

受風面に表面粗度を持つ二次元円柱状物体の風荷重試験

松島, 啓二
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/4794802>

出版情報：九州大学応用力学研究所技術室 技術室報告. 4, pp.1-6, 2022-07. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

受風面に表面粗度を持つ二次元円柱状物体の風荷重試験

松島 啓二

要 旨

強風被害を防ぐため、風荷重を抑えた電線が開発されている。今回、電線の風荷重評価を目的として、風洞を用いた電線風荷重試験を実施した。電線は、流れに直交する軸方向に変化がない二次元円柱状物体である。その周りの二次元流れを精度よく再現するために、本実験では、測定部内でのモデル端部の処理に工夫がある。さらに、周方向に異なる凹凸表面を持つ電線の模擬試験を行うため、受風面（受風角度）を回転できる方法を用いた。

キーワード

大型境界層風洞 風洞試験 風荷重 二次元円柱状物体 受風面

1. はじめに

台風などの強風によって配電線が受ける風荷重は、電柱の損壊・倒壊に繋がるほど強力である。このため、表面の皮膜に凹凸を付けることで風荷重を軽減した低風圧電線が、開発・実用化されている。最適な凹凸の形状や粗さを追求するため、あるいは製造した電線の風荷重特性が要求水準を満たしていることを示すためなどの目的で、風洞装置を用いた風荷重試験がしばしば実施される。

ところで、電線のように 1 つの方向（軸方向）に同じ形状がずっと続く（と看做せる）二次元物体の風洞試験においては、単にその一部分を切り出したモデルを流路に設置しても、正確な計測とはなりがたい。十分に長い電線における任意の 1m 区間周囲における流れと、全長 1m の電線周囲における流れが、特にそのモデル端部において異なっているためである。

九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞では、電線、あるいは類似した円柱状物体の風荷重試験手法が確立されており^[1-2]、過去に電線メーカーの委託による電線風荷重試験などが実施されてきた。さらに、現在では供試体を軸中心に自転させる機構を用いて、受風面（受風角度）をパラメータ化した風荷重計測が可能になっている。

今回、電線メーカーロゴの印字による受風面特性を持つと予測される電線の風荷重試験^[3]を実施

したので、二次元円柱状物体の風荷重試験例として、ここに紹介する。

2. 低風圧電線について

円柱の抗力係数（後述）は、風速が上昇してある臨界に達すると急減する。この急減は、層流境界層が乱流境界層に遷移するために起こる。即ち、円柱表面における流れのパターンが剥離を起こしにくいものに遷移して、剥離点が下流側へ移動し、負圧になっている下流側剥離領域が狭まることで、風荷重が低減して起こるものと考えられる。先行研究^[4]により、円柱の表面に適度な突起（粗度）を加えると、乱流遷移が促進され、臨界風速域が下方に移動することが分かっている。低風圧電線は、皮膜表面の凹凸によって臨界風速域を引き下げることで、風荷重を低減した電線である（図 1）。

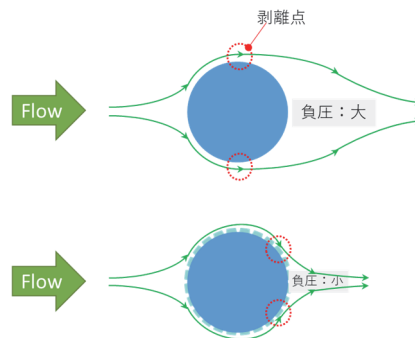


図 1 円柱状物体周りにおける流れの模式図

3. 実験概要

本試験は、気流に対して直交配置した電線が受ける風荷重を評価するものである。供試体は、皮膜表面に一様な凹凸パターンがあり、かつ軸方向に一条だけ印字による凹凸がある低風圧電線のモデルである。当該電線の具体的な仕様は割愛するが、断面の模式図は図2となる。印字面の向きが風荷重に影響を及ぼすと予測できるため、モデルを軸中心に 10° 刻みで回転させ、各角度 θ における風荷重を計測した。主な実験条件を表1に、主な計測機器・センサー類を表2に示す。

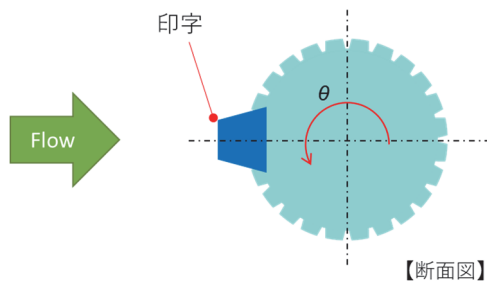


図2 電線モデルの断面模式図

表1 主な実験条件

流入風速 U [m/s]	10, 20, 30, 35, 40
受風角度 θ [deg]	0~360 (10 刻み)
サンプリング周波数 [Hz]	1000
計測時間 [sec]	30

表2 主な計測機器・センサー類

分力計	日章電機 LMC-3505-10
超音波流速計	KAIJO DENKI WAT-395
熱線流速計	日本カノマックス 1011
FFT アナライザ	小野測器 CF-350

4. 風洞装置

実験に使用した大型境界層風洞は、幅 3.6m・高さ 2m・長さ 15m の測定部を有しており、この流路断面で最大風速 30m/s を生成可能である。一方、電線試験では、台風級の強風を想定しているため、より高い風速が要求される。今回は、40m/s が必要であった。当該風洞の能力は、測定部内に追加の縮流洞（第2縮流洞）を設置して流路幅を半減することで最大風速 60m/s に達するので、第2縮流洞の構築を行った。図3に測定部の模式図を、図4に上流側から見た測定部内の写真を示す。

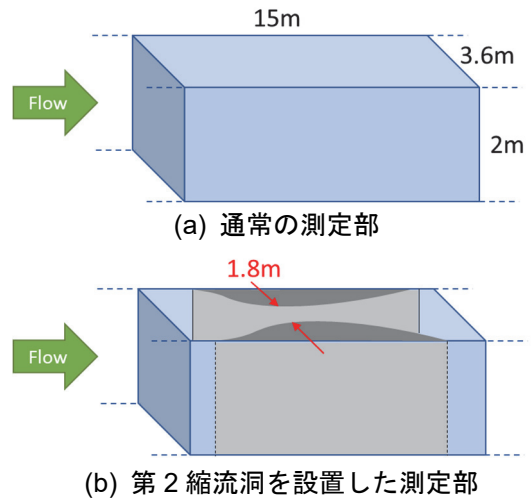
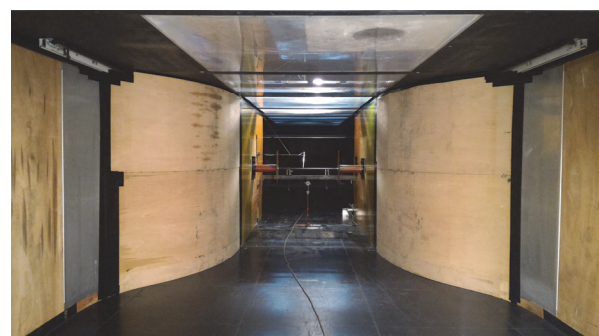


図3 測定部の模式図



(a) 通常測定部



(b) 第2縮流洞を設置した測定部

図4 上流側から見た測定部

5. 供試体とセンサー類の設置

第2縮流洞においては、縮流が完了した直後のエリアを測定部とし、ここに供試体やセンサー類を配置する。今回は、測定部を横断する形で電線モデル（皮膜電線 1m 強の両端に、接続固定のための器具を取り付けたもの）を設置・固定する（図5, 6）。精度よく測定するために、以下のような取り付け方法・計測方法を取っている。

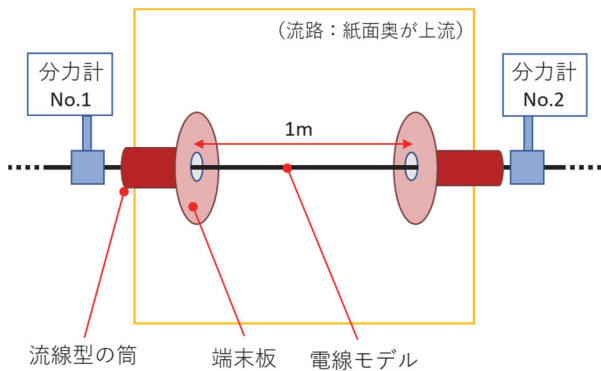


図5 電線モデル設置模式図

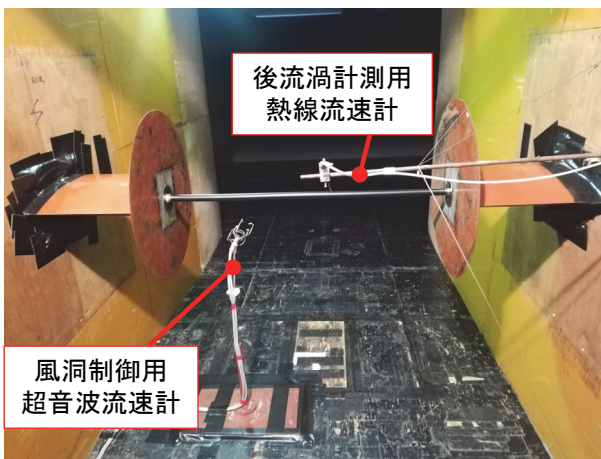


図6 電線モデル設置後の測定部

- 1) 測定部の両側壁には穴が開けられており、モデルは、当該穴を通して流路外で分力計等に固定される。当該分力計は、2台セットで使用する二次元用3分力検出器であり、3成分の力/モーメント (F_x, F_y, M_z) が検出できる。 F_x が主流方向の力、即ち風荷重に対応する。モデルの両端に1台ずつ接続し、それぞれの F_x 出力を足し合わせて計測する。分力計を流路の外に設置しているのは、分力計本体や固定治具部分が気流の影響を受けないようにするためである。
- 2) 測定部側壁の穴を流線型の筒で覆い、筒の入り口部分に端末板を設置する (筒と端末板は一体であり、側壁に対して固定する)。これは、モデル端部における流れの二次元性を確保するためである。実際の電線を考えると、実験で風を当てている部分の外側にも同じ形状で続いており、境界のない気流を受けているはずである。そのため、電線モデルの端部

(固定治具部分) や、流路境界 (風洞測定部の壁) の影響を除去する必要がある。モデルの治具部分を流れから隔離しつつ受風部分を壁から遠ざけるために筒を用い、筒が流れに与える影響を抑制するために筒を流線型にして、壁や筒の影響が受風部分に及ばないように端末板を用いている。

- 3) 図7 (a) に見られる端末板の穴と電線モデルとの隙間を、図7 (b) のように金属板・セロテープ等である程度埋める。さらに、モデル側に小型の第2端末板を貼り付ける (図7(c))。これらは、モデルを通す穴から気流が出入りするのを防ぐ措置である。測定部内外の流速差は気圧差を生み (流速が高いほど気圧は下がる)、測定部外から空気が流入しようとする。このような流入は、モデル端部における流れの二次元性を損なうものであり、実際の電線周りの流れには存在しないものであるため、実験においても極力排除する。なお、風荷重を正確に伝えるため、モデルおよび第2 端末板と、側壁側端末板および穴埋めのテープ類とは、わずかな隙間を残して互いに接触しないようにする必要がある。

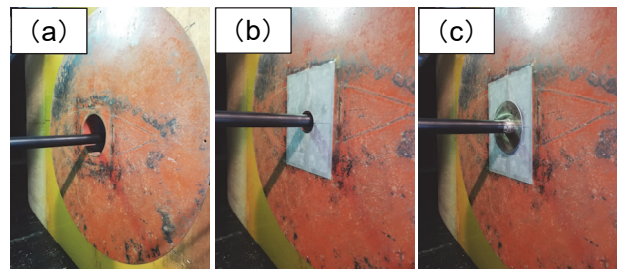


図7 端末板の穴周辺

- 4) 測定部外側にて、ワイヤーとターンバックル (締結金具) を用いて電線モデルに張力を掛ける (図8 ①)。これによって、モデルをその軸方向に対して拘束するとともに、電線のように剛性の低い物体の場合は、たわみを矯正できる。同様に床と天井から引っ張りを加えて、上下方向にも拘束する (図8 ②~⑤)。モデルの自由度が主流方向にのみ残っている状態で、分力計に接続する。

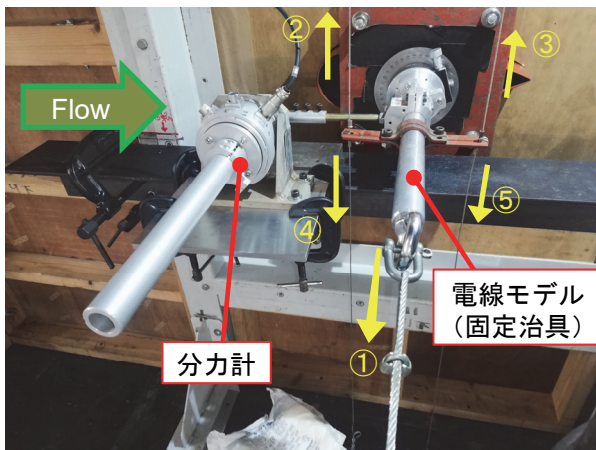


図 8 電線モデル固定治具部分および分力計

- 5) 電線モデルの固定治具部分には回転機構 (図 9) が組み付けられており、モデルの固定を緩めることなく、その受風面を 360° 変更できる。

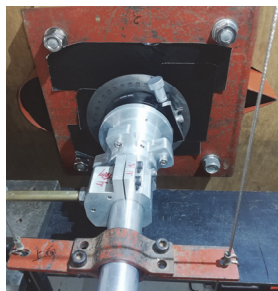


図 9 回転機構

- 6) 電線モデルから数十 cm 上流に、風洞制御用の超音波流速計を設置する。ここで計測した流速が、供試体への流入風速となる。さらに、電線モデル近傍下流側に熱線流速計を設置する (図 10)。こちらは、後述する後流の渦放出を捉えるためのセンサーである。

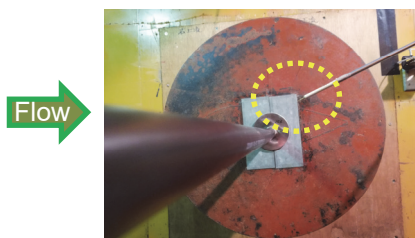


図 10 後流渦計測用熱線流速計

6. 分力計の較正

電線モデルを交換するたびに (モデルの固定を締め直すたびに) 分力計の較正を行う必要がある。

較正では、既知のおもりと滑車を用いてモデルに水平荷重を掛け、荷重と分力計出力の関係を導出する。図 11 に較正の様子を示す。左右の分力計が捉える歪みに偏りが生じないように、モデルの両側 2 箇所に同重量のおもりを掛けている。

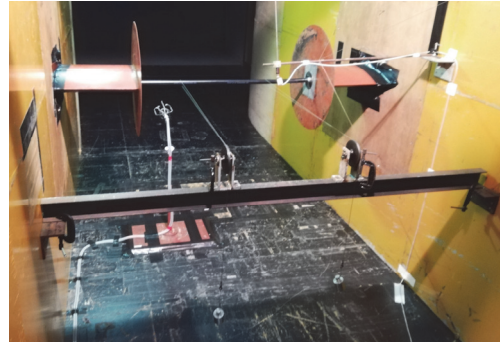


図 11 分力計較正の様子

7. 評価に用いる係数・指標について

風荷重の評価は、単位長さあたりの抗力 [N/m] で行う場合もあるが、無次元化した抗力係数 Cd を用いる場合もある。抗力 F_x [N]、空気密度 ρ [kg/m³]、受風投影面積 A [m²]、主流速度 U [m/s] とすると、式(1)となる。

$$Cd = \frac{F_x}{0.5\rho AU^2} \quad (1)$$

また、物体の周辺流れに係る振動現象 (周波数 f [Hz]) と主流速度、代表長さ D [m] を関係付ける無次元数として、ストローハル数 St が式(2)で定義される。

$$St = \frac{fD}{U} \quad (2)$$

本実験では、電線の直径が代表長さ D 、電線下流側に放出される渦における発生周波数のピークが f となる。電線後流の渦放出を熱線流速計で検出し、FFT アナライザを用いて卓越周波数を計測している。一般に、流れの性質が変化して渦周波数が減少する (St が下がる) と、抗力 (および Cd) は上昇する。

他に、流体の相似性を表す指標として、式(3)で定義されるレイノルズ数 Re を用いる。 ν は動粘性係数 [m²/s] である。ごく大まかにいうと、 Re が

近くて、流路や障害物が相似形であれば、流れのパターンも似たものとなる。

$$Re = \frac{DU}{\nu} \quad (3)$$

8. 滑面電線による確認試験

実験系の妥当性を確かめるために、滑面電線を供試体として計測を行う。表面に凹凸のない滑面電線は、円柱と同等であると考えられ、(一定の Re 範囲における) 円柱の抗力係数 Cd やストローハル数 St は先行研究によって判明している⁵⁾ので、確認に使用できる。

図 12,13 に、今回の確認結果を示す。風速を 10 ~ 45m/s まで 5m/s 刻みで変えて計測した、滑面電線の Cd (図 12) および St (図 13) である。電線は、直径 D の異なる 240sq ($D=2.5\text{cm}$) と 120sq

($D=2\text{cm}$) の 2 種類を使用した。なお、それぞれの系列内で D は一定、 ν もほぼ変化しないので、横軸 Re は風速 U にほぼ比例している。結果としては、試験を行った Re 範囲内で、 Cd は 1.2 程度、 St は 0.2 程度であった。この結果は、文献値⁵⁾とよく一致しており、今回構築した実験環境や計測手順は妥当であったといえる。

9. 電線の風荷重試験

実験系の確認後、本番である低風圧電線の試験に入る。まずは、ゼロオフセットの計測を行う。 $\theta=0^\circ$ で分力計の零点調整を行うが、電線モデルを回転させると、モデルの非直線性や自重によるたわみなどが原因で、分力計に伝わる力にオフセットが生じる。そのため、風速 0m/s の状態で試験予定であるすべての θ について計測を行い、オフセット値とする。続けて、送風を開始して、風荷重計測を行う。

試験結果の一例として、図 14 に、あるモデルの $U=40\text{m/s}$ における計測結果を示す。なお、 $\theta=0^\circ$ のとき、印字面は上流を向いており、 90° のとき、鉛直下方を向いている。図 14 より、受風面に対する印字面の向きに応じて、風荷重が変動していることが見て取れる。その変動は、 180° 付近を中心におおむね対称であり、モデル形状の対称性と整合している。滑面と比較すると、 Cd 値は半減しており、当該風速での低風圧化に成功している。 Cd が比較的大きくなっている角度 θ 付近で St が減少している傾向があり、 Cd を上昇させるような流れの変化が実際に起きていることを示唆する結果である。

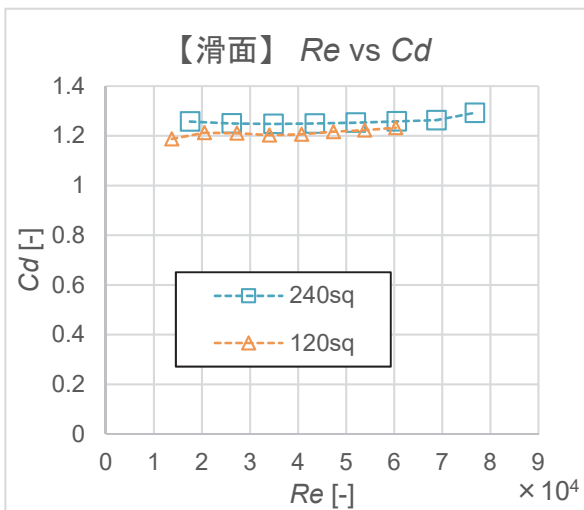


図 12 滑面電線の計測結果 1 (Cd)

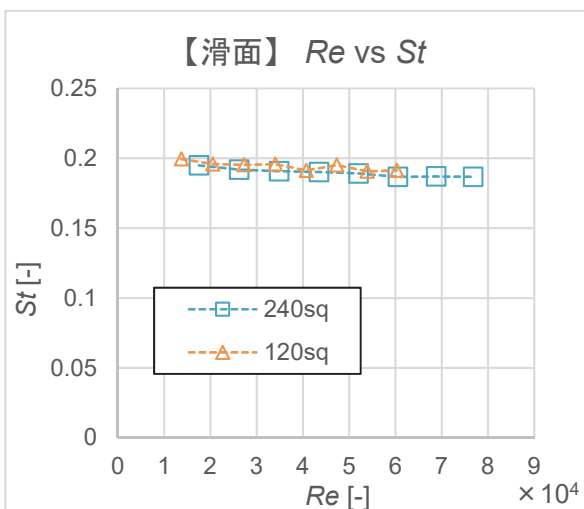


図 13 滑面電線の計測結果 2 (St)

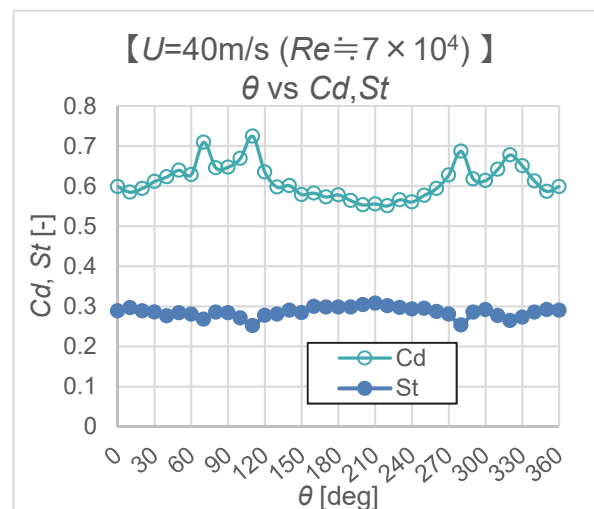


図 14 低風圧電線の計測結果 1 ($U=40\text{m/s}$)

図 15 は、 θ 一定で、風速を（即ち Re ）を変化させた時の結果である。 $Re=3.5\sim 6$ ($\times 10^4$) の間で、 Cd , St を大きく変えるような流れの変化が起きている。第 2 節で述べた臨界風速とは、より正確には臨界レイノルズ数であり、図 15 に見られる流れの変化は、乱流遷移によるものと考えられる。

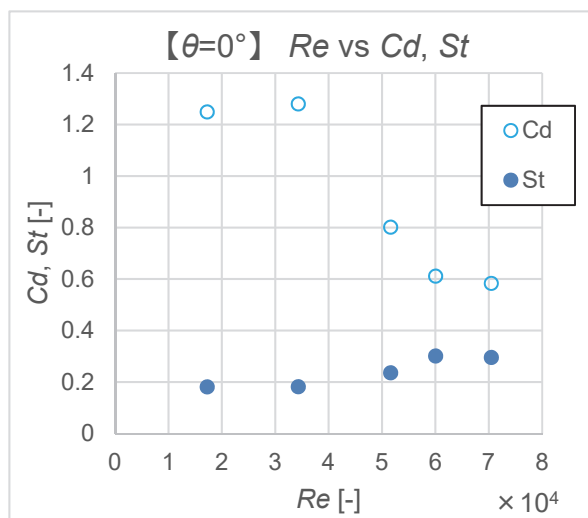


図 15 低風圧電線の計測結果 2 ($\theta=0^\circ$)

10. おわりに

電線試験を題材に、大型境界層風洞で行われている二次元円柱状物体の風荷重試験手法を紹介した。

調査・研究対象の風が二次元的に吹いている（流れに直交する二次元物体が置かれる状況）と考えられる場合、風洞で当該の風を再現する際においては、その二次元性を確保することが必要になる。基本的には、供試体や計測領域に適切なサイズ・形状の端末板を設置することになるが、計測項目や実験条件によっては容易に設置できないこともある。流れを乱さない供試体・計測器類

の支持方法も重要になる。

本稿の手法は、そうした要諦を満たし、再現性を伴って文献値に近い試験結果を実現できる手法といえる。

参考文献

- [1] 渡邊公彦：円柱の抗力測定 = 円柱模型と風洞壁との干渉実験と考察 =, 九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート, 3, 49-57, 2002.
- [2] 渡邊公彦：低風圧絶縁電線の抗力計測 = 電線の受ける風抵抗を軽減するための最適形状の風洞実験と考察 =, 九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート, 4, 100-109, 2003.
- [3] 大屋裕二：西日本電線風洞実験報告書 2022 年 1 月 31 日
- [4] 岡島厚・中村泰治：高レイノルズ数範囲における表面粗さのある円柱まわりの流れ、九州大学応用力学研究所所報, 40, 387-400, 1973.
- [5] 日本流体力学会編 (1998)：流体力学ハンドブック, 善株式会社.

謝辞

本稿で取り上げた風洞試験は、西日本電線株式会社からの委託実験として実施されました。実験補助、および本稿で題材として扱うことへのご快諾に感謝申し上げます。

実験の実施および本稿の作成に際し、ご指導・ご協力賜りました応用力学研究所の内田孝紀准教授、同技術室の高田青技術職員および環境利用技術班員、株式会社リアムウィンドの大屋裕二氏ならびに渡邊公彦氏に感謝の意を表します。