

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：33108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12433

研究課題名(和文) 雪氷に強い小型水車の開発を目的とした実証実験

研究課題名(英文) Demonstration experiment for developing a microhydraulic turbine resistant to snow and ice

研究代表者

佐藤 栄一 (Satou, Eiichi)

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：00288250

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、雪氷塊が流下する水路でも安定して発電する水車を開発することである。下掛け水車を開発対象として選定し、豪雪地帯の農業用水路において実験を実施した。積雪期の性能評価実験では球形の雪玉を水車に向けて上流から流下させ、ロータ通過時の挙動や発電特性などを調べた。ロータの羽根枚数すなわち羽根間隔、雪玉の直径の影響を明らかにした。その結果、雪氷塊が流下する水路への実装性に優れた下掛け水車に関するいくつかの設計指針を獲得できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

全国の農業用水路には水力エネルギーが豊富に賦存する。とくに豊富な水路は降雪量が多い、いわゆる雪国にあり、冬期には水路を雪氷塊が流下する。よって全国の水路の水力エネルギーを通年で最大限利用するには、雪氷塊を含む水流に対しても安定して稼働する小型水車を開発・実用化することは意義深い。また、中山間地では現在も電力が確保できず、防災対策や農作物などの鳥獣被害対策が十分に実施されていない地域も存在する。年間を通じて安定した電源が確保できれば、再生可能エネルギーの有効利用の意義と重要性を啓発することができ、地域活性化にもつながる。

研究成果の概要(英文)：The objective of the present study is to develop a microhydraulic turbine that can stably and efficiently generate electricity even in canals where snow and ice masses frequently flow down. An undershot hydraulic turbine was selected as the target for development, and experiments were conducted in an irrigation canal in a heavy snowfall area. Spherical snowballs were made to flow down to the turbine from the upstream direction. The behavior of the snowballs and the power generation performance were investigated as these snowballs passed through the rotor. The effects of the number of rotor blades, i.e., blade interval, and snowball diameter of the entrained snowballs are clarified. As a result, some design guidelines are developed for an undershot hydraulic turbine that is highly adaptable to irrigation canal where snow and ice masses flow down.

研究分野：情報工学

キーワード：小水力発電 再生可能エネルギー

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

水力発電は大規模集中型から分散型へ移行し、固定価格買取制度（FIT）の導入もあり、これまで未利用であった小規模水力の活用が活発になっている。身近に存在する水力エネルギーに注目すると、日本の農業用水路の長さは 40 万 km であり、その水力ポテンシャルは原発 1 基分に相当すると試算されている。しかし、冬期間、北陸や東北、北海道など日本のいたるところで広範囲にわたって積雪が観測され、特に農業用水路は雪氷の影響を受ける。このような環境下でも、安定して稼働する水車発電システムが望まれる。雪氷に強い小型水車の開発、すなわち、雪氷まじりの水流に対しても安定して発電可能な水車発電システムを開発して実用化することは意義深い。再生可能エネルギーの有効利用の意義と重要性を啓発することができ、地域活性化にもつながる。

### 2. 研究の目的

研究の最終目標は、出力 1 kW 以下の小型水車を開発し実用化することであり、身近に存在する農業用水路や小規模河川などの水力エネルギー有効利用の拡大を図ることである。そこで本研究では、開発に適した実験用の水路を特定し、実証実験により雪氷まじりの水流に対しても安定して発電可能な水車発電システムを開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 水路の積雪状況の観測および流況調査

実証実験場所として特定した長野県北部の信濃町柏原地区の水路について、詳細な積雪状況の観測を行う。夜間でも時系列撮影が可能な定点カメラなどの観測機器を用いて、雪による水路の埋没や閉塞、融解状況等を調べる。

#### (2) 下掛け水車の設計・製作・実装

水路の積雪状況の観測および流況調査の結果を踏まえて、その水路に適用可能な下掛け水車を設計・製作する。次に、製作した水車を実証実験場所へ実装する。

#### (3) 無積雪期間における水車の性能評価

集水装置付近の複雑な水の流れを把握するため、集水装置とロータの間及びロータの後方に平行部を設け、電磁式流速計を用いて各断面の流速を測定する。次に、平行部を除いた状態で発電機に負荷抵抗器を接続し、抵抗値  $R$  を 16 から 1500  $\Omega$  まで 15 段階で変化させることによりロータの回転数  $N$  を制御する。発電機の出力波形を A-D 変換器を介してパソコンに取り込み、波形がゼロ交差する周期を求めることにより、回転数  $N$  の値を計算する。 $N$  の無次元値である周速比  $\lambda$  は、次式で定義する。

$$\lambda = \frac{\pi D_R N}{60 U_0} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $U_0$  は水車未設置時の水路の流速、 $D_R$  は水車のロータの直径である。またパソコンに取り込んだ発電機の出力波形から実効電圧  $V$  を求め、電力  $P (= 3V^2/R)$  を計算する。水車の発電効率に相当する出力係数  $C_p$  は、次式で定義する。

$$C_p = \frac{P}{0.5 \rho_w H_\infty W U_0^3} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 $\rho_w$  は水の密度であり、 $H_\infty$  は水車未設置時の水位、 $W$  は水路幅である。

#### (4) 積雪期間における水車の性能評価

積雪がある期間において、雪塊・氷塊を模擬するために雪を固めて直径  $d = 130, 210$  及び  $240$  mm の雪玉を作り、10 秒間隔で水車上流から流下させた場合の発電出力  $P$  と雪玉の挙動の関係を調べる。実験時は水車の上流、ロータの上部及び後方の計 3 箇所にビデオカメラを設置して撮影を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 水路の積雪状況の観測および流況調査

実証実験場所に定点カメラを設置して観測を行った結果、水路左岸での北風による雪庇の形成と崩落、水路右岸壁の着雪と崩壊が観測された。これら調査により、水路に実装する実証実験用下掛け水車に関する設計指針を得ることができた。

## (2) 下掛け水車の設計・製作・実装

設計・製作した下掛け水車の概要を図1に示す。水車のロータの直径  $D_R$  は 600 mm、幅  $L_R$  は 300 mm である。ロータの上流側には、平板から構成される集水装置が取り付けられている。集水装置は全長が 380 mm であり、出口部には長さ 110 mm の直線流路を持つ。集水装置の入口の幅は水路幅 700 mm と一致し、出口幅はロータ幅よりもやや狭い 250 mm である。ロータの羽根は円弧形状をもち、曲率半径は 70 mm、厚さは 2.5 mm、弧長は 80 mm、羽根の入口角度は  $24^\circ$  である。また、実験には羽根枚数  $n$  が 18 枚および 9 のロータを用いた。発電機は、ロータ回転軸に直結された永久磁石式発電機であり、極数は 40 である。

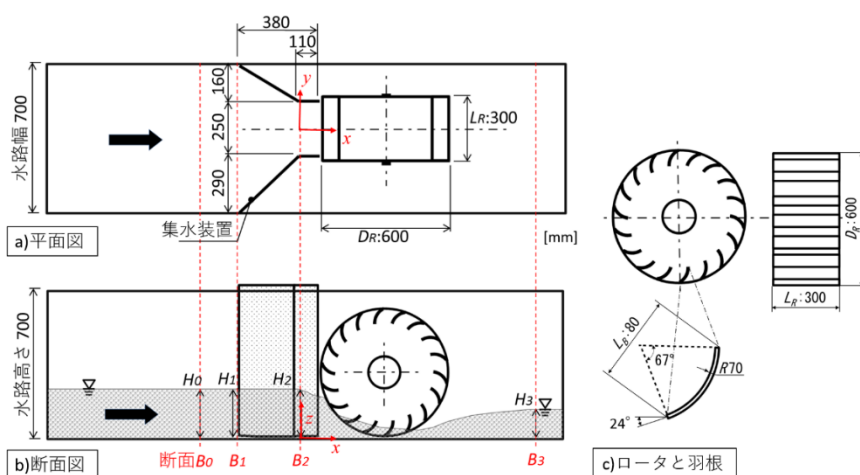


図1 下掛け水車の概要

図1 下掛け水車の概要

## (3) 無積雪期間における水車の性能評価

集水装置とロータの間およびロータの後方にロータの直径  $D_R$  にほぼ等しい長さの直線流路を設け、各流路断面の水位と流速を測定した。その測定値から単位幅流量を計算し、流量図として表した結果を図2に示す。ロータの羽根枚数が9枚の場合、断面  $B_2$  において水位の低下が早まるが、共に水路幅の減少に伴って単位幅流量は増加し、水車のロータが本来置かれている位置で最大となることが確認できた。

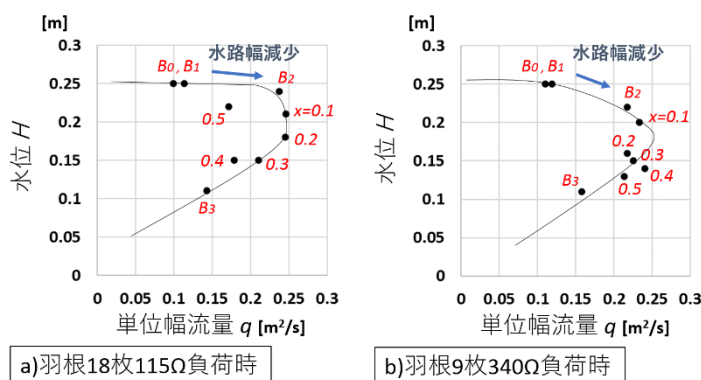


図2 平行部設置時の流量図

図3は、無積雪期間において発電機に接続した負荷抵抗器の値を変化して、水車の出力特性を調べた結果である。まずロータの羽根枚数の条件 18 枚、9 枚で分けて比較すると、水車未設置時の水位  $H_\infty$  が高い場合ほど、発電出力  $P$  が増加し、高回転域での出力係数  $C_p$  が高くなることが分かった。しかし、 $H_\infty:0.183D_R$  のように水車未設置時の水位が高い場合は、18 枚と 9 枚で出力係数に差が生じた。 $H_\infty$  が高い場合は、ロータ内部を貫流して外部に排出される際のクロスフロー効果を得やすい条件にあるが、羽根枚数が 9 枚の場合は、その効果を得る機会が少ないためと推測される。

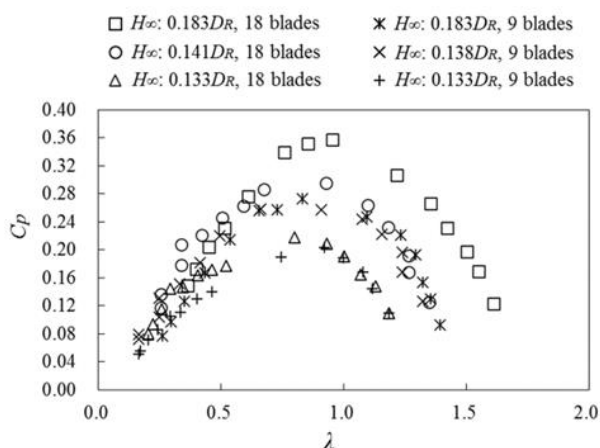


図3 無積雪期の水車の出力特性

## (4) 積雪期間における水車の性能評価

羽根枚数  $n = 18$  すなわち羽根間隔  $L/D_R = 0.175$  の場合の出力  $P$  を測定し、時間  $t$  に対する変化を表すと図4のようになる。ただし、1 個目の雪玉を水路に放出した時刻を  $t = 0$  とし、 $P$  および  $t$  をそれぞれ、雪が流れていない清水時の出力  $P_0$  およびロータの回転周期  $T_0 (= 60/N_0s)$  で無次元化してある。直径  $d = 130$  mm の雪玉を 10 秒間隔で 1 個ずつ 3 回放出した場合の結果

を図4(a)に示す。1個目の雪玉がロータに達した時刻  $t/T_0 = 1.3$  において、出力  $P$  が零になった。雪玉の直径  $d$  が羽根間隔  $L$  よりも大きいため、ロータと水路床の間に雪玉が巻込まれ、ロータの回転を停止したからである。停止状態は、2個目の雪玉がロータに到着した  $t/T_0 = 2.6$  でも継続している。上記の2個の雪玉は、水流からトルクを受ける羽根と水路床の間の圧縮力および水流のせん断作用で変形・崩壊するため、 $t/T_0 = 5.3$  でロータから排出され、出力が回復する。しかし、3個目の雪玉の影響を受け、 $t/T_0 = 6.6$  で再び急降下する。ただし、この雪玉は、ロータを停止することなくロータから排出されるため、出力は直ちに回復する。図5(a)は、図4(a)に矢印で示された時刻  $t/T_0 = 4.2$  における雪玉とロータの様子を示す。ロータの上流と直上に設置したカメラによる撮影画像である。2個目の雪玉がロータに到着し、ロータと水路床に巻き込まれた直後の様子を把握できる。直径  $d = 210$  mm の雪玉を10秒間隔で1個ずつ2回放出した場合の出力変化を図4(b)に示す。 $d$  は、羽根間隔の2倍である。時刻  $t/T_0 = 1.3$  において

1個目の雪玉がロータに巻き込まれるためロータが停止し、 $P = 0$  となる。その後も雪玉が排出されないため  $P = 0$  の状態が続き、 $t/T_0 = 2.6$  において2個目の雪玉がロータの上流に達する。 $t/T_0 = 4.2$  におけるロータ周囲の画像を図5(b)に示す。1個目の雪玉がロータ入口部に巻き込まれ、2個目の雪玉もロータ入口で滞留している。

これらの雪玉は、 $t/T_0 = 14.1$  で崩壊してロータ下流へ排出される。その直後に出力が急速に回復する。ただし、回復直後の  $P$  の値は、清水時の1.6倍である。雪玉によるロータの停止が水路のせき止め効果を誘起し、ロータ上流側の水位が清水時よりも上昇する。このため、ロータ再回転直後の流量が清水時よりも一時的に増大するからである。図4(c)は、 $d = 240$  mm の雪玉を10秒間隔で1個ずつ2回放出した場合の出力変化を示している。ただし、 $d/L = 2.29$  である。図4(b)に示した  $d = 210$  mm の場合と同様、2個の雪玉がロータの回転を停止させ、出力が零となる。 $t/T_0 = 4.2$  におけるロータ周囲の画像を図5(c)に示す。2個目の雪玉がロータ入口に停滞している。出力は、 $d = 210$  mm の場合よりも遅い時刻  $t/T_0 = 16.4$  で回復する。雪玉の直径が大きく、ロータ下流への排出が困難であることによる。また、ロータ停止時間が長いことに起因してロータ上流側の水位上昇量が大きいため、ロータ再回転直後の出力が清水時の1.8倍に達する。

図6は、羽根枚数  $n = 9$  すなわち羽根間隔  $L/D_R = 0.35$  の場合の出力変化を示す。 $d = 130$  mm の雪玉を10秒間隔で3回放出した場合の結果を図6(a)に示す。1個目の雪玉は時刻  $t/T_0 = 2.6$  においてロータに達する。その後の出力  $P$  はほぼ不変である。雪玉の直径が羽根間隔よりも小さく、雪玉がロータを容易に通過したためである。しかし、2個目の雪玉がロータに達した直後の  $t/T_0 = 7.9$  において  $P$  が大きく低下する。ロータを通過する雪玉が抵抗となりロータ回転数が低下したためである。しかし、そ

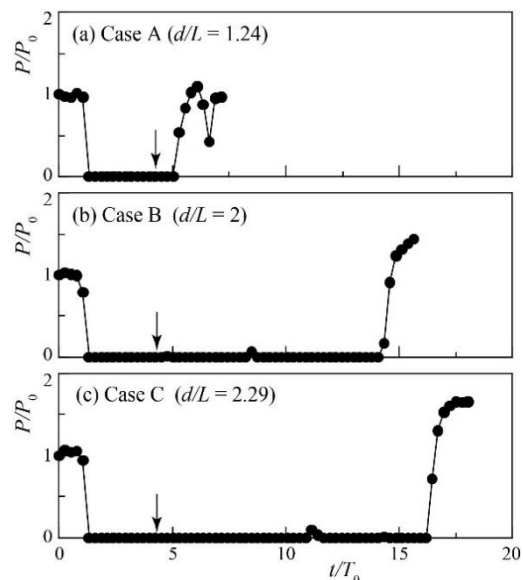


図4 羽根枚数18のロータに雪玉を放出した時の水車出力  $P$  の変化



図5 水路に放出された雪玉と羽根枚数18のロータの様子  
(a)  $d = 130$  mm,  $t/T_0 = 4.2$  (Case A) (b)  $d = 210$  mm,  $t/T_0 = 4.2$  (Case B) (c)  $d = 240$  mm,  $t/T_0 = 4.2$  (Case C)

図5 水路に放出された雪玉と羽根枚数18のロータの様子

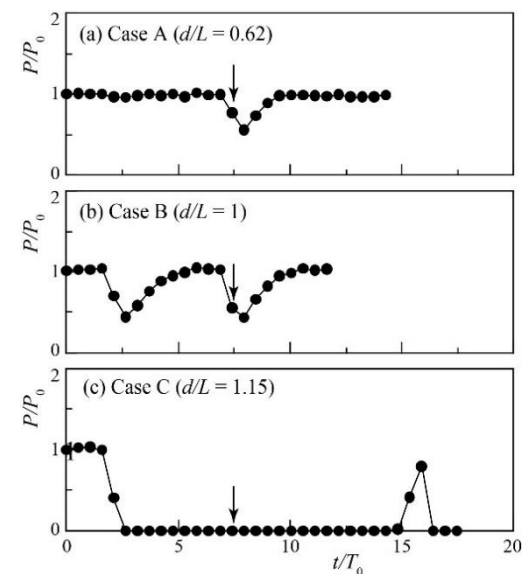


図6 羽根枚数9のロータに雪玉を放出した時の水車出力  $P$  の変化



の後、雪玉は容易に排出されて出力が回復する。3個目の雪玉がロータに達した  $t/T_0 = 12.7$  でも出力変化は測定されない。図7(a)は、出力が低下する直前の  $t/T_0 = 7.4$  における雪玉とロータの撮影結果である。2個目の雪玉がロータの直前に達している。図6(b)は、 $d = 210$  mm の雪玉を 10



(a)  $d = 130$  mm,  $t/T_0 = 7.4$  (Case A) (b)  $d = 210$  mm,  $t/T_0 = 7.4$  (Case B) (c)  $d = 240$  mm,  $t/T_0 = 7.4$  (Case C)

図7 水路に放出された雪玉と羽根枚数9のロータの様子

秒間隔で2回放出した場合の出力変化を示す。 $d$ が羽根間隔と等しい場合の結果である。2つの時刻  $t/T_0 = 3.9$  及び  $7.9$  において出力が極小となる。2個の雪玉の巻き込みと排出による。極小値はほぼ等しく、雪玉はつねに同程度の影響をロータ回転に及ぼしている。図7(b)は、2個の雪玉による出力が低下する直前の  $t/T_0 = 7.4$  における画像を示す。2個の雪玉がロータの直前に達している。 $d = 240$  mm の雪玉を 10 秒間隔で2回放出した場合の出力変化を図6(c)に示す。 $d$ が羽根間隔よりも大きいため、2個の雪玉がロータに巻き込まれ、時刻  $t/T_0$  が 2.6 から 15 の期間においてロータが停止して出力が零となる。図7(c)は、出力が停止していた状態にある  $t/T_0 = 7.4$  における画像である。ロータに向かって接近する雪玉の様子が撮影されている。時刻  $t/T_0$  が 15.3 以降において出力が一時的に回復するが、その直後に再び失われる。ロータ下流への雪玉の排出が困難になるからである。

図8は、雪玉の直径と出力  $P$  を積算した電力量の関係を示している。ただし、電力量  $W$  は雪が流れていない清水時の電力量  $W_0$  で無次元化してある。ロータの羽根枚数 18 及び 9 のいずれも雪玉の直径  $d$  が 210 mm 以上で  $d$  の増大とともに  $W/W_0$  は低下する。 $d$  が大きいほど、ロータと水路床の間への巻き込みが生じやすく、ロータ下流への排出が困難になるからである。ただし、 $n = 9$  の場合は、 $W/W_0$  は高い値を維持する。 $d$  が羽根間隔よりも大きく、雪玉の排出が容易なためである。しかし、 $d = 240$  mm の雪玉に対しては、 $n = 9$  の場合の  $W/W_0$  が大きく低下し、 $n = 18$  の場合とほぼ同程度になる。 $d$  が羽根間隔  $L$  よりも過大な状態にあり、雪玉の排出が極めて困難であることを示している。以上より、下掛け水車は、想定される雪氷塊の寸法よりも羽根間隔を大きくとれば、雪氷塊による発電性能の低下を回避できることが判った。

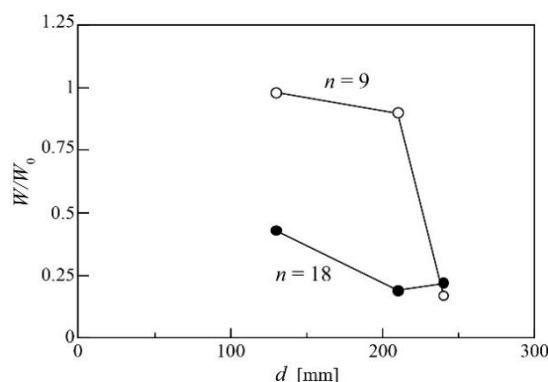


図8 雪玉の直径と発電電力量の関係

本研究を進めるにあたっては、水車を設置する水路の管理組合や町役場及び地域関係者の同意・協力を得て、円滑に進めることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Eiichi Sato, Toshihiko Ikeda, Tomomi Uchiyama, Tomoko Okayama, Tomoaki Miyazawa
2. 発表標題 Basic study on output characteristics of an undershot water turbine applicable to heavy snowfall areas
3. 学会等名 International Conference on Material ans Systems for Sustainability (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡山 朋子  (Okayama Tomoko)  (20418734)	大正大学・人間学部・教授    (32635)	
研究分担者	池田 敏彦  (Ikeda Toshihiko)  (60021010)	信州大学・工学部・特任教授    (13601)	
研究分担者	内山 知実  (Uchiyama Tomomi)  (90193911)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授    (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------