

鳥取大学大学院 工学研究科 機械宇宙工学専攻
熱エネルギーシステム解析学研究グループ
原 豊 (准教授)

排気ダクトから排出される流体エネルギーの回収の可能性に関して、現状の実験装置で簡単に行える実験を実施し考察をする。

本実験では、排気ダクトの代わりに、小型風洞(吹出口サイズ: $0.65\text{m} \times 0.65\text{m}$)を用いて、その吹出口の下流 1m の位置に実験用バタフライ風車(垂直軸タイプ、直径: 0.4m 、高さ: 0.3m)を設置して、風車回転数と風洞吹出口中央部における風速の関係を計測した。

図1に実験装置の写真を示す。



図1 小型風洞の吹出口(左の黒い部分)とバタフライ風車
(吹出口面積に比べて風車の大きさが大きく見えるが、
実際の寸法は、風車の受風面積は吹出口断面積の約 28.4%)

以前に、大学内の食堂の排気ダクトの吹出口で簡易計測した風速値(約 3.2m/s 、ただし、かなり乱れがある)を参考にして、今回の参考実験では、風洞吹出口の風速を約 4m/s に設定した。風車ロータを設置していない状態の風洞吹出口における 5 回の計測の平均は $V_0 = 4.035\text{ m/s}$ であり、これを基準風速とする。

風車を吹出口下流 1m に設置して、インバータ制御された誘導モータで風車を回転させ、毎分回転数を、 $0, 20, 40, \dots, 200, 220, 240, 300, 400, 500, 550\text{ (rpm)}$ と徐々に増加して、各回転数における風車トルクと風洞吹出口中央における風速を計測した。なお、風速計測にはピトー管と電子差圧計を用いている。

図2と図3に風速約 4m/s で計測した風車の出力特性を示す。ただし、図3は図2の低回転数領域の拡大図である。今回用いたバタフライ風車は実験用プロトタイプ機であり、性能は最適化されていないことを注意しておく(風速 6m/s において最大効率 7%程度)。風速 4m/s において、今回用いた風車は 120 rpm の回転数において、最大出力 0.226W の機械出力を生み出す。回転数が 200 rpm を超えると出力はマイナス値となり、モータによって強制回転されている状態となる。風車ロータに発電機を取り付けた風力発電機とするならば、出力がマイナスとなる状態は風車が回転しない状態となるが、本実験では、高速回転によ

て、風車ロータの内部を風が貫通する割合が減少した場合の、上流風速の減少（ダクト損失に相当）の影響を見るために、モータによる強制回転状態の実験を行っている。

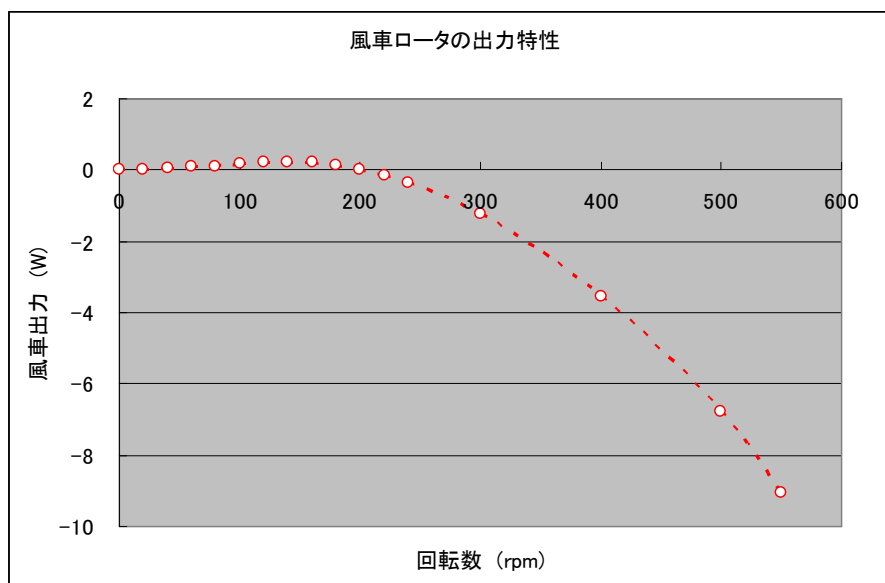


図2 風車の出力特性

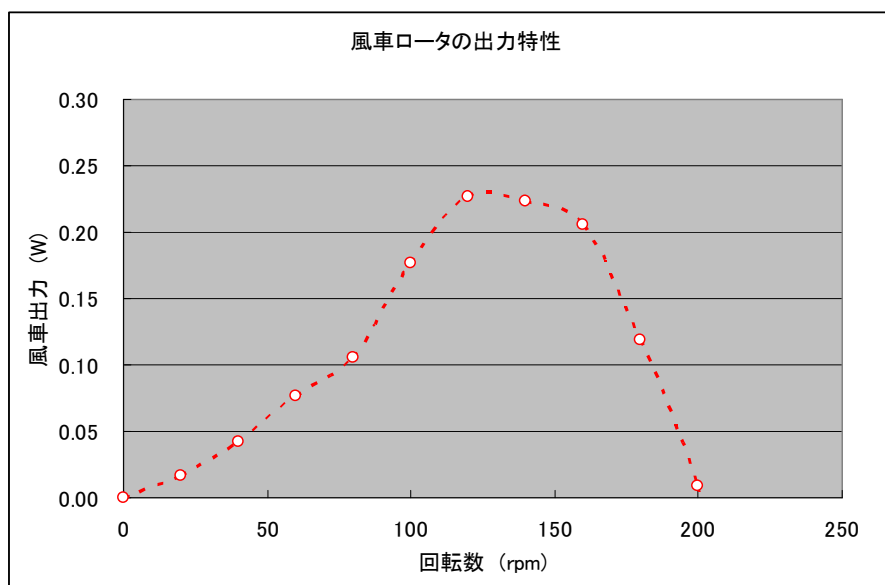


図3 図2の拡大図

図4に各回転数状態において、風洞吹出口中央部において計測された風速(3~5回の計測の平均値)を示す。風洞送風機の風速は多少変動が見られるが、風車出力がプラスの値となる0~200rpmの範囲(風車として機能している状態)では、概ね風車無しの状態と同じ風速であり、この範囲(0~200rpm)の風速の平均は4.03 m/sである。一方、300rpm以上の高回転数状態(風車出力はマイナスであり、強制回転状態)では、風車無しの状態よりも、風速が減少する傾向が見られた。この範囲(300~550rpm)の平均風速は3.989 m/sである。この風速減少は、ダクト損失の増加に相当すると考えられる。

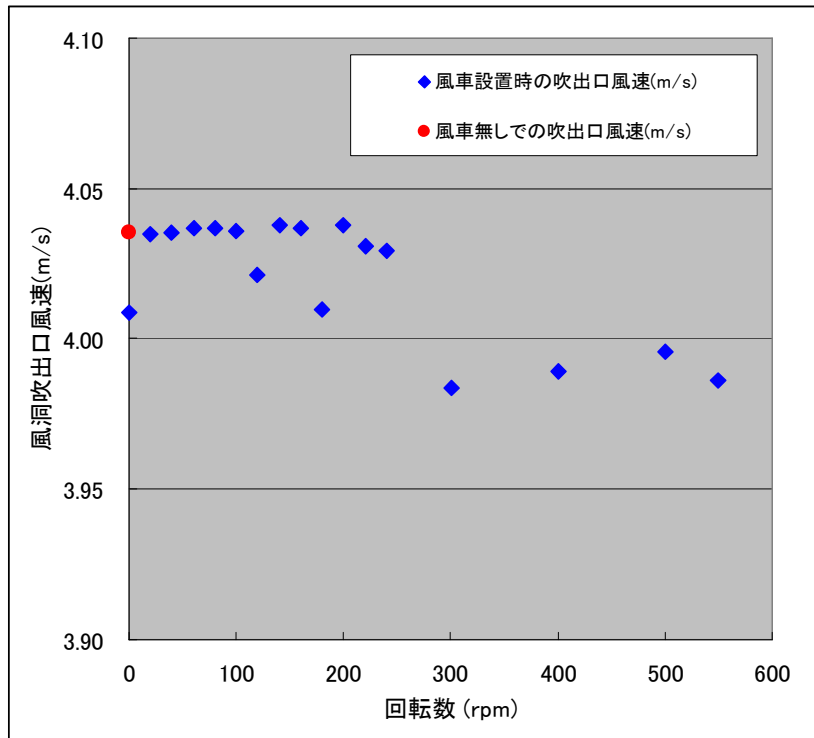


図4 風洞吹出口風速の風車回転数依存

[1] 0~200rpm の低回転数状態と[2] 300~550rpm の高回転数状態の2つの状態に分けて、風洞から流出される流体の運動エネルギー（風エネルギー）の変化を概算する。面積 $A(\text{m}^2)$ を垂直に通過する一定風速 $V(\text{m/s})$ の風力エネルギー P_w (W)は次式(1)で与えられる。

$$P_w = \frac{1}{2} \rho V^3 A \quad \dots (1)$$

ここで、 ρ は空気密度であり、本概算では $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ と仮定する。

[0] 風車ロータを設置していない状態の風速は前述したように、 $V_0 = 4.035 \text{ m/s}$ であり、風洞吹出口面積（ダクト断面積） A_D は $A_D = 0.65 \times 0.65 = 0.4225 \text{ (m}^2)$ であるので、この状態で風洞(ダクト)から吹出している風力エネルギー P_{w0} は、

$$P_{w0} = \frac{1}{2} \times \rho \times V_0^3 \times A_D = \frac{1}{2} \times 1.2 \times 4.035^3 \times 0.4225 = 16.65 \text{ (W)} \quad \dots (2)$$

となる。

ただし、風速分布が風洞吹出口断面で一様であると仮定した概算である。

[1] 低回転数状態(風車として機能)では、平均風速は $V_1 = 4.03 \text{ m/s}$ であり、この状態の風洞(ダクト)から吹出している風力エネルギー P_{w1} は、式(2)と同様の計算から、

$$P_{w1} = \frac{1}{2} \times \rho \times V_1^3 \times A_D = \frac{1}{2} \times 1.2 \times 4.03^3 \times 0.4225 = 16.59 \text{ (W)} \quad \dots (3)$$

となる。

式(2)–式(3) より、低回転数状態で、風車を置くことによる流体運動エネルギーの損失量 ΔP_{10} は、

$$\Delta P_{10} = P_{w0} - P_{w1} = 0.06 \text{ (W)} \quad \dots (4)$$

と計算される。

図3より、実験風車は風速 4m/s において、回転数 120rpm で最大出力 $P_{WT} = 0.226\text{(W)}$ を出力する。この状態における風洞(ダクト)から排出される流体エネルギーの最大回収率 η を概算すると、式(4)の損失分を考慮した結果として、次の結果を得る。

$$\eta = \frac{P_{WT} - \Delta P_{10}}{P_{w0}} = \frac{0.226 - 0.06}{16.65} = 0.00996 \approx 0.01 = 1\% \quad \dots (5)$$

小さい効率ではあるが、ダクトから外部に捨てられた流体エネルギーの一部を回収できると考えられる。なお、実験風車の受風面積 A_{WT} は

$$A_{WT} = 0.4 \times 0.3 = 0.12 \text{ (m}^2\text{)} \quad \dots (6)$$

であり、風洞吹出口面積 $A_D = 0.4225\text{(m}^2\text{)}$ との面積比が

$$\frac{A_{WT}}{A_D} = \frac{0.12}{0.4225} = 0.284 = 28.4\% \quad \dots (7)$$

と小さいことから、エネルギーの回収率(約 1%) が小さくなっていることを注意しておく。(もちろん、風車性能を向上すれば、回収率は改善される。)

[2] 高回転数状態(強制回転)では、平均風速は $V_2 = 3.989 \text{ m/s}$ であり、この状態の風洞(ダクト)から吹出している風力エネルギー P_{w2} は、式(2)と同様の計算から、

$$P_{w2} = \frac{1}{2} \times \rho \times V_2^3 \times A_D = \frac{1}{2} \times 1.2 \times 3.989^3 \times 0.4225 = 16.09 \text{ (W)} \quad \dots (8)$$

となる。

式(2)–式(8) より、高回転数状態で、風車を置くことによる流体運動エネルギーの損失量 ΔP_{20} は、

$$\Delta P_{20} = P_{w0} - P_{w2} = 0.56 \text{ (W)} \quad \dots (9)$$

と計算される。この状態の損失は、低回転数状態の損失量(式(4))の約 10 倍近くになっており、本実験風車の風速 4m/s の最大出力 $P_{WT} = 0.226\text{(W)}$ の 2 倍以上である。このように、風車の大きさが小さくても、高速回転となって、風車の内部を貫通する風が大幅に減少するような状態では、有効なエネルギー回収は不可能であることをこの実験結果は示唆している。

以下は推測になるが、風車がダクト面積と同程度以上に大きくなった場合や、風車が小さくてもダクトのすぐ近くに置かれた場合は、ダクトの損失は風車を取り出すエネルギー以上に大きくなり、エネルギー回収は不可能となる。逆に、多少風車が小さくても、ダクトに影響を及ぼさない範囲かつダクトからの風速が小さくない範囲で風車を設置できる

ならば、有効なエネルギー回収は可能と考えられる。

実際の野外でのダクトからのエネルギー回収を考えた場合は、自然の風の影響もあるため、上記の室内実験とは異なる効果が考えられる。すなわち、自然の風の影響で、ダクトからの排出風の変化を受け、風車に十分に当たらないこともありえる。また、実際には、自然風の影響で、ダクトの損失が変化し、その大きさは、本実験で得られた損失量の結果以上に大きくなるのが容易に想像できる。

小型風車を排気ダクトの気流中におくことの利点の1つとして、エネルギー回収率が微々たるものであったとしても、常に回転していることで、本来のエネルギー源である自然の風が吹いたときに、すぐに反応して高い回転数状態になり、風車の稼働率（あるいは設備利用率）が増加できることが期待できる。すなわち起動性の問題の改善策の1つとしても有効であると考えられる。

本実験は、風車の大きさや吹出口からの距離、および基準風速も一定にした参考実験であるため、今後、条件を様々に変えた実験あるいはシミュレーションで、排気エネルギーの回収が最適に行なえる条件を明らかにする必要がある。

最後に、本実験は2013.1.8に、本研究グループに所属する学生4名が原の指導と立会いの下で実施したものである。