

超小容量(ナノ級)水車発電装置の設計および性能試験

菊池 怜*・仲道 茂生**・中村 政美**
加賀 拓也***・松崎 晴美****・高橋 燦吉*****

The Design and Experiment of a Water Turbine Generator with Nano Class Capacity

Rei KIKUCHI*, Shigeo NAKAMICHI**, Masami NAKAMURA**,
Takuya KAGA***, Harumi MATSUZAKI****
and Sankichi TAKAHASHI*****

Abstract

In this paper we deal with the design and experiments of a water turbine generator with nano class capacity. The turbine designed develops 1 [kW] at 0.125 [m³/s] under an effective head of 2[m]. Characteristics of the test turbine were made clear. The relation for each speed ratio, between generating power and flow rate is represented by straight lines parallel to each other within the limits of our experiments. The generating power per flow rate of the tested runner with wing-shapes is larger than that with flat plates for reducing the cost. In other words we can get larger output power through lower pressure drag of vanes. The optimum speed ratios from 6 to 7 were used. And furthermore, the relation between generating power and revolution speed of the generator was measured.

Key words: Nano class water turbine, Generator, Natural energy, Water for irrigation

1. 緒 言

現在、地球環境問題の一つに、地球温暖化抑制のための二酸化炭素排出削減が重要課題として挙げられている。また、化石燃料資源の枯渇的状况から水力発電、太陽光発電等、自然エネルギーの利用が促進されている。一方、自然エネルギー分野で、従来の水力発電規模は一基、数十万 kW の大容量発電が多いが³、国内未利用発

電資源は既開発水力発電量とほぼ同量あると言われており、現在、新エネルギー財団で、これらの包蔵水力調査を開始する段階¹⁾にある。無駄に捨てられている農業用水等の水資源から電力を回収する超小容量(ナノ級)水力発電技術は現段階では未開発である。これが開発されれば地域の電力資源として活かし、地域産業の振興に資することが出来る。本学が立地する東北は多雪地域で、雪解け水を、「自然のダム」から年間を通じて得ることが出来る。また、水力発電は「昼夜」や、「なぎ」に関係なく、一定の安定した動力が得られる。この設備利用率の点において、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーと比較し、極めて有利である。さらに、低落差化、超小容量化することにより、全国で数十万ヶ所以上あると推計されている数 kW

平成 16 年 12 月 17 日受理

* 大学院工学研究科機械システム工学専攻博士前期課程・2 年

** 工作技術センター・工師

*** 大学院工学研究科機械システム工学専攻・名誉教授

**** 大学院工学研究科機械システム工学専攻・教授

***** 学長

のナノ水力発電装置の設置可能地点²⁾を活用し、回収する電力を増大させることが出来る。

上記仕様のナノ級発電技術は図1に示すように、従来の水車適用領域外にあり、現段階でも未開発であり、未踏技術であると言える。ナノ級水力発電についての明確な定義はないが、経済産業省関連では、20~50 [MW] が中水力、5~20 [MW] が小水力、1~5 [MW] がミニ水力、そして、1 [MW] 以下がマイクロ水力としている³⁾。東芝, EAML ENG. 他から数 kW 級の発電装置は販売されているが^{3,4)}、いずれも有効落差が 2 [m] 以上である。現在、電源開発 (株) と中川水力 (株) が、農業用水路への設置を視野に、落差約 2 [m]、流量 1.29~2.4 [m³/s]、最大出力 30 [kW] 級の発電設備実証試験を実施している⁵⁾。日本自然エネルギー (株) は、横浜市の地中にある上水道用送水管に、170 [kW] の発電機を設置し、運転を開始した⁵⁾。また、他にも高効率、低コストのマイクロ水力発電の研究開発が推進されている^{6,7)}。

本研究の目的は、農業用水路等で最も得られやすい有効落差 2 [m]、流量 0.25 [m³/s] 程度の小容量水力エネルギーを対象に、最大出力 1 [kW] を目標に超小容量水力発電装置の試作と性能評価を行うことである。学内にて試作水車の基本性能試験を行った後、農業用水路に設置し、自然流況下で実用性を検討する。なお、学



1) 流況概観



2) 水車設置予定地

図2 開発試作水車の設置予定地(秋田県西仙北郡)

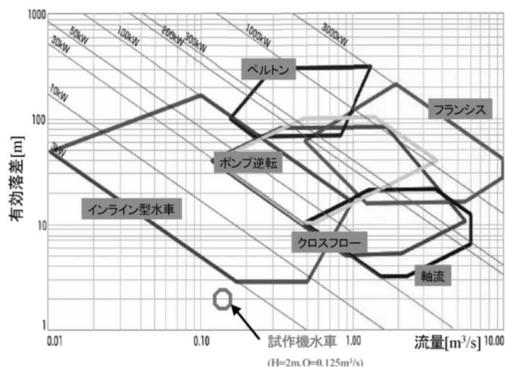


図1 研究開発技術の新規性と位置付け

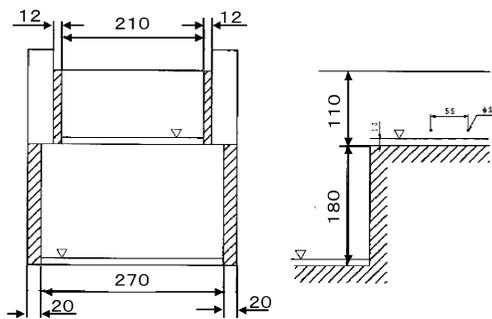


図3 水車設置個所採寸結果(単位 [mm])

内設置ポンプの最大流量 0.125 [m³/s] のため、試作水車はこの流量範囲で実験可能な規模とした。

本報では試作水車の基本性能試験結果について

て報告する。なお、図 2, 3⁸⁾ には、それぞれ、開発試作水車の設置予定地点（秋田県西仙北郡西仙北町内農業用水路）と採寸した結果を示す。

2. 試作水車一式の基本構成

2.1 基本構成

試作水車一式は、機構の単純化による生産コストの低減にも重点を置き、表 1 のようにナノ水車部、増速機構部と発電機部を組合せた構成とした。ナノ水車の回転は増速機構で増速し、発電機およびインバーターで交流 1 kW を発電させる構想とした。

表 1 試作水車の基本構成

構成	ナノ水車部	増速機構部	発電機部
各部の構成	ランナー、水槽	ベルト、歯車	直流発電機、インバーター

2.2 水車型式の選定

水車型式の選定は従来、下記の式(1)⁹⁾ より比速度を求め、その適用範囲を決めるが、ナノ水車では $N_s = 126 \sim 50$ 程度となり表 2 および図 1 では流量・落差は範囲外だが、比速度の値からフランシス型を採用した。

$$N_s = N \frac{\sqrt{Pt}}{H^3 \sqrt{H}} \dots\dots\dots (1)$$

N_s : 比速度 [m, kW, rpm], H : 有効落差 [m]
 N : 水車回転数 [rpm], Pt : 水車出力 [kW]

表 2 水車の型式と比速度

型式	比速度 N_s [m, kW, rpm]	特徴
ペルトン	8~25	高落差 小流量
フランシス	50~350	中落差 中流量
カプラン	200~900	低落差 大流量

表 3 比速度 N_s による水車型式選定

回転数 N [rpm]	300	200	150	120
有効落差 H [m]	2	2	2	2
出力 Pt [kW]	1	1	1	1
比速度 N_s [m, kW, rpm]	126	84	63	50
増速比	6	10	12	15
水車型式	フランシス型			

表 3 はナノ水車の目標仕様範囲に対して回転数を 120~300 [rpm] の範囲で変化させたときの比速度の値を示す。以上の事をまとめると、ナノ水車の仕様は以下のようになる。

表 4 ナノ水車の主な記号と設計値

ランナー名称	平板型	翼型
回転数 n [rpm]	200	200
有効落差 H [m]	2	2
軸端出力 Pt [kW]	1	1
水車効率 η_r [-]	0.8	0.8
発電効率 η_g [-]	0.85	0.85
流量 Q [m ³ /s]	0.125	0.125
ランナー角速度 ω [rad/s]	20.93	20.93
比速度 N_s [m, kW, rpm]	326	326
型式: フランシス水車		
流入側		
ランナ外径 D_i [m]	0.38	0.38
流入係数 C [-]	0.85	0.85
流入流速 V_i [m/s]	2.99	3.06
ランナー流入幅 B_i [m]	0.07	0.05
ランナー外径周速 V_{ω} [m/s]	4.12	4.12
ランナー流入角度 θ_i [°]	65	60
導管内速度 V_g [m/s]	1.3	1.3
流出側		
ランナー内径 D_o [m]	0.23	0.22
ランナー流出幅 B_o [m]	0.069	0.12
流出速度 V_o [m/s]	2.46	3.0
ランナー内径周速 U_o [m/s]	2.46	2.30
ランナー流出角度 θ_o [°]	45	45
流出端流速 V_{ω} [m/s]	4.31	4.37

型式：フランシス水車
 有効落差：2 [m]
 水車出力：1 [kW]
 流量：0.125 [m³/s]
 水車回転数：200 [rpm]
 回転方向：上方から見て、時計回転方向
 フランシス水車は広範囲の流量変化に対応し易いため、季節によって流量が増減する場合でも適用できる水車型式である。表4にはランナーの各種設計値を示す。

2.3 増速装置および発電機

ナノ水車の回転数は三段階で増速することとした。増速手段はベルト及び歯車とした。増速比は5～14の範囲で検討した。供試直流発電機の仕様は以下のようなものである。

電 圧：13.5 V
 回転数：2,500 [rpm]
 電 流：83 [A]

3. 試作水車一式の概要

図4には試作水車一式の外観を示すが、ナノ水車部、増速装置と発電機部に大別できる。

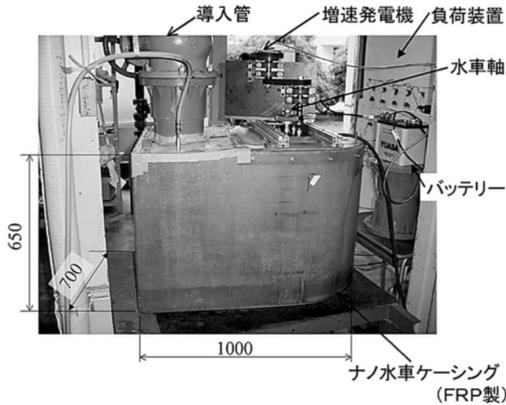


図4 ナノ水車外観

3.1 ナノ水車

ナノ水車部の組立図を図5に示す。

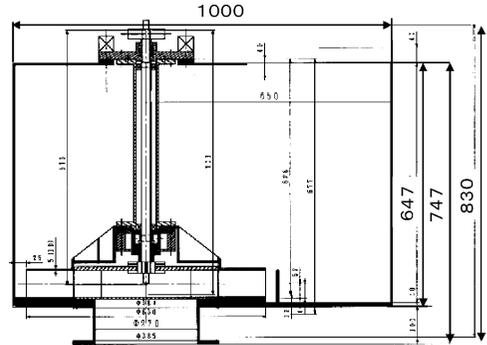


図5 ナノ水車部の組立図(単位 mm)

(a) ケーシング

ケーシングは高さ830 [mm]、長手方向に



図6 ナノ水車ガイドベーン (上) およびケーシング内部 (下)

1,000 [mm] であり、材質は耐久性・軽量化・コストの面から FRP を用いた。図 6 にはガイドベーンおよびケーシング内部を示す。ガイドベーンの中心部に、ランナーがセットされる。下図は設置されたランナーを示す。ガイドベーンカバーを設けることで、ランナーへの流れ込みをスムーズにした。

(b) ランナー

図 7 には供試ランナーの外観図を示すが、平板型、翼型(幅 47[mm])及び翼型(幅 70[mm])を供試した。材質はいずれも SUS である。平板型については軽量化、生産性の向上、コストダウンをねらったものである。それぞれの設計値を同図に示した。また、各々のブレード形状を図 8 に示す。

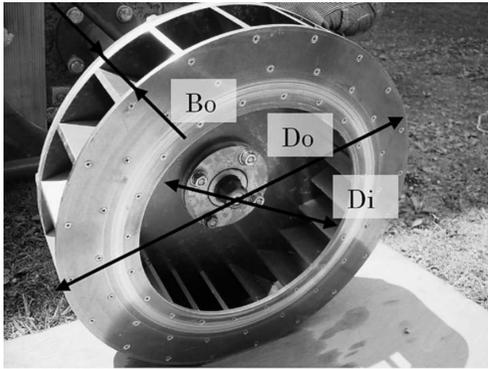
平 板 型		翼 型	
			
外径 D_o [mm]	380	380	
内径 D_i [mm]	235	235	
羽根数 [枚]	20	9	
幅 B_o [mm]	70	47	70

図 7 供試ランナーの外観と主要寸法

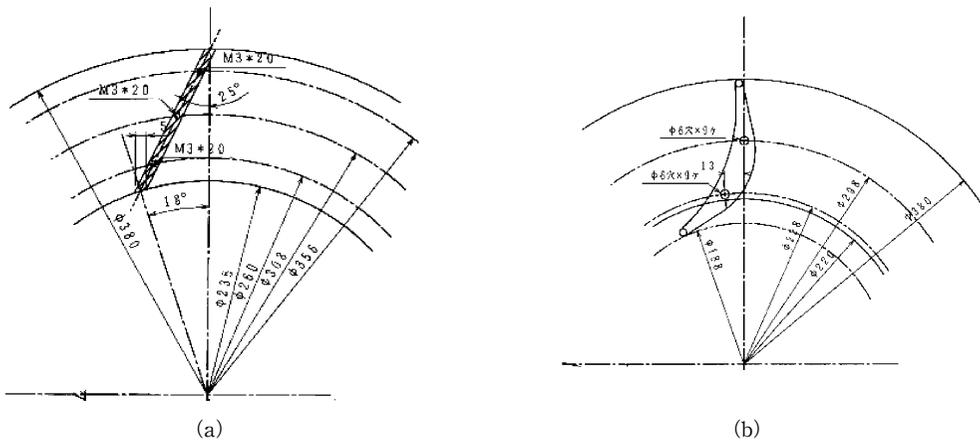


図 8 ブレード形状

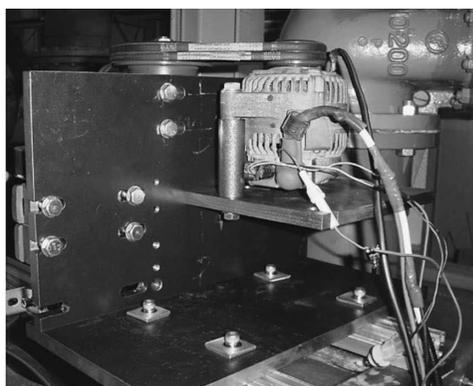
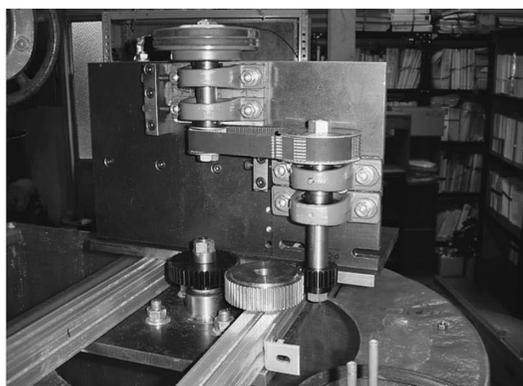


図9 増速装置(上)および発電機(下)の外観

3.2 増速装置および発電機

図9には増速装置および発電機を示す。歯車およびプーリーを三段用いてナノ水車の回転を増速する。各段の比率は、主として一段目1:2、二段目1:2、三段目1:2と設定した。

4. 実験装置および実験方法

4.1 実験装置

図10には、落下式回流水槽の全体図を示す。本設備は200[m³]の地下水槽⑤、ヘッドタンク④、循環ポンプ③、制御用バルブ②、及び供試水車⑥から構成され、一定ヘッドで、供試水

車へ給水出来、また、広い地下水槽で十分に脱気できることが特徴である。図中⑦は流量検知用壁面静圧取り出しタップである。試作水車水槽への導入管は、空気の巻き込みを防止するため、その先端を没水させている。また、試作水車下流にはドラフトチューブを接続し、所定落差が得られるようにした。供試水車への給水量はバルブ②で調整した。

発電機検定用での試験装置を図11に示す。これは駆動用モーター①、増速装置②および発電機③から構成されている。水車に代わり、モーター駆動とした。駆動された発電機による電力は12[V]自動車用バッテリーに蓄電される。図12は発電機から負荷装置に至る結線図を

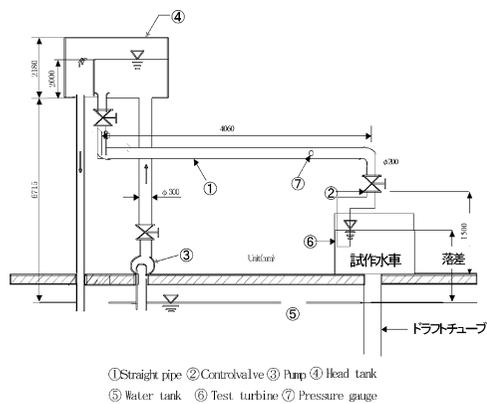
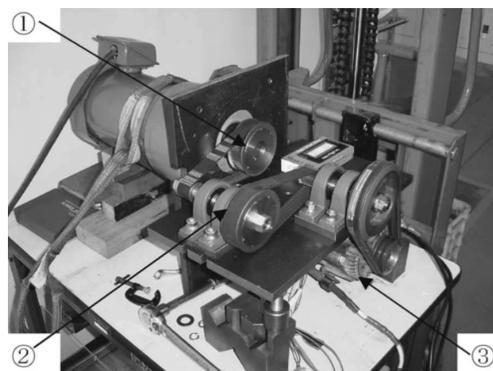


図10 落下式回流水槽



①モーター ②増速装置 ③発電機

図11 発電機単独での試験装置外観

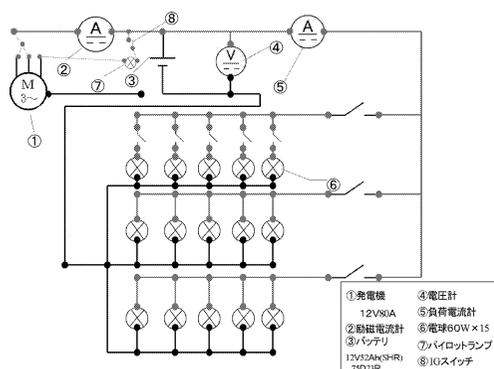


図12 発電機負荷装置結線図



図13 負荷装置外観

示す。これは発電機①，電流計(励磁)②，バッテリー③，電圧計(負荷)④，電流計(負荷)⑤，電球60[W]×15個⑥，パイロットランプ⑦及びイグニッションスイッチ⑧から構成される。発電量は負荷電力+(負荷電圧×励磁電流)で算出する。ランプは一個60[W]であり，一段60[W]×5個の三段式で，最大900[W]消費することが出来る。この電気回路はナノ水車発電試験の場合も同一である。図13は負荷装置の外観を示す。

4.2 実験方法

(1) 流量検定

発電試験に先立ち，流量検定特性を求めた。制御バルブの所定開度ごとに，容量460[l]のタンクが満水になる時間を計測することにより，流量を算出し，同時に，水銀マンオメータにより上流側水平管壁面静圧を計測した。制御用バルブ開度のキザミは，(全開×1/10)回転とした。上述のタンクへの切替操作により流量検定を行い，一開度につき最低三回測定し，その平均値を採用した。

(2) 発電機単独試験

発電機をモーターで駆動することにより，発電機の発生電力と回転数の関係を求めた。発生電力は点燈した電球の数×60[W]としたが，電力計からも算出した。

(3) ナノ水車発電試験

所定のランナーを組込んだナノ水車，所定増速比の増速装置および発電機からなる試作水車一式を，落下式回流水槽設備に連結し，発電試験を実施した。所定流量に対して，① ナノ水車軸回転数，② 発電機軸回転数，③ 有効落差，④ 水槽水位，⑤ 励磁電流，⑥ 負荷電流及び⑦ 出力電圧を計測した。①，②は赤外線回転計(ONO SOKKI FT-1500)で計測した。③は，水車水槽上流側底部と地下水槽水を，水銀U字管を介して連結することにより算出したものを静落差とし，これから吸出し管内速度水頭を差し引いたものを有効落差とした。現地での流量測定はナノ水車ケーシング内に設けた，静圧計測管(図6左図参照)を用いて，予め作成した検定曲線から算出する。学内実験での静落差は次式により，算出した。

$$H_s = \frac{12.6 \times (H_p - H_w)}{1000}$$

H_s : 静落差 [m]

H_p : U字管の貯水槽側の目盛り [mmHg]

H_w : U字管の水車水槽側の目盛り [mmHg]

また，増速比(=発電機軸回転数/ナノ水車軸回転数)は6~14の範囲とした。

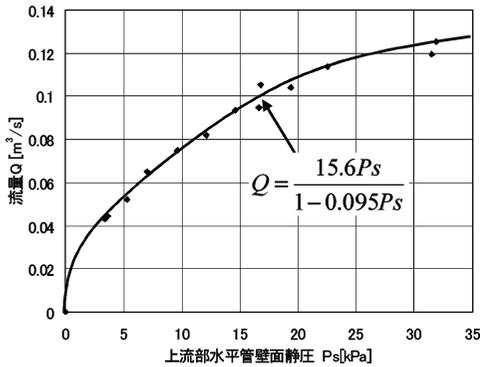


図14 流量－上流部水平管壁面静圧特性

5. 実験結果及び考察

5.1 流量検定試験

図14は流量と上流部水平管壁面静圧との関係を示す。なお、水平管壁面静圧は水銀マンメータから読み取る。図中、実線で表される流量検定曲線は次式で示すことが出来る。

$$Q = 15.6 \times P_s / (1 - 0.095 \times P_s)$$

Q : 流量 [m^3/s]

P_s : 上流部水平管壁面静圧 [kPa , gauge]

以後、流量は、同静圧を計測することにより、上式を用いて求めた。

5.2 発電機特性

表5は60[W]電球の点灯数、発電機回転数、消費電力をまとめたものである。図15には発電機の発電特性を示す。発生電力は回転数1,000[rpm]以上で、回転数上昇により増大する特性となる。発電機の仕様によれば、2,500[rpm]で、約1.1[kW]となるため、図中斜線の部分は熱による抵抗、並びにベルトスリップロスが考えられる。出力1[kW]を達成するためには、上述の熱抵抗並びにスリップロスを改善する必要がある。

表5 発電機特性

点灯数	60W ×1	60W ×2	60W ×4	60W ×5	60W ×6
回転数 [rpm]	1,037	1,082	1,203	1,270	1,383
消費電力 [W]	61	120	240	301	361
点灯数	60W ×7	60W ×9	60W ×10	60W ×11	60W ×12
回転数 [rpm]	1,480	1,645	1,866	2,152	2,417
消費電力 [W]	423	544	605	662	722

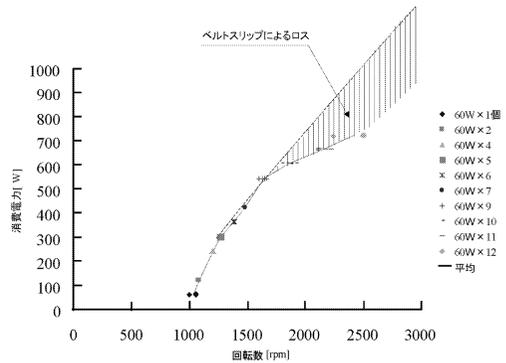


図15 発電機特性

5.3 ナノ水車発電試験

図16は平板型ランナーを供試した場合の、水車と発電機の回転数特性を示す。水車の場合は無負荷特性も併記した。静落差は約2[m]、増速比は8である。水車の回転数は流量増大にしたがって直線的に増加する。発電機回転数も同様だが、より急激に増加する。水車回転数を更に増加する工夫が必要である。

図17は平板型及び翼型ランナーを供試した場合で、静落差が1.85~2.14[m]のときの発電出力と流量の関係を示す。図中、実線が平板型ランナー、破線が翼型ランナーで、数値は増速比を示す。発電出力と流量の関係は、この範囲で、それぞれ平行な直線で表されるが、翼型ラ

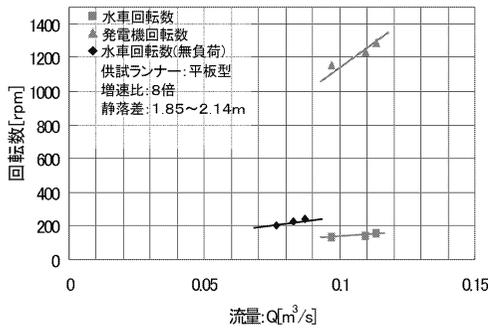


図 16 水車および発電機回転数特性

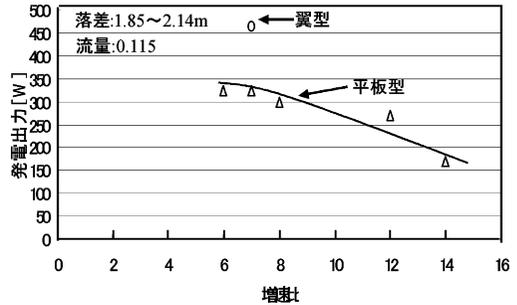


図 18 発電出力と増速比の関係

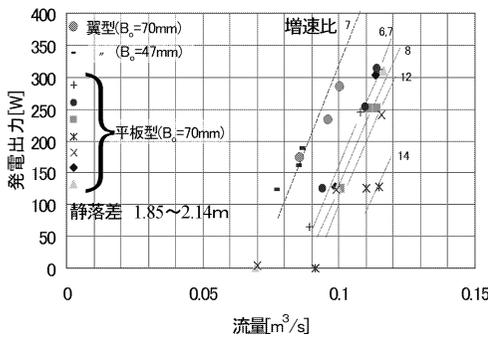


図 17 発電出力と流量の関係

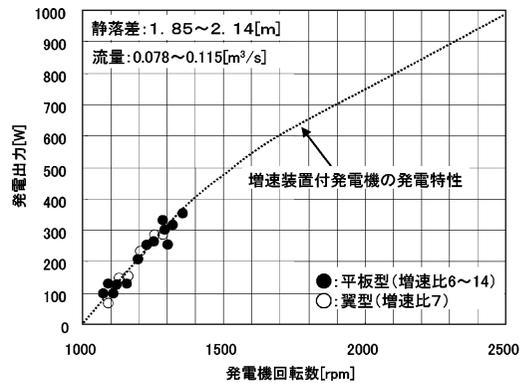


図 19 発電出力と発電機回転数の関係

ランナーの方が、より小さい流量で所定の発電出力を得ていることがわかる。翼型では、ランナー幅を大きく設計した翼型（幅 70 [mm]）の方がより大なる流量を得ることが出来、単位流量当たりの発電出力は、翼型（幅 47 [mm]）に比べ大きい。したがって、低圧損形状とすることで発電出力が増大することがわかる。

図 18 は平板型及び翼型ランナーを供試した場合で、流量 0.115 [m³/s] としたときの発電出力と増速比の関係を示す。平板型ランナーでは増速比 6~7 でマキシマムになる特性となる。

図 19 は平板型及び翼型ランナーを供試した場合の発電出力と発電機回転数の関係を示す。図中点線は先に求めた発電機の発電特性を示す。当然ながら、実験結果は全て発電特性曲線上に存在する。

6. 結 言

有効落差 2 [m]，流量 0.125 [m³/s]，出力 1 [kW] の試作水車を設計，製作し，その基本性能試験を実施し，以下の結論を得た。

- (1) 増速装置および発電機の発電特性を把握した。電力は発電機回転数 1,000 [rpm] 以上で発生する。1,500 [rpm] 以上での熱抵抗並びにベルトスリップロスを改善する必要がある。
- (2) 発電出力ー流量特性は本実験範囲で，平行な直線群で表される。翼型ランナーの流量当たりの発電量は，低コスト化をねらった平板型ランナーより大きい。これは，低圧損形状とすることで発電出力を増大出来ることを意味している。

(3) 増速装置の最適増速比は6~7である。
今後の課題は以下ようである。

- (1) 低圧損形状ランナーによる出力1[kW]の達成
- (2) ランナーの三次元形状化による流量増大化
- (3) 自然流況下での実用性の検討
- (4) 自然流況下での諸データの自動送受信化
- (5) 取水口でのゴミ除去対策

7. 謝 辞

本研究は平成15年度八戸工業大学プロジェクト研究助成金(平成16年度までの二年間)を得て実施されたものであり、関係各位に感謝の

意を表す。また、実験には平成16年度卒研究生、久光克、新岡篤、斎藤真伍の諸君の助力を得た、ここに記し謝意を表す。

8. 参考文献

- 1) 日刊工業新聞：2004-5-28
- 2) <http://www.ecology.or.jp/>
- 3) <http://www.hokoku-kogyo.co.jp/>
- 4) <http://www.eawl.co.jp/>
- 5) 日本農業新聞：2004-8-28
- 6) 稲垣 他：日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集，p.180 (2004)
- 7) 久村 他：同上，p.182 (2004)
- 8) 坂本清法，馬渡智一，松坂正紀：ナノ(超小容量)水力発電機の開発，平成15年度八戸工業大学工学部機械工学科卒業論文
- 9) 深栖俊一：水車の理論と構造，pp.53-114, 170-184 (1956)