

## スモークワイヤー法による風車後流の可視化試験

松島, 啓二  
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/4060755>

---

出版情報：九州大学応用力学研究所技術室 技術室報告. 2, pp.1-6, 2020-07. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

# スモークワイヤー法による風車後流の可視化試験

松島 啓二

## 要 旨

応用力学研究所が保有する大型境界層風洞は、指定した速度で、かつ乱れのない気流を発生させ、各種の流体実験を行うことができる装置である。スモークワイヤー法を用いた流れの可視化試験は、当該装置において比較的高頻度を実施される実験の一つであり、気流に乗せたスモークによって流れを観察・解析するものである。風車後流の可視化試験を題材に、大型境界層風洞におけるスモークワイヤー法について紹介する。

## キーワード

流体実験 風洞 スモークワイヤー法 流れの可視化

## 1. はじめに

応用力学研究所風工学分野では、風力エネルギーの利用に係る研究が行われており、大型境界層風洞を用いた流体実験が盛んに実施されている。当該風洞は、共同利用研究の実験、企業からの委託実験、風力発電装置開発に係る企業との共同プロジェクトに係る実験にも使用されており、実験の内容は、流体機械の動作検証、地形や構造物周辺における流れの調査、気流による荷重や圧力の測定、野外設置物の耐風試験など多岐にわたる。当技術室は、風洞実験に係る長期の技術支援依頼を受けており、担当者は、各種実験における要求分析・計画検討に始まり、実験環境の準備・構築、計測機器類のセッティング、装置運転および計測といった支援を行い、場合によっては計測結果の解析にも携わる。

そうした中で、流れの可視化試験は、比較的高頻度に行われる実験の一つである。一般に可視化の手法は、スモーク・気泡・粉末などのトレーサーを流れに乗せてその動きを観察するものや、片端を固定したタフト（ひも）を設置して流れの方向を見るもの、感圧塗料の蛍光・燐光を観測するものなど、多様である。可視化試験の結果は、他の計測（例えば、流速センサーによる流速測定）におけるセンサーの有益な設置ポイントを見極めるためや、定点的なセンサ

ーだけでは把握が難しい流れ全体の様子を捉えるために利用される他、映像解析による流速ベクトル場の導出、シミュレーションとの比較検討などに用いられており、流体研究における貴重な情報の宝庫といえる。一方で、トレーサーの注入方法、供試体の支持構造、照明の加減等によって、異なる流れ方・見え方が生じるため、適切な実験を行うためには、繊細な実験条件の設定と実験環境の調整が必要である。

本稿では、2020年2月に実施した風車後流可視化試験を例に、大型境界層風洞にて行っているスモークワイヤー法を用いた流れの可視化試験について紹介する。

## 2. スモークワイヤー法について

スモークワイヤー法は、油などのスモーク材を塗布したワイヤーを通电によって加熱し、発生した白煙をトレーサーとする方法である。この時に生じる白煙は、熱によって気化したスモーク材が冷風を受けて白い霧状になったものである。

## 3. スモークワイヤー法による可視化試験手順

以下に、スモークワイヤー法を用いた風車後流可視化試験の具体的手順を説明する。なお、主流方向を  $X$ 、 $X$  に直交する水平方向を  $Y$ 、鉛直方向を  $Z$  とし、ローター中心を原点としている。

(1) 供試体設置

本試験は、運転している風車の後方に発生する流れを調査するものである。供試体としては、ローター径  $D=約 50cm$  の風車模型 (図 1) を使用した。当該模型は、モーター駆動が可能であり、風速に対するローター回転数を調整することで、実際に発電を行っている風車実機に近い条件での運転が可能である。具体的には、周速比 (風速  $U[m/s]$  に対する翼端速度  $v[m/s]$  の比)  $\lambda=v/U=3.6\sim 3.8$  という条件でローターを回転させる。

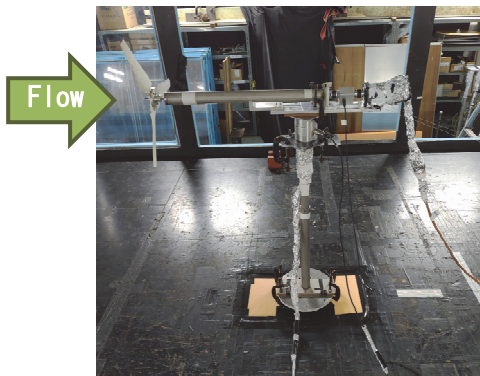


図 1 風車模型

(2) ワイヤー作成

$\phi 0.3mm$  のニクロム線 2 本とガラス繊維を撻り合わせてワイヤーを作成する。この時、ワイヤーは、流れを阻害しない程度に細くするが、通電による熱で断線しない程度の太さは必要である。2 本を撻り合わせ、さらにガラス繊維を巻き込ませているのは、表面積を増大させて油をより多く保持させるためである。端部は、撻り戻り防止・通電・設置のために、導線と合わせて丸形圧着端子で留めている。図 2 にワイヤーとその材料を示す。



図 2 ワイヤーとその材料

(3) ワイヤー設置・接続

供試体の周辺にワイヤーを設置する。熱によってワイヤーが伸びるため、弛緩することがないように、端部をバネに接続して張力を与えている (図 3)。ワイヤーの両端は、導線を介してトランス電源に接続される。電源電圧は、ワイヤーの長さや要求されるスモークの濃度・発煙時間に応じて変わるが、当風洞では概ね  $40\sim 70V$  程度である。

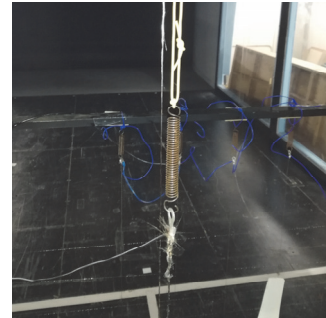


図 3 ワイヤーを接続したバネ

図 4 に設置したワイヤーの模式図を、図 5 に設置したワイヤーを示す。今回は、主流方向とその直交方向を持つ断面 (X-Y 断面または X-Z 断面) を撮影することが要求されたため、ワイヤーを天井から床へ鉛直に張ることにした。観察・撮影を Y 方向から行い、X-Z 断面を捉えることになる。ワイヤー 1 本では、スモーク濃度が不足していたので、主流方向から見て重なるように 2 本目のワイヤーを設置している。

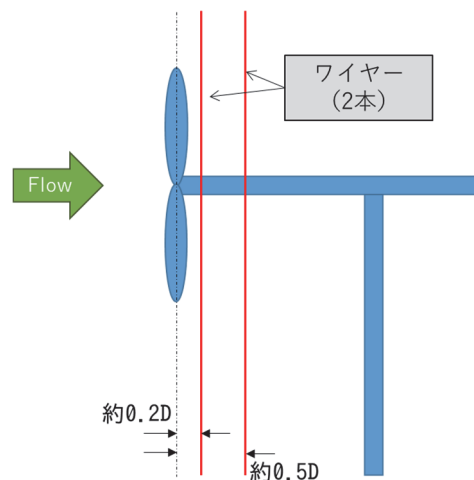


図 4 設置したワイヤーの模式図

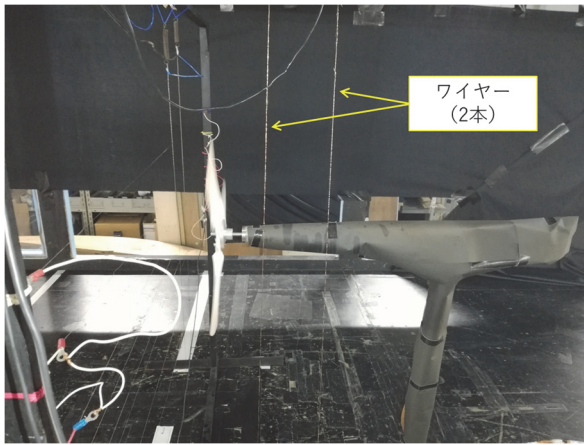


図5 設置したワイヤー

ワイヤーの Y 位置は、ローター径  $D$  に対して、ローター中心付近 (= 中心から  $0.11D$ )、中心から  $0.25D$ 、中心から  $0.5D$  (翼端) である。X 位置は、ローター面より下流へおよそ  $0.2D$ 、 $0.5D$  である。その他、水平にワイヤーを張って天井から撮影する案、供試体の上流側にワイヤーを張る案などもあり、このセッティング条件は諸々の試行錯誤を経た結果である。

(4) 照明の設置

可視化レーザーを用いる場合もあるが、当風洞では概ね出力  $1kW$  のスライドプロジェクター (理化学精機社製 Master HILUX-H、図 6) を使用している。なお、スモークの断面を照射するために、スライド板として幅  $1mm$  ほどのスリットを入れたアルミ板を用いており、光は厚みの小さな扇形に広がることになる。図 7 は今回の照射配置図、図 8 はプロジェクター配置の様子である。



図6 スライドプロジェクター

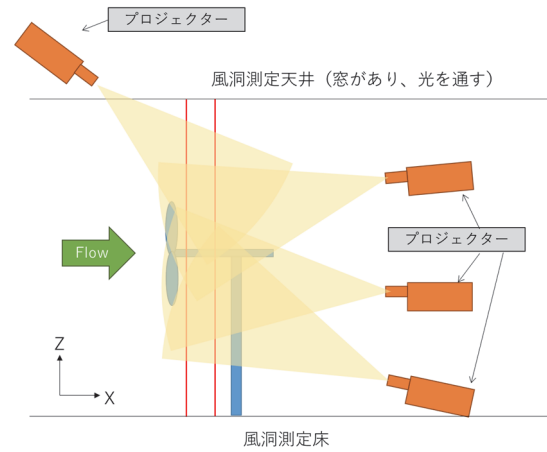


図7 照射配置図 (X-Z 断面)



図8 プロジェクター配置の様子

(5) 流動パラフィン塗布

スモーク材としては、鉄粉を混合させた流動パラフィンを使用しており、刷毛を用いて、パラフィン滴が均等に付着するようにワイヤーへの塗布を行う (図 9)。鉄粉を混合させるのは、ワイヤーに付着した鉄粒子が凹凸として作用し、表面張力の増加によってワイヤーがより多くのパラフィンを保持できるようになるためである。



図9 流動パラフィン塗布の例

(6) 送風と可視化

当風洞におけるスモークワイヤー法では、風速 1m/s 程度の流れが適当である。送風を開始して状態が安定した後、ワイヤーへの通電を行う。スモークは通電後数秒で発生し始め、数十秒ほど継続する。

4. 主流方向を横切る断面 (Y-Z 断面) の可視化

実験中、Y-Z 断面の可視化を追加で実施することとなった。ワイヤーから伸びるスモークは主流方向を横切るようには流れないため、目的の断面にスモークを行き渡らせるために、格子状に張ったワイヤー格子をローター面の下流に設置した (図 10)。図 11 に設置したワイヤー格子の模式図を示す。当該ワイヤー格子は、横 7 本、縦 5 本のワイヤーを使用している。図 12 に照射配置図を示すが、プロジェクターは同図で示すように配置した。

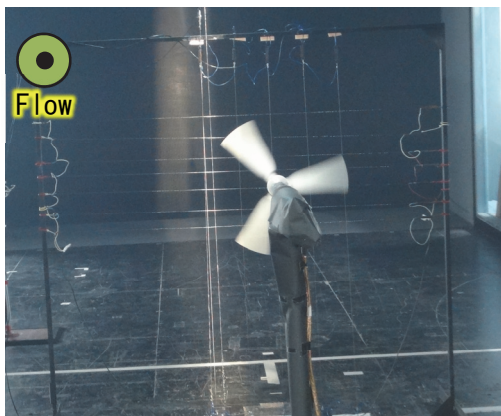


図 10 設置したワイヤー格子

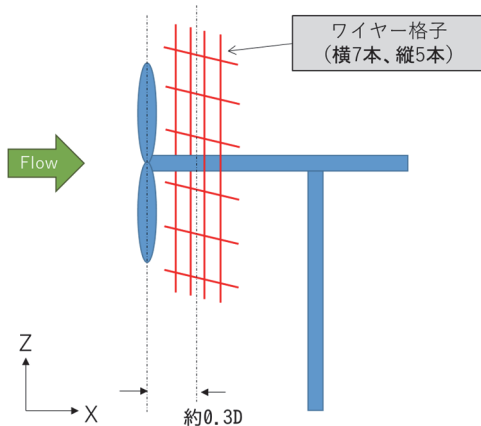


図 11 設置したワイヤー格子の模式図

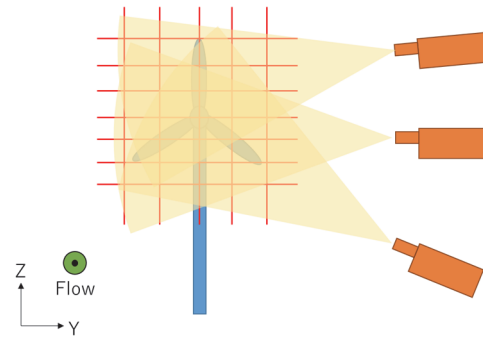


図 12 照射配置図 (Y-Z 断面)

5. 実験条件

表 1 に、最終的に実施した実験条件を整理する。撮影断面は、スモークが照射されている面と同一である。D はローター径である。ブレード型式の「MT 翼」は、風工学分野で研究開発している風車ブレードである。風洞開放状態「3 スパン開放」とは、閉塞効果抑制のために、風洞測定部における供試体周辺の 1 スパン (=2m) およびその下流方向に隣接する 2 スパンの側壁・天井を開放した状態を指す<sup>[4]</sup>。

表 1 実験条件

撮影断面	X-Z	Y-Z
撮影断面位置	Y=0.11D, 0.25D, 0.5D	X=0.3D
風速[m/s]	1	
周速比	3.6~3.8	
D[m]	0.52	
ブレード型式	MT 翼	
風洞開放状態	3 スパン開放	

6. 実験結果

図 13~15 に、X-Z 断面の可視化画像を示す。ローター後方においてスモークの濃淡が交互に現れている箇所 (図中の破線内) は、翼端渦が可視化されたものと考えられる。Y=0.11D、Y=0.25D では、翼端が撮影断面を通過する点は上下に 2 つあり、Y=0.25D において、両方の点で発生した翼端渦を見ることができる。Y=0.11D の位置で下側の翼端渦が見えなくなっているのは、風車の支柱によって後流が阻害されているためであろう。Y=0.5D では、撮影断面がローター面に接するために翼端渦は 1 つだけとなるはずであり、図 15 は、このことに整合している。

図 16 に Y-Z 断面の可視化画像を示す。スモークが歪む方向から、ローター後方の流れがローター回転と逆方向に旋回していると分かる。ここで、気流はローターに対し、ローターを回転させる方向のトルクを与えているので、気流自身は反作用で逆方向のトルクを受け取っているということが確認できる。

図 13-16 はホームビデオカメラによる簡易撮影の画像であるが、本実験では高速度カメラによる撮影も行われており、本格的な解析には高速度カメラ映像が使用される。

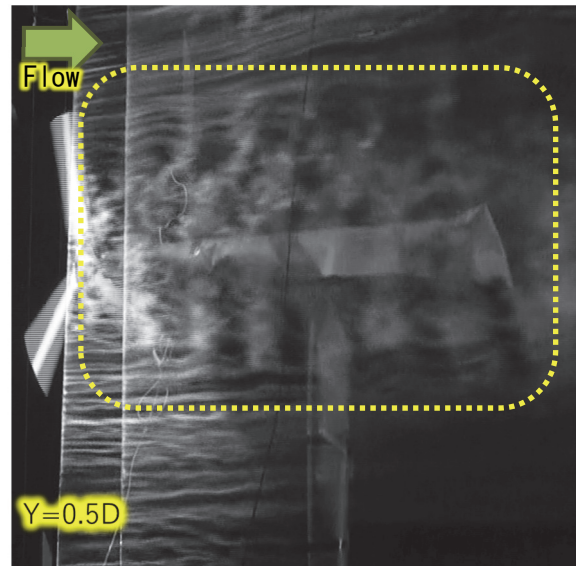


図 15 X-Z 断面の可視化画像 (Y=0.5D)

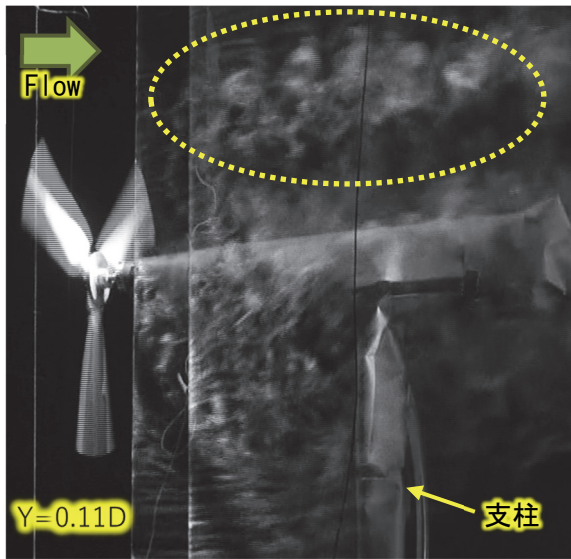


図 13 X-Z 断面の可視化画像 (Y=0.11D)

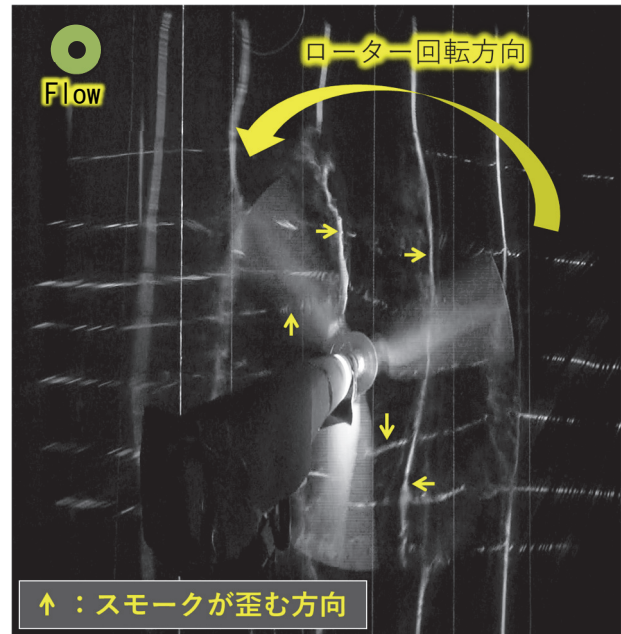


図 16 Y-Z 断面の可視化画像

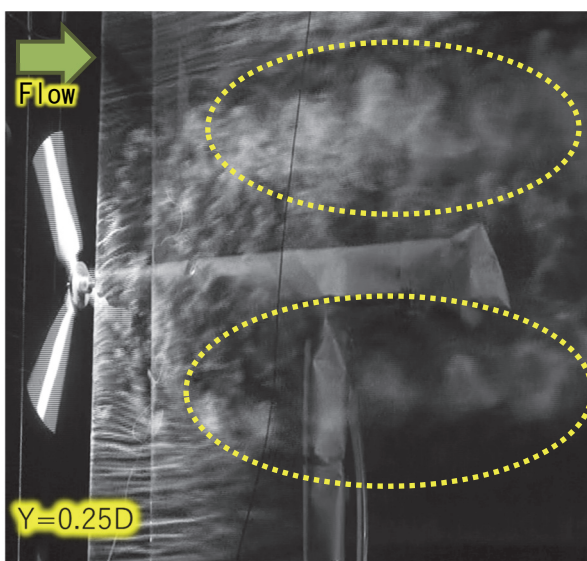


図 14 X-Z 断面の可視化画像 (Y=0.25D)

## 7. おわりに

応用力学研究所大型境界層風洞において実施されているスモークワイヤー法を用いた流れの可視化試験事例を紹介した。

多くの場合、目的に合う可視化を行うためには、実際に可視化を行って観察し、トレーサーの注入方法や照明の位置・角度等のセッティングを再調整するという工程を繰り返す必要がある。スモークワイヤー法は、特殊な装置を必要とせず、現場

での調整も容易であるため、手軽に流れを把握できる実験手法といえる。一方で、長時間の連続的な発煙が困難であることや、高風速に耐えないといった難点もある。ワイヤーにガラス繊維を巻き込む方法や、流動パラフィンに鉄粉を混合する方法は、こうした難点を克服する改善策として、先達により考案されてきた。

今後も、種々の実験手法とそこにある工夫を自身の技能として身に付けて活用し、多様な実験の要望に応えられるようにしたい。

### 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.
- [2] 本間琢也：風車の基礎理論，風力エネルギー，4巻2号, 36-42, 1980.
- [3] 流れの可視化学会編集：新版流れの可視化ハンドブック, 1986.

### 謝辞

本稿で取り上げた風車後流可視化試験は、応用力学研究所における 2019 年度共同利用研究として実施されました。本稿の題材として扱う許可をいただきました研究代表者の弘前大学・本田明弘教授に、厚くお礼申し上げます。

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、大屋裕二特任教授、高田青技術職員、渡辺公彦氏に感謝の意を表します。