

## 大型境界層風洞における風車の風荷重試験手法

松島, 啓二  
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/2329115>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所技術室 技術室報告. 1, pp.1-7, 2019-07. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

# 大型境界層風洞における風車の風荷重試験手法

松島 啓二

## 要 旨

応用力学研究所風工学分野は、風力発電装置の研究・開発を研究テーマの一つに掲げており、独自設計の風車模型を用いた風洞実験が、盛んに実施されている。その中でも、主要な風洞実験の一種として、風荷重試験が挙げられる。風車の風荷重試験は、分力計やロードセル等を用いて、風車が気流から受ける力を計測するものであるが、適切な計測を行うためには、被検体の形状や強度、風洞の特徴に即した実験方法を検討し、実践する必要がある。

## キーワード

風洞実験 風荷重 分力計 ロードセル 歪みゲージ

## 1. はじめに

応用力学研究所大型境界層風洞は、1999年3月に建設された実験設備であり、指定した速度の気流を発生させる装置である。気流中に被検体を配置することで、気流が被検体に及ぼす作用や、被検体から気流が受ける影響を観測・計測することが可能であり、様々な流体実験に使用されている。近年、盛んに実施されている実験は、風力エネルギーの利用に関する実験であり、風車などの風力発電装置やその模型を用いて、発電性能の評価、空力特性の調査などが行われている。

風車に関する主要な風洞実験の一つとして、風荷重試験がある。風車の風荷重試験は、風車が風からどの程度の力を受けるかを評価する実験であり、その試験結果は、風車実機を建設する際の必要強度を推定するために用いられるほか、各運転状態の風車に係る空力特性の評価、風車と気流の相互作用に係る調査など、多様な研究に利用される。本稿では、大型境界層風洞で行われている風車の風荷重試験について紹介し、その詳細な実験手法を説明する。

## 2. 抗力係数について

風荷重の評価は、抗力係数を用いて行われる。抗力は、気体が物体に衝突することで物体が受ける力であるが、抗力係数は、次のように定義される。気体に対して相対速度  $U$  [m/s] で移動する物体

が気体から抗力  $F$  [N] を受けているとした場合、気体が物体にした仕事の仕事率は  $FU$  となる。一方、物体に相対速度  $U$  で衝突する気体の運動エネルギーは、物体の受風面積を  $A$  [m<sup>2</sup>]、気体の密度を  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] とすると、 $(1/2) \cdot \rho AU \cdot U^2$  となる。 $\rho AU$  は衝突した気体の総質量である。この時、物体の形状等によって、衝突した気体の全運動エネルギーと物体が受けた仕事率との比が変わる。この比が抗力係数  $Cd$  である。即ち、式(1)となり、 $Cd$  の定義式は式(2)となる。

$$FU = Cd \times \frac{1}{2} \rho AU^3 \quad (1)$$

$$Cd = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho AU^2} \quad (2)$$

風洞実験時の風速や被検体サイズを調整し、レイノルズ数  $Re=UL/\nu$  ( $L$ : 代表長さ [m]、 $\nu$ : 動粘性係数 [m<sup>2</sup>/s]) を大気中と同程度に合わせれば、実験によって得られた  $Cd$  を、大気中における実際の  $Cd$  と見なすことが可能である。

## 3. 計測機器・装置類

風車の風荷重試験では、主に以下のセンサーや機器を使用している。

- ① 歪みゲージ
- ② ロードセル
- ③ 分力計
- ④ ストレインアンプ
- ⑤ AD変換器
- ⑥ ACサーボモーター

図1に、風荷重試験システム例の模式図を示す。

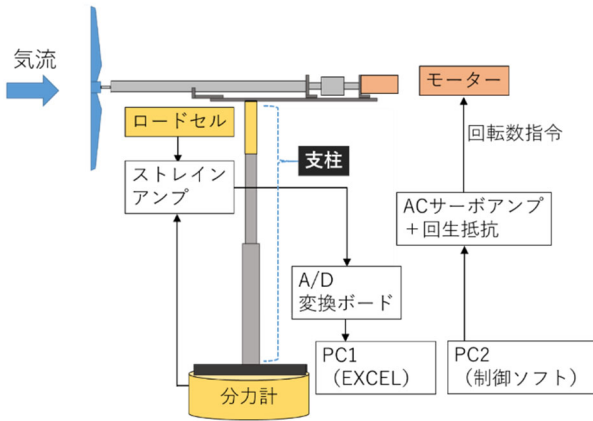


図1 風荷重試験システム例の模式図

### 3-1. 歪みゲージ

電気抵抗式歪みゲージは、図2のように、金属箔にリード線が繋がった構造をしており、被検体表面に接着剤等で貼り付けて使用する。被検体に力が加わると、被検体に歪みが生じ、被検体表面に固着した歪みゲージも同程度歪む。金属箔が歪むとその抵抗値が変化するため、歪みゲージの抵抗変化量を読み取ることで、力を計測することができる。

歪みゲージの抵抗変化量を計測する際は、ホイートストンブリッジ回路(図3)を利用する。 $R_1=R_2=R_3=R_4$ として出力電圧を0Vとした後、力が加わって $R_1$ が $R_1+\Delta R$ に変化すると、非ゼロの出力電圧が生じるので、歪みを計測することができる。ブリッジ回路を利用する理由としては、測定器の内部抵抗を考慮する必要がないこと、ゼロ点からの変位を計測することで微小変化の読み取りが可能になることなどが挙げられる。

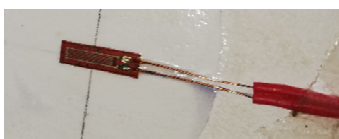


図2 電気抵抗式歪みゲージ

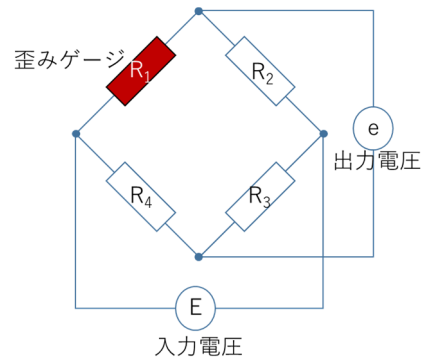


図3 ホイートストンブリッジ回路

### 3-2. ロードセル

歪みゲージ式ロードセルは、起歪体と呼ばれる金属製の構造物に歪みゲージが貼り付けられた計測器である。ロードセルには、用途に応じて様々な形状・特性のものが存在するが、当該風洞における風荷重試験では、作用点の精密な特定が不要なロバーバル型(図4)を使用している。



図4 ロバーバル型ロードセル

### 3-3. 分力計

分力計(図5)は、被検体に加わる力を、3軸(X,Y,Z)方向の力と3軸回りのモーメントという計6成分の力に分解して、そのいずれか、またはすべてを計測するセンサーである。分力計は、例えば図6のような内部構造を備えており、起歪体の構造と歪みゲージの組み合わせによって、力の各成分を分力して出力している。

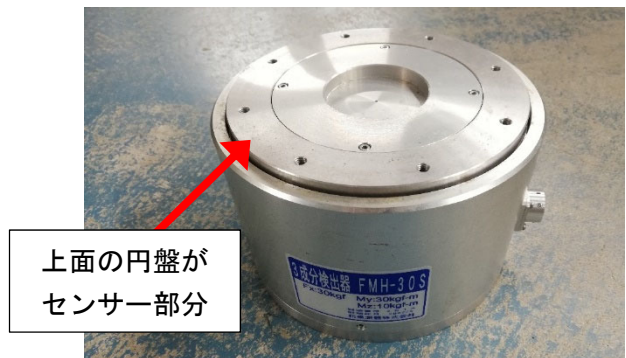


図5 分力計

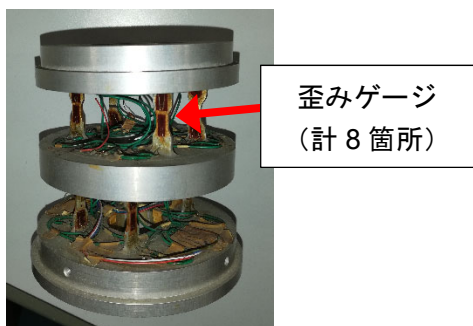


図6 分力計の内部構造

### 3-4. ストレインアンプ

ストレインアンプ (図 7) は、歪みゲージの微小な抵抗変化量 (ブリッジ回路の出力) を増幅して出力する増幅装置であり、ブリッジ回路への電源供給も担う。多くは、平衡調整やフィルターといった付属機能を備えている。



図7 ストレインアンプ

### 3-5. AD 変換器

ストレインアンプからの出力信号はアナログ電圧であり、これをデータとして取り込むために AD 変換器を使用する。AD 変換器としては多種多様な機器が存在しているが、大型境界層風洞では、PCI ないし PCIe を介してパソコンに取り付ける AD 変換ボード (図 8) を使用している。実験では 10kHz 程度のサンプリングを必要とする場面があり、それに適したサンプリングレート帯を使用できること、加えて、Excel VBA (Microsoft 社) による操作が可能で計測結果を即座に Excel 上で処理できることなどが、その理由である。



図8 AD 変換ボード

### 3-6. AC サーボモーター

発電中の風車を模擬するためには、風車のローターを特定の回転数で回転させる必要がある。そのために、AC サーボモーターシステム (図 9) を用いて、風車をモーター駆動させている。モーターの容量・特性に関しては、予測される風車ローターの必要回転数やローターにかかるトルク等を勘案し、十分な高風速下でローターを制御できるものを選択する必要がある。

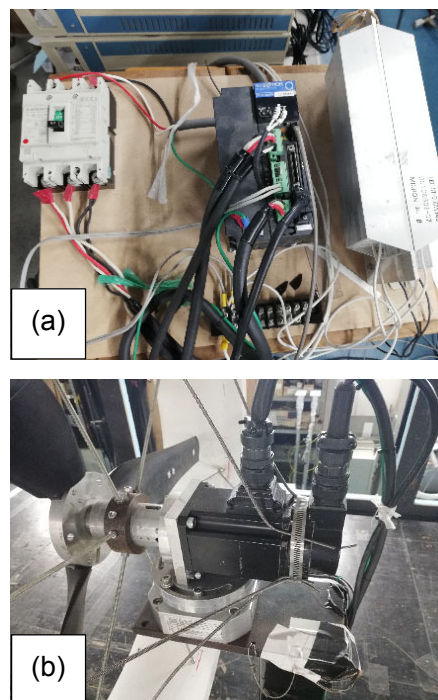


図9 AC サーボモーターシステム  
(a) AC サーボアンプ (b) AC サーボモーター

## 4. 実験方法

実験手順の概要としては、被検体である風車模型およびセンサーの設置、計測機器類のセットアップ、センサーの校正、計測となる。

過去に実施してきた風車実験では、ローター径 30cm、60cm、1m という 3 種類の風車模型が使用された。それぞれ、予測される風荷重や模型重量、模型の支持構造等が異なるため、適切な計測方式を検討する必要があった。即ち、30cm 風車については、支柱に歪みゲージを貼り付ける方式 (図 10) を採り、60cm 風車の場合は、一部をロードセルに置き換えた支柱 (図 11) を用い、1m 風車の実験では、支柱ごと分力計に搭載設置して計測を行った。

今回は、従来と異なり 60cm 風車を分力計に載せて行った実験（2019 年 3 月実施）を例に、風荷重試験の手順を解説する。本実験は、従来のロードセルを使用した 60cm 風車の試験結果を別方式で確認するための追試といえる。

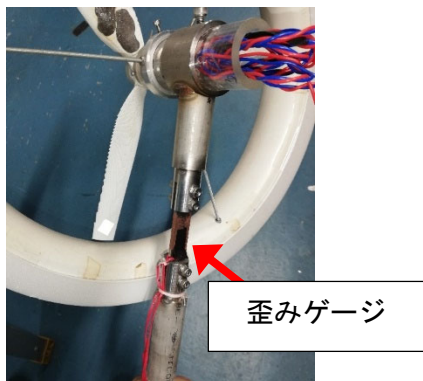


図 10 歪みゲージを貼り付けた支柱

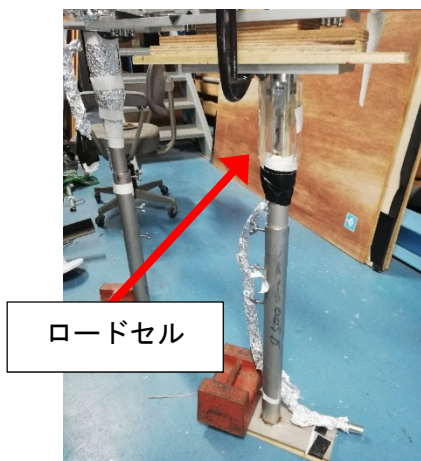


図 11 一部をロードセルに置き換えた支柱

#### 4-1. 風車模型およびセンサーの設置

風洞測定部の床板は、一部が外れる構造になっており、その下に位置する建屋床には、被検体を固定するための支持台が備え付けられている（図 12）。風洞壁面（側壁・床・天井）の影響を排するために、被検体の配置は主流断面の中央とすることが望ましいので、支柱の長さ、支柱を含む風車模型全体を分力計の上に搭載することを勘案し、支持台の高さ調節を行う。

床板を外し、支持台の高さを調節し、分力計を支持台に固定した後、分力計に風車を搭載固定して、基本的な設置作業は完了となる。この時、分力計が水平に設置されていること、分力計の方向が主流方向に対して適切であること、風車のヨー角度（首振り角度）が計測条件に適っていること

などを確認する必要がある。

なお、固定用の治具やアダプタ（図 13）は、金属材料の加工等によって製作している。



図 12 建屋床に備え付けられた支持台



図 13 分力計・被検体固定用の治具やアダプタ

#### 4-2. カバー設置

被検体の設置に際して風洞の床板を外したが、風洞内の流速が上がると静圧が下がる（ベルヌーイの定理より）ので、相対的に気圧が高くなった床下から風洞内に気流が入り込んで、正確な計測を困難にする。これを防ぐため、計測前に当該の穴を塞ぐ必要がある（図 14）。

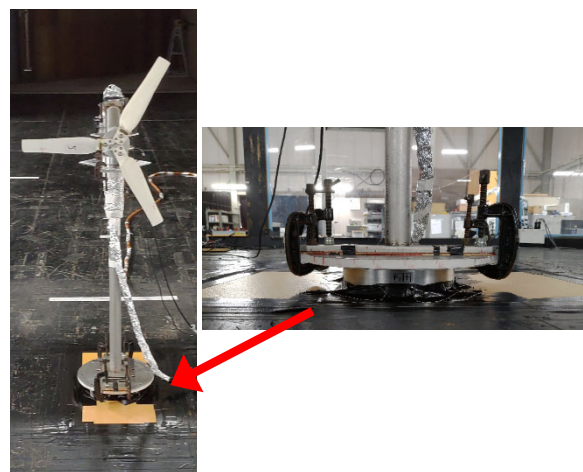


図 14 風洞測定部床の穴を塞いだ様子

さらに、気流が分力計センサー部と被検体との接続部分に当たると、被検体だけの風荷重とは見做せなくなるため、分力計センサー部を包むように風よけカバーを設置して、これを防ぐ(図 15)。

穴を塞ぐ工作物と風よけカバーは、いずれも被検体に接触しないように注意する必要がある。また、風よけカバーの上流側は、気流が乱れないように、上流に向けて緩やかに下る形状で作成しなければならない。



図 15 風よけカバー

安定性によって変わり、数週間の実験で最初に 1 回だけ行う場合もあれば、毎日最初と最後に行う場合もある。

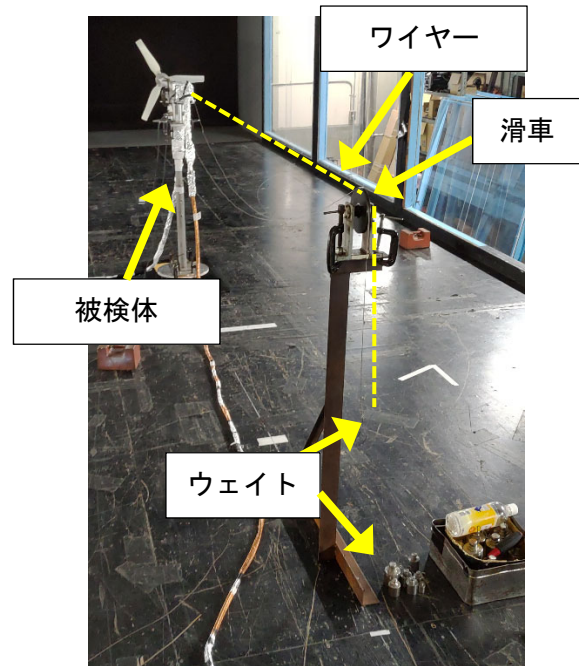


図 16 校正の様子

### 4-3. 計測機器・駆動機器のセットアップ

今回取り上げた実験では、3 成分を計測できる 3 分力計を用いている。なお、実験目的としては、抗力である  $F_x$  だけ計測できればよい。分力計から伸びる 3 系統の出力は、3 ユニットのストレインアンプにそれぞれ接続され、ストレインアンプの出力は、AD 変換ボードの端子台における 3 つのポートにそれぞれ入力される。

モーター制御用(および電源供給用)の AC サーボアンプは、PC 上のソフトウェアによって設定・操作される。気流がより高速に回転させようとするローターを、モーターが一定回転数に制動することで、回生エネルギーが発生するため、ドライバーには十分な容量の回生抵抗を接続する必要がある。

## 5. 校正

当該風洞における風荷重試験では、重量が既知であるウェイト(分銅)を用いて、分力計(あるいは歪みゲージやロードセル)の校正を行っている。図 16 は校正の様子を、図 17 は校正結果のグラフを示す。校正頻度は、センサーや実験環境の

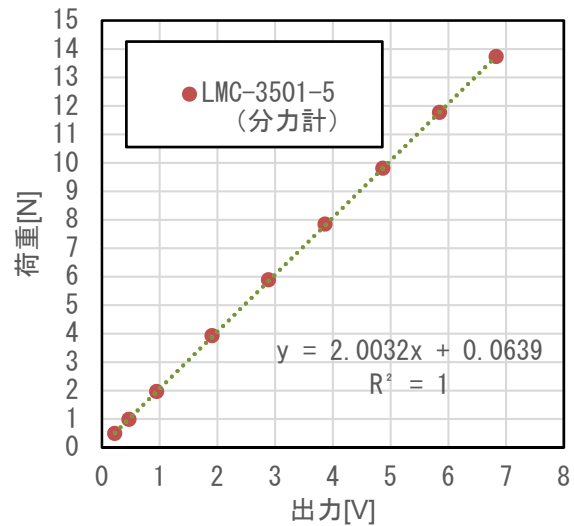


図 17 校正結果のグラフ

## 6. 実験条件

従来行ってきた 60cm 風車の風荷重試験は、ロードセルを用いたものであり、その一部がロードセルであるような支柱(以下、ロードセル支柱と呼称する)と風車模型を使用している。今回は、分力計を用いて同じ実験を行ったものであり、ここでは、以下の条件での計測について述べる。

- 風速：6, 12 m/s
- Case：
  - (1) 分力計の上にロードセル支柱と風車模型
  - (2) ロードセル支柱の上に分力計と風車模型

前掲の図 1 は Case (1) に該当するが、Case (2) のように支柱と分力計の位置を変えている理由については、実験結果とともに述べる。

なお、Case (2) では、分力計に 4-2 節の風よけカバーを設置していない。これは、接続部分のアダプタ（金属板）の受風面積を十分に小さくした（図 18）ので、風荷重への影響は無視できると考えたためである。実際に無視できるものであるか否かは、計測結果を分析して判断する必要がある。

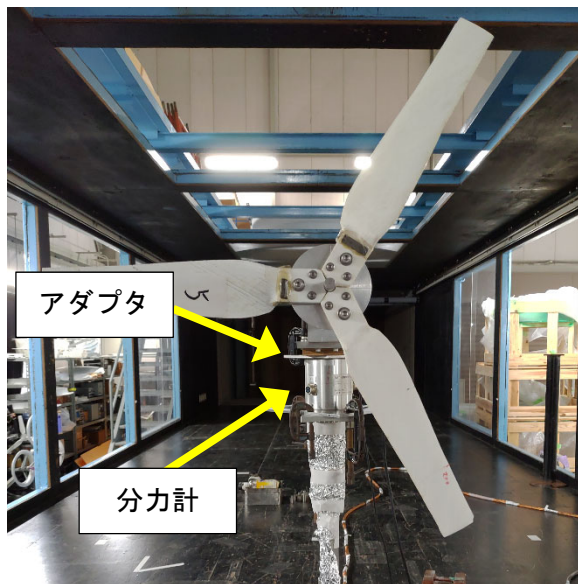


図 18 分力計と風車模型の接続部分

### 7. 実験結果と考察

今回の実験における Case (1) の結果を図 19 に示す。参考値として、過去（2018 年 11 月）にロードセル支柱で計測した結果を併せて記載している。Case (1) の風速は 6m/s で実施したが、2018 年試験では 6,8,10,12m/s で行っている。 $\lambda$  は周速比と呼ばれるパラメータであり、 $\lambda = v/U$  ( $v$ : 翼端速度、 $U$ : 風速) で定義される。 $\lambda$  は、風速とローター径が一定であれば、回転数に比例して増加する。

同図から分かる通り、過去の実験結果とは大きく異なる結果となり、正常な計測の結果とは考えられない。ロードセルの結果については、駆動系のインバーターノイズが考えられた。経験上、

分力計が当該ノイズの影響を受けることは少なかつたが、ロードセルの場合はノイズの影響が顕著であったためである。分力計の結果に関しては、支柱の剛性が疑われた。作用点からセンサーまでの構造に剛性が不足していると、正確な荷重計測ができないためである。他に、分力計の計測レンジに対して荷重が小さすぎる可能性も考えられた。そこで、分力計を支柱の上かつ風車本体の直下に設置して、さらに、風荷重を上げるために風速を 12m/s とし計測を行った。加えて、各所のケーブルに銅箔シールド、フェライトコア等のノイズ対策を実施した。本稿では、これを Case (2) としている。

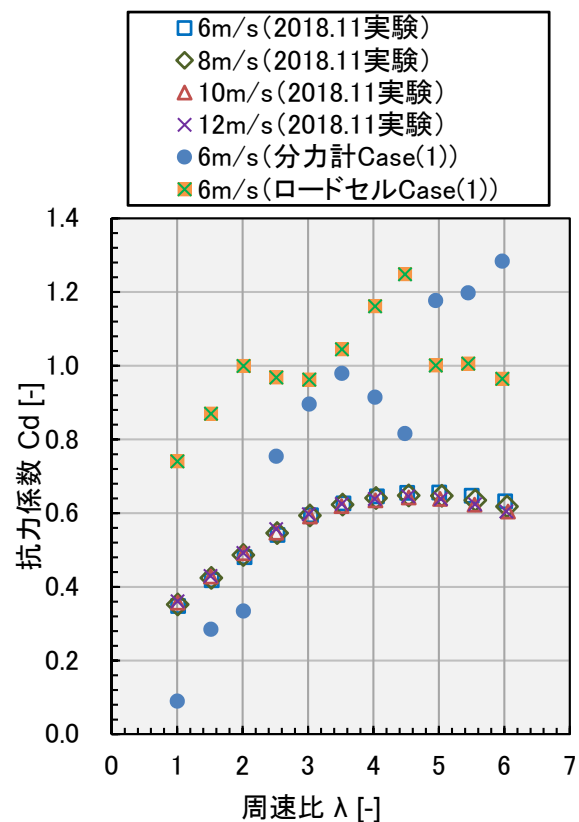


図 19 Case (1) の結果

図 20 に Case (2) の結果を示す。Case (2) の結果は、2018.11 のグラフに近いものとなった。一方、特に  $\lambda=4$  付近から以降で、分力計 (Case (2)) とロードセル (2018.11) の差が広がっている。この原因は特定できていないが、気温差やセッティングの微差が影響している可能性がある。厳密な比較が有効なのは、同時期に同じセッティングで計測した、分力計 (Case (2)) とロードセル (Case (2)) である。

ここで、ロードセル (Case (2)) がより高いのは、分力計本体が受ける風荷重の分だけ加算されたためではないかと推測する。「分力計に搭載されている風車および駆動系」と「分力計以下」を切り離し、「風車の後流を受ける分力計」だけをロードセルで計測すれば、分力計本体が受ける風荷重を適切に差し引くことができるかもしれない。

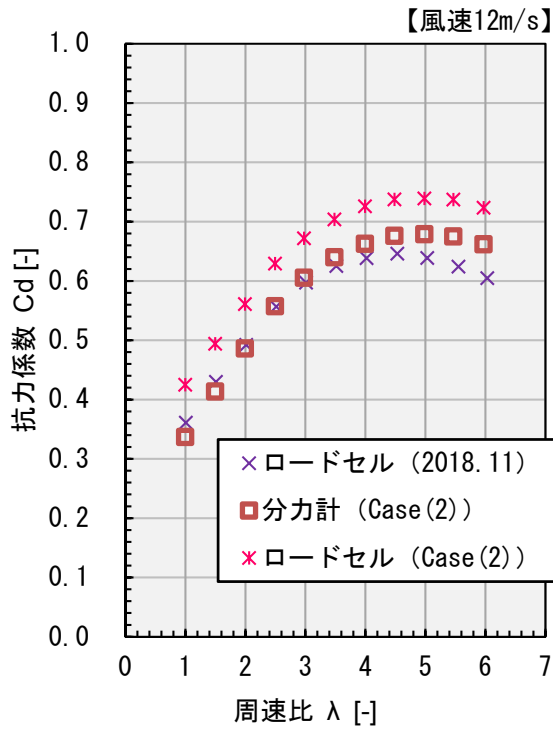


図 20 Case (2) の結果

### 8. まとめ

応用力学研究所大型境界層風洞にて行われている風車の風荷重試験について紹介した。加えて、60cm 風車模型を用いて行った風荷重試験の一例について、結果を示し、考察した。本実験については、理論上一致するべき計測結果に有意差が生じており、その原因を解明するために追加試験の実施を検討中である。

風洞実験では、実験目的にとって有益であると予測されるすべての Case を揃え、かつ正確な計測を行うことが理想である。計測器や治具の有無、時間的制約といった現実の条件を勘案しつつ、可能な限り上記理想に近い実験を行うために、日々の技術向上や知見の収集、現場での創意工夫を継続していきたい。

### 参考文献

- [1] 松島啓二：レンズ風車の研究・開発にかかる風洞実験ならびに閉塞効果の補正について、九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート, 15, 33-39, 2014.

### 謝辞

実験の実施および本稿の作成に際し、九州大学応用力学研究所の大屋裕二特任教授、内田孝紀准教授から多くのご指導・ご教示を賜りました。ここに感謝の意を表します。