

マルチロータ化した2基レンズ風車の風車間隔の近接による出力向上及び後流干渉に関する研究

戸越, 將太

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/6788229>

出版情報：九州大学, 2022, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



令和 4 年 度

修 士 論 文

マルチロータ化した 2 基レンズ風車の風車間隔の近接による
出力向上及び後流干渉に関する研究

九州大学大学院総合理工学府
総合理工学専攻
機械・システム理工学メジャー
風工学研究室

戸越 將太

指導教員 内田 孝紀

提出年月日 令和 5 年 0 2 月 0 7 日

目次

記号表

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 エネルギー需給の動向	1
1.1.2 再生可能エネルギー	3
1.1.3 風力エネルギー	4
1.1.4 風車の大型化	5
1.1.5 マルチロータシステム(MRS)	7
1.1.6 レンズ風車	9
1.1.7 マルチレンズ風車	11
1.2 研究目的	13
1.3 論文構成	14
第 2 章 風洞実験手法	15
2.1 実験設備	15
2.1.1 大型境界層風洞	15
2.1.2 実験に用いた風車模型	17
2.1.3 パラメータ定義	18
2.2 出力計測手法	20
2.2.1 出力係数	20
2.2.2 周速比	20
2.2.3 出力計測の概要	20
2.3 単体レンズ風車とマルチレンズ風車の性能評価	23
第 3 章 数値計算手法	27
3.1 基礎方程式	27
3.2 ブレードの出力・抗力計算	31
3.2.1 アクチュエータラインモデル	33
3.2.2 ブレードによる出力計算	33
3.3 計算条件	34
第 4 章 風洞実験の結果と考察	36
4.1 出力性能試験	36
4.1.1 風速変化試験	37
4.1.2 風車間隔変化試験 (風洞内風速 $U_{\infty}=6\text{m/s}$)	42
4.1.3 風車間隔変化試験 (風洞内風速 $U_{\infty}=17\text{m/s}$)	46
4.1.4 風車間隔変化試験(風洞内風速 $U_{\infty}=17\text{m/s}$, 4 スパン開放及び解放条件比較)	50
4.1.5 レンズ無風車(Bare)の出力性能試験および, レンズ有風車との比較	52
4.1.6 柱を配置した際の 2 基レンズ風車の出力性能試験	53

4.2 風車後流測定試験.....	56
4.2.1 風洞内風速分布試験	59
4.2.2 風車後流測定（及び後方距離比較）	62
4.2.3 風車後流分布に関する考察	108
第5章 数値計算の結果と考察	121
5.1 計算条件.....	121
5.2 無次元圧力分布(時間平均値)と実験との比較	121
5.3 主流方向無次元流速(時間平均値)と実験値との比較	130
5.4 瞬間値分布	138
5.5 流速平均場 XY 分布考察.....	139
第6章 結論	143
参考文献	146
謝辞	150
Appendix-A 風洞実験データ	151
A-1 風車出力の予備試験	151
A-2 験風車後流の風車間隔による比較	154
A-3 風車後流のレンズ有無による比較	202
Appendix-B 数値計算結果	275
B-1 流速平均場 XZ 分布鉛直方向比較	275

記号表

A	ロータ受風面積
c	コード長
C_D	ブレードの翼素断面における翼型の抗力係数
C_L	ブレードの翼素断面における翼型の揚力係数
C_P	風車の出力係数
$C_{Pi,SA}$	単体配置時における風車単基の出力係数
$\overline{C_{Pi,SA}}$	単体配置時における全風車の出力係数の平均値
C_{Pi}	複数配置時における風車単基の出力係数
$\overline{C_{Pi}}$	複数配置時における全風車の出力係数の平均値
ΔC_{Pi}	風車単基の出力係数の変化率
ΔC_P	風車全体における出力係数の平均値の変化率
D_{rotor}	ロータ直径
D_{throat}	集風体スロート部直径
D_{brim}	集風体外径
f_x	流体に作用する外力（体積力）の主流方向成分
f_θ	流体に作用する外力（体積力）の円周方向成分
F_D	ブレード 1 枚に作用する抗力（方向はピッチ角に依存）
F_L	ブレード 1 枚に作用する揚力（方向はピッチ角に依存）
F_x	ブレード 1 枚に作用する空気力の主流方向成分
F_θ	ブレード 1 枚に作用する空気力の円周方向成分
F_{drag}	風車の抗力（主流方向）
L_t	集風体長さ
ΔL	アクチュエーターディスクの厚さ
h	集風体つば高さ
H	集風体高さ
m	マルチロータ風車を構成する小型風車のロータ質量
M	大型風車のロータ質量
n	マルチロータ風車を構成する小型風車の個数
N	風車のブレードの枚数
r	半径方向距離
R	ロータ半径
Re_{rotor}	レイノルズ数（代表長さ＝ロータ直径）
Re_{chord}	レイノルズ数（代表長さ＝コード長）

P	風車出力
s	風車配置間隔
T_r	トルク
t	無次元時間（数値計算）
Δt	時間刻み（数値計算）
u	任意点の流速 主流方向成分
U_0	流入風速
U_{blade}	風車ブレードへの局所流入流速
U_{tip}	ブレード先端回転速度
v_θ	任意点の流速 円周方向成分
α	ブレードへの流入迎角
α_u	対流航空監査分における数値拡散項の重み
γ	ブレードのピッチ角
ρ	空気密度
λ	周速比
ω	ブレードの角速度

第1章 序論

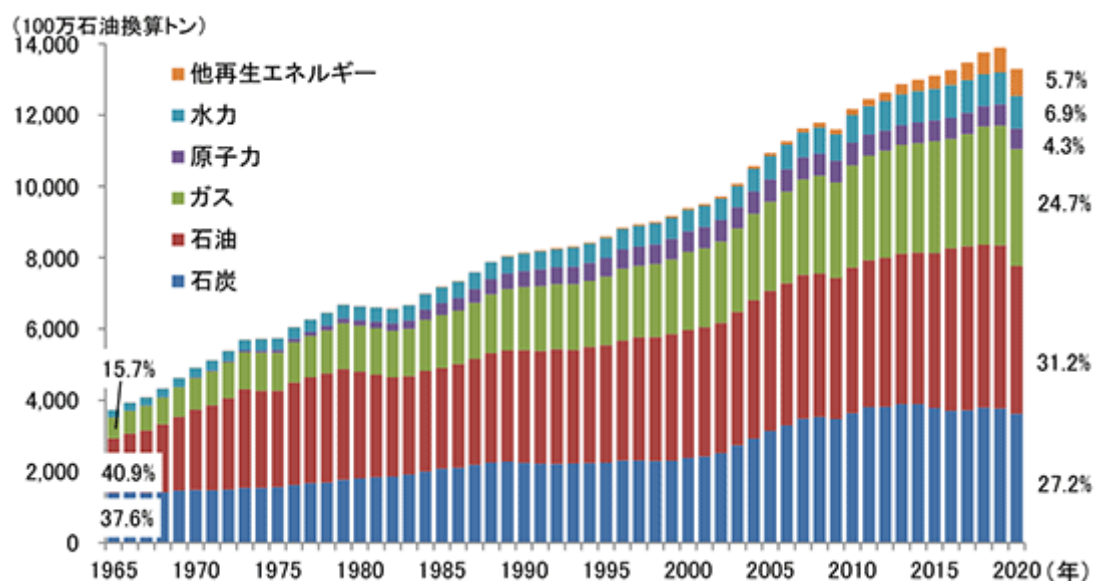
1.1 研究背景

1.1.1 エネルギー需給の動向

人類は、生活スタイルとともにエネルギー利用を徐々に多様化させてきた。約 50 万年前の薪などによる火の利用から始まり、移動や農牧への水力や風力利用など幅広く用いてきた。しかしそのエネルギー消費量および利用用途は非常に限られたものであった。18 世紀に入り産業革命がおこると、石炭をエネルギー源とする蒸気機関が動力源として利用されるなどして工業化が進展し、エネルギー使用量が急速に増加するとともにエネルギーの利用用途も広がった。これに従い、エネルギー源にも一層の汎用性が求められるようになった結果、20 世紀中ごろより使い勝手の良い石油が大量に消費されるようになった。このような化石燃料に頼ったエネルギー開発が進められていった結果、生活水準や公衆衛生が向上し、より一層のエネルギー消費量の増加をもたらしていった。図 1.1 に世界のエネルギー消費量^[1]を示す。図 1.1 より化石燃料のシェアは常に高い状態であることがわかる。化石燃料の燃焼によって排出される二酸化炭素などの温室効果ガスは、解決が急務とされる地球温暖化の原因である。この問題に対して、パリ協定では今世紀後半に温室効果ガスの排出量を実質ゼロにするという長期削減目標が示された。

日本のエネルギー消費量においても、傾向は世界のエネルギー消費量と同様である。図 1.2 に日本内でのエネルギー供給推移^[2]を示す。図 1.2 より 2020 年度での化石エネルギー消費量は約 85%もあることが分かる。日本はエネルギー自給率が 11.2%と他の OECD 諸国と比較してもかなり低い水準であり、エネルギー資源の大部分は海外に依存している。

これらの問題を解決するため化石燃料を必要としないクリーンで再生可能なエネルギーの供給形態が必要とされている。再生可能エネルギーは純国産エネルギーとして自給ができるという点で、エネルギーセキュリティの観点からも大きな意義がある。



(注) 端数処理の関係で合計が 100%にならない場合がある。

出典：BP「Statistical Review of World Energy 2021」を基に作成

図 1.1 世界のエネルギー消費量推移

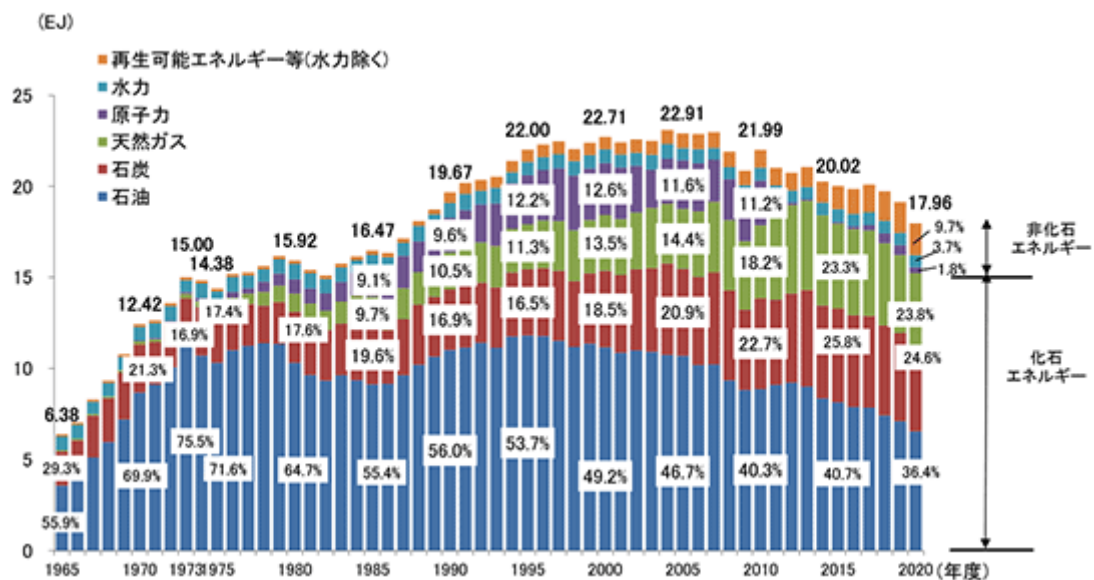


図 1.2 国内のエネルギー供給の推移

1.1.2 再生可能エネルギー

化石燃料といった限りがあるエネルギー資源と違い、一度利用しても比較的短期間に再生が可能であり、資源が枯渇しないエネルギーのことを再生可能エネルギーという。太陽光や太陽熱、水力、風力、バイオマス、地熱などのエネルギーがある。図 1.3 に日本国内での自然エネルギー及び原子力の発電量の割合と推移のグラフ^[3]を示す。2011 年の東日本大震災での原発事故以降、原子力発電が大きく低下してきている一方、原子力発電に代わる手段として再生可能エネルギーの発電量は増加してきているが、2017 年度における再生可能エネルギー発電の割合は 16.7%と低い水準に留まっている。図 1.4 には世界の発電供給割合の図^[4]を示す。日本に比べるとカナダやヨーロッパ圏の多くの国が再生可能エネルギーの割合において高いことが分かる。

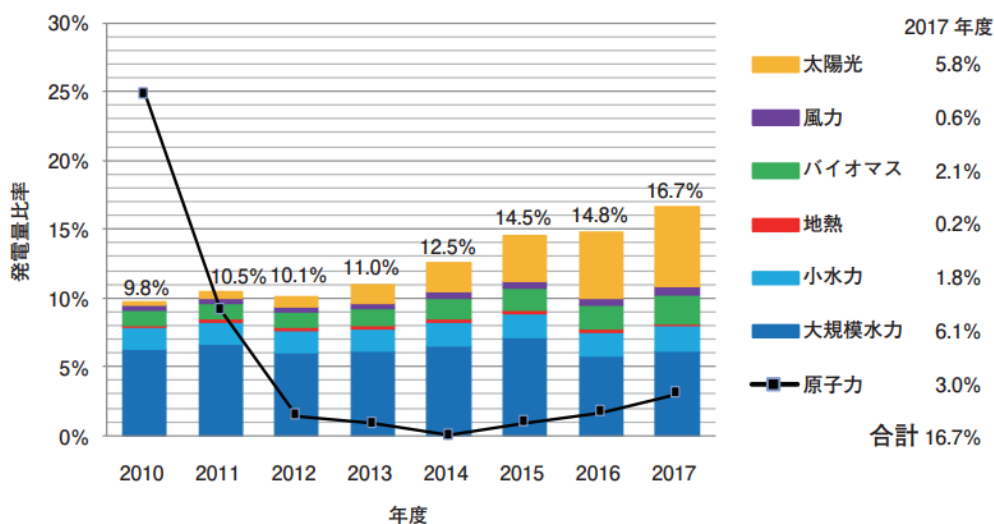


図 1.3 国内の自然エネルギーおよび原子力の発電量の推移^[3]

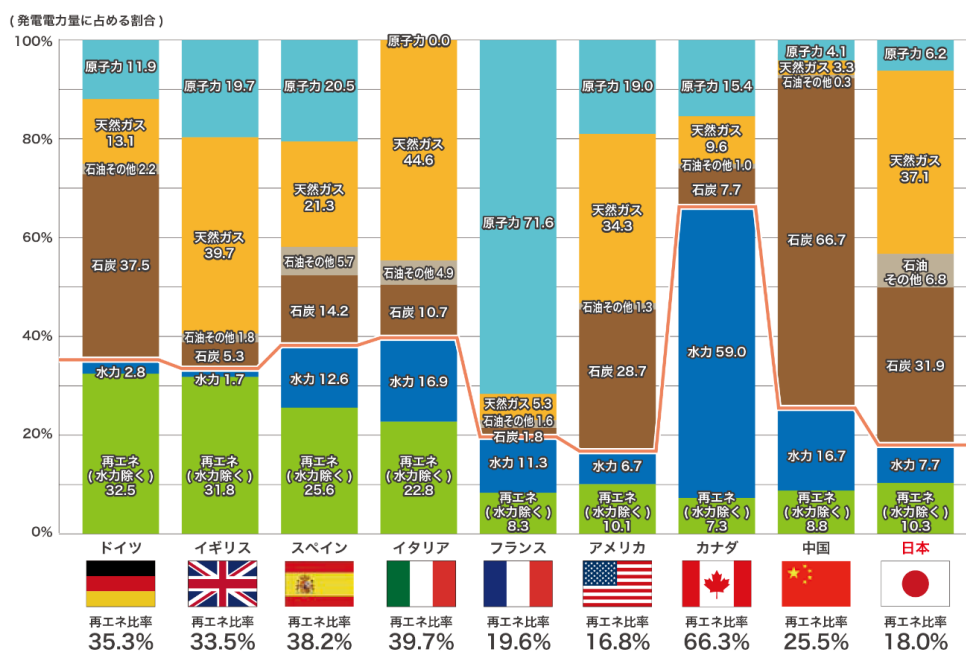


図 1.4 世界の発電供給割合^[4]

1.1.3 風力エネルギー

我々はこの再生可能エネルギーの中でも発電に伴う二酸化炭素の生成がなく、比較的発電コストが低いことが特徴(図 1.5^[5])の一つである風力発電に注目した。風力発電で用いる風は地球上のどこにでも存在するユニークなエネルギーであるため、エネルギー源を能動的に準備する必要はない。図 1.6 に再生可能エネルギーへの投資動向^[1]を示す。図 1.6 からわかるように風力発電への投資額は太陽光に次いで 2 番目に高く、増加傾向にあることが分かる。日本は急峻な土地が多く、風車建設の適地選定が難しい地域が多いが周囲を海に囲まれているため洋上風力発電への導入に期待が高まっている。(図 1.7)

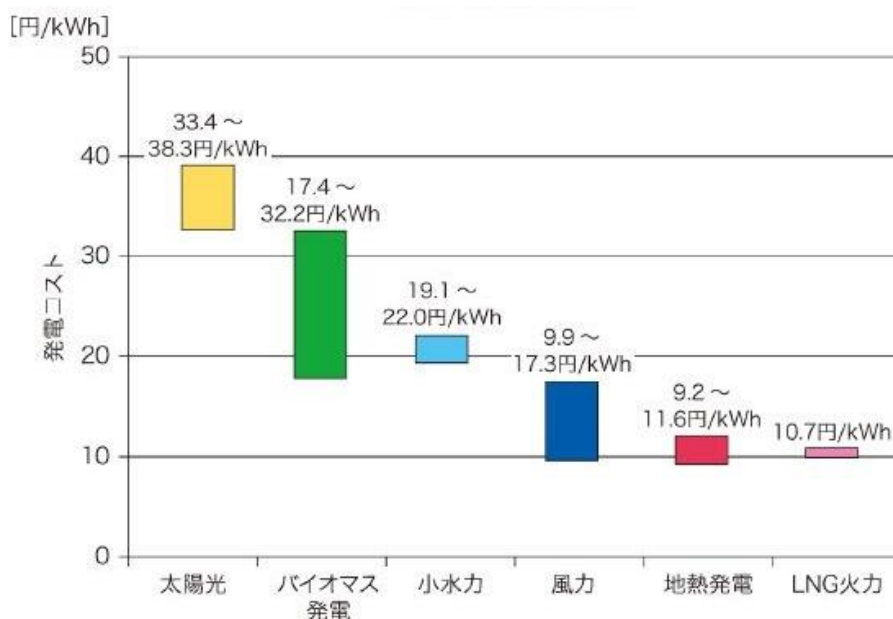


図 1.5 発電手法別の発電コスト^[5]

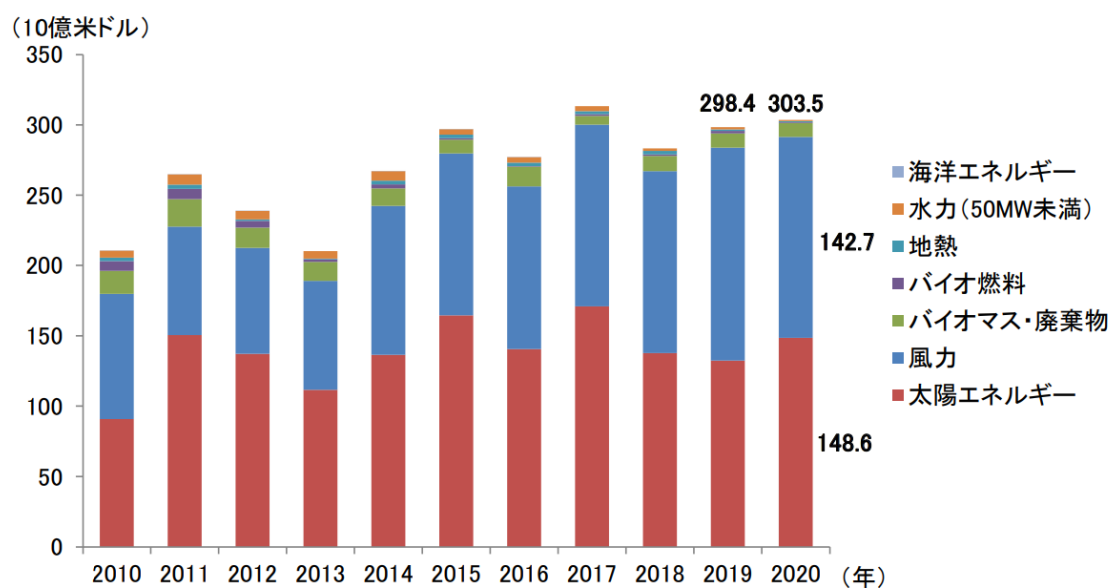


図 1.6 再生可能エネルギーへの投資動向^[1]

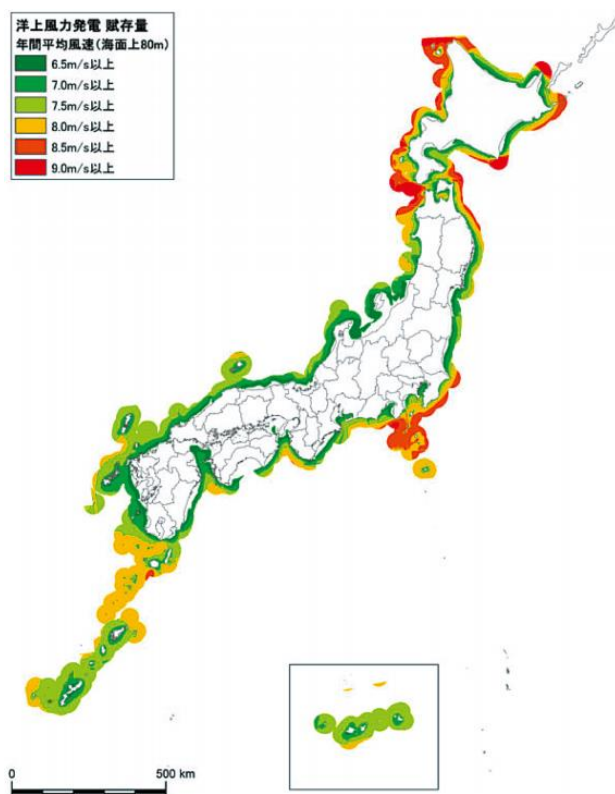


図 1.7 国内の風力ポテンシャルマップ^[5]

1.1.4 風車の大型化

風力発電に用いられる風車は、表 1.1 に示すように定格出力によってマイクロ風車、小型風車、中型風車、大型風車に分類することができる。今日、風力発電は発電出力を増加させるため風車サイズ

の大型化が進んでいる。これは風車の発電出力 P が式(1.1)で定義されるように受風面積 A に比例するためである。なお式中の ρ は空気密度、 U_0 は近寄り風速、 C_p は出力係数を表している。図 1.8 は風車サイズの推移^[6]を表している。19 世紀ごろには 100m 未満であった風車も現在ではエッフェル塔と同じほどの高さまで大きくなっている。

さらなる風力発電導入容量拡大のためにも大型化は主流であるが、それに伴う問題も顕在化してきている。メンテナンスや運搬といった技術的問題や騒音、バードストライクといった社会的問題である。図 1.9 はブレード運搬時の様子を表した写真であるが、このように巨大な翼を運ぶには様々な困難が伴う。また製造コストや構造強度面でも問題が浮上してきている。長大なブレードを用いた場合、風荷重に耐えられるだけの強度が必要になり、ブレードの形状を広く、厚くする必要がある。また、コスト面でも発電出力が受風面積に比例する(翼長の 2 乗則)のに対して、ブレードの質量が体積に比例(翼長の 3 乗則)してしまうため、大きくすればするほどコスト当たりの発電性能が悪くなってしまうのである。現在、最新の材料技術によって支えられてきたが 10MW 以上の定格出力の大型風車では限界が見えつつあるということが G.Siero ら^[7]の研究から明らかになっている。

表 1.1 定格出力による風車の分類

風車の種類	定格出力
マイクロ風車	1kw 未満
小型風車	1~50kW 未満
中型風車	50~1000kW 未満
大型風車	1000kW 以上

$$P = \frac{1}{2} \rho U_0^3 A C_p \quad (1.1)$$

Evolution of wind turbine heights and output

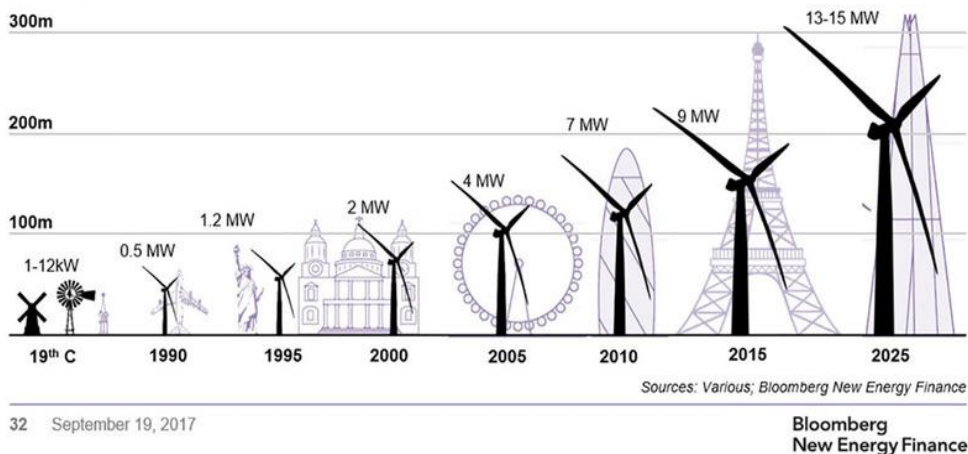


図 1.8 風車サイズの推移^[6]



図 1.9 ブレード運搬時の様子

1.1.5 マルチロータシステム(MRS)

風車大型化によって起こる問題の解決策の一つとしてマルチローター風車(MRS)が提唱されている。MRS とは同一鉛直平面上に複数基の風車をまとめて配置したものである。図 1.10 に MRS の例を示す。図 1.10(a)は当時建設業界の権威であった H. Honnef が 1932 年に構想した風車である。翼の重量化を避けるために小容量風車を三角形に配置しているが、実現には至らなかった^[8]。1970 年代には Heronemus^[9]により洋上浮体で用いられる MRS が考案され 1980 年代には Lagerway Wind 社によって図 10(b)のような二枚ブレード風車を 4 基設けた 300[kW]の MRS が作られ、Maasvlakte 工業地帯に約 15 年間設置されていた^[10]。2016 年には、図 1.10(c)のようにデンマークの Vestas 社が 1 基当たりの直径 116m の発電量 225kW の風車を 4 基配置させた MRS の試作機を建設した^[11]。

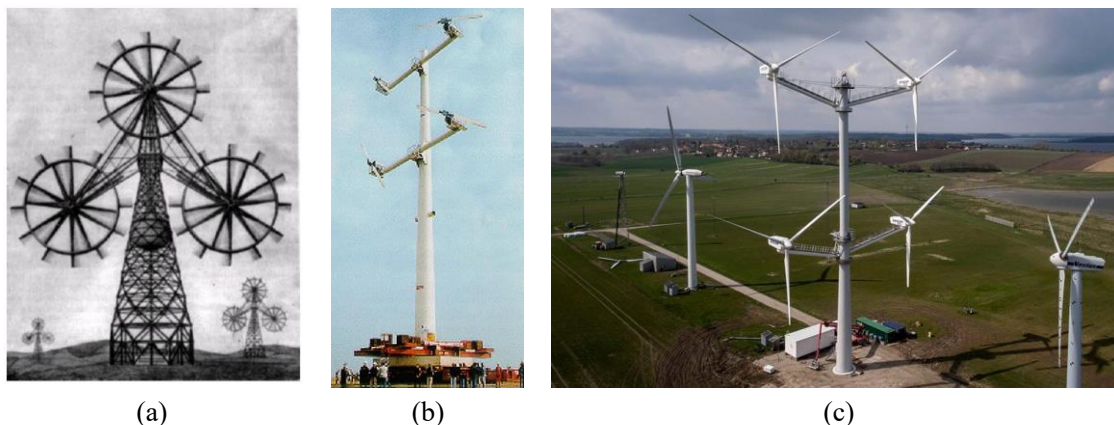


図 1.10 マルチローター風車(MRS)

Jamieson ら^[12]によると, MRS の利点を次のように説明することができる. 図 1.11 は 1 基の大型風車に対して, 同等の出力を得られるように 9 基の小型風車で構成された MRS である. この大型風車と MRS は受風面積が等しいため, 得られる出力も同等であるといえる. 大型風車の質量は, 小型風車を 3 方向に 3 倍拡大したものであるため小型風車 1 基の 27 倍(3^3 倍)となっているのに対し, MRS では小型風車 9 基分の質量になるので, 同じ出力に対して 3 分の 1 の質量となっている. このように大型風車のロータ質量を M , 小型風車のロータ質量を m , 構成する小型風車の個数を n とすると, 質量は以下の式のように $1/\sqrt{n}$ 倍になる.

$$m = \frac{1}{\sqrt{n}} M \quad (1.2)$$

実際には小型風車間の支持構造の部分などもあり, この式通りにはならないが, 質量削減には大きく貢献すると考えられる. Verma^[13]によるマルチローターの設計の研究では, 発電出力 5MW の風車単体と 1.67MW の風車 3 つの MRS を比較した場合, MRS の方が風車単体よりも重量, コストともに低くなると述べられている. 他にも MRS では, 多数の小型風車に風荷重が分散されることによる風車全体への風荷重の平滑化や騒音の低減^[14], ユニット化された小型風車を大量に製造することによるコスト削減, 風車設置場所への運搬を容易にするといったメリットも実現可能であると考えられる.

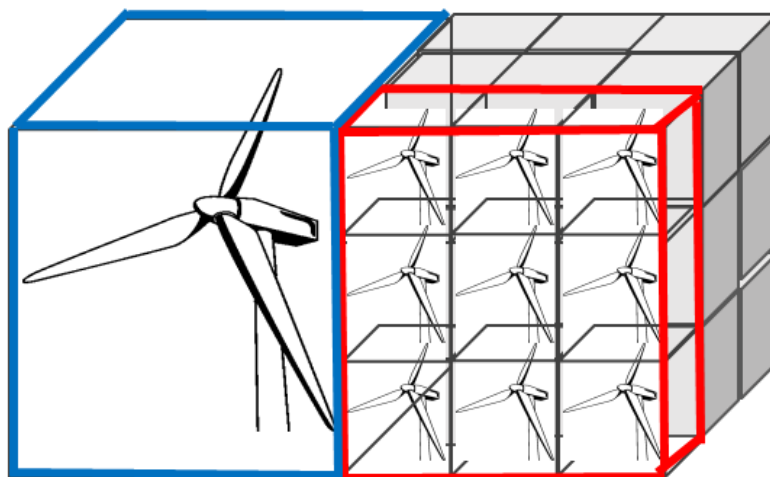


図 1.11 マルチローター風車の受風面積と体積の内訳

空力性能においては、Smulders ら^[15]による実験が行われており、マルチローター風車を構成する小型風車同士を適切な間隔で配置することで発電出力の上昇が得られることが示されており、適切な配置間隔であれば全体の出力が上昇する可能性を示唆している。この他にも、Ransom ら^[16]によって7基の小型風車から構成された MRS の風洞実験が行われており、可視化実験や7基のうちの2基のみを発電可能状態にして残りは固定した状態での出力などを測定している。数値計算では Chasapogiannis ら^[17]によって7基の MRS の数値計算が行われており、MRS のほうが同じ風車の単体配置よりも風車1基当たりの発電出力が2~3%増加するという結果が得られている(図 1.12)。

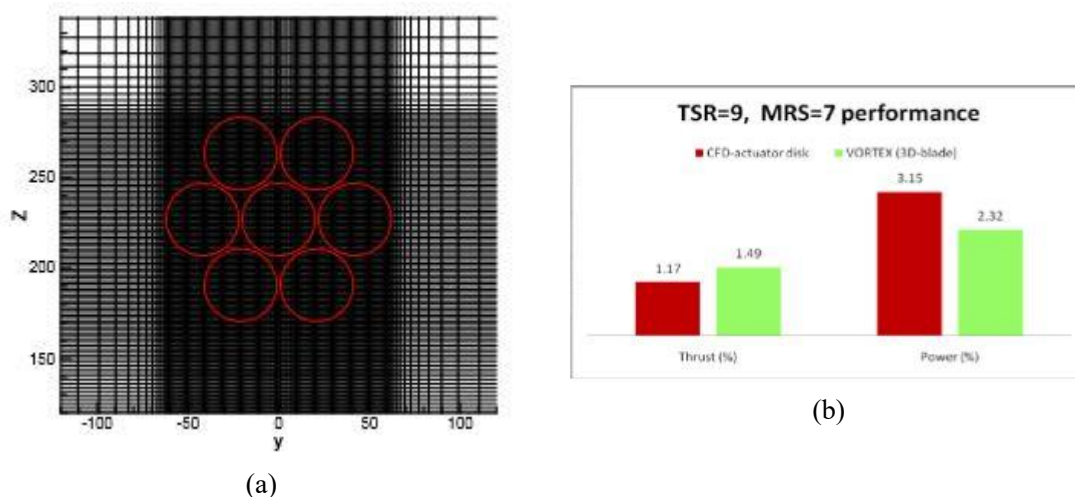


図 1.12 Chasapogiannis らによる数値計算(a:グリッド図, b:計算結果)^[17]

1.1.6 レンズ風車

Ohya^[18]らは、通常の風車と比べて高効率である、つば付きディフューザ風車(通称:レンズ風車、図 1.13)を開発した。レンズ風車とは、風の入り口から出口に向かって広がる筒(ディフューザ)と出口周

辺につばがついた”風レンズ“を風車周りに取り付けた風車である．このディフューザとつば(以下，集風体)によって風レンズの後方に渦が発生し，圧力が低下することで入口付近の風速が増加し，発電量の増加を得ている(図 1.14)．他にもレンズ風車には多くの利点があり，それらを以下に示す．

(1) 高効率

集風体の効果により，同じロータ径の通常風車に比べて 2~3 倍の出力増加が得られる．

(2) 静粛性

ブレードと集風体(レンズ)との流体力学的相互作用で，翼の先端から発生する翼端渦を抑制するため，風切り音がほとんどせず静粛性を保つ．

(3) 景観性

尖った先端をもつブレードがむきだしでまわる従来の通常風車と違い，ブレードを囲んでいる丸い集風体(レンズ)による柔らかなイメージは景観を損なわないコンパクトなもので，周りの風景に溶け込みやすい．

(4) 制御性

風見鶏効果により自動的に風上の方を向く(パッシブヨー)．

(5) 安全性

回転体周囲に構造体があるため，事故時のブレード飛散を抑制する．ブレードまわりに構造体があるため視認性がよく，バードストライクの回数が少なくなる．また集風体頂部に避雷針を設置することで，雷害を回避できる．

このような利点がある一方で，集風体が付加されることによる風車重量の増大，つばの存在による風荷重の増大などの短所が挙げられる．これらの問題の対策としてレンズ支持構造の検討などが行われている．^{[19][20][21]}



図 1.13 100kW レンズ風車

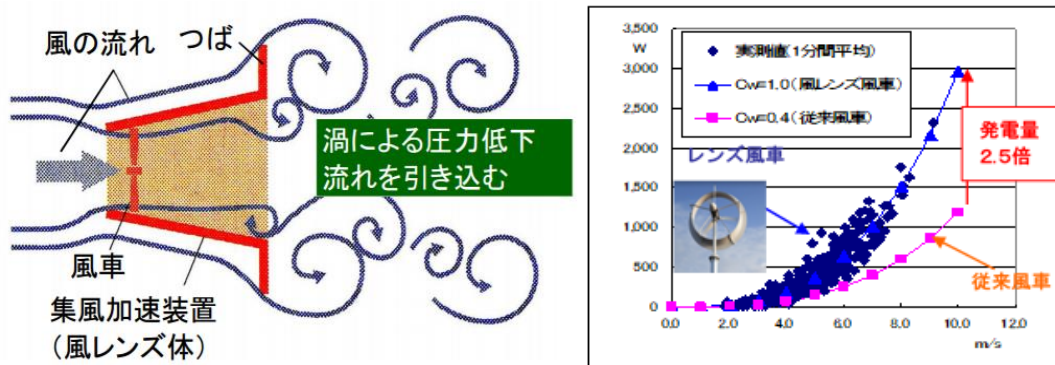


図 1.14 レンズ風車の基本原理

1.1.7 マルチレンズ風車

九州大学応用力学研究所では、風車システムの更なる高効率を目指して上記のマルチローター風車とレンズ風車を組み合わせた“マルチレンズ風車”の開発に取り組んでいる(図 1.15)。それぞれの利点を合わせることで、相乗効果による発電出力の向上を期待している。具体的には隙間流れの加速によるものである。通常マルチローター風車と異なり、マルチレンズ風車では風車の集風体によるブラフボディ同士で明確な干渉が起こるため、風車同士でのブロッキング効果による風車間の流速増加が大きくなり、発電出力がより増加すると考えられる。密集して配置された三次元物体の周りで起こる流れは複雑で不明な点が多く、あまり多くの研究は行われていない。



図 1.15 マルチレンズ風車(左：9KW マルチレンズ風車 右：9 基構想図)

当研究室では、マルチレンズ風車に関する研究が以前から行われており、発電出力に関する研究は大屋^[22]、Göeltenbott^[23]らによっていくつか行われた。Göeltenbott らはレンズ風車を用いた三角形配置、並列配置に関して出力の計測を行い、限られた条件を除き単体の場合と比べて出力が向上することを確認している。

またレンズ風車のマルチローター化は、発電出力上昇に影響すると同時に風車の受ける抗力にも影響するため抗力に関する研究もおこなわれている。中野^[24]は翼単体の場合とレンズ風車の場合における三角形配置での出力および風速分布への影響の調査とそれぞれの最適距離の研究を行った。宗像^[25]は複数の集風体 CiiB5 と CiiB10 を用いて、並列配置以外の平面配置における出力・抗力の増加率について検討を行った。森山^[26]は集風体 CiiB10 を用いたレンズ風車で 5 基配置における出力係数と抗力係数増加率を測定した。David^[27]は集風体 CiiB7.5 のレンズ風車 7 基を用いて、平面配置とスタガード配置における出力係数の測定を行った。

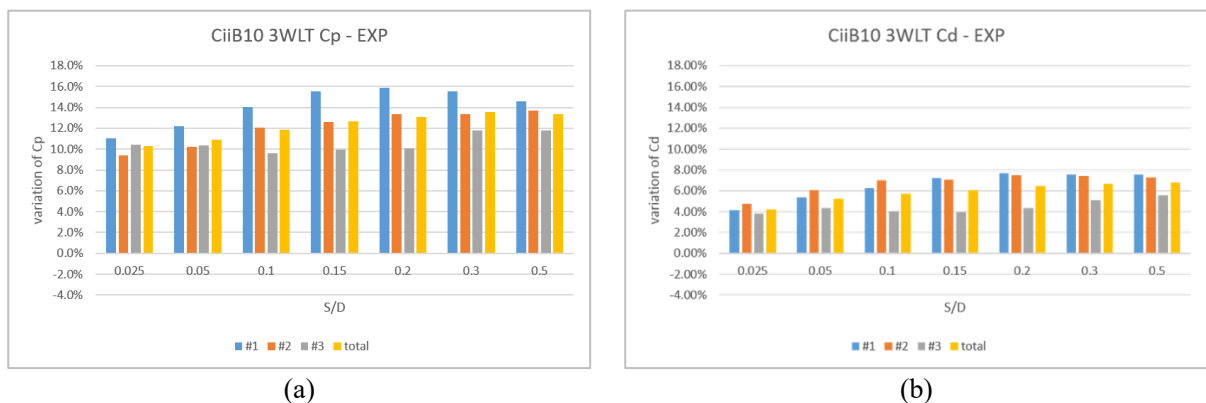


図 1.16 レンズ風車を 3 基並列配置にした場合の各風車と全体の係数変化率^[25]

(a：出力係数 b：抗力係数)

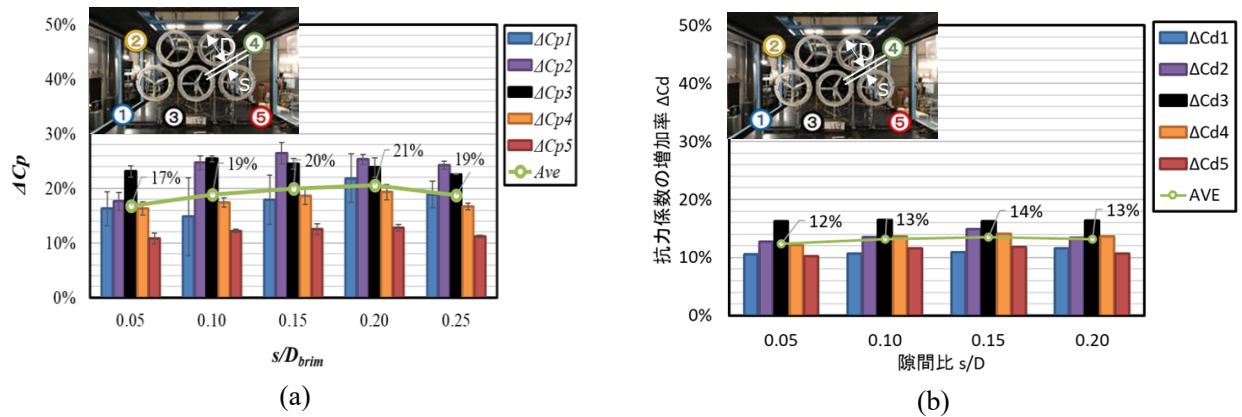


図 1.17 レンズ風車を 5 基配置した際の出力係数と抗力係数増加率^[26]

(a : 出力係数 b : 抗力係数)

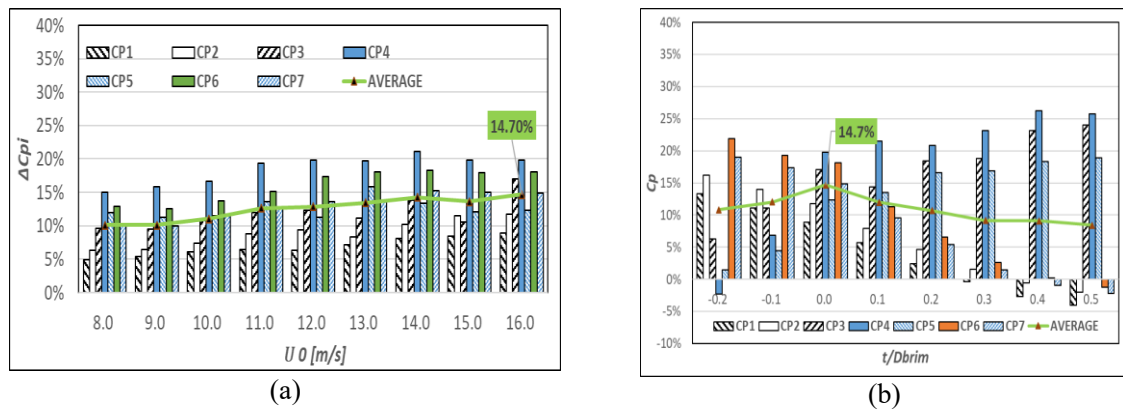


図 1.18 レンズ風車を 7 基配置した際の出力係数^[27]

(a : 平面配置 b : スタガード配置)

1.2 研究目的

先行研究ではレンズ風車のマルチロータ化によって単基風車に対し、出力の増加することが分かっており、風車間隔を変化させ出力が変動する結果が得られている。しかし、出力の増加に関して、風車基数を増やすことによる風洞内でのブロッケージによるものか、完全に否定できていない。また風車間隔についても近接させた状態付近のパターンでのみ実施されており、風車間隔がかなり広い場合での出力試験は行われていない。また、設定された風洞内風速が低く、実装されるレンズ風車の条件と比べ Re 数が小さいことが課題となっている。

本研究では、レンズ風車のマルチ化によって出力が向上する要因を考察するため、2 基にマルチ化したレンズ風車の特性に関して、風洞実験及び、数値計算を用いて研究を行う。マルチ化することによる出力向上が、ブローケージの影響では無く風車同士の干渉によるものか検証するため、風車間隔を変化させることで生じる発電出力や風車後流への影響を研究するとともに、風車後流の流れ場の解

明を行うことを本実験の目的とする.

1.3 論文構成

本論文の構成は以下のとおりである.

第2章

風洞実験手法について具体的に述べる. 実験で使用した装置を示し, 評価指標である出力係数の定義とその評価方法について述べる.

第3章

数値計算手法について, 支配方程式や境界条件について具体的に述べる.

第4章

風洞実験で得られた出力係数の結果を記し, 考察する.

第5章

数値計算で得られた出力係数と抗力係数についての結果を記し, 考察する.

第6章

本論文の結論をまとめる.

第2章 風洞実験手法

本章では，風洞実験で用いた装置や測定手法について述べる．

2.1 実験設備

本節では，風洞試験を行った風洞設備の詳細，および実験モデルについて記述する．

2.1.1 大型境界層風洞

風洞実験に用いた風洞は，九州大学応用力学研究所(Research Institute for Applies Mechanics : RIAM)が所有する大型境界層風洞である．図 2.1 及び表 2.1 に大型境界層風洞の仕様を示す．風洞の計測部は幅 3.6[m]×高さ 2[m]×長さ 15[m]となっており，風速 30[m/s]まで風速を任意に変化させることができる．6 つに分かれた測定部分の上流から数えて 3 スパン目に風車の模型を設置している．ブロッキング効果による影響を考慮して測定部の上流から 3～6 スパンの天板及び側壁を外している．環境条件である温度と大気圧は第 6 区間目の後ろの区間にある温度計と圧力計で測定している．2 スパン目に流入風速 U_0 を測定するための超音波風速計が設置されている．図 2.2 に超音波流速計の概観を示す．超音波流速計の仕様を表 2.2 に示す．

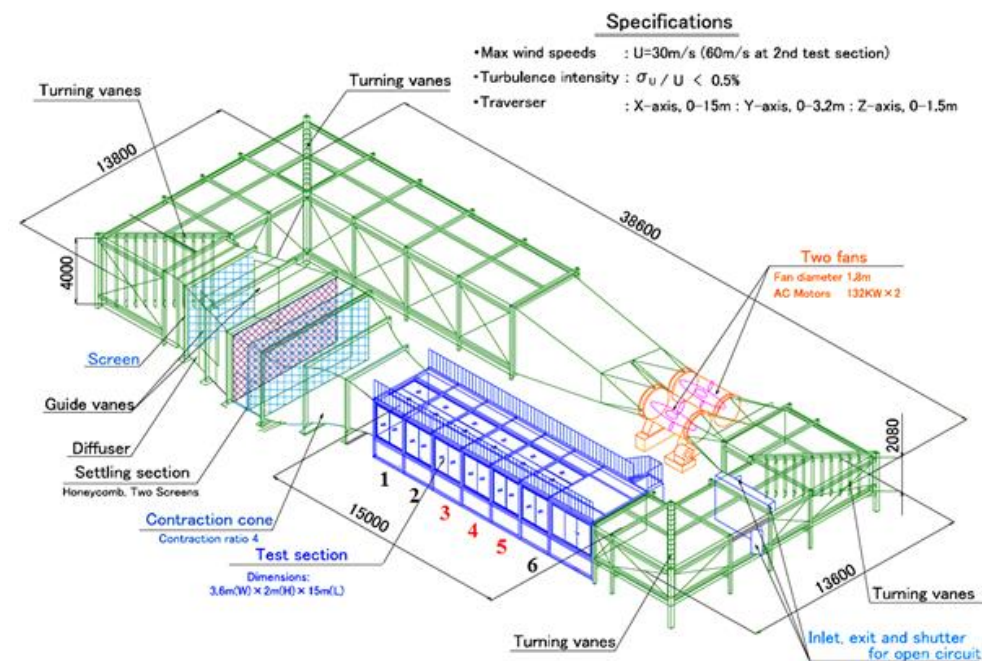


図 2.1 大型境界層風洞の概要図

表 2.1 大型境界層風洞の概要

装置名	地球大気動態シミュレーション装置
型式	単回路回流型
型番	ESWT - 3B
測定洞	幅 3.6m×高さ 2m×長さ 15m
風速範囲	0.5~30m/s
第 2 縮流洞	最大 60m/s
風速分布	±1%以下
乱れ度	0.5%以下
納入年月	1993 年 3 月
製作会社	株式会社 西日本流体技研

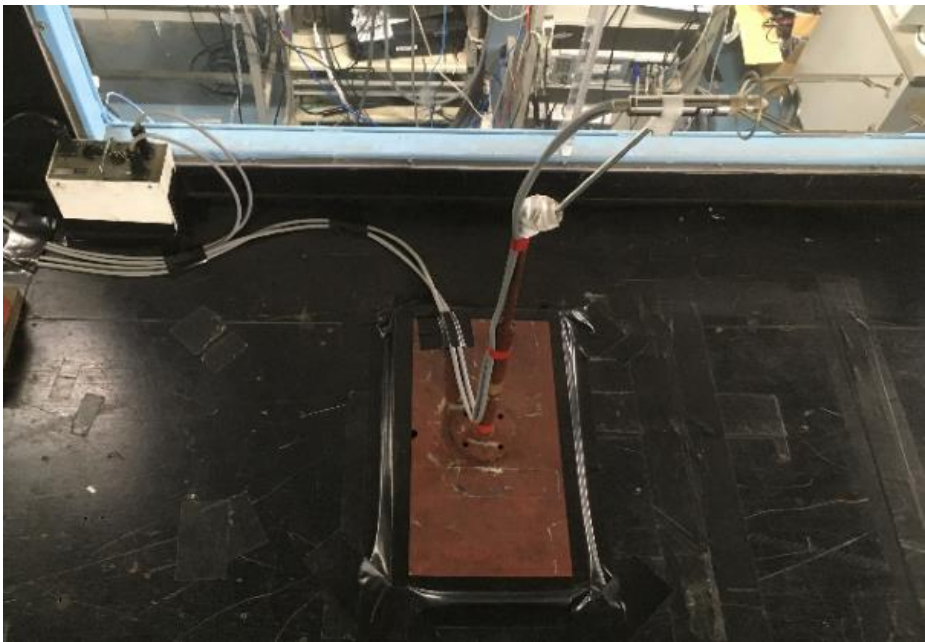


図 2.2 風洞上流側の超音波流速計

表 2.2 風洞上流に取り付けられた超音波流速計の仕様

装置名	: 超音波風速計
型番	: TR-90AH
測定方式	: 時分割送受切換型超音波パルス法
分解能	: 0.005m/s
測定範囲	: 0~20m/s
納入年月	: 2010 年 5 月
製作会社	: SONIC CORPORATION

2.1.2 実験に用いた風車模型

図 2.3 に実験で使用したレンズ風車の模型を示す．ロータ径は $D_{rotor}=442\text{mm}$ である．集風体はサイクロイド型ディフューザにスロート径内径の 7.5%のつばを取り付けた CiiB7.5 を用いており，外径 $D_{brim}=580\text{mm}$ である．図 2.4 に CiiB7.5 の断面形状とパラメータ図を示す．

図 2.4 に実験で使用したロータを示す．本実験では先行研究で使用されていた，アルミ製 MEL 翼を使用した．ロータの仕様を表 2.3 に示す．

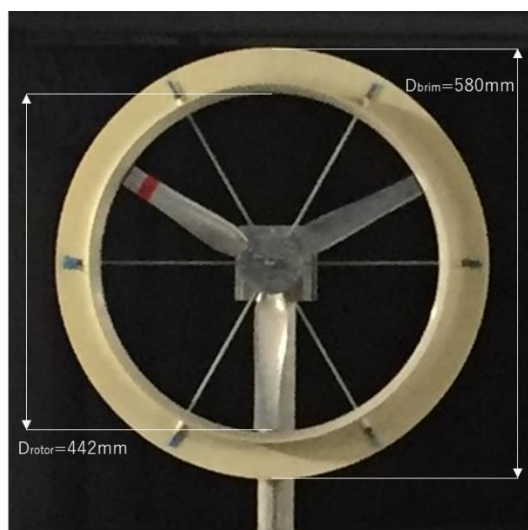


図 2.3 レンズ風車模型

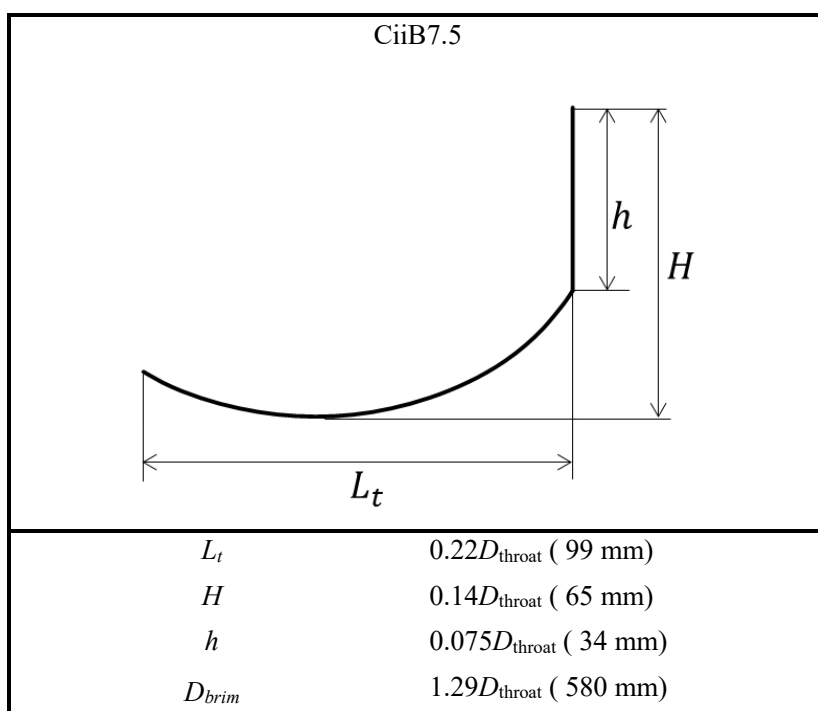


図 2.4 CiiB7.5 の形状



図 2.5 ブレード形状

表 2.3 ブレードパラメーター

材質	Aluminum
ローター直径	442 mm
ブレード半径	221 mm
ハブ直径	83 mm

2.1.3 パラメータ定義

風洞実験に用いるパラメータの定義を行う．これらのパラメータの定義は数値計算においても同様に用いる．

本実験では，上述した実験模型を図 2.6 のように 2 基配置し，風車同士の間隔を変化させていった際の出力の変動を測定した．各配置でのレンズ間の距離 s を集風体外径 D_{brim} で除したものを隙間比 s/D_{brim} と定義する．風洞実験概観図を図 2.7 に示す．

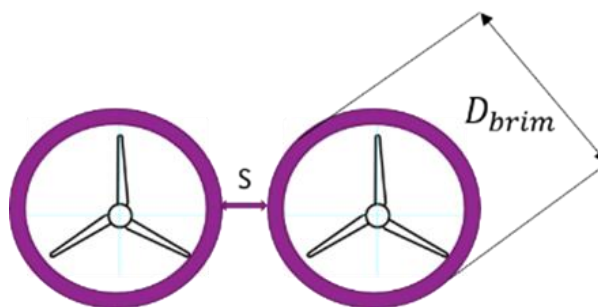


図 2.6 2 基配置時の風車間隔及び，集風体直径



図 2.7 風洞実験概要図

2.2 出力計測手法

2.2.1 出力係数

風車によって発生するパワー P はロータの角速度 ω と発生トルク T_r の積で得られる．これを無限遠方におけるロータ径の掃引面積のエネルギー流束で正規化すると，風車の発電効率を意味する出力係数 C_p が次式より導出される．

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_0^3 A} = \frac{T_r \times \omega}{\frac{1}{2}\rho U_0^3 A} \quad (2.1)$$

ここで U_0 は近寄り風速， ρ は空気密度， A はロータ面の受風面積を表している．

上述した C_p は集風効果によって出力が通常風車の何倍に増加したかを示す指標にもなる．

2.2.2 周速比

周速比 λ は風車の回転数を表す無次元数である．翼端の速度 U_{tip} と近寄り風速 U_0 の比として次式で与えられる．

$$\lambda = \frac{U_{tip}}{U_0} = \frac{R \cdot \omega}{U_0} \quad (2.2)$$

R はロータ半径である．

2.2.3 出力計測の概要

本実験では近寄り風速 U_0 を一定にし，入力としてACサーボモータの回転数を制御する．ロータの角速度 ω を入力として与えることで出力としてトルク T_r が測定される．回転数を制御した状態で風洞内に任意の風を発生させた場合，風のエネルギーにより風車はより回転数を上昇させようとする．しかしながら，サーボモータによって風車の回転数が制御されているため，サーボモータでトルクが発生し出力される．ここで，サーボモータによるトルク出力計測値とトルク計による出力値の比較を図2.8に示す．また，サーボモータで得られたトルクをもとに導出した出力係数と，トルク計によって得られた出力係数との比較を図2.9に示す．出力試験を行う風速17m/sにおけるサーボモータ及び，トルク計から出力されたトルク値及び出力係数は1.2%であることから，本実験ではトルク値はサーボモータから出力された値を用いて問題ないことが確認できる．よって，サーボモータで得られたトルクを風車の実際の出力として計測する．サーボモータによって検知されたトルク信号はA/Dコンバータ

ボードを経由し、PC 上にデジタルデータとして取り込まれる。トルク計測システムの概観図を図 2.10 に示す。また測定に用いた機器を表 2.4 にまとめ、外観図を図 2.11 に示す。計測時間は 30[sec]、サンプリング周波数は 500[Hz]とした。

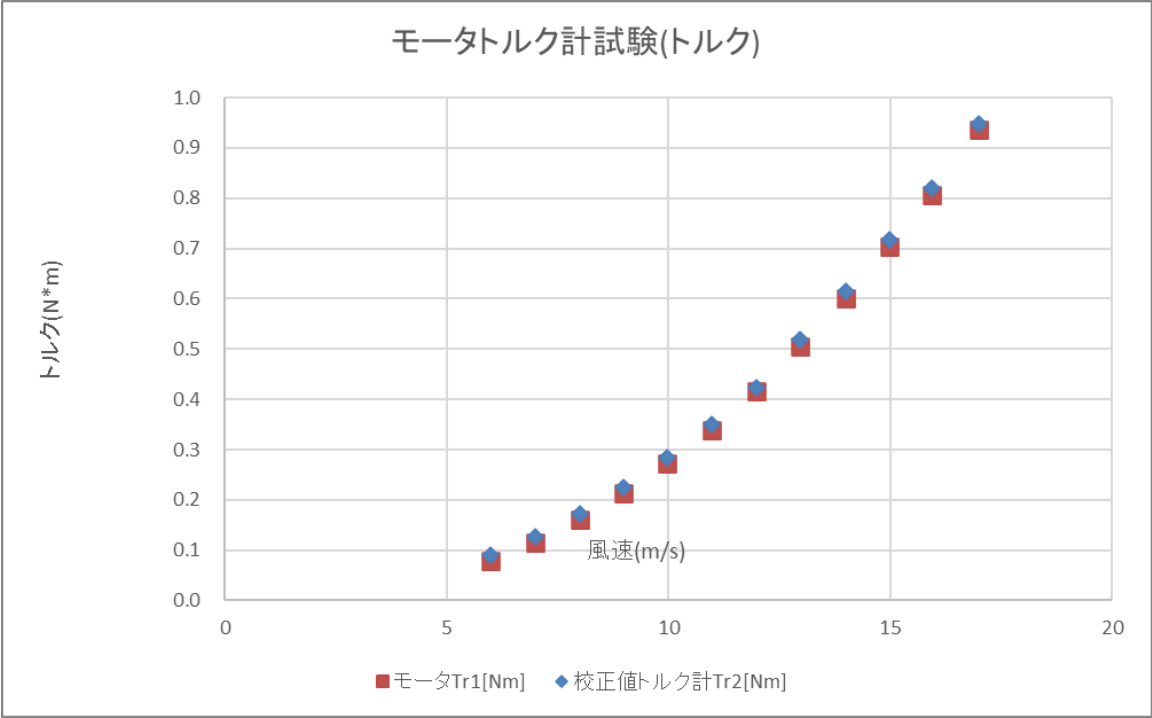


図 2.8 サーボモータのトルク出力とトルク計出力の比較

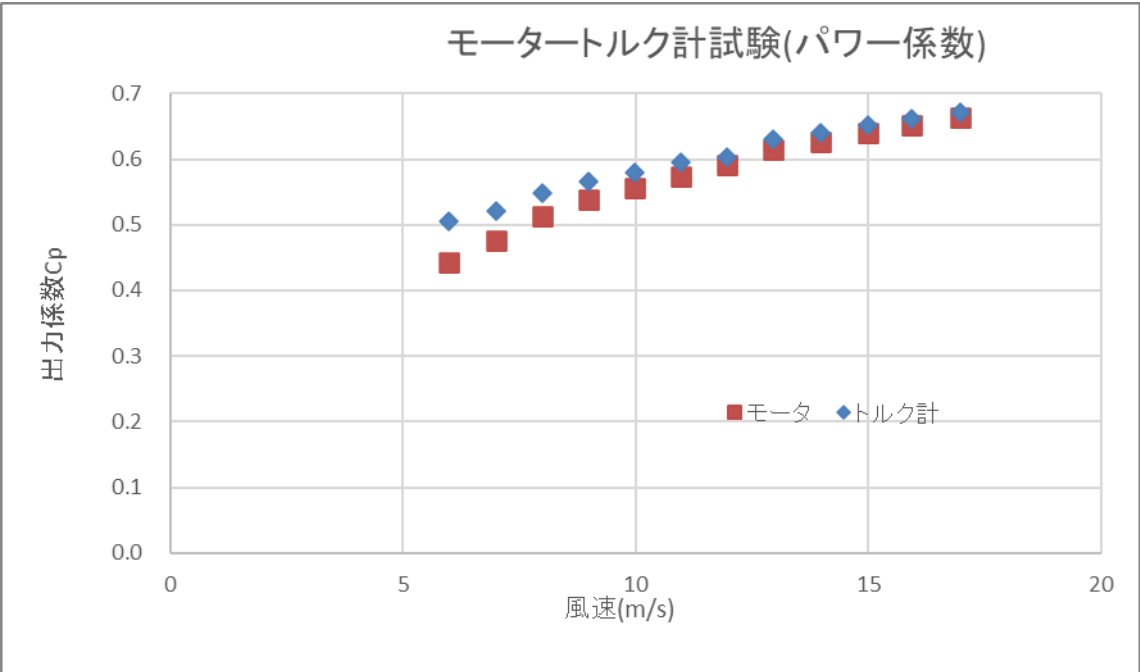


図 2.9 サーボモータのトルク値とトルク計出力値をもとにしたパワー係数の比較

表 2.4 出力計測に使用した機器

図番号	機器名	製造元	型番
(a)	AC サーボモータ	Oriental motor	NXM640A
(b)	データ設定機	Oriental motor	OPX-2
(c)	サーボアンプ	Oriental motor	NXD75-S
(d)	コンバータボード	株式会社インターフェース	TRM-7101

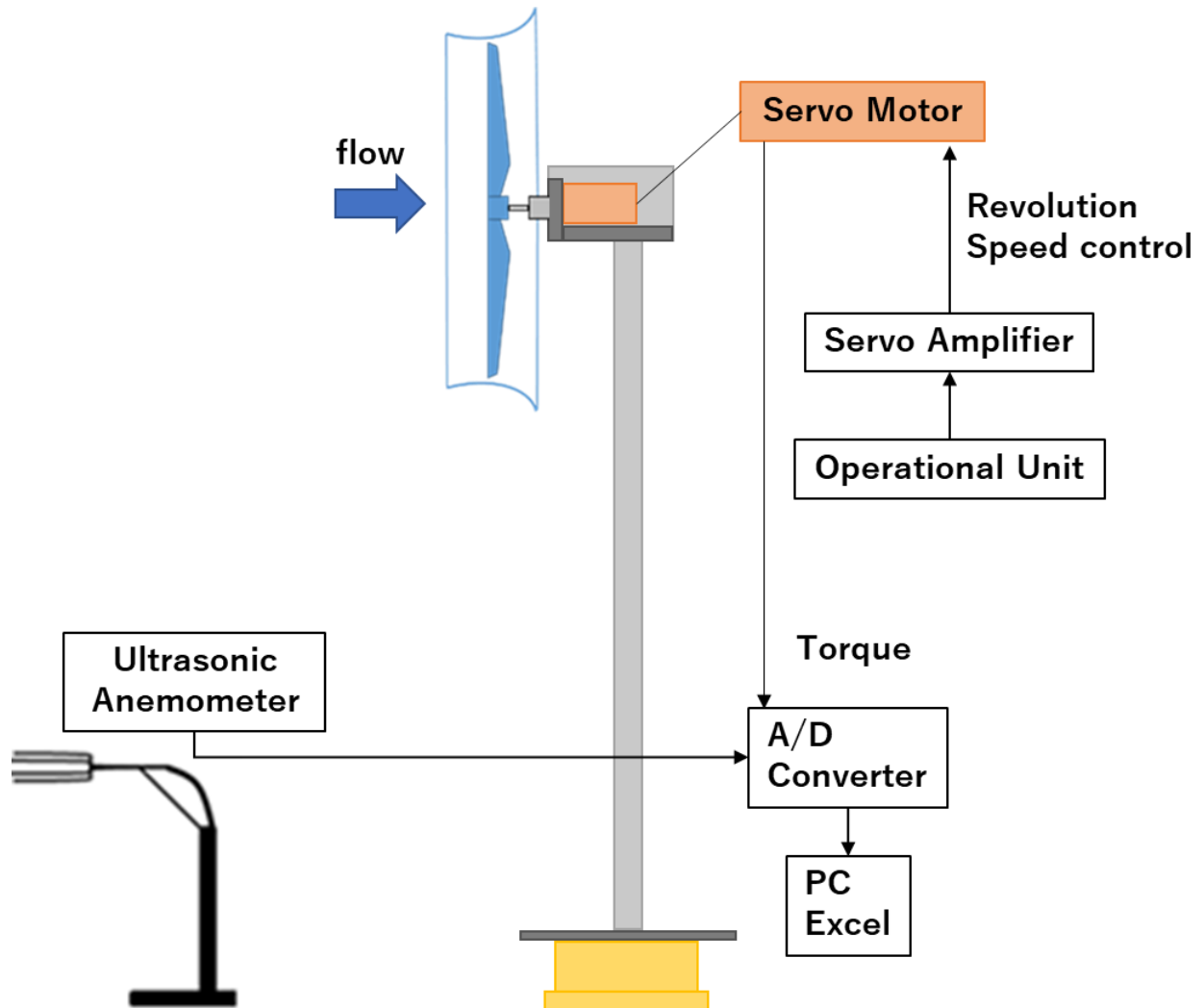


図 2.10 風車の出力計測の概観図

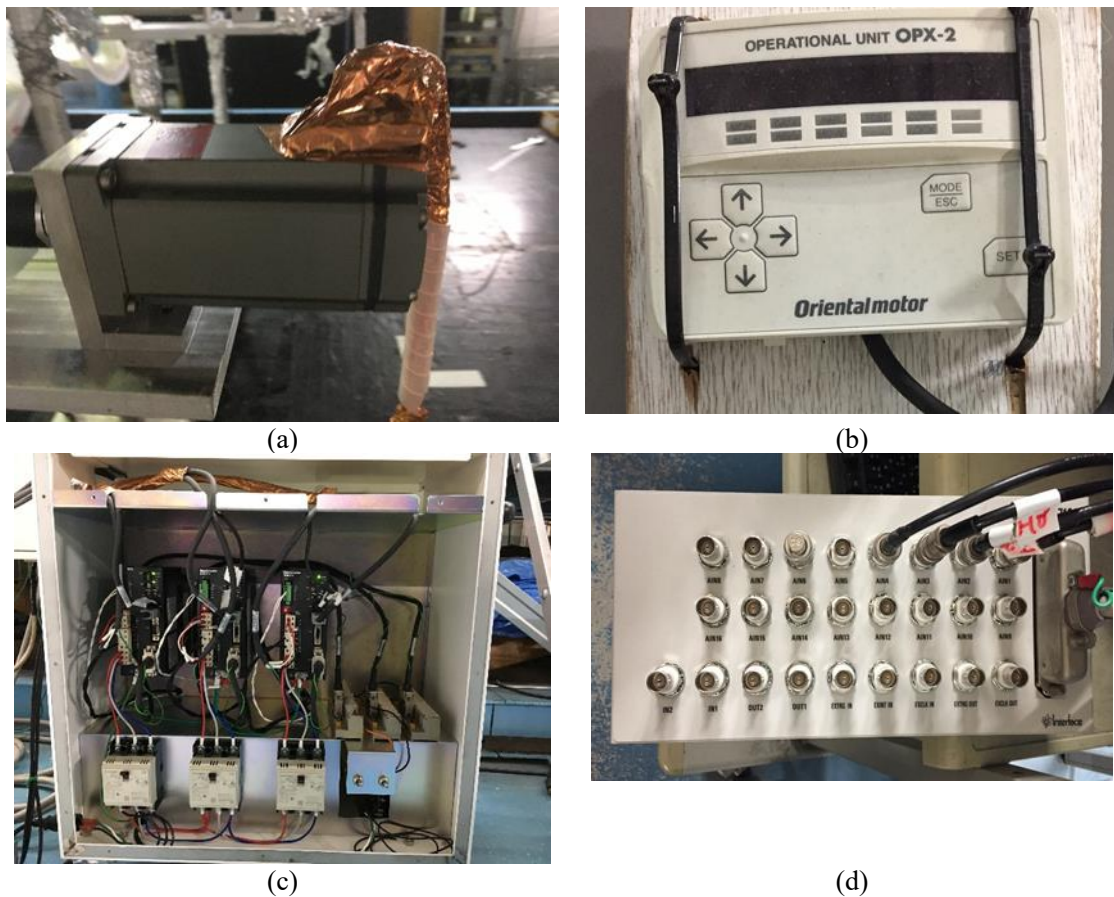


図 2.11 計測機器外観図

2.3 単体レンズ風車とマルチレンズ風車の性能評価

複数のレンズ風車によるスタaggerド配置での出力係数が、単体配置の出力係数と抗力係数からどれほど変化したかで風車を評価するため、各係数の変化率を算出した。比較における概念図を図 2.12 に示す。個々の風車における出力係数の変化率を ΔC_{pi} と定義した。単体配置の出力係数を $C_{pi,SA}$ とし、複数配置の出力係数を C_{pi} とするときそれぞれの増加率は以下の式で与えられる。

$$\Delta C_{pi} = \frac{C_{pi}}{C_{pi,SA}} - 1 \quad (i = 1, 2) \quad (2.4)$$

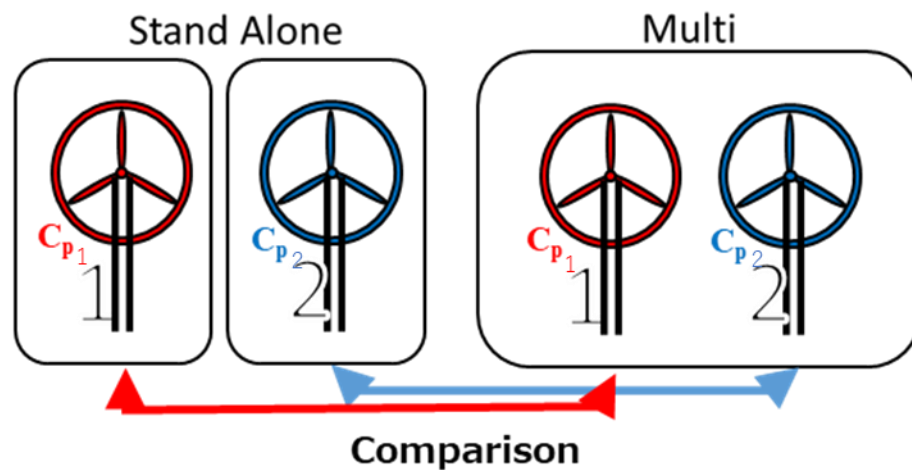


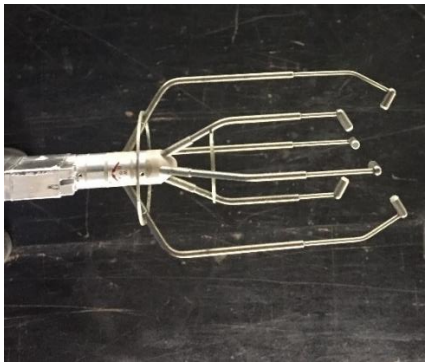
図 2.12 単体レンズ風車と 2 基レンズ風車の性能比較における概念図

2.4 風車後流測定手法

風速の測定には熱線流速計（I 型プローブ）及び、超音波流速計を使用した．静圧の測定には管直径 3mm かつ静圧孔直径 0.5mm の銅管を用いた．これら 3 つの機器をトラバースに装着し，3 次元的に移動できるようにした．熱線流速計からの信号はリニアライザを介したのち AD 変換を施して取得した．超音波流速計からの信号も同様に AD 変換を施して取得した．静圧管からの信号は，風洞建屋内の大気圧との差を圧力変換器に通してとっている．なおこれらの機器は風車の上流に設置された超音波風速計によって校正が行われた．計測時間は 10[sec]，サンプリング周波数は 500[Hz]とした．流速・静圧測定時に用いた周辺機器の仕様を表 2.5 に，概観を図 2.13 に示す．また後流測定機器の配置を図 2.14 に，後方を測定時の装置の概観を図 2.15 に示す．

表 2.5 流速・静圧測定に用いた機器

図番号	機器	製造元	型番
(e)	超音波流速計	SONIC CORPTATION	TR-90AH
(f)	I 型プローブ	KANOMAX	MODEL 0251R-T5
(g)	リニアライザ	NIHON KAGAKU KOGYO	MODEL1023 LINEARIZER
(h)	圧力変換器	SOKKEN	DPC-1
(i)	静圧管		



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

図 2.13 流速・静圧測定に使用した機器

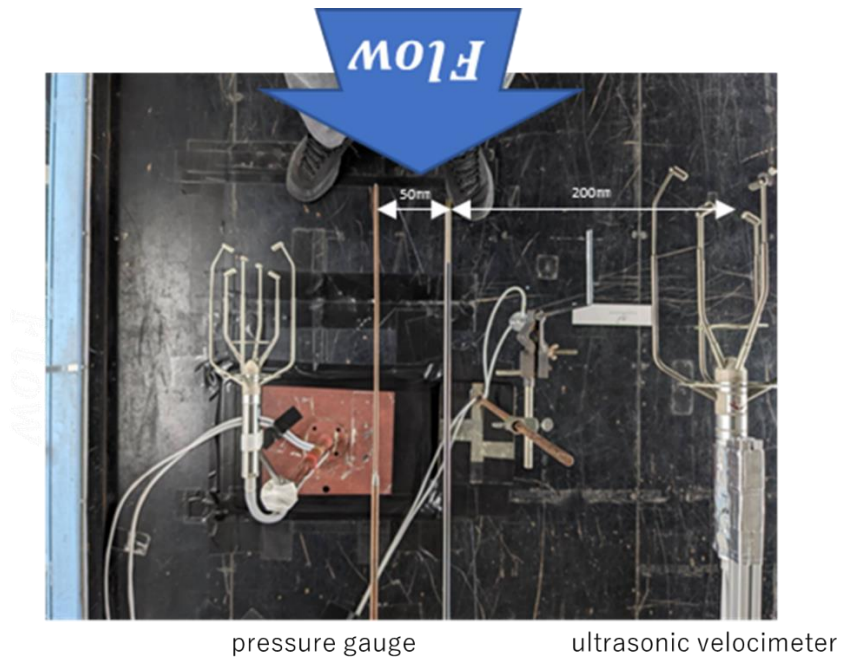


図 2.14 後流測定機器の配置図

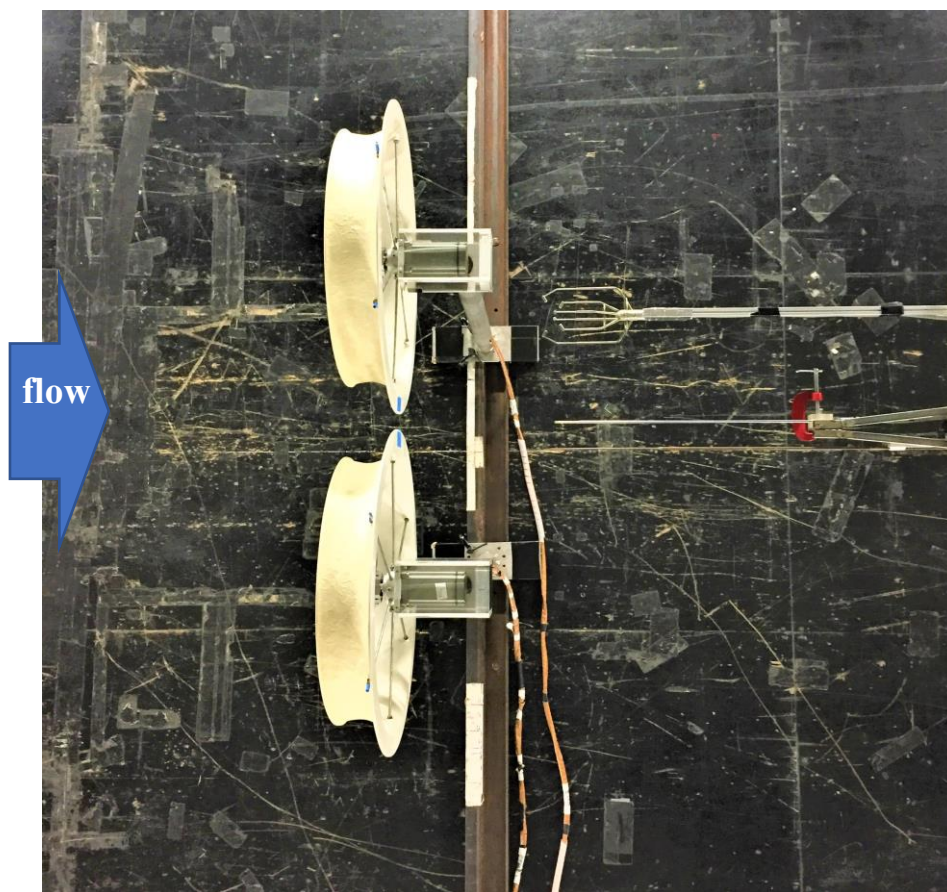


図 2.15 風車後方の流速・静圧測定時の概観

第3章 数値計算手法

本章では，本研究で用いた数値計算に関する LES 解析の手法を述べる．

3.1 基礎方程式

本研究で用いた解析プログラムは，九州大学応用力学研究所において開発された局地的風況予測シミュレータRIAM-COMPACT®をブラフボディ流れに適用したものであり，矩形格子近似法によるLES(Large Eddy Simulation)プログラムである．デカルト座標系の不等間隔スタガード格子に基づき，数値計算手法には有限差分法を用いる．支配方程式は非圧縮性の連続の式，3次元ナビエ・ストークス方程式である．ここで，主流方向，主流直交方向，鉛直方向を示す座標は x_i ($x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$)とし，流れの各方向成分は u_i ($u_1 = u$, $u_2 = v$, $u_3 = w$)とする．なお，重複する添え字には総和規約が適用される．

連続の式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3.2)$$

ここでレイノルズ数は風車のロータ径 D_{rotor} を代表長さ，流入速度 U_0 を代表速度として以下の式で定義する．

$$\text{Re} = \text{Re}_{\text{rotor}} = \frac{U_0 D_{\text{rotor}}}{\nu} \quad (3.3)$$

RIAM-COMPACT®は乱流モデルとしてLESを採用している．LESでは流れ場に空間フィルタ(空間平均)を施し，大小様々なスケールの乱流渦を計算格子よりも大きなグリッドスケール(GS)成分，それよりも小さなサブグリッドスケール(SGS)成分の渦に着目する．GS成分の大きな渦については，流れ場の影響を強く受けるため直接数値計算を行う．一方で，SGS成分の小さな渦が担う，主としてエネルギー消散作用についてはフィルタリング操作により生じたSGS応力を物理的考察に基づいたうえでモデル化して計算に取り入れる．差分法においては一般的に空間フィルタと微分操作の互換性が成

立するので、フィルタ関数を陽に与える必要はない．式(3.4)，(3.5)に空間フィルタを施して粗視化 (coarse graining)した連続の式とナビエ・ストークス方程式を示す．

連続の式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.4)$$

ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} + \nu_{\text{SGS}} \right) \bar{S}_{ij} \right] \quad (3.5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.6)$$

式(3.5)に含まれる ν_{SGS} はSGS粘性係数と呼ばれる．SGS粘性係数は唯一のモデルパラメータであり，本研究においてはSGSモデルに混合時間スケールSGSモデルを採用した．混合時間スケールモデルの定義式を以下に示す．

$$\nu_{\text{SGS}} = C_{\text{MTS}} k_{\text{SGS}} T_s \quad (3.7)$$

$$k_{\text{SGS}} = (\bar{u}_k - \hat{u})^2 \quad (3.8)$$

$$T_s = \left(\frac{\Delta}{\sqrt{k_{\text{SGS}}}} \right)^{-1} + \left(\frac{C_T}{|\bar{S}|} \right)^{-1} \quad (3.9)$$

$$C_{\text{MTS}} = 0.05, \quad C_T = 10 \quad (3.10)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (3.11)$$

混合時間スケールSGSモデルでは，大小様々なスケールの乱流渦を分離するフィルタ幅を，格子幅と等しく設定している．したがって，フィルタ幅は各方向の格子幅 $h_i(h_x, h_y, h_z)$ により以下のように定義する．

$$\Delta = (h_x, h_y, h_z)^{1/3} \quad (3.12)$$

式(3.4)から(3.12)がLES基礎方程式である．速度場と圧力場のカップリングアルゴリズムには，オイラー陽解法を基礎とした部分段階法を採用する．

RIAM-COMPACT®における時間発展スキームは部分段階法であり，各時間の速度場 u^n から次ステップの速度場 u^{n+1} を算出するプロセスを定式化する．

$$u^F = u^n + \Delta t \left[-(u^n \cdot \nabla)u^n + \frac{1}{Re} \nabla^2 u^n \right] \quad (3.13)$$

$$u^{n+1} = u^F - \Delta t \nabla p^{n+1} \quad (3.14)$$

ここで u^F はナビエ・ストークス方程式のうち圧力勾配項を除いて時間発展した部分段階の速度場であり，式(3.13)において[]内の第1項が対流項，第2項が粘性項を表している．ここから u^{n+1} を求めるには， p^{n+1} が必要である．連続の式より

$$\nabla \cdot u^{n+1} = 0 \quad (3.15)$$

となるので，式(3.14)中の圧力場 p^{n+1} はポアソン方程式

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\nabla \cdot u^F}{\Delta t} \quad (3.16)$$

を陰的に解くことで得られる．よって， u^{n+1} は，式(3.14)から得られる．

ナビエ・ストークス方程式(3.5)の空間項の離散化に関して，対流項には3次度風上差分を適用する．ただし，4次精度中心差分は補間法に基づき，4階微分の数値拡散項の重みは通常使用されるK-Kスキームの $\alpha_u=3$ に対して $\alpha_u=0.5$ として，その影響を十分小さくする．残りの空間項については2次精度中心差分を用いる．表3.1に数値計算手法概要を示す．

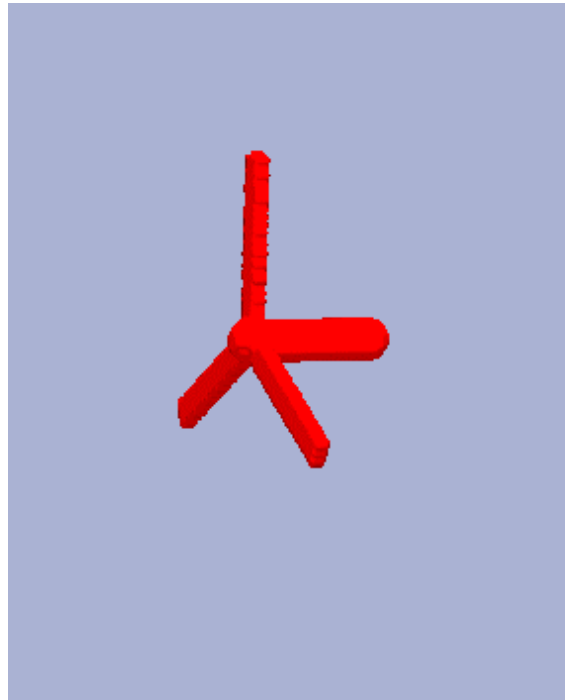
表3.1 数値計算手法概要

項目	適用条件
座標系	3次元直交座標系
乱流モデル	LES : Large Eddy Simulation
変数配置	スタガード配置
離散化手法	有限差分法(FDM)
カップリングアルゴリズム	部分段階法 (Fractional step method)
時間進行法	オイラー陽解法
圧力方程式の反復法	逐次緩和法 (SOR 法 : Successive Over-Relaxation method)
対流項	補間法に基づいた3次精度風上差分 (K-Kスキーム)

圧力項	2次精度中心差分
粘性項	2次精度中心差分
SGSモデル	混合時間スケールSGSモデル

3.2 ブレードの出力・抗力計算

水平軸型風車によって流体に作用する外力を，二次元翼素運動量理論に基づき定式化を行う．風車のブレードのモデルとして図3.1に示すアクチュエータラインモデル(Actuator Line model : AL model)を用いて近似することができる．本論文ではALモデルについて記述する．



アクチュエータラインモデル

図3.1 モデルにおける外力を与える領域

風車ブレードの半径方向断面翼素への流入風と，それにより発生する空気力を図3.2に示す．無限遠方の一様流は x 方向，風車の回転は θ 方向である．風車ブレードに対する流入風速 U_{blade} および迎角 α については次式が成り立つ．ここでスパン位置 r におけるピッチ角 g はブレードの形状から決定され，ブレードの角速度 $\dot{\theta}$ は既知量として与えられる．よって風車ブレードに対する流入風速 U_{blade} および迎角 α は流速 u_x ， u_θ を用いて次式で表される．

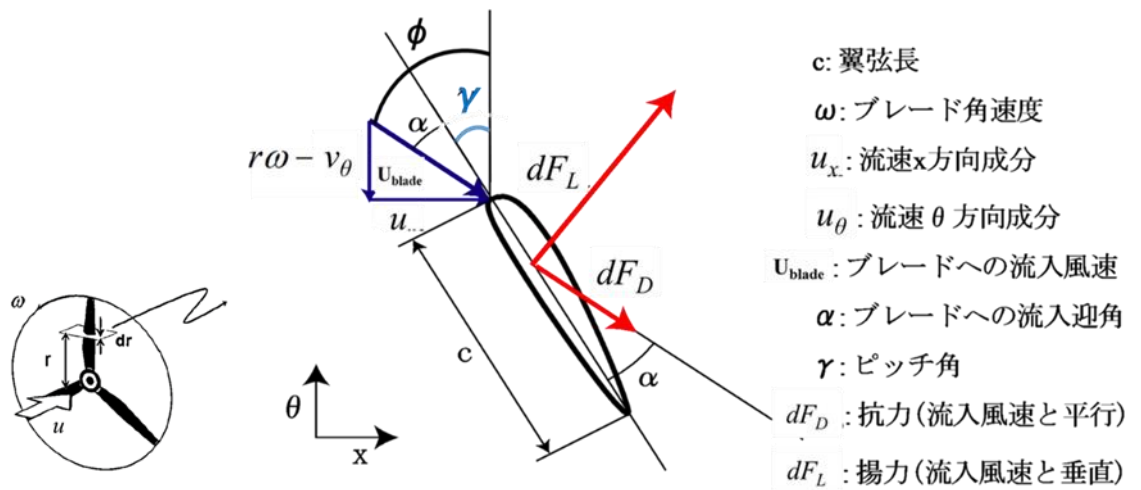


図3.2 翼素への流れと空気

$$U_{\text{blade}} = \sqrt{u_x^2 + (r\omega - u_\theta)^2} \quad (3.17)$$

$$\alpha = \phi - \gamma, \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{u_x}{r\omega - u_\theta}\right) \quad (3.18)$$

ブレードの要素すなわち翼素に作用する揚力 dF_L と抗力 dF_D は以下の式で与えられる。

$$dF_L = C_L \frac{1}{2} \rho U_{\text{blade}}^2 c dr \quad (3.19)$$

$$dF_D = C_D \frac{1}{2} \rho U_{\text{blade}}^2 c dr \quad (3.20)$$

このとき C_L と C_D はそれぞれ各翼素の揚力係数，抗力係数であり，ブレードの形状によってスパン位置 r とピッチ角 g から定められる。また翼弦長 c もスパン位置 r によって定められる。ブレードに働く力を回転面と軸面に分解すると，接線力 dF_q スラスト力 dF_x が以下の式で与えられる。

$$dF_x = dF_L \cos(\alpha + \gamma) + dF_D \sin(\alpha + \gamma) = (C_L \cos(\alpha + \gamma) + C_D \sin(\alpha + \gamma)) \frac{1}{2} \rho U_{\text{blade}}^2 c dr \quad (3.21)$$

$$dF_\theta = dF_L \sin(\alpha + \gamma) - dF_D \cos(\alpha + \gamma) = (C_L \sin(\alpha + \gamma) - C_D \cos(\alpha + \gamma)) \frac{1}{2} \rho U_{\text{blade}}^2 c dr \quad (3.22)$$

3.2.1 アクチュエータラインモデル

AL モデルでは、「風車のブレードによる外力」を「軸厚さ ΔL のライン状の領域を流体が通過するときに、そのライン領域内（図 3.3）で流体に与えられる体積力」とバランスさせる．したがって体積力の成分 f_x , f_θ は以下の式で与えられる．

$$(f_x dV =) f_x 2r \sin^{-1}(d/2r) \Delta L dr = -NdF_x \quad (3.27)$$

$$(f_\theta dV =) f_\theta 2r \sin^{-1}(d/2r) \Delta L dr = -NdF_\theta \quad (3.28)$$

翼素の接線力 dF_q とスラスト力 dF_x を代入すると

$$f_x = -[C_L \cos(\alpha + \gamma) + C_D \sin(\alpha + \gamma)] \frac{3c}{2r \sin^{-1}(d/2r) \Delta L} \frac{1}{2} \rho U_{blade}^2 \quad (3.29)$$

$$f_\theta = -[C_L \sin(\alpha + \gamma) - C_D \cos(\alpha + \gamma)] \frac{3c}{2r \sin^{-1}(d/2r) \Delta L} \frac{1}{2} \rho U_{blade}^2 \quad (3.30)$$

が成り立つ．

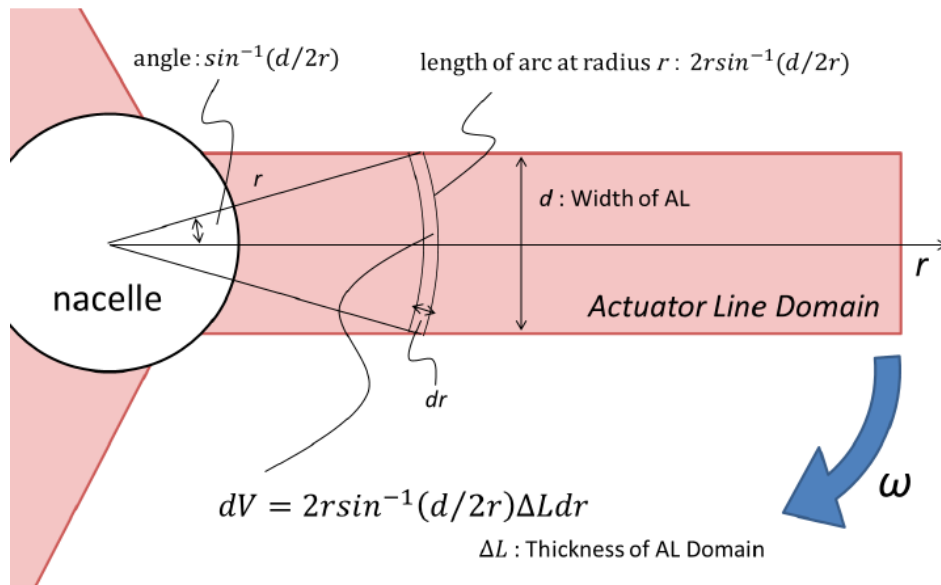


図 3.3 モデル領域と微小体積

3.2.2 ブレードによる出力計算

前節で導出した体積力の成分である f_x , f_θ を支配方程式であるナビエ・ストークス方程式の外力項に代入する．またこの体積力より風車トルク T_r , 出力係数 C_p を以下の式より算出することができる．

$$T_r = \int_V (-f_\theta \cdot r) dV = 2\pi\Delta L \int_r (-f_\theta \cdot r)r dr \tag{3.31}$$

$$C_p = T_r \cdot \omega / \left(\frac{1}{2}\rho AU^3\right) \tag{3.33}$$

3.3 計算条件

数値計算では，ロータ直径を代表長さとしたレイノルズ数 Re_{rotor} を風洞実験と同じオーダーである $Re_{\text{rotor}} = 4.5 \times 10^5$ ，AL モデルの回転速度を周速比 $\lambda = 4$ ，境界条件，初期条件などを全計算ケースにおいて共通の条件としている．ロータ直径を代表長，流入風速を代表速さとした無次元計算を行った．

境界条件の一覧を表 3.2 と図 3.4 に示す．空間境界の境界条件については，速度条件として上面・下面・側面の境界にはスリップ条件を与え，入口境界には主流方向速度に一樣流（ $U_0 = 1$ ）主流直交方向速度，鉛直方向速度に流速ゼロのディリクレ条件を与え，出口境界には主流方向速度にゾンマーフェルト放射条件(SRC), 主流直交方向速度, 鉛直方向速度に速度勾配ゼロのノイマン条件を与えている．圧力条件に関しては 6 面全てに圧力勾配ゼロのノイマン条件を与えている．物体境界の境界条件については，ナセル・集風体部分にノンスリップ条件を与えることで物体を表現しており，圧力に関しては特別な境界条件を設定していない．また，初期条件として物体を除く計算領域全体に $u = 1$ の条件を与えている．

表 3.2 境界条件

	境界条件	
	速度	圧力
側面境界	スリップ条件	圧力勾配ゼロ
入口境界	一樣流れ	
出口境界	ゾンマーフェルト放射条件	
物体境界	ノンスリップ条件	なし

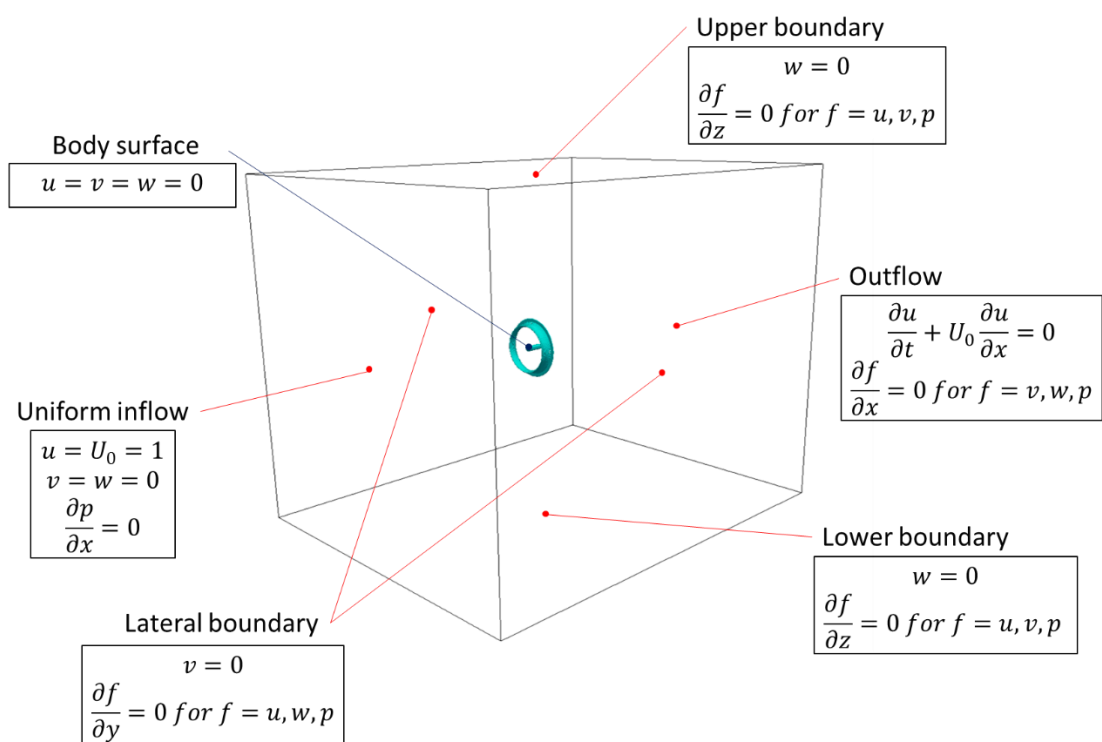


图 3.4 境界条件

第4章 風洞実験の結果と考察

過去の研究において2基, 3基, 5基配置のマルチレンズ風車の発電出力・抗力の特性を実験的に調査した。その結果, 風車間の間隔 s と配置パターンによって変化し, 最適な配置間隔があることが示された。

本章では2基マルチレンズ風車において, 風車間隔が風車出力に及ぼす要因について考察するため, 出力性能試験及び後流測定試験を行った。両試験の結果と考察を示す。

4.1 出力性能試験

出力性能試験では単基レンズ風車(Stand Alone)及び, 2基レンズ風車の出力係数を測定した。レンズ風車の各風車の指定ナンバリングの模式図を図4.1に, 概観を図4.2に示す。

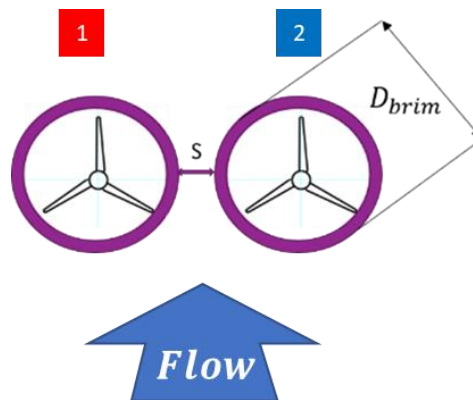


図 4.1 風車ナンバリング模式図



図 4.2 風車ナンバリング概観図

4.1.1 風速変化試験

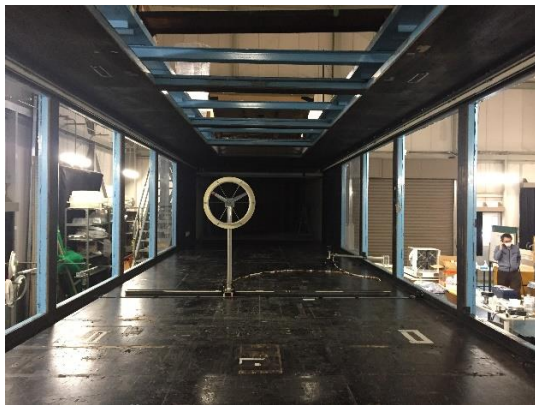
レンズ風車の風速を変化させた際の出力性能を検証するため，単基レンズ風車及び，先行研究で最も性能の高いとされた風車間隔 $s/D_{brim}=0.2$ の 2 基平面配置レンズ風車において風速を変化させたときの出力係数を測定した．

4.1.1.1 単基(Stand Alone)

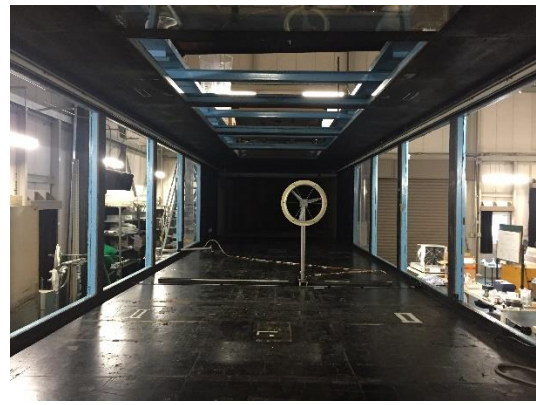
本試験では，使用した 2 基の風車の個体差を考慮するため 2 基それぞれの単基風車の出力係数を測定した．結果内の数字はそれぞれの指定ナンバリングを表すものとする．実験条件を表 4.1 に，実験概観図を図 4.3 に示す．風洞内風速 U_∞ を 6~17m/s の範囲で 1m/s ずつ変化させた際の風洞内風速と単基レンズ風車の出力係数のプロットを図 4.4 に示す．

表 4.1 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに単基風車を設置
計測条件	サンプリング周波数 (200Hz)，計測時間(30s)
風速 U_∞	6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17(m/s)
周速比 λ	4.0



単基①



単基②

図 4.3 単基レンズ風車出力性能試験概観図

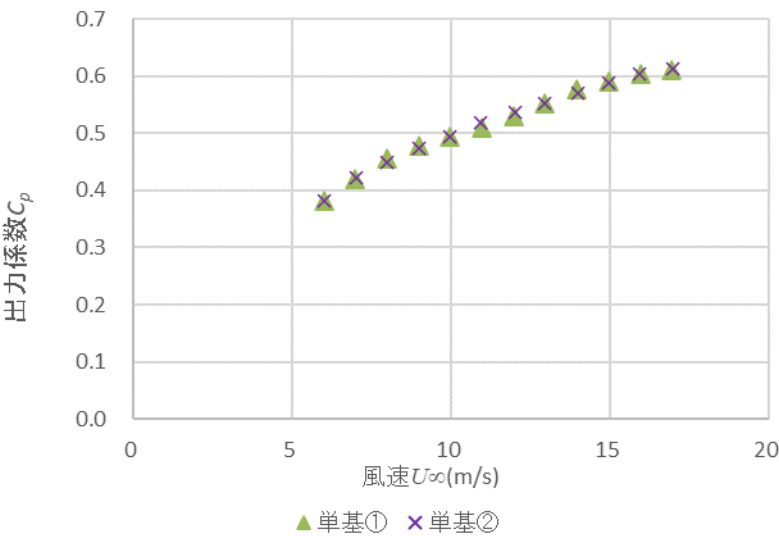


図 4.4 風速変化単基風車出力性能

4.1.1.2 2 基レンズ風車(風車間隔 $s/D_{brim}=0.2$)

本試験では風車間隔は $s/D_{brim}=0.2$ で固定した状態で風洞内風速を変化させた際の風車出力を測定した．実験条件を表 4.2 に，実験概観図を図 4.5 に示す．風洞内風速 U_∞ を 6~17m/s の範囲で 1m/s ずつ変化させた際の風洞内風速と 2 基レンズ風車の出力係数のプロットを図 4.6 に示す．

表4.2 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置
計測条件	サンプリング周波数 (200Hz)，計測時間(30s)
風速 U_∞	6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17(m/s)
周速比 λ	4.0



図 4.5 2 基レンズ風車出力性能試験概観図($s/D_{brim}=0.2$)

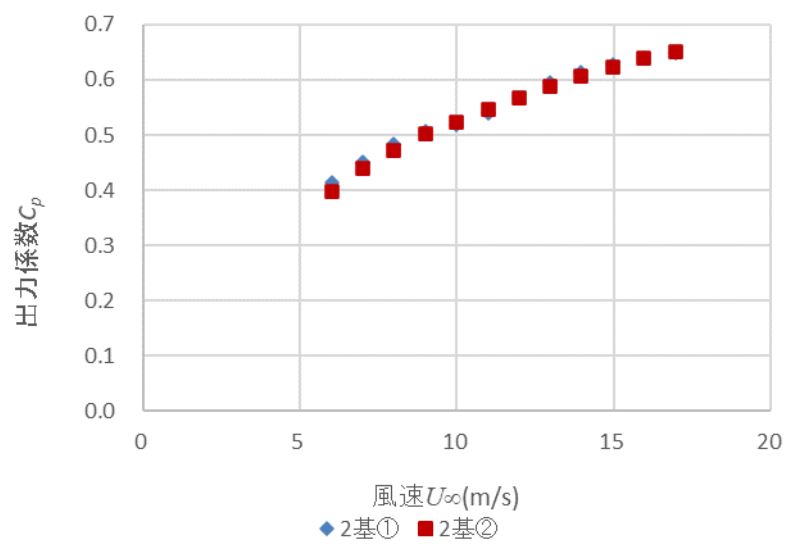


図 4.6 風速変化 2 基風車出力性能

4.1.1.3 単基—2 基レンズ風車性能比較

風洞内風速 U を 6~17m/s の範囲で 1m/s ずつ変化させた際の風洞内風速と単基レンズ風車及び、2 基レンズ風車の出力係数をまとめてプロットしたものを図 4.7 に示す。風洞内風速 U_{∞} を 6~17m/s の範囲で 1m/s ずつ変化させた際の風洞内風速と、単基に対して 2 基レンズ風車の出力係数増加率をプロットしたものを図 4.8 に示す。

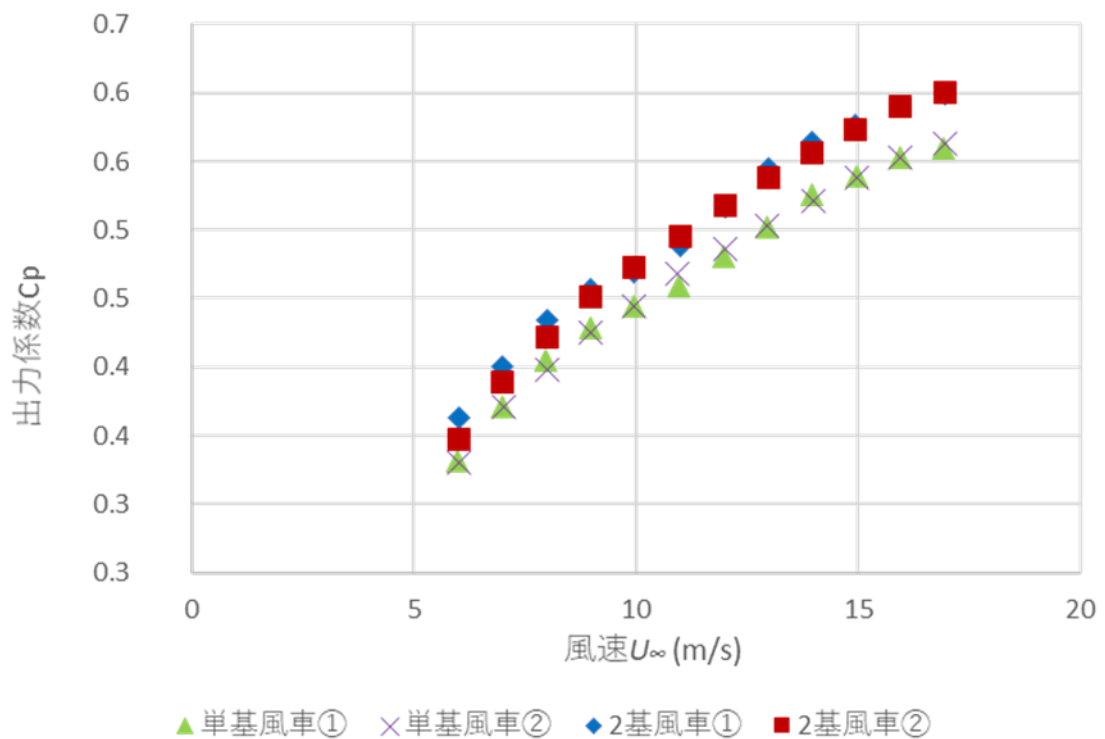


図 4.7 風速変化風車出力性能

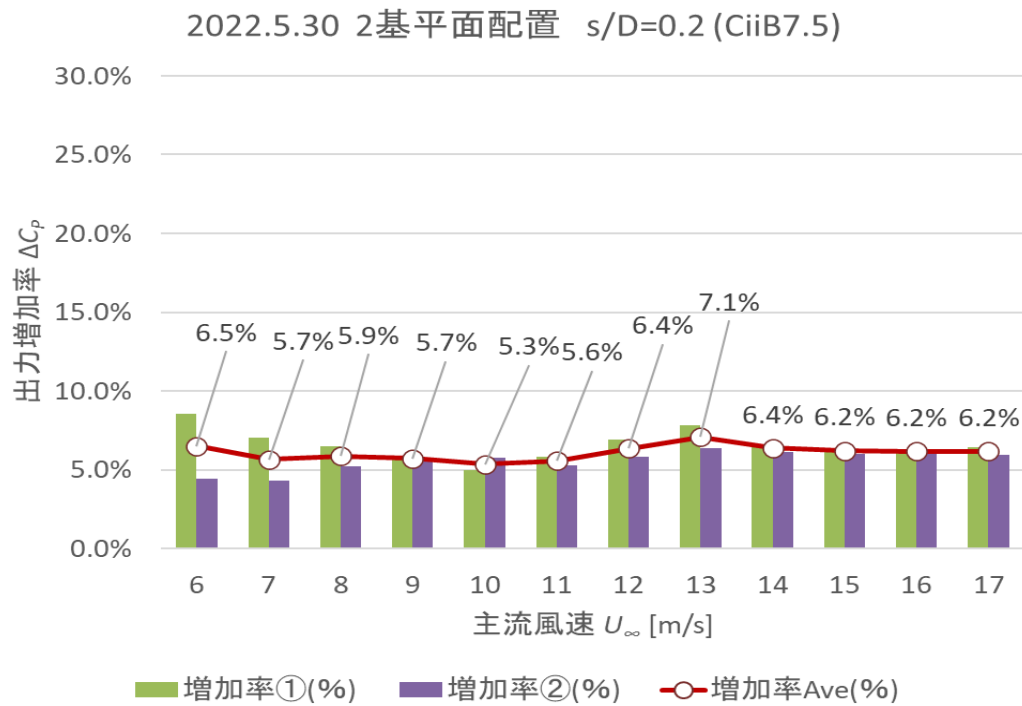


図 4.8 風速変化 - 出力増加率

図 4.7 より風速の増加により出力係数 C_p が増加していることが見られる．また各風速での出力係数 C_p は，単基風車に対してマルチ化した 2 基レンズ風車の方が大きいことが分かる．図 4.8 より風速による出力係数 C_p の増加率 ΔC_p に大きな変化は見られず，17m/s で 6.2% となった．

4.1.2 風車間隔変化試験 (風洞内風速 $U_\infty=6\text{m/s}$)

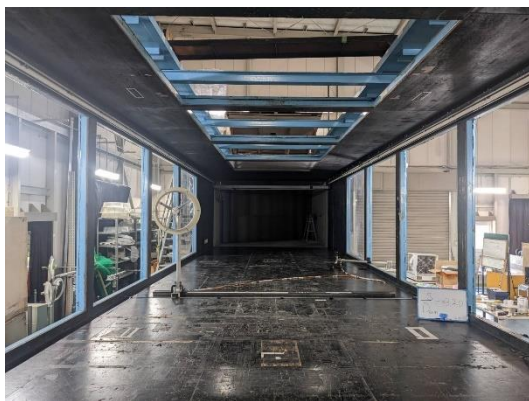
レンズ風車の風車間隔を変化させた際の出力性能を検証するため、風洞内風速 $U_\infty=6\text{m/s}$ において単基レンズ風車及び、2 基レンズ風車の風車間隔 s/D_{brim} を 0.00～3.20 まで変化させたときの出力係数を測定した。

4.1.2.1 単基(Stand Alone)

本試験では、使用した 2 基の風車の個体差を考慮するため 2 基それぞれの単基風車の出力係数を測定した。結果内の数字はそれぞれの各風車の指定ナンバリングを表すものとする。また単基レンズ風車の配置位置は、2 基マルチレンズ風車に対応する位置に設置した。実験条件を表 4.3 に、実験概観図を図 4.9 に示す。風車間隔 s/D_{brim} を 0.00～3.20 まで変化させた際の風車間隔と、単基レンズ風車の出力係数のプロットを図 4.10 に示す。

表 4.3 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに単基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.00\sim3.2$ 対応位置)
計測条件	サンプリング周波数 (200Hz), 計測時間(30s)
風速 U_∞	6 (m/s)
周速比 λ	4.0



単基① $s/D_{brim}=3.2$ 対応位置



単基② $s/D_{brim}=3.2$ 対応位置

図 4.9 単基レンズ風車出力性能試験概観図

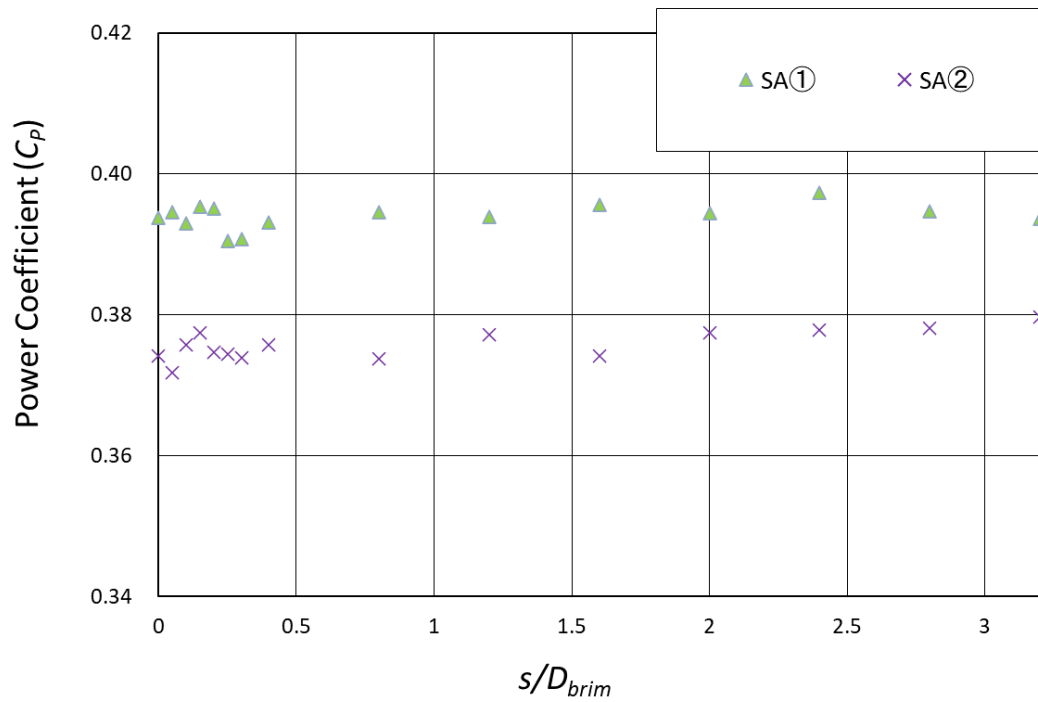


図 4.10 風車間隔変化単基風車出力性能

図 4.10 より風車位置を水平方向に変化させた際、単基のレンズ出力係数は大きな変動が見られず一定であることが見られる。また単基①と単基②で出力係数に差があることから各風車の個体差があるといえる。

4.1.2.2 2 基レンズ風車(Multi)

本試験では風洞内風速 $U_\infty=6.0\text{m/s}$ の状態で風車間隔 s/D_{brim} を変化させた際の風車出力を測定した。実験条件を表 4.4 に、実験概観図を図 4.11 に示す。風車間隔 s/D_{brim} を 0.00~3.20 まで変化させた際の風車間隔と 2 基レンズ風車の出力係数のプロットを図 4.12 に示す。

表 4.4 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.00\sim3.2$)
計測条件	サンプリング周波数 (200Hz), 計測時間(30s)
風速 U_∞	6 (m/s)
周速比 λ	4.0


 $s/D_{brim}=0.00$

 $s/D_{brim}=3.2$

図 4.11 2 基レンズ風車出力性能試験概観図

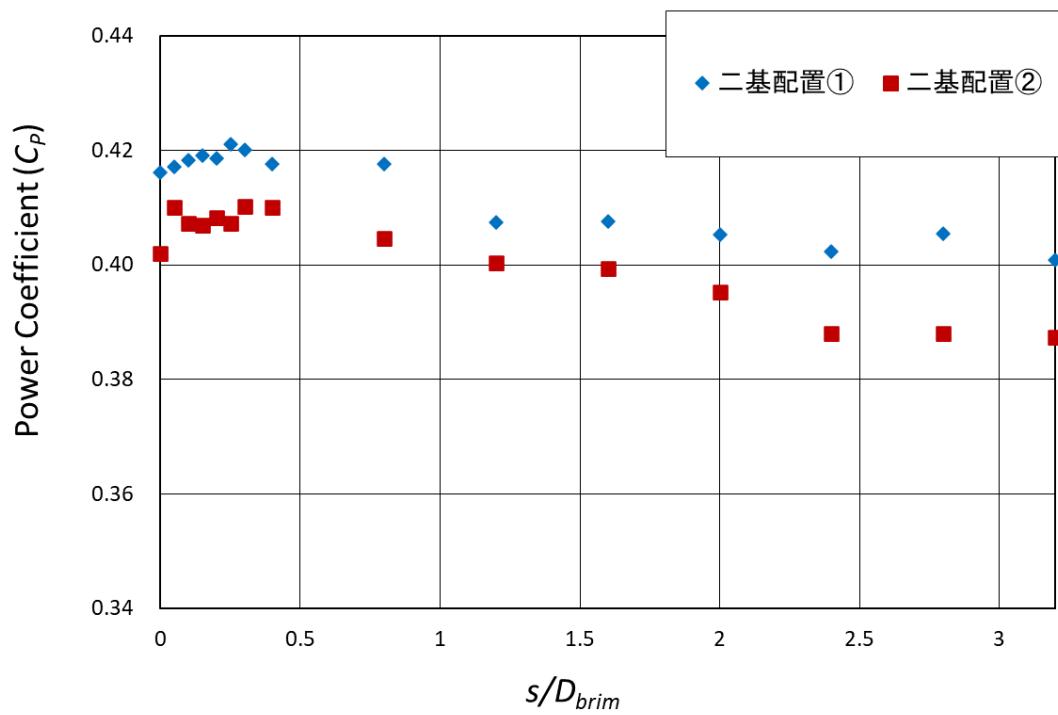


図 4.12 風速変化 2 基風車出力性能

4.1.2.3 単基—2 基レンズ風車性能比較

風車間隔 s/D_{brim} を 0.00～3.20 まで変化させた際の風車間隔と単基レンズ風車及び、2 基レンズ風車の出力係数をまとめてプロットしたものを図 4.13 に示す。風車間隔 s/D_{brim} を 0.00～3.20 まで変化させた際の風車間隔と、単基に対して 2 基レンズ風車の出力係数増加率をプロットしたものを図 4.14 に示す。

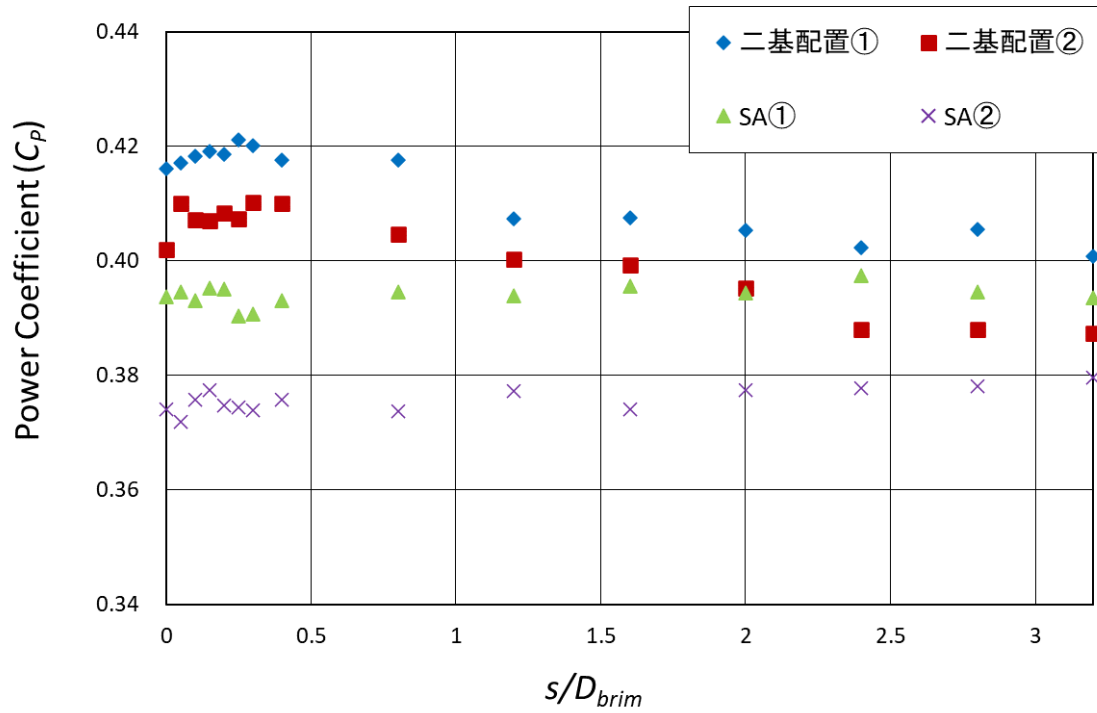


図 4.13 風車間隔変化風車出力性能

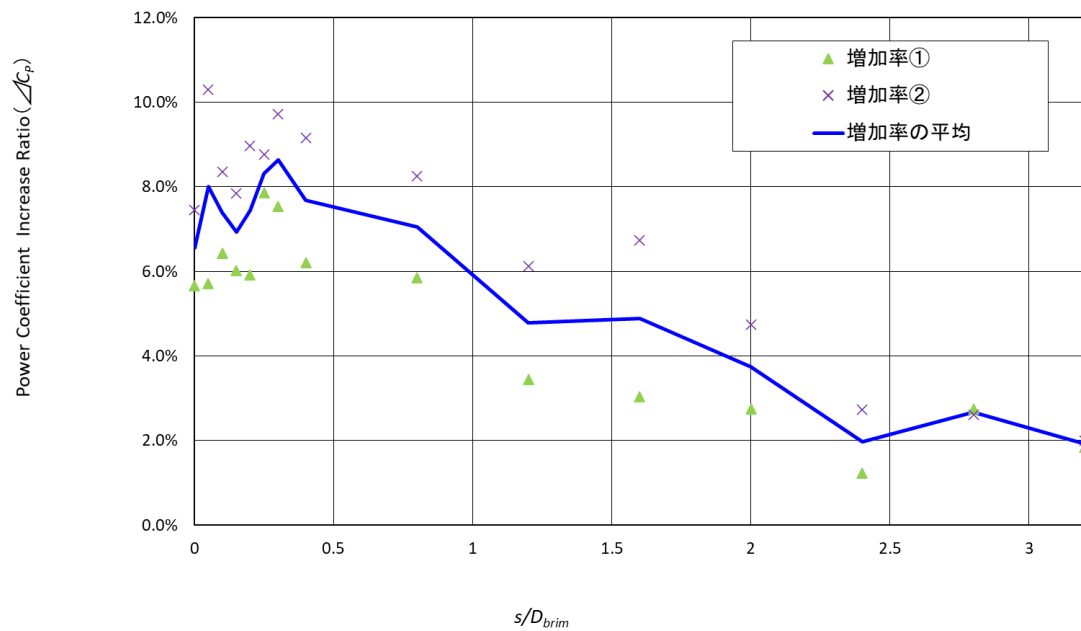


図 4.14 風車間隔変化 - 出力増加率

図 4.13 より単基風車に対して 2 基レンズ風車の出力係数が大きくなっていることが分かる。また、図 4.14 より風車間隔を狭めていった際に、出力増加率が増加していることが分かり、 s/D_{brim} が 0.05~0.4 あたりで最大となることが分かる。

4.1.3 風車間隔変化試験 (風洞内風速 $U_{\infty}=17\text{m/s}$)

レンズ風車の風車間隔を変化させた際の出力性能を検証するため，風洞内風速 $U_{\infty}=17\text{m/s}$ において単基レンズ風車及び，2 基レンズ風車の風車間隔 s/D_{brim} を 0.00～3.20 まで変化させたときの出力係数を測定した．

4.1.3.1 単基(Stand Alone)

本試験では，使用した 2 基の風車の個体差を考慮するため 2 基それぞれの単基風車の出力係数を測定した．結果内の数字はそれぞれの各風車の指定ナンバリングを表すものとする．また単基レンズ風車の配置位置は，2 基マルチレンズ風車に対応する位置に設置した．実験条件を表 4.5 に，実験概観図を図 4.15 に示す．風車間隔 s/D_{brim} を 0.00～3.20 まで変化させた際の風車間隔と，単基レンズ風車の出力係数のプロットを図 4.16 に示す．

表 4.5 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに単基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.00\sim3.2$ 対応位置)
計測条件	サンプリング周波数 (200Hz)，計測時間(30s)
風速 U_{∞}	17(m/s)
周速比 λ	4.0



単基① $s/D_{brim}=3.2$ 対応位置



単基② $s/D_{brim}=3.2$ 対応位置

図 4.15 単基レンズ風車出力性能試験概観図

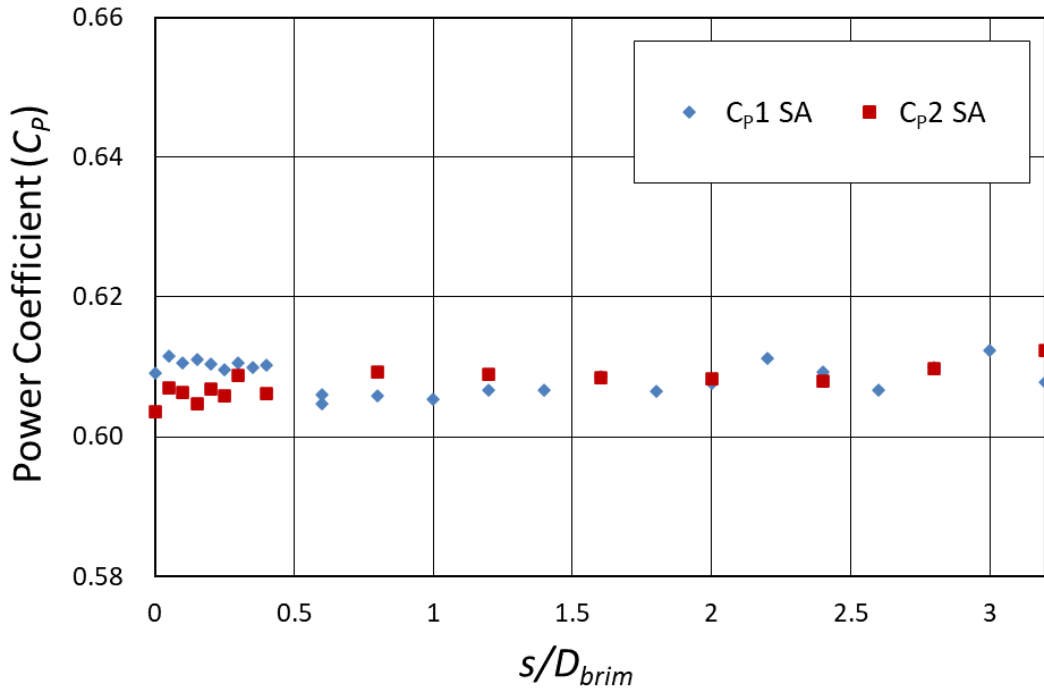


図 4.16 風車間隔変化単基風車出力性能

4.1.3.2 2 基レンズ風車(Multi)

本試験では風洞内風速 $U_{\infty}=17.0\text{m/s}$ の状態で風車間隔 s/D_{brim} を変化させた際の風車出力を測定した。実験条件を表 4.6 に、実験概観図を図 4.17 に示す。風車間隔 s/D_{brim} を 0.00~3.20 まで変化させた際の風車間隔と 2 基レンズ風車の出力係数のプロットを図 4.18 に示す。

表 4.6 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.00\sim3.2$)
計測条件	サンプリング周波数 (200Hz), 計測時間(30s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0


 $s/D_{brim}=0.00$

 $s/D_{brim}=3.2$

図 4.17 2 基レンズ風車出力性能試験概観図

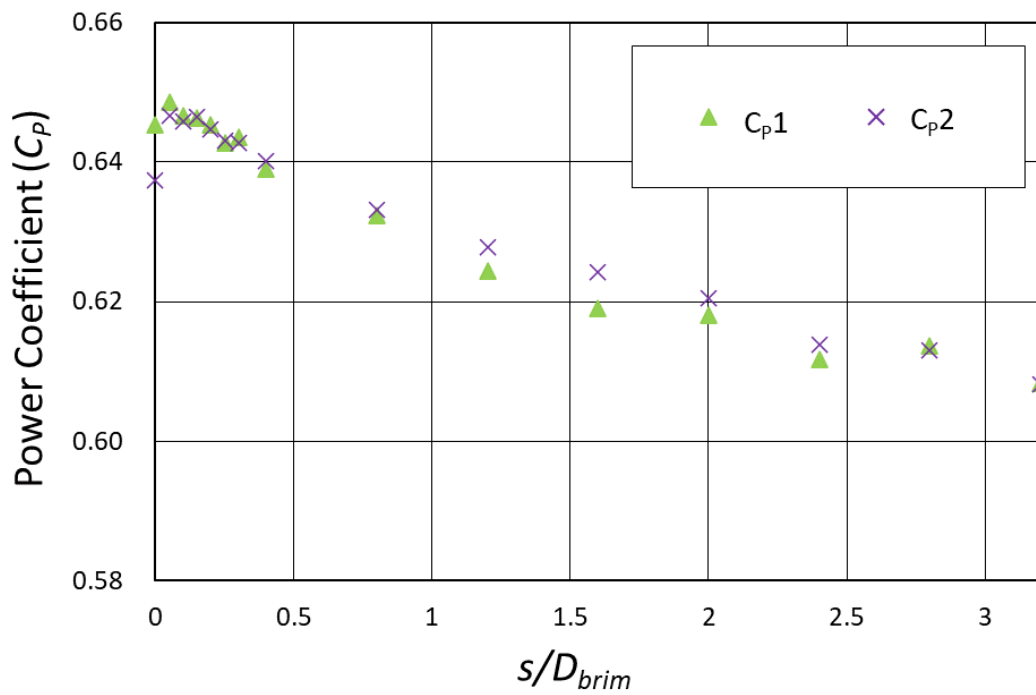


図 4.18 風速変化 2 基風車出力性能

4.1.3.3 単基—2 基レンズ風車性能比較

風車間隔 s/D_{brim} を 0.00～3.20 まで変化させた際の風車間隔と単基レンズ風車及び、2 基レンズ風車の出力係数をまとめてプロットしたものを図 4.19 に示す。風車間隔 s/D_{brim} を 0.00～3.20 まで変化させた際の風車間隔と、単基に対して 2 基レンズ風車の出力係数増加率をプロットしたものを図 4.20 に示す。

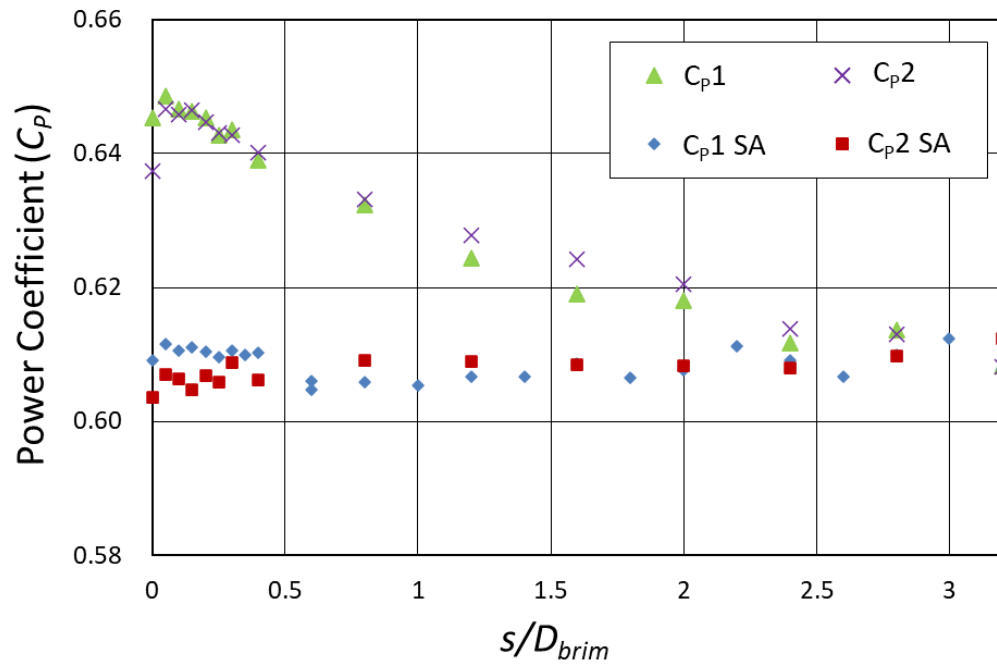


図 4.19 風車間隔変化風車出力性能

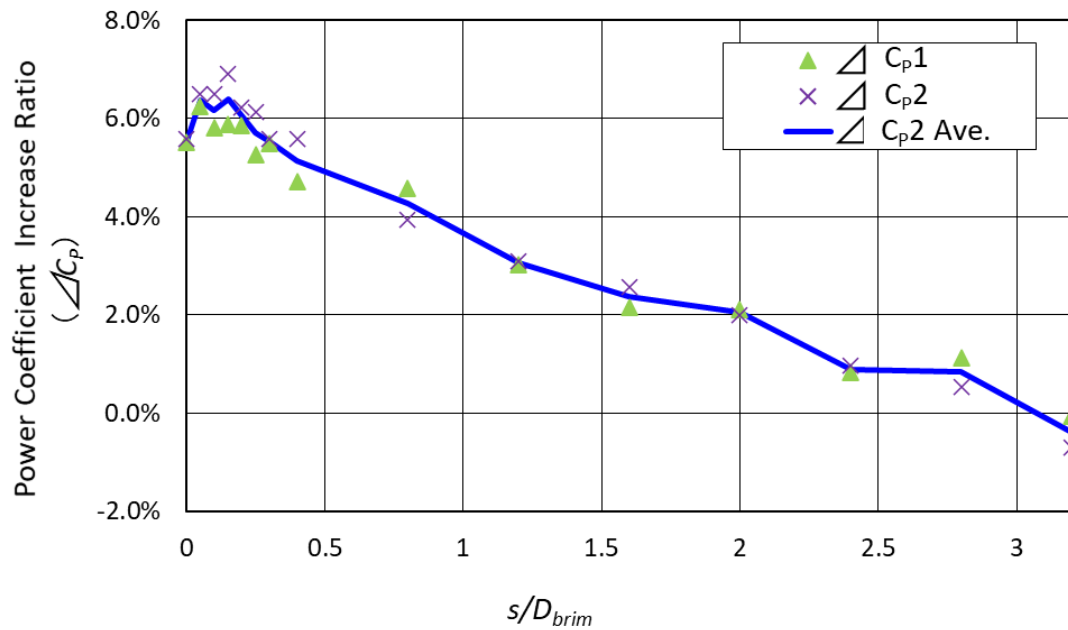


図 4.20 風車間隔変化 - 出力増加率

2 基風車は、風車間隔 $s/D_{brim}=3.2$ では単基風車と比較して出力の増加が見られなかった。しかし風車間隔 $s/D_{brim}=2.4$ 以下では風車間隔が狭くなるにつれ出力係数の増加が見られ、 $s/D_{brim}=0.05, 0.15$ で増加率は最大となり、単基風車に対して 2 基平均で 6.4% の出力の増加が見られた。風車間隔 $s/D_{brim}=3.2$ では単基風車と比較して出力の相違が見られなかったことから、この出力増加に関してブ

ロッケージの影響は小さいと考えられ、マルチロータ化によってもたらされる流れの干渉効果が出力増加の主要因と考えられる。

4.1.4 風車間隔変化試験(風洞内風速 $U_\infty=17\text{m/s}$, 4 スパン開放及び解放条件比較)

風車後流試験での解放条件が 4 スパン開放であるため、4 スパン開放時の風洞内風速 $U_\infty=17\text{m/s}$ における単基レンズ風車及び、2 基レンズ風車の風車間隔 s/D_{brim} を 0.00~3.20 まで変化させたときの出力係数を測定した。実験条件を表 4.7 に示す。本実験では単基風車の配置位置は $s/D_{brim}=-0.6, 0.8, 1.6, 2.4, 3.2$ での計測を行い、一時線形補完を行ったものを単基風車の出力係数としている。単基及び 2 基レンズ風車の出力係数を図 4.21 に、単基レンズ風車に対して 2 基レンズ風車の出力増加率を図 4.22 に示す。また出力増加率に関して 3 スパン開放と 4 スパン開放した際の比較したものを図 4.23 に示す。

表 4.7 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3,4,5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.00\sim 3.2$, 単基は $s/D_{brim}=-0.6, 0.8, 1.6, 2.4, 3.2$)
計測条件	サンプリング周波数 (200Hz), 計測時間(30s)
風速 U_∞	17 (m/s)
周速比 λ	4.0

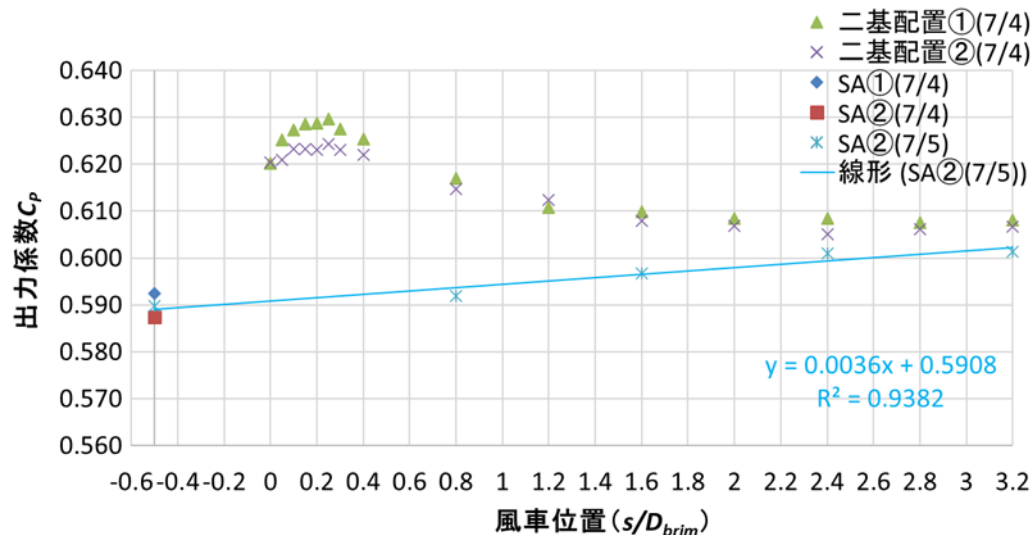


図 4.21 風車間隔変化風車出力性能及び単基出力性能補完

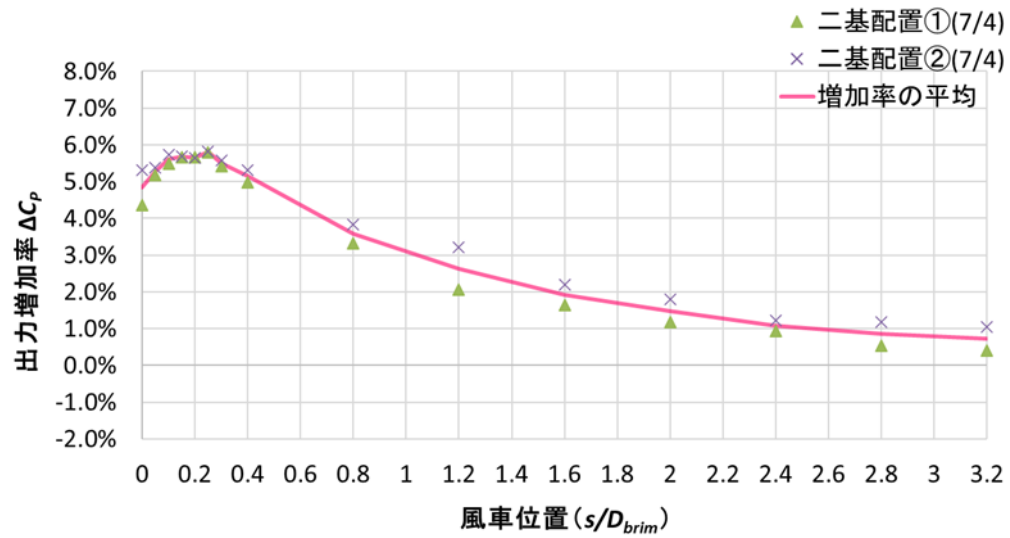


図 4.22 風車間隔変化 - 出力増加率

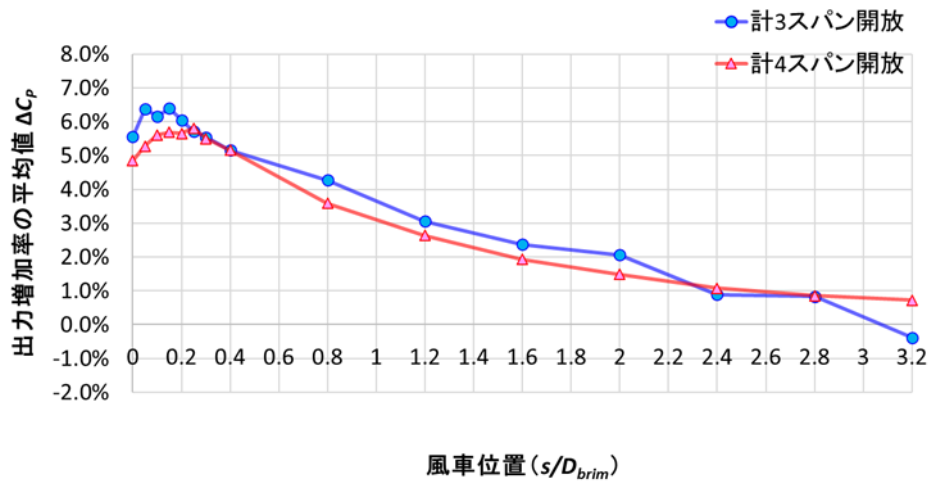


図 4.23 出力増加率 解放条件比較

図 4.21 及び、図 4.22 より単基に対し、2 基風車の出力係数の増加が見られ風車間隔 $s/D_{brim}=0.05\sim0.4$ で増加率が最大となる。また図 4.23 より解放条件による出力増加率は 3 スパン解放時のほうが 0.8%，4 スパンと比べて大きくなった。また出力増加の傾向としてはおおむね一致しており $s/D_{brim}=0.05\sim0.4$ 付近で最大となり $s/D_{brim}=3.2$ の場合最も小さくなる。

4.1.5 レンズ無風車(Bare)の出力性能試験および、レンズ有風車との比較

本試験ではレンズ無風車(Bare)の出力性能が風車間隔の変化によって与えられる影響について検討するため、単基及び2基の出力係数の測定を行った。またレンズ無風車とレンズ有風車で出力性能の差を比較した。表 4.8 にレンズ無風車の実験条件を示す。レンズ無風車の出力係数を図 4.24 に、レンズ無風車(Bare)とレンズ有風車(WLT)との風車出力係数の比較を図 4.25 に示す。

表 4.7 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3,4,5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに単基風車,2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.05, 3.2$, 単基は風洞中央)
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz), 計測時間(10s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0

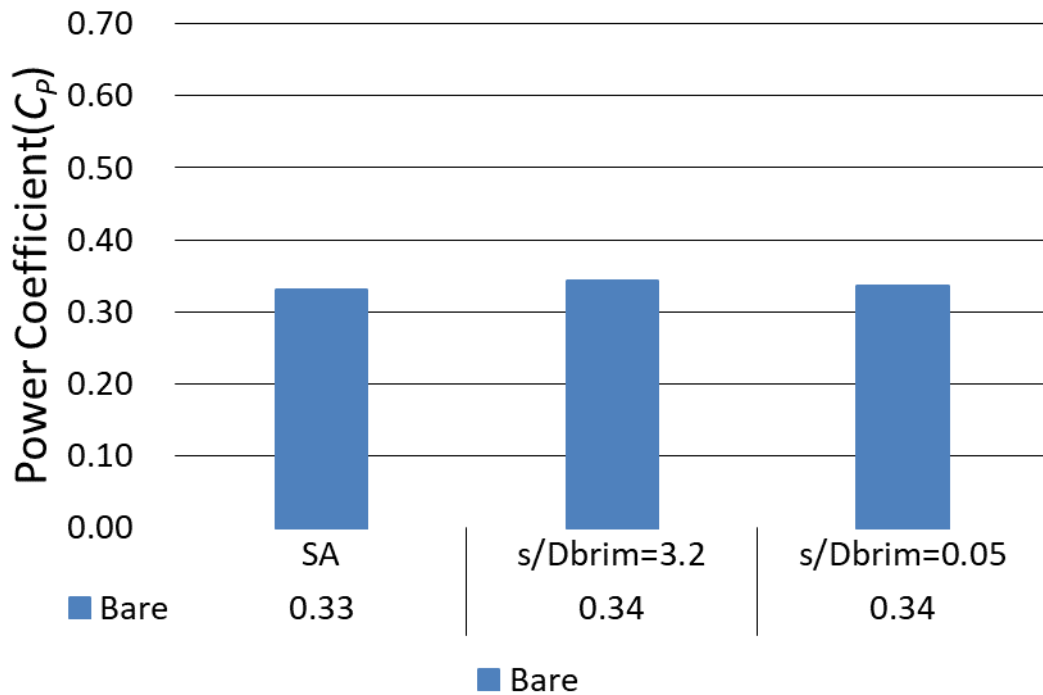


図 4.24 レンズ無風車出力係数

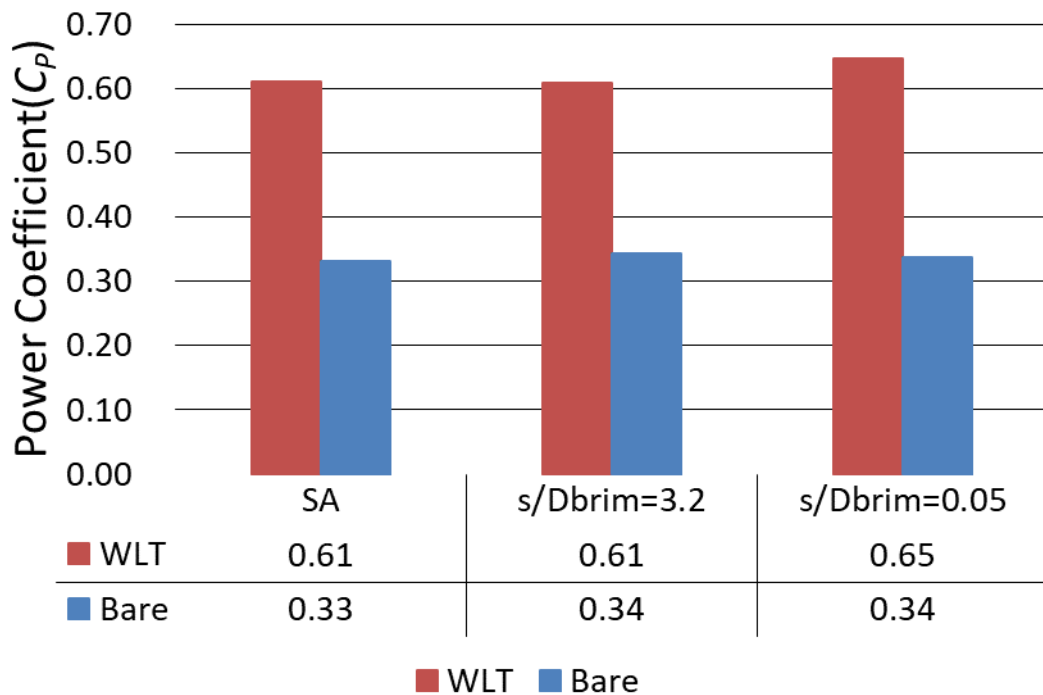


図 4.25 レンズ有無による出力係数の比較

図 4.24 及び、図 4.25 よりレンズ有では風車間隔を狭めたことによる出力増加が 6.4%見られたが、レンズ無では風車間隔を狭めた際の顕著な出力増加は見られない。よって風車間隔の変化による出力係数の変化はレンズ風車特有のものであると考えられる。

4.1.6 柱を配置した際の 2 基レンズ風車の出力性能試験

2 基レンズ風車の前後に、タワーに見立てた柱を配置することで 2 基レンズ風車の出力性能に与える影響について考察するため、2 基配置における構造物と想定した $\phi 40$ mm 柱を設置し、風速 17m/s における柱位置および風車間隔を変化させたときの出力係数の計測を行った。本実験では柱位置に関して集風体後端位置を原点とし、風下側を正としており、柱位置と集風体のつばとの距離を l とし、 l を集風体外径 D_{brim} で除したものを柱間比 l/D_{brim} と定義する。実験条件を表 4.8 に示す。また配置における模式図を図 2.26 に、実験概観図を図 2.27 に示す。また本実験の柱位置条件は風車間隔によって変えており、柱位置 1 は $s/D_{brim}=0.05$ の場合 $l/D_{brim}=-0.3 \sim -0.2$ に配置 $s/D_{brim}=0.00$, 0.2 の場合 $l/D_{brim}=-0.1$ に配置としている。柱位置と風車間隔を変化させた際の風車出力係数を図 4.28 に、柱がない状態からの出力増加率を図 4.29 に示す。

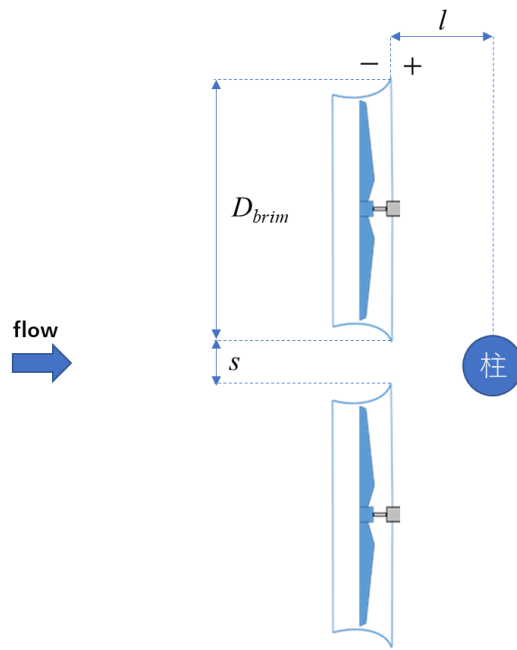


図 4.26 柱位置模式図



図 4.27 ポールを配置した際の 2 基レンズ風車の出力性能試験概観図

表 4.8 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.00, 0.05, 0.2$)
柱位置	柱位置 l は $s/D_{brim}=0.05$ の場合 $l/D_{brim} \sim 0.3 \sim 0.2$ に配置 $s/D_{brim}=0.00, 0.2$ の場合 $l/D_{brim} \sim 0.1$ に配置
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz), 計測時間(10s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0

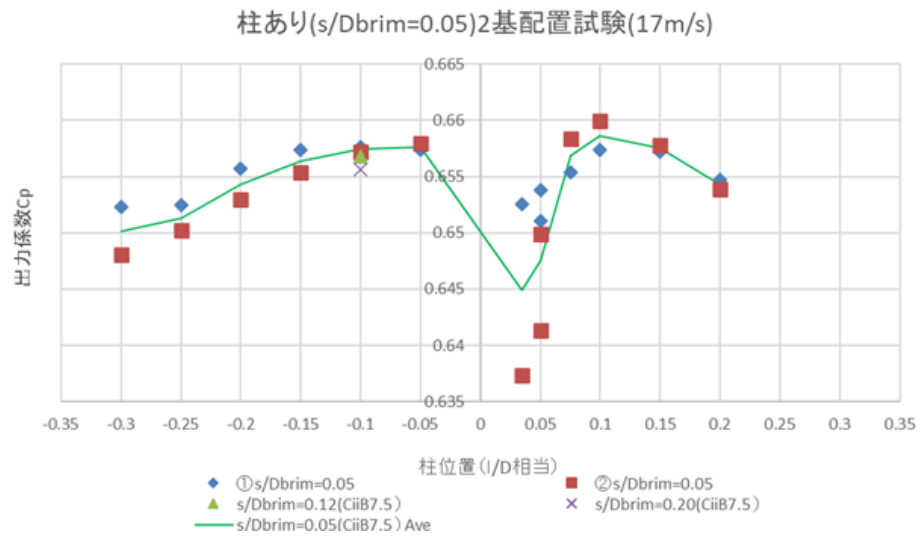


図 4.28 出力係数

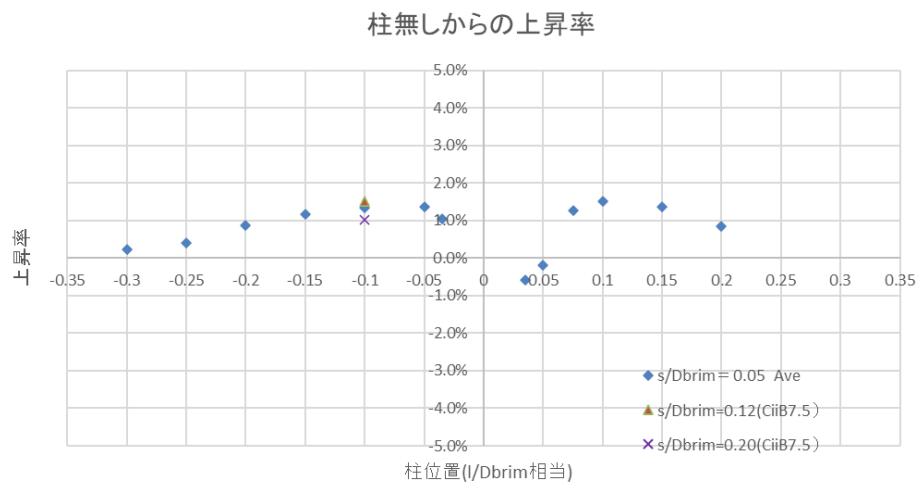


図 4.29 出力増加率

図 4.28, 4.29 より風車直後に柱を配置した際、出力係数は低下しており増加率も負と低下していることが見られる。一方その他の柱位置では風車出力の増加率が正となり柱を設置することで風車出力の向上が見られた。

4.2 風車後流測定試験

レンズ風車の間隔を狭めた際に，出力が向上した要因が風車同士の干渉効果によるものか考察するため，風車後方の流速及び圧力場を測定した．評価するにあたって，風車後方の圧力差，熱線流速計で流速，超音波流速系で測定した主流方向，水平方向，鉛直方向流速の風洞水平方向分布を測定した．また，測定した圧力差を，風洞上流風速 U_∞ より求めた動圧で除した圧力係数 C_p と，後流測定実験で測定した風速を風洞上流風速 U_∞ で除した無次元流速を用いて評価した．圧力係数 C_p は式(4.1)により導出される．無次元流速 u^* は式(4.2)で導出される．

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (4.1)$$

$$u^* = \frac{u}{U_0} \quad (2.2)$$

風洞内の風車後流測定の測定位置座標について，主流方向を X 軸，原点は計測部入口より 3000 mm，風上方向を正とする．水平方向を Y 軸，原点は各測定機器が風洞中心となる位置．風上から見て右方向を正とする．鉛直方向を Z 軸，原点は風洞床面，鉛直上方向を正とする．計測機器の配置は Y 座標の小さい方から超音波流速計，熱線流速計，静圧管とする．超音波流速計と熱線流速計との距離を 200 mm，熱線流速計と静圧管との距離を 50 mm とする．測定ラインは $Z=1040$ mm における Y 方向の分布を測定する．超音波流速計で得られる主流方向，水平方向，鉛直方向について，主流方向流速は風下を正，水平方向上流から見て右が正，鉛直方向上が正の値で測定される．各測定機器の配置及び，座標についての模式図を図 4.30，図 4.31 に示す．計測機器を配置した際の概観図を図 4.32，図 4.33 に示す．

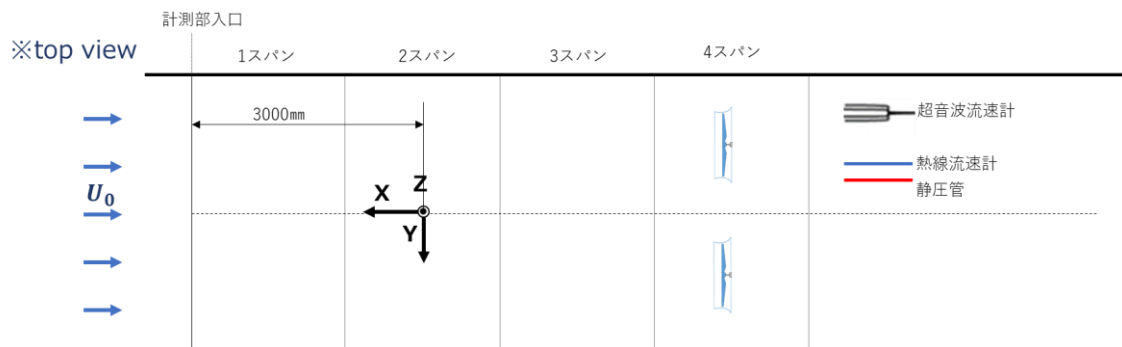


図 4.30 XY 平面模式図

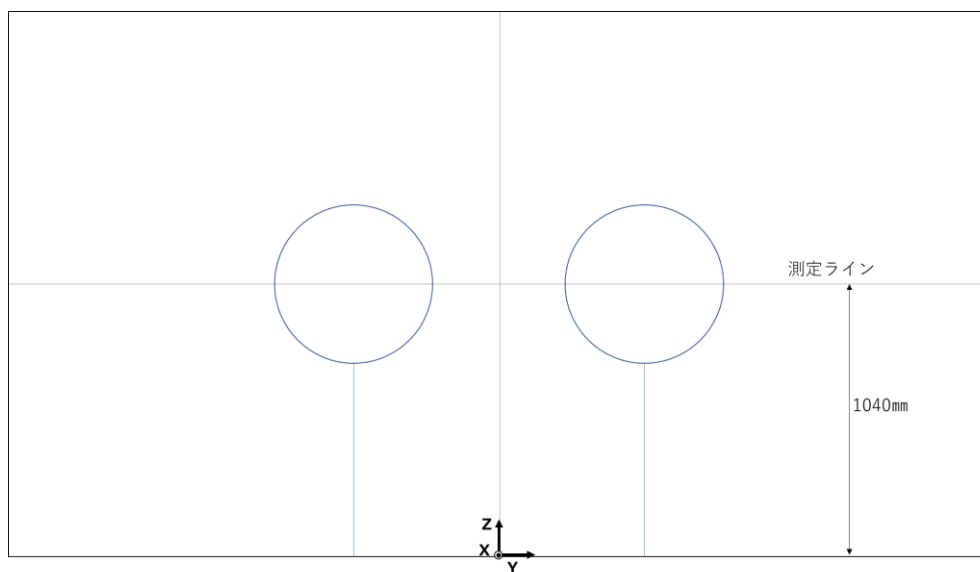
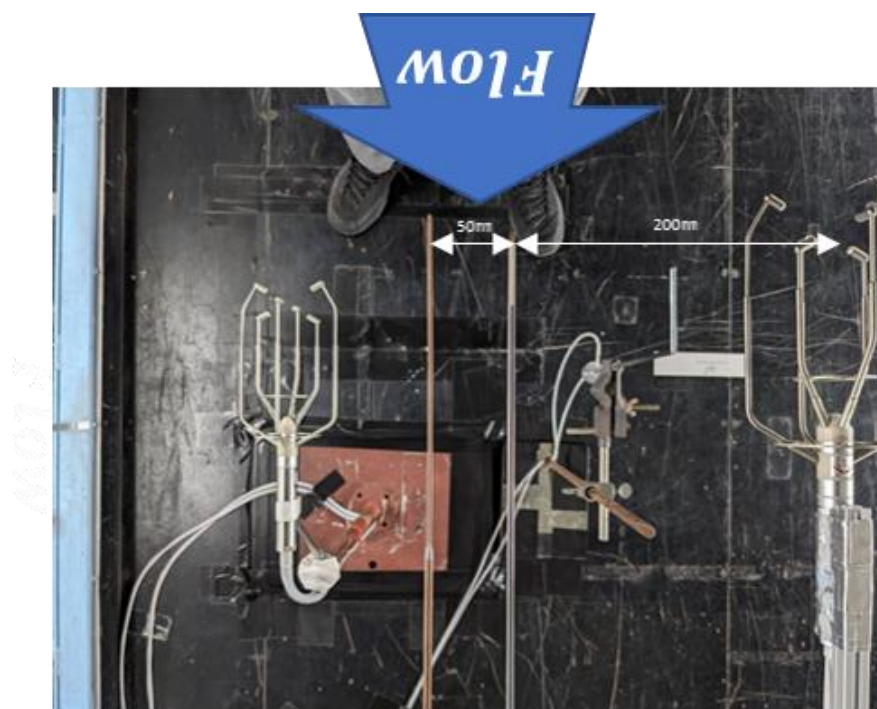


図 4.31 上流から見た YZ 平面模式図



左から静圧菅，熱線流速計，超音波流速計

図 4.32 XY 平面概観図

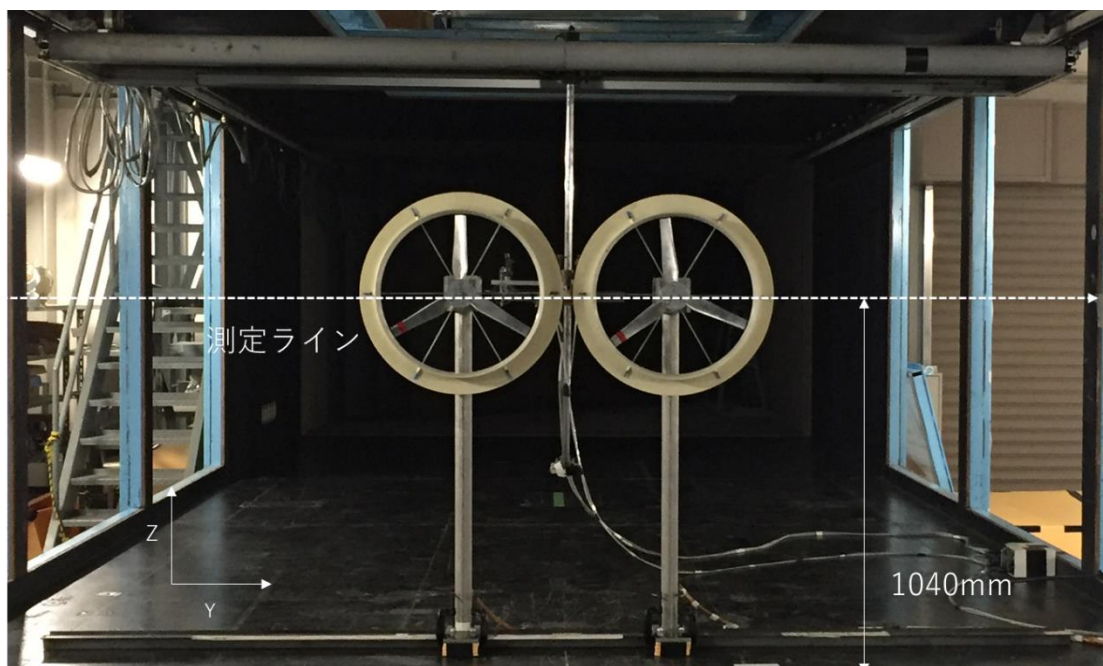


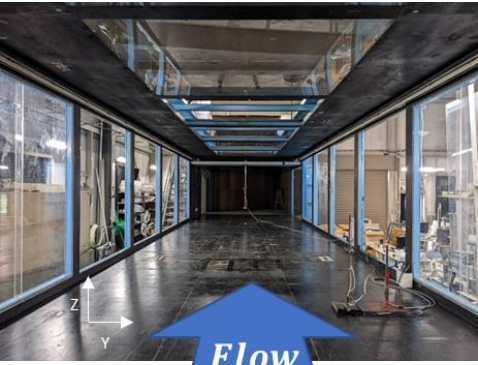
図 4.33 YZ 平面概観図

4.2.1 風洞内風速分布試験

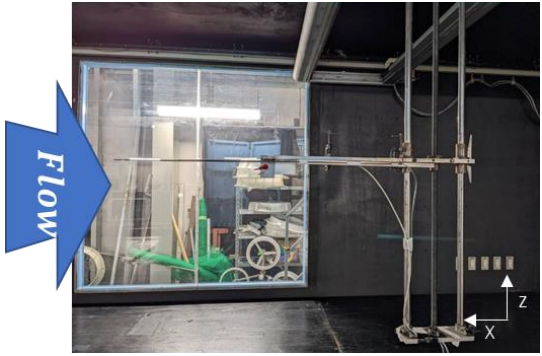
風車後測定試験をするにあたって、風洞を解放した状態での風洞内流速の分布を調べた。本実験では風洞の開放状態によって風洞内の流速に影響が及ぼされるか検証するため、主流方向風速及び圧力差の洞内主流方向(X 方向)及び風洞内水平方向の分布を測定した。実験条件を表 4.9 に示す。測定時の概観図を図 4.34 に、 X 方向の風洞内圧力差及び流速分布を図 4.35, 4.36 に示す。 Y 方向の風洞内圧力差及び流速分布を図 4.37, 4.38 に示す。

表 4.8 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5 スパン開放(3 スパン開放), 第 3.4.5.6 スパン解放(4 スパン開放)時を計測
風車配置	風車無の風洞内を計測
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz), 計測時間(30s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)



上流からの様子



側方からの様子

図 4.34 風洞内風速分布測定概観図

X方向圧力分布($Z=1040, Y=0$)

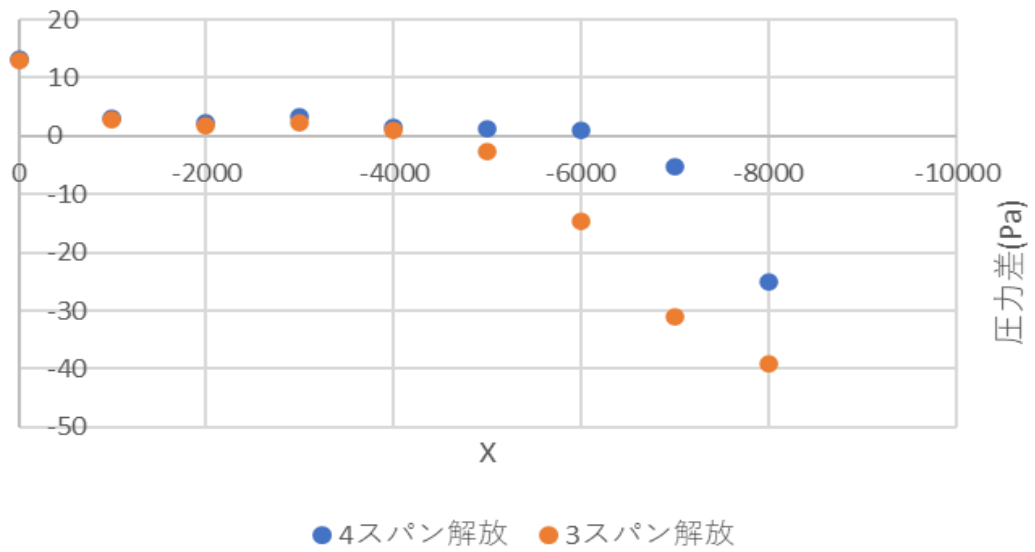


図 4.35 圧力差 主流方向分布

X方向風速分布($Z=1040, Y=0$)

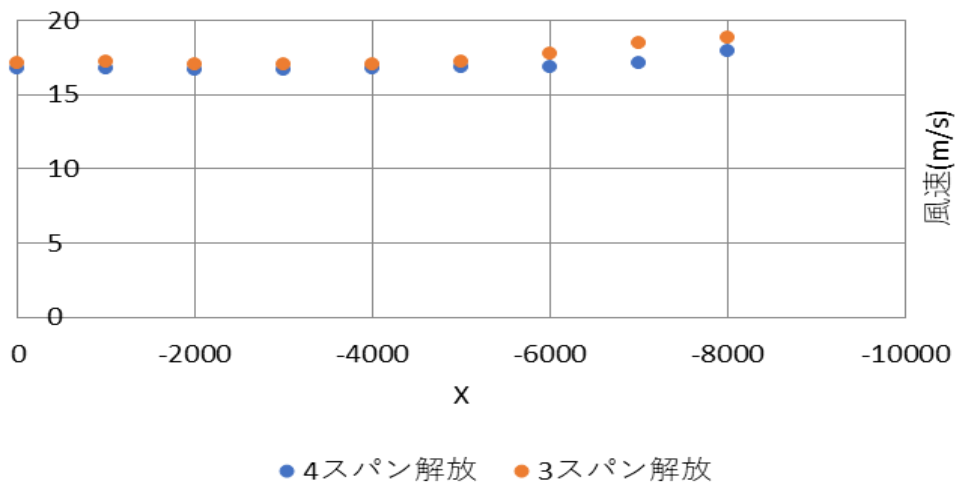


図 4.36 流速 主流方向分布

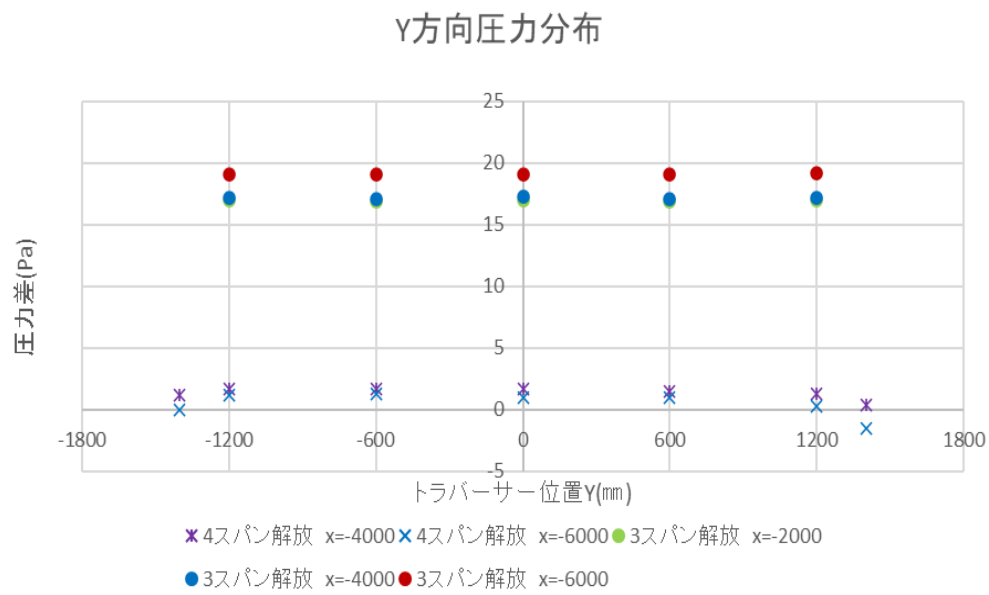


図 4.37 圧力差 水平方向分布

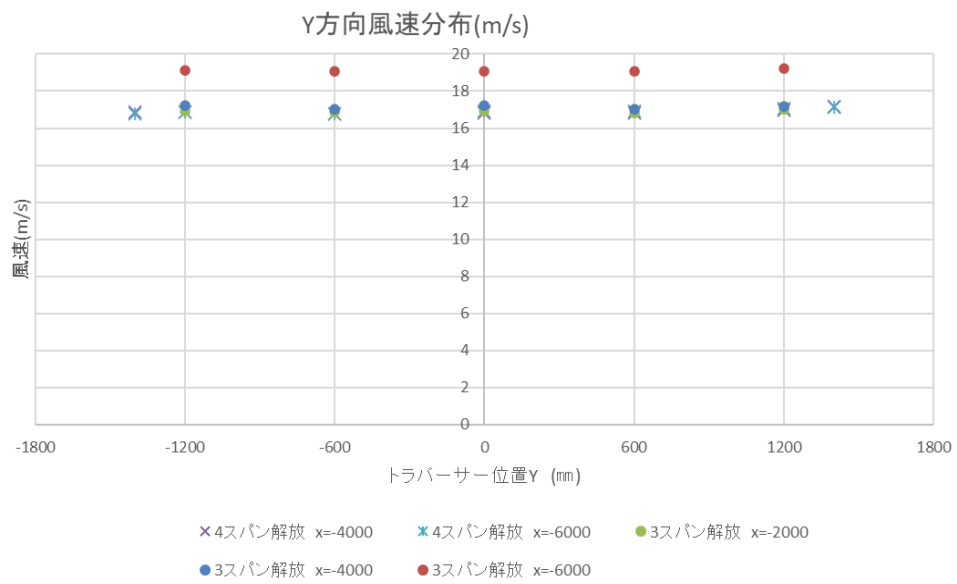


図 4.38 流速 水平方向分布

4.2.2 風車後流測定（及び後方距離比較）

本実験では風車後方において、集風体後端から集風体外径 D_{brim} を基準として $0.5D_{brim}$ ($X=-4290$), $1.0D_{brim}$ ($X=-4579$), $2.0D_{brim}$ ($X=-5159$), $3.0D_{brim}$ ($X=-5738$), $4.0D_{brim}$ ($X=-6318$), $5.0D_{brim}$ ($X=-6897$) における水平方向の後流を測定した。測定位置の模式図を図 4.39 に示す。 $0.05D_{brim}$ 後方測定時の概観を図 4.40 に示す。

また後流を測定するにあたって、代表として風車間隔を $s/D_{brim}=0.05, 0.8, 1.6, 3.2$ での後流及び、風車単基 SA での後流を測定した。また比較用としてレンズ無での SA, $s/D_{brim}=0.05, 3.2$ での交流を測定した。

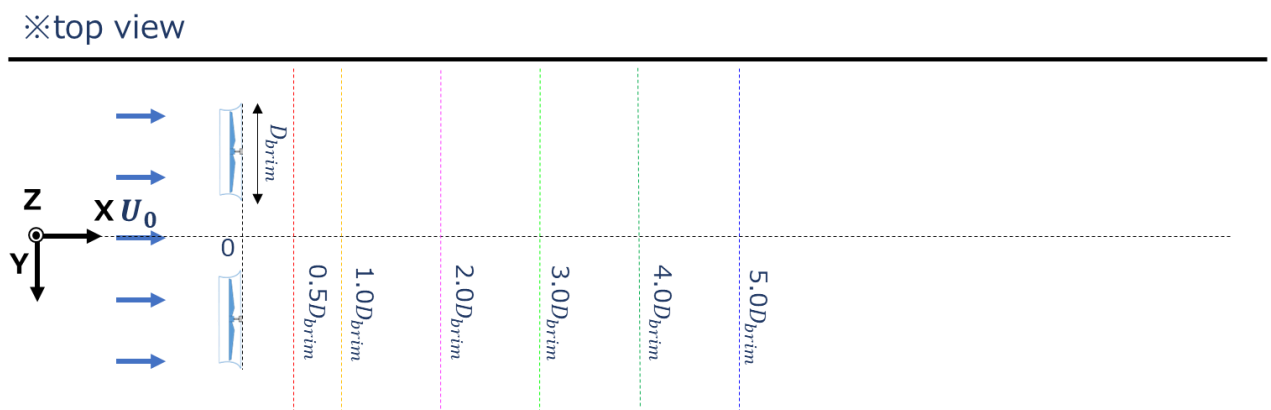


図4.39 風車後流測定箇所

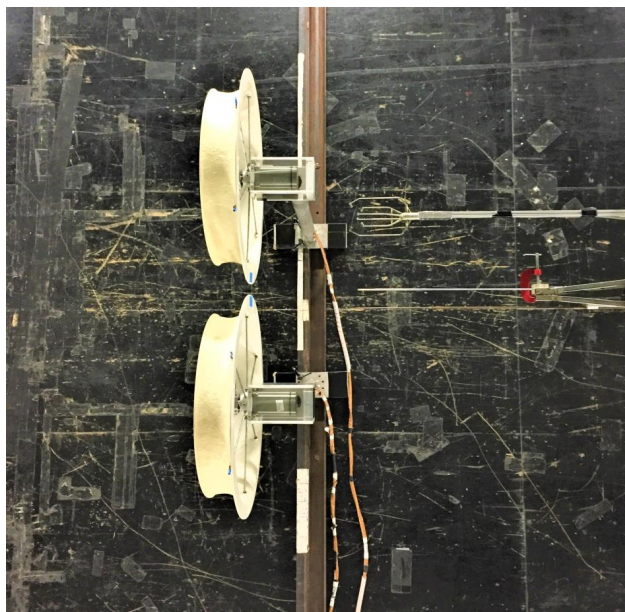


図4.40 $0.05D_{brim}$ 後方測定時概観

4.2.2.1 レンズ有 $s/D_{brim}=0.05, 1$ 回目

レンズ有風車 2 基における風車間隔 $s/D_{brim}=0.05$ での風車後方流速を測定した．風車配置位置は 4 スパン中央($X=-4000$)としている．実験条件を表 4.9 に，実験概観図を図 4.41 に示す

測定した圧力差プロファイルを図 4.42 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.43 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.44 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.45 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.46 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.47 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.48 に示す．

表 4.9 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3,4,5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.05$)
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz)，計測時間(10s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0



図4.41 実験概要図

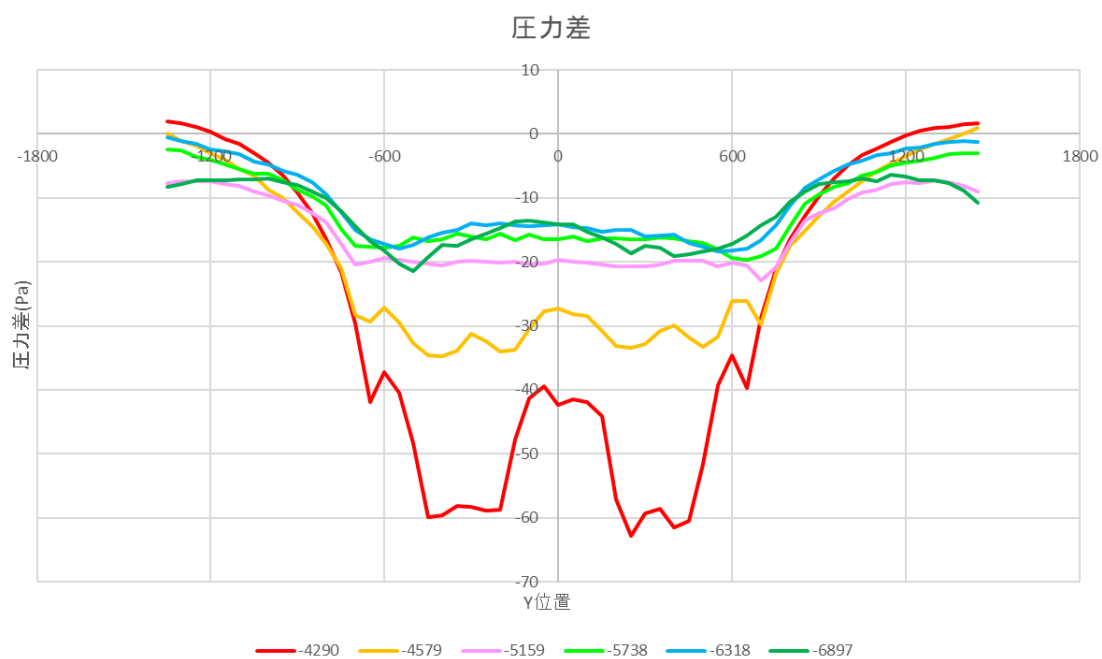


图4.42 風車後方压力差分布图

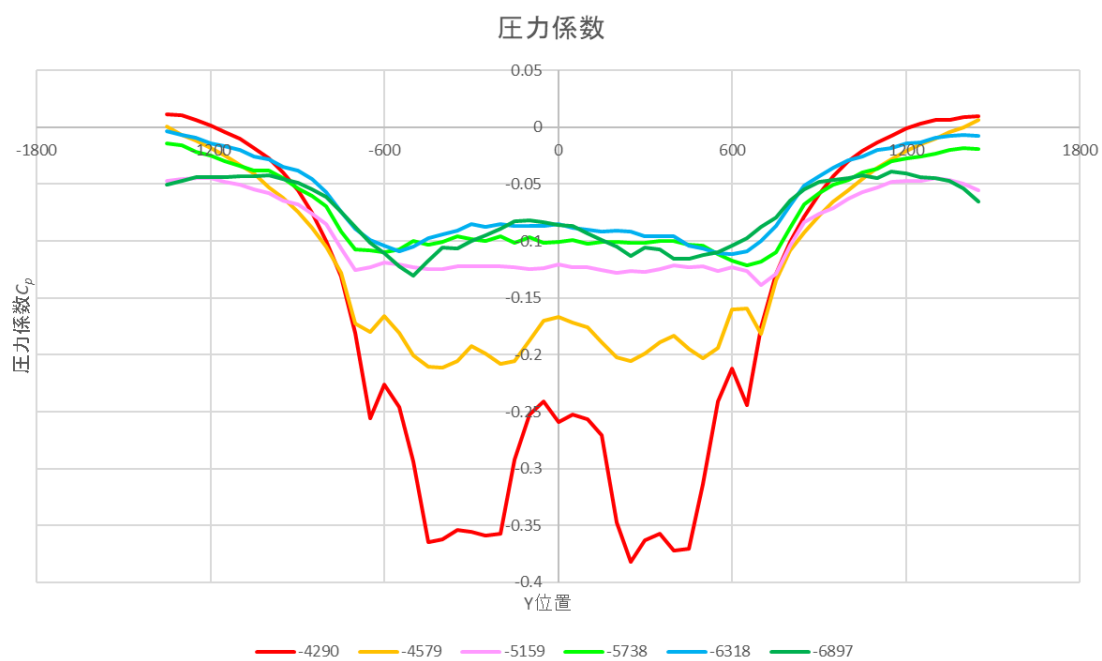


图4.43 風車後方压力系数布图

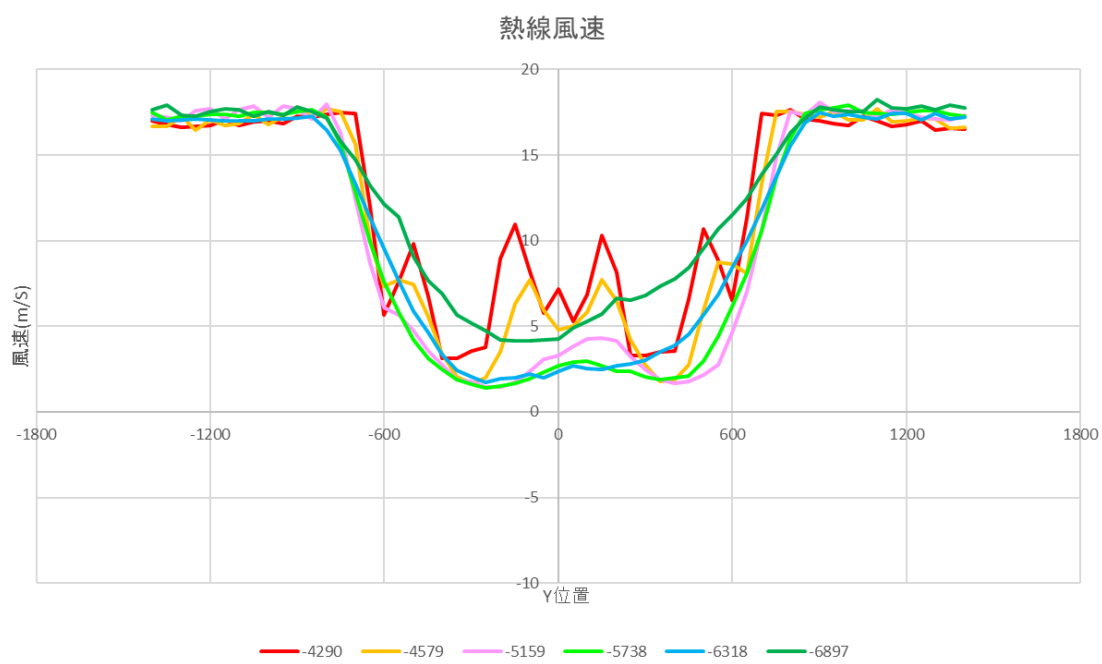


图4.44 風車後方熱線流速布图

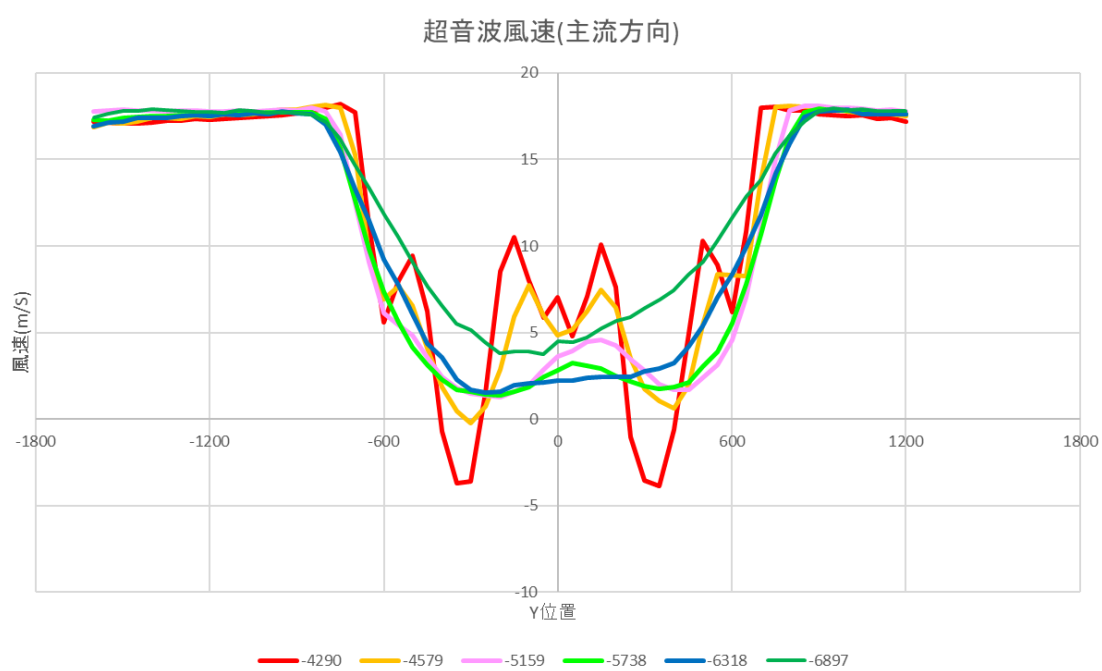


图4.45 風車後方超音波主流方向流速分布图

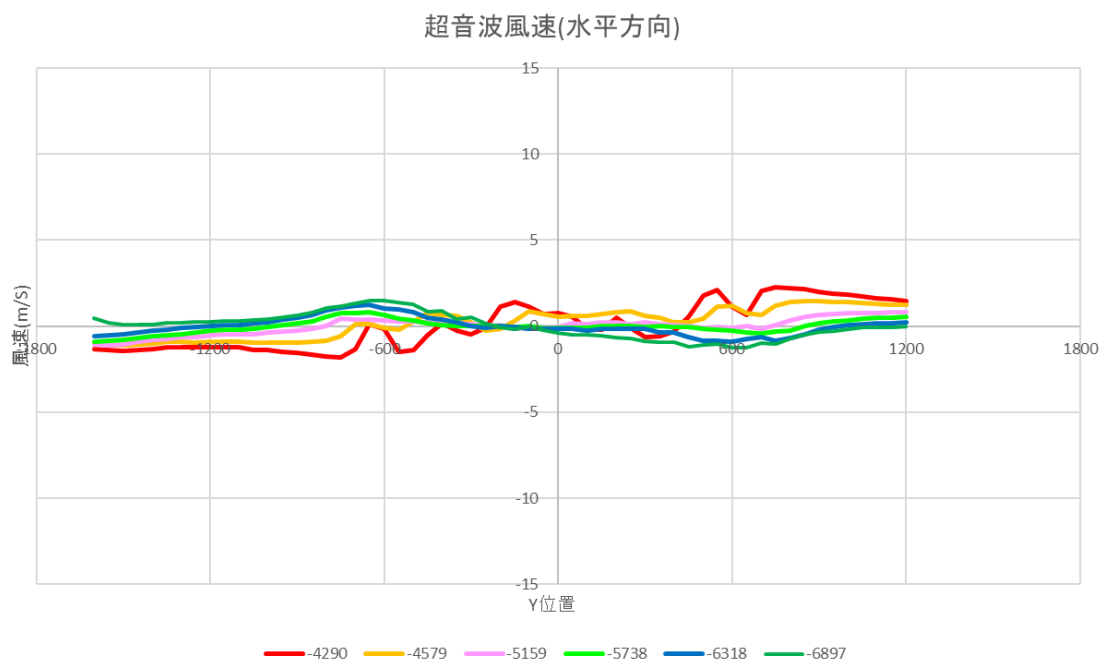


图4.46 風車後方超音波水平方向流速分布图

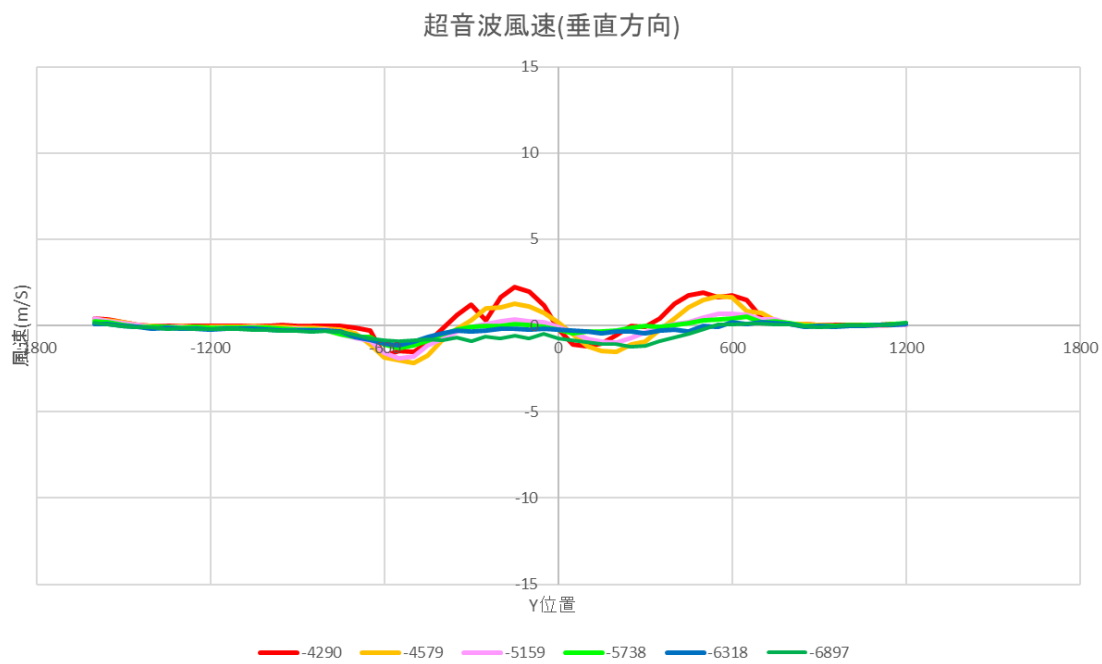


图4.47 風車後方超音波鉛直方向流速分布图

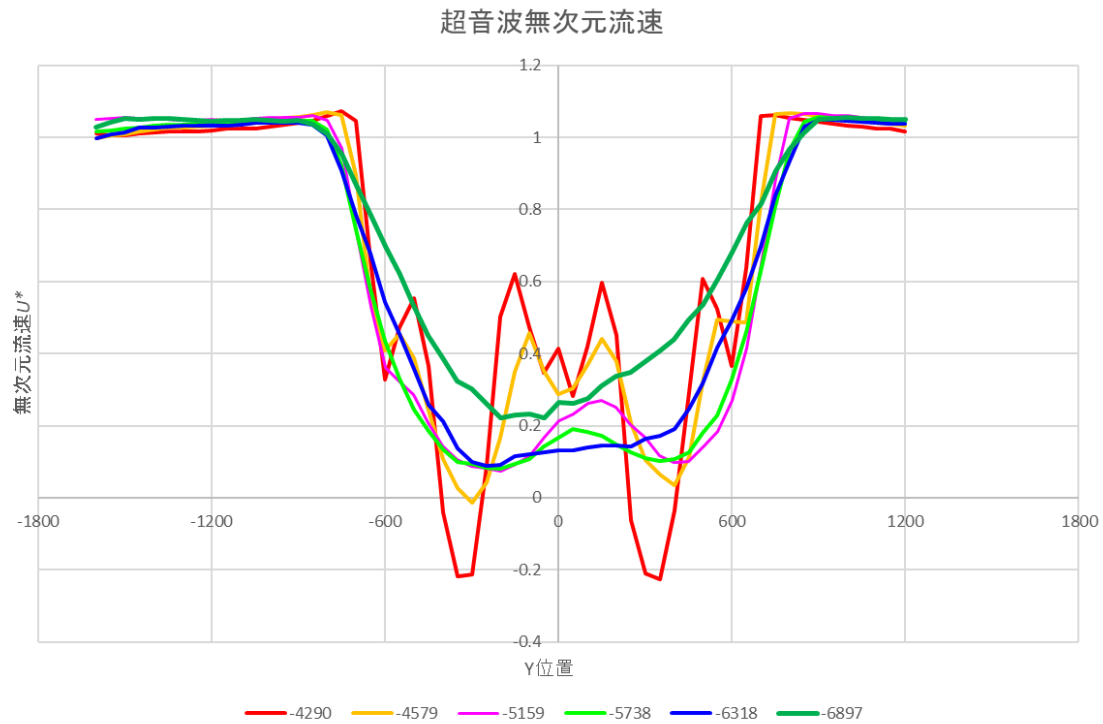


図4.48 風車後方超音波主流方向無次元流速分布図

4.2.2.2 レンズ有 $s/D_{brim}=0.05$, 2 回目

レンズ有風車 2 基における風車間隔 $s/D_{brim}=0.05$ での 2 回目の風車後方流速を測定した。風車配置位置は 4 スパン中央($X=-4000$)としている。実験条件を表 4.10 に、実験概観図を図 4.49 に示す。測定した圧力差プロファイルを図 4.50 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.51 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.52 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.53 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.54 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.55 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.56 に示す。

表 4.10 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3,4,5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.05$)
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz), 計測時間(10s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0



图4.49 实验概要图

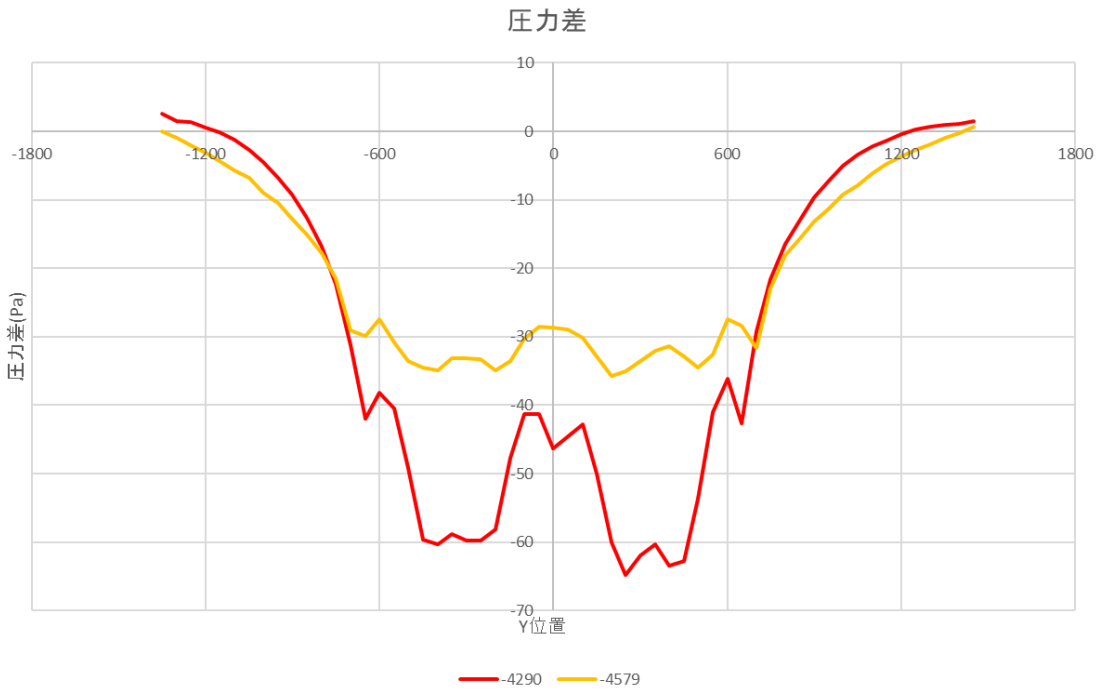


图4.50 风车后方压力差分布图

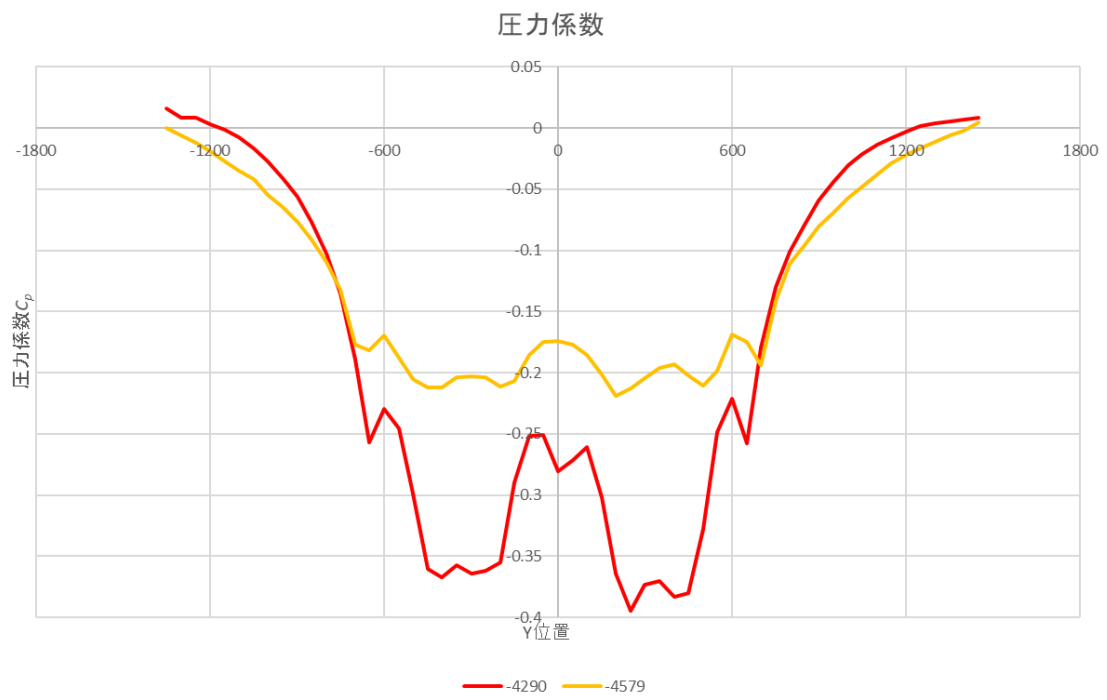


图4.51 風車後方压力系数布图

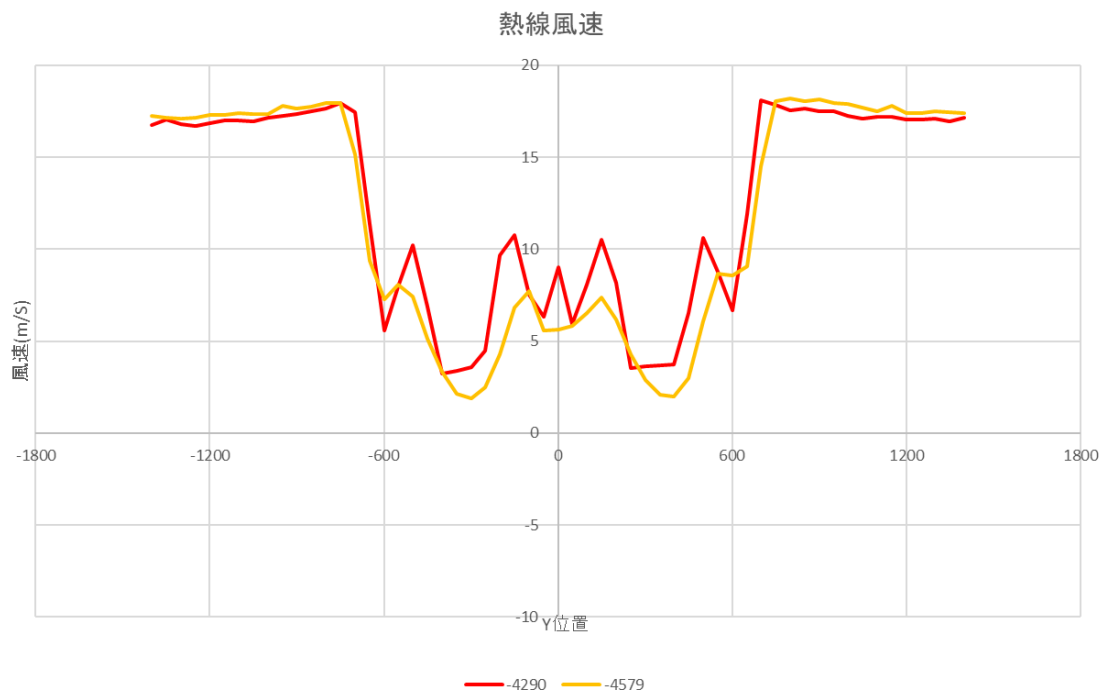


图4.52 風車後方熱線流速布图

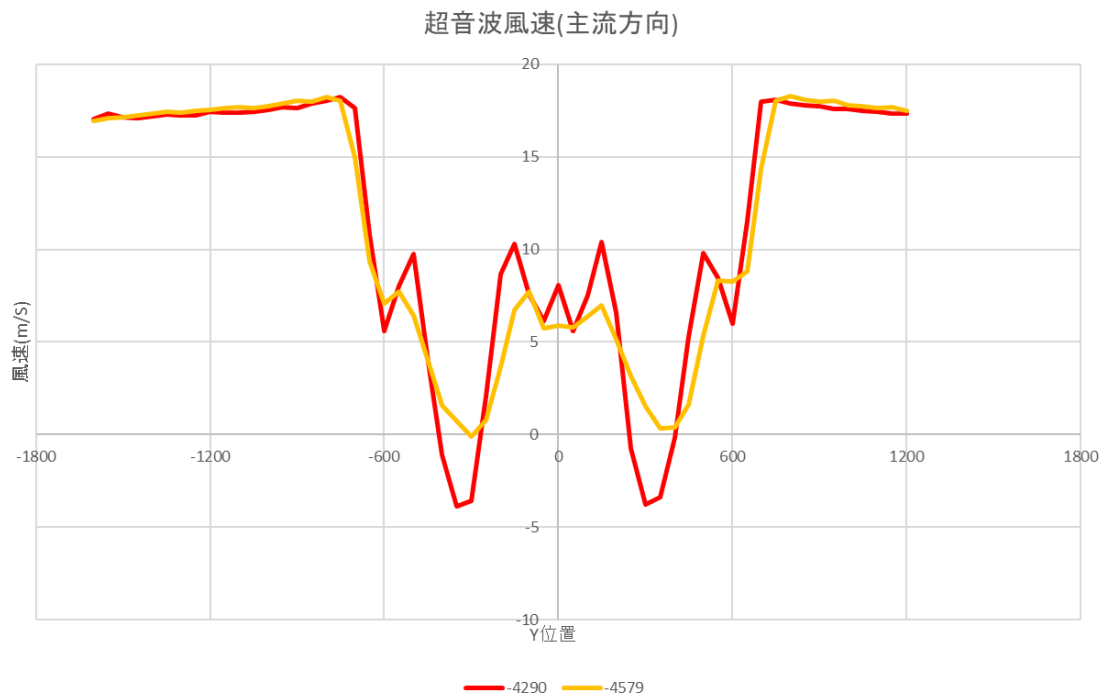


图4.53 風車後方超音波主流方向流速分布图

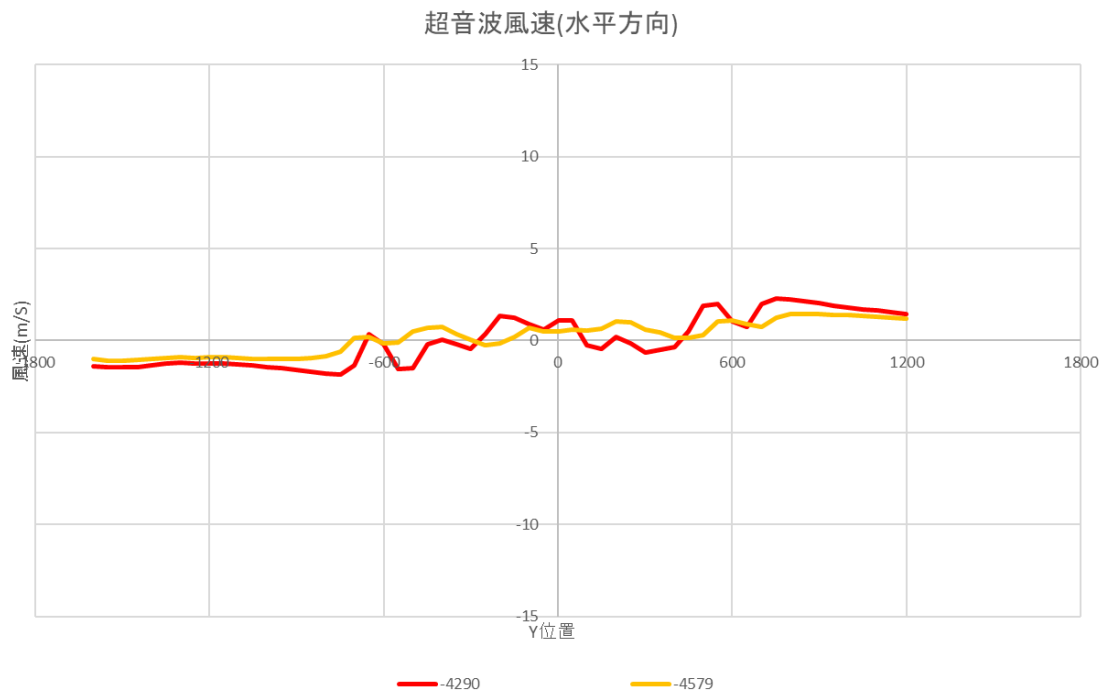


图4.54 風車後方超音波水平方向流速分布图

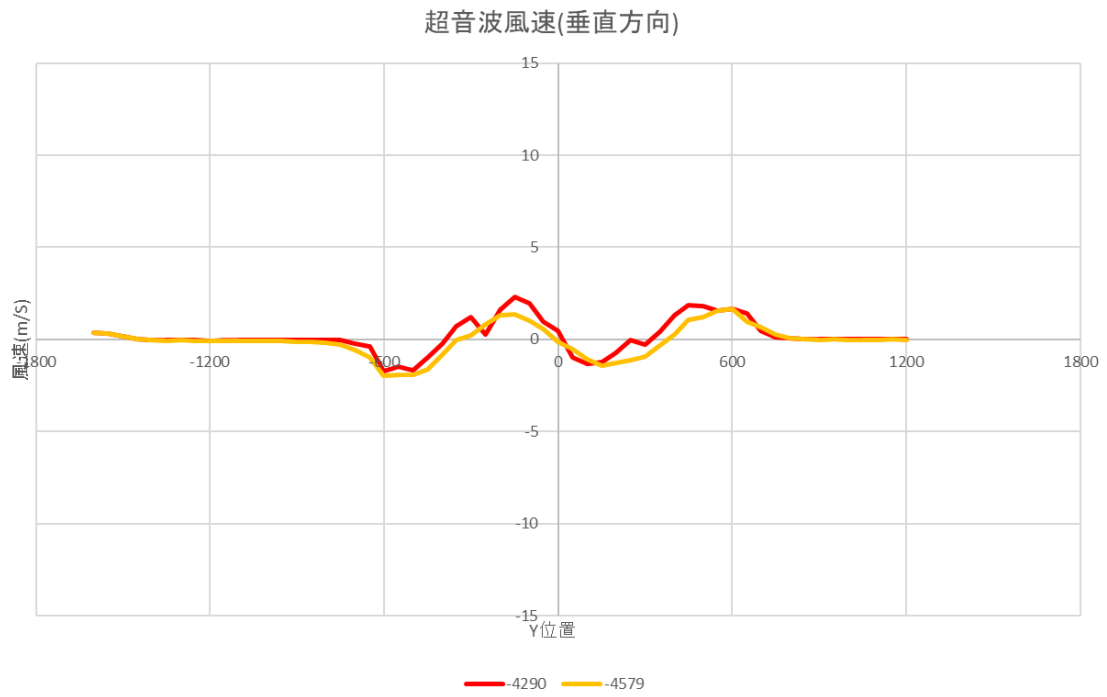


图4.55 風車後方超音波鉛直方向流速分布图

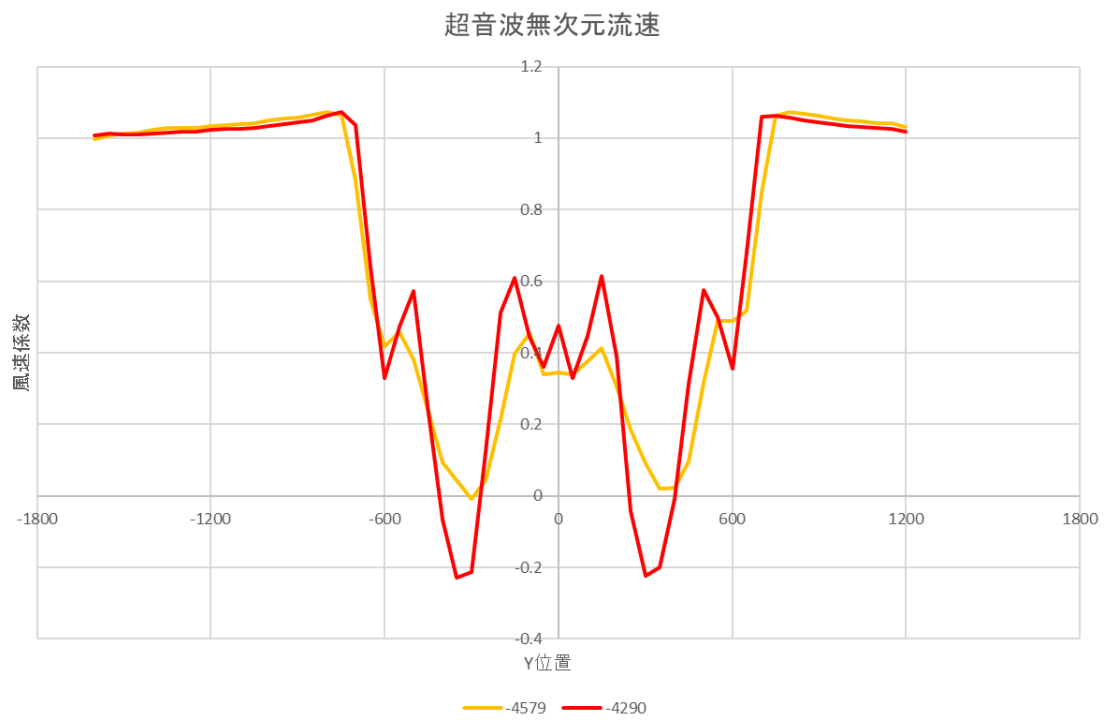


图4.56 風車後方超音波主流方向無次元流速分布图

4.2.2.3 レンズ有 $s/D_{brim}=0.8, 1$ 回目

レンズ有風車 2 基における風車間隔 $s/D_{brim}=0.8$ での風車後方流速を測定した。風車配置位置は 4 スパン中央($X=-4000$)としている。実験条件を表 4.11 に、実験概観図を図 4.57 に示す

測定した圧力差プロファイルを図 4.58 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.59 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.60 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.61 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.62 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.63 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.64 に示す。

表 4.11 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3,4,5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.8$)
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz), 計測時間(10s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0

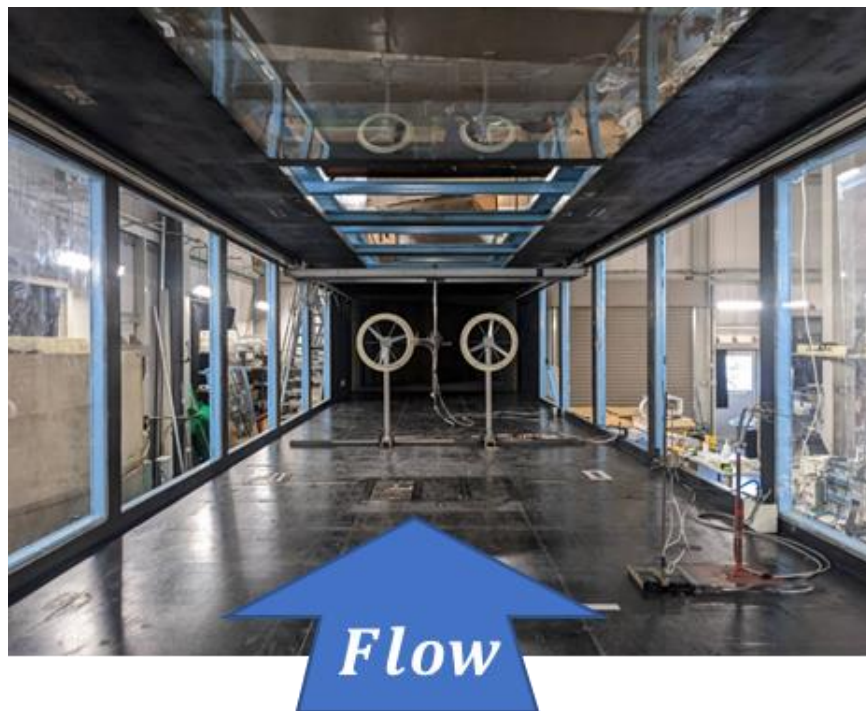


図4.57 実験概要図

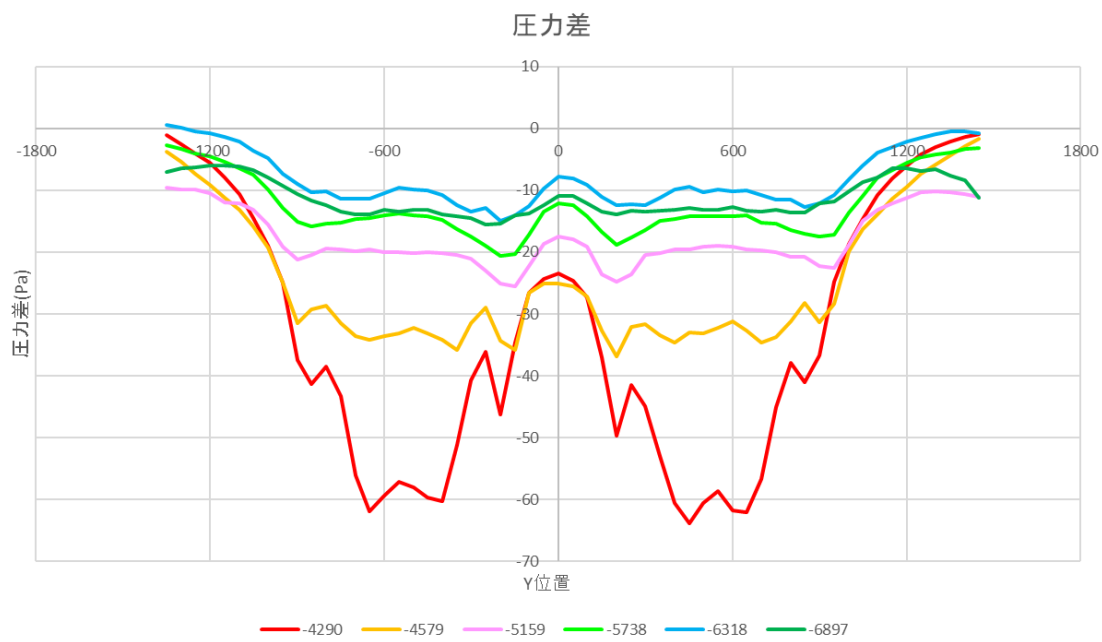


图4.58 風車後方压力差分布图

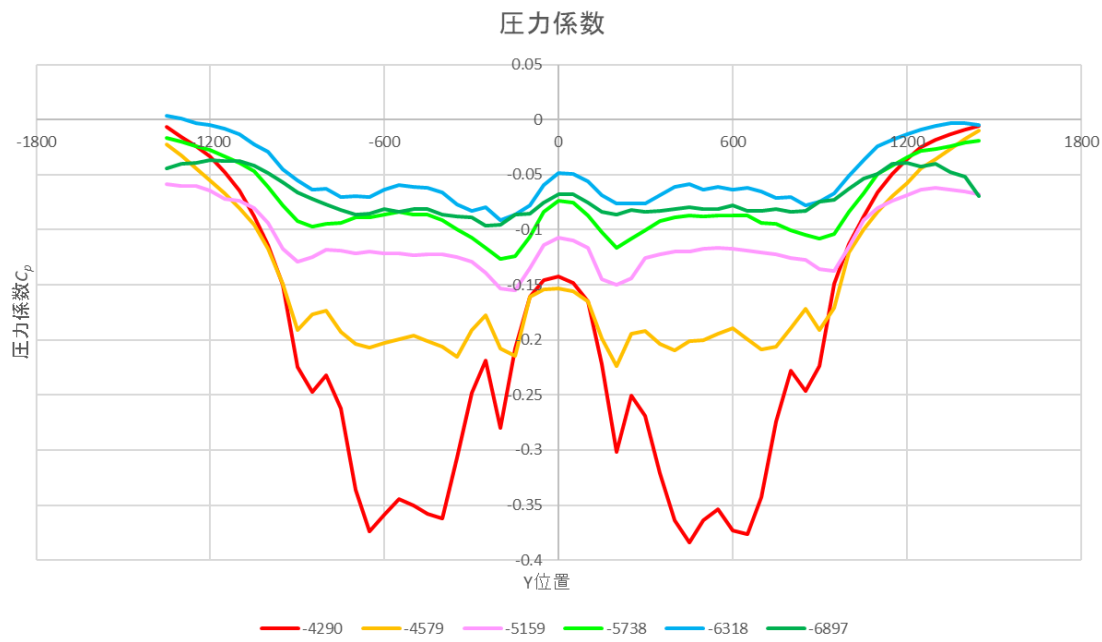


图4.59 風車後方压力系数布图

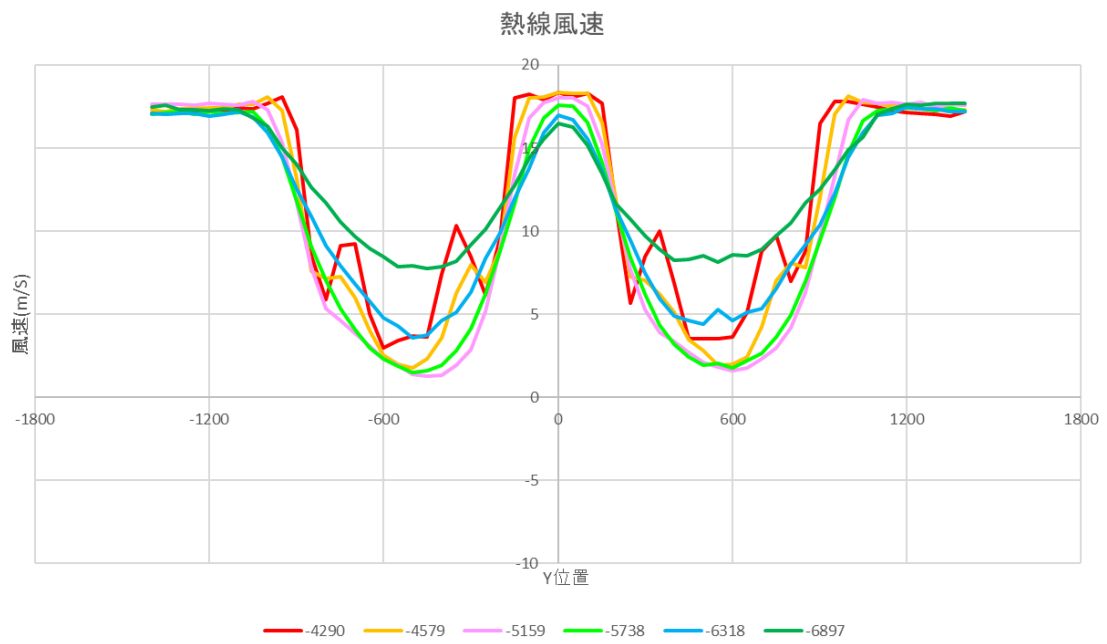


图4.60 風車後方熱線流速布图

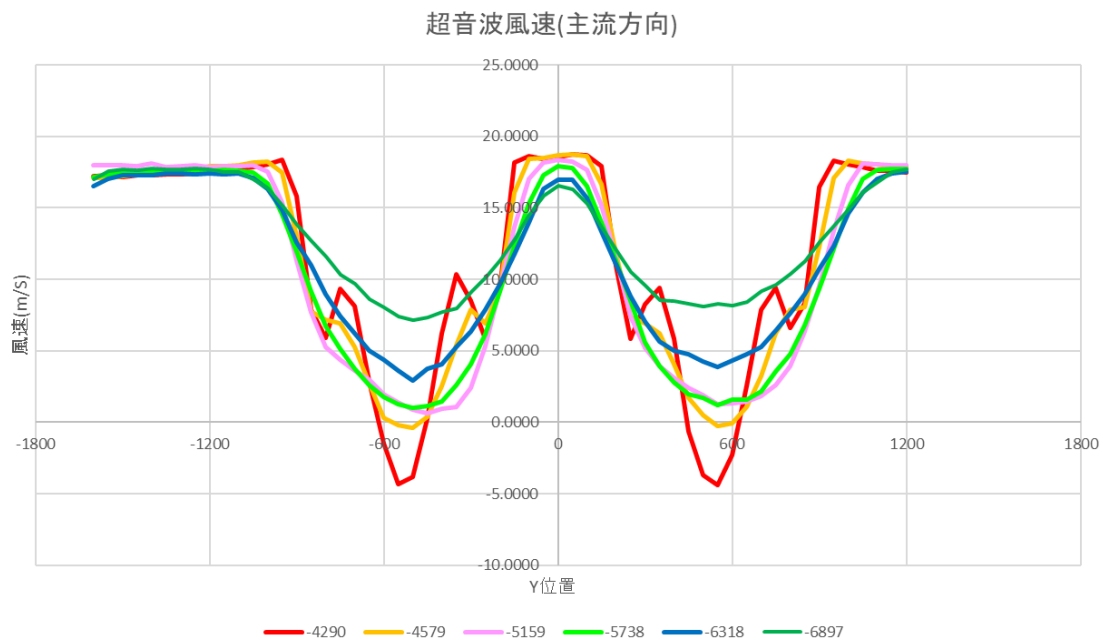


图4.61 風車後方超音波主流方向流速分布图

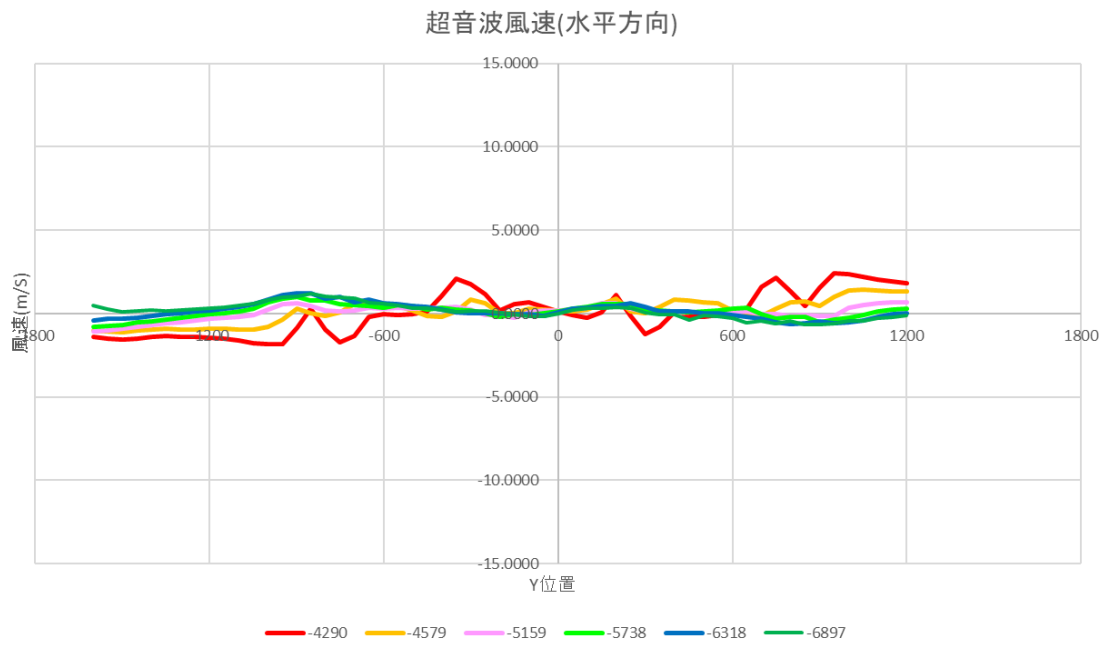


图4.62 風車後方超音波水平方向流速分布图

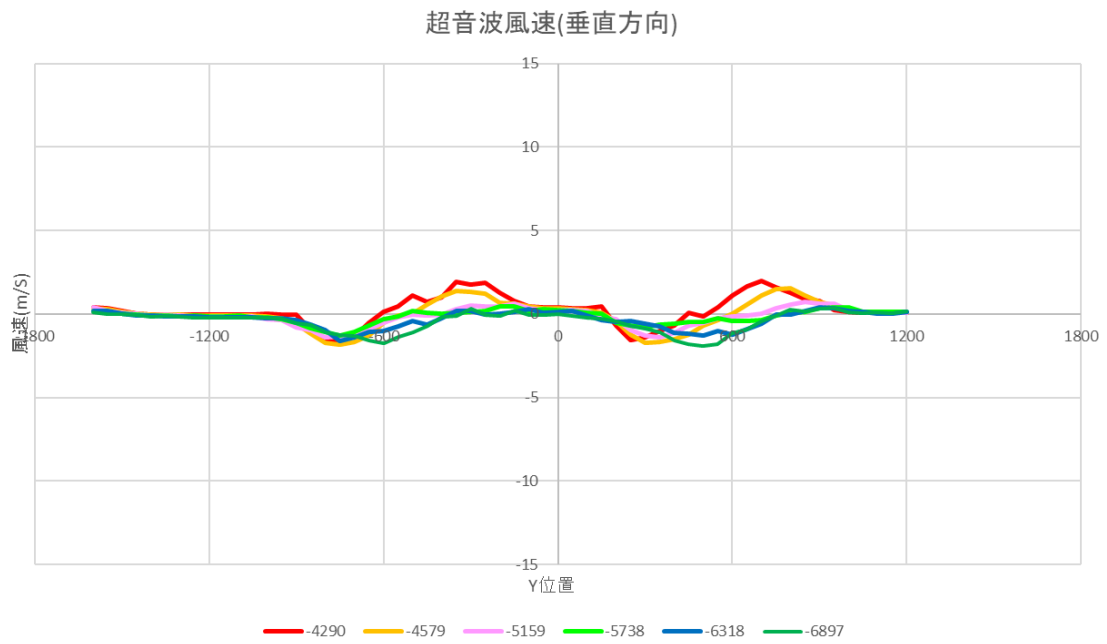


图4.63 風車後方超音波鉛直方向流速分布图

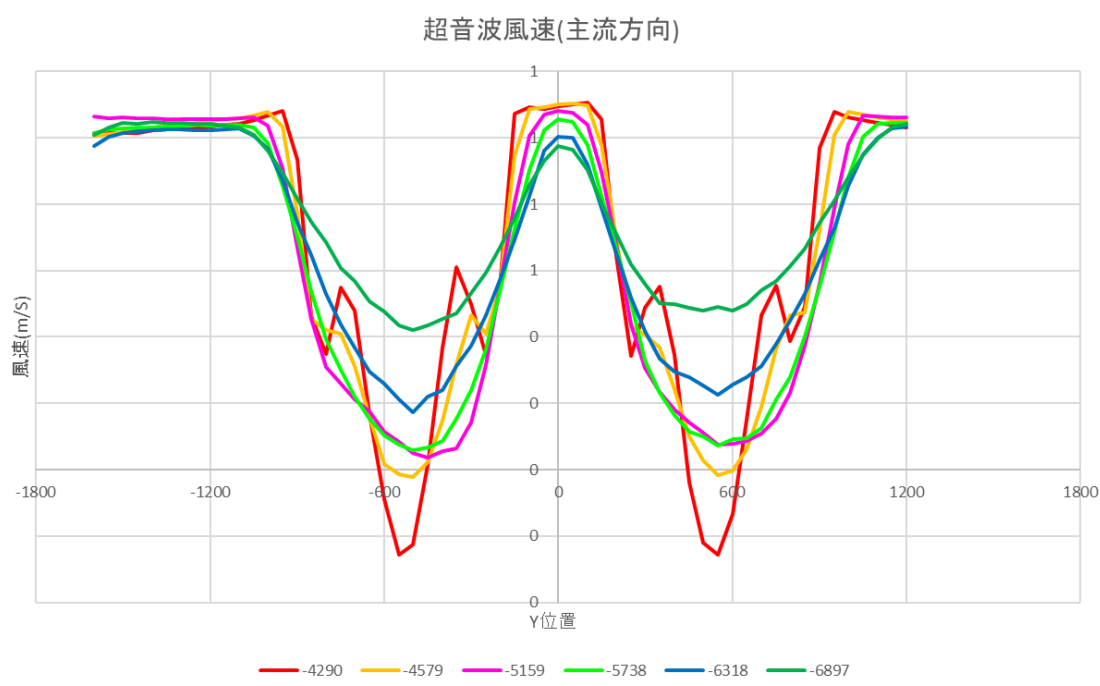


図4.64 風車後方超音波主流方向無次元流速分布図

4.2.2.4 レンズ有 $s/D_{brim}=0.8, 2$ 回目

レンズ有風車 2 基における風車間隔 $s/D_{brim}=0.8$ で 2 回目の風車後方流速を測定した．風車配置位置は 4 スパン中央($X=-4000$)としている．実験条件を表 4.12 に，実験概観図を図 4.65 に示す

測定した圧力差プロファイルを図 4.66 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.67 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.68 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.69 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.70 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.71 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.72 に示す．

表 4.12 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.8$)
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz)，計測時間(10s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0

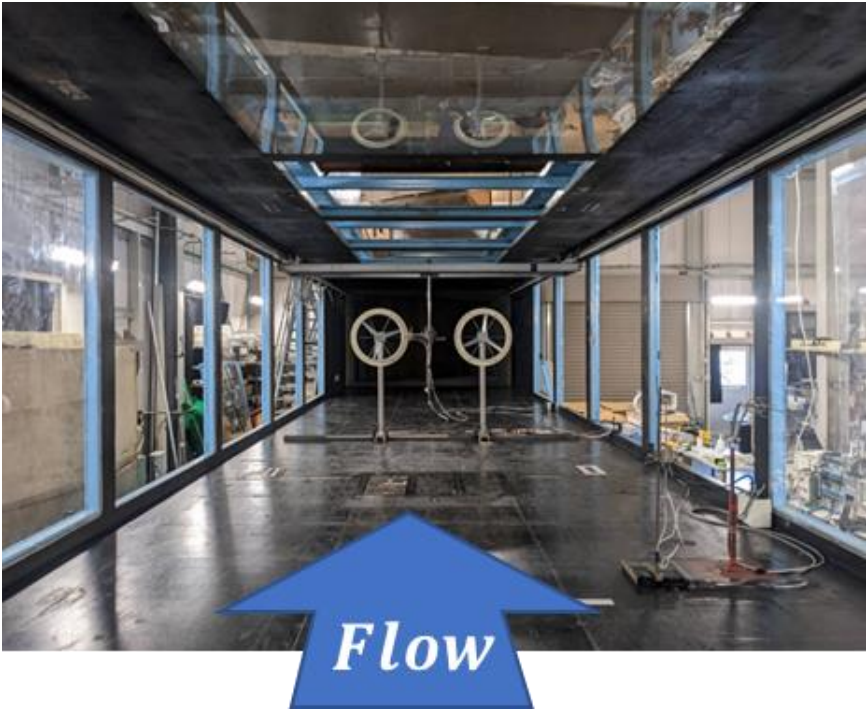


图4.65 实验概要图

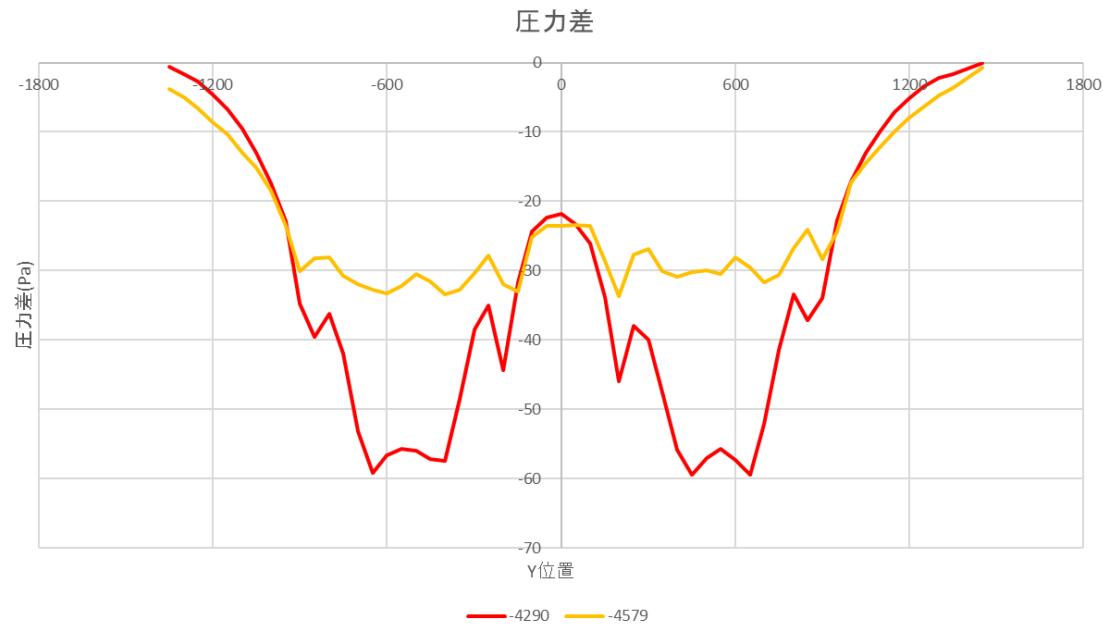


图4.66 风车后方压力差分布图

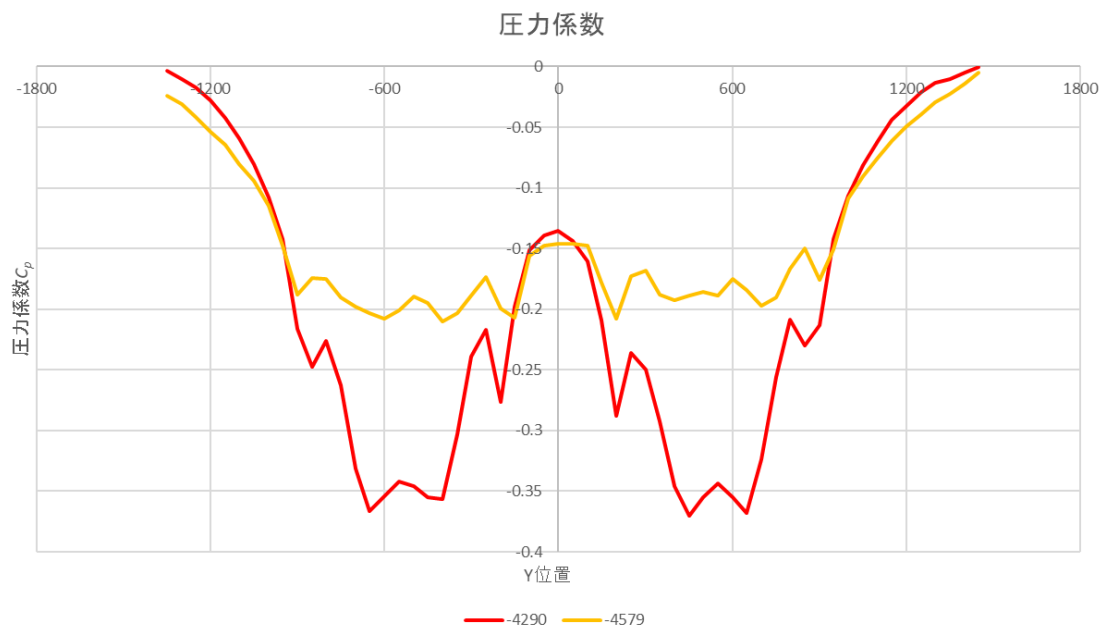


图4.67 風車後方压力系数布图

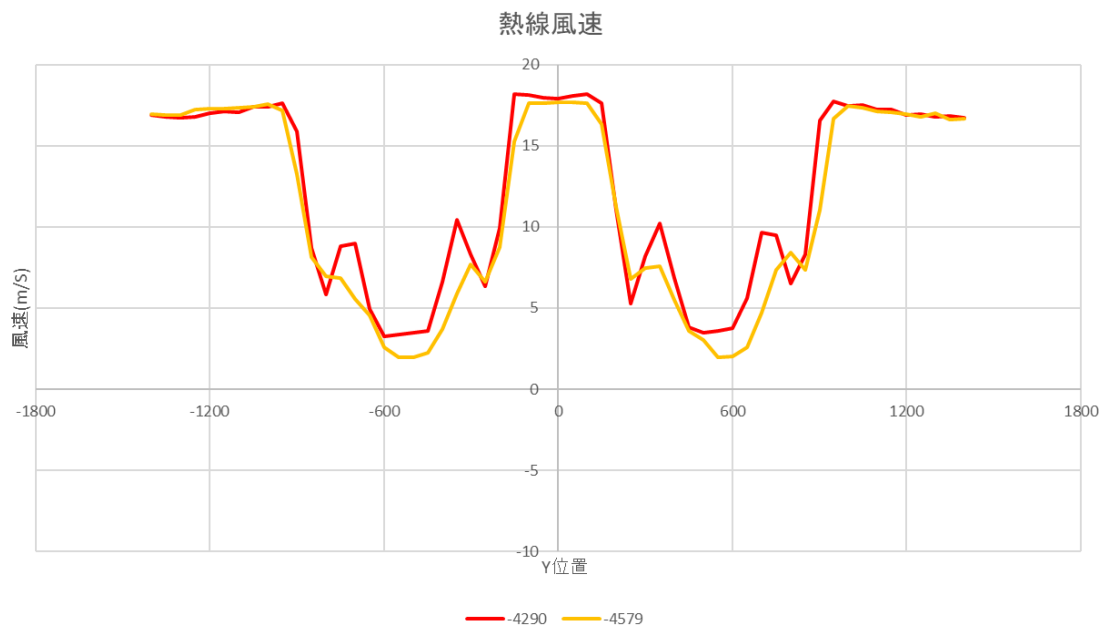


图4.68 風車後方熱線流速布图

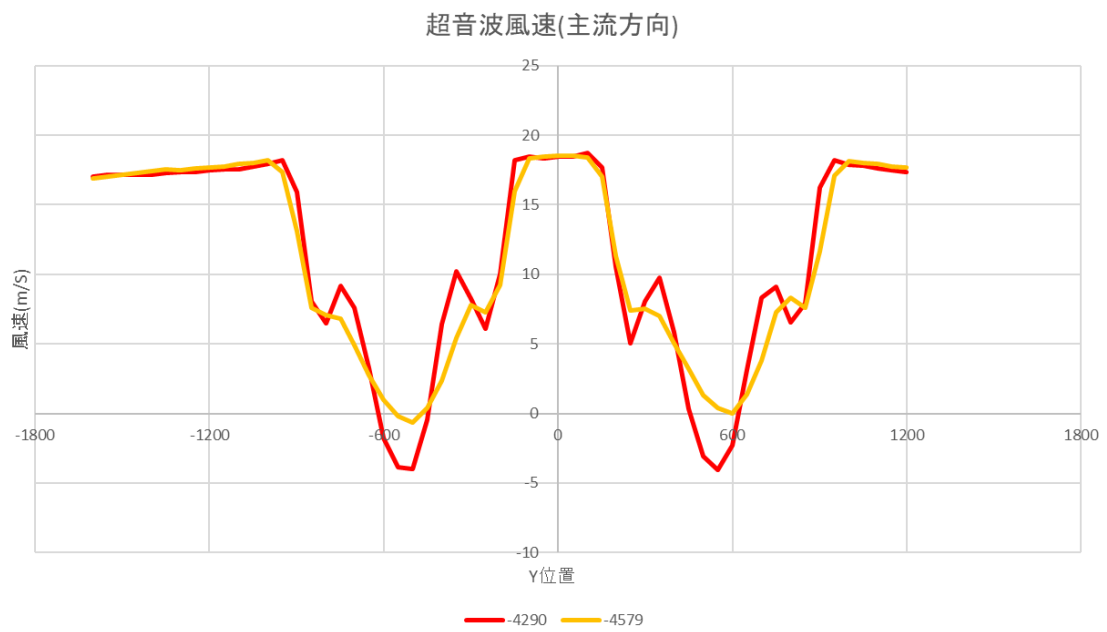


图4.69 風車後方超音波主流方向流速分布图

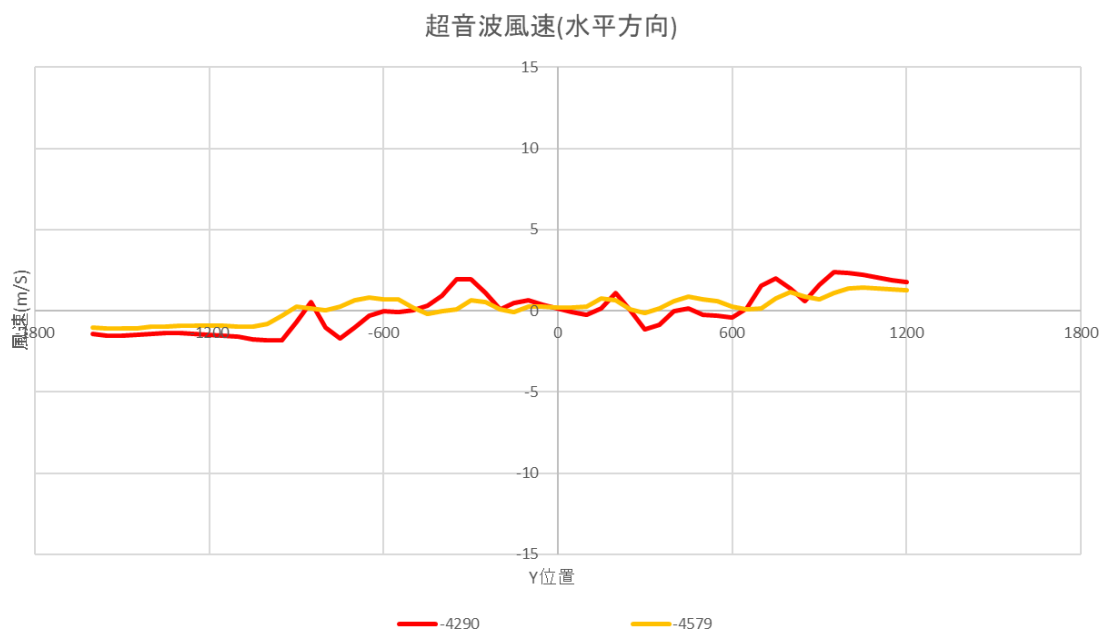


图4.70 風車後方超音波水平方向流速分布图

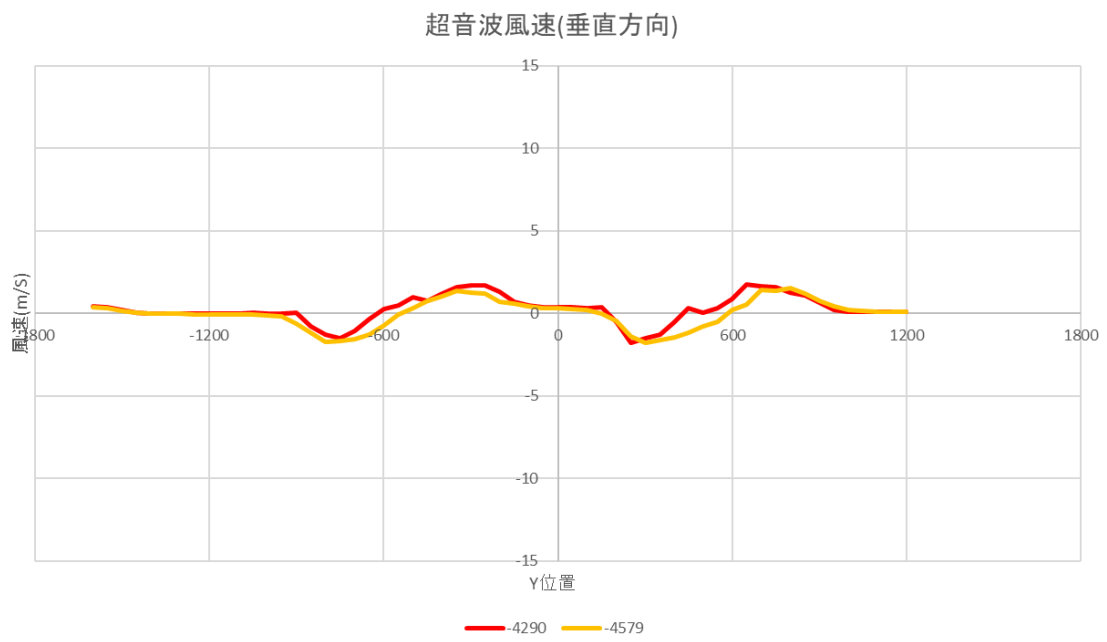


图4.71 風車後方超音波鉛直方向流速分布图

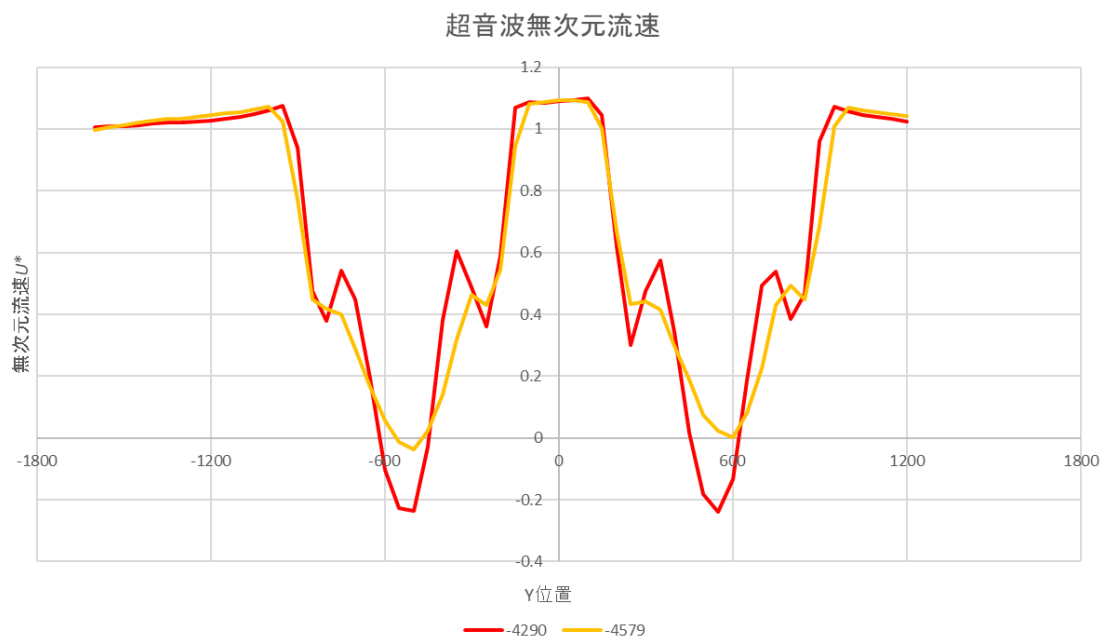


图4.72 風車後方超音波主流方向無次元流速分布图

4.2.2.5 レンズ有 $s/D_{brim}=1.6$

レンズ有風車 2 基における風車間隔 $s/D_{brim}=1.6$ での風車後方流速を測定した。風車配置位置は 4 スパン中央($X=-4000$)としている。実験条件を表 4.13 に、実験概観図を図 4.73 に示す

測定した圧力差プロファイルを図 4.74 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.75 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.76 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.77 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.78 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.79 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.80 に示す。

表 4.13 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3,4,5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=1.6$)
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz), 計測時間(10s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0



図4.73 実験概要図

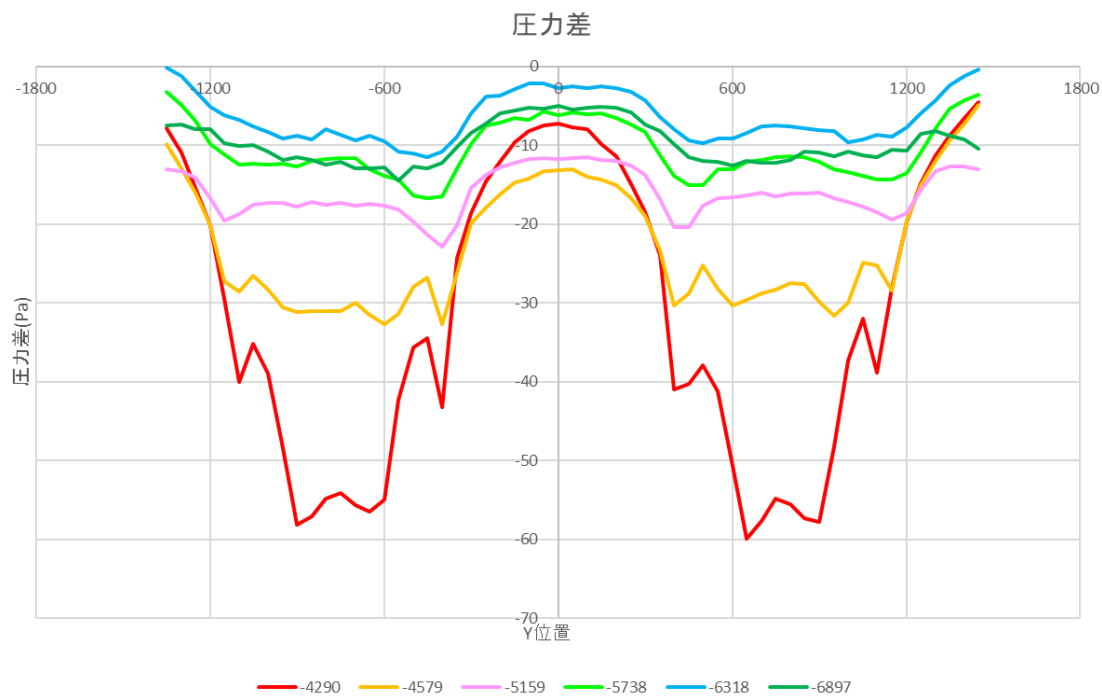


图4.74 風車後方压力差分布图

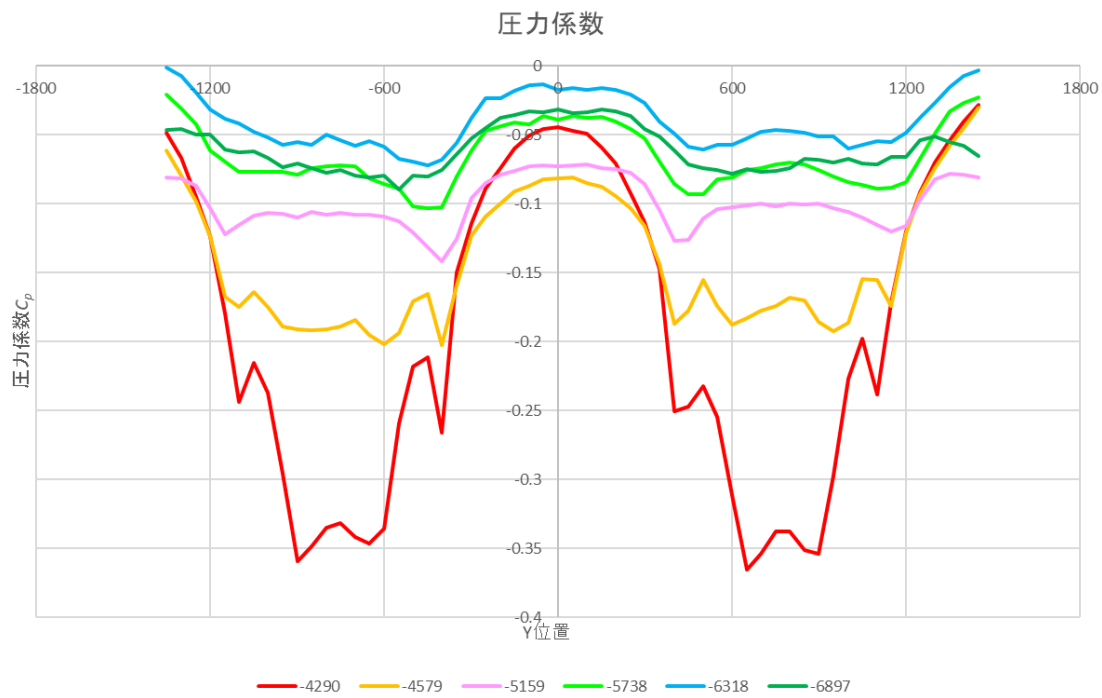


图4.75 風車後方压力系数布图

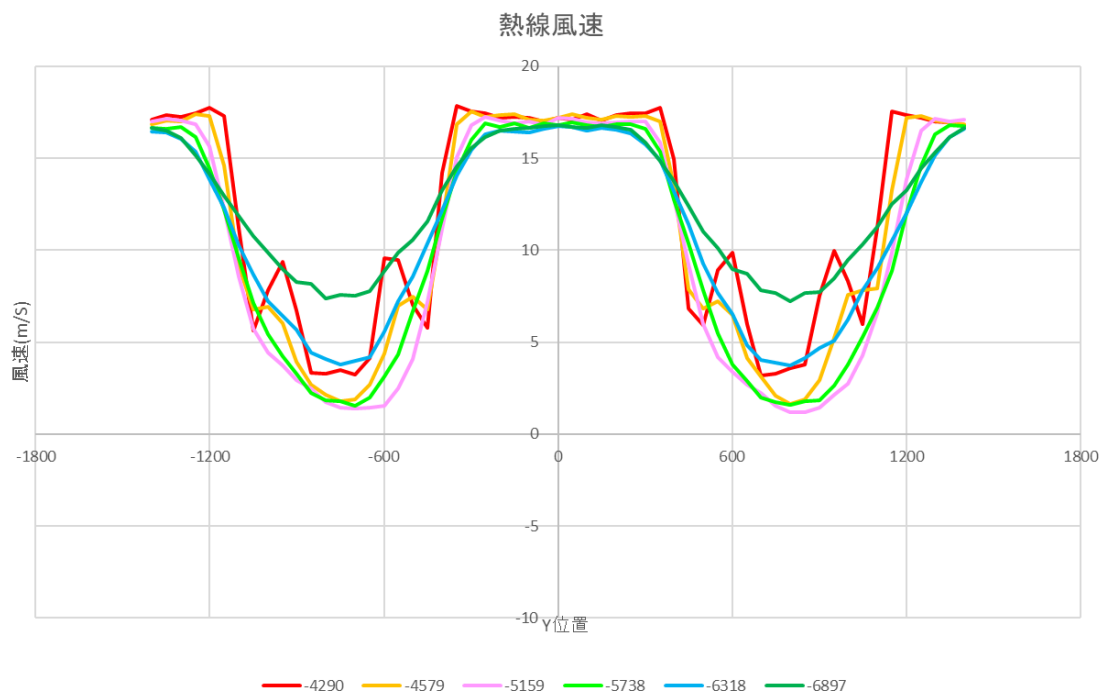


图4.76 風車後方熱線流速布图

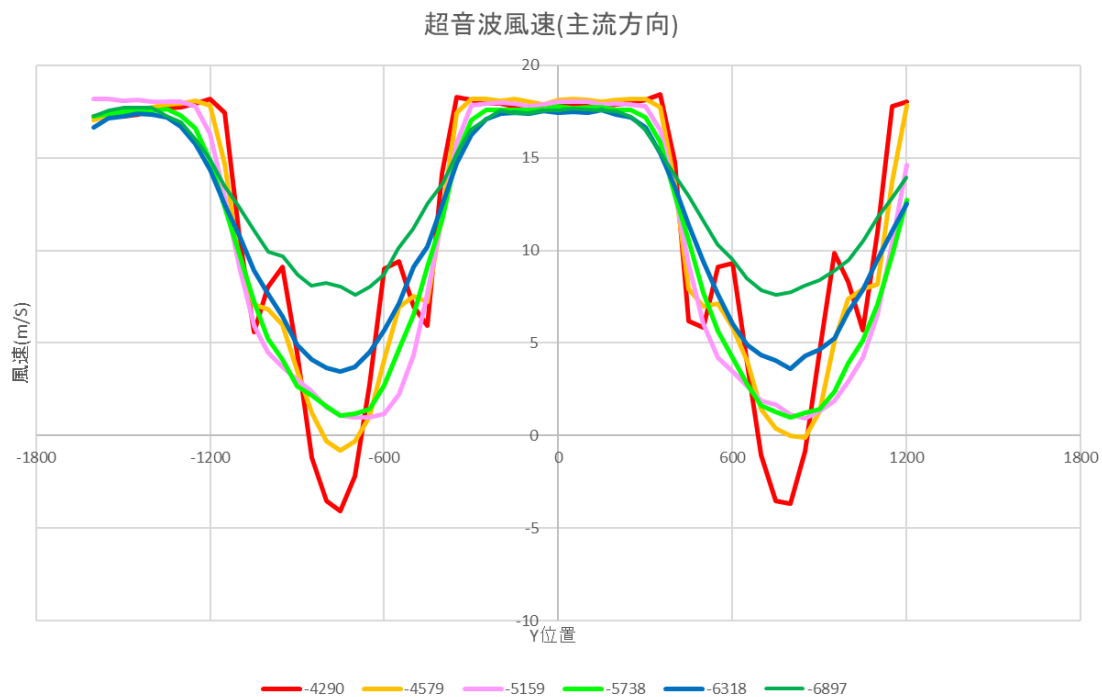


图4.77 風車後方超音波主流方向流速分布图

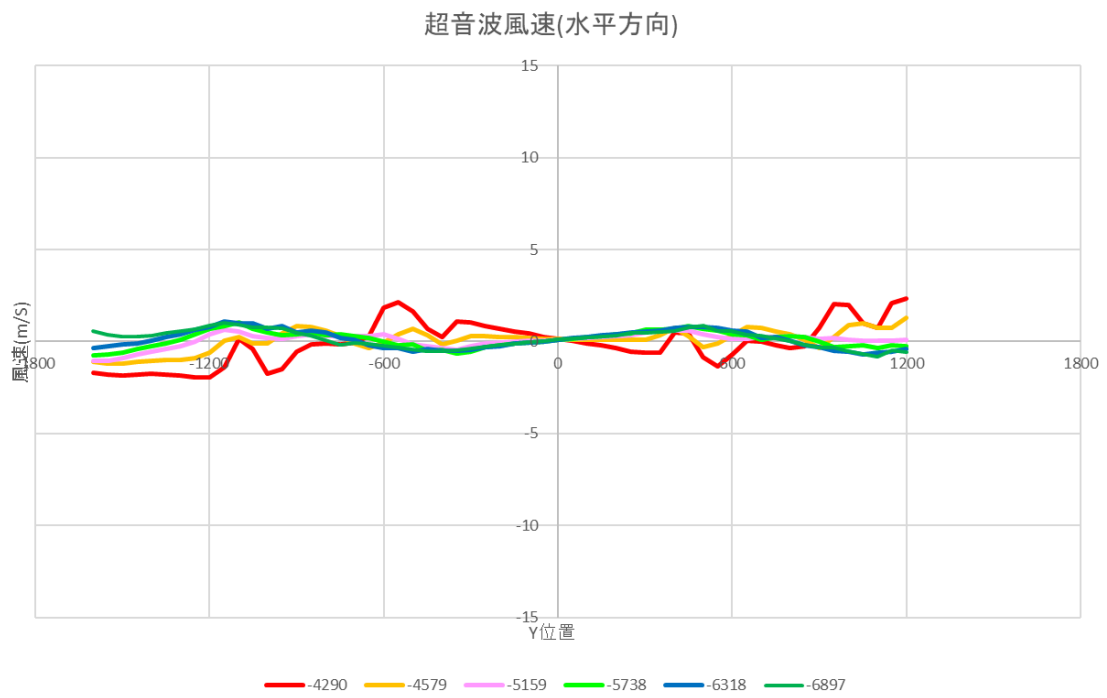


图4.78 風車後方超音波水平方向流速分布图

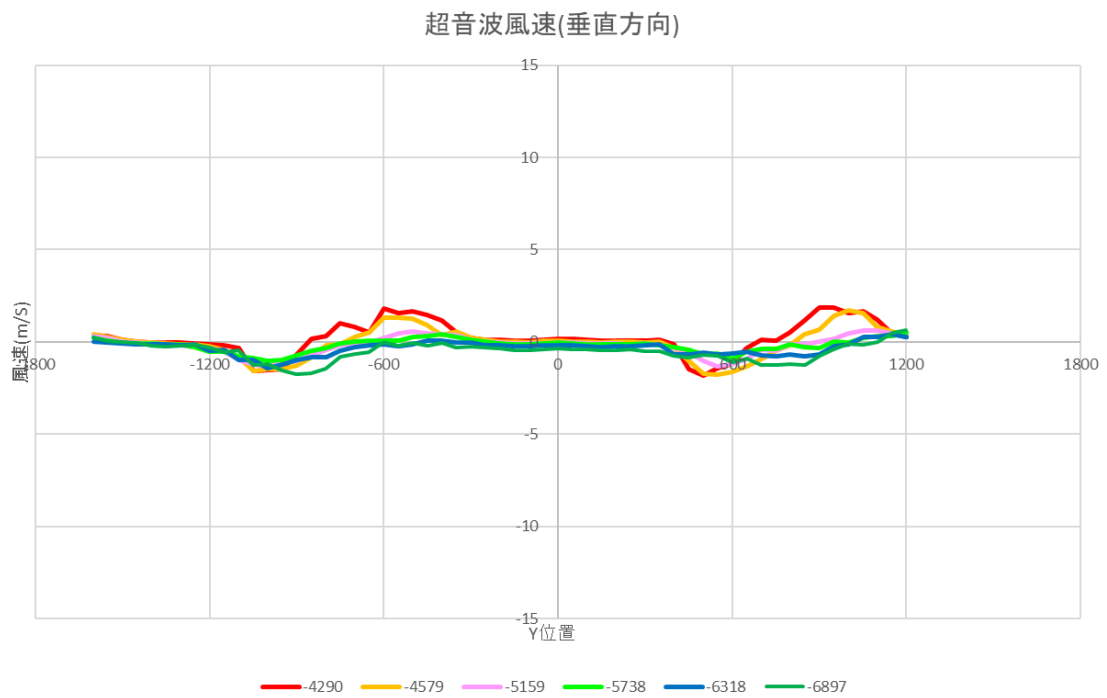


图4.79 風車後方超音波鉛直方向流速分布图

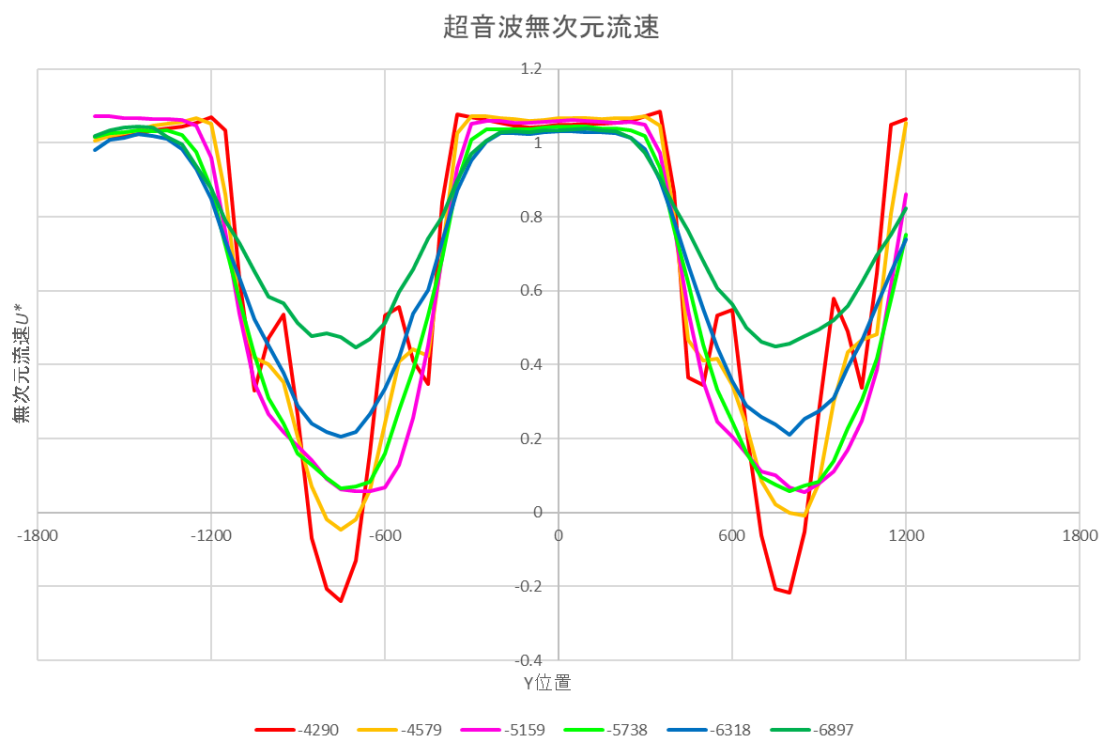


図4.80 風車後方超音波主流方向無次元流速分布図

4.2.2.6 レンズ有 $s/D_{brim}=3.2$

レンズ有風車 2 基における風車間隔 $s/D_{brim}=3.2$ での風車後方流速を測定した．風車配置位置は 4 スパン中央($X=-4000$)としている．実験条件を表 4.14 に，実験概観図を図 4.81 に示す

測定した圧力差プロファイルを図 4.82 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.83 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.84 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.85 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.86 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.87 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.88 に示す．

表 4.14 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3,4,5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=3.2$)
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz)，計測時間(10s)
風速 U_∞	17 (m/s)
周速比 λ	4.0



図4.81 実験概要図

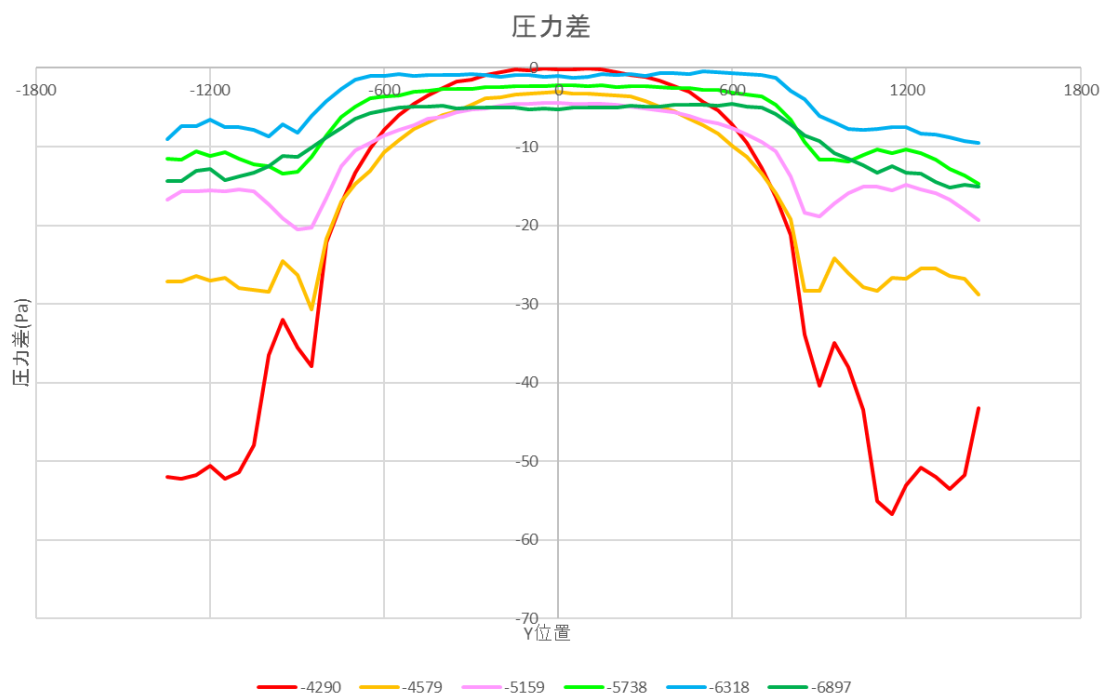


図4.82 風車後方圧力差分布図

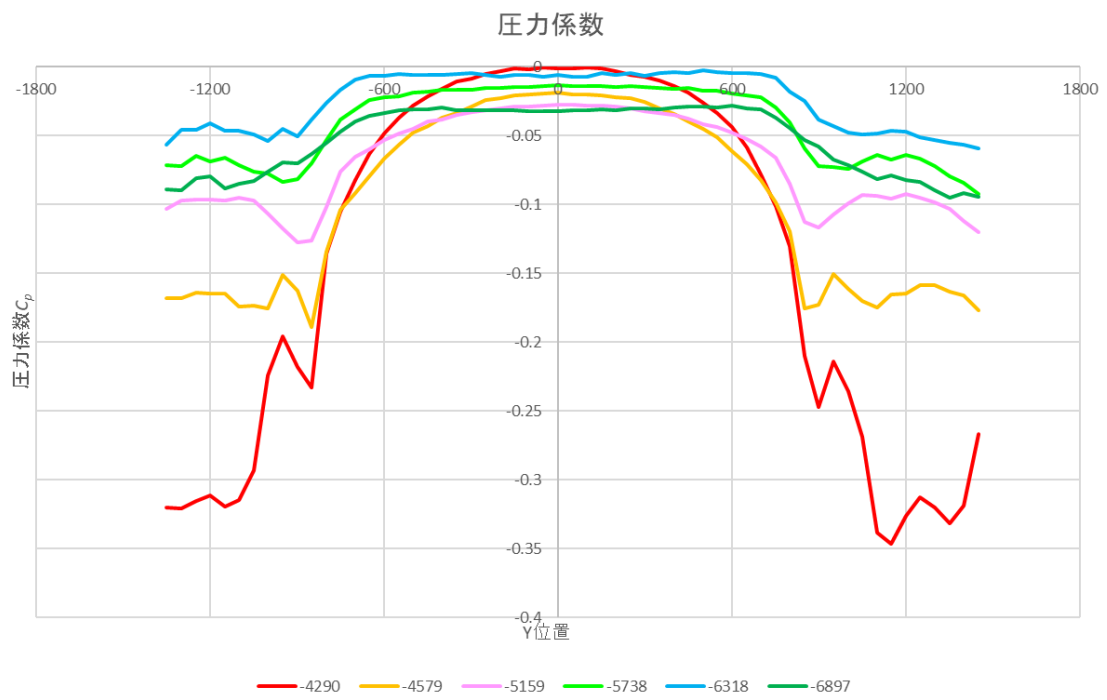


图4.83 風車後方压力系数布图

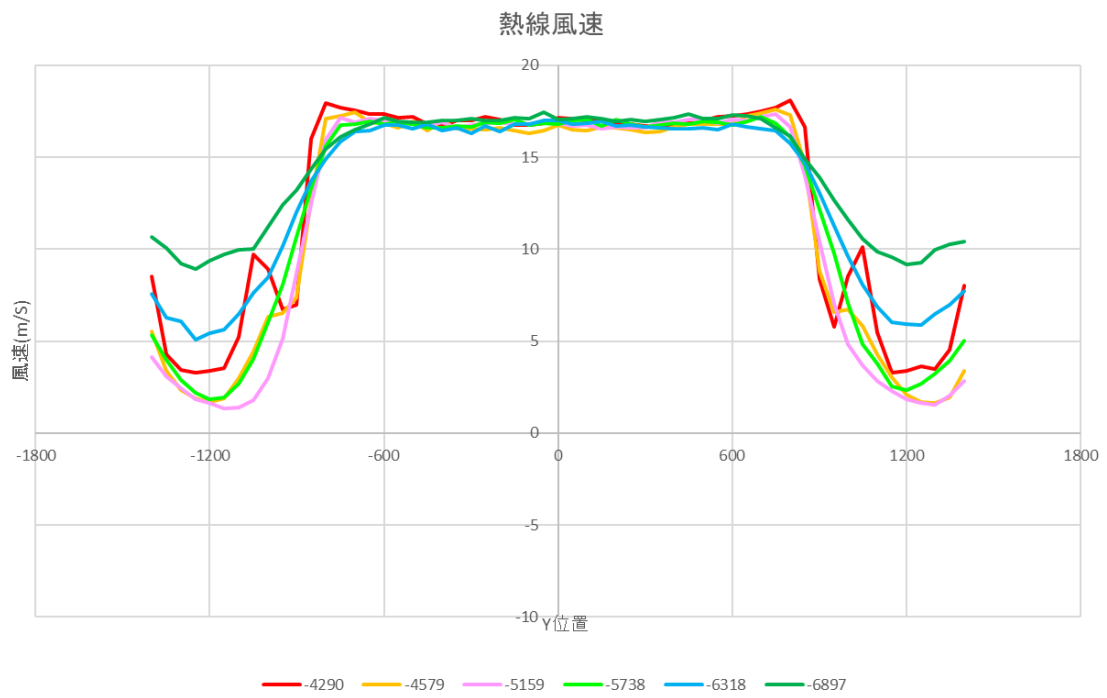


图4.84 風車後方熱線流速布图

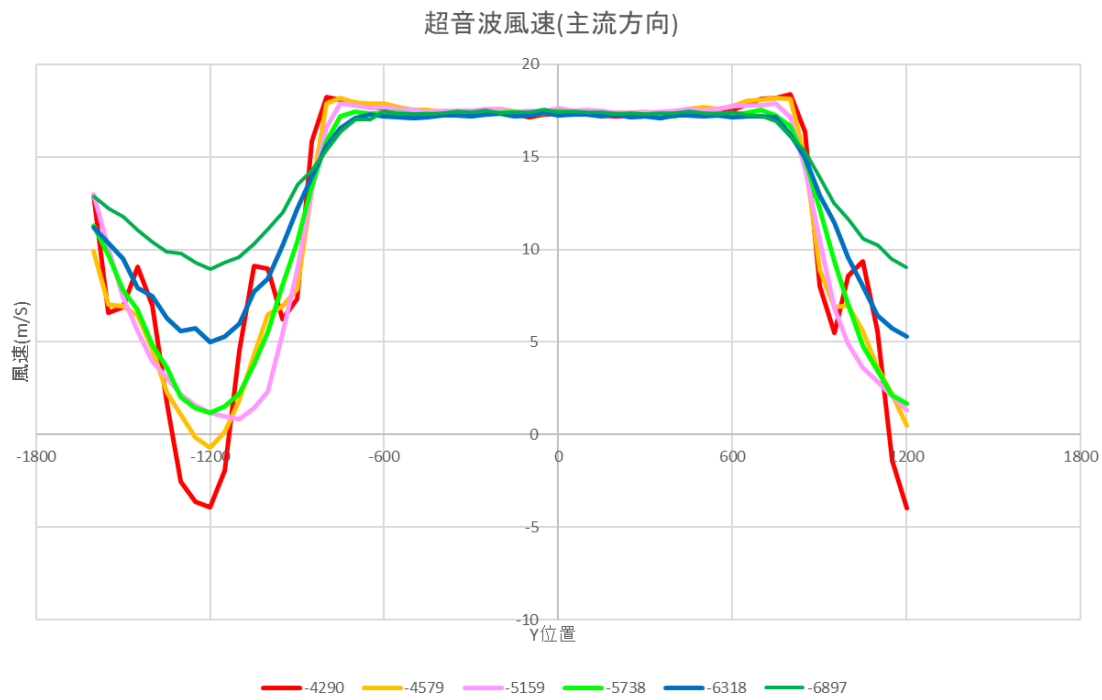


图4.85 風車後方超音波主流方向流速分布图

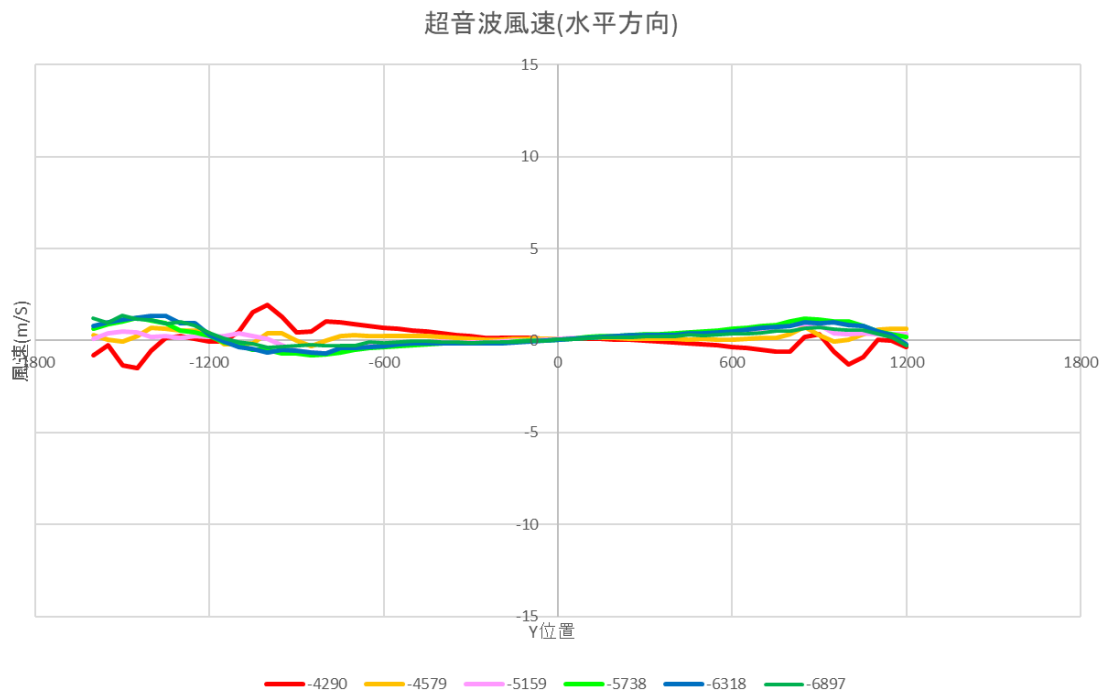


图4.86 風車後方超音波水平方向流速分布图

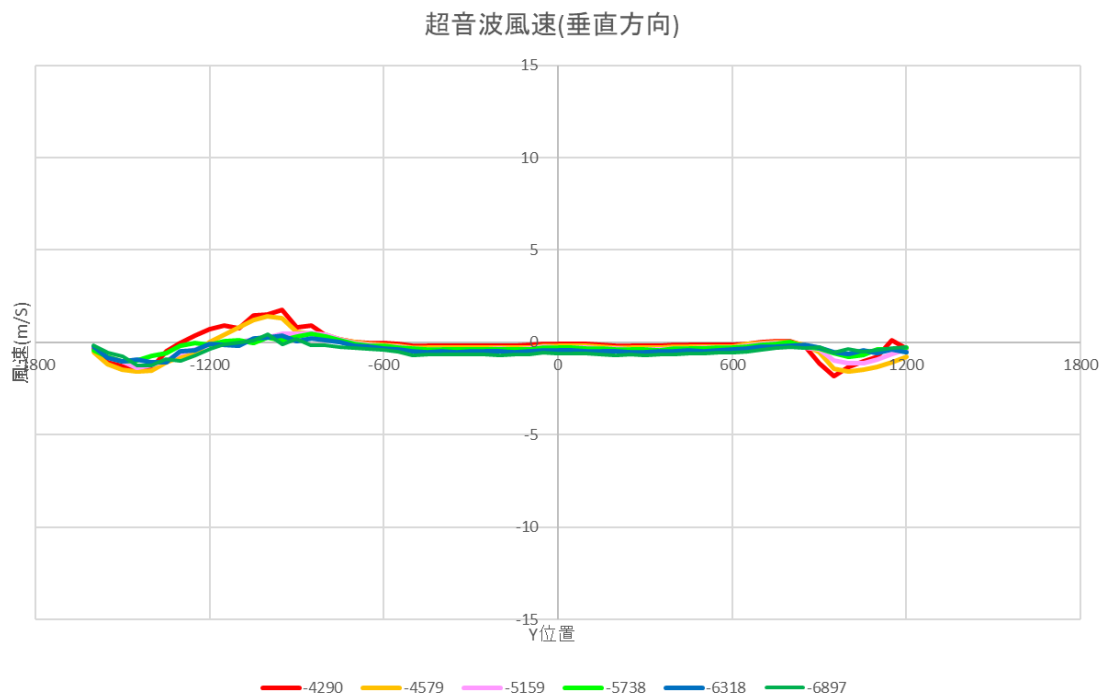


图4.87 風車後方超音波鉛直方向流速分布图

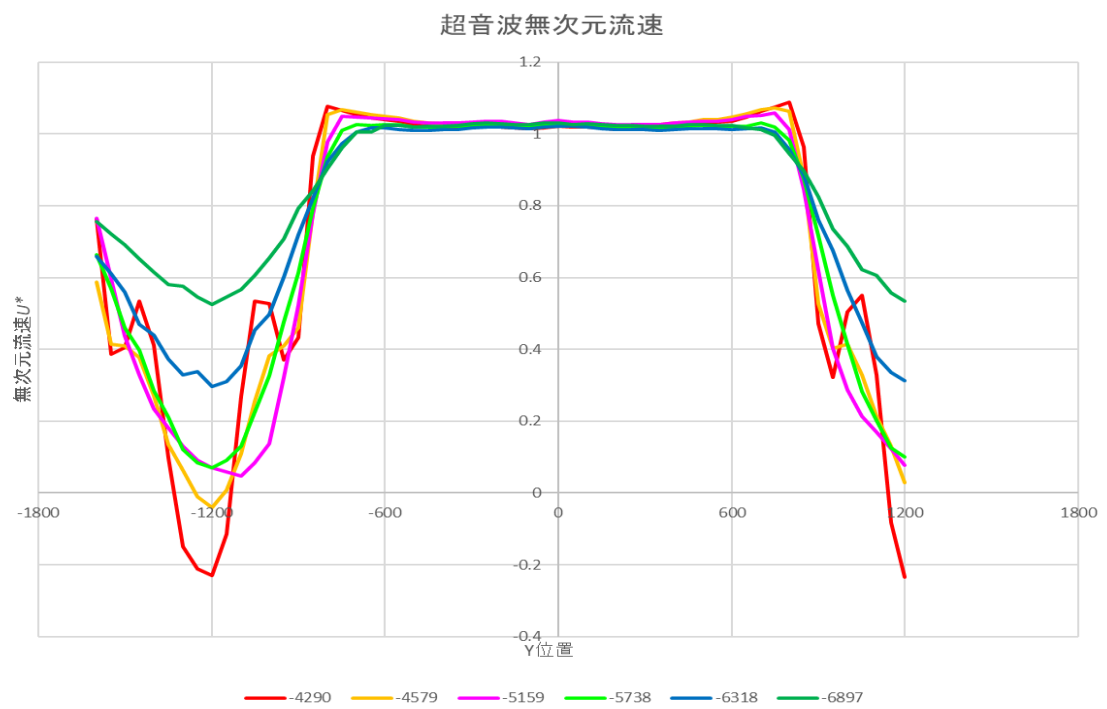


图4.88 風車後方超音波主流方向無次元流速分布图

4.2.2.7 レンズ有 単基風車(SA)

レンズ有風車単基における風車後方流速を測定した。風車配置位置は4スパン中央($X = -4000$)と
している。実験条件を表 4.15 に、実験概観図を図 4.89 に示す

測定した圧力差プロファイルを図 4.90 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.91 に示す。
熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.92 に示す。超音波流速計で測定した主流方
向流速を図 4.93 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.94 に示す。超音波流速計で測
定した鉛直方向流速を図 4.95 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.96 に示
す。

表 4.15 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパン，風洞中央に単基風車配置
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz)，計測時間(10s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0



図4.89 実験概要図

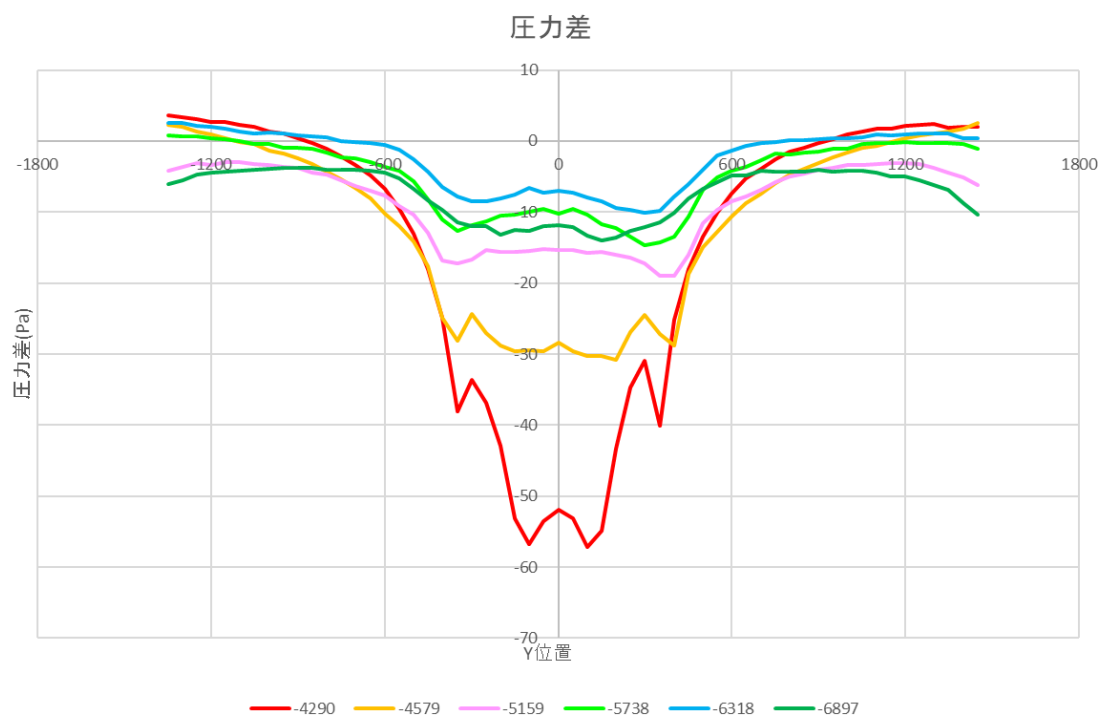


图4.90 風車後方压力差分布图

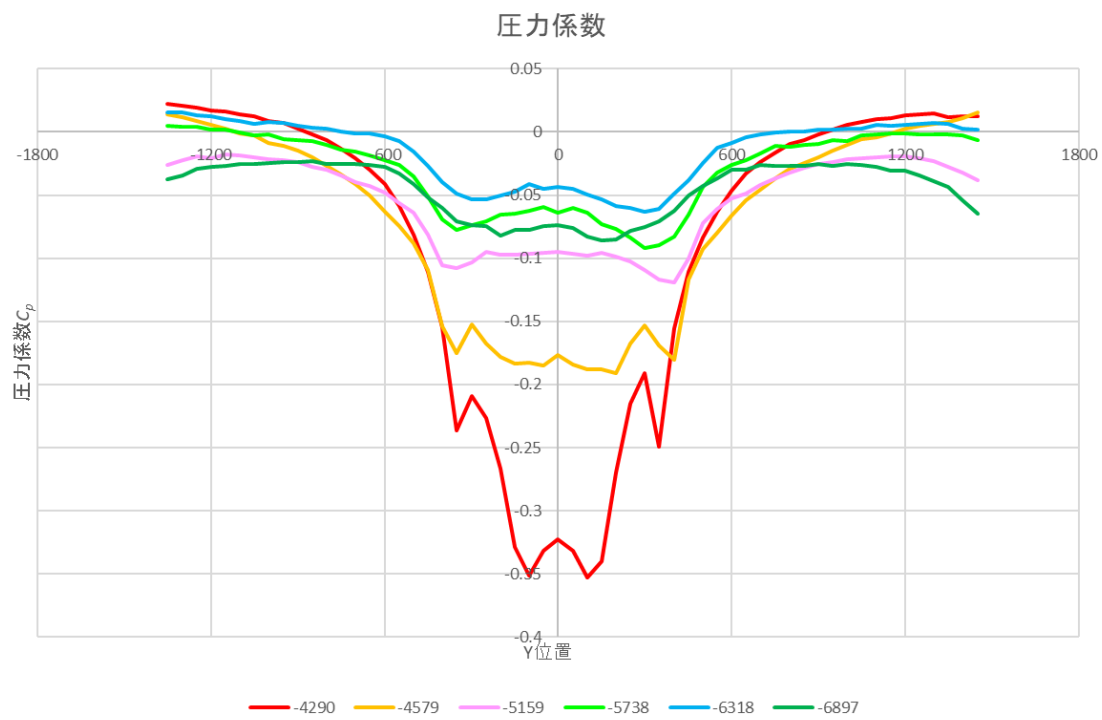


图4.91 風車後方压力系数布图

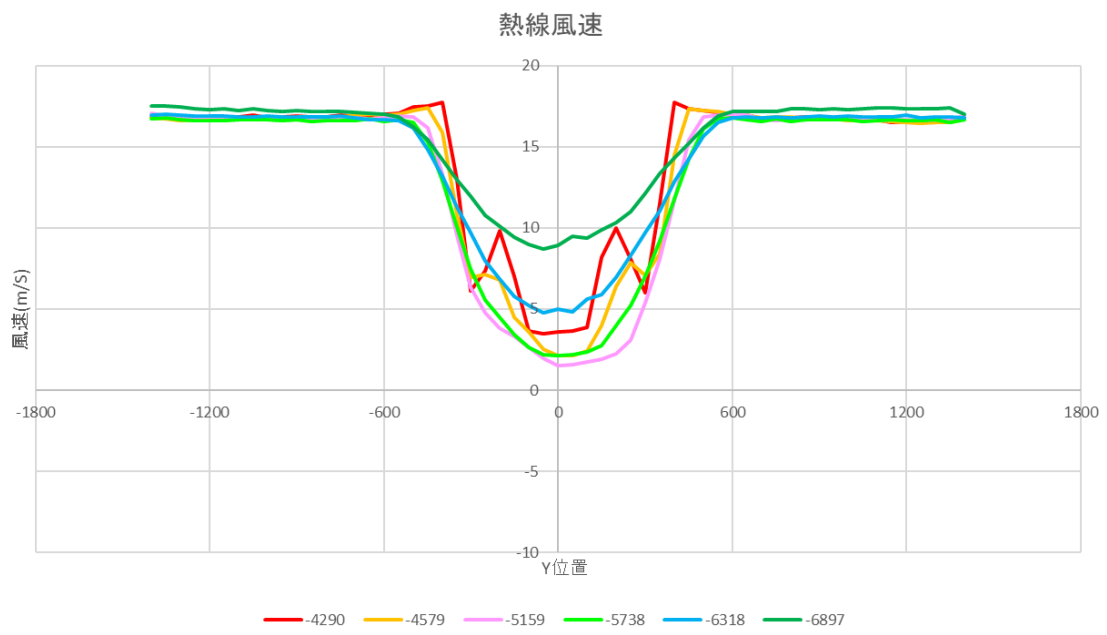


图4.92 風車後方熱線流速布图

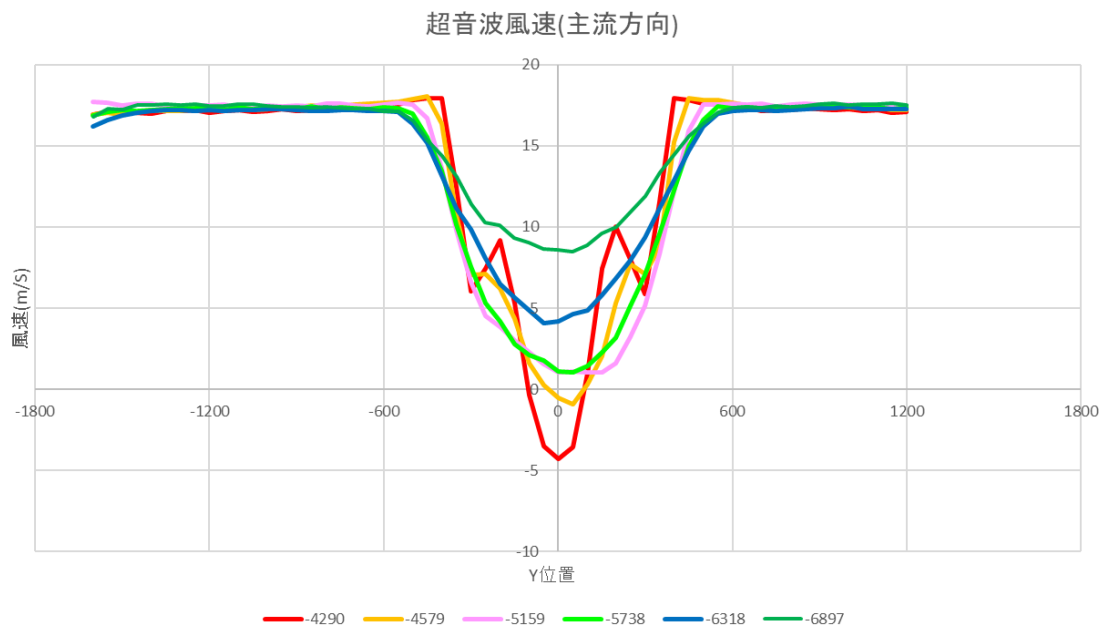


图4.93 風車後方超音波主流方向流速分布图

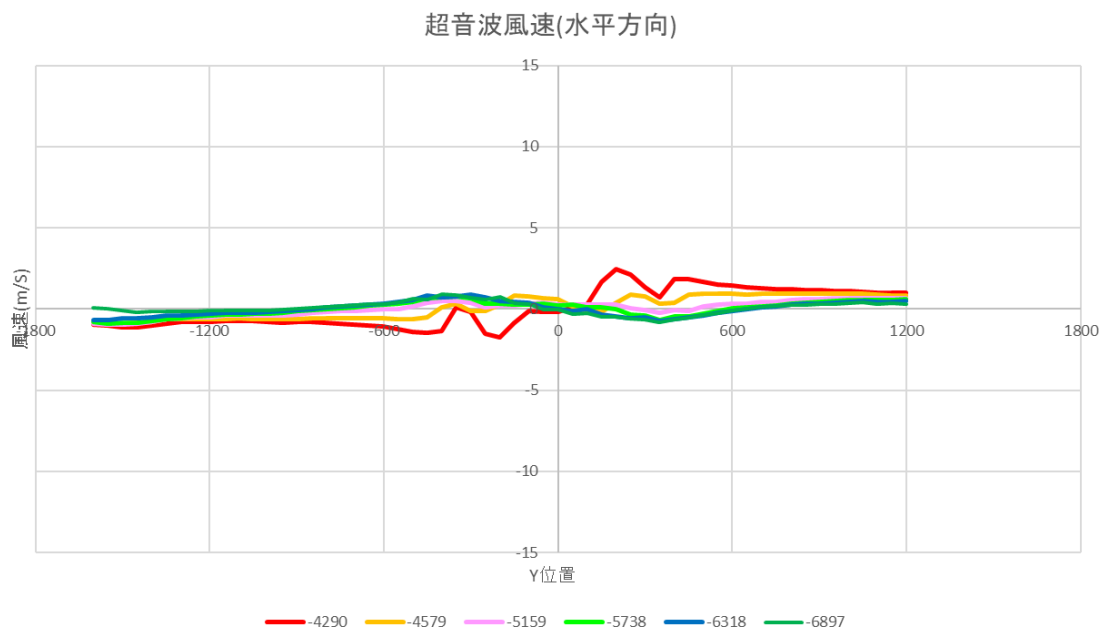


图4.94 風車後方超音波水平方向流速分布图

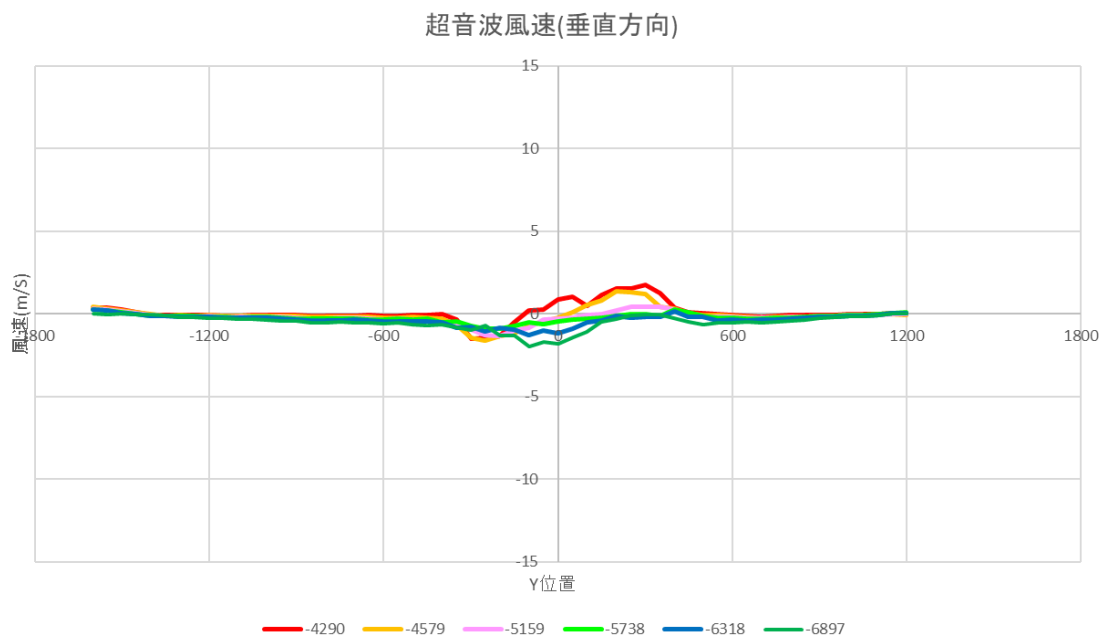


图4.95 風車後方超音波鉛直方向流速分布图

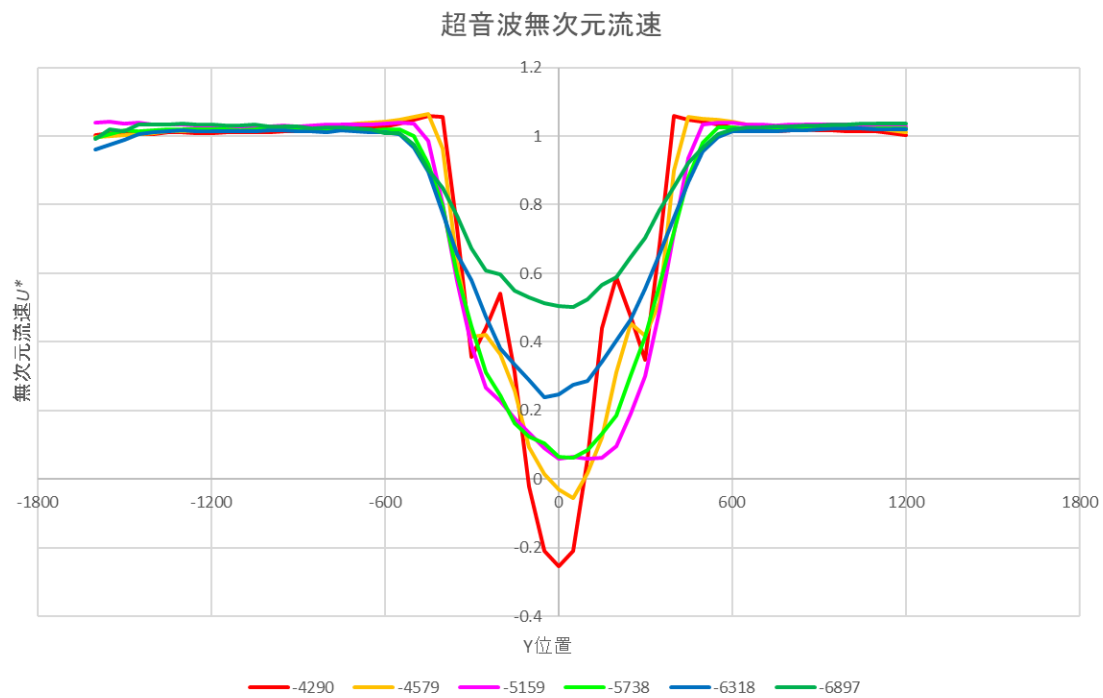


図4.96 風車後方超音波主流方向無次元流速分布図

4.2.2.8 レンズ無 BARE $s/D_{brim}=0.05$

レンズ無(BARE)風車 2 基における風車間隔 $s/D_{brim}=0.05$ での風車後方流速を測定した．風車配置位置は 4 スパン中央($X=-4000$)としている．実験条件を表 4.16 に，実験概観図を図 4.97 に示す

測定した圧力差プロファイルを図 4.98 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.99 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.100 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.101 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.102 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.103 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.104 に示す．

表 4.16 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3,4,5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.05$)
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz)，計測時間(10s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0



図4.97 実験概要図

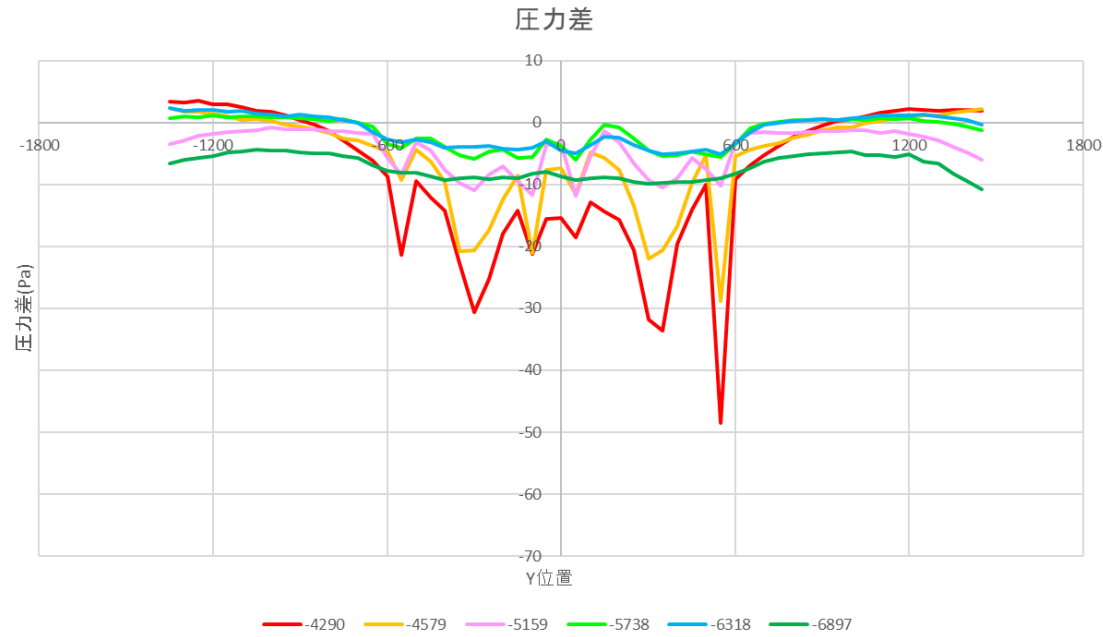


図4.98 風車後方圧力差分布図

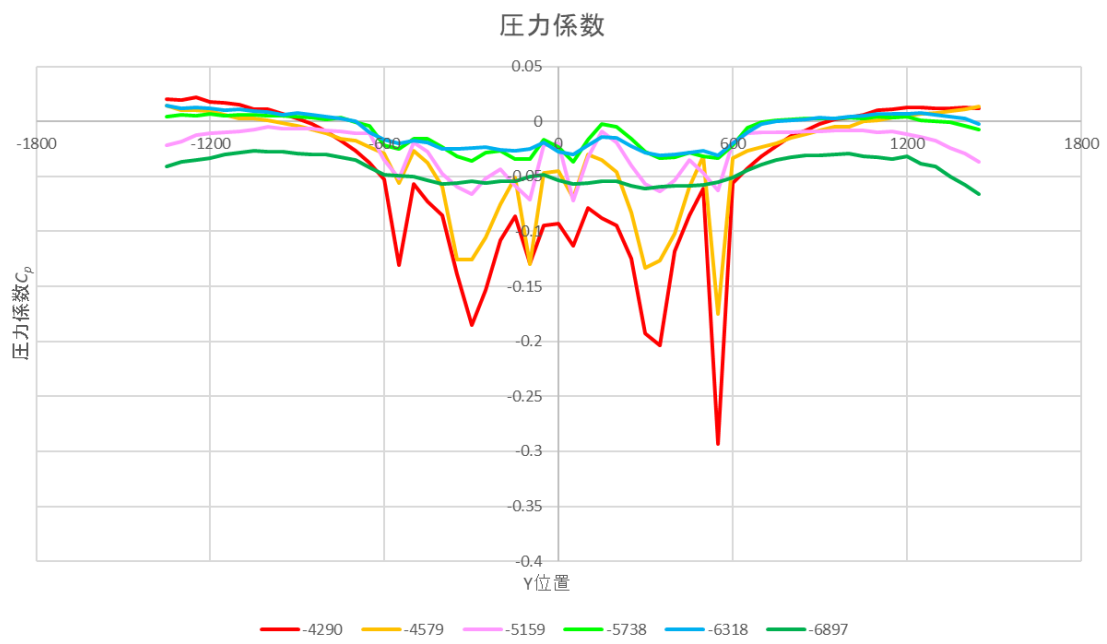


图4.99 風車後方压力系数布图

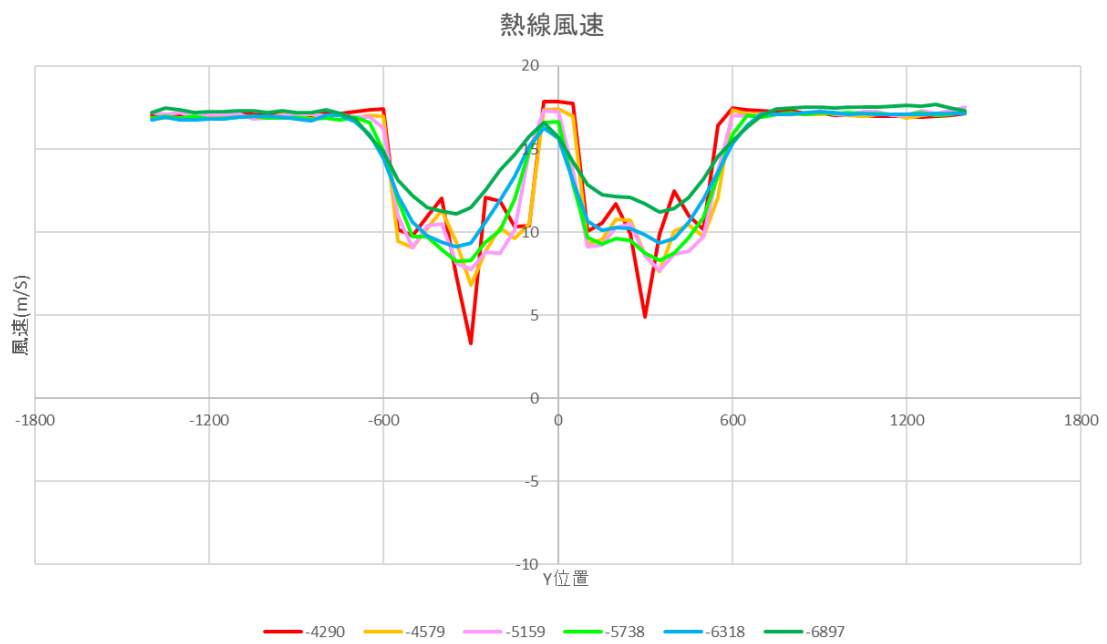


图4.100 風車後方熱線流速布图

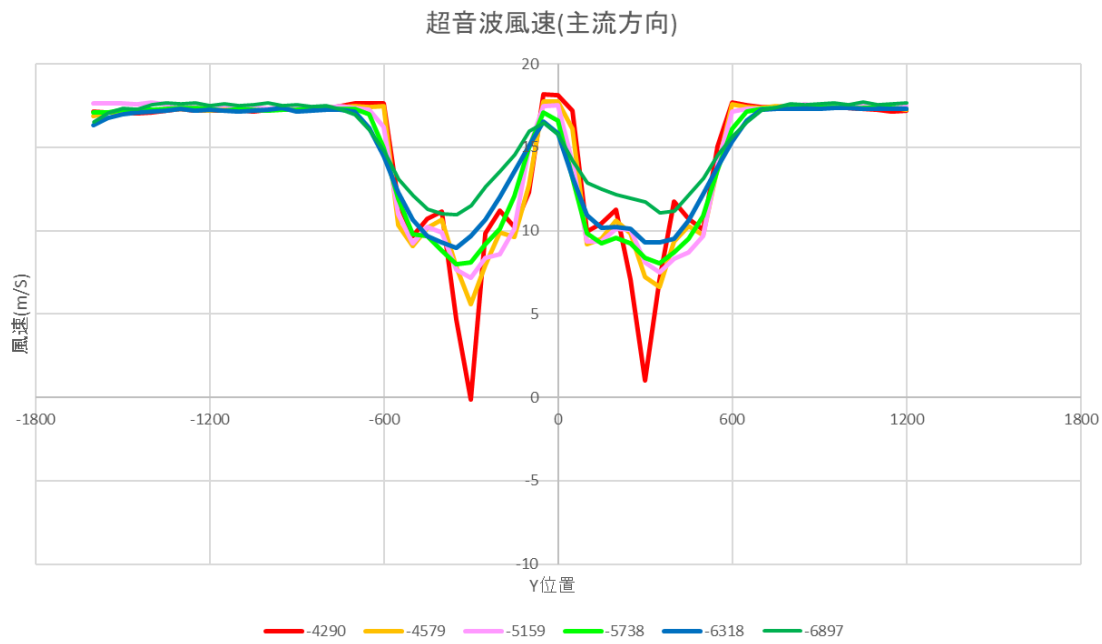


图4.101 風車後方超音波主流方向流速分布图

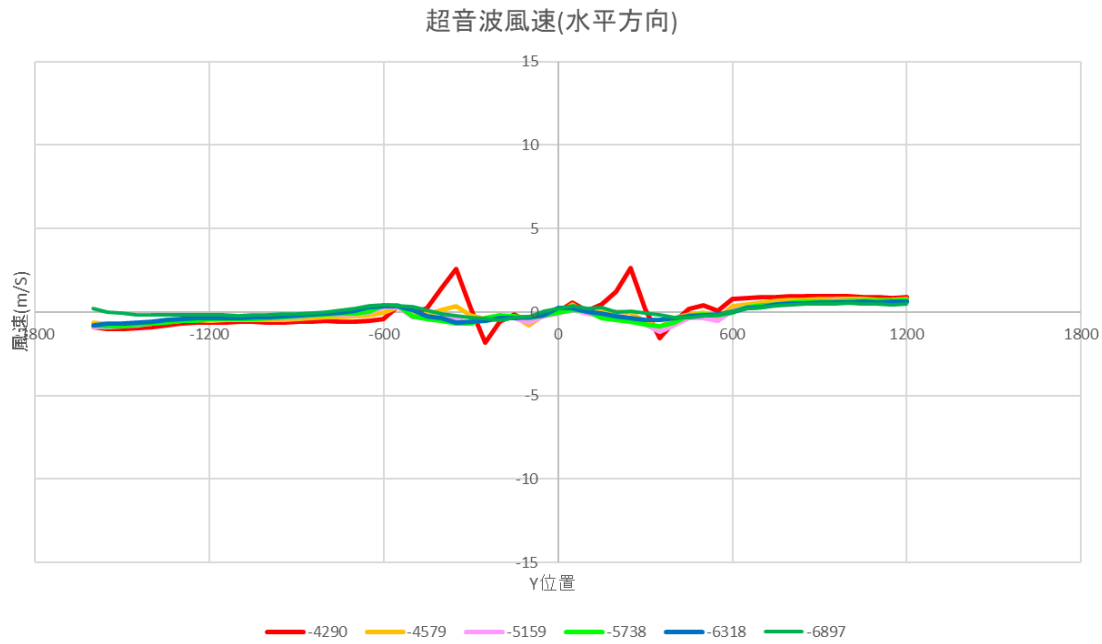


图4.102 風車後方超音波水平方向流速分布图

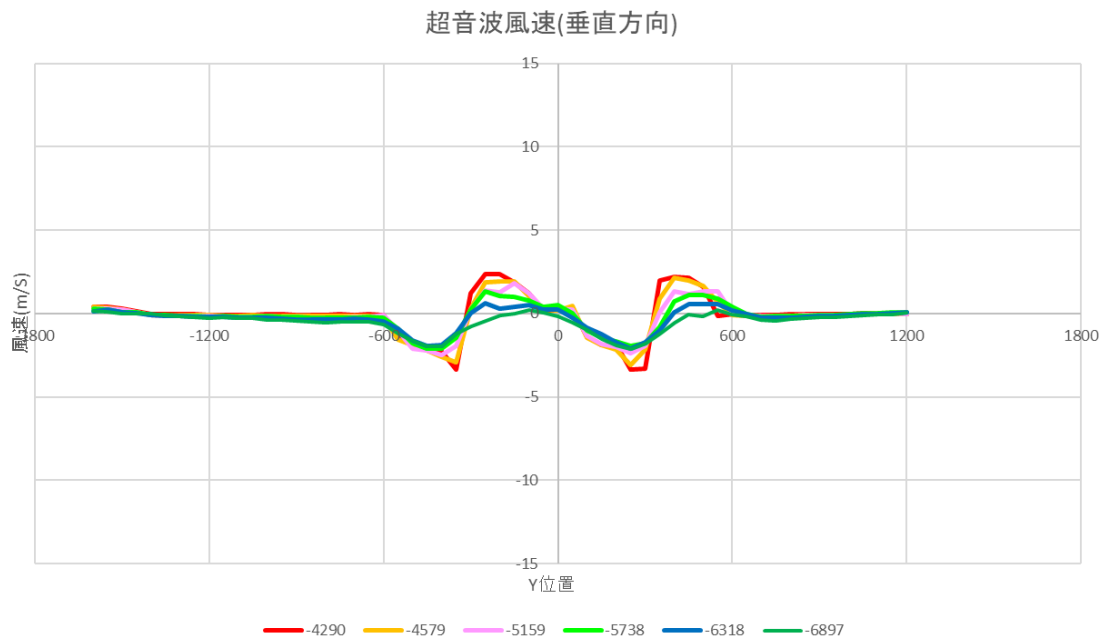


图4.103 風車後方超音波鉛直方向流速分布图

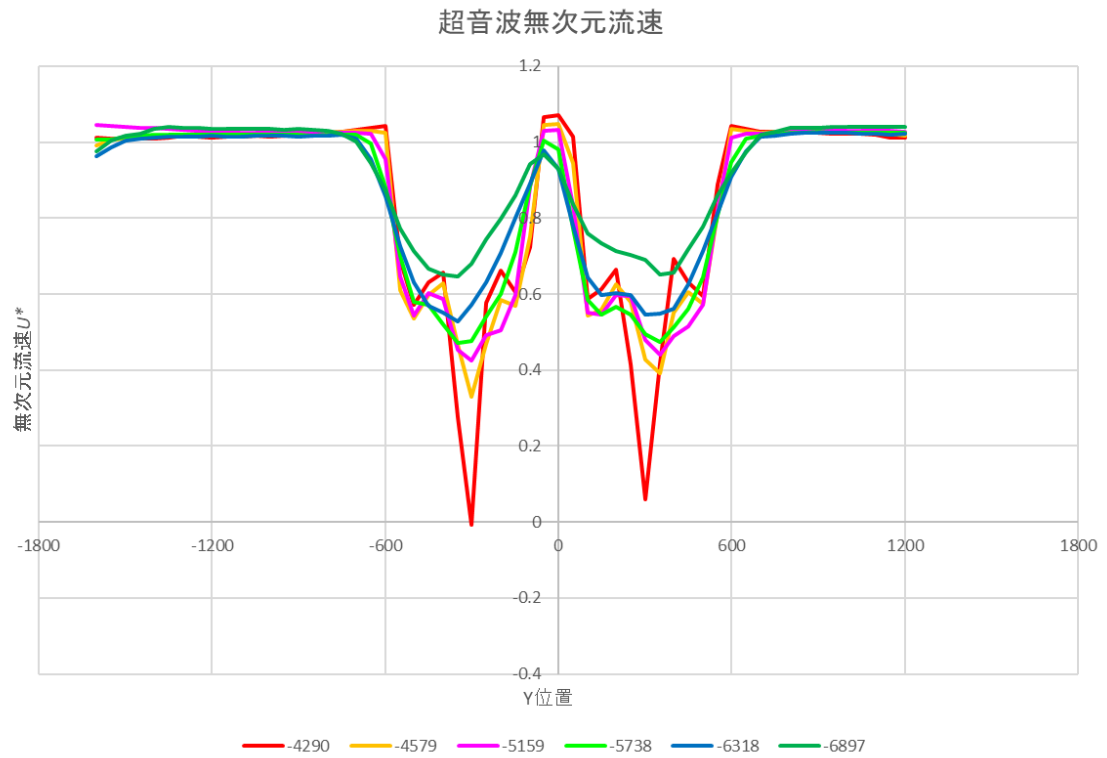


图4.104 風車後方超音波主流方向無次元流速分布图

4.2.2.9 レンズ無 BARE $s/D_{brim}=3.2$

レンズ無(BARE)風車 2 基における風車間隔 $s/D_{brim}=3.2$ での風車後方流速を測定した。風車配置位置は 4 スパン中央($X=-4000$)としている。実験条件を表 4.17 に、実験概観図を図 4.105 に示す

測定した圧力差プロファイルを図 4.106 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.107 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.108 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.109 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.110 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.111 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.112 に示す。

表 4.17 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに 2 基風車を設置 ($s/D_{brim}=3.2$)
計測条件	サンプリング周波数 (500Hz), 計測時間(10s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0



図4.105 実験概要図

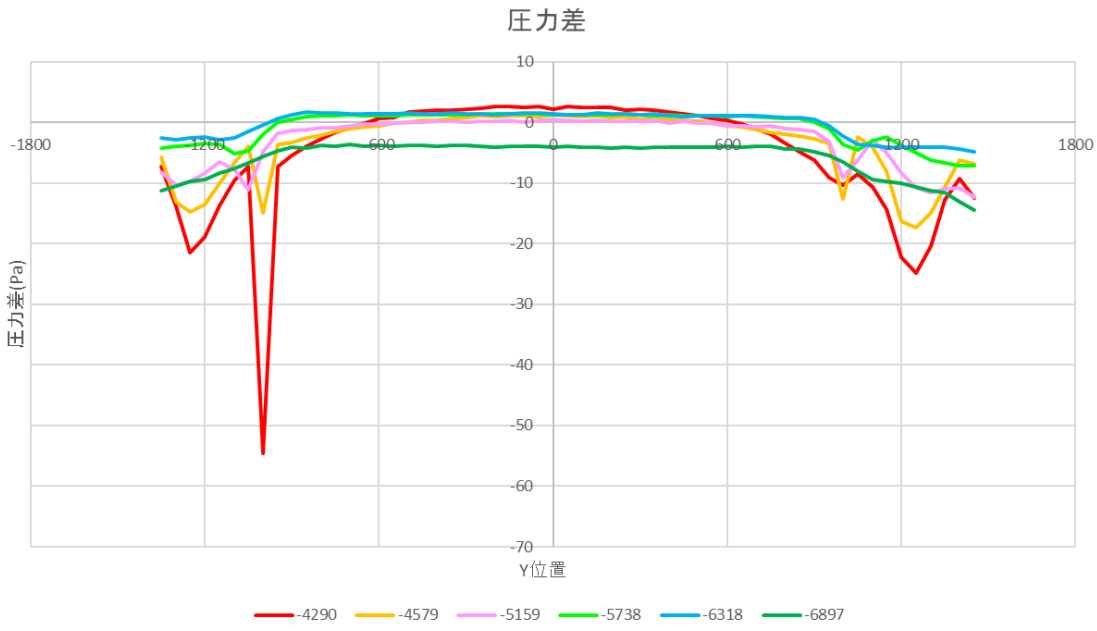


图4.106 風車後方压力差分布图

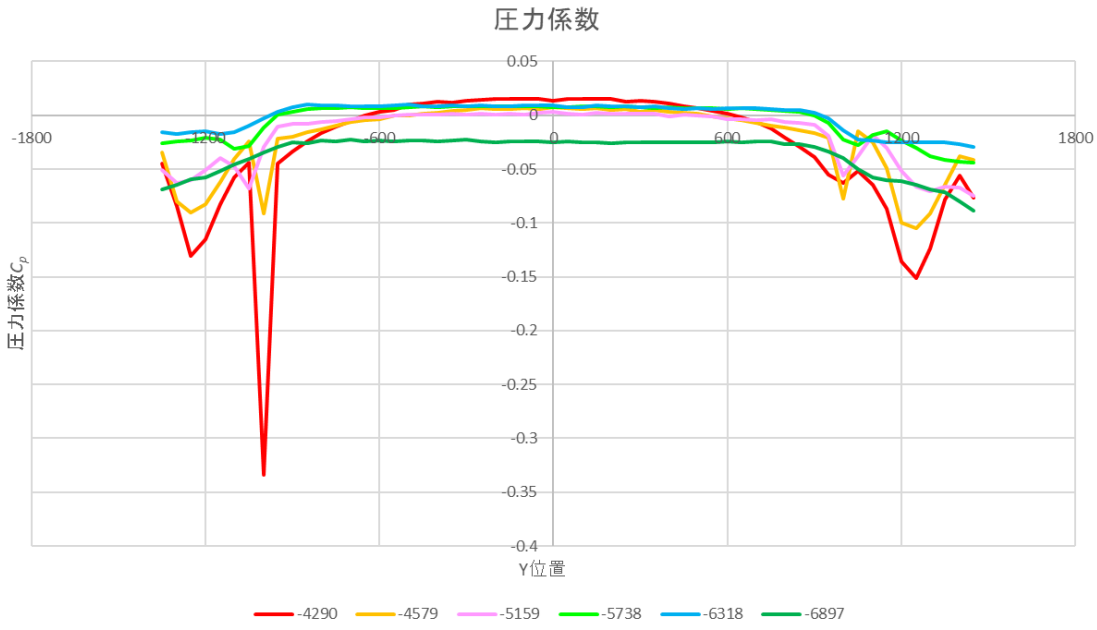


图4.107 風車後方压力系数布图

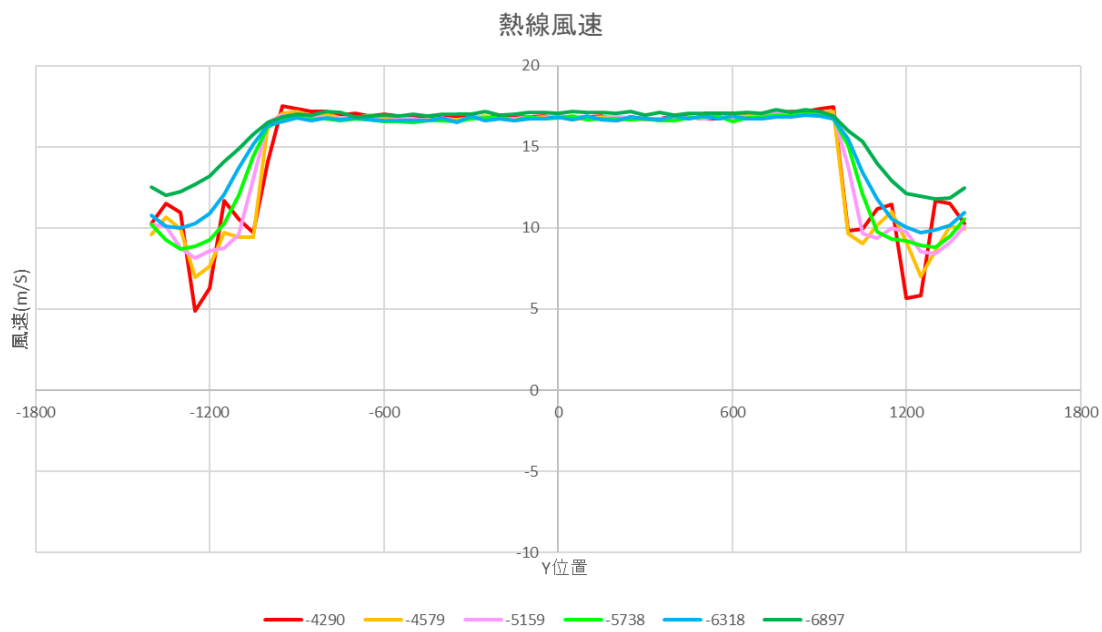


图4.108 風車後方熱線流速布图

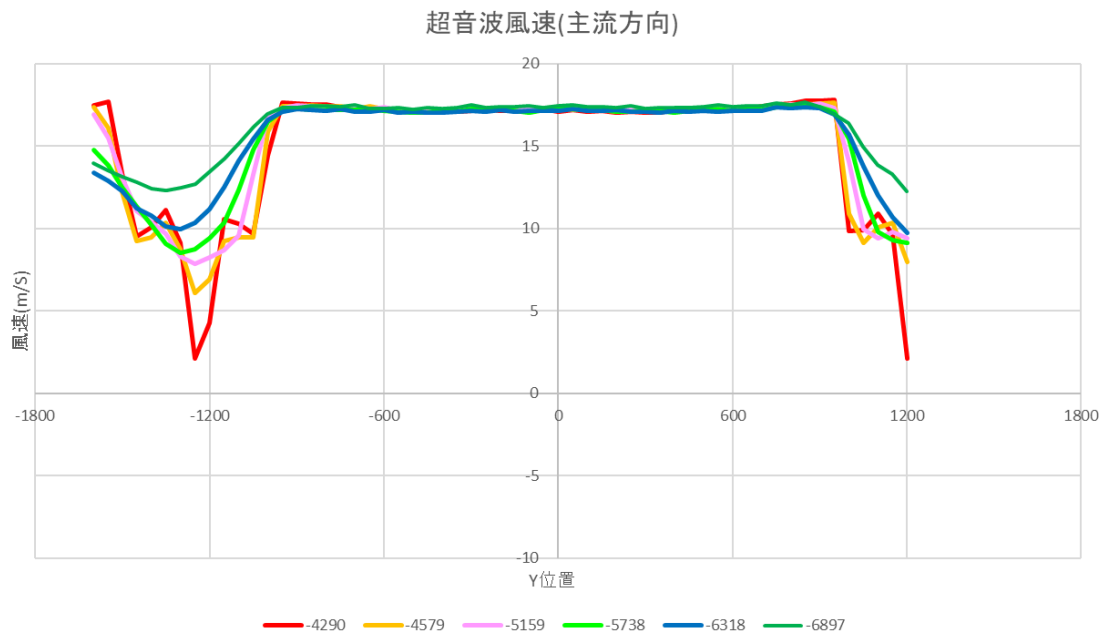


图4.109 風車後方超音波主流方向流速分布图

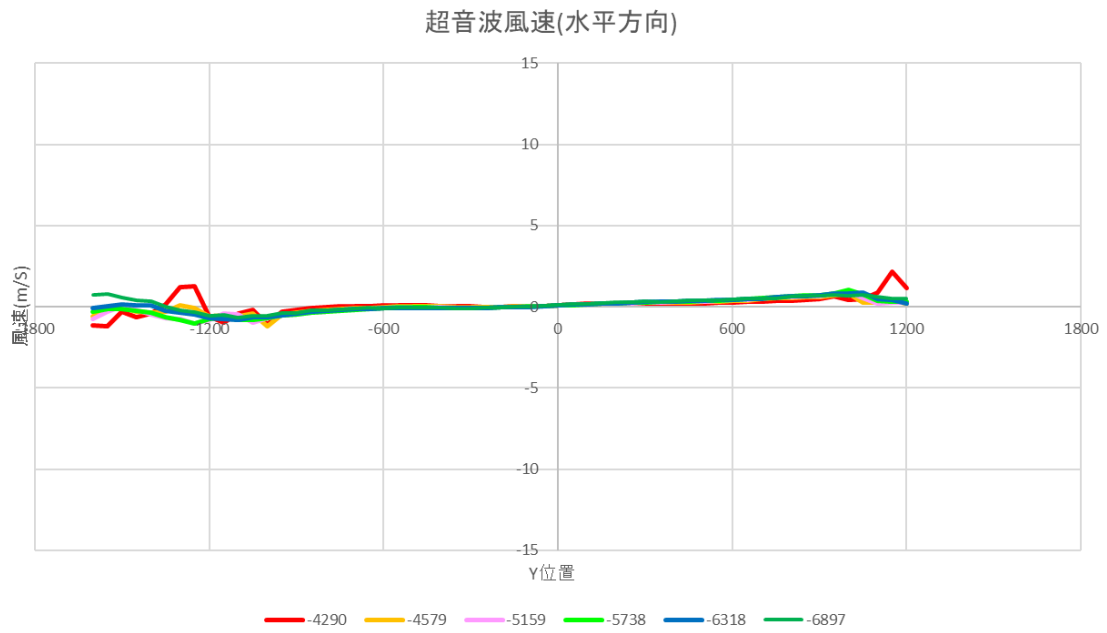


图4.110 風車後方超音波水平方向流速分布图

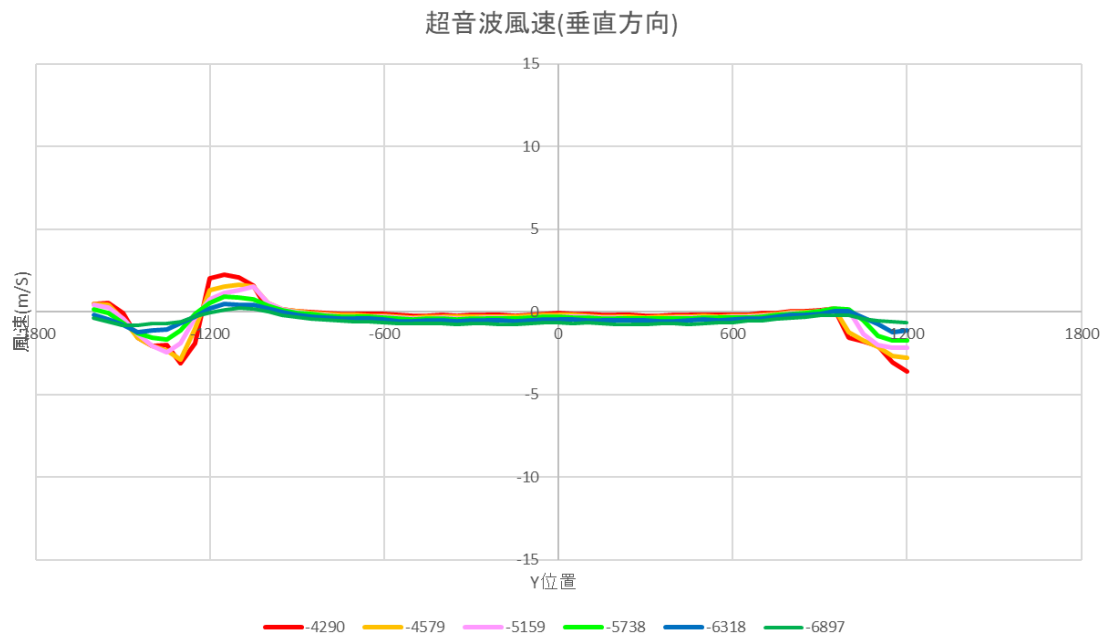


图4.111 風車後方超音波鉛直方向流速分布图

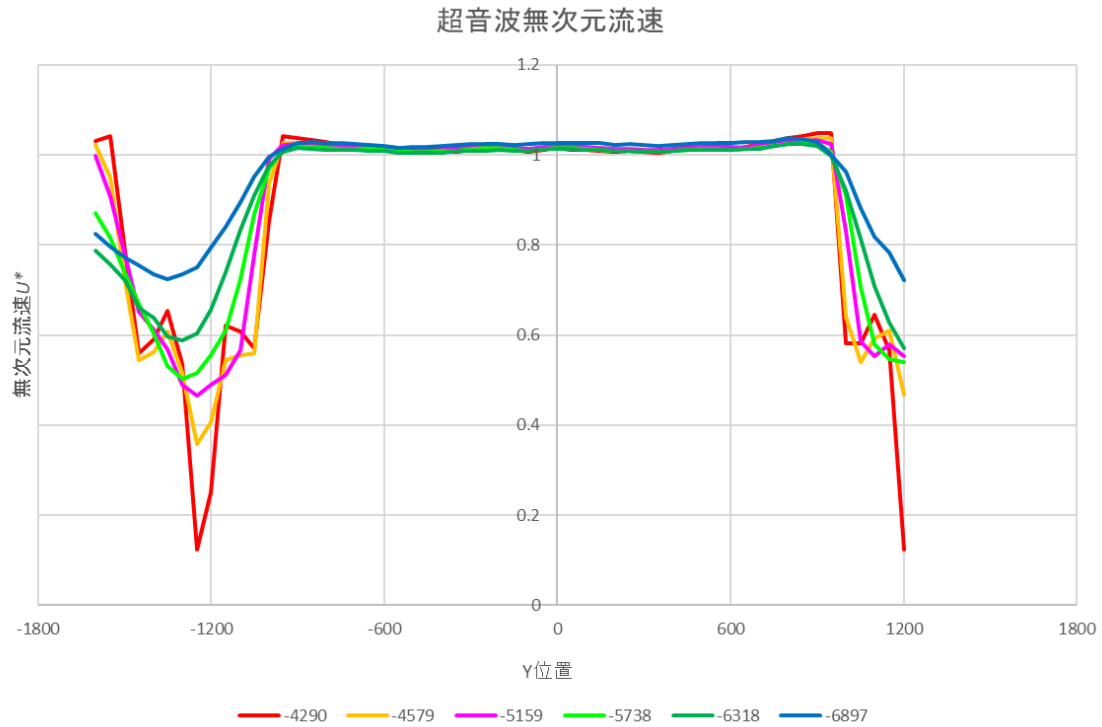


図4.112 風車後方超音波主流方向無次元流速分布図

4.2.2.10 レンズ無 BARE 単基 SA

レンズ無(BARE)風車単基における風車後方流速を測定した．風車配置位置は4 スパン中央(X=-4000)としている．実験条件を表 4.18 に，実験概観図を図 4.113 に示す

測定した圧力差プロファイルを図 4.114 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.115 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.116 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.117 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.118 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.119 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.120 に示す．

表 4.18 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5,6 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパン，風洞中央に単基風車を設置
計測条件	サンプリング周波数（500Hz），計測時間(10s)
風速 U_{∞}	17 (m/s)
周速比 λ	4.0

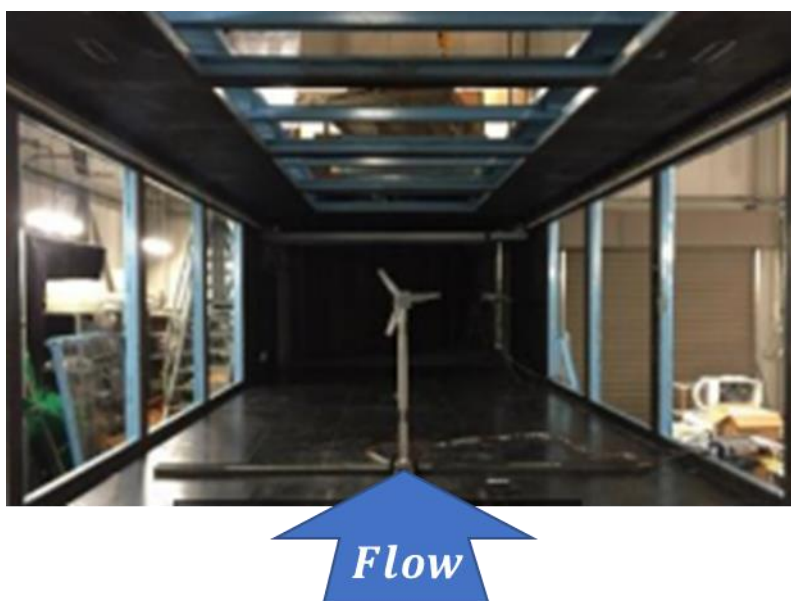


図4.113 実験概要図

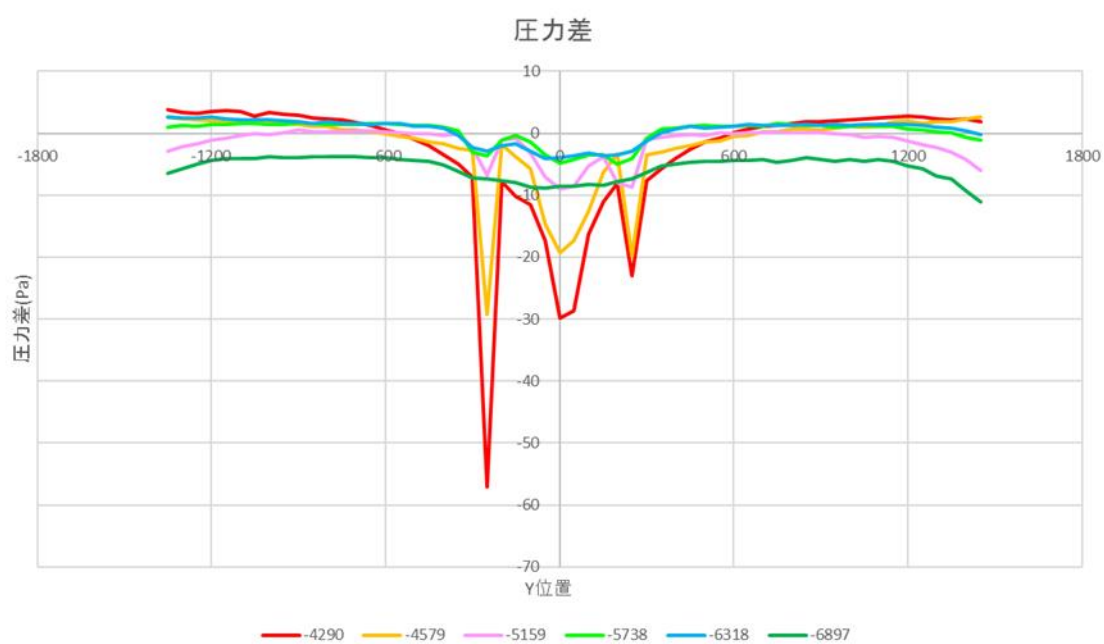


図4.114 風車後方圧力差分布図

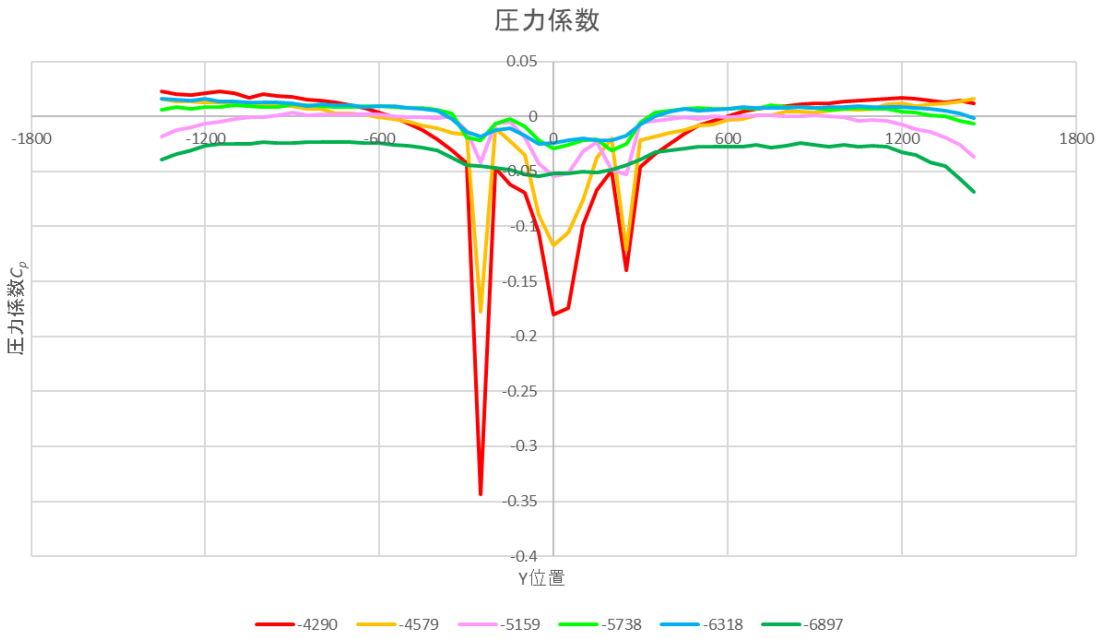


图4.115 風車後方压力系数布图

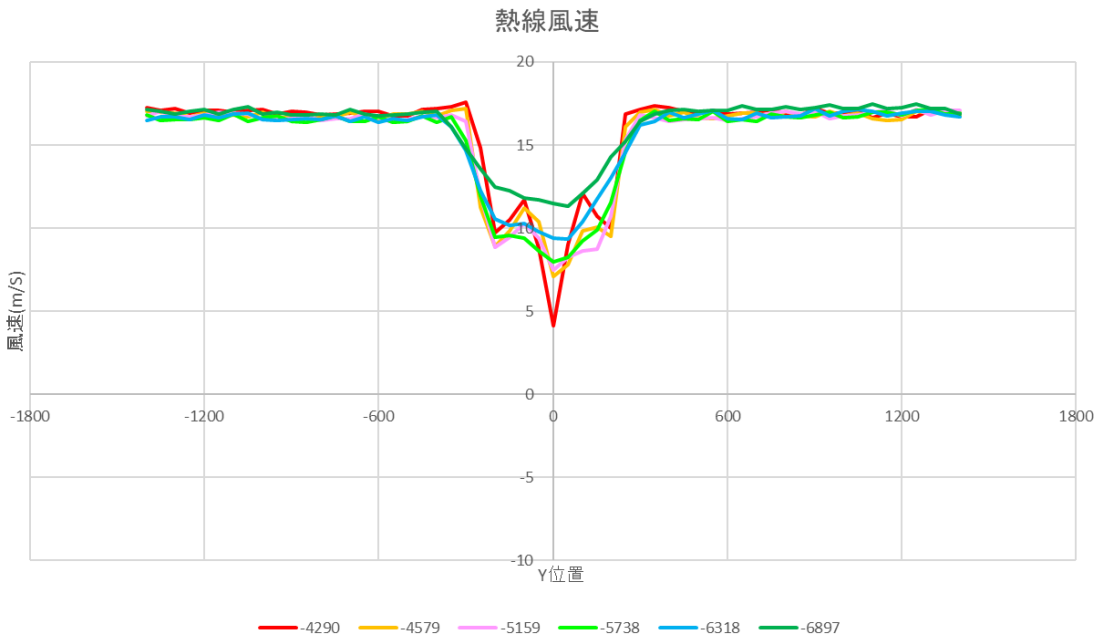


图4.116 風車後方熱線流速布图

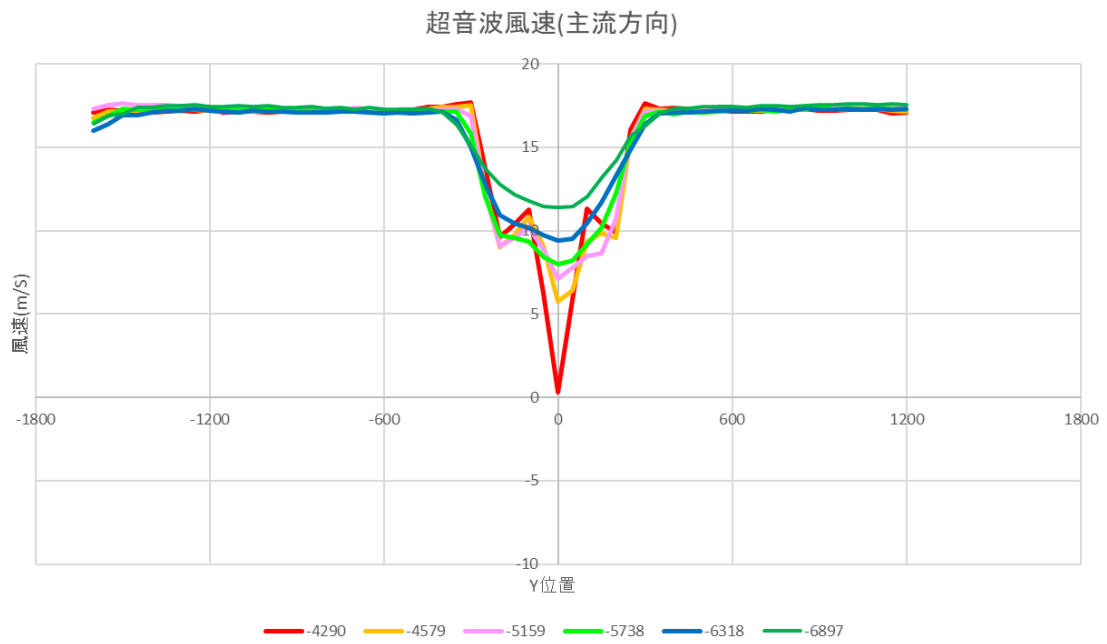


图4.117 風車後方超音波主流方向流速分布图

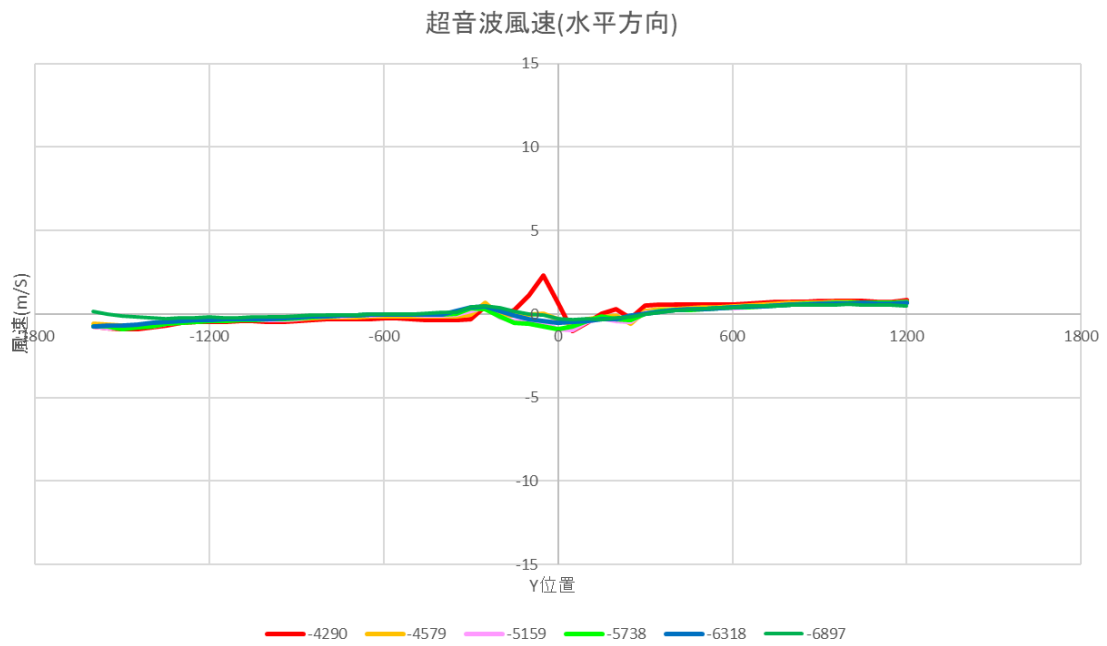


图4.118 風車後方超音波水平方向流速分布图

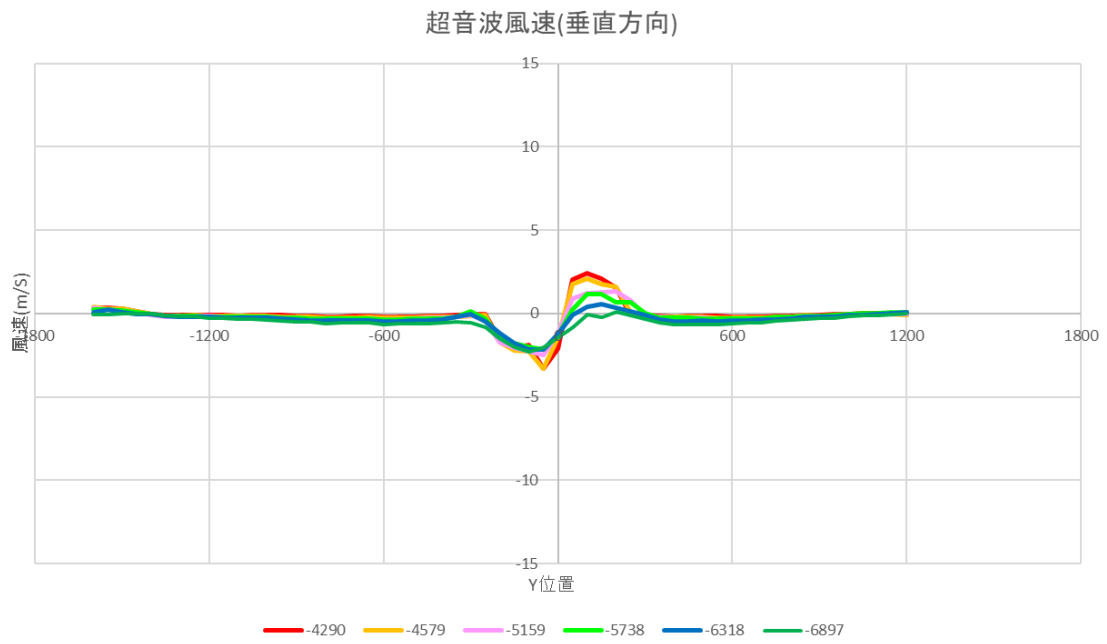


图4.119 風車後方超音波鉛直方向流速分布图

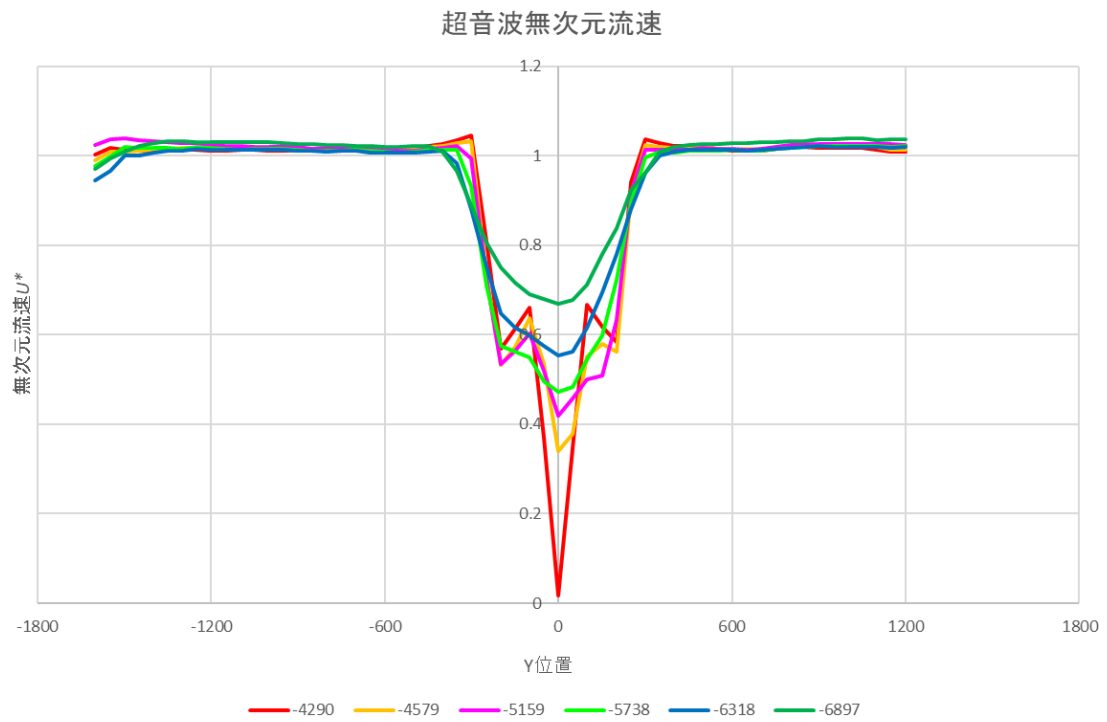


图4.120 風車後方超音波主流方向無次元流速分布图

4.2.3 風車後流分布に関する考察

4.2.3.1 後方距離比較の考察

風車直後である $0.5 D_{brim}$ では圧力の低下が見られ後方へ遠ざかるほど圧力が回復している様子が見られた。また流速も同様に後方へ行くほど速度の回復が見られた。水平方向，垂直方向の流速が後方に行くにつれピークが変動しており，旋回している様子が測定されたことが考えられる

4.2.3.2 風車後流の風車間隔による比較

測定した風車後流の測定分布をもとに同じ測定位置での風車間隔を変化させた際のプロットを比較した。なお2回測定したもの(レンズ有 $s/D_{brim}=0.05, 0.8$)については平均値を使用している。風車間隔の変化による圧力係数プロファイルの変化を図 4.121 に示す。風車間隔の変化による無次元風速プロファイルの変化を図 4.122 に示す。図 4.121 より，風車間隔の変化により風車後方での圧力の変化が見られ，風車間隔が狭まるほど風車後方圧力が単基と比較して低下していることが分かる。また図 4.122 より $s/D_{brim}=0.8$ までは風車間隔が狭くなるにつれて風車間の風速が増速していくが，さらに風車間隔が狭い $s/D_{brim}=0.05$ では2基の後流の減速域が合体し風車間の増速は見られなくなることがわかる。

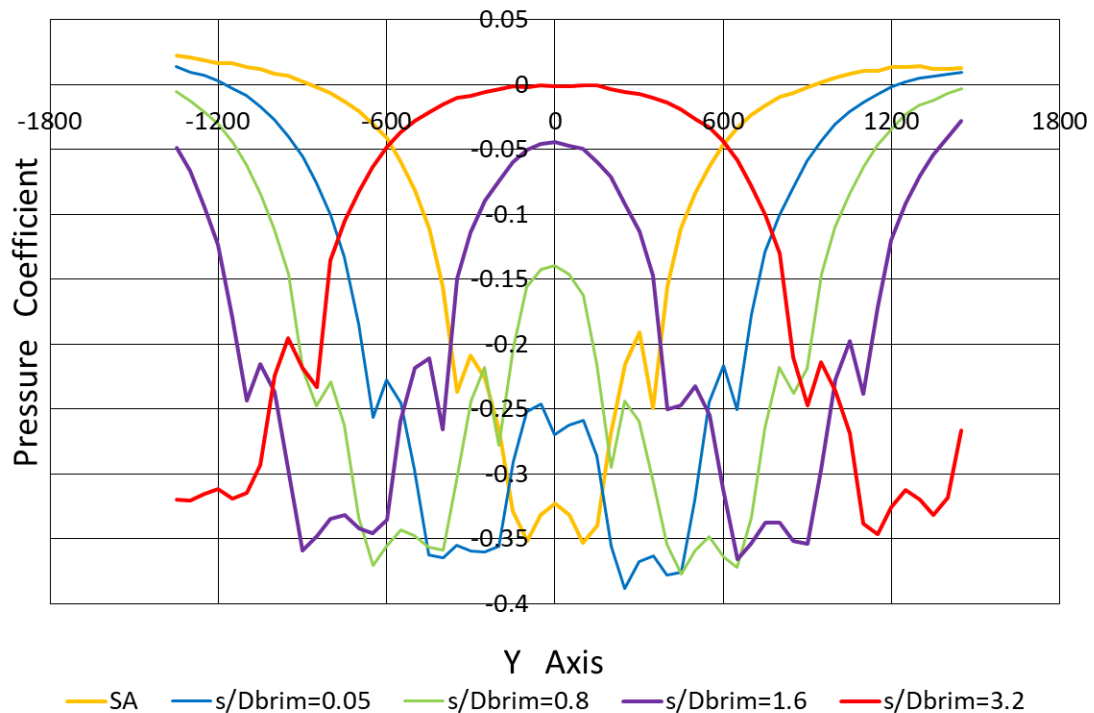


図4.121 風車間隔による風車後方圧力の変化

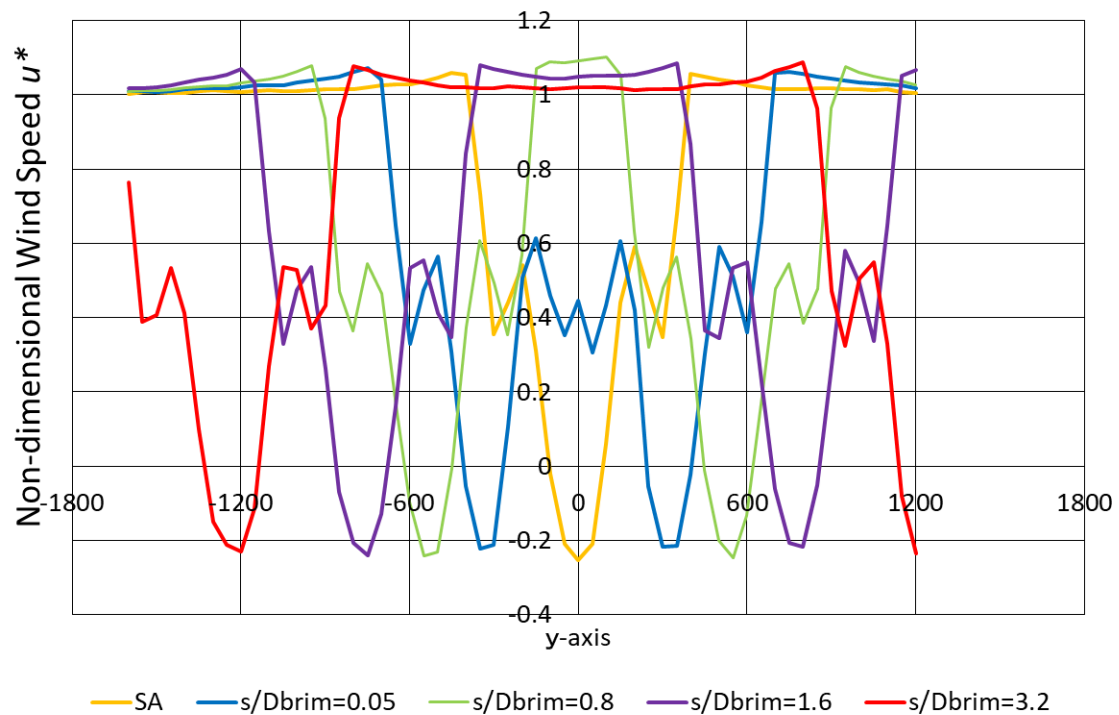


図4.122 風車間隔による風車後方流速の変化

4.2.3.3 風車後流のレンズ(集風体)の有無による比較

測定した風車後流の測定分布をもとに同じ測定位置，同じ風車間隔における集風体有無のプロットを比較した．なお2回測定したもの(レンズ有 $s/D_{brim}=0.05$)については平均値を使用している． $s/D_{brim}=0.05$ における無次元流速のプロファイルのレンズ有無比較を図 4.123 に示す．図 4.123 に着目すると，風車間のギャップフローがレンズ無では増速しているのに対し，レンズ有では風車間の流速が低下しており，後流の減速域が合体し始めている様子が見てとれる．

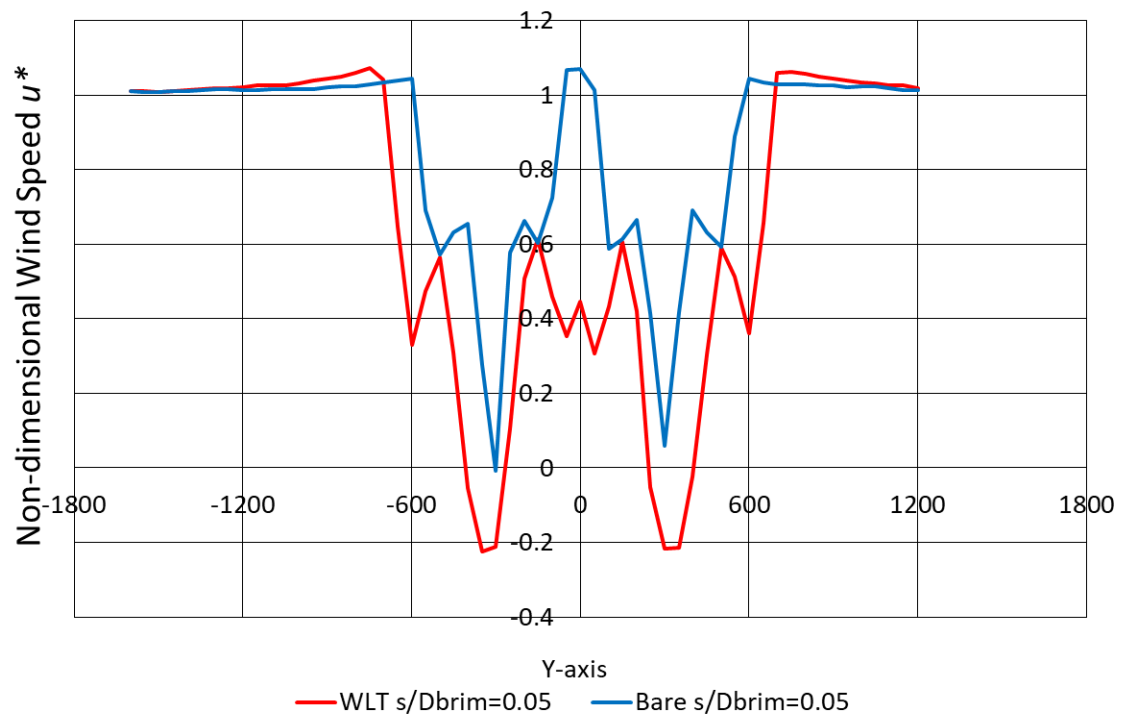


図4.123 風車後方流速の $s/D_{brim}=0.05$ におけるレンズ有無比較

4.2.3.4 後流の2次元プロファイル(圧力場)

得られた後流分布をもとにそれぞれの測定ライン間を線形補完することで圧力場の2次元プロファイルを可視化した。レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=0.05$ における圧力場を図 4.124 に示す。レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=0.8$ における圧力場を図 4.125 に示す。レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=1.6$ における圧力場を図 4.126 に示す。レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=3.2$ における圧力場を図 4.127 に示す。レンズ有 WLT の単基 SA における圧力場を図 4.128 に示す。レンズ無 Bare の $s/D_{brim}=0.05$ における圧力場を図 4.129 に示す。レンズ無 Bare の $s/D_{brim}=3.2$ における圧力場を図 4.130 に示す、レンズ無 Bare の単基 SA における圧力場を図 4.131 に示す、

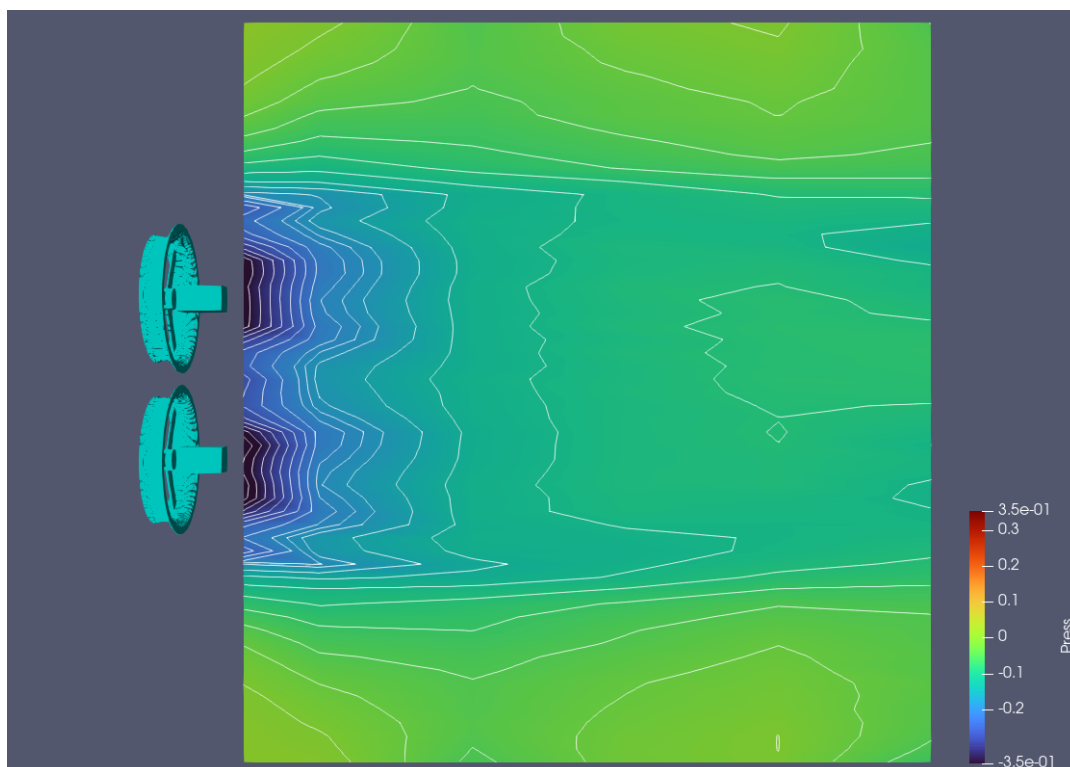


図4.124 レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=0.05$ 圧力場

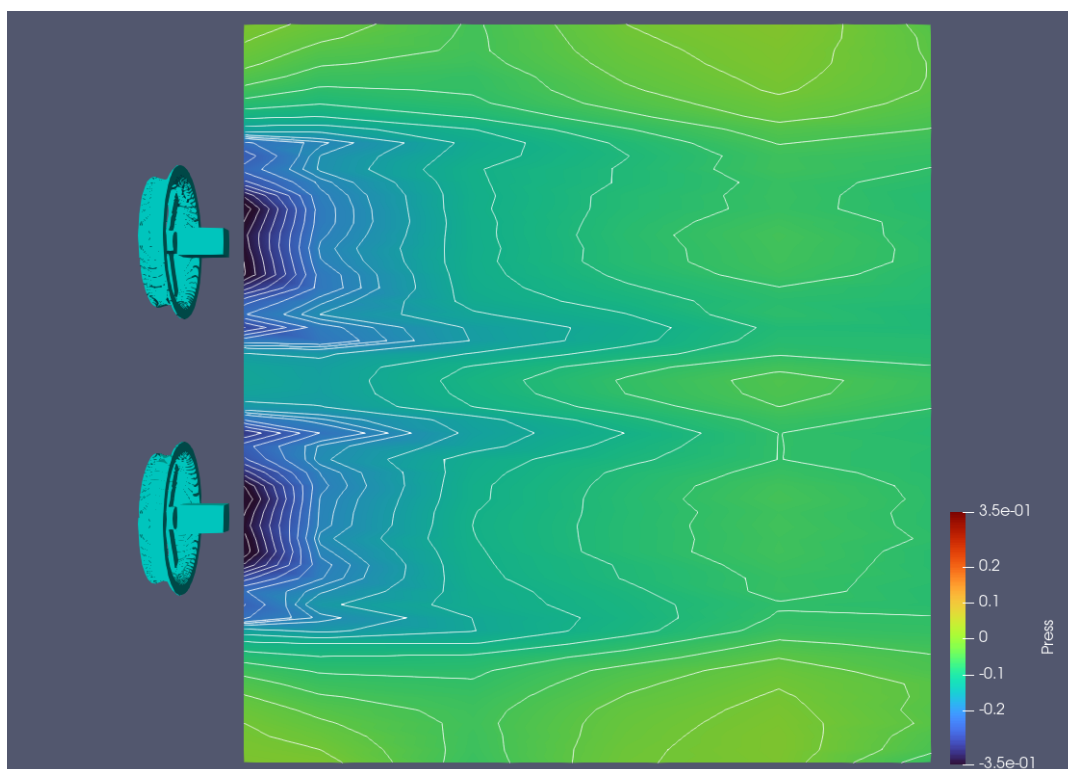


図4.125 レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=0.8$ 圧力場

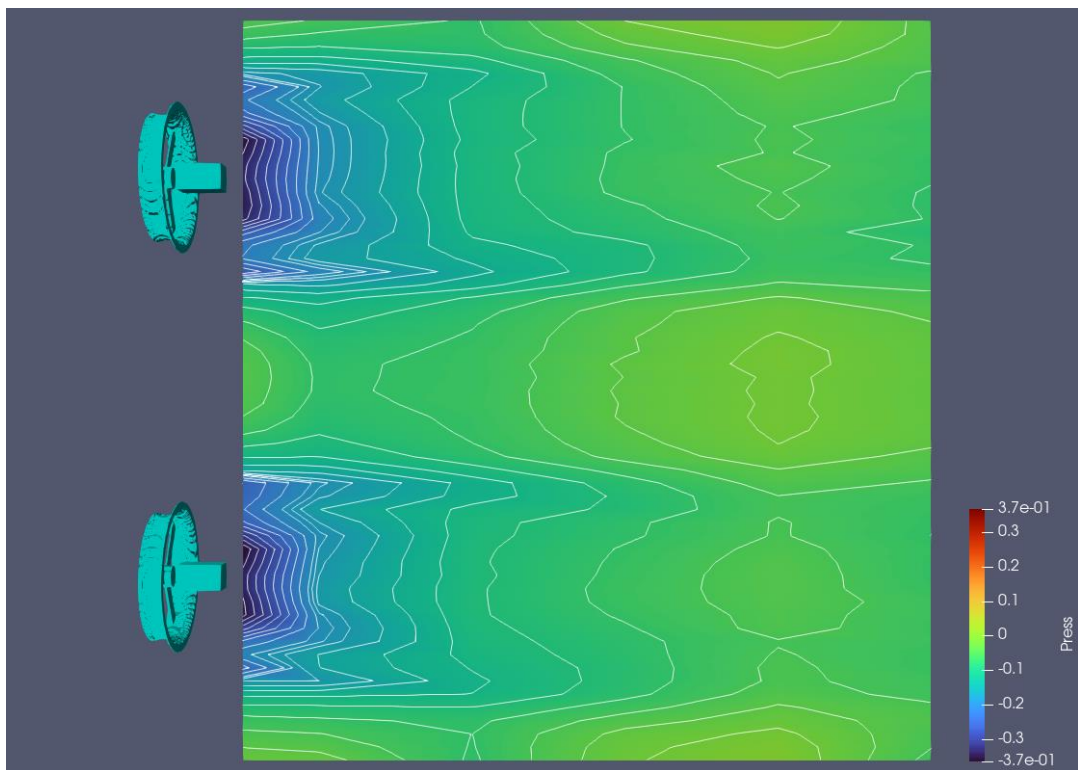


図4.126 レンズ有 WLT の $s/D_{brim} = 1.6$ 圧力場

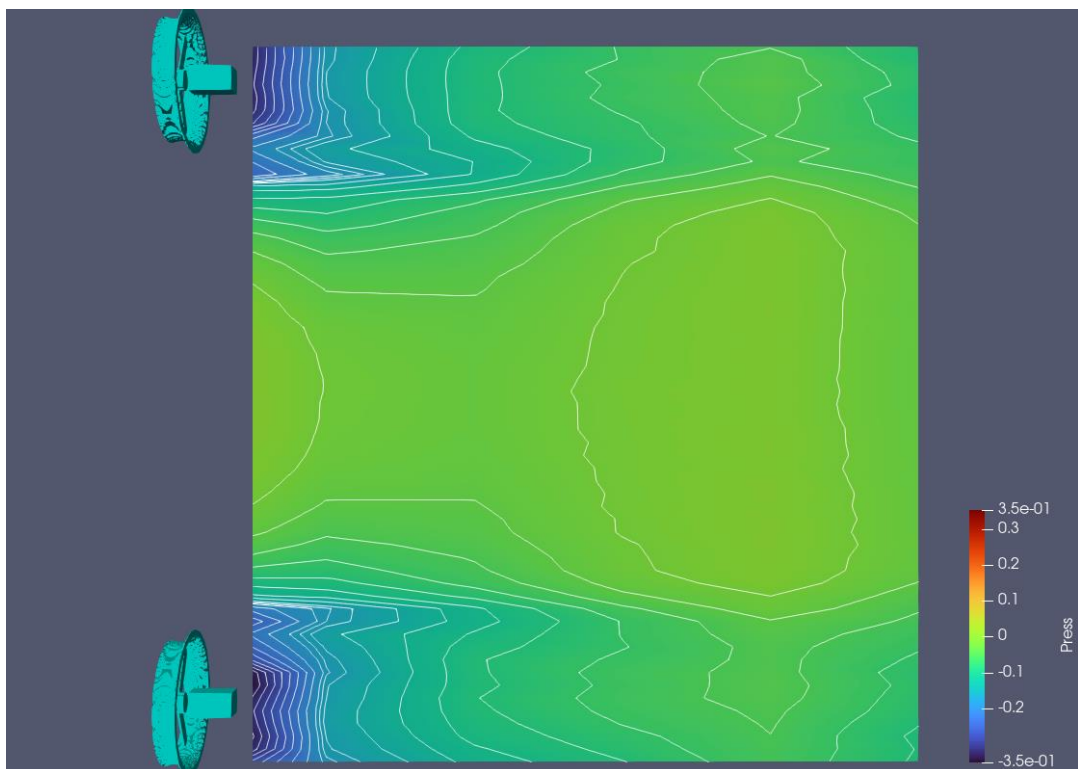


図4.127 レンズ有 WLT の $s/D_{brim} = 3.2$ 圧力場

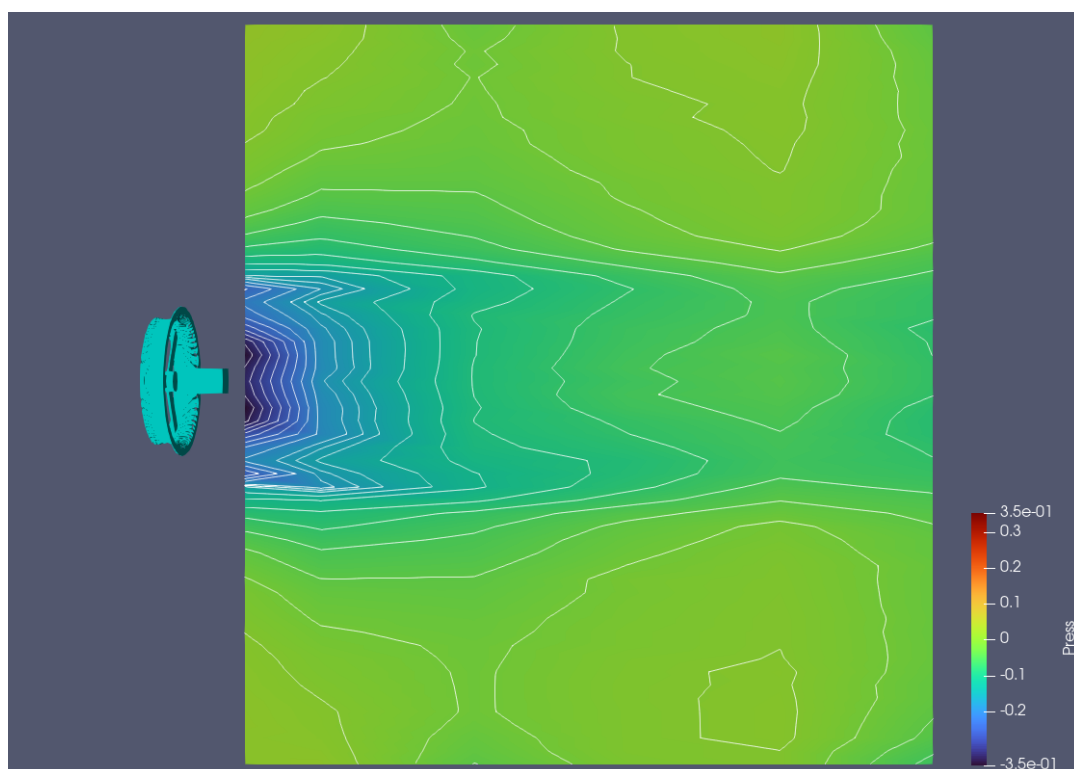


図4.128 レンズ有 WLT の単基 SA 圧力場

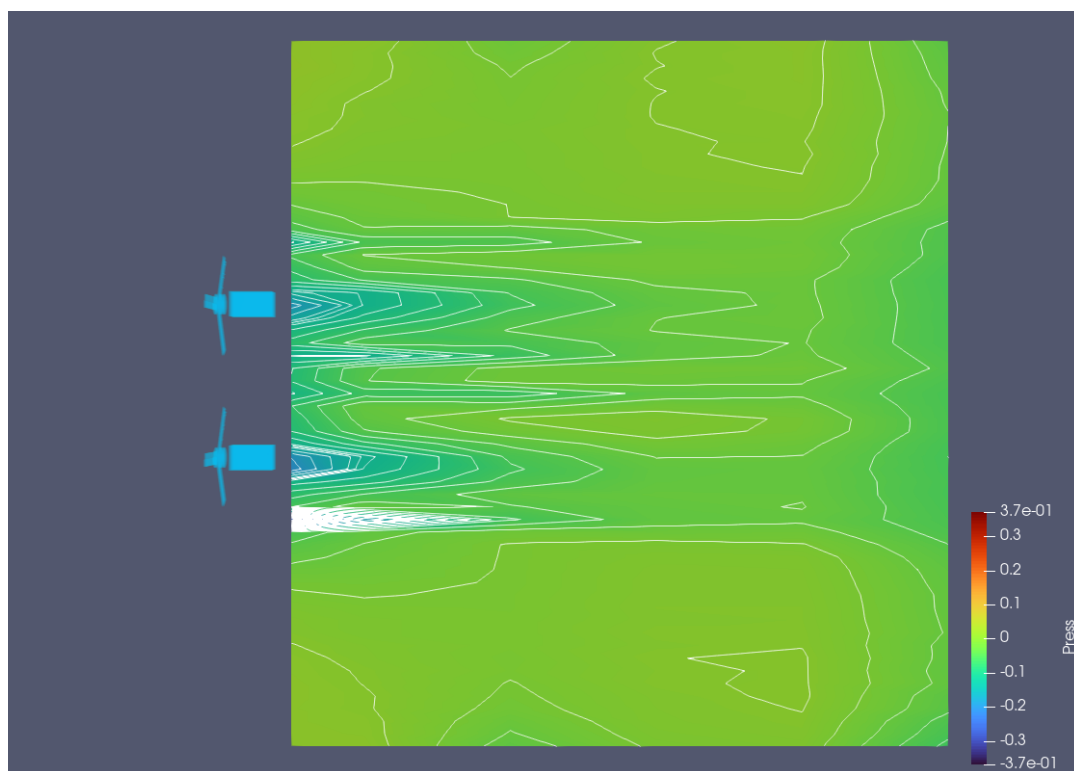


図4.129 レンズ無 Bare の $s/D_{brim}=0.05$ 圧力場

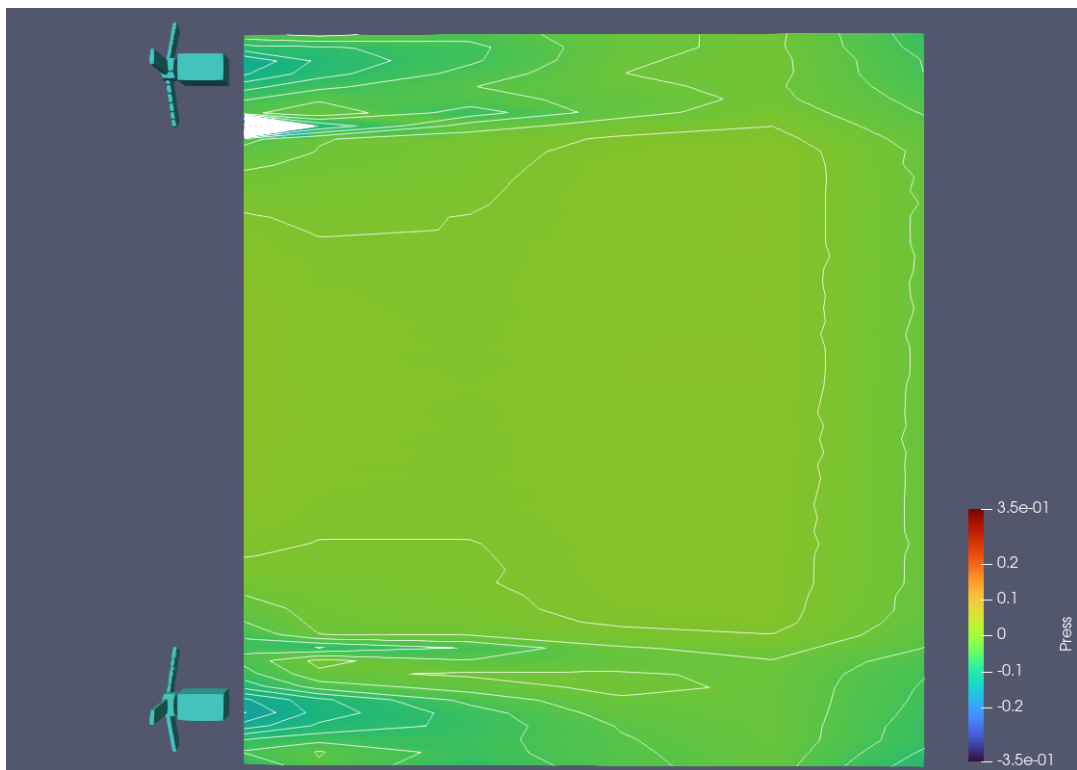


図4.130 レンズ無 Bare の $s/D_{brim} = 3.2$ 圧力場

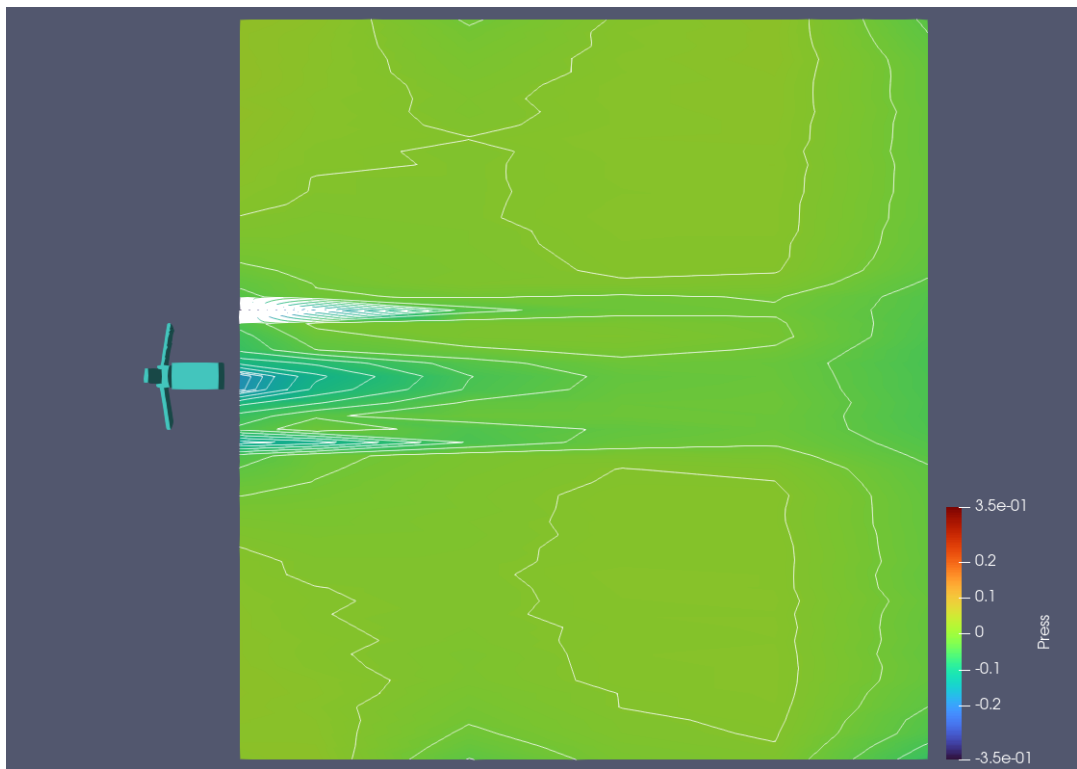


図4.131 レンズ無 Bare の単基 SA 圧力場

図 124~128 では風車間隔が狭まることによって風車後方圧力の低下範囲が広がっていることが分かる。また図 126 の風車後方 $0.5 \sim 1.0 D_{brim}$ に着目すると、風車間隔が近接した場合、風車同士が干渉することで圧力低下範囲が広がり、風車後方の圧力低下に繋がったと考えられる。この風車後方圧力低下が、流入する風を加速させたことが、出力が増加した要因になっていると考えられる。

一方、**Bare** では富者後方の圧力の低下が小さく $s/D_{brim}=0.05$ では圧力低下範囲の一体化が見られるものの後方での圧力回復が **WLT** と比較して早いことが分かる。

4.2.3.5 後流の2次元プロファイル(速度場)

得られた後流分布をもとにそれぞれの測定ライン間を線形補完することで速度場の2次元プロファイルを可視化した。レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=0.05$ における速度場を図 4.132 に示す。レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=0.8$ における速度場を図 4.133 に示す。レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=1.6$ における速度場を図 4.134 に示す。レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=3.2$ における速度場を図 4.135 に示す。レンズ有 WLT の単基 SA における速度場を図 4.136 に示す。レンズ無 Bare の $s/D_{brim}=0.05$ における速度場を図 4.137 に示す。レンズ無 Bare の $s/D_{brim}=3.2$ における速度場を図 4.138 に示す。レンズ無 Bare の単基 SA における速度場を図 4.139 に示す。

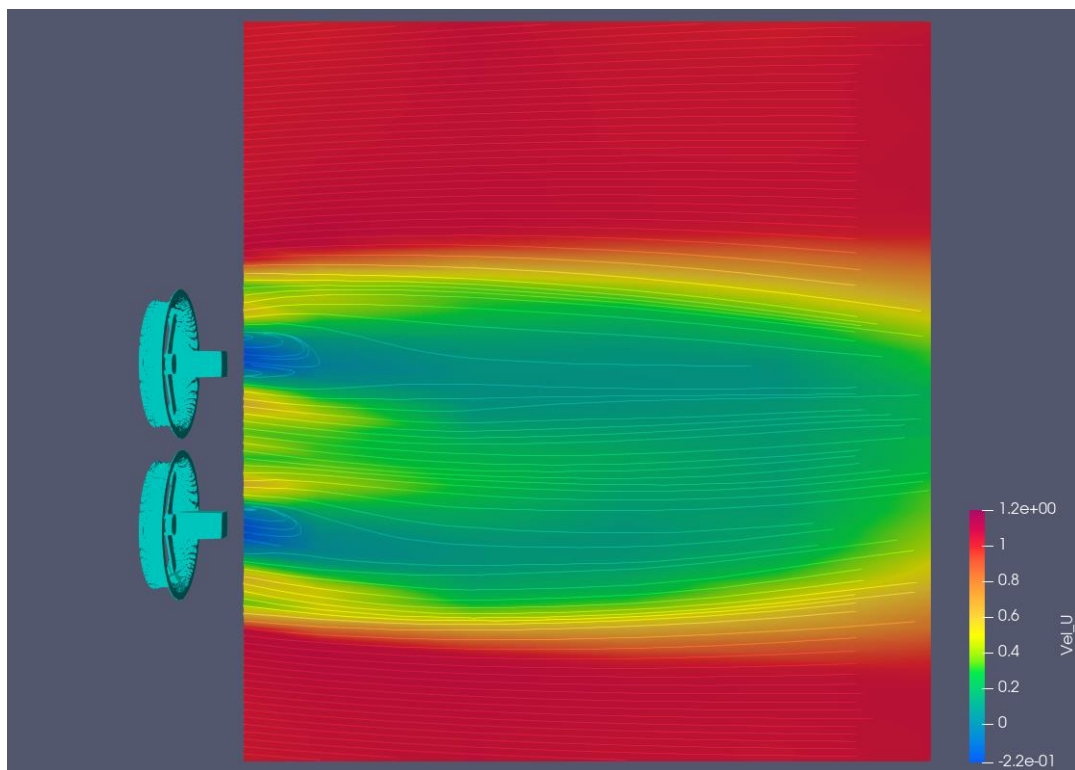


図4.132 レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=0.05$ 速度場

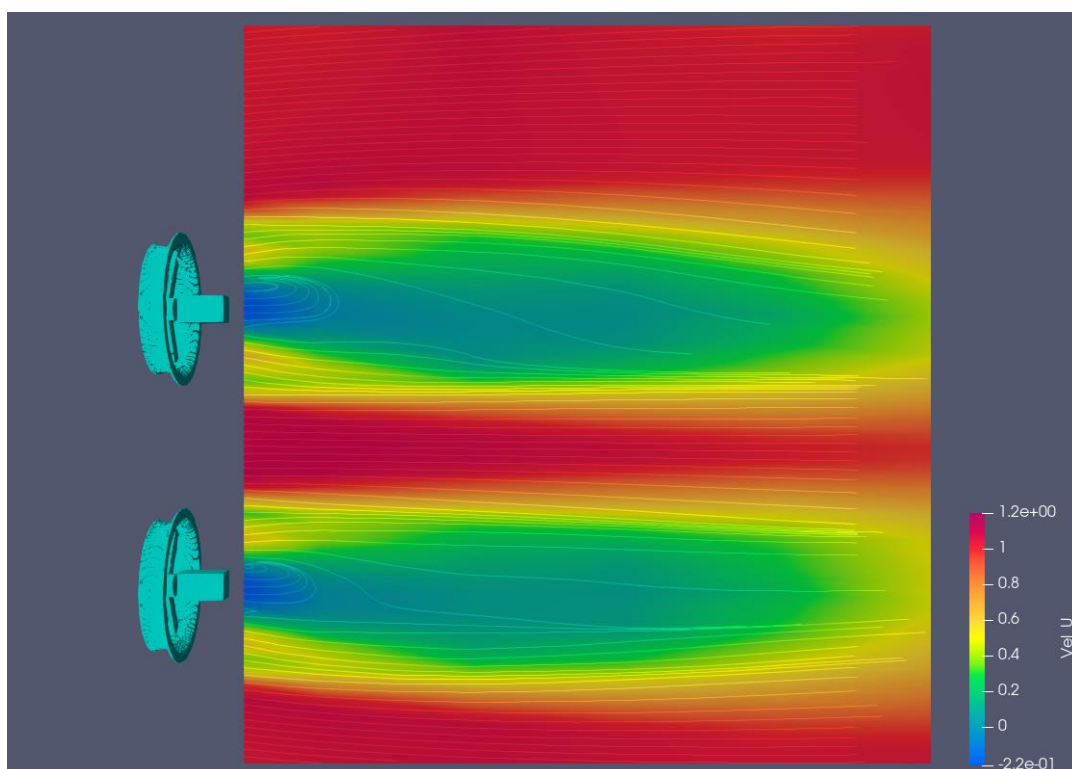


図4.133 レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=0.8$ 速度場

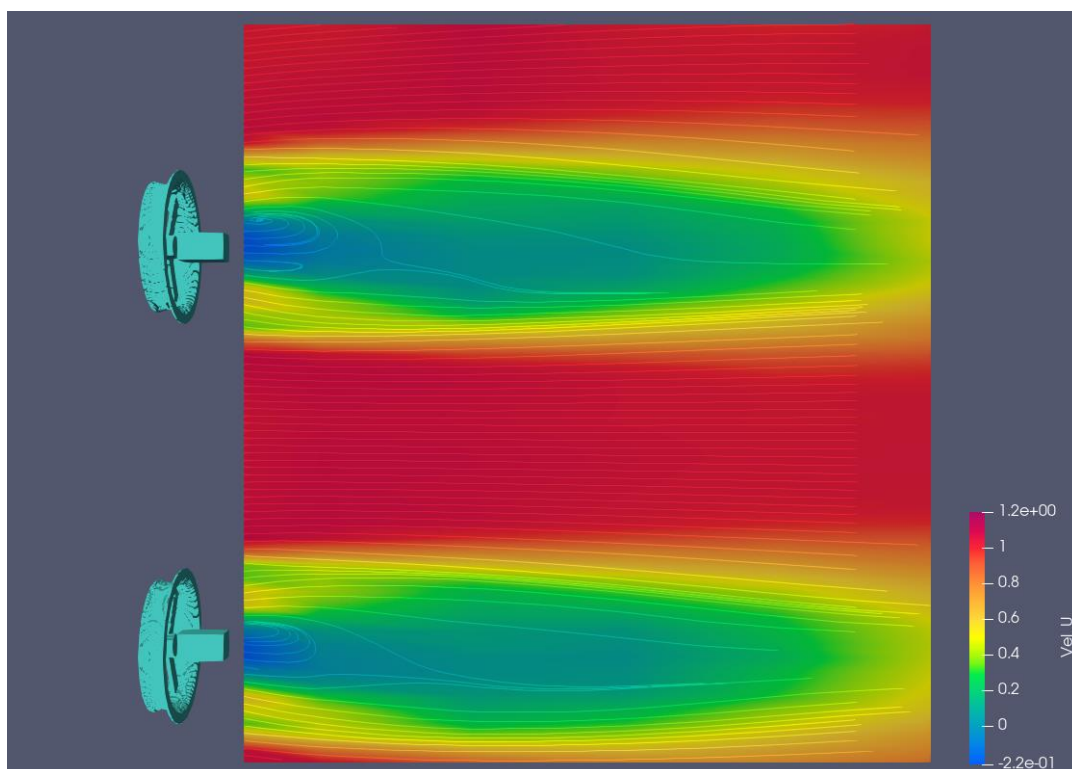


図4.134 レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=1.6$ 速度場

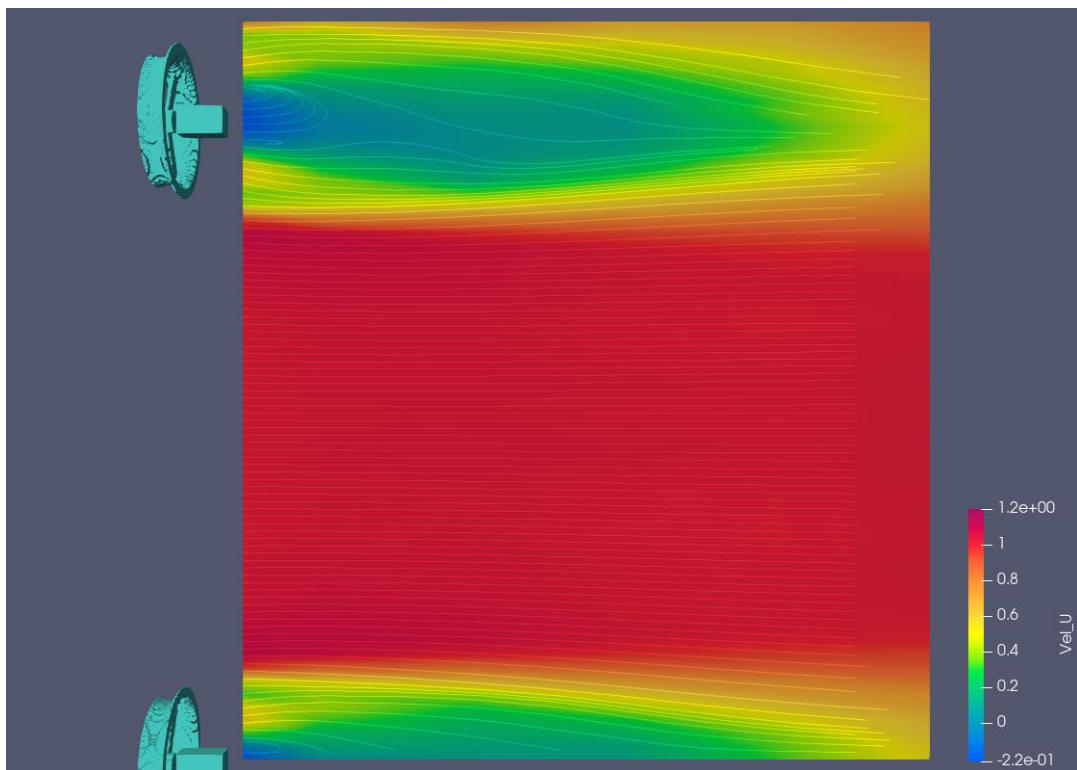


図4.135 レンズ有 WLT の $s/D_{brim}=3.2$ 速度場

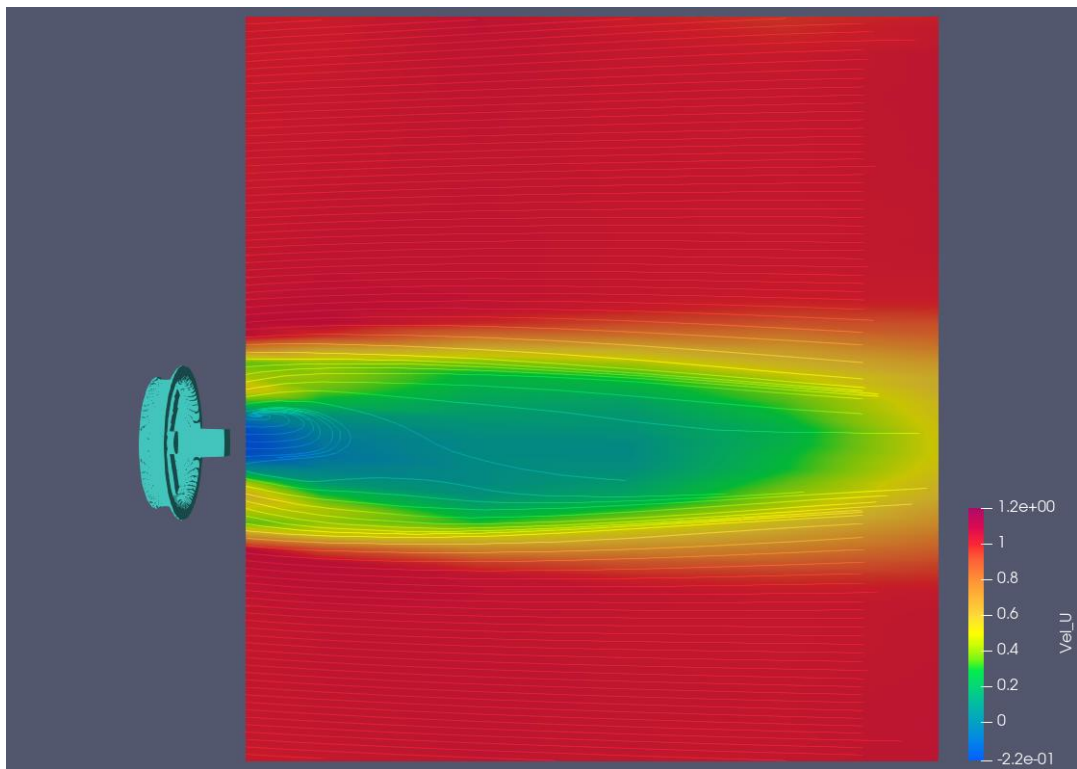


図4.136 レンズ有 WLT の単基 SA 速度場

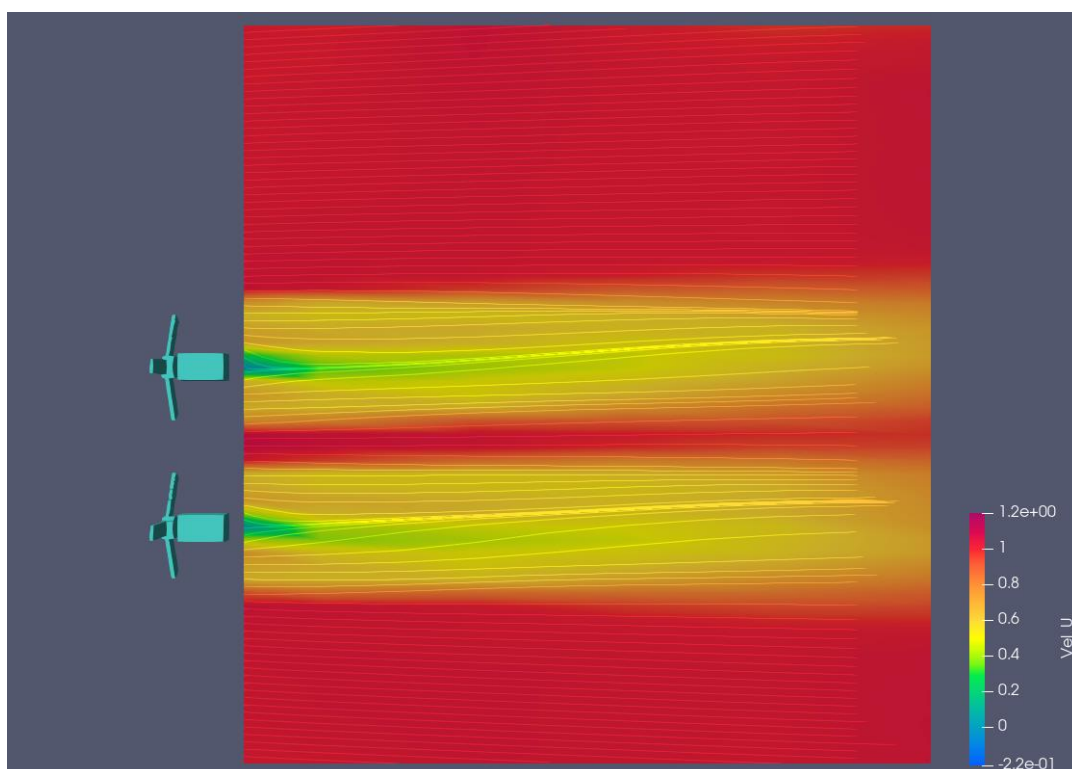


図4.137 レンズ無 Bare の $s/D_{brim}=0.05$ 速度場

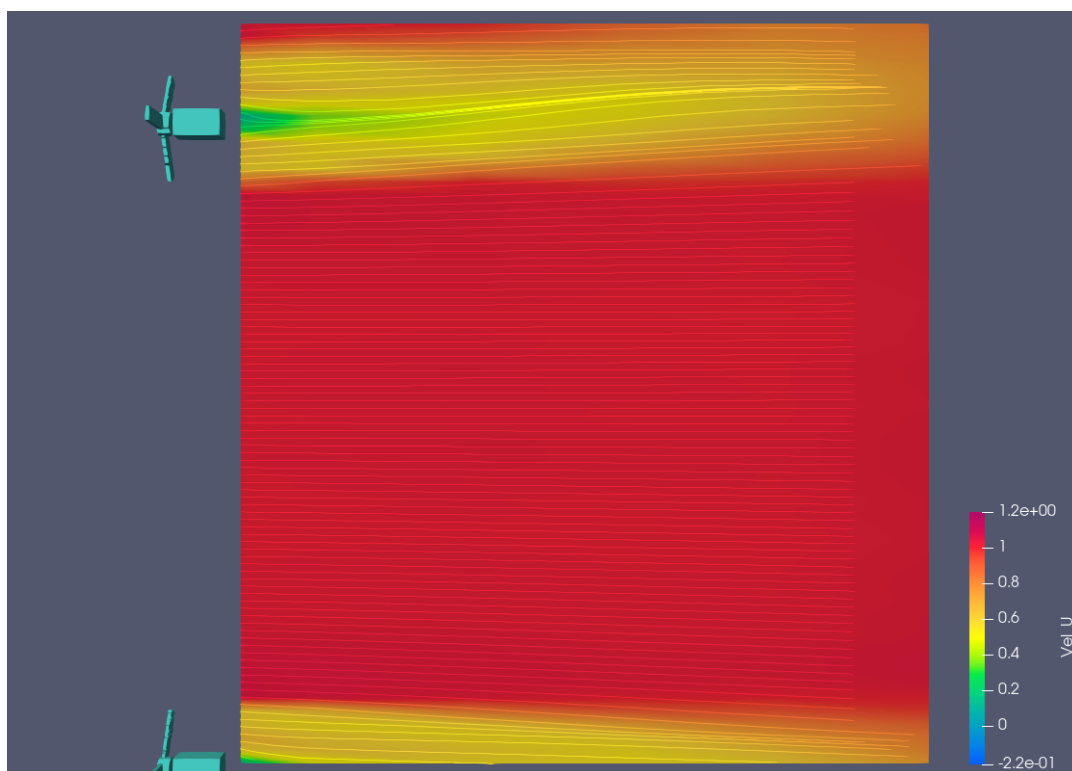


図4.138 レンズ無 Bare の $s/D_{brim}=3.2$ 速度場

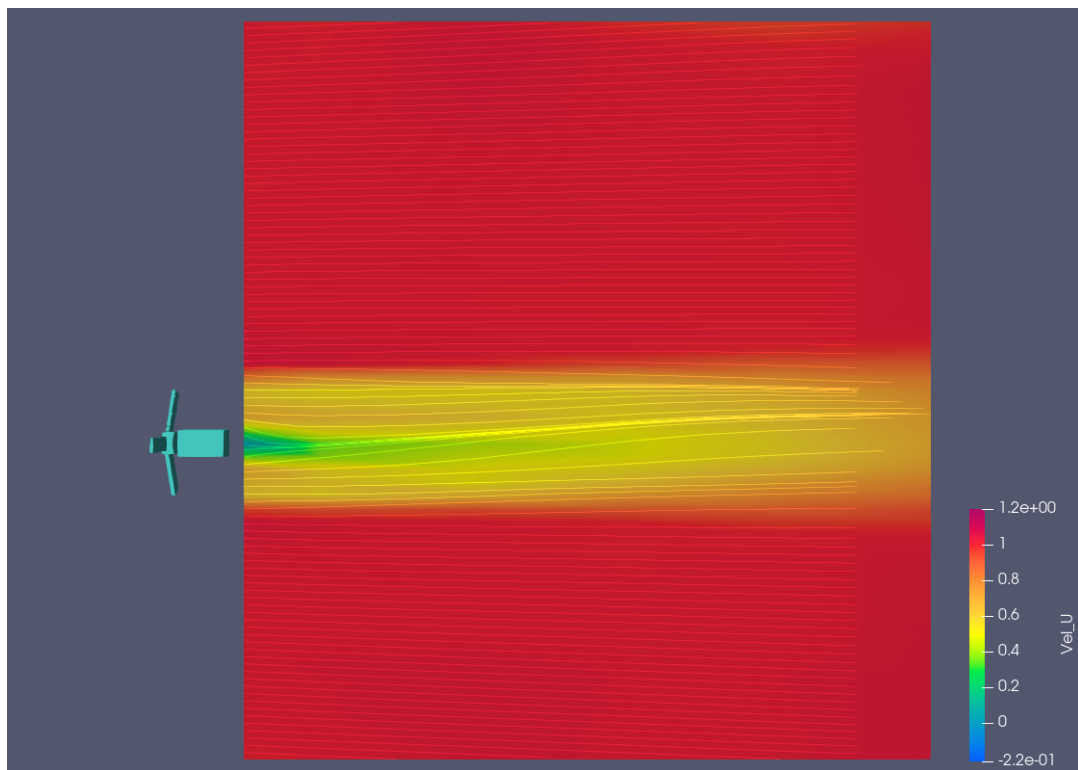


図4.139 レンズ無 Bare の単基 SA 速度場

図 132 と図 137 で比較すると、 $s/D_{brim}=0.05$ において、レンズ有では後流の減速領域が合体していく様子が見られるのに対し、レンズ無では各風車後方にそれぞれ減速域が見てとれ、ギャップフローが維持されながら後流がそれぞれの風車の下流側に独立に存在している。WLT においては近接させた状態での風車同士の干渉が見てとれ、この後流構造の違いが WLT において風車間隔によって出力が大きく変化する要因と考えられる。

第5章 数値計算の結果と考察

本章ではマルチレンズ風車について、第3章で記述した数値計算手法によって行われた結果を記す。

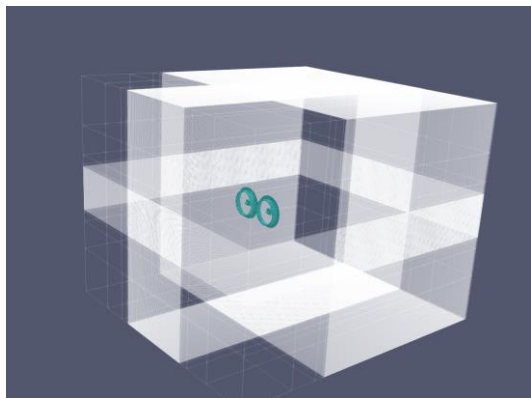
5.1 計算条件

マルチロータシステムを評価する際の比較基準として、CiiB7.5 風車 2 基の $s/D_{brim}=0.05$ の風車間隔における数値計算を行った。数値計算の計算条件を表 1 に示す。数値計算では定常状態となる計算無次元時間 10.0～15.0 における平均値と、計算無次元時間 15.0 における瞬間値を導出した。

数値計算をするにあたってのグリッド図を図 5.1 に示す。風車周辺及び後方では、流れを詳しく解析するため高分解領域としている

表 5.1 計算条件

Re 数	4.5×10^5
周速比	4 (最適周速比)
格子	$901 \times 411 \times 211$ 直交座標
計算領域	$13.0 D_{rotor} \times 12 D_{rotor} \times 10 D_{rotor}$
計算無次元時間	15.0
最小格子幅	$0.01 D_{rotor}$ (高分解能)
風車配置	$s/D_{brim}=0.05$



(a)全体図



(b)最小格子範囲

図5.1 レンズ風車における計算グリッド図

5.2 無次元圧力分布(時間平均値)と実験との比較

数値計算で得られる無次元圧力 p^* について、風洞実験で測定した圧力差を、風洞上流風速 U_∞ より求めた動圧で除した圧力係数 C_p と比較するにあたっての関係は次の通りとなる。ナビエストークスの関係は式(5.1)で示される。ここで圧力項より求められる数値計算内の無次元圧力は式(5.2)となり、実験で得られる圧力係数は式(5.3)であるので、数値計算で得られる無次元圧力と風洞実験で得られた圧力係数の関係は式(5.4)となる。よって数値計算で得られた無次元圧力の数値は 2 倍することで実験値と

比較することができる.

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + u_j \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^* \partial x_j^*} \quad (5.1)$$

$$p^* = \frac{p}{\rho U^2} \quad (5.2)$$

$$Cp = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (5.3)$$

$$Cp = 2p^* \quad (5.4)$$

数値計算で得られた風車周辺及び後方における無次元圧力の XY 分布の平均場を図 5.2 に示す. 図 5.2 に示した白線は 4 章の後方流速測定試験で測定した集風体後端から 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 D_{brim} 後方を示している. 上流から見た風車位置と圧力分布を図 5.3 に, 各測定ラインにおける無次元圧力の YZ 分布を図 5.4～図 5.9 に示す.

また各測定ラインの無次元圧力を 2 倍した水平方向(Y 方向)分布を図 5.10 に示す. 後方流速試験で測定した圧力係数分布と数値計算で得られた無次元圧力を比較した水平方向(Y 方向)分布を図 5.11～5.16 に示す.

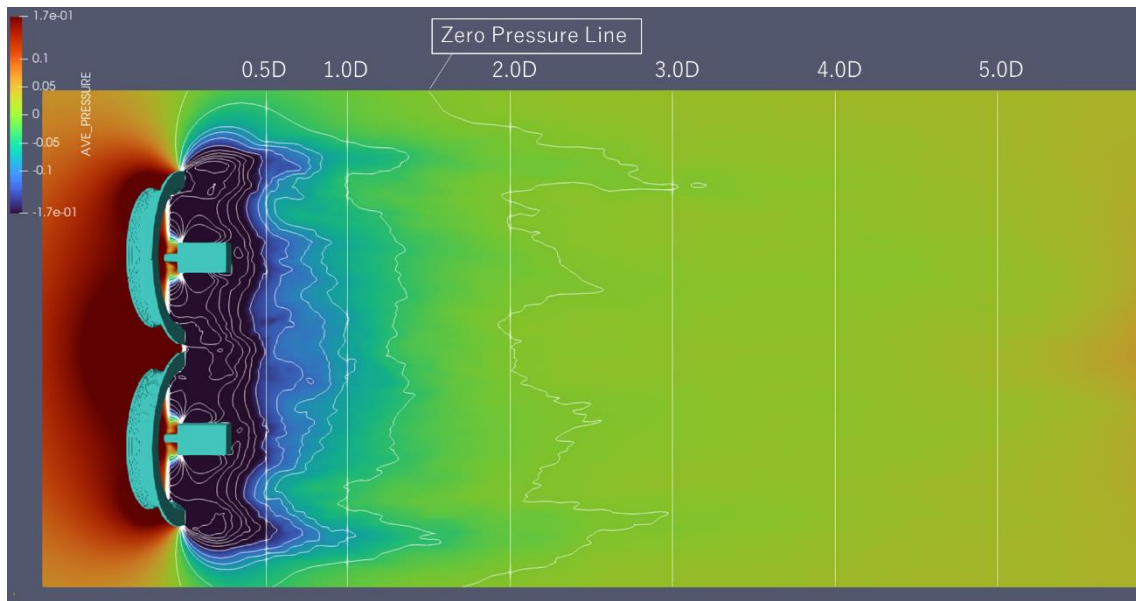


図5.2 無次元圧力係数 XY 分布

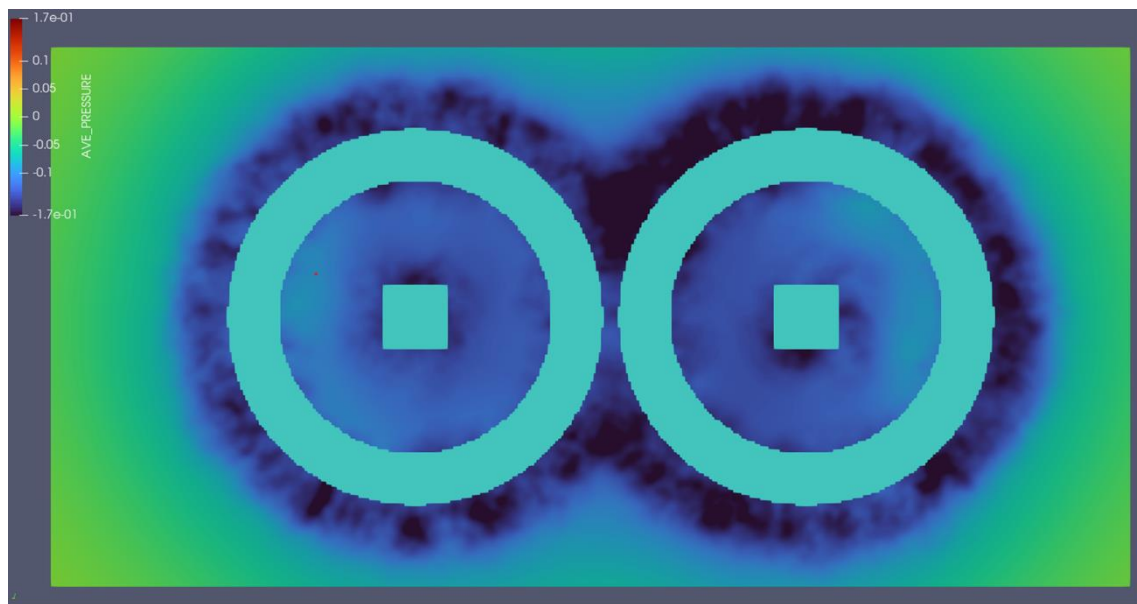


図5.3 上流から見た風車位置関係

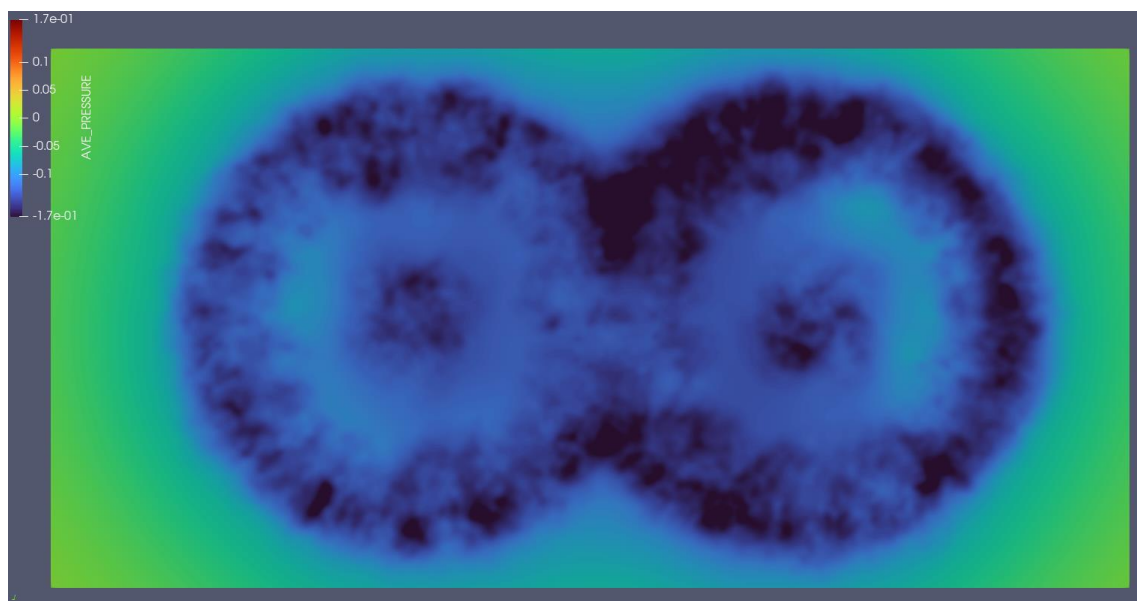


図5.4 $0.5D_{brim}$ 後方での YZ 分布

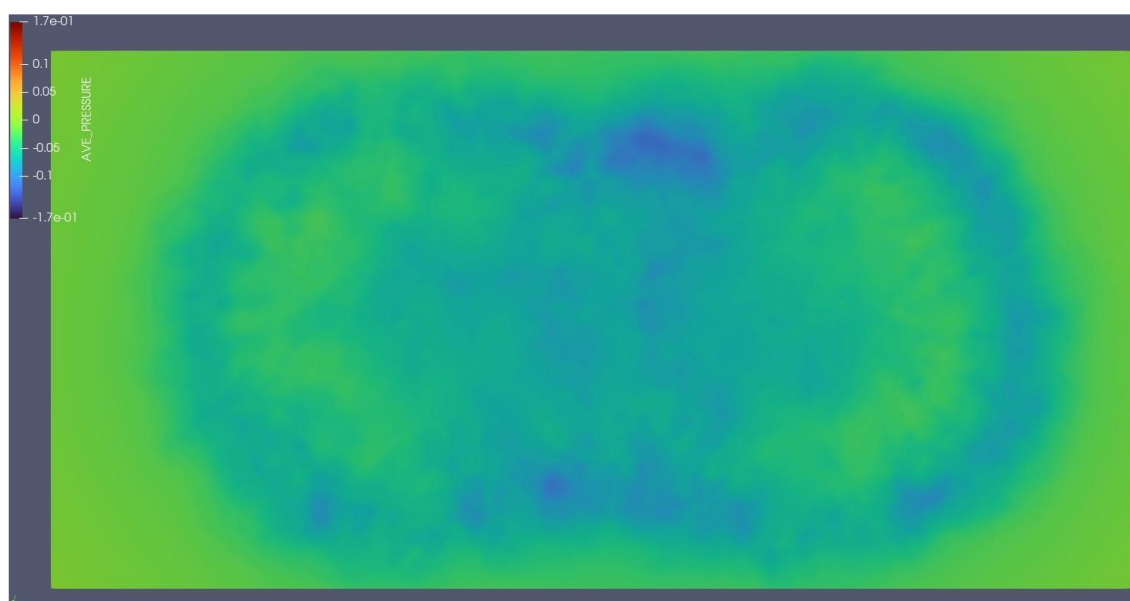


図5.5 $1.0D_{brim}$ 後方での YZ 分布

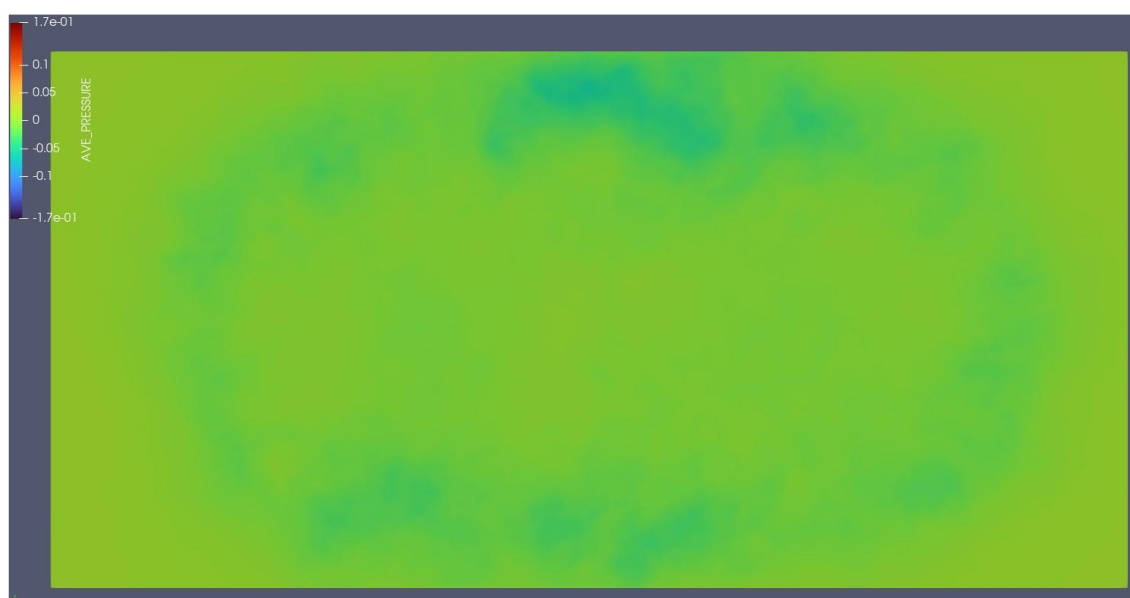


図5.6 $2.0D_{brim}$ 後方での YZ 分布

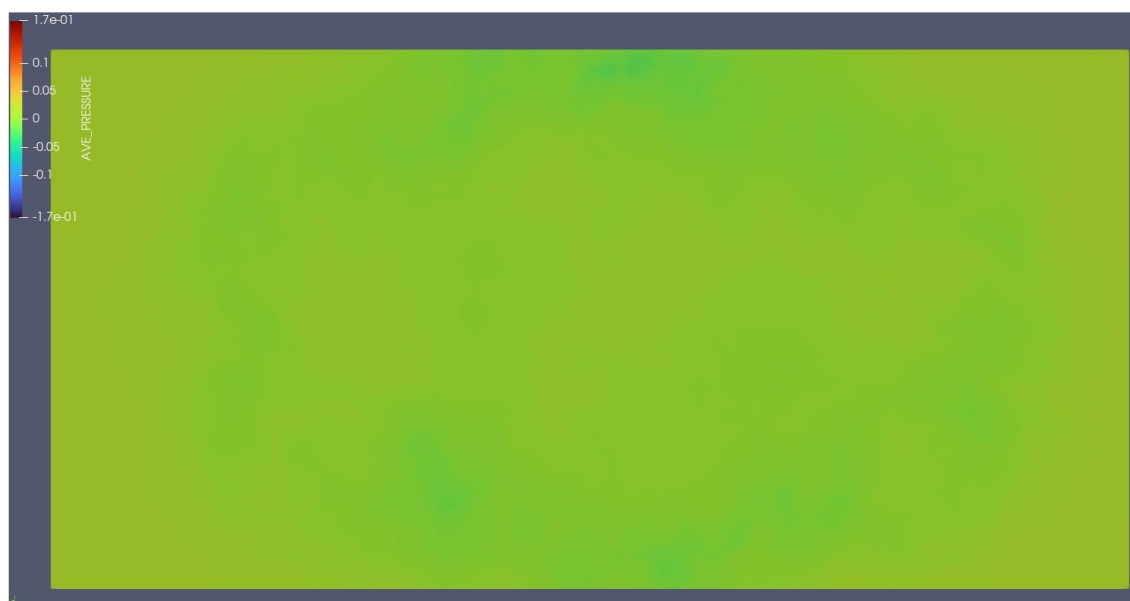


図5.7 $3.0D_{brim}$ 後方での YZ 分布

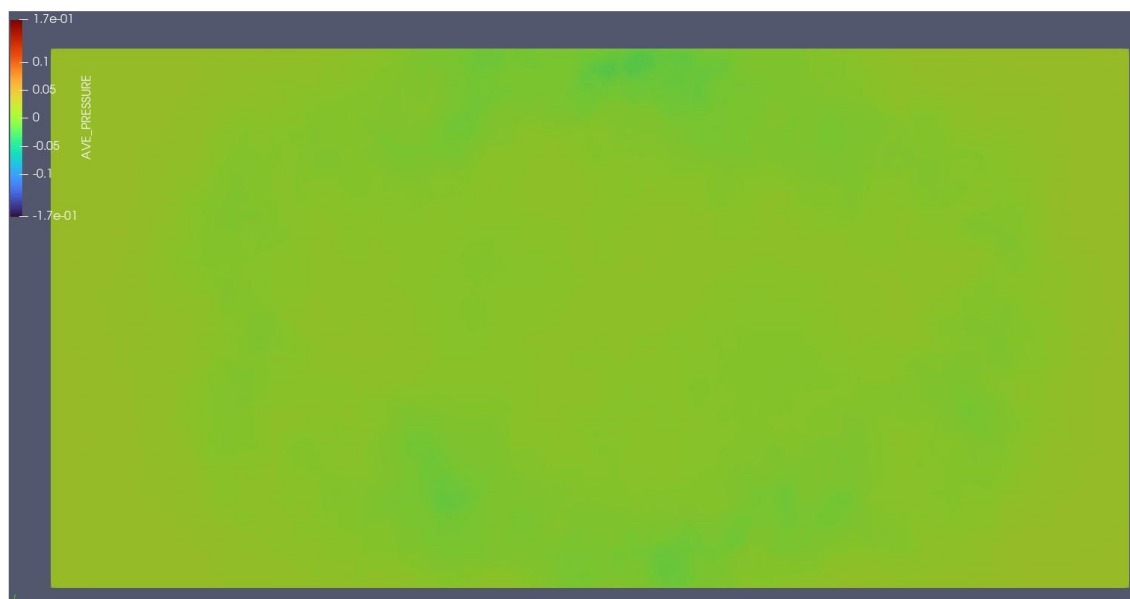


図5.8 $4.0D_{brim}$ 後方での YZ 分布



図5.9 $5.0D_{brim}$ 後方での YZ 分布

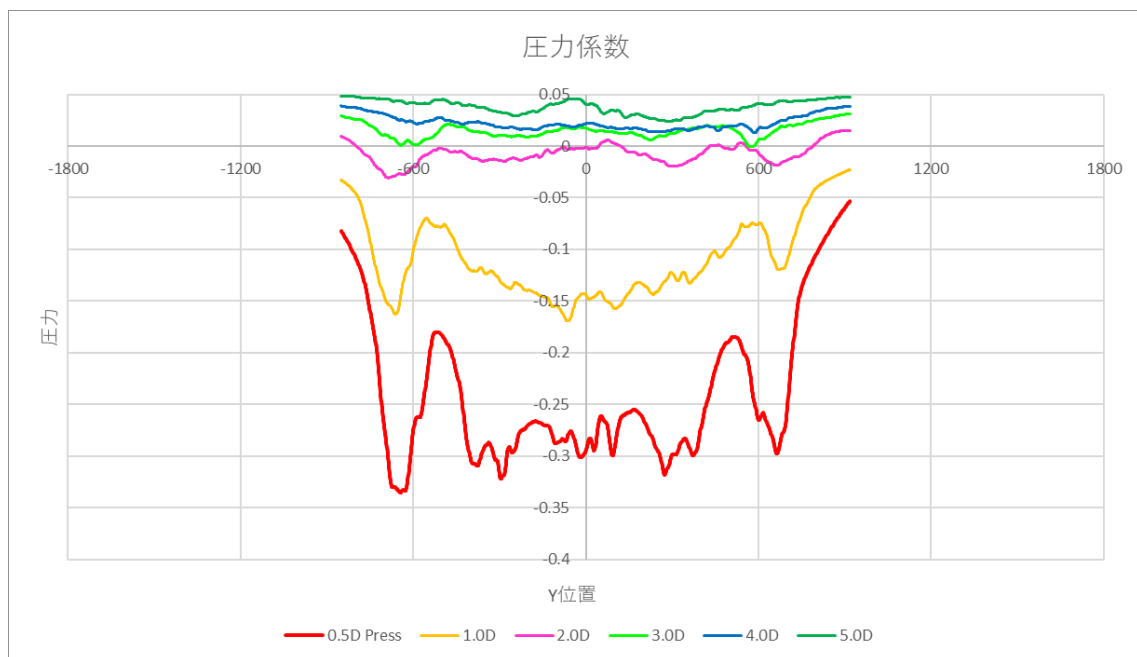


図5.10 無次元圧力分布

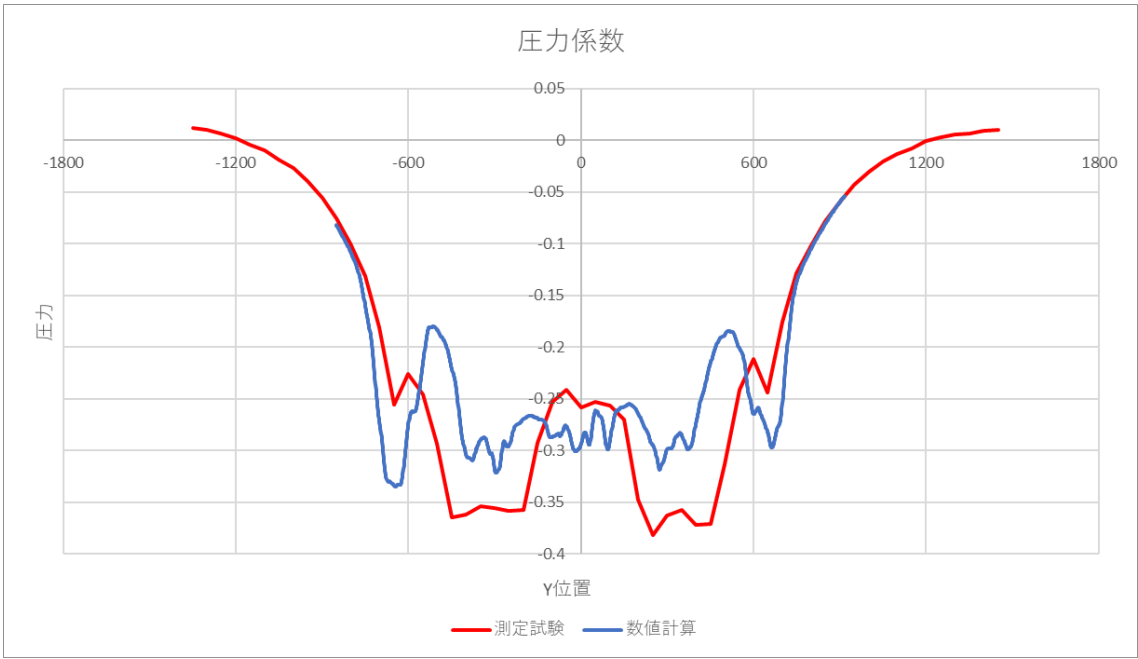


図5.11 $0.5D_{brim}$ 压力比較

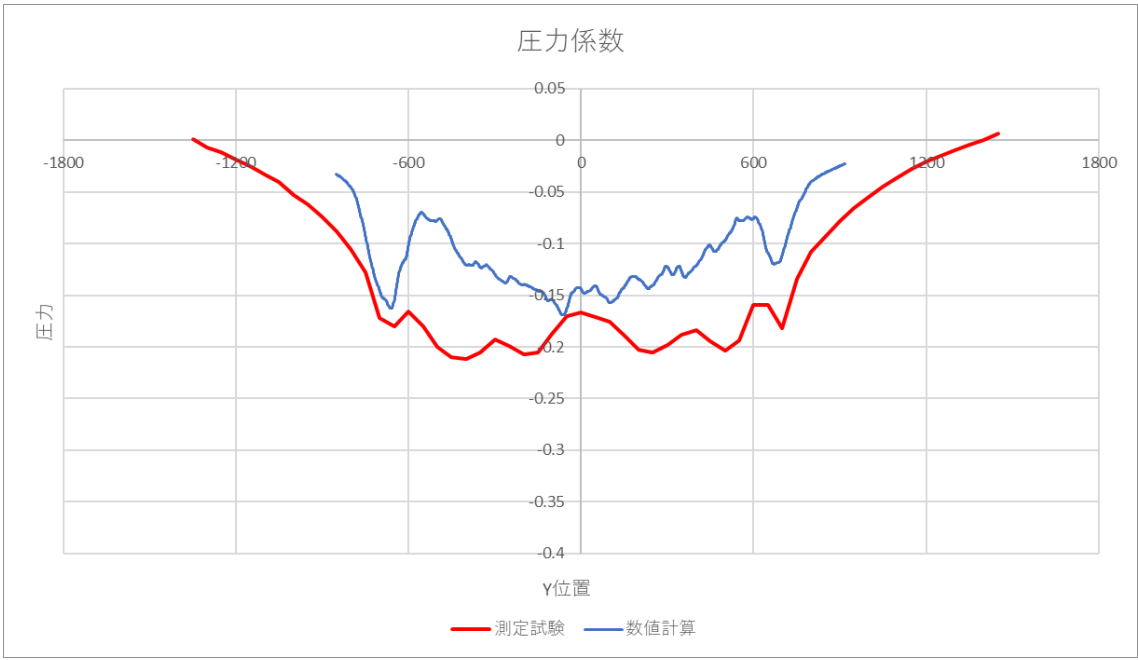


図5.12 $1.0D_{brim}$ 压力比較

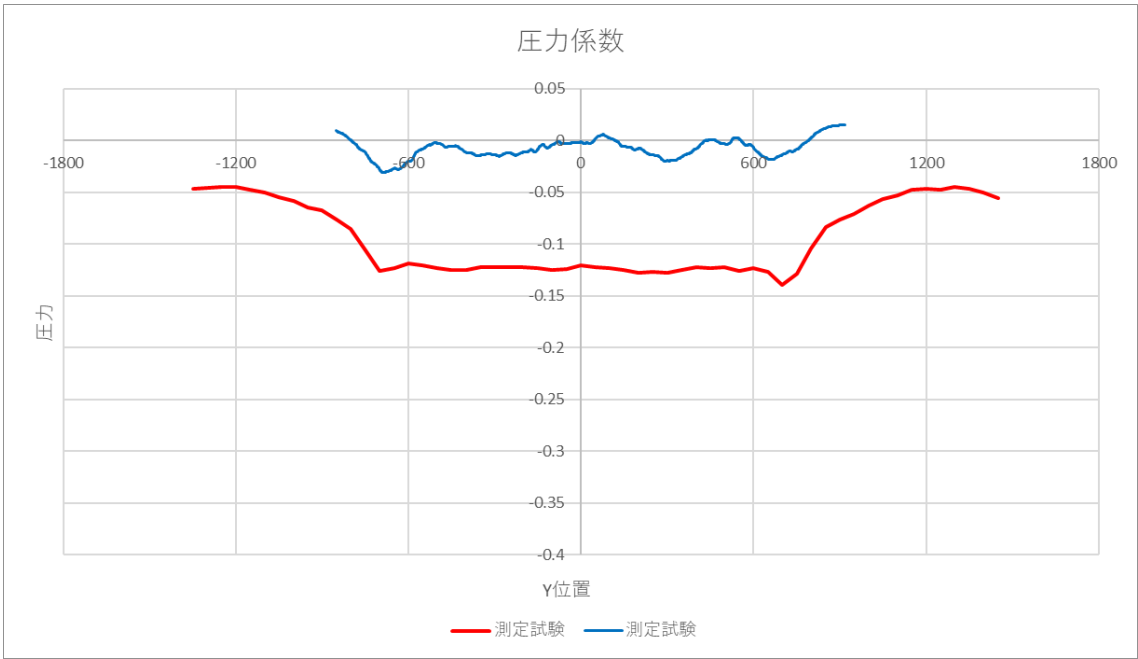


图5.13 2.0 D_{brim} 压力比較

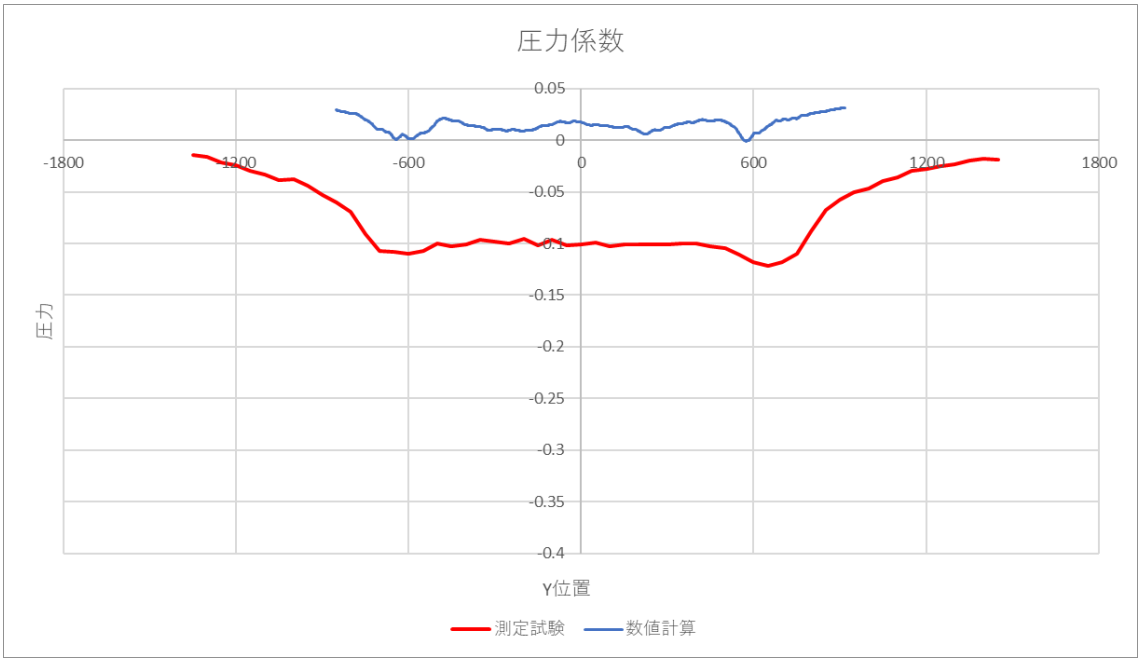


图5.14 3.0 D_{brim} 压力比較

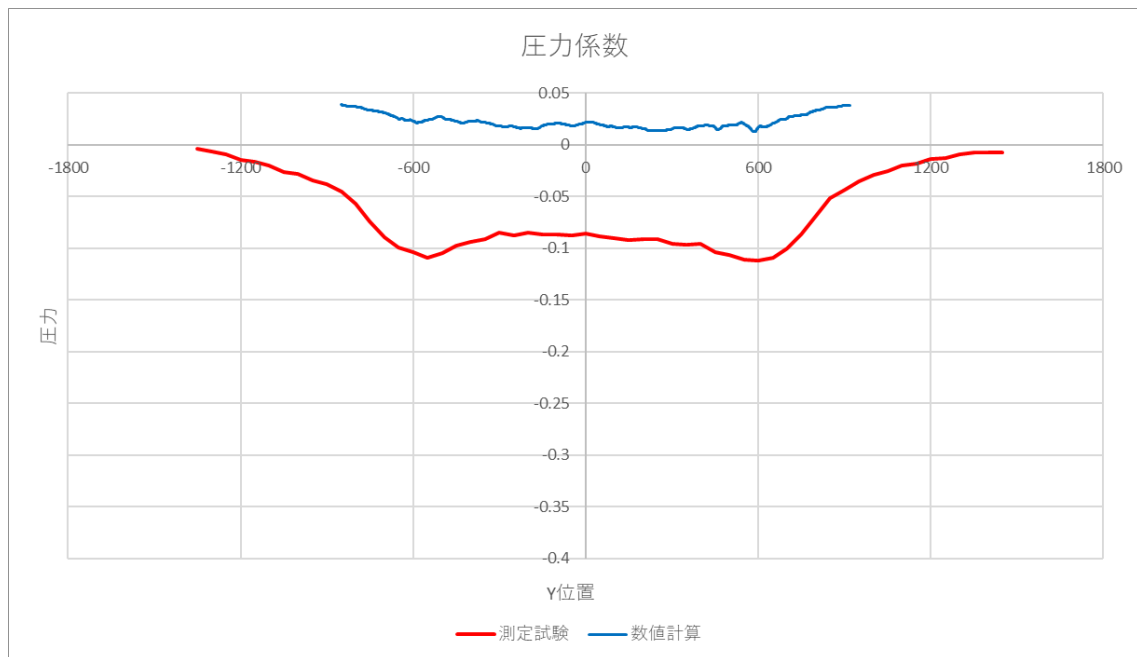


図5.15 $4.0D_{brim}$ 圧力比較

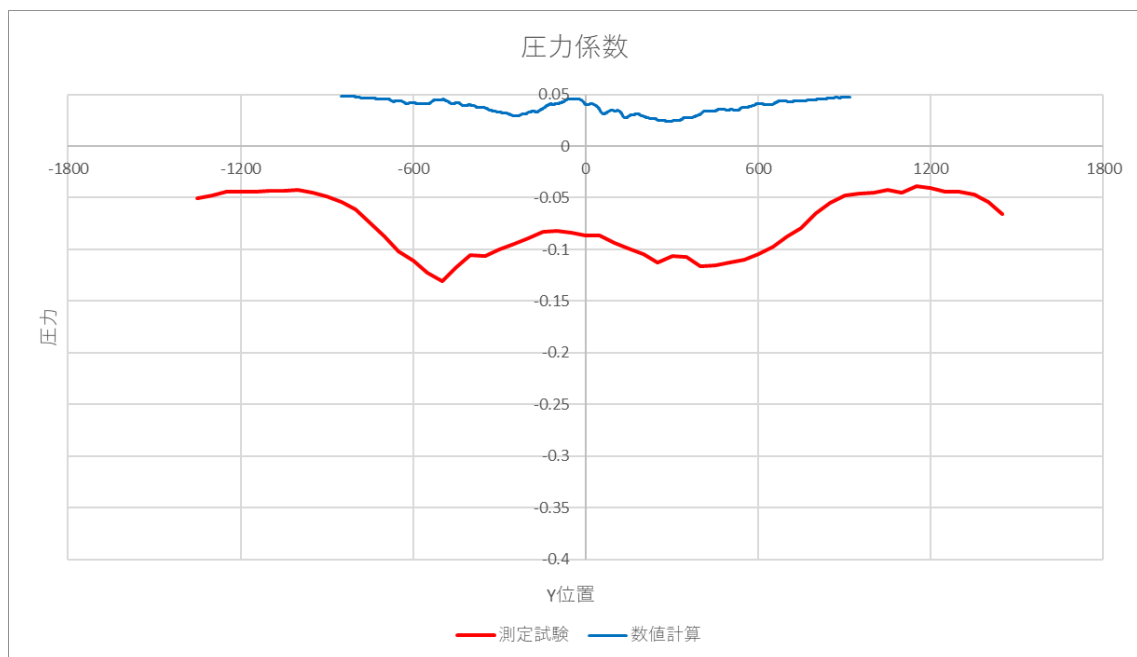


図5.16 $5.0D_{brim}$ 圧力比較

図 5.2, 図 5.4, 図 5.11 より風車直後での圧力低下範囲は、一体化している様子が見られ風洞実験で得られた圧力係数と同程度の圧力低下が見られた。

一方図 5.5～図 5.9 では低下していた圧力の回復が見られ、図 5.10 から風車後方 $2.0D_{brim}$ では圧力が完全に回復し、それより後方では圧力が正となっていることが見られる。

図 12～16 では実験の測定値と比べ大きな乖離が見られる。図 5.10 と 4 章 4.2.2.1 の図 4.43 と比較す

るとレンズ外側での圧力に大きな違いが見られる．数値計算では後方になるにつれレンズ外側圧力が回復しているのに対し，風洞実験試験ではレンズ外側の圧力が後方へと行くにつれて圧力の回復が見られない．この違いがレンズ後方の圧力回復の差に繋がった要因と考えられる．

5.3 主流方向無次元流速(時間平均値)と実験値との比較

数値計算で得られた風車周辺及び後方における無次元流速の XY 分布の平均場を図 5.17 に示す．図 5.17 に示した白線は 4 章の後方流速測定試験で測定した集風体後端から 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 D_{brim} 後方を示している．上流から見た風車位置を図 5.18 に，各測定ラインにおける無次元の YZ 分布を図 5.19～図 5.24 に示す．

また各測定ラインの無次元流速を実験値のオーダーにした水平方向(Y 方向)分布を図 5.25 に示す．後方流速試験で測定した無次元流速分布と数値計算で得られた無次元流速を比較した水平方向(Y 方向)分布を図 5.26～5.31 に示す．

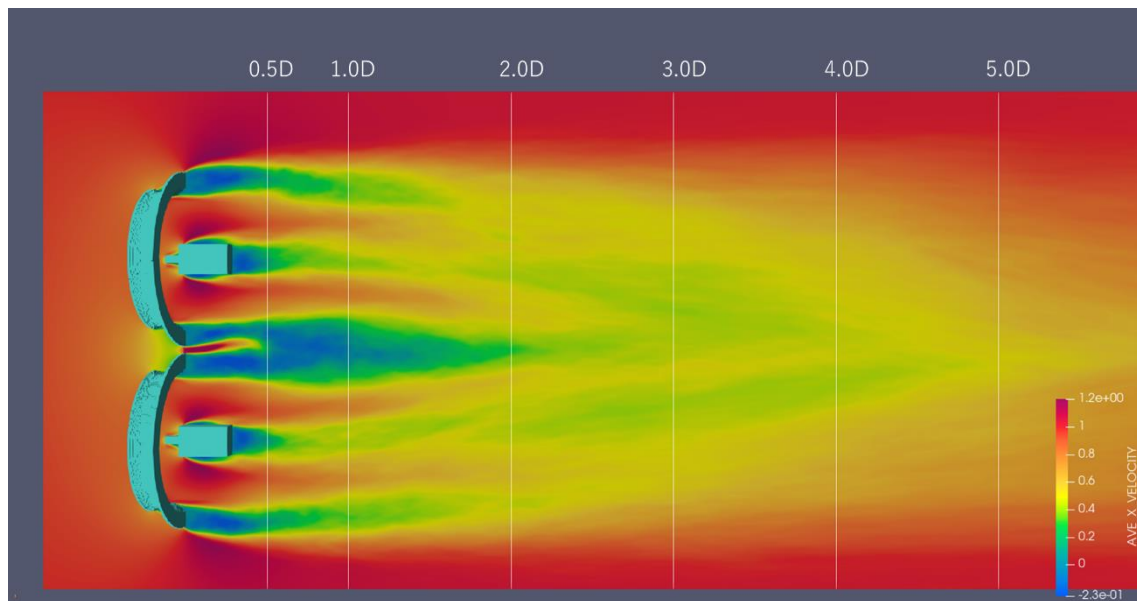


図5.17 無次元流速 XY 分布

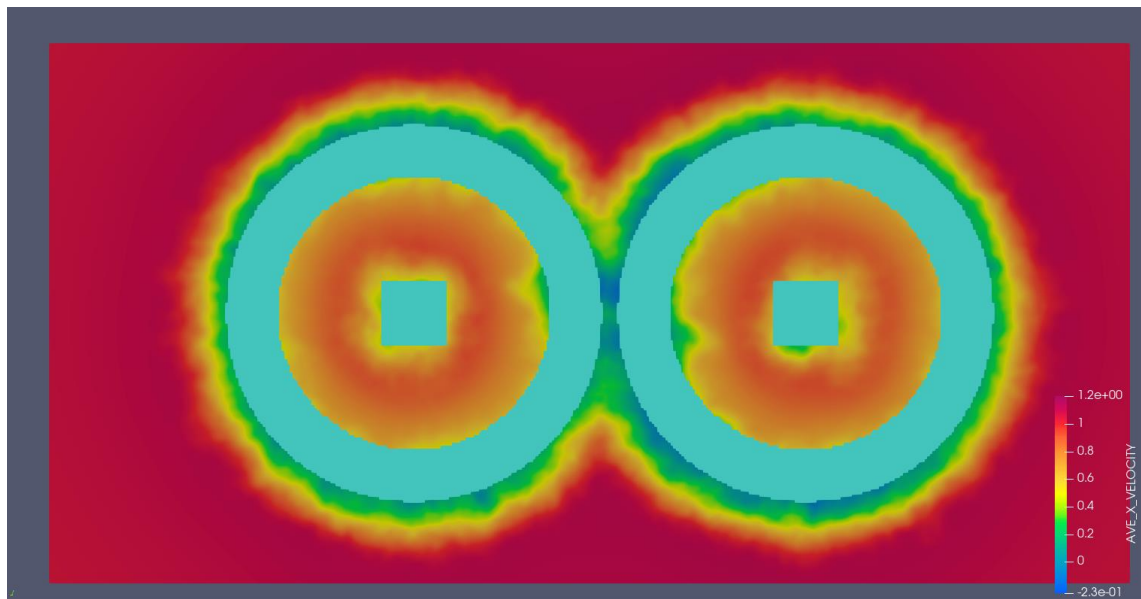


図5.18 上流から見た風車位置関係

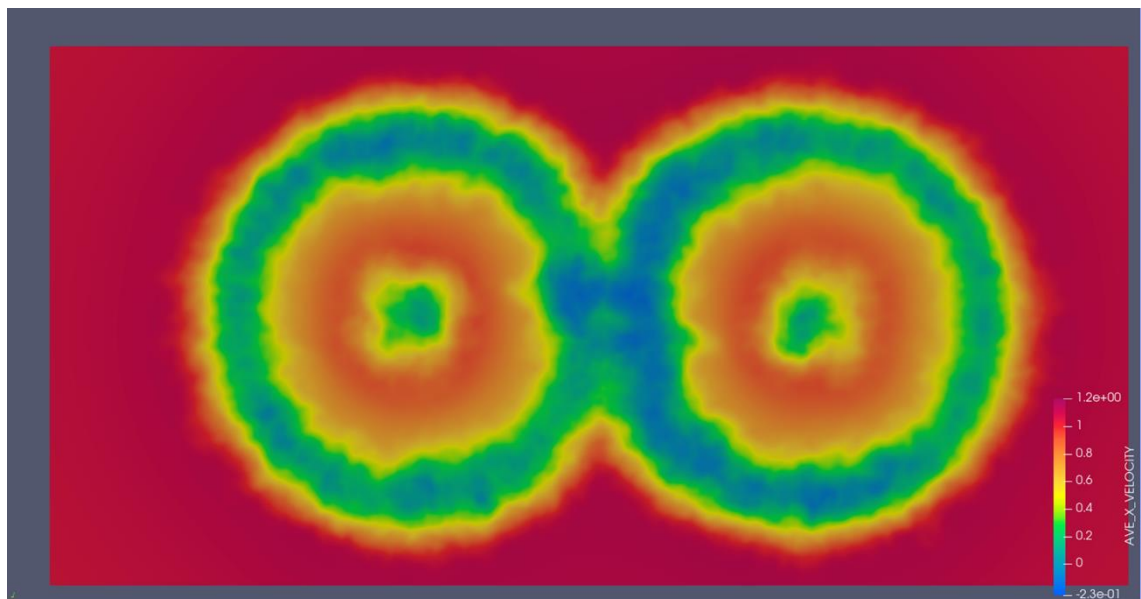


図5.19 $0.5D_{brim}$ 後方での YZ 分布

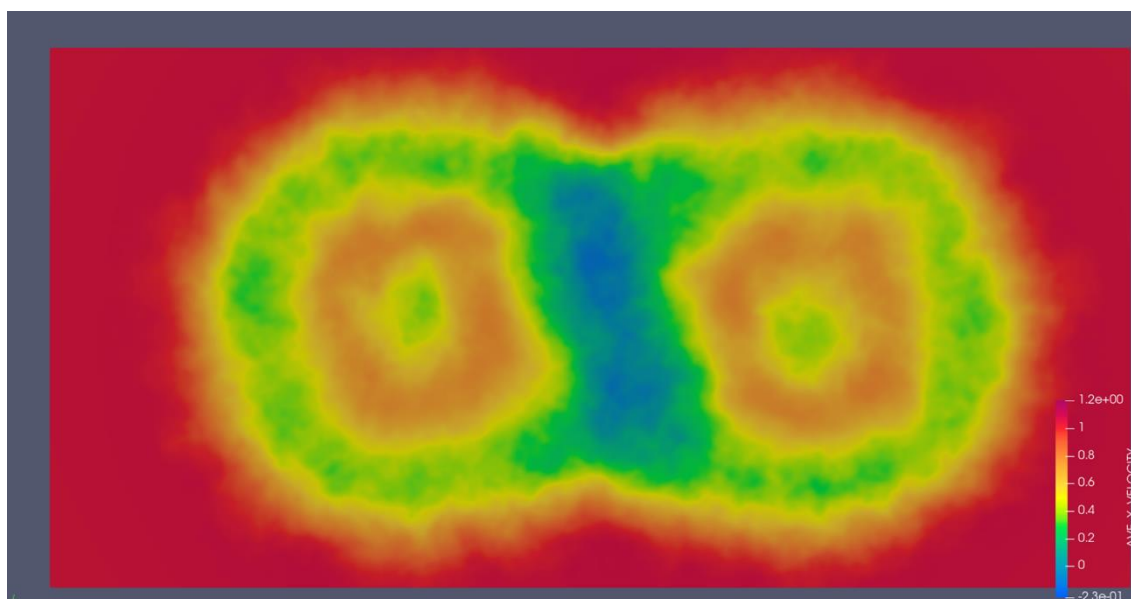


図5.20 $1.0D_{brim}$ 後方での YZ 分布

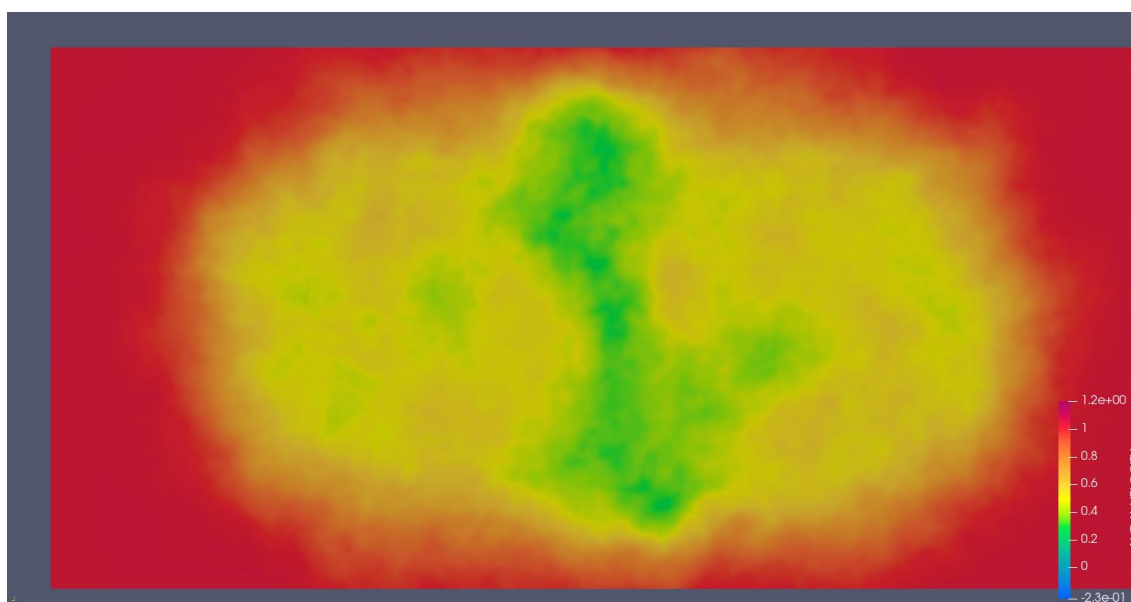


図5.21 $2.0D_{brim}$ 後方での YZ 分布

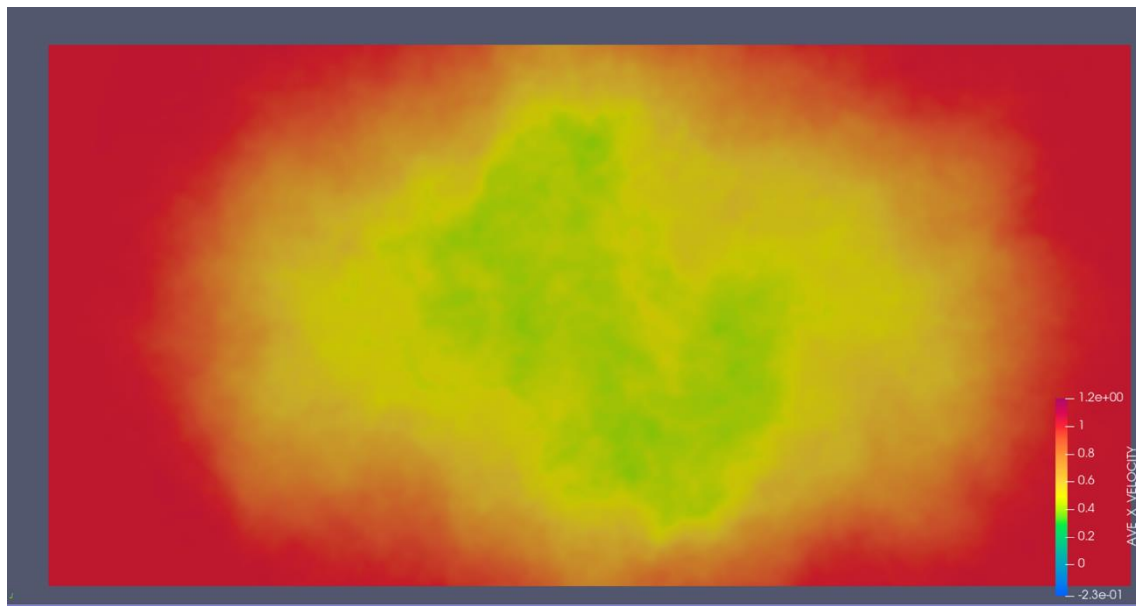


図5.22 $3.0D_{brim}$ 後方での YZ 分布

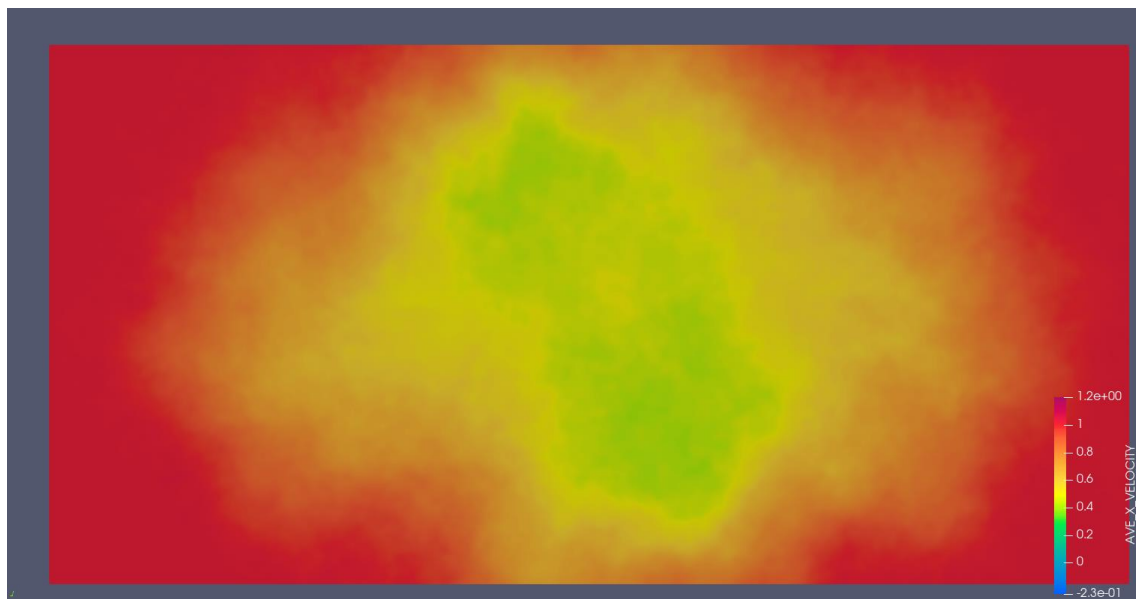


図5.23 $4.0D_{brim}$ 後方での YZ 分布

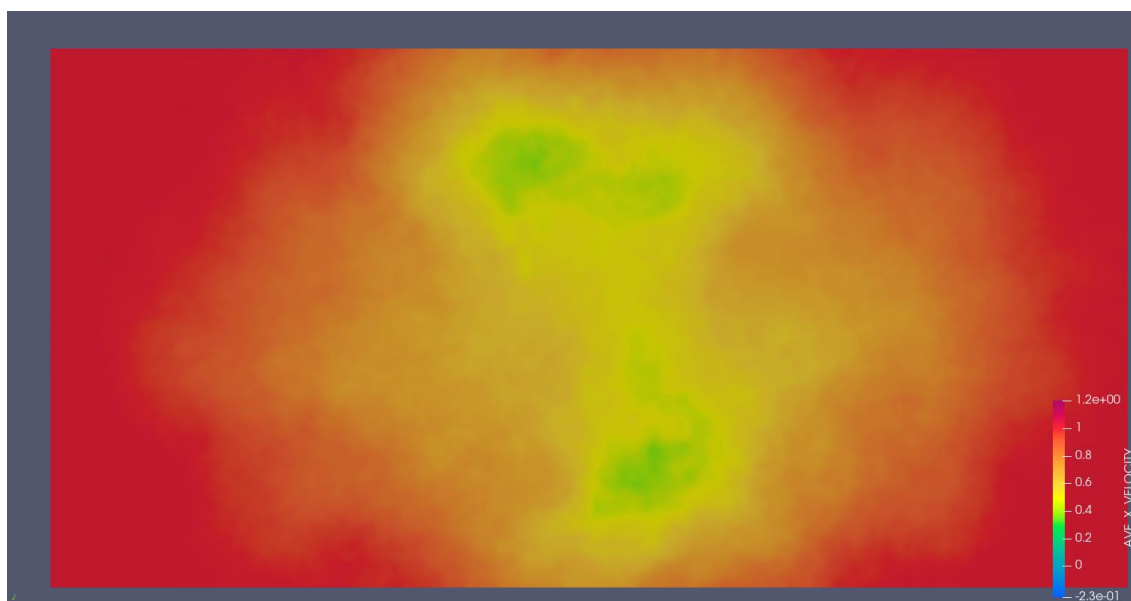


図5.24 $5.0D_{brim}$ 後方での YZ 分布

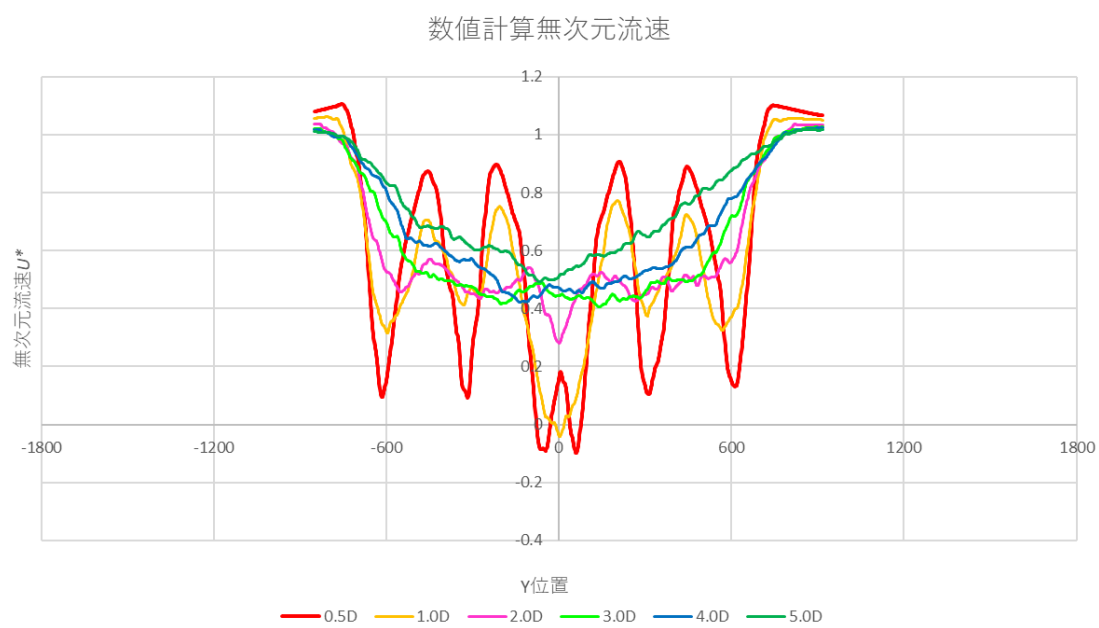


図5.25 無次元流速分布

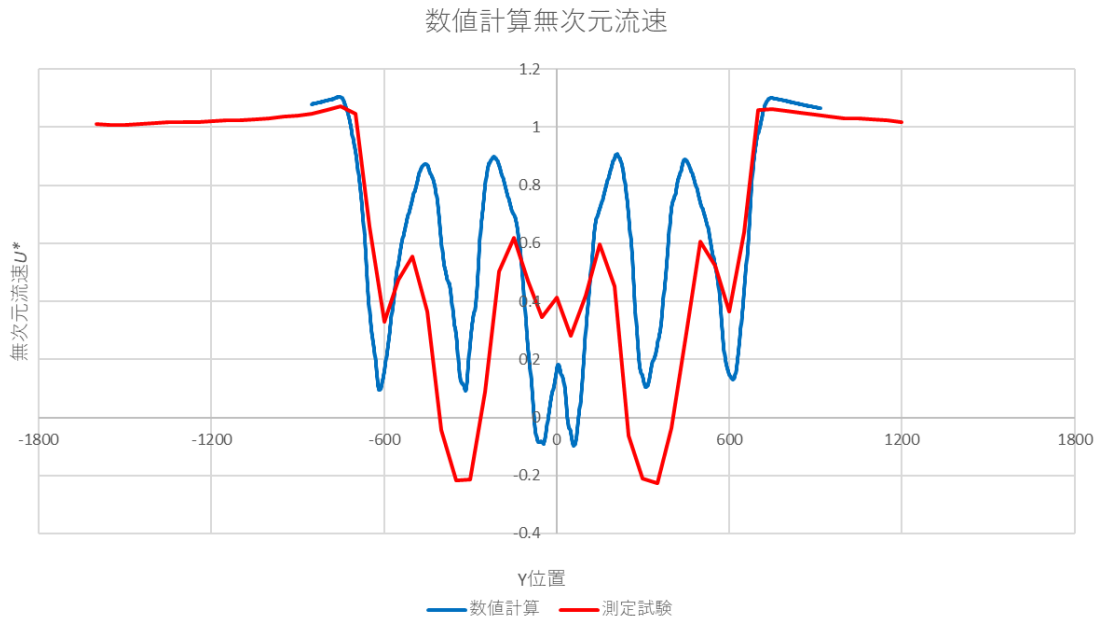


図5.26 $0.5D_{brim}$ 流速比較

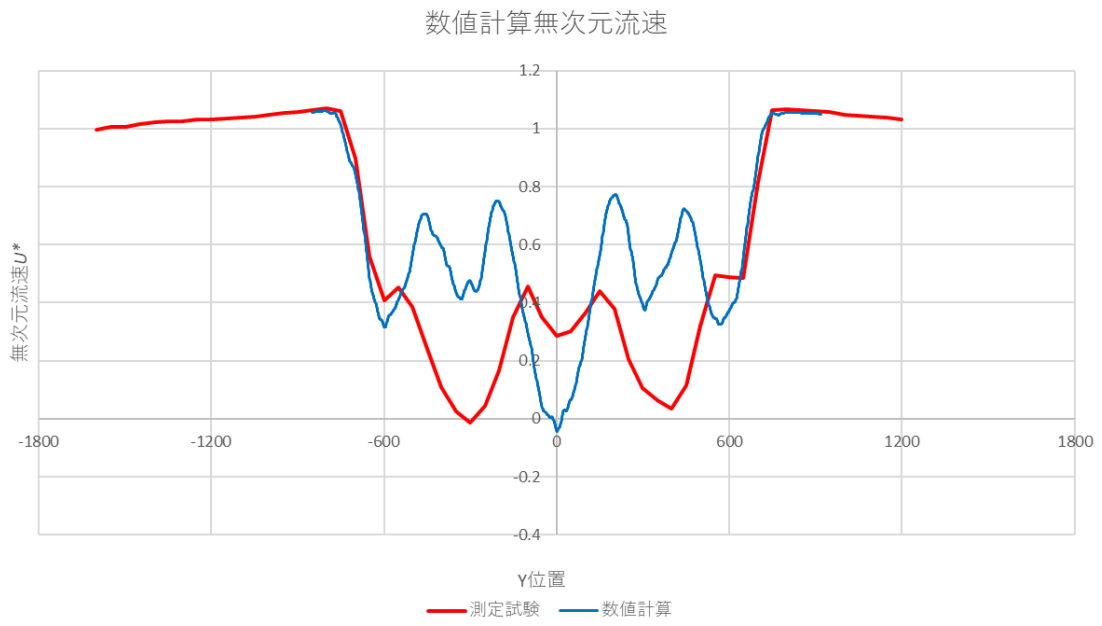


図5.27 $1.0D_{brim}$ 流速比較

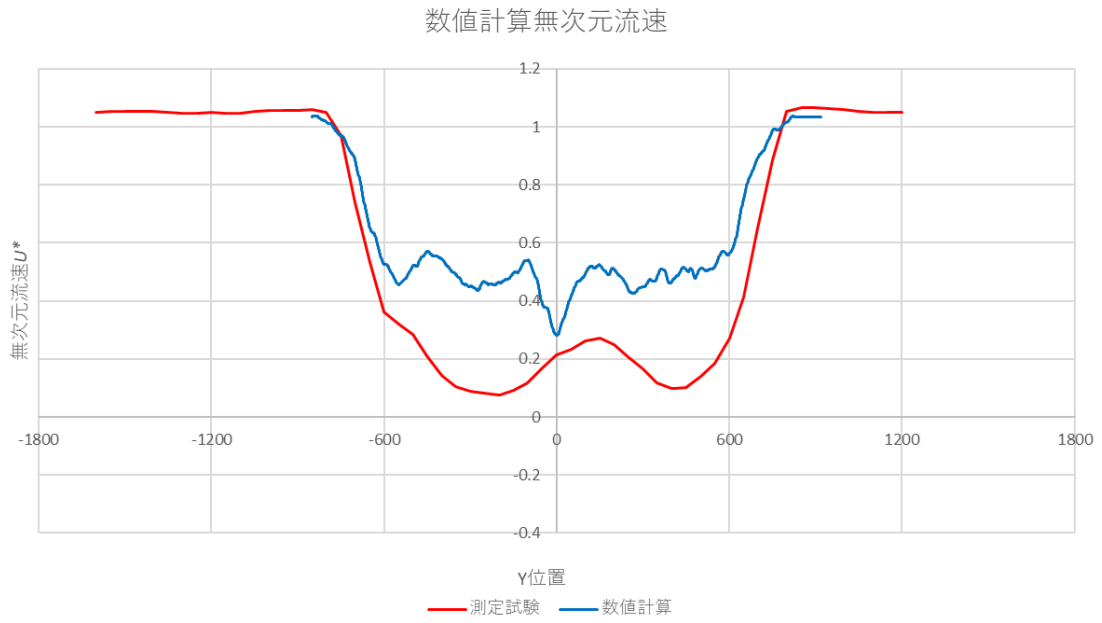


図5.28 $2.0D_{brim}$ 流速比較

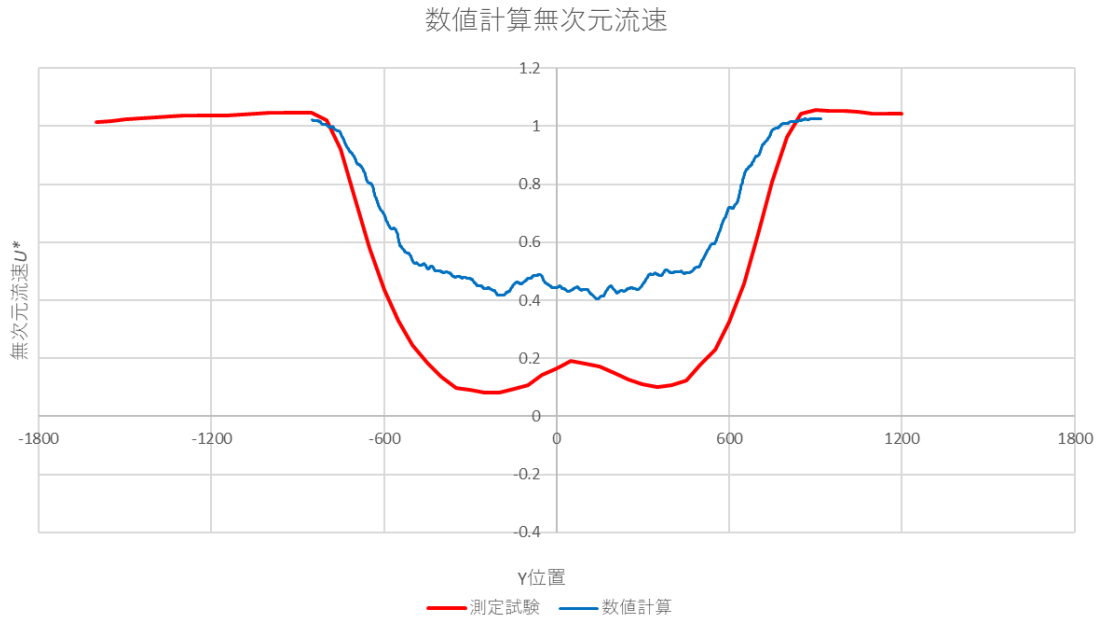


図5.29 $3.0D_{brim}$ 流速比較

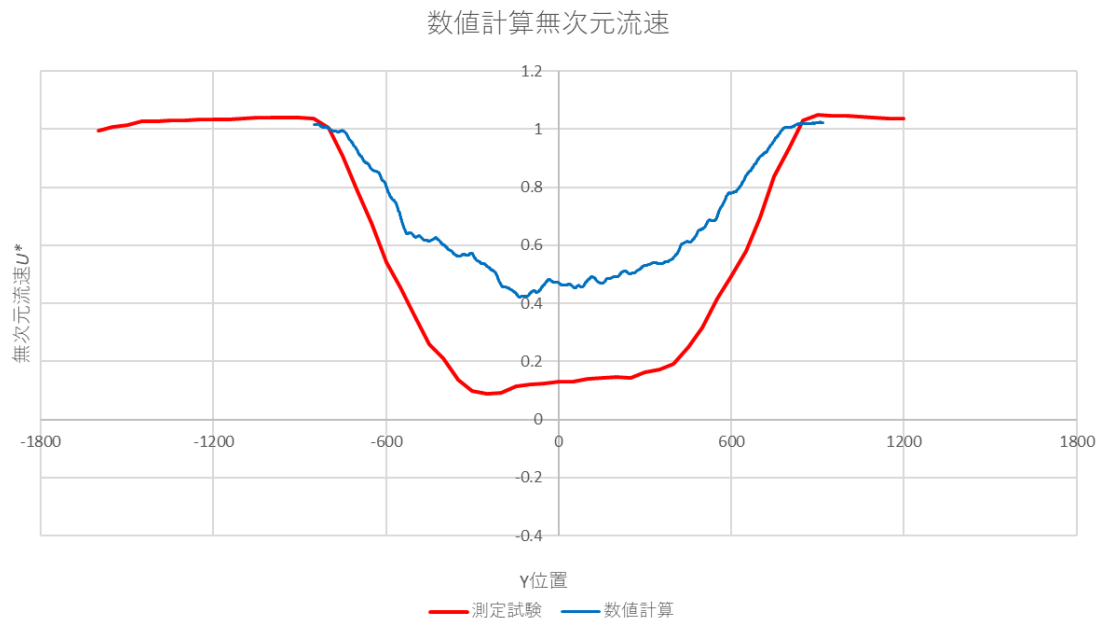


図5.30 4.0 D_{brim} 流速比較

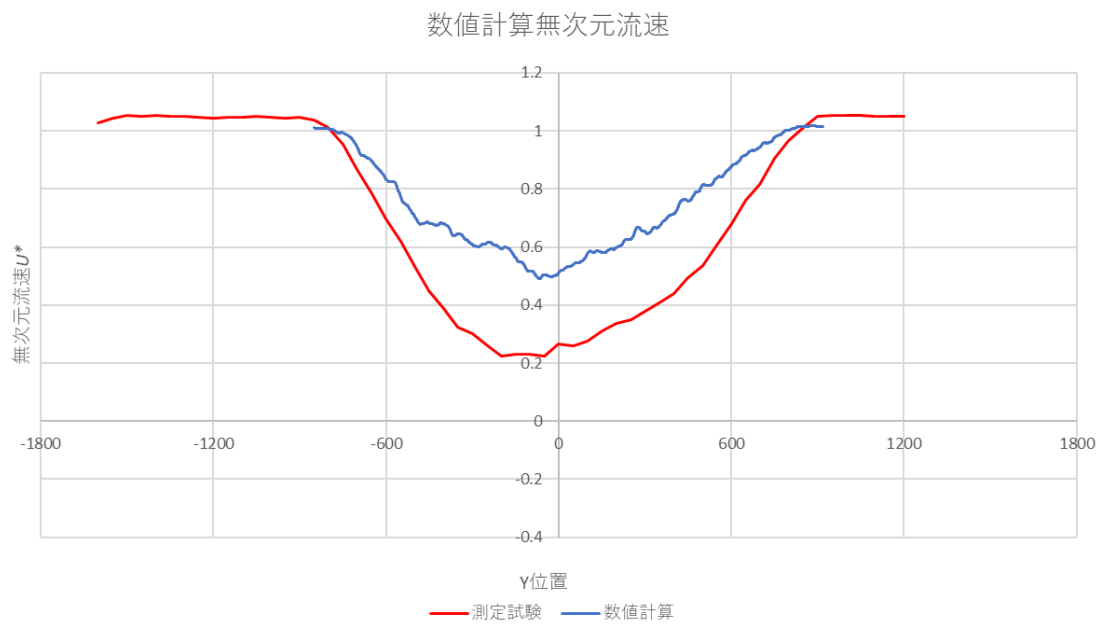


図5.31 5.0 D_{brim} 流速比較

図 5.17 より風洞実験と同様に風車後方での減速域の一体化が見られた。また図 5.19～図 5.24 より風車間で減速域の一体化が見られ、減速域が鉛直方向に分散し回復していく様子が見られ、斜めに広がっているのはブレードの回転によるものだと考えられる。

一方図 5.26～図 5.31 では後方流速の値に大きな乖離が見られ、数値計算の方が減速域の回復が早いことが分かる。

5.4 瞬間値分布

数値計算で得られた無次元圧力の XY 分布の瞬間場を図 5.32 に示す．数値計算で得られた無次元流速の XY 分布の瞬間場を図 5.33 に示す．

数値計算で得られた無次元圧力の XZ 分布の瞬間場を図 5.34 に示す．数値計算で得られた無次元流速の XZ 分布の瞬間場を図 5.35 に示す．

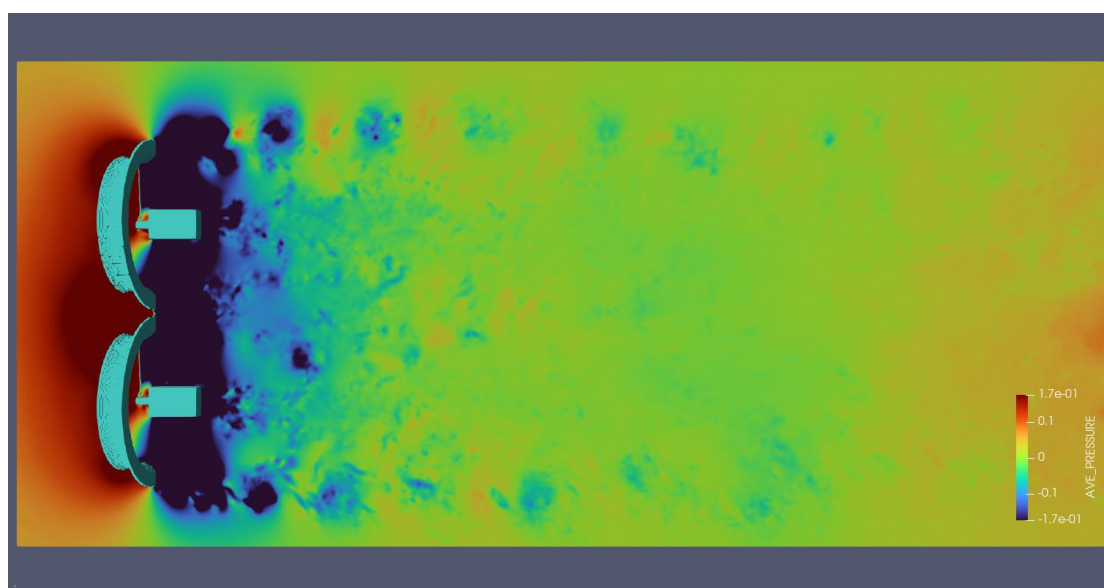


図5.32 無次元圧力 XY 分布

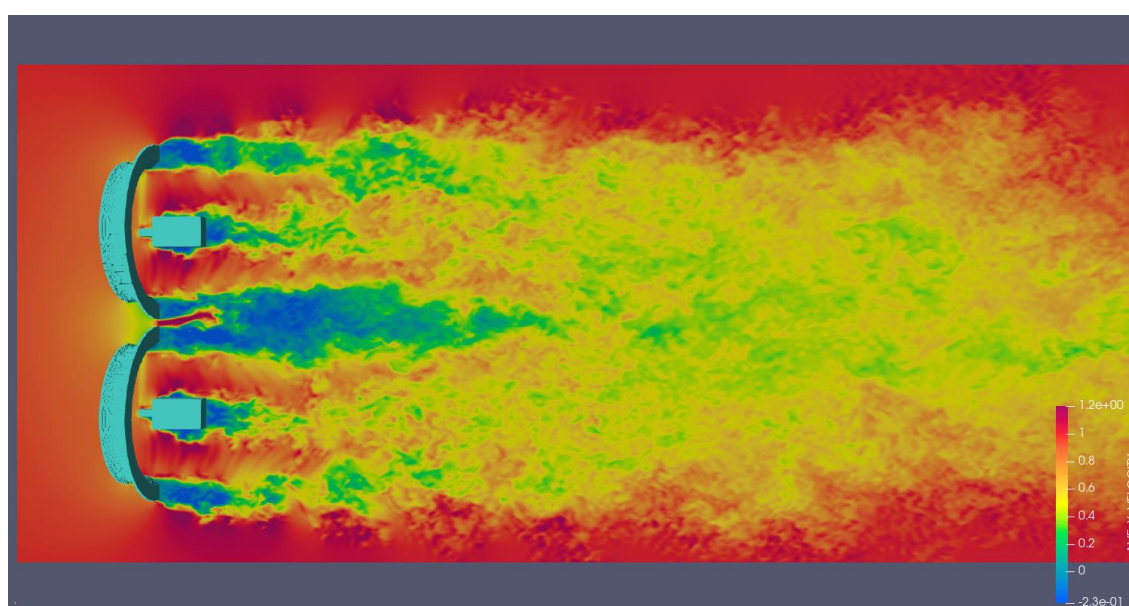


図5.33 無次元流速 XY 分布

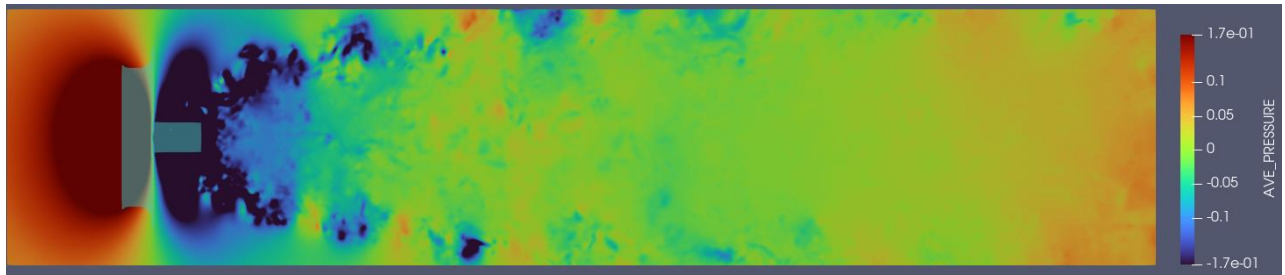


図5.34

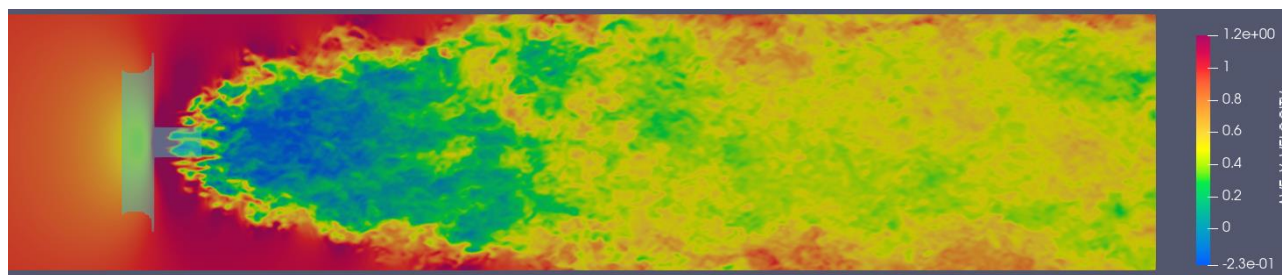


図5.35

圧力場では集風体つば部分で渦が生成されることによる高压部，低压部が繰り返し生成される様子が見られた．また速度場では風車間での減速域が一体化し混合していく様子が見られた．隙間流れに着目すると風車直後までの短い間で増速域が見られその後渦状に減速域として崩壊している様子が見られる．

5.5 流速平均場 XY 分布考察

後流の流れ場を考察するため平均流速の複数面での XY 分布を可視化した．可視化面を表したものを図 5.36 に，可視化した XY 平面を上から順に 3 段目までを図 5.37～図 5.39 に示す．4 段目(風車流心高さ)は図 5.17 に示している．風車中心高さにおける流速時間平均場の流線を図に示す．

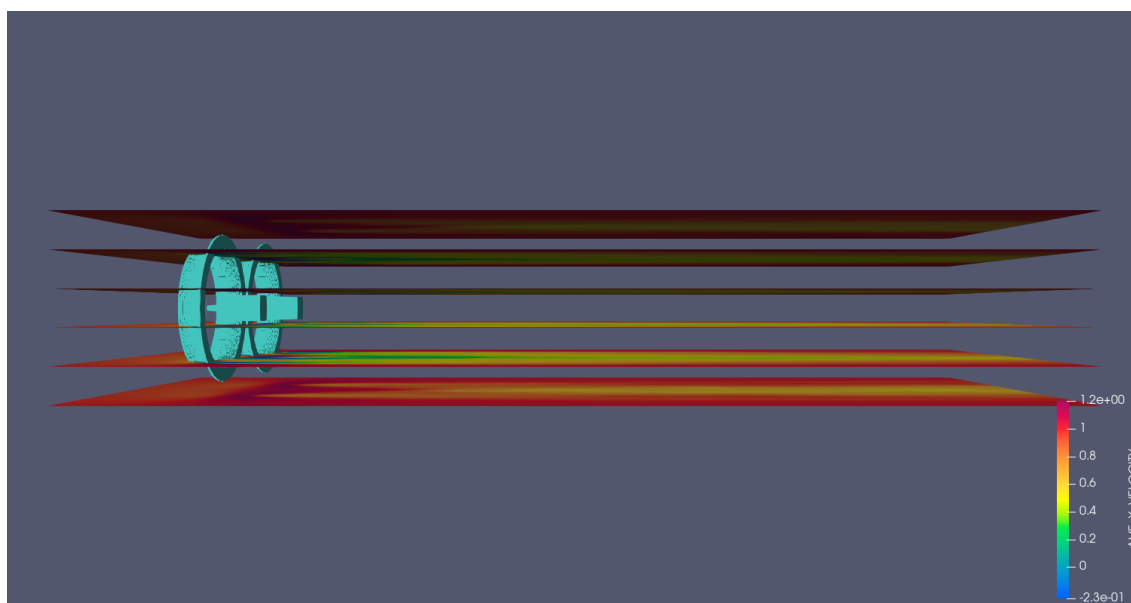


图5.36 XY 分布可视化面

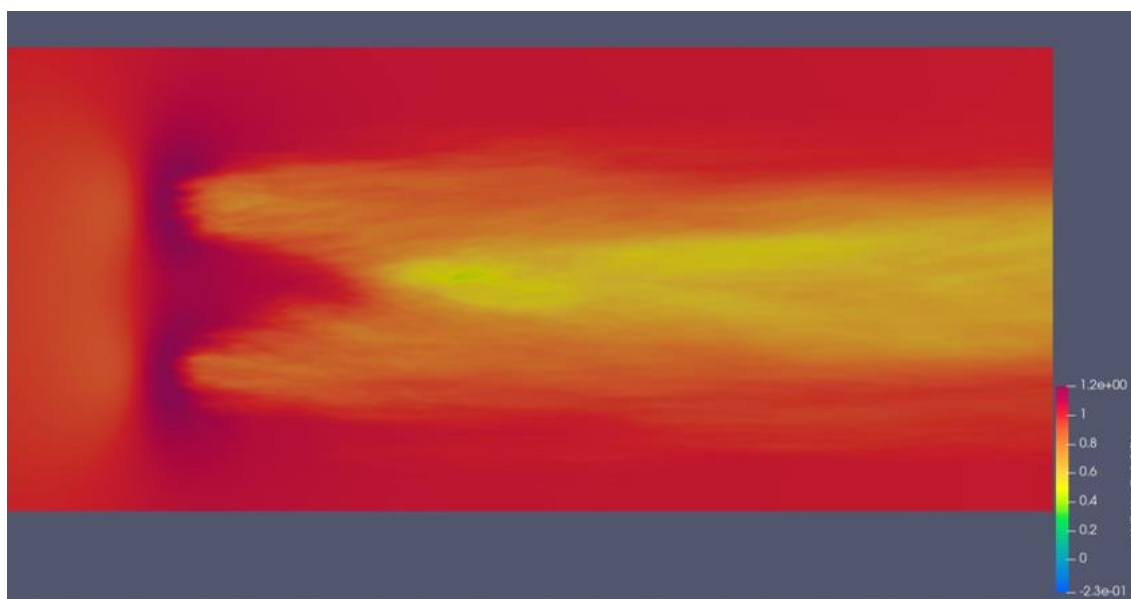


图5.37 XY 分布最上面

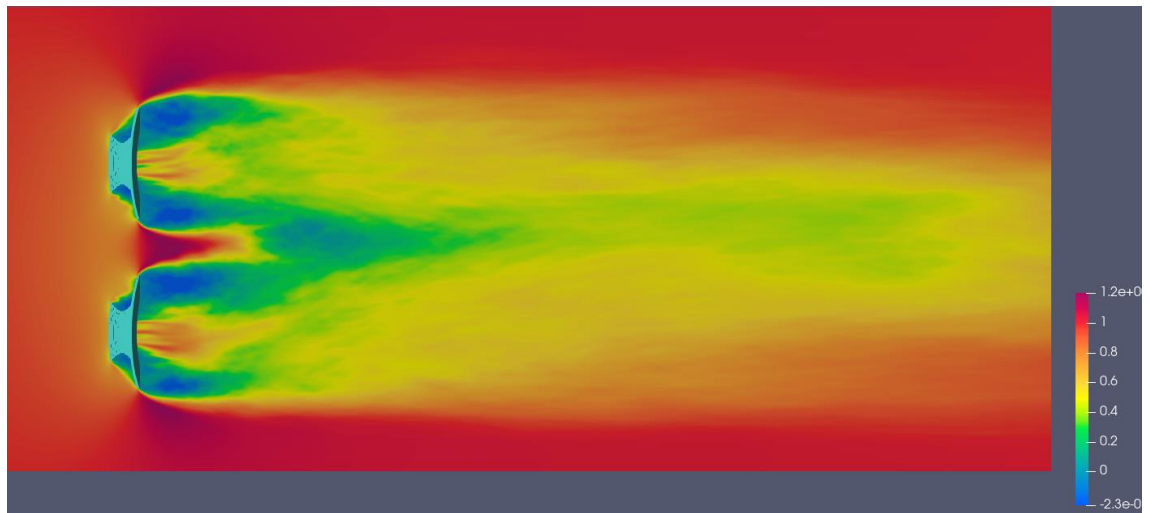


図5.38 XY 分布 2 段目

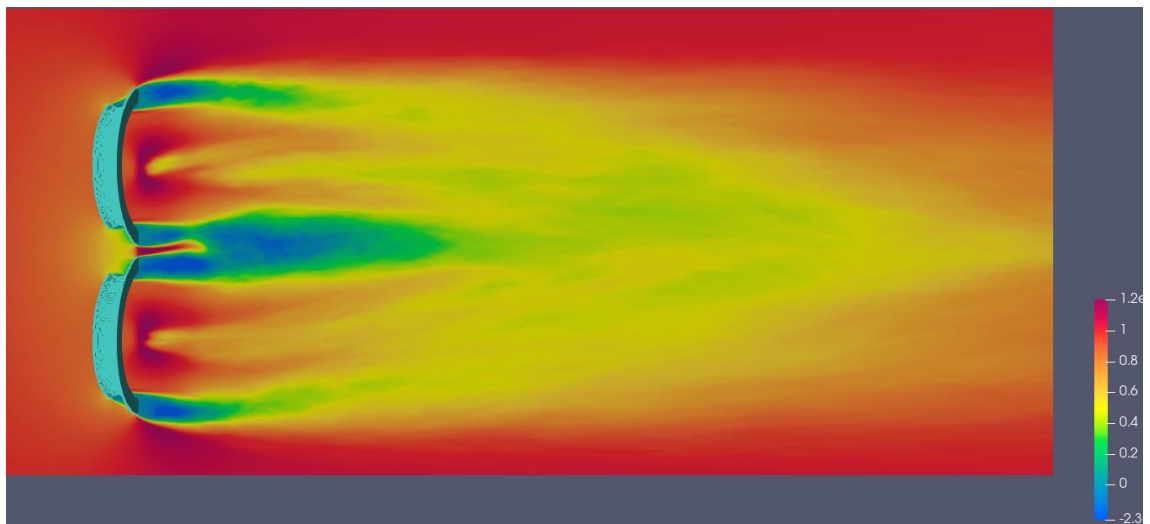


図5.39 XY 分布 3 段目

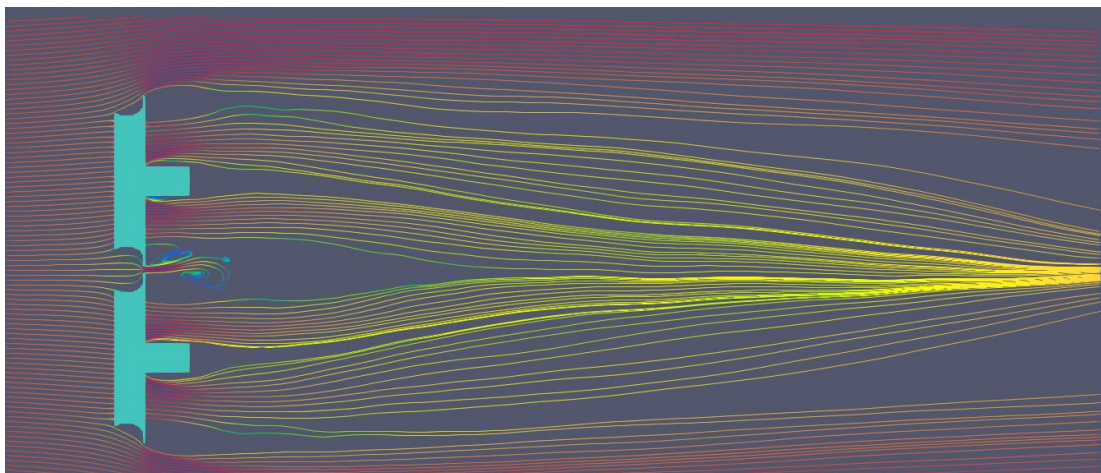


図5.40 風車中央高さにおける主流方向流速の時間平均場の流線

図 5.17, 図 5.37~図 5.39 より各図において, 風車間での隙間流れが増速していることが確認できる. また, 風車上方へ行くにつれ減速域が合流し低下する範囲が後方へと移動している様子が見られる. これは YZ 平面分布の図 5.19~図 5.24 で見られた風車間の減速域が後方に行くにつれ鉛直方向に広がっていることが見られたものだと考えられる. また, 図 5.40 より風車間における増速域がナセル程度後方に行くと渦を生成している様子が見られる. このことから, 風車間隔を狭めた際, 風車間での隙間流れの増速により強い渦が生成され風車後方の圧力が下がったと考えられる.

第6章 結論

本研究では、レンズ風車のマルチ化によって出力が向上する要因を考察するため、2基にマルチ化したレンズ風車の特性に関して、風洞実験及び、数値計算を用いて研究を行った。マルチ化することによる出力向上が、ブローケージの影響では無く風車同士の干渉によるものか検証し、風車間隔を変化させることで生じる発電出力や風車後流への影響を研究するとともに、風車後流の流れ場の解明を行うことを本実験の目的として風洞実験及び数値計算を行った。

風洞実験結果

風洞実験では2基風車において風車間隔を変化させ、出力係数を計測、単基風車からの増加率を算出した。また2基風車の干渉を検討するため風車後流の圧力及び流速を測定した。

(a) 出力計測試験

- ・風車間隔を広げた状態から狭めていくほど風車出力が増大していく。
- ・風車出力の増加率において風車間隔を広げた状態では増加率がほとんど見られないのに対し、風車間隔を狭めた際には最大6.4%の増大が見られた

(b) 風車後流測定試験

- ・風車後流にいくほど後方流速は回復し、圧力の低下部分は回復していく様子が見られた。
- ・風車間隔を狭めていくほど風車直後の圧力の低下範囲が広がり低下量が増大している様子が見られた
- ・風車間隔を狭めた際、風車間流速の増速が見られ、後方に行くにつれそれぞれの風車後流が合体していく様子が見られた。

以上(a)～(b)をまとめ風洞実験では以下のような知見を得た。

- ・風車間隔を広げた際に出力が単基風車と等しいことからブローケージの影響が小さいと考えられる。
- ・風車間隔を狭めることによって出力が増加する要因は風車同士の流れの干渉によるものと推定される。
- ・風車間隔を狭めていくほど、風車直後の圧力低下が大きくなることが確認され、風車出力の増大の要因となったと考えられる。
- ・風車間隔を狭めた際風車後方の流速が一体化していく様子が見られ、風車間隔が非常に狭い際、風車後流が干渉することが確認できた。

数値計算結果

数値計算では風車間隔を狭めた際特有の流れ場について考察するため，2 基レンズ風車の風車間隔を狭めた $s/D_{brim}=0.05$ における数値計算を行い可視化，分析を行った．

(a) 風洞実験との比較

- ・ 風洞実験の後流測定試験で見られた風車後方の後流の一体化する様子が再現された．
- ・ 風洞実験の測定結果と計算値では完全には一致せず，数値計算の方が無次元圧力，無次元流速ともに後方での回復が早いことが見られる．
- ・

(b) 流れ場の構造

- ・ 圧力場では集風体つば部分で渦状の高圧部，低圧部が繰り返し生成される様子が見られた．
- ・ 速度場では風車間での減速域の渦が一体化し混合していく様子が見られた．
- ・ 風車間での隙間流れにおいていったん増速域が生成されその後渦となり減速域へと混合される様子が見られた．

以上(a)～(c)をまとめ数値計算では以下のような知見を得た．

- ・ 風洞実験同様に，風車後方における圧力の低下，減速域の一体化が見られ，流れ場の再現に成功した．
- ・ 数値計算と実験値では値に大きな違いが見られ，数値計算は圧力と流速の回復が早いことが分かった．
- ・ 瞬間場の可視化結果より，風車後方では渦状の流れがみられ，混合していく様子が見られた．
- ・ 風洞実験では把握できなかった鉛直方向での減速域の拡散が見られた．
- ・ 風車後方の減速域が混合し，風洞実験同様に風車後方の減速域が一体化する様子が見られた．また，風車隙間流れの増速により強い渦が生成され，後方圧力の低下，ひいては風車に流入する流れの増速に繋がり，風車出力が増加したと考えられる．

まとめ

出力試験を通して、風車間隔が狭くなると出力の増加が見られた。風車間隔が広い場合では単基風車と比較して出力の増加が見られなかったことから、ブロッキングの影響は小さいと考えられ、マルチロータ化による流れの干渉効果が出力増加の原因と考えられる。また後流測定試験を通して、風車間隔を狭めていくと、風車後方圧力が単基の場合と比較して低下していく様子が見られ、近接させた際には圧力低下範囲が一体化し、風車直後の圧力がより大きく低下している様子が見られた。また、後方流速測定では後方に行くにつれ後流が一体化し干渉している様子が見られた。数値計算では、流れ場の可視化に成功し、風車後流構造では風車後方の減速域が混合し、風洞実験同様に風車後方の減速域が一体化する様子が見られ、風車間の隙間流れにおいては増速域が形成されその後渦状の減速域が生成される様子が見られた。

これらの結果より、2 基レンズ風車における風車同士の近接による出力性能の向上について、風車隙間流れの増速により強い渦が生成され、後方圧力の低下、ひいては風車に流入する流れの増速に繋がり、風車出力が増加したと考えられる。

本研究では、数値計算は計算時間の都合上 1 条件でのみとなった。しかし風洞実験では得ることのできない流れ場を可視化することができ、風車後流の挙動の知見を得ることができた。今後基数を増やした場合やレンズの有無などによる異なる条件での数値計算により、風車後流のより詳しい流れ場の違いを考察することは、マルチレンズ風車の出力向上の要因の解明や、より高性能なマルチレンズの開発に繋がる事が期待される。

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁.
“第2部 第2章 国際エネルギー動向”
エネルギー白書 2022, pp.113-148. 2022
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁.
“第2部 第1章 国内エネルギー動向”
エネルギー白書 2022, pp.72-112. 2022
- [3] 環境エネルギー政策研究所.
自然エネルギー白書 2018/2019 サマリー版, pp1-28, 2019
- [4] 経済産業省資源エネルギー庁.
日本のエネルギー「エネルギーの今を知る 20 の質問」,
pp1-19,2021
- [5] NEDO.
“第1章 再生可能エネルギーの役割(総編)”
再生可能エネルギー技術白書第2版, pp1-45.2014
- [6] CLEAN FUTURE
<http://www.cleanfuture.co.in/2017/09/22/evolution-of-wind-turbine-heights-and-output/>
201811/20 引用
- [7] G.Siero, P.Chaviaropoulos, J.D.Sorensen, B.H.Bulder and P.Jamieson. "Upscaling wind turbines: theoretical and practical aspects and their impact on the cost of energy"
Wind energy15.1, January 2012
- [8] 牛山泉,
風車工学入門~基礎理論から運用のノウハウまで~,
森北出版, 2013

- [9] P.Jamieson.
"15 Multi Rotor Systems"
INNOVATION IN WIND TURBINE DESIGNS, pp229-238. A John Wiley & Sons,Ltd.,Pub.2011.
- [10] Sandip A Kale, S.N.Sapali
"INNOVATIVE MULTI ROTOR WIND TURBINE DESIGNS."
International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)3.2,730-739.2012
- [11] WINDPOWER, "First power from Vestas four-rotor concept"
<http://www.windpowermonthly.com/article/1401013/first-power-vestas-four-rotor-concept>
201801/07 引用
- [12] P.Jamieson and M.Branney.
"Multi-Rotors ; A Solution to 20MW and Beyond?"
DeepWind Norway, 2012
- [13] P.Verma.
"Multi rotor Wind Turbine Design And Cost Scaling."
University of Massachusetts-Amherst. 2013
- [14] P.Jamieson and M.Branney.
"Structural Considerations of a 20 MW Multi-Rotor Wind Energy System." Journal of Physics :
Conference Series. Vol.555. No.1. IOPPub, 2014
- [15] P.T.Smolders, S.Orbons and C.Moes.
"AERODYNAMIC INTERACTION BETWEEN TWO WIND ROTORS SET NEXT TO EACH
OTHER IN ONE PLANE"
EUROPIAN WIND ENERGY CONFERENCE, 22-26. 1984
- [16] D.Ransom,J.J.More and M.Heronemus-Pate.
"Performance of Wind Turbines in a Closely Spaced Array."
<http://www.renewableenergyworld.com/articles/print/rewna/volume-2/issue-3/wind-power/performa>

nce-of-wind-turbines-in-a-closely-spaced-array.html

201801/07 引用

- [17] P.Chasapogiannis, J.M.Prospathopoulos, S.G.Voutsinas and T.K.Chaviaropoulos
 "Analysis of the aerodynamic performance of the multi-rotor concept."
 Journal of Physics: Conference Series. Vol524. No.1. IOPPub, 2014

- [18] Y.Ohya, and T.Karasudani,
 "A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind Lens Technology" Energies 2010,
 3, pp634-649

- [19] 高田一成
 “大規模風車への風レンズ体の適用”
 九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻修士論文. 2007

- [20] 上野祥彦
 “中型クラスの新型風レンズ風車周りの流れ場に関する研究”
 九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻修士論文, 2010

- [21] 李雪
 “レンズ風車の大型化に関する研究”
 九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻修士論文, 2013

- [22] Ohya, J.Miyazaki, U. Göltzenbott, K. Watanabe
 “Power augmentation of shrouded wind turbines in a multi-rotor system”, ASME, Journal of Energy
 Resources Technology, 139 (5), 2017

- [23] U. Göltzenbott, Y.Ohya, S.Yoshida, P.Jamieson
 "Aerodynamic interaction of diffuser augmented wind turbines in multi-rotor systems"
 Renewable Energy 112, pp25-34, 2017

- [24] 中野貴暁
 “洋上ウィンドファームの実現に向けたレンズ風車の相互干渉に関する研究” 九州大学大学
 院工学府航空宇宙工学専攻修士論文, 2013

[25] 宗像秋生

“つば付きディフューザ風車を利用したマルチロータシステムに関する研究” 九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻修士論文，2016

[26] 森山喬史

“複数のつば付きディフューザ風車を用いたマルチロータシステムに関する研究”
九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻修士論文，2017

[27] David Carrillo-Cañizalez

“Power Output Enhancement of Diffuser-Augmented Wind Turbines Using a Multi-Rotor System
複数のつば付きディフューザー風車を用いたマルチローターシステムの出力性能向上に関する研究”
九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム工学専攻修士論文，2021

謝辞

本論文を執筆するにあたり、九州大学応用力学研究所新エネルギー力学部門風工学研究室の皆様には多大なるご支援を賜りました。心より感謝申し上げます。

渡邊康一准教授には、風洞実験における機器や設備の準備から、実験条件や考察等多岐にわたるアドバイスなど修士論文を書き上げる上で、様々な手助けをしていただき大変お世話になりました。また学会活動での発表やゼミでの輪講及び、数値解析で、学術的な知見や文書作成、発表等のアドバイスを通して様々な学びを得ることができ、自身の成長に繋がったのはひとえに先生のおかげです。ありがとうございました。内田孝紀准教授には、ゼミや講義を通して現在の風力発電の先端研究に関する幅広い知見をご教授していただき、たくさんの学びを得ることができました。また、就職活動や学校生活に対して、自身の経験を交えて様々なアドバイスをいただきありがとうございました。昨年退官された大屋裕二特任教授には、レンズ風車の開発や実装における見解や、レンズ風車まわりの流体挙動に関する知見など、様々な角度から自身の経験をもとにご教授していただき、研究での課題を解決する際に勉強になりました。大変ありがとうございました。

渡邊公彦技官、松島啓二技官、高田青技官には、風洞実験を行う際に用いる計測機器の取り扱いの説明や実験装置の設置等、多大なる支援をしていただきました。渡邊公彦技官には気さくに話しかけてくださったり、趣味のバイクの部品を頂いたりしました。松島啓二技官には、風洞実験をするうえでPCのセッティングやデータ整理等のアドバイス、実験設備の準備や設置をしていただきました。高田青技官は、実験部品の製作や3Dプリンターなどの導入などをしていただきました。大変ありがとうございました。

テクニカルスタッフの久保田萌美様には、修士論文での数値計算においてプログラムの修正や計算等でお世話になりました。テクニカルスタッフの小野裕子様、技術補佐員の篠原由香様には、事務手続きのサポートなど様々な面でお世話になりました。大変ありがとうございました。

本年度から博士課程に所属されている澁谷光一郎さんには、実験結果に関する考察や数値計算におけるプログラムに関する指導など様々な知見を得ることができました。昨年度九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻を修了された吉岡達也さんには、研究活動や大学院生活についても多くのことを教えて頂きました。ありがとうございました。

同期の柳川泰我君、三輪哲聖君、鞭馬宏太君には、実験の補助や、研究に関する議論等様々な学びを得ることができました。また、学業以外でも様々なことに付き合ってください大変楽しく学生生活を過ごすことができました。修士1年の北村虎太郎君、林昇吾君は、研究に関する素直な疑問や質問など、研究活動での新たな見解を得ることができ刺激となりました。皆様のこれからの活躍を願っています。

Appendix-A 風洞実験データ

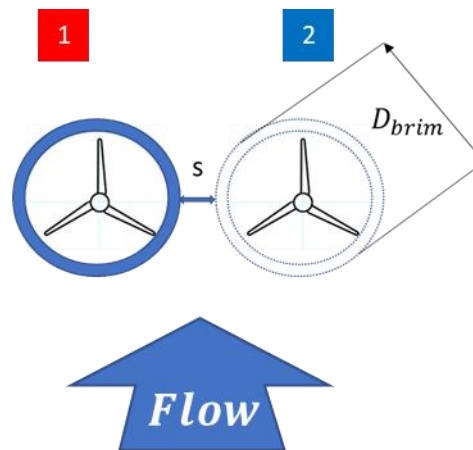
A-1 風車出力の予備試験

風車出力性能試験をするにあたって、風洞解放状態における風車の配置位置が出力に影響を及ぼすか検証するため、単基風車を水平方向へ $s/D_{brim}=0.0\sim4.0$ 相当に移動させ出力係数を計測した。また基数を増やすことでブロッキング効果により風車出力に影響を及ぼすか検証するため、風車同士の干渉が小さいと考えられる $s/D_{brim}=4.0$ における 2 基レンズ風車の風車出力を測定し、単基風車と比較した。実験条件を表 A.1.1 に示す。単基風車の配置概略図を図 A.1.1 に、単基風車配置時の概観図を図 A.1.2 に示す。また 2 基風車を $s/D_{brim}=4.0$ に配置した際の概観図を図 A.1.3 に示す。

実際に測定された結果を図 A.1.4 に示す。

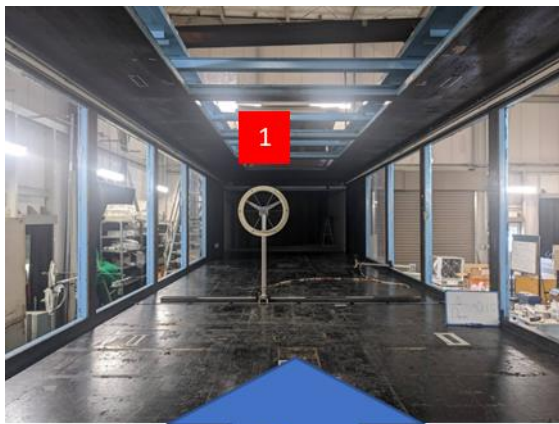
表 A.1.1 実験条件

風洞解放条件	計測部入口より第 3.4.5 スパン解放
風車配置	計測部入口より第 4 スパンに基風車を設置 ($s/D_{brim}=0.00\sim4.0$)
計測条件	サンプリング周波数 (200Hz), 計測時間(30s)
風速 U_∞	17(m/s)
周速比 λ	4.0

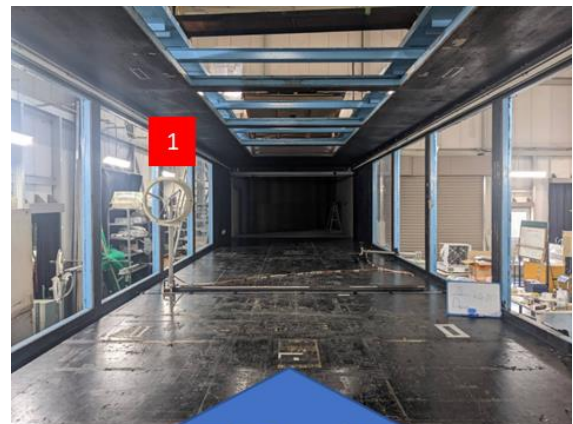


風洞中心を軸に対称配置した時に
 $s/D_{brim}=0.00\sim4.00$ 相当になるよう①風車を配置

図 A.1.1 単基レンズ風車出力性能試験概略図



単基① $s/D_{brim}=0.1$ 対応位置



単基① $s/D_{brim}=4.0$ 対応位置

図 A.1.2 単基レンズ風車出力性能試験概観図

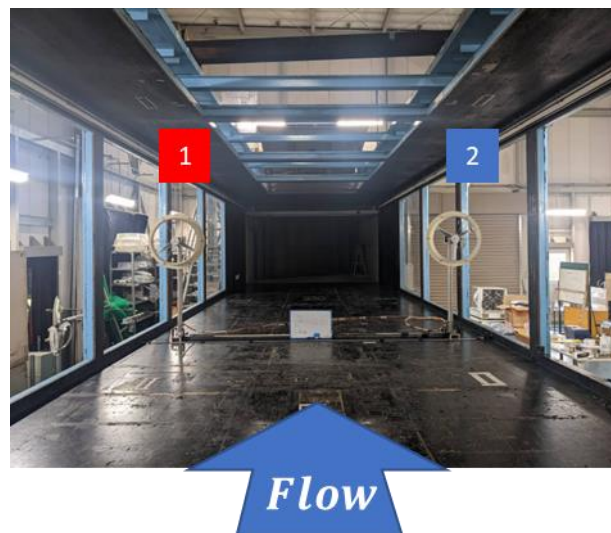


図 A.1.3 2基レンズ風車出力性能試験概観図($s/D_{brim}=4.0$)

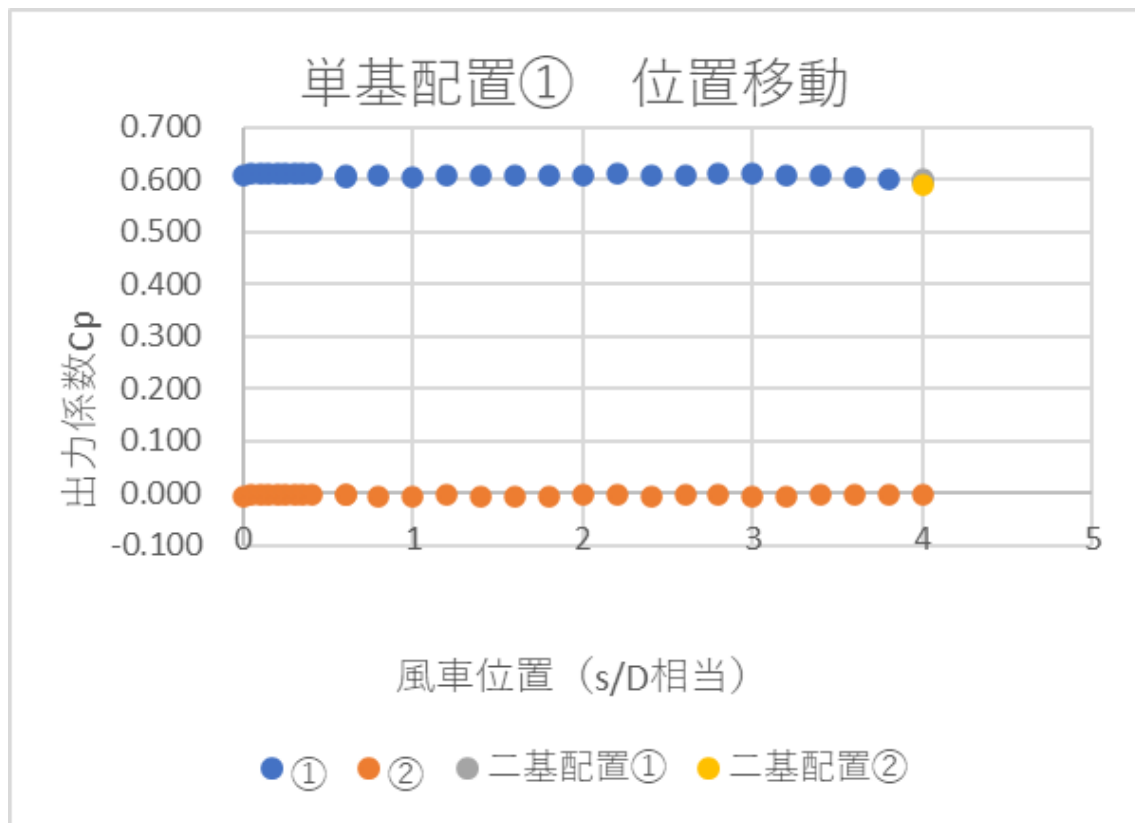


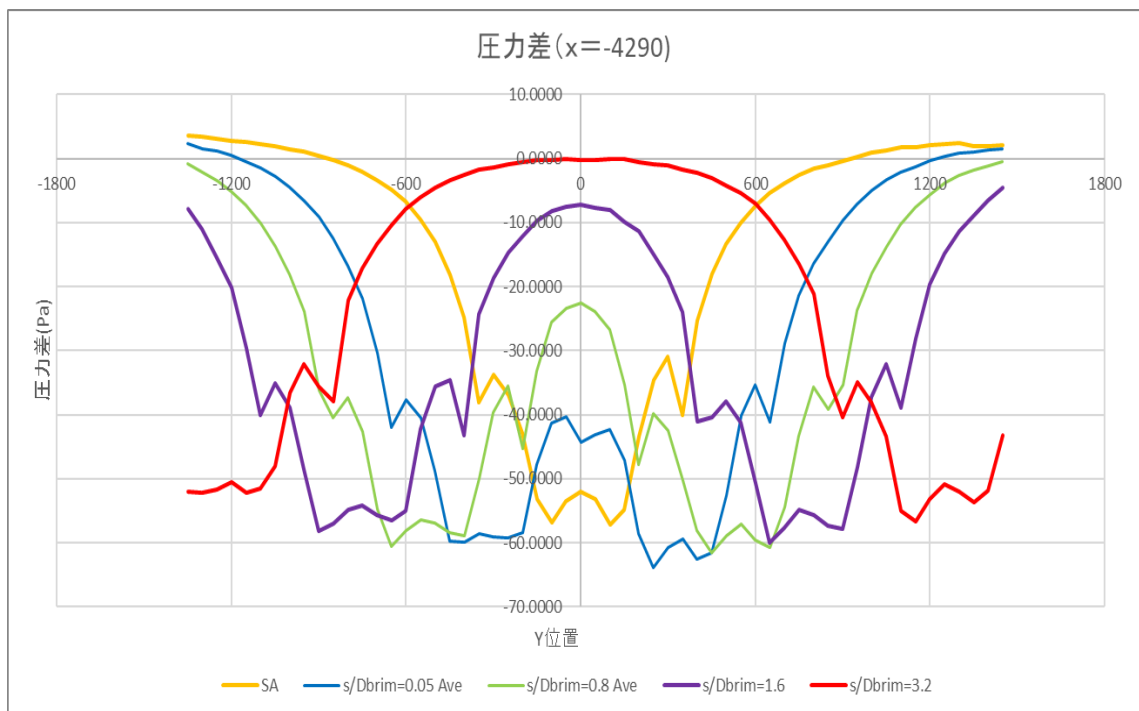
図 A.1.4 風車間隔変化風車出力性能

図 A.1.4 より風洞解放状態では、水平方向へ単基風車①位置の変更による C_p 変化は最大で 2 % で変化は見られない。また $s/D_{brim}=4.0$ に 2 基風車を配置した際単基風車と出力係数は一致しており基数を増やすことによるブロッキングの影響は無いといえる。

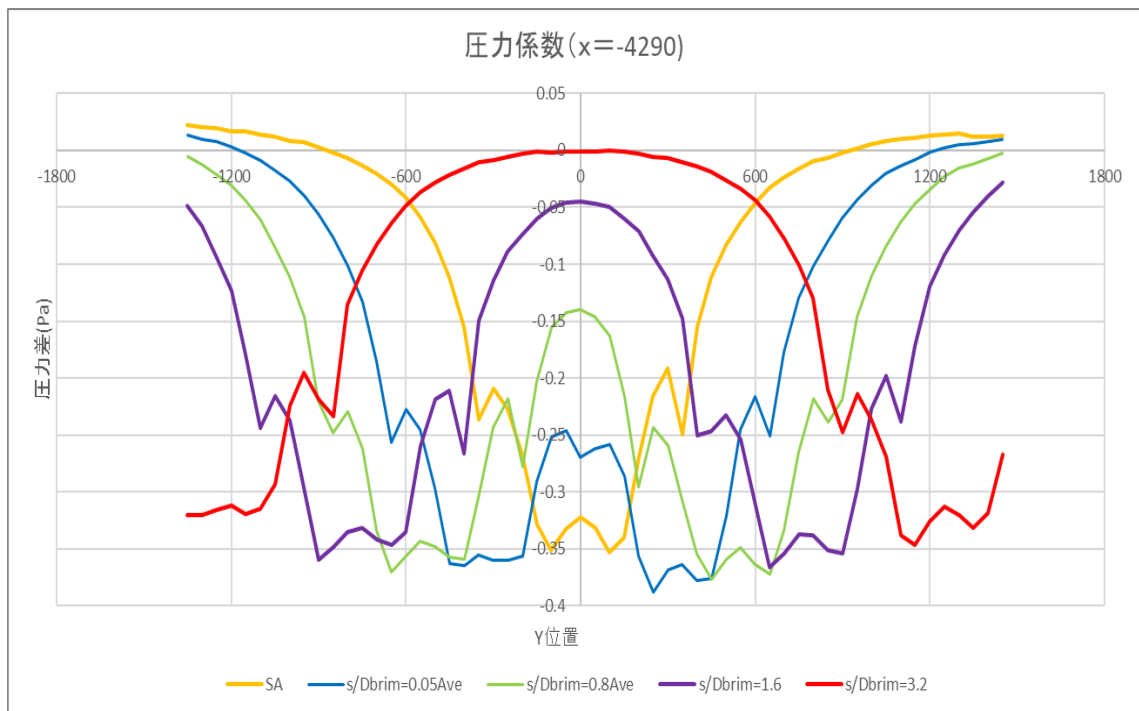
A-2 験風車後流の風車間隔による比較

レンズ有 X=-4290 風車間隔比較

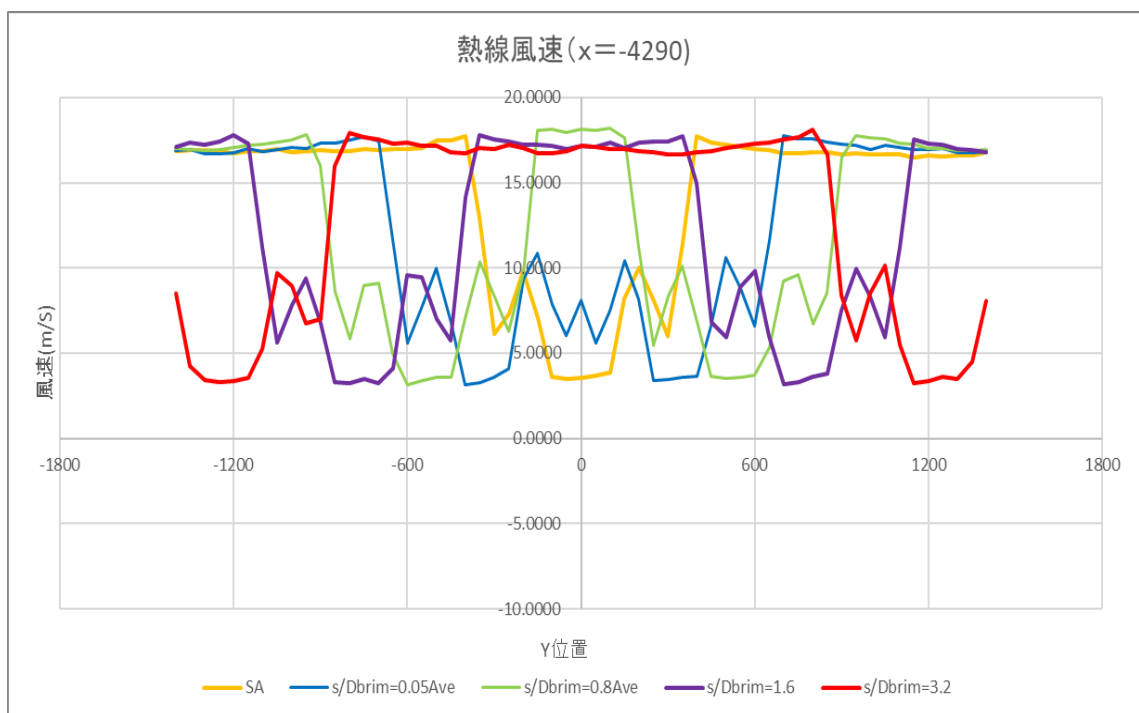
$s/D_{brim}=0.05$, 0.8 では2回測定したため、平均値を使用している．測定した圧力差プロファイルを図 4.121 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.122 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.123 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.124 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.125 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.126 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.127 に示す．



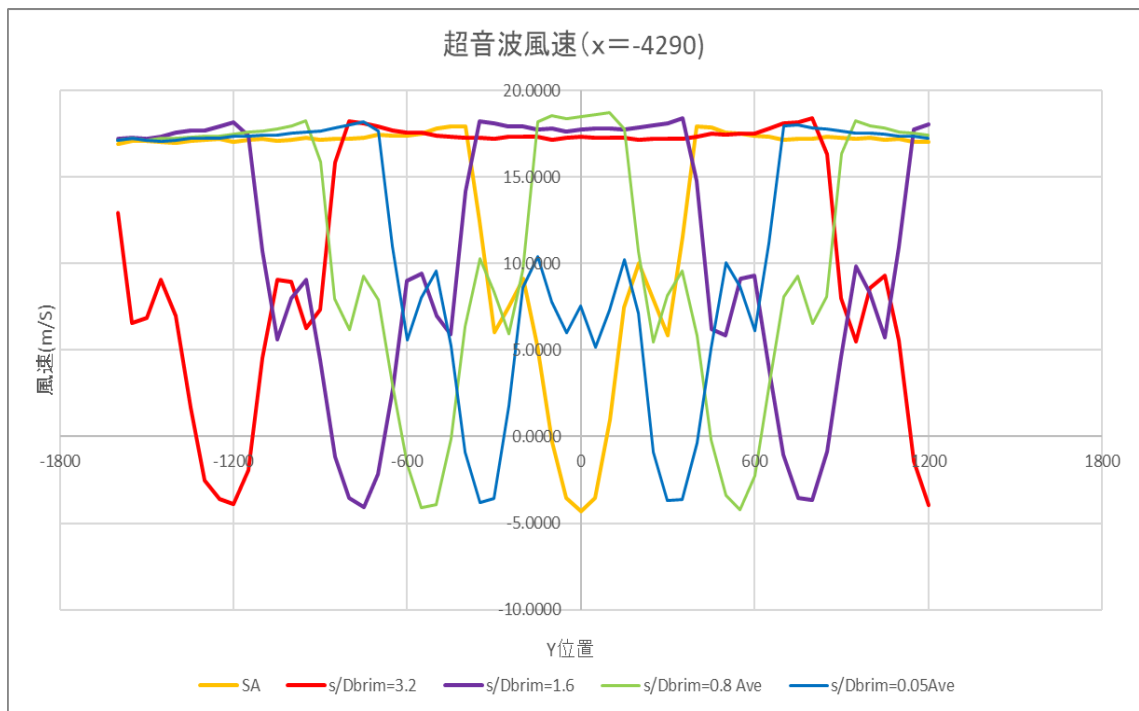
後方圧力差分布図



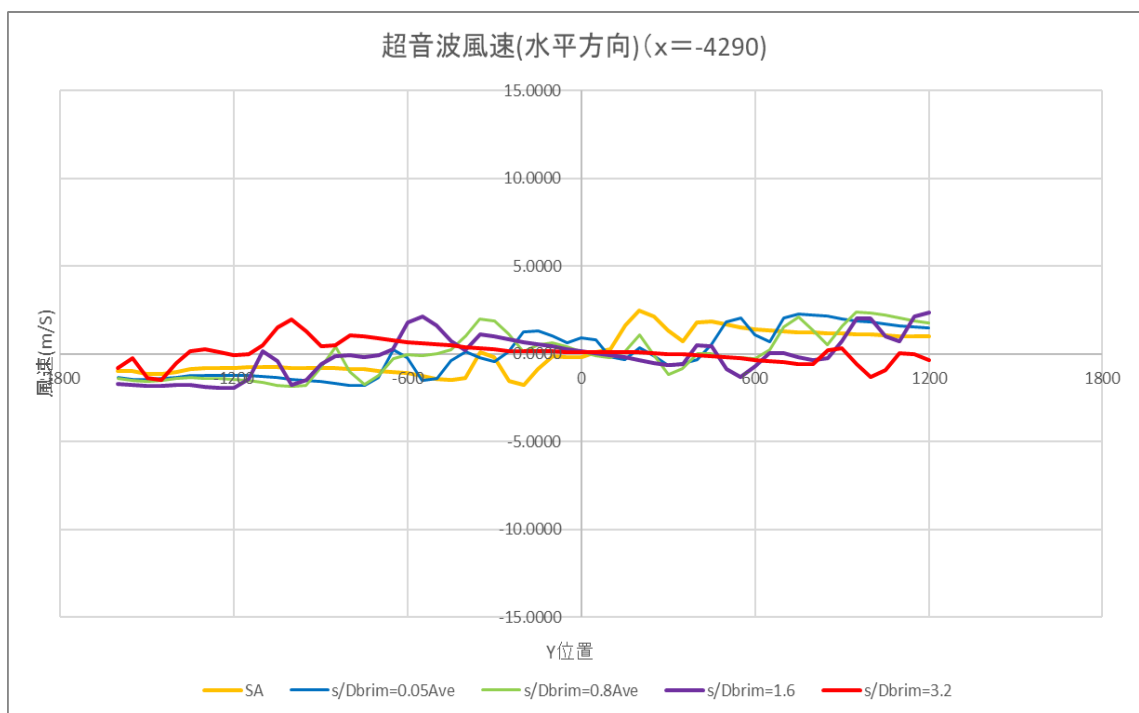
後方压力系数布图



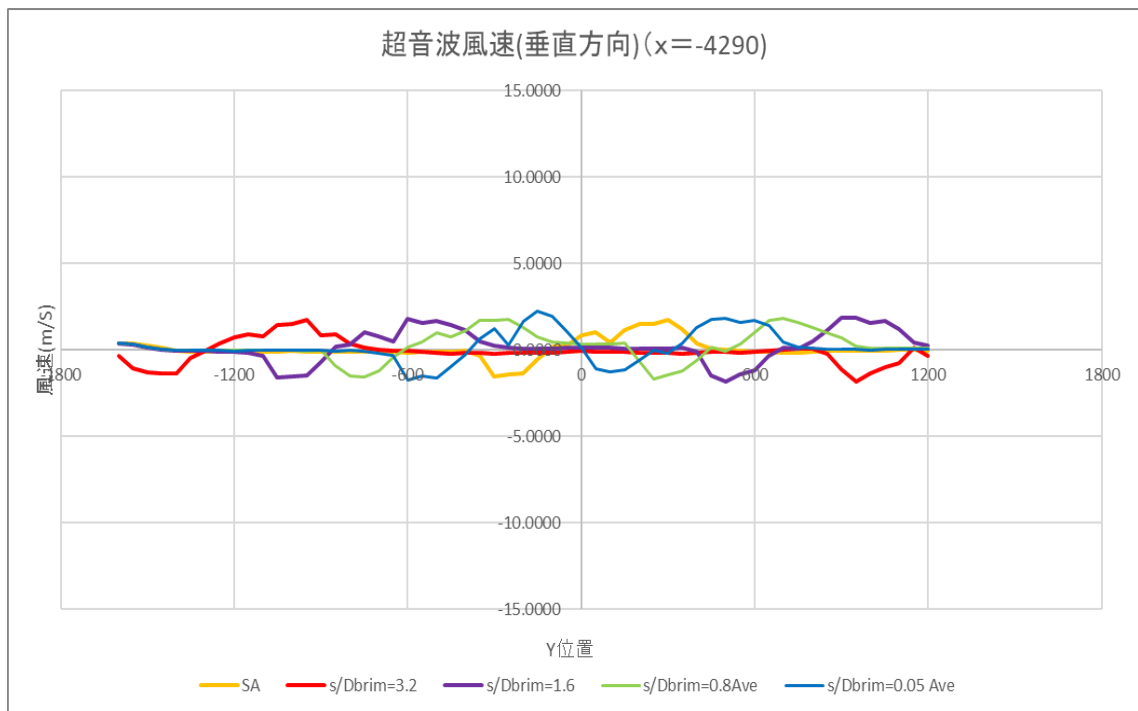
後方熱線流速布图



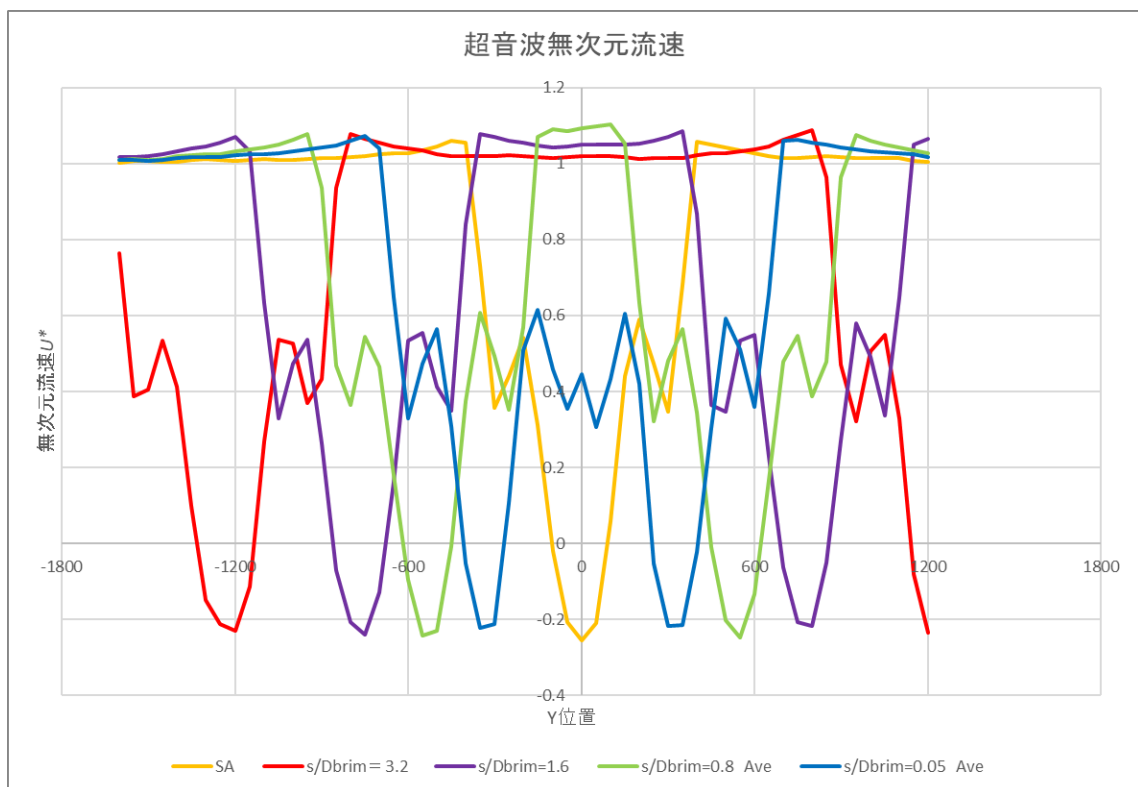
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



後方超音波鉛直方向流速分布図

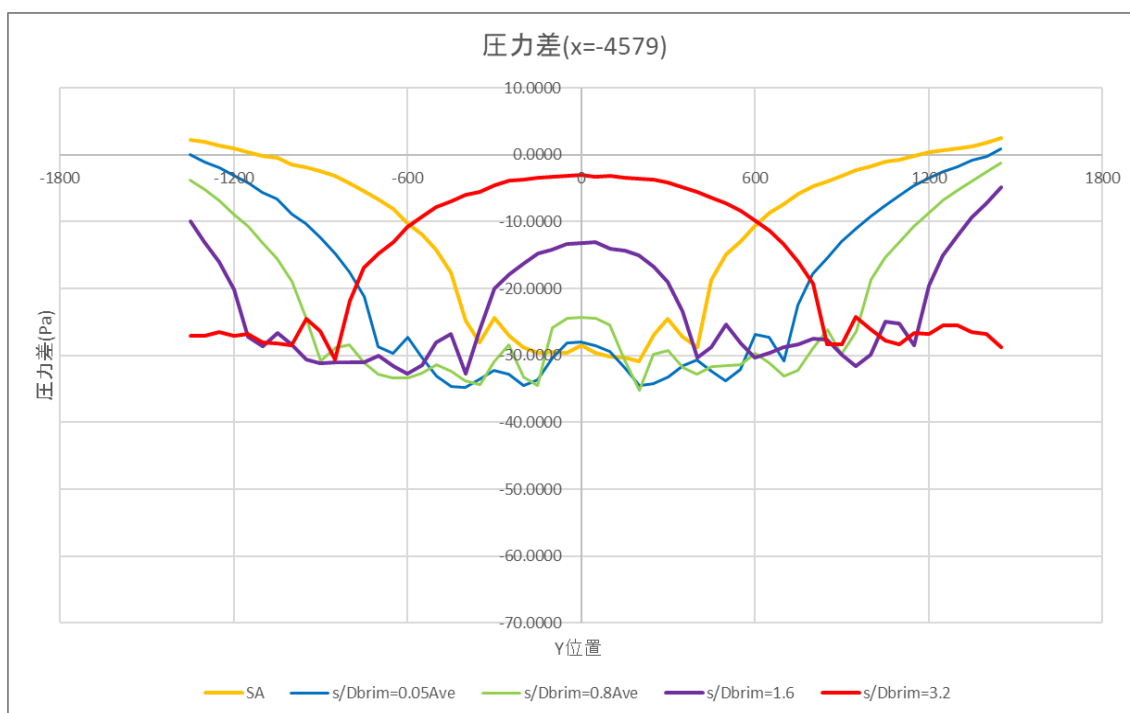


後方超音波主流方向無次元流速分布図

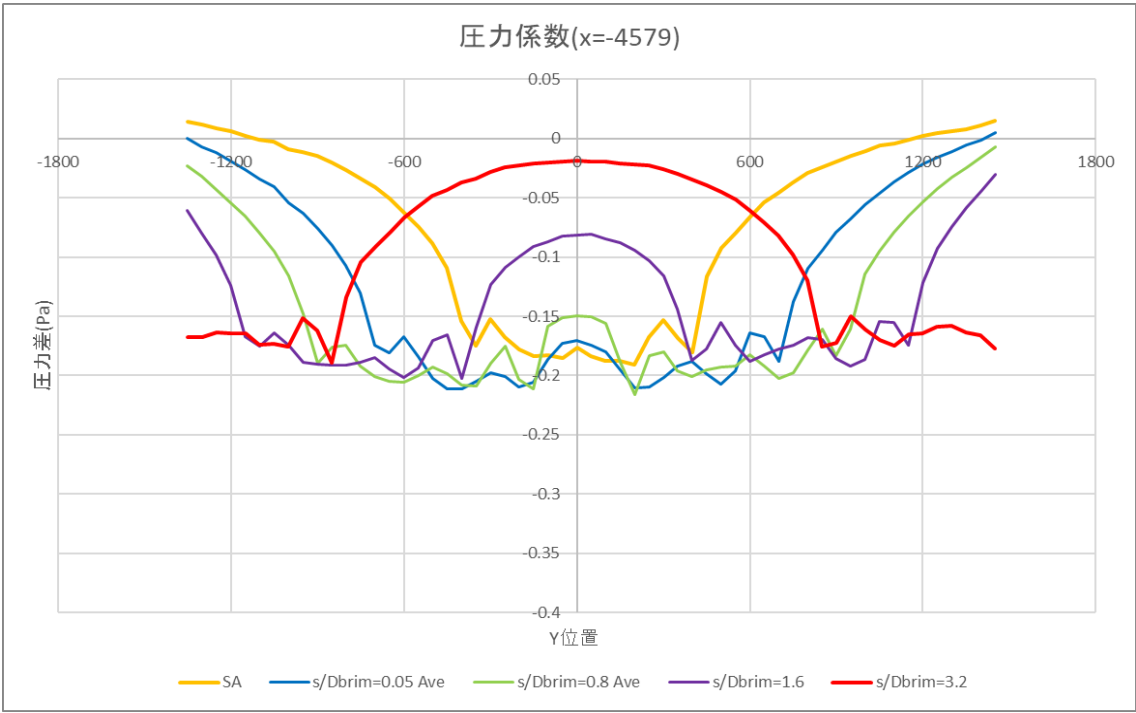
レンズ有 $X=-4579$ 風車間隔比較

$s/D_{brim}=0.05, 0.8$ では2回測定したため、平均値を使用している。測定した圧力差プロファイル

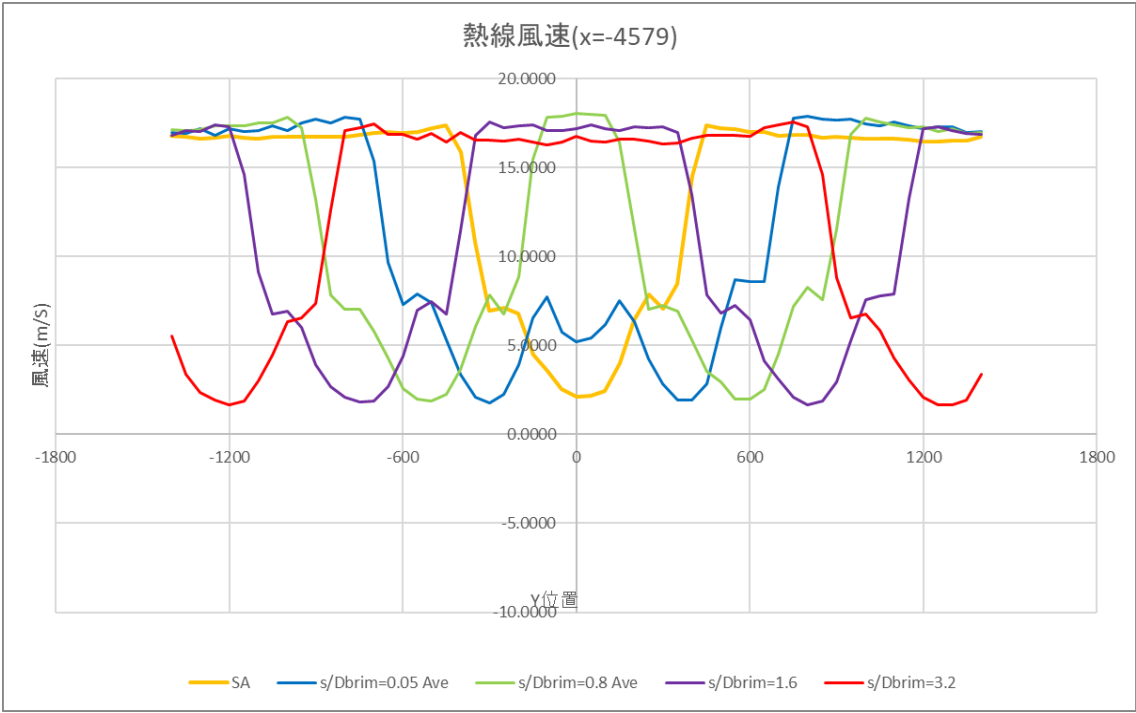
を図 4.128 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.129 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.130 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.131 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.132 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.133 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.134 に示す。



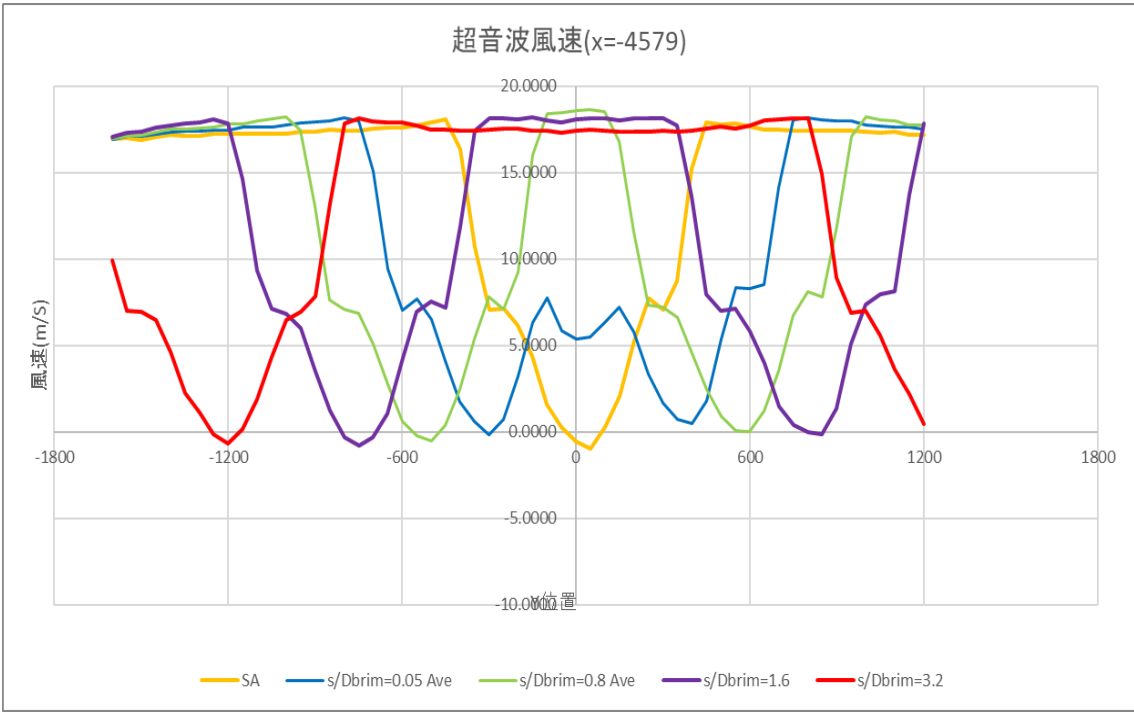
後方圧力差分布図



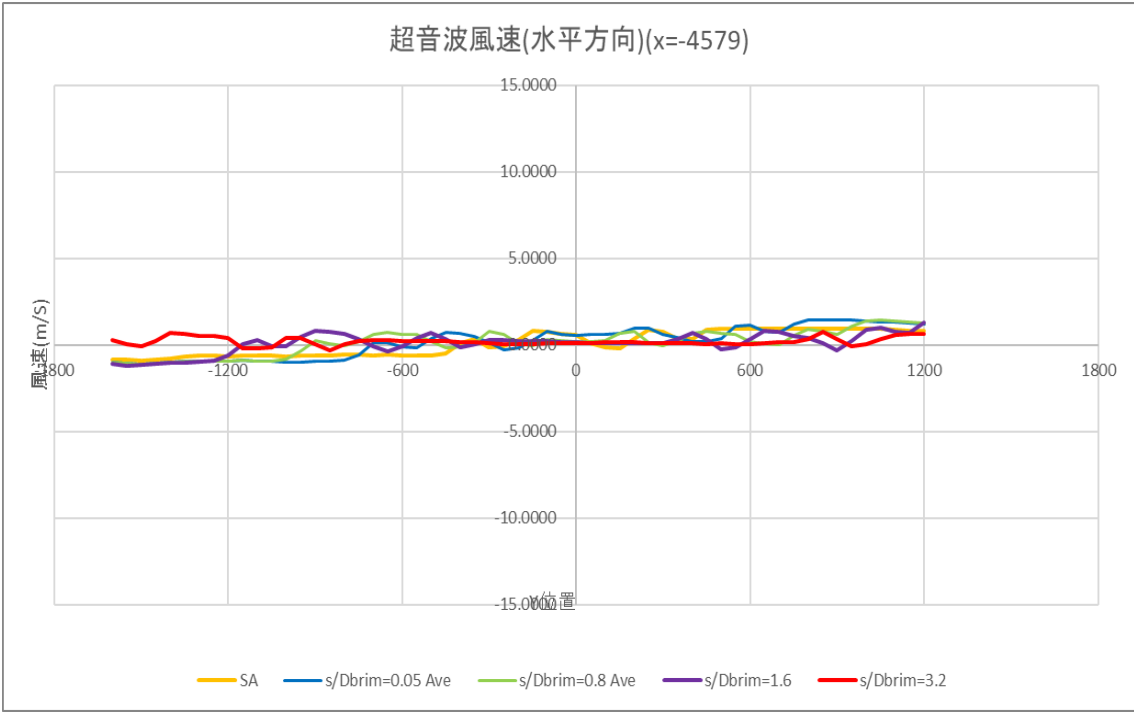
後方压力系数布图



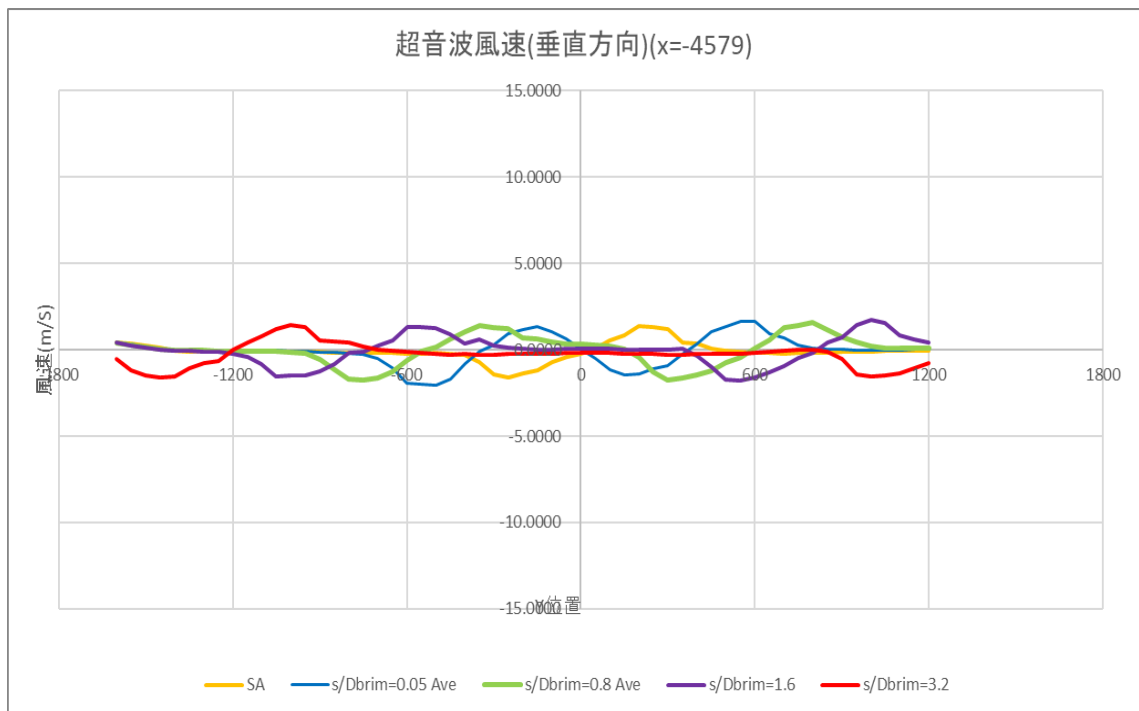
後方熱線流速布图



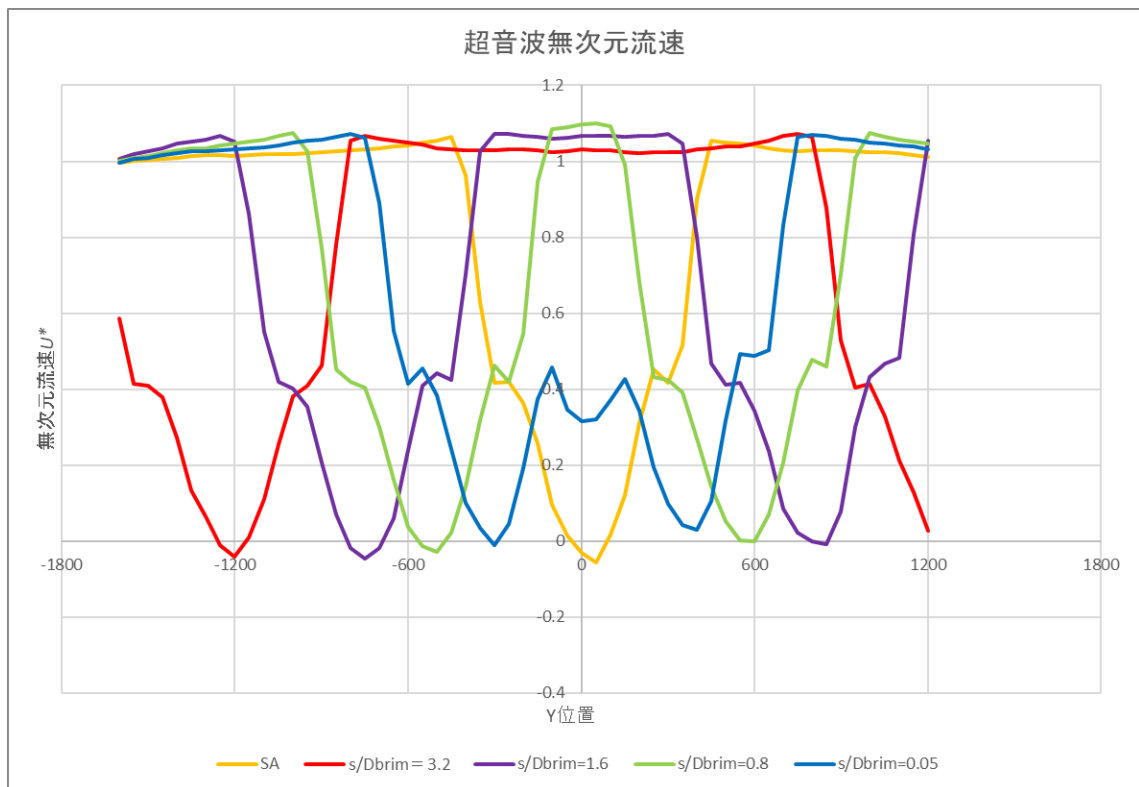
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



後方超音波鉛直方向流速分布図

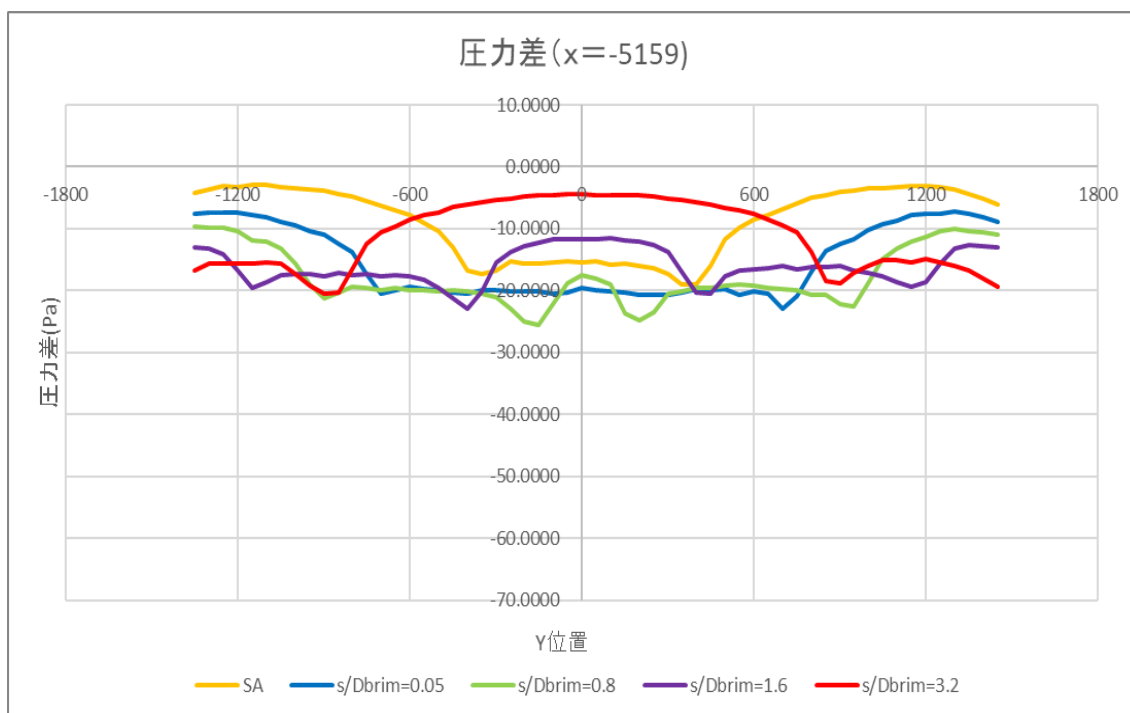


後方超音波主流方向無次元流速分布図

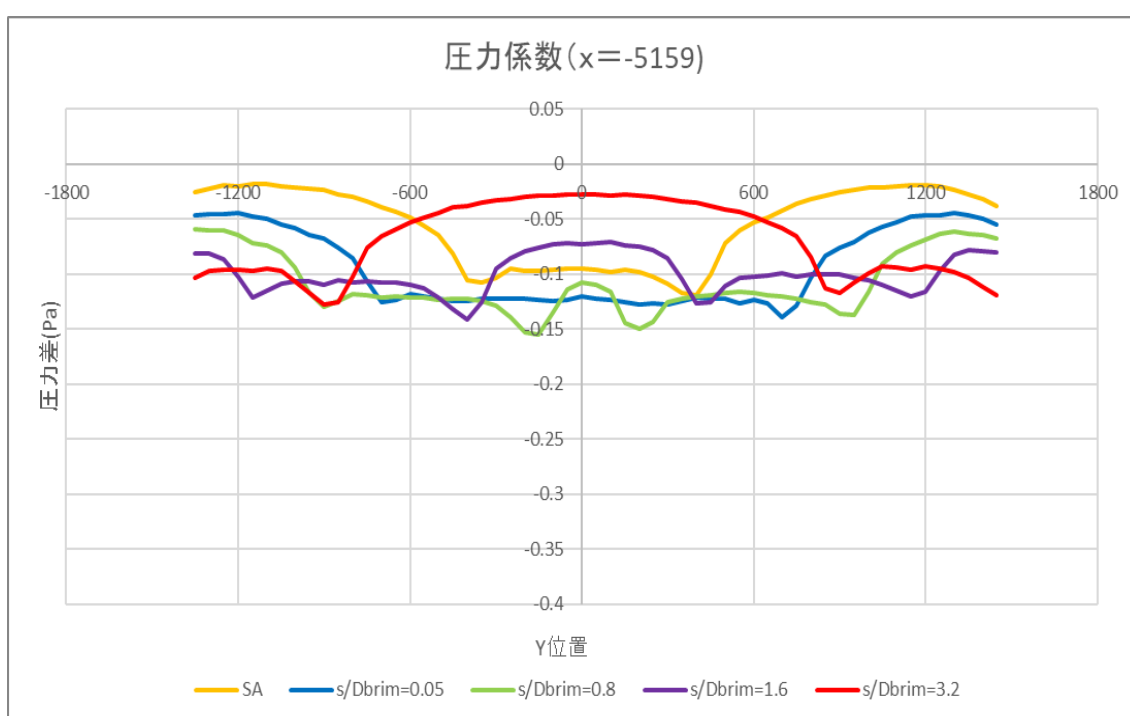
レンズ有 X=-5159 風車間隔比較

測定した圧力差プロファイルを図 4.135 に示す. 測定した圧力係数プロファイルを図 4.136 に

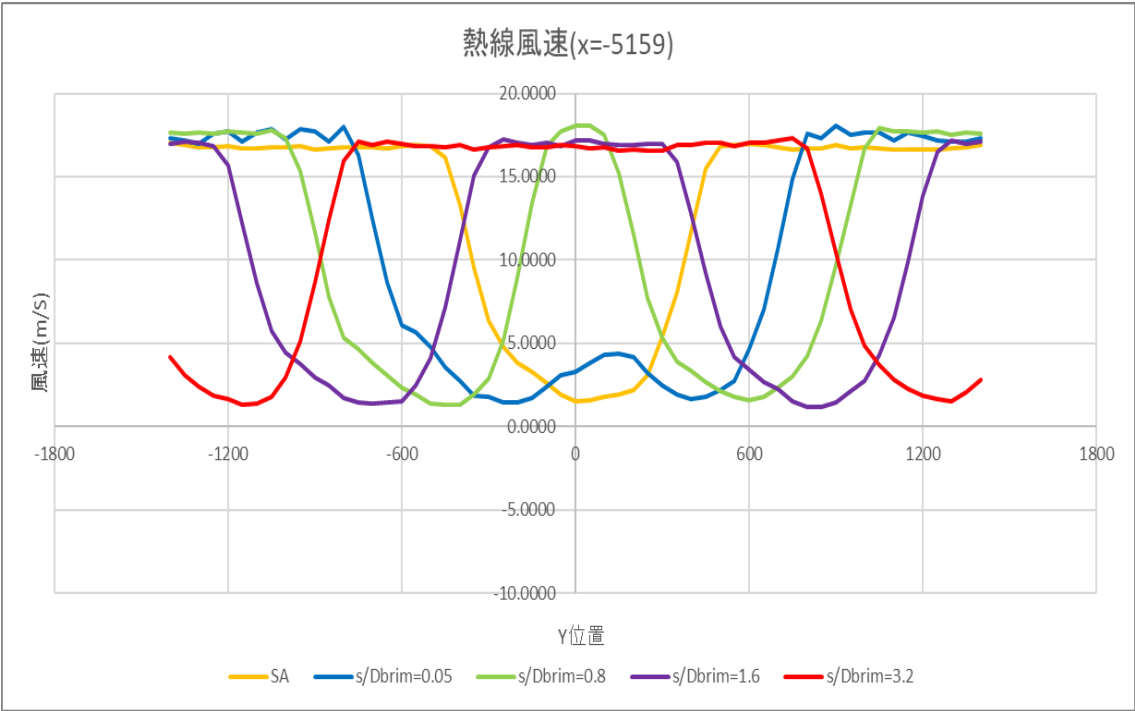
示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.137 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.138 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.139 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.140 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.141 に示す。



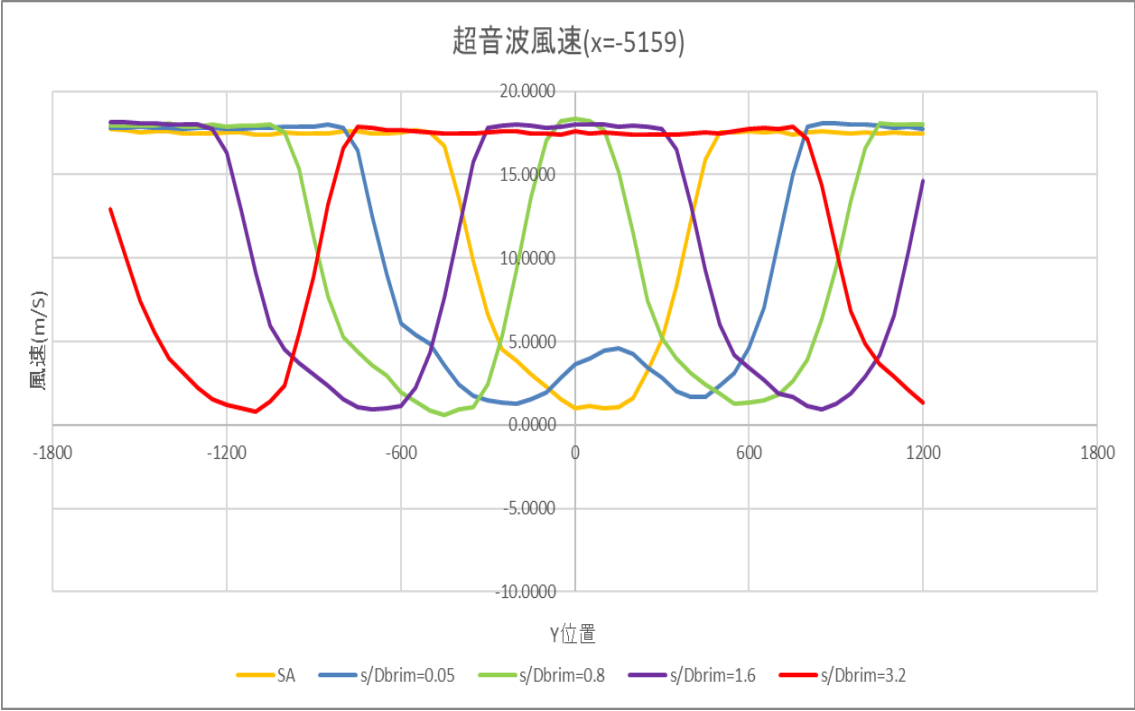
後方圧力差分布図



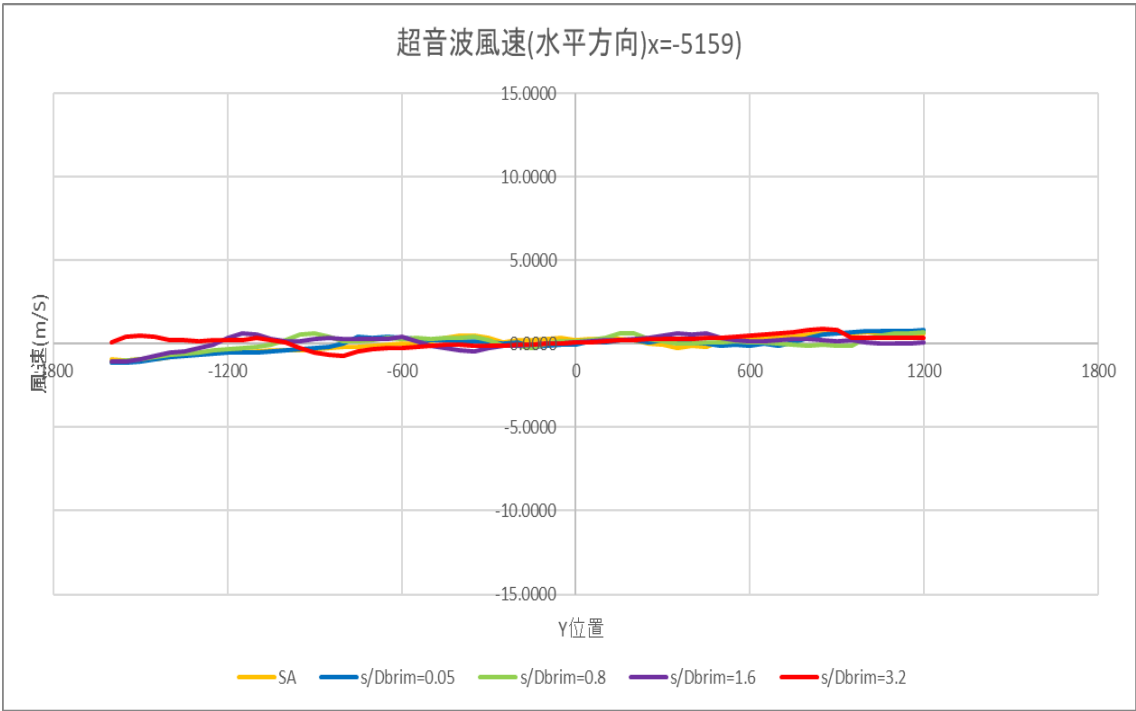
後方压力係数布图



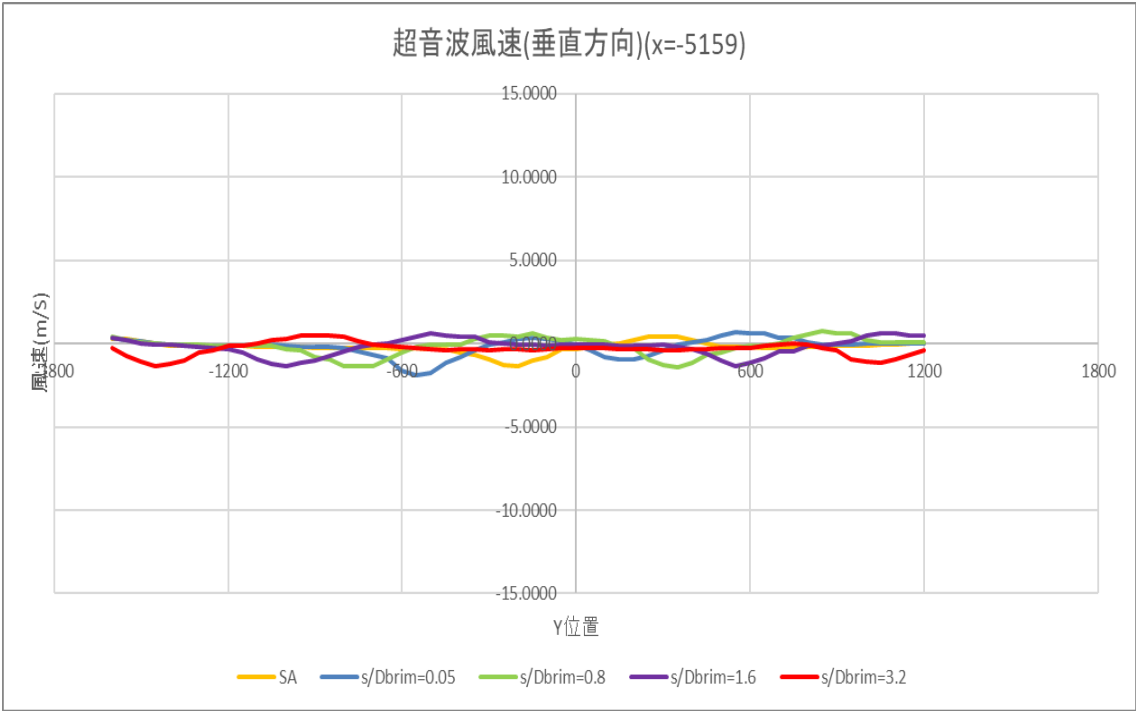
後方熱線流速布图



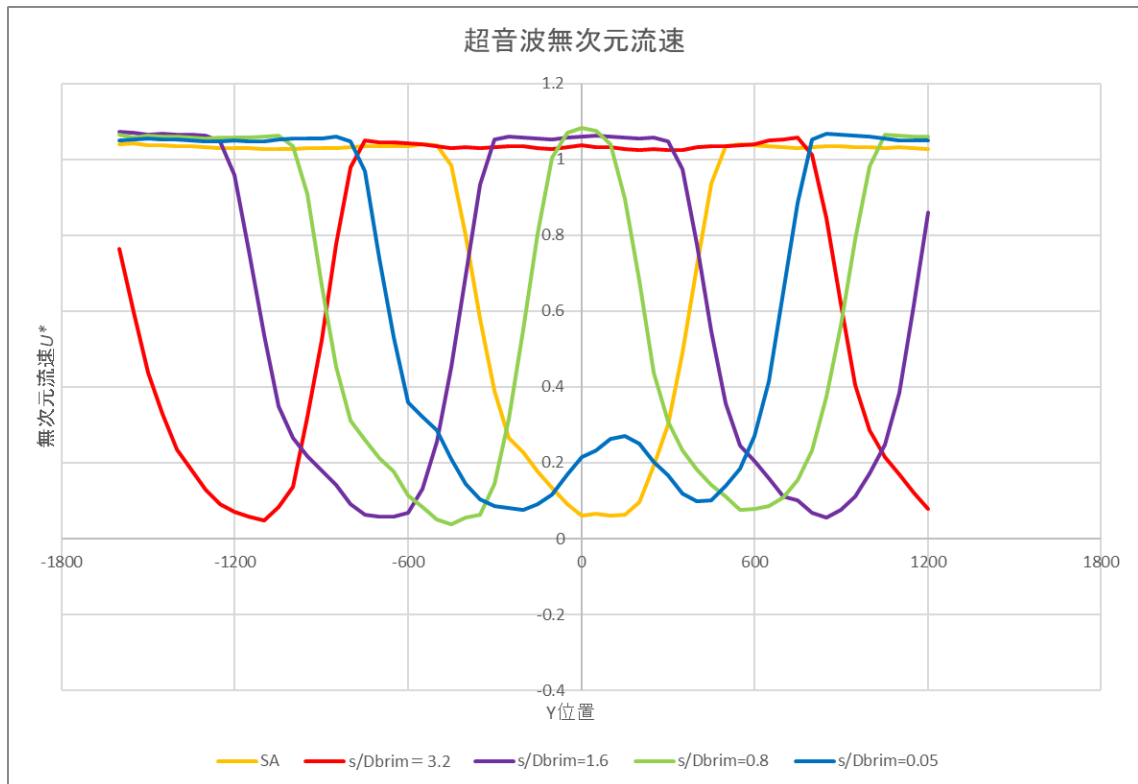
後方超音波主流方向流速分布图



後方超音波水平方向流速分布図



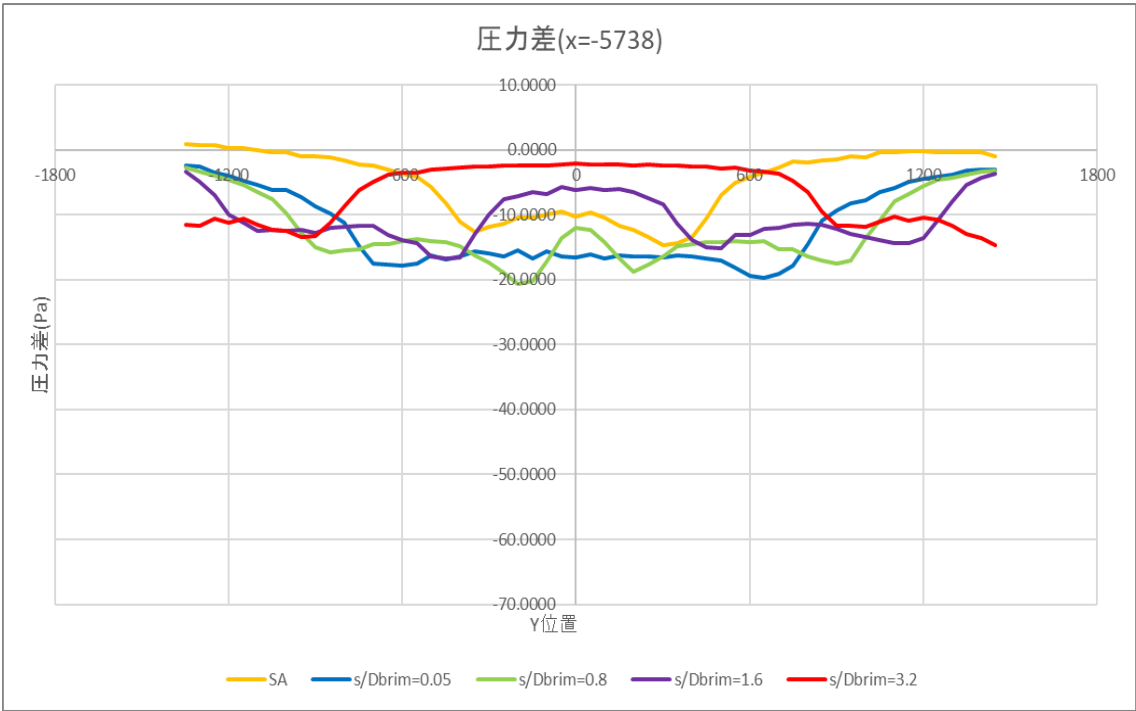
後方超音波鉛直方向流速分布図



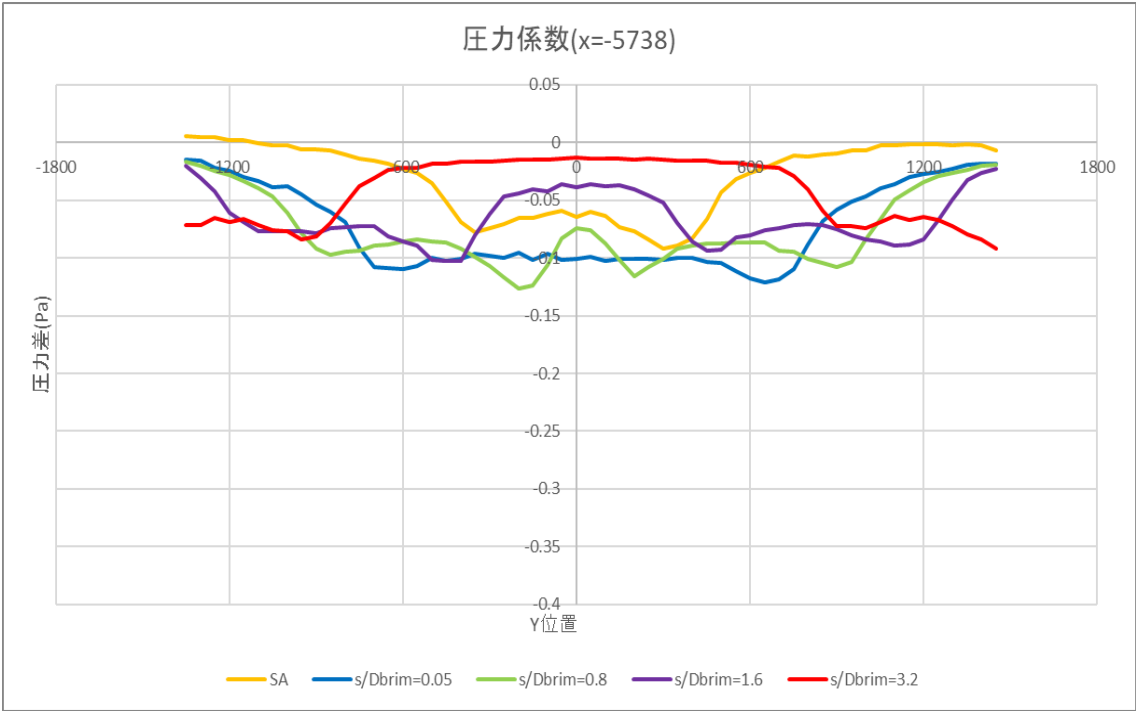
後方超音波主流方向無次元流速分布図

レンズ有 X=-5738 風車間隔比較

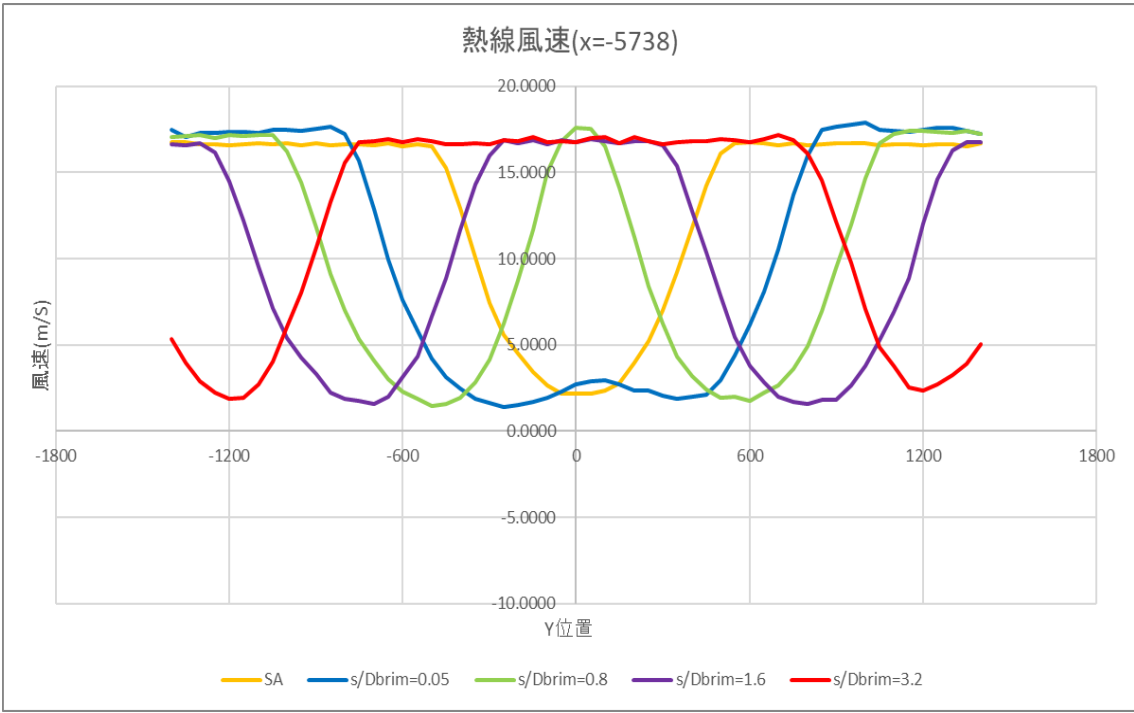
測定した圧力差プロファイルを図 4.142 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.143 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.144 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.145 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.146 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.147 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.148 に示す。



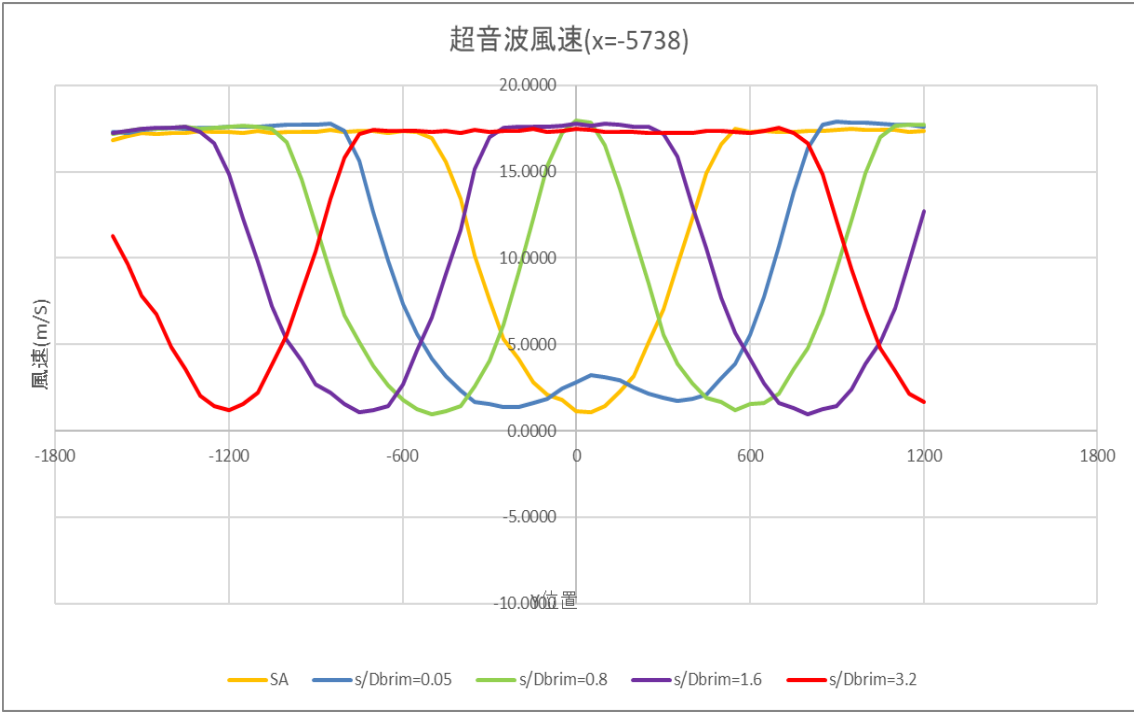
後方压力差分布图



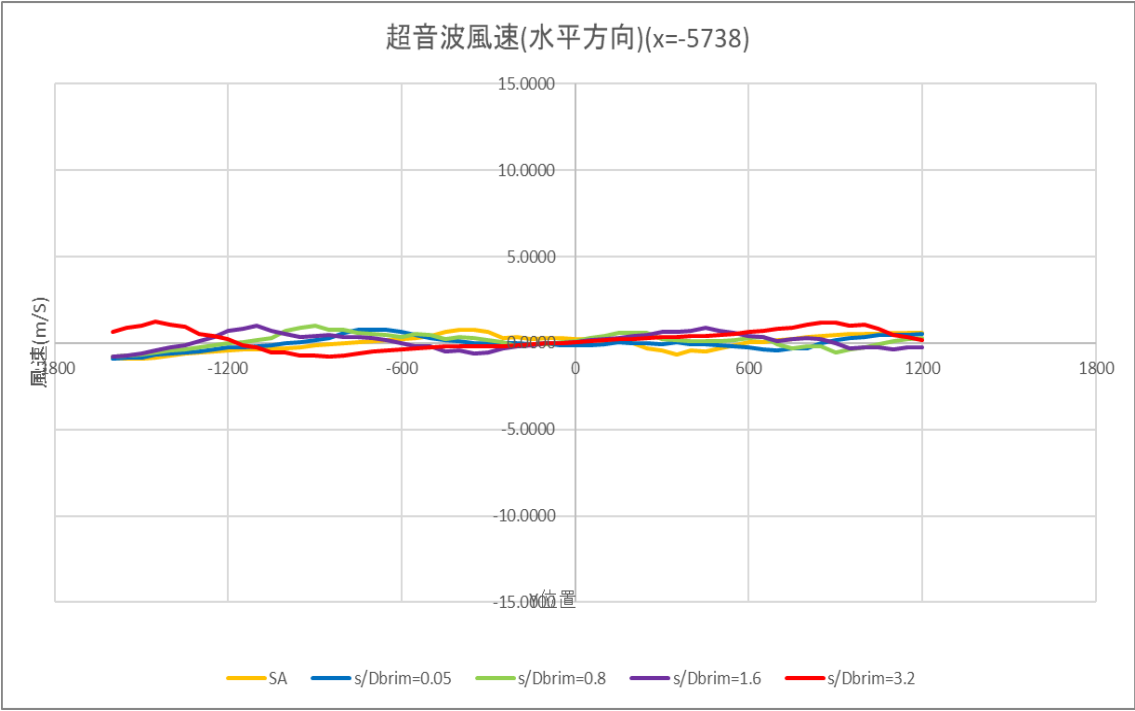
後方压力系数分布图



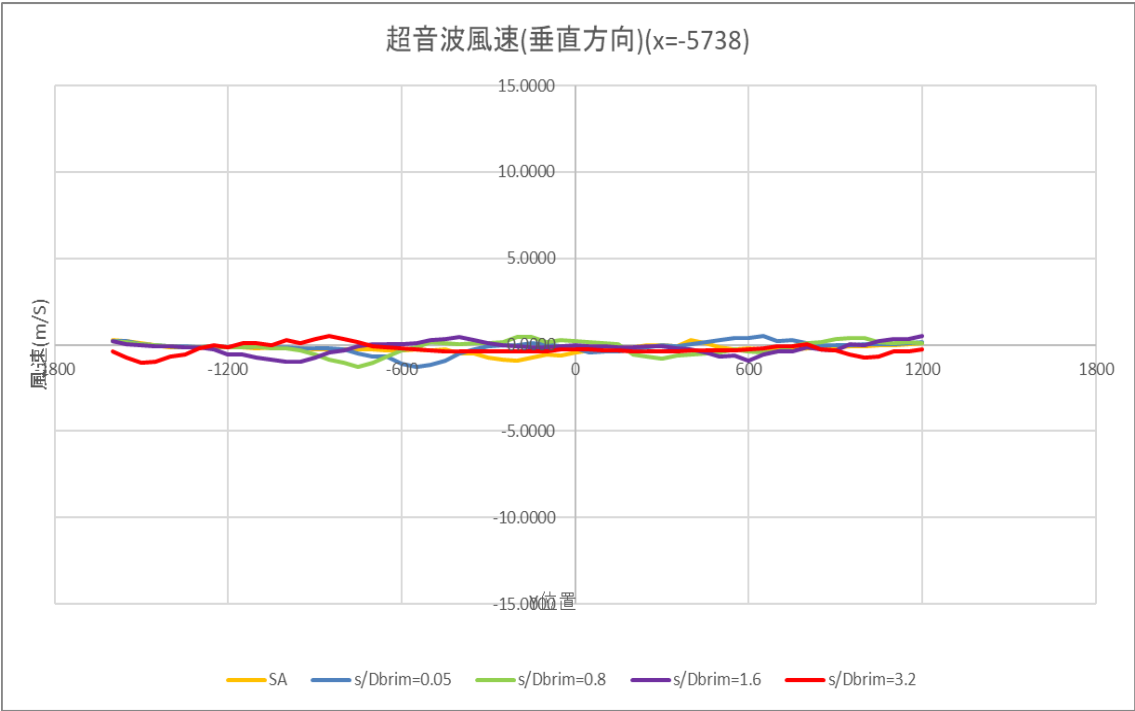
後方熱線流速布図



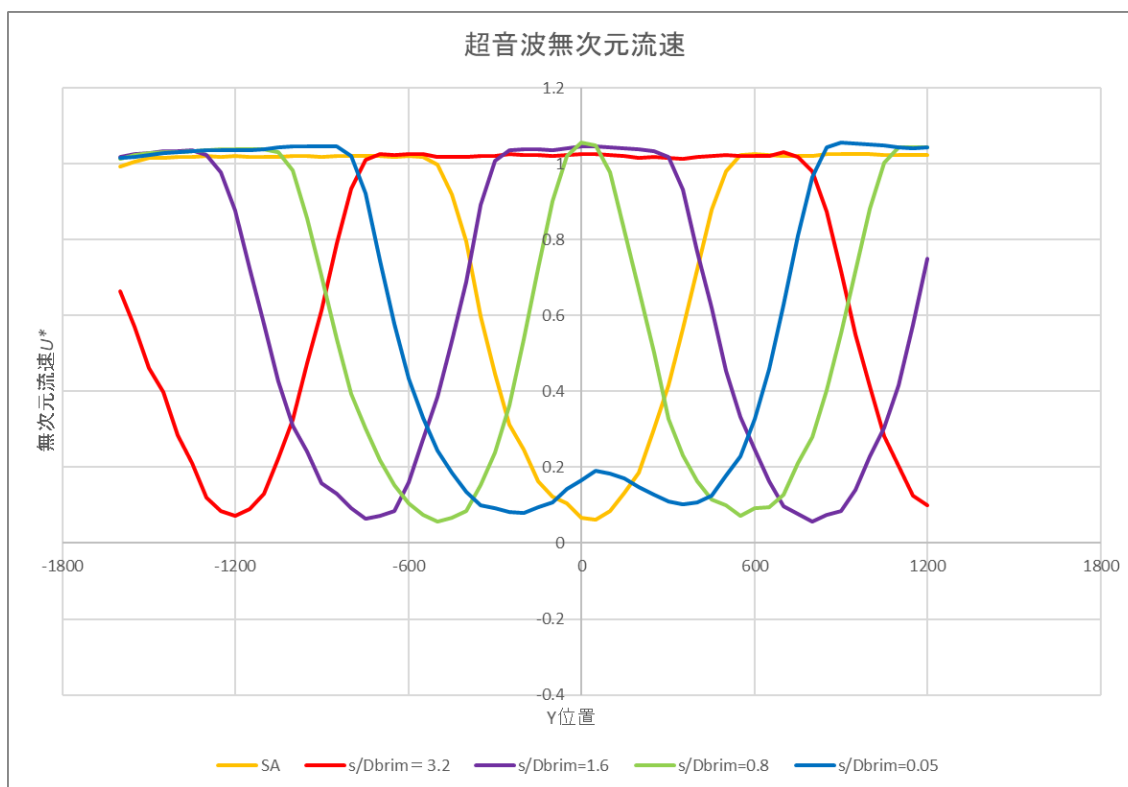
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



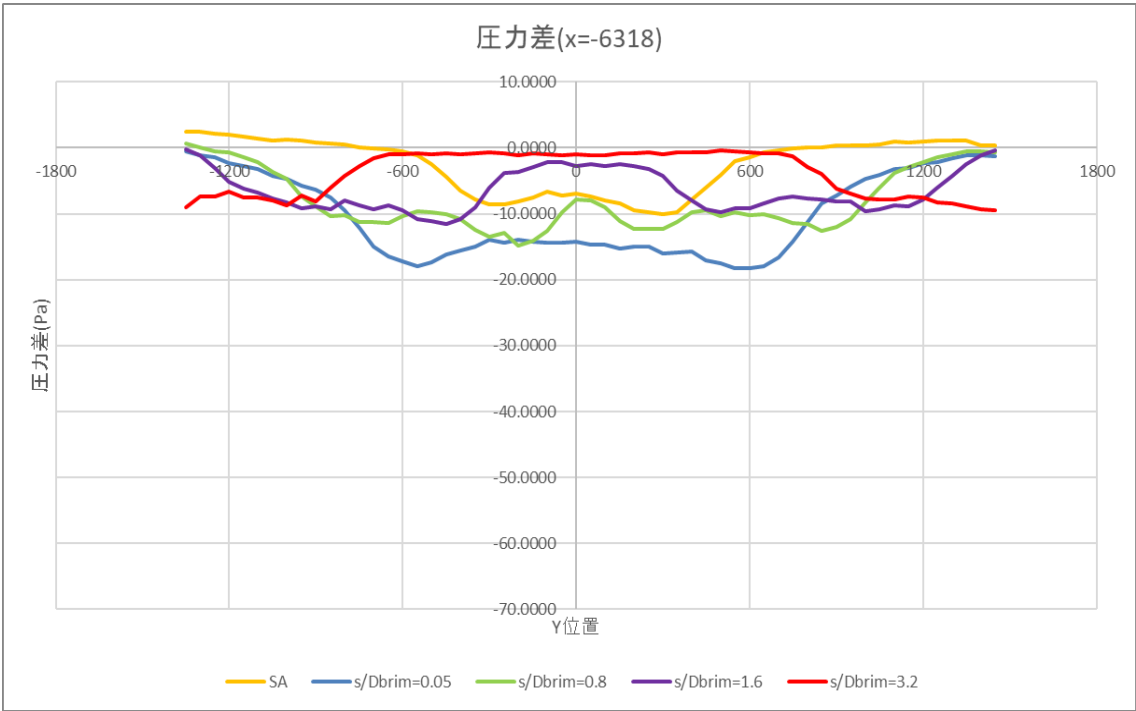
後方超音波鉛直方向流速分布図



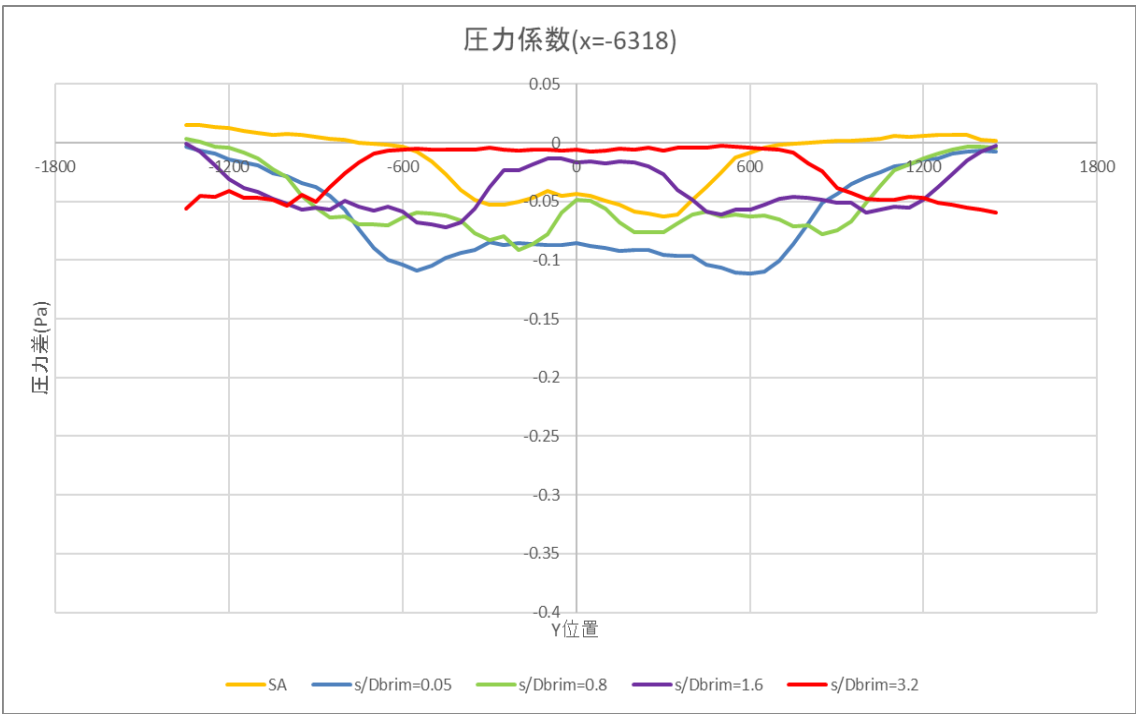
後方超音波主流方向無次元流速分布図

レンズ有 X=-6318 風車間隔比較

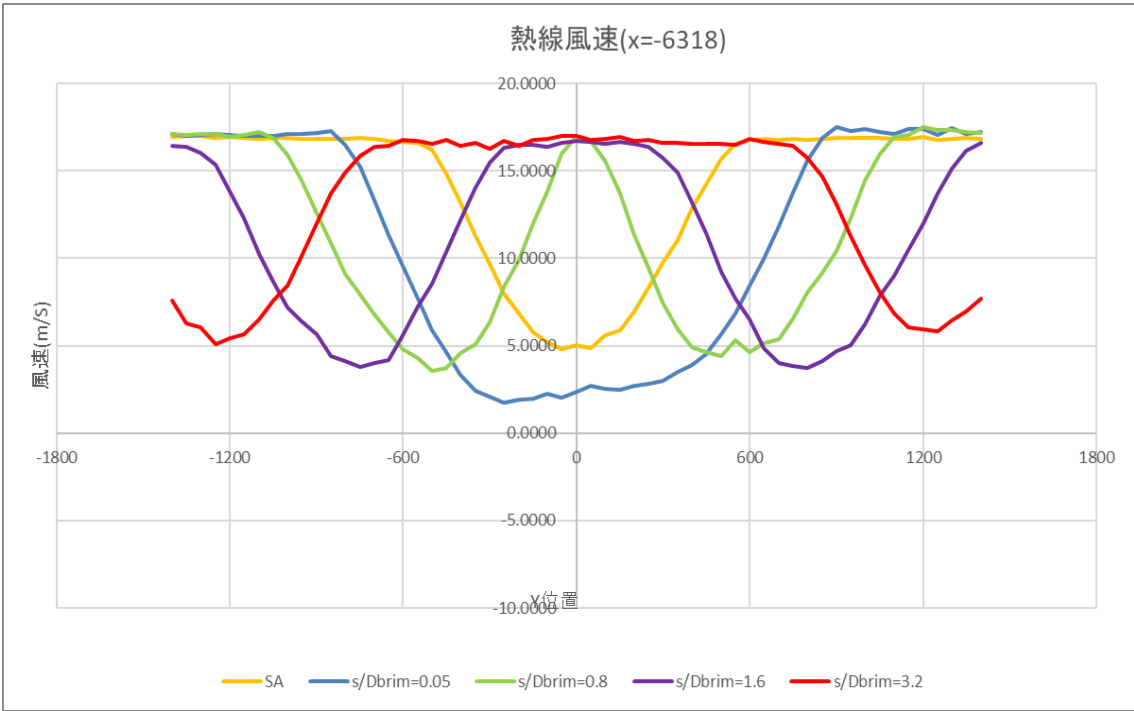
測定した圧力差プロファイルを図 4.149 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.150 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.151 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.152 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.153 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.154 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.155 に示す。



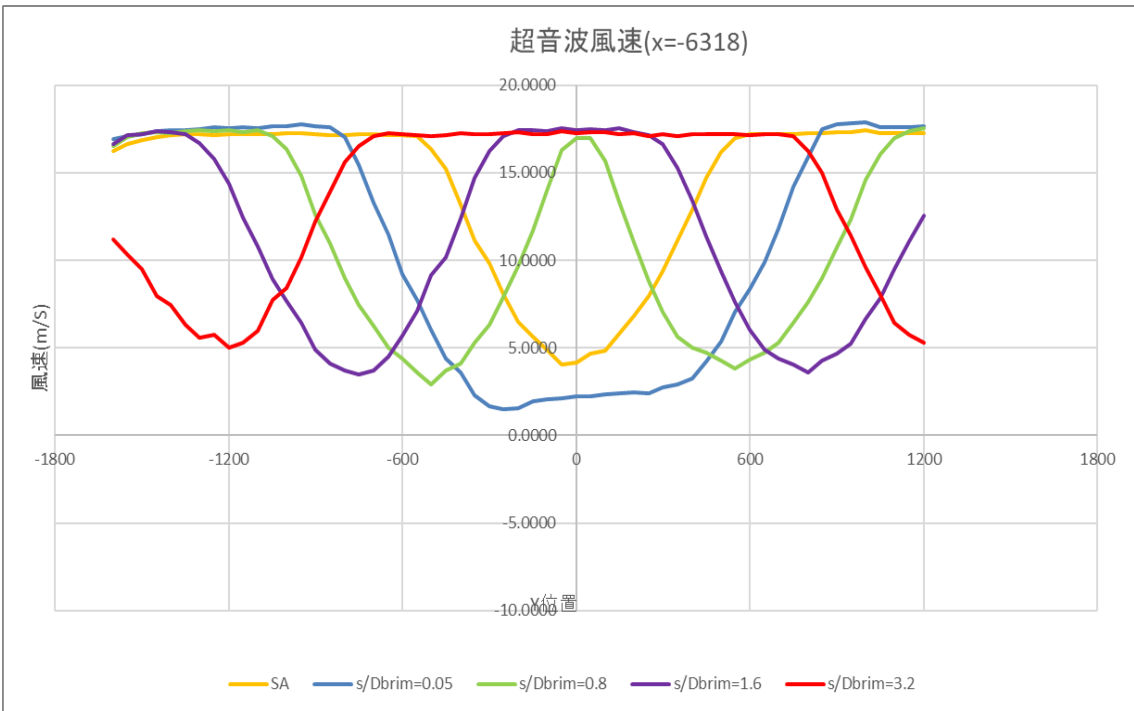
後方压力差分布图



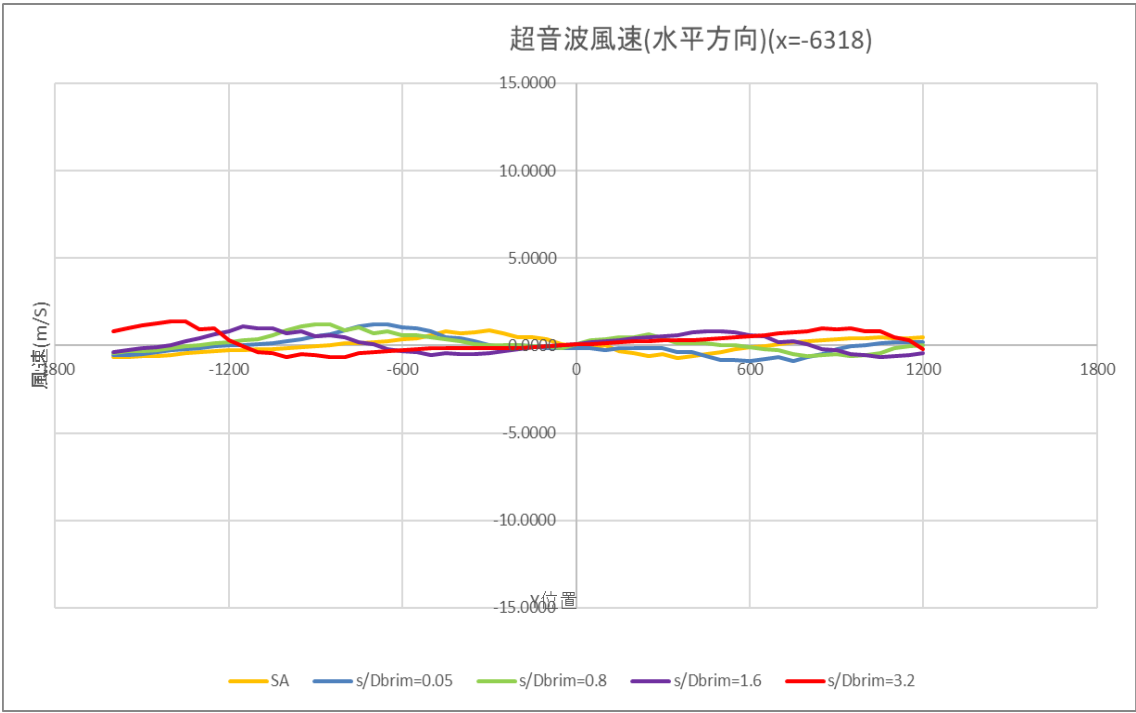
後方压力系数分布图



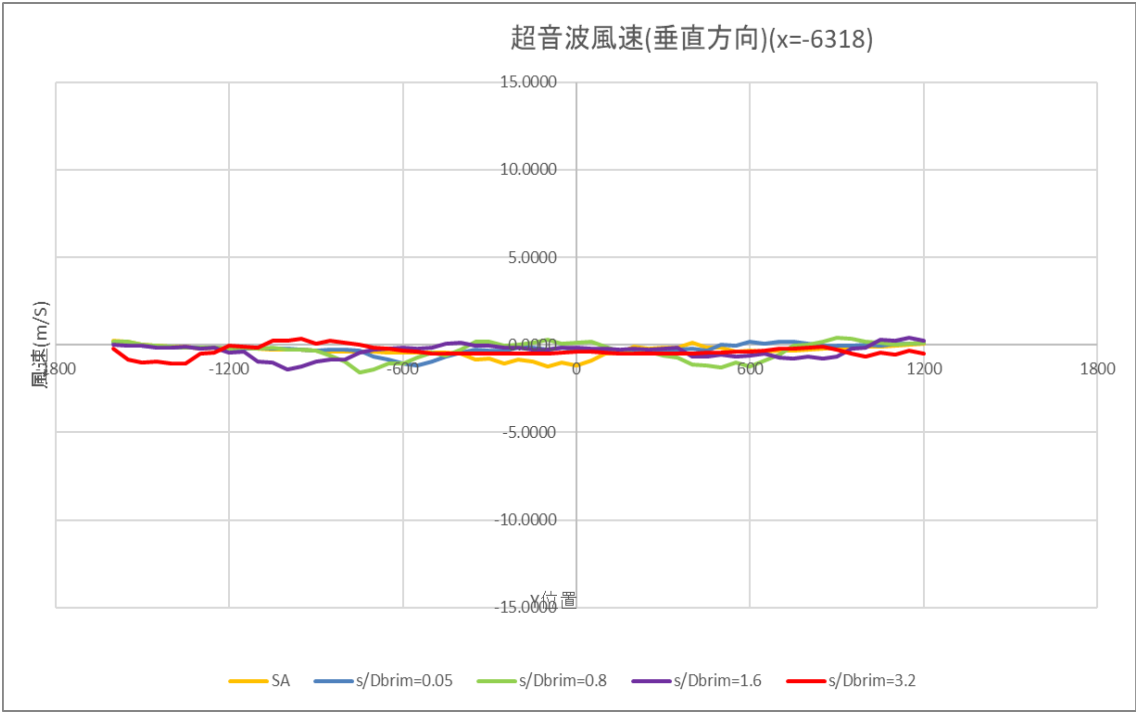
後方熱線流速分布図



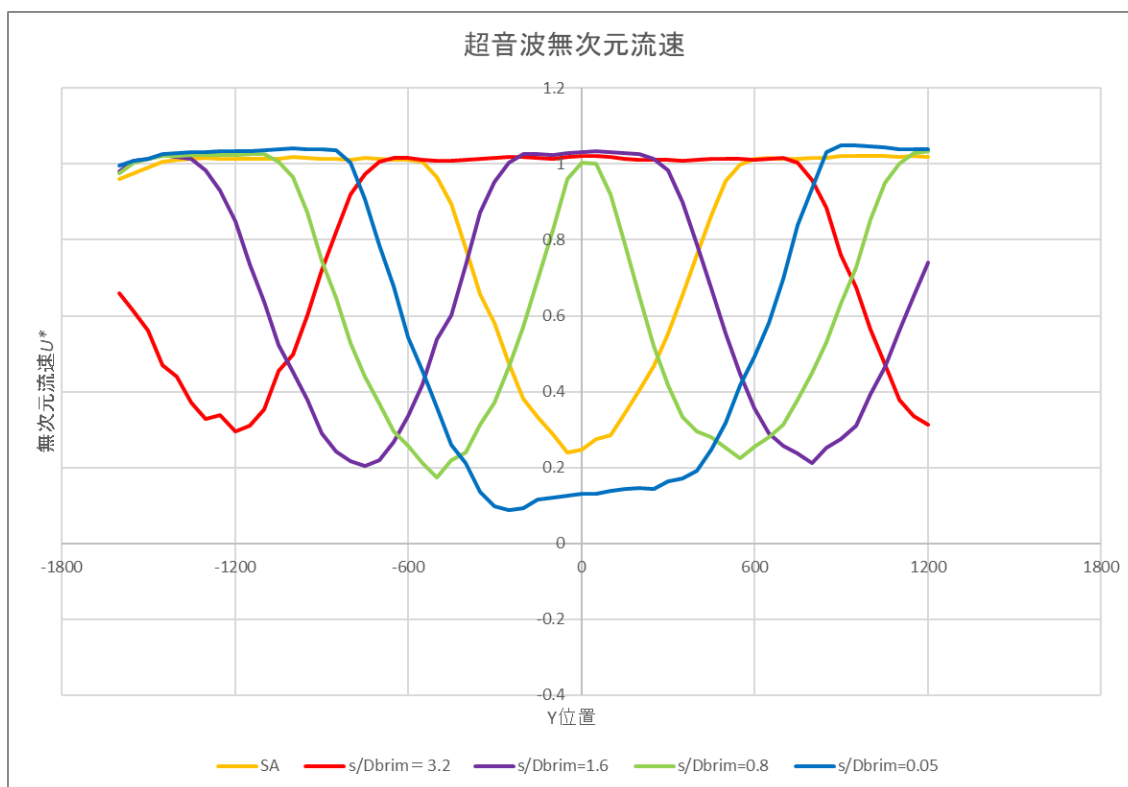
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



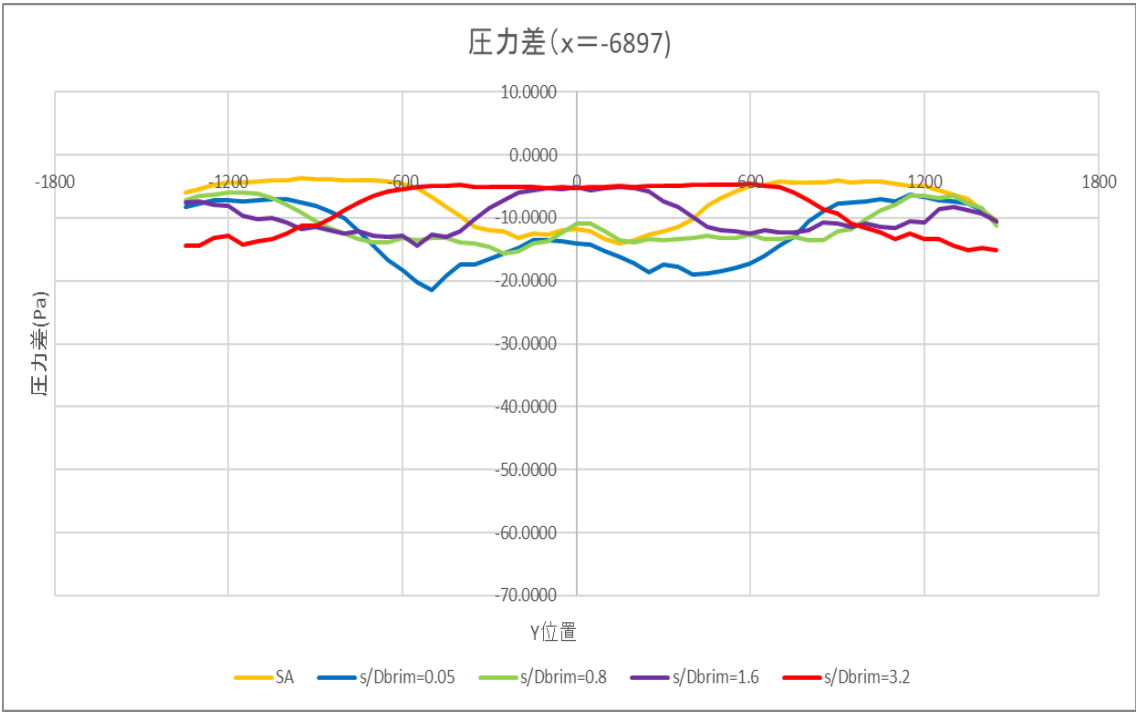
後方超音波鉛直方向流速分布図



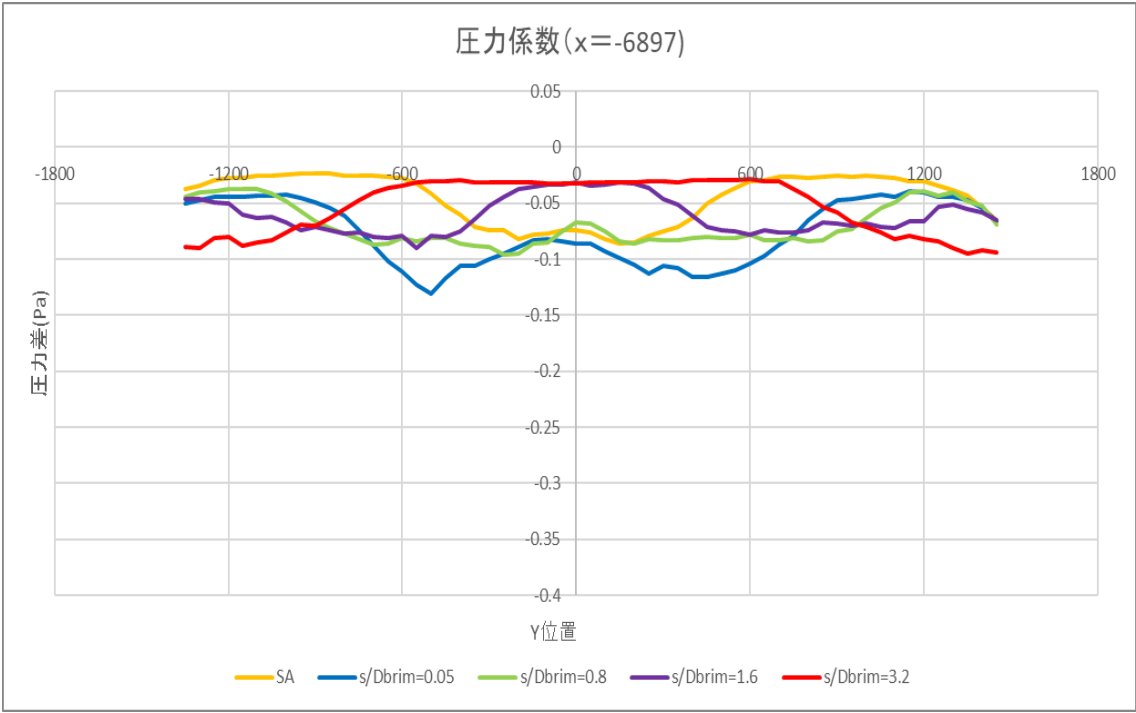
後方超音波主流方向無次元流速分布図

レンズ有 X=-6897 風車間隔比較

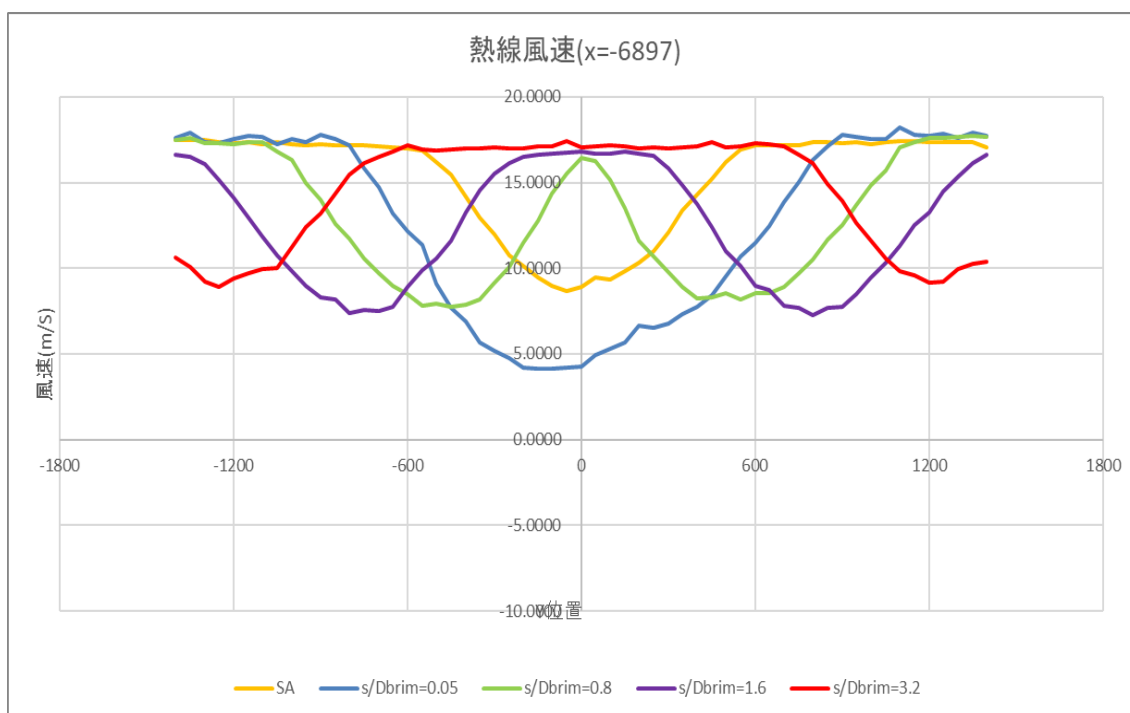
測定した圧力差プロファイルを図 4.156 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.157 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.158 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.159 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.160 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.161 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.162 に示す。



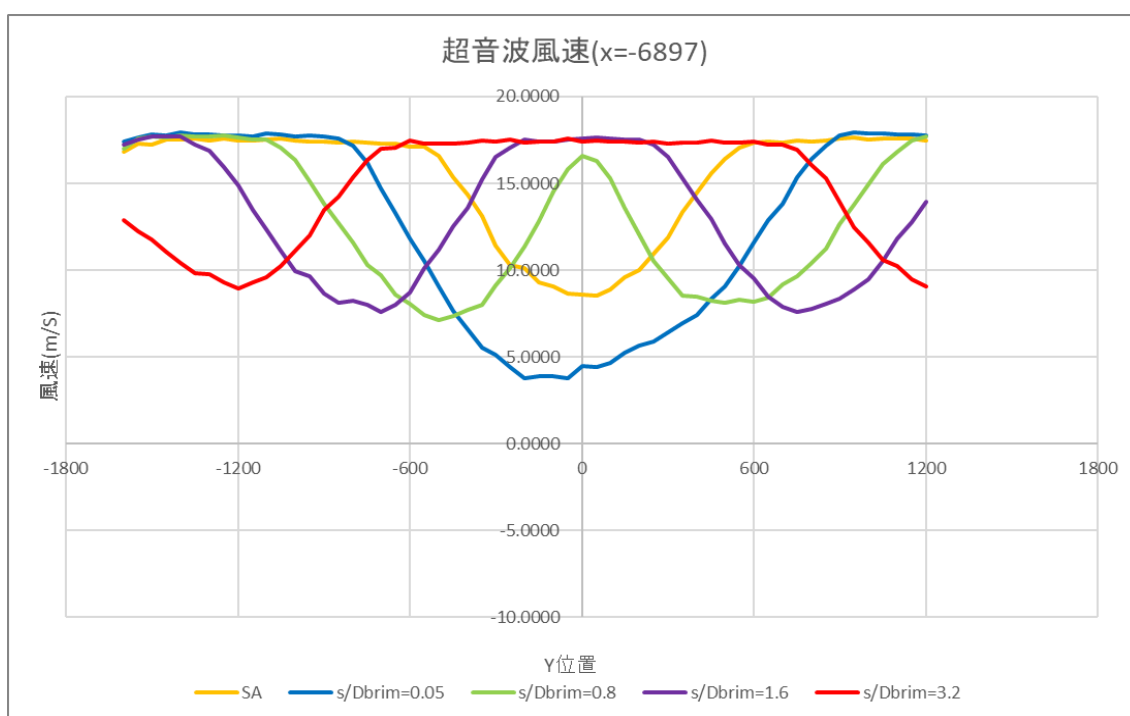
後方压力差分布图



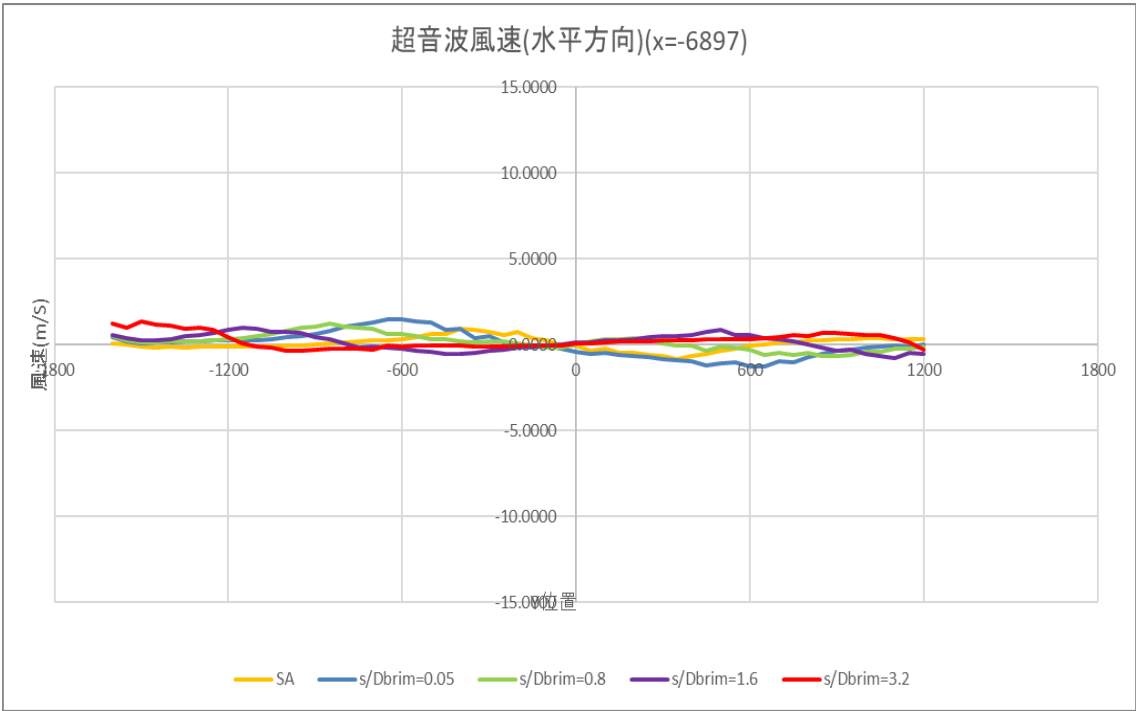
後方压力系数布图



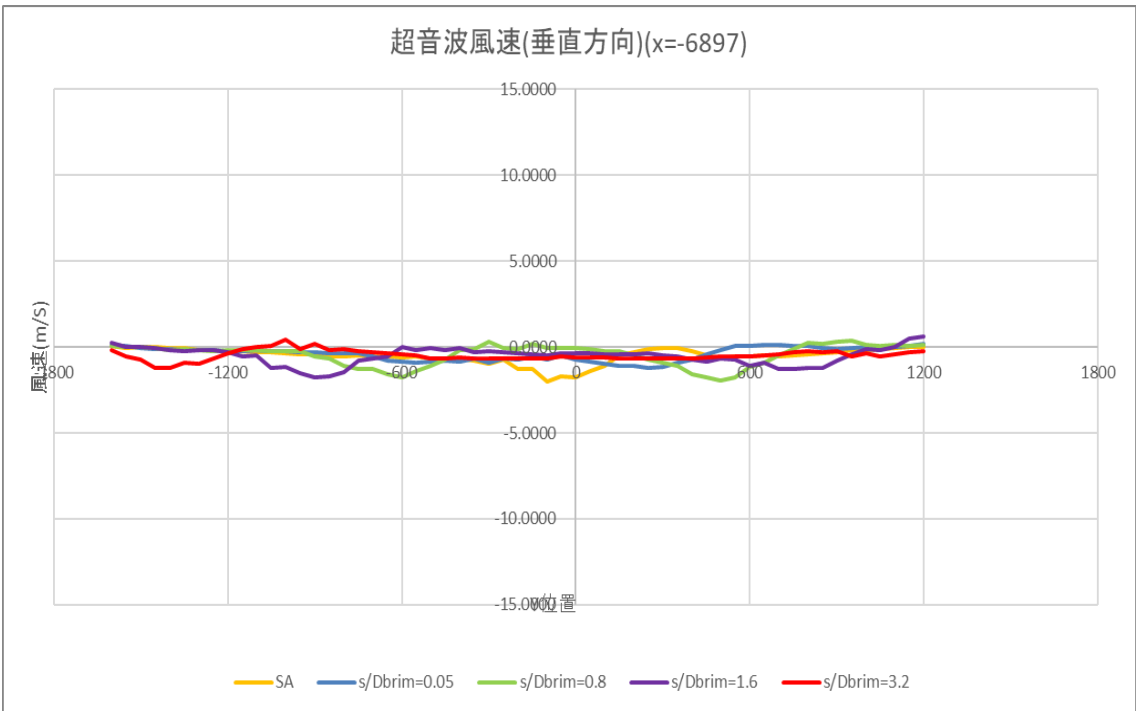
後方熱線流速分布図



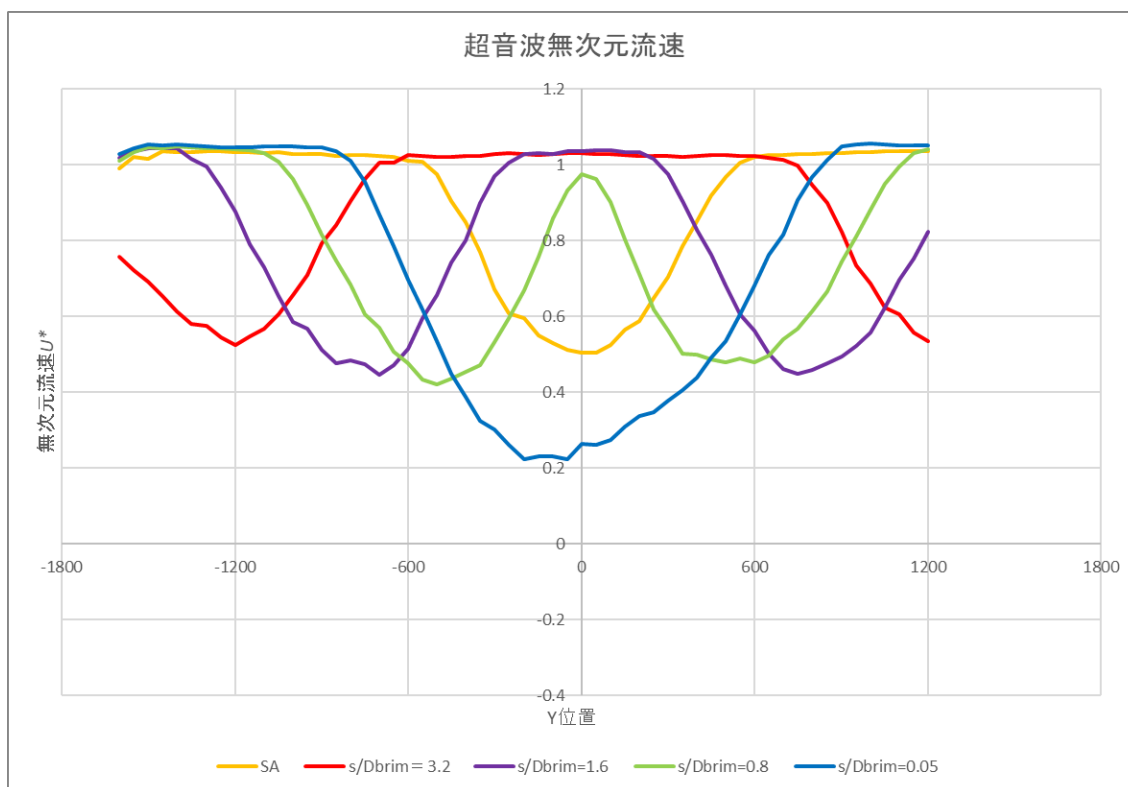
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



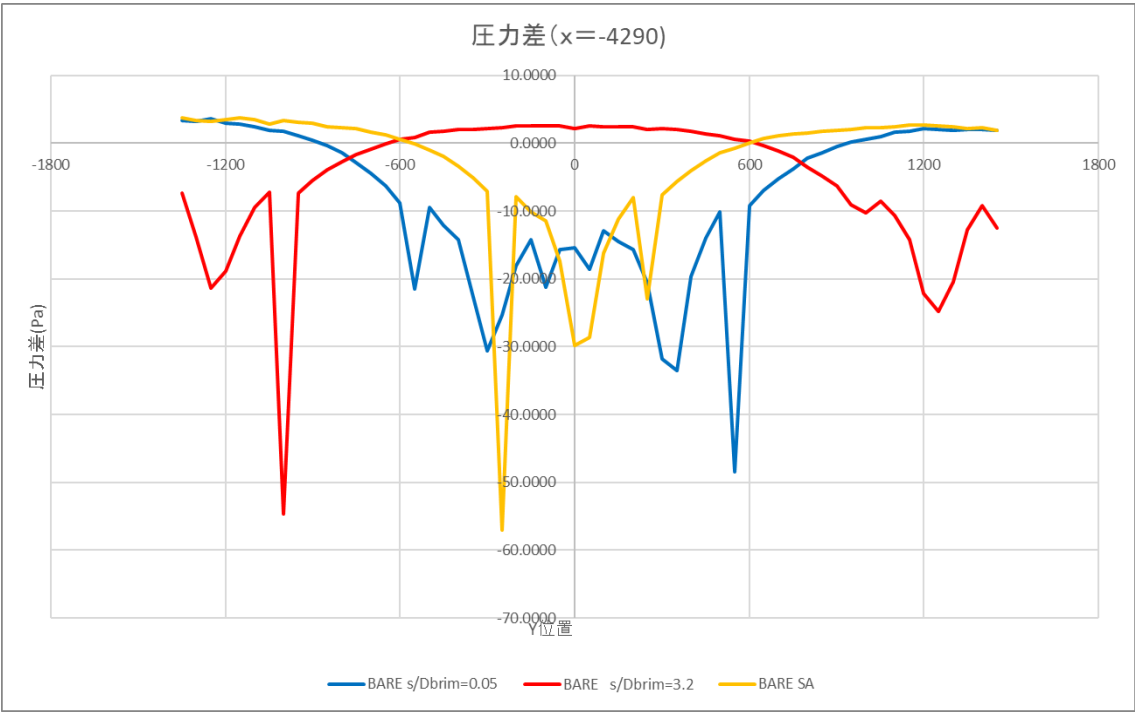
後方超音波鉛直方向流速分布図



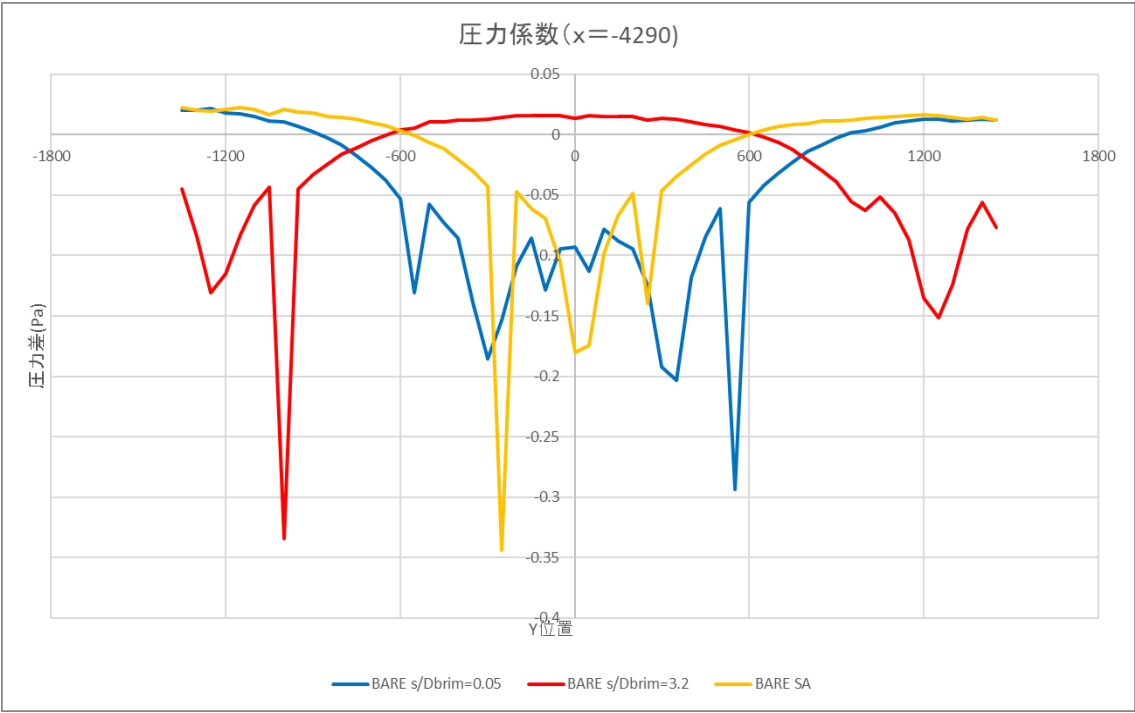
後方超音波主流方向無次元流速分布図

レンズ無 X=-4290 風車間隔比較

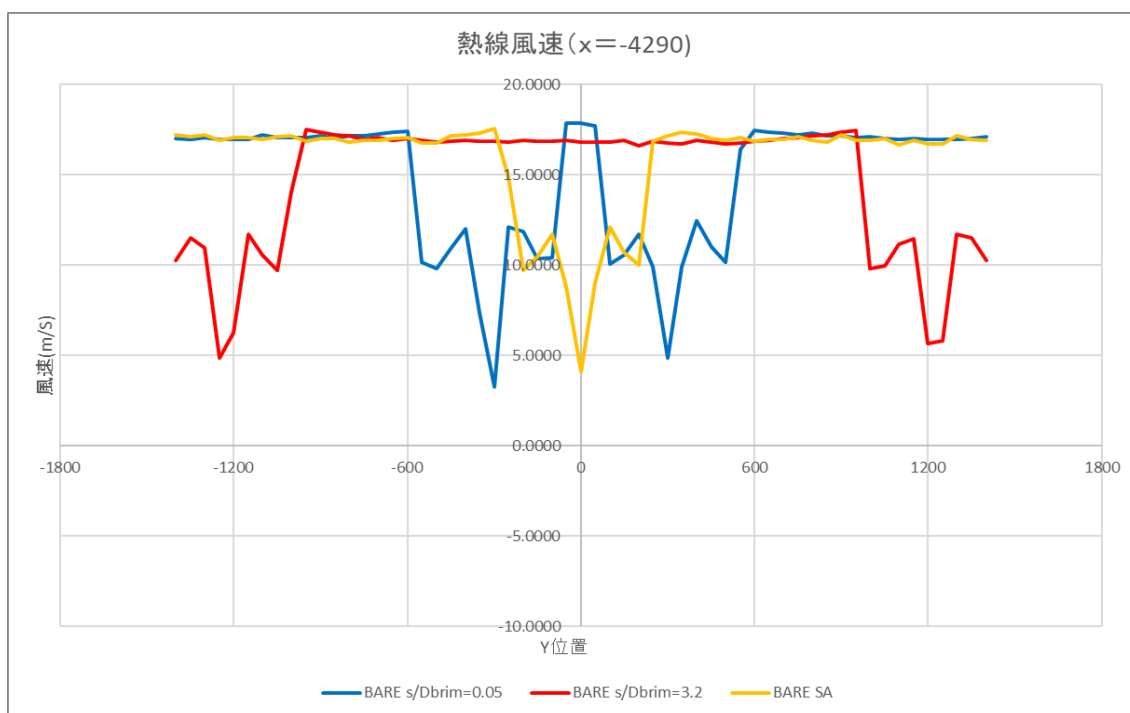
測定した圧力差プロファイルを図 4.163 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.164 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.165 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.166 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.167 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.168 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.169 に示す。



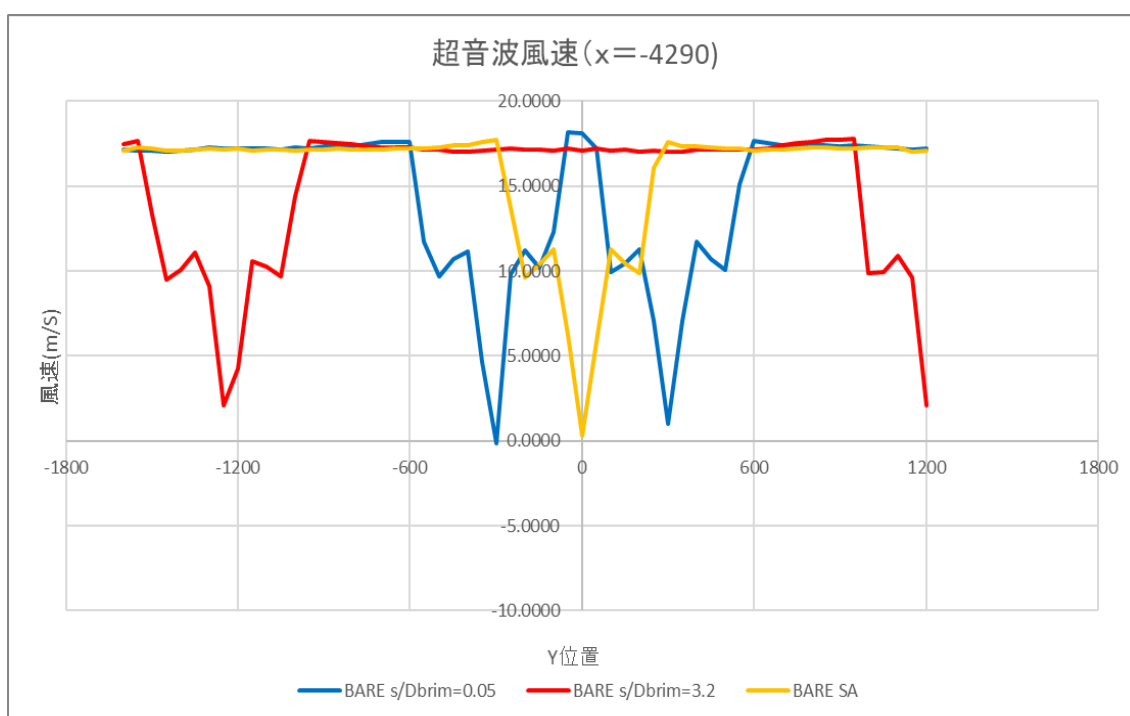
後方压力差分布图



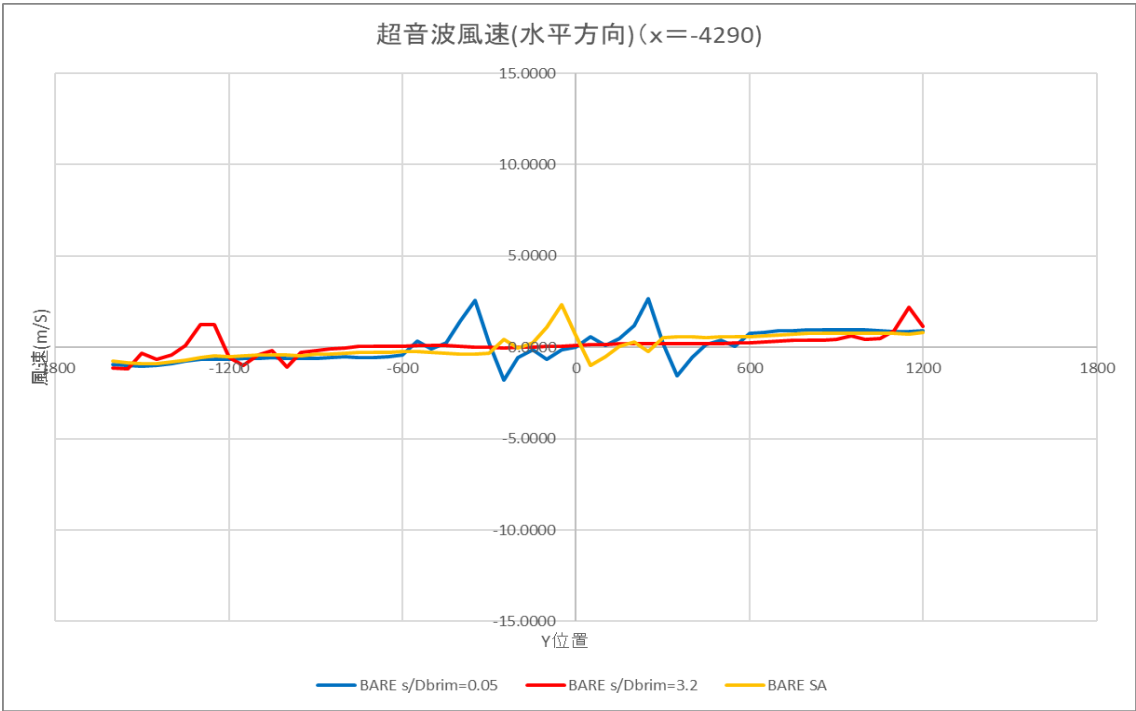
後方压力系数分布图



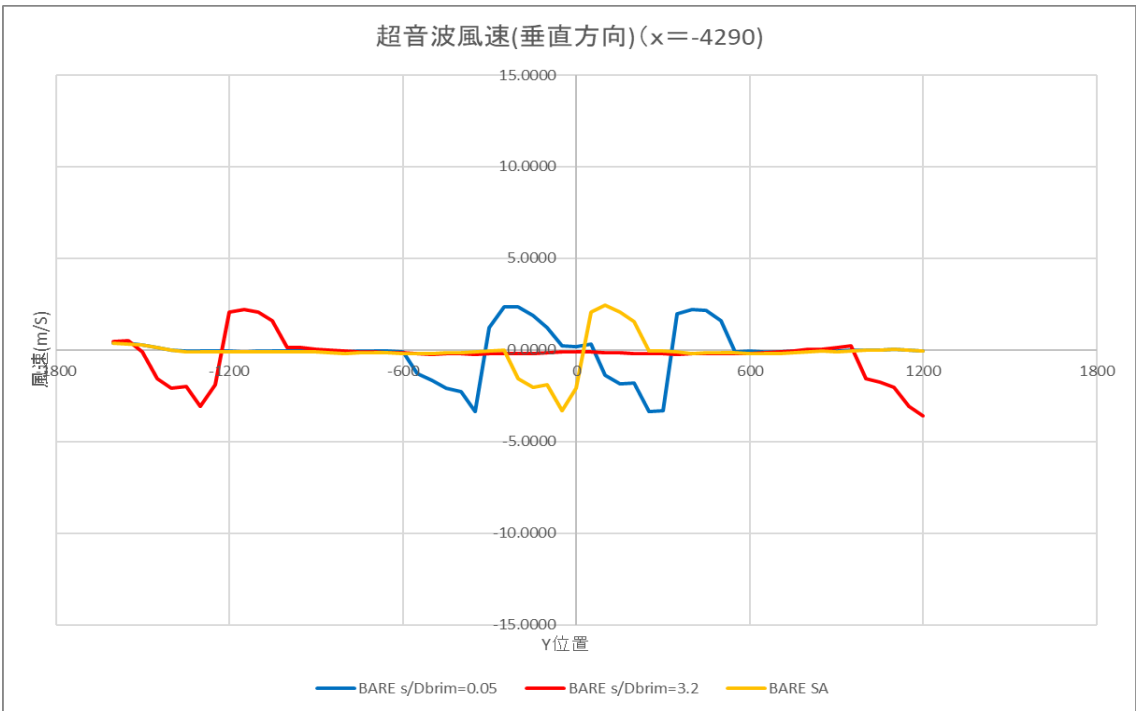
後方熱線流速布図



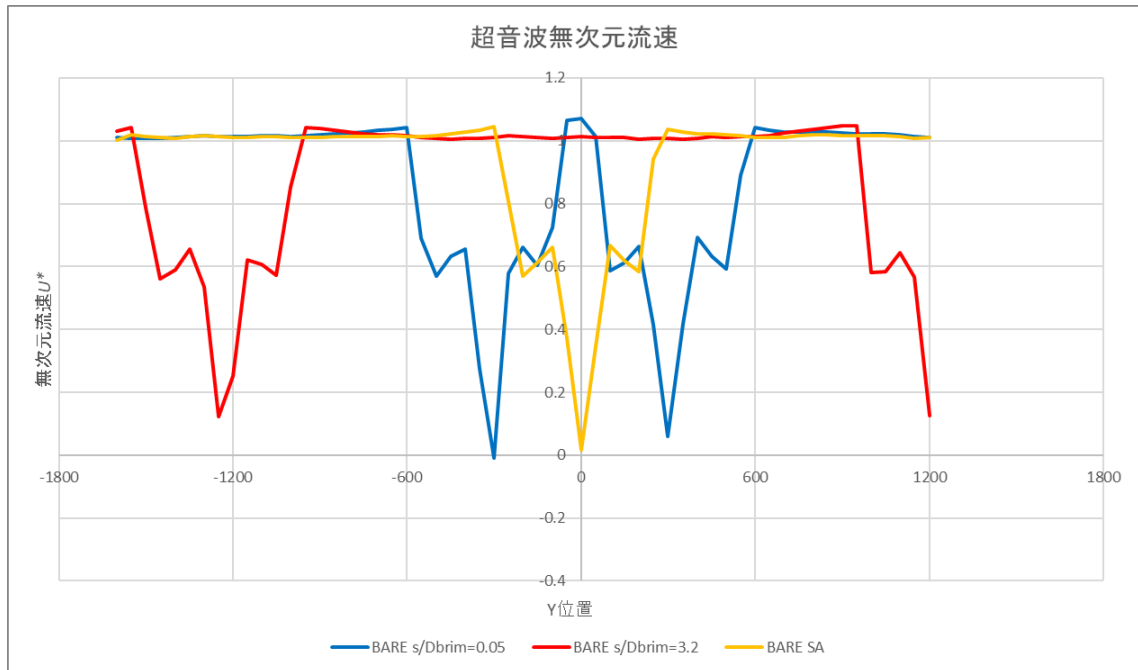
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



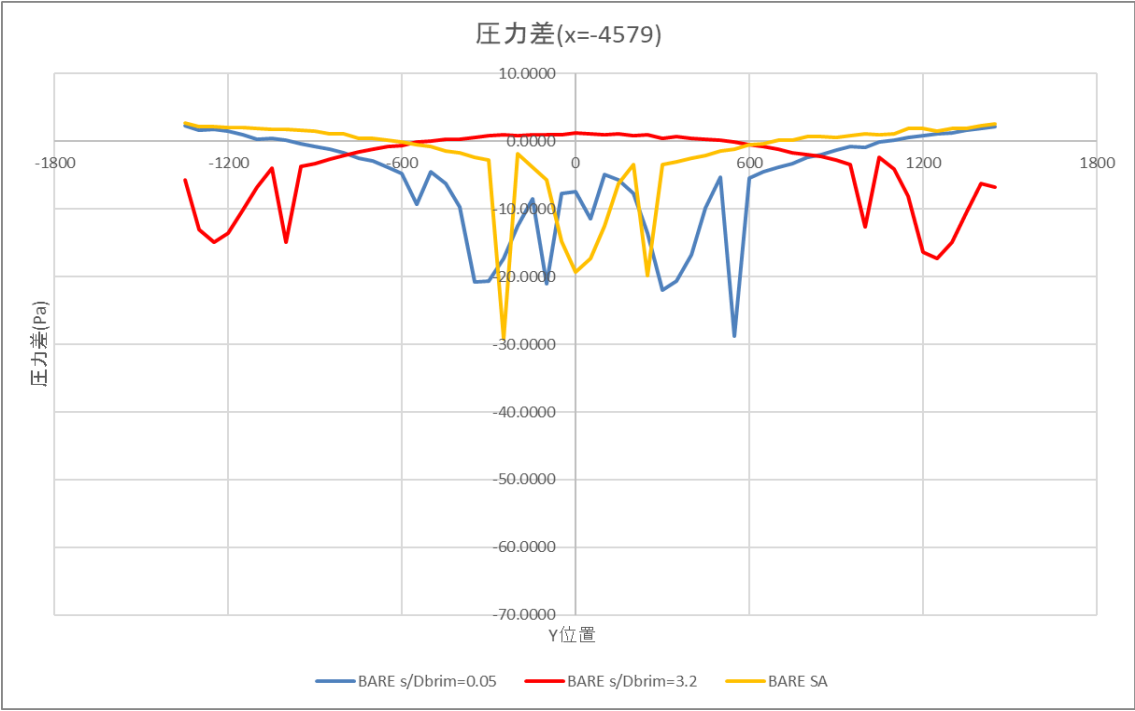
後方超音波鉛直方向流速分布図



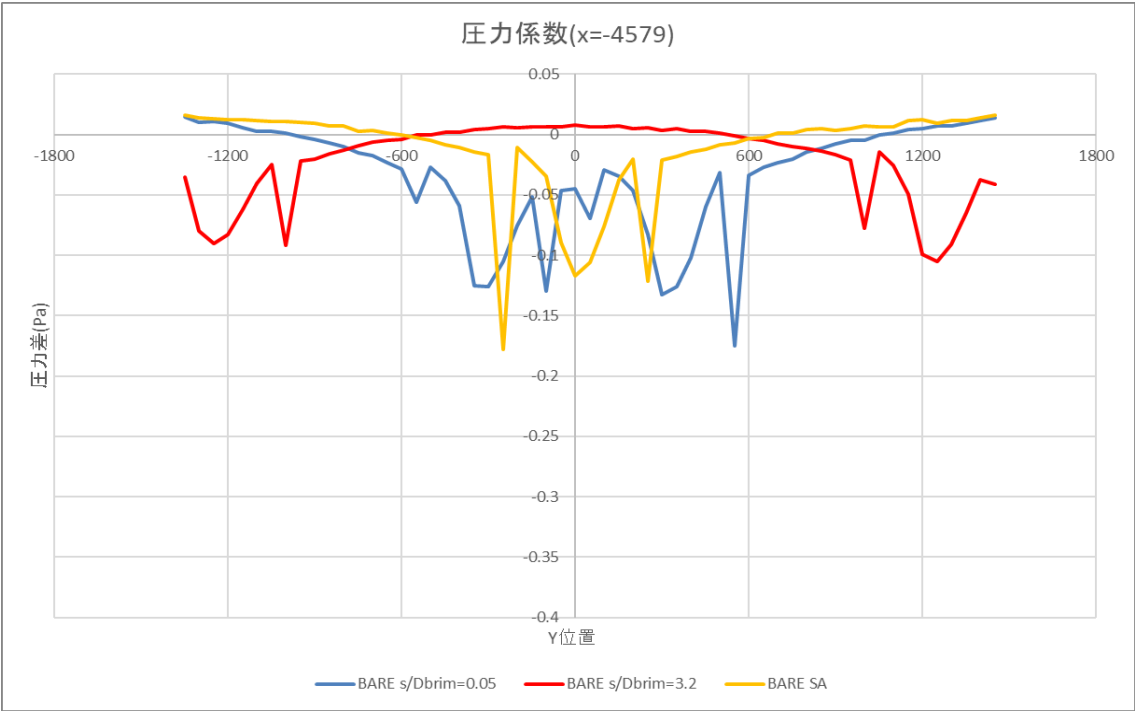
後方超音波主流方向無次元流速分布図

レンズ無 X=-4579 風車間隔比較

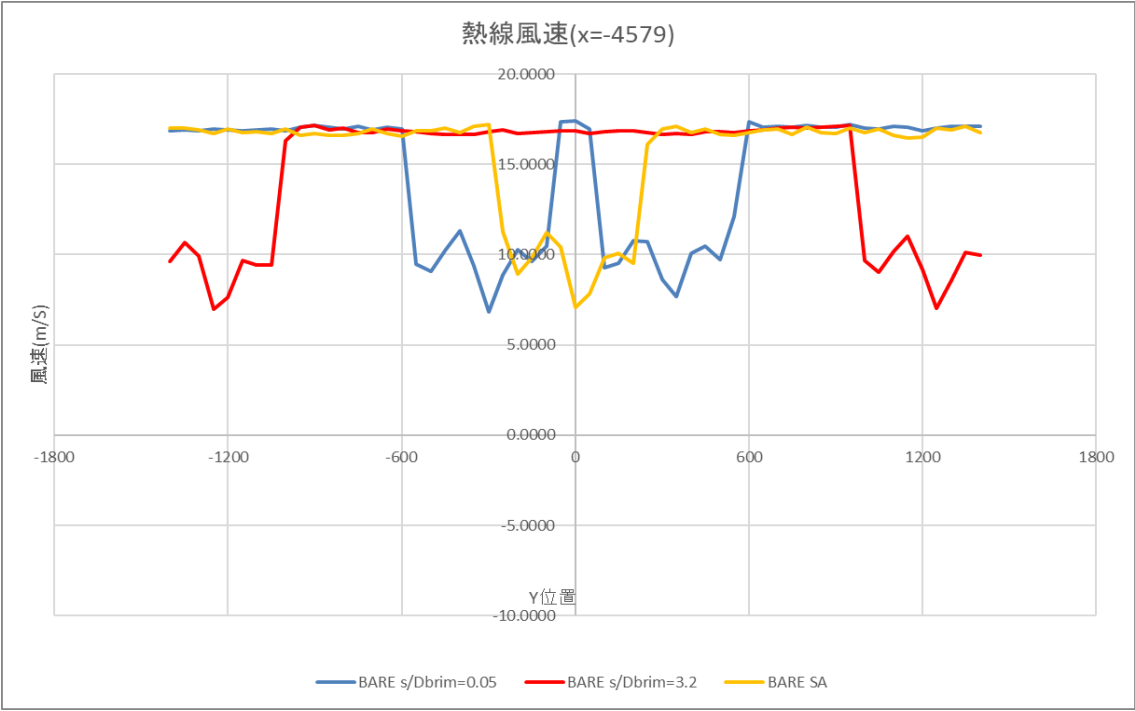
測定した圧力差プロファイルを図 4.170 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.171 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.172 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.173 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.174 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.175 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.176 に示す．



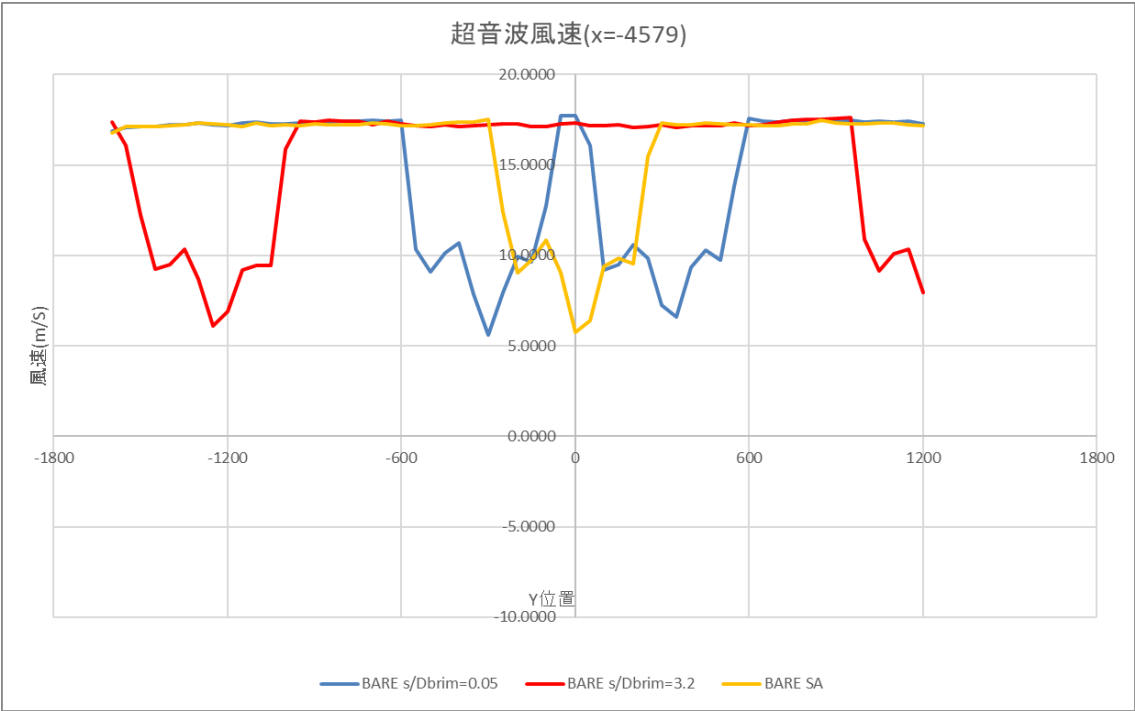
後方压力差分布图



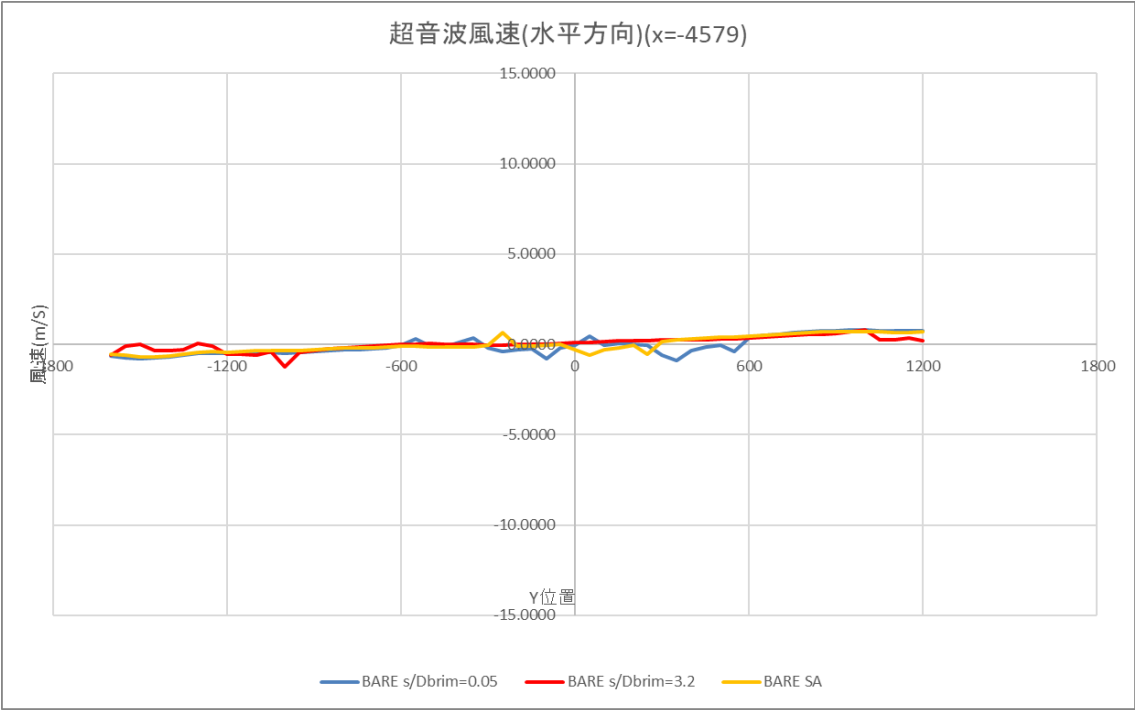
後方压力系数分布图



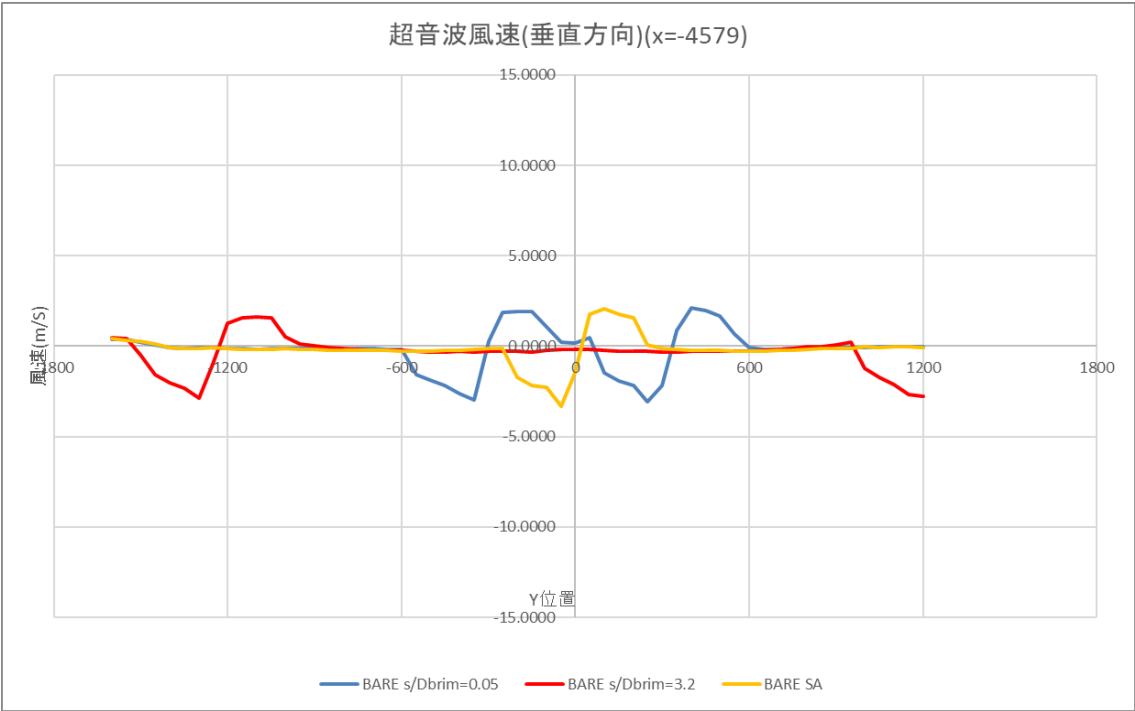
方熱線流速布図



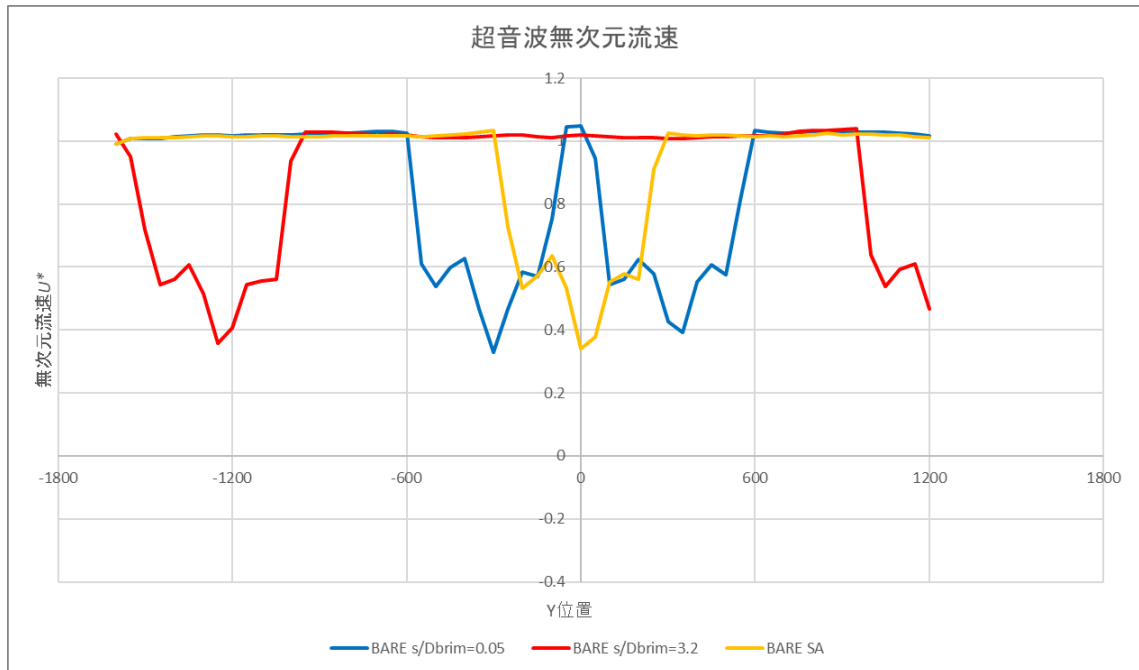
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



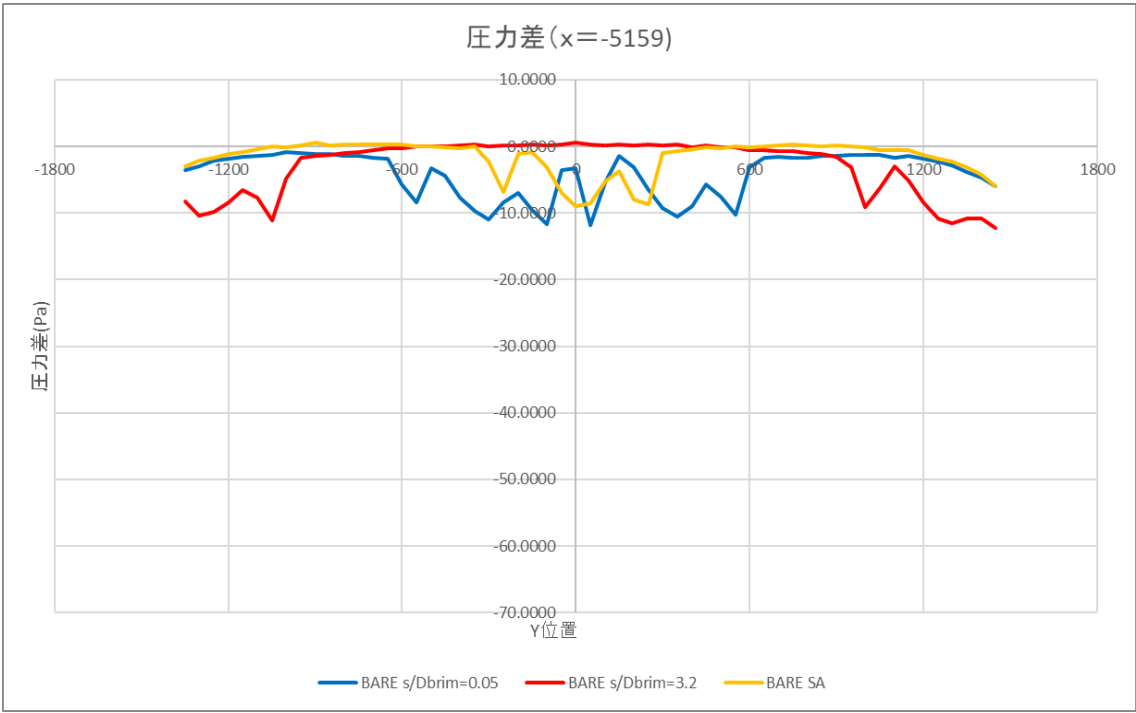
後方超音波鉛直方向流速分布図



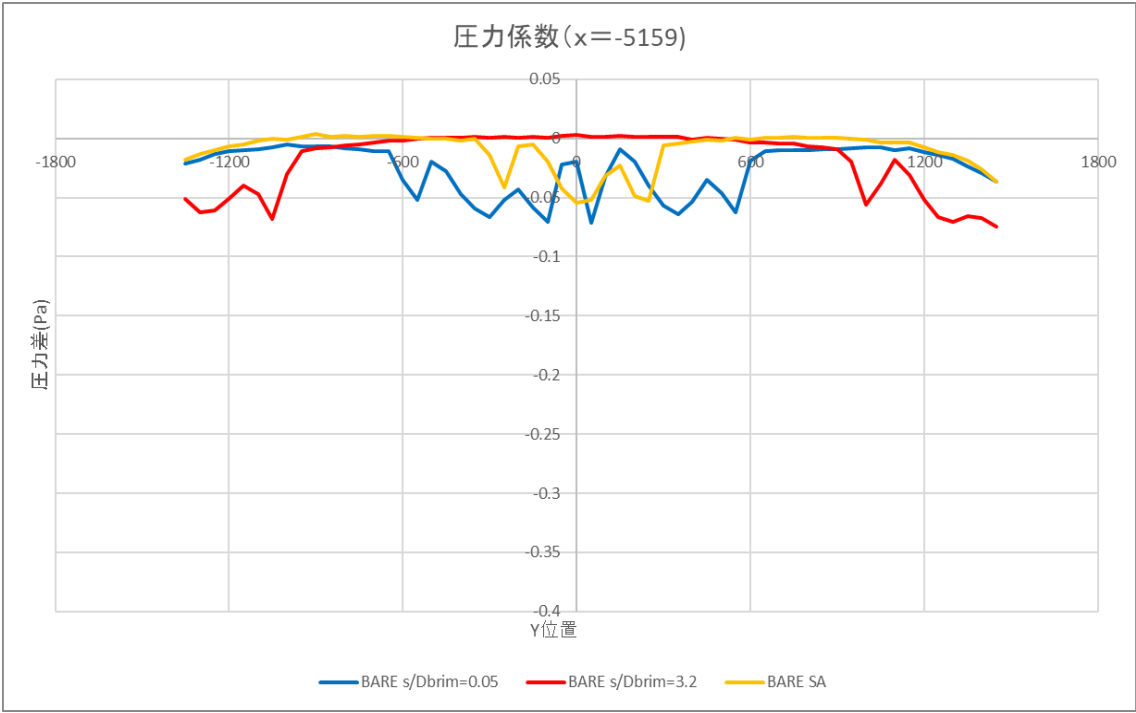
後方超音波主流方向無次元流速分布図

レンズ無 X=-5159 風車間隔比較

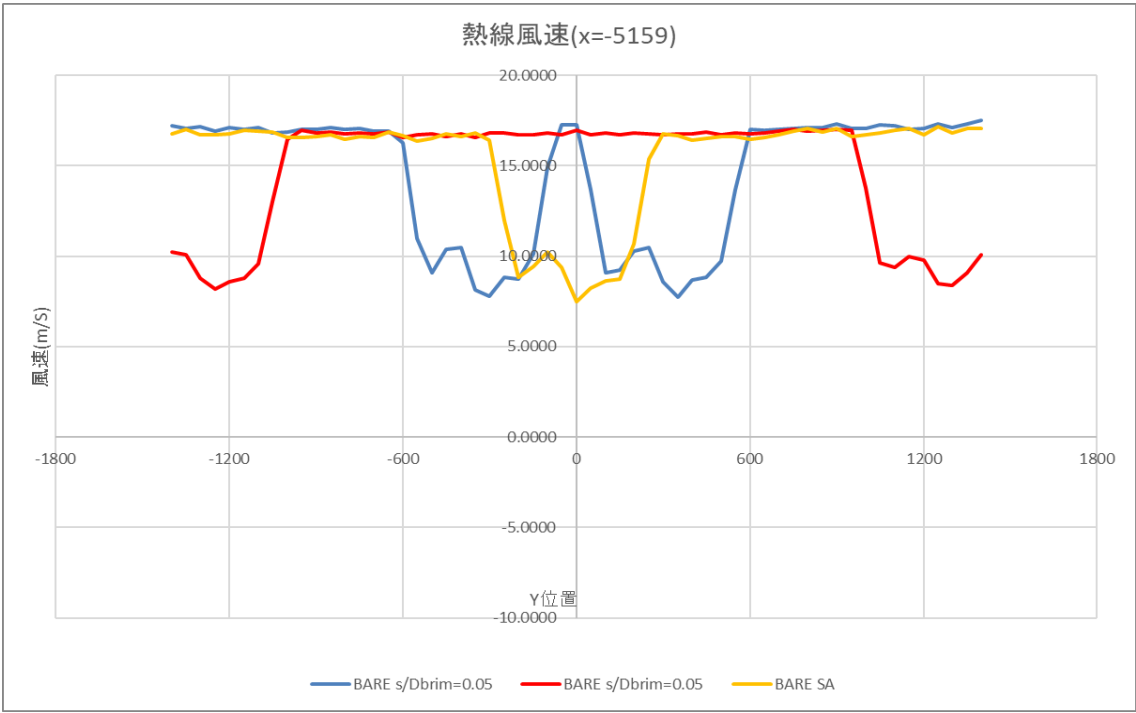
測定した圧力差プロファイルを図 4.177 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.178 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.179 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.180 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.181 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.182 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.183 に示す．



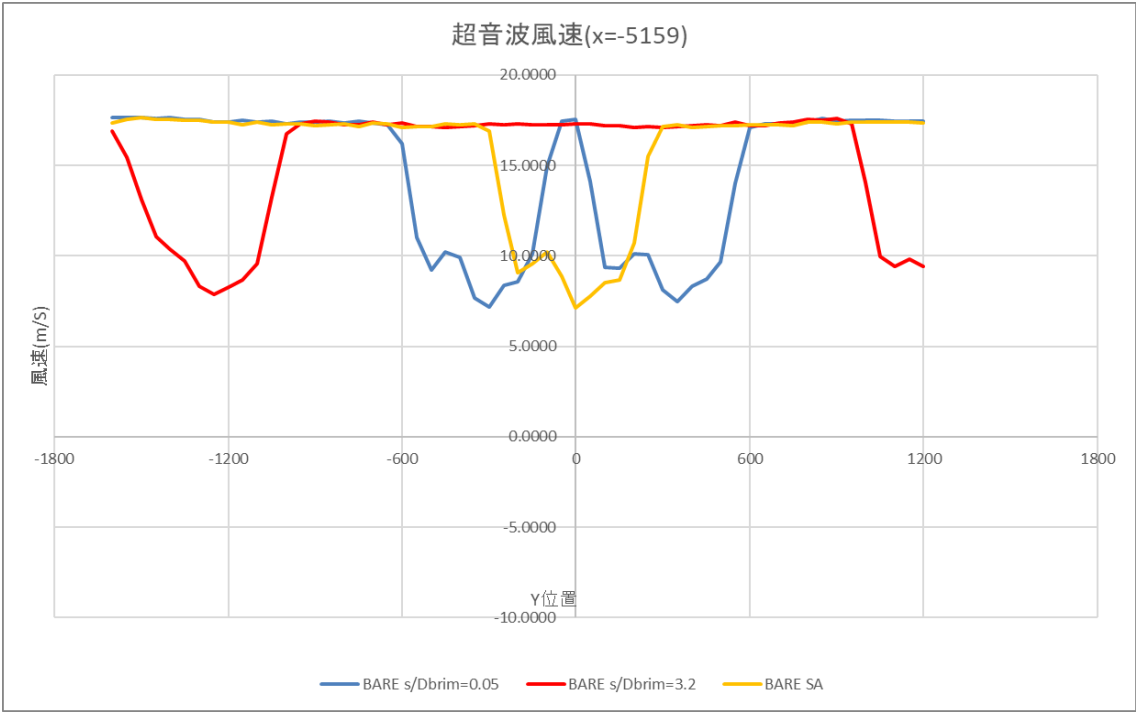
後方压力差分布图



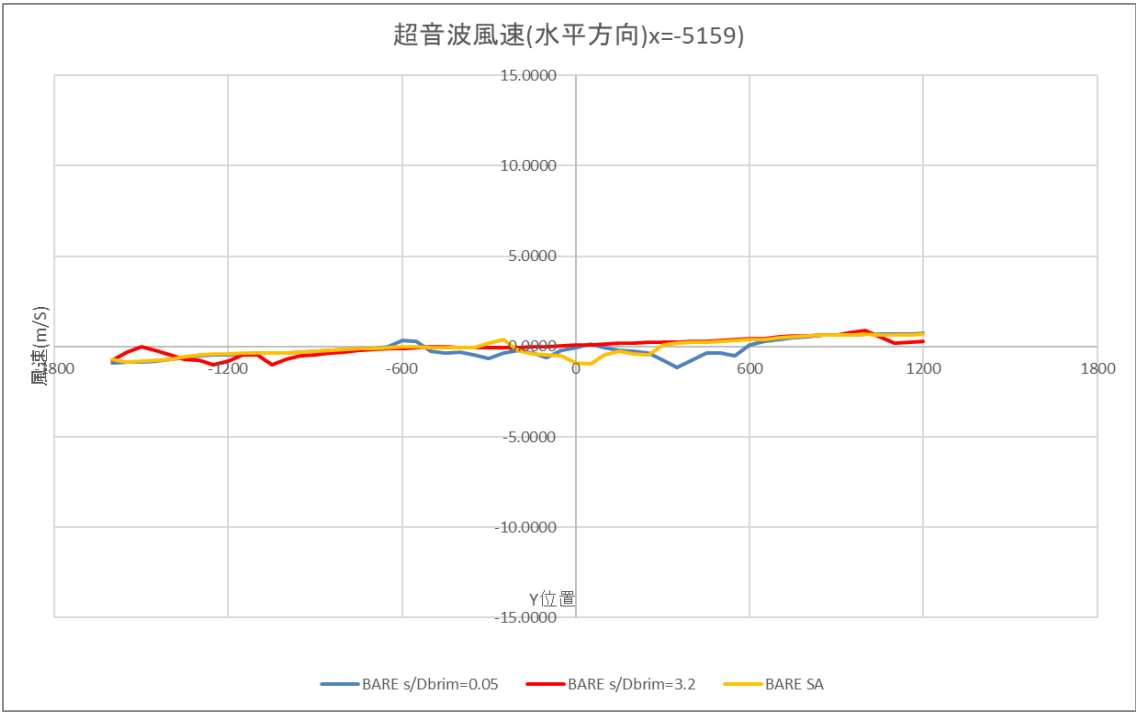
後方压力系数布图



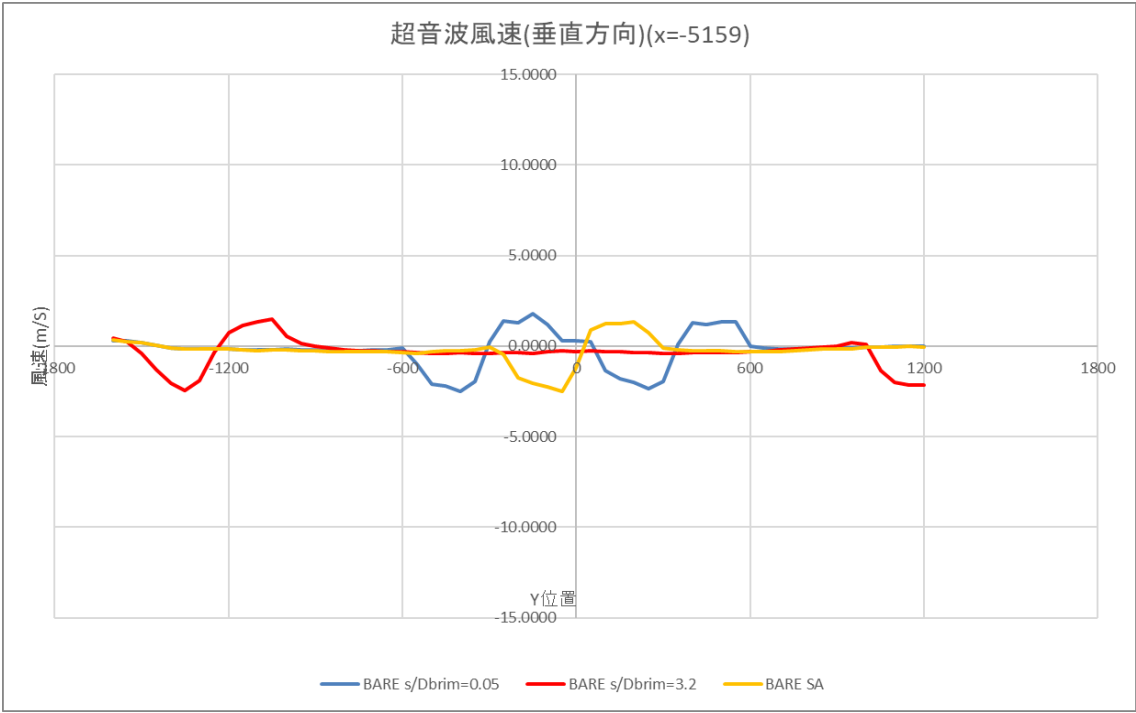
後方熱線流速布図



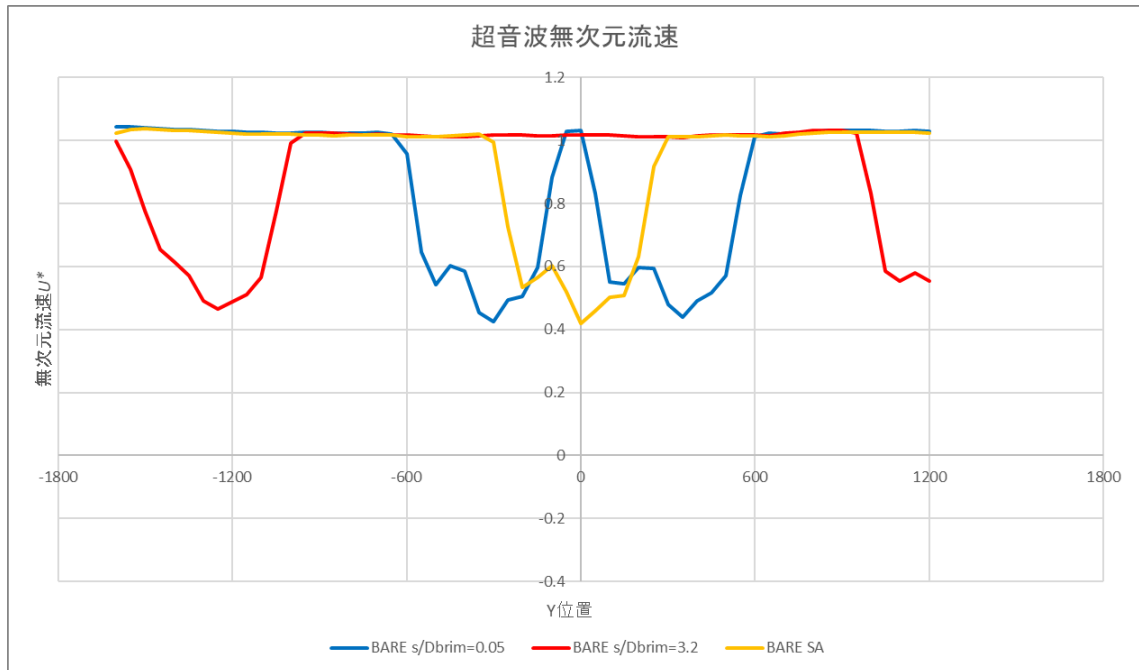
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



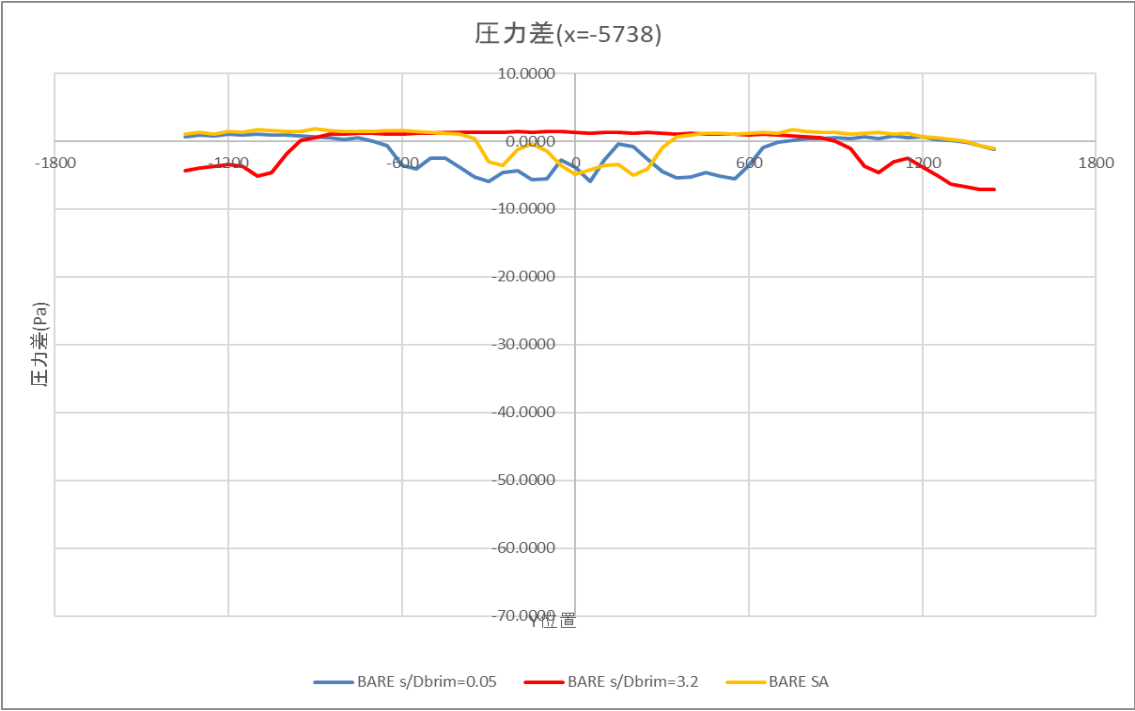
後方超音波鉛直方向流速分布図



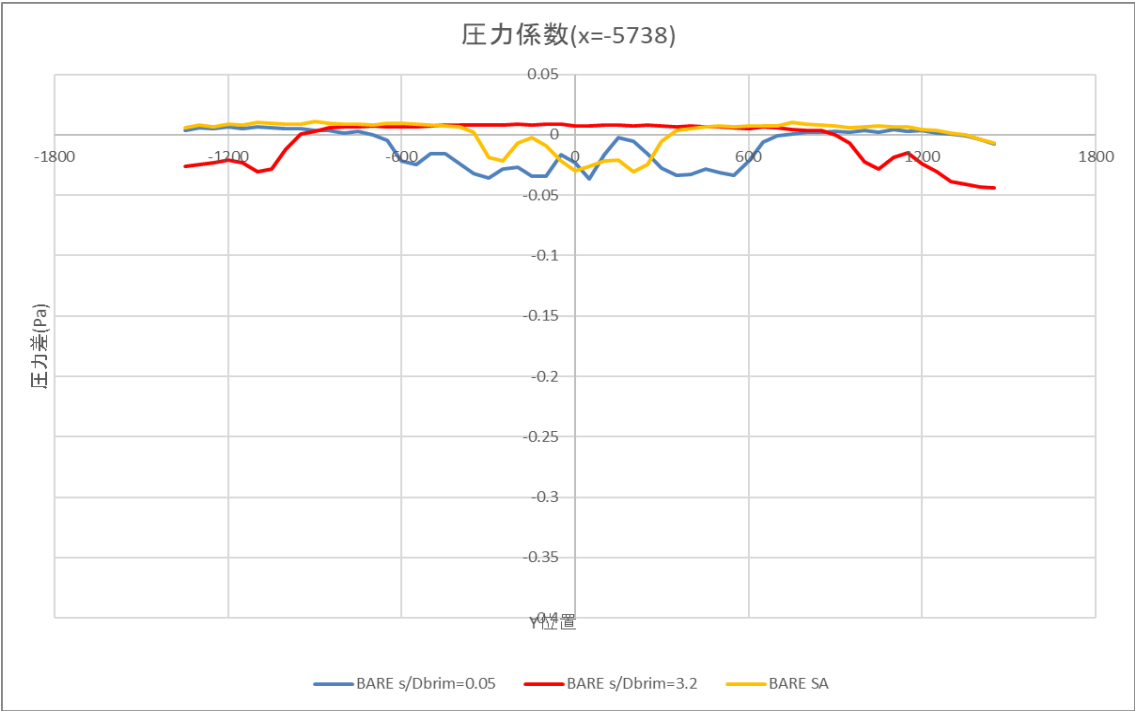
後方超音波主流方向無次元流速分布図

レンズ無 X=-5738 風車間隔比較

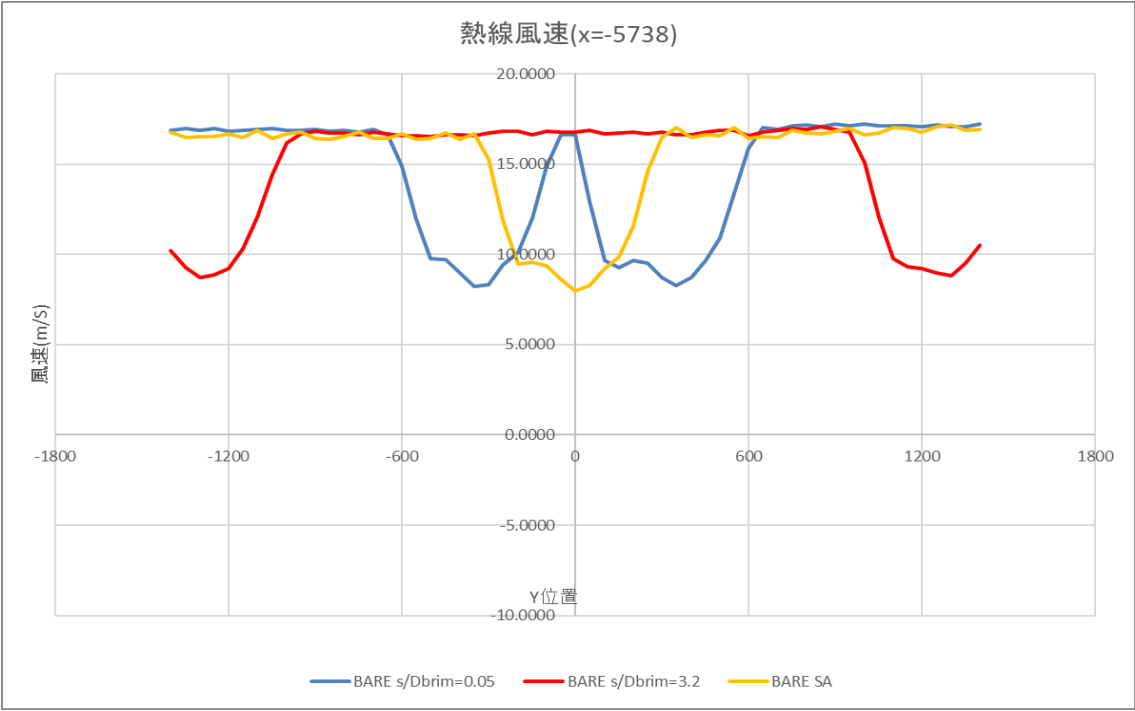
測定した圧力差プロファイルを図 4.184 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.185 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.186 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.187 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.188 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.189 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.190 に示す．



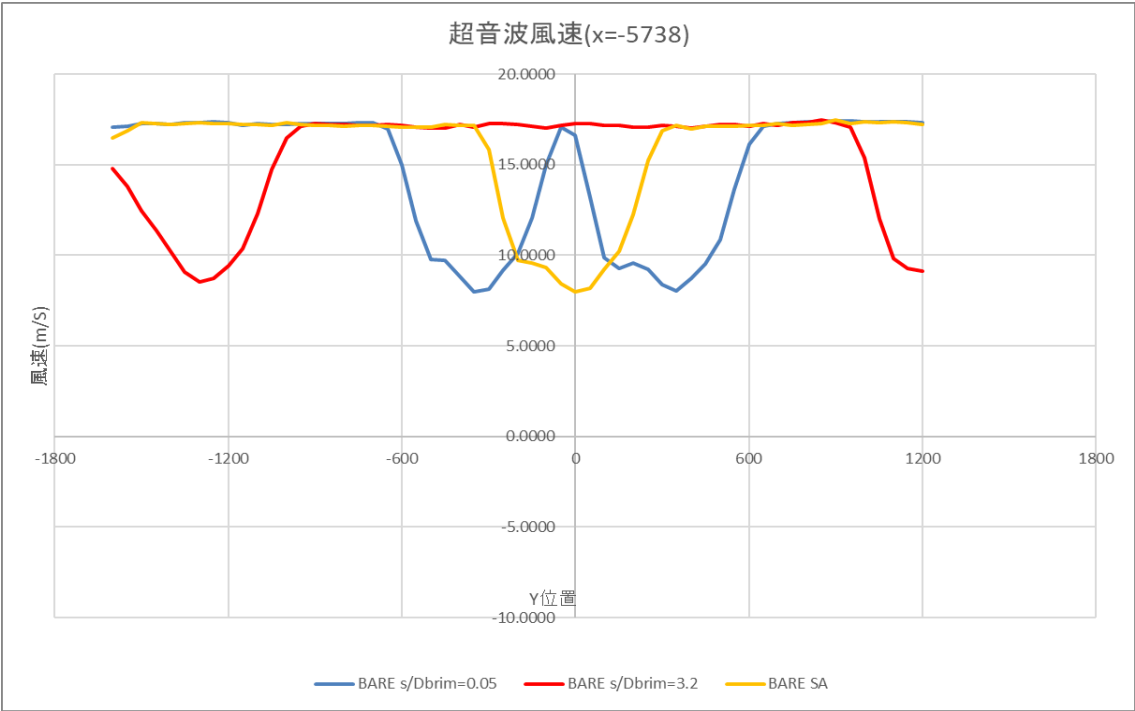
後方压力差分布图



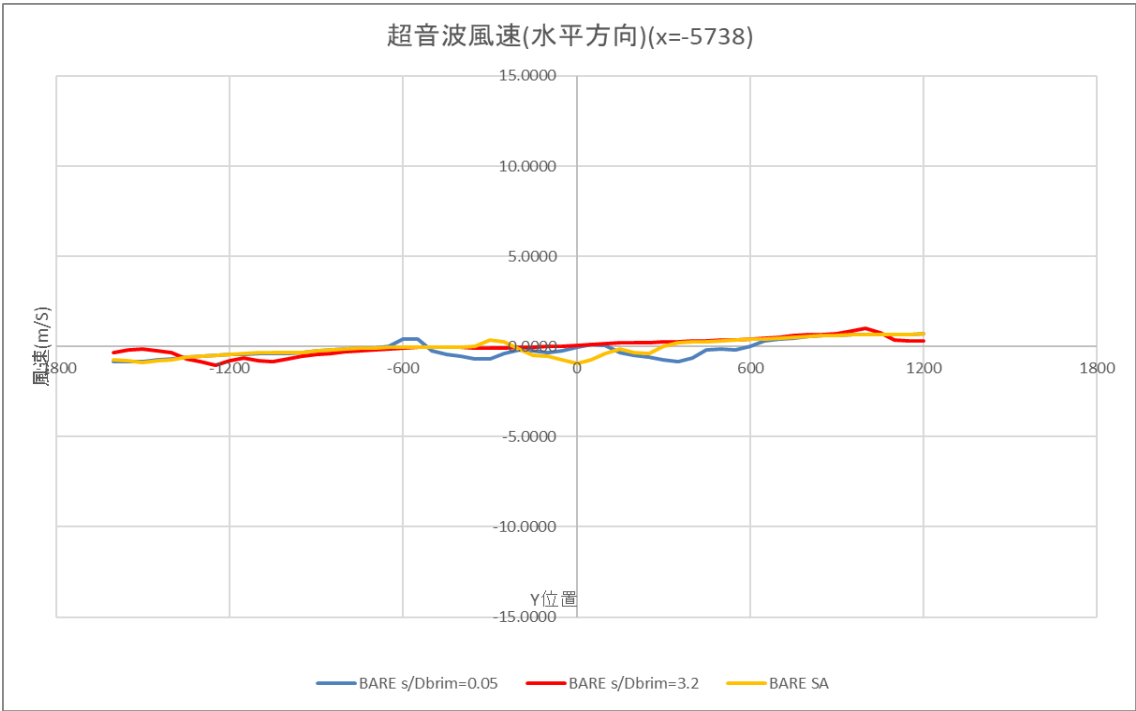
後方压力系数分布图



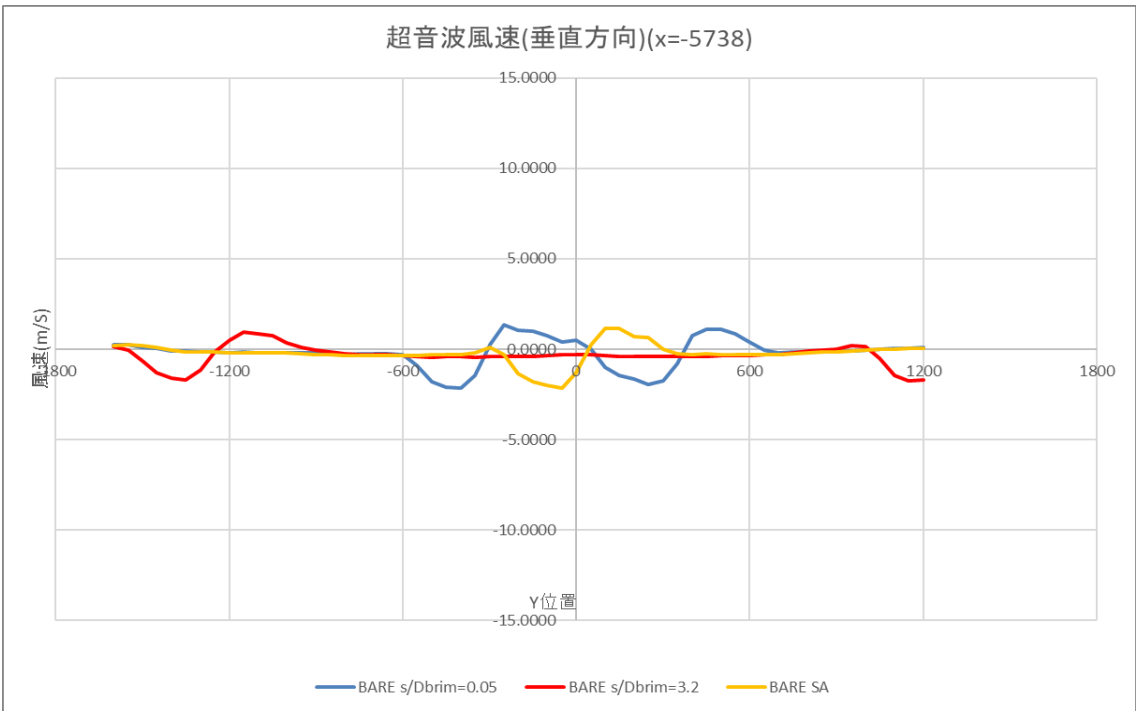
後方熱線流速布図



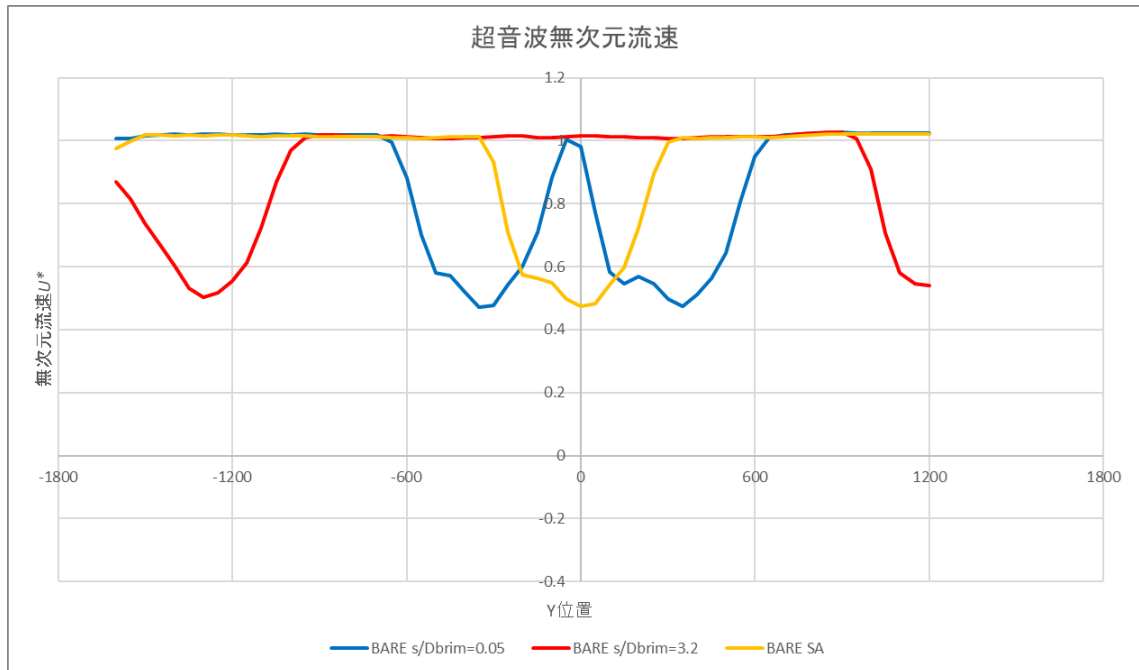
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



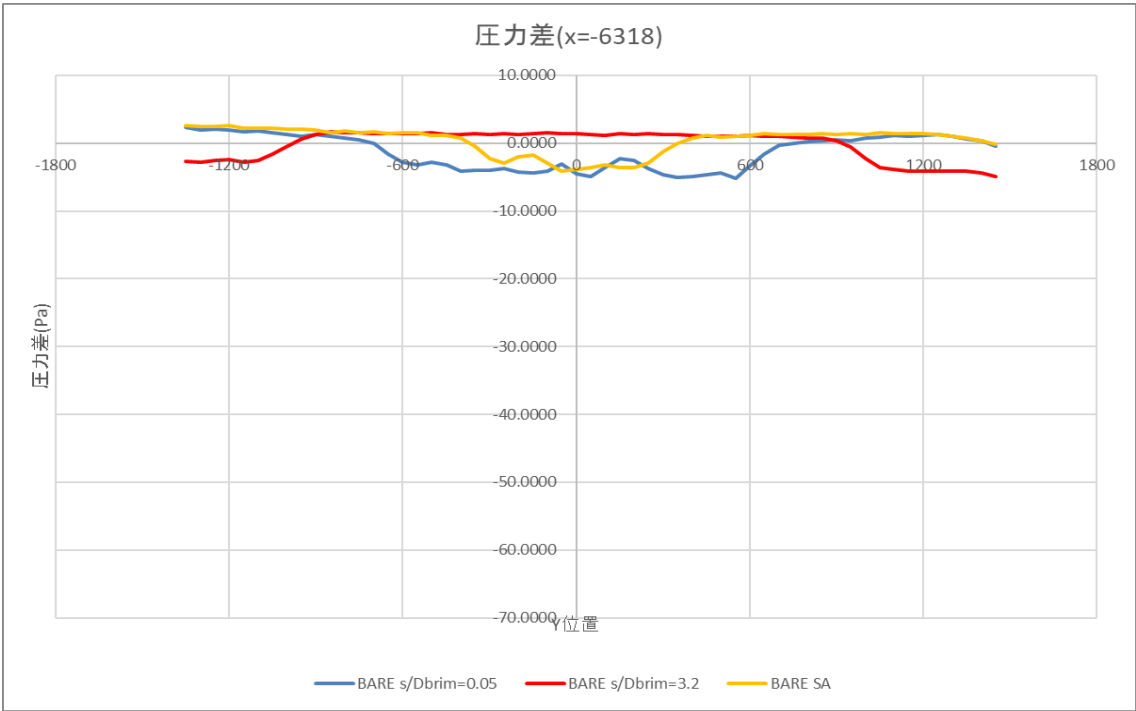
後方超音波鉛直方向流速分布図



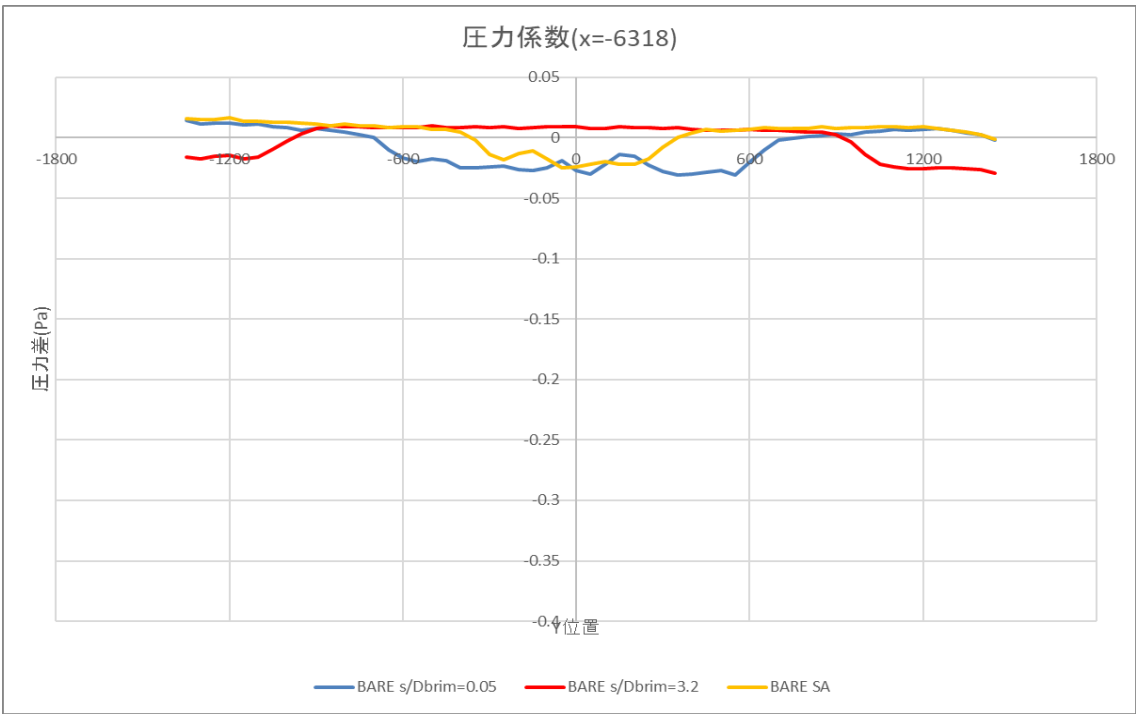
後方超音波主流方向無次元流速分布図

レンズ無 X=-6318 風車間隔比較

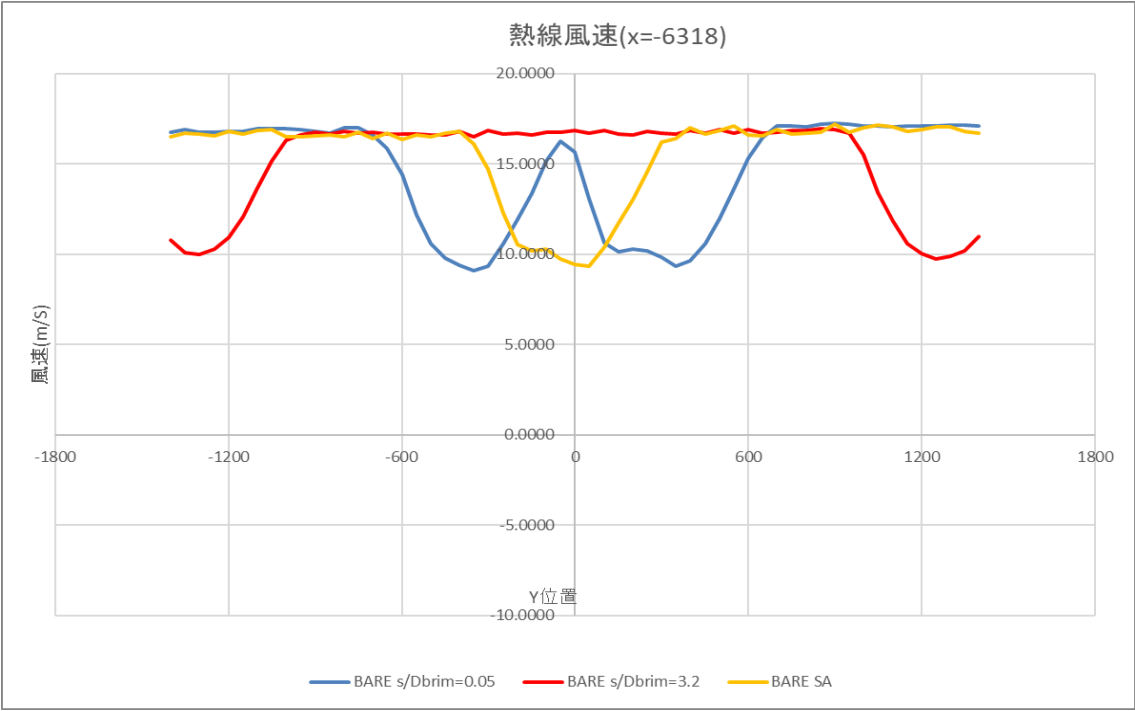
測定した圧力差プロファイルを図 4.191 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.192 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.193 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.194 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.195 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.196 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.197 に示す．



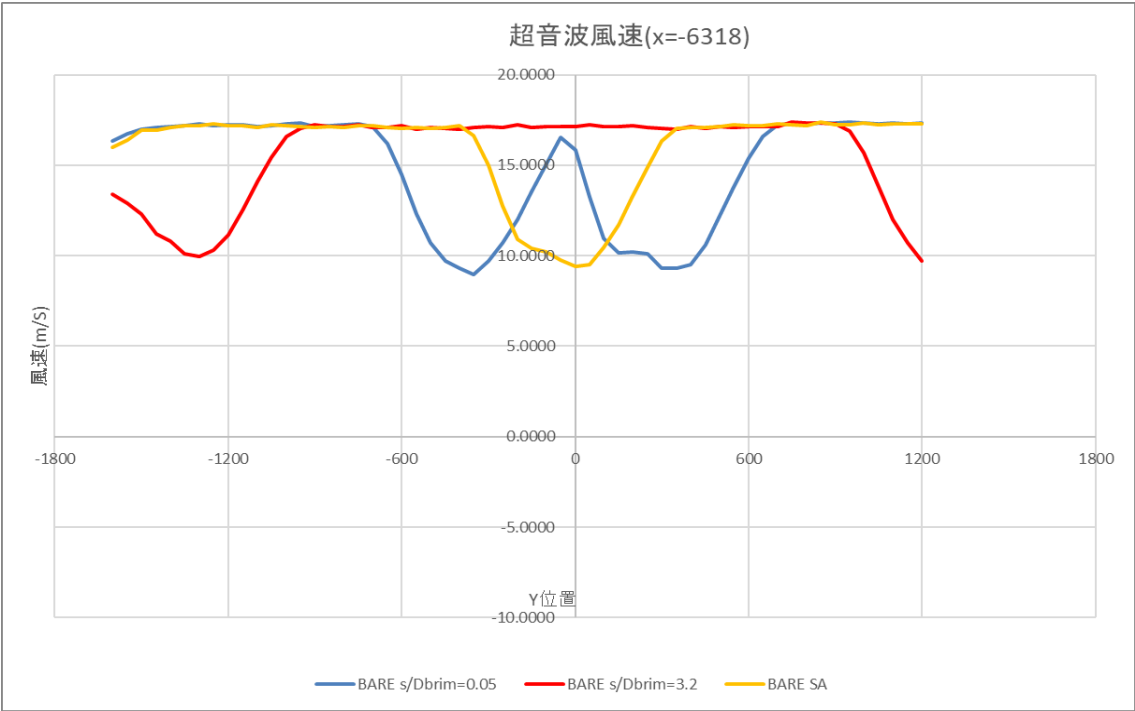
後方压力差分布图



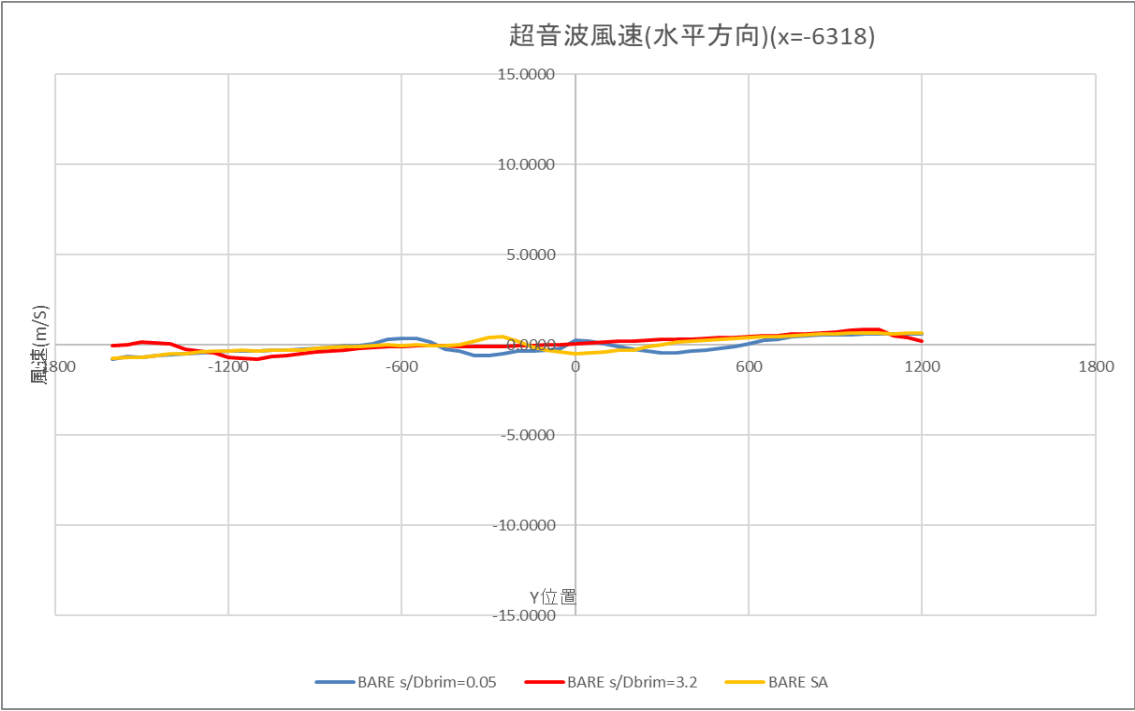
後方压力系数分布图



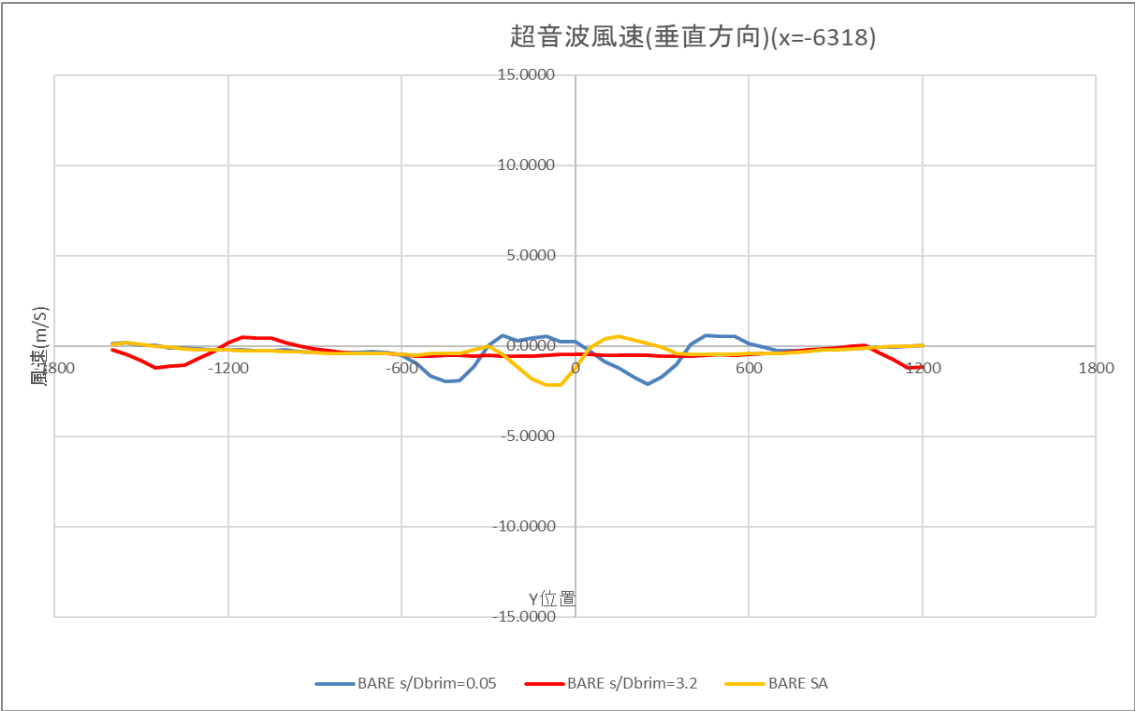
後方熱線流速布図



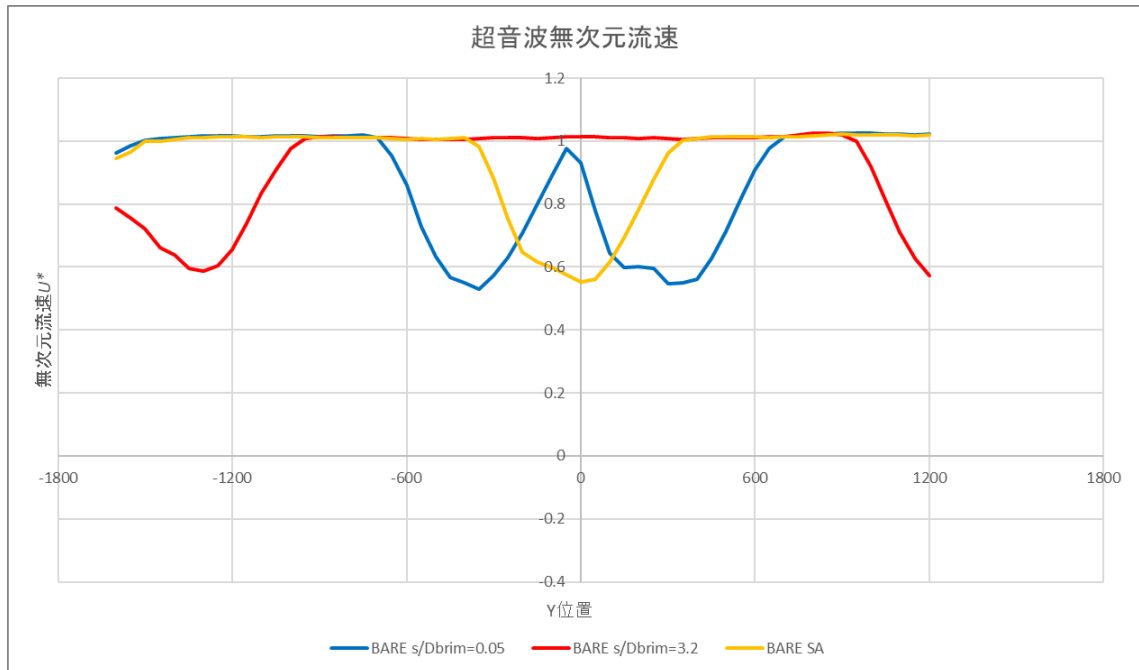
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



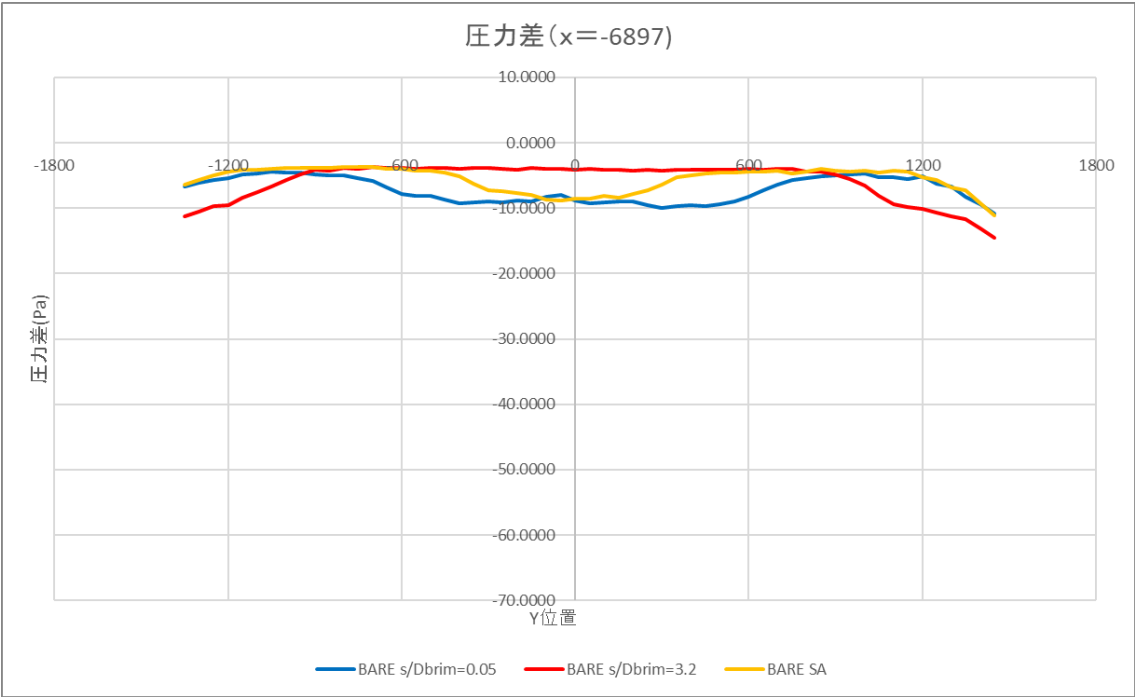
後方超音波鉛直方向流速分布図



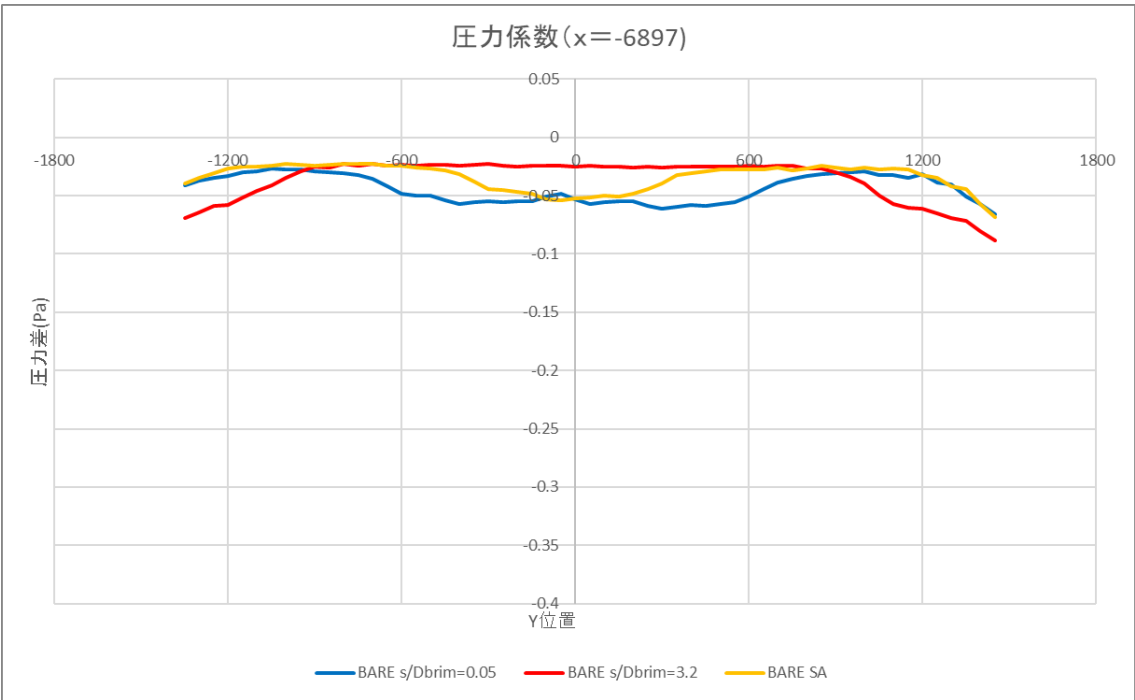
後方超音波主流方向無次元流速分布図

レンズ無 X=-6897 風車間隔比較

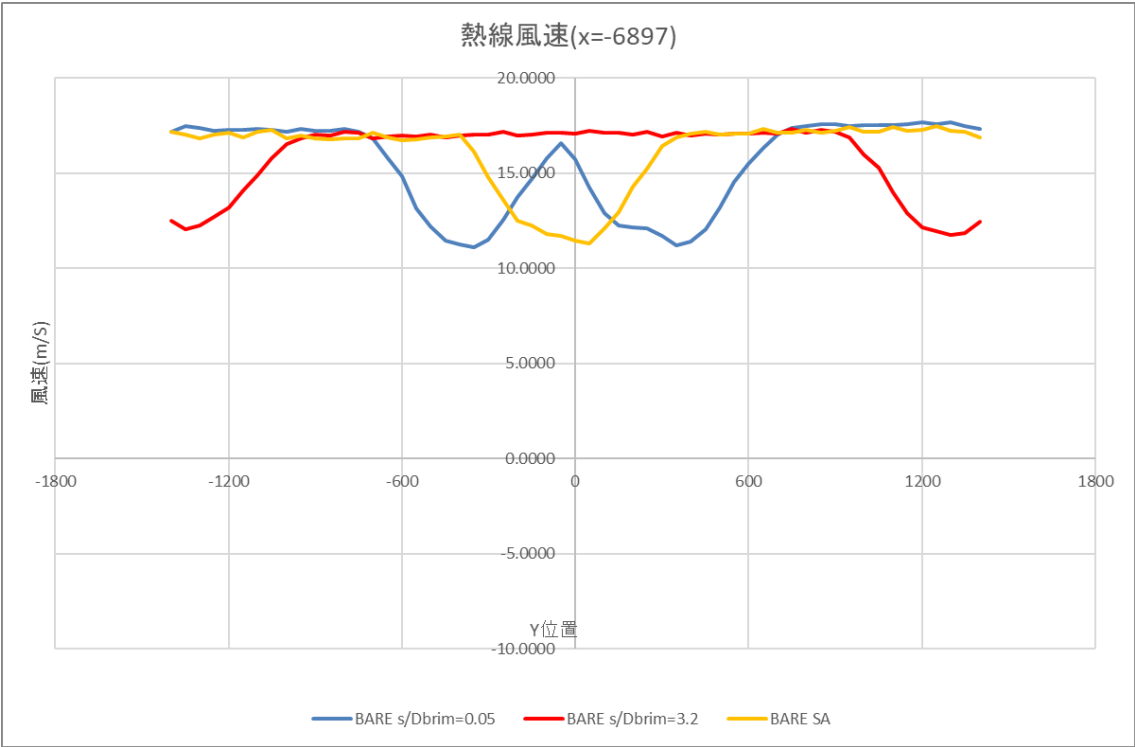
測定した圧力差プロファイルを図 4.198 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.199 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.200 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.201 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.202 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.203 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.204 に示す．



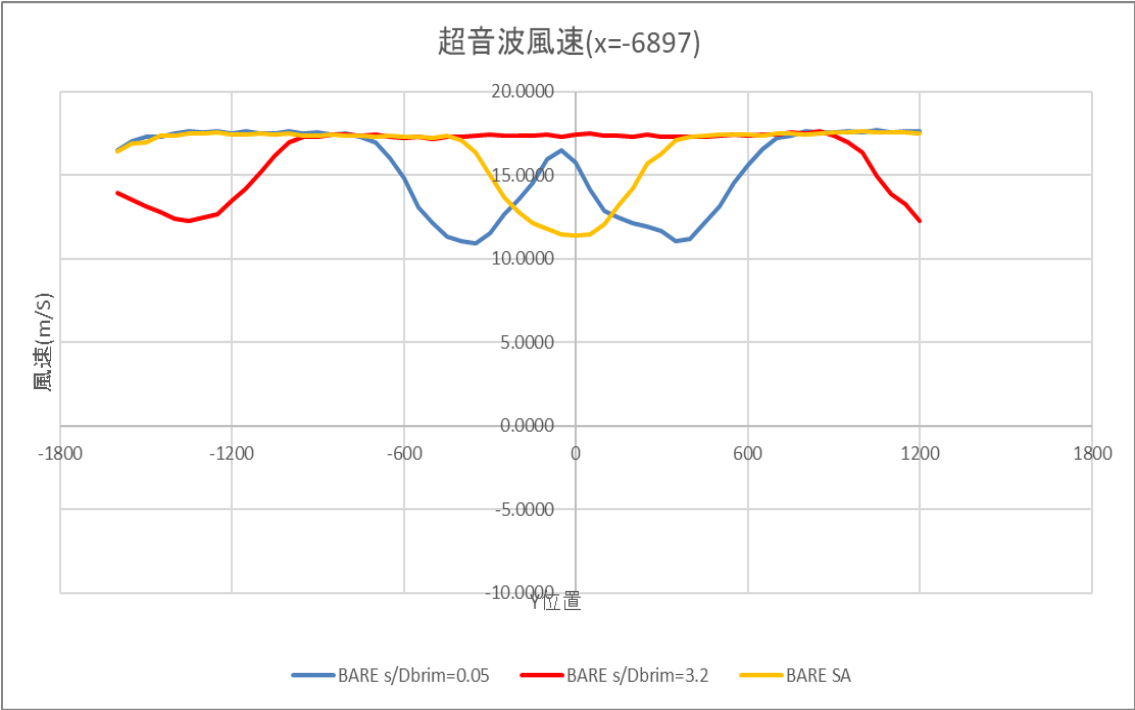
後方压力差分布图



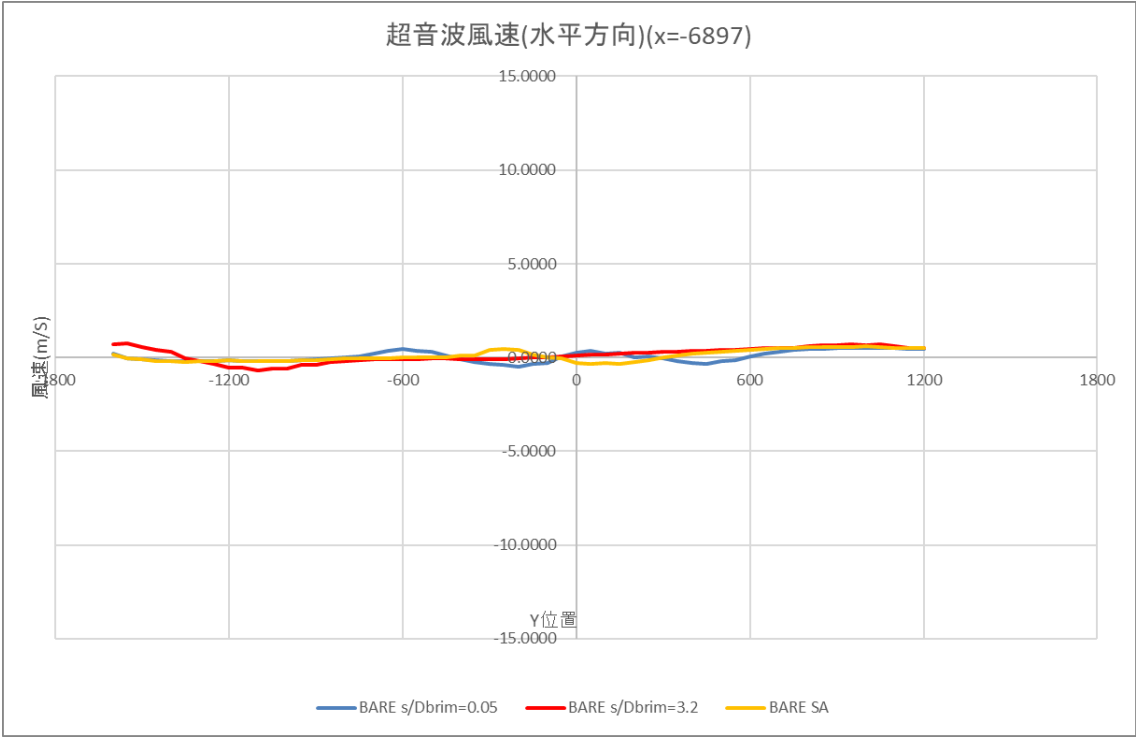
後方压力系数分布图



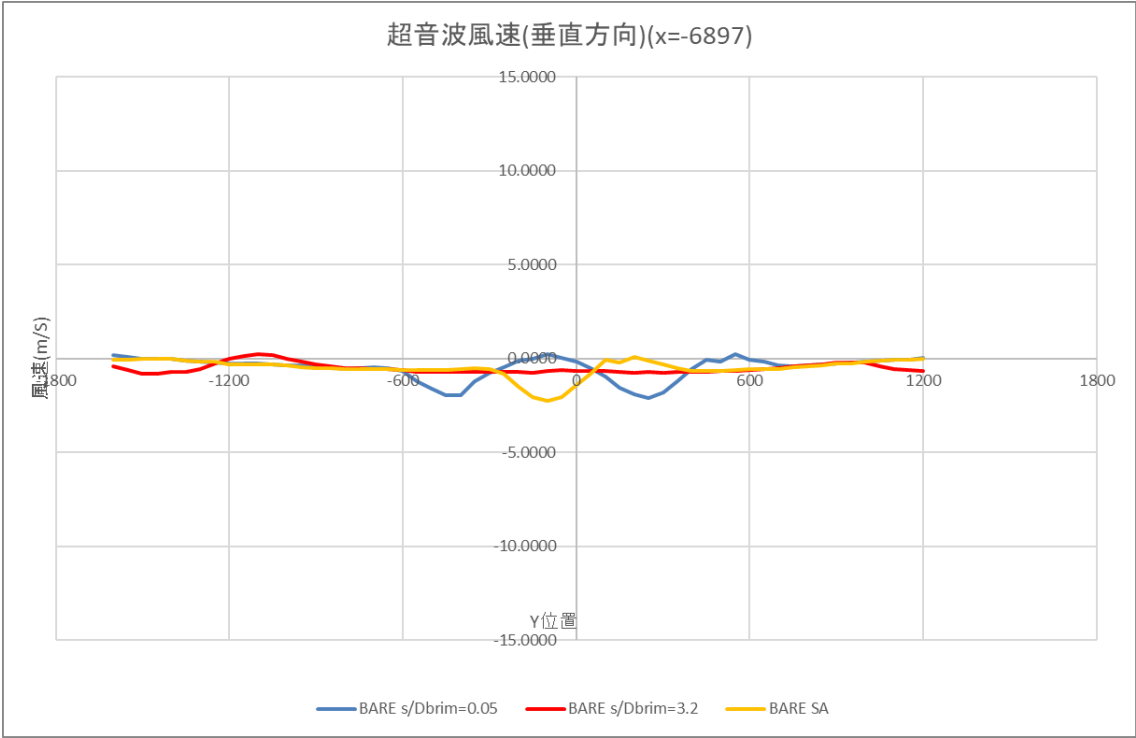
後方熱線流速分布図



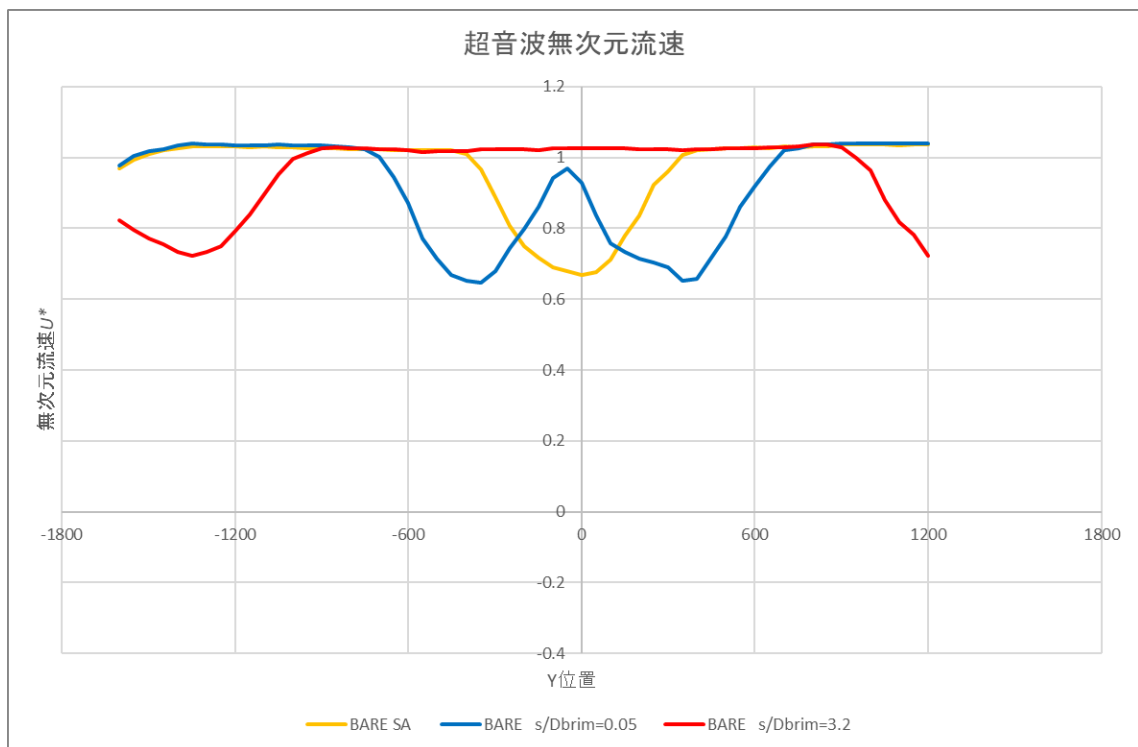
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



後方超音波鉛直方向流速分布図



後方超音波主流方向無次元流速分布図

考察

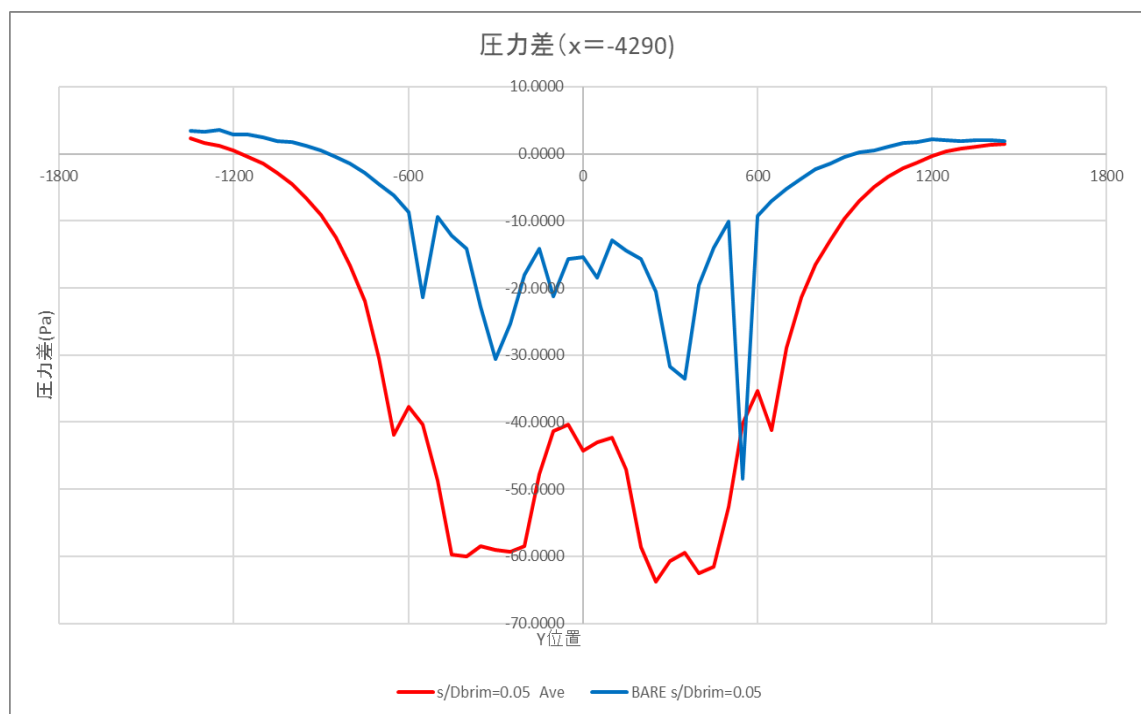
図 4.121 に着目してみると，風車間隔を狭めていくほど風車後方の圧力が低下していることが分かる．この風車後方圧力の低下が風車出力の増加へと繋がったと考えられる．

図 127, 134, 141, 148, 155, 162 に着目すると風車間隔を狭めた $s/D_{brim}=0.05$ では後方に行くにつれ風車後流が一体化し，減速域が大きく，また風速の回復が遅れていることが分かる．

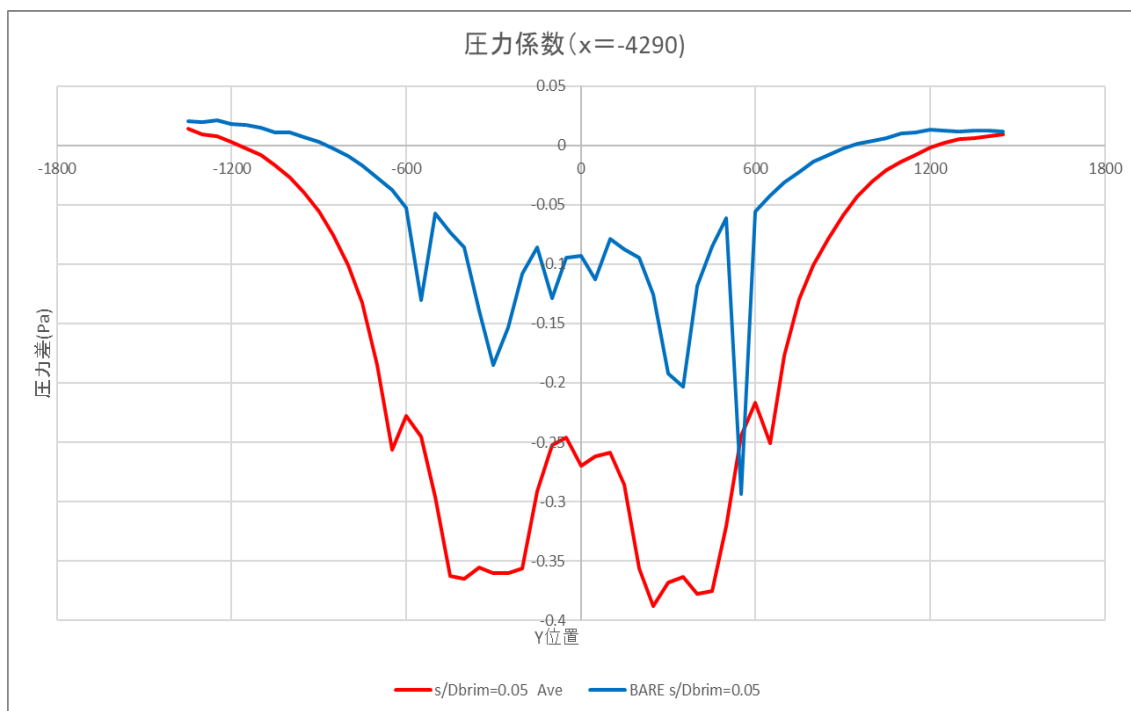
A-3 風車後流のレンズ有無による比較

$s/D_{brim}=0.05$ $X=-4290$ レンズ有無比較

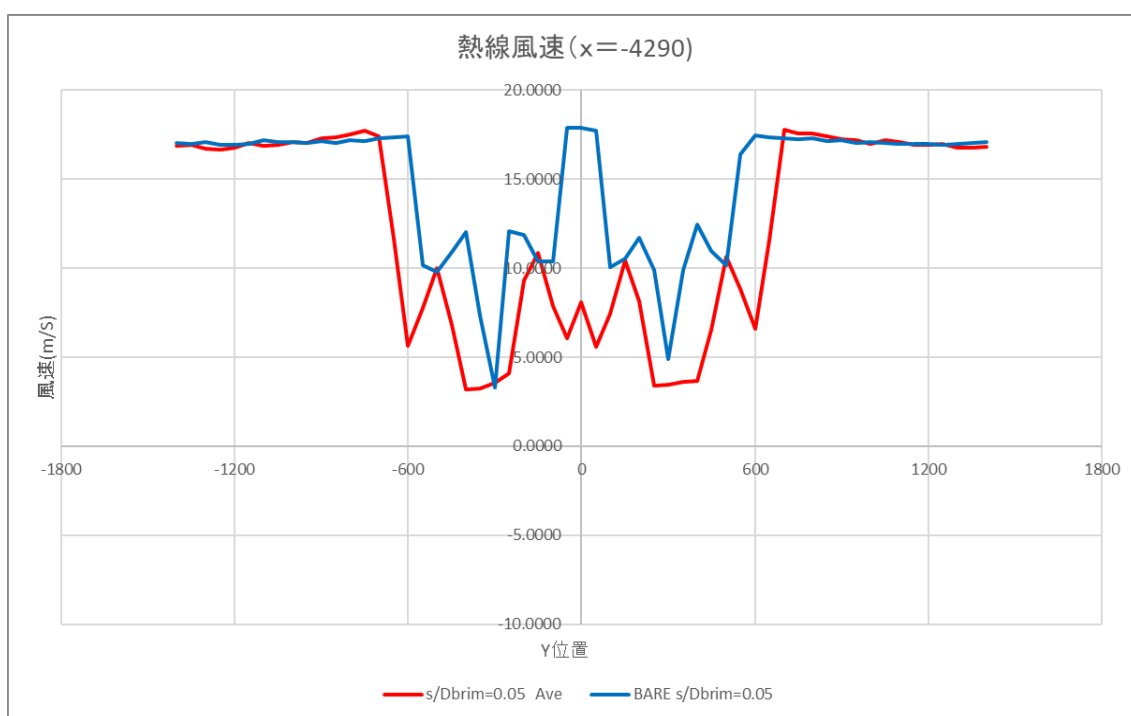
レンズ有の $s/D_{brim}=0.05$ では2回測定したため、平均値を使用している。測定した圧力差プロファイルを図 4.204 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.205 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.206 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.207 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.208 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.209 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.210 に示す。



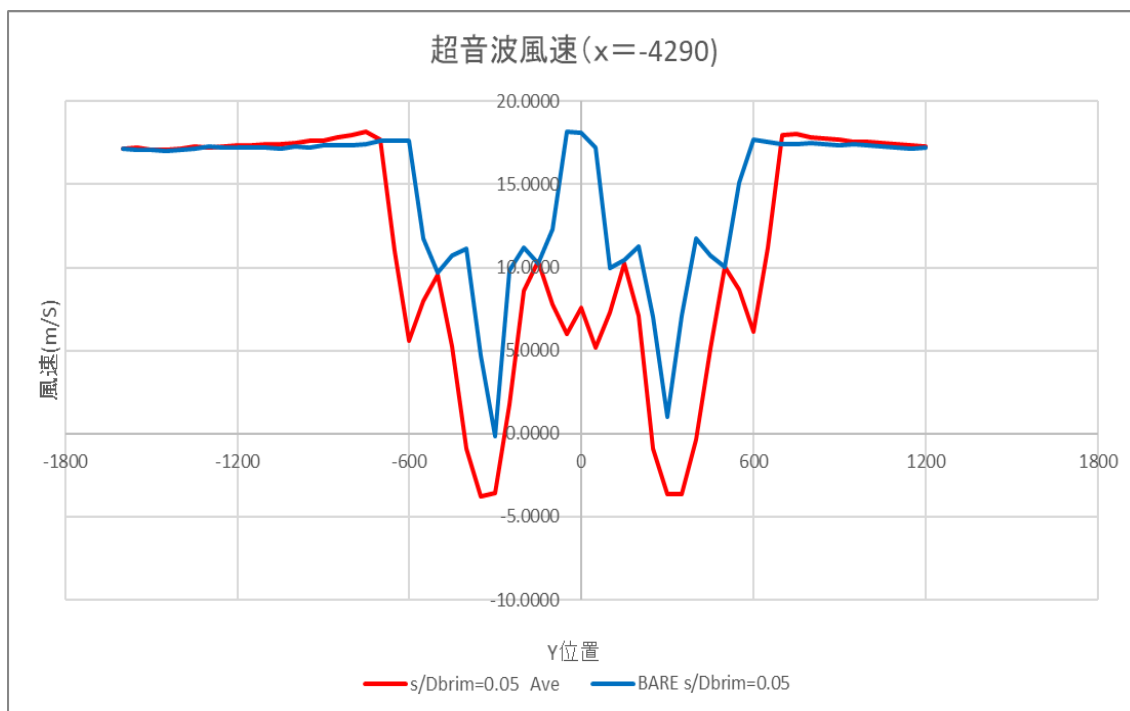
後方圧力差分布図



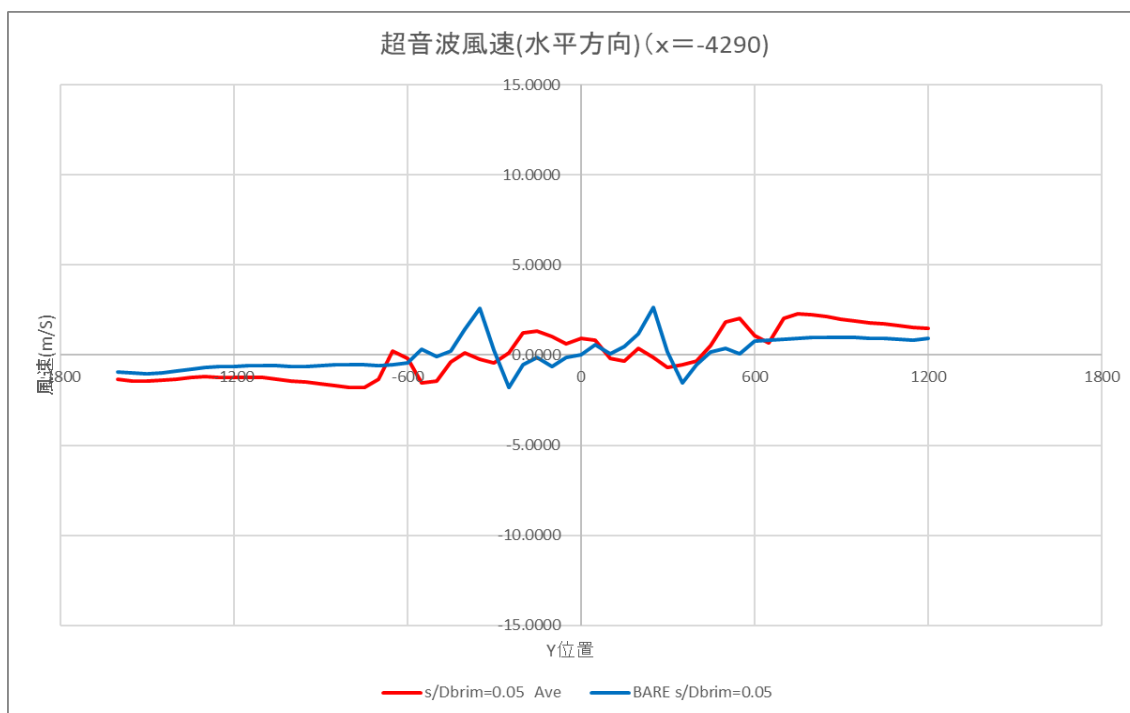
後方压力係数布図



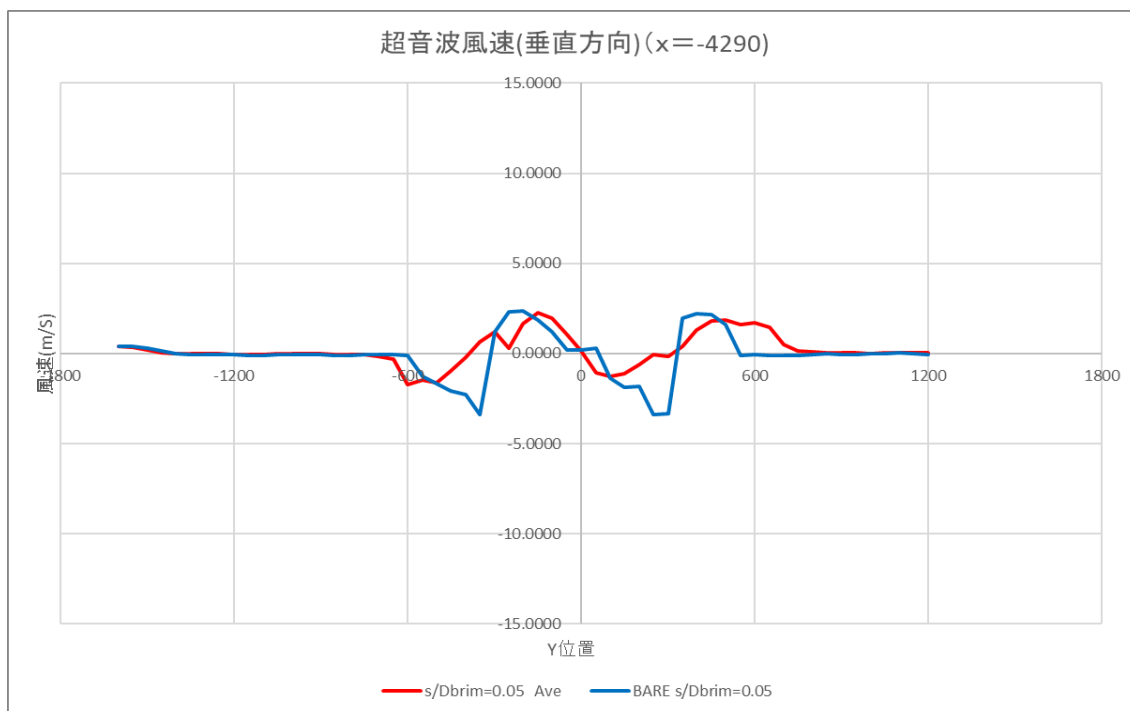
後方熱線流速布図



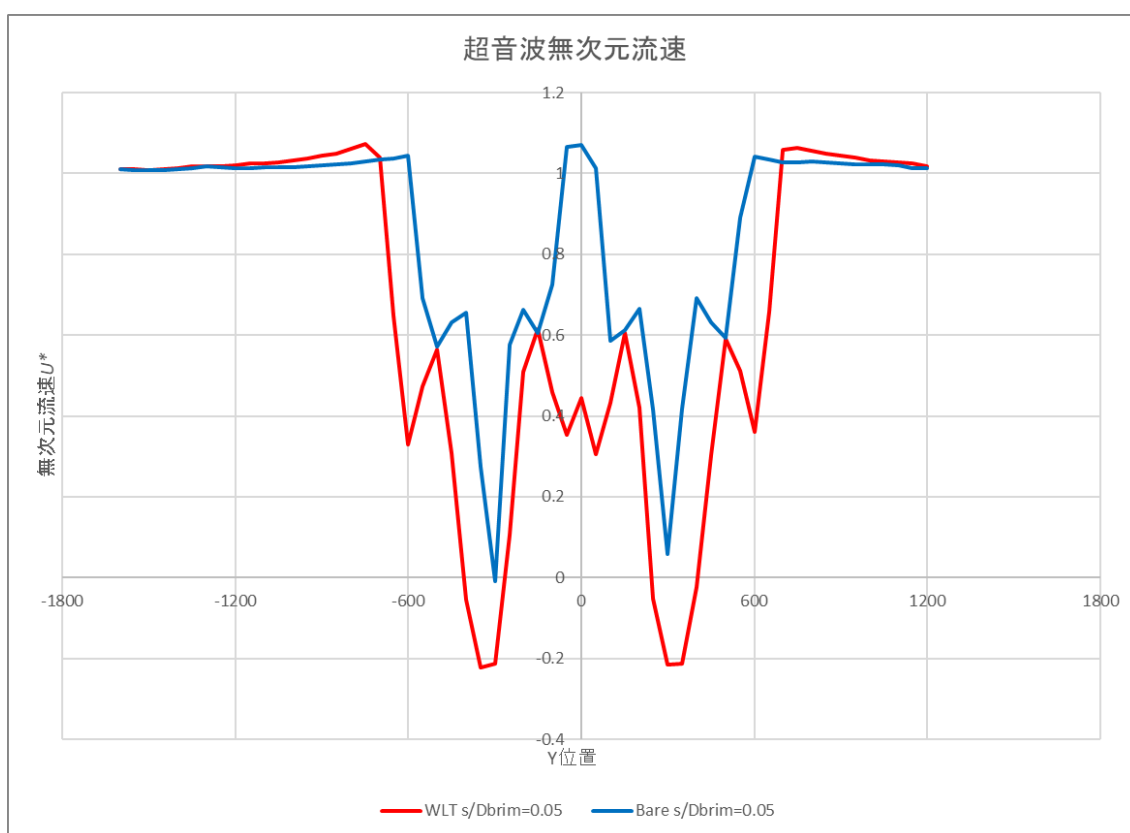
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



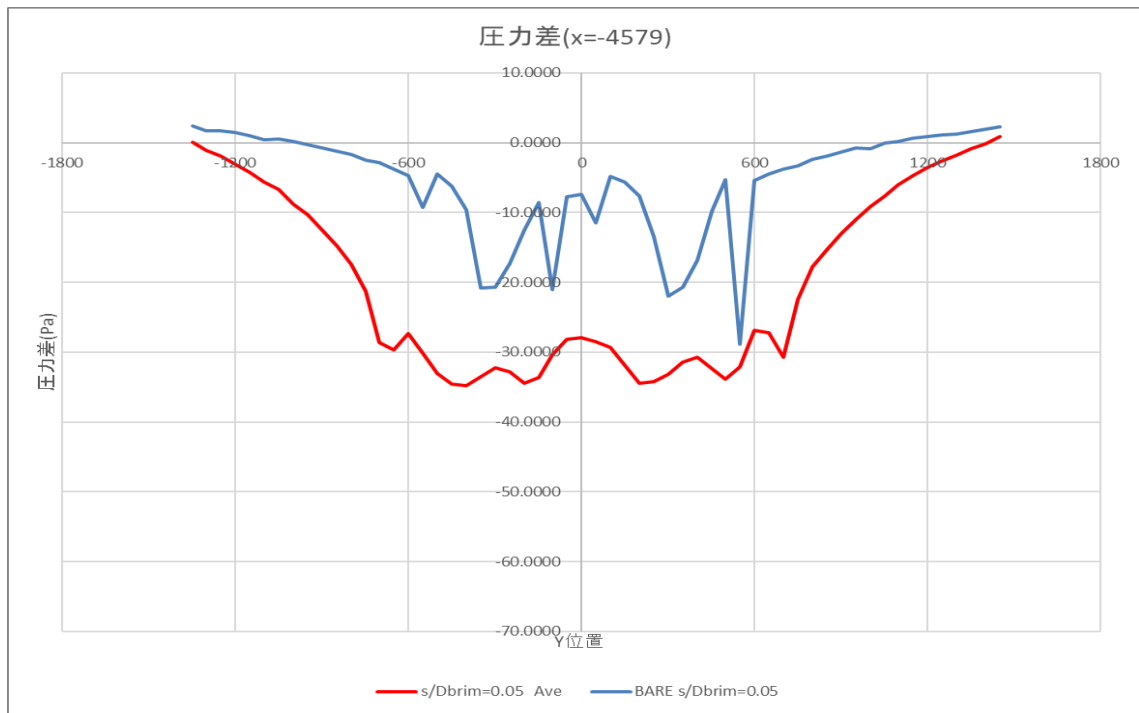
後方超音波鉛直方向流速分布図



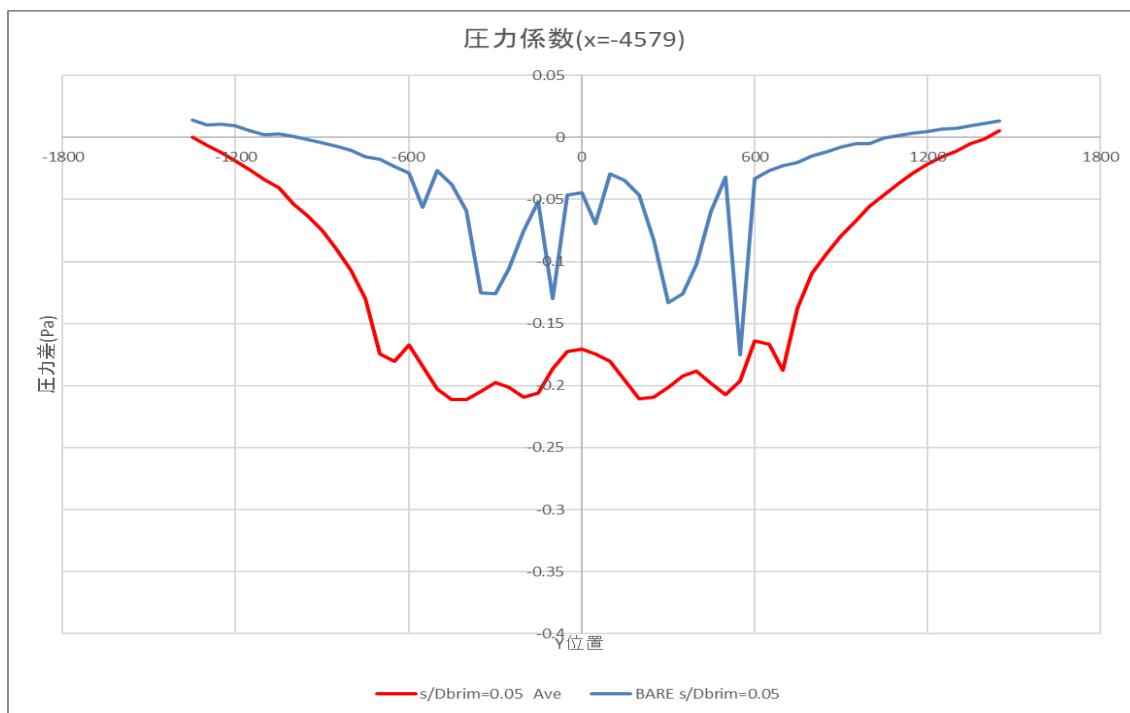
後方超音波主流方向無次元流速分布図

$s/D_{brim}=0.05$ $X=-4579$ レンズ有無比較

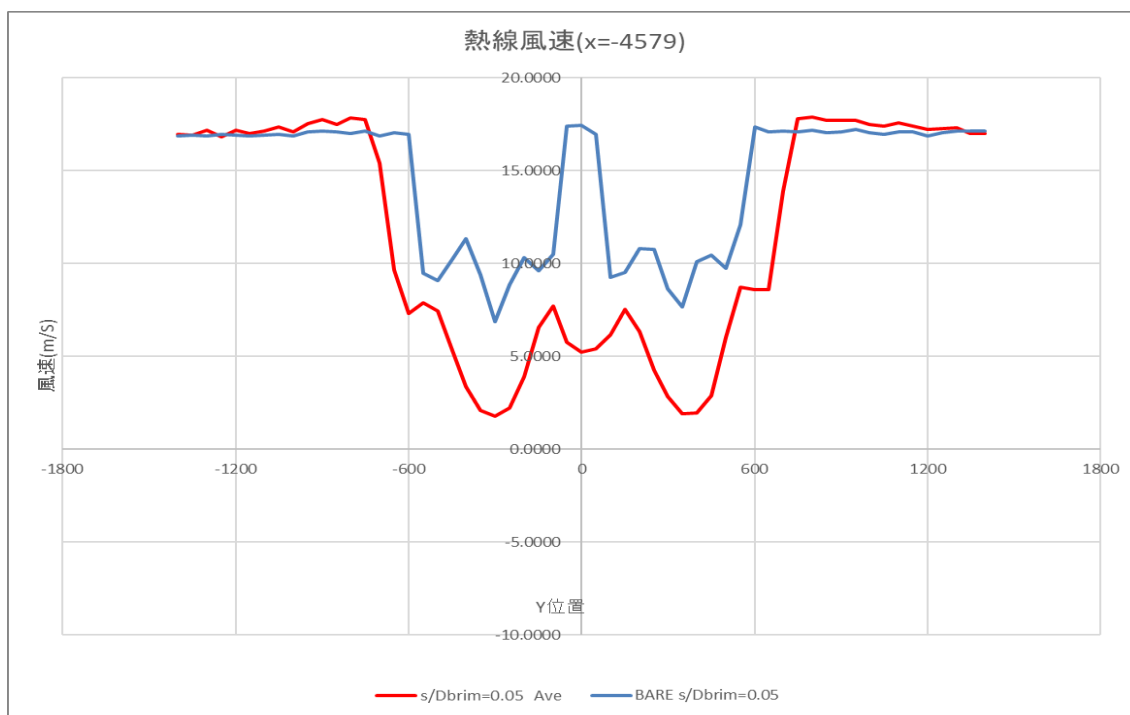
レンズ有の $s/D_{brim}=0.05$ では2回測定したため、平均値を使用している。測定した圧力差プロファイルを図 4.211 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.212 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.213 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.214 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.215 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.216 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.217 に示す。



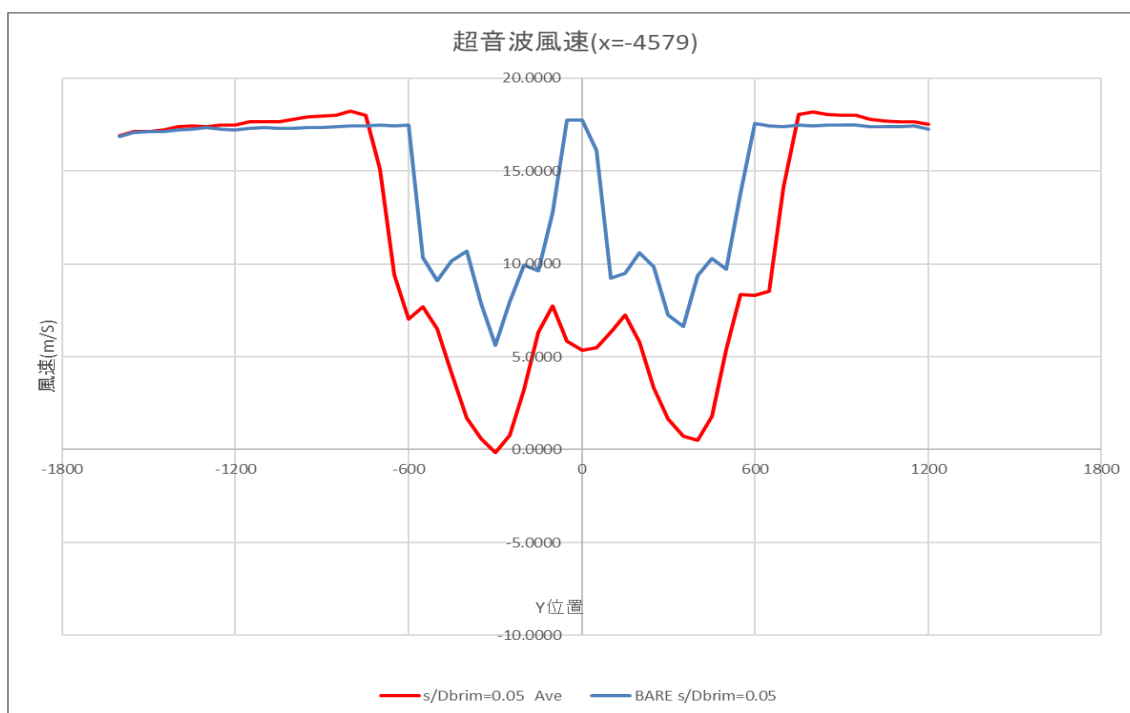
後方圧力差分布図



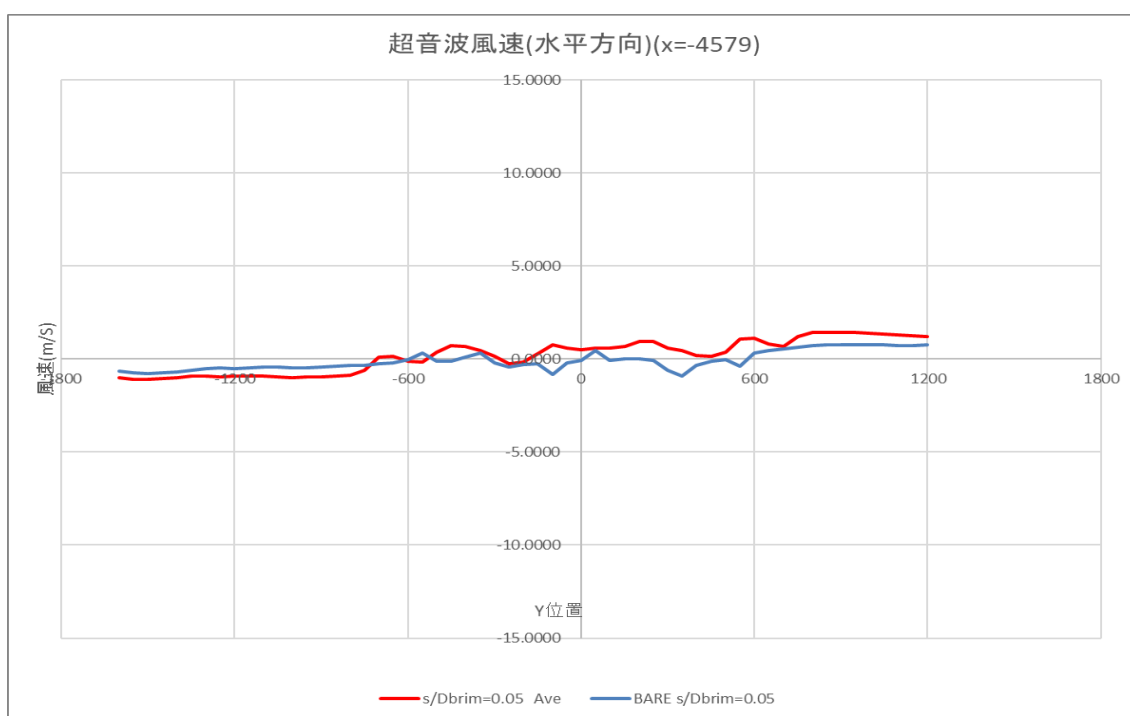
後方压力系数布图



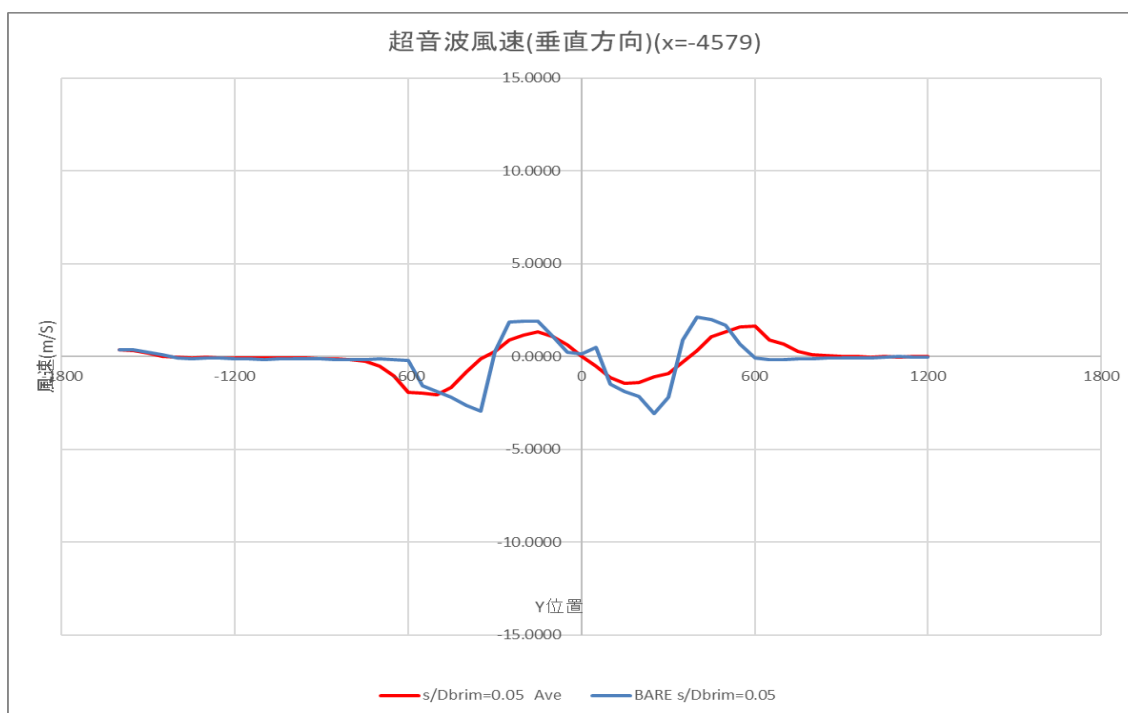
後方熱線流速布图



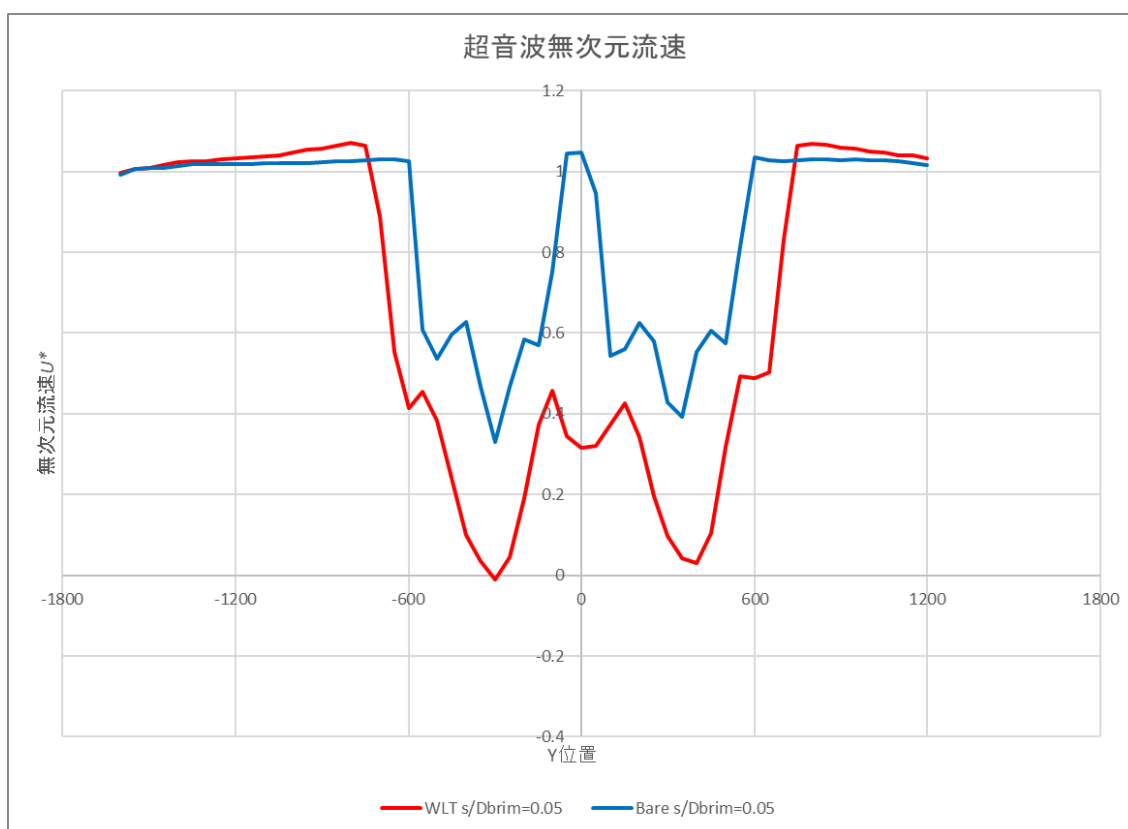
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



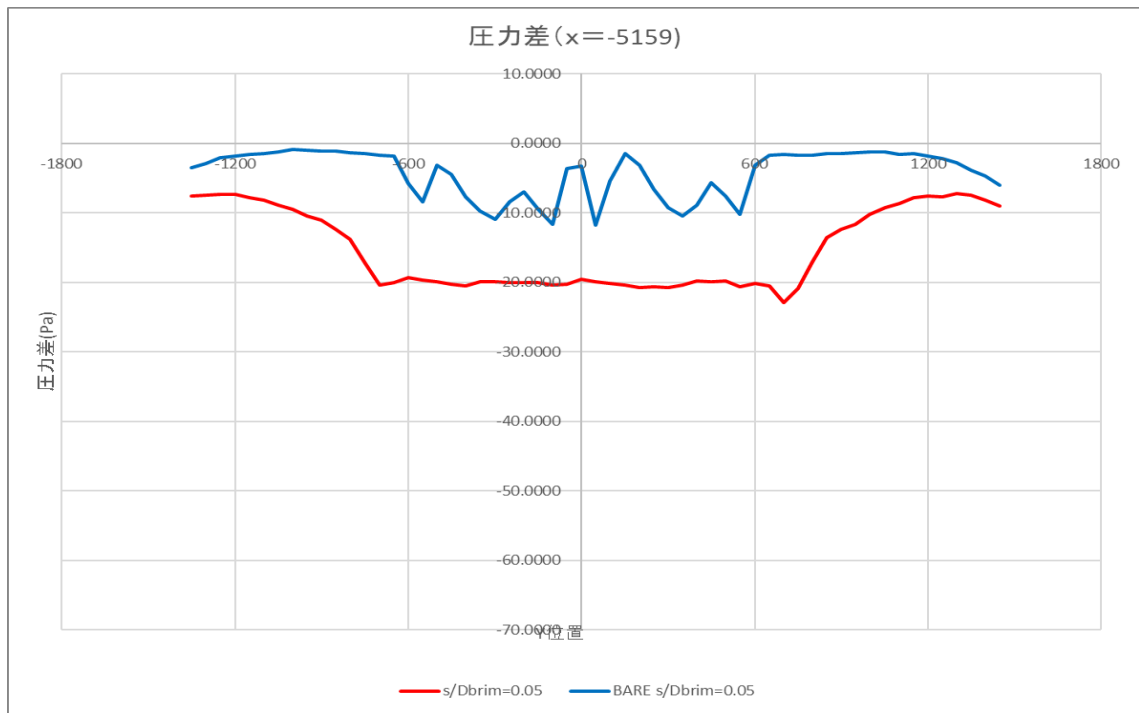
後方超音波鉛直方向流速分布図



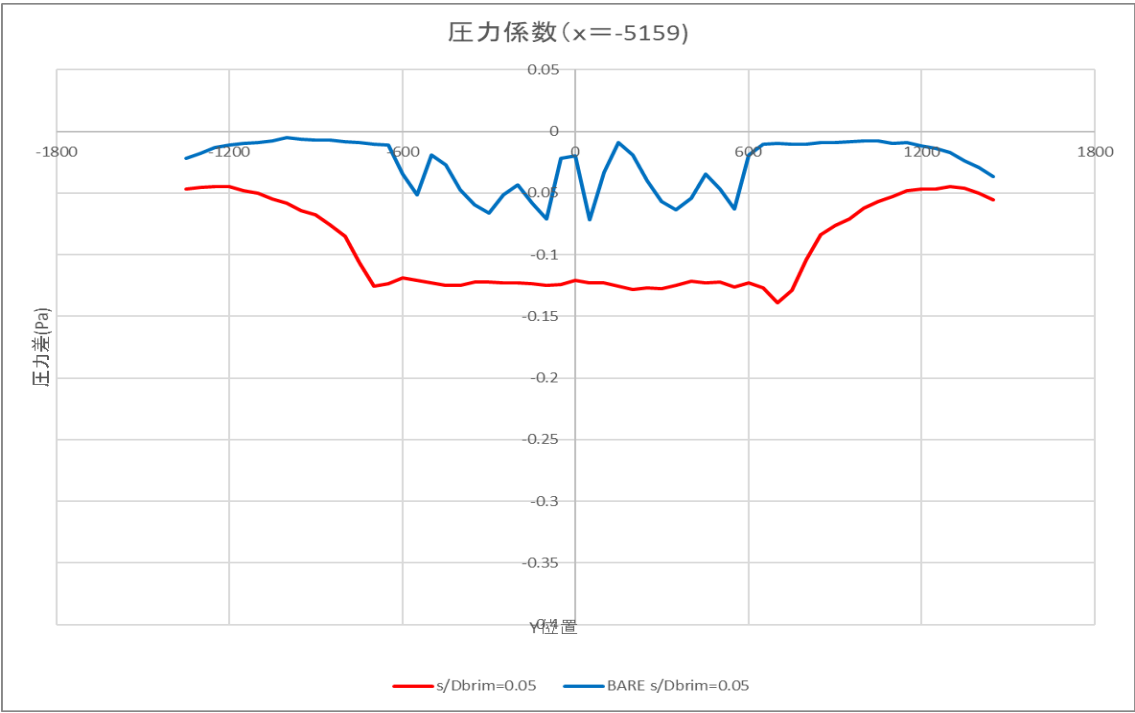
後方超音波主流方向無次元流速分布図

$s/D_{brim}=0.05$ X=-5159 レンズ有無比較

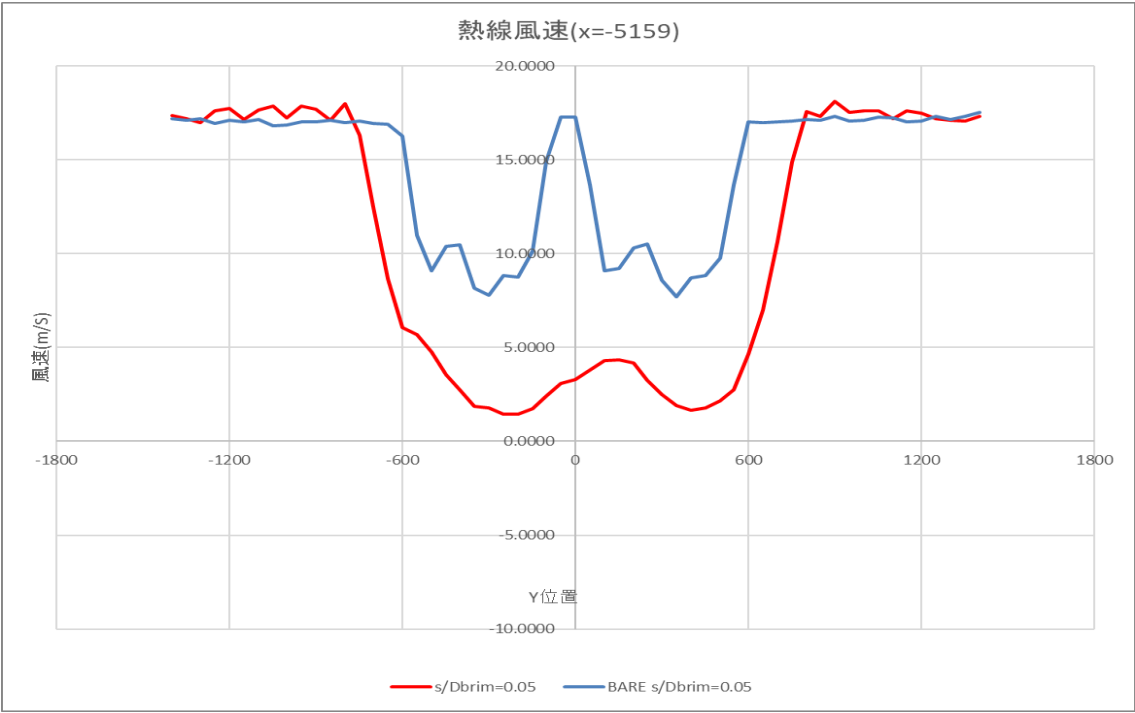
測定した圧力差プロファイルを図 4.218 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.219 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.220 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.221 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.222 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.223 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.224 に示す。



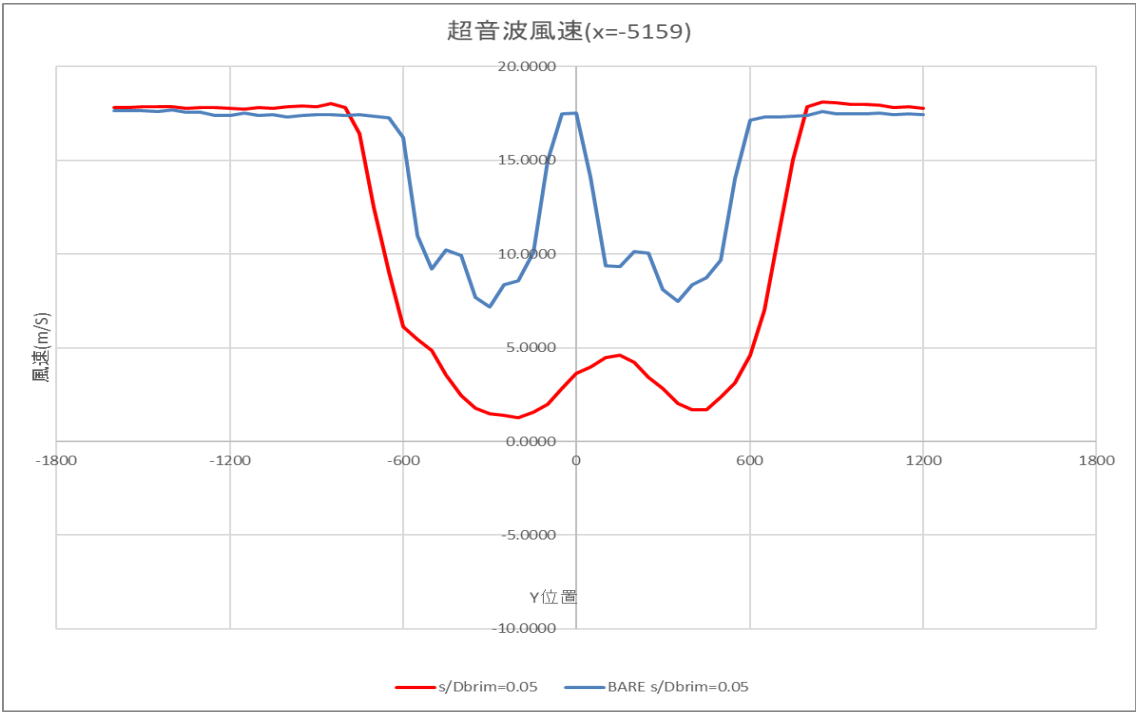
後方圧力差分布図



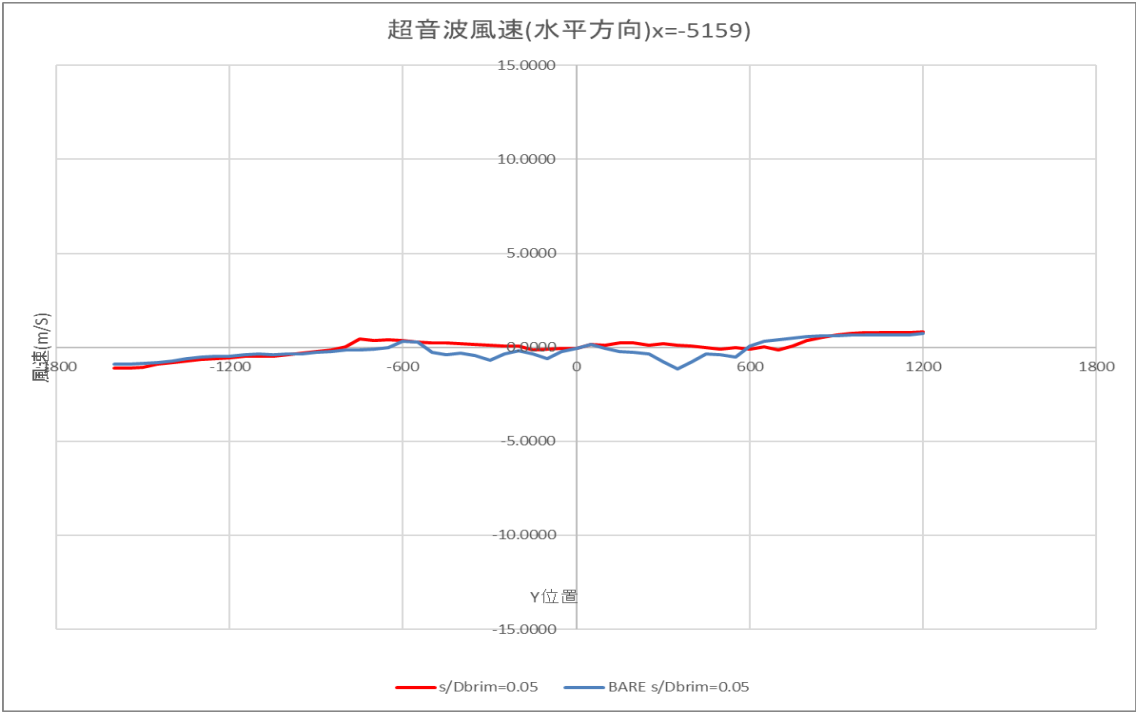
後方压力系数布图



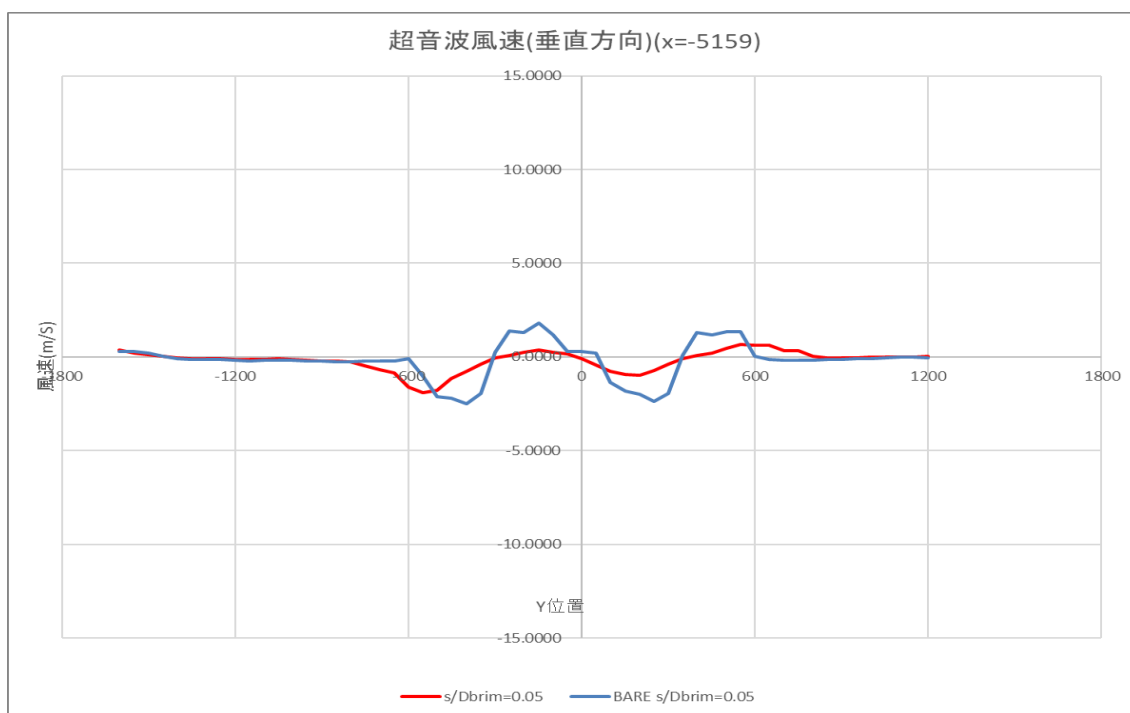
後方熱線流速布图



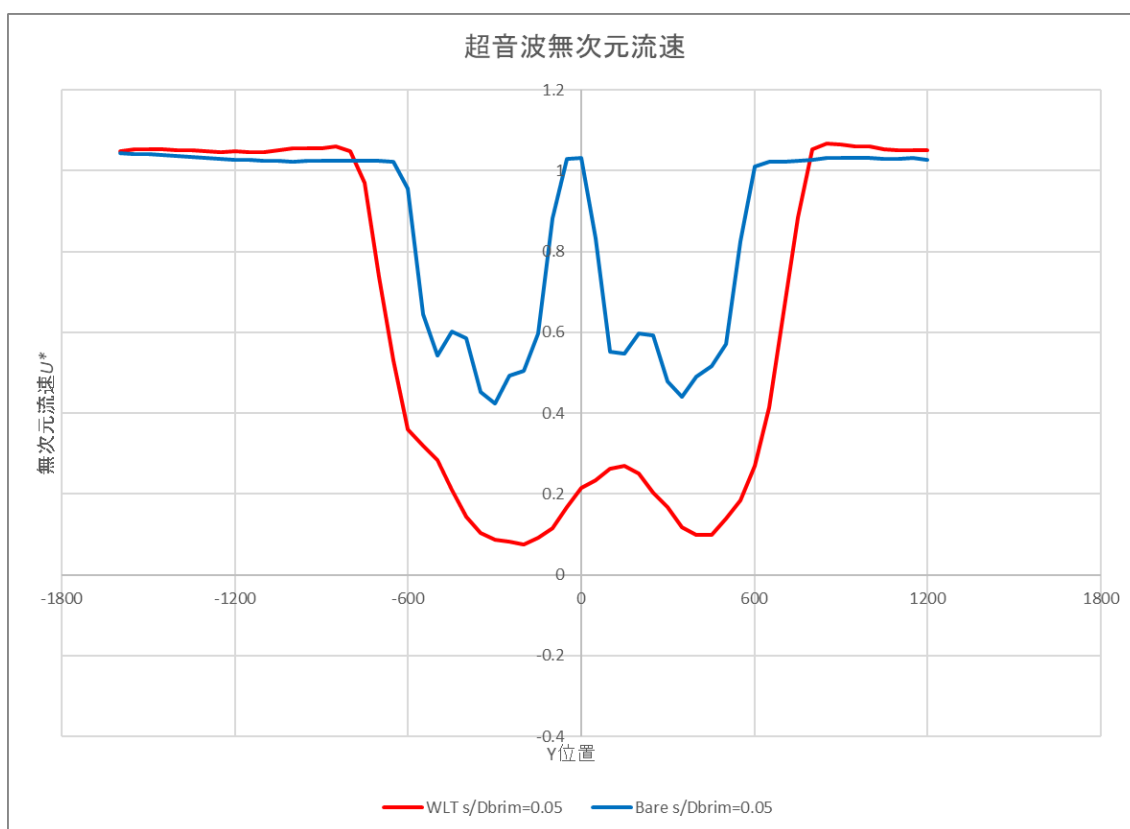
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



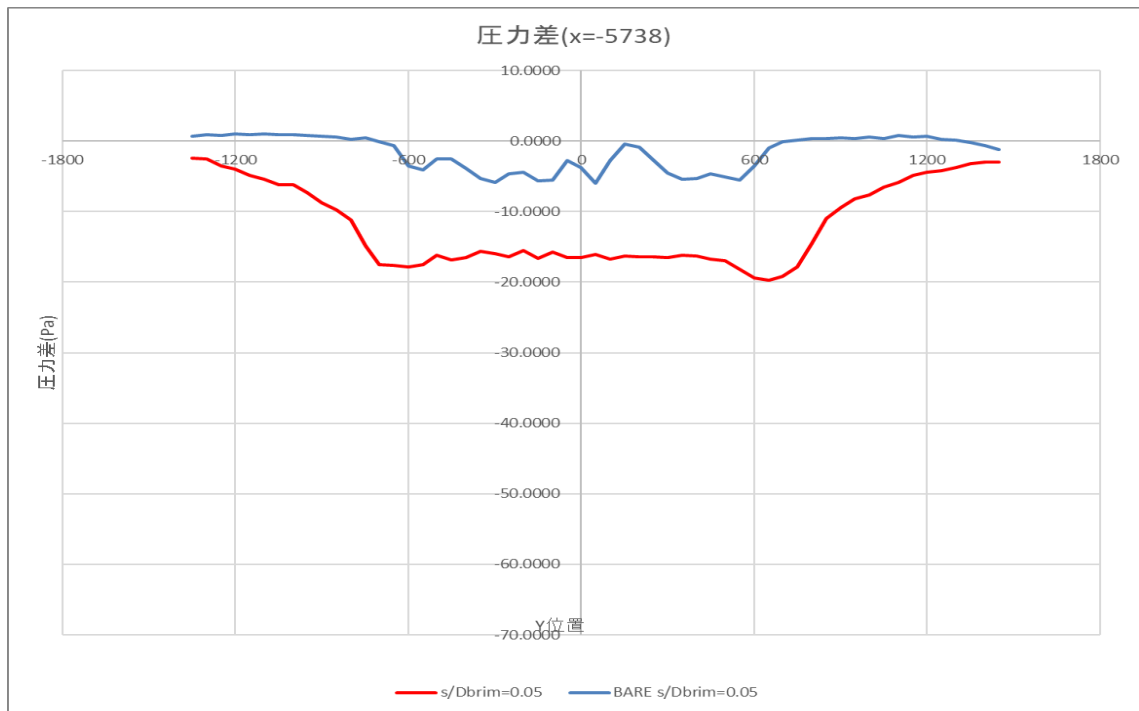
後方超音波鉛直方向流速分布図



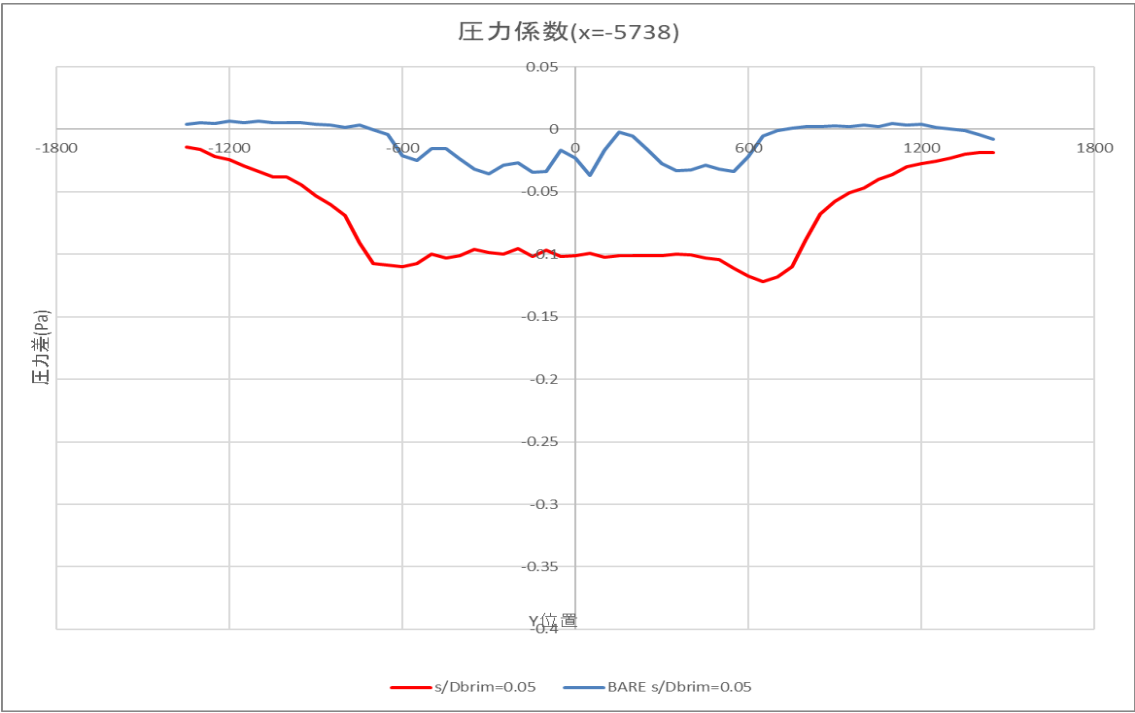
後方超音波主流方向無次元流速分布図

$s/D_{brim}=0.05$ $X=-5738$ レンズ有無比較

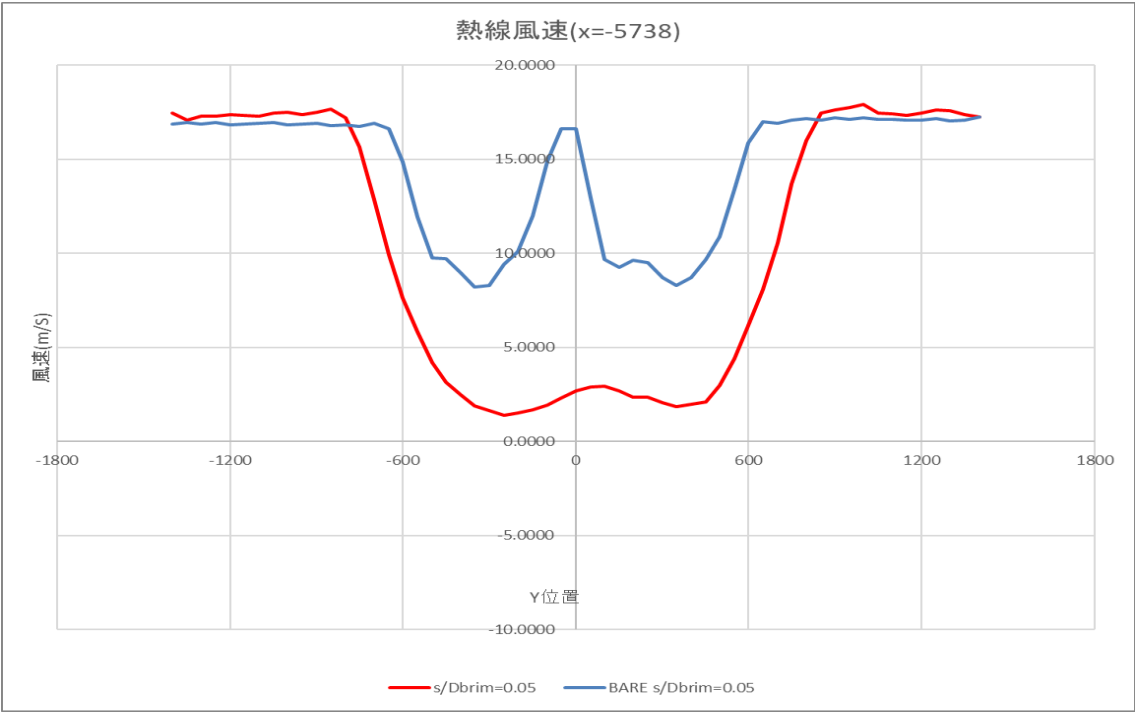
測定した圧力差プロファイルを図 4.225 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.226 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.227 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.228 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.229 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.230 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.231 に示す．



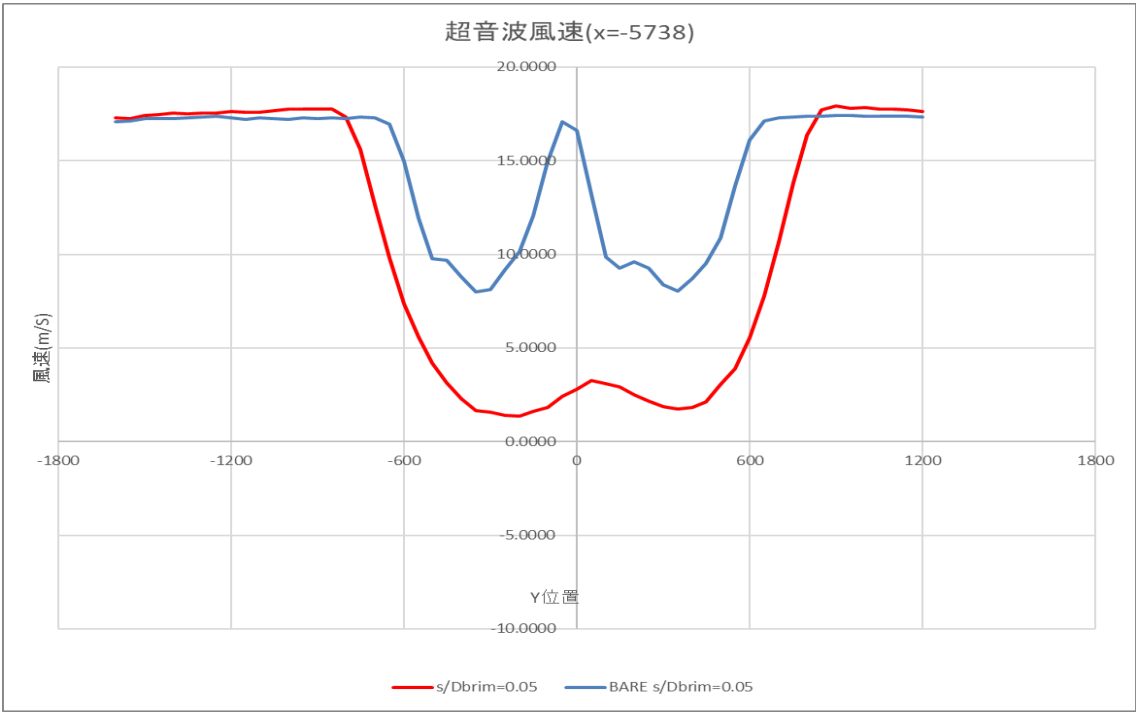
後方圧力差分布図



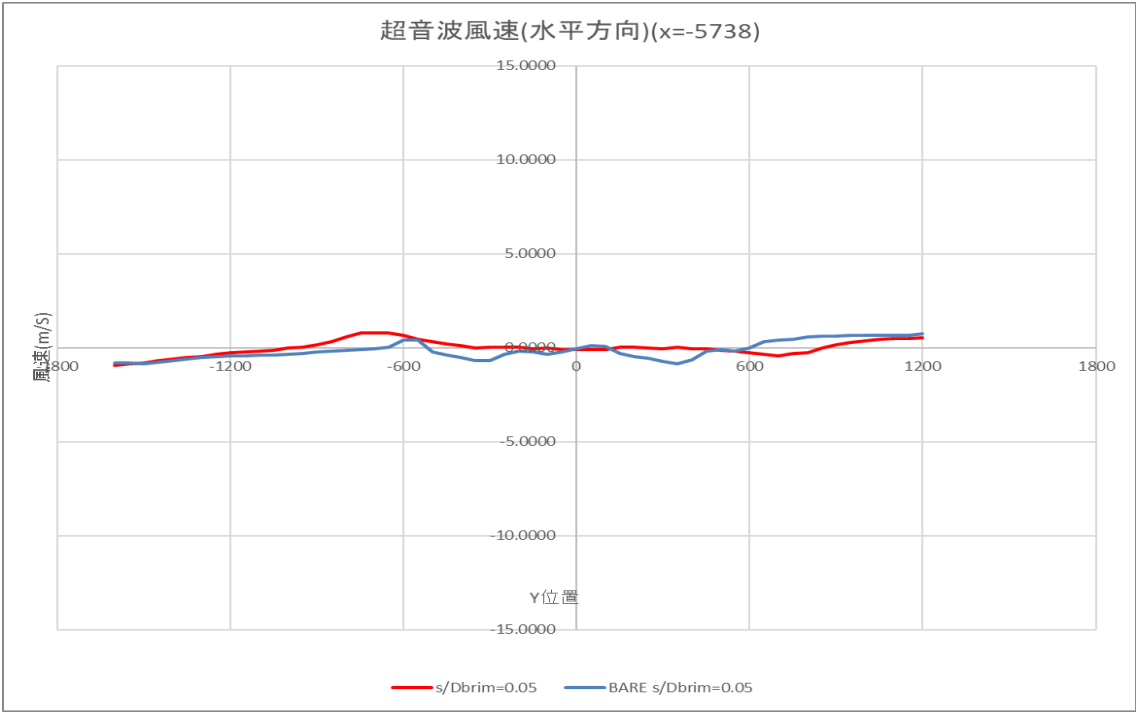
後方压力係数布図



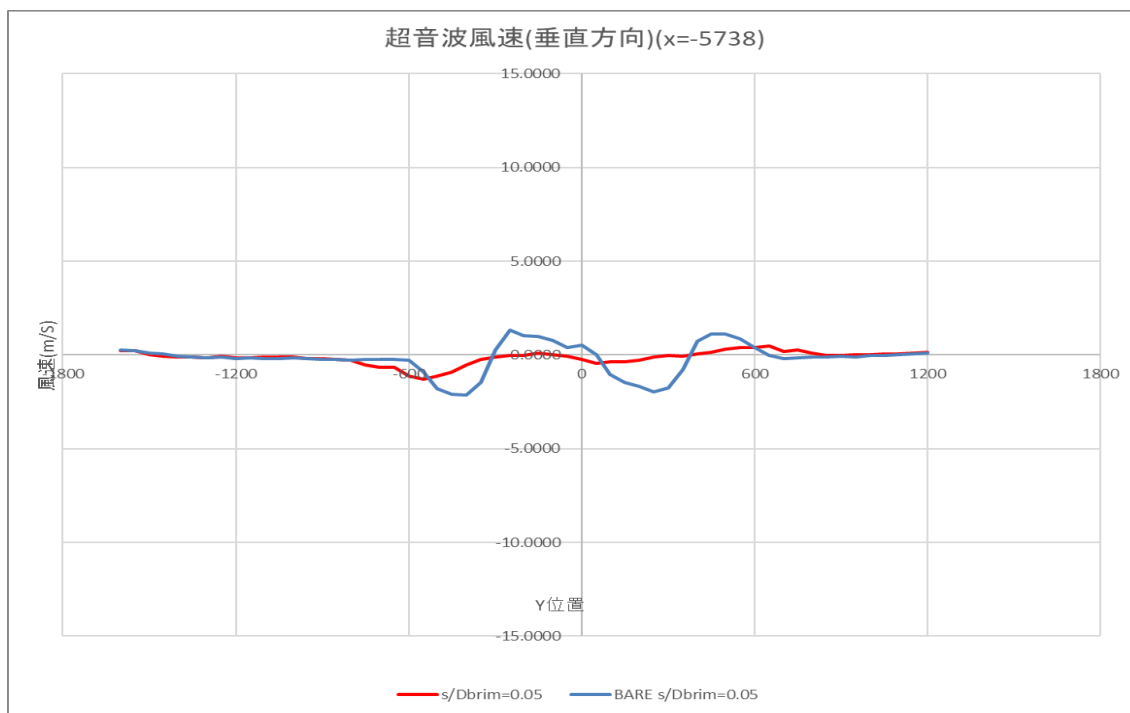
後方熱線流速布図



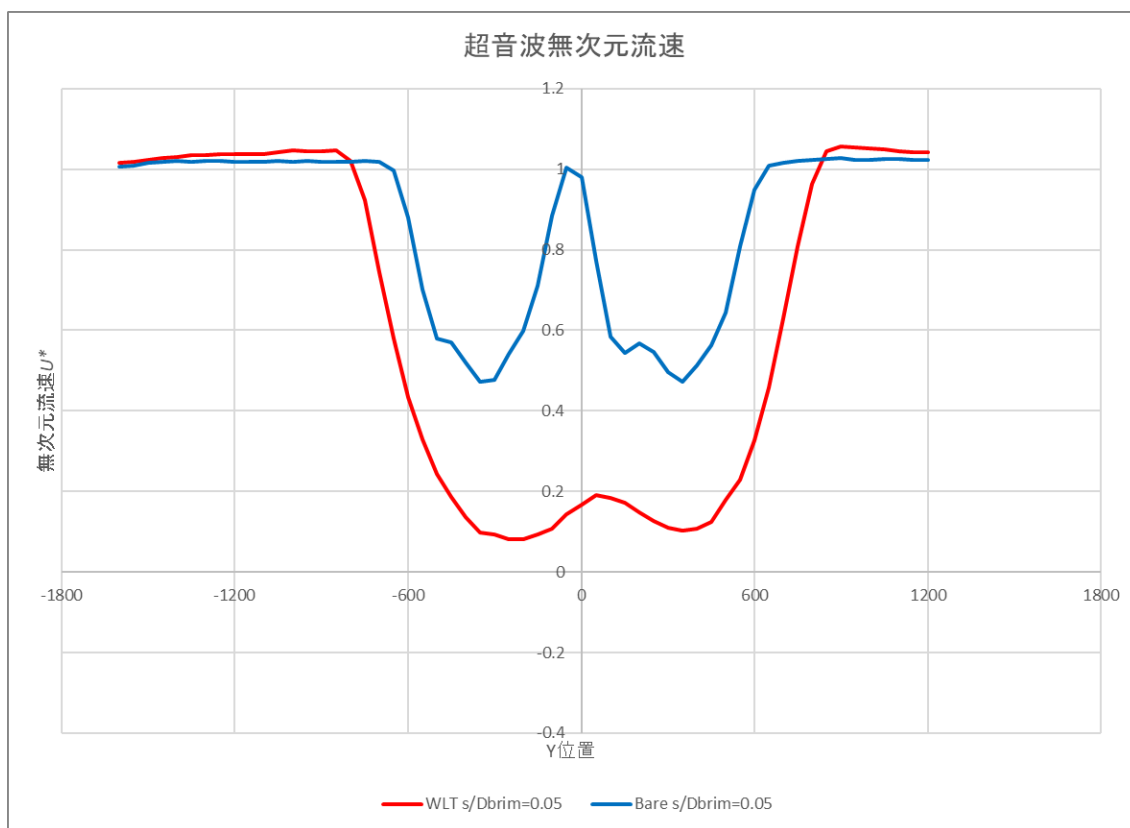
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



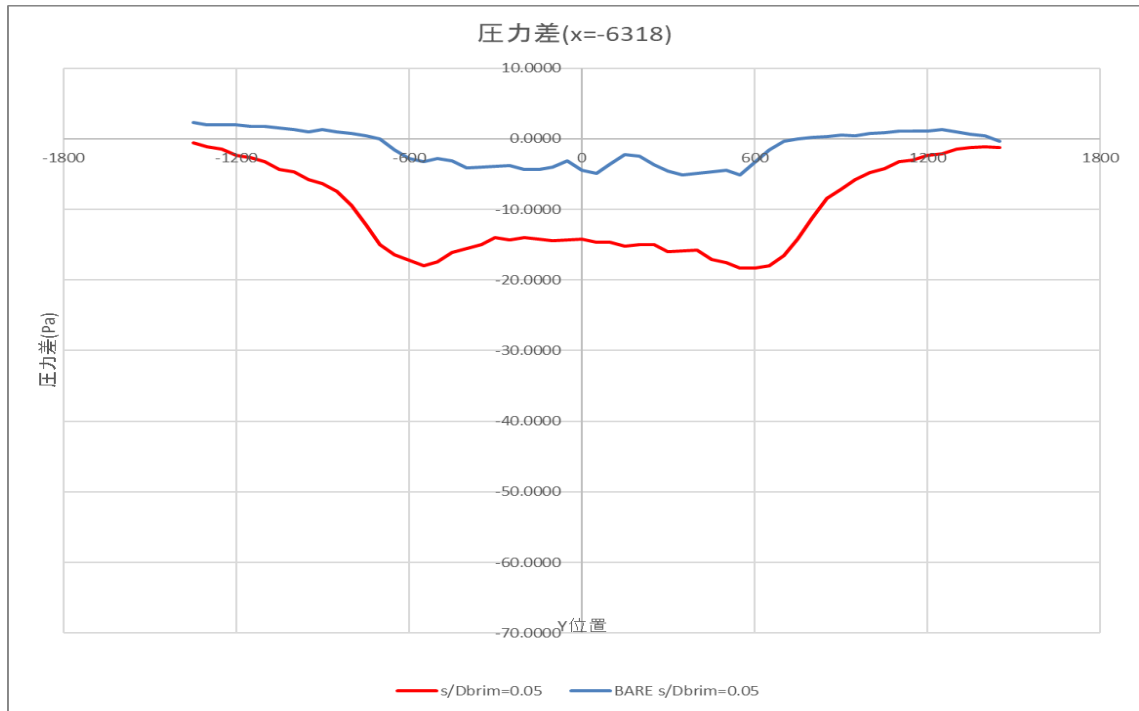
後方超音波鉛直方向流速分布図



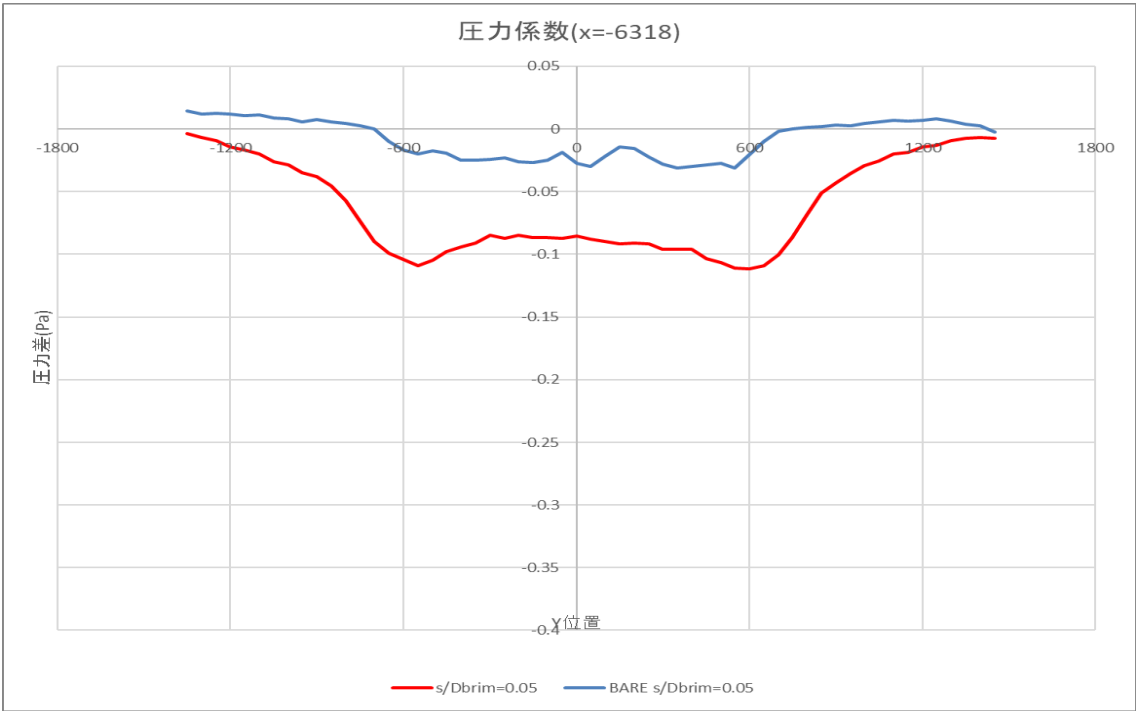
後方超音波主流方向無次元流速分布図

$s/D_{brim}=0.05$ $X=-6318$ レンズ有無比較

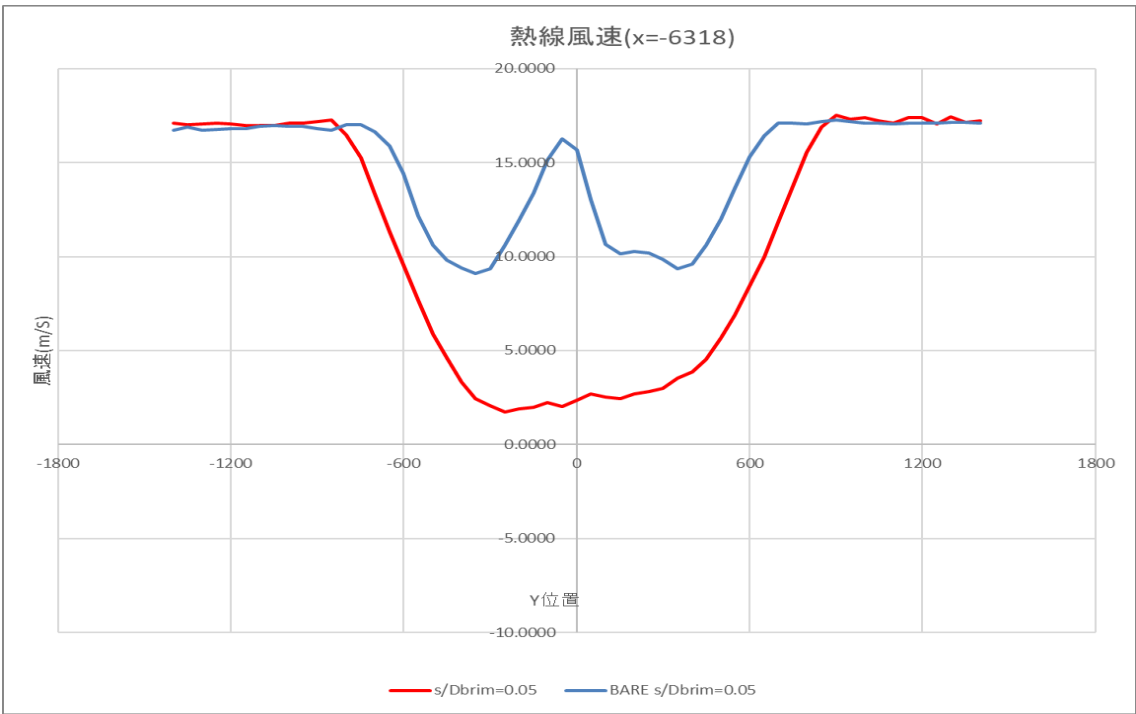
測定した圧力差プロファイルを図 4.232 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.233 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.234 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.235 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.236 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.237 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.238 に示す。



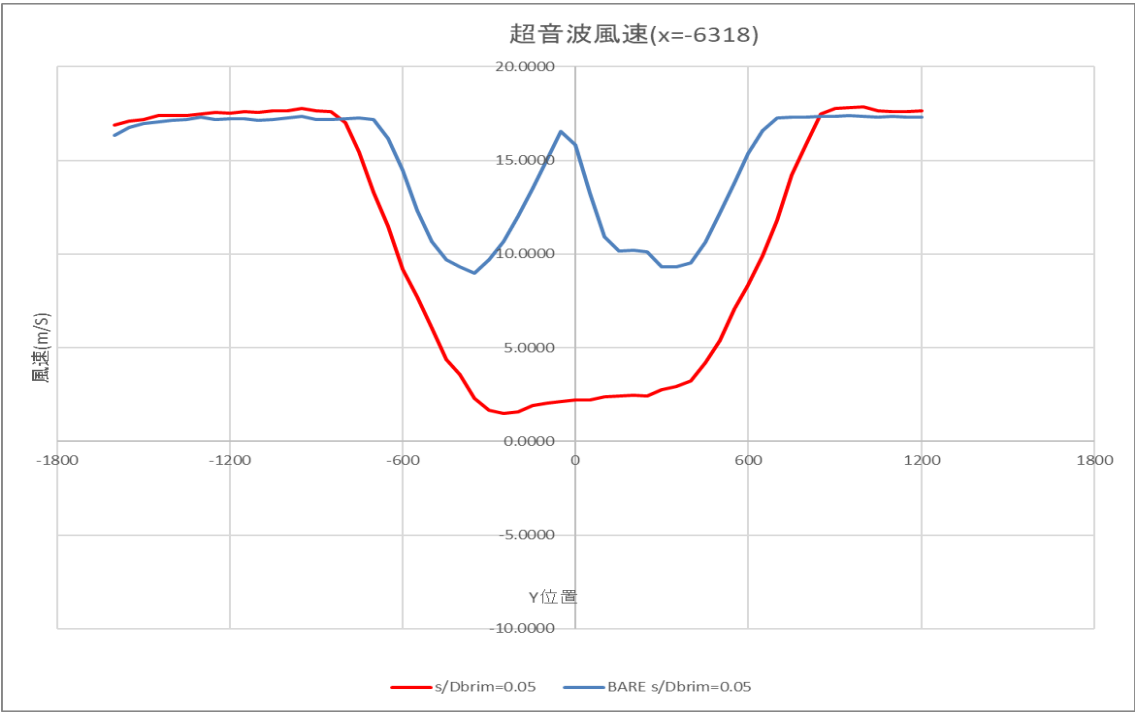
後方圧力差分布図



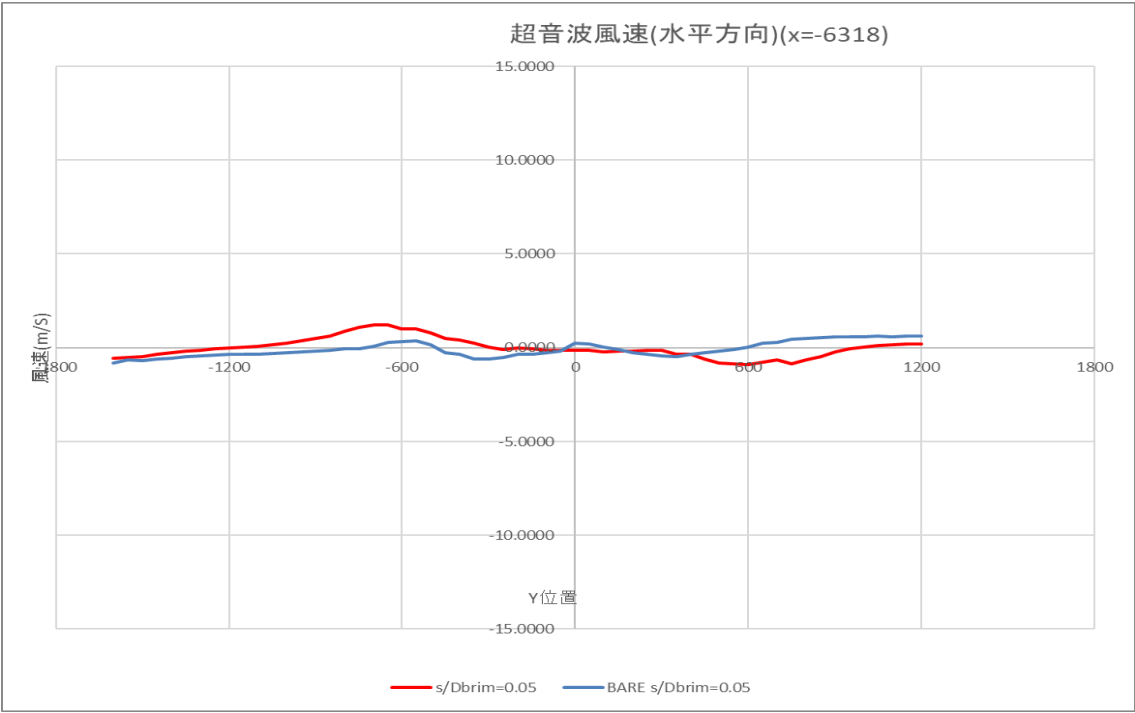
後方压力系数布图



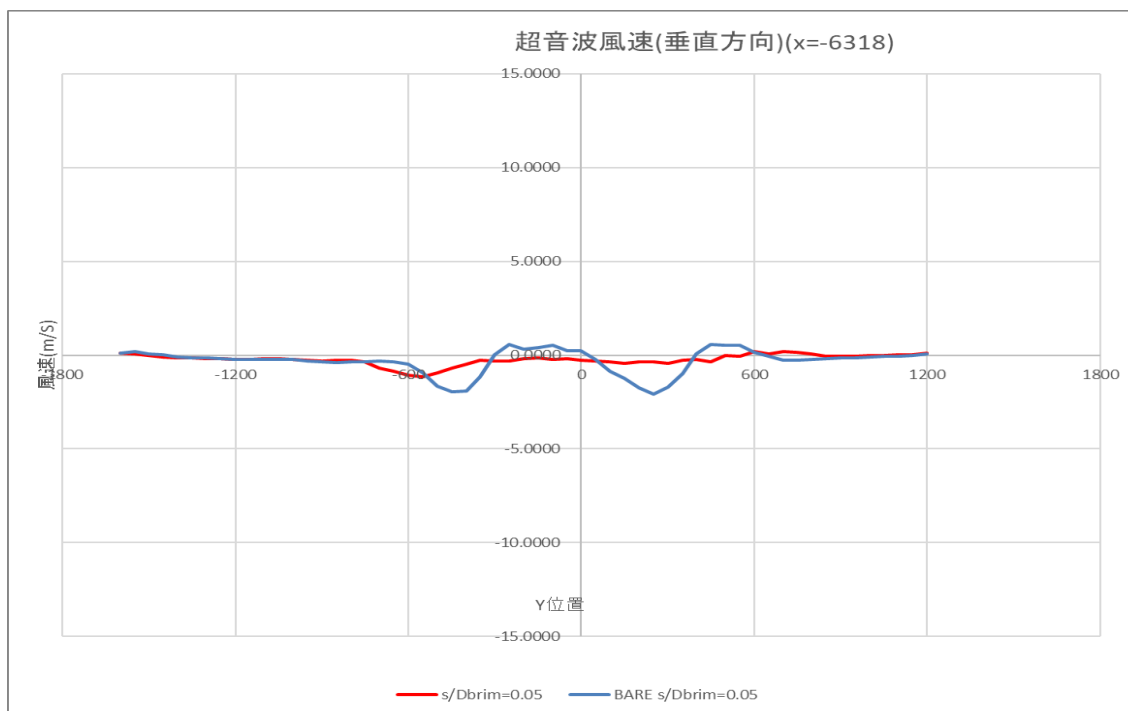
後方熱線流速布图



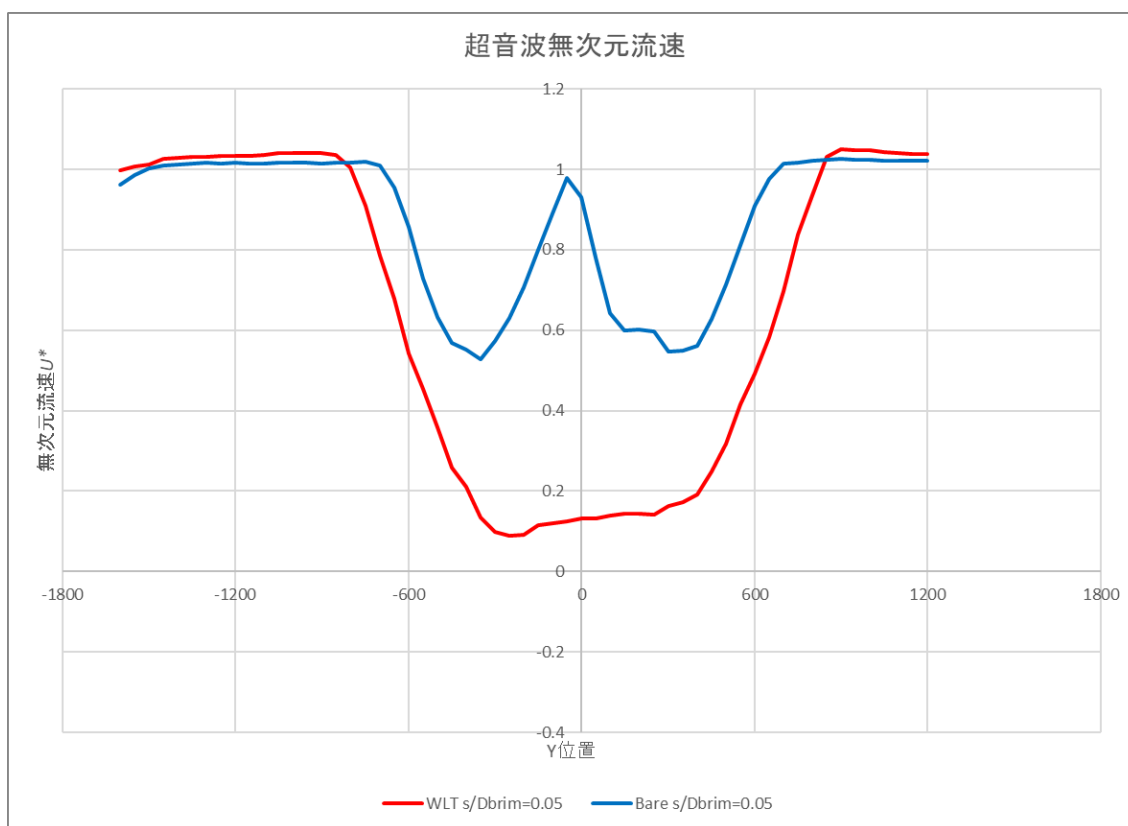
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



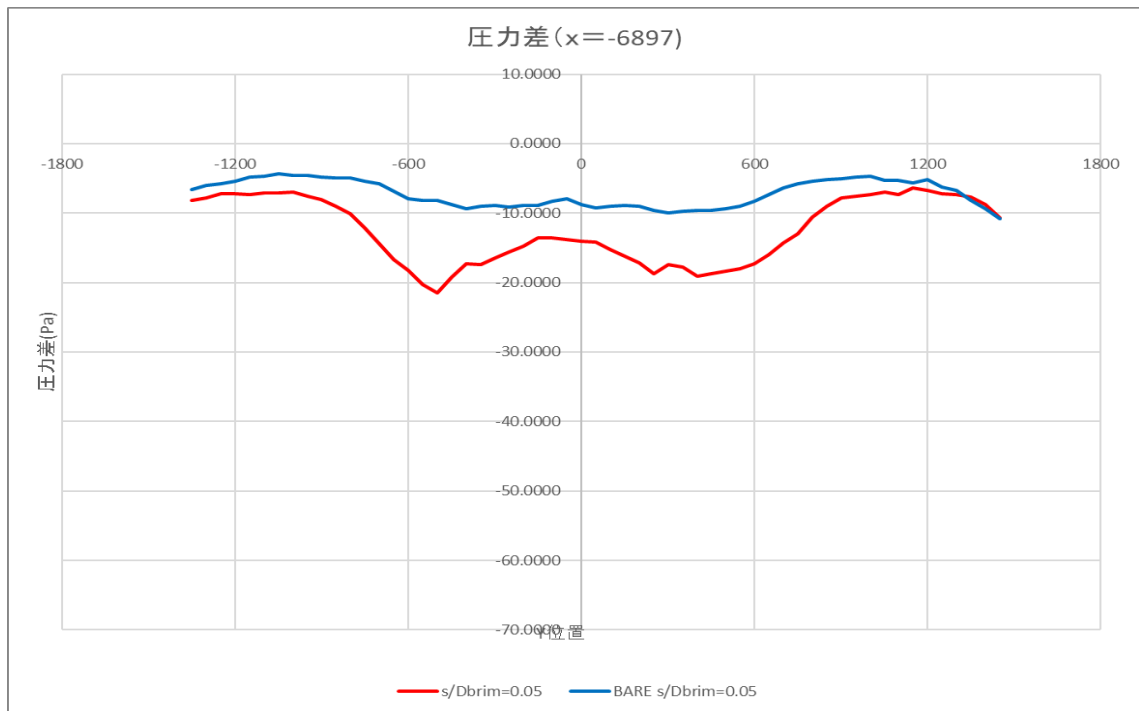
後方超音波鉛直方向流速分布図



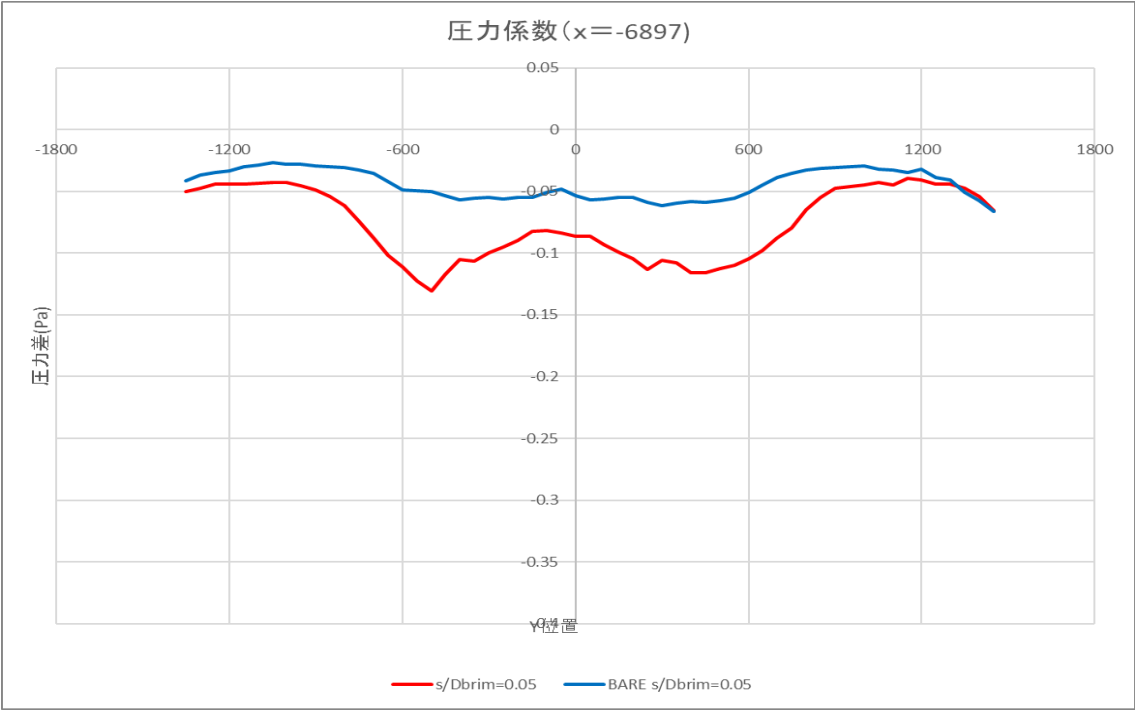
後方超音波主流方向無次元流速分布図

$s/D_{brim}=0.05$ $X=-6897$ レンズ有無比較

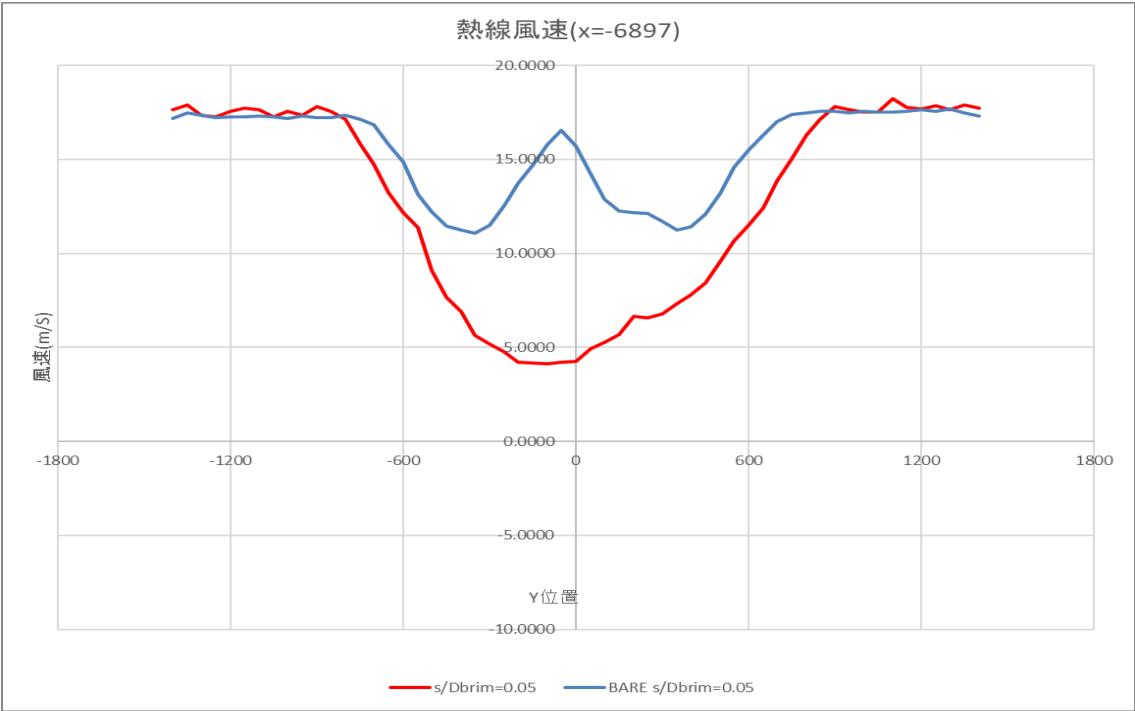
測定した圧力差プロファイルを図 4.239 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.240 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.241 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.242 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.243 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.244 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.245 に示す．



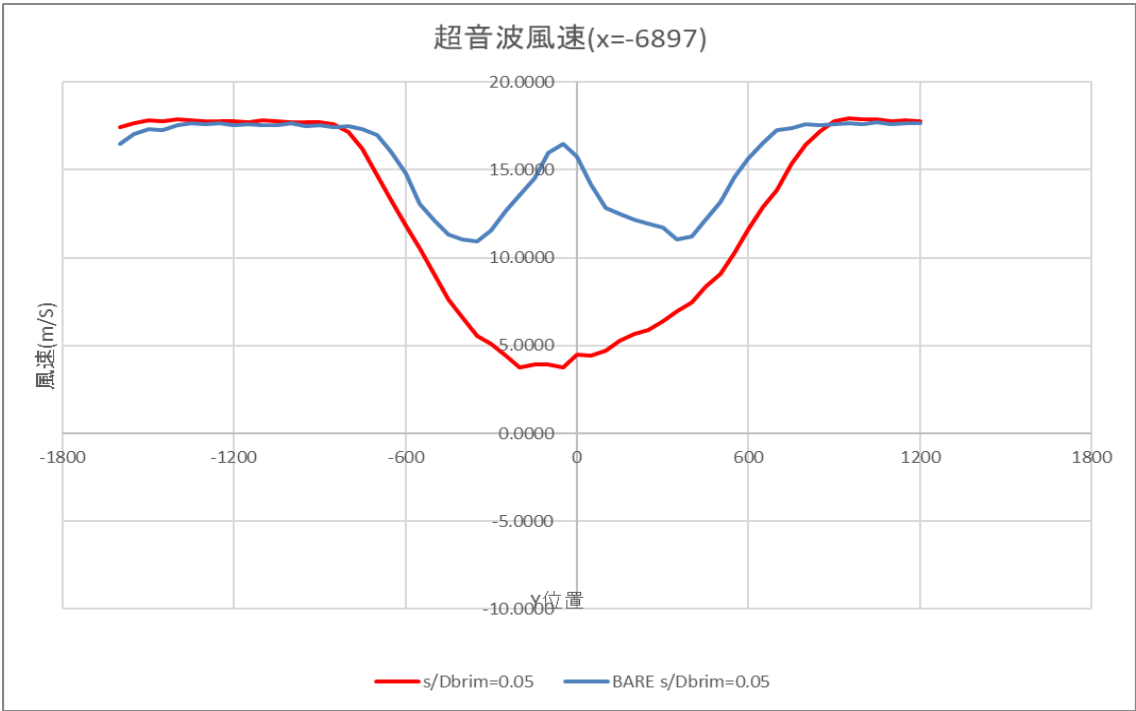
後方圧力差分布図



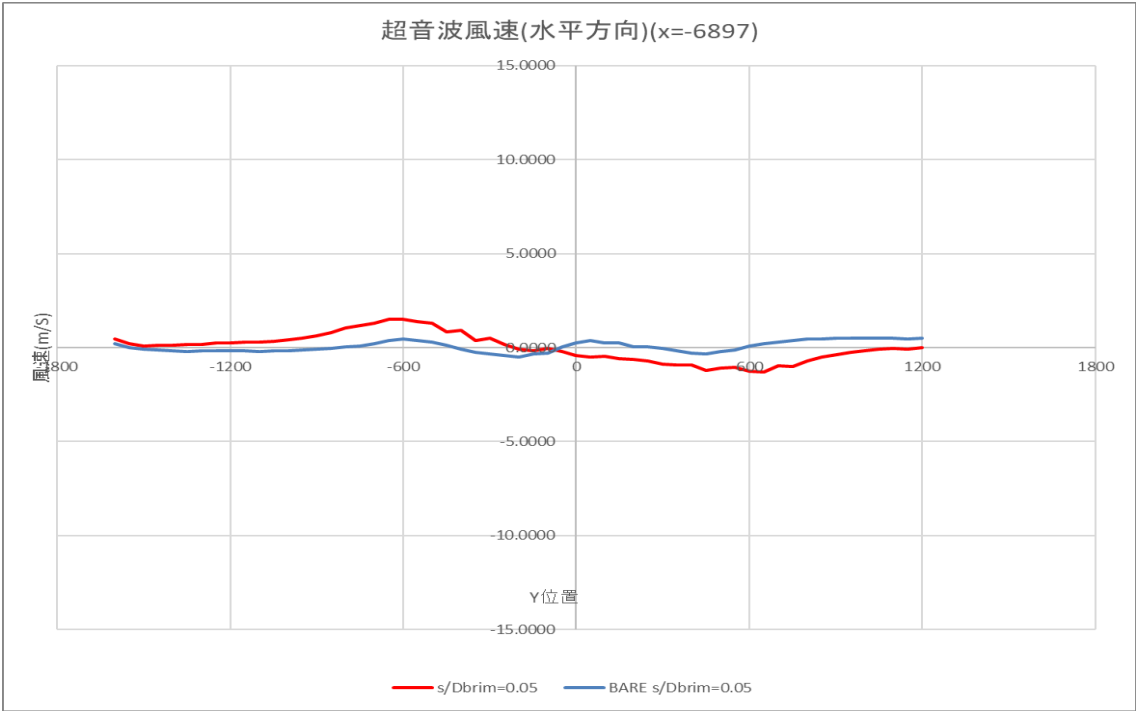
後方压力系数布图



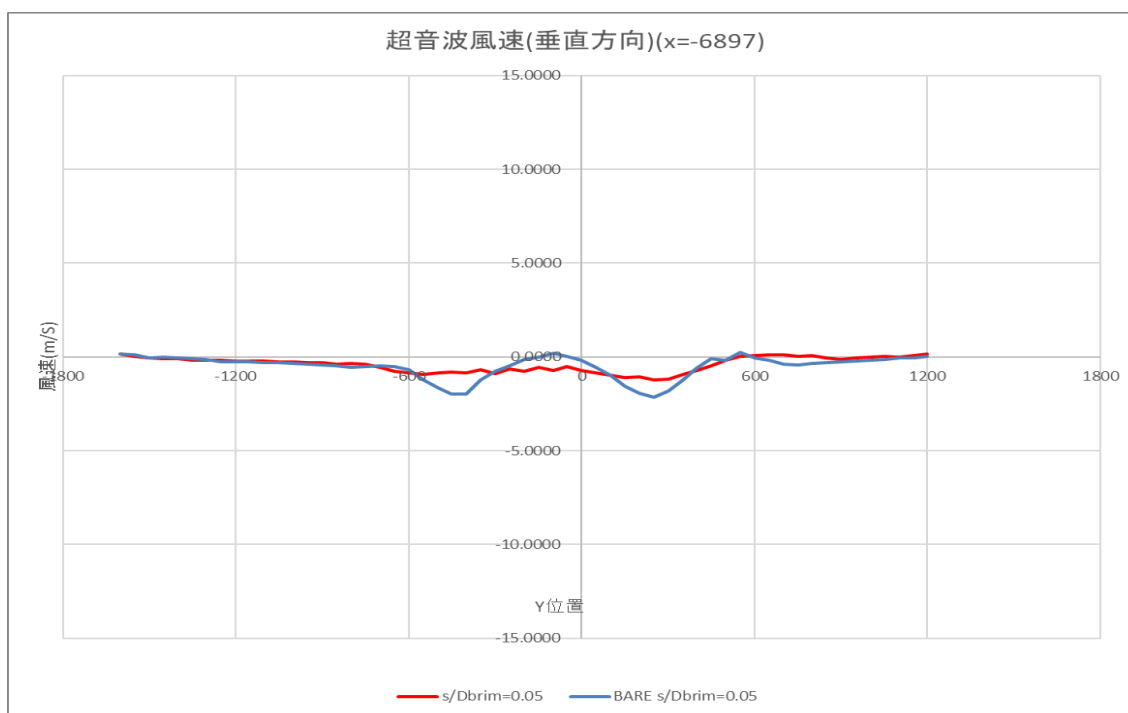
後方熱線流速布图



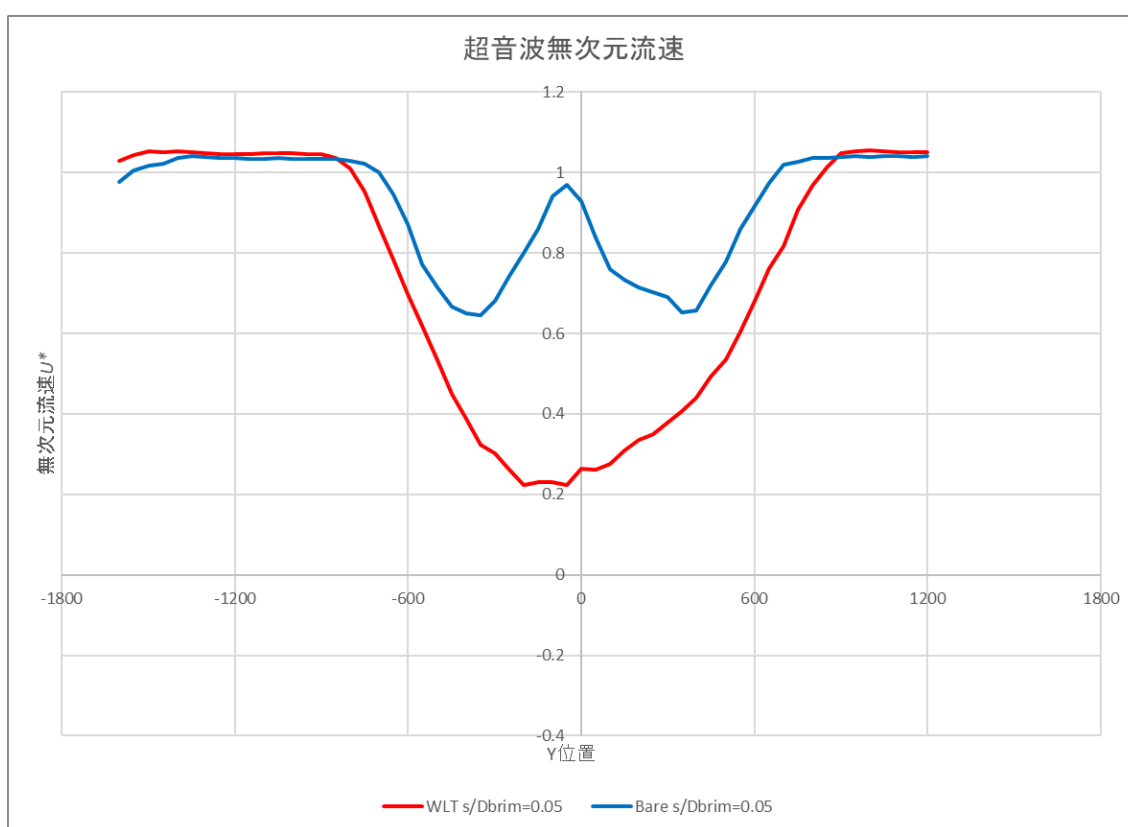
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



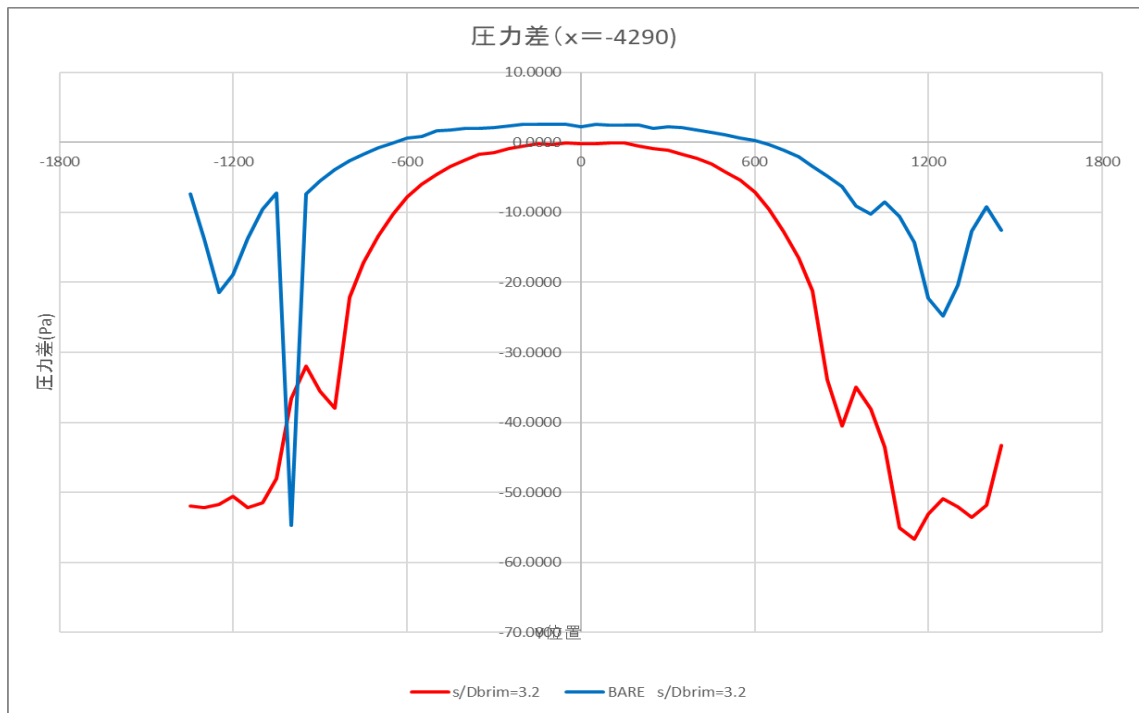
後方超音波鉛直方向流速分布図



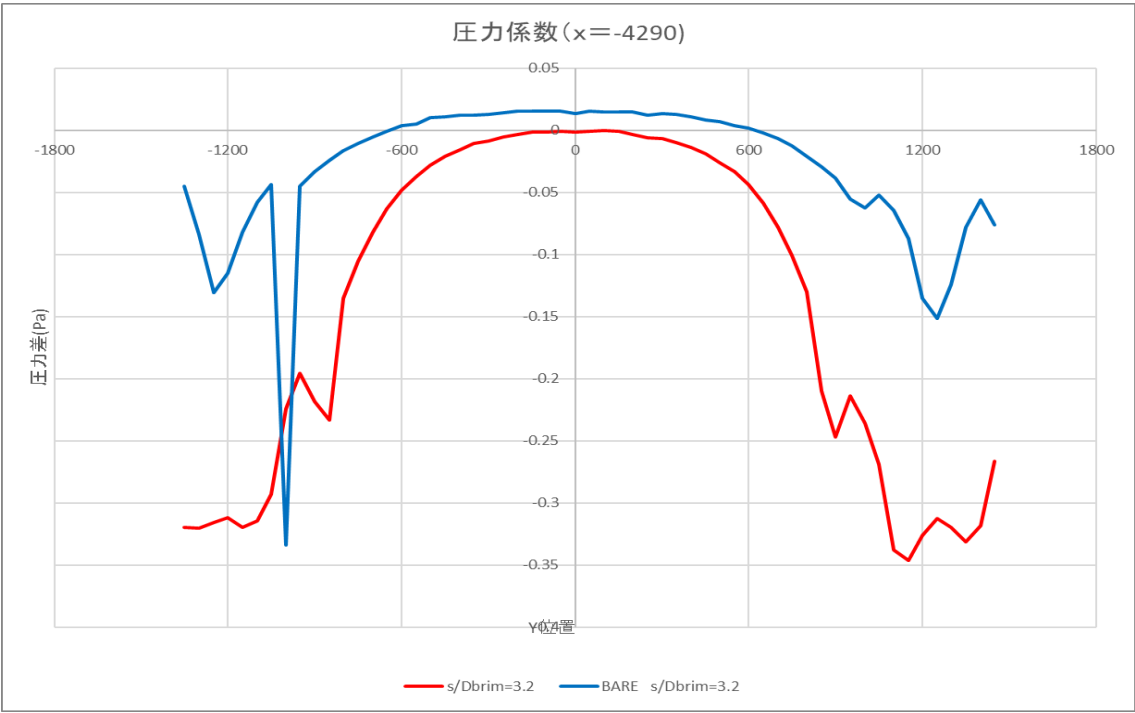
後方超音波主流方向無次元流速分布図

$s/D_{brim}=3.2$ $X=-4290$ レンズ有無比較

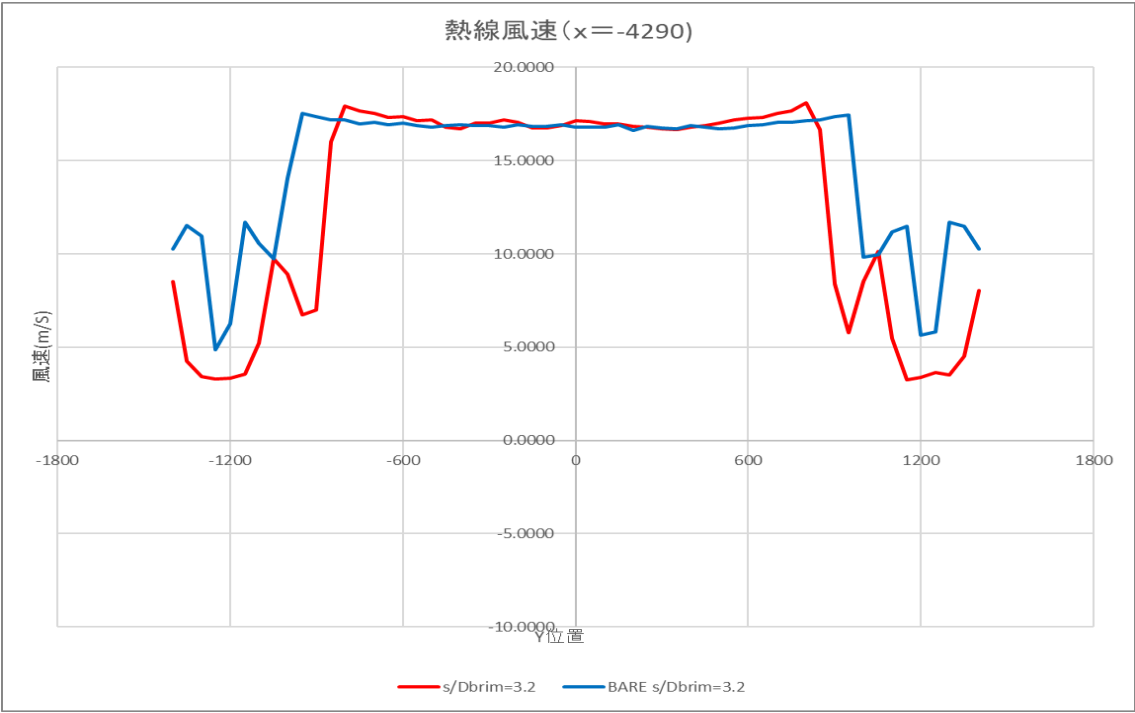
測定した圧力差プロファイルを図 4.246 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.247 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.248 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.249 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.250 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.251 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.252 に示す．



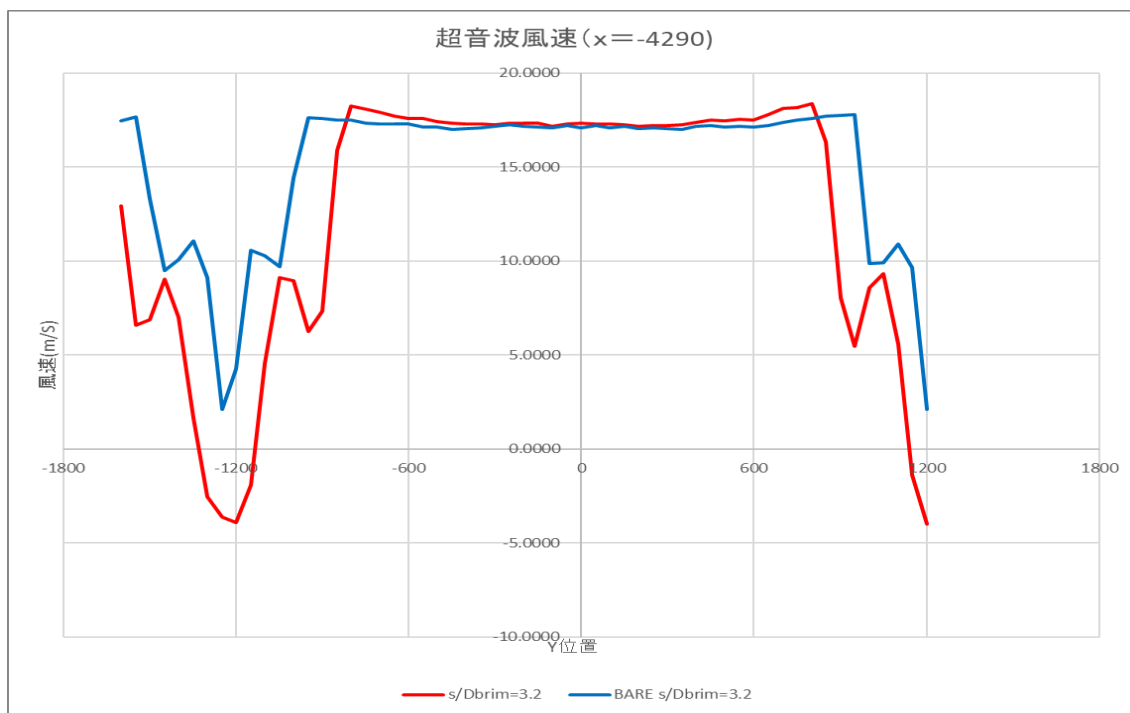
後方圧力差分布図



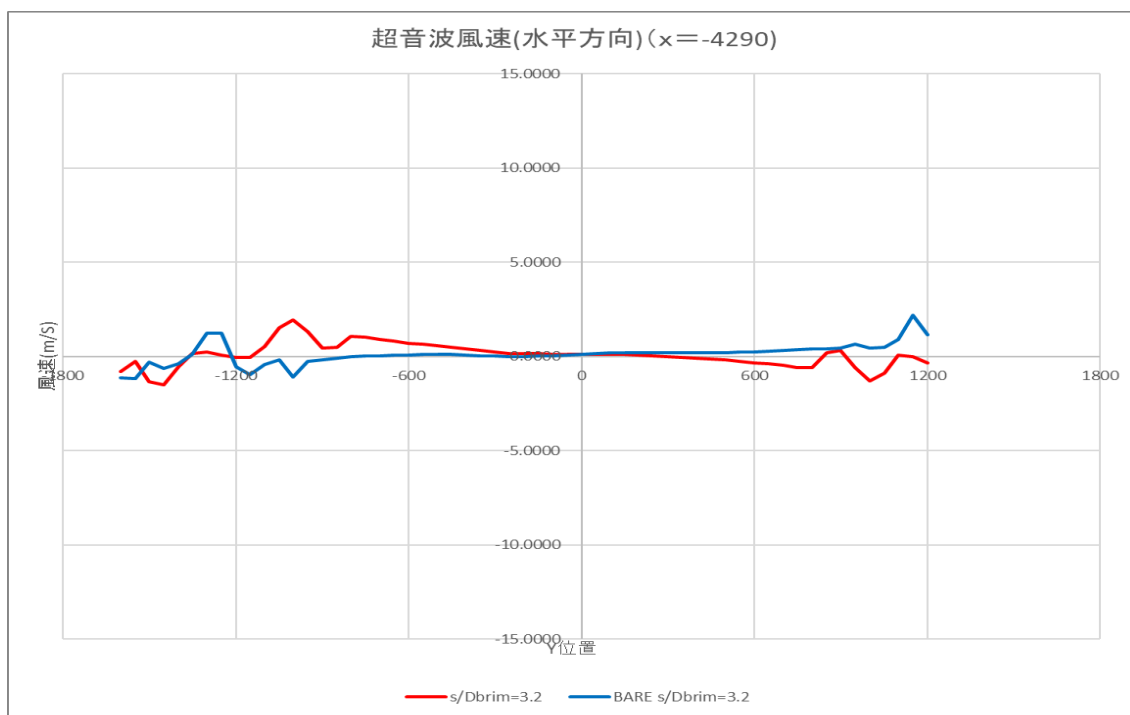
後方压力系数布图



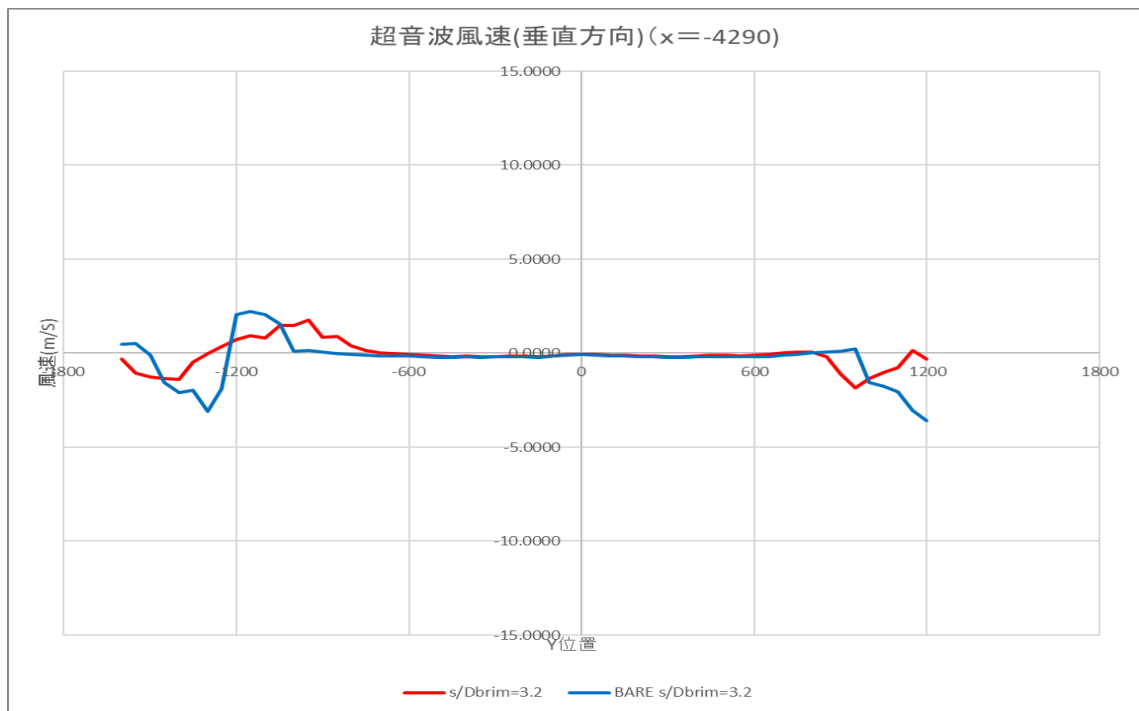
後方熱線流速布图



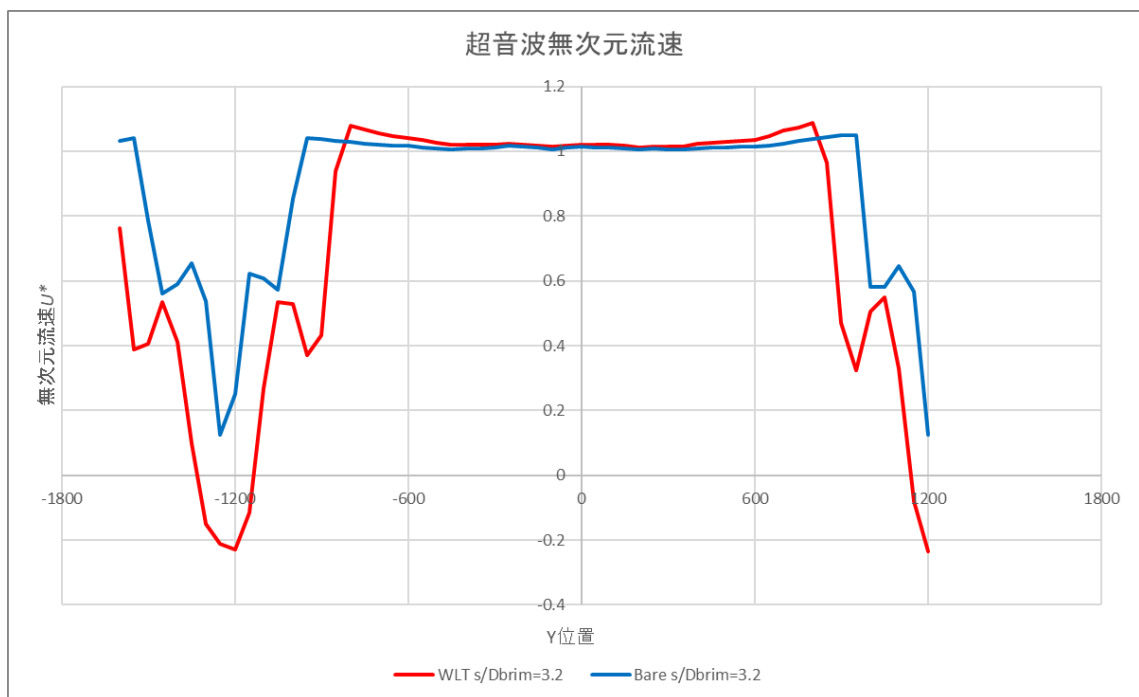
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



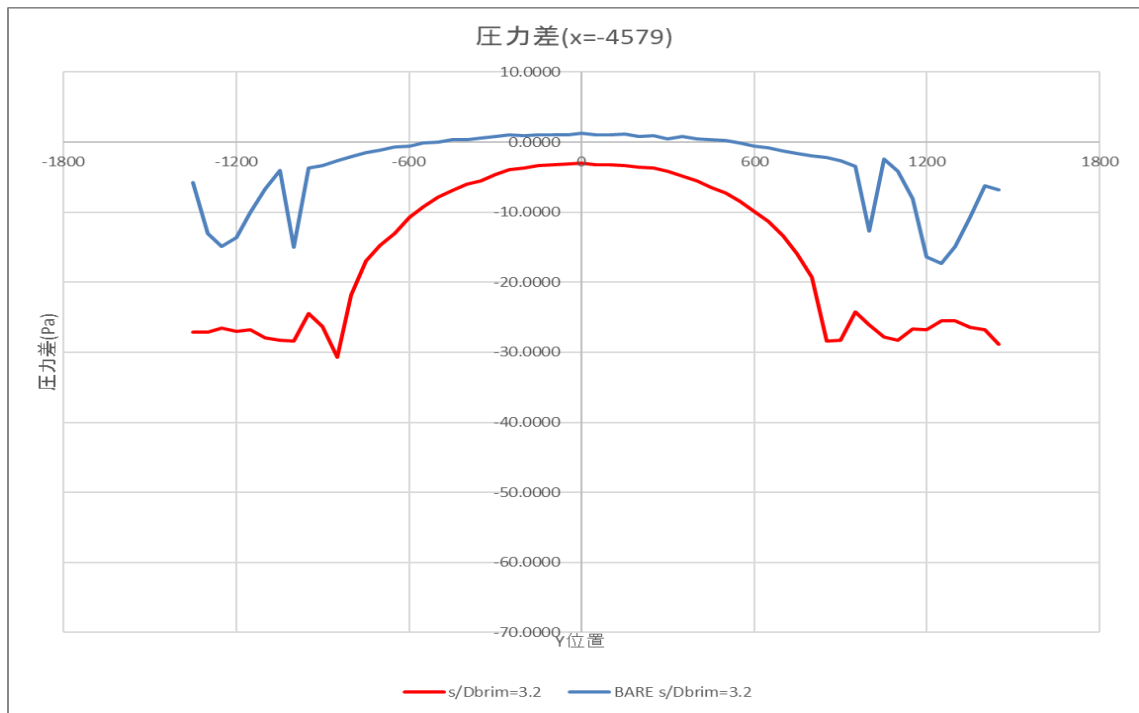
後方超音波鉛直方向流速分布図



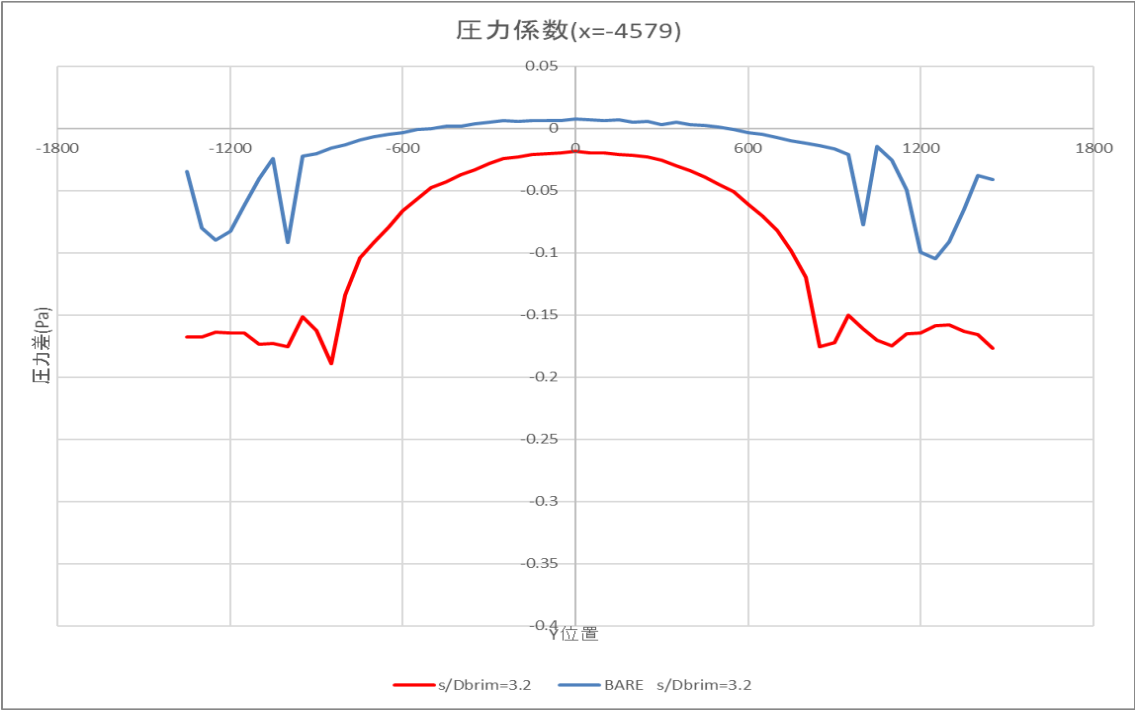
後方超音波主流方向無次元流速分布図

$s/D_{brim}=3.2$ $X=-4579$ レンズ有無比較

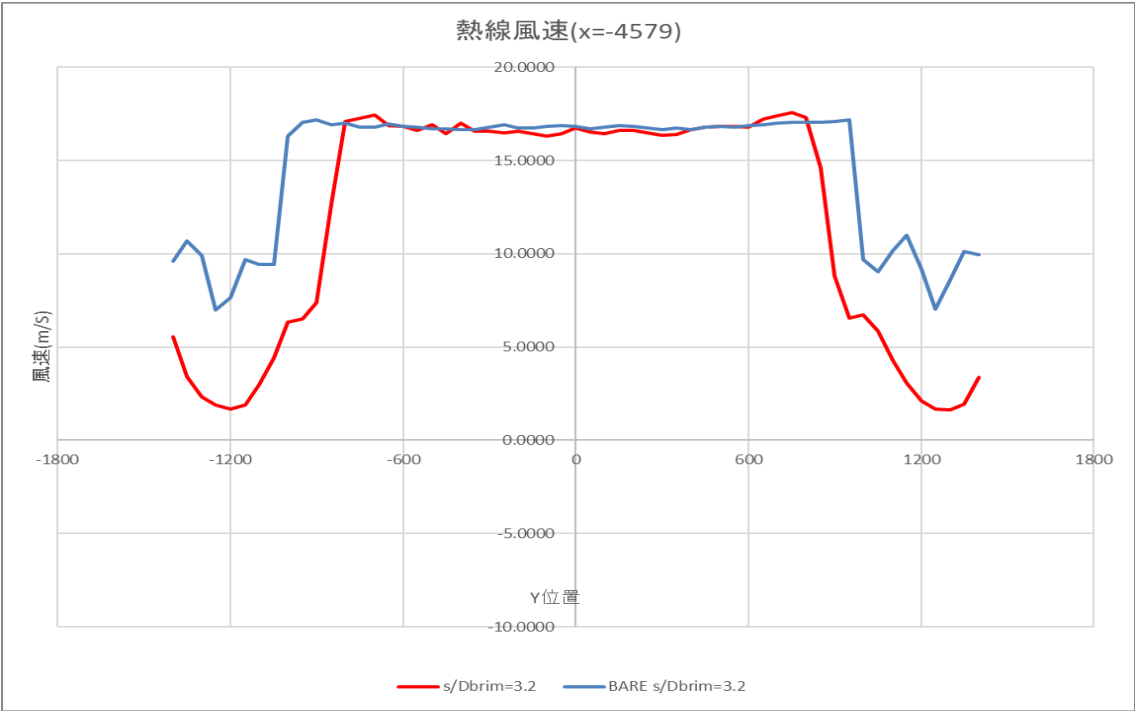
測定した圧力差プロファイルを図 4.253 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.254 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.255 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.256 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.257 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.258 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.259 に示す．



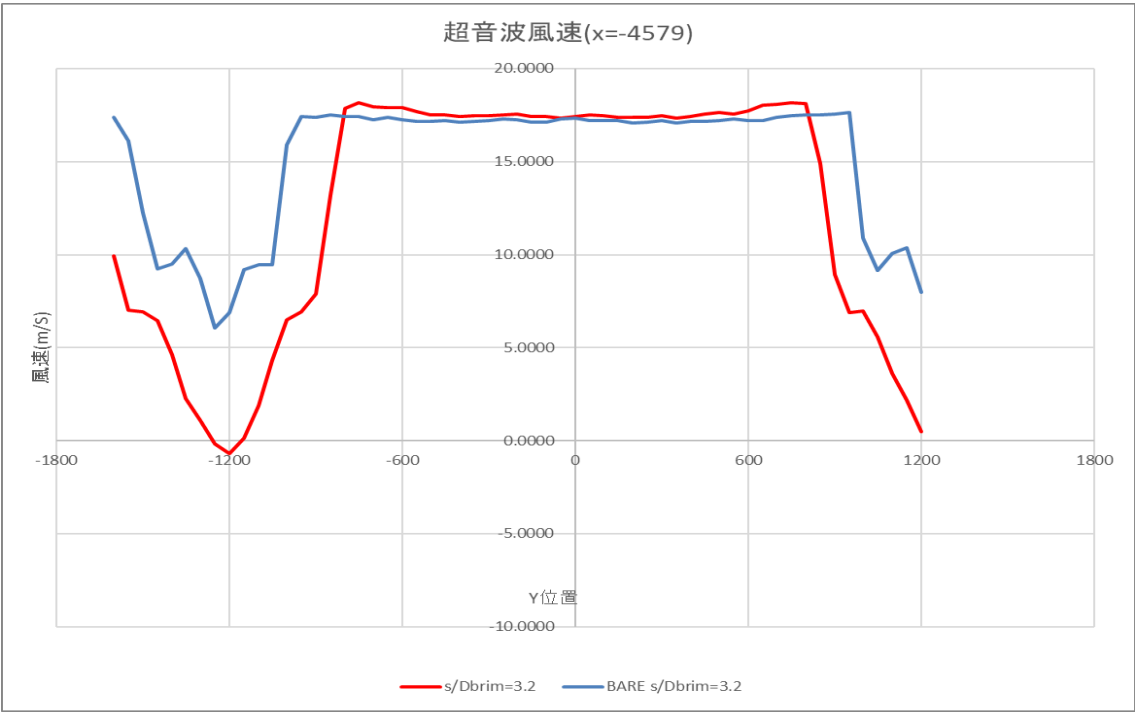
後方圧力差分布図



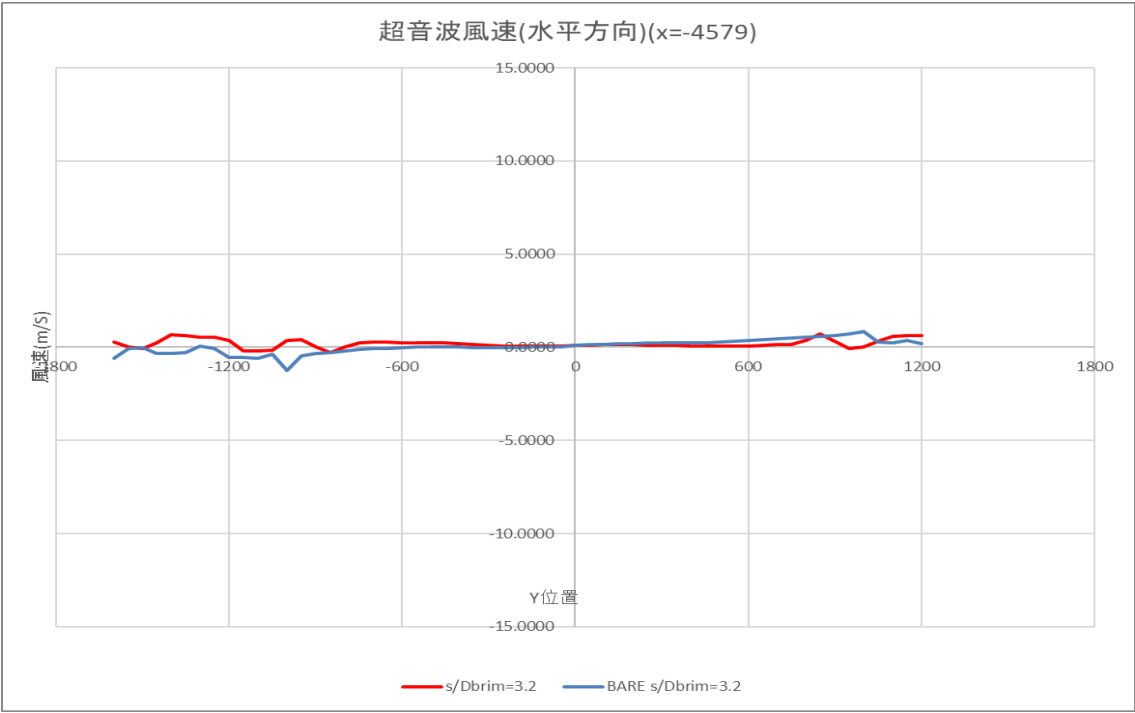
後方压力系数布图



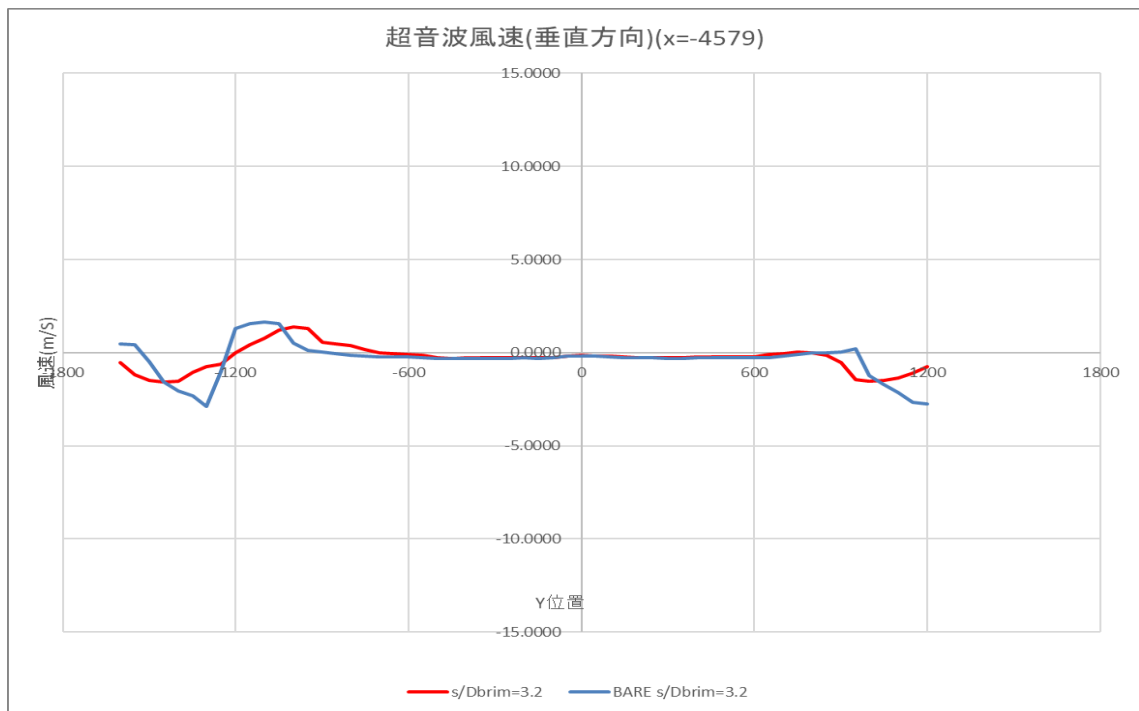
後方熱線流速布图



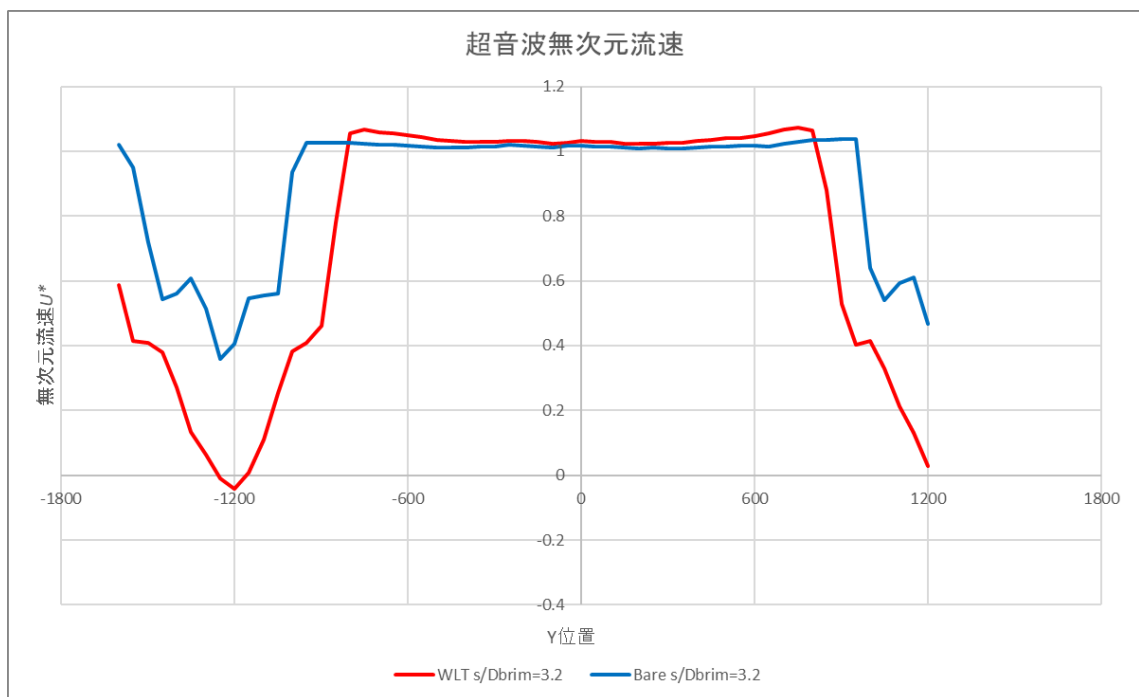
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



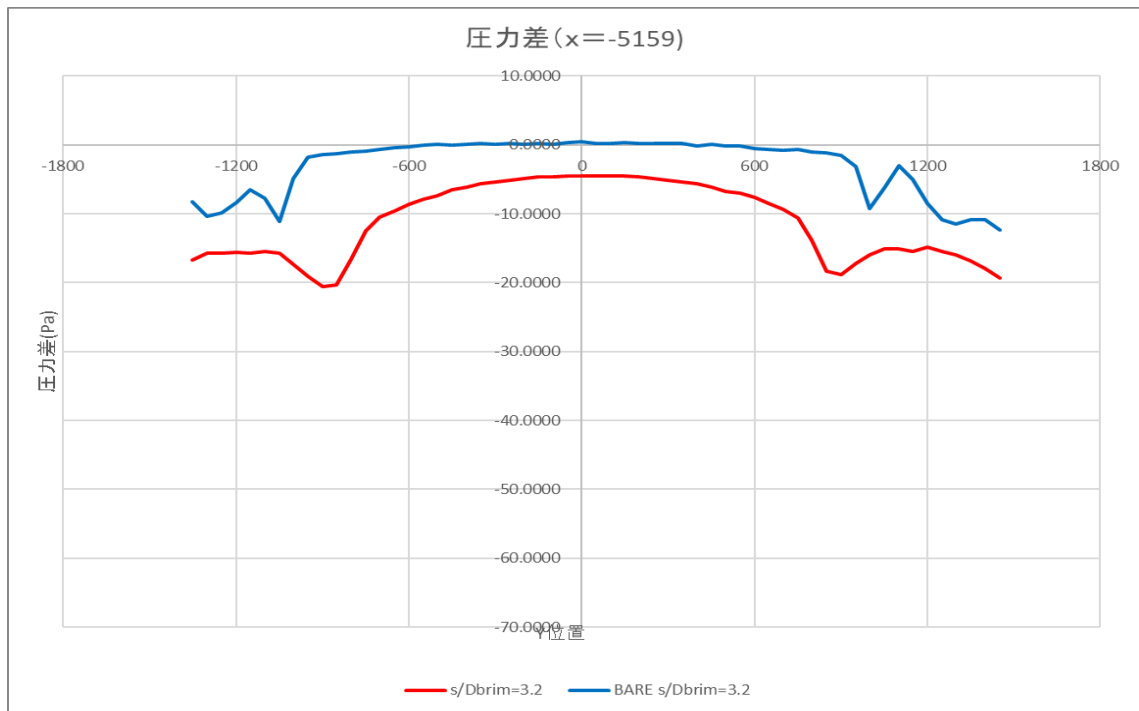
後方超音波鉛直方向流速分布図



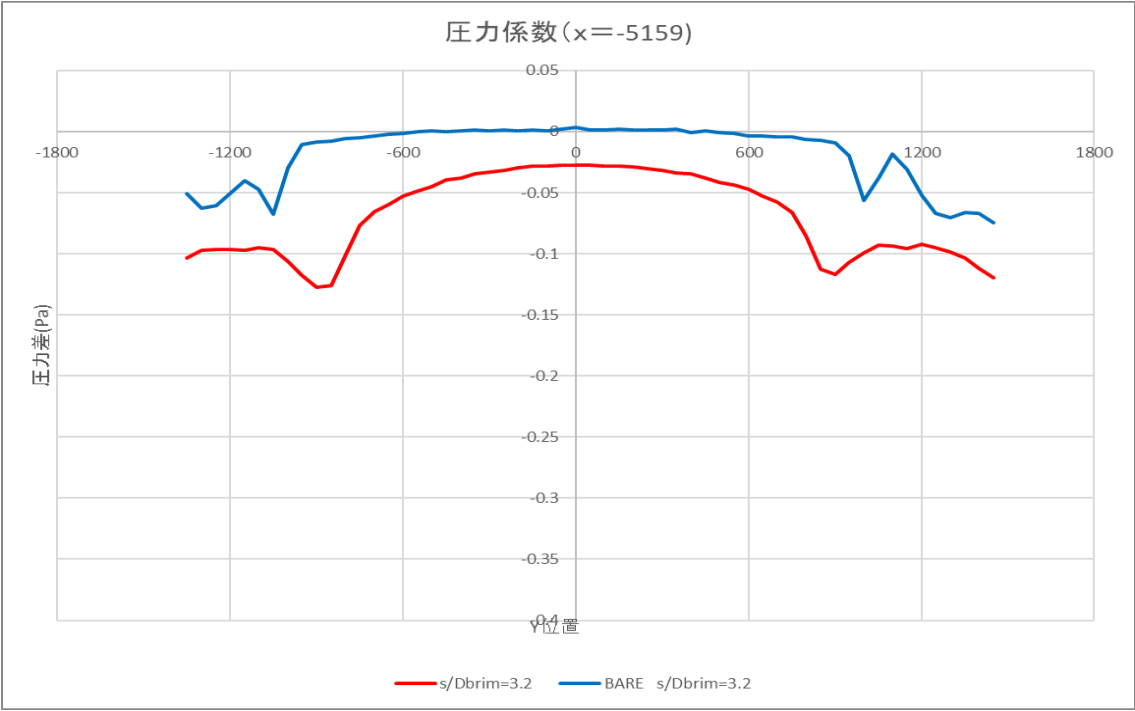
後方超音波主流方向無次元流速分布図

$s/D_{brim}=3.2$ X=-5159 レンズ有無比較

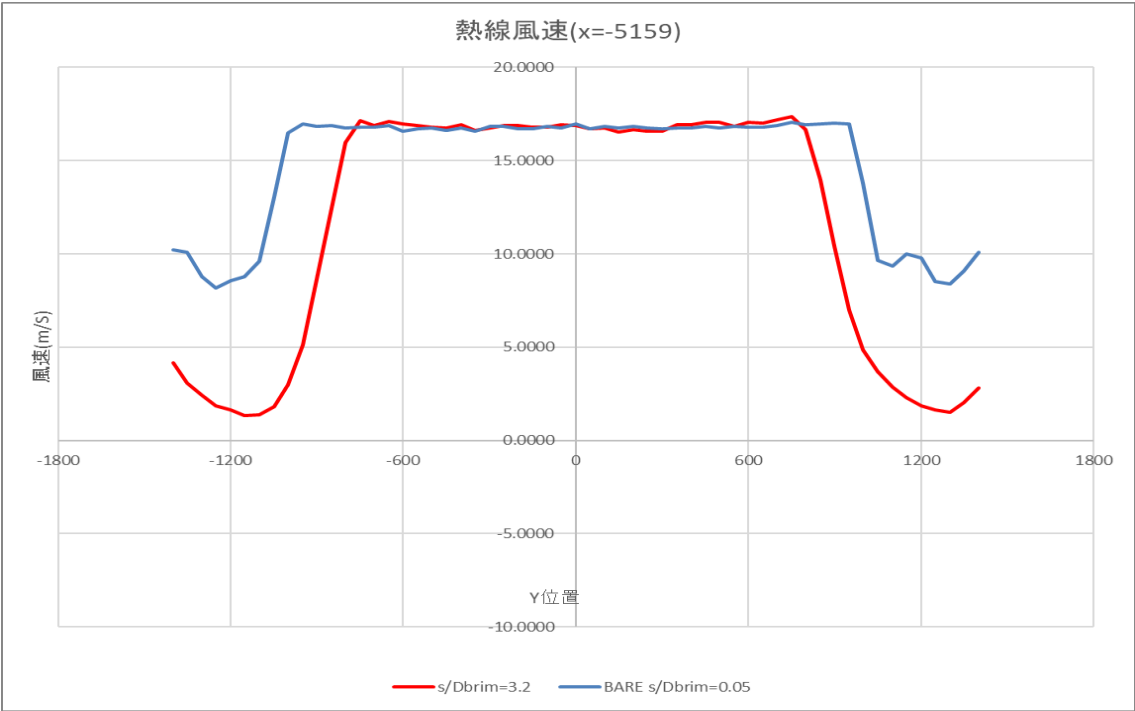
測定した圧力差プロファイルを図 4.260 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.261 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.262 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.263 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.264 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.265 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.266 に示す。



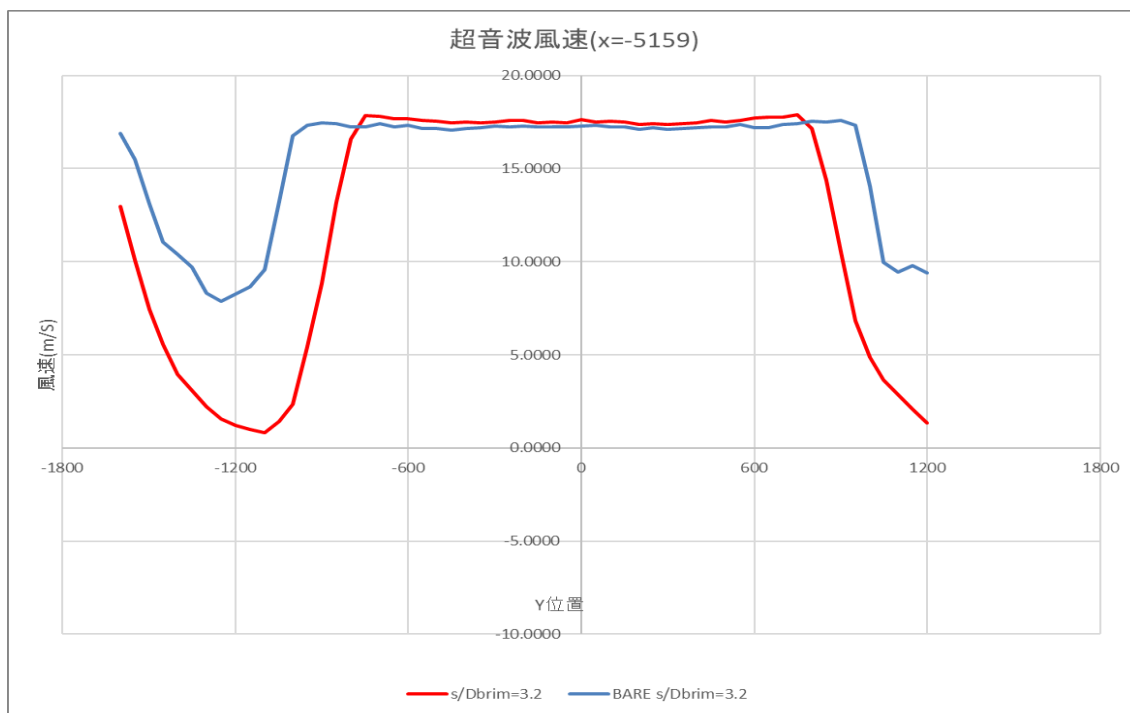
後方圧力差分布図



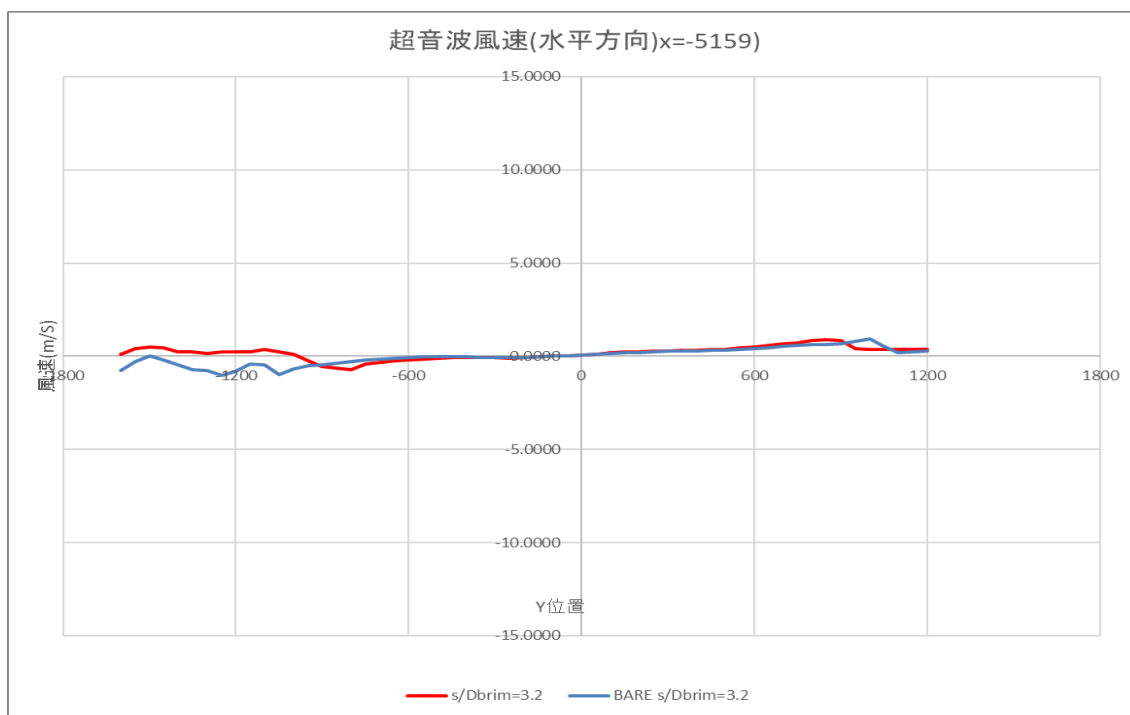
後方压力系数布图



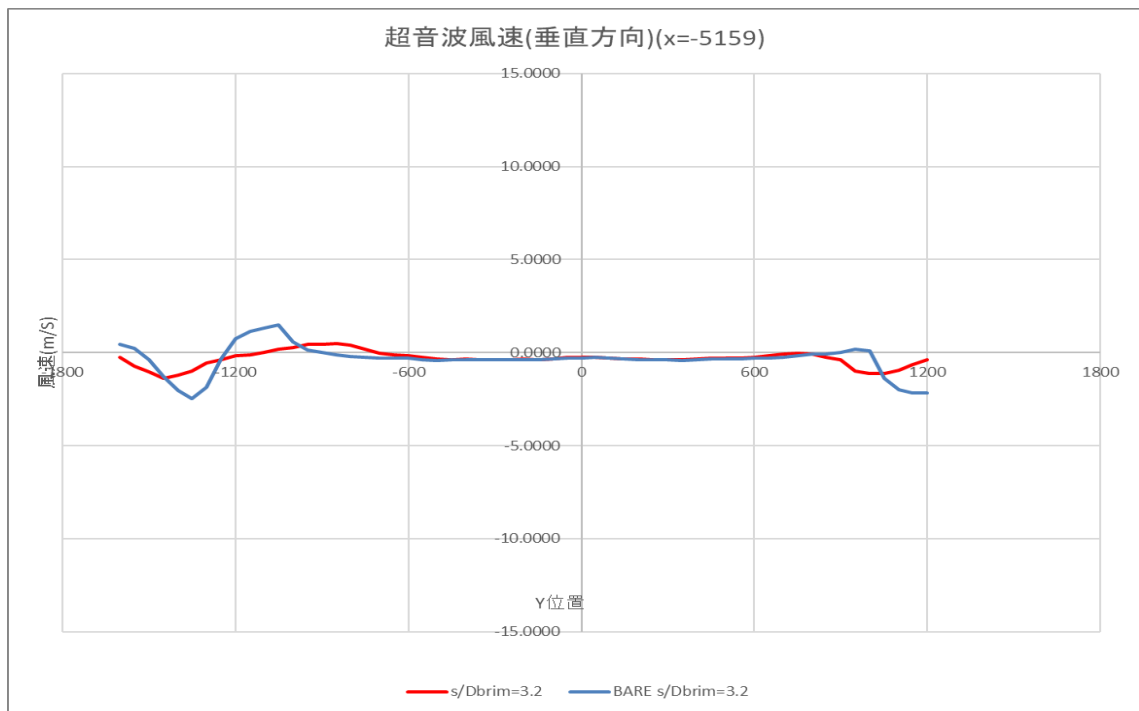
後方熱線流速布图



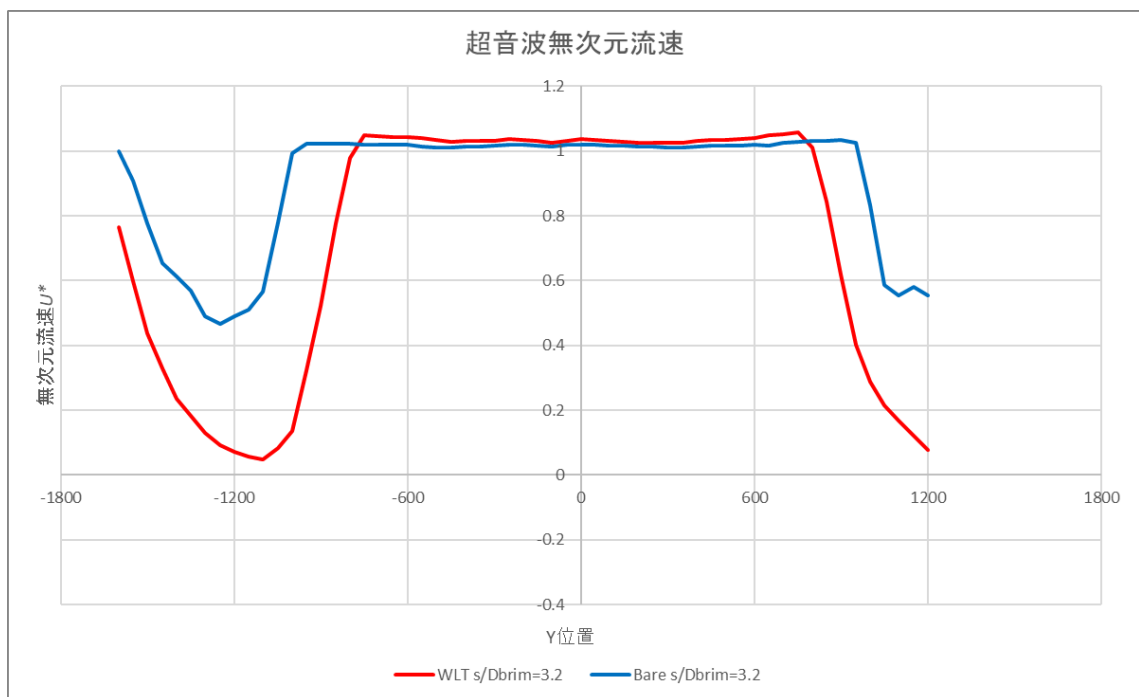
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



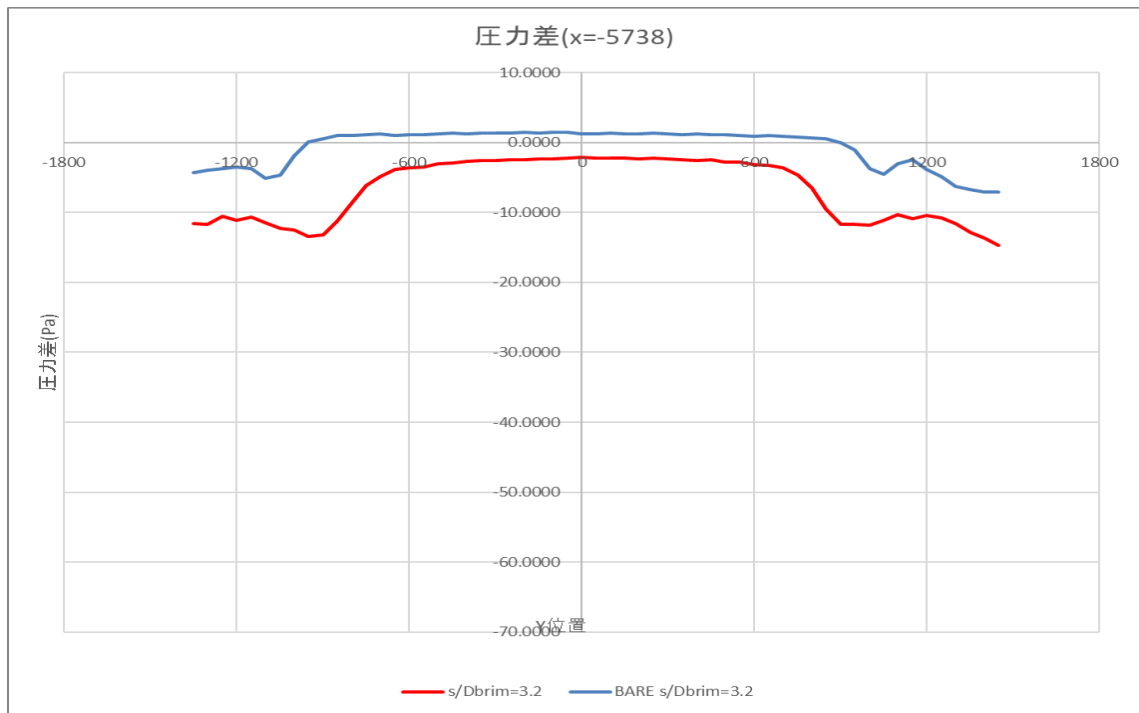
後方超音波鉛直方向流速分布図



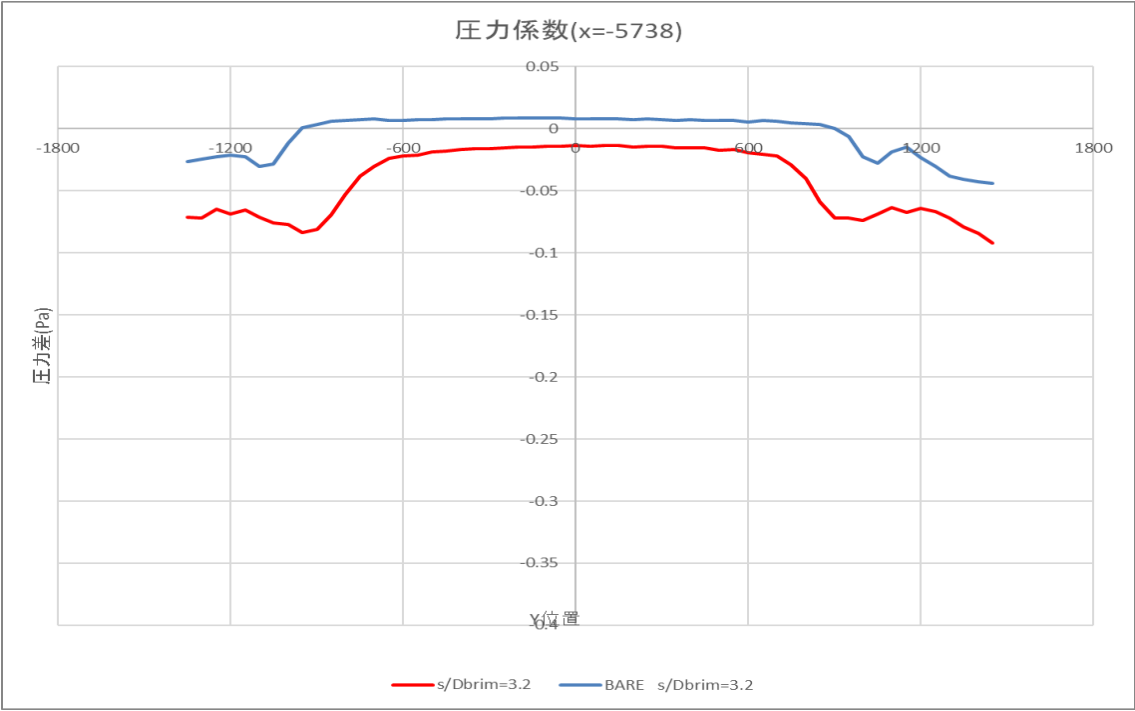
後方超音波主流方向無次元流速分布図

$s/D_{brim}=3.2$ X=-5738 レンズ有無比較

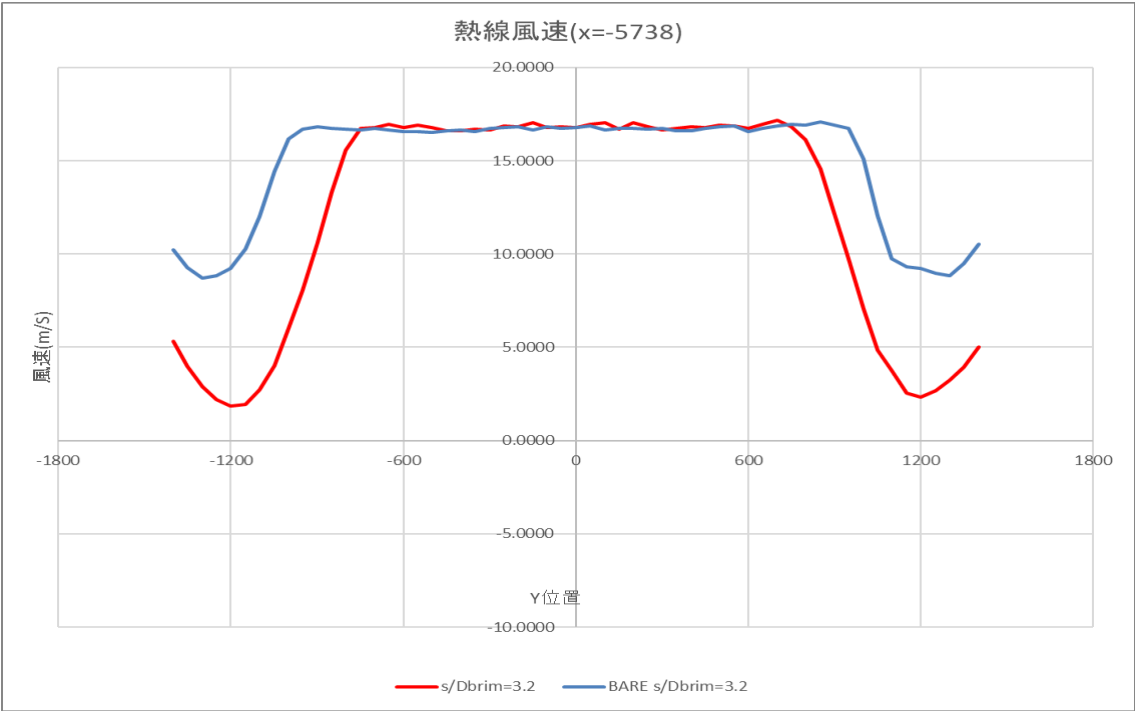
測定した圧力差プロファイルを図 4.267 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.268 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.269 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.270 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.271 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.272 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.273 に示す．



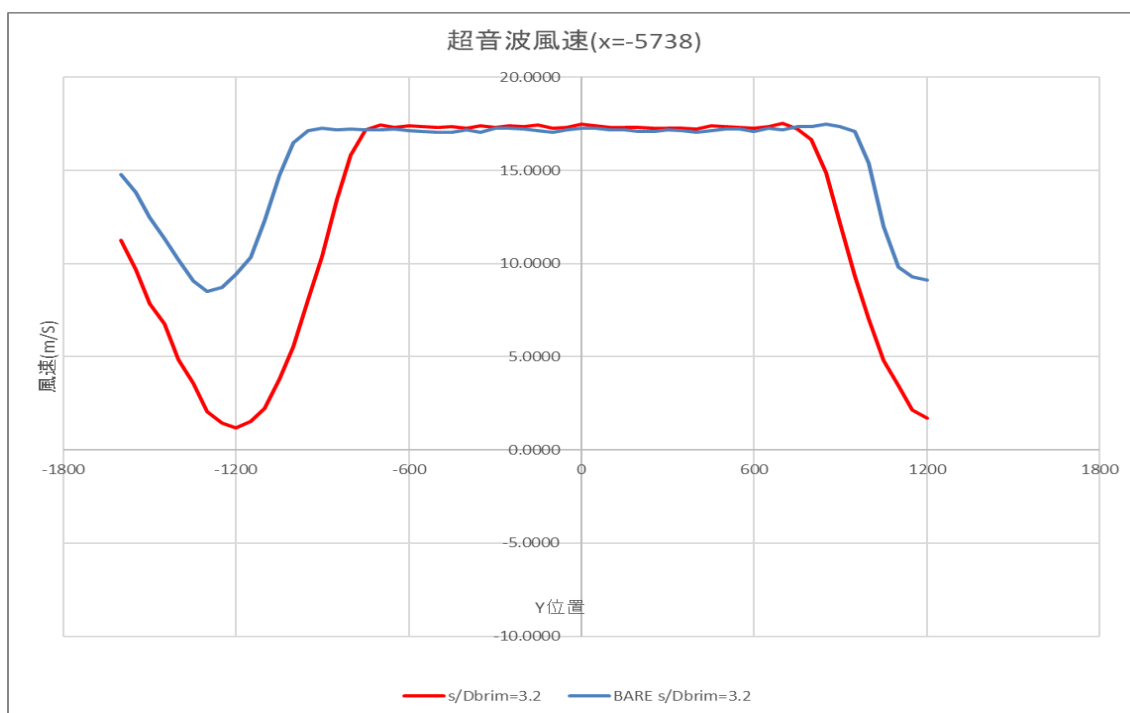
後方圧力差分布図



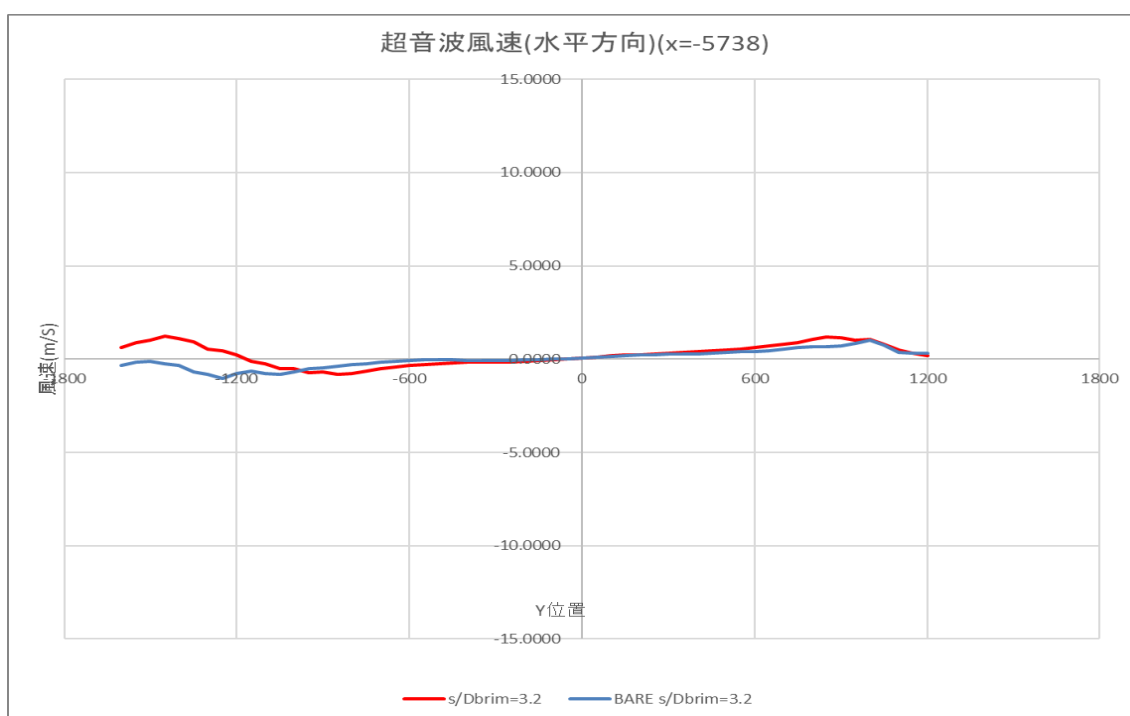
後方压力系数布图



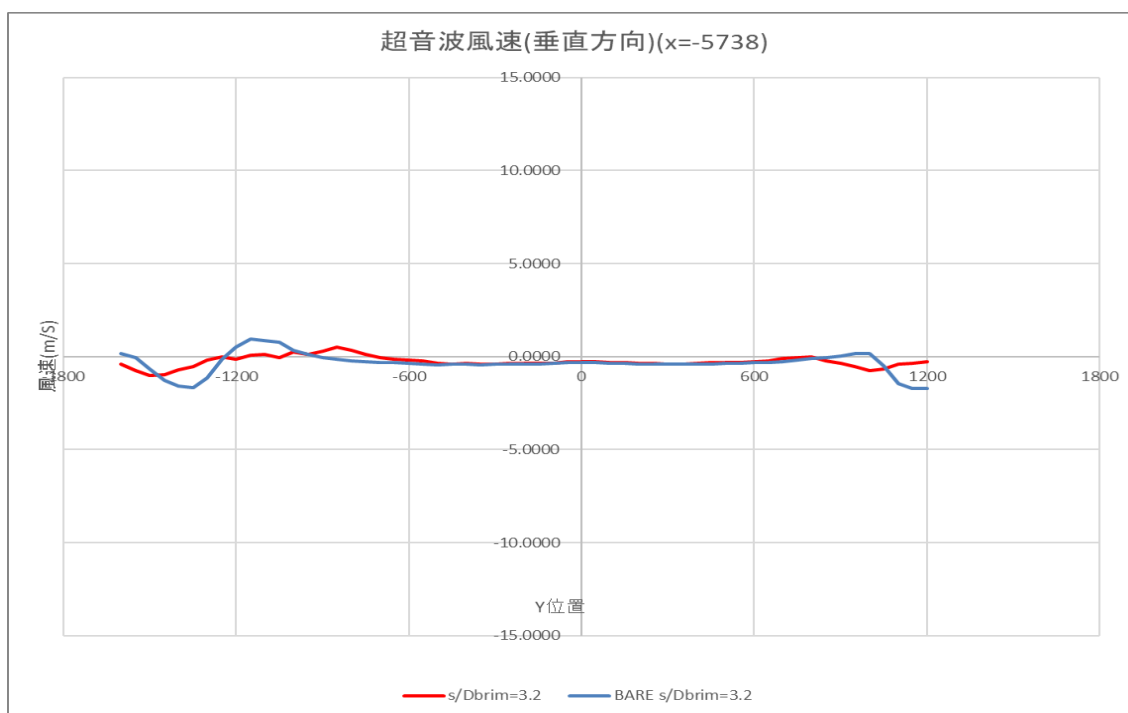
後方熱線流速布图



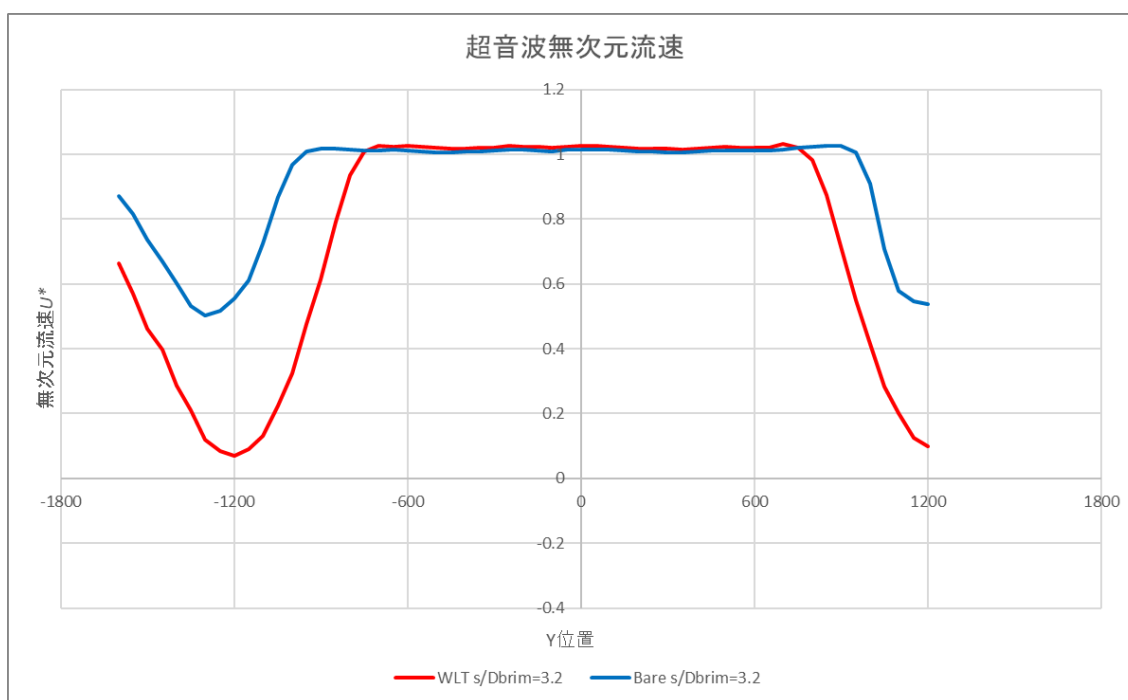
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



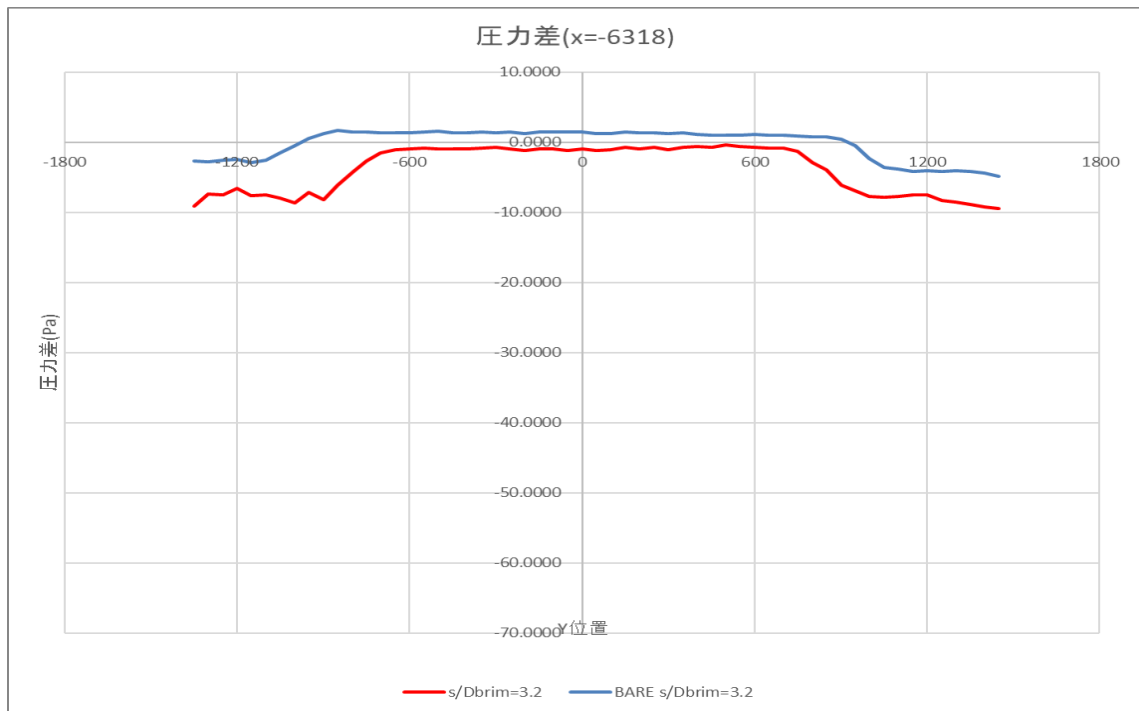
後方超音波鉛直方向流速分布図



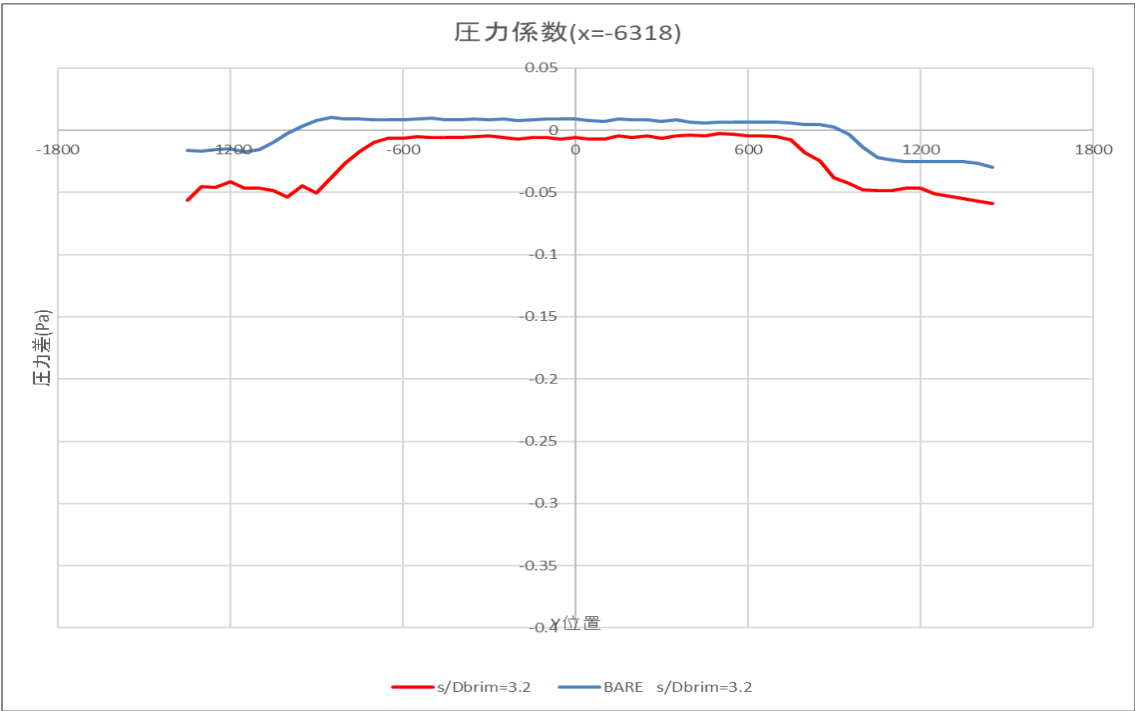
後方超音波主流方向無次元流速分布図

$s/D_{brim}=3.2$ $X=-6318$ レンズ有無比較

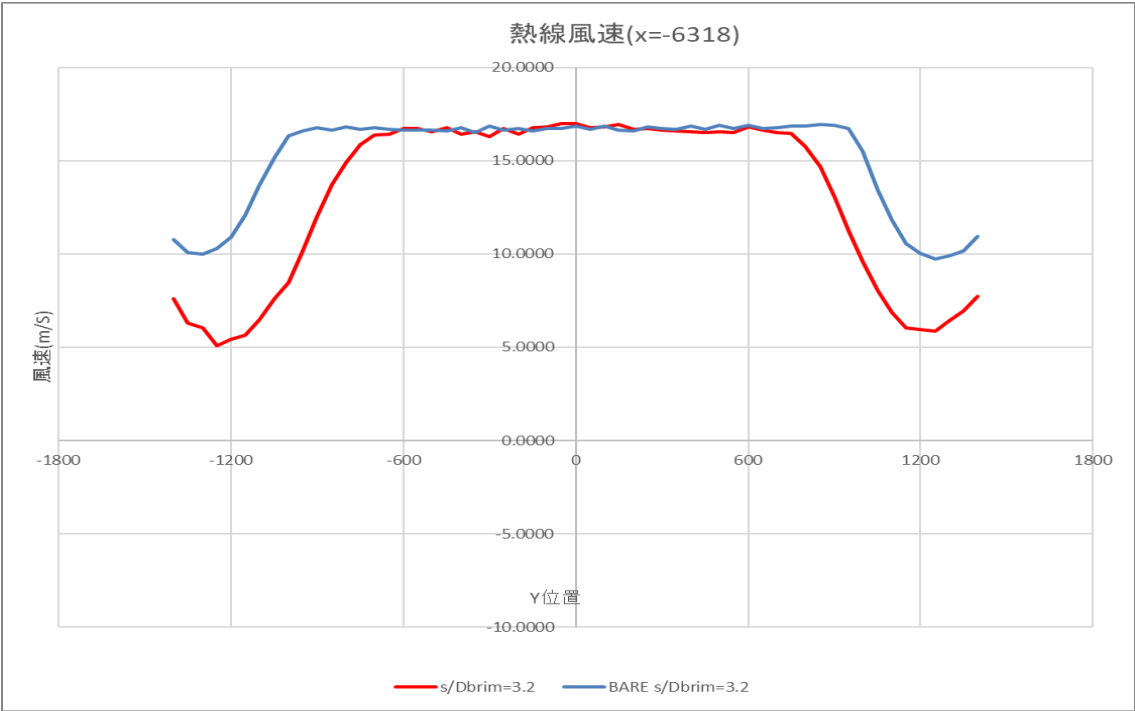
測定した圧力差プロファイルを図 4.274 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.275 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.276 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.277 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.278 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.279 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.280 に示す。



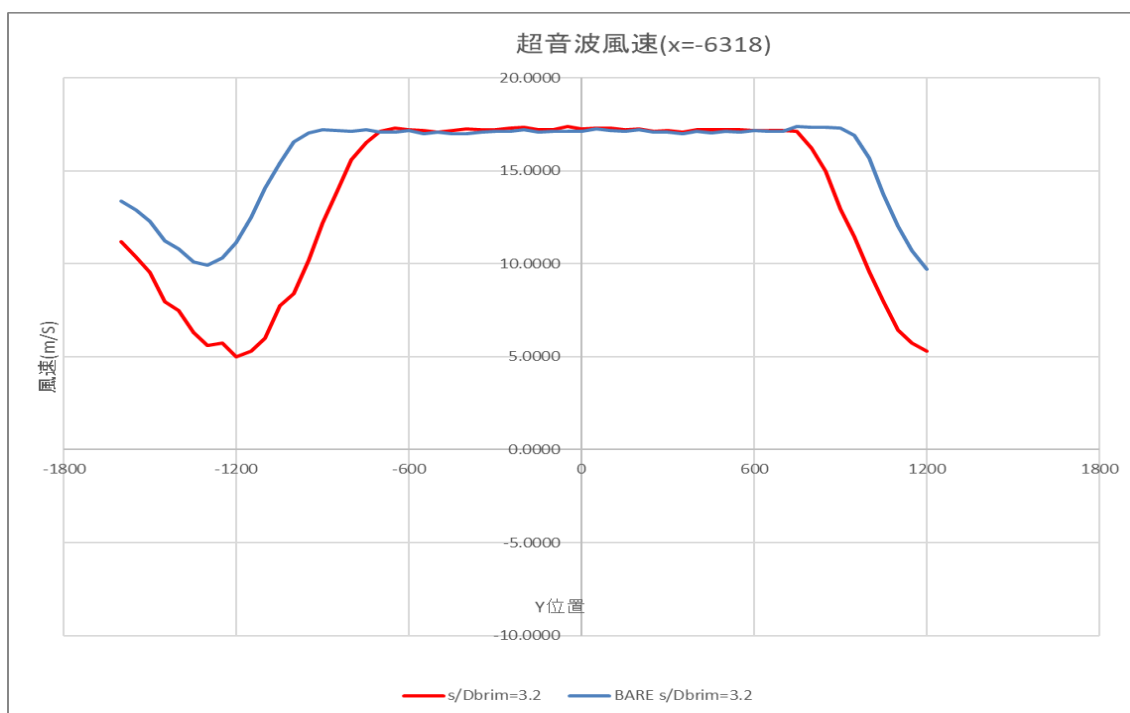
後方圧力差分布図



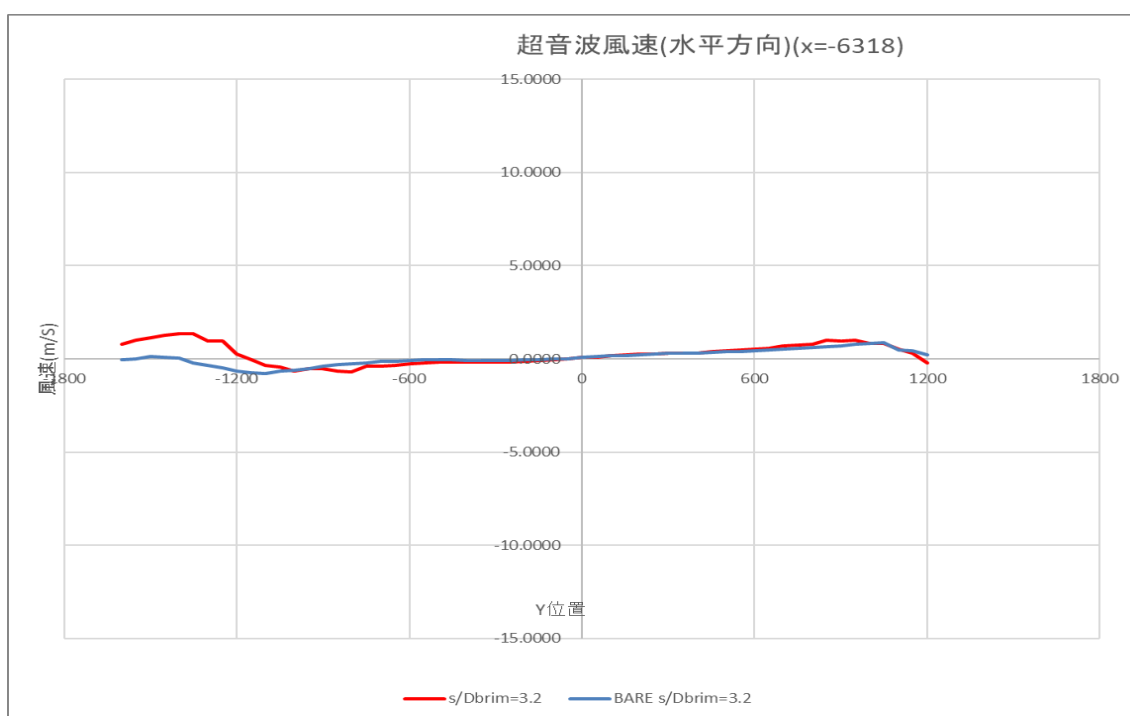
後方压力系数布图



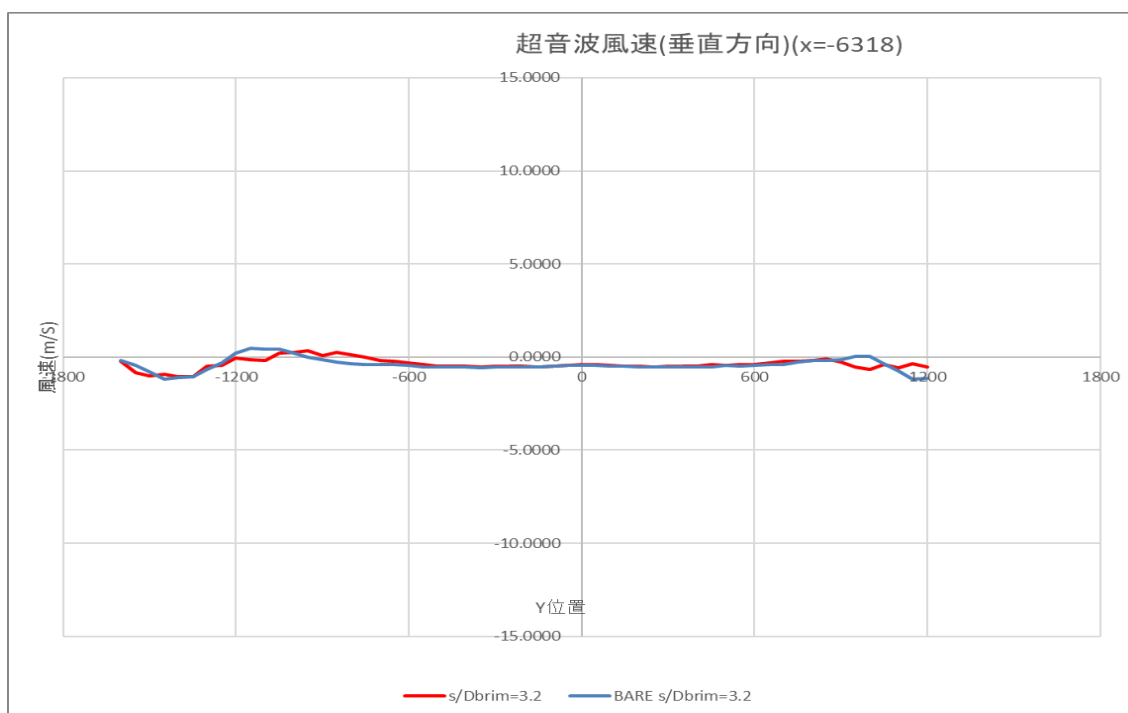
後方熱線流速布图



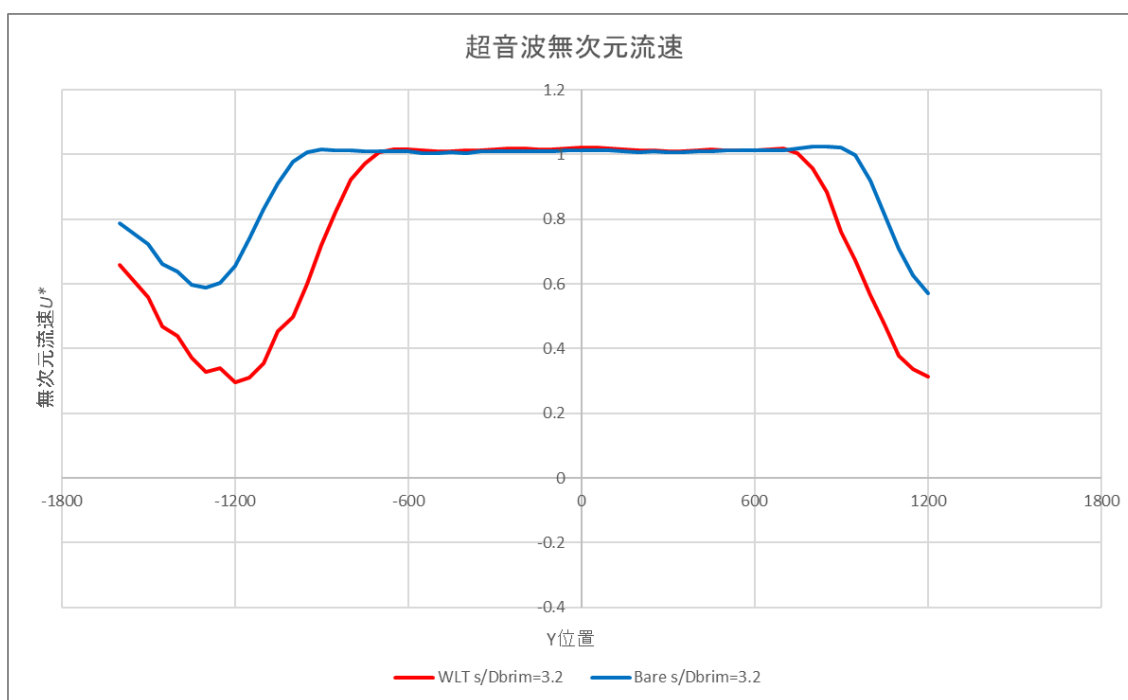
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



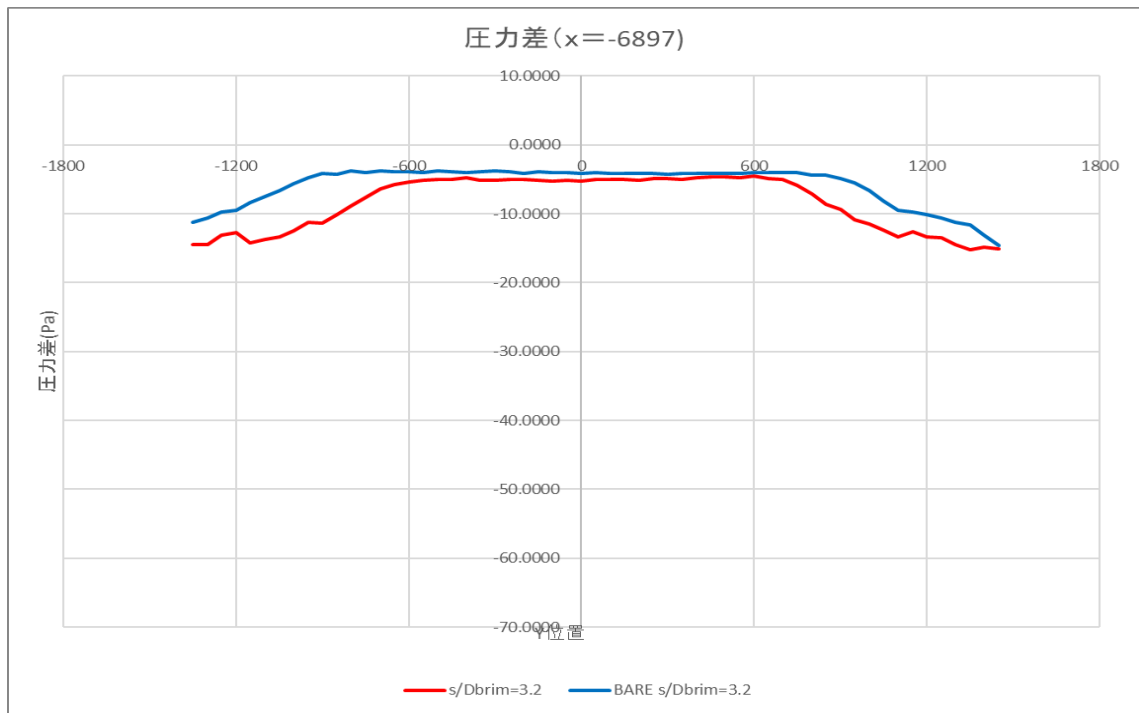
後方超音波鉛直方向流速分布図



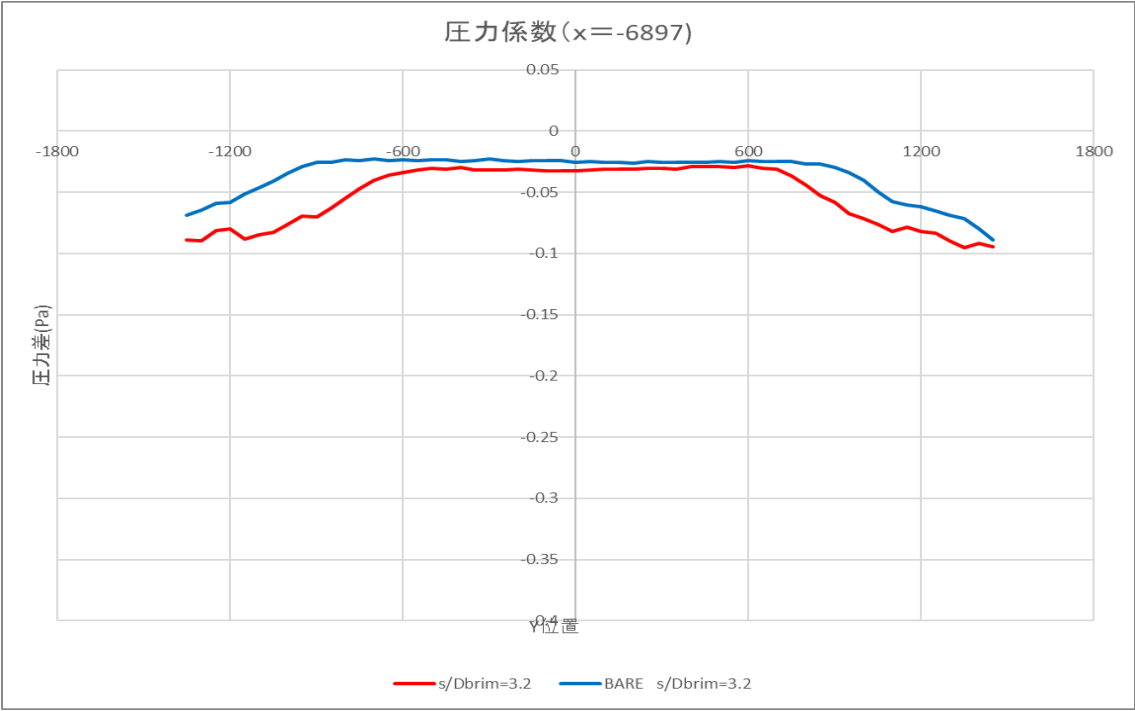
後方超音波主流方向無次元流速分布図

$s/D_{brim}=3.2$ $X=-6897$ レンズ有無比較

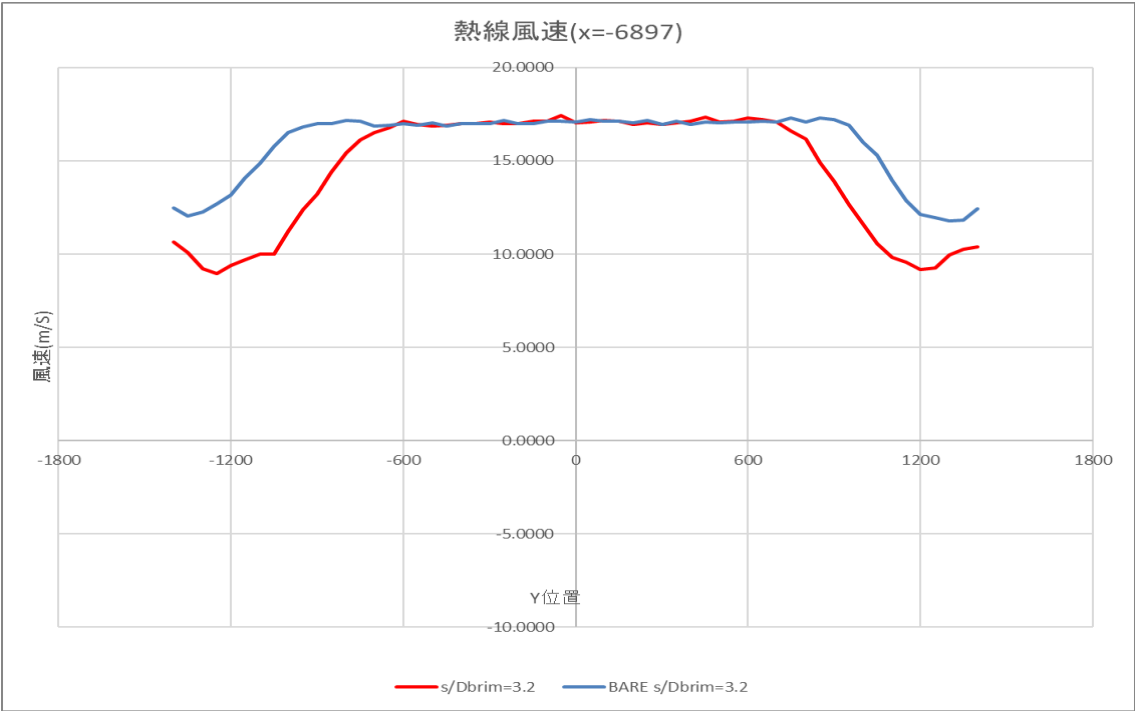
測定した圧力差プロファイルを図 4.281 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.282 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.283 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.284 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.285 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.286 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.287 に示す。



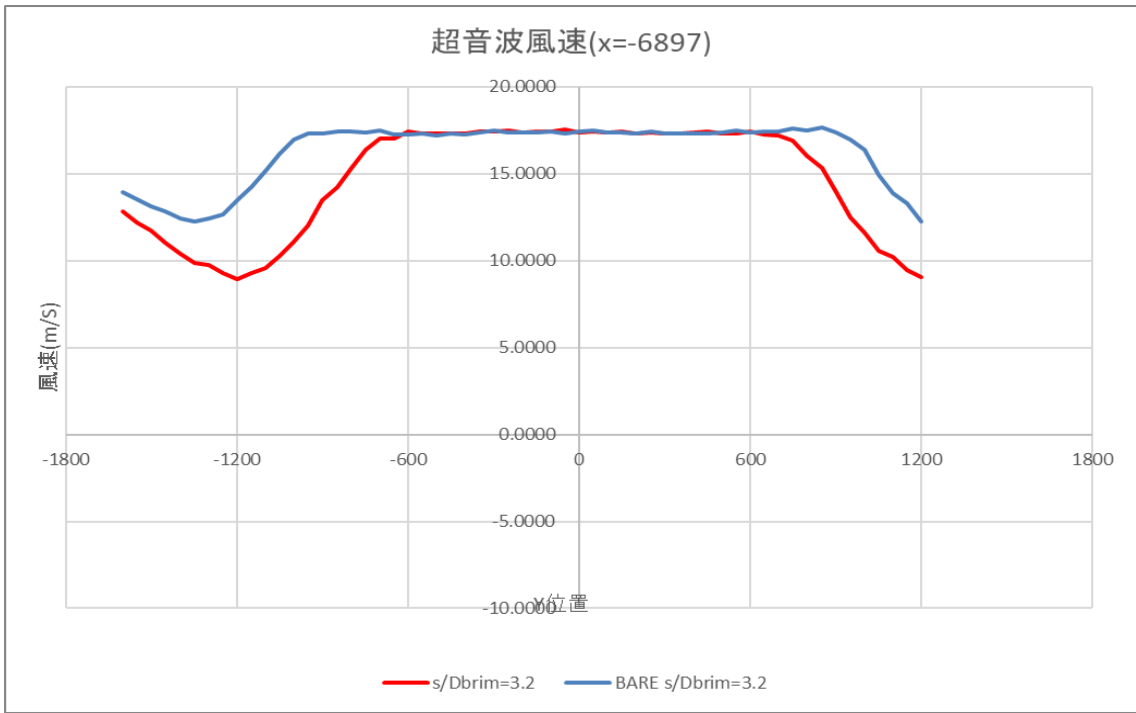
後方圧力差分布図



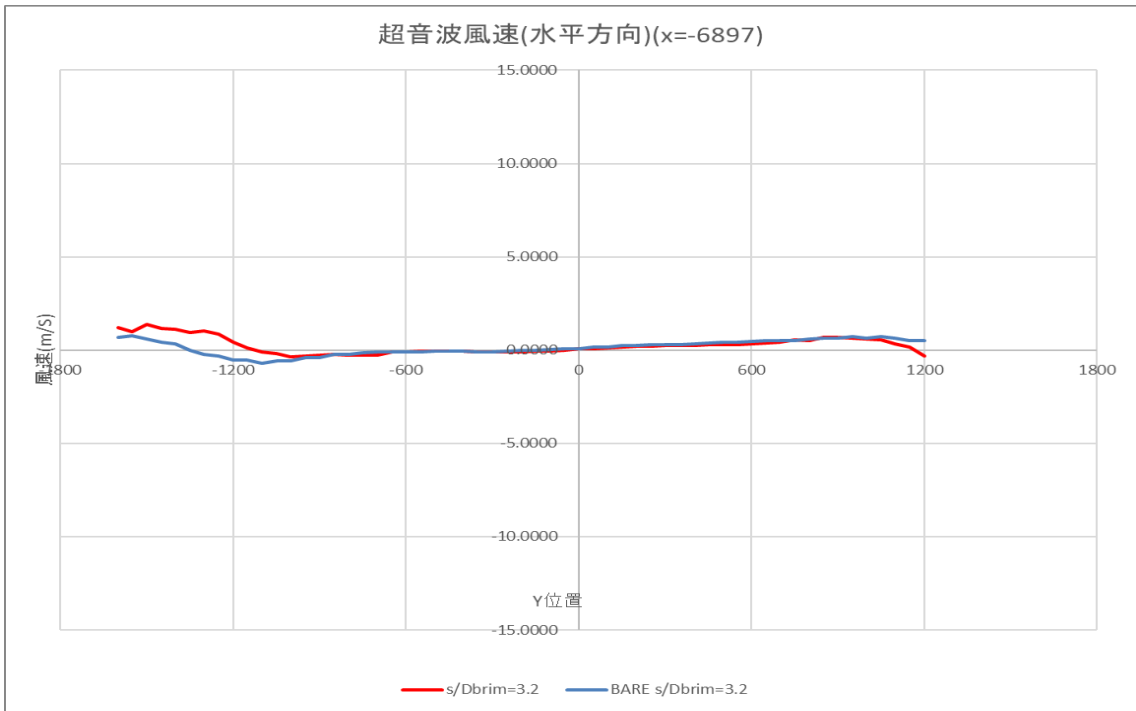
後方压力係数布図



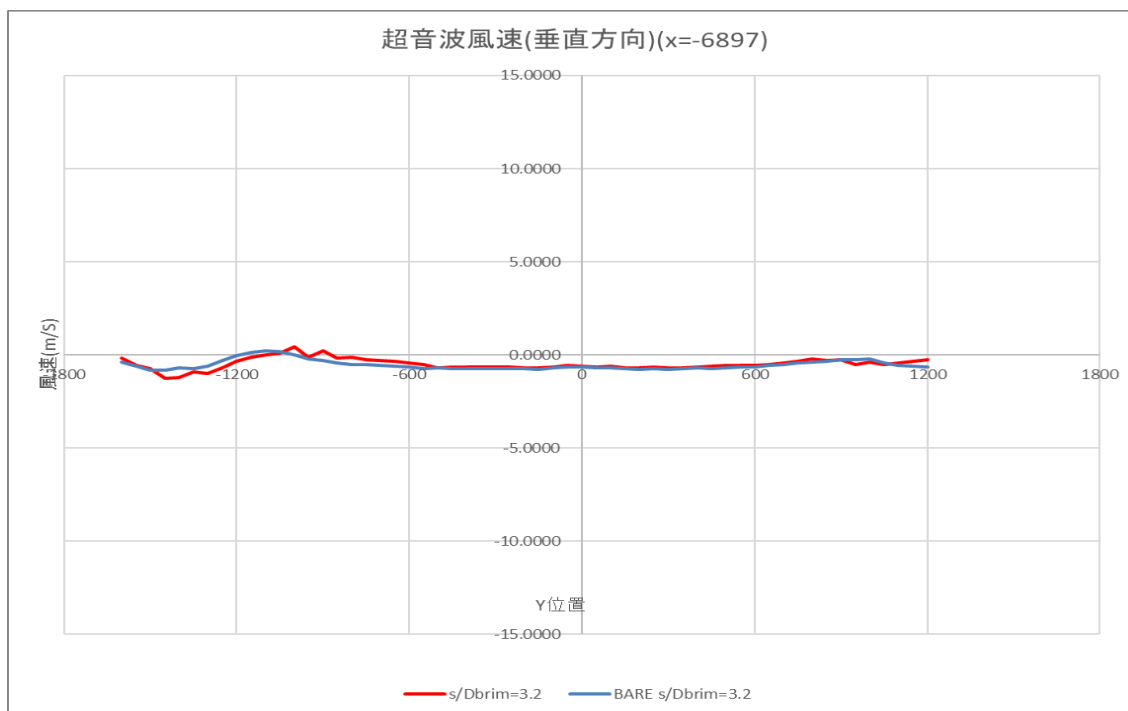
後方熱線流速布図



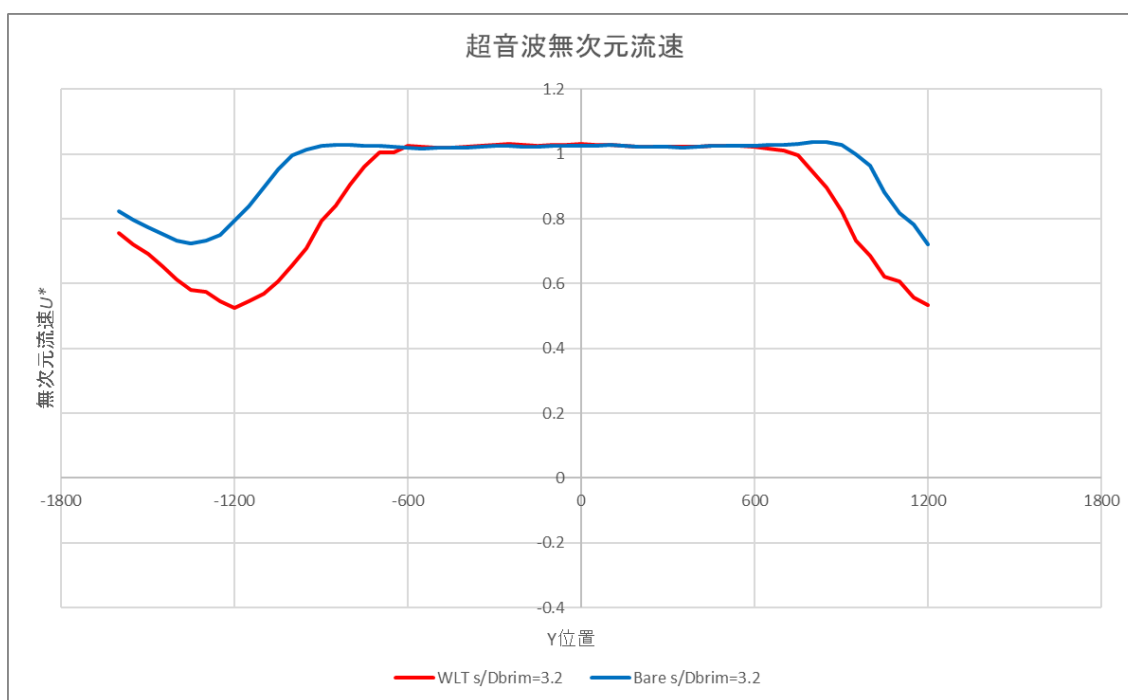
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



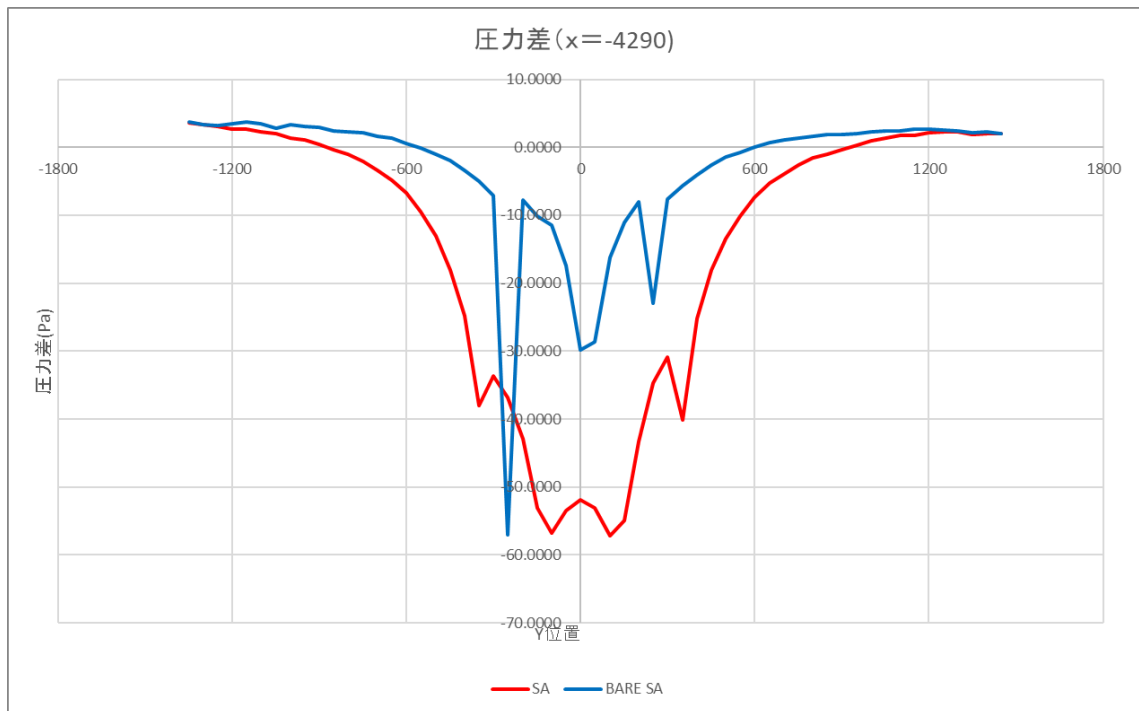
後方超音波鉛直方向流速分布図



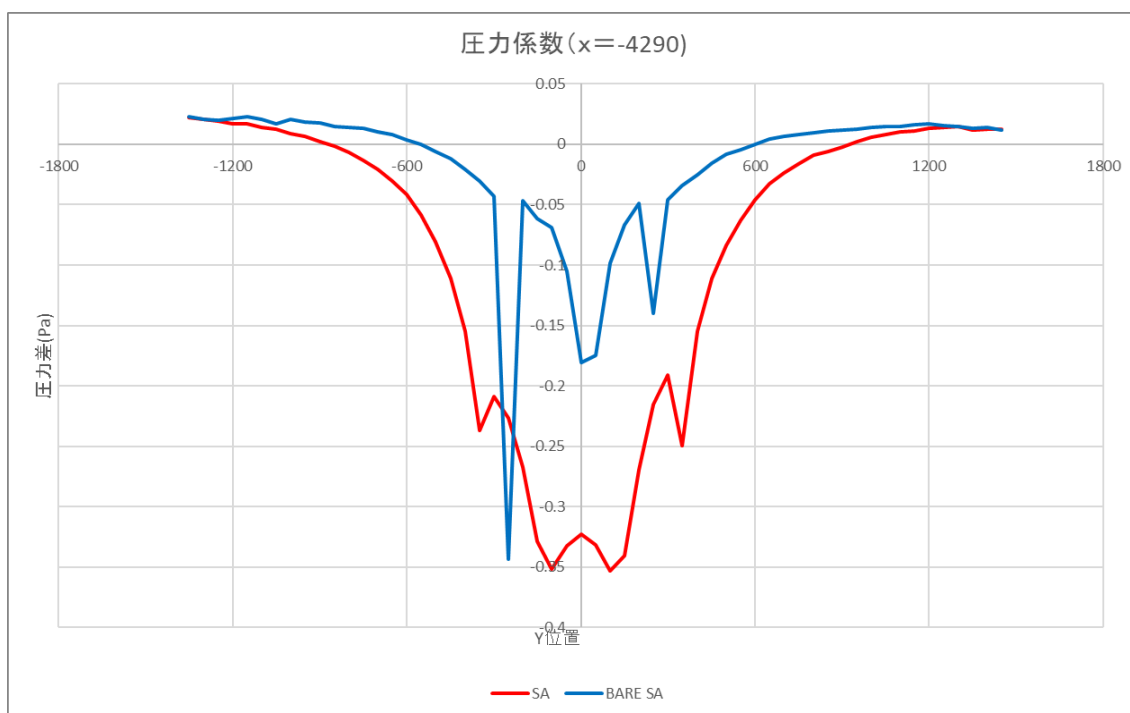
後方超音波主流方向無次元流速分布図

単基 SA X=-4290 レンズ有無比較

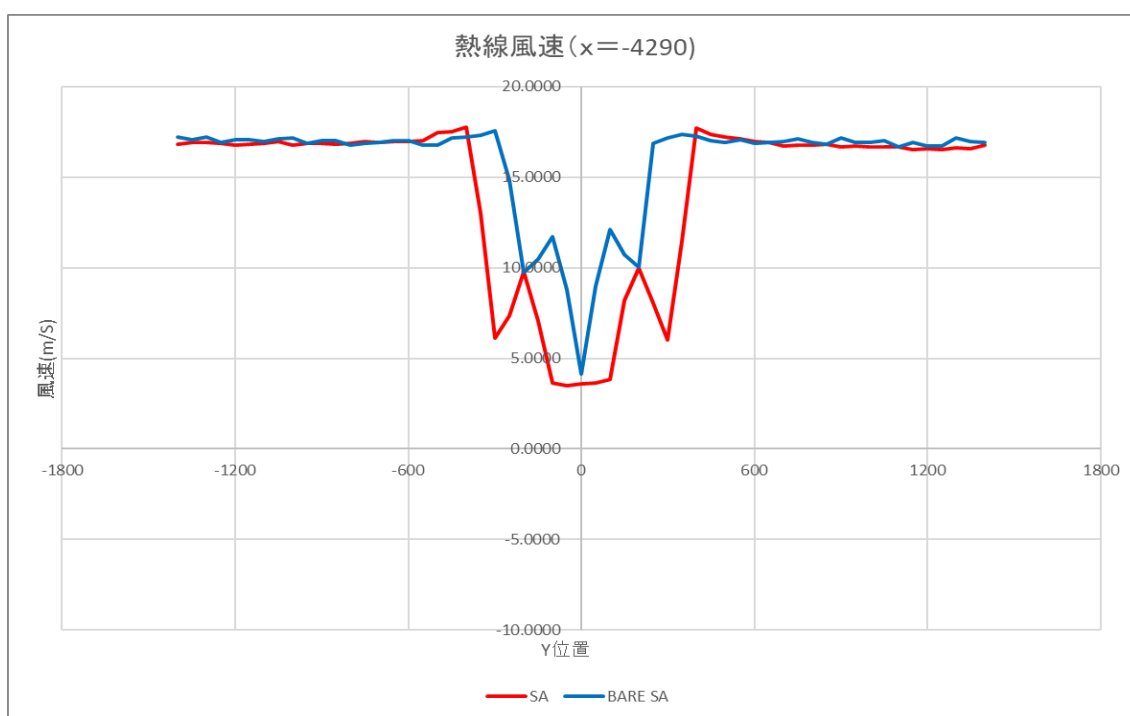
測定した圧力差プロファイルを図 4.288 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.289 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.290 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.291 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.292 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.293 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.294 に示す．



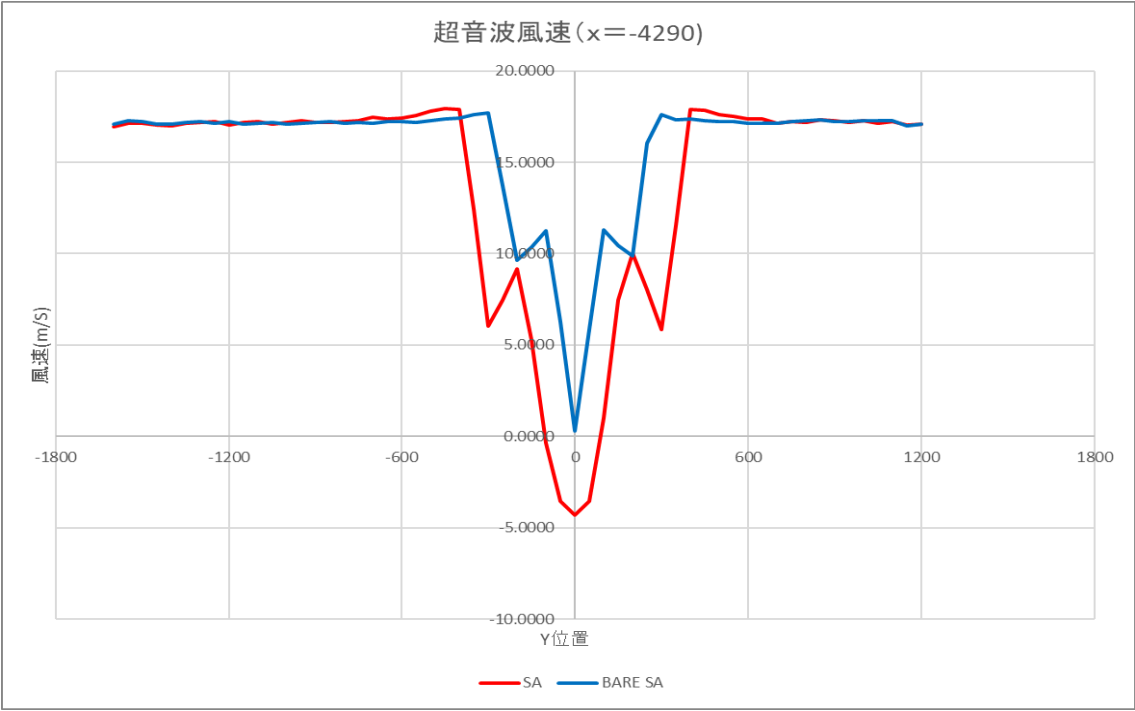
後方圧力差分布図



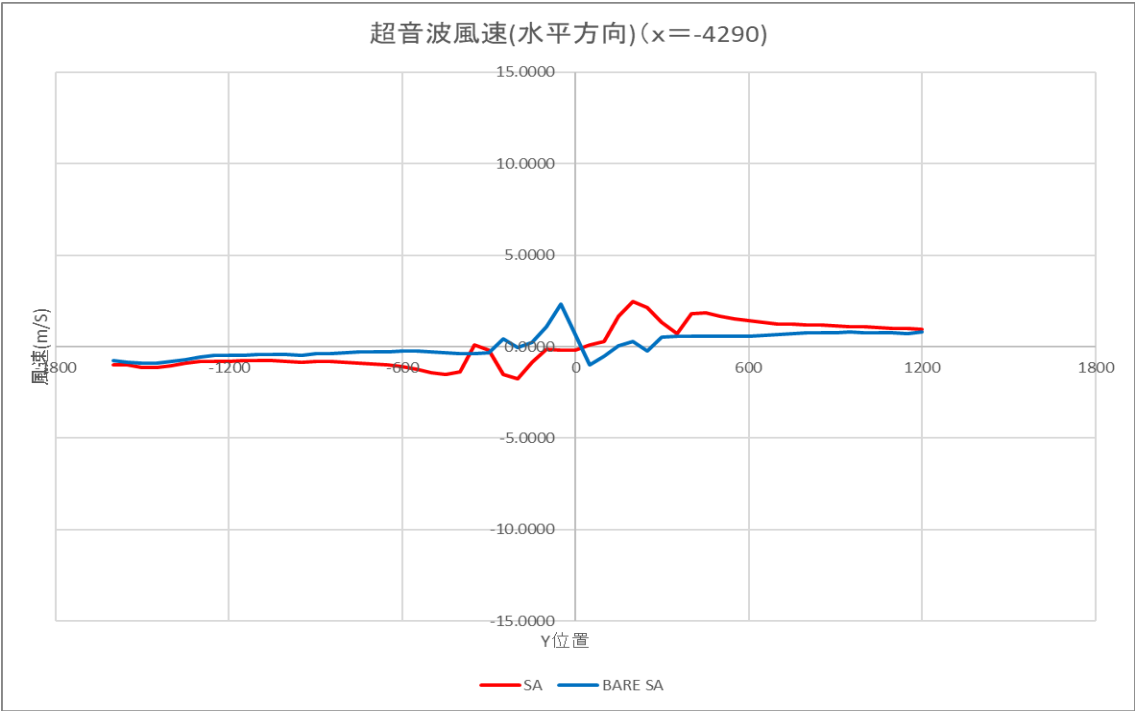
後方压力系数布图



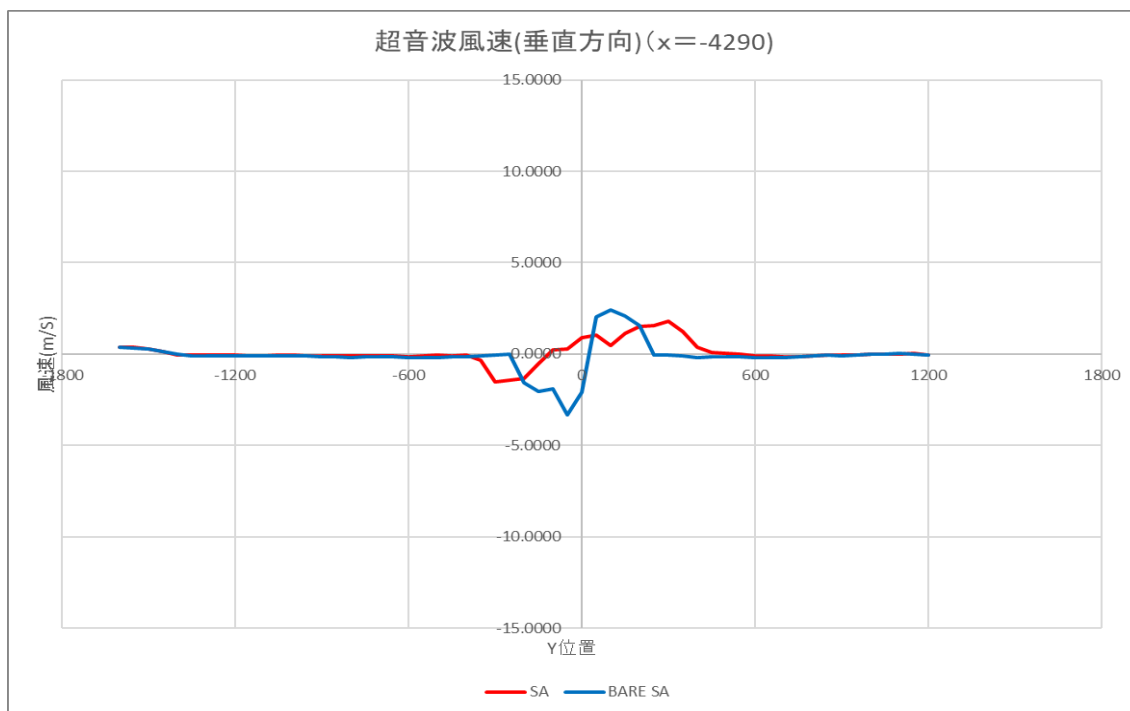
後方熱線流速布图



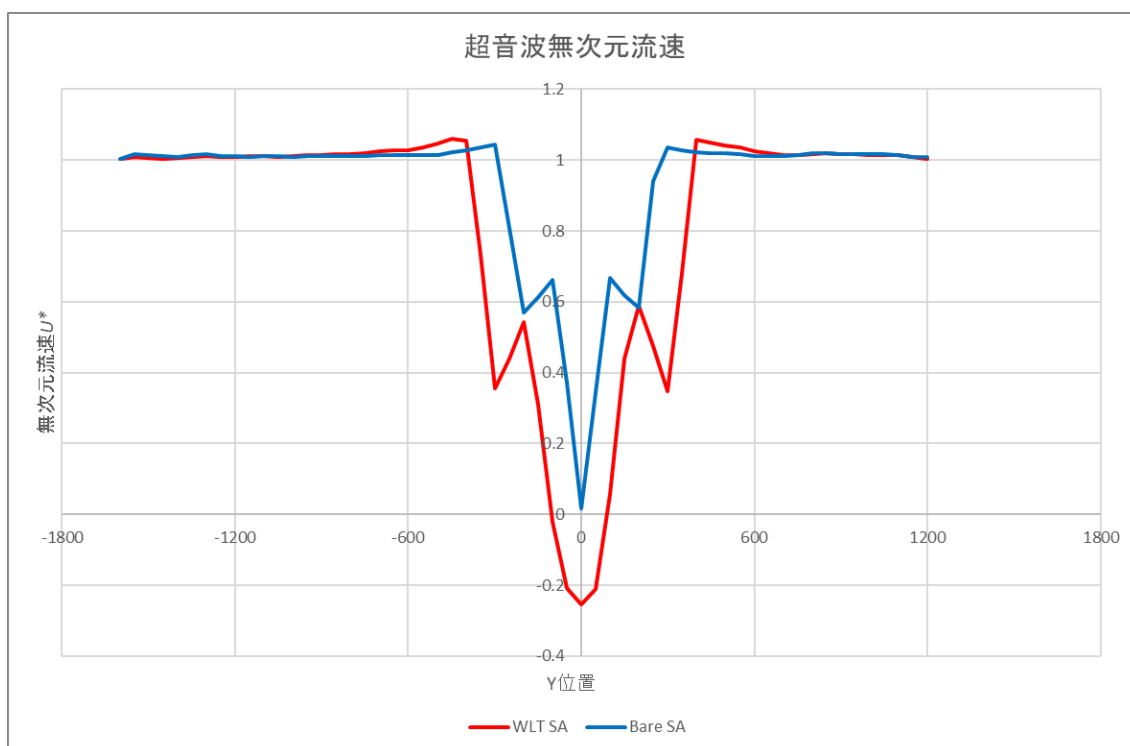
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



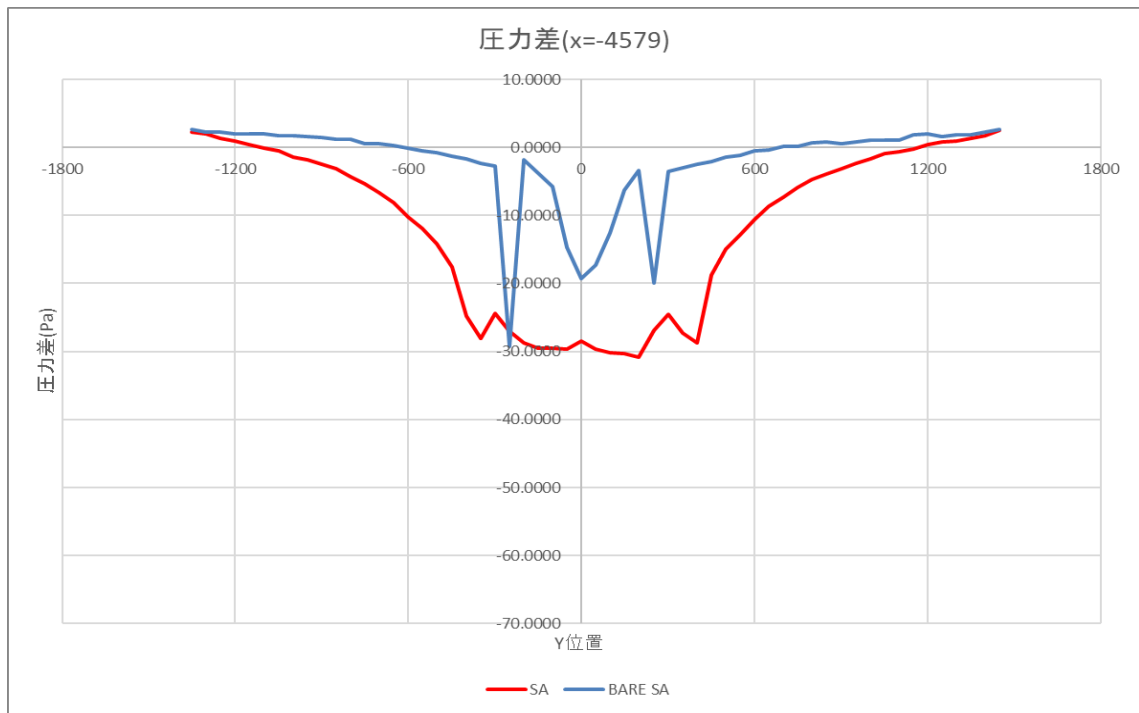
後方超音波鉛直方向流速分布図



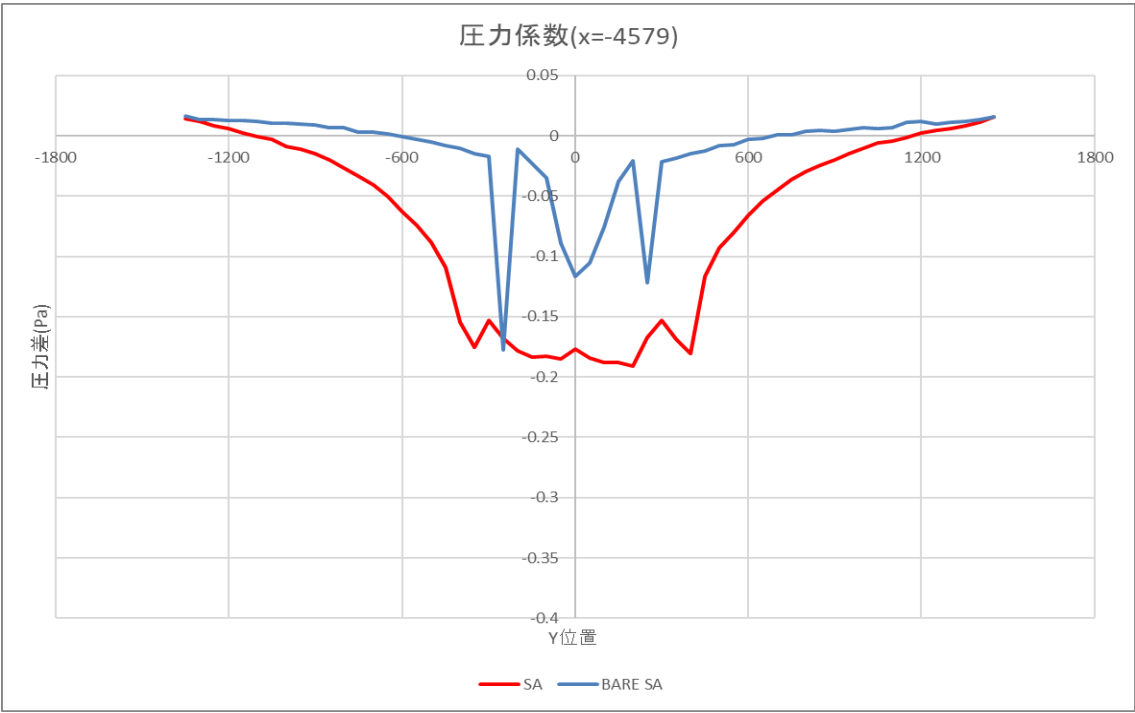
後方超音波主流方向無次元流速分布図

単基 SA $X = -4579$ レンズ有無比較

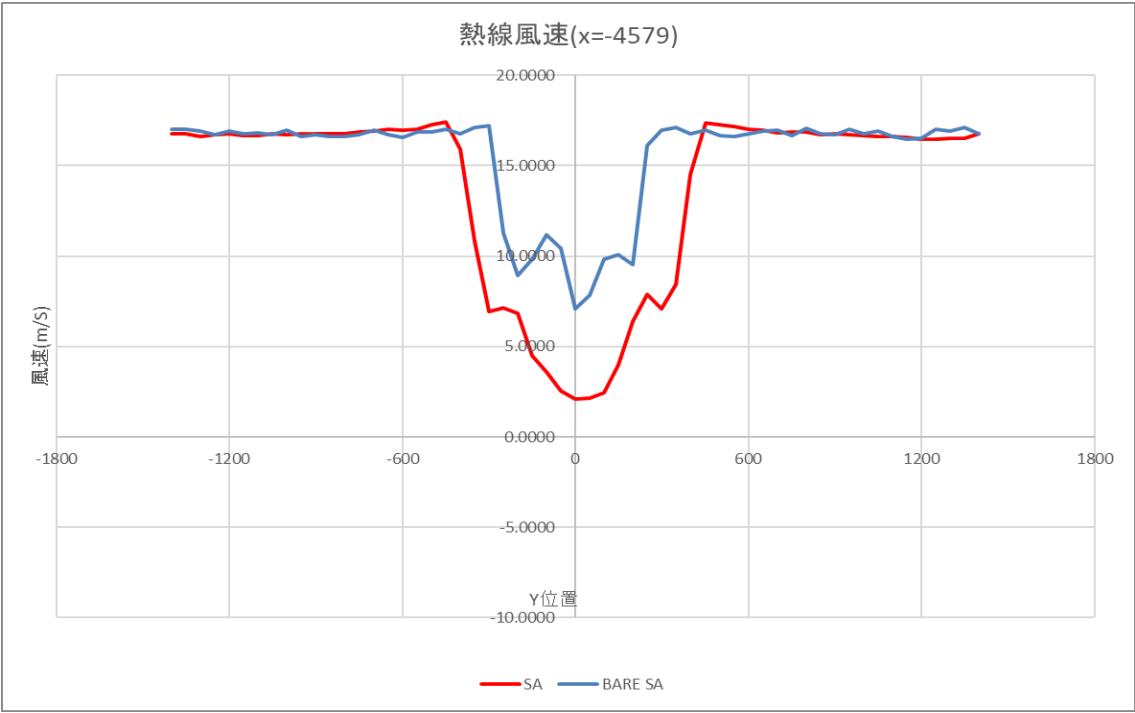
測定した圧力差プロファイルを図 4.295 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.296 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.297 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.298 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.299 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.300 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.301 に示す。



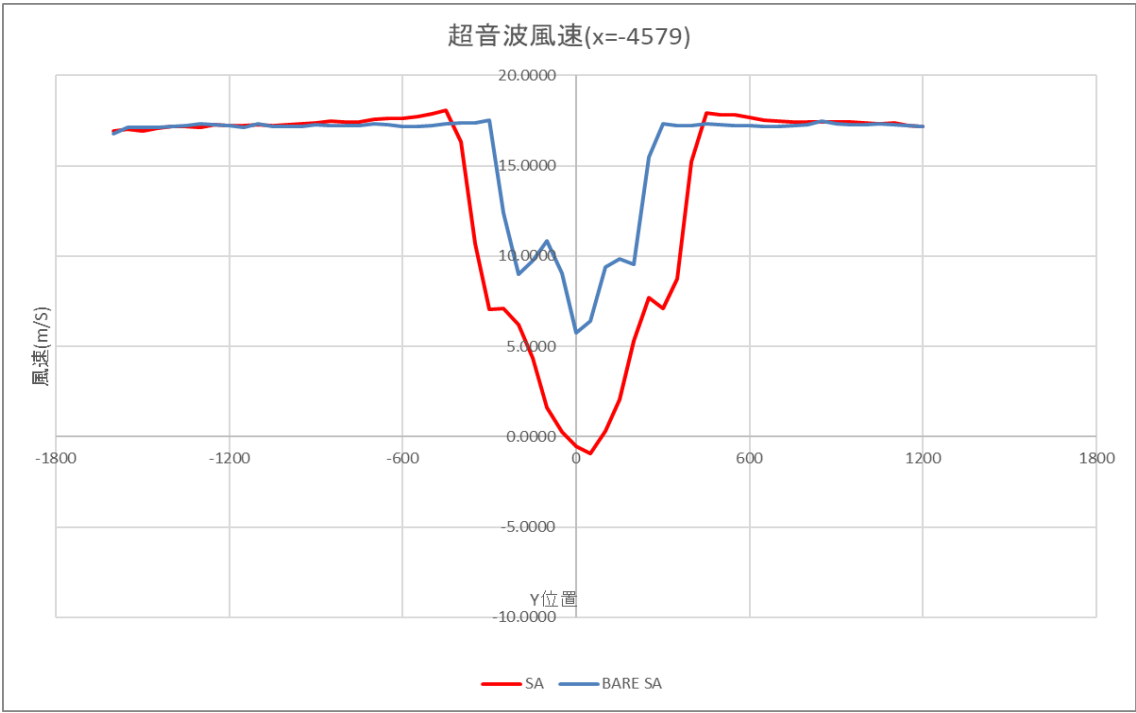
後方圧力差分布図



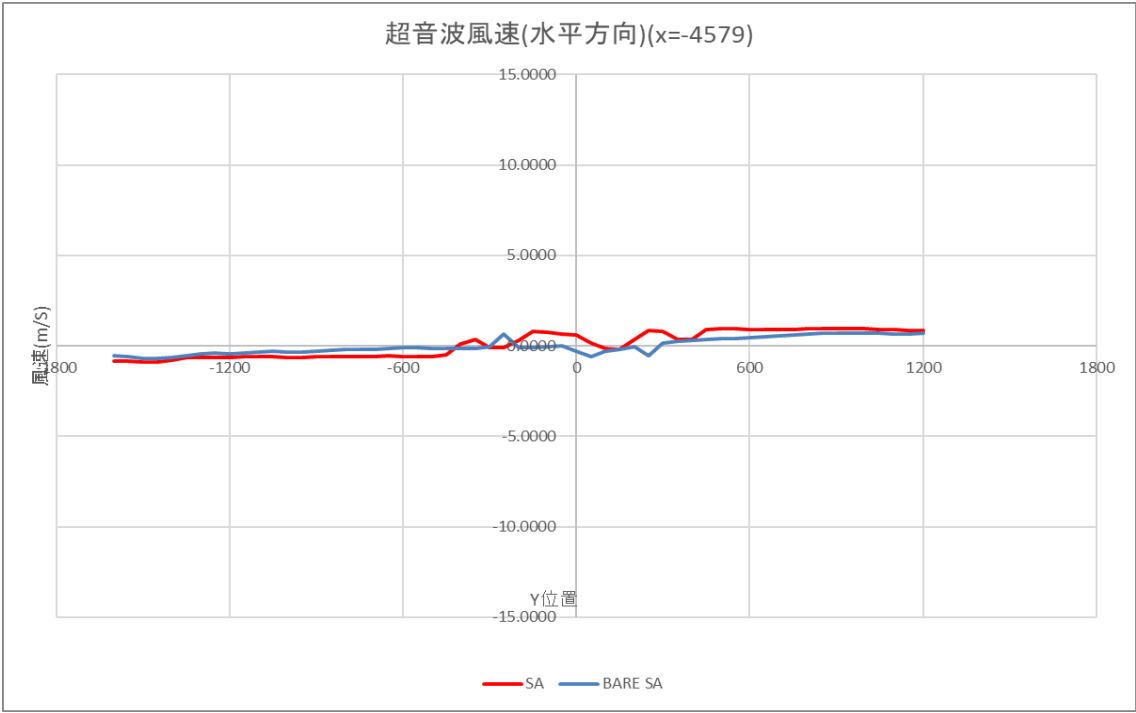
後方压力係数布図



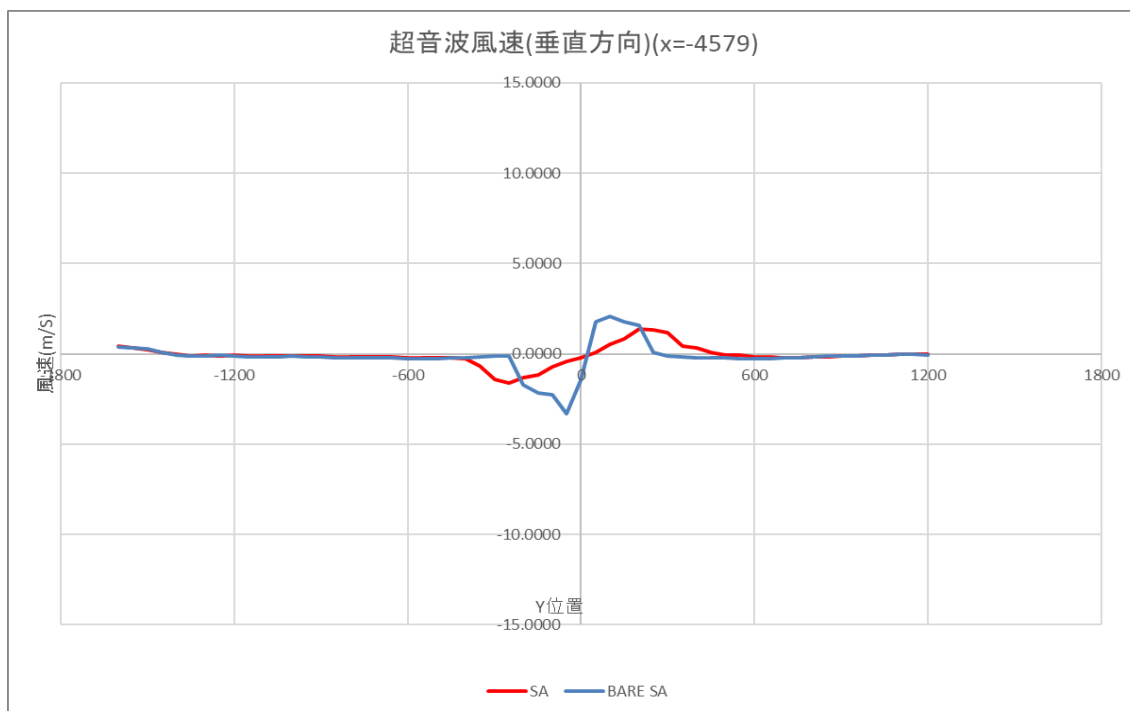
後方熱線流速布図



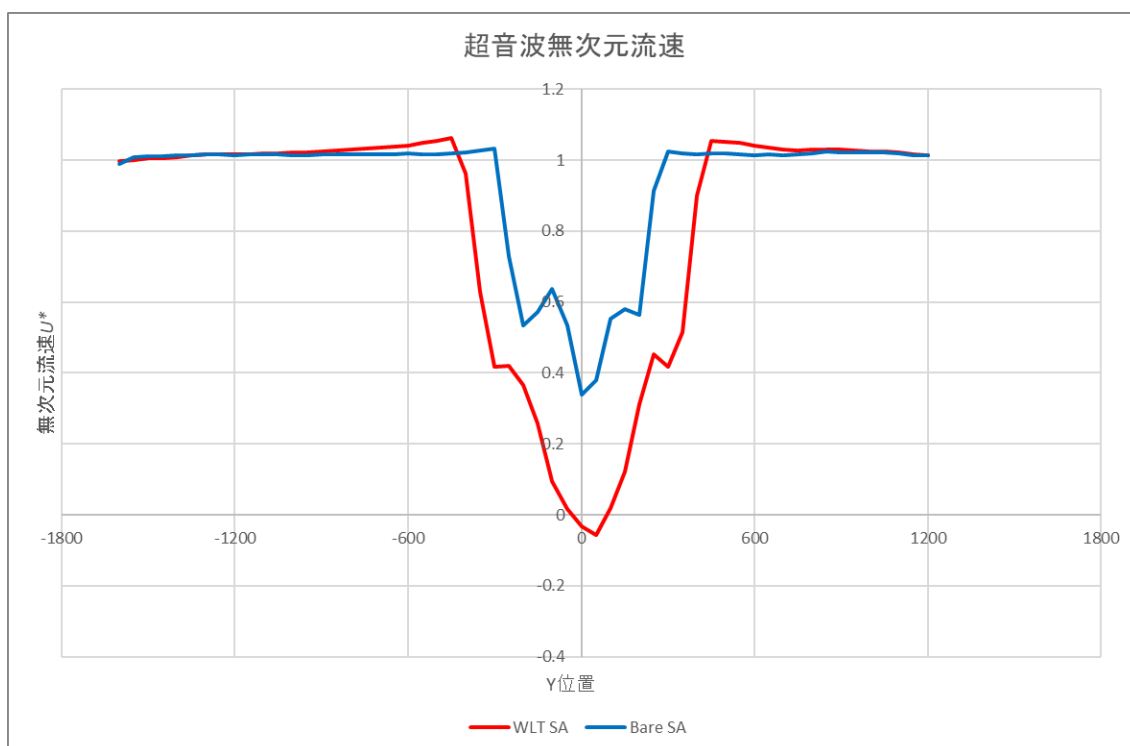
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



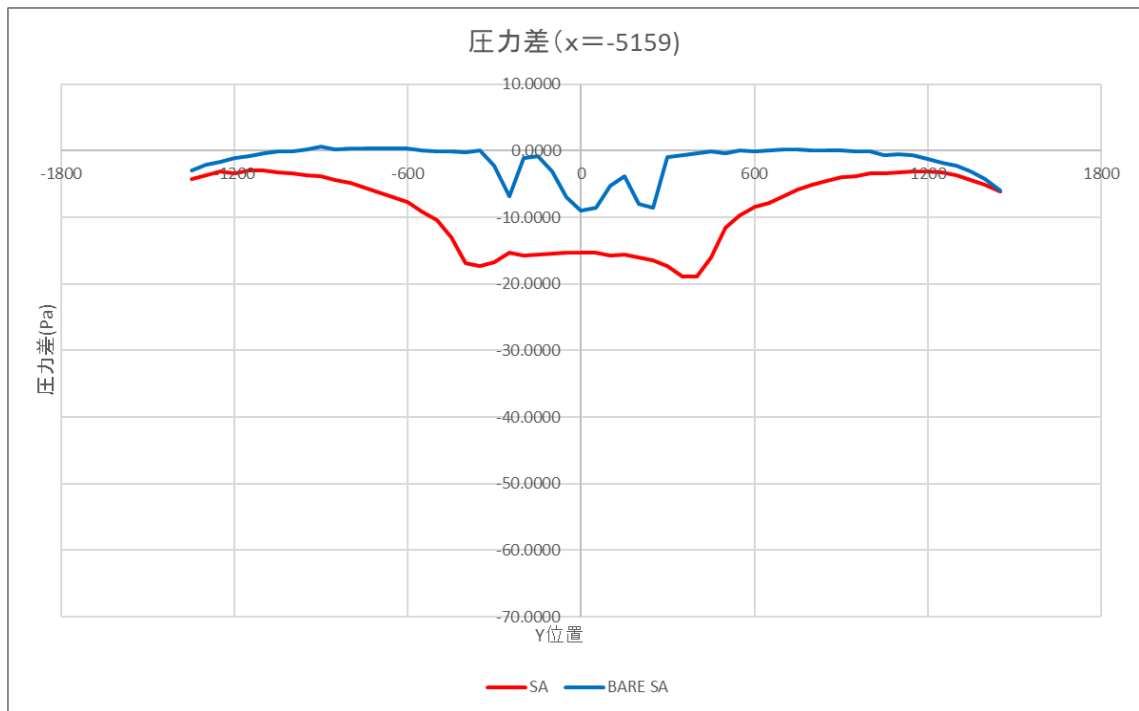
後方超音波鉛直方向流速分布図



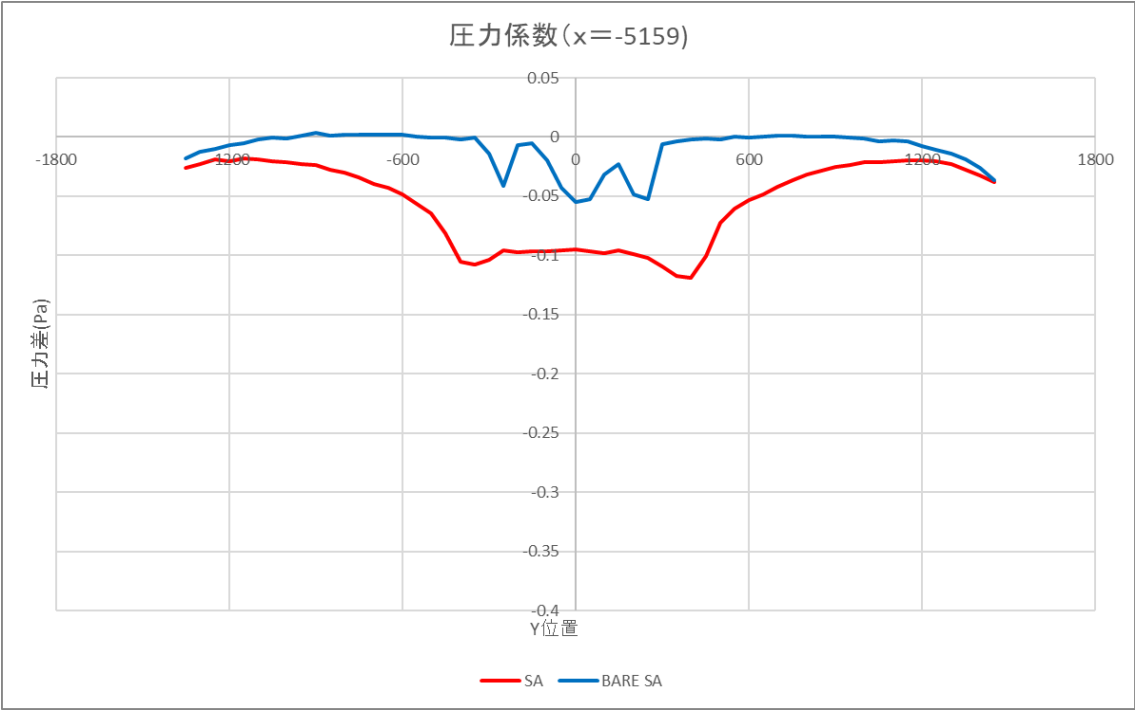
後方超音波主流方向無次元流速分布図

単基 SA X=-5159 レンズ有無比較

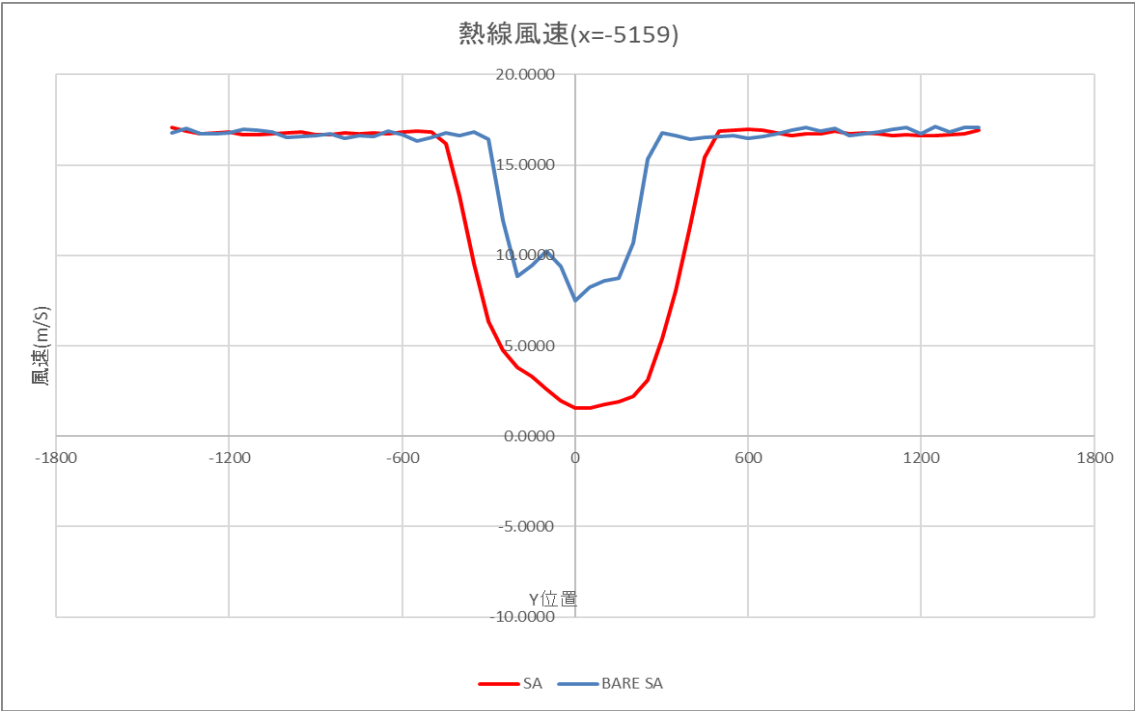
測定した圧力差プロファイルを図 4.302 に示す。測定した圧力係数プロファイルを図 4.303 に示す。熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.304 に示す。超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.305 に示す。超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.306 に示す。超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.307 に示す。超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.308 に示す。



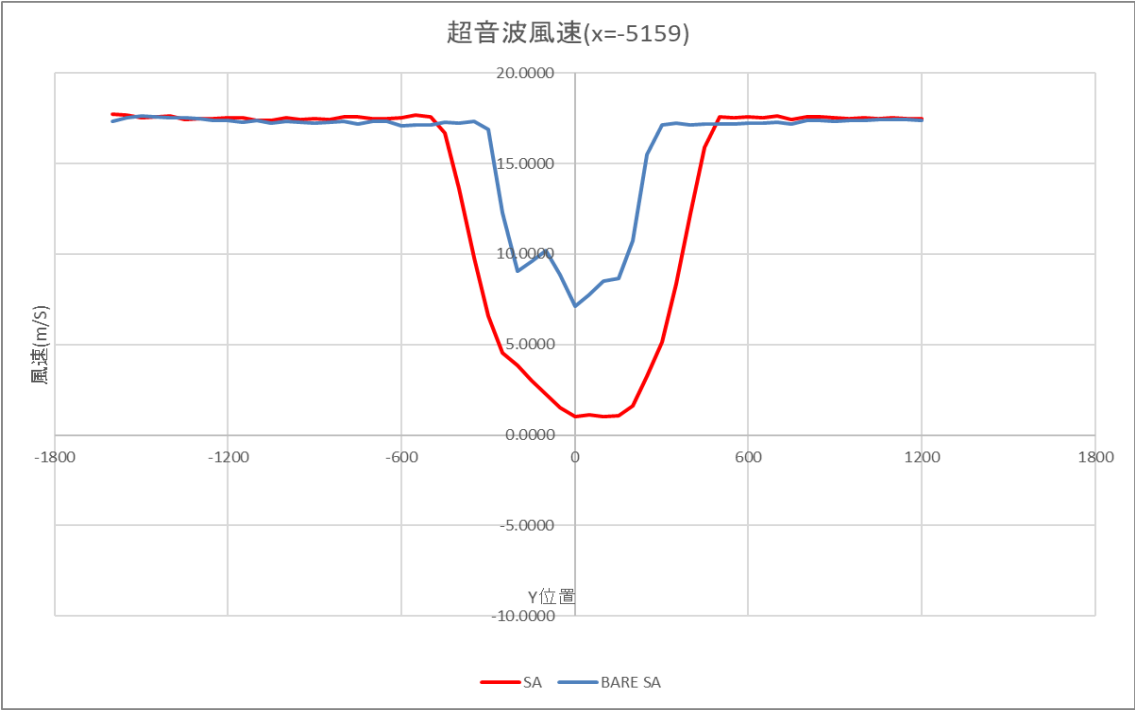
後方圧力差分布図



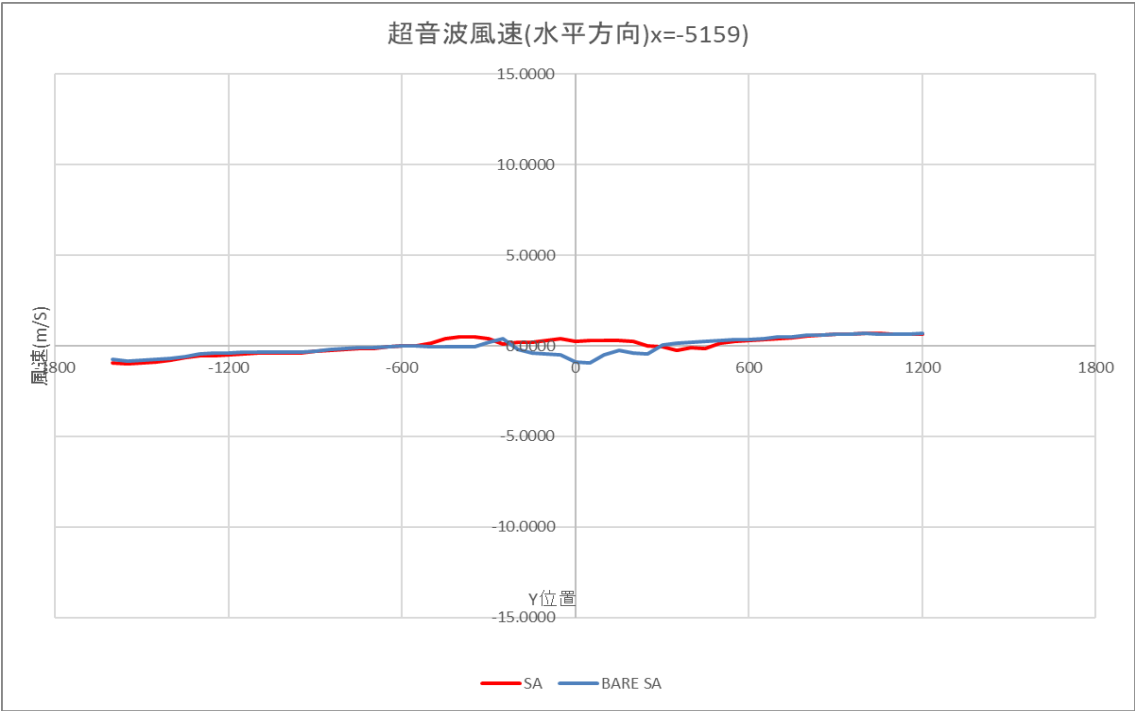
後方压力系数布图



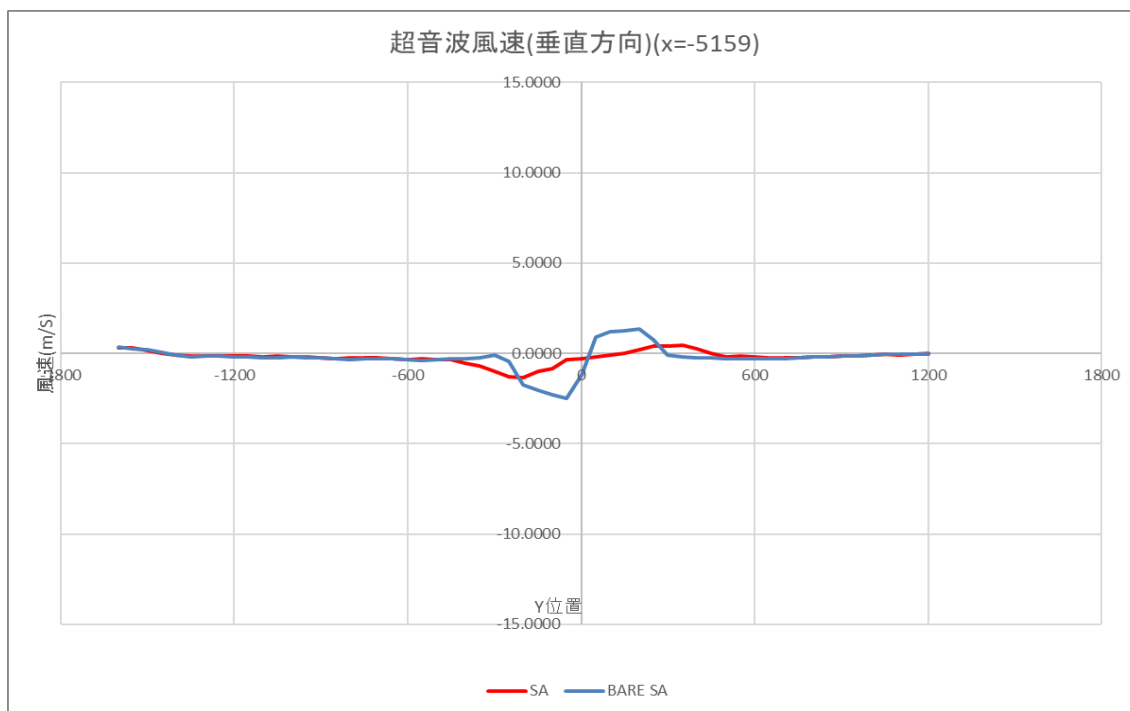
後方熱線流速布图



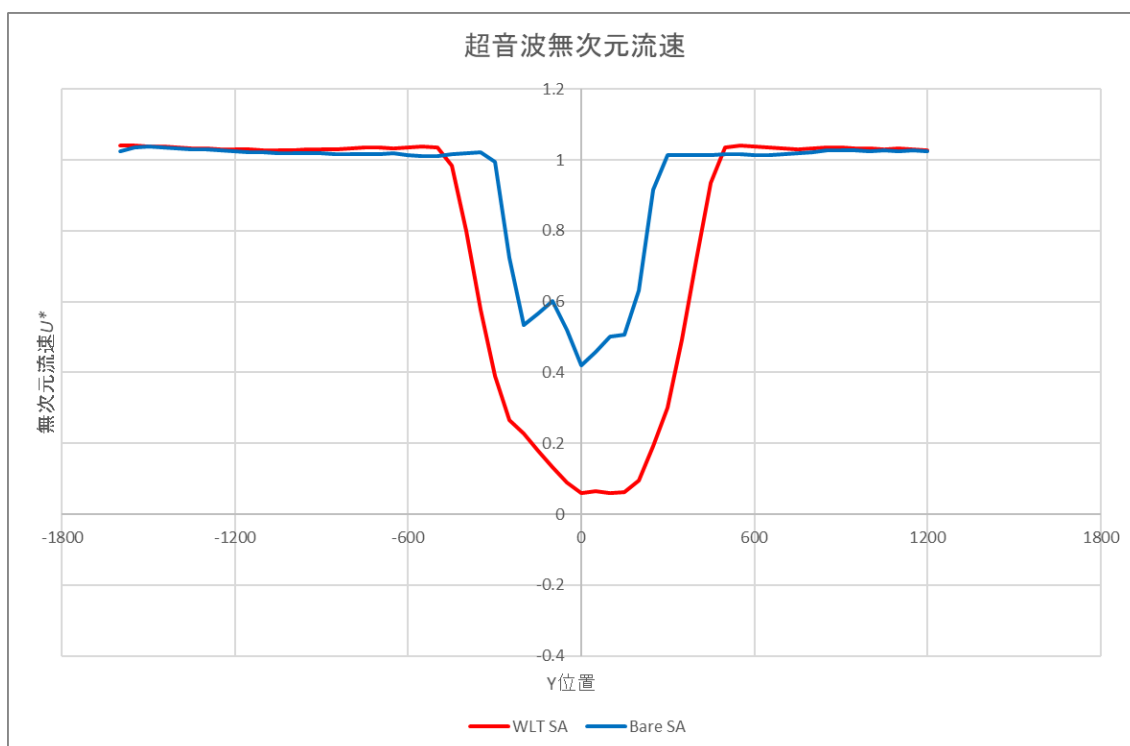
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



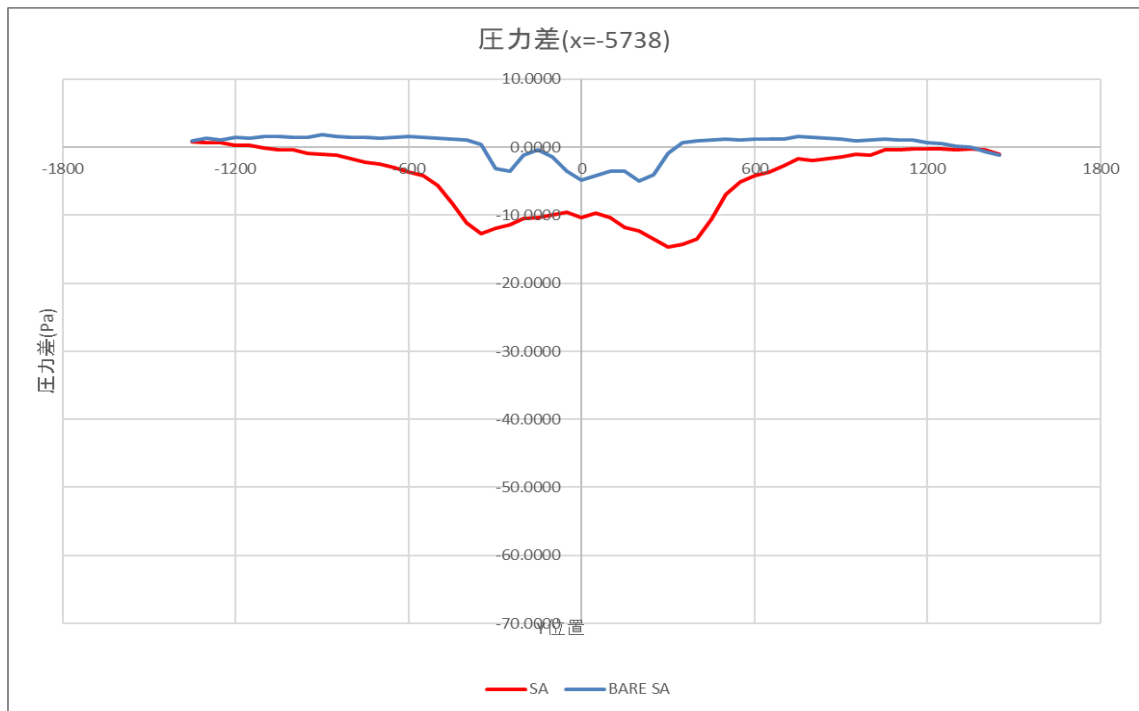
後方超音波鉛直方向流速分布図



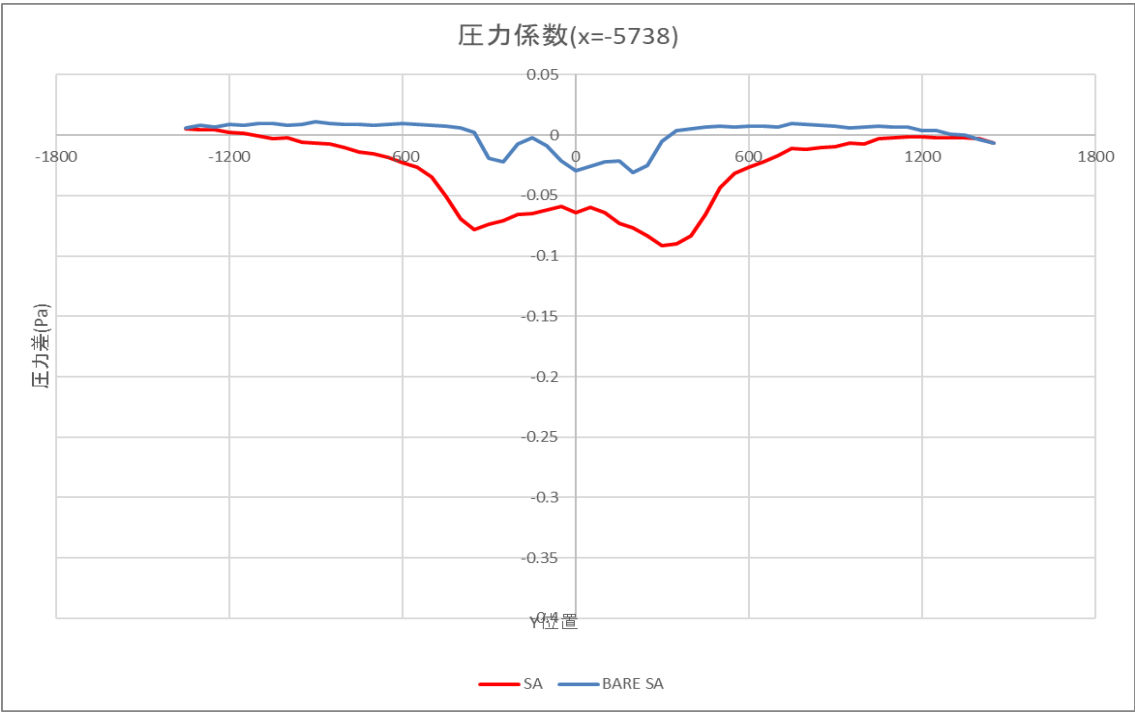
後方超音波主流方向無次元流速分布図

単基 SA X=-5738 レンズ有無比較

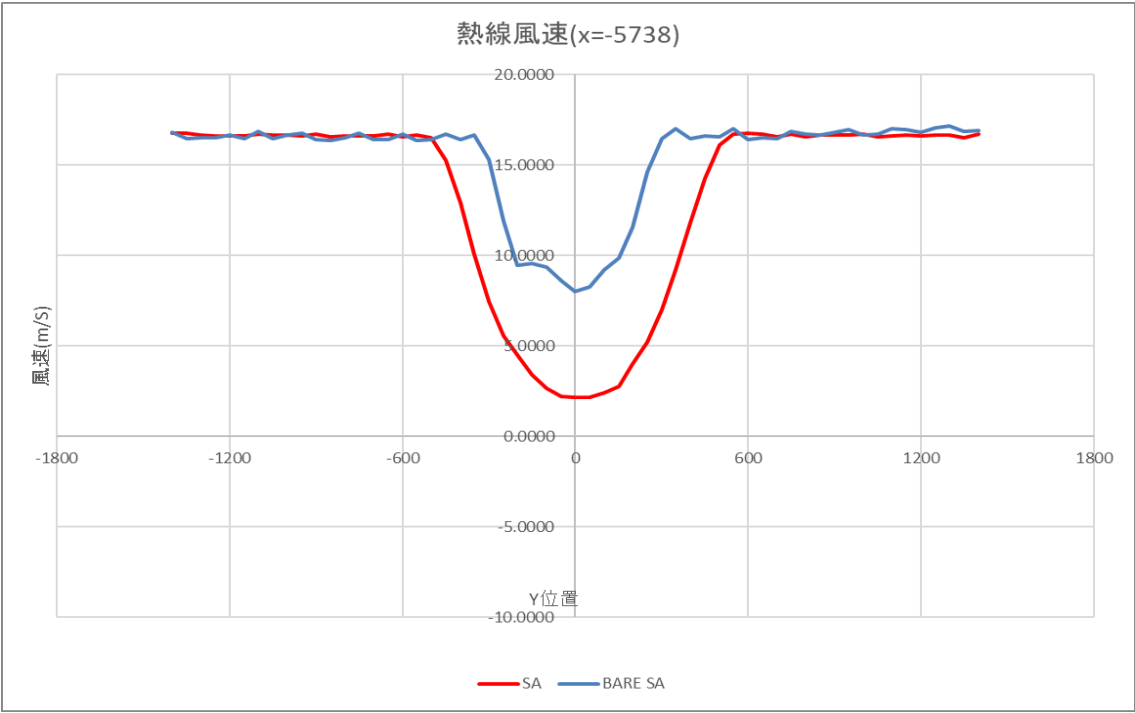
測定した圧力差プロファイルを図 4.309 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.310 に示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.311 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.312 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.313 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.314 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.315 に示す．



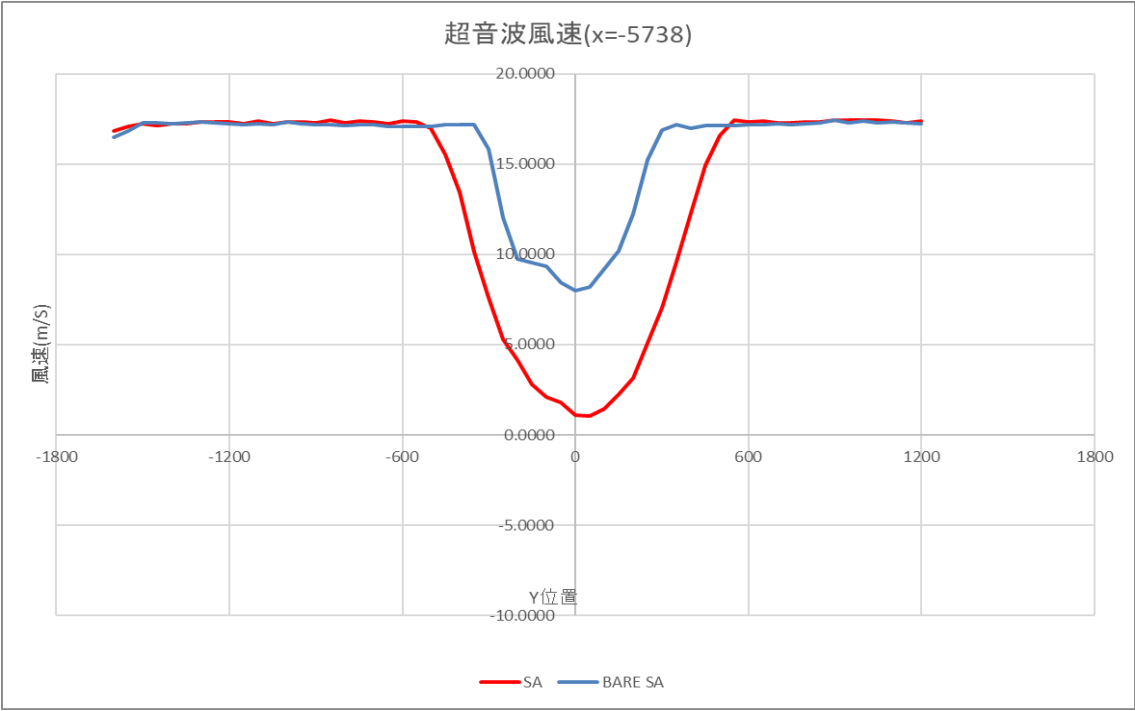
後方圧力差分布図



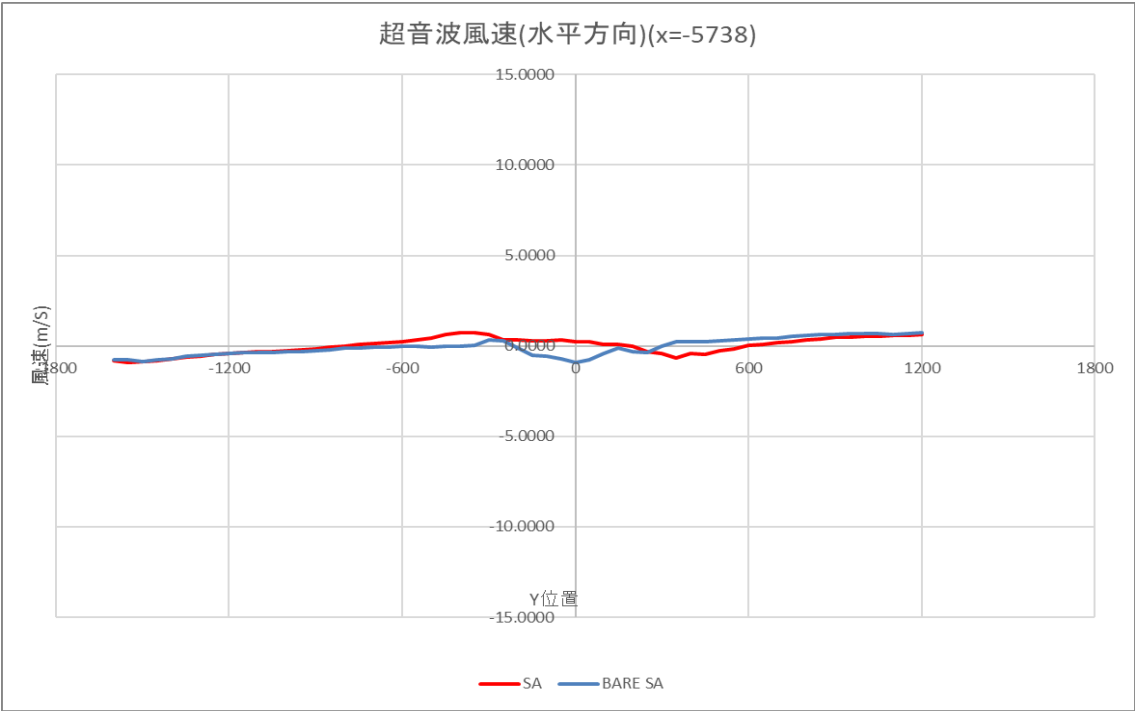
後方压力係数布図



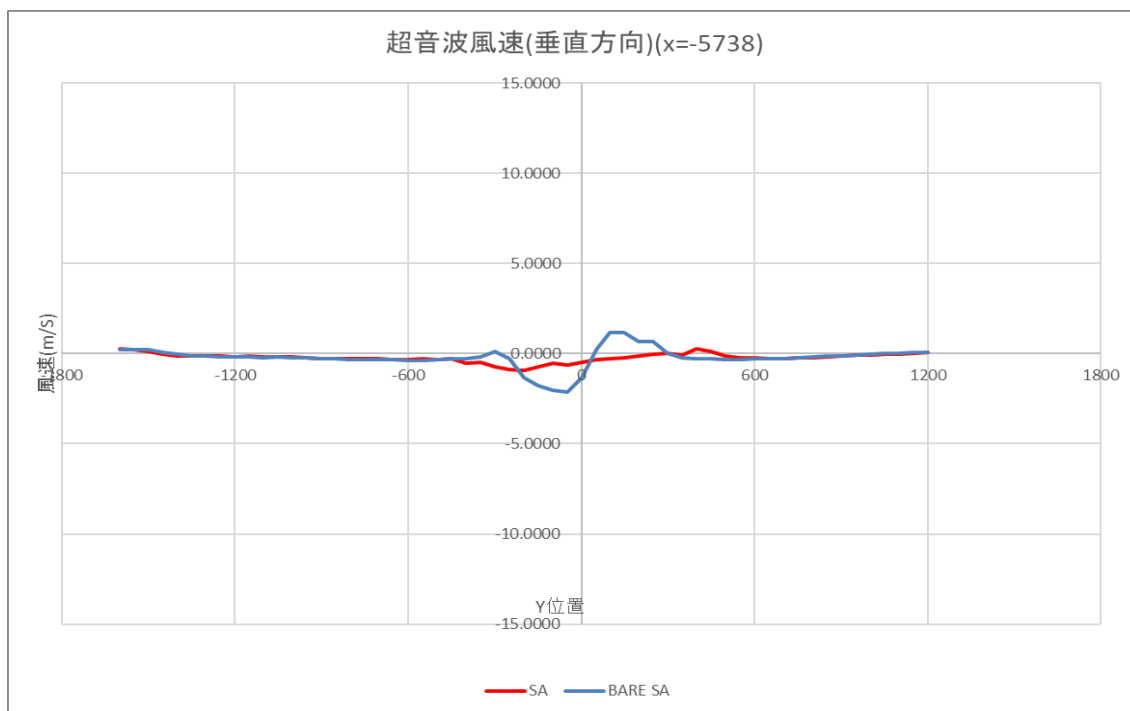
後方熱線流速布図



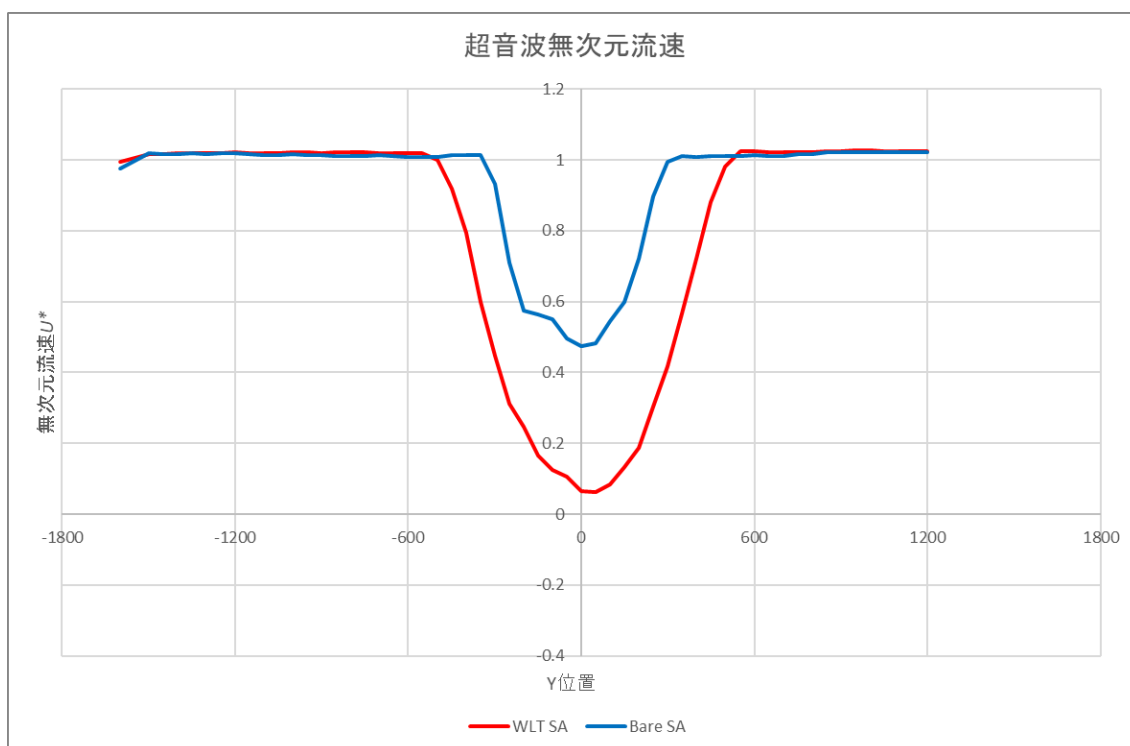
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



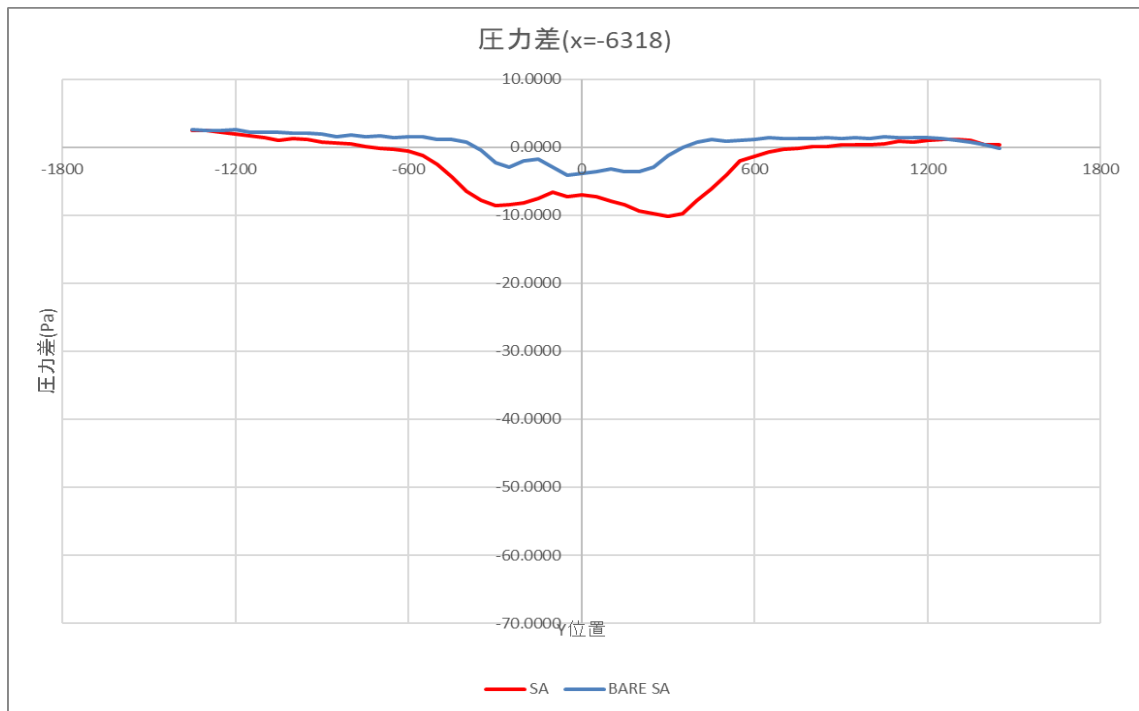
後方超音波鉛直方向流速分布図



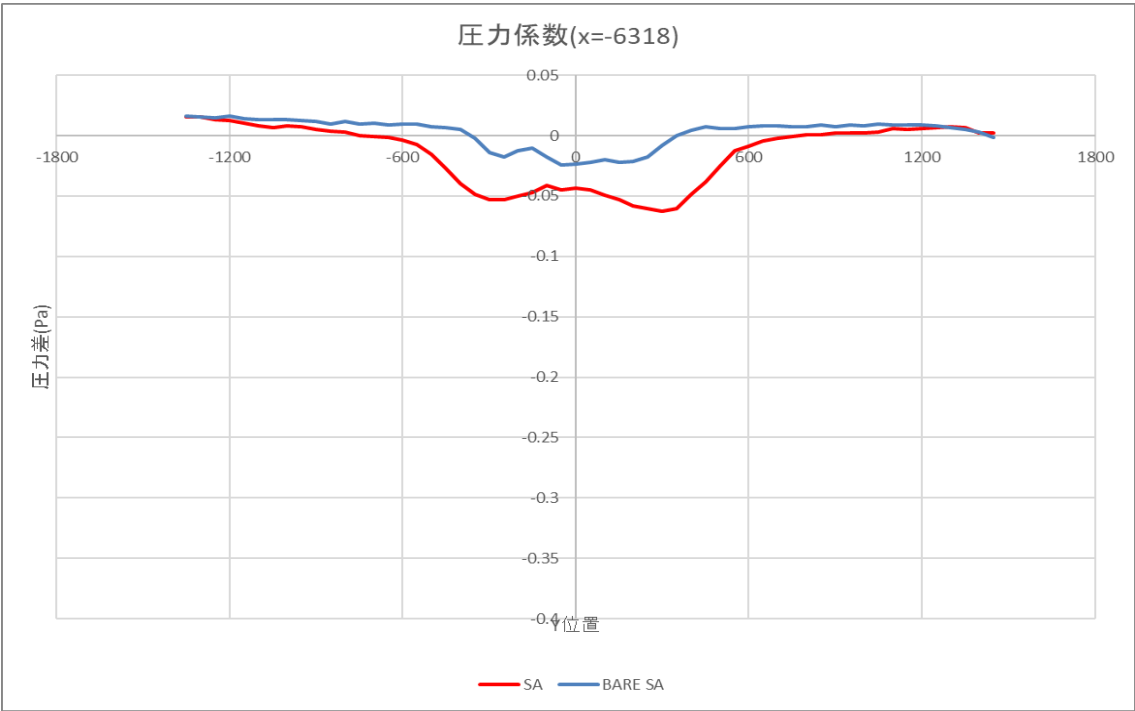
後方超音波主流方向無次元流速分布図

単基 SA X=-6318 レンズ有無比較

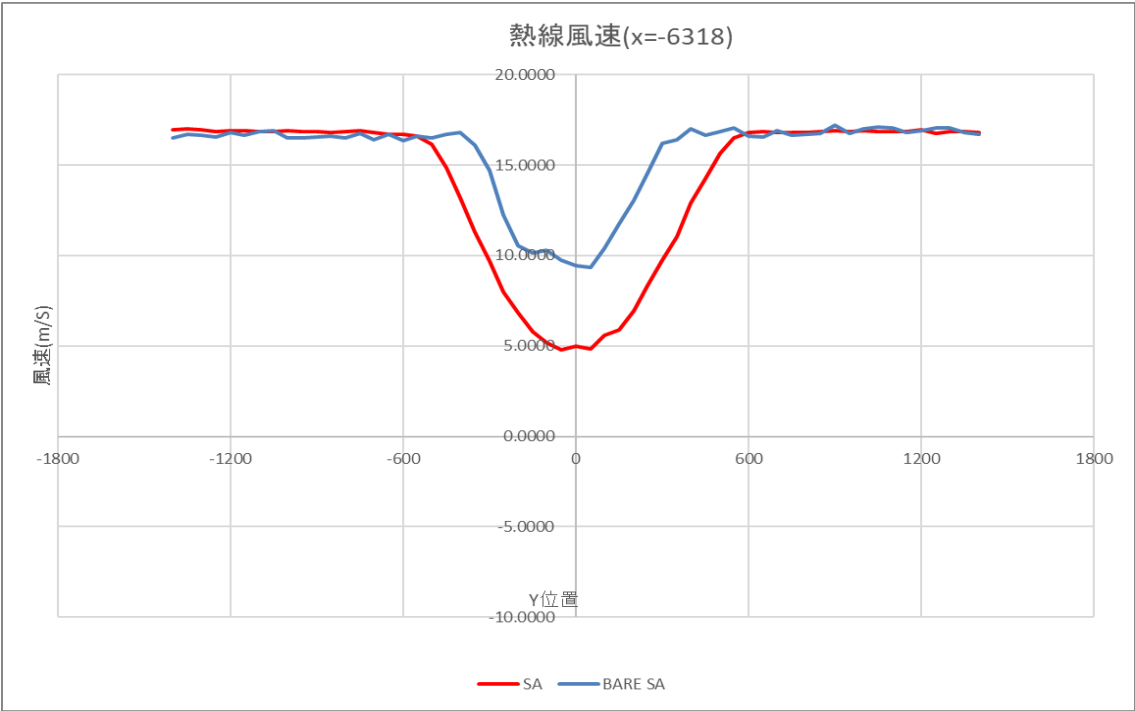
測定した圧力差プロファイルを図 4.316 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.317 示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.318 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.319 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.320 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.321 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.322 に示す．



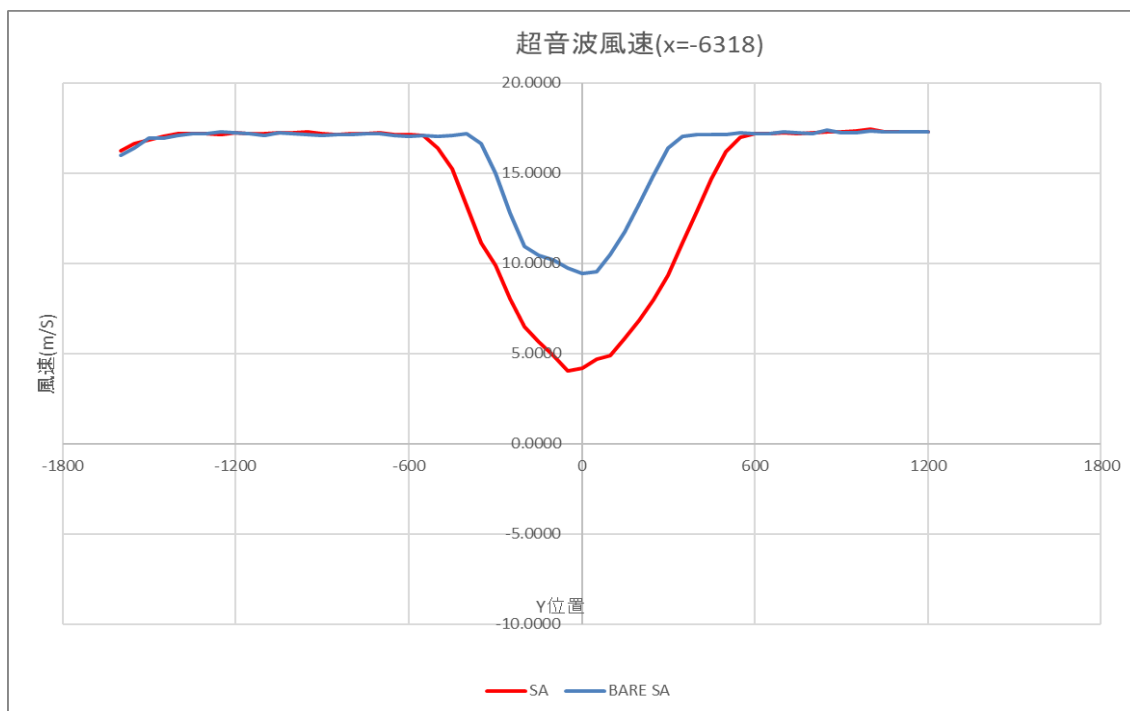
後方圧力差分布図



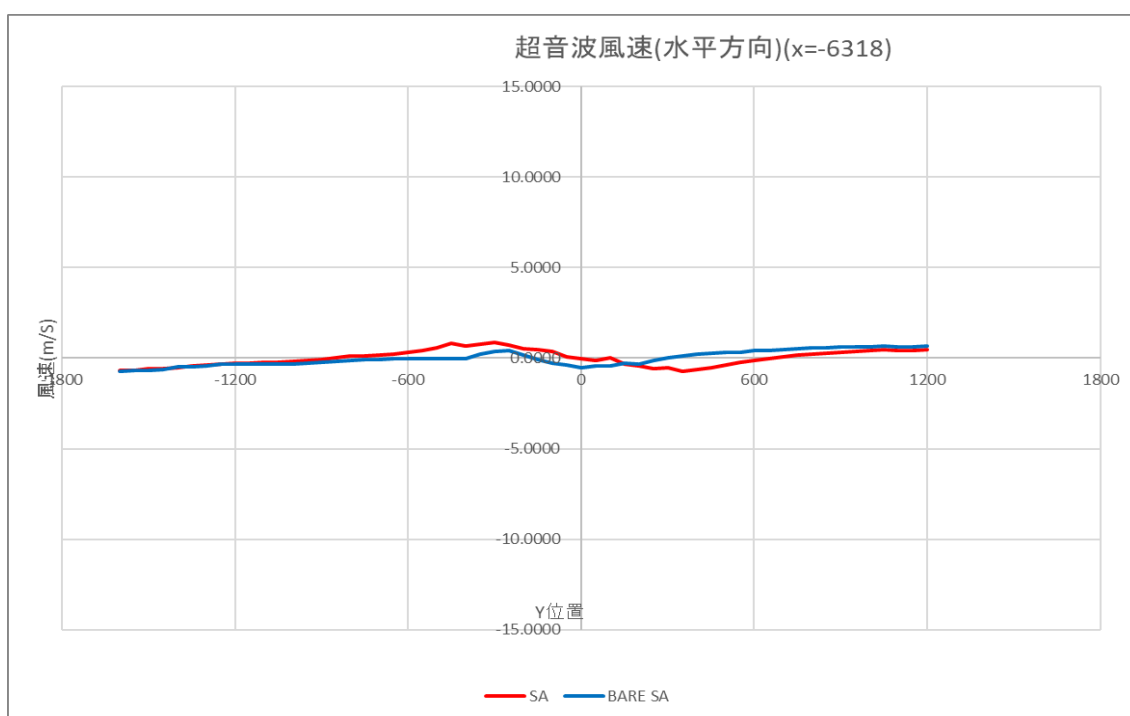
後方压力系数布图



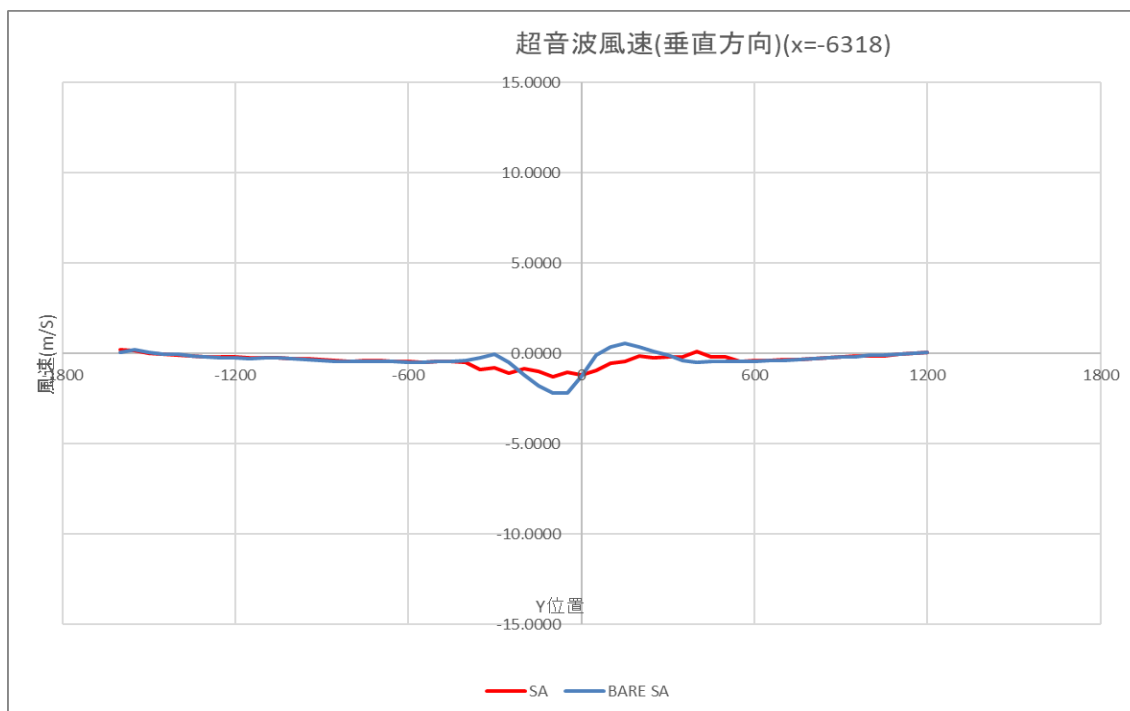
後方熱線流速布图



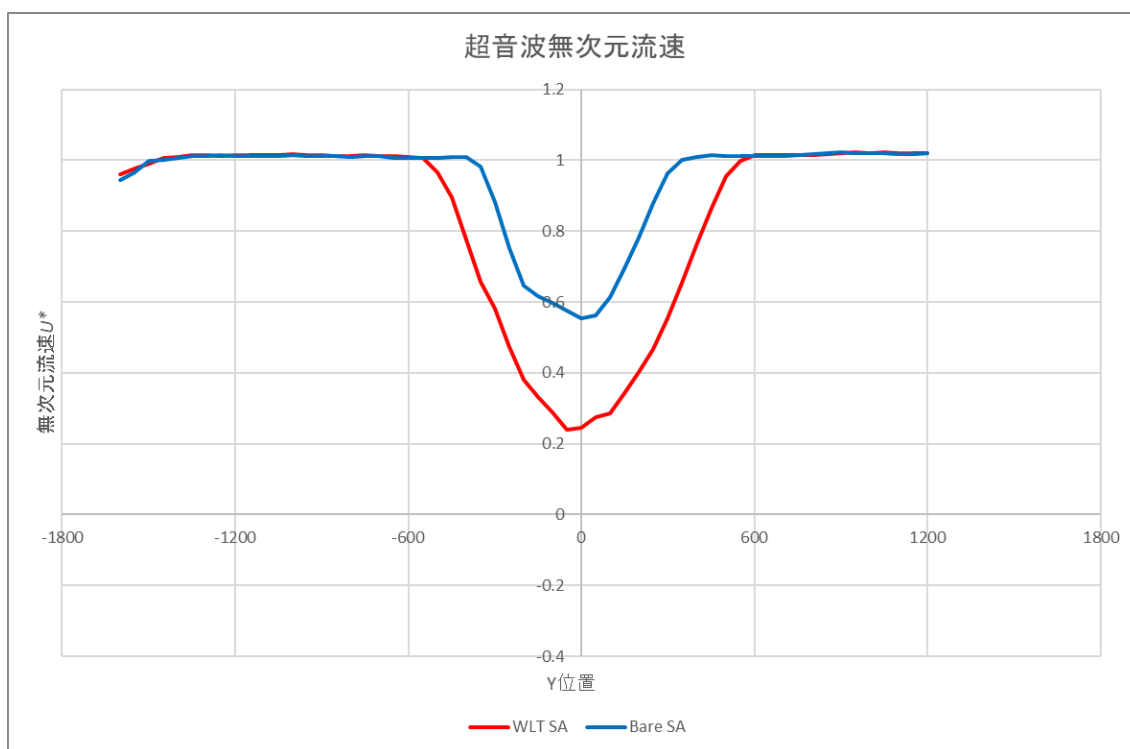
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



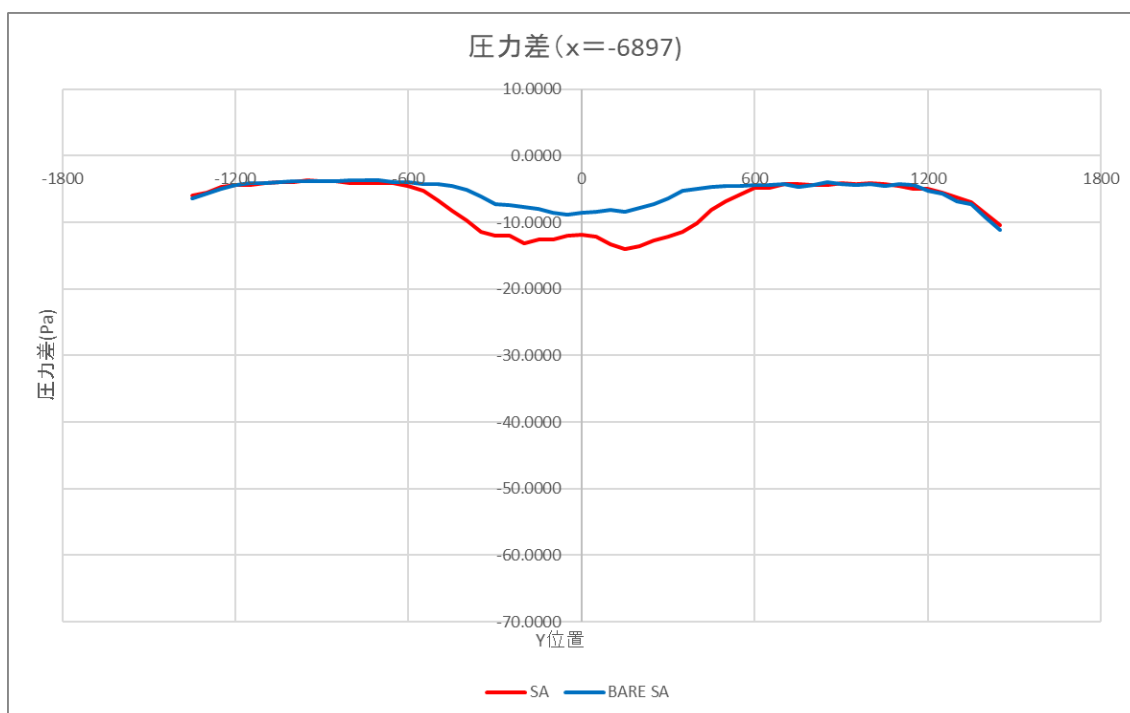
後方超音波鉛直方向流速分布図



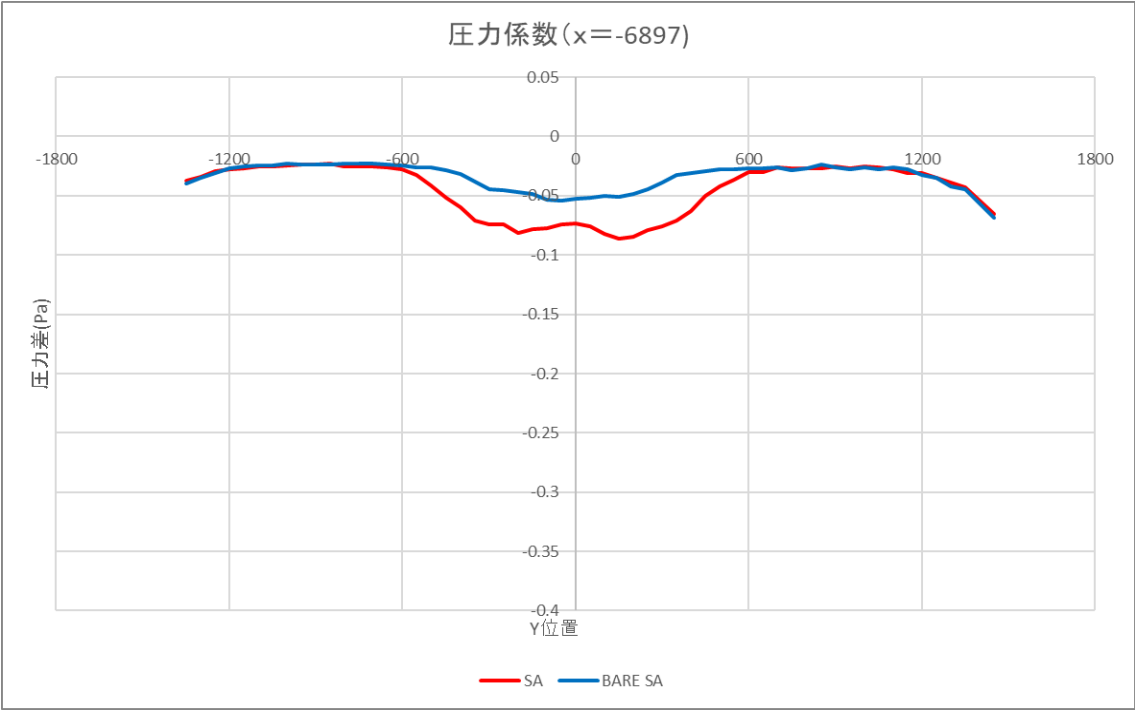
後方超音波主流方向無次元流速分布図

単基 SA X=-6897 レンズ有無比較

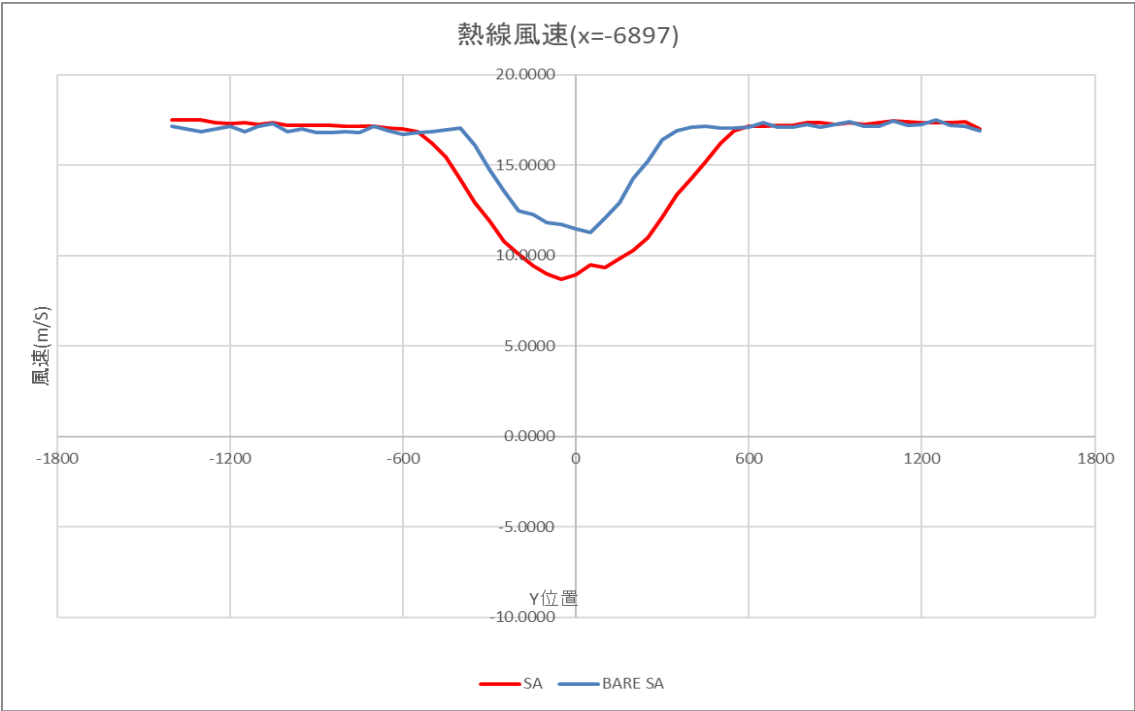
測定した圧力差プロファイルを図 4.323 に示す．測定した圧力係数プロファイルを図 4.324 示す．熱線流速計で測定した風車後方流速プロファイルを図 4.325 に示す．超音波流速計で測定した主流方向流速を図 4.326 に示す．超音波流速計で測定した水平方向流速を図 4.327 に示す．超音波流速計で測定した鉛直方向流速を図 4.328 に示す．超音波流速計で測定した主流方向無次元流速を図 4.329 に示す．



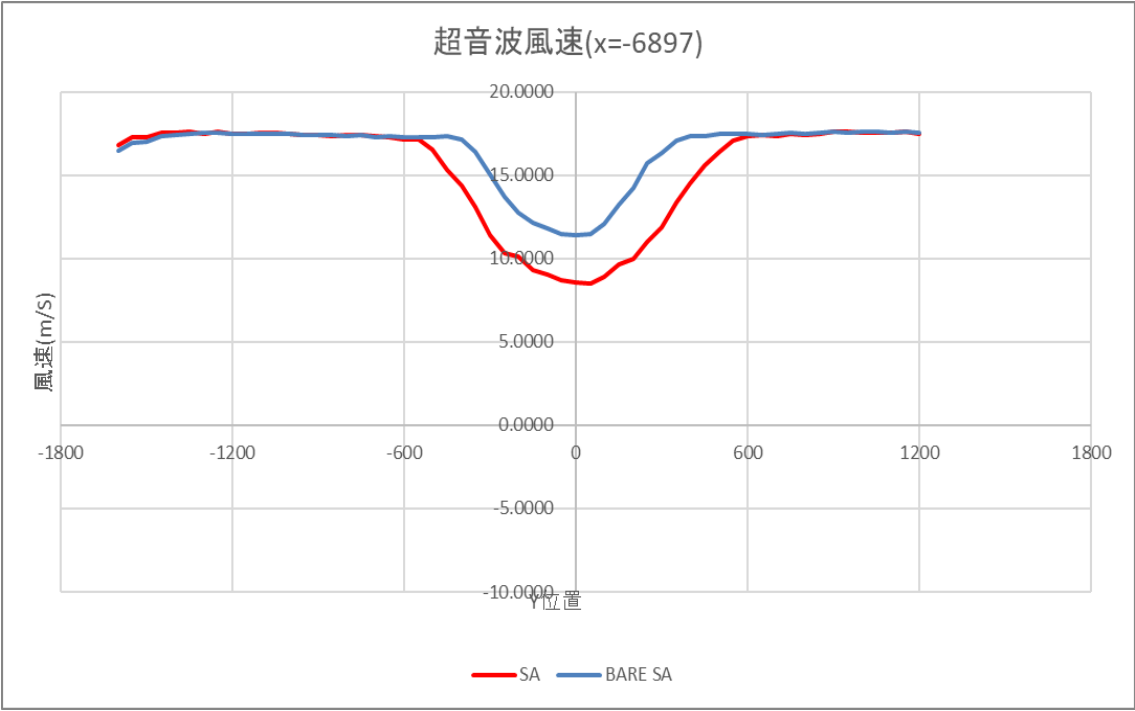
後方圧力差分布図



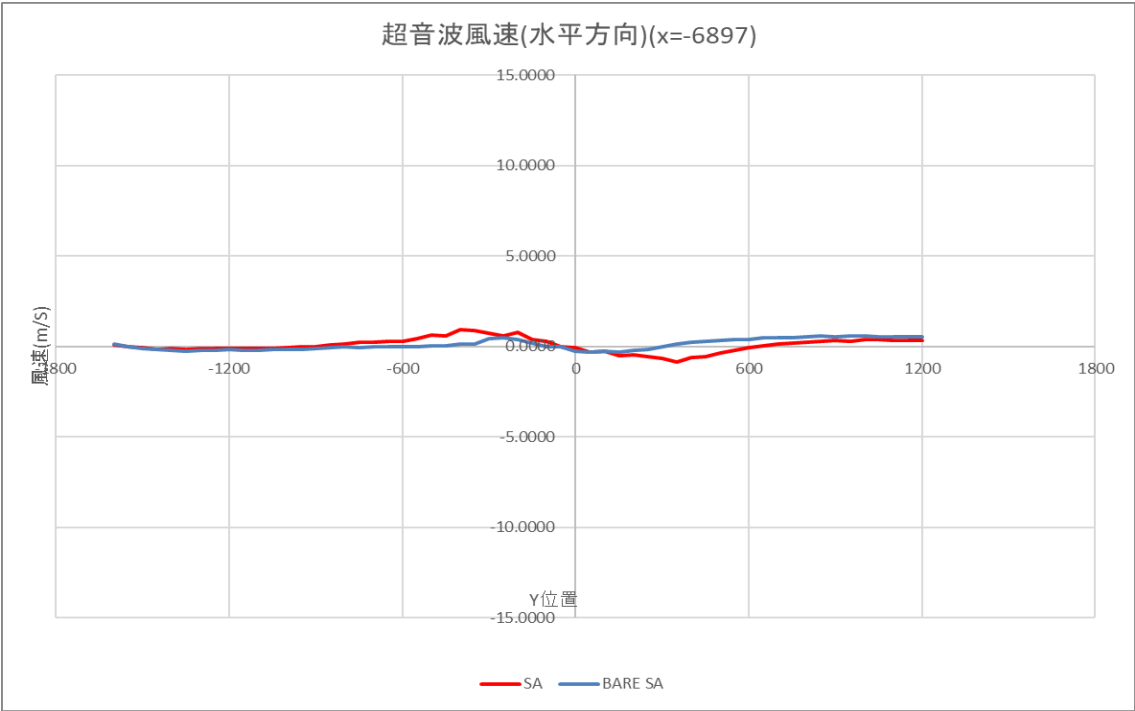
後方压力係数布図



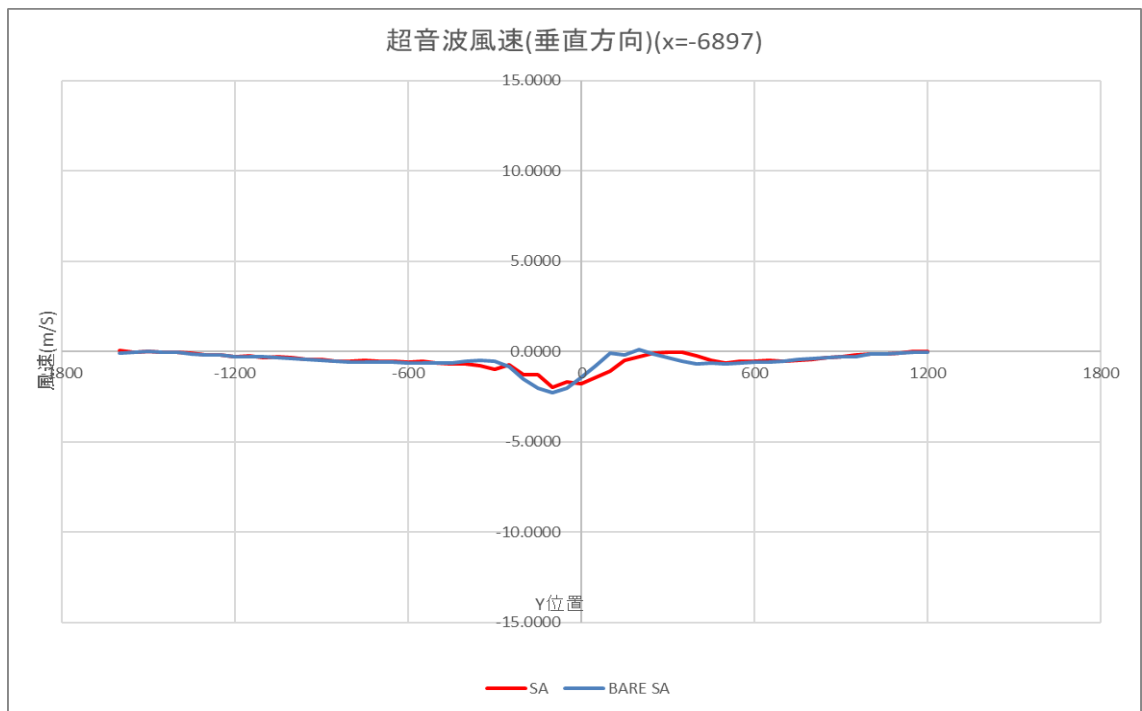
後方熱線流速布図



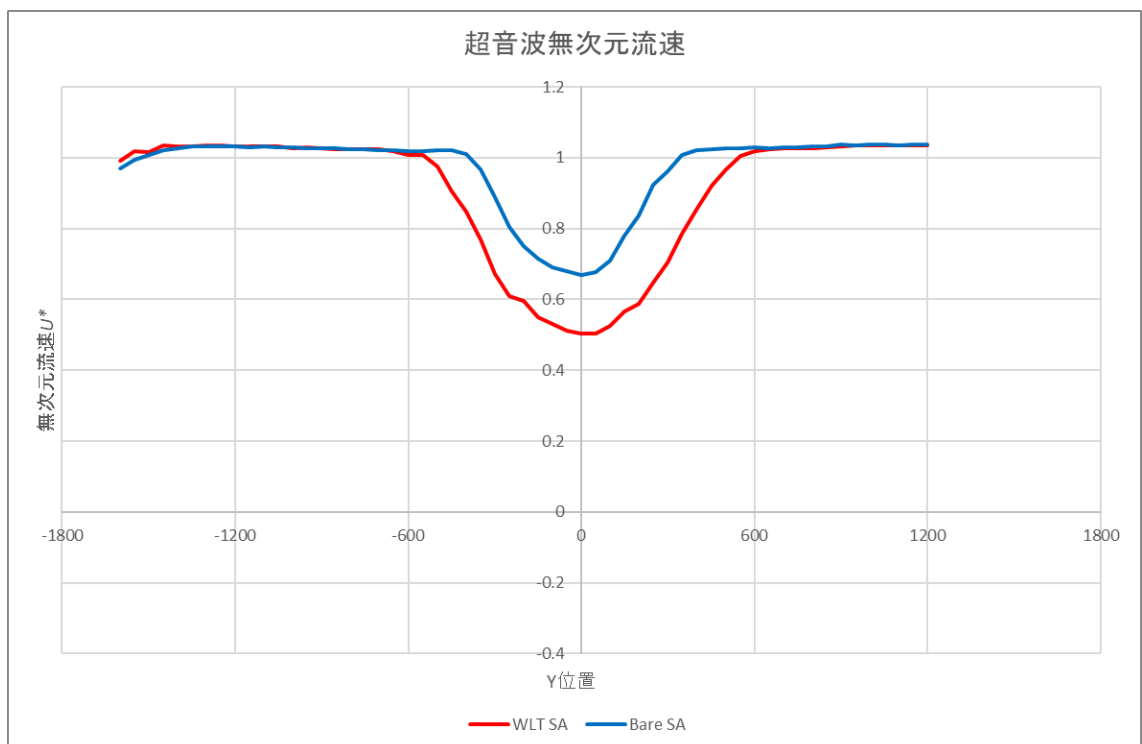
後方超音波主流方向流速分布図



後方超音波水平方向流速分布図



後方超音波鉛直方向流速分布図



後方超音波主流方向無次元流速分布図

考察

後方圧力に関して **Bare** と比較した際 **WLT** では大きく圧力が低下していることが分かる．また $s/D_{brim}=0.05$ に着目すると風車後方流速については **Bare** では減速域が後方まで独立しているのに対し **WLT** では合体していることが分かる．

Appendix-B 数値計算結果

B-1 流速平均場 XZ 分布鉛直方向比較

後流の流れ場を考察するため平均流速の XZ 分布を可視化した. 可視化面を表したものを図 B.1.1 に示す

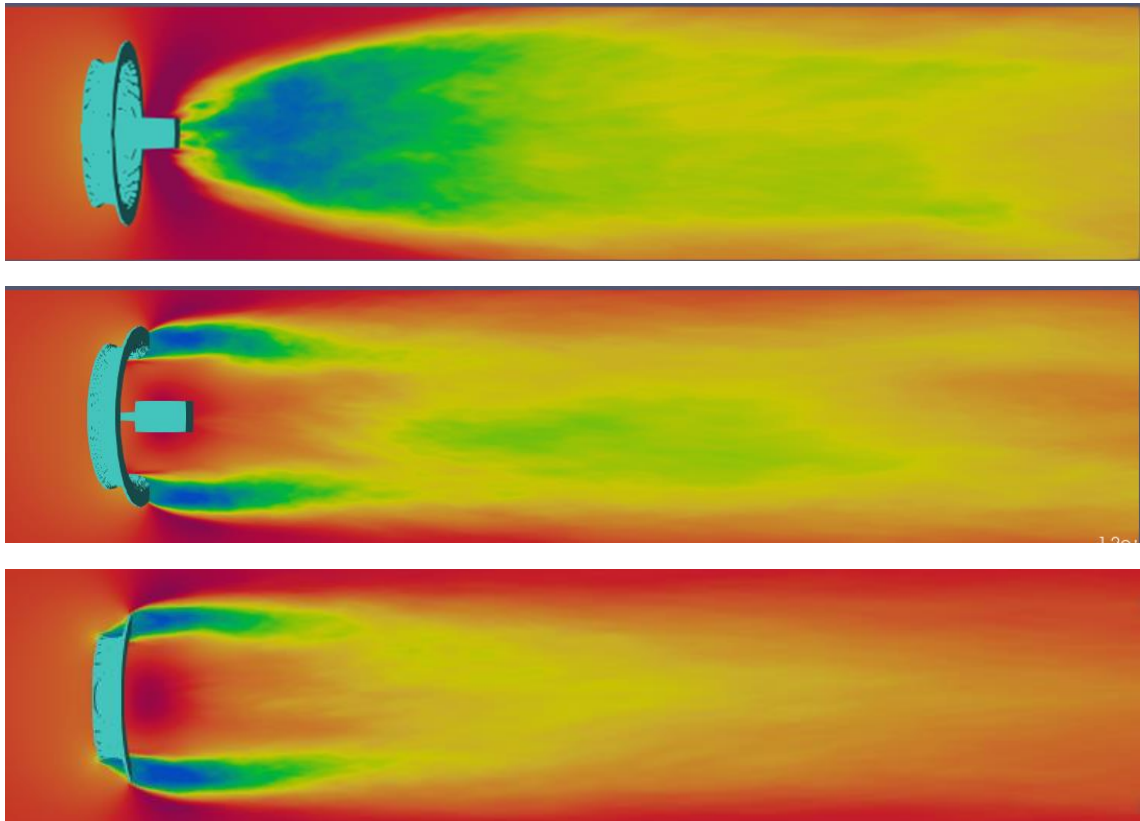


図 B.1.1 平均流速の XZ 平面分布

風車間でのギャップフローでは減速域が発生しており, 後方に行くにつれ拡散し広がっている様子が見られた.