

エチオピア農村部におけるマイクロ水力発電の開発とその普及に関する一考察

M2019SC011 志村拓海

指導教員：藤井勝之

1 はじめに

20 世紀、電力は世界中に普及し、多くの人々が利用できるようになった。一方で、サハラ以南アフリカの農村部では、政治・経済・地理的状况などによって電化率は圧倒的に低く押しとどめられている。こうしたなかで、本研究はエチオピア農村部を対象として、環境を破壊しない再生可能エネルギーを以て、現地の人々が自作、修理可能な雨水を利用したマイクロ水力発電の開発に取り組むという、持続可能な開発目標として立てる。そこでは、現地の環境、気候、生活実態に適した水車の設計を行う。また、現地の人々が水車の構造や仕組み、発電に関する知識を習得し、自らでマイクロ水力発電機を管理できるよう、マイクロ水力発電の普及案としてマニュアルを考案する。そこから、現地の人々の生活と連動、循環する知と技術の構築を目指す。

2 研究背景

電力の普及が世界中で進んでいく中、サハラ以南の農村部においては、不衛生や低い識字率、資本の不足、貧困が起きていた。貧困率と電化率には深い関係があると考え、着目した。世界各地域とサハラ以南アフリカ地域の貧困率を図 1 で示している。また、同様に図 2 に示す通り電化率も貧困率同様の世界各地域との格差が生まれていた。ここで、SSA(Sub-Saharan Africa) はサハラ以南地域のことであり、JICA によれば、電力供給がない

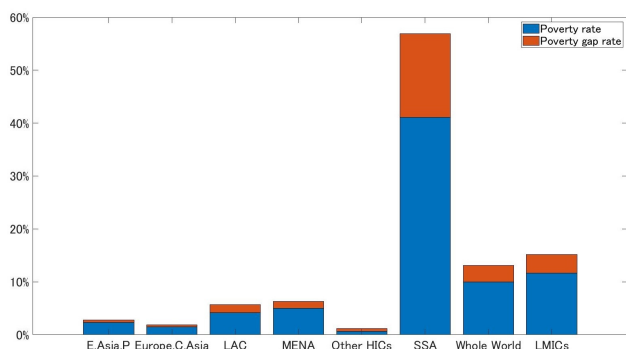


図 1 世界各地域の貧困率 [1]

人口の割合がエチオピアでは 70%とエチオピア近隣諸国に比べて高く、さらにはサハラ以南アフリカが世界各国の未電化率の半分以上を占めている。また今回の研究対象であるエチオピアの農村部では電化率が 19%と、都市部の電化率 71%に対して低くなっている。その解決のための課題として、エチオピア農村部を対象として、環境を破壊しないエネルギーとして再生可能エネルギーを活用する発電を研究課題とする。

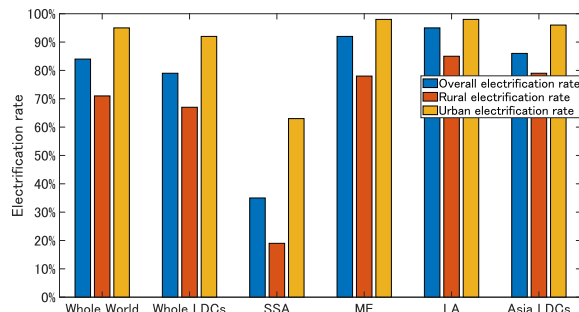


図 2 世界各地域の電化率 [2]

3 アプローチ

サハラ以南アフリカ地域からエチオピア農村部を選出する理由として、サハラ以南アフリカ地域の中でも近隣諸国と比べてエチオピアは特に未電化率が高いことが理由として挙げられる。JICA によると、エチオピア近隣諸国のほとんどが未電化率 50%以下であることにに対し、エチオピアは 7 割に達して、その現状がよくわかる [3]。また、再生可能エネルギー発電を行うにあたり、現地に適した発電方法を選ばなければならない。この時、各再生可能エネルギーの発電機関に関する費用を表したグラフが図 3 のようになる。この中では水力発電が最も低コストであると述べることができ、現地の人々が発電機構を自作する際のことを考慮すると、低コストの発電が望ましい。エチオピアには乾季、小雨季、大雨季が存在しており、乾季では太陽光発電を活用しているが、本研究の発電方法は雨季に向けて研究するものである。また、研究対象であるエチオピアのジンマ県農村部の年間降水量は 2008, 2009, 2011-2013 年の平均値が 1547.64mm/年と、日本の年間降水量 1668mm/年と比べてもほとんど変わらず高いと言える為、雨水を利用したマイクロ水力発電の選出への後押しとなっていると言える [4]。

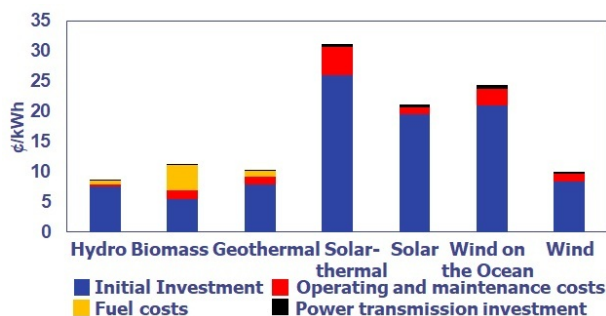


図 3 再生可能エネルギーの費用 [5]

4 技術課題

マイクロ水力発電においては、水車を活用する。水車に組み込まれる発電機を回転させるとファラデーの電磁誘導により、ハブダイナモにおいては交流電圧が発生し、直流モーターにおいては直流電圧が発生する。発生した電圧を必要に応じて電子回路に入力し、バッテリーへと充電する。これらより、エチオピアの気温や湿度、気候に合った材質の選択を行った水車の適した型の選定、それぞれの発電機に適した電子回路の設計、電子回路にて整流した直流電流を日常に使うための電気を貯めるバッテリーの選定、以上の3つが必要となってくる。今回は、雨水で回転させることができる水車の型の考案の為に、AcuSolveという流体シミュレーションソフトウェアを活用し、理論的観点で水車の型の考察を行うことが狙いである。本研究では、水車の型の考察にのみ専念する。また、マイクロ水力発電の普及案のマニュアルを考案するにあたり、エチオピアの母国語であるアムハラ語や現地の人々の識字率を考慮する必要がある。

5 シミュレーション概要

上記のAcuSolveを使ってシミュレーションを行い、4種の水車の性能評価を行う。一定時間水車に放水を行い、それぞれの水車が想定された状況に対し、どの程度回転するかをシミュレーションする。シミュレーションによって得られた結果を基に決定された型の水車を作製し、発電実験に繋げる。

5.1 シミュレーション概要図

シミュレーションを行う前に、水車の実装想定図からシミュレーションに起用するモデルを考案する。その簡易的な絵が図4となる。シミュレーションでは、シミュレー

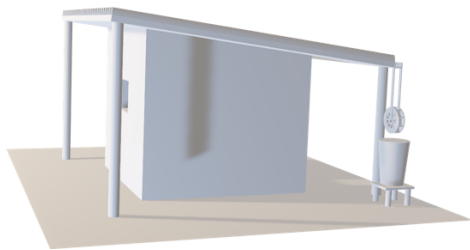


図4 マイクロ水力発電想定図

ション時間削減の為に余分なモデルを省く。水車、流体の流入口、流出口のみの流体に必要な要素から成る、密閉された簡易的な3Dモデルを使用する。簡易モデルは、雨水が屋根から雨樋に集まり、雨樋からパイプを通過して落下することで位置エネルギーを得るところを、重力により加速した雨水が一つの流体となって流入口から水車へと直接放水するようなモデルとなっている。続いて、簡易モデルの内部には水車をそれぞれ設置する。すべての水車の側面を $50 \times 50 \times \pi \text{mm}^2$ に揃えることで、水車の形状のみを比較できる。水車はそれぞれ以下のようになっ

ている。

5.2 上掛水車

先行研究より引用した、重力水車の中でも最も基本的な形の水車である。モデルは図5となっている。内部に発電機を格納できるように、水車の中心部を覆うことで中心部のモーターに水がかからないよう設計されている。また、中心部を覆った素材と水車の羽根を組み合わせることで水の受け皿を作り、水車の回転をやすくしている。だが、それらのおかげで素材を多く使い、水車自体の質量が大きくなりやすい。

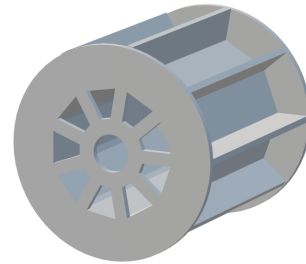


図5 上掛水車

5.3 オープンクロスフロー水車

オープンクロスフロー水車は、反動水車と衝動水車の両方の特性を持つ。水車の中心部分が空洞になっていることにより流水が羽根に二度当たるようになっており、上掛水車のような中心を流水が通らないような水車よりも流水の影響を受けやすい。ただ水車に搭載する発電機が水が掛からないように水車の外側に取り付ける必要がある。本研究でのこの水車は羽根が12枚、厚みは側面が直径 10cm^2 の円形という寸法に対し、 1mm となっている。

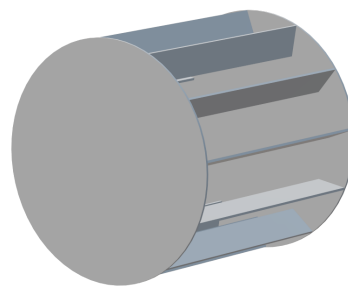


図6 オープンクロスフロー水車

5.4 ダリウス水車

ダリウス形水車はダリウス形風車が元になった水車である。水車の羽根が板状ではなく、水の流れに対して零形になっており、流体による揚力が発生する。中心が空洞になっている点はオープンクロスフロー水車と同じで、流水が二度羽根に当たりやすくなっている。羽根の形は曲線であり、忠実に作るのは困難であると思われる。

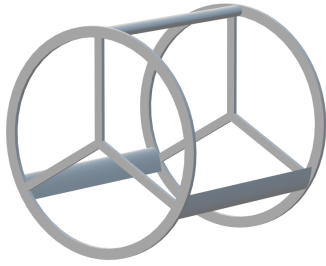


図 7 ダリウス水車

5.5 オープンクロスフロー揚力水車

オープンクロスフロー水車とダリウス形水車の特徴を掛け合わせて作成した水車．オープンクロスフロー水車の基本的なつくりと水車の羽根の枚数に加えて，羽根の形をダリウス形水車の揚力を生み出す雫型に変更した．

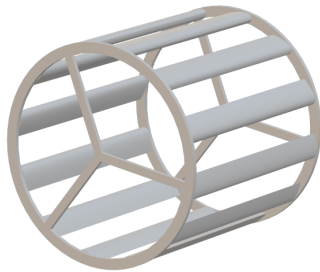


図 8 オープンクロスフロー揚力水車

6 シミュレーション条件

放水を行う際に，シミュレーションにおける流速を決定しなければならない．この流速は，水車へ衝突する直前の流速とする．ここで，屋根から雨樋へと流れる雨水は十分な量があると仮定し，また流体分子内部の密度は変化せず一定であると仮定する．最初に雨樋から落ちる際の流速の初速を次の二式で求める．

$$Q = DA\sqrt{2gh} \quad (1)$$

$$Q = vA \quad (2)$$

流量 Q [kg/s] を流出係数 D ，流体の断面積 A [m²/s]，雨樋の高さ h [m] で求めることにより，流速の初速が求まる．この時，流体の断面積 A は雨樋の排出口 A_0 [m²] と一致している為，既知である．流速の初速が求められたことにより，次のベルヌーイの式及び流体の質量保存則を使用してシミュレーションに必要な流速の値を求める．

$$\frac{1}{2}v_0^2 + \frac{p}{\rho} + gh = \text{constant} \quad (3)$$

$$Q = v_0A_0 = v_rA_r \quad (4)$$

断面積 A_r [m²] は雨樋から水車へと雨水である流体を放水した際の断面積であり， v_r [m/s] はその時の流速となる．式 4 は流体の質量保存の法則を表したものである．式

3 を式 4 に代入し，断面積を半径で表すことで A_r [m²] の算出に繋がり， v_r [m/s] の導出に繋がる．ここまでの計算によって，AcuSolve に起用する流速の値が求まる．よって，水車共通の設定は表 1 の様に表される．

表 1 水車の共通設定

水車側面面積	50×50 × πmm ²
水車羽根長	100mm
水車質量	0.100kg
タイムステップ	0.0180s
流入初速度	5.29m/s
流入初期面積	39.7×39.7mm ²
メッシュ値	8.00mm
終了時間	6.00s

7 シミュレーション結果とその評価

6 秒間のシミュレーション結果をアニメーションで作成し，結果を確認した．アニメーション時間は計算時間と同時間に調整したことでシミュレーションに即した結果を示すことができた．シミュレーション結果はアニメーションを目視で確認した．それぞれの結果は 2 のようになる．よって，作製する水車は一番結果が優れていたオープンクロスフロー揚力水車に決定した．

表 2 シミュレーション結果

上掛水車	0.444 回
オープンクロスフロー水車	0.417 回
ダリウス水車	0.333 回
オープンクロスフロー揚力水車	0.458 回

8 実験

実験に使用する水車の素材には現地にも存在するペットボトルを使用した．使用したペットボトルは 500mL 容器のペットボトル 6 本である．エチオピア農村部には 500mL，1L，2L 容器のペットボトルが存在し，一番小型で扱いやすく，尚且つ他の容量のペットボトルよりも価格の安いペットボトルを選んだ．水車の羽根は，揚力を生み出す為に断面が雫型でなければならないが，雫型は均一でない曲率の断面となっている為，作製が困難である．雫型を疑似的に形成するべく，ペットボトルの側面を 10cm の長さで 0.8cm から 1.2cm の幅の長方形に揃え，長方形の板を五枚重ねて接着させることで作製した．水車の側面板もペットボトルで作製し，DC モーターを水車に取り付けることで完成とした．

8.1 水車の実験

エチオピアでは降水量が多い時には 20 分で 100L ほどの雨水がタンクに貯まる．そこで，100L/20 分を 500mL/6 秒に換算し，高さ 20cm に中心点が置かれた水車めがけて，約 2m ほどの高さから 500mL/6 秒の水を流すという



図 9 作製した水車

実験を 10 回行った。この時、オープンクロスフロー揚力水車の DC モーターに 10 の抵抗を接続し、抵抗の両端の電圧も同時に測定した。実験結果の回転数平均値が 5.8 回なので、シミュレーション結果と比較すると大幅に優れた結果が出たことになる。電圧に関しては、最大電圧が 428mV となっているが、単三充電電池を使用するとして、公称されている充電電圧は 1.5V と、実用には程遠い。また、電圧の値も水車の回転具合によって瞬間的に何度も変化したため、電圧が安定しているとも言えなかった。これは水車及び DC モーターの回転数が足りず、DC モーターでは本研究のコンセプトに合っていないことが考えられる。

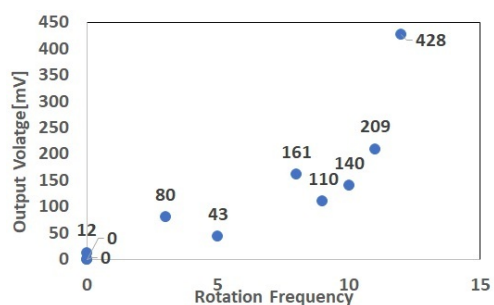


図 10 水車の回転数と発電電圧

9 マニュアル

本章ではシミュレーション・水車作製とは別に、マイクロ水力発電の普及案としてマニュアルを一例として提案し、考察する。マニュアルの必要性として、マイクロ水力発電の受け入れが現地の人々の文化に新たな文化を融合させることと同義であり、更に水車や発電機構を現地の人々に作製させると想定している為、水車作製・使用手法のみにとどまらないマニュアルが必要となる。マニュアルには発電原理・水車作製方法・使用方法を掲載する。知識のない非専門家でも水車の必要性を理解し、水車を自作する技術を習得させることのできる。発電原理を掲載する理由としては、本研究の目標の一つの循環する知と技術の構築を目指す為であり、発電原理のファラデーの電磁誘導の法則が主となる。また、エチオピアの成人の識字率は 35.1% [7] とおよそ三人に一人の割合であって高いとは言いがたい。よって、文章を多用せずに絵や写真を使用したマニュアルは受け入れられやすく理想的であると言える。

10 考察

エチオピア農村部における再生可能エネルギー発電の研究として、雨水の運用を基本としたマイクロ水力発電だが、設計・流体シミュレーションによる性能比較・その後実験によって確かめという基本的な流れに沿って行うものとした。水車設計に関しては先行研究を基に、現地の家屋の雨樋のサイズと現地の降水量を考慮することで凡その設計が可能である。その設計を基に 3D モデルによる流体シミュレーションも同様にを行い、水車の型の選定を終え、同時に選定の基準をある程度作り上げた。また、エチオピアに存在するペットボトルのみで水車を作製でき、その二つは当初の予定通りとなった。しかし、ペットボトル水車では実際に強度が安定しているか、十分に電力を確保できるかは確認できていない。ここでの十分な電力の定義は夜間 3 時間程度一つ明かりが確保できる電力である。また、実際に工作の専門知識がない人々が水車を作製できるかどうかは要検証である。また、水車に取り付ける、雨水で動かせる発電機がないことが現状の問題である。これの解決案としては、RPM が 120 程度の低速回転かつ雨水の自由落下でもトルクが小さい発電機を用意又は制作することだが、その発電機も現地に存在する素材で作製できることが望ましく、現地の人々に発電機を提供するのではなく文化を提供することに終始すべきである。

参考文献

- [1] “世界の貧困に関するデータ,” 世界銀行, <http://www.worldbank.org/ja/news/feature/2014/01/08/open-data-poverty>, Aug, 26, 2020.
- [2] “JICA によるアフリカ電力開発支援,” 独立行政法人国際協力機構 (JICA), https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/global_energy/pdf/003_04_00.pdf, Aug, 26, 2020.
- [3] 上石博人, “JICA によるアフリカ電力開発支援,” 独立行政法人国際協力機構 (JICA) 産業開発・公共政策部, http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/global_energy/pdf/003_04_00.pdf, Aug, 30, 2020.
- [4] “世界の年間降水量 国別ランキング・推移,” Global Note, <https://www.globalnote.jp/post-816.html>, Aug, 30, 2020.
- [5] リチャード・ムラー, “カリフォルニア大学バークレー校 特別講義エネルギー問題入門,” 株式会社楽工社, 2016 (, pp.185) .
- [6] 電気規格調査会, “JEC-TR-40008;2015 小規模水車,” 電気学会 (, pp.6-8) .
- [7] Servicio de Informacin sobre Discapacidad, “The Education For All Development Index,” http://sid.usal.es/idocs/F8/FDO22160/the_education.pdf, Aug, 30, 2020