

螺旋水車を用いたピコ水力発電システムの実験的研究

(独)国立高専機構 岐阜工業高等専門学校 専攻科 学生会員 ○田上 寛之

(独)国立高専機構 岐阜工業高等専門学校 正会員 和田 清・平林 裕貴

(株)篠田製作所 岡村 鉄兵

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの開発・普及が求められている。水力発電は、発電時に CO_2 を排出しない安定的な再生可能エネルギーであり、包蔵水量が日本一である岐阜県は、そのポテンシャルが特に高い地域である。現在、地域分散性が高く、小流量・低落差でも発電可能なピコ水力発電が注目されている。また、持続的社会の形成に必要な豊富な地域資源を活かすことができ、中山間地域の地域再生につながる等の特長がある。一方、河川法や電気事業法などの制約も多く、小流量・低落差の水車の設置数およびデータ量が少ないため未知なことが多く、実用化が進んでいない現状である。

そこで本研究では、小流量・低落差に適応可能な螺旋水車を対象とし、実験模型による力学モデル¹⁾の適用性および水理特性と出力や発電効率の関係を明らかにすることを目的とする。具体的には流量および水路勾配等を変化させ、提案された力学モデルによる理論値と、実験模型を用いた水理実験との比較検討を行う。

2. 半没水状態における螺旋水車の力学モデル

螺旋水車の原理は、アルキメデスの揚水ポンプを応用したもので、ポンプとは逆に水車上部より水を流下させ、螺旋構造を持つ水車軸の回転により動力を得るものである(図-1(a)参照)。水車内に半分程度の水が入った半没水状態における螺旋水車の力学モデルは以下のように構築されている。水車内で、水は羽根と羽根に挟まれ分断されている水塊がある。力学モデルでは、羽根が一定速度での回転時において、水塊は等速運動をしていると考え、羽根にかかる水塊の傾斜方向成分の力と水塊にかかる抵抗力がつりあう関係により、水車トルクが求められる。この水車トルク T を次式(1)に示す。

$$T = \frac{(m(1 - \alpha) g \sin \psi - \gamma q v) \cdot L \cdot B}{2\pi} + \frac{F_p \cdot l_p}{2\pi} \cos \phi \quad [\text{Nm}] \quad (1)$$

ここで、 m :水塊の体積(kg)、 α :水車バケットの許容分を超えた損失率、 g :重力加速度(m/s^2)、 ψ :水平と水車シャフトのなす角度(rad)、 q :水車軸に垂直な断面の潤辺、 γ :粘性摩擦による抵抗係数($\text{kgs}^{-1}\text{m}^{-1}$)、 v :水塊の速度(m/s)、 L :水車全長(m)、 B :水車の羽根の枚数、 F_p :水車最上部においてシャフトと垂直な面に投影した羽根形状にかかる水圧(N)、 l_p :羽根ピッチ(m)、 ϕ :水塊が羽根の軸に対する角度(rad)である。このモデルによれば、水が水車の容量を超えて溢れ出すまでは、低速であるほど粘性摩擦による抵抗力が小さく、水車上部に溜まる水が増えるため出力が高くなること、最大出力の回転速度を決める水車の容量は、その回転速度での水車内の水塊の状態によって左右されることなどが明確にされている。

3. 実物模型における力学モデルの適用

図-1(b)は螺旋水車の実物模型を示し、大きさは直径 0.37m、羽根の全長 1.0m、ピッチ 0.4m の 4 枚羽根で構成されている。発電機は、風力用(スカイ電子社製定格 200W HR-200)を採用し、水車と発電機の接続方法はチェーン・ベルト方式で、プーリによる増速比は約 4.2 倍である。図-2 に実物模型における水車トルク曲線(流量 30 l/s、水路勾配 25°)を示す。力学モデルでは、水車内の水面が水車軸に対し平行状態(以下、Case1)、水面が地面に対し水平状態(以下、Case2)の 2 通りを想定し、前者が理論出力の上限値、後者が理論出力の下限値となり、水路勾配と流量に影響される。なお、事前の実験により水車軸受の摩擦によるトルク損失は 2.01Nm と算定されたため、計算値から差し引いた。図-3 に実物模型における等倍および増速後の水車出力曲線(流量 30 l/s、水路勾配 25°)を示す。水車出力はトルク×角速度で算定する。増速後の曲線は、水車本体の回転速度を 4.2 倍およびトルクを 4.2 分の 1 にし、増速に伴うトルク損失を計算値の 2 割とし、差し引いた。



(a) 螺旋本体 (3D)



(b) 水理実験

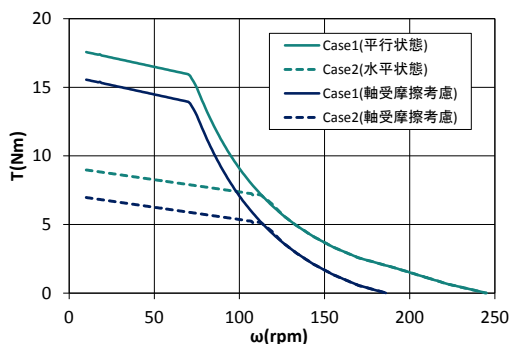


図-2 実物模型における水車トルク曲線
(流量 30ℓ/s, 水路勾配 25°)

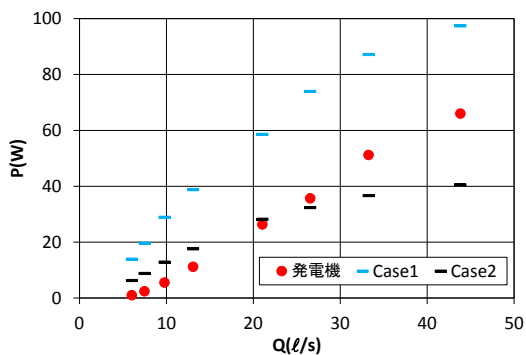


図-4 流量と出力 (50Ω・水路勾配 25°)

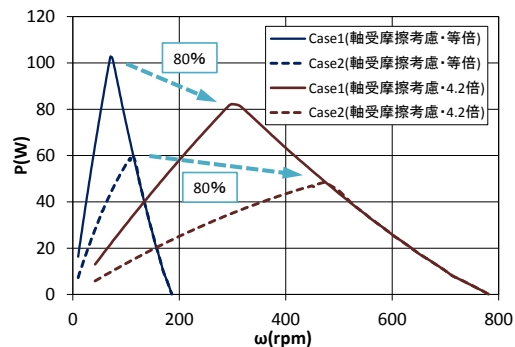


図-3 等倍および増速後の水車出力曲線
(流量 30ℓ/s, 水路勾配 25°)

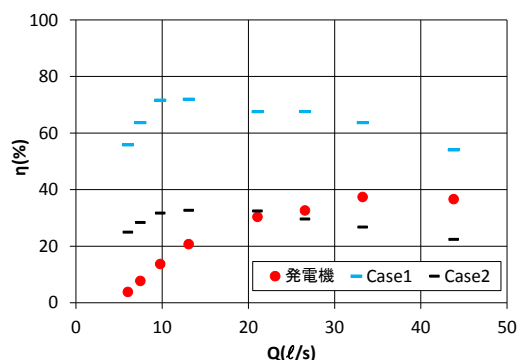


図-5 流量と発電効率 (50Ω・水路勾配 25°)

これが実験模型における水車出力曲線である. 水車出力の最大値は Case1 の回転速度 298rpm で 82W となった.

4. 水理実験および考察

実験方法は, 螺旋水車の回転によって得られる電気エネルギーを回路に通し, 電気計測器により電圧を読み取り, レーザ回転計を用いて水車軸と発電機の回転数を計測した. 実験条件は, 水路勾配は螺旋水車が最大出力を発揮すると考えられる 15~25° とし, 電気抵抗値 R は 10~70Ω と設定した. なお, 電圧は抵抗値との関係からオームの法則で出力に変換し, 発電システム全体のエネルギー損失を考慮した出力 (以下, 実験値) とする. また, 実験時の流量, 回転数から力学モデルを用いて出力を算定し, 水車によるエネルギー損失を考慮した出力 (以下, 理論値) をする. 抵抗値 50Ω, 水路勾配 25° において最大出力が得られたため, 図-4 および図-5 に実験および理論上における流量 Q と出力 P , 発電効率 η の関係を示す. 発電効率は水塊の位置エネルギーを基準とした. 両図より, 小流量時 (10 l/s 程度) には実験値の発電効率は樋と水車羽根のクリアランスからの流水の漏れにより極めて悪い. また, 理論値の発電効率は良く, Case1 の流量 9.79 l/s 時に最大 72% となった. 一方, 大流量時 (40 l/s 程度) では, 実験値および理論値ともに出力は増加するが, 発電効率は低下し, 特に理論値は大きく低下する. 理論値は水車によるエネルギー損失を考慮した出力で, 実験値は発電システム全体のエネルギー損失を反映した出力であるため, 理論値と実験値の比較より, クリアランスからの流水の漏れを含めた出力の低減量を求めることができる. さらに, 理論値における水車内の水面の仮定は, 流量 0~15 l/s 程度までは Case2 の水平状態を, それ以上の流量では Case1 の軸と平行状態が対応することが分かる.

5. おわりに

以上述べたように, 水車軸受の摩擦によるトルクの損失を考慮した上での水車出力の算定により, より実物模型の再現に近づいた. また, 水理実験により流量や電気抵抗値の変化による力学モデルの適用が可能となった. 今後, 電気抵抗値と水路勾配を変化させてビデオ撮影により, 力学モデルの適用範囲および妥当性を検討するとともに, 実験模型を再現した螺旋水車を MPS(Moving Particle Semi-implicit)法によって水路勾配および流量の変化に伴う水塊の再現および水車の挙動の把握し, 力学モデルによる理論値および実験値と比較検討する.

[参考文献] 1) 岡村・高野ほか: らせん水車を用いた農業用水路におけるピコ水力発電システムの最適設計と実証試験, 農業機械学会誌, 第 73 巻第 5 号, 2011.