L-25

潮流発電システムのダリウス形水車特性の検討
−スプライン関数による効率特性の近似−
Study on the Characteristics of Darrieus Water Turbine for Tidal Current Generation System
-Approximations of Power Characteristics by Spline Function-

○浅野敬之[1]，　直井和久[2]，塩野光弘[2]，鈴木勝行[2]
*Takayuki Asano[1], Kazuhisa Naoi[2], Mitsuhiro Shiono[2], Katsuyuki Suzuki[2]

Abstract: Tidal current generation system is more advantageous than other renewable energy, because of the tidal current is easy to predict the generating power. The system uses Darrieus turbine and induction generator. The rotational speed of generator and turbine are different, therefore the turbine is connected with the generator through the step-up gear.

In this paper, to determine the power characteristic of Darrieus turbine required examining a gear ratio, the power characteristic of the channel experiment was approximated by the 3rd spline function. The result of power characteristic at1.2m / s was the smoothest, true and power coefficient is zero when tip speed ratio is zero.

1．はじめに

現在主流である発電方式の代替エネルギーとして、再生可能エネルギーが注目されている。潮流は再生可能エネルギーの一種であり、その流速が一日の中で周期的に変化するため、潮流発電では発電電力が予測しやすい点が他の再生可能エネルギーに比べて有利である。

本研究では発電装置としてダリウス形水車とかご形誘導発電機を接続して使用するが、水車と発電機では動作回転数が異なるので、増速機を介して接続する。これまでに 2003 年 1 ~12 月の流速データを用いて最適増速比の検討[1]を行った。この増速比の検討では、水路実験で得られたトルク特性C_Tを 3 次のスプライン関数で近似して、効率C_Pを$\lambda C_T = C_P$の関係から求めた。つまり、C_Pをλの 4 次の多項式とした。

しかし、理論的には効率C_Pは周速比λの 3 乗の多項式で表される。そこで今回は効率C_Pを 3 次のスプライン関数で直接近似し、その近似特性について検討する。

2．ダリウス形水車の出力特性[2]

検討するダリウス形水車の形状を図 1 に、水車が受ける力の図を図 2 に示す。

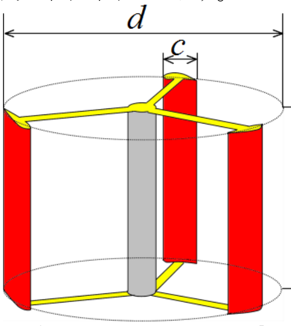

Fig.1 Darrieus water turbine

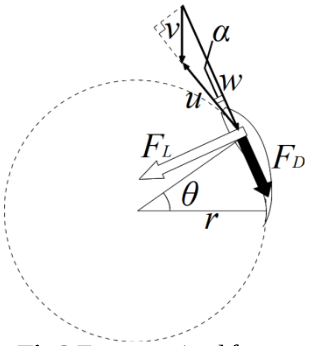

Fig.2 Force received from

図 2 は、ブレードの 1 枚が水車半径rの円周上の回転位置θにある場合、流速vとブレードの周速度uの関係を示しており、ブレードに対する流体の流れ(相対速度)wはvとuの合成となり、次の(1)式となる。

$$w = v\sqrt{1 + 2\lambda\cos\theta + \lambda^2} \tag{1}$$

ここで、λは周速比で、(2)式となる。

$$\lambda = \frac{r\omega_T}{v} \tag{2}$$

ただし、r：水車半径[m]、ω_T：水車の回転角速度[rad/s]である。そして、図 2 より、ブレードに働く力は相対速度の直線上に働く抗力F_Dと、垂直に働く揚力F_Lに分解でき、次式で示すことができる。

$$F_L = \frac{1}{2}C_L \rho A_B w^2 \tag{3}$$

$$F_D = \frac{1}{2}C_D \rho A_B w^2 \tag{4}$$

ただし、ρ：流体密度[kg/m^3]、A_B：ブレード面積[m^2]、C_L：揚力係数、C_D：抗力係数である。

よって、1 枚のブレードに働く力F_1は(5)式となる。

$$F_1 = F_L \sin\alpha - F_D \cos\alpha \tag{5}$$

ただし、αは迎角であり、図 2 より、(6)式となる。

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta}{\cos\theta + \lambda}\right) \tag{6}$$

1 枚のブレードに発生するトルクT_1は(7)式となる。

$$T_1 = \frac{1}{2}\rho r A_B w^2 (C_L \sin\alpha - C_D \cos\alpha) \tag{7}$$

n枚ブレードの水車に発生する 1 回転中の平均トルクT_qは(8)式となる。

$$T_q = \frac{n}{2\pi}\int_0^{2\pi} T_1 d\theta \tag{8}$$

トルクの評価には(9)式のトルク係数C_Tで表す。

$$C_T = \frac{T_q}{0.5\rho A v^2 R} \tag{9}$$

ただし、A：水車の掃過面積(A=h×d)[m^2]である。

(1)式と(7)式を(8)式に代入すると(9)式よりC_Tは(10)式となる。

$$C_T = \frac{nA_B}{2\pi A}\int_0^{2\pi}(1 + 2\lambda\cos\theta + \lambda^2)\times (C_L \sin\alpha - C_D \cos\alpha)d\theta \tag{10}$$

また、効率C_Pは(11)式となる。

1：日大理工・院(前)・電気　2：日大理工・教員・電気

$$C_P = \frac{P_{To}}{P_{Ti}} = \frac{\omega_T T_q}{0.5\rho A v^3} = \frac{T_q}{0.5\rho A v^2 R}\frac{R\omega_T}{v} = \lambda C_T \quad (11)$$

(11)式に示すように、理論的には C_P は周速比 λ の 3 乗の多項式となる。そこで今回は 3 次のスプライン関数を用いて、C_P を直接近似する。

3．ダリウス形水車特性の近似

3．1．スプライン関数による近似法

本章では、水路実験で得られた C_P から、任意の流速における出力特性を推定するため、水車特性の近似にスプライン関数を用いる。データ点に近い滑らかな曲線を $f_s(x)$、データ点の座標を(x_1,y_1)、(x_2,y_2)、・・・、(x_n,y_n)とし、平滑化曲線 $f_s(x)$ がデータ点に対して如何に忠実であるか、滑らかであるかの指標として、次の ε を定義する。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{n} w_i \{f_s(x) - y_i\}^2 + g\int_{x_1}^{x_n} \{f_s^{(m)}(x)\}^2 dx \qquad (12)$$

ただし、$f_s^{(m)}(x)$は $f_s(x)$の m 階微分、w_i、g は重み係数であり、$0< w_i \le 1$、$g>0$ である。(12)式の第 1 項を ε_w とすると、これは平滑化曲線 $f_s(x)$がデータ点に対して忠実であるかの尺度になる。また、第 2 項を ε_g とすると、これは平滑化曲線 $f_s(x)$が滑らかであるかの尺度になる。ε が最小となる時 $f_s(x)$は重み g の下で最も滑らかな曲線となる。滑らかな関数として、(13)式に示す2m-1次の自然スプラインを用いる。今回は m=2、つまり 3 次を使用する。

$$f_s(x) = p_{m-1}(x) + \sum_{i=1}^{n} c_i (x - x_i)_+^{2m-1} \qquad (13)$$

ただし、$(x - x_i)_+^{2m-1}$ は 2m-1 次の切断べき関数、$p_{m-1}(x)$ は m-1 次の多項式で、c_i は m 個の条件を満たす定数である。

3．2．ダリウス形水車の近似法

ここでは、実際の水路実験から求めた C_P 特性の近似について述べる。始めに前節の (12)式で示した、w_i=1 としたときの ε が最小となる C_T 特性の g を表 1 に示す。

Table1.Minimum value of ε and *g* for current speed on C_T

Current speed v[m/s]	Weighting factor *g*	Evaluation index ε	ε_w	ε_g
1.0	2.7×10^{-2}	2.6×10^{-2}	2.8×10^{-4}	2.6×10^{-2}
1.2	3.1×10^{-2}	2.2×10^{-2}	2.6×10^{-4}	2.2×10^{-2}
1.4	3.9×10^{-2}	2.9×10^{-2}	4.5×10^{-4}	2.8×10^{-2}

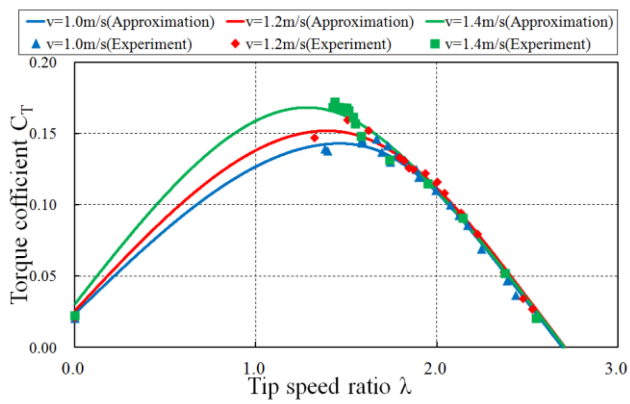

Fig.3 Approximations of torque characteristics by spline

図 3 は水路実験より求めた C_T 特性を 3 次のスプライン関数で近似したものである。表 1 より、ε が最小となるのは流速 1.2m/s の時である。従来は図 3 の流速 1.2m/s の C_T 近似特性を用いて (11)式の関係から C_P 特性を求めた。しかし、本稿では水路実験より求めた C_P 特性を 3 次のスプライン関数で近似する。w_i=1 としたときの ε が最小となる C_P 特性の g を表 2 に、C_P 特性を近似したものを図 4 に示す。

Table2.Minimum value of ε and *g* for current speed on C_P

Current speed v[m/s]	Weighting factor *g*	Evaluation index ε	ε_w	ε_g
1.0	1.2×10^{-2}	2.1×10^{-1}	1.1×10^{-3}	2.1×10^{-1}
1.2	1.6×10^{-2}	1.9×10^{-1}	1.0×10^{-3}	1.9×10^{-1}
1.4	9.0×10^{-2}	1.5×10^{-1}	2.9×10^{-3}	1.5×10^{-1}

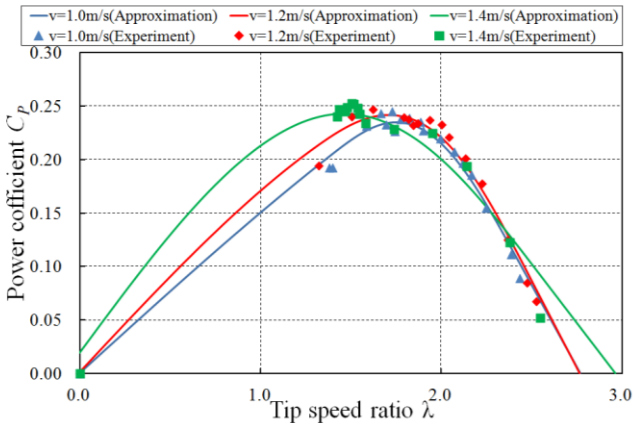

Fig.4 Approximations of power characteristics by spline

表 2 において、ε が最小となるとき最も忠実かつ滑らかに近似されており、流速 1.4m/s において ε が最小となる。しかし、図 4 を見ると流速 1.4m/s の時、周速比 λ が 0 で C_P が 0 にならないので除外し、表 2 より、ε は流速 1.2m/s において最小となる。そのため、最適増速比の検討には流速 1.2m/s の C_p 近似特性を用いる。

4．まとめ

潮流発電システムの最適増速比を検討する際に必要となるダリウス形水車の C_P 特性は、これまでは 3 次の多項式である C_T 特性から、周速比 λ の 4 次の多項式として検討してきた。しかし、理論的には周速比 λ の 3 乗の多項式で表される。そこで今回は水路実験で得られた効率 C_P を 3 次のスプライン関数で直接近似した。その結果、流速 1.2m/s のときの C_P 特性の ε が最小となった。

参考文献

[1] 浅野ほか：「潮流発電システムの増速比と発電電力量の検討-流速の出現確率を用いた方法-」, 平成 22 電気学会 B 部門大会, pp.23-9~23-10

[2] 直井ほか：「潮流発電システムにおける発電電力量による増速比の最適化」，電学論 B，Vol.131，No.2，pp222-230，2011