

1. 研究の背景

日本には、農業用水路をもつ地域が全国各所にある。図1に水路の例を示す。農業用水路の総延長距離は40万kmすなわち地球10周分に及び(出典:農林水産省Webページ)、その水力ポテンシャルは原発1基分に相当するものと試算されている。水路の局所的な発電出力は最大でも1kW程度であるが、自産自消の電力として照明や電気柵に活用され、災害時の非常



図1 農業用水路の例

用電源としての利用も期待されている。また、将来、電源構成比の見直しを契機として、水路の微小な水力エネルギーも発電に総動員する時代が到来することが想定される。したがって、水路への設置に適した高性能な発電用水車を開発することは極めて意義深い。

一方、包蔵水力(発電に利用可能な水力エネルギー量)が豊富な上位10位までの都道府県を示すと図2のようになる。静岡と宮崎を除いて降雪量が多く、日本でも有数の豪雪地域が多数含まれる。このような降雪地域の水路では、雪塊・氷塊が頻繁に流下するため、水車を設置した場合には、回転するランナが雪塊・氷塊を巻き込んで損傷するばかりか、性能低下・閉塞・停止などの深刻な運転障害が発生するおそれがある。よって、全国各所の水路の水力エネルギーを最大限に発電に活用するには、雪氷に強い小型水車の開発が不可欠である。

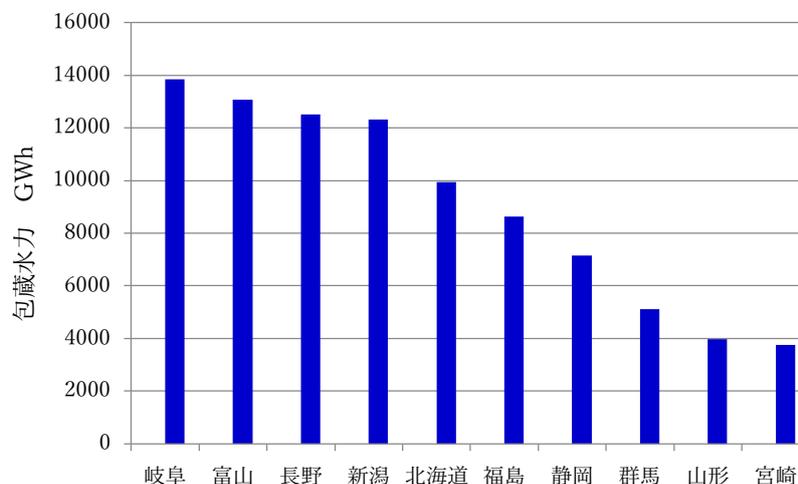


図2 包蔵水力が豊富な上位10位までの都道府県

オーストリアやイタリアに代表されるヨーロッパ諸国では、従来、上掛け式や下掛け式など、様々な形式の小型水車が開発され、山岳地域などでの発電に貢献している。日本でも、福島第一原発の事故以降、小型水車の開発が活発化している。しかし、雪塊・氷塊が流下する水路においても性能を失うことなく安定して高効率に稼働する、雪氷に強い小型水車の開発例は国内外において皆無であり、開発しようとする着想すら見当たらない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、雪塊・氷塊が流下する水路でも性能を失うことなく安定して高効率に稼働する、雪氷に強い小型水車を開発することである。

本研究では雪塊や氷片が流下する水流を扱うため、大学の室内実験室では実験が極めて困難であることから、山形県長井市および長野県信濃町の農業用水路を実験フィールドとして選定し、開発を目指す水車を設置し、水車の性能に及ぼす雪塊・氷塊の影響などを調べた。

3. 山形県長井市における実験

3.1 実験に用いた農業用水路

山形県長井市の農業用水路において実験を実施した。長井市の位置を図3に示す。図4および5は、それぞれ秋季の非降雪時および冬季の降雪時の水路の様子を示す。水路の幅は1.3 mである。



図3 山形県長井市の位置



図4 非降雪時の水路



図5 降雪時の水路

研究代表者らは、本研究の開始直前に相当する2018年10月～2019年9月の1年間にわたり、毎日1回、水路の流量を測定した。図6は、1年間にわたる毎日の流量の測定結果を示す。年間の平均流量は $0.11 \text{ m}^3/\text{s}$ 、平均流速は 0.41 m/s 、平均水深は 0.21 m である。なお、降雪時には雪塊が頻繁に流下することを観察済みである。

3.2 小型水車の概要

一年間にわたる流量の測定結果をもとに、図7に示すような下掛け水車のロータを設計し、製作した。

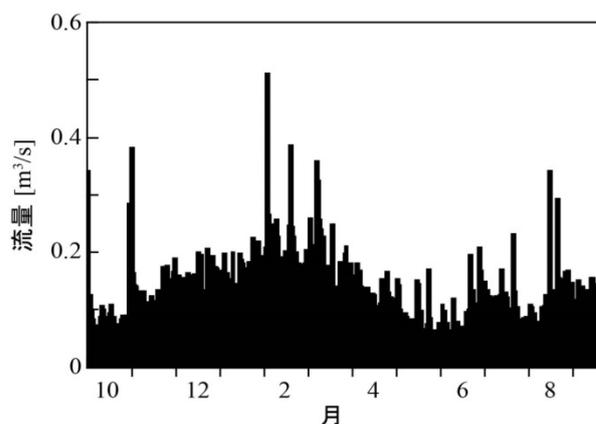


図6 1年間にわたる水路の流量

水車全体の見取り図を図8に示す。低落差の流れに適した貫流型のロータをもち、流路床に沿う流れがロータの羽根に衝突してロータ内部に流入し、再び羽根に衝突しながらロータ外部に流出する。この2回の衝突により水力エネルギーがロータの回転エネルギーに変換される。ロータの上部には発電機が設置されている。ロータの回転がベルトを介して発電機を駆動する。

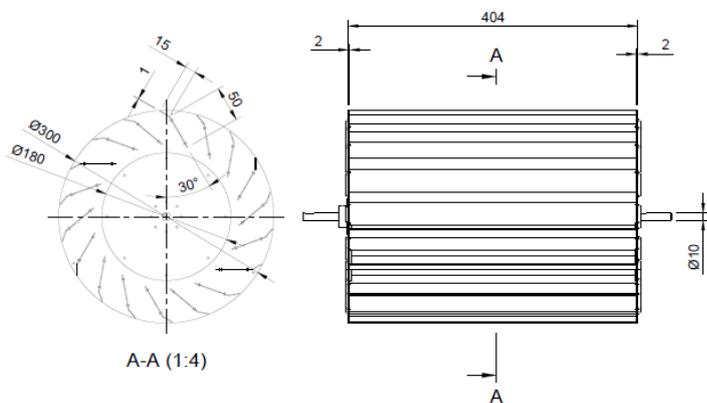


図7 下掛け水車のロータ

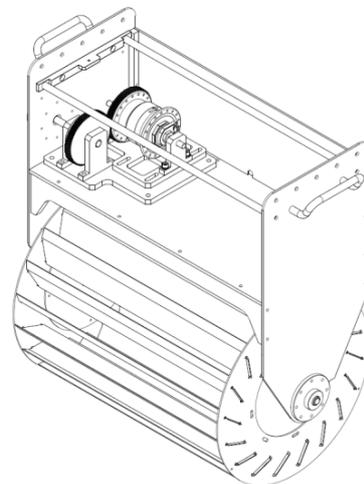


図8 下掛け水車の見取り図

水車システムの全体写真を図9に示す。ロータはステンレス製である。ロータと発電機を格納したフレームの上部には、2本の平行な支柱が取り付けられている。メンテナンス時や大雨による増水時などに担当者2名で水車システムを容易に水路から引き上げられることを狙った設計である。また、後述するように、支柱を水路土手に固定せずに置くことにより、水路を流下する雪塊がロータと衝突する際の衝撃を緩和する効果も期待できる。図10は、水車システムを水路に設置した状態を示す。非降雪期と降雪期に水車の発電状況を調査し、年間を通して約10Wの出力が得られることを確認した。



図9 水車システム



図10 水路に設置された水車システム

3.3 雪塊による運転障害に対するスイング機構の適用

降雪期には、図11に示すように水路を雪塊が流下した、雪塊の大きさは様々であるが、図中の雪塊の寸法はロータ幅(400 mm)以下であった。ロータ直径(300 mm)よりも大型の雪塊は、ロータ前面と衝

突したのちにロータ回転軸に沿って移動し、ロータ下流へ流れていく場合が多かった。ところが、ロータ直径の1/6程度の寸法の雪塊は、ロータと流路床の隙間に侵入してロータに巻き込まれ、ロータの回転を妨げることがあった。図11は、巻き込まれる直前の雪塊を捉えた撮影結果である。

上述のようなロータへの雪塊の巻き込みを防止してロータ回転の低下を防ぐため、水車システムを支える2本の支柱を水路土手に固定せず、図12に示すように、水車が水流方向に自由にスイングできるようにした。この工夫の結果、雪塊がロータと水路床に巻き込まれた場合にもスイング作用により、雪塊が円滑に下流へ解き放たれ、ロータ回転の低下や停止などの運転障害を回避できた。



図11 水路を流下する雪塊と水車



図12 スイングによる雪塊の回避

3.4 集水装置と組み合わせた雪塊粉碎装置の設置

ロータは水路に設置された障害物に相当し、水流の抵抗となる。このため、水流はロータを回避して流れる特性がある。水車出力を高めるには、ロータ上流側で水流を集め、ロータに集中して流入させる仕組みが必要である。また、流路を流下する雪塊を粉碎するなどして小型化すれば、ロータと流路床の間に雪塊が流入することがなくなり、円滑な運転・発電を期待できる。

集水と雪塊粉碎の機能を組み合わせた装置を設計し、図13のように製作した。集水装置は、水路内の水流をロータ入口に向かって集めるための2枚の斜め版からなる。雪塊粉碎装置は、図14に示すように、8枚のステンレス板を間隔25mmで並置し、ここを通過する雪塊の粉碎を狙ったものである。

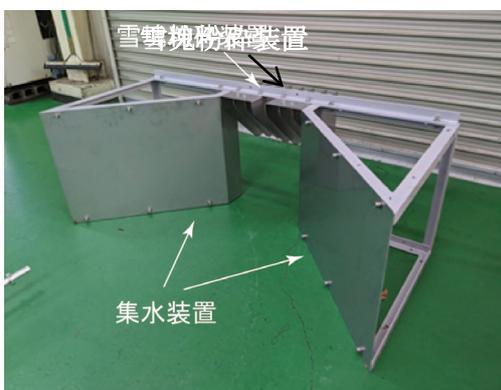


図13 集水装置と雪塊粉碎装置



図14 雪塊粉碎装置の詳細

上述の集水・雪塊粉碎装置を水車システムの上流側に実装したときの写真を図15に示す。集水効果により、水車出力が約23%増加した。また、雪塊粉碎装置を通過した雪塊は雪塊を20mm以下に小型化で

きた。ただし、硬い氷塊は粉碎できなかった。また、水路を流下する小枝や草などが雪塊粉碎装置に絡まり、水流の妨げとなる場合が発生した。このような異物除去には手間を要するため、今後の解決すべき課題のひとつである。



図 15 集水・雪塊粉碎装置が装備された水車システム

4. 長野県信濃町における実験

4.1 実験に用いた農業用水路

国内でも豪雪地帯として有名な長野県信濃町でも実験を実施した。信濃町の位置を図 16 に示す。図 17 および 18 は、降雪時の水路の様子を示す。水路の幅は 0.7 m である。



図 16 長野県信濃町の位置



図 17 降雪時の信濃町の水路(1)



図 18 降雪時の信濃町の水路(2)

研究代表者らは、2015 年度から年間を通して流況を観測している。2016 年度は、水路脇の積雪量を実測するとともに、インターバルカメラで 1 時間毎に積雪の状態を撮影した。雪のアーチ形堆積と崩壊の繰返しが観測された。2017 年度のトレイルカメラ（夜間撮影可能）を用いた撮影では、水路左岸での北風

による雪底の形成と崩落，水路壁の着雪と崩壊が観測された

4.2 小型水車の概要

長井市と同様の下掛け水車を設計・製作し，上記の農業用水路に設置して実験を実施した．図 19 に水車の概要を示す．水路に設置された水車の様子を図 20 に示す．

ロータの直径は 600 mm，幅は 300 mm である．羽根の枚数が 18 および 9 の場合を実験した．

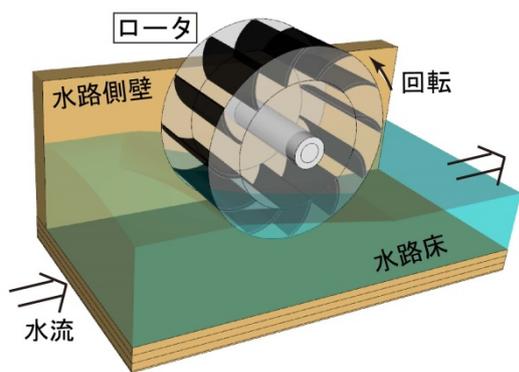


図 19 下掛け水車の概要



図 20 水路に設置された下掛け水車

4.3 清水に対する水車の出力

まず，雪氷を含まない清水に対する水車の出力を調べるため，ロータに負荷を与えて回転数 N を変化させ，そのときの出力 P を測定した．図 21 は，羽根数 z が 18 と 9 の場合の P と N の関係を示す． $N \leq 30$ rpm において $z = 9$ よりも $z = 18$ のロータのほうがやや高い出力を発生する．羽根数が多いほど水のエネルギーを高い効率でロータの回転エネルギーに変換できることを示している． $z = 18$ および 9 のロータの最高出力は，それぞれ 7.76 W および 7.21 W である．なお，水深は 0.19 m，流量は $0.056 \text{ m}^3/\text{s}$ であった．

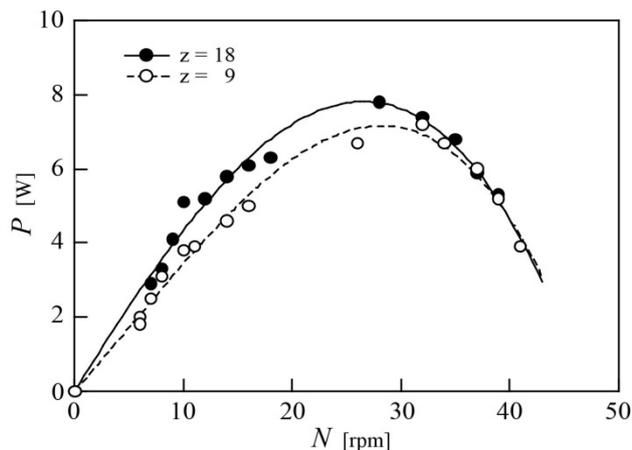


図 21 清水時の水車の出力特性

最高出力点で動作している水車に対して，水路の 1.4 m 上流から球形の雪玉を水流に放置して流下させ，水車の出力の変化および雪玉の挙動を調べた． $z = 18$ および 9 のロータ先端における羽根間隔は，それぞれ 105 mm および 210 mm である．

雪玉の直径 D_B を 130, 210, 240 mm とし，雪玉 1 個を 10 秒間隔で 2 回あるいは 3 回流下させた．雪玉の密度は，0.55 から $0.69 \text{ kg}/\text{m}^3$ の範囲であった． $D_B = 210 \text{ mm}$ の雪玉の様子を図 22 に示す．



図 22 雪玉の例 ($D_B = 210 \text{ mm}$)

4.4 雪玉を流下させたときの水車出力と雪玉の挙動

直径 $D_B = 130$ mm の雪玉を水車上流から流下させたときの水車出力の時間変化を図 23 に示す。ただし、雪玉 1 個を 10 秒間隔で 3 回流下させたときの結果である。ロータの羽根数 z が 18 の場合、約 18 秒にわたり出力がゼロとなる。ロータ先端の羽根間隔 (105 mm) よりも雪塊の直径が大きいため、ロータが雪玉を巻き込んで停止するためである。図中に矢印で示す時刻 t_{18} における水車上流側の撮影結果

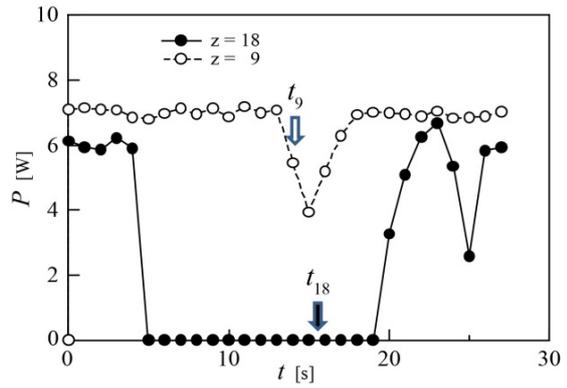


図 23 雪玉による水車出力の時間変化 ($D_B = 130$ mm の場合)

を 図 24 に示す。雪玉がロータ前面に挟まれている様子を把握できる。その後、雪玉が変形・崩壊するため、ロータ下流へ排出され、出力が回復する。一方、羽根数 z が 9 の場合には、雪玉による出力低下は小さく、低下時間も短い。羽根間隔 (210 mm) が雪玉直径よりも大きいため、羽根間および羽根と流路床の間に雪玉が挟まれることが少なく、容易にロータ下流へ排出されるからである。図 25 には、時刻 t_9 において、先行する雪玉がロータ内部を通過している様子が捉えられている。

その後、雪玉が変形・崩壊するため、ロータ下流へ排出され、出力が回復する。一方、羽根数 z が 9 の場合には、雪玉による出力低下は小さく、低下時間も短い。羽根間隔 (210 mm) が雪玉直径よりも大きいため、羽根間および羽根と流路床の間に雪玉が挟まれることが少なく、容易にロータ下流へ排出されるからである。図 25 には、時刻 t_9 において、先行する雪玉がロータ内部を通過している様子が捉えられている。



図 24 羽根数 $z = 18$ の場合の雪玉の様子



図 25 羽根数 $z = 9$ の場合の雪玉の様子

図 26 は、 $D_B = 210$ mm の雪玉を水車上流から流下させたときの水車出力の時間変化を示す。ただし、雪玉 1 個を 10 秒間隔で 2 回流下させたときの結果である。 $z = 18$ の場合には、羽根間隔よりも大きな雪玉がロータの回転を停止させるため、長時間にわたり出力が零となる。ただし、 $t = 61$ s では、雪玉が水車下流へ流され、出力が回復する。時刻 t_{18} における、ロータ入口における雪玉に停滞の様子を図 27 に示す。 $z = 9$ の場合には、雪玉の通過により出力が 50 %程度に低下するが、低下時間は長くはない。雪玉は羽根間隔と同じ直径をもつため、ロ

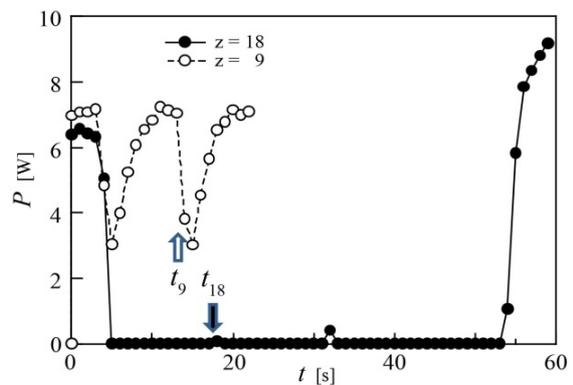


図 26 雪玉による水車出力の時間変化 ($D_B = 210$ mm の場合)

ータは、 $D_B = 210$ mm の雪玉を水車上流から流下させたときの水車出力の時間変化を示す。ただし、雪玉 1 個を 10 秒間隔で 2 回流下させたときの結果である。 $z = 18$ の場合には、羽根間隔よりも大きな雪玉がロータの回転を停止させるため、長時間にわたり出力が零となる。ただし、 $t = 61$ s では、雪玉が水車下流へ流され、出力が回復する。時刻 t_{18} における、ロータ入口における雪玉に停滞の様子を図 27 に示す。 $z = 9$ の場合には、雪玉の通過により出力が 50 %程度に低下するが、低下時間は長くはない。雪玉は羽根間隔と同じ直径をもつため、ロ

ータ内部を通過できるからである。図 28 に示すように、時刻 t_9 においてロータ内部を通過している雪玉の様子を確認できる。



図 27 羽根数 $z = 18$ の場合の雪玉の様子



図 28 羽根数 $z = 9$ の場合の雪玉の様子

図 29 は、 $D_B = 240$ mm の雪玉を水車
上流から流下させたときの水車出力の時
間変化を示す。ただし、雪玉 1 個を 10 秒
間隔で 2 回流下させたときの結果である。
 $z = 18$ の場合には、図 26 に示した $D_B =$
210 mm の雪玉の場合と同様な結果が得
られた。図 30 に示すロータの周囲におけ
る雪玉の挙動も図 27 の様子と同様である。
 $z = 9$ の場合にも雪玉による出力低下が生
起する。雪玉直径が大きいいため、たとえ
羽根間隔が広いロータでも雪玉による性能低下が顕著に現れた。図 31 に示すように、時刻 t_9 においてロータ上流端に雪玉が滞留している、

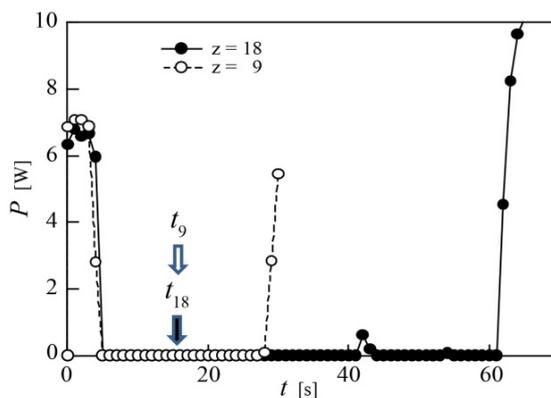


図 29 雪玉による水車出力の時間変化 ($D_B = 240$ mm の場合)



図 30 羽根数 $z = 18$ の場合の雪玉の様子



図 31 羽根数 $z = 9$ の場合の雪玉の様子

5. まとめ

山形県長井市および長野県信濃町の農業用水路において下掛け式水車の実験を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 水車の固定方法を工夫することにより、流下する雪塊・氷塊を受け流すことができる。集水装置および雪塊粉碎装置により、一定の性能向上を達成できた。

- (2) ロータ先端の羽根間隔よりも雪玉の直径が大きい場合には、ロータが雪玉を巻き込んで回転が停止し、出力が零になる。この運転停止が継続したのち、雪玉の変形・崩壊によりロータ下流へ放出されるため、回転が再開し、出力が回復する。
- (3) ロータ先端の羽根間隔よりも雪玉の直径が小さい場合には、雪玉により出力がやや低下するが、ロータへの巻き込みがないため、運転停止には至らない。
- (4) 雪塊・氷塊に強い水車では、予測される雪塊・氷塊よりもロータ先端の羽根間隔を大きくとる必要がある。