

複写可

平成 20 年度 修士論文

フィールド水平軸風力タービンの  
後流解明とガストによる空力負荷変動

2009 年 2 月 4 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

古澤 雅佳

緒言	1
主な記号	2
第1章 実験装置および実験方法	
1.1 供試風車および風車周辺装置	4
1.2 供試翼	
1.3 測定装置	
1.3.1 測定装置	
1.3.2 風車後流測定装置	
1.3.3 歪み測定装置	
1.4 実験方法	
第2章 非定常流れ下における風車後流分布	
2.1 はじめに	26
2.2 定義式	
2.2.1 風速	
2.2.2 乱れ強度	
2.2.3 風向標準偏差	
2.3 データ整理方法	
2.3.1 アナログ及びデジタル出力測定値の置換	
2.3.2 後流速度分布測定	
2.4 実験結果および考察	
2.4.1 テストサイト	
2.4.2 風向許容範囲の影響	
2.4.3 フィールド風力タービンにおける風車後流	
2.4.3.1 鉛直方向速度分布	
2.4.3.2 乱れ強度比	
2.4.3.3 風向の標準偏差比	
2.4.3.4 流入風の乱れ強度による風車後流	
2.5 まとめ	
第3章	
3.1 はじめに	60
3.2 データ整理方法	
3.3 実験結果および考察	

3.3.1	風況データ	
3.3.2	ガスト平均形状とガストモデルの比較	
3.3.3	ガスト平均形状による空力負荷変動	
3.3.4	ヨー角の影響	
3.4	まとめ	

結言	.....	92
参考文献	.....	94
謝辞		

## 緒言

現在、我々は地球温暖化や資源の枯渇などの問題に直面している。しかし生活が豊かになるにつれ、問題の原因となるエネルギーを消費しない生活は考えられない状態となってきた。日本の発電方法は、火力発電(石油, 石炭, LNG)が60%, 原子力30%を占めている。両者の発電方法の燃料は、ほぼ100%近くを輸入に依存している。そのため世界情勢の変化によって、燃料は安定供給されなくなることも想定される。また化石燃料は地球温暖化の原因となるだけでなく、近い将来に枯渇してしまうという問題も抱えている。これらの問題の解決策として、再生可能な自然エネルギーを利用した風力発電があげられる。NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)によると日本における風力発電は96年度の総設置数66基, 総設備容量1.3万kWから10年間で約1300基, 約150万kW(07年度)になっている。そして2010年度までに300万kWを目標に、急速な発展がみられている。これは制度の改正や技術の進歩による風車の大型化, 風車を多数設置するウィンドファームの建設が進んでいるからである。風力発電は再生可能エネルギーとして重要な一端を担っているが、課題も抱えている。ウィンドファームでは可能な限り密に風車を建てるため、下流側にある風車は、上流にある風車の後流の影響を受ける。NEDOの風力発電導入ガイドブック<sup>(1)</sup>によると、主流方向に対して風車間の距離を風車直径の10倍離すことが提唱されている。一方でガスト(突風)は、風車翼の破壊, 疲労の原因となり、ガストが風車に与える影響についての知見が求められているが、IEC(国際規格)で定められているガストモデル<sup>(2)</sup>は、欧米の風況を基にしており、複雑地形が多いわが国の風況には適していない。

本研究では、フィールドにおいて超音波流速計を用いて風車後流の速度分布を測定した。またガストによる空力負荷変動について解析を行った。

## 主な記号

$c$	:任意断面における翼弦長	[m]
$D$	:翼車直径 = 10m	[m]
$M_f$	:フラップモーメント	[N·m]
$M_l$	:リードラグモーメント	[N·m]
$n$	:測定点数	
$R$	:翼車半径 = 5m	[m]
$t$	:任意断面における翼厚	[m]
$T$	:ガスト時間幅	[s]
$TI$	:各測定位置の乱れ強度	
$TI_{\text{ratio}}$	:乱れ強度比	
$TI_{\text{ref}}$	:基準風速計乱れ強度	
$u_{\text{ave}}$	:20 分間平均風速	[m/s]
$u_{\text{gust}}$	:ガスト振幅	[m/s]
$u$	:瞬時風速	[m/s]
$u_{\text{ini}}$	:ガスト流入前風速	[m/s]
$u_{\text{LF}}$	:各測定点の風速	[m/s]
$u_{\text{ref}}$	:ローターから 10m 上流の回転軸高さ位置の風速	[m/s]
$\bar{U}$	:測定地点の平均風速	[m/s]
$U_{\text{N0}}$	:ローターから 10m 上流の回転軸高さ位置の平均風速	[m/s]
$U_d$	:速度欠損	
$U_N$	:無次元風速	
$x$	:主流方向位置	
$y$	:半径方向位置	
$z$	:鉛直方向位置	
$\alpha$	:迎角	[deg]
$\Phi$	:ヨー角度	[deg]
$\Phi_{\text{Wind}}$	:瞬時風向	[deg]
$\bar{\Phi}_{\text{Wind}}$	:平均風向	[deg]
$\Psi$	:アジマス角 (翼回転角)	[deg]
$\sigma_{\text{ratio}}$	:風向の標準偏差比	

$\sigma_{\text{ref}}$	: 基準風速計の風向の標準偏差	[deg]
$\sigma_{\text{WD}}$	: 各測定位置における風向の標準偏差	[deg]
$\sigma_{\text{WV}}$	: 風向の標準偏差	[deg]

## 第1章 実験装置および実験方法

### 1.1 供試風力タービンおよび風力タービン周辺装置

本実験に使用した風力タービンの正面図および側面図を図 1.1 に、写真を図 1.2 に示す。供試風力タービンは発電機容量 30kW，翼車直径 10.0m，ハブ高さ 13.3 m，可変ピッチ機構を持つ 3 枚翼のアップウインド型水平軸風力タービンである。翼ピッチの駆動はパワーシリンダによって行われる。タワーは図 1.3 に示すように油圧シリンダによる可倒式であり，ナセルやブレードのメンテナンスを安全かつ容易に行うことができる。タワーは直径 460mm の鋼管である。また，ナセルとタワーの間にヨーモータが取り付けられており，ナセル方位を変化させることで風向に対して任意のヨー角をとることができる。

図 1.4 に風力タービンのシステム図を示す。翼車の回転はプーリとタイミングベルトを用いた増速機構を介して誘導発電機に伝達される。増速比は 4:15, 5:12 の 2 段階で合計 9 倍である。発電システムはインバータを用いた AC-DC-AC リンクを持つ可変速発電システムである。翼車回転数は，ナセル内部の誘導発電機に対してインバータにより制御周波数を変化させることで任意に設定できる。

翼ピッチ，ナセル方位は機械制御盤から手動にて操作される。また，誘導発電機の回転数制御は，計測パソコンから制御周波数をインバータに出力することで任意に設定可能である。

図 1.5 に三重大学生物資源学部附属紀伊・黒潮生命地域フィールド・サイエンスセンター付帯施設農場（これ以降，農場と記述）における風力発電実験設備全体図を示す。本農場は三重県津市高野尾町に位置し，初秋から春先までは日本海側からの北風が琵琶湖，鈴鹿山脈を越えて吹き降ろす通称「鈴鹿おろし」と呼ばれる季節風が吹く。本農場の冬場における風向は西から北にかけてであ

り，主風向はほぼ西北西方向にある。

本実験設備では風力タービン回転面上流の流入風の色度分布を調べるため風力タービン位置から主風向である西北西方向に基準となる超音波流速計を1基，及び三杯式風速計，矢羽根式風向計をそれぞれ6基設置してある。三杯式風速計の測定範囲が2m/s~50m/sであり，測定精度は風速10m/s以下のとき±0.5m/sであり，10m/s以上で±0.5m/s以内となっている。図1.6に超音波流速計と風力タービンの位置関係および概略図を示す。超音波流速計は風力タービンの上流10m，地上高13.3m(ハブ高さと同じ)に設置してある。流速計プローブは3成分の流速を測定する形式を採用し，本体の制御演算表示部に速度3成分流速，もしくは風速および風向を表示させることができる。この超音波風速計の分解能は0.005m/sであり，測定精度は風速10m/sのとき±0.1m/s以内である。また，取得した風速データは電圧に変換し出力されA/Dボードを介してパソコンでサンプリングされる。三杯式風速計，矢羽根式風向計は風力タービンの上流10mで左右方向にそれぞれ9mの位置に2本のパンザマストを立て，それぞれハブ高さ13.3m，その上下5mスパンの8.3m，18.3mの高さに風速計と風向計を一組にして取り付けてある。風速計から出力されるパルスは周波数・電圧変換機によって電圧に変換されA/Dボードを介してパソコンにサンプリングされる。また，風向計から出力される電圧も同様にサンプリングされる。



測定装置	仕様・型番	メーカー
三杯式風速計	A703 パルス式	横河電子機器株式会社
矢羽根式風向計	A803	
	ポテンシヨメータ式	横河電子機器株式会社
超音波流速計（本体）	DA-650	カイジョーソニック
超音波流速計（プローブ）	TR-61B	カイジョーソニック
A/D ボード	DF-4000	日本シンクネット社製

## 1.2 供試翼

図 1.7 に本研究に用いた供試翼を示す。供試翼は回転半径 5m のテーパねじり翼で、翼のみの長さは 4990.2mm である。翼は FRP 製の中空構造で、木型から FRP 製メス型を作成し FRP を積層して表面シェルを作成、翼弦方向、翼スパン方向に補強を入れ、正圧面側と負圧面側のシェルを張り合わせて作成した。

断面形状は、回転中心から約 1.35m の位置で DU91-W2-250（翼厚 25%）、約 2.5m の位置で DU93-W-210（翼厚 21%）、約 4m の位置より翼端側では NACA63-618（翼厚 18%）の翼断面を代表として採用した。上記の翼断面以外の翼断面は補間によって寸法を定めている。翼端から翼根までのねじり角は約 12° である。翼端はノーマル、シャークフィン、オジー、Mie ベーンと交換可能となっているが、本実験ではノーマルのみを使用した。

## 1.3 測定装置

### 1.3.1 風力タービンの運転状態

実験では風力タービン運転状態のデータを取得している。翼車回転角は中間軸に取り付けられたロータリーエンコーダおよび主軸に取り付けたフォトセン

サにより測定される。ピッチ角はピッチ操作用パワーシリンダに取り付けてあるポテンショメータから出力される電圧により測定される。ナセル方位はナセル回転軸に取り付けられたロータリーエンコーダにより測定する。交流電力、交流電圧および交流電流は、デジタル電力計で測定される。

なお、各測定機器の測定値は電圧もしくはパルスで出力されるので A/D ボードおよびカウンターボードを介してデータサンプリング用パソコンに取り込まれる。

測定装置	仕様・型番	メーカー
デジタル電力計	3192	日置製
カウンターボード	pci-6205c	interface
PC	FC-86J	NEC

### 1.3.2 風力タービン後流測定装置

本研究で用いた、風力タービン後流測定装置の全体写真を図 1.8 に示す。後流測定装置は超音波流速計を 5 個（以降この超音波流速計を SAT と記述）と後流測定用タワーにて構成される。SAT の風速分解能は 0.01m/s で、精度は±2%以内である。これは出力値が 10m/s の場合±0.25m/s の誤差を含むことを意味している。

図 1.9 は後流測定用タワーの模式図を示す。後流測定用タワーの先端は 100mm 角のラーメン構造で、先端から 9.0m の位置から根元の位置までテーパで 380mm 角に広がっている、なお根元部分は大きなモーメントを受けるためトラス構造を用いて作成した。タワーは根元部分で油圧ショベルに取り付けられており、立て起こしが可能で任意の測定地点に移動することができる。タワーの

設置位置は各測定位置測量を行い、正確にロータとの位置関係を把握している。測定時にはロープを用いてタワーの揺れを防いでいる。一番上に取り付けられた SAT を SAT1 とし、下方向に順に SAT2, SAT3, SAT4, SAT5 とする。各測定高度は 8.3m (回転面の下端), 10.8m, 13.3m (ハブ高さ), 15.8m, 18.3 (回転面の先端) の 2.5m 間隔に設置した。また風力タービン翼端半径を  $R$  として鉛直方向に無次元鉛直方向位置  $z/R$  を定義した。 $z/R$  は風力タービンハブ高さを基準としてハブ高さより上側を正とした。つまり、風速測定は  $z/R=-1.0, -0.5, 0, +0.5, +1.0$  となる。

図 1.10(a)に主流風向と SAT の  $U, V$  方向を示す。 $W$  方向は鉛直上向きが正である。SAT は超音波を送受信するアームを持っている。測定体積上流にアームがある場合、アームの影響により、測定値に誤差を含むと考えられる。このため、主流方向にアームが位置しないように、SAT は角度を調節して取り付けられている。後流測定に用いた SAT は風力タービン上流 10m の位置に設置された超音波流速計と同様に 3 成分の流速を測定することができる。図 1.10(b)は SAT と後流測定用タワーの取り付け部の拡大図である。風速計を設置する場合、水平距離はタワーの直径の 7 倍以上となるように設置しなければならない<sup>(2)</sup>。本実験では SAT は後流測定用タワー直径の 10 倍にあたる 1m を張り出した位置に設置した。

図 1.11 に後流測定信号系統図を示す。SAT はアナログ及びデジタルの両方で信号出力可能である。測定データは電圧信号に変換し出力されケーブルを通り前述の A/D ボードを介して他のデータと同時測定を行っている。また、SAT プローブはシリアル通信によってアナログ及びデジタル出力の測定項目を遠隔で変更できる。本実験では速度の  $U, V, W$  成分及び温度を出力している。また SAT は内部で任意の校正用に電流値を出力することができ、各ケーブルの損失

による校正がなされている。

測定装置	仕様・型番	メーカー
三次元超音波風向風速計	SAT-550(50Hz)	カイジョーソニック
測量機	ETH-220c	PENTAX

### 1.3.3 応力測定装置

本研究では翼根シャフト部分に歪みゲージを取り付け、翼端の翼弦線に対して垂直な方向（フラップ）、平行な方向（リードラグ 2 方向のモーメント値を測定した。図 1.12 に翼根フランジ部分に取り付けた歪みゲージの配置を示す。なお、フラップ方向およびリードラグ方向は 2 ゲージ法を用いた。

歪みゲージのゼロ点は供試風力タービンを立て、供試翼の翼端方向が鉛直下向きを向いている状態をゼロ点とし、ハブ内部に設置した歪みゲージ用アンプから出力される電圧を基準値とした。図 1.13 にフラップモーメントとリードラグモーメントの方向を示す。

測定装置	仕様・型番	メーカー
歪みゲージ用アンプ	HSC-20BS	トヤソニック社製

## 1.4 測定実験方法

SAT のデジタル出力応答速度が 50Hz のため、サンプリング周波数は 50Hz で実験を行った。サンプリングされるデータ項目は、6 つの三杯式風速計の風速値、6 つの矢羽根式風向計の風向値、風力タービン上流の超音波流速計の速度 3 成分 ( $U$ ,  $V$ ,  $W$ ) と温度、発電量、発電電圧、発電電流、ピッチ角、回転数、ナセル方

位, アジマス角 (風力タービン翼回転角), それぞれ 5 つの SAT の速度 3 成分 ( $U, V, W$ ) である. また, サンプリングのスタート時を 0[sec]とし測定時刻も記録した.

風力タービン後流測定的位置を図 1.14 に示す. 風力タービン後流は翼車直径を  $D(=10\text{m})$  として翼車回転面に対して垂直下流方向を正とし  $x/D=1.5$  から  $x/D=2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0$  の位置にて測定を行った. 図 1.15 にヨー角  $\Phi$ およびアジマス角  $\Psi$ の定義図を示す. ヨー角は風力タービン回転軸と風向のなす角であり, 風力タービン上空から見てナセル方位を基準として風向が時計回り側にある場合を正と定義する. アジマス角は, 翼が頂点に位置する時を  $0^\circ$  とし反時計回りに  $360^\circ$  回る間の翼の方位角度と定義した. なおピッチ角は翼端の翼弦線が翼車回転面と平行になる角を  $0^\circ$  とし, 翼弦線の前縁が上流側に回転する方向を正と定義する.

本実験条件は, 翼車回転数を 60rpm で固定し, 測定中のナセル方位を  $300^\circ$  (北からの角)に, また, ピッチ角を  $3^\circ$  に固定して実験を行った.

各測定点における測定時間は, 測定時の風況によって風向, 風速が大きく左右されるため, 風力タービン上流 10m の超音波流速計の風向, 風速を随時確認し, ヨー角が  $0^\circ$  付近のデータが十分にサンプリングされるまで行った.

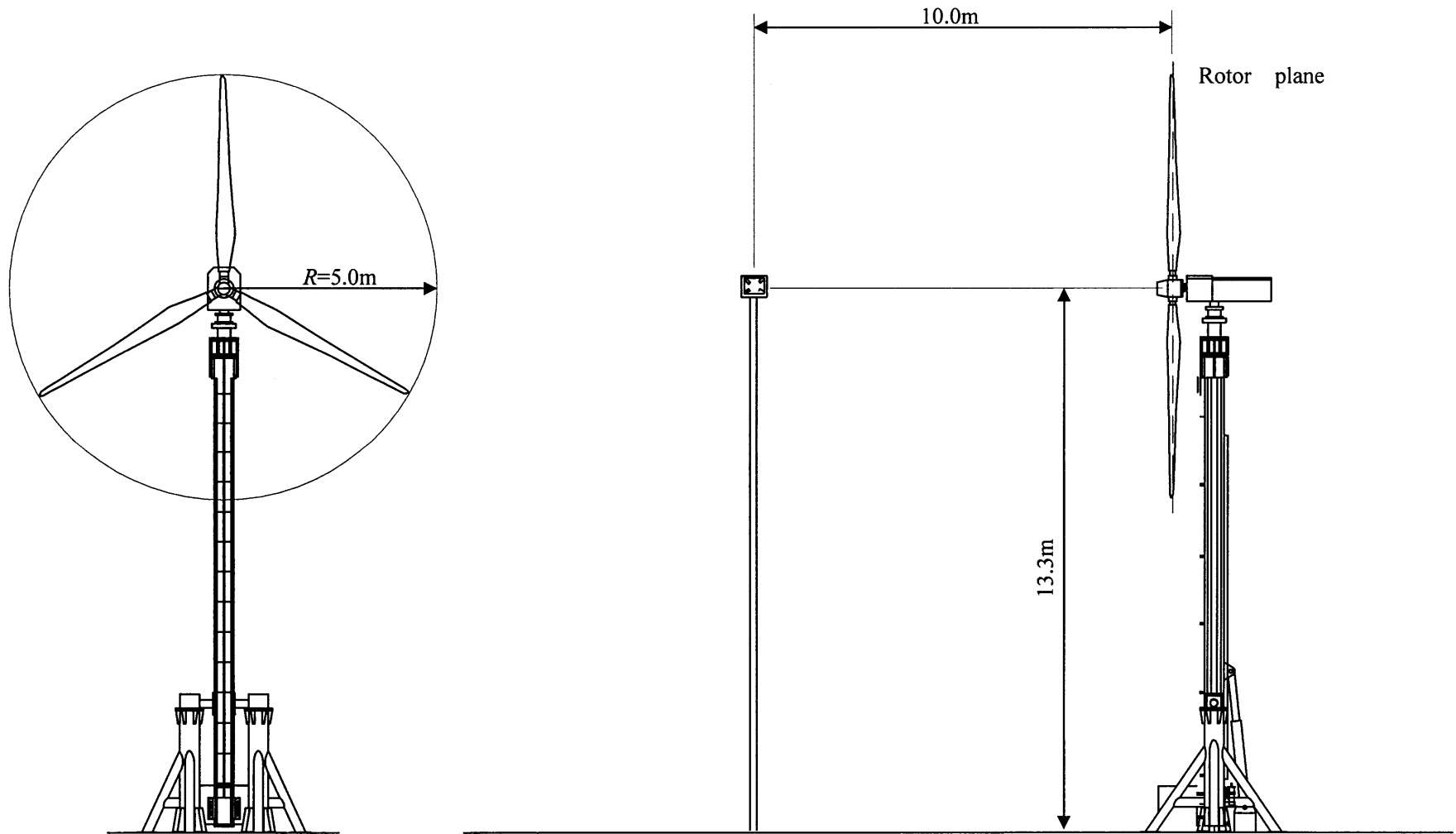


図 1.1 供試風力タービンの正面図及び側面図

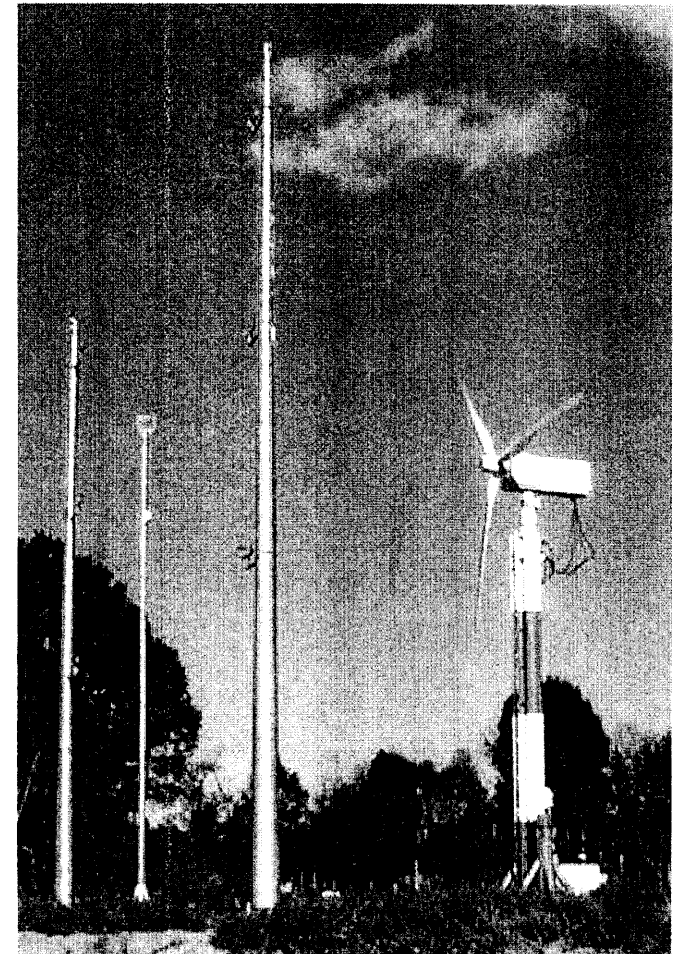
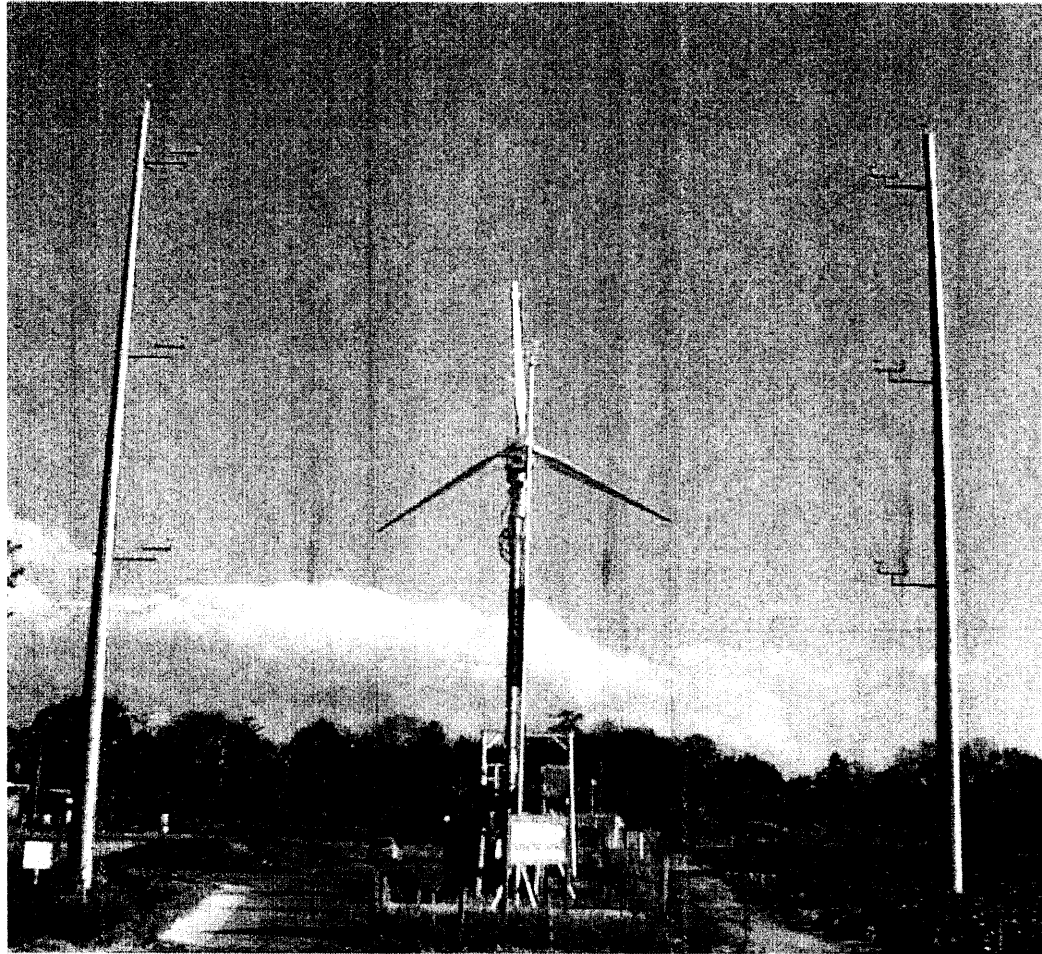
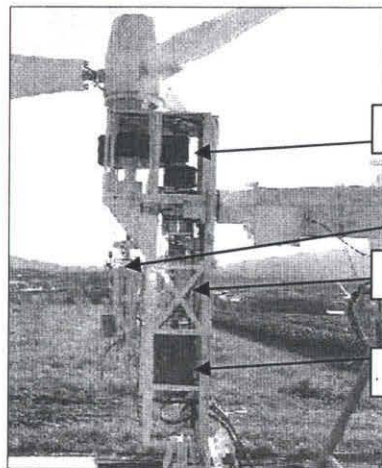
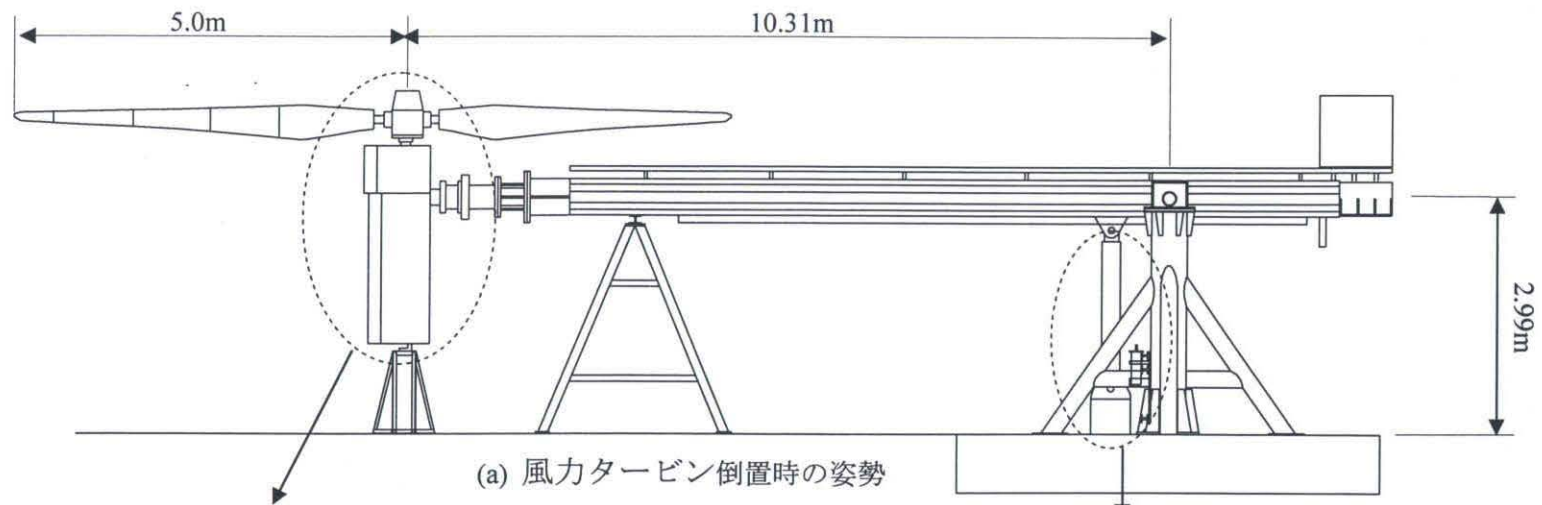
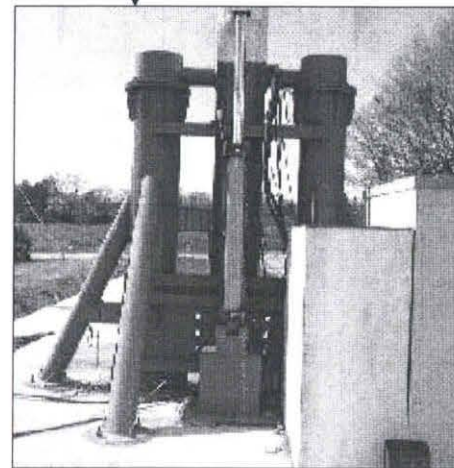


図 1.2 供試風力タービン正面及び側面写真



- 増速機
- ピッチシリンダ
- トルク計
- 発電機

(b) ナセル内部



(c) 起倒用油圧シリンダ部

図 1.3 供試風力タービン倒置図及び細部写真



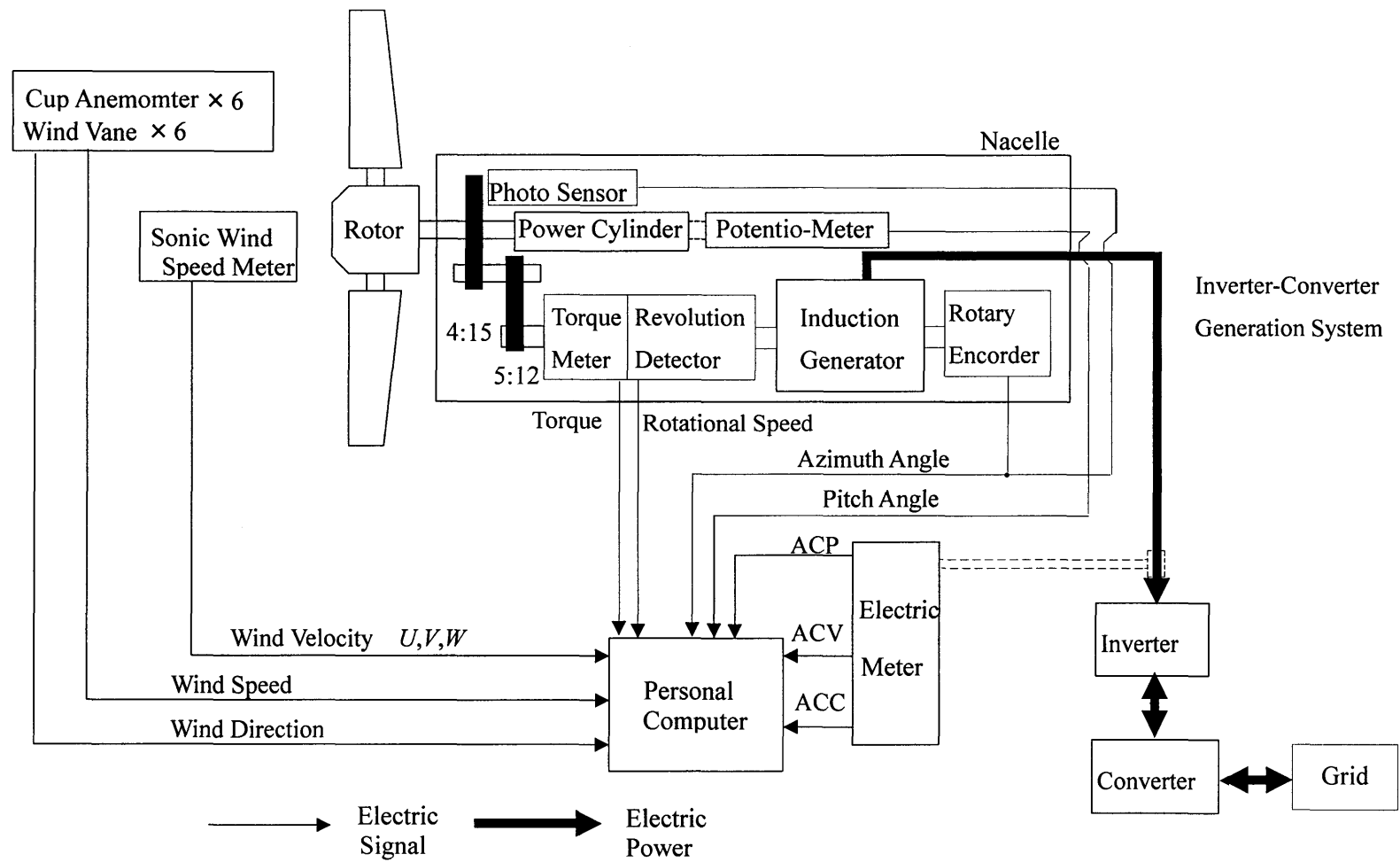


図 1.4 供試風力タービンシステム図

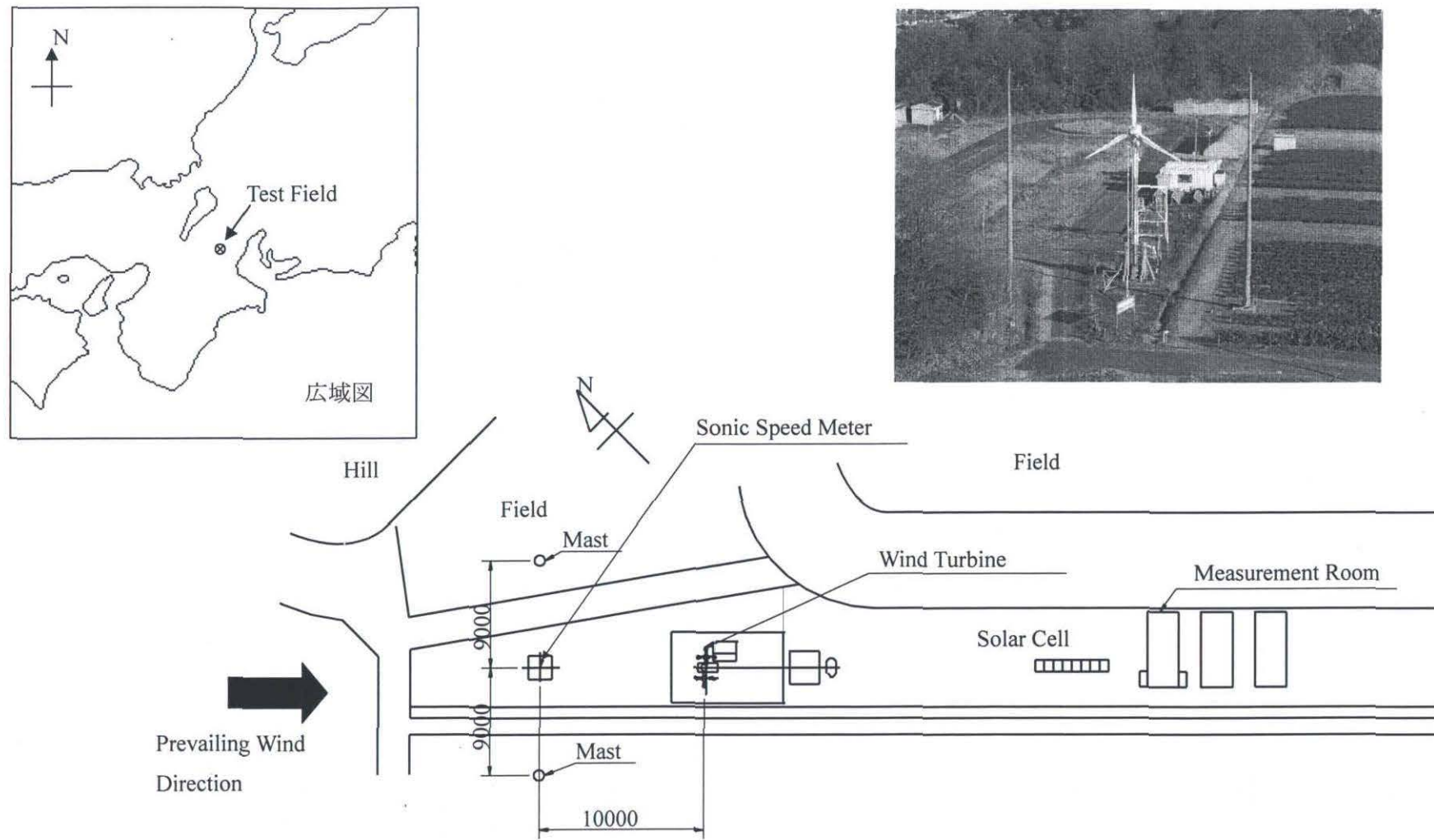


図 1.5 三重大学生物資源学部附属 紀伊・黒潮生命地域フィールドサイエンスセンター付帯施設農場における風力発電実験設備全体図

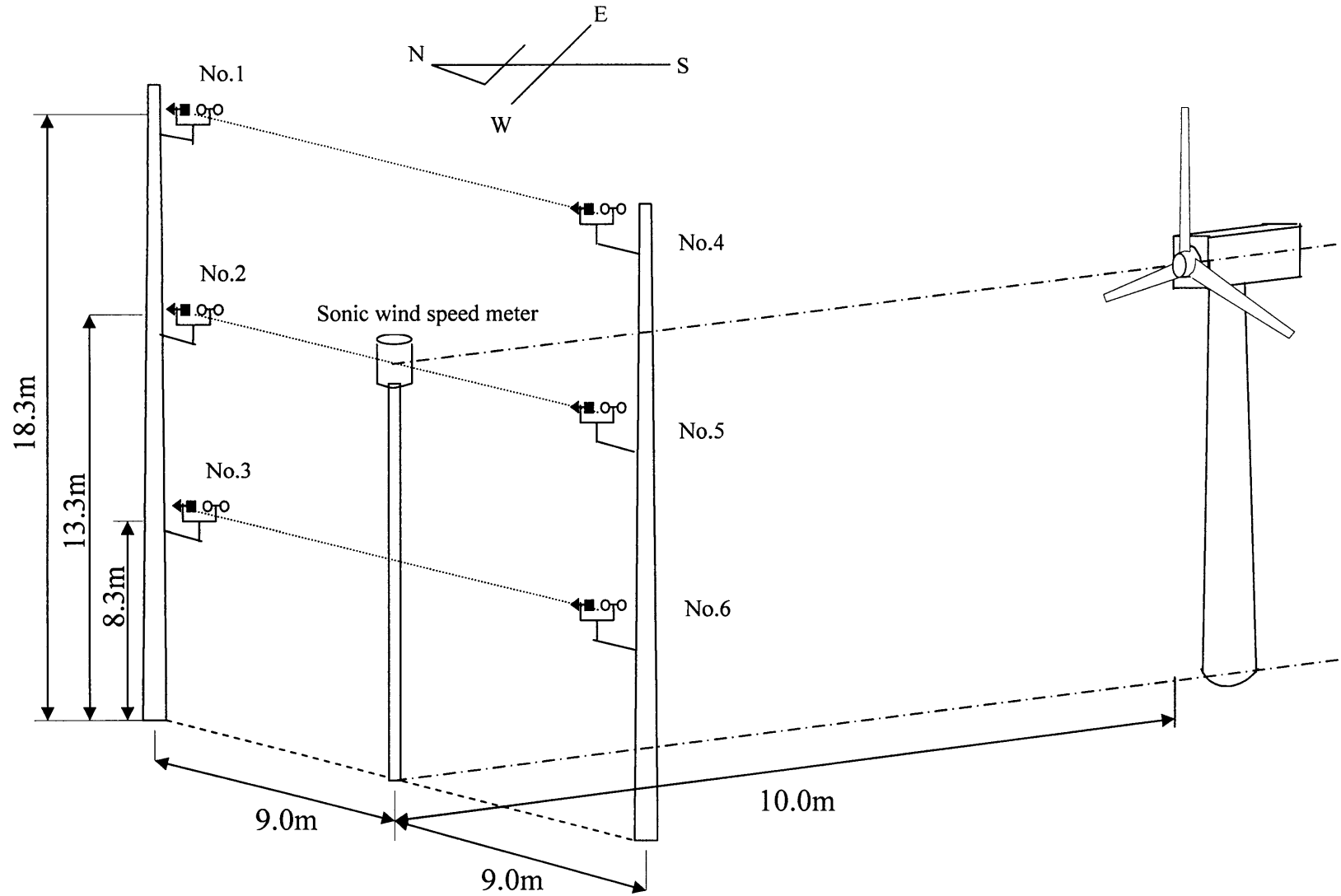


図 1.6 供試風力タービン、超音波流速計、3 杯式風速計位置関係図

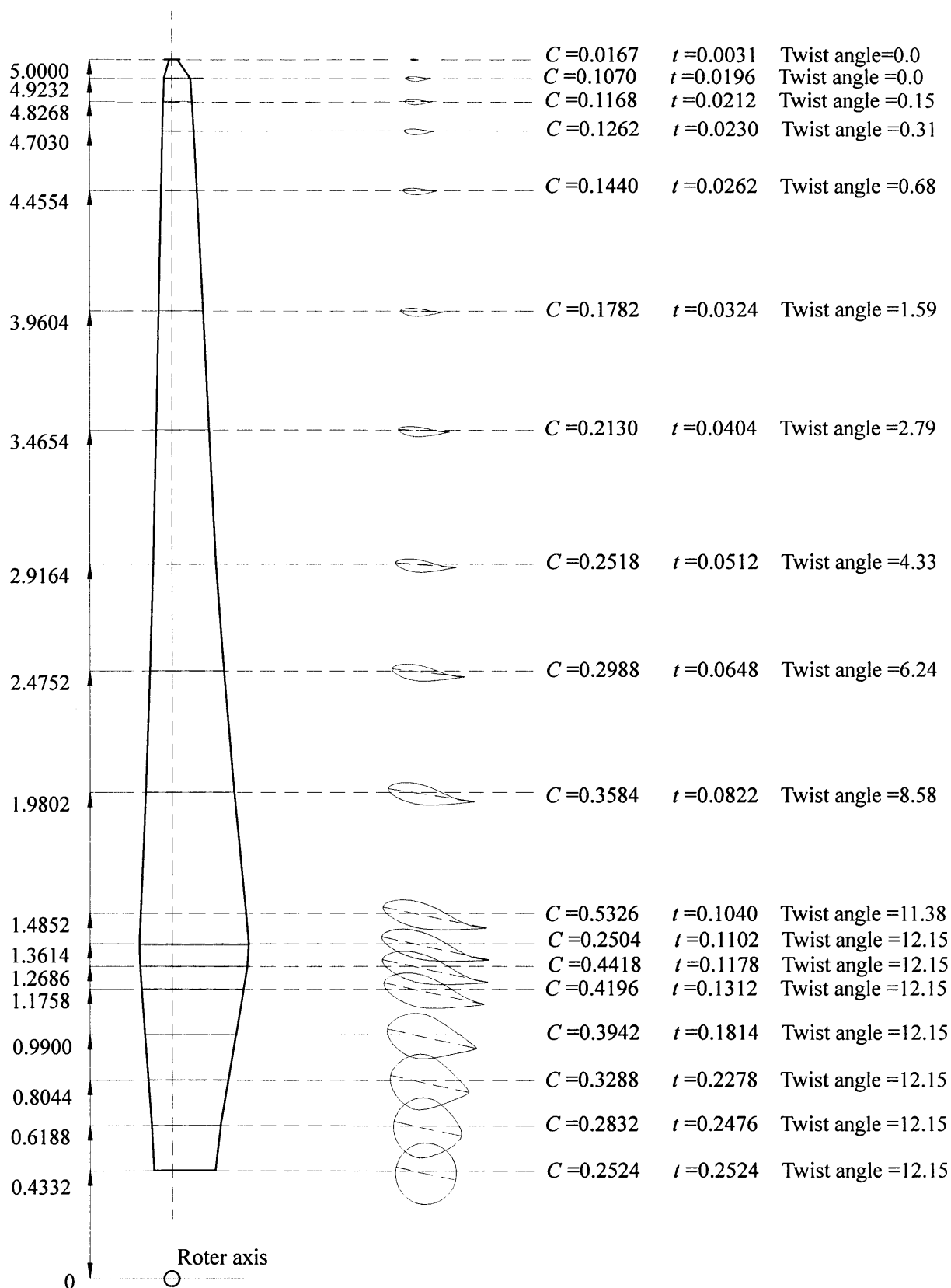


图 1.7 供試翼(APX-40)

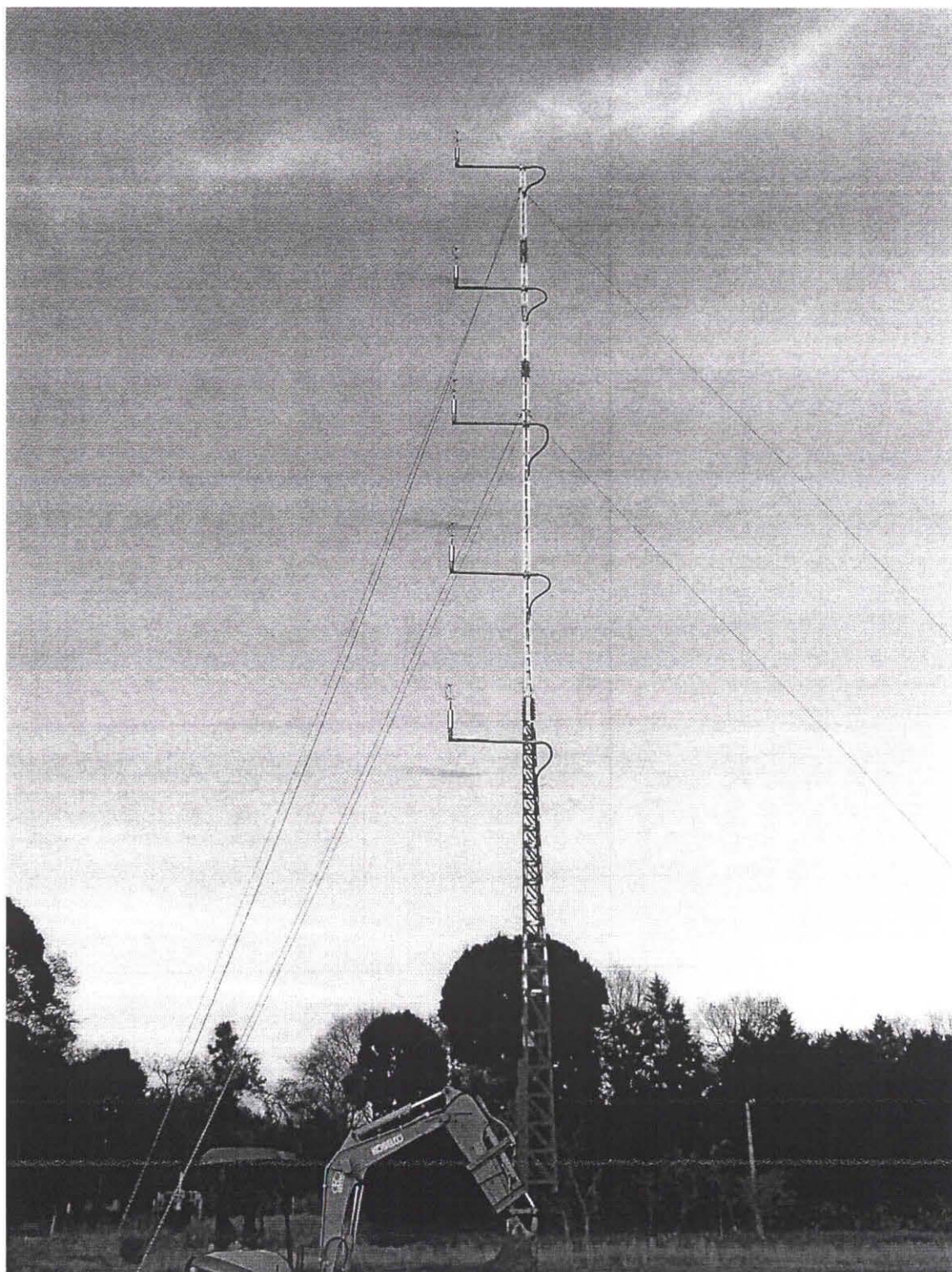


図 1.8 風力タービン後流測定装置の全体写真

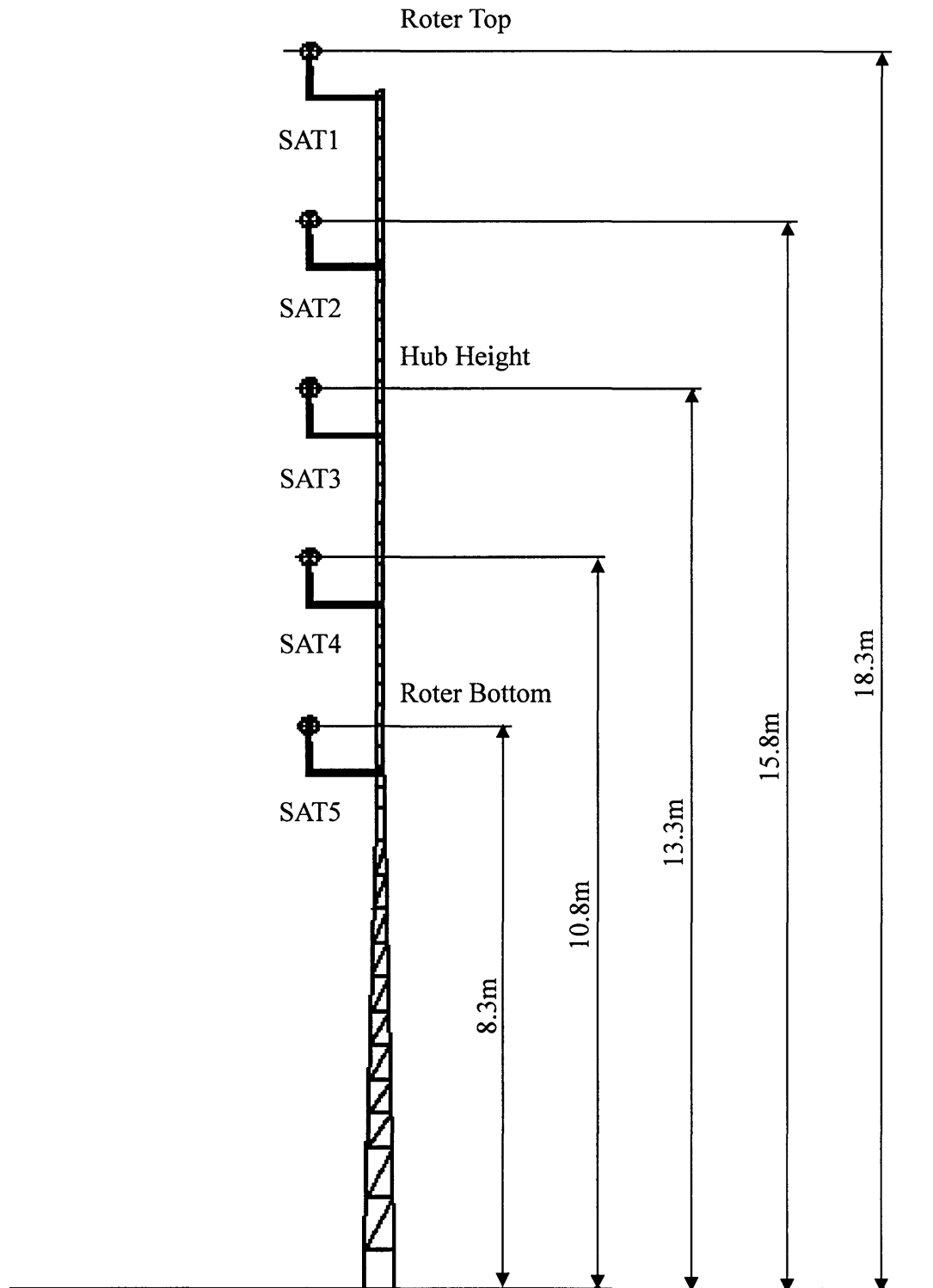
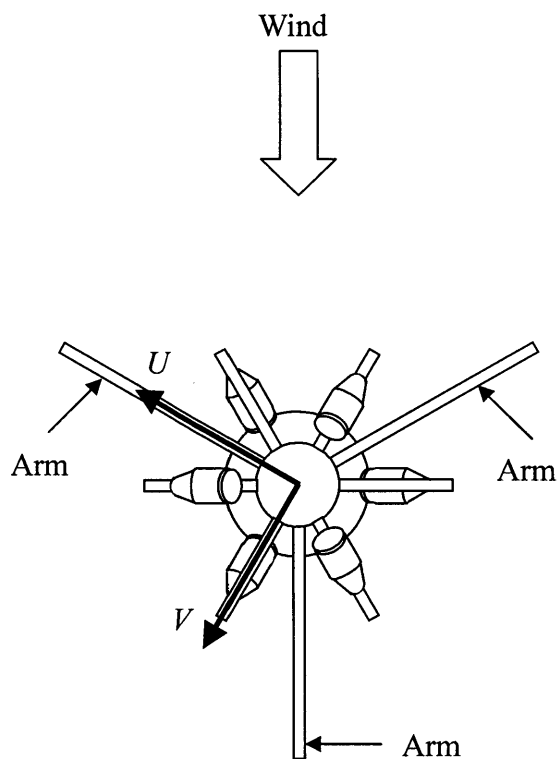
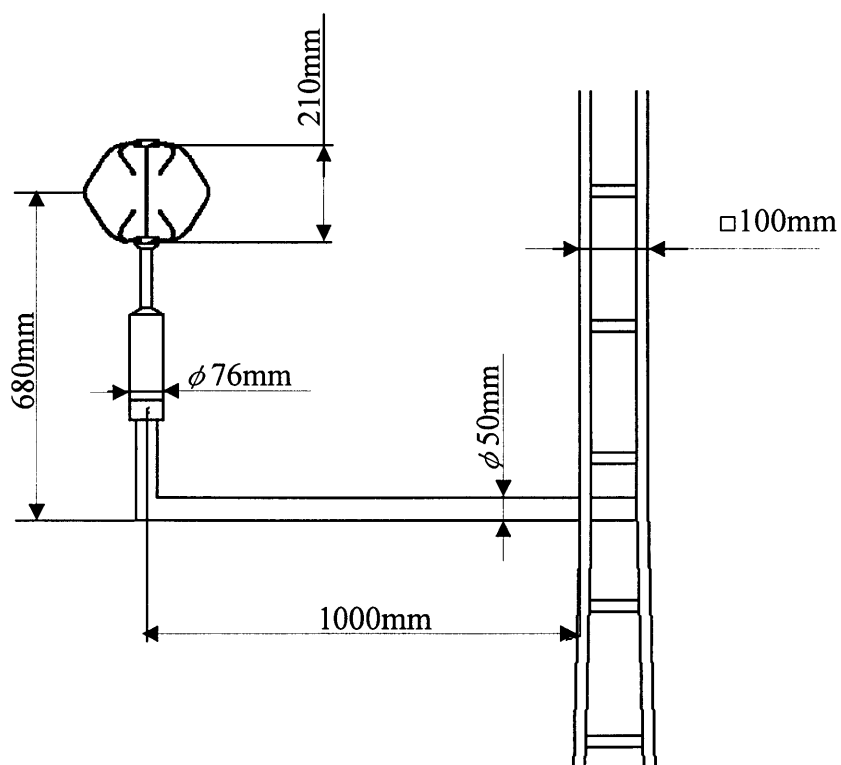


図 1.9 後流測定用タワーと SAT 関係図



(a) SAT 上面図と各方位



(b) 後流測定用タワーと SAT 拡大図

図 1.10 超音波流速計の取付部の詳細

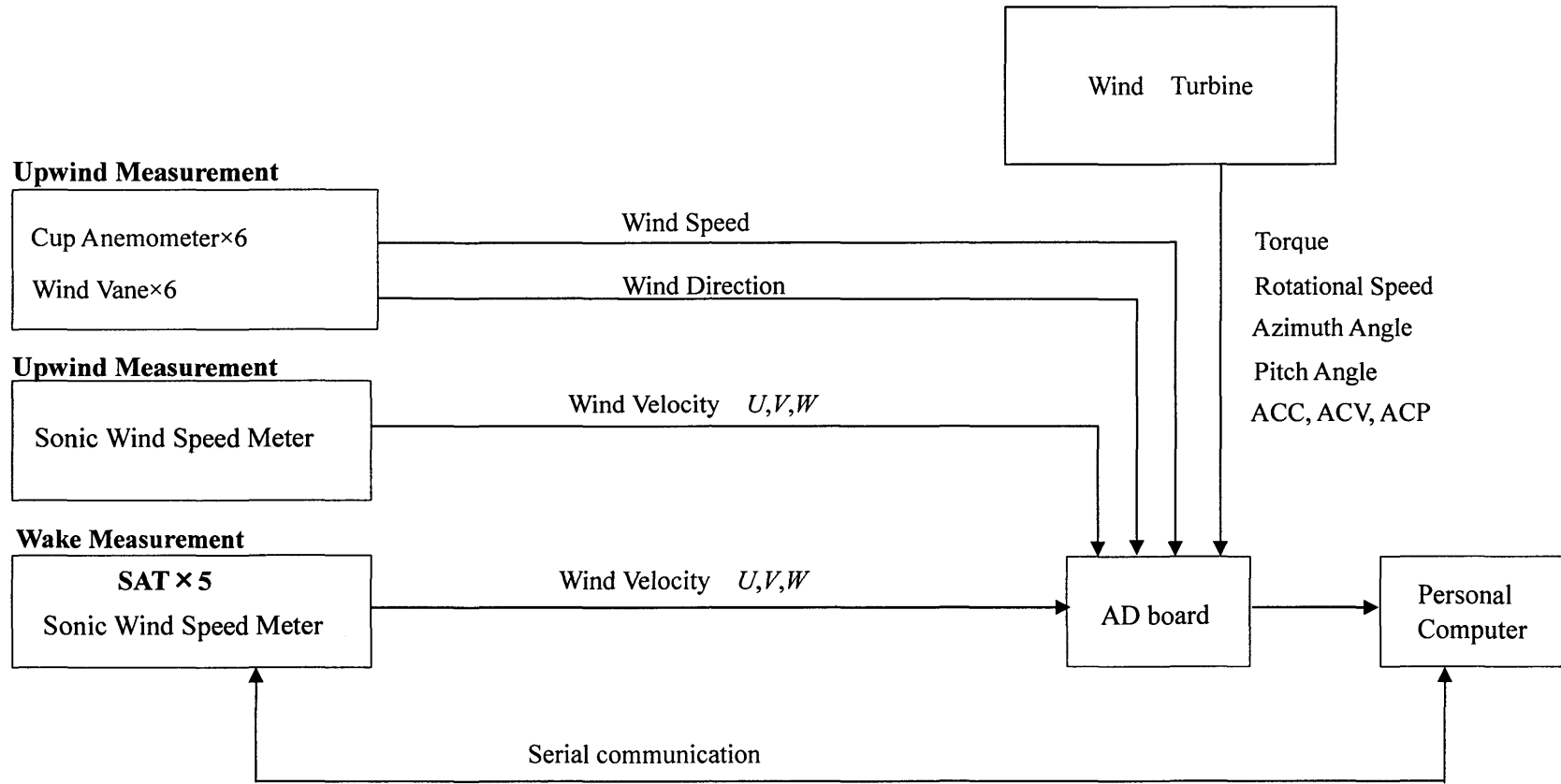


図 1.11 風力タービン後流信号系統図



共和電業製

型番

KFG-5-120-C1-11L1M2R

ゲージ長

5 mm

ゲージ率(24°C,50%RH)

2.11±1.0%

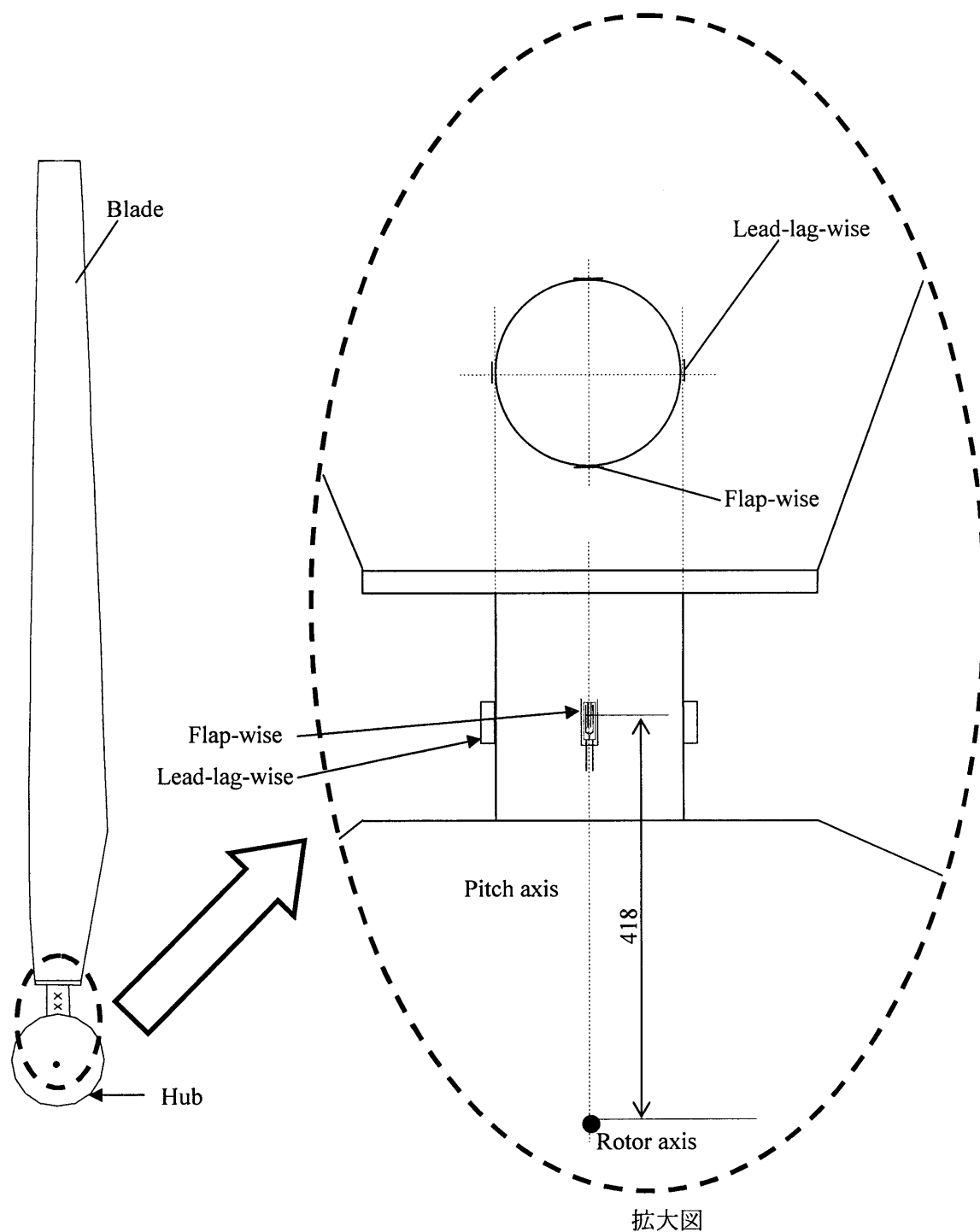


図 1.12 歪ゲージの取付け位置

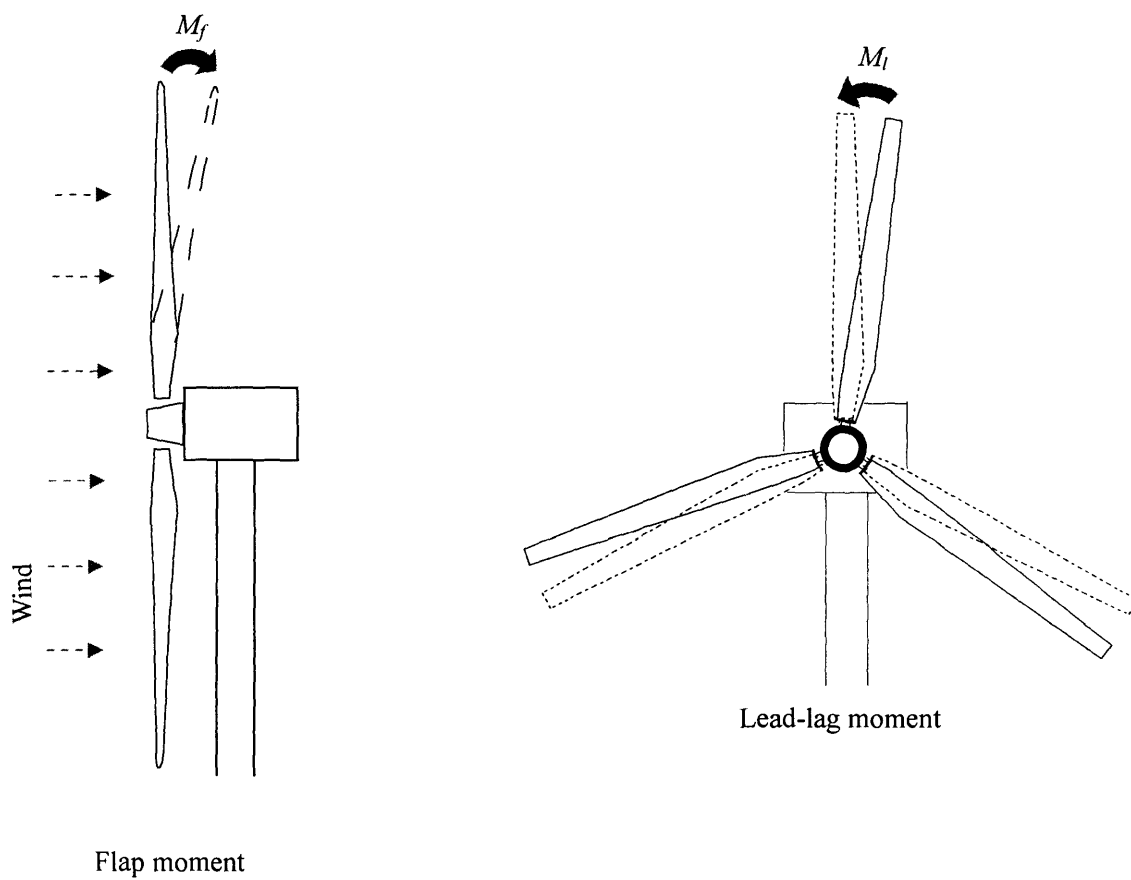


図 1.13 フラップモーメントとリードラグモーメントの方向

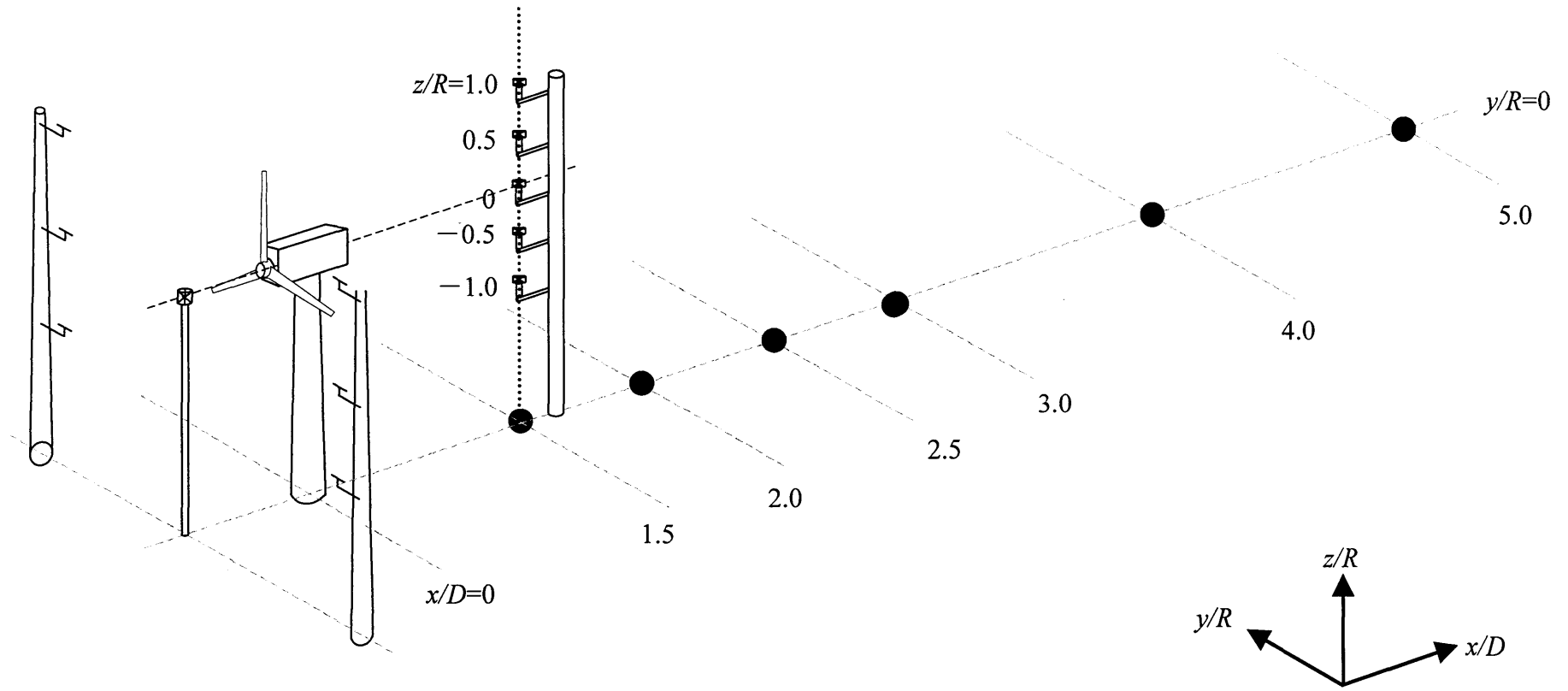


図 1.14 風力タービン後流測定的位置

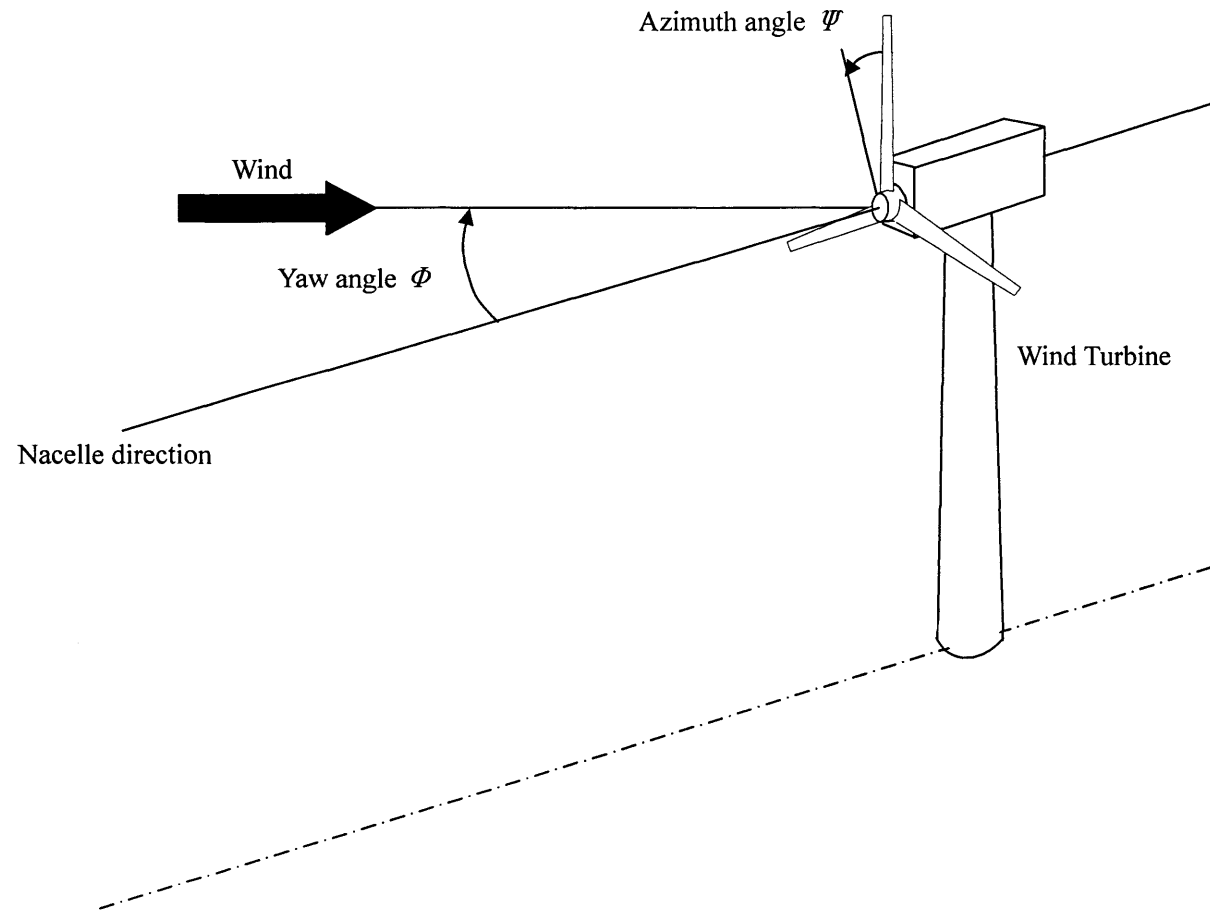


図 1.15 アジマス角とヨー角の定義

## 第2章 非定常流れ下における風力タービン後流分布

### 2.1 はじめに

複数の風力タービンを配置するウィンドファームが多く見られるようになってきた。ウィンドファームでは限られた面積の中で、多くの風力タービンを配置するため、下流側にある風力タービンは上流の風力タービンの影響を受ける可能性がある。風力タービンの導入が進んでいる欧米の場合、平坦な土地が多く風力タービン間距離の確保が可能である。しかし、わが国の場合、好風況地域が起伏の大きい山岳地や丘陵地に多く、設置面積を確保することが困難である。風力タービン設置間隔は風下方向に風力タービン直径の10倍、風向と垂直方向に3倍必要と言われている<sup>(1)</sup>。現在までに、数値解析や風洞実験、フィールド実験などで風力タービン後流に関する研究がされてきた。定常状態である風洞実験では風力タービン直径の10倍下流において、流入風速の3割程度の速度欠損があると報告されている<sup>(4)</sup>。一方、フィールド実験では風洞実験に比べ風力タービン後流の速度回復が早いことが知られている<sup>(5)</sup>。そのため風速、風向が常に変動する非定常状態であるフィールドでの風力タービン後流の詳細な流れ場を把握し、定量的に評価することは重要である。従来の研究では、風速変動に対して応答性の低い三杯式風速計を用いて行われてきた。本研究では風速変動に対する応答性の高い超音波流速計を用いて風力タービン後流内の風速、風向の乱れの解析を行った。風力タービン後流の詳細を把握し風力タービンの配置に反映することで、より少ない面積で、多くの風力タービンを設置できる可能性がある。

## 2.2 定義式

### 2.2.1 風速

本研究はフィールド風力タービンの後流の速度分布を実験的に解明することを目的とする。フィールドにおいて風力タービンの流入風は風向、風速ともに変化する自然風である。したがって風力タービンの下流で測定した後流内の風も非定常である。そのため風力タービンの後流内速度に普遍性をもたせるために、風力タービンの後流内で測定した風速は、風力タービンの上流の基準風速計の風速を基準として無次元化を考察する。以下に風速の無次元化方法について説明する。

本実験での風力タービンの後流測定位置は、1章の図 1.14 で示されるように、 $y/D=0$  において主流方向 ( $x$  方向) に 6 点 ( $x/D=1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0$ )、鉛直方向 ( $z$  方向) に 5 点の計 30 点である。フィールド実験であるため、流入風は風速、風向とも変動し、大気境界層による速度勾配を持つ。これらの影響を実験的に補正し、ロータ空力による後流を明らかにするため各測定位置において翼車無回転状態の速度分布測定を行う。基準風速計の風速  $U_{\text{ref}}$  で、それぞれの測定位置における風速  $u_{\text{LF}}$  を除したものが無次元風速  $U_N$  である。基準風速計は風力タービン上流 10m、ハブ高さ (13.3m) 位置に設置された超音波流速計を用いる。そのため各位置での無次元風速は、大気境界層による速度勾配を含む。次式に算出式を示す。

$$U_N = \frac{u_{\text{LF}}}{u_{\text{ref}}} \quad (2.1)$$

- $U_N$  : 無次元風速
- $u_{\text{LF}}$  : 各測定位置の風速[m/s]
- $u_{\text{ref}}$  : 基準風速計の風速[m/s]

また風力タービンの下流の速度分布は風力タービン運転時と停止時で異なるため、風力タービンの運転による主流の減少がどの程度になるかを表す指標として、速度欠損を用いて考察を行う。次式に速度欠損の算出式を示す。

$$U_d = U_{N0} - U_N \quad (2.4)$$

$U_d$  : 各高度の速度欠損

$U_N$  : 各測定位置の無次元風速

$U_{N0}$  : 各主流方向位置  $x/D$  における風力タービン停止時の無次元風速の  
平均値

### 2.2.2 乱れ強度

流入風と風力タービンの後流内の乱れを定量的に考察するため乱れ強度を用いた。本章では乱れ強度を次のように定義した。乱れ強度は個々の SAT からの風速の標準偏差をハブ高さ位置の基準風速計の値で除すことで無次元化を行い、以下の式で表される。

$$TI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u - \bar{U})^2}}{\bar{U}} \quad (2.5)$$

$TI$  : 乱れ強度

$\bar{U}$  : 測定位置の平均風速[m/s]

$u$  : 瞬時風速[m/s]

$n$  : 測定点数

また流入風の持つ乱れ強度は測定時の気象条件により異なる。このため流入風に対し、風力タービンの後流の乱れがどの程度になるかを表す指標、乱れ強

度比を用いて考察する。以下に定義式を示す。

$$TI_{\text{ratio}} = \frac{TI}{TI_{\text{ref}}} \quad (2.6)$$

$TI_{\text{ratio}}$  : 乱れ強度比

$TI_{\text{ref}}$  : 基準風速計で測定された乱れ強度

$TI$  : 各測定位置における乱れ強度

### 2.2.3 風向標準偏差

流入風と風力タービンの後流内の風向の乱れの変化を定量的に考察するため風向の標準偏差を用いた。

$$\sigma_{\text{WD}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Phi_{\text{Wind}} - \bar{\Phi}_{\text{Wind}})^2} \quad (2.7)$$

$\sigma_{\text{WD}}$  : 風向の標準偏差[deg]

$\Phi_{\text{Wind}}$  : 瞬時風向[deg]

$\bar{\Phi}_{\text{Wind}}$  : 測定位置の平均風向[deg]

$n$  : 測定点数

乱れ強度と同様に、測定時の気象条件により流入風自体の持つ風向の標準偏差が異なる。このため流入風に対し、風向の乱れがどの程度になるかを表す指標として、風向の標準偏差比を用いて考察する。以下に定義式を示す。

$$\sigma_{\text{ratio}} = \frac{\sigma_{\text{WD}}}{\sigma_{\text{ref}}}$$

$\sigma_{\text{ratio}}$  : 風向の標準偏差比

$\sigma_{\text{ref}}$  : 基準風速計の風向の標準偏差[deg]



$\sigma_{wd}$  : 各測定位置における風向の標準偏差[deg]

## 2.3 データ整理方法

### 2.3.1 アナログおよびデジタル出力測定値の置換

得られた後流測定用の超音波流速計 (SAT) の風速データは、風力タービンの発電システムのインバータやコンバータのスイッチングノイズを含むことがある。データ整理を行うにあたり、真のデータを抽出するためにはノイズを取り除く必要がある。1.3.2 項で記述した通り超音波流速計 (SAT) はサンプリング周波数 50Hz でアナログおよびデジタル出力でデータを出力している。デジタル出力はスイッチングノイズの影響を受けないため、デジタル出力の測定値で考察を行うことが望ましい。

アナログおよびデジタル出力の測定値はそれぞれ別の PC でサンプリングしている。風力タービンの各測定値と同期して測定しているデータはアナログ出力である。そのためノイズの影響なく他の測定値と同期させるために、SAT のアナログ出力を同時刻のデジタル出力に置換する必要がある。

図 2.1(a)にアナログ出力の時系列測定値、図 2.1(b)にデジタル出力の時系列測定値を示す。各図の横軸は時間  $t$ 、縦軸は測定風速  $U$  を示す。同時刻に取得したアナログおよびデジタル出力の測定値の置換を行った結果を図 2.1(c)に示す。置換した際の相関係数は  $R_c=0.8\sim 0.95$  である。相関係数が  $R_c=1$  を示さないのは、アナログ出力のノイズの影響である。また、置換による時間の誤差は 0.01s である。

### 2.3.2 後流速度分布測定

フィールド実験における測定値は、各測定位置における測定時刻に影響されるとともに、測定時の風向変動にも大きく影響されると考えられる。このため、考察に用いた 60s 間のデータが次の条件を満たすものとした。16 方位の半値として風向許容範囲を風向標準偏差 $\pm 11.25^\circ$ とした。また流入風速についてもフィールド実験においては再現性がないため、風速許容範囲を  $6 \pm 0.5 \text{m/s}$  とした。これらの条件を満たすデータが測定されるまで実験を行い、得られたデータを用いて考察を行った。乱れ強度および風向の標準偏差は 60s 間で得られる 3000 点を用いて算出した。表 2.1 は考察に用いた各後流測定位置における測定時の流入風の風況を示す。風況は基準風速計を基にしている。

表 2.1 各後流測定位置の測定時の風況( $z/R=0$ )

測定位置 $x/D$	平均風速 $U[\text{m/s}]$	ヨー角 $\Phi[\text{deg}]$	風向の標準偏差 $\sigma[\text{deg}]$	乱れ強度 $TI$
1.5	6.00	1.57	9.14	0.21
2.0	6.02	-0.24	10.40	0.19
2.5	6.20	-0.23	9.84	0.17
3.0	6.22	1.03	10.54	0.20
4.0	5.80	0.01	9.99	0.22
5.0	5.66	2.59	9.49	0.19

また基準風速計と後流測定位置では測定している空間が異なり、流れの測定に時間的な誤差が生じる。誤差を最小限に抑えるため、基準風速計と超音波流速計 (SAT) の相関を取り、補正を行った。図 2.2(a)および 2.2(b)に風力タービン停止時の基準風速計と SAT3 ( $z/R=0$ ) の時系列測定値と相関係数の値を示す。図 2.2(a)および 2.2(b)の測定位置は  $x/D=1.5$  である。それぞれ図の横軸は時間  $t$ ,

縦軸は測定風速  $u$ ，相関係数  $R_c$  を示す．基準風速計と SAT3 ( $z/R=0$ ) の風速の変動に時間的なずれが見られる． $x/D=1.5$  の場合，基準風速計と SAT3 ( $z/R=0$ ) の距離は 25m である．また表 2.1 より， $x/D=1.5$  の位置での測定期間の平均風速は 6m/s である．流入風速が 6m/s の場合、基準風速計から SAT3 ( $z/R=0$ ) まで到達するのは約  $4.2s(=25[m/s]/6[m/s])$  であると考えられる．図 2.2(b)より，相関係数は 4.1s 後にピークを示し，基準風速計から SAT3 ( $z/R=0$ ) に到達すると考えられる時間のずれとほぼ一致する．図 2.2(c)に相関係数による解析から時間補正した風速の時系列データを示す．基準風速計と SAT3 ( $z/R=0$ ) の風速の変動は，補正により良く一致している．相関係数を用いて時刻の補正することで，空間による時間のずれの影響を抑えることができると考えられる．また風力タービン運転時も同様に，基準風速計と SAT の流れの測定の補正を行った．2.3(a)～(c)に風力タービン運転時の補正の例を示す．図で示されている測定位置は  $x/D=1.5$  である．風速運転時においても補正により基準風速計と SAT の時系列データは良く一致している．

## 2.4 実験結果および考察

### 2.4.1 テストサイト

風力タービンに流入する風特性は風力タービンの後流を考察する上で重要となる．本節では風力タービンの停止時の各測定位置におけるテストサイトの風況を示す．図 2.4(a)は半径方向位置  $y/R=0$  の鉛直方向速度分布を示す．図 2.4(b)は半径方向位置  $y/R=0$  の乱れ強度比を示す．また図 2.4(c)は半径方向位置  $y/R=0$  の風向の標準偏差比を示す．後流内の主流方向位置は  $x/D=1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0$  および  $5.0$  である．図の縦軸は鉛直方向位置  $z/R$  を示し，横軸はそれぞれの図において無次元風速  $U_N$ ，乱れ強度比  $TI_{ratio}$ ，風向の標準偏差比  $\sigma_{ratio}$  を示す．

図 2.4(a)より風力タービン後流内のすべての位置で無次元風速分布はほぼ一

致する。したがって本テストサイトにおいて速度分布は一様だと考えられる。また速度分布は、地表面の影響を受け常に大気境界層を形成していることがわかる。図 2.4(b)より乱れ強度は高度の増加にしたがい減少し、高度の低下にしたがい増加する。これは大気境界層を形成していることで、高度増加にしたがい風速が増加し、風速勾配が減少するためである。図 2.4(c)より風向の標準偏差比は高度の増加にしたがい減少し、高度の低下にしたがい増加する。

高度により変化し、高い高度で小さく、低い高度で大きくなる。これは乱れ強度と同様であり、高高度なほど地表面との摩擦の影響を受けないため、風速および風向変動の乱れが小さくなると考えられる。

#### 2.4.2 風向許容範囲の影響

流入風向は風力タービンの後流を測定するにあたり、一定であることが望ましい。これは風向の乱れにより、風力タービンの後流以外を測定しまうためである。しかし、自然風は非定常であり、風向は常に変動している。そのため、流入風の風向の範囲を絞ってデータ整理を行った。本節では  $y/R=0$  における各測定位置の風向許容範囲について説明する。

図 2.5(a)～(f)に  $z/R=0$  における風向許容範囲について示す。考察に用いるデータの風向許容範囲は基準風速計の風向標準偏差が 16 方位の半値である  $\pm 11.25^\circ$  以内とした。正規分布では  $\pm\sigma$  の範囲に風向が含まれる確率は 68.26% である。図 2.5(a)～(f)で示されている範囲は  $\pm 11.25^\circ$  である。図で示される範囲は基準風速計で観測される流入風の風向許容範囲  $\pm 11.25^\circ$  でどの位置を通過するかを示している。各測定位置で測定される風速は、 $x/D=1.5\sim 5.0$  まで風力タービンから離れるほど、ロータを通過しない風である可能性が高くなる。

## 2.4.3 フィールド風力タービンにおける後流

### 2.4.3.1 鉛直方向速度分布

図 2.6 に  $y/R=0$  における風力タービン後流の鉛直方向速度分布を示す。図の縦軸は鉛直方向位置  $z/R$  を示し、横軸は各測定位置の無次元風速  $U_N$  を示す。黒塗りのプロットは風力タービン停止時、白抜きのプロットは風力タービン運転時を示す。図 2.6 より、風力タービン運転時の速度分布は、風力タービン停止時の速度分布に比べて、減少していることがわかる。これは風力タービンのエネルギー抽出によるものである。風力タービン後流内の風速は下流に行くにしたがい、風力タービン停止時の速度分布に回復していく。  $x/D=1.5$  の場合、  $z/R=0$  において無次元風速は風力タービン停止時に比べ、77%に低下しているが、  $x/D=3.0$  の場合、無次元風速は91%まで回復している。風のエネルギーは風速の3乗に比例するため、  $x/D=1.5$  の場合  $z/R=0$  において、46%であった風のエネルギーは、  $x/D=3.0$  の場合、74%まで回復したといえる。また  $x/D=5.0$  の  $z/R=0$  において無次元風速は91%であり、風力タービンの後流の影響が残っているといえる。

図 2.7 に  $z/R=\pm 1.0, 0$  の速度欠損を示す。縦軸は速度欠損  $U_d$  を示し、横軸は各測定位置  $x/D$  を示す。図 2.7 より  $x/D=1.5$  の場合、  $z/R=0$  において速度欠損は  $U_d=0.21$  であり、下流に行くにしたがい速度欠損の大きさが減少していき、風力タービンの後流が回復していることがわかる。一方、  $z/R=\pm 1.0$  の場合、高高度ほど速度欠損が小さく、また速度欠損の回復が  $z/R=0$  と比べて見られない。これは  $z/R=0$  において大きく減少した風速の影響が半径外側に拡大するのと同時に、ロータ外側から混合による風速の回復が起こり、2つの影響が平衡状態となるため、風速の回復が遅れると考えられる。

図 2.6 より、  $x/D=3.0\sim 5.0$  において顕著な風速の回復は見られなかった。この理由について、以下に  $x/D=3.0\sim 5.0$  の時系列データを用いて考察を行う。

## 時系列データ

図 2.8(a)～2.8(c)は各測定位置 ( $x/D=3.0, 4.0, 5.0$ ) の場合の時系列データを示す。上図は基準風速計と SAT3 ( $z/R=0$ ) の風速  $U$  を示し、下図はヨー角  $\phi$  を示す。横軸に時間  $t$ 、縦軸に風速  $U$  およびヨー角  $\phi$  を示している。下図の色が塗られた範囲は、ロータを通過した風が SAT3 ( $z/R=0$ ) で測定される風向範囲を示している。用いた時系列データは 2.3.2 項で説明した相関係数を用いて時間の補正を行ったデータを用いている。

### (a) $x/D=3.0$

図 2.8(a)に  $x/D=3.0$  における  $z/R=0$  の時系列データを示す。 $x/D=3.0$  の場合, SAT3 ( $z/R=0$ ) で測定される風は  $-9.5^\circ \leq \phi \leq +9.5^\circ$  の範囲でロータを通過する。上図より,  $t=5\sim 11$ [s]で SAT3 ( $z/R=0$ ) の風速の減少が見られる。この理由として, 風速が遅いため SAT3 ( $z/R=0$ ) に到達が遅れたことが考えられる。下図より  $t=27\sim 36$ [s]の場合, SAT3 ( $z/R=0$ ) はロータを通過しない風を測定している。図 2.6 より  $z/R=0$  の無次元風速は 91%まで回復していたが, これはロータを通過せずに後流測定用の SAT3 ( $z/R=0$ ) に到達した風の風速が大きいため無次元風速が大きくなったと考えられる。

### (b) $x/D=4.0$

図 2.8(b)に  $x/D=4.0$  における  $z/R=0$  の時系列データを示す。 $x/D=4.0$  の場合, SAT3 ( $z/R=0$ ) で測定される風は  $-7.1^\circ \leq \phi \leq +7.1^\circ$  の範囲でロータを通過する。図 2.6 より  $z/R=0$  の無次元風速は 87%であった。SAT3 ( $z/R=0$ ) の風速は基準風速計の値より  $t=18\sim 24$ [s]および  $40\sim 60$ [s]において減少している。下図より, この範囲で SAT3 ( $z/R=0$ ) は風力タービン後流の測定範囲に入っているため, 風力タービンのエネルギー抽出により風速が減少したと考えられる。風速は風力タービン後

流の測定範囲に入っている  $t=18\sim 24[s]$  および  $40\sim 60[s]$  で減少している。このことから、 $x/D=4.0$  の場合、 $z/R=0$  において風力タービンの後流の影響は残っていると見える。

(c)  $x/D=5.0$

図 2.8(c) に  $x/D=5.0$  における  $z/R=0$  の時系列データを示す。 $x/D=5.0$  の場合、SAT3 ( $z/R=0$ ) で測定される風は  $-5.7^\circ \leq \phi \leq +5.7^\circ$  の範囲でロータを通過する。 $x/D=5.0$  の場合、ロータを通過した風が風力タービン後流の範囲に入る領域はかなり狭くなっている。SAT3 ( $z/R=0$ ) の風速は基準風速計の値と比べて  $t=11\sim 23[s]$  において大きく減少していることがわかる。これは  $t \leq 10[s]$  のヨー角が安定した際の風力タービンの後流を捉えたためだと考えられる。測定空間の距離の差の分を時間補正しているが、減速された風は到達に時間を要し、風力タービンから離れるほど誤差が大きくなると考えられる。

### 2.4.3.2 乱れ強度比

図 2.9 に  $y/R=0$  における各測定位置の乱れ強度比を示す。図の縦軸は鉛直方向位置  $z/R$  を示し、横軸は各測定位置の乱れ強度比  $TI_{ratio}$  を示す。図より、風力タービン運転時の乱れ強度は、停止に比べ大きくなっている。図 2.6 より、無次元風速は  $x/D=3.0$  の場合、 $z/R=0$  において 91% 回復している。乱れ強度比は  $x/D=3.0$  の場合、 $TI_{ratio} = 1.5$  であり、風が大きく乱れていることがわかる。 $x/D=5.0$  の場合、 $z/R=0$  において乱れ強度比は  $TI_{ratio} = 1.1$  となり、風力タービン停止時に近い値をとる。

### 2.4.3.3 風向の標準偏差比

図 2.10 に  $y/R=0$  における風向の標準偏差比を示す。図の縦軸は鉛直方向位置  $z/R$  を示し、横軸は各測定位置の風向の標準偏差比  $\sigma_{\text{ratio}}$  を示す。図より、風力タービンの停止時と風力タービンの運転時で風向の標準偏差比が異なることがわかる。図 2.10 より、 $z/R=0$  において  $x/D=1.5$  の場合、風向の標準偏差比は  $\sigma_{\text{ratio}}=1.5$  であったが、 $x/D=3.0$  の場合、風向の標準偏差比は  $\sigma_{\text{ratio}}=1.2$  まで回復している。したがって、風力タービン運転時の風向の標準偏差比は下流に行くにしたがい、風力タービン停止時に近づく。

風力タービンの後流の風向は主流方向速度と半径方向速度により決まる。表 2.2 に各後流測定位置における  $z/R=0$  の主流方向および半径方向（風速の絶対値）の無次元風速を示す。用いた基データは表 2.1 で示されるデータと同じである。

表 2.2 主流方向および半径方向の無次元風速 ( $z/R=0$ )

	$x/D=1.5$	$x/D=2.0$	$x/D=2.5$	$x/D=3.0$	$x/D=4.0$	$x/D=5.0$
主流方向	0.77	0.83	0.81	0.91	0.88	0.91
半径方向	1.04	1.03	1.09	1.03	1.05	0.99

表 2.2 より、流入風に対する主流方向の無次元風速はすべての測定位置において 1 より小さく、後流の風速が減少していることがわかる。しかし、流入風に対する半径方向の無次元風速はすべての測定位置において減少しない。主流方向速度は風力タービンによるエネルギー抽出によって減少するが、半径方向速度は変化しない。風向は主流方向風速と半径方向速度のなす角で決定され、主流方向速度が減少することで風向の絶対値は大きくなる。そのため、風力タービンの後流の風向の変動が大きくなり、標準偏差は大きくなったと考えられる。



#### 2.4.3.4 流入風の乱れ強度による風力タービンの後流

本項では，流入風の乱れ強度の違いによる風力タービンの後流の鉛直方向速度分布について述べる．用いたデータは10分間連続のデータを使用した．10分間データを用いた理由は，平均化する時間を長くすることで，風況の統計的な誤差を少なくするためである．測定条件が10分間の値で2.3.2項の条件を満たすことは難しいため，各測定位置で風向の標準偏差が近いデータを用いて比較を行う．そのため，測定位置により比較の対象とした風向の標準偏差は異なる．表2.3は考察に用いた各後流測定位置の測定時の流入風の風況を示す．

表 2.3 各後流測定位置の測定時の風況 ( $z/R=0$ )

測定位置 $x/D$	平均風速 $U[\text{m/s}]$	ヨー角 $\Phi[\text{deg}]$	風向の標準偏差 $\sigma[\text{deg}]$	乱れ強度 $TI$
2.0	5.83	-2.33	13.66	0.24
2.0	5.87	-1.82	13.39	0.26
3.0	5.77	-1.58	17.10	0.30
3.0	6.24	-3.58	16.84	0.35
4.0	5.98	2.37	15.23	0.27
4.0	5.79	-2.15	17.66	0.36

図2.11(a)~2.11(c)に $y/R=0$ における乱れ強度別の風力タービンの後流の鉛直方向速度分布を示す．図の縦軸は鉛直方向位置 $z/R$ を示し，横軸は無次元風速 $U_N$ を示す．白抜きのプロットは大きな乱れ強度，黒塗りのプロットは小さな乱れ強度の結果を示す．

図2.11(a)は $x/D=2.0$ の鉛直方向の速度分布を示しており，2条件の乱れ強度の差は0.02である．鉛直方向の速度分布は乱れ強度によって異なっており，流入風の乱れ強度の大きい場合，風力タービンの後流速度の回復は，乱れ強度の小

さい場合に比べて早くなる。

図 2.11(b)は  $x/D=3.0$  の鉛直方向速度を示しており, 2 条件の乱れ強度の差は 0.05 である。 $x/D=2.0$  と同様に, 風力タービンの後流は乱れ強度が大きい場合は, 乱れ強度が小さい場合に比べ風速が回復している。

図 2.11(c)は  $x/D=4.0$  の鉛直方向速度を示しており, 2 条件の乱れ強度の差は 0.09 である。 $x/D=4.0$  においても, 風力タービンの後流は乱れ強度が大きい場合, 乱れ強度が小さい場合比べ風速が回復している。

風力タービンの後流の無次元風速はすべての後流測定位置 ( $x/D=2.0, 3.0, 4.0$ ) で流入風の乱れ強度によって異なる。乱れ強度の大きい場合, 乱れ強度の小さい場合に比べ風速の回復が早い。これは風の乱れにより, 風力タービン後流内の流れと風力タービン後流外部の流れとの混合が促進されるためであると考えられる。

## 2.5 まとめ

1. 風力タービンの後流内の風速は下流に行くにしたがい、風力タービンの停止時の速度分布に回復していく。  $x/D=1.5$  の場合、  $z/R=0$  において無次元風速は風力タービン停止時に比べ、77%に低下しているが、  $x/D=3.0$  の場合、  $z/R=0$  において無次元風速は91%まで回復している。風のエネルギーは風速の3乗に比例するため、風速を基にエネルギー換算すると  $x/D=1.5$  の  $z/R=0$  で46%であった風のエネルギーは、  $x/D=3.0$  で74%まで回復したといえる。
2. 流入風に対し、主流方向の無次元風速はすべての測定位置において減少する。しかし、流入風に対し、半径方向の無次元風速はすべての測定位置において減少していない。主流方向速度は風力タービンによるエネルギー抽出によって減少するが、風向は主流方向風度と半径方向速度のなす角で決定されるため、半径方向速度が減少せずに、主流方向速度が減少することで風向の絶対値は大きくなる。そのため、風力タービン後流の風向の変動が大きくなり、風力タービン後流の標準偏差は大きくなると考えられる。
3. 風力タービンの後流の速度分布は、すべての後流測定位置 ( $x/D=2.0, 3.0, 4.0$ ) で流入風の乱れ強度によって異なる。乱れ強度の大きい場合、乱れ強度の小さい場合に比べ風速の回復が早い。これは風の乱れにより、風力タービン後流内の流れと風力タービン後流外部の流れとの混合が促進されるためであると考えられる。

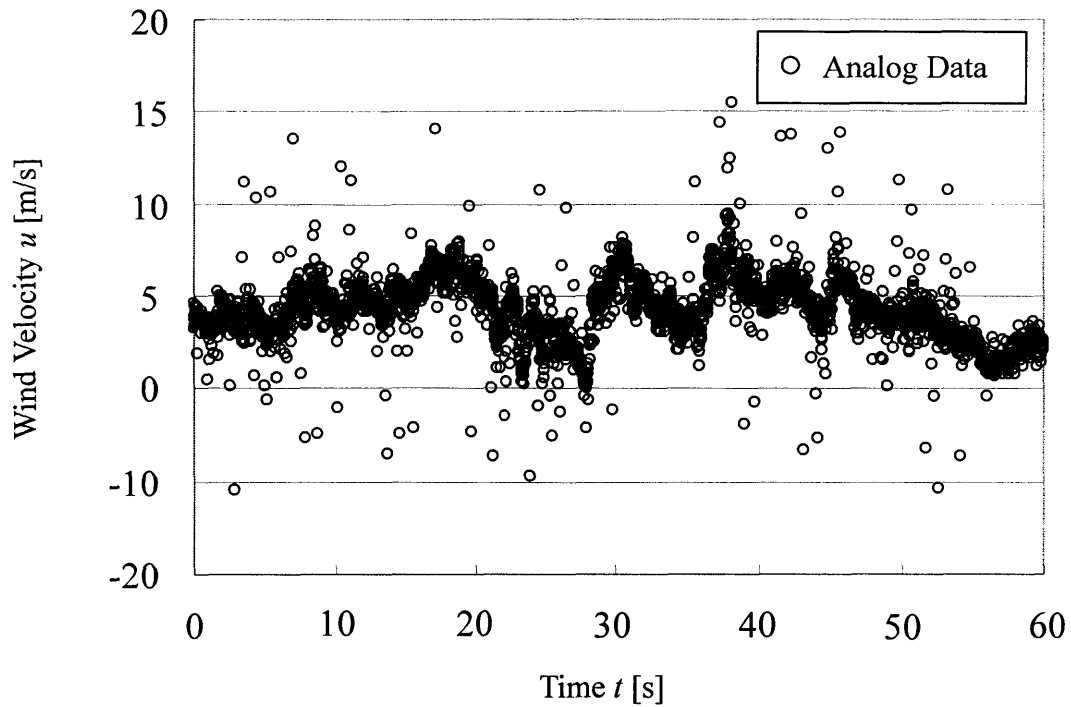


図 2.1(a) 後流測定用超音波流速計(SAT)アナログ出力データ

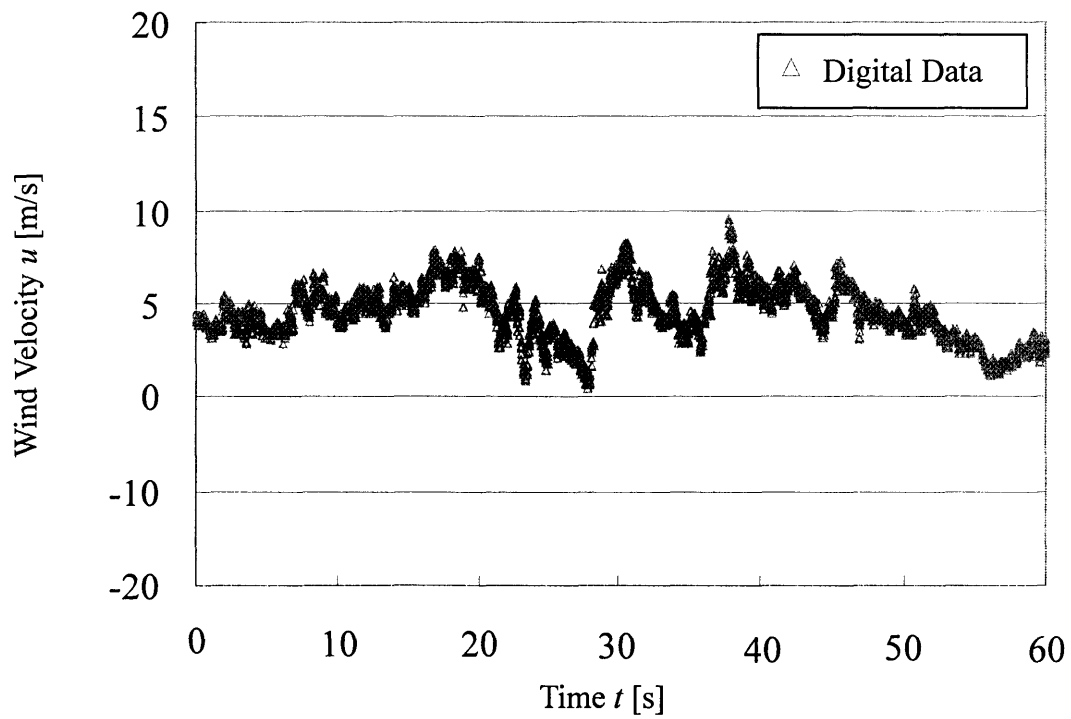


図 2.1(b) 後流測定用超音波流速計(SAT)デジタル出力データ

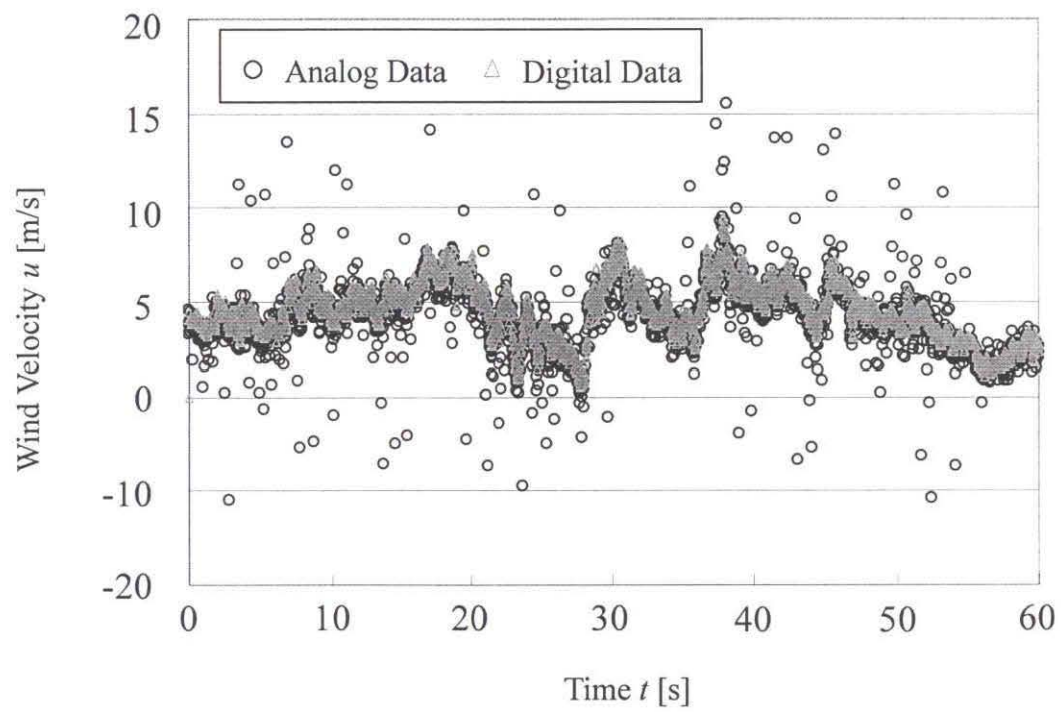


図 2.1(c) 置換後の時系列データ

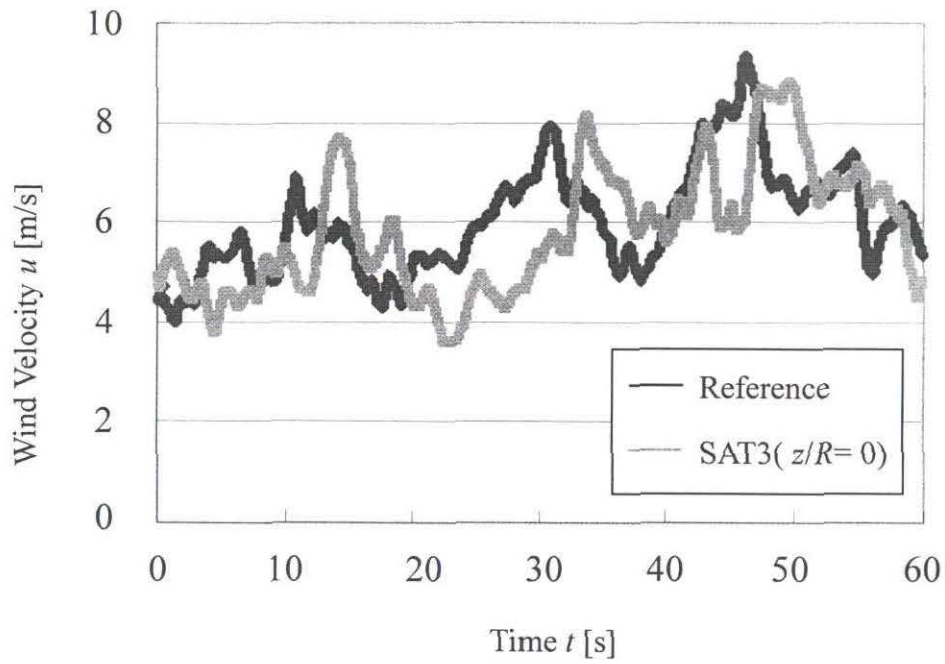


図 2.2(a) 風力タービン停止時の風速の時系列データ ( $x/D=1.5$ )

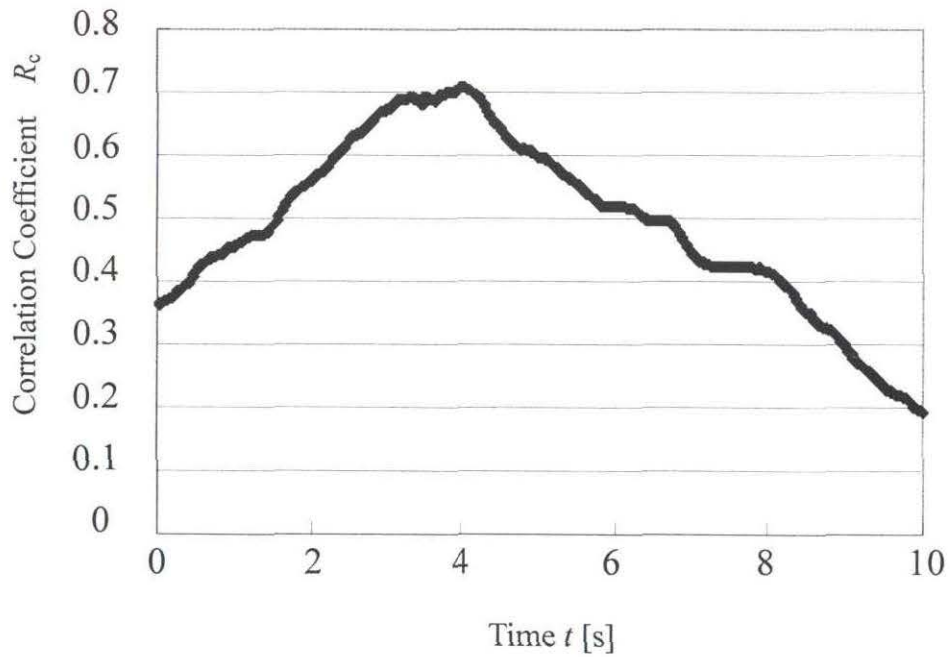


図 2.2(b) 風力タービン停止時の基準風速計と後流測定用超音波流速計の測定風速の相関係数 ( $x/D=1.5$ )

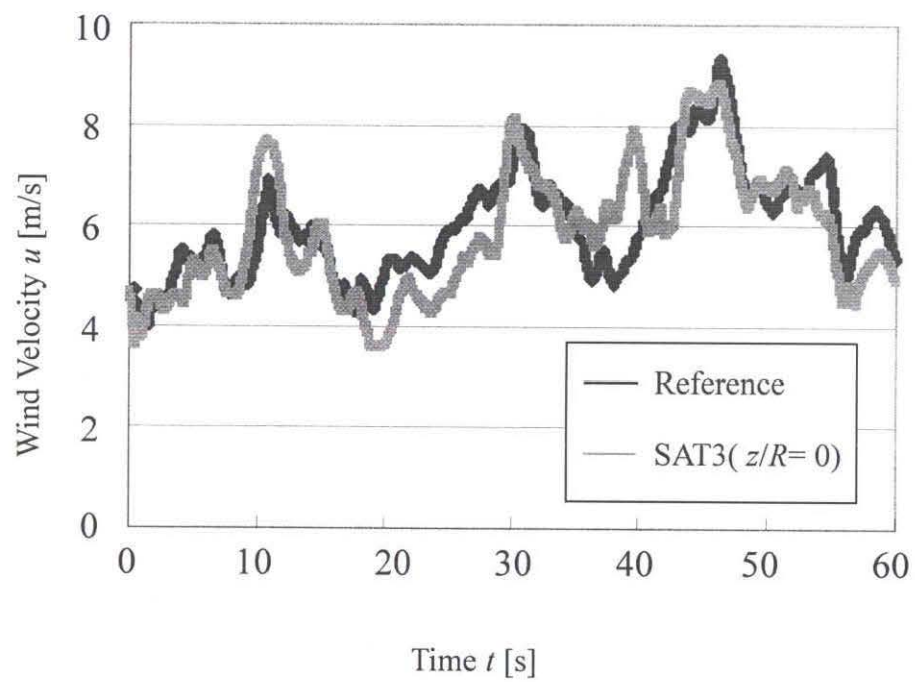


図 2.2(c) 風力タービン停止時の相関処理後の時系列データ ( $x/D=1.5$ )

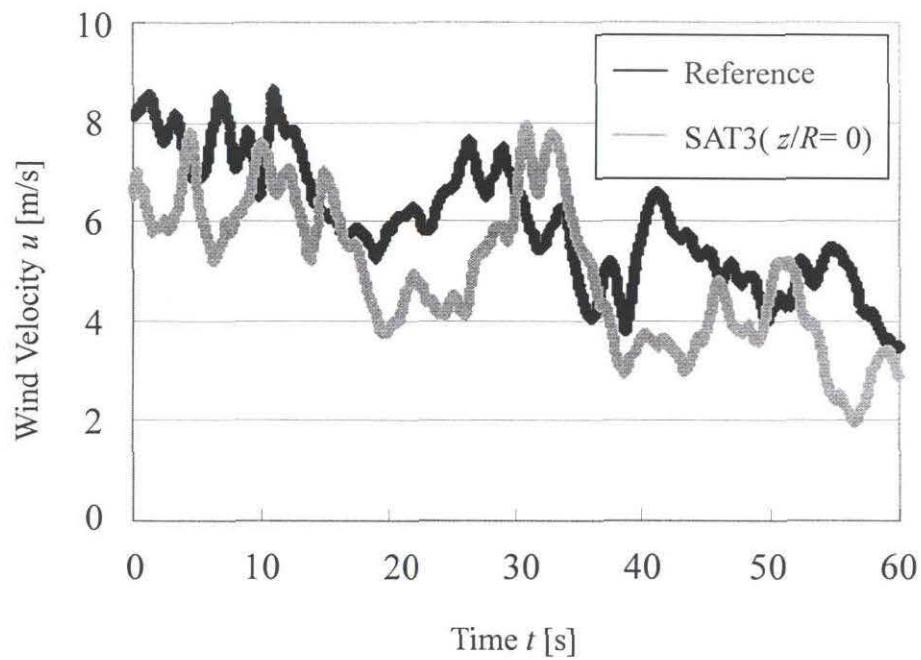


図 2.3(a) 風力タービン運転時の時系列データ ( $x/D=1.5$ )

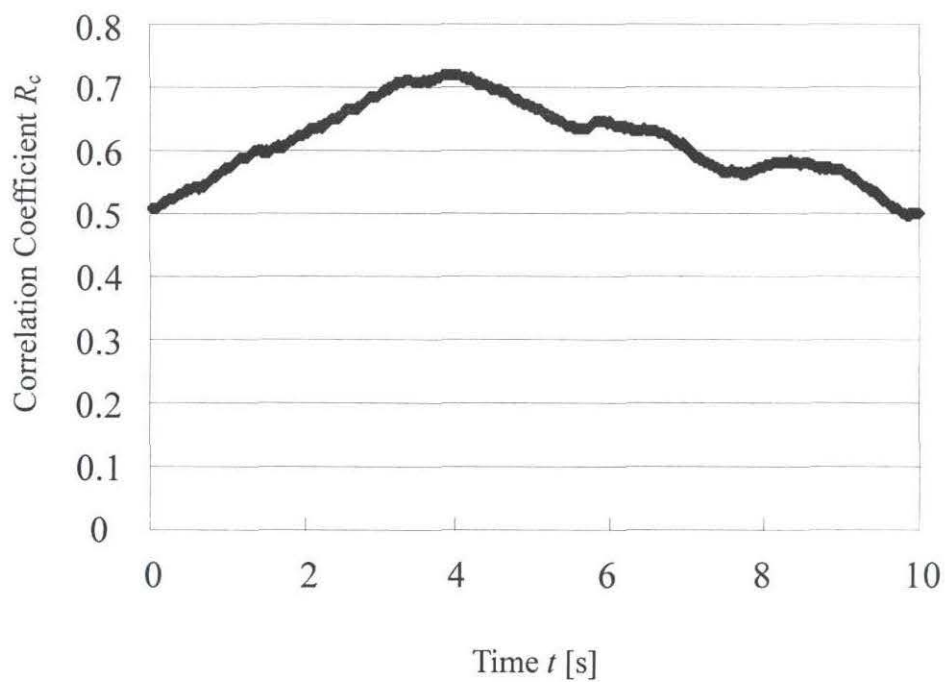


図 2.3(b) 風力タービン運転時の基準風速計と後流測定用超音波流速計の測定風速の相関係数 ( $x/D=1.5$ )



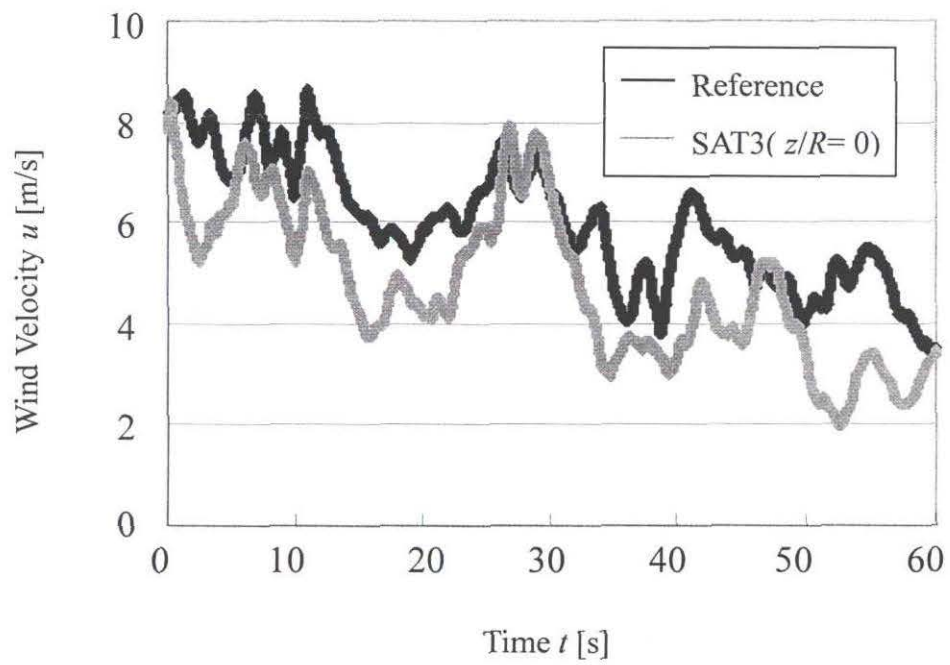


図 2.3(c) 風力タービン運転時の相関処理後の時系列データ ( $x/D=1.5$ )

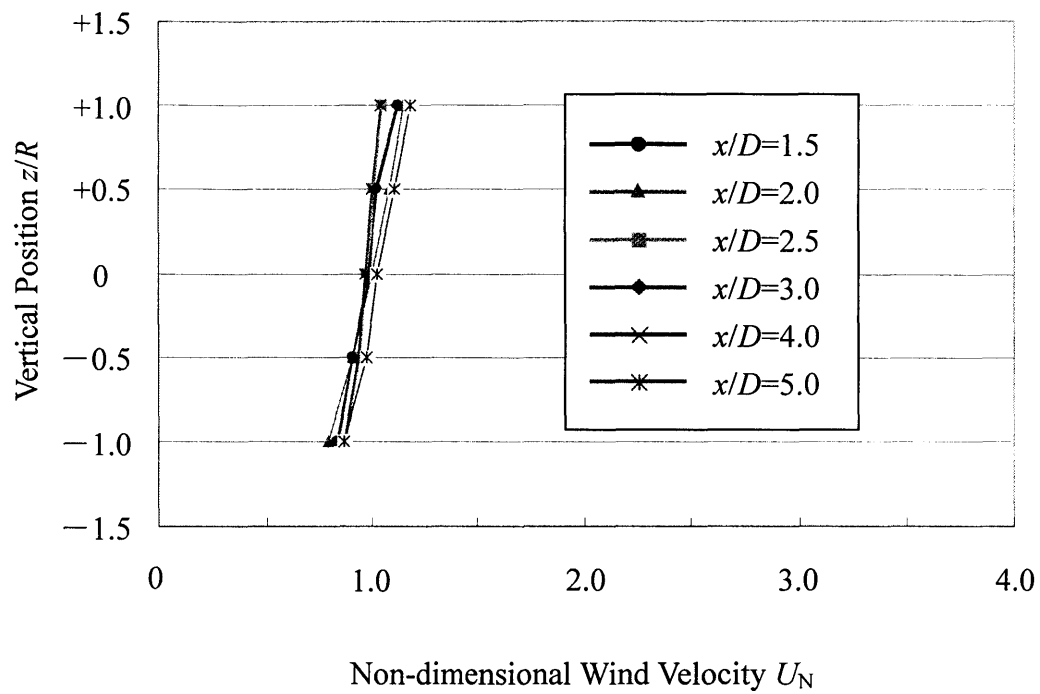


図 2.4(a) 風力タービン停止時における無次元風速

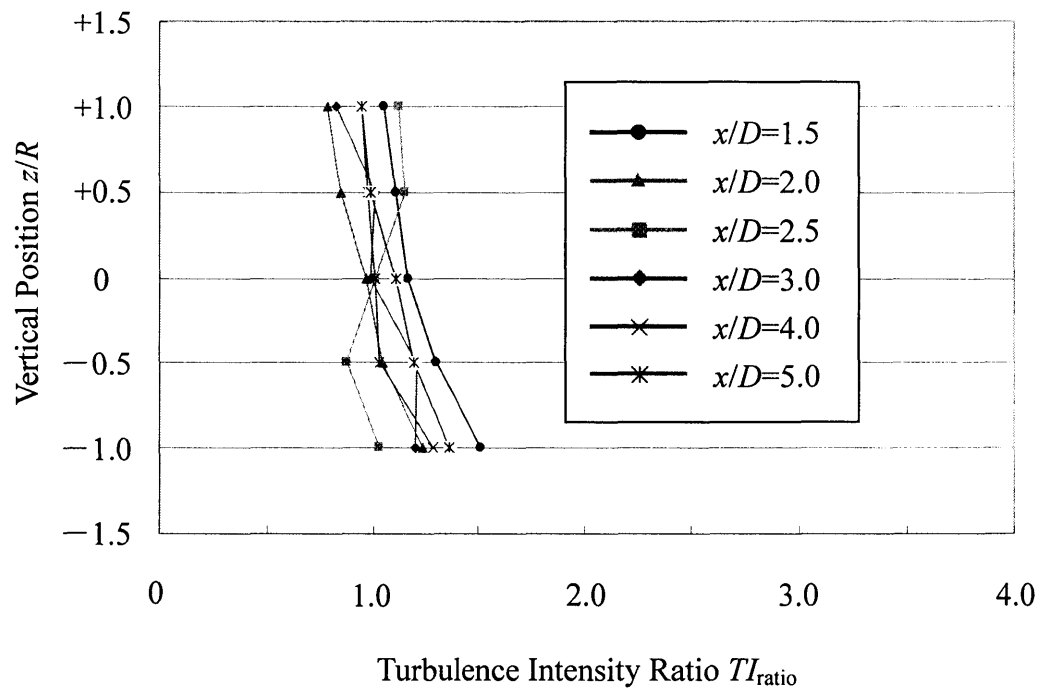


図 2.4(b) 風力タービン停止時における乱れ強度比

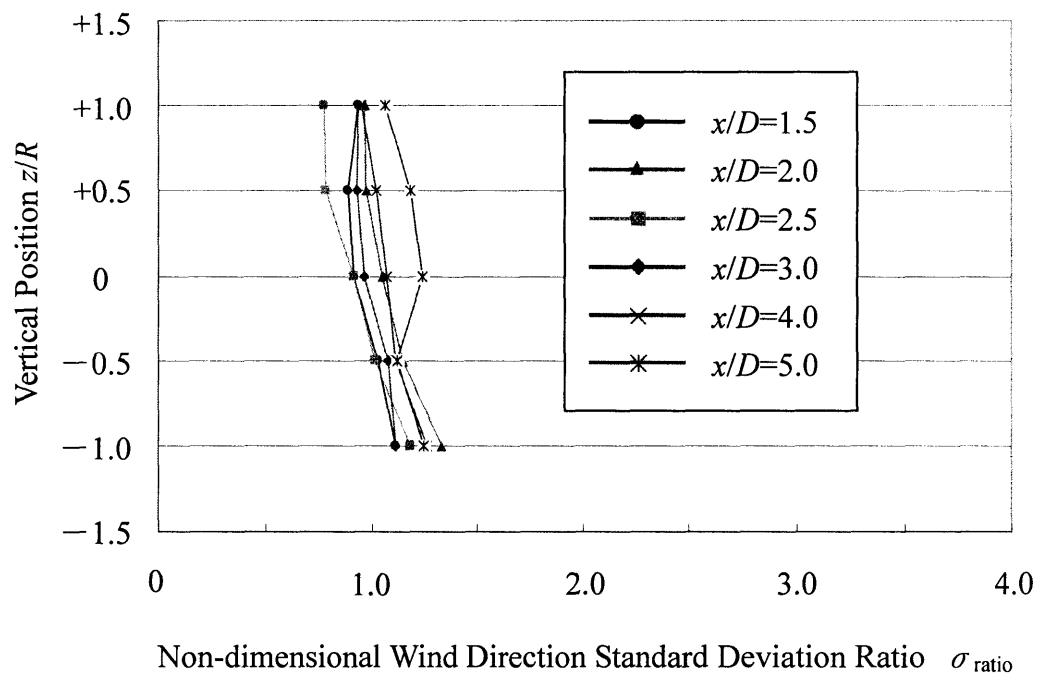


図 2.4(c) 風力タービン停止時における風向の標準偏差比

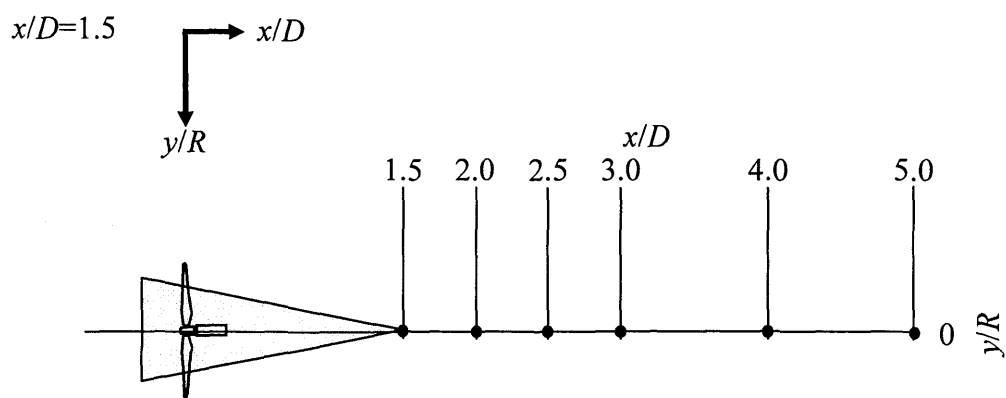


図 2.5(a) 風向許容範囲 ( $x/D=1.5$ )

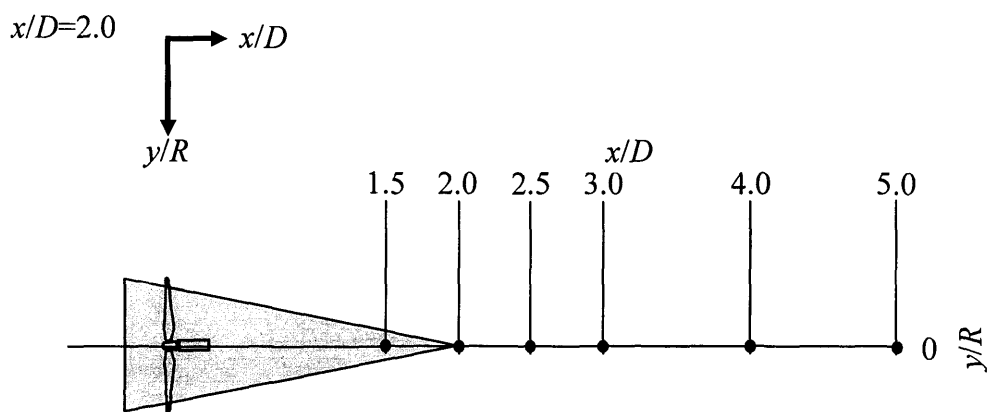


図 2.5(b) 風向許容範囲 ( $x/D=2.0$ )

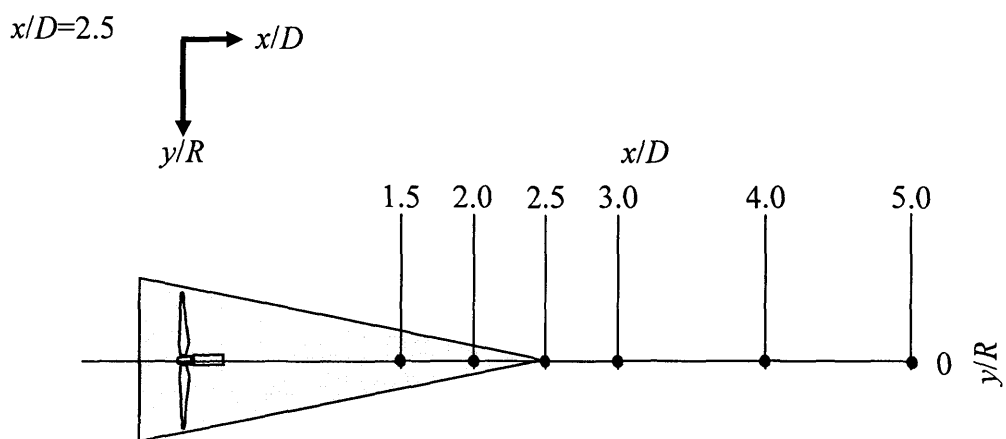


図 2.5(c) 風向許容範囲 ( $x/D=2.5$ )

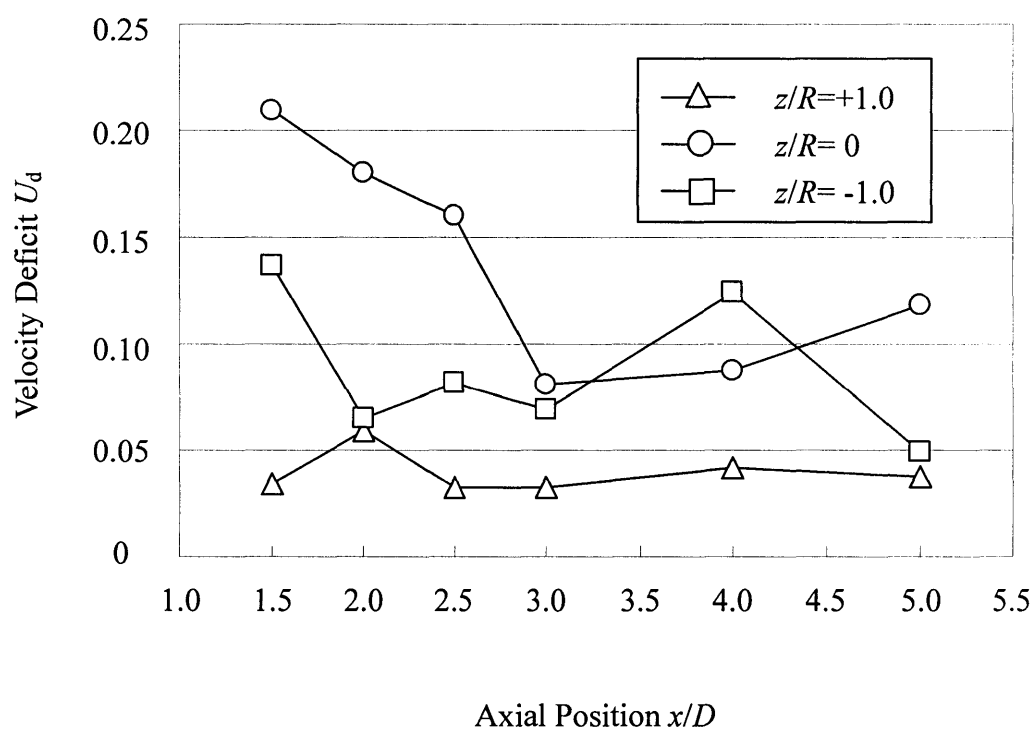
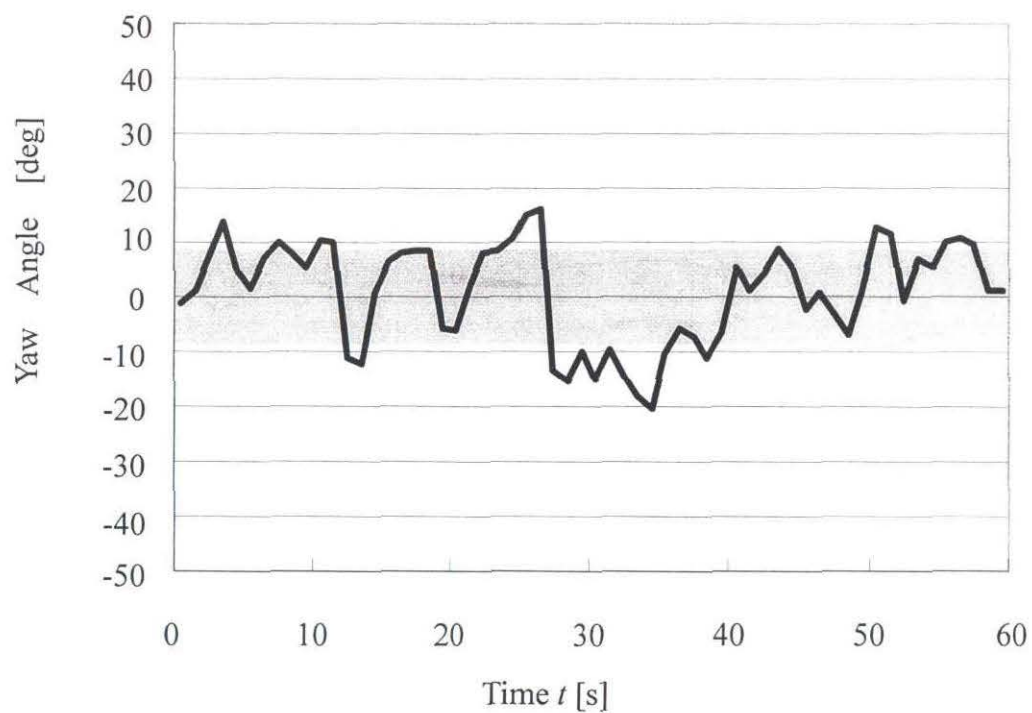
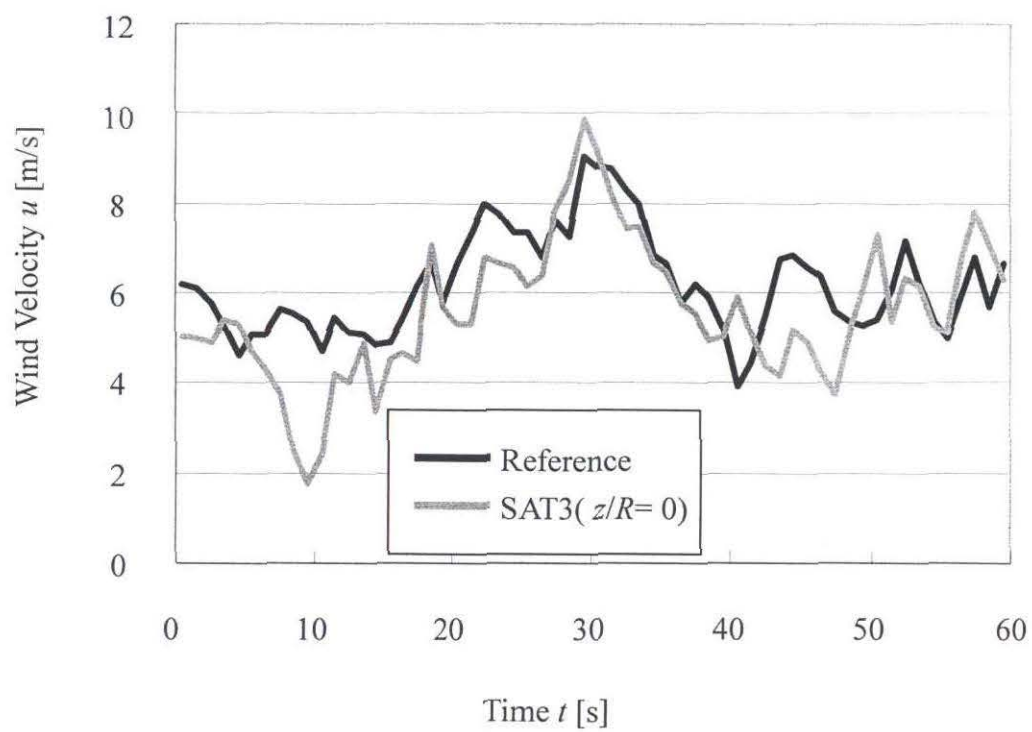


図 2.7 各高度における速度欠損

図 2.8(a) 時系列データ ( $x/D=3.0$ )

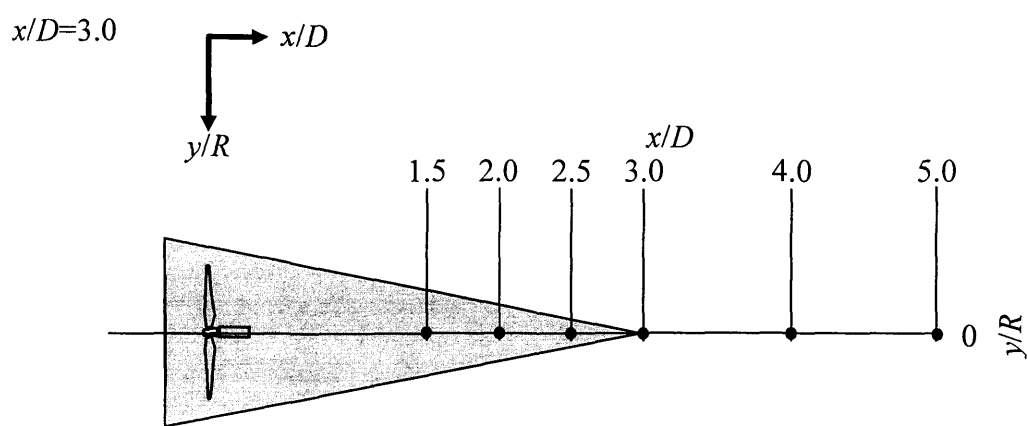


図 2.5(d) 風向許容範囲 ( $x/D=3.0$ )

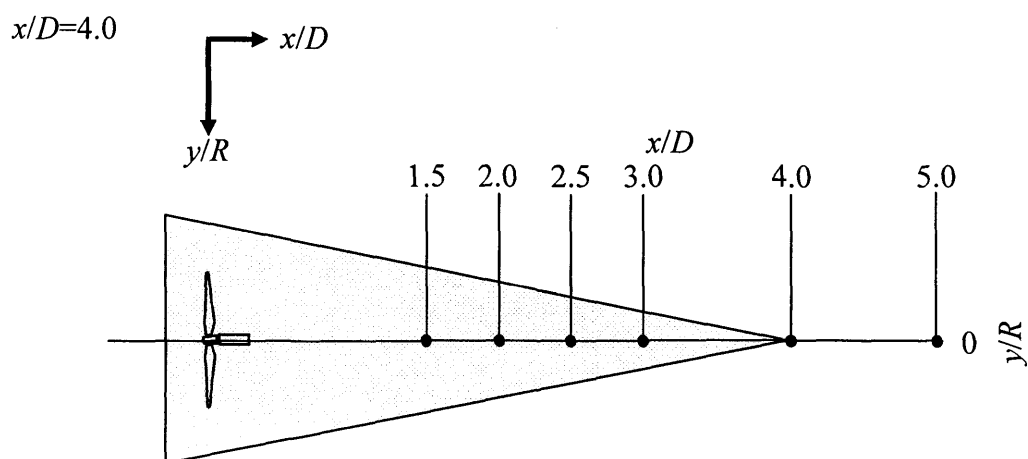


図 2.5(e) 風向許容範囲 ( $x/D=4.0$ )

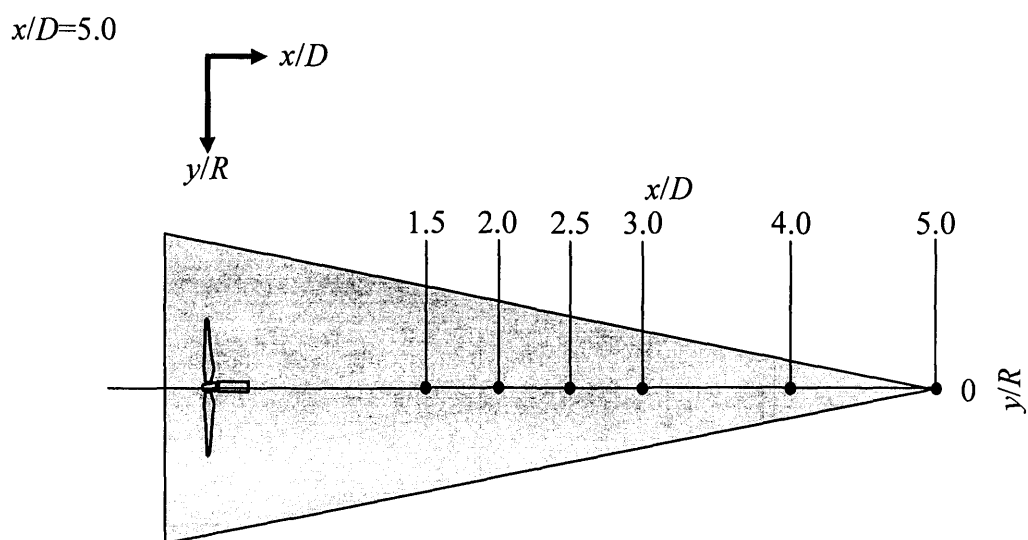


図 2.5(f) 風向許容範囲 ( $x/D=5.0$ )

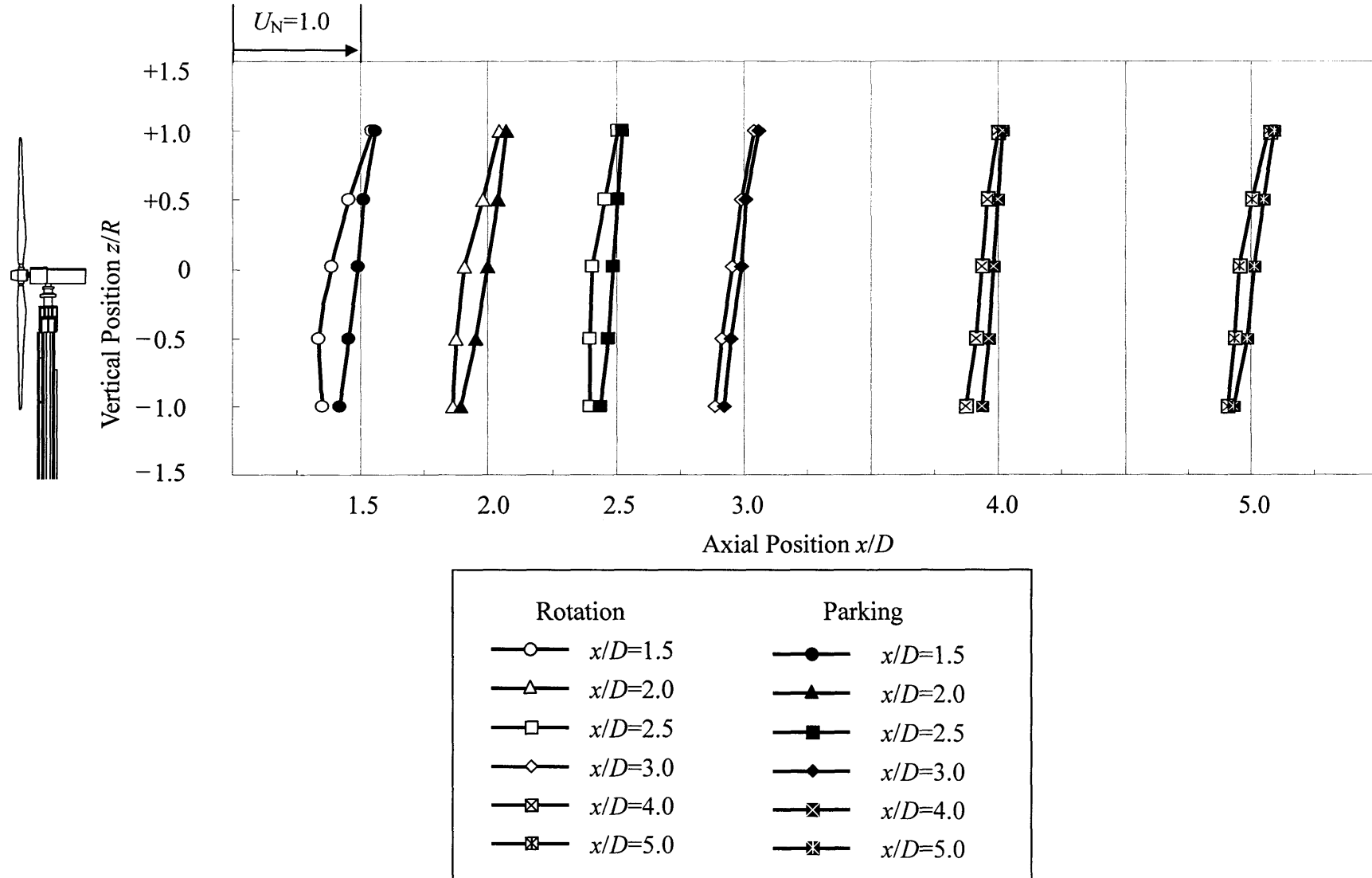
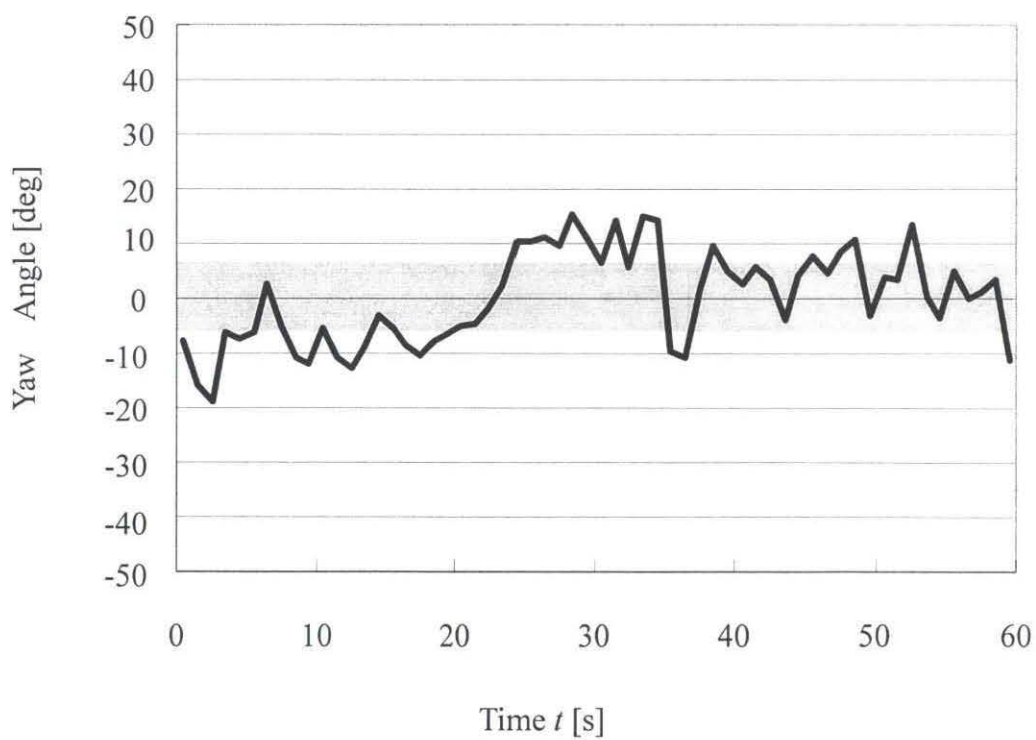
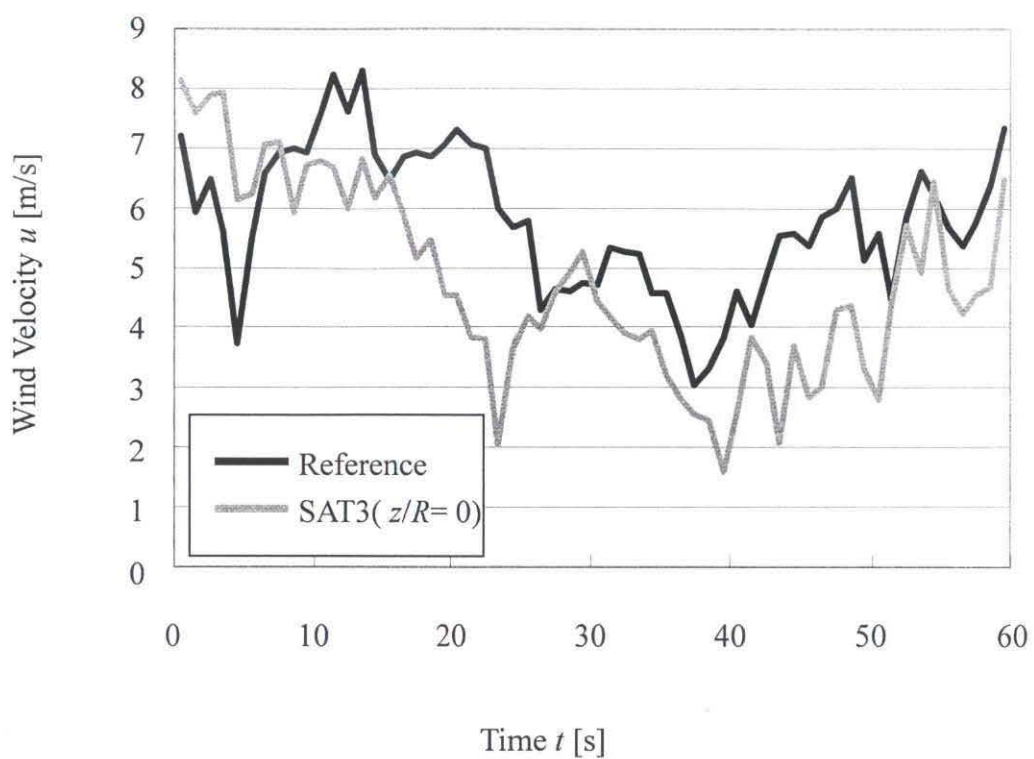


図 2.6 風力タービン運転時と停止時の速度分布



図 2.8(b) 時系列データ ( $x/D=4.0$ )

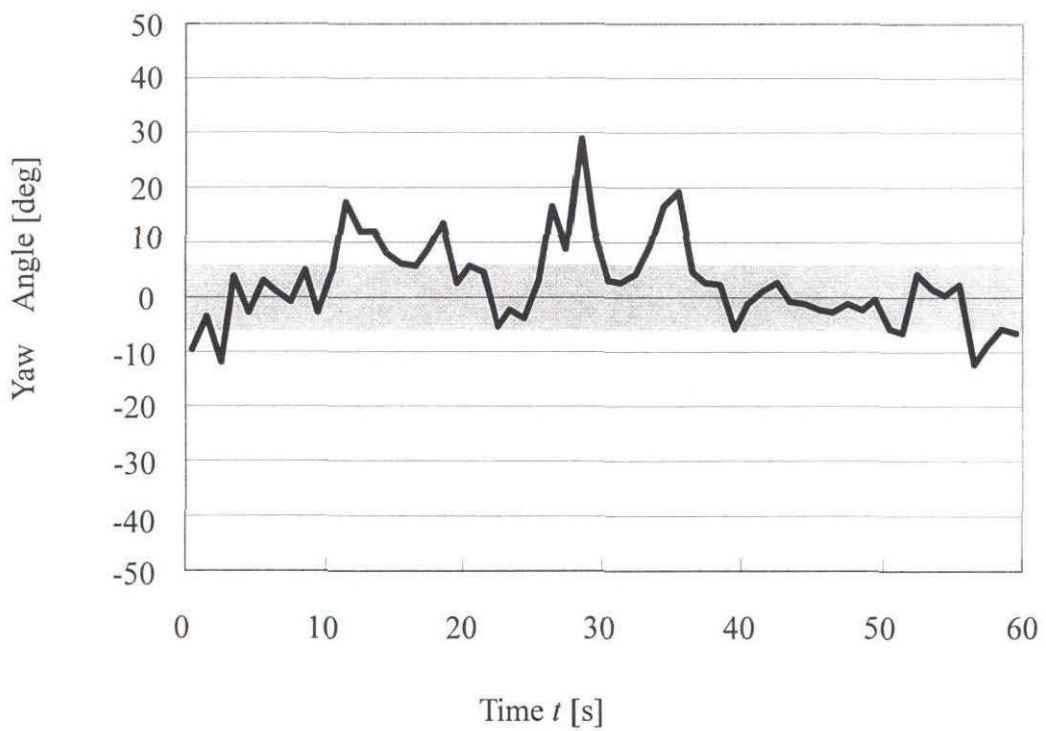
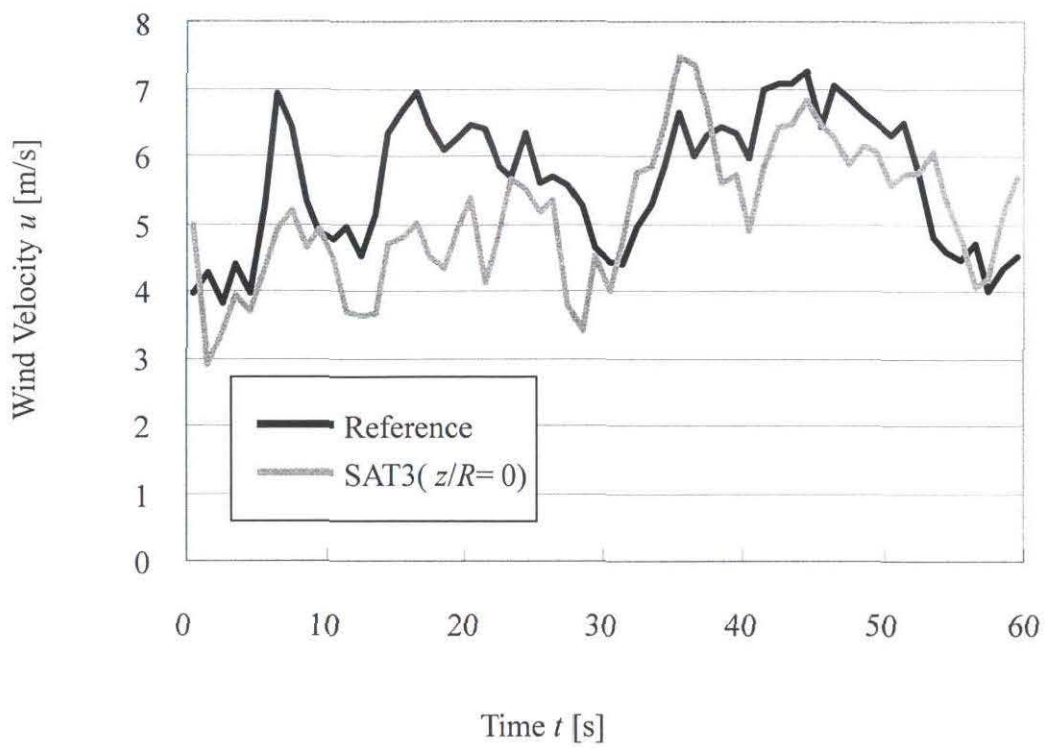


図 2.8(c) 時系列データ ( $x/D=5.0$ )

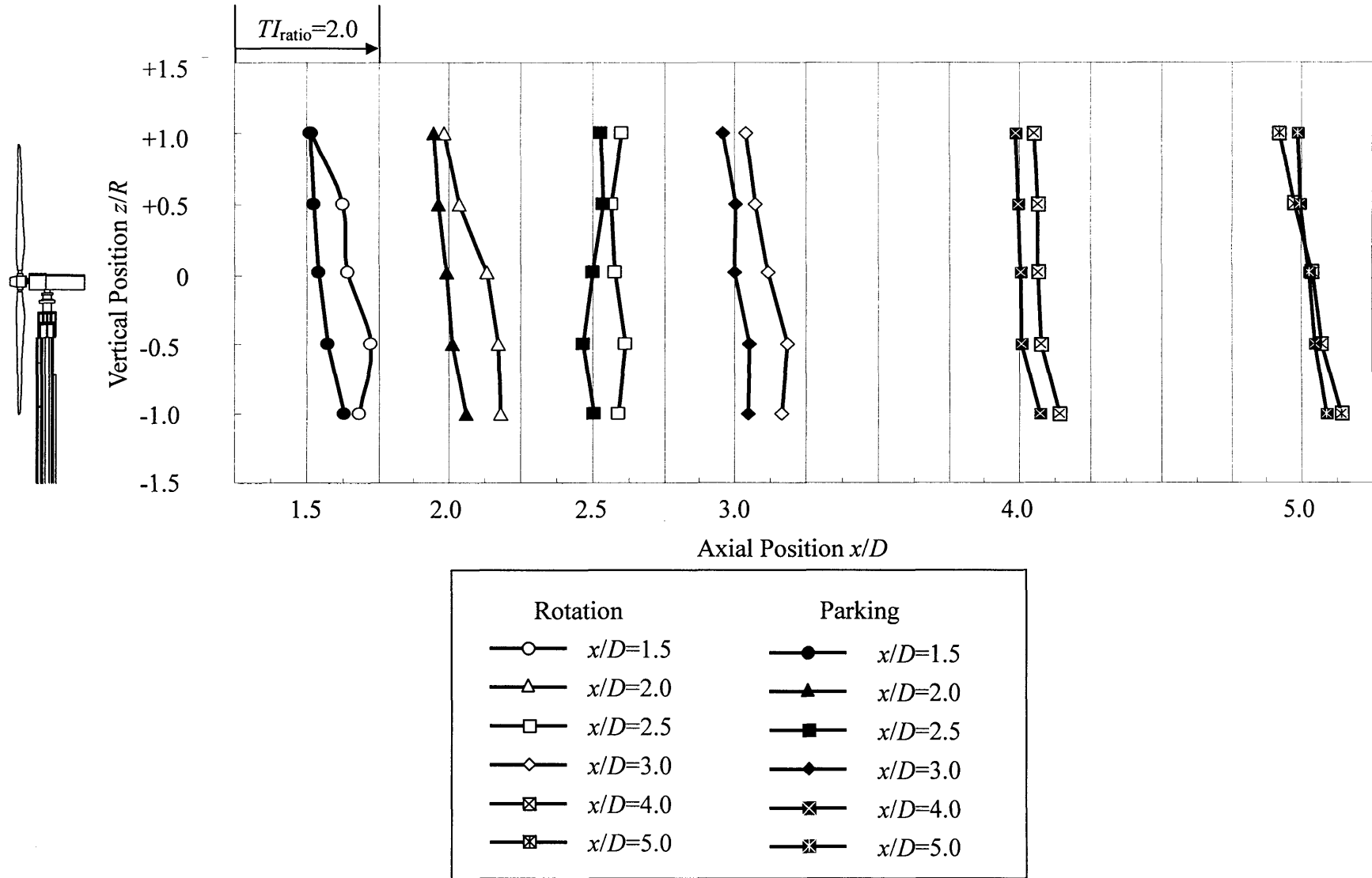


図 2.9 風力タービン運転時と停止時の乱れ強度比

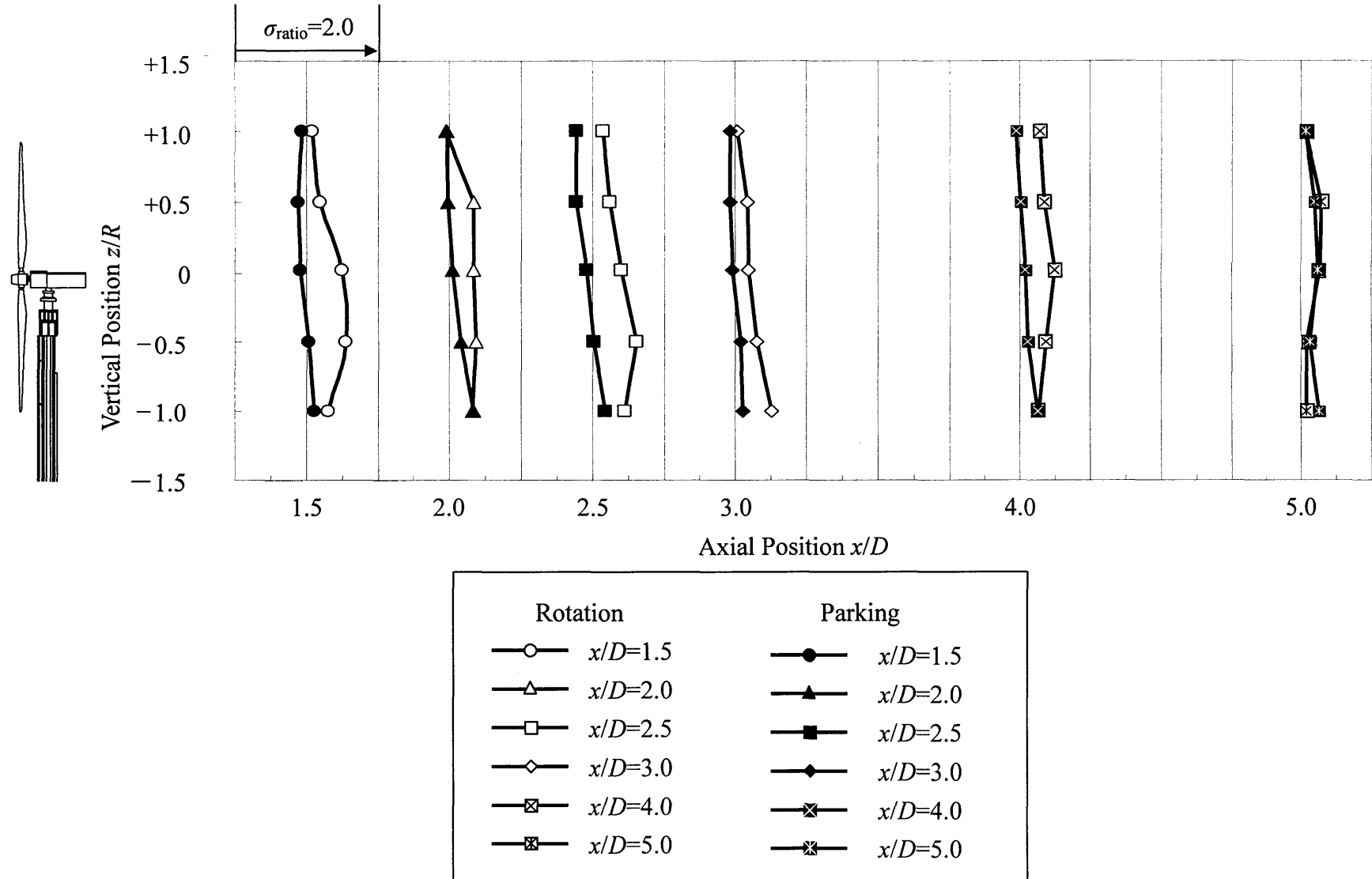


図 2.10 風力タービン運転時と停止時の風向の標準偏差比

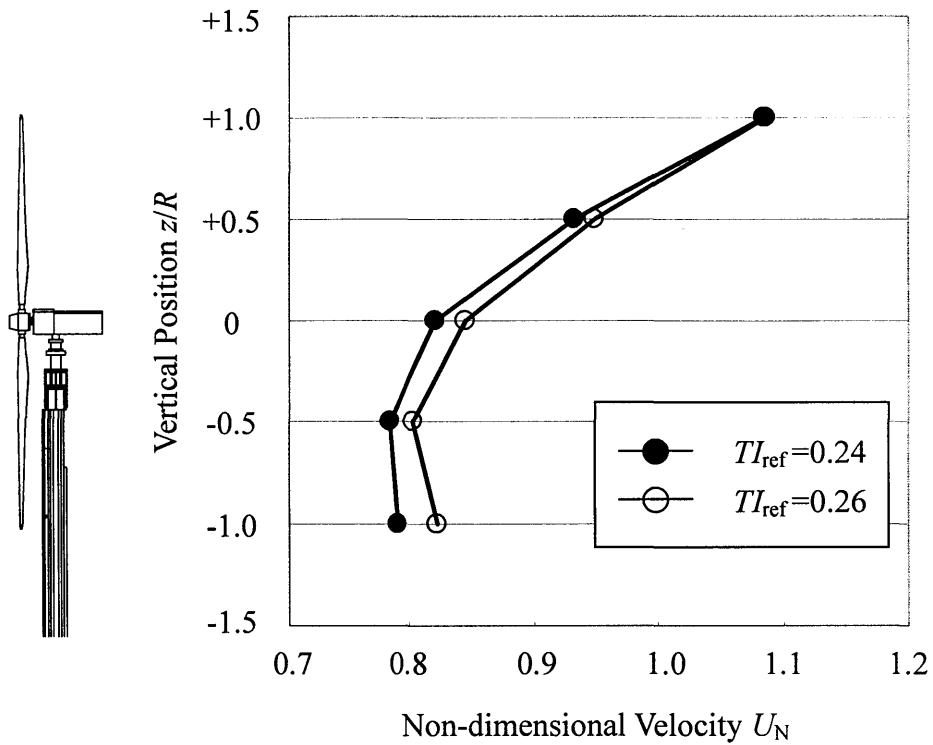


図 2.11(a) 乱れ強度別鉛直方向速度分布 ( $x/D=2.0$ )

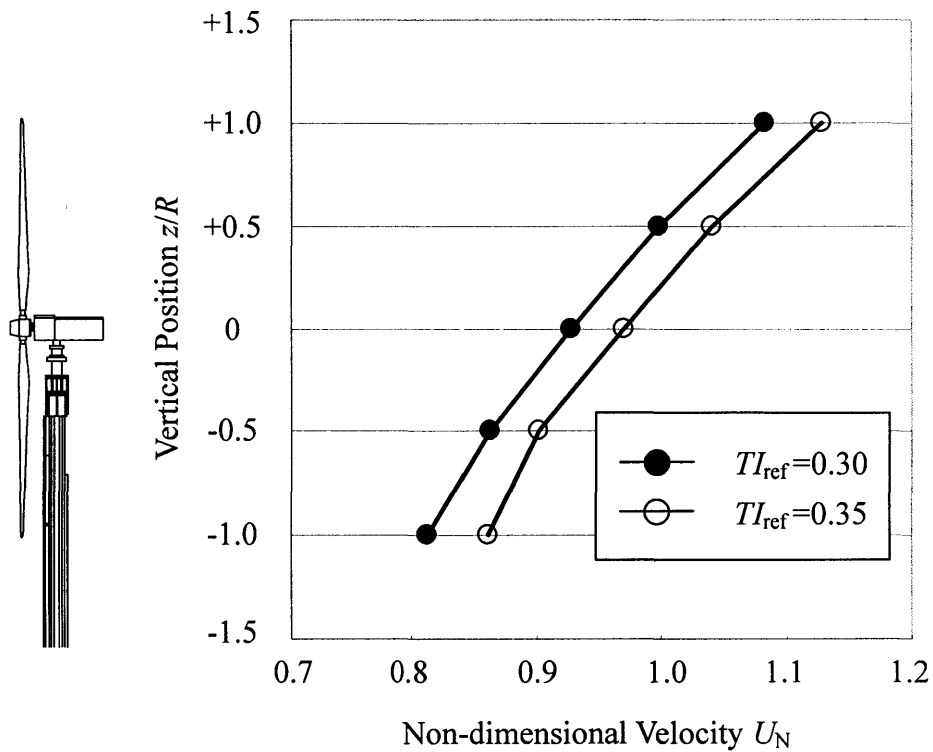


図 2.11(b) 乱れ強度別鉛直方向速度分布 ( $x/D=3.0$ )

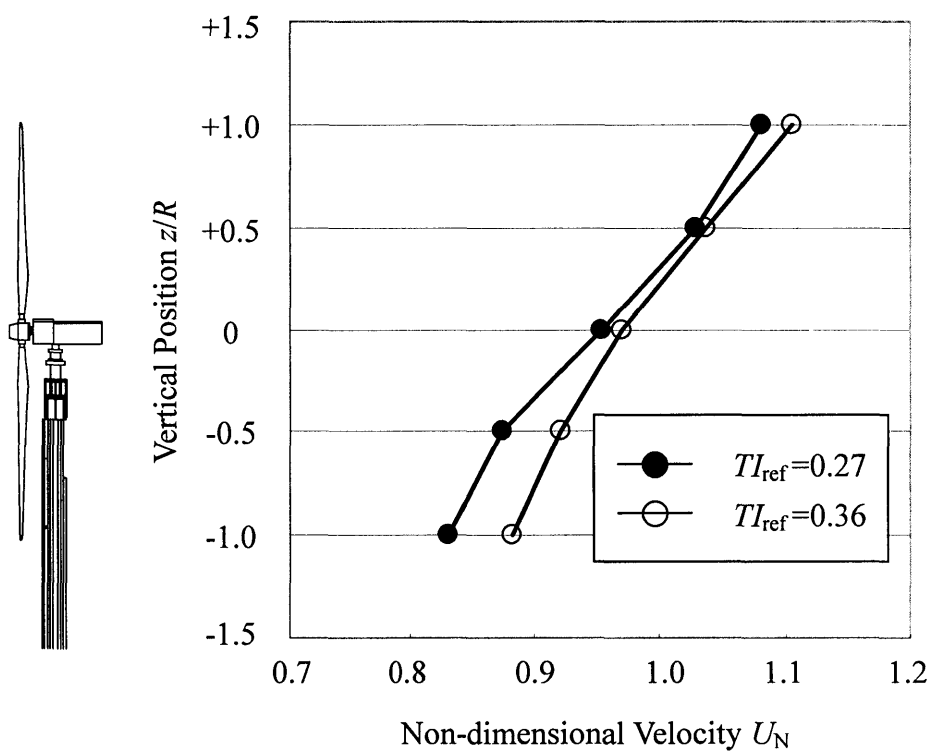


図 2.11(c) 乱れ強度別鉛直方向速度分布 ( $x/D=4.0$ )

## 第3章 ガストによる空力負荷変動

### 3.1 はじめに

風速が急激に変動する突風（以下ガストと呼ぶ）は、風力タービンブレードの破壊、疲労の原因となる。そのため、風力タービン設計時においてガストによる空力負荷変動を把握することは重要となる。IEC で定められているガストモデル<sup>(2)</sup>は、地形が平坦で風速変動が小さい欧米の風況を基に定められているため、複雑地形が多いわが国の風況には適していない。これまでの風力タービンの故障や破壊の原因には、風力タービン設計の IEC 規格がわが国の風況に適応していなかったことが要因と想定されるものもある。

過去の研究において、ガストによる空力負荷の研究はいくつか行われている<sup>(6)</sup>。しかし、風況データを基にした数値解析であり、風速変動と空力負荷変動の関係は実験的には明らかにされていない。本研究では、得られた測定データを Peak-Over-Threshold 手法<sup>(7)</sup>を用いて統計学的にガスト平均形状を求め、ガストによる空力負荷変動について実験による評価および解析を行った。

### 3.2 データ整理方法

#### Peak-Over-Threshold 手法

本研究では Peak-Over-Threshold（以下 POT 手法と呼ぶ）を用いて、測定データからガストの抽出を行った。以下に POT 手法を示す。

- 1) 取得した時系列データから風速のピークと同時刻のリードラグ・モーメント、フラップ・モーメントを抽出（風速のピークの時間を  $t=0[s]$  として  $-30 \leq t \leq 30$ ）する。
- 2) 抽出されたすべての風速のピークに対して、ピークを中心とした平均風速  $u_{ave}$ 、風速変動の標準偏差  $\sigma$ 、ガスト振幅  $u_{gust}$  を求める。ここでガスト振

幅  $u_{gust}$  は式(3.1)で示すように抽出した風速のピークと平均風速  $u_{ave}$  との差として定義される。平均風速  $u_{ave}$  は、風速のピークを含んだ 20 分間データの平均風速とした。

- 3) 抽出したガストを、平均風速  $u_{ave}$ 、風速変動の標準偏差  $\sigma$ 、ガスト振幅  $u_{gust}$  に基づき分類する。
- 4) それぞれの分類ごとに、風速のピークの前後  $t=30[s]$  (風速のピークの時間を  $t=0[s]$  として  $-30 \leq t \leq 30$ ) の 60s 間の風速時系列データとリードラグ・モーメント、フラップ・モーメントの平均値を計算する。

図 3.1 にガストの時系列データの例を示す。縦軸に風速  $u$ 、横軸に時間  $t$  を示す。また平均風速  $u_{ave}$  およびガスト振幅  $u_{gust}$  の関係についても図 3.1 に示す。図 3.1 で示されるガストは平均風速  $u_{ave}=4.1[m/s]$ 、ガスト振幅  $u_{gust}=3.9[m/s]$  である。

$$u_{gust} = u(0) - u_{ave} \quad (3.1)$$

$u_{gust}$	: ガスト振幅[m/s]
$u(0)$	: $t=0$ における風速のピーク [m/s]
$u_{ave}$	: 平均風速[m/s]

以上の手順によりガストの統計的な平均形状が求められる。本来は平均風速  $u_{ave}$ 、風速変動の標準偏差  $\sigma$ 、ガスト振幅  $u_{gust}$  の 3 つのパラメータで分類すべきである。しかし、パラメータ数を増やすとデータの数が絞られて、統計量として意味がなくなる。そのため、本研究では統計的に意味がある量として十分なデータ点数を確保するために、平均風速  $u_{ave}$ 、ガスト振幅  $u_{gust}$  の 2 つのパラメータが重要であると考え、2 つのパラメータにより分類を行った。この 2 つのパラメータにより、データを 8 つに分類をして考察を行った。分類条件を以下の表



3.1 に示す.

表 3.1 ガスト分類条件

平均風速 $u_{ave}$ [m/s]	ガスト振幅 $u_{gust}$ [m/s]
3.0~5.0	1.0~3.0
	3.0~5.0
	5.0~7.0
5.0~7.0	1.0~3.0
	3.0~5.0
	5.0~7.0
7.0~9.0	3.0~5.0
	5.0~7.0

また、本実験は 2 章の後流測定と同時に行ったため、サンプリング周波数を 50Hz, ナセル方位を  $300^\circ$  に固定して行った. 一般に風力タービンは風向を追尾して運転される. このため、風向を追尾していると仮定するために、データ整理には 20 分間の平均風向が  $300^\circ$  付近 ( $285\sim 315^\circ$ ) のデータのみを使用した.

### 3.3 実験結果および考察

#### 3.3.1 風況データ

ガストを評価するにあたり、平均量とガストの関係について調べることを目的に風況解析を行った. 図 3.2 は実線がデータ整理に用いた全時間の風向別平均風速と風向出現率を示しており、破線がガスト観測時の 60s 間の風向別平均風速と風向出現率を示している. 図の出現率はヨー角を基準としているため、 $\phi=0^\circ$  は風向  $300^\circ$  (北を  $0^\circ$  としている)を表している. 図より、卓越風向からの風速が最も強いことがわかる. またガスト観測時の卓越風向と風速の関係は、デー

タ整理に用いた全時間の傾向と同じであった。

### 3.3.2 ガスト平均形状とガストモデルの比較

本実験で得られた実測のガスト平均形状と、IEC 規格で提唱されているガストモデル<sup>(5)</sup>との比較を行った。ガストモデルは正弦関数の組み合わせから風速の瞬時値を与える。風速の瞬時値はガストの開始時刻を  $t=0$ [s]として、以下の式で表される。

$$\begin{cases} u(t) = u_{\text{ini}} - 0.37u_{\text{gust}} \sin(3\pi t / T)(1 - \cos(2\pi t / T)) & (0 \leq t \leq T) \\ u(t) = u_{\text{ini}} & (t < 0, T < t) \end{cases} \quad (3.2)$$

$u_{\text{ini}}$  : ガスト流入前風速[m/s]

$T$  : ガスト時間幅[s]

ガスト振幅  $u_{\text{gust}}$  とガスト時間幅  $T$  をパラメータとして様々なガストを表現することができる。図 3.3 にガストモデルの時系列データの例を示す。縦軸に風速  $u$ 、横軸に時間[s]を示す。また、ガスト流入前風速  $u_{\text{ini}}$  およびガスト時間幅  $T$  の関係について図 3.3 に示す。

実測のガスト平均形状とガストモデルの比較は以下の表 3.2 の 3 条件について行う。ここでガストモデルの  $u_{\text{ini}}$  は測定データの  $u_{\text{ave}}$  と仮定した

表 3.2 ガスト分類条件

平均風速 $u_{\text{ave}}$ [m/s]	ガスト振幅 $u_{\text{gust}}$ [m/s]
-----------------------------	-------------------------------

3.0～5.0	3.0～5.0
5.0～7.0	3.0～5.0
7.0～9.0	3.0～5.0

図 3.4(a)～(c)は、平均風速  $u_{ave}$  およびガスト振幅  $u_{gust}$  によって分類された実測のガスト平均形状とガストモデルの比較を示す。縦軸に風速  $u$ ，横軸に時間  $t$  を示す。実測のガスト平均形状とガストモデルの大まかな傾向は一致していることがわかる。しかし  $t=0[s]$  において風速がピークを示す場合、実測のガスト平均形状のピークが急峻なのに対して、ガストモデルはなだらかなピークを示している。IEC の提唱するガストモデルは正弦関数を組み合わせであるため、様々な地形によって影響されるガスト形状の全てを完全に再現することはできないと考えられる。分類条件の平均風速  $u_{ave}$  が大きくなるほど、実測のガスト時間幅  $T$  は狭くなり、風速の増加と減少が急峻になる。今回、実測のガスト平均形状とガストモデルを比較した 3 条件（表 3.2）はガスト振幅  $u_{gust}$  が同じである。ガスト振幅  $u_{gust}$  が同じ場合、平均風速  $u_{ave}$  が大きいほど、ガスト時間幅  $T$  が狭くなっている。ガストモデルのガスト時間幅  $T$  は順に  $T=40, 35, 20[s]$  である。ガスト流入前の風速が大きいほど、ガストによる風速のピーク前後の風速の増加と減少が短時間で起こると考えられる。

### 3.3.3 ガスト平均形状による空力負荷変動

図 3.5～3.12 は表 3.1 に示されている平均風速  $u_{ave}$  およびガスト振幅  $u_{gust}$  によって分類されたガスト平均形状と、上図はリードラグ・モーメント  $M_l$ ，下図はフラップ・モーメント  $M_f$  を示す。図の左の縦軸は風速  $u$ ，右の縦軸はリードラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$  であり、横軸は時間  $t$  を示す

(a) 平均風速  $u_{ave}=3.0\sim 5.0[m/s]$

図 3.5～3.7 は表 3.1 で示される平均風速  $u_{ave}=3.0\sim 5.0 [m/s]$  におけるガスト振幅

$u_{\text{gust}}$  の 3 条件 ( $u_{\text{gust}}=1.0\sim 3.0, 3.0\sim 5.0, 5.0\sim 7.0$  [m/s]) について示す. 図 3.5~3.7 の上図(a)に各ガスト振幅  $u_{\text{gust}}$  の実測のガスト平均形状とリードラグ・モーメント  $M_l$  の変動を示し, 図 3.5~3.7 の下図(b)に実測のガスト平均形状とフラップ・モーメント  $M_f$  の変動を示す. 風速の増減とリードラグ・モーメント  $M_l$  とフラップ・モーメント  $M_f$  の増減の傾向は一致しているといえる. 一方で, 風速とモーメントのピークに時間差がある. これは基準風速計と風力タービン間の距離 10m によって生じると考えられる. 図 3.7(a)は風速のピークとリードラグ・モーメント  $M_l$  のピークは一致していない. これはヨー角の変動によるものと考えられる. ヨー角の影響については次項で考察を行う.

図 3.5 より, ガスト振幅  $u_{\text{gust}}=1.0\sim 3.0$ [m/s] の場合, ガストにより風速が増加すると, リードラグ・モーメント  $M_l$  は  $t=0$ [s] において  $t=-7$ [s] に比べ約  $120\text{N}\cdot\text{m}$  増加し, フラップ・モーメント  $M_f$  は約  $220\text{N}\cdot\text{m}$  増加した. 同様に図 3.6 より, ガスト振幅  $u_{\text{gust}}=3.0\sim 5.0$ [m/s] の場合, リードラグ・モーメント  $M_l$  は  $t=0$ [s] において  $t=-11$ [s] に比べ約  $120\text{N}\cdot\text{m}$  増加し, フラップ・モーメント  $M_f$  は約  $200\text{N}\cdot\text{m}$  増加した. また図 3.7 よりガスト振幅  $u_{\text{gust}}=5.0\sim 7.0$ [m/s] の場合, リードラグ・モーメント  $M_l$  は  $t=0$ [s] において  $t=-9$ [s] に比べ  $80\text{N}\cdot\text{m}$  増加し, フラップ・モーメント  $M_f$  は  $120\text{N}\cdot\text{m}$  増加した. 平均風速  $u_{\text{ave}}=3.0\sim 5.0$ [m/s] において, ガスト振幅  $u_{\text{gust}}$  が一番小さい  $u_{\text{gust}}=1.0\sim 3.0$ [m/s] の場合に, リードラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$  の増加が一番大きい. これはガスト振幅  $u_{\text{gust}}$  が大きい場合, ガストにより風速が増加することで低周速比の状態になり, 翼の失速現象が生じたためであると考えられる. ここで周速比は風力タービンに流入する風速と翼先端の速度の比である. 失速についての考察は次項で行う.

#### (b) 平均風速 $u_{\text{ave}}=5.0\sim 7.0$ [m/s]

図 3.8~3.10 は表 3.1 で示される平均風速  $u_{\text{ave}}=5.0\sim 7.0$  [m/s] におけるガスト振

幅  $u_{\text{gust}}$  の 3 条件 ( $u_{\text{gust}}=1.0\sim 3.0, 3.0\sim 5.0, 5.0\sim 7.0$  [m/s]) について示す. 図 3.8 ~3.10 の上図(a)に各ガスト振幅  $u_{\text{gust}}$  の実測のガスト平均形状とリードラグ・モーメント  $M_l$  の変動を示し, 下図(b)に実測のガスト平均形状とフラップ・モーメント  $M_f$  の変動を示す. 風速の増減によりフラップ・モーメント  $M_f$  は変動しており, それぞれの変動の傾向は一致している. リードラグ・モーメント  $M_l$  は風速の増減により変動すると考えられるが, 図 3.9(a)および図 3.10(b)のリードラグ・モーメント  $M_l$  の変動は, 風速の変動に対応していない.

図 3.8 より, ガスト振幅  $u_{\text{gust}}=1.0\sim 3.0$ [m/s]の場合, ガストにより風速が増加するとリードラグ・モーメント  $M_l$  は  $t=0$ [s]において  $t=-7$ [s]に比べ約  $100\text{N}\cdot\text{m}$  増加し, フラップ・モーメント  $M_f$  は約  $180\text{N}\cdot\text{m}$  増加した. 同様に図 3.9 より, ガスト振幅  $u_{\text{gust}}=3.0\sim 5.0$ [m/s]の場合, リードラグ・モーメント  $M_l$  は  $t=0$ [s]において  $t=-10$ [s]に比べ  $20\text{N}\cdot\text{m}$  増加し, フラップ・モーメント  $M_f$  は  $70\text{N}\cdot\text{m}$  増加した. また図 3.10 より, ガスト振幅  $u_{\text{gust}}=5.0\sim 7.0$ [m/s]の場合, リードラグ・モーメント  $M_l$  は  $t=0$ [s]において  $t=-5$ [s]に比べ  $50\text{N}\cdot\text{m}$  減少し, フラップ・モーメント  $M_f$  は  $80\text{N}\cdot\text{m}$  増加した. 前述の(a)平均風速  $u_{\text{ave}}=3.0\sim 5.0$ [m/s]の時と同様にガスト振幅  $u_{\text{gust}}=1.0\sim 3.0$ [m/s]の場合にリードラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$  の増加が一番大きい. ガスト振幅  $u_{\text{gust}}=5.0\sim 7.0$ [m/s]の場合, リードラグ・モーメント  $M_l$  は増加でなく  $50\text{N}\cdot\text{m}$  の減少を示した. これは(a)平均風速  $u_{\text{ave}}=3.0\sim 5.0$ [m/s]のときに比べ, さらに低周速比になり, 失速現象が進んだためであると考えられる. このときフラップ・モーメント  $M_f$  も失速により減少するはずであるが, 増加している. これは風速の増加による抗力はフラップ・モーメント  $M_f$  と同じ方向に増加するため, 翼の失速による減少分を抗力が上回るためフラップ・モーメント  $M_f$  は増加すると考えられる.

(c) 平均風速  $u_{\text{ave}}=7.0\sim 9.0$ [m/s]

図 3.11 および 3.12 は表 3.1 で示される平均風速  $u_{\text{ave}}=7.0\sim 9.0$  [m/s]における振

幅  $u_{\text{gust}}$  の 2 条件 ( $u_{\text{gust}}=3.0\sim 5.0, 5.0\sim 7.0$  [m/s]) について示す. 図 3.11 および 3.12 は上図(a)に各ガスト振幅  $u_{\text{gust}}$  の実測のガスト平均形状とリードラグ・モーメント  $M_l$  の変動を示し, 図 3.11 および図 3.12 の下図(b)に実測のガスト平均形状とフラップ・モーメント  $M_f$  の変動を示す. フラップ・モーメント  $M_f$  は風速の増減により変動しており, 風速変動と傾向は一致している. 図 3.11(a)および図 3.12(a)より, リードラグ・モーメント  $M_l$  は風速の増減により変動しているが, 風速が極大値を示す際に, 極小値を示している.

図 3.11 より, ガスト振幅  $u_{\text{gust}}=3.0\sim 5.0$  [m/s] の場合, ガストにより風速が増加するとリードラグ・モーメント  $M_l$  は  $t=0$  [s] において  $t=-7$  [s] に比べ約  $60\text{N}\cdot\text{m}$  減少し, フラップ・モーメント  $M_f$  は約  $100\text{N}\cdot\text{m}$  増加した. 同様に図 3.12 より, ガスト振幅  $u_{\text{gust}}=5.0\sim 7.0$  [m/s] の場合, リードラグ・モーメント  $M_l$  は  $t=0$  [s] において  $t=-8$  [s] に比べ  $100\text{N}\cdot\text{m}$  減少し, フラップ・モーメント  $M_f$  は  $190\text{N}\cdot\text{m}$  増加した. リードラグ・モーメント  $M_l$  が減少したのは図 3.11 および 3.12 共に低周速比になり, 失速現象が進んだためであると考えられる. フラップ・モーメント  $M_f$  は失速により減少するはずであるが, 前述の平均風速  $u_{\text{ave}}=3.0\sim 5.0$  [m/s] と同様に, 風速の増加による抗力が失速による減少分を上回るため増加すると考えられる.

### 3.3.4 ヨー角の影響

本項ではヨー角の影響について示す. リードラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$  は風速変動だけでなく, 風向変動によっても変化する. 得られたデータからは風速がピークを示す際にヨー角  $\phi=0^\circ$  付近の場合と, そうでない場合が確認された. 今回, 測定された全ガスト中, 86%が風速のピークを示す場合に, ヨー角  $\pm 15^\circ$  以内であった. つまり風速のピークの風向は卓越風向と同じ確率が高かった.

図 3.13 および 3.14 は、上図(a)が風速のピークを示すときのヨー角変動が±15° 以内の場合の風速とリードドラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$  の関係を示し、下図(b)がヨー角  $\phi$  の変化を示している。図 3.13 および 3.14 より  $t=0$ [s]の時、ヨー角は  $\phi=0^\circ$  付近で変動している。風速の増減と、リードドラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$  の増減は一致している。ヨー角は  $t=-20$  および  $t=0$ [s]付近で約  $\phi=0^\circ$  である。 $t=-20\sim 0$ [s]の間に風速は約 4m/s 増加している。その間リードドラグ・モーメント  $M_l$  は約 170N・m 増加しており、フラップ・モーメント  $M_f$  は約 300N・m 増加している。図のガストは平均風速  $u_{ave}=3.0\sim 5.0$ [m/s]、ガスト振幅  $u_{gust}=3.0\sim 5.0$ [m/s]の条件に分類され、その分類条件の場合、実測のガスト平均形状のリードドラグ・モーメント  $M_l$  の増加量は約 120N・m、フラップ・モーメント  $M_f$  の増加量は約 200N・m であった。図 3.13 および 3.14 で示されるガストは、実測のガスト平均形状のモーメントに比べリードドラグ・モーメント  $M_l$  の増加量は約 1.4 倍、フラップ・モーメント  $M_f$  の増加量は約 1.5 倍になる。

図 3.15 および 3.16 は、上図(a)が風速のピークを示すときに、ヨー角変化が±15° 以上の風速とリードドラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$  を示し、下図(b)はヨー角  $\phi$  を示している。図 3.15 および 3.16 より  $t=0$ [s]の時、ヨー角は  $\phi=0^\circ$  から大きく離れて変動している。風速の増減とリードドラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$  のおおまかな増減の傾向は一致している。しかし、 $t=0\sim 12$ [s]の間で、風速は減少しているにも関わらずリードドラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$  の減少は小さい。 $t=0\sim 12$ [s]の間ではヨー角は  $\phi=-30\sim 0^\circ$  へ変動しているため、リードドラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$  は減少しないと考えられる。

ガストによる空力負荷は風速およびヨー角の変動によって決定される。そこで風速とヨー角の変化がモーメントの変化に与える影響について説明する。

図 3.17(a)および 3.17(b)にヨー角別のリードラグ・モーメント  $M_l$  とフラップ・モーメント  $M_f$  を示す。縦軸にリードラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$ 、横軸に風速  $u$  を示す。図 3.17(a)より、リードラグ・モーメント  $M_l$  はすべてのヨー角で風速  $u_{ave}=7\sim 8$ [m/s]まで増加し、その後、減少している。これは翼の失速が原因と考えられる。風力タービン翼の 90% $R$  および 70% $R$  (翼型:NACA63-618), 50% $R$  (翼型:DU93-W-210) の静的失速角はそれぞれ,  $12.8^\circ$ ,  $8^\circ$  である。迎角  $\alpha$  は翼のねじり角およびピッチ角を考慮して計算してみると。風速 6m/s の場合, 迎角は  $\alpha_{90\%R}=8.4^\circ$ ,  $\alpha_{70\%R}=9.7^\circ$ ,  $\alpha_{50\%R}=12.0^\circ$  である。50% $R$  の場合, 静的失速角を超えるが, 90% $R$  および 70% $R$  の場合, 静的失速角を超えていない。しかし風速 8m/s の場合, 迎角は  $\alpha_{90\%R}=12.2^\circ$ ,  $\alpha_{70\%R}=14.4^\circ$ ,  $\alpha_{50\%R}=18.1^\circ$  となり, 70% $R$ , 50% $R$  で静的失速角を超えている。ガストにより風速が増加し, 低周速となることで, 迎角が大きくなり, 翼が失速状態になったため, リードラグ・モーメント  $M_l$  が減少したと考えられる。またヨー角が  $\Phi=0^\circ$  に近いほどリードラグ・モーメント  $M_l$  は大きいことがわかる。図 3.17(b)より, フラップ・モーメント  $M_f$  は風速に比例して増加していることがわかる。リードラグ・モーメント  $M_l$  と同様に, フラップ・モーメント  $M_f$  はヨー角が  $\Phi=0^\circ$  に近いほど大きい。ヨー角  $\Phi=0^\circ$  に注目すると, 失速により翼性能が落ちると考えられる  $u_{ave}=7\sim 8$ [m/s]までのフラップ・モーメント  $M_f$  の増加の傾きは大きく, その後は傾きが小さくなっている。フラップ・モーメント  $M_f$  は翼性能による増加量と, 風速による抗力で決まるため,  $u_{ave}=7\sim 8$ [m/s]を境に, フラップ・モーメント  $M_f$  の増加の傾きが小さくなると考えられる。フラップ方向の翼負荷は, 風速の増加にしたがい増加し, ヨー角  $\Phi=0^\circ$  付近で大きくなることがわかる。

次にガスト観測時の平均的なヨー角の変動について説明する。図 3.18 にガスト観測時のヨー角 (絶対値) の平均値を示す。縦軸にヨー角  $\Phi$ , 横軸に時間  $t$  を示す。



図よりヨー角は  $t=0[s]$  を境に  $t=-30\sim 0[s]$  の間に  $\phi=0^\circ$  に近づき、 $t=0\sim 30[s]$  の間に  $\phi=0^\circ$  から離れていく。本実験は、卓越風向で運転されている。つまり、風はガストが発生する場合、風速が増加するにしたいがヨー角は  $\phi=0^\circ$  に近づき、反対に風速が減少するにしたいが、ヨー角は  $\phi=0^\circ$  から離れる。翼負荷は風速の増加にしたいが大きくなり、ヨー角が  $\phi=0^\circ$  に近いほど大きくなるため、翼の負荷変動は風速の増加以上の変動が発生することが考えられる。

### 3.4 まとめ

1. POT 手法によって得られた実測の平均ガスト形状と、IEC のガストモデルを比較した場合、実測のガスト平均形状はピークが急峻なのに対して、ガストモデルはなだらかなピークを示す。またガスト振幅  $u_{\text{gust}}$  が同じである場合、平均風速  $u_{\text{ave}}$  が大きいほど、ガスト時間幅  $T$  は狭くなり、風速の増加と減少が急峻になる。
2. 測定された全ガスト中、86%が風速のピークを示す際にヨー角変化が $\pm 15^\circ$  以内であった。つまり風速のピークの風向は卓越風向と同じ確率が高い。
3. 翼根モーメントは風速変動だけでなく風向変動の影響を受けるため、ガストによる空力負荷もガスト発生時の風速および風向の変動により決定される。
4. ガストにより風速が増加するにしたがいリードドラグ・モーメント  $M_l$  およびフラップ・モーメント  $M_f$  は増加する。しかしリードドラグ・モーメント  $M_l$  は、本実験の場合、風速 7~8m/s を境に減少する。これは、風速 7~8m/s を境に低周速比となることで、翼が失速状態となる範囲が増加するためであると考えられる。フラップ・モーメント  $M_f$  は風速 7~8m/s を境に増加の傾きは小さくなる。これはリードドラグ・モーメント  $M_l$  と同様に風速 7~8m/s を境に翼が失速状態する範囲が増加するが、フラップ方向には風速の増加による抗力が増加するため、失速によるモーメントの減少を風速の抗力の増加が上回るためと考えられる。
5. ガストによるヨー角の変動は、ガスト発生時のピークを  $t=0[\text{s}]$  として、ガストのピーク前の  $t=-30\sim 0[\text{s}]$  においてヨー角の絶対値は小さくなり、 $\phi=0^\circ$  に近づく。ガストのピーク後の  $t=-30\sim 0[\text{s}]$  においてヨー角は  $\phi=0^\circ$

から絶対値が大きくなる方向に変動する。翼負荷はヨー角が  $\phi=0^\circ$  に近いほど大きくなるため、翼負荷はガストによる風速の増加分以上の負荷の変動が発生すると考えられる。

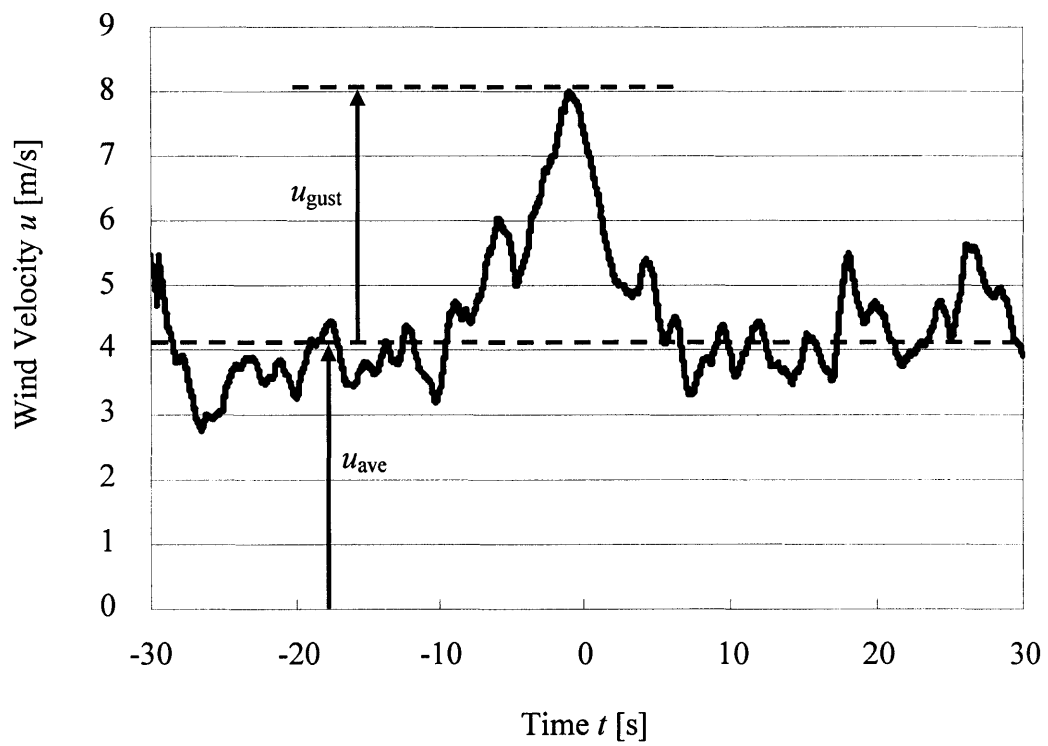


図 3.1 ガスト測定時における平均風速  $u_{ave}$  とガスト振幅  $u_{gust}$

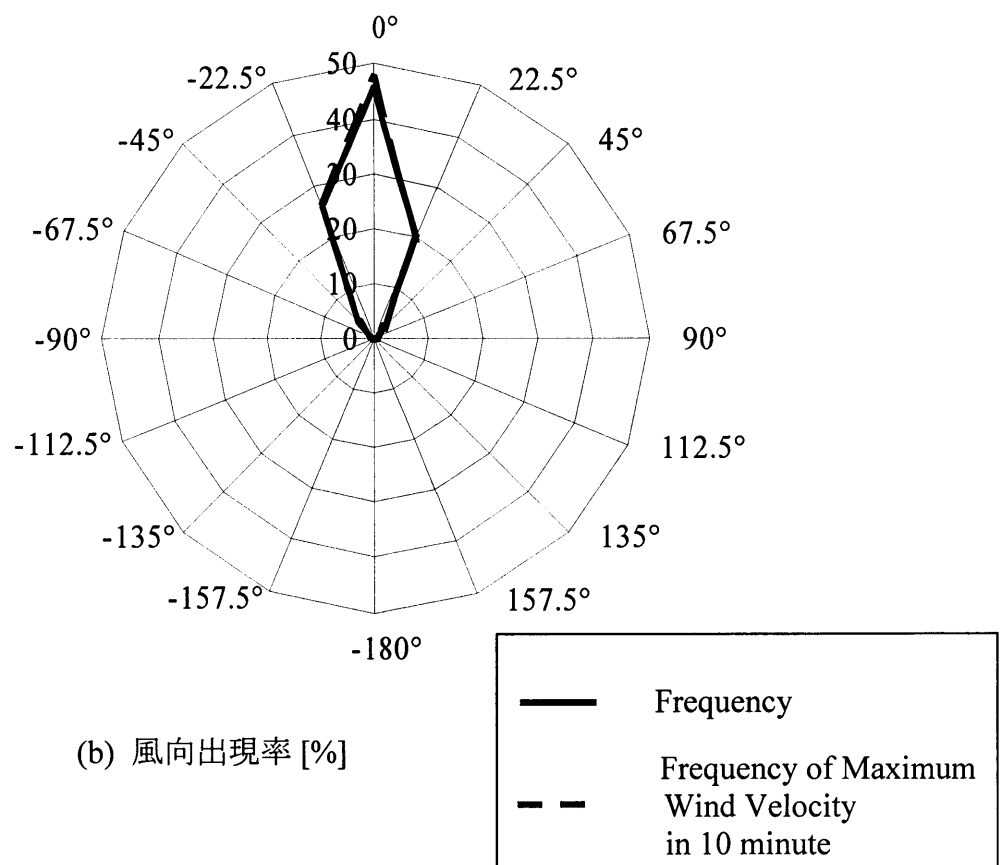
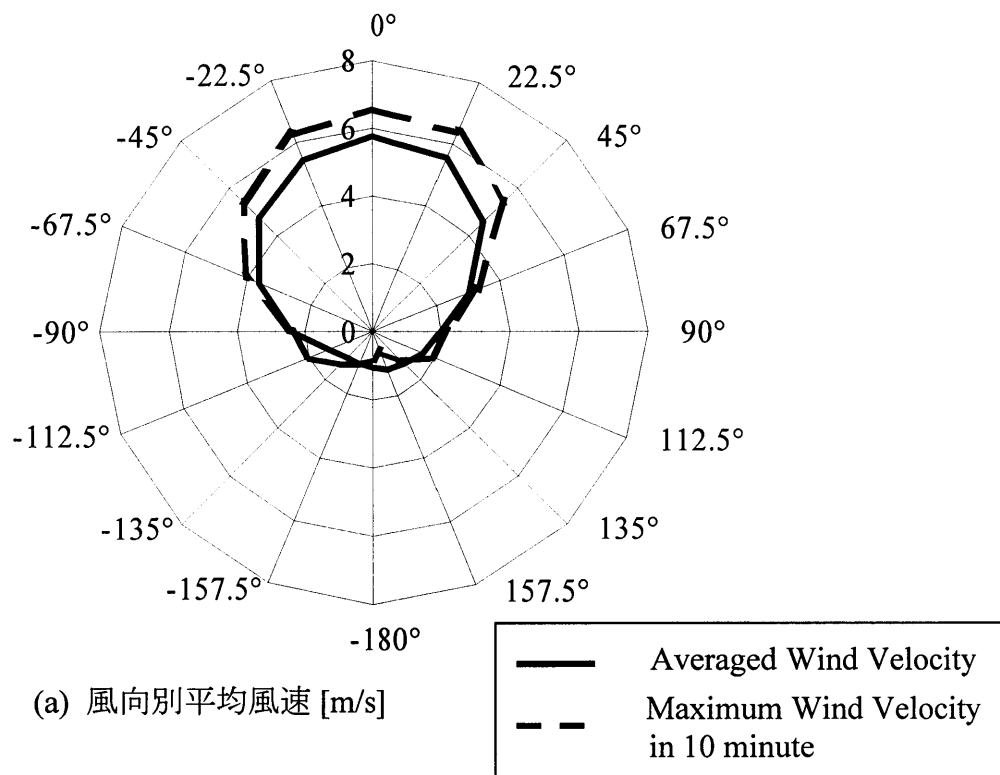


図 3.2 農場における風向別平均風速と風向出現率

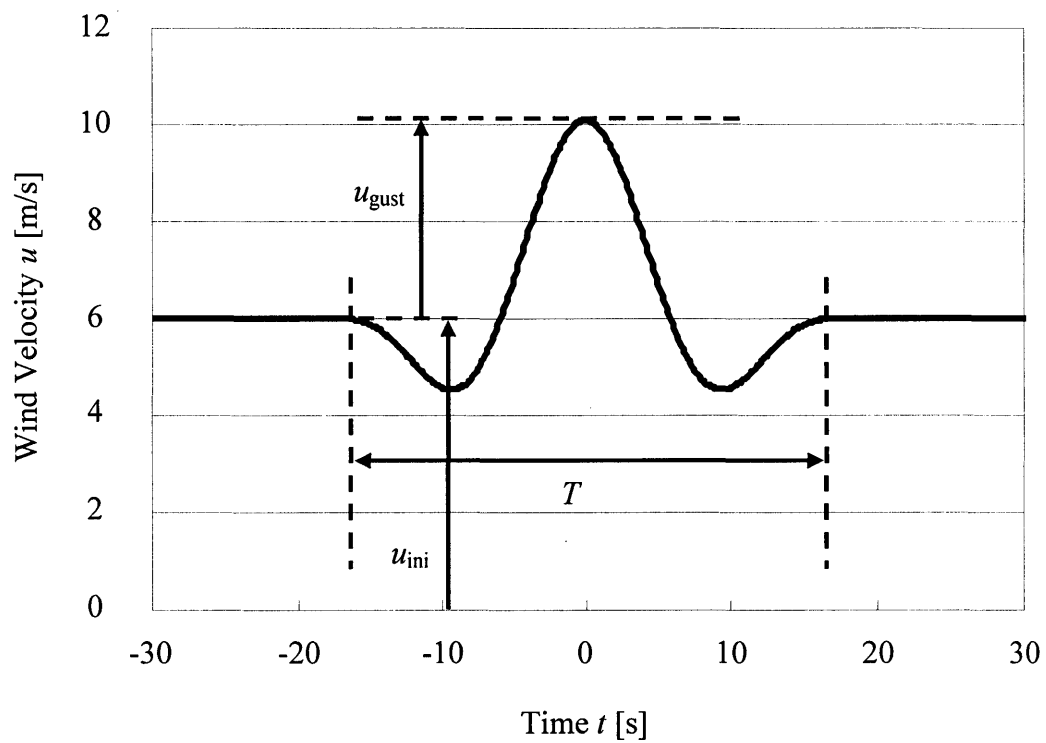


図 3.3 ガストモデルの定義  
ガスト流入前風速  $u_{\text{ini}}$ , ガスト振幅  $u_{\text{gust}}$ , ガスト時間幅  $T$

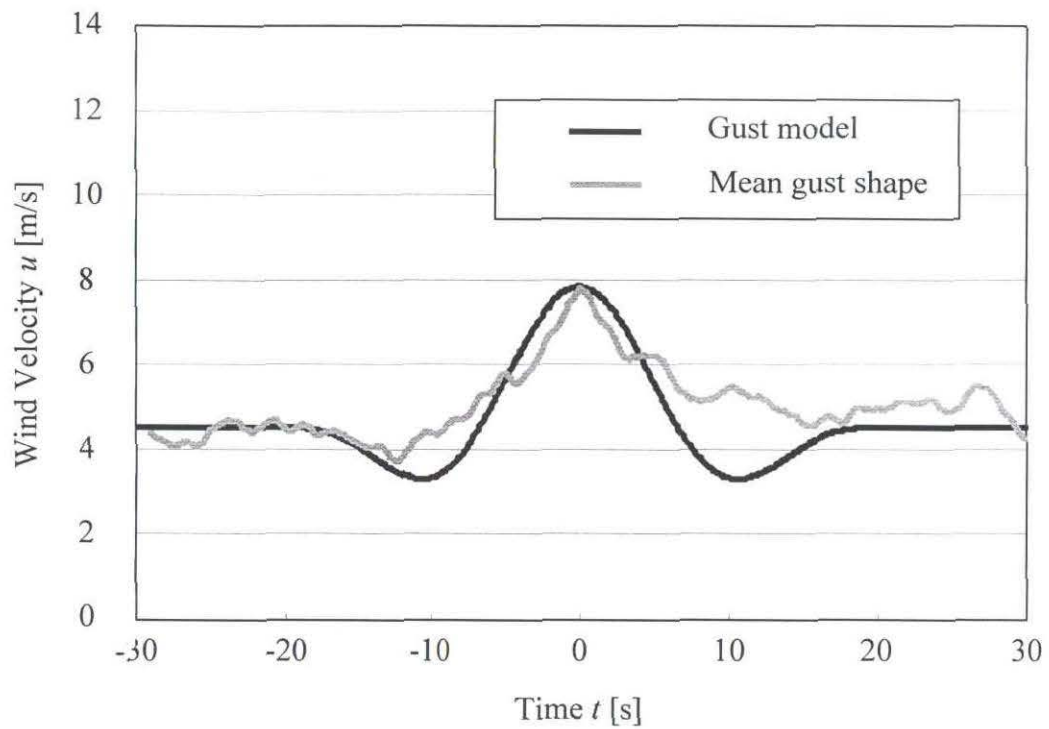


図 3.4(a) ガストモデル  
(平均風速  $u_{\text{ave}}=3.0\sim 5.0$  m/s ガスト振幅  $u_{\text{gust}}=3.0\sim 5.0$  m/s)

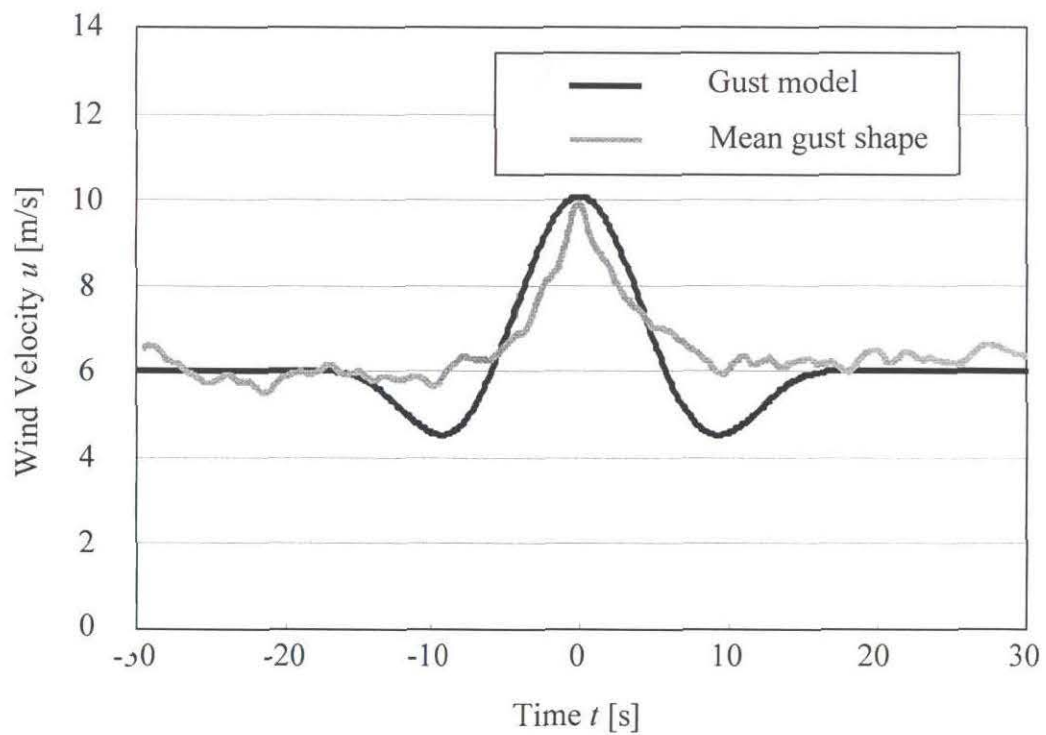


図 3.4(b) ガストモデル  
(平均風速  $u_{\text{ave}}=5.0\sim 7.0$  m/s ガスト振幅  $u_{\text{gust}}=3.0\sim 5.0$  m/s)

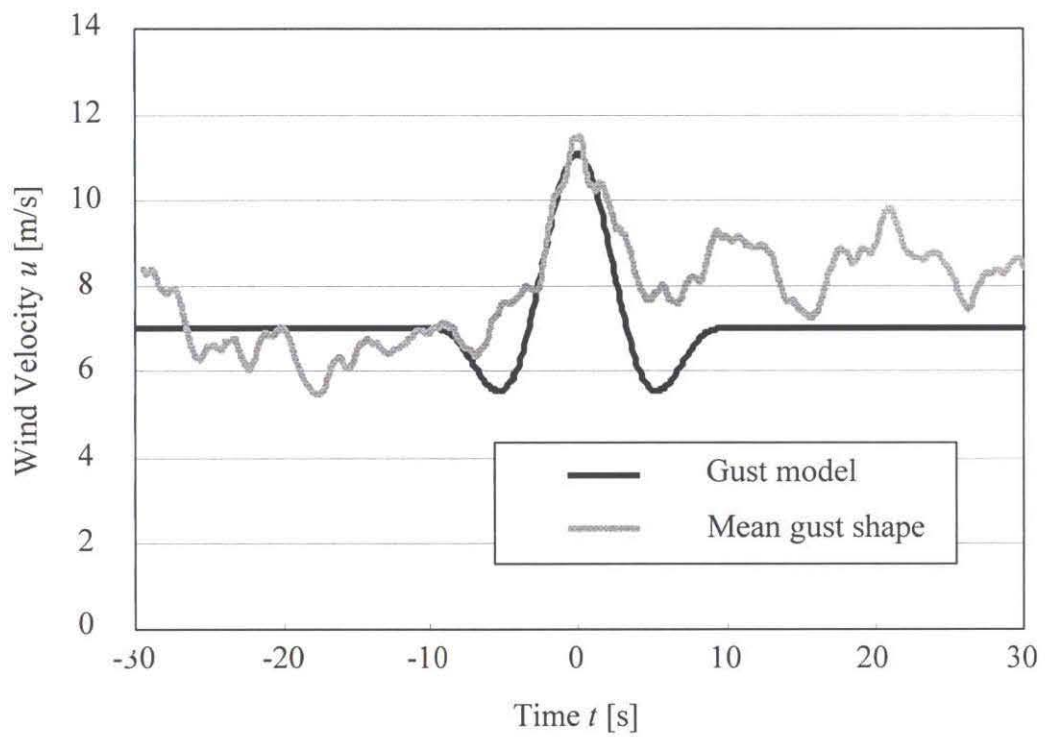


図 3.4(c) ガストモデル  
(平均風速  $u_{ave}=7.0\sim 9.0$  m/s ガスト振幅  $u_{gust}=3.0\sim 5.0$  m/s)



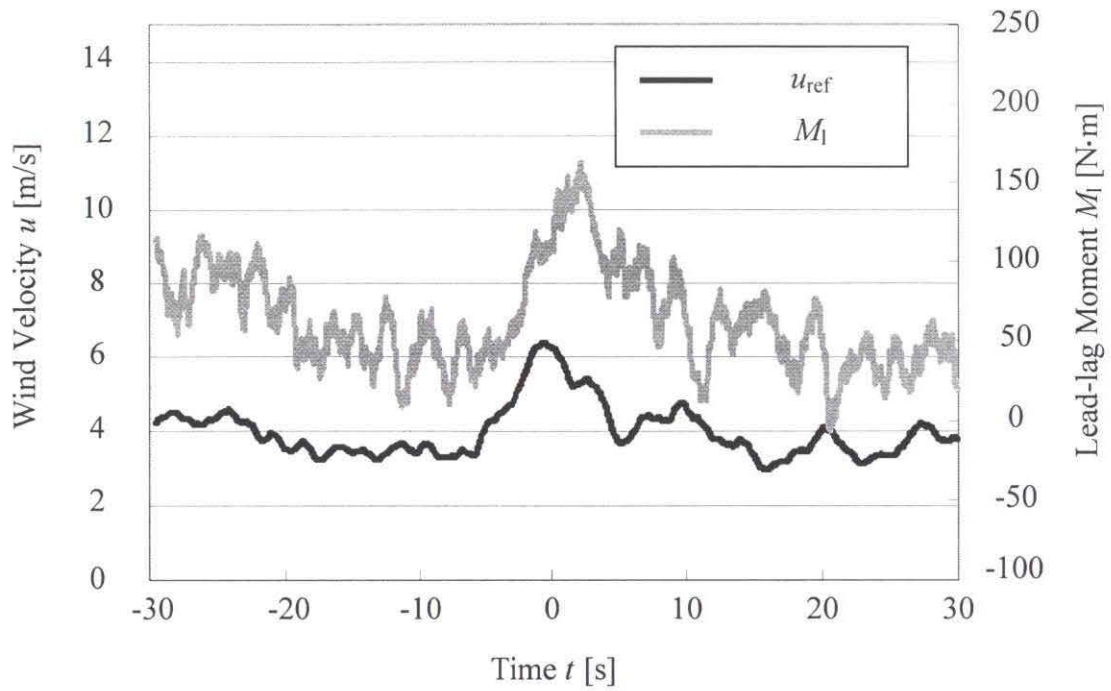


図 3.5(a) 平均ガスト形状とリードラグ・モーメント  
 $(u_{ave}=3.0\sim 5.0$  [m/s]  $u_{gust}=1.0\sim 3.0$  [m/s])

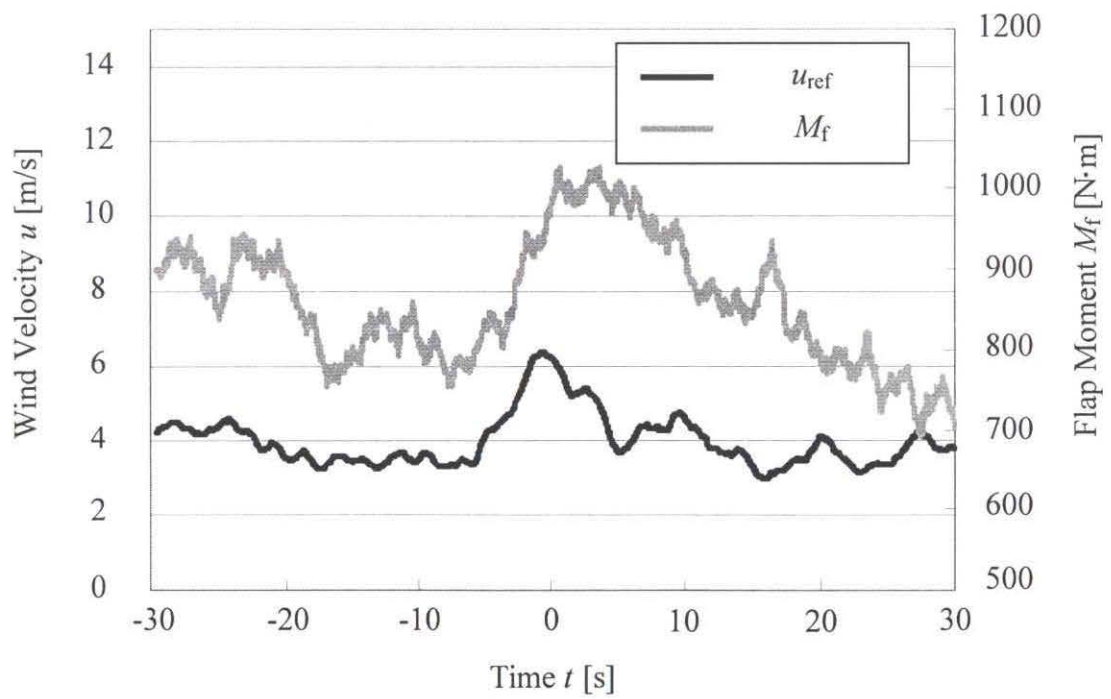


図 3.5(b) 平均ガスト形状とフラップ・モーメント  
 $(u_{ave}=3.0\sim 5.0$  [m/s]  $u_{gust}=1.0\sim 3.0$  [m/s])

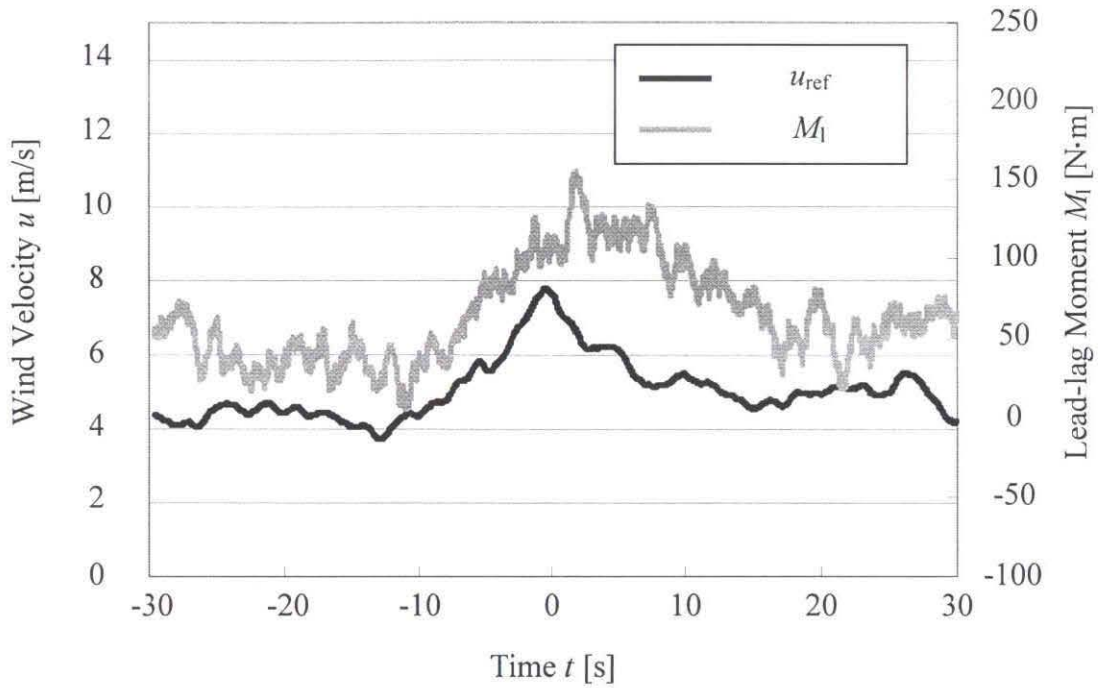


図 3.6(a) 平均ガスト形状とリードラグ・モーメント  
 $(u_{ave}=3.0\sim 5.0$  [m/s]  $u_{gust}=3.0\sim 5.0$  [m/s])

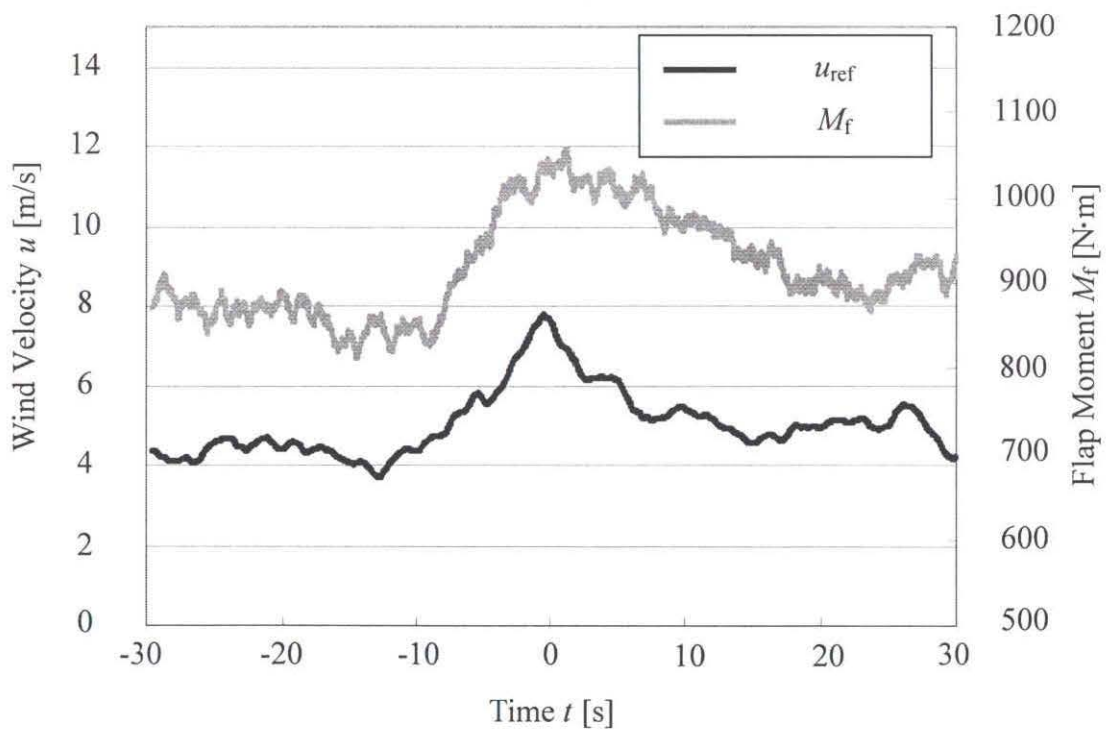


図 3.6(b) 平均ガスト形状とフラップ・モーメント  
 $(u_{ave}=3.0\sim 5.0$  [m/s]  $u_{gust}=3.0\sim 5.0$  [m/s])

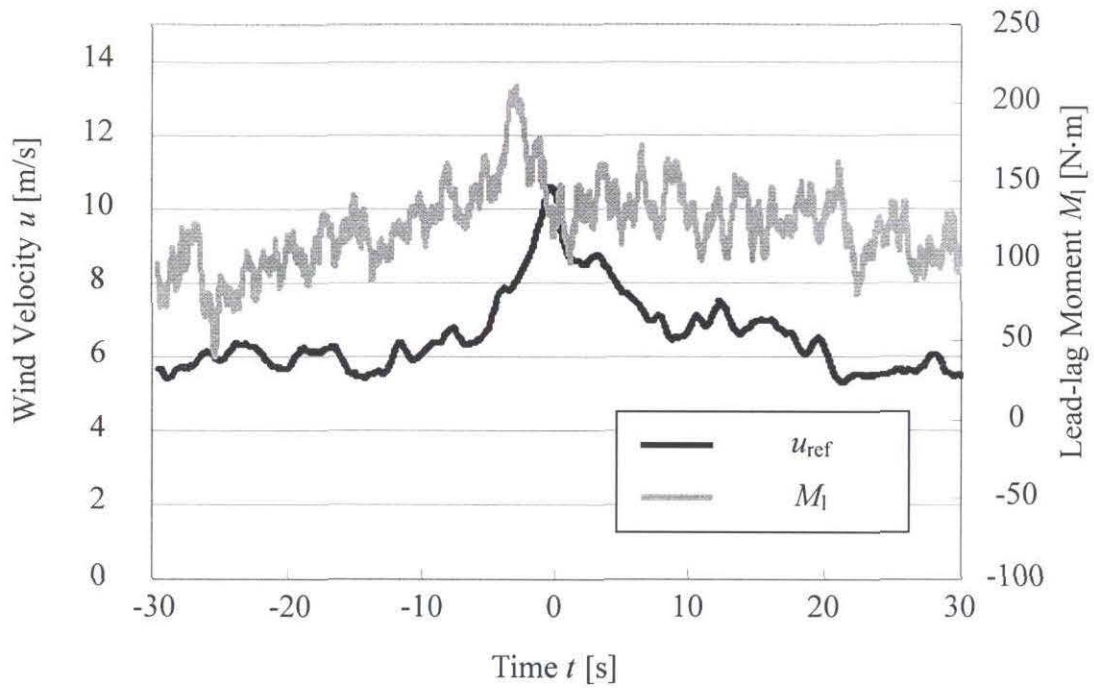


図 3.7(a) 平均ガスト形状とリードラグ・モーメント  
 $(u_{ave}=3.0\sim 5.0$  [m/s]  $u_{gust}=5.0\sim 7.0$  [m/s])

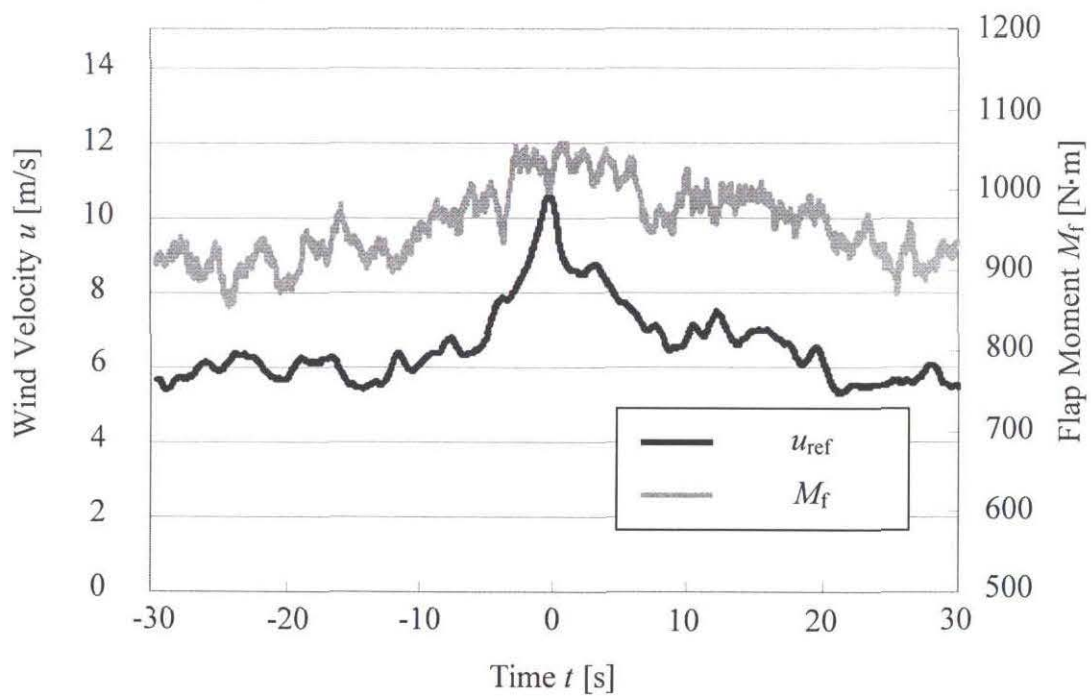


図 3.7(b) 平均ガスト形状とフラップ・モーメント  
 $(u_{ave}=3.0\sim 5.0$  [m/s]  $u_{gust}=5.0\sim 7.0$  [m/s])

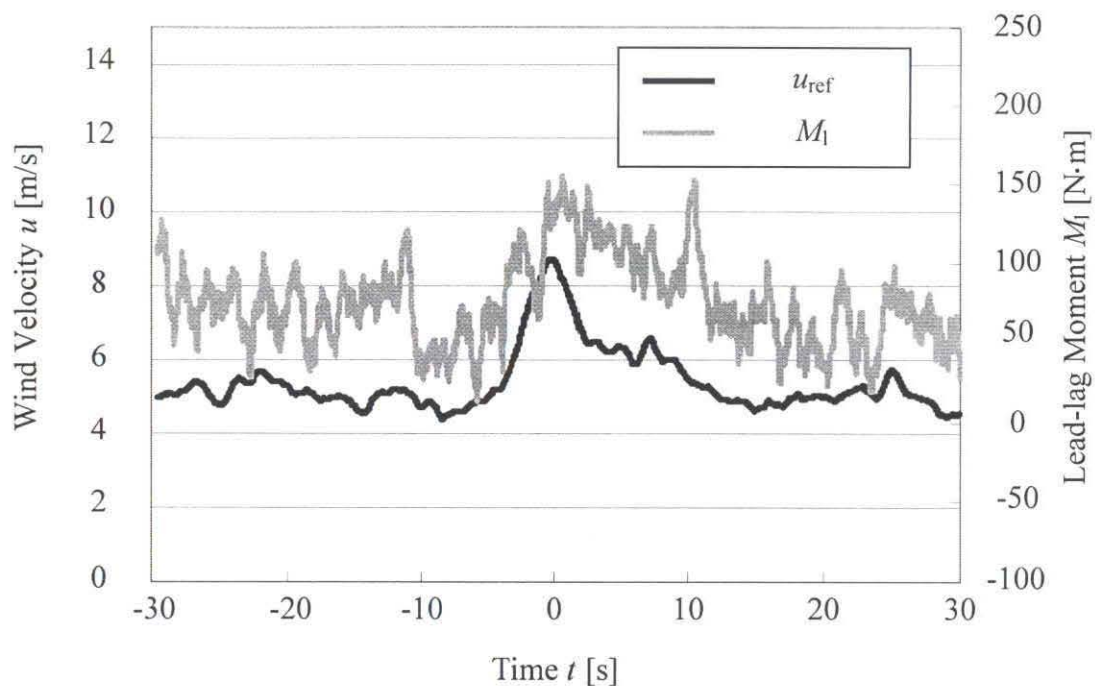


図 3.8(a) 平均ガスト形状とリードラグ・モーメント  
 $(u_{ave}=5.0\sim 7.0$  [m/s]  $u_{gust}=1.0\sim 3.0$  [m/s])

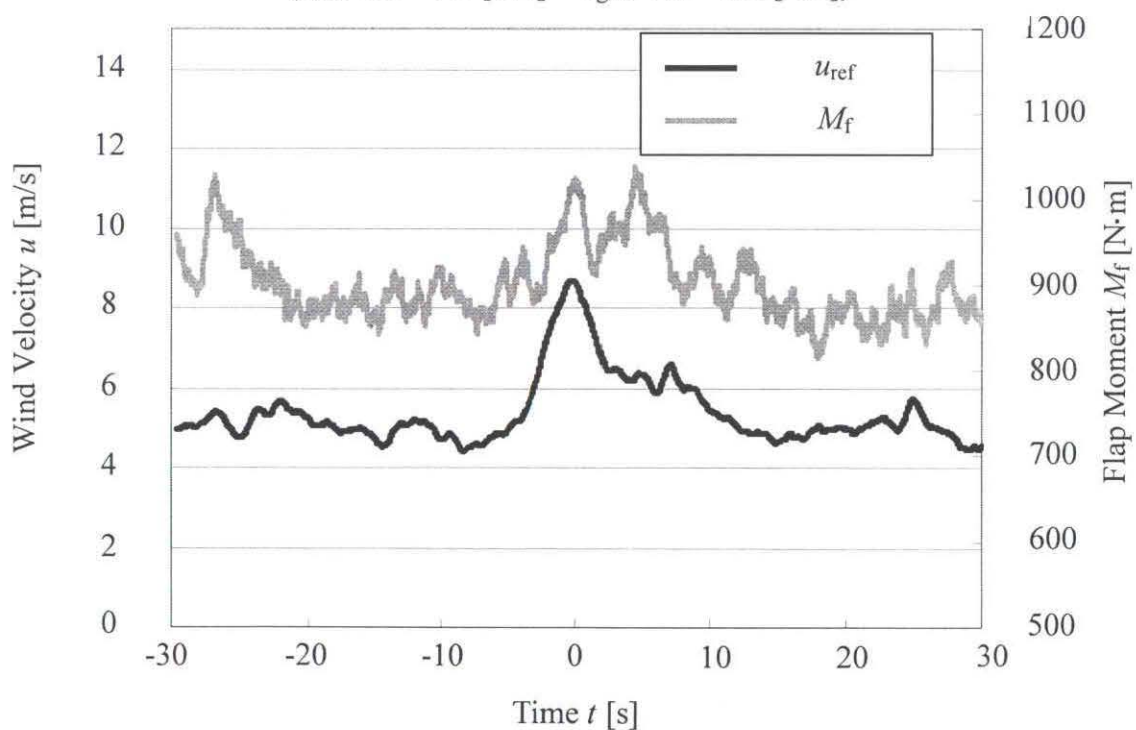


図 3.8(b) 平均ガスト形状とフラップ・モーメント  
 $(u_{ave}=5.0\sim 7.0$  [m/s]  $u_{gust}=1.0\sim 3.0$  [m/s])

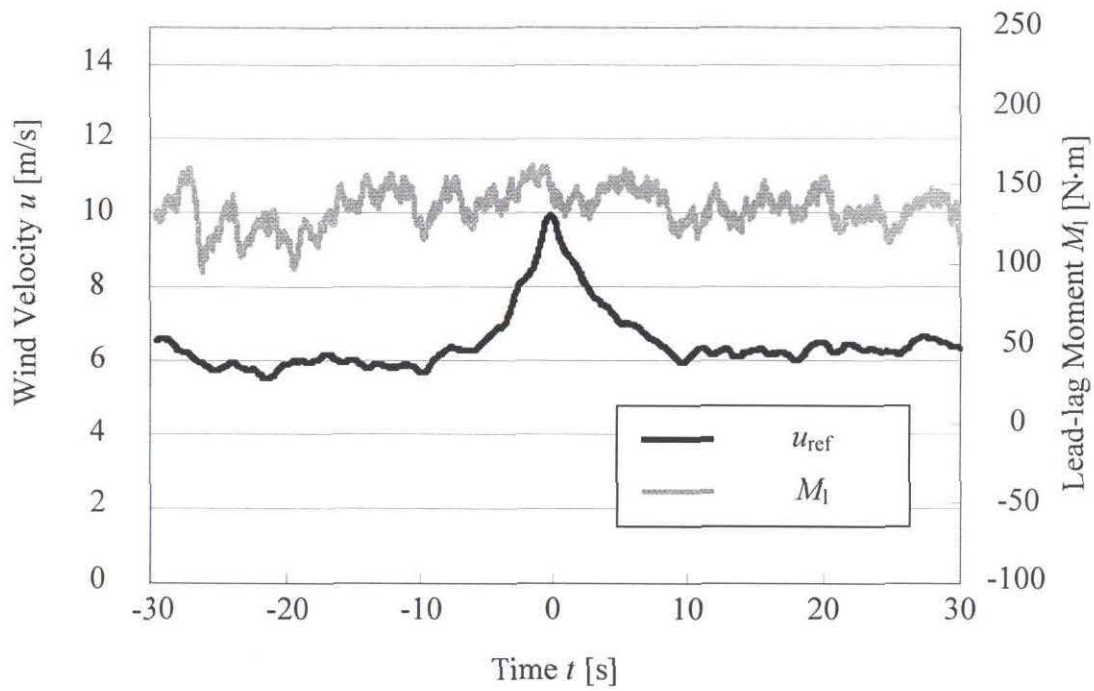


図 3.9(a) 平均ガスト形状とリードラグ・モーメント  
 $(u_{\text{ave}}=5.0\sim 7.0$  [m/s]  $u_{\text{gust}}=3.0\sim 5.0$  [m/s])

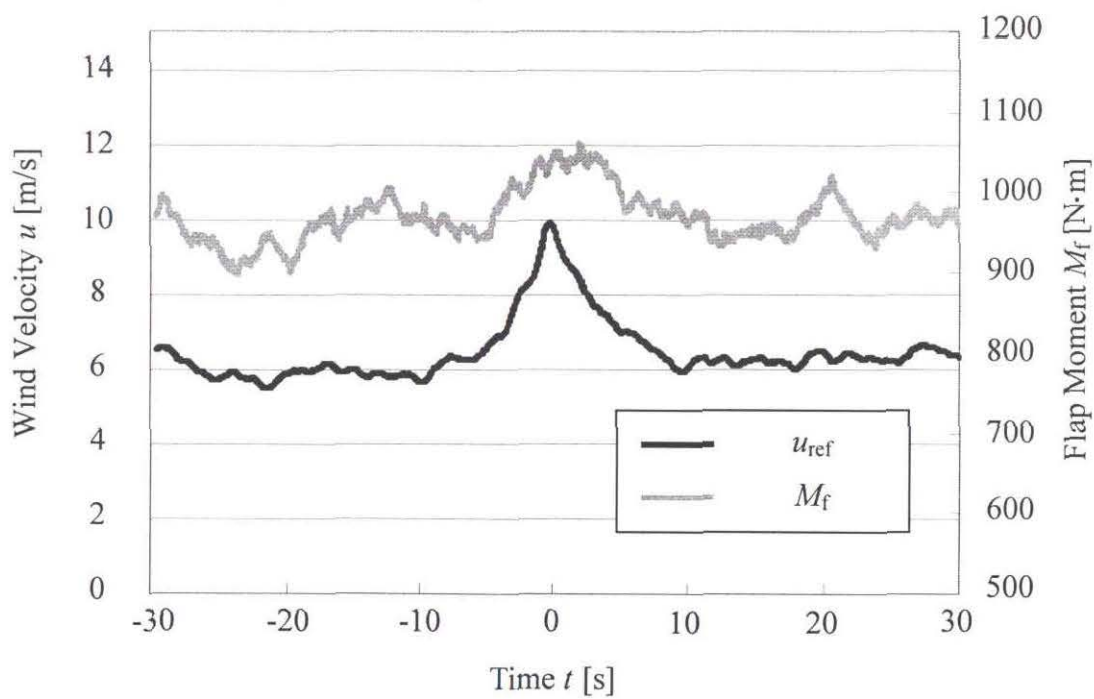


図 3.9(b) 平均ガスト形状とフラップ・モーメント  
 $(u_{\text{ave}}=5.0\sim 7.0$  [m/s]  $u_{\text{gust}}=3.0\sim 5.0$  [m/s])



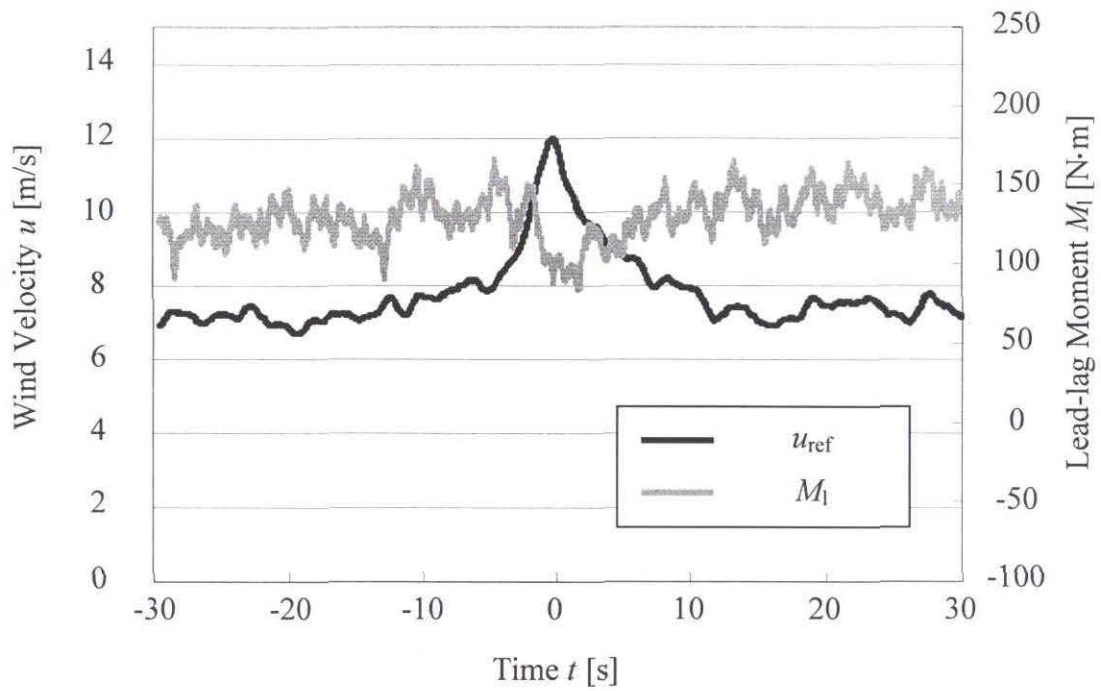


図 3.10(a) 平均ガスト形状とリードラグ・モーメント  
 ( $u_{ave}=5.0\sim 7.0$  [m/s]  $u_{gust}=5.0\sim 7.0$  [m/s])

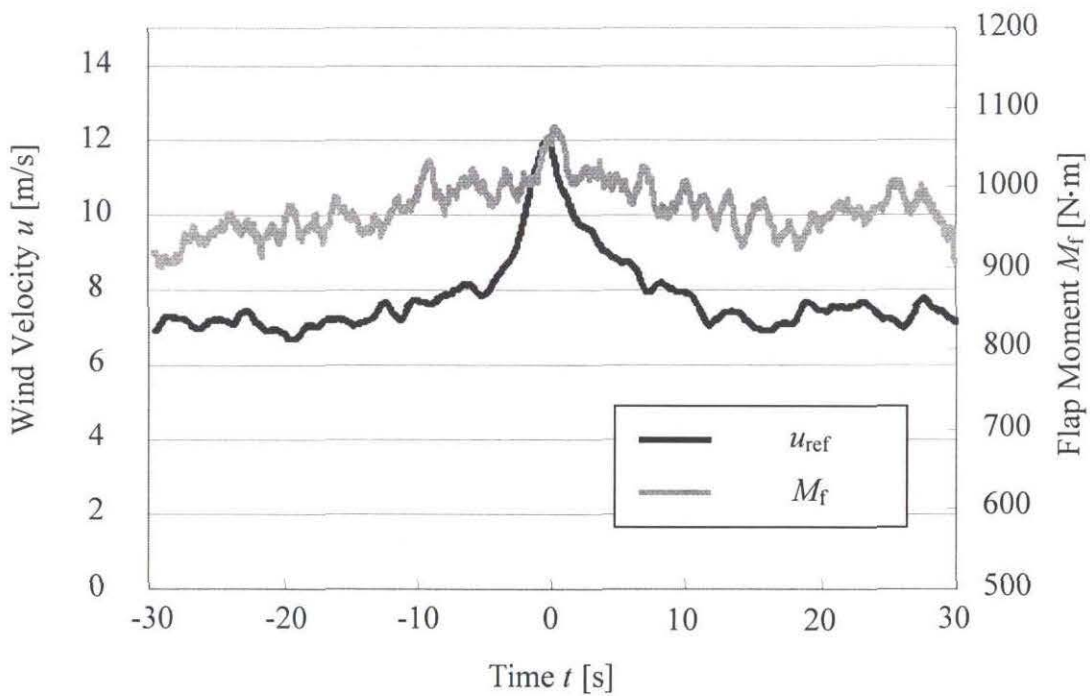


図 3.10(b) 平均ガスト形状とフラップ・モーメント  
 ( $u_{ave}=5.0\sim 7.0$  [m/s]  $u_{gust}=5.0\sim 7.0$  [m/s])

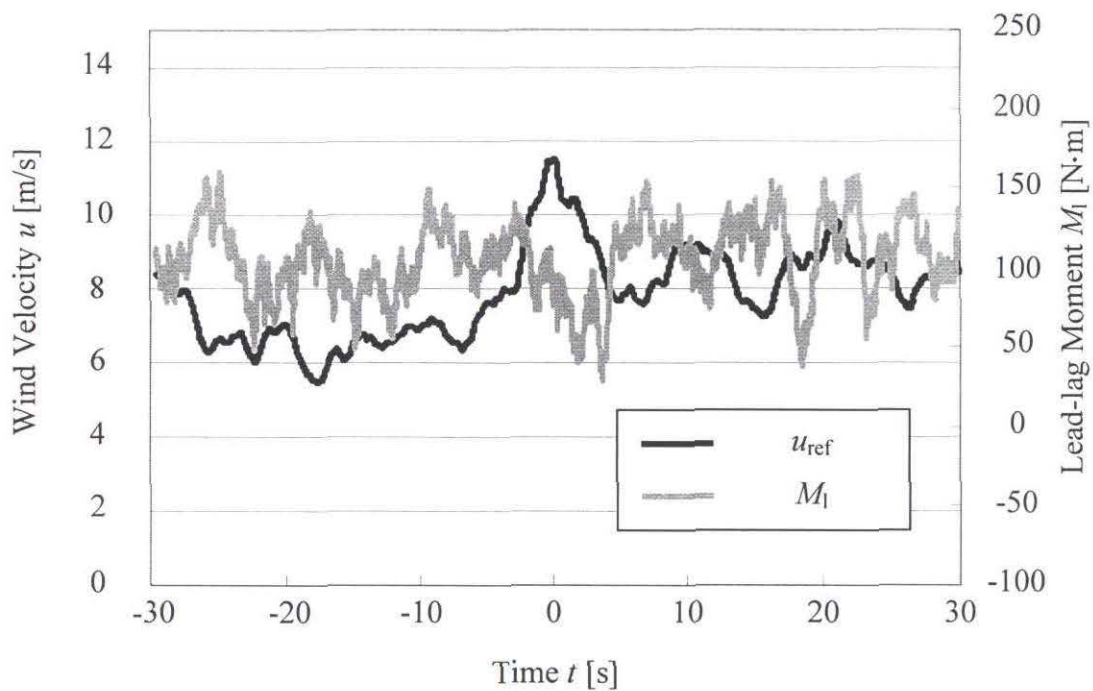


図 3.11(a) 平均ガスト形状とリードラグ・モーメント  
 ( $u_{ave}=7.0\sim 9.0$  [m/s]  $u_{gust}=3.0\sim 5.0$  [m/s])

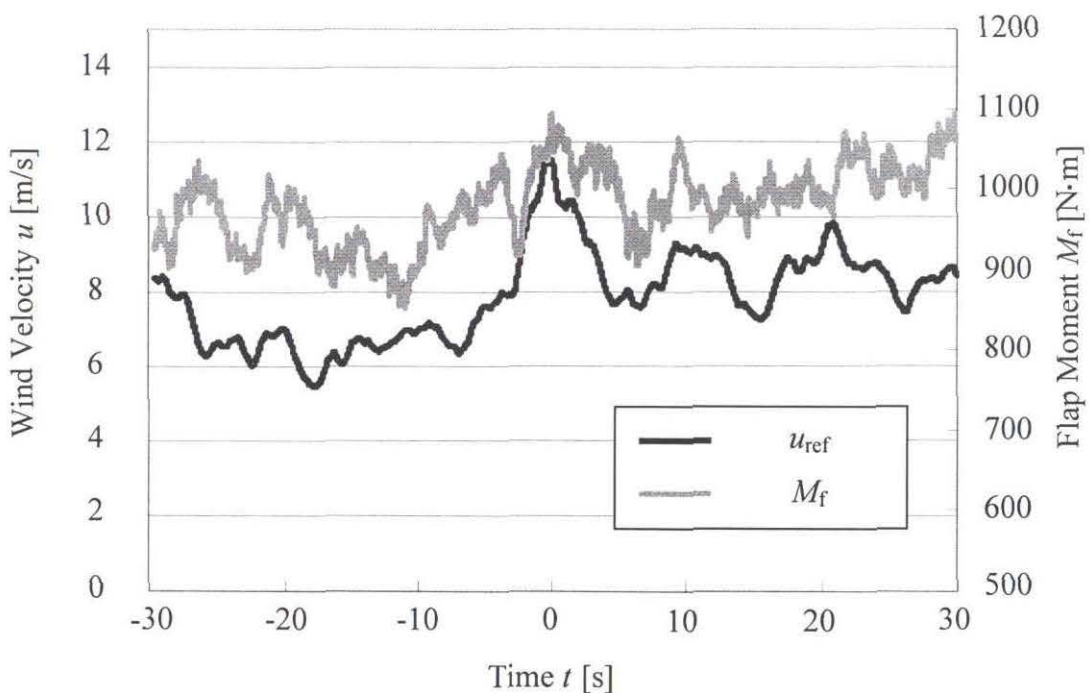


図 3.11(b) 平均ガスト形状とフラップ・モーメント  
 ( $u_{ave}=7.0\sim 9.0$  [m/s]  $u_{gust}=3.0\sim 5.0$  [m/s])

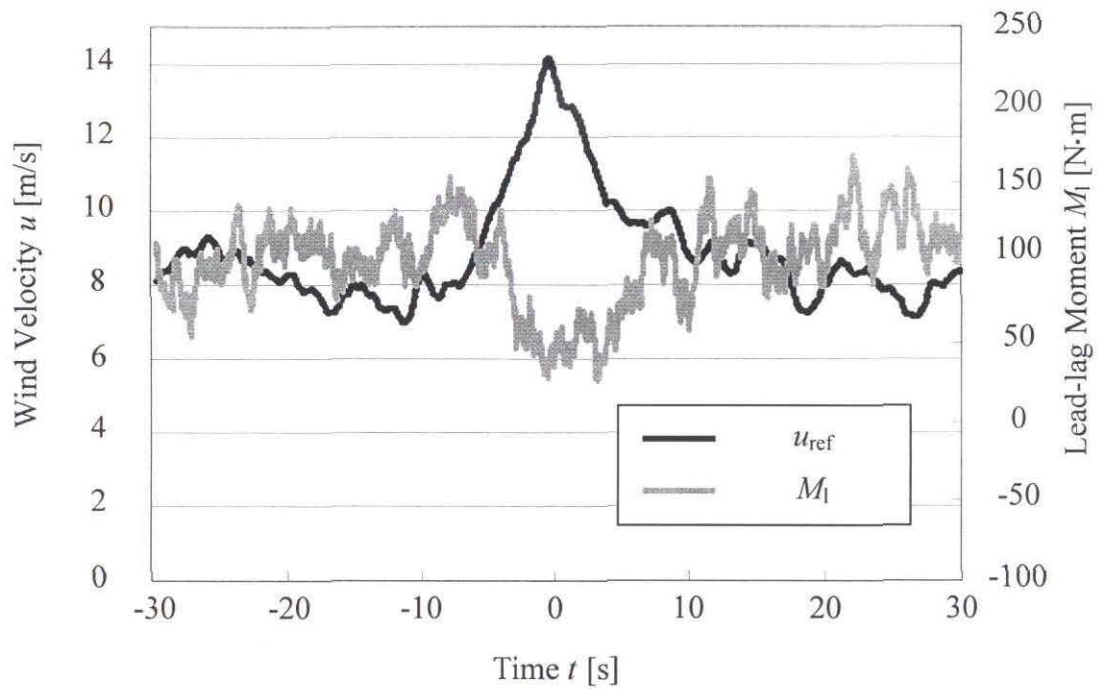


図 3.12(a) 平均ガスト形状とリードラグ・モーメント  
 ( $u_{ave}=7.0\sim 9.0$  [m/s]  $u_{gust}=5.0\sim 7.0$  [m/s])

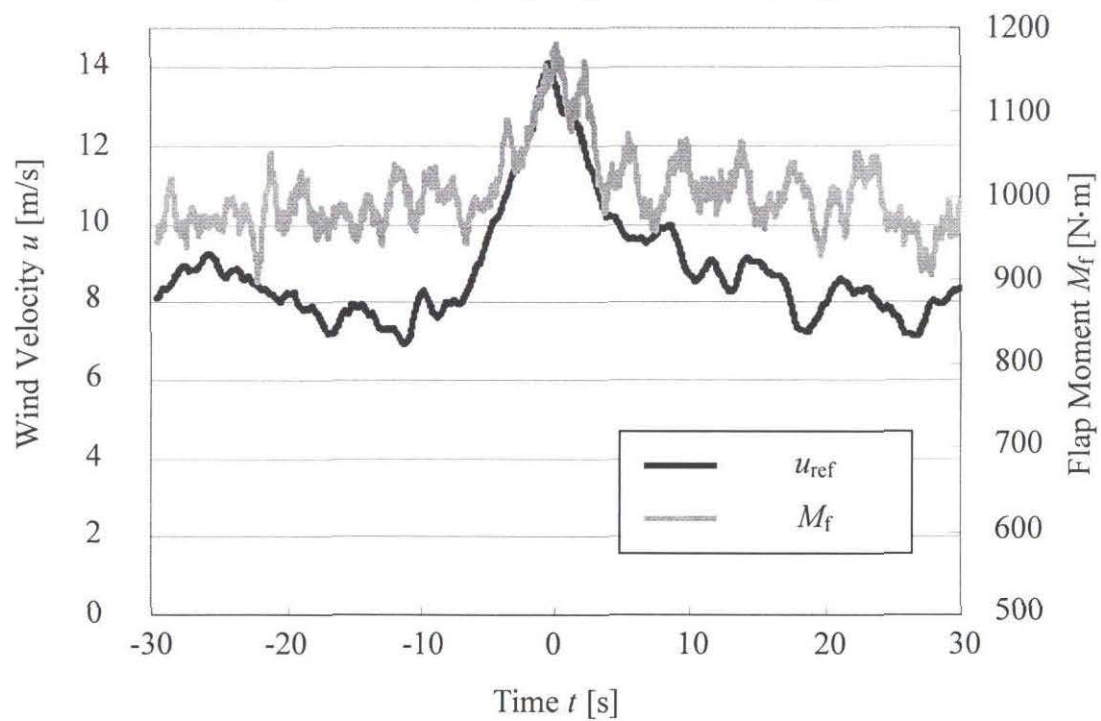


図 3.12(b) 平均ガスト形状とフラップ・モーメント  
 ( $u_{ave}=7.0\sim 9.0$  [m/s]  $u_{gust}=5.0\sim 7.0$  [m/s])



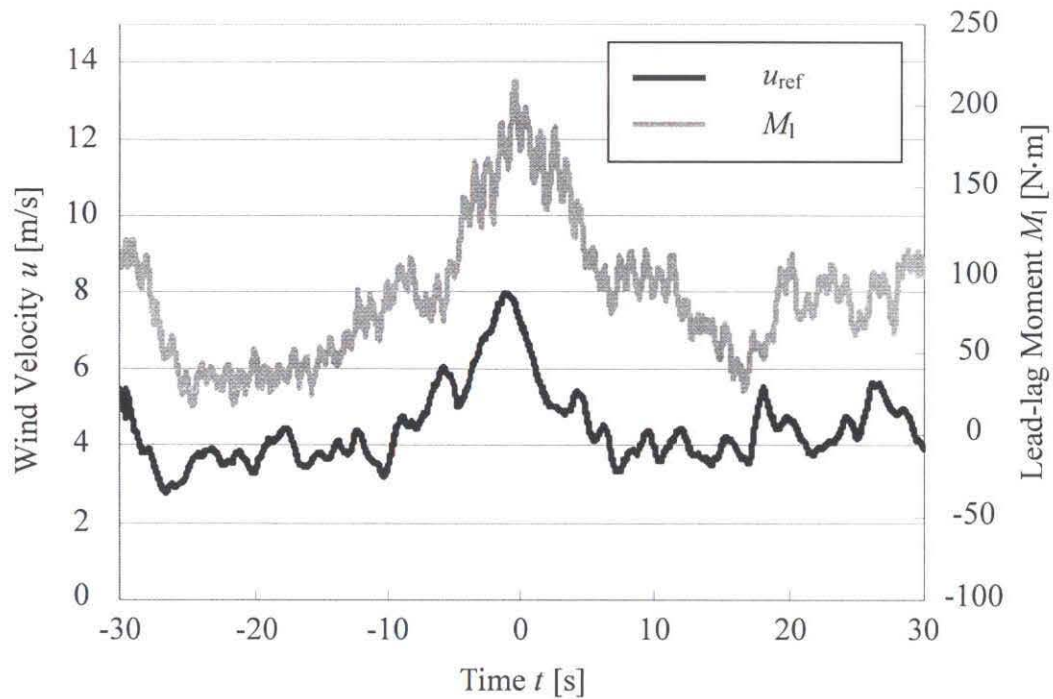


図 3.13(a) 風速とリードラグ・モーメントの時系列データ  
( $-15^\circ \leq \phi \leq +15^\circ$ )

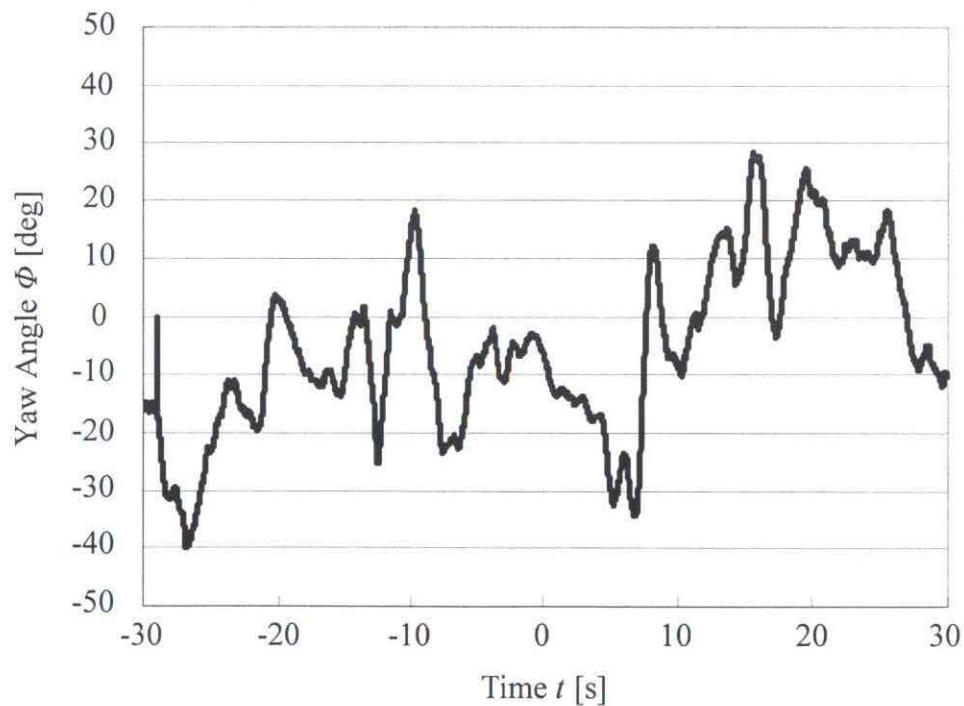


図 3.13(b) ヨー角別時系列データ ( $-15^\circ \leq \phi \leq +15^\circ$ )

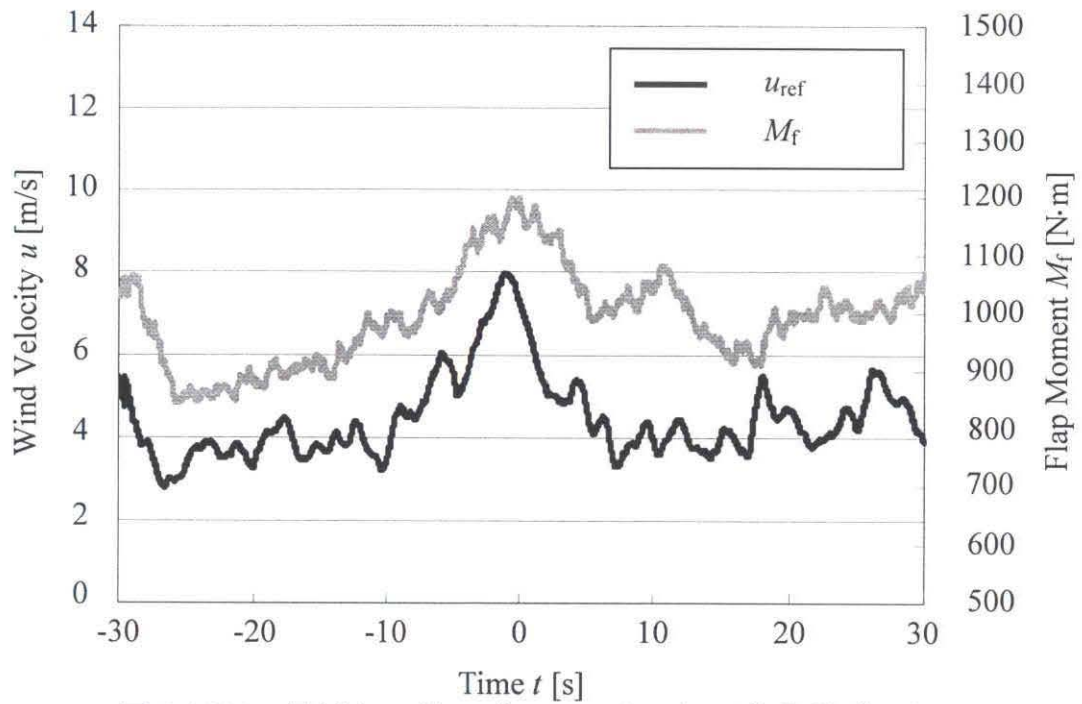


図 3.14(a) 風速とフラップ・モーメントの時系列データ  
( $-15^\circ \leq \phi \leq +15^\circ$ )

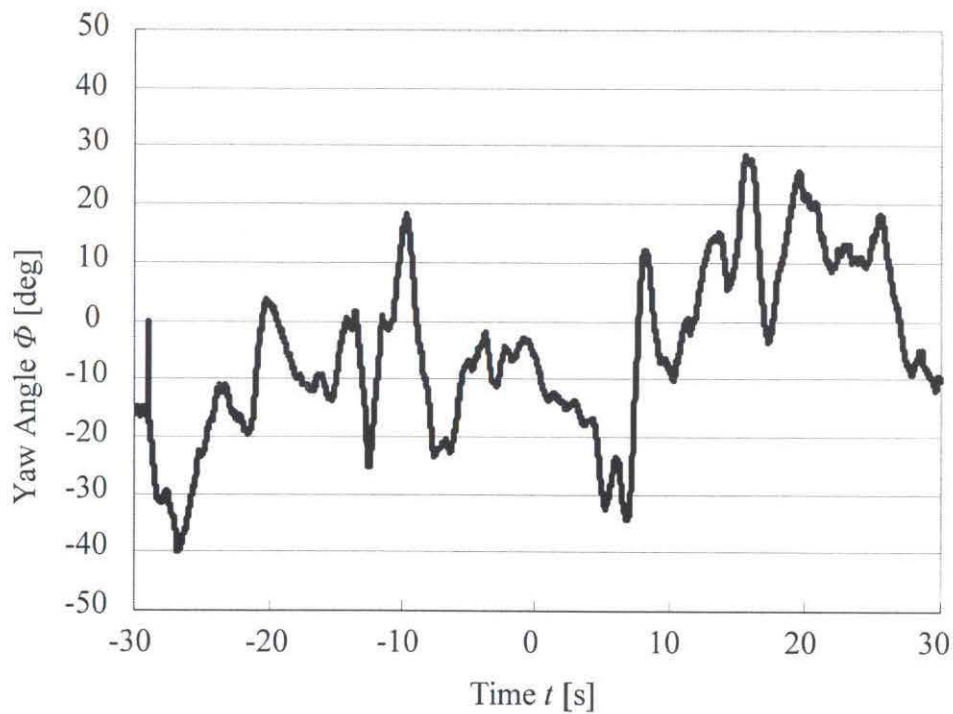


図 3.14(b) ヨー角別時系列データ ( $-15^\circ \leq \phi \leq +15^\circ$ )

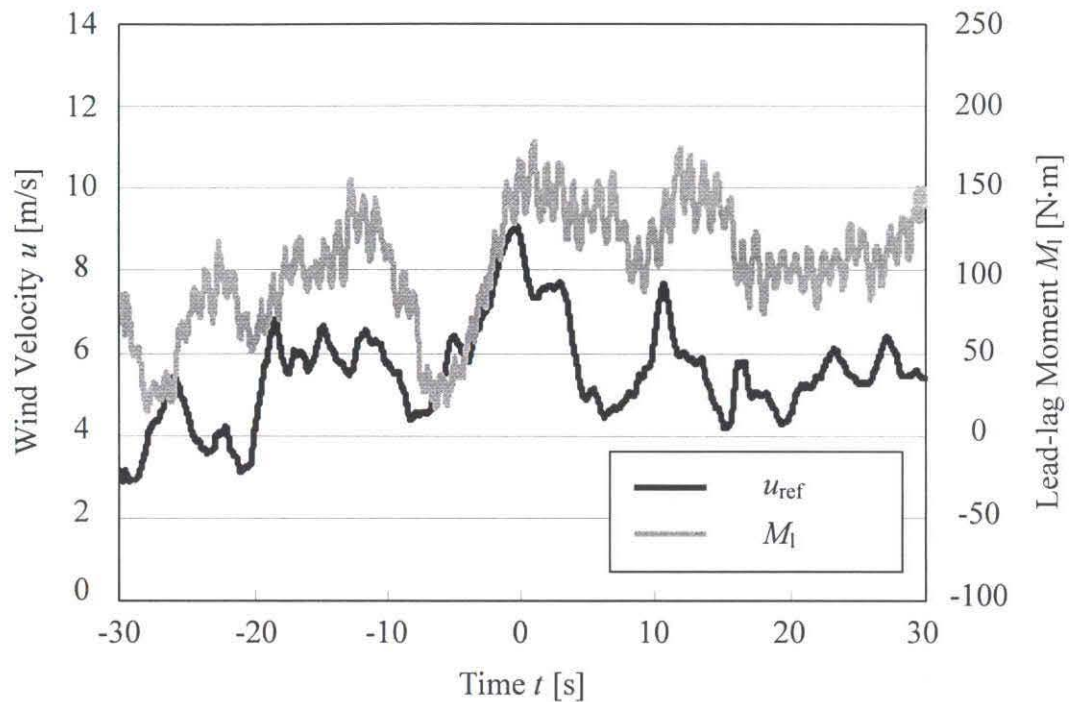


図 3.15(a) 風速とリードラグ・モーメントの時系列データ ( $\phi \leq -15^\circ$ ,  $15^\circ \leq \phi$ )

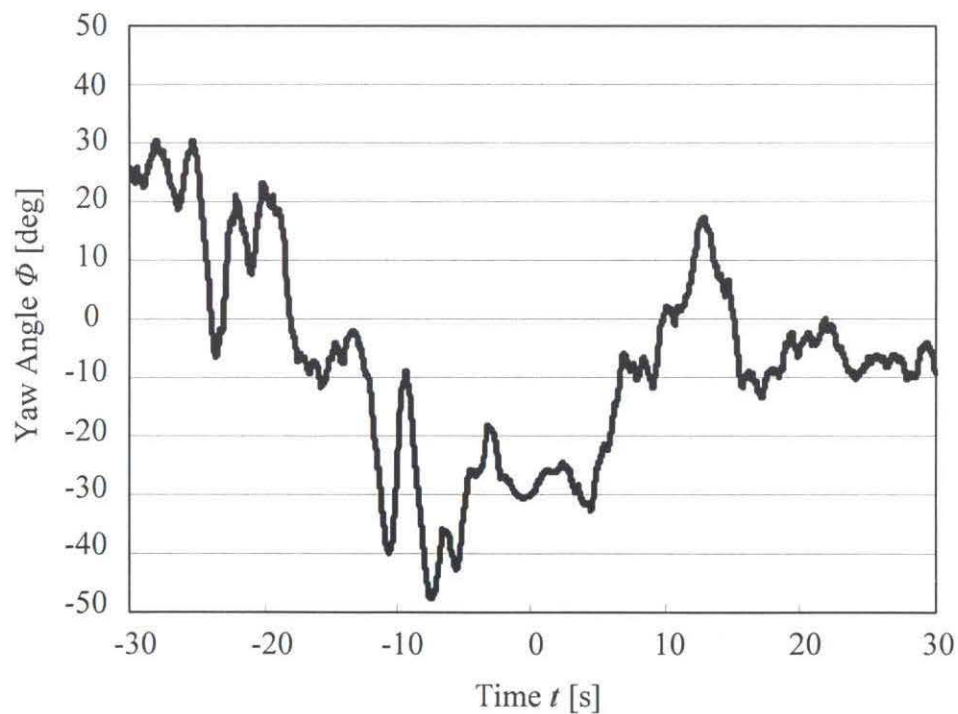


図 3.15(b) ヨー角別時系列データ ( $\phi \leq -15^\circ$ ,  $15^\circ \leq \phi$ )

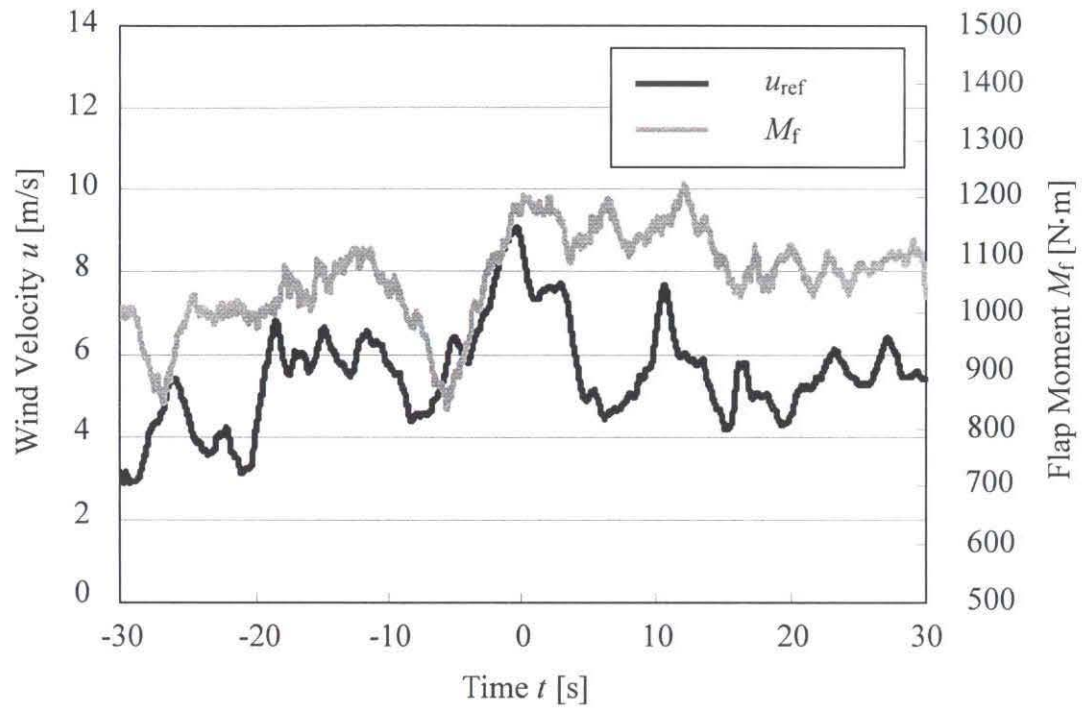


図 3.16(a) 風速とフラップ・モーメントの時系列データ ( $\phi \leq -15^\circ$ ,  $15^\circ \leq \phi$ )

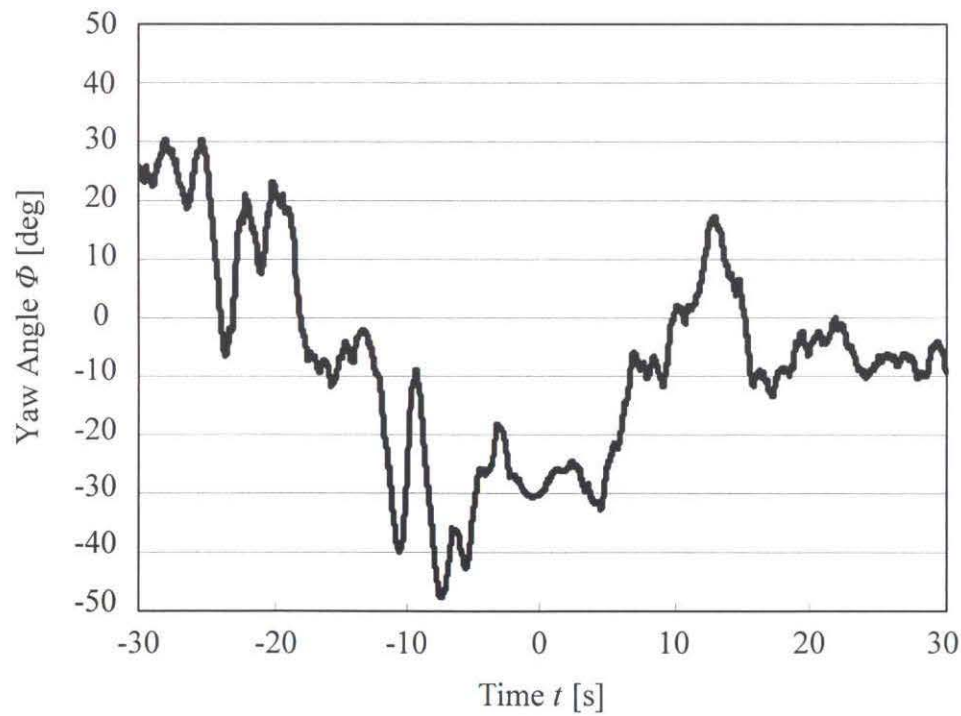


図 3.16(b) ヨー角別時系列データ ( $\phi \leq -15^\circ$ ,  $15^\circ \leq \phi$ )

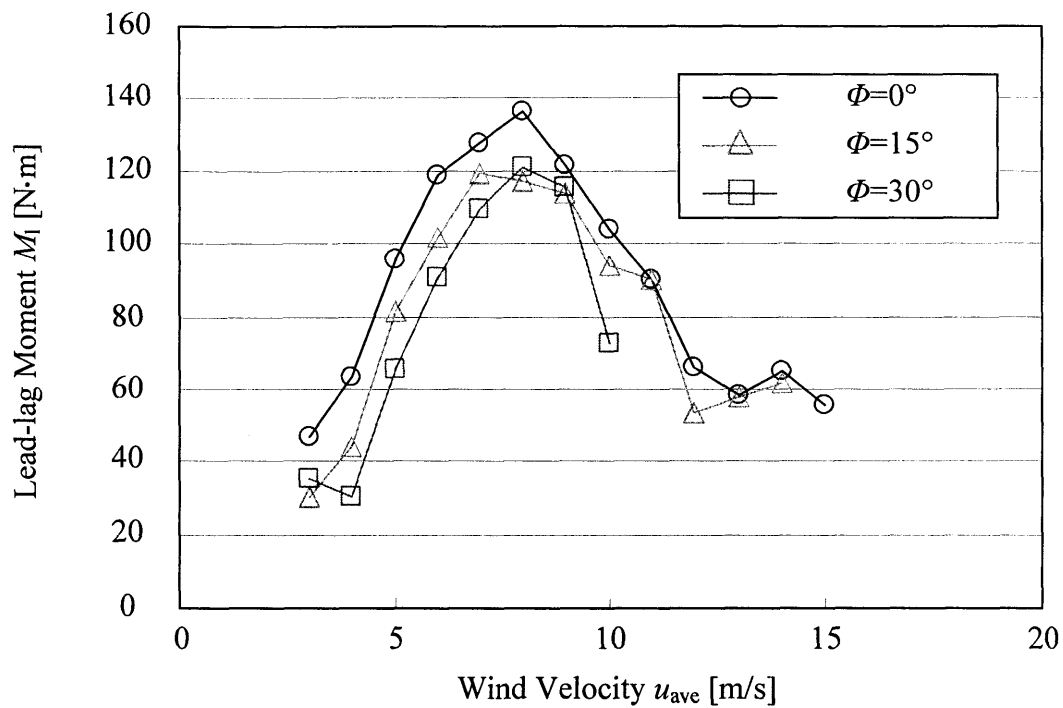


図 3.17(a) ヨー角別の風速に対するリードラグ・モーメントの変化

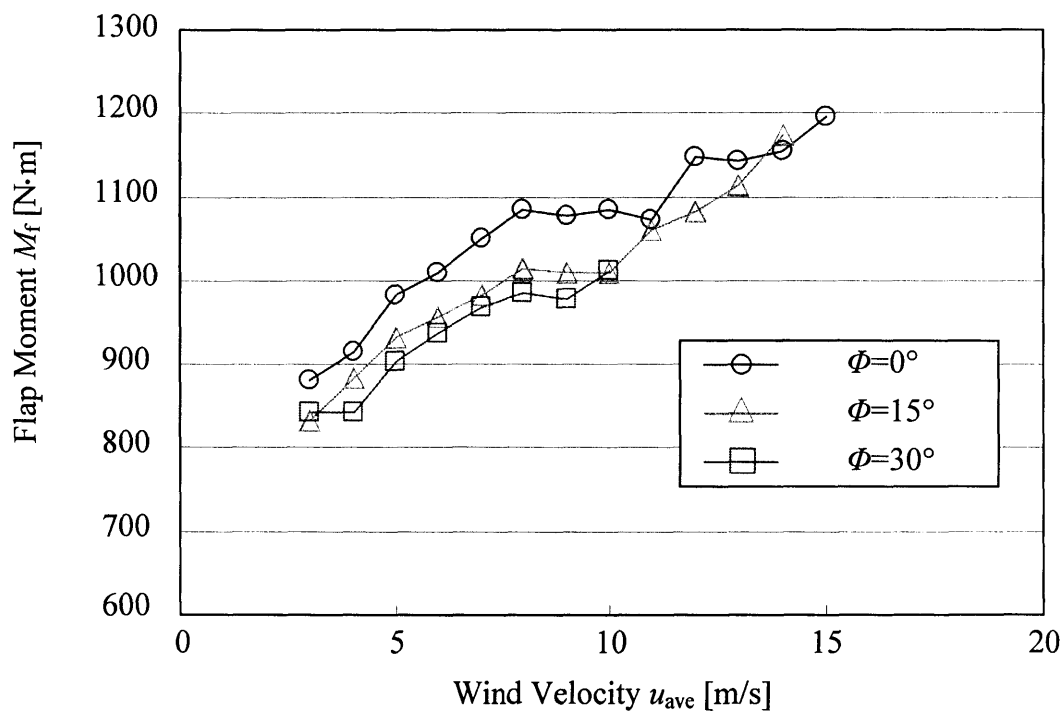


図 3.17(b) ヨー角別の風速に対するフラップ・モーメントの変化

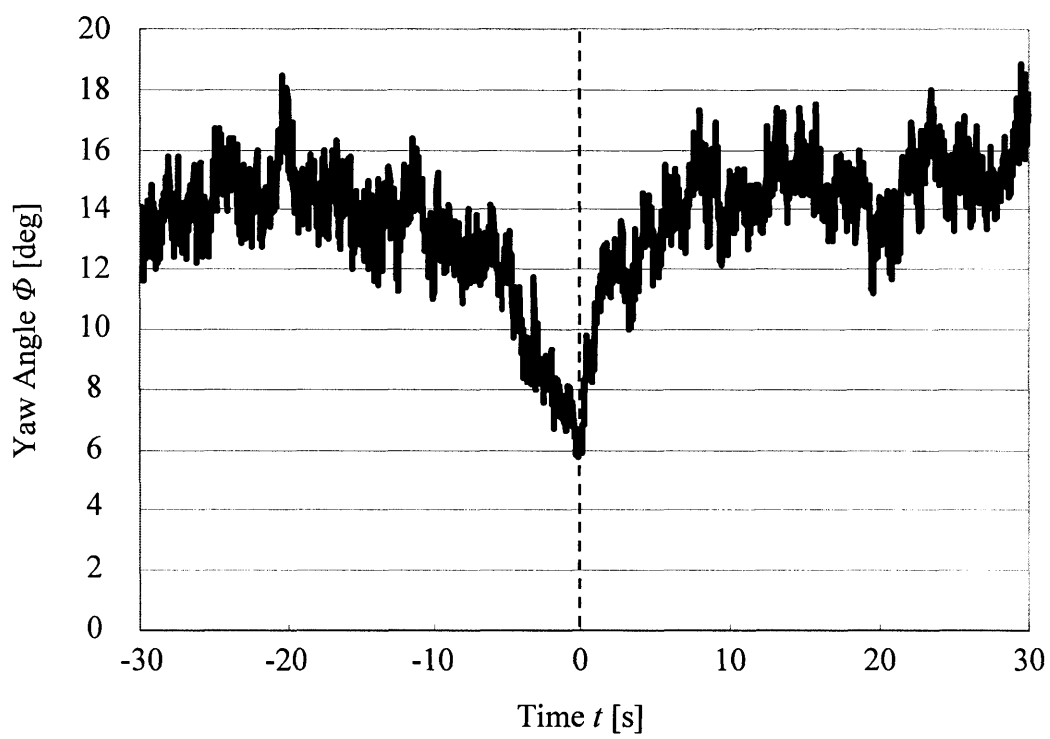


図 3.18 ガスト時のヨー角変動

## 結言

本研究では、フィールドにおいて超音波流速計を用いてロータ直径 10m 風力タービン後流の速度分布を測定した。またガストによる空力負荷変動について解析を行った。

以下に、そのまとめを示す。

1. 風力タービン後流内の風速は下流に行くにしたがい、風力タービン停止時の速度分布に回復していく。  $x/D=1.5$  の場合、  $z/R=0$  において無次元風速は風力タービン停止時に比べ、77%に低下しているが、  $x/D=3.0$  の場合、  $z/R=0$  において無次元風速は91%まで回復している。
2. 主流方向速度は風力タービンによるエネルギー抽出によって減少する。風向は主流方向速度と半径方向速度のなす角で決定される。半径方向速度が減少せずに、主流方向速度が減少することで風向の絶対値は大きくなる。そのため、風力タービン後流の風向の変動が大きくなり、風力タービン後流の標準偏差は大きくなると考えられる。
3. 風力タービン後流の速度分布は、乱れ強度によって異なり、乱れ強度が大きい場合、乱れ強度が小さい場合に比べて風速の回復が早い。これは風が乱れることで、風力タービン後流の流れと風力タービン後流外部の流れとの混合が促進されるため、風速の回復が早くなると考えられる。
4. POT 手法によって得られた実測の平均ガスト形状と、IEC のガストモデルを比較した場合、実測のガスト平均形状はピークが急峻なのに対して、ガストモデルはなだらかにピークを示す。またガスト振幅  $u_{\text{gust}}$  が同じである場合、平均風速  $u_{\text{ave}}$  が大きいほどガスト時間幅  $T$  は狭くなり、風速の増加と減少が急峻になる。

5. ガストによるヨー角の変動は，ガスト発生時のピークを  $t=0[s]$  として，ガストのピーク前の  $t=-30\sim 0[s]$  においてヨー角の絶対値は小さくなり， $\phi=0^\circ$  に近づく．ガストのピーク後の  $t=-30\sim 0[s]$  においてヨー角は  $\phi=0^\circ$  から絶対値が大きくなる方向に変動する．翼負荷はヨー角が  $\phi=0^\circ$  に近いほど大きくなるため，翼負荷はガストによる風速の増加分以上の負荷の変動が発生すると考えられる．

## 今後の課題

### 風力タービン後流測定について

1. 本研究の風力タービン後流測定は，各測定位置において風況が異なっているため，各測定位置の同時測定，もしくは統計的に十分な量の平均で考察する必要がある．
2. 本研究の風力タービン後流測定は，回転中心のみであった．風力タービンの後流は下流に流れるほど拡大が起こるため，半径方向も測定する必要がある．

### ガストによる空力負荷について

1. 本研究の場合，リードラグ・モーメント  $M_l$  は  $u_{ave}=7\sim 8[m/s]$  を境に，減少が確認された．またフラップ・モーメント  $M_{fl}$  は  $u_{ave}=7\sim 8[m/s]$  を境に，増加の傾きが小さくなった．風速の増加による失速と抗力の関係について検証する必要がある．



## 参考文献

- (1)独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 風力発電導入ガイドブック, 2008年2月改訂第9版.
- (2)IEC 61400-1 Wind turbine generator systems-Part 1 : Safety requirements International Electrotechnical Commission, 1999.
- (3)IEC 61400-12 Wind turbine generator systems-Part 12 : Wind turbine power performance testing, International Electrotechnical Commission, 1998.
- (4)内田孝紀, 他 2 名, 最適周速比における風車後流と静止円盤後流の比較, 第19回風工学シンポジウム論文集 pp.187-192.
- (5)前田太佳夫, 他 2 名, 水平軸風車後流の風洞実験とフィールド実験, 日本機械学会論文集 (B 編), 71 巻, 701 号 (2005-1).
- (6)村田淳介, 他 4 名, 統計的手法に基づくガスト形状の評価及び風車負荷解析への適用, 第59回ターボ機械協会論文集 pp.61-66.
- (7)Gunner Chr. Larsen et. al. , Mean Gust Shapes, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2003.

## 謝辞

本研究を行うにあたり終始温かく適切なアドバイスをいただいた前田太佳夫教授，実験装置作りなど，時には夜遅くまでご指導頂いた鎌田泰成准教授に心より感謝の意を表します．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．また，工作に関することをご指導いただいた堀場映次技官，研究室のムードメーカーであり，たくさんのお世話をしていただいた都築修子さん，本当にありがとうございました．また環境装置開発の加藤修氏には風車の修理などで大変お世話になりました．付属農場の方々にも大変お世話になりました．心より厚く感謝致します．

フィールドチームとしてこれまで共に過ごした飯田充博君，倉知慎一君には大変感謝しています．不甲斐ない私をサポートしてくれて感謝の気持ちでいっぱいです．おかげで無事に修士論文を書き上げることができました．本当にありがとうございました．来年は飯田君をリーダーに頑張ってください．また，実験設備を構築していただいた先輩方，特に未熟な私にたくさんの指導をいただいた，田中圭先輩，内藤啓太先輩に心より厚く感謝致します．

同期の荻田朋希君，苅谷将宏君，富山知樹君，長谷佳和君と研究室で過ごした日々は，とても充実なものになりました．この100年に1度の不況の中，長谷君は風車業界に進み，順風満帆です．私を含め，他の4人は不況の煽りを大きく受けた自動車業界に進みます．次に集まったときに，笑って会えるようにがんばりましょう．

2009年2月4日 古澤 雅佳