

潮流発電システムの発電電力量の検討

-Heier の式による効率特性の近似-

Study on the Generated Energy for Tidal Current Generation System

-Approximations of Power Characteristics by Heier's equation-

○田中良平¹, 辻健太郎², 直井和久³, 塩野光弘³, 鈴木勝行³*Ryohei Tanaka¹, Kentarou Tsuji², Kazuhisa Naoi³, Mitsuhiro Shiono³, Katsuyuki Suzuki³

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

So far, to determine the power characteristic of Darrieus turbine required examining a gear ratio used by spline function. In this paper, the power characteristic of water channel experiment was approximated by the function suggested by Heier.

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量を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特性から、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ている。

しかし、水車特性をスプライン関数で近似した場合、データ点近似区間毎に定数が異なるため計算が煩雑となる。そこで本稿では、どのデータ点近似区間においても定数が同じである近似式の一例として、Heier²⁾³⁾氏によって提案された風車出力の近似式を用いて水路実験から得られた水車特性を近似し、その近似特性について検討する。

2. 供試水車の諸元

図 1 に水路実験にて使用したダリウス形水車の概形を、表 1 にその諸元を示す。翼形は NACA63-018 を基にした円弧翼とする。円弧翼は、キャンバー線がタービンの回転軌跡に沿うように円弧状に曲げられている。

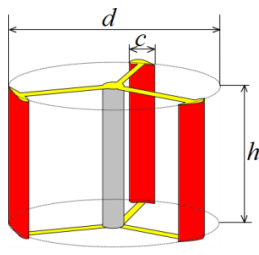


Fig.1 Darrieus water turbine

Table1. Specifications of tested water turbines

Number of blade	3
Diameter d [mm]	300
Height h [mm]	200
Chord length c [mm]	55.3
Solidity	0.176

3. 水車特性の近似

これまでの増速比の検討¹⁾では水車特性の近似にスプライン関数を用いていた。水路実験から得られた水車特性は回転速度と発生トルクである。測定誤差も含まれるため、ここではトルク係数特性 C_T を 3 次のスプライン関数で近似し C_T 特性を求め、これと周速比の積から水車効率 C_p を求める。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) , \dots , (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。

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

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、 $0 < w_i \leq 1$, $g > 0$ である。(1)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、(2)式に示す $2m-1$ 次の自然スプラインを用いる。

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

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。ここでは C_T を $m=2$ 、つまり 3 次のスプライン関数で近似するため C_T は次式で表すことができる。

$$C_T(\lambda) = d_0 + d_1 \lambda + d_2 \lambda^2 + d_3 \lambda^3 \quad (3)$$

ただし、 λ : 周速比 ($=R\omega_T/v$)、 R : 水車半径[m]、 ω_T : 水車回転速度[rad/s]、 v : 流速[m/s]、 d_0-d_3 : λ に対するスプライン関数の近似区間毎に異なる定数である。従って、 C_p は次式で表すことができる。

$$C_p(\lambda) = \lambda C_T = \lambda(d_0 + d_1 \lambda + d_2 \lambda^2 + d_3 \lambda^3) \quad (4)$$

本稿では新たな近似法として Heier 氏が提案した近似式を

用いる。風力発電設備では出力特性はある程度似通った形状を呈することが多い。そのため、出力係数については近似式も提案されており、その一例として Heier 氏による近似式を(5)式に示す^{[2][3]}。

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_0} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) \exp\left(-\frac{c_7}{\lambda_0}\right) \quad (5)$$

ただし、 $1/\lambda_0 = [1/(\lambda + c_8\beta)] - [c_9/(\beta^3 + 1)]$ 、 β はピッチ角[deg]、 $c_1 \sim c_9$ は定数である。本稿では水車特性を近似するが、流体が異なるだけであるため、(5)式の近似式を用いて水車特性を近似する。我々が水路実験に使用したダリウス形水車は、キャンパー線がタービンの回転軌跡と一致した状態である。従って、ピッチ角(翼取付角)は $\beta = 0$ であり、(5)式は次のように表すことができる。

$$C_p(\lambda) = \left(\frac{c_1 c_2}{\lambda} - c_1 c_2 c_9 - c_1 c_6 \right) \exp\left(c_7 c_9 - \frac{c_7}{\lambda}\right) \quad (6)$$

(6)式を用いてデータ点を近似するために最小二乗法を用いる。従って、近似曲線からの偏差の二乗和 S はデータ点の座標を $(\lambda_1, C_{p1}), (\lambda_2, C_{p2}), \dots, (\lambda_n, C_{pn})$ とすると次式で表すことができる。

$$S = \sum_{j=1}^n \left[C_{pj} - \left(\frac{c_1 c_2}{\lambda_j} - c_1 c_2 c_9 - c_1 c_6 \right) \exp\left(c_7 c_9 - \frac{c_7}{\lambda_j}\right) \right]^2 \quad (7)$$

(7)式が最小となる各定数を求めるためには

$$\partial S / \partial c_k = 0 \quad (\text{ただし、} k=1, 2, 6, 7, 9) \quad (8)$$

の条件を満たせば良い。

4. 結果

スプライン関数において(1)式で示した、 $w_T=1$ としたときの ε が最小となる C_T 特性の g を表2に示す。図2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。また、図3は $C_p = \lambda C_T$ の関係から C_p 特性を求めたものである。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、 ε は流速 1.2m/s において最小となる。

Table2. 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}

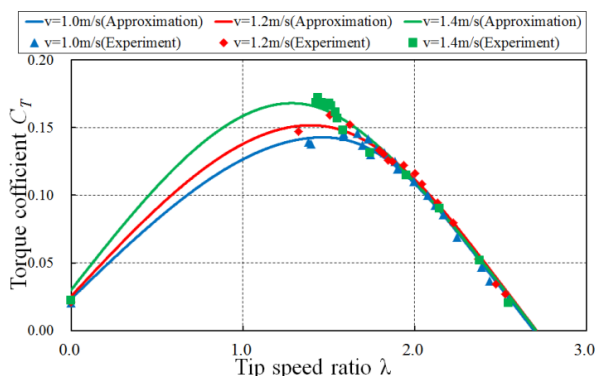


Fig.2 Approximations of torque characteristics by spline

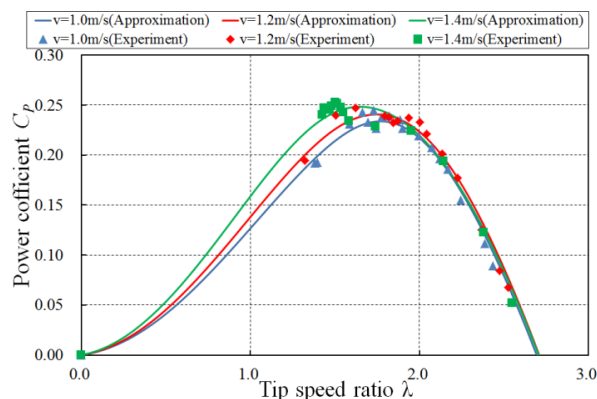


Fig.3 Approximations of power characteristics by spline

図4は水路実験より求めた C_p 特性を(6)式を用いて近似したものである。(7)式はデータ点と差の二乗誤差であるが、流速によってデータ点の数が異なる。そこで、 S の平方根をデータ点の数 n で除すとデータ点一点あたりの平均誤差 S_{C_p} と解釈することができる。 S_{C_p} を(9)式に示す。

$$S_{C_p} = \frac{\sqrt{S}}{n} \quad (9)$$

表3は各流速における S と S_{C_p} を示す。表3より流速 1.0m/s において S と S_{C_p} の値が最小となっている。

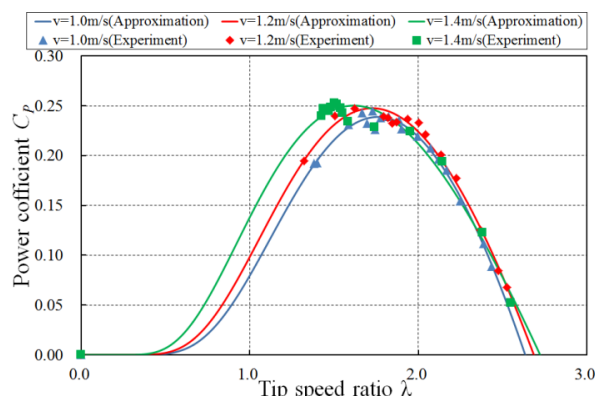


Fig.4 Approximations of power characteristics by least square method

Table3. Value of S and S_{C_p} for current speed

Current speed v [m/s]	Square sum S	S_{C_p}
1.0	3.67×10^{-4}	1.07×10^{-3}
1.2	5.20×10^{-4}	1.52×10^{-3}
1.4	1.03×10^{-3}	2.14×10^{-3}

5. まとめ

本稿では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 特性を Heier 氏によって提案された風車出力の近似式を用いて近似した。その結果、流速 1.0m/s のときの C_p 特性の S と S_{C_p} が最小となった。今後は流速 1.0m/s の C_p 近似特性を用いて、最適増速比の検討を行う。

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,(2010)
- [2] J.G.Slootweg,H.Polinder and W.L.Kling :「Wind Power in Power Systems」,John Wiley&Sons, pp555~584,(2005)
- [3]七原:「風力発電プラントのシミュレーション手法の開発-固定速・可変速機のモデリングと風速を入力としたシミュレーション-」,電力中央研究所報告,(2008.7)