

2011年度 修士論文

複数ファン風洞による竜巻を想定した非定常気流 の作成と基本断面への非定常作用

-竜巻を考慮した耐風設計に関する基礎的研究-

*Reproduction of non-stationary stream intended for tornado
by multiple wind tunnel and effect on basic cross section*

-Basic study on The method of Wind Proof Design with Tornado Effect-

帯刀 良之

Tatewaki Yoshiyuki

2012年1月

東京大学 大学院

新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻

神田研究室

47-106760

目次

第1章-序論

- 1.1 研究の背景 p.2
- 1.2 既往の研究 p.3
- 1.3 研究の目的 p.9
- 1.4 本論の構成 p.9

第2章-設計用仮想竜巻モデルの提案

- 2.1 設計用仮想竜巻モデルの必要性 p.14
- 2.2 日本における竜巻の被害傾向の統計と分析 p.16
- 2.3 米国の竜巻の被害傾向 p.24
- 2.4 米国の竜巻の被害傾向と日本の被害傾向の比較 p.27
- 2.5 日本における記録的な被害を及ぼした竜巻 p.29
- 2.6 竜巻内作用風力の理論値 p.32
- 2.7 甚大な被害及び甚大な被害を与える風速の定義 p.33
- 2.8 設計用仮想竜巻モデルの提案 p.37
- 2.9 都道府県別竜巻発生確率 p.41
- 2.10 米国の竜巻関連設計指針 p.42
- 2.11 米国の竜巻関連設計指針と仮想竜巻モデルとの比較 p.45
- 2.12 設計用仮想竜巻モデルと被害分布との対応 p.49
- 2.13 日本各地の年最大風速との対応 p.51
- 2.14 第2章のまとめ p.61

第3章-竜巻状風発生装置による実験

- 3.1 竜巻状風発生装置の概要 p.65
- 3.2 実験概要と実験パラメータ p.70
- 3.3 実験結果 p.73
- 3.4 移動速度による影響 p.87
- 3.5 風速と風向変化の対応 p.92
- 3.6 理論式との対応 p.96
- 3.7 第3章のまとめ p.108

第4章-複数ファン風洞による竜巻を想定した非定常気流の作成

- 4.1 複数ファン風洞の概要 p.110
- 4.2 竜巻状風模擬気流の作成 p.117
- 4.3 模型周辺での気流分布の把握 p.135
- 4.4 第4章のまとめ p.137

第5章-非定常気流下における基本断面の風圧測定実験

- 5.1 実験パラメータ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ p.139
- 5.2 圧力測定手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・ p.140
- 5.3 円柱における風向変化実験結果・・・・・・・・ p.144
- 5.4 実験結果一風圧係数・・・・・・・・・・・・・・・・ p.154
- 5.5 実験結果一風力係数・・・・・・・・・・・・・・・・ p.199
- 5.6 各係数の重ね合わせ・・・・・・・・・・・・・・・・ p.211
- 5.7 各実験結果の比較・考察・・・・・・・・・・・・ p.213
- 5.8 第5章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ p.215

第6章-結論

- 6.1 結論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ p.217
- 6.2 問題点及び今後の課題・・・・・・・・・・・・ p.219

謝辞

要旨

付録

- S.1 入力電圧と複数ファンの追従性

第 1 章-序論

Chapter.1
Introduction

1. 1 研究の背景

竜巻は積雲や積乱雲等の対流雲によって作られる鉛直軸周りの激しい渦である。積雲や積乱雲は我国の周辺で無数に発生しているが、我が国における竜巻の発生頻度は陸上竜巻において年20個程度と報告されている。これは、竜巻が発生する条件が非常に特殊である事を示唆しているが、この発生数は米国と比較すると50分の1程度であり、単位面積当たりの発生数は2分の1程度になる。しかし、日本においても北海道佐呂間町のF3(2006年11月)、千葉県茂原市のF3(1990年9月)等、竜巻により甚大な被害が確認されている。

現在竜巻の発生機構は2通りあると考えられており、1つは地形の効果や他の降水系からの冷氣外出流などによって生じる局地前線に伴うもの、もう1つはスーパーセルという特殊な積乱雲に伴うものである事が分かっている。又、気象庁では周辺の気象条件の変化や今後の気象情報(竜巻発生確度ナウキャスト)も元に竜巻の危険がある区域に対して竜巻注意情報の公表も行っている。

しかしながら、現在我が国において一般的に竜巻を考慮した耐風設計は行われていない。なぜならば、竜巻はその現象自体が未だ詳細に解明されておらず、荷重評価の為の風速や風向、圧力の変化・変動について明らかでない部分が多く、陸上の一地点を襲う確率が非常に低い為である。

竜巻被害の特異性を示している例として茂原の竜巻をあげる。1990年の茂原市の被害調査報告によると、竜巻の強風域内において、屋根部材の飛散や電柱の倒壊、窓ガラスの破損等から、風速が80m/sを超えると推測できる被害が発生しているにも関わらず、同じ強風域内でもあまり損傷を受けていない場合もある。この事から、台風などとは異なり、竜巻の場合には数十メートル単位での局所的な強風域の存在が考えられる。

又、原子力発電所など、社会に多大な影響を与える構造物や、長期の供用期間を要する建築物に対しては確率の小さな竜巻を考慮した設計が必要と考えられる。

一方、米国では既に原子力施設に対する竜巻関連設計指針についてUSNRC(Design Basis Tornado for Nuclear Power Plants ,Regulatory Guide)が整備されており、全米を竜巻のスケール毎に再現期間を定め、その竜巻のスケールを表す、被害幅、被害長さ、移動速度等のパラメータを公表している。それにより構造物を設計する際にそれらの指標を参照する事で、竜巻も考慮した耐風設計が可能となっており、実際に送電線などの解析例が報告されている。

日本においても竜巻を対象とした研究は規模が小さいながらも続けられており、幾つかの論文が発表されているが、竜巻の気流メカニズムを中心としたもの、被害の原因となった突風等に着目したもの、被害調査による被害の傾向を扱ったもの等、竜巻という現象を分割化して研究しているものがほとんどであり、系統的な研究・発表は見られない。このような状況から、竜巻による被害の低減を図る為にも、竜巻を耐風設計に取り入れる為の系統的な研究が必要と考えられる。

1. 2 既往の研究

本研究に取り組むに当たり、これまで建築学会や風工学会等の各分野において竜巻について研究された文献から、主なものについて得られている結論とその著者について【被害調査・計測】、【実験・シミュレーション】に分けて、以下にまとめる。

【被害調査・計測】

光田・文字・岩谷・西岡ら(1978)¹⁾は1978年2月28日に東京地方を襲った竜巻について、竜巻の進行が速く強風の作用時間が短かった事が被害にどのように関連しているか、最大風速の大きかった割合に地面にしっかりと固定された建物の被害が少なく、かえって重量は大きくとも地面との固定の悪いプレハブ校舎や電車に大きな被害が出た事は、竜巻の中で上昇気流が大きかった事と同時にこの作用時間の短かった事が関係していると考察している。

小林・内藤・道本ら(1992)²⁾は1991年12月11日に金沢市北西部に発生した強風災害についてレーダー観測、地上観測、ビデオ撮影等により竜巻被害である事、その被害規模やフックエコーに着目した解析結果と、組織化された降雪雲による小規模攪乱の形成過程を明らかにするためには地上のメソ解析および広域での雲の動きに注目する事が重要だと報告している。

小林・菊池ら(1994)³⁾らは、1988年9月22日に北海道千歳市内で発生した竜巻について、詳細な現地結果、レーダー観測及び写真・ビデオの連続撮影によりその全容を明らかにし、漏斗雲のライフサイクルについて地上の被害と対応させて解析を行う事でその水平風速や強風域について解明している。

喜々津・奥田・伊藤ら(2003)⁴⁾らは2002年7月10日に群馬県佐波群境町で発生した竜巻による被害調査結果から、局地的な地域性を考慮した推定風速に関して考察を行い群馬県全体の竜巻の年発生確率をもとにした平均的な年超過確率と同地区を含む範囲において過去100年間に竜巻発生事例があると言った局地的な地域性を考慮した年超過確率とを比較し後者の場合0.01と仮定すると、同じ規模の基準化変数での年最大風速に対応した突風の風速よりも大きな値となり得る事を報告している。

吉野・石川・植田・安田ら(2007)⁵⁾らは1999年9月24日に愛知県豊橋市において発生した通称豊橋の竜巻について気象庁名古屋レーダー、潮岬のレーウィン・ゾンデ観測や数値気象モデルMM5による数値解析の結果より、温低化初期の耐風9918号に伴うアウターレインバンドで形成された事、日本アルプスの存在により迂回する流れが卓越し、そこに強い台

風を伴う南風が合流する事で顕著な下層局地前線が形成されていた事、この下層局地前線の上をアウトターレインバンド中の攪乱が次々と通過する事で過渡集束が生じ強い竜巻渦が発生した事等を報告している。

桜井・川村ら(2008)⁶⁾は竜巻発生近傍のレーウィンゾンデデータとJRA-25長期再解析データを主に用いて、日本の竜巻発生環境場の実態を統計的に調査し、シビアストーム発生ポテンシャルを示す既存のパラメータについてその診断基準が日本ではどの程度有効かについて報告している。

佐藤・石川ら(2008)⁷⁾は1980年10月13日に宮崎平野上で発生した竜巻について、領域機構モデルPSU/NCARMM5を用いて再現実験を行った。モデルの初期値に用いたデータの解像度が荒いにも関わらず、竜巻の引き金となったと考えられるメソサイクロンの再現にも成功した。また、地形や陸海関の粗度長差が竜巻発生に与える影響を調べる為に感度実験を行った。その結果宮崎平野の北西に位置する九州山地が竜巻の発生の元となるメソサイクロンを発生し易い環境を作っている可能性があるとして報告している。

野田・長尾ら(2008)⁸⁾はここでは、2007年8月29日に徳島市国府町で発生した竜巻被害の際に現地調査で見つけた竜巻の痕跡や、残されたビデオ映像を元に、竜巻近傍で吹く風速を推定することを試みた。その結果、気象庁が発表したF1スケールという竜巻の強さに対して、推定された風速は概ね同レベルの値となり、藤田スケールの評価が適切であったことが確認できたと報告している。

宮城・鈴木ら(2008)⁹⁾は2008年1月4日の9:50ごろ、北海道室蘭市東部のイタンキ浜沖に発生した2本の竜巻を撮影した写真2枚を、記録された撮像情報を利用して分析した。その結果、一箇所から撮影した写真から竜巻までの距離や竜巻の寸法を計測できることを示し、竜巻の規模について一定の見積もりを行い、竜巻等の位置は水平線との小さな角度差から推定するため、視点高度が低いと精度が低下する。複数地点から写真撮影された場合には、三角測量の要領で位置推定する方法を推奨すると報告している。

小林・菅原ら(2008)¹⁰⁾は2007年5月31日千葉県富津市沖の東京湾で発生した竜巻について、竜巻渦とマイソサイクロンの関係とそのライフサイクル通じて解析することにより、ドップラーレーダーで観測された竜巻渦は、直径約150 m、約7分間の寿命、10-1 s⁻¹オーダーの渦度を有し、海面から高度3 kmまでほぼ一定の直径で存在した事など海上竜巻と竜巻との規模や構造的・統計的な違いについて指摘した。

小林・菅原・今井・前坂ら(2008)¹¹⁾は、2007年5月31日千葉県富津沖で発生した竜巻についてドップラーレーダー観測及び現地調査で得られた各種映像及び証言から、雲底下の竜巻渦を解析し、この竜巻は高気圧性の回転を持ち寿命が7分だった事、この竜巻はシアーライン(ガストフロント)上で、積乱雲の発生とほぼ同時に形成され海上竜巻的な構造を有している事等について報告している。

川名・田村・松井ら(2010)¹²⁾は竜巻のリスク評価を行う上で必要となる分析を行い、その結果、竜巻の年発生数はポリヤ分布で評価でき、竜巻の風速、被害幅及び被害長さは、3変量対数正規分布で評価できる事が明らかになったと報告している。

【実験・シュミレーション】

文字(1982)¹³⁾は回転スクリーン型、頂部回転型、案内羽根型の各種竜巻シュミレーターについてまとめ、それらの渦の風速分布及び圧力分布、最大風速、渦と地表面及び構造物の相互作用、について考察を行い、竜巻シュミレーターによる室内実験の問題点として、渦流の境界層中の風速の鉛直方向の一般法則が確率されていない事、つまり、どの個所でピークが生じているか等、渦流を乱さずに測定する技術等の必要性について報告している。

佐々(2005)¹⁴⁾は気象学的知見から竜巻の生成に取り組んだ。これはドライアイスによって生成されたガストフロントをファンで吸い上げることにより、自由空間中で竜巻を再現する事に成功した。これらの竜巻は主としてシアーラインの鉛直渦度を起源としているが、蛇行渦においてはガストフロントにおける水平渦度の立ち上げも寄与する事も分かっており、ファンの移動速度が水平シアアの平均速度以下の時、竜巻は安定に移動し、その循環も強いと報告している。

松井・田村ら(2006)¹⁵⁾はWard型竜巻発生装置により、建築物に大きな被害を及ぼす気象攪乱について、大気中に発生する竜巻を対象にその流れ場を室内実験により再現する事を試みた。再現された竜巻状流れ場に対する可視化実験では、流れ場の特徴に大きな影響を与えるスワール比が増加すると共に、層流渦から渦崩壊が始まり、乱流渦に移行すること、さらに大きなスワール比ではコア半径が大きくなると報告している。又レーザードップラ一流速計による計測において、渦の直径がスワール比と共に大きくなり、粗度の小さい場合の方がその傾向が顕著である事、大きなスワール比では粗度の影響が小さくなる事も確認している。

丸山(2007)¹⁶⁾は数値流体解析LESにより、竜巻状の渦を再現する事の可能性を示唆し、その計算例として、上空の対流域が地面に接して動かない場合と、動く場合の計算結果を示

し、親雲と共に移動する場合に渦の軸が傾く結果を得たと報告している。

河井(2007)¹⁷⁾は、竜巻に水平風速分布をランキン渦と仮定し、地上付近における竜巻通過時の風速・変化と竜巻に伴う物体の経路、竜巻通過時に構造物に作用する風力等を計算し、ランキン渦モデルによって、竜巻通過時の被害分布や飛散物の方向を推定できる事、奥田らによる被害ランク3,4,5は竜巻時の最大風速がそれぞれ50,60,70m/s程度に相当すると推定される事、竜巻が構造物の右側を過ぎる時、竜巻は構造物に引き寄せられる事、構造物に作用する負圧の大きさは、竜巻の移動速度を加味した最大風速を基準とした速度圧を基準とした場合、台風等による同程度の強風の場合よりも大きいと考えられようという報告している。

松井・田村・吉田ら(2008)¹⁸⁾は風圧計測が可能な竜巻発生装置を作成し、床面および立方体模型の平均風圧係数を計測した。その結果、同心円状の風圧分布が認められ、その分布にランキン渦モデルを当てはめて求められる最大旋衡風速半径が、計測された最大風速発生位置と良い対応を示した。又、立方体模型表面およびその周辺の平均風圧係数を明らかにした。模型壁面の影響により、模型近傍では床面の風圧分布がやや複雑になること、旋回流の衝突及び剥離風下部分に特徴的な風圧分布がみられた。移動効果を再現可能な竜巻模擬装置の試作し、この試作機による竜巻状旋回流の基本的性質を明らかにする為、渦の形成状況やその形状を観察した。静止状態での可視化実験では、つばの有無、収束域の高さ、ベーン角度 θ' 、風速の計測と、様々な条件を変えながら可視化実験をした。その結果、上部ベーンによる循環が減衰して収束層に伝わる状況が認められた。移動式の可視化実験ではスワール比とともに、移動速度が渦の形成に大きく影響することが明らかとなったと報告している。

松本・白土・八木・橋本ら(2008)¹⁹⁾は京都大学保有の突風風洞によりギャロッピングの生じる正方形断面や車両断面ではアンダーシュート現象が見られ、風速が急変する場合には、定常地と逆方向の揚力が作用する事、構造基本断面では風速急変時において抗力が定常値の1.157~1,348倍(完全ステップ関数上の入力の時)の値を示すオーバーシュート現象が見られた事、オーバーシュート時に確認された非定常な周波数成分はカルマン渦に発達する前のペアー渦成分であると言える事等について報告している。

佐々・竹村・道下ら(2008)²⁰⁾は実際に移動する竜巻の下層の速度場を明らかにすることを目的として、自由空間中で再現した竜巻状渦のPIV計測と熱線計測を行った。PIV計測の結果、移動する渦の下層の速度場は収束流の影響で非対称な分布となり、反時計回りに回転する渦の移動方向に向かって右後方に最大風速領域が見られた。これは従来の移動する竜巻をランキン渦と仮定し進行方向の右側に最大風速領域が現れるような速度場の評価と

は異なっている。また、ファンの移動速度が大きくなるにつれて、上層と下層での水平方向の速度の差が大きくなって、渦軸の傾きも大きくなった。渦のストレッチング効果により移動速度が大きいほど渦が強化され、加わった移動速度以上に風速が大きくなることがわかった。熱線計測の結果、移動する竜巻状渦に伴う速度変動が捉えられた。この結果は竜巻の通過に伴う風の負荷を評価する上で重要なものである。また、移動速度が大きいほどそれに伴う風速変動の時間スケールが大きくなることが認められたと報告している。

武田・河西ら(2008)²¹⁾は竜巻の風速分布をランキン渦と仮定した場合、竜巻による風はF3ではレベル1の地震程度、F5ではレベル2程度の地震程度の力を持つ事が分かった。又、応答加速度は小さく、動的効果はほとんど無い事が分かったと報告している。

ファム・野津・野澤・菊池ら(2010)²²⁾は移動式竜巻状旋回流の数値シュミレーターを用い、旋回流を発生し、その流れ場内に置かれた立方体の風圧力を評価する事を試みた。移動していない旋回流内の結果と比べ、移動している旋回流内の立方体の風圧係数は大きな正と小さな負の値なり、旋回流の移動の影響が大きく出ていると報告している。

【海外の文献】

Preliminary Report for Tornado Outbreak May 22nd ²³⁾ では5月22日に米ミズーリ州ジョプリンで発生した竜巻について報告している。この報告によると、EFスケールは4で風速は190-198mph、被害116棟、死傷者400人以上でこの地方では、近年稀にみる被害である事が記述されている。

Lawrence A ら²⁴⁾は、竜巻の強風による被害確率について、ポワソン・ポリヤ・ワイブル分布等と照らし合わせ、竜巻による被害区域と竜巻の構造物に対する進入角度毎に被害確率を基め、強風域の水平最大風速に関する検討も行っている。又、竜巻に対する構造物のサイズが被害確率に影響する事にも考察している。

Robert C.Garson ら²⁵⁾は、米国の竜巻の被害傾向について統計的な分析を行うと共に、竜巻の経路と強風域について定義し、信頼性設計の観点から、竜巻による強風に対する設計についていくつかのモデル化を行いその意義について報告している。

Shakeel ら²⁷⁾は、Wenらが提唱した竜巻の風速と風向を三次元的に算出できる計算方法を一部改良を加え、それを用いて竜巻が送電塔に接近した際の、送電塔の時刻歴応答解析を行った。

P.P.Sarkar ら²⁸⁾はアイオワ州立大学保有のISU型竜巻発生装置による風圧測定実験を行い、渦中心からの床面の風速、風圧分布と低層構造物に竜巻が接近した場合の構造物各所の風圧力の時刻歴変動を竜巻の移動速度等のパラメータ毎に整理し報告している。

1. 3 研究の目的

研究の背景指摘した竜巻に関する研究の実情と既往の研究の紹介をしたが。それらを元に本研究で何を目的とするか明確にする。

まず、第一にこれまでの研究で対象にしてきた竜巻という現象を漠然と示すもの、もしくは単体の例として示すものではなく、最大風速や最大接線風速半径(コア半径)等の竜巻のスケールを日本の被害傾向を反映した形で定義し、再現期間とそれに対応する規模をそれぞれ定義する。

第二に、定義した渦現象とその急激な風向や風速の変化が構造物に対してどのように影響を及ぼすかを明確にする、の二点である。

これにより日本で発生し得る竜巻の規模、再現期間やそれによる構造物に対する風圧力・風力といった構造設計の荷重算定に必要な値を算出する事で、竜巻を考慮した耐風設計の基礎を固める事ができる。また、全体から、日本における竜巻による構造物との被害が発生すると考えられる位置関係等も推測が可能となる。

本論では前者について第2, 3章で、後者について第4, 5, 6章で扱うものとする。

1. 4 本論の構成

研究の目的でも触れたが、日本において発生する竜巻を最大風速や最大接線風速半径(コア半径)等の竜巻のスケールを日本の被害傾向を反映した形で定義する作業を第2章で、その結果を基に、竜巻による構造物への非定常作用について実際に検証する作業を第3, 4, 5章で行う。

又、竜巻を対象とした本研究の位置づけ等の序論を第1章とし、本研究で得られた各知見と総括を第6章としてまとめるものとする。

具体的には第1章;竜巻という現象と本研究の概要、第2章;設計用仮想竜巻モデルの提案と、米国の設計用竜巻モデルとの比較、第3章;竜巻状風発生装置を使用した渦の風速・風向変化の把握、第4章;複数ファン風洞による竜巻を想定した非定常気流の作成、第5章;複数ファン風洞による構造物への急激な風速・風向変化が及ぼす影響の測定、そして第6章の結論である。

各章の導入部でそれぞれのテーマにおける検討の意義や本論中での位置づけについてより詳細に記述し、各章の終りで章の一定の成果についてまとめるものとする。本研究にあたり意図せずに、又は本論文のストーリーにそぐわない結果が幾つか得られたが、それらについては末尾に付録という形で記録を残しておく。

【参考文献】

- 1) 昭和53年2月28日に東京地方を襲った竜巻について“光田寧 文字信貴 岩田祥美 西岡淳一” 構造物の耐風性に関するシンポジウム(1978)
- 2) 冬季日本海上の降雪雲に伴って発生した竜巻-1991年12月11日金沢市の突風災害- “小林文明 内藤玄一 道本光一郎” 第12回風工学シンポジウム(1992)
- 3) 竜巻に伴う漏斗雲と地上の強風域の観測的研究 “小林文明 菊池勝弘” 第13回風工学会シンポジウム(1994)
- 4) 群馬県境町で発生した竜巻による建築物の被害及び推定風速について “喜々津仁密 奥田泰雄 伊藤弘” 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)2003年9月
- 5) 台風に伴う竜巻発生の原因とその環境場の解析 “吉野純 石川裕彦 植田洋匡 安田孝志” 日本風工学会誌 第32巻第3号(通号第112号)平成19年7月
- 6) 日本における竜巻発生環境場と予測可能性 “桜井溪太 川村隆一” 第5回天気予報研究会(2008)
- 7) 台風8019号に伴い発生した竜巻に関する数値実験 “佐藤和歌子 石川裕彦” 京都防災研究所年報 第51号B平成20年6月
- 8) 2007年8月に徳島市で発生した竜巻における風速推定 “野田稔 長尾文明” 風工学シンポジウム論文集 Vol. 20 (2008) No. SPACE pp.29-
- 9) 写真に記録されたデジタル情報を用いた海上竜巻の幾何学的分析 “宮城弘守 鈴木修” 風工学シンポジウム論文集, Vol. 20 (2008) No. SPACE pp.28-
- 10) 2007年5月31日東京湾で発生した竜巻とマイソサイクロンの関係 “小林文明 菅原裕也” 風工学シンポジウム論文集, Vol. 20 (2008) No. SPACE pp.26-
- 11) 2007年5月31日に千葉県富津沖で発生した竜巻の風速分布 “小林文明 菅原裕也 今井真希 前坂剛” 日本風工学会論文集 第33巻第2号(通号第115号)平成20年4月
- 12) 日本における竜巻のリスク評価のための統計分析 “川名清三 田村幸雄 松井正宏” 日本建築学会学術講演梗概(北陸)2010年9月

- 1 3) 龍巻渦の実験的研究-室内実験の展望- “文字信貴” 日本風工学会誌第12号,昭和57年4月
- 1 4) 自走する竜巻の模擬実験 “佐々浩司” 数理解析研究所講究録1454巻2005年88-95
- 1 5) 竜巻状流れ場に対するスワール比, 粗度の影響に関する室内実験 “松井正宏 田村幸雄” 風工学シンポジウム論文集Vol. 19(2006)No. SPACE pp.7-12
- 1 6) LESによる竜巻状渦のシュミレーション “丸山敬” 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)2007年8月
- 1 7) 竜巻の通過に伴う飛散物の経路と構造物に作用する風力 “河井宏允” 京都大学防災研究年報 第50号B平成19年4月
- 1 8) 竜巻状旋回流中におかれた立方体に作用する風圧力と移動効果による旋回流形成への影響に関する実験的研究 “松井正 宏田村幸雄 吉田昭仁” 風工学シンポジウム論文集 Vol. 20(2008) No. SPACE pp.54-
- 1 9) 竜巻等の突風による構造物に生じる非定常空気力 “松本勝 白土博通 八木知己 橋本三智雄” 日本風工学会誌 第33巻2号(通号第115号)平成20年4月
- 2 0) 移動竜巻の下層構造の実験的解明 “佐々浩司 竹村早紀 道下翔吾” 風工学シンポジウム論文集,Vol. 20 (2008) No. SPACE pp.27-
- 2 1) 竜巻荷重による建物応答の検討 “武田慈史 河西良幸” 日本建築学会大会学術講演梗概(東北)2009年8月
- 2 2) LESによる移動竜巻状旋回流中の立方体に作用する風圧力の変化 “ファム・バン・フック 野津剛 野澤剛二郎 菊池浩利” 日本建築学会大会学術講演梗概(北陸)2010年9月
- 2 3) Preliminary Report for Tornado Outbreak May 22nd Preliminary Tornado Report 05/22/2011
- 2 4) Probabilistic Analysis of Tornado Wind Risks “Lawrence A.Twisdale,M.ASCE and William L.Dunn” journal of Structural Engineering,vol.109,No2 Februry,1983

2 5) Journal of The Structural Division Tornado Design Wind Based on Risk “Robert C.Garson,M.ASCE,Jose Morla Catalan,A.M.ASCE,and C.Allin Cornell,M.ASCE”

2 6) Response of Transmissin Towers Subjected to Tornado Loads “Shakeel Ahmad and Md.Ehtesham ansari” The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November 8-12,2009,Taipei,Taiwan.

2 7) Tornado-Induced Wind Loads on Loads on a Low-rise Building “F.L.haan Jr.,A.M.ASCE;Vasanth Kumar Balaramudu; and P.P. Sarkar, M.ASCE” Jounal of Structural Engineering ASCE/January 2010

第 2 章-設計用仮想竜巻モデルの提案

と米国設計指針との比較

Chapter.2

*Suggestion about Virtual Tornado Model for Design
and the Compare with American Tornado Model
on Guide Line (USNRC)*

2. 1 設計用仮想竜巻モデルの必要性

竜巻による突風を想定した風洞実験や数値流体解析によるシミュレーションは、既往の研究でも触れたようにこれまで幾つかの報告がなされている。それらの論文では対象とした突風の風速を過去に甚大な被害を与えたケースなど、被害例から任意に選びとって再現している。しかしながら、それらの被害例から抽出した情報は最大風速のみの場合が極めて多く、幾つかの例では突風の立ち上がり時間を任意に設定したうえで、記録された被害が発生させ得るほどの突風を再現できているか検証するという本末転倒な報告もある。それらの研究において実際の突風立ち上がり時間がどの程度だったのかという検証のみならず、それらの突風が実現象としてどの程度の規模であるか、又再現期間はどの位であったかという見当はいまだなされていない。

竜巻による突風と言っても、竜巻には渦の回転に起因する接線最大風速や渦自身の移動速度、渦の直径、あるいはコア半径、被害幅、被害長さ等の数多くのパラメータがあり、その発生確率も都道府県別にみても大きな偏りがある。

既往の研究⁽¹⁾によると、日本における竜巻の1年あたりの発生数は約20個であり、単位面積当たりで見ると、日本の竜巻発生数は米国の60%程になり決して少ない数ではなく、一般的に関東平野や海岸沿いの平野部に多いとの事である。ここで、気象庁で発表している過去に発生した竜巻の位置を日本地図にプロットしたものを図2.1.1に、竜巻発生時の気象条件の統計を図2.1.2に示す。⁽²⁾

そこで本研究では、各種風洞により竜巻状の渦が構造物に及ぼす風圧・風力といった影響を検証する前段階として竜巻の基本的な性質の把握から研究を始めるものとする。日本で過去に発生した竜巻に関しては1961年以降気象庁により被害が記録されており、それらの被害記録を統計的に分析する事により日本で起こり得る竜巻の規模とその再現期間について把握する。それにより、耐風設計に際して最大風速と再現期間、後に行う風洞実験の実験結果と関連づけて検討するで、竜巻状の渦が及ぼす風圧力・風力の実現象との対応が明らかになる。

この章では日本における竜巻の被害傾向の統計と分析を行い、日本における記録的な被害を及ぼした竜巻について整理したうえで、甚大な被害及び甚大な被害を与える風速の定義を行う。それらを元に、先に挙げた各種パラメータを有する設計用仮想竜巻モデルの提案を行う。竜巻以外の耐風等の自然風との関係を炤間にする為に最後に日本各地の年最大風速との対応も比較する。

日本における竜巻被害の統計情報について、過去の竜巻被害についての調査結果がまとめられた文献は多数存在するが、各竜巻被害の被害幅や被害長さについては、被害を受けた様々な構造物の状態から目視により推測される事が一般的であり、被害を調査する人物の評価尺度に違いがある場合は、調査結果に差が生じてしまう。本研究では、1961年以降の竜巻やダウンバースト等の突風事例について、統計的な被害調査結果が整備されている

気象庁の気象統計情報「竜巻等の突風データベース」において竜巻と明記されている記録を主に使用する。

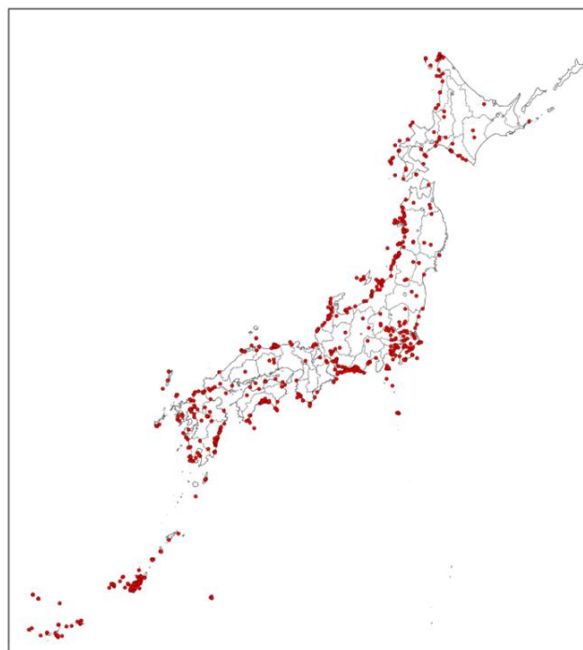


図 2.1.1 日本におけるこれまでの竜巻発生場所

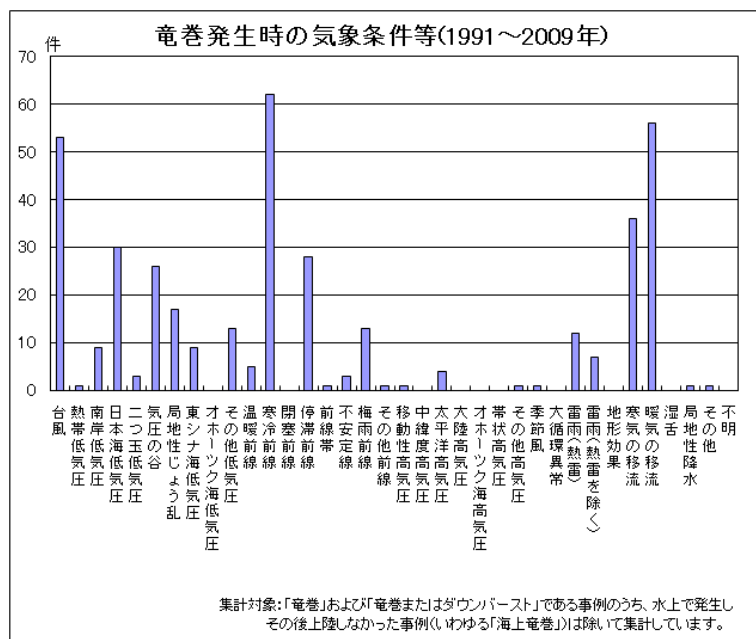


図 2.1.2 竜巻発生時の気象条件

※「年代別の事例一覧」、「都道府県別の事例一覧」に収録している突風事例のうち、現象区別が「竜巻」および「竜巻またはダウンバースト」である事例が発生した際の気象条件等を集計。ただし、水上で発生しその後上陸しなかった事例(いわゆる「海上竜巻」)は除く。一つの竜巻に対して複数の要素が該当する場合があるため、合計すると収録している突風事例の総数を超える。

2. 2 日本における竜巻の被害傾向の統計と分析

気象庁の気象統計情報「竜巻等の突風データベース」より日本における竜巻の被害傾向の分析を行う。分析は被害調査から得たFPPスケールを基準とし、各スケール毎に被害幅(m)、被害長さ(km)、竜巻の移動速度(m/s)について傾向の把握を試みる。竜巻の評価手法として広く利用されているFPPスケール⁽⁴⁾について、表2.2.1に示す。

表 2. 2. 1 FPP スケール

F	風速(m/s)	被害のカテゴリー	P	被害長さ(km)	被害幅(m)
0	17.8～32.6	軽微な被害	0	～1.6	～16
1	32.7～50.3	並みの被害	1	1.6～5.0	16～50
2	50.4～70.3	顕著な被害	2	5.1～16.0	51～160
3	70.4～92.5	激甚な被害	3	16.1～50.8	161～490
4	92.6～116.6	荒廃的な被害	4	50.9～160	500～1500
5	116.7～142.5		5	161～508	1600～5000

「竜巻等の突風データベース」は2010年10月20日更新までの多くのデータがある程度の幅を持って記録されている。この被害記録の幅をどの様に扱うかが仮想竜巻モデルを提案する上で多少の影響を受けると考えられる。この被害記録の幅は、F0やF1の場合においても2km程の差があることもあるので、被害記録の最大値ではなく幅の中間値を取って分析を行う。又、同様の理由から被害幅及び被害長さについては被害記録が比較的まとまっているF1.5～F3を分析する事で傾向の把握を試みる。幅を持った記録の例として近年の神奈川県の一部を抜粋し、表2.2.2に示す。

表 2. 2. 2 近年の神奈川の例

現象区別	発生日時	発生場所		藤田 スケール	被害幅 m	被害 長さKm
竜巻	2008/12/05 15:25頃	神奈川県 横浜市	詳細(D)	F1	200	1.2
その他(不明を含む)	2008/08/09 13:10頃	神奈川県 愛甲郡清川村	詳細	F0	2	0.5
竜巻	2008/3/25 21:04	神奈川県(海上)	詳細(D)	不明	不明	不明
竜巻	2008/3/25 20:57	神奈川県(海上)	詳細(D)	不明	不明	不明
竜巻	2008/3/25 20:53	神奈川県(海上)	詳細(D)	不明	不明	不明
その他(不明を含む)	2007/04/28 15:15頃	神奈川県 横浜市	詳細	F0～F1	不明	不明
竜巻	2006/04/20 12:10頃	神奈川県 藤沢市	詳細(D)	F1	30	0.8
その他(不明を含む)	2005/05/15 15:45頃	神奈川県 相模原市	詳細	F0～F1	10～50	0.5～1.5
その他(不明を含む)	2004/10/09 17:10頃	神奈川県 横浜市	詳細	F1	400～800	1.0～1.2
その他(不明を含む)	2004/07/21 15:00頃	神奈川県 箱根町	詳細	F0～F1	不明	0.5～0.8
その他(不明を含む)	2004/07/21 15:00頃	神奈川県 小田原市	詳細	F0～F1	不明	0.5～0.8

これらの被害記録から、ある程度サンプル数があるF0~F2について、被害幅、被害長さ、移動速度、継続時間についてヒストグラムを作成する。被害幅のヒストグラムを図2.2.1に、被害長さのヒストグラムを図2.2.2、移動速度のヒストグラムを図2.2.3継続時間のヒストグラムを図2.2.4に示す。

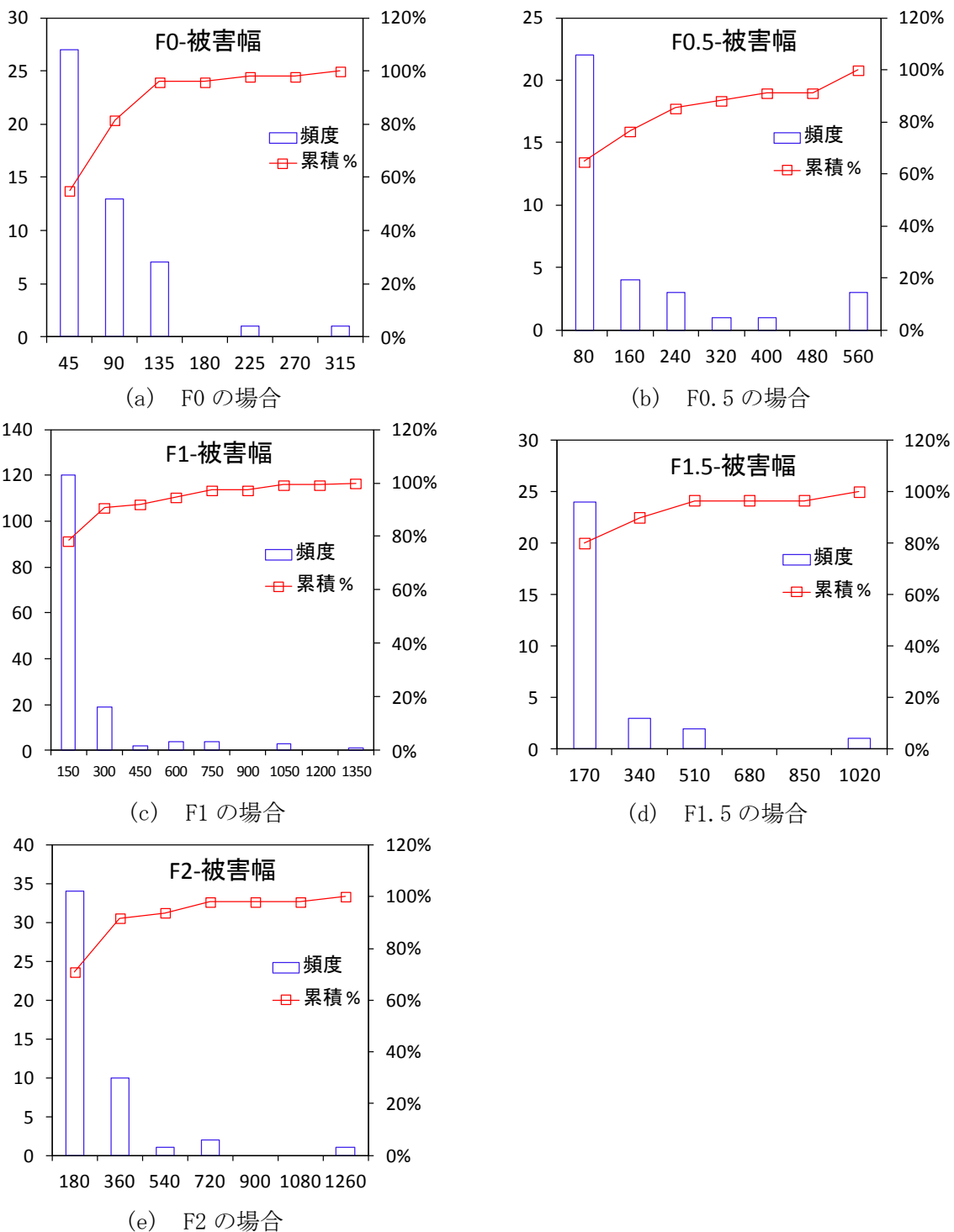


図 2.2.1 被害幅のヒストグラム

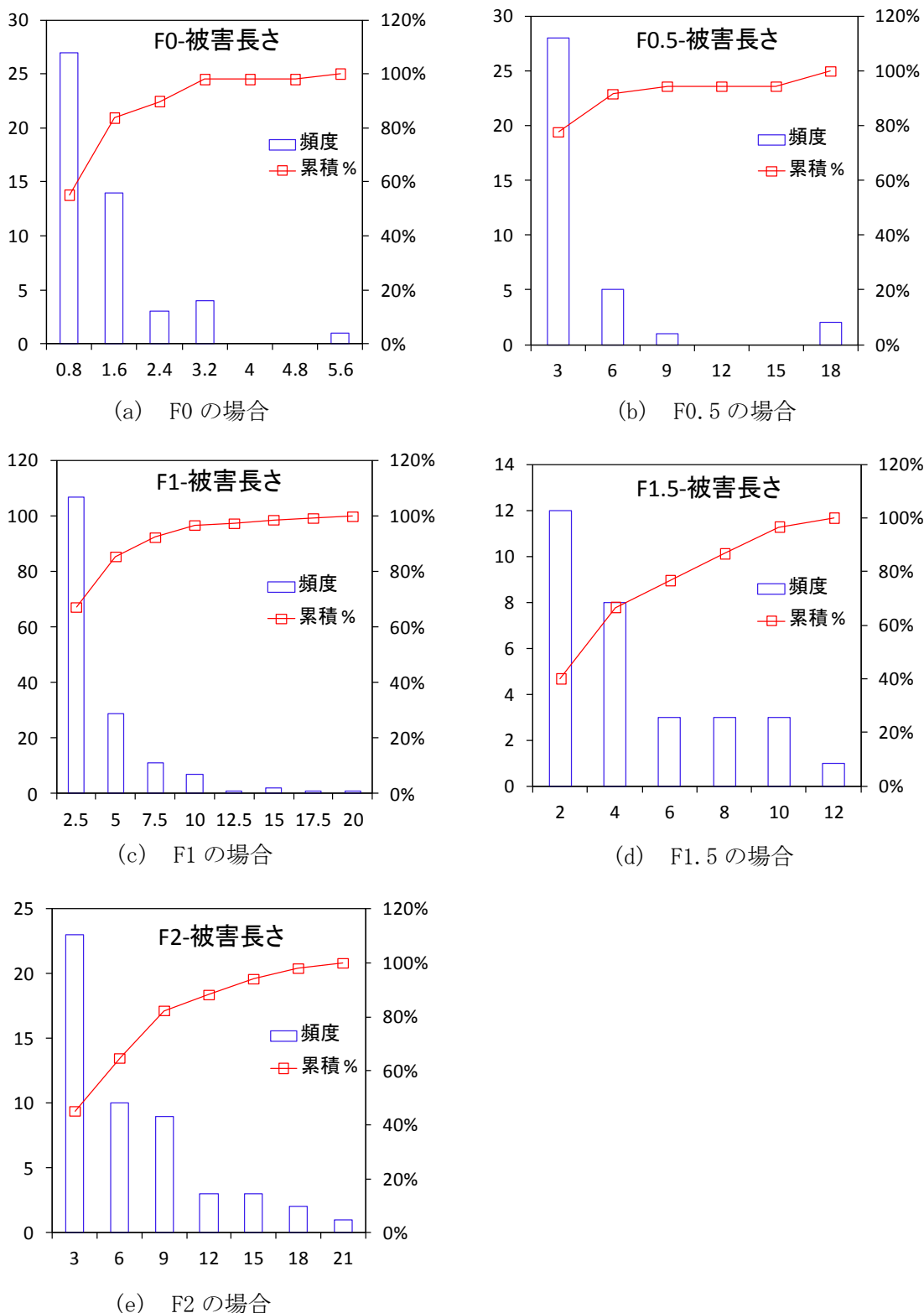
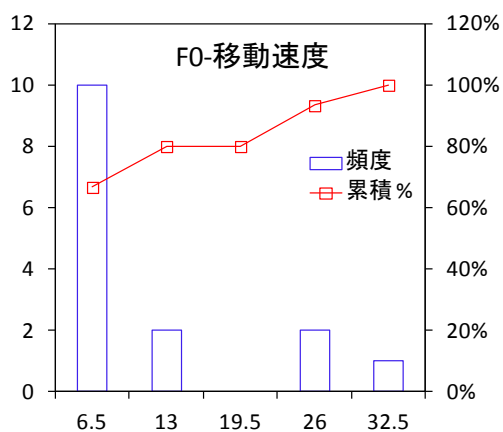
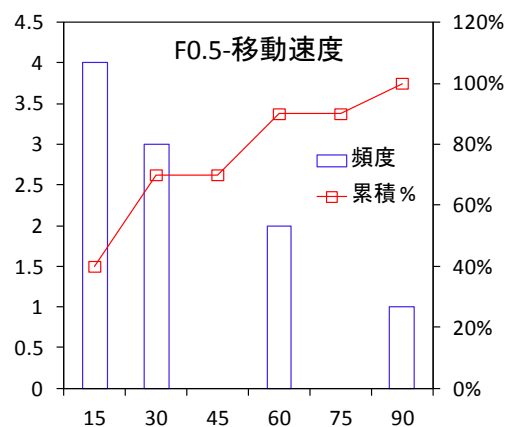


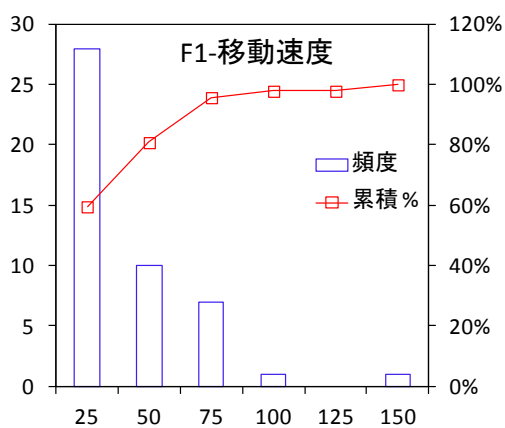
図 2.2.2 被害長さのヒストグラム



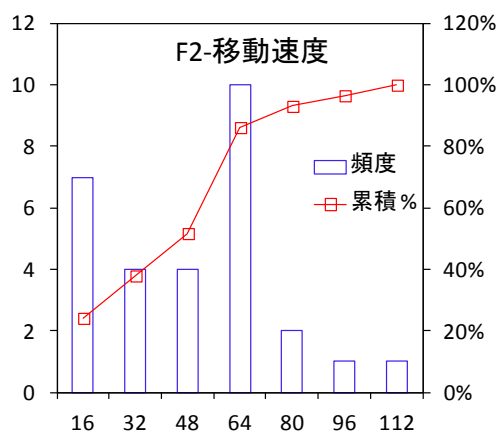
(a) F0 の場合



(b) F1.5 の場合

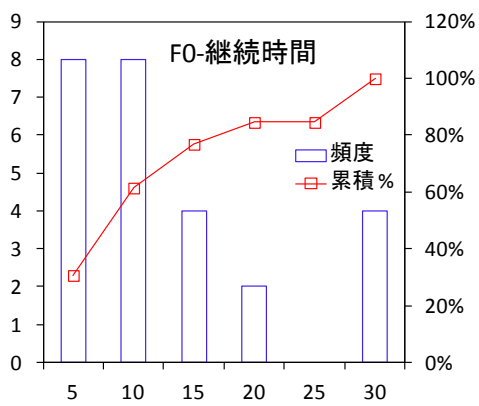


(c) F1 の場合

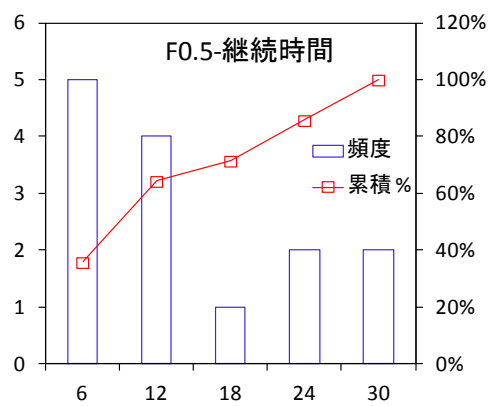


(d) F2 の場合

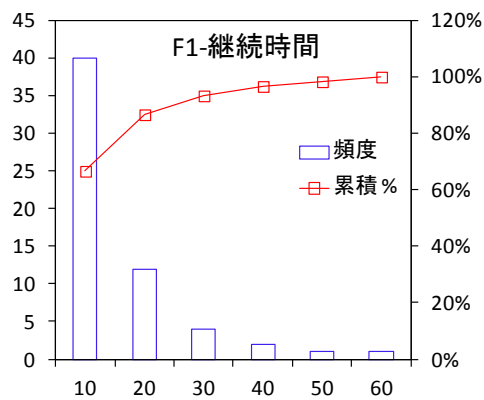
図 2.2.3 移動速度のヒストグラム



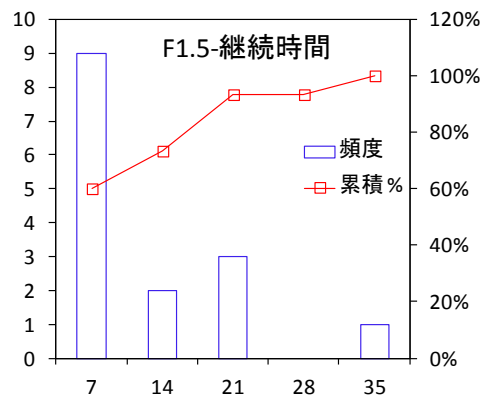
(a) F0 の場合



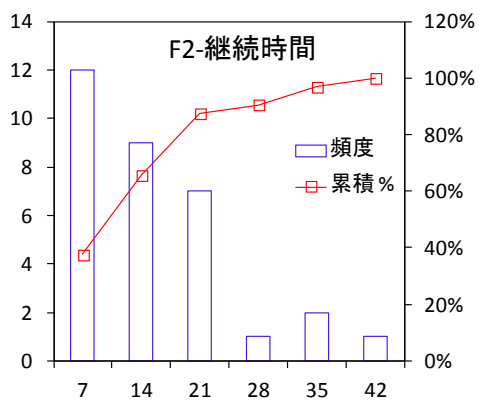
(b) F0.5 の場合



(c) F1 の場合



(d) F1.5 の場合



(e) F2 の場合

図 2.2.4 継続時間のヒストグラム

「竜巻等の突風データベース」において記録されている観測データに基づいて非線形関係を求める。指数関数モデルの非線形回帰分析を用いた計算式を式2.2.1~式2.2.5に示す。被害幅及び被害長さをLとすると

$$L = \alpha e^{\beta F} \quad (\text{式2.2.1})$$

両辺の自然対数をとると

$$\ln L = \ln \hat{\alpha} + \hat{\beta} F \quad (\text{式2.2.2})$$

X=F, Y = ln Lとし、Xに対するYの線形回帰を得る。

$$E(Y|X) = \ln \hat{\alpha} + \hat{\beta} X \quad (\text{式2.2.3})$$

$$\ln \hat{\alpha} = \bar{Y} - \hat{\beta} \bar{X} \quad (\text{式2.2.4})$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum x_i \ln y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{\sum x_i^2 - n \bar{X}^2} \quad (\text{式2.2.5})$$

ただし $\Sigma = \Sigma_{i=1}^n$

\bar{X}, \bar{Y} = それぞれ x と y の標本平均

n=標本の大きさ

算出した被害幅とFスケールとの関係を図2.2.5、被害長さとの関係を図2.2.6、移動速度との関係を図2.2.7に示す。又、これまでの被害記録の内、記録的な被害をもたらした竜巻も図中にプロットしており、その例を表2.2.3に示す。

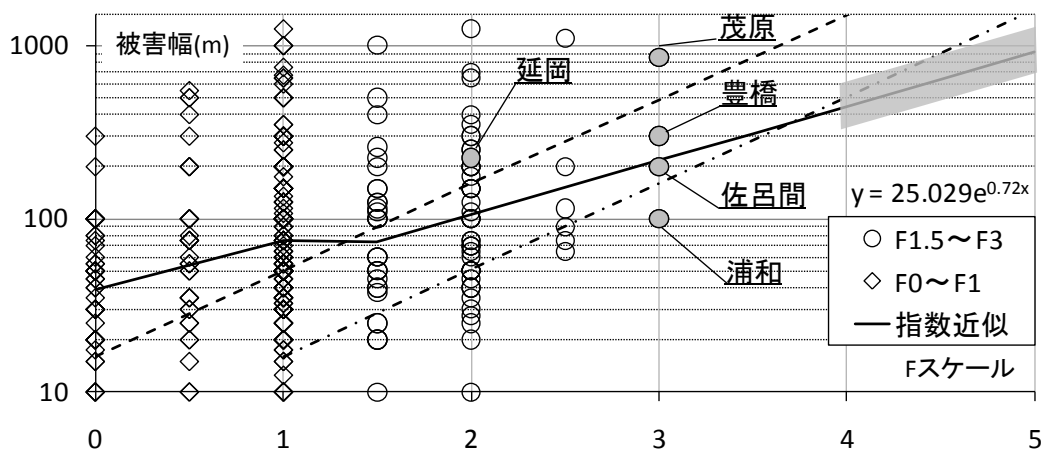


図 2.2.5 被害幅と F スケールとの関係

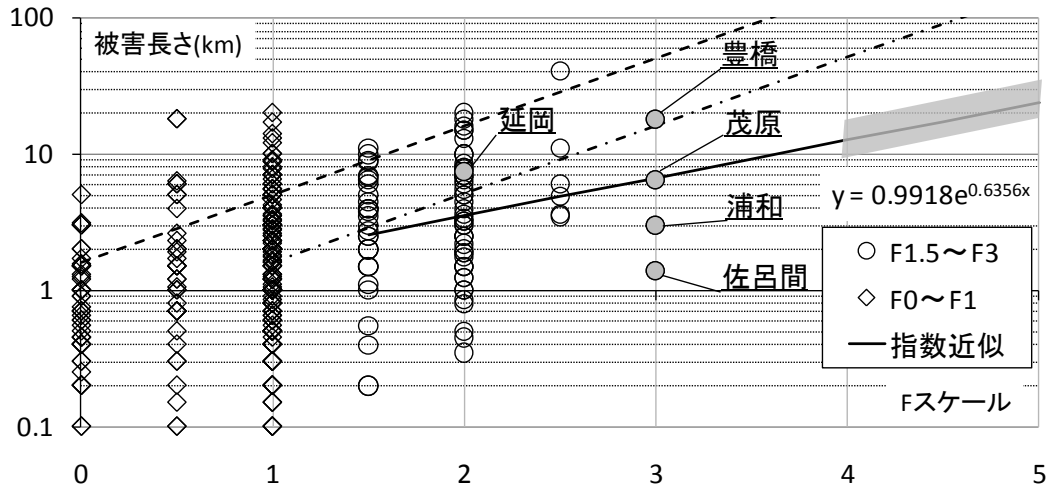


図 2.2.6 被害長さと F スケールとの関係

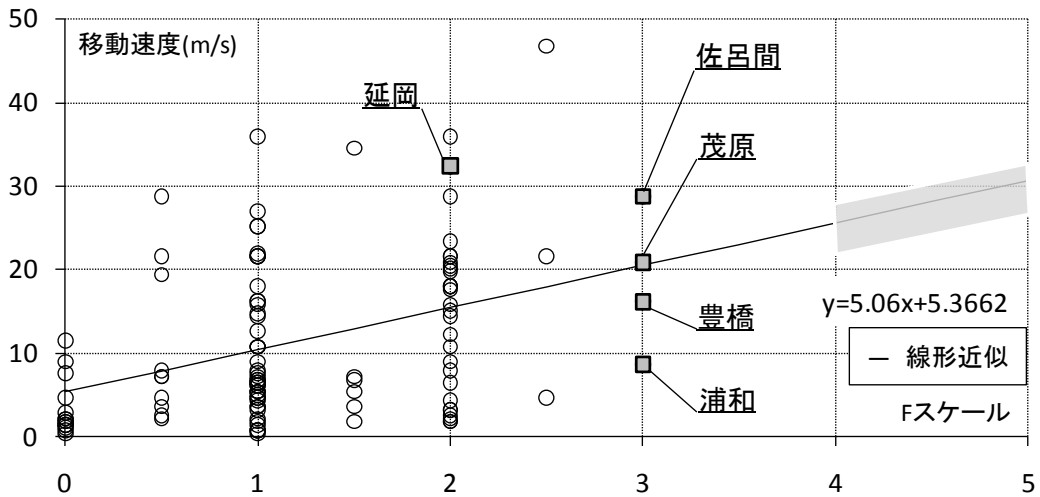


図 2.2.7 移動速度と F スケールとの関係

表 2.2.3 過去に記録的な被害を及ぼした竜巻のパラメータ

発生場所	F	被害幅 (m)	被害長さ (km)	移動速度 (m/s)
埼玉県 浦和市	3	100	3	28.8
千葉県 茂原市	3	850	6.5	8.64
愛知県 豊橋市	3	300	18	20.88
北海道 佐呂間町	3	200	1.4	16.2
宮城県 延岡市	2	225	7.5	32.4

これまでに回帰分析により算出した被害幅、被害長さ、移動速度の各近似値を表2.3.4に示す。設計用仮想竜巻モデルを提案するに際し、接線最大風速 U_m (m/s)、移動速度 v (m/s)、コア半径 R (m)の3つのパラメータの把握が不可欠である。しかし、これまでに把握した被害幅は竜巻のコア半径の2倍よりも大きな値となっている為に、被害幅からその竜巻のコア半径を推測する必要がある。被害幅からコア半径 R (m)を式2.2.4より求める。甚大な被害を与える風速の範囲と竜巻のコア半径との関係を図2.2.8に示す。

表 2.2.4 被害幅、被害長さ、移動速度の F スケールに対する近似値

F	被害幅 (m)	被害長さ (km)	移動速度 (m/s)
2	105.6	3.54	15.49
3	217.0	6.68	20.55
4	445.9	12.61	25.61
5	916.0	23.80	30.67

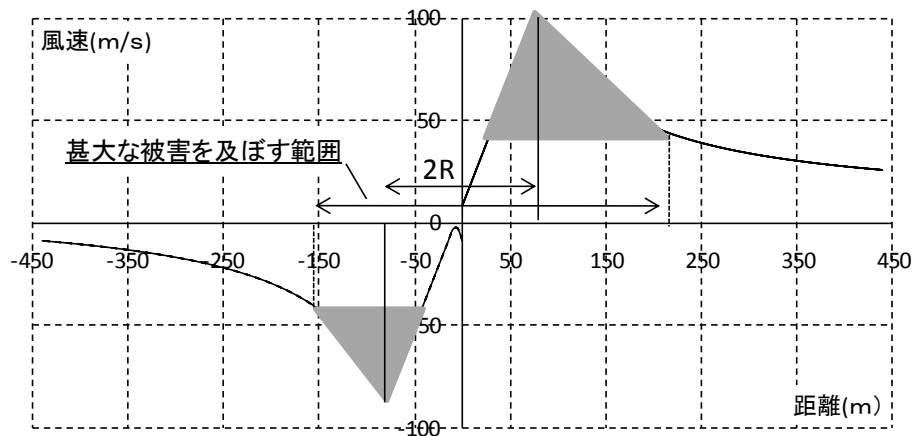


図 2.2.8 コア半径と甚大な被害を与える風速との関係

2.3 米国の竜巻の被害傾向

2.2において気象庁の「竜巻等の突風データベース」より過去の竜巻の被害記録を統計的に分析し、近似的に一定の傾向を見出した。次に米国の竜巻被害について同様の手法で統計的な分析を行う。各竜巻のスケールが日米で非常に近いものであるならば、米国の竜巻関連設計指針を参考にする事が可能である為に、その後の分析では、特重要なパラメータである最大風速、移動速度、被害幅、被害長さについて着目する。

米国での竜巻被害の記録は、米国海洋大気局(NOAA'S National Weather Service)のStorm Prediction Center(<http://www.spc.noaa.gov/wcm/>)が記録を行っており、このデータを元に統計的な分析を行う。記録は1950年から2010年までの50年間で、2006年度までは現在の気象庁と同じFスケールで被害を記録しているが、2007年以降は改良型Fスケールを使用している点に注意する必要がある。改良型Fスケールはその尺度をFスケールに修正して処理するものとする。各1950から2007年の画期間の被害記録を図2.3.1～2.3.7に示す。

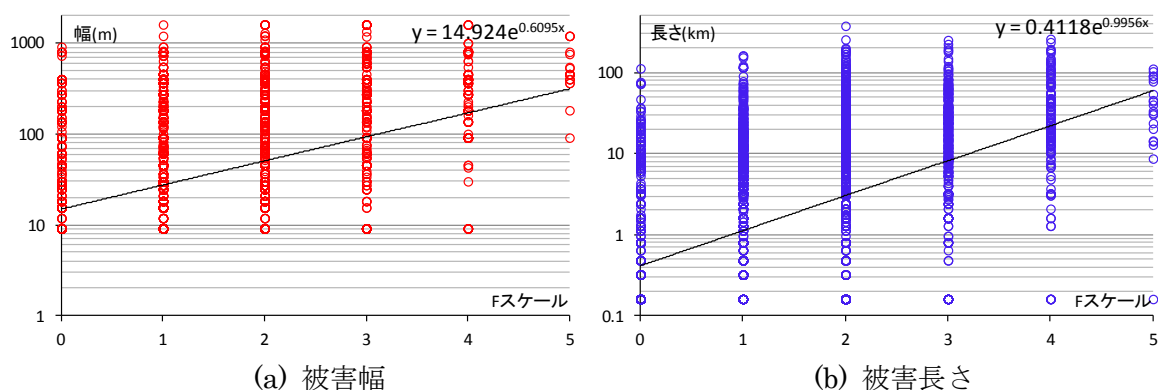


図 2.3.1 1950-59 の被害記録

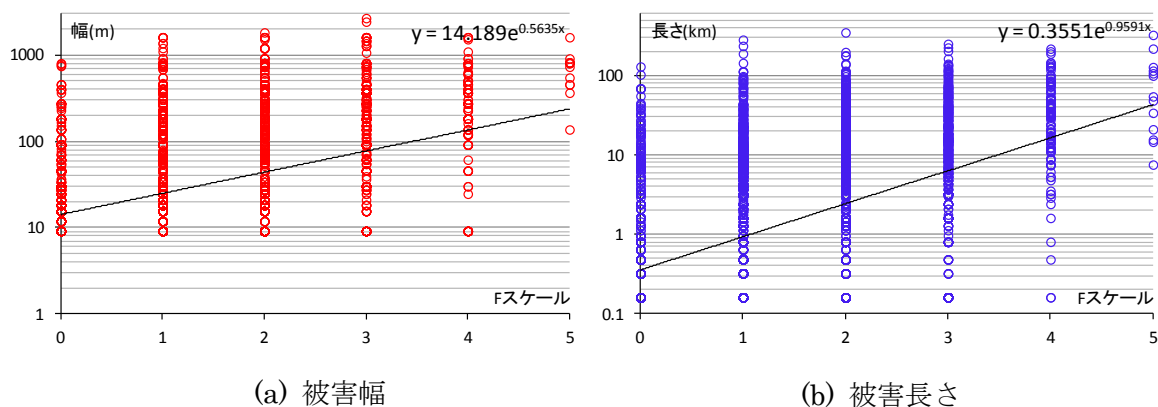


図 2.3.2 1960-69 の被害記録

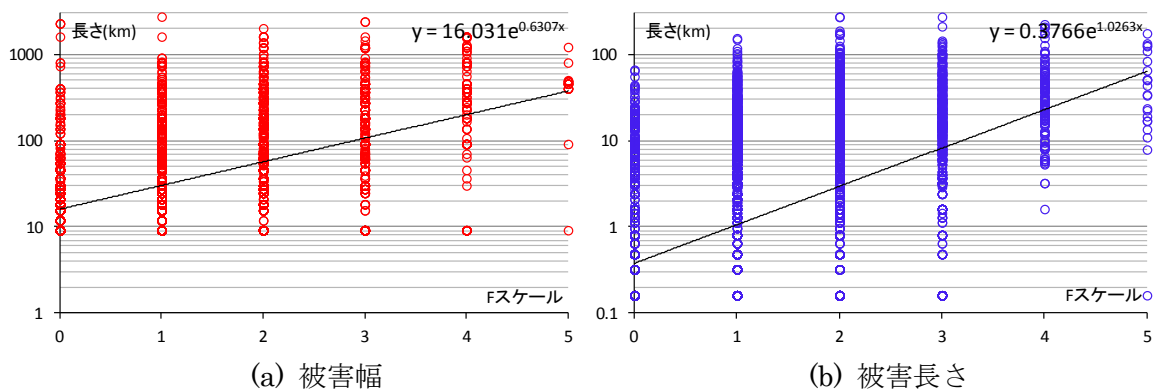


図 2.3.3 1970-79 の被害記録

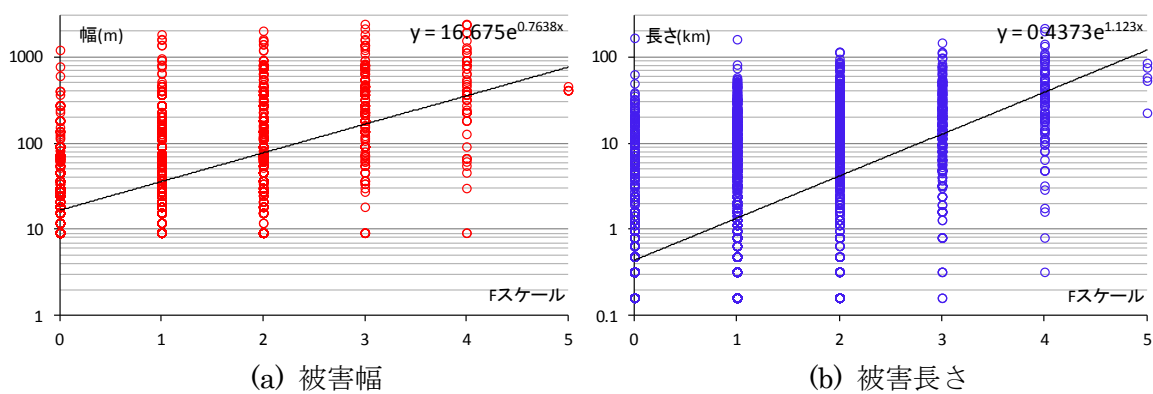


図 2.3.4 1980-89 の被害記録

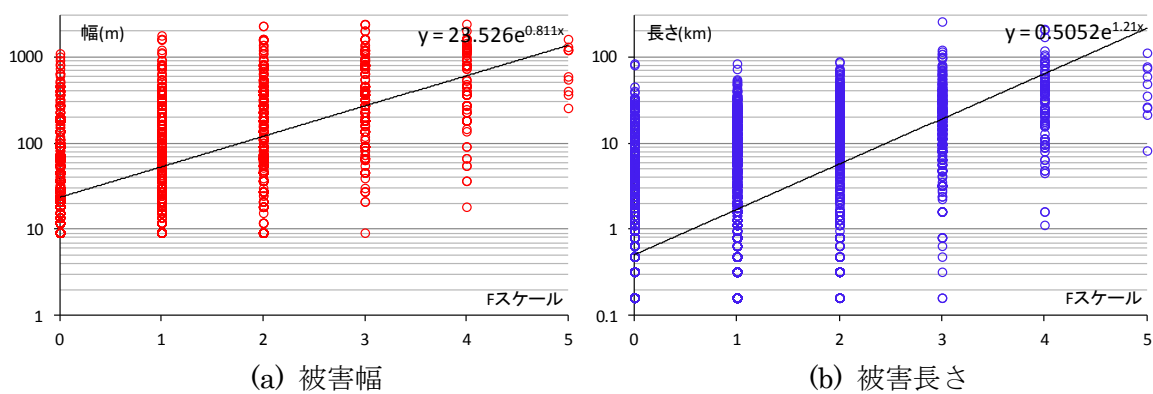


図 2.3.5 1990-99 の被害記録

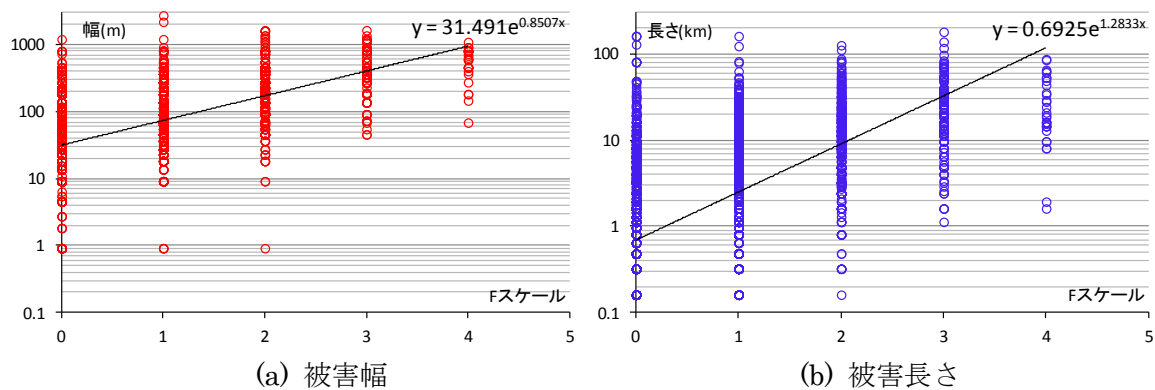


図 2.3.6 2000-04 の被害記録

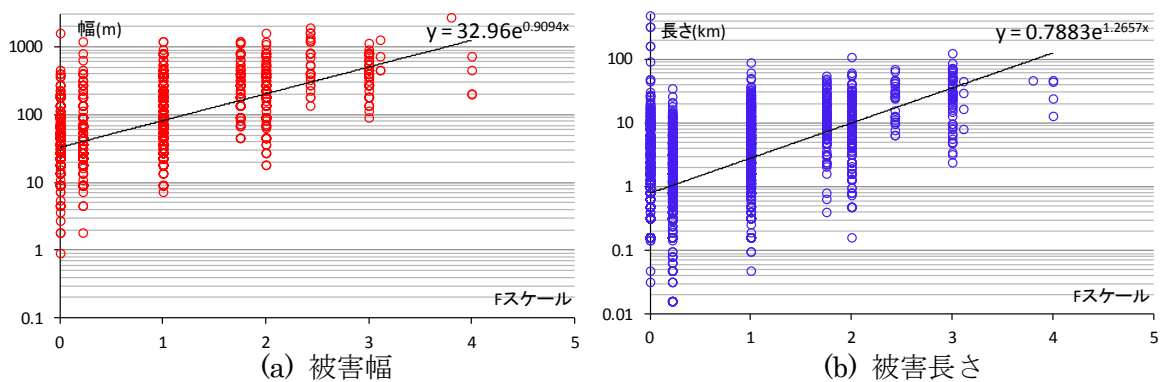


図 2.3.7 2005-07 の被害記録

2.4 米国の竜巻の被害傾向と日本の被害傾向の比較

これらのデータを全てまとめて回帰分析すると、米国の竜巻に各スケールと被害幅、被害長さの関係が把握できる。又、前章で算出した日本の各竜巻のスケールと被害幅、被害長さの関係と合わせてプロットする事で、日本と米国の竜巻の被害の際についておおよその傾向を把握する事が出来る。米国の竜巻スケールと被害幅、長さの関係の図2.4.1に、日米両国の傾向を比較したものを図2.4.2に示す。

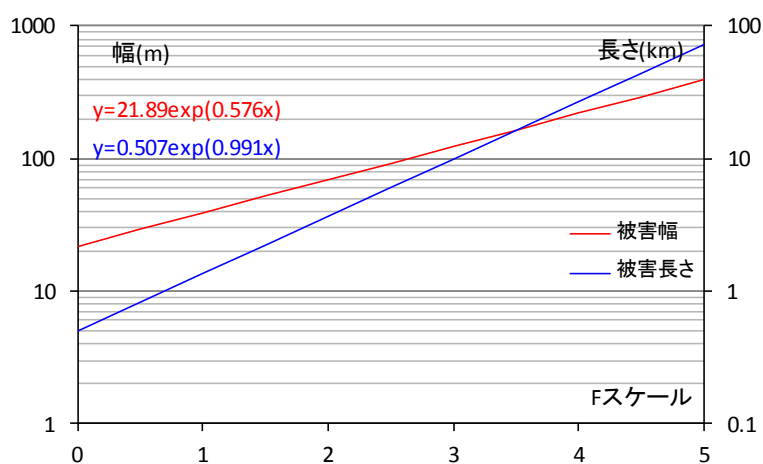


図 2.4.1 米国の竜巻の各スケールと被害傾向の回帰分析結果

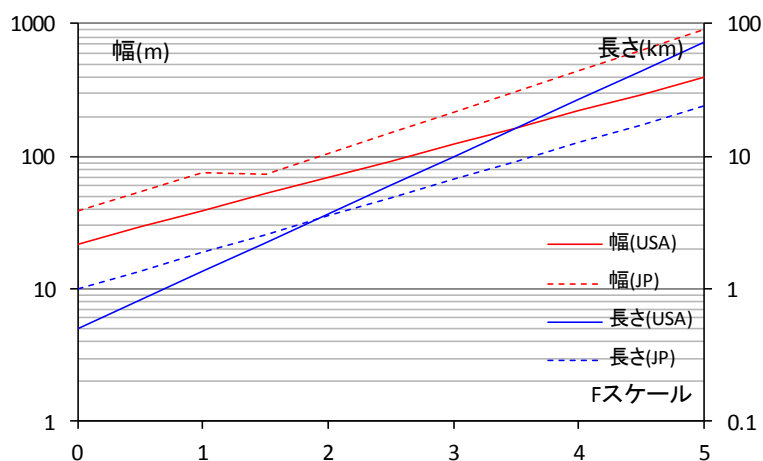


図 2.4.2 日米両国の竜巻のスケールと被害の傾向

比較した結果から、日本の被害傾向に対する米国の被害傾向の比率を算出し、表2.4.1に示す。被害幅については各スケールについて概ね日本の方が2倍ほどの値となっており、スケールが大きくなるに従ってその差は開いてゆく傾向にある。被害長さについては、スケールが小さい場合は日本の方が大きいですが、F2程度を境にスケールが大きくなるに従って、米国の場合の方が大きくなってゆく傾向がある事が把握できる。

しかしながら、後述する米国の竜巻関連設計指針や、Fスケールは著者が計算した米国の被害傾向を大きく上回る値に設定した事から、単純な回帰分析結果に何らかの係数を乗ずるなどの処理を施した可能性も考えられるが、そういった資料を見つける事が出来なかった為。

表 2.4.1 日米両国の竜巻被害傾向の比率

F	幅	長さ
0	1.77	1.96
1	1.92	1.37
2	1.52	0.96
3	1.76	0.67
4	2.03	0.47
5	2.34	0.33

これらの結果から、米国と日本で発生する竜巻の傾向は全く違う物である事が言える事で、必然的に、米国の竜巻関連設計指針をそのまま日本の建築設計に適用する事は適切でない事を指し示す。よって次章以降、日本における設計用仮想竜巻モデルの提案の為の作業を行う。

2.5 日本における記録的な被害を及ぼした竜巻

これまで日本において発生した最大規模の竜巻はF3スケールが最大であり、F3スケールは現在までに僅か4例しか報告がなされていない。日本は海洋国家であり広大な領海を有しており、海上でF3スケール以上の竜巻が発生していた可能性も考えられるが、海上で竜巻が発生した場合は被害の痕が目に見える形で残らない為その規模を特定する事はできない。そこで、これまで地上で発生が観測された特に渦自体もそれによる被害も大きな竜巻について表2.5.1に示す。

表 2.5.1 過去に甚大な被害を及ぼした竜巻について

発生日時	発生場所	Fスケール	被害幅(m)	被害長さ(km)	死者	負傷者	住家		総観場
							全壊	半壊	
1971/07/07 07:50頃	埼玉県 浦和市	F3	100	3	1	11	5	1	台風
1990/12/11 19:13	千葉県 茂原市	F3	500~1200	6.5	1	73	82	161	暖気の移流・気圧の谷・寒冷前線
1999/9/24 11:07	愛知県 豊橋市	F3	50~550	18	0	415	40	309	台風
2006/11/7 13:23	北海道 佐呂間町	F3	100~300	1.4	9	31	7	7	寒冷前線・暖気の移流
2006/9/17 14:03	宮崎県 延岡市	F2	150~300	7.5	3	143	#	#	台風

これらの竜巻はその被害の大きさからも建築研究所や大学などの教育機関が被害状況や当日の気象状況について調査し、幾つかは報告書としてまとめられている。

ここでは“2.7甚大な被害及び甚大な被害を与える風速の定義”に使用するこれらの竜巻の内、調査結果が明確なものに絞り被害状況について報告書より抜粋して記述する。

・佐呂間町⁽⁴⁾

北海道佐呂間町の新佐呂間トンネル工事現場付近で竜巻が発生。後の調査により、瞬間風速は毎秒83メートルに達していたことが判明、気象庁からもF3と発表された。死者9名、負傷者23名を出した。被害分布を図2.5.1に、被害状況を図2.5.2に示す。



図 2.5.1 佐呂間町の竜巻による被害状況



(a) 被災直後の新佐呂間トンネル作業事務所・宿舎（国土交通省北海道開発局提供）



(b) 被災直後の新佐呂間トンネル作業事務所向いの状況（国土交通省北海道開発局提供）



(c) 事務所併用住宅の被害

図 2.5.2 佐呂間町の竜巻による被害状況

・延岡市⁽⁵⁾

人的被害では3名が亡くなり,11月7日の佐呂間竜巻による労災被害発生までの短期間であったが,1971年以降の気象庁の被害統計で死者数を更新する悲しい記録となった。報道等によると,浜町で2名(店舗陳列棚の下敷,屋外(畑)で高齢者がショック死),山下町で1名(屋内に飛び込んできた飛散物が頭部を直撃)が亡くなっていて,屋内にいても飛来物による被害を受ける可能性があることが明らかとなった。被害統計を表2.5.2に、被害状況を図2.5.3に示す。

表 2.5.2 延岡市の竜巻による被害統計

(延岡市防災推進室調べ：2006年11月6日現在,旭化成除く)

人的被害 (人)	死者		重傷者		軽傷者	
	3		3		140	
住家被害 (棟)	全壊	大規模半壊	半壊	一部破壊		
	79	83	265	753		
非住家被害 (棟)	全壊	大規模半壊	半壊	一部破壊		
	15	9	33	110		
被害額 (千円)	水産	農業	商工	公共 施設	合計	
	65	88,474	1,188,700	16,847	1,294,086	

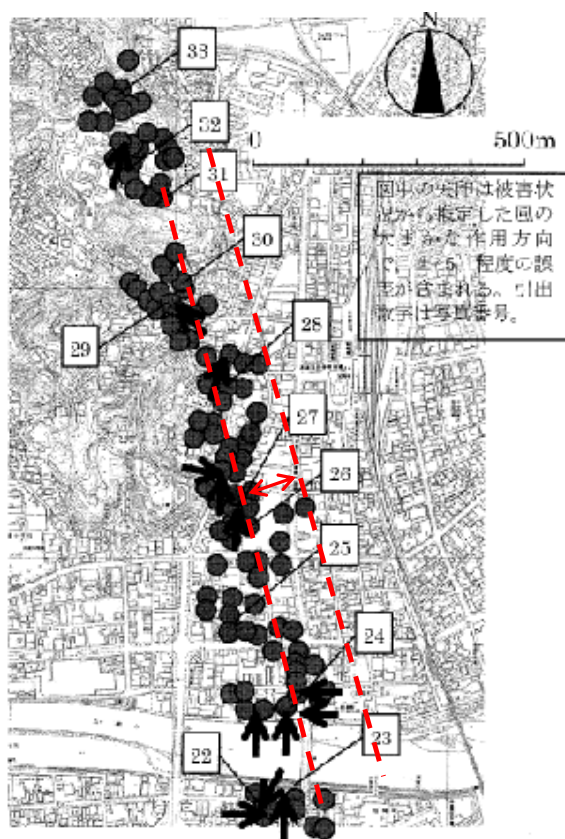


図 2.5.3 延岡市の竜巻による被害状況

2. 6 竜巻内作用風力の理論値

これまで竜巻状風発生装置を使用した実験は数多く行われている。しかし、実現象として竜巻内・外でどのように風速・風向が変動しているかは十分に解明されていない。本研究では竜巻を左回りのRankine渦が円形状態を保った状態で、ある一定の速度を持って移動するものとモデル化する。同様に、竜巻の鉛直風速成分についても十分な実態の把握がされていない為、本研究で提案する仮想竜巻モデルについては主に水平風速成分を対象として提案を行うものである。Rankine渦モデルで近似した各座標系で竜巻による水平風速成分を式(3.1),式(3.2),式(3.3),式(3.4)に示す。⁽³⁾

竜巻の進行方向にy軸をとり、竜巻進行方向に対して渦の中心からの直角距離にx軸をとる。ある一地点において、速度v(m/s)の竜巻が最大風速半径(以下コア半径と呼ぶ)R(m)の外側から接近・通過するものとする。(図2.6.1)

時刻t=0の時、竜巻の中心は原点y=SRの位置にある。時刻tの、ある一地点での風速ベクトルUのx,y方向成分は

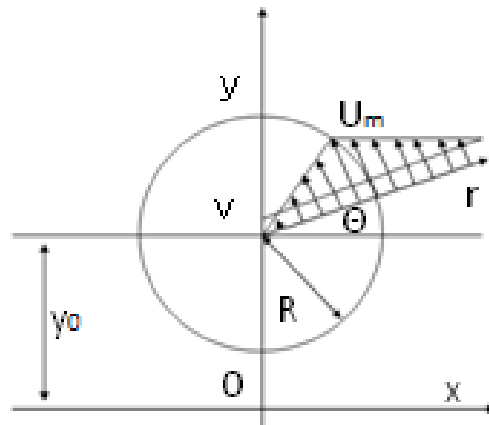


図 2. 6. 1 Rankine 渦による水平風速成分

$r \leq R$ の時

$$U_x = -U_m \frac{(SR-vt)-y_0}{R} \quad (3.1)$$

$$U_y = \frac{U_m}{R} x + v \quad (3.2)$$

$r \geq R$ の時

$$U_x = -U_m R \frac{(SR-vt)-y_0}{\{x^2+\{(SR-vt)-y_0\}^2\}} \quad (3.3)$$

$$U_y = U_m R \frac{x}{\{x^2+\{(SR-vt)-y_0\}^2\}} + v \quad (3.4)$$

以上の式により算出する。ここで $r = R$ における接線最大風速を U_m (m/s)、渦中心からの距離を r (m)、 S は任意の整数とし R に乗じる事により、 $t=0$ の時、ある一地点が渦中心からどれだけ離れているかを示す。

2. 7 甚大な被害及び甚大な被害を与える風速の定義

気象庁が先に示した「竜巻等の突風データベース」で発表している被害状況は統計的にまとめられていると記したが、これらの被害がどの程度の被害であるかは調査する人間によって違いが生じるものと考えられ、瓦の飛散や鉢植えの転倒か、墓石やコンクリートブロックの倒壊かその程度は不明である。

本研究ではこの調査結果を元に、設計用仮想竜巻モデルを求める事が後の実験の為に重要である為に、発生した竜巻の被害幅と、構造物が損傷を受けている甚大な被害の幅との違いを明確にする事が重要である。そこで、構造物が損傷を受けるほどの甚大な被害の幅が調査されている文献から被害な甚大な幅を求め、FスケールからRankine渦モデルにより逆算する事で、竜巻のコア半径を求める。

その為には甚大な被害を与える風速を定義しなければならない。

・甚大な被害を与える風速の推定

建築物に甚大な被害を与える風速を定義する為に、米国海洋大気圏局(NOAA)の部局の一つである米国立気象局(NWS)が運用しているDAMAGE INDICATORS (DI)、Degrees of damage(DODs)という指標を利用する。⁶⁾DIは評価基準となる構造物の種別、DODは構造物の被害度合いを示している。この評価方法により、各構造物の甚大な被害の定義とその際の風速を推定した物を表2.7.1に示す。

表 2.7.1 各種構造物に対して甚大な被害を及ぼす風速

NO.	DAMAGE INDICATORS (DI)	DOD(gl)	V(m/s)
1	Small Barns or Farm Outbuildings (SBO)	4	40.0
2	One- or Two-Family Residences (FR12)	4	43.1
3	Manufactured Home - Single Wide (MHSW)	4	39.6
4	Manufactured Home - Double Wide (MHDW)	5	39.1
5	Apartments, Condos, Townhouses (ACT)	3	55.1
6	Motel (M)	4	42.2
7	Masonry Apartment or Motel (MAM)	3	42.2
8	Small Retail Building (SRB)	4	43.6
9	Small Professional Building (SPB)	5	44.4
10	Strip Mall (SM)	4	44.9
11	Large Shopping Mall (LSM)	4	48.0
12	Large, Isolated Retail Building (LIRB)	3	31.6
13	Automobile Showroom (ASR)	4	44.9
14	Automobile Service Building (ASB)	4	43.6
15	Elementary School (ES)	5	44.9
16	Junior or Senior High School (JHSH)	5	44.9
17	Low-Rise Building [1-4 Stories] (LRB)	3	44.9
18	Mid-Rise Building [5-20 Stories] (MRB)	6	52.9
19	High-Rise Building [More than 20 Stories] (HRB)	4	44.9
20	Institutional Building (IB)	5	50.7
21	Metal Building System (MBS)	3	42.2
22	Service Station Canopy (SSC)	3	40.9
23	Warehouse Building (WHB)	4	45.8
24	Electrical Transmission Lines (ETL)	5	61.3
25	Free-Standing Towers (FST)	2	59.1
26	Free-Standing Light Poles, Luminary Poles, Flag Poles (FSP)	2	45.3

構造種別の被害度合いについて、各用途の構造物において、主要構造部、構造耐力上主要な部分である屋根(版)が損傷した場合を甚大な被害と定義して、甚大な被害を与える風速を求める。その結果、風速およそ46(m/s)で各用途の建築物において甚大な被害が生じるものとする。

被害状況の例として、No.2 One-orTwo-Family Residences(FR12)-DOD4、No.4 Manufactured Home-Double Wide (MHDW)-DOD5、No.11 Large Shopping Mall (LSM)-DOD4、No.15 Elementary School (ES)-DOD5、No.3 Manufactured Home - Single Wide (MHSW)-DOD4、No.10 Strip Mall (SM)-DOD4、No.19 High-Rise Building [More than 20 Stories] (HRB)-DOD4について図2.7.1に示す。



(a) No.2 One-orTwo-Family Residences(FR12)-DOD4



(b) No.4 Manufactured Home-Double Wide (MHDW)-DOD5



(c) No.11 Large Shopping Mall (LSM)-DOD4



(d) No.15 Elementary School (ES)-DOD5

図 2. 5. 1 被害状況の例



(e) No.3 Manufactured Home – Single Wide (MHSW)-DOD4



(f) No.10 Strip Mall (SM)-DOD4



(g) No.19 High-Rise Building [More than 20 Stories] (HRB)-DOD4

図 2.5.1 被害状況の例

・被害の甚大な幅員の推定

被害幅から竜巻のコア半径を求める際に、気象庁の「竜巻等の突風データベース」に記録されている被害幅は5章で筆者が定義したようには扱われておらず、被害記録を確認すると被害幅が5kmにもなるような途方もない記録も存在する。これは被害調査の際に、程度や範囲の推定が一樣ではないとして、竜巻の形跡が軽微な被害の確認された場合も含めて被害記録を行っている為であると考えられる。

これまでの被害記録について被害の甚大な幅について報告がなされている例は非常に少なく、これまで記録的な被害を出した極一部の竜巻についてのみである。そこで既往の文献を調査する事により記録的な被害を出した5つの竜巻について気象庁で発表している被害幅と、調査報告書^{(7),(8)}の記述や写真等から判断した被害の甚大な幅との関係を比率の算出過程を表したものを表2.7.2に、それにより求めた各Fスケールの甚大な被害の幅を表2.7.3に示す。

文献から明確な数値の把握が出来なかった竜巻については、筆者が定義した甚大な被害を及ぼす風速とDI・DODを参考に被害写真より推定した。北海道佐呂間町で発生した竜巻被害の例を図2.7.2に示す。

表 2.7.2 被害の甚大な幅の算出

気象庁データより			被害論文・写真より		被害幅と被害の甚大な幅の比	平均比
詳細	被害幅(m)	中間値(m)	被害の甚大な幅			
埼玉県 浦和市 (F3)	100	100	30		0.300	0.370
千葉県 茂原市 F3	500~1200	850	200		0.235	
愛知県 豊橋市 F3	50~550	300	100		0.333	
北海道 佐呂間町 F3	100~300	200	107		0.535	
宮崎県 延岡市 F2	150~300	225	100		0.444	

表 2.7.3 各Fスケールの被害の甚大な幅

Fスケール	被害幅の指数近似値(m)	想定甚大な被害幅
0	68.10	24.53
1	117.46	42.31
2	202.60	72.98
3	349.44	125.87
4	602.71	217.10
5	1039.54	374.45



図 2.7.2 佐呂間町の竜巻被害の甚大な幅

2. 8 設計用仮想竜巻モデルの提案

「竜巻等の突風データベース」から求めた過去の竜巻による被害幅の指数近似値に前節において気象庁の被害記録と被害調査報告書から求めた甚大な被害の幅との比率を乗じることで、各Fスケールのコア半径を算出する。

これに移動速度の線形近似値を対応させることで、Fスケールを基準尺度として日本における過去の竜巻被害の記録を反映させた仮想竜巻モデル(VF表記)を表2.8.1に、各Fスケールの竜巻が発生した場合の被害幅、被害長さを表4.8.2示す。ローマ字表記は記録的な被害を与えた竜巻の被害報告書から求めたパラメータである。

表 2. 8. 1 設計用仮想竜巻モデルのパラメーター

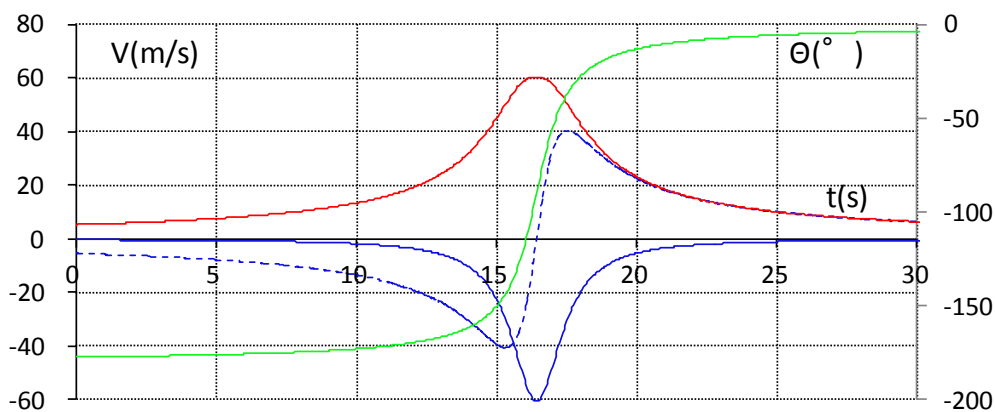
モデル	Fスケール	風速(m/s)	移動速度(m/s)	コア半径(m)
Toyohashi	3	81	16.2	28.3
Mobara	3	81	20.9	80.0
Urawa	3	81	8.6	8.4
Saroma	3	81	28.8	30.2
Nobeoka	2	60	32.4	38.0
VF2	2	60	15.5	14.7
VF3	3	81	20.6	22.5
VF4	4	105	25.6	36.2
VF5	5	130	30.7	60.1

表 2. 8. 2 各Fスケールに対応した被害幅・被害長さ

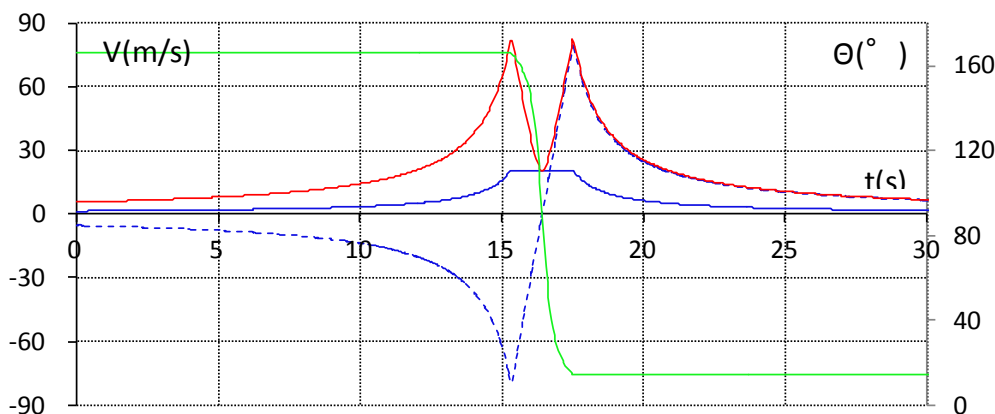
指数近似		
F	被害幅 (m)	被害長さ (km)
0	38.70	0.99
1	74.76	1.89
2	105.64	3.54
3	217.03	6.68
4	445.87	12.61
5	916.02	23.80

これにより、日本において発生した竜巻の傾向を把握し、渦を特徴づける各種パラメータを過去の被害記録から近似的に算出した。又、それらの値と、過去に甚大な被害を与えた竜巻の記録と比較する事で、それらの竜巻がどういった規模の物であったかが大まかに把握できる。しかしながら、米国と比較すると日本における竜巻の発生数が少ない事から統計的に十分な記録が得られているとは言い難い為に、今後新たに竜巻が発生する度に、それらの被害記録を考慮して常に修正してゆく必要がある。

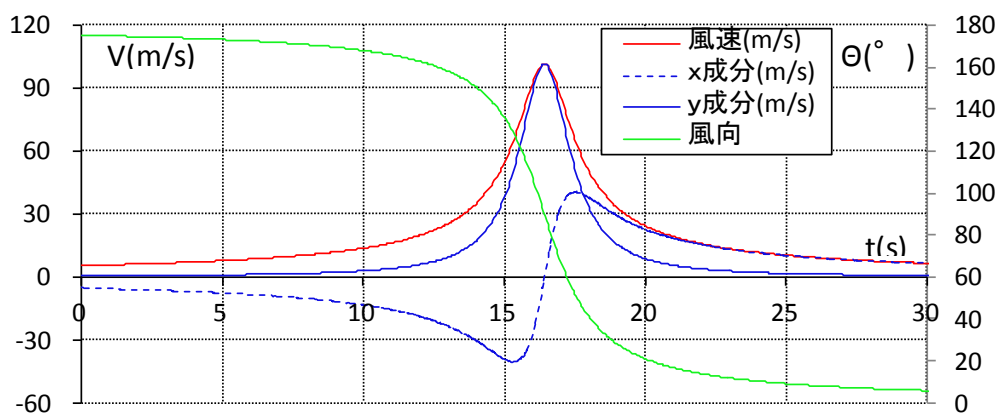
更に、提案した仮想竜巻モデルのパラメータをRankine渦に適用することにより、提案した設計用仮想竜巻モデルの風速・風向の時刻歴変化を図2.8.1に示す。このモデルから竜巻右側面を通過する最も風速が高い場合、と竜巻が直上を通過する短時間で風速・風向が急激に変化する場合の2パターンが建築物に最も強く影響を及ぼすと考えられる。又同様にRankine渦モデルより渦の水平風速分布を図2.8.2に示す。



(a) 渦左側面が通過する場合

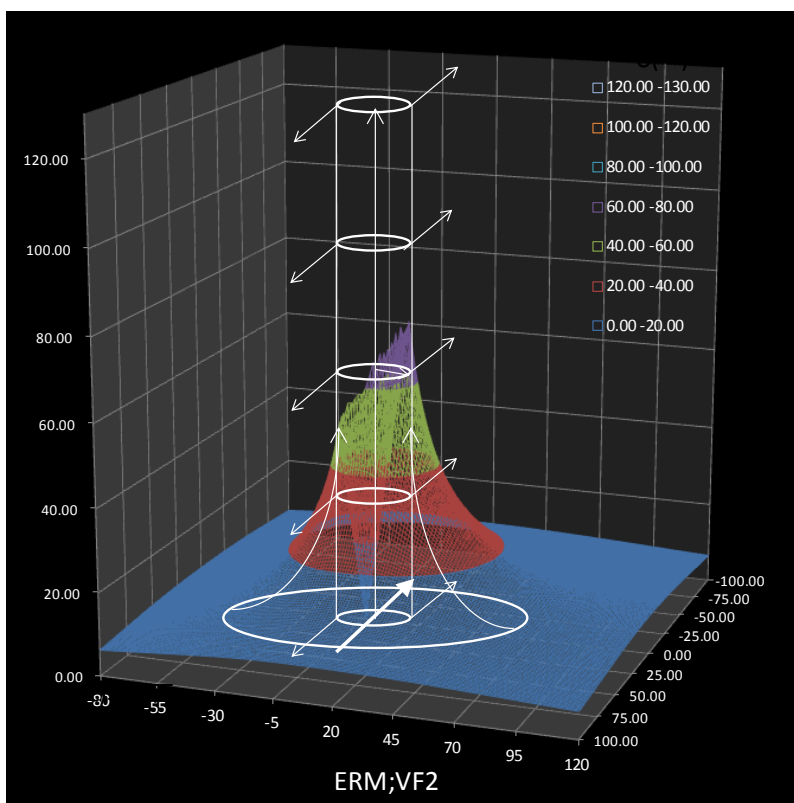


(b) 渦中心が通過する場合

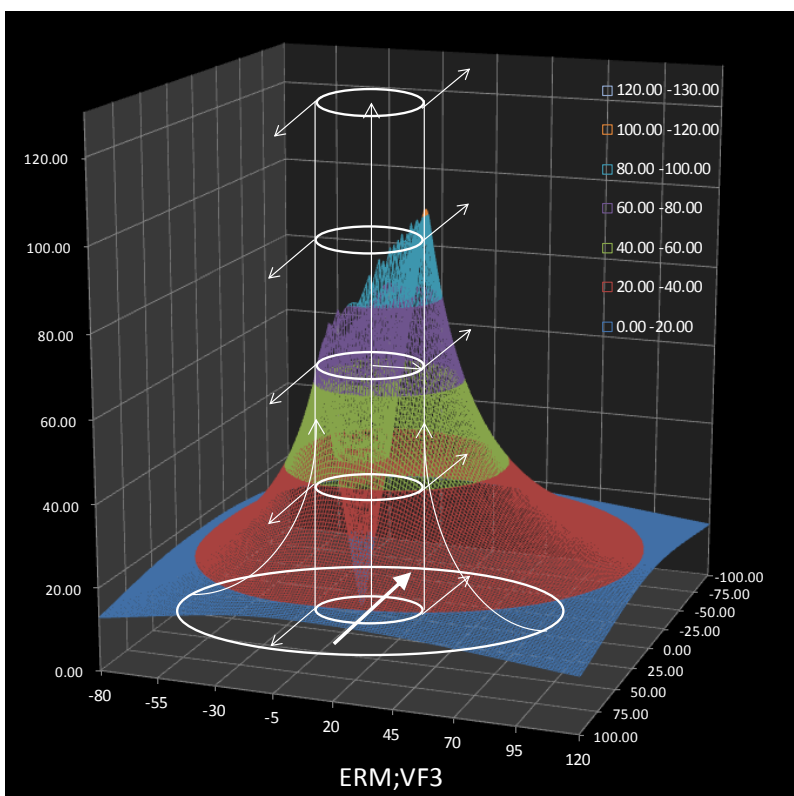


(c) 渦右側面が通過する場合

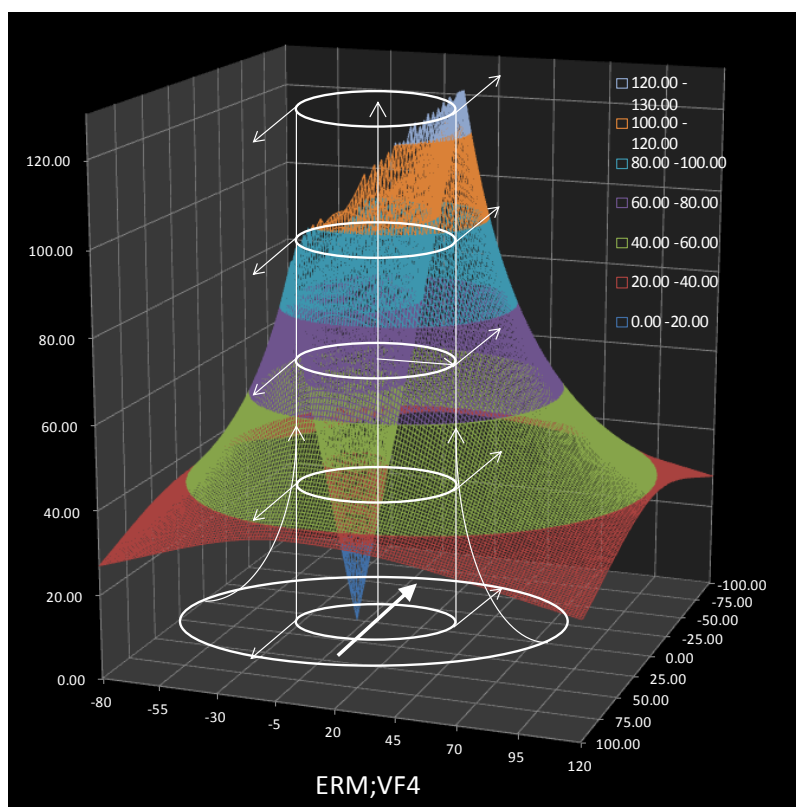
図 2.8.1 設計用仮想竜巻モデル VF3 の風速・風向の時刻歴変化



(a) VF2 の風速分布



(b) VF3 の風速分布



(c) VF4 の風速分布

図 2.8.2 Rankine 渦モデルにより算出した設計用仮想竜巻モデルの風速分布

2.9 都道府県別竜巻発生確率

提案した設計用仮想竜巻モデルの強風域及び、既往の研究⁹⁾を基に「竜巻等の突風データベース」から各都道府県の一年当たりのF2,F3スケールの竜巻による甚大な被害が発生する確率を算出したものを表2.9.1及び図2.9.1に示す。都道府県面積は竜巻発生記録の対象とならないと考えられる山間部などの面積を除いたものを使用する。

表 2.9.1 各都道府県の竜巻発生確率

都道府県名	(a)	(b)	富山県	1.90	74.3	島根県	3.09	27.8
北海道	1.08	51.0	石川県	1.35	50.9	岡山県	3.96	31.2
青森県	0.61	49.3	福井県	0.00	27.7	広島県	1.68	20.2
岩手県	0.68	27.8	山梨県	0.00	15.4	山口県	4.24	33.4
宮城県	0.56	74.4	長野県	1.41	15.6	徳島県	0.00	20.1
秋田県	1.18	41.9	岐阜県	2.47	23.9	香川県	0.00	50.9
山形県	0.96	45.3	静岡県	6.78	29.0	愛媛県	0.00	17.1
福島県	0.85	24.5	愛知県	11.29	58.7	高知県	8.43	14.4
茨城県	1.86	76.2	三重県	0.00	35.8	福岡県	2.26	52.7
栃木県	3.82	47.1	滋賀県	0.00	54.9	佐賀県	2.43	48.6
群馬県	5.86	23.2	京都府	0.00	31.6	長崎県	1.90	37.0
埼玉県	4.49	68.1	大阪府	0.00	61.0	熊本県	1.67	24.3
千葉県	11.33	93.3	兵庫県	0.00	41.7	大分県	6.49	26.1
東京都	10.98	62.4	奈良県	0.00	19.7	宮崎県	15.13	32.7
神奈川県	7.47	61.9	和歌山県	3.28	18.6	鹿児島県	3.82	49.1
新潟県	0.00	42.8	鳥取県	0.00	12.8	沖縄県	18.52	75.2

(a); 被害の発生する確率(10⁻⁶/km²/年)

(b); 都道府県の山間部を除いた竜巻の発生しうる面積の総面積に対する割合(%)

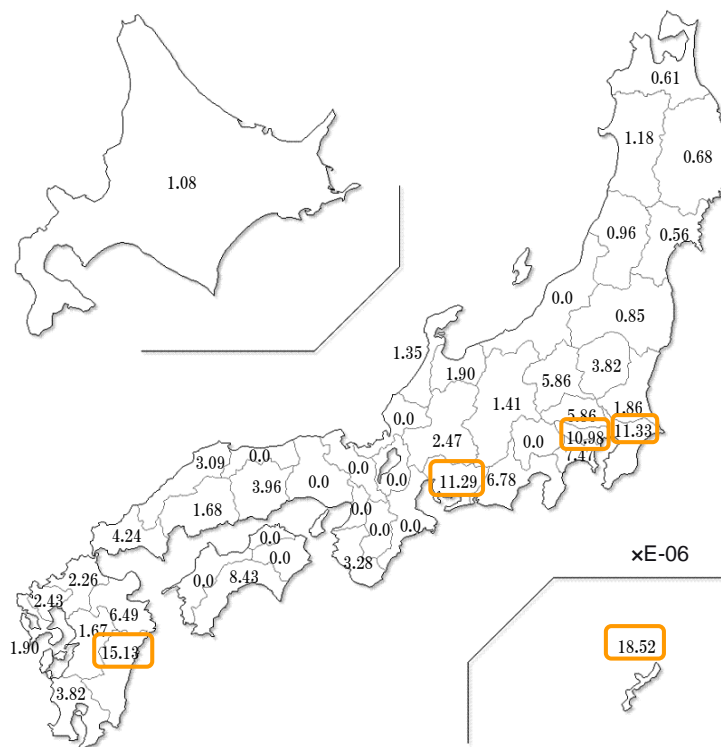


図 2.9.1 各都道府県の竜巻発生確率

2. 10 米国の竜巻関連設計指針

本研究における建築設計用仮想竜巻モデルの着想を得た米国のガイドライン**American National Standard for Estimating Tornado and Extreme Wind Characteristics at Nuclear Power Sites (ANSI/ANS-2.3-1983)** に記述されている内容の内、本研究結果と比較が可能なデータである荷重評価のための風速等の各種パラメータと、それぞれの再現期間について記載¹¹⁾する。社会の健全性および安全性が保持されるように、原子力施設の設計も行わなければならない。そのために必要な、竜巻以外の強風の決定についても推奨された方法を示している。

この基準では、竜巻は米国本土の全ての州で発生するものとしているが、アラスカ、ハワイ、プエルトリコ、および海洋上の設計基準竜巻、および竜巻以外による強風の決定方法については言及していない。なお、この基準は設計基準風速に耐え機能性が保持されるような構造形式や部材要素を明示するものではない。また、設計基準風速に対し、構造設計に要求される事項を論ずるものでもない。と書かれており、あくまでもガイドラインという性格が強い事が窺える。尚、竜巻の風速分布をRankine渦で近似している点などは共通である。

各種風速の再現期間は気象および地形の条件は米国本土の地域によって大きく異なり、これらの条件は竜巻の発生頻度や強さに大きく影響する。米国の本土を図2.10.1、図2.10.2、および図2.10.3 に示したような超過確率が 10^{-7} 、 10^{-6} 、および 10^{-5} に対応して異なるレベルの竜巻の風速を考え、それぞれ3つの地域に分けて風速値を与えるのが適切であるとしている。

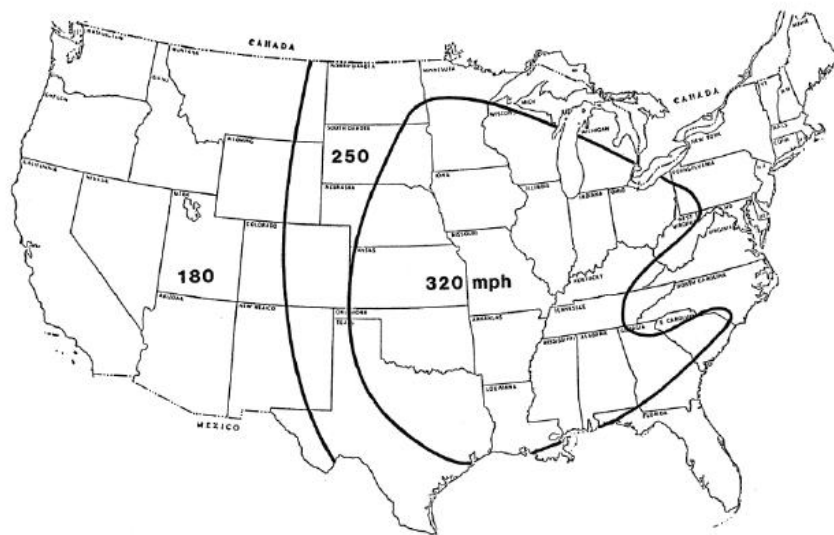


図 2.10.1 年超過確率が 10^{-7} に相当する竜巻による風速 (ガストファクター=1.0)

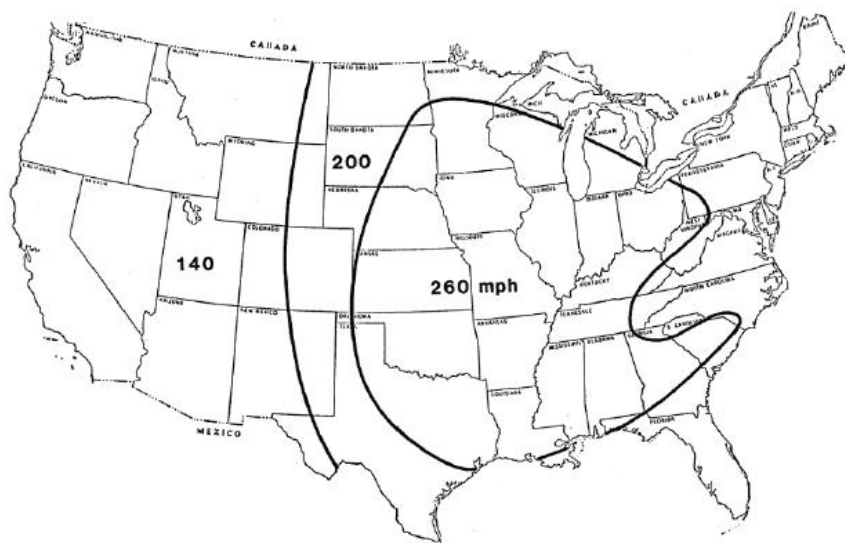


図 2.10.2 年超過確率が 10^{-6} に相当する竜巻による風速 (ガストファクター=1.0)

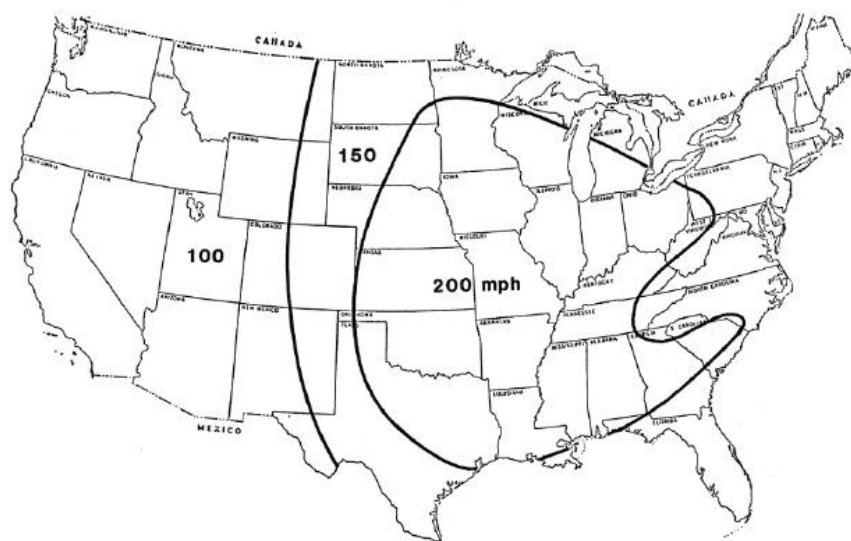


図 2.10.3 年超過確率が 10^{-5} に相当する竜巻による風速 (ガストファクター=1.0)

図に示した風速域は竜巻のスケールを評価尺度としたものではなく、あくまでの強風の再現期間を主としている。この強風領域は竜巻だけではなくハリケーン等も考慮されたものであるが、やはり内陸部の一般に「竜巻の道」と呼ばれる範囲は各再現期間において風速の数値が大きい事が分かる。次にこれらの風速領域に対応する竜巻の各種パラメーターを表2.10.1に示す。

表 2.10.1 各強風領域に対応した竜巻パラメータ

竜巻の最大風速 mph (m/s)	移動速度 mph (m/s)	半径 R feet (m)	気圧の最大降下量 ΔP^a Psi (mb)
320 (143)	70 (31)	540 (165)	1.96 (135)
260 (116)	57 (25)	453 (138)	1.46 (101)
250 (112)	55 (24)	435 (133)	1.35 (93)
200 (89)	45 (20)	355 (108)	0.85 (58)
180 (80)	40 (18)	320 (98)	0.70 (48)
150 (67)	33 (16)	270 (82)	0.47 (32)
140 (63)	32 (14)	253 (77)	0.41 (28)
100 (45)	25 (11)	185 (56)	0.20 (14)

先に言及したように、このパラメーターは竜巻のFスケールに直接対応しているわけではなく、先の強風領域で示している再現期間に対応する最大風速の竜巻のパラメーターとして記載されている。これによると、竜巻の最大風速の数値は、接線最大風速と移動速度を足したものであると考えられ、竜巻の中心気圧降下量についても記載されている。これらの数値から、設計時は外装材、構造躯体の入力外力や、ガラスや小屋組等の気圧の極端な低下の影響を受ける部材の設計にも役立てられるよう配慮されている事が窺える。

2. 1 1 米国の竜巻関連設計指針と仮想竜巻モデルとの比較

米国ガイドラインに示している竜巻の各種パラメータと第2章で提案した設計用仮想竜巻モデルとの比較を行う。まず再現期間について、本論で提案した日本のF2以上の竜巻の各都道府県の年発生確率を図2.11.1及び表2.11.1に示す。又、既往の文献で報告されている米国の各州の竜巻発生確率を図2.11.2及び表2.11.2に示す。

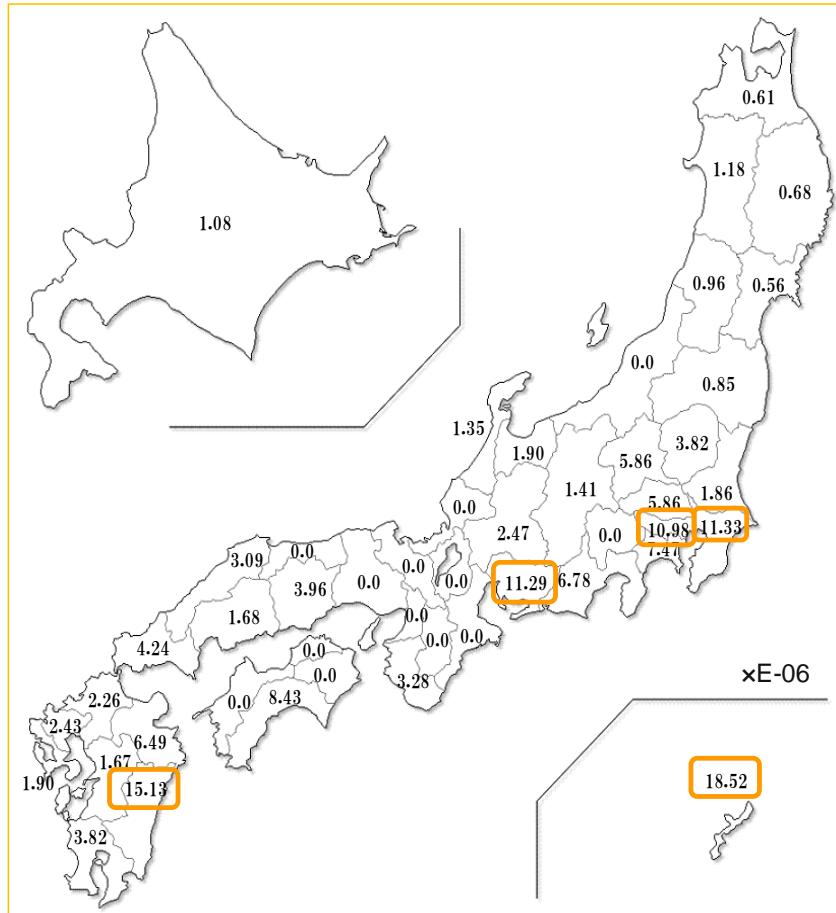


図 2.11.1 各都道府県の F2 以上の竜巻の襲来確率分布

表 2.11.1 日本における F2 以上の竜巻の襲来確率

都道府県番号名 (E-06)	12	千葉県	11.33	24	三重県	0.00	36	徳島県	0.00		
1	北海道	1.08	13	東京都	10.98	25	滋賀県	0.00	37	香川県	0.00
2	青森県	0.61	14	神奈川県	7.47	26	京都府	0.00	38	愛媛県	0.00
3	岩手県	0.68	15	新潟県	0.00	27	大阪府	0.00	39	高知県	8.43
4	宮城県	0.56	16	富山県	1.90	28	兵庫県	0.00	40	福岡県	2.26
5	秋田県	1.18	17	石川県	1.35	29	奈良県	0.00	41	佐賀県	2.43
6	山形県	0.96	18	福井県	0.00	30	和歌山県	3.28	42	長崎県	1.90
7	福島県	0.85	19	山梨県	0.00	31	鳥取県	0.00	43	熊本県	1.67
8	茨城県	1.86	20	長野県	1.41	32	島根県	3.09	44	大分県	6.49
9	栃木県	3.82	21	岐阜県	2.47	33	岡山県	3.96	45	宮崎県	15.13
10	群馬県	5.86	22	静岡県	6.78	34	広島県	1.68	46	鹿児島県	3.82
11	埼玉県	4.49	23	愛知県	11.29	35	山口県	4.24	47	沖縄県	18.52

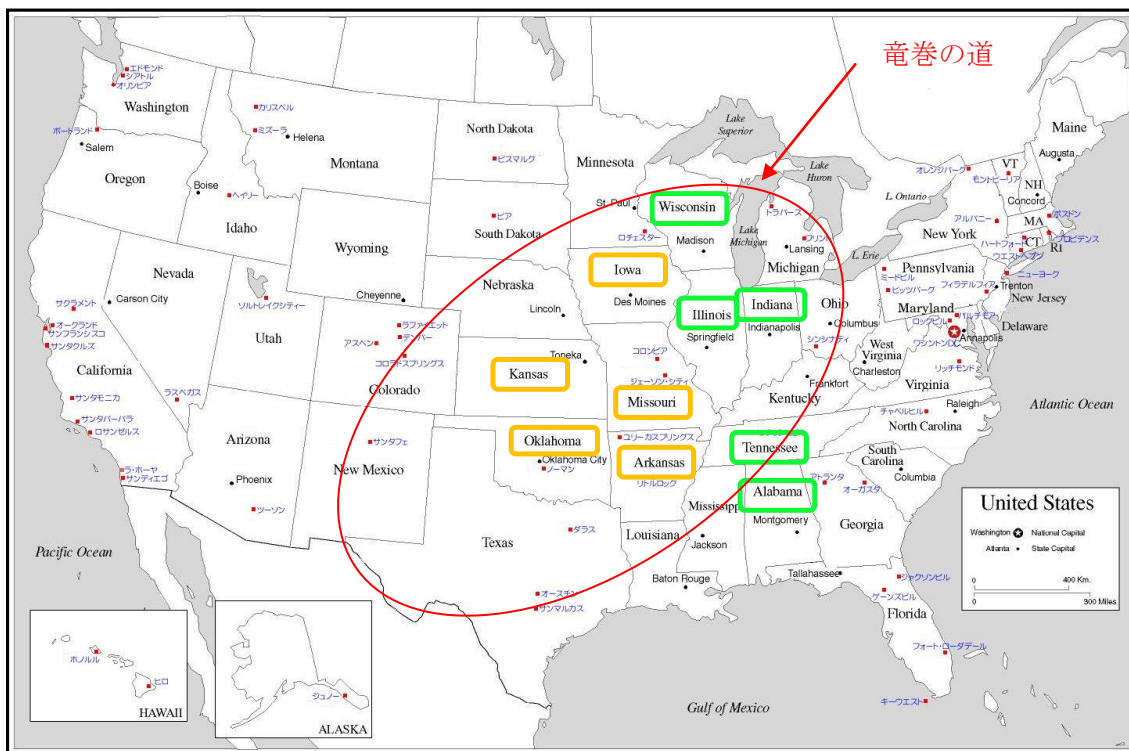


図 2.11.2 竜巻襲来確率の高い州の分布

表 2.11.2 米国各州における竜巻の襲来確率

Rank	State	Probability	Rank	State	Probability
1	Mississippi	4.30E-04	25	South Dakota	9.29E-05
2	Arkansas	4.26E-04	26	New Jersey	8.06E-05
3	Oklahoma	4.11E-04	27	Delaware	7.81E-05
4	Kansas	3.49E-04	28	Maryland	7.67E-05
5	Iowa	3.46E-04	29	Florida	6.79E-05
6	Indiana	3.15E-04	30	Connecticut	6.58E-05
7	Alabama	2.68E-04	31	Virginia	4.35E-05
8	Wisconsin	2.49E-04	32	New York	4.32E-05
9	Illinois	2.45E-04	33	North Dakota	3.46E-05
10	Tennessee	2.39E-04	34	Colorado	1.90E-05
11	Nebraska	2.32E-04	35	Wyoming	1.67E-05
12	Georgia	2.27E-04	36	New Hampshire	1.56E-05
13	Louisiana	1.89E-04	37	Vermont	1.47E-05
14	Michigan	1.75E-04	38	West Virginia	7.27E-06
15	Missouri	1.73E-04	39	Montana	6.59E-06
16	Ohio	1.72E-04	40	Maine	4.30E-06
17	North Carolina	1.63E-04	41	New Mexico	4.14E-06
18	South Carolina	1.44E-04	42	Utah	2.80E-06
19	Pennsylvania	1.41E-04	43	Oregon	1.73E-06
20	Minnesota	1.36E-04	44	California	1.73E-06
21	Texas	1.35E-04	45	Washington	1.56E-06
22	Kentucky	1.23E-04	46	Arizona	1.56E-06
23	Massachusetts	1.13E-04	47	Idaho	1.23E-06
24	Rhode Island	1.06E-05	48	Nevada	5.10E-07

比較すると、日本において竜巻発生確率が高いのは太平洋側及び関東平野であった、これには竜巻を発生させる可能性が大きい熱帯低気圧の存在と平野である事が大きいと考えられる。対して、米国では完全に内陸部に発生確率上位の州が集中しており、沿岸部の州ではむしろ発生確率は低い方である。米国中央部の州は以前より竜巻の道と呼ばれており、例年多くの竜巻被害を引き起こしている地域である。共通項としては、やはり平野である事が竜巻発生確率に大きな関係がある事が窺える。

しかし、それぞれの発生確率を比べると米国の場合は、日本よりもおよそ1オーダー大きい事が分かる。

次に各種竜巻のパラメーターについて比較を行う。本論で提案した設計用竜巻モデルのパラメーターを表2.11.3に、米国ガイドラインを表2.11.4に示す。又両者を合わせてプロットして比較したものを図2.11.3に示す。

表 2.11.3 設計用仮想竜巻モデルのパラメーター

モデル	Fスケール	(FPPスケール)	移動速度(m/s)	コア半径(m)
Toyohashi	3	81	16.2	28.3
Mobara	3	97	20.9	80.0
Urawa	3	81	8.6	8.4
Saroma	3	81	28.8	30.2
Nobeoka	2	60	32.4	38.0
VF2	2	60	15.5	14.7
VF3	3	81	21.3	22.5
VF4	4	105	25.6	36.2
VF5	5	130	30.7	60.1

表 2.11.4 米国ガイドラインの竜巻パラメーター

最大風速 (m/s)	移動速度 (m/s)	コア半径 (m)
143	31	165
116	25	138
112	24	133
89	20	108
80	18	98
67	16	82
63	14	77
45	11	56

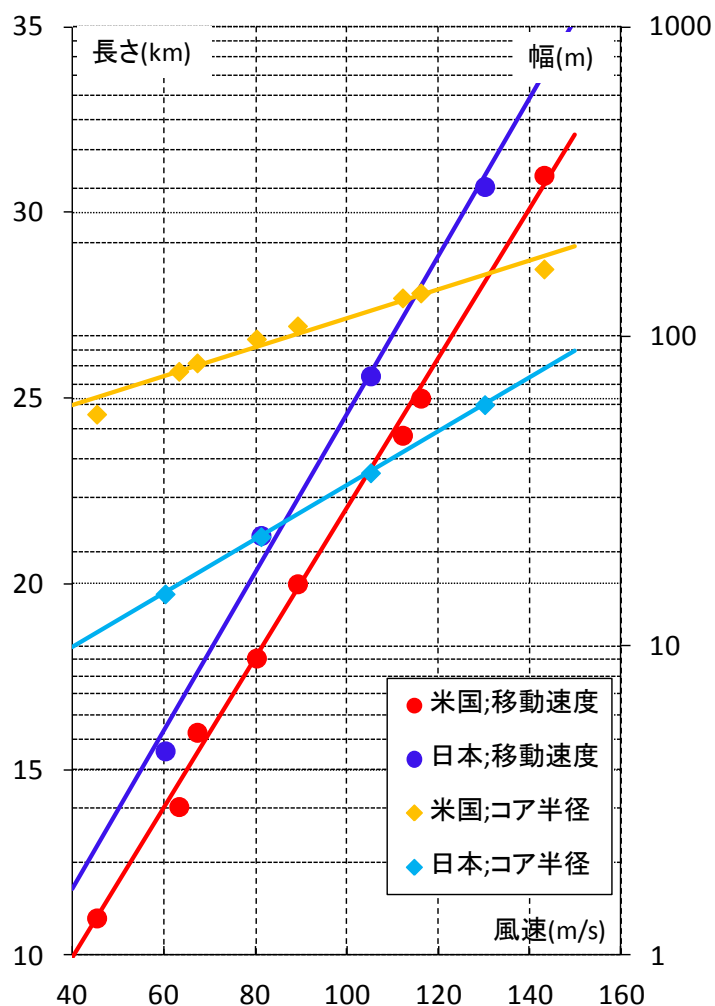


図 2.11.3 竜巻モデルの比較

米国の竜巻モデルは評価尺度が最大風速である為に、設計用仮想竜巻モデルも評価尺度の風速に直して比較を行う。比較した結果、同じ最大風速において、提案モデルは米国モデルと比較して、移動速度は10%程速く、コア半径は米国の25%程となっている。大まかな傾向として、設計用竜巻モデルとしては、日本の方が小規模でありながら、移動速度が速いという事が分かる。

しかしながら、米国のガイドラインの策定手法を完全に把握出来てはいない為に、被害統計の際に言及した何らかの処理が施された可能性がある事から、今後もガイドラインの策定作業について調査を継続する必要があると考える。

2. 1 2 設計用仮想竜巻モデルと被害分布との対応

1990年の茂原市の被害調査報告によると、竜巻の強風域内において、屋根部材の飛散や電柱の倒壊、窓ガラスの破損等から、風速が80m/sを超えると推測できる被害が発生しているにも関わらず、同じ強風域内でもあまり損傷を受けていない場合もある。この事から、台風などとは異なり、竜巻の場合には数十メートル単位での局所的な強風域の存在が考えられる。⁽⁹⁾

竜巻は移動する旋回流であるというその構造特性上、渦のコアの左右において移動速度の影響を受ける為、一定区間を通過する場合、最大風速は左右対称にはならない。渦が反時計回りに回転している場合、風速は進行方向右側において高くなり、左側において低くなる事は周知の事であると共に、本章におけるRankine渦モデルによる検討でも明らかとなっている。

ここでは、先に提案した建築設計用仮想竜巻モデルにおける強風域を求めると共に、実際の被害分布と強風域を比較することで竜巻の局所的な強風領域と被害分布との整合性の確認を行う。

佐呂間町の被害分布と算出した強風域を既往の研究⁽¹⁰⁾に加筆する形で図2.12.1に示す。又、被害に対応した被害のランクを表2.12.1に示す。

これにより、推測した強風域と被害分布が対応している事が分かる。序において記述したように、竜巻による被害は竜巻の中心よりも右側にずれている事が確認できる。同様の手法により求めた仮想竜巻モデルの強風域を図2.12.2に示す。



図 2. 12. 1 佐呂間町の被害分布と強風域との対応

表 2.12.1 対応する被害ランク⁽¹⁰⁾

ランク	被害の程度	被害の状況(例)
①	極く軽微な被害	住宅のテレビアンテナが曲がる。樋が落ちる。小枝が折れ、葉が飛散する。
②	軽微な被害	瓦がずれる。軒先やケラバなどで部分的に瓦が飛散する。太い枝が折れる。
③	顕著な被害	屋根の広範囲で瓦が飛散し、野地板の広い面が見える。部分的に窓ガラスが割れる。太い木が倒れる。
④	甚大な被害	屋根の垂木や母屋が破損する。小屋組が壊れる。多くの窓ガラスが割れる。
⑤	壊滅的な被害	家屋が倒壊する。

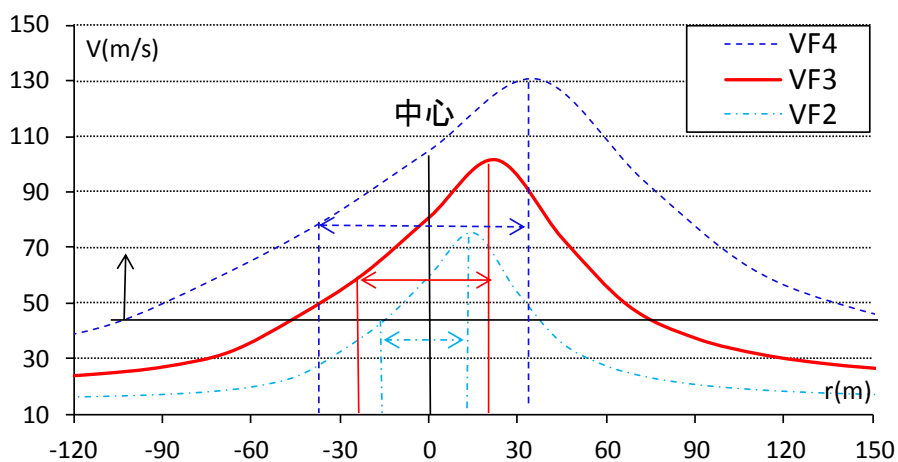


図 2.12.2 設計用仮想竜巻モデルの強風域

2. 13 日本各地の年最大風速との対応

各都道府県別の竜巻発生確率を算出した事により、竜巻による最大風速と再現期間との関係を示した。しかし、建築物に対する荷重の評価について再現期間を長くすればそれだけ荷重は大きくなる点については自然風でも同様である。そこで日本国内155地点の年最大風速データから、自然風の場合に竜巻の再現期間のオーダーを取った場合にどの程度の風速となるかを検証する。各地点の再現期間と年最大風速の関係を図2.13.1~図2.13.20に、年最大風速の日本における分布を図2.13.21に示す。

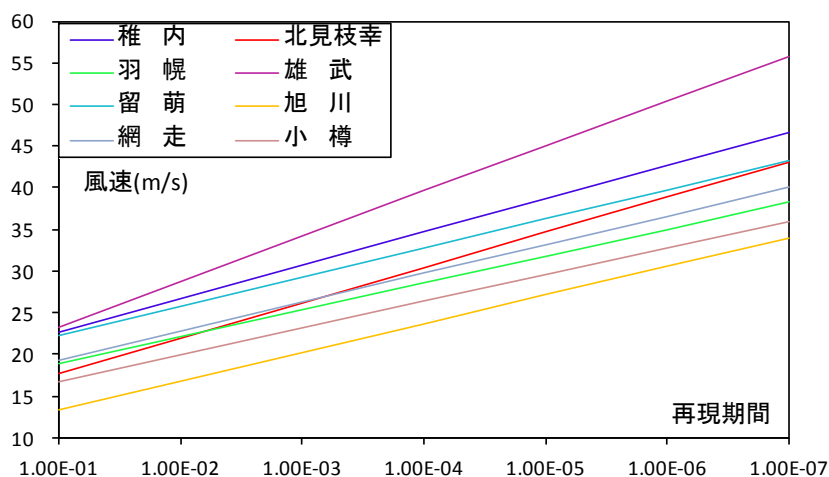


図 2. 13. 1 再現期間と年最大風速

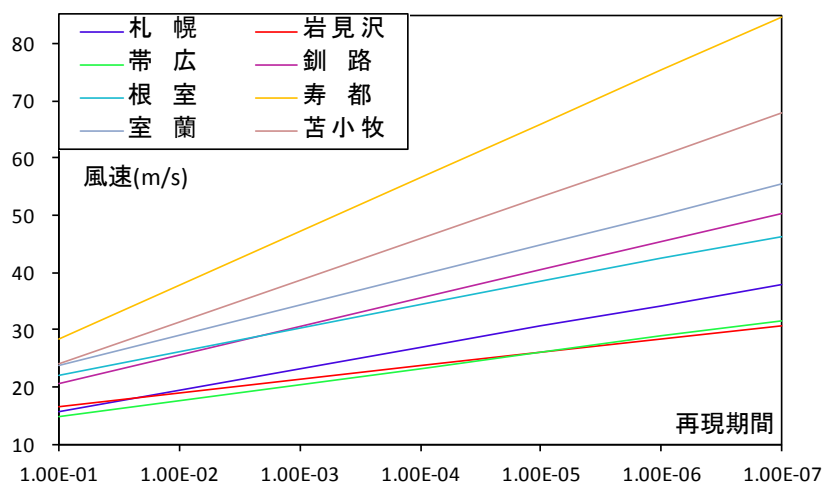


図 2. 13. 2 再現期間と年最大風速

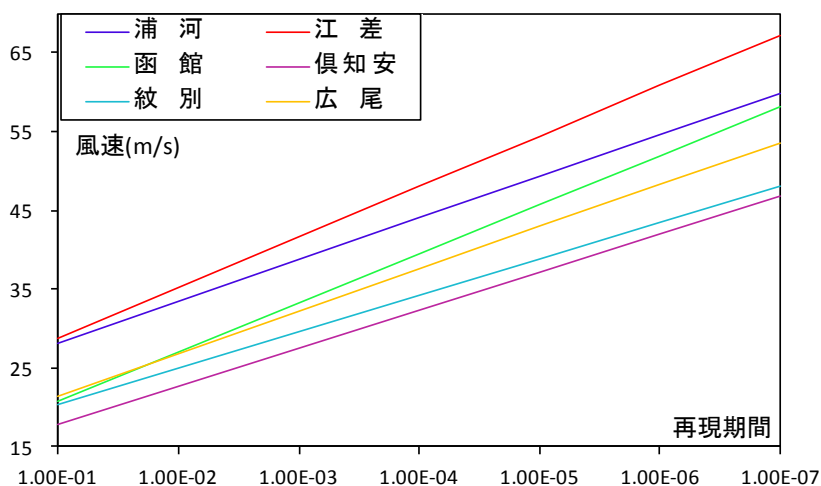


図 2.13.3 再現期間と年最大風速

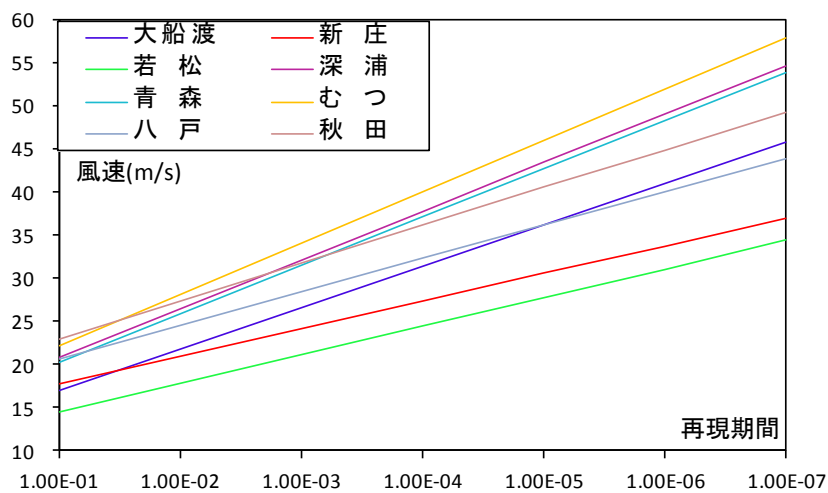


図 2.13.4 再現期間と年最大風速

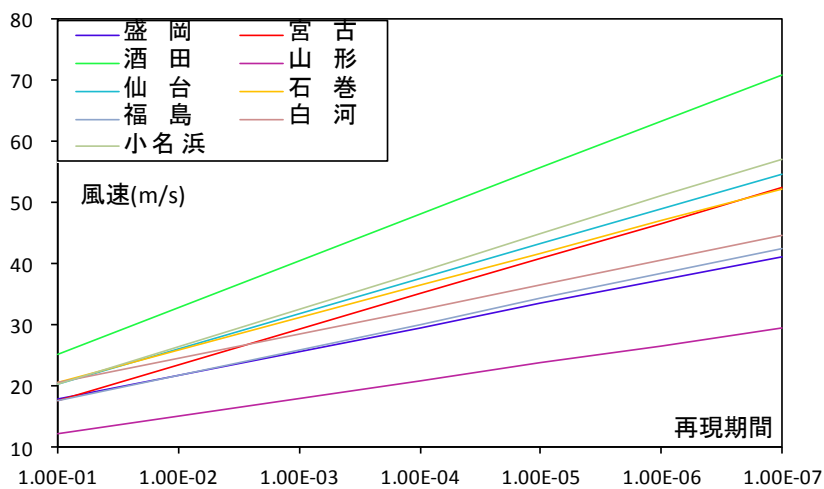


図 2.13.5 再現期間と年最大風速

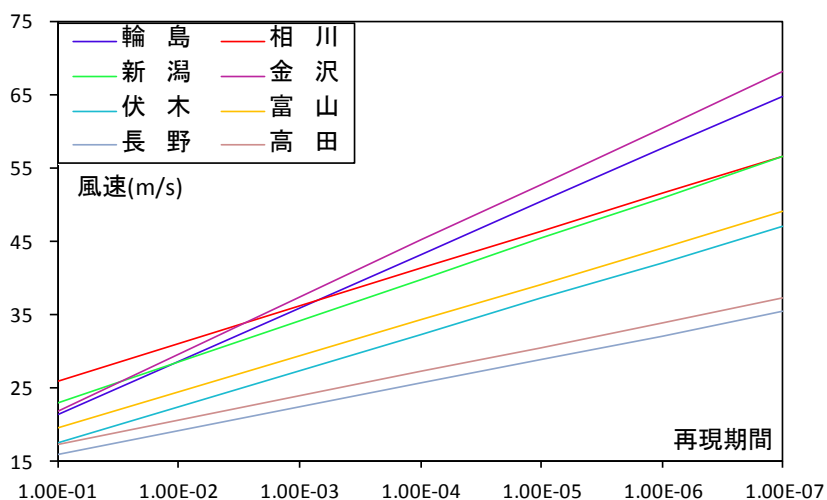


図 2.13.6 再現期間と年最大風速

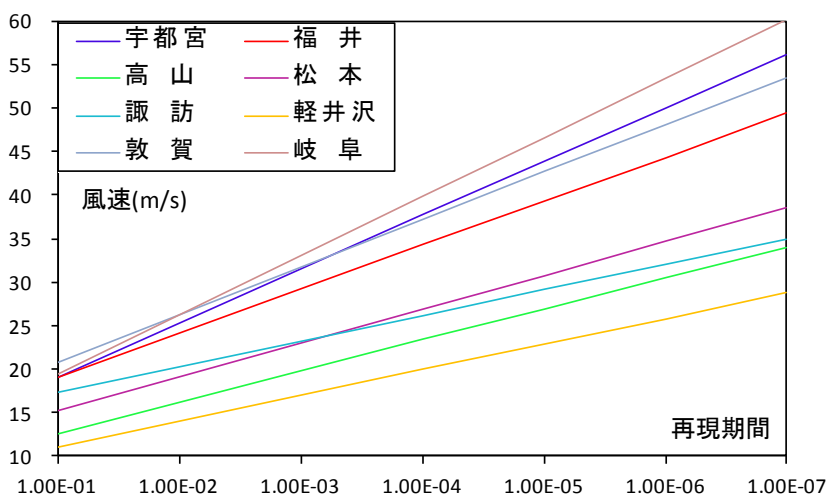


図 2.13.7 再現期間と年最大風速

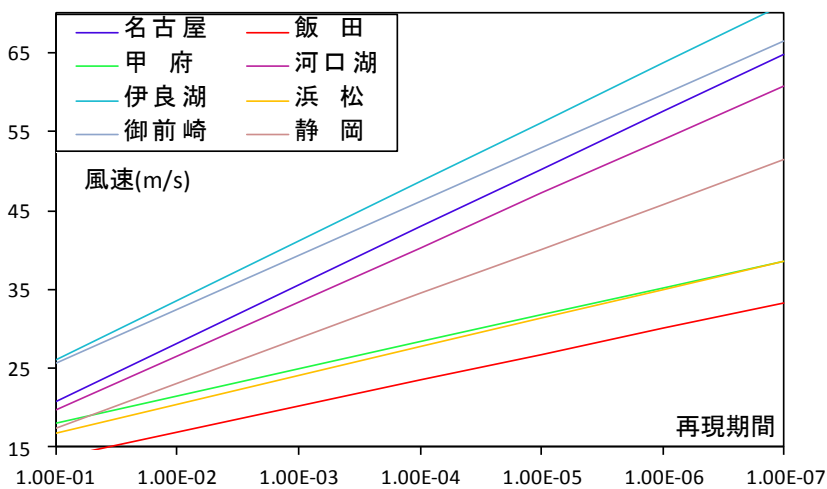


図 2.13.8 再現期間と年最大風速

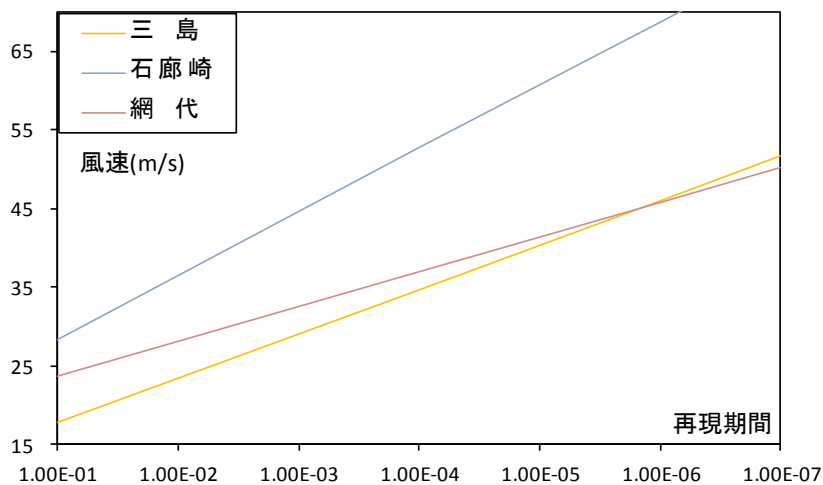


図 2.13.9 再現期間と年最大風速

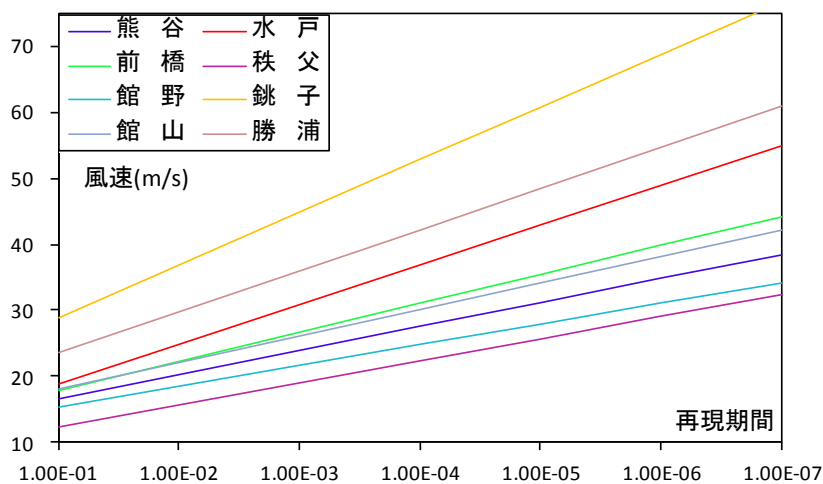


図 2.13.10 再現期間と年最大風速

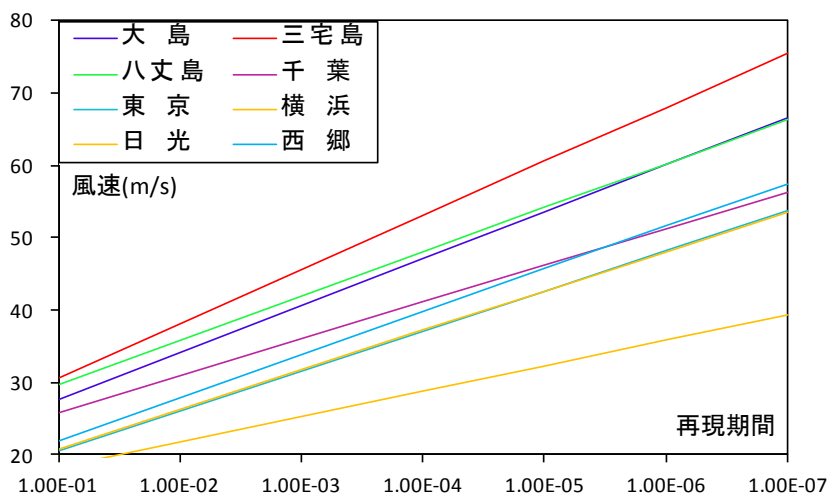


図 2.13.11 再現期間と年最大風速

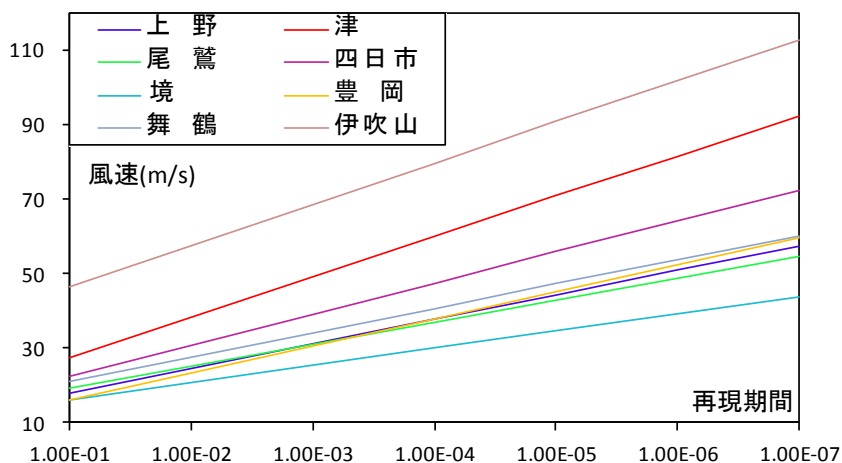


図 2.13.12 再現期間と年最大風速

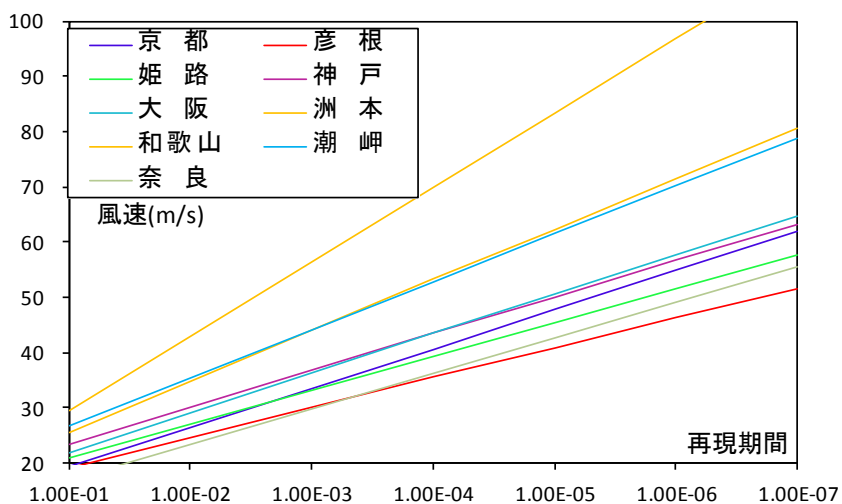


図 2.13.13 再現期間と年最大風速

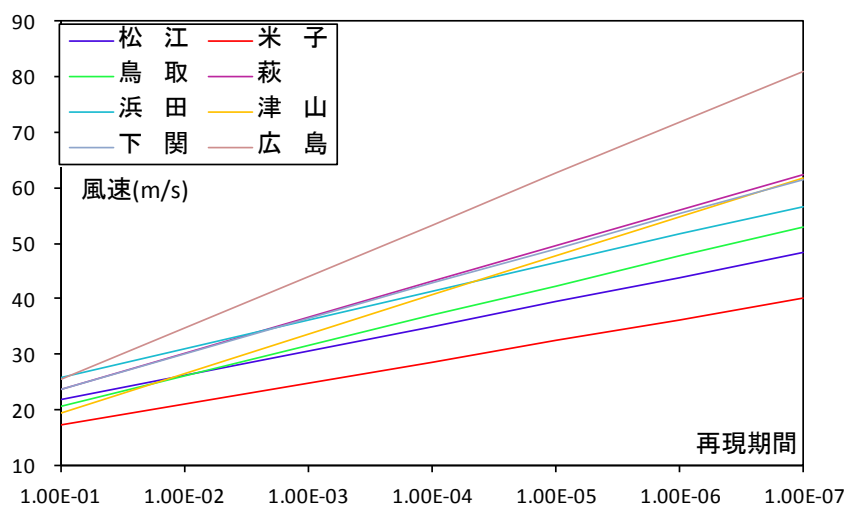


図 2.13.14 再現期間と年最大風速

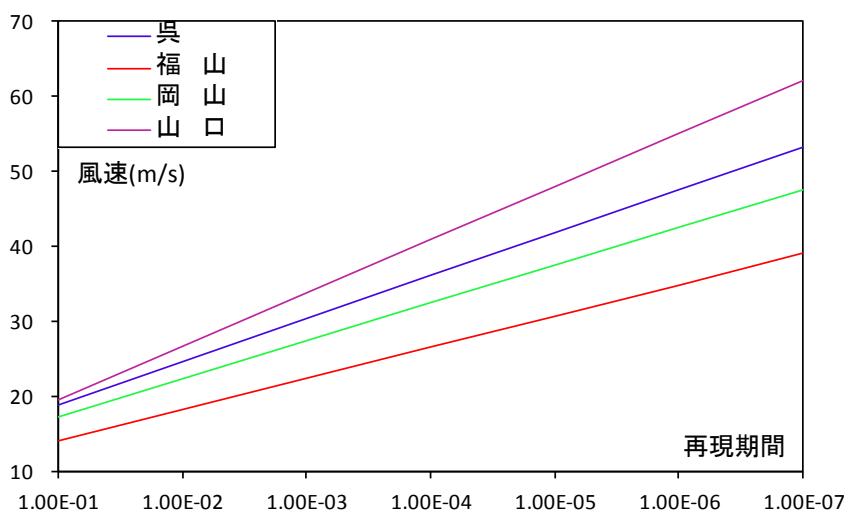


図 2.13.15 再現期間と年最大風速

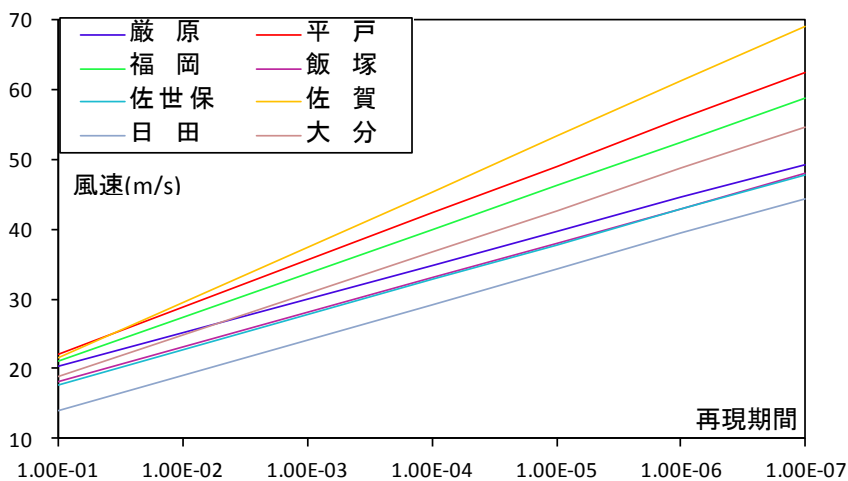


図 2.13.16 再現期間と年最大風速

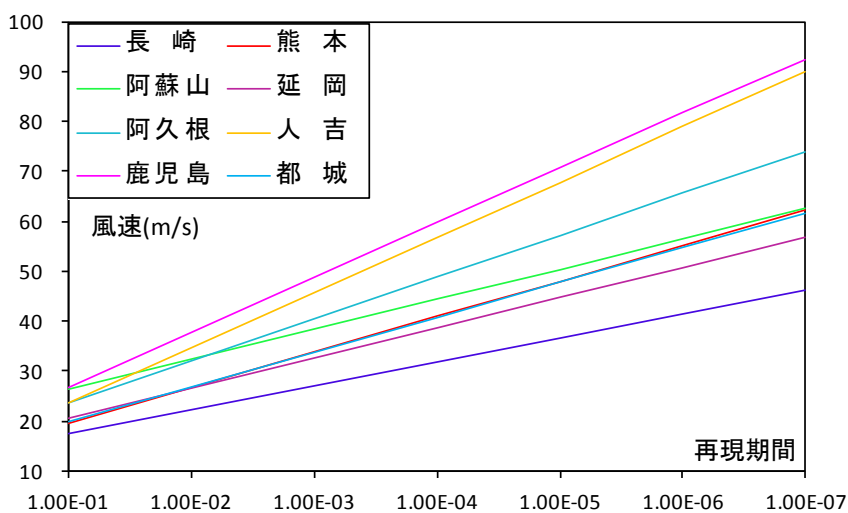


図 2.13.17 再現期間と年最大風速

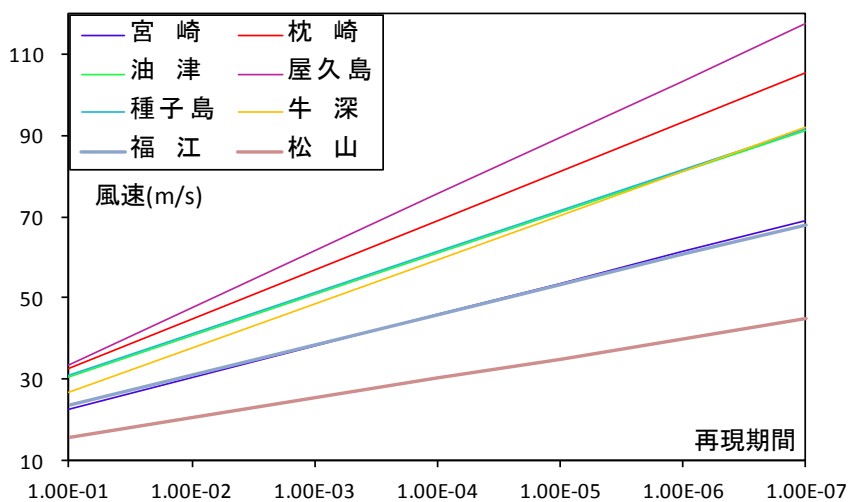


図 2.13.18 再現期間と年最大風速

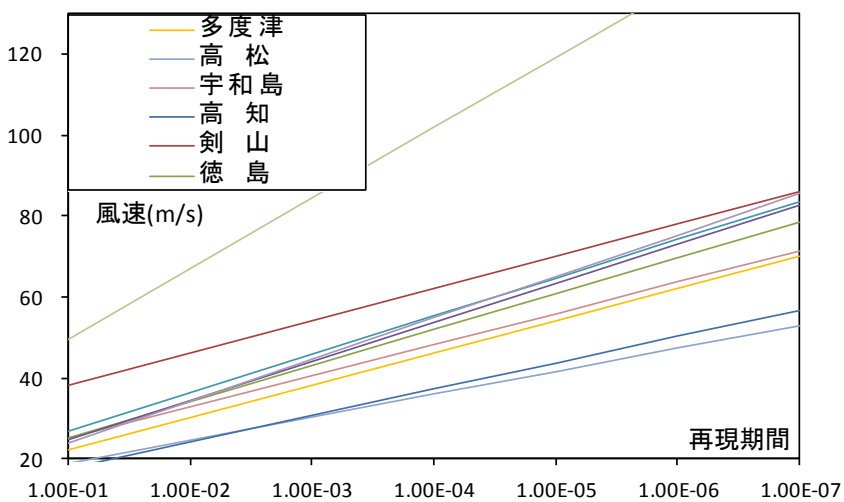


図 2.13.19 再現期間と年最大風速

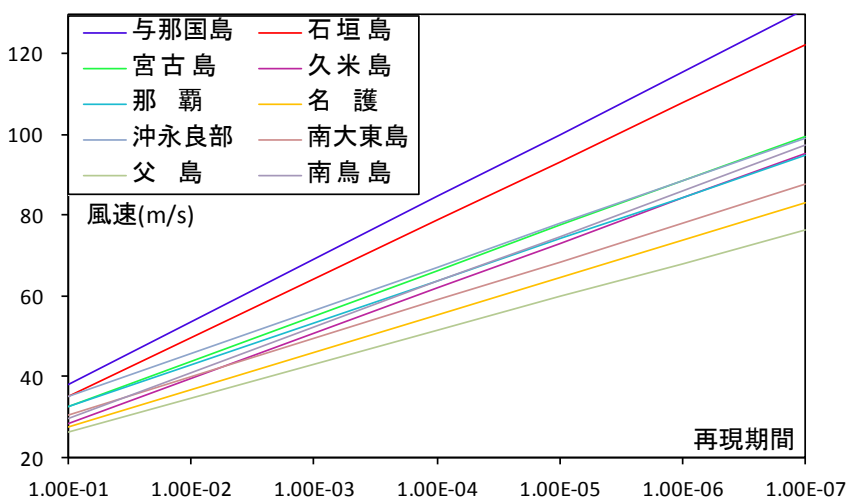
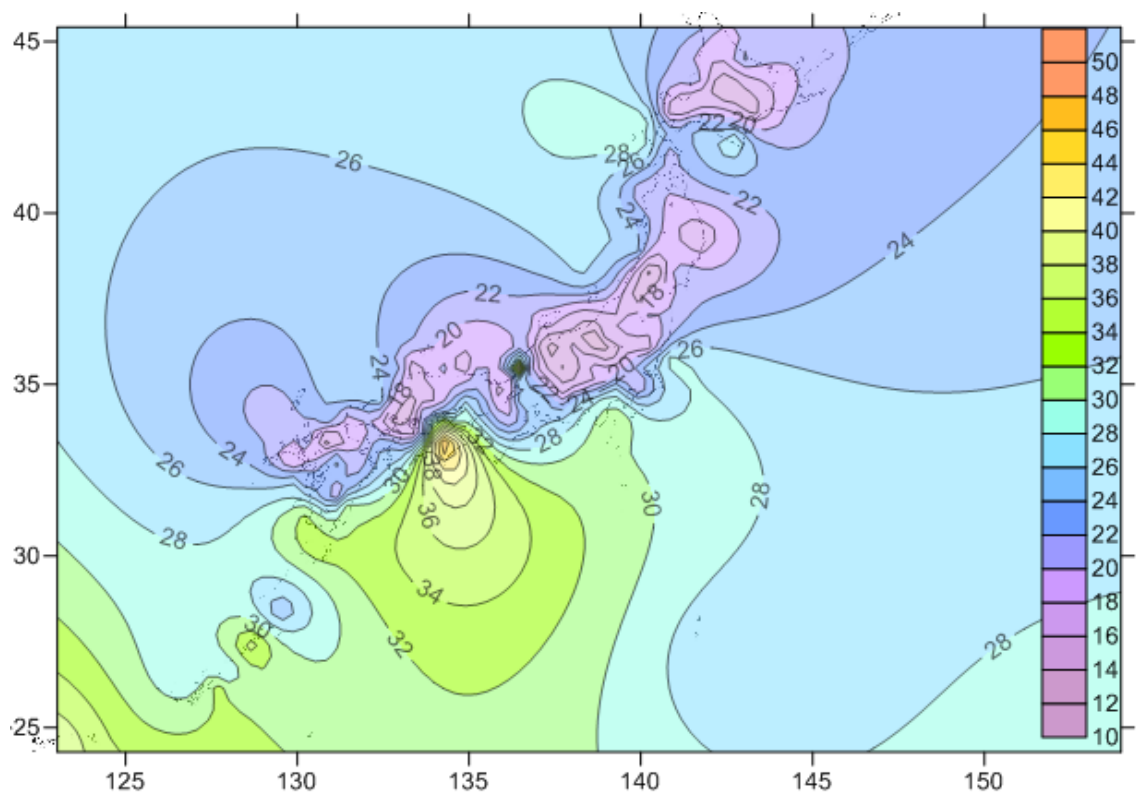
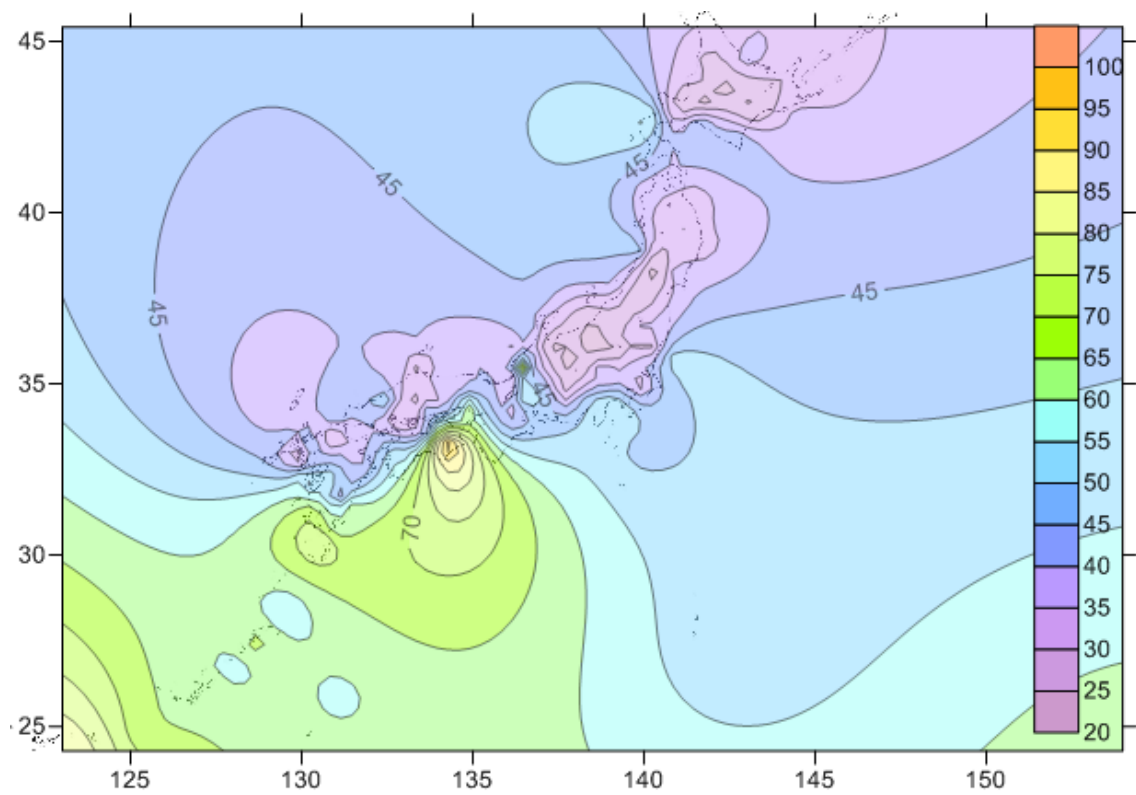


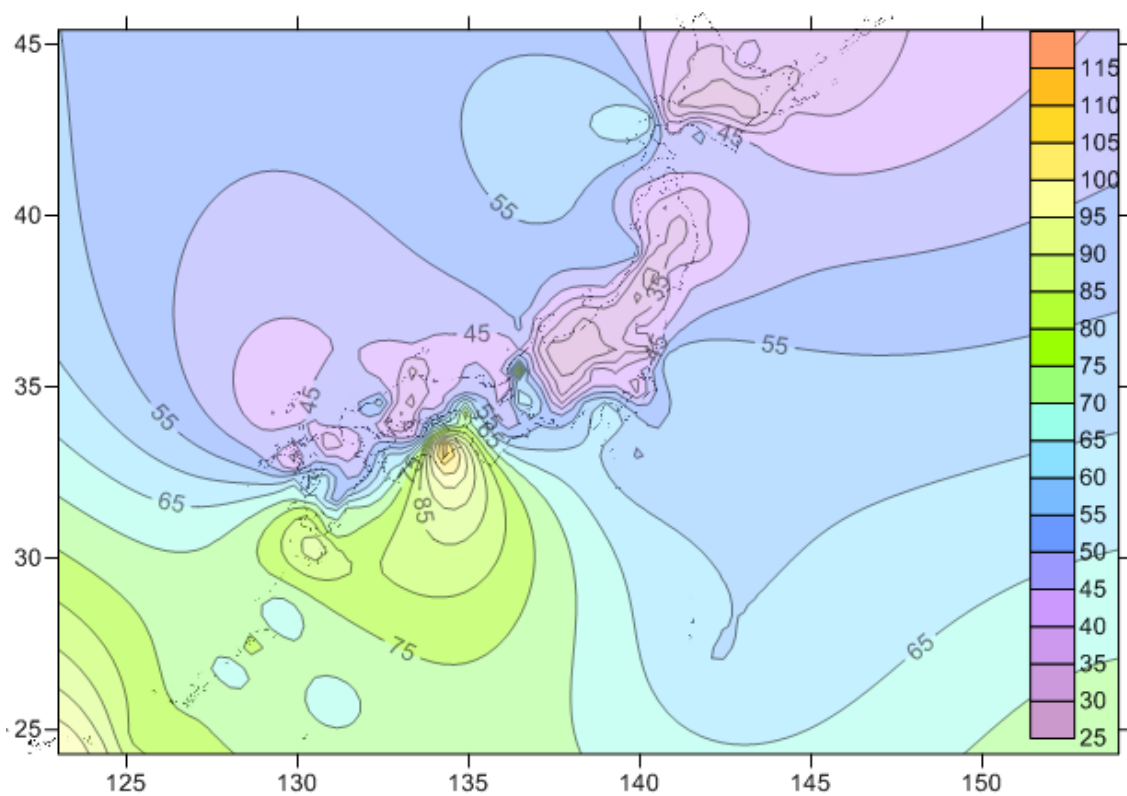
図 2.13.20 再現期間と年最大風速



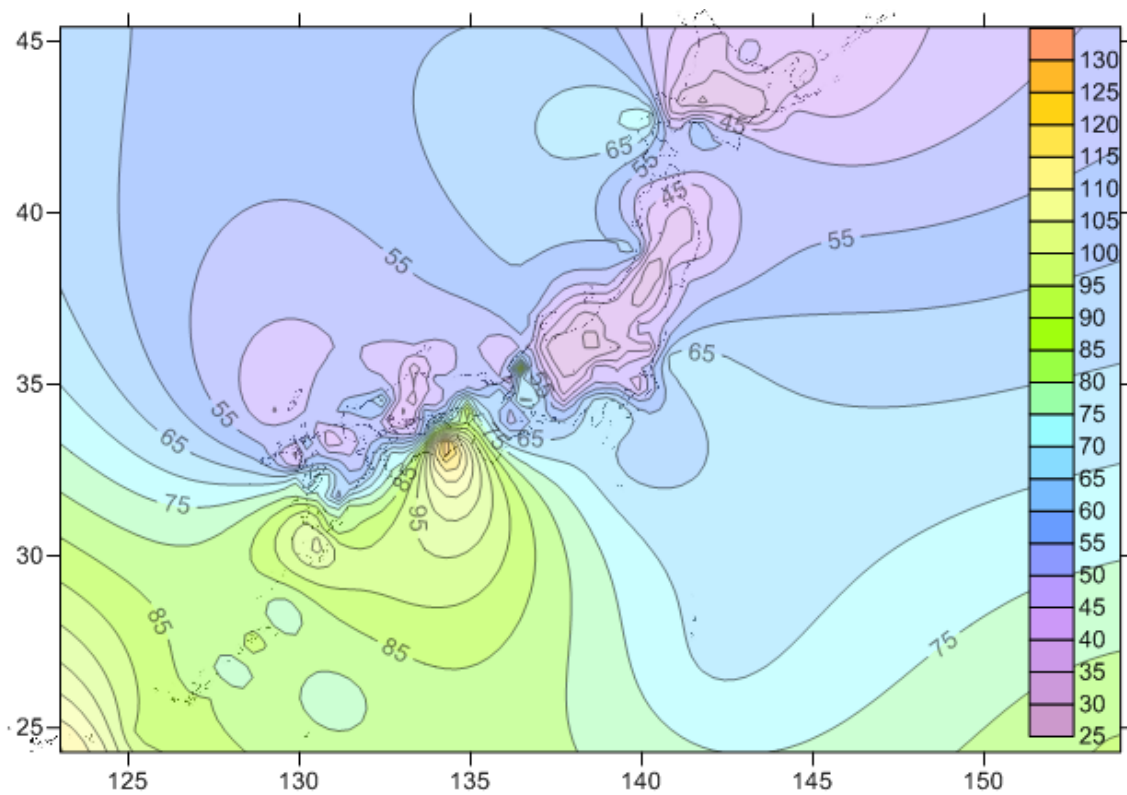
(a) 再現期間 1 年



(b) 再現期間 1 万年



(c) 再現期間 10 年



(d) 再現期間 100 万年

図 2.13.21 再現期間別年最大風速分布

竜巻の発生確率のオーダーで再現期間として年最大風速を算出したが、竜巻は山間部では発生確率が極めて小さいように、自然風の風速が高い場所と竜巻が発生し易い場所とは地理的条件が大きく異なる為に、再現期間を単純に長くとっても竜巻を対象と出来ない事が分かった。しかし、室戸岬や関東平野など、一部の地域では最大風速が対応しているような箇所もある。

そもそも竜巻はその風速・風向の急激な変化による影響も考慮しなければならない為に、より複雑な評価が必要と考えられる。

2. 1 4 第2章のまとめ

第2章では、日本と米国の竜巻による被害傾向の違いを踏まえて、日本における設計用の仮想竜巻モデルの提案をRankine渦モデルに従って行った。その後、提案したモデルと米国設計指針にある竜巻モデルとの比較を行い、被害分布との対応や年最大風速との違いなどについて論じた

【参考文献】

1. 新しい渦の脅威「竜巻」 “新野宏” 防災研究講義2002予防時報209
2. 気象庁HP<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>
3. 谷池義人;竜巻内の加速度と作用風力、第12回風工学会シンポジウム
4. 2006年佐呂間町竜巻被害調査報告 “建築研究所 構造研究グループ奥田泰雄・喜々津仁密・村上知徳”
5. 2006年台風13号に伴って発生した竜巻による延岡市の被害調査速報 “宮城弘守ら5名” 日本風工学会誌第32巻第1号(通号第110号)平成19年1月
6. A Recommendation for an ENHANCES FUJITA SCALE(EF-Scale) Submitted to the National Weather Service and Other Interested Users June2004 WIND SCIENCE AND ENGINEERING CENTER Texas Tech University
7. 現代建築防災工学 オーム社；藤本盛久・羽倉弘人
8. 1990年12月11日房総半島で発生した竜巻について 光田寧 他 1990年12月11日千葉県に発生した竜巻による暴風災害の調査研究 文部省科学研究費(No,02306029)
9. 竜巻を考慮した設計風速の評価について;神田順 1990年12月11日千葉県に発生した竜巻による暴風災害の調査研究 文部省科学研究費(No,02306029)
10. 奥田泰雄・喜々津仁密・村上知徳建築研究所 構造研究グループ2006年佐呂間町竜巻被害調査報告 加筆

11. 平成21～22年度 原子力安全基盤調査研究（その1）（竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究）

第 3 章-竜巻状風発生装置による実験

Chapter.3

Experiment on Tornado Like Vortex Simulator

3. 1 竜巻状風発生装置の概要

第1章-序論における既往の研究でも触れたが、特殊な風洞を製作し竜巻を模擬した渦状の気流を発生させることで、竜巻の複雑な気流性状を把握しようとする研究はすでに日本・米国問わず広く行われている。これは実際に竜巻内部の気流性状を計測した例が無く、竜巻を研究するに際し実現象が明確に把握できていない為に、風洞実験によりその気流分布を把握することで、ある種の模範解答を得ようとする試みである。

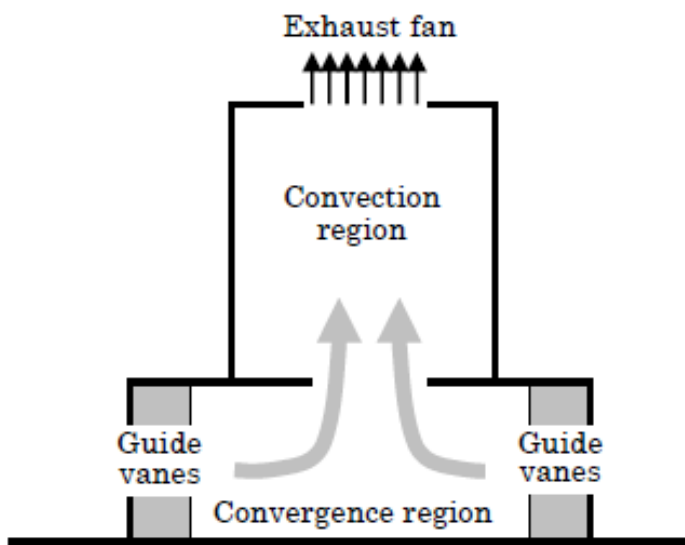
しかしながら、竜巻の視覚的な形状だけでも数十種類が観測されており、さらには竜巻発生気象条件も統計的な傾向が把握されている段階にすぎず、竜巻周辺の気象条件について不明瞭な点が多い。

今日竜巻状の渦の発生に成功し、かつ系統的な研究が進められている特殊な風洞は主に2つの種類に分類できる。一つは東京工芸大学が保有しているWard型竜巻発生装置である。Ward型竜巻発生装置の概要を図3.1.1に示す。^{(1),(2)}このタイプの竜巻発生装置は、風洞下部の円形口から回転を加えた気流を吹き入れ風洞上部の開口へと送風することにより、風洞中央の円筒形の空間において竜巻状の渦を発生させるものである。もう一つはアイオワ州立大学保有のICU型竜巻発生装置である。このタイプは同大学の竜巻研究で高名なパーサー・サーカー教授が考案したタイプであり、椀形の風洞の内部に設置された送風機が角度を与えた気流を装置外縁部から吹き出し、再び装置中心部で吸い上げる事で気流の回流過程で竜巻状の渦を生成するものである。ICU型竜巻発生装置の概要を図3.1.2に示す。^{(3),(4)}

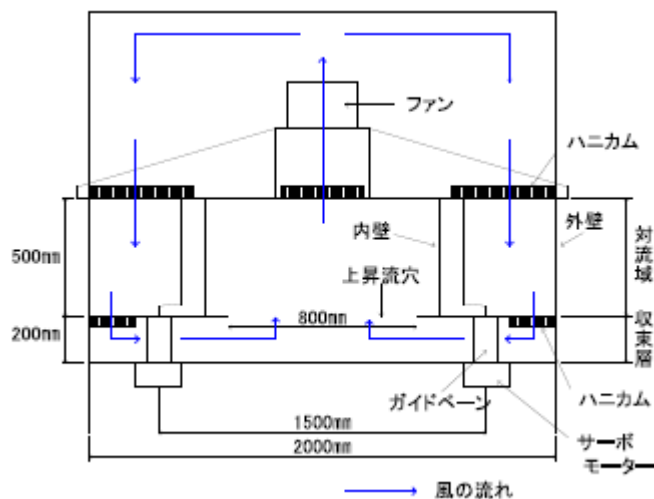
先に紹介したこの2種類の竜巻発生装置について、竜巻状の渦を発生させる機構が違う事から、当然長所と短所が指摘できる。Ward型竜巻発生装置は渦を閉じた空間の中で生成する事により、生成された渦は中心部付近で上昇流、外周部で回転流というように気流が比較的よく分かれており、視覚的に綺麗な渦が観測できる。しかしながら、渦を生成する空間には回転を加えた気流を空間下部の開口から送風する為に、実現象において地面から気流がわき出ると言う事になってしまい、当然のことながら渦中心部における風圧模型実験等は不可能である。又、静止状態の渦しか生成する事が出来ない。

一方、ICU型竜巻発生装置は送風機を備えた渦発生装置の下部で竜巻状の渦を生成する事が出来るので、渦中心部はもとより、装置を移動させることによって竜巻状の渦のどの部分でも風圧模型実験等の計測が出来、渦を移動を考慮した実験も可能である。しかしながら、風速や風圧を計測するに当たり、どうしても装置外縁部から吹き出す気流の影響を受けてしまう。現状で竜巻発生メカニズムが解明されていないとしながらも、このような気流の流れが実現象と対応しているかは今後も議論する必要があると考える。

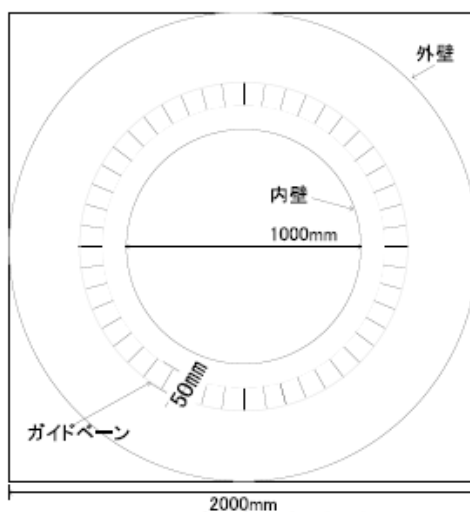
2010年度に独立行政法人国土政策基盤研究所所属の喜々津一密上席研究員(環境学博士)ら主導の下に日本でもこのタイプの竜巻発生装置を設計し、現在は独立行政法人建築研究所の風雨棟に設置されている。本研究では喜々津博士の協力の下、ICU型竜巻発生装置で実験を行った。



(a) 装置内気流分布図

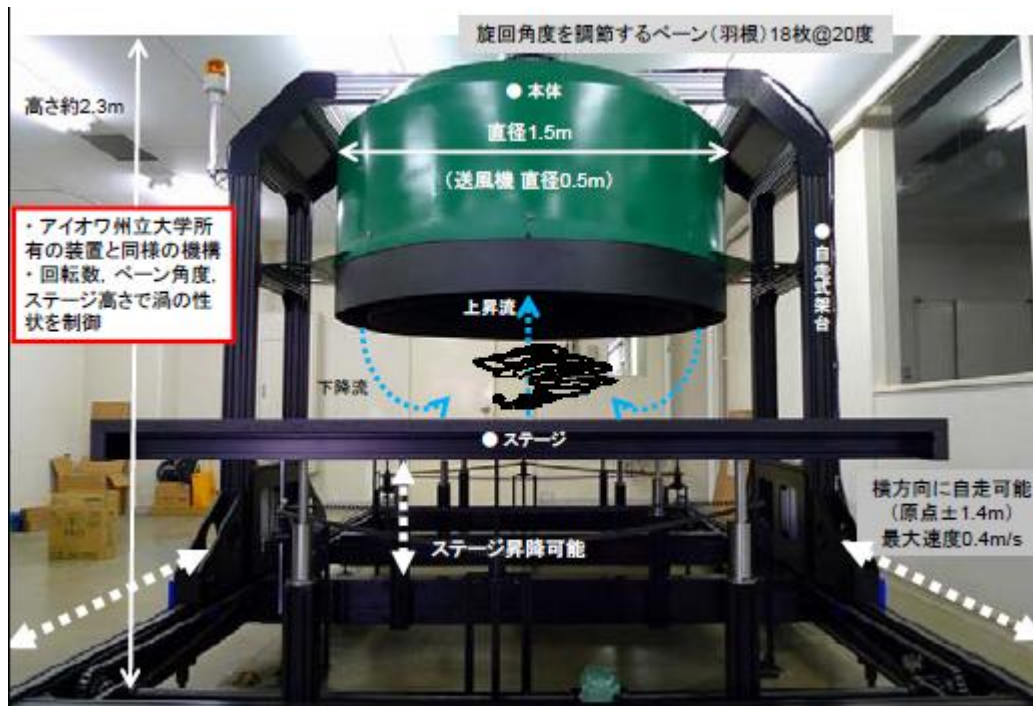


(b) 風洞断面図

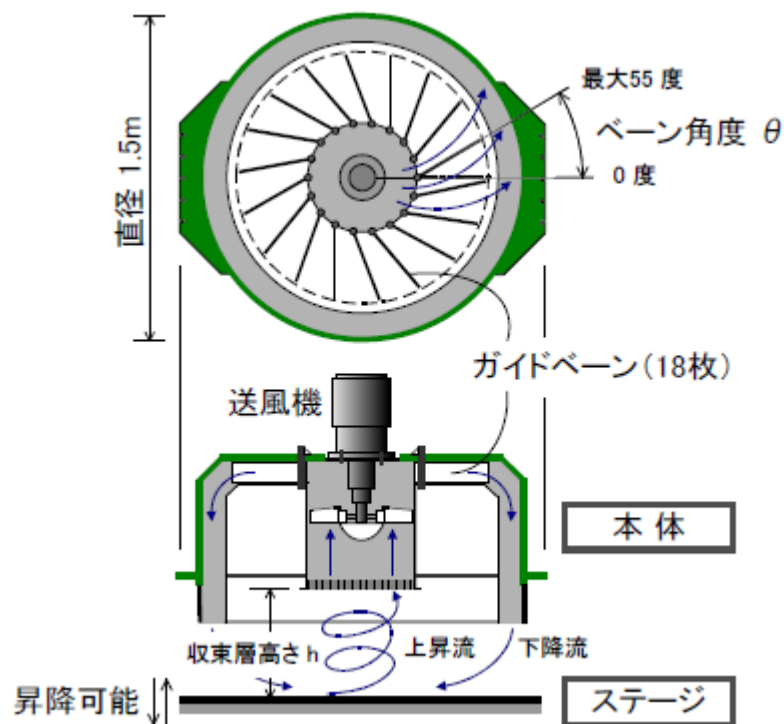


(c) 集束層平面図

図 3.1.1 Ward 型竜巻発生装置の概要



(a) 正面概要



(b) 断面概要

図 3.1.2 ICU 型竜巻発生装置の概要

ICU型竜巻発生装置

この竜巻状気流発生装置は、アイオワ州立大学所有の装置の機構に倣って設計・製作した。装置は送風機を内蔵した「本体」、横方向に自走可能な「架台」、上下に昇降可能な「ステージ」及び「制御盤」から構成される。

本体各部の寸法は ISU 型装置の約1/3.7 であり、外径と送風機の直径はそれぞれ1.5m、0.5m である。先に示したように下降流に強制的に旋回性状を与えるガイドベーンが均等に18枚配置されており、法線方向に対する角度を0~55度の範囲で設定できる。また、装置の全高は約2.3m、架台の自走範囲は原点に対して±1.4m（最大移動速度0.4m/s）である。竜巻発生装置の各図面を図3.1.3に示す。

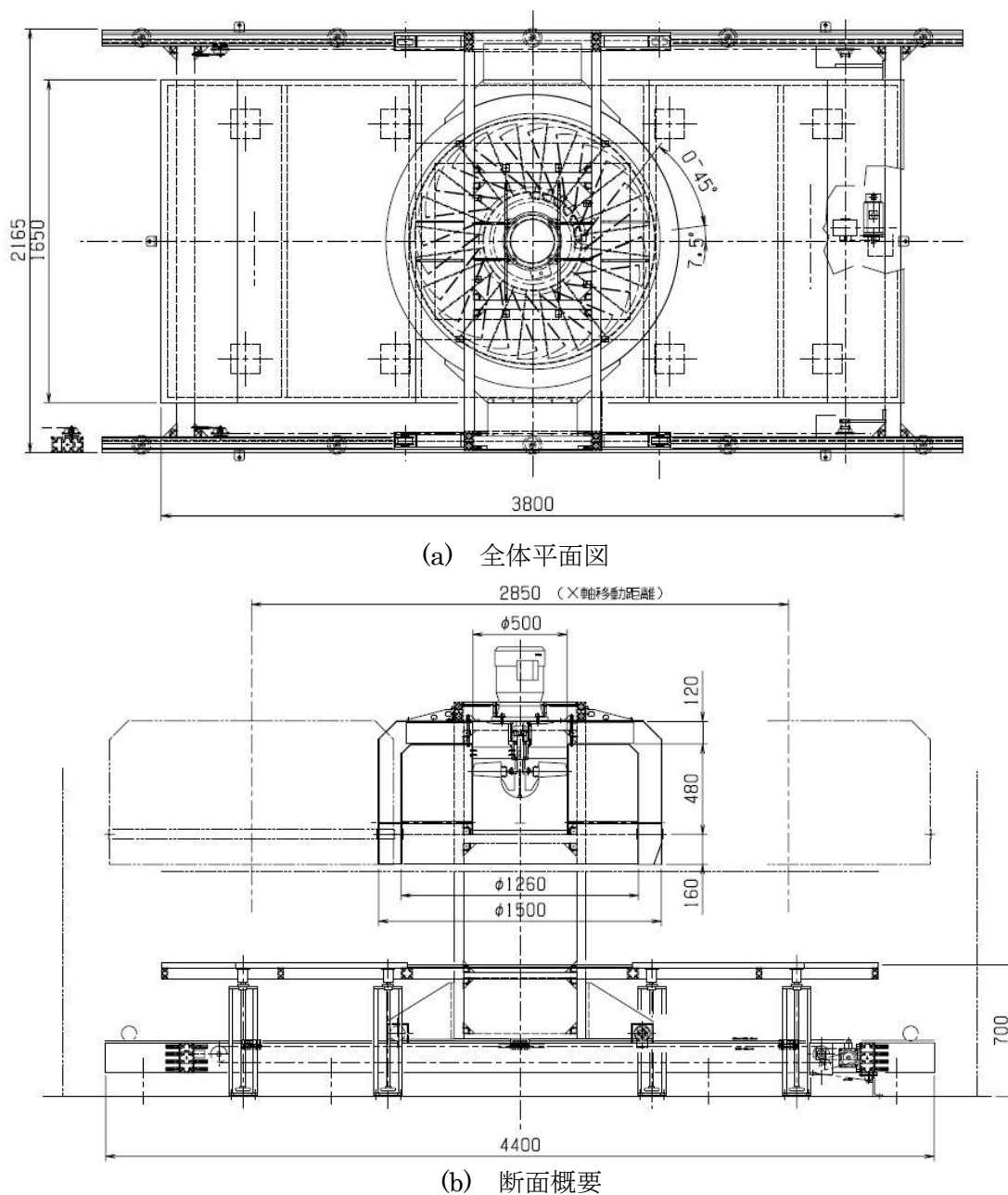
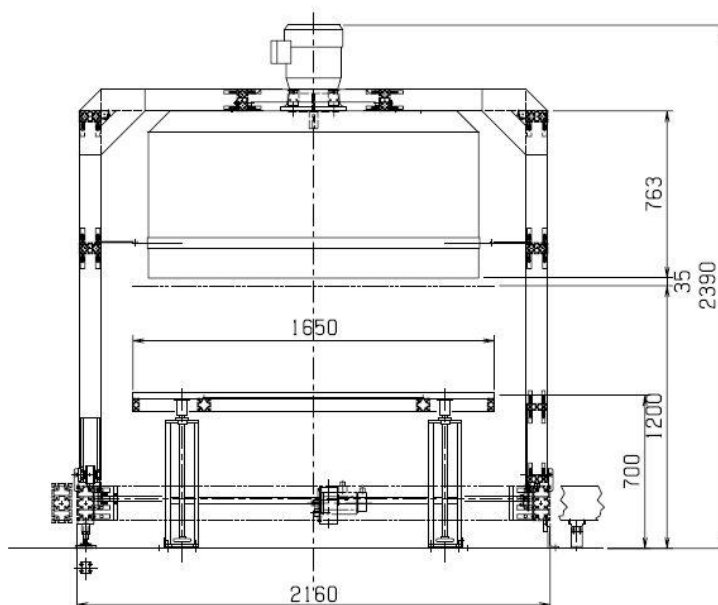
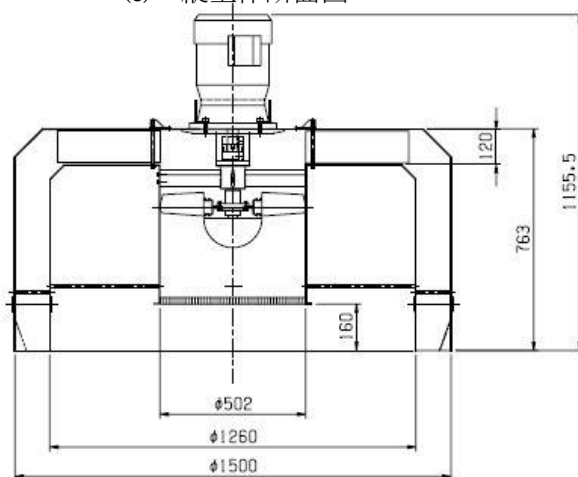


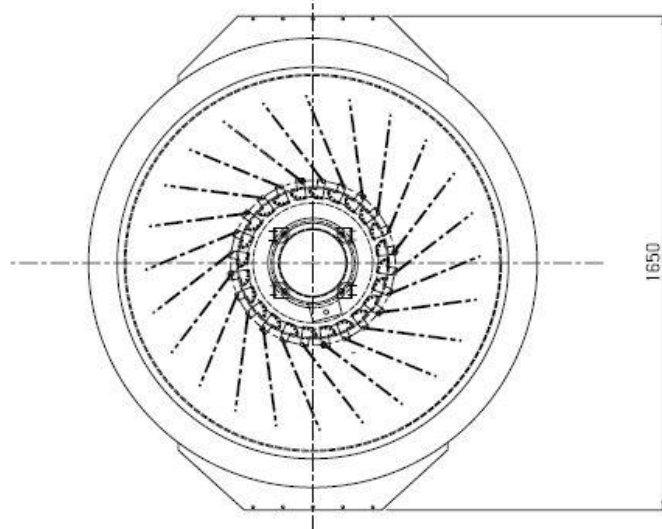
図 3.1.3 ICU 型竜巻発生装置の概要



(c) 縦全体断面図



(d) 縦断面図



(e) 横断面図

図 3.1.3 ICU 型竜巻発生装置の概要

3. 2 実験概要と実験パラメータ

既往の研究によれば、竜巻の気流分布はRankine渦モデルやW.K渦モデルで再現する試みは過去に行われている。^{(5),(6)}そこで本研究においても、第2章-設計用仮想竜巻モデルの提案で示した渦パラメータを有する渦を竜巻発生装置により実際に生成し、その風速・風向の分布や移動速度の影響等を測定する事で、既往の渦モデルと実験値との整合性の確認が必要となる。

しかし、本研究で使用するICU型竜巻発生装置は当初移動速度による影響を測定する事を主目的としていなかった事や、本稿で提案した設計用仮想竜巻モデルの移動速度が速い事から相似側を合わせても、実験において十分な移動速度には達していない。又、時間・距離・風速(移動速度)の各相似側を合わせる事が難しく実験の目的上、距離と風速を優先して相似側を定め、実験パラメーターも設計用仮想竜巻モデルVF3のみとし、移動速度のみ0.1~0.4m/sにて実験を行った。

本研究で使用した竜巻発生装置のベーン角度、ファン入力電圧、生成される渦のコア半径、集束層高さ等のパラメーターは相互に密接な関わり既往の研究により確認されており、本研究における相似則の決定はそれらを元に設定した。⁽⁵⁾

設計用仮想竜巻モデルのパラメーターを表3.2.1に、設定した相似側を表3.2.2に、そして竜巻発生装置における設定パラメーターを表3.2.3に示す。

表 3.2.1 設計用竜巻モデル VF3 のパラメーター

仮想竜巻モデルパラメータ			
スケールVF	接線最大風速:Vm	移動速度:Vt(m/s)	コア半径:R(m)
3	81	20.6	22.5

表 3.2.2 設定相似側

相似則:1/n			
風速	移動速度	距離	時間
20	20	200	20

表 3.2.3 設定パラメーター

竜巻発生装置パラメータ				
スケールVF	接線最大風速:Vm	移動速度:Vt(m/s)	コア半径:R(mm)	ベーン角度:θ
3	4.05	1.03	112.5	30

風速の測定にはI型プローブ熱戦風速計を使用する。測定間隔は20Hz、渦が移動する場合は測定10回のアンサンブル平均をとる。測定高さはステージより340mmで、生成される渦の中央(C)、左側面(-R)、右側面(R)の3つの線上を計測する。これは、第2章-設計用仮想竜巻モデルの提案において、Rankine渦モデルの理論式より風速と風向の時刻歴変化を算出した結果から、渦中心(C)が通過する際に最も風向変化が大きく、渦右側(R)が通過する際に最も風速が高くなる事によるものである。渦の対称性という観点から渦左側(-R)も計測を行う。ステージ上座標を図3.2.1に示す。風速計設置の様子を図3.2.2に示す。

渦の風速分布を計測するに際し、渦のコアの中心位置を把握する事が接線最大風速を測定する為に不可欠である為、実験の前に図3.2.1におけるZ-Z軸上のy方向風速の計測を行った。その結果を図3.2.3に示す。

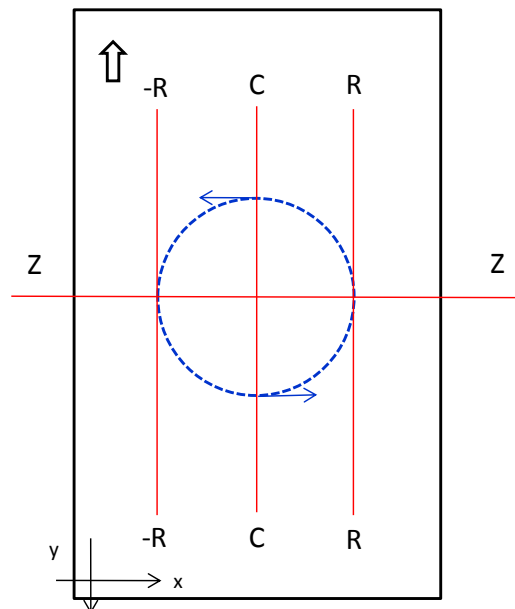


図 3.2.1 ステージ上測定位置



図 3.2.2 風速計設置の様子

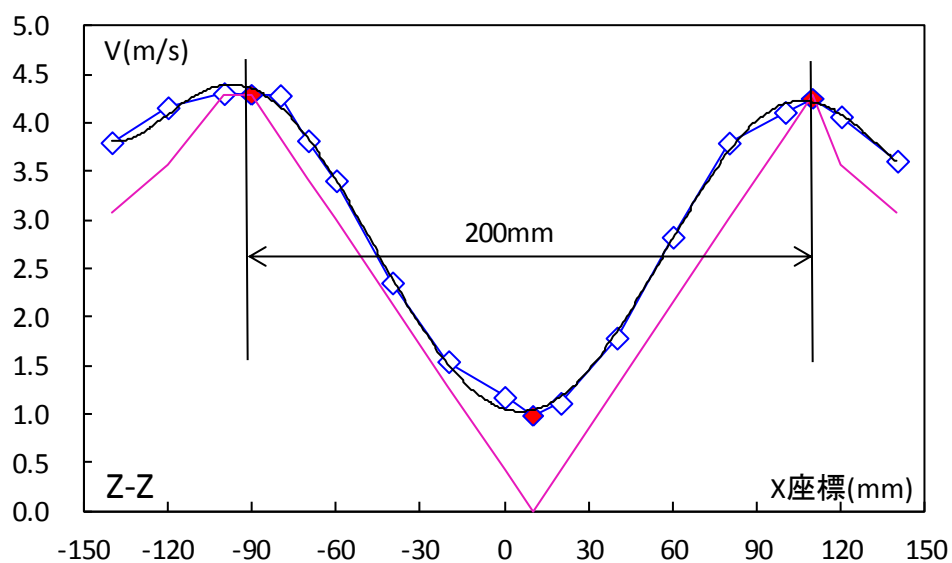


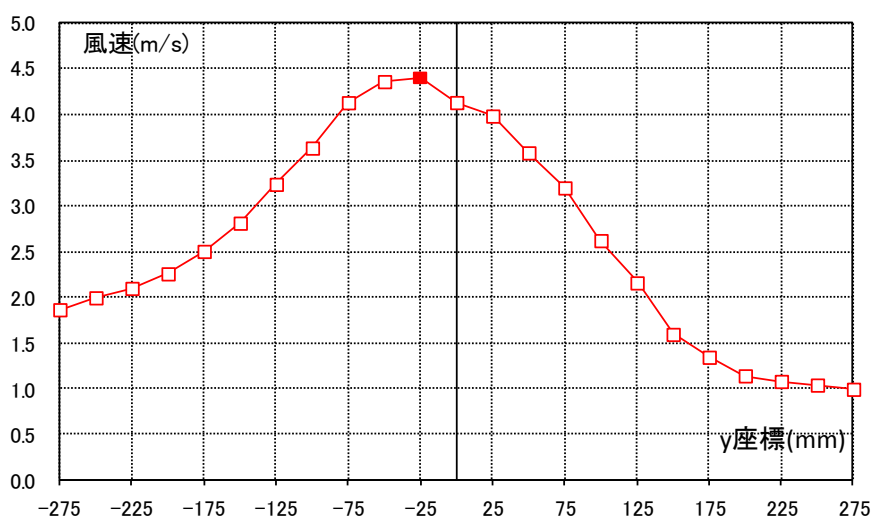
図 3.2.3 Z-Z 軸線上 y 方向風速分布

これにより、渦の中心はステージ中央よりx座標で+10mm、コア半径100mmであり、およそ設定した通りの渦が生成出来た事が分かる。赤線はRankine渦モデルによる理論値である。これらの結果を踏まえて、渦の風速分布の計測を行うものとする。

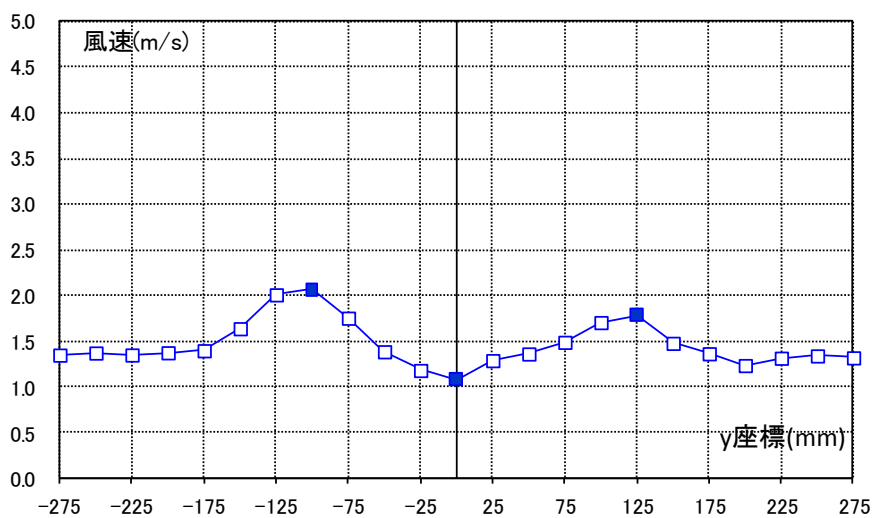
3.3 実験結果

【渦が静止している状態の風速分布】

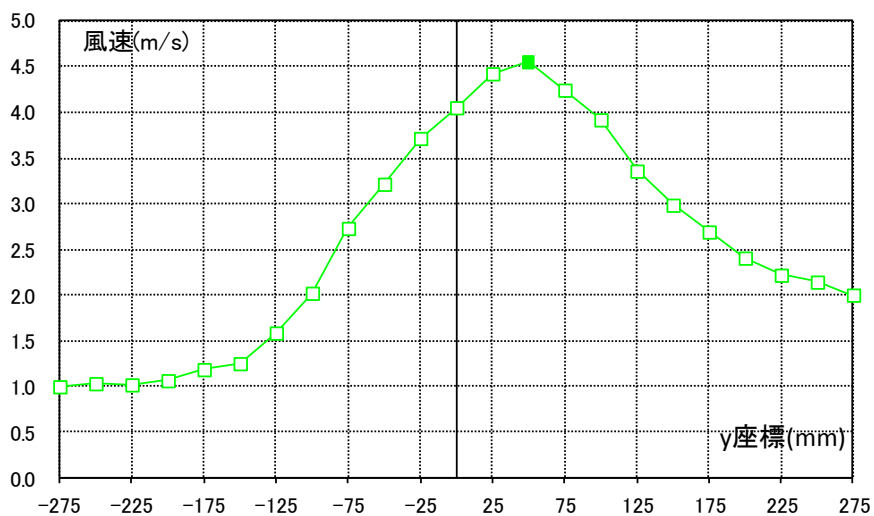
移動速度0m/s、静止している渦の風速分布の計測を行う。渦が移動しない為に、R,C-Rの各線上の連続的な不足の変化を測定する事が出来ない為に、渦中心より適当な位置で風速の定点測定を行う。サンプリング周波数は20Hzで40s間とする。y方向風速成分の実験結果を図3.3.1に、x方向成分の実験結果を図3.3.2に示す。それら比較したものを図3.3.3に占めす。



(a) -R 線上の風速分布

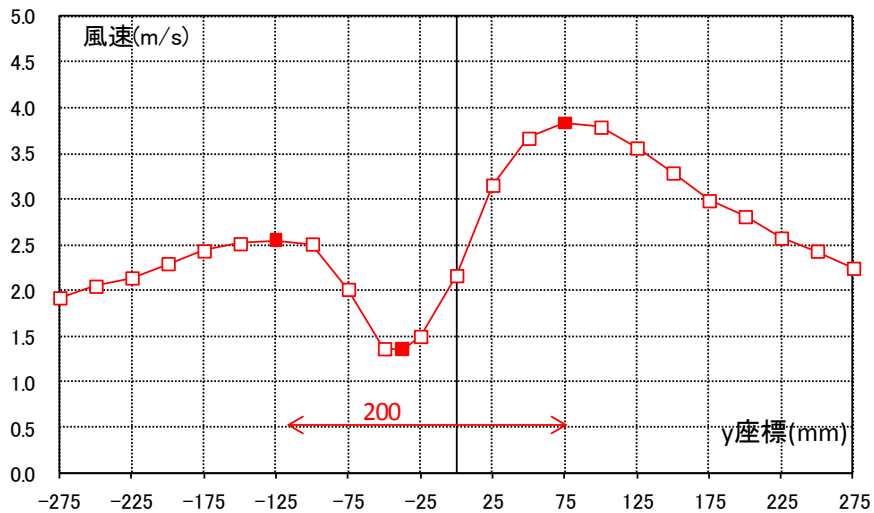


(b) C 線上の風速分布

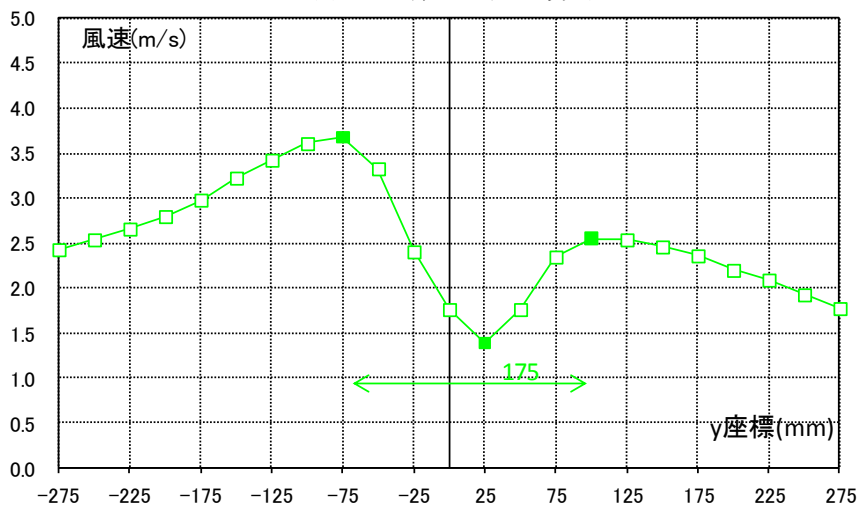


(c) R線上の風速分布

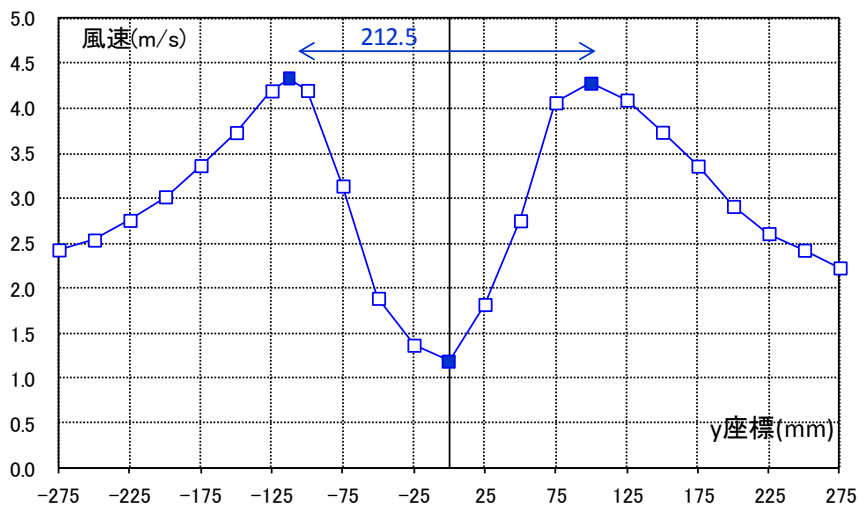
図 3.3.1 y 方向風速成分



(a) -R線上の風速分布

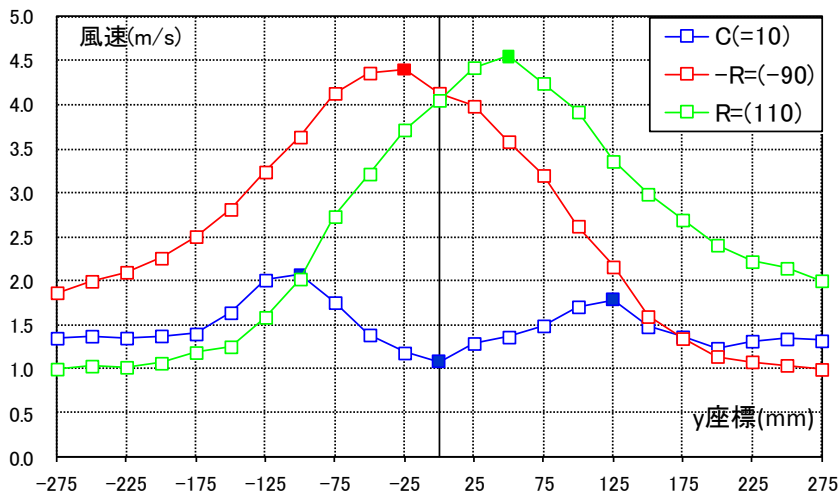


(b) C線上の風速分布

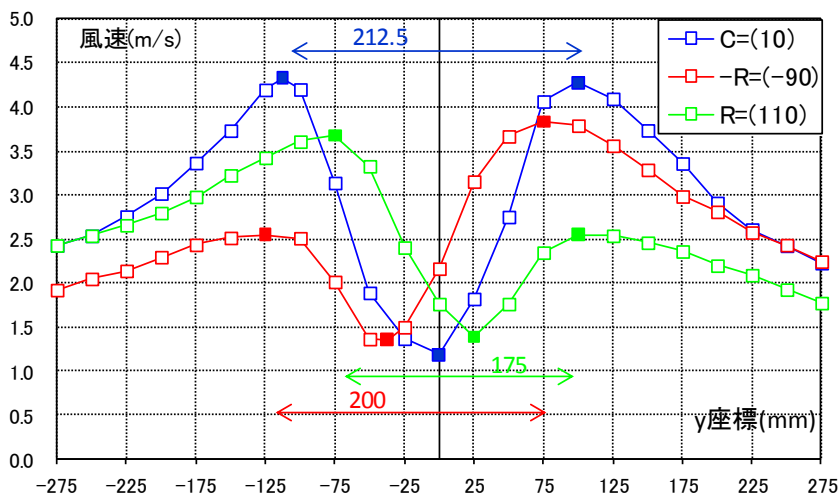


(c) R 線上の風速分布

図 3.3.2 x 方向風速成分



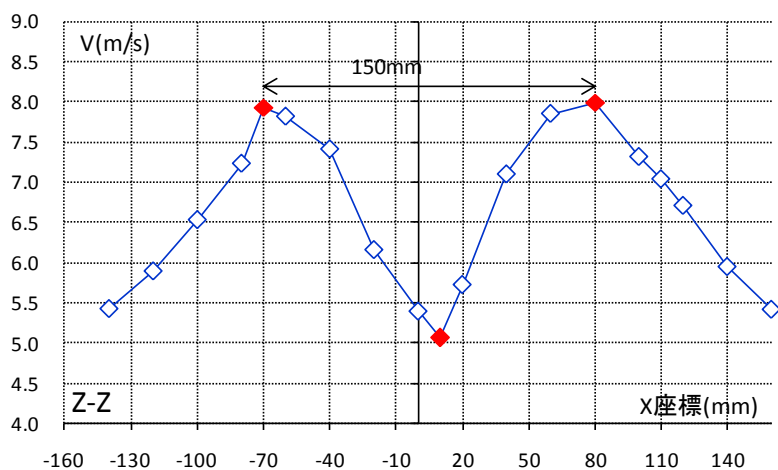
(a) y 方向風速成分の比較



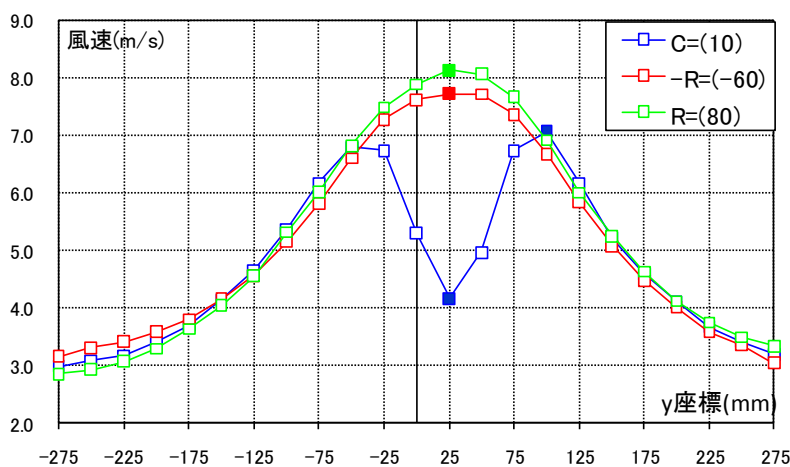
(b) x 方向風速成分の比較

図 3.3.3 x,y 方向風速成分の比較

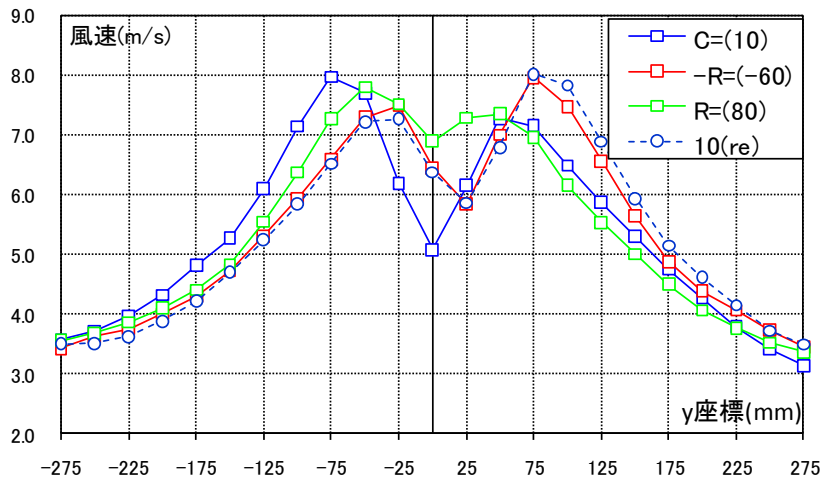
静止渦の風速分布を結果、渦右側面と左側面が予測される中心位置からそれぞれ25mm程度ずれている事が分かる。既往の研究より、渦が高速で移動している場合に渦の形状が楕円形に変化するという報告があるが⁷⁾、この場合は静止している為に装置本体の癖と判断する。この渦の変形はファン入力電圧20Hzで測定した結果、小さくなる事が分かっている。20HzでのZ-Z軸上のy方向風速と各測定線上のx,y方向風速を図3.3.4に示す。



(a) Z-Z 軸線上の y 方向風速分布



(b) y 方向風速の比較



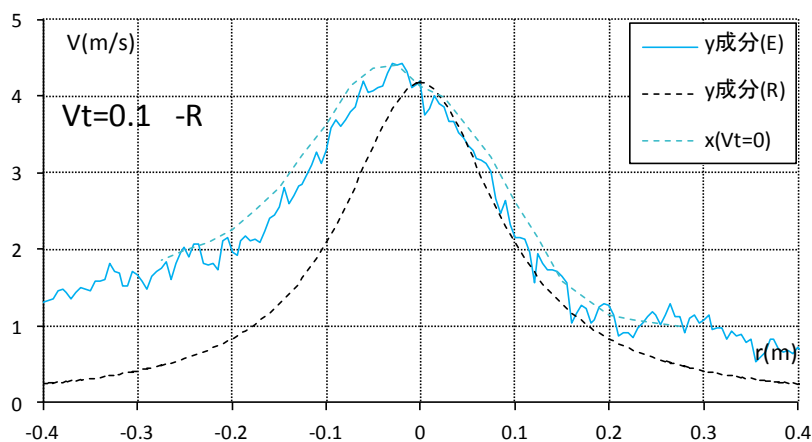
(c) x 方向風速の比較

図 3.3.4 20Hz における x,y 方向風速の比較

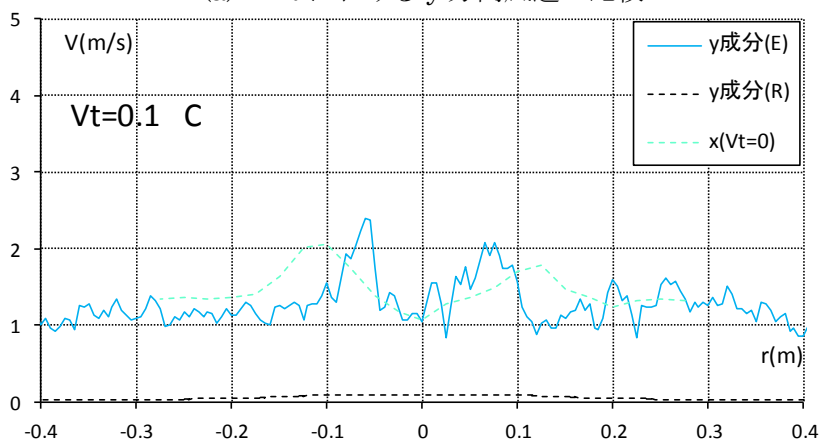
ファン入力電圧が20Hzの場合であれば渦の変形が小さくなる事から、静止渦の風速分布のみを計測する場合は入力電圧を大きく設定する方が適切と考えられるが、本研究では仮想竜巻モデルとの対応や移動速度の影響も計測する事が目的である。移動速度は最大0.4m/sである為に、渦自体の風速は低い方が好ましい。この為にファン入力電圧8Hzで実験を続けるものとする。

【渦が移動している場合の風速分布】

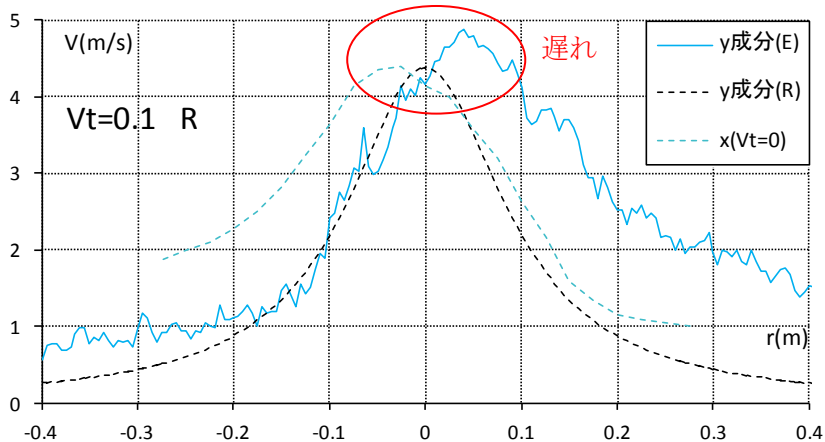
渦が静止している状態での風速分布を基準点として、移動速度0.1~0.4m/sでの実験結果を示す。z,y方向分布と共に静止渦の風速分布、Rankine渦より算出した風速の理論値も合わせてプロットする。移動速度0.1m/sの実験結果を図3.3.5、0.2m/sでの実験結果を図4.3.6、0.3m/sでの実験結果を図3.3.7、0.4m/sでの実験結果を図3.3.8に示す。



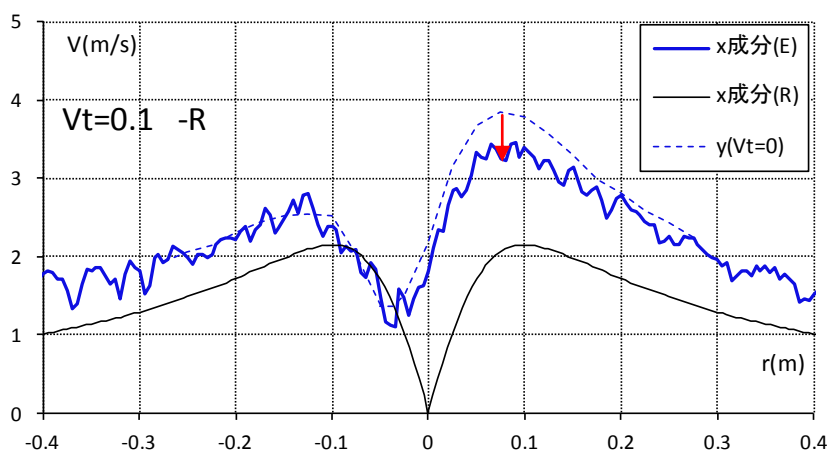
(a) -Rにおけるy方向風速の比較



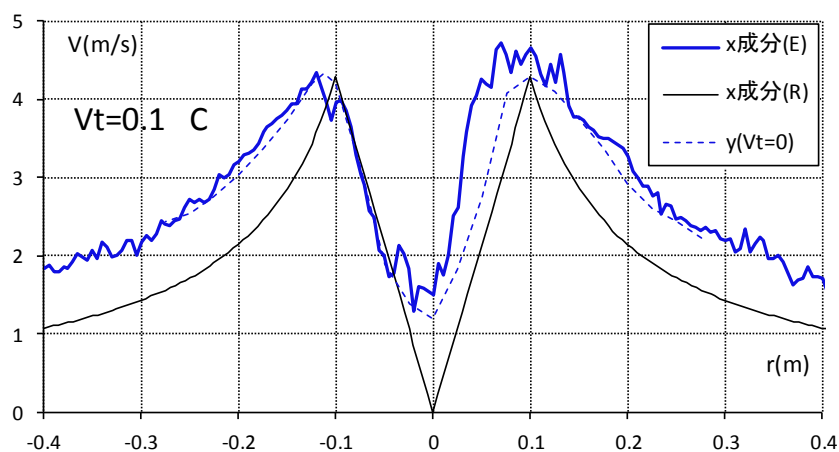
(b) Cにおけるy方向風速の比較



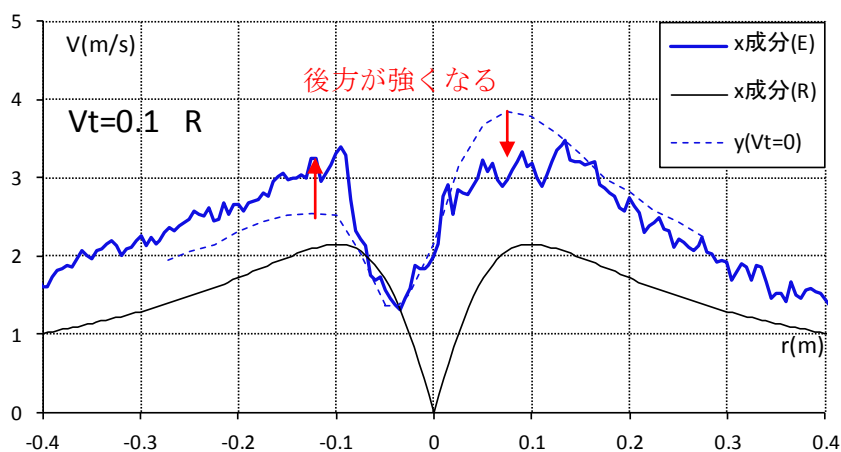
(c) Rにおけるy方向風速の比較



(d) $-R$ における x 方向風速の比較

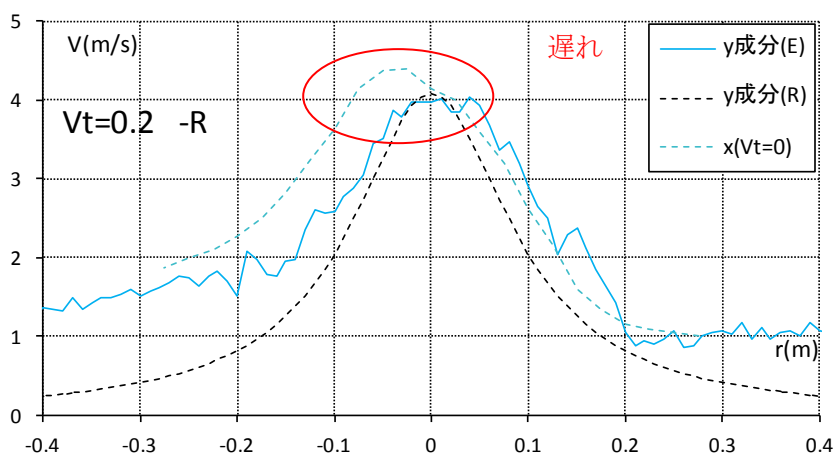


(e) C における x 方向風速の比較

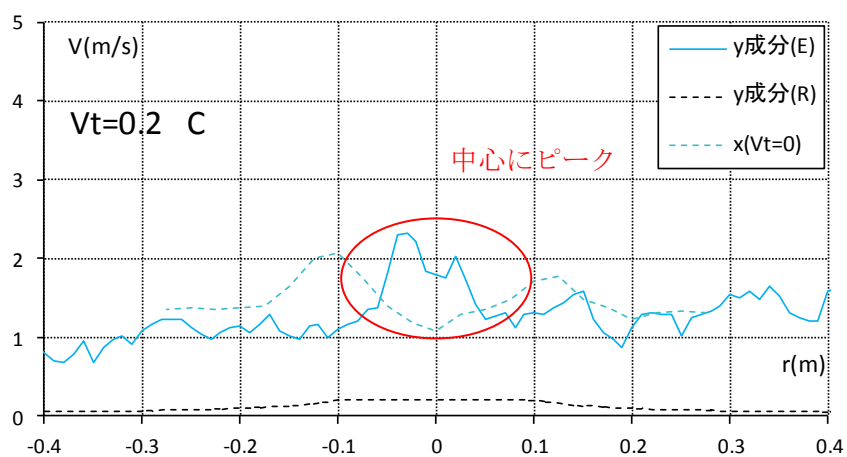


(f) R における x 方向風速の比較

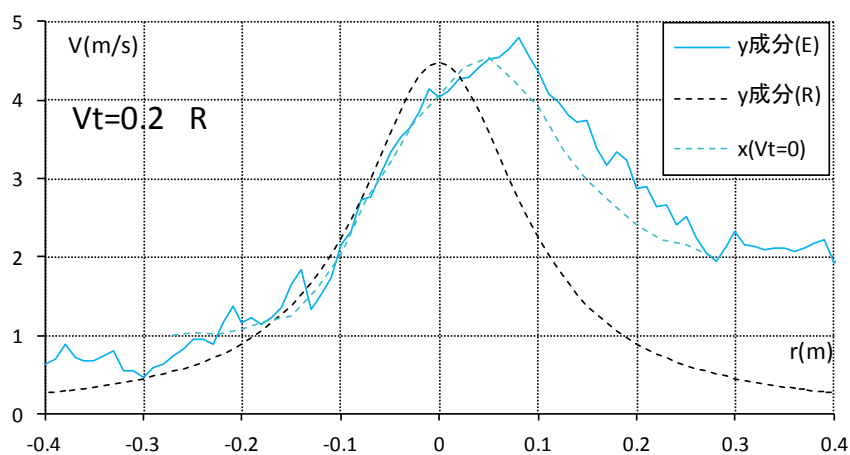
図 3.3.5 移動速度 0.1m/s における x,y 方向風速の比較



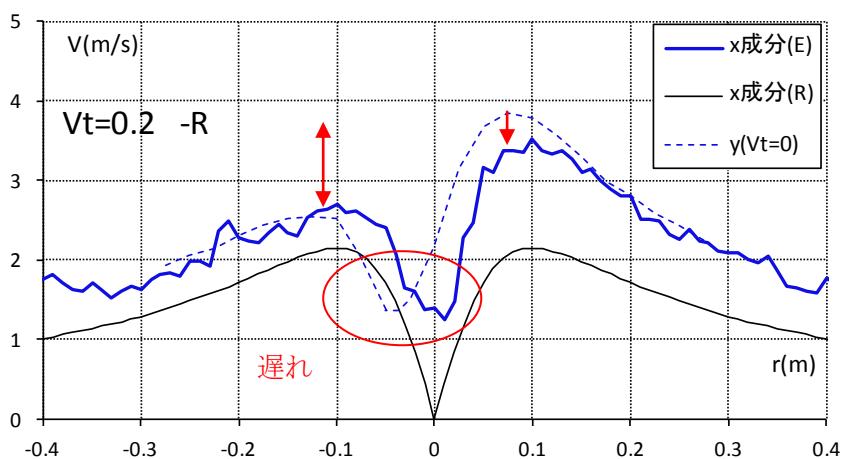
(a) $-R$ における y 方向風速の比較



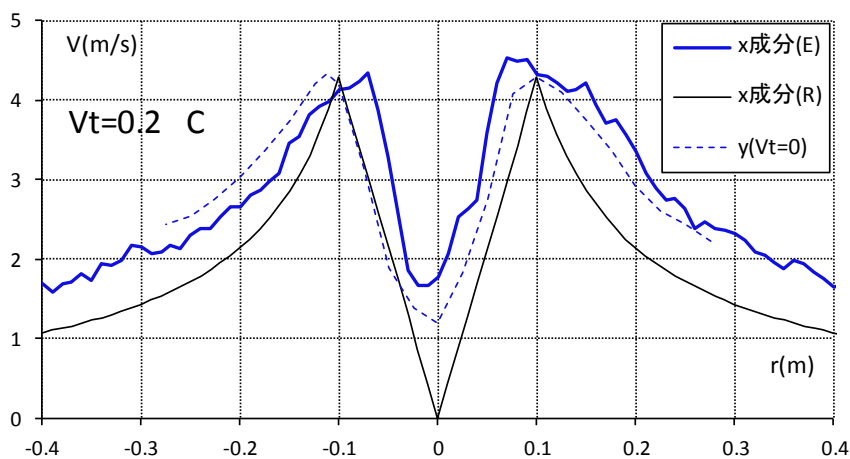
(b) C における y 方向風速の比較



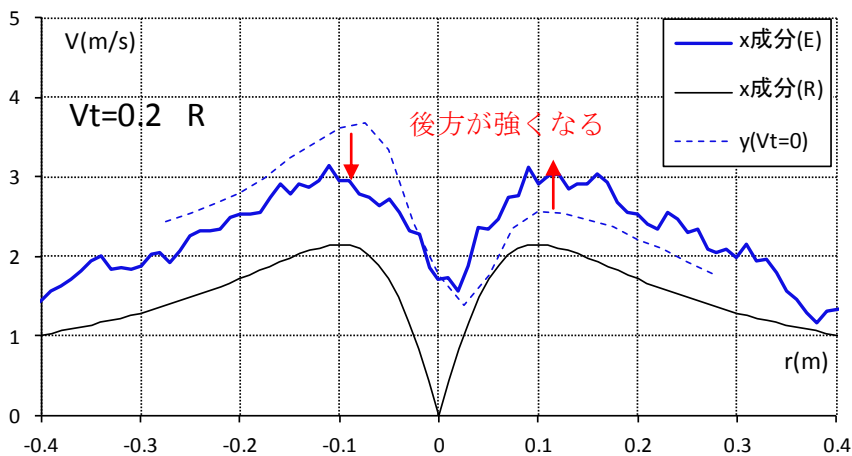
(c) R における y 方向風速の比較



(d) $-R$ における x 方向風速の比較

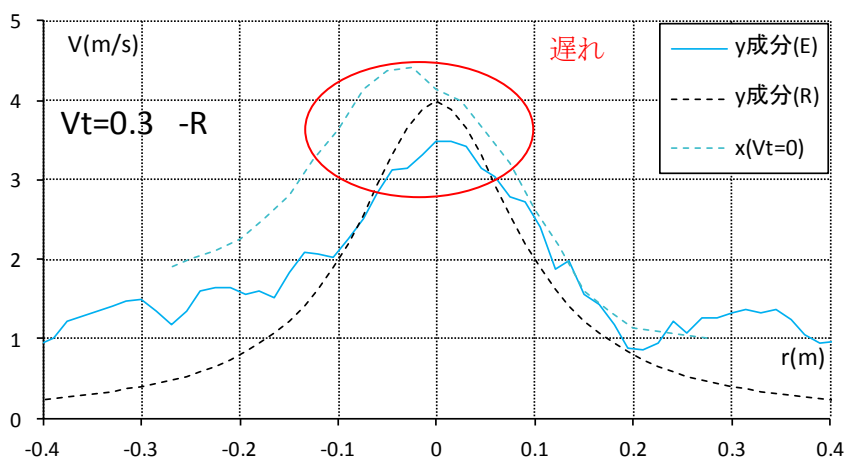


(e) C における x 方向風速の比較

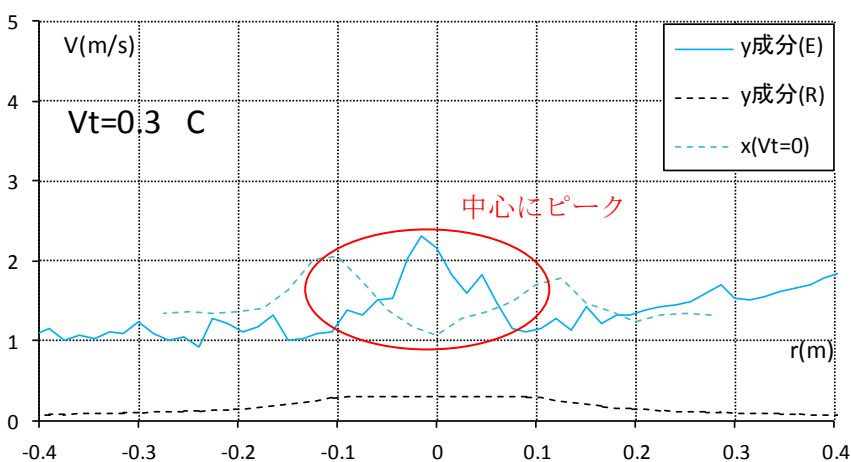


(f) R における x 方向風速の比較

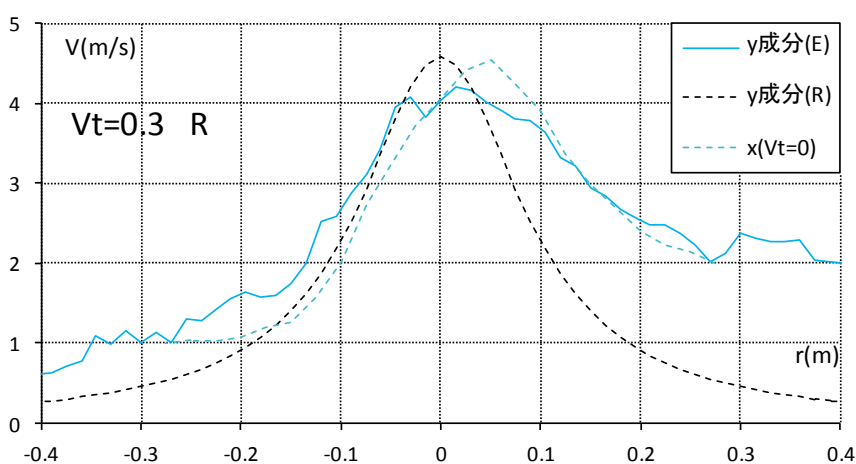
図 3.3.6 移動速度 0.2m/s における x,y 方向風速の比較



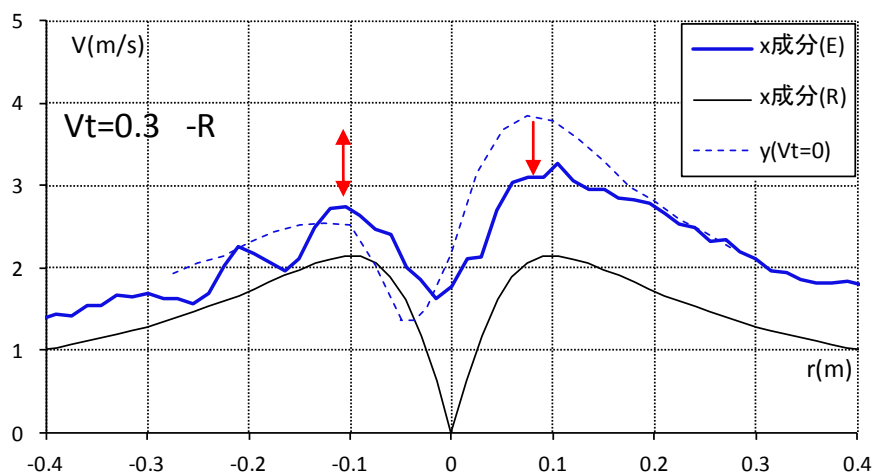
(a) -Rにおけるy方向風速の比較



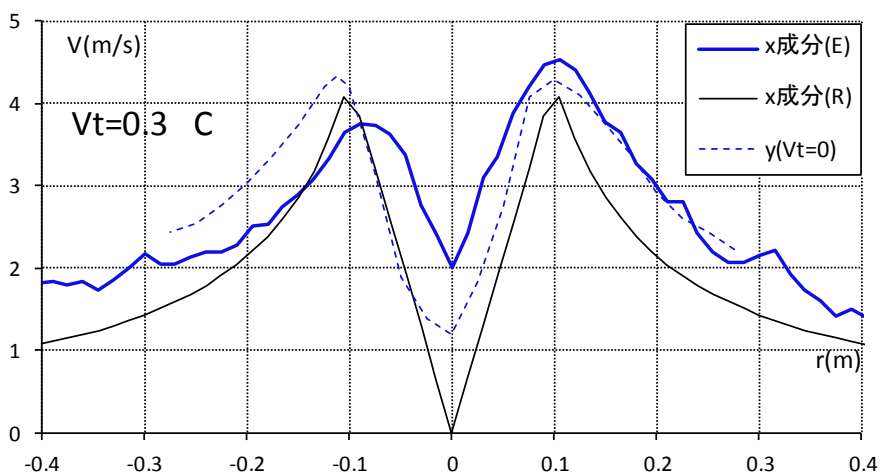
(b) Cにおけるy方向風速の比較



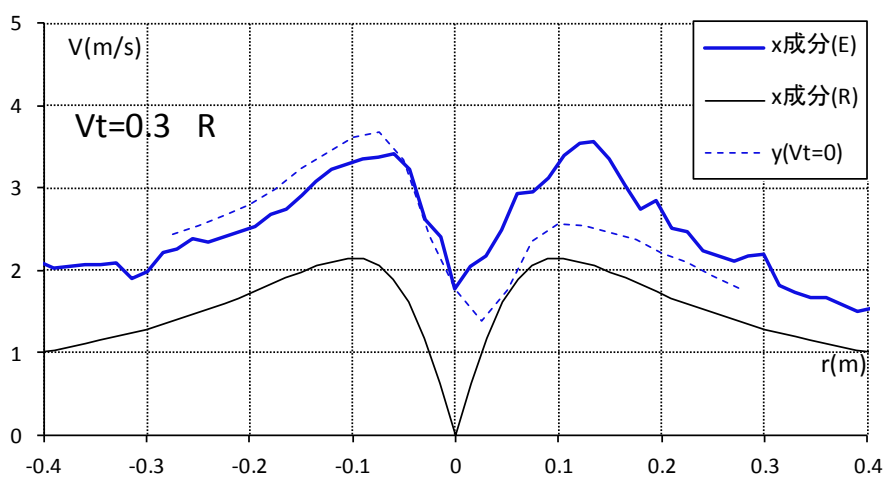
(c) Rにおけるy方向風速の比較



(d) $-R$ における x 方向風速の比較

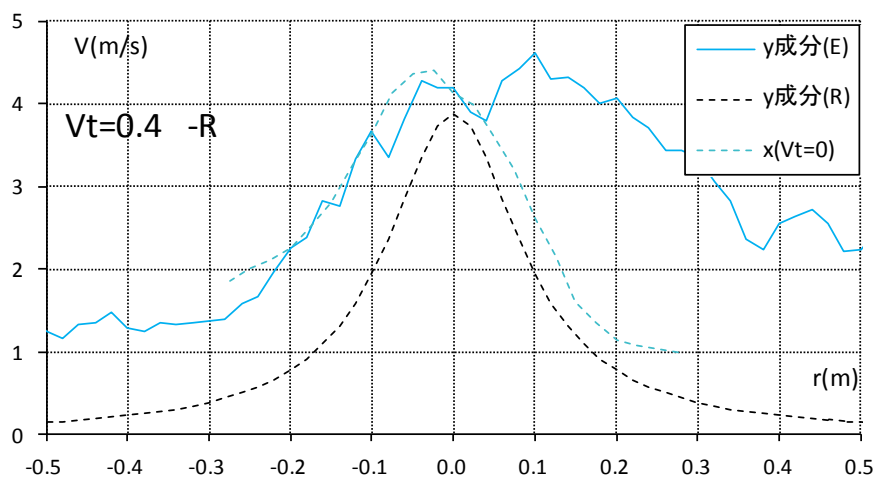


(e) C における x 方向風速の比較

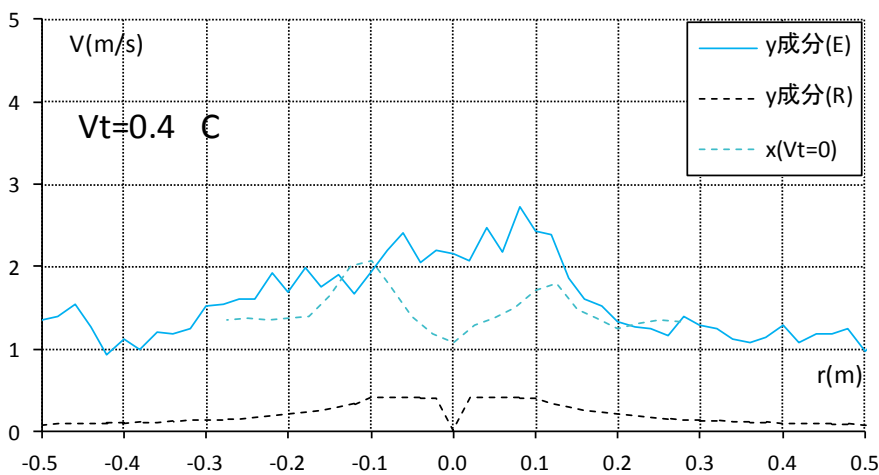


(f) R における x 方向風速の比較

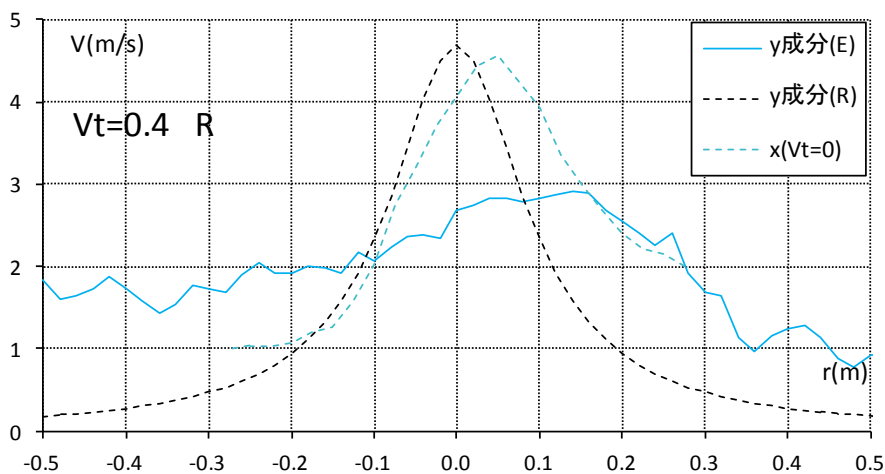
図 3.3.7 移動速度 0.3m/s における x,y 方向風速の比較



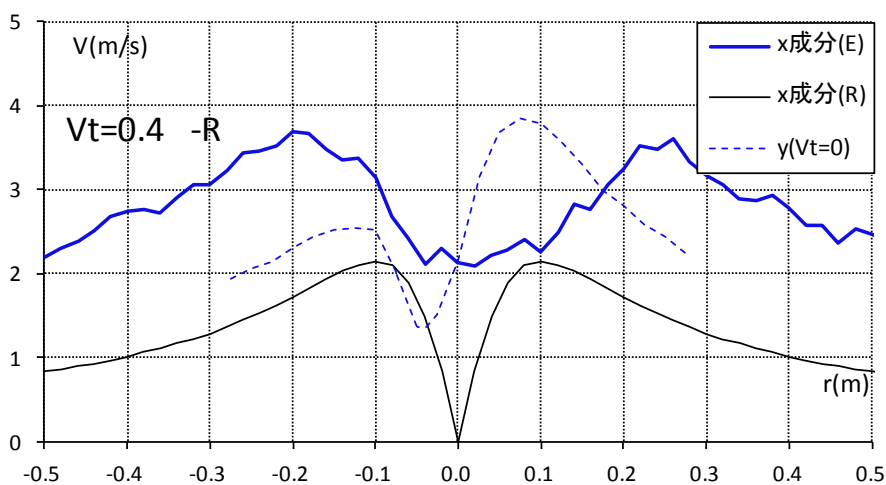
(a) $-R$ における y 方向風速の比較



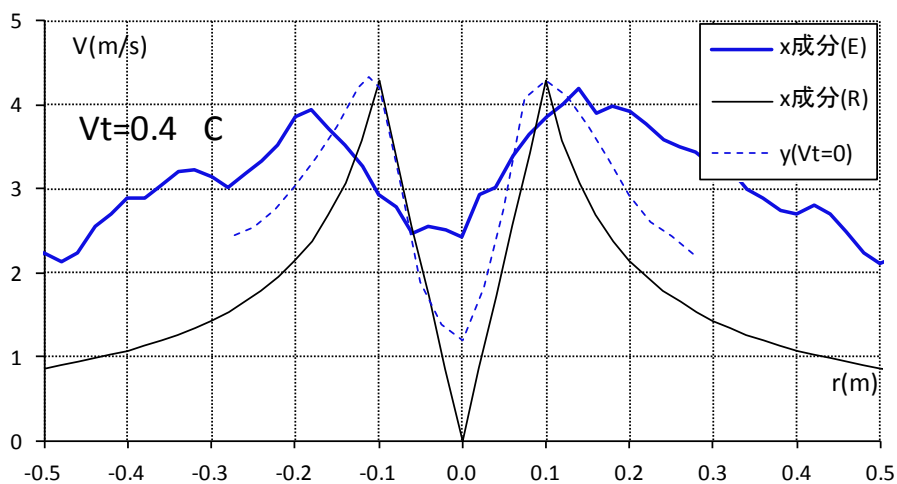
(b) C における y 方向風速の比較



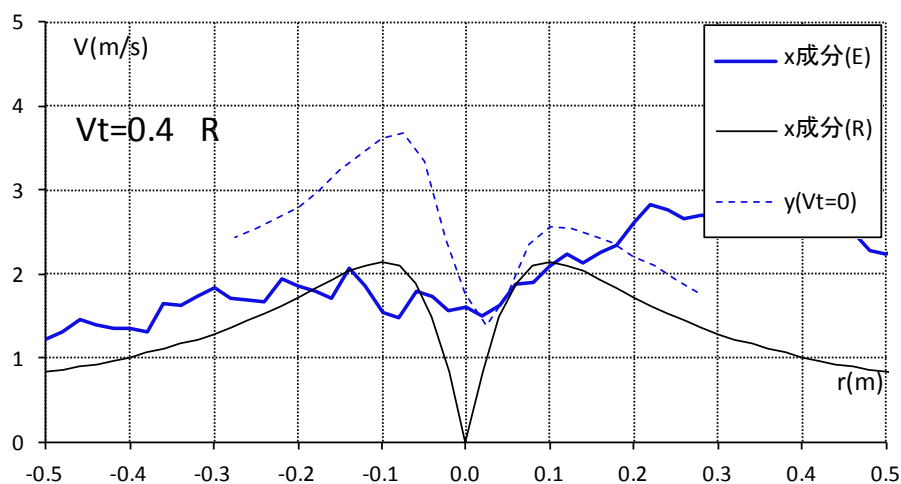
(c) R における y 方向風速の比較



(d) -Rにおけるx方向風速の比較



(e) Cにおけるx方向風速の比較



(f) Rにおけるx方向風速の比較

図 3.3.8 移動速度 0.4m/s における x,y 方向風速の比較

【実験結果の考察】

移動速度0.1m/sの結果では、右側面において、若干の渦の遅れが確認できる。又、渦後方の風速が上昇する事によって、渦両側面において静止状態で計測された風速の非対称性が小さくなる傾向がみられた。

Rankine渦モデルとの比較では、渦中心が通過する場合のx方向風速がとてもよく一致している。又渦両側面のy方向風速も渦の中心がずれている事を考慮すればよく対応していると言える。しかしながら、渦両側面のx方向風速はRankine渦モデルにより算出した風速よりも1.0m/s程大きな風速が計測された。

移動速度0.2m/sの結果では0.1m/sと同様に渦の非対称性が小さくなる傾向がみられるが、渦の遅れは左側面で確認された。又、渦静止状態では渦中心において風速が最低値となっているが、0.2m/sの場合は渦中心位置で最大風速が計測された。

Rankine渦モデルとの比較では、移動速度0.1m/sの結果とほぼ同様の傾向を示しているが、両側面y方向風速の最大風速付近から徐々に大きくなる事が分かった。

移動速度0.3m/sの結果では、これまでの結果と同様に渦の非対称性が小さくなる結果が得られた。しかし、渦中心のy方向風速が渦の中心で最大風速となると共に、x方向成分がRankine渦モデルから乖離し始めた様子が確認できる。又、渦左側面の最大風速が静止状態の最大風速よりも1.0m/s程低くなり、渦の中心付近より生成した渦の風速分布が乱れ始めたような数値となった。

移動速度0.4m/sの結果では渦の風速が完全に乱れており、ほとんど理論値を満たしていない。x方向風速は全体的にはRankine渦モデルのような分布を示しているものの個々の値は全く対応していない。y方向風速分布においても渦静止状態の際に計測された山なりの分布が崩れ、風速分布の変化が緩やかになっている。これは、接線方向風速に対して移動速度が大きい為に渦が綺麗に形成されていないと考えられる。しかし、過去の被害記録では、 V_m/V_t がこれ以上の例(eg.延岡,佐呂間)も報告されているが、最大風速4.5m/sに対して、移動速度が0.1m/s程度変化した事がそれほど大きな影響を受けたという事が実験結果より把握できる。

3.4 渦の移動速度による影響

先の実験結果により、渦の最大風速に対して移動速度が一桁小さい程の差でありながら、その移動速度の変化が渦の風速分布に対して大きな影響を与えている事が分かった。

既往の研究において「移動竜巻については、反時計回転する場合、進行方向に対して右後方が最大風速となる非対象な速度分布が得られ、単に移動速度が加わるだけでなく渦軸が傾いて伸長される為に渦が強化され、移動速度が増加するほど速度場も強化される事が分かった。」という報告もあり、⁽⁷⁾このような移動竜巻から速度場から固定観測点における風速変化を評価した結果、渦軸通過に伴い風向が急変し、最大風速は渦軸通過後に出現する傾向にある事が分かったとのことである。

この実験結果は高知大学大学院総合人間自然科学研究科の竹村(2010)により報告されており、同大学の釣り鐘型竜巻発生装置という特殊な装置を使用して得られた結果である。釣り鐘型竜巻発生装置の概要を図3.4.1に、PIV実験により計測した渦の非対称変形の様子を図3.4.2に示す。

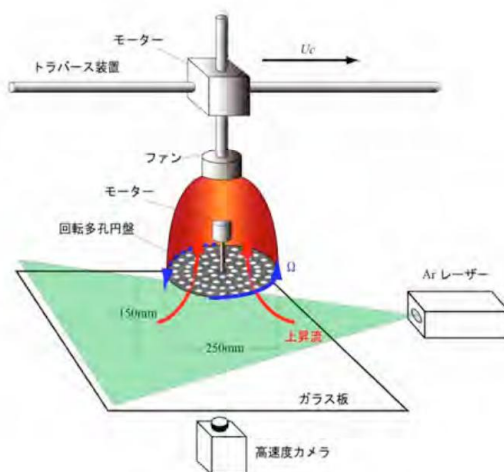


図 3.4.1 釣り鐘型竜巻発生装置の概要

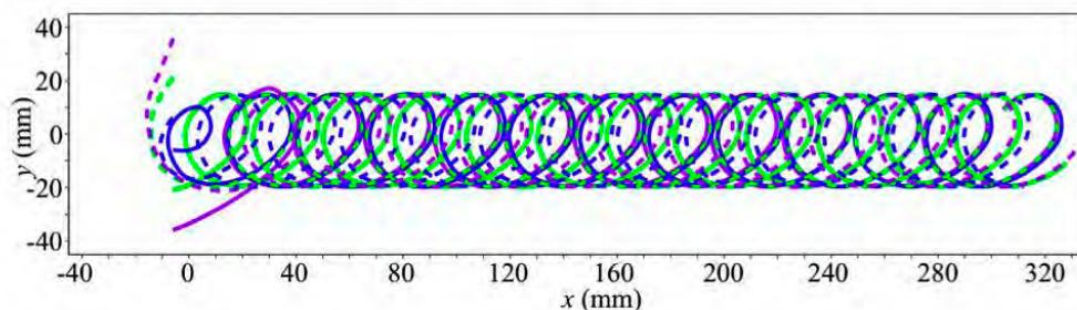


図 3.4.2 移動による渦の変形の様子

高知大学での竜巻発生装置と本研究で使ったつくばのICU型竜巻発生装置は旋回気流を発生させる根本的なメカニズムが異なる為、安易に比較するわけにはいかないと考えられる。

実験結果を渦の場所別に最大風速とその差についてまとめたものを表3.4.1に示す。

(a) 移動速度 0.1m/s の最大風速と差

Vt=0.1	X			Y		
	-R	R	C	-R	R	C
ピーク(+)	3.46	3.48	4.73	-	4.89	2.39
ピーク(-)	-2.81	-3.40	-4.35	-4.43	-	-
差	0.65	0.09	0.38	-	-	-
+差(±R)	-0.03					
-差(±R)	0.59					

(b) 移動速度 0.2m/s の最大風速と差

Vt=0.2	X			Y		
	-R	R	C	-R	R	C
ピーク(+)	3.52	3.11	4.54	-	4.80	2.33
ピーク(-)	-2.70	-3.13	-4.35	-4.03	-	-
差	0.82	-0.03	0.19	-	-	-
+差(±R)	0.41					
-差(±R)	0.43					

(c) 移動速度 0.3m/s の最大風速と差

Vt=0.3	X			Y		
	-R	R	C	-R	R	C
ピーク(+)	3.26	3.57	4.52	-	4.22	2.31
ピーク(-)	-2.74	-3.40	-3.76	-3.49	-	-
差	0.52	0.16	0.77	-	-	-
+差(±R)	-0.30					
-差(±R)	0.66					

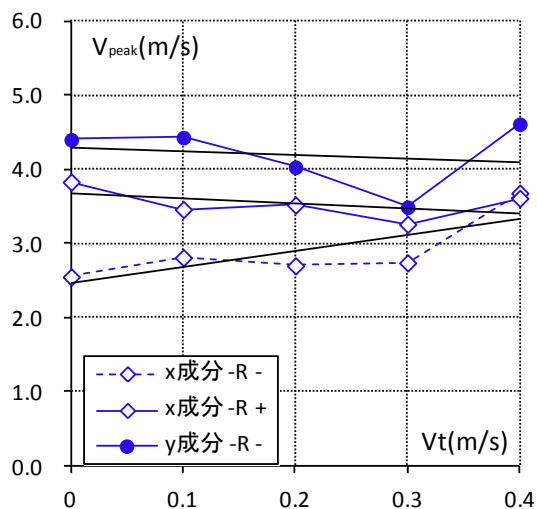
(d) 移動速度 0.4m/s の最大風速と差

Vt=0.4	X			Y		
	-R	R	C	-R	R	C
ピーク(+)	3.61	2.81	4.19	-	2.92	2.73
ピーク(-)	-3.68	-2.07	-3.93	-4.61	-	-
差	-0.08	0.74	0.26	-	-	-
+差(±R)	0.79					
-差(±R)	-1.62					

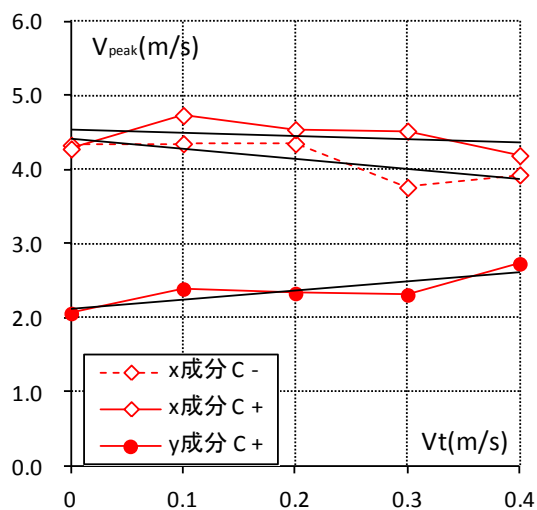
表 3.4.1 渦の各点の最大風速と差

これにより渦後の方が最大風速が高く、両端y方向風速は確かに移動速度が速くなるにつれて大きくなる事が分かる。しかしながら、移動速度0.4m/sの場合において風速の分布が大きく異なった事は説明できていない。

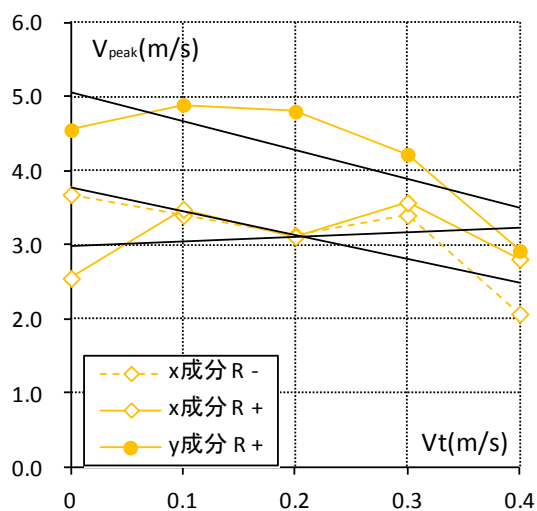
次に渦の最大風速の移動速度による影響を調べる為、渦左側面(-R)、中心(C)、右側面(R)の最大風速について移動速度による比較を行う。これは渦両端のy方向最大と渦前後のx方向最大風速を比較する事で傾向を分析するものである。風速測定箇所別最大風速の比較を図3.4.3に示す。



(a) 渦左側面の場合



(b) 渦中心の場合



(c) 渦右側面の場合

図 3.4.3 渦測定箇所別最大風速の比較

渦の最大風速の移動速度による影響について、測定箇所別、移動速度別に比較を試みたが、移動速度が速くなるにつれ最大風速が減少傾向にあり、かつ風速分布が滑らかになる。他の今回は今回実験を行った範囲の結果から一定の傾向を把握する事は出来なかった。

この結果の内、移動速度と渦の風速分布の変化については既往の研究からSwirl比という数値による大まかな傾向が報告されている。^{(8),(9)}これらの報告によれば、Swirl比が2.0の場合は移動速度の影響が極めて少なく、Swirl比が小さくなるに従って移動速度の影響が渦の風速分布に対して大きく作用するというものである。この傾向は数値流体解析(LES)や本研究で使用しているアイオワ州立大学でのICU型竜巻発生装置を使った実験でも同様である事が報告されている。

図3.4.4に数値流体解析によるSwirl比の影響を、図3.4.5にICU型竜巻発生装置の移動速度による風速分布の影響を示す。

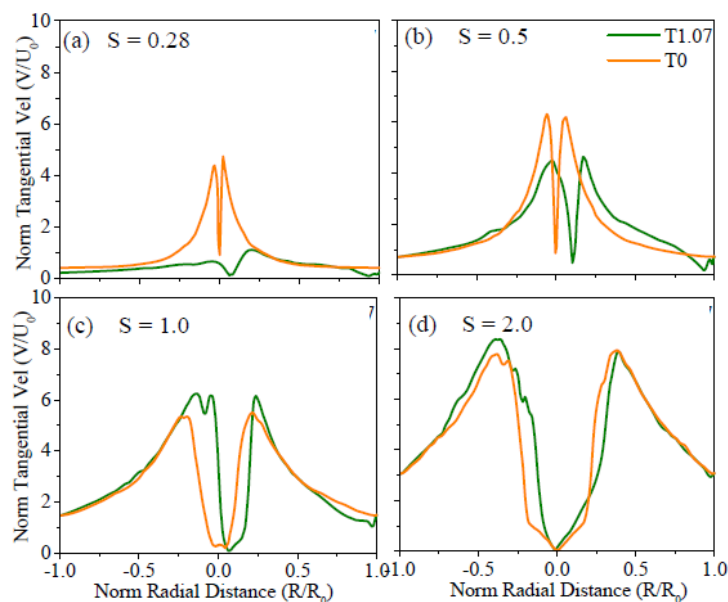


図 3.4.4 数値流体解析による風速分布への Swirl 比の影響

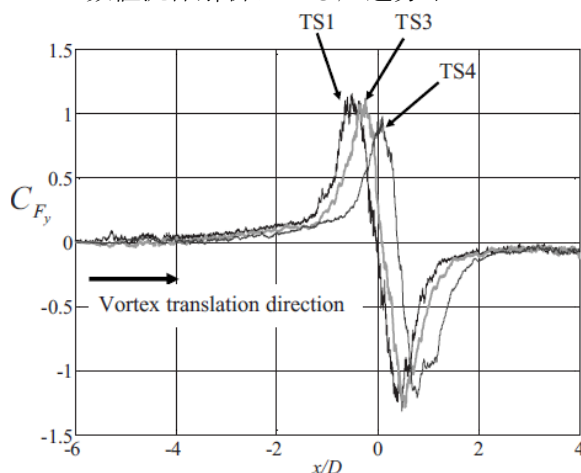


図 3.4.5 ICU型竜巻発生装置の移動速度による風速分布への影響

Swirl比の算出式を式3.4.1に示す。本実験パラメーターをこの式により算出すると、0.38となり、図3.4.4からも、渦の風速分布が渦静止状態よりも大きく異なる事が分かる。

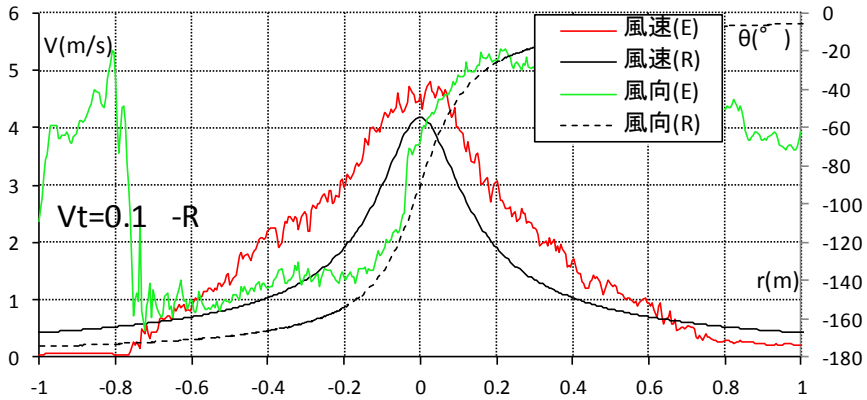
$$S = \frac{R}{2h} \tan \theta \quad \dots \dots \dots \quad \text{式(3.4.1)}$$

ここにR:上層流穴半径 h:集束層高さ θ :空気の流入角度とする

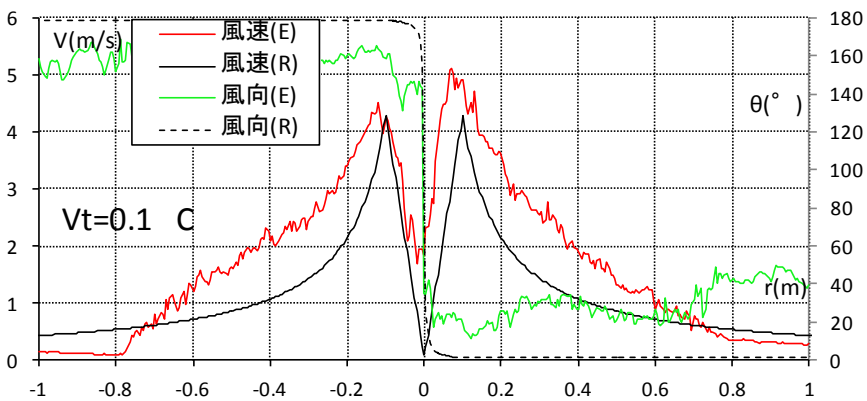
以上より、本実験の風速分布の乱れはの原因は装置にあるのではなく、生成される渦の諸条件によりSwirl比で説明できる事が分かる。しかしながら、移動速度により風速分布が変化するという点しか把握できておらず、渦のメカニズムが完全に解明できていない以上、「移動速度によって渦の風速分布が非対称的になる」という点しか、現時点では明らかにはなっていない。

3.5 風速と風向変化の対応

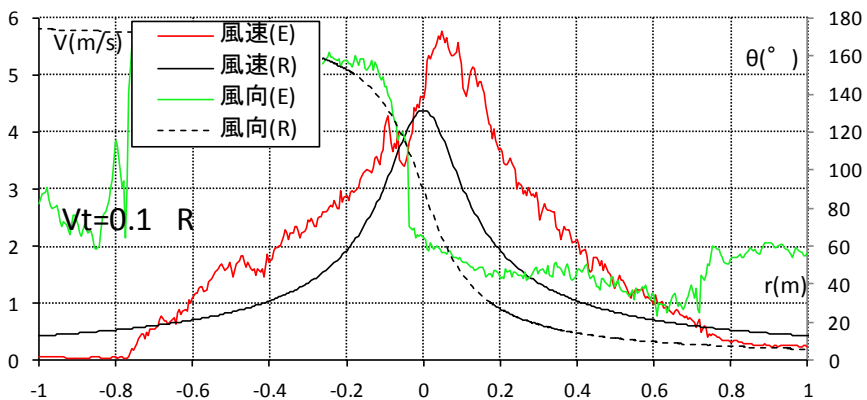
実験により渦の左側面、中央、右側面の風速分布を測定した。それらの結果よりx,y方向風速の合力として風速とその風向を求める。実験結果より算出した風速・風向及びRankine渦モデルより算出した風速・風向との比較を移動速度0.1~0.4m/sを図3.5.1~図3.5.4に示す。



(a) -Rにおける風速・風向分布

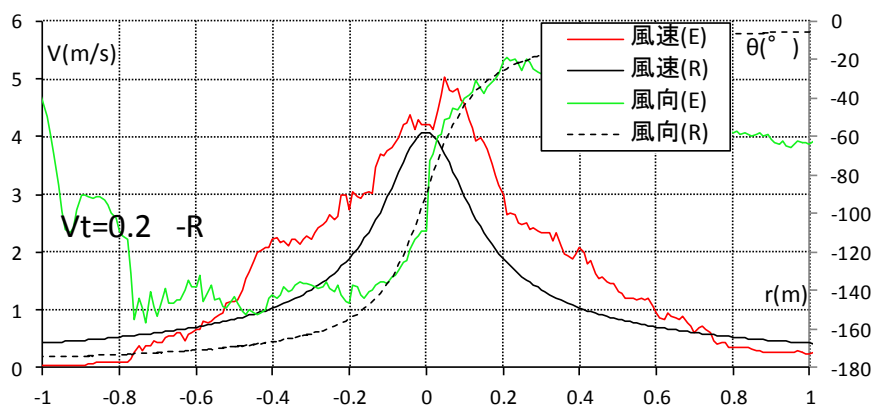


(b) Cにおける風速・風向分布

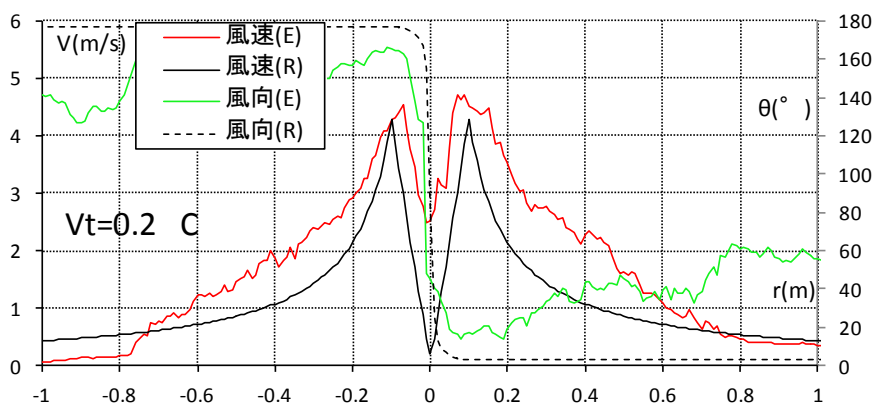


(c) Rにおける風速・風向分布

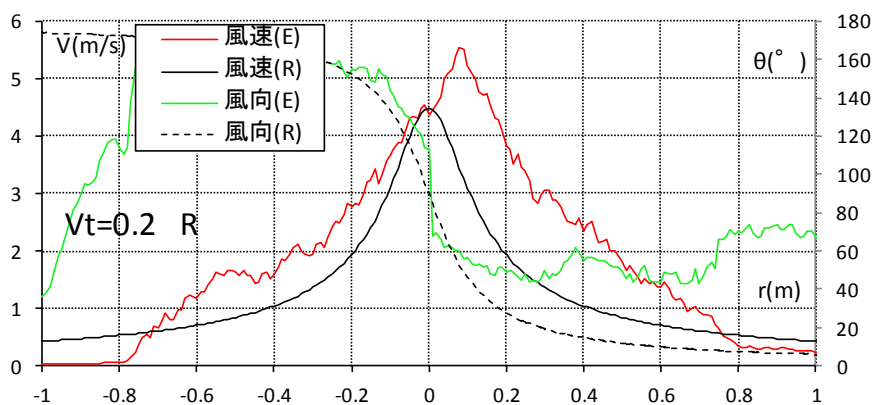
図 3.5.1 移動速度 0.1m/s における風速・風向分布



(a) -Rにおける風速・風向分布

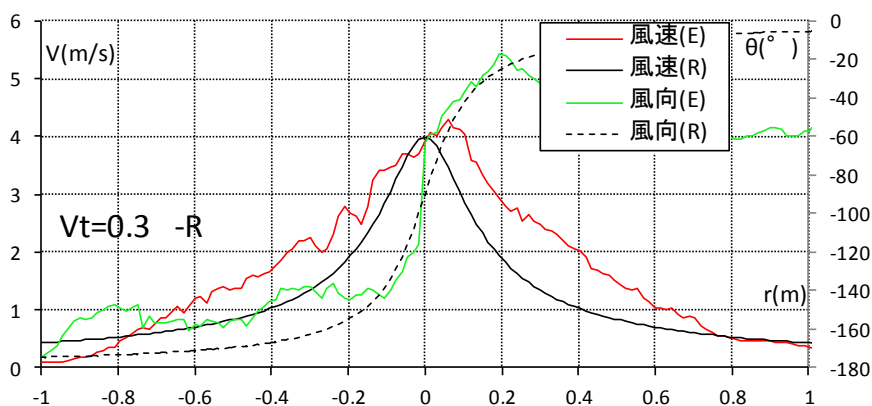


(b) Cにおける風速・風向分布

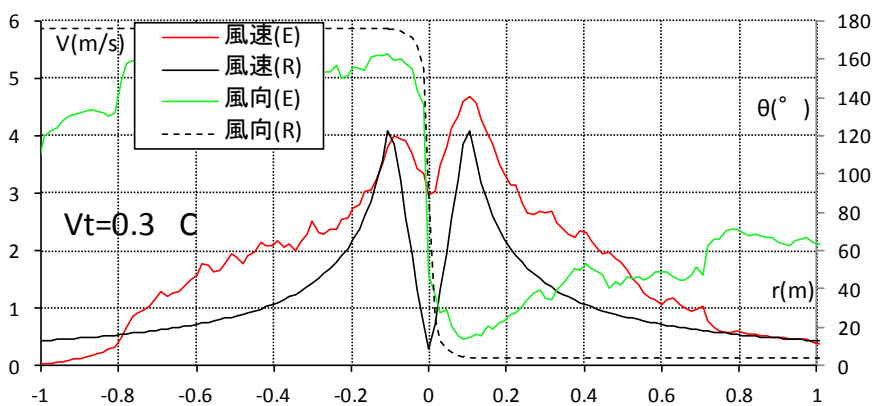


(c) Rにおける風速・風向分布

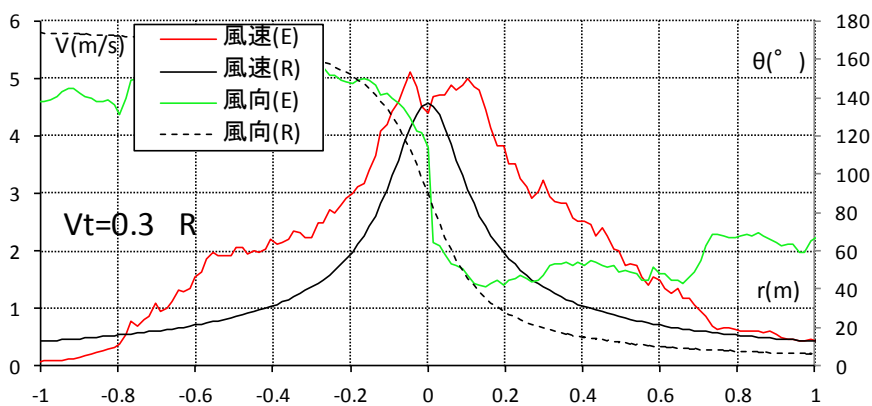
図 3.5.2 移動速度 0.2m/s における風速・風向分布



(a) $-R$ における風速・風向分布

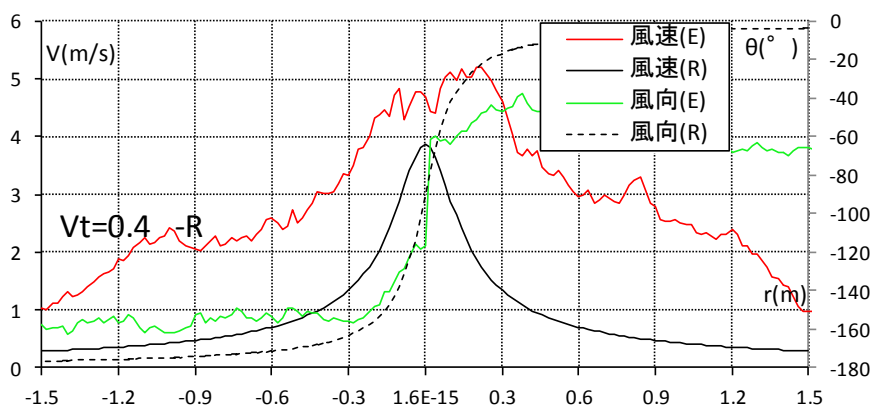


(b) C における風速・風向分布

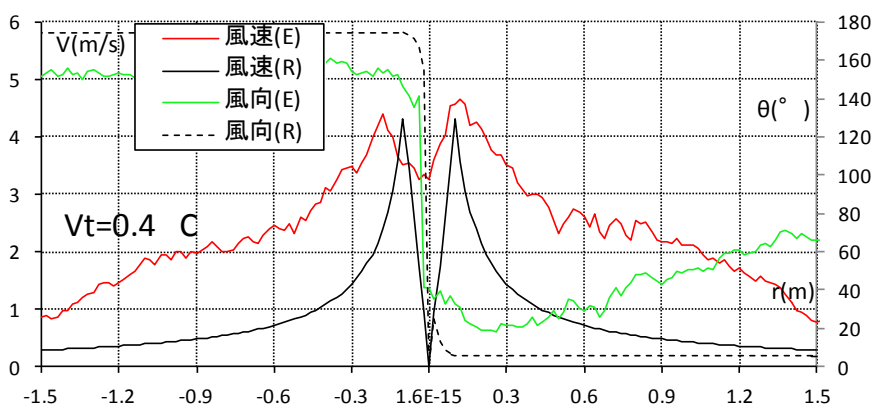


(c) R における風速・風向分布

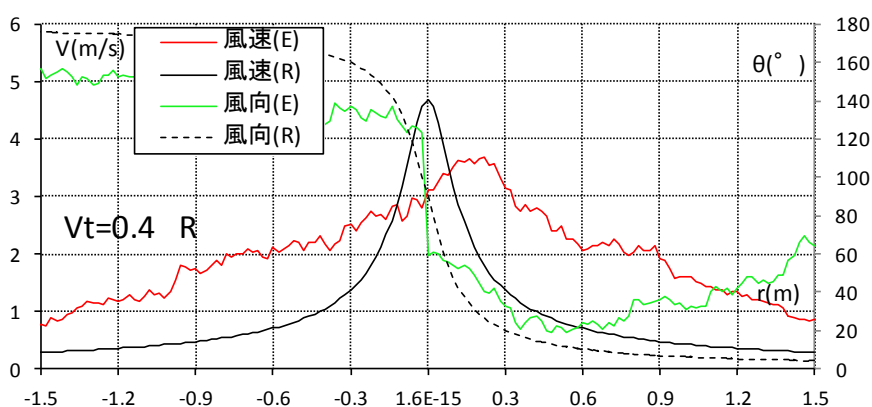
図 3.5.3 移動速度 0.3m/sにおける風速・風向分布



(a) -Rにおける風速・風向分布



(b) Cにおける風速・風向分布



(c) Rにおける風速・風向分布

図 3.5.4 移動速度 0.4m/s における風速・風向分布

3.6 理論式との対応

前節で風速・風向分布について示したが、本稿ではこれまでもRankine渦モデルとの比較を中心に行ってきた。これは現在日本における竜巻を対象とした各種研究において、渦中心からの風速分布はRankineモデルに従うものとされている事に起因する。既往の研究にも示してきたように確かにRankine渦モデルが渦の風速分布とよく対応しているという報告はなされているが、それらの研究においてRankine渦モデルと比較された渦は、竜巻発生装置によって渦が形成可能という事のみが、その存在の条件となっている事に注意する必要がある。つまり、既往の研究でRankine渦モデルと比較された渦は竜巻という実現象とは直接的な関係性を全く持たないものであるという事である。

本研究では、今指摘した点については第2章-設計用仮想竜巻モデルにおいて提案したように過去に日本で発生した竜巻の被害報告より、実現象に則したパラメーターを持つ竜巻を研究の軸においており、本実験において竜巻発生装置により生成した竜巻も実現象に則したものであると言える。

そこで、実験により計測した風速・風向分布こそが実現象と対応した渦であるものとして、Rankine渦モデル及びW.Kモデルとの風速・風向分布について比較を行う。

先に示したように日本では渦との風速・風向分布をRankine渦モデルと比較しているが、米国では1971年にwenらが竜巻を構成する風速成分を鉛直方向、接線方向、中心方向の3成分に分けて3次元的な渦の理論式を提案しており、近年では2008年にwenが提案した3次元理論式を改良して送電塔の耐風設計等について報告をしている。この改良された3次元渦モデルを以下W.Kモデルと呼び、本稿ではRankine渦モデルと共にW.Kモデルとも実験結果を比較する。W.Kモデルの理論式を式3.6.1~式3.6.7に、3成分の概要を図3.6.1、実験パラメーターから算出したW.Kモデルによる風速・風向分布を図3.6.2に示す。

boundary layer thickness

$$\delta(r') = \delta_0 [1 - e^{-0.5r'^2}] \quad \text{式 3.6.1}$$

radial function

$$r = r'/r_{\max} \quad \text{式 4.6.2} \quad \eta = z/\delta \quad \text{式 3.6.2}$$

T=tangential velocity component

$$T(\eta, r) = f(r) = 1.4 \frac{V_{\max}}{r} [1.0 - e^{-1.256r^2}] \quad \text{式 3.6.3}$$

W=vertical velocity component

$$W(\eta, r) = g(r) = 93.0r^3 e^{-5r} V_{\max} \quad \eta > 1 \quad \text{式 3.6.4}$$

T=tangential velocity component

$$T(\eta, r) = f(r)[1 - e^{-\pi\eta} \cos(2b\pi\eta)] \quad \text{式 3.6.5}$$

R=radial velocity component

$$R(\eta, r) = f(r)[0.672e^{-\pi\eta} \sin\{(b + 1)\pi\eta\}] \quad \text{式 3.6.6}$$

W=vertical velocity component

$$W(\eta, r) = g(r)[1 - e^{-\pi\eta} \cos(2b\pi\eta)] \quad \eta \leq 1 \quad \text{式 3.6.7}$$

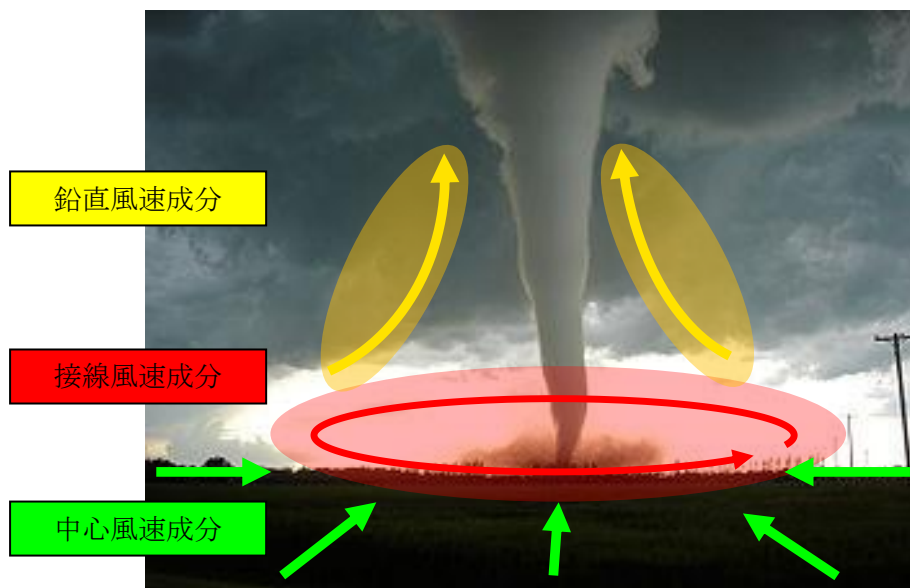
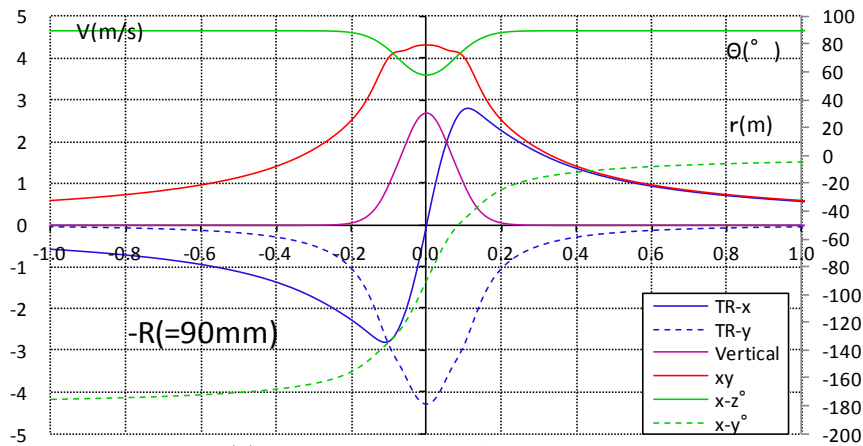
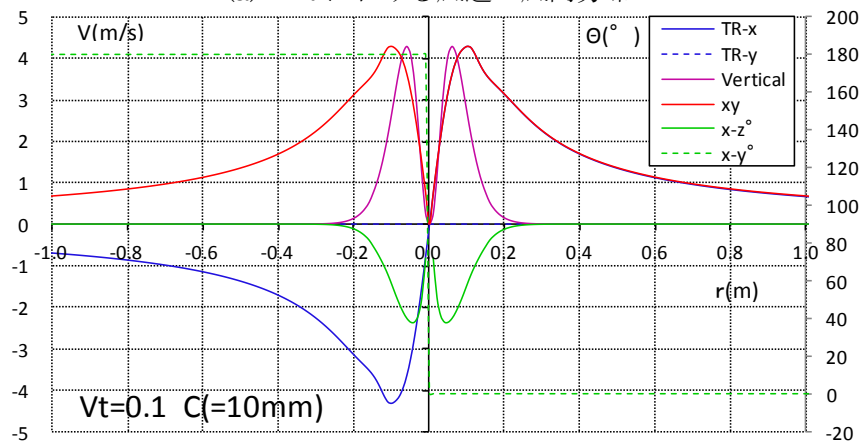


図 3.6.1 W.K モデルによる風速 3 成分の概要

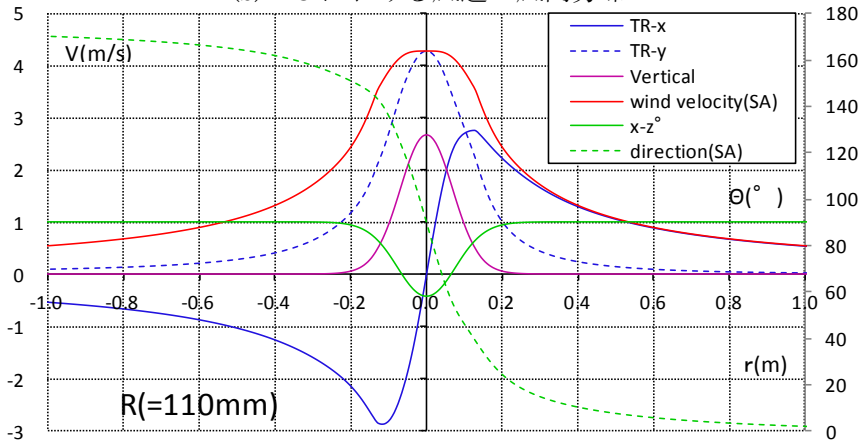
W.K モデルによる渦の風速の算出は、図 3.6.1 に示したように、渦の中心方向に対して直角に接線方向に対して吹く成分、渦中心方向に向かって吹く成分、鉛直上向きに吸い上げる成分の 3 成分に分解して算出される。この内接線風速成分と中心風速成分の二乗和を平面風速成分とみなし、Rankine 渦モデルとの対応も比較する事が出来る。



(a) $-R$ における風速・風向分布



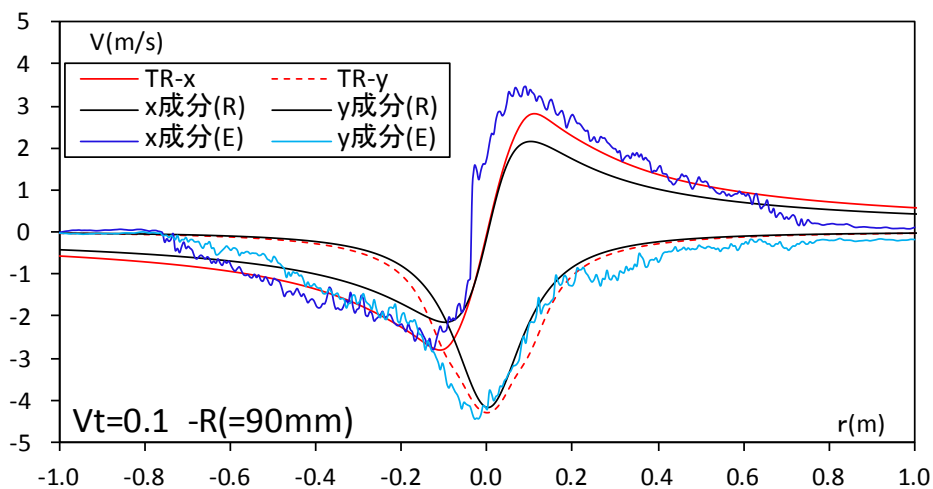
(b) C における風速・風向分布



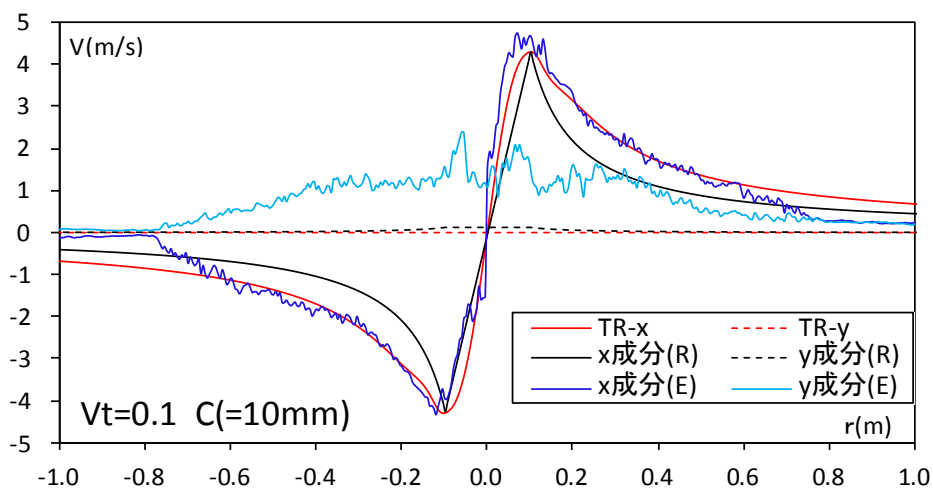
(c) R における風速・風向分布

図 3.6.2 W.K モデルによる風速・風向分布

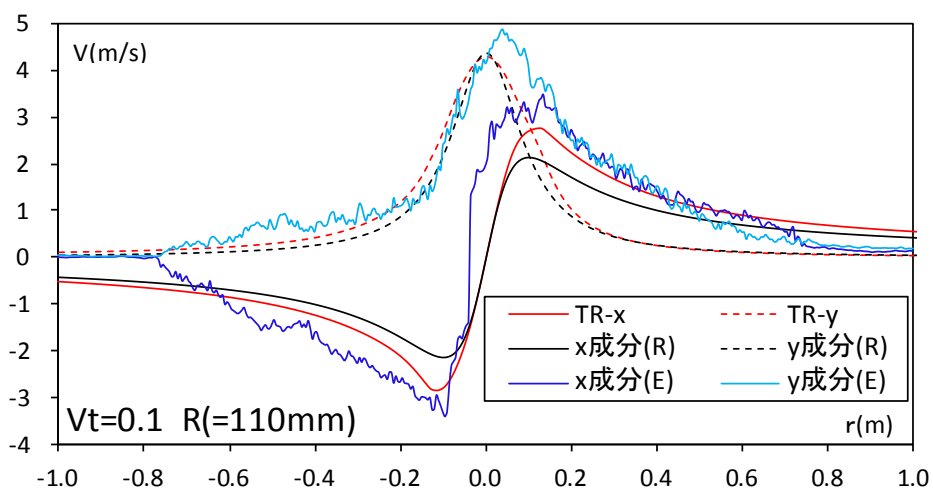
このように、W.Kモデルは竜巻を3次元的に捉える事の出来るモデルであり、2次元的な風速成分、しかも接線風速成分しか算出出来ないRankine渦モデルの発展したモデルと考えられる。そこで、次に今回の実験結果についてRankine渦モデル及びW.Kモデルとの対応を評価する。x,y方向風速で比較した場合を移動速度0.1~0.4m/s別に図3.6.3~3.6.6に、風速・風向変化で比較した場合を同様に図3.6.7~3.6.10に示す。



(a) $-R$ における x,y 風速分布

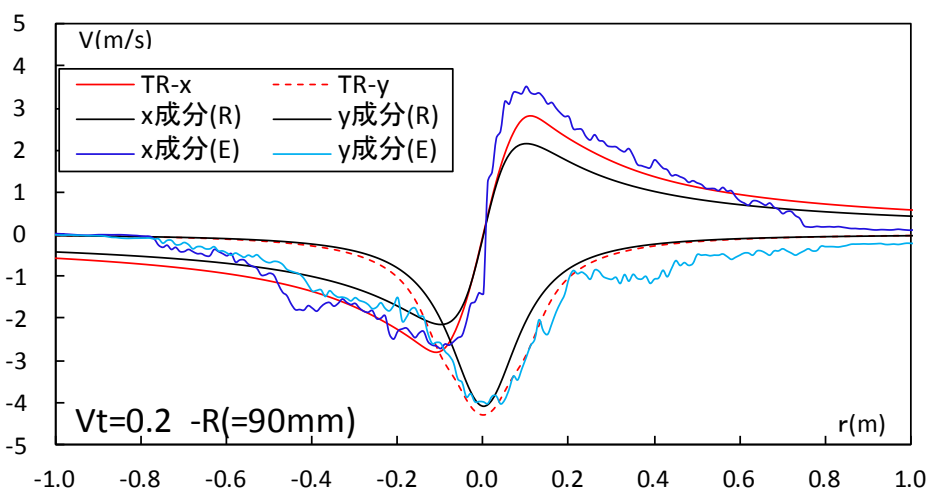


(b) C における x,y 風速分布

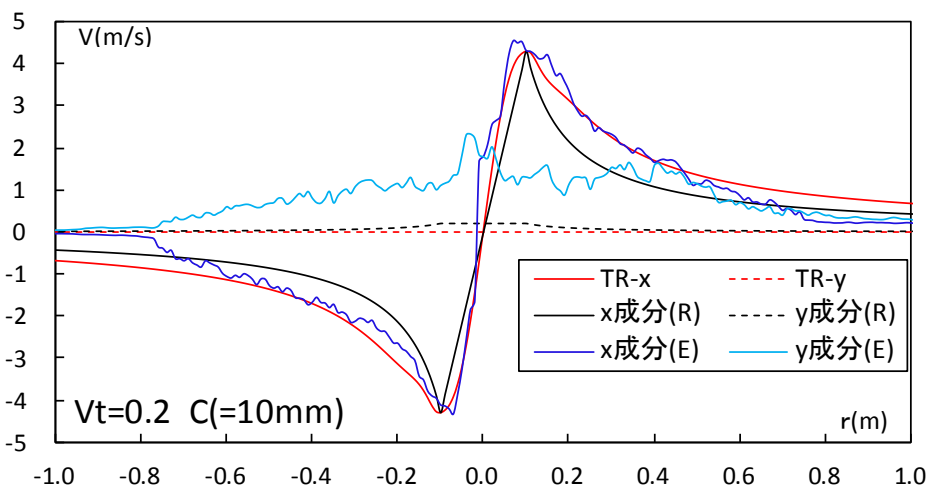


(c) R における x,y 風速分布

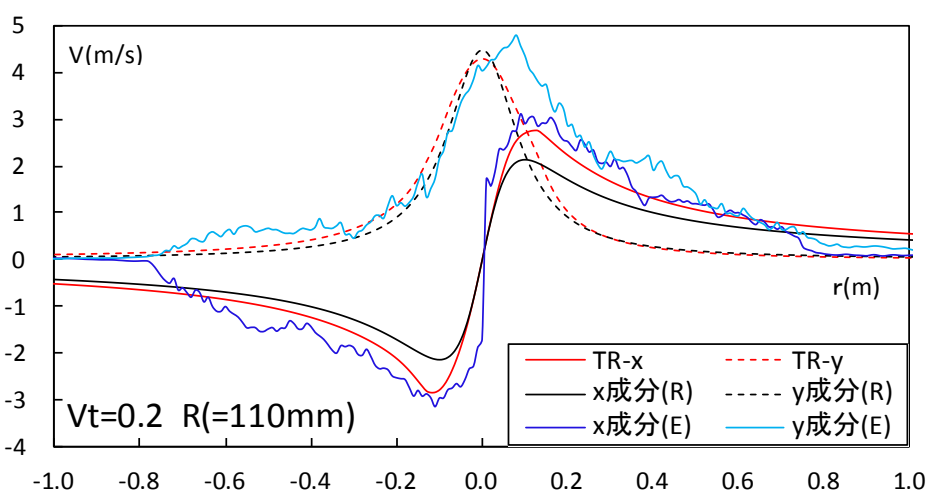
図 3.6.3 移動速度 0.1m/s の x,y 風速分布の実験値と理論値との対応



(a) $-R$ における x,y 風速分布

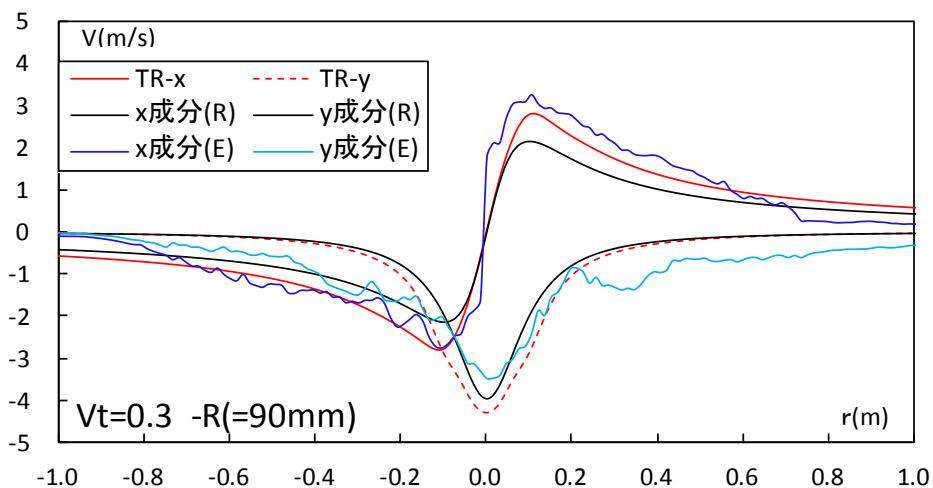


(b) C における x,y 風速分布

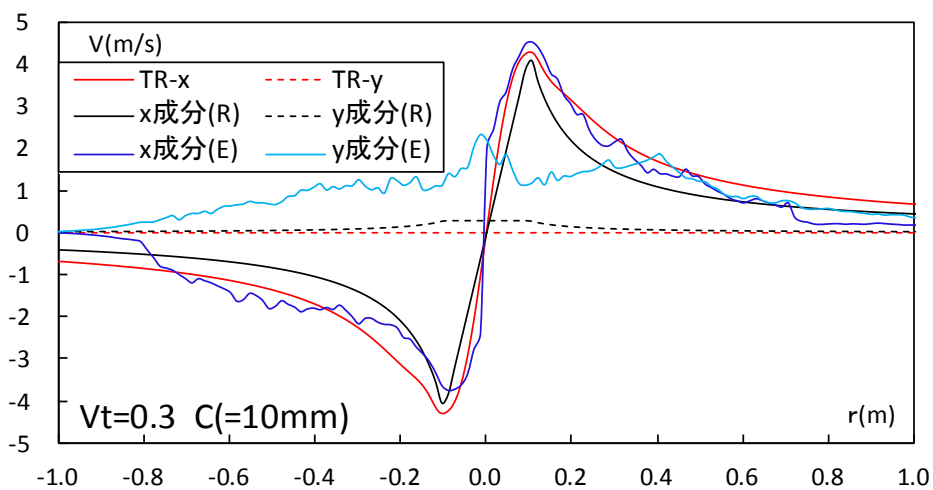


(c) R における x,y 風速分布

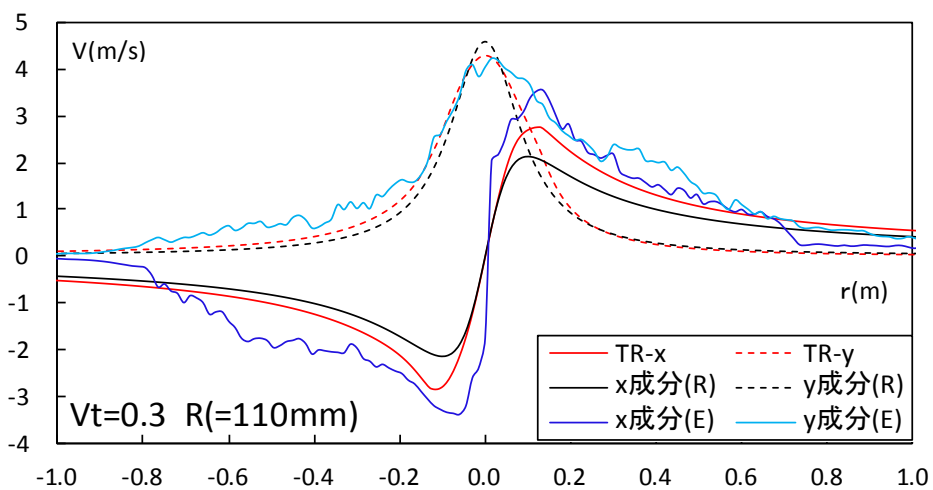
図 3.6.4 移動速度 0.2m/s の x,y 風速分布の実験値と理論値との対応



(a) -Rにおける x,y 風速分布

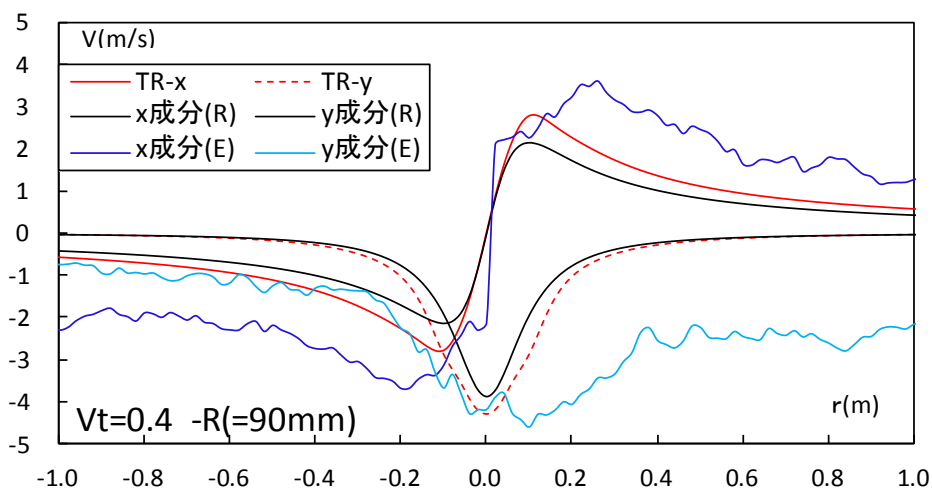


(b) Cにおける x,y 風速分布

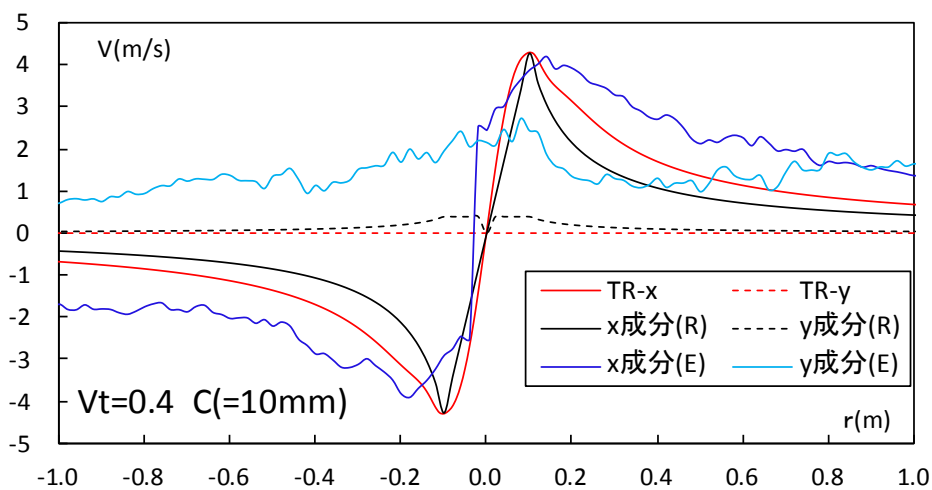


(c) Rにおける x,y 風速分布

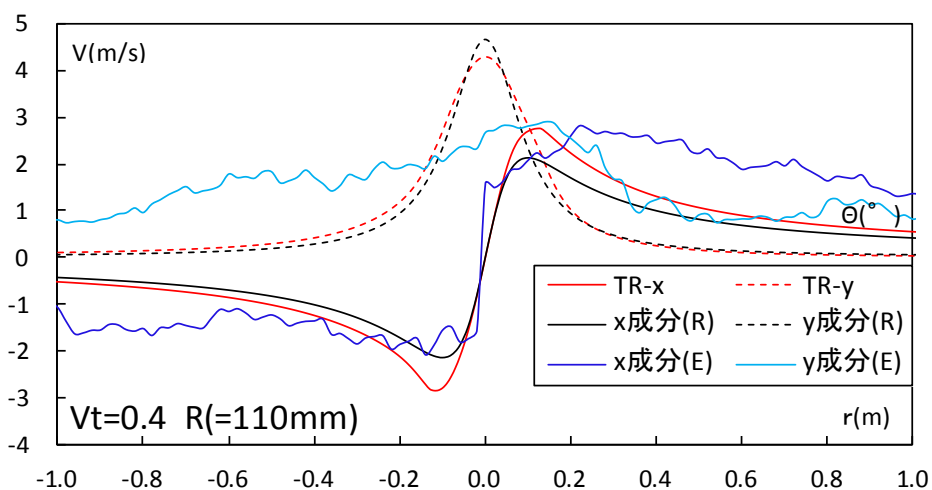
図 3.6.5 移動速度 0.3m/s の x,y 風速分布の実験値と理論値との対応



(a) $-R$ における x, y 風速分布

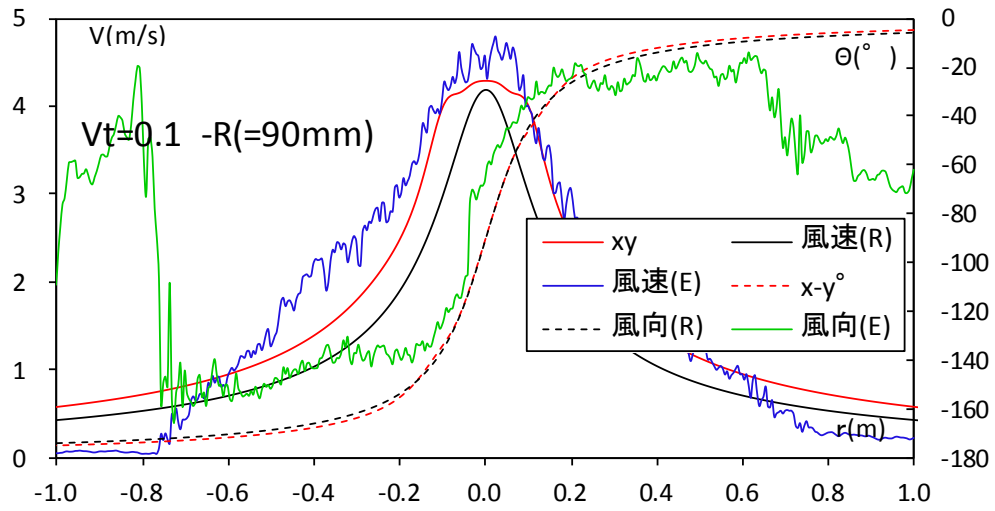


(b) C における x, y 風速分布

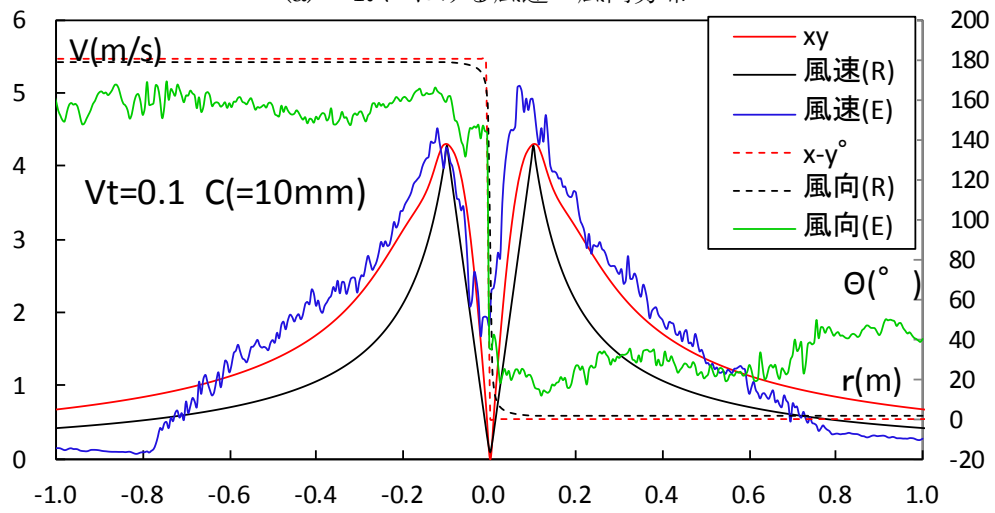


(c) R における x, y 風速分布

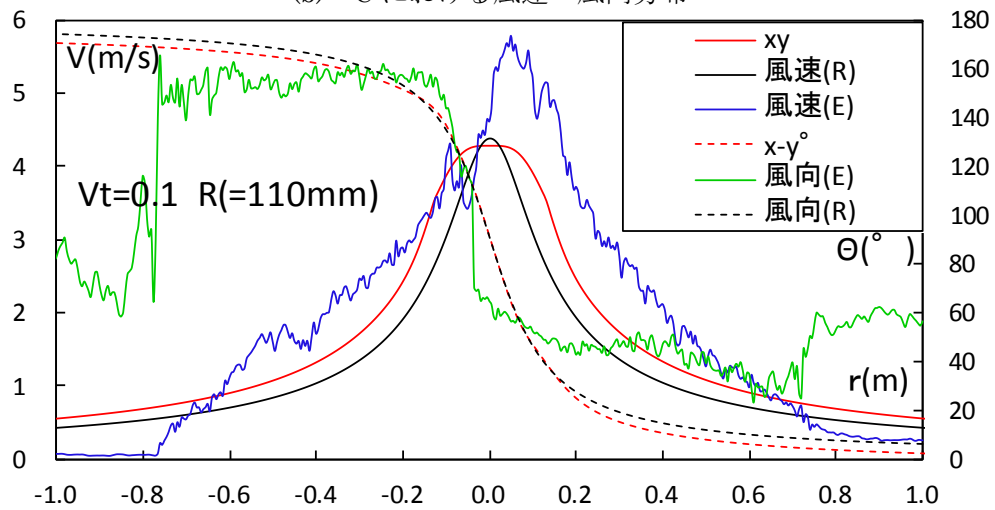
図 3.6.6 移動速度 0.4m/s の x, y 風速分布の実験値と理論値との対応



(a) $-R$ における風速・風向分布

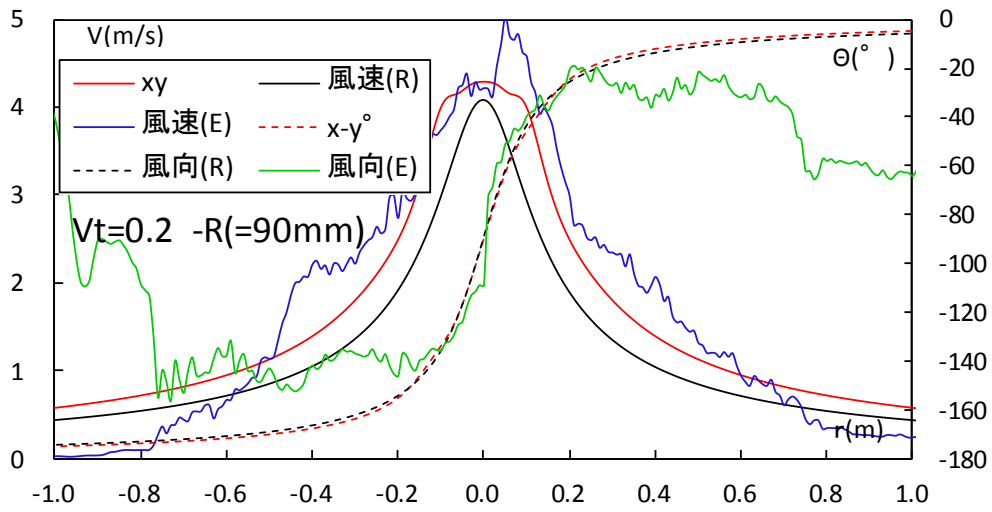


(b) C における風速・風向分布

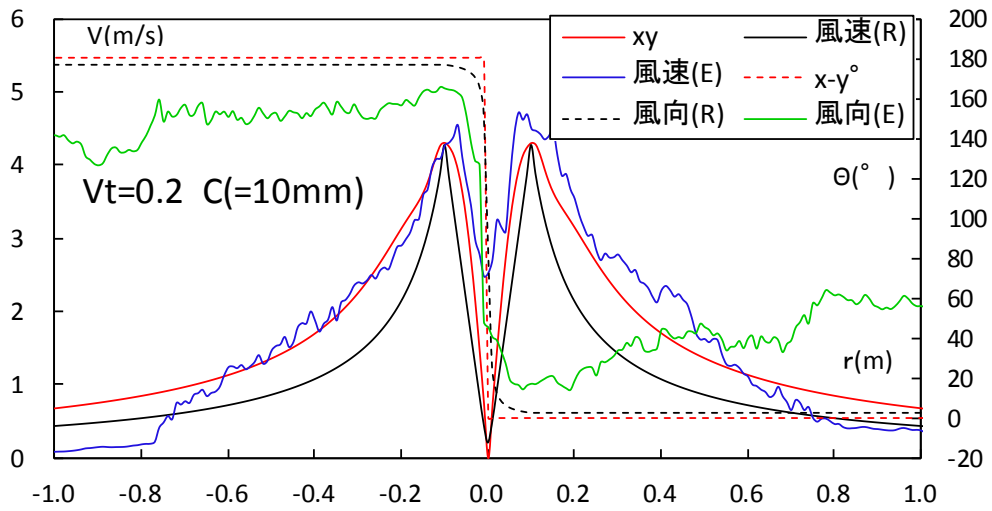


(c) R における風速・風向分布

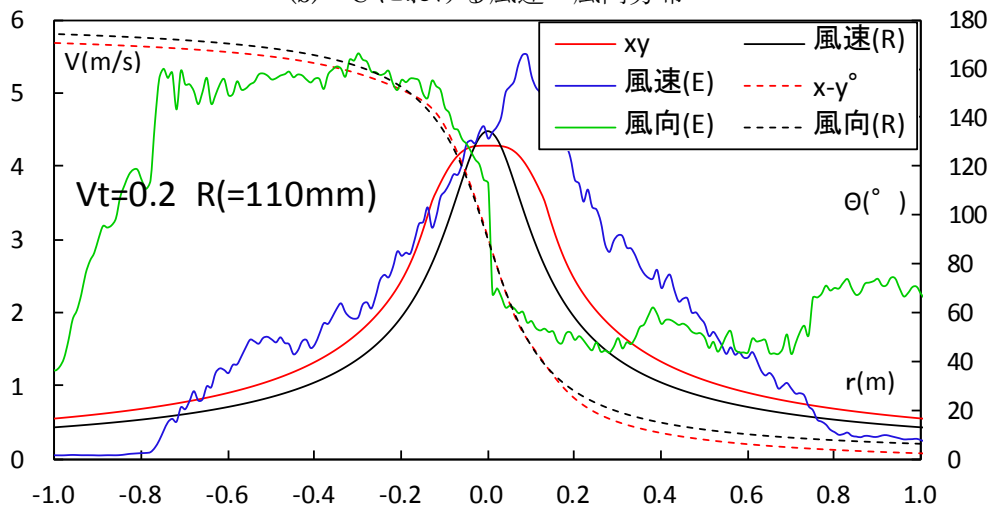
図 3.6.7 移動速度 0.1m/s の風速・風向分布の実験値と理論値との対応



(a) $-R$ における風速・風向分布

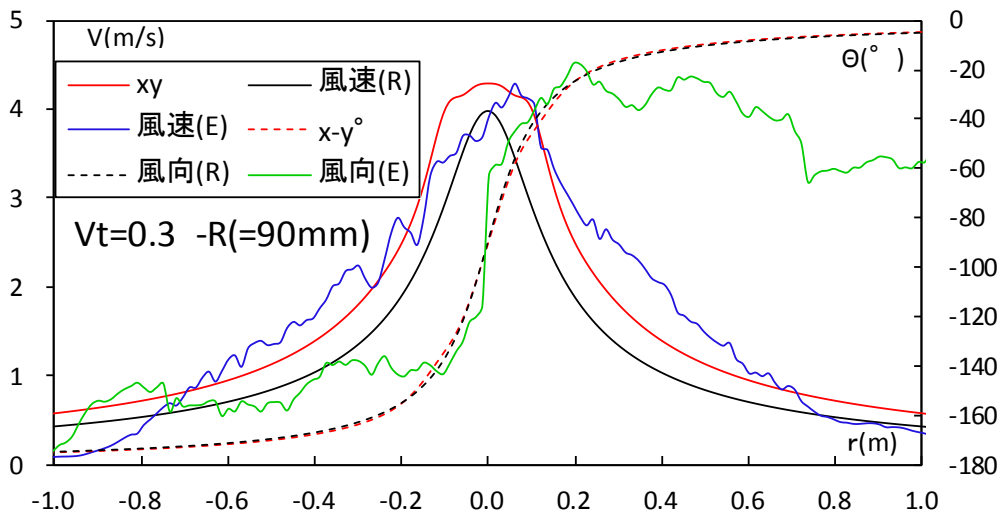


(b) C における風速・風向分布

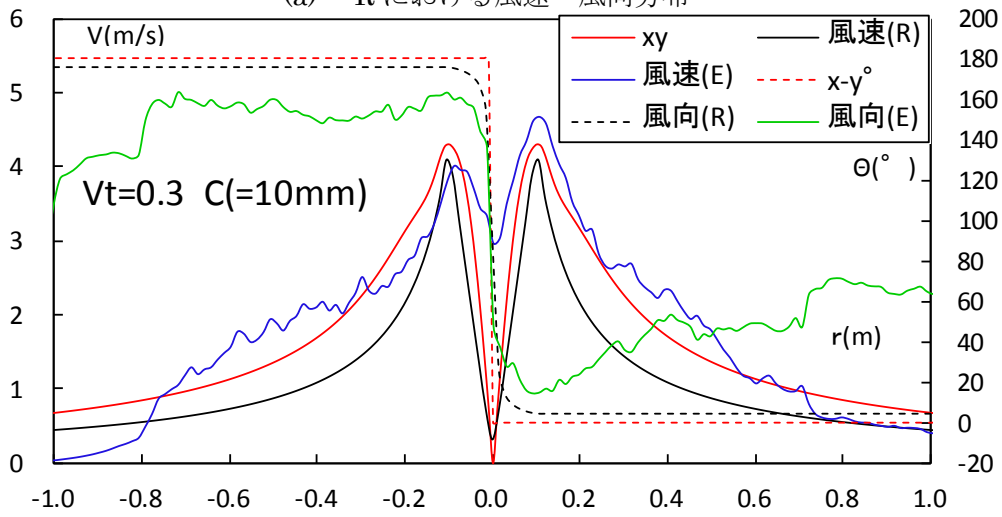


(c) R における風速・風向分布

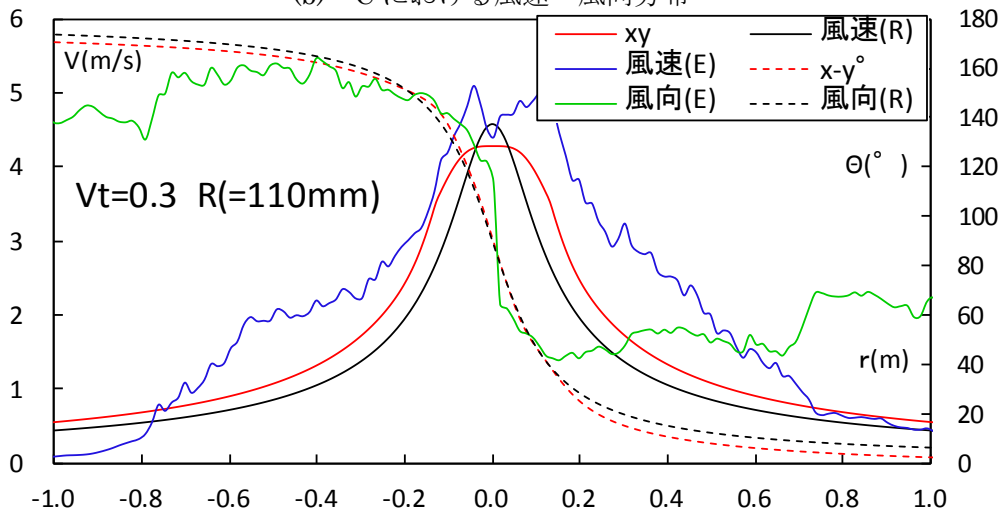
図 3.6.8 移動速度 0.2m/s の風速・風向分布の実験値と理論値との対応



(a) $-R$ における風速・風向分布



(b) C における風速・風向分布



(c) R における風速・風向分布

図 3.6.9 移動速度 0.3 m/s の風速・風向分布の実験値と理論値との対応

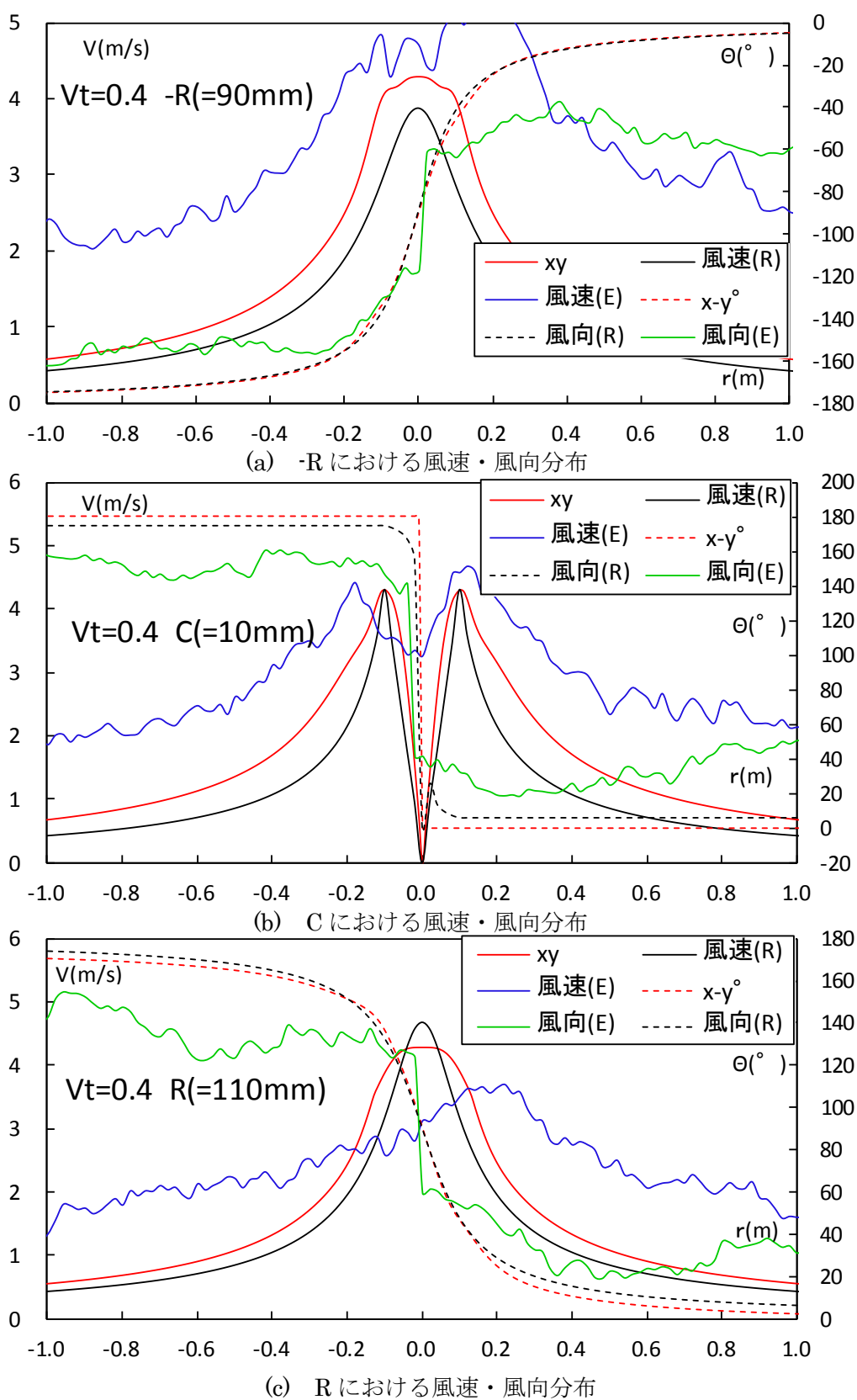


図 3.6.10 移動速度 0.4m/s の風速・風向分布の実験値と理論値との対応

風速・風向変化と理論式との対応を比較した結果から、Rankine渦モデルよりも、W.Kモデルの方がより実験値に近い風速を求められる事が分かる。これは接線最大風速となるコア半径周辺の風速変化が、Rankine渦モデルは実験値やW.Kモデルやモデルよりも急激であり、その変化の勾配がW.Kモデルの方がより緩やかである為である。しかしながら、W.Kモデルにおいてはその理論式の中に移動速度に対するパラメーターが無い為に、静止状態の渦の風速分布を表す事しか出来ない為に、“3.4移動速度による影響”で考察を行ったSwirl比による移動速度の風速分布への影響については全く対応できていない。その為に移動速度が0.3~0.4m/sになるに従って、理論式と実験値との乖離が大きくなってしまおうという点はRankine渦モデルと同様である。

風向分布については、Rankine渦モデル、W.Kモデル共にほとんど同じ値が算出されるが、実験値はそれほど大きな風向の変化はしておらず、中心付近での風向の急激な変化は対応しているが、渦中心から距離が離れるに従って、風向分布の実験値と理論式の差が大きくなってしまおう傾向が見られた。

実験値とRankine渦モデル、W.Kモデルのどちらがよく対応しているかという点については、風速を大き目に算出している点、渦の3成分を別個に算出できる点、パラメーターに高さを加えた3次元的な風速の分布を算出出来るという点からW.Kモデルの方がより適切に渦の風速分布を表すことができると言える。

先に述べたSwirl比による移動速度の影響など、W.Kモデルでも渦の風速分布を完全に表す事が出来ないという問題点は残るが、今後はW,Kモデルにより渦の風速分布に対する評価を行いたいと思う。

3. 7 第3章のまとめ

第3章では、つくばにある独立行政法人建築研究所保有の竜巻状風発生装置により、竜巻状の渦を生成することで、実際の竜巻の風速・風向の分布について、又、渦に対して移動速度がどのような影響を及ぼすのかを理論式と比較しながら検証した。その際に第2章で提案した設計用仮想竜巻モデルのパラメータを使用することにより、既往の研究とは違い、生成した渦が実現象と、どの様な関係があるかも考慮できるように配慮した。

【参考文献】

1. スワール比が竜巻状流れ場に及ぼす影響 “野田稔、長尾文明、山下翔平”
2. ラージ・エディ・シミュレーションによる竜巻状の渦を作る試み “丸山敬” 京都大学防災研究所年報 第51号B平成20年6月
3. 竜巻状気流発生装置の概要と基本的な気流特性 “喜々津一密” 100917竜巻研究会
4. 竜巻状気流発生装置による実験気流の基本特性 “喜々津一密、奥田 泰雄、河井 宏允、神田 順” 日本建築学会大会(関東)2011
5. 竜巻状気流発生装置の概要と基本特性 “喜々津一密” 2011年度風工学会
6. WKモデルのやつ
7. 竜巻下層構造と竜巻による飛散特性の実験的解明 “竹村早紀” 風工学会
8. Diwakar Natarajan, Horia Hangan “Large eddy simulation of translation and surface roughness on tornado-like vortices” ICWE
9. F.L.Haan Jr., A.M.ASCE; Vasanth Kumar Balaramudu; P.P.Sakar, M.ASCE “Tornado-Induced Wind Loads on a Low-Rise Building” JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING ; ASCE/JANUARY 2010

第4章-複数ファン風洞による

竜巻を想定した非定常気流の作成

Chapter.4

Reproduction of Non-Stationary Stream

Intended for Tornado by Multiple Fan Wind Tunnel

4. 1 複数ファン風洞の概要

本章では、第3章で竜巻発生装置を使用した実験で計測した竜巻を想定した渦の風速と方向の変化を規範として、複数ファン風洞により竜巻を想定した非定常気流の作成を行う。3列複数ファン風洞は、1列複数ファン風洞を改修する形で2010年7月に東京大学柏キャンパス新領域環境棟1Fの風洞実験室に設置されている。複数ファン風洞の概要を図4.1.1に示す。本風洞を使用した実験手法等は既往の研究¹⁾にならうものとする。

本風洞は、上流端に6行3列の計18個の小型ファンが並んでおり、全長6000mmの吹き出し式風洞である。入力電圧によって吸込み式風洞として使用も可能であるがある程度の改装が必要となる。吸込み型風洞としての性能については付録に示す。上流端のファンから測定胴へは鉛直方向に5/9の断面比で縮流され、各ファンの後ろには気流のねじれを防ぐためのストロー状の整流格子が設置してある。測定胴は、長さ3600mm×幅600mm×高さ600mmとなっており、図4.1.2のように風洞上流端を原点としたxyzの3次元座標系によって位置を表すこととする。風洞上部から取り付けられたトラバースによって、 $x=0\text{mm}\sim 3400\text{mm}$ 、 $y=60\text{mm}\sim 540\text{mm}$ 、 $z=30\text{mm}\sim 570\text{mm}$ の範囲で任意の位置で風速を測定することができる。また、気流の可視化実験にも対応できるように、縮流胴と測定胴の片面はアクリル板とガラス板が用いられている。図4.1.3に風洞の全体図を、図4.1.4に風洞上部のトラバースを示す。また、図4.1.5に風洞の詳細図面を示す。また本研究における各種測定装置、システムは既往の研究¹⁾と全く同様の手法であるため以下該当部分を抜粋させて頂く。

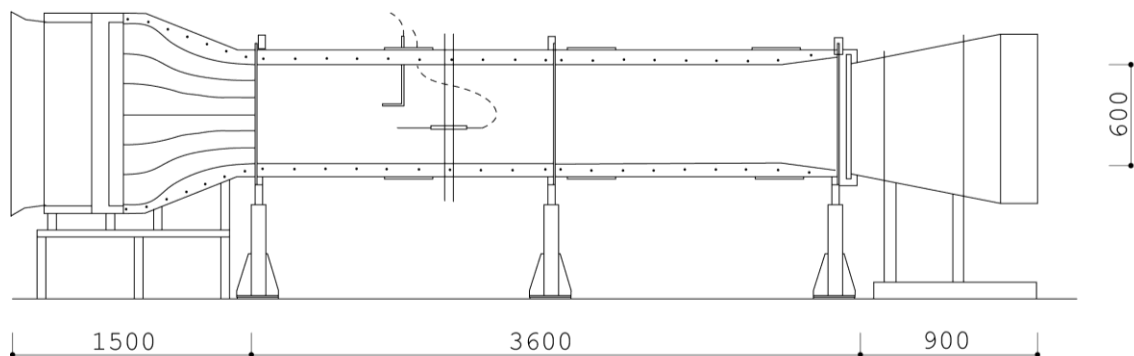


図 4.1.1 複数ファン風洞の概要

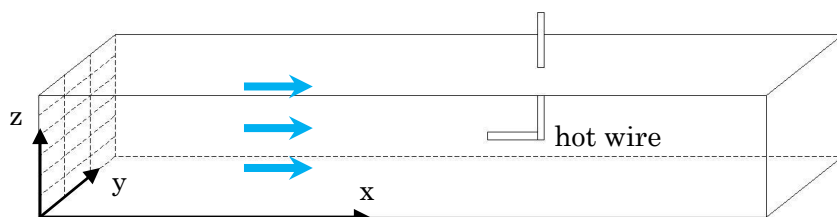


図 4.1.2 測定胴内の座標設定図



図 4.1.3 複数ファン風洞の全体図



図 4.1.4 複数ファン風洞上部のトラバース

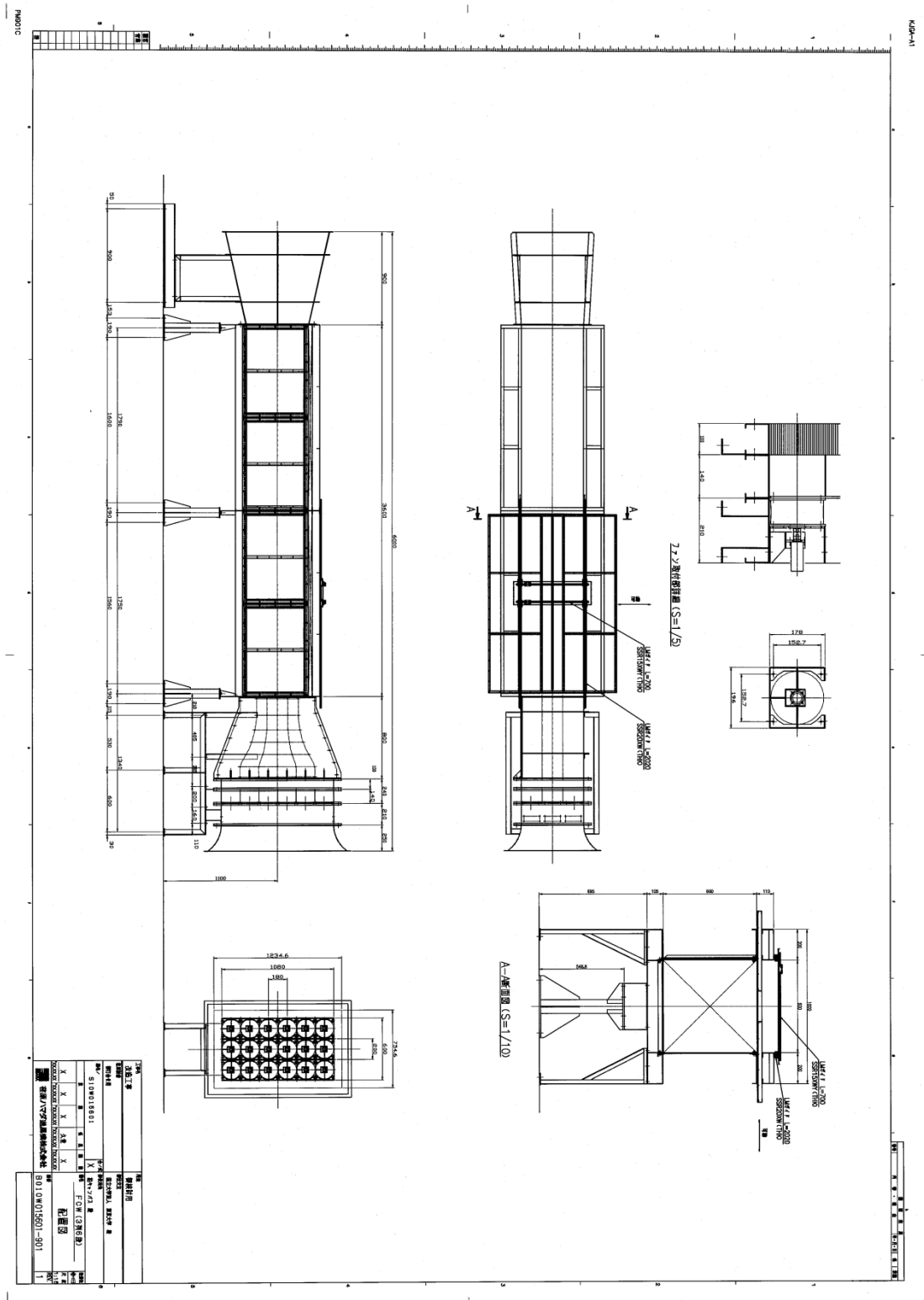


図 4.1.5 風洞の詳細図面

本風洞の18個のファンの写真を図4.1.6に示す。ファンの並びは上から順番に1段目、2段目、…、6段目、また、y方向に小さいものから順番に1列目、2列目、3列目とし、それぞれa段b列のファンをch(a,b)と呼ぶことにする。

各ファンの駆動に用いたACサーボモータとファンの諸性能を表4.1.1に示す。これらの機器は1列複数ファン風洞から流用したものと、新しく追加したものとで混成されている。ファンの回転数は0~3000r/minの範囲で、各ファンについて独立に制御することができる。

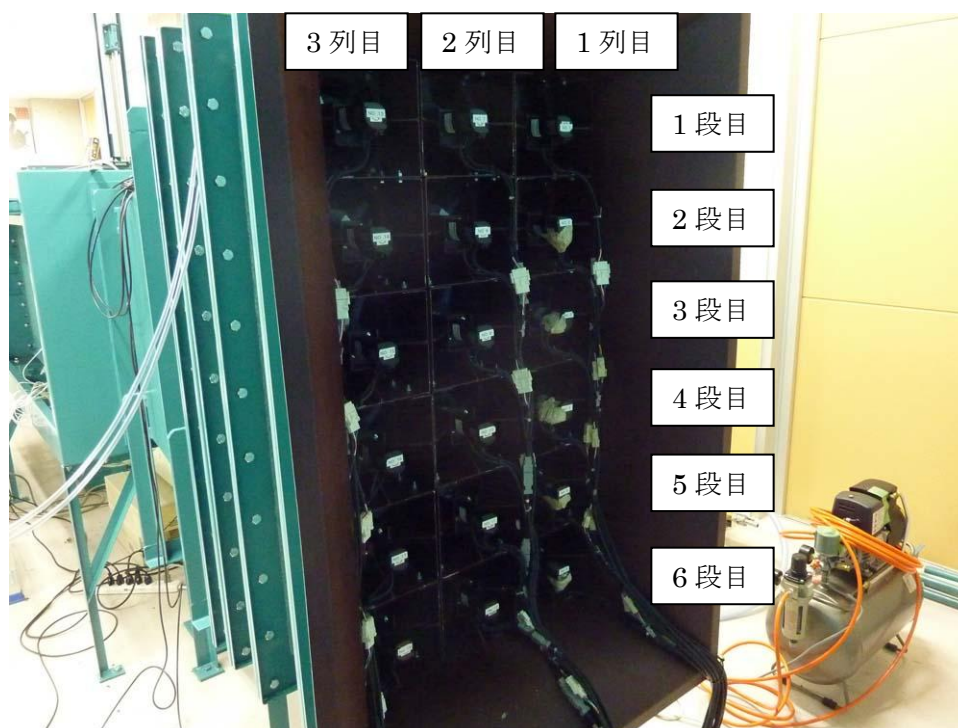


図 4.1.6 複数ファンの様子

表 4.1.1 ACサーボモータとファンの諸性能

ファン	
形式	2段羽タイプ
直径	180mm
最大風量	11.2m ³ /mm
最大静圧	28.0mmAq
騒音	65db

ACサーボモータ	
定格出力	100W
定格トルク	0.318Nm
瞬間最大トルク	0.960Nm
トルク定数	0.156Nm/A
定格回転速度	3000r/min
最高回転速度	4500r/min
機械的時定数	0.6ms
電氣的時定数	1.6ms

測定制御システムについて

ファンの制御は制御用のコンピュータ上のプログラム（図4.1.7）を用いることで行われる。このプログラムでは、事前に作成したcsvファイルを読み込むことで、それぞれのファンについて、各時点におけるファンの回転数を任意に設定することが可能である。csvファイルは-1~1の数値によって構成され、その数値にプログラム上で与える数値Vlt0を掛け合わせることで、それぞれのファンに対する入力電圧が決定される。ファンの回転数の0~5000r/minに対して、プログラム上の入力電圧0~10vが対応し、かつ逆回転をさせることも可能となっている。ただし、実際のサーボモータの定格は3000r/minであり、安定性の保証された実験は0~6vの入力の時に行えるといえる。

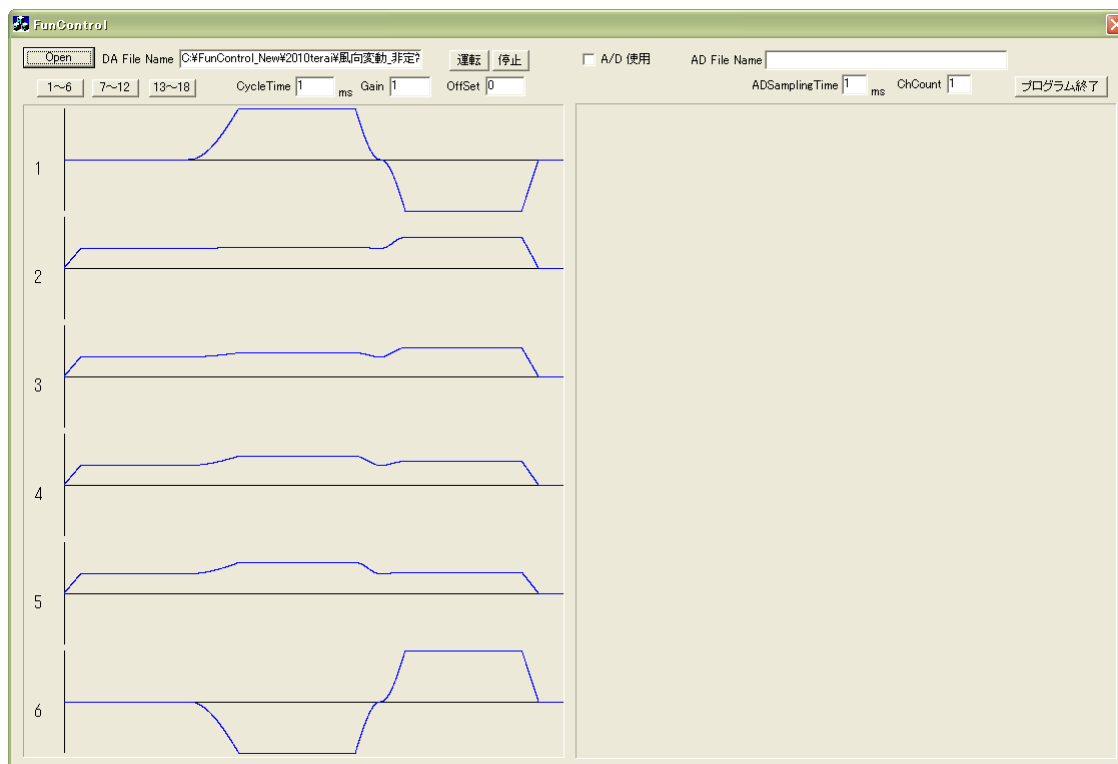


図 4.1.7 複数ファン制御プログラムの様子

風速測定装置について

風速の測定は図4.1.8のように機器を設置して行う。各測定機器の詳細を表4.1.2に示す。本研究では風速を2次元的、あるいは3次元的に計測する必要がある。そのため、風速の測定を行う際には、ファン制御用のコンピュータの他に、もう一台のコンピュータを用意し、それにx型プローブに対応した熱線風速計を接続することで風速を測定する。この際、x型熱線風速計の校正を行うため、風洞内の風速を事前に知る必要がある。そのため、ピトー管を用いて全ファンへ一定値を入力した時の風速を事前に測定しておき、そのデータを用いて熱線風速計の校正を行っている。なお、以上の校正は全ファンへ同じ値を入力した時に、y方向及びz方向に風向が振れないと考えられる、 $y=300\text{mm}$ 、 $z=300\text{mm}$ の風洞中心部で行っている。

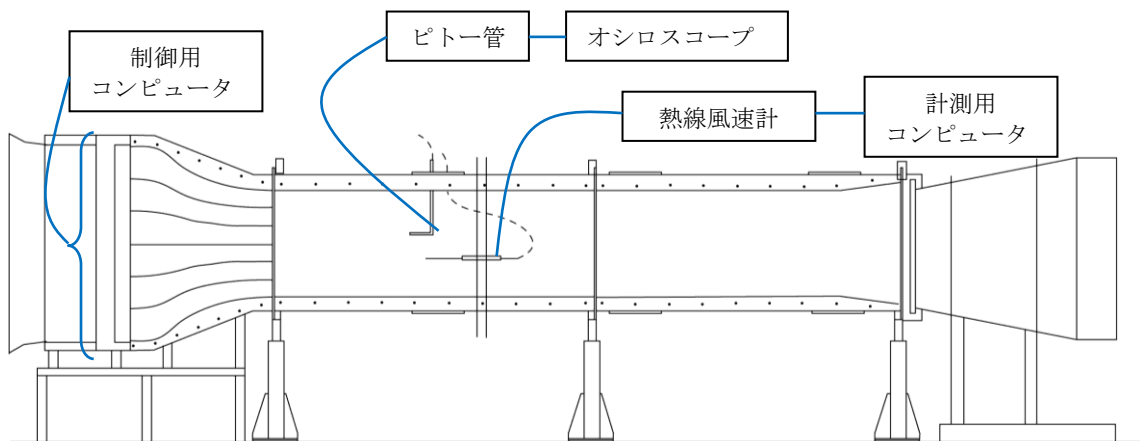


図 4.1.8 風速測定システム概要

表 4.1.2 風速測定機器

x型熱線風速計	KANOMAX MODEL 0252R-T5 Serial No.1542
I型熱線風速計	KANOMAX MODEL 0251R-T5 Serial No.5655
プローブサポート	KANOMAX Probe Support 0107
熱線風速計	KANOMAX MODEL IFA300 Serial No.334D
ピトー管	ツクバリカセイキ株式会社 F202 JIS型ピトー管
オシロスコープ	YOKOGAWA DL750 Scope Corder MODEL 701210
圧力計	風工房 DIGITAL MANOMETER MODEL PZ-77 Serial No.C-41
測定用コンピュータ	DELL OPTIPLEX GX260
制御用コンピュータ	DELL DIMENSION 9150

入力電圧と風速の関係

実際に各ファンを制御するには、時刻歴データを0～6vの電圧値に変換して制御を行う。まず、入力電圧に対する出力としての風速の関係を調べる。熱線風速計を(x,y,z) = (1000,300,300)に設置し、18個全てのファンに対する入力電圧vを0vから6.5vまで変化させながら風速を測定した。測定結果を図4.1.9に示す。入力電圧vと平均風速Vとの間には明確な比例関係が見えてとれ、1次近似によって以下の式が得られる。

$$U=1.64 \times Vt - 0.14$$

この式は神田²⁾による1列複数ファン試作風洞における測定結果と比較しても良好な結果が得られていることが確認できる。

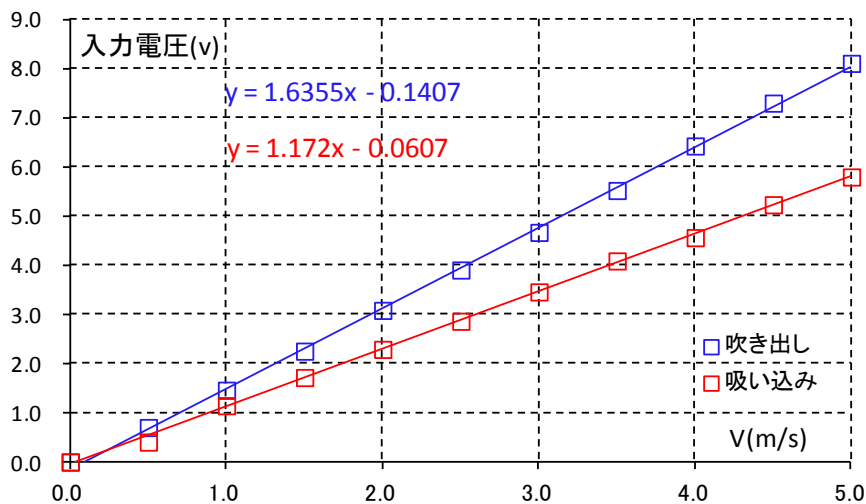


図 4.1.9 ファン入力電圧と風速の対応

4. 2 竜巻状風模擬気流の作成

複数ファン風洞により、第3章で計測した竜巻状渦の部分的な模擬を試みるに当たり、まず、ターゲットとする風速・風向変化のオーダーを決定する。竜巻状渦発生装置の実験結果より、すでに言及した、最も風速が大きく変化するある一地点を渦中心が通過する場合と、最も風速が大きく変化する渦右側面が通過する場合の2通りについて図4.2.1及び、図4.2.2に示す。その結果及び、複数ファンの入力電圧とファンとの性能上最大風速の50%程の風速1.5~2.0m/s、風向15~20°程度の変化とし、相似則上、変化時間は可能な限り短くする。

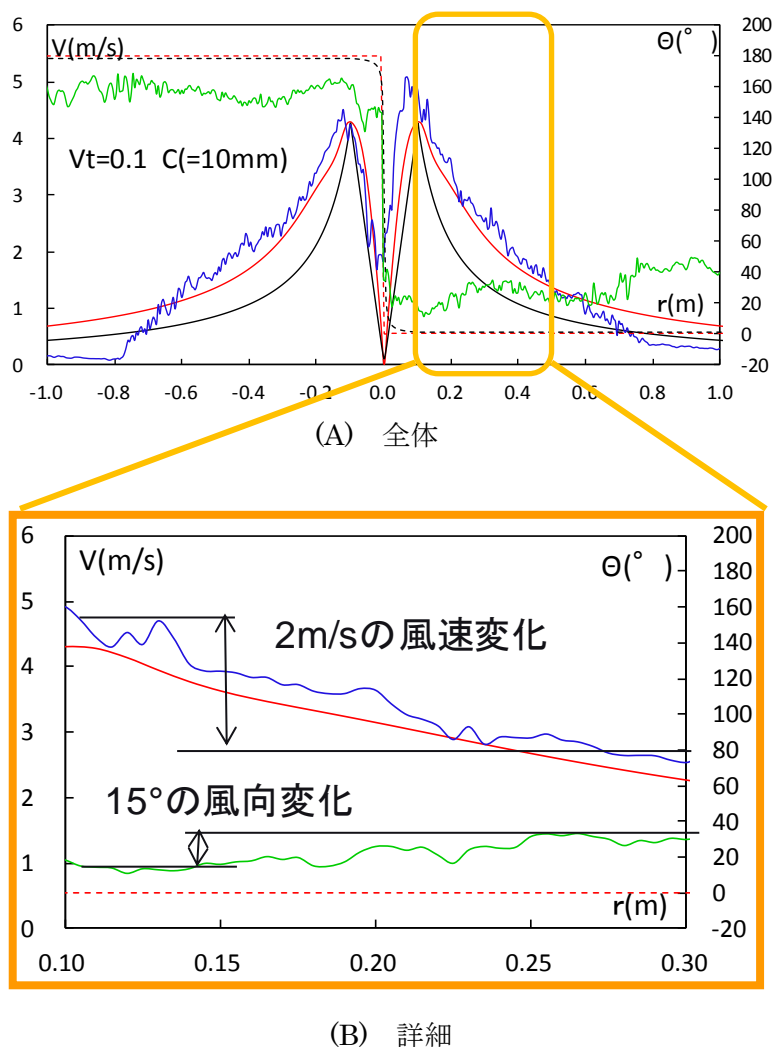


図 4.2.1 渦中心が通過する時の風速・風向変化の様子

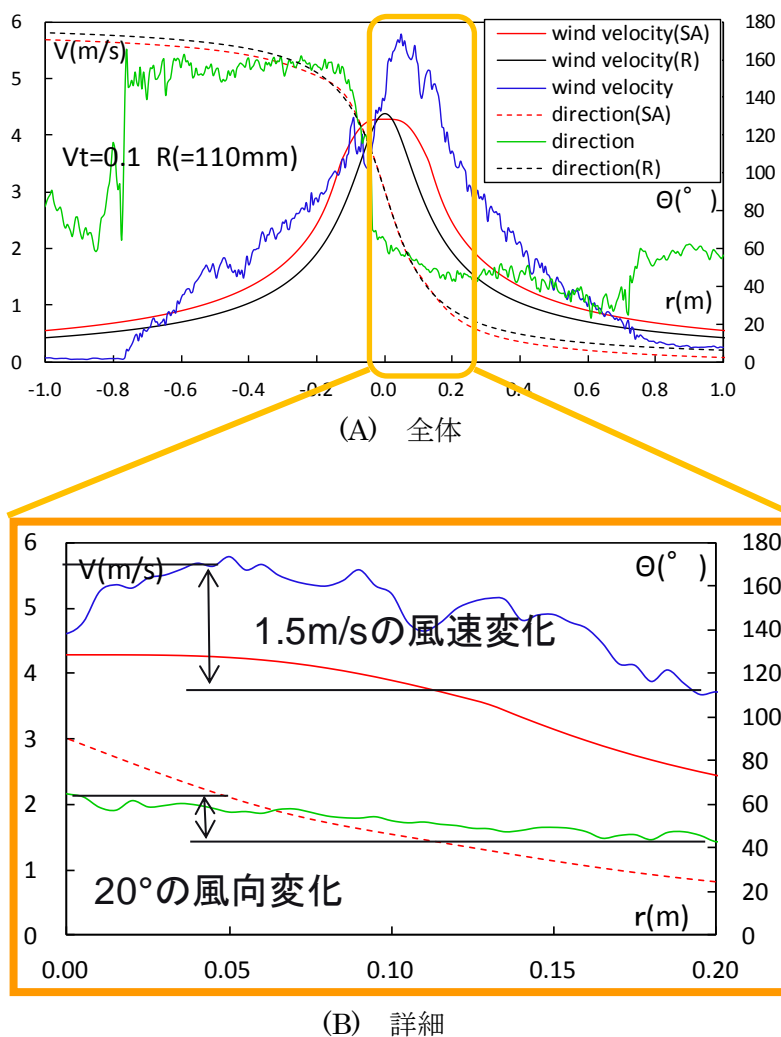
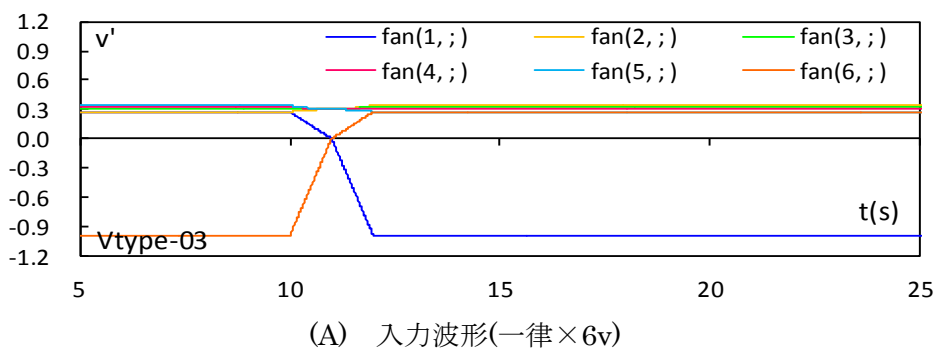
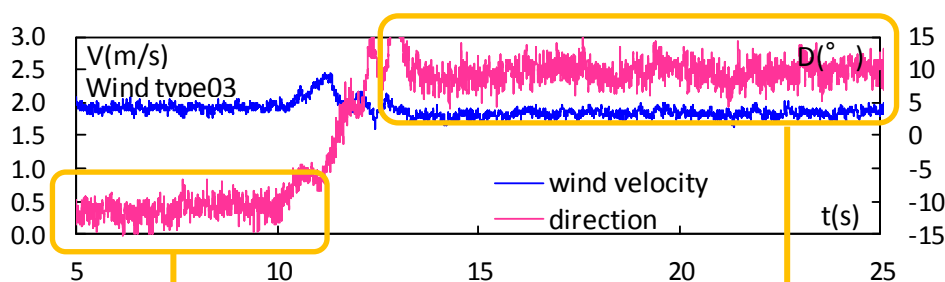


図 4.2.2 渦右側面が通過する時の風速・風向変化の様子

既往の研究では、風速一定・風向変化気流の作成が試行されており、2s間で風向が 20° 変化する波形が作成されているが、風向変化後に風向のオーバーシュートが出る事、及び風速に若干の上昇が見られる事から、本研究では、まず既往の気流の改良を行う事が必要となる。既往の気流と入力電圧波形を図4. 2. 3に示す。又、本研究における風向変化の正負についてのイメージ図を図4. 2. 4に示す。





(B) 測定気流

図 4.2.3 既往の作成波形と気流

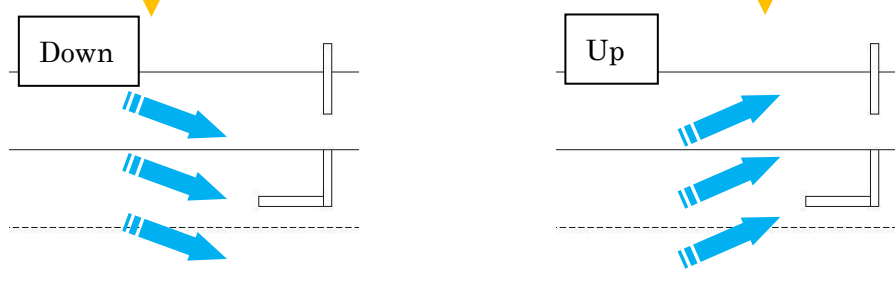
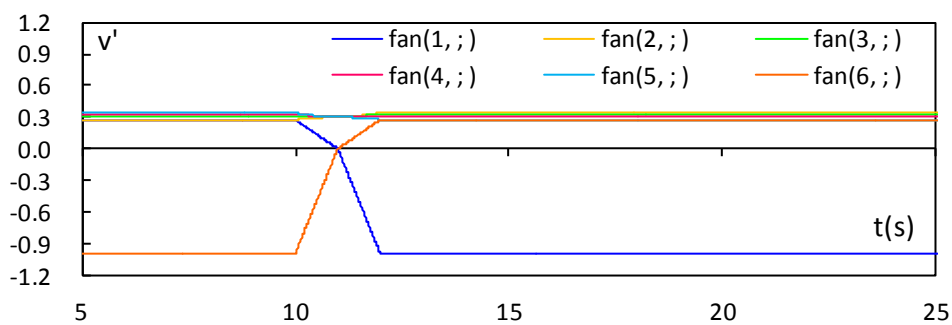


図 4.2.4 風向正負のイメージ図

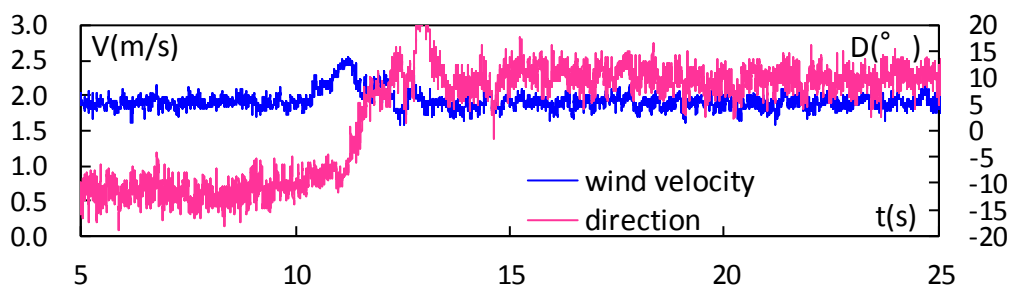
既往の気流を元に風向変化時間の短縮化を試みたが、それぞれのファンへの入力電圧と風向変化の対応について現段階では法則性が見いだせていない為に、様々な入力電圧の組み合わせを試みた(表4.2.1)。最終的にはおよそ1sでの変化が可能となったが、ここでは失敗した例について幾つか紹介する。波形改良例を入力電圧波形と気流それぞれについて図4.2.5から図4.2.21に示す。

表 4.2.1 波形改良例

波形番号	改良点
1	既往の波形
2	1の上下ファンの変化をcos形状にしたケース
3	2の上下ファンの交差点を左にずらした(0.5)ケース
4	1のy方向両端のファンの入力電圧を90%にしたケース
5	1のy方向両端のファンの入力電圧を80%にしたケース
6	1のy方向両端のファンの入力電圧を70%にしたケース
7	1のy方向両端のファンの入力電圧を60%にしたケース
8	1のファン6のみcos形状にしたケース
9	1のファン1のみcos形状にしたケース
10	8のファン6のみタイムラグを入れる(0.5s)ケース
11	8のファン6のみタイムラグを入れる(1.0s)ケース
12	9のファン6のみタイムラグを入れる(0.5s)ケース
13	9のファン6のみタイムラグを入れる(1.0s)ケース
14	1の変化後にファン6のみ強めに(1.2)吹かせるケース
15	1の変化後にファン6のみ強めに(1.4)吹かせるケース
16	2の変化後にファン6のみ強めに(1.2)吹かせるケース
17	2の変化後にファン6のみ強めに(1.4)吹かせるケース

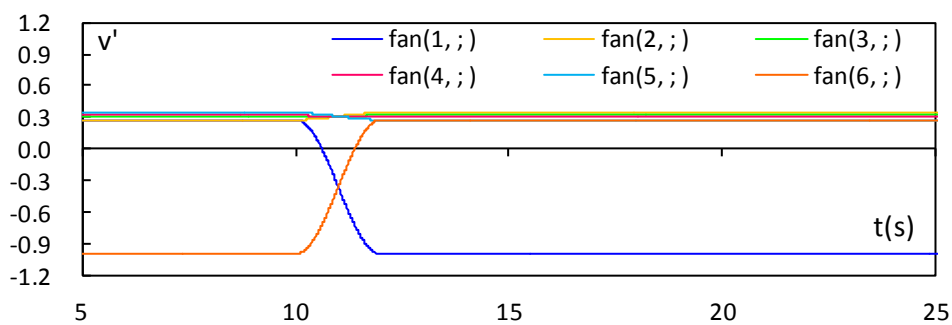


(A) 入力波形

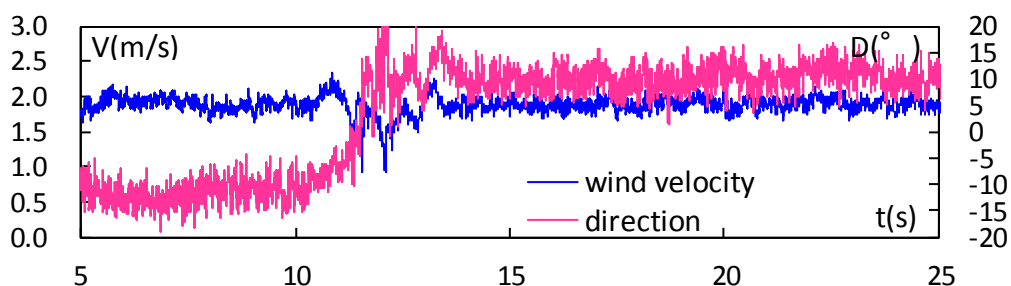


(B) 計測気流

図4.2.5 波形番号1

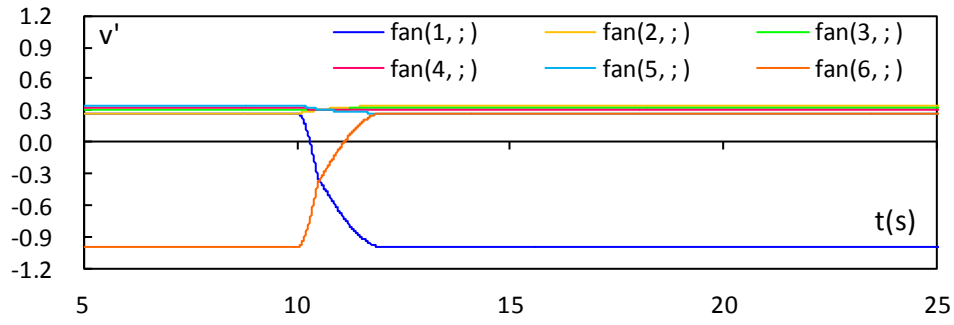


(A) 入力波形

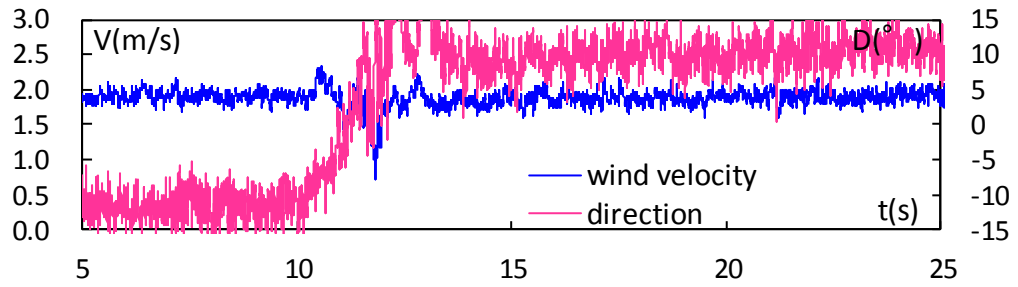


(B) 計測気流

図4.2.6 波形番号2

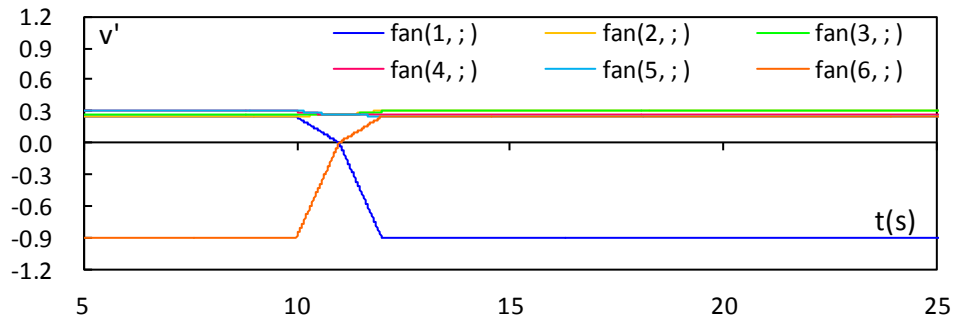


(A) 入力波形

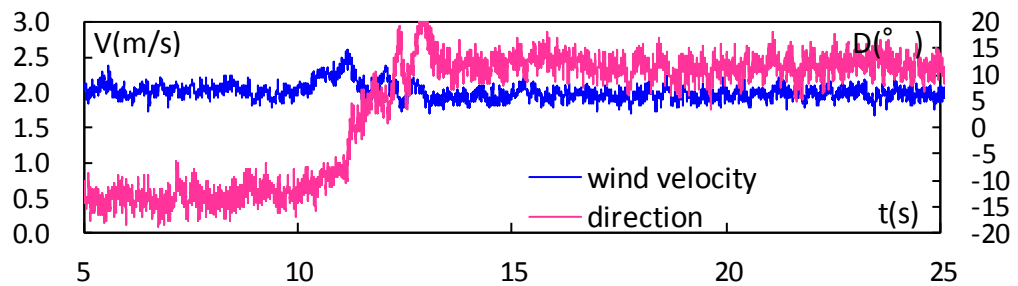


(B) 計測気流

図4.2.7 波形番号3

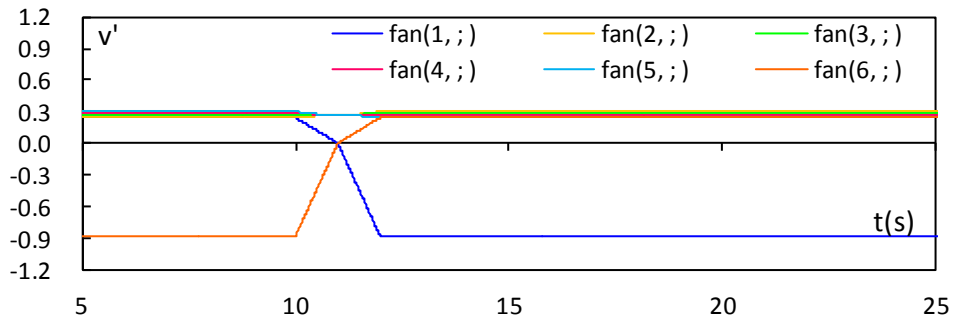


(A) 入力波形

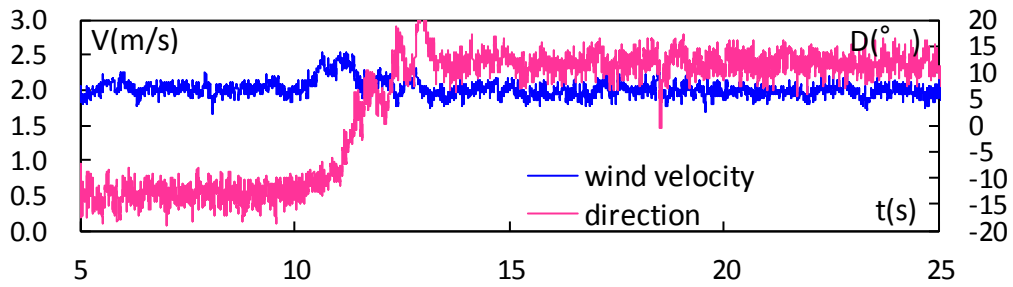


(B) 計測気流

図4.2.8 波形番号4

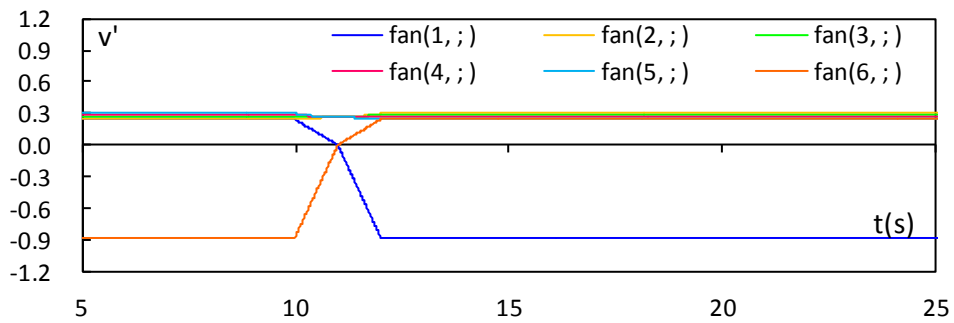


(A) 入力波形

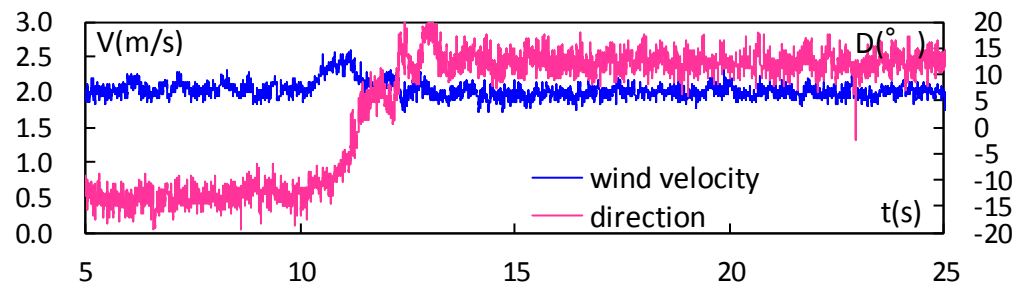


(B) 計測気流

図4.2.9 波形番号5

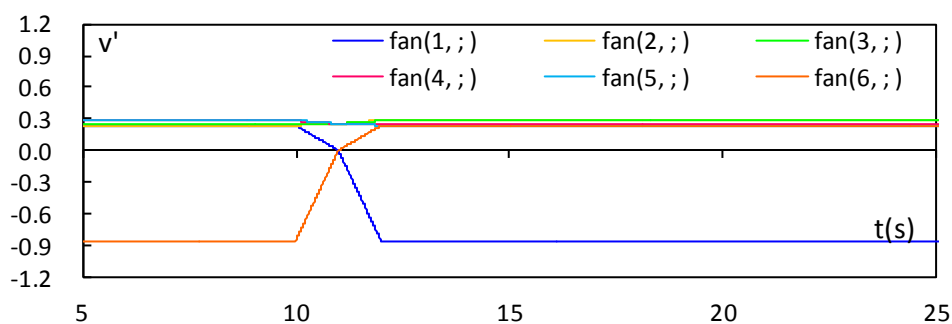


(A) 入力波形

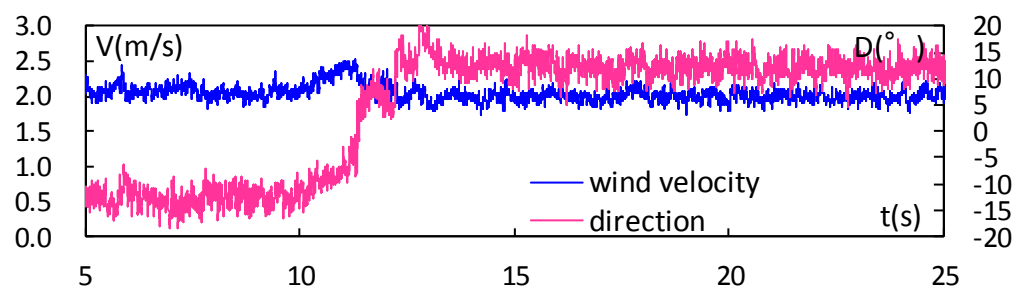


(B) 計測気流

図4.2.10 波形番号6

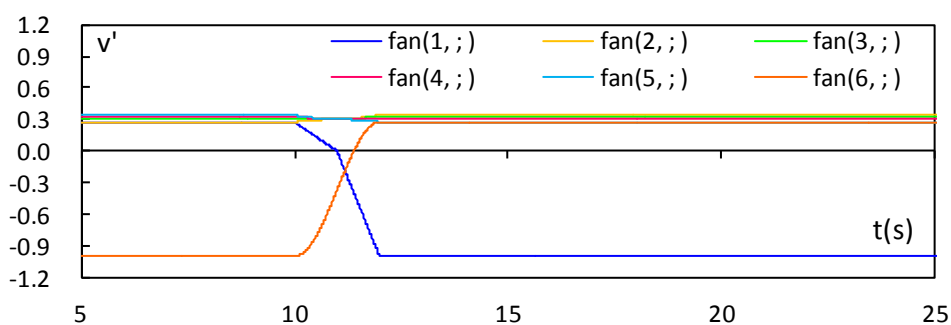


(A) 入力波形

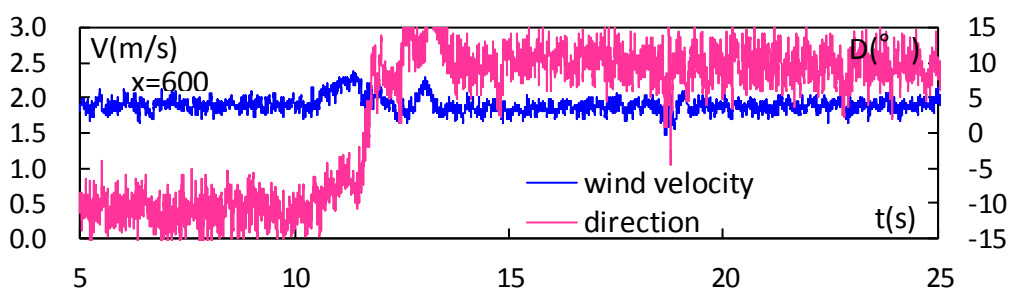


(B) 計測気流

図4.2.11 波形番号7

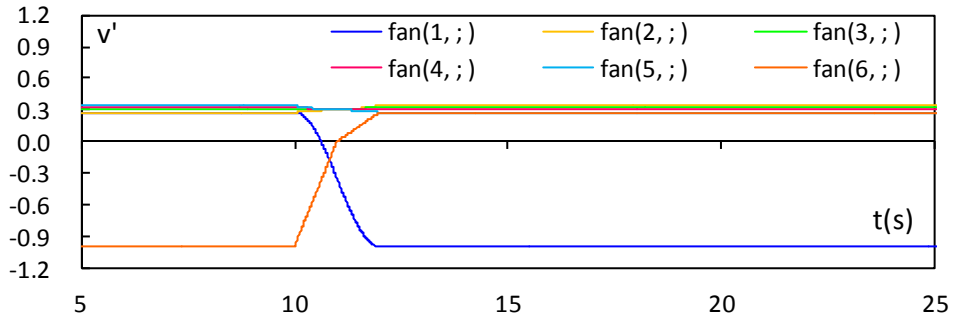


(A) 入力波形

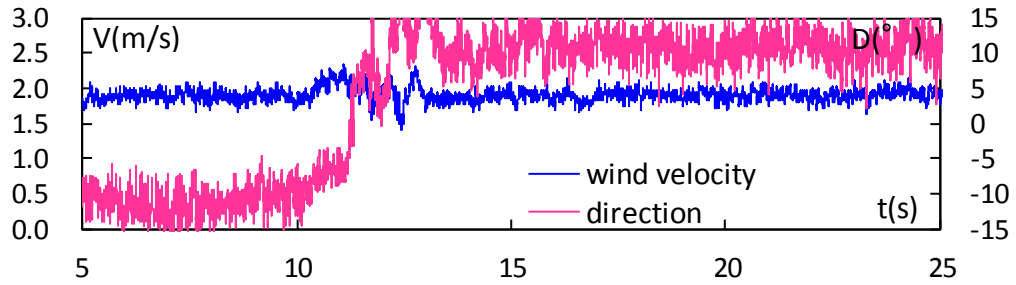


(B) 計測気流

図4.2.12 波形番号8

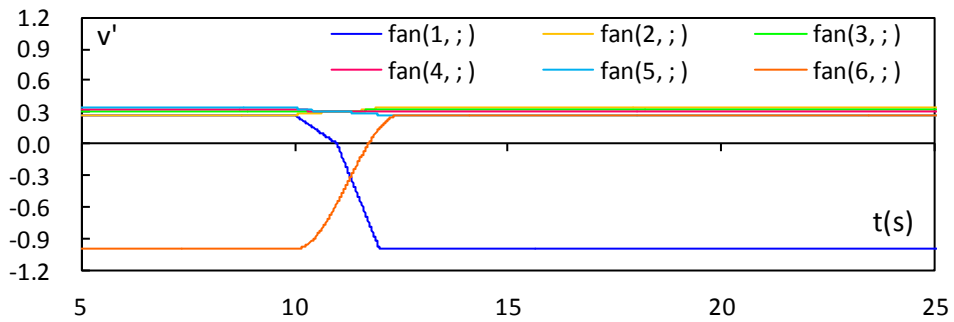


(A) 入力波形

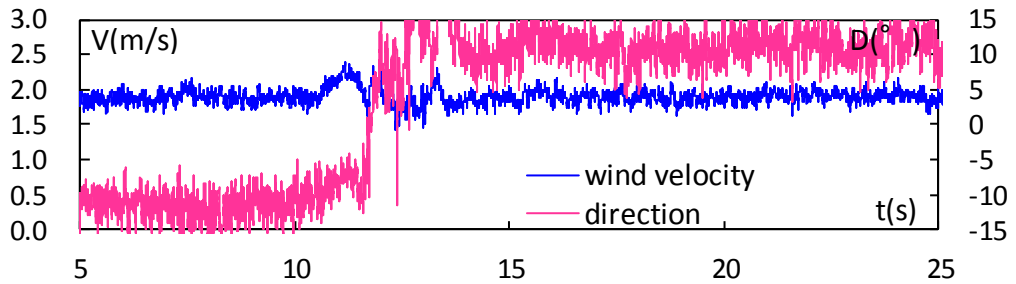


(B) 計測気流

図4.2.13 波形番号9

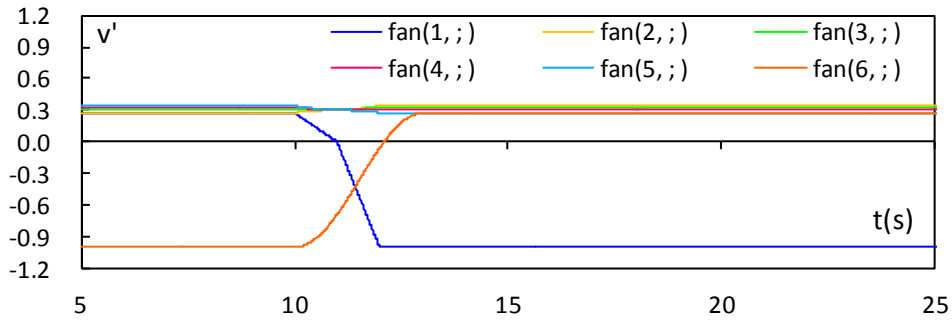


(A) 入力波形

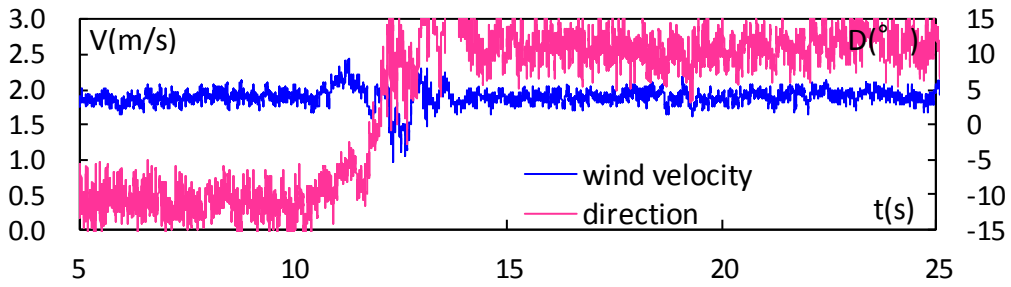


(B) 計測気流

図4.2.14 波形番号10

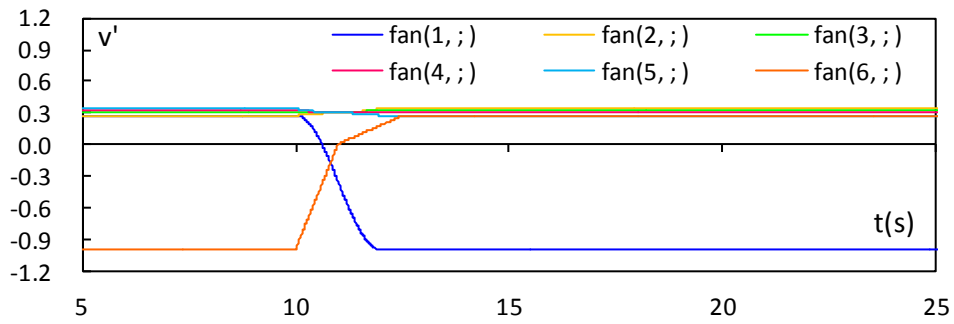


(A) 入力波形

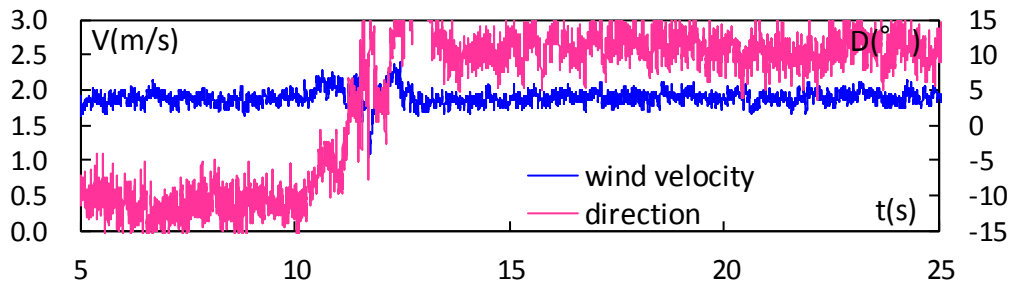


(B) 計測気流

図4.2.15 波形番号11

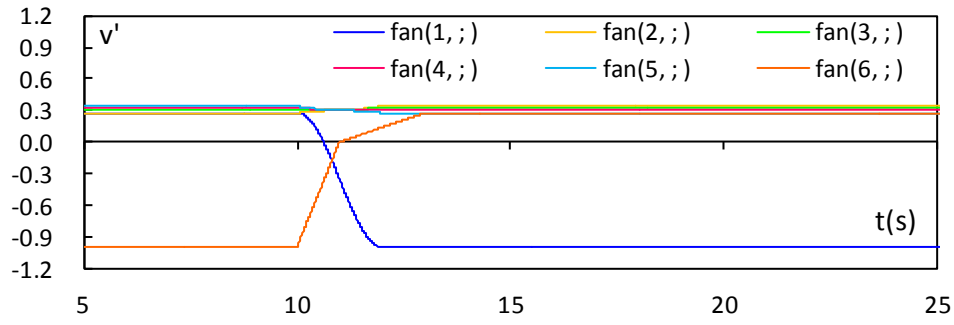


(A) 入力波形

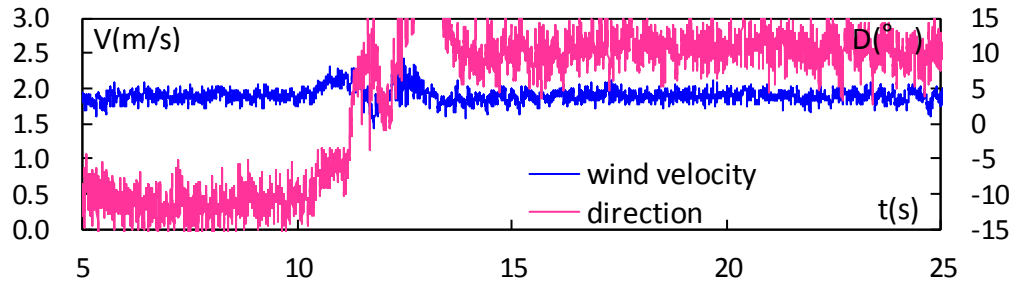


(B) 計測気流

図4.2.16 波形番号12

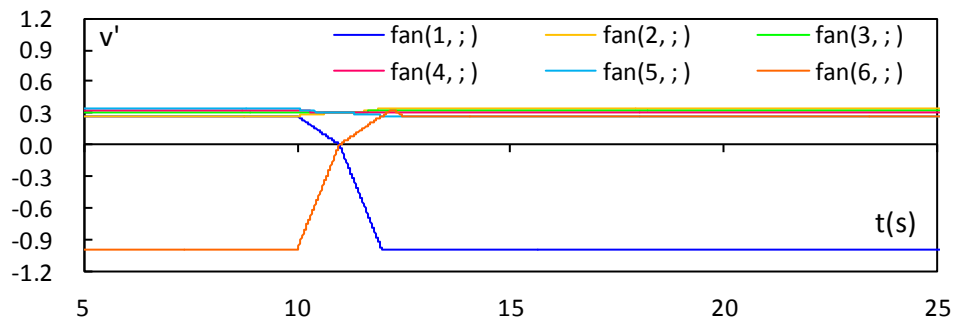


(A) 入力波形

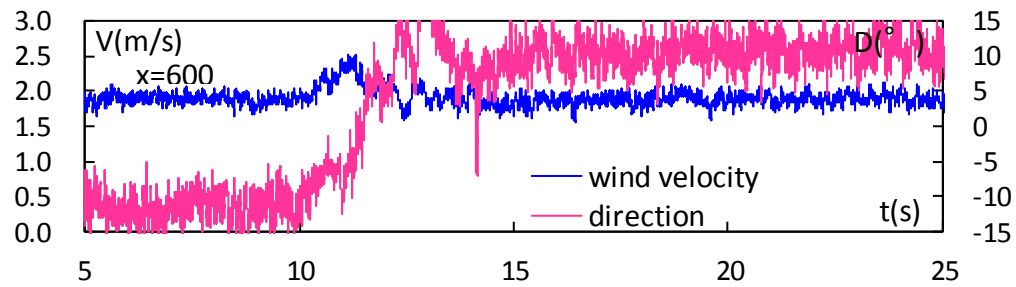


(B) 計測気流

図4.2.17 波形番号13

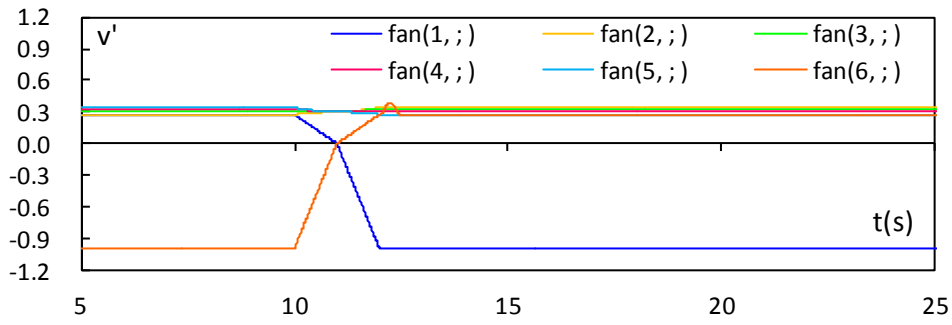


(A) 入力波形

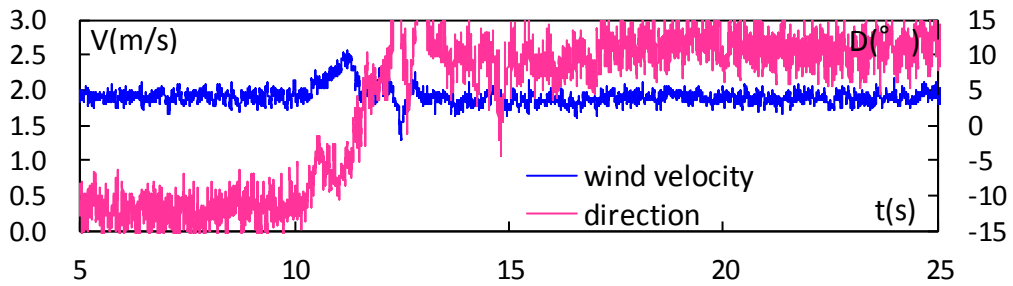


(B) 計測気流

図4.2.18 波形番号14

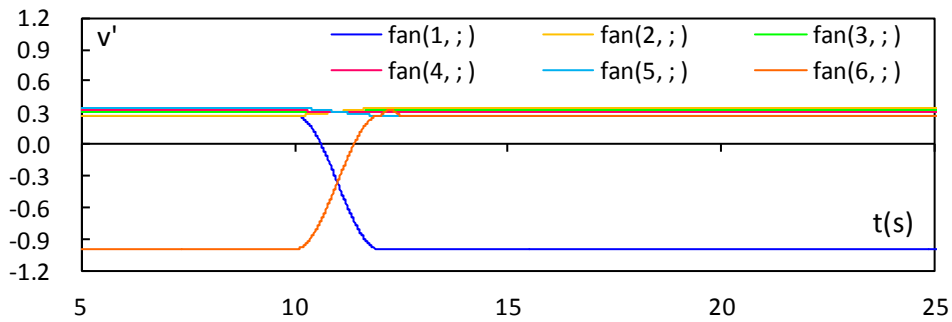


(A) 入力波形

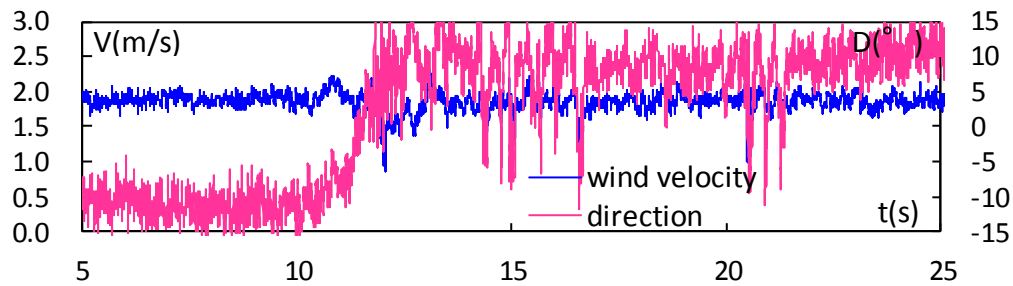


(B) 計測気流

図4.2.19 波形番号15

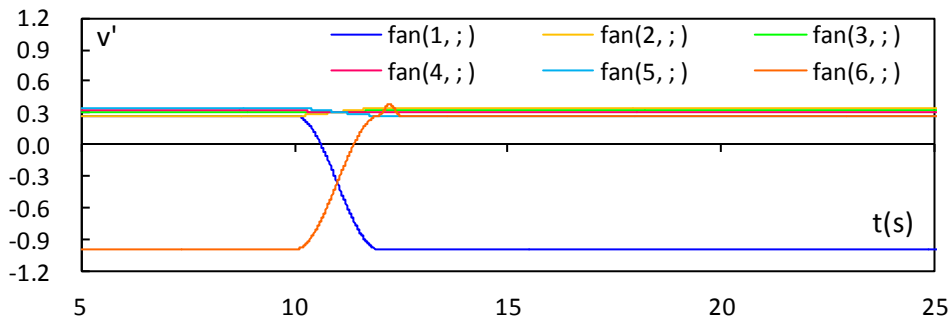


(A) 入力波形

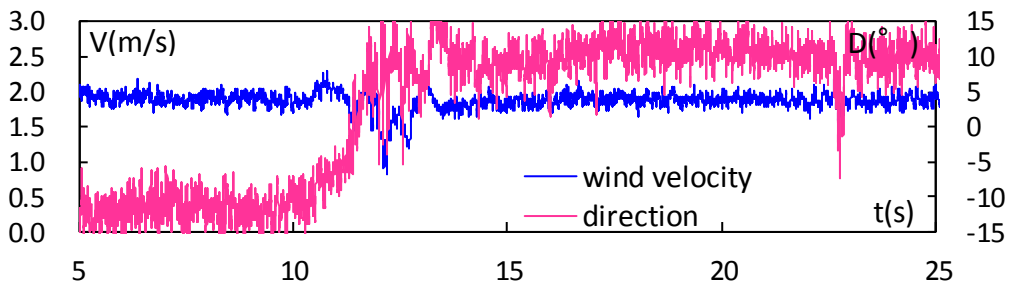


(B) 計測気流

図4.2.20 波形番号16



(A) 入力波形



(B) 計測気流

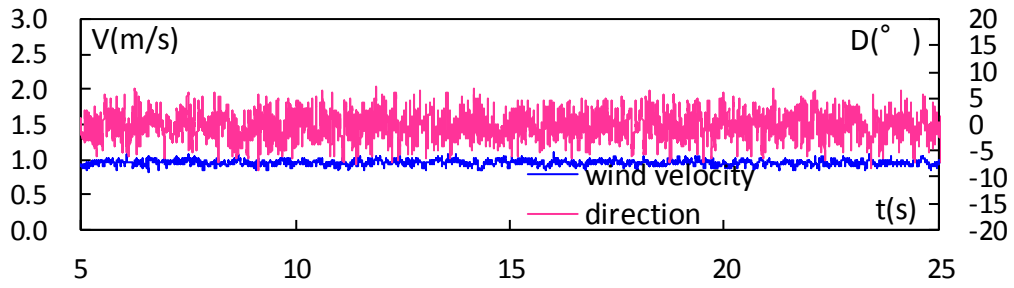
図4.2.21 波形番号17

これらの試行錯誤を経て、本研究で新たに作成した波形の入力電圧と測定気流及び、風圧実験で主に使用する波形を図4.2.22～4.2.30に、一覧を表4.2.2示す。

これらの波形は実験パラメータで触れるが、瞬間的な風速・風向の変化が構造物に対してどのような影響を及ぼすかを把握するために、風速・風向の変化の各組み合わせと風向変化を逆にした場合の計9タイプの気流により実験を行うものとする。

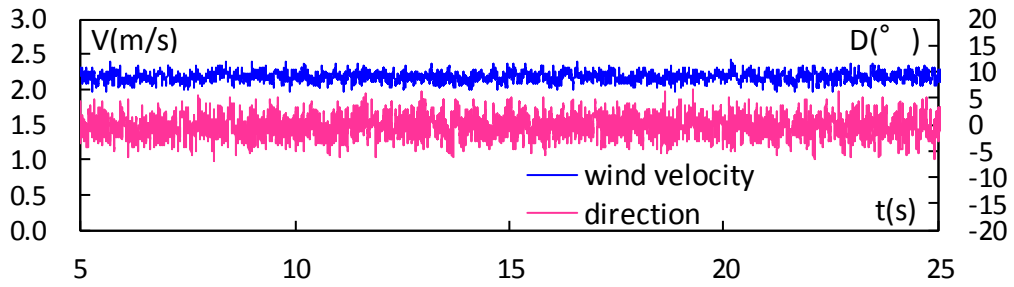
表 4.2.2 実験用波形

stream type	$\Delta U(\text{m/s})$	$\Delta D(^{\circ})$	$\Delta t(\text{s})$	remarks
st.1	-	-	-	stationary (0.9m/s)
st.2	-	-	-	stationary (2.18m/s)
st.3	1.23	-	1	velocity only
st.4	-	23.38	1	direction only
st.5	-	24.72	1	direction only (reverse)
st.6	1.53	21.95	1	vel & dir
st.7	1.16	18.81	1	vel & dir (reverse)
st.8	-	21.01	2	direction only
st.9	-	21.78	2	direction only (reverse)



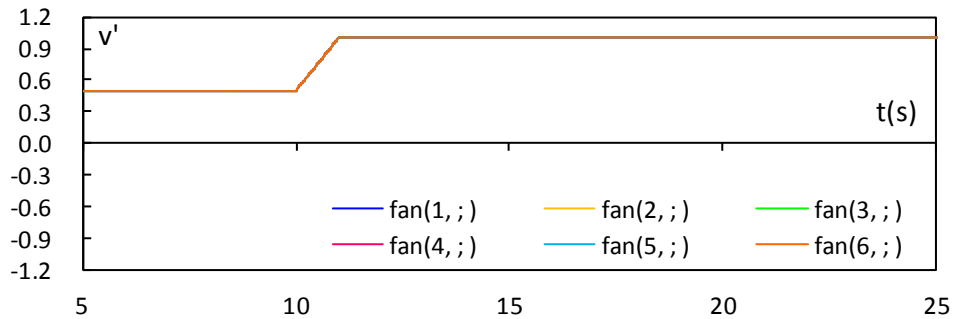
(A) 計測気流

図4.2.22 波形番号1

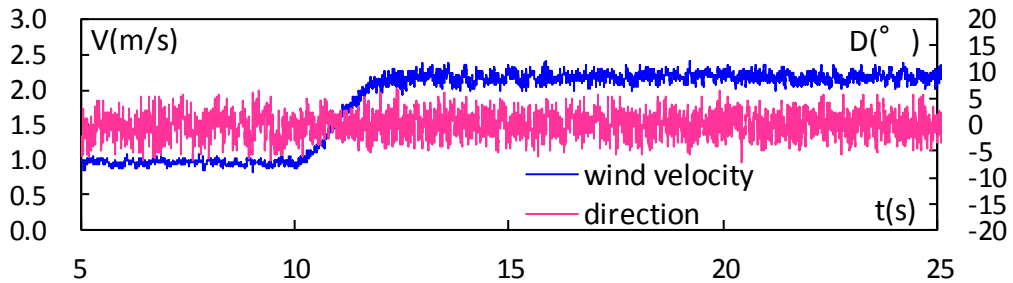


(A) 計測気流

図4.2.23 波形番号2

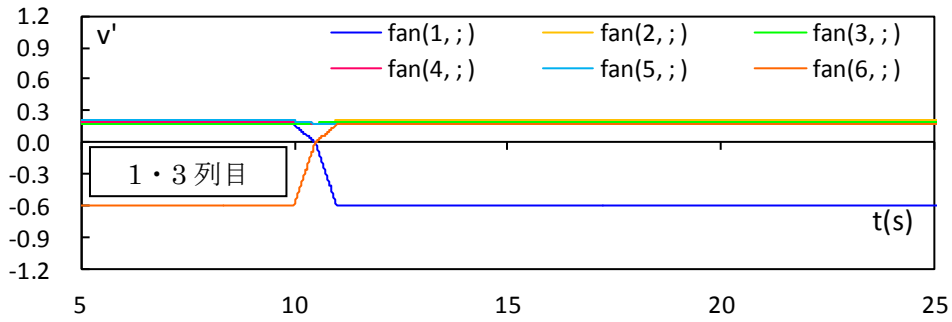
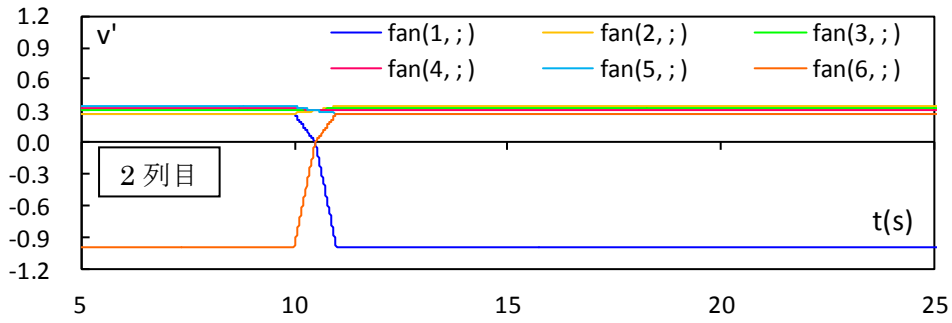


(A) 入力波形

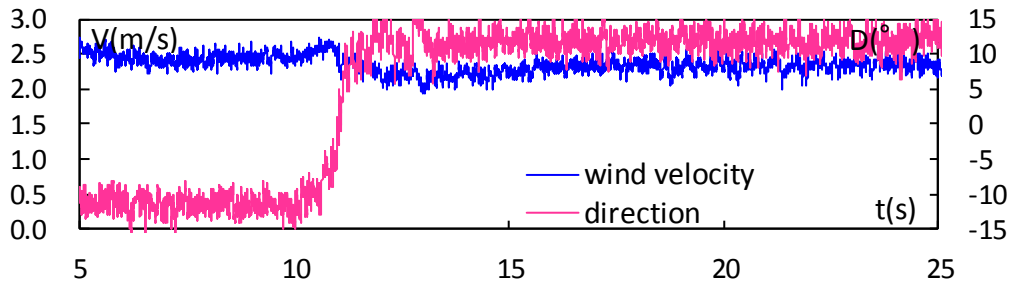


(B) 計測気流

図4.2.24 波形番号3

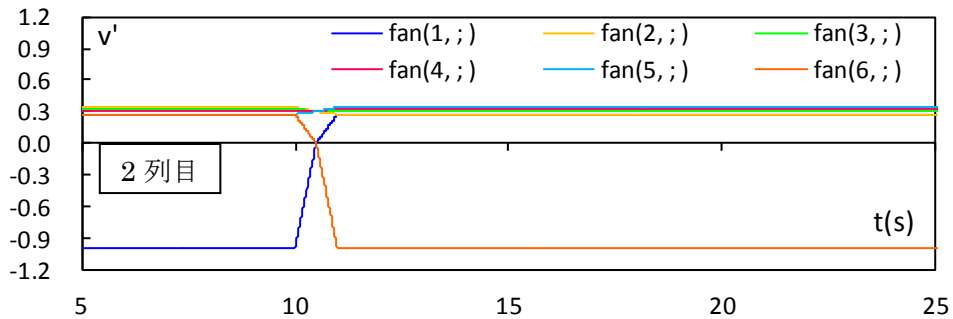


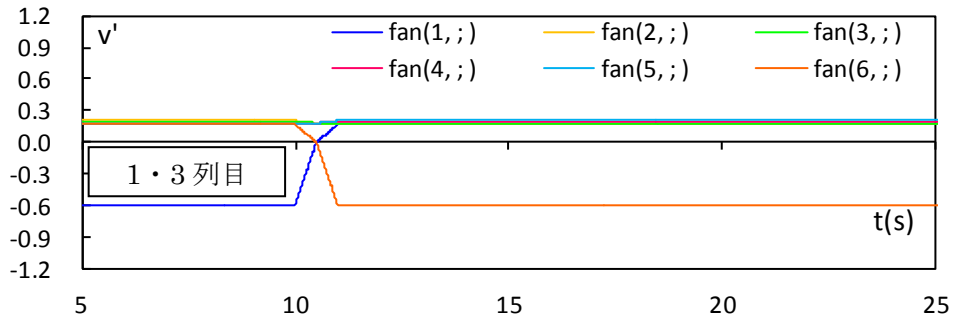
(A) 入力波形



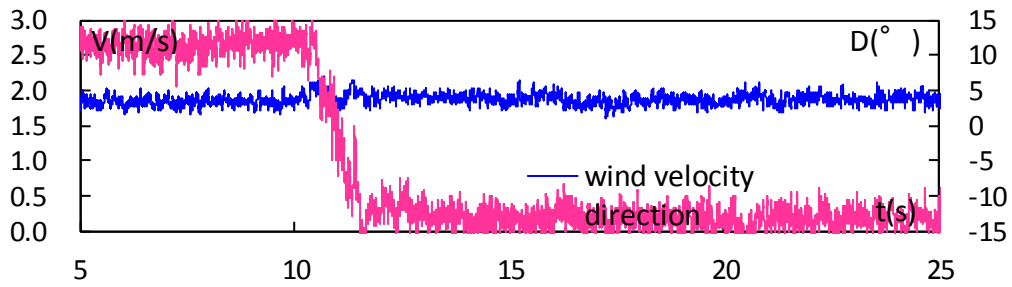
(B) 計測気流

図4. 2. 25 波形番号4



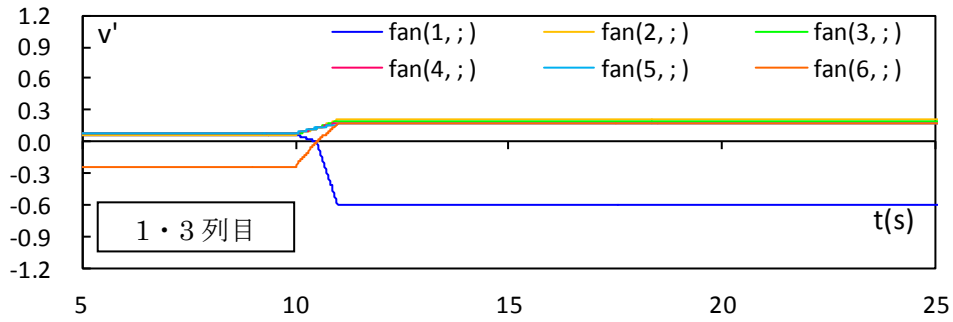
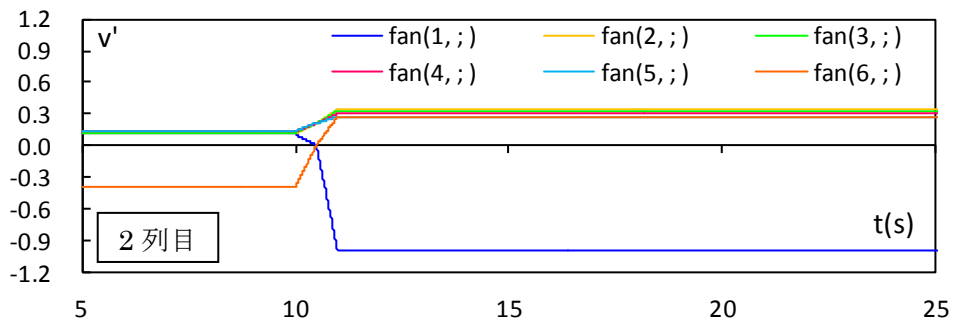


(A) 入力波形

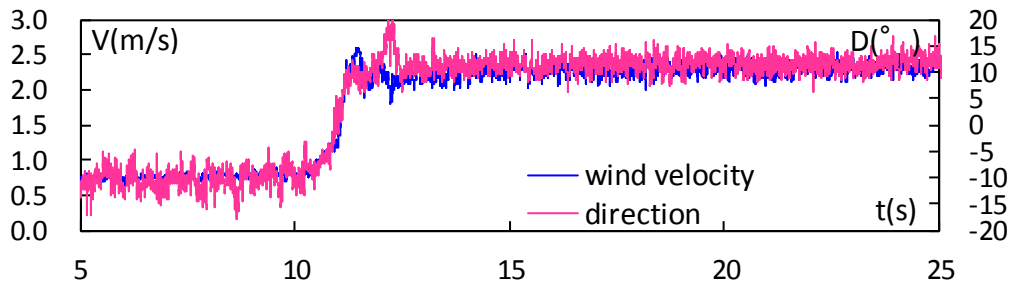


(B) 計測気流

図4. 2. 26 波形番号5

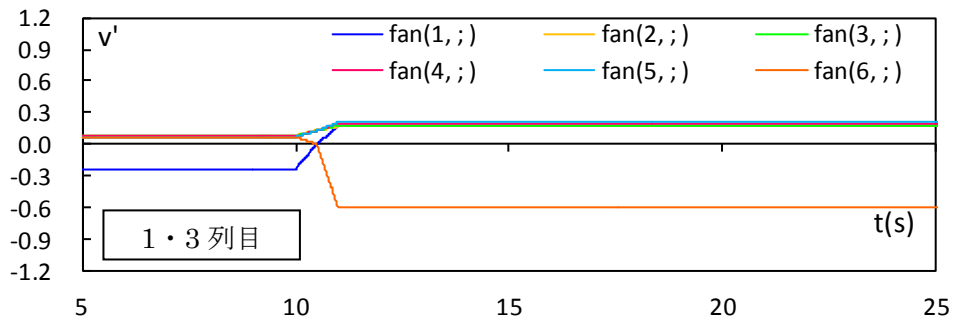
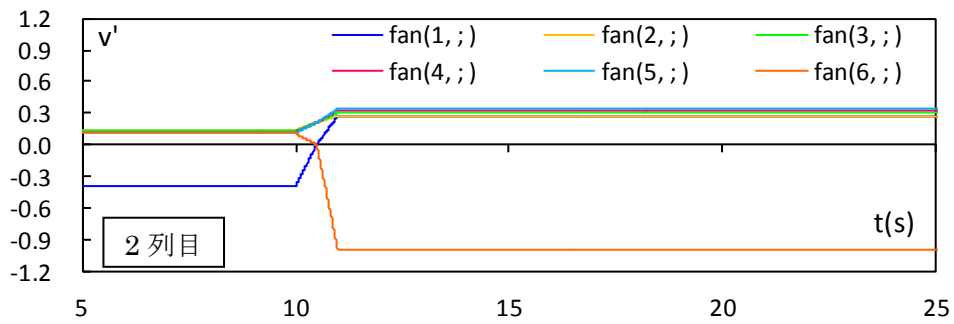


(A) 入力波形

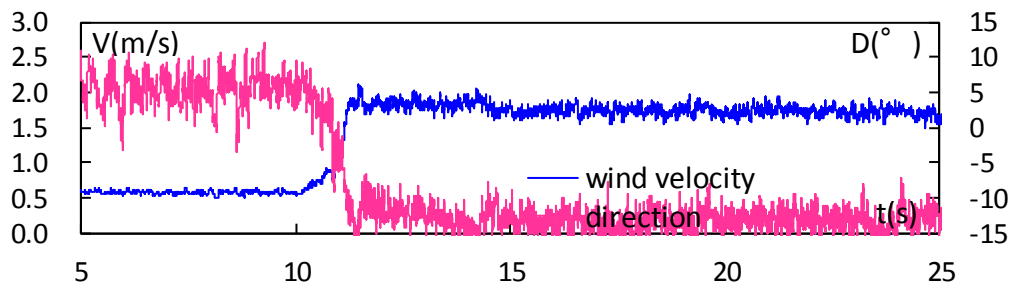


(B) 計測気流

図4.2.27 波形番号6

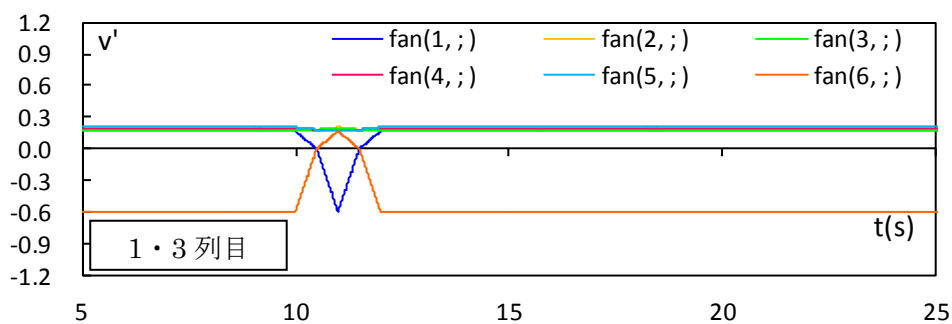
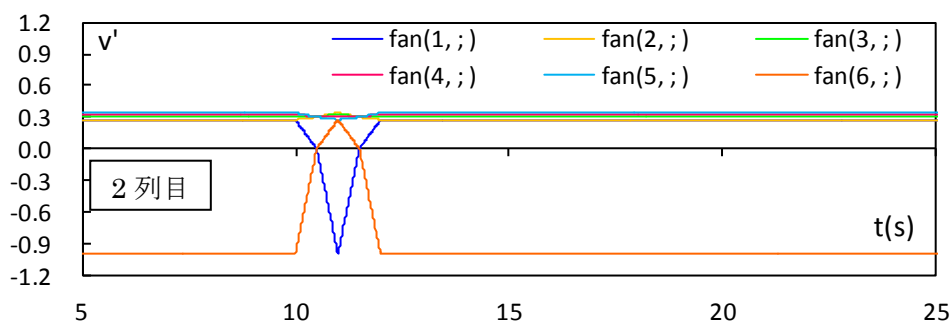


(A) 入力波形

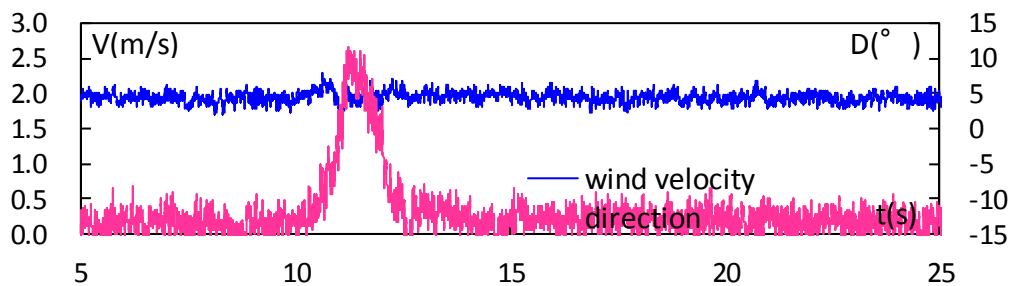


(B) 計測気流

図4.2.28 波形番号7

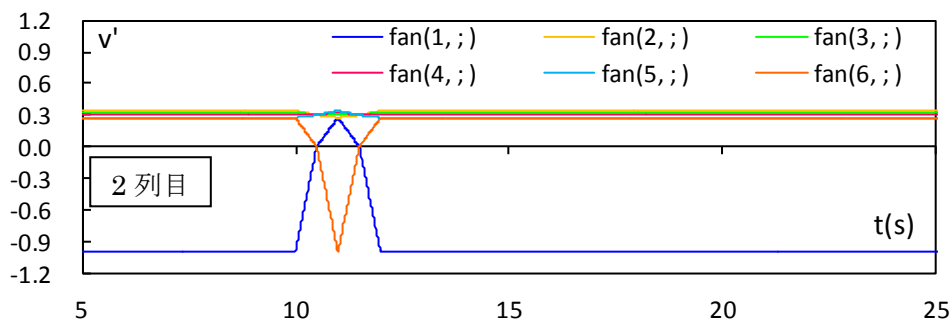


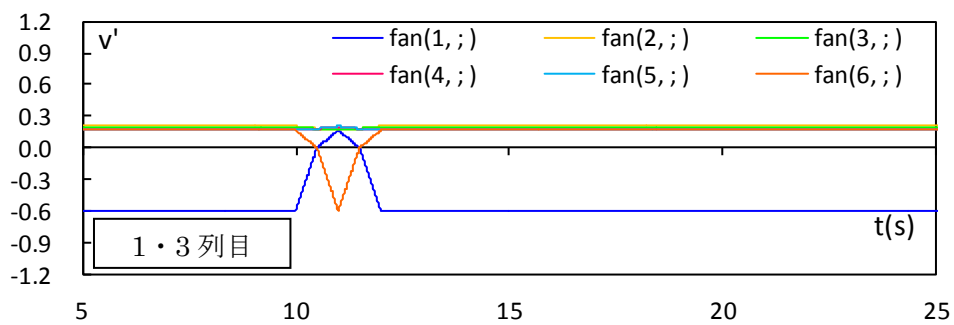
(A) 入力波形



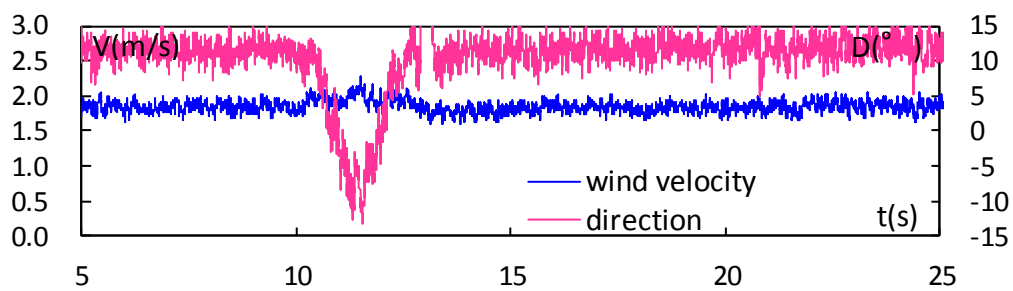
(B) 計測気流

図4.2.29 波形番号8





(A) 入力波形



(B) 計測気流

図4.2.30 波形番号9

4. 3 模型周辺での気流分布の把握

これまでの研究では12番の点において安定して気流が変化していれば、模型の周囲でも同様な気流の変化が生じているものとして実験を行ってきた。しかしながら、限られた空間を流れる気流が全て一様な変化をしていると仮定することは非現実的である為、作成した気流の確認を行う。模型設置位置を中心に25mm間隔計25点で測定する。風速測定点、風圧模型周辺でどのような気流が発生しているか計測を行う。計測地点の模型・測定洞内との関係を図4.3.1に、計測結果をベクター・コンター図(surfer10を使用)で示した物を図4.3.2に示す。

風速は0.3m/s以内の範囲に収まっており、風向もほぼ一様に変化している事が分かる。この事から、模型周辺では風速・風向共に一様に変化しているものと考ええる。

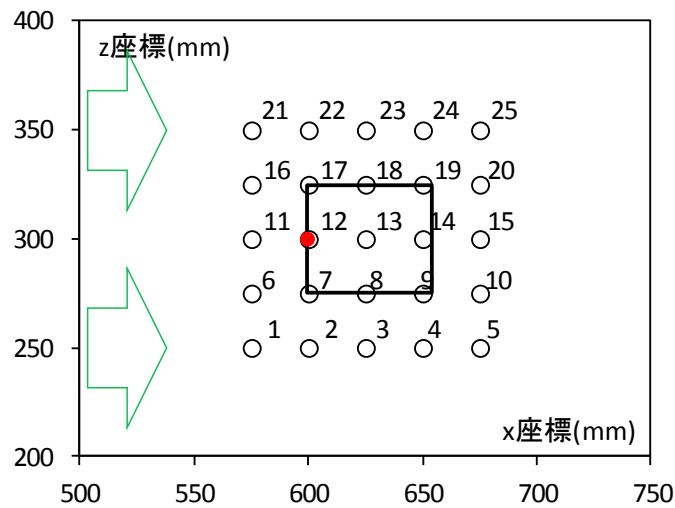
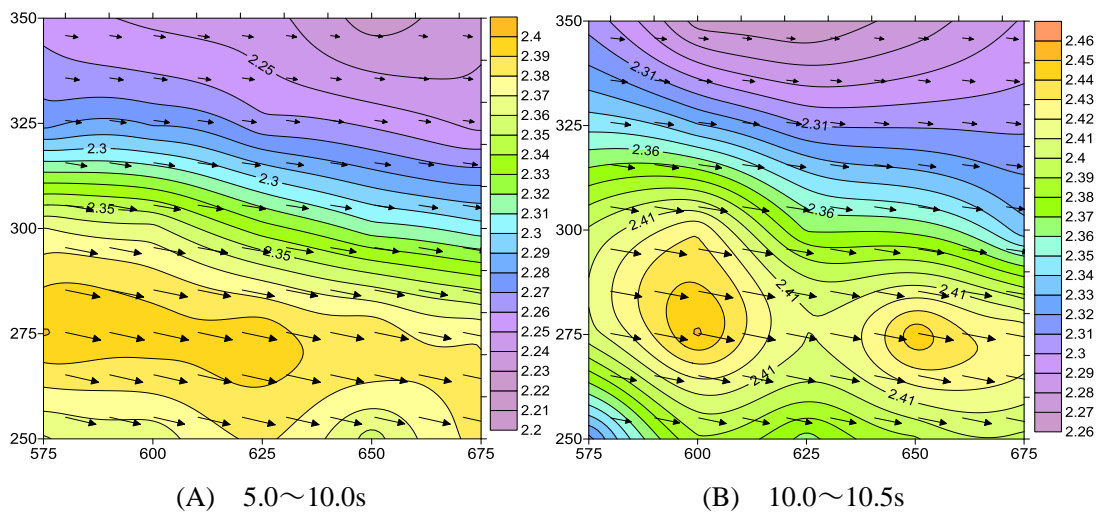


図 4.3.1 模型周辺の計測地点



(A) 5.0~10.0s

(B) 10.0~10.5s

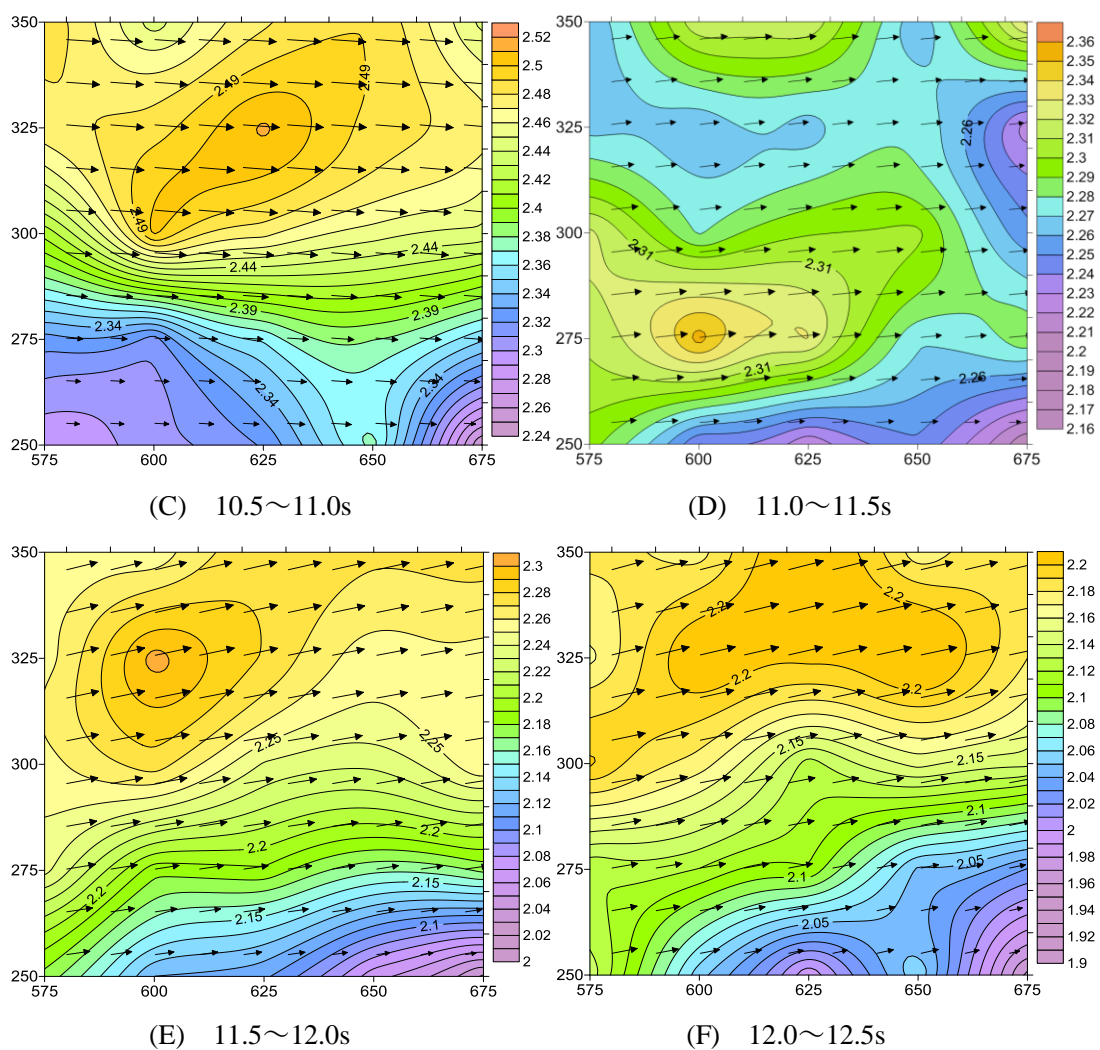


図 4.3.2 模型周辺の気流分布

4. 4 第4章のまとめ

第4章では、複数ファン風洞の装置の説明と、第3章で求めた竜巻発生装置の計測結果を基に、複数ファン風洞で竜巻を想定したいくつかの非定常気流の作成を試みた。また、作成した気流が模型設置場所周辺でおよそ一様に変化している事を確認した。

【参考文献】

- 1) Ryo Terai, Jun Kanda, 2011, Non-stationary Wind Direction Simulation in Wind Tunnel with Computer-controlled Multiple Fans, ICWE13 Proceedings
- 2) 神田順 “複数ファン制御乱流風洞の試作研究” 平成6年度～平成8年度 科学研究費助成金(基盤研究(A)(2)) 研究結果報告書