

# ナノ級水車発電装置の高性能化に関する研究

—— 3次元翼ランナーの性能検討 ——

松崎 晴美\*・加賀 拓也\*\*・仲道 茂生\*\*\*  
中村 政美\*\*\*・玉川 邦夫\*\*\*・増田 陽一郎\*\*\*\*  
高橋 燦吉\*\*\*\*\*

## Development of a High Performance Water Turbine Generator with Nano Class Capacity

—— Study on the Performance of Water Turbine Generator  
with a Runner Consist of 3-dimensional Blades ——

Harumi MATSUZAKI\*, Takuya KAGA\*\*, Shigeo NAKAMICHI\*\*\*,  
Masami NAKAMURA\*\*\*, Kunio TAMAKAWA\*\*\*, Yoichiro MASUDA\*\*\*\*  
and Sankichi TAKAHASHI\*\*\*\*\*

### Abstract

In this paper, we deal with the design and experiments of a water turbine generator with a runner consist of 3-dimensional blades. Characteristics of the test turbine were made clear. It was clarified that critical flow rate increased to the limit capacity of our equipment,  $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ , by preparing the fluid inlet direction to the casing in order to smooth the flow into a runner. Also, it was showed that the water turbine power of about  $1.2 \text{ kW}$  might be obtained by considering the relation between the water turbine power per unit head and water turbine revolution speed per unit head.

**Keywords:** Nano class water turbine, Generator, Natural energy, 3-dimensional blades

### 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<sup>1)</sup>。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、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<sup>2)</sup>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新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

---

\* 大学院工学研究科機械システム工学専攻・教授  
\*\* 名誉教授  
\*\*\* 工作技術センター・工師  
\*\*\*\* 大学院工学研究科電気電子工学専攻・教授  
\*\*\*\*\* 学長

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のナノ水力発電装置の設置可能地点<sup>3)</sup>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<sup>3)</sup>。東芝、EAML ENG. 他から数kW級の発電装置は販売されているが<sup>4,5)</sup>、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[m<sup>3</sup>/s]、最大出力30[kW]級の発電設備実証試験を実施している<sup>6)</sup>。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<sup>6)</sup>。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<sup>7,8)</sup>。

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 [m<sup>3</sup>/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、学内設置ポンプの最大流量は0.125 [m<sup>3</sup>/s] 程度であるため、試作水車はこの流量範囲で実験可能な規模とした。

前報<sup>9)</sup>では、2次元翼ランナーを具備した試作水車の性能試験結果について報告した。本報では、3次元翼ランナー<sup>10)</sup>を具備した試作水車の基本性能試験結果について報告する。

## 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1kWを発電させる構想とした。

### 2.2 水車型式の選定

水車型式の選定は従来、下記の式(1)<sup>11)</sup>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 $N_s=50\sim126$ 程度となり表2および

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

表2 水車の型式と比速度

型 式	比速度 $N_s$ [rpm・kW・m]	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

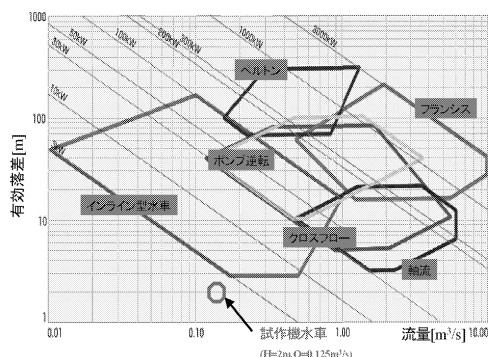


図1 研究開発技術の新規性と位置付け

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。

$$Ns = N \frac{\sqrt{Pt}}{H^4 \sqrt{H}} \quad (1)$$

$Ns$ : 比速度 [rpm・kW・m]

$H$ : 有効落差 [m]

$N$ : 水車回転数 [rpm],  $Pt$ : 水車出力 [kW]

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。

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 [m<sup>3</sup>/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3次元翼ランナーの各種設計値を、2次元翼<sup>9)</sup>と比較して示した。

### 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

表3 比速度  $Ns$  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 $Ns$ [rpm・kW・m]	126	84	63	50
増速比 $SR$	6	10	12	15
水車型式	フランシス型			

の仕様は以下のである。

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2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。

表4 ナノ水車の主な記号と設計値

ランナー名称	3次元	2次元
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 $\eta_r$ [—]	0.8	0.8
発電効率 $\eta_g$ [—]	0.85	0.85
流量 $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	0.125	0.125
ランナー角速度 $\omega$ [rad/s]	20.93	20.93
比速度 $Ns$ [rpm・kW・m]	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]	0.143	0.07
ランナー外径周速 $V_{co}$ [m/s]	4.12	4.12
ランナー流入角度 $\theta_i$ [°]	65	60
導入管内速度 $V_g$ [m/s]	1.3	1.3
流 出 側		
ランナー内径 $D_o$ [m]	0.35	0.235
ランナー流出幅 $B_o$ [m]	0.143	0.07
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 $\theta_o$ [°]	45	45
流出端流速 $V_o$ [m/s]	4.31	4.37



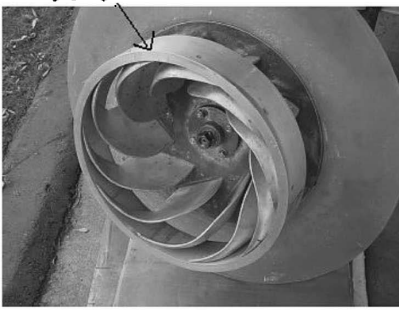
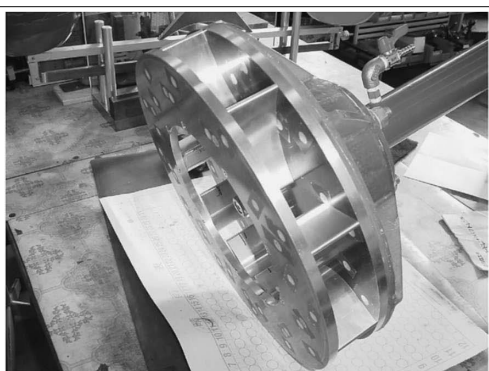
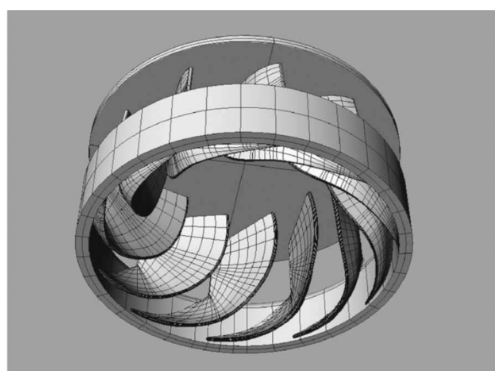
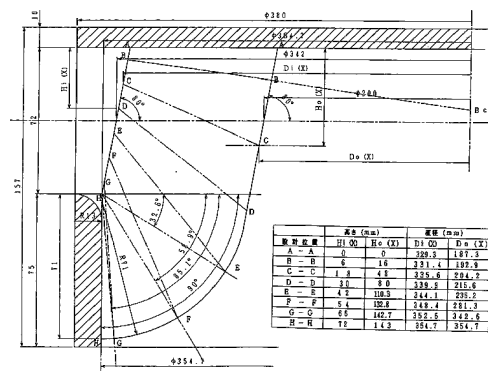
3次元翼型		2次元翼型	
			
外径 $D_o$ [mm]	380	380	
内径 $D_i$ [mm]	350	235	
羽根数 [枚]	10	9	
幅 $B_o$ [mm]	143(リング無の場合)	47	70

図5 供試ランナーの外観と主要寸法



(a)



(b)

図6 ブレード形状

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。

図9は発電機から負荷装置に至る結線図を示す。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

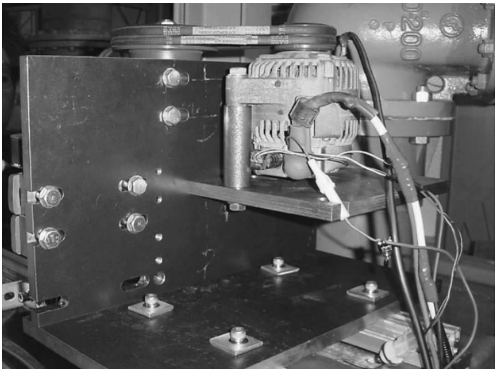
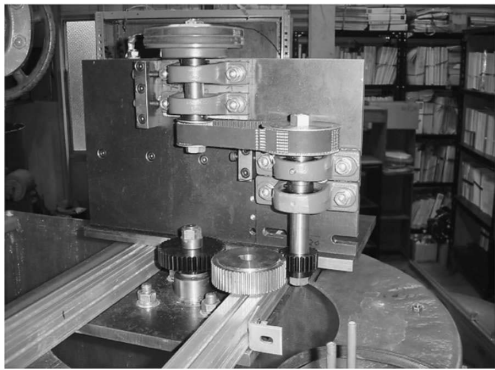


図 7 増速装置 (左) および発電機 (右) の外観

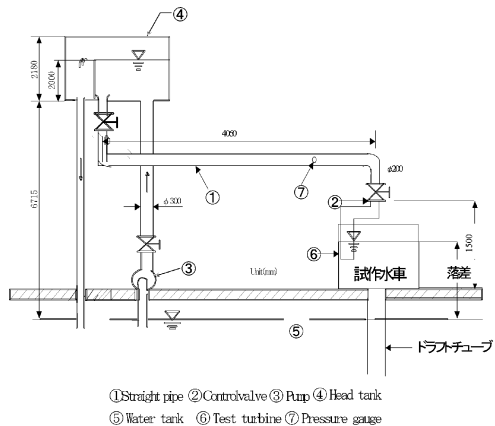


図 8 落下式回流水槽



図 10 負荷装置外観

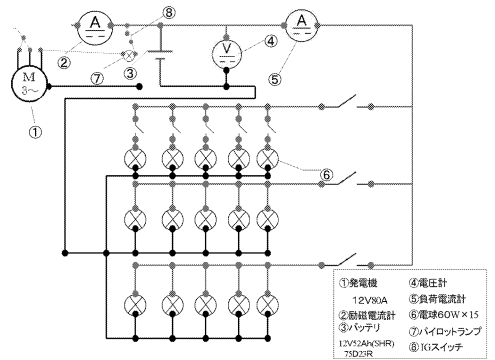


図 9 発電機負荷装置結線図

[W]×5 個の三段式で, 最大 900 [W] 消費することが出来る。図 10 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) 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 4 上図参照) 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。

$$H_s = \frac{12.6 \times (H_p - H_w)}{1000} \quad (2)$$

$H_s$ : 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  $SR$  (= 発電機軸回転数/ナノ水車軸回転数) は 6~14 の範囲とした。

## 5. 実験結果及び考察

### 5.1 流量検定試験

図 11 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

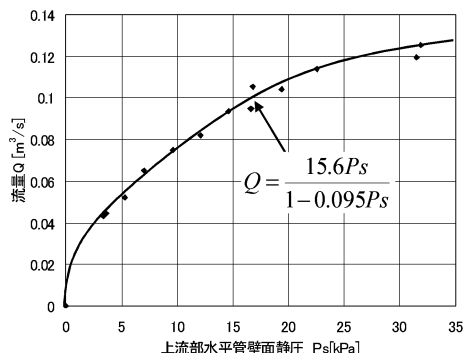


図 11 流量－上流部水平管壁面静圧特性

定曲線は次式で示すことが出来る。

$$Q = 15.6 \times P_s / (1 - 0.095 \times P_s) \quad (3)$$

$Q$ : 流量 [m³/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 ナノ水車発電試験

図 12 は水車発生動力  $L_t$  と  $Q$  の関係を、静落差  $H_s = 1.64 \sim 2.17$  m, 流入角  $\theta = 20^\circ$  及びリング有の場合について示した。 $L_t$  は  $Q$  に伴い増加し、 $Q = 0.13$  m³/s で 660 W を達成した。なお、ここでは、 $H_s$  が広範囲に変化しているため、 $L_t$ - $Q$  特性に及ぼす  $SR$  の影響は未検討である。

図 13 は、 $SR = 7$  としたときの  $L_t$  に及ぼす  $\theta$  の影響を示す。本水車ケーシング構造においては、ケーシング流入位置と流出位置が異なるため、図中に示す  $\theta$  の影響は大と考えられる。

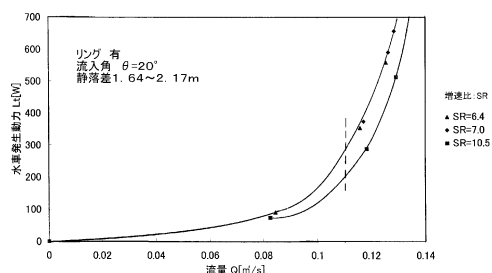


図 12  $L_t$  と  $Q$  の関係

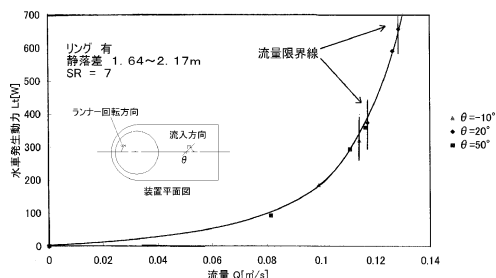


図 13  $L_t$  に及ぼす  $\theta$  の影響

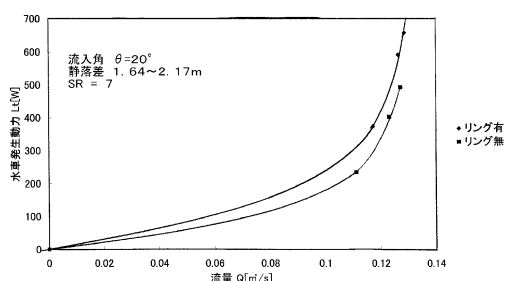


図14  $Lt$  に及ぼすリング有無の影響

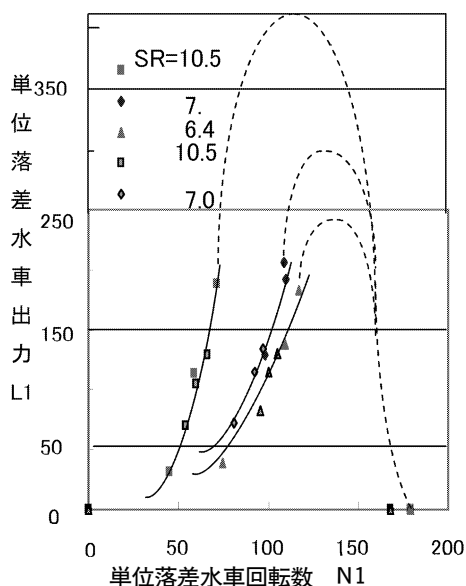


図15  $L1$  と  $N1$  の関係

$Lt$ - $Q$  特性は  $\theta$  に依存せず、1本の特性線で表すことができるが、流量限界線で示したように、 $\theta$ により、到達流量が異なる。 $\theta=20^\circ$ で、設備限界である  $Q=0.13 \text{ m}^3/\text{s}$  に到達する。

図14は、 $\theta=20^\circ$ 、 $SR=7$ の場合、 $Lt$ に及ぼすリング有無の影響を示す。リング有の方が性能が良い。

図15は、有効落差の影響を考慮し、 $\theta=20^\circ$ の場合の単位落差水車出力  $L1 (=Lt/H^{3/2})$  と単位落差水車回転数  $N1 (=N/H^{1/2})$  の関係を、 $SR$  をパラメータに示した。図中、実験点枠無がリング有、枠有がリング無である。無拘束速度

の値は横軸上の  $n1=175$  付近にある。一般に、 $L1$ - $N1$  特性は上に凸の曲線で表されるため<sup>12)</sup>、これに従って、線引きしたのが同図である。リングの有無によらず、 $SR$ により異なる曲線となり、 $SR=10.5$ の場合に最大出力が得られると考えられる。現時点では水量不足のために、ピーク付近の  $N1$  領域は実験未了であるが、予想ピーク値は、破線で示した特性から、約  $L1=400$  であり、これより、 $Lt$  値 ( $=L1 \times H^{3/2}$ ,  $H=2 \text{ m}$ ) で約  $1.1 \text{ kW}$  が得られることが期待できる。

## 6. 結 言

3次元翼ランナーを具備した試作水車を設計、製作し、その基本性能試験を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 水車発生動力  $660 \text{ W}$  を達成。
- (2) 流入角の適正化により ( $\theta=20^\circ$ )、流量の増大 ( $0.115 \Rightarrow 0.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ) が可能。 $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$  は落下式回流水槽設備の限界である。
- (3) リング有の方が高性能である。
- (4) 単位落差水車出力—単位落差水車回転数特性を把握した。この特性から、水車発生動力約  $1.1 \text{ kW}$  の出力が得られる可能性を示した。

今後の課題は以下である。

- (1) 落下式回流水槽設備の改造
- (2) 改造設備での流量増大確認実験
- (3) 発電機出力での確認
- (4) 2次元翼への流入角成果の反映

## 7. 謝 辞

本研究は独立行政法人 科学技術振興機構 JST サテライト岩手の委託研究にて実施されたものであり、関係各位に感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 朝日新聞：2005-10-30
- 2) 日刊工業新聞：2004-5-28
- 3) <http://www.ecology.or.jp/>
- 4) <http://www.hokoku-kogyo.co.jp/>
- 5) <http://www.eaml.co.jp/>
- 6) 日本農業新聞：2004-8-28
- 7) 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)
- 8) 久村 他：同上，P. 182 (2004)
- 9) 菊池 他：八戸工業大学紀要，第 24 巻，pp. 9 (2005)
- 10) 玉川 他：八戸工業大学紀要，to be published
- 11) 深栖俊一：水車の理論と構造，pp. 53-114, 170- 184 (1956)
- 12) 日本機械学会編：機械工学便覧，pp. 9-13 (1977)