

研究成果報告書

研究課題名	農業用水路等勾配流（非落差流）水力発電技術の開発
研究開発組合代表者名	榎本ビーエー株式会社

1. 研究目的

図1は $50\text{m}^3/\text{秒}$ ほど流れる緩勾配用水路である。水力（位置）エネルギーは落差と質量に依存することから、落差（水路勾配）は小さくても流量の大きな流れは大きなエネルギーを有している。国内各所で、このエネルギーは流下しているのみで未活用である。

本研究は、上記エネルギーを電力に変換する手段の開発と、その手段で変換できる量（変換効率）を確認するとともに手段実用上大きな課題となる除塵の方法、発電の経済性（建設単価＝設置原価／年間発電量）について見通しを得ることを目的とする。



図1 流量豊富な用水

2. 研究内容

水力発電の核である多種の水車技術（従来技術）を緩勾配水路に適用するには、水路を改修して落差を設ける必要がある。水路改修工事費は発電に関するライフサイクルコストの大きな部分であり、発電単価を押し上げる要因でもある。また、緩勾配ゆえに落差を作ること自体が難しい場所が多く、緩勾配水路での従来技術による発電は制約が多い。

これまでに建設された農業用水発電設備は落差式であり、発電量は大きくても数百kW程度である。緩勾配流での発電では一発電システム当たり数10kW程度が上限であろう。風力等他の発電システム同様に水力においても発電能力が高いほど経済性は高い。裏返せば、発電量が低いほど経済性がわるい。いわゆる“小水力発電”の普及を阻む要因である。従って、緩勾配流発電が実用になるには、“経済的に成り立つこと”が最重要課題である。

従来技術で経済性低下の大きな要因が初期建設コストの高さにあることから、これへの対策として、“投げ入れ型水車”の実現が有効である。投げ入れ型は、水車が流されないように、たとえば水路岸に結び付けておくだけであるので大きな水路改修工事は不要である。

緩勾配流はエネルギー密度が低い。従って、流れの一部を利用するのみでは発電量も少ない。投げ入れ型水車に要求されるのは水路の流れをより多く取込めるものでなければならない。さらに、取込んだ流れのエネルギーを吸収する高い水車効率が要求される。

以上を踏まえ、高い水車効率が期待でき、投げ入れ型設置の可能な並進翼水車の開発を目指す。

進翼水車の作動原理

翼理論によれば、流れに対し適切な角度をもって置かれた平板様物体（翼：ブレード）には流れに垂直な方向の力が働く（図2）。このブレードを複数枚平行配置した列（翼列）とさらに角度を反転した翼列を流れ横断的に平行配置すれば、各翼列は相反方向に力を発生する。この二組の翼列を無限ベルト状に結合し、二本の平行軸周りに回転可能とすることによりブレードの無限軌道運動を生じさせることができる。

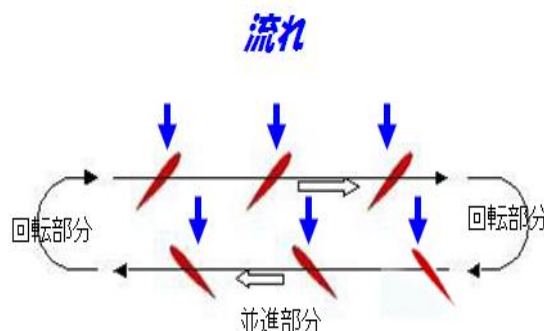


図2 並進用水車の原理

3. 目標とする成果

3. 1 目標とする成果

1) 水車効率が従来水車の効率 (80%以上) に限りなく近いこと。

緩勾配流はエネルギー密度が低いことから、水車効率の高い水車が必要である。新規開発である並進翼水車の水車効率として、技術的にほぼ上限に近い性能をもつ従来水車並みの値の実現を目標とする。

2) 簡易な除塵装置の開発

流れ下ってくるゴミは水路外に引き上げずに、水車上流に斜めのすのこ状スクリーンを配置し、ゴミをスクリーンに沿って流し水車からそらし水車後方へ自然流下させる。

3) 安全性確保の方法の開発

事故の中でも、最も避けなければならないのは、発電システム構成品により水路を閉塞し水流が水路岸を越え溢水することである。水路閉塞を確実に回避できる方法が必須である。

4) 緩勾配流発電の経済的成立性の把握

経済性評価の一つの目安とされる建設単価 250 円/kWh 並み、ないし以下の可能性を把握する。

3. 2 従来技術との比較

1) 水車効率

従来水車に比べ、並進翼水車は可動部分が多いため、機械効率 (水車効率) は下がることが予想されるが、直線矩形翼ブレードが流れを横断的に運動することから高い水力学的性能が機械効率低下を補い、従来水車並みの効率が期待できる。

2) 除塵方法

従来の除塵方法は、除塵スクリーンに集積した塵埃を機械的にかき上げて水路外にとりだす方法が一般的である。本研究では、除塵スクリーンを流れ方向に傾けて設置し、流下する塵埃を水車に流れ込まない様に流れ方向を変えて水車後方に流す方法を採用する。

3) 安全性確保

水路閉塞による溢水は確実に防がなければならない。従来は溢水を防ぐために余水路を設けるが、余水路設置はコスト高であり、またどこにでも設置可能ではない。流水全体を利用するという目標とは反するが安全性を第一優先として、本研究では、並進翼水車を水路幅一杯には設置せずに、除塵された塵埃の流路を確保することによりこの流路を余水路としても機能させる。状況によっては、この余水路の機能さえも阻害される状況も想定し、水位が設定した限界に達したら、水路を完全開放する自動運転システムを採用する。

4) 経済性：建設単価

現状では、小水力発電の建設単価は、設置場所ごとで大きく異なるが、250 円/kWh 程度以下であることが経済的成立性を示す指標として用いられる。並進翼発電システムでは当指標なみ、ないし以下の建設単価の可能性を検討する。

4. 研究成果

4. 1 研究成果概要

(1) 水車効率

水車効率 76%程度を実証した。目標値は 80%であった。

(2) 簡易な除塵装置の開発

すのこ状のスクリーンを流れに対し角度を付けて設置することで、水車に悪影響を及ぼす塵埃を水車からそらすことが可能であることを検証した。また、スクリーン設置のために水力フラップの利用が有効であることを確認した。

(3) 安全性確保の方法の開発

水路閉塞状態が起こる前に除塵機付近に設置した水位計で水位上昇を感知し、水位が限界水位に達した時、水車引上げ、除塵機収納を自動的に行って水路を開放すること

により溢水を確実に防ぐ自動制御系統を検証した。

(4) 勾配流発電の経済的成立性の把握

経済性指標の一つである建設単価 250 円/kWh に対し、今回試験での最大発電量の 2 倍程度発電量があり、構成品価格を 20% 程低減することができれば指標をクリアできる。

4. 2 試験概要、結果

(1) 用水路発電試験の概要

図 3 は岐阜県美濃市・関市を流れる曾代農業用水路で行った実験状況である。水車サイズはブレード幅 0.6m、水車幅 3m、水車奥行 0.9m である。図 4 は発電状況で 1.5kW 程の発電量である。



図 3 水車設置状況



図 4 発電状況

図 5 は水車主軸回転数と発電量の計測結果である。本水車は、ブレードピッチ角が可変であり、ピッチ角の効果を示している。ピッチ角はブレード翼弦と水流の成す角度であり、両者平行時をピッチ角 0 度と定義している。図 6 は図 5 ピッチ角 68.9 度のデータをもとに効率を求めた結果であり、発電効率約 52%、水車効率約 76% である。発電効率と水車効率の相違は、水車回転数を上げる増速機と発電機自体の効率（合計効率約 68%）による。また、図 6 から、最大効率はブレード並進速度 1.4m/s 程度で得られ、水車への流入速度（1.0m/s 程）の 1.4 倍の時である。

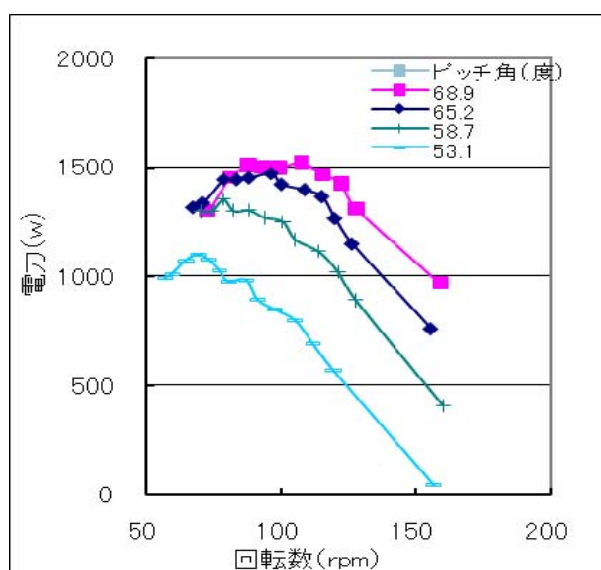


図 5 発電量

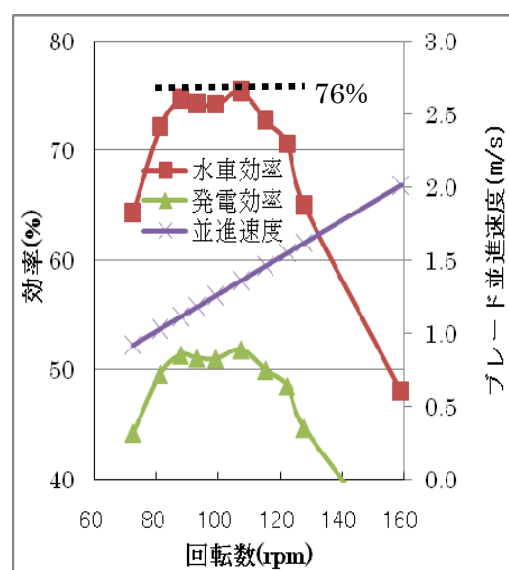


図 6 効率

なお、効率の定義は水車前後の水位差に基づく位置エネルギーに対する発電量の割合としている。位置エネルギーの算出は、水車前面の流速計測値（図 7）より求めた水車への流入流量と水車前後の水位差計測値より算出した。

図 8 は除塵スクリーン設置状況である。

スクリーン全体はフロートにより水中に浮いている。水流に対し約 60 度ほどの傾きをもって設置されている。スクリーンすのこの間隔によりゴミサイズを分別できる。並進翼水車のブレード並進速度は水路流速と同程度であり、小サイズのゴミならば水車を通過していくので、際限なくスクリーン間隔を細かくする必要はない。

スクリーン設置角度を 60 度よりさらに小さくすることによりゴミの偏流機能は増すが、スクリーン全長が長くなるため設置角度・全長は設置場所ごとでのトレードオフとなる。また、除塵スクリーンは流れを弱めるので、水車との間隔は可能な限り離す必要がある。

水路閉塞による溢水を確実に回避するためには、閉塞状態が起ころうな状況を早めに検知し、自動的に水路を開放するシステムが必要である。特に、実用段階では基本的に無人運転であるので自動制御は必須である。本研究では、除塵機を岸側に寄せて水路を開放する自動制御系を組込み、その機能を検証した。

(2) ブレード強度試験

複合材ブレードの強度確認を行った。図 9 は試験状況である。設計最大発電量 10kW 相当時の負荷(約 700N)の 2 倍に対し耐荷した。

(3) CFD 解析

図 10 は CFD により求めたカスケード周りの流れ場の様子である。2 重反転翼列で構成される水車に関して移動境界 CFD を適用し、基本的な流れ性状を明らかにすると共に、計算結果に基づき各ケースでの揚力、抗力を評価した。上段翼列と下段翼列はそれぞれアプローチ流れの向きが異なり、揚力・抗力の発生で大きな差異が観察される。

(4) 経済的成立性の検討

本研究での供試体設計・製作過程を通し、発電システム製造原価を求め建設単価を検討した。図 11 は発電システム総額に対する構成要素のコスト割合である。

図 12 は発電能力と建設原価の関係を示す。

今回試験では、水量が予定以下であったこともあり発電量は 1.5kW にとどまったが、図 12 より今回発電量の 2 倍程度の発電量 (3kW)、設置原価 20%減で建設単価 = 246 円/kWh が可能である。水車効率 76%は流量が倍の流れにおいても同じく達成可能と考えることに妥当性は欠かないことから 2 倍の流量水路において 3kW 発電は可能であり、かつ、今回供試体の設計目標(10kW)は 3kW 発電には過剰品質（コスト高）となっているの

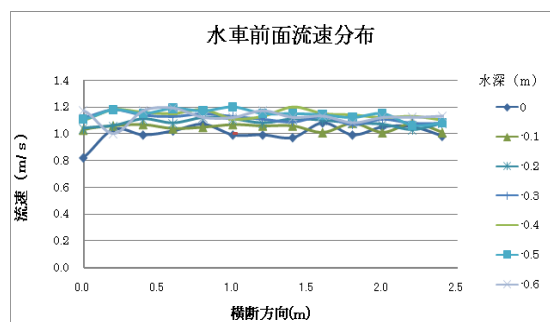


図 7 水車前面流速分布

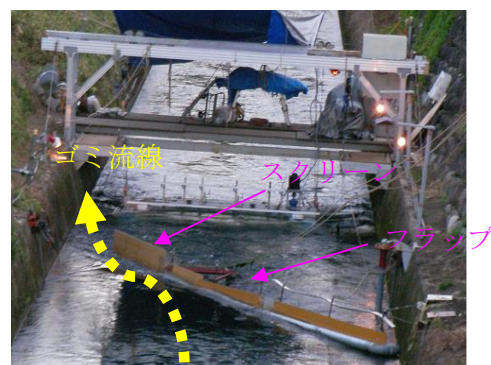


図 8 除塵スクリーン設置



図 9 ブレード強度試験

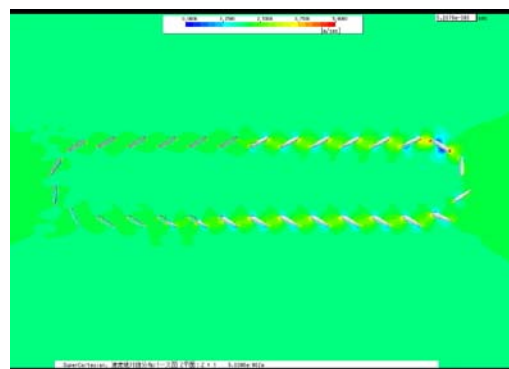


図 10 流速分布@70rpm

で、20%コストダウンは可能な範囲である。経済性評価基準クリヤは可能な範囲にある。

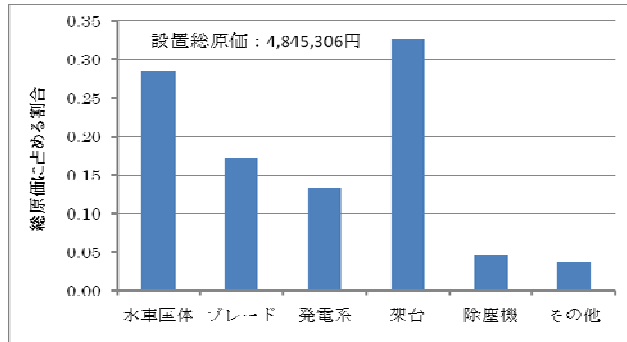


図 11 発電システムコスト構成

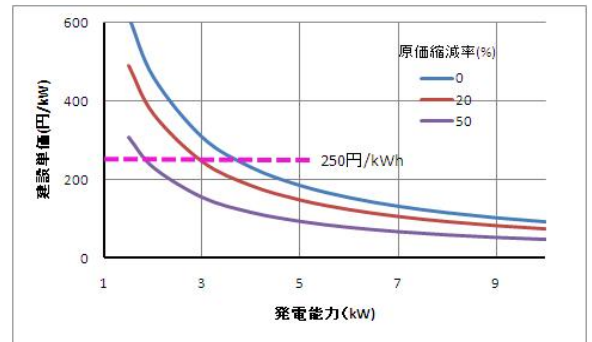


図 12 発電能力 vs. 建設単価
(年間稼働率 60%を仮定)

4. 3 普及活動状況等

岐阜新聞(平成 21 年 7 月 5 日朝刊 9 面)に試験状況等 1 面を割いて紹介された(図 13)。また、当記事を見て県内の土地改良区(1 区)からの技術問合せがあり、今後の展開を協議中である。今後は、研究メンバー各社ホームページでの技術広報を行い広く情報を発信していくとともに、各地土地改良区等とも積極的に交流し当技術の実用に結び付ける活動を行う予定である。

5. 今後の課題

(1) 水車性能の向上

従来水車並みの水車効率達成を目指したが、未達成である。今後、摺動部の改良により機械効率、延いては水車効率の更なる向上を図る必要がある。本研究ではブレード形状は NACA0015 翼型をベースとしたが、より高性能な翼型の開発、ブレード軸部やベアリング等の可動部の水力特性改良も今後の重要な課題である。

(2) 除塵能力の向上

いかに水車効率が高くとも、除塵が不十分では発電システムは実用にならない。本研究内ではすのこ状スクリーンで除塵機能は果たしたが、長期運転下での機能確認が必要である。すのこ状スクリーンはすのこを固定する軸にゴミが掛かり、徐々に溜まっていく。溜まったゴミは人手で取除くことはできるが、維持コスト増となる。今後、このゴミの自動処置方法の開発が必要である。

(3) 安全確保システムの実証

溢水を避ける方法は水路閉塞を防ぐことである。本研究の発電システムでは、除塵機と水車が水路を横断して設置される。これらが水路閉塞を引き起こす前に水路開放するための手段として下記に対する制御要素を検証した。

①除塵機より上流での水位が設定限界に達した場合

②水車で発電電圧が充電電圧より低下した場合

③除塵機に設定負荷以上の負荷が加わった場合

今後、発電システム稼働の完全自動化を図るためには、これら制御要素と水路開放後に発電システムを再稼働させる制御要素を組み合わせ自動化する必要がある。



図 13 新聞記事切抜き

(4) 経済的成立性の確認

経済性指標としての建設単価 250 円／kWh をクリアするためには、本研究内で計測した最大発電量より 2 倍程度の発電量を実証し、また、発電システムコスト 20%減が必要であることが分かった。コスト 20%減は先述のように目標発電量に適した水車規模とすること、また図 10 に見られるように、特に、架台コストを下げる努力が必要である。

経済的成立性も発電システムの耐久性が保障されて初めて成り立つことである。

耐久性は、システム運用にかかわる維持経費とも密接であり経済性の最終的評価指標である発電単価の重要なパラメータである。

今後の最大の課題は長々期耐久性の実証（維持経費データの取得）であり実用試験が必須である。

6. 試験研究機関（農工研、大学等）総括者による意見・評価等

項 目	評価結果	備 考
研究計画の効率性・妥当性	A	短時間の研究期間で目標達成のための効率的な研究計画であったといえる。
目標の達成度	A	短時間の研究期間において、実用化に向けた水車特性、材料特性を明らかにした点で目標の達成度は高い。
研究成果の普及可能性	B	連続設置の可能性や耐久性などさらなる検討が必要と考えるが、普及可能性は十分である。
研究成果の出来栄	A	本研究期間において、水車効率の向上、ブレードの選定等十分な研究成果といえる。
総合コメント:緩勾配水路で水車出力1.5kWの達成、耐久試験の実施、ブレードの試験等当初目標以上の研究の成果が認められる。今後の課題であるが、現地水理条件を考慮すると、より勾配のある水路での実証試験が望まれる。		

7. 研究総括者による自己評価

項 目	評価結果	備 考
研究計画の効率性・妥当性	B	満点の目標達成度ではなかったが、実用への基本技術取得はできたことから計画の効率性・妥当性は概ねあったと考える。
目標の達成度	B	実用システムまで組上げ、実証できれば満点であったが、そこまでは実施できなかった。基本技術は取得した。
研究成果の普及可能性	A	身近にあるエネルギー源の利用を容易に可能とする故に普及性ありと判断する。

研究成果の出来栄え	B	目標達成度にも関わり、不満が残った
総合コメント：新技術（並進翼水車）を核とした緩勾配流での発電システムの基本技術は検証できたので、今後は実用試験を経て実用へと進む。		