

日本における小水力発電技術再生の試み：  
ネパール・ベルトン水車の技術移転

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-05-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 高木, 美奈, 藤本, 穰彦, 島谷, 幸宏 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10297/00024957">http://hdl.handle.net/10297/00024957</a>

# 日本における小水力発電技術再生の試み

—ネパール・ペルトン水車の技術移転—

Attempt to regenerate the technology of small-scale-hydropower in Japan:  
Transferred technology from Nepal

高木美奈・藤本穰彦・島谷幸宏  
TAKAGI Mina, FUJIMOTO Tokihiko, SHIMATANI Yukihiro

## Abstract

Small scale hydropower (=SSHP) is one of the generation method suitable for natural environment. In Japan, this method has its long history in linking hydropower with community development. However, after Second World War, the main energy resource was shifted from water to coal, oil, and nuclear energy. This has resulted in declining technical expertise of small hydropower and waterwheel makers throughout Japan. In this study, the main focus is on the appropriate technology of small scale hydropower. Facilities of small hydro power generation differ in each area. Thus it is necessary to re-construct the technology suit for each area.

For this attempt we focused on the Pelton wheel technology of Nepal. The information of this method was founded in the manual book: "The Micro-Hydro Pelton Turbine Manual" which is freely accessible, and that summarizes the know-how of process of the small hydro technology transferred from United Kingdom to Nepal.

From this, we could learn the fundamental structure of Pelton turbine and the technology of designing turbines in various sizes. We, then, decided to design a system by using 3D-CAD and made our Pelton buckets using with 3D printer. We compared the power generation capacity of our waterwheel with one purchased from New Zealand to investigate its effectiveness and efficiency. Results of our experiment shows that the power generation curves for each turbine are approximately equal. The power increases continuously with increase of the flow rate. The maximum power generated by each turbine is approximately the same. This means it is possible to design the Pelton bucket that has equal power generation efficiency compare to a purchased bucket.

To confirm our study, we installed scaled-up and re-designed version of our Pelton turbine made by local maker to Shiraito fall in Fukuoka and succeeded to regenerate the Pelton turbine technology at low cost and in a short time.

## はじめに

2011年3月11日の東日本大震災と原子力発電所の事故の後、将来のエネルギーへの不安や、今後の社会の仕組みに対する危機感が高まっている。国土に分散して賦存する自然エネルギーが重要な役割を果たしそうだと、国民的期待が寄せられるようになった。

2012年6月8日には、政府の「エネルギー・環境会議」(内閣官房・国家戦略室)による「選択肢に関する中間的整理(案)」が発表された。その中で自然エネルギーは、「現行エネルギー基本計画を超え、2030年時点での電源構成に占める割合を約25%～35%の間で整理する」とされた。政権交代もあり、具体的な目標数値の承認には至らなかったが、将来のエネルギー供給や脱温暖化のシナリオに全面的な見直しを加えられており、どのようなシナリオが採択されても、自然エネルギーの大幅導入が目指されることになる。

2012年7月には自然エネルギーの固定価格買取制度がスタートし、制度的な後押しも始まった。しかし、太陽光発電の導入は一定程度進んだものの、その他の自然エネルギーの導入は進んでいない。なかでも長期間にわたる調査と合意形成を要する地熱発電を除くと、中小水力発電の導入がもっとも進んでいない<sup>1)</sup>。

したがって、本研究では中小水力発電に注目する。図1は、地域が主体となった小水力発電の導入フローである[島谷・山下・藤本(2013)]。地域づくりのための小水力発電の導入は、(1)地域主体形成、(2)事業主体形成、(3)適正技術の3パートから成る。小水力発電と地域づくりをめぐる研究分野では学際的な研究が進んでおり、総合的な研究としてJST社会技術研究開発センター編(2010)や小林久(農村計画学)による一連の研究がある[小林(2010)、小林(2013)]。(1)については、島谷幸宏(河川工学)、藤本穰彦(地域社会学)、山下輝和(合意形成)を中心とした実践的な研究蓄積がある[島谷・山下・藤本(2013)、藤本・安永ほか(2012)、山下・藤本ほか(2012)]。(2)については、諸富徹(環境経済学)による地方自治体(長野県飯田市)の地域自然エネルギー政策の制度化に関する研究[諸富(2013)]や、自然エネルギー社会企業の研究[藤本(2014)]がある。しかし、(3)小水力発電を地域に導入する際の社会技術研究が不足している。本稿は(3)の研究に位置付けられる。

第二次世界大戦後の水力発電の大規模化、高度経済成長期の火力、原子力へのエネルギー転換を背景に、我が国における小水力発電の適正技術が、多くの地域で失われていることが指摘されている[小林(2013)]。東広島市に所在するイームル工業等、地域に根ざした小水力技術を現在に伝える企業は存在するものの、既設の水力発電所のメンテナンス業務を中心に、新規製造は年間数件である。既存の小水力発電メーカーのキャパシティはすでにオーバーしており、長納期、高コストの対応となっている[藤本・島谷(2014a)]。

また、地域毎に自然条件やメンテナンス状況も異なることから、各地域レベルで小水力

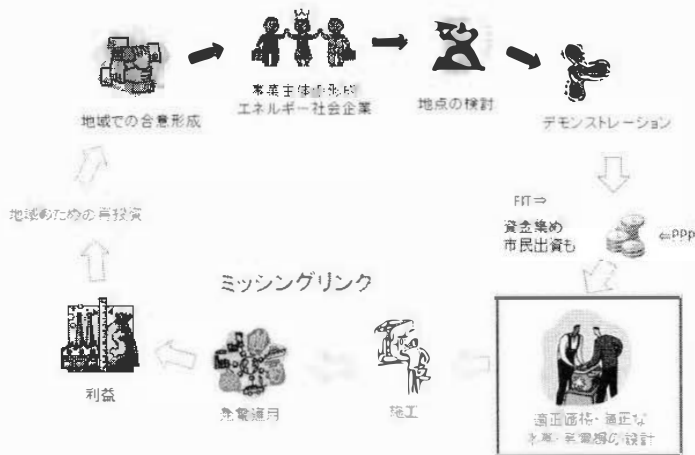
<sup>1)</sup> 資源エネルギー庁によれば、制度開始以降2014年3月までに導入された自然エネルギーの総量895.4万kWのうち、約97.3%が太陽光発電であり、中小水力は0.07%にすぎない[資源エネルギー庁(2014)]。

技術を再構成していく必要がある。小水力発電の技術は、単純に大規模な水力発電を縮小したものではない。地域の自然条件（特に流量と落差）に合わせて、個別の対応が求められる。現在の日本では、大規模な水力発電技術はあるものの、小規模な水力発電技術が失われている。小水力発電を導入するための技術的課題があることが分かってきた。

そこで本稿では、我が国における小水力発電の技術再生の試論として、イギリスからネパールへ技術移転された際のノウハウをまとめたテキストを読み込み、河川工学の知見と日本の小水力発電サイトからの知見を合わせて再構成しながら、小水力発電用ペルトン水車の技術再生に取り組んだ結果を報告する。水車の製造に挑戦したい地域の中小企業の具体的かつ実践的課題（小水力発電に興味があり水車を設計してみたい、技術的な部分で困っている等）に応える社会技術研究が必要である。

本稿は以下のように進める。第Ⅰ章では、ペルトン水車の設計に関する知識や技術の習得プロセスを再構成する。とりわけ、ペルトン水車技術の核となるランナとバケットの設計について必要な知識を再構成する。続く第Ⅱ章では、技術再生の研究開発における3Dプリンタ活用のアイデアを示す。3Dプリンタを活用するために必要な3次元CADの知識と、3Dプリンタでバケットを設計する際の経験から得たノウハウをまとめる。特に、筆者が開発した3次元CADを活用した設計の具体的ノウハウをまとめている点が重要である。第Ⅲ章では、3Dプリンタで製作したバケットの性能実験を行った結果を報告する。第Ⅳ章では、筆者等が設計したペルトン水車を地域の中小企業と協力して製品化し、実際の発電所（福岡県糸島市白糸の滝）に設置・稼働するところまで到達したことを示す。最後に今後の課題と展望をまとめる。

図1 地域が主体となった小水力発電の導入プロセス



資料：島谷・山下・藤本（2013）、202頁の図3-11を加筆修正。

I ネパール・ペルトン水車の技術移転——Jeremy (2000) の水車設計技術

本章では、ネパール・ペルトン水車の技術移転プロセスについての知見を再構成する。小水力発電に利用される水車には様々なものがあるが、中でも代表的な水車には、プロペラ水車、フランシス水車、ペルトン水車、クロスフロー水車がある。それぞれの水車には表1で示すような特徴がある。ペルトン水車は水流の衝撃を利用した衝動水車であり、落差を十分に確保することで、少流量でも高効率の発電ができる特徴がある。

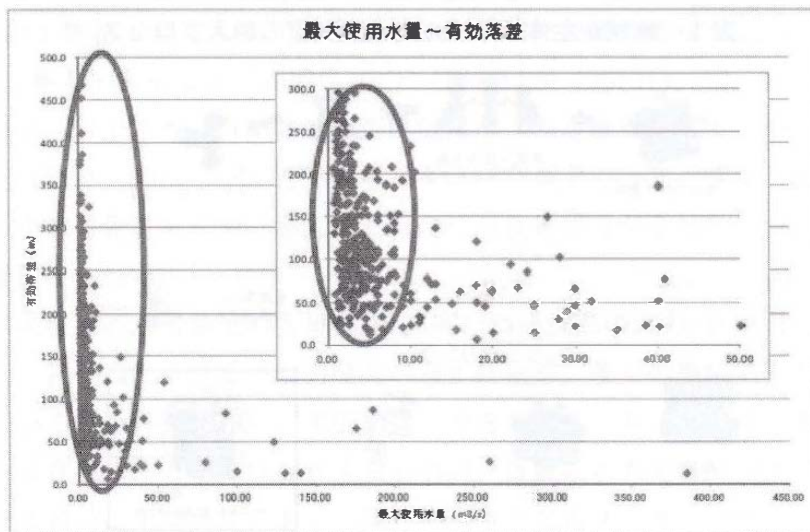
資源エネルギー庁が小水力の新技术の開発促進を行うために委託調査した「中小水力開発促進指導事業基礎調査」に掲載されている「未開発地点開発最適化調査」と「未利用落差発電包蔵水力調査」の調査結果から、日本の小水力ポテンシャルは高落差で少流量の地点に多く分布していることが明らかとなっている（図2、3）。高落差、少流量に適したペルトン水車の技術開発は、我が国における今後の小水力発電の導入において有効である。

表1 水車の種類と特徴

水車の種類	流量の目安	落差の目安
プロペラ水車	0.1m <sup>3</sup> /秒～2.5m <sup>3</sup> /秒	20m以下（低落差）
フランシス水車	0.1m <sup>3</sup> /秒～1.5m <sup>3</sup> /秒	5m～60m（低～中落差）
ペルトン水車	0.02m <sup>3</sup> /秒～0.3m <sup>3</sup> /秒	30m以上（中～高落差）
クロスフロー水車	0.05m <sup>3</sup> /秒～2m <sup>3</sup> /秒	7～60m（低～中落差）

資料：JST社会技術研究開発センター編（2010）をもとに作成。

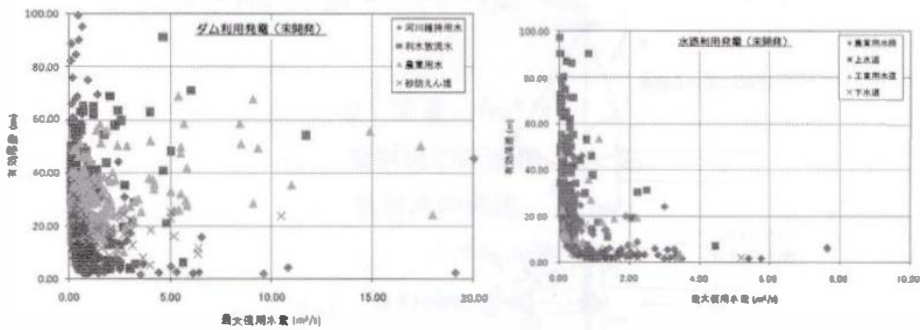
図2 未開発地点開発最適化調査 最大使用量と有効落差の分布<sup>2)</sup>



資料：（一財）新エネルギー財団（2013）p.2-1の図2.1.1

<sup>2)</sup> 1993～1995（平成5～7）年度に行われた「未開発地点最適化調査」において、自然・社会環境に関する評価で開発可能性が高いとされた開発難易度A・Bランクの371地点の最大使用水量と有効落差の関係図。

図3 未利用落差発電包蔵水力調査 最大使用量と有効落差の分布<sup>3)</sup>



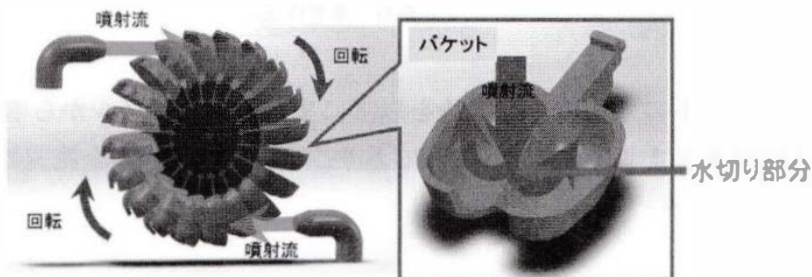
資料：(一財)新エネルギー財団 (2013) p.2-2の図2.1.2

ペルトン水車の構造は、水を水車にぶつける、ただそれだけの構造である。水車に関する知識が少ない人でも、目に見て構造を理解することができる。ペルトン水車の設計図面や製造ノウハウは、Jeremy (2000) によって開示されている。ペルトン水車の技術開発のなかでも、ペルトン水車の最も重要な部分である水衝部（バケット）の設計を学び、再現することを試みたものが本稿である。

### 1. ペルトン水車の原理

まず、ペルトン水車の技術再生に必要な知識と技術の構築プロセスを再構成する。ペルトン水車は、ランナと呼ばれる円盤部分と、円周上にスプーンのような形をした水衝部（バケット）によって構成されている。ノズルから勢い良く放たれた水はバケットに衝突する。そのとき水は反対方向に向きを変え、バケットに対して押し出す力が働く。その力で水車が回転する（図4、図5）。

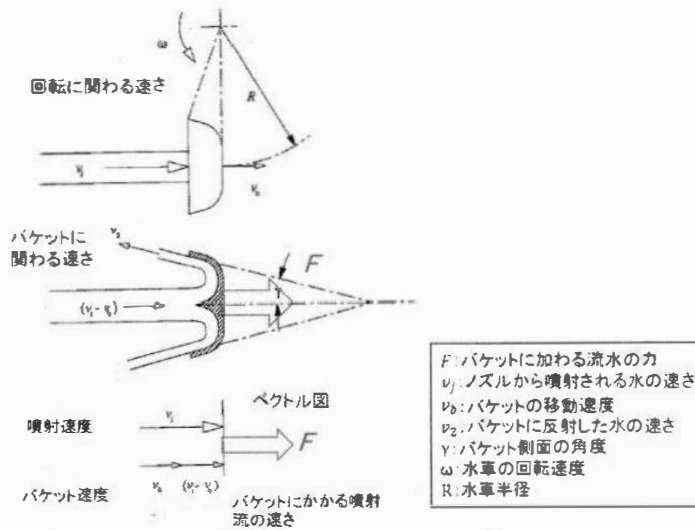
図4 ペルトン水車の仕組み



資料：筆者作成。

<sup>3)</sup> 1999～2008（平成11～20）年度に行われた、既設構造物（ダム・水路）における遺休落差や余剰水圧を利用した包蔵水力調査「未利用地落差発電包蔵水力調査」におけるダム利用発電（971地点）と水路利用発電（418地点）の最大使用流量と有効落差の関係図。

図5 バケットにあたる水の動き

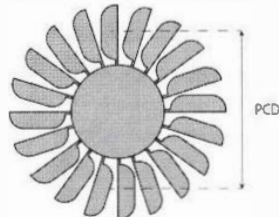


資料: Jeremy (2000) p.136 の Fig.10-3 を翻訳し、加筆修正。

## 2. Jeremy (2000) ペルトン水車の基本的考え方

Jeremy (2000) は、流量と有効落差からノズルからの噴出流の直径を計算し、ペルトン水車のPCD (=Pitch Circle diameter) を決め、さらにPCDを元にバケットを設計する方法を確立した (図6)。

図6 ペルトン水車のPCD



資料: 筆者作成。

PCDとバケットの寸法の算出方法を以下にまとめる。ノズルから噴射される水の流量はノズルの大きさでコントロールされており、噴射流の断面積と流速の積より求めることが出来る。

$$Q = A_{jet} \times v_{jet} \times n_{jet} = \frac{\pi \cdot d_{jet}^2}{4} \cdot v_{jet} \cdot n_{jet} \quad \dots \textcircled{1}$$

$Q$  : 流量 (m<sup>3</sup>/s)  
 $A_{jet}$  : 噴射流の断面積 (m<sup>2</sup>)  
 $v_{jet}$  : 噴射流の流速 (m/s)  
 $n_{jet}$  : ノズルの数  
 $d_{jet}$  : 噴射流の直径 (m)

また、噴射流の流速は有効落差によって決まり、次式で求めることが出来る。

$$v_{jet} = C_v \sqrt{2g \cdot H_n} \quad \dots \textcircled{2}$$

$g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)  
 $C_v$  : 流速係数  
 $H_n$  : 有効落差 (m)

式①、②より噴射流の直径は以下のように求められる。

$$d_{jet} = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot C_v \cdot \sqrt{2g}} \cdot \frac{1}{H_n^{1/4}} \cdot \sqrt{\frac{Q}{n_{jet}}}} \quad \dots \textcircled{3}$$

流速係数 $C_v$ には一般的な0.97を用い [Jeremy (2000) p.25]、以下のように整理出来る。

$$d_{jet} = \frac{0.54}{H_n^{1/4}} \cdot \sqrt{\frac{Q}{n_{jet}}} \quad \dots \textcircled{4}$$

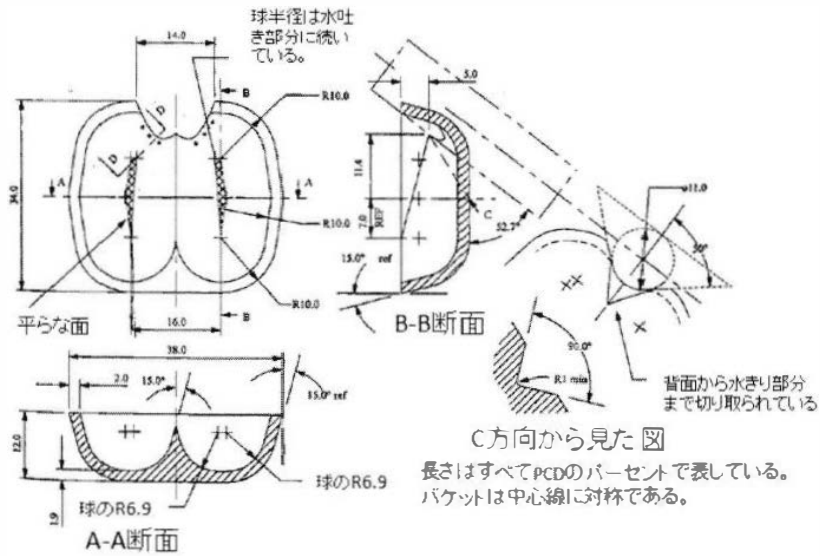
式④より噴射流の直径 $d_{jet}$ を算出し、式⑤を用いてPCD (mm) を決定する。

$$PCD = \frac{d_{jet}}{0.11} \quad \dots \textcircled{5}$$

PCDサイズを決定した後は、図7の図面に対応し、バケットを設計する。



図7 Jeremy (2000) のバケット設計図



資料：Jeremy (2000), p.33のFig.4-1を翻訳し、加筆修正。

## Ⅱ ペルトン水車の研究開発を実現した技術——3Dプリンタの活用

ペルトン水車の技術再生にあたって、3Dプリンタを活用したことも本研究の特色である。筆者らは研究開始にあたって、機械設計や3次元CADの基本的知識を全く有していなかった。そこで、筆者のうち高木は(株)中山鉄工所(佐賀県武雄市)にて3週間のインターンシップを行った。そこでは3次元CADの講習及び、水車の設計から製造までのプロセスを学んだ。3次元CADの講習ではSolidWorksを用いた。本章第1節では水車の設計に最低限必要と考えられる3次元CADの知識を示す。第2節では筆者の経験をもとに、機械設計の知識や3次元CADの知識を有していない者が水車を設計できるようになるために獲得すべき知識と技術を再構成して示す。

### 1. 3次元CADの基本知識

3次元CADとは、仮想の3次元空間に「縦」・「横」・「奥行き」の立体形状を作るツールである。3次元CADでは、単純な形状(フィーチャー)を複数組み合わせることで複雑な形状を作ることが出来る。このようにして空間上に複数のパーツを組み立てたものをアセンブリという。本研究ではこのアセンブリ機能を利用してペルトン水車のバケット部分を設計している。

## (1) 基本用語

- ・エッジ：面と面が交差するところのできる稜線または直線の線の部分のこと
- ・合致：アセンブリ上で部品間に拘束条件をつけること
- ・干渉：アセンブリ上で部品間に食い込みが発生している異常な状態
- ・サーフェス：表面
- ・スケッチ：立体形状を作成するための2次元図形
- ・スケッチ平面：スケッチを描くキャンバスとなる平面
- ・抜き勾配：鋳造で鋳型から成形品を取り出すために付ける勾配（傾斜）
- ・非表示：一時的に構成部品を表示させないことで作業が簡単になる機能
- ・フィーチャー：直方体、円柱、フィレットといった形状の最小単位
- ・マージ：複数の立体を1つの要素にすること。複数の立体を1つの立体にする機能
- ・ミラー：平面を基準に対称な形状を複製する機能
- ・面取り：立体の角を指定した角度で削り取ること

## (2) 基本機能<sup>4)</sup>

### ① スケッチの基本

平面を選択し、スケッチツールバーの中から好きなツールを選びスケッチする。必要な寸法をすべて入力して図形を定義し、固定する。

### ② 対称（ミラー）機能

スケッチの際に対称（ミラー）機能を用いて対照的な図形のスケッチを簡略化することができる。この機能を利用する際は、対称的に描きたいものの中心に対称線を描くと、片側の図形を描くだけで対称線の反対側にも自動的に図形が描かれる。

### ③ 押し出し機能

スケッチを描き、押し出し機能を用いて立体を作成したり、カットすることができる。ソフトによっては抜き勾配を指定して押し出すこともできる。押し出す際には押し出し長さを指定する。

### ④ フィレット機能

立体のエッジを指定した半径で丸めることができる。

### ⑤ シェル機能

指定した厚みを残してモデルの中身をくり抜くことができる。

<sup>4)</sup> ソフトによっては表記が異なるものもある。3次元CADを実際に使いながら学ぶ際には、ソフト内のチュートリアルを利用したり、テキストをもとに簡単なものを設計することで身に付けていくと良い。

## ⑥ 回転機能

スケッチした図形を回転させることにより、立体を作成したり、カットすることができる。回転角を指定することができる。

## ⑦ パターン化機能

部品やアセンブリを作成する際に、複数作成したいフィーチャーや部品をパターンのように配置することができる。例えば、今回の水車の設計では、バケットを20個配置するときに、円形パターンを用いてバケットをランナに配置する際に用いられる。

## ⑧ アセンブリ機能

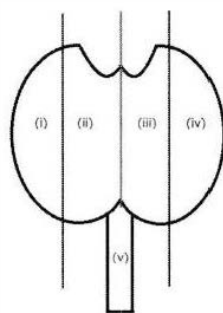
一つの3次元空間で個々の部品を組み立て、アセンブリを作成することができる。アセンブリ内でも個々の部品を編集することができるし、新たに部品を作成することもできる。

## 2. 3次元CADを活用したペルトン水車の設計

それでは図7をもとに3次元CADでバケット部分の設計を行ってこよう。研究開発段階の設計においては、バケットの各部分の寸法を分かりやすく正確にするためにPCDを100mmと仮定した。

バケットは5つの部位に分けて設計した(図8)。図中の(ii)の部分は(i)の部分、(iv)の部分は(iii)の部分ミラーして作成した。最も設計が難しかったのは(ii)の水を吐き出す部分(水捨て部分)であった。バケット裏側から52.7度で円とV字を組み合わせさせて切り抜く際に、過度の切り取りや、不十分な切抜きを防ぐために、切り抜く前のバケット側面の楕円形状を何度も調節したり、上から放物線で切り抜く際の放物線を書き換えて設計を行った。試行錯誤の末、簡易かつ納得のいく設計方法を生み出した。

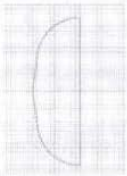
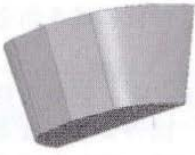

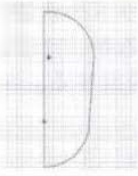
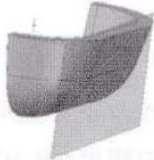
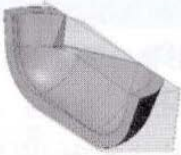

図8 バケット設計時の分割方法



資料：筆者作成。

筆者が考案するバケットの設計方法を表2に示した<sup>5)</sup>。

表2 バケットの設計方法

バケットのパーツ (i)		
① 設計図面を元に スケッチを行う。		② スケッチした面 を下方方向に押 し出しフィー チャーを作る。
③ 側面を抜き勾配 15度でカットす る。		④ 下のエッジを図 面から得られた 寸法 (8.8mm) でフィレットす る。
⑤ 上面と内側の面 を選択する。		⑥ シェル化 (2mm) して完成。
バケットのパーツ (ii)		
① 設計図面を元に スケッチを行う。		② パーツ(i)の時と 同様の作業で シェル (2mm) まで済ませる。
● 右側面をバケッ トの中心となる 位置で面を作る。		④ 作った面の右側 をカットする。
⑤ 先ほど作った面 に図の寸法で切 り取り、水切り 部を作る。		⑥ 上面内側部分の 先端と水切り部 を結ぶ平面を作 成する。
⑦ 作成した平面に φ11の円をスケ ッチする。		⑧ 先ほど描いた円 でフィーチャー を切り抜く。

<sup>5)</sup> 本稿では設計を簡易にするために、Jeremy (2000) の図面と多少形状を変更している。Jeremy (2000) の図面形状により近づけたい場合は、3次元CAD技術をより磨いて取り組んでも良いし、鋳造段階で改良することも出来る。

<p>⑨ バケツ底の中心部分から水切り部の頂点を通る面を作成する。</p> 	<p>⑩ 先ほど作成した面に長方形を描き、その面とバケツが交差する線を回転軸としてフィーチャーを45度回転カットする。</p> 
<p>⑪ 回転カットができると右図のようになる。</p> 	<p>⑫ バケツを底面から見て、バケツの水捨て部分ができるように、放物線と直線を程よい位置に描き面を作る。</p> 
<p>⑬ 先ほど作成した面を垂直上向きにフィーチャーをカットし、水捨て部分を作る。</p> 	<p>⑭ 完成。上から見ると右図のようになる。図に○で示した部分は実際に製造した後に、滑らかになるように削ると良い。</p> 
<p>(i)と(ii)のアセンブリ</p>	
<p>(i)と(ii)のパーツの設計が完了したら、アセンブリ機能を用いてパーツを合体させる。(iii)、(iv)部分はバケツの水切り部分でミラー機能を用いて製造すると簡単であるが、ミラー機能がない場合は(i)、(ii)部分と同様の方法で設計する。</p> 	

資料：筆者作成。

### 3. 3Dプリンタによる製造

設計したバケツの再現性実験のために、バケツを造形する必要があった。しかし、実験用バケツを鋳造するのは、時間とコストの観点から困難であった。そこで3Dプリンタを使って造形するアイデアが浮上する。今回使用した3Dプリンタ(Afinia H479)は、3次元CADデータを元にABS樹脂で3次元造形物を製造できる装置である。

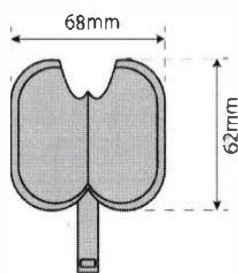
再現性実験では、比較対象にニュージーランド・エコイノベーション社製ペルトン水車：Powerspoutを用い、Powerspoutに3Dプリンタで印刷したバケツを取り付け、既製品の水車との形状比較実験を行った(詳細は次節で述べる)。Powerspoutに装着するため、PCD100mmで設計したバケツを既製品の水車のバケツと寸法が等しくなるように再設計した(図9、図10)。さらに、バケツの設計方法のパーツ(ii)の部分である、表2の⑭に○で示した部分の出っ張りは、3Dプリンタで製造した後に滑らかになるように削った。

再設計したバケツを3Dプリンタで20個印刷し、水車に取り付けた。実際に印刷することで、次のような設計段階の形状の問題点を目視で発見し、改良を加えた。(1) 3次元CADでは設計できていたと思われた水捨て部分が実際に印刷してみると形状が薄すぎて

製造できていなかった。(2)バケットを下向きに伏せた状態になる向きで印刷したところ、傾斜が急な部分はインクが垂れてしまい、設計通りに印刷できなかった。また、バケットを鉛直に立てた状態になる向きで印刷したところ、バケットの付け根部分の強度が弱まり、手で力を加えた際に折れてしまった。そのため、印刷の向きはバケットの内側が上を向くように印刷する必要があることが分かった。(3)印刷のペン幅を最も細い0.15mmに設定して印刷したところ、線が細いために時間がかかり、更にインクが固まりきる前にインクが上塗りされるため、形状が乱れ印刷精度が落ちてしまった。そのため、今回のバケットの印刷には0.20mmが最適であった。なお、表2で示したバケットの設計方法には、これらの問題点を反映してある。

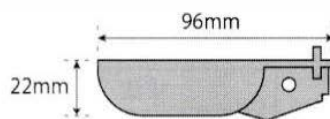
次に費用と時間コストについて検討する。3次元CADで筆者が設計したバケットを3Dプリンタで印刷した場合と鋳造した場合にかかる費用と時間的コストを比較した(表3)。3Dプリンタは、機器購入のための初期投資を勘案しても、20個のバケットを印刷する際にかかる総費用が大幅に下げることが可能で、製造時間も大幅に短縮できることが分かる。

図9 印刷したバケットの寸法 (正面)



資料：筆者作成。

図10 印刷したバケットの寸法 (側面)



資料：筆者作成。

表3 3Dプリンタと鋳造のコストの比較

コスト	3Dプリンタ	鋳造
初期投資	3Dプリンタ購入費 20万円	金型製作費 20万円
バケット1つ当たりの製作費	103.5円	16,000円
総額	20万2千円	52万円
バケット1つ当たりの製造時間	2時間15分	3～4週間
合計製造時間	45時間	1ヶ月

資料：筆者の実験結果及び(株)中山鉄工所へのヒアリング(2014年3月7日実施)をもとに作成。

### Ⅲ 3Dプリンタで印刷したペルトンバケットの比較実験

本章は、Jeremy (2000) の設計図をもとに3次元CADで設計し、3Dプリンタで製作した水車バケットと、既製品(ニュージーランド・エコイノベーション社製Powerspout)

における水車バケットとの形状の違いによる発電性能の比較実験を行った結果を報告する。実験の目的は、それぞれの発電量を比較し、筆者の設計・製造した水車バケットの発電性能を検証することである。

## 1. 実験設備の概要

### (1) 水車

表4は、ニュージーランド・エコイノベーション社製ペルトン水車：Powerpoutの仕様を示したものである。表5は、3Dプリンタ製バケットとPowerspoutバケットの形状の比較をまとめたものである。バケットの形状の違いによる発電性能の差を知ることが目的であるため、実験にあたっては、Powerspoutのバケットの縦の長さ62mmに合わせて、3Dプリンタ製バケットの縦の長さを62mmになるようにバケット全体を設計した（図7、図8）。バケットの縦の寸法を等しくしたところ、バケットの厚みは18mmになり、Powerspoutのほうが薄い形状となった。図11はバケットを正面から見た写真、図12は側面から見た写真である。白が3Dプリンタ製、黒がPowerspoutのバケットである。これらの写真を見ると、白のバケットはバケットの形状が上下対象で深い形状となっているが、黒のバケットは上部分が小さくて薄く、下部分は大きく深い形状となっていることがわかる。

表4 Powerspoutの仕様

寸法	470 × 400 × 430 (mm)
発電能力	10 ~ 1.000W
タービン	ペルトン
ノズル数	1 ~ 2
ペルトン回転体	直径 230mm ガラス繊維入りナイロン樹脂製
バケットの数	20 個
最大流量	8 ~ 10L/s

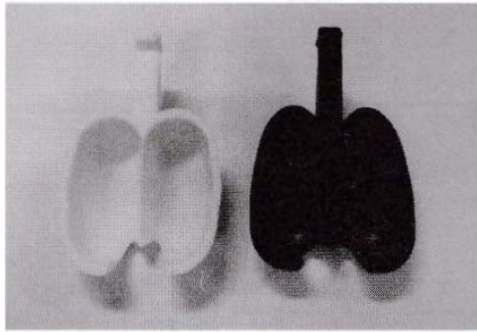
資料：(株)イズミ・ホームページ (<http://www.izumicorp.co.jp/ecopelton/pdf/plt.pdf>) をもとに筆者作成。

表5 3Dプリンタ製バケットとPowerspoutバケットの形状の比較

		設計したバケット	Powerspout
寸法	縦	62mm	62mm
	横	68mm	68mm (中心)
	厚み	18mm	22mm
表面		粗い	滑らか
水受け部分		上下対象で深い	上が小さく下が大きい
水切り部分		フラット	尖っている

資料：筆者計測をもとに作成。

図11 正面から見たバケット



資料：筆者撮影。

図12 側面から見たバケット



資料：筆者撮影。

## (2) 発電機

発電機は、(株)明和製作所(福岡県糸島市)製のアウトローター発電機(1kW)を用いた。小水力発電は規模が小さいため、一般的な発電機に必要な回転数を得ることが困難であるが、この発電機は低速回転でも発電できる仕様となっており、増速機が不要である。発電機の仕様を表6に示す。

表6 発電機の仕様

種類	三相交流永久磁石式
極数	56極
電圧	200VDC(三相整流後)
電流	5ADC(三相整流後)
回転数	400r/min
質量	15kg

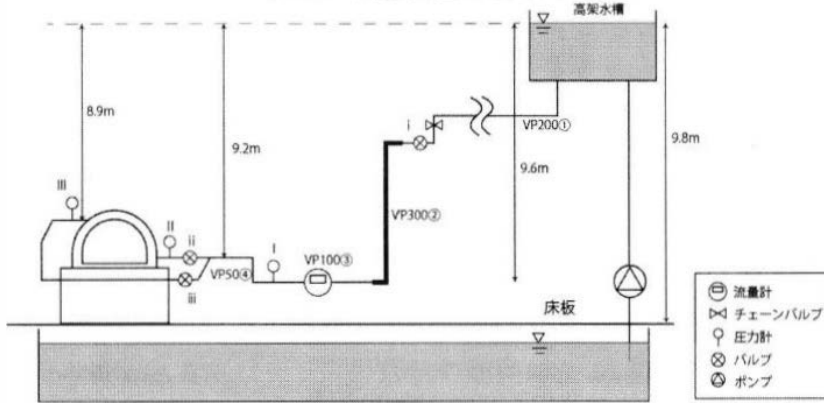
資料：(株)明和製作所へのヒアリング(2014年6月19日実施)をもとに筆者作成。

## (3) 実験室設備

実験には九州大学工学研究院環境社会部門(流域システム研究室)の実験室を用いた。実験装置の概略図を図13に示す。この装置の高架水槽はポンプから汲み上げた水を水槽から溢れさせることによって、水位を常に床下から9.8mの位置に保っている。ポンプが汲み上げ可能な流量は最大90L/sである。水は高架水槽から直径200mmの円管①、直径300mmの円管②、直径100mmの円管③の順に流れ、二つに分岐して直径50mmの円管④を通り水車に左右両側のノズルから噴射して、その水の衝撃力によって水車を回転させて発電する仕組みとなっている。水車に流す水量はチェーンバルブと三つのバルブによって調節できる。回転した水車の動力は発電機に伝わり、発電を開始する。発電された電気は整流部で交流から直流に変換され、60W白熱球へ流れて消費される仕組みとなっている(図14)。水車に加わる負荷はこの白熱球の数によって調節できる。本試験ではスイッチを三箇所入れて、白熱球を三個(計180W)用いた。

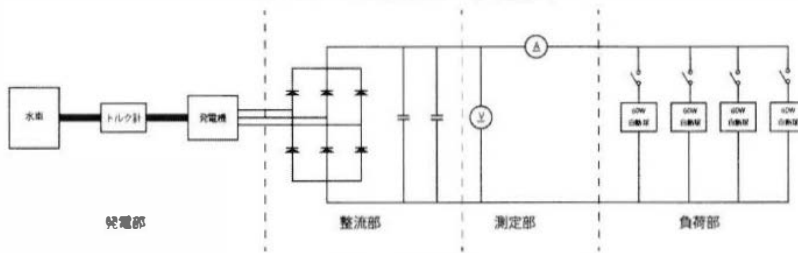


図13 実験装置の概略図



資料：筆者作成。

図14 発電部分の回路図



資料：筆者作成。

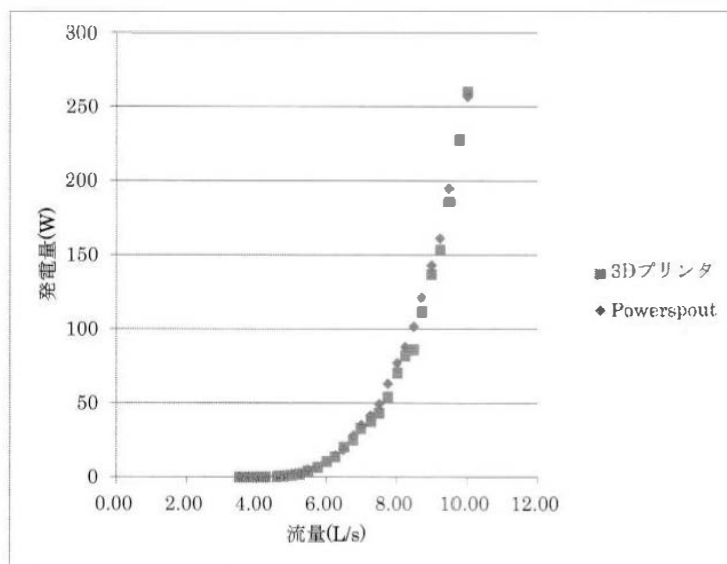
## 2. 実験結果

図13の実験施設の概略図に示したチェーンバルブとメインバルブ*i*を全開し、流量計と圧力計Ⅱ、Ⅲを見ながら、ノズルに最も近いバルブⅡ、Ⅲを操作して流量を調節した。二つのノズルから噴射される流量を等しくするため、圧力計Ⅱ、Ⅲが同じ圧力となるようにバルブを回し調整した。流量3.5L/sから測定を開始し、流量を約0.25L/sずつ増やして発電量を記録していった。そしてこの実験装置で流すことができる最大流量になるまで実験を行った。この実験を3Dプリンタ製バケットとPowerspoutバケットの両方で行った。

実験結果を図15に示す。流量を徐々に増やして行き、ノズル径や管路の制約条件から最大流量は10L/sである。その際、3Dプリンタ製水車のノズル付近の圧力計Ⅱ、Ⅲは圧力0.075MPa、トルク計は最大で12.36N・mを指したが、水車は壊れなかった。また、3Dプリンタ製水車とPowerspoutではバケットの形状が違うにも関わらず、どの流量に対しても発電量はほぼ等しい値を示し、両者とも同様の曲線を描いた。

最大発電量についても、3Dプリンタ製バケットは260Wと、Powerspoutの257Wと近い値が得られた。バケットは基本の構造が似通っていれば、多少の形状の違いは無視できることが分かった。3Dプリンタは水車の模型実験に用いるために十分な強度があることと、著者が設計したバケットも既製品のPowerspoutバケットもほぼ同じ発電量であるので、著者が設計したバケットの実用性が検証されたといえる。

図15 3Dプリンタ製水車とPowerspoutの発電量の測定結果



資料：2013年12月23日実験結果をもとに筆者作成。

#### IV 小水力発電技術再生の実践——糸島市・白糸の滝への応用

本章では、筆者等が設計したペルトン水車を地域の中小企業と協力して製品化し、実際の発電所（福岡県糸島市白糸の滝）に設置・稼働するところまで到達したことを示す。

##### 1. 対象地の概要——「白糸の滝1・2・3夢プロジェクト」<sup>6)</sup>

白糸の滝は福岡県糸島市に所在し、川付川の上流、標高900mの羽金山の中腹530mに位置する（図16）。福岡県の名勝指定を受けて自然公園が整備され、年間約14万人が訪れる観光地となっている。

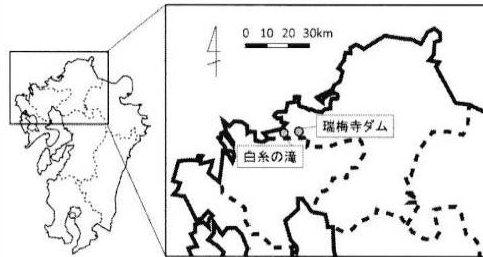
白糸の滝の約600m下流には、32世帯の白糸行政区（2012年6月現在）があり、自然公園の管理・運営及び食堂経営の指定管理者となっている。糸島市からの管理委託費に加えて、食事処での飲食や自動販売機の収入、ヤマメ釣りやそうめん流し等の収入で、自然公園の運営費や周辺の河川や道路の環境整備にかかる費用を捻出している。

白糸の滝に新しい価値を創出しようと、2011年度より「白糸の滝1・2・3夢プロジェクト」がスタートした。プロジェクトは以下の3ステップから成り、最終的には白糸の滝を様々なタイプの小水力発電に触れることが出来る小水力エコパークにすること、そのことで新たな価値を創出し、白糸行政区そのものの活性化に繋げることを目的としたプロジェクトである。本論が対象とするのは、ステップ2である。

<sup>6)</sup>「白糸の滝1・2・3夢プロジェクト」の全体像や計画形成のプロセスについては、藤本・安永ほか（2012）に詳しい。また、白糸行政区を対象事例としたコミュニティ政策形成における糸島市と九州大学の果たした役割については、渡辺・藤本・島谷（2013）を参照のこと。

- ・ステップ1（終了）：1998年（平成10）に観光用施設として建設され、6年前から休止している水車を再生し発電する。学生が手づくりした超小型水力発電機〈みどりくん〉を設置し、小水力発電の仕組みを多くの人に知ってもらう。
- ・ステップ2：滝下の落差約30mを活用し、小水力発電所を設置する。年間7万kW（電気代140万円）を使用しているふれあいの里の休憩所であるレストハウス〈四季の茶屋〉に電力を供給する（本稿の研究対象）。
- ・ステップ3：滝から白糸集落までの落差約100mを活用し、32戸の集落への電力の供給、または売電のための小水力発電施設を設置する。

図16 白糸の滝の位置（福岡県糸島市）



資料：筆者作成。

## 2. ステップ2の発電計画

図17はステップ2の白糸の滝小水力発電所建設の関係者を図にまとめたものである。土木工事（蔵持工業・福岡県糸島市）、発電機5kW（株明和製作所・福岡県糸島市）、ペルトン水車の設計・製造及び現場への納入（株中山鉄工所・佐賀県武雄市）を、北部九州・地場の中小企業が担っていることが特徴である。

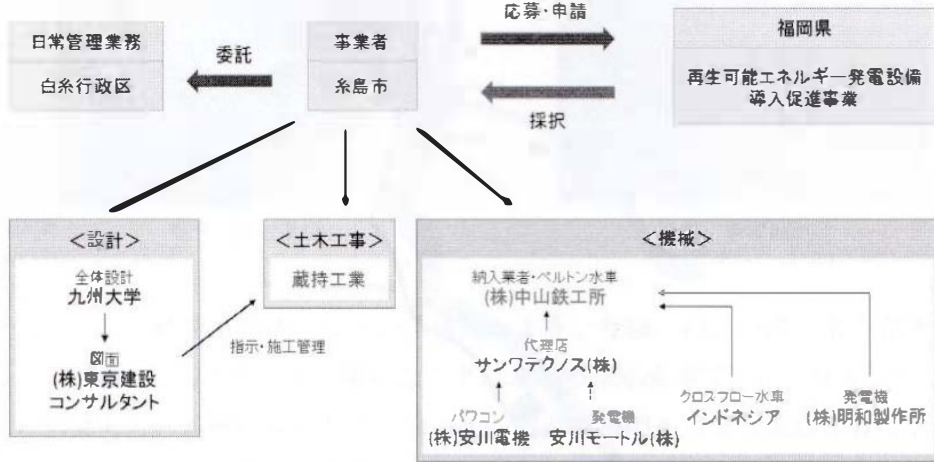
表7は発電計画をまとめたものである。今回の事業では水車を二台設置することにした。その理由は、(1) メンテナンス時の対応と流量変動時の発電量調整、(2) 学習の場としての役割の二点である。ペルトン水車とクロスフロー水車<sup>7)</sup>の二台を同時に稼働させ、合計で15kWを発電する計画である。

図18は発電施設の概要を示したものである。川の左岸側に設置された取水口から取り込まれた水は、全長150mの導水管を通り、発電小屋に流入していく。取水口はゴミが詰まらないようにグレーチングと金網で蓋をして落ち葉や小石、枝などを取り除いている。導水管は直径300mmのVU管を用いており、外部衝撃に強く維持管理を簡単にするためU字溝に通した。水車小屋の中では導水管が二つに枝分かれし、ペルトン水車とクロスフロー水車にそれぞれ水が流れ込む仕組みとなっている（図19）。

<sup>7)</sup> 適正価格、適正納期、適正技術での発電所設置を目指すため、クロスフロー水車はインドネシアから輸入された。本プロジェクトに合わせてインドネシアの小水力ネットワークとの連携関係を構築し、今後とも継続的に輸入・供給出来る商ルートを構築した。インドネシアの小水力ネットワークについては、藤本・島谷（2014a）、藤本・島谷（2014b）に詳しい。

図17 白糸の滝発電事業組織関係図

平成24年度 白糸の滝発電所建設事業



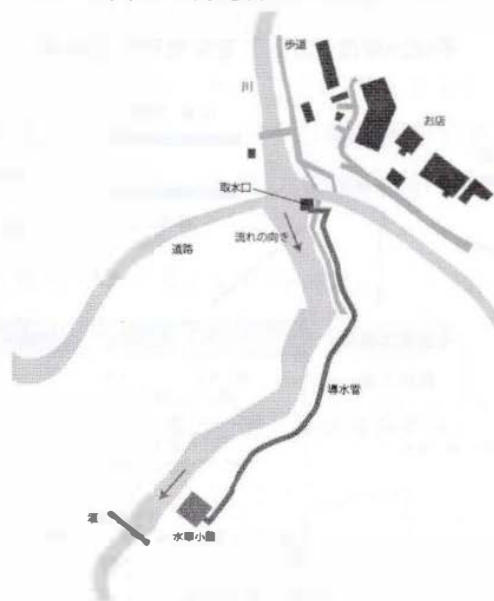
資料：筆者作成。

表7 ステップ2の発電計画

設計 (計画)	ペルトン水車	クロスフロー水車
常時発電量	9.6kW	5.6kW
流量	50L/s	30L/s
有効落差	30.3m	30.3m
水車効率	70%	70%
発電機	安川モートル(株) IPM モータ	(株)明和製作所 アウターローター発電機
発電機効率	92.5%	90%
総合効率	65%	63%

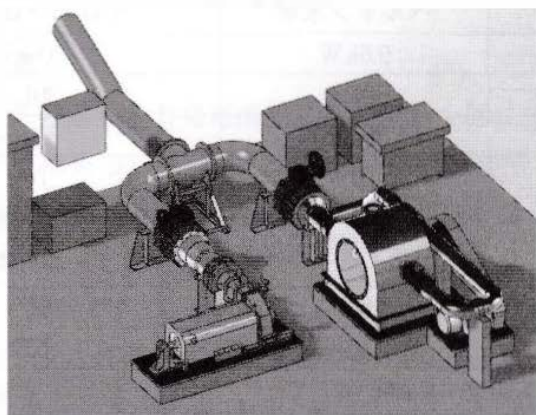
資料：IPMモータは安川モートル(株)へのヒアリング (2014年2月12日実施)、アウターローター発電機は(株)明和製作所へのヒアリング (2014年2月10日実施) をもとに筆者作成。

図18 発電施設の位置



資料：筆者作成。

図19 水車小屋の内部構造

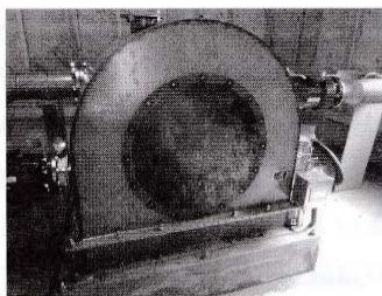


資料：(株)中山鉄工所より提供。

### 3. ペルトン水車の製造と設置、コストの検証

第I章から第III章で設計・実験・検証を行ったペルトン水車を、白糸の滝の設計流量と落差にあわせて再度設計した。第I章で示した計算方法により再設計を行ったところ、最適なPCDは333mmという結果が得られたことから少し大きく見積もってPCD350mmで設計した。現場に導入するペルトン水車のバケットは、耐久性の観点からアルミで鋳造することになった。コスト低減の工夫として、3Dプリンタでバケットを印刷し、それを金型に代用してバケットの鋳造を行った。(株)中山鉄工所が、最終的なペルトン水車全体のデザインを行い製造し、発電所内の設計と設置を担当した(図20、21)。

図20 ベルトン水車



資料：筆者撮影。

図21 水車小屋



資料：筆者撮影。

最後にコスト（納期と価格）について検証しよう。今回、白糸の滝の水力発電施設設置において、金型に3Dプリンタを用いたこと、地域の中小企業で設計・製造したことから、コストと納期両方の短縮に成功した。表8は、白糸の滝の水力発電施設建設にかかった費用及び納期を、日本を代表する水車メーカー三社に同条件の水力発電施設を建設する費用と納期の見積もりをヒアリングした結果をまとめたものである。コストと納期の遜減に成功していることがわかる。小水力発電施設は2014年4月から試験的な運行を開始しており、技術的な検証及び評価をこれから行っていく予定である。

表8 白糸の滝の小水力発電施設建設費と納期の見積もり<sup>8)</sup>

	白糸プロジェクト		A社	B社	C社
水車 (15kW)	ベルトン (10kW)	320万円	5,000万円	1,900万円	1,200万円
	クロスフロー (最大出力11kW、5kW の発電機で運用)	160万円			
発電機	480万円		/	1,300万円	80万円
制御盤					
配線工事 (水車小屋内)	160万円		/	/	1,220万円
合計	1,120万円		5,000万円以上	3,200万円以上	2,500万円
納期	7ヶ月		15～20ヶ月	15～20ヶ月	～12ヶ月

資料：各水車メーカーへのヒアリング（2014年3月14日実施）をもとに筆者作成。

<sup>8)</sup> 水力発電施設（水車小屋内）の建設費のみについてまとめたものであり、土木工事や設計費は含まれていないことに注意願いたい。

## おわりに

本研究の目的は、我が国における小水力発電の技術再生を進める端緒を拓くための試みとして、小水力発電用ペルトン水車に関する知識と技術、ノウハウを再構成し、地域の中小企業と協力しながら、技術再生の実践に取り組んだ結果を報告し、成果を共有することであった。

本稿で明らかにしたことは、以下4点にまとめられる。

1. ペルトン水車のバケットの設計に必要な知識と技術、ノウハウを獲得し共有。
2. 3Dプリンタの研究開発場面における有効性：3Dプリンタを活用することで、造形に対する費用と時間の削減に成功し、さらに、流水実験にて性能・効果を確認。
3. 技術移転に成功：筆者の設計方法で作られたバケットの発電能力を証明。
4. 技術再生に一先ず成功：白糸の滝小水力発電所の建設に成功。地域の中小企業と連携・協同することで、地域企業に技術とノウハウが蓄積。費用や時間の削減にも成功。

地域づくりのための小水力発電の導入は、(1) 地域主体形成、(2) 事業主体形成、(3) 適正技術の3パートから成ることは冒頭で述べた通りである。本稿は(3)について、ペルトン水車のバケットに関する適正技術研究を行ってきた。最後に、(3)の論点について、今後取り組む課題群を提示する。

- (1) 【ペルトン水車の技術移転・技術再生についての研究】<sup>9)</sup>：本稿では十分に検討出来なかったが、実験室実験及び白糸の滝発電所の導入事例の検証から、ノズルの形状が発電効率に少なくない影響を与えることが分かった。発電効率を上げるためにはノズルを改良する必要がある。Jeremy (2000) のマニュアルについて、ノズルに関する記述を再度読み込みながら検証し、流量の変動に合わせて噴射流の直径を変えられる可変ノズルについても検討していきたい。また、ペルトン水車を縦軸に設置することで水の流れをよりスムーズにでき、発電効率を上げ、水車への負荷を軽減できるという指摘もある<sup>10)</sup>。今後検討していきたい。
- (2) 【システム化の適正技術研究：水車・発電機・制御のシステム化の研究】：白糸の滝への導入を通じて、機器のマッチングに関する適正技術研究の重要性を痛感した。小水力発電所内は、管路設計や排水に関する土木技術、水車に関する機械技術、発電機に関する電気技術、電気制御に関する電力システム技術等、スケールは小規模でも複合的・総合的な技術力が求められる。システム化についての適正技術研究を

<sup>9)</sup> 本稿では日本の自然条件と残されている有望地点に適合的なタイプとしてペルトンを取り上げたが、もちろん他のタイプの水車についての技術再生研究も行われると良い。とりわけ、プロペラ水車等低落差用の水力発電技術についての研究が必要である。

<sup>10)</sup> 茨城大学・小林久教授へのヒアリング (2014年5月31日実施)。

進めつつ、総合的な技術者を地域の中小企業に育てていくことが重要である。

- (3) 【小水力発電所建設に特化した土木工事に関する適正技術研究】：白糸の滝小水力発電所の圧力管は、遊歩道の整備も兼ねて設計されたために、地形に沿って何カ所も折れ曲がる配管となった。圧力管内にエアポケットが発生しやすい構造となってしまったため、白糸の滝ではエア抜きを設置する場所を検討していく等の構造変更を検討していく必要が生じている。取水から導水までのレイアウト、デザインについて大規模な水力発電とは異なる技術が要請されるため、小水力に特化した土木工事の適正技術研究を行い、知識とノウハウを蓄積していく必要がある。搬入経路や搬入の方法についてもノウハウが必要である。小水力発電施設を建設するような溪流河川は建設用道路が狭く、白糸の滝小水力発電所建設中も大型の工事用機械の通行が困難で、搬入に時間を要した。設計と施工管理双方についての研究の蓄積が待たれる。

## 参考文献

- 一般財団法人 新エネルギー財団 (2013)、「平成24年度 中小水力開発促進指導事業基礎調査(水力開発技術情報収集調査) 新技術調査報告」, <[http://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2013fy/E002874.pdf](http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E002874.pdf)>, 2014年7月31日最終アクセス。
- 半山直樹 (2007)、『よくわかる3次元CADシステムSolidWorks入門』日刊工業新聞社。
- 小林久 (2010)、「小水力発電の可能性——温暖化・エネルギー・地域再生」『世界』(2010年1月号), 104-114頁。
- (2013)、「コミュニティ・エネルギーに挑む農山村——小水力発電を中心に」(室田武・倉阪秀史・小林久・島谷幸宏・山下輝和・藤本稜彦・三浦秀一・諸富徹『コミュニティ・エネルギー——小水力発電、森林バイオマスを中心に』農山漁村文化協会), 125-175頁。
- JST社会技術研究開発センター編、小林久・戸川裕昭・堀尾正朝監修 (2010)、『小水力発電を地域の力で』公人の友社。
- 資源エネルギー庁 (2014)、『New Release 再エネ設備認定状況(平成26年6月17日)』, <[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new\\_saiene/kaitori/index.html#setsubi](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new_saiene/kaitori/index.html#setsubi)>, 2014年7月28日最終アクセス。
- 島谷幸宏・山下輝和・藤本稜彦 (2013)、「中山間地域における小水力発電による地域再生の可能性——宮崎県五ヶ瀬町の事例から」(室田武・倉阪秀史・小林久・島谷幸宏・山下輝和・藤本稜彦・三浦秀一・諸富徹『コミュニティ・エネルギー——小水力発電、森林バイオマスを中心に』農山漁村文化協会), 177-208頁。
- 内閣官房・国家戦略室(2012)、「選択肢に関する中間的整理(案)(平成24年6月8日) エネルギー・環境会議」, <[http://www.env.go.jp/council/06earth/y060-109/ref07\\_1.pdf](http://www.env.go.jp/council/06earth/y060-109/ref07_1.pdf)>, 2014年9月17日最終アクセス。
- 藤本稜彦 (2014)、『『自然エネルギー社会企業』の構想——『協同組合方式』への注目』『協同組合研究』第33号(2), 3-9頁。



- 藤本稜彦・島谷幸宏 (2014a)、「日本の小水力発電をめぐる現在と課題」『協同の発見』第254号、64-69頁。
- (2014b)、「インドネシアの水力ポテンシャルと技術ネットワーク」『協同の発見』第257号、48-54頁。
- 藤本稜彦・安永文香・山下輝和・青木一良・渡辺孝司 (2012)、「地域主体による小水力発電導入の構想と計画——福岡県糸島市における『白糸の滝・小水力エコパーク』構想を事例に」『小水力エネルギー論文集』第1号、63-70頁。
- 諸富徹 (2013)、「『エネルギー自治』による地方自治の涵養——長野県飯田市の事例を踏まえて」、『地方自治』第786号、2-29頁。
- 山下輝和・藤本稜彦・石井勇・島谷幸宏 (2012)、「小水力エネルギーを起点とした地域住民の主体生成過程に関する一考察」『河川技術論文集』第18号、565-568頁。
- 渡辺孝司・藤本稜彦・島谷幸宏 (2013)、「大学と地方自治体の連携研究による地域コミュニティの活性化——福岡県糸島市白糸行政区を事例として」『コミュニティ政策』第11号、145-157頁。
- Jeremy Thake (2000). *The Micro-Hydro Pelton Turbine Manual : Design, Manufacture and Installation for Small-Scale Hydropower*, Practical Action Publishing.

## 付記

本研究は、2013年度NEDO「新エネルギーベンチャー技術革新事業」(フェーズB)の研究課題「小水力発電機の技術開発及びその他小型発電との連携による小型EV充電システムの構築」の成果の一部です。また、(株)中山鉄工所さまには、高木がインターンとして技術研修を受ける機会を頂きました(高木美奈・2013年8月5～30日)。特に、代表取締役社長・中山弘志さま、担当の渡邊美信さまには大変お世話になりました。ここに記して感謝致します。