

Study of Performance of a Cross-flow Wind Turbine Located above a Roadway fence

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/40533

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



道路用フェンス上部に設置した
クロスフロー風車の性能に関する研究

中田 博精

平成26年7月

博士論文

道路用フェンス上部に設置した クロスフロー風車の性能に関する研究

金沢大学大学院自然科学研究科
システム創成科学専攻
機能開発システム講座

学籍番号 1123122208

氏名 中田 博精

主任指導教員 木綿 隆弘 教授

平成26年7月

目次

第1章 序論	
1-1 研究背景	1
1-2 研究目的	6
1-3 本論文で使用する記号	7
第2章 実験装置及び方法の概要	
2-1 実験装置	10
2-1-1 風洞実験装置	10
2-1-2 供試風車	13
2-1-3 供試フェンス	15
2-1-4 クロスフロー風車付きフェンス	16
2-2 実験方法	17
2-2-1 風車出力特性測定	17
2-2-2 風速分布測定	21
2-2-3 可視化測定	24
第3章 供試風車の性能	
3-1 供試風車の機械損失	25
3-2 供試風車の風速出力特性	27
第4章 フェンス上部における風車設置位置の検討	
4-1 はじめに	28
4-2 実験概要	30
4-3 垂直方向における設置位置の検討	32
4-3-1 風車出力特性	32
4-3-2 風車後流の風速分布	35
4-3-3 フェンス下流域の風速分布	37
4-4 水平方向における設置位置の検討	40
4-4-1 風車出力特性	40
4-4-2 風速分布	45

4-5	まとめ	51
第5章 直角偏向板を用いた風車性能向上に関する検討		
5-1	はじめに	52
5-2	実験概要	53
5-3	風車出力特性	55
5-4	風速分布	59
5-5	まとめ	64
第6章 防雪フェンスに風車を設置する場合の最適設置位置の検討		
6-1	はじめに	65
6-2	実験概要	66
6-3	風車出力特性	68
6-3-1	フェンス上部に無孔板領域がある場合	68
6-3-2	フェンス下部に無孔板領域がある場合	73
6-4	風速分布	78
6-4-1	フェンス上部に無孔板領域がある場合	78
6-4-2	フェンス下部に無孔板領域がある場合	82
6-5	フェンス周辺の流れ	85
6-6	まとめ	91
第7章 斜風時における風車性能低下の抑制に関する検討		
7-1	はじめに	92
7-2	実験概要	93
7-3	斜風時の風車出力特性	96
7-4	風車端板を用いた対策	100
7-4-1	風車端板について	100
7-4-2	風車出力特性	101
7-4-3	風車周辺の風速分布	103
7-5	フェンス偏向板による対策	108
7-5-1	フェンス模型及び偏向板について	108
7-5-2	フェンス下流域及び上部の風速分布	111
7-5-3	偏向板を設置した場合のフェンス下流域の風速分布	113

目次

7-5-4	偏向板を設置した場合のフェンス上部の風速分布	116
7-5-5	偏向板の形状の検討	118
7-5-6	偏向板の設置間隔の影響	119
7-5-7	風車出力特性	121
7-6	まとめ	125
第8章 結論		126
参考文献		130
謝辞		137

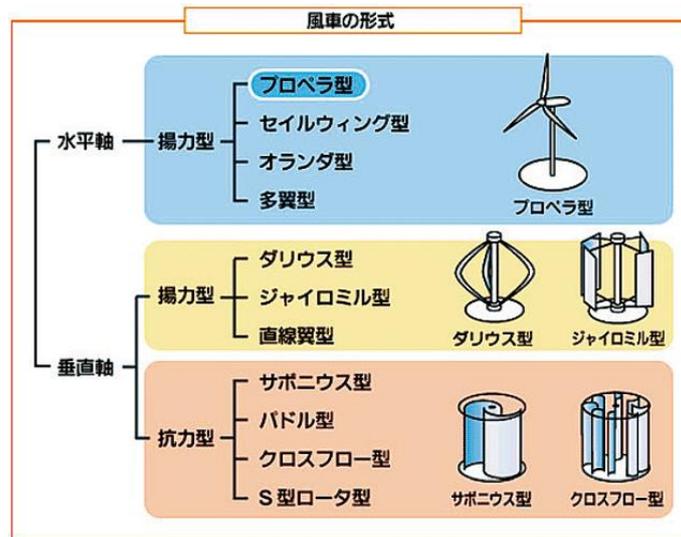
第1章 序論

1-1 研究背景

近年、地球温暖化などの環境問題に対する対応が世界的に求められ、温室効果ガスのひとつである二酸化炭素の抑制が課題になっており、発電時に二酸化炭素を排出しない、再生可能エネルギーを利用した発電システムへの注目が高まっている。また、2011年3月11日に発生した東日本大震災では、未曾有の被害をもたらすとともに、福島第一原子力発電所の事故などを受け、温室効果ガスの低減効果などの観点から基幹電源として考えられていた原子力発電の安全性への信頼が大きく低下した。このことにより、再生可能エネルギーを利用した発電システムへの期待がより一層高まっている。再生可能エネルギーには、太陽光、風力、太陽熱、水力、波力、地熱など多様な種類がある。再生エネルギーを用いた発電システムの中でも、自然界に無尽蔵に存在する「風」の力を利用する風力発電は、発電時に二酸化炭素や廃棄物を出さないクリーンなイメージが強い。また、理論的には風が持つ運動エネルギーは風を受ける面積に比例し、風速の3乗に比例して大きくなる性質を持っており、風速が2倍になると風力エネルギーは8倍になることが知られている。現在では、風力発電は広く認知されており、学校や街中でも見かけるようになってきており、世界的な需要の高まりから、市場の規模も拡大を続けている。しかし、風力のエネルギー密度は低く、連続性がないため、安定したエネルギー供給が課題である。最近の研究・開発により風力発電システムの性能が向上している。

風力発電では、風力エネルギーを回転力として得る方法として、風車が用いられている。風車の種類を示した図を図1-1-1に示す。風車の種類、回転軸の方向により「水平軸風車」と「垂直軸風車」に大きく分けられ、さらに作動原理により、翼の揚力を利用して回転する「揚力型」と風が押す力を利用して回転する「抗力型」に分けられる。大形風車として、水平軸風車で揚力型のプロペラ風車が主に用いられている。大形風車を用いた発電では、これまでは海岸の近くや山間部において主に風車を設置し、発電を行っていた。最近では、陸上よりも風況が安定している洋上に風車を設置して発電する洋上風力発電システムにも注目が集まっている。大形風車を用いた発電システムでは、1ヶ所に数機～数百機の風車を設置した大規模発電システムも存在する。図1-1-2に新潟県上越地区における大形風車を用いた風力発電を示す。一方で、小形風車としては、大形風車としても用いられるプロペラ風車や垂直軸風車で揚力型のダリウス風車に加えて、垂直軸風車で抗力型であるサボニウス風車、クロスフロー風車などの多様な種類の風車が実用化に向けて研究・開発をされている。これらの小形風車は単体又は2、3機のみで発電機に接続する小規模発電システムとして、一般の送電網とは独立した電源と

して、公園や駐車場の照明や道路標示の照明として用いられている。そのため、風車が必ずしも風速の速い場所に設置されるとは限らないことなどから、風車の起動性についても考慮する必要がある。また、小形風車の場合、大形風車に比べて、より人の生活空間に近いところに設置されることから、安全性についても考慮する必要がある。一般的には、揚力型風車は発電効率がが高いが、起動性が悪く、風車回転数も高くなるため安全性が低下する。一方で、抗力型風車は、起動性が良く、風車回転数が低いため比較的安全性が高いが、風車効率が非常に低い。そのため、各風車に対して、これらの短所を改善するように研究・開発が今日にわたって行われている。



出典：NEDO 再生可能エネルギー技術白書（2014）

図 1-1-1 風車の形式

本研究では、フェンスやビルなどの構造物上に設置可能であり、加えて、構造物近傍で生じる剥離した、増速流れを有効に利用できる風車として、垂直軸風車で抗力型であるクロスフロー風車に着目した。クロスフロー風車は、風に対する指向性がなく、低周速域から発電が可能である。また、運転回転数が低いために低騒音であり、安全性が高いなどの長所がある。ただし、一般的に普及しているプロペラ風車と比較すると、低回転であるために系統に接続するには不向きであり、発電効率も低いなどの課題がある。これまでにクロスフロー風車を対象とした研究として、谷野ら（2007）がクロスフロー風車の翼枚数および翼取付角が風車出力特性に及ぼす影響を明らかにした。清水ら（1998）は、出力を増加させるためにより多くの流れを風車内へ誘導させるようにガイドベーンを設置することでクロスフロー風車の出力向上を実現させた。重光ら（2008）も同様に、対称ケーシングを設置することでクロスフロー風車の出力向上を実現させた。また本橋ら（2004）も案内羽根を設置することでクロスフロー風車の出力特性を改善した。



図 1-1-2 新潟県上越地区における風力発電

道路沿いや建築物の近辺などにフェンスが設置してあることがよくある。フェンスの設置目的は、防風、防雪、防砂、防塵、防波など様々であるが、設置場所に最も適したフェンス形状及びフェンスの遮蔽率を特定することが重要である。防風フェンスは、台風や季節風などの強風から果実園における果物を保護したり、海岸地帯の樹木を潮風から守って立枯れを防止する等、農林業関係で広く用いられている。最近では、高層ビル周辺に局地的に発生する強風（ビル風）を緩和したり、自動車の走行安定性を確保するために道路上における強い横風を防止する等の目的でも用いられている。図 1-1-3 に北陸自動車道に設置してある防風フェンスを示す。自然強風地帯にある高速道路上に設置されている防風フェンスは、道路上を走行する車両に対して強い横風的作用を軽減させる。防雪フェンスは、主として道路上の自動車を雪害から守る目的で用いられている。防雪フェンスの種類には、吹きだめ式、吹き止め式、吹き払い式などがあり、防雪フェンスの種類によって、設置場所や機能が異なる。図 1-1-4 に主な防雪フェンスの概要を示す。吹きだめ式防雪フェンスは、道路から距離をおいて設置され、フェンスの前後に雪を留めることによって、吹き溜まりや地吹雪を防止する。吹き止め式防雪フェンスは、道路の近くに設置され、フェンス下部の遮蔽率を高くすることによって、フェンスの風上側に多くの吹き溜まりを形成させて、地吹雪を防止する。吹き払い式防雪フェンスは、道路の近くに設置され、風上側からの風を道路に吹きつけることによって、道路上の吹き溜まりを防止するものであり、雪を吹き払い地表面に露出させることによる視線誘導の役割と、飛雪を地表面近くに集中させ、運転手等の視界を確保するという機能が期待される。これらの機能から上下2車線道路には主に吹き払い式フェンス、上下4車線道路には主に吹き止め式フェンスと区別して使用されている。しかし中央分離帯を有する道路の場合には、路面近傍に沿って風下側に流下してきた吹雪は、それによって巻き上がるために吹雪障害を防止することは困難となる。そのために中央分離帯を有する4車線道路に対しては、吹き止め式防雪フェンスの設置が不可欠となる。



図 1-1-3 北陸自動車道に設置してある防風フェンス

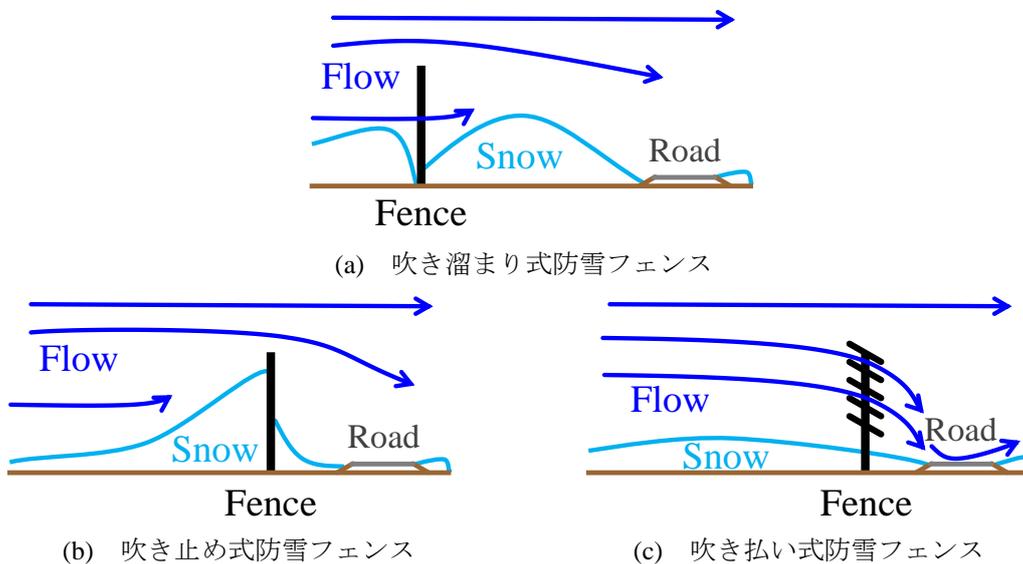


図 1-1-4 防雪フェンスの概要

このような防風・防雪フェンスを強風地点に適切に設置するためには、対象となる地点における風環境を熟知することは勿論であるが、フェンス周りの流れを知ることは極めて重要なことである。特にフェンス周りの流れは、背後に逆流を伴う典型的な剥離流れを形成し、フェンスの形状やフェンスの遮蔽率等によってフェンス後方側及び周辺の流れは大きく変化する。したがって、この評価を誤ると、フェンスの風下側を走行するトラックの横転事故や雪混じりの強風時における視界不良によるドライバーの運転ミスによって引き起こされる大事故の原因にもなる。

高層建築物周辺に生じるビル風と同様に、土木構造物の建設によって風環境が変化する事例は意外と多く、このことが工事の遂行を困難にし、完成した構造物の使用性の悪化が問題となることもある。土構造物として道路の一部をなす盛土や切土の建設は風環

境変化を引き起こす典型的な例であり、これらの構造物によって風の収束が促されて風速の増加を招くことがある。そのような地点を通過する車両にとっては時に危険な状況にさらされることがあるうえに、この場合に注意すべきことは、道路あるいは鉄道などの路線上における風速の増加のみならず、その下流域一帯に風環境の変化を招くことであり、広範囲にわたる遮風効果が必要となることがある。

これまでにフェンスを対象とした研究として、木綿ら（2002）はフェンスの遮蔽率がフェンス下流域に与える影響を調べ、有孔フェンスを用いることで再循環領域（逆流領域）が形成されないことや、フェンス先端に取り付けた偏向板の形状により減速領域が変化することなどを明らかにした。また高田ら（2006）は防雪フェンスを対象とし、フェンス上部に誘導板を設置し誘導板部の有効率変化させた場合の性能評価を行った。Sang-Joon Lee と Hyong-Bum Kim（1999）は、主に防砂・防塵フェンスを対象とした研究を行っており、多孔性フェンス後方の流れ特性などについて PTV 法を用いて明らかにした。

また風車を用いた防風効果に関する研究として、内海ら（2007）によって、プロペラ風車を複数台配置させることにより、防風ネットの代わりにする試みもなされている。その他にも、風車と他の構造物を組み合わせた研究として、ビルなどの構造物の角部で流速が増加することから、谷野ら（2004, 2006, 2007）が構造物の壁端部にクロスフロー風車を設置し、高い出力を得る試みがなされている。Ferreria ら（2006）は、直線翼垂直軸風車をビル屋上に設置する際の吹き上がり風の影響を調べるために、風車を傾けた場合の出力特性を調べている。

1-2 研究目的

これまでの研究では、フェンスやクロスフロー風車自体に着眼点がおかれ、それぞれの性能向上に向けた研究が行われてきた。しかし、構造物と風車の両方に着眼点を当てた研究は、谷野らが行っている、構造物の上部にクロスフロー風車を設置する試みや Ferreria ら (2006) が行っているビルの屋上に直線翼垂直風車を設置する試みなどの研究のみである。強風にみまわれる地域の道路においては、車の運転手がより安全な走行をすることを確保するために、道路に沿って防風・防雪フェンスが設置されている。これらのフェンス上部で、風上側からの吹き上がり流れの影響などから風速が増すことが一般的に知られている。しかし、フェンスとクロスフロー風車を組み合わせた研究は、これまでに行われたことがない。フェンス上部にクロスフロー風車を水平に設置することによって、風車発電による道路標示の照明や指示灯などの電力補助とフェンス下流域における減速効果の向上が期待される。

本研究では、クロスフロー風車を組み込んだ道路用フェンスの実用化に向けて、フェンス上部におけるクロスフロー風車の最適な設置方法と斜風時における風車の性能について明らかにすることを目的としている。フェンス上部に風車を設置することで、本来のフェンスとしての性能を損なわないようにすることが前提であり、本来のフェンスとしての性能を損なうのであれば、フェンスに風車を組み合わせたものの実用化は難しい。そのため、以下の2点に着目して風車の設置方法について評価を行った。

- (1) クロスフロー風車の出力が高いこと (風車出力特性)。
- (2) フェンスの防風・防雪性能を損なわないこと (フェンス下流の流れ場)。

本研究では、最適なクロスフロー風車の設置方法を明らかにするために主に4つの実験を行った。フェンスから垂直及び水平に移動させて風車を設置した場合に風車出力特性及びフェンス下流域の防風性能に及ぼす影響を第4章に示す。第5章では、フェンスの上端に直角偏向板を設置した場合の直角偏向板を変化させたときの風車出力特性及びフェンス下流域の防風性能に及ぼす影響を示す。第6章は、防雪フェンスの上部にクロスフロー風車を設置する場合の防雪フェンスの種類が風車出力特性及びフェンス下流域の流れ場に及ぼす影響について示す。最後に第7章では、斜めからの風 (以後「斜風」という) が風車及びフェンス上部に設置してある風車の出力特性に及ぼす影響と斜風に対する対策とその有効性について示す。

1-3 本論文で使用する記号

本論文で使用する記号は以下のとおりである.

A	: 水平方向の移動距離 [mm]
A_T	: 風車投影面積 [m^2]
a	: 移動距離 A を風車外径 D_1 で無次元化した値 ($= A/D_1$) [-]
B	: 変換係数 [-]
C	: フェンス上端と風車下端の隙間 [mm]
C_P	: 風車出力係数 [-]
C_{Pmax}	: 最大風車出力係数 [-]
C_T	: 風車トルク係数 [-]
c	: 隙間 C を風車外径 D_1 で無次元化した値 ($= C/D_1$) [-]
D_1	: クロスフロー型風車の外径 [mm]
D_2	: クロスフロー型風車の内径 [mm]
d	: パンチングメタルの孔径 [mm]
E	: 出力電圧 [V]
g	: 重力加速度 [m/s^2]
H	: フェンス模型高さ [mm]
H'	: 直角偏向板の高さ [mm]
h_e	: エタノール柱高さ [m]
h_{Hg}	: 水銀柱高さ [m]
I	: 電流 [A]
K	: 角度係数 [-]
L	: クロスフロー風車の翼スパン [mm]
l_c	: 翼弦長 [mm]
N	: クロスフロー風車の羽根枚数 [枚]
n	: 風車回転数 [min^{-1}]
P	: 風車出力 [W]
P_w	: 風から得られる全エネルギー [W]
p	: パンチングメタルの孔のピッチ間隔 [mm]
p_d	: 垂直偏向板の設置間隔 [-]
R	: 電気抵抗 [Ω]
r	: 1枚の円弧翼の反り線半径 [mm]

T	: 発生トルク [N・m]
T_0	: 測定トルク [N・m]
T_{loss}	: 機械損失トルク [N・m]
T_{max}	: 最大発生トルク [N・m]
t	: 温度 [°C]
u	: 主流方向速度 [m/s]
U	: 風洞出口平均風速 [m/s]
u'	: 主流方向速度の変動成分 [m/s]
u_i	: 各時間における主流方向速度 [m/s]
u_ξ	: ξ 方向速度 [m/s]
v	: 鉛直方向速度 [m/s]
v'	: 鉛直方向速度の変動成分 [m/s]
v_i	: 各時間における鉛直方向速度 [m/s]
w	: 奥行方向速度 [m/s]
w_ζ	: ζ 方向速度 [m/s]
X	: 直角偏向板の幅 [mm]
x	: 模型設置位置からの水平方向距離 [mm]
y	: 床面からの垂直方向距離 [mm]
y'	: フェンス上部に設置した風車中心軸からの垂直方向距離 [mm]
z	: 床面に対して平行な奥行方向距離 [mm]
α	: 風車中心と直角偏向板の上端との角度 [°]
β	: 羽根入口角度 [°]
β_0	: 翼取付角度 [°]
ϕ	: フェンス遮蔽率 [%]
λ	: 周速比 [-]
$\lambda_{C_{Pmax}}$: 最大出力係数時の周速比 [-]
π	: 円周率 [-]
θ	: 設置角度 [°]
θ_b	: 円弧翼の開き角度 [°]
θ_v	: フェンスで偏向された後の風向の平均角度 [°]
ρ	: 空気密度 [kg/m ³]
ρ_e	: エタノール密度 [kg/m ³]

- σ_u : 主流方向の標準偏差 [-]
- σ_v : 鉛直方向の標準偏差 [-]
- ω : 周速度 [m/s]
- ξ : 風車中心軸及びフェンスに対して直角な方向の距離 [mm]
- ζ : 風車中心軸及びフェンスに対して平行な方向の距離 [mm]

第2章 実験装置及び方法の概要

本章では、風洞実験で使用した風洞装置、実験装置及び各実験方法の概要について説明する。

2-1 実験装置

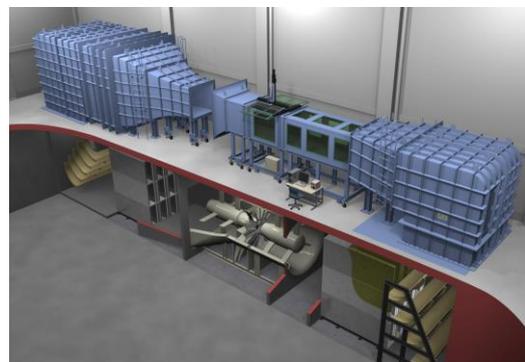
本節では、風洞装置、供試風車、供試フェンス及び風車とフェンスを組み合わせた風車付きフェンスの模型について説明する。

2-1-1 風洞実験装置

本実験で使用した風洞は金沢大学角間キャンパスにある多目的風洞装置である。この風洞は2007年10月に完成した大型風洞で、図2-1-1(a)は密閉回流型の風洞概要図であるが、測定胴の一部を取り外すことで図2-1-1(b)に示すように開放回流型になる。また、右上のコーナーを取り外すことで吹き出し型に組み替えることが可能となっている。最大風速は35 m/s（密閉回流型の場合）で、測定胴寸法は1250 mm×1250 mm×8000 mmである。また、地下にある送風機の前後には消音機が取り付けられており、風速20 m/sでの騒音レベルが50dB(A)以下（開放回流型及び無響音室設置時）となる低騒音風洞である。本実験では測定部の後流側にはベルマウスを取り付けた開放回流型風洞とした。また本研究では、風洞出口とベルマウスの上にベニヤ板を下に敷き、両端に高さ1000 mmの亚克力板とベニヤ板を設置した。閉塞率による効果の影響を低減させるために上部は開放しており、測定部を1250 mm×1250 mm×2000 mmとした。なお、風洞内の風速は、遠隔操作のインバータで送風機の回転数を操作する事で設定することができる。



(a) 密閉回流型



(b) 開放回流型

図 2-1-1 多目的風洞

下板と端板を風洞に設置し、測定部の上部を開放した状態において、風洞出口から600mmの位置における一様流測定を行った。主流に対して鉛直方向で下板からの距離を y 、主流に対して水平方向で風洞の中心からの距離を z とすると、一様流測定を行った範囲は $y = 100 \text{ mm} \sim 1100 \text{ mm}$ 、 $z = -500 \text{ mm} \sim 500 \text{ mm}$ であり、各方向において25mm間隔で測定点を取り、各測定点における風速の測定を行った。なお、風洞出口の風速は $U = 10 \text{ m/s}$ とした。風速の測定はI形熱線プローブを用いており、サンプリング周波数1000 Hz（時間間隔:1 msec）であり、サンプリングデータ数を2048個とした。

各測定点における平均風速 \bar{u} を風洞の断面の中心における風速 U で割った平均風速分布（ \bar{u}/U ）を図2-1-2に示す。上部を除き測定断面の風速の非一様性は $\pm 1\%$ 以下である。測定断面の上部において非一様性は $+1.0 \sim +1.5\%$ 以下と他の測定断面に比べて非一様性が高い。この原因として、本実験では閉塞率による影響を低減するために測定部の上部を開放型としており、上部を開放型にすることにより測定部の上部の風速が速くなるためと考えられる。

図2-1-3に各測定点における乱れ強さ分布（ σ_u/U ）を示す。測定断面の上部を除いて、乱れ強さは 0.5% 以下である。測定断面の上部においての乱れ強さ分布は他の測定点よりも乱れが強いが最も強い位置でも 2.0% 以下であった。これらの原因としては、非一様性の場合と同様に、測定部上部が開放型になっていたことが影響していると考えられる。

以上の結果から、本実験で使用した風洞の測定部は一様性があり、乱れが小さいと言える。

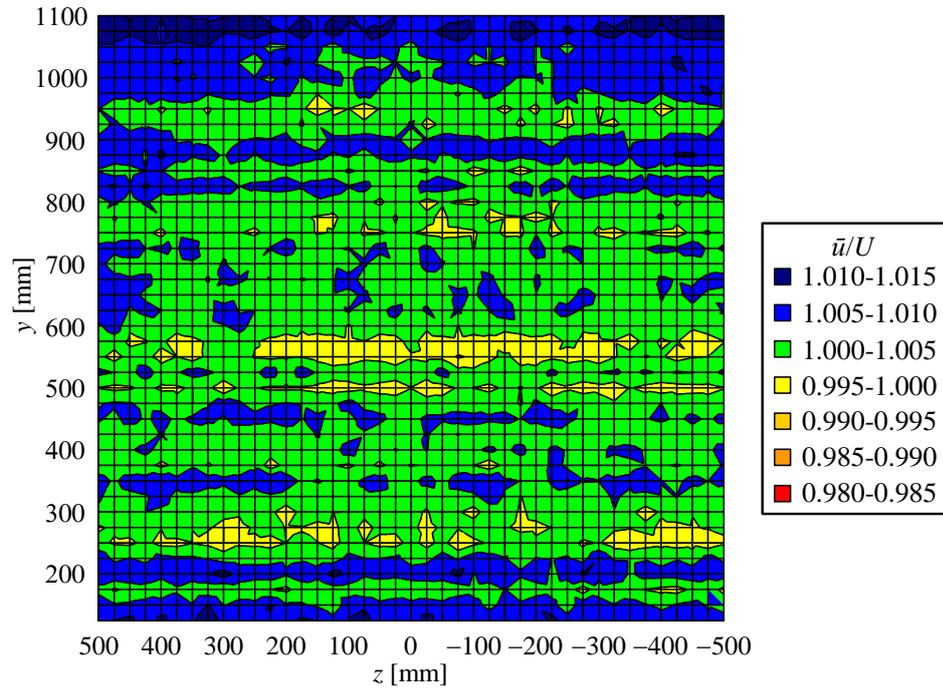


図 2-1-2 風洞測定部における平均風速分布 ($x = 600\text{mm}$)

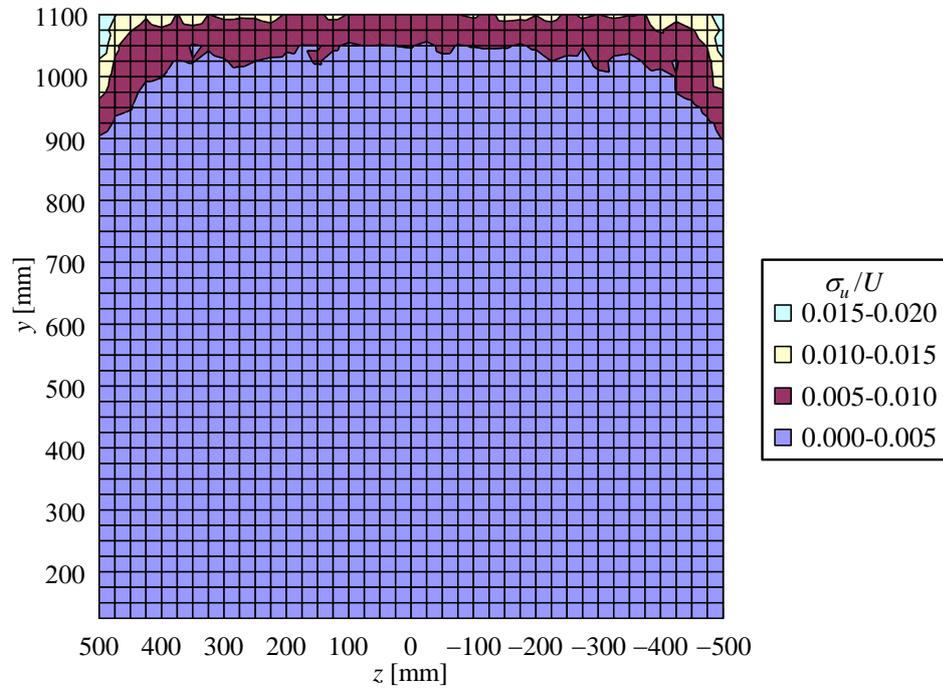


図 2-1-3 風洞測定部における乱れ強さ分布 ($x = 600\text{mm}$)

2-1-2 供試風車

本研究では、フェンスの上部に設置する風車としてクロスフロー風車を使用した。クロスフロー風車は、作動原理としては、抗力型風車であり、風に対する指向性が無く、低風速域から発電が可能である。また、運転回転数が低いため低騒音であり、安全性が高いなどの利点がある。ただし、一般に普及しているプロペラ風車と比較した場合、低回転であるために系統に接続するには不向きであり、発電効率が劣る点なども課題として挙げられる。しかし、都市部などの人と身近な環境において風力発電の利用を考えた場合、前者の利点を考慮すると、クロスフロー風車に代表される垂直軸・抗力型風車の利用の可能性は十分にあると思われ、実際に、都市部における公園や駐車場の照明用の小形独立風車として利用されている。

図 2-1-4 に本研究で使用したクロスフロー風車の概観を示す。供試風車の基本寸法は、図 2-1-4 及び表 2-1-1 に示すように、外径 $D_1 = 80\text{mm}$ 、内径 $D_2 = 65\text{mm}$ 、翼スパン $L = 400\text{mm}$ であり、羽根枚数は $N = 15$ 枚である。また、羽根入口角度は $\beta = 40^\circ$ である。1 枚の羽根は円弧翼となっており、その詳細寸法を図 2-1-5 及び表 2-1-2 に示す。翼弦長は $l_c = 10.35\text{mm}$ で、曲率半径 $r = 5.67\text{mm}$ であり、風車のソリディティ $\sigma = (N \cdot l_c) / \{\pi(D_1 + D_2)/2\} = 0.68$ である。

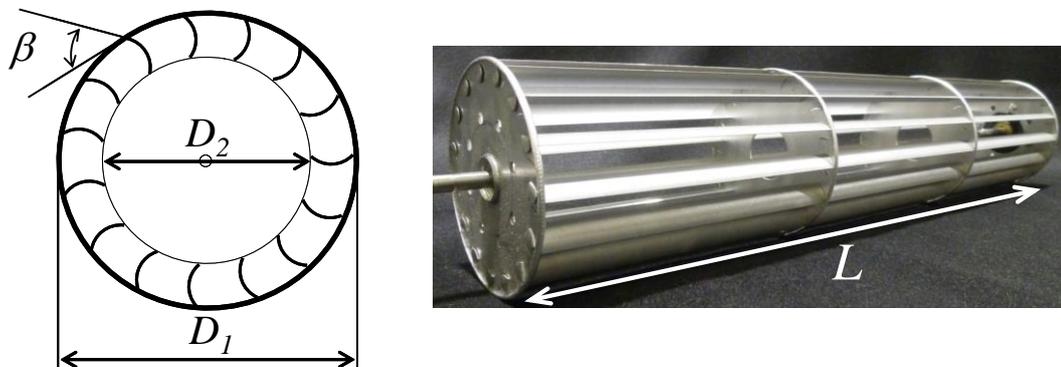


図 2-1-4 クロスフロー風車概観

表 2-1-1 クロスフロー風車の各寸法

翼枚数	N	15 枚
外径	D_1	80 mm
内径	D_2	65 mm
羽根入口角度	β	40°
翼スパン	L	400 mm

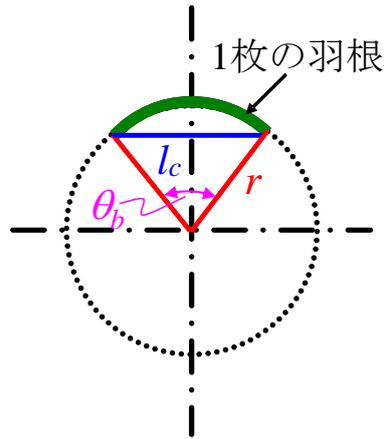


図 2-1-5 クロスフロー風車に用いている羽根の詳細

表 2-1-2 クロスフロー風車に用いている羽根の各寸法

翼弦長	l_c	10.35 mm
曲率半径	r	5.67 mm
円弧翼の開き角度 θ_b		114°

2-1-3 供試フェンス

フェンス模型としてパンチングメタルのパネルを用いた。パネルの概観を図 2-1-6 に示す。パネルの断面形状は、高さ $H = 500 \text{ mm}$ 、幅 1250 mm であり、厚さは 1 mm である。これは実際に設置されている防風フェンスの $1/5$ サイズとなっている。全体は1枚のパネルで構成されているが、図 2-1-6 からわかるように支柱が2本設置されており、これにより実質3枚のパネル形状に等分割される。等分割された時の1枚のパネルの形状は高さ $H = 500 \text{ mm}$ は変更なく、幅が 406 mm となる。防風フェンスを模擬したパネルには図 2-1-7 に示すように孔径 $d = 2 \text{ mm}$ の円形の穴がピッチ $p = 3 \text{ mm}$ の間隔で菱形上に空いている。供試フェンスは遮蔽率 $\phi = 60\%$ となっている。これは、一般的に防風フェンスとして道路の側面に設置されているフェンスの遮蔽率と同じである。



図 2-1-6 供試フェンス概観

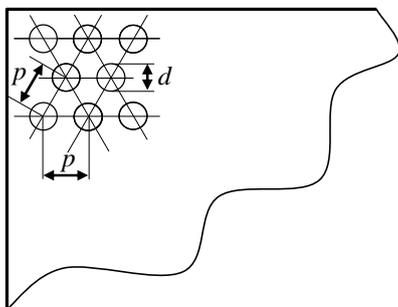


図 2-1-7 パンチングメタルの形状

表 2-1-3 パンチングメタルの各寸法

孔径 d	2 mm
ピッチ p	3 mm
厚さ	1 mm

2-1-4 クロスフロー風車付きフェンス

本研究では、クロスフロー風車をフェンス上部に水平に設置した、クロスフロー風車付きフェンスを製作した。本研究で用いた、クロスフロー風車付きフェンスの模型の概観を図 2-1-8 に示す。

図 2-1-9 に示すように、風車の左側を上流側とした場合に、風車の回転方向は時計回りと反時計回りの2種類が存在する。本研究においては、風車回転方向が時計回りのものを風車回転方向 **CW** とし、反時計回りのものを風車回転方向 **CCW** とした。また、フェンス上端と風車下端の隙間を C とし、風車の中心軸をフェンスから水平方向への移動距離を A とした。移動距離 A は、フェンスの下流側に移動させた場合に正の値になり、フェンスの上流側に移動させた場合には負の値になる。風車設置位置の評価の際には、隙間 C 及び移動距離 A を風車外径 D_1 で無次元化した値である、クリアランス $c (= C/D_1)$ 及び水平位置 $a (= A/D_1)$ を用いた。

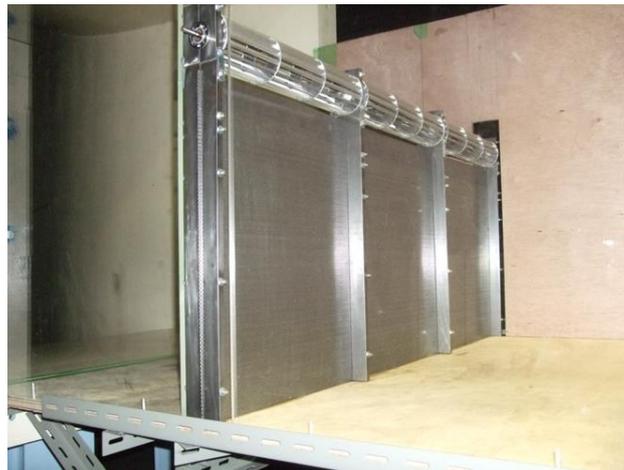


図 2-1-8 クロスフロー風車付きフェンス模型概観

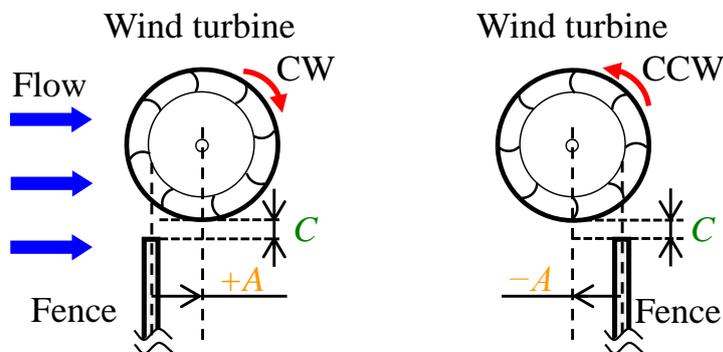


図 2-1-9 風車回転方向と風車設置位置

2-2 実験方法

本節では、風車出力特性測定、風速分布測定と可視化測定の各実験方法について説明する。

2-2-1 風車出力特性測定

本研究における、出力特性の測定時に用いた測定装置と測定方法について説明する。

風車出力特性測定時の概観図を図 2-2-1 に示す。本実験では、風車の回転数を任意に制御し、トルク計により風車出力トルク T_0 を測定し、トルク係数 C_T と出力係数 C_P を算出する。風車の出力トルク測定には、トルク検出器 (SS-020, 小野測器製, 図 2-2-2, 以後「トルク計」という) を用いた。このトルク計に磁電式回転検出器 (MP-981, 小野測器製, 図 2-2-3) が取り付けられている。測定範囲は 1 ~ 20,000[rpm] である。トルク検出器と回転検出器から出力された信号がトルクコンバータ (TS-2700, 小野測器製, 図 2-2-4) を通し、その後電圧として出力され、AD 変換ボードを介してパソコン (ソフト名: KanazawaAcq, 図 2-2-5) に取り込み、データを保存する。トルク値の測定は、ドライバと負荷用モータによって風車の回転数を制御し、風洞からの風速 U , 風車回転数 n が定常状態となった時に、KanazawaAcq によって測定する。ドライバはオリエンタルモーター製, BXD120A-A (図 2-2-6) であり、負荷用モータはオリエンタルモーター製, BX6400S-A (図 2-2-7) である。ドライバの設定方法によって正回転・停止・逆回転の制御も可能である。風車の軸とトルク計との連結部, トルク計と負荷用モータの連結部にはそれぞれカップリングがあり、回転軸の芯ずれの影響を抑えている。トルク計からは、トルク値に応じた電圧値が出力され、トルクコンバータを通して KanazawaAcq を用いてデータをパソコンのハードディスクに保存する。KanazawaAcq ではサンプリング周波数は 1000 [Hz] (時間間隔 1.0msec), サンプリングデータ数は 10,000 個とし、10 秒間平均値を測定値とした。

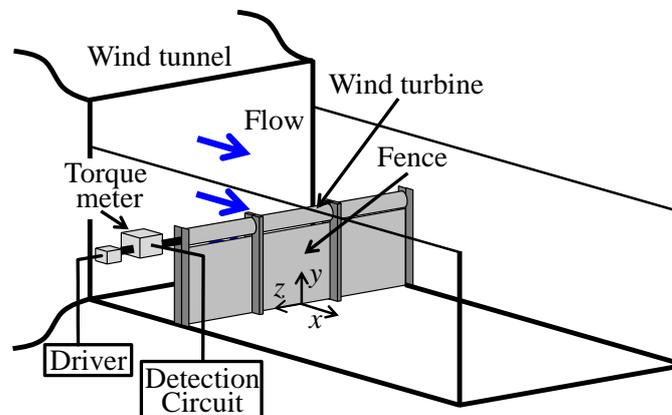


図 2-2-1 クロスフロー風車付きフェンス模型概観



図 2-2-2 トルク検出器



図 2-2-3 磁電式回転検出器



図 2-2-4 トルクコンバータ

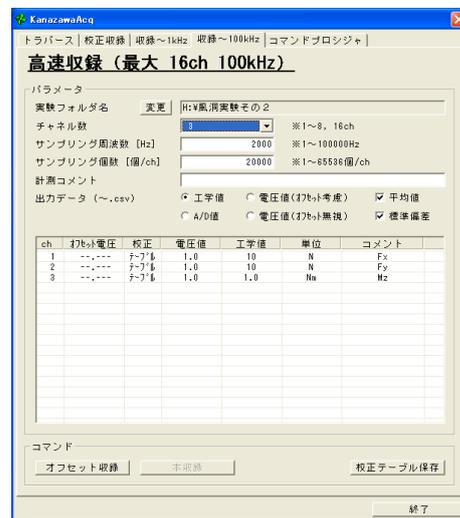


図 2-2-5 KanazawaAcq



図 2-2-6 DC モータ用ドライバ



図 2-2-7 負荷用モータ

測定したトルク値 T_0 から風車のトルク係数 C_T と出力係数 C_P の算出過程を以下に説明する。

風車の発生トルク T は測定されたトルク値 T_0 から風車機械損失トルク T_{loss} を差し引いたものであり、次式で与えられる。

$$T = T_0 - T_{loss} \quad (2-2-1)$$

また、1つの風車にかかる抗力 D は、

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 \cdot 3A_T \quad (2-2-2)$$

となる。ここで、風車1つ当たりの投影面積 A_T はクロスフロー風車の場合、次式のよ
うに、風車外径 D_1 と翼スパン長さ L の積となる。

$$A_T = D_1 L \quad (2-2-3)$$

風車のトルクは風車にかかる抗力のモーメントであることからトルク係数 C_T は式
(2-2-1)及び式(2-2-3)から次式のように表される。

$$C_T = \frac{T}{D \cdot \frac{D_1}{2}} = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot 3A_T \cdot \frac{D_1}{2}} = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot 3D_1 L \cdot \frac{D_1}{2}} = \frac{T}{\frac{3}{4} \rho U^2 D_1^2 L} \quad (2-2-4)$$

また、風車出力 P は発生トルクの値に周速度をかけて、

$$P = T\omega \quad (2-2-5)$$

となる。ここで周速度 ω は風車回転数 n [rpm]によって以下の式で表される。

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2-2-6)$$

一方で、風車が風から得られる全エネルギー P_w は風車の投影面積を A_T 、風速 U より、

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_T U^3 \quad (2-2-7)$$

以上より、出力係数 C_P は風車出力 P と風から得られる全エネルギー P_w との比である
から式(2-2-1)と式(2-2-5)～式(2-2-7)を用いると次式のように表される。

$$C_P = \frac{P}{P_w} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2} \rho \cdot 3A_T U^3} = \frac{T \frac{2\pi n}{60}}{\frac{1}{2} \rho U^3 \cdot 3D_1 L} \quad (2-2-8)$$

また風車翼の先端速度と風速の比をとったものを周速比と呼び、周速比 λ は次式で表される。

$$\lambda = \frac{D_1 \omega}{2U} = \frac{D_1 \frac{2\pi n}{60}}{2U} \quad (2-2-9)$$

風車の出力特性は、式(2-2-9)で表される周速比 λ と式(2-2-1-4)で表されるトルク係数 C_T 、式(2-2-8)で表される出力係数 C_P によって評価する。

2-2-2 風速分布測定

風洞の出口中心における流速の測定には、ピトー管（図2-2-8）及び精密差圧計（図2-2-9）を用いて行う。ピトー管の全圧孔，静圧孔にそれぞれビニールチューブを取り付け，精密差圧計に接続し，ピトー管を風洞出口断面の中心に設置する。差圧計内の液体はエタノールであり，比重計を用いて比重を0.80に調整している。エタノールの密度を ρ_e [kg/m³]，重力加速度を g [m/s²]，エタノール柱の高さを h_e [m]，角度係数を K （今回は $K=1$ ），空気密度 ρ [kg/m³]とすれば，風洞からの風速 U は式（2-2-10）で示される。

$$U = \sqrt{\frac{2\rho_e g h_e K}{\rho}} \quad (2-2-10)$$

また，空気密度 ρ [kg/m³]は温度 t [°C]，水銀気圧計の水銀柱の高さを h_{Hg} [mm]として，式（2-2-11）を用いて算出する。

$$\rho = \frac{1.293}{1+0.00367 \cdot t} \cdot \frac{h_{Hg}}{760} \quad (2-2-11)$$

風速分布の測定には，図2-2-10に示すように定温度型熱線風速計（KANOMAX 製，MODEL1008 DC VOLTMETER，MODEL1011 CTA ANEMOMETER（MODEL1010 CTA SYSTEM ANEMOMETER），MODEL1013 LINEARRIZER，MODEL1020 TEMPERATURE UNIT）を使用し，自動トラバース装置により熱線プローブを移動させて行った。パソコンにより制御された自動トラバース装置により，プローブの測定位置の移動を行うことができる。自動トラバース装置を使用することにより，主流方向，主流に対して鉛直方向，主流に対して水平方向の各位置に正確にかつ迅速に移動することが可能で，多くの点で流速を測定する場合には非常に有効である。図2-2-11に自動トラバース装置にプローブを設置した概観を示す。

熱線プローブは，X形熱線プローブ（KANOMAX 製，0252R-T5）を使用した。X形熱線プローブにはX形に配置した直径5 μ m長さ2mm（センサー長さ1mm）の2本のタングステン線が用いられている。また，X形熱線プローブは，2本の熱線からの出力の和，差をとることにより，プローブに対して平行・垂直方向の測定を同時に行うことができる。X形熱線プローブからの信号はリニアライザーにより線形化され，KanazawaAcqによって測定を行った。測定したデータはパソコンによってハードディスクに保存後，各方向における風速を算出した。本研究においては，図2-2-1に示す座標系と定義し， x 方向の風速を u ， y 方向の風速を v ， z 方向の風速を w とした。



図 2-2-8 ピトー管



図 2-2-9 精密差圧計 (傾斜マンノメータ)

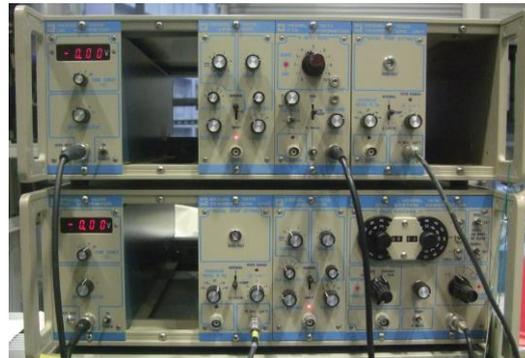


図 2-2-10 定温度型熱線風速計

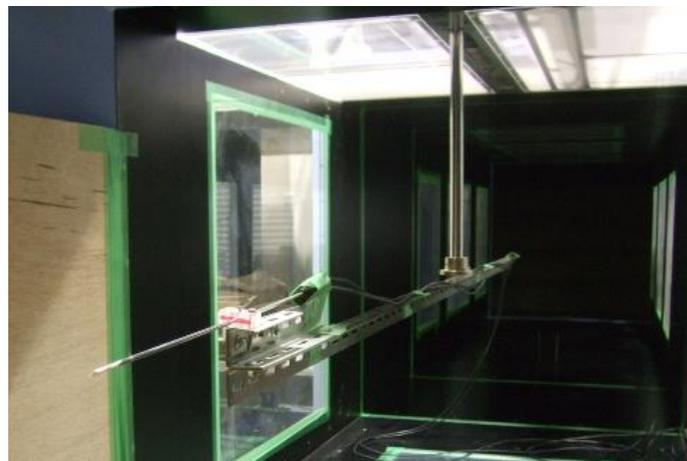


図 2-2-11 熱線プローブを設置した自動トラバース装置の概観

X形熱線プローブを用いてx方向とy方向における各点における速度を測定した場合の風速分布の算出過程を以下に説明する。

各時間における速度成分 u_i, v_i は、平均速度 \bar{u}, \bar{v} 、変動成分 u', v' として、

$$u_i = \bar{u} + u' \quad (2-2-12)$$

$$v_i = \bar{v} + v' \quad (2-2-13)$$

で表される。

ここでX形熱線プローブにおける2つの信号A, Bの処理方法について説明する。信号A, Bの各熱線出力が直線化されている場合、信号A, Bは平均成分に関しては $\bar{u} + \bar{v}$ と $\bar{u} - \bar{v}$ 、変動成分に関しては $u' + v'$ と $u' - v'$ を表し、これらの信号の和と差をとることにより \bar{u}, \bar{v}, u', v' が得られる。すなわち、X形熱線プローブから得られる出力電圧を E_A, E_B とすると、

$$E_A + E_B = 2B(u + u') \quad (2-2-14)$$

$$E_A - E_B = 2B(v - v') \quad (2-2-15)$$

と表され、平均速度分布は変換係数 B とすると、

$$\bar{u} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \frac{E_A + E_B}{2B} dt \quad (2-2-16)$$

$$\bar{v} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \frac{E_A - E_B}{2B} dt \quad (2-2-17)$$

となる。ここでサンプリング時間は実際には有限個であることに注意する。また、変動成分は、式(2-2-14)、式(2-2-15)から平均速度分布を差し引くことにより求めることができる。

2-2-3 可視化測定

本研究では、クロスフロー風車付きフェンス周辺の流れの可視化測定にスモークワイヤ法を用いる。流れに直交して張った金属細線上にあらかじめ流動パラフィンを塗布しておくことにより、瞬間的に大きな電流を流すと、ワイヤの発熱によって流動パラフィンの蒸気が、常温の空気流に触れて凝縮しミストとなる。このミストは写真写りが極めてよい白煙であり、これをトレーサとして細線を通過する空気流れの挙動を可視化が可能となる方法である。スモークワイヤ法は簡単な装置で手軽に行え、二次元流れのみならず三次元流れ、非定常流れの速度分布や流脈の可視化を行うことが可能である。

発煙のメカニズムは、細線で発生した熱エネルギー I^2R のうち、細線表面から熱伝達によって油膜に伝えられたものの残りは内部エネルギーとして細線に蓄えられ、熱容量に応じて温度上昇する。油膜に伝えられた熱のうち、気流へ伝えられた残りは油膜の温度上昇、蒸発に使われる。細線に加えるエネルギーに比べ気流への熱伝達はわずかであるので、発煙量は供給電力や細線温度、油膜の厚さ、沸点、表面張力、密度などの細線と油膜との間の熱伝達に関係する因子だけでほぼ決定される。しかし、これらの間の関係は微妙なので各自が最適値を経験的に把握することが重要である。

本研究における可視化実験装置の概観を図 2-2-12 に示す。図 2-2-12 に示すように、本実験では風洞からの一様流と直交するようにステンレス鋼製細線(ワイヤ)を設置し、流動パラフィンを可視化トレーサとしてクロスフロー風車付きフェンス周りの可視化を行った。テストセクションの上下には白熱球を設置し、可視化光源とした。ステンレスワイヤに流す電流は、電源を 100V コンセントから採り、変圧器によって適切な電圧(本研究においては約 80V) に設定した。なお、本実験時の風速は約 2m/s とした。

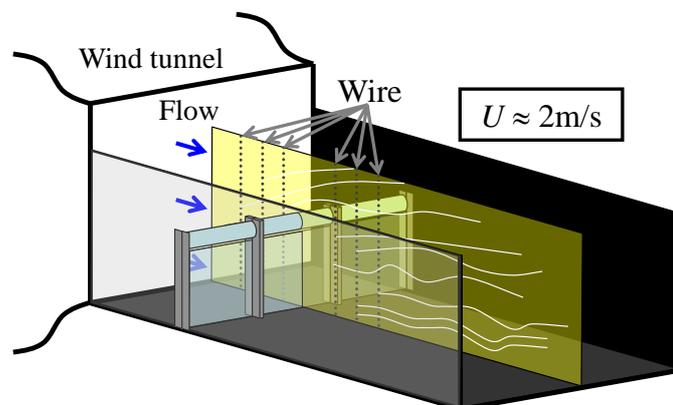


図 2-2-12 可視化実験装置概観

第3章 供試風車の性能

本章では、本研究で用いる実験装置における機械損失と供試風車の出力特性を示す。

3-1 供試風車の機械損失

風車には、シャフトやベアリング風車にはシャフトやベアリング、カップリングなどのエネルギーを損失する部分が存在する。これらは、風車出力中に常に負の作用をもたらすため、正味の風車出力を求めるには、機械損失を考慮する必要がある。機械損失測定時の実験装置の概観を図3-1-1に示す。クロスフロー風車のブレードを取り除いた状態でドライバにより負荷モータの回転数を制御しながら機械損失を測定する。測定値は損失トルクとなるため、負の値となる。正味風車出力は、損失トルクの絶対値を風車トルクに加算して計算することによって求めることが可能である。

図3-1-2に本実験装置における機械損失測定の結果を示す。図中には、測定によって得られたベアリング1つ分のトルク損失と、そのトルク損失を2倍した2つ分のベアリングのトルク損失もの示されている。本実験では1台の風車を支持するために2つのベアリングを使用されるため、測定したトルク損失を2倍したものを風車機械損失 T_{loss} とする。測定により得られた結果から、 T_{loss} の2次多項式近似曲線を求めると式(3-1-1)が得られた。なお、モータの回転数を n [rpm] とする。

$$T_{loss} = 8.39 \times 10^{-10} n^2 - 3.75 \times 10^{-6} n \quad (3-1-1)$$

以後の風車出力測定実験結果は、実際に測定されたトルクから式(3-1-1)で求められる風車機械損失を差し引いた値を発生トルクとしている。

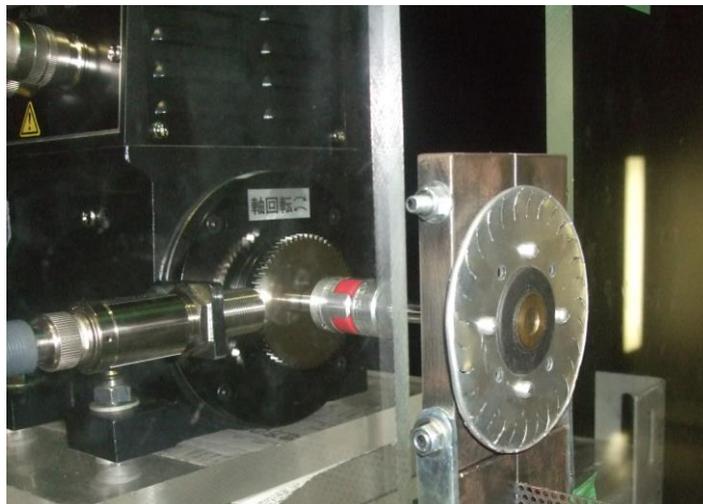


図3-1-1 機械損失測定実験時の実験装置概観

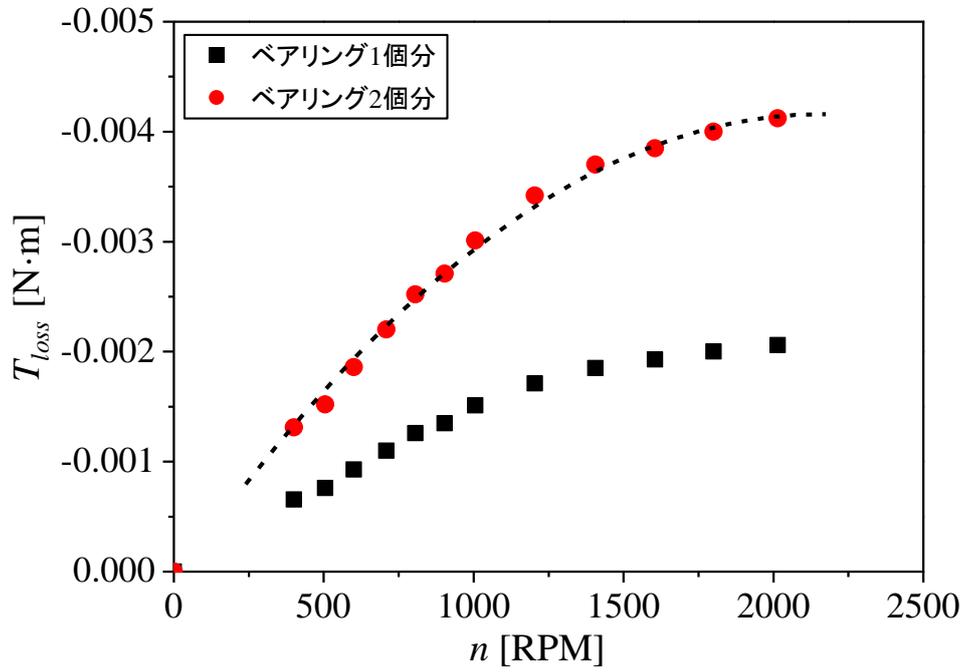


図 3-1-2 機械損失

3-2 供試風車の風車出力特性

本研究で用いる供試風車であるクロスフロー風車単体における風速 $U = 5, 7, 9 \text{ m/s}$ における風車出力特性を図 3-2-1 に示す。風速に関わらず，風速 $U = 5 \sim 9 \text{ m/s}$ における出力特性はほぼ一致し，周速比 $\lambda \approx 0.4$ 付近で最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.12$ を示す。また図中には，谷野ら (2007) のクロスフロー風車 ($D_1 = 120 \text{ mm}$, $L = 250 \text{ mm}$, $\sigma = 0.76$, $l_c = 20 \text{ mm}$, 翼取付角 $\beta_0 = 45^\circ$, $U = 8 \text{ m/s}$) や重光ら (2008) のクロスフロー風車 ($D_1 = 150 \text{ mm}$, $L = 450 \text{ mm}$, $l_c = 17.3 \text{ mm}$, $\beta = 40^\circ$, $U = 20 \text{ m/s}$) のデータも示す。本供試風車の方が他の風車に比べて，最大出力係数 C_{Pmax} が大きい。本研究で用いるクロスフロー風車のアスペクト比が $L/D_1 = 5$ であるのに対して，谷野らや重光らの風車の場合はアスペクト比が $L/D_1 \approx 2.1, 3$ となる。他の風車では，アスペクト比 L/D_1 が小さいことの 2 次元性や翼性能に及ぼすレイノルズ数の影響のため，出力特性が小さくなっていると考えられる。

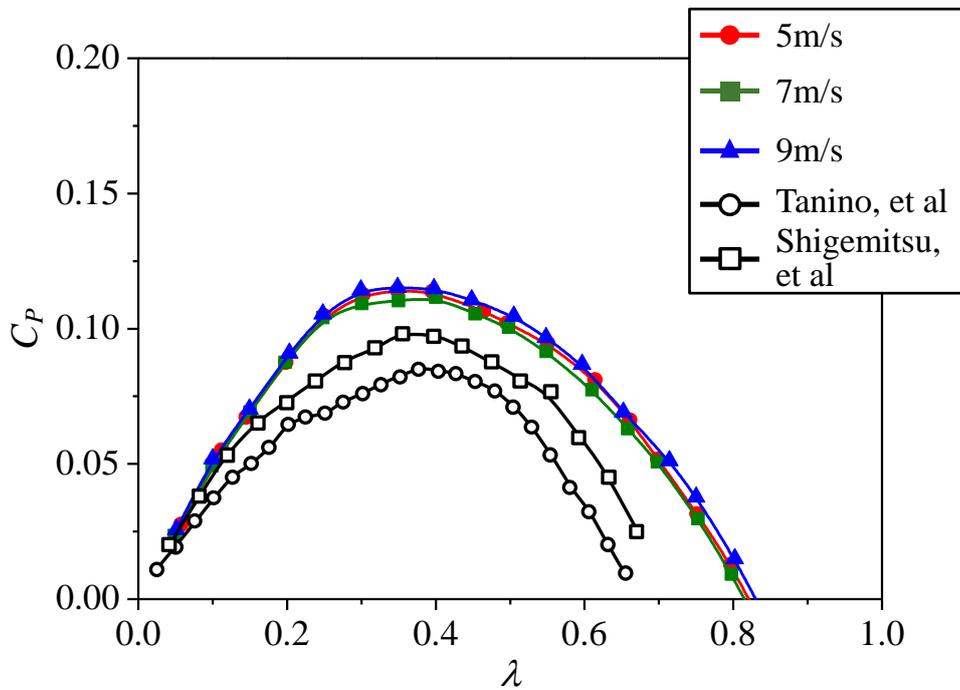


図 3-2-1 クロスフロー風車の風車出力係数

第4章 フェンス上部における風車設置位置の検討

4-1 はじめに

北陸地方などの冬季に強風にみまわれる地域の道路では、道路の側面に防風フェンスが設置されている。防風フェンスの上部は、吹き上がり流れの影響などから風速が速く、流量が増すことが一般的に知られている。

フェンス上部の時間平均した風速分布を図4-1-1に示す。風速は $U=7\text{ m/s}$ とした。フェンス上部風速分布の測定範囲は $x/H=-0.2\sim 0.4$ 、 $y/H=1.01\sim 1.61$ であり、 x 方向、 y 方向共に 10 mm 間隔で測定した。また、図中の黒の実線は、 $\sqrt{\bar{u}^2+\bar{v}^2}/U=1.0$ となる線で、増速域と減速域の境界を表わしている。風速はフェンス上端に近い位置で最も速く、 $\sqrt{\bar{u}^2+\bar{v}^2}/U\approx 1.5$ となっている。高い出力を得ようとした場合、進み側ブレードが増速域にあり、戻り側ブレードが減速域にある場合、最も高い出力を得ることができると予想できる。

本章では、フェンス上部に設置する風車の設置位置を検討するために、まずフェンス直上に風車を設置し、垂直方向に設置位置を変化させた場合の風車出力特性及び風車後流やフェンス下流の流れ場に及ぼす影響を示し、最適な垂直方向の設置位置を検討する。その次に、より高い出力を得るために、水平方向にも設置位置を変化させた場合の風車出力特性及びフェンス下流の流れ場に及ぼす影響を示し、最適な水平方向の設置位置を検討する。

4-3節に垂直方向に風車の設置位置を変化させた場合の風車出力特性及び風車後流やフェンス下流域の風速分布を示し、4-4節に、水平方向にも風車の設置位置を変化させた場合の風車出力特性及びフェンス下流域の風速分布を示す。

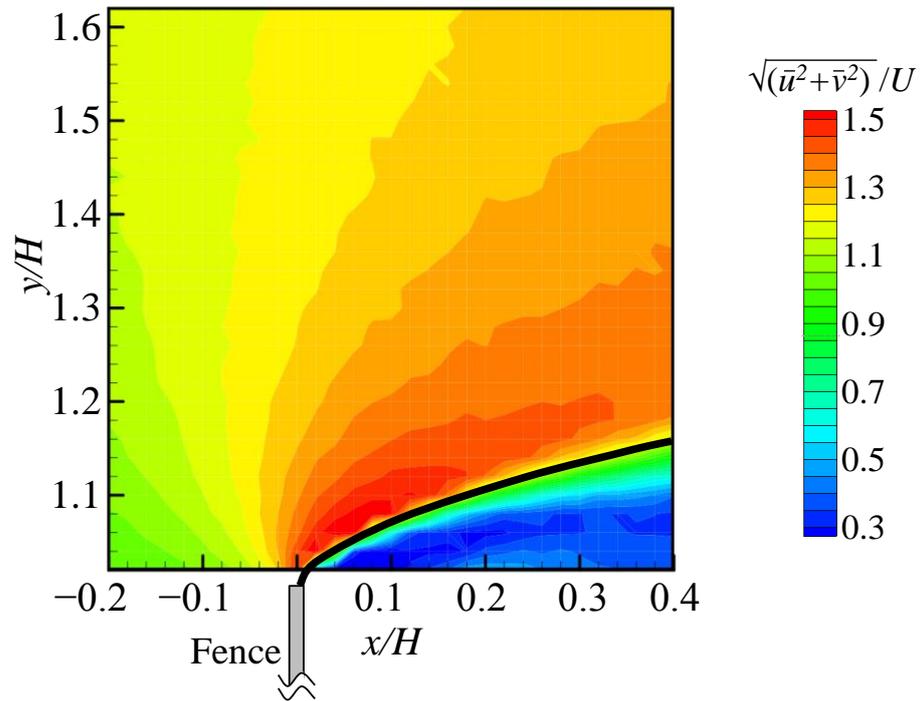


図 4-1-1 有孔フェンス上部の風速分布 ($U = 7 \text{ m/s}$)

4-2 実験概要

本実験では、図 4-2-1 に示すように、フェンス上端と風車下端の隙間を C 、風車の中心軸とフェンスの水平方向の移動距離を A とし、隙間 C 及び移動距離 A を変化させて風洞実験を行った。本実験においては、フェンス中央の床面と接する部分を原点とし、隙間 C 及び移動距離 A を風車外径 D_1 で無次元化した値をクリアランス $c (= C/D_1)$ と水平位置 $a (= A/D_1)$ とした。

垂直方向における風車設置位置の検討では、フェンス直上 ($a = 0.00$) に風車を設置し、クリアランス $c = 0.0625 \sim 0.313$ と変化させた。風速 $U = 7, 9 \text{ m/s}$ と変化させて、風車出力を測定した。また、風車後流及びフェンス下流域の風速分布を測定した。

次に行った水平方向における風車設置位置の検討においては、垂直方向に設置位置を変化させた場合に、風車回転方向 CW で最も風車性能がよかったクリアランス c を用いて行った。水平位置 a は風車回転方向 CW の場合 $a = -0.250 \sim 1.00$ 、CCW の場合 $a = -1.00 \sim 0.250$ の範囲で変化させた。水平位置 a の検討においては、風速 $U = 5 \sim 9 \text{ m/s}$ と変化させて、風車出力を測定した。また、フェンス上部付近及びフェンス下流域の風速分布を測定した。

風速 U は風洞の出口中心における風速をピトー管及びマノメータを使用して測定した。風速分布は、自動トラバース装置に取り付けられた X 形熱線プローブを用いて測定した。なお、データはサンプリング周波数 10kHz、測定点数 4 万点で取得し、時間平均風速や乱れ強さの値を計算した。

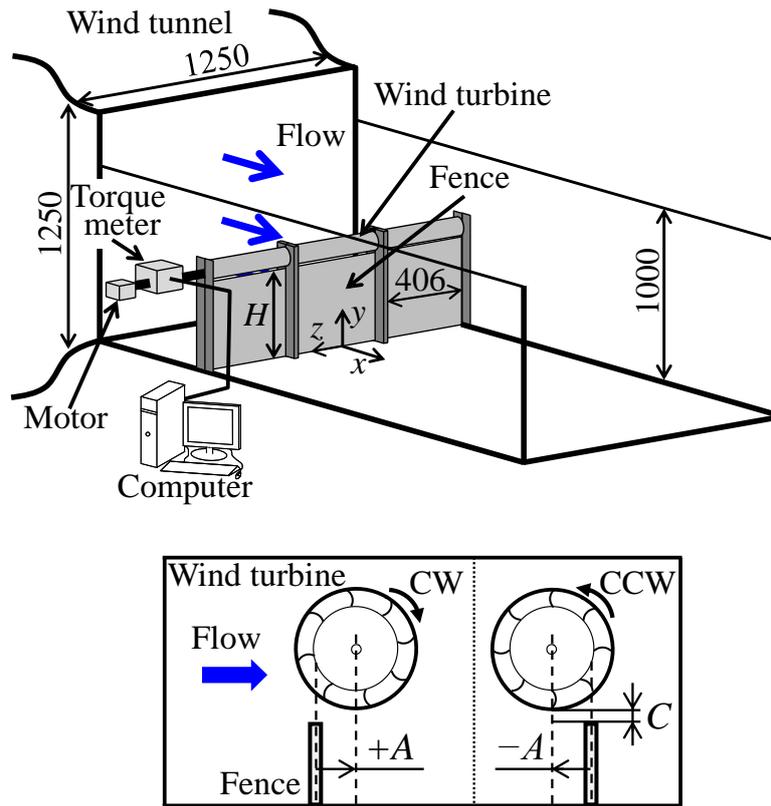


図 4-2-1 実験装置概要及びクリアランス C , 移動距離 A の定義

4-3 垂直方向における設置位置の検討

有孔フェンスの直上 ($a = 0.00$) に風車を設置した場合における、フェンス上端と風車下端のクリアランス c を変化させた場合の風車出力及び風車後方、フェンス下流域の風速分布に与える影響を示す。

4-3-1 風車出力特性

有孔フェンスの直上 ($a = 0.00$) に風車を設置し、風速 $U = 7 \text{ m/s}$ において、クリアランス c を変化させた場合の風車回転方向 CW, CCW における風車出力特性を図 4-3-1 と図 4-3-2 に示す。図中には、フェンスが無い状態の風車単体の出力特性も示す。フェンス直上に風車を設置することによって、クリアランス c に関わらず出力特性は風車単体の場合よりも 2 倍以上大きくなる。これは、風車出力が風速の 3 乗に比例することと、4-3-2 項で示すようにフェンス上部の速度上昇が一樣流の約 1.4 倍となることから判断できる。風車回転方向 CW の場合、図 4-3-1 に示すように、クリアランス $c = 0.0625$ の場合に最も風車出力が大きいことがわかる。また風車回転方向 CCW の場合は、図 4-3-2 に示すように、クリアランス $c = 0.185, 0.313$ の場合に風車出力が大きくなり、ほぼ同じ値であることがわかる。また風車回転方向に関わらず、各クリアランス c において最大出力係数 C_{Pmax} を得る周速比 λ は、おおよそ 0.40 である。

図 4-3-3 及び図 4-3-4 に風車回転方向 CW, CCW の場合のクリアランス c に対する最大出力係数 C_{Pmax} の変化を示す。フェンスがない風車単体の場合における最大出力係数 C_{Pmax} をクリアランス $c = \infty$ として示している。図 4-3-3 に示すように風車回転方向 CW の場合、クリアランス c が大きくなるにつれて、最大出力係数 C_{Pmax} が低下していることがわかる。一方で、図 4-3-4 に示す風車回転方向 CCW の場合、クリアランス c が大きくなるにつれて、最大出力係数 C_{Pmax} が上昇し、 $0.20 \leq c$ においては、ほぼ同じ値になることがわかる。この原因については、4-3-2 項で述べる。

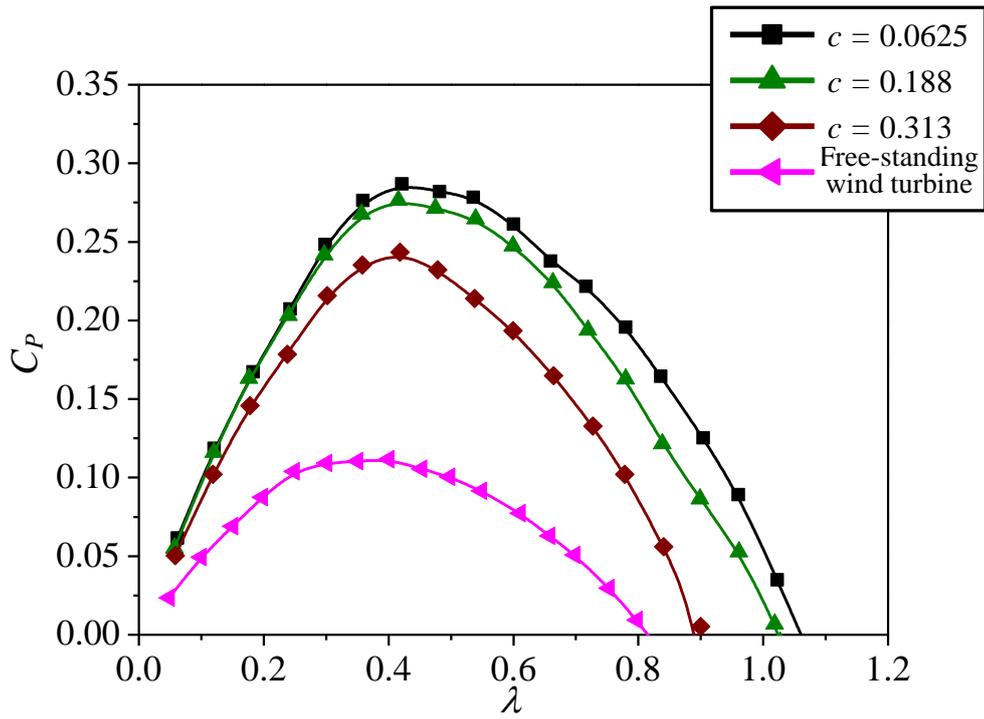


図 4-3-1 クリアランス c を変化させた場合の出力係数 (CW, $U = 7$ m/s)

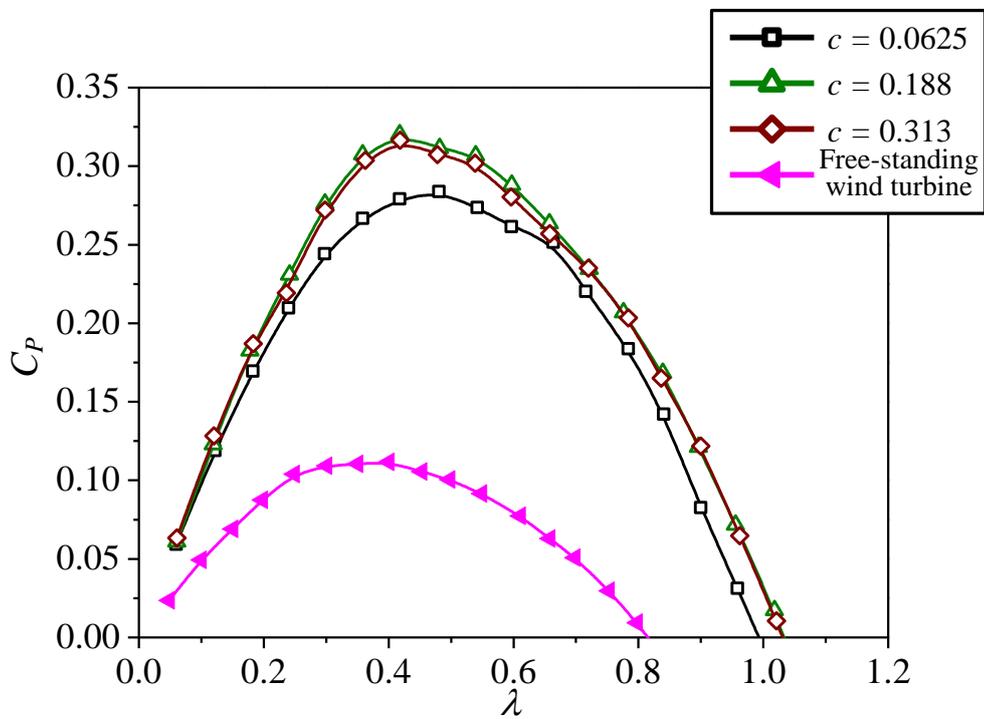


図 4-3-2 クリアランス c を変化させた場合の出力係数 (CCW, $U = 7$ m/s)

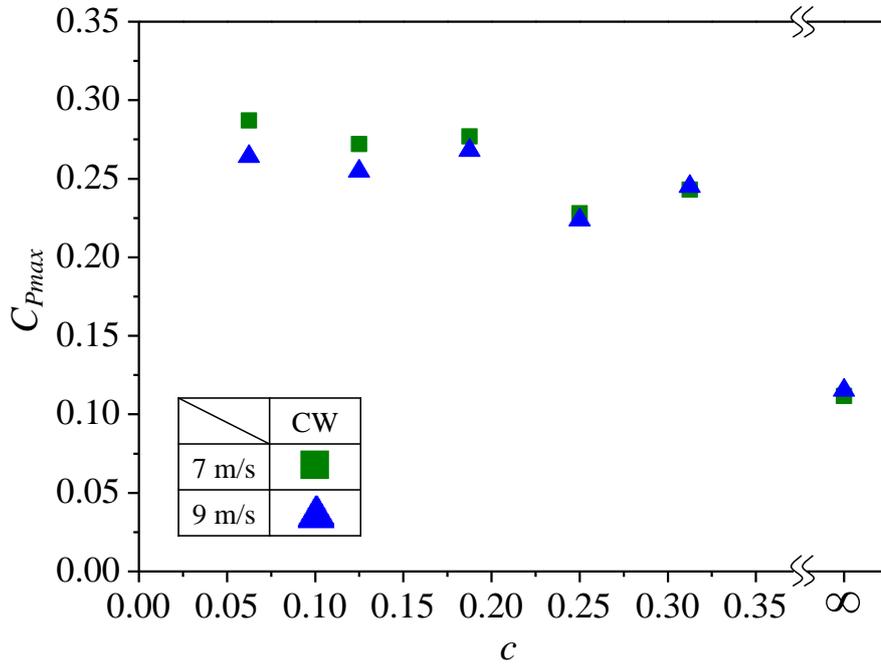


図 4-3-3 クリアランス c に対する最大出力係数 (CW)

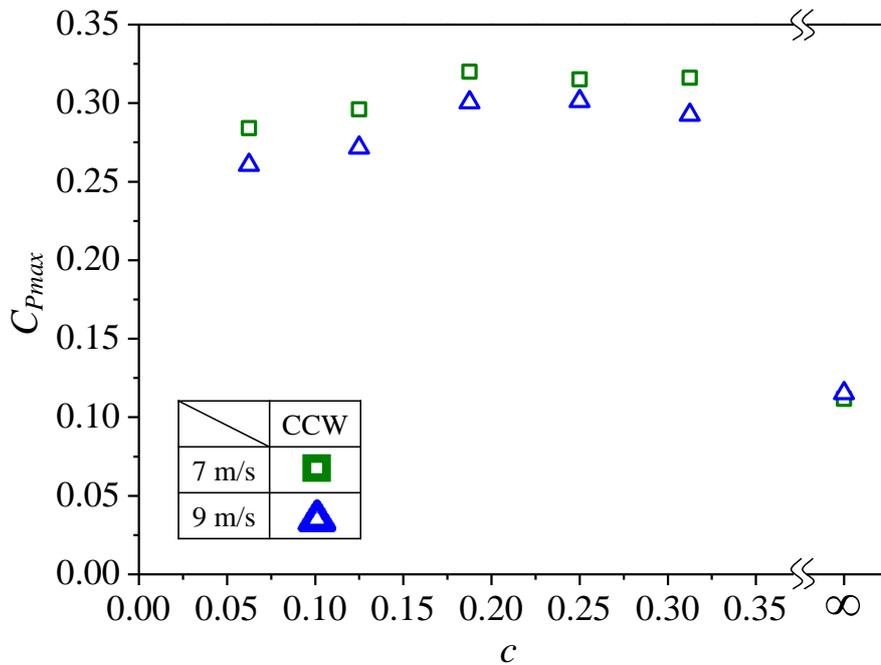


図 4-3-4 クリアランス c に対する最大出力係数 (CCW)

4-3-2 風車後流の風速分布

有孔フェンスの直上 ($a = 0.00$) に風車を設置し、クリアランス c を変化させた場合の風車回転方向 CW, CCW における風車後流の平均主流風速分布を図 4-3-5 と図 4-3-6 に示す。なお、測定時の風速は $U = 5 \text{ m/s}$ とした。

図 4-3-5 (a) に示すように、風車回転方向 CW でクリアランス c が小さい場合は、風車の後方には減速領域が形成されており、フェンスで堰き止められ吹き上がる流れが風車の回転方向と同じ方向であるために風車の回転が促進されて風車出力が向上する。クリアランス c が大きくなるにつれて、クリアランス内の流れ（以下、「隙間流れ」という）の流速が増加し、この流れが風車の回転方向と逆向きの流れであるため、風車出力は低下すると考えられる。したがって、図 4-3-3 でみられるようにクリアランス c が小さい方が風車出力は上昇する。

また風車回転方向 CCW の場合は、図 4-3-6 (a) に示すように、クリアランス c が小さい場合の風速分布は、図 4-3-5 (a) に示す風車回転方向 CW の場合と比較して減速領域は小さく、吹き上がる流れとは風車の回転方向が逆であるため、風車上端からの速い流れの傾き角度は小さくなっている。一方で、クリアランス c が大きくなると図 4-3-6 (e) からわかるように、隙間流れが風車回転方向と同じ方向であるため、流速が増加し、風車出力が上昇していると言える。したがって、図 4-3-4 でみられるようにクリアランス c が大きい方が風車出力は上昇する。しかし、クリアランス c をさらに大きくし、フェンスの影響がなくなる上部まで移動させた場合には、一様流内に設置した風車単体の出力特性になると予想される。

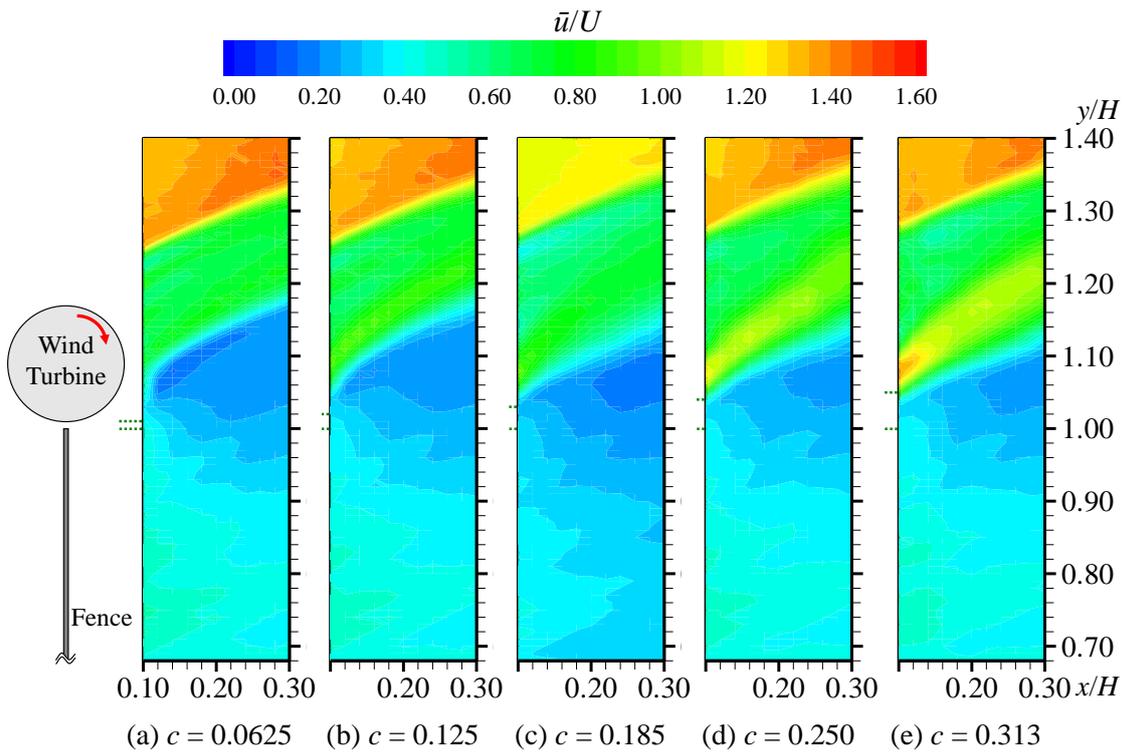


図 4-3-5 風車後流における風速の等値分布 (CW)

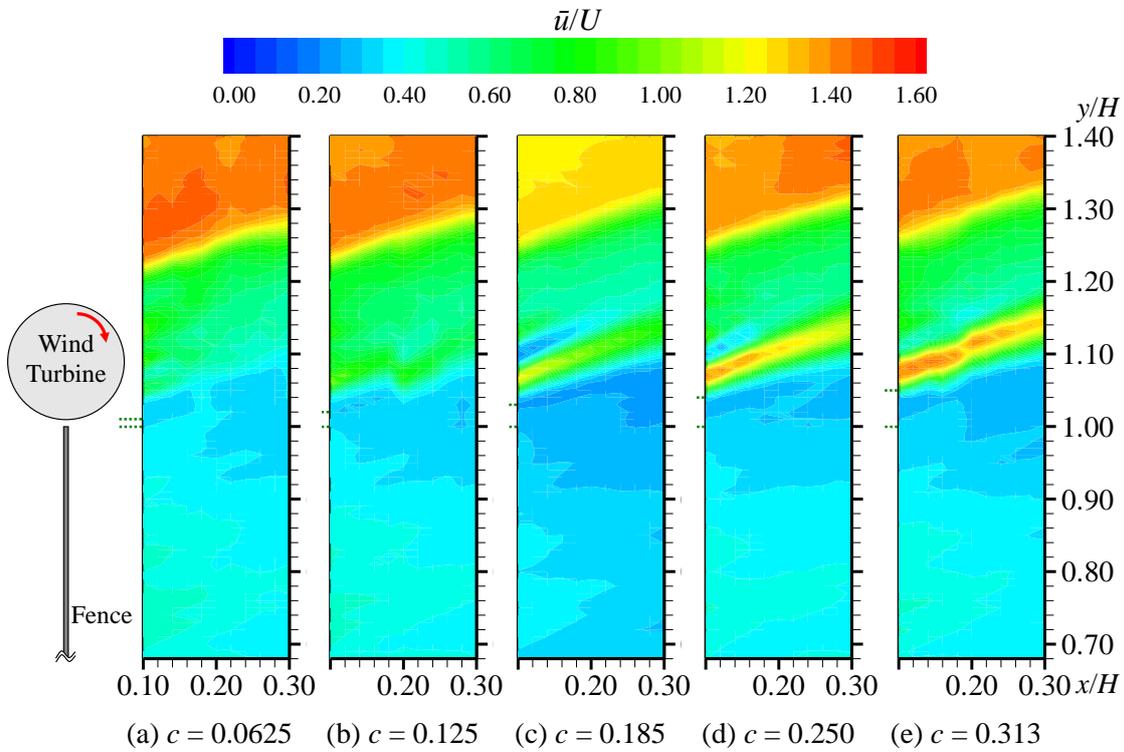


図 4-3-6 風車後流における風速の等値分布 (CCW)

4-3-3 フェンス下流域の風速分布

図4-3-7～図4-3-10に風速 $U=7$ m/s におけるフェンス下流域の時間平均した主流方向の風速分布と乱れ強さを示す。風車下流域の風速分布は、 $x/H=0.6, 1.2, 1.8, 2.4$ における $y/H=0.8\sim 1.8$ の範囲を y 方向に 25 mm 間隔で測定した。

図4-3-7及び図4-3-8に示すように風車回転方向に関わらず、フェンス直上 ($a=0.00$) に風車を設置することによりフェンスのみの時に比べ、 $1.2\leq y/H\leq 1.4$ において減速領域が広がっている。図4-3-7に示すように、風車回転方向 CW の場合、 $x/H=0.6$ ではクリアランス c が小さい方 ($c=0.0625$) が隙間流れの速度が小さいため、 $1.2\leq y/H\leq 1.3$ で減速していることがわかる。そして、その影響は下流の $x/H=2.4$ においても確認できる。一方で風車回転方向 CCW の場合、クリアランス c が大きい方 ($c=0.313$) が $x/H=0.6$ の $1.1\leq y/H\leq 1.2$ において風速が増加し、その影響が $x/H=2.4$ においても残っている。また、 $x/H=2.4$ の風速分布を比較すると風車回転方向が CW の方が CCW に比べて、減速領域が広がっている。

図4-3-9及び図4-3-10は各風車回転方向における主流方向の乱れ強さを示している。 $x/H=0.6$ では風車回転方向に関わらず、クリアランス c が小さい場合に比べて、クリアランス c が大きい方が乱れ強さが全体的に大きくなっている。フェンス上部に風車を設置することによって、乱れ強さが大きい範囲が広がることがわかる。しかし、 $x/H=2.4$ においては、フェンスのみの場合に比べて、風車を設置することによって最も大きい乱れ強さは小さな値になっていることがわかる。クリアランス c が小さい場合、乱れ強さが最も大きくなる高さはフェンスのみの場合よりも高い位置であることもわかる。

以上、4-3-1項に示す出力特性の結果と4-3-2項及び4-3-3項に示す風速分布の結果から、より高い風車出力と減速効果の両方を備えたフェンス直上 ($a=0.00$) への風車の設置方法は、風車回転方向を CW、クリアランス c を小さくして風車を設置する方が良いといえる。

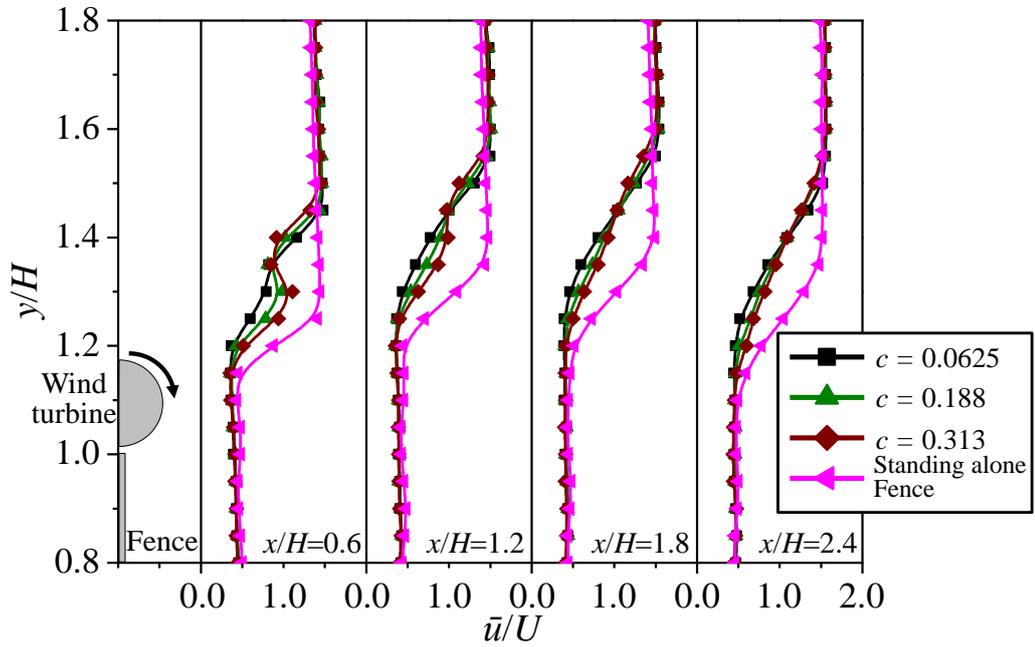


図 4-3-7 各クリアランス c におけるフェンス下流域の主流方向風速分布 (CW, $U = 7$ m/s)

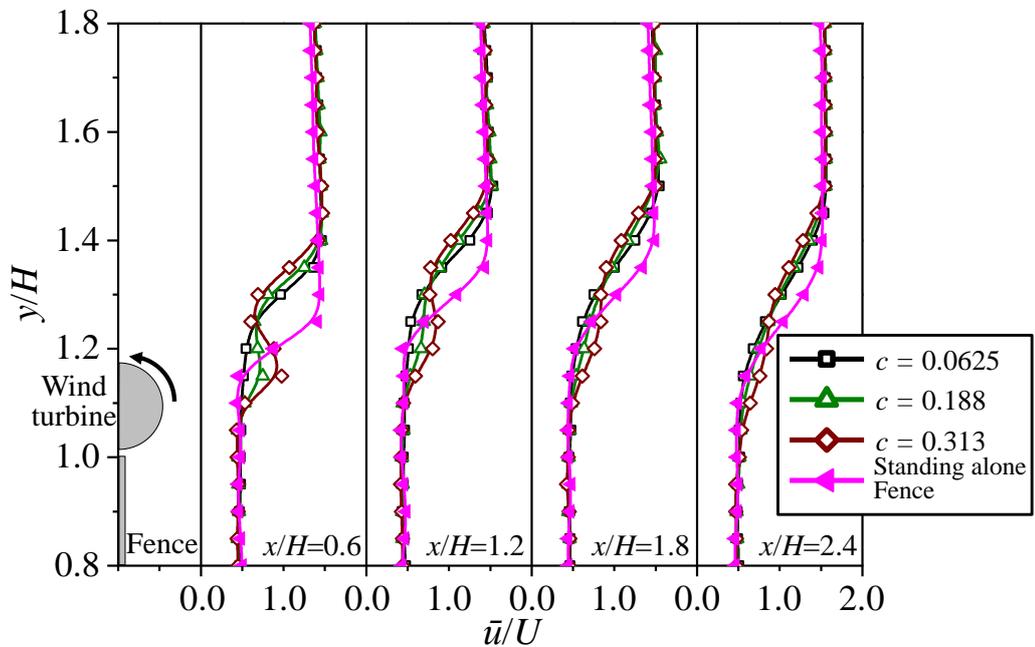


図 4-3-8 各クリアランス c におけるフェンス下流域の主流方向風速分布 (CCW, $U = 7$ m/s)

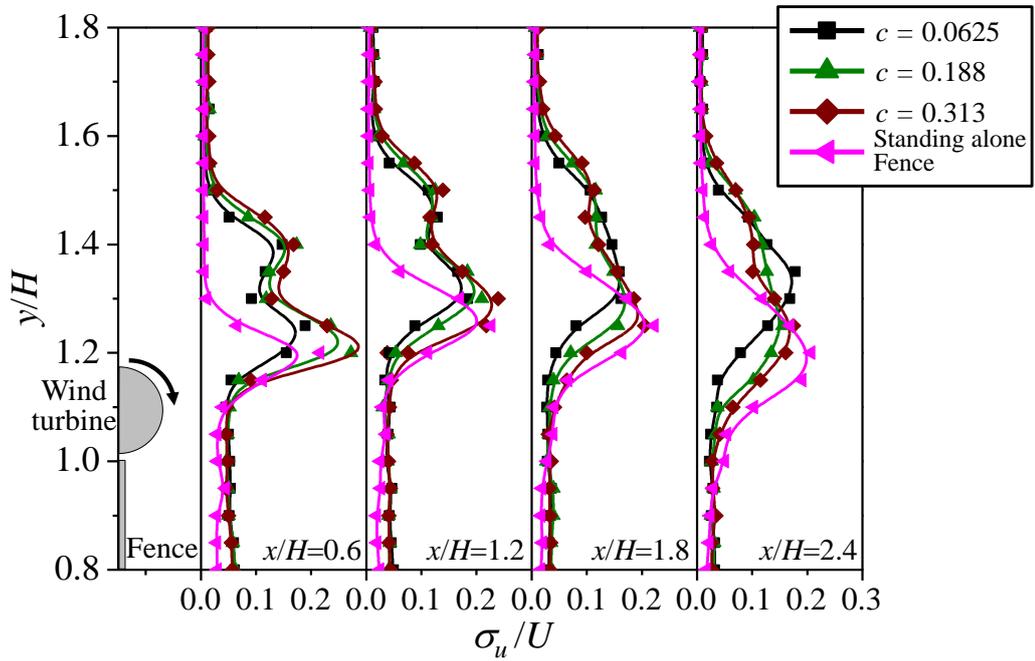


図 4-3-9 各クリアランス c におけるフェンス下流域の主流方向乱れ強さ (CW, $U = 7$ m/s)

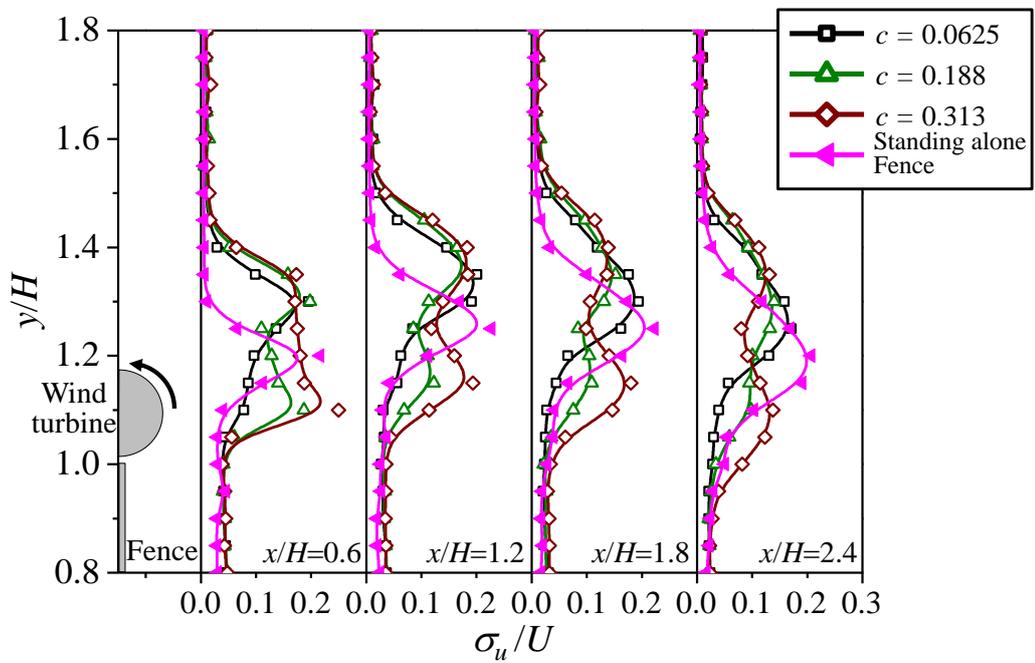


図 4-3-10 各クリアランス c におけるフェンス下流域の主流方向乱れ強さ (CCW, $U = 7$ m/s)

4-4 水平方向における設置位置の検討

4-3節で示したように、フェンスの直上に風車を設置する場合、フェンス上端と風車下端のクリアランスが小さく、風車回転方向CWとした際に最も風車性能がよく、フェンス下流域における減速効果が大きかったことから、本実験では、フェンス上端と風車下端のクリアランスは $c = C/D_1 = 0.0625$ とした。

4-4-1 風車出力特性

フェンス上部に風車を設置し、水平位置 a を変化させた場合の風車回転方向CW及びCCWの風車出力特性を図4-4-1及び図4-4-2に示す。本クロスフロー風車単体の出力係数は $U > 5 \text{ m/s}$ で周速比に対して同じ特性を示すため、風速 $U = 7 \text{ m/s}$ における結果のみを示す。なお、風車とフェンスの位置関係がわかるように各図の上部に風速分布の中に風車位置を破線で示した図も示す。図4-4-1の風車回転方向がCWでは、水平位置 $a = 0.00, 0.625, 1.00$ の場合の風車位置を示している。一方で図4-3-2の風車回転方向がCCWでは、水平位置 $a = -1.00, -0.250$ の場合の風車位置を示している。

図4-4-1の風車回転方向CWの場合、風車をフェンス直上($a = 0.00$)に設置することで最大出力係数 C_{pmax} は約0.22となり、風車単体の場合と比べ約2.0倍の出力係数となった。風車を水平位置 $a = 0.00$ の位置からフェンス下流側へ移動させて設置することで、風車出力はさらに増大し、 $a = 0.625$ の位置で最も高い最大出力係数 C_{pmax} を示す。その値は約0.27であり、これは風車単体の場合と比べ約2.5倍となる。これは、風車の進み側ブレードが増速された風を受けるだけでなく、風車がフェンスに対して下流側へ移動するにつれて戻り側ブレードが減速域に入り、ブレーキとなる力が減少したことによる出力の増加であると考えられる。最も高い出力を示した風車位置では、風車断面積の約6割が増速域に入っている。この結果は構造物端壁流れを利用した谷野ら(2007)の実験結果と定性的に一致している。水平位置 $a = 1.00$ の位置に風車を設置した場合、減速域に入る風車の面積が大きくなり、出力係数は低下する。逆に風車をフェンス上流側 $a = -0.250$ に設置した場合、戻り側ブレードに増速された風が当たることで、出力係数は風車をフェンス直上に設置した場合よりも低下する。また、トルク係数 C_T は、抗力駆動型風車の特性に見られるように周速比の増加とともに減少している。周速比 $\lambda < 0.4$ の領域において水平位置 $a = 0.00$ のトルク係数は、 $a = 0.625, 1.00$ の場合と比べ大きな差が見られない。しかし、周速比 $\lambda > 0.4$ では、水平位置 $a = 0.00$ のトルク係数が大きく低下し始める。これは周速比が大きくなるにつれて進み側ブレードに当たる風の影響よりも、戻り側ブレードに当たる風の影響が強くなることで、減速域に入っていない水平位置 $a = 0.00$ の風車では、トルク係数の低下が顕著に表れるものと考えられる。

次に図 4-4-2 の風車回転方向 CCW の場合、水平位置 $a = 0.00$ において最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.18$ を示し、風車単体の場合と比べ約 1.6 倍の出力係数となった。風車回転方向 CW の場合とは逆に、風車をフェンス上流側へ移動させて設置することで、風車出力はさらに増大し、水平位置 $a = -0.250$ の位置で最も高い最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.22$ を示す。この値は、風車単体の場合と比べると約 2.0 倍になる。これは進み側ブレードが増速された風を受けているからだと考えられる。この時のトルク係数をみると、最大トルク係数は、風車回転方向 CW における最も高いトルク係数とほぼ同じ値となっている。しかし、前述したように、戻り側ブレードに当たる風が速いために、最大出力係数は風車回転方向 CCW の場合よりも小さくなっている。水平位置 $a = -0.250$ からさらに上流側に風車を設置すると、出力係数は低下し始める。水平位置 $a = -1.00$ ではフェンス直上に風車を設置した場合よりも低い出力係数となり、最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.15$ となる。これは、風車がフェンスから離れることで、増速されたフェンスからの吹き上がり風の影響を受けなくなるからである。逆にフェンス下流側 $a = 0.250$ に風車を設置した場合、進み側ブレードが減速域に入ること出力係数が若干低下する。

図 4-4-3 及び図 4-4-4 に風車回転方向 CW 及び CCW の場合の水平位置 a に対する最大出力係数 C_{Pmax} の変化を示す。フェンスがない風車単体の場合における C_{Pmax} を水平位置 $a = \infty$ として示している。風車回転方向 CW の場合、水平位置 $a = 0.250 \sim 1.00$ の広い範囲で最大出力係数 C_{Pmax} が 0.25 以上となり、なだらかな山形の曲線を描く。一方で、風車回転方向 CCW の場合、最大で $C_{Pmax} \approx 0.22$ であり、風車出力の向上は風車回転方向 CW の場合よりも小さくなる。さらに、水平位置 $a = -0.250$ の位置でピークを持つような曲線を描いており、その前後における最大出力係数 C_{Pmax} の低下割合が風車回転方向 CW の場合よりも大きい。これらのことから、発電に適する設置条件は、風車回転方向 CW で、フェンス下流側に風車を設置した状態であると言える。また、反対の方角から風が吹いて来る時も想定した場合には、風車回転方向も逆になるため、風車の水平位置は、 $|a| = 0.25 \sim 0.5$ の範囲に設定すれば良い。

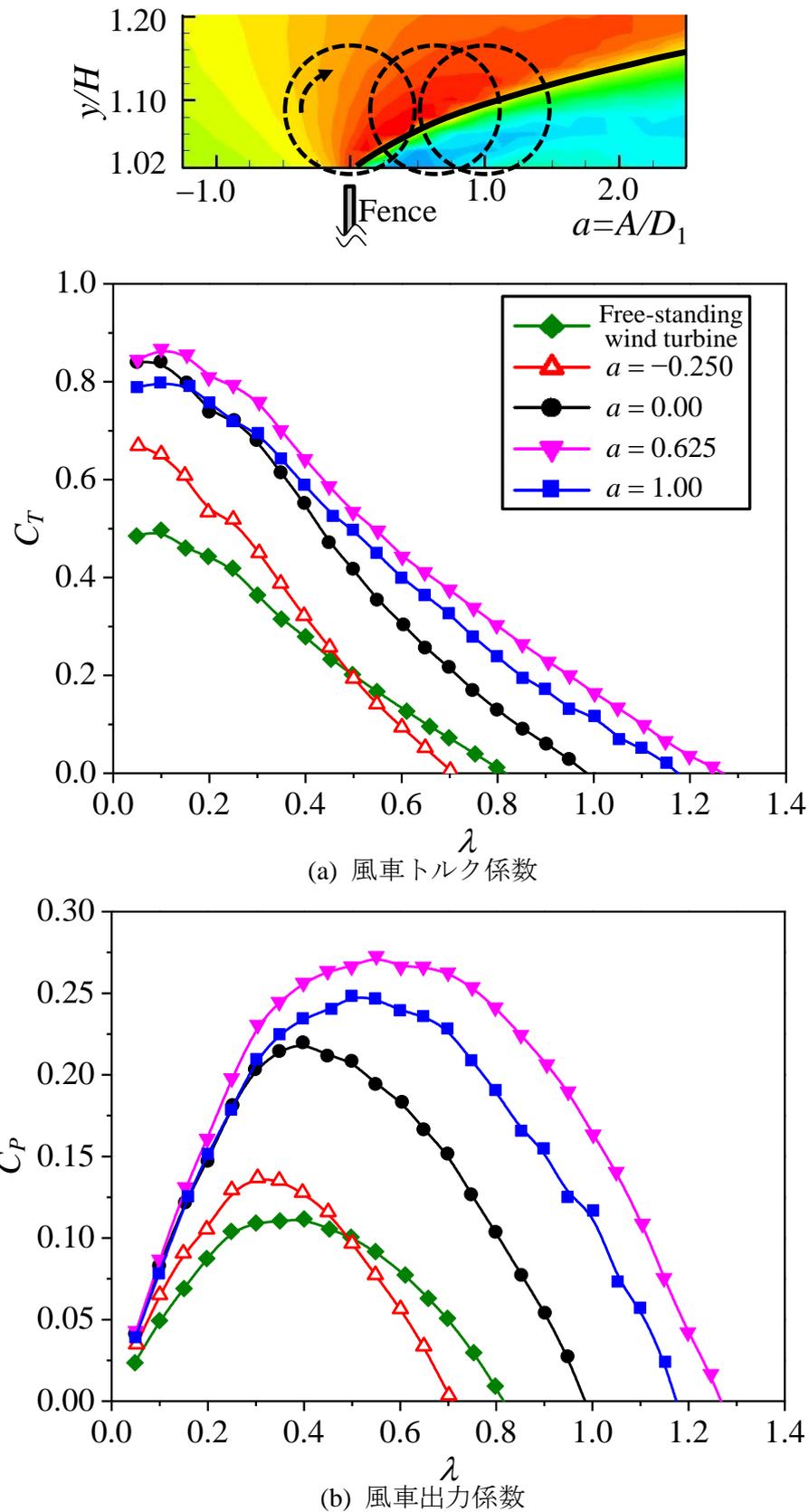


図 4-4-1 各水平位置 a における風車トルク係数と出力係数 (CW, $U = 7$ m/s)

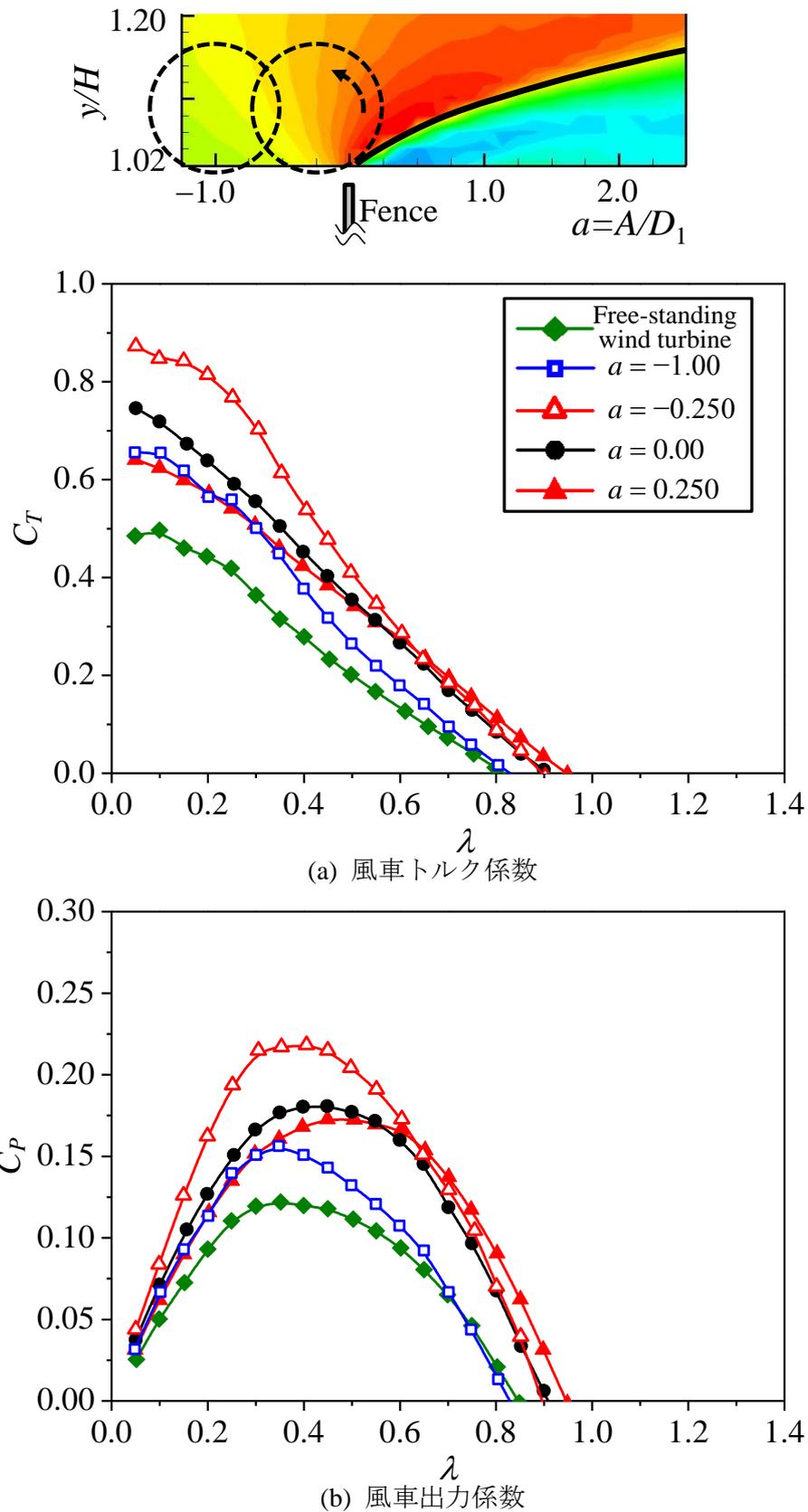


図 4-4-2 各水平位置 a における風車トルク係数と出力係数 (CCW, $U = 7$ m/s)

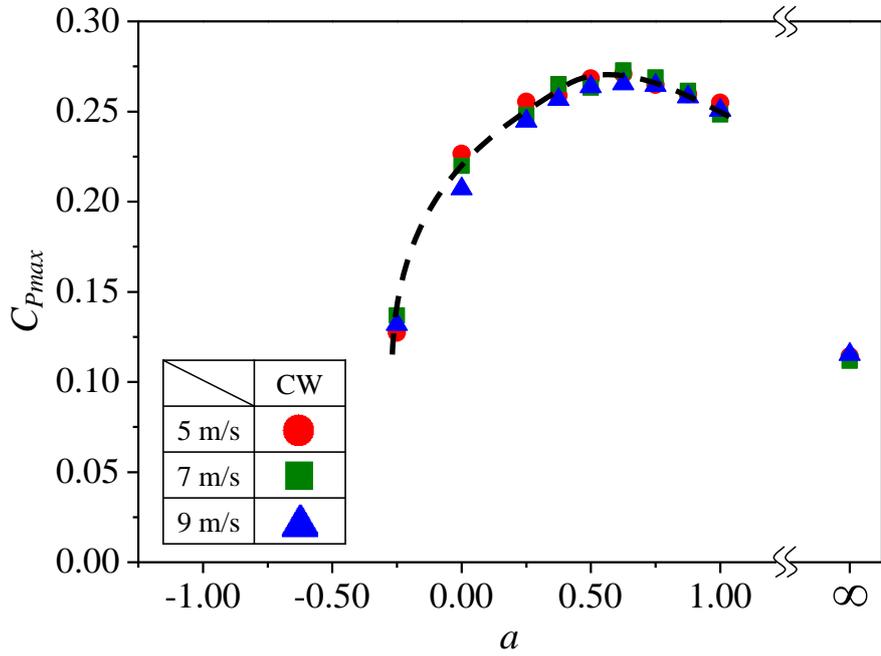


図 4-4-3 水平位置 a に対する最大風車出力係数 (CW)

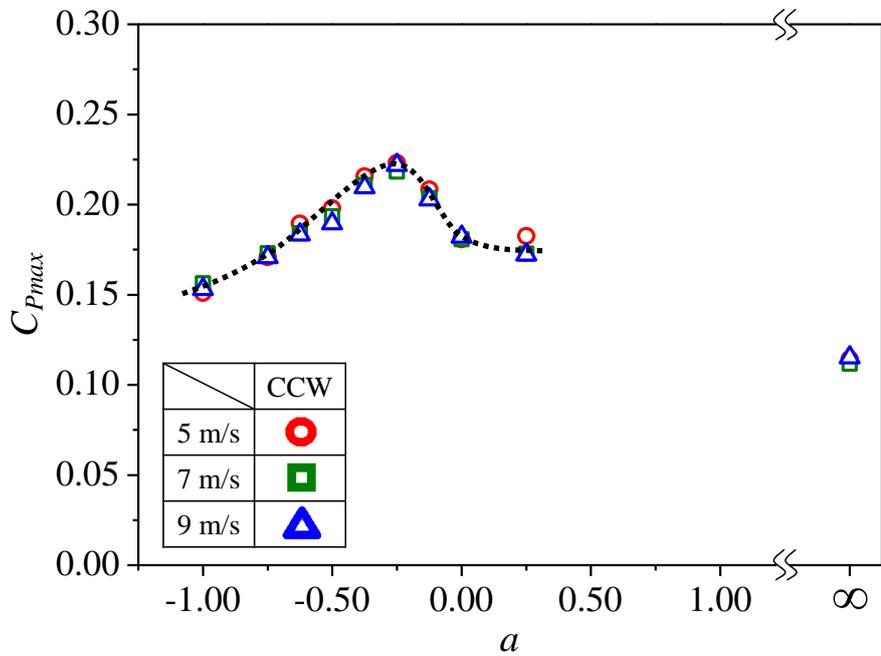


図 4-4-4 水平位置 a に対する最大風車出力係数 (CCW)

4-4-2 風速分布

図4-4-5～図4-4-8に風速 $U = 7 \text{ m/s}$ におけるフェンス下流域の時間平均した主流方向の風速分布と乱れ強さを示す。風車下流域の風速分布は、 $x/H = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ における $y/H = 0.8 \sim 1.8$ の範囲を y 方向に 20 mm 間隔で測定した。

図4-4-5及び図4-4-7の風車回転方向CWの場合は、水平位置 $a = 0.00, 0.625, 1.00$ の位置における結果を示す。図4-4-6及び図4-4-8の風車回転方向CCWの場合は、水平位置 $a = 0.00, -0.250, -1.00$ の位置における結果を示す。なお、各図中には風車が設置されていないフェンス単体の場合における分布も示す。

図4-4-5の風車回転方向CWの場合、 $x/H = 0.5$ の位置において、 $y/H = 1.1 \sim 1.3$ の風車後方においてフェンス単体の場合よりも減速されることがわかる。 x/H が大きくなるにつれてなだらかな曲線となり、 $x/H = 2.0$ の位置において、 $y/H = 1.1 \sim 1.4$ の高さで、フェンス単体の場合よりも風速が減少する。風速は水平位置 $a = 0.00$ のときに最も大きく減速される。水平位置 $a = 0.650, 1.00$ では風車断面積の半分程度が減速領域に入るため、フェンスによって増速された流れを受ける面積が小さくなったことで $a = 0.00$ の場合よりも減速効果が小さくなる。図4-4-7の乱れ強さの分布を見ると、風車上部の進み側ブレードから発生した乱れが $y/H = 1.25 \sim 1.45$ に広がっている。

図4-4-6の風車回転方向CCWの場合、 $x/H = 0.5$ の位置において、 $y/H = 1.1 \sim 1.3$ の間に風車設置位置によって高さが異なるが、フェンス単体の場合と比べ風速が減速する領域が見られる。風車回転方向CWの場合と同様に x/H が大きくなるにつれて風速のピークがなくなり、 $x/H = 2.0$ の位置においては、風車設置位置によらず $y/H = 1.1 \sim 1.4$ の高さで減速領域が確認できるが、CWの場合に比べて小さく、水平位置 $a = -1.00$ の風車ではフェンス単体の場合と似た風速分布になっている。図4-4-8の乱れ強さの分布を見ると、水比位置 $a = -1.00$ ではフェンスとの隙間間隔が大きいため、そこを通過する速い流れに起因する乱れのピーク($x/H = 0.5$ 断面の $y/H = 1.15$ 付近)が、風車上部の戻り側ブレードから発生していく乱れのピークより大きくなっている。水平位置 $a = -0.250, 0.00$ の風車においては、フェンスとの隙間を通過する流れが速くないため、戻り側ブレードから発生していく乱れのピークの方が大きい。

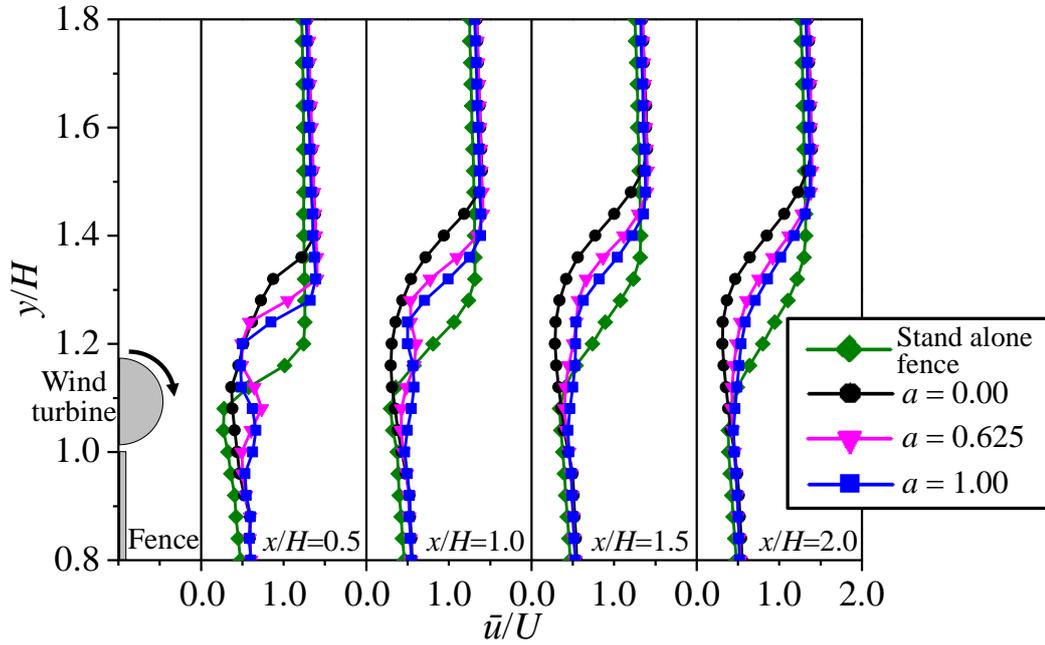


図 4-4-5 各水平位置 a におけるフェンス下流域の主流方向風速分布 (CW, $U = 7$ m/s)

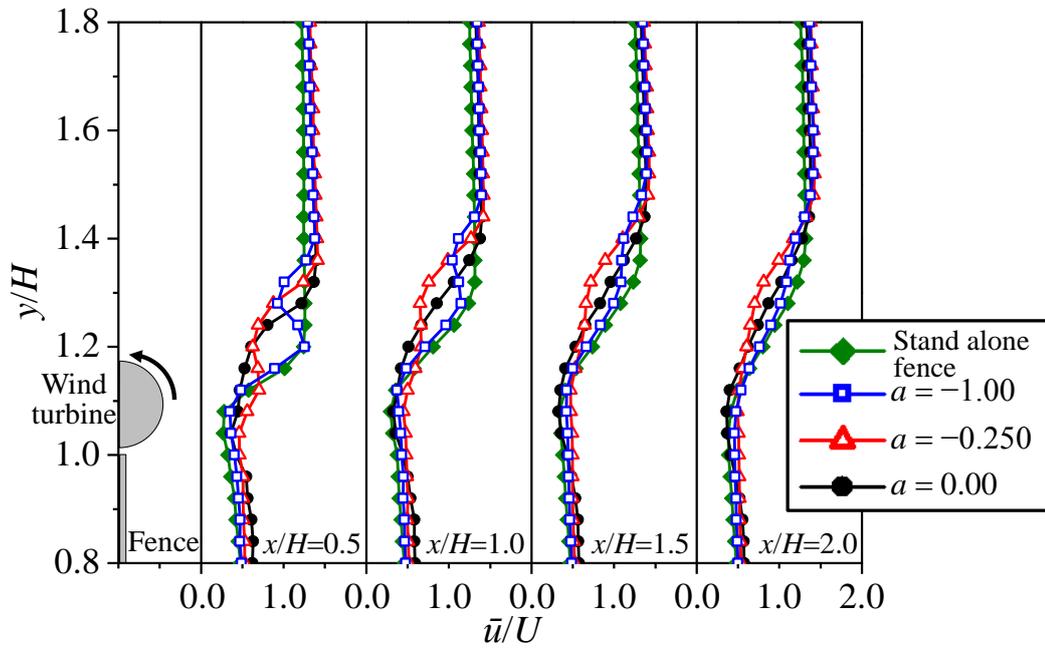


図 4-4-6 各水平位置 a におけるフェンス下流域の主流方向風速分布 (CCW, $U = 7$ m/s)

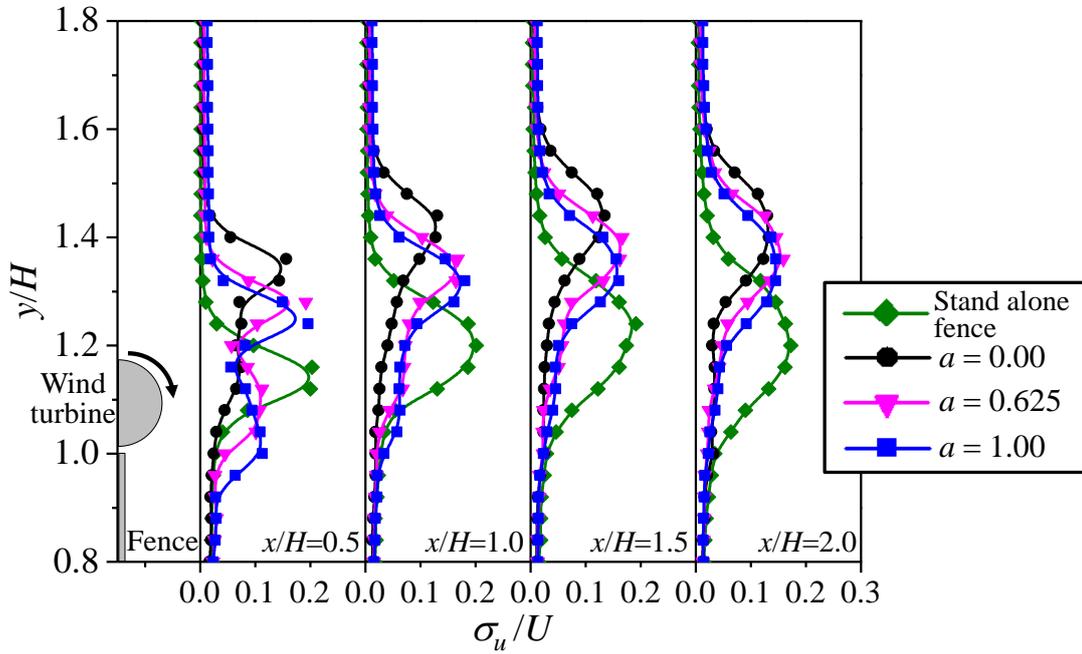


図 4-4-7 各水平位置 a におけるフェンス下流域の主流方向乱れ強さ分布 (CW, $U = 7$ m/s)

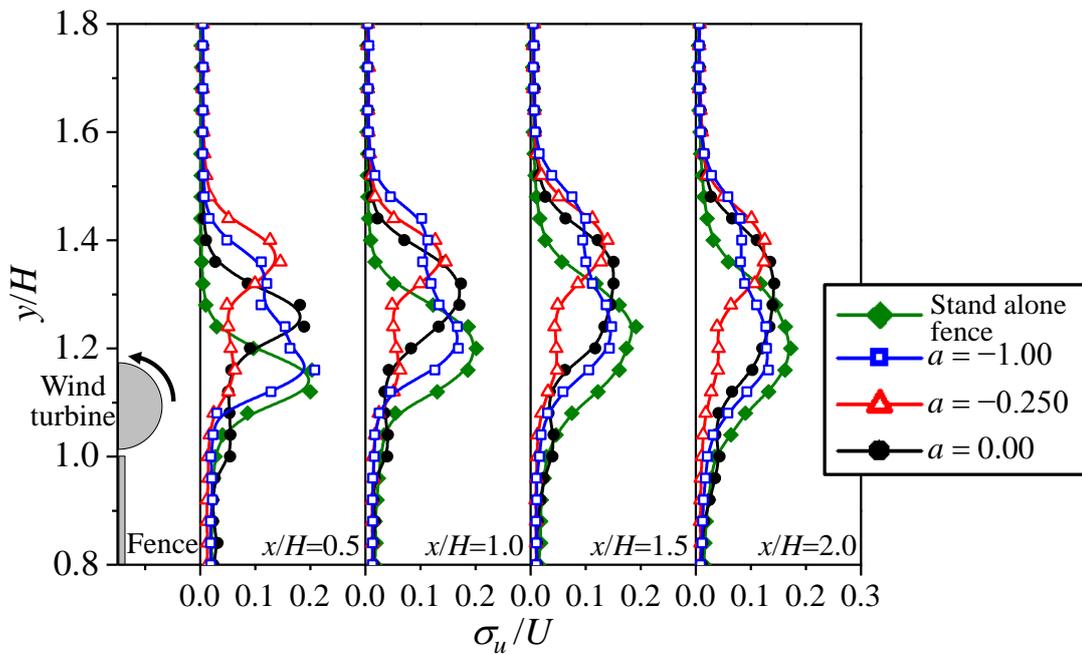


図 4-4-8 各水平位置 a におけるフェンス下流域の主流方向乱れ強さ分布 (CCW, $U = 7$ m/s)

図4-4-9～図4-4-12に風速 $U = 7 \text{ m/s}$ におけるフェンス下流域の時間平均した鉛直方向の風速分布と乱れ強さを示す。主流方向の風速分布測定と同様の範囲を測定した。

主流方向の結果と同様に、図4-4-9及び図4-4-11の風車回転方向 **CW** の場合は、水平位置 $a = 0.00, 0.625, 1.00$ の位置における結果を示す。図4-4-10及び図4-4-12の風車回転方向 **CCW** の場合は、水平位置 $a = 0.00, -0.250, -1.00$ の位置における結果を示す。なお、各図中には風車が設置されていないフェンス単体の場合における分布も示す。

図4-4-9の風車回転方向 **CW** の場合、 $x/H = 0.5$ の $1.3 \leq y/H$ の位置においては、風車を設置することで鉛直方向の速度が増速していることがわかる。これは、風車を設置したことにより、吹き上がり流れがより高くなっているためと考えられる。フェンス下流側にいくにしたがって、フェンス上部の風車の有無に関係なく、各高さにおける風速分布の差が小さくなり、 $x/H = 2.0$ の位置においては、風速分布がほぼ一致していることがわかる。図4-4-11の乱れ分布を見ると、フェンスより下流側に風車を設置することにより乱れが大きくなる高さが、フェンスの直上である $a = 0.00$ のときに比べて、低くなっている。また、風車をフェンス直上 ($a = 0.00$) の場合は、各下流位置における最大の乱れ強さがフェンス単体の場合よりも小さくなっており、その他の位置に風車を設置した場合の最大の乱れ強さは、フェンス単体の場合とほぼ同じ強さであった。

図4-4-10の風車回転方向 **CCW** の場合、 $x/H = 0.5$ の $1.31 \leq y/H \leq 1.3$ の位置において、水比位置 $a = -1.00$ では最大の風速がフェンス単体の場合よりも速くなっているが、その他の位置に設置した場合の最大の風速はフェンス単体の場合に比べて、小さい値となっていることがわかった。風車回転方向 **CW** で下流側に風車を設置した場合と同様に、下流にいくにしたがって、風速分布の差は小さくなっている。図4-4-11の乱れ分布を見ると、フェンスの上流側に風車を設置することにより、 $1.0 \leq y/H$ の位置における乱れが強い領域が増加している。ただ、最大の乱れ強さについては、フェンス単体の場合よりも若干小さい値になっていることがわかる。

以上の結果から4-4-1項に示す出力特性の結果だけでなく、防風性能の観点からも考慮すると風車回転方向は **CW** で設置する方が良いといえる。

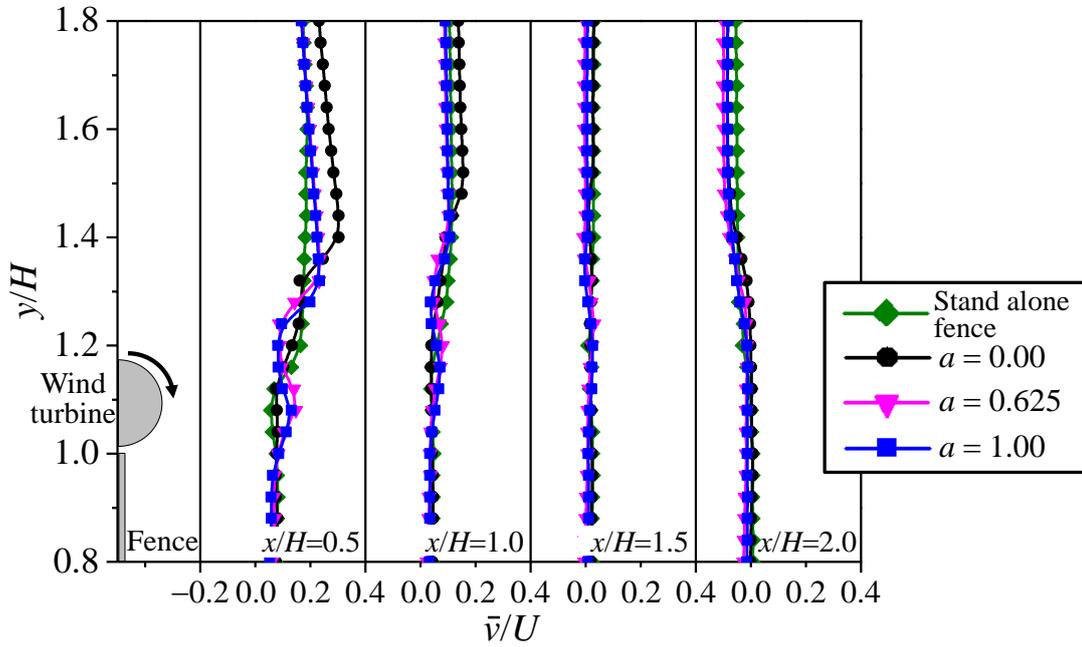


図 4-4-9 各水平位置 a におけるフェンス下流域の鉛直方向風速分布 (CW, $U = 7$ m/s)

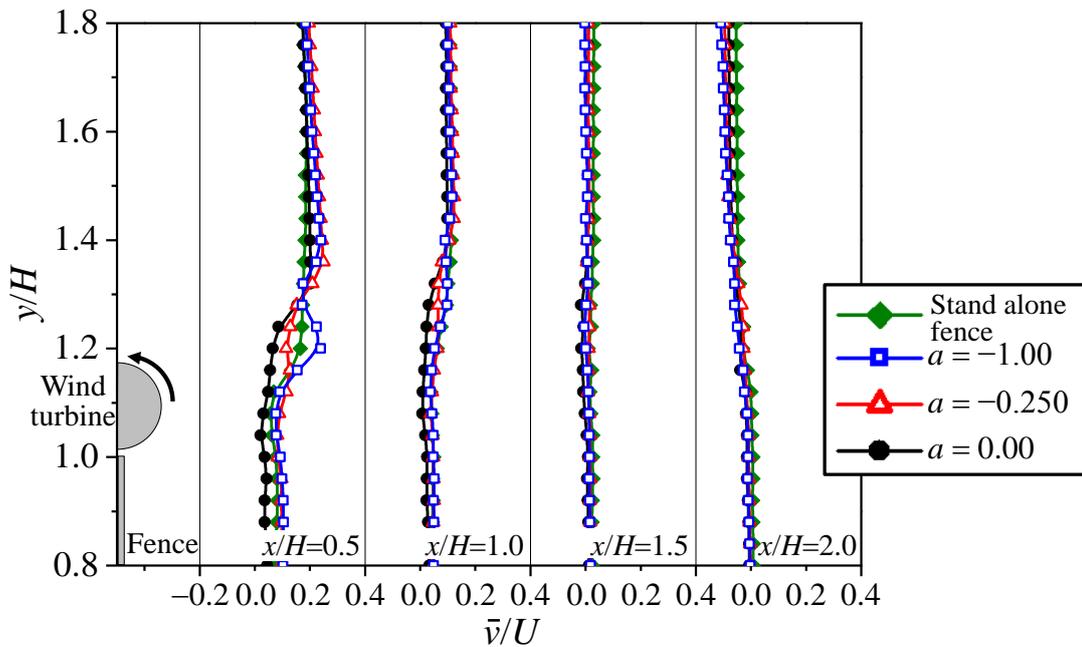


図 4-4-10 各水平位置 a におけるフェンス下流域の主流方向風速分布 (CCW, $U = 7$ m/s)

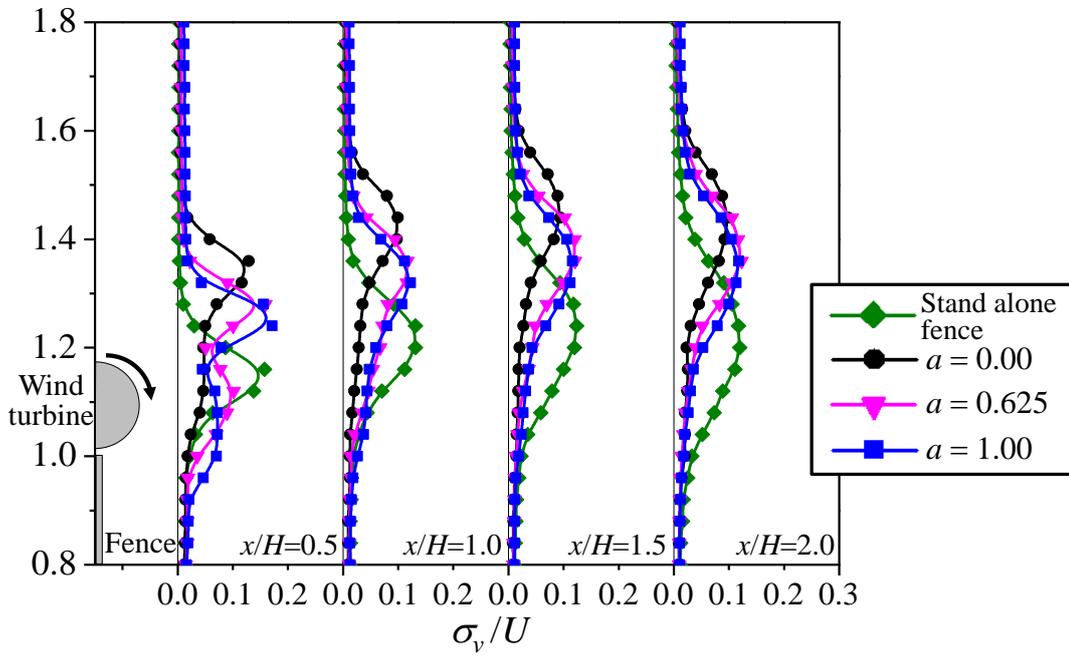


図 4-4-11 各水平位置 a におけるフェンス下流域の鉛直方向乱れ強さ分布 (CW, $U = 7$ m/s)

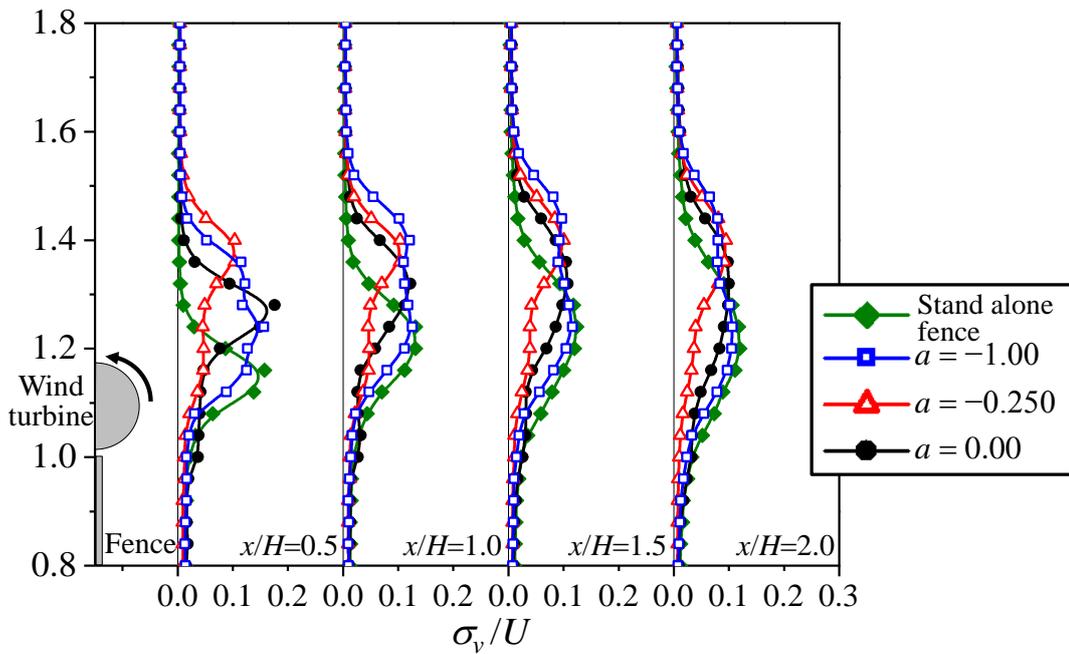


図 4-4-12 各水平位置 a におけるフェンス下流域の鉛直方向乱れ強さ分布 (CCW, $U = 7$ m/s)

4-5 まとめ

防風フェンス上部にクロスフロー風車を設置し、風車設置位置を垂直方向及び水平方向に変化させた場合の風車出力特性及び風車後流とフェンス下流域の風速分布に与える影響を風洞実験により調べ、以下の結果を得た。

- (1) フェンス上部にクロスフロー風車を設置し、風車を垂直方向に移動させることやフェンス付近の上流側もしくは下流側に移動させることで風車単体の場合と比べて風車出力が増加することを示した。
- (2) フェンス直上 ($a = 0.00$) に風車を設置する場合、風車出力は風車の回転方向とクリアランス c に影響することを明らかにした。風車回転方向CWの場合、クリアランス c が大きくなるにつれて、最大出力係数 C_{Pmax} は低下するが、風車回転方向CCWの場合、クリアランス c が大きくなるにつれて、最大出力係数 C_{Pmax} は上昇する。
- (3) 高い風車出力と減速効果の両方を備えたフェンス直上 ($a = 0.00$) への風車の設置方法は、風車回転方向をCW、クリアランス c を小さくして風車を設置する方が良いことを示した。
- (4) クリアランス c を小さくして風車を設置した場合の風車出力は、風車回転方向CWの場合、フェンス下流側の水平位置 $a = 0.625$ に風車を設置した時に最も大きい出力係数を示し、 $C_{Pmax} \approx 0.27$ となった。一方で、風車回転方向CCWの場合、フェンス上流側の水平位置 $a = -0.250$ に風車を設置した時に最も大きい出力係数を示し、 $C_{Pmax} \approx 0.22$ となった。さらに、反対の方角からも風が吹いて来る時を想定すると、水平位置を $|a| = 0.25 \sim 0.50$ に風車を設置すると良いことがわかった。
- (5) クリアランス c を小さくしてフェンス上部に風車を設置することにより、風車の水平方向の設置位置や風車回転方向に関係なく、フェンス単体の場合に比べ、 $y/H = 1.1 \sim 1.3$ の風車後方において、風速が減速される。
- (6) より高い風車出力と減速効果を備えた風車付き道路用フェンスとして使用する場合、クリアランス c を小さく、風車回転方向はCWとし、フェンス下流側に水平位置 $a = 0.25 \sim 0.50$ 程度移動させて設置すると良いことを明らかにした。

第5章 直角偏向板を用いた風車性能向上に関する検討

5-1 はじめに

有孔フェンス上部にクロスフロー風車を水平に設置する場合、フェンスの直上に設置するよりも風車を水平方向に移動させて設置した方が風車の出力が大きくなることを第3章で示した。特に風車回転方向をCWとして設置する場合には、フェンス下流側の水平位置 $a = 0.625$ に風車を設置することで最も大きい風車出力が得られた。これは、風車の進み側ブレードがフェンス上部で増速された風を受けているだけでなく、風車がフェンスに対して下流側へ移動させたことにより戻り側ブレードが減速域に入り、風車の回転を妨げようとする力が減少したためであると考えられる。しかし、実際のフェンスの設置場所などによっては、フェンス上部で水平方向に移動させた位置に風車を設置することが難しいことがある。そこで図5-1-1に示すように、フェンスの上端に直角偏向板を設置することで、フェンス上部の剥離点の位置を変化させ、風車を水平方向に移動させて設置した場合と同様の効果が得られることが期待できる。

本章では、フェンス上端に直角偏向板を設置し、その直角偏向板を変更させた場合の風車出力特性及び風速分布に及ぼす影響を示し、風車に対して最適な直角偏向板の形状を検討する。

5-3 節に直角偏向板を変更した場合の風車出力特性を示す。5-4 節には、直角偏向板を設置した場合のフェンス下流域の風速分布を示す。

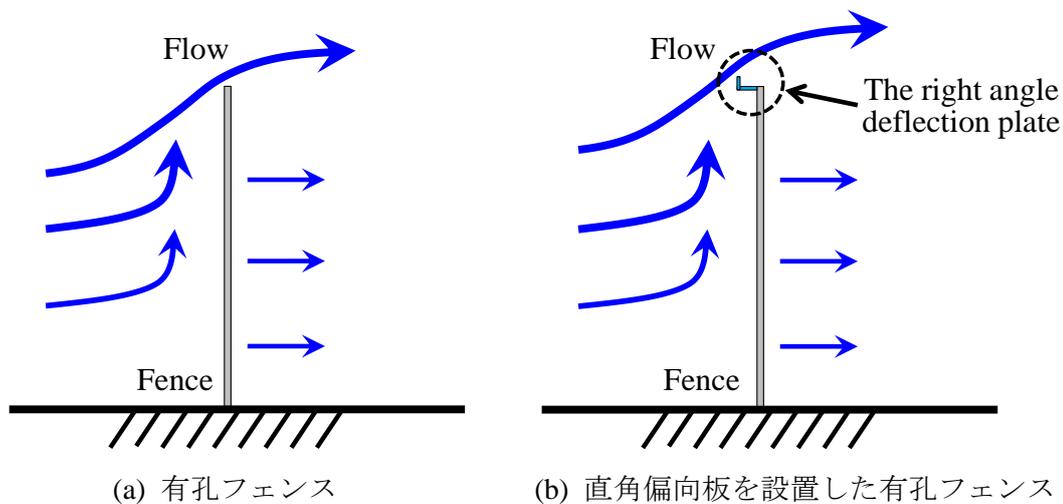


図 5-1-1 有孔フェンス上部の吹き上がり流れ

5-2 実験概要

本実験では、フェンス上端の風車の前方に直角偏向板を設置して風車出力測定及びフェンス下流域における風速分布測定を行った。また、風車を設置せずにフェンス上端に直角偏向板を設置した状態におけるフェンス上部の風速分布の測定も行った。

図 5-2-1 に直角偏向板の各寸法を示す。直角偏向板は、高さ $H' = (D_1/2 + C) \cdot (1 - \cos \alpha)$ とし、幅 $X = (D_1/2 + C) \cdot \sin \alpha$ と定義した。本実験では、図 5-2-1 に示す風車中心と直角偏向板の上端との角度 α を $40^\circ \sim 80^\circ$ まで 10° 間隔で変化させた。本実験に用いた直角偏向板には、無孔板を用いて作成した。直角偏向板とフェンス上端に直角偏向板を設置した場合の概観を図 5-2-2 及び図 5-2-3 に示す。なお、本実験においてはフェンス上端と風車下端のクリアランスは $C = 5\text{mm}$ ($c = C/D_1 = 0.0625$) とし、風車回転方向は風が左から右に流れている側からみて時計回り (CW) になるように風車を設置した。

フェンス上部付近及び風車下流域の風速分布は、自動トラバース装置に取り付けられた X 形熱線プローブを用いて測定した。風速測定実験時の風速は $U = 7\text{ m/s}$ とした。なお、データはサンプリング周波数 10 kHz 、測定点数 4 万点で取得し、時間平均風速や乱れ強さの値を計算した。

フェンスのみの場合におけるフェンス上部の風速分布測定の範囲は、図 5-2-4 に示すように、x 方向に $-0.4 \leq x/H \leq 0.2$ 、y 方向に $1.01 \leq y/H \leq 1.63$ である。測定間隔は、x 方向も y 方向もともに 10 mm 間隔とした。

風車と直角偏向板を設置した状態におけるフェンス下流域の風速分布の測定は、 $x/H = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の各位置で y 方向に $0.8 \leq y/H \leq 1.8$ の範囲で行った。測定間隔は y 方向に 25 mm 間隔とした。

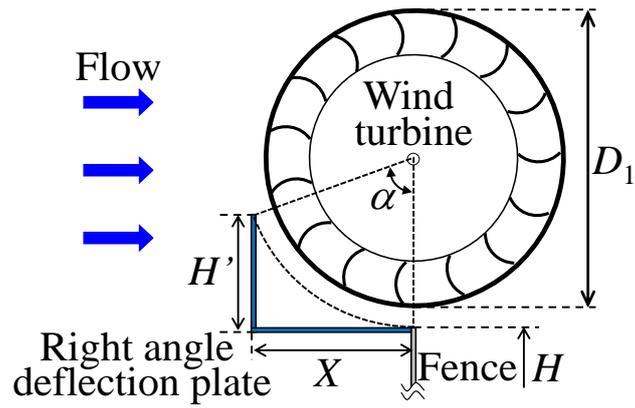


図 5-2-1 直角偏向板の各寸法

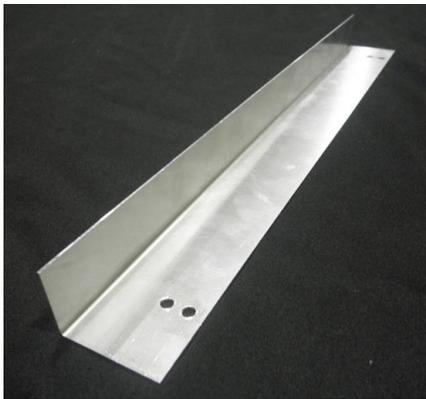


図 5-2-2 直角偏向板の概観

図 5-2-3 有孔フェンスに設置した直角偏向板

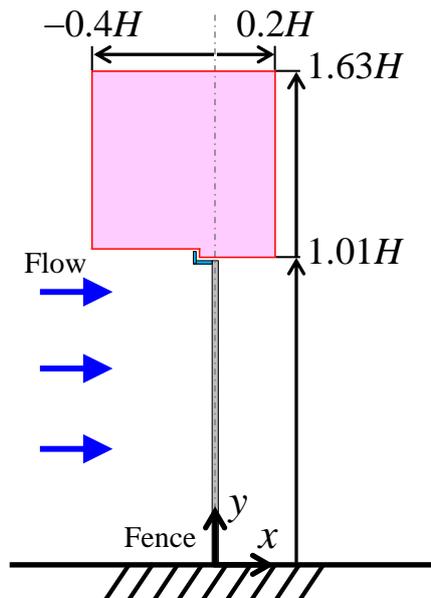


図 5-2-4 直角偏向板を設置したフェンス上部の風速分布測定範囲

5-3 風車出力特性

フェンス直上に風車回転方向 CW で風車を設置し、フェンス上端に取り付ける直角偏向板を変化させた場合の風車出力特性を図 5-3-1 に示す。図中には、風車単体のみの場合の結果と風車をフェンスの下流側 $a = 0.625$ に設置した場合の結果も示す。第3章で示したように、風車回転方向 CW、クリアランス $c = 0.0625$ とした場合に風車をフェンス下流側 $a = 0.625$ の位置に設置することで最も高い風車出力が得られた。なお、 $\alpha = 0^\circ$ の結果は、フェンス上端に直角偏向板を取り付けていない状態を示している。 $\alpha = 60^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合に出力係数が最も高くなり、最大出力係数 C_{Pmax} は約 0.33 となり、風車単体の場合と比べ約 3.0 倍の出力係数となった。 $\alpha = 70^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合の最大出力係数は、風車をフェンス下流側 $a = 0.625$ の位置に設置した場合の最大出力係数とほぼ一致しており、最大出力係数 $C_{Pmax} = 0.27$ となった。しかし、高い出力が得られる周速比の範囲は、 $\alpha = 70^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合の方が風車をフェンス下流側 $a = 0.625$ の位置に設置した場合よりも狭い範囲となった。この原因については、まだわからないため、今後さらなる議論が必要である。 $\alpha = 80^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合は、フェンスに直角偏向板を取り付けていない場合よりも出力係数は大きく低下し、最大出力係数 $C_{Pmax} = 0.17$ となった。

図 5-3-2 に直角偏向板を変化させた場合で、風速 $U = 5, 7, 9\text{m/s}$ における最大出力係数 C_{Pmax} の結果を示す。図中には、風速 $U = 7\text{m/s}$ において風車をフェンス下流側 $a = 0.625$ の位置に設置した場合の最大出力係数 C_{Pmax} を一点短鎖線で示し、同じく風速 $U = 7\text{m/s}$ における風車単体の最大出力係数 C_{Pmax} の結果も示す。なお、 $\alpha = 0^\circ$ の結果は、フェンス上端に直角偏向板を取り付けていない状態を示している。風速に関係なく、各条件における最大出力係数 C_{Pmax} はほぼ同じ値をとることがわかる。 $\alpha \geq 40^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けることで最大出力係数 C_{Pmax} は、風車をフェンス下流側 $a = 0.625$ の位置に設置した場合よりも大きくなっている。 $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合は、 α の増加に伴って、最大出力係数 C_{Pmax} は比例的に増加していることがわかる。しかし、 $60^\circ < \alpha$ になることで最大出力係数 C_{Pmax} は大きく低下していくことがわかる。

図 5-3-3 に直角偏向板をフェンス上端に設置した場合のフェンス上部付近の風速 $\sqrt{u^2+v^2}/U$ の分布を示す。図中には、点線で風車を設置した場合の風車の位置を示す。直角偏向板をフェンス上端に取り付けることで、吹き上がり流れの剥離位置が前方に移動し、直角偏向板の後方では風速がほぼ 0m/s となり、大きな減速域が形成されている。

このことより、フェンス上端に直角偏向板を設置することで風車をフェンスに対して水平に移動させて設置した状態と同様の流れ場をフェンス直上においても得られていることがわかる。最も大きい風車出力が得られた $\alpha = 60^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合のフェンス上部付近の風速分布を示している図 5-3-3(c)をみると、減速域になっている部分に風車下部が位置しており、風車上部が位置する部分に増速域が位置している。風車下部の戻り側ブレードが減速域に位置することにより風車の回転を抑制する力が小さくなり、一方で風車上部の進み側ブレードが増速域に位置することで風車の回転を促進されたと考えられ、これらの影響によって、風車の出力が増加したと考えられる。図 5-3-3(e)に示すように、風車出力が低下した $\alpha = 80^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合では、風車下部の部分は減速域に位置しているものの、風車の出力を生み出す風車上部の進み側ブレードの部分にあたる増速域が小さいために風車出力が低下したと考えられる。

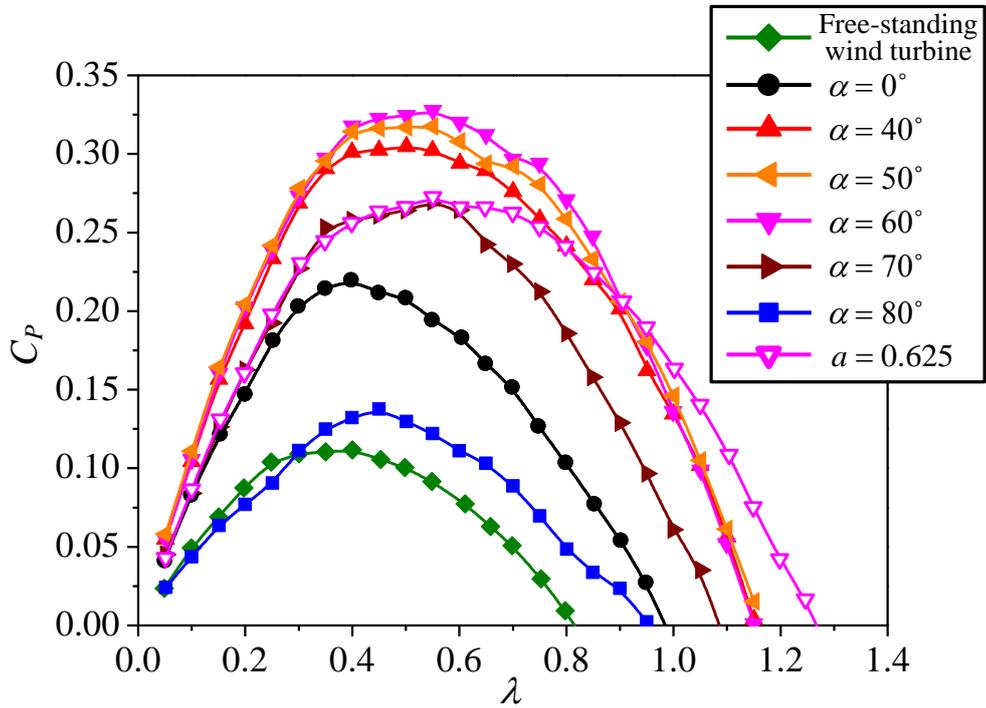


図 5-3-1 直角偏向板を設置した場合の風車出力係数

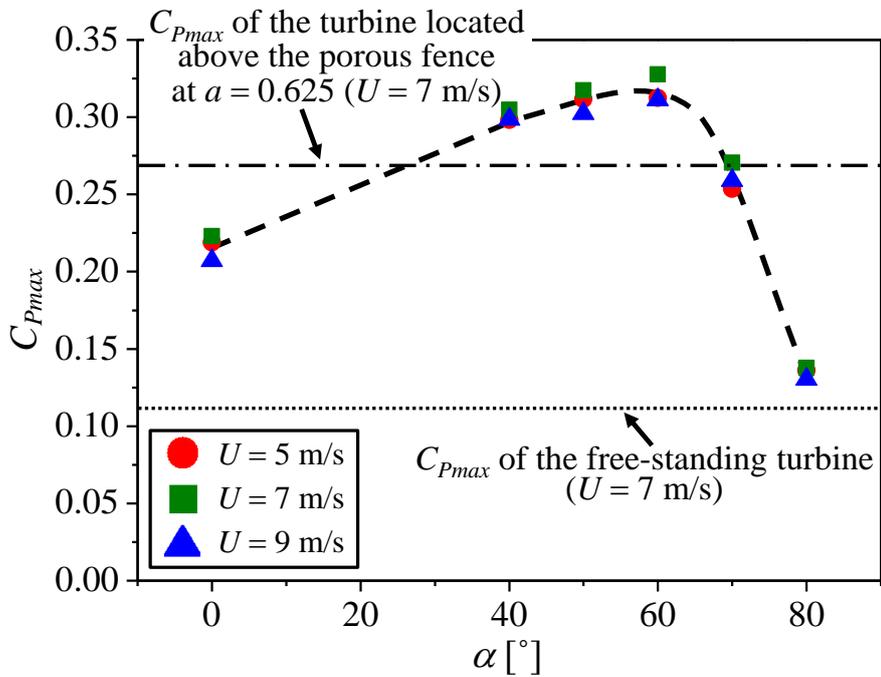


図 5-3-2 直角偏向板を設置した場合の最大風車出力係数

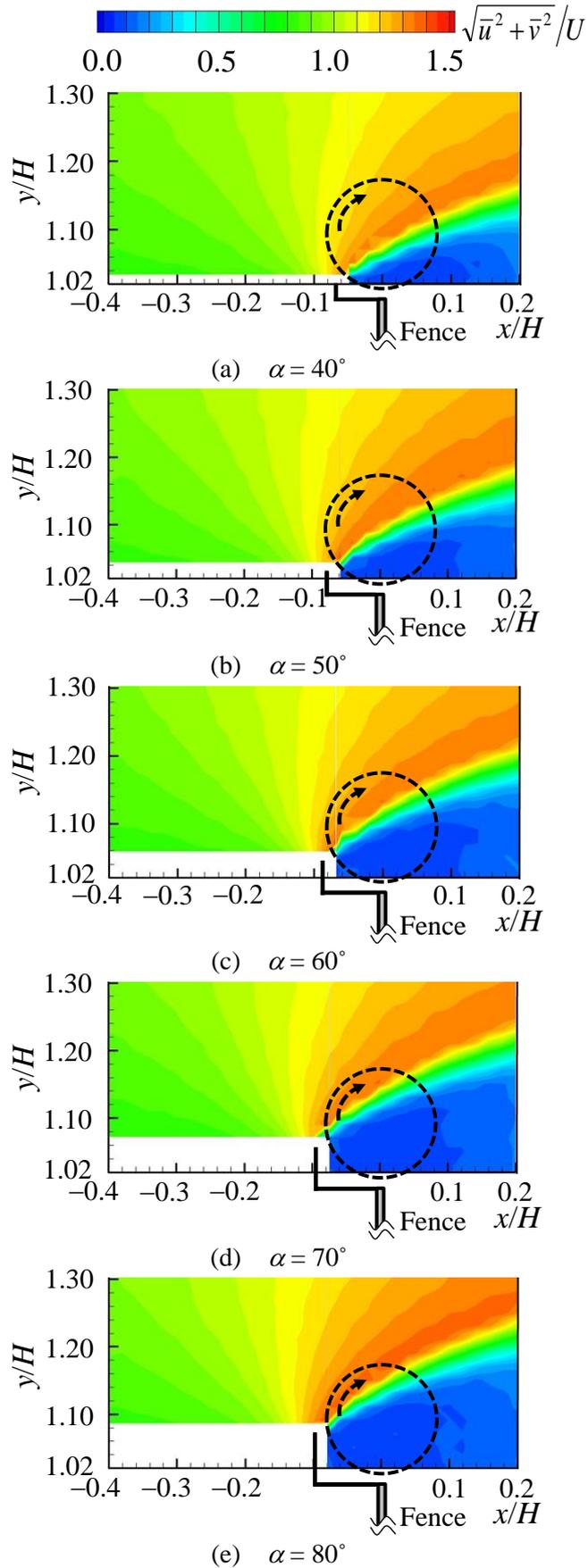


図 5-3-3 直角偏向板を設置した場合のフェンス上部における風速分布

5-4 風速分布

図 5-4-1, 図 5-4-2 に風速 $U = 7 \text{ m/s}$ で $\alpha = 0^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合におけるフェンス下流域の時間平均した主流方向の風速分布と乱れ強さを示す。図中には、フェンス単体の場合の結果も示す。なお、 $\alpha = 0^\circ$ の結果は、フェンス上端に直角偏向板を取り付けていない状態を示している（他の図においても同様である）。フェンス下流域の風速分布は、 $x/H = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ における $y/H = 0.8 \sim 1.8$ の範囲を y 方向に 25 mm 間隔で測定した。

図 5-4-1 に示すように、フェンス下流のどの位置においてもフェンス上部に風車を設置することで、 $y/H = 1.15 \sim 1.45$ においてはフェンス単体の場合よりも減速領域が大きいことがわかる。 $x/H = 0.5$ の位置で、 $y/H = 1.0 \sim 1.4$ の高さにおいては、直角偏向板をフェンス上端に取り付けることで直角偏向板がない場合よりも減速されている。しかし、下流側に行くにつれて、直角偏向板を取り付けることで直角偏向板がない場合よりも減速効果が低下していることがわかる。図 5-4-2 に示した乱れ強さ分布より、風車中心と直角偏向板の上端との角度 α が大きい直角偏向板をフェンス上端に取り付けた方が、 $x/H = 0.5$ の位置の $y/H = 1.2 \sim 1.4$ の高さにおいて、風車上部の進みブレードから発生した乱れ強さが大きくなっている。

図 5-4-3, 図 5-4-4 に風速 $U = 7 \text{ m/s}$ の時間平均した垂直方向の風速分布と乱れ強さを示す。図中には、フェンス単体の場合の結果も示す。図 5-4-3 に示すように、 $x/H = 0.5$ の位置では $y/H = 1.1 \sim 1.35$ の高さにおいて、直角偏向板を設置することで垂直方向の風速が減速されている。しかし、フェンス下流域の $x/H = 2.0$ の位置では、直角偏向板の設置の有無による垂直方向の時間平均の風速分布に違いはないことがわかる。図 5-4-4 に示す鉛直方向の乱れ強さ分布をみると、 $x/H = 0.5$ の位置の $1.1 \leq y/H$ においては、直角偏向板の設置の有無に関係なく、鉛直方向の乱れ強さがほぼ同じであることがわかる。フェンス下流域に行くにつれて、風車中心と直角偏向板の上端との角度 α が大きい直角偏向板を用いた場合に乱れ強さが高さに関わらず大きくなっている。

図 5-4-5 に風速 $\sqrt{u^2 + v^2}/U$ の分布を示す。図中には、フェンス単体の場合の結果も示す。 $x/H = 0.5$ の位置の $y/H = 1.0 \sim 1.4$ の高さにおいては、直角偏向板を取り付けることで減速領域が大きくなる。しかし、フェンス下流域の $x/H = 2.0$ の位置では、風車中心と直角偏向板の上端との角度 α が小さい直角偏向板の方が $y/H = 1.1 \sim 1.5$ において、減速領域が大きいことがわかる。

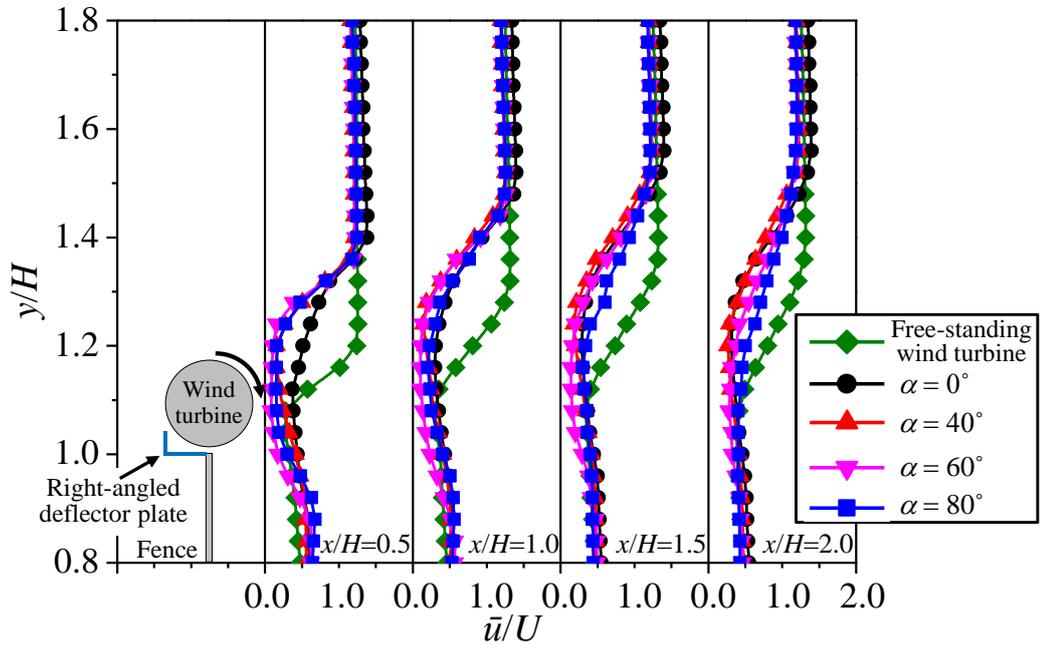


図 5-4-1 直角偏向板を設置した場合のフェンス下流域の主流方向風速分布

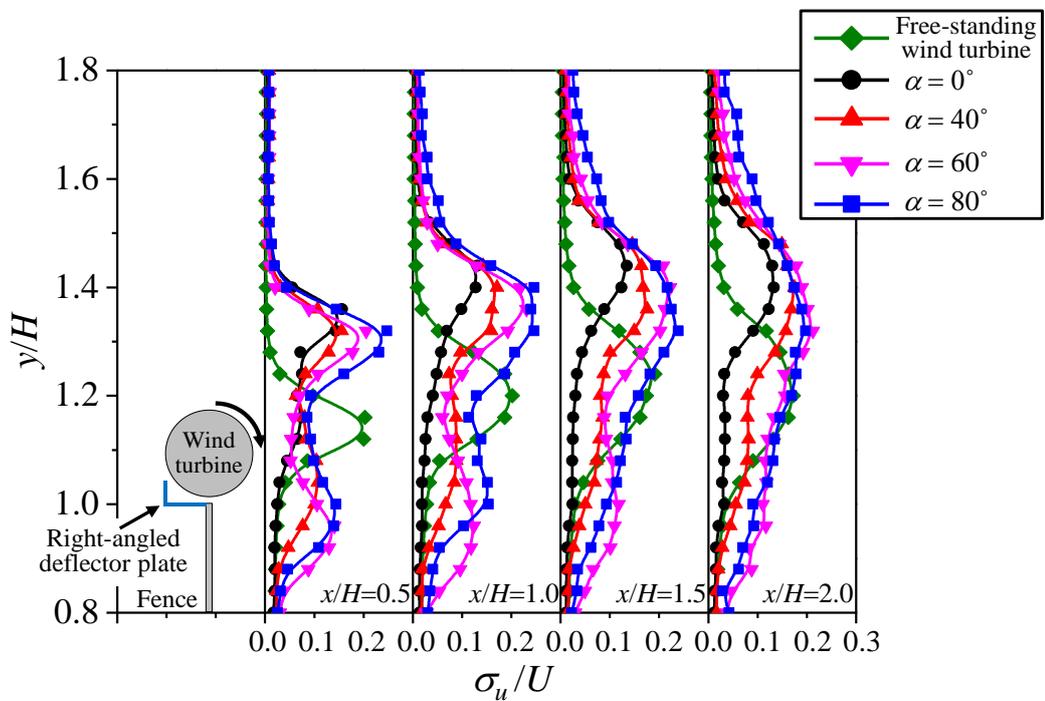


図 5-4-2 直角偏向板を設置した場合のフェンス下流域の主流方向乱れ強さ分布

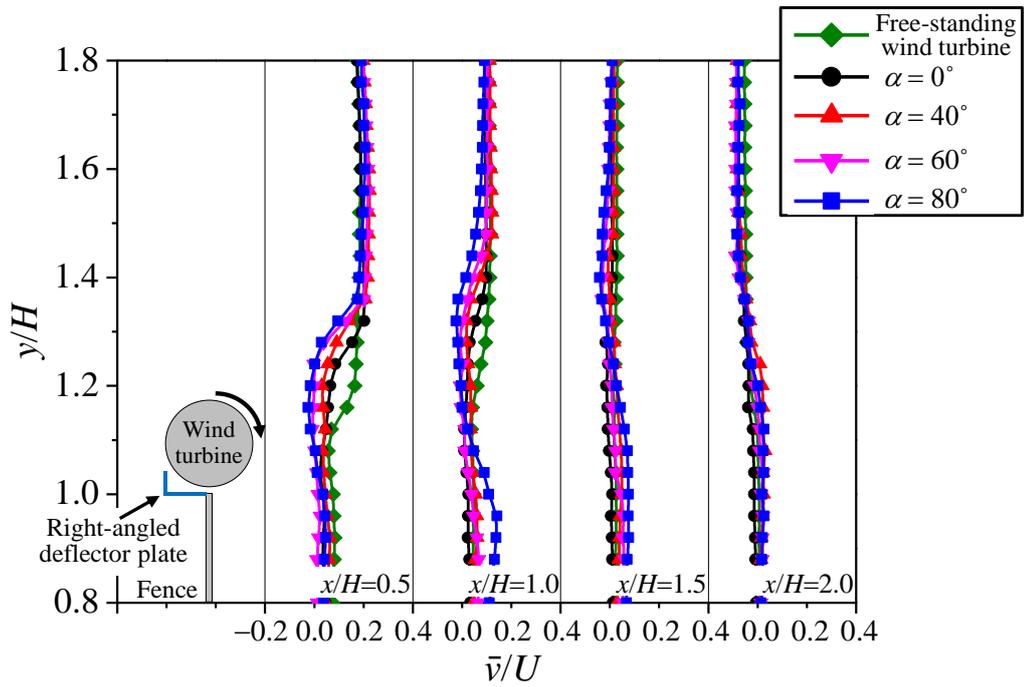


図 5-4-3 直角偏向板を設置した場合のフェンス下流域の鉛直方向風速分布

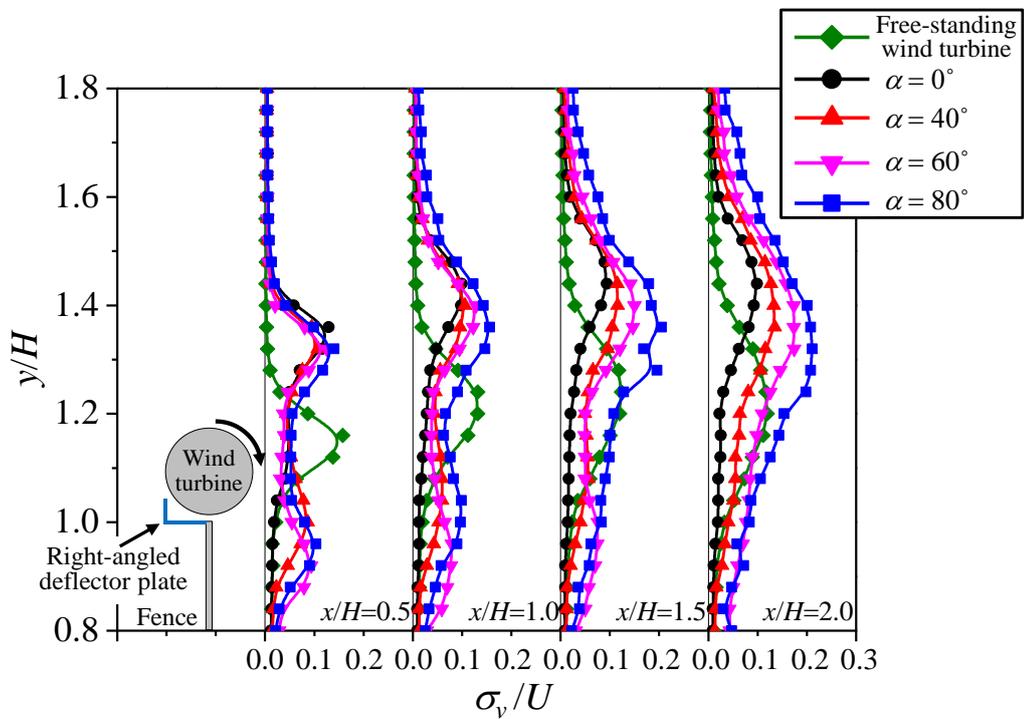


図 5-4-4 直角偏向板を設置した場合のフェンス下流域の垂直方向乱れ強さ分布

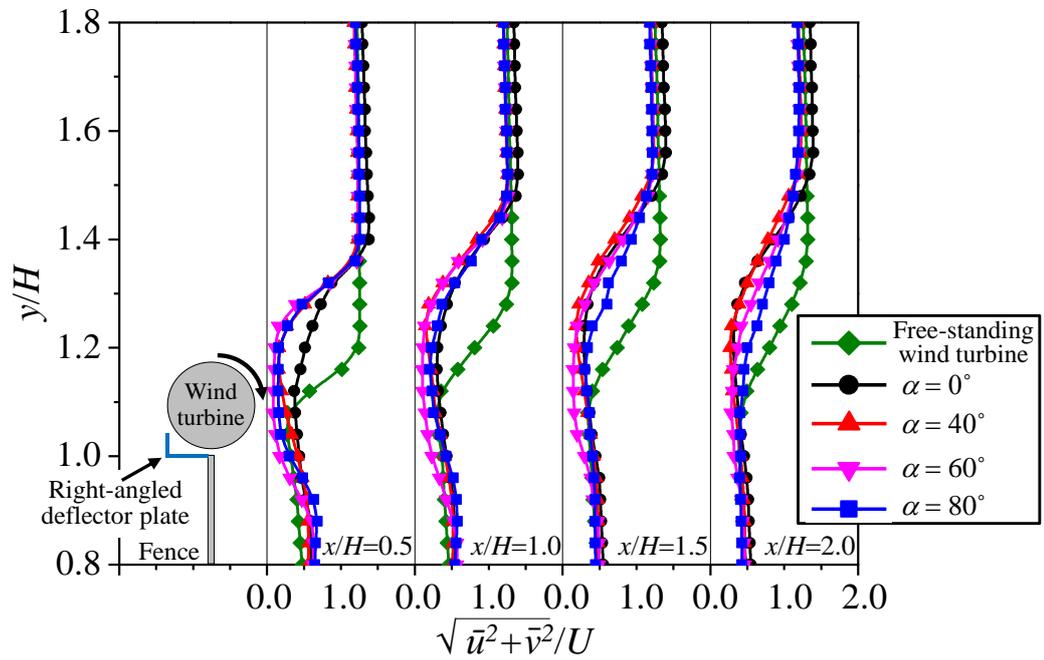


図 5-4-5 直角偏向板を設置した場合のフェンス下流域の風速分布

図 5-4-6 に最も大きい風車出力が得られた $\alpha = 60^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた場合、直角偏向板を取り付けていない場合で風車をフェンス直上 ($\alpha = 0^\circ$) と水平位置 $a = 0.625$ の位置に設置した場合の結果を示す。図中には、フェンス単体の場合の結果も示す。フェンス下流のどの位置においても、風車を水平位置 $a = 0.625$ に設置する場合に比べて、フェンス上端に $\alpha = 60^\circ$ の直角偏向板を取り付けた方が減速領域が大きくなっていることがわかる。このことより、風車回転方向 CW、クリアランス $c = 0.0625$ で風車をフェンスの上部に設置する場合は、 $\alpha = 60^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けていないことで、風車をフェンス下流側に水平に移動させて風車を設置するよりも、防風効果が高く、かつ風車出力も高いものが得られることがわかった。

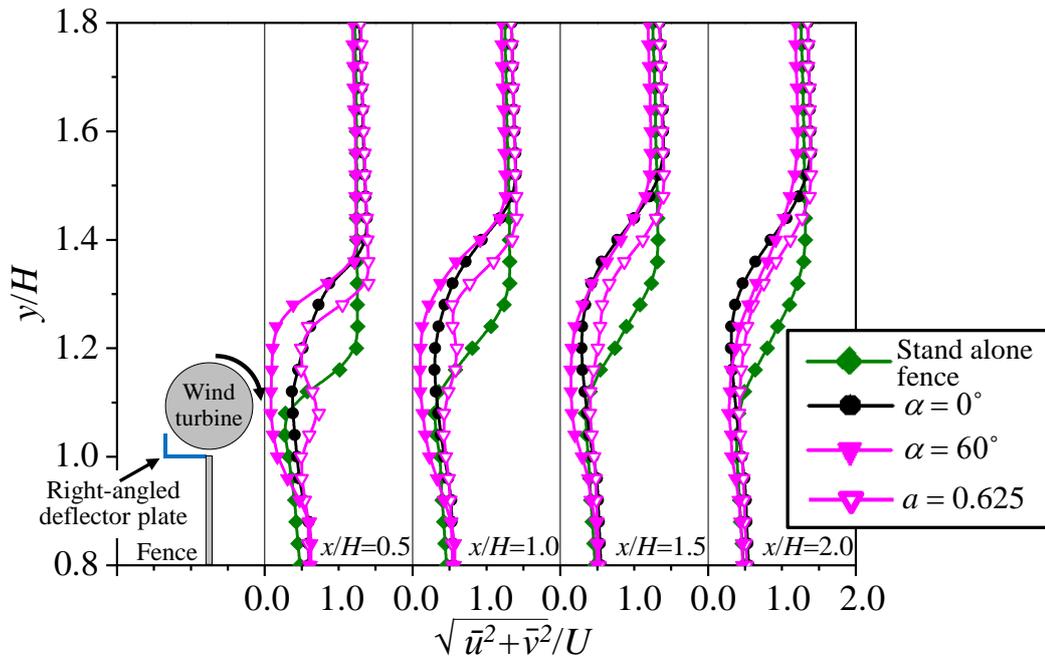


図 5-4-6 風車をフェンス上部に設置した場合のフェンス下流域の風速分布

5-5 まとめ

本章では、フェンス上端に直角偏向板を設置し、その直角偏向板を変更させた場合の風車出力特性及び風速分布に及ぼす影響を風洞実験により調べ、以下の結論を得た。

- (1) フェンス上部にクロスフロー風車を設置し、フェンス上端に直角偏向板を取り付けることで風車単体の場合と比べて風車出力が増加することを示した。
- (2) 風車出力は、風車中心と直角偏向板の上端との角度 $\alpha = 60^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた時に最も大きい出力係数を示し、 $C_{Pmax} \approx 0.33$ となり、風車単体の場合に比べて約3倍の値になった。
- (3) フェンス上部にクロスフロー風車を設置し、フェンス上端に直角偏向板を取り付けた場合、フェンス下流域の $y/H = 1.1 \sim 1.5$ において減速領域が大きくなり、防風フェンスとしての効果が失われないことがわかった。
- (4) 風車を回転方向CWとして有孔フェンス上部に風車を設置した場合、フェンス上端に直角偏向板を取り付けることで、風車をフェンス下流側に設置した場合に得られた効果と同じ効果が得られることがわかった。

第6章 防雪フェンスに風車を設置する場合の

最適風車設置位置の検討

6-1 はじめに

北海道地方や日本海側の東北・北陸地方では、雪混じりの視界不良によるドライバーの運転ミスを防止する目的で防雪フェンスが道路沿いに設置されている。防雪フェンスの種類には、吹きだめ式、吹き止め式及び吹き払い式などがあり、防雪フェンスの種類によって、設置場所や機能が異なる。

吹きだめ式防雪フェンスは、道路から距離をおいて設置され、フェンスの前後に雪を留めることによって、吹き溜まりや地吹雪を防止する。吹き止め式防雪フェンスは、道路の近くに設置され、フェンス下部の遮蔽率を高くすることによって、フェンスの風上側に多くの吹き溜まりを形成することによって、地吹雪を防止する。吹き払い式防雪フェンスは、道路の近くに設置され、風上側からくる風を道路に吹きつけることによって、道路上の吹き溜まりを防止する。防雪フェンスの一例として、図 6-1-1 に吹き払い式防雪フェンスを示す。

高井ら（2009）によって、地吹雪の発生時において雪を如何にフェンスの周りに吹き止めるのか、道路上の雪を吹き払うのか等の研究がこれまでに行われている。

本章では、吹き払い式と吹き止め式の防雪フェンスの上部に水平にクロスフロー風車を設置する場合のフェンスの種類と風車設置位置が風車の性能に及ぼす影響を示す。

6-3 節に防雪フェンス上部に設置した風車の出力特性を示す。6-4 節には、フェンスの上部に設置した風車後流の風速分布を示す。6-5 節には、吹き払い式と吹き止め式の防雪フェンス上部に風車を設置した場合のフェンス近傍の吹き上がりや増速、逆流などの流れの様相を示す。



図 6-1-1 北海道地方に設置されている吹き払い式防雪フェンス

6-2 実験概要

本実験では、遮蔽率 $\phi = 60\%$ の有孔フェンスと遮蔽率 $\phi = 100\%$ の無孔板フェンスに加え、遮蔽率 $\phi = 60\%$ の有孔フェンス上部から無孔板で遮蔽した場合及び下部から無孔板で遮蔽した場合の8種類について風洞実験を行った。図6-2-1に本実験で用いた供試フェンスを示す。吹き払い式防雪フェンスを模擬する場合は、フェンス上部を無孔板で遮蔽し、吹き止め式防雪フェンスを模擬する場合はフェンス下部を無孔板で遮蔽した。フェンス上部から25%の高さを無孔板で遮蔽した場合を25%upper、下部から25%の高さを無孔板で遮蔽した場合を25%lowerと定義する。

図6-2-2及び図6-2-3に実験装置の概要を示す。フェンス上端と風車下端のクリアランス $c (= C/D_1)$ は、第4章で示した遮蔽率 $\phi = 60\%$ のフェンス直上($a = 0.00$)に風車を設置して行った実験において、風車回転方向CWとCCWのそれぞれの場合に風車出力係数が最も大きくなる $c = 0.0625, 0.313$ とした。

フェンス上部に設置した風車後流の風速分布の測定範囲は、フェンス中央の床面と接する部分を原点として、 x 方向に $0.01 \leq x/H \leq 0.32$ 、 y 方向に $0.67 \leq y/H \leq 1.45$ の範囲を、10 mm 間隔で測定した。AD変換された各データはサンプリング周波数10 kHz、測定点数4万点で取得し、時間平均値を計算した。

フェンス周辺の流れ場の可視化実験は、 $U \approx 2 \text{ m/s}$ として、多線スモークワイヤ法を用いて行った。可視化実験時の風速は出力測定実験及び風速分布測定実験における風速とは異なるものの、風速 $U \approx 2 \text{ m/s}$ においてもレイノルズ数 $Re \approx 7.9 \times 10^4$ であることから、流れの様相の定性的な比較が可能であると考えられる。

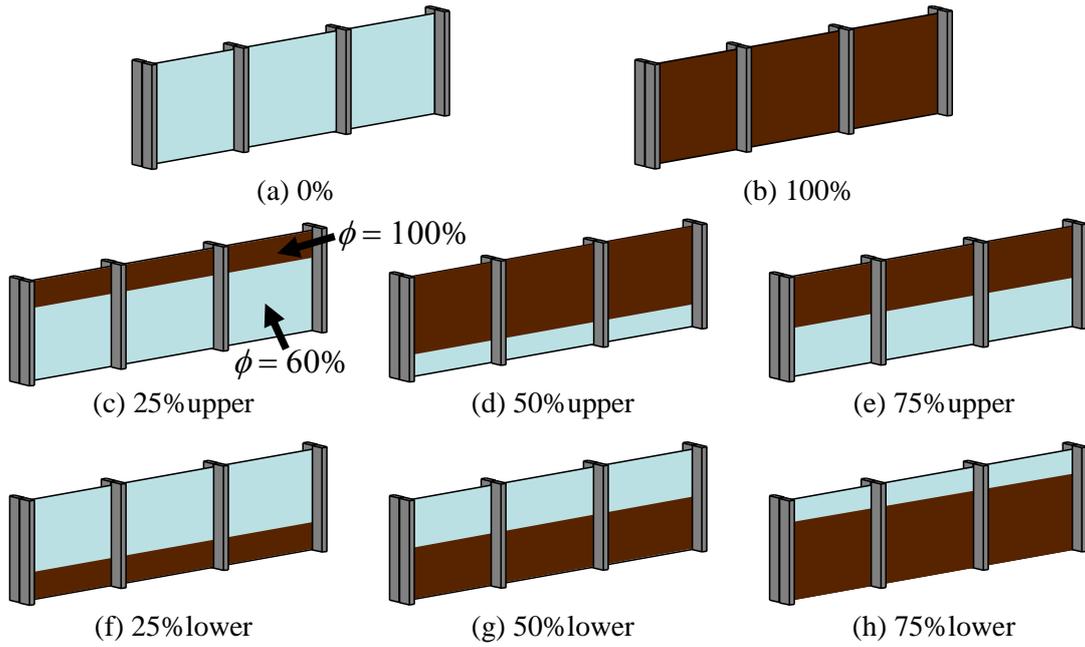


図 6-2-1 有孔フェンス模型

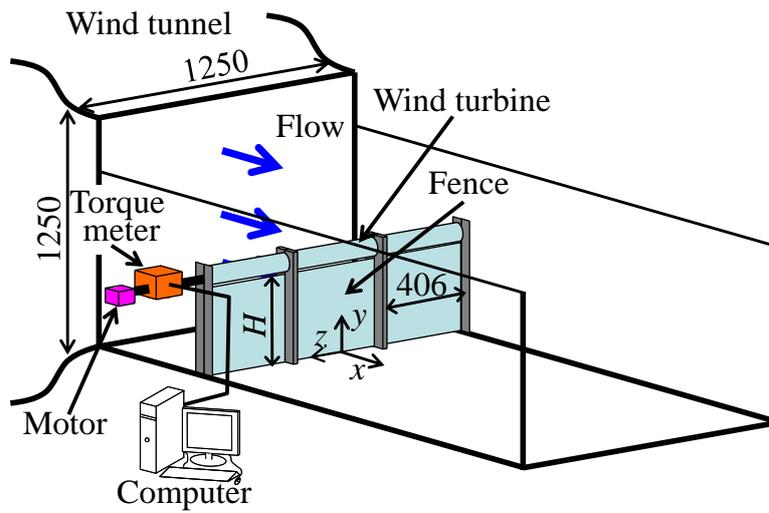


図 6-2-2 実験装置概要

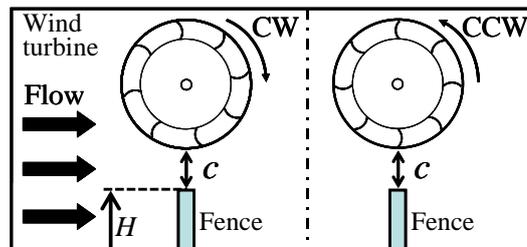


図 6-2-3 風車回転方向及びクリアランス

6-3 風車出力特性

6-3-1 フェンス上部に無孔板領域がある場合

吹き払い式防雪フェンスを模擬して、フェンス上部に無孔板領域を設けた場合における、無孔板領域の変化が風車出力係数 C_P に及ぼす影響について示す。

図 6-3-1 及び図 6-3-2 にクリアランスが小さい $c = 0.0625$ で風車回転方向が CW と CCW の 2 つの場合における、有孔板フェンスの無孔板領域を 0%, 25%upper, 50%upper, 75%upper, 100% と変化させた場合の風車出力特性を示す。なお、図中には風車単体の結果も示す。

図 6-3-1 に示すように風車回転方向 CW の場合、有孔板フェンス上部の無孔板領域が大きくなるにつれて、出力係数 C_P が大きくなる。風車単体に比べて最大出力係数は、無孔板領域が 100% の場合は 4.1 倍となり、吹き払い式防雪フェンスを模擬したもので最も出力係数 C_P が大きくなる無孔板領域が 75%upper の場合は 3.8 倍であった。また最大出力係数 C_{Pmax} とその時の周速比 $\lambda_{C_{Pmax}}$ は、風車単体の場合は $C_{Pmax} \approx 0.11$ と $\lambda_{C_{Pmax}} \approx 0.35$ であるが、各有孔板フェンスの上端に風車を設置することで最大出力係数が $C_{Pmax} = 0.26$ から 0.46 と向上するのに対応して、その時の周速比も $\lambda_{C_{Pmax}} = 0.40$ から 0.55 とわずかに増加することがわかる。一方、図 6-3-2 に示すように風車回転方向 CCW の場合、有孔板フェンスのみの無孔板領域 0% の場合はフェンス上端に風車を設置することによって最大出力係数は風車単体の 2.1 倍で最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.24$ となり、出力係数 C_P が風車単体の場合よりも大きくなる。しかし、有孔板フェンスの上部を遮蔽したフェンスの場合、無孔板領域 0% に比べて風車出力が低下し、無孔板領域を変化させても大きな違いが見られず、最大出力係数は風車単体の 1.1 倍で最大出力係数は $C_{Pmax} \approx 0.12$ となる。また最大出力係数時の周速比 $\lambda_{C_{Pmax}}$ も、無孔板領域の大きさによらずほぼ同じ値の $\lambda_{C_{Pmax}} \approx 0.45$ となる。

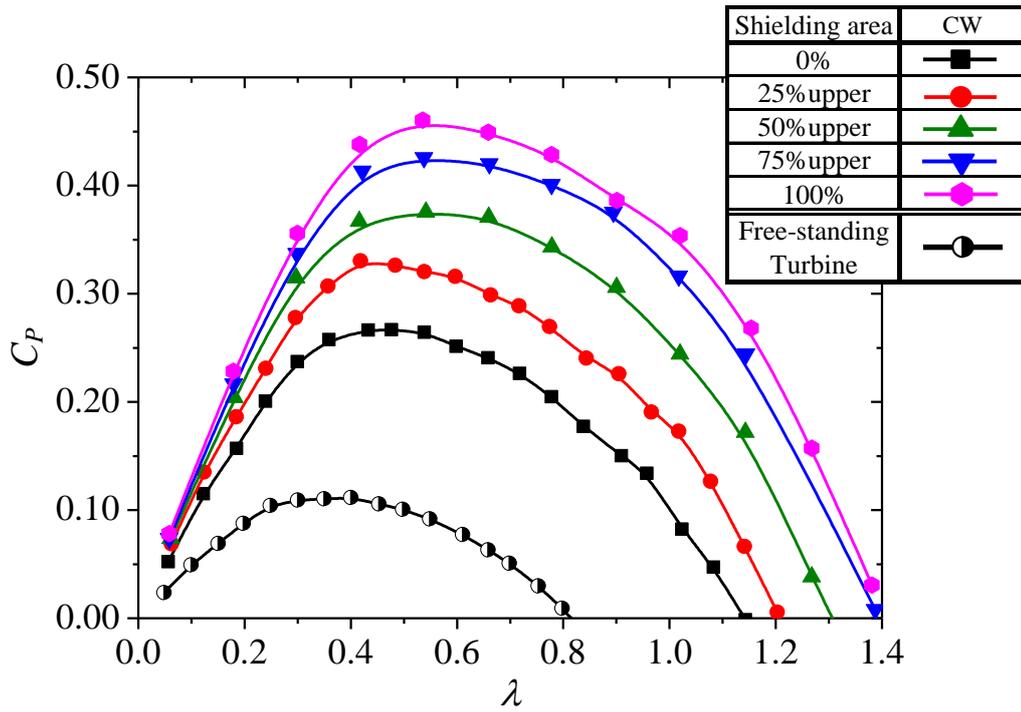


図 6-3-1 フェンス上部に無孔板領域がある場合の風車出力係数 ($c = 0.0625$, CW)

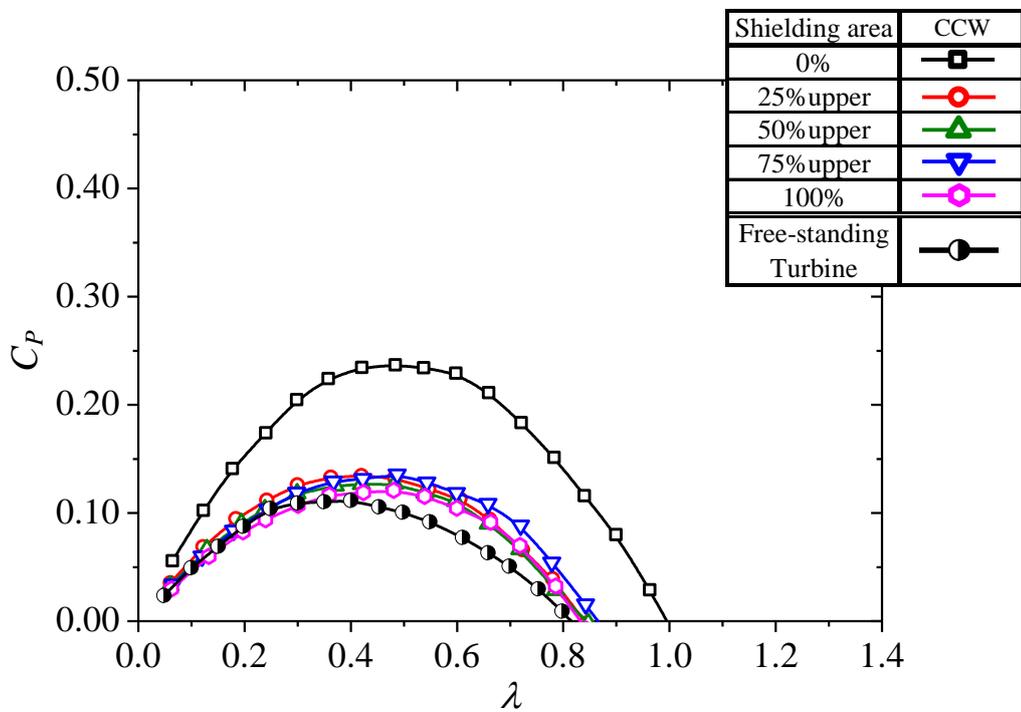


図 6-3-2 フェンス上部に無孔板領域がある場合の風車出力係数 ($c = 0.0625$, CCW)

図 6-3-3 及び図 6-3-4 にクリアランスが大きい $c = 0.313$ で風車回転方向が CW と CCW の 2 つの場合における、有孔板フェンスの無孔板領域を 0%, 25%upper, 50%upper, 75%upper, 100% と変化させた場合の風車出力特性を示す。なお、図中には風車単体の結果も示す。

図 6-3-3 に示すように風車回転方向 CW の場合、有孔フェンス上部の無孔板領域が大きくなるにつれて、出力係数 C_P が大きくなる。この傾向は、図 6-3-1 で示すクリアランスが小さい $c = 0.0625$ の場合と同じである。吹き上がり式防雪フェンスを模擬したもので最も出力係数 C_P が大きくなる無孔板領域が 75%upper の場合、最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.38$ となった。また最大出力係数 C_{Pmax} を得る周速比 $\lambda_{C_{Pmax}}$ は、無孔板領域が大きくなるにつれて大きくなることがわかり、無孔板領域が 75%upper の場合には $\lambda_{C_{Pmax}} = 0.55$ となる。図 6-3-4 に示すように風車回転方向 CCW の場合も、風車回転方向 CW の場合と同様に無孔板領域が大きくなるにつれて、出力係数 C_P が大きくなることがわかる。無孔板領域が 75%upper の場合、最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.35$ となり、風車回転方向 CW の場合に得られる風車出力よりも小さくなるが、最大出力係数 C_{Pmax} を得る周速比 $\lambda_{C_{Pmax}}$ は $\lambda_{C_{Pmax}} = 0.54$ となり、風車回転方向 CW とほぼ同じ値であった。しかし、高い風車出力を得られる周速比 λ の範囲は風車回転方向 CCW の方が狭くなる。

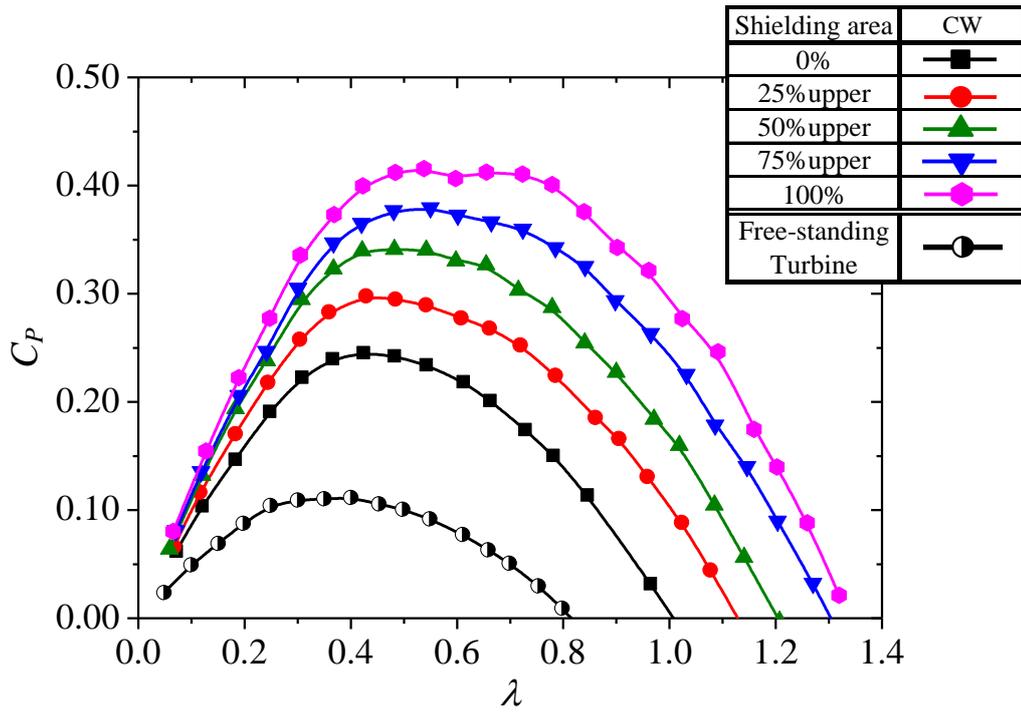


図 6-3-3 フェンス上部に無孔板領域がある場合の風車出力係数 ($c = 0.313$, CW)

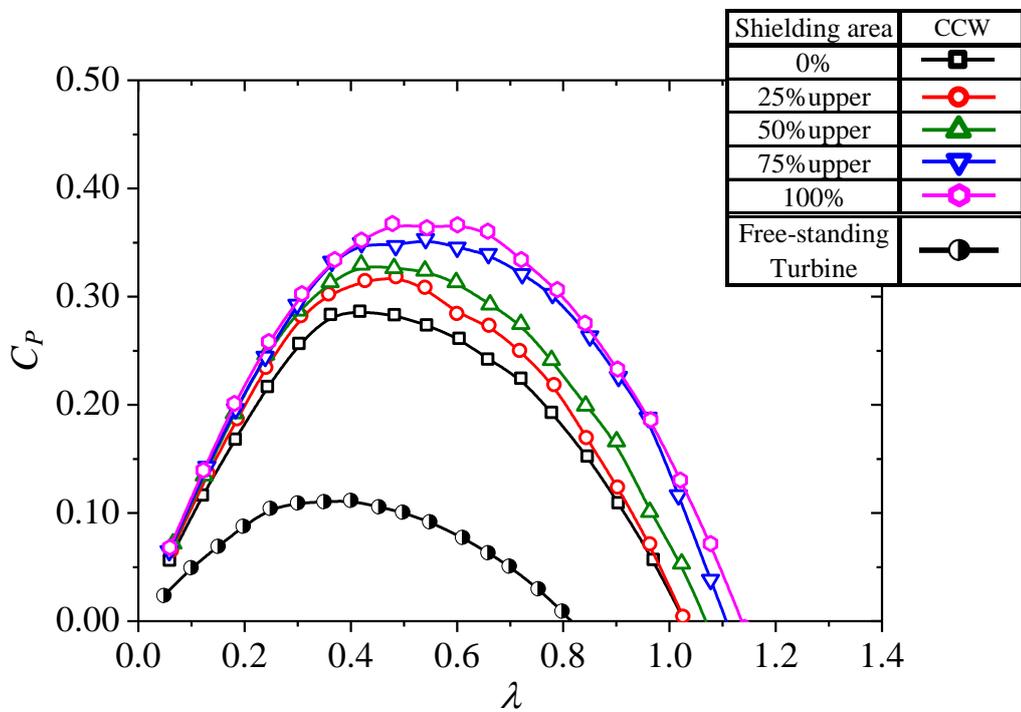


図 6-3-4 フェンス上部に無孔板領域がある場合の風車出力係数 ($c = 0.313$, CCW)

図 6-3-5 にクリアランス $c = 0.0625$ 及び $c = 0.313$ の場合での有孔板フェンス上部の無孔板領域の変化に伴う最大出力係数 C_{Pmax} の変化を風車単体のときの最大出力係数 C_{Pmax} に対する比として示す。風車回転方向 CW の場合、クリアランス c の大小に関わらず、無孔板領域が大きくなるにしたがって最大出力係数 C_{Pmax} が上昇している。クリアランス $c = 0.0625$ 、風車回転方向 CW で無孔板領域が 50%upper では、最大出力係数が風車単体の場合に比べ 3.3 倍になり、無孔板領域が 100%になると 4.1 倍に増加する。一方、風車回転方向 CCW の場合、クリアランスが大きい $c = 0.313$ の場合においては風車回転方向 CW と同様に有孔板フェンス上部の無孔板領域が大きくなるにしたがって最大出力係数 C_{Pmax} が上昇し、無孔板領域が 50%upper では風車単体の場合に比べ 2.9 倍になり、無孔板領域が 100%では 3.3 倍になる。しかし、風車回転方向 CW に比べると、無孔板領域が大きい場合の最大出力係数 C_{Pmax} は小さい。クリアランス が小さい $c = 0.0625$ においては、無孔板領域 25%以上で最大出力係数 C_{Pmax} が無孔板領域 0%の場合よりも大きく低下し、無孔板領域 100%の場合とほぼ同じ値になり、風車単体の場合に比べ 1.1 倍となる。有孔板フェンス上部に無孔板領域がある場合、吹き上がる流れ及び風車とフェンスの隙間を通る流れと風車回転方向が風車出力の増減に関係していることは、6-4-1 項で議論する。

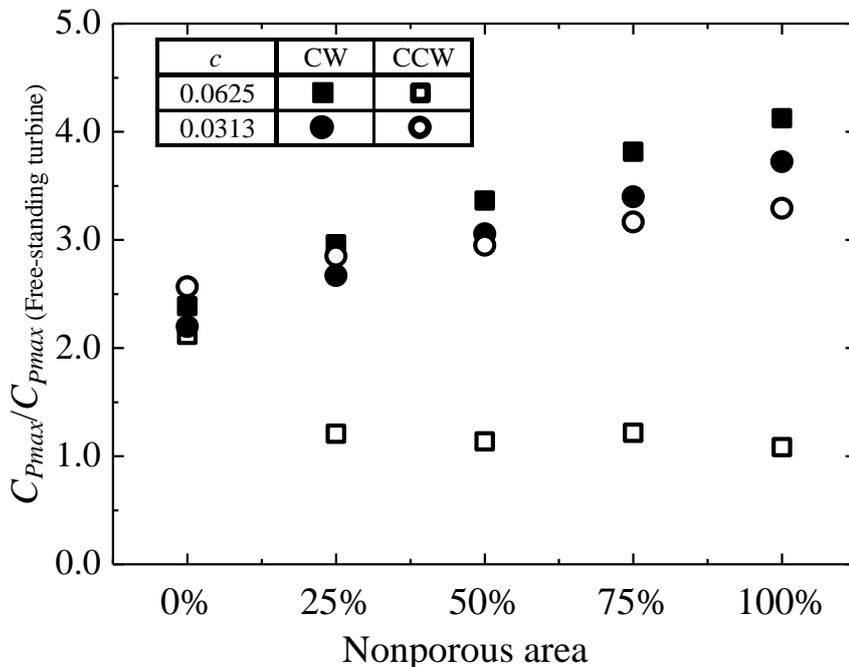


図 6-3-5 フェンス上部に無孔板領域がある場合の最大風車出力係数

6-3-2 フェンス下部に無孔板領域がある場合

吹き止め式防雪フェンスを模擬して、フェンス下部の無孔板領域を変化させた場合の風車出力係数 C_P に及ぼす影響について示す。

図 6-3-6 及び図 6-3-7 にクリアランスが小さい $c = 0.0625$ で風車回転方向が CW と CCW の 2 つの場合における、有孔板フェンスの無孔板領域を 0%, 25%lower, 50%lower, 75%lower, 100% と変化させた場合の風車出力特性を示す。なお、図中には風車単体の結果も示す。

図 6-3-6 の風車回転方向 CW の場合、有孔板フェンス下方の無孔板領域が大きくなるにつれて、出力係数が大きくなり、吹き止め式防雪フェンスを模擬したもので最も出力係数 C_P が大きくなるものは無孔板領域が 75%lower の場合で最大出力係数 C_{Pmax} は風車単体の 3.8 倍であり、吹き払い式フェンスを模擬したもので最も出力係数が大きかった無孔板領域が 75%upper と大きく異なることがわかる。最大出力係数 C_{Pmax} とその時の周速比 $\lambda_{C_{Pmax}}$ は、図 6-3-1 の吹き払い式防雪フェンスを模擬した時と同様に、最大出力係数が $C_{Pmax} = 0.27$ から 0.46 と向上するのに対応して、その時の周速比も $\lambda_{C_{Pmax}} = 0.40$ から 0.55 とわずかに増加する。図 6-3-7 の風車回転方向 CCW の場合、無孔板領域があることによって無孔板領域 0% の場合に比べて、出力係数 C_P が 0.05 程度上昇する。最大出力係数 C_{Pmax} とその時の周速比 $\lambda_{C_{Pmax}}$ は無孔板領域が大きくなるにつれて変化はしているが、回転方向 CW の場合と比べるとその変化量は小さい。吹き止め式防雪フェンスを模擬した場合の最大風車出力は無孔板領域に関わらず、風車単体のおおよそ 2.4 倍である。最大出力係数も $C_{Pmax} = 0.27 \sim 0.28$ の範囲であり、その時の周速比は $\lambda_{C_{Pmax}} = 0.50 \sim 0.55$ である。しかし、無孔板領域が 100% の場合では風車出力は大きく低下し、最大出力係数 C_{Pmax} は風車単体の場合に比べて 1.1 倍となった。風車出力特性も風車単体の場合とほぼ同じ特性となった。

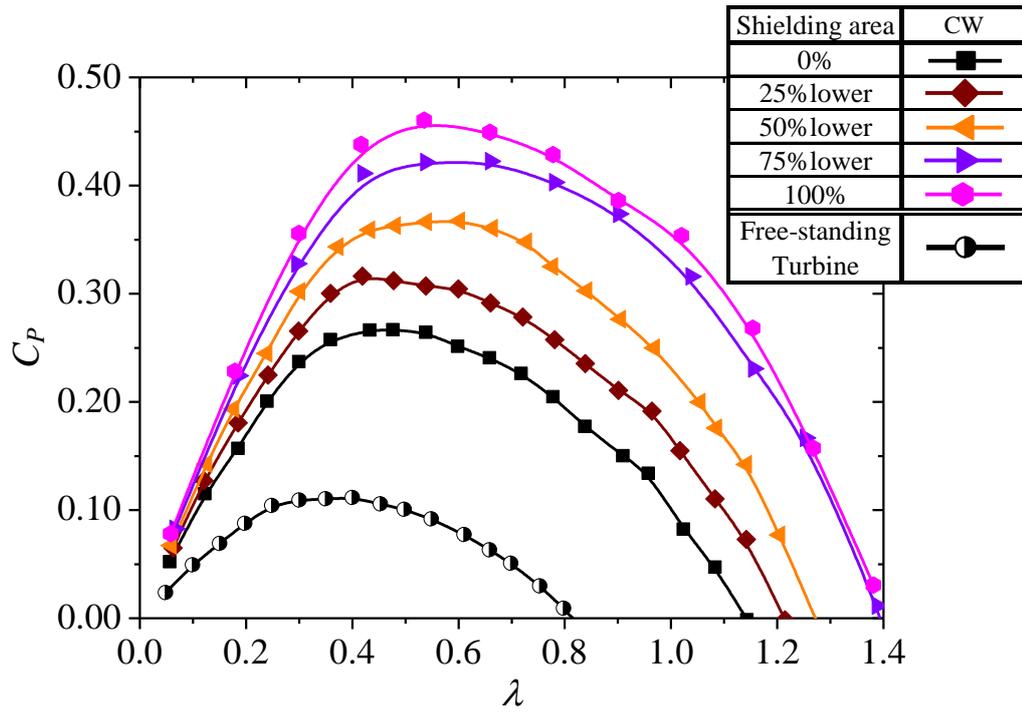


図 6-3-6 フェンス下部に無孔板領域がある場合の風車出力係数 ($c = 0.0625$, CW)

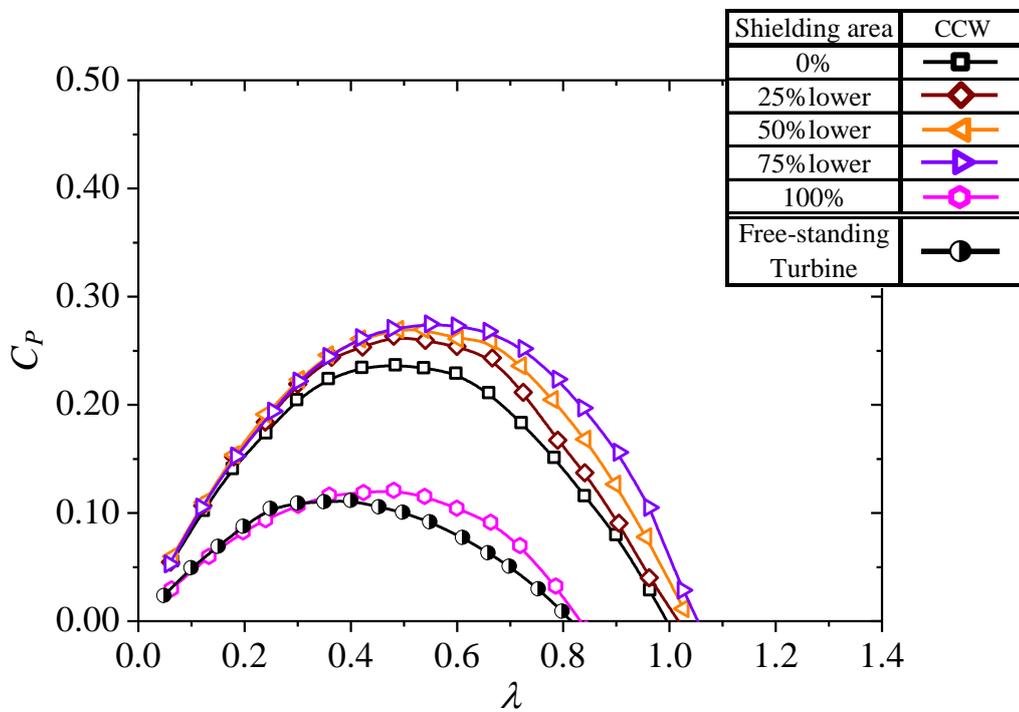


図 6-3-7 フェンス下部に無孔板領域がある場合の風車出力係数 ($c = 0.0625$, CCW)

図 6-3-8 及び図 6-3-9 にクリアランスが大きい $c = 0.313$ で風車回転方向が CW と CCW の 2 つの場合における、有孔板フェンスの無孔板領域を 0%, 25%lower, 50%lower, 75%lower, 100% と変化させた場合の風車出力特性を示す。なお、図中には風車単体の結果も示す。

図 6-3-8 に示すように風車回転方向 CW の場合、有孔フェンス下部の無孔板領域が大きくなるにつれて、出力係数 C_p が大きくなる。この傾向は、図 6-3-6 で示すクリアランスが小さい $c = 0.0625$ の場合と同じである。吹き上がり式防雪フェンスを模擬したもので最も出力係数 C_p が大きくなる無孔板領域が 75%lower の場合、最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.37$ となった。図 6-3-9 に示すように風車回転方向 CCW の場合も、風車回転方向 CW の場合と同様に無孔板領域が大きくなるにつれて、出力係数 C_p が大きくなる。しかし、無孔板領域が 100% になると、最大出力係数 C_{Pmax} は無孔板領域が 75%lower の場合より小さくなり、最大出力係数が $C_{Pmax} = 0.37$ となる。フェンス上部まで遮蔽領域があることで、フェンスによる吹き上がり流れの影響が大きくなり、その流れが風車の上部にあたり、風車の回転を抑制したと考えられる。

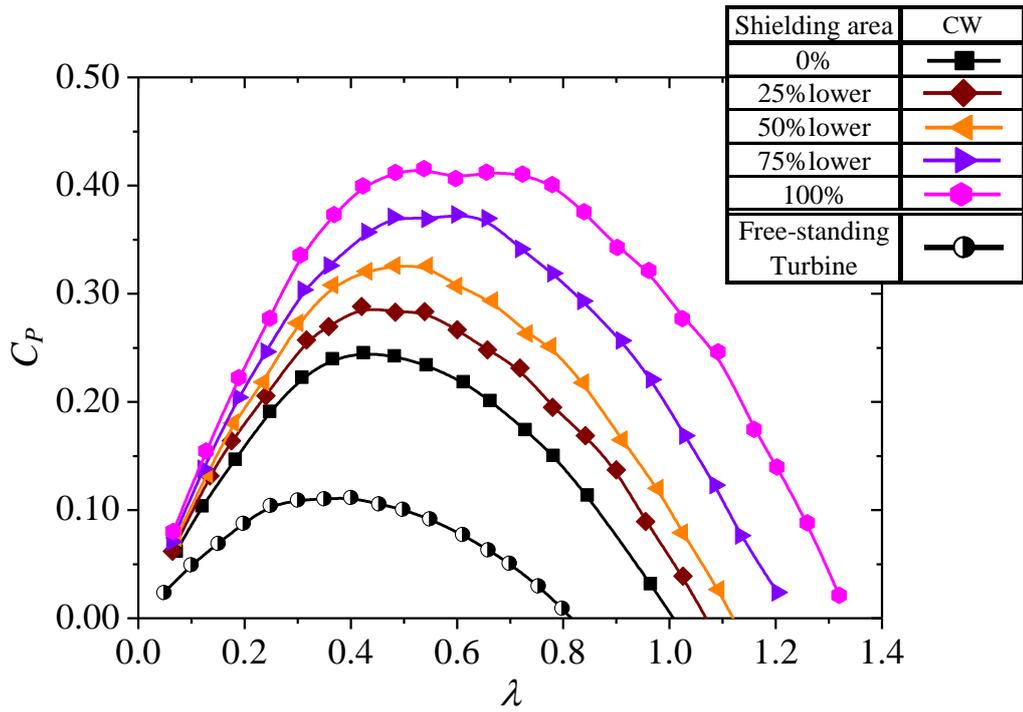


図 6-3-8 フェンス下部に無孔板領域がある場合の風車出力係数 ($c = 0.313$, CW)

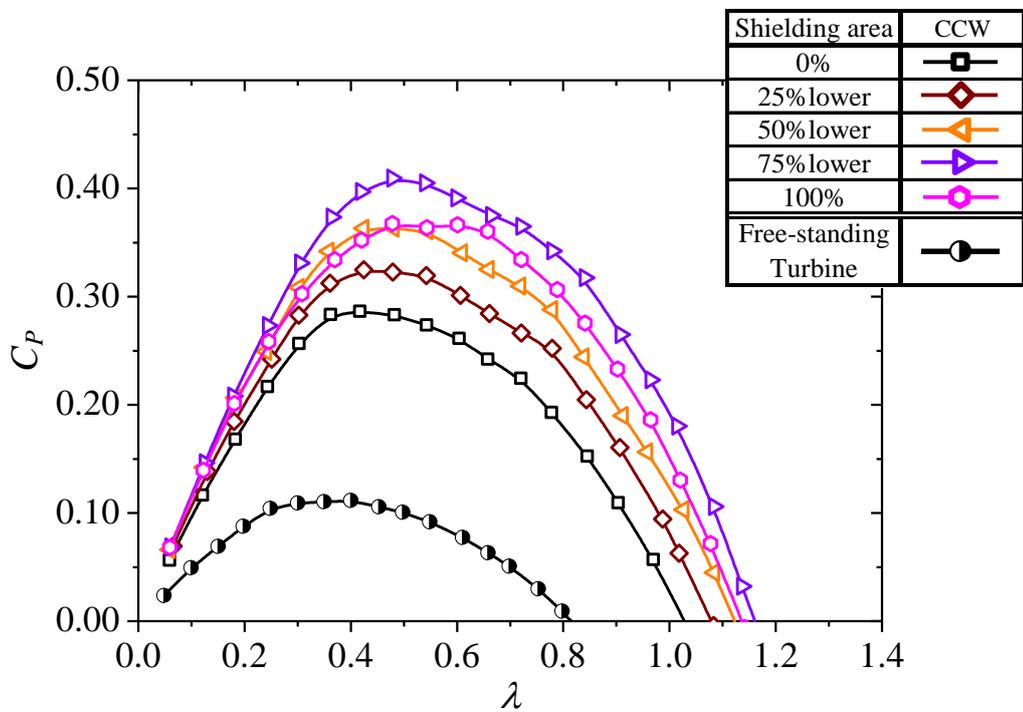


図 6-3-9 フェンス下部に無孔板領域がある場合の風車出力係数 ($c = 0.313$, CCW)

図 6-3-10 にクリアランス $c = 0.0625$ 及び $c = 0.313$ の場合で有孔板フェンスの無孔板領域の変化に伴う最大出力係数 C_{Pmax} の変化を風車単体のときの最大出力係数 C_{Pmax} に対する比として示す。風車回転方向 CW の場合、クリアランス c の大小に関わらず、無孔板領域が大きくなるにしたがって、最大出力係数 C_{Pmax} が上昇している。クリアランス $c = 0.0625$ 、風車回転方向 CW で無孔板領域が 50%lower では、最大出力係数が風車単体の場合に比べ 3.2 倍になり、無孔板領域が 100%になると 4.1 倍に増加する。これらの値は、吹き止め式防雪フェンスを模擬した場合の結果とほぼ同じ値になる。風車回転方向 CCW の場合も、無孔板領域が大きくなるにしたがって風車出力は上昇する。しかし、無孔板領域が 100%になるとクリアランスに関わらず、最大出力係数 C_{Pmax} は低下する。風車単体に比べて最大出力係数は、クリアランス $c = 0.0625$ の場合は 1.1 倍、クリアランス $c = 0.313$ の場合は 3.2 倍となり、クリアランスの小さい $c = 0.0625$ の場合の方が大きく低下した。フェンス下方に無孔板領域がある場合もフェンス上部に無孔板領域がある場合と同様に、フェンスでせき止められた流れは吹き上がる流れに影響を与える。風車回転方向 CCW で無孔板領域が 100%の場合、クリアランスに関わらず、風車回転方向と吹き上がり流れの方向が逆であるために風車出力が低下すると考えられる。

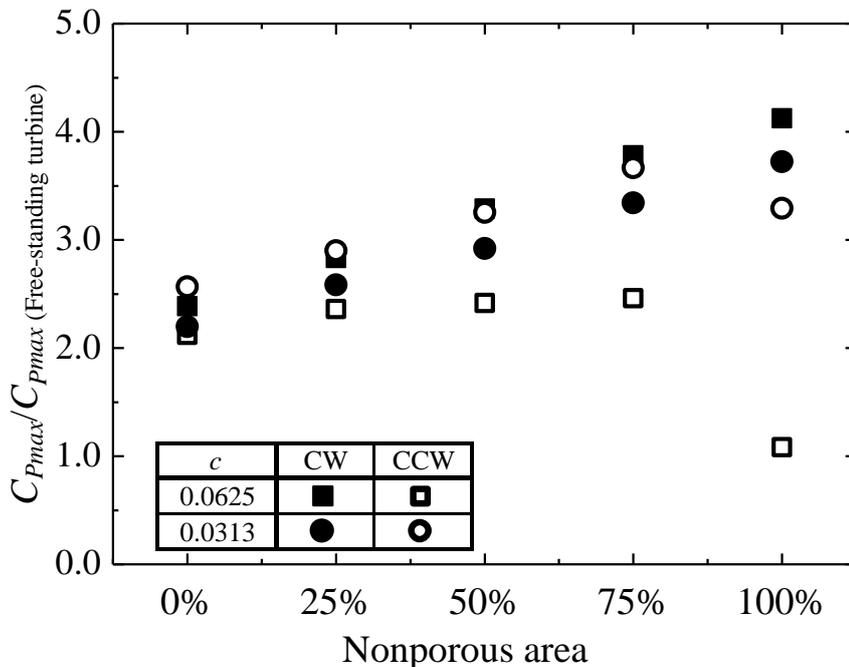


図 6-3-10 フェンス下部に無孔板領域がある場合の最大風車出力係数

6-4 風速分布

6-4-1 フェンス上部に無孔板領域がある場合

吹き払い式防雪フェンスを模擬して、フェンス上部に無孔板領域を設けた場合における、風車後流の $\sqrt{u^2+v^2}/U$ の風速分布を示す。

図6-4-1及び図6-4-2にクリアランスが小さい $c=0.0625$ で風車回転方向がCWとCCWの2つの場合における、有孔板フェンスの無孔板領域を0%、25%upper、50%upper、75%upper、100%と変化させた場合の風車後流の風速分布を示す。

図6-4-1より無孔板領域が大きくなるにしたがって、風車後流域における吹き上がりの角度が大きくなっていることがわかる。また、風車上方からの流れも無孔板領域の増大に伴って増速されている。このことから、風車回転方向CWの場合、フェンス上部の無孔板領域が大きくなるにつれて、風車に対してプラスの回転力を発生する羽根に強い風が当たり、図6-3-5のように出力係数が増加するといえる。また図6-3-5より、クリアランス $c=0.0625$ で風車回転方向CWの場合の最大風車出力について、風車単体の時の最大風車出力を基準として増加率を求め、それらの3乗をとると、無孔板領域0%の場合は1.3倍、50%upperの場合は1.5倍、100%の場合は1.6倍となる。これは図6-4-1で示された同じ条件における風車後流の上層部における風速増加率 $\sqrt{u^2+v^2}/U$ におおよそ一致する結果となる。一方、図6-4-2に風車回転方向CCWでクリアランスが小さい $c=0.0625$ の場合も、無孔板領域が大きくなるにしたがって、風車後流域における吹き上がりの角度が大きくなり、風車上方からの流れも増速されている。しかし、吹き上がりの角度は風車回転方向CWの場合よりも小さくなっている。また、風車とフェンスの隙間からの流れはほとんど見られない。このことから風車回転方向CCWの場合も、無孔板領域が大きくなるにつれてフェンスから上昇する風が増大するが、この上昇流は風車の回転を妨げる力を発生する羽根に衝突するため、図6-3-5で見られるように出力係数の低下が起こる。

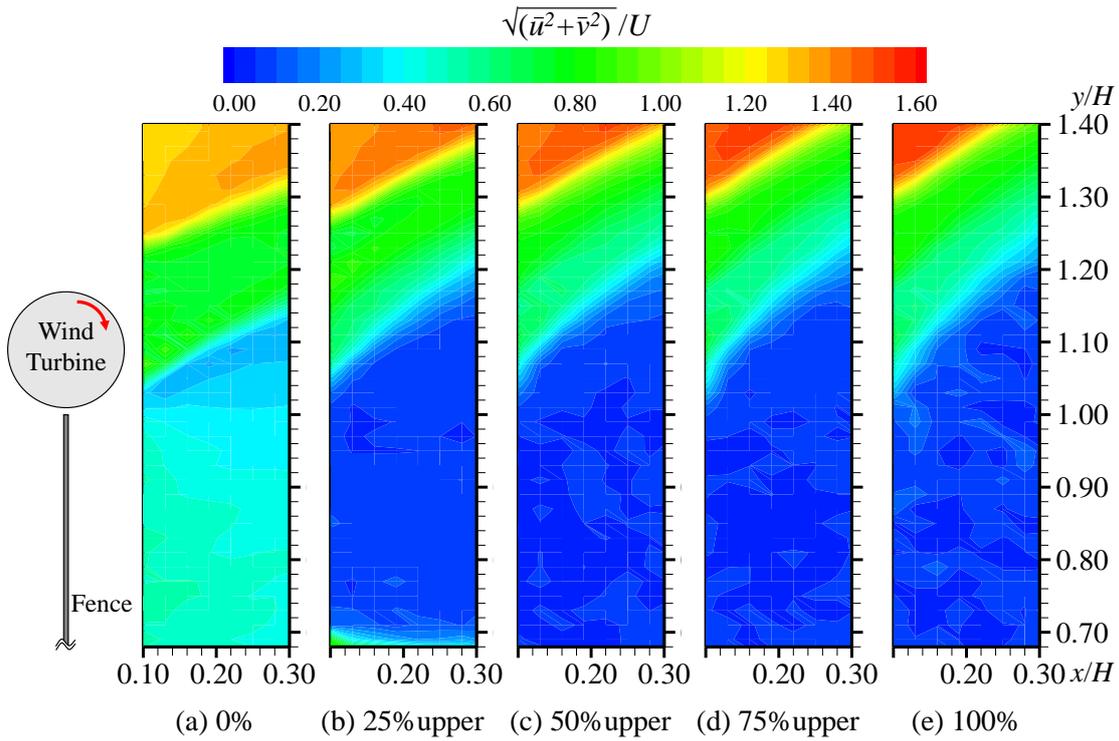


図 6-4-1 風車後流における風速の等値分布 ($c = 0.625, CW$)

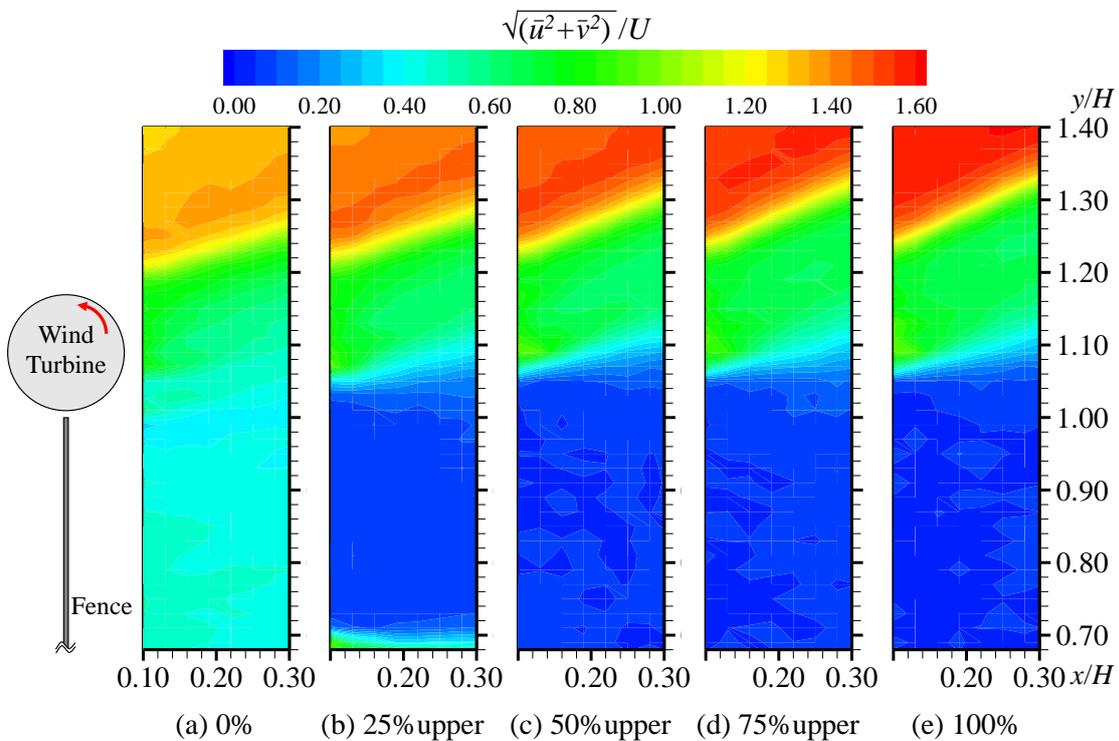


図 6-4-2 風車後流における風速の等値分布 ($c = 0.625, CCW$)

図 6-4-3 及び図 6-4-4 にクリアランスが大きい $c = 0.313$ で風車回転方向が CW と CCW の 2 つの場合における、有孔板フェンスの無孔板領域を 0%, 25%upper, 50%upper, 75%upper, 100% と変化させた場合の風車後流の風速分布を示す。

吹き上がりの角度は、クリアランスが小さい場合と同様に、無孔板領域が大きくなるにつれて高く吹き上がっている。クリアランスが大きい場合、図 6-4-1 及び図 6-4-2 のクリアランスが小さい場合と比較して、風車とフェンスの隙間を通る流れがはっきりと確認できる。この隙間流れは風車下方の羽根にフェンス上端から上昇してきた流れが衝突・通過していることを示しており、この風が回転力を発生している。したがって、クリアランスが大きい場合は、無孔板領域が増加しても図 6-3-10 のように風車回転方向 CCW の出力係数は増加する。

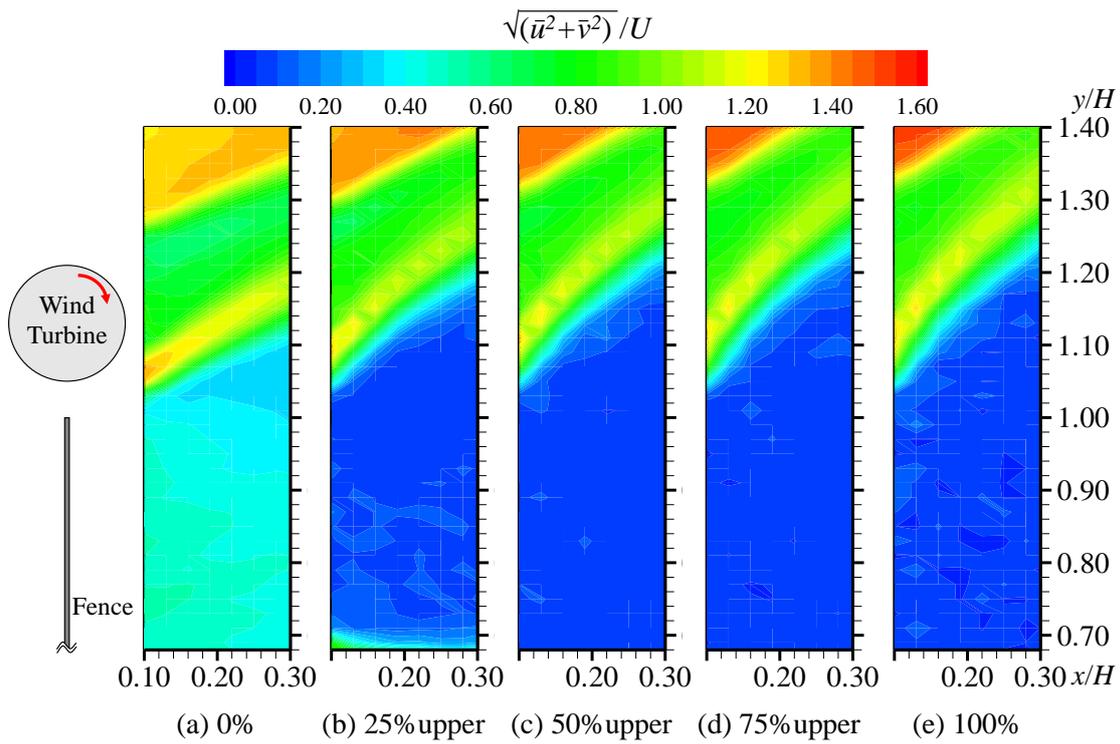


図 6-4-3 風車後流における風速の等値分布 ($c = 0.313, CW$)

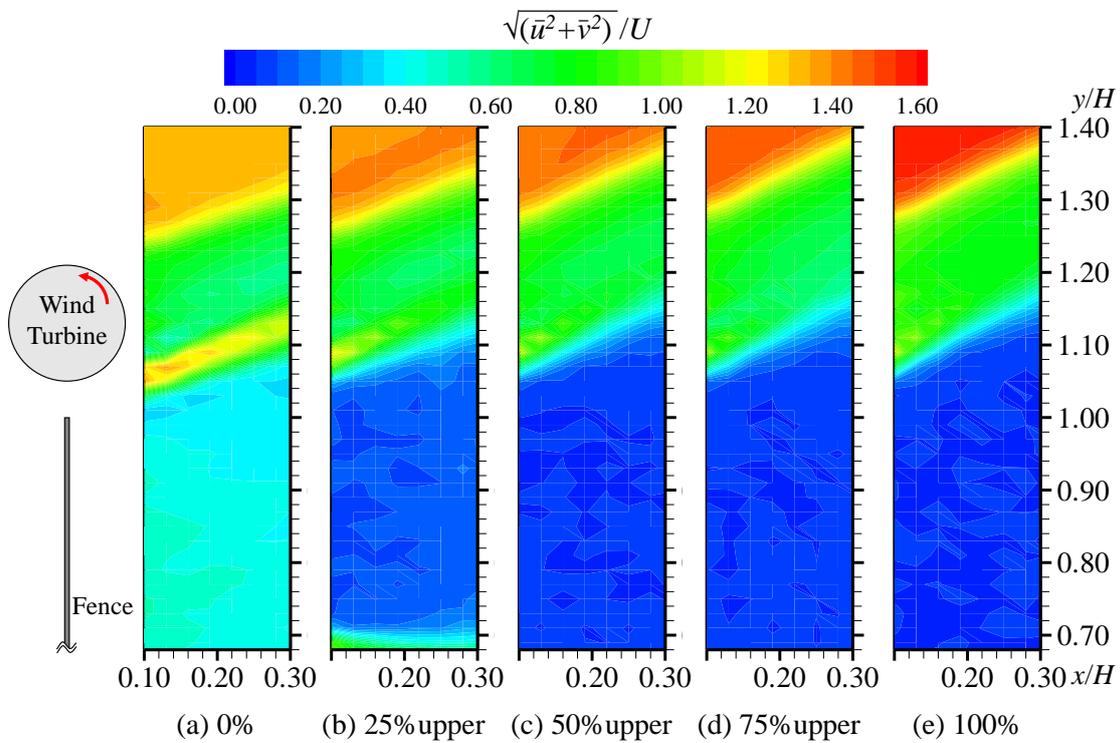


図 6-4-4 風車後流における風速の等値分布 ($c = 0.313, CCW$)

6-4-2 フェンス下部に無孔板領域がある場合

吹き払い式防雪フェンスを模擬して、フェンス下部に無孔板領域を設けた場合における、風車後流の $\sqrt{u^2+v^2}/U$ の風速分布を示す。

図6-4-5及び図6-4-6にクリアランスが小さい $c = 0.0625$ で風車回転方向がCWとCCWの2つの場合における、有孔板フェンスの無孔板領域を0%、25%lower、50%lower、75%lower、100%と変化させた場合の風車後流の風速分布を示す。

フェンス上部が無孔板領域がある場合と同様にフェンス下部に無孔板領域がある場合も、無孔板領域が大きくなるにつれて、吹き上がりの角度が大きくなっている。また、風車上方の風速も無孔板領域の増加に従って、増速していることがわかる。図6-4-6に示す風車回転方向CCWの場合では、フェンスの無孔板領域の大きさに関わらず、 $\sqrt{u^2+v^2}/U \approx 1.0$ となる領域の位置はほとんど変わっていないことがわかる。

図6-4-7及び図6-4-8にクリアランスが大きい $c = 0.313$ で風車回転方向がCWとCCWの2つの場合における、有孔板フェンスの無孔板領域を0%、25%lower、50%lower、75%lower、100%と変化させた場合の風車後流の風速分布を示す。風車回転方向CWと同様に無孔板領域の増加に伴って、風車上方の風速が増速している。風車上方の風速が増速することによって、風車の回転が促進されて図6-3-10に示すように風車出力が無孔板領域の増加に伴って、増加していると考えられる。風車回転方向に関わらず、クリアランスが大きいことで風車とフェンスの隙間を通る隙間流れがはっきりと確認できる。特に風車回転方向CCWの場合、無孔板領域が100%以外の場合には、遮蔽領域が大きくなるにつれて隙間流れの影響が風車後方にまで影響していることがわかる。また、風車回転方向CCWで無孔板領域が100%の場合には、風車後方における隙間流れの影響が確認できない。隙間流れの影響が少ないことから、図6-3-10に示すように無孔板領域が100%の場合に大きく風車出力が低下したと考えられる。

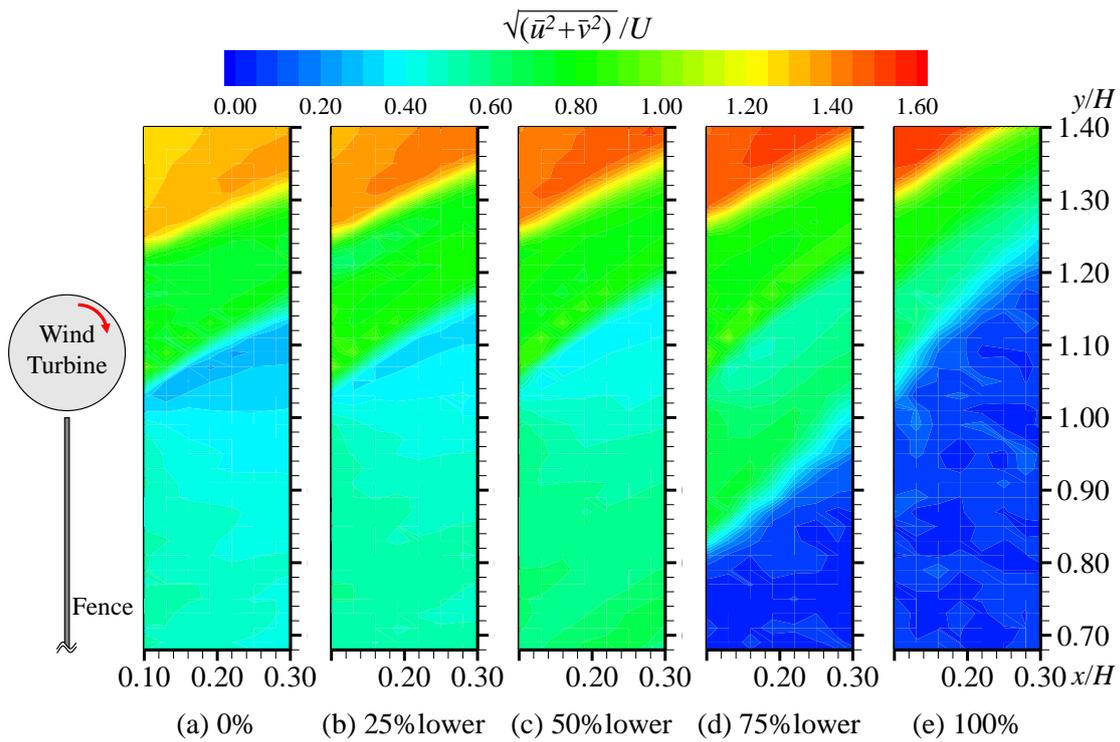


図 6-4-5 風車後流における風速の等値分布 ($c = 0.625, CW$)

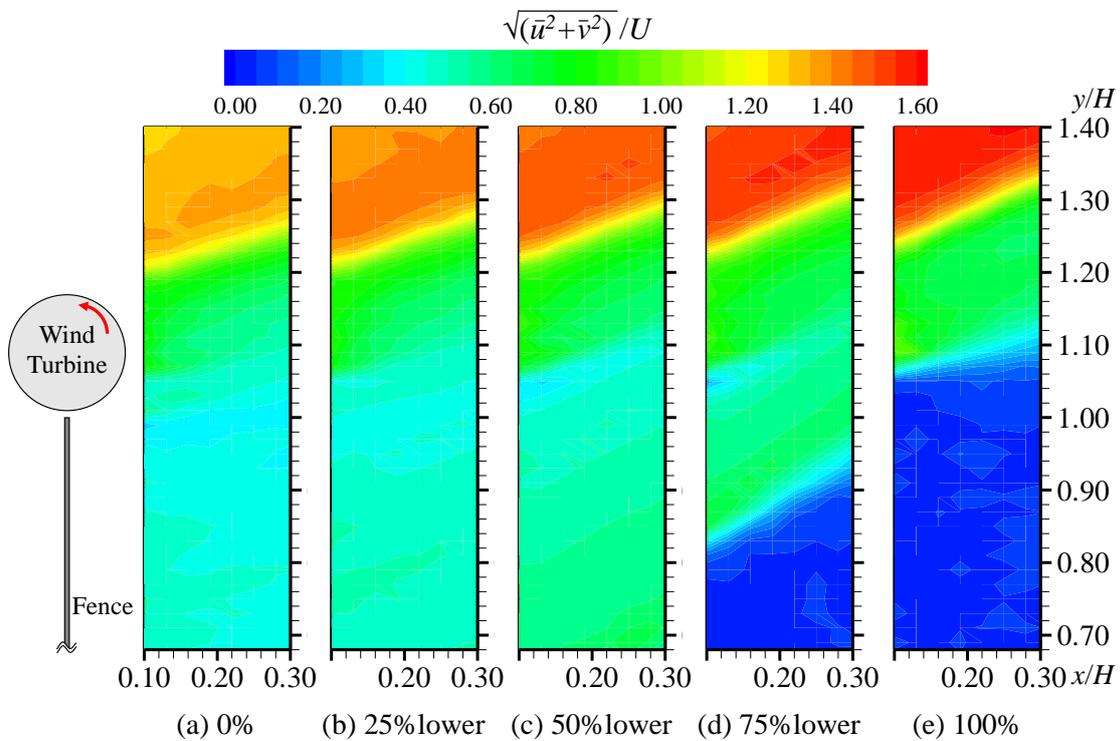


図 6-4-6 風車後流における風速の等値分布 ($c = 0.625, CCW$)

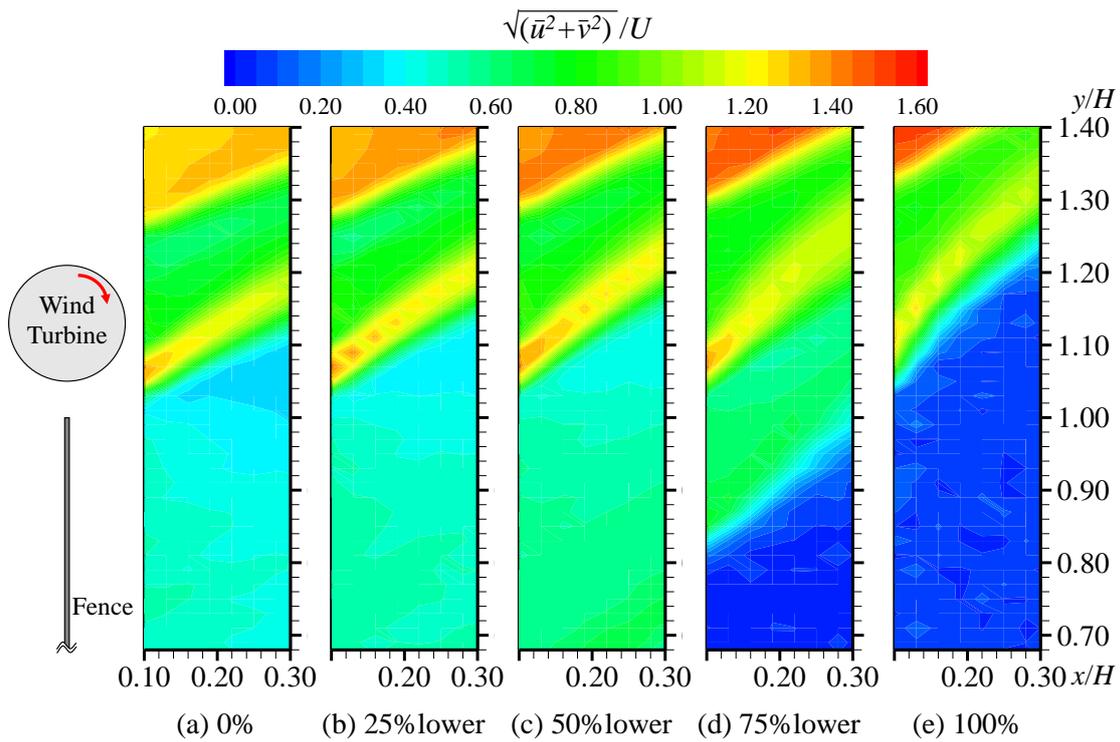


図 6-4-7 風車後流における風速の等値分布 ($c = 0.313, CW$)

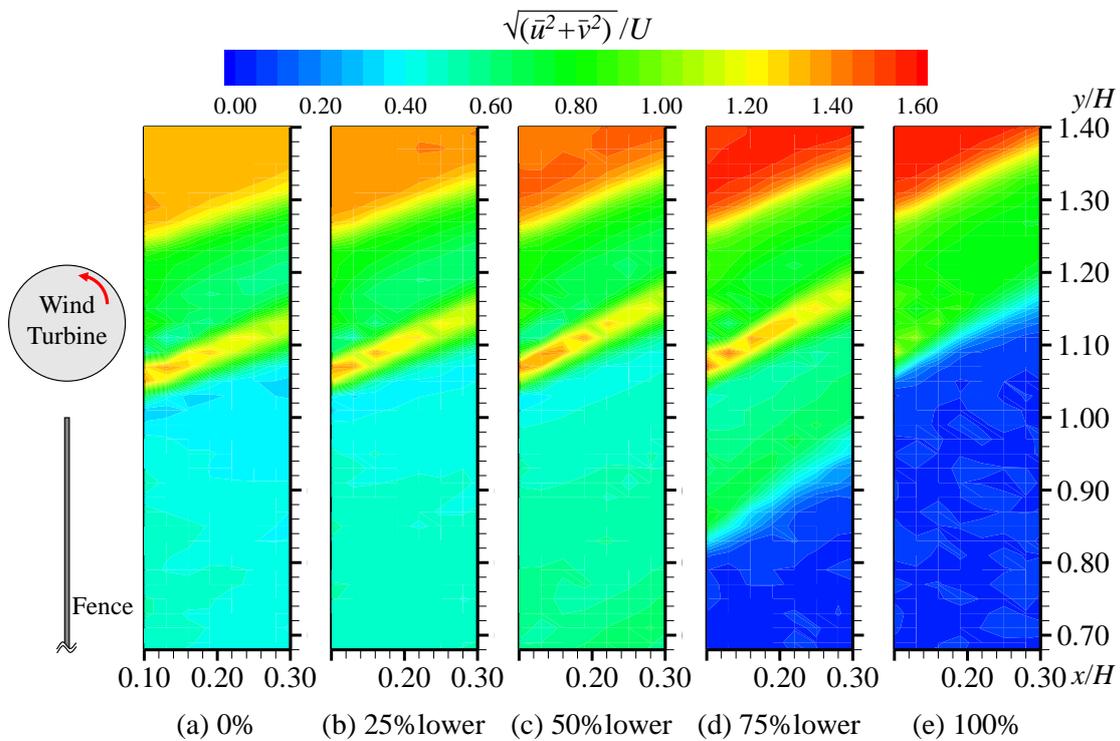


図 6-4-8 風車後流における風速の等値分布 ($c = 0.313, CCW$)

6-5 フェンス周辺の流れ

有孔フェンスの無孔板領域を変更させた場合のフェンス周辺の流れ場の可視化結果を示す。フェンス単体の場合における、無孔板領域を変化させた場合のフェンス近傍の可視化写真を図 6-5-1 に示す。フェンス上部に無孔板領域がある場合の方が、フェンス下部に無孔板領域がある場合に比べて、吹き上がり高さが高くなっている。フェンス上部に無孔板領域がある場合、フェンス下部に強い吹き出し流れが存在していることが確認できる。無孔板領域 100%の場合、フェンス後方で流れが淀んでおり、逆流域が形成されている。

図 6-5-2 及び図 6-5-3 にクリアランスが小さい $c = 0.0625$ で風車回転方向が CW と CCW の 2 つの場合における、有孔板フェンスの無孔板領域を変化させた場合のフェンス周辺の可視化写真を示す。なお、周速比は最大出力係数となる $\lambda \approx 0.45$ とした。風車の回転方向に関わらず、フェンス上部に無孔板領域がある場合の方がフェンス下部に無孔板領域がある場合よりも吹き上がり高さが高いことがわかる。

図 6-5-4 及び図 6-5-5 にクリアランスが大きい $c = 0.313$ で風車回転方向が CW と CCW の 2 つの場合における、有孔板フェンスの無孔板領域を変化させた場合のフェンス周辺の可視化写真を示す。なお、周速比は最大出力係数となる $\lambda \approx 0.45$ とした。図 6-5-2 及び図 6-5-3 に示したクリアランスが小さい $c = 0.0625$ の場合と同様に、フェンス上部に無孔板領域がある方が、フェンス下部に無孔板領域があるよりも吹き上がり高さが高くなっている。図 6-5-4 及び図 6-5-5 では、フェンスと風車の間の隙間の流れが確認でき、風車回転方向 CCW の場合は風車回転方向 CW に比べて、よりフェンス下流域までその隙間流れが確認できる。これは、風車の下方部分のブレード部分に当たる隙間流れが風車の回転を促進させる流れであるためと考えられる。



(a) 0%



(b) 100%



(c) 25%upper



(d) 25%lower



(e) 50%upper



(f) 50%lower



(g) 75%lower



(h) 75%upper

図 6-5-1 有孔フェンスにおけるフェンス周辺の流れ場



(a) 0%



(b) 100%



(c) 25% upper



(d) 25% lower



(e) 50% upper



(f) 50% lower



(g) 75% lower



(h) 75% upper

図 6-5-2 風車付き有孔フェンスにおけるフェンス周辺の流れ場 ($c = 0.625, CW$)



(a) 0%



(b) 100%



(c) 25%upper



(d) 25%lower



(e) 50%upper



(f) 50%lower



(g) 75%lower



(h) 75%upper

図 6-5-3 風車付き有孔フェンスにおけるフェンス周辺の流れ場 ($c = 0.625$, CCW)



(a) 0%



(b) 100%



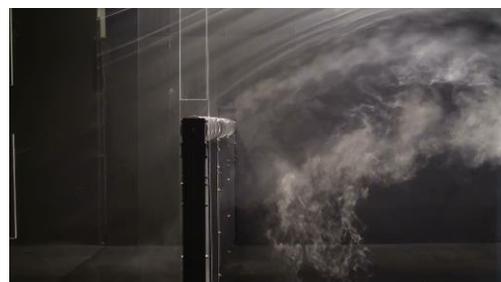
(c) 25%upper



(d) 25%lower



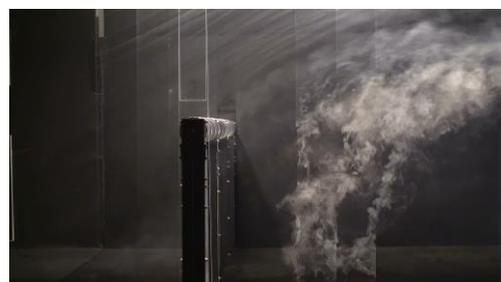
(e) 50%upper



(f) 50%lower



(g) 75%lower



(h) 75%upper

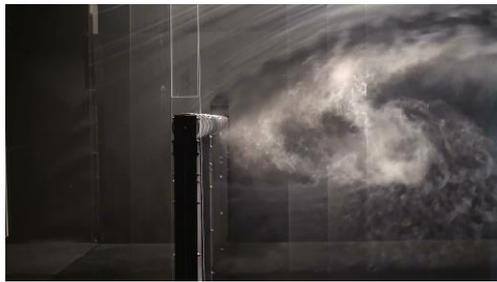
図 6-5-4 風車付き有孔フェンスにおけるフェンス周辺の流れ場 ($c = 0.313, CW$)



(a) 0%



(b) 100%



(c) 25%upper



(d) 25%lower



(e) 50%upper



(f) 50%lower



(g) 75%lower



(h) 75%upper

図 6-5-5 風車付き有孔フェンスにおけるフェンス周辺の流れ場 ($c = 0.313$, CCW)

6-6 まとめ

本章では、防雪フェンスを模擬した有孔板フェンス上部にクロスフロー風車を設置し、有孔板フェンスの無孔板領域を変化させた場合の風車出力特性及び風車周辺の流れの様相を風洞実験により調べ、以下の結論を得た。

- (1) 風車回転方向 CW として風車を設置することで、クリアランスに関わらず、有孔フェンスの無孔板領域が拡大するにしたがって、風車上方の回転力を発生するフェンスからの上昇流が羽根に当たることで最大出力係数 C_{Pmax} が上昇する。最大出力係数はクリアランスが小さい $c = 0.0625$ で、フェンスの無孔板領域を 100% としたときに最も大きくなり、 $C_{Pmax} \approx 0.46$ となった。
- (2) 風車回転方向 CCW でクリアランスが小さい $c = 0.0625$ で風車を設置した場合、フェンスと風車の隙間を通り抜ける流れが弱くなる。そのため有孔板フェンス上部の無孔板領域が 25% 以上では、風車の回転を妨げるフェンスからの上昇流が羽根に当たり、最大出力係数 C_{Pmax} は低下し、ほぼ一定となる。
- (3) 風車回転方向 CCW でクリアランスを大きく $c = 0.313$ として風車を設置した場合、フェンスと風車の隙間を通り抜ける風が風車下方で回転力を発生する羽根に当たるため、有孔板フェンスの無孔板領域の増加とともに最大出力係数 C_{Pmax} は増加する。最大出力係数はフェンスの無孔板領域を 75% lower とした場合に最も大きくなり、 $C_{Pmax} \approx 0.41$ となった。
- (4) 可視化実験の結果より、各種の防雪フェンス上部に風車を設置しても、風車を設置しない防雪フェンス下流の流れと定性的に一致することがわかった。

第7章 斜風時における風車性能低下の抑制に関する検討

7-1 はじめに

垂直軸風車の1つであるクロスフロー風車は、風向に対する指向性がなく、どの方向から風が吹いても発電できるという長所を有している。しかし、本研究においては、クロスフロー風車を地面に対して水平に設置しているため、垂直軸風車の長所である無指向性が失われており、斜めからの風（斜風）が流入した場合に、風車出力が低下することが予想される。そこで、風向が変化した場合においても風車出力の低下を抑制する機構を考案する必要がある。

風車に対して風が斜めから流入した際の出力特性に関する研究は、プロペラ風車について、清水ら（1985）が風洞実験、今村ら（2005）がパネル法による非定常解析を行っている。直線翼垂直軸風車について、Ferreira ら（2006）はビル屋上に風車を設置する際の吹き上がり風の影響を調べるために風車を傾けた場合の出力特性を測定している。また、本橋ら（2010）はサボニウス風車を設置する場合について、同様の実験を行っている。

本章では、クロスフロー風車単体及びクロスフロー風車をフェンス上部に水平に設置した場合の流入する風向（斜風の角度）が出力特性に及ぼす影響を示す。また斜風時の風車出力低下を抑制するために、風車単体の場合には、風車の両端に円形端板を設置し、フェンス上部に水平に風車を設置した場合には、フェンス前面に垂直な偏向板を設置して斜風時における風車出力と風速分布を測定し、円形端板及び垂直偏向板の設置が斜風時の風車出力の低下抑制に有効かどうかについて検討する。

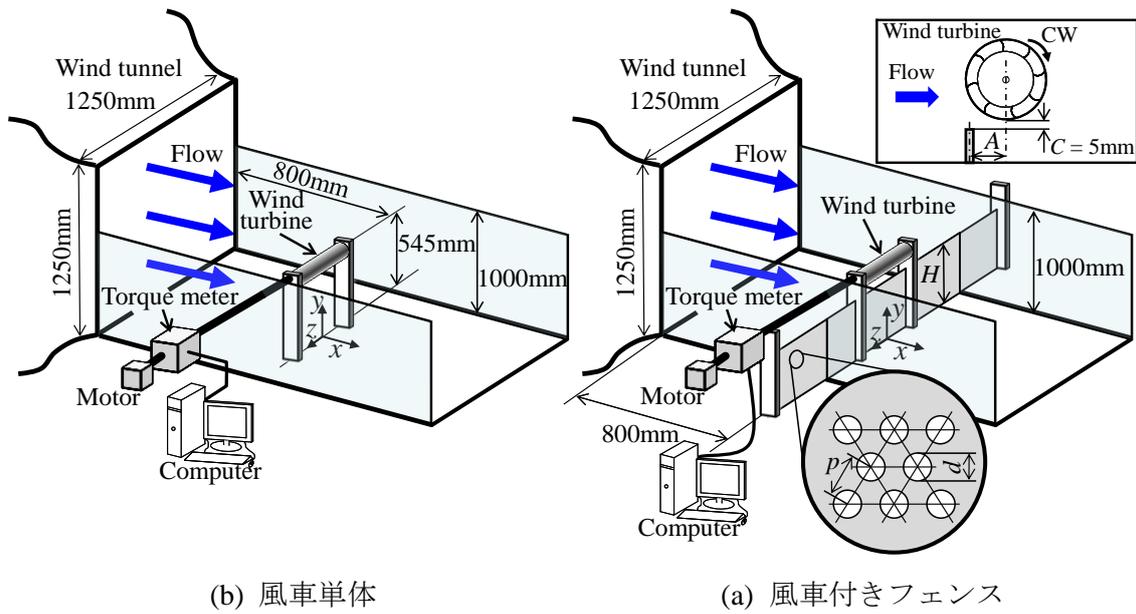
7-3 節に斜風時における風車単体及びフェンス上部に水平に風車を設置した場合の風車出力特性を示す。7-4 節に斜風対策として、風車の両端に円形端板を設置した場合の風車出力特性及び風速分布を示す。7-5 節に斜風対策として用いるフェンス偏向板の検討及びフェンスに偏向板を設置した場合における、風車出力特性及び風速分布を示す。

7-2 実験概要

本実験では、風洞ノズル出口から 800 mm 下流の位置にフェンス及びクロスフロー風車を設置した。図 7-2-1(a)に示すように風車単体の場合は、柱を 2 本用いて、クロスフロー風車の風車軸が床面から高さ 545 mm の位置水平に設置した。図 7-2-1(b)にフェンス上部にクロスフロー風車 1 台を水平に設置した場合の実験装置の概要を示す。なお、フェンス上端と風車下端の隙間は $C = 5 \text{ mm}$ ($c = C/D_1 = 0.0625$) とし、風車回転方向は風が左から右に流れている側からみて時計回り (CW) となるように設置した。また第 4 章で示したように、クロスフロー風車をフェンス直上 $a (= A/D_1) = 0.00$ に設置する場合よりも、フェンス下流側に移動させて設置する方が高い出力となる。本実験では、第 4 章において最も高い出力を示した $a (= A/D_1) = 0.625$ に風車を設置した場合についても実験を行った。フェンスの有無に関係なく、風車軸の延長線上にトルク計とモータをカップリングにより連結している。

座標軸は、図 7-2-1 に示すようにフェンス中央の床面と接する部分を原点とし、主流方向に x 、鉛直方向に y 、主流方向と鉛直な水平方向に z と定義した。本実験では、斜風を模擬するために、図 7-2-2 に示すように、風車及びフェンスの設置角度 θ を変更できるようにしており、設置角度 θ を $0^\circ \sim 40^\circ$ まで 10° 間隔で変化させた。また、設置角度 $\theta (>0^\circ)$ における風車軸に対して直角方向を ξ 、軸方向を ζ と定義する。座標軸に対応する風速分布の定義は、 x 方向成分を u 、 y 方向成分を v 、 z 方向成分を w 、 ξ 方向成分を u_ξ 、 ζ 方向成分を w_ζ とする。

図 7-2-3 に示すように、風車の中心高さ ($y = 545 \text{ mm}$) を原点として鉛直方向に新たに y' を定義する。風車周りの風速分布測定範囲は、図 7-2-4 に示すように $x(\xi)$ 方向に $-2 \leq x(\xi)/D_1 \leq 3$ 、 y 方向に $-1.5 \leq y'/D_1 \leq 1.5$ 、 $z(\zeta)$ 方向に $-0.45 \leq z(\zeta)/D_1 \leq 0.45$ である。測定間隔は、 $x(\xi)$ 方向に $1.0 D_1$ 間隔、 y' 方向に $0.8 D_1$ 間隔、 $z(\zeta)$ 方向に $0.25L$ (両端は $0.2L$) 間隔で測定した。図中の赤点は、実際の測定点を示している。また、図 7-2-5 に示すように、設置角度 $\theta = 40^\circ$ における風速分布も測定を行った。なお、サンプリング周波数は $10,000 \text{ Hz}$ 、サンプリングデータ数は $40,000$ 個とした。



(b) 風車単体

(a) 風車付きフェンス

図 7-2-1 実験装置概要

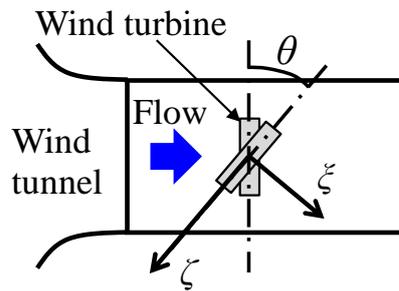


図 7-2-2 設置角度 θ 及び座標軸

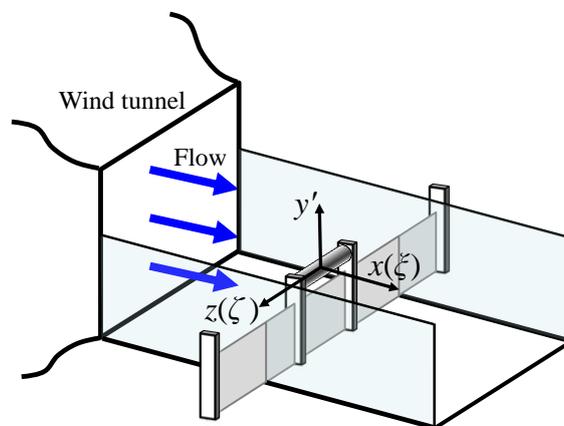


図 7-2-3 風車周りの座標軸

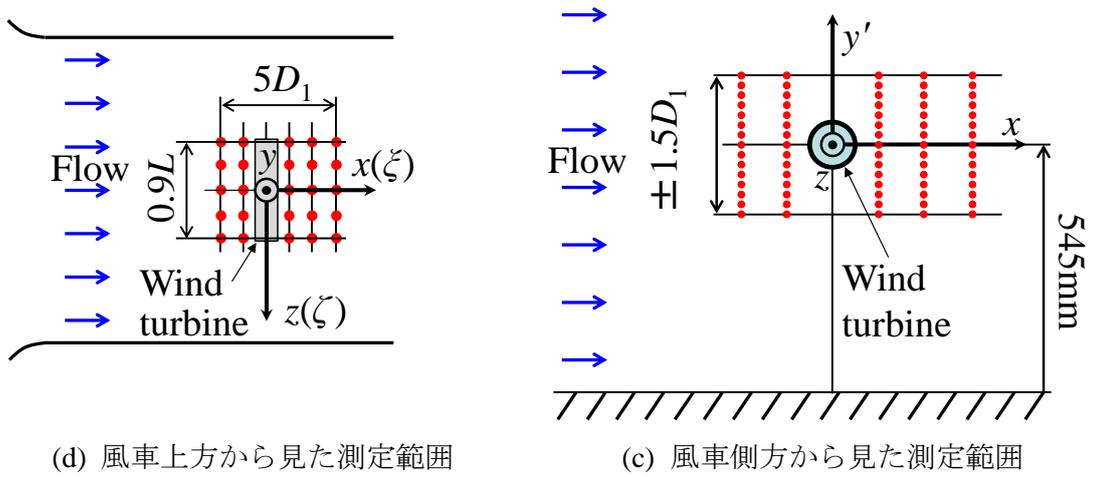


図 7-2-4 風車周りの風速分布測定範囲

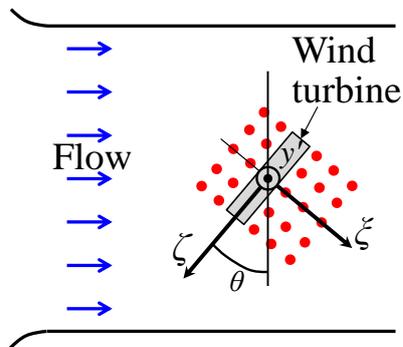


図 7-2-5 風車周りの風速分布測定範囲 ($\theta = 40^\circ$)

7-3 斜風時の風車出力特性

本節では、クロスフロー風車を水平に設置した場合の風車単体とフェンス上部にクロスフロー風車を水平に設置した場合における斜風時の風車出力の変化を示す。

クロスフロー風車単体において、設置角度 $\theta = 0^\circ \sim 40^\circ$ に変化させた場合の出力係数 C_P を図7-3-1に示す。風車に直角に風が流入する設置角度 $\theta = 0^\circ$ のときに最大出力係数 C_{Pmax} は最も大きくなり、 $C_{Pmax} \approx 0.12$ であった。設置角度 θ が大きくなるにつれ、最大出力係数 C_{Pmax} は低下し、設置角度 $\theta = 40^\circ$ において、最大出力係数は $C_{Pmax} \approx 0.07$ まで低下した。また、設置角度 θ が大きくなるにつれて、高い風車出力を得られる周速比の範囲が狭くなっていることがわかる。

図7-3-2に各設置角度 θ に対する最大出力係数 C_{Pmax} を設置角度 $\theta = 0^\circ$ のときの最大出力係数 $C_{Pmax(\theta=0^\circ)}$ との割合で示す。図中には、設置角度 θ に対する $\cos^2\theta$ 及び $\cos^3\theta$ の曲線も示す。風の持つエネルギーは風速の3乗に比例することより、最大出力係数の低下は $\cos^3\theta$ の曲線と一致すると予想されるが、本研究のクロスフロー風車の出力は、 $\cos^2\theta$ の曲線変化に近かった。

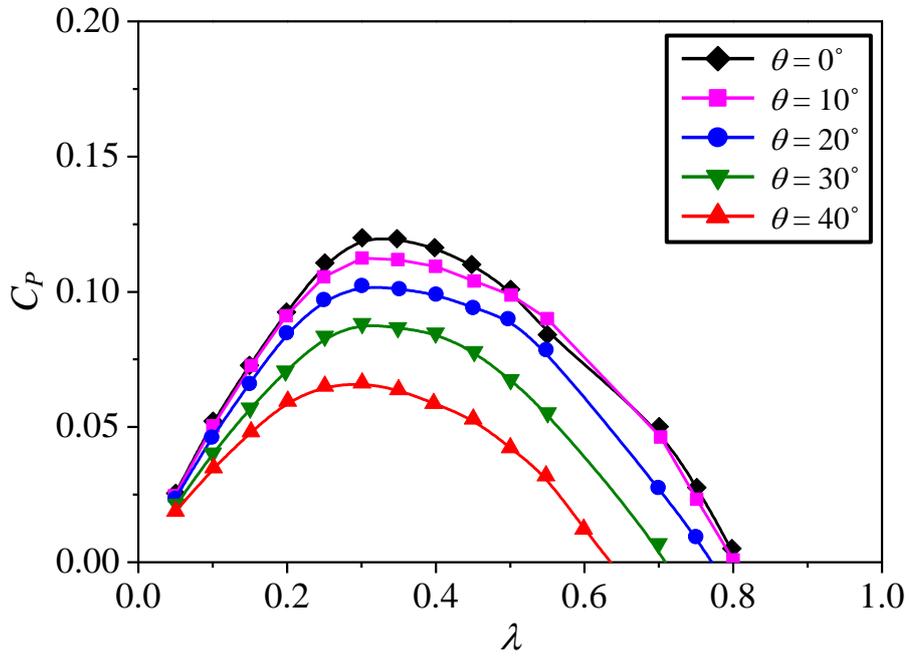


図 7-3-1 風車設置角度を変更させた場合の風車出力係数

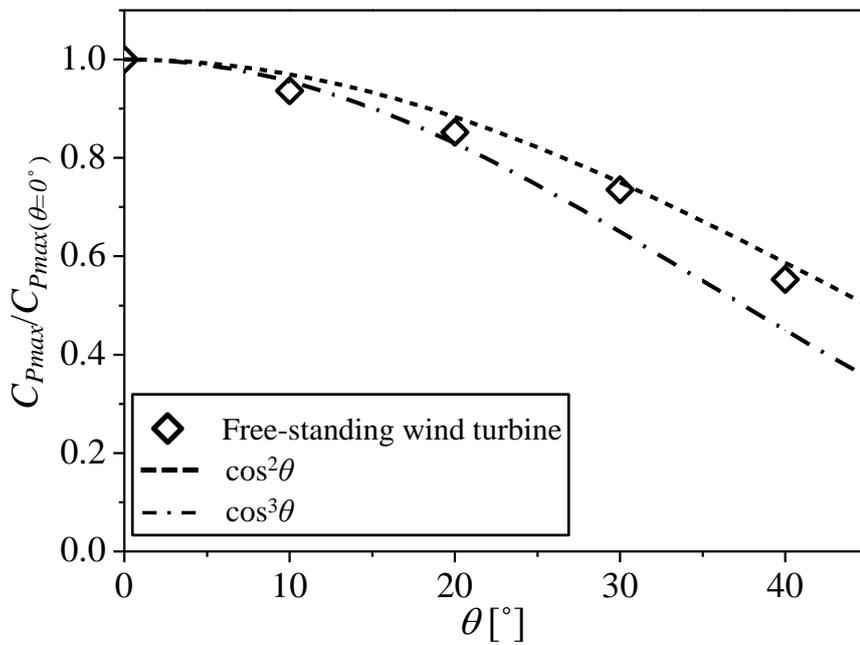


図 7-3-2 風車設置角度を変更させた場合の最大風車出力係数

図 7-3-3 に風車をフェンス上部の各位置 ($a = 0.00, 0.625$) に設置した場合の設置角度 $\theta = 0^\circ \sim 40^\circ$ における出力係数 C_P を示す。風車設置位置 $a = 0.00$ の場合、設置角度 $\theta = 0^\circ$ において、最大出力係数は $C_{Pmax} \approx 0.22$ となり、風車単体の場合の約 2 倍の値となった。風車単体の場合と同様に設置角度 θ が大きくなるにつれて出力係数は低下し、設置角度 $\theta = 20^\circ$ で最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.20$ 、設置角度 $\theta = 40^\circ$ で最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.13$ となった。風車設置位置 $a = 0.625$ の場合は、設置角度 $\theta = 0^\circ$ における最大出力係数は風車設置位置 $a = 0.00$ に設置した風車出力よりもさらに大きく $C_{Pmax} \approx 0.27$ となり、風車単体の約 2.3 倍の値になった。設置角度が大きくなると出力は低下し、設置角度 $\theta = 20^\circ$ で最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.25$ 、設置角度 $\theta = 40^\circ$ で最大出力係数 $C_{Pmax} \approx 0.16$ となった。最大出力係数が最も小さかった、設置角度 $\theta = 40^\circ$ の場合でも $C_{Pmax} \approx 0.16$ であり、図 7-3-1 に示す設置角度 $\theta = 0^\circ$ における風車単体の $C_{Pmax} \approx 0.12$ よりも大きい値となることが分かった。

図 7-3-4 にフェンス上部に設置した風車の各設置位置 θ に対する最大出力係数 C_{Pmax} を設置角度 $\theta = 0^\circ$ のときの最大出力係数 $C_{Pmax(\theta=0^\circ)}$ との割合で示す。図中には、風車単体の結果、設置角度 θ に対する $\cos^2\theta$ 及び $\cos^3\theta$ の曲線も示す。フェンス上部の風車設置位置に関係なく、風車単体の場合と同様に最大出力係数の低下は $\cos^2\theta$ の曲線と一致した。今村ら (2005) のプロペラ風車の数値解析においても、出力係数が $\cos^2\theta$ に比例して低下することが報告されており、本実験結果と同様の傾向であることがわかる。しかし、斜風時の風の流入角度と風車出力との関係については、まだ原因がわかっていないため、今後さらに検討をしていく必要がある。

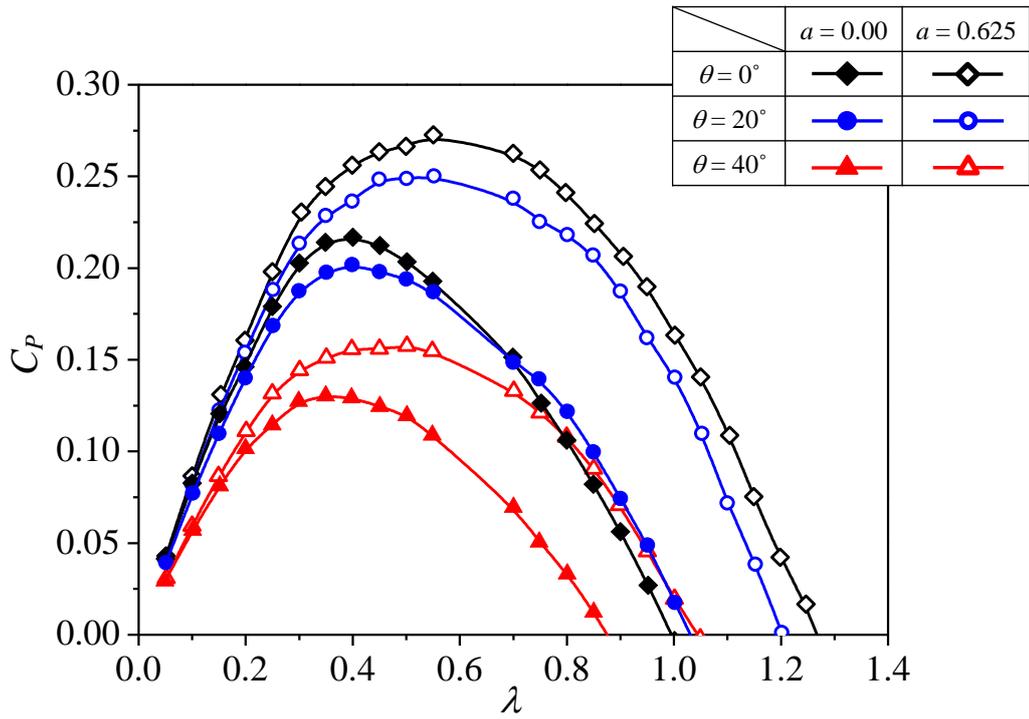


図 7-3-3 設置角度を変更させた場合の風車出力係数

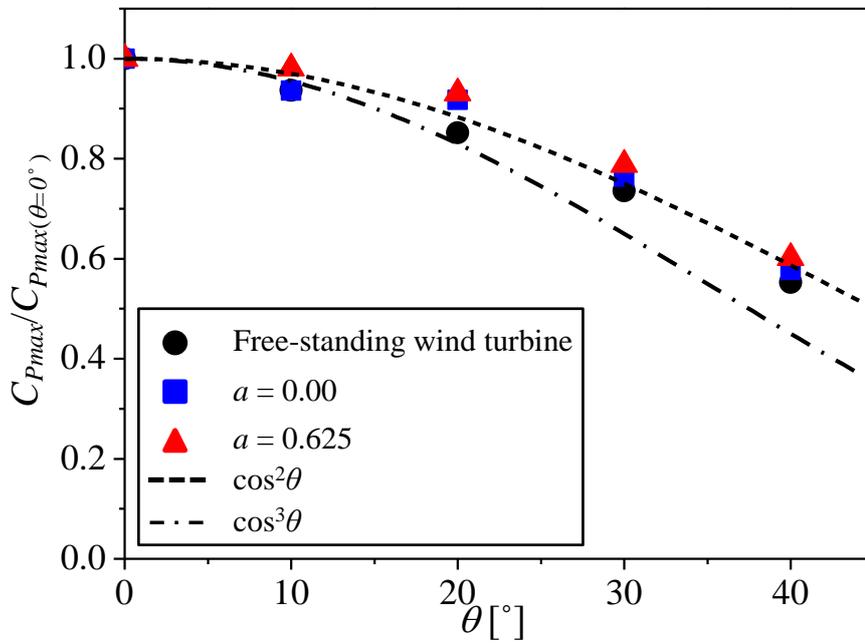


図 7-3-4 設置角度を変更させた場合の最大風車出力係数

7-4 風車端板を用いた対策

7-4-1 風車端板について

7-3節で示すように、単体のクロスフロー風車を水平に設置した場合、斜風の影響によって風車出力が低下することがわかった。斜風時の風車出力の低下を抑制する対策のひとつとして、風車の両端に円形端板を設置した。本実験では、図7-4-1に示す2種類の円形端板を用いた。円形端板は厚さ1mmの亚克力板を用いて、直径が風車外径 D_1 の2倍のものと3倍のものを製作した。図7-4-2に示すように、円形端板を風車の両端に設置し、風車に流入する風の風向を変えることで、風車出力の低下抑制効果を期待した。

風車の両端に円形端板を設置した場合における、斜風時の風車出力特性及び風車周りの風速分布に円形端板が及ぼす影響を示す。

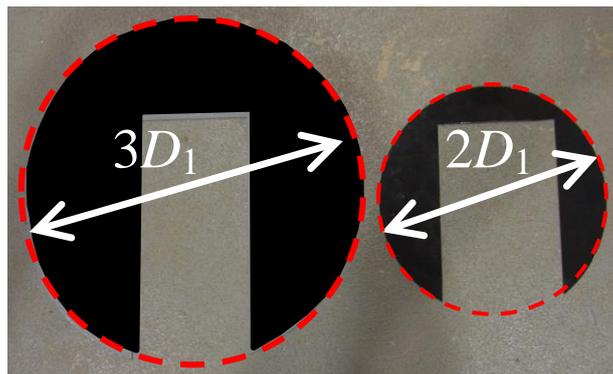


図 7-4-1 円形端板



図 7-4-2 風車の端に設置した円形端板

7-4-2 風車出力特性

設置角度 $\theta=0^\circ, 40^\circ$ において、直径 $2D_1$ と直径 $3D_1$ の円形端板を風車の両端に設置した場合の出力係数 C_P を図7-4-3に示す。図中には、円形端板が設置されていない風車のみの場合の結果も示す。設置角度 $\theta=0^\circ$ の場合、円形端板が設置された風車の最大出力係数は $C_{Pmax} \approx 0.12$ となり、円形端板が設置されていない場合とほぼ一致していることがわかる。一方で設置角度 $\theta=40^\circ$ の場合は、円形端板が設置された風車の最大出力係数は $C_{Pmax} \approx 0.073$ となり、円形端板が設置されていない場合に比べてわずかではあるが、風車出力が向上している。設置角度 $\theta=0^\circ, 40^\circ$ においては、円形端板の大きさによる風車出力への影響はほとんど見られなかった。

図7-4-4に設置角度 θ に対する最大出力係数 C_{Pmax} の変化を設置角度 $\theta=0^\circ$ のときの最大出力係数 $C_{Pmax(\theta=0^\circ)}$ との割合で示す。図中には、端板を設置していない風車単体の場合の結果、設置角度 θ に対する $\cos^2\theta$ 及び $\cos^3\theta$ の曲線も示す。設置角度 θ の大きくなるにつれて風車出力は低下する。円形端板を設置した場合で設置角度 $\theta=40^\circ$ のときは、 $C_{Pmax}/C_{Pmax(\theta=0^\circ)} \approx 0.62$ となり、円形端板がない場合の $C_{Pmax}/C_{Pmax(\theta=0^\circ)} \approx 0.55$ と比べると、円形端板を設置することで出力低下を約7%抑制することができた。直径 $2D_1$ の円形端板を設置するよりも、直径 $3D_1$ の円形端板が設置された風車の出力のほうが設置角度 $\theta=10^\circ \sim 30^\circ$ において、出力低下の割合がわずかに小さいことがわかる。

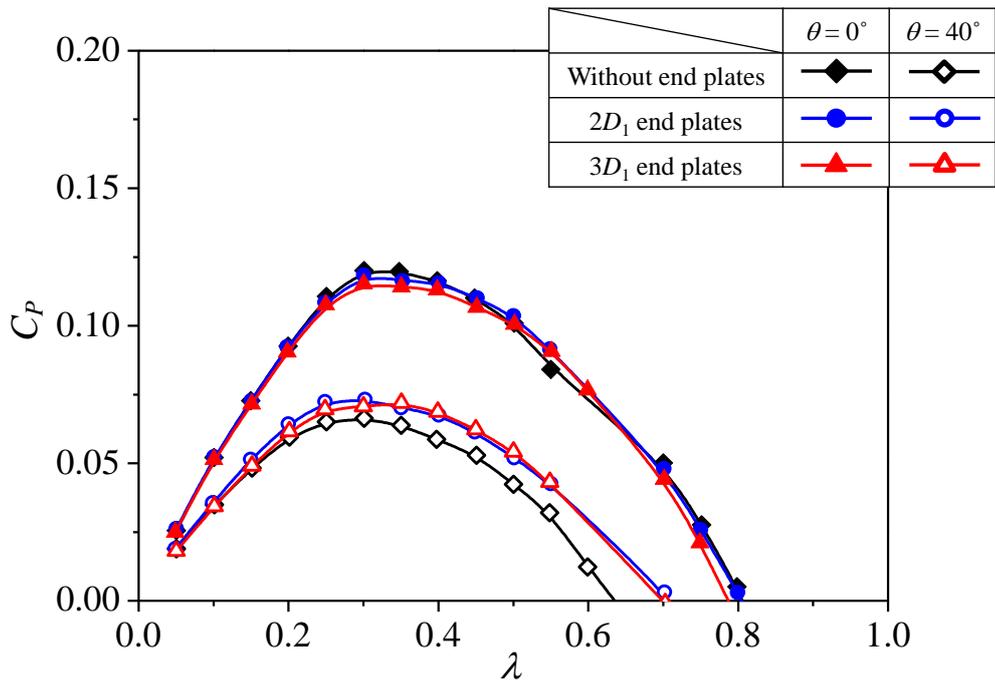


図 7-4-3 円形端板を設置した場合の風車出力係数

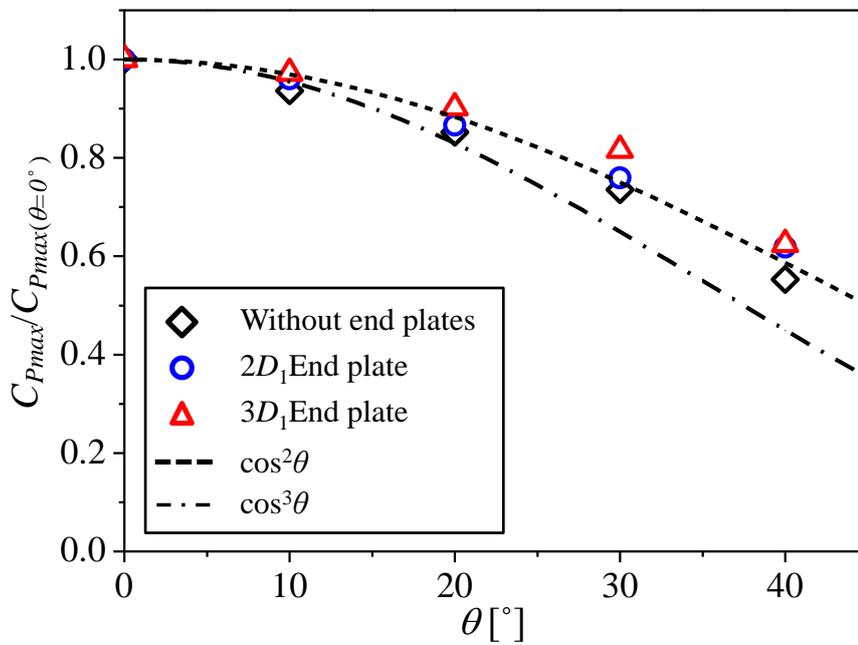


図 7-4-4 円形端板を設置した場合の最大風車出力係数

7-4-3 風車周辺の風速分布

図7-4-5～図7-4-8に設置角度 $\theta = 0^\circ, 40^\circ$ における、円形端板が設置されていない場合と直径 $3D_1$ の円形端板が設置された場合の風車中心高さ($y/D_1 = 0.0$)における速度ベクトルを示す。図中には、破線で風車を示し、円形端板が設置されている場合は円形端板の位置も示す。

図7-4-5と図7-4-6に示すように設置角度 $\theta = 0^\circ$ においては、円形端板が設置されていない場合と円形端板を設置した場合で、風車下流域で風速分布に若干の違いはみられるが、全体として大きな違いはみられない。

一方で設置角度 $\theta = 40^\circ$ においては、図7-4-8に示すように風車の両端に円形端板を設置した場合、 $\zeta/D_1 = -1.0$, $\zeta/L = 0.45$ の位置で、風速がほぼ0 m/sとなっている。これは、上流側 $\zeta/L = 0.50$ にある円形端板の背後に死水域が形成されていると考えられる。また下流側 $\zeta/L = -0.50$ の円形端板近くの $\zeta/D_1 = -1.0$, $\zeta/L = -0.45$ の位置での速度が減速している。しかし、円形端板からの剥離による増速された流れが、 $\zeta/D_1 = -1.0$, $\zeta/L = 0.25$ の位置で見られ、円形端板が設置されていない場合と比べ、速度が大きくなっている。

このように円形端板を設置することで、風車に流入する風車は ζ 方向に増速する省域と減速する領域を有しており一様流ではないが、全体的に風車へ流入する風力エネルギーが大きくなることによって、結果として、円形端板を設置した方が風車単体の場合よりも風車出力が増加したと考えられる。

図7-4-9～図7-4-11に設置角度 $\theta = 0^\circ, 40^\circ$ における、円形端板が設置されていない場合と直径 $3D_1$ の円形端板が設置された場合の風車前方 $x(\zeta)/D_1 = -1.0$ における3次元速度ベクトルを示す。円形端板が設置されていない場合は、設置角度 $\theta = 40^\circ$ においても、 $\theta = 0^\circ$ のときと同様に、スパン方向で流れに大きな違いはなく、各高さにおいてほぼ同じ流れが風車に流入している。設置角度 $\theta = 40^\circ$ で円形端板を設置した場合、 $\zeta/L = 0.45$ の $-0.5 \leq y/D_1 \leq 1.2$ において上流側の円形端板の背後では速度がほぼ0になっている。しかし、 $\zeta/L = 0.25$ においては円形端板から剥離した流れにより、風速が速くなっていることがわかる。

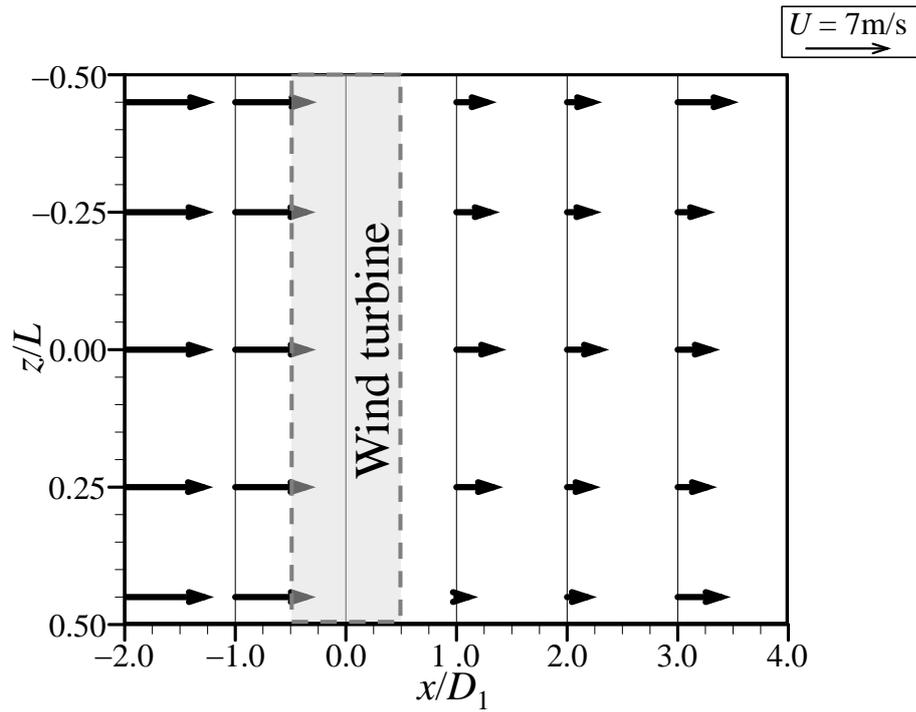


図 7-4-5 風車単体の場合の風車周りの速度ベクトル分布 ($\theta=0^\circ$)

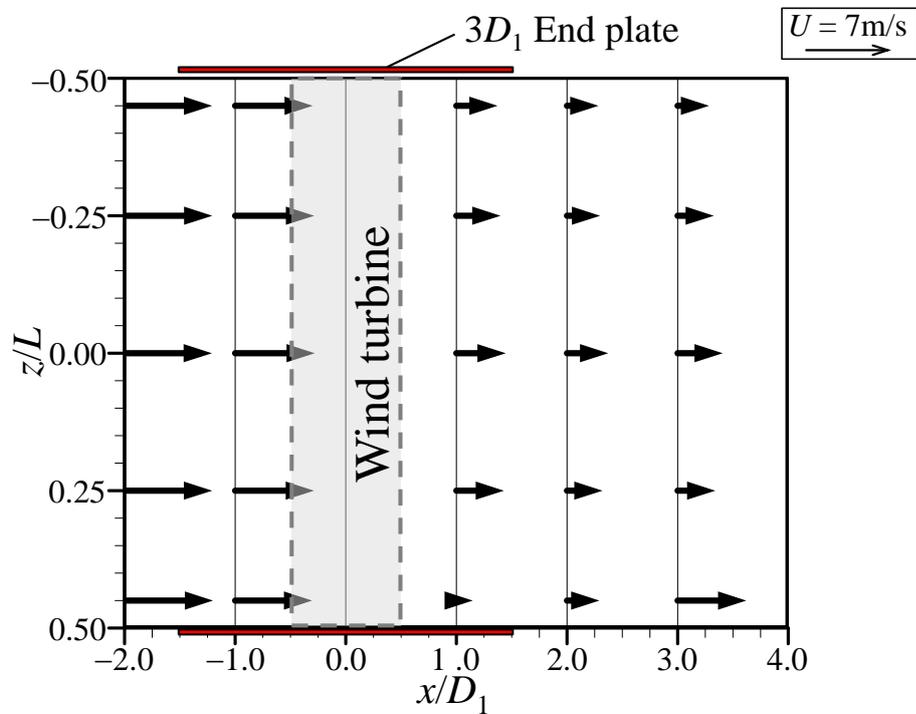


図 7-4-6 風車に円形端板を設置した場合の風車周りの速度ベクトル分布 ($\theta=0^\circ$)

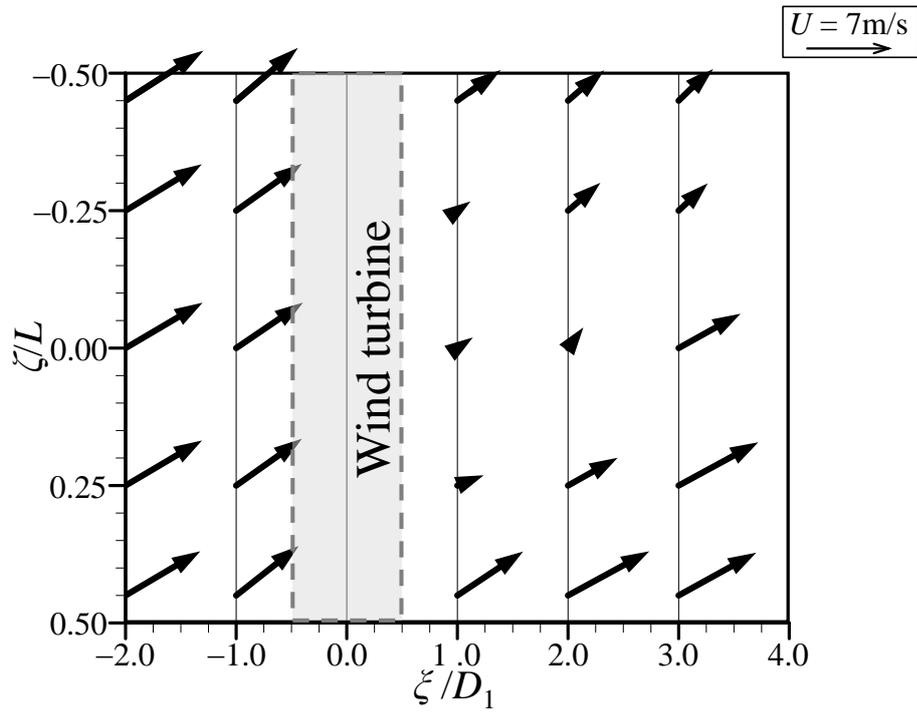


図 7-4-7 風車単体の場合の風車周りの速度ベクトル分布 ($\theta = 40^\circ$)

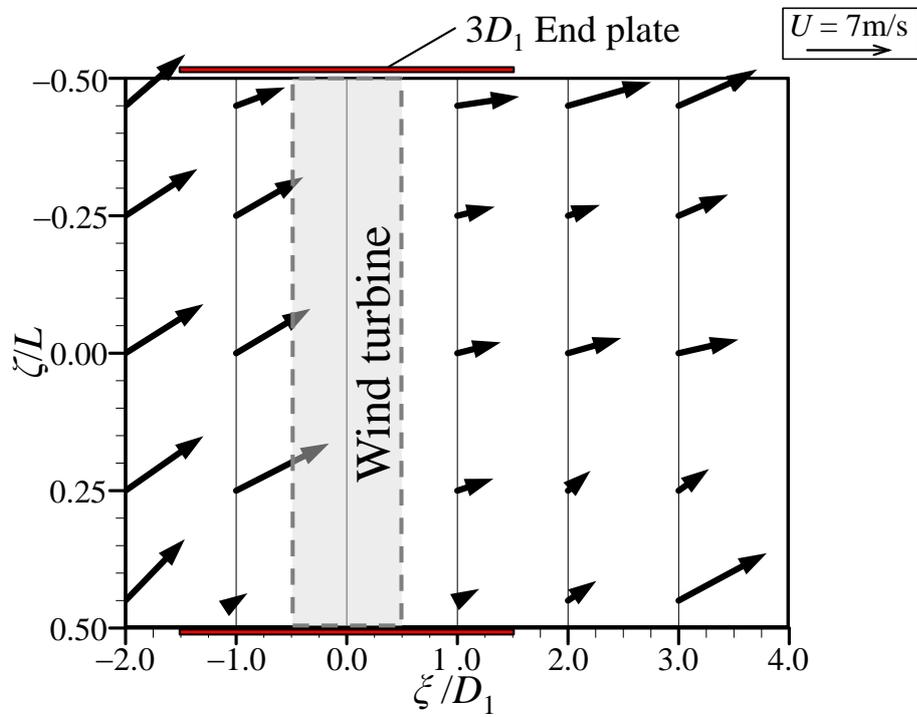


図 7-4-8 風車に円形端板を設置した場合の風車周りの速度ベクトル分布 ($\theta = 40^\circ$)

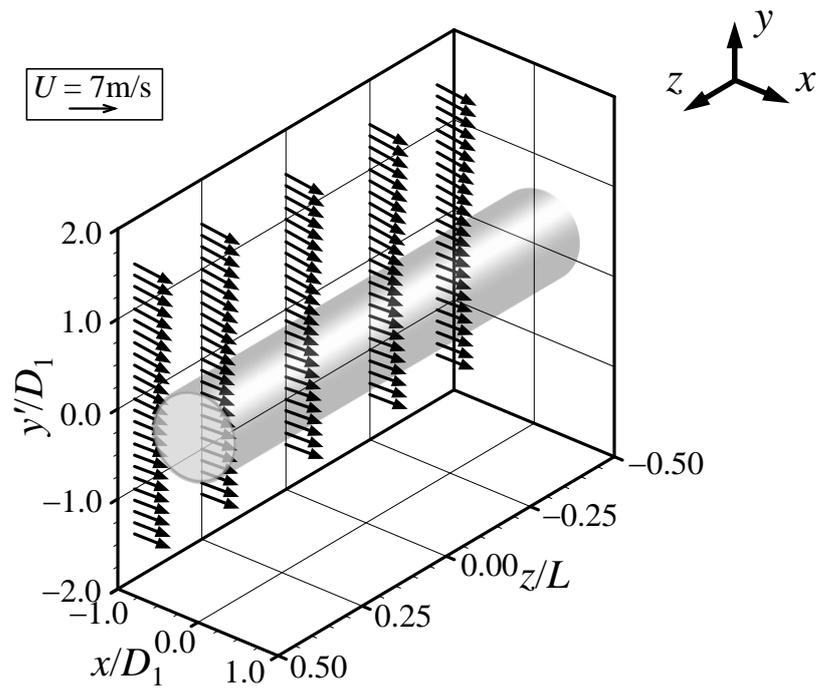


図 7-4-9 風車単体の場合の 3次元速度ベクトル分布 ($\theta = 0^\circ$)

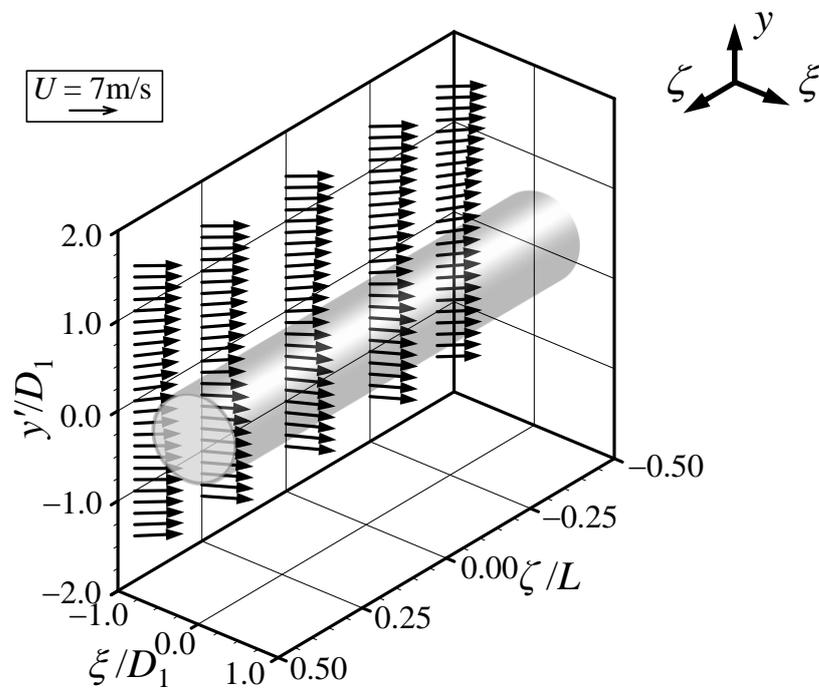


図 7-4-10 風車単体の場合の 3次元速度ベクトル分布 ($\theta = 40^\circ$)

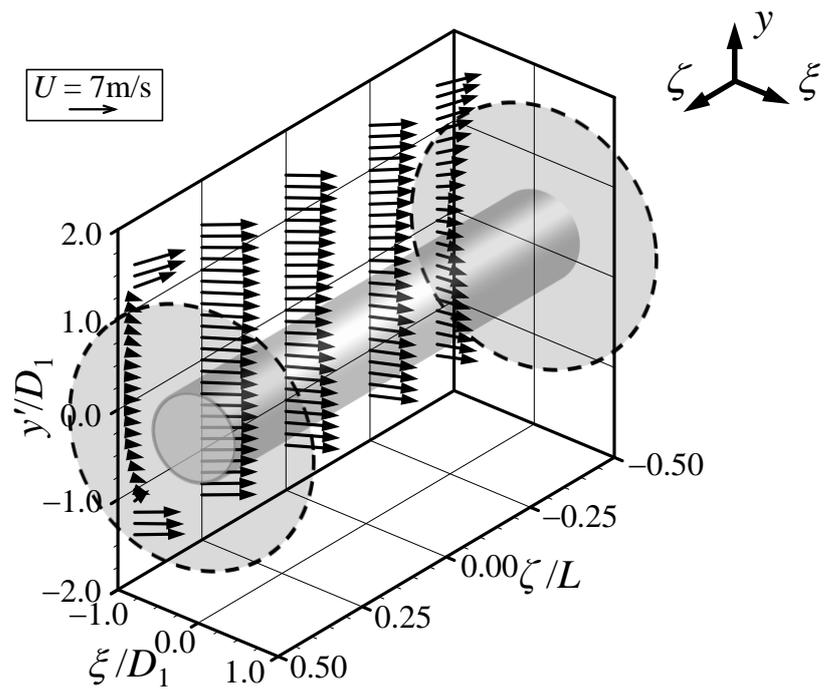


図 7-4-11 風車に円形端板を設置した場合の3次元速度ベクトル分布 ($\theta = 40^\circ$)

7-5 フェンス偏向板による対策

7-5-1 フェンス模型及び偏向板について

クロスフロー風車をフェンス上部に設置した場合に、フェンス前面に偏向板を設置することで、7-4 節に示した風車の両端に円形端板を設置した場合に得られた効果と同様に斜風による風車出力の低下抑制の効果について検討を行った。

図 7-5-1 に偏向板を設置した場合のフェンス概略図を示す。本実験では長方形偏向板、長三角形偏向板、短三角形偏向板の3種類の偏向板を用い、偏向板の設置間隔 p_d を $1/2H$ と $1/3H$ に変更させた。長方形偏向板は、高さがフェンス高さ H と同じで幅は $1/10H$ である。長三角形偏向板は、高さがフェンス高さ H と同じで幅は $1/10H$ である。短三角形偏向板は、高さが $1/2H$ で幅は $1/10H$ である。

各偏向板を設置したフェンス高さ $H = 60 \text{ mm}$ の小フェンス模型を用いて、フェンス下流域とフェンス上部の風速分布を測定した。この実験の目的は、偏向板とその設置間隔 p_d を変更させた場合に、フェンス下流域の減速効果を保ちつつ、風車に流入する風翼がより速くなる偏向板とその設置間隔を明らかにすることである。本実験で用いた偏向板を設置した小フェンスの模型の概観を図 7-5-2 に示す。なお、小フェンス模型は図 7-5-3 に示すように菱形状に円形の穴が開いており、パネルは遮蔽率 $\phi = 60\%$ になっている。パネルの孔径、ピッチ及び厚みは表 7-5-1 に示す。

図 7-5-4 に示すように、風洞出口から 800 mm の位置に小フェンスを設置した。小フェンスを用いた風速分布測定における座標軸は、図 7-2-1 に示すものと同様に、フェンス中央の床面と接する部分を原点とし、主流方向に x 、鉛直方向に y 、主流方向と鉛直な水平方向に z と定義した。また図 7-5-5 に示すように、斜風を模擬する設置角度 θ も図 7-2-2 と同じ定義をしている。

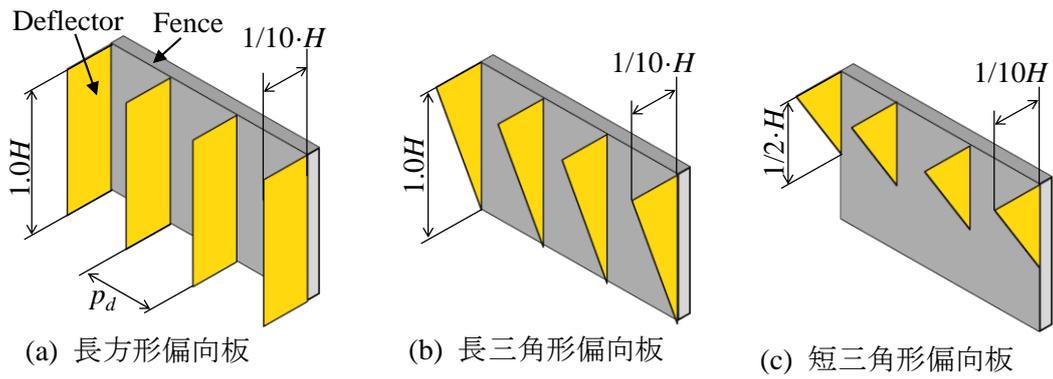
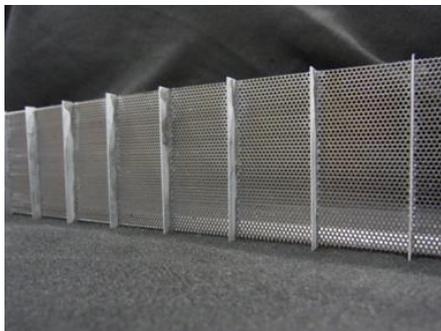
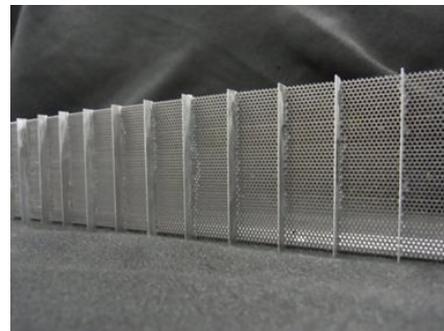


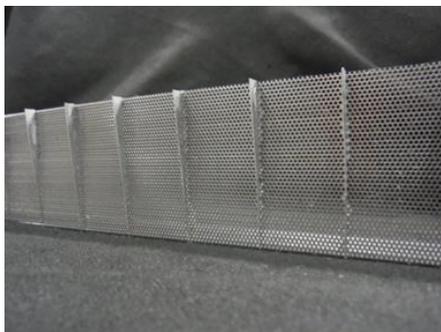
図 7-5-1 偏向板の各寸法



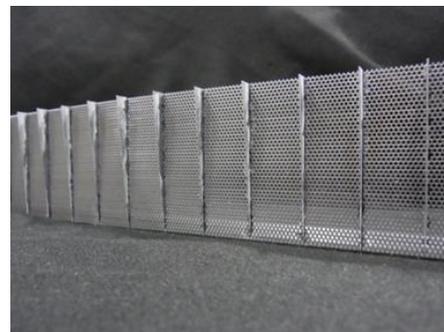
(a) 長方形偏向板 ($p_d = 1/2H$)



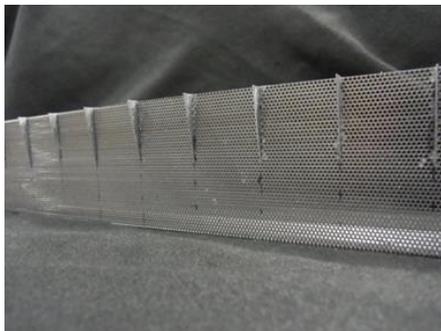
(b) 長方形偏向板 ($p_d = 1/3H$)



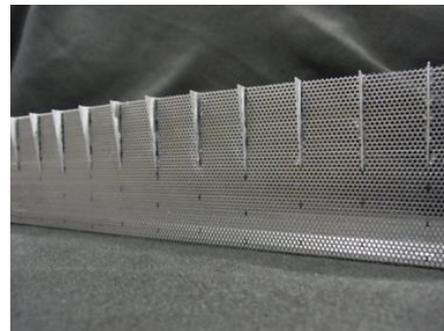
(c) 長三角形偏向板 ($p_d = 1/2H$)



(d) 長三角形偏向板 ($p_d = 1/3H$)



(e) 短三角形偏向板 ($p_d = 1/2H$)



(f) 短三角形偏向板 ($p_d = 1/3H$)

図 7-5-2 偏向板を設置した小フェンス概観

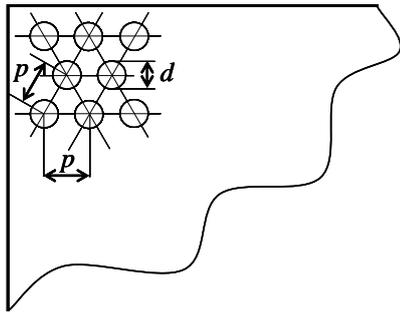


図 7-5-3 パネル形状

表 7-5-1 パネルの各寸法

孔径 d	1 mm
ピッチ p	1.5 mm
厚さ	1 mm

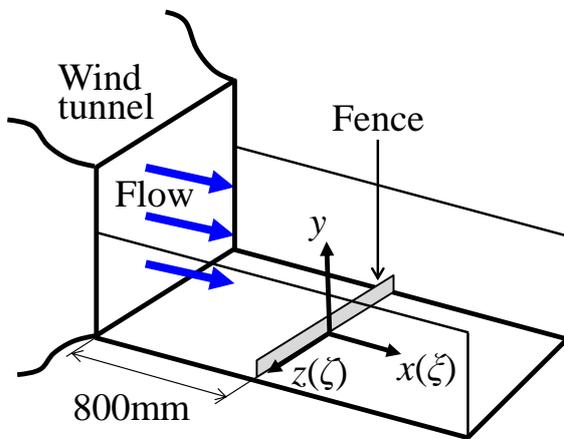


図 7-5-4 風速測定時の概観及び座標軸

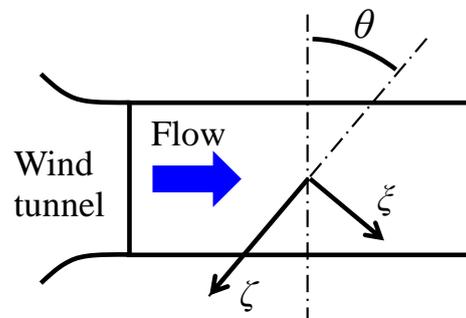


図 7-5-5 設置角度 θ 及び座標軸

7-5-2 フェンス下流域及び上部の風速分布

図 7-5-6 にフェンス設置角度 $\theta=0^\circ$ と斜風を模擬した設置角度 $\theta=40^\circ$ における、フェンス下流域の風速分布を示す。フェンスの設置角度に関わらず、フェンスに風があたることによって、フェンスから吹き上がり流れが発生し、フェンス下流域までその影響があることがわかる。図 7-5-6(a)に示すフェンス設置角度 $\theta=0^\circ$ の場合、フェンス下流 $x/H=10.0$ において、風速が $0.2U$ 以下になる範囲が確認できる。しかし、図 7-5-6(b)に示すフェンス設置位置 $\theta=40^\circ$ の場合では、風速が $0.2U$ 以下になる範囲が確認できず、斜風時にはフェンスの防風効果が低下していることがわかる。

図 7-5-7 にフェンス設置角度 $\theta=40^\circ$ における、フェンス上部の $\xi-\zeta$ 平面の風速分布を示す。フェンス単体の場合、フェンスへ流入する斜風は流入角を保ちながらフェンス上部を追加していることがわかる。また風車と平行な方向である ξ 方向では、位置による風速の違いがほとんどないこともわかる。

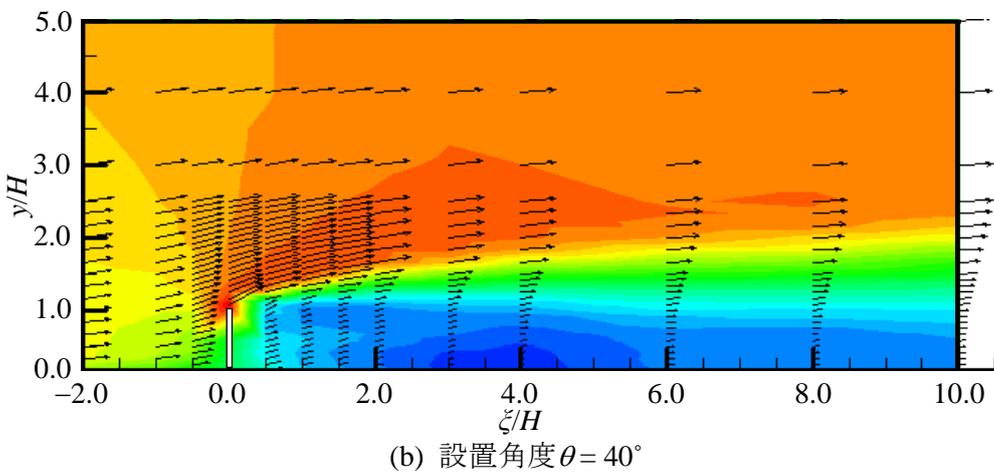
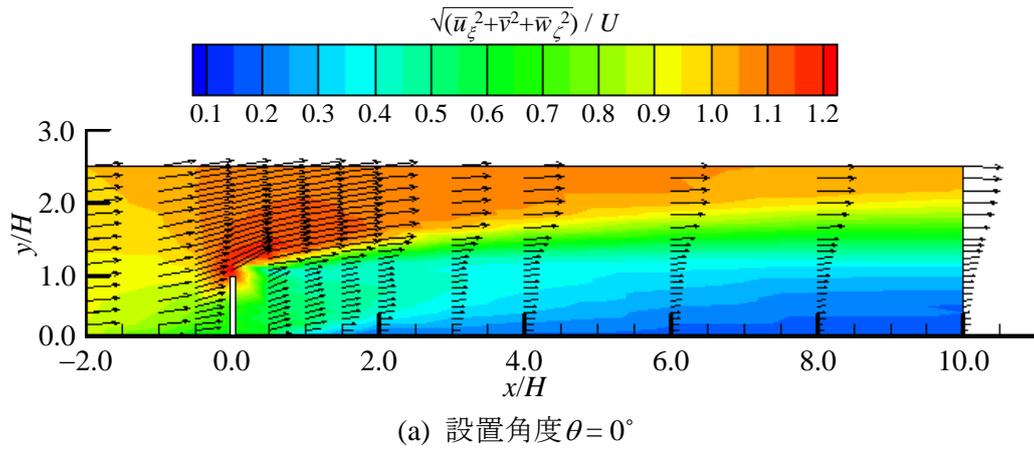


図 7-5-6 フェンス下流域の風速分布

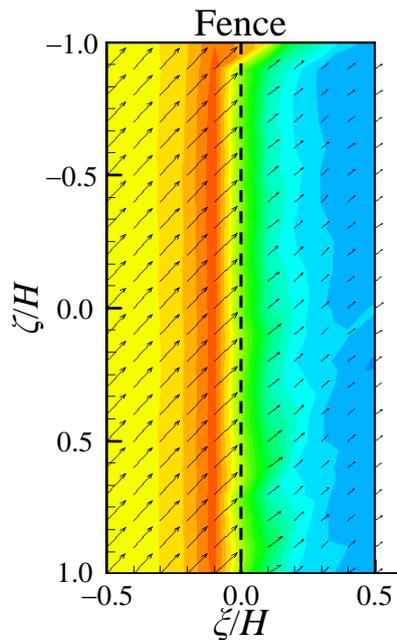


図 7-5-7 フェンス設置角度 $\theta = 40^\circ$ におけるフェンス上部の風速分布

7-5-3 偏向板を設置した場合のフェンス下流域の風速分布

図 7-5-8 にフェンス前方に長方形偏向板を設置した場合の設置角度 $\theta = 40^\circ$ における、フェンス下流域の風速分布を示す。図 7-5-8(a) に長方形偏向板を設置間隔 $p_d = 1/2H$ で設置した場合の結果を示し、(b) に設置間隔 $p_d = 1/3H$ で設置した場合の結果を示す。フェンス付近の吹き上がり流れは、設置間隔による違いは見られない。しかし、図 7-5-8(a) に示す設置間隔 $p_d = 1/2H$ の場合、フェンス下流の $8.0 \leq \xi/H$ においてフェンスの効果による減速領域が小さくなっており、フェンス下流の $\xi/H = 10.0$ では風速が $0.3U$ 以下になる領域が確認できない。図 7-5-8(b) に示す設置間隔 $p_d = 1/3H$ の場合においては、 $\xi/H = 10.0$ で風速が $0.3U$ 以下になる領域が存在し、設置間隔 $p_d = 1/2H$ の場合よりも減速領域がよりフェンスの下流域まで形成されていることがわかる。

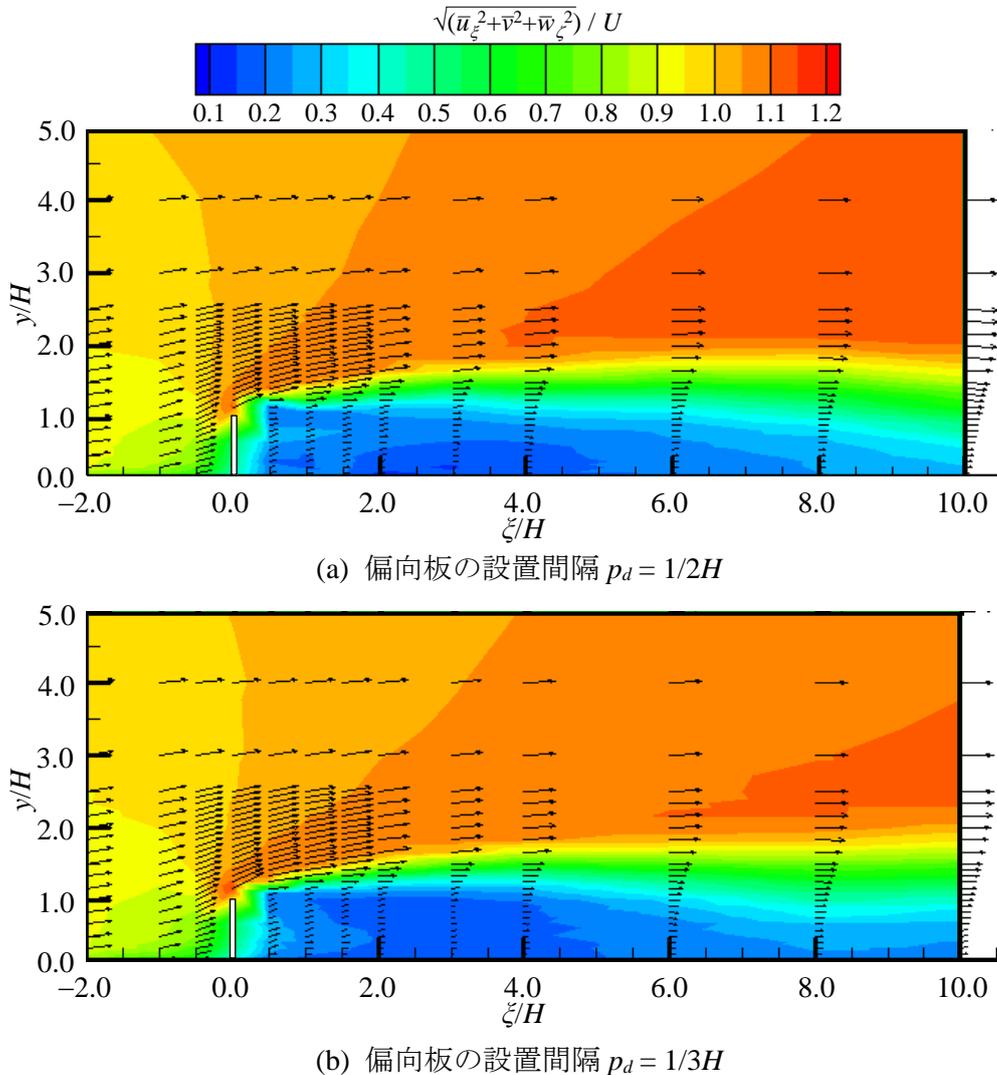


図 7-5-8 フェンスに長方形偏向板を設置した場合の下流域の風速分布 ($\theta = 40^\circ$)

図 7-5-9 にフェンス前方に長三角形偏向板を設置した場合の設置角度 $\theta = 40^\circ$ における、フェンス下流域の風速分布を示す。図 7-5-9(a) に長三角形偏向板を設置間隔 $p_d = 1/2H$ で設置した場合の結果を示し、(b) に設置間隔 $p_d = 1/3H$ で設置した場合の結果を示す。図 7-5-6 に示すフェンスに偏向板が設置されない場合に比べて、長三角形偏向板を設置することで、フェンス下流域の減速領域が減少していることがわかる。図 7-5-9(a) に示す設置間隔 $p_d = 1/2H$ の場合はフェンス下流域の $\xi/H = 4.0, 8.0$ において、 $y/H \leq 1.0$ の位置において減速領域が山型になっている。この減速領域が形成される理由として、逆流領域が形成されている可能性がある。しかし本実験では、X 形熱線プローブを用いて風速を測定しているため、逆流が発生していても捉えることができない。また図 7-5-9(b) に示す設置間隔 $p_d = 1/3H$ の場合、フェンス下流の $8.0 \leq \xi/H$ の $y/H \leq 1.0$ の領域において、風速が速くなっており、フェンス本来の減速効果が保てていないことがわかる。

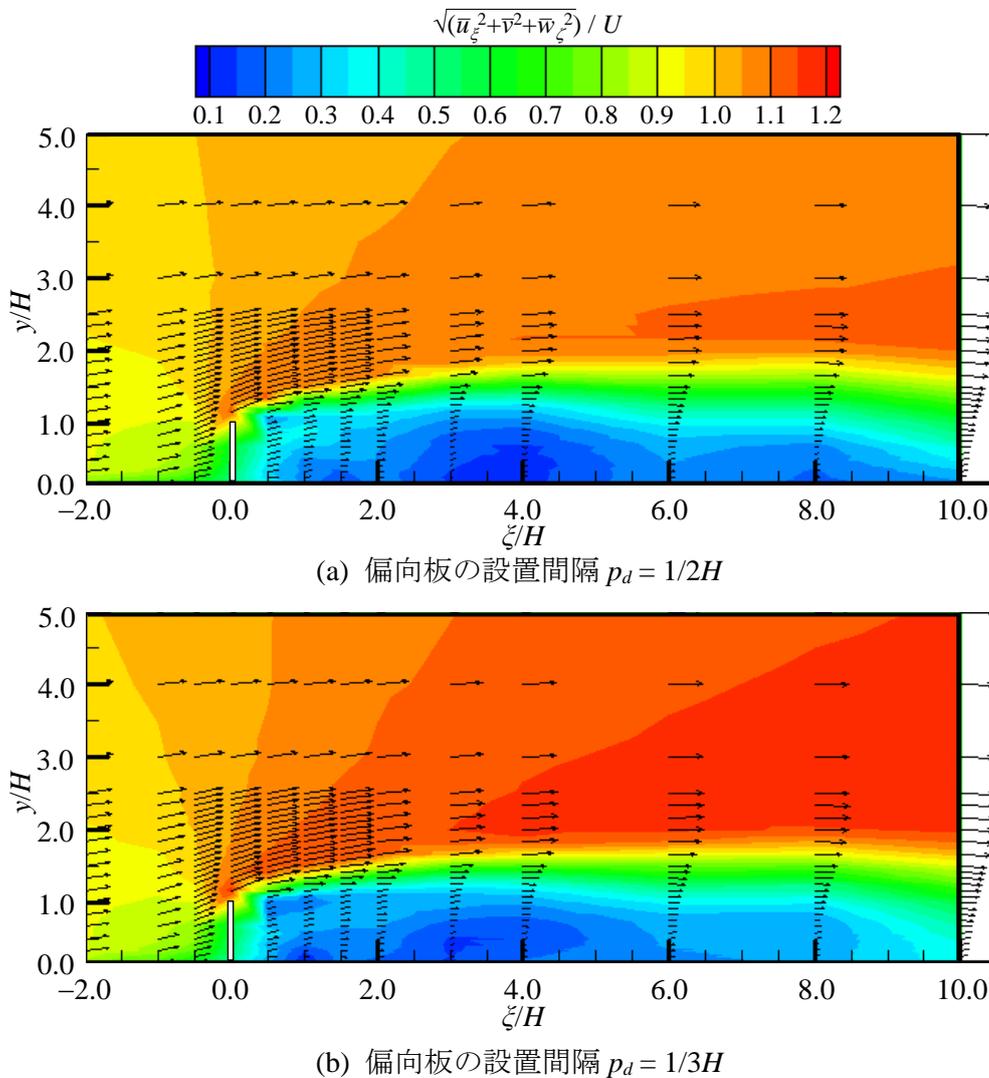
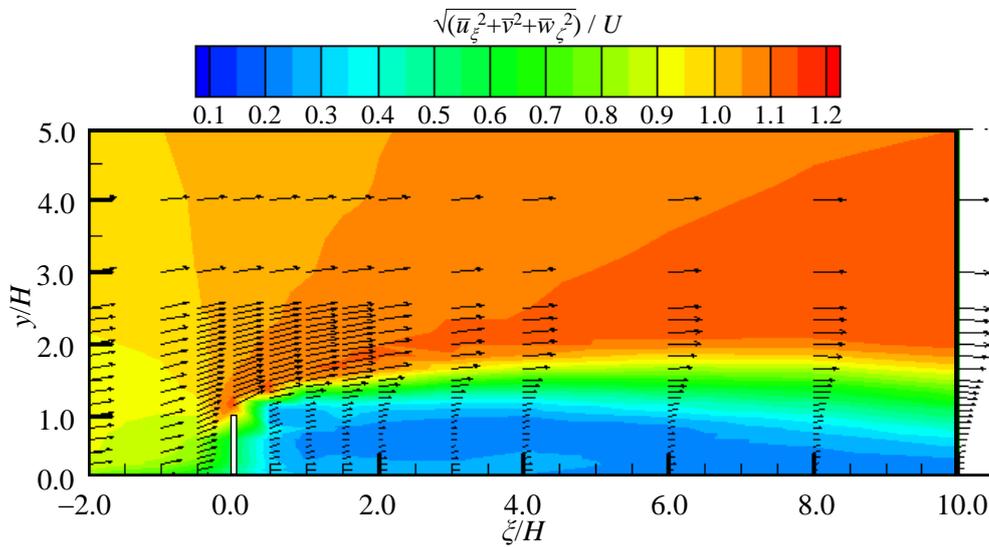
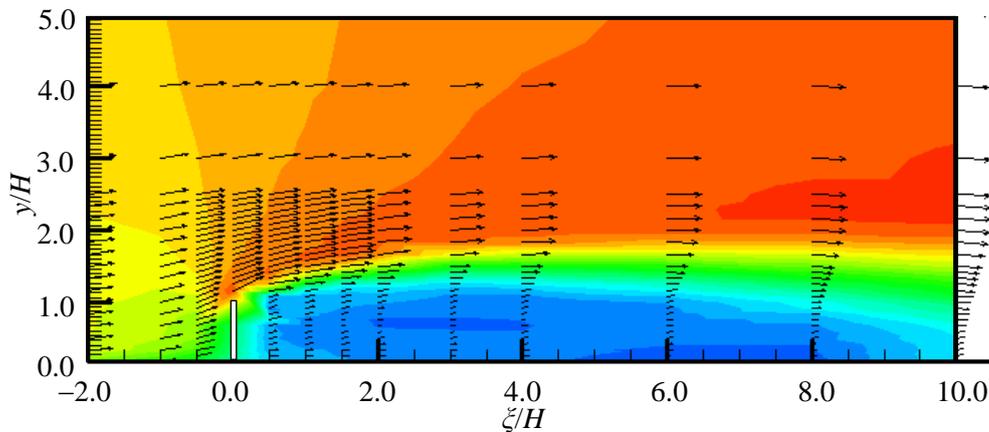


図 7-5-9 フェンスに長三角形偏向板を設置した場合の下流域の風速分布 ($\theta = 40^\circ$)

図 7-5-10 にフェンス前方に短三角形偏向板を設置した場合の設置角度 $\theta = 40^\circ$ における、フェンス下流域の風速分布を示す。図 7-5-10(a) に短三角形偏向板を設置間隔 $p_d = 1/2H$ で設置した場合の結果を示し、(b) に設置間隔 $p_d = 1/3H$ で設置した場合の結果を示す。他の偏向板を設置した場合と同様に短三角形偏向板を設置した場合も、図 7-5-6 に示すフェンスに偏向板が設置されない場合に比べて、フェンス下流域の減速領域が減少していることがわかる。図 7-5-9 に示す長三角形偏向板を設置した場合とは異なり、減速領域がフェンス下流域にいくに伴って、緩やかに小さくなっていることがわかる。設置間隔 p_d に関わらず、フェンス下流域の減速領域はほぼ同じ大きさではあるが、設置間隔 $p_d = 1/2H$ で設置した方がよりフェンス下流域まで風速が $0.3U$ 以下になる領域が大きいことがわかる。



(a) 偏向板の設置間隔 $p_d = 1/2H$



(b) 偏向板の設置間隔 $p_d = 1/3H$

図 7-5-10 フェンスに短三角形偏向板を設置した場合の下流域の風速分布 ($\theta = 40^\circ$)

7-5-4 偏向板を設置した場合のフェンス上部の風速分布

図 7-5-11 にフェンス前方に各偏向板を設置し、偏向板の設置間隔 p_d を $1/2H$ と $1/3H$ に変更させた場合の設置角度 $\theta = 40^\circ$ における、フェンス上部の ξ - ζ 平面の風速分布を示す。フェンス前方に偏向板を設置することで、斜めに流入してきた風が偏向板によって偏向され、フェンス後方で風向が変化している。長方形偏向板を設置した場合には、設置間隔 $p_d = 1/2H$ の方が設置間隔 $p_d = 1/3H$ よりもフェンス直上の風速が偏向板の影響によって速くなっている。しかし、長三角形偏向板と短三角形偏向板を設置した場合には、設置間隔 $p_d = 1/2H$ と設置した場合よりも設置間隔 $p_d = 1/3H$ で設置した場合の方がフェンス直上の風速が速くなっていることがわかる。

図 7-5-12 に示すように、偏向板を設置したフェンスによって偏向された後の風向の平均角度を θ_r と定義する。図 7-5-11 に示す風速分布から、 $\zeta/H = 0.1$ の位置の風向の平均角度 θ_r と ζ 方向の風速 u_ζ/U の平均値を調べたものを表 7-5-2 に示す。なお、最も良い結果を青色で塗りつぶし、最も悪い結果を赤で塗りつぶしている。平均角度 θ_r が 0° の時は流入風がそのままの角度で後方へ流れ、平均角度 θ_r が 40° の時は風向がフェンスに対して直角になる。風車によって高い出力を得るためには、風向がフェンスに対して直角に偏向される方が良いため、平均角度 θ_r の値は 40° に近いほど偏向板の効果が発揮されていることになる。

偏向板を設置しない場合、平均角度 $\theta_r = 2.3^\circ$ であり、フェンス後方へそのままの角度で風が流れるのに対し、偏向板を設置した場合、長三角形偏向板と短三角形偏向板の設置間隔 $p_d = 1/2H$ の結果を除いては、平均角度 θ_r が大きな角度となった。最も角度が大きくなったのは、長方形偏向板を設置間隔 $p_d = 1/2H$ で設置した場合で、 $\theta_r = 17.9^\circ$ であった。長三角形偏向板と短三角形偏向板を設置間隔 $p_d = 1/2H$ で設置した場合、偏向板の総面積が小さく、角度を変化させることができなかつたと考えられる。

次に平均風速 u_ζ/U を比較する。平均風速 u_ζ/U は偏向板がないときに最も遅く、 $u_\zeta/U = 0.48$ であった。偏向板を設置した場合は偏向板の種類や設置間隔に関係なく、偏向板がない時よりも平均風速 u_ζ/U が速くなった。最も平均風速 u_ζ/U 速くなったのは、短三角形偏向板を設置間隔 $p_d = 1/3H$ で設置したときで $u_\zeta/U = 0.69$ となり、偏向板がない場合の約 1.4 倍であった。

長三角形偏向板と短三角形偏向板は共通の傾向を持っており、設置間隔 $p_d = 1/2H$ のときは、偏向板がない場合と近い値となり、設置間隔 $p_d = 1/3H$ のときは、平均風速 u_ζ/U と平均角度 θ_r が大きくなる。長方形偏向板の場合、平均角度 θ_r はどちらの間隔でも大きいですが、設置間隔 $p_d = 1/3H$ の場合の方が $p_d = 1/2H$ の場合よりも風速が遅くなる。

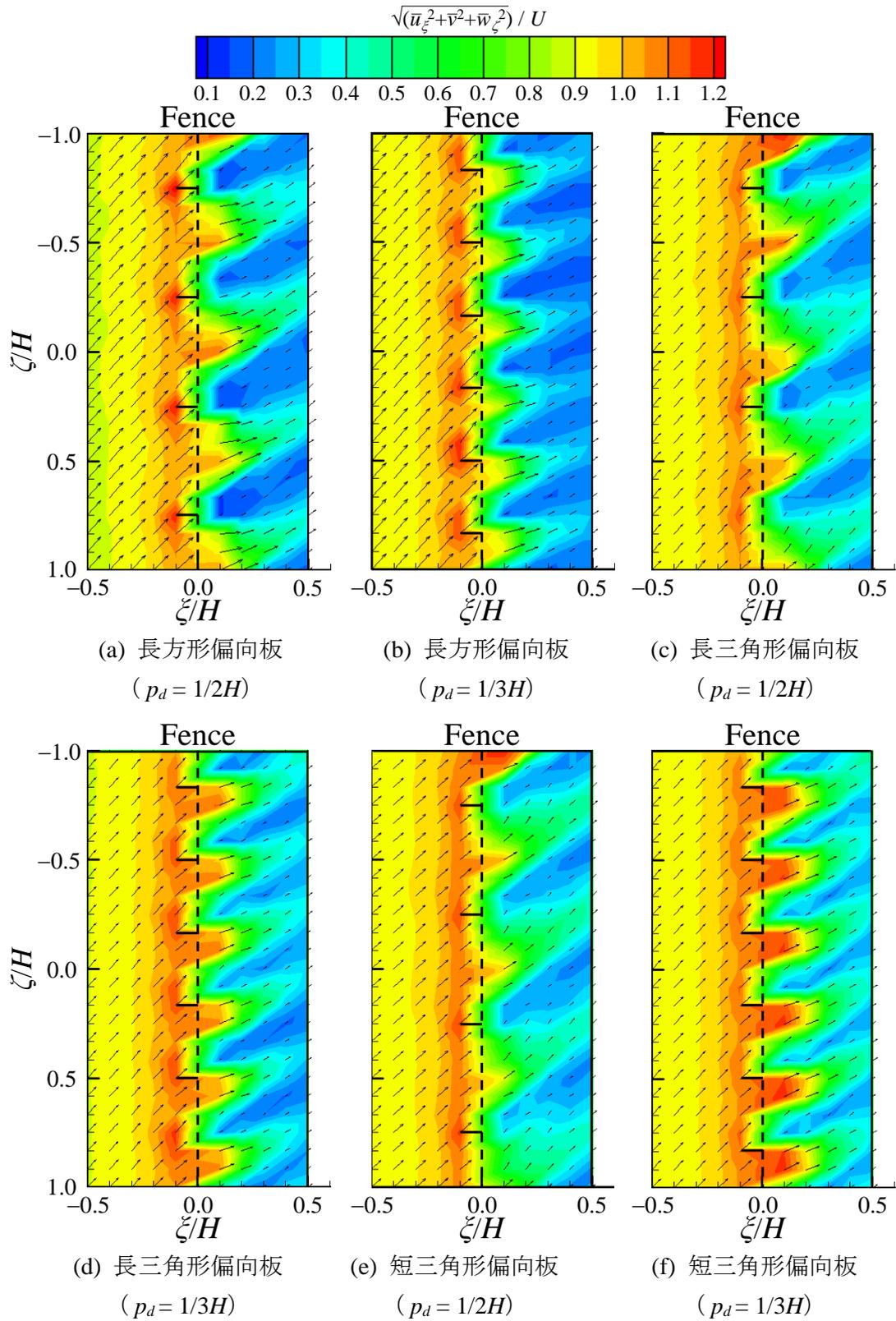


図 7-5-11 フェンスに各偏向板を設置した場合のフェンス上部の風速分布 ($\theta = 40^\circ$)

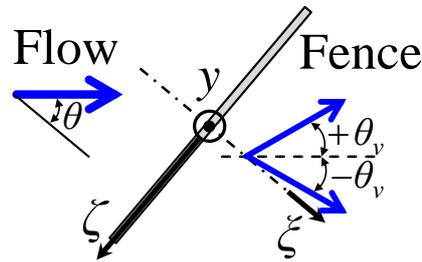


図 7-5-12 風のパフェンス流入角とフェンスにより偏向された角度 θ

表 7-5-2 偏向板を設置した場合のフェンス上部の平均角度と平均風速 ($\theta = 40^\circ$)

	偏向板無し	長方形 $p_d = 1/2H$	長方形 $p_d = 1/3H$	長三角形 $p_d = 1/2H$	長三角形 $p_d = 1/3H$	短三角形 $p_d = 1/2H$	短三角形 $p_d = 1/3H$
平均風向 θ_v	2.3°	17.6°	15.5°	-0.8°	14.6°	2.4°	13.3°
平均風速 u_v/U	0.38	0.59	0.48	0.47	0.60	0.48	0.69

7-5-5 偏向板の形状の検討

前項の 7-5-4 より、フェンス上部に水平に設置する風車の出力を斜風時に向上させるには、長方形偏向板を設置間隔 $p_d = 1/2H$ で設置するか、短三角形偏向板を設置間隔 $p_d = 1/3H$ で設置する方が良いと考えられる。しかし、7-5-3 で述べたように、フェンス下流域の減速効果をみると長方形偏向板を設置間隔 $p_d = 1/3H$ で設置する場合は最も効果が高い。第1章でも述べたように、フェンス本来の性能である減速効果を失うものであってはならない。よって、フェンス本来の性能である減速効果を最も低下させずにフェンス上部の風向を大きく偏向させることのできる、長方形偏向板がフェンス前面に設置する偏向板として、最も適切な形状であると考えられる。

次項の 7-5-6 では、最も適切な形状であると考えられる長方形偏向板の設置間隔についてさらに評価を行った。

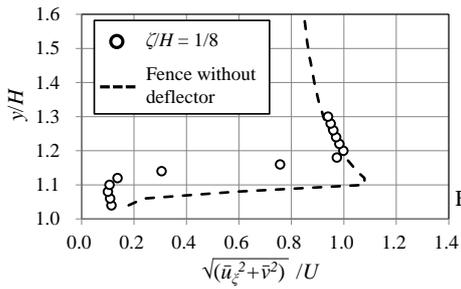
7-5-6 偏向板の設置間隔の影響

図 7-5-13 及び図 7-5-14 に長方形偏向板を設置間隔 $p_d = 1/2H$ 及び $p_d = 1/3H$ で設置した場合で、設置角度 $\theta = 40^\circ$ におけるフェンス上部の 4 地点の風速分布を示す。なお、図中には破線で偏向板が無い場合の風速分布も示す。また、フェンスを上から見た場合の測定地点の概略図も示す。なお、ここで示す風速は風車に対して直角に流入する風速成分 $\sqrt{u_\xi^2 + v^2}$ のみを示している。

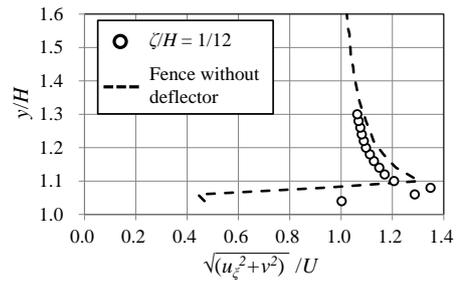
図 7-5-13(a)を除く全ての結果において、長方形偏向板を設置しない場合に比べて、長方形偏向板を設置することにより設置間隔 p_d に関わらず、 $\xi/H = 0.1$ における風速が増加していることがわかる。この結果より、長方形偏向板を設置することで、斜風時の風車出力の低下を抑制する効果が期待できる。

また、図 7-5-13 と図 7-5-14 の結果を比較すると、全ての位置です設置間隔を $p_d = 1/3H$ とした場合に最大風速がより速くなっていることがわかる。最も風速が速い位置は偏向板直上であり、一様風速の約 1.3 倍となった。

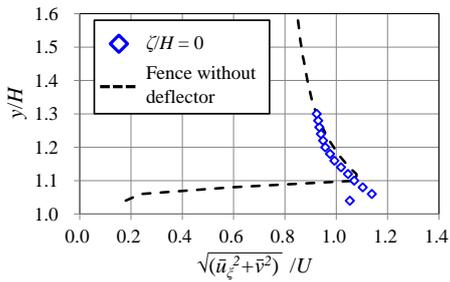
この結果より、6-6-7 項では長方形偏向板を $p_d = 1/3H$ の間隔でフェンス前面に設置した場合のフェンスの上部に設置された風車の出力特性について示す。



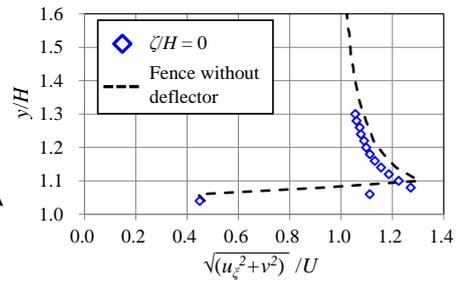
(a) $\zeta / H = 1/8$



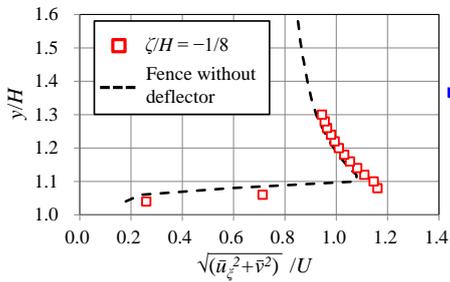
(a) $\zeta / H = 1/12$



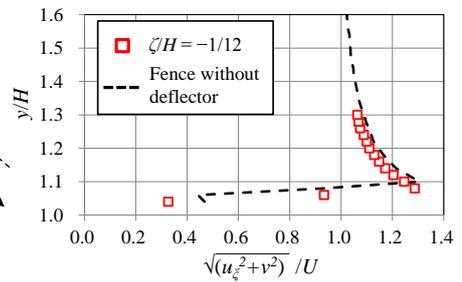
(b) $\zeta / H = 0$



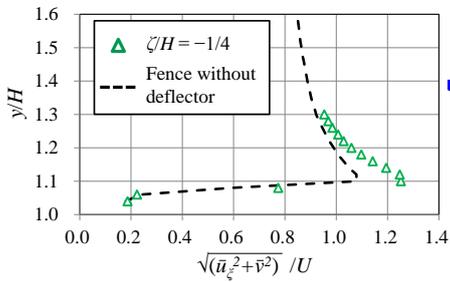
(b) $\zeta / H = 0$



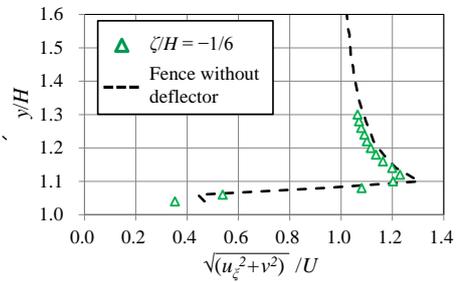
(c) $\zeta / H = -1/8$



(c) $\zeta / H = -1/12$



(d) $\zeta / H = -1/4$



(d) $\zeta / H = -1/6$

図 7-5-13 $\zeta / H = 0.1$ における風速分布
($p_d = 1/2H$)

図 7-5-14 $\zeta / H = 0.1$ における風速分布
($p_d = 1/3H$)

7-5-7 風車出力特性

フェンス直上 ($a = 0.00$) に風車を設置した場合の斜風時の出力係数 C_p を図 7-5-15 に示す。設置角度 $\theta = 20^\circ, 40^\circ$ においてはフェンスに長方形偏向板を設置しない場合と $p_d = 1/3H$ 間隔で長方形偏向板を設置した場合の結果を示している。設置角度 $\theta = 0^\circ$ においては、長方形偏向板の有無に関係なく、出力係数 C_p は同じであった。

風車設置位置 $a = 0.00$ においては長方形偏向板の有無によって出力係数に大きな違いは見られず、設置角度 θ が大きくなるにつれて出力係数は小さくなり、設置角度 θ に関わらずほぼ同じ出力係数となった。よって、フェンス直上 ($a = 0.00$) に風車を設置した場合には、フェンスに長方形偏向板を設置したとしても風車出力の低下は抑制できなかった。

図 7-5-16 にフェンス下流側 $a = 0.625$ に風車を設置した場合の斜風時の出力係数 C_p を示す。図 7-5-15 と同様に、設置角度 $\theta = 20^\circ, 40^\circ$ においてはフェンスに長方形偏向板を設置しない場合と $1/3H$ 間隔で長方形偏向板を設置した場合の結果を示している。なお、風車設置位置 $a = 0.625$ の場合においても、設置角度 $\theta = 0^\circ$ では長方形偏向板の有無による出力係数 C_p の違いはみられなかった。

風車設置位置 $a = 0.625$ の場合、設置角度 $\theta = 20^\circ$ においては長方形偏向板の有無に関わらず同様の出力係数を示すが、一方で、設置角度 $\theta = 40^\circ$ においては長方形偏向板を設置した場合の方が出力係数は大きくなった。長方形偏向板が無い場合の最大出力係数は $C_{pmax} = 0.16$ であったのに対し、長方形偏向板を設置した場合 $C_{pmax} = 0.17$ となり、約 1.1 倍の向上がみられた。

図 7-5-17 に設置角度 θ に対する各条件の最大出力係数 C_{pmax} の変化を設置角度 $\theta = 0^\circ$ のときのそれぞれの最大出力係数 $C_{pmax(\theta=0^\circ)}$ との割合で示す。フェンスに長方形偏向板を設置しない場合と、風車設置位置 $a = 0.00$ で長方形偏向板を設置した場合の最大出力係数は $\cos^2\theta$ の曲線とおおよそ一致する。風車設置位置 $a = 0.625$ でフェンスに偏向板を設置した場合、設置角度が小さい $\theta = 10^\circ, 20^\circ$ においては他の条件とほぼ同じ値となるが、設置角度 $\theta = 30^\circ, 40^\circ$ においては最大出力係数が向上していることがわかる。この差はフェンスに偏向板を取り付けることに起因していると考えられるが、風車設置位置 $a = 0.00$ の場合では偏向板による出力係数の大きな違いは見られなかった。

図 7-5-18 及び図 7-5-19 に設置角度 $\theta = 40^\circ$ における風車を設置した場合を想定した $a = 0.00, 0.625$ の $\zeta - y'$ 断面の $\sqrt{u_\zeta^2 + v^2}$ の風速分布図を示す。この風速分布測定は、実際に風車出力特性を測定した際に用いたフェンス高さ $H = 500\text{mm}$ のものを用いて行った。図 7-5-18(a)、図 7-5-19(a)の長方形偏向板を設置していないフェンス上部の風速分布は

方向にほぼ一様な分布である。一方で、図 7-5-18(b), 7-5-19(b)の長方形偏向板を設置したフェンス上部の風速分布は長方形偏向板の設置間隔に対応して ζ 方向に $1/3H$ の間隔で増速している領域が見られる。また、図 7-5-18 の風車設置位置 $a = 0.00$ の風速分布は風車の下方 ($y/D_1 < 0$) で風速が大きくなっているのに対して、図 7-5-19 の風車設置位置 $a = 0.625$ の風速分布は風車の中心付近から上方 ($y/D_1 > 0$) で大きな値、下方 ($y/D_1 < 0$) では低い値となっている。

図 7-5-18 及び図 7-5-19 に示されている風車設置位置における風速分布を基に推定される風車に流入する風が持っているエネルギーを表 7-5-3 に示す。風車の設置位置が $a = 0.00$ の場合の風力エネルギーが $a = 0.625$ の場合よりも大きくなっているのは、上述のように、風車設置位置 $a = 0.625$ の場合は風車下方で風速が遅くなっているためである。ここで、長方形偏向板の有無による風力エネルギー差に着目すると、風車設置位置 $a = 0.00$ の場合は 0.61 W 、 $a = 0.625$ の場合は 0.50 W となっており、風車設置位置 $a = 0.00$ の場合の方が大きい。しかし、エネルギー差が大きいかかわらず風車設置位置 $a = 0.00$ の場合、設置角度 $\theta = 40^\circ$ における出力係数は偏向板を設置しても変化しなかった。一方で、風車設置位置 $a = 0.625$ の場合には偏向板を設置することにより出力係数が向上した。この違いは、クロスフロー風車の駆動原理が原因で引き起こされる。クロスフロー風車の円弧翼には、風を受けて駆動力を発生する側と、風を受けて回転の抵抗となる側が存在する。本実験の場合、風車の上方が駆動力を発生し、下方が回転抵抗となるように設置されており、風車設置位置 $a = 0.00$ の場合は、偏向板を設置することで全体の風力エネルギーは増加するが、風車下方の風速が速くなっているために風車出力が向上しなかったと考えられる。一方で風車設置位置 $a = 0.625$ の場合は、風車上方で風速が速くなるために風車出力が向上したと考えられる。

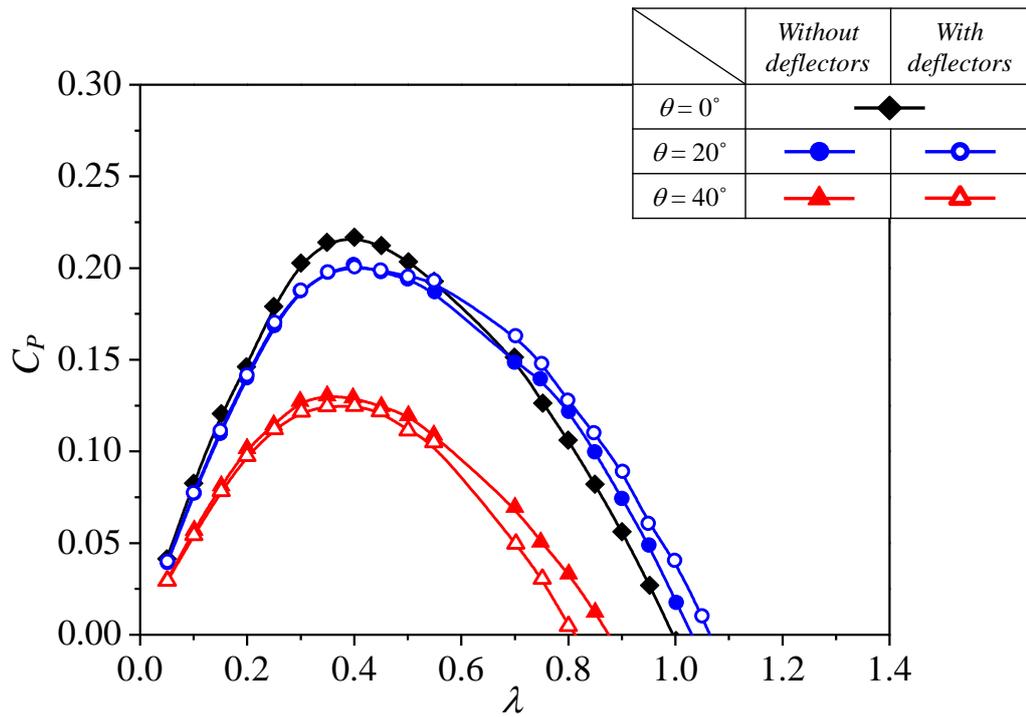


図 7-5-15 偏向板を設置した場合の風車出力係数 ($a = 0.00$)

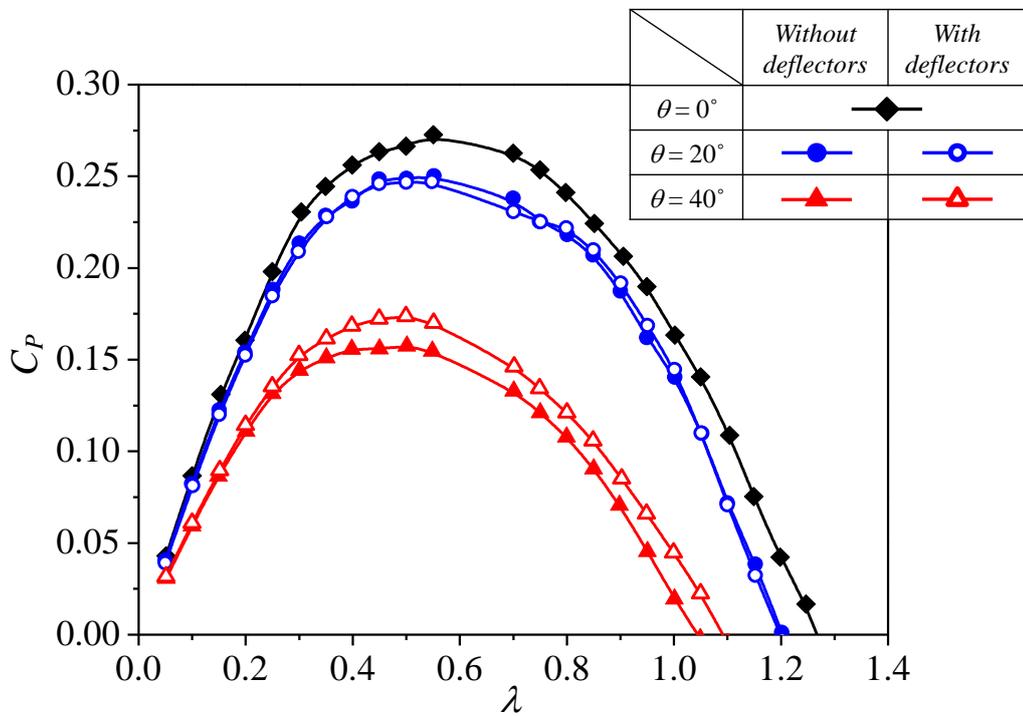


図 7-5-16 偏向板を設置した場合の風車出力係数 ($a = 0.625$)

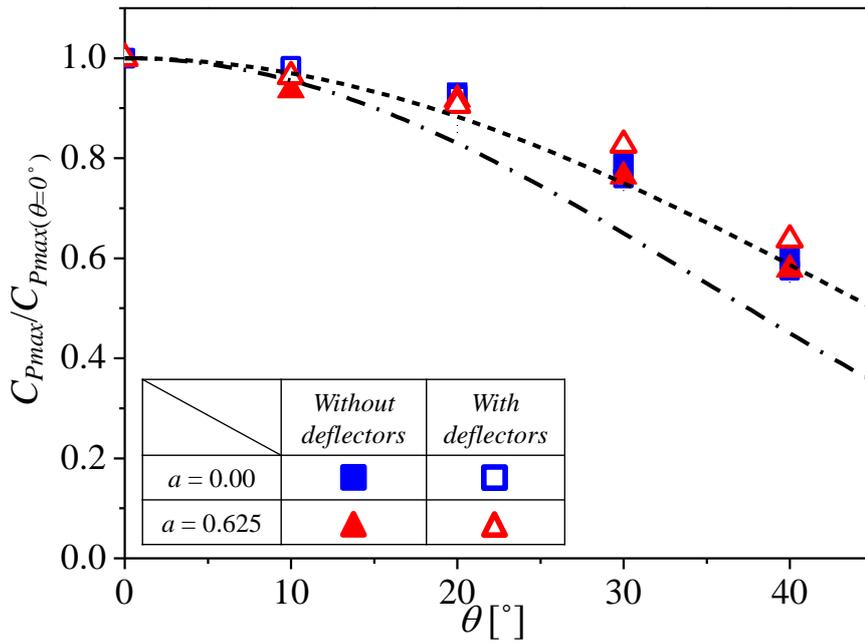


図 7-5-17 偏向板を設置した場合の最大風車出力係数

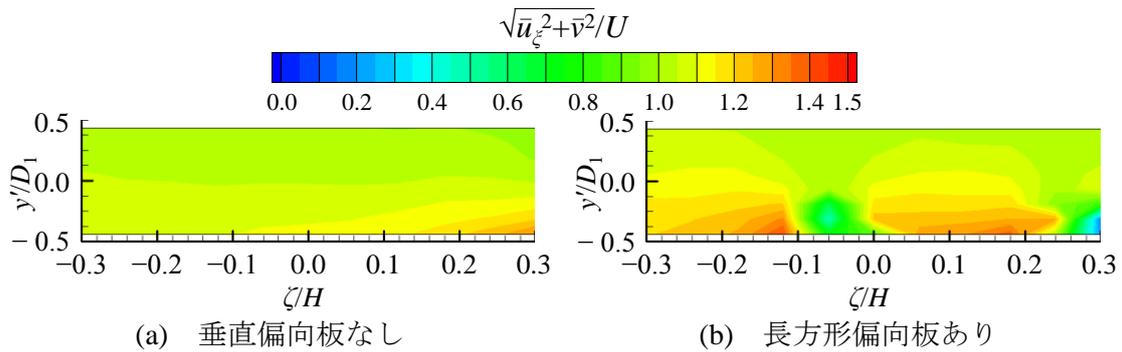


図 7-5-18 $a = 0.00$ における風速の等値分布図

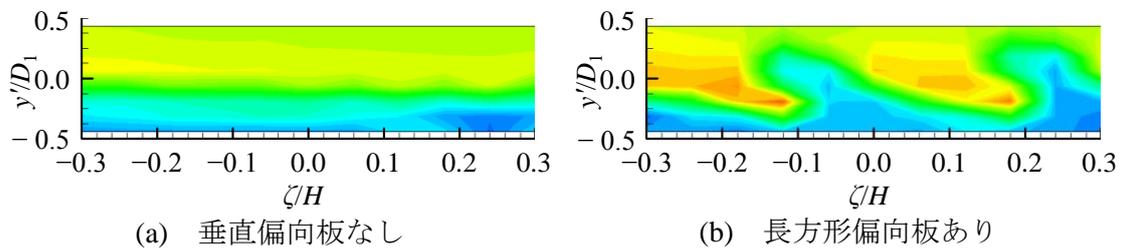


図 7-5-19 $a = 0.625$ における風速の等値分布図

表 7-5-3 風速分布から推測される風力エネルギー

	偏向板の有無	エネルギー[W]	エネルギー差[W]
$a = 0.00$	無	6.56	0.61
	有	7.17	
$a = 0.625$	無	3.92	0.50
	有	4.42	

7-6 まとめ

本章では、水平に設置したクロスフロー風車に流入する風向を変化させ、風車単体及び偏向板を設置したフェンス上部に設置した場合の風車出力特性及びフェンス周りの風速分布を風洞実験により調べ、以下の結論を得た。

- (1) 風車単体の場合とフェンス上部に風車を設置した場合($a = 0.00$ と $a = 0.625$)の最大出力係数 C_{Pmax} は設置角度 θ が大きくなるにつれて低下し、その低下の割合は $\cos^2\theta$ の曲線とほぼ一致した。
- (2) 風車の両端に直径 $2D_1$ と $3D_1$ の円形端板を設置することで、出力係数は円形端板が設置されていない場合に比べてわずかに向上した。
- (3) フェンス前方に長方形偏向板を設置することによって、斜風時にフェンス本来の性能であるフェンス下流域の減速効果を失うことなく、フェンス直上において風向を大きく偏向できることを明らかにした。
- (4) フェンス直上($a = 0.00$)に風車を設置し、フェンス前面に長方形偏向板を設置した場合、垂直偏向板が無い場合に比べて全体の風力エネルギーは増加するが、風車回転の抵抗となる風車下方の翼が受ける風が速くなり、風車出力は変化しなかった。
- (5) フェンス下流側($a = 0.625$)に風車を設置し、フェンス前面に長方形偏向板を設置した場合、風車の駆動力を発生する風車上方の翼が受ける風が速くなることで、長方形偏向板が無い場合と比べて設置角度 $\theta = 40^\circ$ における風車出力が約 1.1 倍に向上し、風車出力の低下が抑制される。

第8章 結論

道路に沿って設置されている防風・防雪フェンスの上部において、風速の増加に着目し、その風を利用した風力発電をするために、フェンス上部にクロスフロー風車を設置したフェンスの開発を行った。本研究では、クロスフロー風車を組み込んだ道路用フェンスの実用化に向けて、フェンス上部におけるクロスフロー風車の最適な設置方法と斜風時における風車の性能について明らかにすることを目的とし、以下の4つの影響を風洞実験により明らかにした。

1. 風車設置位置を垂直方向及び水平方向に変化させた場合の影響
2. フェンス上部に直角偏向板を設置し、その直角偏向板を変化させた場合の影響
3. 防雪フェンスの種類の違いによる影響
4. 斜風時における風車性能への影響とその対策

以下に各風洞実験により得られた結果を示す。

第4章では、防風フェンス上部にクロスフロー風車を設置し、風車設置位置を垂直方向及び水平方向に変化させた場合の風車出力特性及び風車後流とフェンス下流域の風速分布に与える影響を風洞実験により調べ、以下の結果を得た。

- (1) フェンス上部にクロスフロー風車を設置し、風車を垂直方向に移動させることやフェンス付近の上流側もしくは下流側に移動させることで風車単体の場合と比べて風車出力が増加することを示した。
- (2) フェンス直上 ($a = 0.00$) に風車を設置する場合、風車出力は風車の回転方向とクリアランス c に影響することを明らかにした。風車回転方向CWの場合、クリアランス c が大きくなるにつれて、最大出力係数 C_{Pmax} は低下するが、風車回転方向CCWの場合、クリアランス c が大きくなるにつれて、最大出力係数 C_{Pmax} は上昇する。
- (3) 高い風車出力と減速効果の両方を備えたフェンス直上 ($a = 0.00$) への風車の設置方法は、風車回転方向をCW、クリアランス c を小さくして風車を設置する方が良いことを示した。
- (4) クリアランス c を小さくして風車を設置した場合の風車出力は、風車回転方向CWの場合、フェンス下流側の水平位置 $a = 0.625$ に風車を設置した時に最も大きい出力係数を示し、 $C_{Pmax} \approx 0.27$ となった。一方で、風車回転方向CCWの場合、フェンス上流側の水平位置 $a = -0.250$ に風車を設置した時に最も大きい出力係数を示し、 $C_{Pmax} \approx 0.22$ となった。さらに、反対の方角からも風が吹いて来る時を想定すると、水平位置を $|a| = 0.25 \sim 0.50$ に風車を設置すると良いことがわかった。

-
-
- (5) クリアランス c を小さくしてフェンス上部に風車を設置することにより、風車の水平方向の設置位置や風車回転方向に関係なく、フェンス単体の場合に比べ、 $y/H = 1.1 \sim 1.3$ の風車後方において、風速が減速される。
 - (6) より高い風車出力と減速効果を備えた風車付き道路用フェンスとして使用する場合、クリアランス c を小さく、風車回転方向はCWとし、フェンス下流側に水平位置 $a = 0.25 \sim 0.50$ 程度移動させて設置すると良いことを明らかにした。

第5章では、フェンス上端に直角偏向板を設置し、その直角偏向板を変更させた場合の風車出力特性及び風速分布に及ぼす影響を調べ、以下の結論を得た。

- (1) フェンス上部にクロスフロー風車を設置し、フェンス上端に直角偏向板を取り付けることで風車単体の場合と比べて風車出力が増加することを示した。
- (2) 風車出力は、風車中心と直角偏向板の上端との角度 $\alpha = 60^\circ$ の直角偏向板をフェンス上端に取り付けた時に最も大きい出力係数を示し、 $C_{Pmax} \approx 0.33$ となり、風車単体の場合に比べて約3倍の値になった。
- (3) フェンス上部にクロスフロー風車を設置し、フェンス上端に直角偏向板を取り付けた場合、フェンス下流域の $y/H = 1.1 \sim 1.5$ において減速領域が大きくなり、防風フェンスとしての効果が失われないことがわかった。
- (4) 風車を回転方向CWとして有孔フェンス上部に風車を設置した場合、フェンス上端に直角偏向板を取り付けることで、風車をフェンス下流側に設置した場合に得られた効果と同じ効果が得られることがわかった。

第6章では、防雪フェンスを模擬した有孔板フェンス上部にクロスフロー風車を設置し、有孔板フェンスの無孔板領域を変化させた場合の風車出力特性及び風車周辺の流れの様相を調べ、以下の結論を得た。

- (1) 風車回転方向CWとして風車を設置することで、クリアランスに関わらず、有孔フェンスの無孔板領域が拡大するにしたがって、風車上方の回転力を発生するフェンスからの上昇流が羽根に当たることで最大出力係数 C_{Pmax} が上昇する。最大出力係数はクリアランスが小さい $c = 0.0625$ で、フェンスの無孔板領域を100%としたときに最も大きくなり、 $C_{Pmax} \approx 0.46$ となった。
 - (2) 風車回転方向CCWでクリアランスが小さい $c = 0.0625$ で風車を設置した場合、フェンスと風車の隙間を通り抜ける流れが弱くなる。そのため有孔板フェンス上部の無孔板領域が25%以上では、風車の回転を妨げるフェンスからの上昇流が羽根に当たり、最大出力係数 C_{Pmax} は低下し、ほぼ一定となる。
-
-

- (3) 風車回転方向 CCW でクリアランスを大きく $c = 0.313$ として風車を設置した場合、フェンスと風車の隙間を通り抜ける風が風車下方で回転力を発生する羽根に当たるため、有孔板フェンスの無孔板領域の増加とともに最大出力係数 C_{Pmax} は増加する。最大出力係数はフェンスの無孔板領域を 75%lower とした場合に最も大きくなり、 $C_{Pmax} \approx 0.41$ となった。
- (4) 可視化実験の結果より、各種の防雪フェンス上部に風車を設置しても、風車を設置しない防雪フェンス下流の流れと定性的に一致することがわかった。

第7章では、水平に設置したクロスフロー風車に流入する風向を変化させ、風車単体及び偏向板を設置したフェンス上部に設置した場合の風車出力特性及びフェンス周りの風速分布を調べ、以下の結論を得た。

- (1) 風車単体の場合とフェンス上部に風車を設置した場合($a = 0.00$ と $a = 0.625$)の最大出力係数 C_{Pmax} は設置角度 θ が大きくなるにつれて低下し、その低下の割合は $\cos^2\theta$ の曲線とほぼ一致した。
- (2) 風車の両端に直径 $2D_1$ と $3D_1$ の円形端板を設置することで、出力係数は円形端板が設置されていない場合に比べてわずかに向上した。
- (3) フェンス前方に長方形偏向板を設置することによって、斜風時にフェンス本来の性能であるフェンス下流域の減速効果を失うことなく、フェンス直上において風向を大きく偏向できることを明らかにした。
- (4) フェンス直上($a = 0.00$)に風車を設置し、フェンス前面に長方形偏向板を設置した場合、垂直偏向板が無い場合に比べて全体の風力エネルギーは増加するが、風車回転の抵抗となる風車下方の翼が受ける風が速くなり、風車出力は変化しなかった。
- (5) フェンス下流側($a = 0.625$)に風車を設置し、フェンス前面に長方形偏向板を設置した場合、風車の駆動力を発生する風車上方の翼が受ける風が速くなることで、長方形偏向板が無い場合と比べて設置角度 $\theta = 40^\circ$ における風車出力が約 1.1 倍に向上し、風車出力の低下が抑制される。

以上のように、フェンス上部に水平にクロスフロー風車を設置し、各パラメータを変化させた場合の影響を風洞実験により調べ、クロスフロー風車を組み込んだ道路用フェンスの実用化に向けた基礎的な知見を得ることができた。

図 8-1-1 に、クロスフロー風車を組み込んだ防風フェンスの概観を示す。今後は、本研究で得られた結果を基に図 8-1-1 に示すような実際の防風フェンスを用いてフィールド実験を行い、データを取得する必要がある。また、フェンスとしての性能をより適切

に評価するためには、本研究で調べたフェンス下流域よりもさらに下流の流れ場についても数値解析などを用いて明確にする必要もあると考えている。



図 8-1-1 クロスフロー風車を設置した防風フェンスの概観

クロスフロー風車を設置した道路用フェンスの実用化に向けた課題は何点かあるものの、本研究で得られた結果を基に風車を設置することにより、フェンス本来の性能を失うことなく、大きな風車出力を得られる可能性が高いことから、道路標示の照明や指示灯などの電力補助としてクロスフロー風車をフェンスに組み込んだ、クロスフロー風車付きフェンスの幅広い導入が今後期待される。

参考文献

- 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 編集, NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 第2版, 2014.
- 日本風工学会 編集, 風工学ハンドブック-構造・防災・環境・エネルギー-, 朝倉書店, 2007.
- 日本建設機械化協会 編集, 新防雪工学ハンドブック, 森北出版, 1977.
- 流れの可視化学会 編集, 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, 1986.
- 岡内 功, 伊藤 學, 宮田 利雄, 耐風構造, 丸善, 1977.
- 笠木 伸英, 木村 龍治, 西岡 通男, 保原 充, 流体実験ハンドブック, 朝倉書店, 1997.
- 日本パーツセンター, <http://www.n-parts.jp/index.html>
- 有江 幹男, 木谷 勝, 鈴木 雍宏, 吉村 秀勇, 平面壁の干渉を受ける傾斜円柱周りの流れ, 北海道大学工学部研究報告, 第87号, 1978, pp.11-22.
- 今村 博, 竹崎 大輔, 長谷川 豊, 川合 正洋, 菊山 功嗣, パネル法による水平軸風車ロータ周りの非定常解析(斜め流入風の影響と三次元流れ場における迎え角の考察), 日本機械学会論文集 (B編), 71巻701号, 2005, pp.154-161.
- 今村 博, 沼尻 智宏, 黒川 淳一, 斜め流入風における水平軸風車ロータ周りの非定常流れ(速度場と流体力の測定および推定), ターボ機械, 第33巻第3号, 2005, pp.178-184.
- 牛山 泉, 長井 浩, 篠田 仁吉, サボニウス風車の最適設計形状に関する研究, 日本機械学会論文集 (B編), 52巻480号, 1986, pp.2973-2982.
- 内海 航介, 野々村 善民, 小林 信行, 平原 裕行, 防風・防雪柵における小型風車の利用とその効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2007, pp.649-650.
- 内田 孝紀, 杉谷 賢一郎, 大屋 裕二, 一様流中の二次元崖状地形まわりの気流性状に関する実験的研究, 日本風工学論文集, 第95号, 2003, pp.233-244.
- 緒方 正幸, 山口 信行, 佐瀬 友昭, 車載型風力発電システムに関する研究(第2報 クロスフロー風車の特性), 日本機械学会 2005年度年次大会講演論文集(2), 2005, pp.253-254.
- 加藤 雄三, 坂本 弘志, 高井 和紀, 小畑 芳弘, 多機能防雪柵の空力特性に関する研究, 日本機械学会北海道支部 第44回講演概要集, 2005, pp.46-47.
- 香川 聡, 金子 憲一, 辻川 吉春, ガイドベーンの利用したクロスフロー風車の性能向上に関する研究, 日本機械学会 2007年度年次大会講演論文集(2), 2007, pp.365-366.

-
- 鳥谷 隆, 渡辺 公彦, 大屋 裕二, 小型風車の動特性に関するいくつかの考察, 九州大学応用力学研究所所報, 第 137 号, 2009, pp.165-174.
- 鳥谷 隆, 大屋 裕二, 渡辺 公彦, ピッチ角が固定された風車の変動風に対する振る舞い, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.34, No.3, 2010, pp102.-107.
- 木綿 隆弘, 岡島 厚, 倉谷 知宏, 高橋 誠, 坂本 匠, 吉村 昭志, 有孔板フェンス周りの流れの風洞実験と数値解析, 第 17 回風工学シンポジウム論文集, 2002, pp.351-356.
- 小垣 哲也, 風力発電の役割と今後の動向, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集 (8), 2007, pp.44-45.
- 郷 浩視, 篠原 俊夫, 中村 陽一, 堀内 啓司, 炭じん飛散とその防止策に関する研究 (第 1 報, 限界摩擦速度と飛散流量), 日本機械学会論文集 (B 編), 51 巻 468 号, 1985, pp.2664-2671.
- 郷 浩視, 篠原 俊夫, 中村 陽一, 堀内 啓司, 炭じん飛散とその防止策に関する研究 (第 2 報, 防風フェンスの効果), 日本機械学会論文集 (B 編), 51 巻 469 号, 1985, pp.2916-2925.
- 佐藤 祐子, 河村 哲也, クロスフロー風車のブレード形状特性に関する数値的研究, 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集 (2), 2004, pp.141-142.
- 重光 亨, 福富 純一郎, 武山 裕一, 対称形ケーシングによるクロスフロー風車の高性能化に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編), 74 巻 743 号, 2008, pp.1505-1511.
- 清水 幸丸, 片山 薫, 水平軸風車の動特性に関する実験的研究 (風速・風向が周期的に変動する場合), 日本機械学会論文集 (B 編), 49 巻 445 号, 1983, pp.1869-1878.
- 清水 幸丸, 高田 実, 坂田 甚作, クロスフロー風車の高性能化に関する研究 (ガイドベーン付リングディフューザによる出力増強方法について), 日本機械学会論文集 (B 編), 64 巻 625 号, 1998, pp.2958-2963.
- 清水 幸丸, 中村 俊祐, 水平軸風車周囲の流れ状態と風車性能に関する研究 (翼に適切なねじれ角を与えた場合とねじりなしの場合の比較), 日本機械学会論文集 (B 編), 51 巻 471 号, 1985, pp.3530-3538.
- 鈴木 智也, 鈴木 秀平, 渡辺 浩司, 角田 和巳, 岡本 史紀, 迎角を有する二次元傾斜平板まわりの流れ, 日本機械学会北信越支部第 50 期総会・講演会講演集, 2013, pp.1-2 (USB).
- 高井 和紀, 小畑 芳弘, 坂本 弘志, 吹雪障害を防止する防雪柵, ながれ: 日本流体力学会誌 28 (6), 2009, pp.469-476.
- 高瀬 知章, 村上 周三, 小澤 裕己, 出口 清孝, 実物大の防風フェンスを用いたフェ
-

-
- ンスの防風効果に関する風洞実験, 日本建築学会昭和 55 年度関東支部研究報告集, 1980, pp.9-12.
- 高田 尚樹, 坂本 弘志, 高井 和紀, 小畑 芳弘, 斜風対応型高性能防雪柵の研究開発, 日本機械学会北海道支部 第 45 回講演概要集, 2006, pp.45-46.
- 竹内 一喜, 福富 純一郎, 小谷 秀俊, 堀口 裕憲, クロスフロー風車の性能と内部流れに関する研究, ターボ機械第 32 巻第 8 号, 1999, pp.473-481.
- 谷口 二郎, 後藤 孝太郎, 岸浪 紘機, 今 紀衡, ヒムサール・アンバリタ, 鈴木 淳, 縦軸型貫流式風車の全方位性案内羽根の性能特性に関する実験的研究, 日本機械学会第 18 回環境工学総合シンポジウム 2008 講演論文集, 2008, pp.346-349.
- 谷野 忠和, 仲尾 晋一郎, 上林 源樹, 構造物端壁近傍に設置したクロスフロー型風車周りの風環境の最適化, 日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集, 2004, pp.175.
- 谷野 忠和, 仲尾 晋一郎, 小宮 康徳, 構造物端壁部に設置したクロスフロー風車の入口流れモデルによる偏流板効果の検証, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 (2), 2006, pp.257-258.
- 谷野 忠和, 仲尾 晋一郎, クロスフロー型風車の翼枚数および翼取付角が出力特性に及ぼす影響, 日本機械学会論文集 (B 編), 73 巻 725 号, 2007, pp.225-229.
- 谷野 忠和, 仲尾 晋一郎, 構造物端壁剥離流れの有孔利用および入口流れ改善によるクロスフロー型風車の出力特性の向上 (端壁剥離流れの有効性と端壁部誘導板による入口流れの改善), 日本機械学会論文集 (B 編), 73 巻 726 号, 2007, pp.588-593.
- 谷野 忠和, 仲尾 晋一郎, 宮國 健司, クロスフロー型風車周辺および内部流れの可視化と流れ場の出力性能の関係, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集 (2), 2007, pp.369-370.
- 谷野 忠和, 仲尾 晋一郎, 宮國 健司, 有田 直樹, 対称配置した 1 対の偏流板の設置条件がクロスフロー風車の性能改善効果に及ぼす影響, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集 (2), 2008, pp.177-178.
- 谷野 忠和, 仲尾 晋一郎, 宮國 健司, 田口 啓太, 二偏流板ケーシング付クロスフロー風車のケーシング傾き角と性能の関係, ターボ機械第 39 巻第 12 号, 2011, pp.722-728.
- 谷野 忠和, 仲尾 晋一郎, 宮國 健司, 田口 啓太, 二偏流板ケーシング付クロスフロー風車の出力性能と流れ場の評価, ターボ機械第 40 巻第 5 号, 2012, pp.313-319.
- 都筑 建, 日本の風力発電 -特に小型風車における誤解-, 電子情報通信学会信学技報, 2003, pp.21-24.
-

-
- 成瀬 廉二, 防雪柵による吹きだまりと風速分布, 北海道大学低温科学研究所業報第 2483 号, 低温科学 物理篇第 41 報, 1983, pp.65-73.
- 野々村 善民, 平原 裕行, 小林 信行, 建築物を利用した風力発電技術に関する研究 (その 9) -複数の風車の周辺における気流性状-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2004, pp.687-688.
- 長谷 聡士, 江尻 英治, 矢部 祥司他, 垂直軸クロスフロー風車の性能解析, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 (2), 2006, pp.261-262.
- 藤沢 延行, 白井 紘行, 齋川 雄司, サボニウス風車周りの流れ場と出力機構に関する研究 (スモークワイヤ法による可視化観察), 日本機械学会論文集 (B 編), 53 巻 496 号, 1987, pp.3716-3721.
- 藤澤 延行, 田口 祥和, 佐藤 毅, 植村 知正, 長屋 幸助, 井開 重男, 条件抽出法によるサボニウス風車の内部流れ場の画像計測, 日本機械学会論文集 (B 編), 59 巻 567 号, 1993, pp.3519-3523.
- 藤原 岳志, 金子 憲一, 辻川 吉春, ビル風を利用したクロスフロー風車の性能に関する基礎実験, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集 (2), 2007, pp.367-368.
- 舟木 治朗, 木全 伸幸, 久田 基秀, 平田 勝哉, ケーシングの無い短スパン貫流羽根車のアスペクト比効果とレイノルズ数効果, 日本機械学会論文集 (B 編), 73 巻 736 号, 2007, pp.2514-2523.
- 丸山 敬, 有孔フェンス周囲の非定常流れ場の数値シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻 第 639 号, 2009, pp.873-880.
- 宮國 健司, 仲尾 晋一郎, 谷野 忠和, 田口 啓太, クロスフロー風車高出力化のための二偏流板ケーシングの最適条件, 日本風力エネルギー協会 論文集, Vol 35, No.4, 2011, pp.15-20.
- 本橋 元, 丹 省一, 後藤 誠, 風向偏在を考慮した案内羽根によるクロスフロー型風車の特性改善, 日本機械学会論文集 (B 編), 70 巻 690 号, 2004, pp.407-412.
- 本橋 元, 丹 省一, 後藤 誠, 傾斜面に沿った風を受けるサボニウス型風車の出力特性, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2010, pp.419-420.
- 山下 四郎, 河村 哲也, 降雪粒子追跡による防雪柵まわりの降雪の数値シミュレーション, 第 14 回数値流体力学シンポジウム, 2000, pp.1-9.
- Md. Zalir HOSSAIN, 平原 裕行, 野々村 善民, 川橋 正昭, 建物に設置された集積型小型風車周りの流れの可視化, 可視化情報学会論文集, Vol.26, No.3, pp.19-26.
- GWEC, GLOBAL WIND REPORT (2013)
- ADRIE JACOBS, THE FLOW AROUND A THIN CLOSED FENCE, Boundary-Layer
-

-
-
- Meteorology 28, 1984, pp.317-328.
- Alexander Orellano, Hans Wengle, Numerical simulation (DNS and LES) of manipulated turbulent boundary layer flow over a surface-mounted fence, *Eur. J. Mech. B - Fluids* 19, 200, pp.765-788.
- André Huppertz, Hans-Hermann Fernholz, Active control of the turbulent flow over a swept fence, *European Journal of Mechanics B/Fluids* 21, 2002, pp.429-446.
- C. FRANK, B. RUCK, Double-Arranged Mound-Mounted Shelterbelts: Influence of Porosity on Wind Reduction between the Shelters, *Environmental Fluid Mechanics*, 2005, pp.267-292.
- Carlos J. Simão Ferreira, Gerard J. W. van Bussel, Gijs A. M. van Kuik, Wind Tunnel Hotwire Measurements, Flow Visualization and Thrust Measurement of a VAWT in Skew, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 128, 2006, pp.487-497.
- Cheol-Woo Park, Sang-Joon Lee, Experimental study on surface pressure and flow structure around a triangular prism located behind a porous fence, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91, 2003, pp.165-184.
- Faizul Mohammad Kamal, Md. Quamrul Islam, AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A STATIONARY FIVE BLADED VERTICAL AXIS VANE WIND TURBINE, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. ME39, No. 2, 2008, pp.95-99.
- Francesco Balduzzi, Alessandro Bianchini, Ennio Antonio Carnevale, Lorenzo Ferrari, Sandro Magnani, Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building, *Applied Energy* 97, 2012, pp.921-929.
- Fuh-Min Fang, D.Y. Wang, On the flow around a vertical porous fence, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 67 & 68, 1997, pp.415-424.
- G.J. Dalton, D.A. Lockington, T.E. Baldock, Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel, *Renewable Energy* 33, 2008, pp.1475-1490.
- G. P. Almeida, D. F. G. Durao, M. V. Heitor, Wake Flows Behind Two-Dimensional Model Hills, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1993, pp.87-101.
- Go-Long TSAL, Tsung-Hsien TU, Tung-Chen LI, Kuang-Hsieng WANG, Flow Style Investigation and Noise Reduction of a Cross-Flow Fan with Varied Rotor-Skew-Angle Rotor, *JSME International Journal (Series B)*, Vol.49, No.3, 2006, pp.695-704.
- H.B. Kim, S.J. Lee, THE STRUCTURE OF TURBULENT SHEAR FLOW AROUND A TWO-DIMENSIONAL POROUS FENCE HAVING A BOTTOM GAP, *Journal of Fluids and Structures* 16(3), 2002, pp.317-329.
-
-

-
-
- HAO WANG, EUGENE S. TAKLE, A NUMERICAL SIMULATION OF BOUNDARY-LAYER FLOWS NEAR SHELTERBELTS, *Boundary-Layer Meteorology* 75, 1995, pp.141-173.
- Hiroshi SAKAMOTO, Masaru MORIYA, Kazunori TAKAI, Yoshihiro OBATA, Development of a New Type Snow Fence with Airfoil Snow Plates to Prevent Blowing-Snow Disasters: Part 1, Evaluation of Performance by Blowing-Snow Simulation in a Wind Tunnel, *Journal of Natural Disaster Science*, Volume 23, 2001, pp.1-11.
- J.K. RAINE, D.C. STEVENSON, WIND PROTECTION BY MODEL FENCES IN A SIMULATED ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER, *Journal of Industrial Aerodynamics*, Vol.2, 1977, pp.159-180.
- J. Whale, C.G. Anderson, R. Bareiss, S. Wagner, An experimental and numerical study of the vortex structure in the wake of a wind turbine, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 84, 2000, pp.1-21.
- Jiro FUNAKI, Nobuyuki KIMATA, Motohide HISADA, Katsuya HIRATA, Aspect-Ration Reynolds-Number Effects on Short-Span Cross-Flow Impellers without Casings, *JSME International Journal Series B*, Vol.49, No.4, 2006, pp.1197-1205.
- K. Pope, V. Rodrigues, R. Doyle, A. Tsopelas, R. Gravelins, G.F. Naterer, E. Tsang, Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine, *Renewable Energy* 35, 2010, pp.1043-1051.
- K. Pope, I. Dincer, G.F. Naterer, Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines, *Renewable Energy* 35, 2010, pp.2102-2113.
- Ki-Pyo You, Young-Moon Kim, Effect of protection against wind according to the variation porosity of wind fence, *Environ Geol* 56, 2009, pp.1193-1203.
- Martin Agelinchaab, Mark F. Tachie, PIV Study of Separated and Reattached Open Channel Flow Over Surface Mounted Blocks, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 130, 2008, 061206-1 - 061206-9.
- N. Fujisawa, F. Gotoh, Visualization study of the flow in and around a Savonius rotor, *Experiments in Fluids* 12, 1992, pp.407-412.
- Ning Zhang, Jong-Hoon Kang, Sang-Joon Lee, Wind tunnel observation on the effect of a porous wind fence on shelter of saltating sand particles, *Geomorphology* 120, 2010, pp.224-232.
- Raul Morais, Samuel G. Matosb, Miguel A. Fernandes, Ant´onio L.G. Valentea, , Salviano F.S.P. Soares, P.J.S.G. Ferreira, M.J.C.S. Reis, Sun, wind and water flow as energy supply for
-
-

-
-
- small stationary data acquisition platforms, computers and electronics in agriculture 64, 2008, pp.120-132.
- S. Alhajraf, Computational fluid dynamic modeling of drifting particles at porous fences, *Environmental Modelling & Software* 19, 2004, pp.163-170.
- Sang-Joon Lee, Cheol-Woo Park, Surface pressure characteristics on a triangular prism located behind a porous fence, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 80, 1999, pp.96-83.
- Sang-Joon Lee, Hyoung-Bum Kim, Velocity field measurements of flow around a triangular prism behind a porous fence, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 77&78, 1998, pp.521-530.
- Sang-Joon Lee, Hyoung-Bum Kim, Laboratory measurements of velocity and turbulence field behind porous fences, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 80, 1999, pp.311-326.
- Sang-Joon Lee, Ki-Chul Park, Cheol-Woo Park, Wind tunnel observations about the shelter effect of porous fences on the sand particle movements, *Atmospheric Environment* 36, 2002, pp.1453-1463.
- Sander Mertens, Gijs van Kuik, Gerard van Bussel, Performance of an H-Darrieus in the Skewed Flow on a Roof, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 125, 2003 pp.433-440.
- S J Watson, D G Infield, J P Barton, S J Wylie, Modelling of the Performance of a Building-Mounted Ducted Wind Turbine, *Journal of Physics: Conference Series* 75, 2007, pp.1-10.
- U. Boldesa, J. Colman, J. Maranon Di Leo, About the penetration of a horizontal axis cylindrical vortex into the nearby downwind region of a vertical porous fence, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91, 2003, pp.859-872.
- W.R. Chang, Effect of porous hedge on cross ventilation of a residential building, *Building and Environment* 41, 2006, pp.549-556.
- Zhibao Dong, Wanyin Luo, Guangqiang Qian, Hongtao Wang, A wind tunnel simulation of the mean velocity fields behind upright porous fences, *Agricultural and Forest Meteorology* 146, 2007, pp.82-93.
- Zhibao Dong, Wanyin Luo, Guangqiang Qian, Ping Lu, Hongtao Wang, A wind tunnel simulation of the turbulence fields behind upright porous wind fences, *Journal of Arid Enviroments* 74, 2010, pp.193-207.
-
-

謝辞

本論文は筆者が、金沢大学 工学部 機能機械工学科在籍時（平成 21 年 4 月～平成 22 年 3 月）、金沢大学大学院 自然科学研究科 博士前期課程 機能機械科学専攻在籍時（平成 22 年 4 月～平成 23 年 3 月）、博士後期課程 システム創成科学専攻在籍時（平成 23 年 4 月～平成 26 年 9 月）の 5 年 6 ヶ月間の研究成果をまとめたものです。この間、大変多くの方々のご指導、ご協力、ご鞭撻を賜り、本研究を博士論文としてまとめられたことに対して、深く感謝しております。

学部 4 年生の時から現在に至るまで、終始懇切丁寧なご指導を賜りました主任指導教員の金沢大学 理工学域の 木綿隆弘 教授には心から感謝申し上げます。また、学部時代から研究だけでなく、私生活についての相談や愚痴にも親身になって聞いて下さり、大変お世話になりました。厳しくご指導いただいたこと、またやさしく励ましてくださったことを通して、私自身の至らなさを実感することができたことは、今後の努力の糧になるものであります。重ねて御礼申し上げます。

金沢大学 環日本海域環境研究センターの 木村繁男 教授には、ゼミや発表練習の際に的確なコメントやアドバイスを頂きました。また、博士課程への進学の際にも的確なアドバイスを頂き、博士課程への進学を決心することができました。心より感謝しております。金沢大学 理工学域の 小松信義 助教には、本研究を遂行するに当たり、日々の研究だけでなく、多岐のわたり多くのご指導を賜り、本当にありがとうございました。金沢大学 理工学域 サステナブルエネルギー研究センターの 河野孝昭 助教には、実験結果の評価、データのまとめ方などに関して、的確なアドバイスを頂き、大変お世話になりました。本当に感謝いたします。技術職員の 倉谷知宏 様には、学部 4 年生の時から研究の進め方、風洞実験のやり方など様々な面でお世話になりました。また、公私にわたり良き相談相手になって下さったことにも、大変感謝しております。

本論文の審査過程で数々の貴重なご意見とご指導を賜りました金沢大学 理工学域の 川端信義 教授、児玉昭雄 教授、斎藤武久 教授に厚く御礼申し上げます。

筆者の研究について、助力頂いた学生にも深く感謝しております。「斜風時におけるクロスフロー風車の出力向上に関する研究」を行った 櫃田禎大 君（現：ダイキン工業株式会社）、研究室に在籍中の 坂井遼 君、山岸啓 君には、大変お世話になりました。皆様のおかげで研究成果をまとめることができました。本当にありがとうございました。

本研究の共同研究者である、株式会社 日本パーツセンターの皆様には多くのご支援

謝辞

とご協力を賜り、深く感謝しております。特に、設計部の 古路裕子 様・中口彰人 様には、本研究を始めた当初から大変お世話になりました。本当にありがとうございました。

博士後期課程への進学を認めてくださった、国土交通省 航空局 安全部 航空機安全課 首席航空機検査官の 山田康弘 様（当時 東京航空局 保安部 航空機検査官室 前任航空機検査官）をはじめとする航空局の皆様には多くのご支援を賜り、大変感謝しております。

また、自分が思う道に進むことに対して、温かく見守り、辛抱強く支援・協力して下さった家族に対しては深く感謝しております。

最後になりましたが、お世話になりました皆様のご活躍と金沢大学、そして流体工学研究室の益々のご発展を願ひまして、ここに謝辞とさせていただきます。

平成 26 年 7 月 1 日

中田 博精