

複雑地形における大気境界層内の
速度と乱れに関する研究

平成 18 年 度

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻

中 野 桂 太

平成 18 年度 修士論文

複雑地形における大気境界層内の
速度と乱れに関する研究

2007 年 2 月 6 日 提出

指導教員

前田 太佳夫 教授

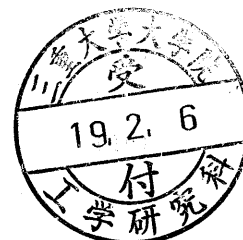
辻本 公一 助教授

鎌田 泰成 助教授

三重大学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

中野 桂太



目次

緒言	(1)
主な記号	(2)
第1章 観測装置	
1.1 はじめに	(3)
1.2 ドップラーソーダの測定原理	(3)
1.3 高度分解能	(5)
1.3.1 測定地点	
1.3.2 測定条件	
1.3.3 測定結果	
1.4 データ整理方法	(7)
第2章 ドップラーソーダによる風況精査	
2.1 はじめに	(12)
2.2 観測地点概況	(12)
2.3 観測地点の各方位の地形形状	(13)
2.4 風況観測結果	(14)
2.4.1 観測高度 70m の方位別風速・出現率	
2.4.2 各観測高度の方位別風速出現率	
2.5 風速の乱れ強度	(16)
2.5.1 観測高度 70m における風速の乱れ強度	
2.6 観測高度による乱れ強度の変化	(20)
まとめ	(22)
結言	(44)
参考文献	(45)
謝辞	(46)

緒言

現在、環境問題やエネルギー価格の高騰などの問題により、石油代替エネルギーとして風力エネルギーが注目されており、世界規模で風力エネルギーの開発が進んでいる。エネルギー資源の大半を他国へ依存している日本においてもエネルギー自給率の向上、環境問題などの面で風力エネルギーの開発が求められている。しかし、風力発電を多く取り入れている諸外国の好風況地帯は、広大で平坦な地形に集中しているが、日本の場合は山岳地帯などの起伏の著しい地形に集中している。複雑地形を流れる風は平坦な地形上を流れる風に比べ、地形形状の影響を大きく受け、複雑な流れ、強い乱れ強度を含んでいる。風に含まれる乱れ強度は風力タービンの疲労荷重や出力変動という問題を引き起こす。

従来 of 風況精査研究では 50m 程度もしくはそれ以下のポールに取り付けた風向・風速計で観測したデータに基づき行われている。特に複雑地形における風況は、低高度についてしか研究されておらず、現在の大型風力タービンのハブ高さに相当する 70～100m 程度の高度での観測例はほとんどない。特に風車の疲労荷重、出力変動に大きな影響を与える乱れについては、詳細な検討がなされていない。

そこで本研究では上空 1000m の風況観測を行うことができるドップラーソーダを用いて高高度の風況観測を行い、複数のサイトにおいて、風速、乱れ強度などの風の特長について明らかにした。

主な記号

H_0 : 観測高度[m]
 X : 観測地点からの距離[m]
 AP : 風速出現率[%]
 TI : 1 時間平均風速の乱れ強度[%]
 σ_U : 1 時間内の 10 分ごとの標準偏差の平均[m/s]
 U : 1 時間平均風速[m/s]
 TI_{IEC} : IEC 乱れ強度も出るの風速の乱れ強度[%]
 TI_{15} : 風速 15m/s における風速の乱れ強度の期待値[%]
 V_{hub} : ハブ高さにおける風速[m/s]
 σ_{bin} : 各 BIN の乱れ強度の標準偏差[%]
 TI_U : 各 BIN の乱れ強度の期待値[%]
 TI_i : 各 BIN の乱れ強度[%]
 TI_F : 乱れ強度による風圧の指標[m²/s²]
 TI_{bin} : 各 BIN の 1 時間平均風速の乱れ強度期待値
 U_{bin} : 各 BIN の風速期待値[m/s]
 TI_E : 乱れ強度によるエネルギーの指標[m³/s³]
 TI_{bin} : 各 BIN の平均風速の乱れ強度
 TI_{Fsum} : 乱れ強度による風圧指標の変動量[m²/s²]
 TI_{Fi} : 各 BIN の乱れ強度による風圧指標期待値[m²/s²]
 TI_{Esum} : 乱れ強度によるエネルギー指標の変動量[m²/s²]
 TI_{Ei} : 各 BIN の乱れ強度によるエネルギー指標期待値[m²/s²]
 P_i : 風速階級別出現率[%]

第1章 観測装置

1.1 はじめに

現在の大型風力タービンロータ先端高さは 100m を超えており、ロータに流入する風の特性を調べるためには高高度における風況観測が必要である。しかし、観測ポールによる風況調査の場合、マスト立地条件により 100m を超える高高度観測は困難になる。特に複雑地形に高いポールを設置することは困難である。本研究では音波を利用するリモートセンシング装置ドップラーソーダを用いて高高度の風況を調査する。ドップラーソーダは地上に設置した送受波器により上空 1000m までの風の色度成分を観測できる。このため、従来困難であった複雑地形における高高度風況観測を可能にする。本章ではドップラーソーダの測定原理、取得したデータの整理方法について記述する。

1.2 ドップラーソーダの測定原理

ドップラーソーダは、地上の 1 地点に音波送受信用のパラボラ送受波器を上空に向けて設置し、発射した音波パルスの上空からの後方散乱波を受信することによって、風速を測定する。本研究ではパラボラ送受波器を、3 台 1 組として用いる 3 方向モノスタティック型を用いた。図 1 に観測に用いたモノスタティック型の写真を示す。以下にモノスタティック型の測定原理を示す。

3 方向モノスタティック型のドップラーソーダは地上の 1 地点に音波送受信用のパラボラ送受波器を上空 3 方向に向けて設置し、発射した音波パルスの上空からの後方散乱波を受信することによって、風速を測定する。測定にはパラボラ送受波器を、3 台 1 組として用いる。このうち 2 台は鉛直方向から 20 度傾斜させ、2 台の傾斜方位交差角は 90 度に設置し、残り 1 台は傾斜させずに鉛直方向に向け設置する。測定時の音波は 10 秒間隔で 1 台ずつ発射され、30 秒で 1 サイクルする。そして、この 3 台により測定された後方散乱データを合成することによって、風速の水平方向成分、鉛直方向成分、風向およびそれらの標準偏差を測定する。ドップラーソーダで測定されるドップラー風速は音波の散乱領域の速度であり、これが大気中の風ベクトルとともに移動しているとして、風速を算出した。ビーム軸方向の風速 3 成分 V_1 、 V_2 、 V_3 から、時間平均することにより測定空間を均質とみなして、風速の東西成分 V_x 、南北成分 V_y および鉛直成分 V_z は次式により求められる。

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = -M^{-1} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

ここでマトリクス M は、

$$M = \begin{pmatrix} \cos x_1 & \cos y_1 & \cos z_1 \\ \cos x_2 & \cos y_2 & \cos z_2 \\ \cos x_3 & \cos y_3 & \cos z_3 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

$\cos x_j, \cos y_j, \cos z_j$ はそれぞれアンテナ j ($j=1, 2, 3$) の x 、 y 、 z 軸への方向余弦であり、 V_j はアンテナに向かう風を正とし、 V_x は西風を正、 V_y は南風を正とした。

各アンテナの受信信号のドップラー周波数偏移である $\Delta f_j (= f_j - f_0)$ と、 V_j との関係は、次式である。

$$V_j = \frac{C}{2} \times \frac{\Delta f_j}{f_0} \quad (1.3)$$

ここで、 f_j は受信周波数の算定値、 f_0 は送信周波数、 C は音速 340 (m/s) である。

送受波器は、2 台のアンテナを天頂角 α 、方位角を各々 A 、 B に設置し、残る 1 台を鉛直上向きに設置した。 A 、 B は互いに直交に近くなるように設置する。このように設置すると、式(1.3)の方向余弦は

$$M = \begin{pmatrix} \sin \alpha \sin A & \sin \alpha \cos A & \cos \alpha \\ \sin \alpha \sin B & \sin \alpha \cos B & \cos \alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

となる。よって、東西成分 V_x 、南北成分 V_y は、

$$V_x = \frac{\{V_1 \cos B - V_2 \cos A + V_3 \cos \alpha (\cos A - \cos B)\}}{\sin \alpha \sin(B - A)} \quad (1.5)$$

$$V_y = \frac{\{V_1 \sin B - V_2 \sin A + V_3 \cos \alpha (\sin A - \sin B)\}}{\sin \alpha \sin(A - B)} \quad (1.6)$$

となる。

水平面内での風速 U と風向 θ は、次式によって表わされる。

$$U = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (1.7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_x}{V_y} \quad (1.8)$$

受信信号のパワースペクトルは以下の図 1.2 に示すように、ビーム軸方向の風速によってドップラー偏移を受けた周波数 f_p のまわりに、風速の乱れに応じた広がりが生じる。ドップラーソーダの場合、受信信号のサンプリング周波数 f_s は 7040Hz であり、また、サンプリングデータ数 N は 1024 個であるのでパワースペクトルは FFT 法により f_s / N 、すなわち約 7 Hz 毎に離散データとして得ることができる。高い高度からの受信信号は減衰し、スペクトルピークは明瞭でなくなる。そこで、スペクトル領域で次式に示す S/N 比を表

わすパラメータ γ を定義し、 γ の値によって測定した信号の信頼度を評価している。

$$\gamma = S(f_p) / \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S(f_i) \right) \quad (1.9)$$

ここで、 $S(f_i)$ はスペクトル密度を表し、 n は $f_0 \pm 10\%$ の周波数解析内のスペクトルデータの数を表し、 $n=70$ である。ドップラーソーダでは、 γ の基準値を8～10dBとし、この値以上の受信信号を用いて風向風速の計算を行う。この処理によって不良なデータを除去した後の有効なデータ数は百分率にして各アンテナ毎に記録されている。

1.3 高度分解能

ドップラーソーダの高度分解能は音波を利用するため、音速および音波パルス幅を用いて示され以下の式で算出される。

$$\Delta h = \frac{C \cdot \tau}{2} \quad (1.10)$$

Δh : 高度分解能[m]、 τ : パルス幅[s] C : 音速(340[m/s])

式(1.10)より、高度分解能は観測データのパルス幅の増加に従い低下する。しかし、パルス幅を小さくすると送波パワーが低下して探知能力が低下するので高高度までの測定ができない。一般的に風は、指数法則に基づく風速分布をもつため、低高度の風速の勾配は大きく、高高度の風速の勾配は小さい。風速の高度に対する勾配が大きい場合、高度分解能を高くしないと測定体積内に大きな速度変化を含み、観測データの誤差が大きくなる。このため、低高度測定を行う場合パルス幅を小さくし、高度分解能を向上させ、高高度測定を行う場合パルス幅を大きくし、探知能力を向上させた混合パルス方式を採用して観測を行う。混合パルス方式とは、短パルスと長パルスを設定された高度で切り替え、測定する方式である。それぞれのパラボラ送受波器は、短とパルスと長パルスを順に発射し、短パルスで低高度、長パルスで高高度を測定する。

混合パルス方式を用いた場合、短パルスと長パルスで高度分解能が違いため、観測誤差により、速度分布が不連続になる可能性がある。そこで、短パルスと長パルスの両方によって観測される同一高度の風速データを用いて、高度分解能が観測風速値に与える影響を検証した。

1.3.1 測定地点

図 1.3 に測定地点の鳥瞰図を示す。測定地点は標高約 1000m の地点で北から西には山林があり、東は崖である。測定地点付近には西に約 19m の地点に風速計があり、南西に約 43m の地点に高さ約 15m の資料館がある。

ドップラーソーダは後方散乱波を受信して風速の測定を行っている。音波の発射方向に固定物がある場合、固定物からの後方散乱波を受信し、風速を 0m/s と測定する。そのため、観測精度が設置地点の周囲の環境に左右される。

今回の測定地点において音波の発射方向に障害物になるような建物はなく、ドップラーソーダによる観測値に固定物による後方散乱波は含まれていない。

1.3.2 測定条件

表 1 は混合パルスの短パルス及び長パルスの長さ設定と測定高度を示す。これらの値は過去のドップラーソーダの設定と観測結果の関係から、経験的に求められた。そこで、本節では表 1 に示す 3 条件について高度分解能が観測風速値に与える影響を検証した。

表 1.1 測定条件

	短パルス[ms]	長パルス[ms]	測定高度[m]
条件 1	30	80	50
条件 2	30	200	100
条件 3	80	200	100

条件 1 での観測期間は 2006 年 10 月 7 日から 10 月 13 日までの 7 日間、条件 2 は 2006 年 10 月 16 日から 10 月 20 日までの 5 日間、条件 3 は 2006 年 10 月 23 日から 10 月 27 日までの 5 日間および 10 月 30 日の合計 6 日間である。10 月 28 日から 10 月 29 日はドップラーソーダ設置地点の地権者の要請により、観測を中止している。

それぞれの条件について、短パルス及び長パルスで取得した同一高度、同一時刻の 10 分間平均速度を用いて検討する。

1.3.3 測定結果

図 1.4 は 3 条件により測定された同一高度で同一時刻に取得した 10 分間平均風速の短パルスによる結果と長パルスによる結果の関係を示す。横軸に短パルスによる風速、縦軸は長パルスによる風速を示す。また、図には最小二乗法により求めた関数 $y=ax$ を示す。図のプロットより、短パルスと長パルスのそれぞれから得られた風速はばらつきが含まれるものの、相関はあるといえる。この両者の関係を検討するため、表 1.2 に近似直線の傾き及び相関係数を示す。

表 1.2 測定結果

	傾き	相関係数
条件 1	0.95	0.93
条件 2	0.82	0.68
条件 3	0.96	0.92

表 1.2 より、条件 1、条件 3 の場合、長、短 2 種類のパルスに基づく 10 分間平均風速の相関係数が 0.9 以上であるため、両パルスの風速の相関は強いといえる。また、短パルスの風速に対する長パルスの風速の傾きは条件 1 の場合、0.95、条件 3 で 0.96 である。しかし、条件 2 の場合、相関係数は 0.68 であり、条件 1、条件 3 に比べ、相関が低い。また、短パルスの風速に対する長パルス風速の傾きも 0.68 と非常に小さい。風速観測において条件 2 のような観測結果になる場合、大気境界層速度分布や大気境界層乱れ強度分布は高さ方向に不連続な部分を持つことになる。そこで、本研究では観測時に場所、季節ごとに短パルス、長パルス、短パルスと長パルスを切り替える高度しきい値のパラメータを変え、最適に取得できるよう条件を設定し観測する。

ドップラーソーダで風況観測を行う場合、高度分解能による観測誤差についても考慮して各パラメータの設定を行わなければならない。

1.4 データ整理方法

ドップラーソーダの出力するデータは 1 高度につき水平成分の平均風速・平均風向、鉛直方向風速、それぞれの 10 分間における標準偏差である。しかし、音波の散乱を利用し、観測を行っているため極端な低高度の場合、発射アンテナの共鳴中に後方散乱波を受信すると観測できず、また極端な高高度の場合、後方散乱波が小さすぎるため受信できない。そこで、本研究では 10 分間でのデータ取得率が 20%以上有するデータを用いて、1 時間平均データを作成した。

1 時間平均データは NEDO 風況精査マニュアルに基づき、10 分間値の 1 時間の平均値を 1 時間平均データとした。本研究ではさらに精度を上げるため、1 ヶ月間のデータの充足率が 50%以上の高度のデータのみを使用した。

サイト A においては観測高度 20m から 500m、サイト B においては観測高度 20m から 550m の観測データが充足率 50%以上を示した。そこで、各サイトこれらの観測高度のデータのみを使用し、サイト A は 2005 年 4 月から 2006 年 3 月、サイト B は 2002 年 12 月から 2003 年 1 月の 1 年間の観測データについて風況考察を行った。



図 1.1 モノスタティック型ドップラーソーダ

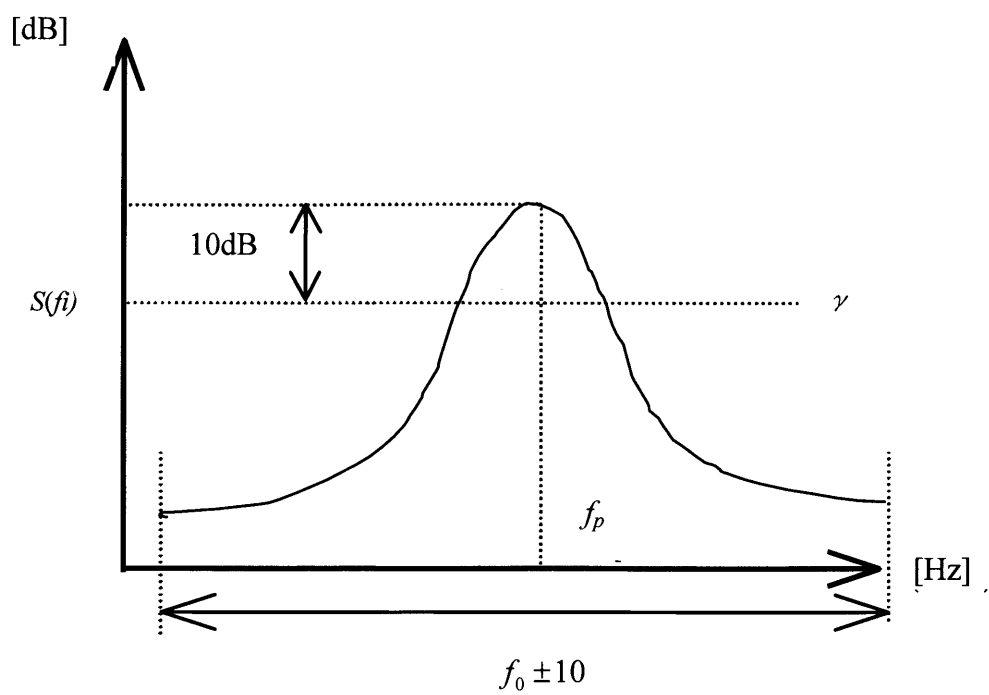


図 1.2 受信信号のパワースペクトル

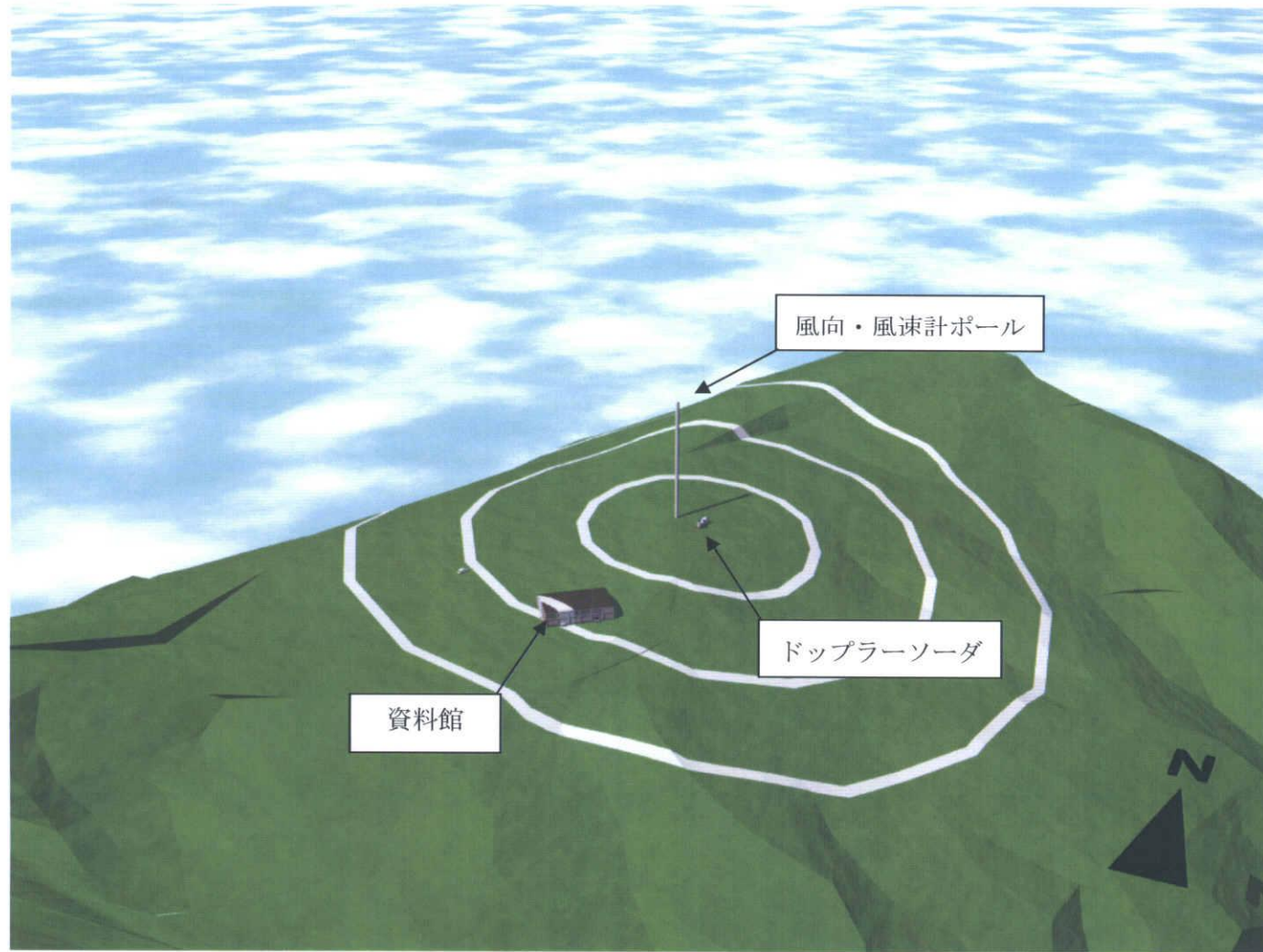
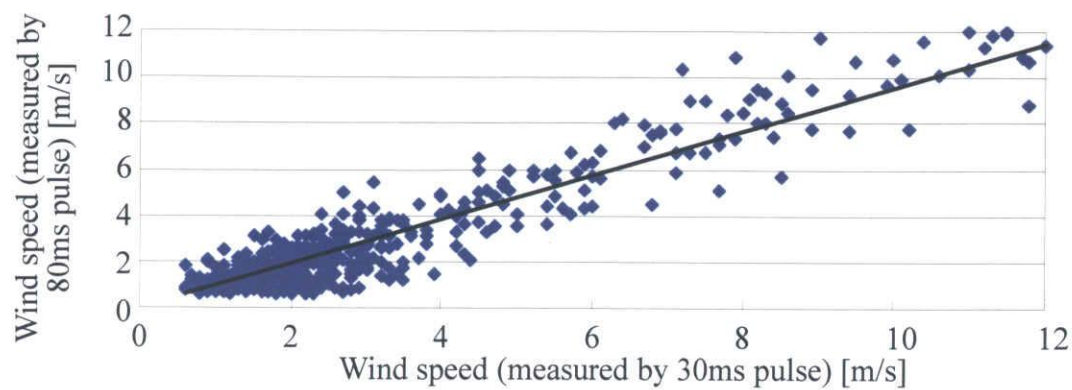
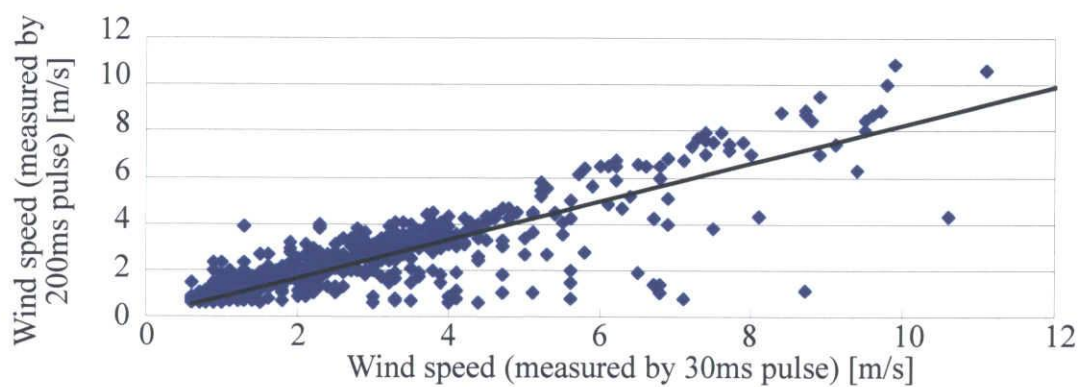


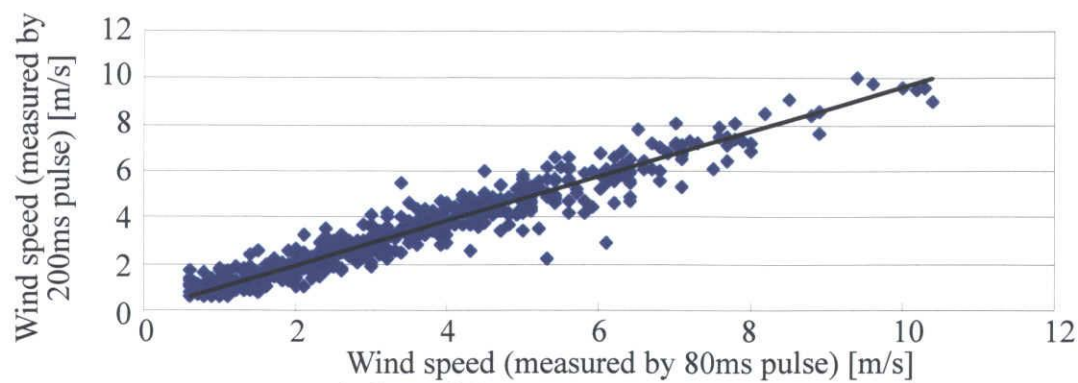
図 1.3 観測地点鳥瞰図



(a) 条件 1 (短パルス 30ms , 長パルス 80ms)



(b) 条件 2 (短パルス 30ms , 長パルス 200ms)



(c) 条件 3 (短パルス 80ms , 長パルス 200ms)

図 1.4 各パルス幅による風速測定結果

第2章 ドップラーソーダによる風況精査

2.1 はじめに

日本国内における好風況地帯は山岳地帯など起伏の著しい地形に集中している。複雑地形上を流れる風は平坦な地形上を流れる風に比べ、地形形状の影響を大きく受け、複雑な流れになり、強い乱れ強度を生じる。風の乱れ強度は風力タービンに疲労加重及び出力変動の影響を与える。疲労加重は風力タービンの寿命に、出力変動は電力供給に影響を与える。

本章では、2つの複雑地形の実測値を用いて、乱れ強度による疲労加重及び出力変動、高度による乱れ強度の考察を行う。

2.2 観測地点概況

(1) サイト A

図 2.1 にサイト A の鳥瞰図を示す。ドップラーソーダは茶畑と山林に囲まれた標高約 80m の丘陵地に設置されている。東方向数十 m 先に国道があり、さらに 1km ほど先には海がある。南から西には約 3km ほど山林が広がっており、その先には住宅地がある。観測地点において音波の発射方向に観測の障害物になるような建物はなくドップラーソーダによる観測値に固定物による後方散乱波は含まれていない。サイト A の風は山、海、林など様々な地形形状から風が吹く。

(2) サイト B

図 2.2 にサイト B の鳥瞰図を示す。ドップラーソーダは標高 0m の海岸線に設置されている。北側は広範囲に砂浜が広がり、海岸との高低差ほとんどない。また、海岸線には防風林が設置されている。南東から南西の方向には住宅地や農地が存在する。さらに 3km ほど先には標高 100m ほどの山がある。南には約 1km 先まで、住宅地がありその先には農地及び川がある。観測地点において、音波の発射方向に観測の障害物になるような建物はなくドップラーソーダによる観測値に固定物による後方散乱波は含まれていない。

2.3 観測地点の各方位の地形形状

観測地点の地形形状は、国土地理院の25000分の1数値地図データを用いて、観測地点から30km範囲で、16方位それぞれについて地形断面図を作成した。図2.3にサイトAの地形断面図、図2.4にサイトBの地形断面図を示す。

(1) サイト A

サイト A 周辺の地形断面形状を16方位について考察する。図2.3 (a)から(h)の縦軸は標高を示しており、横軸は観測地点からの距離を示している。また、軸の中心 $X=0$ は観測地点を示し、観測地点から30kmまで、2方位の地形断面図を示す。図2.3(a)、(b)より、北、北北東は設置地点から30km以内すべて陸地のみである。図2.3(c)から(g)より、北東から西は海である。図2.3(c)から(g)より北東から南東は観測地点から約2km以遠海である。図2.3(h)、(a)から(d)より、南南西から西南西は観測地点から約8km以遠海である。図2.3(e)より、西は観測地点から約10km以遠海である。図2.3(f)から(g)より、西北西から北北西まで観測地点から30km以内、陸地のみである。西北西は観測地点から約18kmの位置に標高約200mの山がある。北西は観測地点から30km以内に標高の高い山はない。北北西は観測地点から約22kmから標高約400mがある。

(2) サイト B

サイト B 周辺の地形断面形状を16方位について考察する。図2.4 (a)から(h)の縦軸は標高を示しており、横軸は観測地点からの距離を示している。また、軸の中心 $X=0$ は観測地点を示し、観測地点から30kmまで、2方位の地形断面図を示す。図2.4(a)から(f)より、北から東南東は海である。これらの方位において北、東北東は観測地点から30km以内全て海のみである。北北東、北東は観測地点から約25kmまで海であり、それ以遠は対岸である。東は観測地点から約12kmの位置に島がある。東南東は観測地点からの距離、約5kmから12kmの範囲に島がある。図2.4(g)、(h)、(a)から(c)より、東南から南南西は観測地点から約8km以遠、標高約200mから600mの山がある。図2.4(d)、(e)より、西南西、西は観測地点から約15kmまでは平坦な陸地である。それ以遠は標高約400mの山がある。図2.4(f)より、西北西は観測地点30kmまで陸地のみである。図2.4(g)、(h)より、北西、北北西は観測地点から30kmまで陸地のみである。

2.4 風況観測結果

現在、世界中で建設されている大型風力タービンのハブ高さは 70m 程度である。また、風力タービンの稼動状況はハブ高さの風の特徴によって大きく影響される。そこで、各サイトの観測高度 70m の風況について述べる。さらに観測高度による風況特性の違い、各サイトの風の流れを知るため、観測高度 70m 以外に 50m、100m、200m、300m、400m、500m の高度別の風況について述べる。

2.4.1 観測高度 70m の方位別風速・風速出現率

(1) サイト A

図 2.5(a)はサイト A の観測高度 70m における方位別風速出現率を示す。図より、サイト A の風速出現率は西北西で 26.6%と最も高くなる。したがって、西北西は明らかに卓越風向である。風速出現率の高い他の方位は順に西 13.9%、北東 12.1%、東北東 8.4%、北西 6.3%である。

図 2.5(b)にサイト A の観測高度 70m における方位別平均風速を示す。図より、サイト A の方位別平均風速は西北西で 9.2m/s と最も高くなる。その他の平均風速の高い他の方位は順に西 7.3m/s、北西 6.9m/s、北東 6.6m/s、東北東 6.2m/s である。これより、サイト A の観測高度 70m の場合、西北西が卓越風向で、かつ主風向であり、西北西のとなりの 2 方位の西、北西の風と北東、東北東の風が風力タービンの稼動状態に大きな影響を与えるといえる。

(2) サイト B

図 2.6(a)はサイト B の観測高度 70m における方位別風速出現率を示す。図よりサイト B の風速出現率は西北西で 20.1%と最も高くなる。したがって、西北西は明らかに卓越風向である。風速出現率の高い方位は順に北西 16.5%、西 13.5%、東南東 7.6%、南東 6.3%である。

図 2.6(b)にサイト B の観測高度 70m における方位別平均風速を示す。図より、サイト B の方位別平均風速は北西で 7.9m/s と最も高くなる。平均風速の高い他の方位は順に西北西 6.6m/s、北北西 5.9m/s、東南東 5.8m/s、南東 6.2m/s である。これより、サイト B の観測高度 70m の場合、西北西が卓越風向で、主風向が北西である。西北西、北西 2 方位が風力タービンの稼動状態に大きな影響を与えるといえる。

2.4.2 各観測高度の方位別風速出現率

(1) サイト A

図 2.7(a)から(f)はサイト A における観測高度 50m、100m、200m、300m、400m、500m の方位別風速出現率を示す。図 2.7(b)、(d)、(f)より、西北西の風速出現率は観測高度 100m で 26.6%、300m で 25.3%、500m で 18.4%であり、高度の上昇によりわずかに減少する。また、西北西をはさむ西、北東の風速出現率は高度の上昇にしたがい同様に減少する。図 2.7(b)、(c)、(f)より、東北東の風速出現率は観測高度 100m で 4.9%、200m で 5.6%、500m で 7.8%、東の風速出現率は観測高度 100m で 4.3%、200m で 5.0%、500m で 12.4%であり、それぞれ風速出現率は高度の上昇にしたがい増加する。したがって、低高度の場合、西北西、西の風速出現率が高く、高度の上昇にしたがい、東北東、東の風速出現率が増加する。なお、東北東、東の風は海風である。観測地点は東北東、東の海岸線よりも約 1.3km 陸に入った標高約 80m の丘陵地である。海から陸へ吹く海陸風は陸に上陸する場合、急激な粗度変化を受ける。そのため、低高度の場合、東北東、東の風は特に減速されたと思われる。高高度の場合、地形の影響がなくなり風速出現率が増加したのだと思われる。

(2) サイト B

図 2.8(a)から(f)はサイト B における観測高度 50m、100m、200m、300m、400m、500m の方位別風速出現率を示す。図 2.8(a)、(b)、(d)、(f)より、卓越風向は観測高度 50m で西北西、100m で西北西、300m で北西、500m で北西であり高度の上昇により、卓越風向が変化する。図 2.8(a)より、観測地点の南南東から南西の方位は山岳地帯である。これらの方位の風速出現率は観測高度 50m で全方位の 19.0%を占める。図 2.7(f)より、観測高度 500m の場合、これらの方位の風速出現率は 28.1%に増加する。したがって、低高度の場合、風速出現率は地形の影響を受け特定の方位で高くなるが、高高度では風速出現率の高くなる方位が分散される。サイト B の場合、観測地点の南南東から南西の方位約 7.0km に標高 300m から標高 650m の山がある。そのため、南南東から南西では低高度の場合、地形形状の影響により、風速出現率が低いのだと思われる。

2.5 風速の乱れ強度

風速の乱れ強度は 1 時間平均値を基準として次式で表される。

$$TI = \frac{\sigma_U}{U} \times 100 \quad (2-1)$$

TI : 1 時間平均風速の乱れ強度[%]

σ_U : 1 時間内の 10 分標準偏差の平均[m/s]

U : 1 時間平均風速[m/s]

風速の乱れ強度は風力タービンの耐久性や出力変動に大きく影響してくるパラメータである。そのため、IEC(IEC61400-1)において風力タービンの設計基準の 1 つに風速の乱れ強度の基準が設けられている。この基準は IEC 乱れ強度モデルと呼ばれ、次式で求められる。

$$TI_{IEC} = TI_{15}(0.75V_{hub} + a)/V_{hub} \quad (2-2)$$

TI_{IEC} : 風速の乱れ強度[%]

TI_{15} : 風速 15m/s における風速の乱れ強度の期待値[%]

V_{hub} : ハブ高さにおける風速[m/s]

この式の TI_{15} と a は値がそれぞれ以下のように定められている。

表 2.1 IEC による class ごとの乱れ強度パラメータ

class		I	II	III
基準風速[m/s]		50.0	42.5	37.5
平均風速[m/s]		10.0	8.5	7.5
乱れ強度パラメータ	A	$TI_{15}=0.16$ 、 $a=5.6$		
	B	$TI_{15}=0.14$ 、 $a=5.6$		
	C	$TI_{15}=0.12$ 、 $a=5.6$		

これらのパラメータは IEC のワーキンググループが各国の風速の乱れ強度データの統計データより決めた値である。風力タービンを設置する場合、風況精査を行いその設置地点に見合った設計を行わなければならないとされているが、この基準は class I、class II、class III にのみ適用され、それ以上の条件の場合は class S と呼ばれる。class S を持つ地形形状に風力タービンを設置する際は製造者が責任を持って自ら風速の乱れ強度の値を決めなければならない。

2.5.1 観測高度 70m における風速の乱れ強度

(1) 各サイトの乱れ強度

図 2.9 にサイト A、サイト B の観測高度 70m における風速 BIN0.5m/s の乱れ強度の 90%カンタイル値 TI_{bin} 、標準偏差 σ_{bin} の 90%の値、IEC の規格において風速の乱れ強度のクラスが最も高い class A の IEC 乱れ強度モデルを示す。 σ_{bin} は以下の式より求める。

$$\sigma_{bin} = 0.9 \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (TI_i - TI_U)^2} \quad (2-3)$$

σ_{bin} : 各 BIN の乱れ強度の標準偏差[%]

TI_U : 各 BIN の乱れ強度の期待値[%]

TI_i : 各 BIN の乱れ強度値[%]

図 2.9 より、サイト A において、風速の乱れ強度は全風速域で IEC 乱れ強度モデルよりも高い。そのため、サイト A は乱れ強度の大きい class S 相当の地域だといえる。一方、サイト B の場合、風速 7.0m/s 以下で乱れ強度は IEC 乱れ強度モデルよりも高い。しかし、風速 10m/s 以上で乱れ強度は IEC 乱れ強度モデルと同程度である。したがって、サイト B の風速の乱れ強度クラスはほぼ class A 相当である。

風速の乱れ強度はある時間における平均風速に対する標準偏差を示すため、低風速の場合に高く、高風速の場合に低くなる。しかし、風力タービンへ加わる風圧は風速の二乗に比例し、風力エネルギーは風速の三乗に比例する。そのため、低風速の乱れ強度よりも高風速の乱れ強度の方が風力タービンに大きな疲労加重を与え、かつ大きな出力変動を与える。そこで、本研究では各風速域の風力タービンへの疲労加重及び出力変動を検討する。

風圧による疲労加重は風の動圧に比例すると考え、以下の式より、風速の乱れ強度による風圧を考える。

$$(U + TIU)^2 = U^2 + U^2(2TI + TI^2) \quad (2-4)$$

式(2-4)は平均風速と風速変動を含む風圧である。この式の第 2 項が風速変動による風圧の指標、すなわち乱れ強度の風圧の指標となる。

$$TI_F = U^2(2TI + TI^2) \quad (2-5)$$

TI_F : 乱れ強度による風圧の指標[m²/s²]

TI_{bin} : 各 BIN の平均風速の乱れ強度

U_{bin} : 各 BIN の風速[m/s]

また、以下の式より、風車出力は風速に流入するエネルギーに比例すると考え、以下の式より、乱れ強度によるエネルギーの指標を求めた。

$$(U + TIU)^3 = U^3 + U^3(3TI + 3TI^2 + TI^3) \quad (2-6)$$

式(2-6)は平均風速と風速変動を含むエネルギーである。この式の第 2 項が風速変動によるエネルギー、すなわち乱れ強度によるエネルギーの指標となる。

$$TI_E = U^3(3TI + 3TI^2 + TI^3) \quad (2-7)$$

TI_E : 乱れ強度によるエネルギーの指標[m³/s³]

TI_{bin} : 各 BIN の平均風速の乱れ強度

U_{bin} : 各 BIN の風速[m/s]

図 2.10(a)にサイト A、図 2.10(b)にサイト B の観測高度 70m における風速 BIN0.5m/s ごとの乱れ強度による風圧の指標 TI_F の 90%カンタイル値と IEC モデルより定義された乱れ強度による風圧の指標を示す。横軸に風速階級、縦軸に乱れ強度による風圧の指標を示す。図 2.11(a)にサイト A、図 2.11(b)にサイト B の観測高度 70m における風速 BIN0.5m/s の乱れ強度によるエネルギーの指標 TI_E の 90%カンタイル値と IEC モデルより定義された乱れ強度によるエネルギー指標を示す。図は横軸に風速階級、縦軸に乱れ強度によるエネルギー指標を示す。

図 2.10(a)より、サイト A の実測に基づく乱れ強度による風圧の指標は図示された風速範囲で IEC モデルより大きくなる。風速 5.0m/s 以下の範囲では、実測に基づく乱れ強度による風圧の指標は IEC モデルと同程度である。風速 8m/s 以上の範囲では、風速の増加に従い、実測に基づく乱れ強度による風圧の指標が IEC 乱れ強度モデルより大きな値を示す。図 2.11(a)より、サイト A の実測に基づく乱れ強度によるエネルギー指標は図示された風速範囲で IEC モデルより大きくなる。風速 5.0m/s 以下の範囲では、実測に基づく乱れ強度によるエネルギー指標は IEC モデルと同程度となる。風速 5m/s 以上の範囲では、風速の増加に従い、実測に基づく乱れ強度によるエネルギーが IEC 乱れ強度モデルより大きな値を示す。したがって、サイト A に建てられた風力タービンは IEC モデルが示すよりも大きな疲労加重及び出力変動を受ける。

図 2.10(b)より、サイト B の実測に基づく乱れ強度による風圧指標は図示された風速範囲で IEC モデルと同程度の値である。また、図 2.11(b)より、サイト B の実測に基づく乱れ強度によるエネルギー指標においても、IEC モデルと同程度である。したがって、サイト B に建てられた風力タービンは IEC モデルのクラス A よりわずかに疲労加重及び出力変動を受けるが、サイト B に建てられた風力タービンは IEC モデルのクラス A 程度の疲労加重及び出力変動を受ける。

風力タービンの疲労加重及び出力変動は高風速域の乱れ強度に大きく影響を受ける。したがって、各サイトにおいて乱れ強度を評価するには風速出現率を考慮する必要がある。ここで、風圧が与える風力タービンの影響を示す指標として風圧指標の変動量、エネルギー指標の変動量を求める式として以下の式を提

案する。各変動量は以下の式より求める。

$$TI_{Fsum} = \sum_{i=0}^n (TI_{Fi} P_i) \quad (2-8)$$

TI_{Fsum} : 乱れ強度による風圧指標の変動量[m²/s²]
 TI_{Fi} : 各 BIN の乱れ強度による風圧指標期待値[m²/s²]
 P_i : 風速階級別出現率

$$TI_{Esum} = \sum_{i=0}^n (TI_{Ei} P_i) \quad (2.9)$$

TI_{Esum} : 乱れ強度によるエネルギー指標の変動量[m²/s²]
 TI_{Ei} : 各 BIN の乱れ強度によるエネルギー指標期待値[m²/s²]
 P_i : 風速階級別出現率

表2.2は各サイトの実測及びIEC 乱れ強度モデルに基づく風圧指標及びエネルギー指標の変動量を示す。IEC モデルの各変動量は比較のため、各サイトの風速階級別出現率により求める。実測に基づく各変動量は IEC モデルよりもそれぞれのサイトにおいて大きくなる。IEC モデルとサイト B の実測に基づく乱れ強度及び乱れ強度による風圧指標、エネルギー指標を比較するとサイト B は IEC モデルのクラス A 相当といえるが、変動量で評価すると IEC モデルより大きな疲労加重及び出力変動を受けることになる。

また、国内の平均的な地形であるサイト A において、IEC モデルの classA は適さないといえる。このため、国内の風況データに基づいて日本クラス(classJ)を制定すべきである。

表 2.2 乱れ強度による風圧指標の変動量

	実測値	IEC 乱れ強度モデル
サイト A	32.56 m ² /s ²	27.49 m ² /s ²
サイト B	25.08 m ² /s ²	21.53 m ² /s ²

表 2.3 乱れ強度によるエネルギー指標の変動量

	実測値	IEC 乱れ強度モデル
サイト A	525.74 m ³ /s ³	417.82 m ³ /s ³
サイト B	326.16 m ³ /s ³	289.49 m ³ /s ³

2.6 観測高度による乱れ強度の変化

複雑地形を通過する風は地形形状の影響を強く受けるため、強い乱れ強度が発生する。その影響は低高度において強く、高度の上昇とともに減少すると考えられる。そこで、本節において、各サイトの陸風及び海風の吹く 2 方位について、高度による乱れ強度の考察を行い、風が地形形状の影響を受けない高度について検討する。

(1) サイト A

図 2.12(a)にサイト A において海風である北東、図 2.12(b)にサイト A において海風である東北東の観測高度 50m、100m、200m、300m による風速ビン 0.5m/s の乱れ強度の 90%カンタイル値を示す。図にプロットされたデータに変動幅があるのはデータ数が少ないからである。そこで、サイト A の海風の高度の上昇による乱れ強度の考察は全高度においてデータ数の多い北東、東北東について行う。図(a)より、サイト A において海風である北東の乱れ強度は高度 100m から 300m の範囲で同程度となり、高度による乱れ強度の差はない。しかし、高度 50m の乱れ強度と高度 100m から 300m による乱れ強度には差が生じる。これは図(b)より、サイト A において海風である東北東においても同様のことがいえる。したがって、サイト A の海風は、高度の上昇にしたがい、乱れ強度の高度ごとの差が減少するといえる。

図 2.12(c)にサイト A において陸風である西北西、図 2.12(d)にサイト A において陸風である北西の観測高度 50m、100m、200m、300m による風速ビン 0.5m/s の乱れ強度の 90%カンタイル値を示す。図にプロットされたデータに変動幅があるのはデータ数が少ないからである。そこで、サイト A の陸風の高度の上昇による乱れ強度の考察は全高度においてデータ数の多い西北西、北西について行う。図(c)より、観測高度 50m の乱れ強度と 100m の乱れ強度の差に比べ、観測高度 200m による乱れ強度と観測高度 300m による乱れ強度の差は少ない。これは図(d)より、サイト A において陸風である北西においても同様のことがいえる。また、海風の高度による乱れ強度の差がなくなる高度は 100m である。しかし、陸風の場合は 200m である。したがって、高度による乱れ強度の差がなくなる高度は海の方が低いといえる。

また、乱れ強度による風力タービンの影響を考えると疲労加重は風速の二乗に比例し、出力変動は風速の三乗に比例する。そのため、サイト A において海風の観測高度 100m 以上の風の乱れ強度による疲労加重及び出力変動は観測高度 50m の乱れ強度によるものに比べ小さいといえる。

(2) サイト B

図 2.13(a)にサイト B において海風である北、図 2.13(b)にサイト B において海風である東南東の観測高度 50m、100m、200m、300m による風速ビン 0.5m/s の乱れ強度の 90%カンタイル値を示す。図にプロットされたデータに変動幅があるのはデータ数が少ないからである。そこで、サイト B の海風の高度の上昇による乱れ強度の考察は全高度においてデータ数の多い北、東南東について行う。図(a)、(b)より、全高度において高度による乱れ強度の差はない。

図 2.13(c)にサイト B において陸風である西北西、図 2.13(d)にサイト B において陸風である北西の観測高度 50m、100m、200m、300m による風速ビン 0.5m/s の乱れ強度の 90%カンタイル値を示す。図にプロットされたデータに変動幅があるのはデータ数が少ないからである。そこで、サイト B の陸風の高度の上昇による乱れ強度の考察は全高度においてデータ数の多い西北西、北西について行う。図(c)より、観測高度 50m の乱れ強度と 100m の乱れ強度の差に比べ、観測高度 200m による乱れ強度と 300m による乱れ強度の差は少ない。図(d)より、北西においても同様のことが言える。海風において、観測高度 50m の場合、すでに高度による乱れ強度の差はないが、陸風の場合、高度による乱れ強度の差がなくなる高度は 200m である。したがって、高度による乱れ強度の差がなくなる高度はサイト A 同様に海風の方が低い。

各サイトのすべての風において、高度が上昇すると高度による乱れ強度の差は少なくなる。低高度の場合、風は地形形状の影響により乱れ強度は大きい。しかし、高度の上昇により、地形形状の影響が減るため、乱れ強度の高度による差はなくなったのだといえる。これより、各サイトにおいて、陸風よりも海風の方が高度による乱れ強度の差がなくなる高度が低くなることから地形形状の影響を受けなくなる高度は海風の方が低いといえる。また、サイト A の海風は高度 100m 以上で地形形状の影響を受けなくなるが、サイト B の海風の場合、高度 50m において、すでに地形形状の影響を受けていない。サイト B の観測地点は海岸線であるが、サイト A の観測地点は内陸に約 1.5km の丘陵地に設置されている。そのため、サイト A の海風はサイト B の海風に比べ陸を通過してきているため、地形形状の影響がなくなる高度が高かったのだといえる。

まとめ

- ・ サイト A は西北西、サイト B は西北西、北西が各高度で出現率が高く卓越風向である。
- ・ 本研究において、各サイトの乱れクラスについて検討したところ、サイト A は風力タービンの乱れ強度について規格している IEC が提示する最も高い乱れ強度クラス(classA)の乱れ強度よりも高い乱れ強度をもつ。サイト B は classA 相当の乱れ強度である。
- ・ 本研究で、提案する疲労加重に相当する乱れ強度による風圧指標の変動量用いて、IEC モデルの classA が提示する乱れ強度による疲労加重と classA 相当の乱れ強度をもつサイト B の乱れ強度による疲労加重について検討したところ、サイト B の乱れ強度は IEC モデルのクラス A よりも大きな疲労加重を風力タービンに与える。
- ・ 本研究において、各サイト海風と陸風の高度による乱れ強度について考察したところ、高度が上昇すると、高度による乱れ強度の差がなくなる。低高度の場合、風は地形形状の影響により乱れ強度は大きい。さらに、各サイトの陸風、海風の高度による地形形状の影響を考察したところ、海風は陸風に比べ高度による乱れ強度の差がなくなる高度が低いまた、サイト A の海風に比べより海に近い場所で観測されたサイト B の海風の方が高度による乱れ強度の差がなくなる高度が低い。これは海から離れている観測地点の海風が陸地を通過する過程で地形形状の影響を受けるただと思われる。

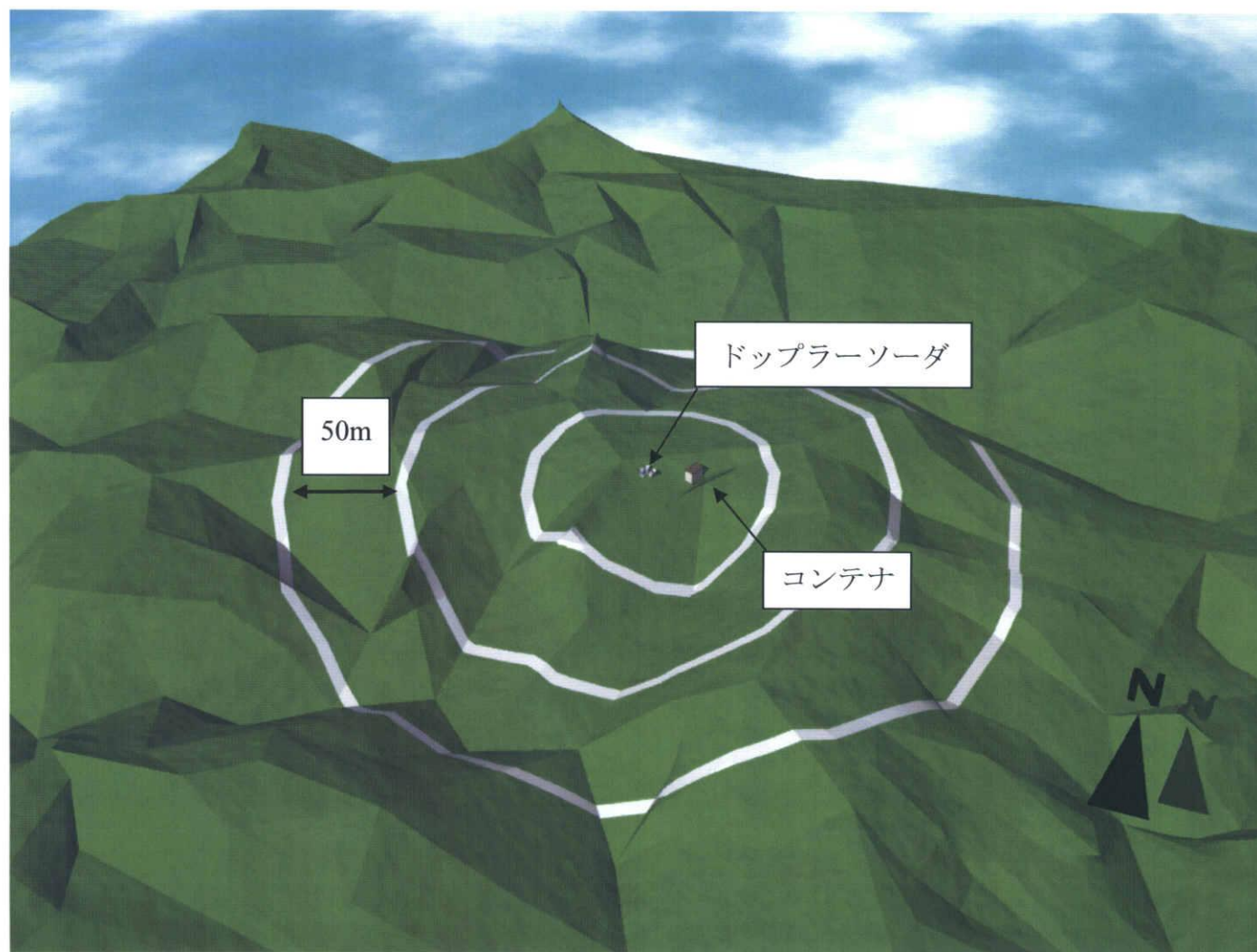


図 2.1 サイト A の鳥瞰図

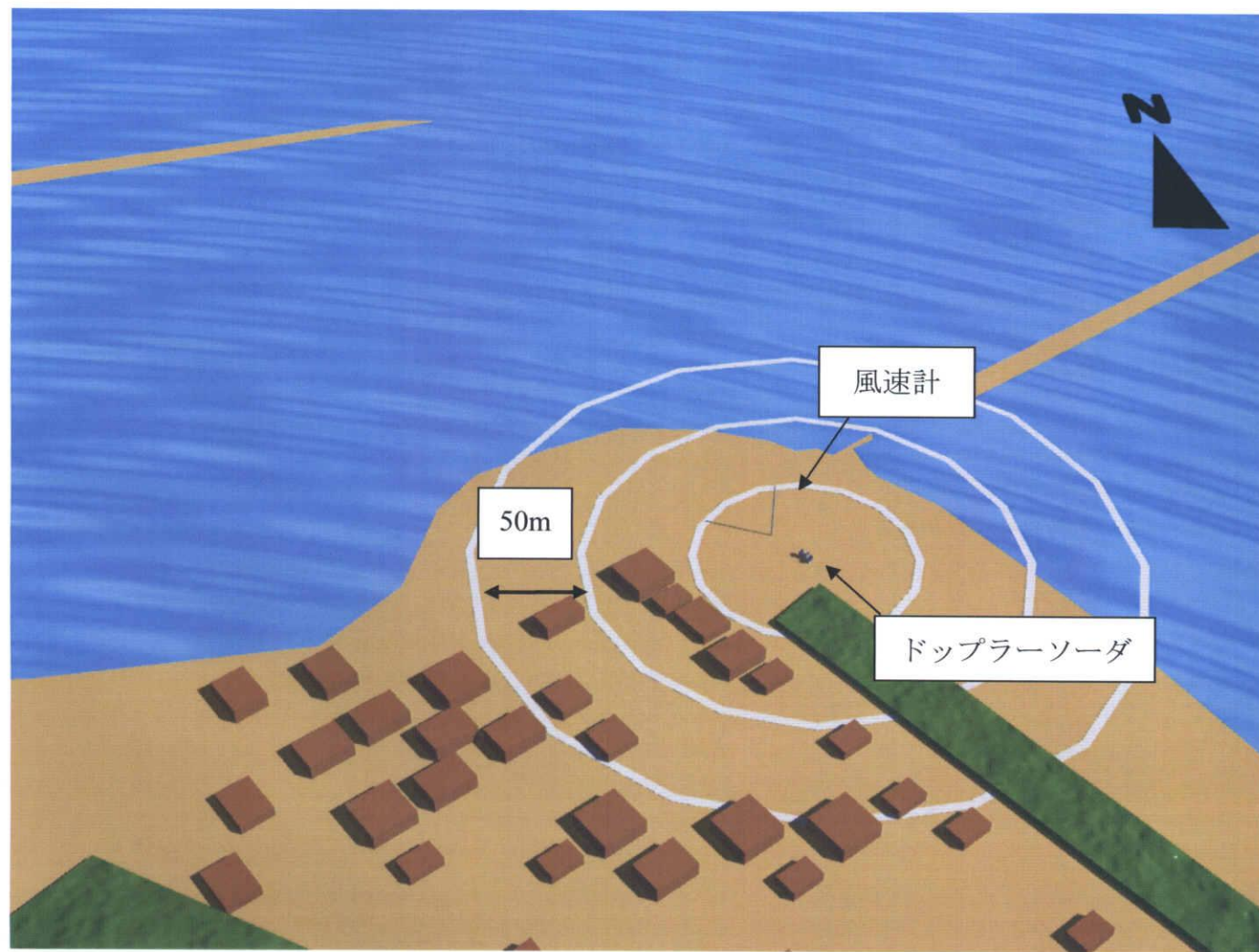


図 2.2 サイト B の鳥瞰図

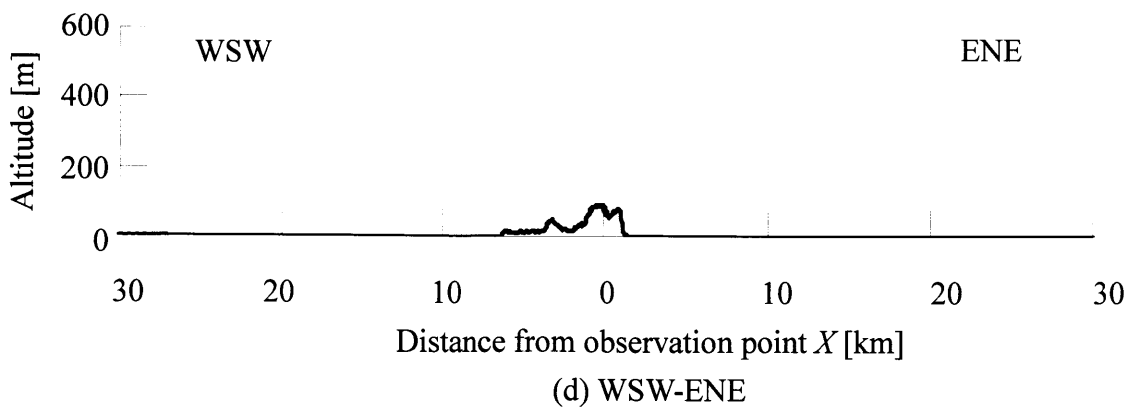
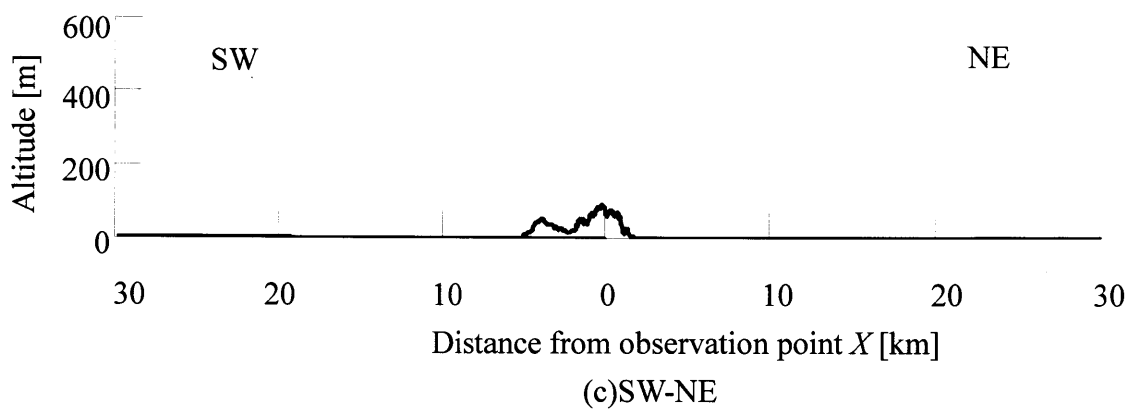
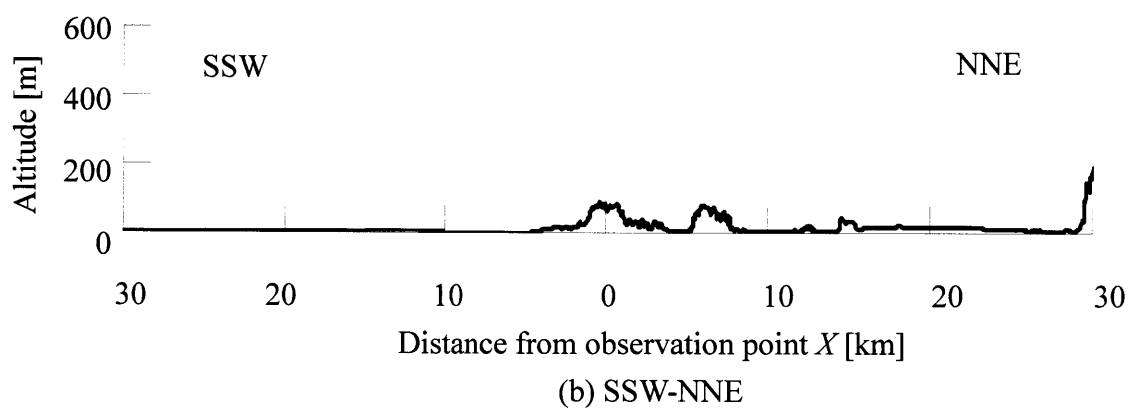
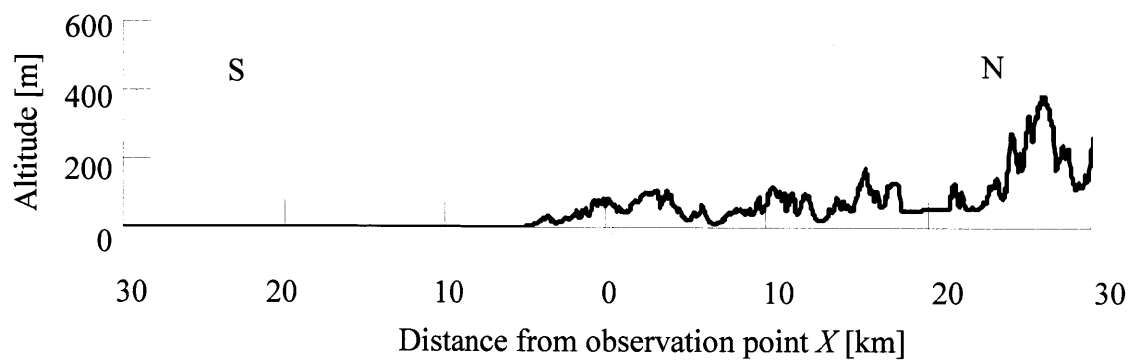
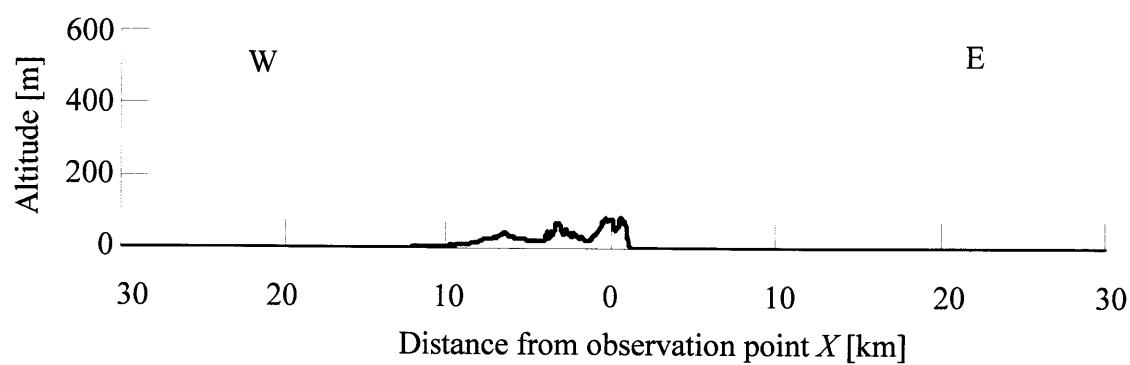
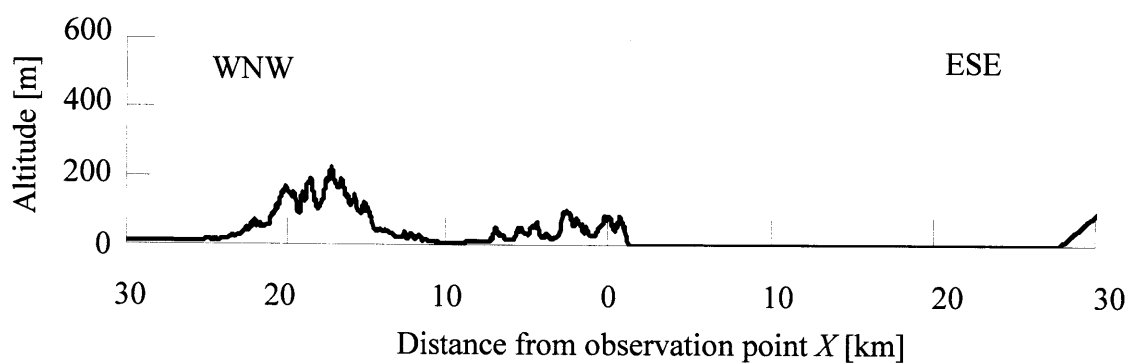


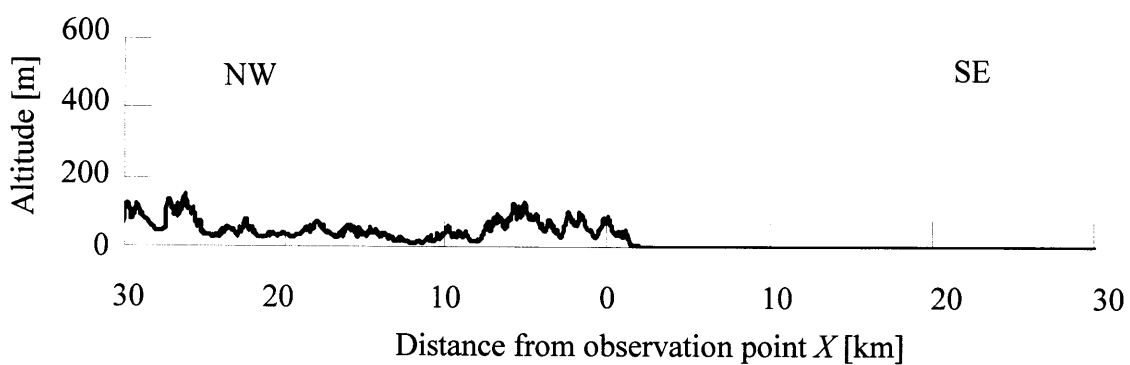
図 2.3 サイト A の断面図(a)～(d)



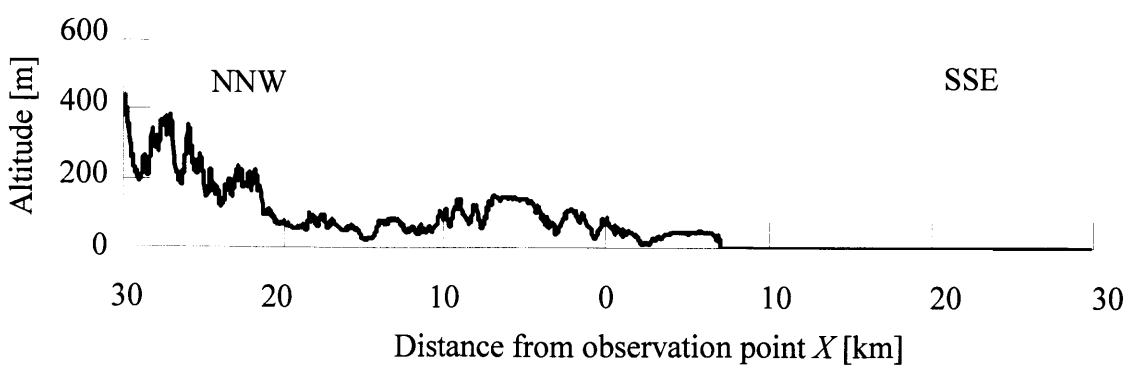
(e) W-E



(f) WNW-ESE

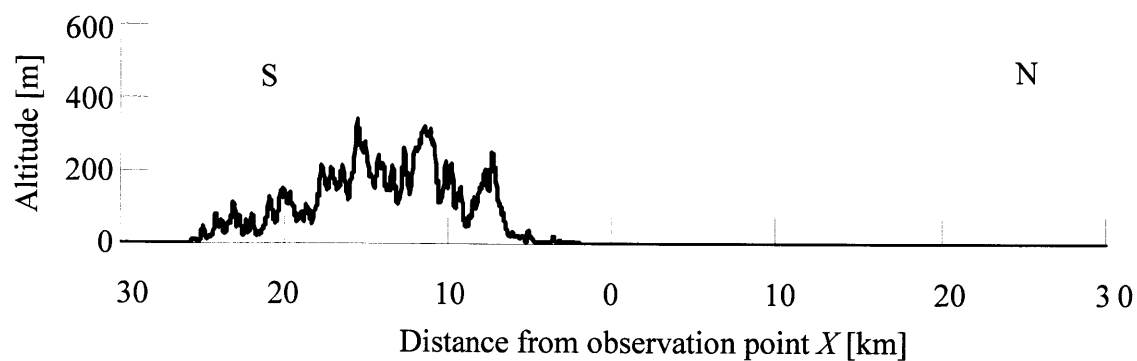


(g) NW-SE

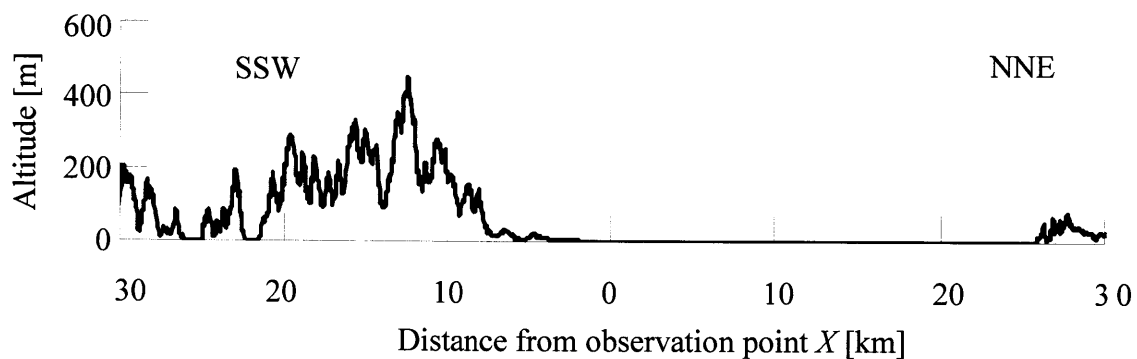


(h) NNW-SSE

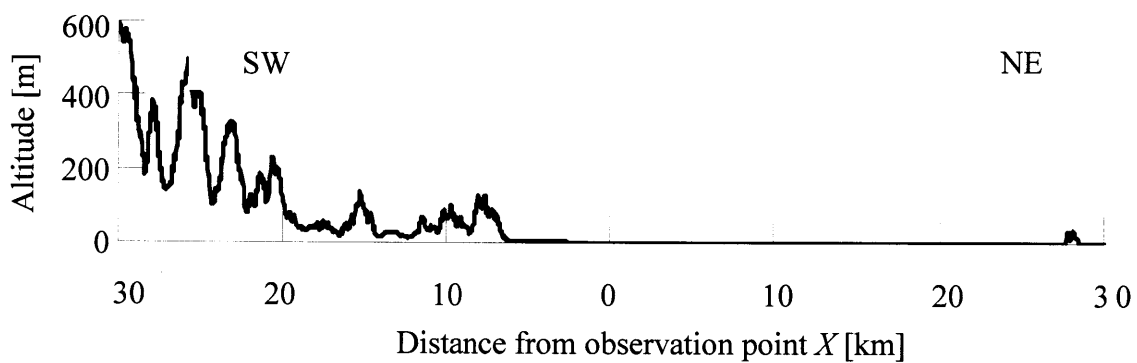
図 2.3 サイト A の断面図(e)～(h)



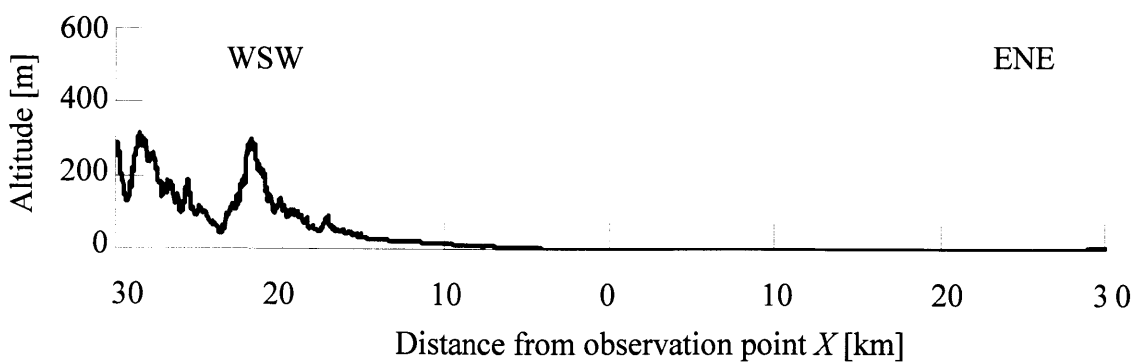
(a) S-N



(b) SSW-NNE

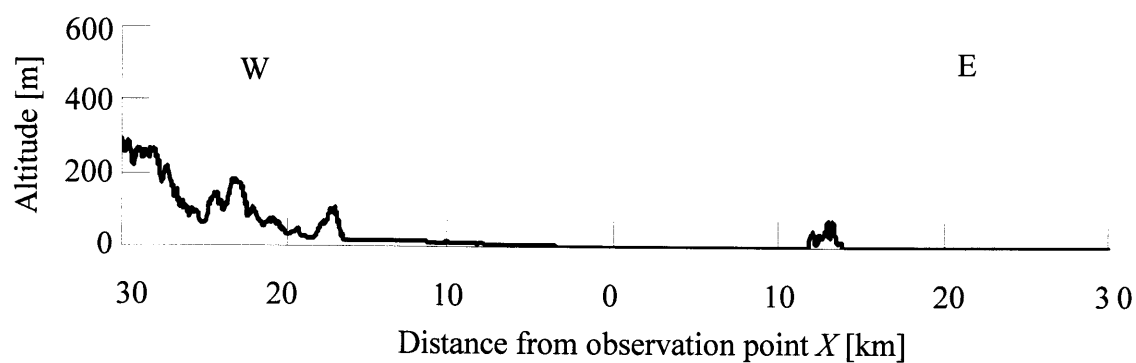


(c) SW-NE

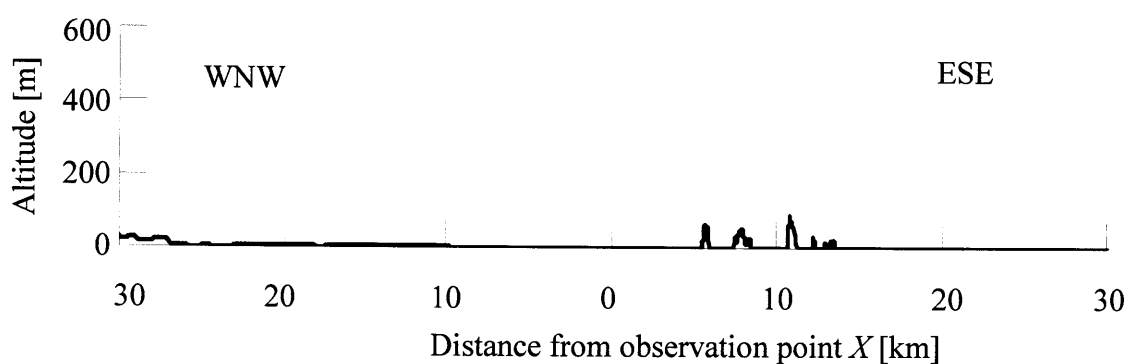


(d) WSW-ENE

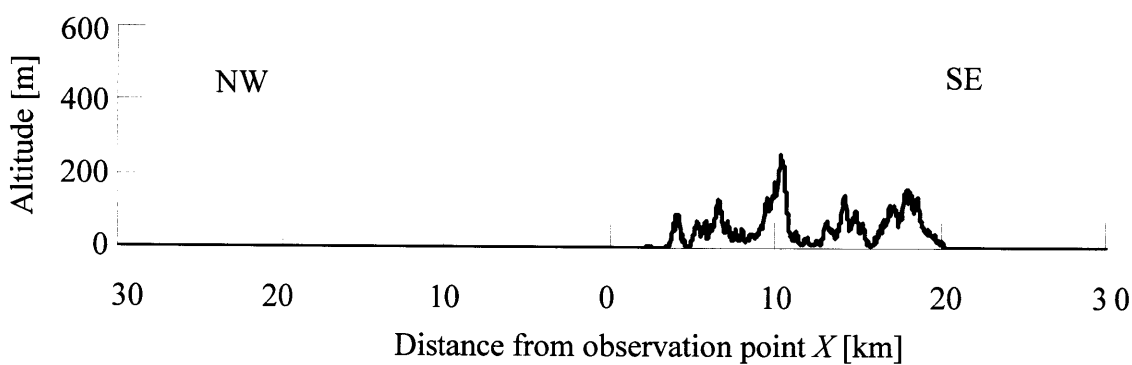
図 2.4 サイト B の断面図(a)~(d)



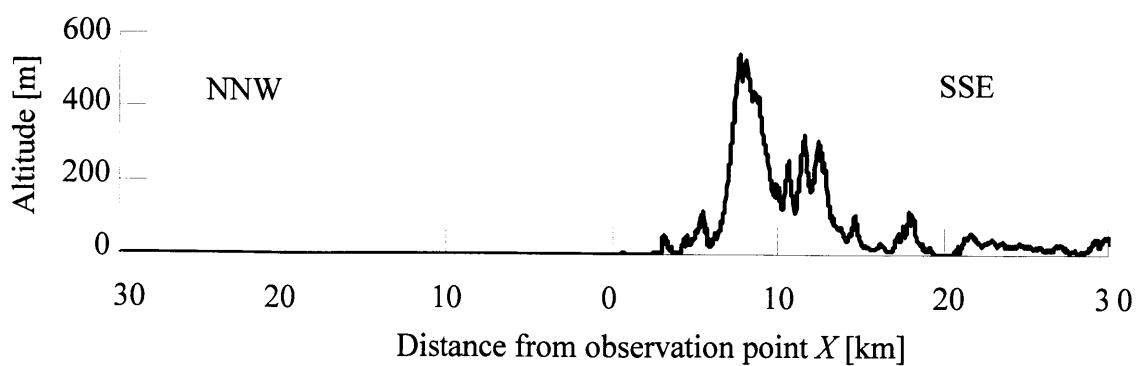
(e) W-E



(f) WNW-ESE

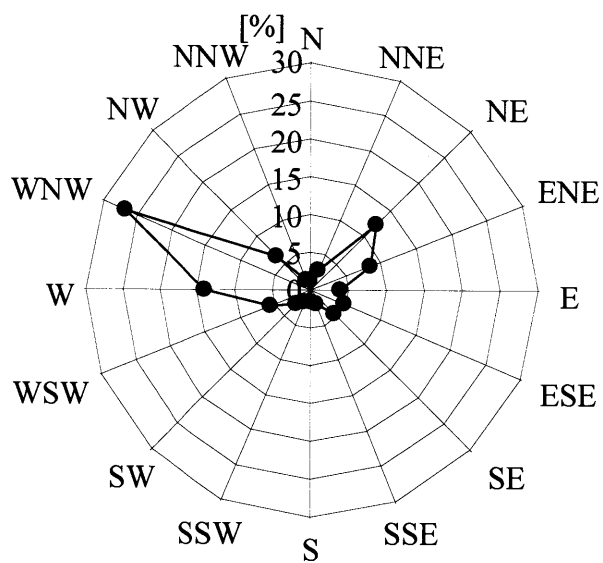


(g) NW-SE

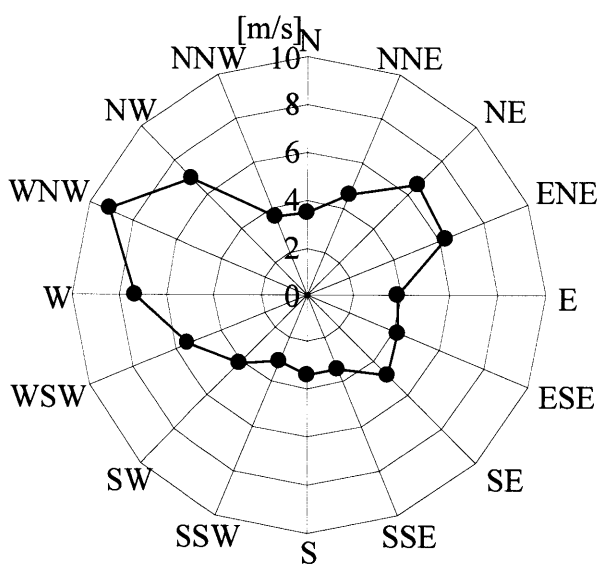


(h) NNW-SSE

図 2.4 サイト B の断面図(e)~(h)

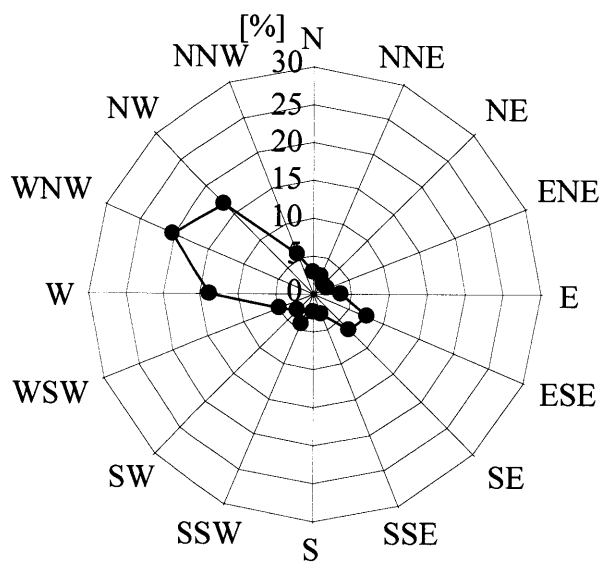


(a) Frequency AP[%]

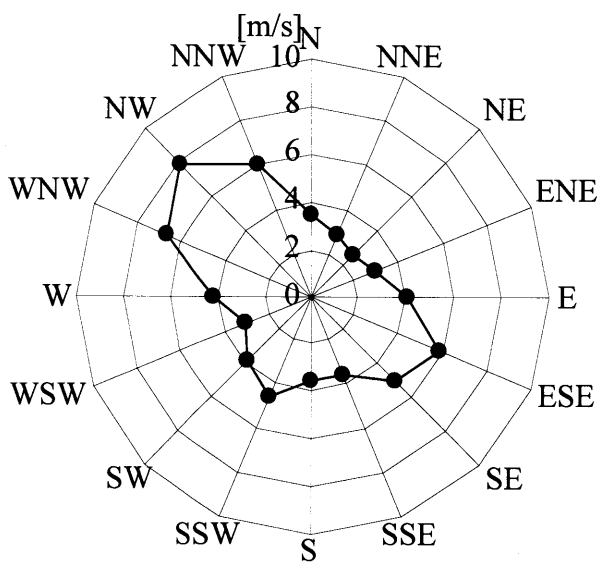


(b) Wind Speed U[m/s]

図 2.5 サイトAの方位別風速出現率、平均風速(観測高度 70m)

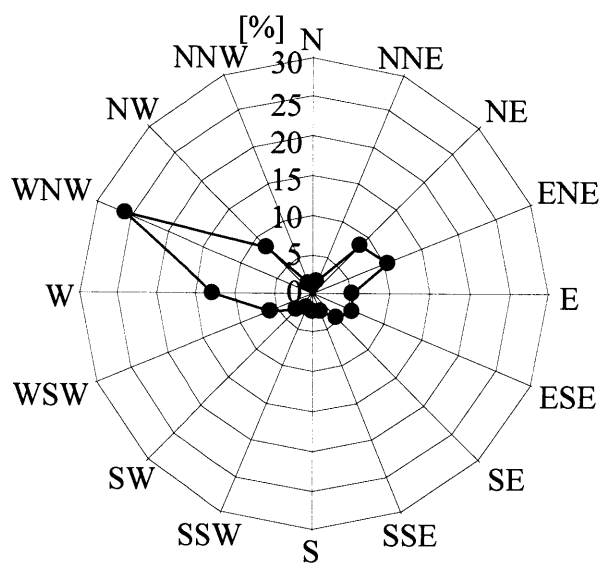


(a) Frequency AP[%]

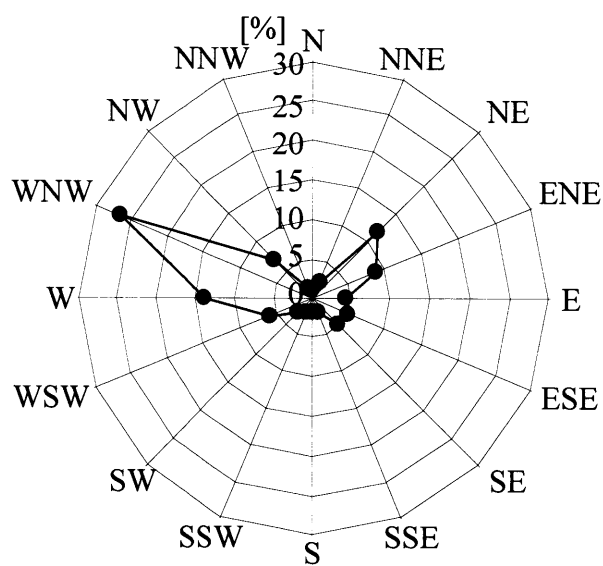


(b) Wind Speed U[m/s]

図 2.6 サイト B の方位別風速出現率、平均風速(観測高度 70m)



(a) 50m Frequency $AP[\%]$



(b) 100m Frequency $AP[\%]$

図 2.7 (a),(b) サイト A の方位別風速出現率 (高度 50m、高度 100m)

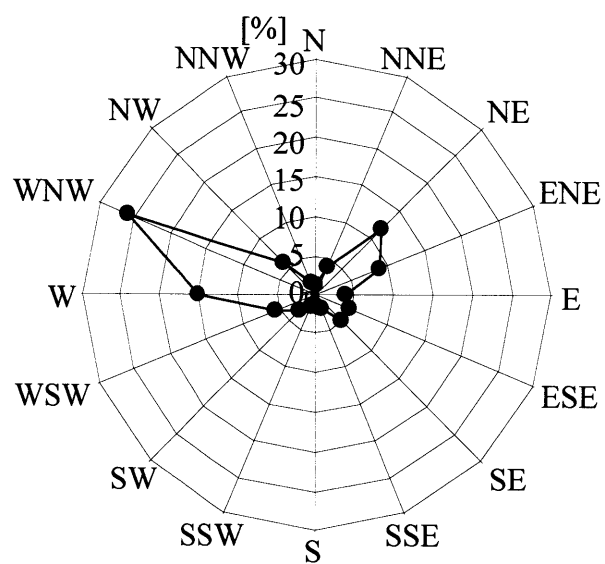
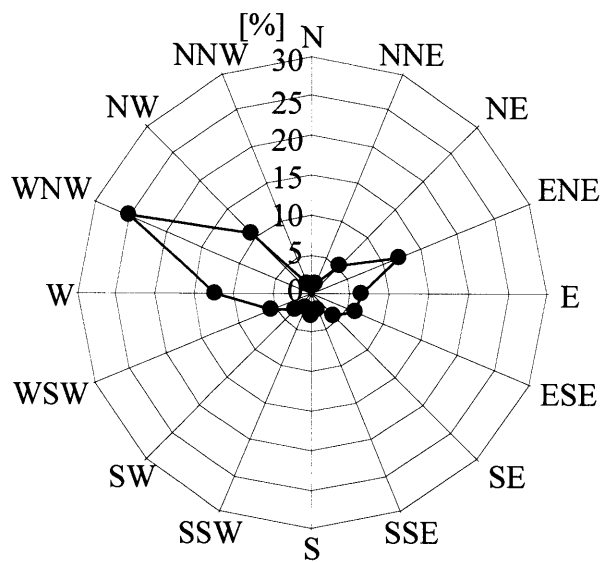
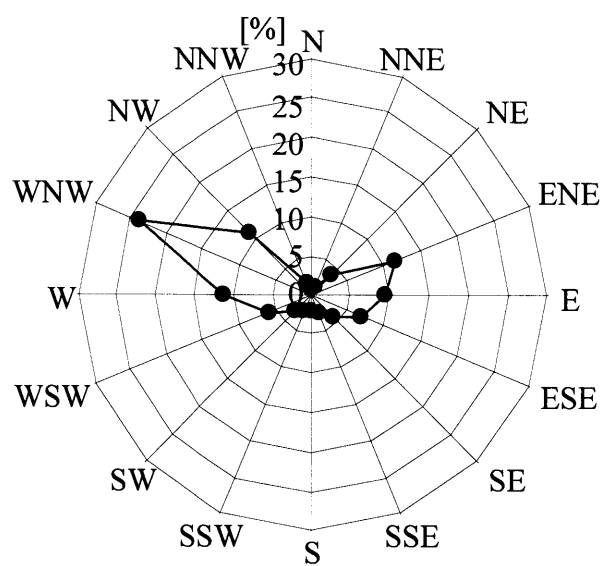
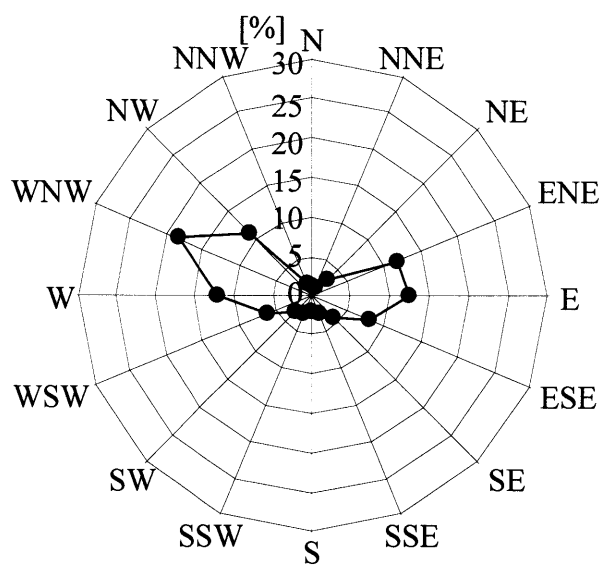
(c) 200m Frequency $AP[\%]$ (d) 300m Frequency $AP[\%]$

図 2.7 (c),(d) サイト A の方位別風速出現率 (高度 200m、高度 300m)

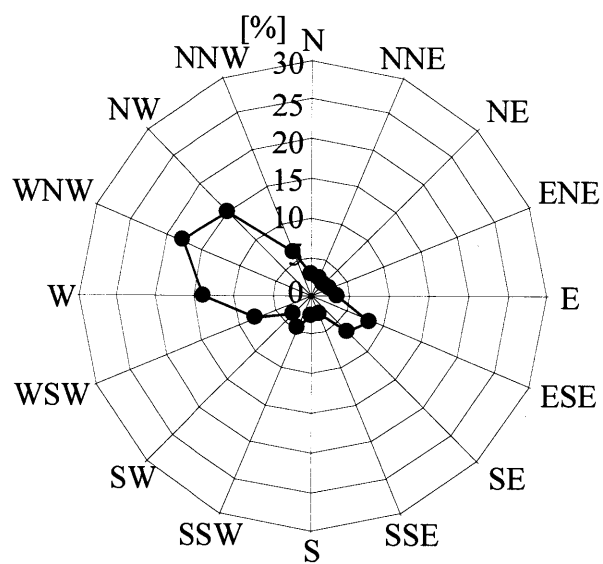


(e) 400m Frequency AP[%]

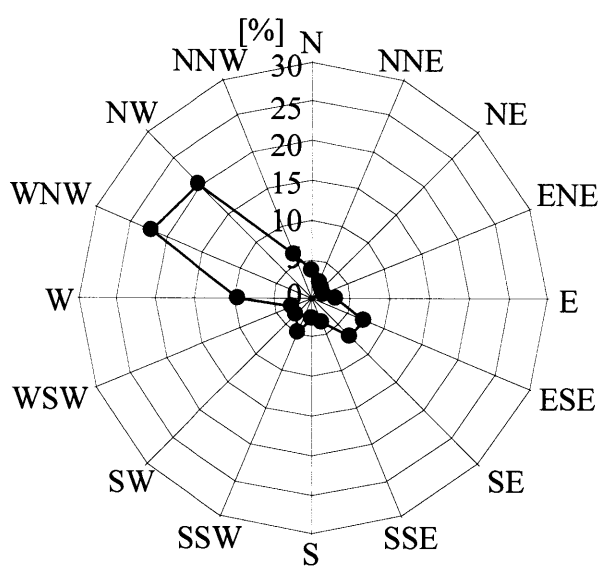


(f) 500m Frequency AP[%]

図 2.7 (e),(f) サイト A の方位別風速出現率 (高度 400m、高度 500m)



(a) 50m Frequency AP[%]



(b) 100m Frequency AP[%]

図 2.8 (a),(b) サイト B の方位別風速出現率 (高度 50m、高度 100m)

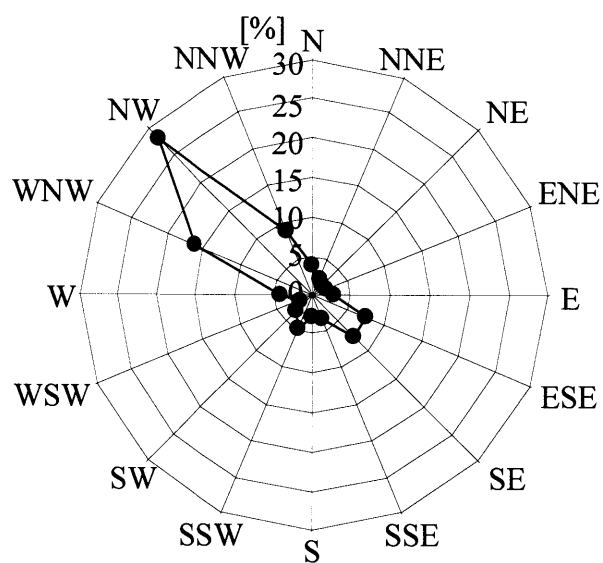
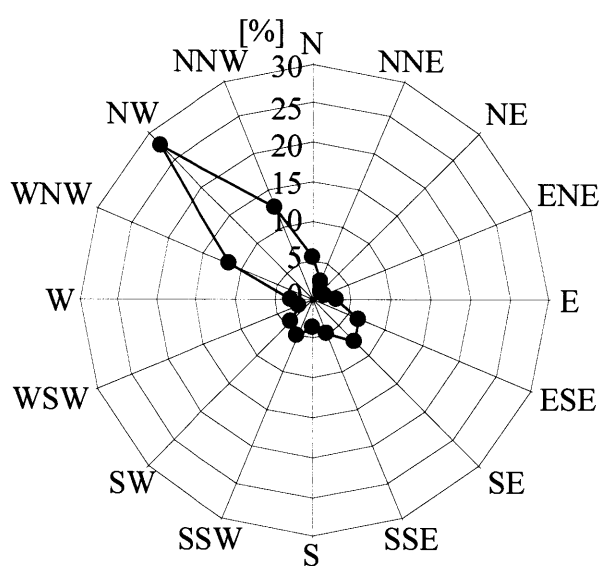
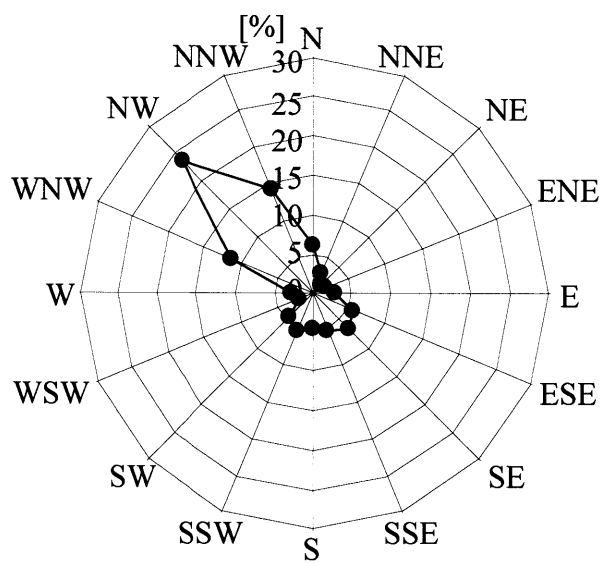
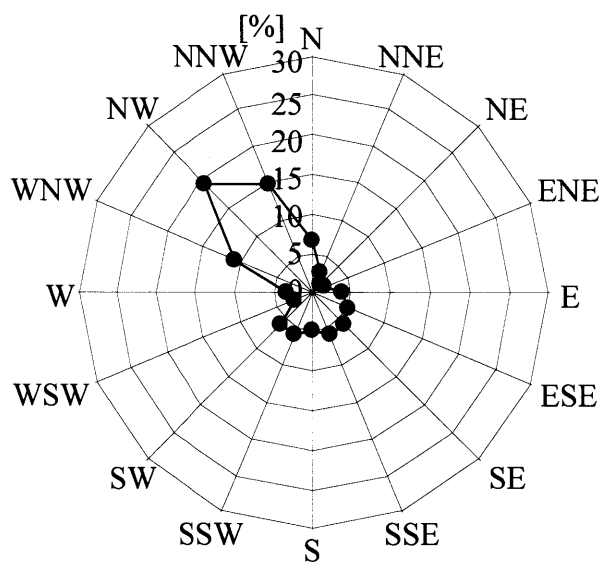
(c) 200m Frequency $AP[\%]$ (d) 300m Frequency $AP[\%]$

図 2.8(c),(d) サイト B の方位別風速出現率 (高度 200m、高度 300m)

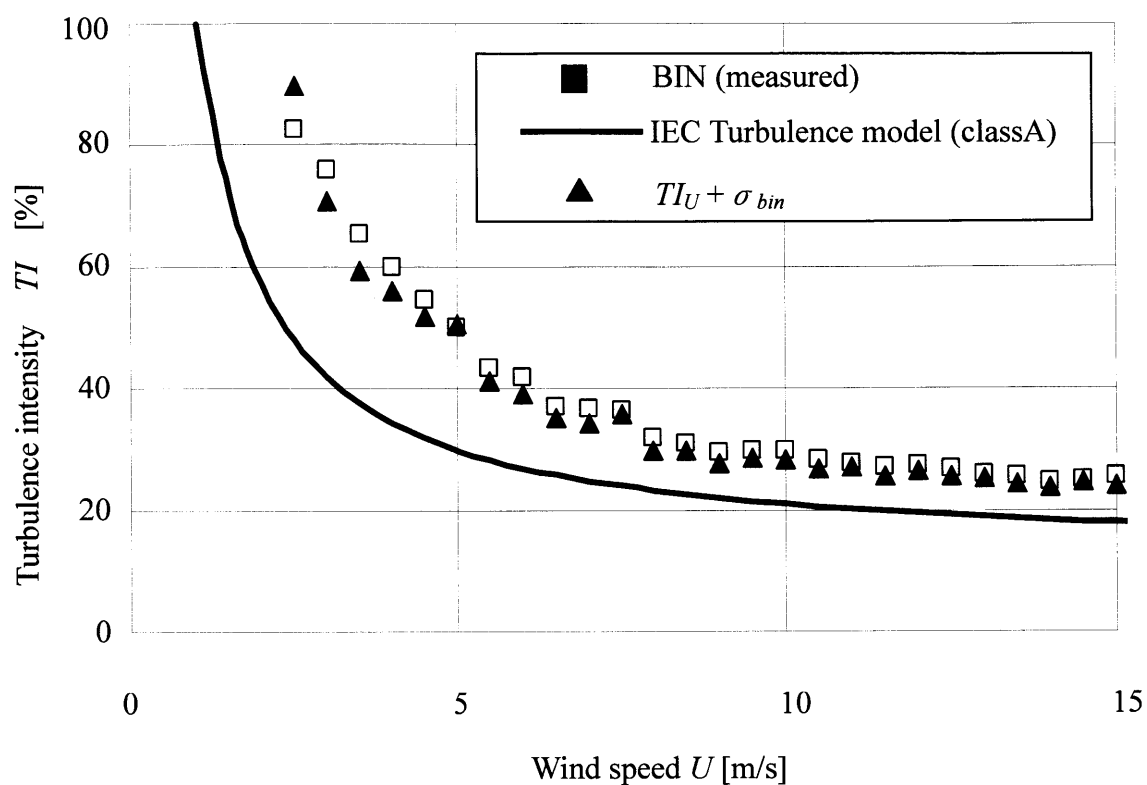


(e) 400m Frequency AP[%]

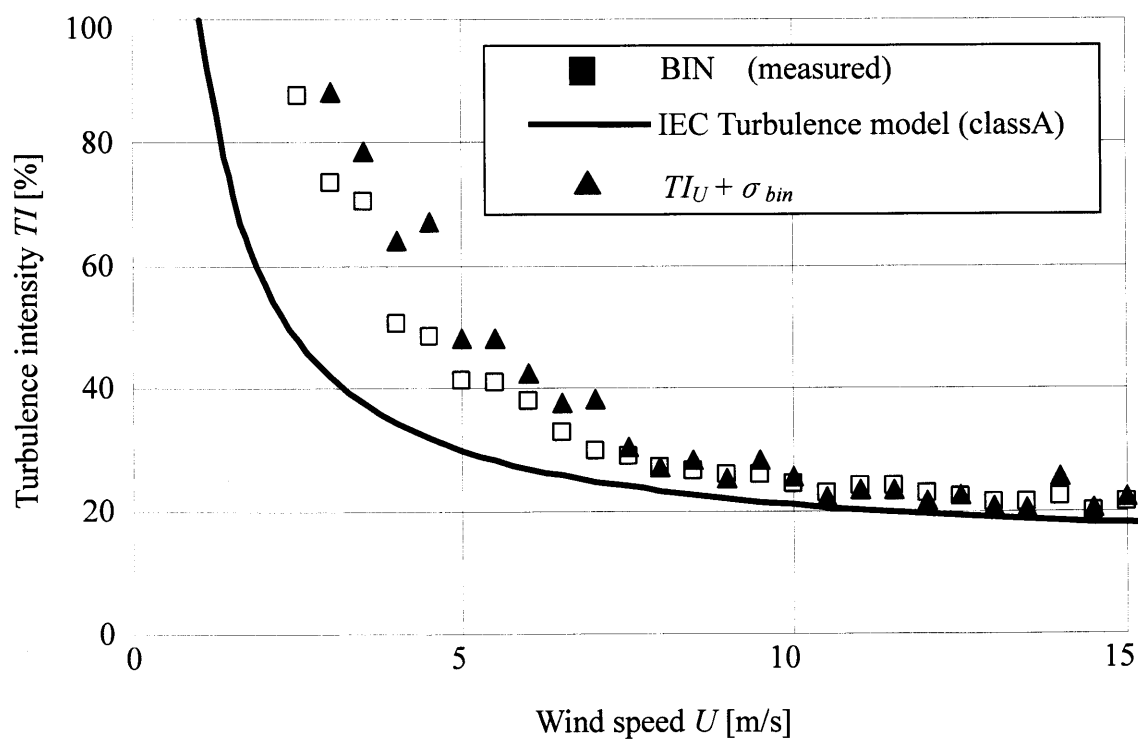


(f) 500m Frequency AP[%]

図 2.8 (e),(f) サイト B の方位別風速出現率 (高度 400m、高度 500m)

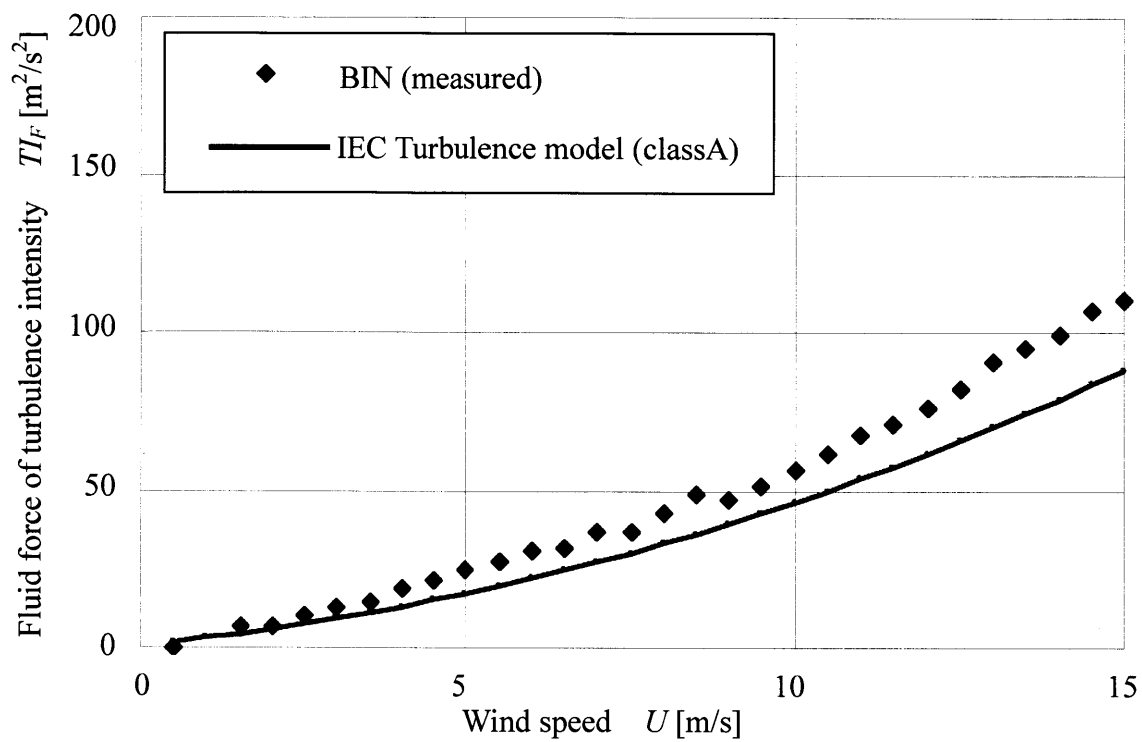


(a) Site A

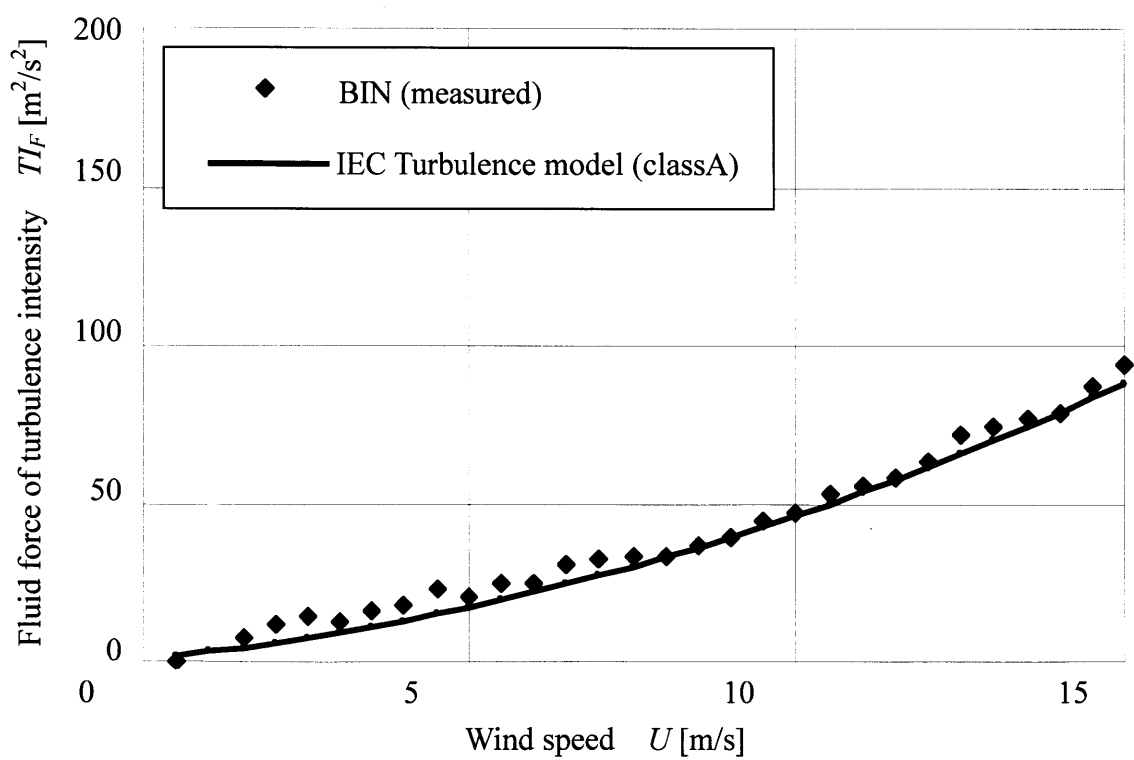


(b) Site B

図 2.9 各サイトの風速 BIN の乱れ強度(高度 70m)



(a) Site A



(b) Site B

図 2.10 各サイトの風速 BIN の乱れ強度による風圧指標

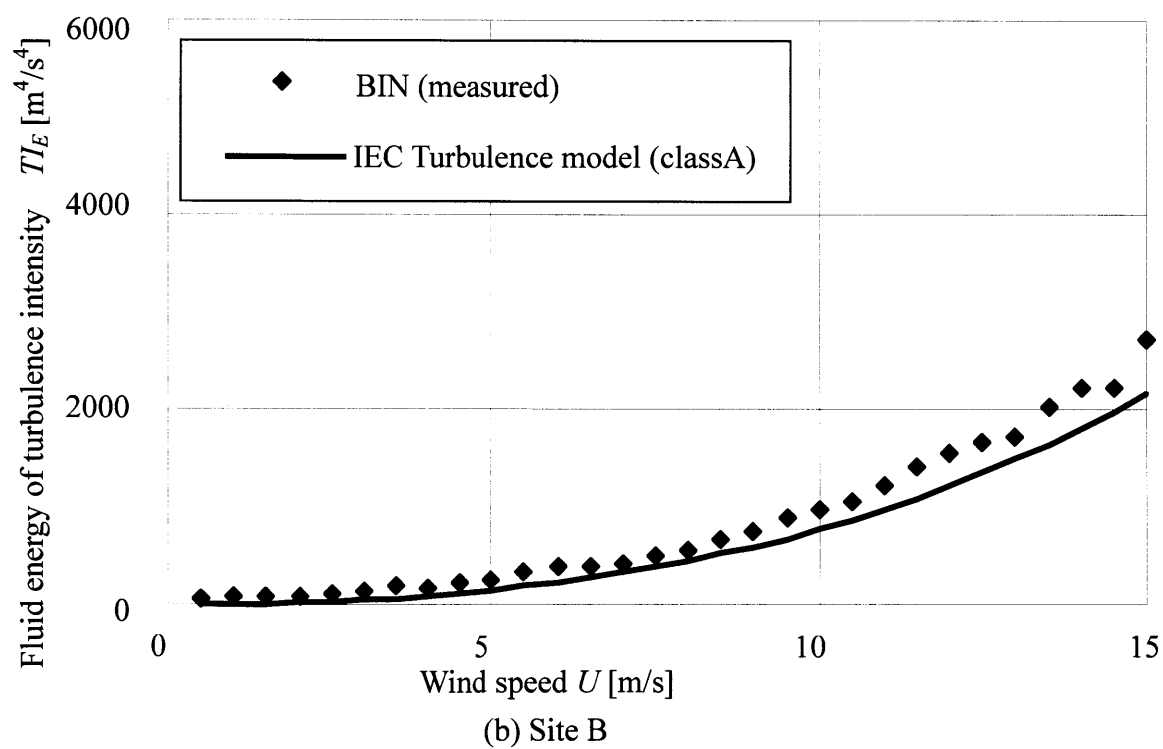
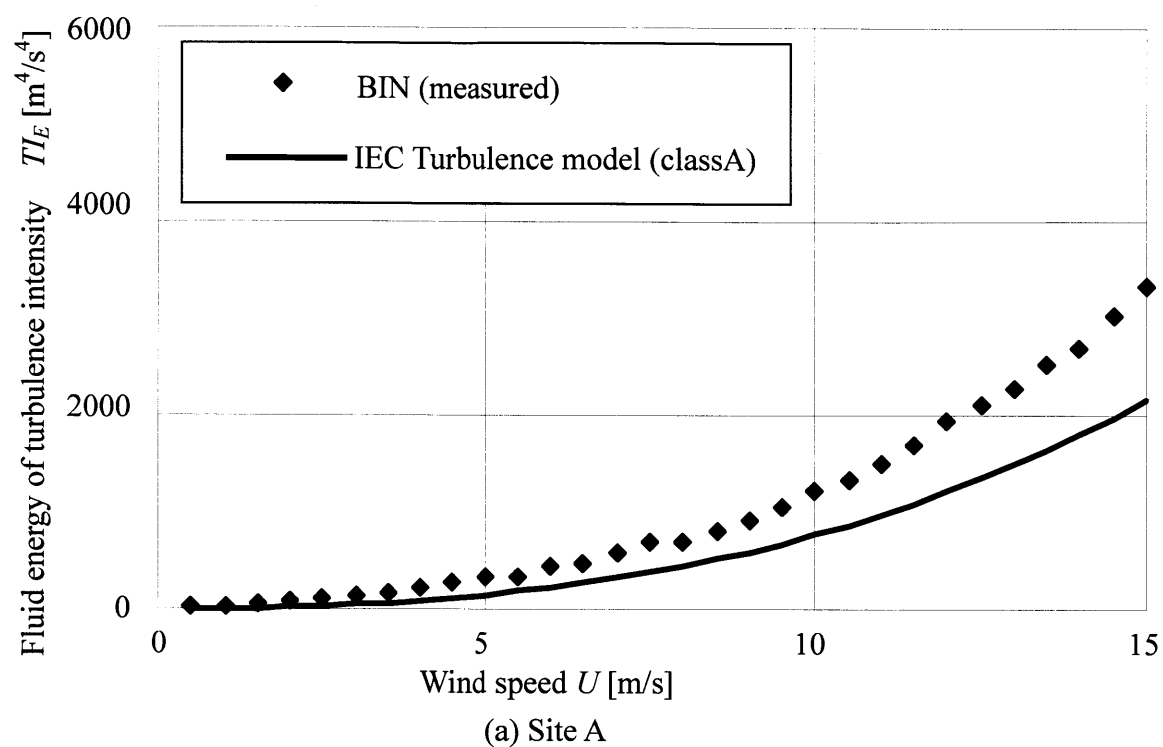
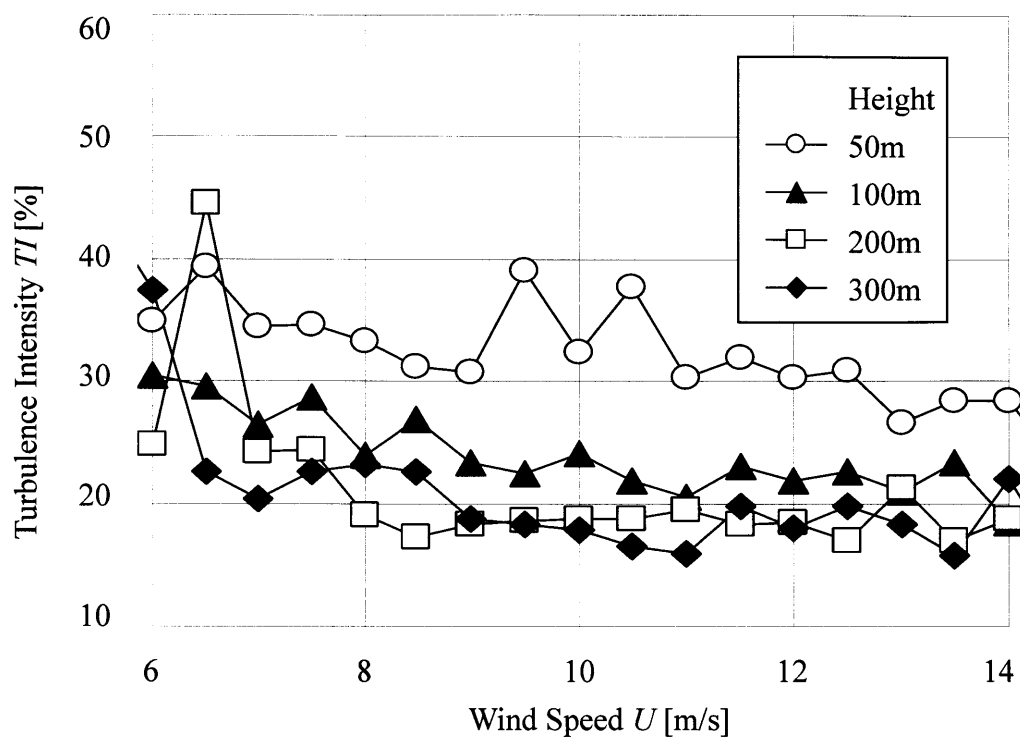
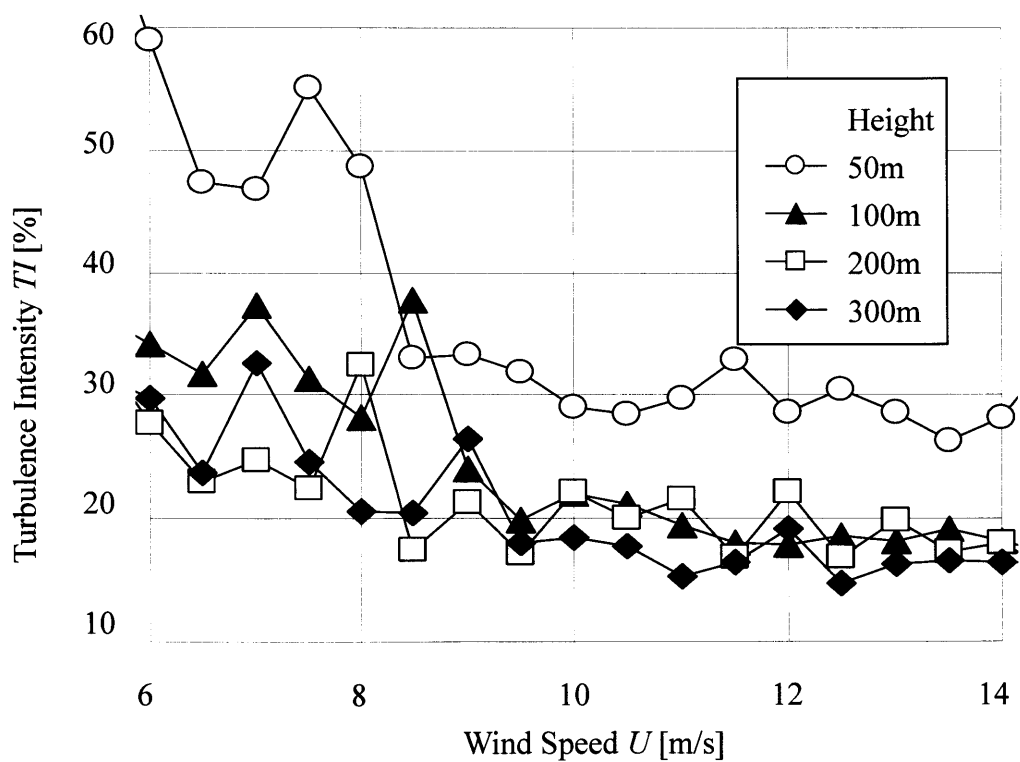


図 2.11 各サイトの風速 BIN の乱れ強度によるエネルギー指標

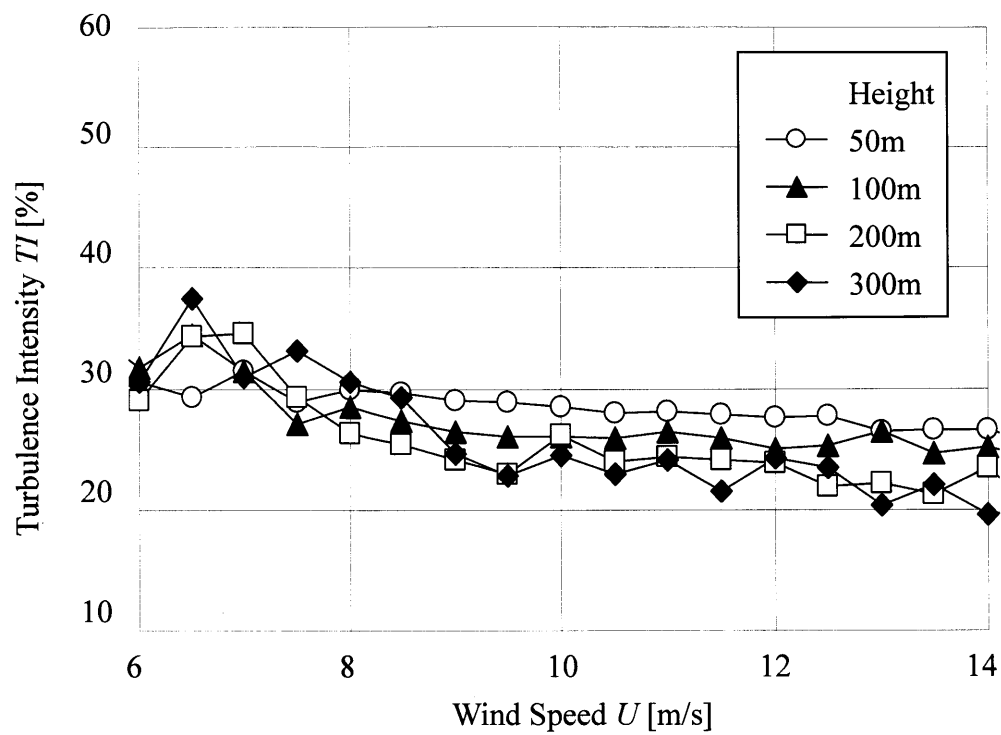


(a) Site A NE

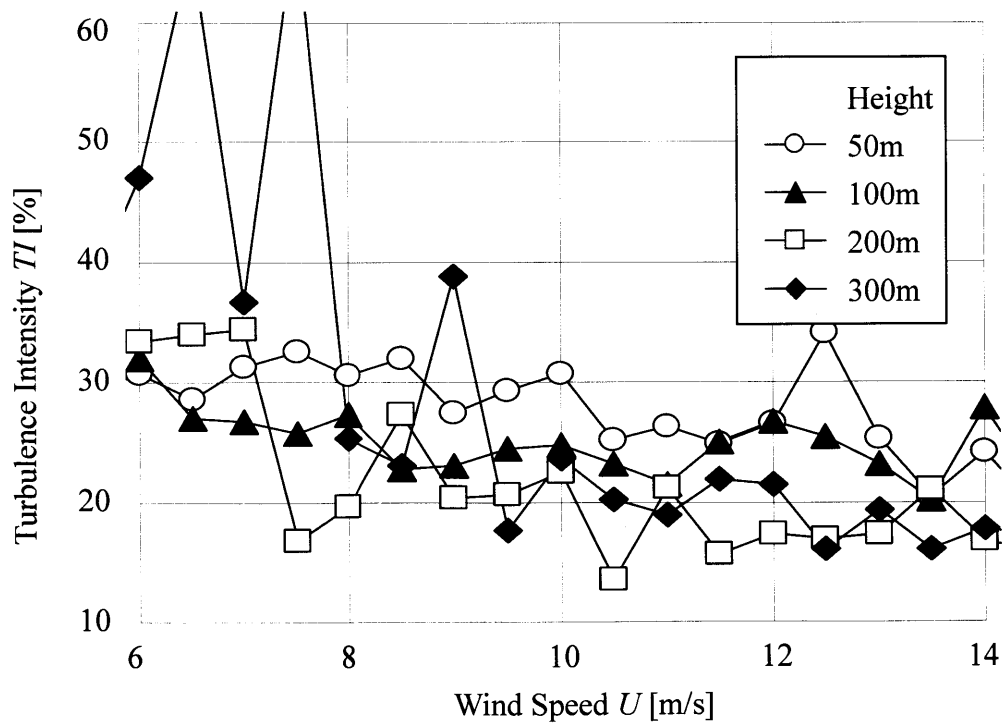


(b) Site A ENE

図 2.12 Site A における各高度の乱れ強度(a)、(b)



(c) Site A WNW



(d) Site A NW

図 2.12 Site A における各高度の乱れ強度(c)、(d)

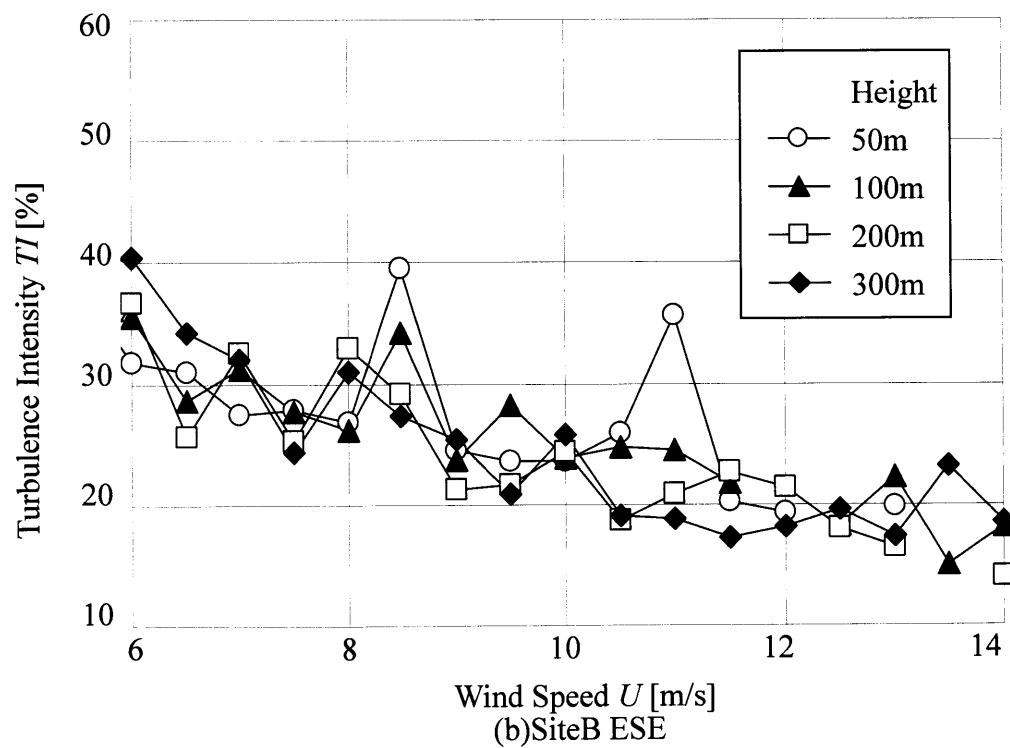
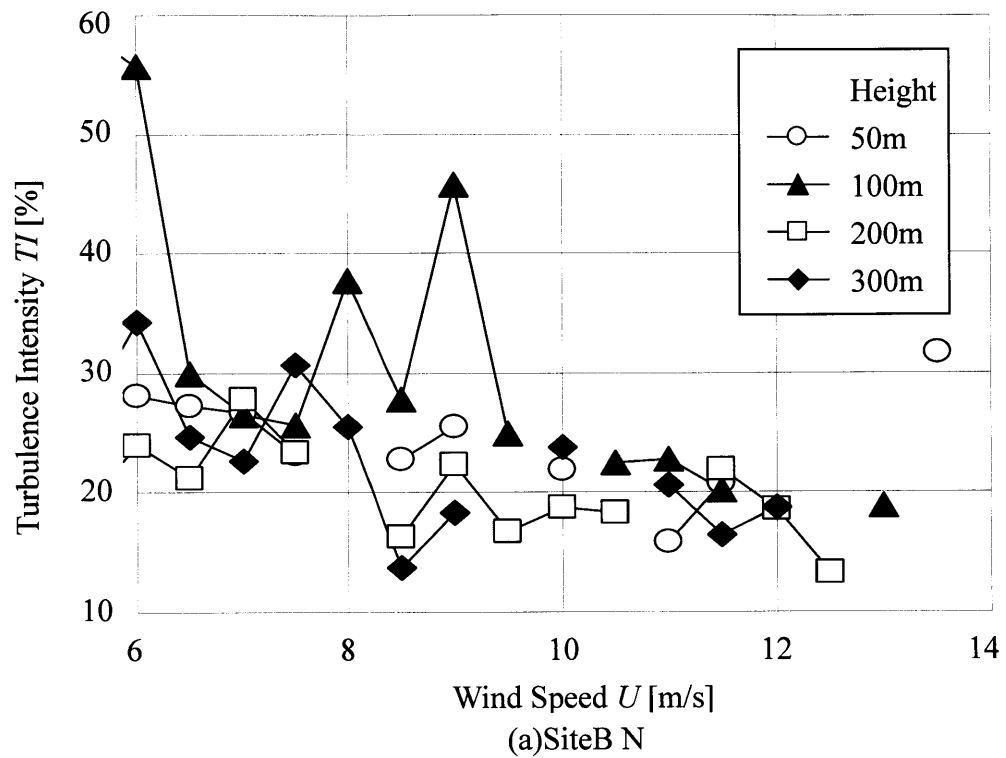


図 2.13 Site B における各高度の乱れ強度(a)、(b)

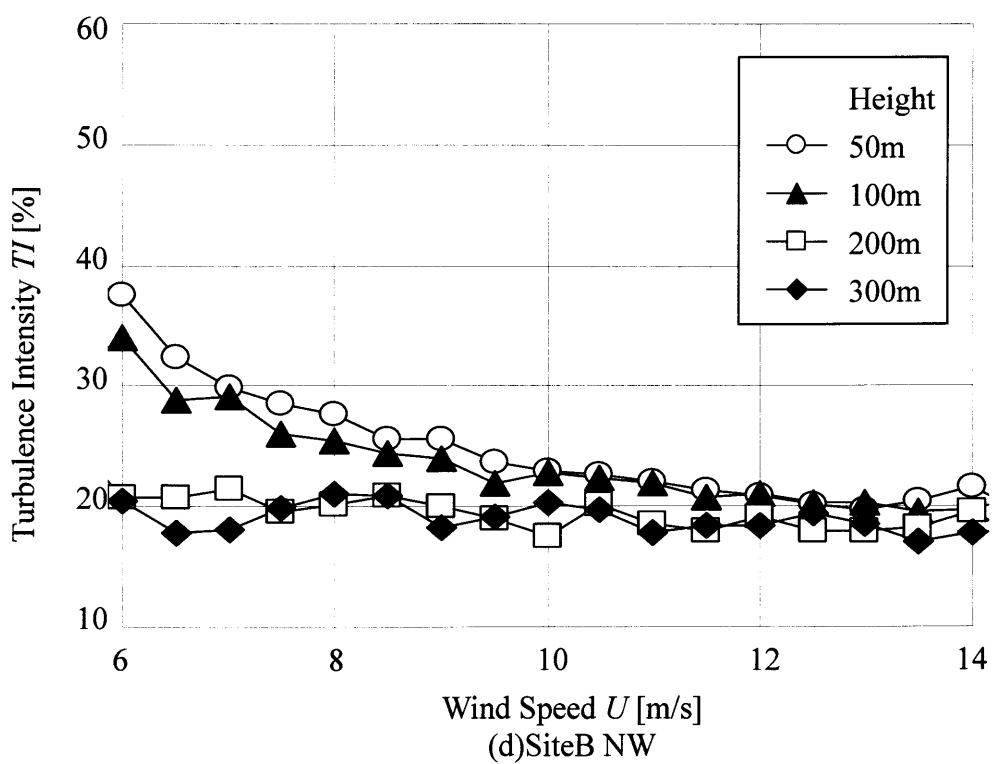
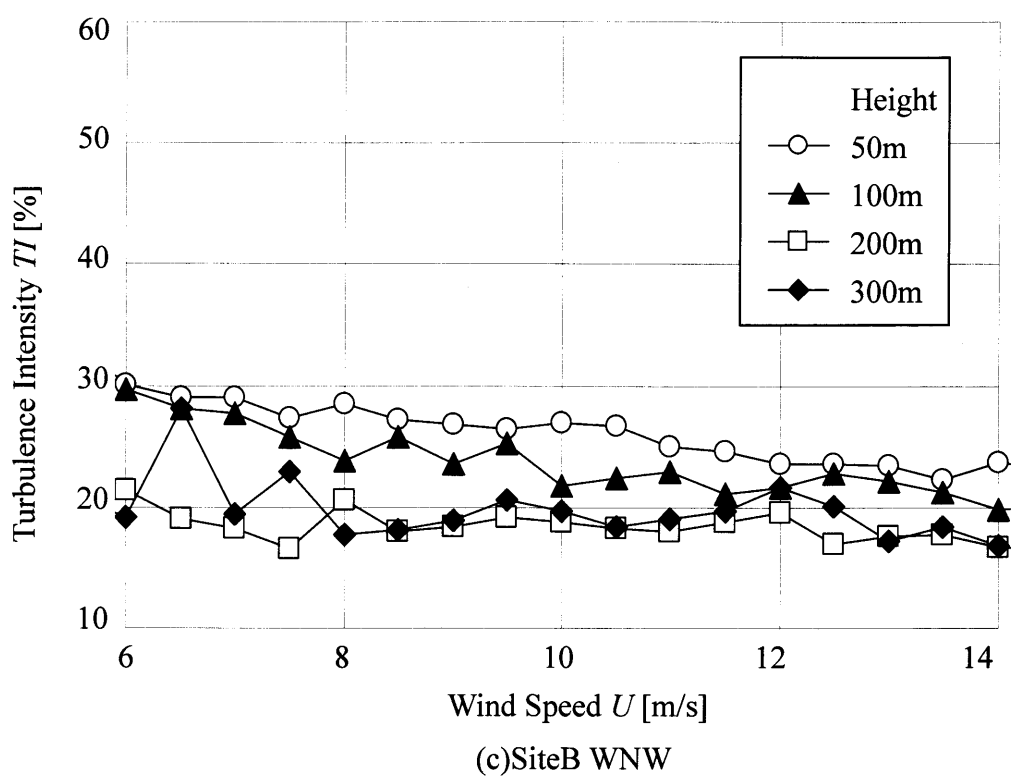


図 2.13 Site B における各高度の乱れ強度(c)、(d)

結言

本研究において、以下のことが明らかになった。

1. 本研究で、提案する疲労加重に相当する乱れ強度による風圧指標の変動量用いて、IEC モデルの classA が提示する乱れ強度による疲労加重と classA 相当の乱れ強度をもつあるサイトの乱れ強度による疲労加重について検討したところ、あるサイトの乱れ強度は IEC モデルのクラス A の乱れ強度よりも大きな疲労加重を風力タービンに与える。また、出力変動に相当する乱れ強度によるエネルギー指標を用いて同様に検討したところ、同じことがいえた。したがって、IEC 乱れ強度モデルは、風力タービンへの疲労加重や出力変動の影響を調べるために用いることは適さないといえる。
2. 本研究において、各サイト海風と陸風の高度による乱れ強度について考察したところ、高度が上昇すると、高度による乱れ強度の差がなくなる。低高度の場合、風は地形形状の影響により乱れ強度は大きい。さらに、各サイトの陸風、海風の高度による地形形状の影響を考察したところ、海風は陸風に比べ高度による乱れ強度の差がなくなる高度が低い。したがって、地形形状の影響がなくなる高度は低い。また、海風はより海に近い場所で観測された海風の方が高度による乱れ強度の差がなくなる高度が低い。これは海から離れている観測地点の海風は陸地を通過する過程で地形形状の影響を受けるためだと思われる

参考文献

- [1] 竹内 清秀 著 “風の気象学” 東京大学出版会
- [2] 浅井 富雄 著 “ローカル気象学” 東京大学出版会
- [3] 竹内 清秀・近藤 純正 著 “大気科学講座 1 地表に近い大気”
東京大学出版会
- [4] 今村 博、妻沼 朋己、黒川 淳一、松宮 輝、猪俣 登
“複雑地形における風況測定と風力タービン性能評価に関する研究”
(第2報, 風況特性および乱れ度の影響)
2004年 日本機械学会論文集(B編)70巻693号

謝辞

本論文は様々な方の協力により完成することができました。前田太佳夫教授には本研究に携わる機会を与えて頂き感謝しております。また、様々な場所において風況観測を行う機会も頂き感謝しております。おかげで、多くの人に出会うことが出来、またその方々から多くのことを学ぶことができました。この体験は今後の人生にとっても役に立つ貴重なものでした。心から厚く御礼申し上げます。鎌田泰成助教授には先生の貴重な時間を本論文の作成のために削ってしまい申し訳ございませんでした。また、先生には研究や風況観測の現場において基礎から教えていただきました。心から厚く御礼申し上げます。都築修子秘書には様々な面からサポートしていただきました。心から感謝いたします。

本論文の作成にあたり M1 のみんなと富山一樹君には全面的に協力していただきました。みんなの貴重な時間を頂き、どうにか完成することができました。本当にありがとうございます。

ドップラーソーダの設置の際にはカイジョーソニックの方々、太田商店の方々に協力していただきました。また、設置の仕方や装置の扱い方を教えていただきました。本当にありがとうございました。

風況観測の際、その町の方々、電源開発の方々にも本当にお世話になりました。風況観測はとてもつらかったですが皆さんのおかげでどうにか乗り越えることが出来ました。本当にありがとうございました。

今までの人生を振り返っても私は本当に人に恵まれていたと思います。また、研究室に入ってから本当に人に恵まれていました。三重大学の在学中には自分の能力不足により、人に迷惑を掛けてばかりでした。今後はみなさんにお世話になったことを無駄にしないためにも、また、これ以上自分の能力不足により、人に迷惑を掛けないためにも頑張っていきます。

お世話になった皆様本当にありがとうございました。

平成 18 年 2 月 6 日

中野 桂太