

# 鶴岡高専におけるマイクロ水力の取組み

## Challenge to micro/pico hydraulic power in National Institute of Technology, Tsuruoka college

本橋 元\*

### 1. はじめに

本校がある山形県鶴岡市は米所の庄内平野南部に位置し、農業用水路が発達している。この地で農業用水路用のマイクロ水力の研究を始めたきっかけは、約20年前に地元の人から、田圃に電気があれば農業従事者の高齢化対策として、作物の映像配信や水門の開閉を自動化でできる、と聞いたことにある。以来、毎年のように卒業研究のテーマとしてマイクロ水力に関するものを取り上げてきた。その内容については全国小水力発電大会<sup>(1)</sup>ほか、いくつかのウェブサイトで紹介されている<sup>(2,3)</sup>。

一般にマイクロ水力の最大の技術的課題は水路の異物対策である。水車上流に除塵スクリーンを設けても、そこの定期的な点検・ごみ処理が疎かになれば、水路が塞がれて水が溢れる恐れもある。そこで、本校では効率よりもメンテナンス性を重視し、開放型の水車を開発してきた。効率は劣るが、ケーシング内部にゴミが詰まることはない。また、増水した水流が羽根車に作用しないため過負荷になりにくいというメリットもある。

水車装置の設計方針は次のとおりである。

- (1) 既存の水路に手を加えない
- (2) 水車の設置・メンテナンスの際に、水を止めない
- (3) エネルギーの観点から、落差を利用する。(落差5cmは流速1m/sに相当する)
- (4) 土地改良区が管理する用水路・排水路では、水車設置に伴って流路断面積を減少させない
- (5) 地元の鉄工所等で水車やフレームを製造・修理が可能である

これらに対応するため、水車装置の条件を以下のように定めた。

- (1) 水車を落差工(図1)の断面拡張部に設置する



(a) 用水路 (b) 排水路

図1 水路の落差工

- (2) 設置、メンテナンスおよび増水時対応として、水車装置を水流が作用しない位置に人力で移動できる
- (3) 羽根車形状を含めて、水車装置をシンプルな構造にする

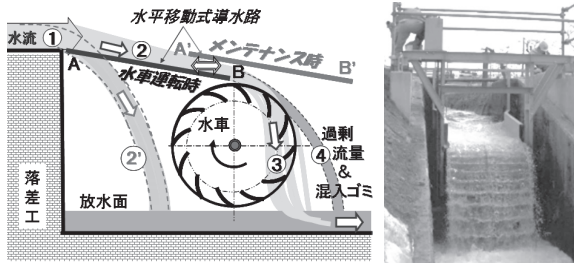
これらに対応するものとして、本校では数種類の極低落差用のマイクロ水車を開発してきた<sup>(4,5)</sup>。ここでは、幹線水路用の出羽水車、排水路用の花笠水車および斜軸上掛け水車、最小水路用に胸掛け衝動式水車を紹介する。さらにマイクロ水力導入に係る周辺技術として、水車設置による落差工の保護効果、および簡易流速測定法についても紹介する。

### 2. 出羽水車

#### 2.1 水車および導水路

本校で考案した水車装置の概略を図2(a)に示す。これは水路の落差部分に設置した開放型のクロスフロー水車である。ゴミの多くは水面を流れることと、ゴミの流れる方向が水車羽根の移動方向と同じであるため、この水車は水路のゴミの影響を受けにくい。同(b)図は幅1.4mの用水路に実装した様子である。落差工と水車の間には図3のように移動式の導水路

\* 鶴岡工業高等専門学校 創造工学科機械コース



(a) 装置概観図 (b) 水路に設置した様子  
図2 出羽水車



図4 系統連系用設備と盤内部



図3 移動式導水路 (左：稼働状態, 右：退避状態)

表1 水車および導水路の主な仕様

水車		導水路	
種類	オープン クロスフロー	長さ	全長 2.57 m 平行部 1.94 m
直径	1.2 m	幅	入口 1.50 m
長さ	1.26 m		出口 1.19 m
羽根枚数	24	側壁高さ	0.33m
羽根形状	円弧	勾配	4.5°

を設けてある。この導水路には、水量によって変化する水流が水車に流入する位置の変動を抑える効果がある<sup>(6)</sup>。水車メンテナンス時には導水路を移動(退避；図中のA'B')させることにより、水流が水車に作用しなくなる(図3右)。これにより水路をバイパスさせることなく、作業・点検等ができる。また、過度な増水時に導水路を退避させることにより、増水で運ばれてきた石や倒木等の重量物による水車の破損も防ぐことができる。水車および導水路の主な仕様を表1に示す。

## 2.2 電気系統

発電機は永久磁石型同期発電機(40極, 3kW)のアウトロータ型で、その出力電圧は水量に依存する。これを交流変換して太陽電池用パワーコンディショナを介して系統連系する。その扱いは一般家庭用の太陽光発電システムと同じで、東北電力に電気使用申込みをしたうえで、自家発電設備の連系(逆潮)となる。そのため図4のように買電・売電用に電力メータは2つある。なお、系統売電単価

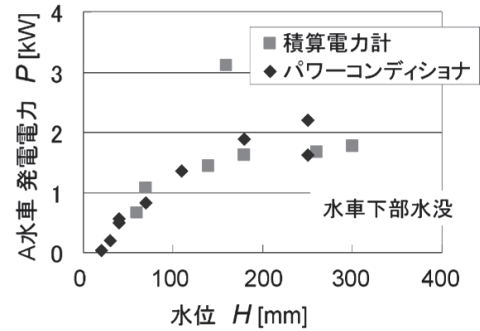


図5 水位と出力の関係

を0円とした。

## 2.3 運転状況

1年余りの運用で、システムトラブル(電気関係および伝動関係)による運転停止はあったが、水路のゴミによるトラブルは観察されなかった。

導水路中央における水位と発電電力の関係を図5に示す。図中の[パワーコンディショナ]は制御盤に表示された瞬間値で、[積算電力計]は売電用積算電力計の指示値から求めた10分程度の平均値である。水位が十数センチまでは水量とともに出力が高くなるが、それ以上の水位に対しては、水量が増加しても発電電力はあまり高くない。その一因としては水車下部が水没していたことが確認されている。

## 3. 排水路用水車

### 3.1 排水路の特徴

庄内地域には農業用水路だけでなく排水路も整備されており、その多くに落差工が設けられている。

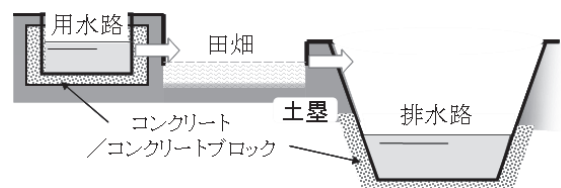


図6 農業用水路と排水路



(a) 通常の水量 (b) 増水時

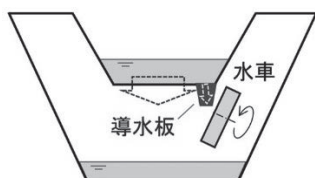
図7 排水路に設置した出羽水車

図6に示すように用水路の水面は一般に農耕地よりも高く、その水量は頭首工で管理されている。一方、排水路は農耕地での利用済の水を排出するため、水面は農耕地よりも低く、用水路の下流にあるので、落差工の落差が小さい。また、水量の調整ができないので水量変化が極めて大きく、大雨等による増水対策のために水路断面が逆台形状になっている。そのため側壁上部の間隔が広い。さらに水路側壁がブロック積みの場合、大きな荷重をかけることが難しい。

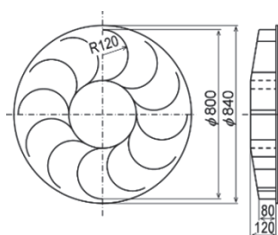
図7はこのような排水路に設置した出羽水車である。(a)図のように羽根車に比べて装置全体が大掛かりで複雑になる。また、過度な増水時にはブロック積みの側壁を超えることもある((b)図)。このように条件が厳しい排水路に従来型水車の適用することは難しいが、そこで利用できる水車を開発できれば、設置可能点が増えることが期待される。

### 3.2 花笠水車

排水路落差工の断面拡張部に設置するために開発した水車を図8に示す。この水車はその外観から「花笠水車」と呼んでいる。水車軸は片持ちで、落差工の水流の一部が導水板により水車に作用する。フ



(a) 設置イメージ



(b) 羽根車形状

図8 花笠水車



(a) 平常時 (b) 増水時 (c) 積雪時

図9 水車運転時の様子(矢印で示されたフレームを基準にすると増水の様子がわかりやすい)

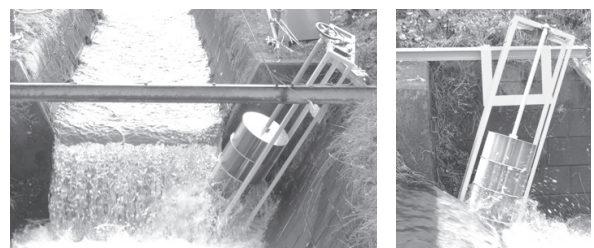
レーム板の裏側で水車出力はVベルト(増速比3)により水車上方に位置する発電機を駆動する。発電電力はバッテリーに充電して道路照明に利用している。

実水路に設置した水車の様子を図9に示す。(a)図は平常時で、増水した流れは羽根車の上方を通過し過負荷にならない。(b)図は過度な増水時に水車ユニットを上方に退避した様子である。(c)図のような積雪時でも水流があれば発電する。なお、渇水時には導水板先端に枯草等のゴミが溜まることもあったが、その後、水流によりゴミは流され、水車は正常に回転することが確認されている。この水車はトラブルが極めて少ない。6年間の運用で、誘導雷の影響と思われる整流素子の破損が1回、車板とフレーム板の間に拳大の石が挟まり回転が止まったことが2回だけである。後者の原因としては、排雪の際に雪塊に混入していた石が入り込んだ可能性がある。

### 3.3 斜軸上掛け水車

排水路で花笠水車より大きな出力を得るために考案した斜軸上掛け水車を図10に示す。水車軸は下流側から見ても対岸側から見ても傾けてある。発電機は水車軸を延長して増水時でも水没しない位置にある。さらに増水対策として水車装置を下流側にスライドさせることができる。

羽根車の形状を図11に示す。これは約240mm



(a) 下流側から (b) 対岸から

図10 農業排水路に設置した斜軸上掛け水車



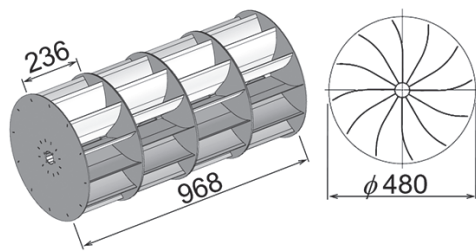


図 11 羽根車

幅のユニットを組み合わせたもので、トルク変動を抑えるために半ピッチずつずらして組立てる。羽根の板厚は2mm、端板の板厚は3mmで、材質はいずれもアルミニウムである。

この水車軸の下端は水中にある。そこで、軸上部をステンレス鋳鋼製ピロー形ユニットで支持し、ラジアル荷重とともに水車の自重を支える。下部には耐摩耗性に優れたMCナイロン製のリングを振れ止めにした。当初、下部には低吸湿性で汚れに強い樹脂製の球面すべり軸受でラジアル荷重のみを受けていたが、摩耗が激しかったため変更した。

水車設置作業の様子を図12に示す。側壁上部にアンカーボルトで固定したH鋼に、組立てた発電装置をユニック車で吊り降ろし、クランプするだけである。発電装置はH鋼上を流れ方向にスライドさせることができる。

図13は運転結果の一例で、水位と発電電圧の時間変化である。発電機出力はDC-DCコンバータ(入力19~72V、出力27V)に入力され、その負荷は



図 12 設置作業風景

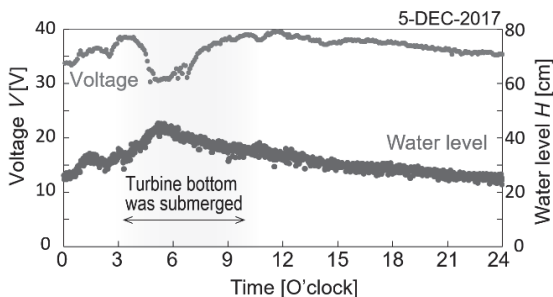


図 13 水位と発電電圧の時間変化

ほぼ空に近いバッテリー (24V \* 2ヶ直列) である。水位が約35cmを超えると発電電圧が低下しているのは、水位上昇により羽根車下部が水没したためである。そのため、増水時には出力は低下するが、過回転が抑制されるので、電気系統を含めた装置全体の保護になるといえる。

#### 4. 胸掛け衝動式水車

##### 4.1 羽根車の検討

排水路山間部の水路(幅500mmの側溝)落差部に小型の出羽水車(直径200mm)を設置・運用したところ、通常の落葉等によるトラブルはなかったが、大雨時に長さ数十センチの枝が羽根車の内部に入り込み、水車が停止したことが短期間に2度あった。そこで水路落差部に設置する新しいタイプの水車を考案した。

羽根車内部への異物侵入を防ぐため、貫流の無い胸掛け式としたが、従来の胸掛け水車では図14(a)のように羽根車下部と水路の隙間が狭いため、ゴミが詰まりやすい。そこで(b)図のように、導水路先端と羽根車の間にスペースを設け、そこをゴミが通過できるようにした。

図15(a)に羽根車形状を示す。これに左上方から水流が作用すると、同(b)図左に示すように、流入水流Vの相対速度Wは羽根の進行方向(裏側)から作用するので回転が妨げられる。羽根車を反転させると同右に示すように、裏面への作用はなくなる。

羽根車の出力特性を調べた結果を図16に示す。これは、周速比λ(羽根車流入流速Vと周速度(D/2)

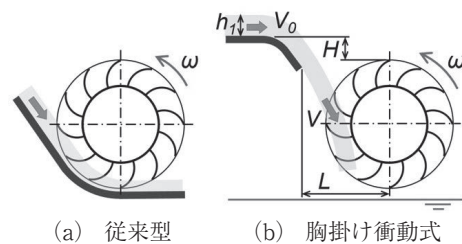
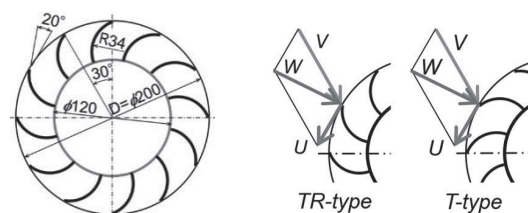


図 14 胸掛け水車



(a) 羽根車形状 (b) 相対流速 (周速度  $U = V/2$  の場合)

図 15 羽根車形状と相対流速

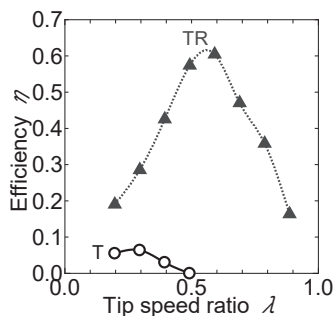


図 16 胸掛け衝動式水車の出力特性

$\omega$ の比)と水車効率の関係で、予想に反し、羽根が水流通過時に抵抗を受けるTR型では最高効率が0.6を超え、逆にT型の効率は著しく低かった。このことは、水流が羽根車に流入する際の羽根裏面への作用よりも、羽根車内部に入った水の排出されやすさの影響が支配的であることを示唆している。

#### 4.2 設置・発電状況

実水路用への水車装置の設置の様子を図17に示す。落差工の幅は1.2m、側壁を含めると1.6mあるが、水車フレームを吊るした単管を単管用の回転クランプに仮止めすることにより、一人作業で設置できるようにした。作業時間は2分以下である。

発電機には、かつては自転車用のハブダイナモを羽根車内部に組込んでいたが、常時水しぶきがかかる場所では劣化が早かった。現在では防水ギヤドモータ(30W, 600rpm)をフレーム上部に収め、水車動力をタイミングベルトで増速して駆動している。最適な増速比については今年度の卒業研究でシミュレーションを試みている。発電機出力を整流して可変抵抗器で負荷試験をしたところ、50mmの水位のときに12Wの発電が確認できた。実用の際に

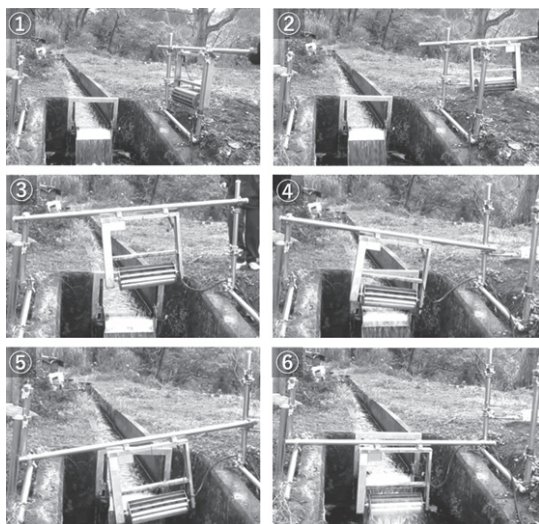


図 17 一人作業による水車設置の様子

は太陽電池用充放電コントローラを介してバッテリー(24V)に充電し、獣害対策用の電気柵に給電する。

### 5. 落差工底部の保護効果<sup>(7)</sup>

#### 5.1 水流による水路底の侵食

落差工の底部は水路保護のプール状になっているが、それでも長期間にわたって水流を受けるため侵食される。図18は羽黒の農業用水路において水を抜いた際に観察されたもので、鉄筋が剥き出しになっていることがわかる。落差工に水車があれば、水車が水流のエネルギーを吸収するので、水路保護の効果が少なからず期待できる。

#### 5.2 水路底の圧力測定

水車による水路の保護効果を調べるために、模型実験で水路底の圧力分布を調べた。図19に示す落差工模型の水路底に10mm間隔で設けた圧力測定孔(φ1mm)によりヘッド $h$ を測定する。落差は $H = 475\text{mm}$ で、水路幅は上部180mm、下部230mmである。設置する水車は直径・幅ともに180mmで、無負荷で回転させる。測定結果は無次元圧力 $h/H$ として表わす。

測定結果の一例を図20に示す。 $x$ は落差工から下流方向への距離で、水車が無い場合は $x = 250\text{mm}$ 付近に水流が作用する。 $d = 45\text{mm}$ の水深があっても、水流作用点にはほぼ落差に等しい圧力が作用している。一方、水車があると、その影響が

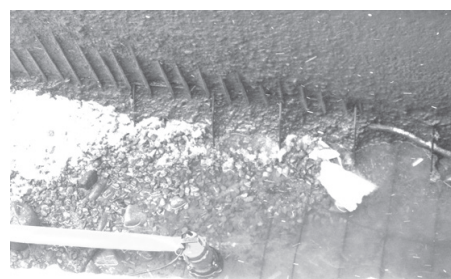


図 18 落差工水叩きの侵食

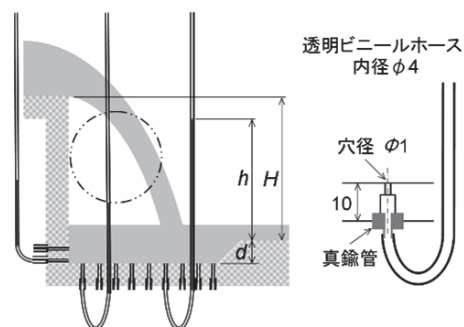


図 19 水路底圧力の検出

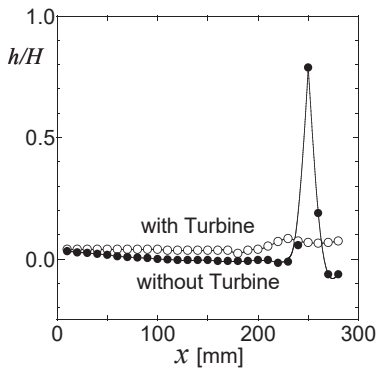


図 20 水路底圧力の測定結果 ( $d = 45$ )

約 1/10 に軽減されている。水車が発電状態であれば、水車により水流のエネルギーの 50% 以上が吸収されるので、より高い圧力低減効果が期待できる。これは水車の付加価値として捉えるべきと考えている。

### 6. 簡易流速測定方法の提案<sup>(8)</sup>

ピコ水力導入のためには、対象水路の流況を把握しておくことが求められる。ここでは高額な計測器を使わない簡便な流速測定方法を提案する。水流に差し入れた棒の上流側では流速  $V$  に応じて水が  $h$  上昇する (図 21)。この関係を予め調べておけば、 $V = \alpha (2gh)^{0.5}$  として、 $h$  から  $V$  を求めることができる。速度係数  $\alpha$  は棒および水路に固有な値である。

3種類の断面形状の棒 (①円柱, 等辺アングル (②上流に凸, および③上流に凹)) について予備試験をした結果, ③および細い棒では  $h$  のばらつきが大きかった。そこで, ①, ②について  $\alpha$  を調べた。図 22 は②についての測定例である。○, ●印は実験用水路におけるデータで, 流速は水路に設けた全幅堰の越流高さから,  $h$  は棒に刻んだ目盛から求めた。△, ▲印は実水路における結果で, 流速はマンシングの式から,  $h$  は棒に張り付けたスケール (厚さ 0.3mm) から求めた。棒が大きいと  $\alpha$  が低めになる傾向は丸棒でも見られた。模型水路で  $\alpha < 1$  となるのは, 棒の挿入により水路断面積が減少する分, 棒の上流側における水面上昇を過大評価する影響が大

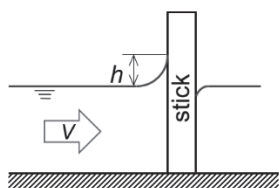


図 21 棒を差し入れた水面

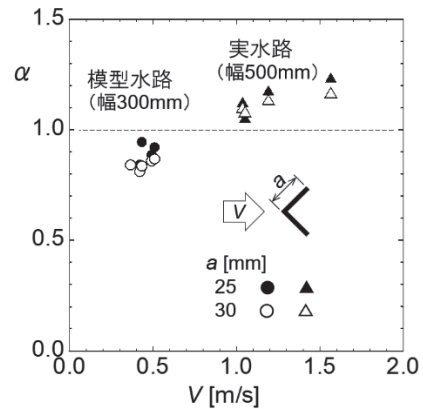


図 22 速度係数  $\alpha$  (L 型凸面上流)

きいためと考えられる。この結果より、水面上昇  $h$  を測定すると  $V$  の概略値が得られるといえる。ただし現場での一人作業では  $h$  の測定が難しい場合もあるので、測定装置・方法の工夫が必要であり、現在では棒を斜めに差し入れる方法を検討している。

### おわりに

マイクロ水力に関する本校の取組みを紹介した。これらは卒業研究・専攻科研究として取組んだ学生諸子の努力がなければ成しえなかった。研究の多くは本校名誉教授丹省一氏と共同で実施したものである。また、地元の渡会電機土木 (株) には電気・土木工事および系統連系手続き等、(有) 畑田鐵工所には水車・構造物の製作および改修等に全面的な協力を頂いた。さらに実証試験にあたっては、山形県庄内総合支庁、鶴岡市、笹川土地改良区の関係者の方々にご尽力頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) 小水力発電大会 (accessed Nov. 30<sup>th</sup> 2020), <http://j-water.org/taikai/index.html>
- 2) やまがたの農村漁村づくり情報マガジン「農楽里」(accessed Nov. 30<sup>th</sup> 2020), <https://www.pref.yamagata.jp/documents/17430/4-5v35.pdf>
- 3) ミツカン機関誌『水の文化』(accessed Nov. 30<sup>th</sup> 2020), <http://www.mizu.gr.jp/images/main/kikanshi/no39/mizu39f.pdf>
- 4) 畑田一志, 武田啓之, 丹省一, 本橋元, 他 2 名, 用・排水路に設置した形式の異なる複数基のマイクロ水車の構想から運転までとその構想, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2013 (2013 年 11 月), 193-196, 沖縄県 那覇市.
- 5) 武田啓之, 畑田一志, 他 3 名, 水路を利用する



マイクロ水力発電装置の課題と新提案，太陽／風力エネルギー講演論文集2016(2016年11月)，267-270，愛媛県 松山市。

- 6) 樋口国孝，鈴木康司，金山訓，他3名，オープントロスフロー型マイクロ水車の特性改善，日本機械学会東北学生会 第36回卒業研究発表講演会講演論文集，(2006年3月)，87-88，福島県いわき市。
- 7) 伊藤祐太，本橋元，水車設置における落差工水路底の保護効果，日本機械学会東北学生会 第44回卒業研究発表講演会講演論文集，(2014年3月)，143-144，山形県米沢市。
- 8) 林りょう，佐藤 知音，本橋元，ピコ水力のための簡易流速測定方法の提案，日本機械学会東

北学生会 第50回学生員卒業研究発表講演会講演論文集(USBメモリ)(2020年3月)，file = 402，青森県 弘前市。

### 著者略歴



本橋 元 (モトハシ ハジメ)  
2000年4月に鶴岡高専・機械工学科に着任し，以来，小型風車，マイクロ水力等の開発および利用技術に関する教育・研究に従事。田圃に電気があれば，という地元の声を受け，農業用水路／排水路で利用可能な水車を開発している。現在は創造工学科教授。博士(工学)。