

多流管モデルを用いたダリウス形タービンのパワー係数の検討
 Study on power coefficient of the Darrieus turbine using multiple streamtube model

○茂木雄太¹, 直井和久², 塩野光弘², 鈴木勝行²
 *Yuuta Mogi¹, Kazuhisa Naoi², Mitsuhiro Shiono², Katsuyuki Suzuki²

Abstract: We examined the performance analysis of the Darrieus turbine by a wind tunnel experiment, and investigated about the Reynolds number used in a wind turbine for the aerodynamic characteristics of the NACA63₃-018 wing in the this turbine. However, study of water turbine for the tidal current power generation requires aerodynamic characteristics in the Reynolds number that are higher than the wind turbine. This paper investigates the power coefficient of the Darrieus turbine using multiple streamtube model from the aerodynamic characteristics of high Reynolds number that assumed the water turbine.

1. はじめに

我々はこれまでダリウス形タービンの性能解析を風洞施設により実験的に行ってきた^[1]が,潮流発電装置の実用化のためには実海域にタービンを使用する場合のタービンのパワー係数を理論的に解明することが重要である.これまで,タービンの性能を理論的に解析するために,空気力学的性能予測モデルである多流管モデルによって検討してきた^{[2],[3]}.この多流管モデルで検討するためには翼の揚力係数と抗力係数,即ち空力特性が必要である.我々が研究対象としてきたタービン翼である NACA63₃-018 について風車におけるレイノルズ数 $Re=1 \times 10^5$ 程度についてはこれまでに検討を行ってきたが,潮流発電用水車として用いる場合には風車よりも高いレイノルズ数 $Re=1.57 \times 10^5 \sim 2.93 \times 10^5$ 程度における空力特性を明らかにする必要がある.

本稿では,風洞施設により測定した NACA63₃-018 の空力特性から多流管モデルを利用して水車でのレイノルズ数に近い風速 10,15,20m/s($Re=1.45 \times 10^5, 2.17 \times 10^5, 2.90 \times 10^5$)におけるダリウス形タービンのパワー係数 C_p について検討する.

2. 翼の空力特性

2.1. 翼の空力特性の算出^[4]

図 1 に翼の空力特性と迎角の関係を示す.ここで, D は抗力, L は揚力, α は迎角, V_∞ は自由流れの流速, b は翼幅, c は翼弦長である.抗力係数 C_D と揚力係数 C_L は風洞施設で測定した D, L を用いて (1), (2) 式より算出する.

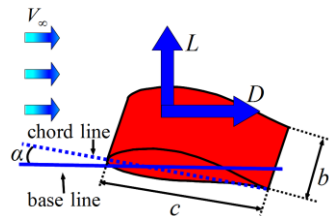


Figure1. Aerodynamic characteristics

$$C_D = \frac{D}{0.5\rho AV_\infty^2} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{L}{0.5\rho AV_\infty^2} \quad (2)$$

ここで, ρ は流体密度, A は翼の断面積 ($A=c \times b$) である.

2.2. 風洞施設による空力特性の測定と実験結果

風洞施設では α を変化させ, D, L を 6 分力検出器により測定する.ここで,翼形状は NACA63₃-018 の直線翼を使用し, $c=210\text{mm}, b=700\text{mm}$ である. α は -20° から 20° まで 2° 毎に設定する.今回の実験では $V_\infty=10, 15, 20\text{m/s}$ ($Re=1.45 \times 10^5, 2.17 \times 10^5, 2.90 \times 10^5$) について D, L を測定して C_D, C_L を算出する.ここで,レイノルズ数 Re は (3) 式に示される値である.

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

ただし, ν : 動粘性係数である.

図 2 に NACA63₃-018 の $\alpha-C_D, \alpha-C_L$ 特性を示す. $\alpha=14^\circ$ の時に Re が高いほど C_D は小さくなり, C_L は大きくなった. また, $Re=2.17 \times 10^5, 2.90 \times 10^5$ では C_D, C_L 共にほぼ等しい値となった.

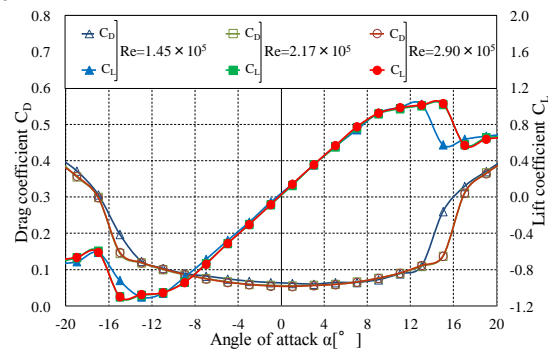


Figure2. Characteristics of $\alpha-C_D$ and $\alpha-C_L$

3. タービンのパワー係数の算出

3.1. 多流管モデル^{[5],[6]}

多流管モデルでは,同一断面を持つ複数の流管がタービンに通っていると仮定し,流管内での流体の運動量変化が翼に働く力に等しいとする.図 3 にダリウス形タービン

1: 日大理工・院(前)・電気 2: 日大理工・教員・電気

と代表する流管を、図 4 にその平面図を示す。ここで、 r はタービンの半径、 Δh は流管の高さ、 θ は $\alpha=0^\circ$ を基準とした翼の回転位置角、 $r\Delta\theta\sin\theta$ は流管の幅、 V は流管内の流速である。

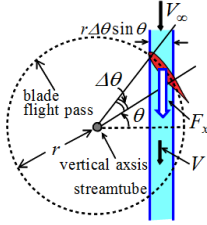


Figure 4. Plan view

翼に働く無次元化した流れ方向の力 F_x^* は、 N を翼枚数として、

$$F_x^* = \frac{NF_x}{2\pi r \Delta h \sin \theta V_\infty^2} = \frac{V}{V_\infty} \left(1 - \frac{V}{V_\infty}\right) \quad (4)$$

となり、 F_x^* は速度比 V/V_∞ に従う。図 5 は、 F_x と法線力 F_N 、接線力 F_T の関係を示している。ここで、 $r\omega$ は翼の回転周速度、 W は相対速度である。 F_x は、

$$F_x = -(F_N \sin \theta + F_T \cos \theta) \quad (5)$$

となる。 F_x^* は(4)、(5)式と法線力係数 C_N 、接線力係数 C_T 及び W を用いると、

$$F_x^* = \frac{S}{4\pi} \left(\frac{W}{V_\infty}\right)^2 \left(C_N - C_T \frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right) \quad (6)$$

となる。ただし、ソリディティを $S=Nc/r$ と定義し、 C_N, C_T は翼の C_D, C_L 及び α と以下のような関係がある。

$$C_N = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (7)$$

$$C_T = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (8)$$

α は ω を角速度として、

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V \sin \theta}{V \cos \theta + r\omega} \right) \quad (9)$$

となる。また、図 5 の W と V は以下の関係となる。

$$W \sin \alpha = V \sin \theta \quad (10)$$

誘導係数 a は以下の式で定義される。

$$a = 1 - V/V_\infty \quad (11)$$

(4)、(11)式より以下の関係式が得られる。

$$a = F_x^* + a^2 \quad (12)$$

(12)式を満たすように a を決定すると(11)式の V が求まる。(10)式より W が求まるので翼に働くトルク T_S は、

$$T_S = \frac{1}{2} \rho r C_T c \Delta h W^2 \quad (13)$$

となる。 T_S は C_T を用いて流管ごとに計算される。 i 番目の流管の位置 θ_i は、 N_T を流管の数として、

$$\theta_i = (2i - 1) \times \pi / N_T \quad (14)$$

となる。パワー係数 C_P は、 i 番目の流管におけるトルクを

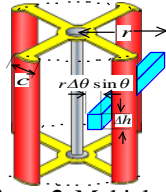


Figure 3. Multiple streamtube model

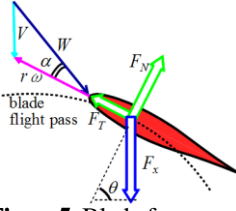


Figure 5. Blade force and relative velocity vector

T_{Si} とし、全流管の平均トルクを \bar{T}_S とすると、

$$C_P = \frac{\bar{T}_S \omega}{\frac{1}{2} \rho 2r \Delta h V_\infty^3} \quad (15)$$

と定義される。ここで i 番目の流管における相対速度 W_i 、接線力係数 C_{Ti} とすると(13)、(15)式より周速比 $\lambda=r\omega/V_\infty$ における C_P は、次式となる。

$$C_P = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \left[\frac{S}{2} \lambda \left(\frac{W_i}{V_\infty}\right)^2 C_{Ti} \right] \quad (16)$$

従って(8)、(16)式より、 C_P を算出する。

3.2. 解析結果

$S=0.2, N_T=36$ の場合における NACA63₃-018 の λ - C_P 特性を図 6 に示す。 C_P の最大値は、 $Re = 2.90 \times 10^5$ の時、0.197 となった。また、 $\lambda=3$ 以下の範囲では C_P が負になっているが、これは \bar{T}_S が負になるためである。今回検討した Re の範囲においては Re が大きくなると C_P も大きくなる。これは図 2 より Re が高いほど C_D は小さくなり、 C_L は大きくなり、(8)式より C_T が大きくなるからである。

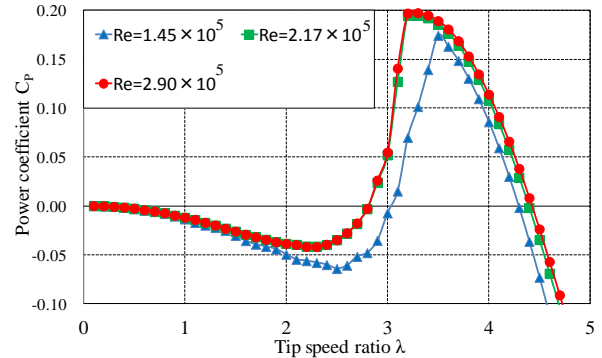


Figure 6. Characteristics of λ - C_P

4. まとめ

風洞実験によって得られた空力特性から多流管モデルを利用して水車に用いた場合のレイノルズ数におけるダリウス形タービンのパワー係数 C_P について検討した。その結果、 C_P の最大値は $Re=2.90 \times 10^5$ の時に 0.197 となり、 Re が大きくなると C_P も大きくなることを明らかにした。

風洞実験に際し、御協力頂いた風洞実験室の安部先生、高橋先生に謝意を表します。

参考文献

- [1] 池田ほか：「ダリウス形タービンに用いる翼形の違いによる性能の検討」平成 21 年度電気設備学会全国大会講演論文集，E-1，pp243-244 (2009,9)
- [2] 鈴木ほか：「ダリウス形風車の理論解析における基礎検討」，平成 19 年度日本大学理工学部学術講演会論文集，pp1150-1151(2007)
- [3] 鈴木ほか：「ダリウス形タービンの複数流管モデルによる解析—ブレード形状の違いによるパワー係数の検討—」，平成 20 年度日本大学理工学部学術講演会論文集，pp1198-1199(2008)
- [4] 牧野：「航空力学の基礎」，産業図書株式会社，pp.86(2009.3)
- [5] I.Paraschivoiu：「WIND TURBINE DESIGN With Emphasis on Darrieus Concept」，インデックス出版，pp.73~94 (2007.3)
- [6] J.H.Strickland：「The Darrieus Turbine : A performance Prediction Model Using Multiple Streamtubes」，SAND75-0431，pp.1~31，(1975)