マイクロ水力発電における螺旋水車の挙動解析に関する研究
Research on behavior analysis of spiral water mill in micro hydro-power

大江慎哉*，小林晃*
S.Ooe and A.Kobayasi

1．はじめに

マイクロ水力発電は、小さな水源かつ比較的簡単な工事で発電でき、太陽光発電と異なり昼夜での電力差が少ない(安定供給)といった特徴があり、注目を浴びている。その中でも、より低流量・低落差にて適用できるとされる水車として、螺旋水車が挙げられる。しかし、未だにその動力特性の理論的解明がなされていない。

本研究では、流体力学・水理学の観点から螺旋水車の挙動解析を行い、特定の条件下における角速度を求める。

2．螺旋水車の挙動理論

2．1．揚力

揚力とは、流体中に置かれた板等の物体に働く力のうち、流れの方向に垂直な成分のことである。揚力は、揚力係数C_Lを用いて、以下のような数式モデルで表される。

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 S \qquad (1)$$

ここで、C_Lは揚力係数、ρは流体の密度、Vは物体と流体の相対速度、Sは物体の代表面積そしてLは発生する揚力である。

2．2．三次元羽解析

三次元羽における回転を考えるため、螺旋水車を図 1、2 のように考える。図内におけるベクトルは全て羽から見たものである。

図 1 に示されるように、太軸（Z 軸）方向が流れ方向であり、流れ方向から水車を見ると正六角形に見える構造になっている。

図 2 は、図 1 の半径距離r（$0 \le r \le R$）における、微小幅drについて考えている。図 2 に示されるように、三次元的な羽の後流からの影響を、誘起速度V_i、それに伴う誘導迎角α_iで補正する。ここで、dLは微小幅drに作用する揚力、dDは微小幅drに作用する抵抗力、ωは角速度、ϕは流速Vと回転速度$r\omega$から成る角、βは回転軸に対し垂直な平面と羽素から成る角、αは$\alpha = \beta - \phi$より求められる角、V_Rは後流からの影響を考慮しない場合の相対速度そしてV_Eは後流からの影響を考慮する場合の相対速度である。

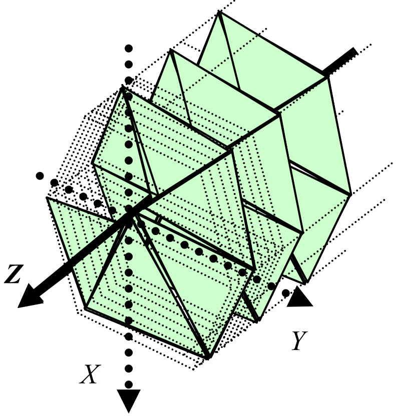

図 1：螺旋水車全体図

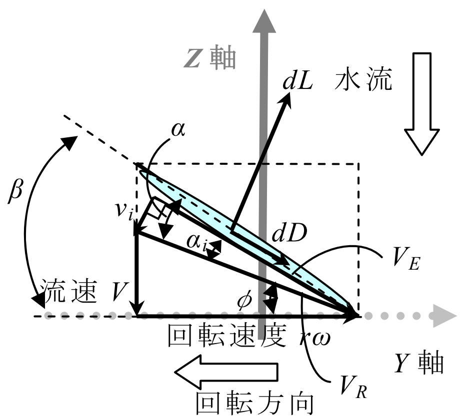

図 2：螺旋水車部分図

* 京都大学 Kyoto University
マイクロ水力発電、螺旋水車、数値解析

図 2 の羽素について、揚力 L が有効速度 V_E に垂直であると仮定すれば、紙面に垂直な dr の微小部分の推力 dT は次式で表される。ここで、c は羽弦長である。

$$\begin{aligned} dT &= dL\ \cos(\phi + \alpha_i) \\ &= \frac{1}{2}\rho V_E{}^2 C_L cdr\ \cos(\phi + \alpha_i) \end{aligned} \quad (2)$$

羽の各半径位置で、D を摩擦に伴う抵抗として、次式であわされる。ここで、C_D は抵抗係数とし、定数とおいてよい。

$$D = \frac{1}{2}\rho V_E{}^2 C_D cr \quad (3)$$

図の幾何学的関係より誘導迎角 α_i の近似解は次式で表される。ここで、R は羽半径、m_0 は揚力傾斜、N は羽の枚数である。

$$\alpha_i = \frac{\beta - \phi - \alpha_0}{1 + \dfrac{8r\pi \sin\phi}{Ncm_0}} \quad (4)$$

よって、トルク Q は、次式のようになる。

$$Q = \int_0^R N \times r \times \left[dL \sin(\phi + \alpha_i) + dD \cos(\phi + \alpha_i)\right] dr \quad (5)$$

2．3．運動方程式

回転運動の運動方程式より、トルク Q は次式で表すことが出来る。

$$Q = I\dot{\omega} = I\frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

3．螺旋水車の挙動解析

2 節を踏まえて、以下の手順に従い数値解析的に角速度を求めていく。解析にはエクセルの *VBA* を利用した。

1. 理論より導き出した式や、モデル特有の式を変数に代入する
2. 定数、流速 V 等を具体的に代入する
3. 角速度 ω に初期値 ω_0 を与え、式（6）より、角加速度 $\dot{\omega}_0$ を求める
4. それに微小時間 dt を掛けて、初期値 ω_0 に加えたものを角速度 ω_1 とし（$\omega_1 = \omega_0 + \dot{\omega}_0 dt$）、以後、角速度 ω が安定するまで繰り返す

4．考察

瀧本[1)]は、螺旋水車の羽根直径 450mm、水車全長 1,000mm、羽根の間隔ピッチ 125mm の 4 重巻き羽根の回転数を実験的に調べて、流量約 1 ℓ/min に対し、約 30rpm といった結果を導いている。同様の条件を本研究プログラムに適用すると、概ね同様な結果が得られた。

また、羽の大きさを 10 倍にして計算してみると角速度は 10 分の 1 に、羽の大きさを 100 倍にすると角速度は 100 分の 1 になった。実際の河川に導入する際には、この結果を踏まえて、最適角速度が得られるような大きさの螺旋水車を導入することが有効であると考えられる。

図 3 は、流速と角速度の対応関係を表したものである。流速 142m/s を超えると、線形的に対応しなくなる。また、流速 361m/s 以降は本研究プログラムでは計算不可能であり、これが本手法の適用範囲であると考えられる。角速度 ω を導出する際に、流速 V は非常に複雑に関係しているので、これらの関係の把握が今後の課題である。

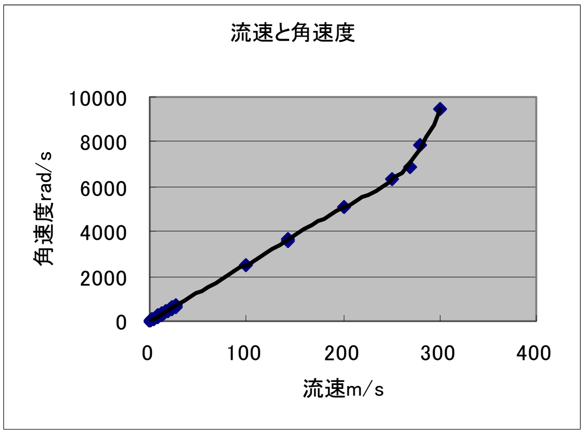

図 3：流速と角速度の関係

参考文献　1)瀧本裕士:「新エネルギー創出に向けたマイクロ発電システム」､富山の水環境（富山県立大学戦略的教育研究課題推進プロジェクト（平成 17 年度））、2005