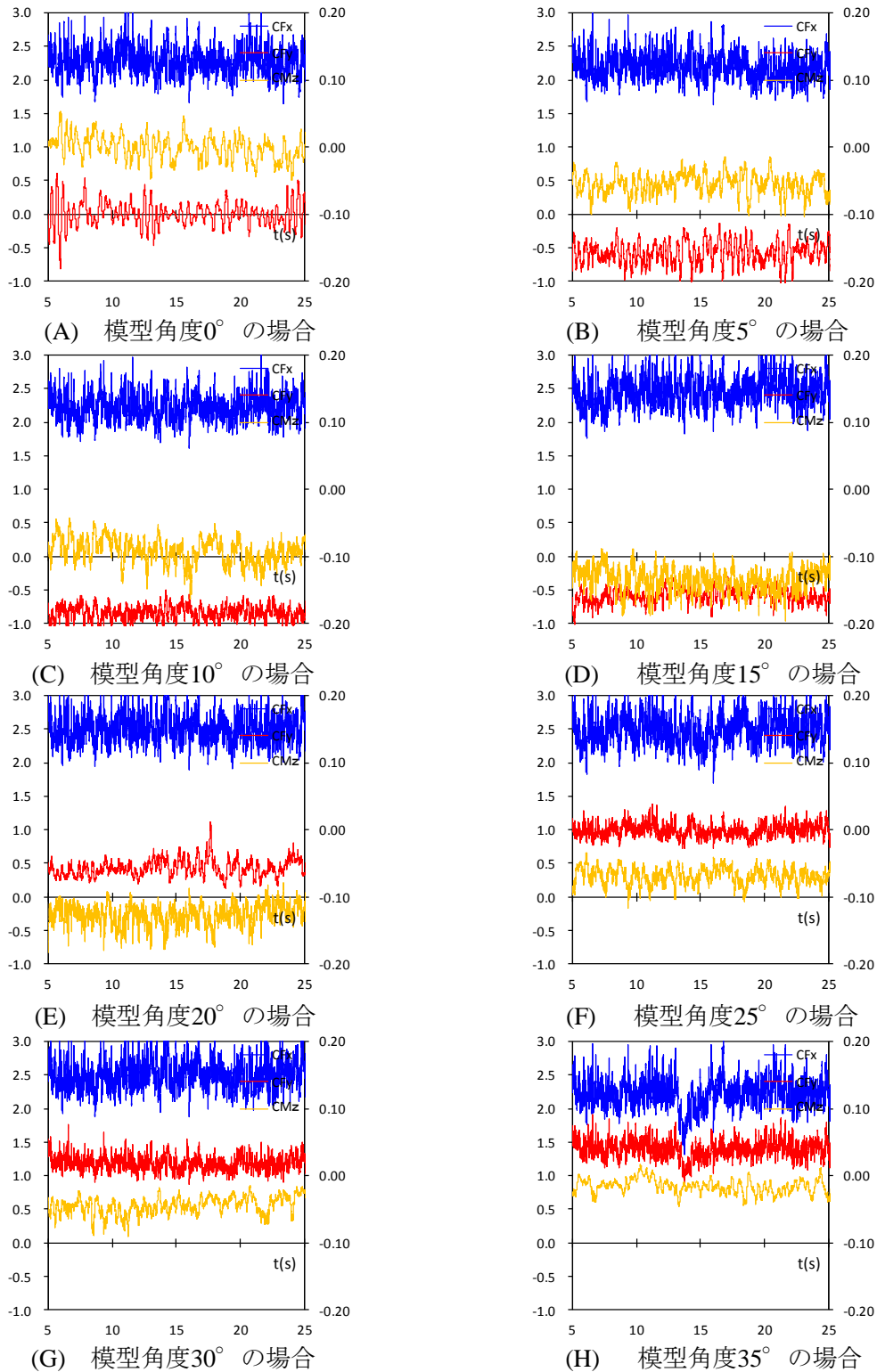
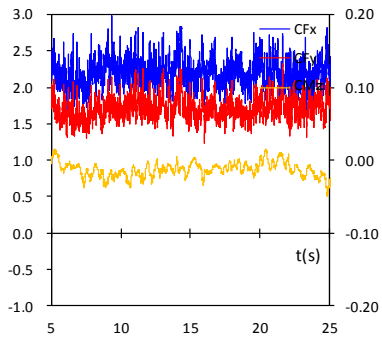


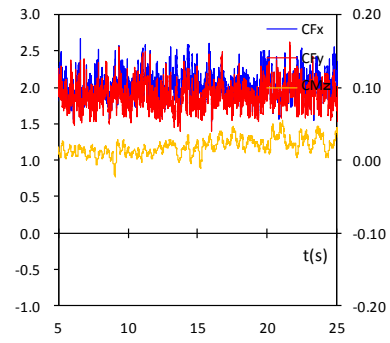
5.5 実験結果-風力係数

風圧実験により得られた各測定点の風圧力より風力係数を算出し、気流ごとにまとめて記載する。気流番号1~9の結果を図5.5.1~図5.5.9に示す。



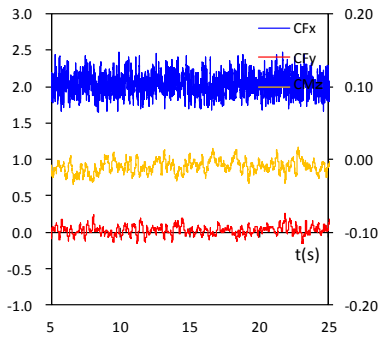


(I) 模型角度 40° の場合

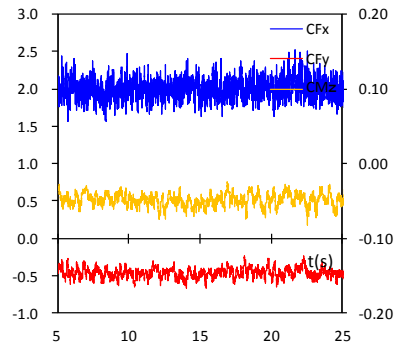


(j) 模型角度 45° の場合

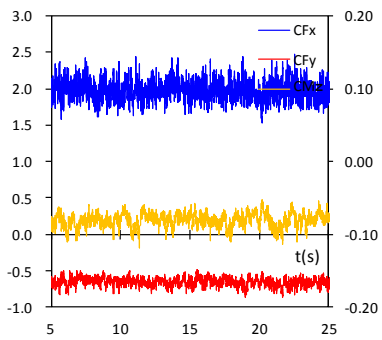
図5.5.1 気流番号1の各模型角度の風力係数



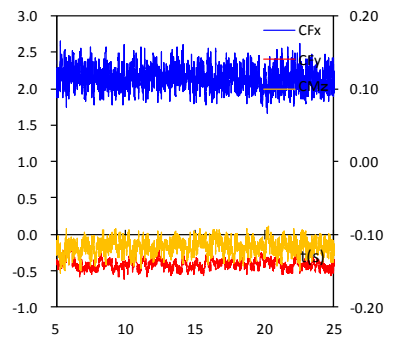
(A) 模型角度 0° の場合



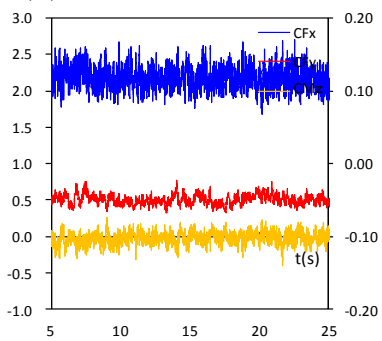
(B) 模型角度 5° の場合



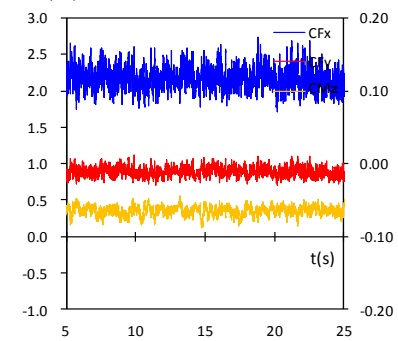
(C) 模型角度 10° の場合



(D) 模型角度 15° の場合



(E) 模型角度 20° の場合



(F) 模型角度 25° の場合

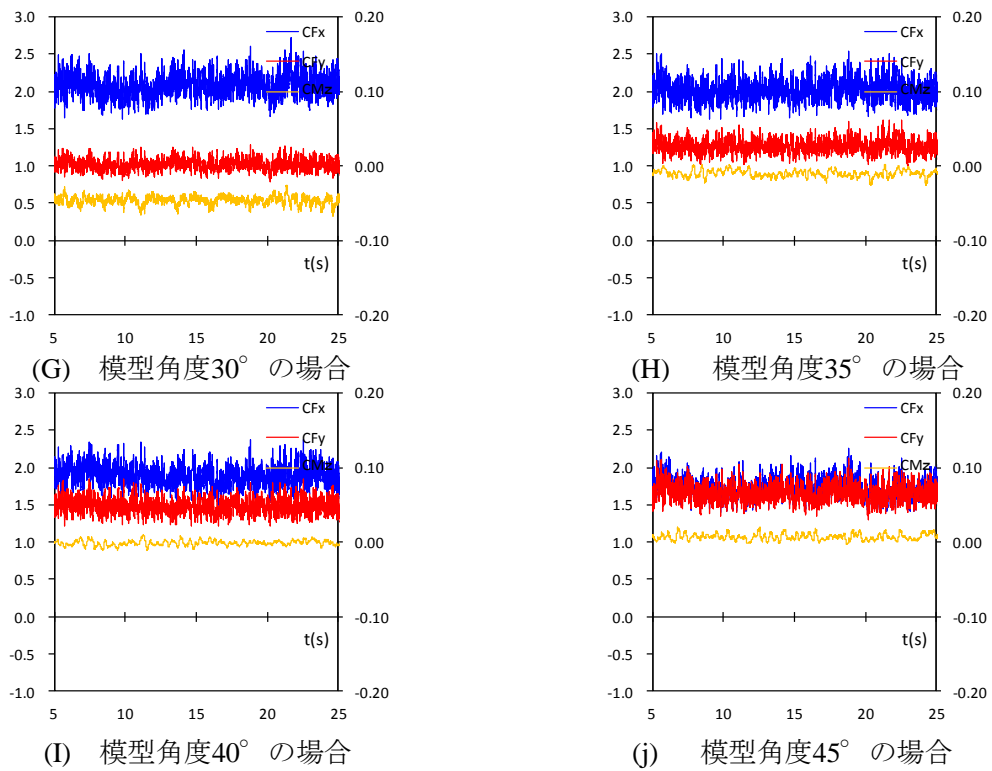
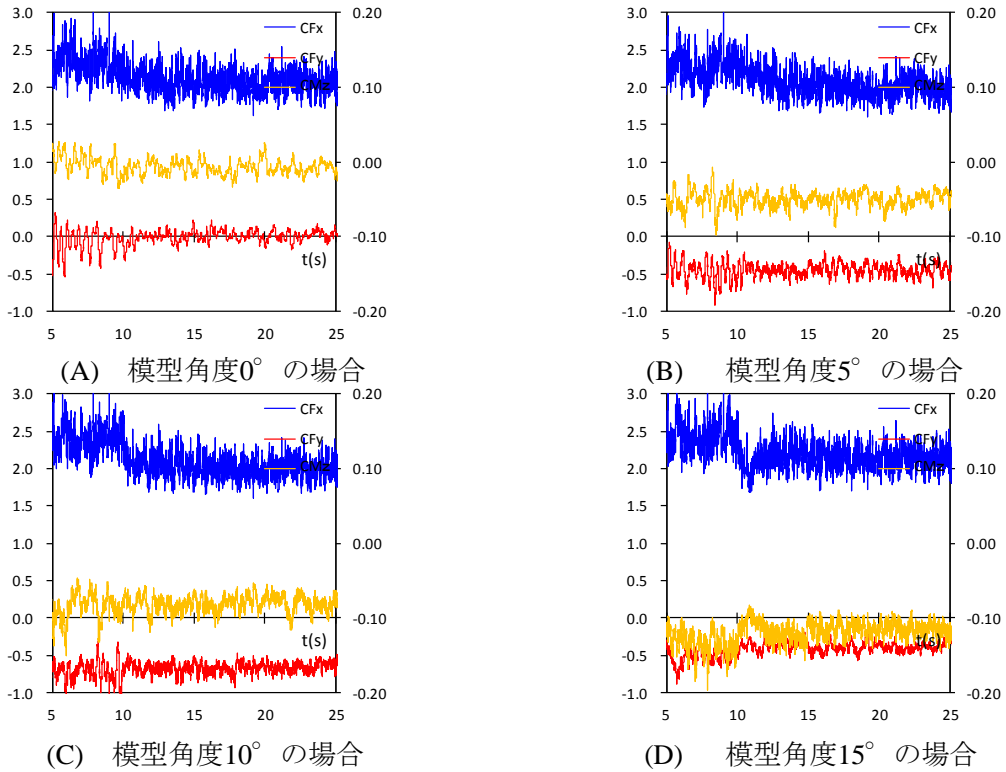
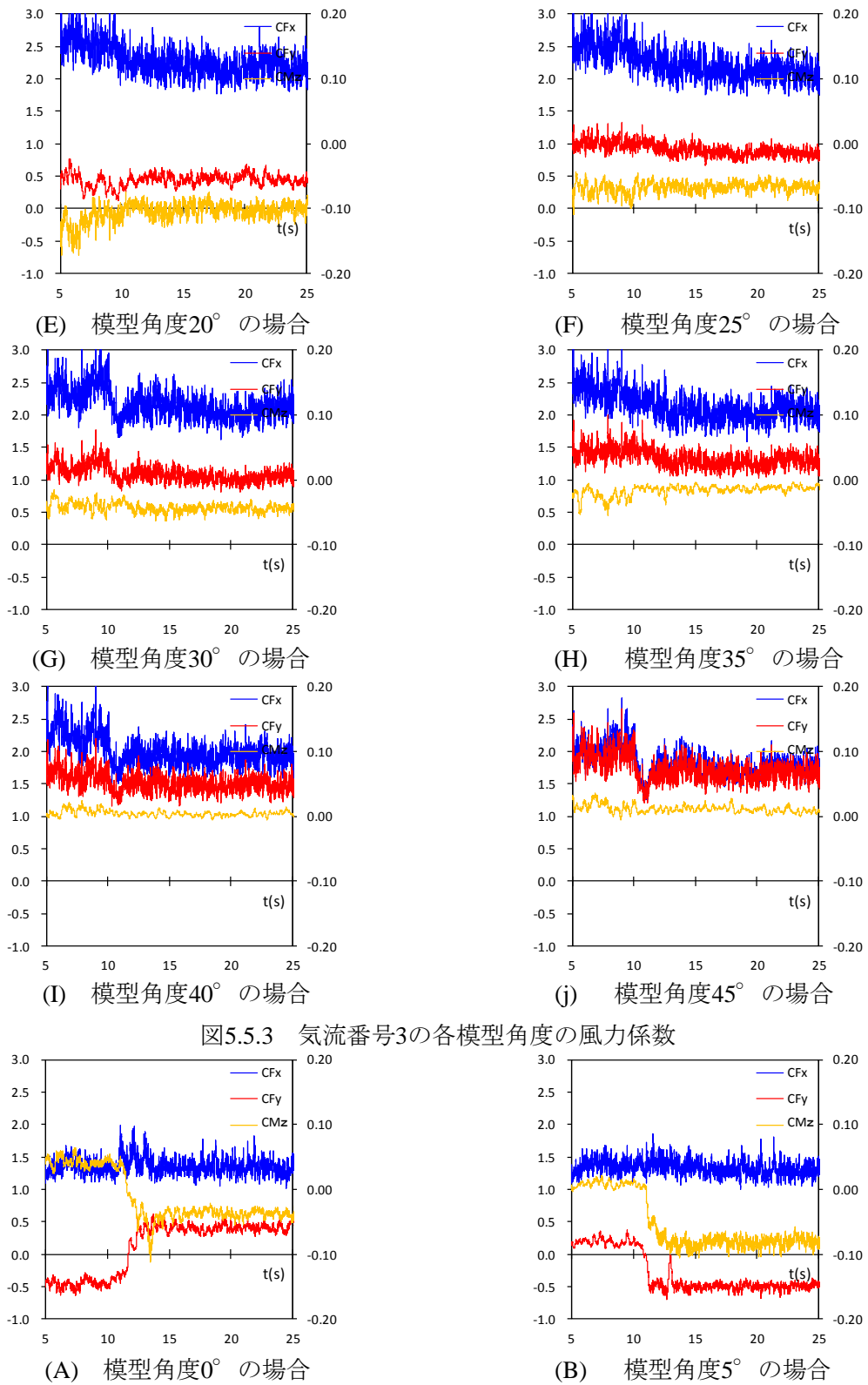


図5.5.2 気流番号2の各模型角度の風力係数





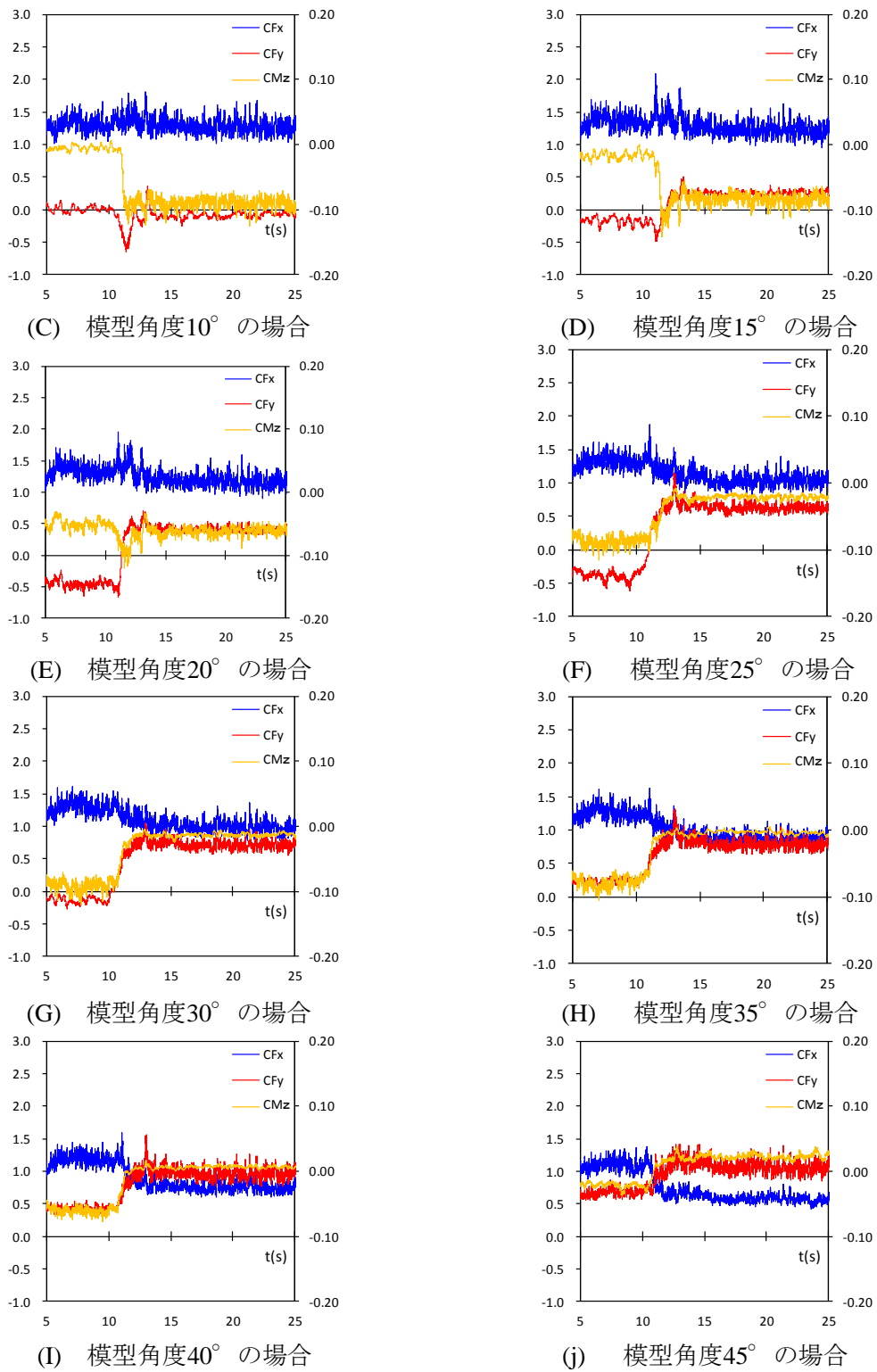
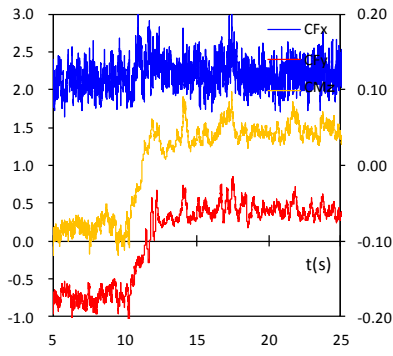
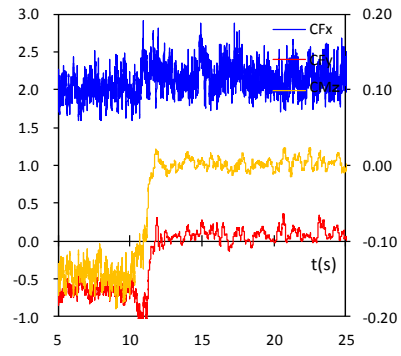


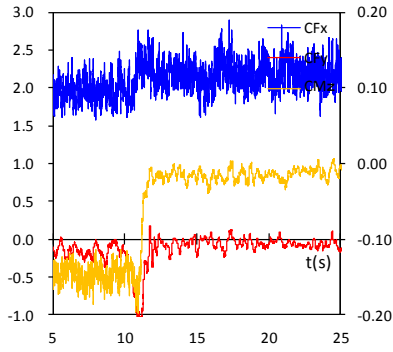
図5.5.4 気流番号4の各模型角度の風力係数



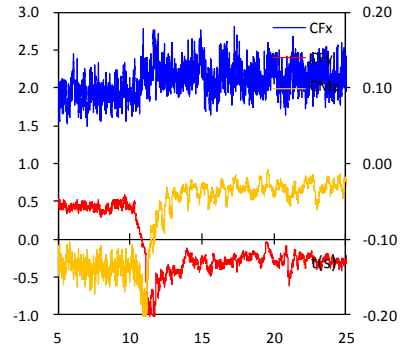
(A) 模型角度 0° の場合



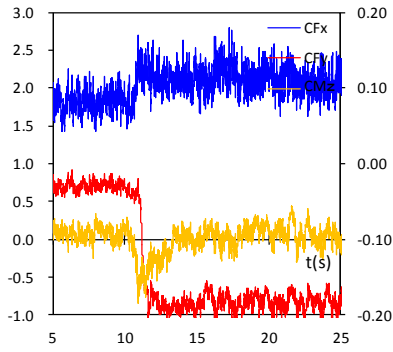
(B) 模型角度 5° の場合



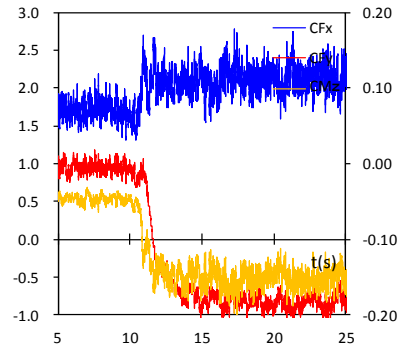
(C) 模型角度 10° の場合



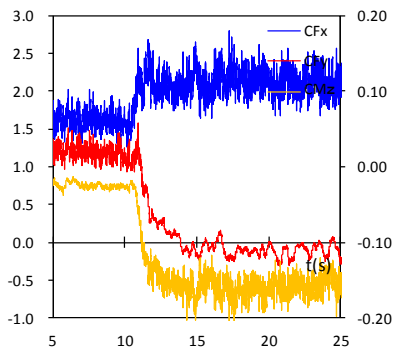
(D) 模型角度 15° の場合



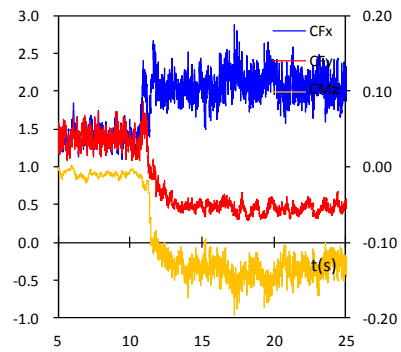
(E) 模型角度 20° の場合



(F) 模型角度 25° の場合



(G) 模型角度 30° の場合



(H) 模型角度 35° の場合

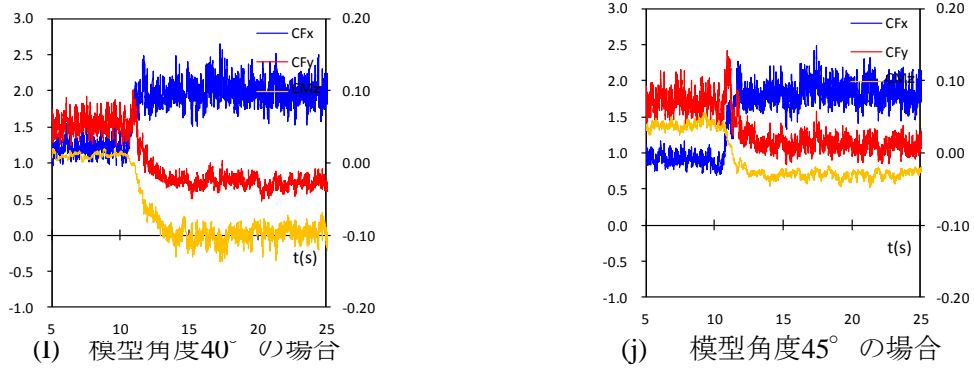
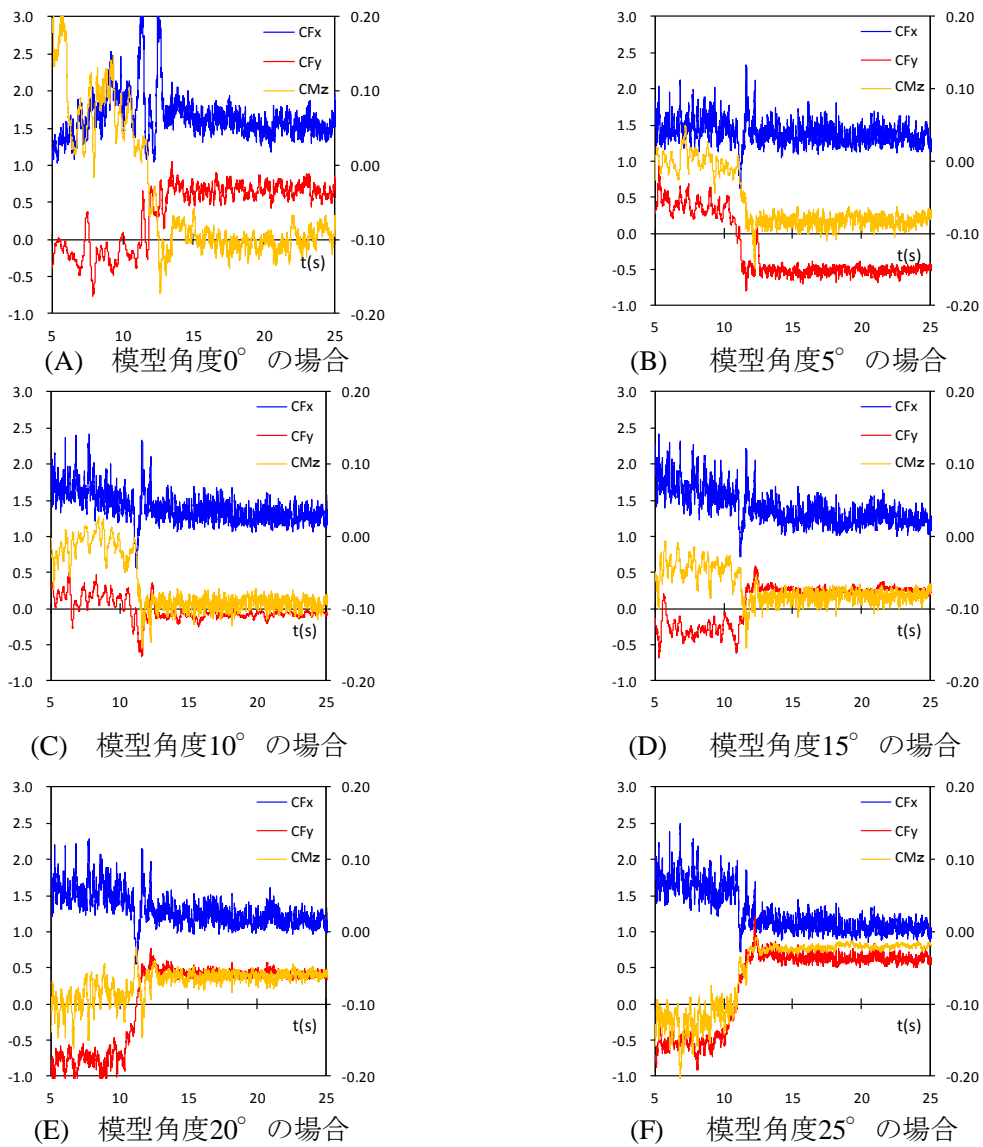


図5.5.5 気流番号5の各模型角度の風力係数



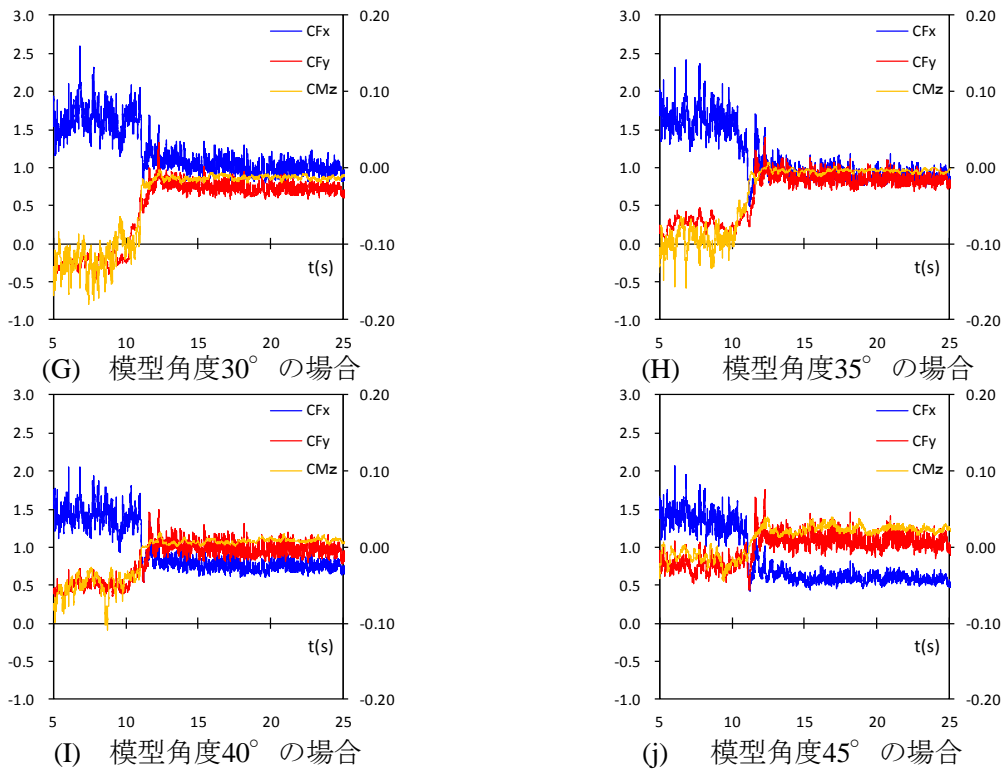
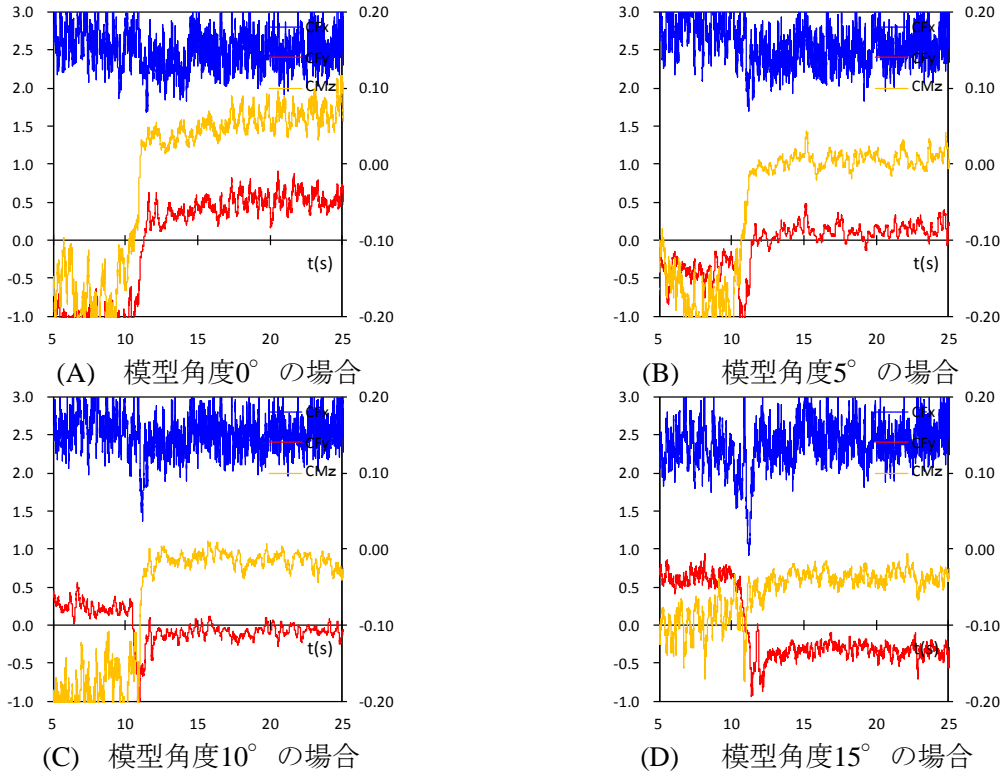


図5.5.6 気流番号6の各模型角度の風力係数



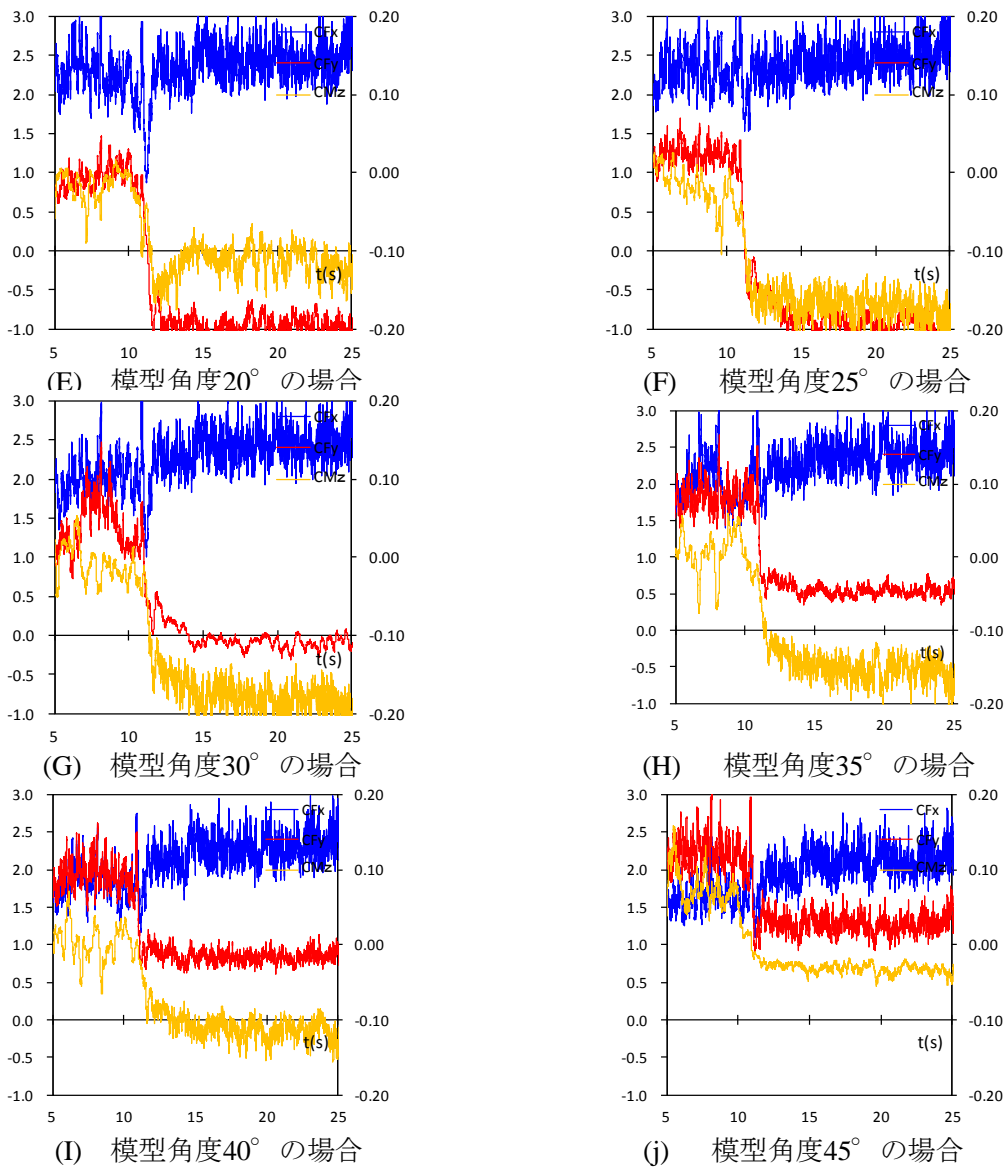
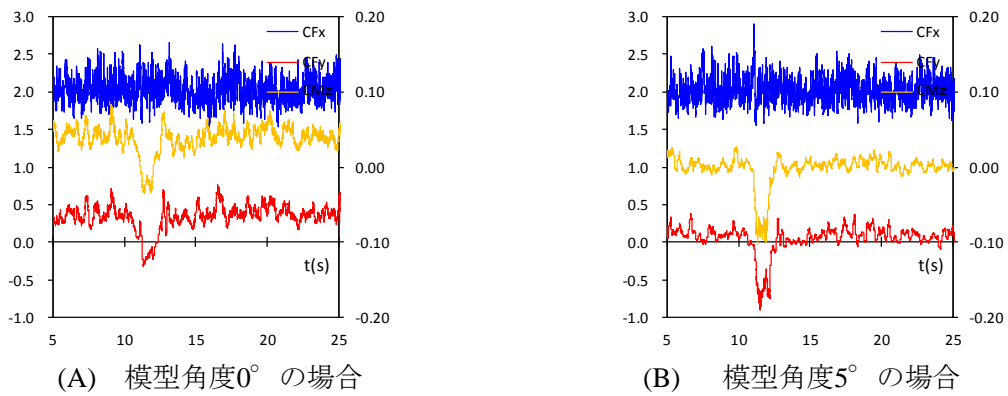


図5.5.7 気流番号7の各模型角度の風力係数



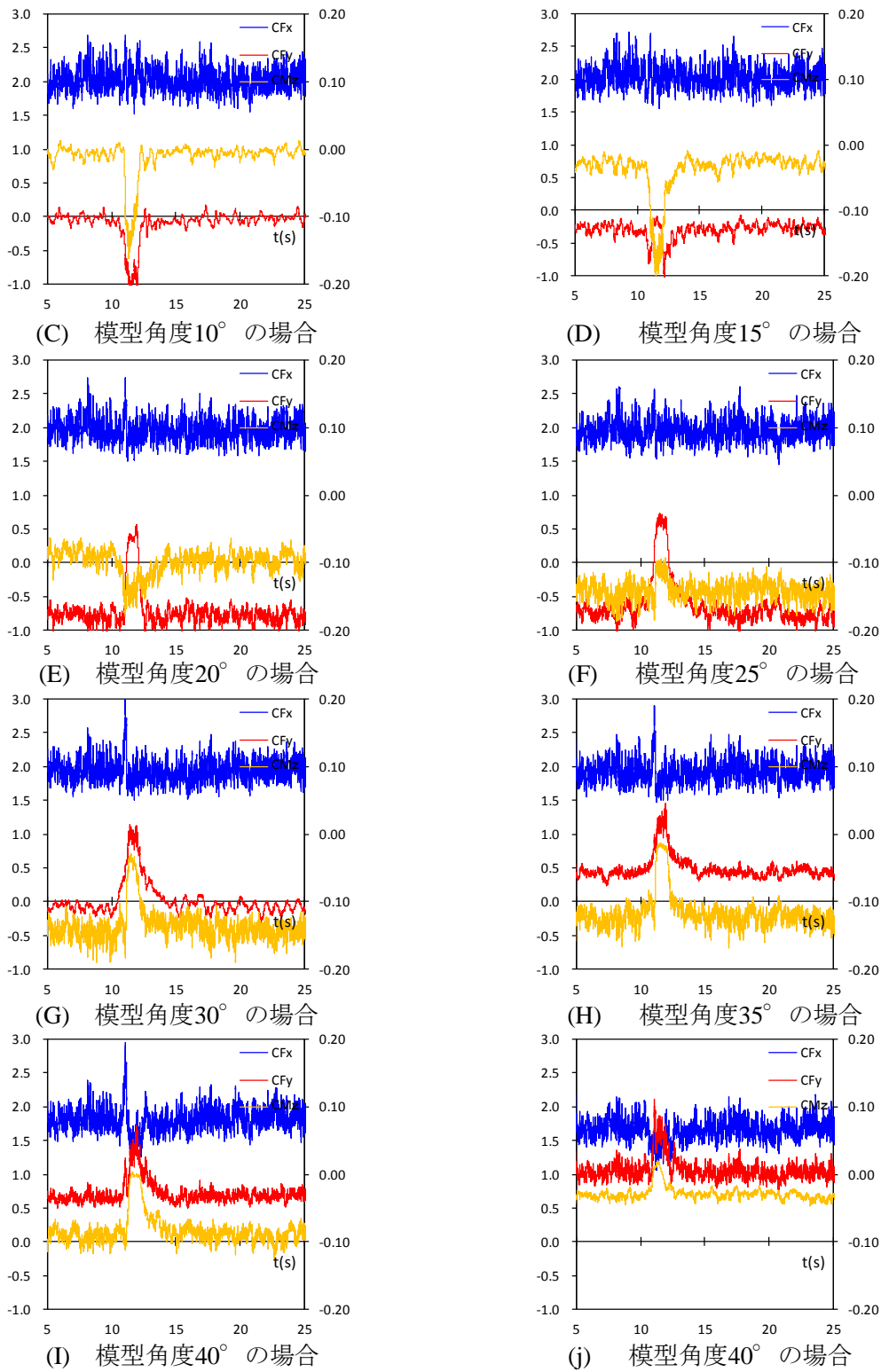
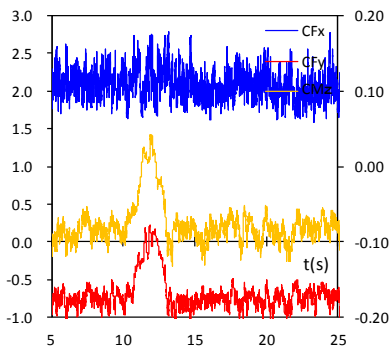
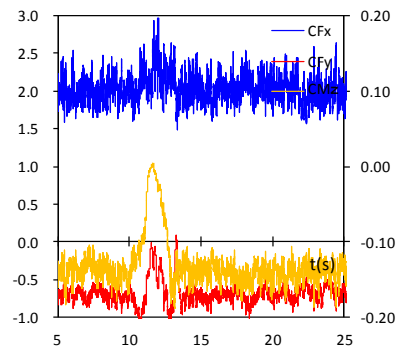


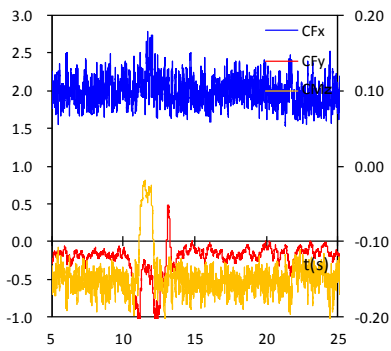
図5.5.8 気流番号8の各模型角度の風力係数



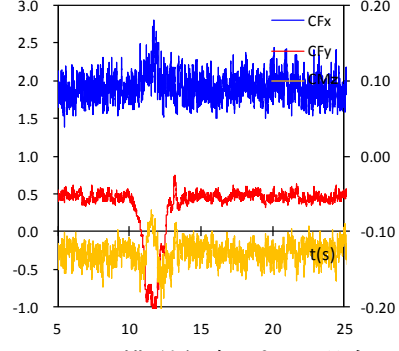
(A) 模型角度 0° の場合



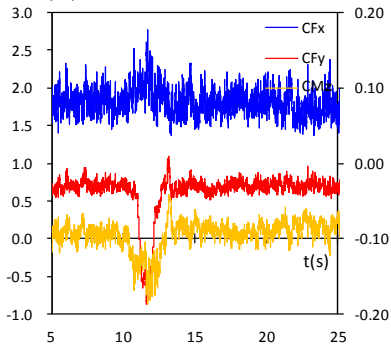
(B) 模型角度 5° の場合



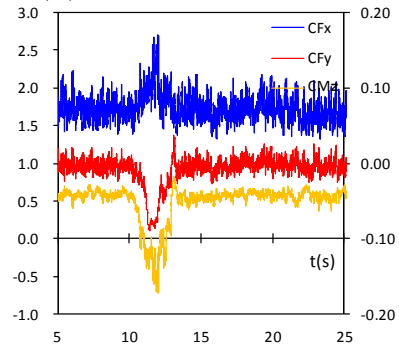
(C) 模型角度 10° の場合



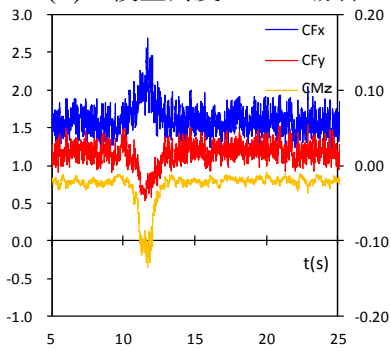
(D) 模型角度 15° の場合



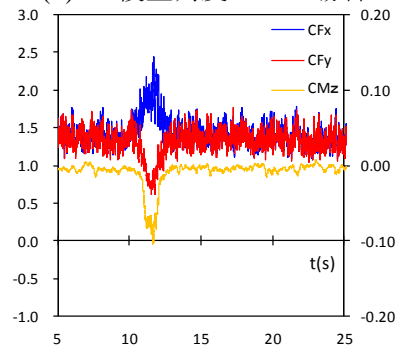
(E) 模型角度 20° の場合



(F) 模型角度 25° の場合



(G) 模型角度 30° の場合



(H) 模型角度 35° の場合

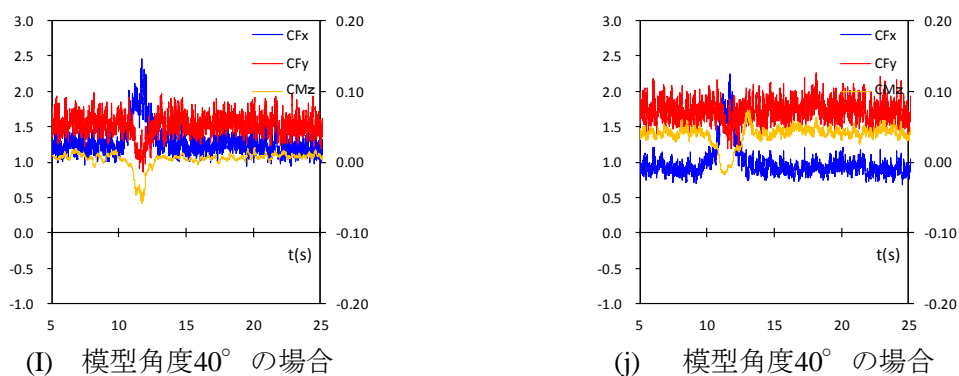


図5.5.9 気流番号9の各模型角度の風力係数

5.6 各係数の重ね合わせ

これまで、風向が変化する気流は約 20° の風向変化をしているので、模型の設置角度を考慮すると各時刻歴風圧係数を連続的に重ね合わせる事で、およそ 110° の風向変化が生じた場合の風圧係数の推移が把握できる。その概要を図5.6.1に、風圧係数の推移を5.6.2に示す。

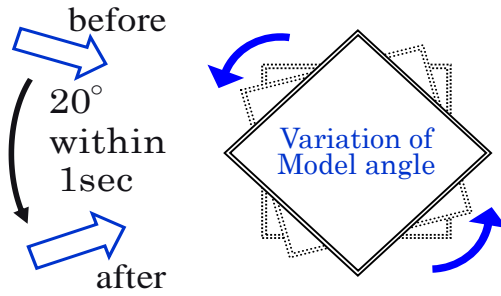
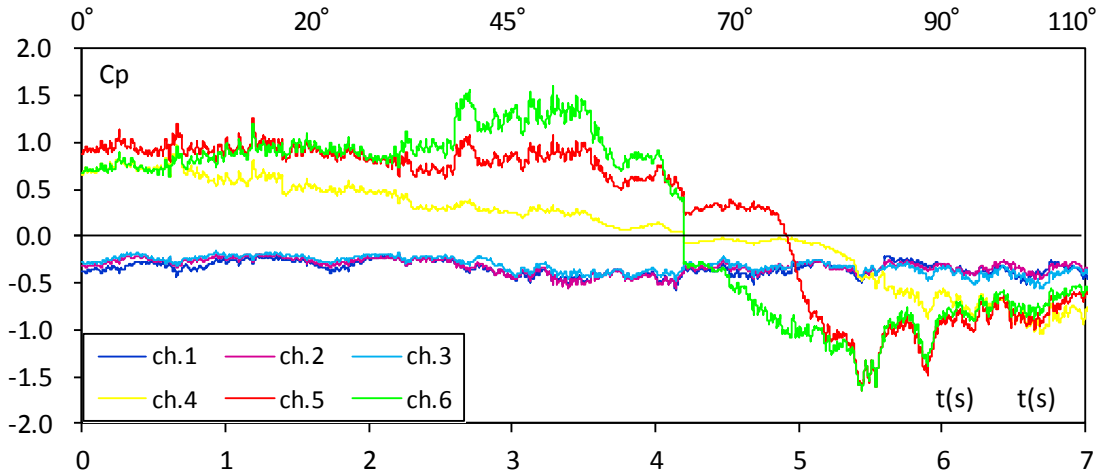
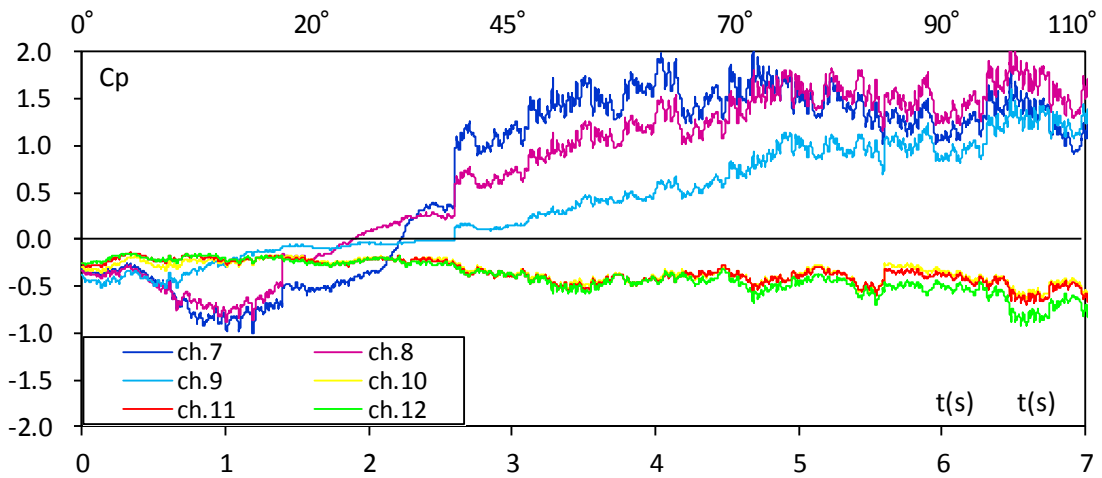


図 5.6.1 重ね合わせ手法の概要



(a) point 1-6



(b) point 7-12

図 5.6.2 風圧係数の時刻歴変化

風圧係数の時刻歴変化の様子を見ると、部分的に連続性が失われている個所が確認できる。これは、風向変化については十分に連続性が保たれていることから、これらの個所において非定常作用が生じているといえる。この非定常作用が大きく発生している点は、既往の研究でも指摘されている 15° 付近もしくは、正四角形なので 70° 付近であることと関係づけられる。

同様の手法で風力係数についても算出し、図6.5.3に示す。また、これらの重ね合わせの時刻歴変化に対応する風向の時刻歴変化を図6.5.4に示す。

風力係数の推移についても風圧係数と同様の傾向が確認できるが、定常流で計測した結果を□でプロットし、比較すると、時刻歴変化時の値が若干小さくなっている部分もあり、短時間での風向変化による非定常作用は必ずしも大きく作用するわけではないことも考えられる。

以上にまとめた風圧係数および風力係数の大風向変化時の時刻歴変化の様子を求めた報告はこれまでになく、構造物に対する非定常作用を検討する上で今後の研究の指針となる一定の成果が上げられたといえる。

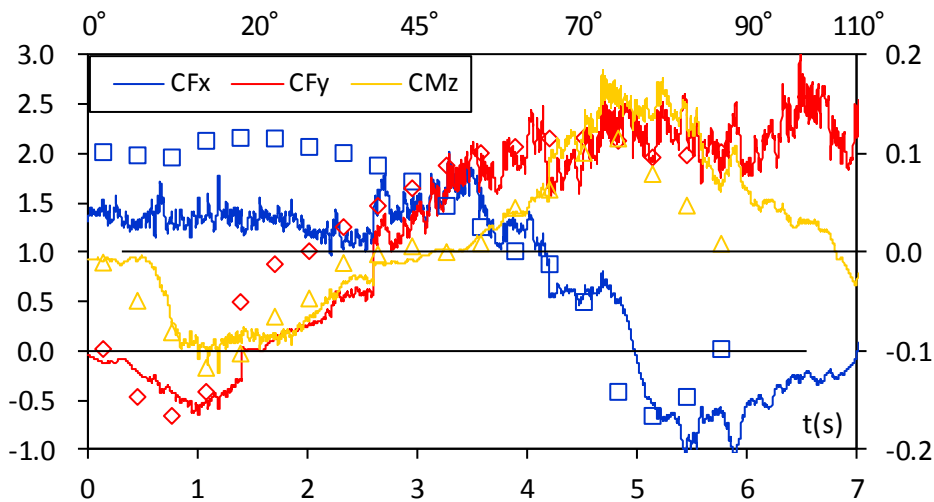


図 5.6.3 風力係数の時刻歴変化

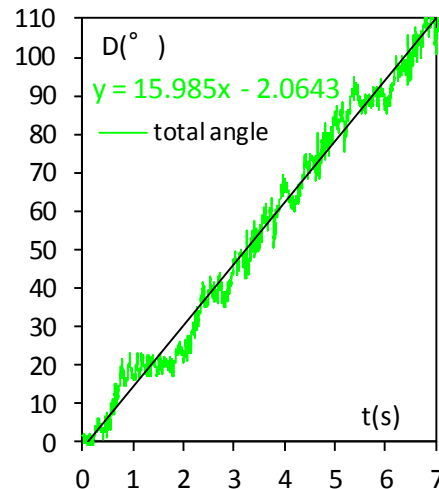


図 5.6.4 重ね合わせに対応する風向の時刻歴変化

5.7 各実験結果の比較考察

風圧係数については、一般的に正方形断面では風向角 15° で側面最大負圧-1.2を取る事が知られている。そこで、実験結果から、風向が短時間で変化することで瞬間的に大きな負圧を計測した例に該当する結果一覧を表5.7.1に示す。

表 5.7.1 風向変化により大きな負圧を計測した事例

| model angle | st. |
|-------------|---------|
| 0° | 6 |
| 5° | 5 |
| 10° | 5,6,7,8 |
| 15° | 5,7,9 |
| 20° | 9 |

この結果から、風向の変化範囲が 15° を挟む場合に大きな負圧を計測していることが分かる。実験気流では風速と風向が一度に変化するケースも試しているが、円柱断面模型による風圧測定によって、風速の変化による風圧係数への影響が打ち消されていることは、すでに確認しているために、ここで示す結果はst4.5、st6.7ともに風向変化による影響といえる。

次に、短時間で風向が変化することで、x,y方向風力係数やねじりモーメントにオーバーシュート現象が発生するか検証を行う。この場合のオーバーシュート現象とは気流の変化直前と直後に大きな値が生じている場合とする。

本実験では気流変化を約1sとしたが、明確な風力のオーバーシュート現象が確認できた例は稀であり、気流変化前後で $CF_y \cdot CM_z$ のオーバーシュート現象を確認した事例は、模型角度 10° のst.4や模型角度 15° のst.5であり、オーバーシュート現象が生じている場合は、それが明確に出ている。しかし、風圧係数の結果を考慮すると、より多くのケースで風力係数のオーバーシュートが計測できてよいはずであるとも考えられる。

以上の結果から、定常流と比較して、風圧係数および、風力係数が短時間での風向変化によって生じた、オーバーシュート現象、非定常作用によりどの程度上回っているか、もっともその比率が大きい事例を表6.7.2に示す。

表 5.7.2 非定常作用の評価

| facter | over shoot (tornado) | stationary | rate | case |
|----------|----------------------|------------|------|-------------------------|
| C_p | -1.97 | -1.2 | 1.64 | 10° ,st.5,point7 |
| C_{fx} | 1.59 | 1.18 | 1.35 | 40° ,st.4 |
| C_{fy} | -1.31 | -0.05 | 26.2 | 10° ,st5 |
| CM_z | -0.11 | -0.04 | 2.75 | 0° ,st.4 |

この結果を第2章で求めた、ある1地点を竜巻が通過した場合の風速・風向の時刻歴変化の様子と合わせると、構造物に対して、竜巻が接近、通過した場合に最も構造物に被害を与えるエリアを推定することが可能になる。第2章で提案した設計用仮想竜巻モデルのVF3モデルに適用した場合を図5.7.1に示す。

風圧測定実験の結果を合わせると、構造物に対して竜巻進行方向水平方向に作用する力が最も大きく、次いでねじりモーメントが大きく作用するが、直角方向に対しては比較的小さめな倍率であることが分かる。しかし、構造物の隅角部に対しては非定常作用が働くために外装材などについては配慮が必要であることがうかがえる。

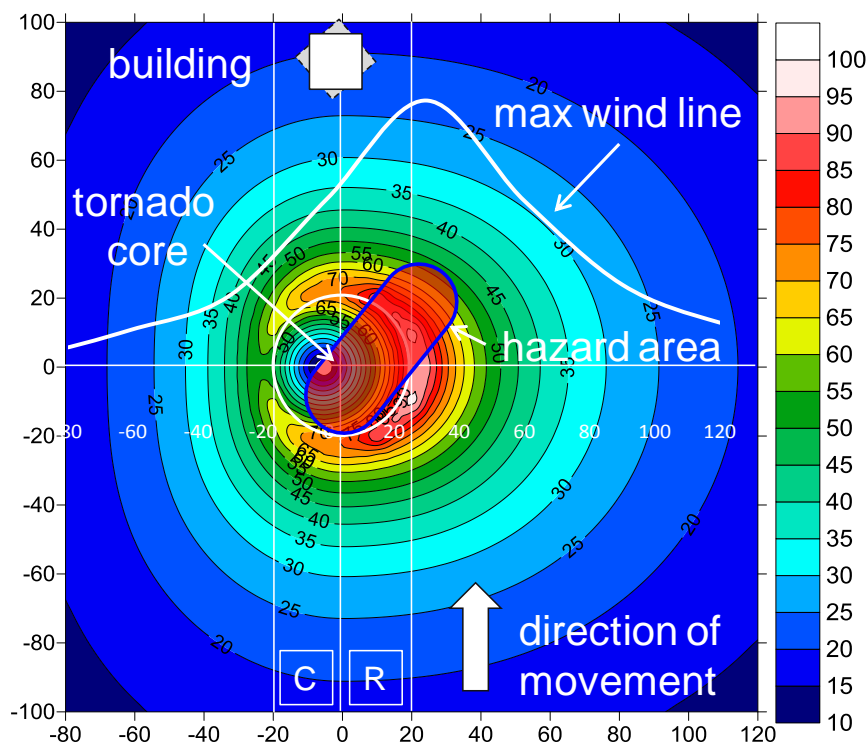


図 5.7.1 竜巻の構造物に対する危険区域と位置関係

以上より、第2章で得られた、竜巻進行方向の右側面および、中心部が通過する場合に最も構造物に被害を及ぼす可能性が高いという結論に対して、その際の非定常作用がどの程度かであるかを風圧測定実験により求めることで、竜巻を考慮した耐風設計に際して、構造物に作用する力を仮定する上で大いに有用な結果が得ることができたと考える。

5. 8 第5章のまとめ

第5種では、第4章で作成した気流による風圧測定実験を2次元円柱模型および2次元角柱模型を用いて行った。その結果、竜巻を想定した非定常流により、角柱模型に作用する非定常作用がどのようなケースで発生しうるのか、また、その場合には定常流と比較してどの程度大きいのかを評価した。

さらに、第2章で提案した設計用仮想竜巻モデルと合わせて、竜巻が構造物に接近、通過する場合に竜巻のどのエリアが構造物に最も被害を及ぼす可能性があるのか推定した。

第 6 章-結論

Chapter.6
Conclusion

6. 1 結論

本論文の結論として、以下に各章ごとに得られた知見についてまとめる。

第1章

建築の構造設計の観点から竜巻を考慮した耐風設計の必要性について論じ、構造設計の為の風速・風向等の非定常作用の解明のための研究手順と、これまでの竜巻に関する文献について本論文で参考とした物に関して整理した。

第2章

気象庁の「竜巻等の突風データベース」及び、NOAAの「Storm Prediction Center」のデータから、日本と米国の竜巻被害の傾向を統計的に分析し、竜巻の理論モデルの一つであるRankine渦モデルや、日本において甚大な被害を及ぼした過去の竜巻の調査報告から、日本における設計用仮想竜巻モデルの提案を行い、米国の設計指針に記載されている竜巻モデルとの比較を行った。

さらに、都道府県別に竜巻による構造物の被害が発生する確率を算出すると共に、提案した竜巻モデルの強風域を算出し、これまでに甚大な被害を及ぼした竜巻の被害調査報告と照らし合わせることで、提案した竜巻モデルの有用性についても議論した。又、全国の年最大風速との関係について考察を行った。

これにより、既往の研究ではあまり論じられてこなかった、竜巻を想定した風洞実験等の風速パラメータが、実現象としてどのような位置づけであるか明確になった。

第3章

つくばの独立行政法人建築研究所保有の竜巻発生装置を使用し、第2章で提案した竜巻モデルのパラメータを参考に、竜巻状の渦を生成させ、その渦の風速・風向を計測し、各種理論式との対応を検証することで竜巻の風速の理論式WKモデルの有用性を確認した。

また、移動速度をパラメータとして、陸上のある一地点を竜巻が通過する場合の地表面付近の風速と風向を計測し、移動速度の風速場に対する影響について、スワール比と移動速度の関係に着目して考察を行った。

第4章

竜巻発生装置を使用した第3章の渦の測定結果を基に、当研究室保有の複数ファン風洞を使用して、既往の研究を基に、竜巻を想定した短時間で風向と風速が変化する非定常気流を作成した。

尚、比較対象として定常流や、風向が折り返すといった特殊な気流も新たに作成し、非定常気流については、風洞内において一様に気流が変化しているのか検証も行った。

第5章

複数ファン風洞で作成した、第4章の気流下における基本断面である2次元円柱及び2次元角柱の風圧測定実験を行った。角柱は 0° ～ 45° まで 5° 毎に実験を行い、短時間で風向や風速が変化するという竜巻特有の非定常性が角柱に対して、どのような非定常作用を及ぼすかも風圧係数、風力係数に分けてオーバーシュート現象に着目して検証を行った。

又、模型の設置角度と気流の変化角度から、実験結果を重ね合わせる事で、およそ 110° までの大きく風向が変化した場合に風圧係数、風力係数がどのように推移するかを時刻歴で推定した。

最後にこれまでの実験結果を基に、竜巻が構造物に接近、通過した際に竜巻のどの部分が最も構造物に影響を与えるか考察し、竜巻の危険エリアを設定した。また、竜巻による非定常作用が定常流と比較してどの程度大きいものであるか評価した。

以上各章の試みの結果から、本研究により、日本で発生する竜巻の風速・風向の変化がどの様なものであるか再現期間とあわせて算出し、それらの竜巻が構造物に接近した際に、竜巻の風速場のどのエリアが、定常流と比較してどの程度危険であるか、竜巻を考慮した耐風設計に役立つ情報としての一定の見解を示した。

6. 2 問題点及び今後の課題

各章ごとに分けて、本研究を進める上で浮かんできた問題点、改善点を示す。

第2章

米国と比較して、日本における竜巻の被害記録のデータ数が少なく、統計量が不足している。また、米国の竜巻関連設計指針の算定手法についての文献が入手できていないことから、米国での設計用竜巻のパラメータがどのような手順で作成されたのかが不明なために、本論文で提案した竜巻モデルと米国のモデルの違いが、単に気象条件によるものであるか明言できない。

これらの問題点を改善する為には、引き続き文献の収集を行う事が重要である。また、日本の竜巻被害のデータ数については、将来被害が発生した都度、被害について詳細に分析して行くとともに、それらの結果を提案したモデルに柔軟に組み込んで再度評価して行くべきと考える。

第3章

竜巻状風発生装置については設置されてから2年程しかたっており、その装置の性能の全容はいまだ解明されていない。又、移動速度とスワール比に関しても、海外で議論が続けられており、その関係性は解明されていない。その為に、今後も多くのパラメータについて検討しつつ実験を行ってゆくべきと考える。

又、諸事情により実験装置の性能や研究手法について、測定環境に多くの改善点が挙げられるが、資金面の問題もあり、今後も継続的な改善の努力が必要とされる。

第4章、第5章

複数ファン風洞による非定常気流の作成は本論文でファンの性能の限界に近い部分まで検討を行った。今後より竜巻に近い気流を作成するには、装置本体に踏み込んだ抜本的な改良が必要と考えられる。

全体を通して、非常に局所的な竜巻という自然現象の発生条件や、その風速場についてはいまだ世界で研究や議論が行われており、その渦のメカニズムさえ解明されていない。その為に、本研究では多くのステップを経て、竜巻の気流について検討を行ってきたが、今後竜巻の実測による、渦中の風速、風向分布について明らかにする事が最も必要と考える。

謝辞

最後に本研究の執筆と、実験に取り組むに当たり多くの方に御指導や御力添えを頂きました事、ここに感謝の意を表したいと思います。

神田先生、2010年の8月に私が竜巻をテーマとして研究を始めてから、およそ30回は教授室やゼミで私の研究について、御指導して頂いたと思います。興味がある方へすっ飛んでゆく私に対して、細かく詰めるべき点や研究のストーリーとして進むべき方向性など、我が強く、その割に知識の乏しい私に対して真摯に御指導下さいました事、深く感謝しております。又、木葉会や高田研究室との合同研究室会議、バーベキュー、神田会、新年会等、毎年多くの楽しい機会と学ぶ機会を与えて頂きました。入学してからの、カントについての議論や、その後の哲学に関する発表がきっかけで、その後も色々な哲学書や世界各国、各時代の主義や思想、政治、経済について興味が沸き、多くの知識を得る事が出来ました。私は神田研究室に所属する事で、建築に関する知識だけではなく、その他の多種多様な事柄について学びました。釜石の被害調査は構造技術者を目指す者として、生涯忘れない体験だとも思います。ここに書いた事以外にももっとも感謝している事がらありますが、止まりそうにありませんので、ここまでに致します。この修士論文の提出後もコヒーレンス用の治具の発注等、どうかももう少しの間御指導のほど宜しく御願致します。

喜々津様、喜々津様にはつくばでの竜巻発生装置を使用した実験に関して、非常に御世話になりました。2010年の酷暑の中でのPIV測定は今でも昨日の事のようにです。2011年春の実験では御忙しい中、長い時間私の研究のために御時間を割いて頂き、又、昼食等まで御馳走になりました事、とても感謝しております。御蔭さまで、本論文の第3章という形でまとめさせて頂きました。建築学会の懇親会で大熊先生と御話しさせて頂きました事も、嬉しい思い出です。喜々津様と一緒に実験に取り組む中で、やはり自分もいつか研究職につきたいという夢も捨てきれない自分を再認識しました。将来、構造技術者として一人前になり、是非喜々津様と一緒に創造的な御仕事がしたいと思っております。

高田先生、先生には合同研究室会議やその後の懇親会の際に、就職活動等について御心遣い頂きました事感謝しております。先生の人に対する気配りや明るさ、人を引き付ける魅力について、私も将来こういう魅力のある人間になりたいと心底思います。

糸井さん、糸井さんには合同研究室会議で御指導頂きました事や、就職活動の際に、技術研究所に興味を持っている私に対して、学外から大学院に入学してきたのにも関わらず、御心遣いだけ頂きました事、非常に感謝しております。技術研究所の件につきましては、夢を必死で追っていた当時、メールを読んだ際に目頭が熱くなるほど、糸井さんから頂いたメールが嬉しかった事を覚えております。本当に有難うございました。

ローレンさん、ローレンさんには風圧装置の設置や実験手順について教えて頂きました事、感謝しております。修士として学ぶ私にとって、博士というさらなる高みで、日々研究に邁進している姿は、私の研究姿勢の目標にしていました。又、いつも温和で、私が何

か質問をしても丁寧に分かりやすいように教えてくれようとしているローレンさんは、研究室で私の心の支えの一部でした。来年から、台湾に戻って本格的に研究者の道を進まれるとの事で、ローレンさんの将来の成功をお祈りしております。いつか、あのローレン先生に〇ツ〇〇マウスパッドをプレゼントしたと自慢できる日が来る事を楽しみにしております。

永雄さん、永雄さんには、初めてのメールで御叱りを受けてから、後輩としてどうしたものかとかなり悩んでおりましたが、永雄さんのサッパリした姿勢には大変救われました。私が研究について相談させて頂いた際も、すぐに紙とペンを取り出して、相談した私が物怖じしてしまうほど真摯に考えて頂きました事感謝しております。又、研究室では兄貴分として、バースデイパーティなど積極的にコミュニケーションの機会を作って下さりとても救われました。唯一心に引っかかるのは確率の勉強会が僕のせいで頓挫してしまった事ですが、それに関しても、一切私をとがめる事無く今日まで接して下さる懐の広さには頭が下がります。永雄さんもローレンさんと共に、これから本格的に研究者の道を歩まれるかと思いますが、将来、あの永雄先生に確率について直接教えてもらったのだと自慢できる日が来る事を楽しみにしております。まだこの大学かは決まってないと思いますが、海外でも頑張ってください。もちろんこんな事言わなくても頑張ると思いますけれど。

和田君、この文章を読まれる可能性を考えるとなんだか恥ずかしいですが、もし研究室の同期が和田君以外の誰かであったら、僕は2年間正気を保てた自信がありません。それほど和田君には救われました。以前、僕が高校生から大学卒業するまで、アルバイトで学費を出した友人の話をして、僕が尊敬する数少ない友人の一人だと話しましたが、和田君も私が尊敬する友人の一人です。あえてここに理由は書きません。文章でもアレですので。大学院で得る事のできた最良の友人だと思っていますし、是非卒業後も懇意にしたいと思っていますけれど、現実はどうなるでしょうか。今後とも何卒宜しく御願申し上げます。

中村君、妹尾さん、大前君、金子君、角谷君、浅井さん、佐藤君、伊藤君、横地さん、大学院生活を通して皆さんのような人間と知り合えた事は、今後の僕の人生にとってとても大きな財産だと思います。それぞれ進む道は違えども、各々が各々の世界で一角の人物として活躍する事を切に願うとともに、僕も皆さんに負けないように努力し行きたいと思っています。

最後に父と母には、東工大ではなく通学費が高い東大に通わせてくれた事感謝しています。学費と交通費と不規則な生活を送る僕への心配の分は成長できたかと思っています。これから満を持して社会に出て、別の形で親孝行して行くつもりですので、これからも宜しくお願い致します。

要旨

Summary

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

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

学籍番号 47-106760

氏名 帯刀 良之 (Tatewaki, Yoshiyuki)

指導教員 神田 順 教授

1. 序

平成23年11月18日鹿児島県徳之島町轟木での被害報告のように、日本においても竜巻とみられる突風被害は発生しており、この場合、全壊1棟・死者3名と報告されている。一般に、竜巻は陸上の一地点を襲う確率が非常に小さく、竜巻を考慮した耐風設計は行われていない。しかし、原子力発電所など、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、原子力施設に関する竜巻関連の指針に見られるように、一定の指針が整備されている。

これらの現状から、日本においても竜巻を考慮した建築物の耐風設計の実用化を検討する必要があると考えられる。

2. 研究目的

本研究では、日本で発生する竜巻の性質や、荷重評価の為の風速・風向変化の把握を目的とし、次の3項目について検討を行う。1) 過去の竜巻被害について統計的な分析を行い、日本における設計用の仮想竜巻モデルを提案する。2) 竜巻発生装置を使用し、竜巻状風の風速・風向分布の把握を行う。3) 複数ファン風洞を使用し、短時間での風向変化という性質を持つ気流の作成と、短時間での風向変化が基本断面に対してどのような影響を及ぼすかを検証する。

Table.1 設計用仮想竜巻モデルのパラメータ

| model | F scale | Wind speed (m/s) | movement (m/s) | radius (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 |

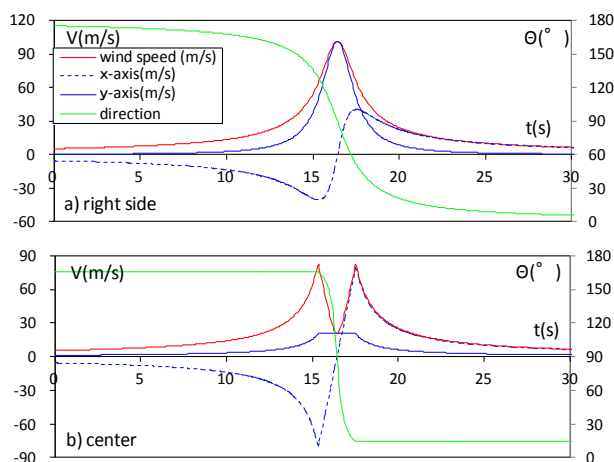


Fig.1 仮想竜巻モデルの時刻歴風速・風向変化

3. 日本における仮想竜巻モデルの提案

仮想竜巻モデルは帯刀ら(2011)が提案したモデルを使用する。これは1961年以降の竜巻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」の記録を主に使用し、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してモデル化したものである。

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 Table.1 に示す。過去に記録的な被害を与えた竜巻のパラメータも併記する。

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、提案した竜巻モデル(VF3)の風速・風向の時刻歴変化を算出し、Fig.1 に示す。これにより竜巻右側面が通過する最も風速が高い場合と、竜巻中心が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強く影響すると考えられる。

提案した竜巻モデルの強風域から、各都道府県の一年当たりの F2,3 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、その確率の高いものから順に 10 例を Table.2 に示す。

4. 竜巻状風の風速・風向分布の把握

竜巻状気流発生装置は、送風機を内蔵した「本体」と横方向に自走可能な「架台」から構成される。装置を Fig.2 に示す。下降流に旋回性状を与えるガイドベーンが 18 枚送風機内に配置されており、法線方向に対する角度を任意に設定できる。架台の最大移動速度は 0.4m/s である。実験ではベーン角度 30° ファン回転数 8Hz、移動速度;Vt をパラメータとして実験を行う。

渦静止時の Z-Z における風速分布を Fig.5 に示す。渦のコア半径;R=100mm、最大接線風速;Vm=4.29m/s、進行方向に対して渦の中心は装置の中心から右側に 10mm ずれている事を把握した。

これらの値は相似則上、先に提案した仮想竜巻モデル VF3 に相当するものである。

Vt=0.1 時の風速・風向の時刻歴変化を

Table.2 都道府県別の竜巻による被害発生確率

| rank | place | probability | | | |
|------|----------|-------------|----|----------|-----------|
| 1 | Okinawa | 1.85.E-05 | 6 | Kochi | 8.43.E-06 |
| 2 | Miyazaki | 1.51.E-05 | 7 | Kanagawa | 7.47.E-06 |
| 3 | Chiba | 1.13.E-05 | 8 | Shizuoka | 6.78.E-06 |
| 4 | Aichi | 1.13.E-05 | 9 | Oita | 6.49.E-06 |
| 5 | Tokyo | 1.10.E-05 | 10 | Gunma | 5.86.E-06 |

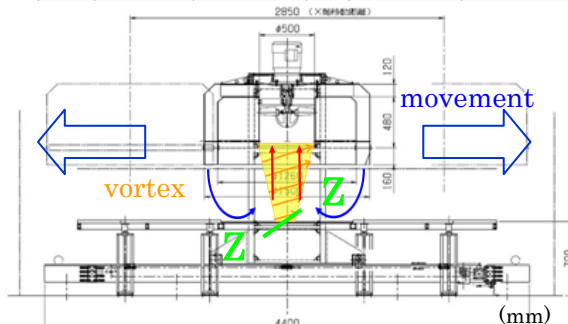


Fig. 2 竜巻状気流発生装置と渦生成の様子

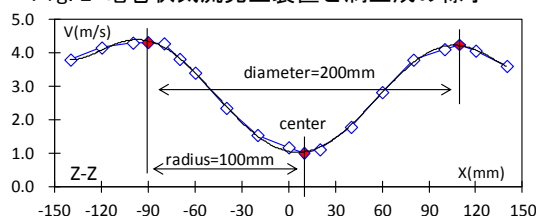


Fig. 3 Z-Z における風速分布

Fig.4 に示す。実験の結果、Rankine 渦モデル(黒線)よりも、Shakeel (2009)らの理論式(以下 W.K モデル(赤線))の方が、より適切に竜巻状風の風速分布を再現している事を確認した。W.K モデルの理論式を式(4.1)~(4.7)に示す。

$$\text{境界層厚さ; } \delta(r') = \delta_0 [1 - e^{-0.5r'^2}] \quad (4.1)$$

$$\text{中心距離係数; } r = r'/r_{\max} \quad \eta = z/\delta \quad (4.2)$$

T;接線方向成分

$$T(\eta, r) = f(r) = 1.4 \frac{V_{\max}}{r} [1.0 - e^{-1.256r^2}] \quad (4.3)$$

W;鉛直方向成分

$$W(\eta, r) = g(r) = 93.0r^3 e^{-5r} V_{\max} \quad (4.4)$$

for $\eta > 1$

$$T(\eta, r) = f(r) [1 - e^{-\eta} \cos(2b\pi\eta)] \quad (4.5)$$

R=中心方向成分

$$R(\eta, r) = f(r) [0.672e^{-\eta} \sin\{(b+1)\pi\eta\}] \quad (4.6)$$

$$W(\eta, r) = g(r) [1 - e^{-\eta} \cos(2b\pi\eta)] \quad (4.7)$$

for $\eta \leq 1$

ここで δ_0 ;境界層高さ z ;地表面高さを示す。

5. 風速・風向変動による非定常作用

竜巻発生装置での実験結果より、Fig.4に示した風速・風向の時刻歴変化のうち、複数ファン風洞による風速・風向変動の部分的模擬気流を作成し、構造物への非定常作用を把握する。

複数ファン風洞は縦6段横3列の計18個の小型ファンを独立制御することで、測定洞内に風速・風向変動といった非定常性を有する気流を再現できる特殊な風洞である。風洞の概要をFig.5に示す。

風向変動を伴う気流を作成するには、複数ファンの上端と下端のファンをそれぞれ正回転・逆回転させることで風向を変化させる。その際の回転数のバランスを調整することで、測定点周辺で安定した風向の変化を可能にする。測定点の位置と風向変化のメカニズムをFig.6に示す。

本研究では最大風速5割程度の風速変化、風向変化 20° 程度として、定常流(st.1,st.2)、風速上昇のみ(st.3)、単純風向変化(st.4,st.5)、風速・風向の同時変化(st.6,st.7)、折り返し風向変化(st.8,st.9)の計9typeの気流を作成した。気流の一覧をTable.3に、例としてst.4の入力電圧と風速・風向の関係をFig.7に示す。測定は、1000Hzの30s計測とし、2回のアンサンブル平均結果を200個の移動平均として扱う。

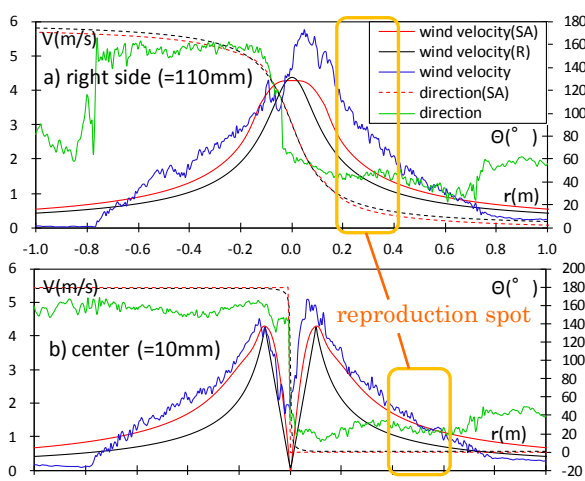


Fig. 4 渦モデルの比較と風速の時刻歴変化

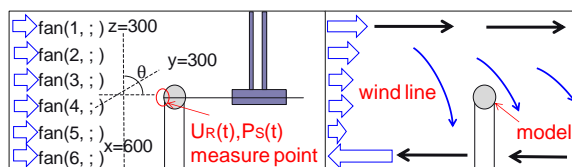


Fig. 6 測定点位置と風向変化のメカニズム

Table. 3 実験気流一覧

| stream type | ΔU (m/s) | ΔD ($^\circ$) | Δt (s) | remarks |
|-------------|------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|
| st.1 | - | - | - | stationary (0.9m/s) |
| st.2 | - | - | - | stationary (2.2m/s) |
| st.3 | 1.2 | - | 1 | velocity only |
| st.4 | - | 23.4 | 1 | direction only |
| st.5 | - | 24.7 | 1 | direction only (reverse) |
| st.6 | 1.5 | 22.0 | 1 | vel & dir |
| st.7 | 1.2 | 18.8 | 1 | vel & dir (reverse) |
| st.8 | - | 21.0 | 2 | direction only |
| st.9 | - | 21.8 | 2 | direction only (reverse) |

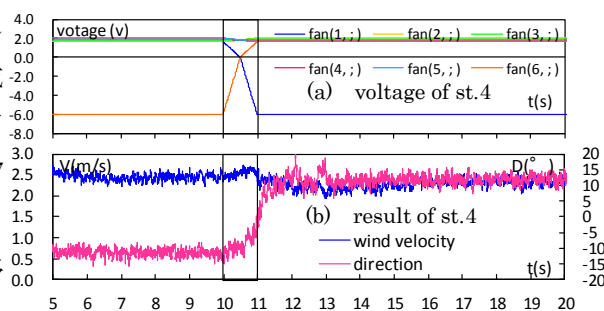


Fig. 7 実験気流例

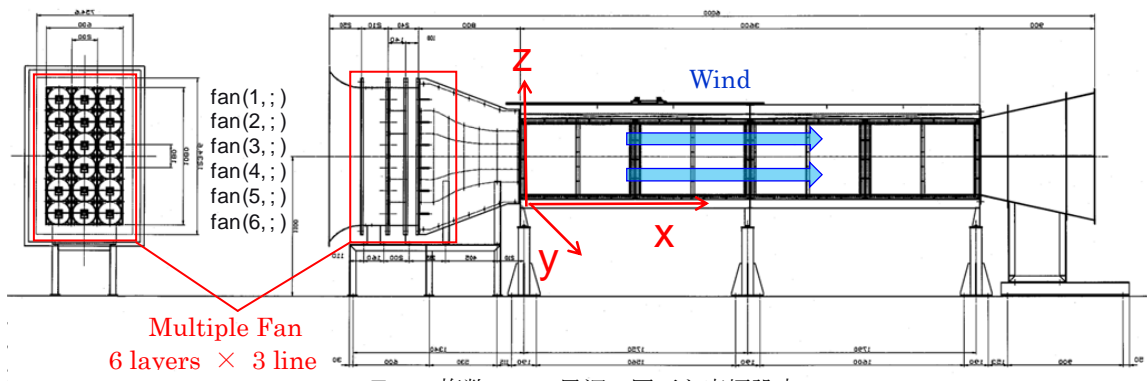


Fig.5 複数ファン風洞の図面と座標設定

6. 円柱・角柱模型による風圧測定

作成した気流による風圧測定実験を行う。設置する角柱模型の角度は $0\sim 45^\circ$ まで 5° 毎とし、計 90 通りの測定を行う。角柱模型の設置要領と角柱の風圧測定点について Fig.8 に示す。角柱模型において、風向が短時間で変化することで瞬間的に大きな負圧を計測した例の、気流変化前後の平均値と時刻歴変化の様子を Fig.9 に示す。

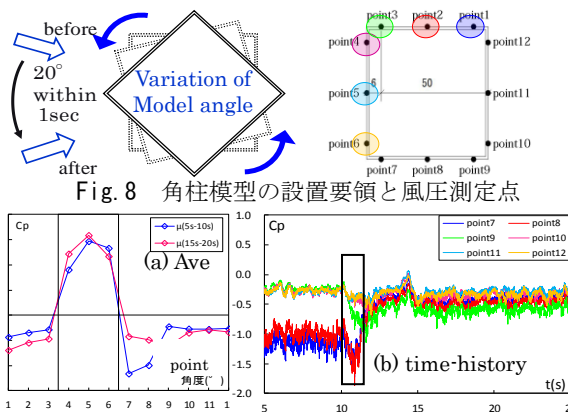


Fig. 8 角柱模型の設置要領と風圧測定点

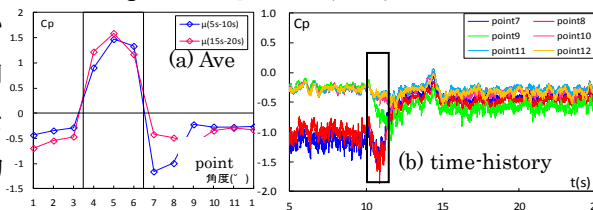


Fig. 9 模型角度 5° st.5 による風圧係数

次に風力係数を算出する。一般に風力係数は風方向に対して算出するが、本研究では非定常に風向が変化する事から、風圧模型を軸に x 方向風力係数、y 方向風力係数、捩じりモーメント係数という形で算出する。

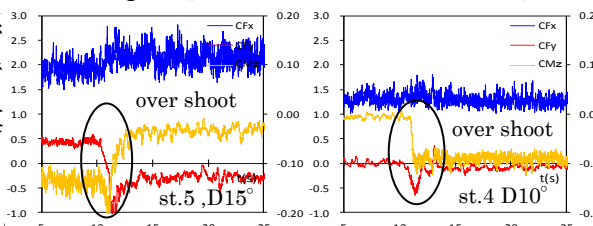


Fig. 10 オーバーシュート計測事例

気流変化前後でオーバーシュート現象を確認した例と、風向変化中に y 方向風力係数が大きく変動した例を Fig.11 示す。

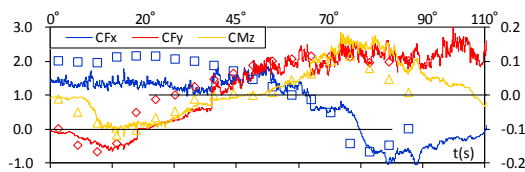


Fig. 11 風力係数の角度毎の推移

気流の風向変化と、模型の設置角度から、各時刻歴風圧係数を連続的に重ね合わせる事で、約 110° 風向が変化した場合の風力係数の推移が把握できる。算出した風力係数の角度毎の推移を Fig.12 に示す。

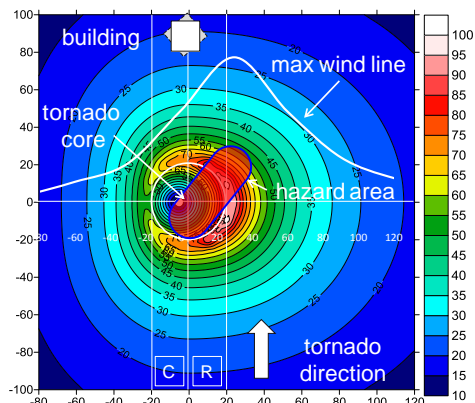


Fig. 12 竜巻風速分布と被害予測区域

8. 竜巻による非定常作用の推定

これまでの結果から、竜巻が構造物に対して損害を与える際の、構造物と竜巻の位置関係を推定し、定常流と比較して竜巻による非定常作用がどの程度大きなものとなるか算出する。竜巻との位置関係を Fig.12 に、非定常作用評価を Table.4 に示す。

Table. 4 非定常作用の評価

| facter | tornado (over shoot) | stationary | rate | case |
|--------|----------------------|------------|-------|-------------------------|
| Cp | -1.97 | -1.20 | 1.64 | 10° ,st.5,point7 |
| CfX | 1.59 | 1.18 | 1.35 | 40° ,st.4 |
| CfY | -1.31 | -0.05 | 26.20 | 10° st.5 |
| CMZ | -0.11 | -0.04 | 2.75 | 0° ,st.4 |

【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) 喜々津仁密, 奥田泰雄, 河井宏允, 神田順“竜巻状気流発生装置の概要と基本特性”2010 年度日本建築学会大会(信州)

9. 結

日本で起こる竜巻の風速場と被害の発生確率を算出し、竜巻により構造物が損害する可能性が高い竜巻の風速域と、その非定常作用の程度を明らかにすることで、竜巻の非定常作用について、実現象に則した評価を行った。

付録

Supplement

S. 1 入力電圧と複数ファンの追従性

1列複数ファン風洞の際はファンにマイナスの電圧を入力出来なかったが、2010年夏の3列への改修により、ファンを逆回転させる事が可能となった。これにより、従来の吹き出し型風洞としてのみならず、吸い込み式風洞としても使用できると考えられる(整流装置無し)。吹き出し型と、吸い込み型の風洞の使用の方法の様子を図S.1.1に示す。

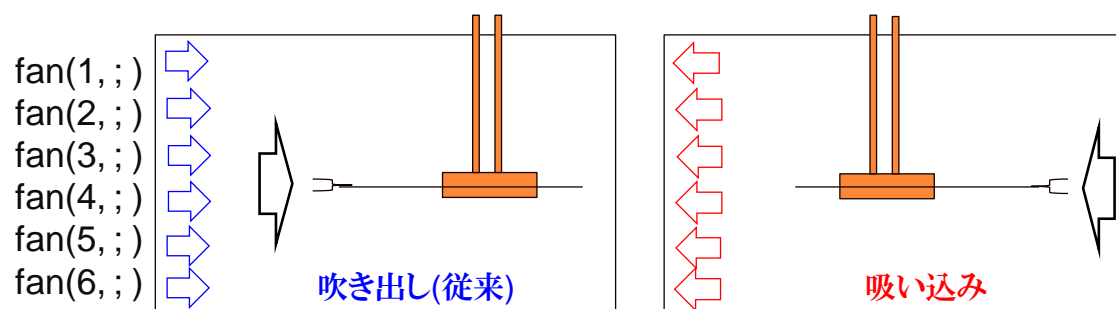


図 S.1.1 風洞の使用方法の違い

また、入力電圧が等しくても、吹き出し気流と吸い込み気流では測定胴内の風速が異なり、吹き出し気流の方が乱れが小さい。使用法による風速と乱れの違いについて、風速を図S.1.2、乱れの違いを図S.1.3に示す。

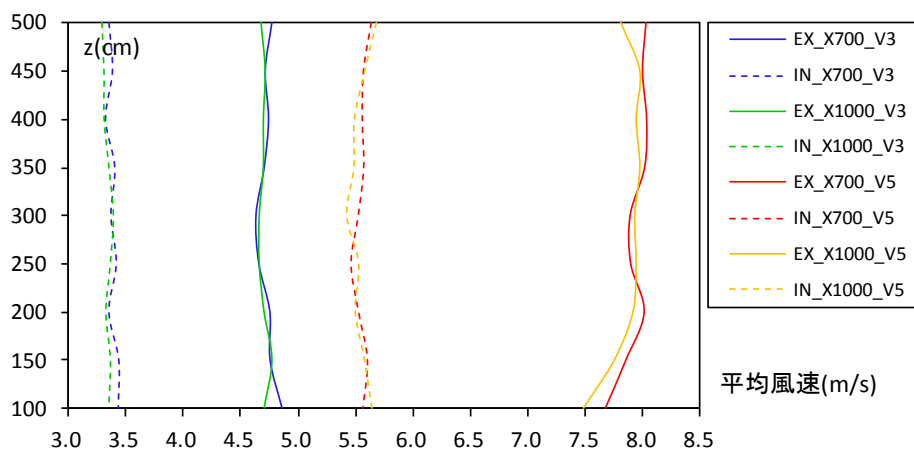


図 S.1.2 使用方法による平均風速の違い

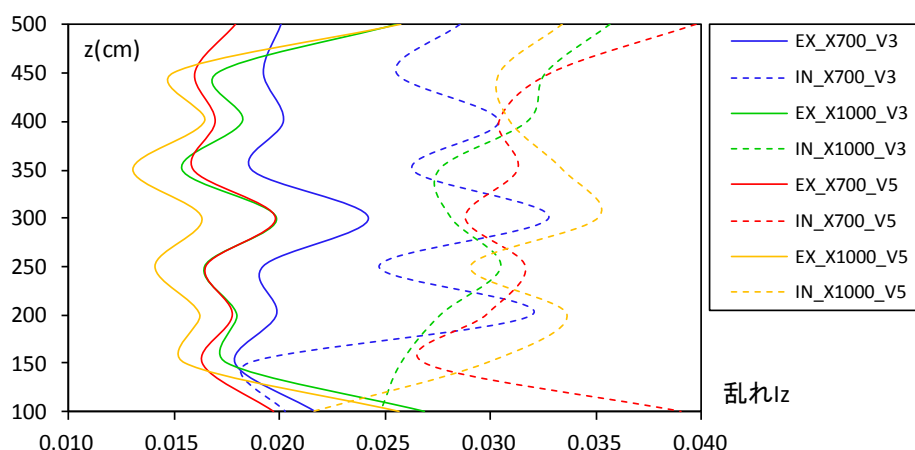
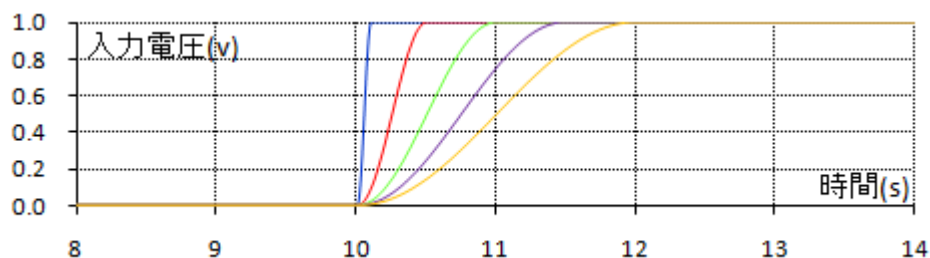


図 S.1.3 使用方法による乱れの違い

次に、入力電圧の大きさと、入力電圧の立ち上がり時間をパラメータとし、±の電圧と風速の立ち上がり時間と風速の低下時間に着目した実験を行う。

図 S1.4 入力電圧波形



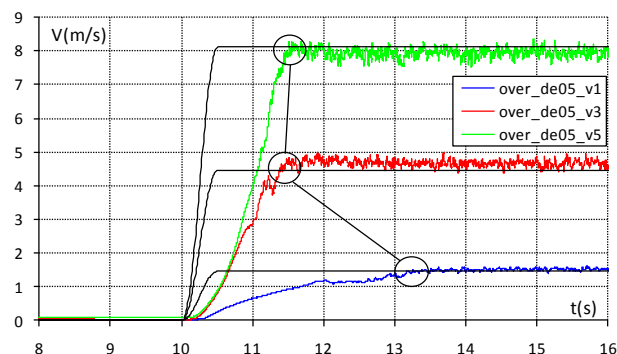
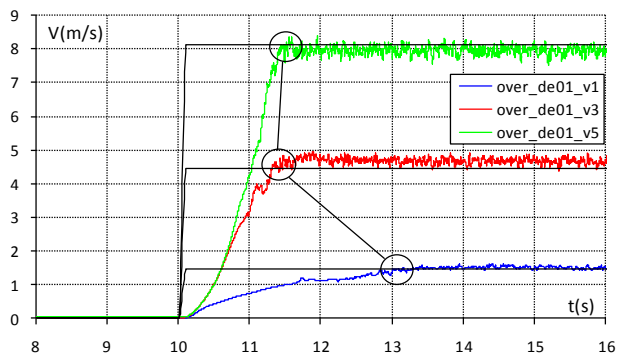
これまでの実験において、+の方が-よりも入力電圧に対する追従性に優れている事が確認出来ている事から、入力電圧との追従性についても、+の方が把握し易い事が予測出来る。

この実験で入力する電圧は立ち上がり、減少時間ともに 0.1,0.1,1.0,1.5,2.0 とし、入力電圧は 1v,3v,5v とすることで計 60 通りの実験を行った。波形の様子を図 S.1.4 に、吹き出し、吸い込みの平均風速の違いを表 S.1.1 に示す。

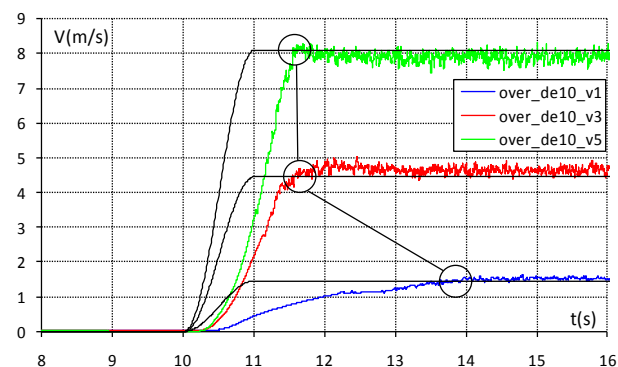
表 S.1.1 入力電圧と平均風速との関係

| exhale | | | inhale | | |
|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| 入力電圧 | 出力(Pa) | 風速(m/s) | 入力電圧 | 出力(Pa) | 風速(m/s) |
| 0 | 0 | 0.000 | 0 | 0 | 0.000 |
| 0.5 | 0.3 | 0.701 | 0.5 | 0.1 | 0.405 |
| 1 | 1.3 | 1.460 | 1 | 0.8 | 1.145 |
| 1.5 | 3.1 | 2.254 | 1.5 | 1.8 | 1.718 |
| 2 | 5.8 | 3.084 | 2 | 3.2 | 2.290 |
| 2.5 | 9.3 | 3.905 | 2.5 | 5 | 2.863 |
| 3 | 13.3 | 4.669 | 3 | 7.3 | 3.459 |
| 3.5 | 18.6 | 5.522 | 3.5 | 10.2 | 4.089 |
| 4 | 25.2 | 6.427 | 4 | 12.7 | 4.563 |
| 4.5 | 32.5 | 7.299 | 4.5 | 16.7 | 5.232 |
| 5 | 40.1 | 8.108 | 5 | 20.5 | 5.797 |

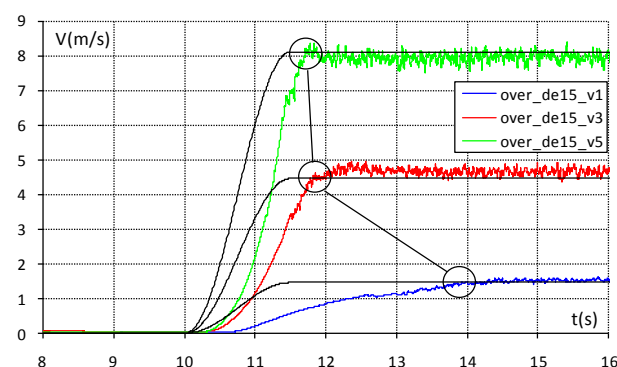
実験結果



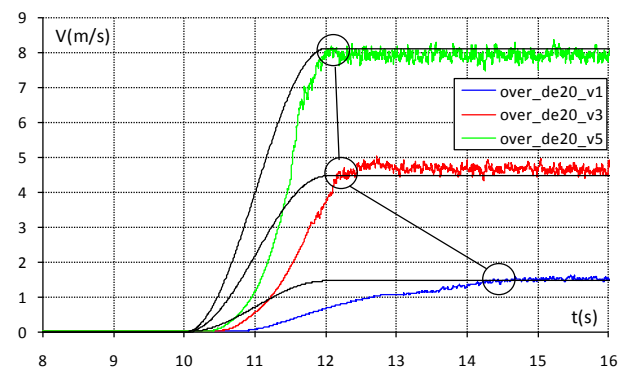
over-ex-de01



over-ex-de05



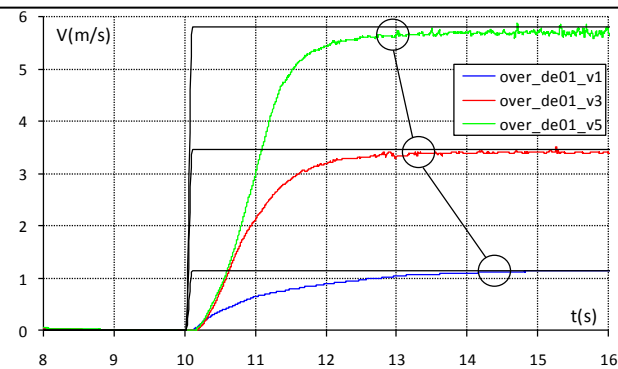
over-ex-de10



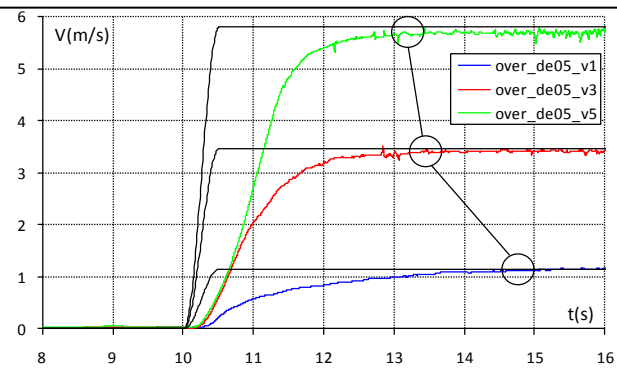
over-ex-de15



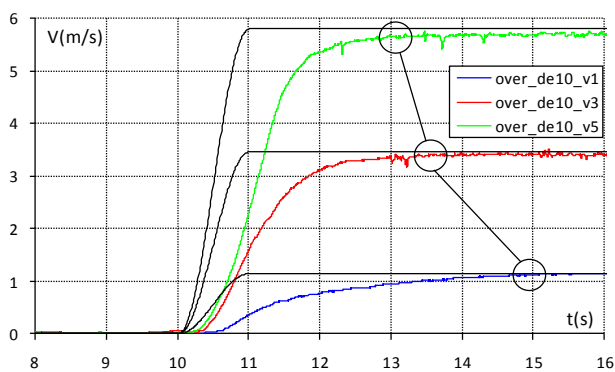
over-ex-de20



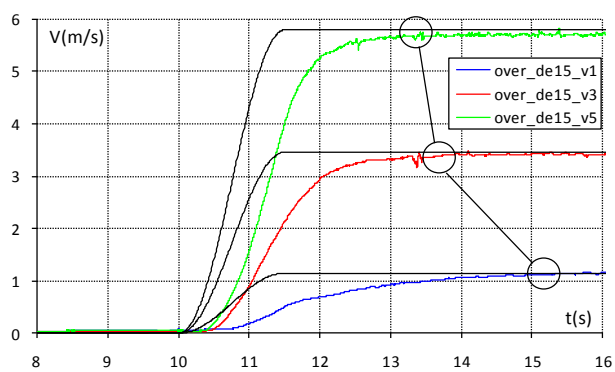
over-in-de01



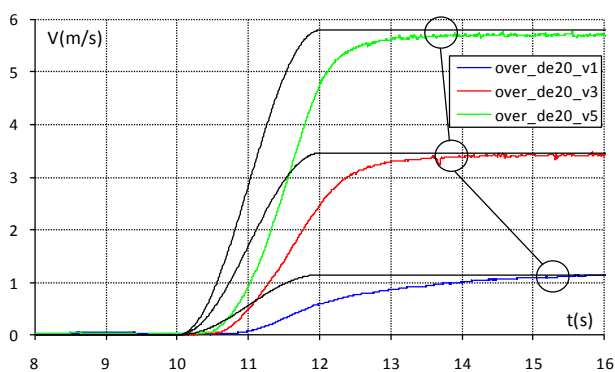
over-in-de05



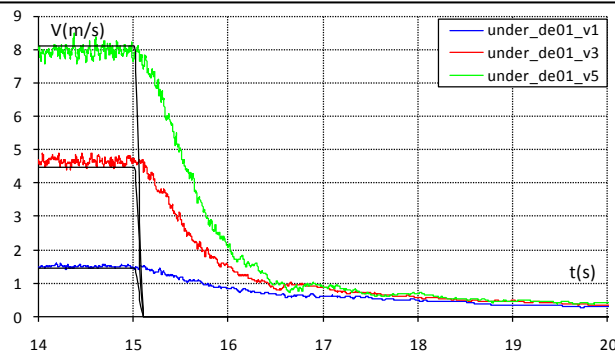
over-in-de10



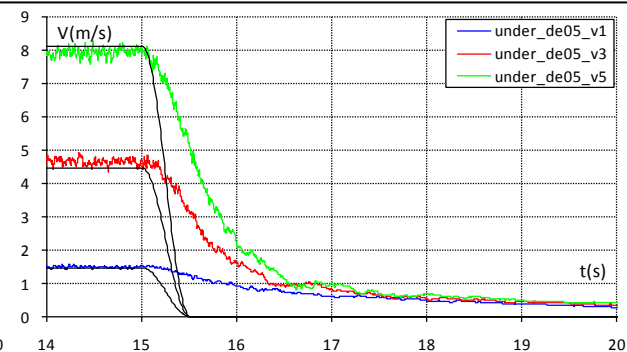
over-in-de15



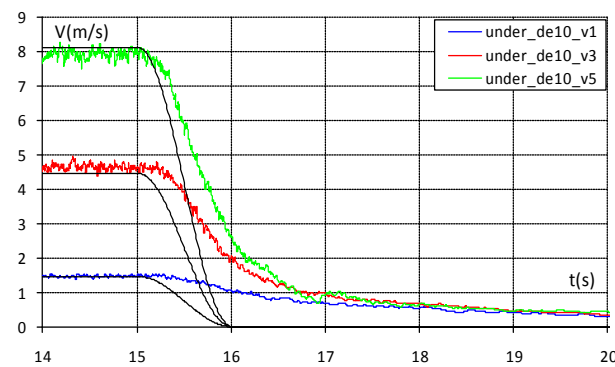
over-in-de20



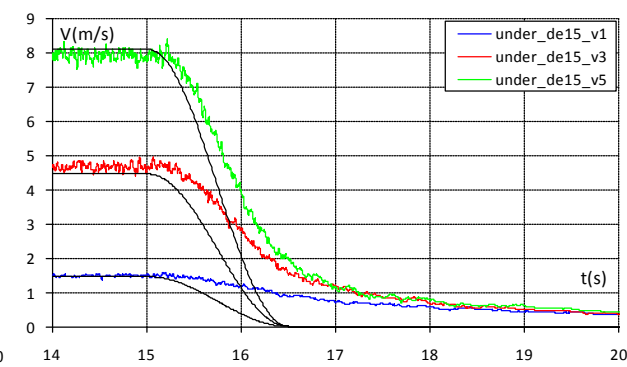
under-ex-de01



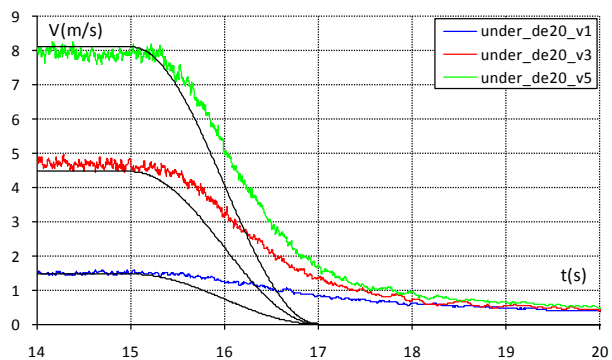
under-ex-de05



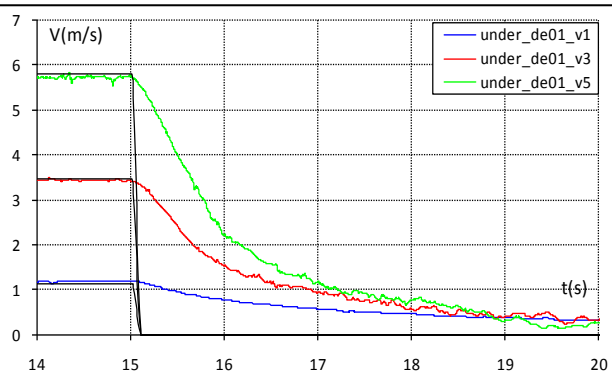
under-ex-de10



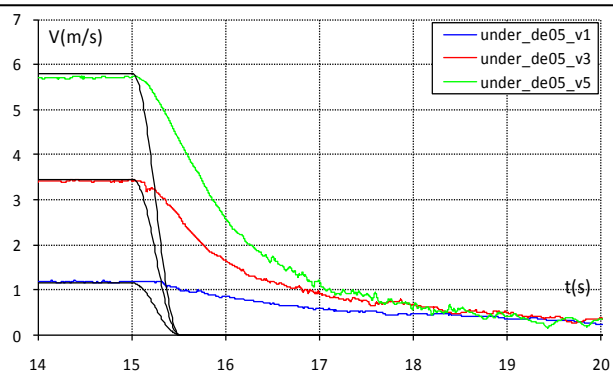
under-ex-15



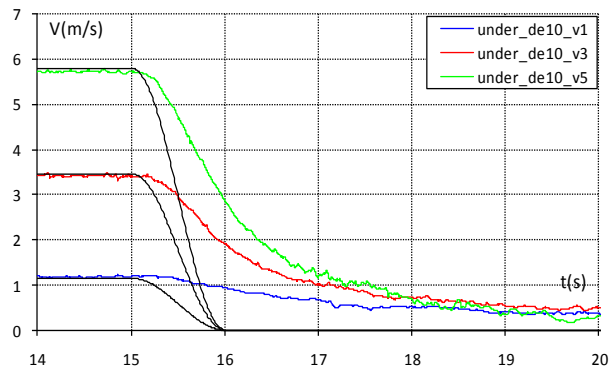
under-ex-de20



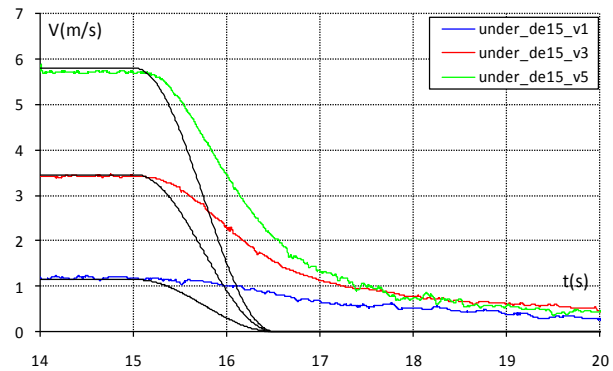
under-in-de01



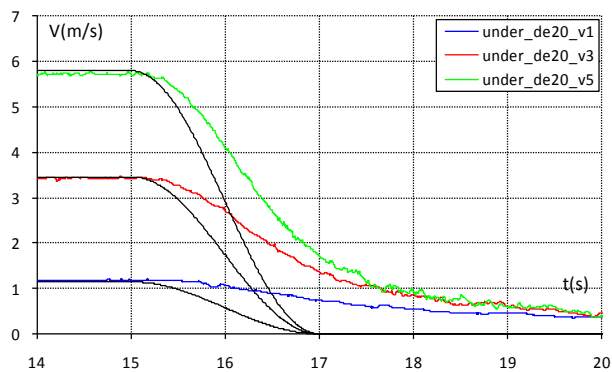
under-in-de05



under-in-de10



under-in-de15



under-in-de20