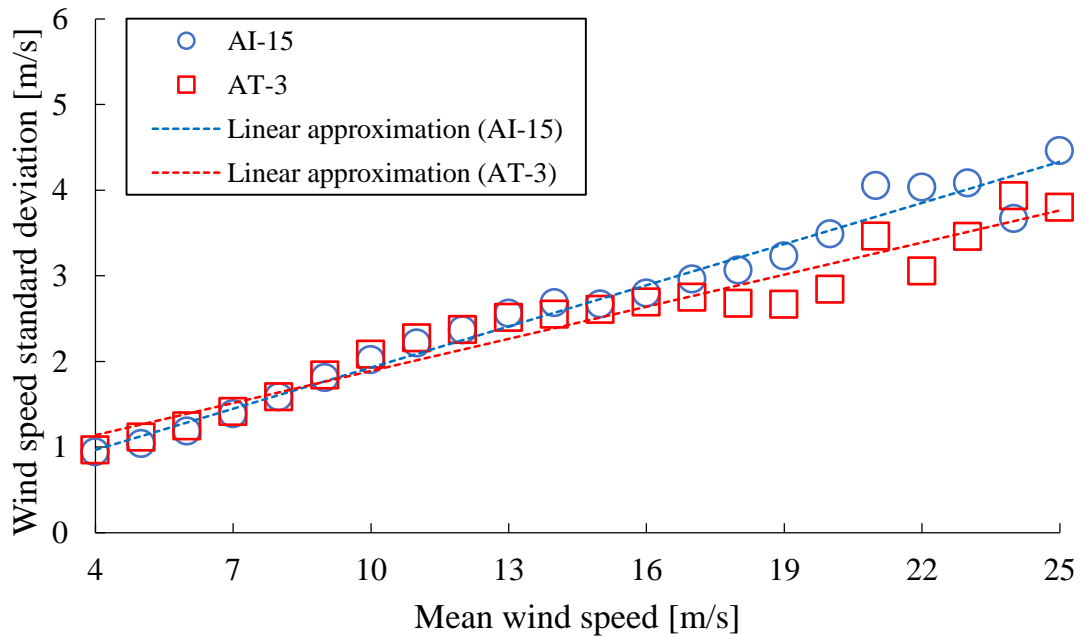


図 A.10 B 断面における風速階級別標準偏差

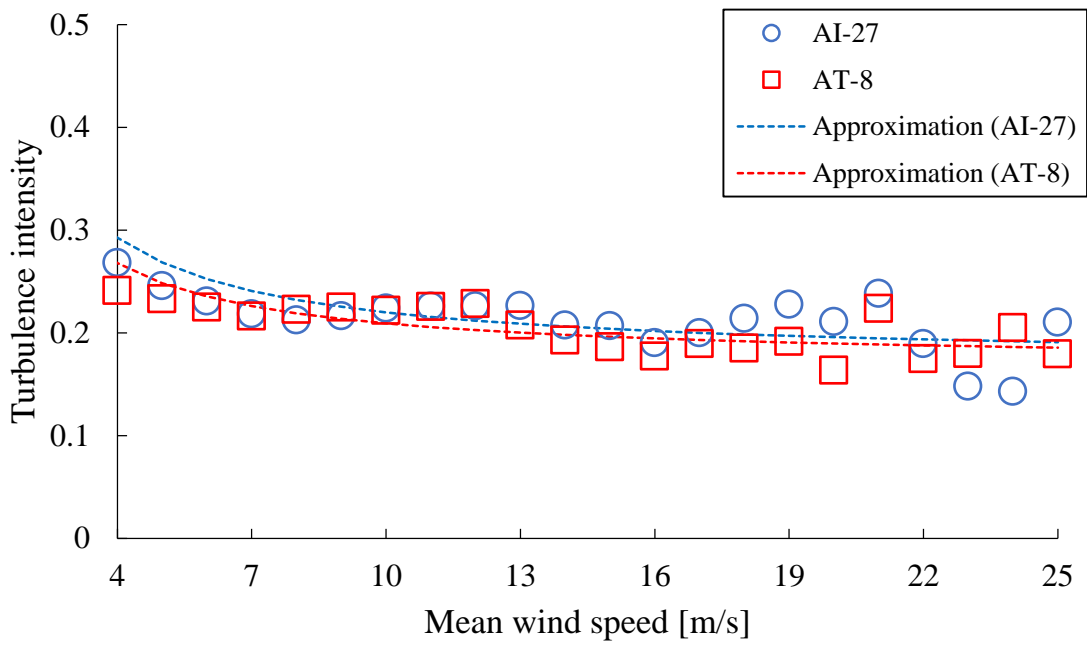


図 A.11 A 断面における風速階級別乱流強度

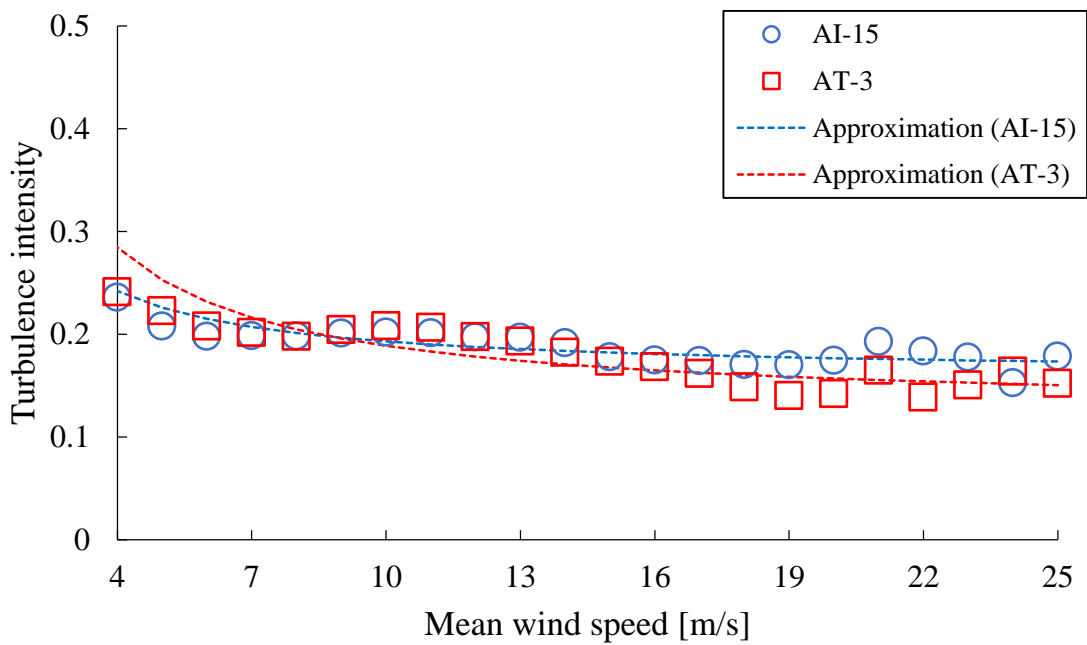


図 A.12 B 断面における風速階級別乱流強度

## 付録 B 風速の鉛直分布

本研究では、非線形風況予測モデル MASCOT を用いた風況解析から得られた風速の鉛直分布から吹上角の算定を行った (5.2 節)。本章では、吹上角の算定に用いた風軸上 6 方位の風速の鉛直分布を示す。

### 付録 B.1 風向 E における 3 次元速度成分の鉛直分布

図 B.1 に風向 E における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.2 に風向 E における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.3 に風向 E における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す。図 B.4 に風向 E における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.5 に風向 E における B 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.6 に風向 E における B 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す。図 B.1 および B.4 は縦軸に標高, 横軸に主流方向速度  $U$ , 図 B.2 および B.5 は縦軸に標高, 横軸に半径方向速度  $V$ , 図 B.3 および B.6 は縦軸に標高, 横軸に鉛直方向速度  $W$  を示す。

### 付録 B.2 風向 ESE における 3 次元速度成分の鉛直分布

図 B.7 に風向 ESE における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.8 に風向 ESE における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.9 に風向 ESE における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す。図 B.10 に風向 ESE における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.11 に風向 ESE における B 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.12 に風向 ESE における B 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す。図 B.7 および B.10 は縦軸に標高, 横軸に主流方向速度  $U$ , 図 B.8 および B.11 は縦軸に標高, 横軸に半径方向速度  $V$ , 図 B.9 および B.12 は縦軸に標高, 横軸に鉛直方向速度  $W$  を示す。

### 付録 B.3 風向 SE における 3 次元速度成分の鉛直分布

図 B.13 に風向 SE における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.14 に風向 SE における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.15 に風向 SE における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す。図 B.16 に風向 SE における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.17 に風向 SE における B 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.18 に風向 SE における B 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す。図 B.13 および B.16 は縦軸に標高, 横軸に主流方向速度  $U$ , 図 B.14 および B.17 は縦軸に標高, 横軸に半径方向速度  $V$ , 図 B.15 および B.18 は縦軸に標高, 横軸に鉛直方向速度  $W$  を示す。

#### 付録 B.4 風向 W における 3 次元速度成分の鉛直分布

図 B.19 に風向 W における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.20 に風向 W における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.21 に風向 W における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す. 図 B.22 に風向 W における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.23 に風向 W における B 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.24 に風向 W における B 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す. 図 B.19 および B.22 は縦軸に標高, 横軸に主流方向速度  $U$ , 図 B.20 および B.23 は縦軸に標高, 横軸に半径方向速度  $V$ , 図 B.21 および B.24 は縦軸に標高, 横軸に鉛直方向速度  $W$  を示す.

#### 付録 B.5 風向 WNW における 3 次元速度成分の鉛直分布

図 B.25 に風向 WNW における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.26 に風向 WNW における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.27 に風向 WNW における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す. 図 B.28 に風向 WNW における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.29 に風向 WNW における B 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.30 に風向 WNW における B 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す. 図 B.25 および B.28 は縦軸に標高, 横軸に主流方向速度  $U$ , 図 B.26 および B.29 は縦軸に標高, 横軸に半径方向速度  $V$ , 図 B.27 および B.30 は縦軸に標高, 横軸に鉛直方向速度  $W$  を示す.

#### 付録 B.6 風向 NW における 3 次元速度成分の鉛直分布

図 B.31 に風向 NW における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.32 に風向 NW における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.33 に風向 NW における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す. 図 B.34 に風向 NW における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布, 図 B.35 に風向 NW における B 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布, 図 B.36 に風向 NW における B 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布を示す. 図 B.31 および B.34 は縦軸に標高, 横軸に主流方向速度  $U$ , 図 B.32 および B.35 は縦軸に標高, 横軸に半径方向速度  $V$ , 図 B.33 および B.36 は縦軸に標高, 横軸に鉛直方向速度  $W$  を示す.

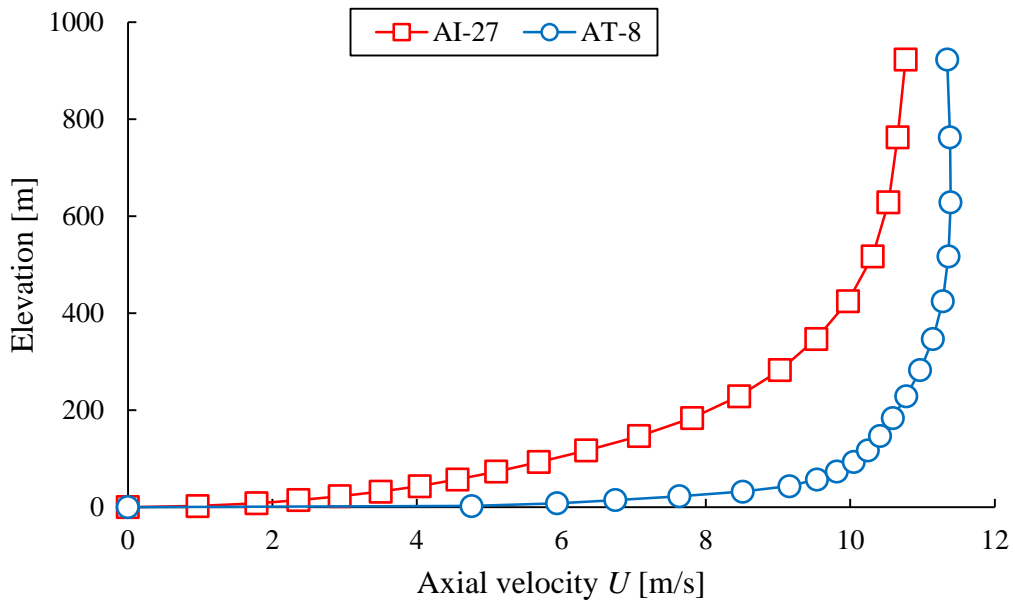


図 B.1 風向 E における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布

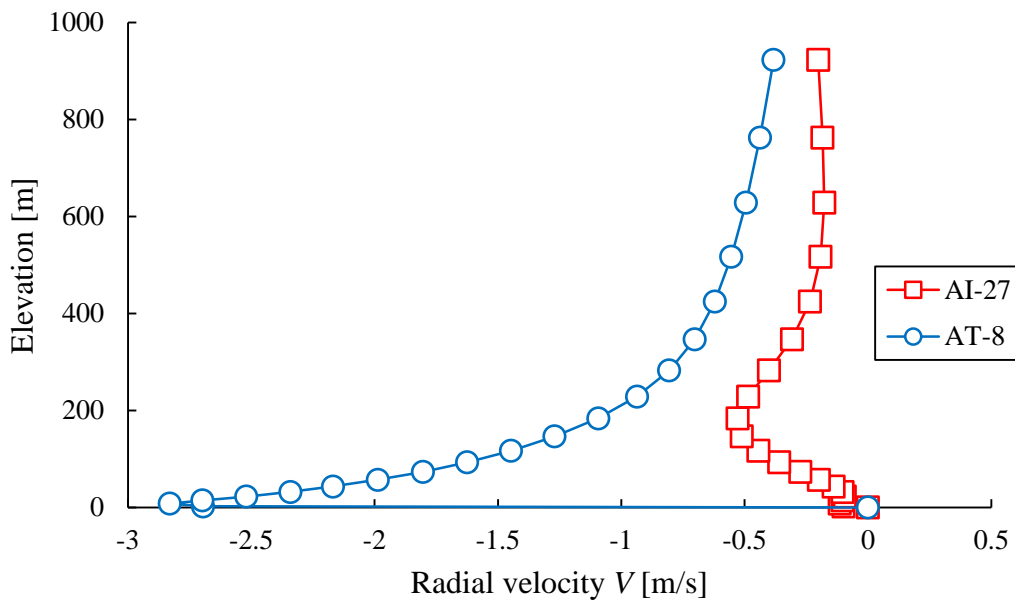
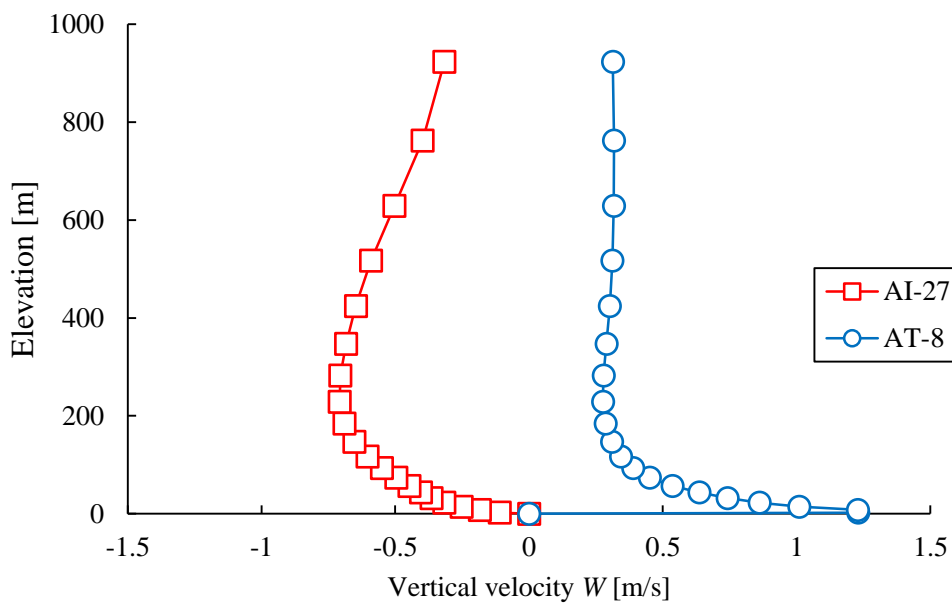
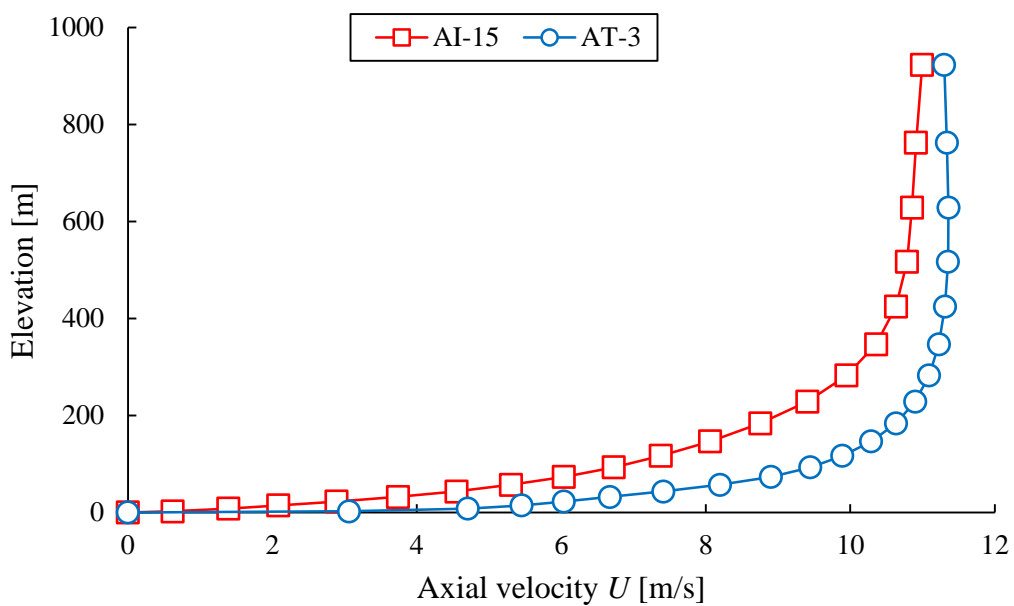


図 B.2 風向 E における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布

## 付録 B

図 B.3 風向 E における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布図 B.4 風向 E における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布

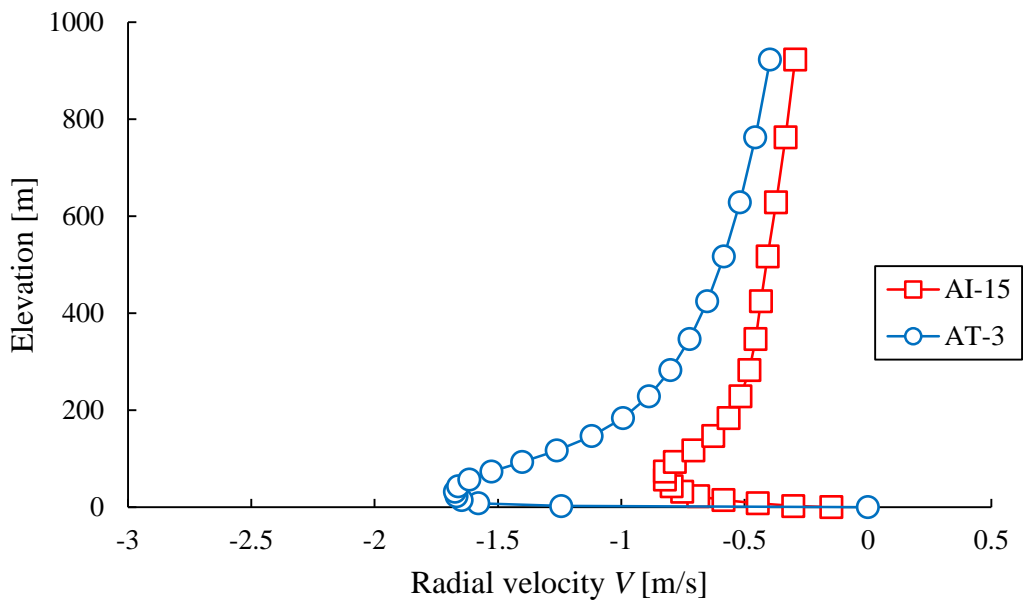


図 B.5 風向 E における B 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布

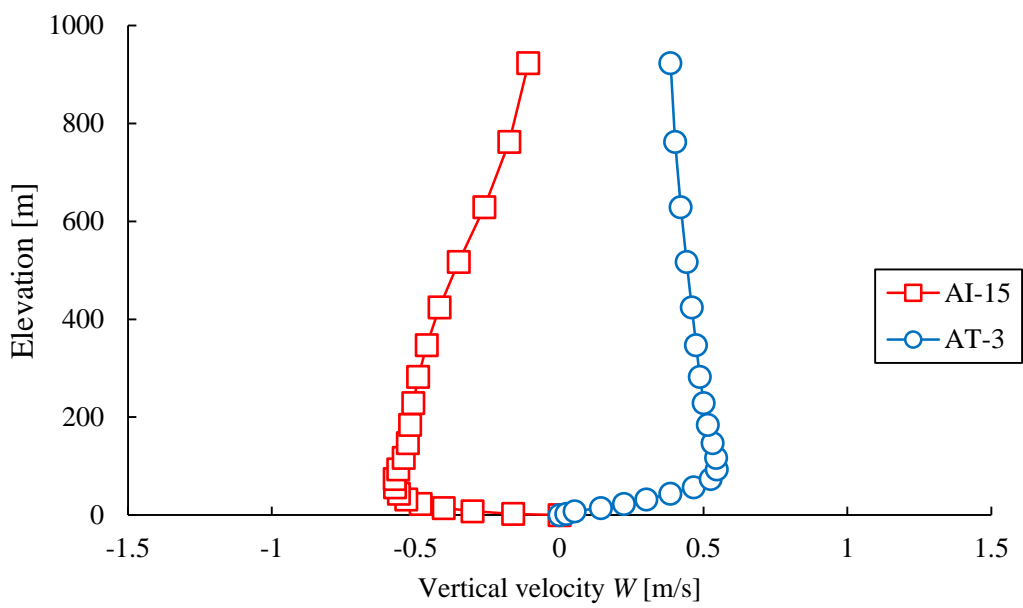


図 B.6 風向 E における B 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布



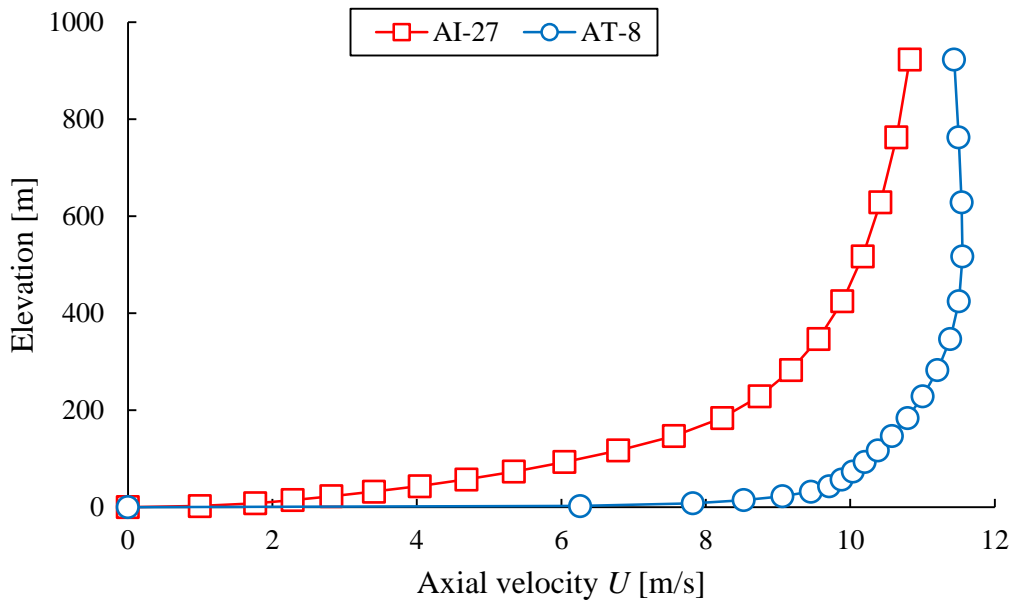


図 B.7 風向 ESE における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布

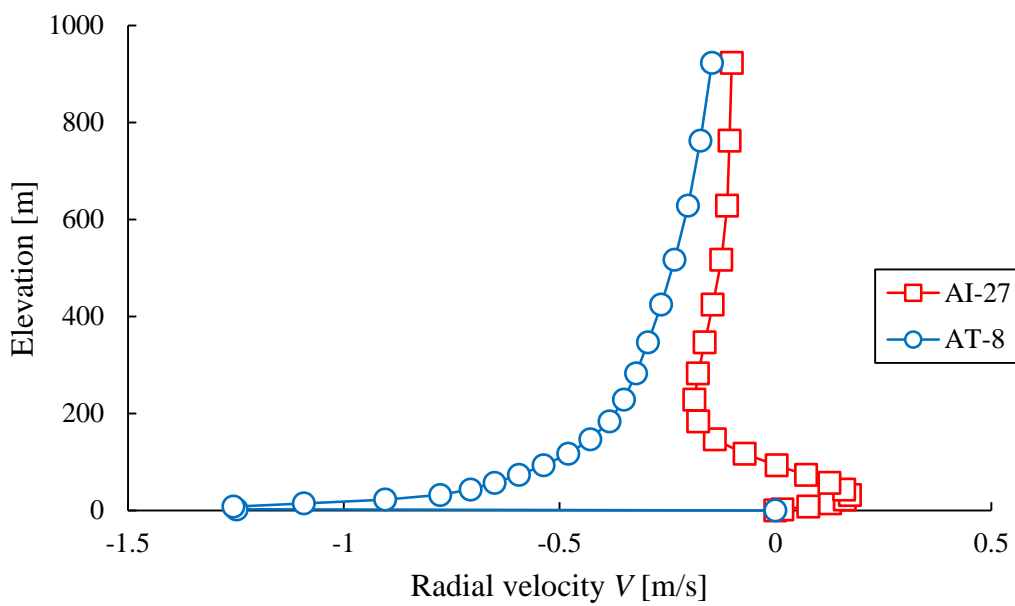


図 B.8 風向 ESE における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布

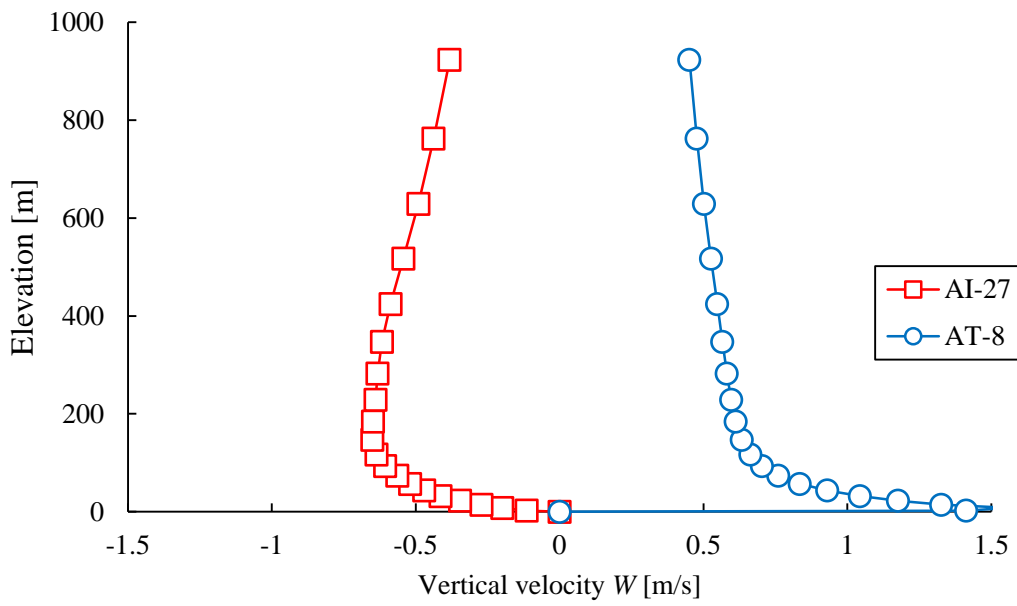


図 B.9 風向 ESE における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布

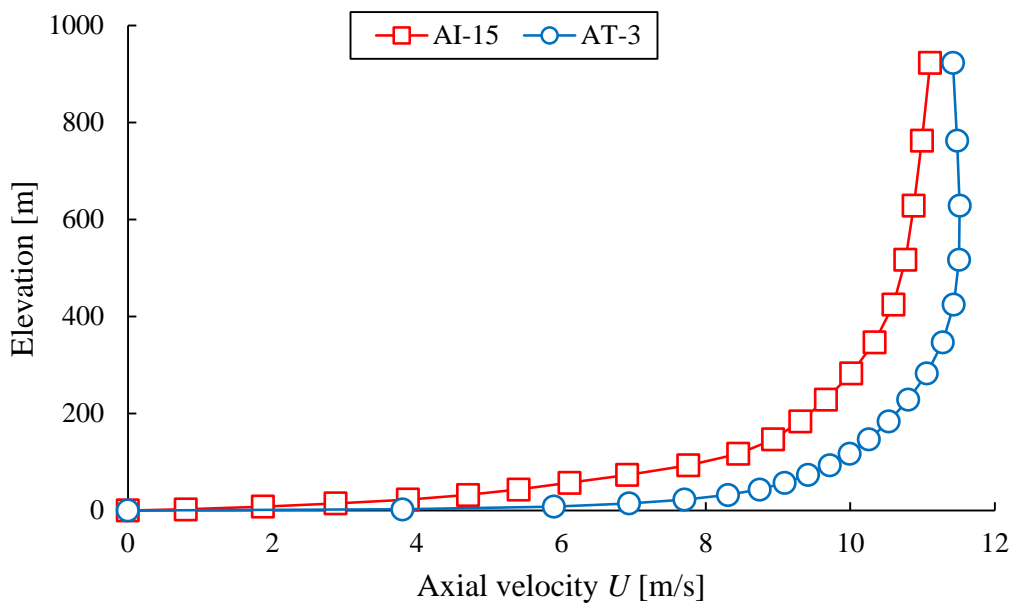


図 B.10 風向 ESE における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布

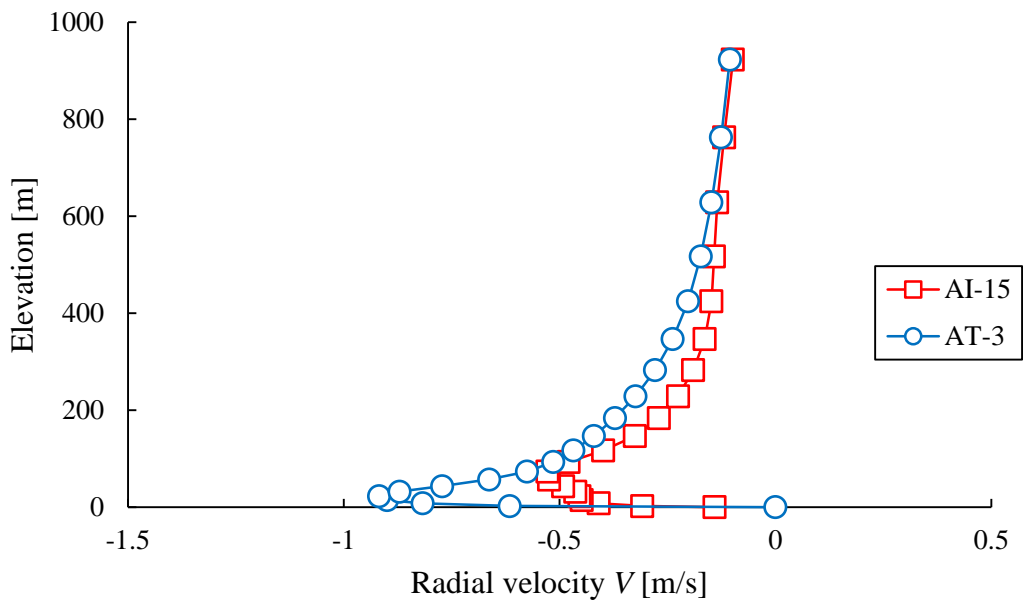


図 B.11 風向 ESE における B 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布

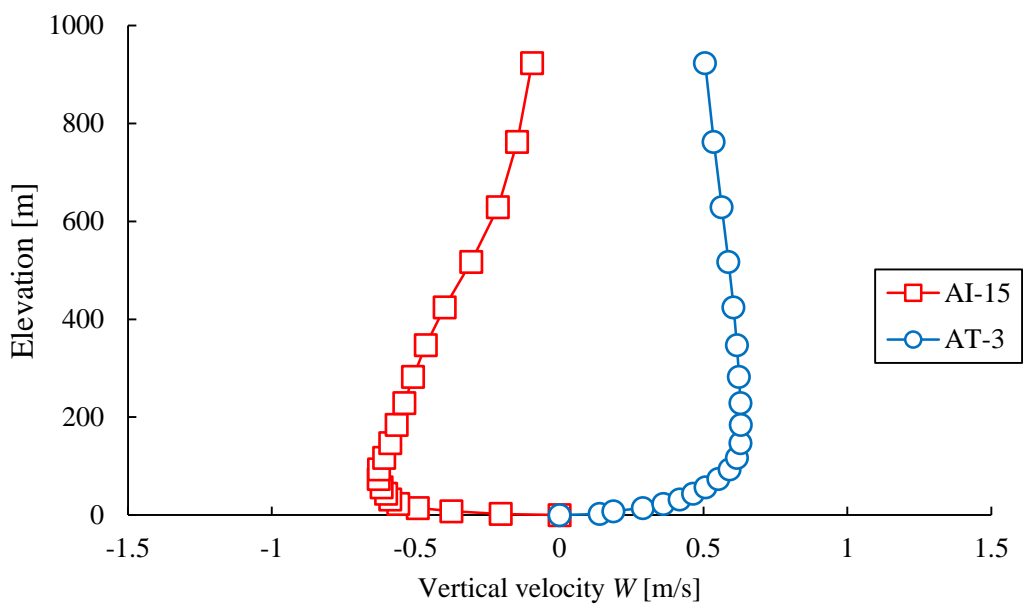


図 B.12 風向 ESE における B 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布

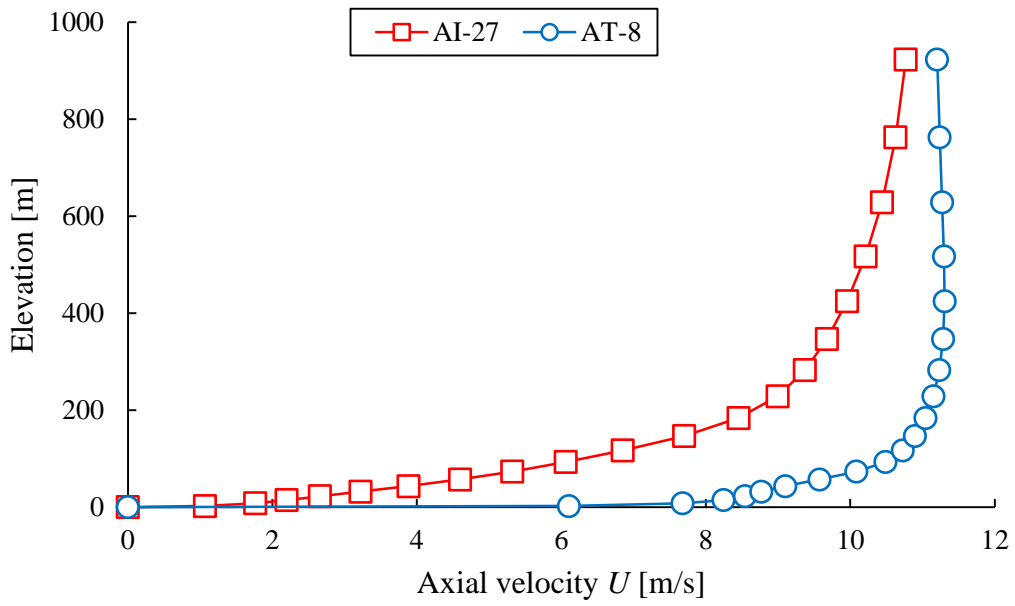


図 B.13 風向 SE における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布

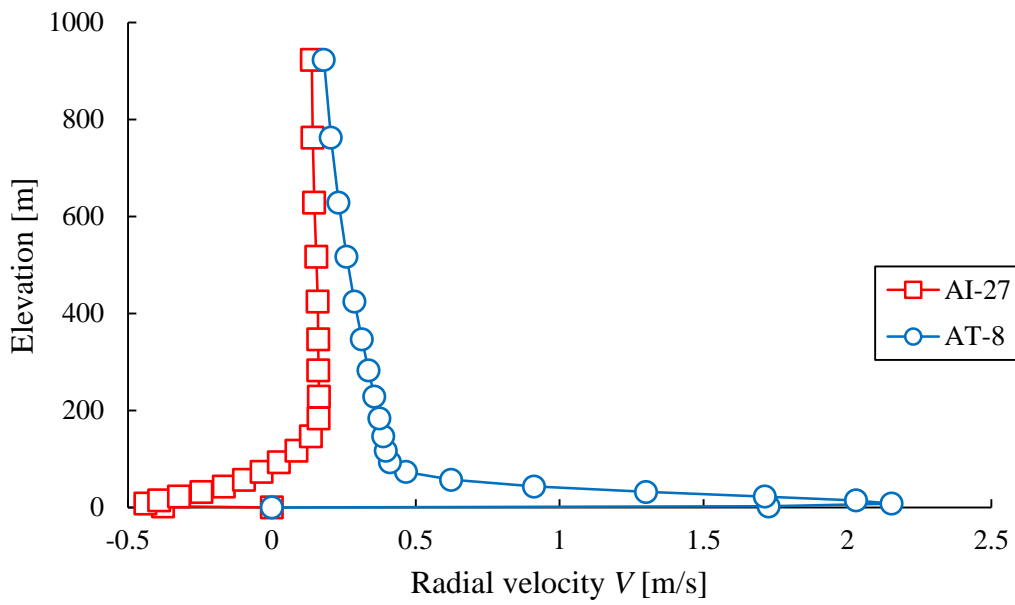


図 B.14 風向 SE における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布

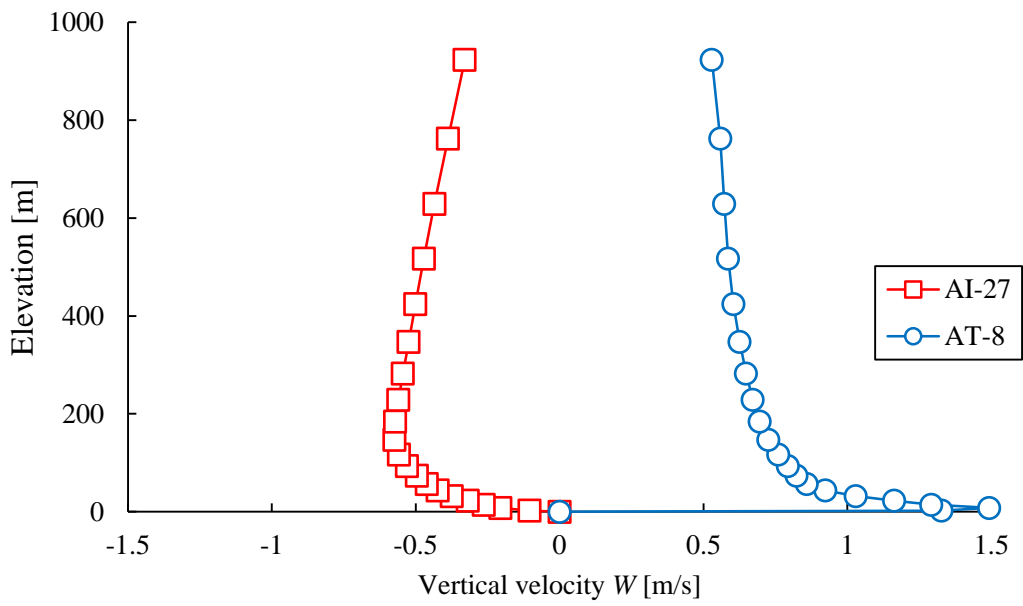


図 B.15 風向 SE における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布

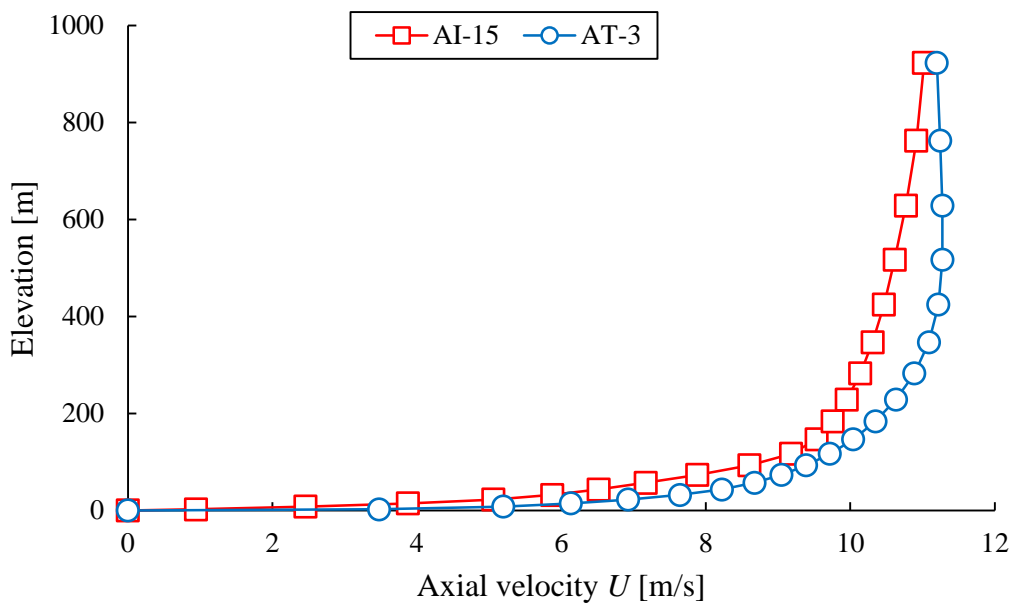


図 B.16 風向 SE における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布

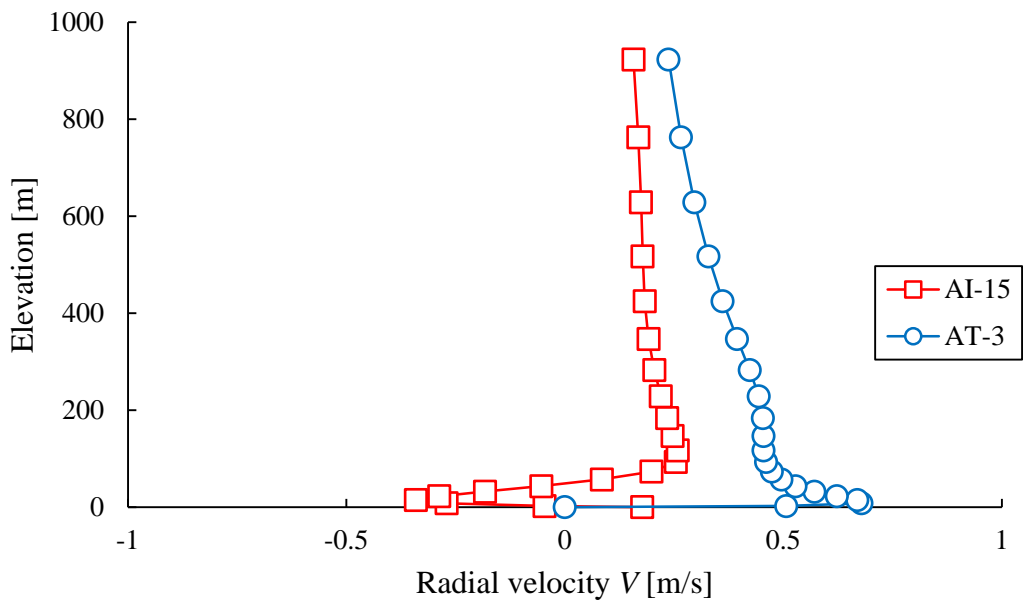


図 B.17 風向 SE における B 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布

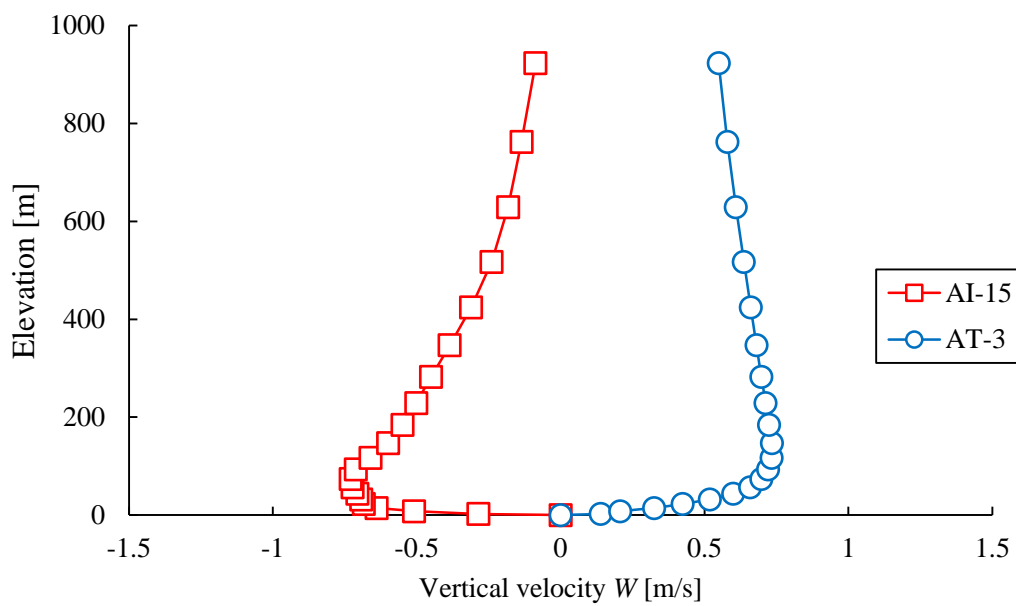


図 B.18 風向 SE における B 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布

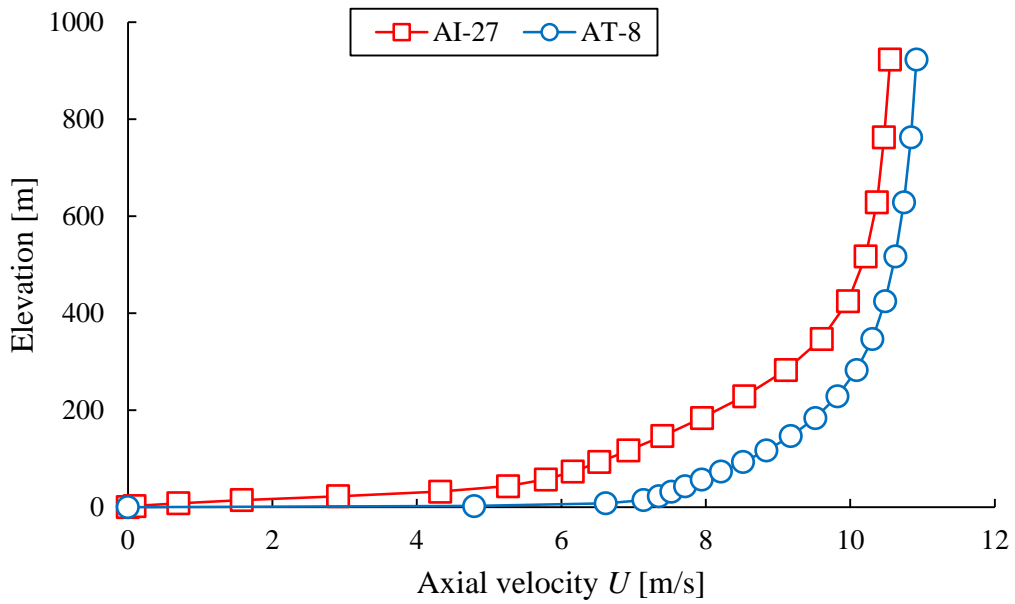


図 B.19 風向 W における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布

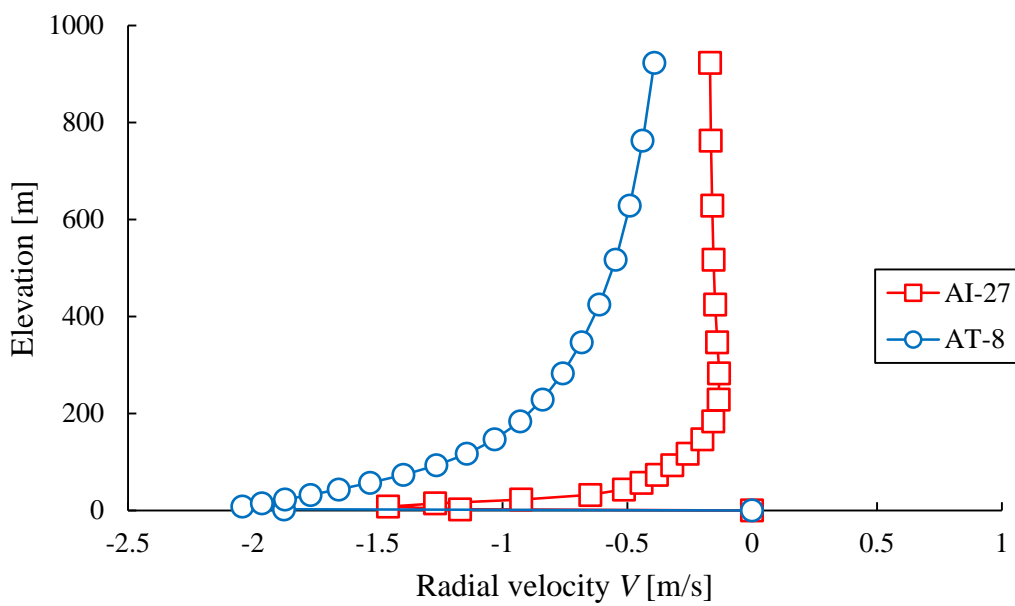


図 B.20 風向 W における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布

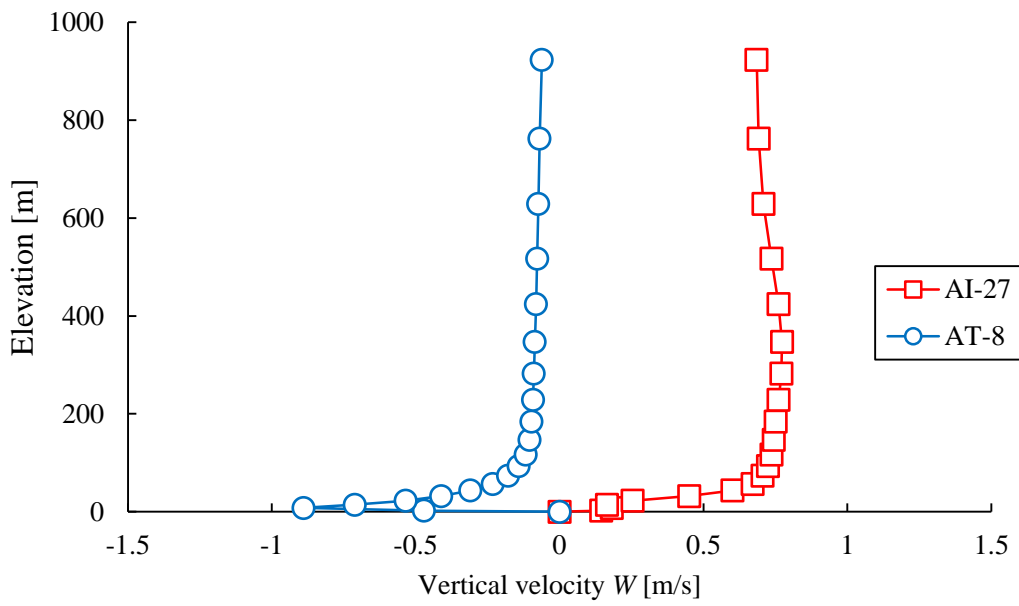


図 B.21 風向 W における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布

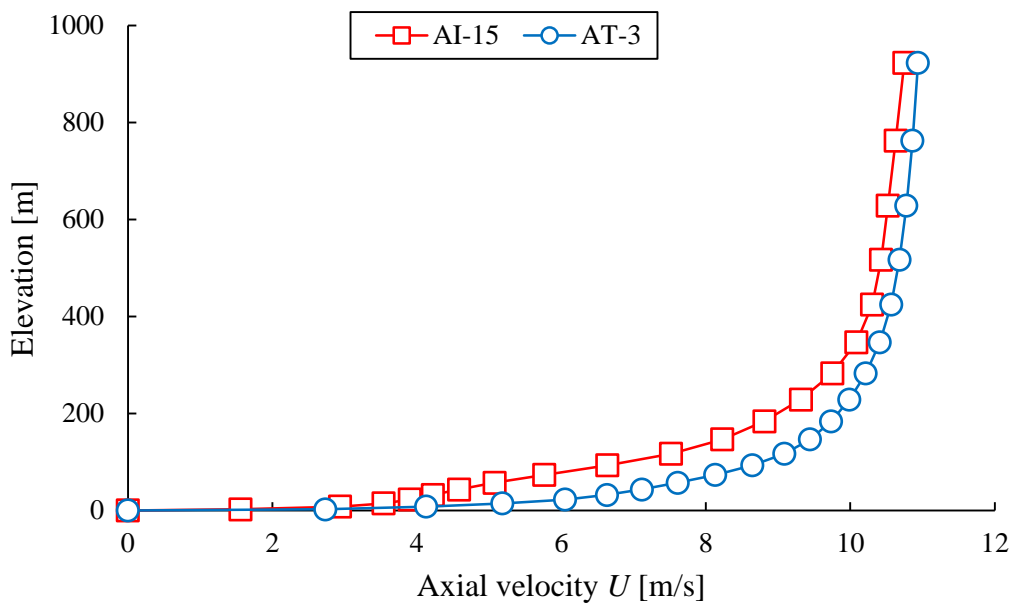


図 B.22 風向 W における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布



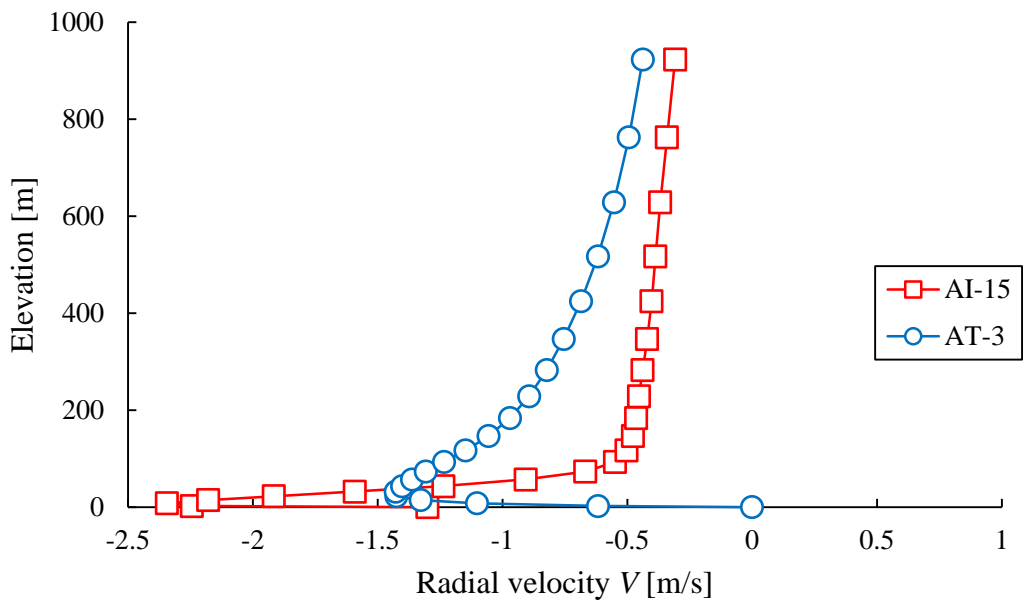


図 B.23 風向 W における B 断面の半径方向速度 V の鉛直分布

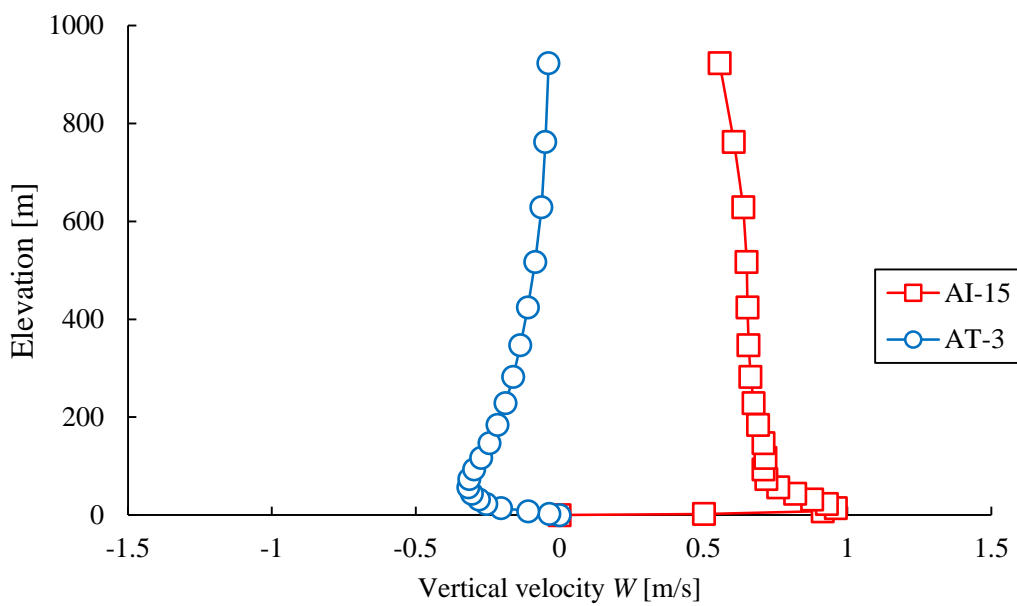


図 B.24 風向 W における B 断面の鉛直方向速度 W の鉛直分布

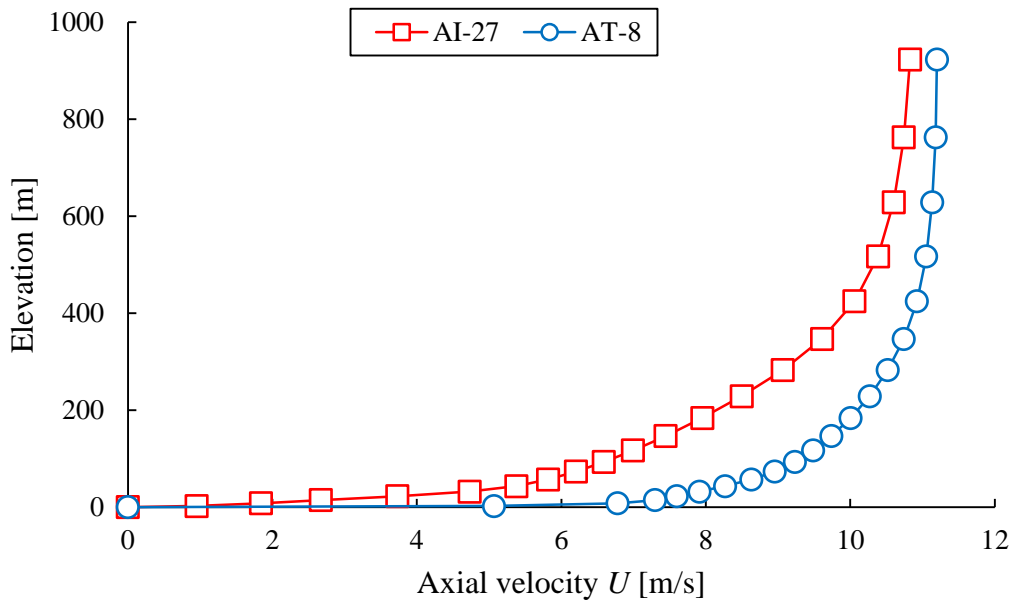


図 B.25 風向 WNW における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布

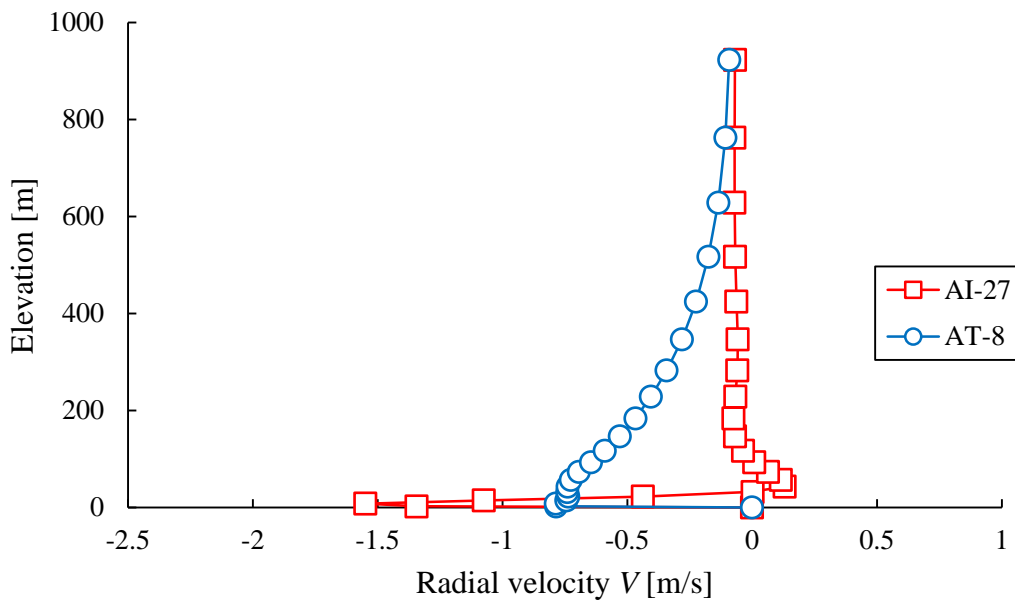


図 B.26 風向 WNW における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布

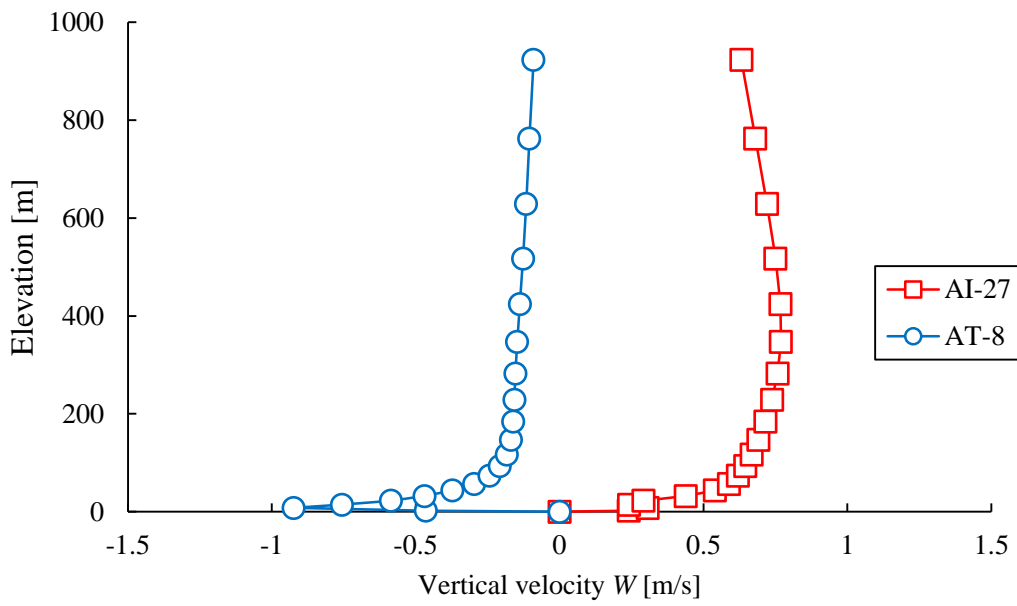


図 B.27 風向 WNW における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布

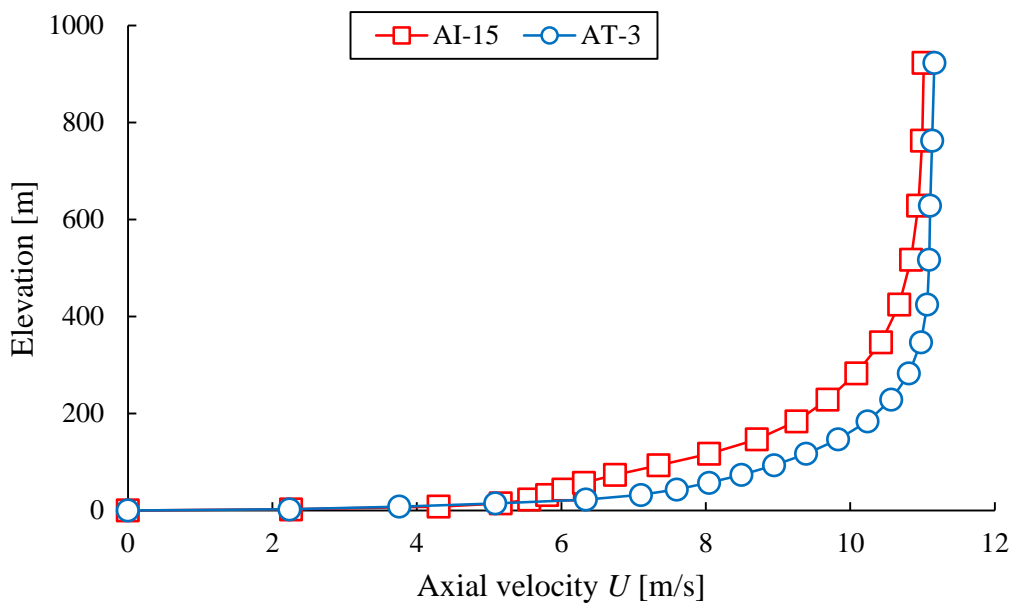


図 B.28 風向 WNW における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布

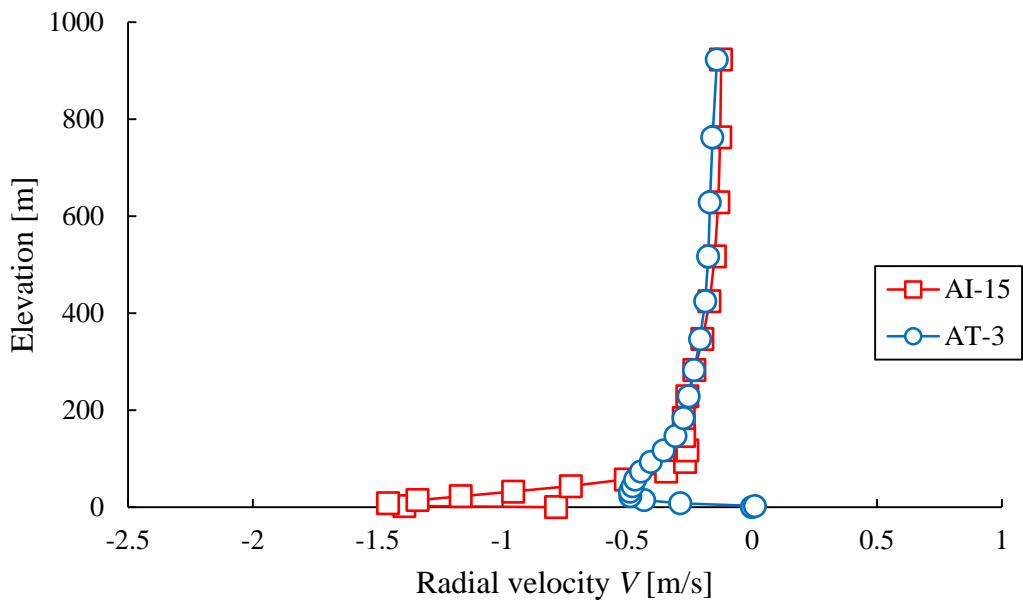


図 B.29 風向 WNW における B 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布

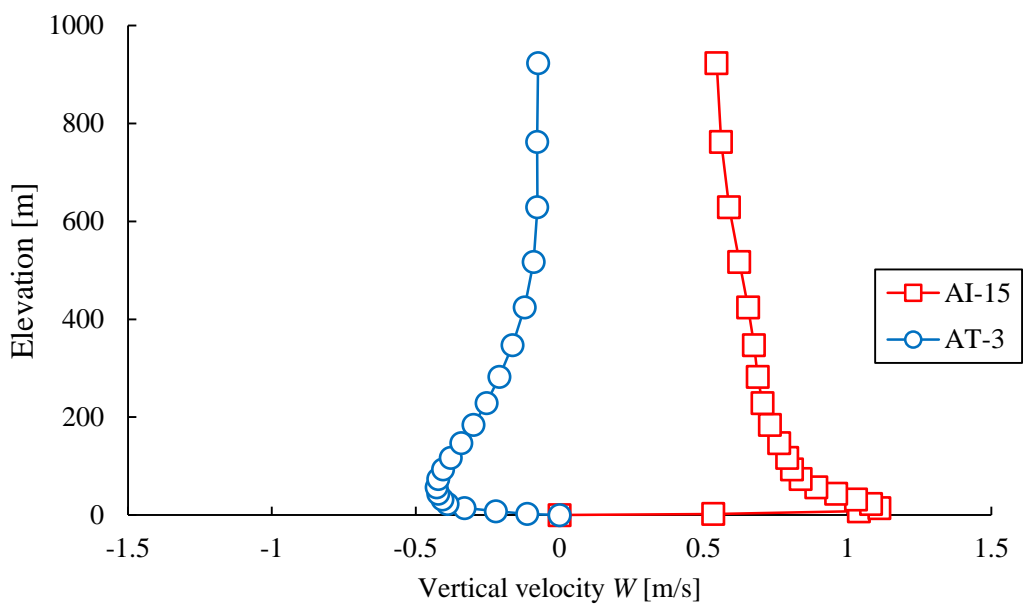


図 B.30 風向 WNW における B 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布

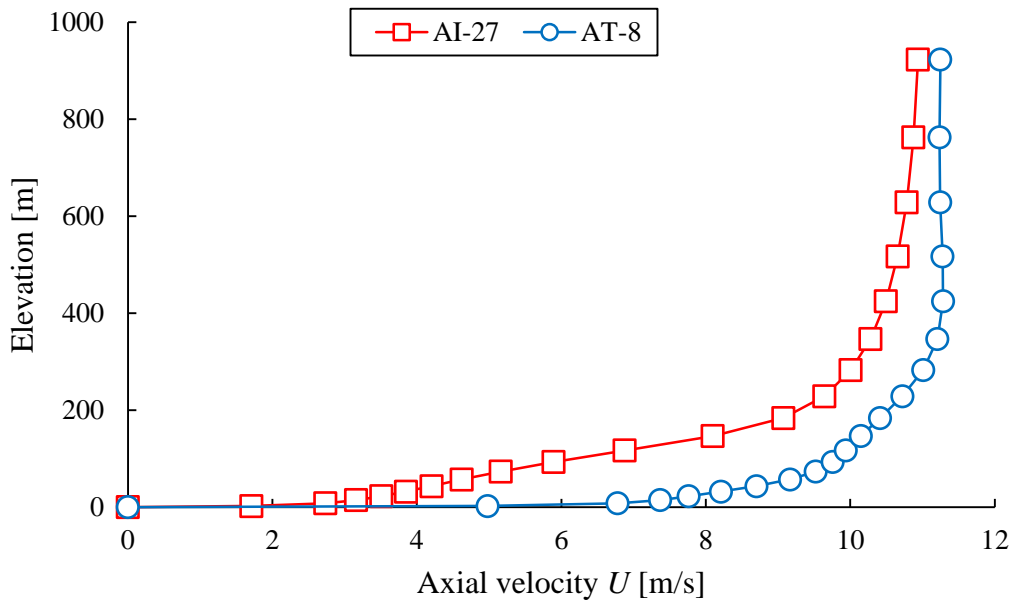


図 B.31 風向 NW における A 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布

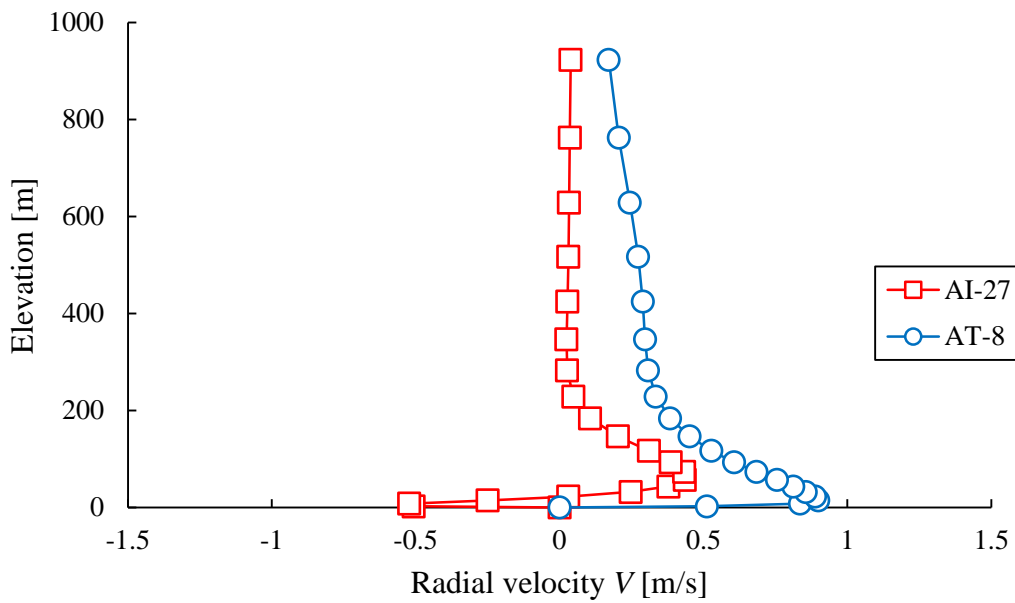


図 B.32 風向 NW における A 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布

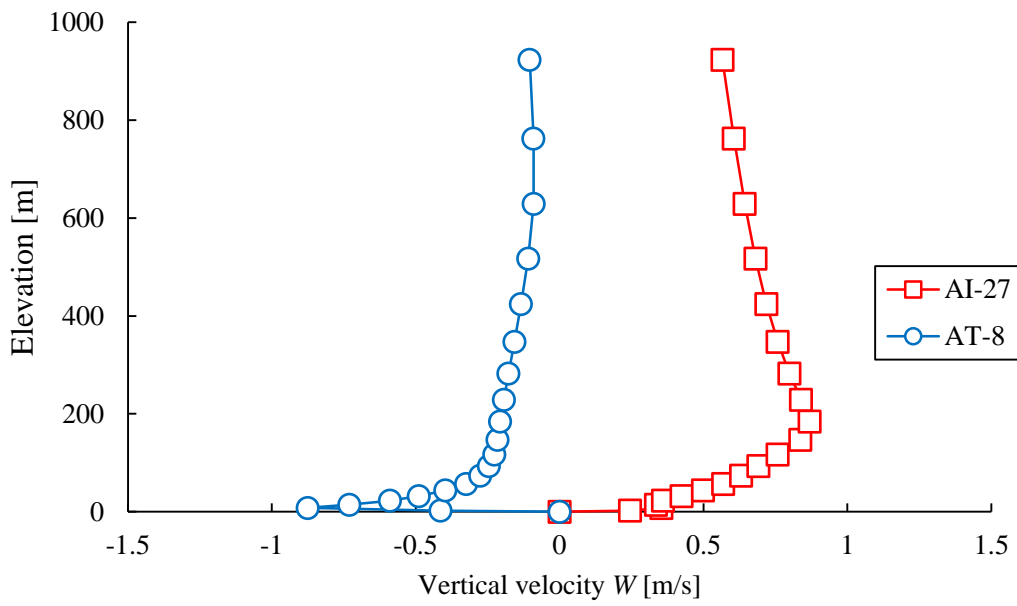


図 B.33 風向 NW における A 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布

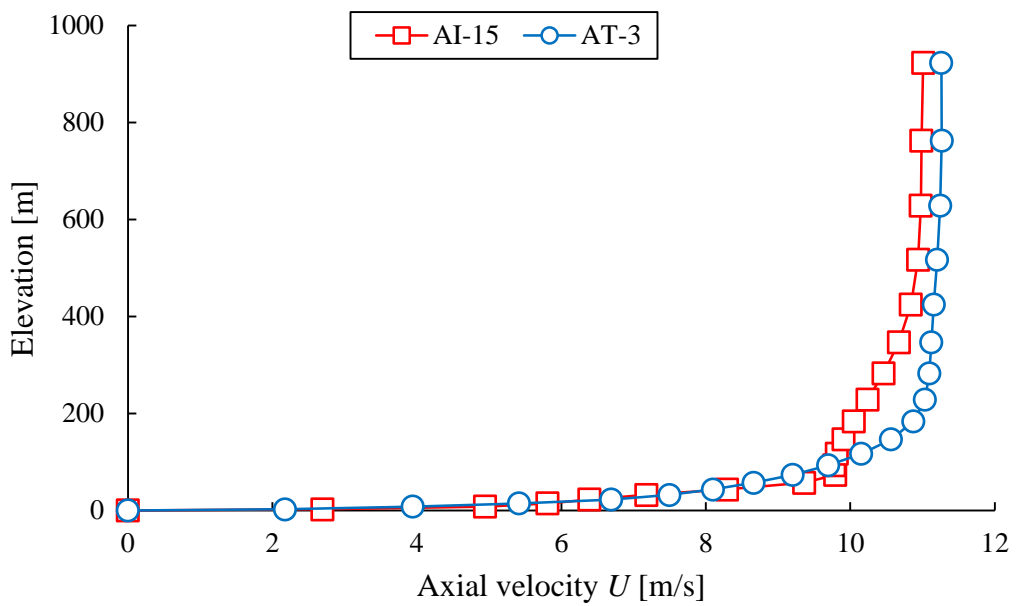


図 B.34 風向 NW における B 断面の主流方向速度  $U$  の鉛直分布

## 付録 B

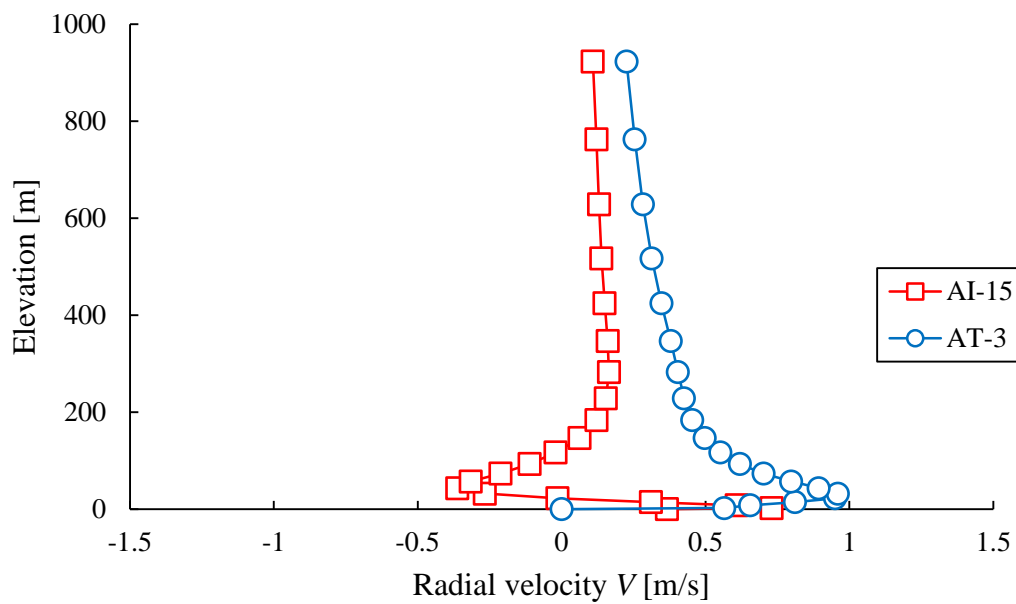


図 B.35 風向 NW における B 断面の半径方向速度  $V$  の鉛直分布

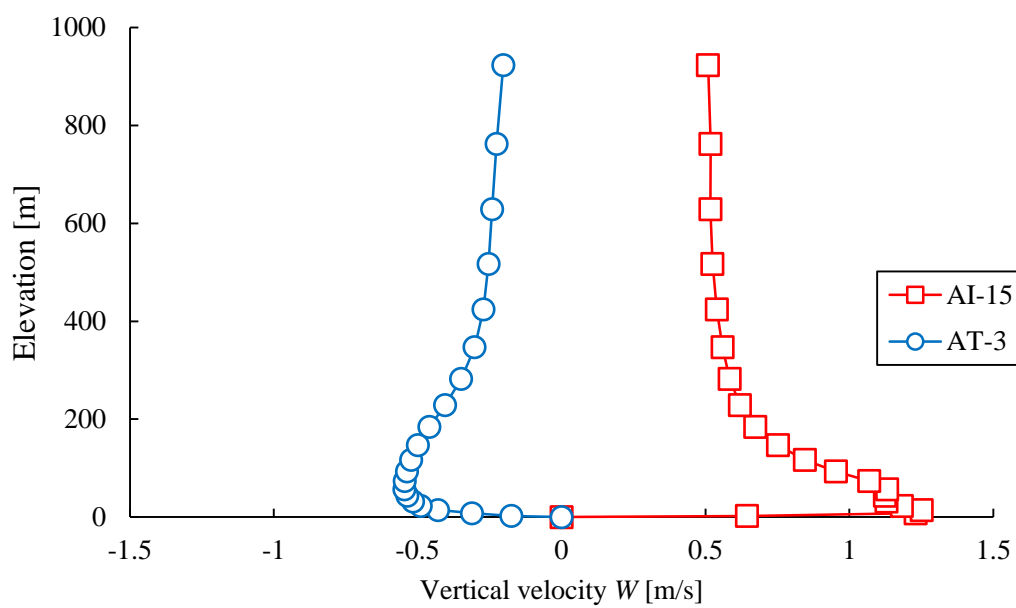


図 B.36 風向 NW における B 断面の鉛直方向速度  $W$  の鉛直分布