

令和元年度 修士論文

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の解明

2020年2月5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

山口 竜司

目次

第 1 章	緒言	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	再生可能エネルギー	1
1.1.2	世界の風力発電	2
1.1.3	日本の風力発電	3
1.2	本研究の目的	4
第 2 章	記号および座標系	8
第 3 章	解析対象および解析方法	10
3.1	風況および風車運転データの観測内容	10
3.1.1	観測項目および平均化時間	10
3.1.2	研究対象	10
3.1.3	風向風速計の主要仕様	11
3.1.4	風向の平均化手法	11
3.2	RIAM-COMPACT	12
3.2.1	数値解析	12
3.2.1.1	差分法	13
3.2.1.2	乱流モデル LES	13
3.2.2	解析条件	14
3.2.2.1	計算領域および地形標高データ	14
3.2.2.2	解析メッシュ	15
3.2.2.3	境界条件	15
3.2.3	代表スケール	15
3.3	ナセル搭載三杯式風速計の風洞試験	15
3.3.1	風洞	15
3.3.2	実験条件	16
第 4 章	風車出力に及ぼす地形および後流の影響	25
4.1	年間および月別の風向出現率	25
4.2	風車出力に及ぼす地形の影響	25
4.2.1	年間および月別の平均風速ならびに発電量	25
4.2.2	風向別の平均風速および発電量	26
4.2.3	風向風速階級別の発電量	27
4.2.4	換算風速による発電量の比較	27
4.2.5	尾根による剥離	29

目次

4.3 後流の影響	30
4.3.1 着目風車	30
4.3.2 乱流強度	31
第5章 RIAM-COMPACTによる解析結果	47
5.1 尾根による剥離風の影響	47
5.1.1 AT-8 (尾根越え風が流入する風車)	47
5.1.2 AT-3 (尾根越え風が流入する風車)	47
5.1.3 尾根越えの風の乱流	48
5.2 後流の影響	48
5.2.1 AI-2 (上流側)および AI-1 (下流側)	49
5.2.2 AI-12 (上流側), AI-17 (中間)および AI-16 (下流側)	49
5.2.3 AI-8 (上流側)および AI-6 (下流側)	49
5.2.4 AI-13 (上流側)および AI-18 (下流側)	50
第6章 三杯式風速計の校正試験	66
6.1 参照ピトー管および測定部の動圧の関係	66
6.2 ナセル搭載三杯式風速計基本性能試験	67
6.3 吹上げおよび吹下げ風を用いた校正試験	67
6.4 今後の課題	68
第7章 結言	73
参考文献	75
謝辞	77
付録 A	79
付録 B	81

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、深刻な地球温暖化の状況が世界的に問題視されている。地球温暖化の原因は、大気中の温室効果ガス（二酸化炭素やメタンガス・フロンガスなど）の増加である。この温室効果ガスの増加は宇宙に逃げるはずの熱の放出を抑制し、気温の上昇や、地球全体の気候変動を引き起こす⁽¹⁾。図 1.1 に日本における温室効果ガスの排出量の推移を示す。日本の人口は世界人口の 2%であるが、日本の温室効果ガスの排出量は、世界で 5 番目に多い⁽²⁾。この排出量は日本の 7 倍の人口であるアフリカ全土の排出量と同じである。温室効果ガスの中で二酸化炭素は最も大きな影響度を示す。IPCC (国連気候変動に関する政府間パネル) によると、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%、一酸化炭素 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⁽³⁾。また、2018 年度の二酸化炭素排出量は 2017 年度と比較し 1.7%増加した。これは、過去最高の約 331 億トンに達したと IEA (国際エネルギー機関) の報告書で明らかになった⁽⁴⁾。図 1.2 に世界のエネルギー消費による二酸化炭素排出量の推移を示す。2014 年度～2016 年度は横ばいで推移しているが、2017 年度、2018 年度は増加した。これは、世界のエネルギー需要が増えたことなどが原因である。また、地球温暖化防止の国際枠組みである「パリ協定」の目標達成に向けた二酸化炭素排出量削減が一向に進んでいないことを示した。IEA が公表した報告書によると、2018 年度のエネルギー需要は前年に比べ 2.3%増えた。これは 2010 年以降の平均伸び率の約 2 倍の値である。また、エネルギー需要増加分の半分以上が電力部門である。2017 年度と比較して 2018 年の電力供給におけるエネルギー資源は、石油が 1.3%、石炭が 0.7%増加している。これが二酸化炭素排出の増加につながった。IEA によると、エネルギー需要増加の理由は、世界経済の拡大である。世界経済は、2018 年度に 3.7%拡大した。アジア新興国を中心に石炭や石油などの化石燃料の需要が増えたことが大きな理由である。

上記の地球温暖化やエネルギー需要の増加から、再生可能エネルギーの導入が非常に注目されている。再生可能エネルギーの利点は、発電時に二酸化炭素をほとんど排出しない点である。平成 21 年 8 月に「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およ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」が執行された。この法律内で再生可能エネルギーは、「非化石エネルギー源のうち、エネルギー源として永続的に利用できると認められるもの」と定義されている⁽⁵⁾。また、再生可能エネルギーの具体的な種類は、太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱、大気中の熱その他の自然界に存在する熱、バイオマス（動植物に由来する有機物）の 7 種類である。これらの再生可能エネルギーの大きな特徴は、「枯渇しない」・「どこにでも存在する」・「CO₂ を排出しない（増加させない）」の 3 点である。我が国は、エネルギー資源に乏しい。そのため、エネルギー供給の約 8 割を石油や石

炭、天然ガス等の化石燃料が占めている。そして、そのほとんどが海外輸入に依存している。我が国の2017年度エネルギー自給率は、9.6%と世界的にも低い値である⁽⁶⁾。このことから、日本の高いエネルギー自給率の確保と低炭素社会実現にむけての再生可能エネルギー導入の意義は非常に大きい。2012年に再生可能エネルギー源から発電された電気を、あらかじめ決めた固定価格で買い取る「固定価格買い取り制度 (FIT 制度)」が導入された。これにより、再生可能エネルギー導入量が制度開始前と比べ約3.2倍となった⁽⁷⁾。

1.1.2 世界の風力発電

風力発電は、他の再生可能エネルギーと比べ発電採算性やエネルギー賦存量などの観点から有望なエネルギー資源である。そのため、世界の主要国で導入が進んでいる。世界の風力発電は、2017年に5,300万kW導入された⁽⁸⁾。図1.3に世界の太陽光、風力および原子力発電における累積設備容量の推移を示す。2007年と比較し2017年の風力発電の累積導入量は、6倍近くに達した。これは、原子力発電における累積設備容量の約1.4倍である。また、図1.4に世界全体の風力発電の導入量の推移を示す。世界の風力発電の年間導入量は、2015年に約6,300万kWと過去最高記録であった。しかしながら、2016年以降は5,000万kW程度に減少している。2017年末までの累積導入量は、前年比11%増加の約5億4,000万kWとなっている。2015年末には、原子力発電が3億8,300万kWであった。それに対し風力発電は、4億3,200万kWと上回った。1992年から2017年までの風力発電の累積導入量は、25年間に飛躍的な成長を遂げ、200倍以上になっている。そのため、陸上での風力発電の発電コストは、既存の火力発電を下回るレベルまで国際的に低下してきている⁽⁹⁾。2010年と比べて2017年の陸上風力の平均発電コストは、8セント/kWhから6セント/kWhへと2割以上低下している。これは、化石燃料の中でも発電コストの低い石炭火力と同レベルになっている。洋上風力についても平均発電コストは、14セント/kWhまで低下している。今後の洋上風力発電の平均コストは、2020年に10セント/kWh以下に下がる見通しとなっている。

風力発電市場は大きく成長している。図1.5に世界各国の風力発電の累積導入量の推移を示す。2008年ごろまで、ドイツやスペインなど欧州の一部の国や米国が牽引していた。しかしながら2010年以降は、中国が風力発電市場を先導している。また、欧州各国(英国、フランス、イタリア、トルコ、スウェーデン、ポーランドなど)や他の新興国(インド、ブラジルなど)でも風力発電の導入が進んでいる。中国国内での風力発電の年間導入量は、2014年以降で毎年約2,000万kWであった。これは世界全体の風力発電の年間導入量5,300万kWの約4割を占めている。今や中国国内での風力発電導入量は、日本国内での年間導入量(18万kW)の100倍以上である。また、2017年末の中国国内での風力発電導入量は、累積導入量が約1億8,800万kWに達している。この値は、風力発電導入量世界一である。また、EUに加盟する全28か国の累積導入量1億7,800万kWを上回っている。中国の風力発電の累積導入量は、日本の累積導入量(340万kW)の50倍以上に相当する。

1.1.3 日本の風力発電

日本においても風力発電の導入が進んでいる。図 1.6 に日本における風力発電導入の推移を示す⁽¹⁰⁾。2018 年 3 月時点までの累積の設備容量は、前年度と比べ 4.3%増の約 350 万 kW であった。また、設置基数は 2.5%増の 2253 基となっている。中国や米国等の国々が世界各国で風力発電の総量を大きく増加させている。その中で日本の設置基数増加量は、非常に低い値である。また日本の風力発電累積導入量は、世界第 19 位にとどまっている。しかしながら、固定価格買取制度 (FIT) における認定量については、同時点において 780 万 kW に達し、着実に拡大している⁽¹¹⁾。

日本は国土面積の約 7 割を山岳地形が占めており、高風速域もこれらの複雑地形上に多い。そのため、日本の風車はこれらの複雑地形に設置されることが多い。また複雑地形に設置された風車に流入する風は、吹上げや吹下しを多く含む。この特性への対応策として、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⁽¹²⁾。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低下を招く。それに対しダウンウィンド型は、発電効率向上を見込める。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。そのため乱れのない風向データが得られ、理想的なヨー角制御を可能とする。ヨー角制御で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、発電効率の向上や変動荷重の低減に繋がる⁽¹³⁾。また、複雑地形において高風況域は尾根部分に集中する。その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。風車を集約的に配置することでインフラ整備や施工にかかるコストが抑えられ、発電量も安定的に確保できるというメリットがある⁽¹⁴⁾。その反面、ウィンドファームでは、風車を密接して配置するため後流の影響が大きくなる。そのため、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把握を必要とする。また風車の最適制御には、正確な風況データを必要とする。

1.2 本研究の目的

近年，世界各国で風力発電の導入が進んでいる．日本は欧州などと異なり，特有の複雑地形上に風車を設置する．そのため発電に関する高精度な性能評価方法は，未だ確立されていない．また複雑地形で運転する風車に流入する乱れの強い風に関する詳細は明らかになっていない．

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，風車観測の風速データの精度向上のために，風車ナセルに搭載されている三杯式風速計の実験的考察を行った．また，ウィンドファーム内の定量的考察のために，非線形風況予測ソフトウェア RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyusyu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain) を用いて数値解析を行った．

第1章 緒言

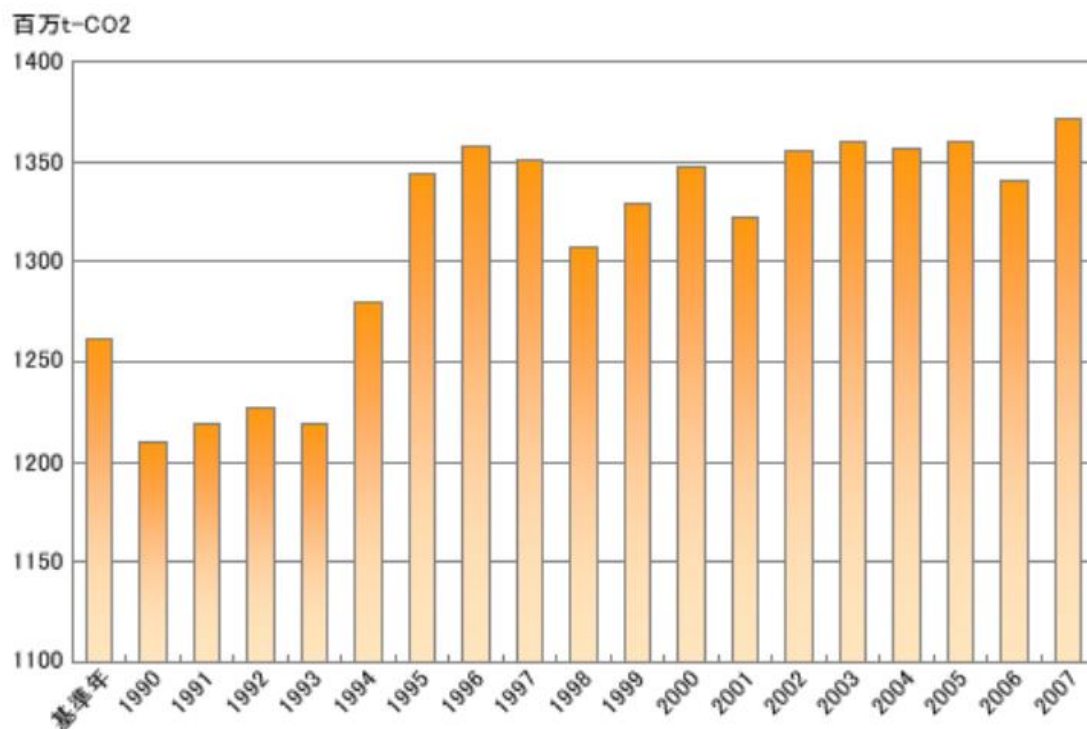


図 1.1 日本の温室効果ガス排出量の推移

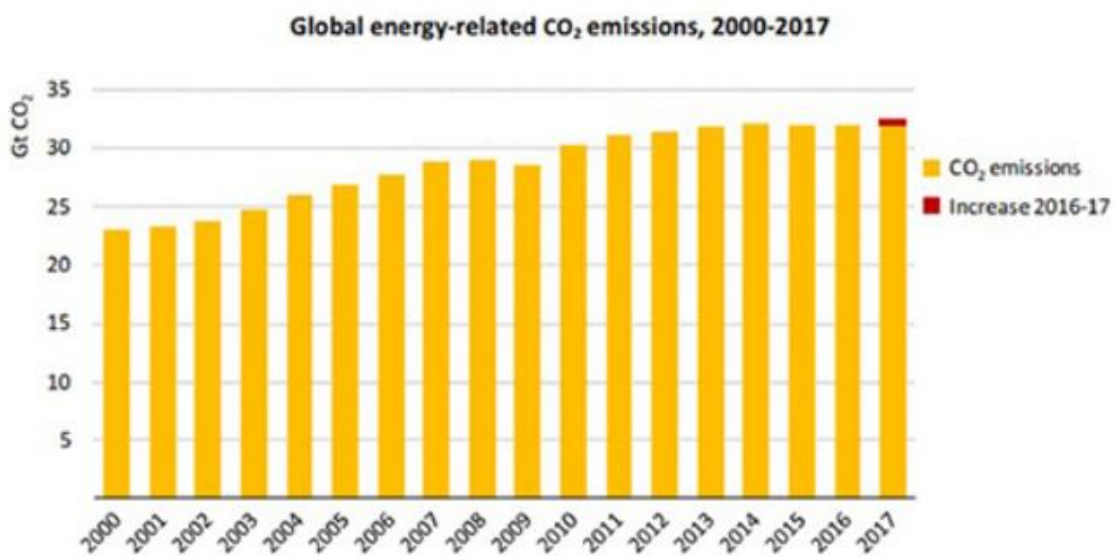


図 1.2 世界のエネルギー消費による二酸化炭素排出量

第1章 緒言

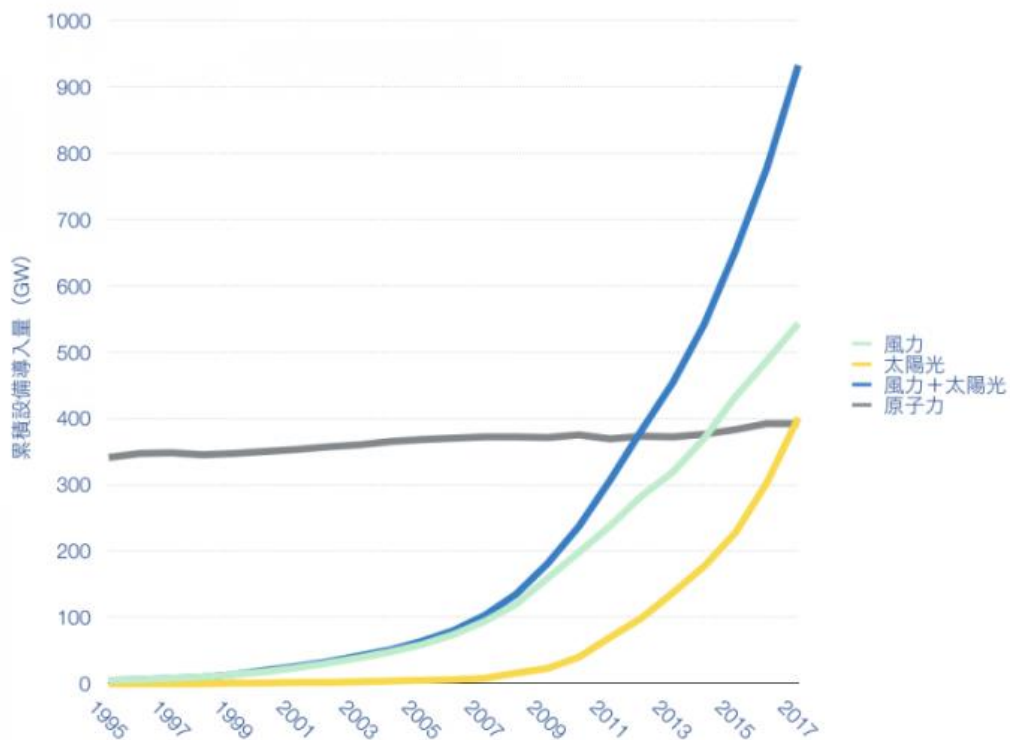


図 1.3 世界の太陽光，風力および原子力発電の累積設備容量の推移

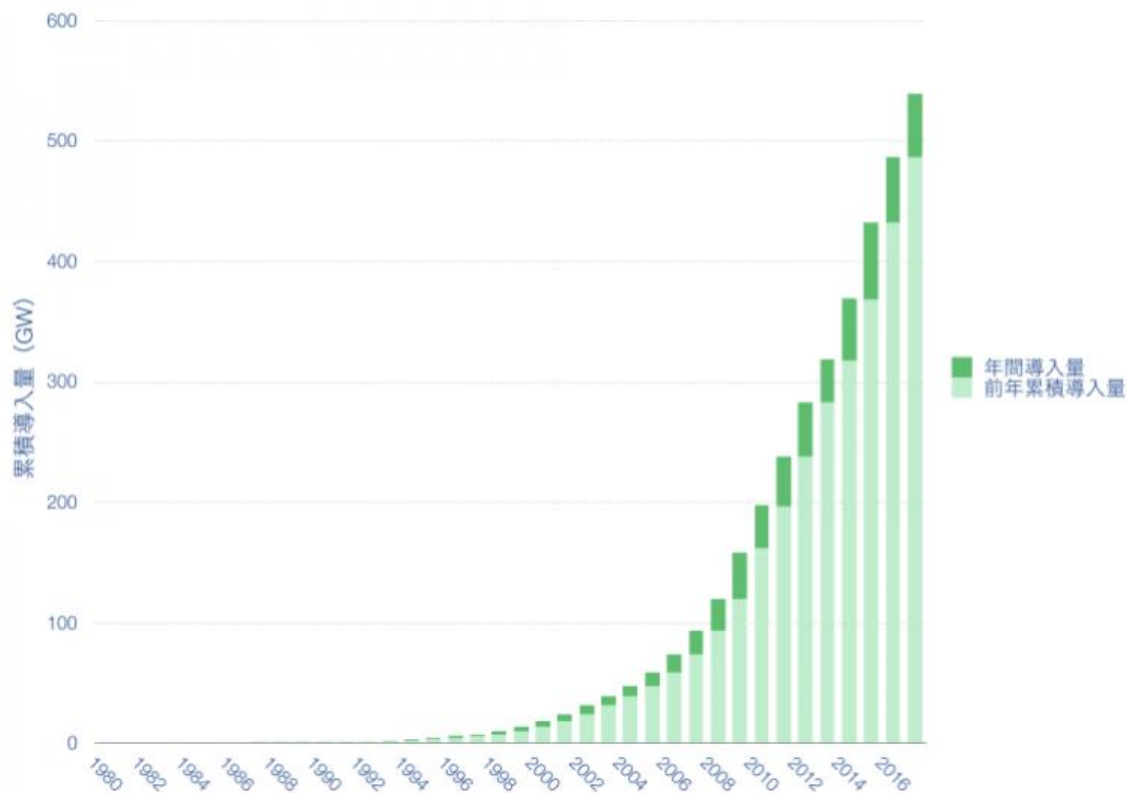


図 1.4 世界全体の風力発電の導入量の推移

第1章 緒言

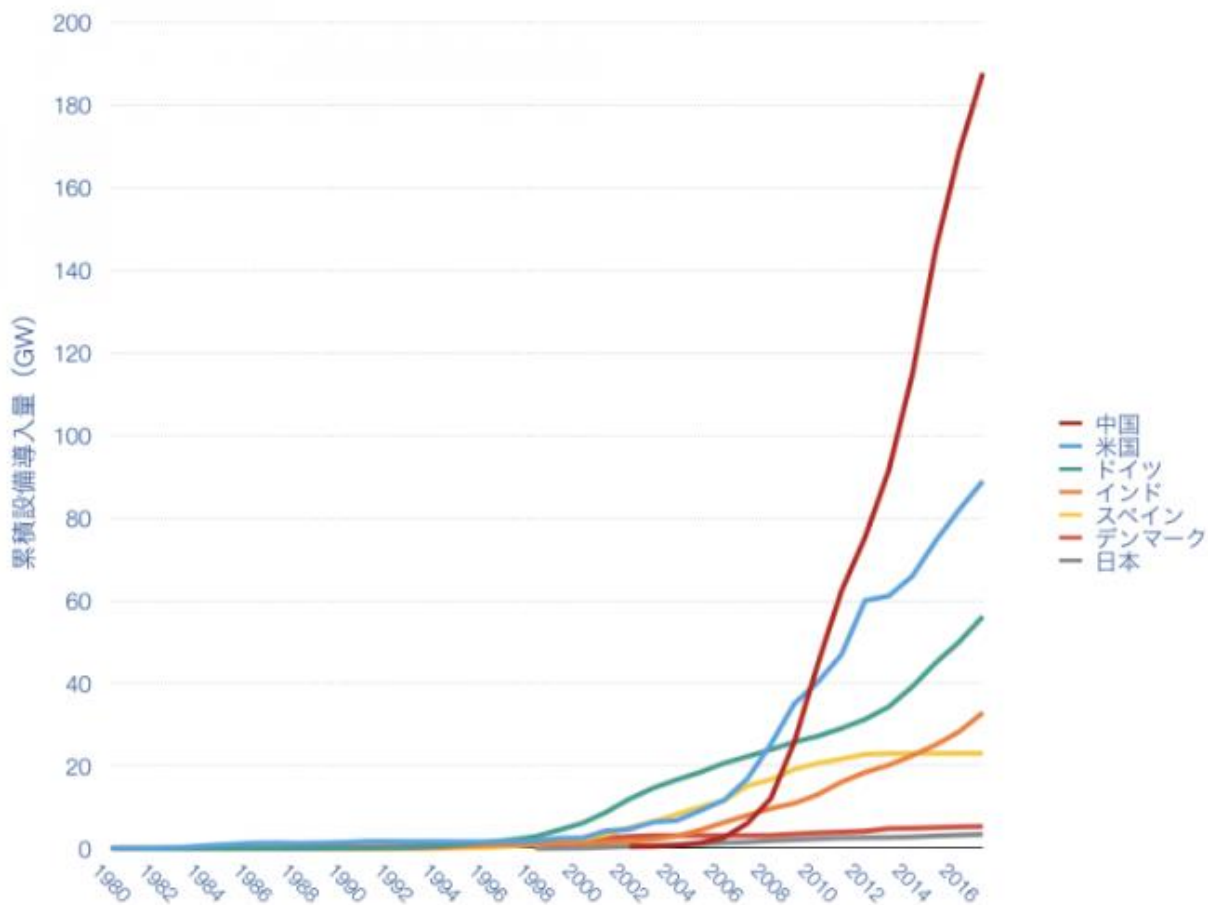


図 1.5 世界各国の風力発電の累積導入量の推移

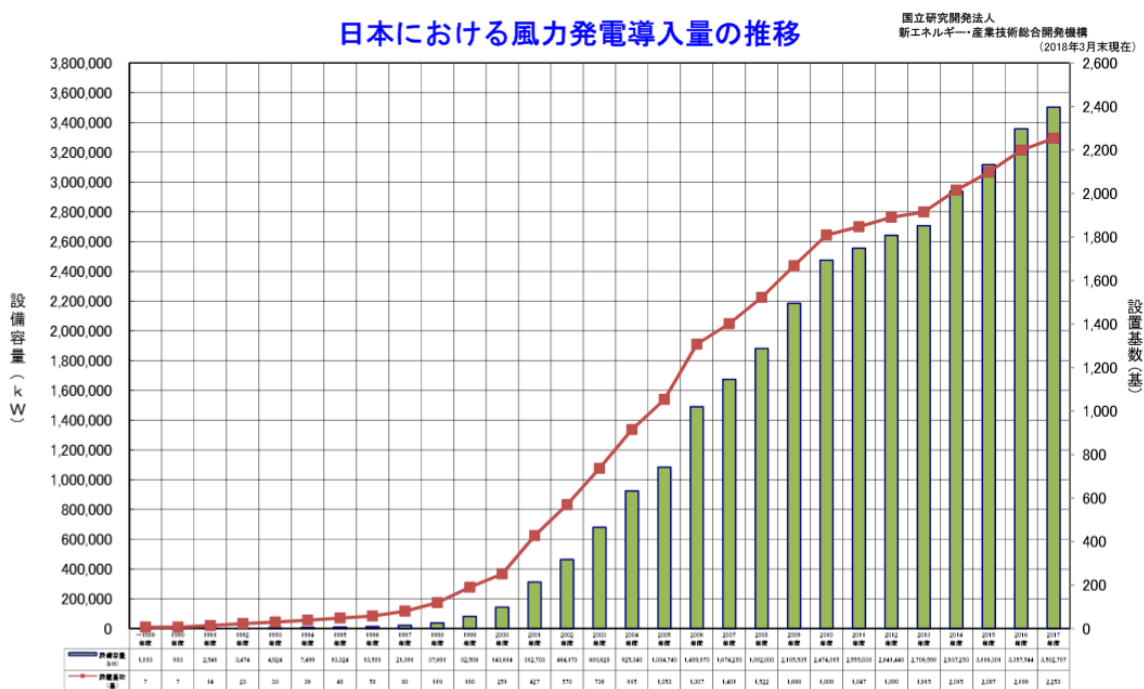


図 1.6 日本における風力発電導入の推移

第2章 記号および座標系

A^+	: 経験的定数 (=25)	
C_s	: スマゴリンスキー定数	
D	: 風車直径	[m]
h	: 代表長さスケール	[m]
h_x	: 主流方向フィルタ幅	
h_y	: 半径方向フィルタ幅	
h_z	: 鉛直方向フィルタ幅	
I	: 乱れ強度	
k	: カットオフ波数	
\bar{p}	: GS 圧力場	
Re	: レイノルズ数	
$\overline{S_{ij}}$: ひずみ速度テンソル	
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}	: 瞬間風速における 10 分平均値	
\bar{u}_i	: 各方向の GS 速度場	
u'_i	: 各方向の SGS 速度場	
$\overline{u'_k}$: SGS 速度場の平均値	
$\overline{u_x}$: 瞬時風速における x 成分の 10 分間平均値	[m/s]
$\overline{u_y}$: 瞬時風速における y 成分の 10 分間平均値	[m/s]
u_τ	: 壁面摩擦速度	[m/s]
U	: 代表風速スケール	[m/s]
U_z	: 高度 z [m]での風速	[m/s]
U_{10}	: 高度 10m での風速	[m/s]
ν_{SGS}	: SGS 渦粘性係数	
x	: 風車間距離	[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]
x_k	: 直交座標系における鉛直方向位置	[m]
y_p	: 壁からの距離	[m]
y^+	: 壁関数	
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	
Δ	: フィルタ幅	

第2章 記号および座標系

θ	: 風向の瞬時値	[°]
$\bar{\theta}$: 風向の10分間平均値	[°]
ν	: 代表動粘度	[m ² /s]
ρ	: 空気密度	[kg/m ³]
σ	: 風の乱れ	
δ_{ij}	: 応力テンソル	
τ_{ij}	: SGS 応力	

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

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3.1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⁽¹²⁾。

本研究では、まず初めに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。図3.3は、サイトの主風向に対し吹上風および吹下風となる場合の関係性を表した簡易図である。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。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。また、図 3.4 および図 3.5 に AI-27 および AT-8, AI-15 および AT-3 の断面図を示す。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、上流側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 ⁻¹
回転速度	11.1~19.6min ⁻¹
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

風速計は NRG SYSTEM 社（米国）製の型式 4718 を使用し、風向計は型式 4715 を使用した。同システムのセンサー部は三杯式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 にナセル外観図を示す。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、風向風速計の下流側 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。また、吹上風や吹下風による風速計の読み誤差に関しては第 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、 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、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、算術平均値の風向は 0° 付近ではらつきを示し、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3.9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。

3.2 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、構造格子は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、乱流モデルは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(3.2)とナビエ・ストークス方程式 (3.3) であり、次のように与えられる。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、重複する添え字には総和規約が適用される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.3)$$

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(3.3)のうち圧力勾配項を含む式を連続の式(3.2)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 乱流モデル LES⁽¹⁵⁾

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(3.2)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。(3.3)式の 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、局所平衡と過粘性を仮定すると次のように与えられる。

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \overline{u'_k u'_k} \delta_{ij} - 2\nu_{SGS} \overline{S_{ij}} \quad (3.4)$$

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

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (3.5)$$

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.

$$\nu_{SGS} = (C_S f_S \Delta)^2 |\overline{S}| \quad (3.6)$$

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.

$$f_S = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A^+}\right) \quad (3.7)$$

式(3.7)の y^+ (壁関数)は次式に示す.

$$y^+ = \frac{u_\tau y_p}{\nu} \quad (3.8)$$

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.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + 2 \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{Re} + \nu_{SGS} \right) \overline{S_{ij}} \right] \quad (3.9)$$

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), 主流直交方向(y), 鉛直方向(z)に10.0(x)×10.0(y)×3.884(z)kmの空間を有する. 計算領域内の最大標高は836m, 最小標高は77m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50m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)、主流直交方向(y)、鉛直方向(z)に 200 × 200 × 40 であり総メッシュ数 1600000 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

流入境界面にはべき法則（経験式）に従う風速分布を与えた。今回、べき指数 α は地表面粗度区分 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 7.0m/s を与えた。

$$U_z = U_{10} \times \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad (3.10)$$

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する。

3.2.3 代表スケール

代表スケールは図 3.12 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、759 m 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 ナセル搭載三杯式風速計の風洞試験

正確な風況データを得るためには、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。そこで、今回の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実験的検証を行った。また、風速計の仕様に関しては 3.1.3 節で示したとおりである。

3.3.1 風洞

三杯式風速計の検証に用いた風洞は、小型のゲッチンゲン型風洞である。図 3.13 に風洞全体図を示す。風洞は送風機、整流部、縮流部、測定部で構成される。送風機は 55kW の軸流ファンで、インバータにより無段階に風速を設定できる。最大風速は 55m/s、乱流強度は風速 13.5m/s で 0.28% である。

図 3.14 に風洞測定部を示す。測定部下部に風速計を取り付ける形で構成されている。測

定部の流路断面は $650 \times 650 \text{mm}^2$ 、全長は 2000mm で、上下左右を透明なアクリル板で閉鎖されている。三杯式風速計はカップ部分の中心が、測定部の中心高さになるように取り付けられている。測定部は、風洞吹出口に設置されたピトー管から 575mm 下流である。風洞の詳細を付録 A に記載する。

3.3.2 実験条件

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。それらの吹上角や吹下角は概ね 10° 未満である。そのため今回の実験では、吹上風となるように 5° と 10° 、吹下風となるように -5° と -10° 、平坦な 0° の合計 5 条件で実験を行った。また、各傾け角において風洞風速は 4, 8, 12, 16m/s の 4 条件で測定を行った。

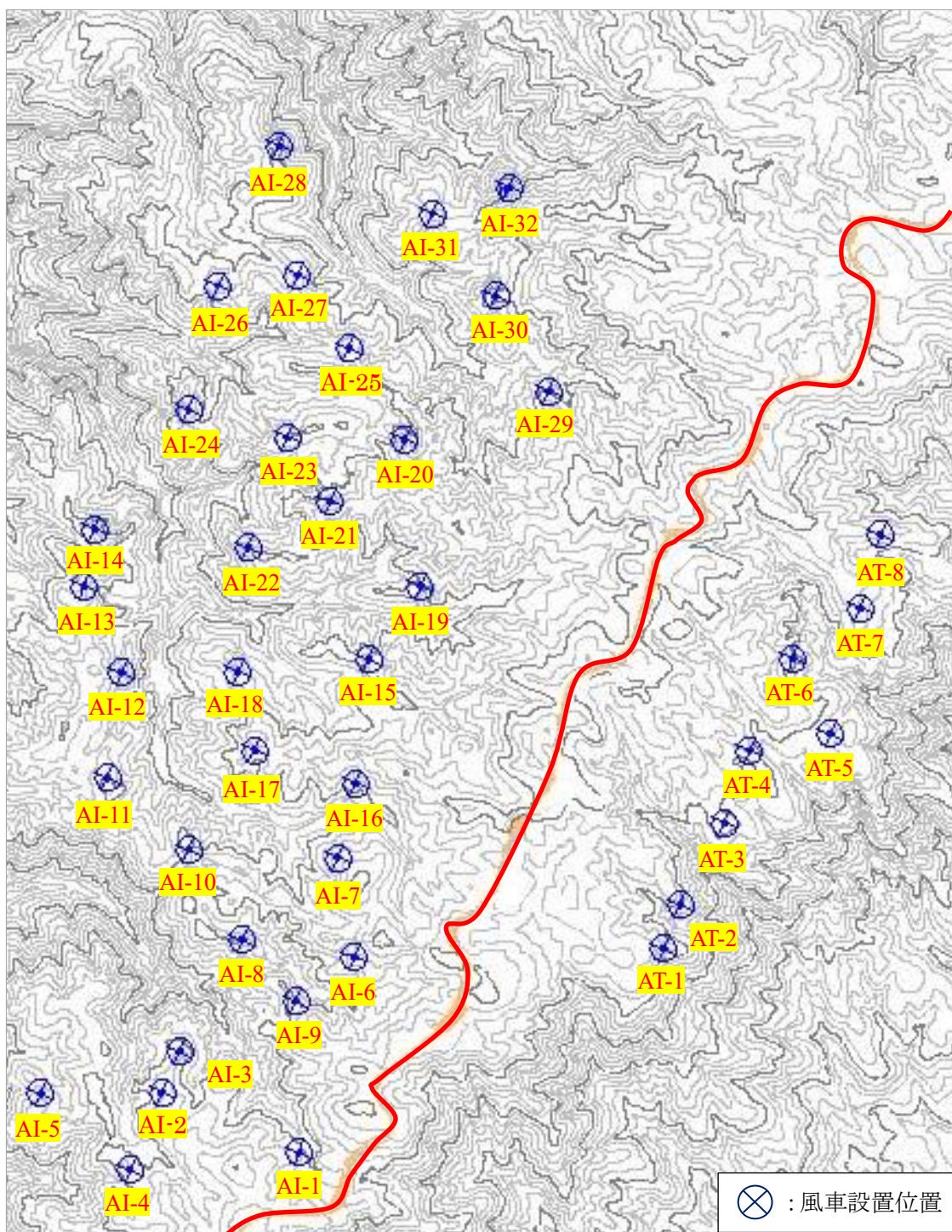


図 3.1 ウィンドファーム内の風車配置図

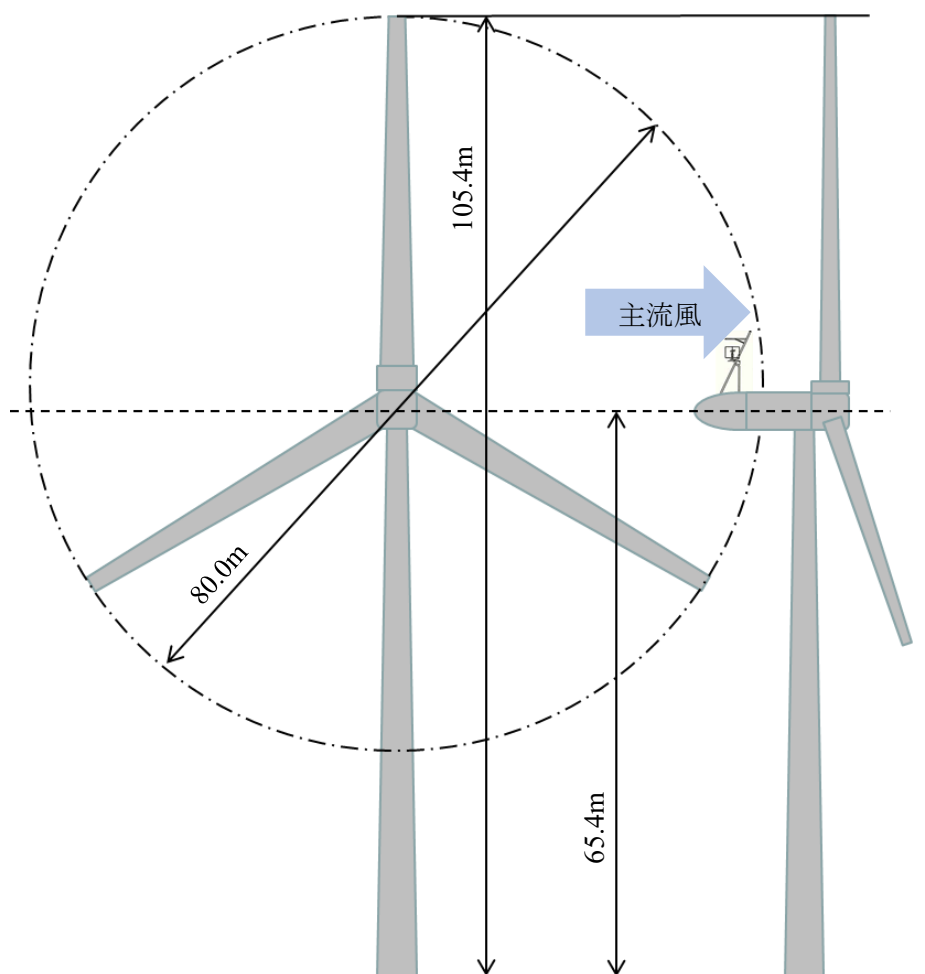


図 3.2 風車概要

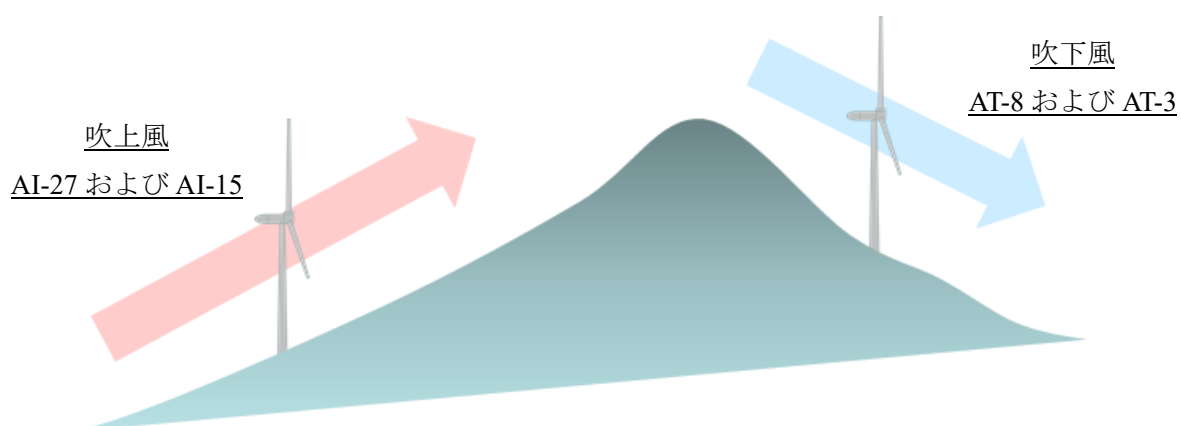


図 3.3 吹上風および吹下風の簡易図

第3章 解析対象および解析手法

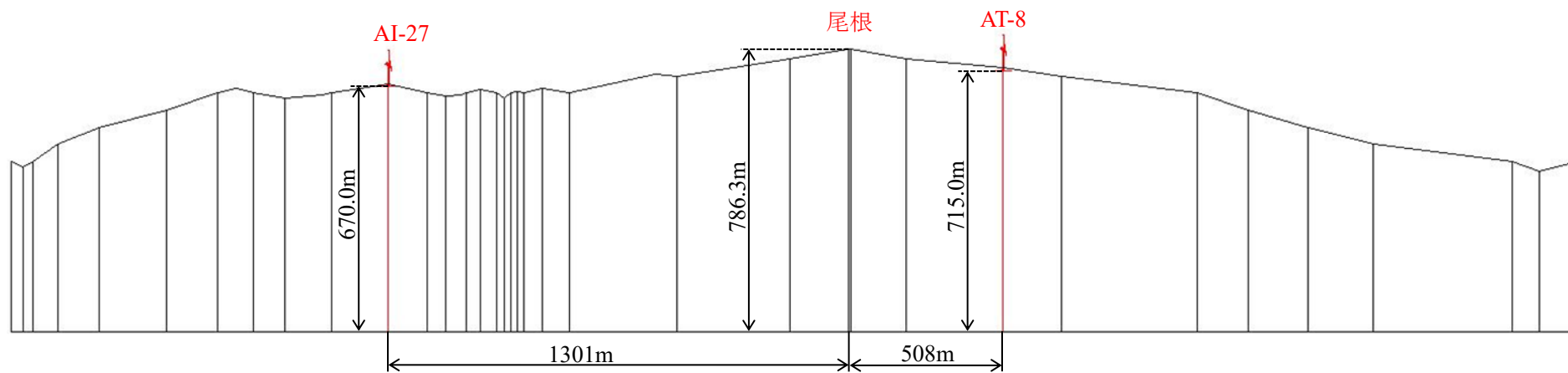


図 3.4 AI-27 および AT-8 の関係

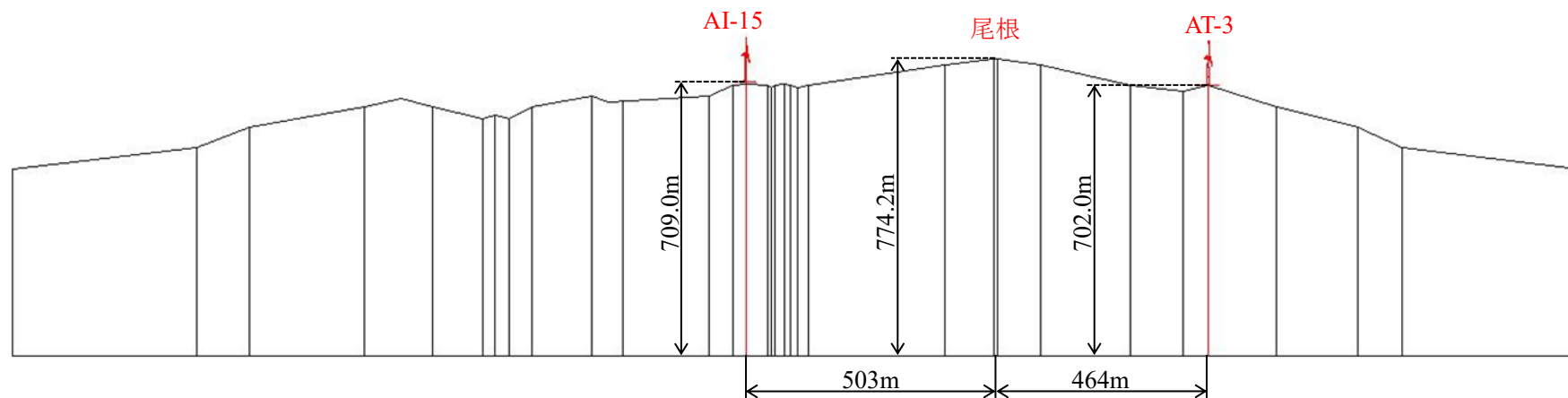


図 3.5 AI-15 および AT-3 の関係

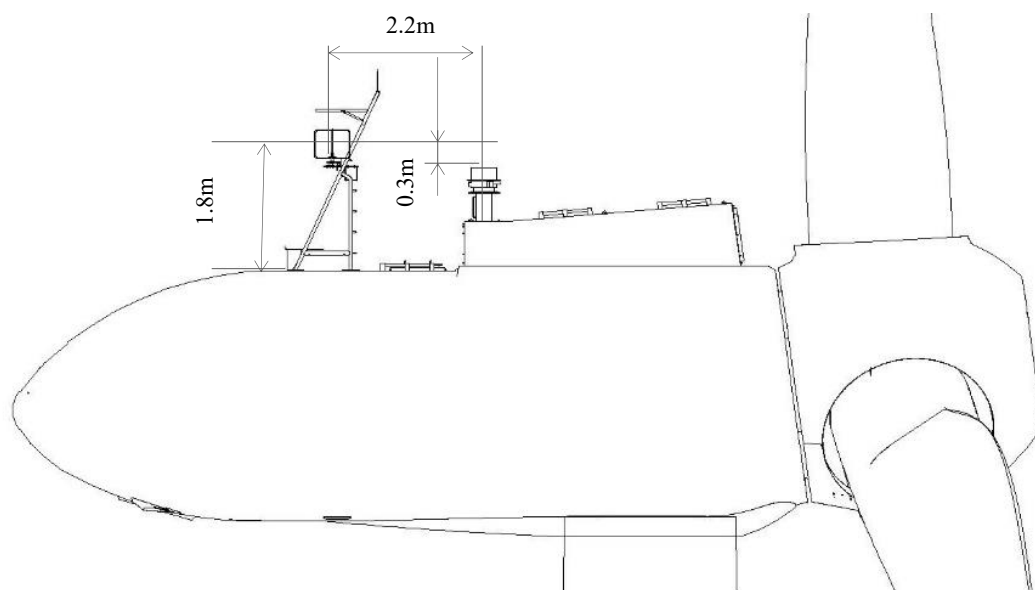


図 3.6 ナセル外観図

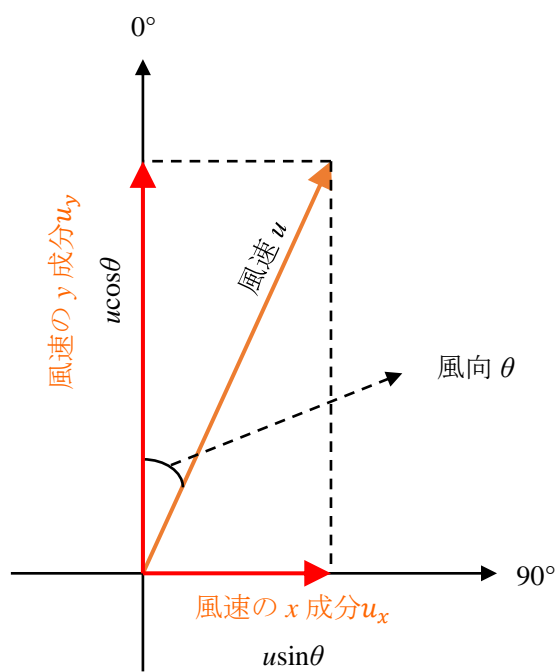


図 3.7 ベクトル平均の概要図

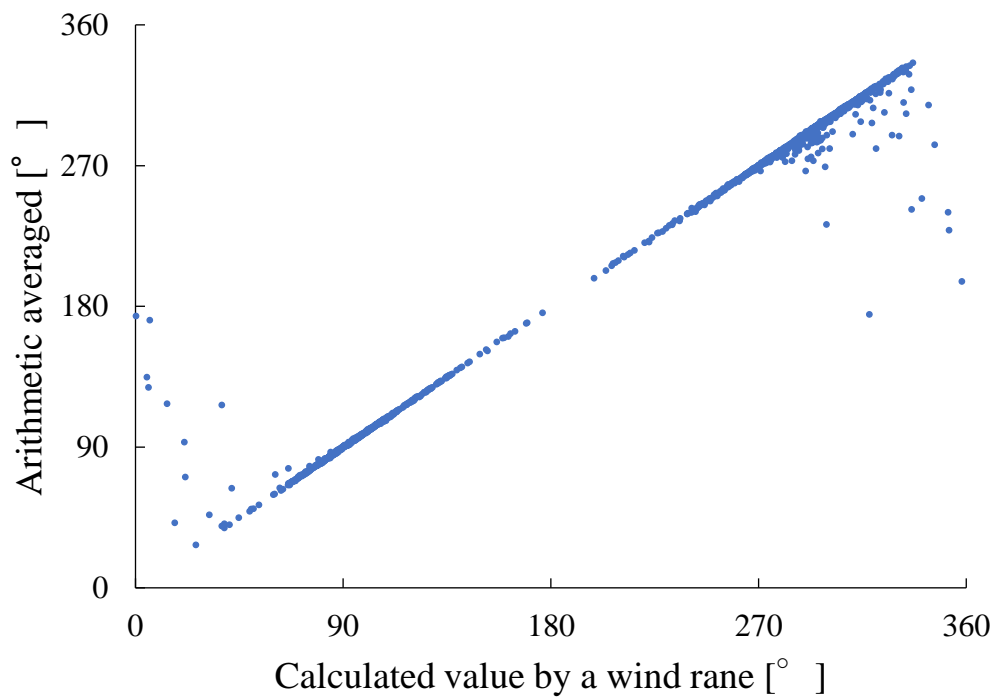


図 3.8 風向計内蔵の演算器による演算値と算術平均値の相関図

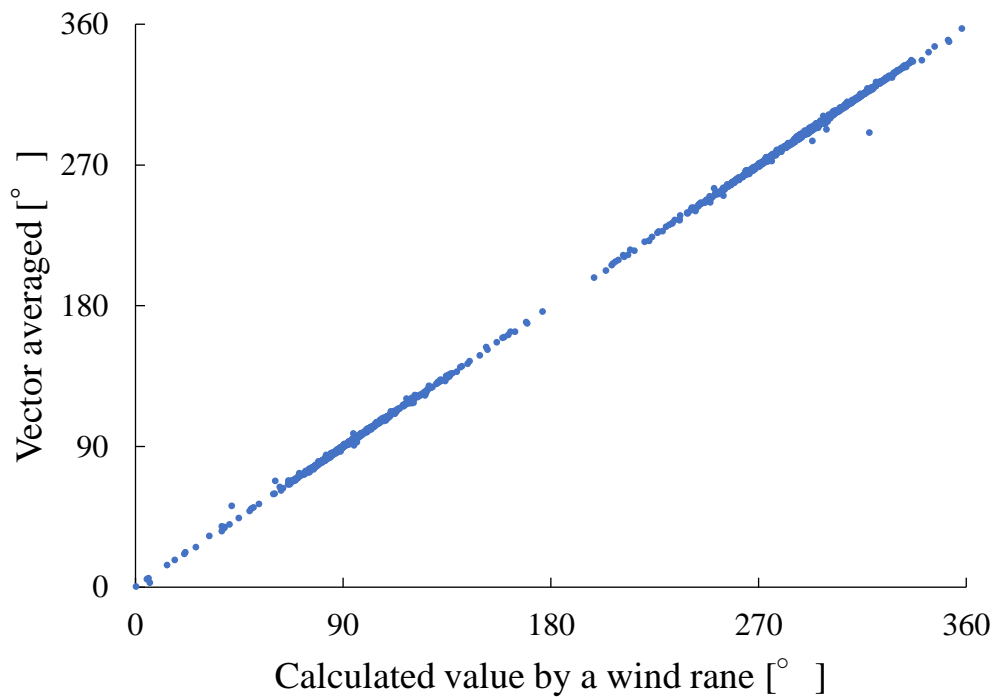


図 3.9 風向計内蔵の演算器による演算値とベクトル平均値の相関図

第3章 解析対象および解析手法

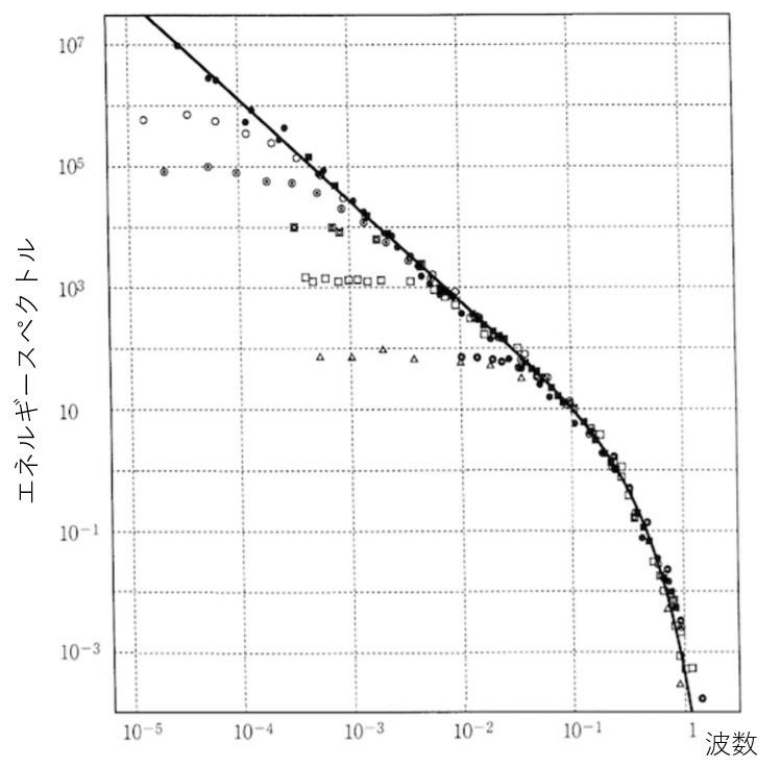


図 3.10 乱流のエネルギースペクトルの普遍則

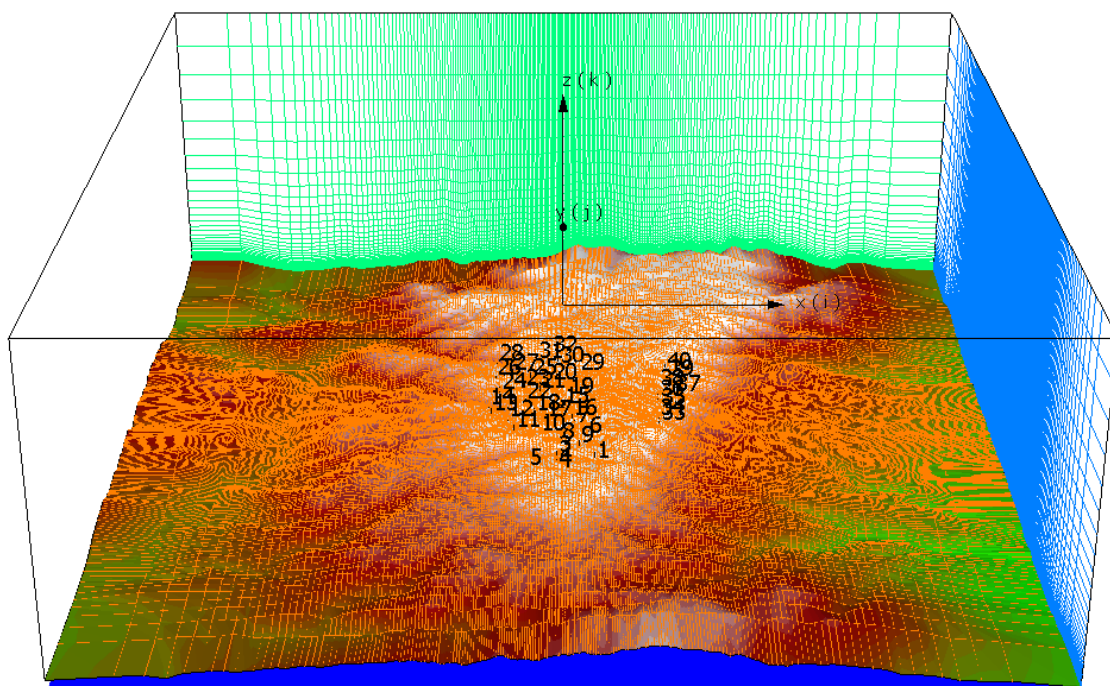


図 3.11 解析領域の鳥観図

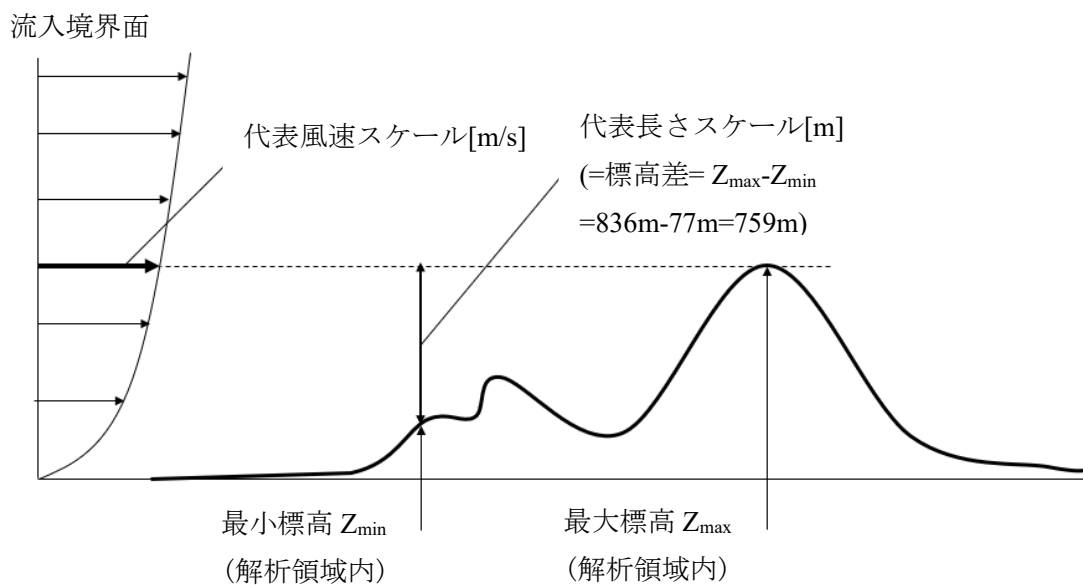


図 3.12 代表スケール

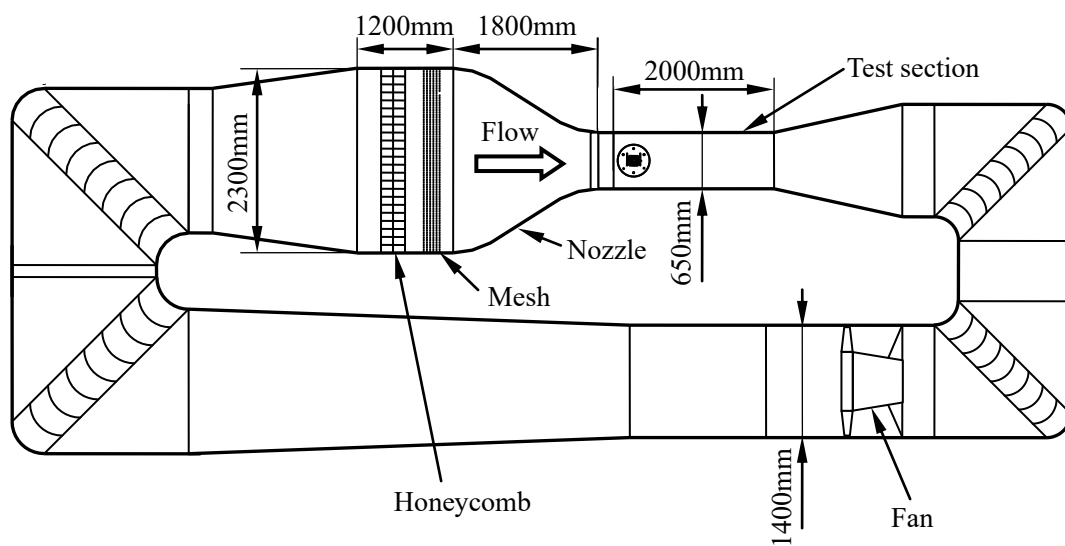


図 3.13 小型風洞全体図

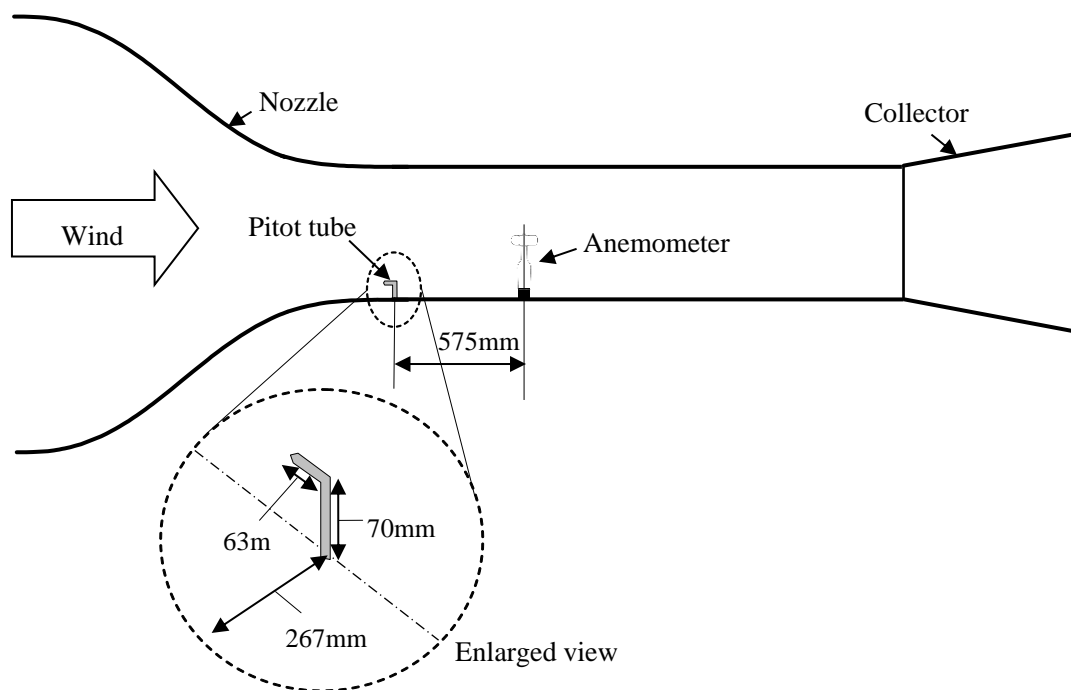


図 3.14 小型風洞測定部（側面図）

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の比較および考察を行う。風車出力に及ぼす地形および後流の影響を明らかにするため、主風向において概ね直線上に配置されている風車に着目し地形による影響や後流による影響を考察した。

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方位の風の出現率をまとめた。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、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に風軸上におけるAI-27およびAT-8の月別平均風速、図4.3に風軸上におけるAI-27およびAT-8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、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。

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

図 4.4 に AI-15 および AT-3 の月別平均風速，図 4.5 に AI-15 および AT-3 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，周囲の風車（AI-27 および AI-15 を含む）に比べ高いため，風速が高く，発電量が多くなると考えられる。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。第 6 章に示す風車ナセルに搭載されている風速計を用いた風洞実験において，風速計は吹上風を受ける場合に真値に近い値を示し，吹下風を受ける場合は真値より高い値を示した。この結果は風速計の読み誤差をさらに広める結果となった。よって，風速計は航空障害灯近傍の失速流れによる影響や，ナセル本体により流入風が迂回することにより読み誤差を引き起こしていると考えられる。

(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 AI-27 および AT-8 の風軸上 6 方位における平均風速，図 4.7 に AI-27 および AT-8 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 AI-15 および AT-3 の風軸上 6 方位における平均風速, 図 4.9 に AI-15 および AT-3 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, 第 5 章で RIAM-COMPACT による解析結果から, 尾根による影響を考察する.

4.2.3 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°以下のデータのみを抽出した. 図 4.10 に AI-27 の風速階級別発電量, 図 4.11 に AT-8 の風速階級別発電量, 図 4.12 に AI-15 の風速階級別発電量, 図 4.13 に AT-3 の風速階級別発電量を示す. 図 4.10 から図 4.13 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, 本ウイ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 4.10 から図 4.13 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 の出力はメーカー公表値以上となっている. 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. 風速計は航空障害灯近傍の失速流れによる影響や, ナセル本体により流入風が迂回することにより, 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.

4.2.4 換算風速による発電量の比較

本節では, 風向 WNW および ESE 方位の各風速 BIN における発電量を, メーカー公表値のパワーカーブに当てはめて求めた風速で比較する. なお, 発電量から風速に換算する方法は, 各風速 BIN の発電量をメーカー公表の性能曲線に移動した場合の風速を読み取る. メーカー公表値は各風速 BIN で線形近似した. また, 風速範囲は, 風速に応じた出力を得る 7m/s から 10m/s までである. 比較した風車は 4.2.3 節と同じ AI-15, AI-27, AT-3, AT-8 である. AI-27 および AI-15 は WNW 方向の風が吹上げとなり, ESE 方向からの風が吹下しとなる. また, AT-8 および AT-3 は ESE 方向の風が吹上げとなり, WNW 方向からの風が吹下しとなる. 各

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

図中に記載した式は、一次近似式を示している。以下の表 4.1 に換算風速の近似式をまとめる。各図は縦軸に各風速 BIN で観測された発電量を、メーカー公表値のパワーカーブに当てはめて求めた風速である。また、横軸は実測データの風速 BIN である。

表 4.1 換算風速の近似式

風車	流入風向	近似式
AI-27	WNW (Blowing Up)	$y = 0.9617x + 0.4785$
	ESE (Blowing Down)	$y = 1.0404x + 0.2005$
AT-8	WNW (Blowing Down)	$y = 0.9887x + 0.8857$
	ESE (Blowing Up)	$y = 0.9917x + 0.0498$
AI-15	WNW (Blowing Up)	$y = 0.9980x + 0.4558$
	ESE (Blowing Down)	$y = 1.0433x + 0.5837$
AT-3	WNW (Blowing Down)	$y = 1.0118x + 0.5711$
	ESE (Blowing Up)	$y = 1.0242x + 0.0560$

図 4.14 に AI-27 の風速比較を示す。図から風速計は、WNW 方位および ESE 方位ともに風速を低めに測定していることが分かる。しかしながら、吹下風となる ESE 方位の方が WNW 方位に比べ風速を低く評価している。

図 4.15 に AT-8 の風速比較を示す。図から風速計は、吹上風となる ESE 方位では風速がほぼ真値を示しているのに対し、吹下風となる WNW 方位では真値より高い値を示した。つまり、吹下風となる WNW 方位で風速計が風速を低く評価している。

図 4.16 に AI-15 の風速比較を示す。図から風速計は、WNW 方位および ESE 方位ともに風速を低めに評価していることが分かる。しかしながら、吹下風となる ESE 方位の方が WNW 方位に比べ風速を低く評価している。

図 4.17 に AT-3 の風速比較を示す。図から風速計は、AT-8 同様に吹上風となる ESE 方位では風速がほぼ真値を示しているのに対し、吹下風となる WNW 方位では真値より高い値を示し、風速を低めに評価している結果となった。

以上より、発電量からメーカー公表の性能曲線を用いて推測した風速は、吹下風においてナセル搭載三杯式風速計より高い値を示す。これは 4.2.1 節で述べた内容と一致している。

4.2.5 尾根による剥離

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。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から送られてくる実測データ（10分平均データ）をもとに風の乱れ σ をその10分平均値で割った乱れ強度 I を乱流強度として定義する。以下の式(4.1)および式(4.2)に乱れおよび乱流強度の計算式を示す⁽¹⁷⁾。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad (4.1)$$

$$I = \frac{\sigma}{\bar{u}} \quad (4.2)$$

研究対象のサイトは、尾根を隔て両側に風車を設置している。そのため、風下側に設置されている風車には尾根越えの風が入る。風が尾根で剥離する可能性がある。剥離をすると風は急激に乱れ、乱流強度が高くなる。乱流強度の高い風を受ける風車は、発電量の低下や使用寿命の低下などを招く。そこで、本節では主風向に対して尾根越えの風が流入すると考えられる、AT-8 および AT-3 に着目する。図 4.18 と図 4.19 に AT-8 および AT-3 の乱流強度を示す。また図中の3本の実線は IEC で定義されている乱流カテゴリ A, B および C の各風速における乱流の値を示している。また各風速 BIN での乱流強度は、各風速 BIN 内にある全データの 90% タイル値*を使用している。

図 4.18 において、AT-8 は全体的に非常に乱流強度が高いことが分かる。また、AT-8 のロータ高さは尾根と同程度であるため、尾根による剥離の影響を強く受けていると考えられる。風速 8m/s から 17m/s の範囲において、IEC で定義される最も高い乱流カテゴリ C の値を大きく上回っている。そのため、AT-8 は非常に乱れの強い風を受けており故障率の増加につながると考えられる。

図 4.19 において、AT-3 は AT-8 と同様に乱流強度が全体的に高いことが分かる。また、AT-3 のロータ面も尾根と同程度に位置しており、尾根による剥離の影響を受けることで風速 10m/s より速い風速域で、AT-3 の乱流強度が乱流カテゴリ C よりも高い値となっている。これより AT-3 も非常に乱れの強い風を受けているため、故障率の増加につながると考えられる。

(注*) タイル値とは、全データを小さい順に並べた時に、初めから数えて全体の%に位置する値のこと

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。

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-12 および AI-17, AI-17 および AI-16, AI-8 および AI-6, AI-13 および AI-18 である。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⁽¹⁶⁾にする必要があるとされている。しかしながら、表 4.2 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-12 および AI-17 の風車間距離は $x/D=5.4$, AI-17 および AI-16 の風車間距離は $x/D=3.8$, AI-8 および AI-6 の風車間距離は $x/D=4.0$, AI-13 および AI-18 の風車間距離は $x/D=5.6$ 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-12 および AI-17 の標高差は 28m, AI-17 および AI-16 の標高差は 3m, AI-8 および AI-6 の標高差は 32m, AI-13 および AI-18 の標高差は 30m となる。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、AI-12, AI-17 および AI-16 の 3 基は主風向に対して概ね直線に並んでいるため、次項からはこの 3 基を同時に考察していく。

表 4.2 後流評価を行った風車の組合せ

前	後	風車間距離 [m]	x/D	地盤標高		標高差 [m]	下流側風車から見た 上流側風車の方位
				前 [m]	後 [m]		
AI-2	AI-1	425	5.3	705	700	5	WNW
AI-12	AI-17	437	5.4	675	708	28	WNW
AI-17	AI-16	302	3.8	708	705	3	WNW
AI-8	AI-6	320	4.0	690	722	32	W
AI-13	AI-18	450	5.6	663	693	30	WNW

4.3.2 乱流強度

図 4.20 から図 4.23 に AI-2 および AI-1, AI-12, AI-17 および AI-16, AI-8 および AI-6, AI-13 および AI-18 の風速 BIN 別乱流強度を示す. また図中の 3 本の実線は IEC で定義されている乱流カテゴリ A, B および C の各風速における乱流の値を示している. また各風速 BIN での乱流強度は, 各風速 BIN 内にある全データの 90% タイル値を使用している. また比較した風向は本サイトの主風向である WNW 方位である.

図 4.20 において, 下流側に来る 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為であると考えられる. また AI-1 の乱流強度は風速 8m/s から 17m/s まで IEC で定義される乱流カテゴリ A 付近の値となっており, 乱れた風を受けている. しかしながら, 乱流強度は全体的に IEC のカテゴリ A 付近である. そのため, 今後も継続して発電していくのに大きな弊害は少ないといえる. 風速 19m/s より高風速域では指標となるデータ点数が少ないため, 正確な傾向を把握することが出来なかった.

図 4.21 において, 一番下流側に来る AI-16 の乱流強度が AI-12 や AI-17 に比べて高いことが分かる. また, AI-17 の乱流強度は AI-12 より少し高い. このことから, AI-16 は AI-12 および AI-17 の後流の影響を受けており, AI-17 は AI-12 の後流の影響を受けていると考えられる. また, サイト内に設置されている風車の定格風速は 13m/s である. よって, 風速が 13m/s より速くなるとピッチ角制御を行い, 出力を定格に保つようになっている. ピッチ角制御によりロータ出力を低下させると同時に推力も低下し, 後流の影響が少なくなる. 図 4.21 の風速 BIN 13m/s から 16m/s にかけて 3 基の乱流強度が収束していることが分かる. これは上流側の風車がピッチ角制御を行い後流の影響が小さくなっているためであると考えられる. 風速 BIN 17m/s より速い風速域で乱流強度の傾向性が見られないのは, 指標となるデータ数が少ないため正確な傾向を把握できないからである.

図 4.22 において, 風速 BIN 10m/s より遅い風速域では, AI-8 と AI-6 の乱流強度に大きな違いは見られない. しかしながら, 風速 BIN 11m/s より速い風速域では下流側に設置されている AI-8 の乱流強度が AI-6 に比べて高いことが分かる. これは高風速域において地形の影響により, AI-8 のロータ面を通過した流れが AI-6 のロータ面に流入しているためであると推測できる. しかしながら, AI-6 の乱流強度が定格風速の 13m/s より速い風速域においても高いままである. これは, 後流の影響だけでなく地形による影響が大きいためであると推測される. この地形の影響に関しては, 5.2.3 節の RIAM-COMPACT の解析結果より詳しく考察を行う.

図 4.23 において, AI-18 の乱流強度は AI-13 に比べ全ての風速域で高いことが分かる. これは, AI-18 が AI-13 の後流の影響を常に受けているためであると考えられる. また, AI-18 の乱流強度は, 風速 9m/s 以上で非常に高くなっている. そのため, 故障率の増加が懸念される.

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

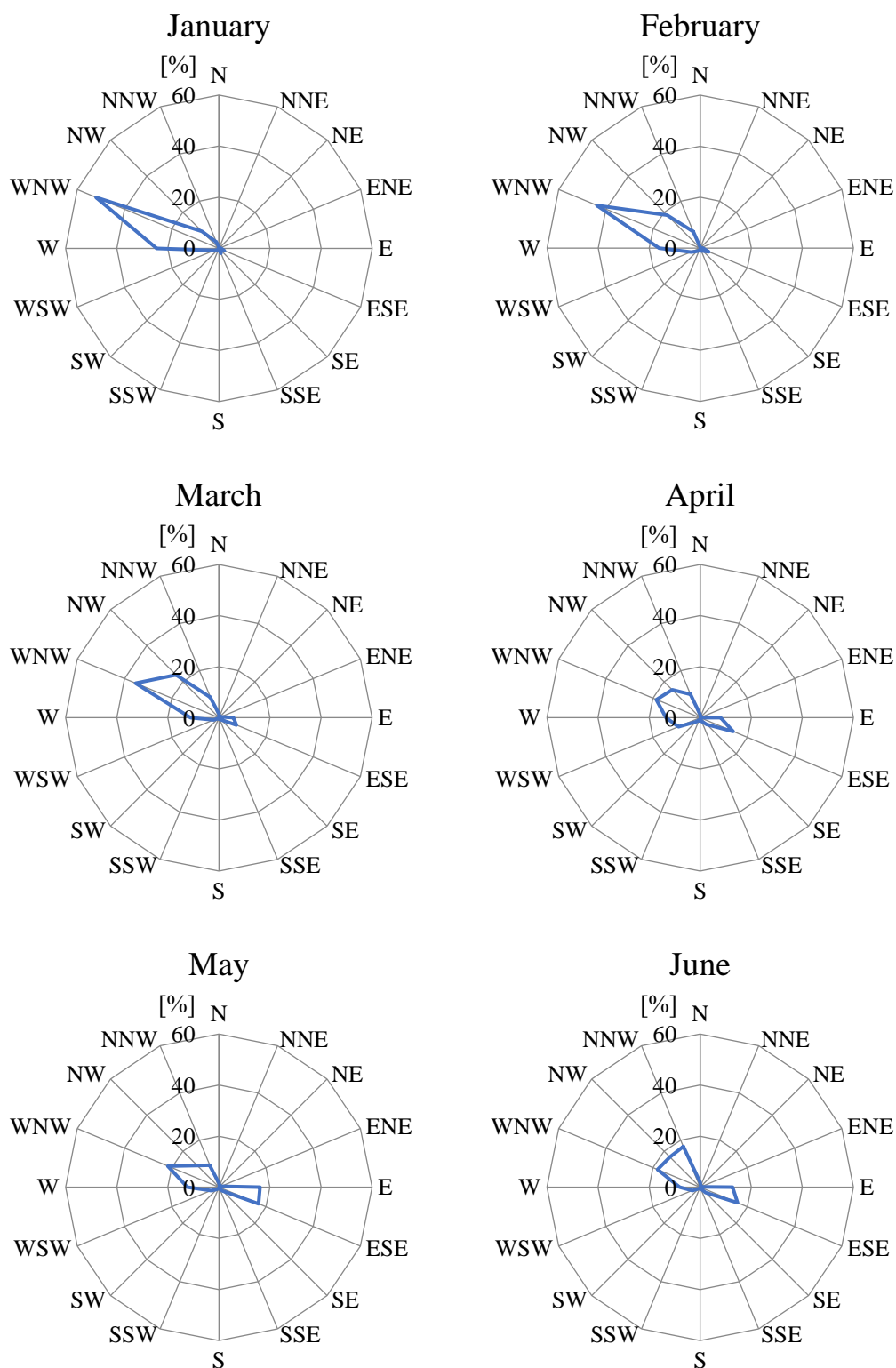


図 4.1(a) AI-2 の月別および年間風向出現率

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

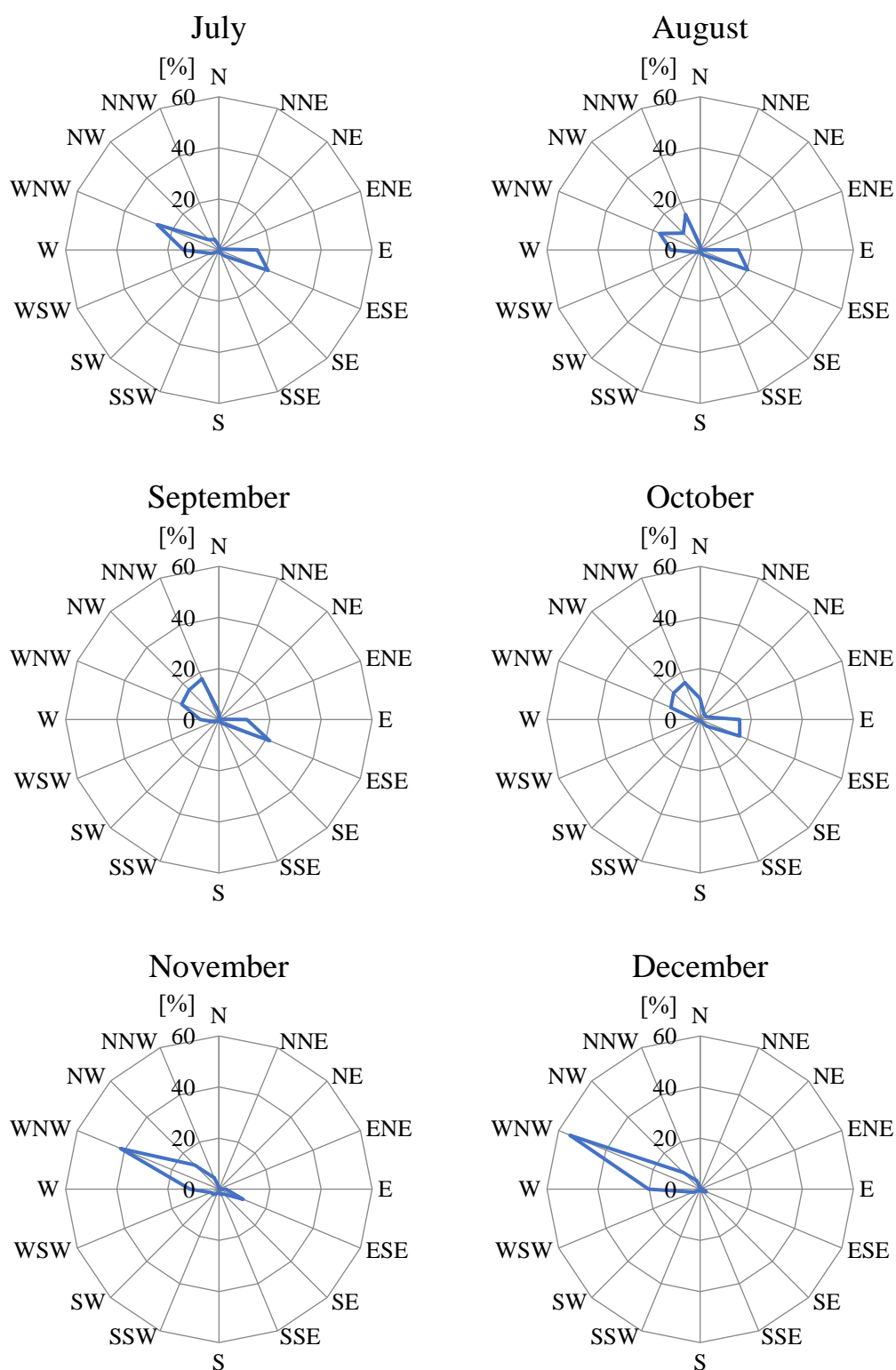


図 4.1(b) AI-2 の月別および年間風向出現率

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

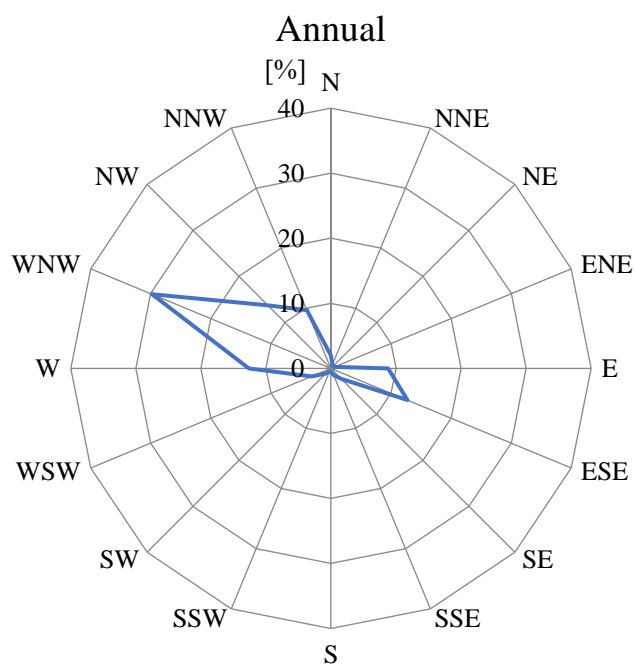


図 4.1(c) AI-2 の月別および年間風向出現率

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

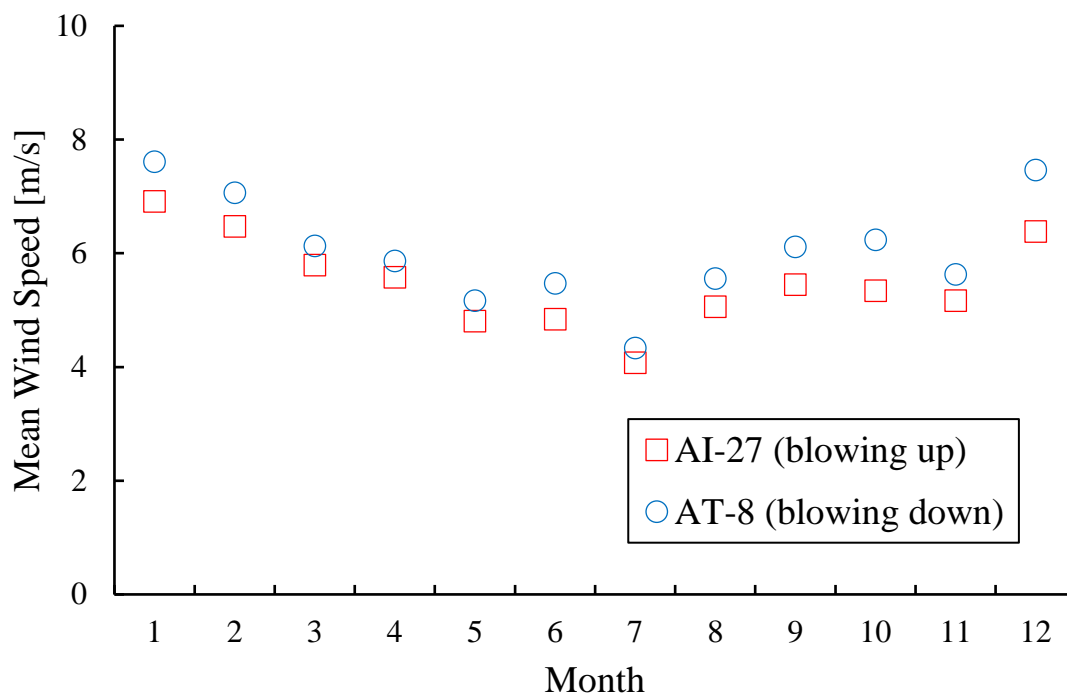


図 4.2 AI-27 および AT-8 の月別平均風速

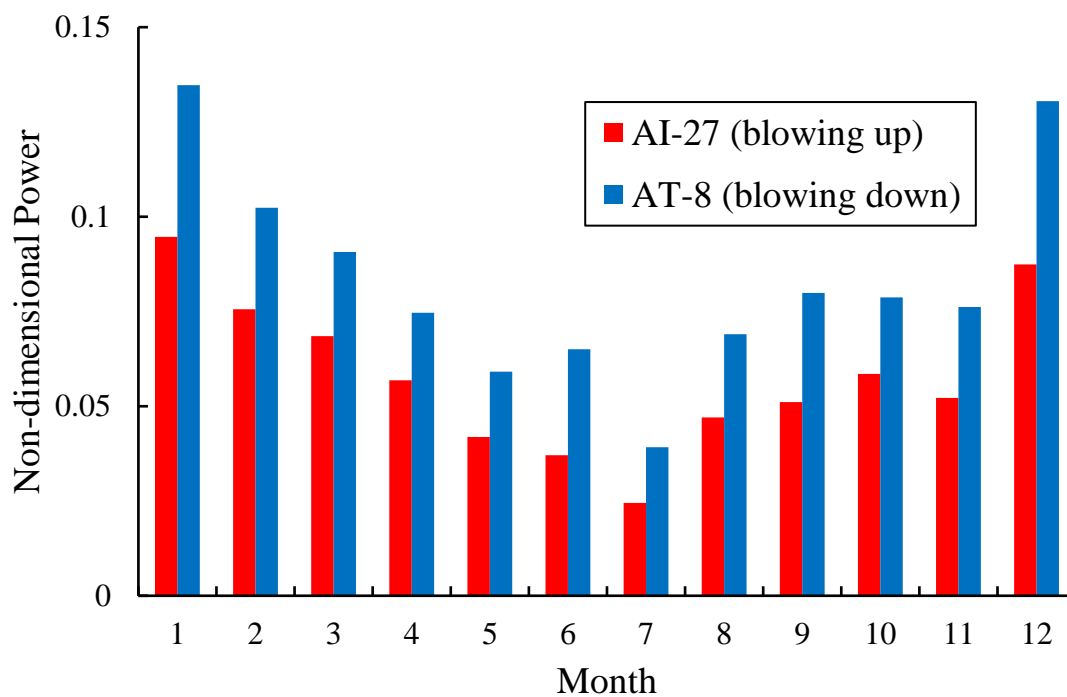


図 4.3 AI-27 および AT-8 の月別発電量

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

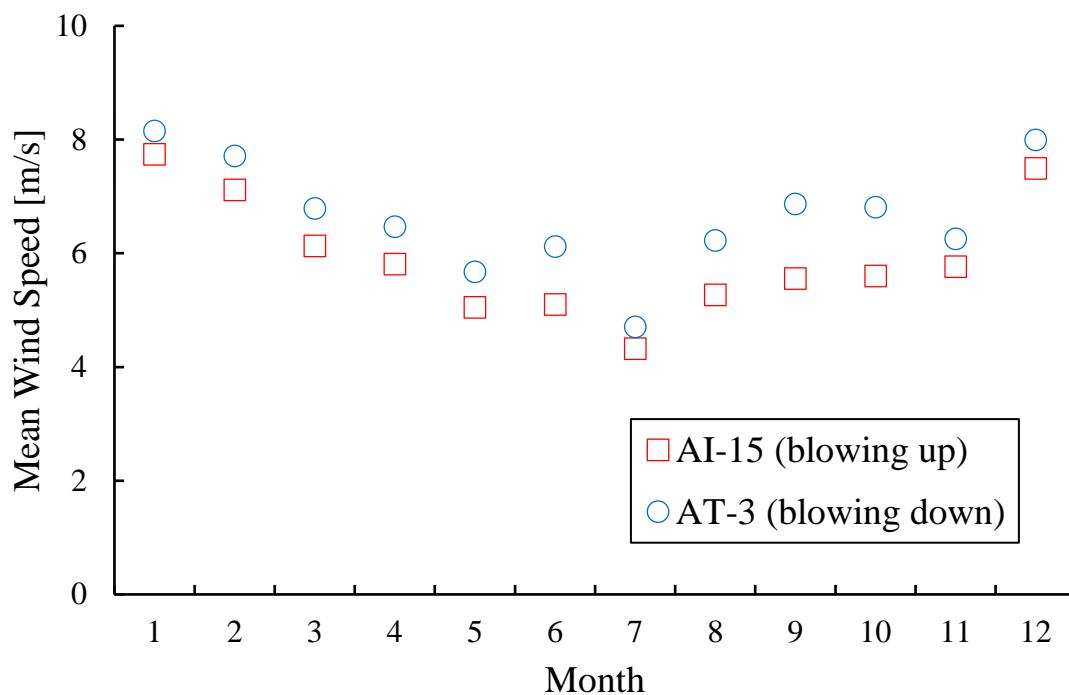


図 4.4 AI-15 および AT-3 の月別平均風速

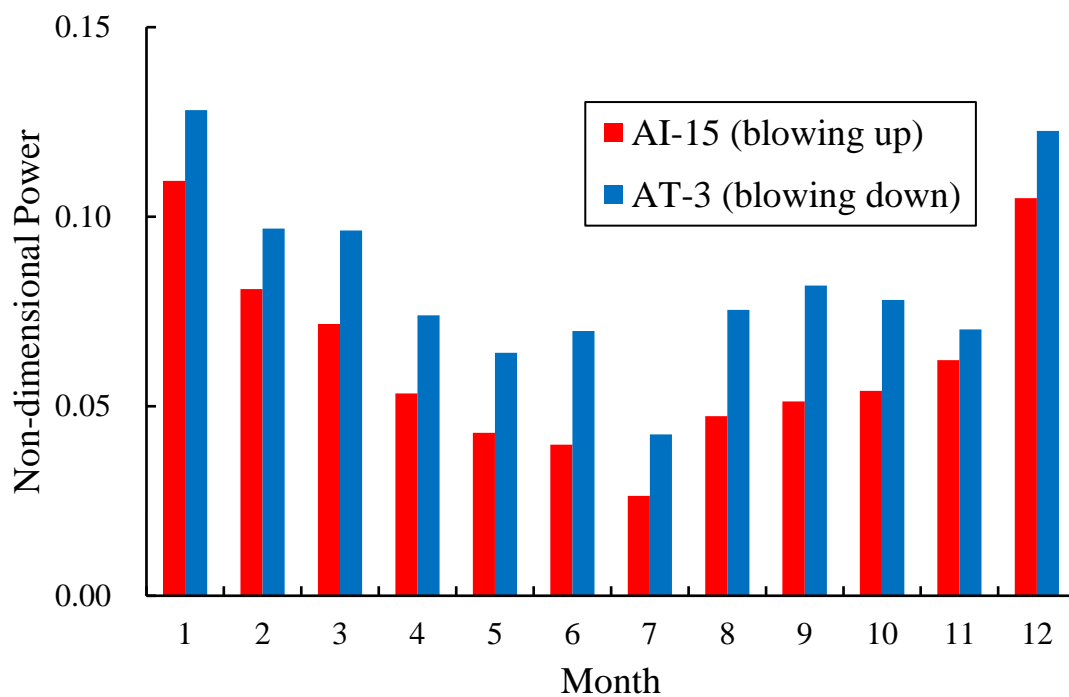


図 4.5 AI-15 および AT-3 の月別発電量

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

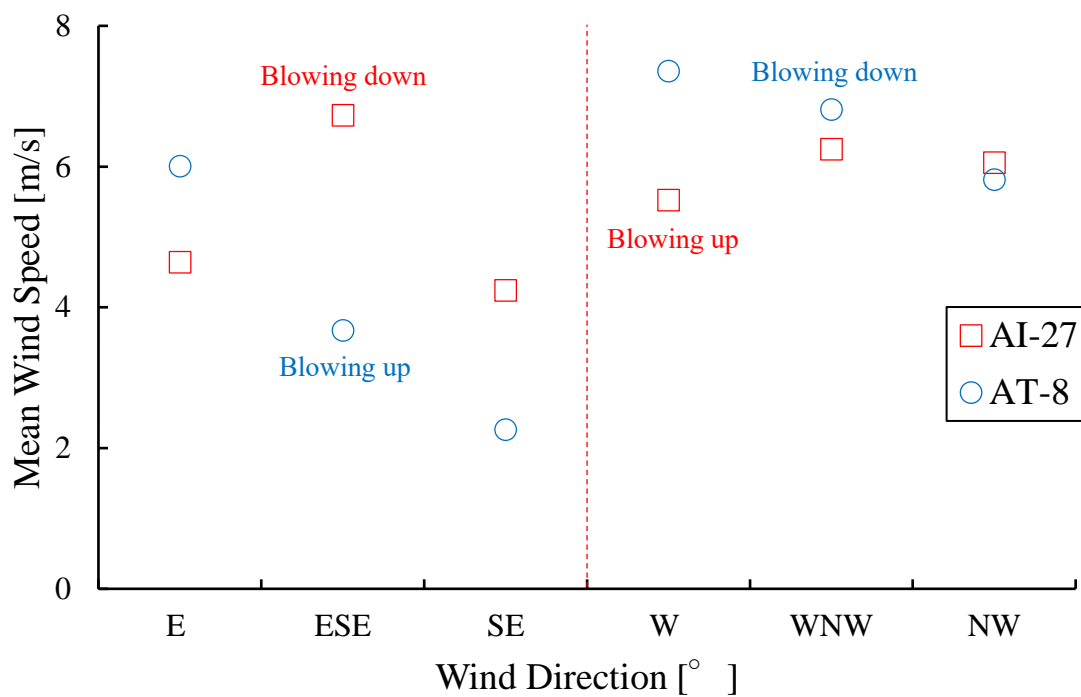


図 4.6 AI-27 および AT-8 の風軸上 6 方位における平均風速

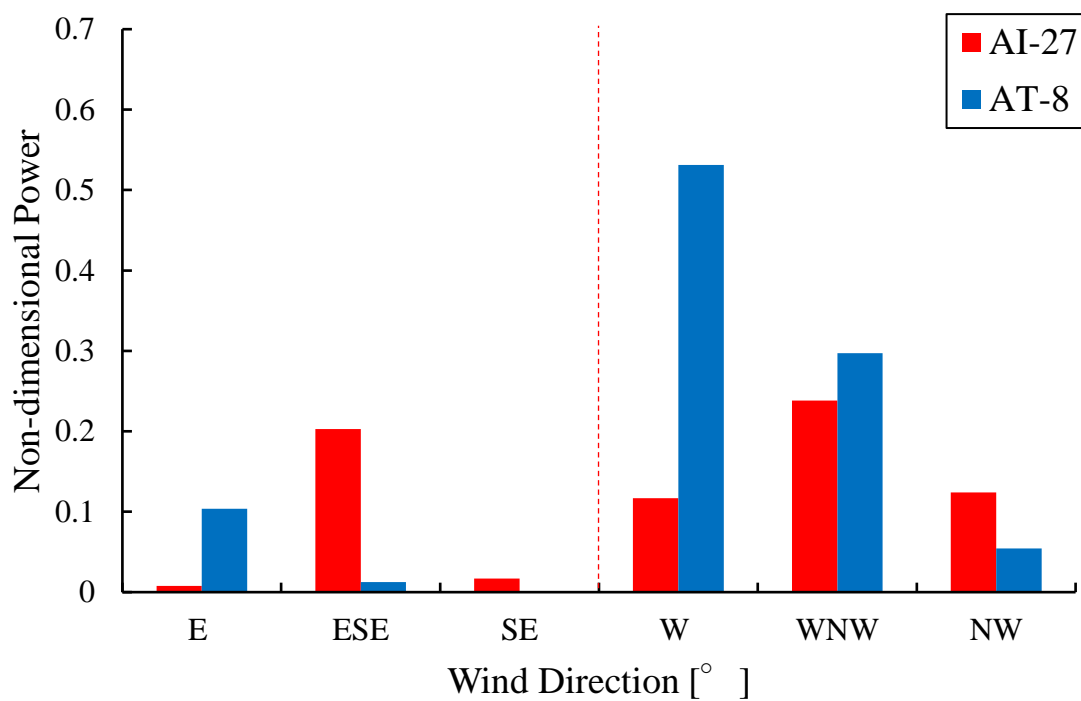


図 4.7 AI-27 および AT-8 の風軸上 6 方位における発電量

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

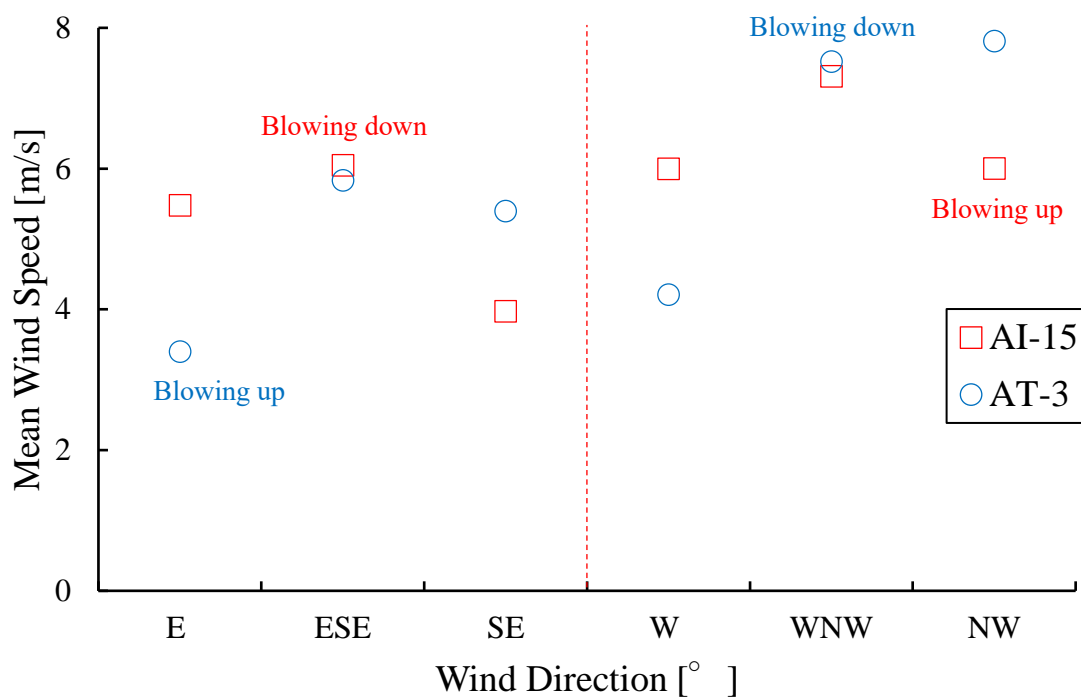


図 4.8 AI-15 および AT-3 の風軸上 6 方位における平均風速

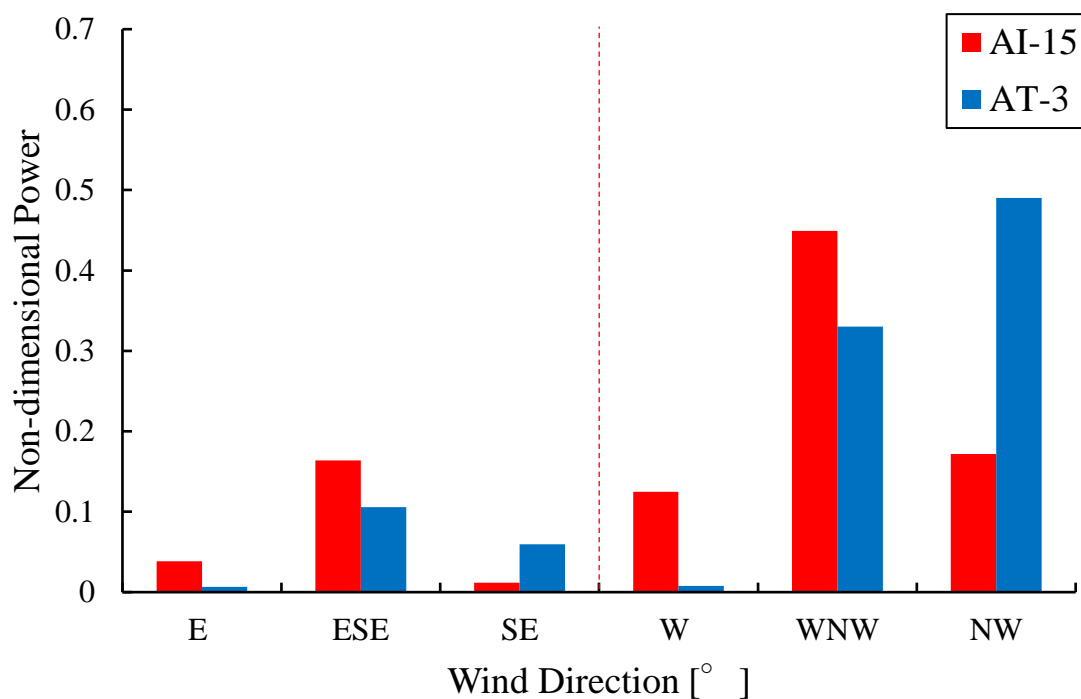


図 4.9 AI-15 および AT-3 の風軸上 6 方位における発電量

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

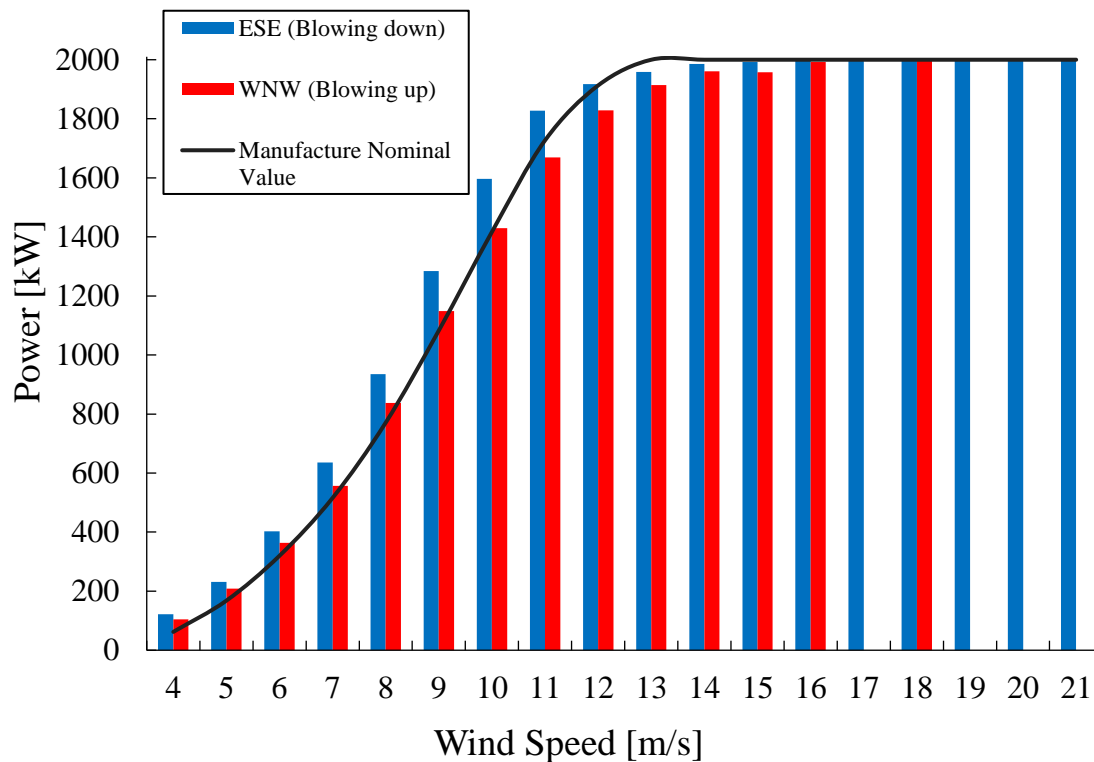


図 4.10 AI-27 の風速階級別発電量

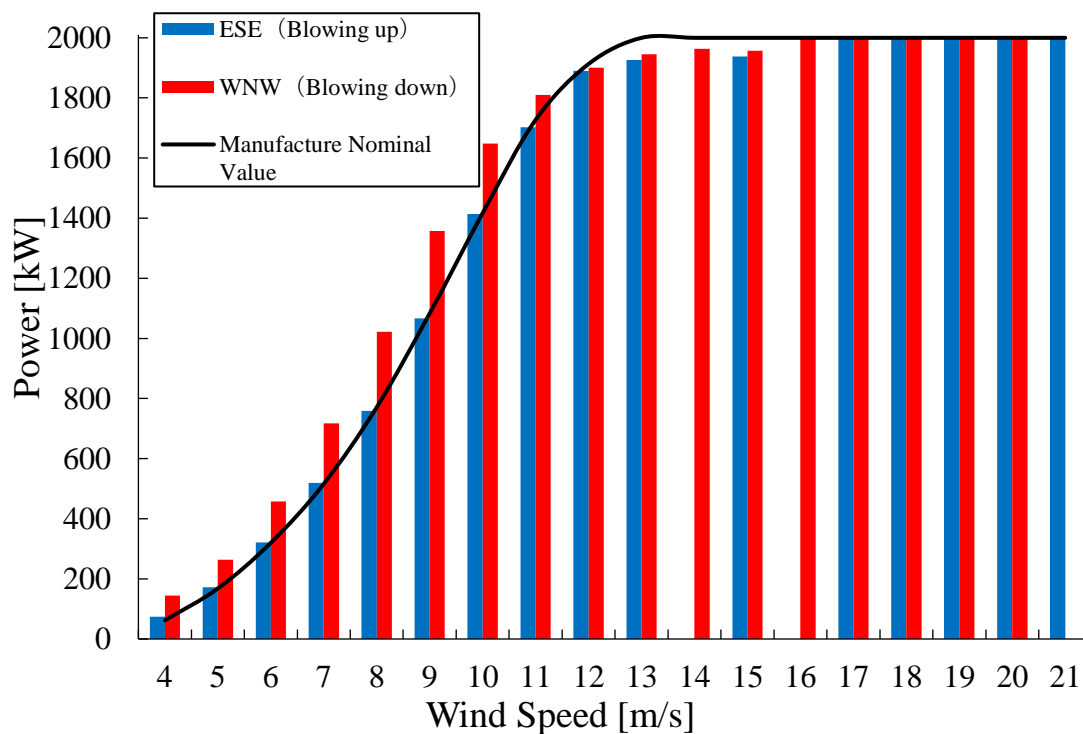


図 4.11 AT-8 の風速階級別発電量

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

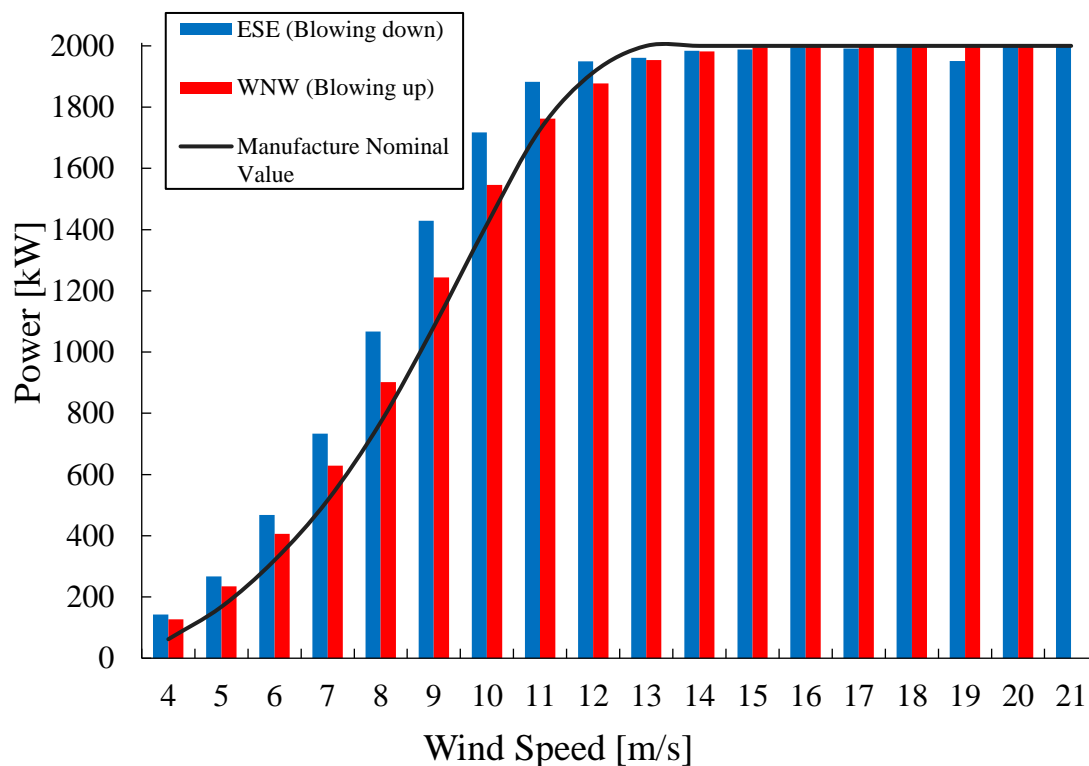


図 4.12 AI-15 の風速階級別発電量

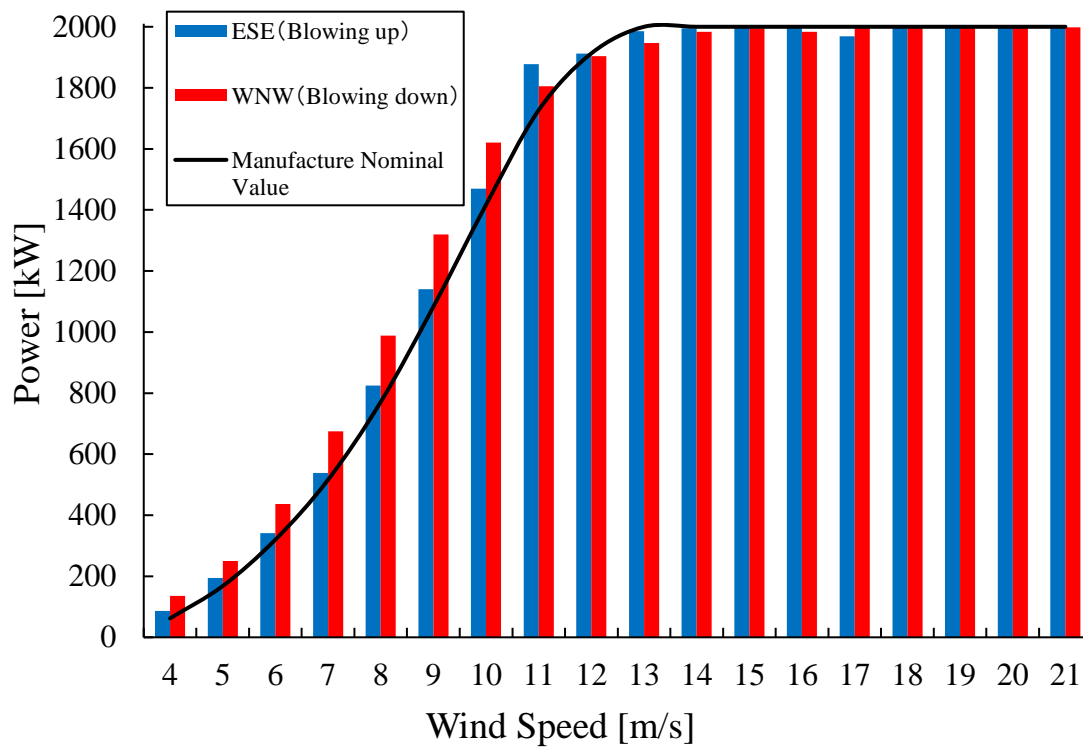


図 4.13 AT-3 の風速階級別発電量

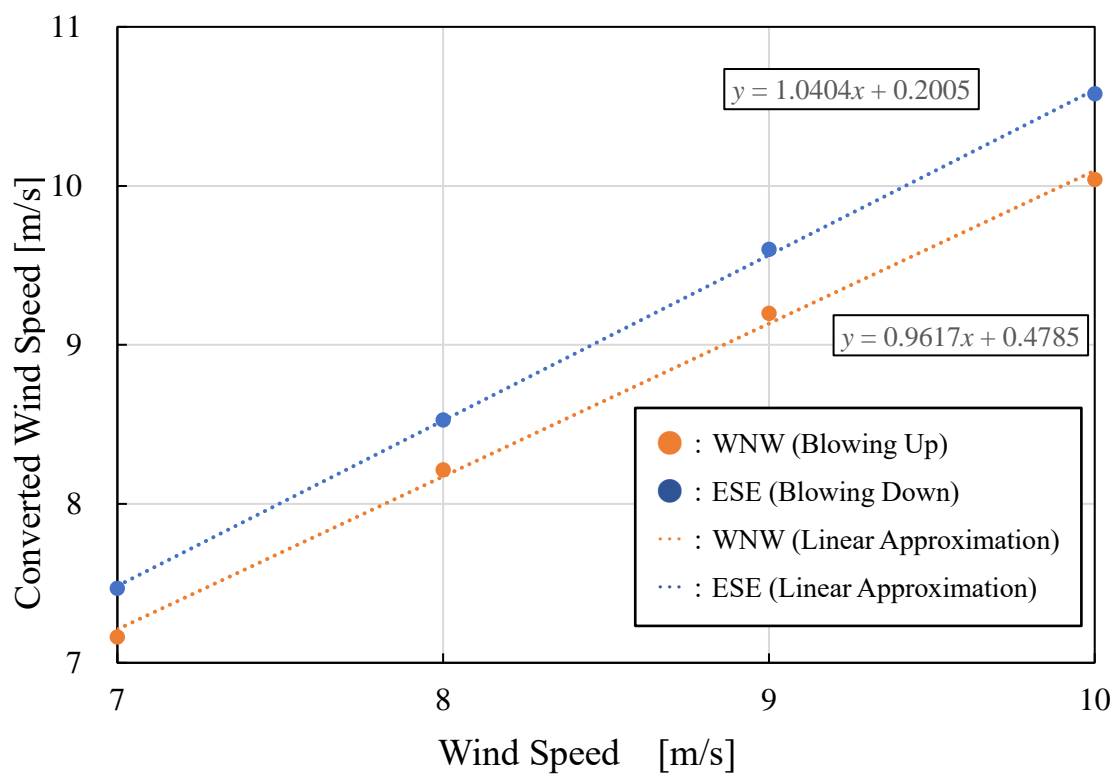


図 4.14 AI-27 の風速比較

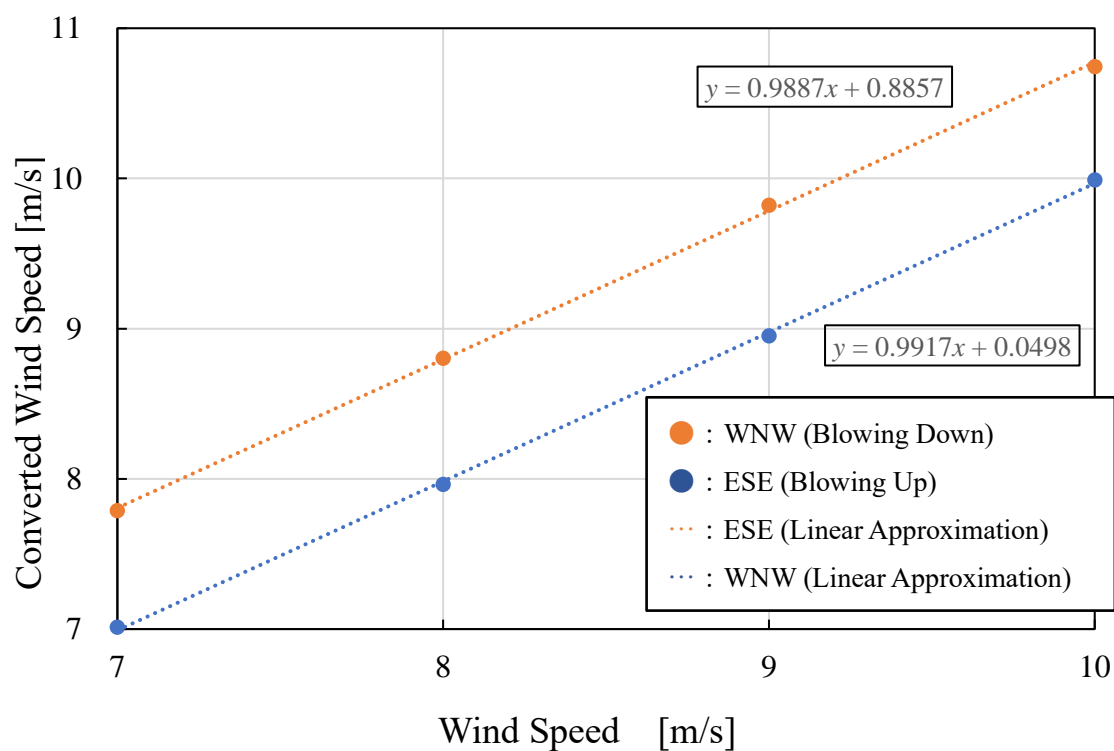


図 4.15 AT-8 の風速比較

第4章 風車出力に及ぼす地形および後流の影響

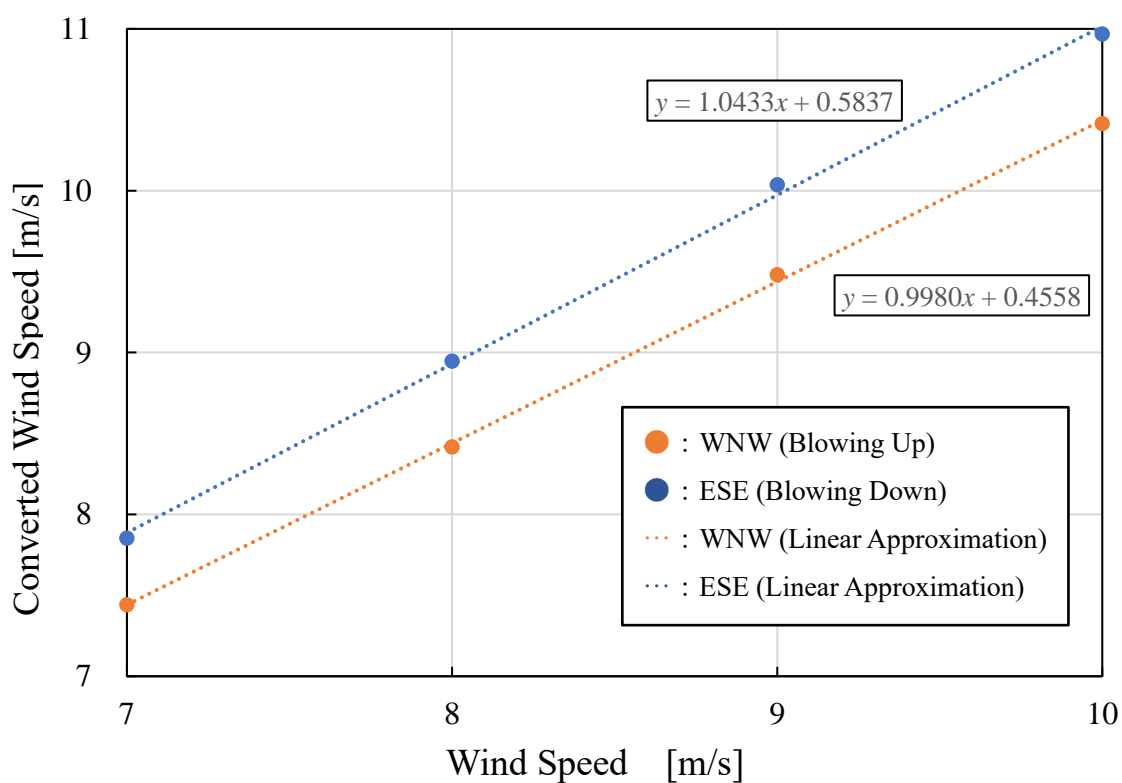


図 4.16 AI-15 の風速比較

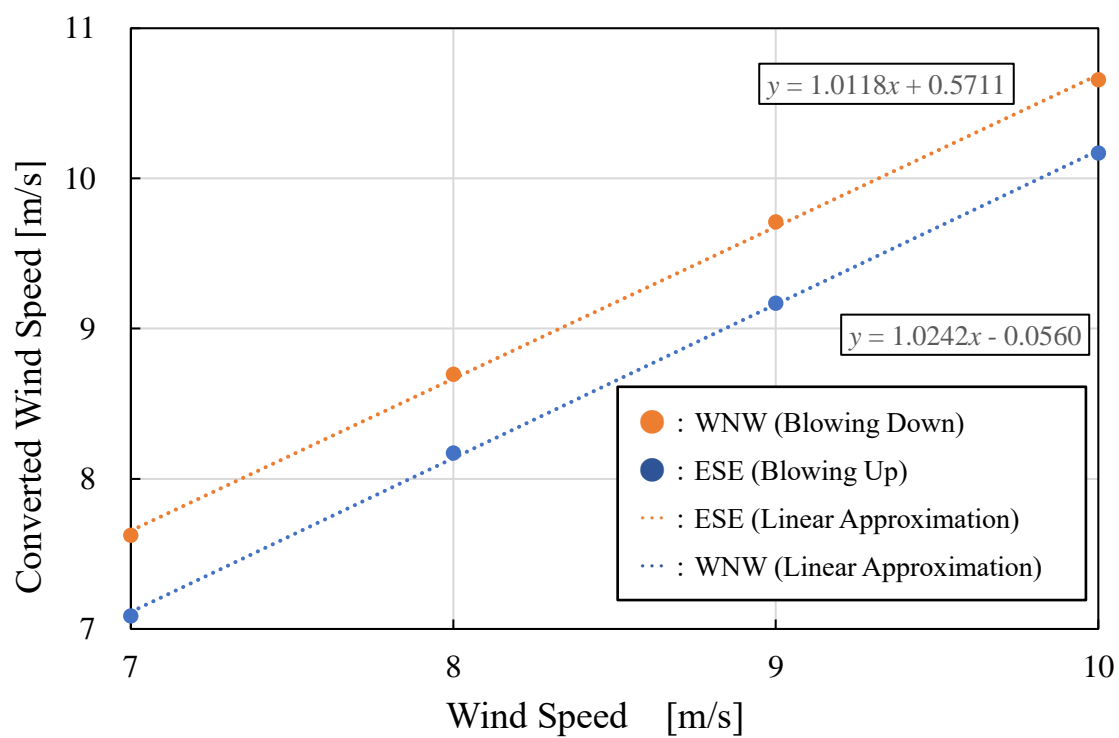


図 4.17 AT-3 の風速比較

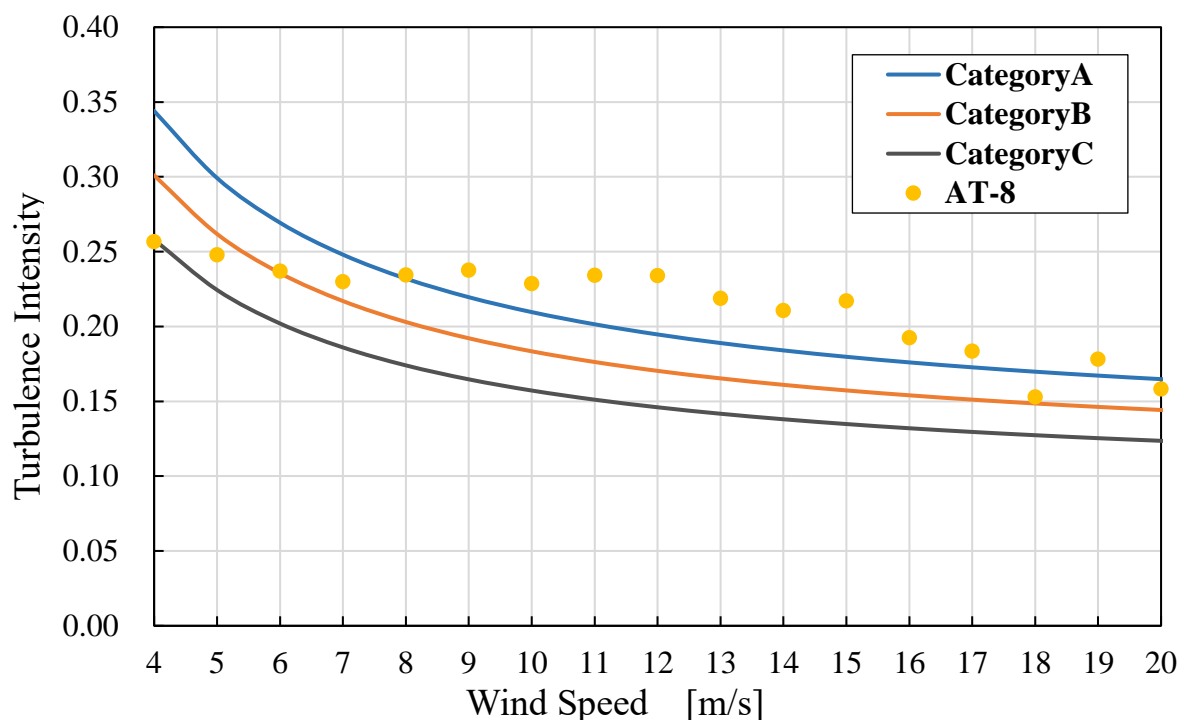


図 4.18 AT-8 の風速 BIN 別乱流強度

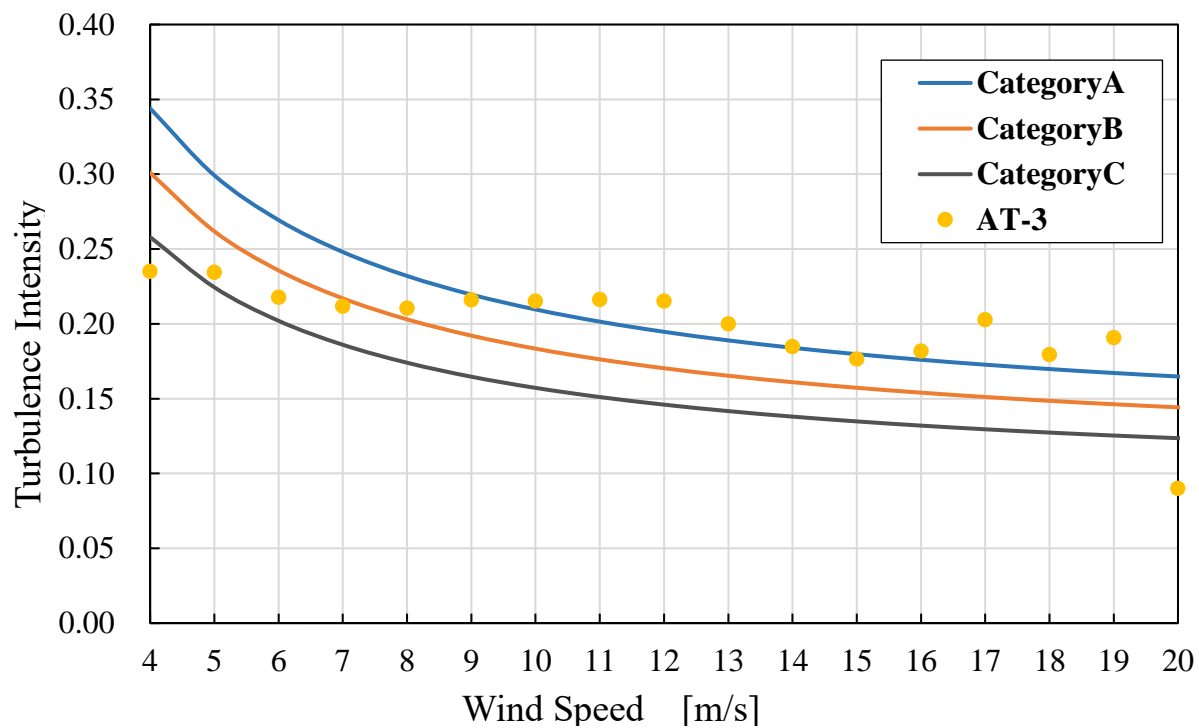


図 4.19 AT-3 の風速 BIN 別乱流強度

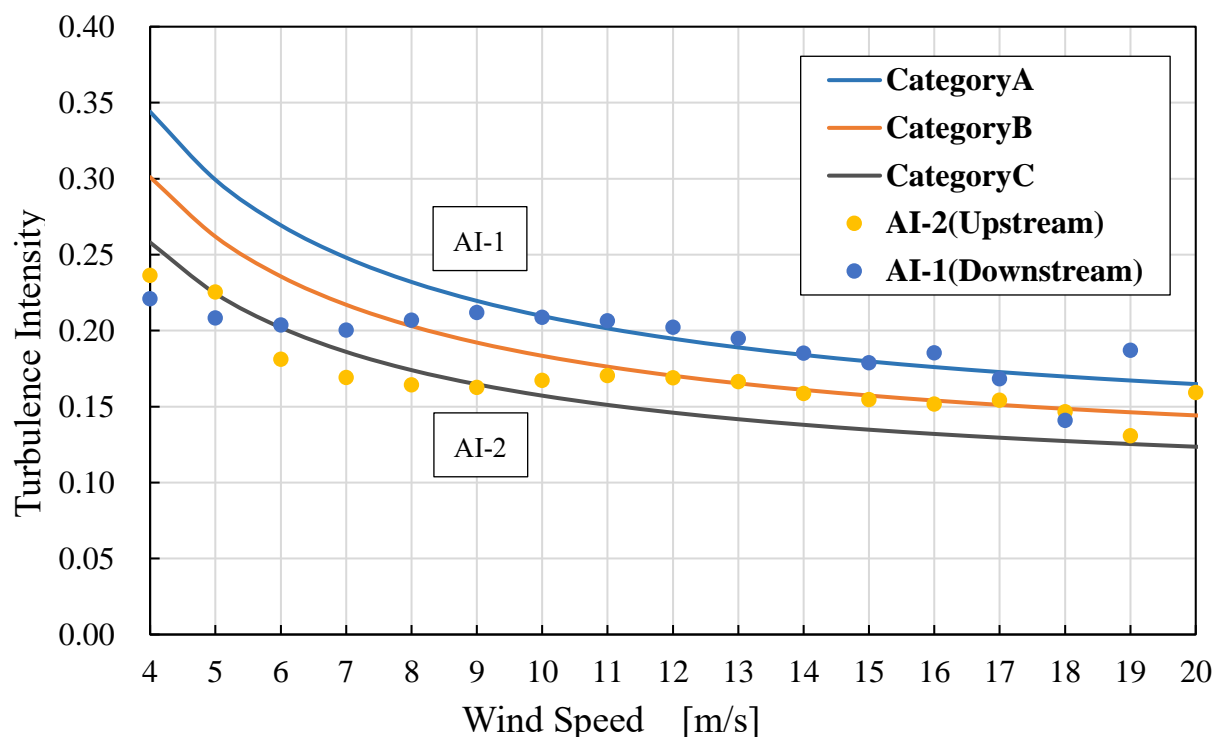


図 4.20 AI-2 および AI-1 の風速 BIN 別乱流強度

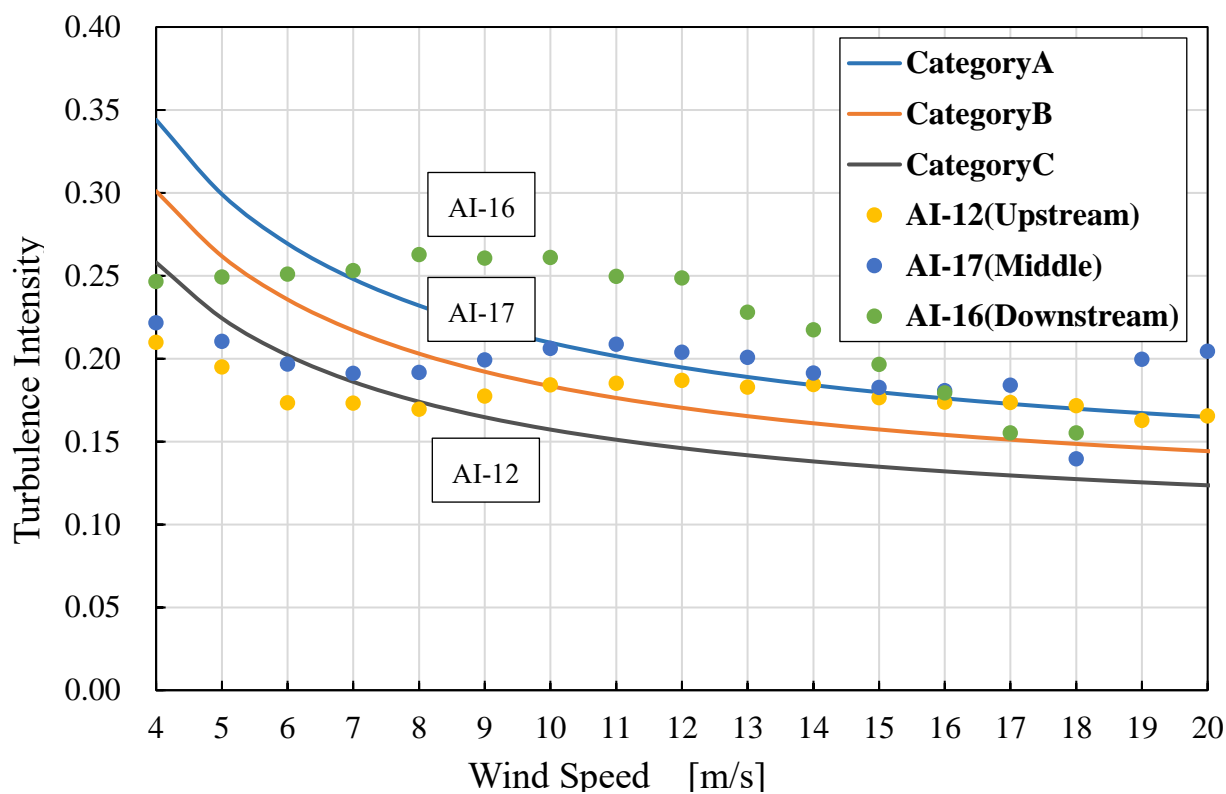


図 4.21 AI-12, AI-17 および AI-16 の風速 BIN 別乱流強度

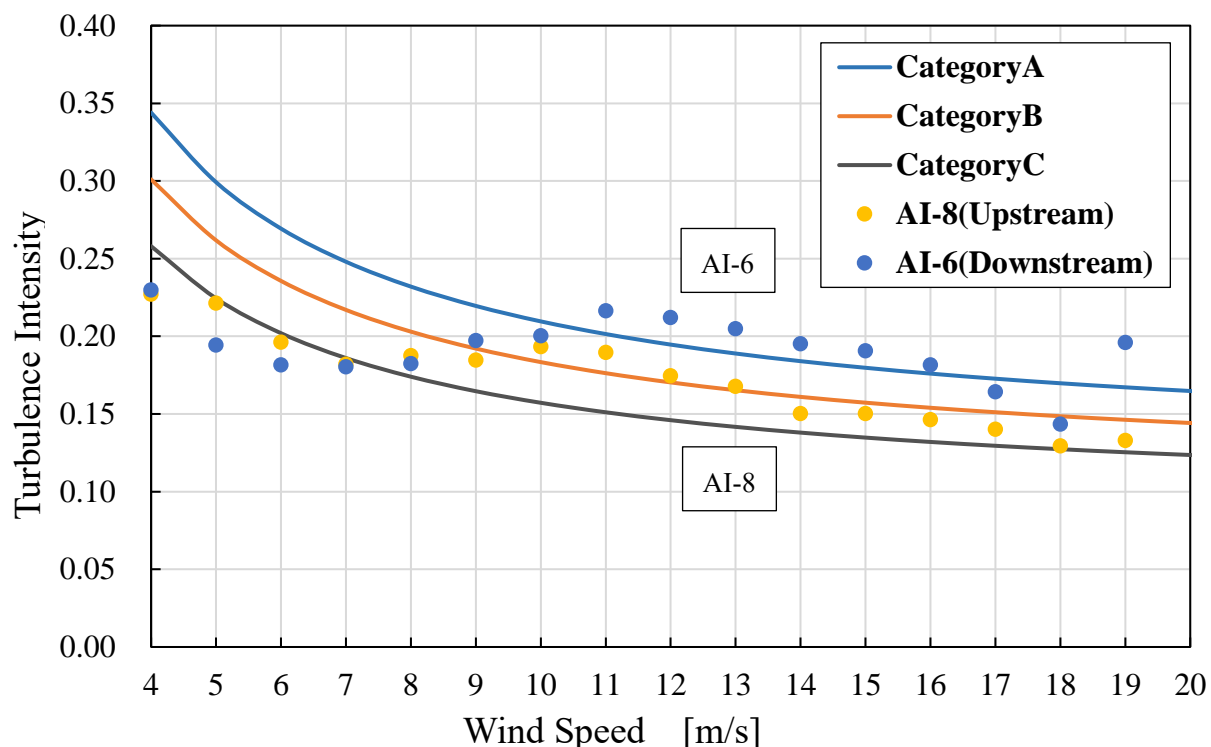


図 4.22 AI-8 および AI-6 の風速 BIN 別乱流強度

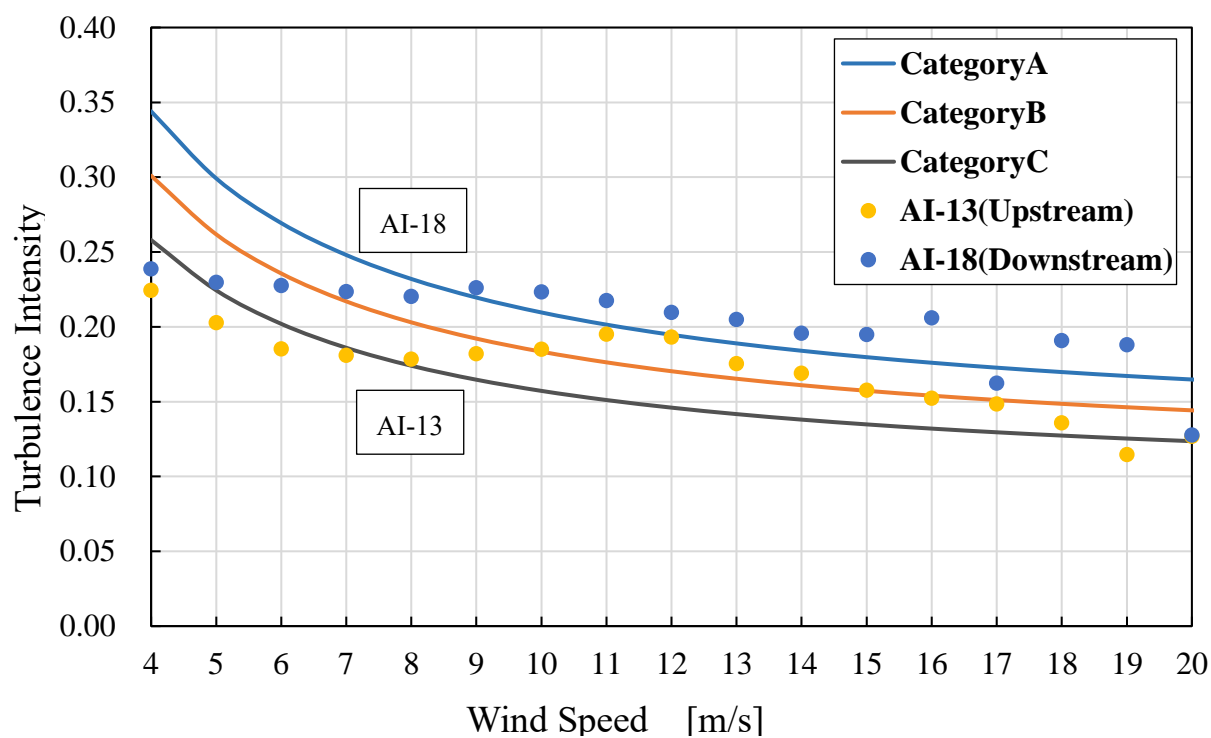


図 4.23 AI-13 および AI-18 の風速 BIN 別乱流強度

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、比較方位は本サイトの主風向である WNW 方位である。流入風速は本サイトの平均風速である 7m/s とした。また、図中に示した線は各メッシュ高さにおける流跡線である。以下にその結果を示す。

5.1 尾根による剥離風の影響

本節では、RIAM-COMPACT から得られた速度分布を可視化したデータをもとに、尾根により剥離した流れの考察を行う。また、着目した風車は 4.2.4 節と同じ AT-8 および AT-3 である。ロータ部は図中に赤色で示している。

5.1.1 AT-8 (尾根越え風が流入する風車)

図 5.1 および図 5.2 に、時間の異なった WNW 方位の AT-8 ロータ面シェーディング図および流跡線を示す。図中の流跡線は、AT-8 のロータ面上流側の各メッシュ高さの軌跡を示している。また、カラーは WNW 方向の風速成分を示し、図 5.1 は青色が最低風速の -0.58m/s を意味し、赤色が最高風速の 8.64m/s を意味している。図 5.2 は青色が最低風速の -2.28m/s を意味し、赤色が最高風速の 8.89m/s を意味している。2つの図より、尾根を越えた流れは非常に乱れており剥離流となっていることが分かる。図 5.1 の速度分布より AT-8 のロータ面下部では非常に遅い風が流入している。また、ロータ面上部では速い風が流入している。一方で図 5.2 ではロータ面全体で風速の大きな差は見受けられない。また、図 5.1 の地表付近の流跡線は尾根部から拡散していることが確認できる。しかしながら、図 5.2 での地表付近の流跡線は尾根部での拡散は見受けられなかった。

5.1.2 AT-3 (尾根越え風が流入する風車)

図 5.3 および図 5.4 に、時間の異なった WNW 方位の AT-3 ロータ面シェーディング図および流跡線を示す。図中の流跡線は、AT-3 のロータ面上流側の各メッシュ高さの軌跡を示している。また、カラーは WNW 方向の風速成分を示し、図 5.3 は青色が最低風速の -2.20m/s を意味し、赤色が最高風速の 8.69m/s を意味している。図 5.4 は青色が最低風速の -1.42m/s を意味し、赤色が最高風速の 8.85m/s を意味している。2つの図より、尾根を越えた流れは非常に乱れており剥離流となっていることが分かる。図 5.3 の速度分布より AT-3 のロータ面下部では非常に遅い風が流入している。また、ロータ面上部では速い風が流入している。一方で図 5.4 ではロータ面全体で風速の大きな差は見受けられない。また、図 5.3 の地表付近の流跡線はロータ面下部に流入していることが確認できる。しかしながら、図 5.4 での地

表付近の流跡線はロータ面上部に流入している。

5.1.3 尾根越えの風の乱流

表 5.1 は、尾根越えの風が流入する AT-8 と AT-3 のハブ高さにおける解析結果の風速の平均値、標準偏差および乱流強度をまとめたものである。また、尾根の上流に位置する AI-2 を比較対象として記載してある。AI-2 は、サイト内で解析方位 WNW の場合、最上流に位置し、剥離した風や上流側風車の後流を受けない風車である。

表より AT-8 のハブ高さの風速標準偏差は AI-2 に比べ高く、平均風速は低下する。よって、乱流強度は AI-2 より大きく、AT-8 の流入風は乱れていると考えられる。このことは、4.2.4 節で述べた結果と一致する。また、AT-3 の風速標準偏差は AI-2 に比べ非常に高く、平均風速も大幅な減少を示す。よって乱流強度は、非常に大きく、AT-3 の流入風は大きく乱れていると考えられる。これは、4.2.4 節で述べた結果と一致する。

以上より、尾根より下流の風車は剥離した流れの中で運転されていると考えられる。

表 5.1 風速、標準偏差および乱流強度まとめ

	風車号機名		
	AI-2	AT-3	AT-8
平均風速[m/s]	7.15	4.73	6.54
風速標準偏差[m/s]	0.69	1.45	1.13
乱流強度	0.10	0.31	0.17

5.2 後流の影響

本節では、RIAM-COMPACT から得られた流線図をもとに、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-12, AI-17 および AI-16, AI-8 および AI-6, AI-13 および AI-18 である。

また AI-8 および AI-6 以外の風車の組み合わせは、解析結果 4803 秒分の平均値で判断し、下流側風車の流入風を上流風車の後流の影響を確認できた。しかしながら AI-8 および AI-6 の風車の組み合わせでは、解析結果 4803 秒分の一部で後流の影響を確認した。

5.2.1 AI-2 (上流側) および AI-1 (下流側)

図 5.5 に WNW 方位の AI-2 のロータ面を通過した流跡線図を示す。図より 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。2 基の風車は標高差が少ない平坦地形に設置されている。そのため AI-2 の後流が AI-1 に流入している。

また、図 5.6 に AI-2 周囲にある AI-3 および AI-5 のロータ面を通過した流跡線図を示す。図は流れを上流側 (WNW 方位) から見た場合である。図より WNW 方位の風が流入する場合、AI-3 および AI-5 を通過した流れは AI-1 に干渉していないと考えられる。

以上から、AI-1 は AI-2 だけの後流の影響を受けていると考えられる。これは 4.3.2 節で述べた内容と一致している。

5.2.2 AI-12 (上流側) , AI-17 (中間) および AI-16 (下流側)

図 5.7 に WNW 方位の AI-12 および AI-17 のロータ面を通過した流跡線図を示す。また、図 5.8 に図 5.7 を上空から見た場合の流跡線図を示す。図より AI-12 および AI-17 のロータ面を通過した後流が AI-16 に流入していることが確認できる。これは 4.3.2 節で述べた、AI-16 のロータ面に流入する風の乱流強度は上流側風車と比較して高くなっている要因であると考えられる。また AI-12 のロータを通過した流れは AI-17 のロータ面も通過していると考えられる。これも、4.3.2 節で述べた AI-17 のロータ面に流入する風の乱流強度は AI-2 と比べて高くなっている要因であると考えられる。

5.2.3 AI-8 (上流側) および AI-6 (下流側)

4.3.2 節で「AI-6 の乱流強度が定格風速 13m/s より速い風速域においても高いままである。これは、後流の影響だけでなく地形による影響が大きいためであると推測される」と述べた。本節では、この地形および後流の影響に関して考察を行う。

図 5.9 に地形の影響で風の流れが迂回しない場合の WNW 方位の AI-8 上流の流跡線図を示す。図より AI-8 上流の流れは、谷の影響で AI-8 を避けるように流れている。また図 5.10 に図 5.9 と同時刻の AI-8 のロータ面を通過した流れの流跡線図を示す。図 5.9 および図 5.10 より迂回流れが発生していない場合、AI-6 に AI-8 のロータ面を通過した流れが流入しないと考えられる。

また図 5.11 に風の流れが迂回する場合の WNW 方位の AI-8 上流の流跡線図を示す。図より谷の影響で流れが迂回し、AI-6 側にそれていると考えられる。また図 5.12 に図 5.11 と同時刻の AI-8 のロータ面を通過した流れの流跡線図を示す。図 5.13 に図 5.12 を上空から見た場合の AI-8 のロータ面を通過した流跡線図を示す。図 5.11 から図 5.13 より迂回流れが発生する場合、AI-6 に AI-8 のロータ面を通過した流れが流入すると考えられる。

以上より、AI-8 のロータ面を通過した流れの一部は AI-6 のロータ面に流入している。また、地形により AI-6 周辺の風の流れは乱れていると考えられる。

5.2.4 AI-13 (上流側) および AI-18 (下流側)

図 5.14 に上流側から見た WNW 方位の AI-13 のロータ面を通過した流跡線図を示す。また、図 5.15 に図 5.14 を上空から見た場合の流跡線図を示す。図より AI-13 のロータ面を通過した流れは、AI-18 に流入していると考えられる。4.3.2 節で述べた、AI-18 の乱流強度が AI-13 より高いのは、AI-13 の後流が AI-18 に流入しているためであると考えられる。

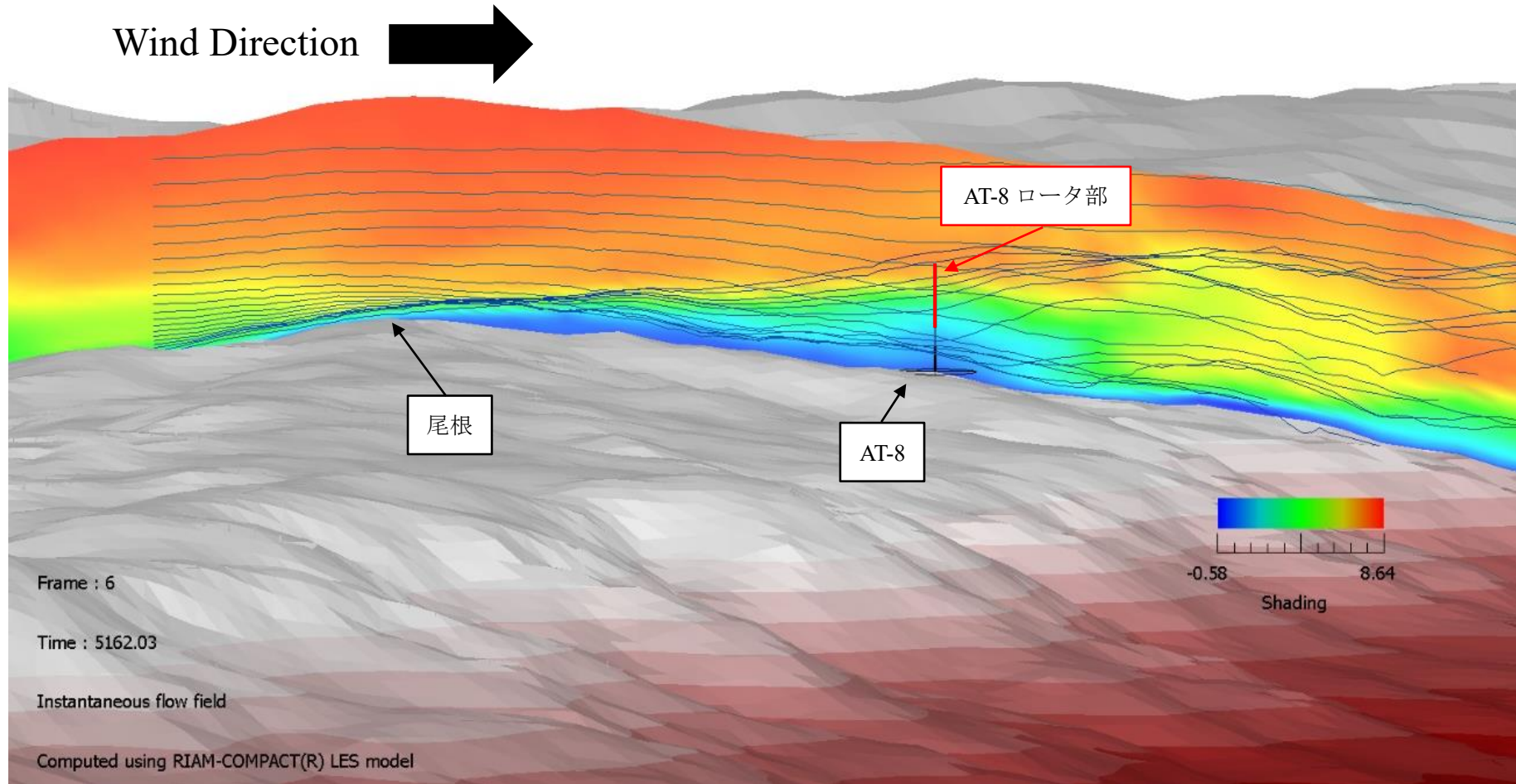


図 5.1 WNW 方位の AT-8 ロータ面シェーディング図および流跡線

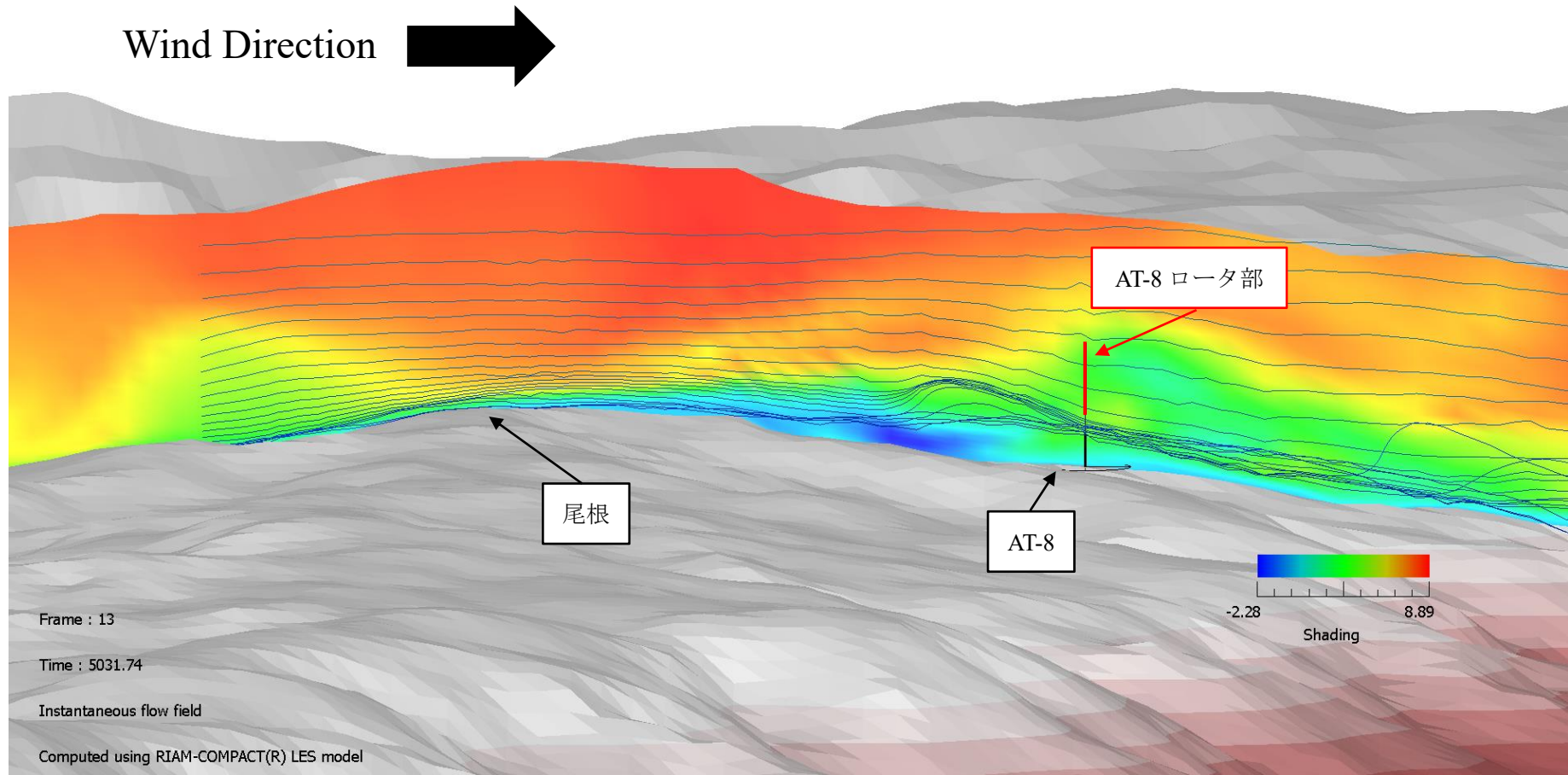


図 5.2 WNW 方位の AT-8 ロータ面シェーディング図および流跡線

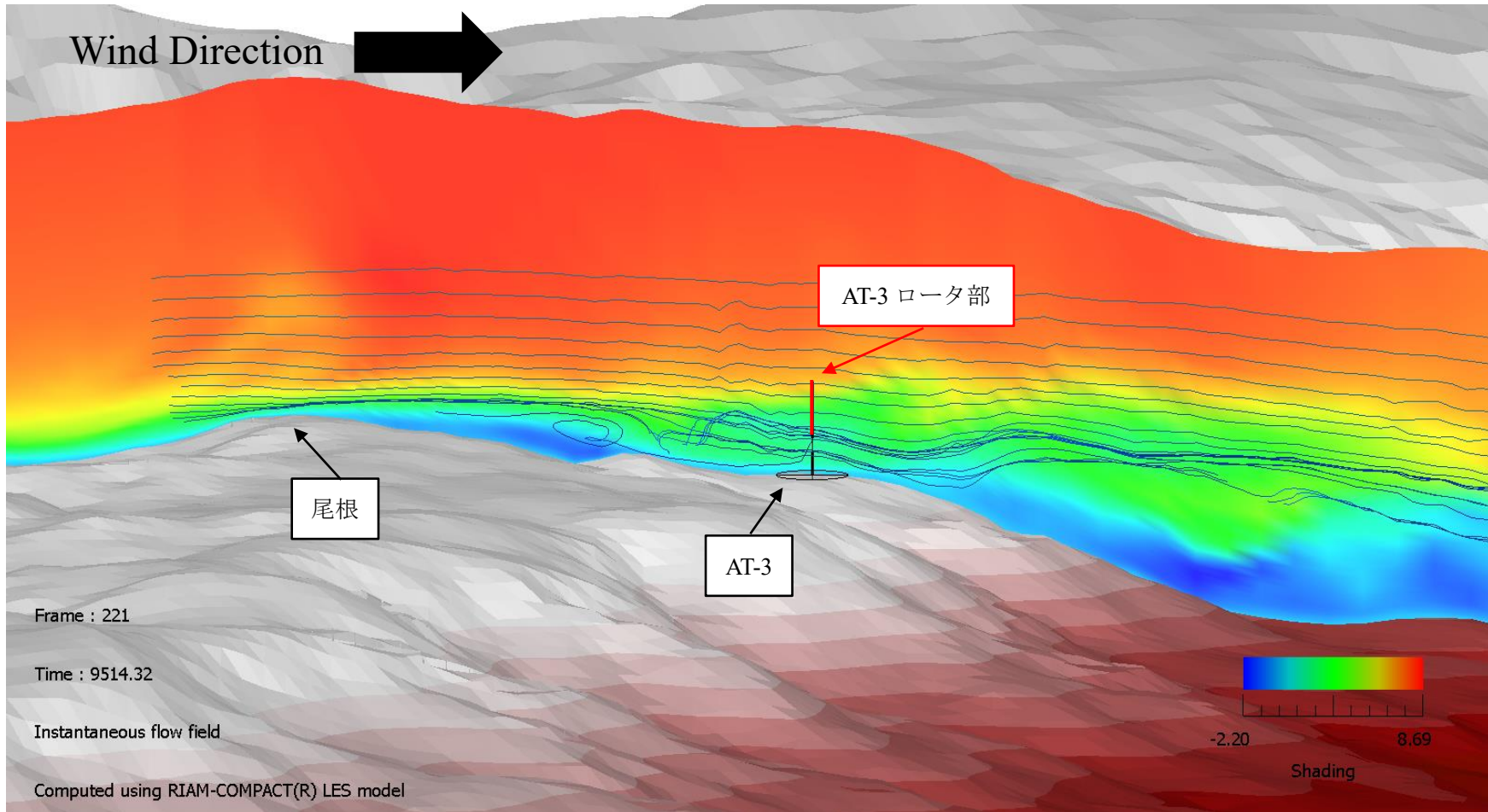


図 5.3 WNW 方位の AT-3 ロータ面シェーディング図および流跡線

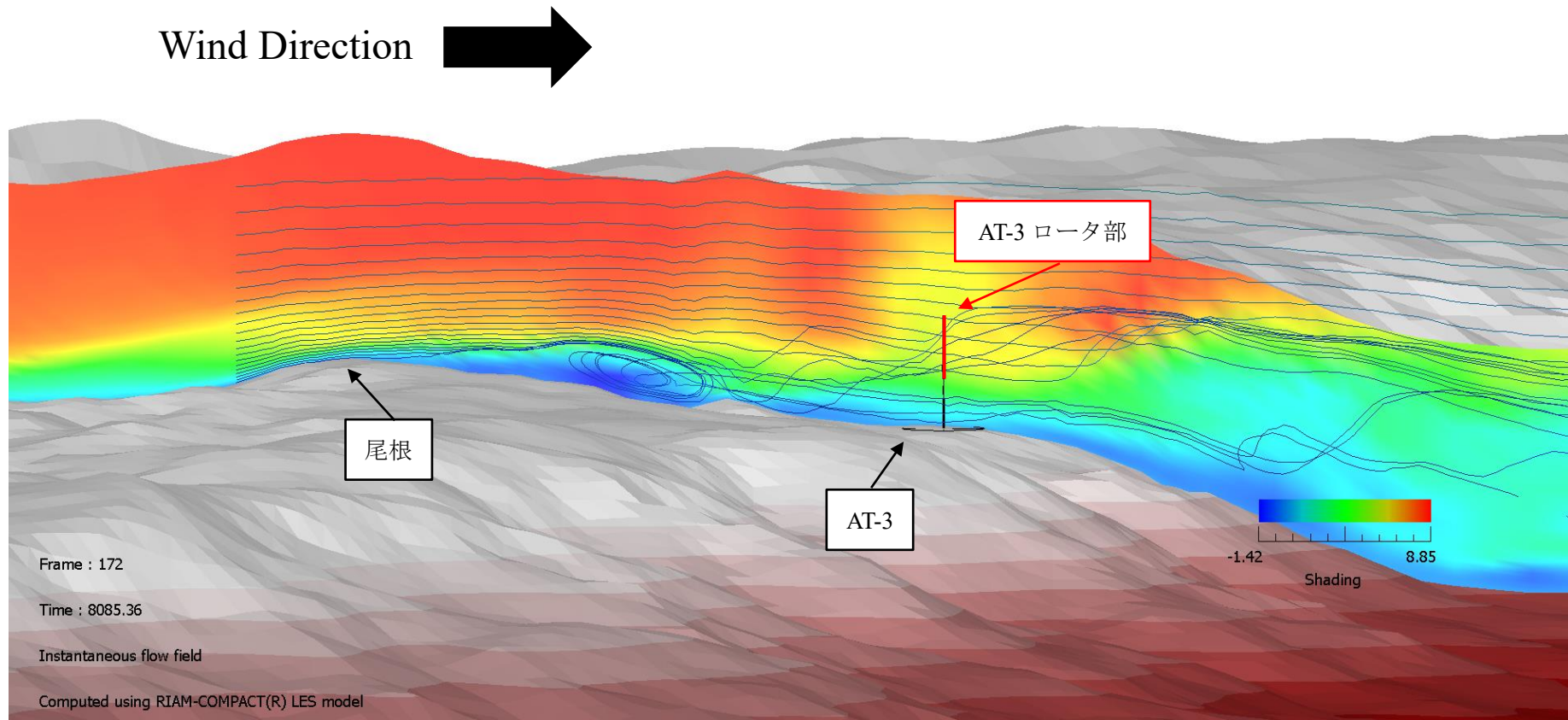


図 5.4 WNW 方位の AT-3 ロータ面シェーディング図および流跡線

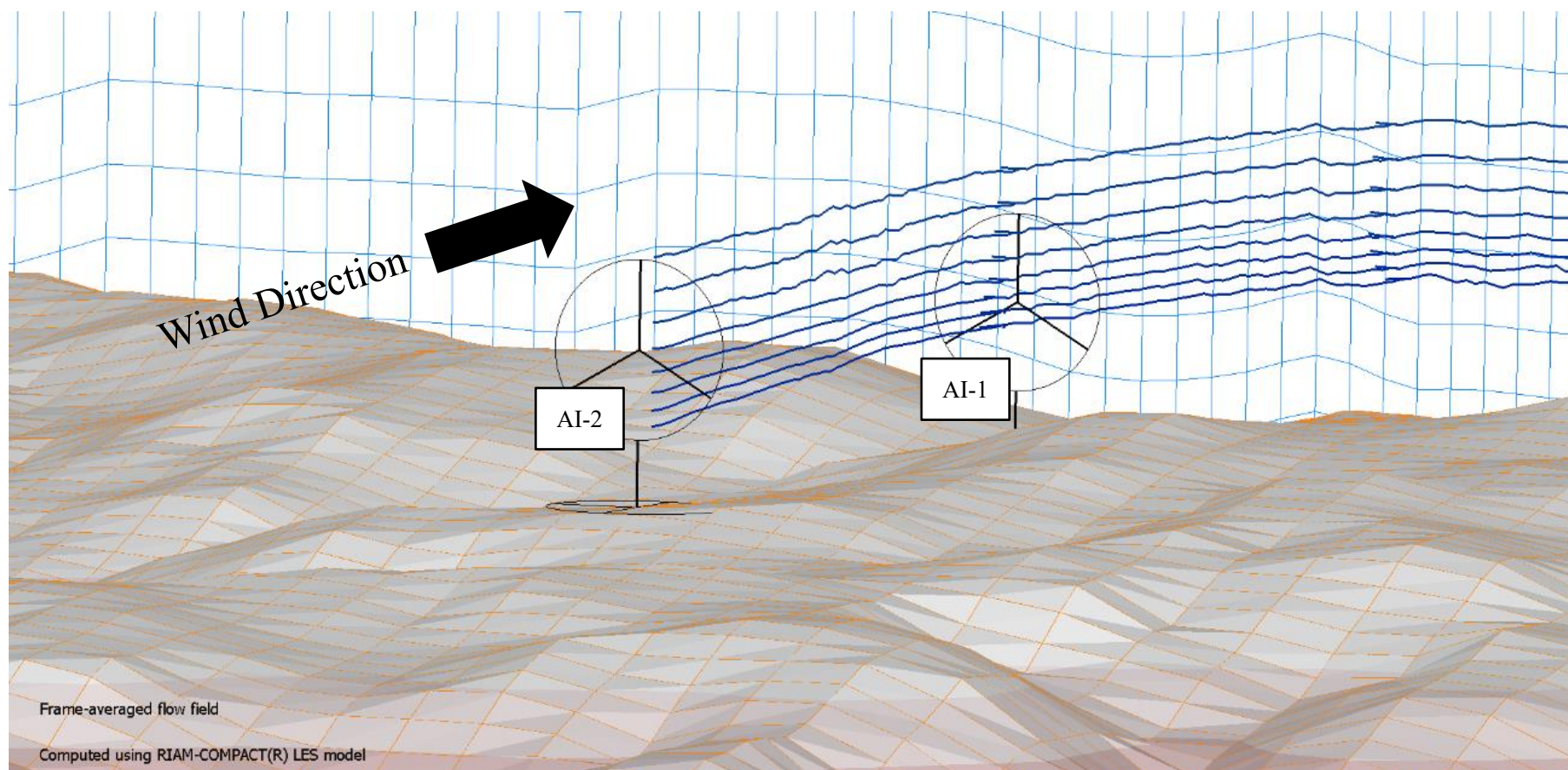


図 5.5 WNW 方位の AI-2 のロータ面を通過した流跡線図

第5章 RIAM-COMPACT による解析結果

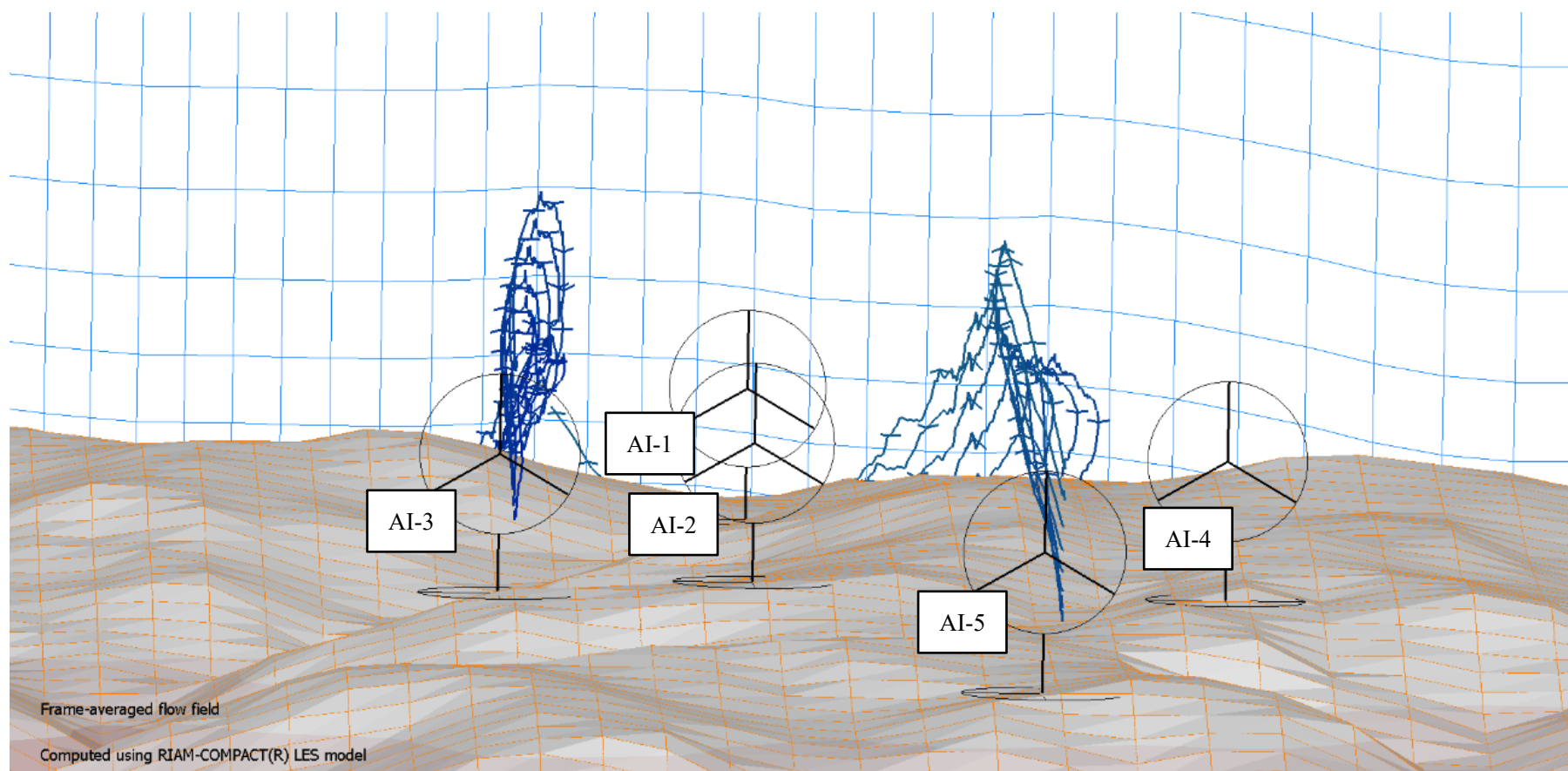


図 5.6 WNW 方位の AI-3 および AI-5 のロータ面を通過した流跡線図

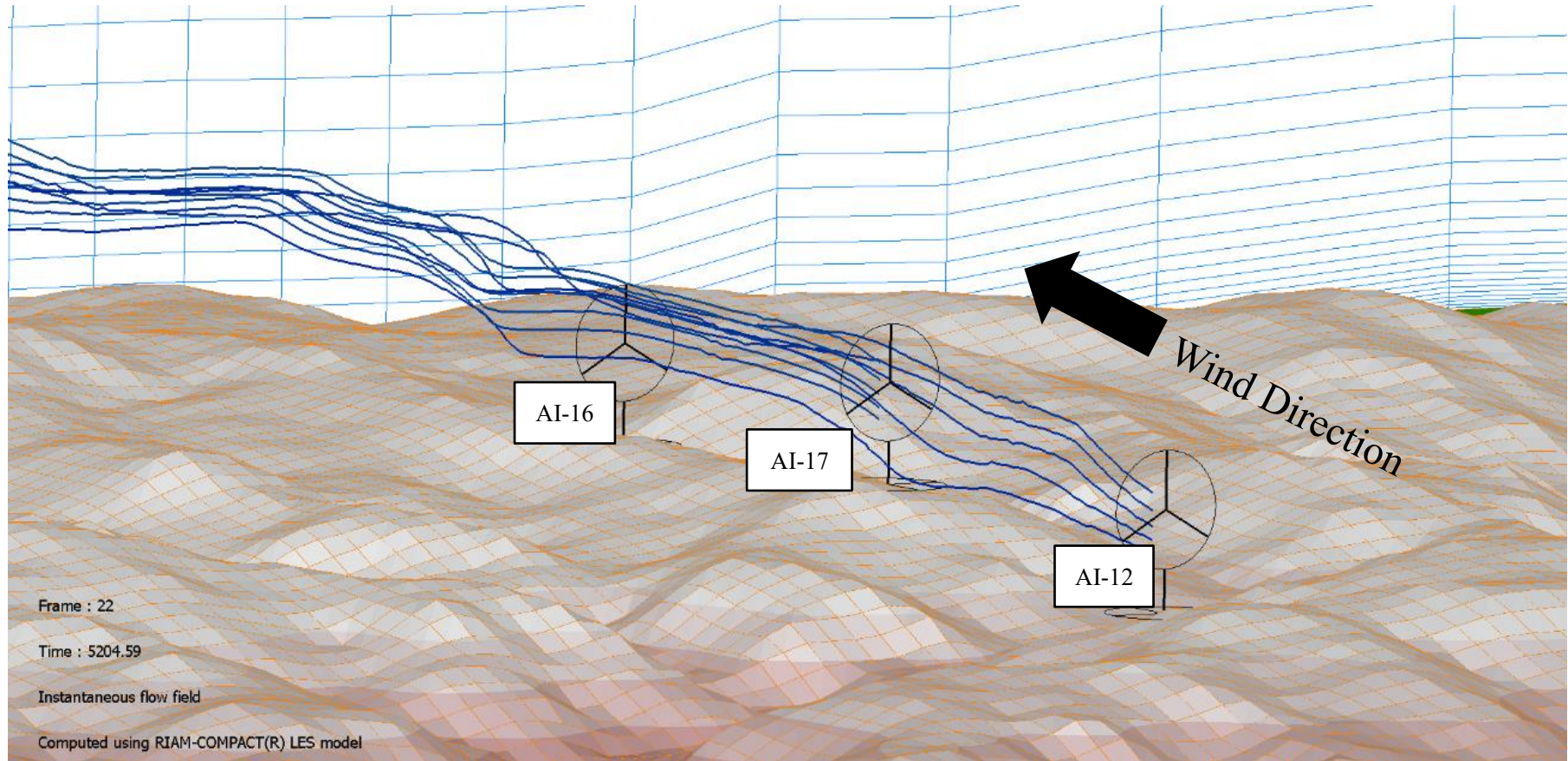


図 5.7 WNW 方位の AI-12 および AI-17 のロータ面を通過した流跡線図

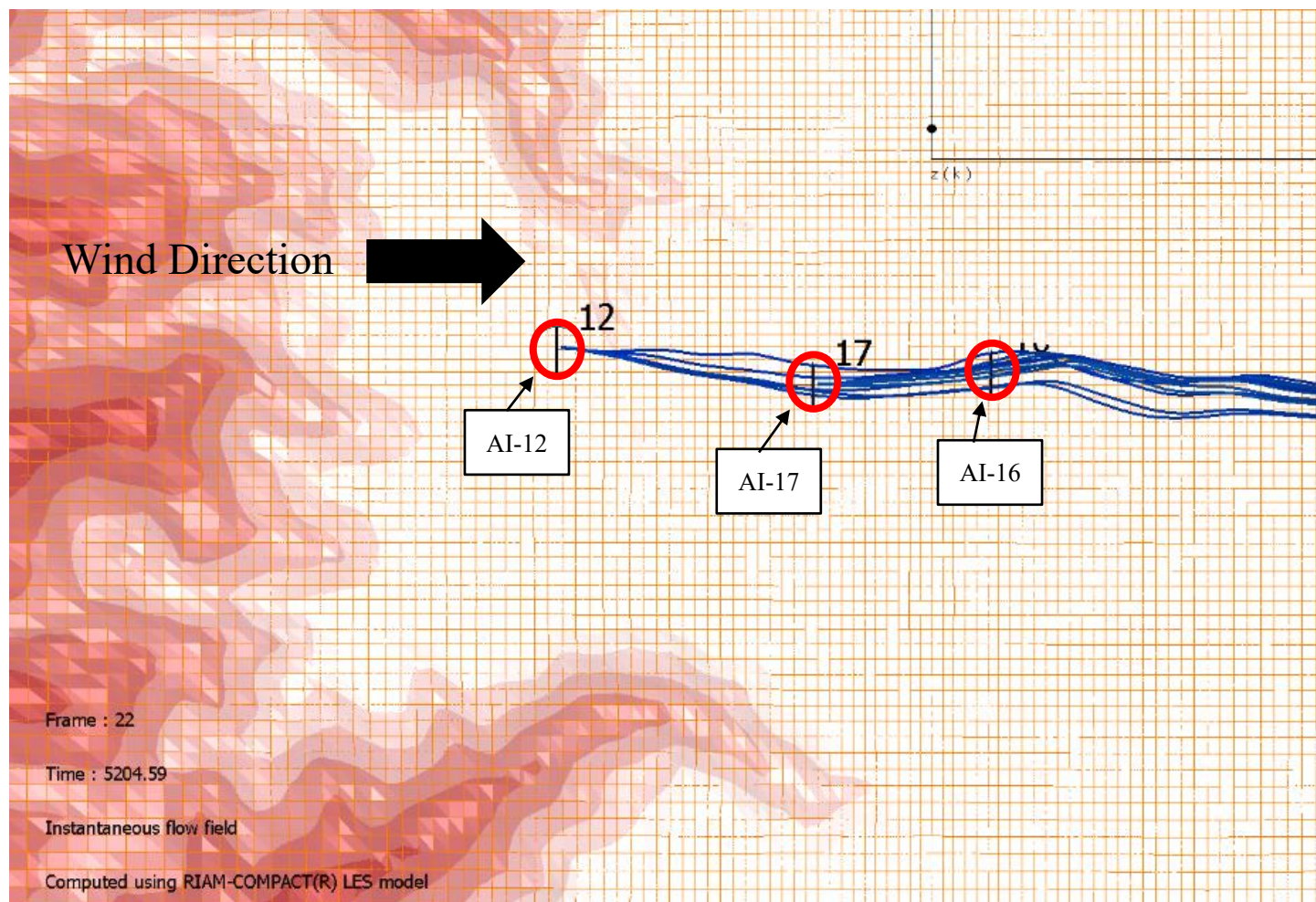


図 5.8 図 5.7 を上空から見た場合の AI-12 および AI-17 のロータ面を通過した流跡線図

第5章 RIAM-COMPACT による解析結果

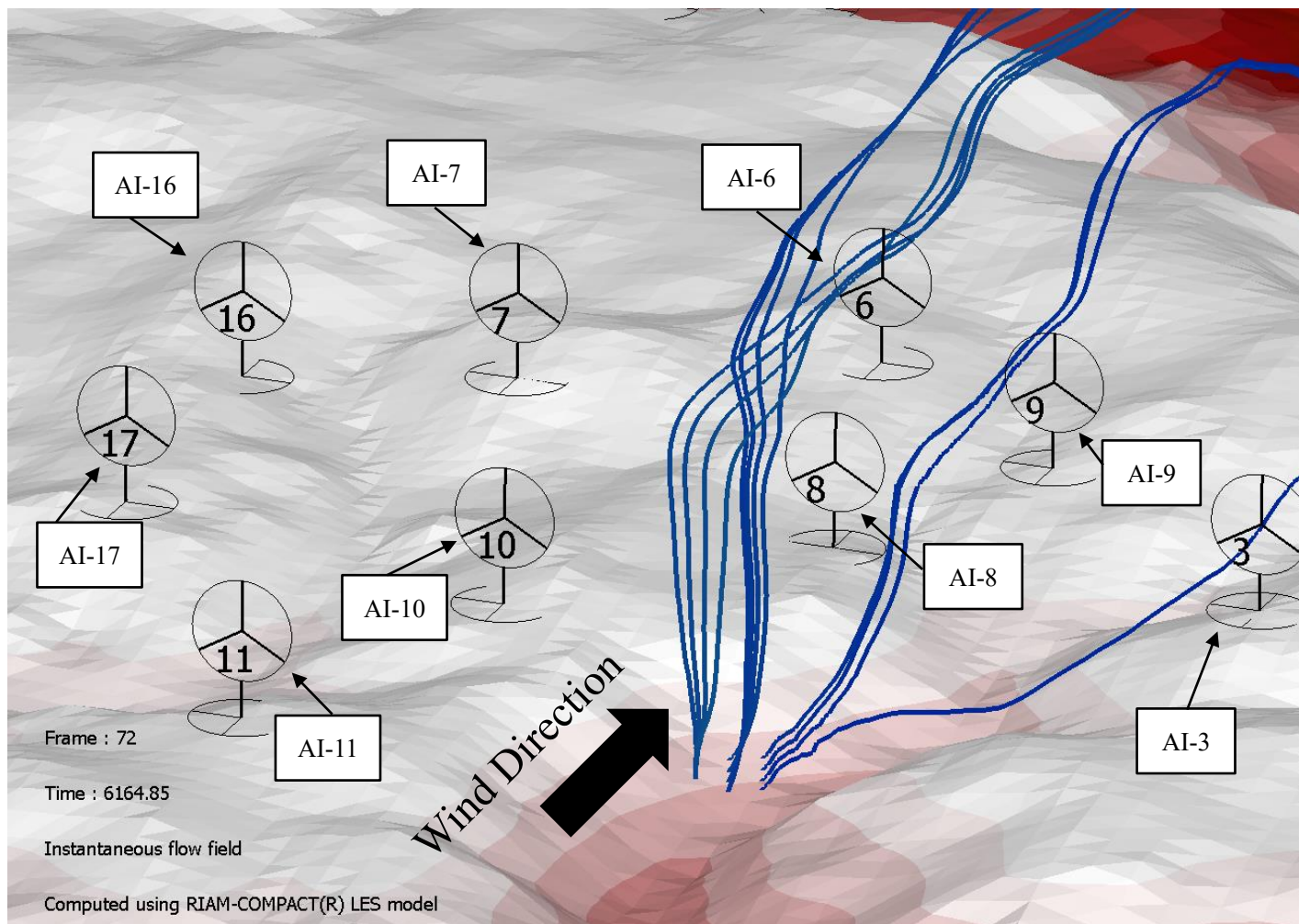


図 5.9 WNW 方位の AI-8 上流の流跡線図 (迂回しない)

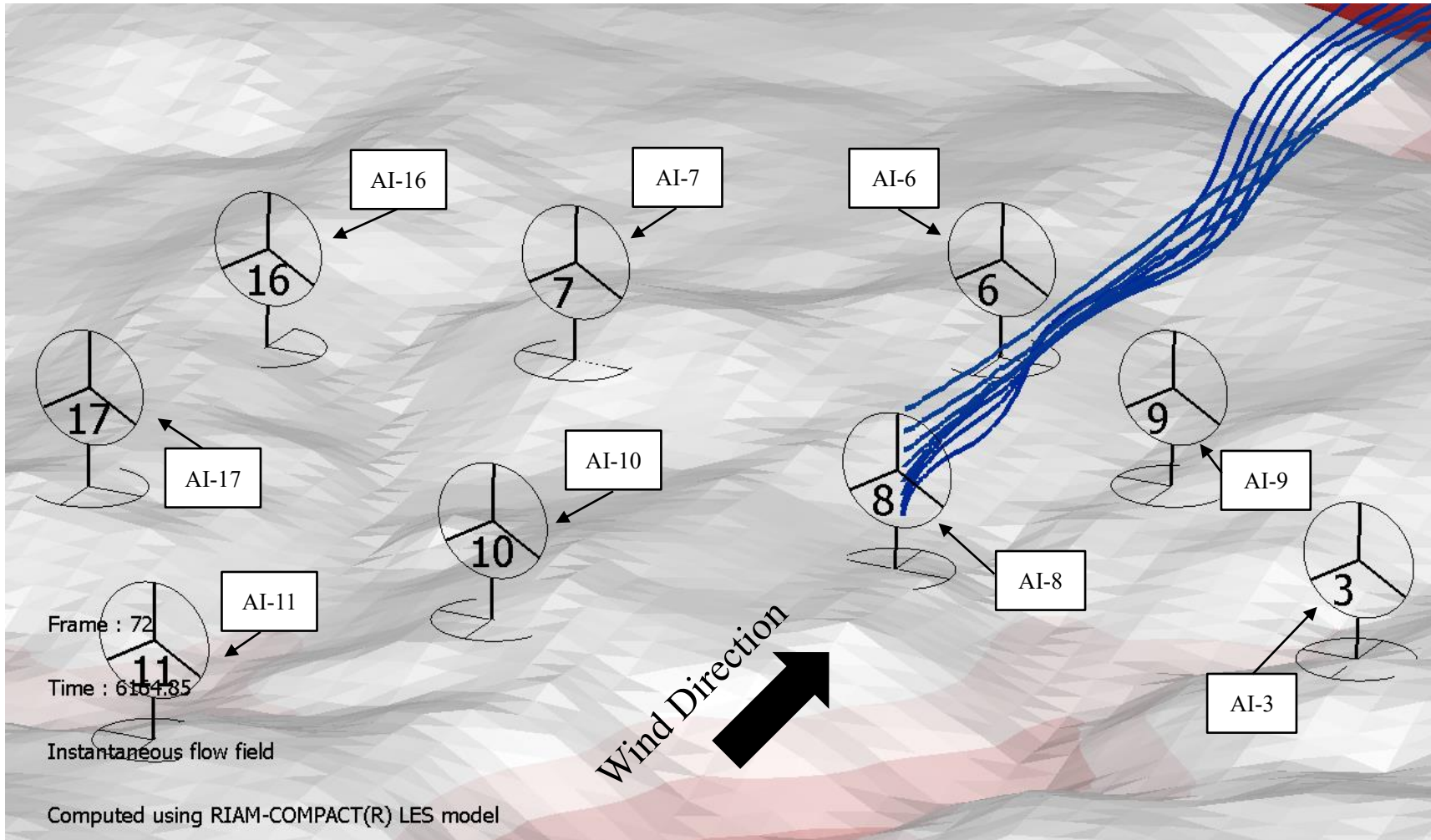


図 5.10 WNW 方位の AI-8 のロータ面を通過した流跡線図 (迂回しない)

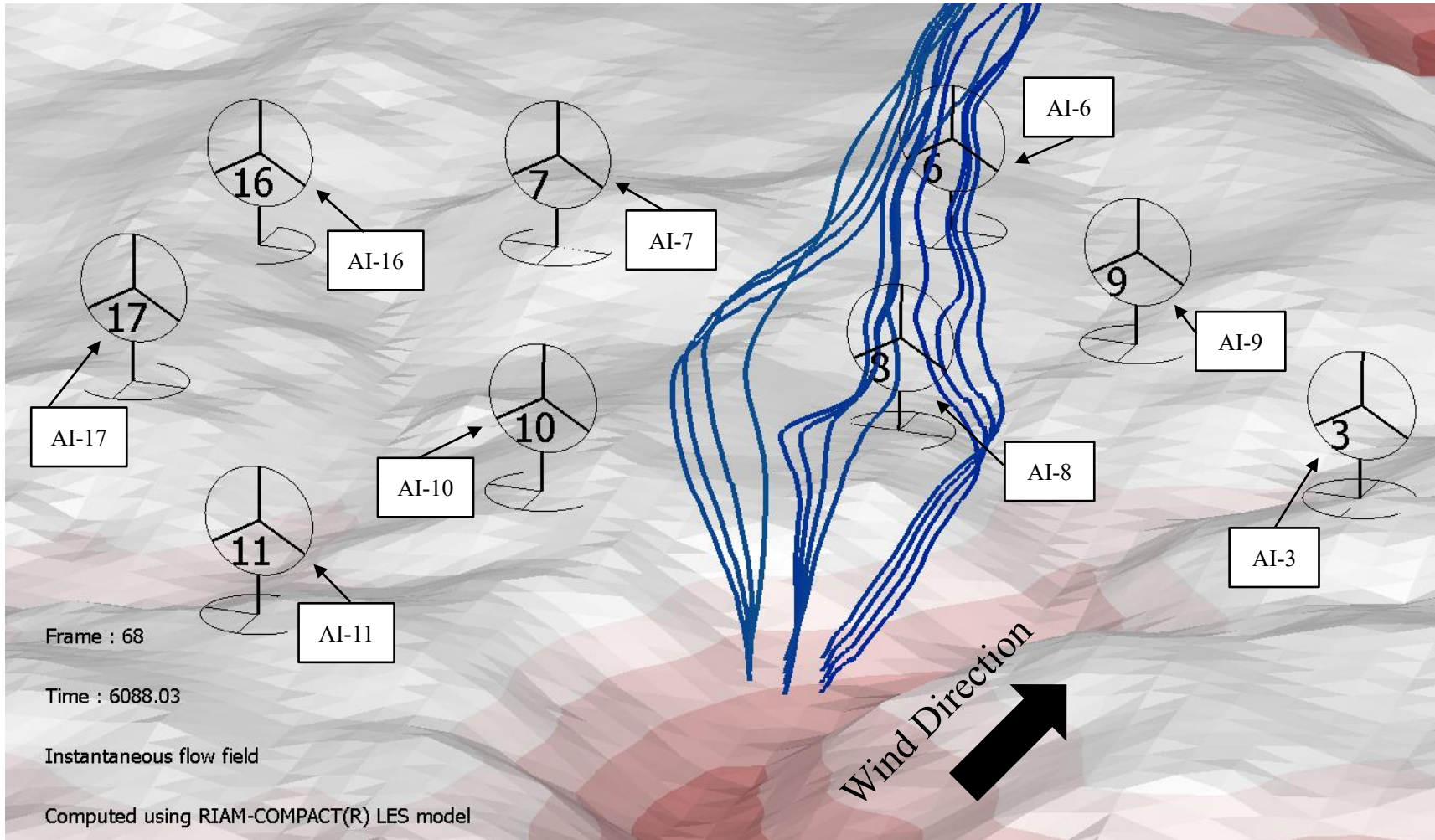


図 5.11 WNW 方位の AI-8 上流の流跡線図 (迂回する)

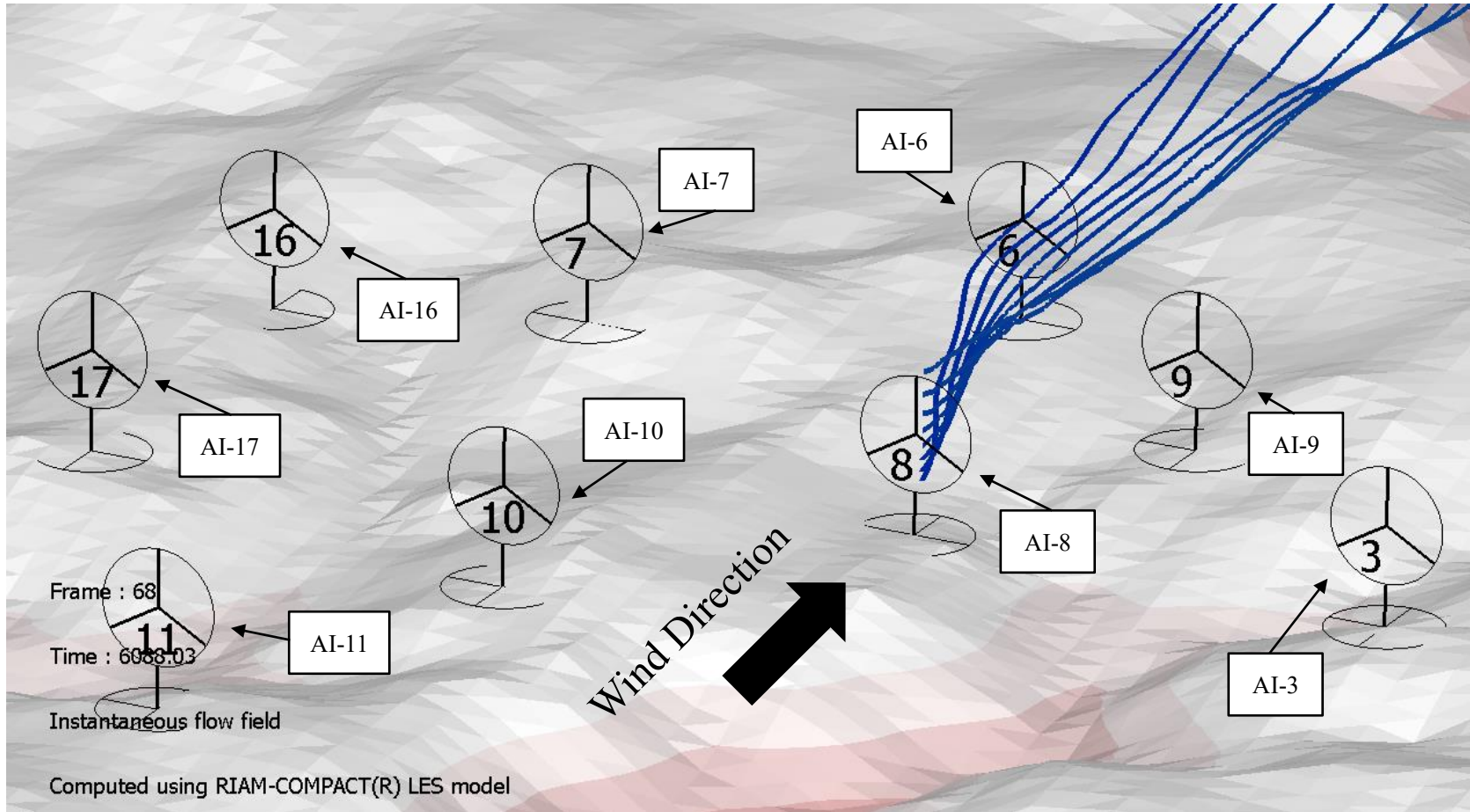


図 5.12 WNW 方位の AI-8 のロータ面を通過した流跡線図 (迂回する)

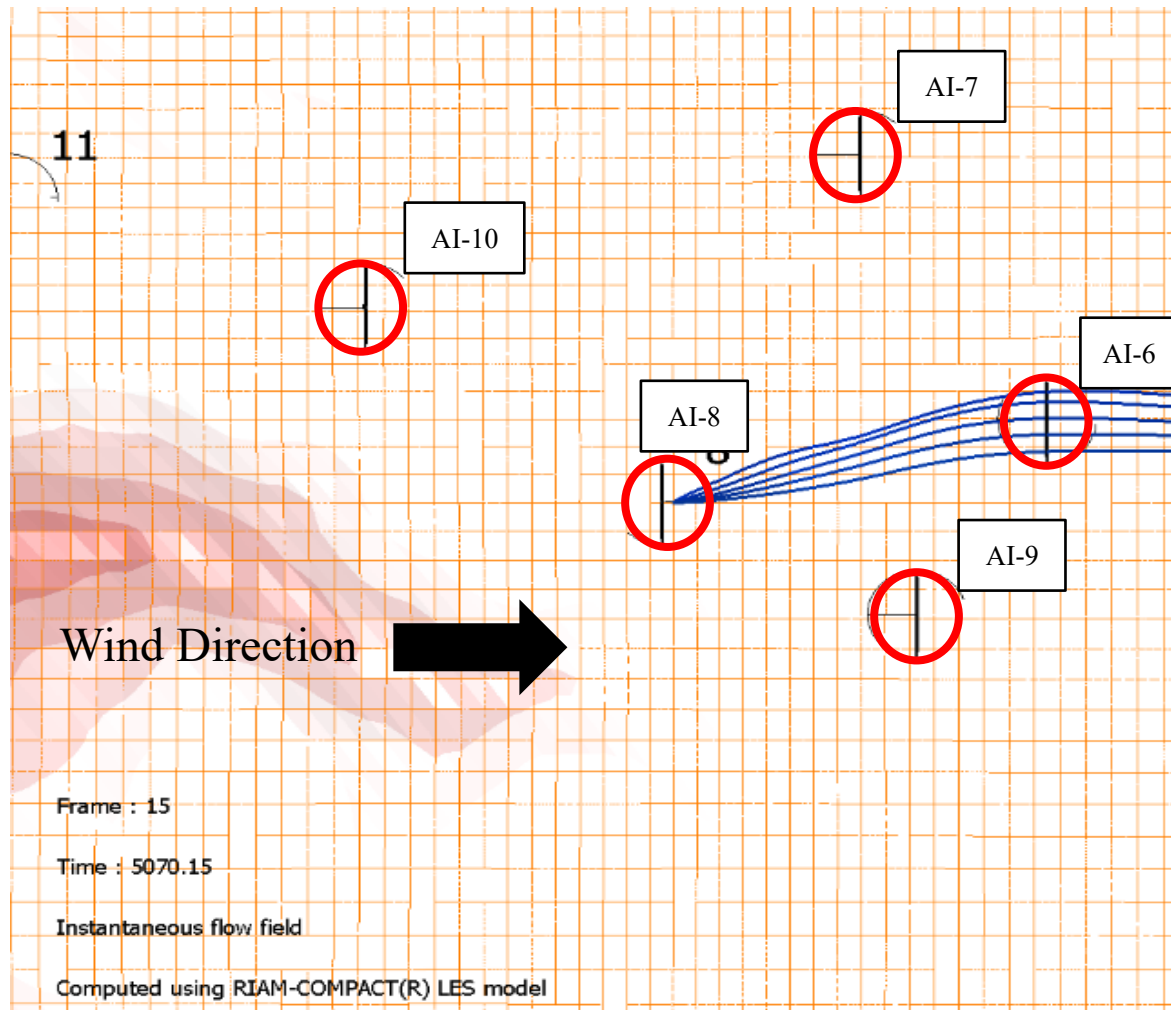


図 5.13 図 5.12 を上空から見た場合の AI-8 のロータ面を通過した流跡線図

第5章 RIAM-COMPACT による解析結果

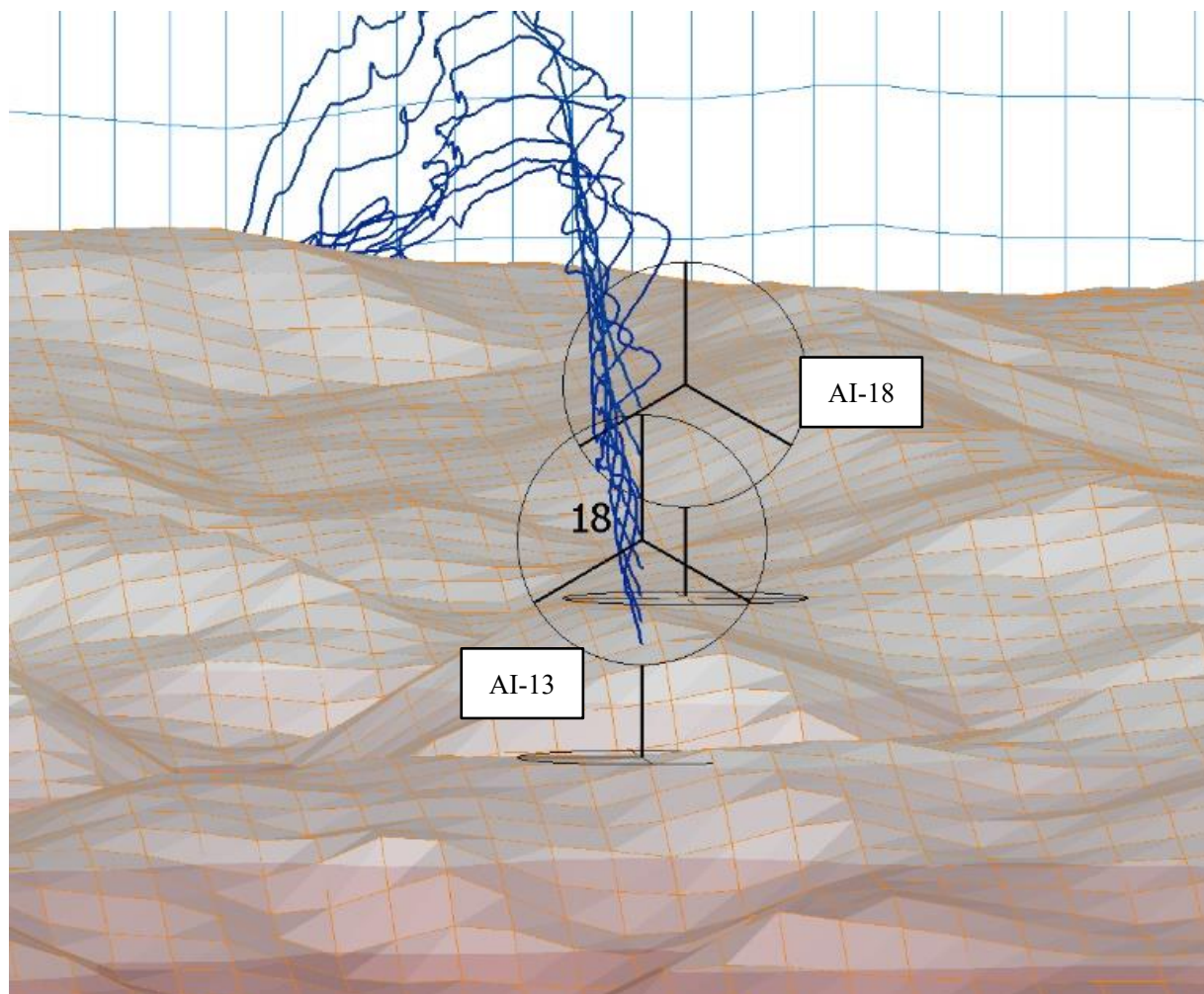


図 5.14 上流側から見た WNW 方位の AI-13 のロータ面を通過した流跡線図

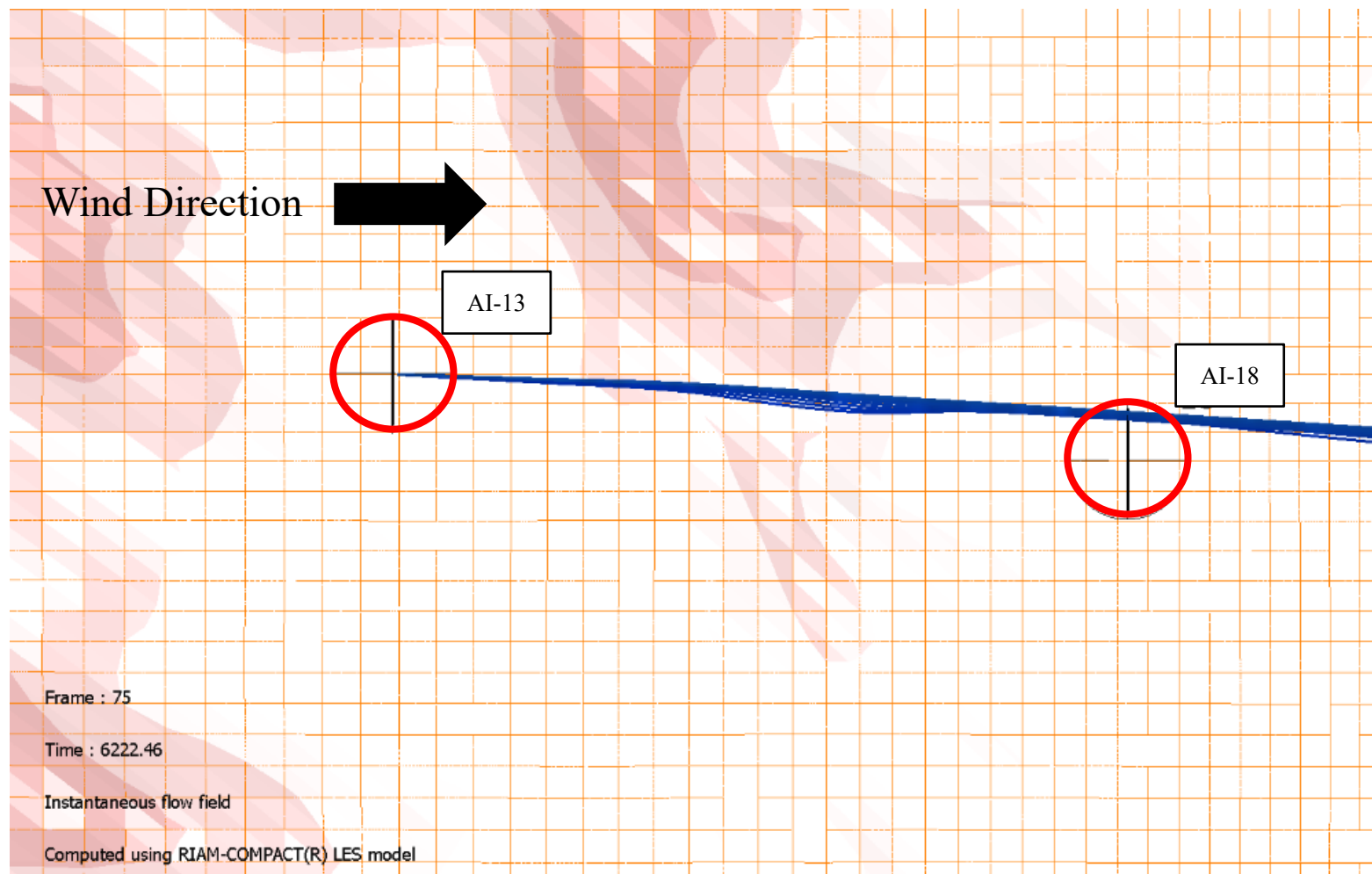


図 5.15 図 5.14 を上空から見た場合の AI-13 のロータ面を通過した流跡線図

第 6 章 三杯式風速計の校正試験

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。風洞内で吹上風や吹下風を模擬するために、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。

6.1 参照ピトー管および測定部の動圧の関係

本節では、風洞に取り付けられている参照ピトー管と測定部の動圧を比較し補正する方法について述べる。測定部は参照ピトー管から 575mm 離れている (図 3.14 小型風洞測定部 (側面図) を参照)。三杯式風速計が取り付けられる位置にピトー管を設置し、動圧の関係を考察した。測定位置は三杯式風速計のカップ中心およびカップ部の両サイドの計 3 点である。また、図 6.1 に三杯式風速計上面図を示す。図中の赤丸部に測定位置を示す。測定位置は、風洞気流に対して垂直となるように移動させた。図中の A 点がカップ部左サイド (Left), B 点がカップ中心 (Center), C 点がカップ部右サイド (Right) の計測位置となっている。

図 6.2 に A 点での計測結果、図 6.3 に B 点での計測結果、図 6.4 に C 点での計測結果を示す。それぞれの図は縦軸に風洞に取り付けられたピトー管の動圧、横軸に A, B, C の各点での動圧を取っている。また、各データの動圧の近似式は以下の表 6.1 に示す。

測定結果より、風洞に取り付けられたピトー管は測定部より約 2% 動圧が高くなった。また、測定部両サイド (A 点と C 点) で動圧差は 0.17% となっており、三杯式風速計に影響はないと判断できる。以上の結果から、6.3 節以降のデータは本節の測定結果を用いて補正する。

表 6.1 動圧の近似式

計測位置	近似式
Left(A)	$y = 1.0222x$
Center(B)	$y = 1.0228x$
Right(C)	$y = 1.0239x$

6.2 ナセル搭載三杯式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 6.5 に実験結果を示す。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。また近似曲線式は $y = 1.0243x$ で表される。これは風速計が風洞風速より約 2.4% 高く風速を見積もっている。

6.3 吹上げおよび吹下げ風を用いた校正試験

本節では、吹上風および吹下風を模擬するために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 6.6 に傾き角 -10° 、 -5° 、 0° 、 5° 、 10° 各々の実験結果を示す。グラフ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。また各々の風速の近似式は以下の表 6.2 にまとめる。表から風速計は吹下風を受ける傾き角 -10° 以外で、真値に近い風速を示した。傾き角が 5° と -5° の時で真値より約 1% 高く風速を評価している。

図 6.7 に傾き角が -10° 、 0° 、 10° のみの実験結果を示す。グラフ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。図から傾き角 10° の吹上風となる場合に、真値とのずれが 1% 未満となり風速を精度よく評価した。一方で傾き角が -10° の吹下風となる場合には真値と比較し 10% ほど風速を高く風速を評価した。

4.2.3 節で吹下風を受ける場合に発電量がメーカ公表値を上回っていた。しかしながら、本章の校正結果を考慮すると吹下風を受ける場合にさらに多くの発電量がメーカ公表値を上回る可能性がある結果となった。そのため、今後の課題としてナセル形状やナセルに取付けられている航空障害灯が風速計に及ぼす影響を考察し、風速補正方法を確立する必要がある。

表 6.2 風速の近似式

傾き角	近似式
-10°	$y = 1.0977x$
-5°	$y = 1.0105x$
0°	$y = 1.0243x$
5°	$y = 1.0145x$
10°	$y = 1.0037x$

6.4 今後の課題

6.2 節および 6.3 節より、ナセルに搭載されている三杯式風速計は吹上風で真値に近い値を示し、吹下風で真値より高い値を示すことが検証された。しかしながら、今回の実験では傾き角を 5 条件で行っているため、より詳しく吹上風および吹下風の影響を考察するためには条件を増やす必要があると考えられる。また、4.2.3 節より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ことが確認されており、今回の実験結果も考慮すると、吹下風において風速階級別発電量がさらに大きくなる結果となった。この要因として、ナセル本体もしくは航空障害等の影響が考えられる。そのため引き続き今後の課題として検証していく必要がある。

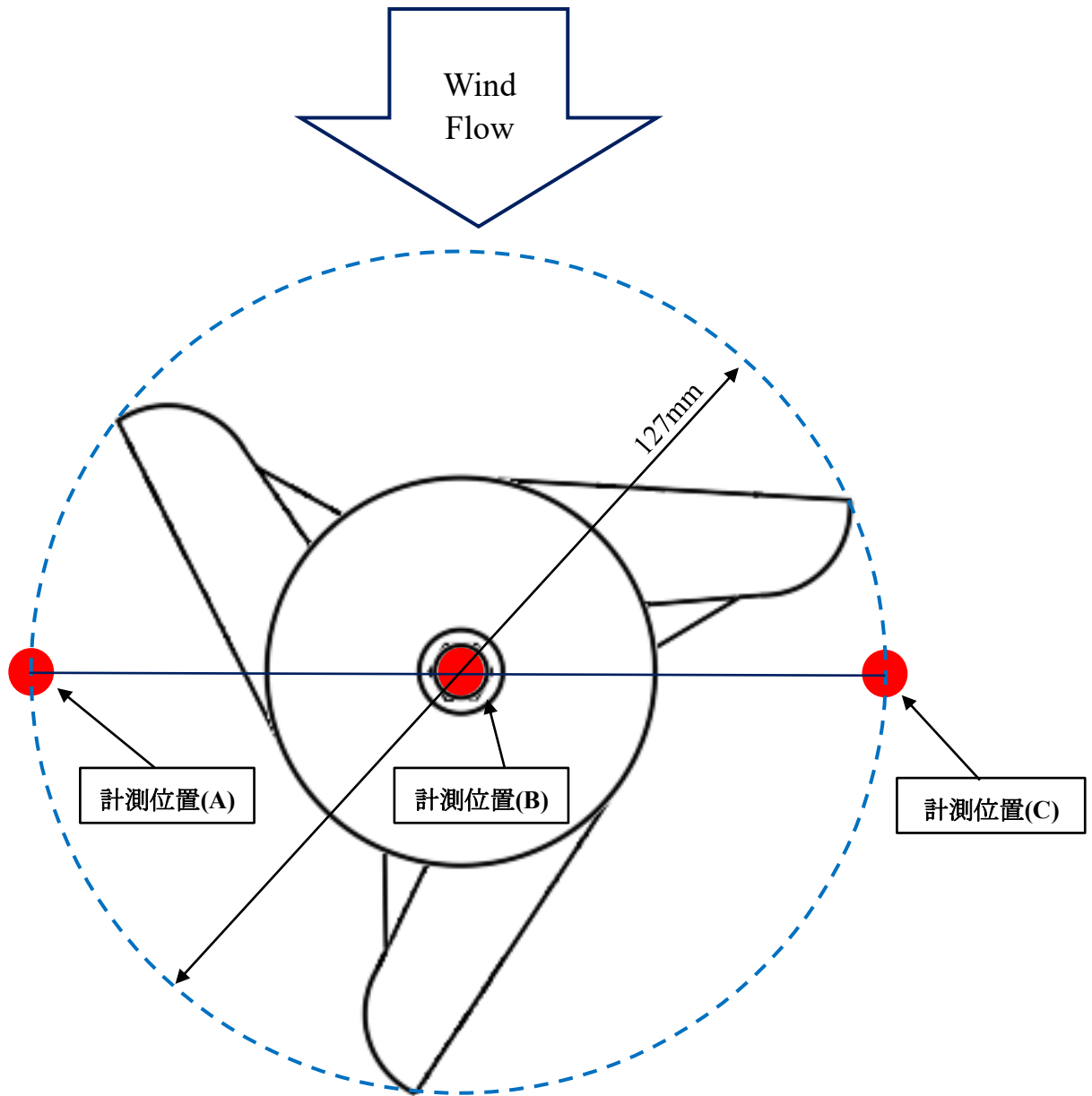


図 6.1 三杯式風速計上面図

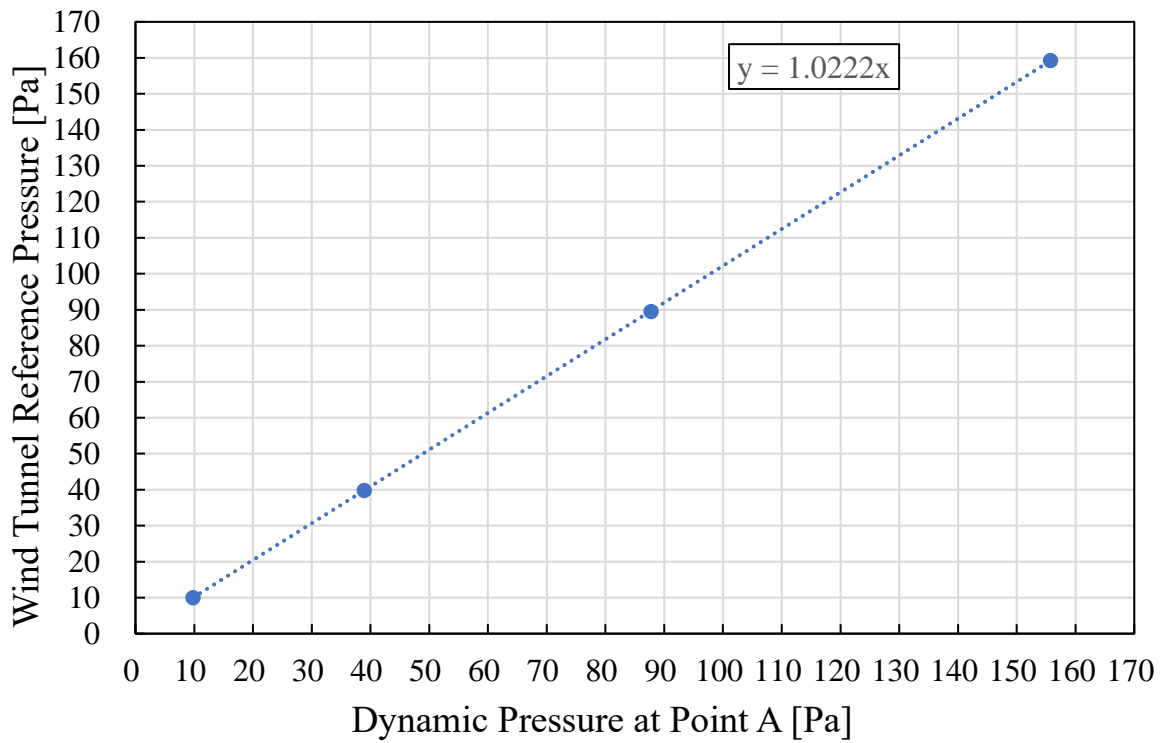


図 6.2 A 点での計測結果

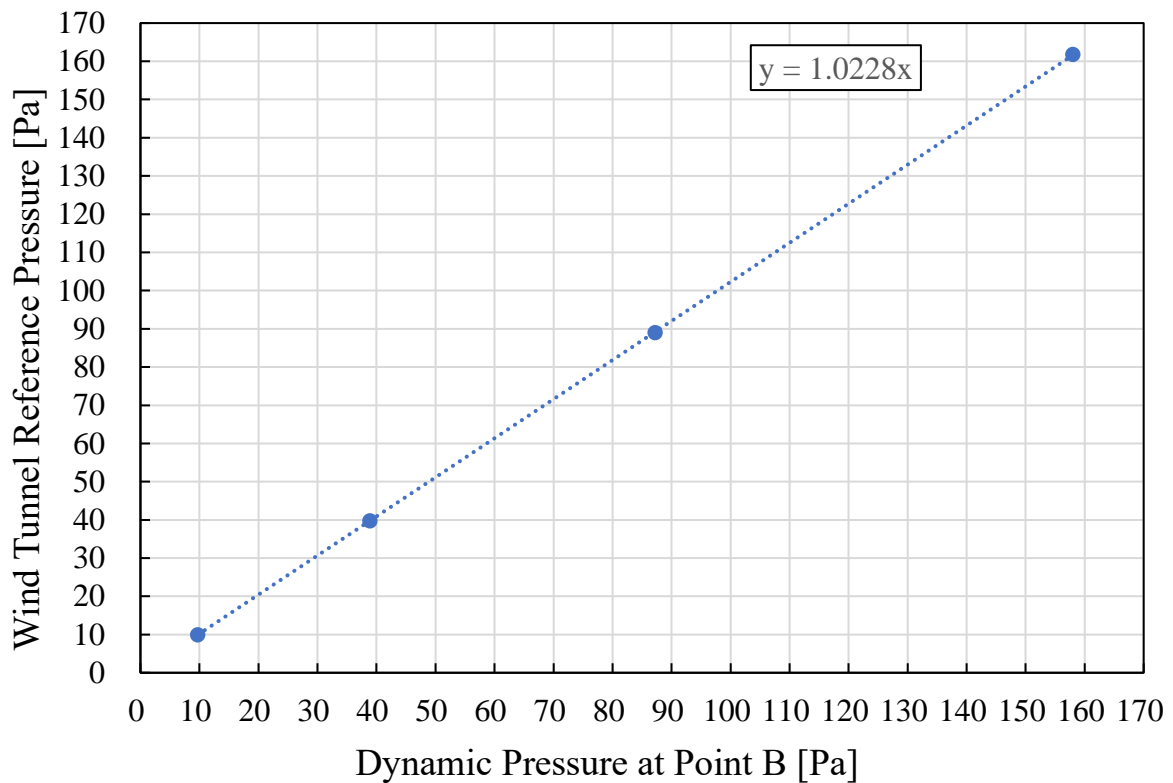


図 6.3 B 点での計測結果

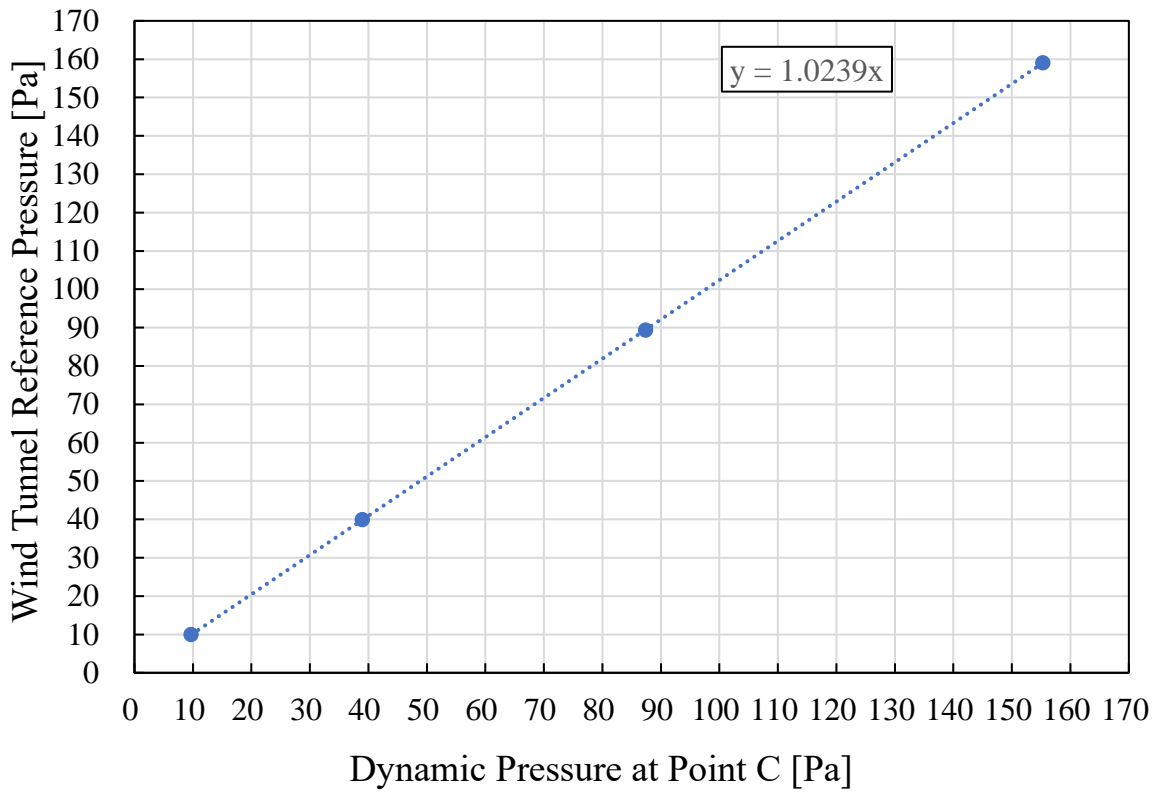


図 6.4 C点での計測結果

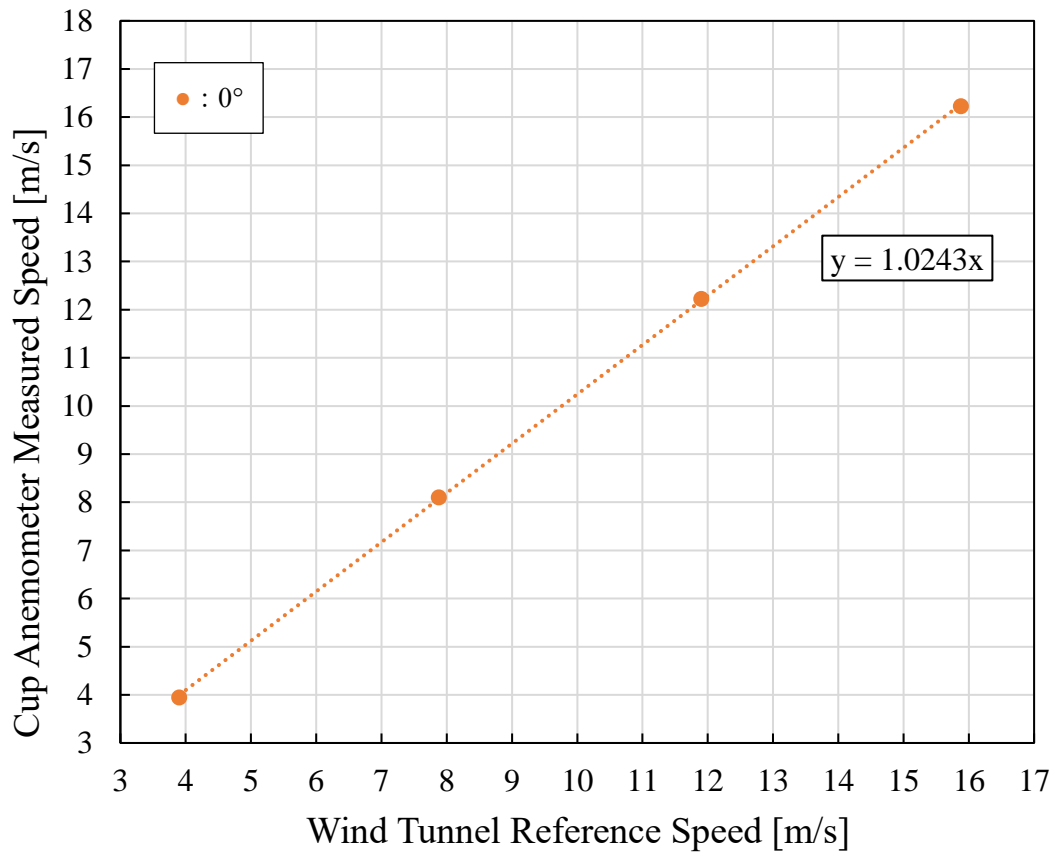


図 6.5 傾け角 0°の実験結果

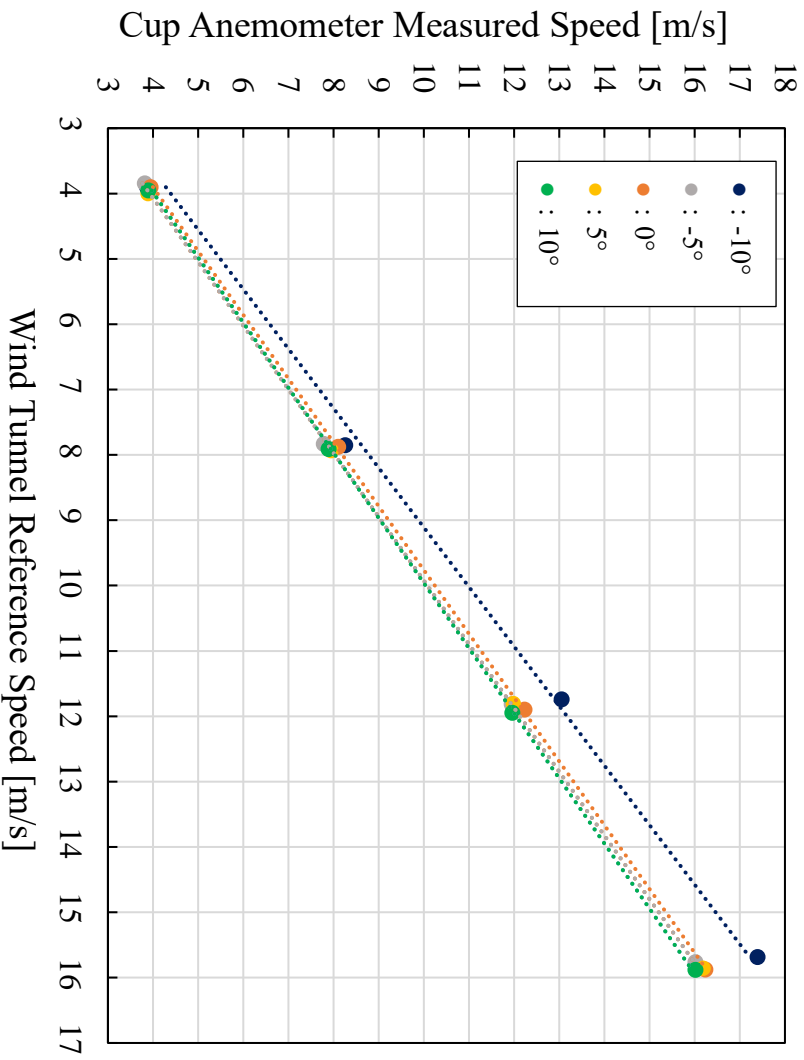


図 6.6 傾き角-10°, -5°, 0°, 5°, 10°各々の実験結果

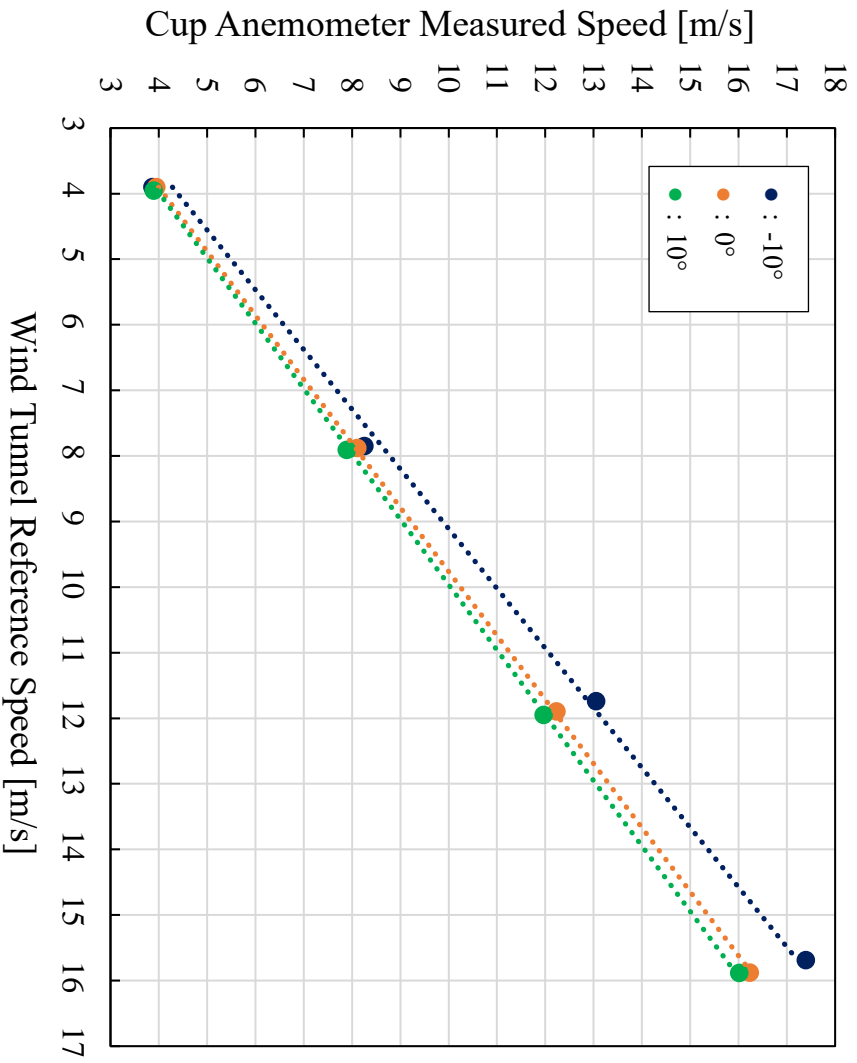


図 6.7 傾き角-10°, 0°, 10°各々の実験結果

第7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）の検証ならびに非線形風況予測モデル RIAM-COMPACT を用いて風況解析を行った。

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) ナセル搭載三杯式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。これは、風速計が航空障害灯により失速した流れを受けることや、ナセル本体を迂回する流れを受けることにより読み誤差を引き起こしていると考えられる。
- (2) 発電量からメーカ公表の性能曲線を用いて推測した風速は、吹下風においてナセル搭載三杯式風速計より高い値を示す。
- (3) 本サイトの主風向 WNW 方位に関して風車間距離が $10D$ (D : 風車直径) 未満の 2 組もしくは 3 組の風車の乱流強度を比較した。その結果、上流側風車の後流により乱れた風が下流側風車に流入していることを確認した。
- (4) 非線形風況予測モデル RIAM-COMPACT により可視化した流跡線結果から、上流側風車のロータ面を通過した流れが、下流側風車のロータ面を通過していることを確認した。また、シェーディング図より風の流れが剥離していることを確認した。
- (5) 三杯式風速計の校正試験より、風速計は吹上風の場合に真値に近い値を読み取り、吹下風の場合に真値より高い値を読み取ることが分かった。しかしながら、実測データでは吹下風を受ける場合に発電量がメーカ公表値を上回っている。これは風速計が吹下風を受ける場合に風速を過小評価している為であると考えられる。そのため校正試験結果は三杯式風速計の読み誤差をさらに広める結果となった。

また、今後の課題を以下に示す。

- (1) 三杯式風速計の校正試験結果は、風速計の読み誤差をさらに広める結果となった。よって、風速計が航空障害灯により失速した流れを受けたり、ナセル本体により流入風が迂回することにより読み誤差を引き起こしていると考えられる。そのためナセルモデルを作成し大型風洞による実験的検証が必要である。
- (2) 三杯式風速計の校正試験では、傾き角を5条件で行った。より詳しく吹上風および吹下風の影響を考察するために条件を増やす必要がある。
- (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を行う必要がある。

参考文献

- [1] WWF ジャパン, 地球温暖化とは? ,
<https://www.wwf.or.jp/activities/basicinfo/40.html>, 2019年12月参照.
- [2] 独立行政法人 環境再生保全機構, 地球温暖化 日本の現状,
<https://www.erca.go.jp/erca/ondanka/japan/index.html>, 2019年12月参照.
- [3] 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, 2019年12月参照.
- [4] 科学技術振興機構 サイエンスポータル, 2019年4月1日ニュース,
https://scienceportal.jst.go.jp/news/newsflash_review/newsflash/2019/04/20190401_01.html,
2019年12月参照.
- [5] 関西電力, 再生可能エネルギーについて,
https://www.kepco.co.jp/siteinfo/faq/new_energy/9098953_10603.html, 2019年12月参照.
- [6] 経済産業省 資源エネルギー庁, 日本のエネルギー2018「エネルギーの今を知る10の質問」,
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2018/html/001/>,
2019年12月参照.
- [7] 経済産業省 資源エネルギー庁, 2019-日本が抱えているエネルギー問題(後編),
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2019_2.html,
2019年12月参照.
- [8] Energy Democracy, 2017年 世界の風力発電市場の成長と日本の課題,
<https://www.energy-democracy.jp/2313>, 2019年12月参照.
- [9] IRENA, Renewable Power Generation Costs, 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, 2018.

参考文献

- [11] 安藤利昭, 中村直貴, 日本の風力発電の現状から見る再生可能エネルギーの課題, 立法と調査, pp63-73, 2018.12 No.407
- [12] 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.
- [13] 日立製作所 HP, 製品情報, HTW2.0-80, ダウンウィンドロータ, 2018.
- [14] 楽エネ, 風力発電の導入加速! 追い風が吹く風力発電の仕組みとメリット, <https://rakuene-shop.jp/columns/2479/>, 2019年12月参照.
- [15] 梶島兵夫, 乱流シミュレーション, 改訂版(2014), p207, 養賢堂
- [16] 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.
- [17] 板垣三之助, ウィンドウズ オブ Wind (風の窓), 風況よもやま話, pp79-88, 教科書に載っていない風の話あれこれ (第5話: 乱れ)
- [18] IEC61400-1 ed.3: Wind turbines - Part 1 Design requirements, 2005.
- [19] H.JULIAN, WALTER G.VINCENTI , “WALL INTERFERENCE IN A TWO DIMENSIONAL FLOW WIND TUNNEL, WITH CONSIDERATION OF THE EFFECT OF COMPRESIBILITY” , NATIONAL ADVISORY COMMITTEE FOR AERONAUTICS, No.782, pp.155-184, 1944.
- [20] 西沢啓, 側垣正, 高木正平, 徳川直子, 三栖功, “低速風洞縮流胴における境界層遷移過程”, 航空宇宙技術研究所報告, TR-1462, pp.1-24, 2003.

謝辞

本研究を遂行するにあたり多くの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。三年間の研究室生活で流体力学・風車工学など多くのことを学びました。また、共同研究や海外留学など私の人生経験を豊富にする沢山の体験をさせていただきました。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いまし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、土木作業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。また、学校生活だけでなく私生活でもカヌー製作やカヌー大会など多くの体験をさせていただきました。製作したカヌー(優勝艇)は家宝として大切にしたいと思います。ありがとうございます。また、秘書として研究室を支えてくださった、寺川智子秘書と伊藤由香秘書に深く感謝申し上げます。寺川さんのいつも明るい姿に元気をいただいていた。また、ソプラノ歌手のような高い声は話していても楽しくなれました。ありがとうございます。伊藤さんは豊富な人生経験から様々な話で盛り上がりました。飲み会で前田先生に負けないぐらいビールを飲む姿はたくましかったです。また、本論文の審査にあたり副査を担当してくださった丸山直樹准教授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や現場見学、ナセル搭載三杯式風速計の提供等で手厚いサポートを賜りました、青山高原ウイ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、中井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イ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。牛草拓巳君は私が苦手としていた解析をチームの誰よりも早く習得し助けてくれました。私が修士論文執筆で忙しかったために手を貸せなかった松田武大君のプラズマ実験を手伝ってくれたことも本当にありがとう。M1で唯一、私と共に松田健太郎君の名前を考えたことは良い思い出です。今年は就職活動で忙しくなるとは思いますが、牛草君なら最高の結果になると確信しています。松田武大君はその豊富な知識量から実験やデータ整理等で色々と助けてくれました。ありがとう。伝説の13秒で終了する抽選ではお互いに興奮したことも良い思い出です。また、キャラが似ているので幾度となく松田健太郎君と間違えてしまいました。来年からは小林君と共に牛草君を手伝ってあげてください。特に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。小林大記君は私の至らなから風洞実験で色々と迷惑をかけたと思います。一つも文句を言わずに実験を遂行してくれて本当にありがとう。来年から松田君と二人三脚で充実した院生生活を送ってください。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。まとめにはなりますが、ウイ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。

謝辞

同期の学生である岩本大河君，遠藤純哉君，直木裕也君，樋口友昭君，松田健太郎君にも心より感謝申し上げます。ティガーこと岩本君は私以上に研究室のレアキャラでした。しかしながら，一緒にいる時はキャッチボールをしたりフリスビーをしたりととても楽しかったです。マキタで私の興味をそそるような電動工具を作ってください。絶対買います。一緒に松田君の名前を呼び続けた遠藤君とはとりとめもない雑談で一緒に笑いました。社会人になってからは，お酒の飲みすぎで鎖に引っかかったり，鎖にぶら下がったりしないように楽しく飲んでください。名古屋に来たときは飲みを誘います。寿司職人の直木くんは数えきれないほどの名言が生まれました。たまに時差を感じましたが，中身のない絡みがとても楽しかったです。一貫入魂で最高のプラントを作ってください。樋口君は農場にいたことが多く夏場はほとんど会えなかったですが，ライダー事件以降に多くの時間を共に過ごしました。私のボケに合いの手をいれてくれて一層笑いが起きました。とても楽しい毎日でした。非常に優れた硬さを有する松田ダンテック健太郎君は，席が隣で毎日たわいない会話に花が咲きました。ダンテックにするかマルテンサイトにするかは永遠の課題だと思います。松田君がネタで買って来たパタゴニアのバックパックは日々の生活に花を添えたと思います。同期のみんなとはこの先も定期的に飲み会をしていきたいです。

その他，エネ環でお世話になった4年生の時の同期や先輩方，M1，B4の皆様，本当にありがとうございました。皆様のおかげで充実した研究室生活を送れました。

最後に，大学・大学院と貴重な学びの場を与えてくれた家族に感謝を申し上げます。

2020年2月5日

山口 竜司

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、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_{ref}	m/s	50	42.5	37.5	設計者が規定する数値
A	I_{ref}	0.16			
B		0.14			
C		0.12			

ここで、 I_{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_{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) ⁽¹⁸⁾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。

主流方向成分に対して与えられている IEC の乱流モデルは以下の式(A.1)および式(A.2)で与えられている。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。

$$\sigma_{90q} = I_{ref}(0.75U + 5.6) \quad (A.1)$$

$$TI_{90q} = \frac{\sigma_{90q}}{U} \quad (A.2)$$

ここで、式中の記号はそれぞれ以下の通りである。

- I_{ref} : $V=15\text{m/s}$ における乱流強度の期待値
- TI : 乱流強度
- U : 10 分間平均風速 [m/s]
- σ : 風速の標準偏差 (乱流標準偏差偏差) [m/s]
- 添え字 90q : 90%タイル値

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_{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

本論文では、乱流強度を式(A.3)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。

$$\text{乱流強度} = \frac{\text{風速標準偏差}}{10 \text{ 分間平均風速}} \quad (\text{A.3})$$

なお、本論文では、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る 90%タイル値を用いた。

付録 B 風洞詳細

付録 B.1 ゲッチンゲン型風洞

ナセル搭載三杯式風速計の風洞実験は、小形のゲッチンゲン型風洞を用いる。風洞は送風機、整流部、縮流部、測定部で構成される。送風機は 55kW の軸流ファンで、インバータにより無段階に風速を設定できる。風速計の性能を総合的に評価するため、充分一様で乱れの小さい主流が必要不可欠である。そこで、風洞測定部、縮流部、整流部を従来の形状から修正して用いた。

付録 B.2 縮流胴

本風洞の縮流胴形状は、航空宇宙技術研究所における小型低乱風洞の形状⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾を参考に設計されている。図 B.1 に、縮流胴形状を示す。風は図の左から右に流れる。縮流胴入口は正方形断面であり、寸法は 2170mm×2170mm である。縮流胴出口も同様に正方形断面であり、寸法は 650mm×650mm である。縮流胴の流れ方向長さは 1800mm で、縮流部内壁の曲線は以下の六次多項式で定義される。

$$(Z_w - Z_2) / (Z_1 - Z_2) = \pm 10(1 - X/L)^6 - 24(1 - X/L)^5 + 15(1 - X/L)^4 \quad (\text{A.1})$$

縮流胴形状を示す座標系は、縮流胴入口中心を原点とし、主流方向に X 、供試翼の翼幅方向に Y 、鉛直方向に Z である。 Z 、 Z_1 、 Z_2 、 X 、 L は、それぞれ縮流胴入口中心からの鉛直方向距離、縮流胴入口距離、縮流胴出口距離、縮流胴入口からの流れ方向距離、縮流胴の流れ方向長さである。任意の X に対する壁面からの鉛直方向距離 Z_w は、上記の式を用いて設計された。本風洞の縮流面積比は 11:1 である。なお、航空宇宙技術研究所の小型低乱風洞の縮流面積比は 9:1 である。

付録 B.3 整流金網

整流金網は開口率 77.2%、一辺あたり 20 メッシュの金網で、整流胴内部に 6 枚設置されている。なお、整流金網は整流胴入口断面に合わせて製作されており、金網接合部等による乱れの発生はない。

付録 B.4 測定部

ナセル搭載三杯式風速計を取り付ける測定部は、透明なアクリル板を上下左右の側壁とした閉鎖流路である。ナセル搭載三杯式風速計のカップ部回転中心位置は、縮流胴出口から

540mm 下流である。測定部下部に風速計を固定するため台が取り付けられている。台は傾き角 0° 、 5° 、 10° の 3 種類用いた。この台は向きを変えることで、 -5° と -10° も測定できる。そのため全部で 5 条件の測定ができる。風洞風速測定用のピトー管は縮流洞出口から 35mm 上流に設置されている。

付録 B.5 風洞主流の性能

風洞主流の性能は、流路内の速度分布および乱れ度の指標で評価される。本風洞の速度分布は、全圧管および静圧管を用いて測定された。

図 B.2 に、測定に使用した全圧管の上面図、測定範囲および測定原点を示す。全圧管は断面寸法 10mm×10mm、長さ 1000mm の角材に、内径 1mm、外径 1.6mm のパイプが 7.5mm 間隔で 46 本平行に配置されている。なお、パイプの先端は、角材から 55mm 突き出している。全圧管は、縮流洞出口に鉛直に設置される。測定された圧力は、高速多点圧力計測装置へ接続される。測定は、縮流洞出口に向かって左上の角を原点とし、 x 方向および y 方向に 0.8mm から 649.2mm まで 50mm 間隔で行われた。総測定点数は、1246 点である。主流風速は、全圧管及び静圧管により測定した動圧から求めた。本測定における主流風速は 20m/s である。

図 B.3 に風洞風速偏差分布を示す。 x 軸、 y 軸、 z 軸はそれぞれ水平方向距離、風速偏差、垂直方向距離を示す。ここで風速偏差は、主流風速と各測定点における風速の差を主流風速で無次元化したものである。主流風速は、測定部に設置されたピトー管を用いて測定した。ピトー管と風路中心のずれは 0.5% である。また、ピトー管と翼弦×翼幅に相当する範囲のずれは 0.2% である。図より、本風洞の風速偏差は 1% 未満であることが確認される。

図 B.4 に縮流洞出口における壁面境界層の速度分布を示す。図より、本風洞の境界層厚さは 3.8mm 以下であることが確認される。従って、主流風速を測定するピトー管（鉛直方向高さ 70mm）は、一様流中に設置されていると言える。

図 B.5 に風洞内乱れ強さの測定に用いた X 型熱線流速計（タングステン線、受感部長さ 1.25mm、線径 5×10^{-6} m）を示す。測定位置はナセル搭載三杯式風速計の取り付け位置とした。測定は平均風速 14m/s で行った。熱線流速計の出力信号は、16bit の A/D 変換器により 2kHz で 1 計測当たり 20000 点取得される。乱れ強さは 0.28% 程度であることが確認された。表 B.1 に本風洞実験装置の風洞主流性能を他研究機関と比較して示す。本風洞実験装置の乱れ強度は、宇宙航空研究開発機構の小形低乱風洞より大きい、一般的な風洞に比べて小さいと判断される。

付録 B

表 B.1 他研究機関との風洞主流性能の比較

研究機関	三重大学	宇宙航空研究 開発機構	三菱重工業	横浜国立大学
名称	ゲッチンゲン型風洞	小型低乱風洞	水平回流式風洞	エッフェル型風洞
断面	正方形	長方形	正方形	長方形
[H×W]	0.65m×0.65m	0.65m×0.55m	1.4m×1.4m	1.8m×1.3m
最大風速	~50[m/s]	~30[m/s]	~48[m/s]	~25[m/s]
乱れ強度	0.28[%]	0.05[%]	0.23[%]	0.50[%]

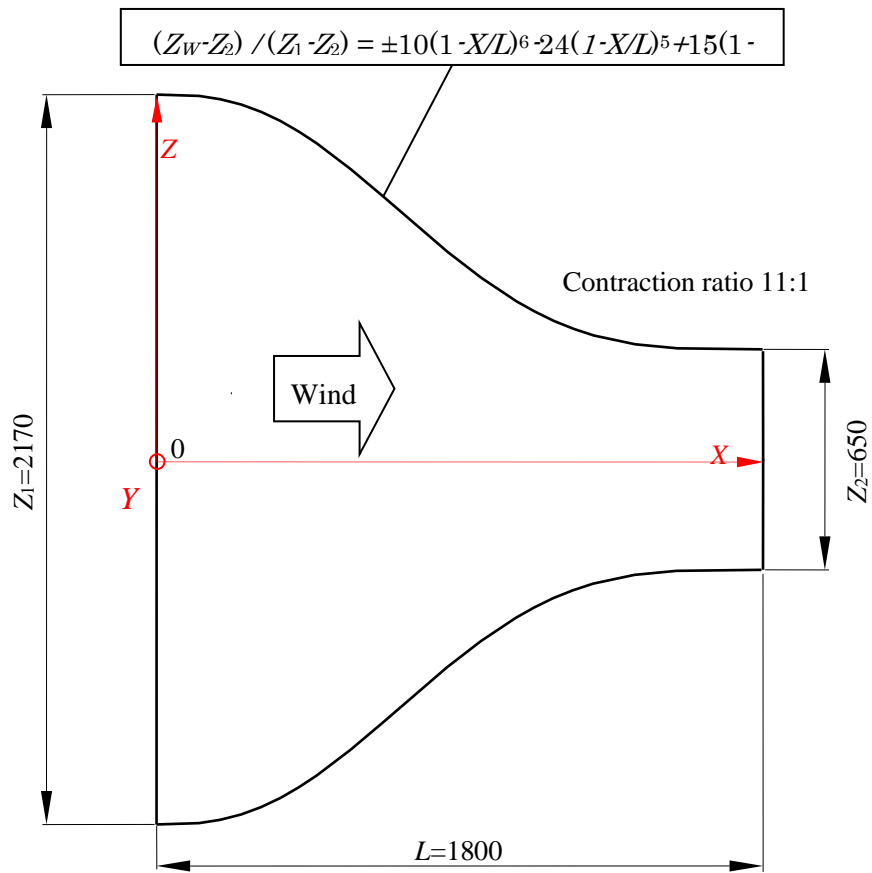


図 B.1 風洞縮流胴形状

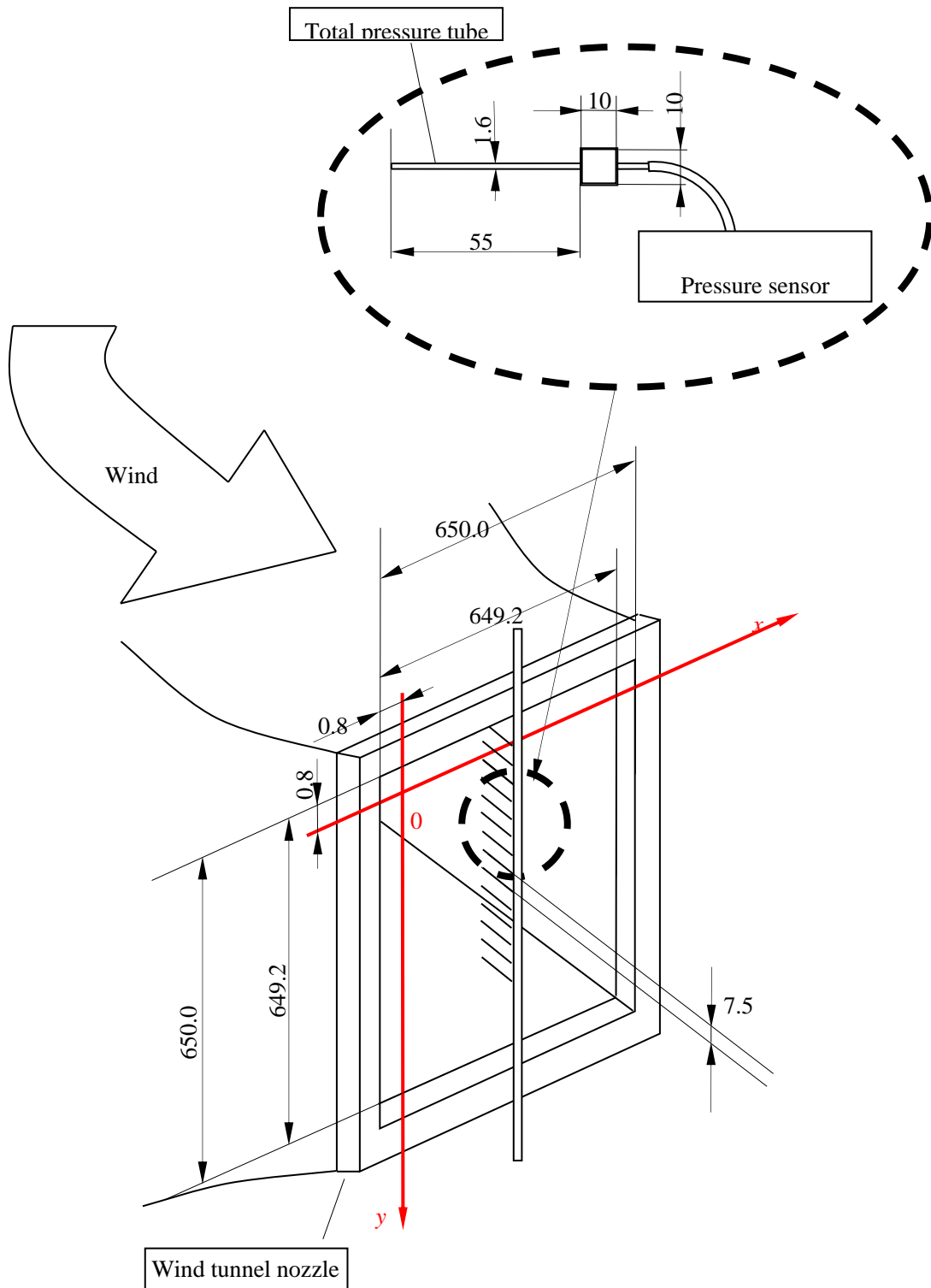


図 B.2 全圧管の上面図，測定範囲および測定原点

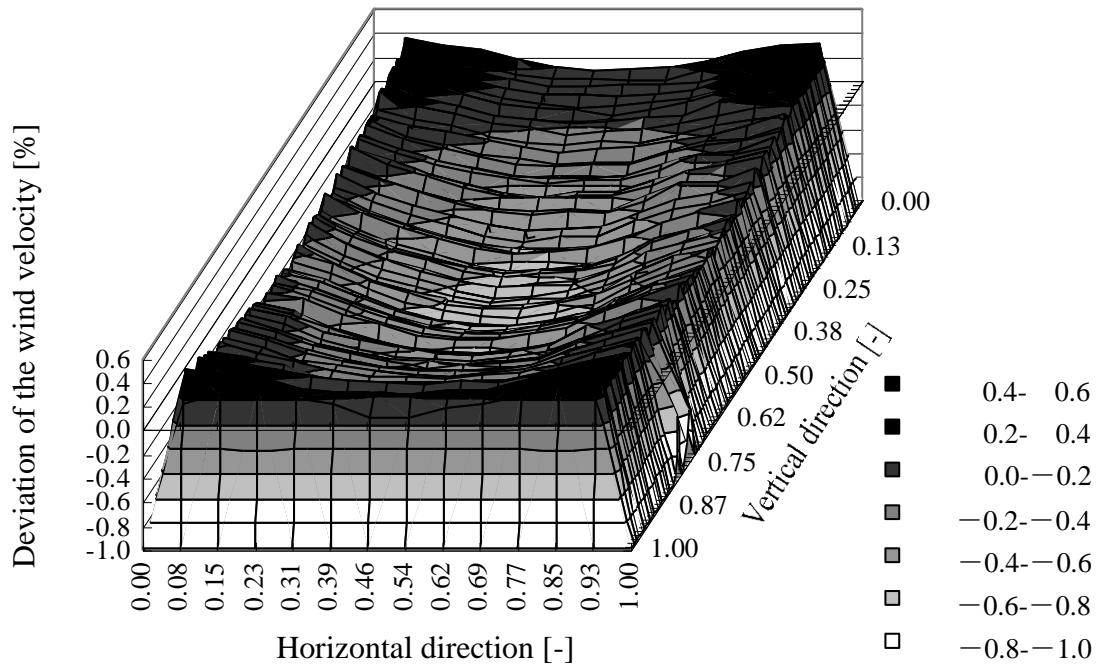


図 B.3 風洞風速偏差分布

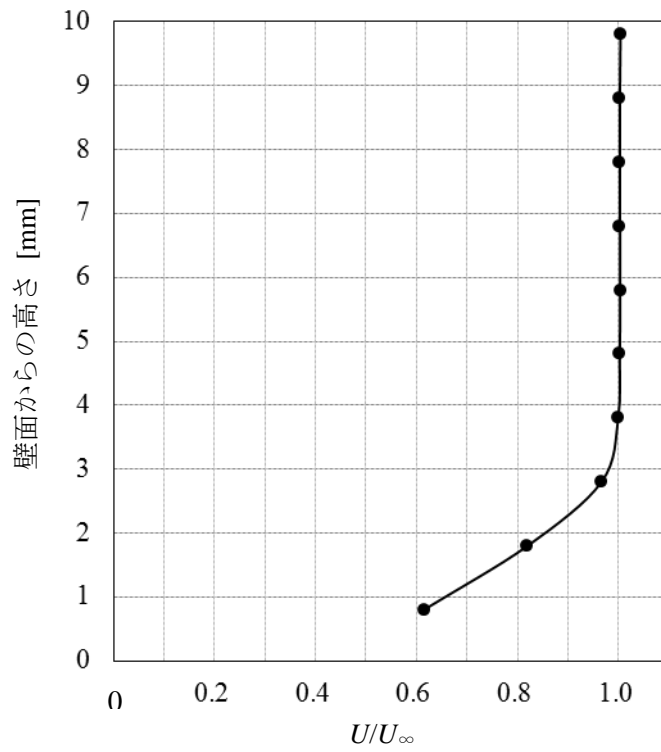


図 B.4 縮流洞出口における境界層厚さ

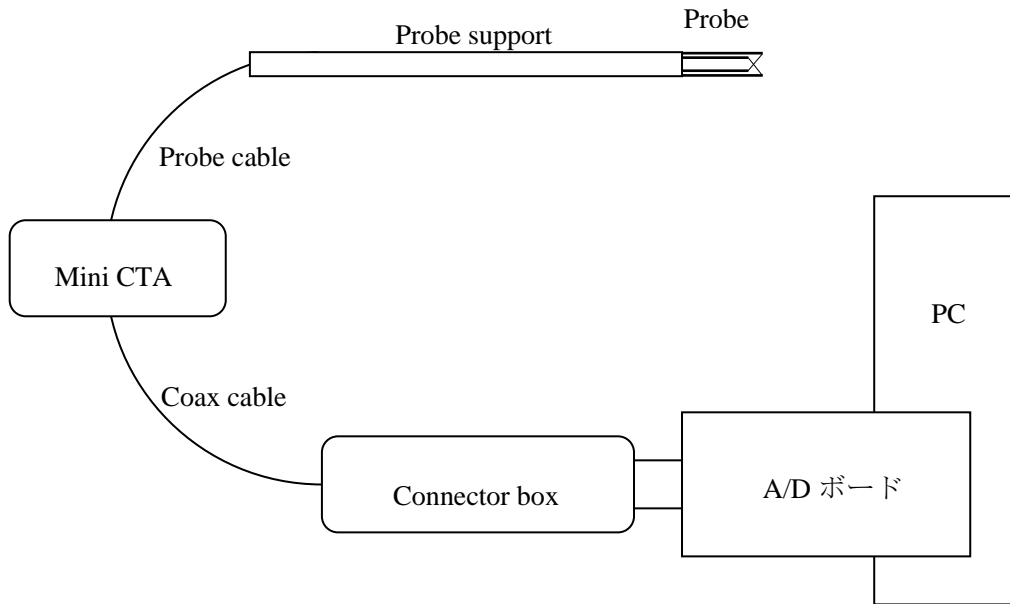


図 B.5 X 型熱線流速計