揺動式ナノ水力発電機の基礎研究

Development of Yawing Type Hydroelectric Unit

○学 後藤 尚史 (九工大院)

三宅 俊甫 (九工大院)

正 金元 敏明 (九工大)

Naofumi GOTOU, Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu, Japan
 Shunsuke MIYAKE, Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu, Japan
 Toshiaki KANEMOTO, Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu, Japan

The use of the clean natural/renewable energy resources has been promoted in the power generation, as those scarcely emit greenhouse gases. The waterpower has larger energy density than the wind power and the solar power, and there are many hydraulic power stations. The large-scale station with a dam, however, is undesirable because such public works damage natural ecosystem in rivers and/or forests. To promote more and more the hydroelectric generation for the next leap, it is necessary to utilize effectively mini/micro/nano hydropower in coexisting with natural ecosystem. This research develops a new type hydroelectric unit utilizing the yawing motion of the submerged blades in rivers, irrigation channels, and so on. In this report, the concepts of the unit are explained, and the output characteristics are discussed experimentally using the trial model.

Key Words: Hydropower, Hydroelectric Unit, Yawing Blade, Generator, Natural Energy

1. 緒言

世界的に環境対策が進められる中、電力部門においても風力、水力、太陽光などの二酸化炭素をほとんど排出しないクリーンな自然エネルギー資源の有効利用が望まれている。中でも水力はエネルギー密度が大きく、天候にほとんど左右されずに安定した電力の供給が見込める利点がある。しかし、従来のようなダムを要する大容量発電の適地は残り少なく（日本の場合）、また土木工事などで環境破壊や生態系への影響を伴うかもしれない。

そこで、本報告では、包蔵水力が未だ豊富で日本の地形に多い浅い河川、用水路、海峡などに注目し、これらのナノ水力資源（1W~1kW）を有効活用すること、また大規模な工事を必要とせず簡単に設置できることを前提として、新しい形式の発電装置（揺動式水力発電機、Yawing Type Hydroelectric Unit と呼ぶことにした）を提案し、その性能を把握することにした。

2. 揺動式水力発電機の着想

本水力発電機は開水路上に機構部（発電機）を設置し、水没させた翼に働く流体力を回転動力に変換するものである。機構部が水没しないため修理やメンテナンスの面で有利となる。また、従来形水車ランナのように水中で回転運動を行わず、格段の工事もないので、自然の生態系との共生が可能となる。

Fig. 1 Yawing blade motion

図1は横軸を時間、縦軸を揺動翼の変位とし、1周期の揺動翼の動きを表している。リンク機構を介してこの揺動を回転運動に変換する。本研究で考案したそのリンク機構の概略を図2に示す。揺動翼、翼軸、回転円板、リンクおよびベースより構成されている。翼軸は揺動翼がリンク A に対して

Fig. 2 Yawing Type Hydroelectric Unit

90deg.となるようリンク A 端に固定され、他端の a 点は回転円板外周上に回転が自在になるように支持されている。リンク B は揺動翼が下流に流されないように支持する役目を担い、両端の支点 b, c は回転が自在である。このような機構により、揺動運動を回転運動に変換することが可能となる。

3. 各要素の算出方法

3-1 揺動角と翼角 回転円板上の支点 a の半径が揺動翼の移動距離と迎え角の範囲を左右する（図3）。回転円板の中心から測った、リンク B の支点 b までの距離を r_b 、リンク A の支点 a までの半径を r_a 、リンク A の長さを S_A 、リンク B の長さを S_B 、回転円板中心とリンク B の支点 b の位置関係を与える距離を S_x 、 S_y （直角関係、水力発電機を河川などに固定するベッド上）、 r_b と r_a のなす中心角を θ （回転円板の回転角）、 r_b とリンク B とのなす角を ϕ とおくと、流れ方向から測ったリンク B の角度 β （揺動角）と弦方向の角度 η （翼角）は次式で与えられる。

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{S_y}{S_x} \right) - \phi \quad (3.1)$$

$$\eta = \sin^{-1} \left[\frac{r_a}{S_A} \sin \left\{ \theta - \tan^{-1} \left(\frac{S_x}{S_y} \right) \right\} - \frac{S_B}{S_A} \cos \beta + \frac{S_x}{S_A} \right] \quad (3.2)$$

Fig. 3 Transform yawing motion into rotational motion

3-2 翼に作用する流体力 本装置は流れに対して垂直方向の力を回転運動に変換して発電を行う。ここで翼に作用する流体力と入口速度三角形を図 4 に示す。ここに、 v は流速、 u は揺動速度、 w は相対速度、 α は迎え角、 L は揚力 (w に垂直な方向)、 D は抗力 (w 方向)、 L_y は L と D の合力の Y 方向成分である。

Fig. 4 Velocity triangle and blade forces

3-3 トルク 回転円板に作用するトルクを求めるためには回転円板外周の支点 a に働く力の周方向成分を求める必要がある。ここに、リンク A と回転円板の周方向のなす角は回転によって変化するため、機構の幾何学的関係を考慮する。流れに垂直方向の力 L_y の周方向成分を L_T 、流れ方向と r_b のなす角度を ψ 、流れに対して垂直方向と r_a のなす角を ξ とおくと、 ψ 、 L_T は

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{S_y}{S_x} \right) \quad (3.3)$$

$$L_T = L_y \sin \xi \quad (3.4)$$

で与えられる。また ξ は支点 a の位置によって計算方法が異なるため以下に示すように領域分けを行う。

① $0 \leq (\theta + \psi) < \psi$	$\xi = \theta - 270^\circ - \psi$
② $\psi \leq (\theta + \psi) < 90^\circ$	$\xi = 90^\circ - \theta - \psi$
③ $90^\circ \leq (\theta + \psi) < 180^\circ$	$\xi = \theta + \psi - 90^\circ$
④ $180^\circ \leq (\theta + \psi) < 270^\circ$	$\xi = 360^\circ - (90^\circ + \theta + \xi)$
⑤ $270^\circ \leq (\theta + \psi) < 360^\circ$	$\xi = \theta - 270^\circ + \psi$

4. 出力の簡単な予測

4-1 揺動角と迎え角 着想の妥当性を実証するためのモデルを想定して、機構各部の寸法を $r_a=100\text{mm}$ 、 $S_A=155\text{mm}$ 、 $S_B=200\text{mm}$ とし、この場合に揺動角が流れ方向に対して左右対称に近くなるよう決めた $S_x=197\text{mm}$ 、 $S_y=155\text{mm}$ の場合について、流速を $v=0.836\text{m/s}$ 、回転円板の回転速度を一定 $n=30\text{min}^{-1}$ (揺動翼の速度 $u=0\sim 0.31\text{m/s}$) に仮定して、円板の回転角 θ に対する揺動角 β 、迎え角 α の関係を求めてみた(図 5)。ここで揺動角、迎え角は流れ方向を中心とし、円板側を正とする。

Fig. 5 Yawing angle β and attack angle

回転円板 1 回転中に揺動角 β 、迎え角 α とともに当然周期変動するが、半回転毎の反周期性はない。以上から、本装置で安定したトルク (出力) を得るためには、図 1 のようなシステムを複数設けて円板同士をベルト等で連結し、更にはフライホイールなどの準備が必要となろう。なお、独立電源として充電機能を備える場合にはこのままでも有効である。

4-2 揺動翼の選定

上述のように迎え角は揺動中に変化するため、翼型選定に注意を要する。たとえば、完全特性が既知の NACA 翼型⁽¹⁾と平板翼⁽²⁾の迎え角 α に対する揚力係数 C_L の関係を図 6 に示す。NACA 翼型の C_L は $\alpha=10\text{deg}$ 付近まで平板よりも高いものの、それを超えると失速に達し著しく低下する。これに対し、平板翼の C_L は迎え角の増加とともに $\alpha=42\text{deg}$ 付近まで増加し、 $\alpha=10\text{deg}$ 付近を超えると NACA 翼型よりも高揚力となる。また、抗力係数 C_D の関係を図 7 に示す。 $\alpha=10\text{deg}$ 付近までは NACA 翼型の C_D が幾

Fig. 6 Lift coefficient

Fig. 7 Drag coefficient

分低い、全体的に同じような傾向を示す。

4-1 に示す条件の下では図 5 より迎え角 α は 10deg. 以上変化するため、ここでは平板翼を使用することとした。翼形状は翼弦長 50mm、翼長 150mm とし (図 8)、上述の条件の下で性能を予測してみた。

4-3 出力特性 図 5 の迎え角に対する揺動翼に作用する揚力 L 、抗力 D は

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho S w^2 \quad (4.1)$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho S w^2 \quad (4.2)$$

Fig. 8 Blade

から、図 6、7 によって求まる。その揚力から L_T を求めると式 (3.4) から L_T が求まる。この結果から出力は $P = L_T r_a \cdot 2\pi / 60$ となる。

図 9 にそれぞれ翼の位相差 $\theta = 0\text{deg}$ 、 $\theta = 120\text{deg}$ 、 $\theta = 240\text{deg}$ と変えた場合の個々の出力、およびそれらを連動させた出力を示す。

Fig. 9 Calculated outputs

本結果では連動させても単機の場合と同様に出力は変動する。位相角を変えることにより、あるいは連動数を増やすことによりこの変動は軽減できるが、これについては次報に譲る。

Fig. 10 Trial model of the Yawing Type Hydroelectric Unit

5. 着想の妥当性

5-1 実験装置と実験方法 前述の着想を実証するために準備したモデルを図 10 に示す。単機の各部寸法は上述の通りであり、揺動翼 3 段分の回転円板はプーリを介して連結されており、トルク検出器と回転検出器、増速プーリを介してインバータで回生制御できる発電機に連結されている。なお、本報告では、空転させたときの機械的動力を加算した値で評価することにした。

本装置を回流水路に設け、流速を一定 ($v = 0.836\text{m/s}$) に保ち、トルクと回転速度を計測した。

5-2 トルク特性と出力特性 まず大まかに性能を把握するため約 3 回転分を時間平均したトルク係数 $C_M = 2M / \rho A v^2 r_a$ 、 A : 翼の揺動面積]と出力係数 $C_P = 2P / \rho A v^3$ を先の計算結果 (実線) とともに図 11、12 に示す。ここに、 U は水流速度 v に対する平均揺動速度 u^* の比 $[= u^* / v]$ 、ここでは揺動速度比と呼ぶ]である。

Fig. 11 Torque coefficient

Fig. 12 Power coefficient

トルク係数は揺動速度比の増加に伴ってほぼ直線的に低下し、計算結果と同様になる。ただし、揺動速度比が小さい場合と大きい場合、すなわち翼の揺動速度が遅い場合と速い場合は流れの剥離に基づく抗力の影響が強くなるものと思われ、実験値のほうが小さくなる。このトルクに回転速度を乗じたものが出力となり、 $U = 0.25$ 付近で最高出力が得られ、幾分計算結果とは異なる。

多数を連動させると前方の翼の後流が後方の翼仕事に影響するようになるから、流れの状態を把握した上で、翼の相対位置等の最適化を図る必要がある。

5-3 変動特性 本装置は本質的に非定常運転されるが、最初でもあり、インバータに一定周波数を入力した場合について、単機の変動トルクの時間変動を調べた (図 13)。ここに、 $\theta=0$ となる時間を実線で示したが、このときの翼位置は $\beta=-11.88\text{deg}$ であり、1.91s が回転円板一回転 (揺動 1 回) に相当する。トルクの変動が大きいため回転速度は入力周波数に同期せず、トルクに応じて変化する。このことから、実際に発電機として稼働させた場合にもある程度の速度変化があると予測できる。

図 13 の回転円板 1 回転分 ($t=2.12\sim 4.03\text{s}$) を抽出して求めた出力を計算値とともに図 14 に示す。トルク変動に対応して出力も変動するが、実験値のほうが振幅は小さい反面、微小変動が混在するようになる。

6. 結言

翼の揺動を利用した新しい水力発電装置を考案し、実際に発電が可能であることを確認した。

7. 参考文献

- (1) <http://www.cyberiad.net/foildata.htm>
- (2) <http://www.atkinsoph.com/>
- (3) 西山哲男, 翼型学,
1992, 日刊工業新聞社
- (4) 松永成徳他 3 名, 流れ学—基礎と応用—,
1991, 朝倉書店

Fig. 13 Unsteady characteristics

Fig. 14 A period of Unsteady Characteristic