

平成 22 年度 修士論文

フィールド水平軸風力タービンの  
後流解明に関する研究

2011 年 2 月 2 日 提出

指導教員 前田 太佳夫 教授

鎌田 泰成 准教授

村田 淳介 助教

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

倉知 慎一

三重大学大学院 工学研究科

第1章	緒言	(1)
第2章	主な記号および座標系	(3)
	2.1.1 主な記号	
	2.1.2 後流測定座標	
第3章	実験装置および方法	(6)
	3.1 テストサイトおよび実験装置概要	
	3.2 供試風力タービン及び供試翼	
	3.3 観測システム	
	3.3.1 風力タービン流入風観測	
	3.3.2 風力タービン後流観測	
	3.4 測定装置および測定方法	
	3.4.1 超音波風速温度計	
	3.4.2 推力測定装置	
	3.4.3 観測システム	
	3.5 データ整理方法	
	3.5.1 アナログ及びデジタル出力測定値の同期	
	3.5.2 基準風と後流の時間補正	
第4章	供試風力タービン性能試験	(36)
	4.1 定義式	
	4.1.1 出力係数	
	4.1.2 推力係数	
	4.1.3 周速比	
	4.2 供試風力タービン性能試験	
	4.2.1 実験条件	
	4.2.2 出力性能曲線	
	4.2.3 推力性能曲線	
第5章	非定常風況下における風力タービン後流内流れ	(41)
	5.1 定義式	
	5.1.1 風速	
	5.1.2 乱流強度	
	5.2 風力タービンの後流内の流れ場	
	5.2.1 後流内軸方向速度の鉛直分布	

- 5.3 風力タービンの発生する推力が後流に与える影響
  - 5.3.1 推力係数と後流内軸方向速度の主流方向の変化
  - 5.3.2 推力係数と後流内軸方向速度の鉛直分布
  - 5.3.3 後流内ロータ軸方向速度の予測
  - 5.3.4 後流内軸方向速度の横方向分布
- 5.4 風力タービン後流の拡大
  - 5.4.1 Frandsen の後流モデル
  - 5.4.2 瞬時データを用いた風力タービン後流内の速度の横方向分布
  - 5.4.3 後流モデルとフィールド実験の比較

第6章 結言 ..... (66)

参考文献 ..... (67)

謝辞 ..... (68)

## 第1章 緒言

現在、地球温暖化や、資源の枯渇、発展途上国の人口増加など、地球環境を取り巻く様々な問題が深刻となってきた。さらに先進国では、豊かな生活をおくるために多くのエネルギーを消費している。日本の主なエネルギーの生産は、主として火力発電(石油、石炭、LNG)や原子力発電によっておこなわれている。しかし、両者の発電方法は燃料のほぼ100%を輸入に依存しているため、常に変化する世界情勢の影響を受け、安定した燃料の取得は困難である。また、化石燃料の使用は地球温暖化の原因として地球環境に影響を与える。日本では環境対策の一つとして、2005年に温室効果ガス排出量削減目標を定めた京都議定書を批准している。その対策の一つとして、化石燃料から再生可能エネルギーへのエネルギー源の転換が挙げられる。稼働中に二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーによる発電のうち、無尽蔵なエネルギー源の風を利用する風力発電が注目され、世界的に導入が進んでいる。

近年、風力発電施設は、好風況地域に複数の風力タービンを建設するウィンドファームという形態で導入が進められている。ウィンドファームは総発電量の増加や、発電電力の平滑化、送電コストの低減など、様々なメリットがある。しかし、日本のような利用可能な土地が狭い地域では好風況地域に可能な限り多くの風力タービンを建て土地を有効活用する必要があるため、風力タービン間の距離が短くなることがある。下流側にある風力タービンは、上流側にある風力タービンの後流に入るとき影響を受ける。風力タービンを通過した風(後流)は風力タービンのエネルギー抽出により減速やロータ回転により、乱流強度は増加する。このため、後流中で運転される風力タービンには出力低下や疲労荷重の蓄積といった問題が生じる。NEDOの風力発電導入ガイドブックによると、主流方向に対して風車間の距離を風車直径の10倍離すことが推奨されている<sup>(1)</sup>。しかし、この推奨距離は欧米での平坦な地形での後流計測の知見によって得られたものであり、我が国のような複雑地形上により乱流強度が大きい風は欧米の風とは異なり、それにとまなう離隔距離も異なると考えられる。後流の詳細な解明はCFDや風洞実験によっても行われている<sup>(2)</sup>。風力タービンは風向、風速が常に変動する環境下で運転するため、風向、風速の変動がほとんどない定常風を用いる風洞実験では非

定常に変動する自然風の特徴を全て再現することは困難である。したがって実際にフィールドにて実験を行い、自然風況下の風力タービンの後流を把握することが重要である。

本研究では、定格出力 30kW の水平軸風力タービンを用いて、自然風の条件下で後流測定を行った。テストサイトには大きな障害物はないが丘陵上に位置し、樹木等が存在する、日本に典型的な複雑地形である。後流に関する研究は欧州で盛んに行われており、いくつかの後流モデルが提案されている。これらのモデルにおいて、ロータ推力や乱流強度などはモデル式の中の重要なパラメータとなっている。このため、本研究では風力タービンのナセルを軸方向に移動可能にし、ロードセルによってロータ推力を測定した。後流測定には応答性の高い超音波流速計を複数設置したマストを用いて行った。マストを任意の位置に設置することで水平方向・鉛直方向・主流方向の 3 方向の空間的な後流内速度分布が得られる。これらの装置を用いて高周波数でデータをサンプリングし、風力タービンのロータ推力、後流内速度、乱流強度の分布を測定し後流モデルとの比較をおこなった..

## 第2章 主な記号および座標系

### 2.1 主な記号

$A$	:ロータ面積	[m <sup>2</sup> ]
$A_0$	:風力タービン上流の流管の断面積	[m <sup>2</sup> ]
$A_1$	:各主流方向位置の流管の断面積	[m <sup>2</sup> ]
$b$	:局所翼厚	[m]
$c$	:局所翼弦長	[m]
$C_p$	:出力係数	
$C_t$	:推力係数	
$D$	:ロータ直径 = 10	[m]
$D_b$	:風力タービン後流の風速欠損域	[m]
$F_D$	:抗力	[m]
$F_L$	:揚力	[m]
$Q$	:ロータトルク	[Nm]
$r$	:ロータ半径位置	[m]
$R$	:ロータ半径 = 5	[m]
$R_c$	:相関係数	
$s$	:無次元主流方向位置	
$t$	:時間	[s]
$T_{air}$	:空気温度	[°C]
$T$	:ロータ推力	[N]
$TI$	:各測定位置の乱流強度	
$TI_{ratio}$	:乱流強度比	
$TI_{ref}$	:基準風速の乱流強度	
$u_A$	:超音波流速計のビーム方向速度	[m/s]
$u_B$	:超音波流速計のビーム方向速度	[m/s]
$u_C$	:超音波流速計のビーム方向速度	[m/s]
$u_{LF}$	:各測定点のロータ軸方向速度	[m/s]
$U_0$	:自由流れ中の風速	[m/s]
$U_b$	:速度欠損域の風速	[m/s]
$U_N$	:ロータ軸方向の無次元風速	[m/s]
$U_{ref}$	:基準風速	[m/s]

$v_{LF}$	:各測定点の水平方向速度	[m/s]
$V_0$	:風力タービン上流の流管の風速	[m/s]
$V_1$	:各主流方向位置の流管の風速	[m/s]
$x$	:ロータ軸方向座標	[m]
$y$	:横方向座標	[m]
$y'$	:斜め流入による見かけ上の横方向座標	[m]
$z$	:鉛直方向座標	[m]
$\beta_0$	:風速欠損領域範囲の拡大率	
$\theta$	:ブレードのねじり角	[ $^\circ$ ]
$\lambda$	:周速比	
$\rho$	:空気密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_U$	:軸方向風速の1分間標準偏差	[m/s]
$\Phi$	:ヨー偏角	[ $^\circ$ ]
$\Psi$	:アジマス角	[ $^\circ$ ]
$\omega$	:ロータ回転角速度	[rad/s]

## 2.2 後流測定座標系

図 2.1 に後流測定点に関する座標系を示す。後流測定座標系は、ロータ回転中心を原点とし、ロータ回転面と垂直な下流方向を  $x$  軸、ロータ回転面と平行な横方向を  $y$  軸、鉛直方向を  $z$  軸とした。後流測定点の  $x$  座標はロータ直径、 $y$  座標と  $z$  座標はロータ半径でそれぞれ無次元化した  $x/D$ ,  $y/R$ ,  $z/R$  を用いて表す。

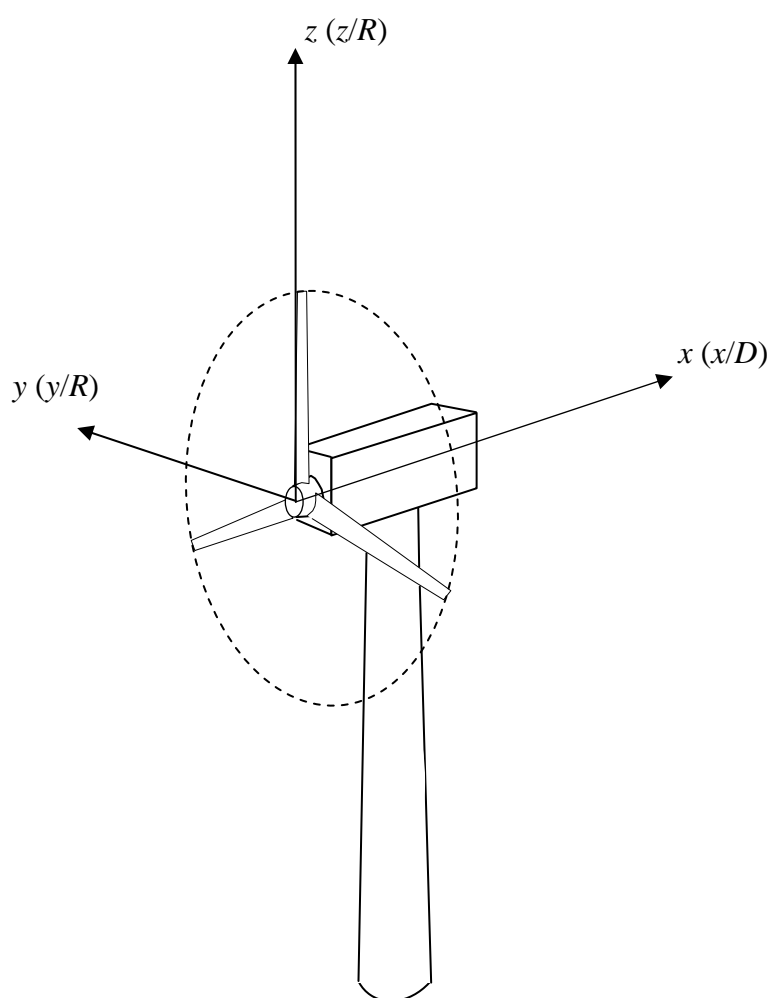


图 2.1 後流測定点座標系



## 第3章 実験装置および方法

### 3.1 テストサイトおよび実験装置概要

本実験は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あるテストサイトで行われた。図 3.1 にテストサイトの全体図を示す。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。テストサイトの冬場における卓越風向はほぼ西北西(303°)である。

図 3.2 に基準マストで測定されたテストサイトの風配図を示す。また、卓越風向を矢印で図 3.1 に示す。北にある丘を除いてテストサイトの周囲は平坦であり、障害物はない。風力タービンの後流測定のため、卓越風向に沿って基準マスト、風力タービンおよび後流測定用マストを並べて配置してある。以下の節で、本研究で用いた実験設備および実験装置の詳細について説明する。

### 3.2 供試風力タービン及び供試翼

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 3.3 に、写真を図 3.4 に示す。供試風力タービンは発電機容量 30kW、ロータ直径 10m、ハブ高さ 13.4m で、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 3.5 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偏角をとることができる。

図 3.6 に風力タービンの駆動系を示す。ロータに生じたトルク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。ロータ回転数は、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。ブレードピッチ角、ナセル方位は測定室にある機械制御盤によって操作される。

図 3.7 にヨー偏角  $\phi$  およびアジマス角  $\psi$  の定義図を示す。ヨー偏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、基準ブレードの方位角を示し、鉛直上向きを  $0^\circ$  として上流側から見て反時計まわりに正と定義した。また、ピッチ角は翼端の翼弦線がロータ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した。

図 3.8 に本研究に用いた供試翼を示す。供試翼は半径 5.0m のテーパねじり翼である。ブレードは 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、ブレード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 1361mm の半径位置で DU91-W2-250, 2475mm の位置で DU93-W-210, 3960mm の位置より翼端側では NACA63-618 の翼型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形状を定めている。翼端から翼根までのねじり角は約  $12^\circ$  で、本実験における設定ピッチ角は  $0^\circ$  である。翼端部は半径 4700mm からノーマル、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、本実験では図 3.8 に示すノーマルを使用した。

### 3.3 観測システム

#### 3.3.1 風力タービン流入風観測

風力タービンへの流入風速を調べるために基準風速計が必要である。本研究では図 3.1, 3.3 に示すように風力タービン設置位置から卓越風向の向きに上流 10.0m の位置に基準マストを設置した。この基準マストの風力タービンハブ高さと同程度の地上高 13.3m の位置に超音波流速計を設置し基準風速計とした。図 3.9 に基準風速計と風力タービンの位置関係および概略図を示す。

#### 3.3.2 風力タービン後流観測

フィールドにて風力タービン後流の分布を把握するには空間的に多くの測定点で測定を行い、時間的に長期にわたる観測データを蓄積することが重要である。本研究では、多点での後流観測のために鉛直分布測定用と横方向分布測定用の 2 本のマストを用いた。

後流の鉛直分布測定マストの全体写真と模式図を図 3.10, 図 3.11 にそれぞれ示す。鉛直分布測定マストの先端から 9.0m の高さまでは 100mm 角のラーメン構造で、9.0m の高さから根元にかけてテーパで 380mm 角にまで広がっている。根元部分には大きなモーメントがかかるためトラス構造を用いて作成した。鉛直分布測定マストは根元部分で油圧ショベルのアームに取り付けられており、任意の測定地点に移動させることができる。後流風速測定は超音波流速計 (SAT) を用いて行う。鉛直分布測定マストの測定高度は 18.3m, 15.8m, 1.33m, 10.8m, 8.3m であり、風力タービンを基準にすると  $z/R=+1.0$  (回転面の上端),  $+0.5$ ,  $0$  (ハブ高さ),  $-0.5$ ,  $-1.0$  (回転面の下端) となる。これらの SAT は上から順に SAT-1, SAT-2, SAT-3, SAT-4, SAT-5 とする。

後流の横方向分布測定マストの全体写真を図 3.12 に示す。横方向分布測定マストは FTI 社製のクランクアップタワー FDX-472J を用いて作成した。このクランクアップタワーは最短 7.0m から最長 22.0m まで伸縮でき、任意の高度の測定が可能である。転倒防止のためにクランクアップタワーの根元は鋼材で固定されている。横方向の速度分布測定用の SAT は、ロータ回転面に平行かつ水平に 2.5m 間隔でタワー先端に 3 つ取り付けてある。横方向分布測定 SAT は、 $x/D=2.0$  で  $y/R=0.5$ ,  $1.0$ ,  $1.5$  となる位置とした。これらの SAT はロータ中心に近い方から順に SAT-a, SAT-b, SAT-c とする。

## 3.4 測定装置および測定方法

### 3.4.1 超音波風速温度計

本研究では風力タービン後流および流入風の変動を高周波数でサンプリングするため、風速測定には応答性の良い超音波流速計 (サンプリング周波数 50Hz) を用いた。基準風速測定及び後流測定に用いた超音波風速温度計の測定原理について説明する。超音波風速温度計は 3 対の超音波送受波器を対向させている。これらの送受波器が互いに逆向きに超音波パルスを伝播させ、伝播時間を測定することで風速を求めることができる。

表 3.1 に基準風速測定及び後流測定に用いた超音波流速計の諸元を示す。基準風速計に用いた DA-650 の風速分解能は 0.005m/s, 温度分解能は 0.025°C であり、測定精度は風速 10m/s のとき実値 $\pm 0.1$ m/s 以内である。プローブは形式 TR-61B を

採用した。後流測定に用いた SAT-550 の風速分解能は 0.01m/s、温度分解能は 0.05°Cであり、精度は風速 10m/s のとき、実値の±0.25m/s 以内である。

図 3.13(a)に主流風向と SAT の  $u_A$ ,  $u_B$  方向を示す。 $u_C$  方向は鉛直上向きが正である。本実験で用いた SAT は構造上、測定体積の周囲に複数のアームがある。測定体積上流にアームがある場合、アームの後流が測定体積に流入し測定値に影響を与えると考えられる。このため、測定体積の卓越風向上流にアームが位置しないように、SAT は卓越風向と  $u_B$  の角度が 30°となるよう調節して取り付けられている。図 3.13(b)は SAT と鉛直測定マストの取り付け部の拡大図である。マストに風速計を設置する場合、マストの影響を受けない位置に風速計を設置する必要がある。一般に風速計とマストの水平距離はマストの直径の 7 倍以上となるように設置しなければならないとされている<sup>(2)</sup>。本実験ではマストの直径の 10 倍にあたる 1m 卓越風向上流に張り出した位置に SAT を設置した。

表 3.1 超音波流速計諸元

用途	測定装置	型番	メーカー
基準風速測定	三次元超音波風速温度計		株式会社ソニック
	本体	DA-650	
	プローブ	TR-61B	
後流測定	三次元超音波風向風速計	SAT-550	株式会社ソニック

### 3.4.2 推力測定装置

風力タービンは、回転中の翼からトルクと推力を発生する。本研究では、風力タービンの発生する推力を測定するために、高精度引張型ロードセルを使用した。

ロータ推力測定装置について以下に説明する。流入風によって風力タービンのロータ面が推力を発生すると同時にタワーは風荷重を受ける。ロータの発生する推力のみを測定するために、ナセルを軸方向に移動できる装置を取り付けた。図 3.14(a), (b)にロータ推力測定装置の概要図と全体写真を示す。図 3.14(a)のように地面に固定されたタワーと軸方向に移動可能なナセルをロードセルで介することで推力を測定する。ナセル移動は、図 3.15 に示すスライドユニットを用いた。ナセル下部にスライドユニットのレールをロータ軸と平行になるように設置し、タ

ワー上部にスライドユニットを設置することで、ナセルがロータ軸方向に移動可能となる。ロードセルは引張り方向を推力の正とする。

表 3.2 に推力測定に用いた装置の諸元を示す。推力測定に用いた LTZ-2TA の分解能は 0.12N であり，測定精度は推力 800N のとき，実値の $\pm 0.4N$  以内である。

表 3.2 推力測定装置諸元

用途	測定装置	型番	メーカー
推力測定	高精度引張型ロードセル	LTZ-2TA	株式会社共和電業
	動ひずみ測定機	DPM-611A	株式会社共和電業
ナセル移動	スライドユニット	LH45GM	日本精工株式会社

### 3.4.3 観測システム

図 3.16 に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の出力が可能である。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。本実験では風速の三成分 ( $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$ ) および空気温度  $T_{air}$  の 4 つのパラメータをアナログおよびデジタルで出力している。基準風速計および後流の SAT により取得した風速・温度データは電圧に変換し A/D ボードに入力される。ロードセルにより取得した推力は動ひずみアンブにより電圧信号に変換される。

実験では風力タービン運転状態に関するデータを取得している。表 3.3 に取得するパラメータと測定装置，設置箇所を示す。

表 3.3 風力タービンに関するパラメータと測定装置

取得パラメータ	測定装置	設置箇所
アジマス角	ロータリーエンコーダ	風力タービン中間軸
	フォトセンサ	風力タービン主軸
ピッチ角	ポテンシオメータ	ピッチ操作用パワーシリンダ
ナセル方位角	ロータリーエンコーダ	ナセル回転軸
トルク	トルク検出器	誘導発電機軸
推力	ロードセル	ナセル下部
交流電力	デジタル電力計	制御室
交流電圧		
交流電流		

これらのパラメータは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へ取り込まれる。

以上をまとめると、本実験でサンプリングされるデータ項目は、基準マストに取り付けた超音波流速計の速度3成分 ( $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$ ) と温度、風力タービンの発電量・発電電圧・発電電流、ブレードピッチ角、トルク、推力、ロータ回転数、ナセル方位角、基準ブレードのアジマス角 (風力タービン翼回転角)、後流観測用のそれぞれ8つのSATの速度三成分 ( $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$ ) と温度である。これらのパラメータのサンプリング周波数は、SATのデジタル出力応答速度に合わせて50Hzで行った。また、サンプリングのスタート時を  $t=0[s]$  とし測定時刻も記録した。1つのデータセットは1200秒である。表3.4に観測システム装置の諸元を示す。

表 3.4 観測システム装置諸元

装置	型番	メーカー
デジタル電力計	3192	日置電機株式会社
カウンターボード	pci-6205c	株式会社インタフェース
A/Dボード	DF4000	日本シンクネット株式会社
PC	FC-86J	日本電気株式会社

### 3.5 データ整理方法

#### 3.5.1 アナログ及びデジタル出力測定値の同期

超音波流速計のアナログ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。それに対してデジタル出力はシリアル通信により直接パソコンに出力されるためスイッチングノイズの影響を受けない。したがってデジタル出力の測定値で考察を行うことが望ましい。

3.4.3 項で記述した通り超音波流速計はアナログ信号とデジタル信号の両方でデータを出力している。本計測システムにおいて、アナログ出力とデジタル出力の測定値はそれぞれ別のパソコンでサンプリングしており、風力タービンの各測定値と同期して測定している超音波流速計データはアナログ出力である。超音波流速計のアナログ出力を同時刻のデジタル出力に同期させることで、ノイズの影響のない後流データを他の測定値と同期させることができる。

アナログデータとデジタルデータを同期させるために両測定値の相関係数を求め、最も相関係数が高くなる時間をデジタルデータとアナログデータとの同期タイミングとする。

図 3.17(a)にアナログ出力の時系列測定値、図 3.17(b)にデジタル出力の時系列測定値の測定例を示す。各図の横軸は時刻、縦軸は測定風速を示す。同時刻に取得したアナログ出力およびデジタル出力の測定値の置換を行った結果を図 3.18 に示す。この 60 秒間のアナログ出力とデジタル出力の相関係数は  $R_c=0.91$  となった。相関係数が  $R_c=1$  を示さないのは、ノイズによるアナログ出力とデジタル出力の差異によるものである。

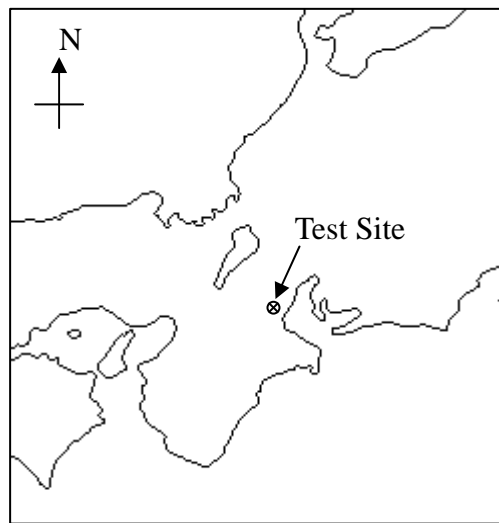
#### 3.5.2 基準風と後流の時間補正

基準風速計位置と後流測定位置では測定している空間が異なるため、基準風速計を通過した風が後流測定位置に到達するまでにタイムラグが生じる。基準風速と後流風速の変動を比較するため、両者の相関を取り、最も高い相関係数を示す時間をタイムラグとして補正する。

図 3.19(a)および(b)は風力タービン停止時の基準風速計と SAT-3 ( $z/R=0$ ) の時系列測定値および相関係数の値を示す。図 3.19(a)および(b)の下流方向測定位置は  $x/D=1.0$  である。図 3.19(a)の横軸は時間  $t$ 、縦軸は測定風速、図 3.19(b)の横軸は時

間、縦軸は相関係数  $R_c$  を示す。図 3.19(a)より、基準風速計と SAT-3 ( $z/R=0$ ) の風速の変動にタイムラグが見られる。 $x/D=1.0$  の場合、基準風速計と SAT-3 ( $z/R=0$ ) の距離は 20m である。 $x/D=1.0$  の位置でのこ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、基準風速計と SAT-3 ( $z/R=0$ ) との間のタイムラグは約  $3.3s(=20[m]/6[m/s])$  であると考えられる。図 3.19(b)より、相関係数は 3.38s にピークを示し、基準風速計から SAT-3 ( $z/R=0$ ) に到達すると考えられる時間のずれとほぼ一致している。図 3.20 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 SAT-3 ( $z/R=0$ ) 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を修正す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、基準風速計と後流 SAT の測定時間の補正を行った。図 3.21 (a)および(b), 図 3.22 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  $x/D=1.0$  である。補正の結果、基準風速計と SAT の時系列データは風力タービンのエネルギー抽出によって後流風速は基準風速に比べ低下しているものの、変動の仕方やピークの時刻は良く一致している。

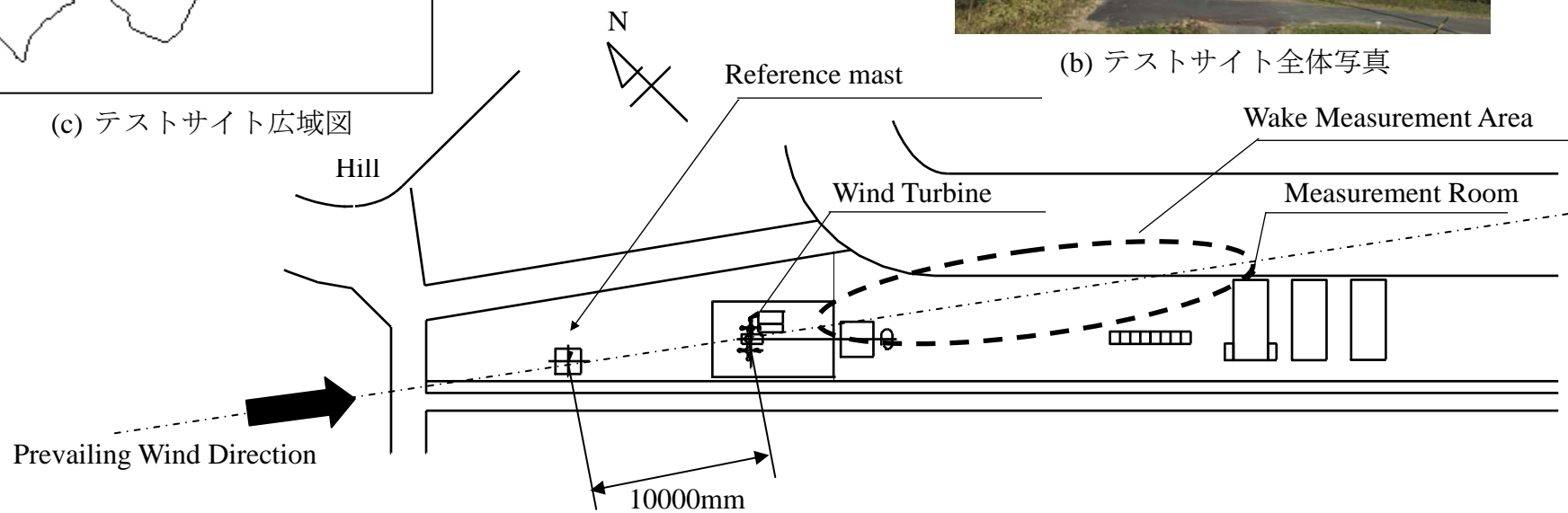




(c) テストサイト広域図

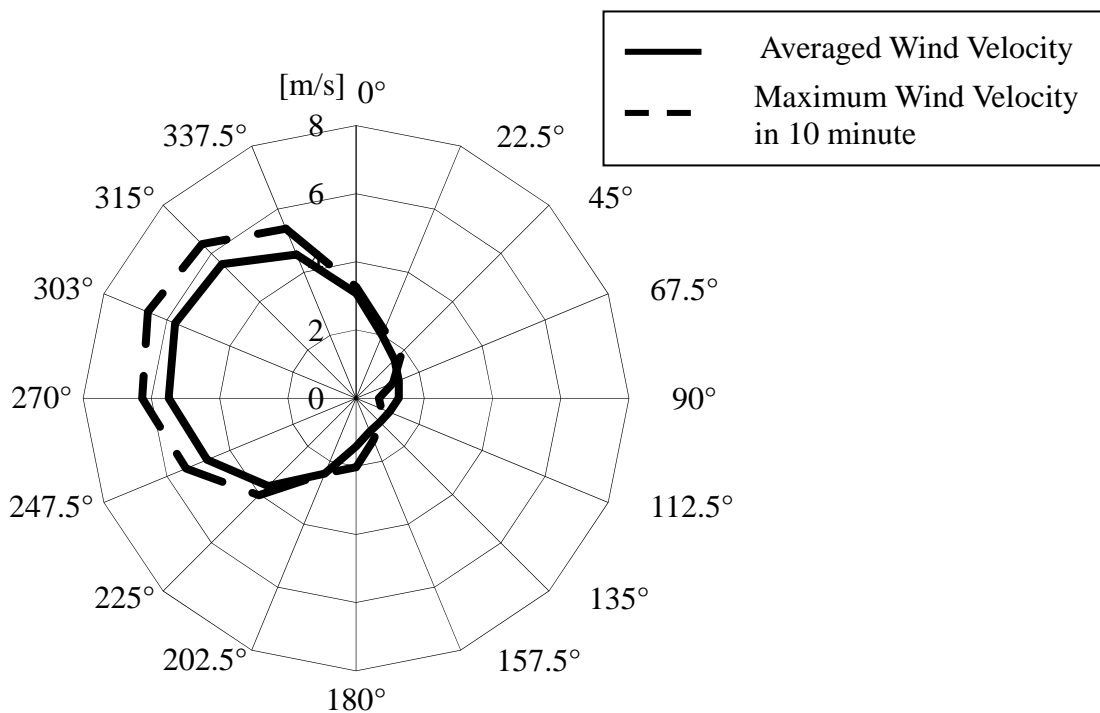


(b) テストサイト全体写真

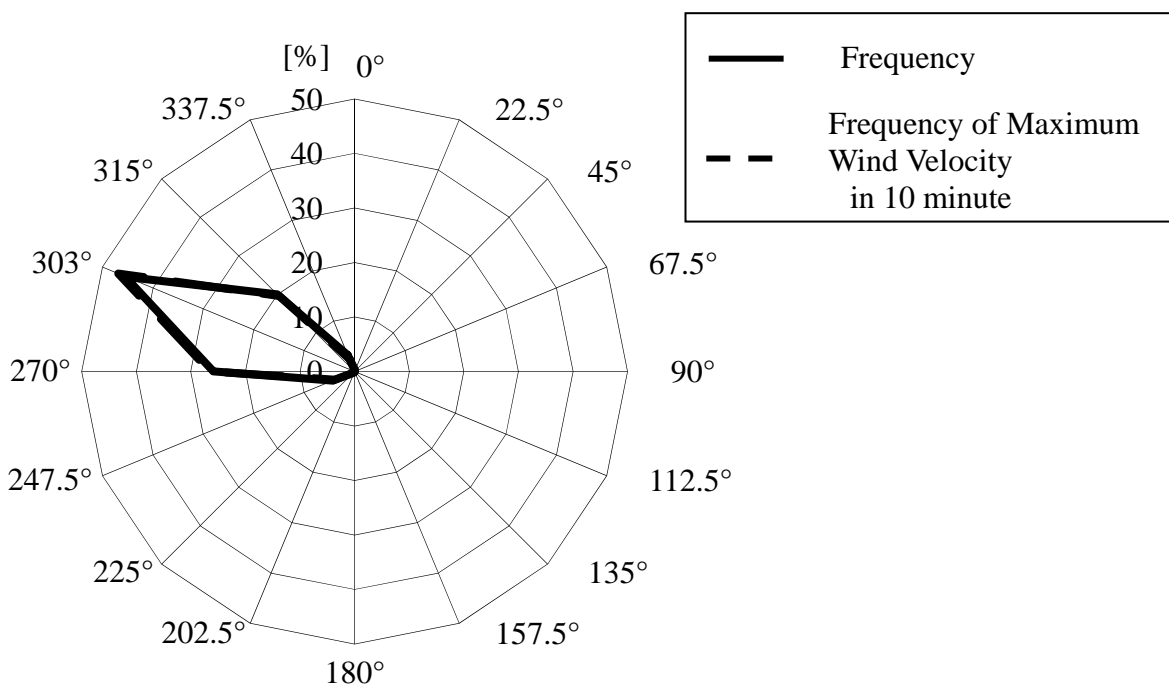


(a) テストサイト概要図

図 3.1 風力発電実験設備全体図



(a) 風向別平均風速



(b) 風向出現率

図 3.2 テストサイトの風配図

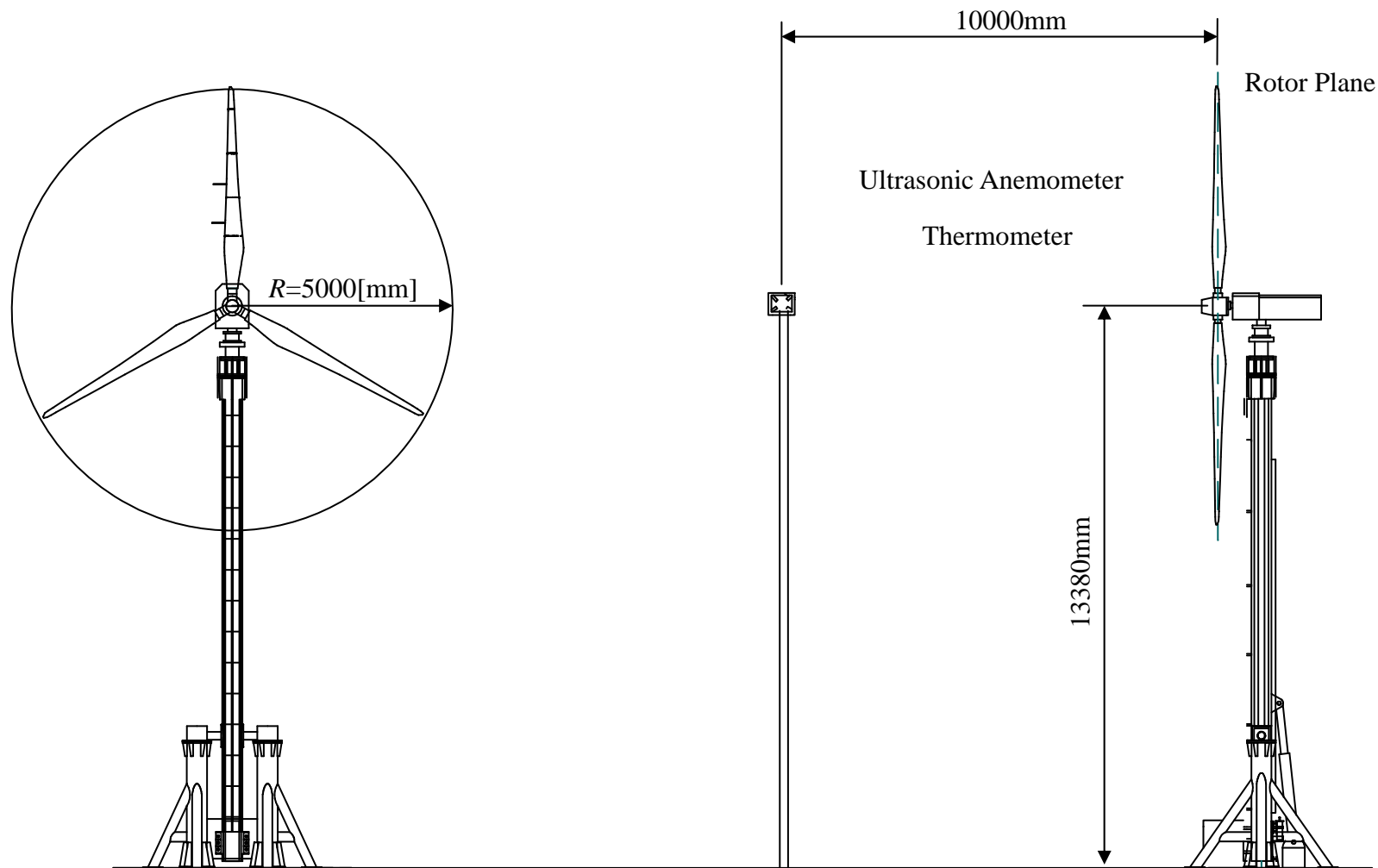


図 3.3 供試風力タービンの正面図及び側面図

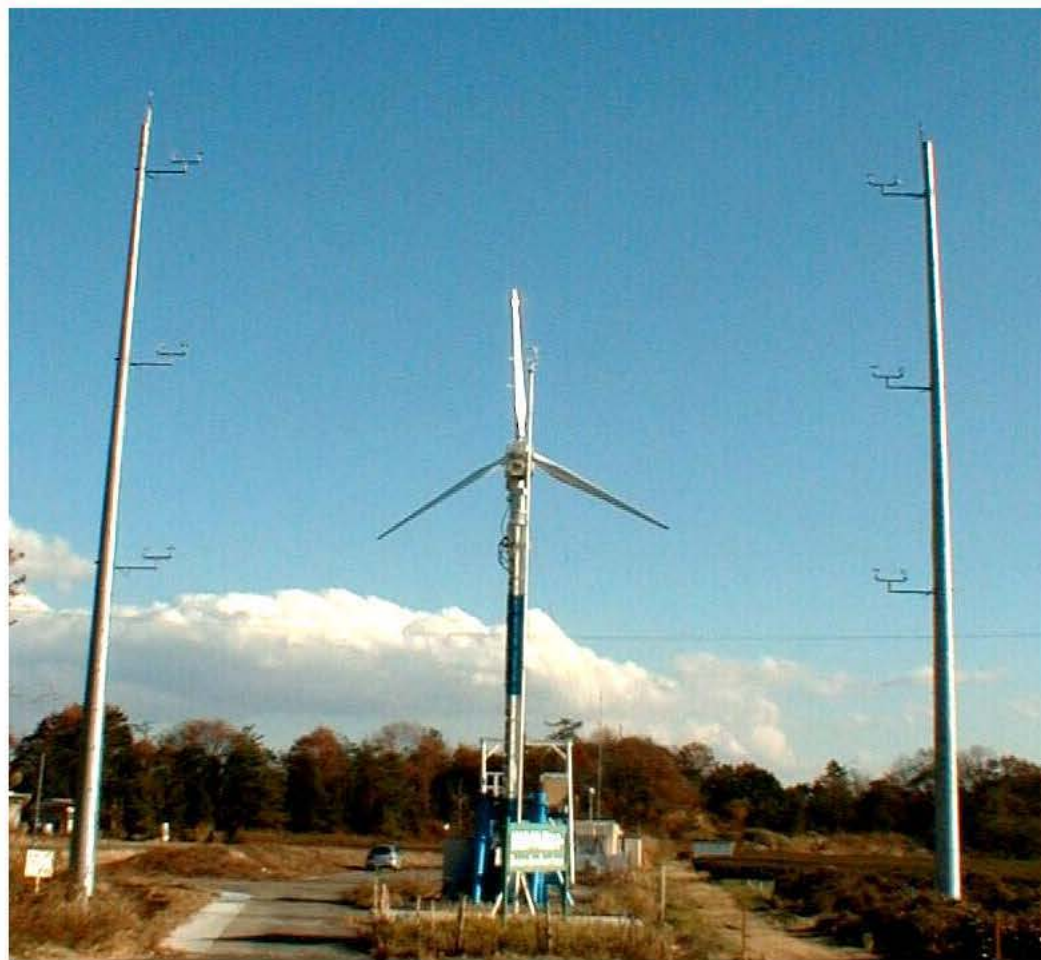
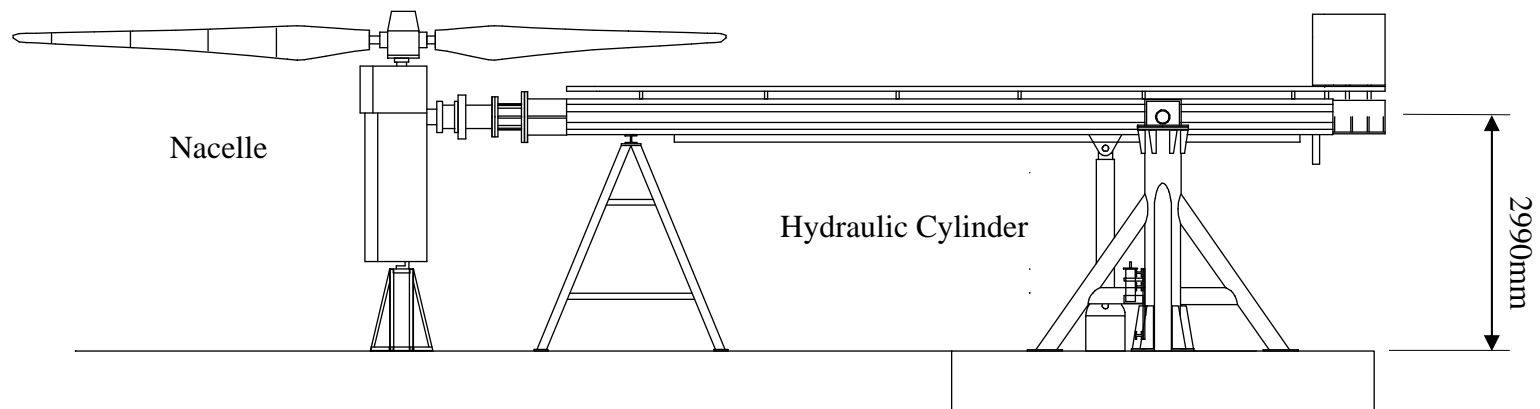
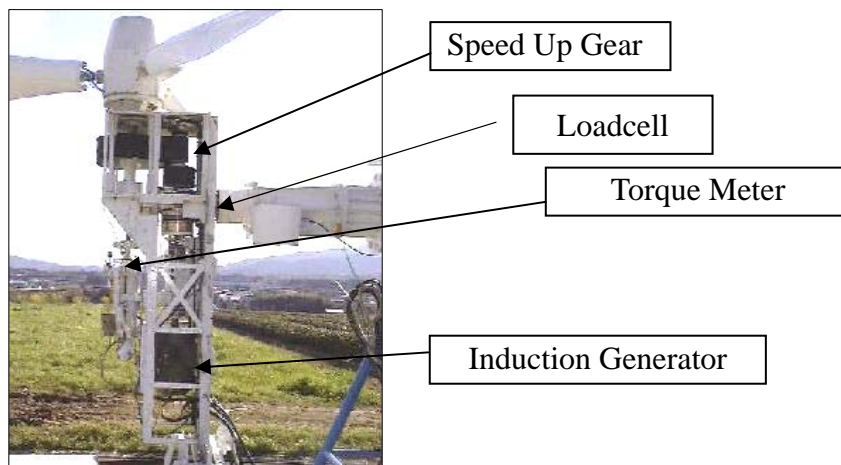


図 3.4 供試風力タービン正面及び側面写真



(a) 風力タービン倒置時の姿勢



(b) ナセル内部



(c) 起倒用油圧シリンダ部

図 3.5 供試風力タービン倒置図及び細部写真

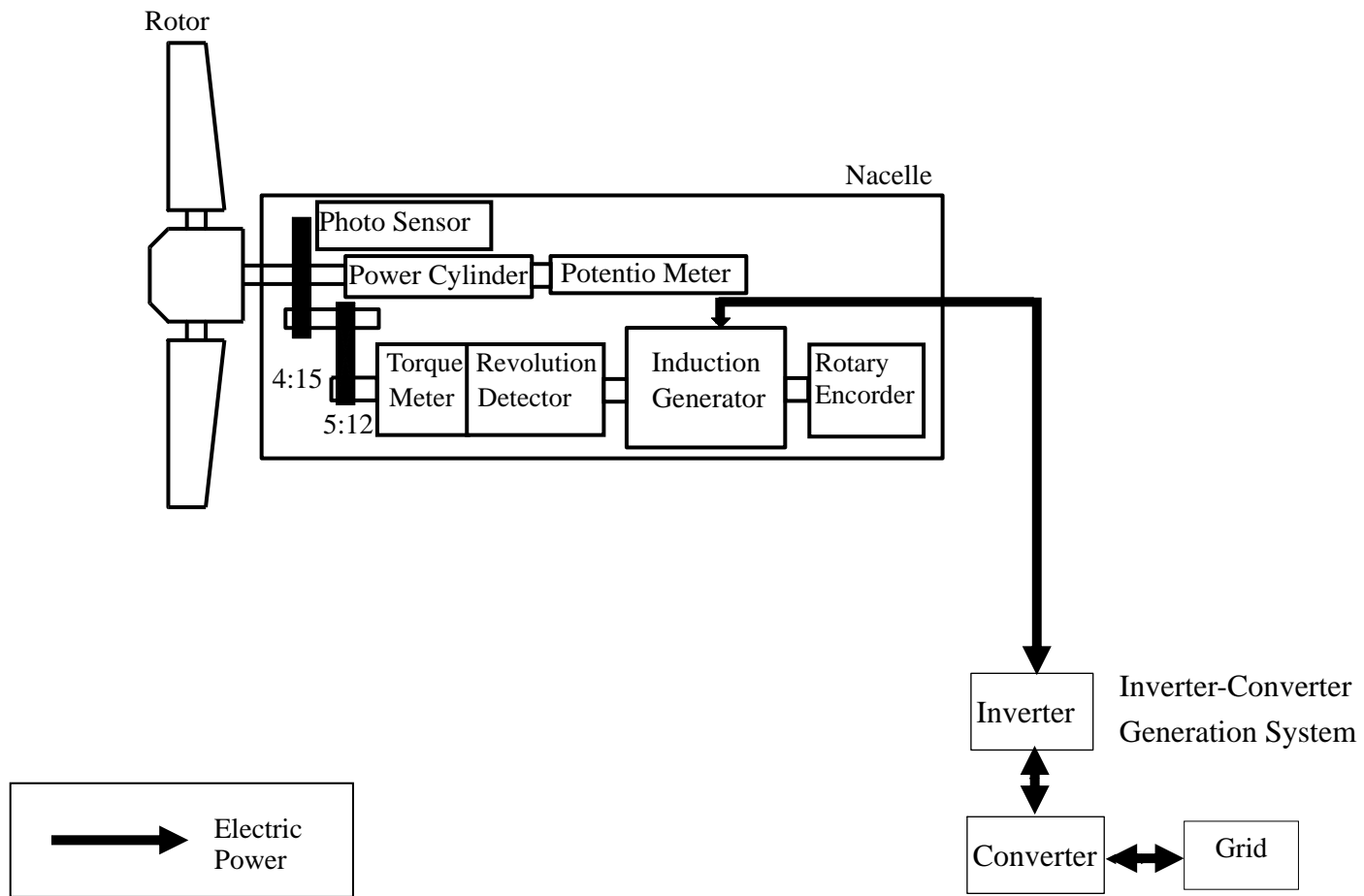


図 3.6 供試風力タービン駆動系図

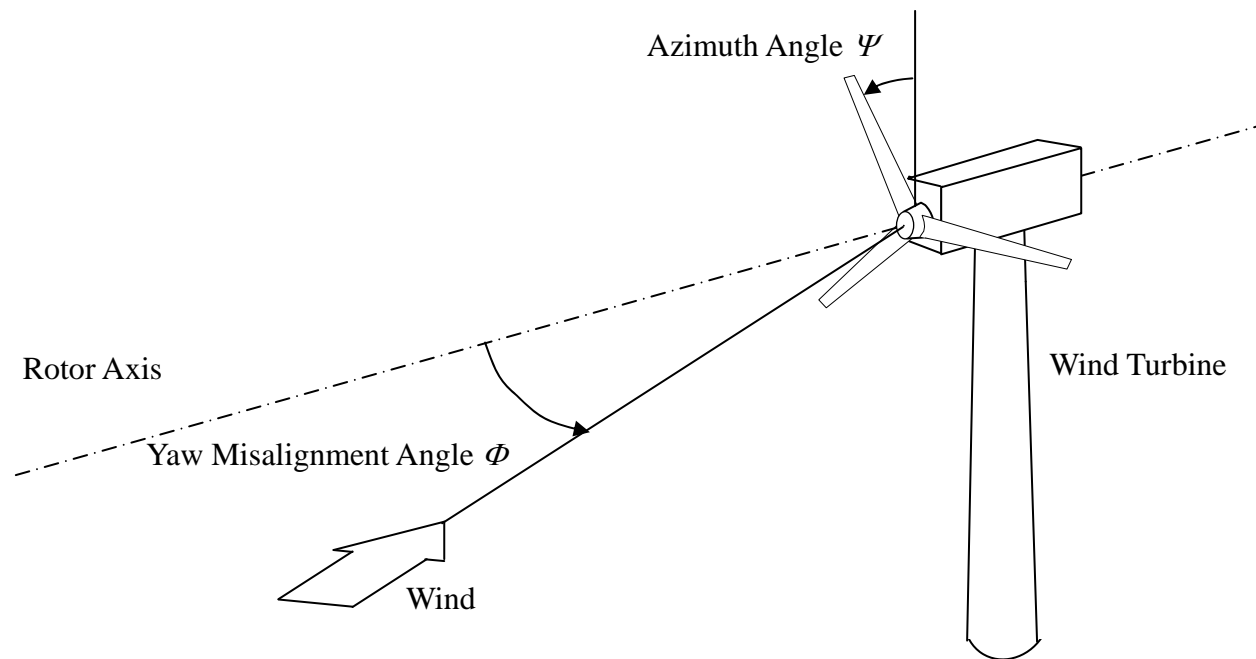


図 3.7 アジマス角とヨー角の定義

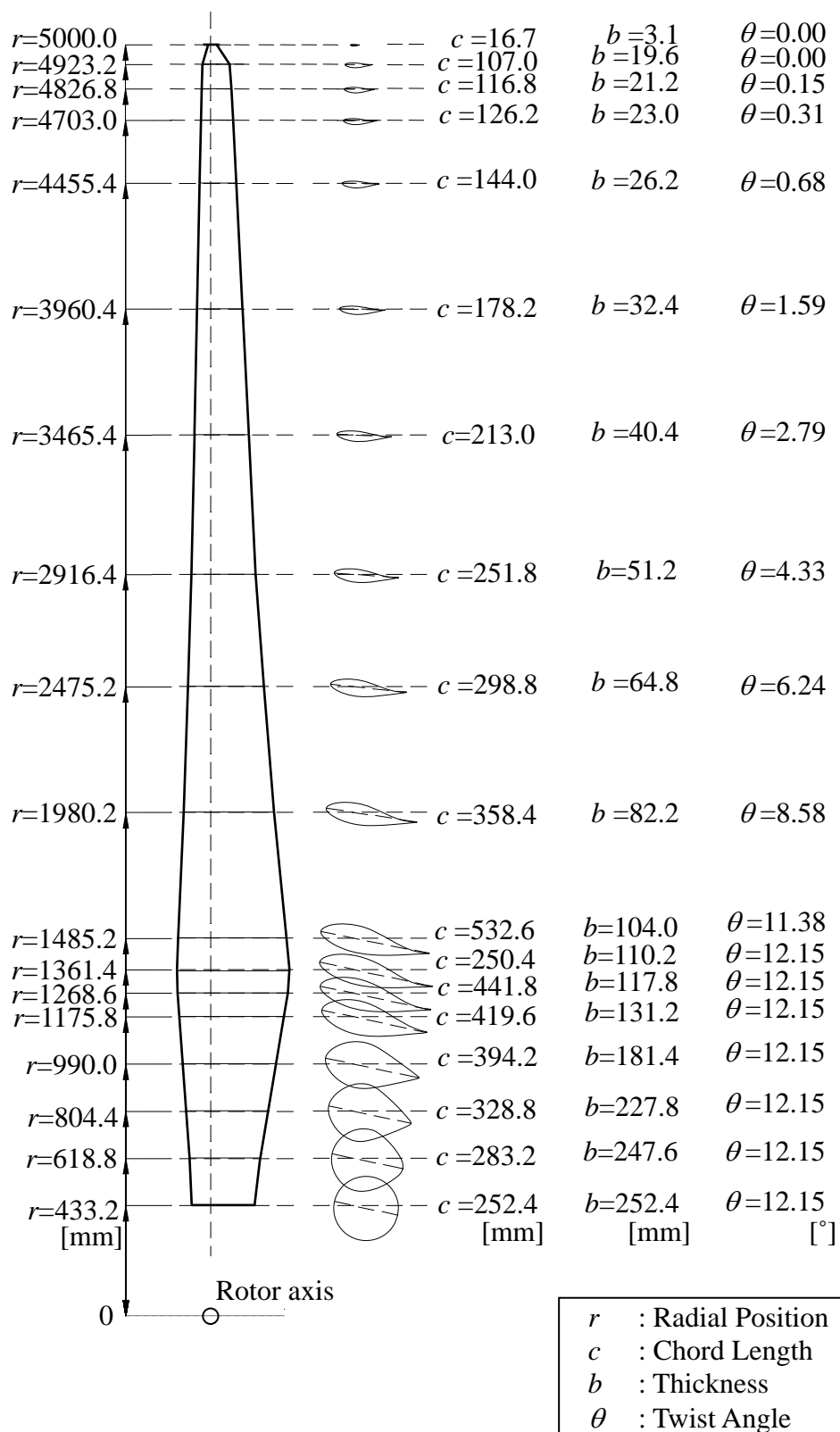


図3.8 供試翼(APX-40スケールモデル)



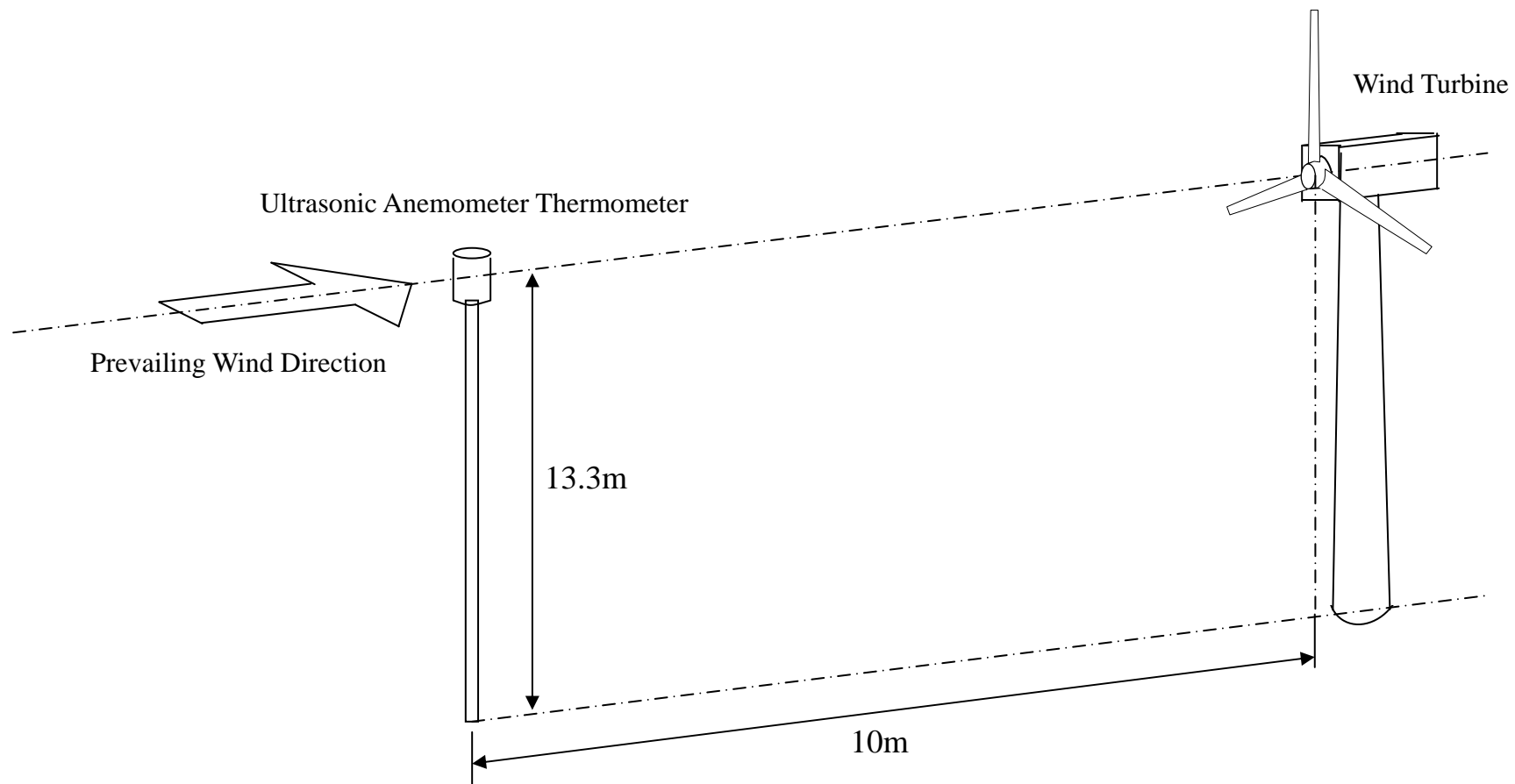


図 3.9 供試風力タービン，超音波流速計位置関係図

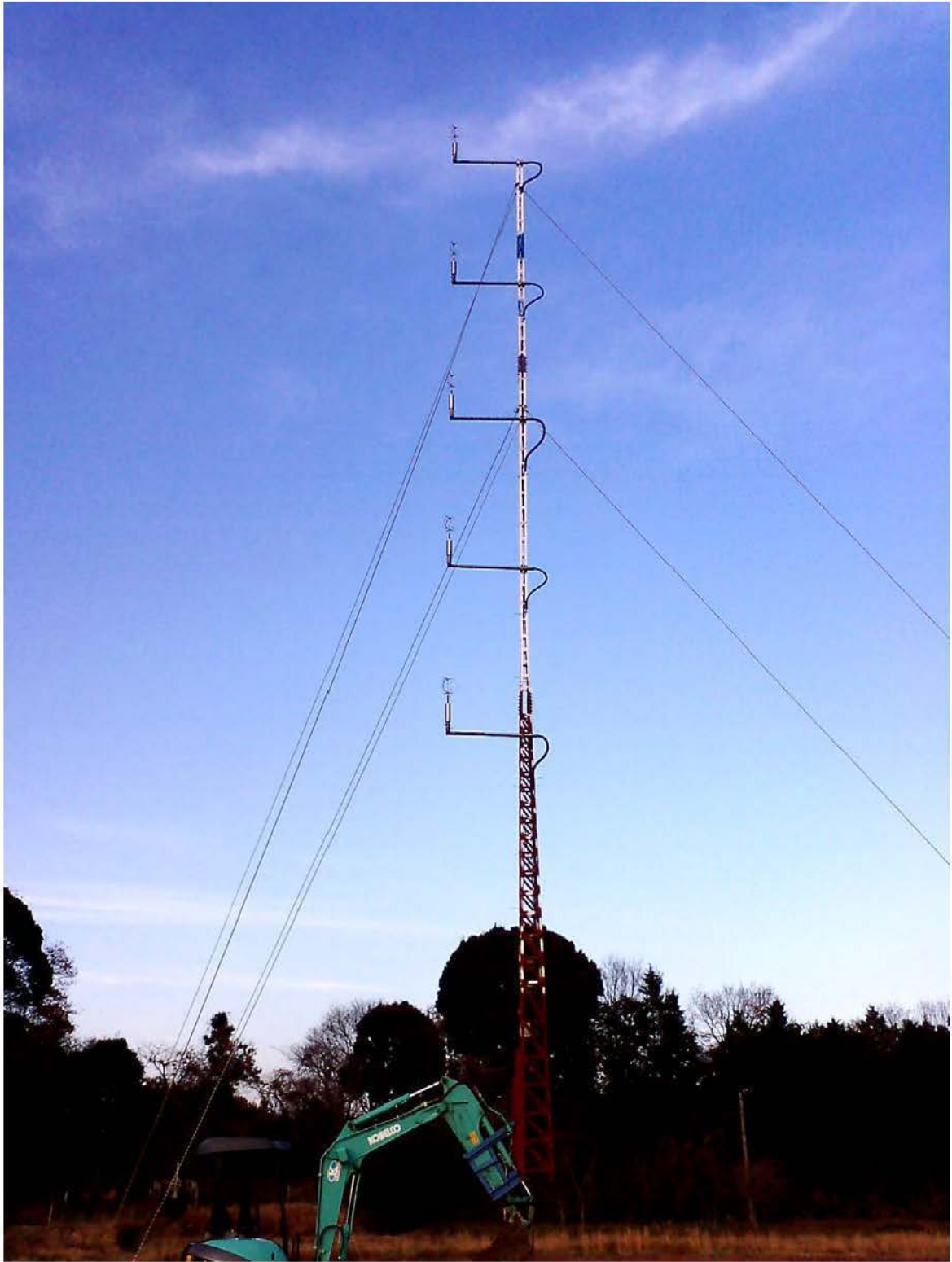


図 3.10 鉛直分布測定マストの全体写真

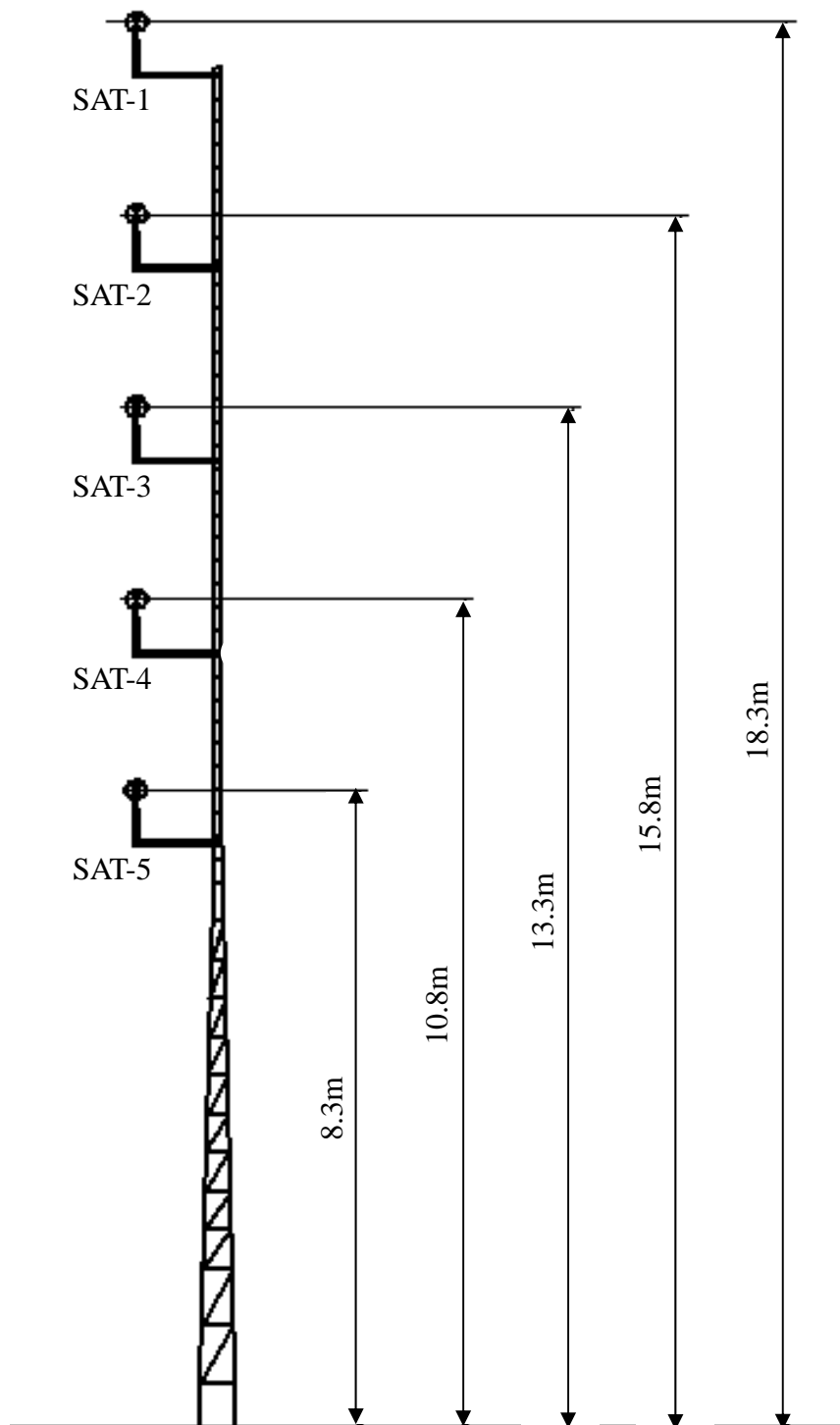


図 3.11 鉛直分布測定マスト模式図

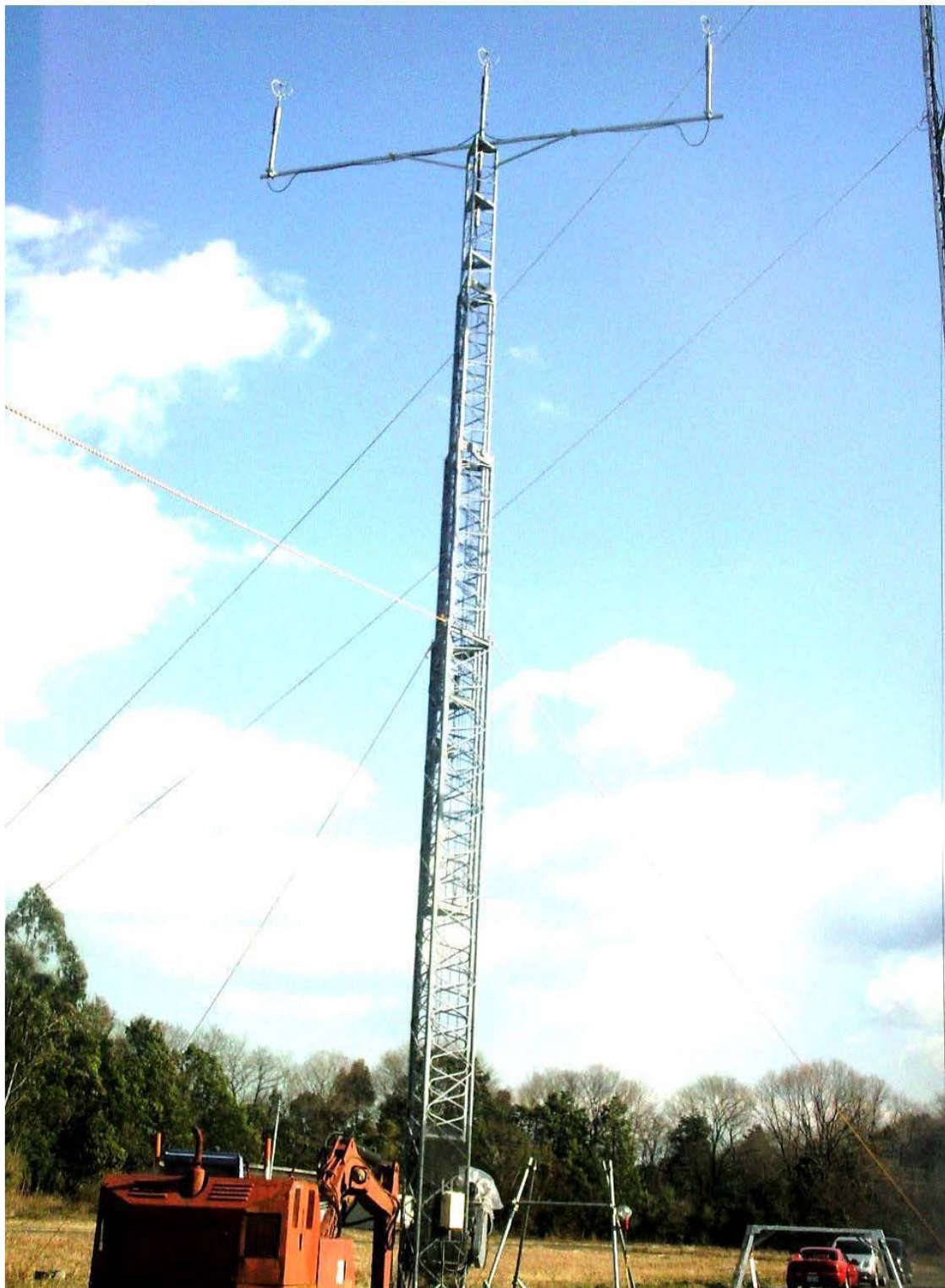
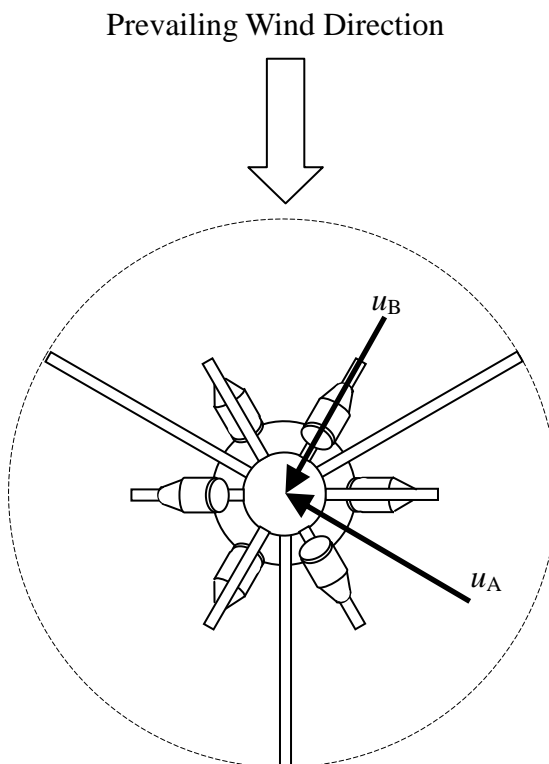
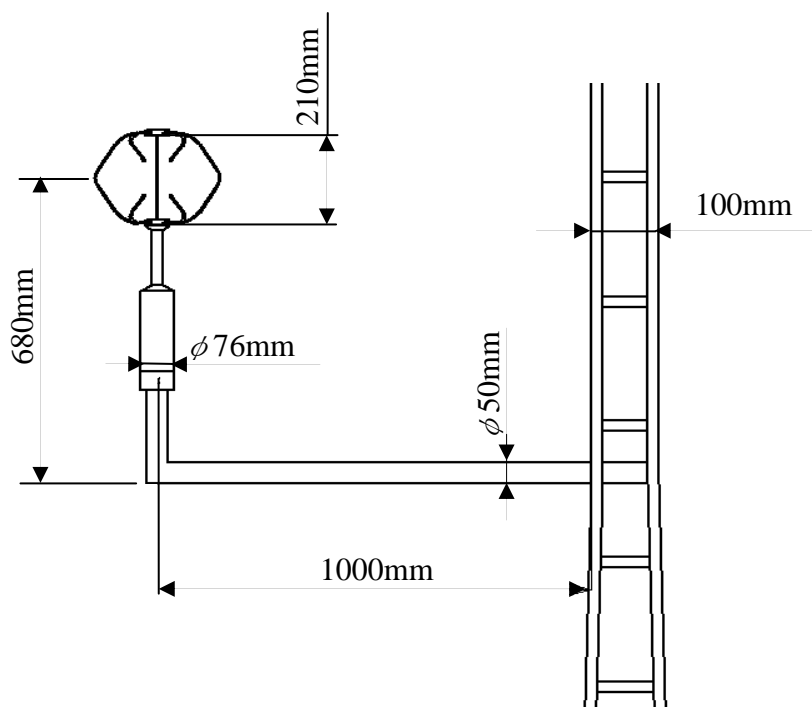


図 3.12 横分布測定マストの全体写真

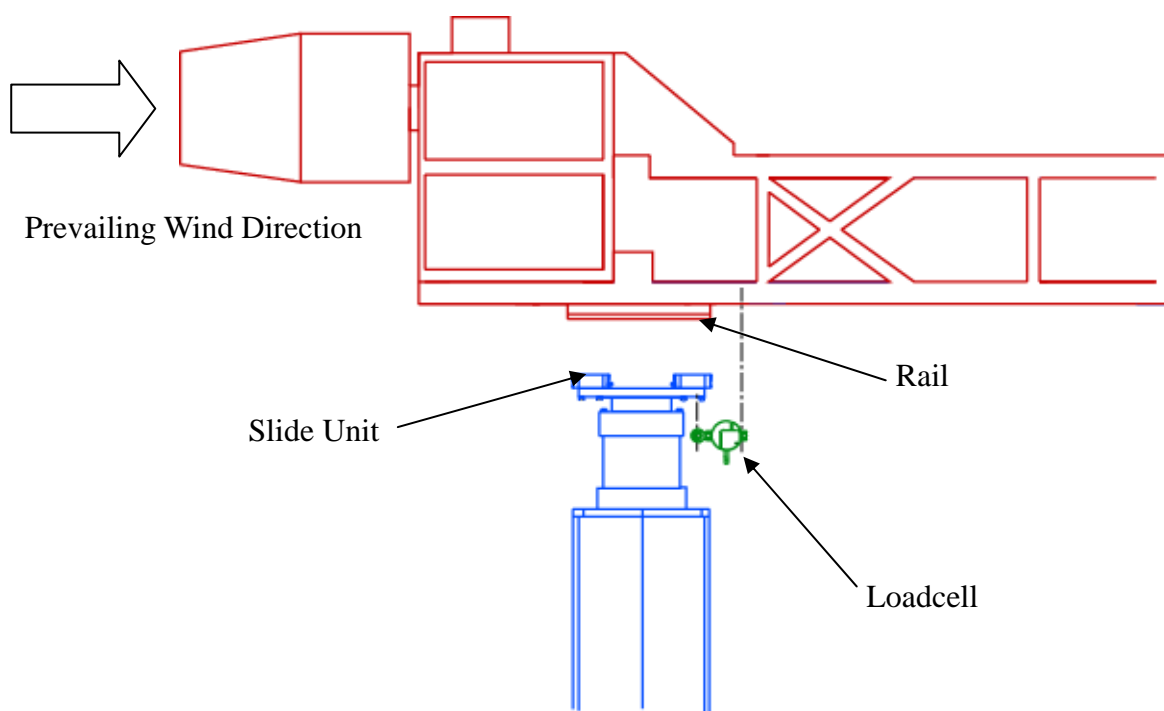


(a) SAT 上面図と各方位

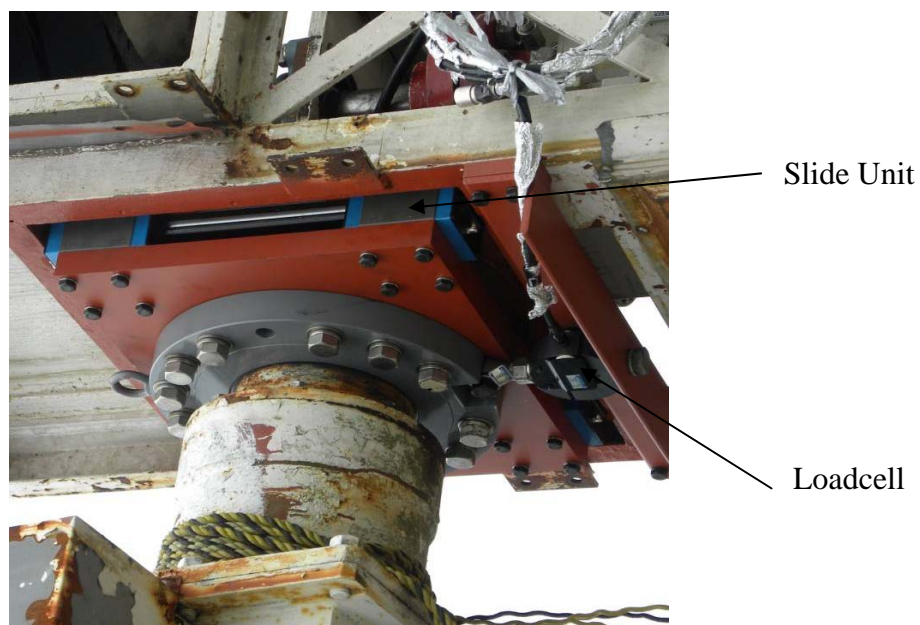


(b) 鉛直測定マストと SAT 拡大図

図 3.13 SAT 取り付け図



(a) ロータ軸推力測定装置概略



(b) ロータ軸推力測定装置側面写真

図 3.14 ロータ軸推力測定装置

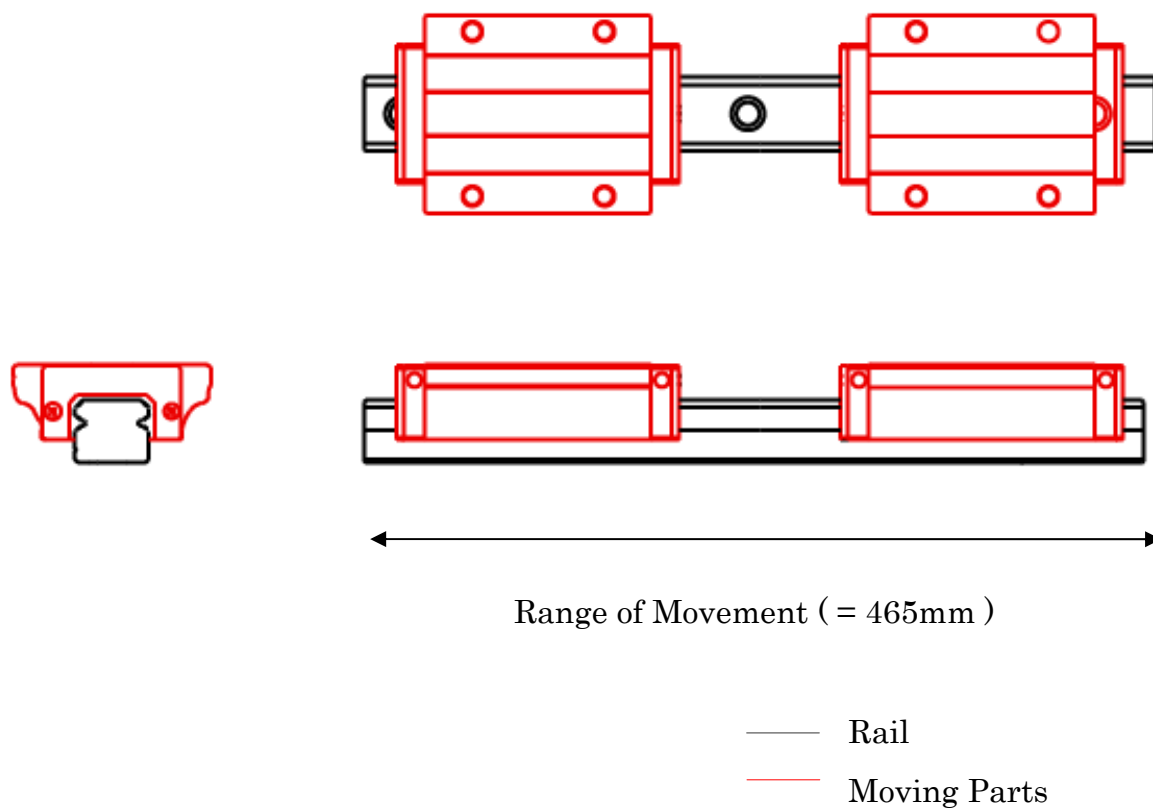


図 3.15 スライドユニット概略図

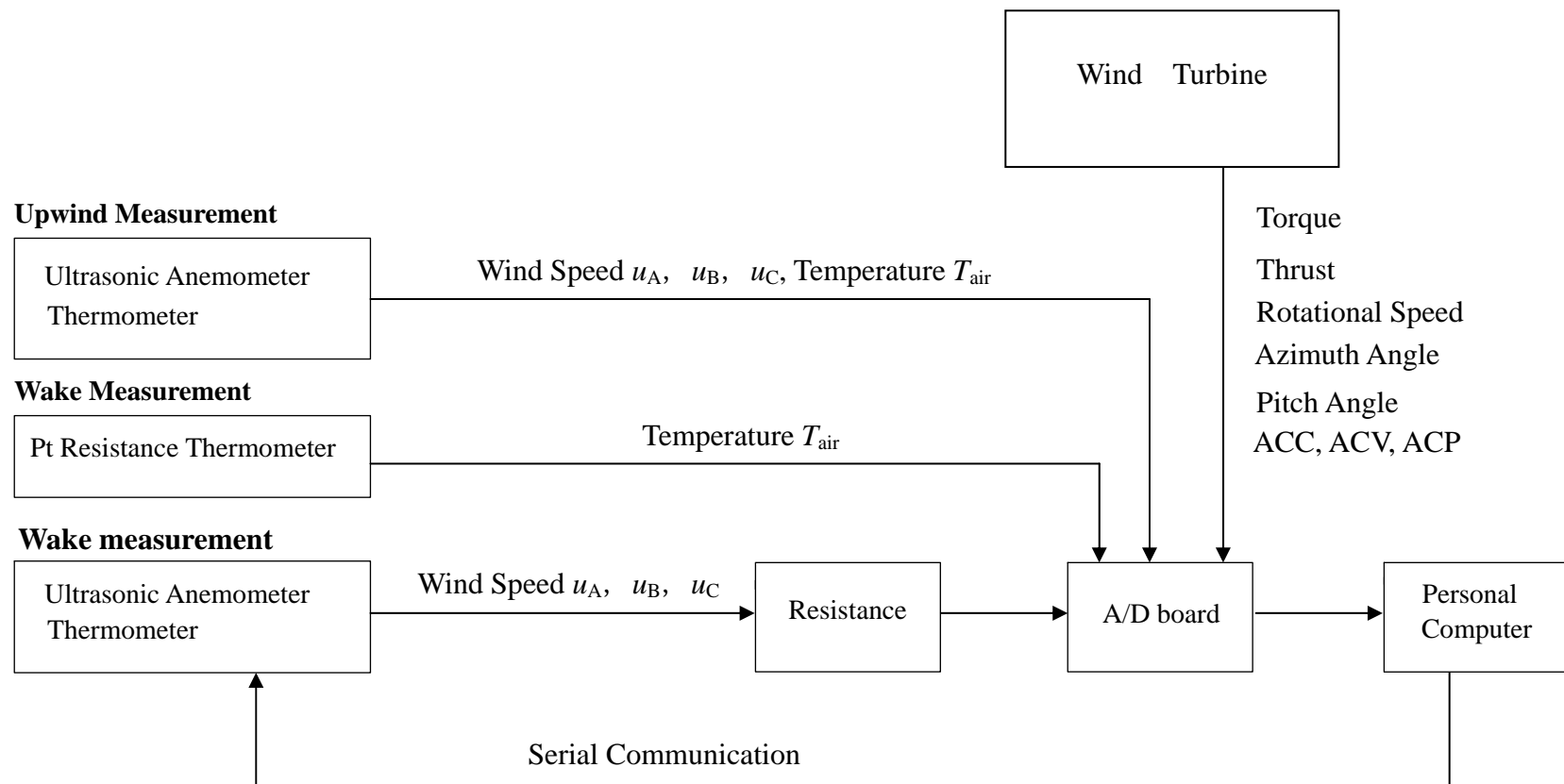
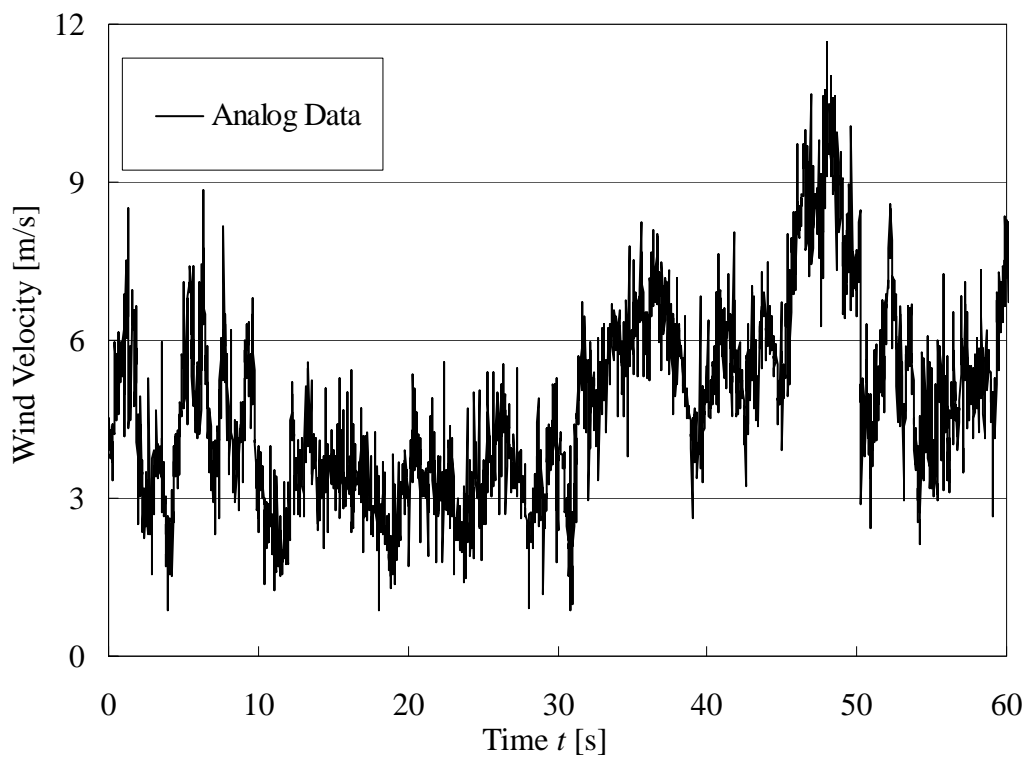
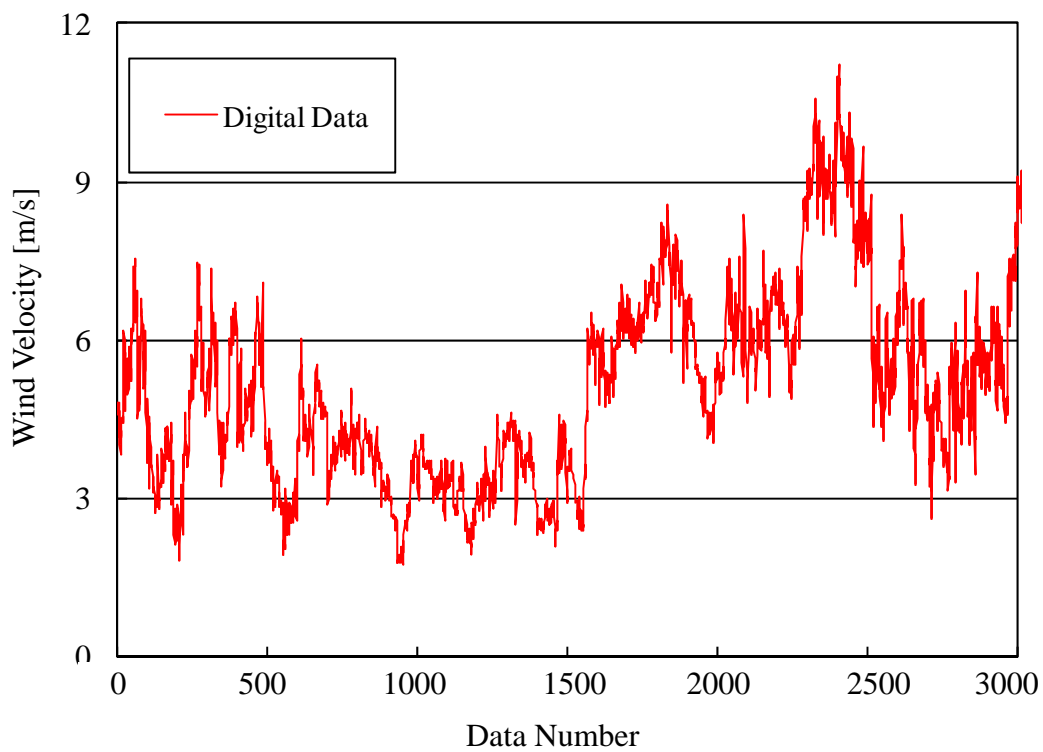


图 3.16 測定信号系統図





(a) アナログ出力



(b) デジタル出力

図 3.17 SAT の時系列測定値

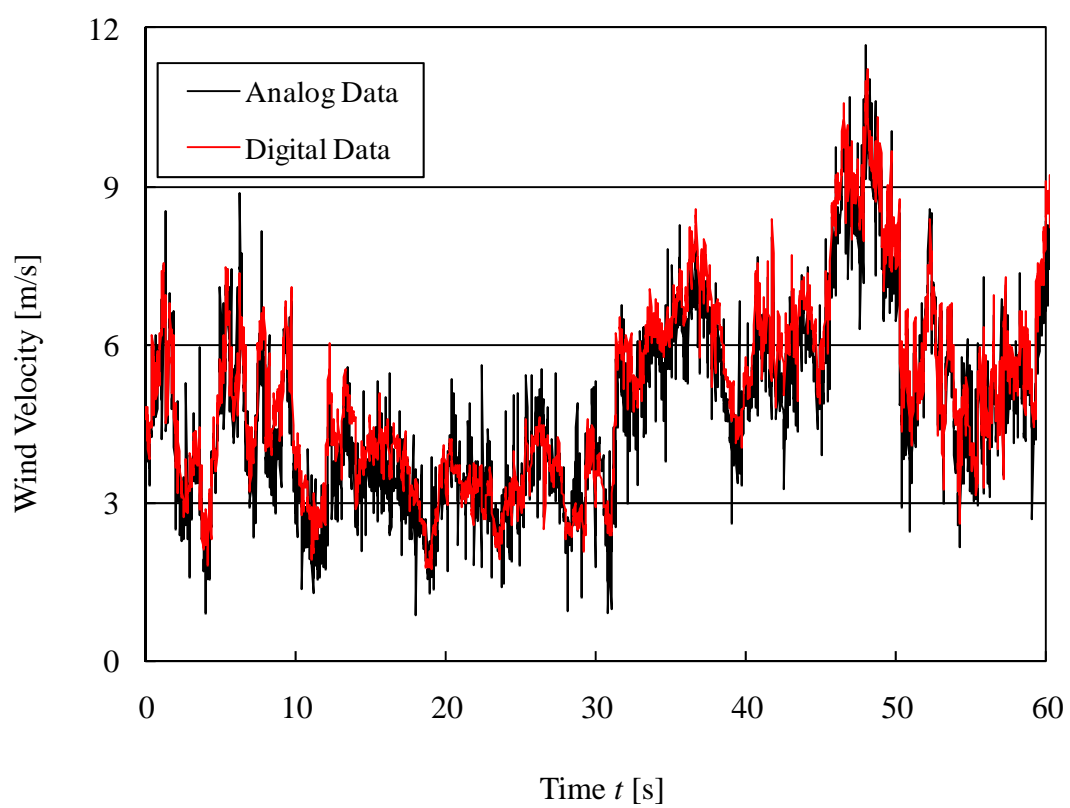


図 3.18 アナログ出力とデジタル出力の時系列測定値

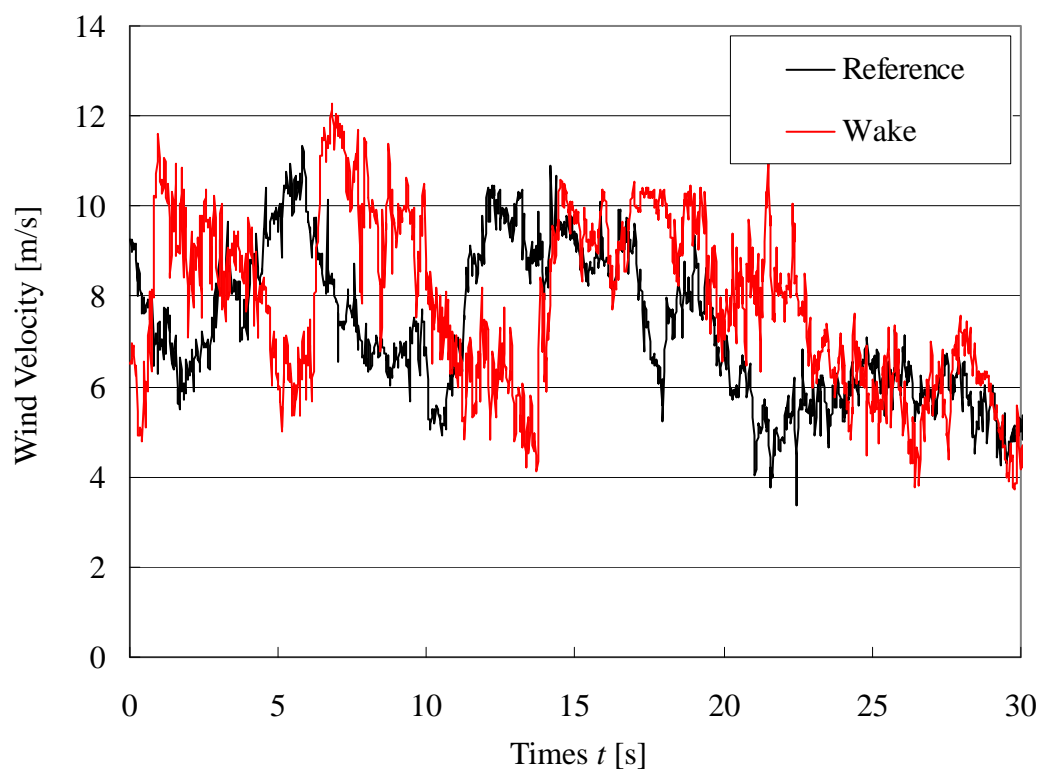


図 3.19(a) 基準風速と後流風速の時系列測定値

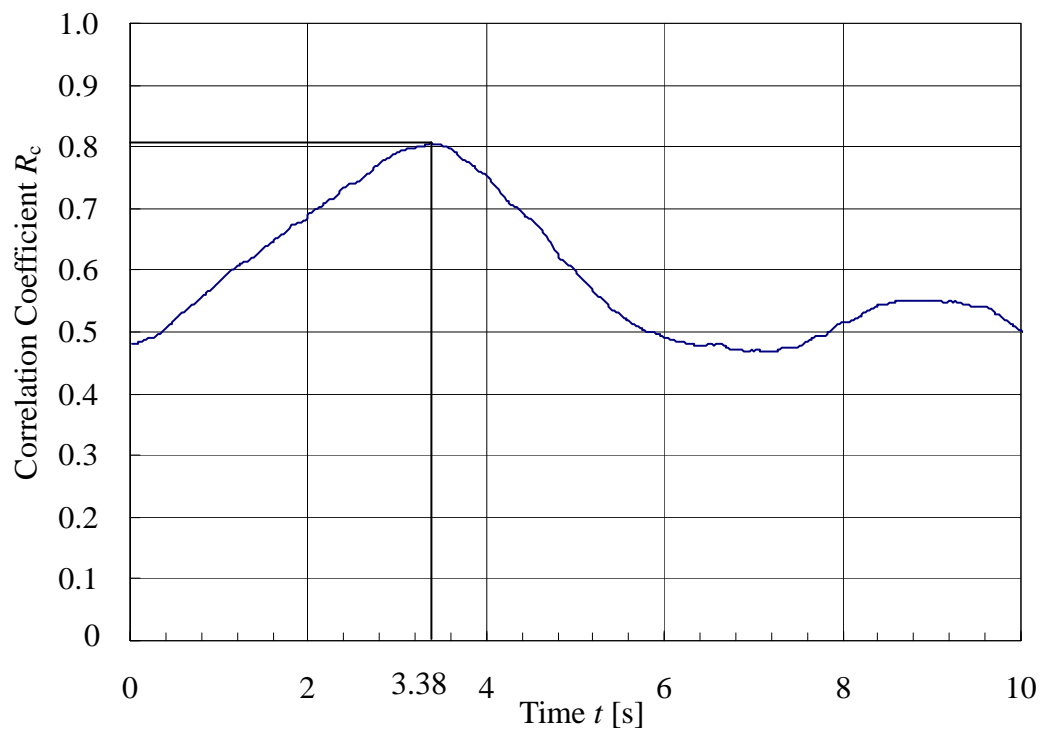


図 3.19 (b) 基準風速と後流風速の相関係数

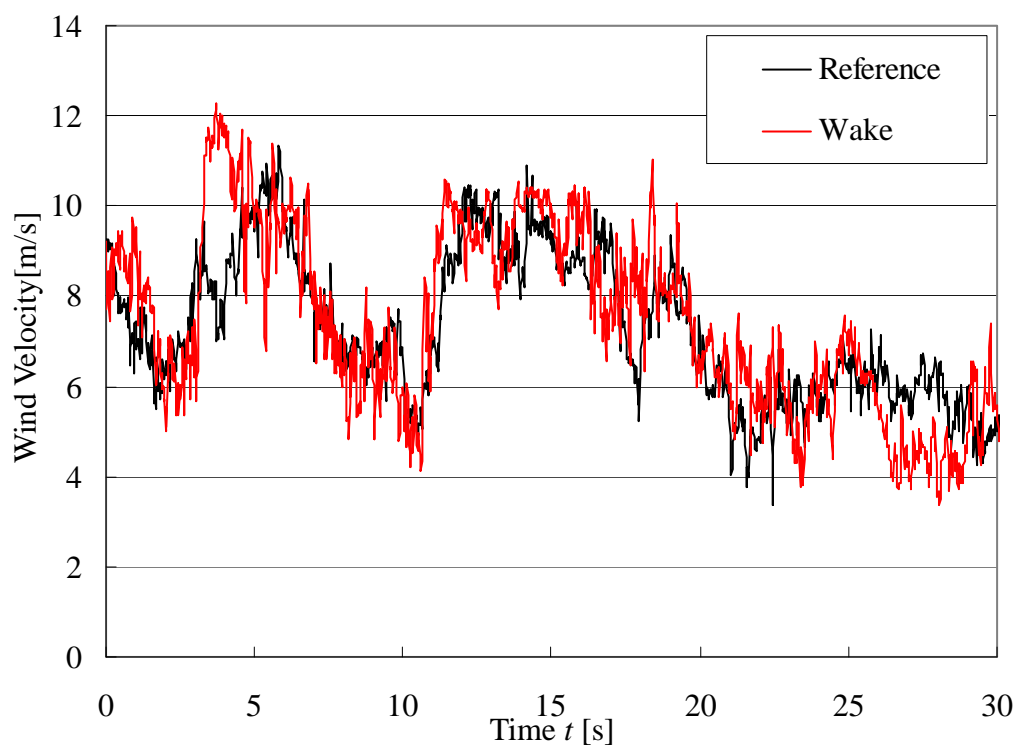


図 3.20 時間補正後の風速の時系列データ

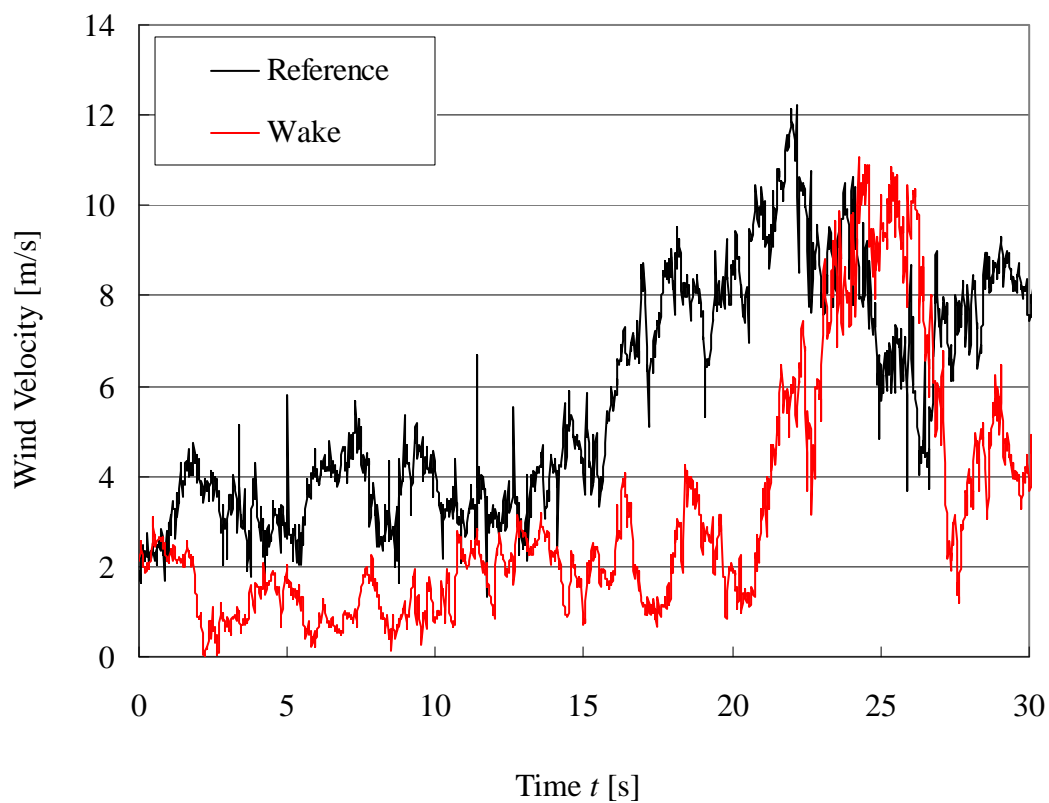


図 3.21(a) 基準風速と後流風速の時系列測定値

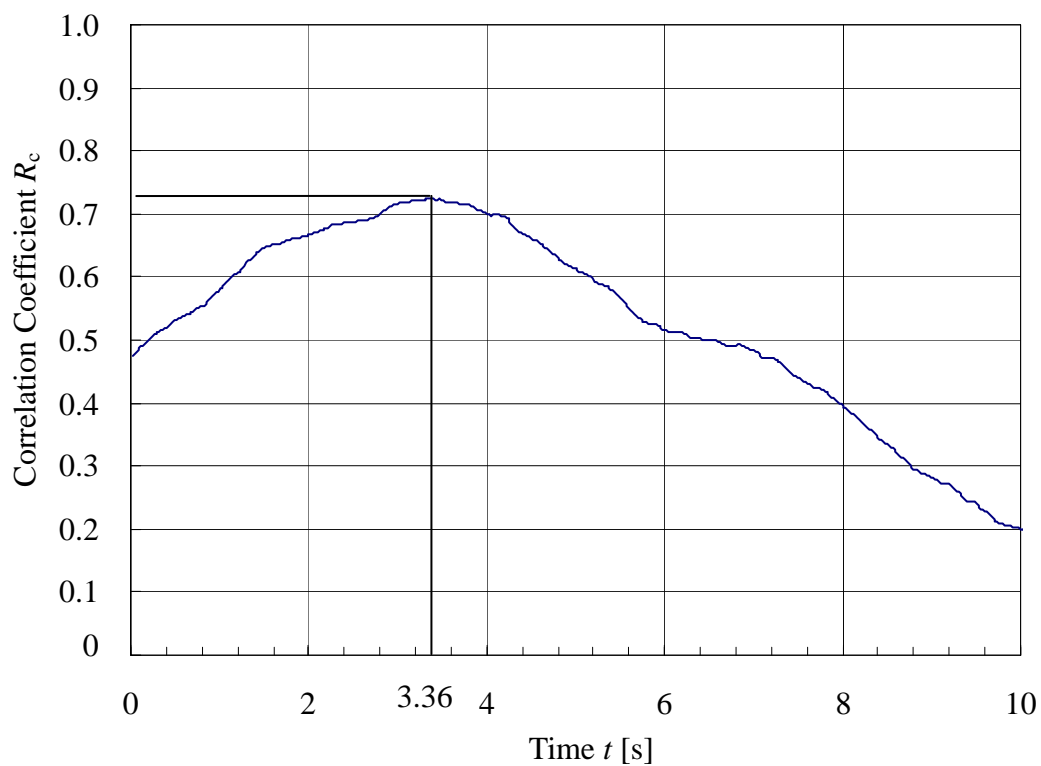


図 3.21(b) 基準風速と後流風速の相関係数

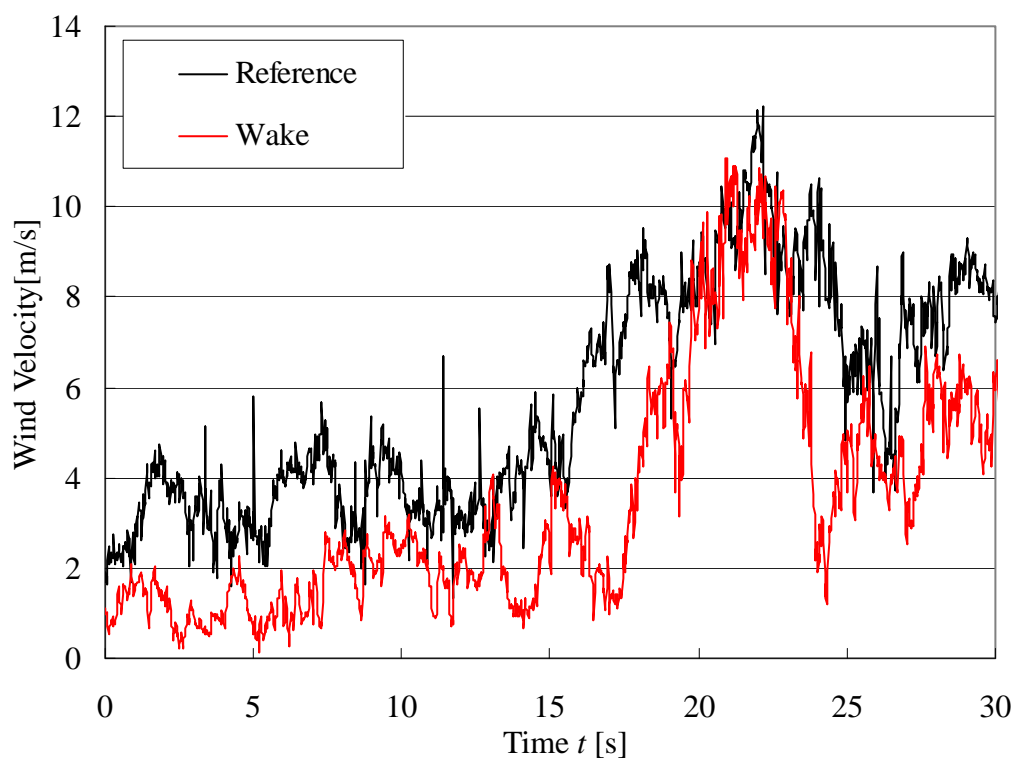


図 3.22 時間補正後の風速の時系列データ

## 第4章 供試風力タービン性能試験

### 4.1 定義式

#### 4.1.1 出力係数

風力タービンの性能は一般に出力係数で示される。出力係数  $C_p$  は風力タービンが風から得られる出力とロータ面への流入風の持つエネルギーの比で示される。出力係数の定義式を式(4.1)に示す。

$$C_p = \frac{Q\omega}{\frac{1}{2}\rho AU_{\text{ref}}^3} \quad (4.1)$$

ここで  $A$  は風力タービンの受風面積、 $Q$  はロータトルク、 $U_{\text{ref}}$  は風速、 $\omega$  はロータの回転角速度、 $\rho$  は空気密度である。本研究では、 $U_{\text{ref}}$  は基準風速のロータ軸方向成分として計算した。

#### 4.1.2 推力係数

推力係数  $C_t$  はロータ面の発生するロータ軸方向の力と流入風の動圧の比で示される。推力係数の定義式を(4.2)に示す。

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho AU_{\text{ref}}^2} \quad (4.2)$$

ここで  $T$  はロータ推力である。

#### 4.1.3 周速比

周速比  $\lambda$  はロータ翼端の周速と流入風速の比で示される。周速比の定義式を式(4.3)に示す。供試風力タービンの性能テストでは出力係数が最大となる周速比を調べた。

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_{\text{ref}}} \quad (4.3)$$

ここで  $R$  はロータ半径である。

### 4.2 供試風力タービン性能試験

最適な運転状態を実験条件の基準とするために、本研究では風力タービン後流

の観測を行う前に、フィールドにて供試風力タービンの性能試験を行った。

#### 4.2.1 実験条件

性能試験を行う際、風力タービンの運転条件はロータ回転数を 70rpm、翼端ピッチ角を 2°とした。また、自然風は風速、風向ともに非定常に変動する、風向がナセル方位から逸れ、ヨー偏角が大きくなる場合、風力タービンは斜め流入状態になり、出力は低下する。本研究では風力タービンロータが正対状態の下で考察を行うため、1 分間平均値でヨー偏角 5 度以内の測定データを抽出し考察に用いる。抽出されたデータは BIN 法により風速階級ごとに分類して平均化する。このときの風速階級の幅は 0.5m/s とした。

#### 4.2.2 出力性能曲線

図 4.1 は本実験で得られた出力係数曲線を示す。図は横軸に周速比 $\lambda$ 、縦軸に出力係数  $C_p$  を示す。 $C_p$  は $\lambda$ の増加にしたがい大きくなり、 $\lambda=6.7$  で最大出力係数  $C_p=0.35$  を示した後低下し、上に凸の分布を描く。翼素に対する流入風の角度は $\lambda$ の増加にしたがい低下し、翼素の迎角も低下する。 $\lambda<6.7$  の場合、 $\lambda$ の増加に従い翼素は失速状態から最適な迎角に近づき、大きな揚力を発生するようになる、また $\lambda>6.7$  の場合、 $\lambda$ の増加により迎角が低下し揚力発生は小さくなる。なお、供試風力タービンのロータ回転数は 70rpm 固定であるため、周速比は流入風速によって決まる。最適周速比 $\lambda=6.7$  を示す流入風速は  $U_{ref}=5.5\text{m/s}$  付近である。

#### 4.2.3 推力係数曲線

図 4.2 は本実験で得られた推力係数曲線を示す。図は横軸に周速比 $\lambda$ 、縦軸に推力係数  $C_t$  を示す。 $C_t$  は $\lambda$ の増加にしたがい大きくなる。最適周速比  $\lambda=6.7$  で、 $C_t$  は 0.70 程度である。

図 4.3 は流入風の乱流強度別の推力係数曲線を示す。図は横軸に周速比 $\lambda$ 、縦軸に推力係数  $C_t$  を示す。なお流入風の乱流強度は  $TI_{ref}=0.18, 0.21, 0.24$  について示してある。図より、いずれの乱流強度においても、 $C_t$  は $\lambda$ の増加に従い大きくなる。また、 $TI_{ref}$  の増加に従い、同一の $\lambda$ に対しての  $C_t$  は若干大きくなるが、ほぼ等しい値を示す。したがって、流入風の乱流強度の推力係数に与える影響は小さいと



いえる。



図 4.1 出力係数曲線

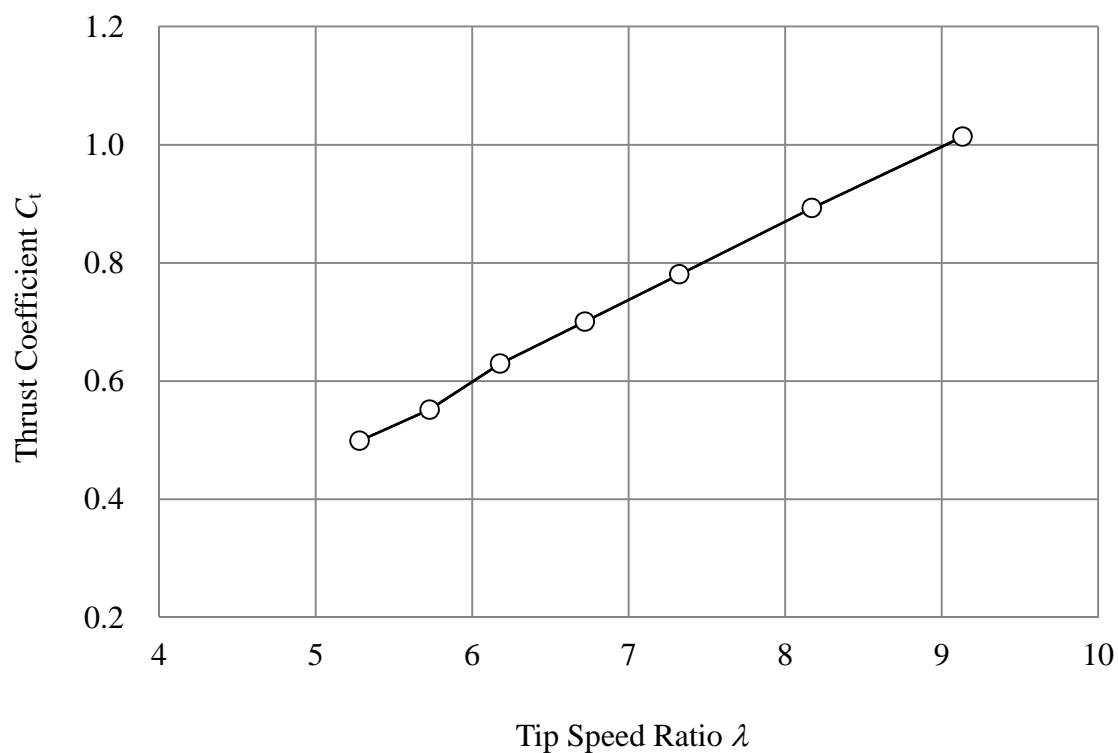


図 4.2 スラスト係数曲線

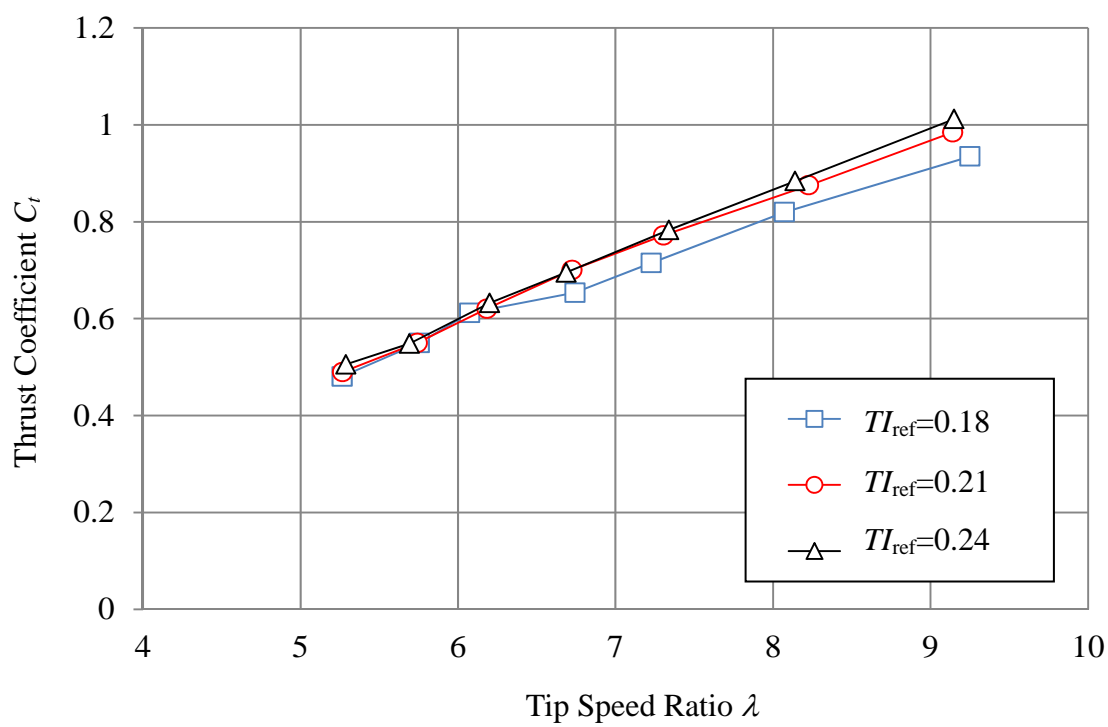


図 4.3 乱流強度別 推力係数曲線

## 第5章 非定常風況下における風力タービン後流内流れ

本研究では非定常況下における風力タービン後流を実験的に明らかにする。自然風は、風速風向ともに非定常に変化するので、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の風速測定を行った。また、流入風の特徴を表す風速、乱流強度のパラメータに注目し、それぞれのパラメータが風力タービン後流に与える影響について考察した。

### 5.1 定義式

#### 5.1.1 風速

風力タービンに流入する主流および後流は非定常である。そのため、測定した瞬時風速の絶対値のみから風力タービンが後流に与える影響を考察することは困難である。そこで、風力タービン後流の風速は基準風速計の風速  $U_{\text{ref}}$  を用い以下のように無次元化し評価する。

$$U_N = \frac{u_{\text{LF}}}{U_{\text{ref}}} \quad (5.1)$$

ここで  $U_N$  はロータ軸方向の無次元風速、 $u_{\text{LF}}$  は各測定位置のロータ軸方向速度である。

#### 5.1.2 乱流強度

流入風と風力タービン後流内流れ場の乱れを定量的に考察するための物理量としては風力発電の分野で一般に用いられている乱流強度を用いた。本研究で乱流強度は次のように表わされる。乱流強度は基準風速計の風速  $U_{\text{ref}}$  に対する各測定位置での風速標準偏差の比を用いて示す。乱流強度の定義式を式(5.2)に示す。

$$TI = \frac{\sigma_U}{U_{\text{ref}}} \quad (5.2)$$

ここで  $TI$  は各測定位置の乱流強度、 $\sigma_U$  は各測定位置の風速の1分間標準偏差である。

また、流入風の乱流強度に対する風力タービン後流の乱流強度の割合を表す指標として乱流強度比  $TI_{\text{ratio}}$  を用いて考察する。以下に定義式を示す。

$$TI_{\text{ratio}} = \frac{TI}{TI_{\text{ref}}} \quad (5.3)$$

ここで  $TI_{\text{ref}}$  は基準風速の乱流強度である。

## 5.2 風力タービンの後流内の流れ場

4.2.2 節より，供試風力タービンの最適周速比は  $\lambda=6.7$  であったため，本節では周速比  $\lambda=6.7$  に相当する基準風速  $U_{\text{ref}}=5.5$  [m/s] の測定結果を使用して，後流内の流れ場について考察する．考察に用いるデータは，実験で測定されたデータのうち基準風速の 1 分間平均値が  $5.5\pm 0.25$  m/s であり，かつ基準風向の 1 分間平均値がナセル方位から  $\pm 5^\circ$  以内であるデータを抽出した。

### 5.2.1 後流内軸方向速度の鉛直分布

風力タービン下流の流れ場を調べるため，鉛直分布測定マストを用いて風速分布を測定した。

図 5.1 は  $x/D=1.0$  での後流測定の写真である．表 5.1 は，測定された流入風速と乱流強度，およびデータセット数を  $x/D$  別に示す．表より， $x/D$  によらず流入風の平均風速はほぼ一定であり，乱流強度はいずれも 0.29 程度である。

表 5.1 測定された流入風速と乱流強度

		$\lambda=6.7$		
	$x/D$	Averaged $U_{\text{ref}}$	Averaged $TI_{\text{ref}}$	Data Count
Operating	1.0	5.44	0.29	94
	2.0	5.46	0.30	251
	3.0	5.44	0.29	110
	4.0	5.52	0.30	194
Parking	1.0	5.39	0.28	28
	2.0	5.44	0.28	130
	3.0	5.47	0.28	109
	4.0	5.47	0.29	34

図 5.2 は風力タービン停止時,  $U_{\text{ref}}=5.5[\text{m/s}]$ の各主流方向位置  $x/D$  におけるロータ軸方向速度の無次元風速  $U_N$  の鉛直分布を示す. 図より, いずれの  $x/D$  においても  $U_N$  は  $z/R$  の増加にしたがい大きくなる. これは大気境界層の速度勾配を捉えたものである. また, 各  $x/D$  で  $U_N$  の鉛直分布形状はほぼ等しい. すなわち本テストサイトの風速分布は, 測定に使用する範囲 ( $1.0 < x/D < 4.0$ ) において一様である. また風力タービン上流側についても同様と考えられ, 流入風の鉛直分布は図に示された速度分布とほぼ一致すると考えられる.

図 5.3 は風力タービン停止時および運転時のロータ軸方向速度の鉛直分布を示す. 図は横軸に無次元風速  $U_N$  および主流方向位置  $x/D$ , 縦軸に無次元高さ  $z/R$  を示し, それぞれの  $x/D$  で  $U_N$  の鉛直分布を示す. 図より, 風力タービン運転時の  $U_N$  は  $x/D$  の増加にしたがい, 風力タービン停止時の  $U_N$  に近づく.  $x/D=1.0$  で風力タービン運転時の  $U_N$  は,  $z/R=0$  (ハブ高さ) を中心に停止時に比べ減速しており,  $z/R=0$  で  $U_N=0.63$  である. この理由は, 風力タービンのエネルギー抽出により軸方向速度の減少が生じることおよびハブ高さ付近で最大のロータ横方向長さとなり風速変動による自由流れの流入が少ないことの 2 点によるためであると考えられる. また 運転中の  $U_N$  の最小値を示す高さは  $z/R=-0.5$  であり, これは本サイトの

大気境界層の速度分布と風力タービンによる減速の重ね合わせの結果と考えられる。また運転時に顕著な減速を示す  $z/R=0$  の  $U_N$  は  $x/D$  の増加にしたがって回復し、 $x/D=4.0$  で  $U_N=0.96$  になる。

図 5.4 は風力タービン停止時、運転時のロータ軸方向の乱流強度比の鉛直分布を示す。図は横軸に乱流強度比  $TI_{ratio}$  と主流方向位置  $x/D$ 、縦軸に無次元高さ  $z/R$  を示し、それぞれの  $x/D$  での  $TI_{ratio}$  の鉛直分布を示す。図より、風力タービン停止時の  $TI_{ratio}$  は  $z/R$  の減少にしたがって大きくなる。大気境界層の速度勾配は地表面に近づくにしたがって大きくなり、流れの中のせん断応力が増加する。したがって地表面近くの風速の標準偏差が増加し、乱流強度が大きくなったものと考えられる。運転時の場合、風力タービン下流の風速の標準偏差は停止時に比べ大きくなる。これは、ロータ回転の作用によるものといえる。風力タービン運転時の  $TI_{ratio}$  は  $x/D$  の増加にしたがって停止時の値に漸近していくが、 $x/D=4.0$  においても停止時より大きい。このため、風力タービン後流内の風速は  $x/D=4.0$  でほぼ回復するのに対し、乱流強度は十分に回復しない。

### 5.3 風力タービンの発生する推力が後流に与える影響

一般に風力タービンの後流内のロータ軸方向速度は推力係数が大きくなるに応じて減速するといわれている。本節ではロータ面の発生する推力が後流に与える影響について述べる。

#### 5.3.1 推力係数と後流内軸方向速度の主流方向の変化

推力係数による後流の影響を考察するため、ここでは取得した速度分布を推力係数に基づいて分類する。

図 5.5 は風力タービン運転時の  $z/R=0$  (ハブ高さ) におけるロータ軸方向速度の無次元風速と推力係数の関係を示す。図は横軸に推力係数  $C_t$ 、縦軸に無次元風速  $U_N$  を示し、各  $x/D$  の結果を示す。図より  $x/D=1.0, 2.0, 3.0$  においては、 $z/R=0$  (ハブ高さ) の高度の  $U_N$  は、 $C_t$  の増加にしたがって小さくなる。これは  $C_t$  の増加により風力タービンの後流の運動量が低下し、 $U_N$  が低下したといえる。また、 $x/D$  の増加にしたがって、ロータ推力の  $U_N$  に対する影響が小さくなる。これは、下流方向にいくにしたがって後流内の風速が外部の自由流れと混合され、ロータ推力と後

流速の関係が弱くなるためである。なお  $x/D=4.0$  の場合、推力係数の増加に対して  $U_N$  はほぼ一定となり、推力係数による後流の影響は  $x/D=4.0$  でみられなくなる。つまり風力タービンの運転状態は  $x/D=4.0$  になると後流内速度にほとんど影響しない。

### 5.3.2 推力係数と後流内軸方向速度の鉛直分布

図 5.6 は推力係数別の後流内ロータ軸方向速度の鉛直分布を示す。図は、横軸にロータ軸方向速度の無次元風速  $U_N$  と主流方向位置  $x/D$ 、縦軸に無次元高さ  $z/R$  を示す。図より  $z/R=1.0$  (ロータ上端) の  $U_N$  はいずれの推力係数  $C_t$  においても、いずれの  $x/D$  でもほぼ等しくなる。これは、 $z/R=1.0$  の  $U_N$  は風向変動により、自由流れを含みやすく、後流のみを捉えることができなかつたためであると考えられる。 $z/R=0.5, -0.5, -1.0$  の  $U_N$  は図 5.5 で示した  $z/R=0$  と同様に、 $C_t$  の増加にしたがい小さくなる。なお  $x/D=4.0$  の  $U_N$  は、各  $z/R$  でいずれの  $C_t$  についてもほぼ等しい。風力タービン後流内の風速は  $C_t$  の増加にしたがいロータ面近傍で小さくなるが、下流方向にいくにしたがい  $C_t$  の影響が小さくなる。

### 5.3.3 後流内ロータ軸方向速度の予測

次式を用いて、運動量の法則から後流内の風速を予測する。

$$\rho A_0 V_0^2 = T + \rho A_1 V_1^2 \quad (5.4)$$

$A_0, V_0$  は、それぞれ風力タービン上流の流管の断面積、風速を示し、 $A_1, V_1$  は、それぞれ各主流方向位置の流管の断面積、風速を示す。 $A_1$  は風力タービン後流の速度欠損領域範囲  $D_b$  を用いて求める。 $D_b$  は後述する Frandsen の後流モデルを用い求めることができ、後流の拡大率を表わす定数  $\beta_0$  は 0.20 とした。予測した無次元風速と測定による無次元風速 ( $z/R=0$ ) を表 5.2 に示す。



表 5.2 無次元風速の予測値

	$C_t=0.50$		$C_t=0.70$	
	Calculation	Measurement	Calculation	Measurement
$x/D$	$U_N$	$U_N$	$U_N$	$U_N$
1.0	0.77	0.68	0.58	0.58
2.0	0.85	0.83	0.77	0.77
3.0	0.89	0.93	0.84	0.90
4.0	0.92	0.99	0.88	0.96

表より、 $C_t=0.70$  の場合、推力から求めた無次元風速  $U_N$  の予測値は  $x/D=1.0, 2.0$  で測定値とほぼ一致し、 $x/D=3.0, 4.0$  で測定値に比べ小さくなると考えられる。これは、 $U_N$  の測定値は風向変化による自由流れを含み大きくなったためである。 $C_t=0.50$  の場合、 $U_N$  の予測値は  $x/D=1.0, 2.0$  で測定値よりも若干大きく、 $x/D=3.0, 4.0$  測定値に比べ若干小さくなる。 $C_t=0.50$  の場合、流入風の平均風速は  $7.0\text{m/s}$  程度であり、測定値はガスト（突風）を含む可能性がある。ガストを含む測定値は大きな速度差を持つ。ガストが発生する前後の流入風速  $U_{\text{ref}}$  はガストの風速に比べ小さくなる。4.2.3 より  $C_t$  と  $\lambda$  は比例関係にあり、本実験でロータ回転数は一定のため、 $U_{\text{ref}}$  が小さいとき  $C_t$  は増加する。このため、ガストが発生する前後の流入風に相当する後流はガスト時の後流に比べて大きく減速する。測定値はガストが発生する前後の大きく減速した後流を含み、 $x/D=1.0$  で予測値よりも小さくなったと考えられる。

#### 5.3.4 後流内軸方向速度の横方向分布

後流の拡大の様子を明らかにするために、風力タービンの後流内ロータ軸方向速度を鉛直分布測定マストと横方向分布測定マストを用いて測定した。2本のマストを  $x/D=2.0$  に設置し、本則測定では、 $z/R=0$  の高さにおいて横方向分布測定マストの測定高度は  $z/R=0$  とする。したがって、横方向の測定位置は  $y/R=0, 0.5, 1.0, 1.5$  の4点である。

図 5.7 は設置した両マストを上流側から撮影した写真である。表 5.3 は、横方向分布の考察に用いる測定データの推力係数、基準風速、乱流強度とデータ数を示

す。

表 5.3 測定された流入風速と乱流強度

$C_t$	Averaged $U_{ref}$	Averaged $TI_{ref}$	Data Count
0.50	7.03	0.25	24
0.70	5.45	0.26	63

図 5.8(a), (b)は  $x/D=2.0$  における風力タービン停止時, 運転時におけるロータ軸方向速度の横方向分布を示す. 横軸は横方向位置  $y/R$ , 縦軸はロータ軸方向速度の無次元風速  $U_N$  である. 図 5.8(a)より, 風力タービン停止時の  $U_{ref}=5.5, 7.0[m/s]$  における各測定点の  $U_N$  は約 0.95 を示し,  $y$  方向にほぼ一様である. したがって  $U_{ref}$  による  $U_N$  の影響は小さい. 図 5.8(b)より, 風力タービン運転時の後流内風速の  $U_N$  は,  $C_t$  の増加にしたがい低下する. また,  $U_N$  は  $y/R$  の増加にしたがい大きくなる.  $y/R=0$  に比べて  $y/R=0.5$  の  $U_N$  はわずかに小さい.

図 5.9(a), (b)に半径方向の揚力分布, 抗力分布を示す. 図 5.9(a)の横軸に半径方向位置  $r/R$ , 縦軸に揚力  $F_L$  を示し, 図 5.9(b)の横軸に  $r/R$ , 縦軸に抗力  $F_D$  を示す.  $F_L, F_D$  は各翼形状で揚抗比が最大であると仮定して求めた. 図より  $F_L, F_D$  は  $r/R$  の増加にしたがい増加し,  $r/R=0.85$  で最大となる. このため, 推力は翼根側で小さく,  $r/R=0.85$  で最大となると考えられ,  $y/R=0.5$  の  $U_N$  はロータ中心に比べ小さくなる.  $C_t=0.70$  ( $\lambda=6.7$ ) の  $U_N$  は  $y/R=1.0$  で 0.81 を示し,  $y/R=1.5$  で 0.88 であり, それぞれの  $y/R$  で風力タービン停止時と比べて小さくなる. この理由として風力タービンの後流は下流にいくにしたがい拡大することと, 後流は主流の風向変化によって, 風力タービンに対する相対位置が変化することが考えられる. 風向変動のある場合, 平均値をとったときには見かけ上後流範囲は拡大するため,  $y/R=1.5$  で停止時よりも小さい  $U_N=0.88$  となったと思われる.

図 5.9(a), (b)は風力タービン停止時, 運転時における乱流強度比の横方向分布を推力係数  $C_t$  別に示す. 図は横軸に横方向位置  $y/R$ , 縦軸に乱流強度比  $TI_{ratio}$  を示す. 図 5.9(a)より, 風力タービン停止時の  $TI_{ratio}$  はいずれの風速についても  $y/R$  方向に一様であり, その値は約 1.1 である. 図 5.9(b)より, 風力タービン運転時の

$TI_{\text{ratio}}$  は、風力タービン停止時に比べ各  $y/R$  およびそれぞれの  $C_t(U_{\text{ref}})$  で大きくなる。また、 $TI_{\text{ratio}}$  はロータ軸中心から水平方向へ離れるにしたがい増加する。 $TI_{\text{ratio}}$  は  $C_t$  の増加にしたがい大きくなり、とくに  $y/R=1.0$  付近で大きくなる。これは、風力タービン後流と自由流れの境界で流れが強いせん断を持ち、大きな乱れをもつためと考えられる。

#### 5.4 風力タービン後流の拡大

風力タービン後流に関する研究は欧州で盛んに行われており、いくつかの後流モデルが提案されている。本節では、フィールド実験値と Frandsen によって提案された後流モデル<sup>(3)</sup>の比較を行う。

##### 5.4.1 Frandsen の後流モデル

Frandsen は図 5.10 のような単純化された後流モデルを提案している。風力タービン後流の速度欠損領域の範囲  $D_b$  はロータ直径  $D$  を用いて次式で示される。

$$\frac{D_b}{D} = 1 + \beta_0 \cdot s \quad (5.5)$$

ここ  $s$  は風力タービンからの無次元主流方向位置  $x/D$ 、 $\beta_0$  は後流の拡大率を表わす定数である。なお、 $\beta_0$  は風力タービン周囲流れの乱流強度の増加にしたがい大きくなる。通常、 $\beta_0$  は 0.15~0.20 を用いる。単純化された風力タービン後流の風速を示す式はロータ周りの検査体積の運動量の平衡から求めることができる。式(5.5)は風力タービン後流内の風速が主流方向位置で決まり、風力タービン後流内の横方向位置によらず一定であると仮定している。速度欠損と風速には以下のような関係がある。

$$U_b = U_0 - \frac{1}{2} U_0 C_t \left( \frac{D}{D_b} \right)^2 \quad (5.6)$$

ここで、 $U_0$  は自由流れ中の風速、 $U_b$  は速度欠損域の風速、 $C_t$  は推力係数である。式(5.5)と式(5.6)を用いると、無次元風速  $U_N$  は以下の式のように表される。

$$U_N = \frac{U_b}{U_0} = 1 - \frac{C_t}{2(1 + \beta_0 \cdot s)^2} \quad (5.7)$$

#### 5.4.2 瞬時データを用いた風力タービン後流内の速度の横方向分布

前節では、主流の風向変化による後流の位置変化のため、後流の範囲を明確にすることができなかった。本実験の測定点は風洞実験に比べ少ないため、後流の詳細な範囲を、1分間平均値を用いて把握することが困難であると考えられる。そのため、瞬時データを用い、瞬時風向による測定点の風力タービンに対する相対位置を算出することで、詳細な後流範囲の検討を行う。

図 5.11 は例としてヨー偏角  $3.5^\circ$  のとき  $x/D=2.0$  に設置した SAT と風力タービンの相対位置を示す。図よりヨー偏角  $3.5^\circ$  で SAT は  $r/R=-0.25$  の下流に位置する、したがって、ヨー偏角による相対位置の補正を行うことで横方向の速度分布を詳細に考察できる。なおヨー偏角のある場合、風力タービンは斜め流入状態となるが、小さなヨー偏角で斜め流入の場合でも後流は変化しないものとして考察を行う。本考察に用いる測定データは 5 秒間で平均化された  $z/R=0$  (ハブ高さ) での後流データを用い、推力係数  $C_t=0.50, 0.70$  に相当する周速比  $\lambda=5.2, 6.7$  のデータを解析した。

図 5.12(a), (b) に  $x/D=1.0$  の位置で各推力係数  $C_t$  における軸方向速度の無次元風速  $U_N$  の横方向分布を示し、図 5.13(a), (b) に  $x/D=2.0$  で各  $C_t$  における  $U_N$  の横方向分布を示す。図は、横軸にみかけ上の横方向位置  $y'/R$ 、縦軸に無次元風速  $U_N$  を示す。図 5.12 および図 5.13 はそれぞれ測定データの散布図と  $y'/R$  を 0.10 間隔で BIN 平均した  $U_N$  を示す。図 5.12(b) より、 $x/D=1.0$ 、 $C_t=0.70$  の  $U_N$  はロータ中心で下に凸の分布を描き、低下しており、 $|y'/R| \approx 1$  で自由流れの風速に近づく。したがって、本手法による  $U_N$  は後流分布を捉えていると考えられる。また図 5.13(a), (b) より、 $x/D=2.0$  の  $U_N$  は  $y'/R > 0$  の範囲で  $y'/R$  についてほぼ一定値を示す。これは上流にある丘が影響しているものと考えられる。 $y'/R < 0$  の範囲で  $x/D=2.0$  の  $U_N$  は図 5.12(b) と同様の傾向を示す。図 5.12(a) より  $x/D=1.0$ 、 $C_t=0.50$  の  $U_N$  はデータの不足により後流分布を捉えられていない。図 5.12, 5.13 より本データ整理方法により後流内の無次元風速の水平分布を表すことができると考えられる。本結果を用いて最小二乗法により  $U_N$ 、 $D_b$  を求める。

#### 5.4.3 後流モデルとフィールド実験値の比較

図 5.14 と図 5.15 は  $y'/R$  を 0.10 間隔で BIN 平均した無次元風速の水平分布を示

す。図は、横軸に横方向位置  $y'/R$ ，縦軸に軸方向速度の無次元風速  $U_N$  を示す。表 5.4 は本結果による  $U_N, D_b$  を示す。なお、データ数が少ない  $x/D=1.0, C_t=0.50$  についてはモデルの設定を行うことはできなかった。

表 5.4 無次元風速と速度欠損域

	$x/D=1.0$		$x/D=2.0$	
	$U_N$	$D_b/D$	$U_N$	$D_b/D$
$C_t=0.50$	—	—	0.73	1.40
$C_t=0.70$	0.61	1.05	0.72	1.54

5.2 節より風力タービンの後流の  $U_N$  は  $x/D$  の増加にしたがい大きくなる。また 5.3 節より  $x/D=2.0$  で風向変動にともなう見かけ上の後流の拡大がみられた。図 5.14 と図 5.15 よりフィールド実験値に基づき係数を決定した後流モデルは  $x/D$  の増加にしたがい、 $D_b$  および  $U_N$  の増加を示す。本結果より速度欠損領域の拡大率を示す  $\beta_0$  は  $x/D=1.0$  で 0.05， $x/D=2.0$  で 0.27 となる。

図 5.17 は後流の速度欠損域範囲を示す。横軸に主流方向位置  $x/D$ ，縦軸に横方向位置を示す。Frandsen の後流モデルで  $\beta_0$  は一定であるのに対して本研究では  $x/D=1.0\sim 2.0$  の間で大きくなる。したがって  $x/D=1.0\sim 2.0$  で後流の拡大率が大きくなる。



図 5.1  $x/D=1.0$  での後流測定

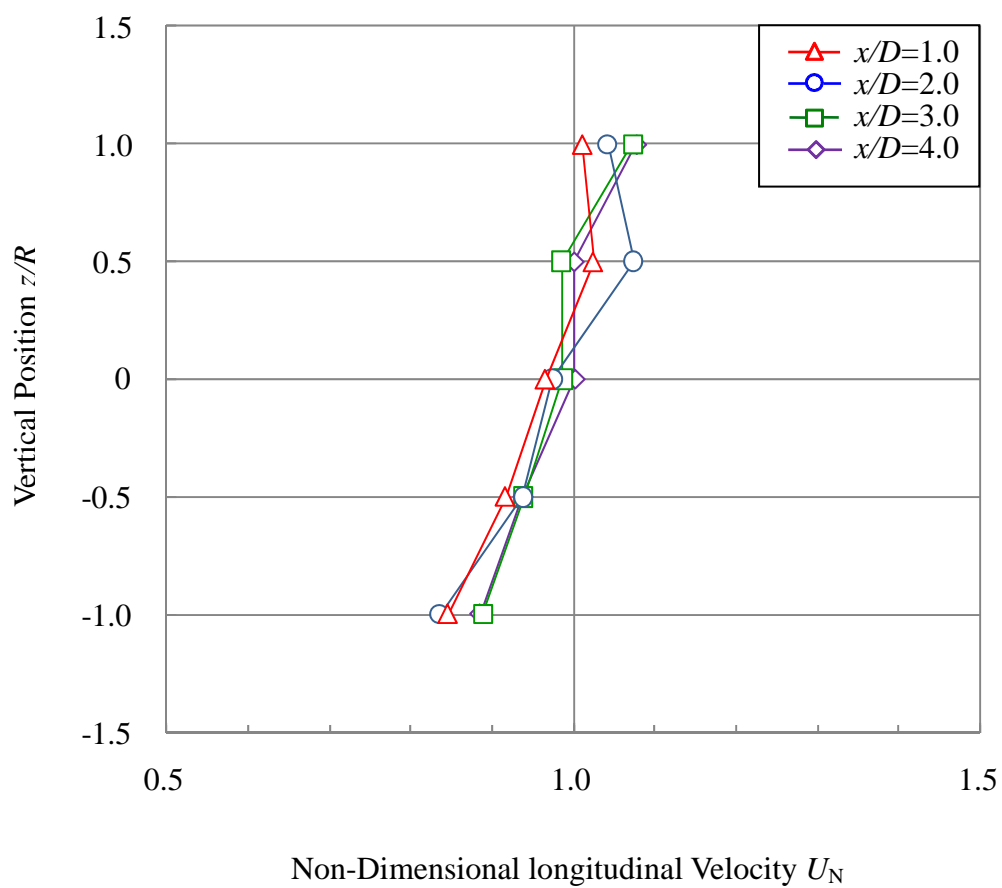


図 5.2  $\lambda=6.7$  ( $U_{\text{ref}}=5.5\text{m/s}$ ) のロータ軸方向速度の鉛直分布

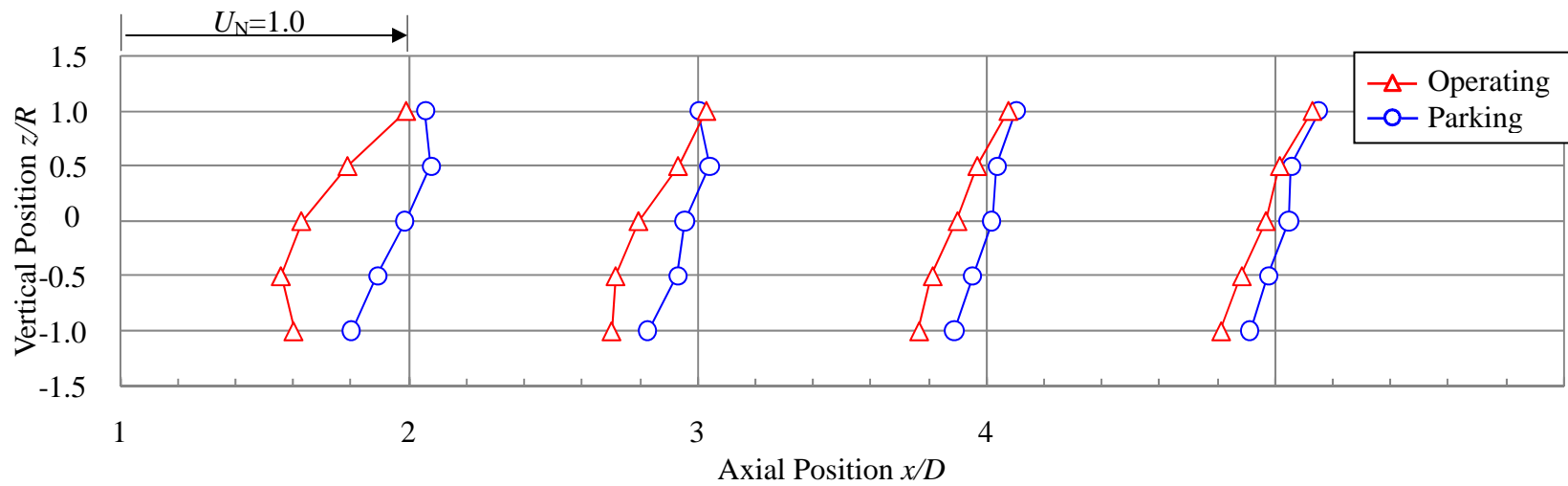


図 5.3 ロータ軸方向速度無次元風速の鉛直分布( $U_{ref}=5.5\text{m/s}$ )

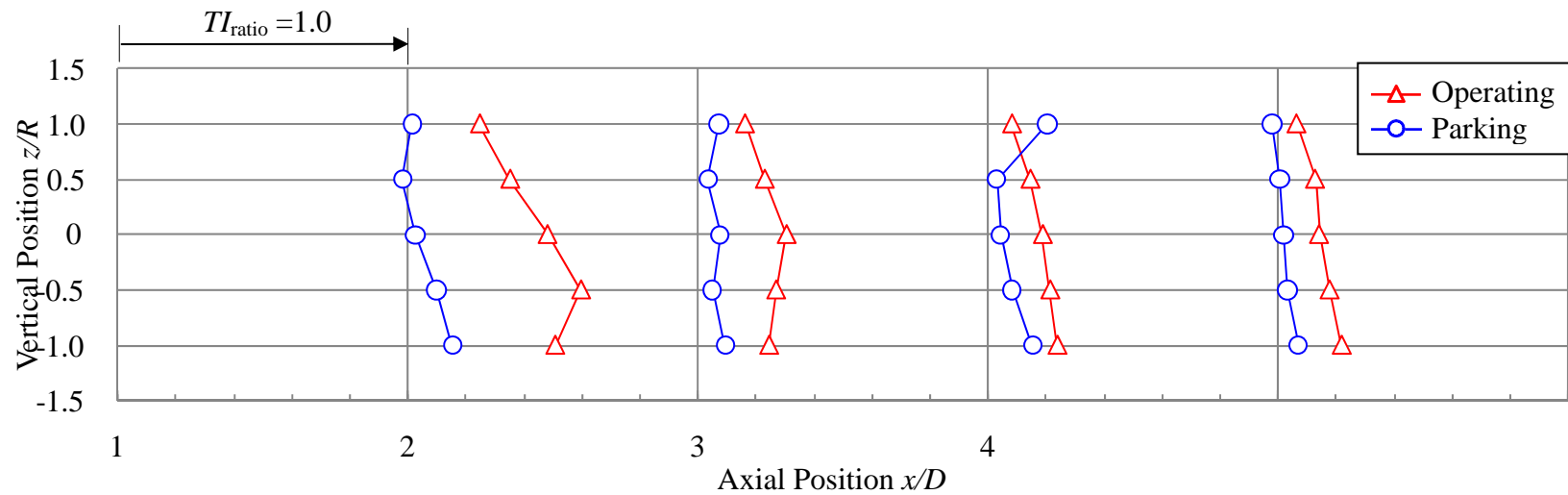


図 5.4 ロータ軸方向乱流強度比の鉛直分布( $U_{ref}=5.5\text{m/s}$ )



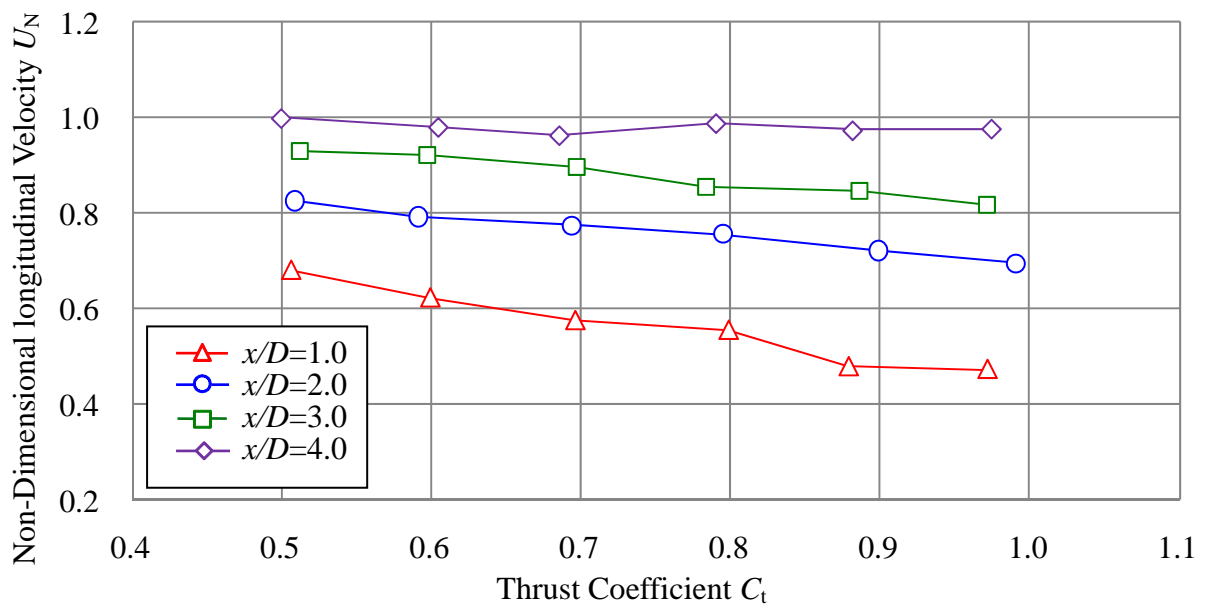


図 5.5 ロータ軸方向速度無次元風速と推力係数の関係( $z/R=0$ )

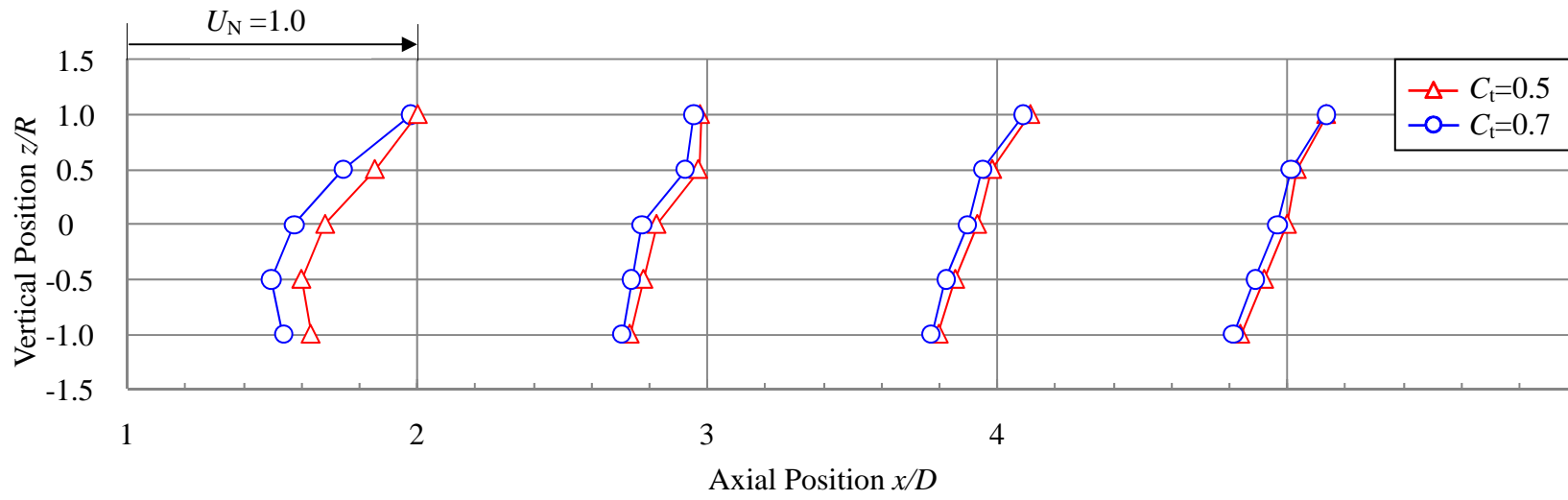
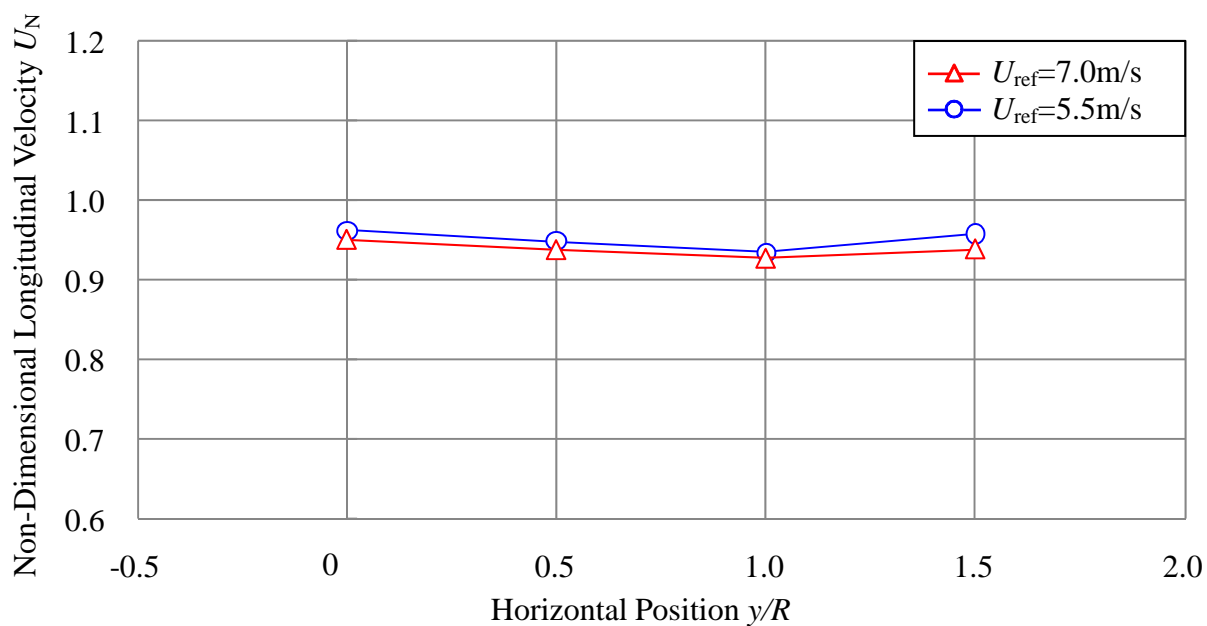


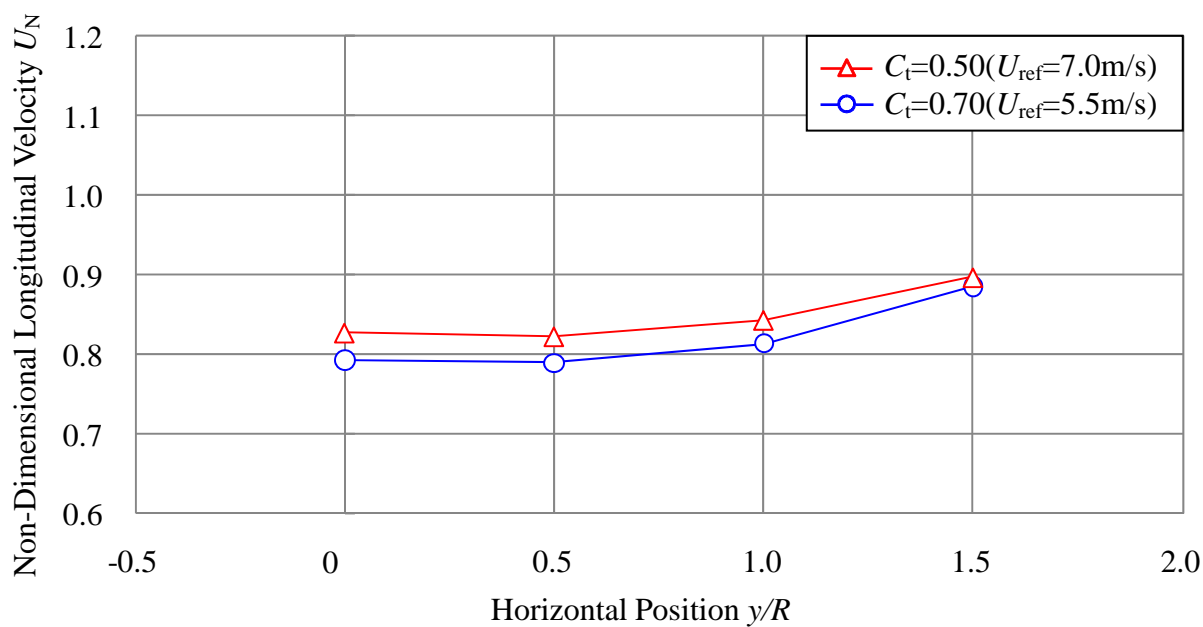
図 5.6 推力別ロータ軸方向無次元風速の鉛直分布



図 5.7 2 マストの同時測定

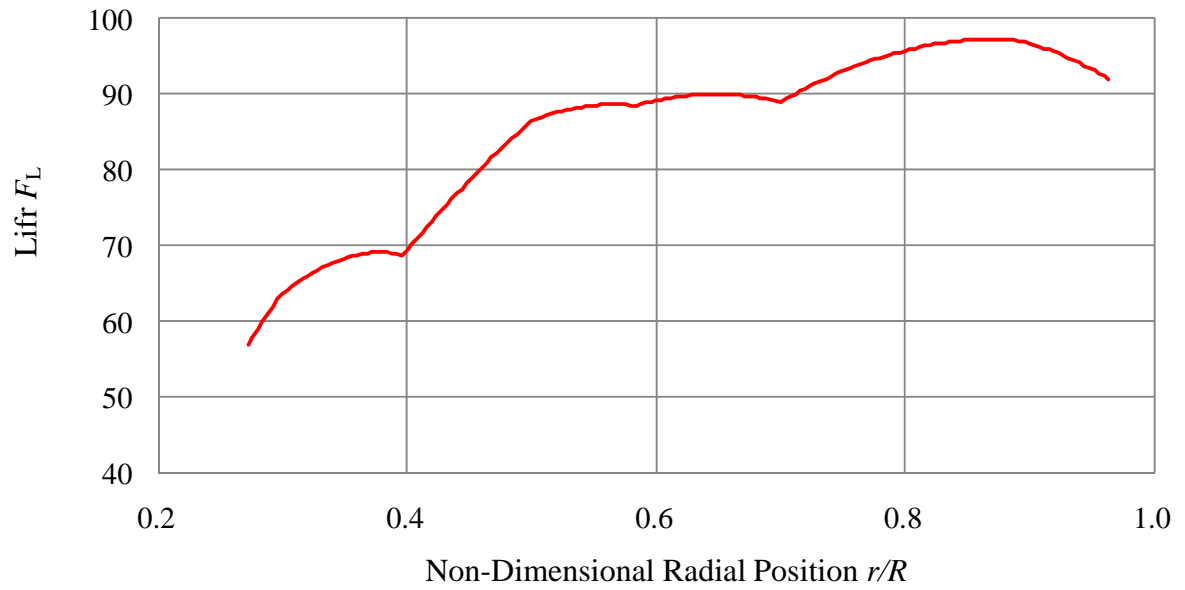


(a) 風力タービン停止時

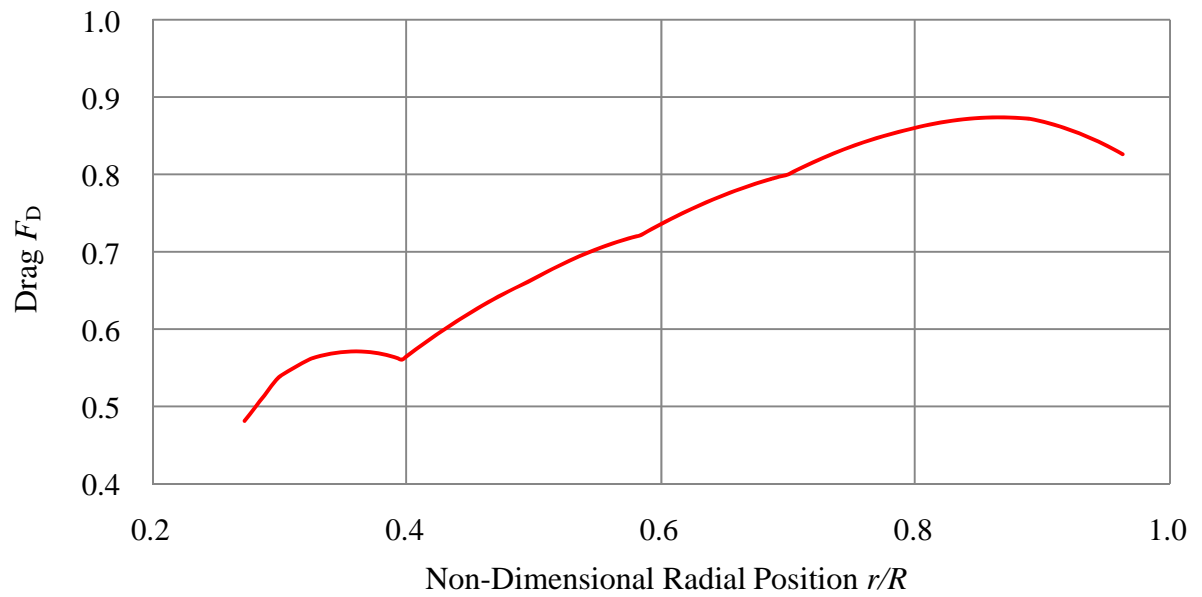


(b) 風力タービン運転時

図 5.8 ロータ軸方向速度無次元風速の水平分布 ( $x/D=2.0, z/R=0$ )

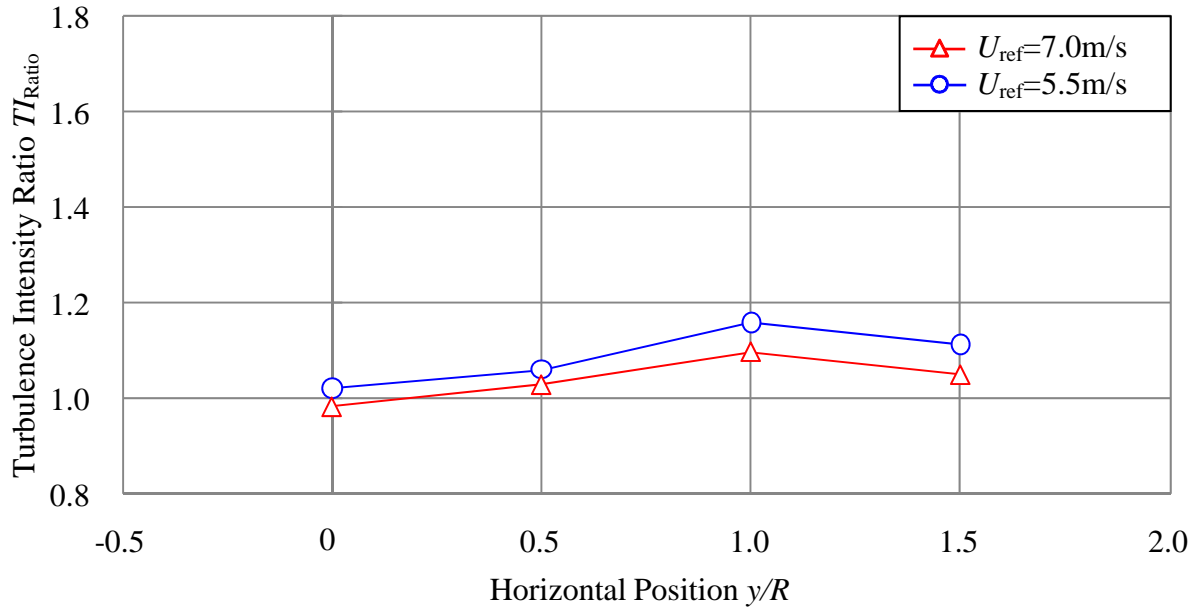


(a) 揚力曲線

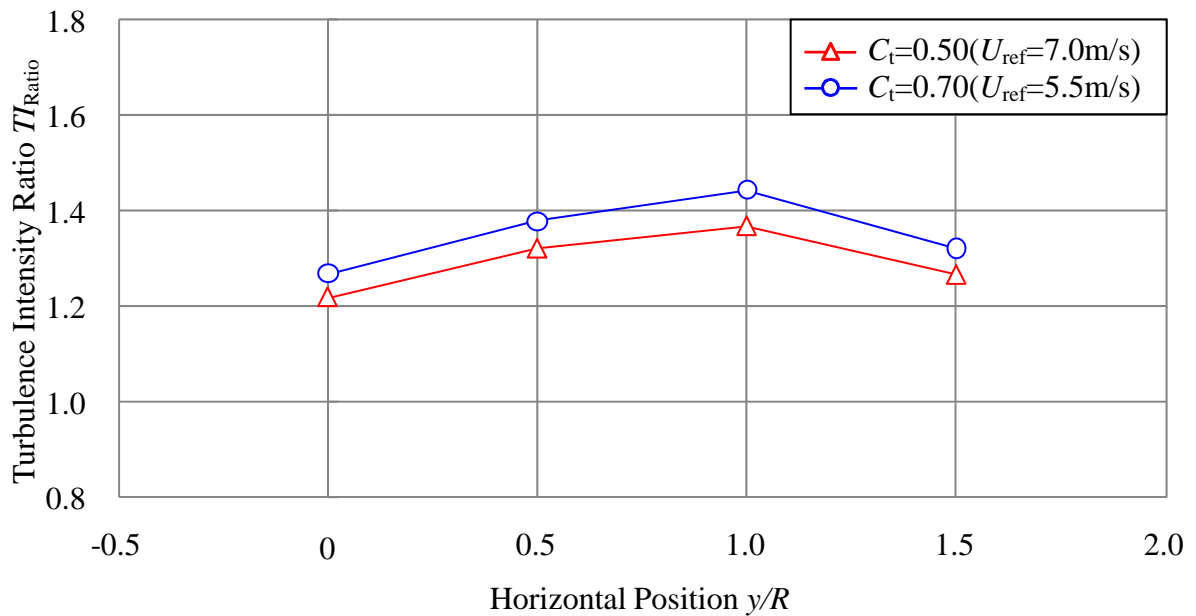


(b) 抗力曲線

図 5.9 供試翼の揚力, 抗力曲線



(a) 風力タービン停止時



(b) 風力タービン運転時

図 5.10 ロータ軸方向速度乱流強度の水平分布 ( $x/D=2.0, z/R=0$ )

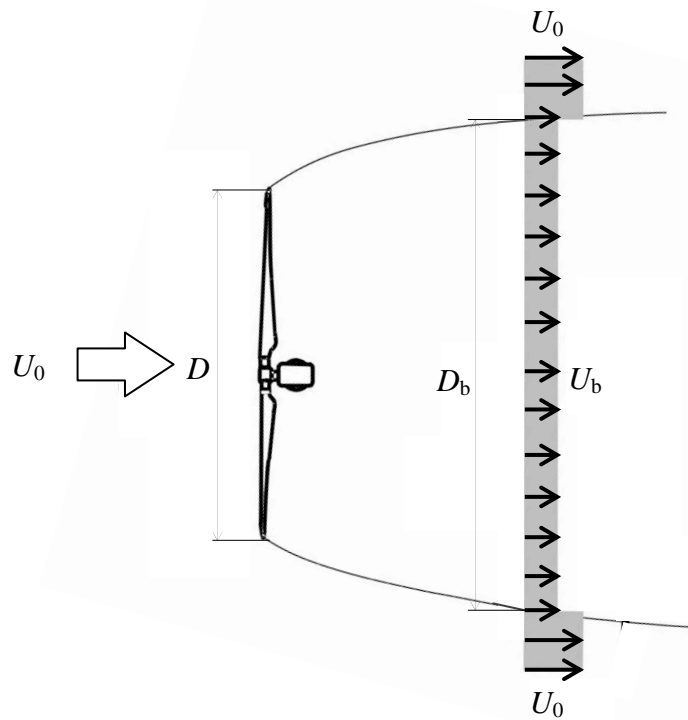


図 5.11 Frandsen の後流モデル

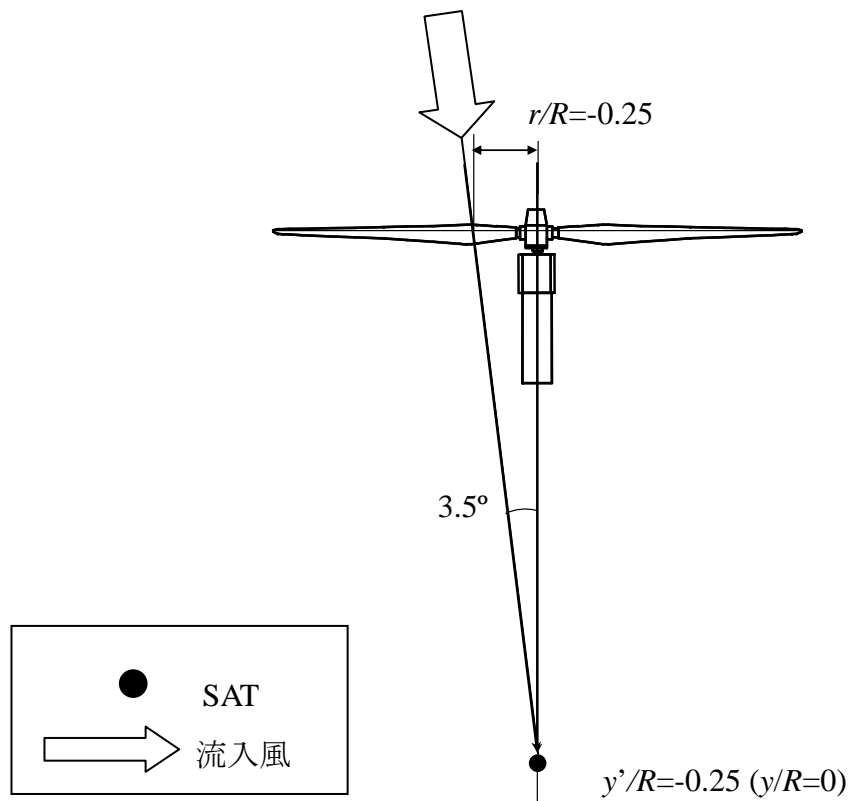


図 5.12 ナセル方位とヨー偏角  $3.5^\circ$

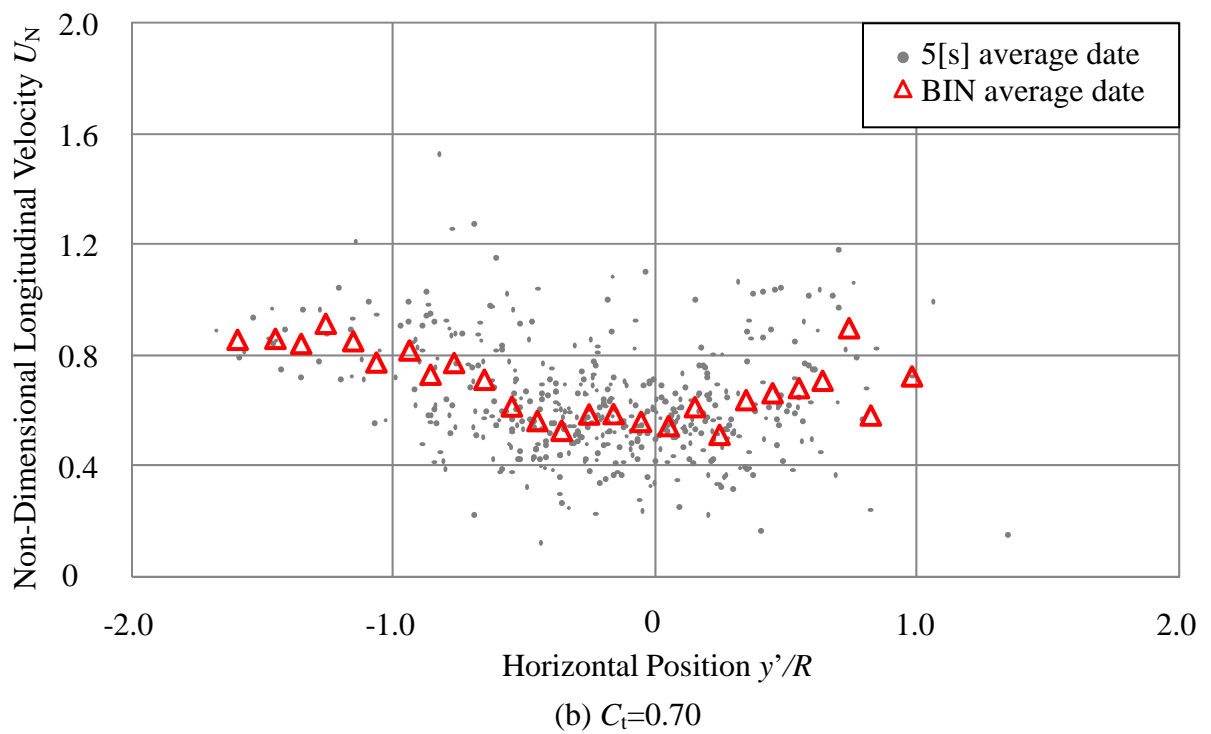
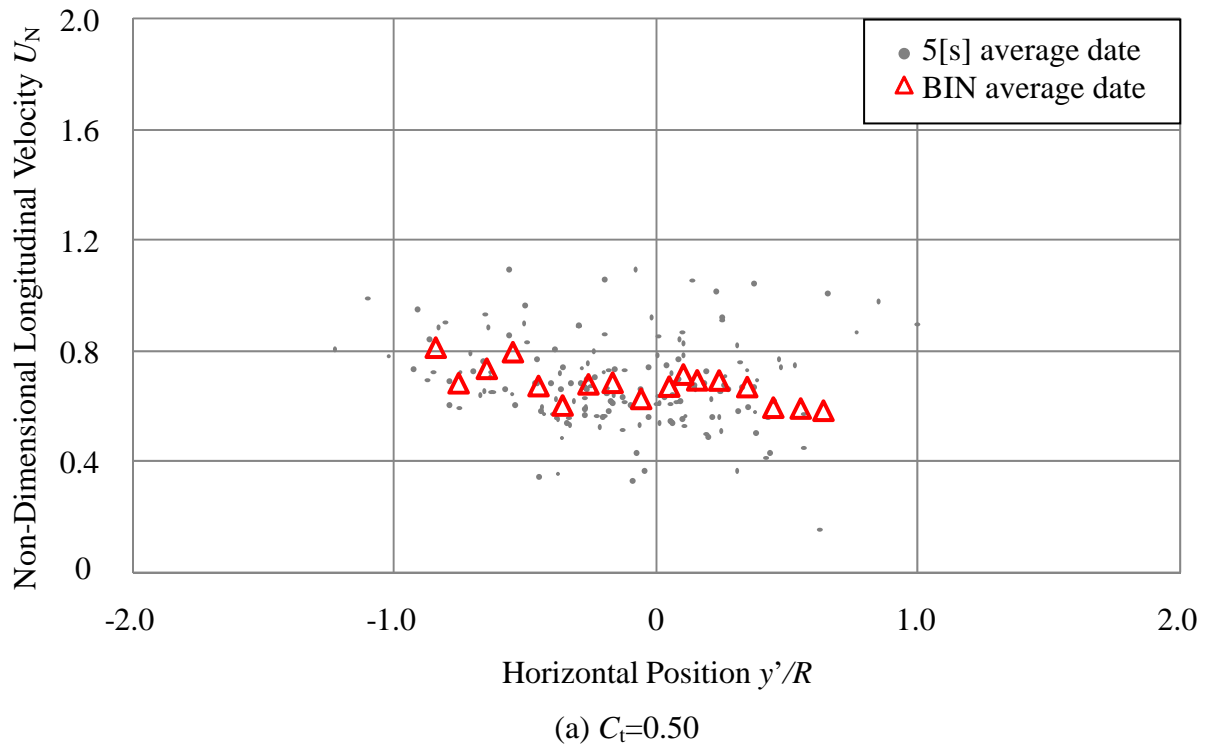


図 5.13 ロータ軸方向速度の無次元風速の水平分布( $x/D=1.0$ )



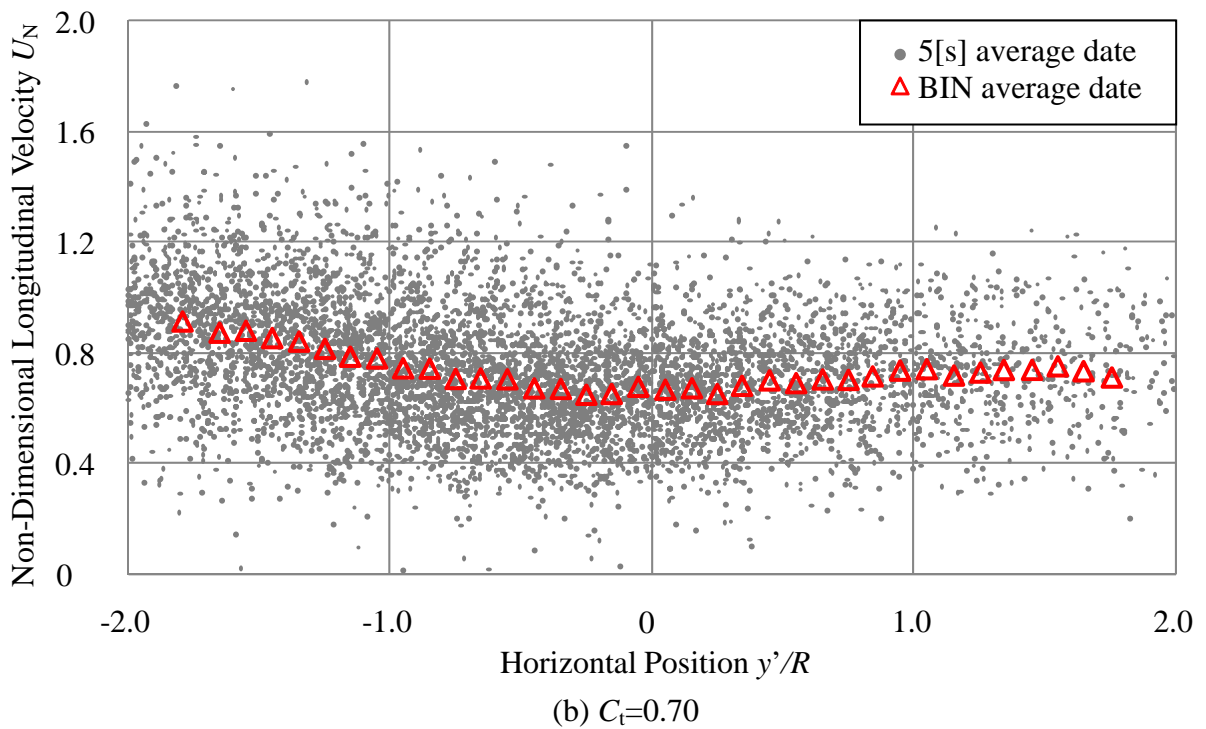
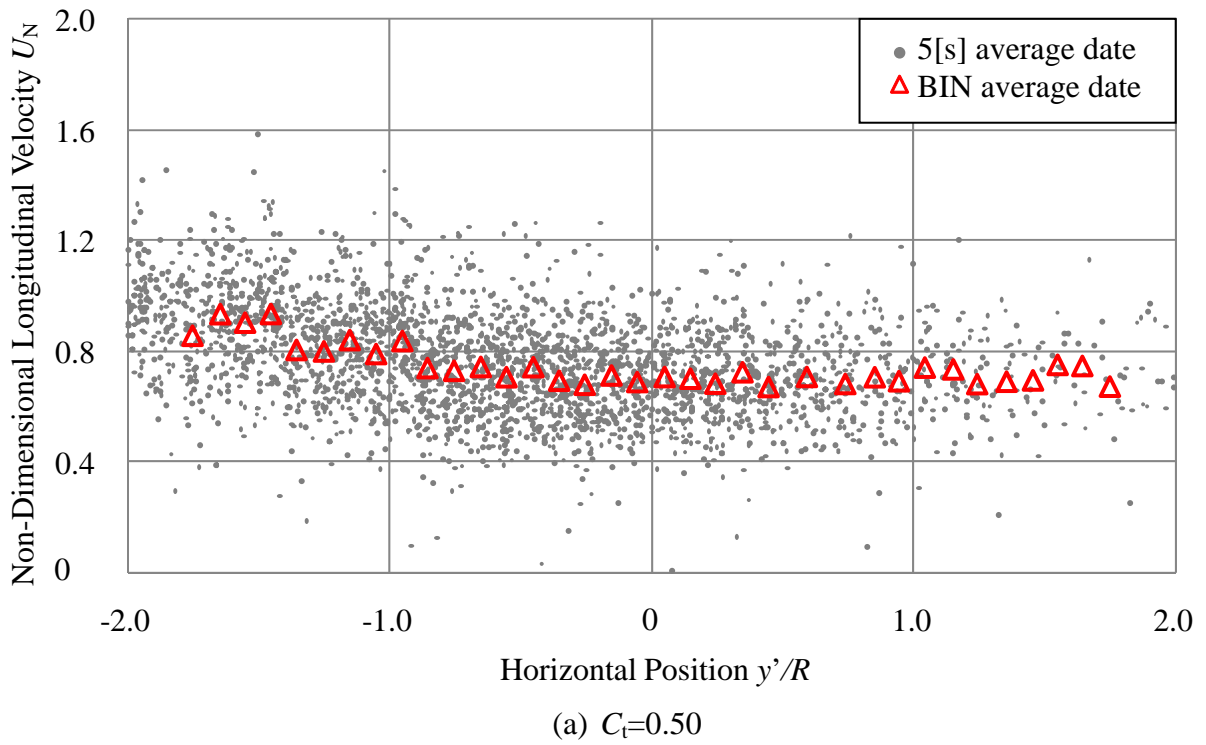


図 5.14 ロータ軸方向速度の無次元風速の水平分布( $x/D=2.0$ )

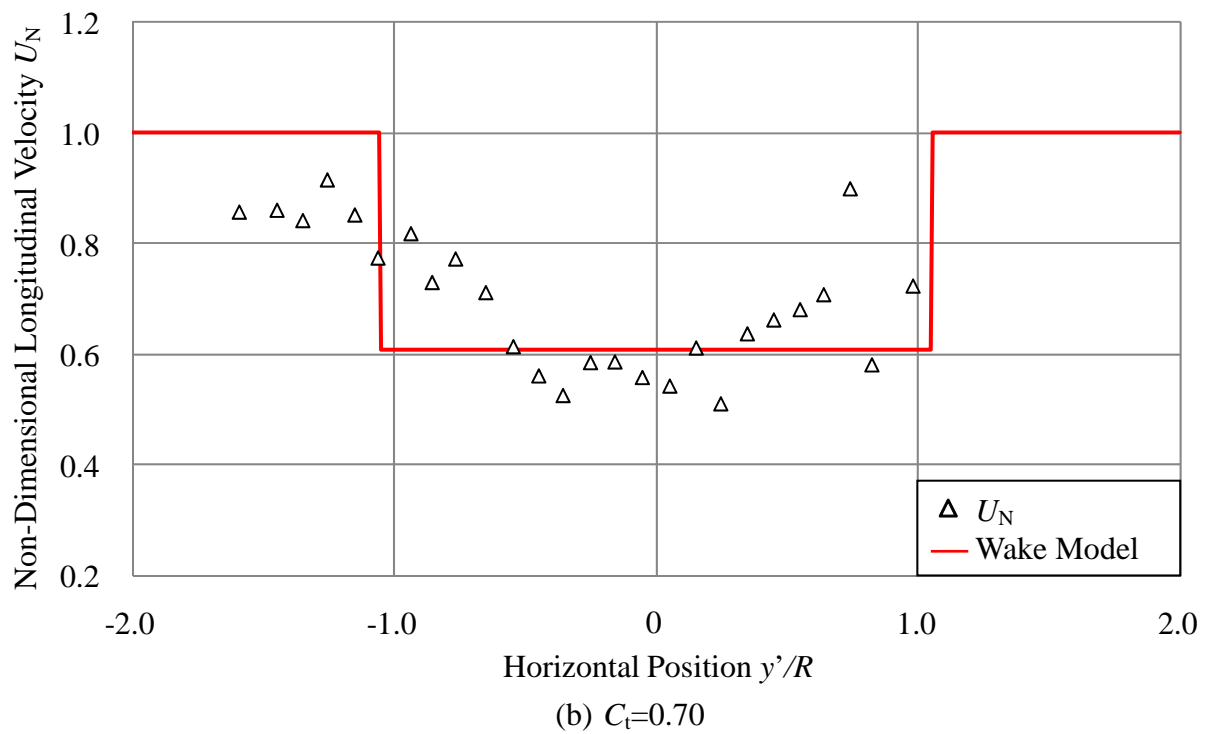
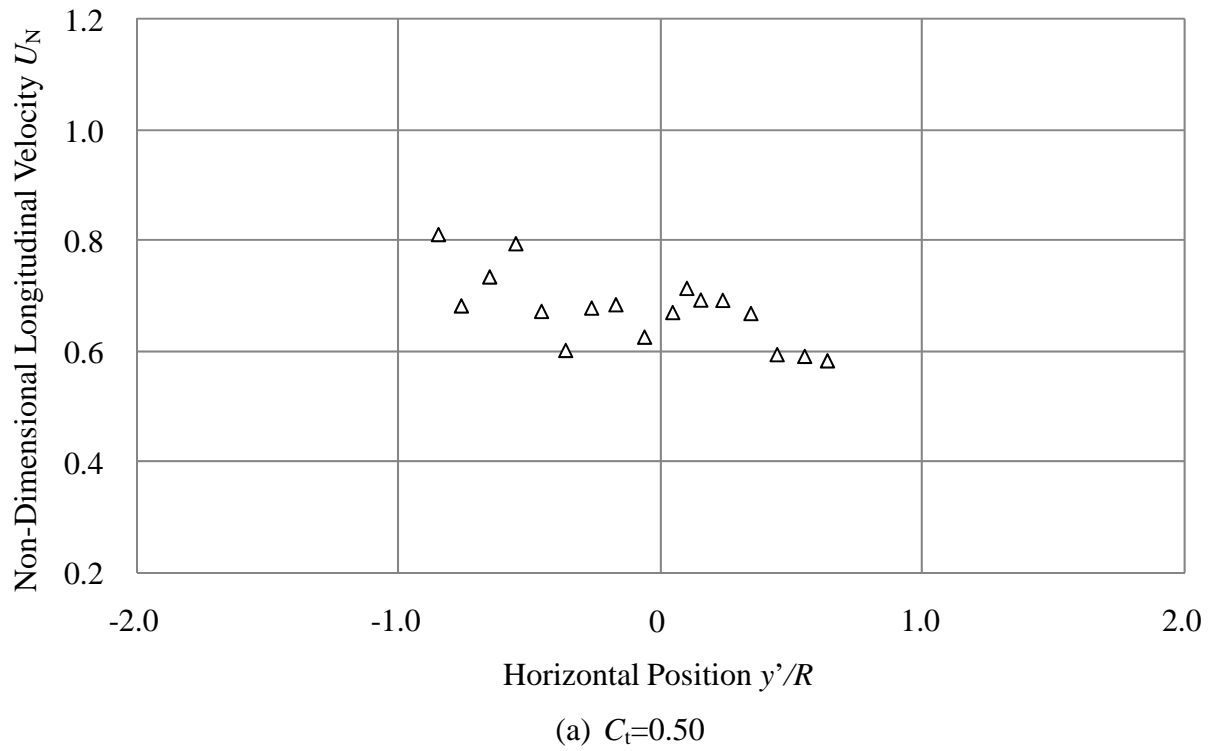
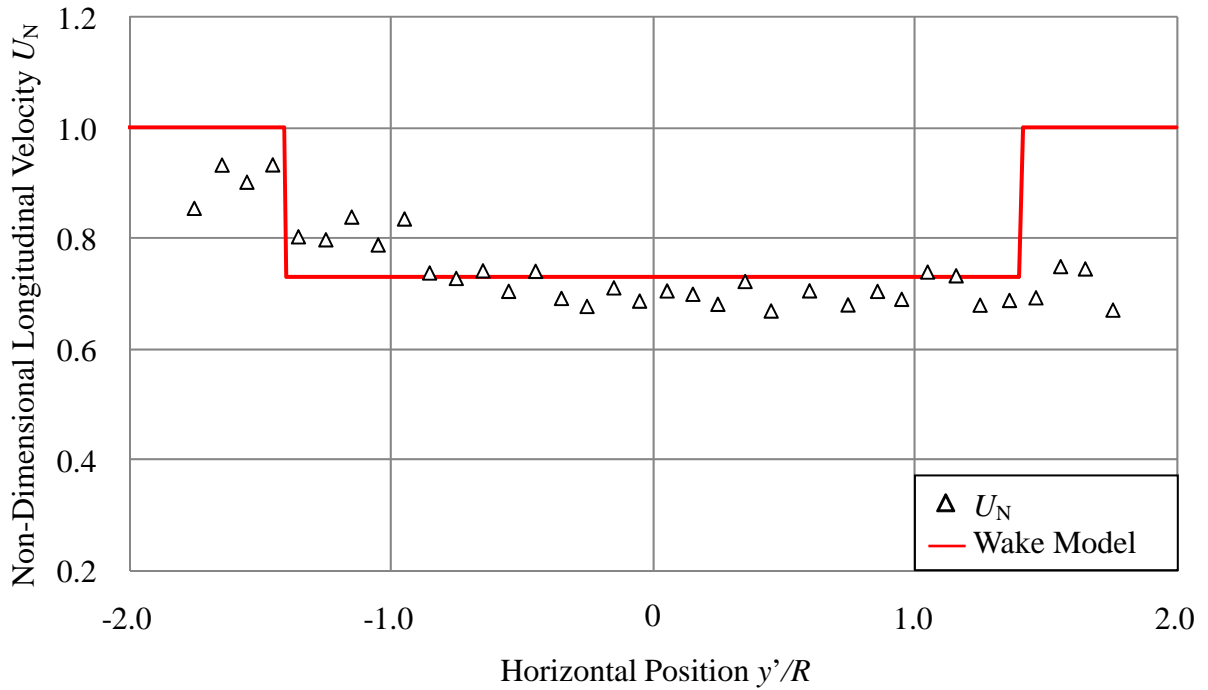
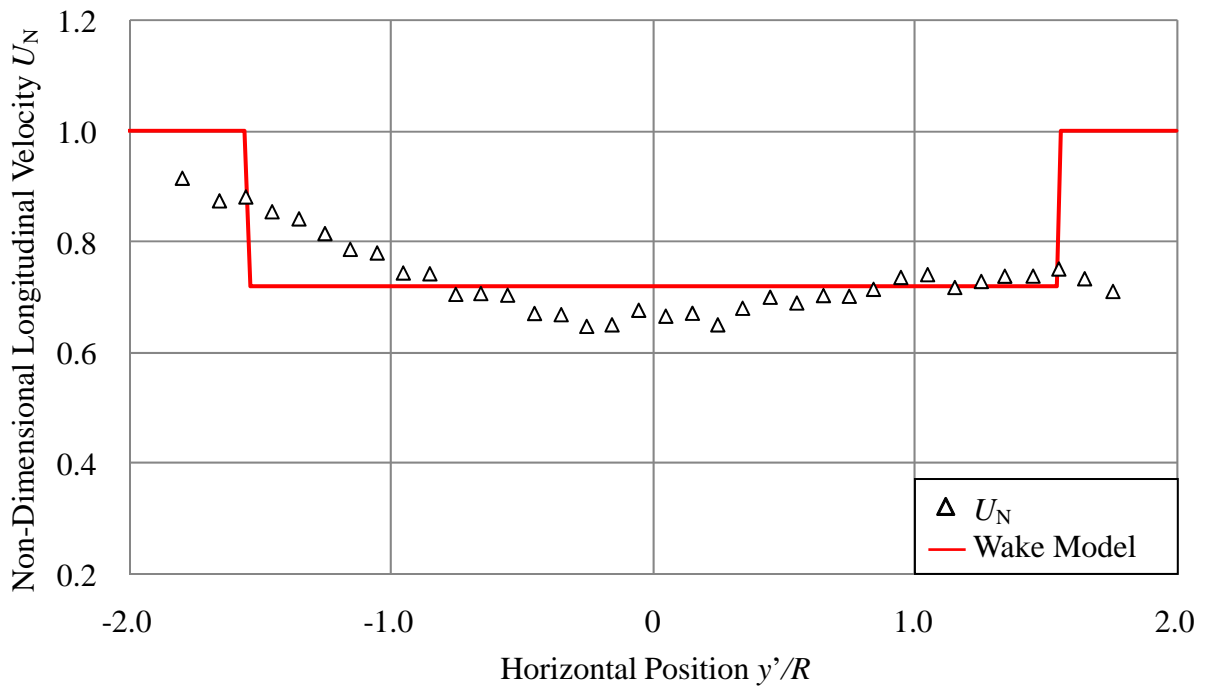


図 5.15 ロータ軸方向速度の平均無次元風速の水平分布と後流モデル( $x/D=1.0$ )

(a)  $C_t=0.50$ (b)  $C_t=0.70$ 図 5.16 ロータ軸方向速度の平均無次元風速の水平分布と後流モデル( $x/D=2.0$ )

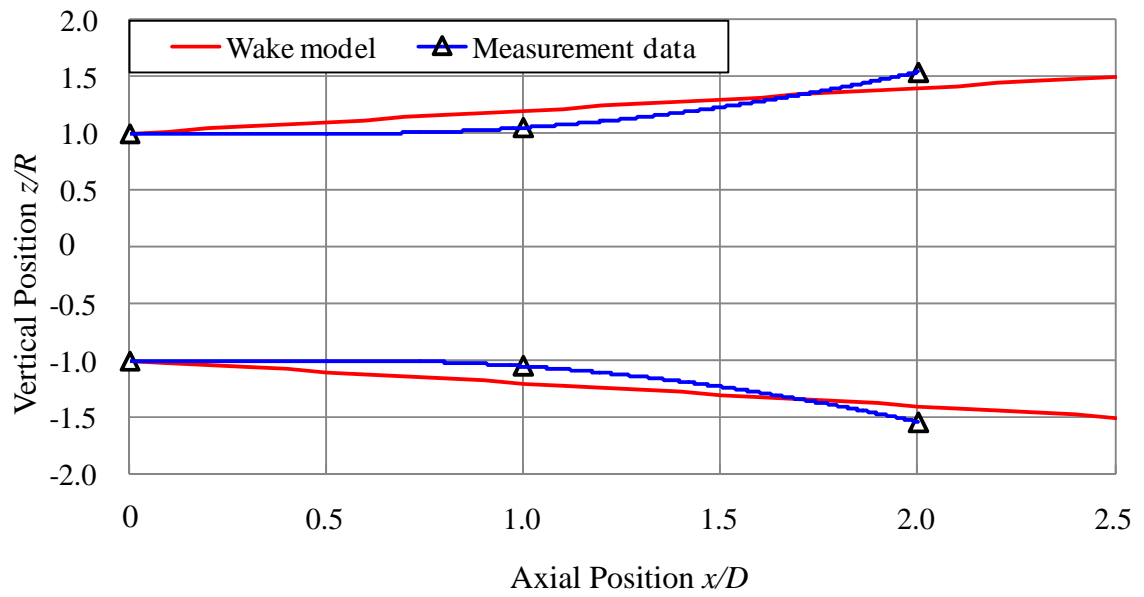


图 5.17 速度欠損域範圍

## 第6章 結言

風力タービンの後流内の流れ場を詳細に把握することを目的として、フィールドにて風力タービン後流を測定した。風車の最適運転時の風速の鉛直分布および横方向分布を高周波数でサンプリング可能な超音波流速計を用い測定した。流入風の風速、風向および風力タービンの推力係数について分類し風車後流を解析した。本研究の主な結果を以下に示す

(1) 風力タービンロータ直径  $D$  に対して下流位置  $x/D=1.0, 2.0, 3.0, 4.0$  における風速の鉛直分布を測定し以下の結果を得た。

- 風力タービン後流内の風速は風力タービンのエネルギー抽出によって流入風に比べて減速し、後流内の乱流強度は大きくなる。
- 後流内速度の鉛直分布は風力タービンのエネルギー抽出による減速と、大気境界層の速度勾配の影響を受ける。本実験サイトではそのため、 $z/R=-0.5$  で風速が最も低くなった。
- 風力タービン後流内の風速は推力係数の増加による 0 風力タービンの後流の運動量の低下によって減速する。
- 下流方向にいくにしたがいロータ推力の後流内の風速に対する影響が小さくなる。

(2) 下流位置  $x/D=2.0$  において風力タービンロータ半径  $R$  に対して  $y/R=0, 0.5, 1.0, 1.5$  において後流内の風速の横方向分布を測定し以下の結果を得た。

- ブレード翼端位置を通過した風は、風力タービン後流と自由流れの境界において強いせん断流れを持ち比較的大きな乱れを持つ。
- 瞬時値を用いて流入風ヨー偏角の後流を測定することで後流分布を描くことができる。
- 本フィールド実験値に基づき係数を決定した後流モデルは  $x/D=1.0\sim 2.0$  で後流の拡大率が大きくなる。

## 参考文献

- (1) NEDO 風力発電導入ガイドブック (2008 年 2 月改訂第 9 版), pp.102-103, 2008
- (2) 前田太佳夫, 鎌田泰成, 村田淳介, 米倉早香, 刈谷将宏, 溝腰拓哉, 稲垣直也: 後流内風力タービンの出力低下と応力変動に関する研究, 第 61 回ターボ機械協会総会講演会講演論文集, pp.107-112, 2009
- (3) Sten Frandsen, et.al. :The necessary distance between large wind farms offshore study, Report Risø -R-1518(EN), pp8-12, 2004.
- (4) S.T. Frandsen, : Turbulence and turbulence generated structural loading in wind turbine clusters, Risø -R-1188(EN), 2007.
- (5) 前田太佳夫, 金原裕介, 柿永勉: 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, 71-701, pp.162-170, 2005.
- (6) 山口浩司, 佐藤隆光, 七原俊也, 平井滋登, 柴田昌明, 有永真司, 実測による大型風車後流の検討, 日本機械学会, 2008 年度 年次大会講演論文集, pp.291-292, 2004
- (7) 山内雅也, 石原孟, 藤野陽三, 風車後流を求めるための新しい解析モデルの提案, 土木学会第 58 回年次学術講演会, I -132
- (8) 山本学, 近藤宏二, 大熊武司, 風車回転時の風力発電設備に作用する風力に関する風洞実験, 日本建築学会構造系論文集 第 73 巻 第 625 号, pp375-382
- (9) 石井秀和, 石原孟, 発電時に風車タワーに作用する風荷重の簡易評価式の提案 その 2 風荷重の簡易評価式の提案, 日本風工学会誌 第 34 巻 第 2 号, pp213-214

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、お忙しい中適切な助言を頂いたり、方向を修正したりして下さった前田太佳夫教授に心より感謝申し上げます。また、鎌田泰成准教授には実験設備の設置や、装置の運搬および考察の助言など、時にやさしく、時に厳しく、多くのご助力を頂き感謝致しております。村田淳介助教はとても身近に接して下さり、研究内容に対して様々な助言をいただきありがとうございました。また、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。

工作に関するご指導を頂いた堀場映次技官にも感謝しております。そして、都築修子さんは常に明るく、辛い研究生活のなか元気を頂きました。コーヒーやお菓子のサービスはとてもありがたかったです。ありがとうございました。また環境装置開発の加藤修試には実験装置を作成していただき感謝致しております。附属農場の使用を許可して下さった生物資源学部の先生方には厚くお礼申しあげます。附属農場の方々にはペンキ塗りの際にご迷惑をおかけしたことをお詫び申し上げますとともに、停電の際にはご助力を頂き深く感謝いたします。

フィールドチームの皆様には感謝してもしきれません。お忙しい中様々な仕事をこなし素早くこなしてくれた幸田晴伸君、黙々と仕事をこなし、人一倍頑張ってくれた平田晴紀君、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。お二人のご助力がなければ乗り越えることができなかったと思っております。本当にありがとうございました。来年は幸田君を中心に素晴らしい研究ができることを願っております。また実験設備を構築していただいた先輩方、特に未熟な私に多くの指導をいただいた古澤雅佳先輩、飯田充博先輩に心より深く感謝いたします。

同期の皆様にはご迷惑をおかけし、元気を頂きました。いつも着々と物事を進める岡本君、やるときはやり遊ぶ時は遊ぶ小比賀君、とても優秀で研究の相談に乗ってくれた川井君、論文作成で一気に抜かしていった土岐君、いつも迷惑ばかりかけてしまった西田君、最後の最後まで私のバカに付き合ってくれた松田君、

すごく忙しいのに弱音を吐かない米倉さんには本当に感謝しています。辛い研究生活でしたが君たちと過ごせた3年間はかけがえのないものになりました。社会に出てもまた集まりましょう。

エネルギー環境工学研究室での経験は必ず社会に出て役立つことと確信しております。この3年間、御指導いただきました先生方、励ましあって共に成長した同期の皆様、献身的なサポートをしてくださった後輩の皆様、本当にありがとうございました。

平成23年2月14日