九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

# 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

松島, 啓二
九州大学応用力学研究所技術室

https://doi.org/10.15017/1786652

出版情報：九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート. 15, pp.33-39, 2014-03. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：

# 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

松島　啓二


**要旨**

風車の研究・開発において、性能や風による荷重、風車周辺の風環境等を調査するために相似の模型を用いた風洞実験が行なわれる。この時、模型によって流路が妨げられることによって流速が増加する閉塞効果が発生し、模型の大きさ・形状によっては測定結果を著しく変えてしまうことがある。本稿では、レンズ風車の研究・開発において頻繁に実施される性能試験、風荷重試験を紹介するとともに、閉塞効果の補正値を導出した方法について報告する。



**キーワード**

風洞実験・レンズ風車・性能試験・風荷重試験・閉塞効果


## 1. はじめに

環境問題およびエネルギー問題が世界的な課題となっている現在、九州大学応用力学研究所風工学分野では、風力エネルギーの効率的な利用を目指して、集風体付き風車であるレンズ風車の研究・開発を行なっている。その中で、風車の空力特性評価、風環境の挙動測定、流れの可視化等に資する風洞実験は、欠くことのできない要素である。一方で、風洞のように流路を限定された空間中に風車模型のような物体が存在すると、物体による閉塞のために物体周辺の流れが加速され（閉塞効果）、正確な測定を妨げる恐れがある。そのため、風洞実験においては閉塞効果の低減・補正が肝要である。

本稿では、レンズ風車の研究・開発において、応用力学研究所が備える大型境界層風洞を用いて行なわれる実験について紹介し、中型レンズ風車（定格 350kW）の模型（外径 0.6[m]）にかかる閉塞効果を補正するための試みを報告する。

## 2. 大型境界層風洞

大型境界層風洞は、幅 3.6[m]・高さ 2.0[m]・長さ 15[m]の測定部を有する、最大風速 30m/s の単回路回流式風洞（吹き出し式へ変更可能）である（図 1）。閉塞効果低減を目的として測定部における側壁・天井が開放可能になっており、開放時には風車翼の飛散等から実験者を保護するための保護カバーを設置する（図 2）。

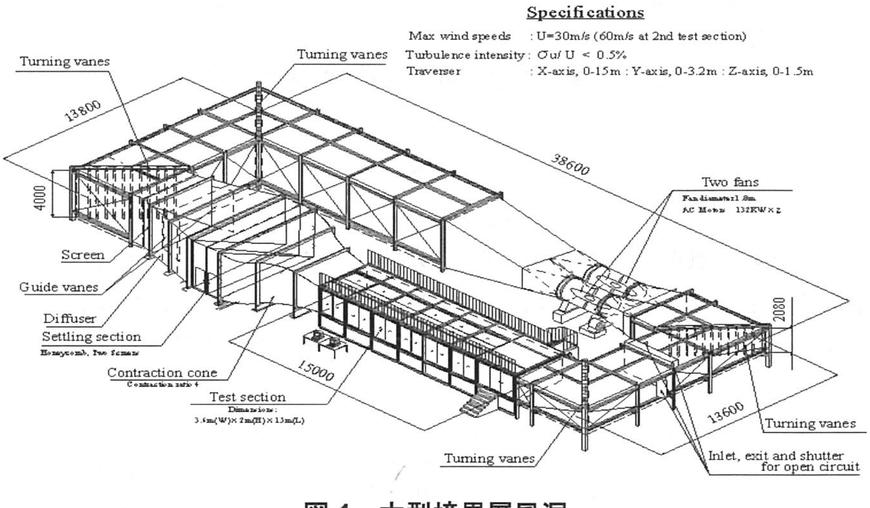



**図 1　大型境界層風洞**

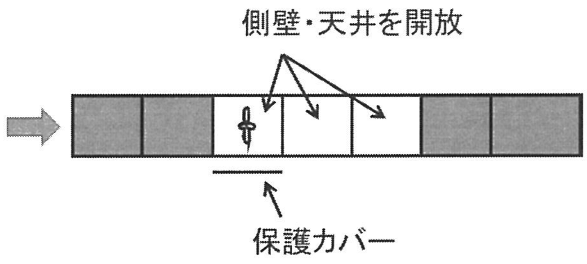
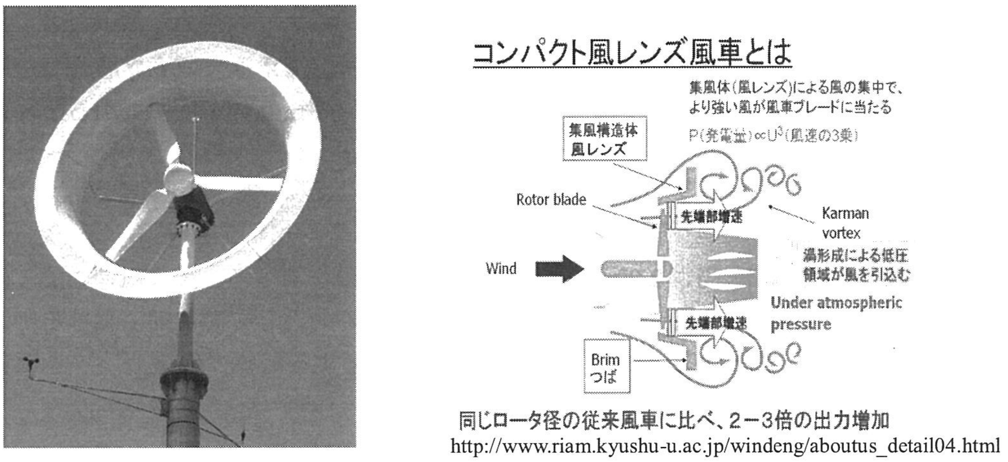



**図 2　大型境界層風洞測定部（一部開放時）の模式図（上から見た様子）**

## 3．レンズ風車

レンズ風車とは、高効率の集風体付き風車である。集風体とは、風下に向かって拡大するディフューザ部と下流端部に位置するつば部から構成され、翼を包んでいる構造体である。つば部によって流れが剥離し、翼端付近の下流側に渦が形成されて圧力が低下する。この低圧領域が風を引き込み、翼端での流速を増加させることで、発電効率を上昇させている。図 3 にレンズ風車の外観と図解を示す。さらに集風体は、風向に自ら正対する風見鶏効果、翼端渦の抑制による騒音低減、翼の破損時における飛散防止、視認性の向上によるバード・ストライクの防止といった多くのメリットをもたらす。その一方で、集風体は風車全体にかかる風荷重を増大させるという短所を持ち、風車各部の構造や強度、ヨー機構（首振り部の機構）等の要件に多大な影響を与えている。

レンズ風車の研究・開発においては、安全性・発電効率・コストといった種々の要求を満たし、さらに向上させるために、材料・形状・構造・発電機構・制御方法といった多角複合的な提案・検討が行なわれている。そうした中で、アイデアの検証や仕様策定のために、風車模型を用いた風洞実験が実施されている。




http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/windeng/aboutus_detail04.html

（a）　　　　　　　　　　（b）

**図 3　レンズ風車の外観（a）と図解（b）**

## 4．風洞実験

### 4-1．性能試験

翼や集風体等を改良した際、風車の性能を調べるために性能試験を行なう。試験の目的は、出力係数 $C_P$ と周速比 $\lambda$ の関係を求めることである。出力係数 $C_P$ は、風速 U[m/s]、受風面積 A[m$^2$]、空気密度 $\rho$[kg/m$^3$]、風車出力 P[W]から次式によって定義され、風車の効率を示しており、風車の特性を表す最も重要な物理量である。

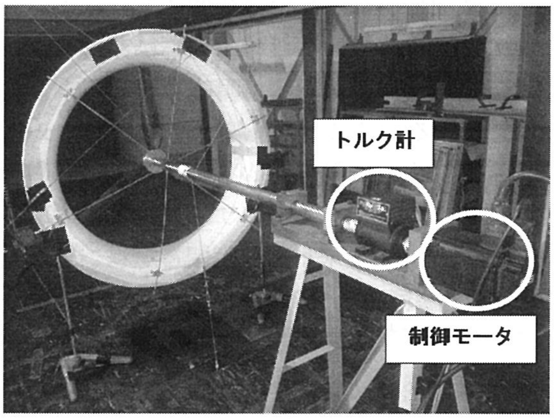
$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A}$$

周速比λは、翼端速度[m/s]／風速[m/s] で定義される比であり、相似形であれば $C_P$ とλの関係は風車の大きさによらないため、風車の特性を表す時に用いられる主要なパラメータである。

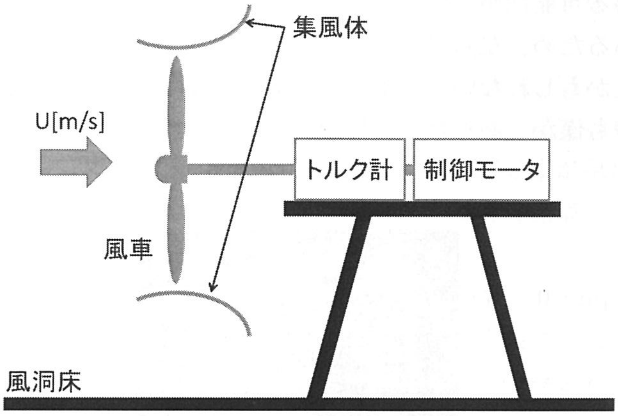
風洞実験では、風車の翼をトルク計と制御モータに接続し、一定風速下で回転数（回転角速度 ω[rad/s]）を変化させ、トルク $T_r$[Nm]を測定して $C_P$ とλの関係を求める。図 4 に性能試験の様子ならびに模式図を示す。この時、翼は制御モータ・トルク計と連結した回転軸に取り付け、集風体は回転軸を覆う円筒に固定する。さらに集風体や円筒については、風によって振動しないようにワイヤ等を用いて風洞の床や梁に固定する。

回転数を制御することは、実際の風車においては負荷を調整することによって風力から得る電力を制御することである。実験において回転数を定めると、それを超えて風車を回そうとする風力がトルク計によって計測される。この時、$P = T_r \cdot \omega$[W]を風力エネルギーから取り出している電力エネルギー、即ち風車の出力とみなすことができる。$C_P$ が最大となる周速比を最適周速比といい、風速が変化しても最適な周速比となるように回転数を調整することを最適制御と呼ぶ。

図 5 に中型レンズ風車の模型を用いた性能試験の結果を示す（模型外径 0.6[m]、風洞は一部開放）。ここで、最適制御時の出力係数は $C_P = 0.66$ であり、その時の周速比は $\lambda = 4.0$ となっている。




(a)




(b)

**図 4　性能試験の様子（a）と模式図（b）**

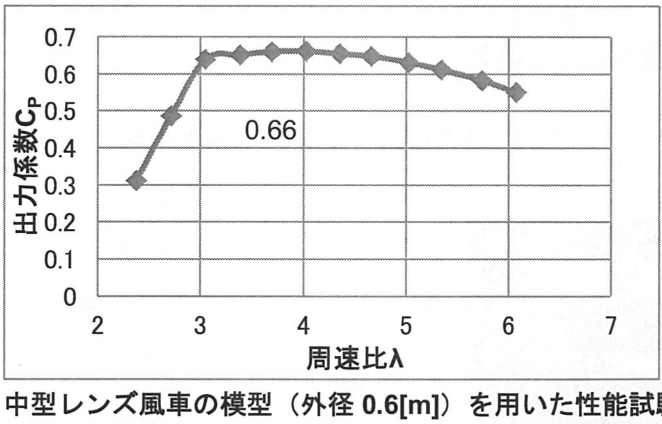



**図 5　中型レンズ風車の模型（外径 0.6[m]）を用いた性能試験結果**

### 4-2. 風荷重試験

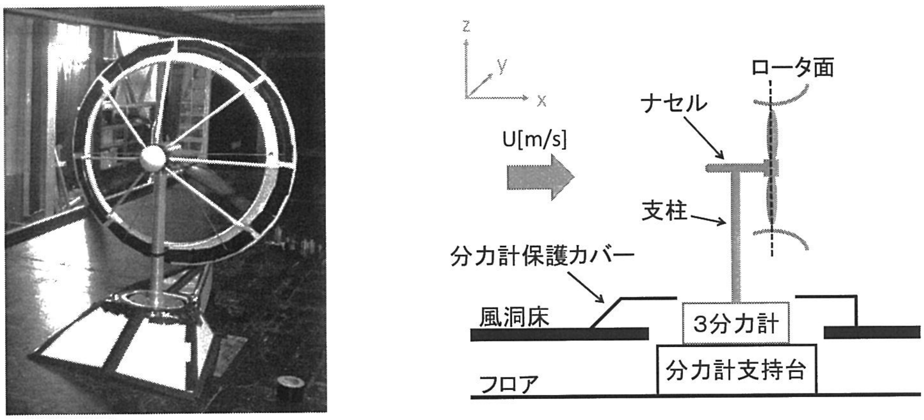
翼や集風体等を改良した際、風車全体にかかる風荷重を調査し、要求される各部の強度を検討するために風荷重試験を行なう。図 6 に風荷重試験の様子ならびに模式図を示す。試験の目的は、抗力係数 $C_d$、横力係数 $C_y$、転倒モーメント係数 $C_{my}$、ヨーモーメント係数 $C_{mz}$ を求めることである。これらの係数は風車の大きさや風速に対してどの程度の力やモーメントが発生するかを示す。抗力（流れ方向の水平力）$F_x$[N]、横力（流

れに直交する水平力）$F_y$[N]、転倒モーメント（下流側へ風車を倒す y 軸回りのモーメント）$M_y$[Nm]、ヨーモーメント（風車の首振りを発生させる z 軸回りのモーメント）$M_z$[Nm]、ナセル中心から 3 分力計までの距離 $L_y$、ロータ面から支柱中心までの距離 $L_z$ とすると、各係数は次式によって定義される。

$$C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \qquad C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \qquad C_{my} = \frac{M_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 A L_y} \qquad C_{mz} = \frac{M_z}{\frac{1}{2}\rho U^2 A L_z}$$

風洞実験では、風車模型を 3 分力計（図 7）に設置して、最適制御運転時や停止時等における風車偏角（z 軸回りの角度）に対する各成分の抗力、モーメントを測定する。3 分力計は、ひずみゲージを組み合わせた構造になっており、3 方向の力またはモーメントをそれぞれ電圧として出力する計測器である。分力計保護カバーは、風が分力計に当たり計測が不正確になることを防ぐものであり、風の剥離が生じないように上流に向かってなだらかに傾斜する構造になっている。

図 8 に中型レンズ風車の模型を用いた風車停止時における風荷重試験の結果を示す（模型外径 0.6[m]、風洞は一部開放）。風車偏角 10° の時に最大の抗力がかかり、その時の抗力係数は $C_d$ = 0.68 となっている。風車偏角 0°でなく、10°の時に最大となっている理由としては、風洞測定部においてわずかに左右対称性が崩れている可能性が挙げられる。当該実験時、風洞は一部開放状態（図 2）であったが、片側にだけ保護カバーがあるため、左右対称とはいいがたい。あるいは、模型の一部分は手作りであるため、そこに非対称性があったかもしれない。いずれにせよ、図 8 は風車偏角 0°を中心にほぼ対称になる傾向が明確であり、0° と 10° の差も僅かであるため、無視できる程度の非対称性であると考えられる。




(a) (b)

**図 6　風荷重試験の様子（a）と模式図（b）**

**図 7　3 分力計**

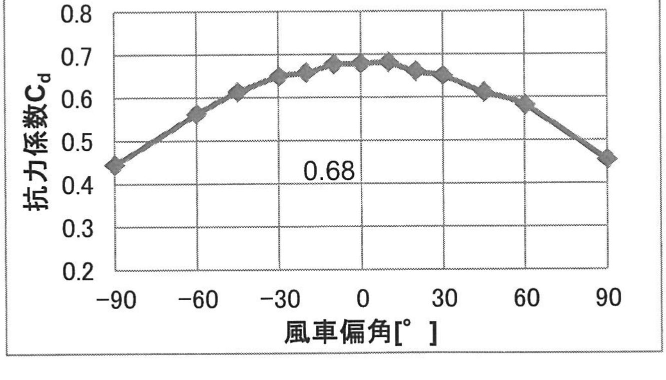



**図 8　中型レンズ風車の模型（外径 0.6[m]）を用いた風車停止時における風荷重試験の結果**

## 5．閉塞効果

### 5-1．閉塞効果について

風洞内の流路中に模型を設置すると、模型自体および模型下流域に発生するwake（渦があり周囲より流速の小さい領域）によって流路の閉塞が生じる。そして、流路が狭まるために模型付近の流れが加速される閉塞効果が発生する。一般に閉塞効果は、流路の断面積に占める閉塞面積の比率が大きいほど、またwakeが大きいほど強い影響を及ぼす。特に流路全体を壁で囲った閉鎖型風洞において顕著であるが、壁を除去した開放型風洞においても、流路周辺の静止した大気が壁の役割を果たすため、閉塞効果が無視できなくなる恐れがある。

風洞実験において正確な測定を行なうためには、有意な閉塞効果が発生しない程度に小さな模型を用いるか、何らかの方法で閉塞効果の抑制・補正を行なう必要がある。

### 5-2．閉塞効果の補正

大型境界層風洞における風車の実験では、図2のように測定部における側壁・天井を開放している。風洞を閉鎖した状態で風車模型のように大きな物体を設置すると、閉塞効果による著しい増速が起こり、正確な測定が困難になる上に安全上の問題も発生しうるためである。性能試験に関しては、実際に発電機を搭載した風車の野外試験結果から、風洞を一部開放した状態で正しい結果を得られることが分かっている。一方で風荷重試験に関しては、野外試験において分力計を用いることが容易でなく、自然気流中における風荷重との比較・検証ができていないために、測定された風荷重が過大である可能性が懸念されていた。閉塞効果がない場合における円盤の抗力係数はすでに調査されている [1)]。また、閉鎖型風洞において閉塞効果が風荷重に及ぼす影響に関しては、既存研究 [2)]を参照できる。その反面、風洞を一部開放するという特殊環境における風荷重に対する閉塞効果は未知である。

今回、図 8 に示したような、風洞を一部開放した状態で測定した中型レンズ風車模型（外径：0.6[m]）にかかる抗力係数に対して、閉塞効果を補正するための方法を検討した。運転時の風車における閉塞は円盤に近似可能である。また、停止している場合、翼による閉塞面積は小さいので集風体による閉塞のみを考慮した。

まずは、図9に示すような円盤模型を用いた風荷重試験を行なった。結果を図10に示す。なお、外径0[m]における$C_d$値として、閉塞効果がない場合の値 [1)]を挿入している。さらに、閉鎖型風洞における閉塞効果を示す曲線 [2)]（点線）を重ねている。外径 0.6[m]までは、風洞の一部開放による有意な影響は現れていない。0.6[m]の円盤に関しては、実験結果の$C_d$に 1.17 / 1.41 ≒ 83 % の補正値を乗算すればよいといえる。

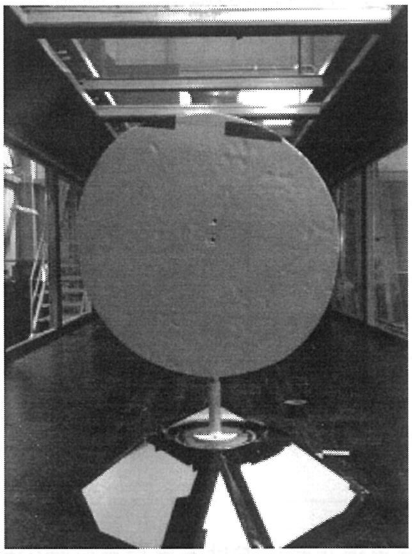


図9　円盤模型

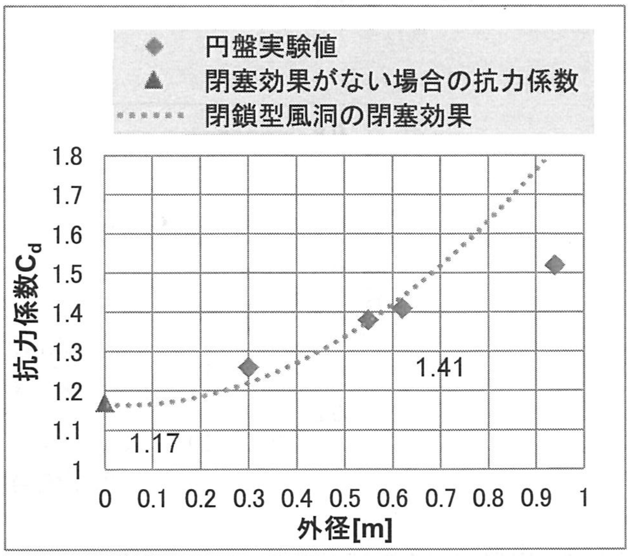



図10　円盤模型の風荷重試験結果

次に、集風体の投影面を模したドーナツ盤模型（図 11）を用いた実験を行なった。ドーナツ盤の幅は、どのサイズにおいても 0.064×内径 [m]である。円盤と異なり、ドーナツの穴にあたる領域にある支柱部分も風荷重を受けるので、「支柱＋ドーナツ盤」の測定結果から「支柱のみ」の測定結果を差し引いた値をドーナツ盤の結果とした。図 12 は、ドーナツ盤の結果であり、円盤の場合と同様の閉塞効果があると推定して描いた抗力係数曲線（点線）を重ねている。点線の外径 0[m]における値は、実験結果の近似曲線（実線）から推定した値 $C_d = 0.30$ に合わせている。外径 0.6[m]まで、結果と抗力係数曲線はよく一致している。ここから、0.6[m]の集風体に対応する補正値を 0.30 / 0.40 = 75 % と導出した。図 8 の結果にこの補正を適用すると、図 13 となる。なお、集風体には厚さがあり、風車偏角を変えても閉塞面積には大きな差がないため、すべての風車偏角でこの補正値を適用している。

図 10, 12 において、外径 0.6[m]よりも大きな模型の実験結果は抗力係数曲線を大きく外れている。このため、円盤／ドーナツ盤型の模型に関してこの補正方法が適用できる最大サイズは、0.6[m]となる。原因としては、模型本体と重なる模型支柱部分の割合変化や、風洞の一部開放による影響の顕在化が考えられる。

円盤とドーナツ盤を比較すると、閉塞効果による抗力係数の増加率は、ドーナツ盤の方が大きい（円盤：1.41 / 1.17 = 1.21、ドーナツ盤：0.40 / 0.30 = 1.33）。このことから、ドーナツ盤の方が wake を生じやすく、閉塞効果を受けやすいものと推測される。

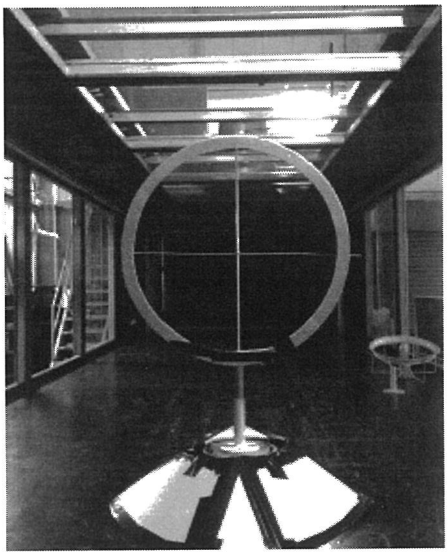


**図 11　ドーナツ盤模型**

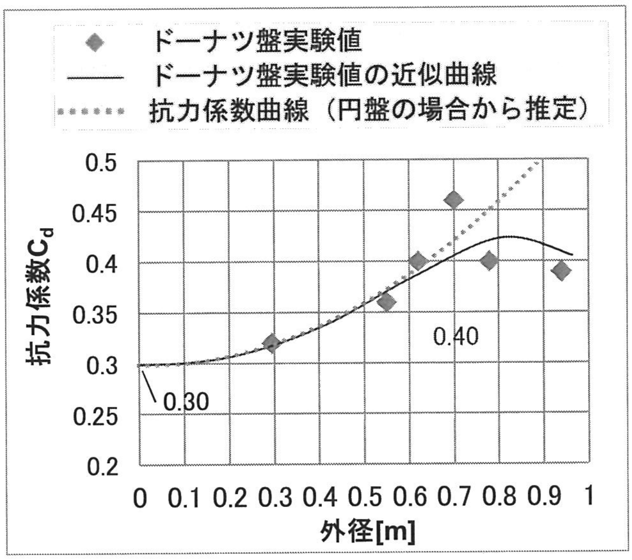



**図 12　ドーナツ盤模型の風荷重試験結果**

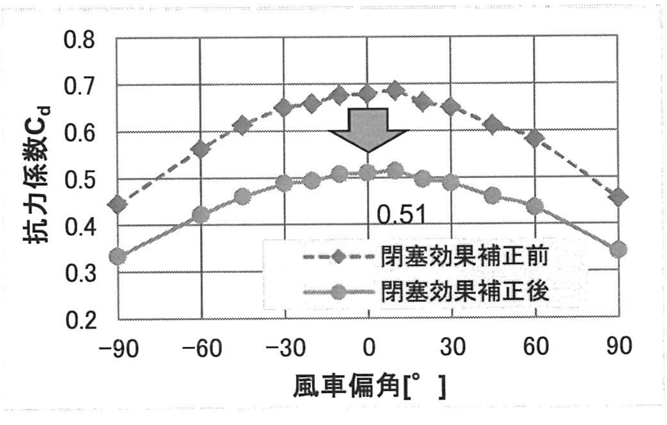



**図 13　中型レンズ風車の模型（外径 0.6[m]）を用いた風車停止時における風荷重試験の結果**
**（閉塞効果補正前と補正後）**

## 6．おわりに

レンズ風車の研究・開発にかかる主要な風洞実験の一部を紹介した。また、大型境界層風洞における閉塞効果の補正に関して検討し、外径 0.6[m] の風車模型にかかる風荷重に対する補正値を導出した。この補正値は、応用力学研究所風車ワーキンググループが主体となって進める中型レンズ風車（定格 350kW）開発の過程で、より正確な風荷重を決定するために用いられた。

閉塞効果は模型形状、流路断面積に占める閉塞面積、風洞の特性等によって複雑に変化するために一般的な補正方法の確立は容易ではない。その中でも、今回行なったような、近似の模型をサイズ違いで数点用意して閉塞効果の傾向を探り、すでに判明している結果と照らし合わせて推定する方法は、有効であると思われる。今後も、今回の方法を応用することで、より多種の実験において閉塞効果を補正できることが期待される。

## 参考文献

[1] 日本流体力学会編 (1998) ： 流体力学ハンドブック，丸善株式会社.

[2] Yasuharu Nakamura & Yuji Ohya: The Effects of turbulence on the mean flow past square rods. JFM (1983), vol.137, pp.331-345.

## 謝辞

実験の遂行、結果の考察および本稿の作成に当たり、九州大学応用力学研究所の大屋裕二教授、烏谷隆准教授、渡辺公彦氏から多くのご教示・ご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。