

334
KU

分散型エネルギーとしての小水力の高効率利用
に関する基礎研究

平成10年度～平成12年度文部省科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）
（課題番号 10450074）研究成果報告書

横浜国立大学附属図書館



11068720

平成13年9月

研究代表者 黒川 淳一

（横浜国立大学大学院工学研究院教授）

寄贈者：黒川淳一

はしがき

本報告書は、平成 10 年度～平成 12 年度にかけて行った標記の研究成果についてまとめたものである。この研究に関して受けた研究助成金、研究課題、研究組織は次の通りである。また、次頁以降に研究成果の概要、研究発表の状況を記す。

助成元 平成 10 年度文部省科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）
 (課題番号 10450074)

研究課題名 分散型エネルギーとしての小水力の高効率利用に関する基礎研究

研究経費	平成 10 年度	7,400 千円
	平成 11 年度	3,400 千円
	平成 12 年度	3,200 千円
	合計	14,000 千円

研究組織 研究代表者：黒川 淳一（横浜国立大学大学院工学研究院・教授）
 研究分担者：松井 純（横浜国立大学大学院工学研究院・助教授）
 今村 博（横浜国立大学大学院工学研究院・助手）

研究成果の概要

本研究は小水力エネルギーの多目的利用法を提案し、各利用目的に最も適した高効率エネルギー回収システムおよび運転制御法を基礎的に研究することにより、小水力エネルギーの高効率利用法を総合的に提案しようとするものである。

平成10年度および11年度の研究・調査により、中～低落差で得られる小水力エネルギー資源の分散型エネルギーとしての高効率利用に対しては、構造がシンプルで安価なクロスフロー水車が適当と判断し、実験的研究を行った。種々の落差と流量の組み合わせに対する性能を総合的に検討し、さらに比較的未開な地での分散型エネルギーとしての利用を考慮して、構造の単純化を目指し、ガイドベーンを除去するなどして流路形状を簡素化して変落差・変流量特性について実験的に調べた。その結果、落差で無次元化された回転数に対して、各運転状態における効率は1本の包絡線上に乗り、最適な無次元回転数が存在することを見いだした。また、ランナ室内の流れ場を調べ、変流量・変落差における流動状態を解明し、更に多目的利用に応じて要求される電力や動力の質の点から、変落差・変流量時の発電特性に最も適合した運転制御法を検討するための発電システム全体の最適化を目指した。

平成12年度は、ガイドベーンを除去したことにより無負荷運転時に生じる無拘束速度について調べ、またランナ室への空気供給法を従来よりも簡素化して、ランナ軸付近から供給すると同時に、ランナ室をコンパクト化して、システムの効率向上を目指した。ランナ室の形状は数値計算を用いて最適形状を検討した。その結果、ランナ中心から空気を供給しコンパクト化されたランナ室を用いることにより、従来よりも最高効率で約1.3%、高回転数側では最大9%もの効率上昇を達成した。

更に、落差変動が大きいマイクロ水力資源の有効利用を目指して、汎用のインバータやコンバータを用いた安価で実用的な可変速マイクロ水力発電システムの開発を行った。分散型独立電源を想定した、同期発電機を用いた単独運転の場合と、かご型誘導発電機を用いて電力系統に連系する場合に分けて検討を行い、構築したシステムの有効性を実験により検証するとともに、簡素化に成功した低落差貫流水車の変落差特性を明らかにした。

以上の結果から、本研究により小水力エネルギー高効率利用のための新しいシステム構成が提案されその有効性が実証された。

研究発表

[1] 学会誌等

- (1) 趙 林虎、黒川 淳一、松井 純、今村 博、低落差貫流水車のマイクロ水力発電への適用（水車構造の簡素化と性能向上）、日本機械学会論文集（B編）、投稿中、2001.
- (2) 趙 林虎、黒川 淳一、松井 純、今村 博、塚本直史、大和昌一、可変マイクロ水力発電システムの実用化に関する研究、ターボ機械、投稿中、2001.

[2] 口頭発表

- (1) 趙 林虎、黒川 淳一、松井 純、今村 博、神戸秀方、「貫流水車のマイクロ水力発電への適用（変落差、変流量特性について）、日本機械学会 1999 年度年次大会講演会講演論文集（IV）、No.99-1、1999、pp.213-214.
- (2) 趙 林虎、黒川 淳一、松井 純、今村 博、貫流水車のマイクロ水力発電への適用（構造の簡素化、及び無拘束速度特性について）、日本機械学会東海支部第 50 期総会講演会講演論文集、No.013-1、2001、pp.377-378.
- (3) 趙 林虎、黒川 淳一、松井 純、今村 博、塚本直史、大和昌一、可変速マイクロ水力発電システムの実用化に関する研究、日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集（in CD-ROM）、No.01-3、2001.

[3] 出版物

該当出版物なし。

目次

1. 序言.....	1
1.1 研究背景および目的.....	1
1.2 研究目的.....	2
2. 低落差貫流水車のマイクロ水力発電への適用～水車構造の簡素化と性能向上～.....	4
2.1 緒言.....	4
2.2 主な記号.....	5
2.3 実験装置及び実験方法.....	6
2.3.1 実験装置.....	6
2.3.2 ノズル及びランナ.....	6
2.3.3 ランナ室と吸出し管.....	6
2.4 実験結果および考察.....	9
2.4.1 ガイドベーン除去後の性能.....	9
2.4.2 ランナ室コンパクト化の試み.....	10
2.4.3 ランナ内部への空気供給方法.....	10
2.4.4 ランナ室の最適形状.....	11
2.5 結言.....	20
参考文献.....	21
3. 可変マイクロ水力発電システムの実用化に関する研究.....	22
3.1 緒言.....	22
3.2 実験装置および方法.....	23
3.3 低落差貫流水車の変落差特性に関する実験結果.....	25
3.4 単独運転のマイクロ水力発電システムに関する実験結果.....	28
3.4.1 定速度システム.....	28
3.4.2 可変速システムの提案.....	28
3.4.2.1 水車・発電機回転速度の最適制御.....	29
3.4.2.2 可変速運転可能範囲.....	30
3.5 電力系統連系のマイクロ水力発電システムに関する実験結果.....	34
3.5.1 可変速運転による効率向上.....	34
3.5.2 システム有効性の検討.....	35

3.6 結言.....	41
参考文献.....	42
4. 結言.....	43
付属資料.....	45

1. 序言

1.1 研究背景および目的

我国のエネルギー資源の構成は、石油 58%、石炭 16%、LNG9%、原子力 9%、水力 5%で、その殆どを化石燃料に頼っている。しかし化石燃料は、SO₂、NO_x など有害物質を含む排気ガスによる環境汚染、そしてCO₂による地球温暖化が深刻な問題となっており、また石油資源はあと 40 年で枯渇が予測されている。来たるべき 21 世紀に飛躍的な増大が予想されるエネルギー需要に対して、化石燃料および原子力は飛躍的に増大させることに国民的合意が得られていないため、新たな環境低負荷型の新エネルギーの開発が強く要望され、国を挙げて開発に積極的に取り組んでいる。

我国の水力エネルギー資源は約 4600 万 kW、うち未開発分は 1900 万 kW で殆どが出力 3 万 kW 以下の小水力である。その内出力 1kW~1MW の低落差マイクロ水力は、発電資源としては開発コストが割高なため、従来あまり関心が持たれなかった。しかし、環境低負荷型の再生可能エネルギーであり未だ豊富に存在するので、これを効率よく安価に活用する技術を確立することは、21 世紀のエネルギー安定供給と環境保全上の緊急の課題であろう。そのためには従来の発想を転換して、大容量発電資源としてではなく、分散型エネルギー資源として高効率利用法を確立することが、エネルギー浪費の上にかかってない繁栄を築いてきた私共の、次世代に対する責務でもであろう。しかし低落差マイクロ水力は技術的にも未熟な分野で、その運転制御法や有効利用法は従来あまり検討されていない。

本研究は、マイクロ水力の多目的利用法を提案し、最適な高効率エネルギー回収システムと運転制御法を基礎的に検討することにより、その高効率利用法を総合的に提案しようとするものである。先ず、国内の低落差マイクロ水力事情を精査し、地域性を考慮して分散型エネルギーとして高効率・多目的に利用する方法を提案する。他の自然エネルギーの利用法の調査も行う。次に、エネルギー回収システムとして、多くの水車機種の中から各利用目的に応じた最適な機種を絞り込み、数種類のモデルを製作して基礎的な試験を行い、併せて最適な運転制御法の検討も行う。本研究を通じて、21 世紀の我国の環境低負荷型エネルギーシステムの開発を推進することが、私共に出来る唯一かつ確実な貢献であると信ずる。

1.2 研究の特色

エネルギーは本質的に創り出すものではなく、形を変えて人類に有効に活用できる形として取り出すだけであり、その過程で必ず損失を伴い有効エネルギーを減らす。例えば、排ガスからCO₂、SO₂を除去する技術は、除去するためのエネルギーが膨大で却って環境を悪化させるので、従来の発想を切り替えてトータルとしての有効利用の検討が必要である。

水力においても、ダムを築いて大規模発電によりエネルギーを取り出すという従来のスケールメリット追及型の発想から、小水力を分散型エネルギーとして直接利用するという発想に切り替える必要がある。分散型エネルギーの有効利用という観点から改めて見直すと、例えば21世紀に主流になると予想される電気自動車のエネルギー補給所として、あるいは灌漑や給水などの動力源として多目的利用が考えられる。そのためには、未熟な技術分野である低落差マイクロ水力の回収技術のレベルを引き上げ、安定したエネルギー供給システムを確立する必要があり、このような観点は従来ほとんど検討されておらず、本研究の独創的・革新的な点であるといえる。

工期が短くしかもダムなど土木工事が不要なため安価に回収できる環境低負荷型の低落差マイクロ水力の有効活用法が確立されれば、国内ばかりでなく国際的にも大なる経済的効果が期待できる。すなわち、大規模発電を対象とした水力エネルギーは先進国では殆んど開発し尽くされているが、小水力は先進諸国にも未だ豊富に存在するので、これを高効率に活用する方法が確立されれば、他の諸国もこぞって開発に乗り出す事になる。特に低開発国では、工期が短くしかも安価に得られるエネルギーを渴望しており、国際的なインパクトは大変大きいといえる。特に、中国では深刻なエネルギー不足を避け、火力及び原子力の建設を急速に進めていくと予想され、多量の有害物質が偏西風によって我国を直撃する危険性が以前から強く指摘されてきた。今から将来の危険性を予測し、予防する手段を講じておくことが、将来の環境保護および子々孫々の安全のために極めて重要な課題である。また、マイクロ水力エネルギー回収システムが、全国の都市周辺あるいは町単位で建設されるようになれば、都市住民にエネルギーが身近なものと感じられ、省エネルギーに対する国民的合意が形成され、とくに青少年に対する啓蒙効果も大変大きいといえよう。

水力エネルギーを大規模発電に用いる水車発電の技術的諸問題に関しては、これまで世界中で活発に研究され、多くのシンポジウムも開催されてきた。その成果は、単体効率が95%以上にも達する水車を生み出し、最近では水車技術はほぼ完成の域に達している。しかし小水力とくにマイクロ水力技術に関しては、その利用法も含めこれまであまり研究されておらず、単体効率も80%程度で、運転制御法も確立されていない。し

たがってマイクロ水力エネルギーを発電以外の多目的に利用しようとする提案は、いまだかつてなされたことがなく、その有効活用法の確立は今後の基礎研究にかかっているといえる。多目的利用を対象とする場合には、その利用目的に応じた最適制御法を開発する必要があり、その成否も今後の検討にかかっている。

2. 低落差貫流水車のマイクロ水力発電への適用 ～水車構造の簡素化と性能向上～

2.1 緒言

発電量が 100kW 以下のマイクロ水力は、クリーンで再生可能な自然エネルギーでその包蔵量も膨大であるが、発電量に対する設備費が割高な点が普及に対する最大のネックとなっている。マイクロ水力の有効利用をはかるには、最適な水車形式の探求と同時に、コントロールフリー・メンテナンスフリーを探求することが重要と考えられる^(2.1)。

貫流水車は、構造が比較的簡単なことから、小水力用として研究開発され、ノズル、ランナ等の最適形状が求められて来た^{(2.2)~(2.4)}。また最近、貫流水車をマイクロ水力用として簡素化し、流量調整用の可動ガイドベーンを省略するとともに、吸出し管も省略した研究例が報告されている^(2.5)。

しかし、マイクロ水力には落差が低いものが多く、低落差に貫流水車を適用する場合、吸出し効果はかなり重要で、吸出し管とランナ室は不可欠である。この場合、良好な性能を示す吸出し管の形状と取付け位置^{(2.6)~(2.8)}、ノズルの最適位置^(2.7)、ランナ室内の最適水位^(2.7)等がこれまでの研究で明らかにされたが、更にマイクロ水力への適用を考えた水車構造の簡素化は、なお大きな課題である。

本研究は、貫流水車を低落差のマイクロ水力発電へ適用し、その実用化に不可欠のコントロールフリー・メンテナンスフリーを目指して、可動ガイドベーンを除去し、ランナ内部への空気供給方法の工夫によるランナ室のコンパクト化等、可能な限り水車構造の簡素化を図るとともに、水車性能の向上を図ったものである。

2.2 主な記号

H	: 有効落差 (放水面を基準としたノズル入口の全ヘッド、m)
Q_w	: 水流量 (m^3/s)
Q_a	: 空気体積流量 (標準状態、 m^3/s)
P	: 軸出力 (kW)
η	: 効率 (放水面を基準とする)
n	: ランナ回転数 (rpm)
d	: ランナ直径 (250mm)
b	: ノズルおよびランナ幅 (150mm)
p_{no}	: ノズル出口の静圧 (ゲージ圧、図 2.2、Pa)
p_{ri}	: ランナ内部の静圧 (ゲージ圧、図 2.2、Pa)
p_{cu}	: ランナ室上部の静圧 (ゲージ圧、図 2.3、Pa)
ρ	: 水の密度 (kg/m^3)
h	: ランナ下端から測ったランナ室内水位 (図 2.3、m)

2.3 実験装置及び実験方法

2.3.1 実験装置

実験装置の概略を図 2.1 に示す。放水槽、ポンプ、導水管、流量測定用のオリフィス、水車及び発電機で構成され、水車の有効落差（放水面を基準としたノズル入口の全ヘッド）は、ポンプ出口に設けたバルブ開度の微調整により一定値に設定する。貫流水車では、性能低下を避けるためにランナの中心部に空気を供給することが重要となるが、空気はランナ室内と外気の圧力差により自然給気され、空気量は空気バルブ開度により調整する。

実験は、有効落差とランナ室内空気層の圧力を一定に保ち、発電機の負荷を変えることにより、水車の回転速度を変化させ、トルク、回転速度、オリフィス前後とノズル出口の圧力、ランナ内部及びランナ室内空気層の圧力を測定した。

2.3.2 ノズル及びランナ

本研究で用いたノズルとランナの形状を図 2.2 に示す。本研究では、ノズル内部にある流量調整用ガイドベーンを除去し、これに対応して流路形状を、実測結果を用いて最適化したので、比較のためにガイドベーン除去前の流路も図 2.2 (a) に示す。ランナ羽根は 26 枚で、円周方向から測った羽根出口角は 87° 、入口角は 30° である^(2,10)。またランナはオーバーハング形式で、内部が観察出来るよう側板は透明アクリル板により製作した。

ランナに対するノズルの取付け位置は、低落差に適する形式として、水を上方から流入させる形式⁽⁷⁾とし、ノズル、ランナ、及びランナ室の流路幅はすべて等しく $b=150\text{mm}$ 、放水面からランナ中心までの高さ $l=1005\text{mm}$ である。また図 2.2 には、ノズル出口（ランナ入口）の圧力 p_{no} とランナ内部圧力 p_{in} の測定位置を示している。

2.3.3 ランナ室と吸出し管

図 2.3 に、本研究で検討した 3 つのランナ室と、それにつながる吸出し管の形状を示す。ランナ室 I は、従来用いられている形式であり、ランナ室内には自由表面が存在し、その上部が空気層になっている^{(2,1), (2,3), (2,7)}。ランナ室 II、III は両方ともコンパクト化した形式で、その詳細については 2.3.2、2.3.4 節で述べる。

ランナ室 I、II にはランナ室上部の静圧 p_{cu} の測定点を設け、ランナ室ケーシングの上壁より空気を供給する場合には、 p_{cu} が一定となるように空気バルブを調整する。3 つのランナ室ケーシングの側板はアクリル製で、内部の流れが観察できる。

貫流水車の吸出し管内の流れは気液混相流となるが、本研究で用いた吸出し管の形状と取付け位置は、空気混入量等を考慮して、最も効率が良いもの^{(2.8), (2.10)}を用い、三つのランナ室とも共通している。

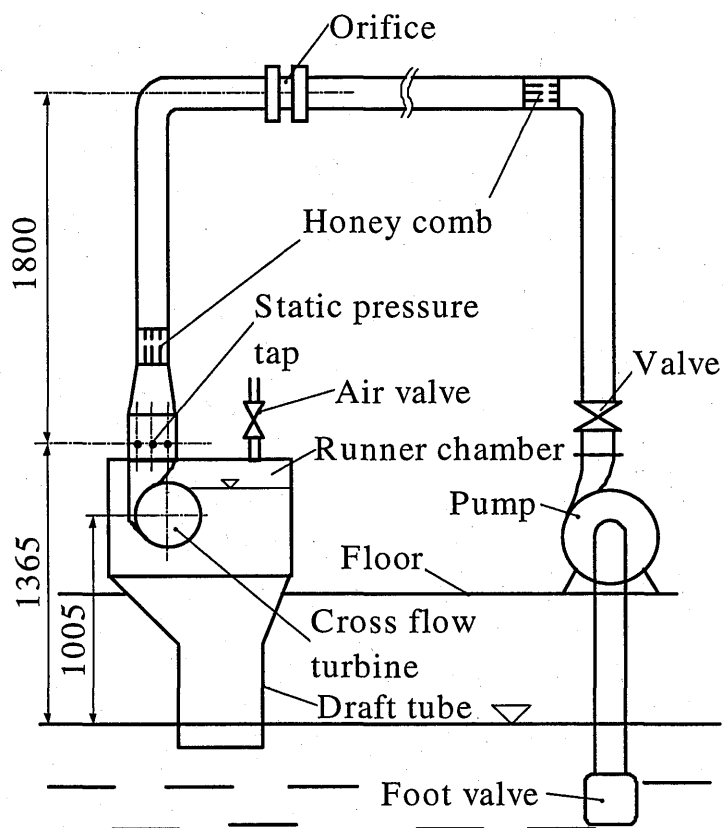


Figure 2.1 : Experimental setup

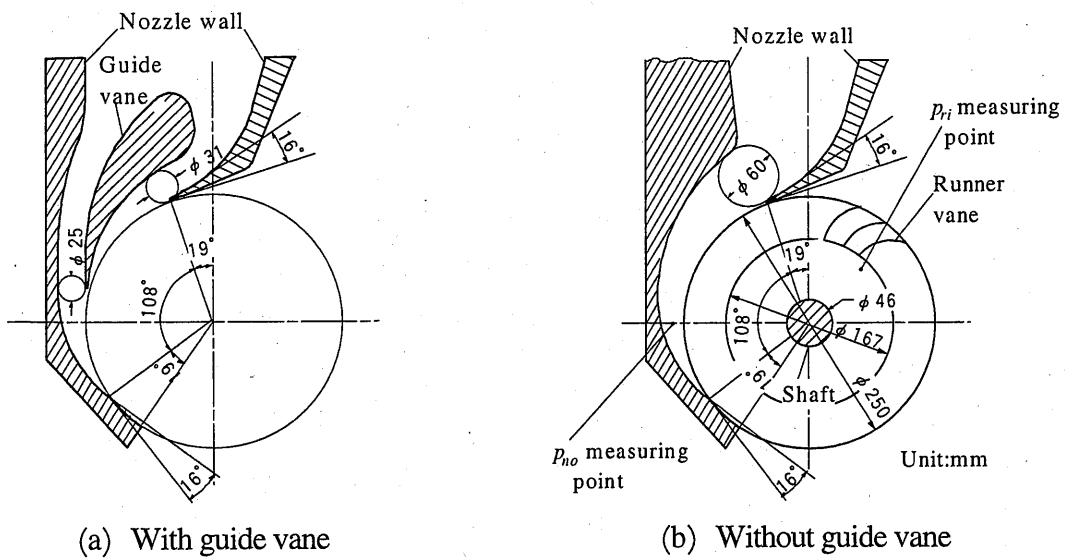


Figure 2.2 : Nozzle and runner

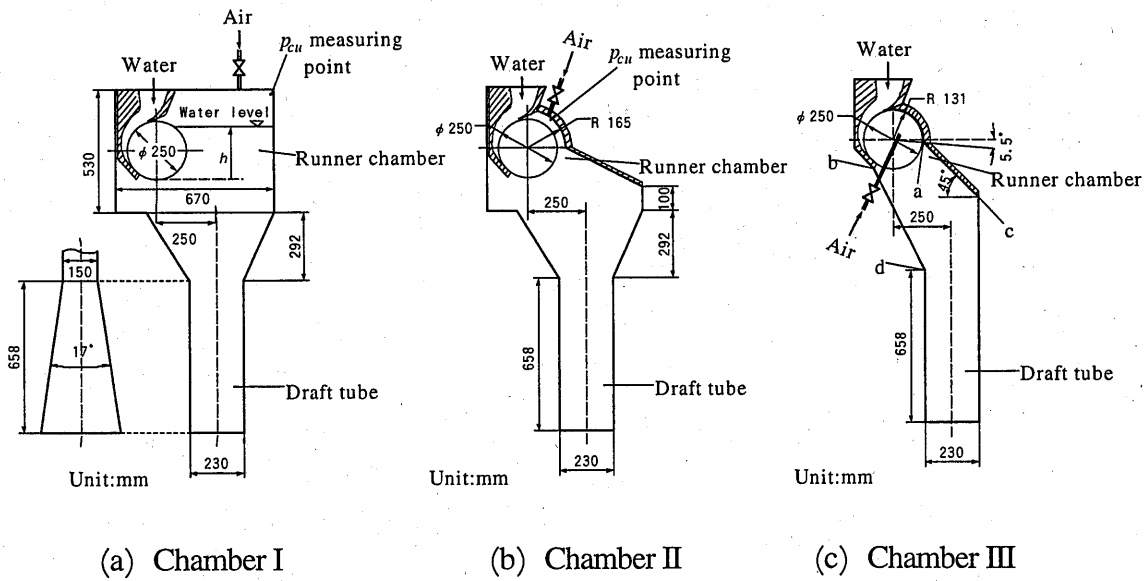


Figure 2.3 : Runner chambers with draft tube

2.4 実験結果および考察

表 2.1 に本研究で行われた主な実験をまとめている。以下、この表で記す実験番号を用いて結果を示す。なお回転速度 n 、軸出力 P 、水流量 Q_w 、静圧 p は単位落差、単位ランナ幅、単位ランナ径当りの値に基準化し、それぞれ $nd/H^{1/2}$ 、 $P/dbH^{3/2}$ 、 $Q_w/dbH^{1/2}$ 、 $p/\rho gH$ を用いて示す。

Table 2.1 : Test conditions

Test	Runner chamber	Air supply method	Maximum efficiency
A	I	Upper wall of chamber casing	76.2%
B	II	Upper wall of chamber casing	75.4%
C	I	Runner side wall	76.3%
D	III	Runner side wall	77.6%
E	III	Runner side wall	78.5%

2.4.1 ガイドベーン除去後の性能

従来の水力発電における周波数制御方式は、負荷変動に応じて流量を調整するが、调速機、サーボモーター等の複雑な付属装置が必要で、その制作及びメンテナンスにかかるコストが高い。従ってこれを省略して、流量調整を行わず、水車の回転速度を最適に設定する様な電気負荷調整を行うことにより、水車構造をずっと簡素化することが出来る⁽²¹⁾。

図 2.4~2.6 に、ガイドベーンを除去し、従来型ランナ室 I (図 2.3 (a)) を用いて行った Test A の結果を、後節の Test B の結果と併記するが、ここでは Test A の結果についてのみ考察する。Test A は、ランナ室内空気層の圧力を、最適回転数で最適水位 ($h/d=0.9$) となる圧力 ($p_{ca}/\rho gH=-0.38$) に保ちながら行った。

図 2.4 よりガイドベーン除去後の性能は、ガイドベーンありの場合⁽²⁹⁾と比べ大きな変化は見られず、最高効率で 76.2%となり、ガイドベーンありの場合とほぼ等しい値が得られた。

また図 2.5 より Test A において、回転数の増加に伴って、水流量は低下するが、ランナ内部に吸込まれる空気量は増加することがわかる。これは図 2.6 に示すように、回転数の増加とともに遠心力が増加して、ノズル出口圧力 p_{n0} が増加し、逆にランナ内部では圧力 p_{ri} が低下するためであり、増加した空気は水と一緒に吸出し管に吐き出される。図 2.7 に、従来型ランナ室 I (Test A) 内の流れの様子を示す。低落差の場合、吸出し効果を高めるためにはランナ室内圧力を低くし、水位を高くした方がよい。ランナ室内水

位の最適値は $h/d=0.9$ であり、それ以下の水位ではランナ内部にランナ室の空気が流入して空気層を形成するが、それより水位が高くなるとランナ全体が水没してランナ内部へ空気が供給されなくなるため、主軸に流れが衝突し、効率が低下する^(2.9)。また、ランナ外周の圧力がランナ内部の圧力より高いため、図 2.7 (a) に示す様に、羽根間にはランナ室の水が再流入してエネルギー損失が起こる^(2.8)。従って、低落差貫流水車のランナ室設計においては、さらに有効な空気供給方法による吸出し効果の増加と、再流入損失の低減が必要と考えられ、以下に検討する。

2.4.2 ランナ室コンパクト化の試み

低落差貫流水車ランナ室のコンパクト化の試みとして、図 2.3 (a) の従来型ランナ室 I の右上部にある空気室を除去し、直接ランナに空気を供給する形にしたのがランナ室 II である (図 2.3 (c))。

ランナ室 II を用い、ランナ室上部の圧力を、Test A と同一値 ($p_{cu}/\rho gH=-0.38$) に保ちながら行った Test B の結果を、図 2.4~2.6 に併記した。また図 2.8 には、ランナ室 II 内の流れの様子を示す。

図 2.8 をみると、最適回転数より低回転側では、ランナ内部を貫流する流れは主軸に当たって分岐し、軸の下側を通してランナから出る流れはランナ室ケーシングの上壁にあたって衝突損失を起こす。同時にランナ軸の上側を通る流れは、ランナ室ケーシングの上壁に衝突してからノズル水切り部付近よりランナ内に再流入し、再流入損失を起こす。一方最適回転数より高回転側では、回転数が高くなると、流れはランナ軸の下方に離れるためにケーシング壁には衝突しないが、ランナからの噴流とケーシング壁の間にはノズル水切り部に向かう逆流が発生する。この流れはランナに再流入して損失を起こすが、ランナ全体が水中で回転するランナ室 I の場合と比べて損失は小さいものと考えられる。一方、ランナ室ケーシングの上壁に設けた空気バルブより流入した空気は、ランナ内に再流入する水と混ざりあい、混相流となってランナ内に吸込まれるので、ランナ内部に鮮明な空気層が形成されにくい。そのため図 2.4 に示される様に、Test A と比べて広い範囲で効率がわずかに低下した。また図 2.5 にみられる様に、無拘束状態に近い高回転側では、遠心力による圧力上昇のために空気量が急減少して、ランナ内部は水で充満され、流れがランナ軸にあたって振動を起こす様になる。

2.4.3 ランナ内部への空気供給方法

Test B の結果より、効率を低下させずにランナ室をコンパクト化するには、適切な空気供給方法の検討が必要ながことが判明した。

そこで図 2.9 に示すように、ランナ内部へ直接空気を供給する方法を考案した。ランナ室ケーシングの側板上に 1 つの空気供給孔を設け、更にランナ側板上にも軸まわりに 4 つの空気供給孔を設けて、ランナ中心の低圧を利用して自然吸気できる様な構造とした。この方法と従来の吸気法を比較するため、従来型ランナ室 I を用いて Test C を行い、その結果を図 2.10、2.11 に Test A と比較して示す。Test C の場合、ランナ室内水位がランナの高さを超えてもランナ内部へ吸気可能なので、吸出し効果をより高めることが出来、最適水位は $h/d=1.0$ となった (図 2.10)。この最適水位におけるランナ内部圧力は、 $p_{ri}/\rho gH=-0.45$ である。またランナ内部の圧力をこの値に保った速度特性をみると (図 2.11)、効率は全回転域にわたり、わずかながら向上した。

2.4.4 ランナ室の最適形状

2.4.2 節の Test B の結果から、ランナとランナ室ケーシングの上壁との隙間は、逆流を誘起させ、性能上望ましくないことが判明した。そこでこの隙間をなくし、しかも図 2.3 (c) においてランナ室ケーシングの上壁の下端 a 点を、最適回転数においてランナからの噴流上部境界に一致する様にした。また吸出し管との接続は、簡素化のために直線で結び、空気供給方法は、2.4.3 節で良好な性能を示した側板空気供給方法のみを使うこととした。

ランナ室 III を用い、ランナ内部の圧力を Test C と同じ値 ($p_{ri}/\rho gH=-0.45$) に保って Test D を行い、その結果を図 2.12、2.13 に Test C と比較して示す。効率は、最適回転数より低回転側では幾分低下するが、高回転側で全体的に高くなり (最大 9%)、最高効率は 1.3% 向上した。Test C と D ではランナ内部の圧力を同一に保っているため、この効率向上はランナ室形状の差異による、再流入損失の低減効果と見なすことが出来る。この場合、ランナ室形状が改善されたため、同一落差において水流量は増加し、空気流量も多少増える。

Test D は、ランナ内部の圧力を従来型ランナ室 I での最適値にして行ったが、ランナ内部の圧力を最適化することにより、吸出し効果をより高められる可能性がある。そこで最適回転数において、流れがランナ軸にあらずにちょうどランナ軸の下方を通る程度まで空気量を絞った。この時のランナ内部圧力は $p_{ri}/\rho gH=-0.50$ である。

ランナ内部の圧力をこの値に保って Test E を行い、その結果を Test C、D と比較して示した (図 2.12、2.13)。効率は全体的に Test D より更に向上し、最高効率は 0.9% 向上して 78.5% となった。

この吸出し効果による向上分 0.9% (Test E と D の差) と、再流入損失の減少による向上分 1.3% (Test D と C の差) をあわせると、従来型ランナ室 I と比べ最高効率は 2.2% 向上した。

図 2.14 に、目視観察された Test E の最適回転数における流れの様子を示す。流れはちょうどランナ軸下方を通過してランナ内部を貫流し、ランナから流出した後もランナ室ケーシングの上壁と衝突せず、スムーズに吸出し管の方へ流出することがわかる。

以上に示したすべてのデータは、有効落差 $H=2.9\text{m}$ における結果であるが、最後に有効落差が変化した場合の性能への影響を検討するために、ランナ室Ⅲの場合について性能の変化を、従来型のランナ室Ⅰと給気法を用いた場合の結果と比較して図 2.15 に示す。有効落差の変化によらず、最高効率ほぼ一定で、従来型より一様に約 2%向上するのがわかり、落差変化に対してもランナ室Ⅲが有効であることがわかる。

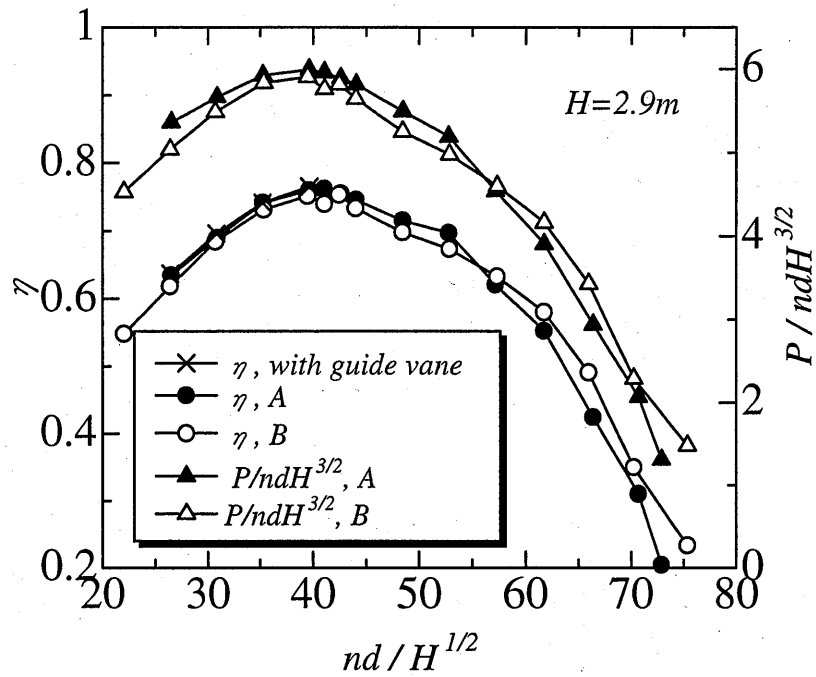


Figure 2.4 : Efficiency and power curve in case of test A and B

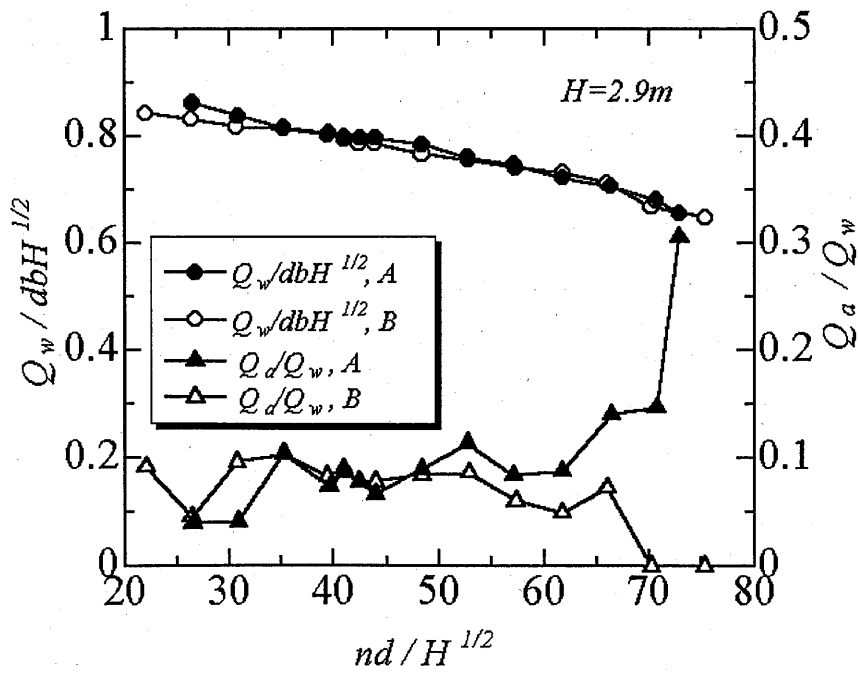


Figure 2.5 : Flow rates of water and air in case of test A and B

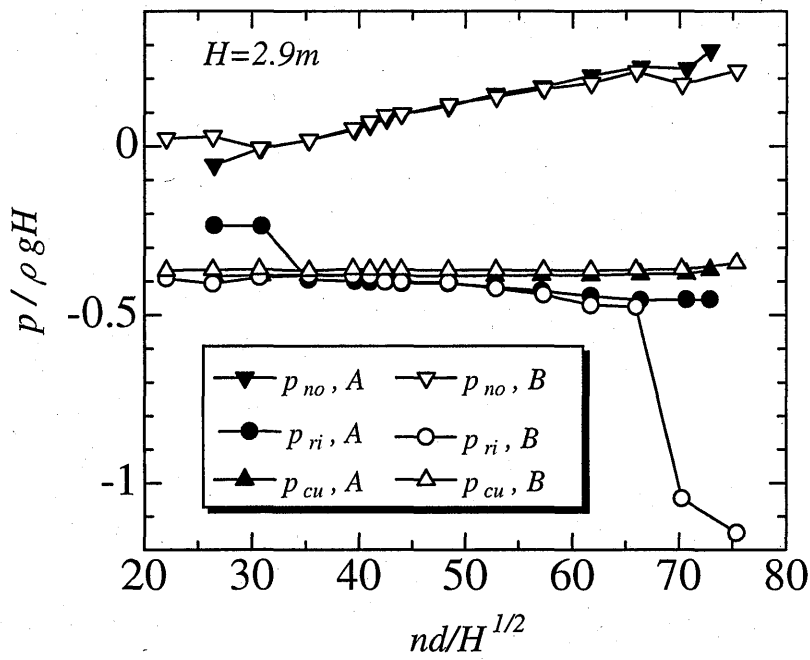


Figure 2.6 : Static pressure in case of test A and B

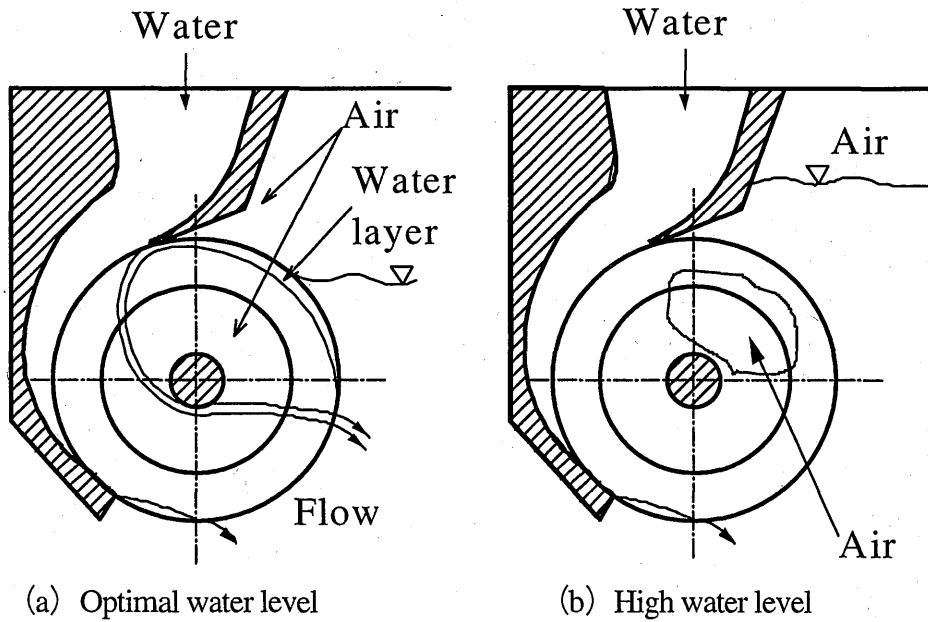


Figure 2.7 : Sketch of flow in runner chamber of type I

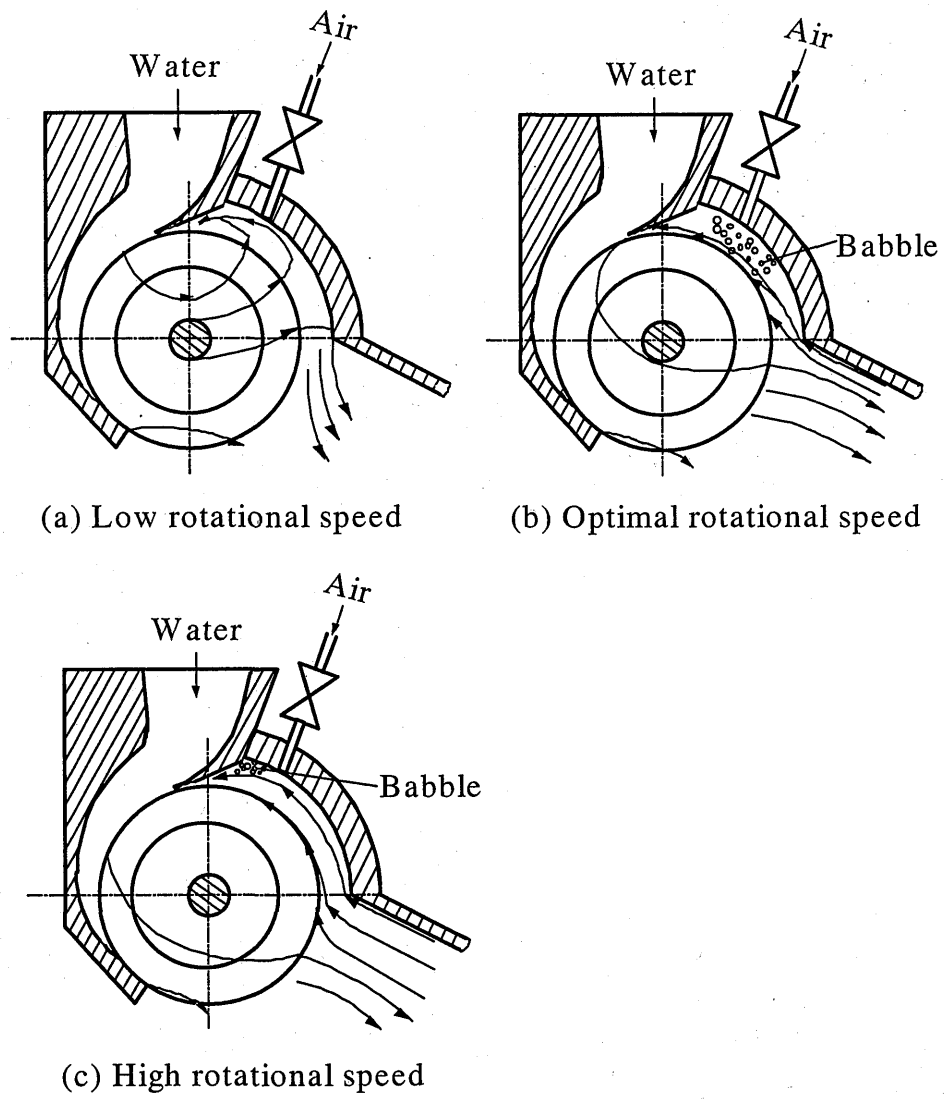
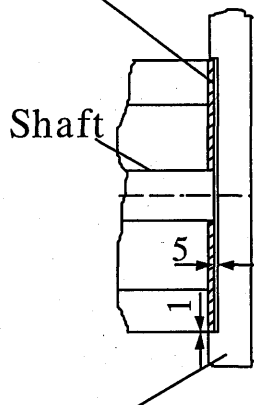
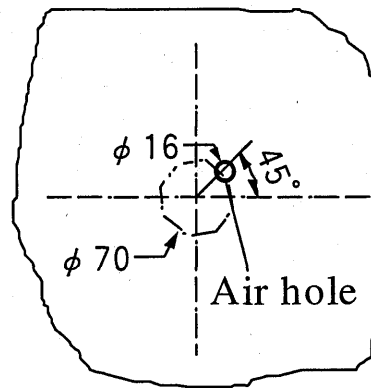


Figure 2.8 : Sketch of flow in runner chamber of type II

Runner side wall

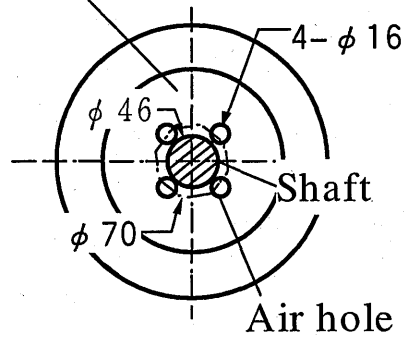


Chamber casing



(a) Chamber casing

Side wall



(b) Runner

Figure 2.9 : Side wall air supply

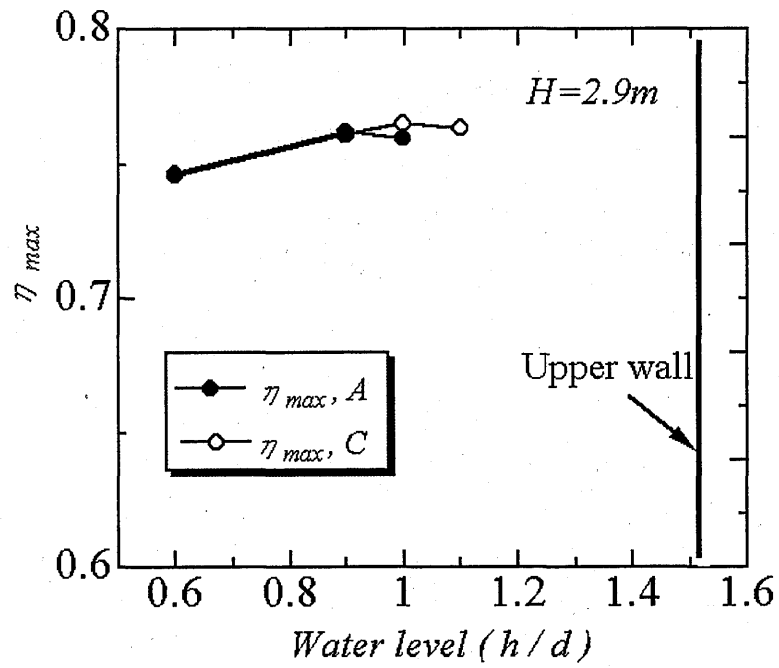


Figure 2.10 : Effect of water level in runner chamber for chamber of type I

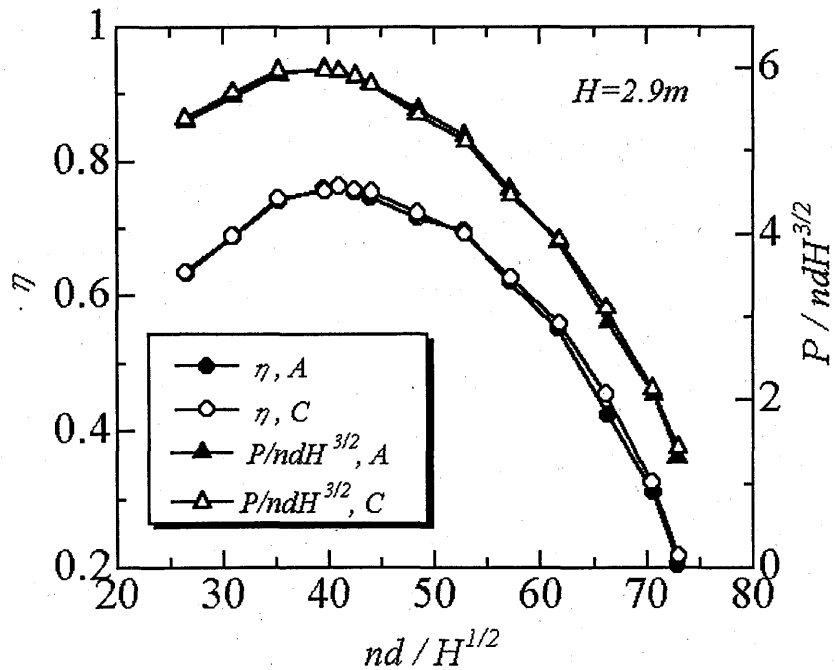


Figure 2.11 : Efficiency and power curve in case of test A and B

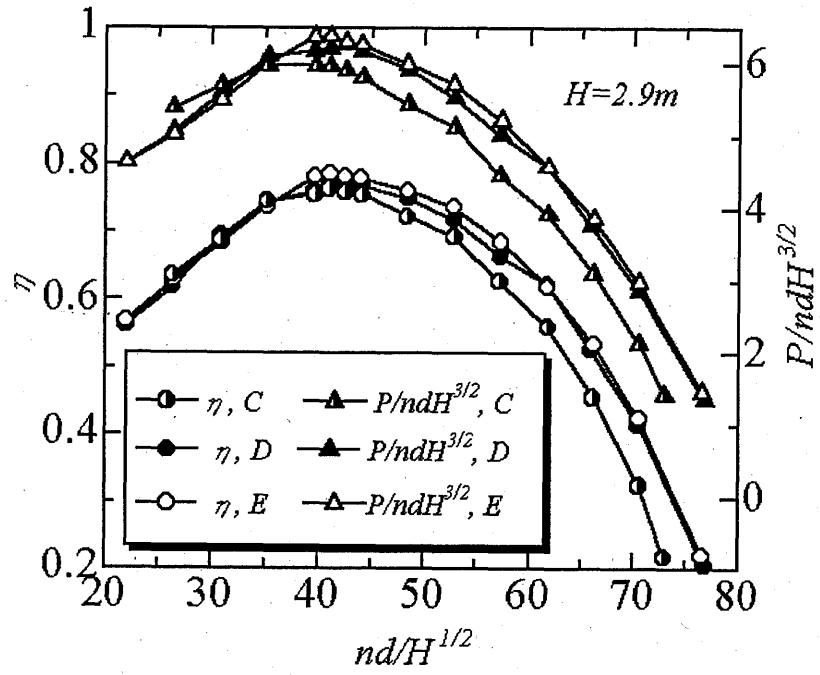


Figure 2.12 : Efficiency and power curve in case of test C, D and E

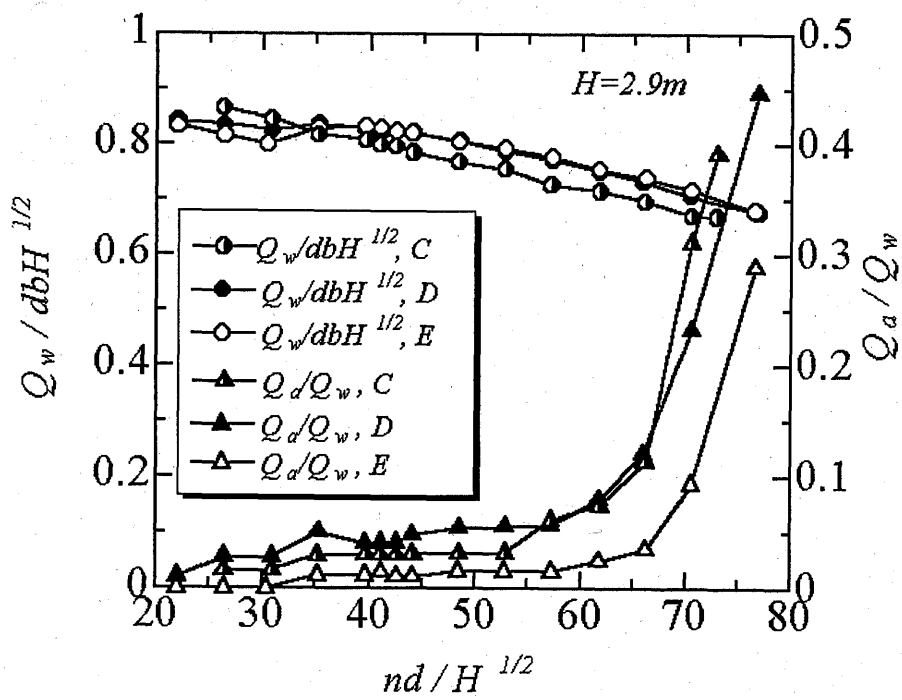


Figure 2.13 : Flow rates of water and air in case of test C, D and E

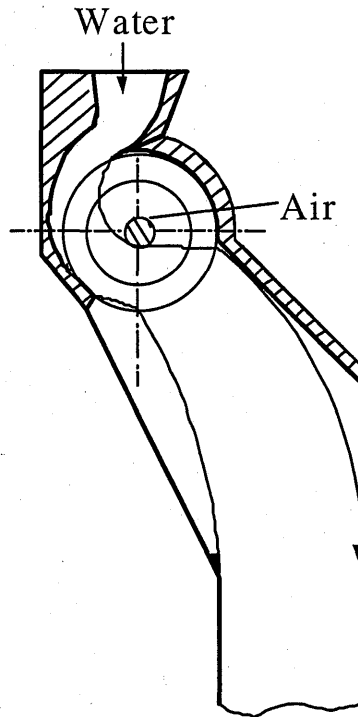


Figure 2.14 : Sketch of flow in runner chamber of type III

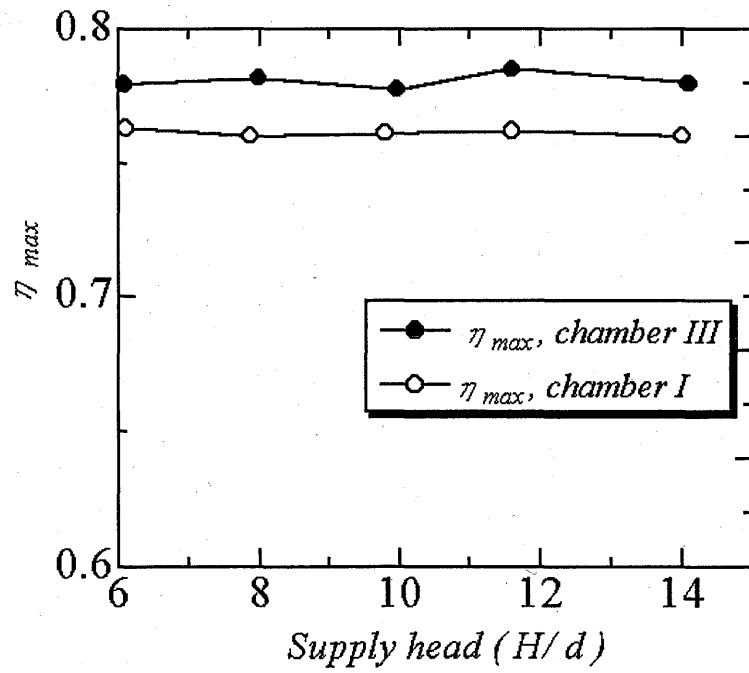


Figure 2.15 : Effect of supply head for chamber of type I and III

2.5 結言

本研究では、低落差貫流水車のマイクロ水力発電への実用化を目指して、水車構造の簡素化を行い、おもに次の様な結果を得た。

- (1) コンパクト化したランナ室において、再流入損失の低減と吸出し効果の増加により、広い回転数範囲で効率が向上し、最高効率は有効落差にかかわらず、従来型ランナ室を用いた場合より約2%向上した。
- (2) 本研究で提案するランナ内部への空気供給方法は、ランナ室をコンパクト化でき、しかもランナ室の形状によらず従来の給気方法より効果が大きい。
- (3) ノズル内部のガイドベーンを除去しても、流路形状を適切に設計すれば、全体性能に影響は見られない。

参考文献

- (2.1) Allen R. Inversin, Micro-Hydropower Sourcebook, NRECA International Foundation, 1986.
- (2.2) Venkappayya R. Desai and et al., An Experimental Investigation of Cross-Flow Turbine Efficiency, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 116, 1994, pp.545-550.
- (2.3) C. B. Joshi and et al., Parametric Study of Performance of Cross-Flow Turbine, ASCE Journal of Energy Engineering, Vol. 121, 1995, pp.28-45.
- (2.4) 豊倉・ほか3名、貫流水車に関する研究、日本機械学会論文集(B編)、51-461、1985、pp.143-150.
- (2.5) 福富、マイクロ水力発電用クロスフロー水車の特性と内部流れ、ターボ機械、28-3、2000、pp.156-163.
- (2.6) 北洞、貫流水車の低落差への適用、ターボ機械、25-4、1997、pp.200-204.
- (2.7) 豊倉・ほか3名、貫流水車に関する研究(続報、低落差への適用)、日本機械学会論文集(B編)、53-491、1987、pp.2078-2084.
- (2.8) 北洞・ほか2名、低落差貫流水車に関する研究(ランナ径が効率に及ぼす影響)、日本機械学会論文集(B編)、61-585、1995、pp.156-161.
- (2.9) 豊倉・ほか3名、気液混相流の鉛直ディフューザ性能、日本機械学会論文集(B編)、51-470、1985、pp.3376-3380.
- (2.10) 北洞・ほか4名、低落差貫流水車の性能向上への一寄与、ターボ機械、18-2、1990、pp.73-78.

3. 可変速マイクロ水力発電システムの 実用化に関する研究

3.1 緒言

水力エネルギーはクリーンで再生可能な自然エネルギーであるが、経済性の高い大容量地点は先進国においてはほぼ開発され、また発展途上国においてもダム建設などによる環境破壊のために新規開発が行いにくくなっている。一方、従来は経済性が低いとして顧られなかった低落差、低流量の地点、あるいは既設多目的ダムの放流水、工場排水や農業用水などのマイクロ水力資源は未だ豊富に存在する。したがってこれらの未利用マイクロ水力資源を有効利用することは、エネルギーセキュリティーのみならず、温暖化防止の上からも急務であると考えられる。

低落差地点においては、落差の変化量はそれほど大きくなくても、基準落差に対する割合が大きくなる。既設多目的ダムの放流水を利用する場合にも、季節によるダム水位の変動のために水車の利用可能落差の変動が大きい。全国の多目的ダムにおいて、ダム水位の変動幅がダム高さの35%以上ある地点は全地点の68%にも達する^(3.1)。また、長い管路をもつ浄水場では、静落差は一定でも、水量変化による管摩擦損失の変化のために、水車に利用できる有効落差は大きく変化する。

変落差対策としては、これまで可動羽根機構の採用、巻線型誘導発電機の二次側励磁制御による可変速技術^(3.2)などが実用化されたが、これらの方法は水車や電力変換装置の特殊設計を必要とするため、発生電力が少ないマイクロ水力に対してはコストが高く、採算性が悪い。

一方、空気機械や一部の汎用ポンプなどにおいて可変速制御による省エネルギー化が進み、汎用のインバータやコンバータ技術の進歩が目覚しく、400kWクラスまでの汎用品が安価に入手できるようになってきた。

そこで本研究では、落差変動が大きいマイクロ水力資源の有効利用を目指して、汎用のインバータやコンバータを用いた実用的な可変速マイクロ水力発電システムの開発を行った。分散型独立電源を想定した、同期発電機を用いた単独運転の場合と、かご型誘導発電機を用いて電力系統に連系する場合に分けて検討を行い、構築したシステムの有効性を実験により検証するとともに、著者らの研究^(3.3)で簡素化に成功した低落差貫流水車の変落差特性を明らかにした。

3.2 実験装置および実験方法

図 3.1 に供試水車の形状を示す。この水車は、低落差用に開発された貫流水車^(3,4)をマイクロ水力に適用するために、流量調整用のガイドベーンを除去し、ランナ内部への空気供給方法の工夫によるランナ室のコンパクト化等、可能な限り構造の簡素化を図るとともに、性能向上を図ったものである^(3,3)。

図 3.2 に、ノズルとランナの形状を示す。ランナ羽根は 26 枚で、周方向から測った羽根出口角は 87° 、入口角は 30° である。ランナはオーバーハング形式で、内部が観察出来るよう側板は透明アクリル板により製作した。ノズル、ランナ、およびランナ室の流路幅はすべて等しく $b = 150\text{mm}$ 、放水面からランナ中心までの高さ $H_s = 1005\text{mm}$ である。

水はポンプより供給され、導水管、流量測定用のオリフィスを経て、水車に導かれる。水車の有効落差 H （放水面を基準としたノズル入口の全ヘッド）は、ポンプの回転速度とポンプ出口に設けたバルブ開度の微調整により一定値に設定する。貫流水車では、性能低下を避けるためにランナの中心部に空気を供給することが重要であり、ランナ中心部の空気層と外気の圧力差により自然給気される。この中心部の最適圧力を明らかにするために、バルブを設けてその開度調整を行った。

実験は、有効落差とランナ中心部空気層の圧力を一定に保ち、発電機の負荷を変えることにより、水車の回転速度を変化させ、トルク、回転速度、オリフィス前後とノズル入口、およびランナ中心部空気層の圧力、各電気量を測定し、これを様々な有効落差に対して繰返した。

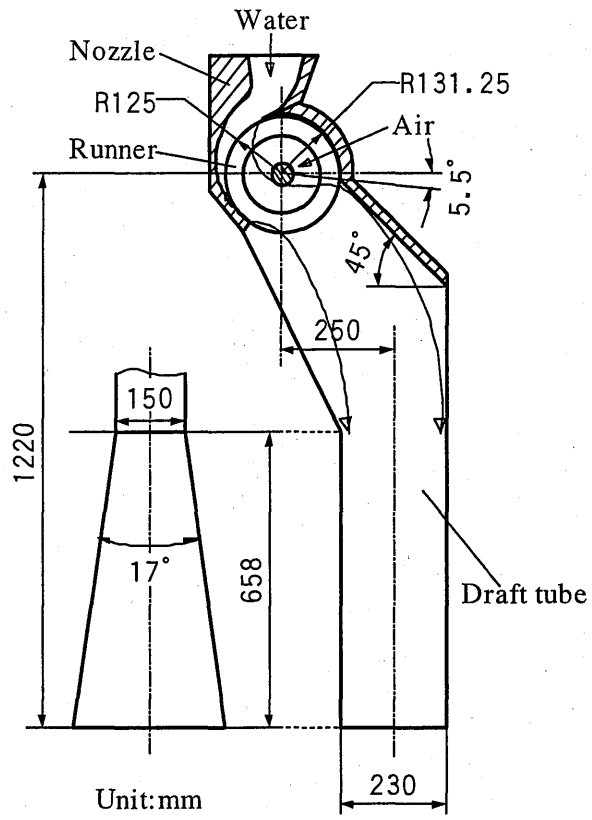


Figure 3.1 : Cross-flow water turbine

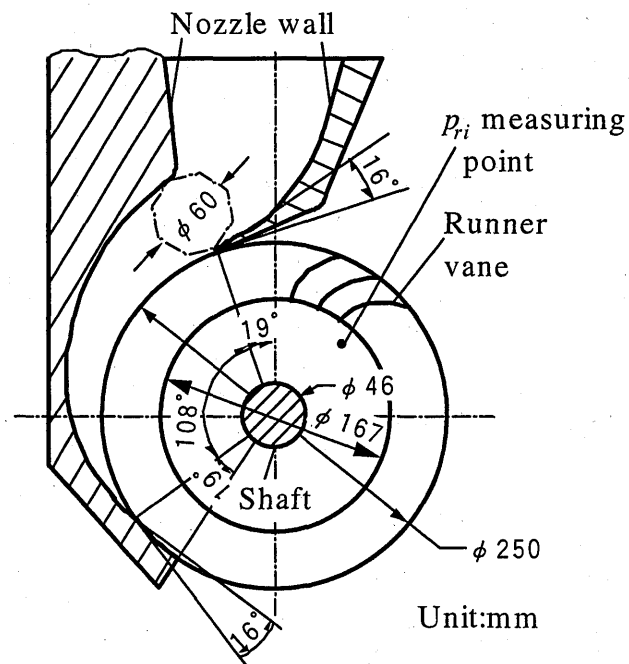


Figure 3.2 : Nozzle and runner

3.3 低落差貫流水車の変落差特性に関する実験結果

貫流水車を落差変化のあるマイクロ水力に適用するために、まず落差変化に対する最適運転条件を明らかにしておく。

低落差貫流水車の効率は、一定落差において回転速度 n のほかに、ランナ中心部空気層の圧力 P_r の影響を強く受ける。吸出し効果を高め、ランナの横断流を増やすためには、ランナ中心部の圧力を低くした方が良いが、低すぎると流れがランナ軸に衝突し、効率が低下する。

そこで P_r が効率に及ぼす影響を調べ、本研究の基準有効落差 $H_n=3.35\text{m}$ における実験結果を図 3.3 に示す (H_s は放水面からランナ中心までの高さ)。同図より効率が最大となる最適ランナ内部圧力 $(P_r)_{opt}$ が存在することがわかる。この時の流れの様子を目視観察すると、流れは図 3.1 に示す流線のようにちょうどランナ軸の下方を通してランナ内部を貫流していた。

この $(P_r)_{opt}$ を有効落差に対してプロットしたものが図 3.4 であり、落差の増加とともにほぼ直線的に低下することがわかる。これは有効落差の増加とともに、ランナ内を通る水の流速が増加するためであると考えられる。また図 3.4 より、ランナ中心部圧力 P_r を最適値に保てば、水車の最高効率 $(\eta)_max$ は変化しないことがわかる。

各有効落差において、ランナ中心圧力を最適値に保ち、回転速度を変化させた時の速度特性を図 3.5 に示す。横軸に単位回転速度 $nd/H^{1/2}$ をとってまとめると、有効落差の変化によらず効率曲線はほぼ一致し、最高効率となる単位回転速度 $(nd/H^{1/2})_{opt}$ は 42 前後である。これより有効落差 H が変化する時に、 $nd/H^{1/2}$ が最適値となるように水車の回転速度 n を調整すれば、有効落差の変化に拘らずつねに最適運転が可能であることがわかる。

定速度運転 ($n=\text{const.}$) を行った時、有効落差の変化による流れの様子は図 3.6 のように変化する。低落差側では流れが軸から離れ、横断流が減って効率が低下する。高落差側では逆に横断流は増えるが、流れが軸に当たって効率が低下し、振動を起こす。また、落差が最適落差から離れすぎると、ランナバーンの前縁でキャビテーションが発生するので、実際に運転可能な落差範囲は制限される^(3.5)。

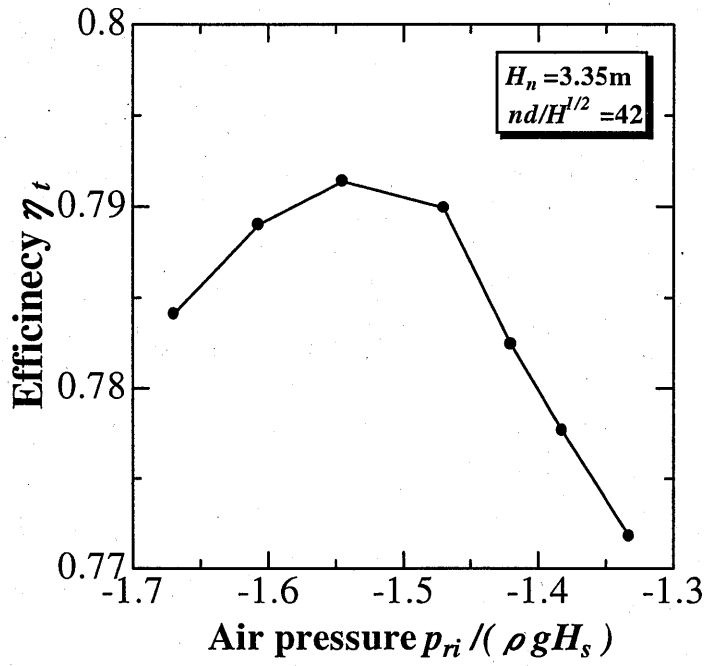


Figure 3.3 : Effect of supply air pressure

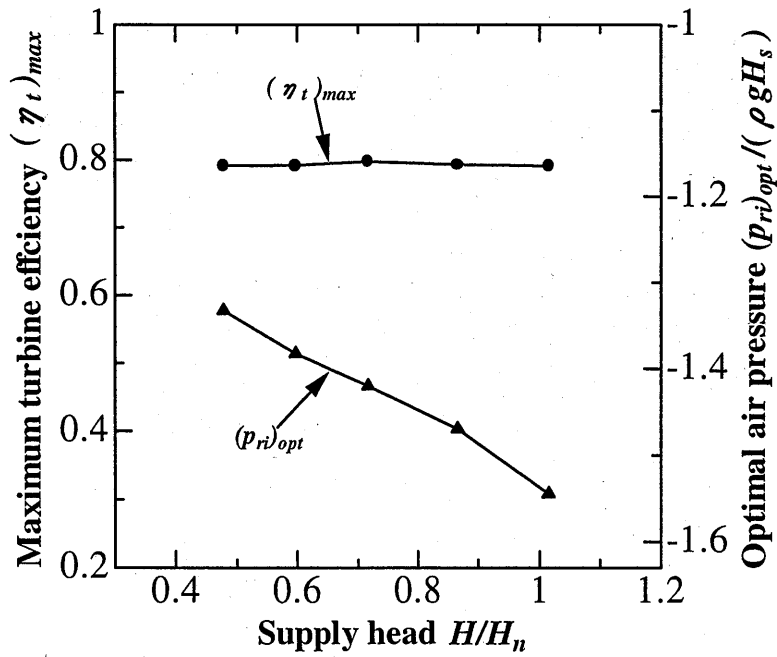


Figure 3.4 : Effect of supply head

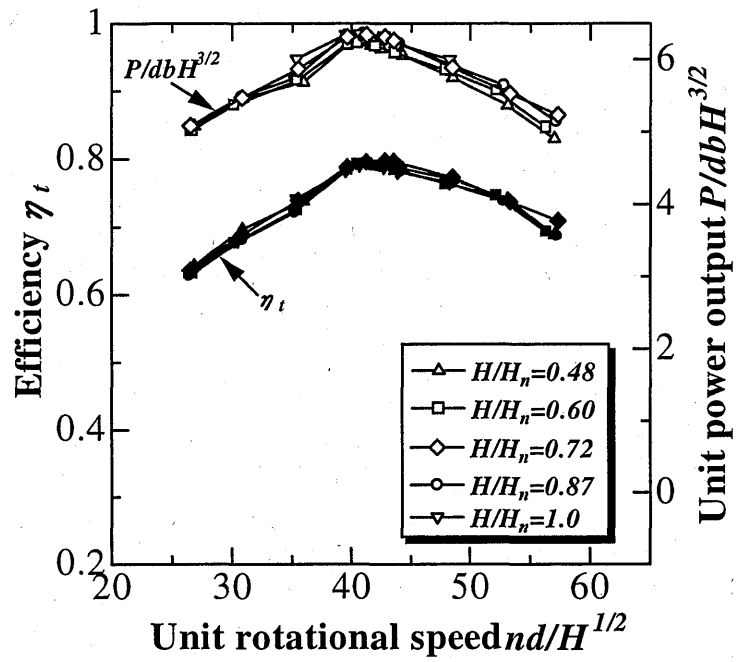


Figure 3.5 : Performance curve for different supply head

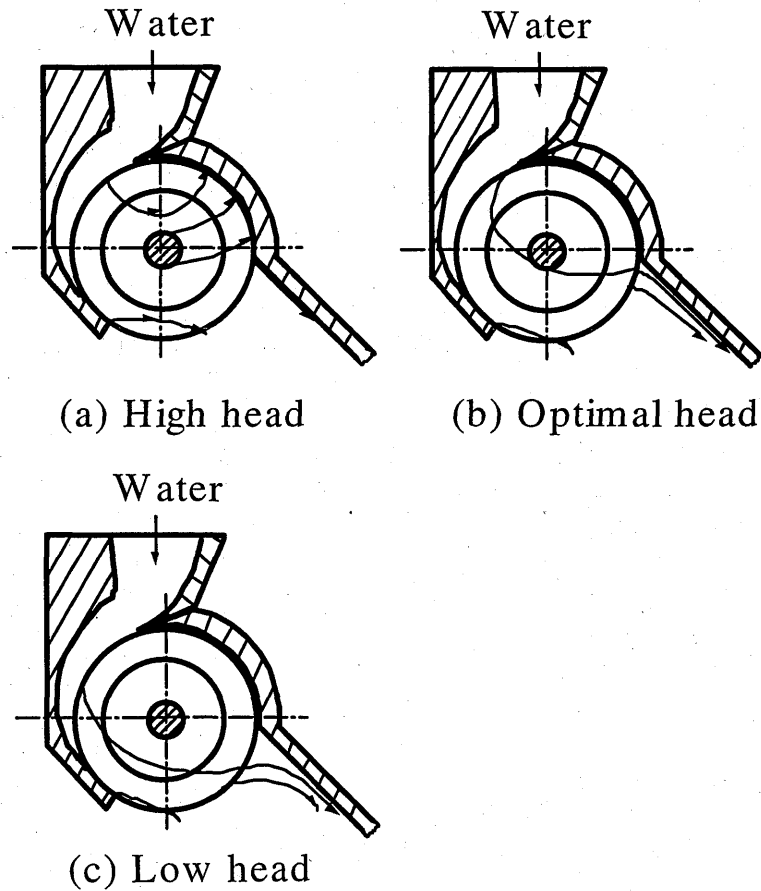


Figure 3.6 : Sketch of flow pattern for different supply head

3.4 単独運転のマイクロ水力発電システムに関する実験結果

まず、マイクロ水力発電システムを分散型電源として単独運転する場合について検討する。

3.4.1 定速度システム

発生電力の品質として、電圧と周波数の安定性が問われる。そのために従来の水力発電に用いられて来た周波数制御方式は、負荷変動に応じて流量を調整するが、調速機、サーボ・モーター等の複雑な付属装置が必要で、コストが高い。著者らはマイクロ水力発電においては、これらの付属装置をできる限り省略して流量調整は行わず、周波数制御はバラスト負荷を制御する方式を採用するべきであると考えている。最近この方式の利用を前提として、流量調整用のガイドベーンを省略するとともに、吸出し管も省略した研究例が報告されている^(3.6)。

図 3.7 に、本研究で検討した定速度マイクロ水力発電システムの構成を示す。図の中で AVR は自動電圧調整装置、ELG は電子負荷調整装置を示す。このシステムでは、AVR により励磁電流を調整することによって発電機の端子電圧を一定に保ち、水車入力と実負荷とのアンバランスは ELG によりバラスト負荷に消耗させることによって発生電力の周波数を一定に保つ。この場合、制御装置のコストは従来の 10%程度でシステムを作ることが可能である^(3.7)。

本研究で用いた同期発電機は、定格出力 2.5kW、定格回転速度 $N_n=1500\text{rpm}$ の三相他励同期発電機であり、AVR と ELG とともに市販品である。また実負荷には白熱電球を、バラスト負荷には水中ヒーターを使っているため負荷力率はほぼ 1.0 である。

また、本研究ではギヤ比 $\alpha=5$ の増速機を使っているため、発電機側の定格回転速度 N_n は、水車側にとっては定格回転速度 $n_n=300\text{rpm}$ に相当し、その時の単位回転速度が最適値となる有効落差は 3.35m であり、これを基準有効落差 H_n としている。

図 3.11 に、定格回転速度 N_n で、落差を $(0.48\sim 1.0)H_n$ の範囲で変化させた時の定速度運転の効率曲線を示す。 η_t 、 η_g 、 η は、それぞれ水車の効率、発電機の出力を用いて計算した水車・発電機の効率、およびシステム全体の効率を表すが、定速度運転の場合には電力変換装置を使わないため、 η_g と η は等しい。同図より定速度運転の場合、有効落差が基準値から低下すると、水車および全体効率が著しく低下することがわかる。

3.4.2 可変速システムの提案

定速度システムの場合、発生電力の周波数を一定に保つためには、発電機の回転速度は同期速度に等しい一定値にしなければならない。そのため、落差が変動すると水車の効率が低下するだけでなく、落差変動が大きい時には運転不能となる。

そこで図 3.8 に示すような、落差が変動しても可変速運転を行うことにより水車が効率よく運転出来る、可変速マイクロ水力発電システムを提案する。このシステムは、定速度システムに、市販の整流器と汎用の PWM (Pulse Width Modulation) インバータを加えて構築したものである。

本システムにおいて、発電電圧は同じく AVR により定格電圧に調整するが、ELG は回転速度を、落差変動に応じた最適回転速度となるように、バラスト負荷を調整する。そのため発電機が発生した電力は、電圧は定格電圧であるものの、周波数が定格周波数でないために、いったん整流器により直流に整流し、その後インバータにより定格電圧、定格周波数になおして負荷に供給する。このシステムをコージェネレーション型として、バラスト負荷を捨てるのではなく熱エネルギーとして回収すれば、運転可能な落差の範囲が広がるだけでなく、システム全体の効率も向上する。

以下、このシステムにおける最適回転速度制御方法、および可変速運転可能範囲について実験的に検討する。

3.4.2.1 水車・発電機回転速度の最適制御

一般的に同期発電機において、以下のような関係が成り立つ。

$$T_g = k_1 \Phi I \quad (3.1)$$

$$E_0 = k_2 \Phi N \quad (3.2)$$

ここで、 T_g は発電機の入力トルク (N・m)、 Φ は磁束 (wb)、 I は負荷電流 (A)、 E_0 は電機子起電力 (V)、 N は発電機の回転速度 (rpm)、 k_1 、 k_2 は発電機により決まる定数である。

簡単化のために、発電機の内部インピーダンスによる電圧降下を無視して $E_0 \cong V$ (V は発電機の端子電圧) とすると、

$$T_g N = \frac{k_1}{k_2} V I \quad (3.3)$$

となり、AVR により V を一定に保つことが出来れば、発電機の入力トルクと回転速度の関係は負荷電流 I のみにより決まることが分かる。

同じく簡単化のために、水車と発電機間の伝達損失を無視すると、水車・発電機回転軸の回転速度は、 αT_g (α は増速ギヤ比) と水車出力トルク T_t が釣合う点で落ち着く。図 3.9 はこの関係を示したもので、水車効率 η_t も破線で示している。 αT_g と T_t が N_{opt} で釣合うように、負荷電流 I を (I_1, I_2, \dots, I_3) と調整して発電機の入力トルク・回転速度曲線を変えれば、 η_t を最大にする最適回転速度制御が可能であることがわかる。図 3.9 は落差が基準落差より低い $0.48H_n$ の場合であるので、 N_{opt} は定格回転速度 N_n より低い。

3.4.2.2 可変速運転可能範囲

前節と同じく簡単化のために、発電機の内部インピーダンスによる電圧降下を無視して、 $E_0 \cong V$ とすると

$$\Phi = \frac{V}{k_2 N} \quad (3.4)$$

上式からわかるように、可変速運転を行う時に発電機端子電圧 V を一定に保つためには、回転速度 N に応じて励磁電流 I_f の調整により磁束 Φ を調整しなければならない。回転速度が定格速度 N_n を上回る時には問題ないが、 N_n より低下しすぎると励磁電流 I_f を増やしても磁束 Φ が増えない、いわゆる磁気飽和現象が起こり、 V を一定に保つことが出来なくなる。

図 3.10 に $H=0.48H_n$ の場合の、可変速実験の飽和曲線を示す。発電機の回転速度が $0.7N_n$ までは定格電圧 200V を保てたが、さらに回転速度を下げると定格電圧を保てなくなる。また回転速度が $0.6N_n$ までさがると、出力電圧がインバータの許容入力値の下限である 170V までさがり、自動運転停止となる。

水車の有効落差を $(0.48 \sim 1.0)H_n$ の範囲で変化させて可変速運転を行い、その結果を図 3.11 に定速度運転時と比較する。ここでいう可変速運転とは、各落差において最適回転速度で運転を行った場合をいう。回転速度は $0.7N_n$ まで、有効落差は $0.5H_n$ まで可変速運転が可能であることがわかる。また整流器とインバータにおいてある程度の電力損失が発生するが、定速度運転時と比べて水車効率、システム全体効率ともに向上することがわかる。

上記は、有効落差が低下する場合について調べたが、有効落差が高くなる場合には低回転運転時のような磁気飽和現象は起こらず、機械的強度と電氣的容量をオーバーしない限り、理論的にはまったく問題ない。

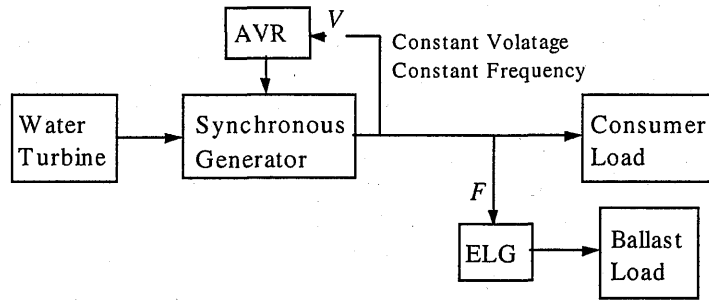


Figure 3.7 : Constant speed system in isolated operation

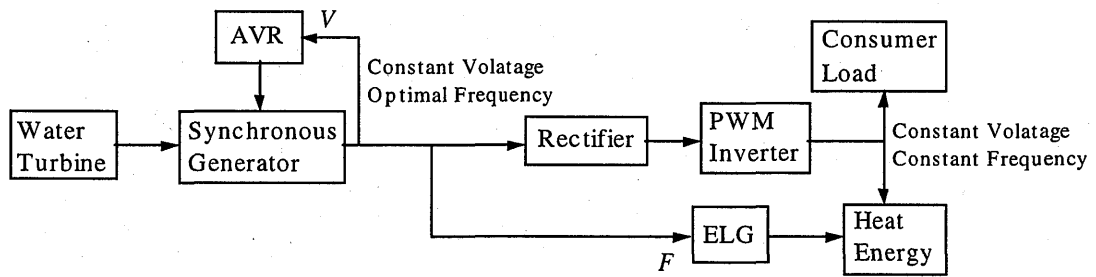


Figure 3.8 : Variable speed system in isolated operation

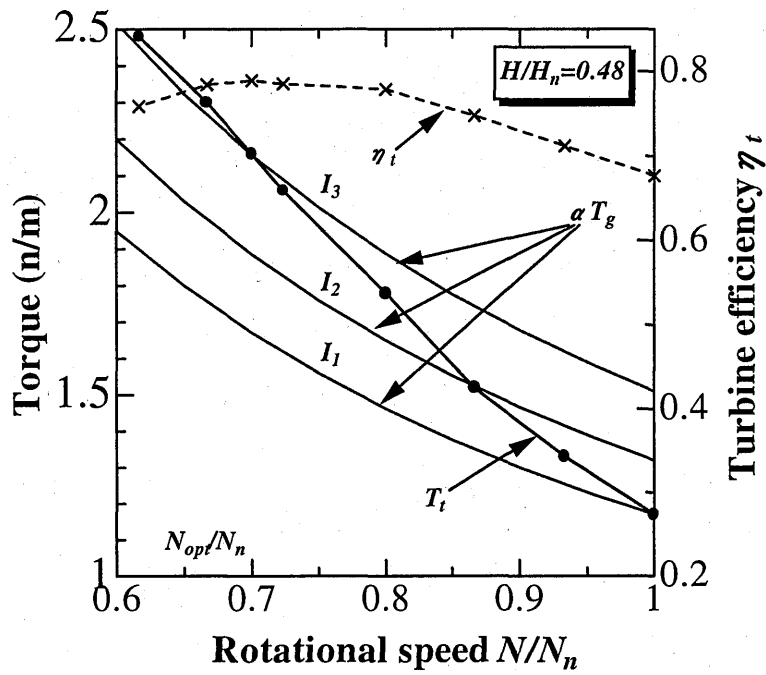


Figure 3.9 : Speed control by ELG

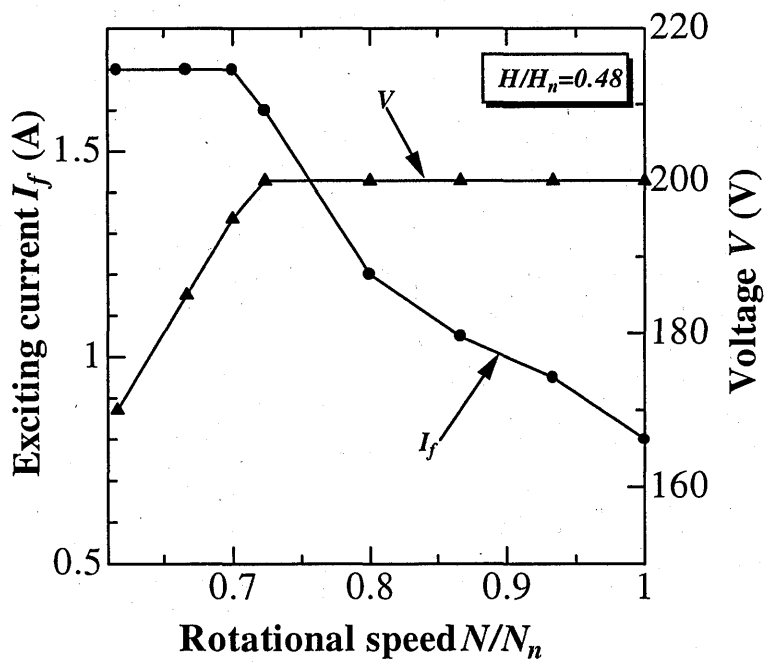


Figure 3.10 : Saturation curve of exciting current and voltage

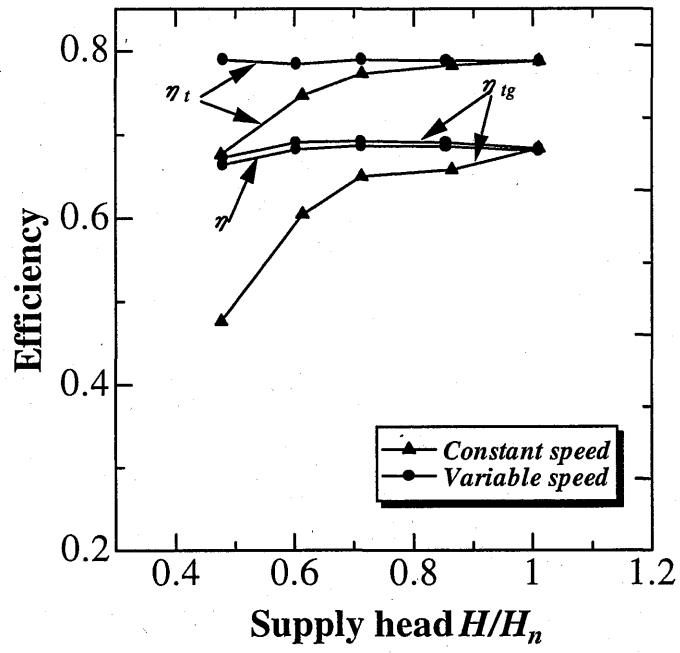


Figure 3.11 : Effect of variable speed operation

3.5 電力系統連系のマイクロ水力発電システムに関する実験結果

マイクロ水力発電システムを電力系統に連系する場合、発電機として誘導発電機を使うと、電力系統自身が発電電圧と周波数調整の役割を果たしてくれるため、複雑な電圧および周波数の調整装置を省略することが出来る。この場合構造が簡単で、安価なかご形誘導モータを発電機として使うことも出来るので、本研究ではこれを用いた。

誘導発電機を直接電力系統に連系する場合、回転子は同期回転速度 N_s (rpm)よりやや高い回転速度 N (rpm) で回転し、次のような関係が成り立つ。

$$N = (1-s) N_s, \quad N_s = \frac{60}{p} F \quad (3.5)$$

ここで、 F は一次（電源）側励磁周波数、 p は極対数であり、 s はすべりで発電領域では負の値をもつ。これより水車の落差が変動する際に、可変速運転を行うためには、周波数 F 、極対数 p 、すべり s を変えてやればよいことがわかる。

本研究では、水車・発電機回転軸の速度制御方法として、一次励磁周波数 F を制御する方法を使うこととした。この方法は、近年の可変速風力発電システム^{(3.8), (3.9)}に使われ、またマイクロ水力発電への適用例も報告されている^(3.10)が、安価な汎用インバータやコンバータを用いた、変落差対応の実用的可変速マイクロ水力発電システムは未だに実現されていない。

そこで本研究では、図 3.12 に示すように、汎用の三相誘導モータ駆動用 PWM インバータを誘導発電機の励磁用コンバータとし、また汎用の電力回生用 PWM コンバータを出力用インバータとした可変速マイクロ水力発電システムを構築した。

このシステムにおいて、励磁用コンバータは誘導発電機の一次側励磁を行うと同時に、後段の DC（直流）リンクに発電機出力を中継する。出力用インバータは DC リンクからの出力を、汎用の力率改善用高調波フィルタを介して電力系統に送出する。

以下、このシステムの最適運転制御法について実験的に検討する。

3.5.1 可変速運転による効率向上

誘導発電機の可変速制御も同期発電機の場合と同じく、入力トルク T_g の制御である。一般的に誘導発電機のトルクは次式で表される。

$$T_g = f_1(s) F \left(\frac{V}{F} \right)^2 \quad (3.6)$$

ここで、 $f_1(s)$ は発電機により決まるすべり s の関数、 V は一次励磁電圧である。また、発電機の特性上磁気飽和防止のために、 F を制御する場合には V/F = 一定となるよう V も同時に制御する必要がある (V/F 一定制御)。上式より、 V/F 比を一定に保ちながら F を調整することにより T_g を制御出来ることがわかる。

本研究で用いたコンバータは V/F 一定制御が可能で、また V/F 比を容易にかえることも出来る。簡単のために最大電圧 V_{max} を定格電圧の 200V に、最大周波数 F_{max} を定格周波数の 50Hz に設定した時の V/F 比を 1.0 と表示し、また F_{max} を定格周波数に固定し、 V_{max} を定格電圧の 0.9~0.4 倍に設定した時の V/F 比をそれぞれ 0.9、0.8、…、0.4 と表示する。

図 3.13 および 3.14 に、水車の有効落差を低落差である $H=0.6H_n$ に、 V/F 比を 1.0 に設定して、 F を変えることにより回転速度を変えて行った実験結果を示す。水車の効率は、 $0.78 N_n$ で最大となり、すべりは小さく、回転速度と F はほぼ直線的な関係となることがわかる。

図 3.15 に、 V/F 比を 1.0 に設定し、水車の有効落差 H を $(0.48 \sim 1.0)H_n$ の範囲で変化させて行った可変速運転の結果を示す。可変速運転を行うことにより、落差変化に拘らず水車効率 η_r はつねに最高効率を保てたが、 η_g と η は大変低いことがわかる。本研究では、水車の最大出力が 1.5kW 程度であるのに対して、実験装置の都合上誘導発電機、励磁用コンバータ、出力用インバータはそれぞれ定格容量が 3.7kW、5.5kW、7.5kW と大変大きいものを用いたので、すべりおよび力率ともに大変低く、誘導発電機は設計点から遠く離れたところで運転を行っている。またこれら電力変換装置における損失も、発生電力に比べて相対的に大きすぎることが低効率の原因である。

誘導発電機の運転を最適状態に保つためには、 V/F 比を最適値に保つ必要がある。そこで V/F 比を 0.4 (最小許容電圧) ~1.0 の範囲で変化させて可変速運転を行い、各落差における最適な V/F 比を求めたものが図 3.16 である。同図より落差が低下するにつれて、最適 V/F 比と最適回転速度は低下する。また図 3.17、図 3.18 に最適運転を行った時のシステムの効率、一次励磁周波数 F およびすべりを示すが、図 3.15 と比較すると、 V/F 比を変えることによって誘導発電機の運転効率は大幅に改善され、落差の変化に拘わらずいつも高効率を保てることがわかる。

3.5.2 システム有効性の検討

図 3.19 に、誘導発電機を直接電力系統に連系した定速度運転と、本システムを用いた可変速、可変 V/F 比運転の結果を比較する。定速度運転の場合には電力変換装置を使わないため、 η_g と η は等しいが、落差が $0.5H_n$ の低落差において効率はほぼ 0 であり、発電不能となる。これに対し可変速、可変 V/F 比運転の場合は、落差の変化に拘らず水車と発電機の効率は最高効率を保つことが判明する。

なお、本研究において、電力変換装置における損失は落差によらず 0.18kW 程度でほぼ一定であった。そのため出力が小さい低落差域においては、可変速、可変 V/F 比運転により水車と発電機の効率は高効率を保てたものの、発電機出力に対する電力変換装置損失の割合が大きくなるため、システム全体効率は大きく低下してしまった。この損失

は、発電電力に合った適切な容量の装置の使用により著しく改善されると考えられる。

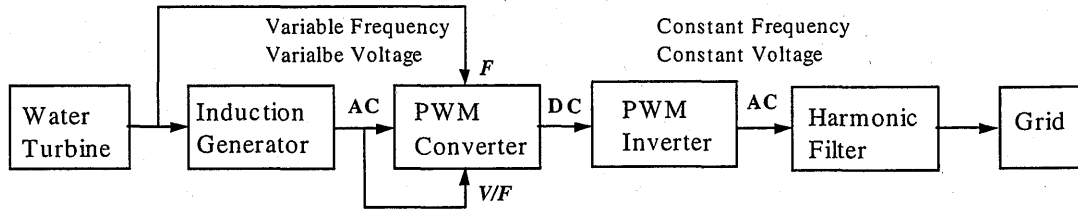


Figure 3.12 : Variable speed system in power grid connected

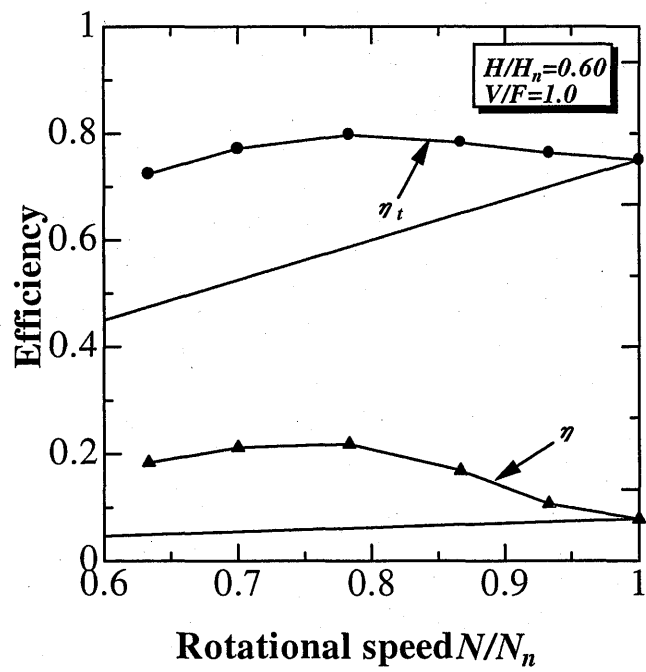


Figure 3.13 : Efficiency

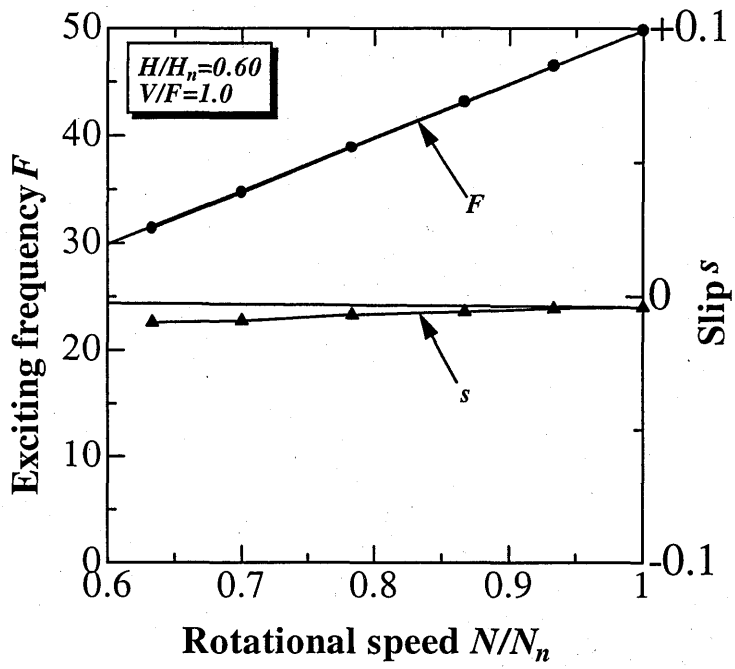


Figure 3.14 : Exciting frequency and slip

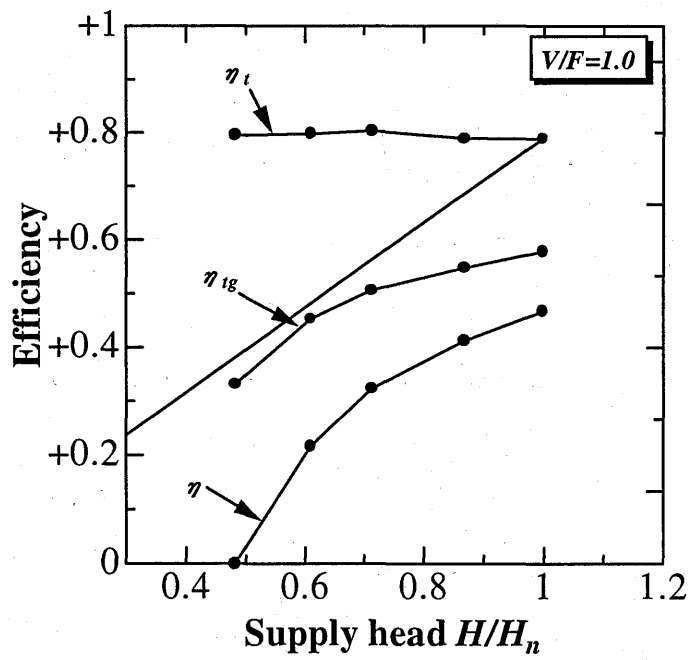


Figure 3.15 : Efficiency in constant V/F ratio

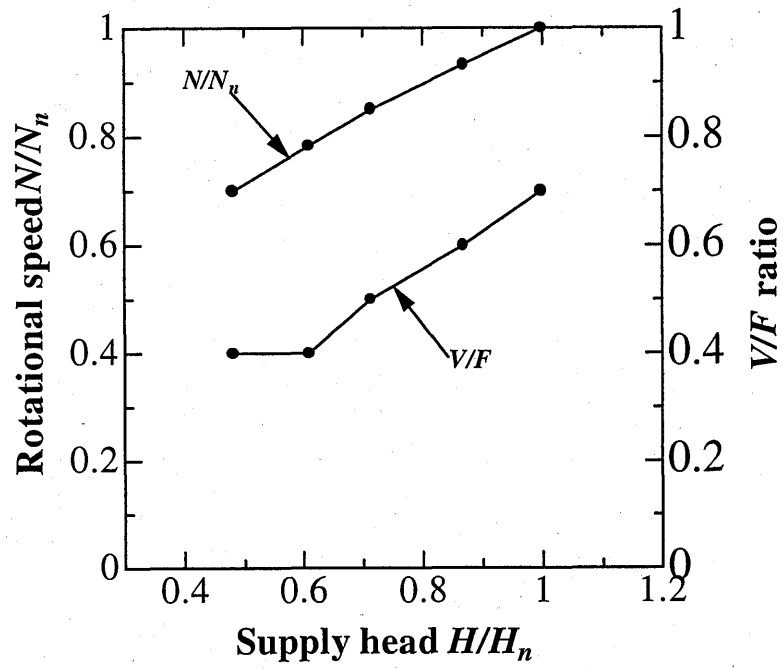


Figure 3.16 : Optimal speed and V/F ratio

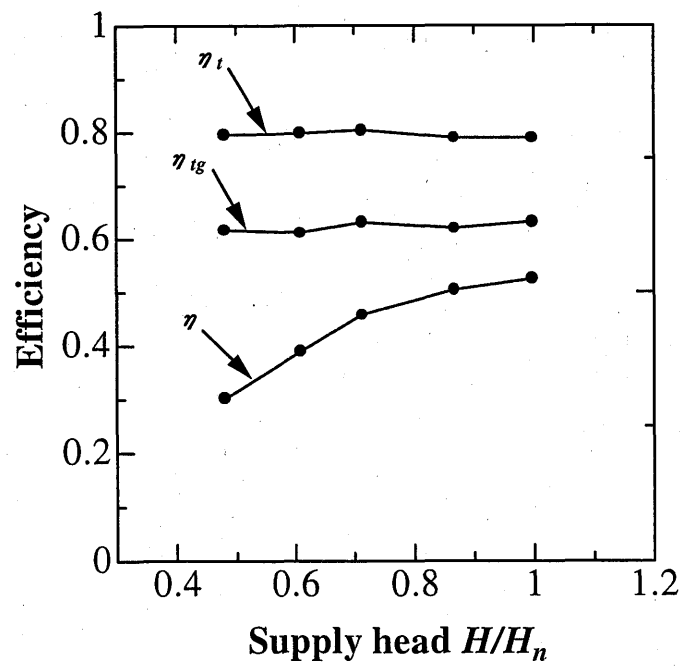


Figure 3.17 : Efficiency in case of optimal speed and V/F ratio

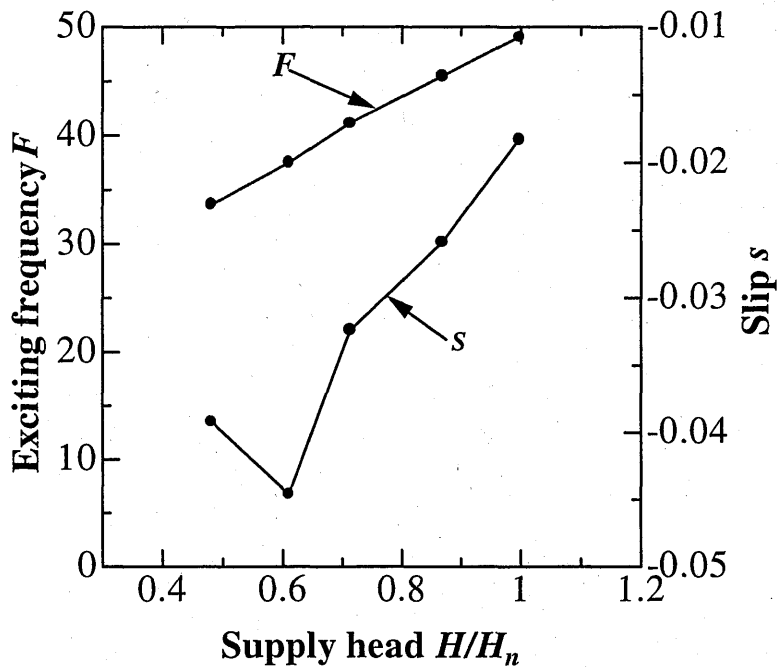


Figure 3.18 : Exciting frequency and slip in case of optimal speed and V/F ratio

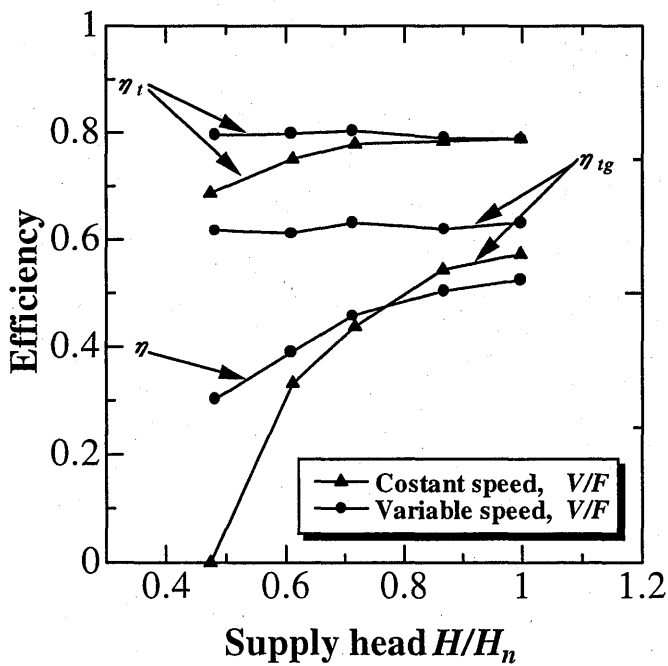


Figure 3.19 : Comparison of efficiency for different types of speed control

3.6 結言

本研究では、落差変動が大きいマイクロ水力において、実用的な可変速マイクロ水力発電システムの開発を行い、主に以下の結論を得た。

- (1) 従来のマイクロ水力発電システムに、安価かつ入手容易な汎用インバータやコンバータを組合せるだけで、落差の変動に対して効率よく運転できる可変速マイクロ水力発電システムを構築した。
- (2) 同期発電機を用いた単独運転では、可変速運転可能範囲は、低回転域で同期発電機の磁気飽和現象により制限される。本研究では、定格回転の 70%、基準落差の 50% まで可変速運転が可能であった。
- (3) 誘導発電機を用いて電力系統に連系する場合は、 V/F 一定運転において最適な V/F 比は落差の低下につれて低下する。各落差において、最適 V/F 比で運転することにより発電機の効率は最高効率を保つことが出来る。
- (4) 低落差貫流水車の効率は、ランナ中心部の圧力により強く影響され、効率を最大にする最適圧力が存在する。有効落差の増加とともにこの最適圧力は直線的に低下するが、水車最高効率は一定値を保つ。

なお、本研究で開発した発電システムは貫流水車のみならず、マイクロ水力発電システムとしてあらゆる形式の水車に適用可能である。

参考文献

- (3.1) 新エネルギー財団、多目的ダム変落差調査結果概要、1999.
- (3.2) 新エネルギー財団、可変速システム導入マニュアル（案）概要、1999.
- (3.3) 趙・他4名、貫流水車のマイクロ水力発電への適用、日本機械学会東海支部第50期総会講演論文集、2001、pp.377-378.
- (3.4) 北洞、貫流水車の低落差への適用、ターボ機械、25-4、1997、pp.200-204.
- (3.5) ターボ機械協会編、ハイドロタービン、日本工業出版、1991、pp.78-80.
- (3.6) 福富、マイクロ水力発電用クロスフロー水車の特性と内部流れ、ターボ機械、28-3、2000、pp.156-163.
- (3.7) Henderson, D.S, An Advanced Electronic Load Governor for Control of Micro Hydroelectric Generation, IEEE Trans. on Energy Conversion, 13-3 1998, pp.300-304.
- (3.8) 堀内・他2名、可変速風力発電システム用誘導発電機の V/F 制御による出力制御、電気学会論文集（B編）、118—10、1998、pp.1170-1176.
- (3.9) Andrew Miler・他2名, A Variable Speed Wind Turbine Power Control, IEEE Trans. on Energy Conversion, 12-2, 1997, pp.181-186.
- (3.10) 清水・他4名、新インバータシステムによるマイクロ水力発電システムの高性能化に関する研究、日本機械学会論文集（B編）、61 - 591、1995、pp.4024-4030.

4. 結言

本研究では、分散型エネルギーとしての小水力エネルギーの高効率利用を目的とし、低落差貫流水車のマイクロ水力発電への実用化を目指した研究を行い、以下の結論を得た。

(1) 水車構造の簡素化と性能向上に関して

- ・ コンパクト化したランナ室において、再流入損失の低減と吸出し効果の増加により、広い回転数範囲で効率が向上し、最高効率は有効落差にかかわらず、従来型ランナ室を用いた場合より約2%向上した。
- ・ 本研究で提案するランナ内部への空気供給方法は、ランナ室をコンパクト化でき、しかもランナ室の形状によらず従来の給気方法より効果が大きい。
- ・ ノズル内部のガイドベーンを除去しても、流路形状を適切に設計すれば、全体性能に影響は見られない。

(2) 可変速マイクロ水力発電用システムの実用化に関して

- ・ 従来のマイクロ水力発電システムに、安価かつ入手容易な汎用インバータやコンバータを組合せるだけで、落差の変動に対して効率よく運転できる可変速マイクロ水力発電システムを構築した。
- ・ 同期発電機を用いた単独運転では、可変速運転可能範囲は、低回転域で同期発電機の磁気飽和現象により制限される。本研究では、定格回転の70%、基準落差の50%まで可変速運転が可能であった。
- ・ 誘導発電機を用いて電力系統に連系する場合は、 V/F 一定運転において最適な V/F 比は落差の低下につれて低下する。各落差において、最適 V/F 比で運転することにより発電機の効率は最高効率を保つことが出来る。
- ・ 低落差貫流水車の効率は、ランナ中心部の圧力により強く影響され、効率を最大にする最適圧力が存在する。有効落差の増加とともにこの最適圧力は直線的に低下するが、水車最高効率は一定値を保つ。
- ・ 本研究で開発した発電システムは貫流水車のみならず、マイクロ水力発電システムとしてあらゆる形式の水車に適用可能である。

最後に、数々の助言と実験装置の制作に協力を頂いた富士電機(株)の大和昌一氏、塚

本直史氏ならびに相場茂氏に、また、本研究を進めるにあたり実験に協力された横浜国立大学の勢井賢太郎君に感謝の意を表す。

付属資料

An Application of Cross-Flow Turbine to Micro Hydroelectric Generation
(Investigation on Variable Head—Flow Characteristics)

○正 趙 林虎 (横国大院) 正 黒川 淳一 (横国大) 正 松井 純 (横国大)
正 今村 博 (横国大) 神戸 秀方 (横国大院)

Linhu ZHAO, Junichi KUROKAWA, Jun MATSUI, Hioroshi IMAMURA, and
Hidemasa, KAMITO, Yokohama Nat. Univ., Tokiwadai 79-5, Hodogaya-Ku, Yokohama

In this study, the Cross-Flow Turbine(CFT) is considered as the prime mover of a micro hydroelectric generation system, and the overall performance characteristics of the CFT under variable head and flow conditions are investigated by varying operating parameters such as the rotational speed, the rate of opening of guide vane and supply head etc.. The simple and effective operation of the CFT is also considered.

Key words: Cross-Flow Turbine, Micro Hydro Power, Fluid Machinery

1. はじめに

発電量が 100kw 以下のマイクロ水力発電では、環境保全とコスト低減の要求からダムを建設せず自然流量のまま発電するため、季節による流量と落差の変動が比較的に激しい。そのため、変落差、変流量特性に優れた、構造的に簡単で安価なマイクロ水力発電用水車の開発が期待される。本研究では、本学で長年にわたって研究されてきた低落差貫流水車⁽¹⁾をマイクロ水力発電に適用する際に、落差と流量の変動に対し、水車の回転速度、ガイドベーン開度、空気量調整バルブなどのパラメーターを調整して、貫流水車の総合的な特性を知り、いかに簡潔かつ効率よく貫流水車を運転させるかを検討した。

2. 実験装置及び方法

実験装置の全体図を Fig.1 に示す。実験装置は、放水槽、ポンプ、導水管、水車部分で構成され、導水管の途中には、流量測定用のオリフィスを設けた。ポンプ出口には、バルブを設けて水車に流す水の有効落差を変化させている。水車部分の下方に吸出し管を設けることで、有効落差の基準面を放水槽水面とした。Fig.2 に、低落差において良好な性能を示す貫流水車⁽¹⁾のノズル及びランナの形状を示す。

本研究では、貫流水車の 1) 水車の回転速度に対する特性；2) 流量が変化するときの特性；3) 落差が変化するときの特性について調べた。操作するパラメータとしては、落差を設定するポンプ出口のバルブ、水車の負荷で、2)、3)に関してはガイドベーン開度、空気供給バルブ開度を変化させて実験を行った。実験の条件としては、1)に関しては有効落差 $H=2.9\text{m}$ 一定の下で行い、2)に関しては有効落差 $H=2.9\text{m}$ 一定と水車回転数 n が $150\sim 360\text{rpm}$ 範囲内で、3)に関してはガイドベーン全開、回転数 n が $150\sim 360\text{rpm}$ 範囲内でその特性について調べた。

3. 実験結果及び考察

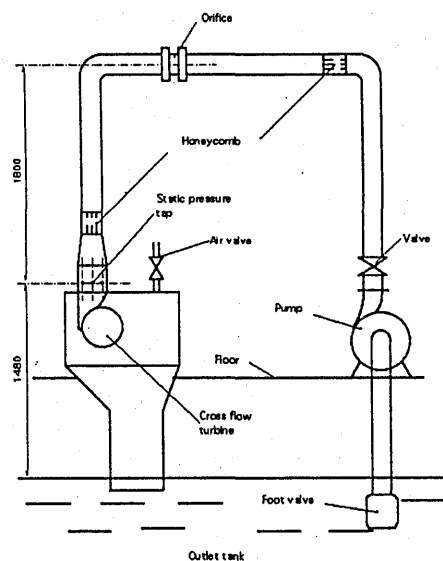


Fig. 1 Experimental setup

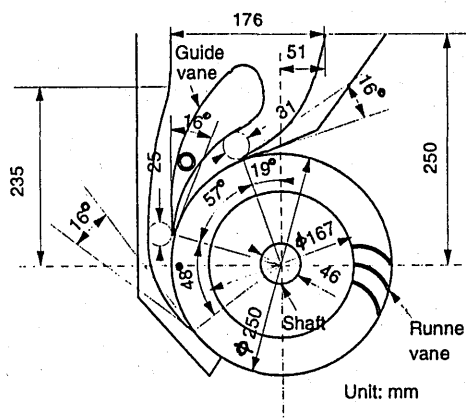


Fig.2 The nozzle and runner

Fig. 3 に供試水車の速度特性を示す。水車回転数が増加すると、流量はそれに反比例して減少するが、その減少量はそれほど大きくない。これは、 n が大きくなる時、水車ランナの遠心力によってランナ入り口部分で圧力が大きくなり、ランナ内に入れ込む流速が落ちることで流量が小さくなると考えられる。マイクロ水力発電において、従来の定速発電方式より、最近のパワー・エレクトロニクス技術による可変速発電システムが有効だとされている⁽²⁾。また、水車によっては、可変速運転による流量制御も可能である⁽³⁾。この図から、貫流水車において可変速運転により常に最高効率点で運転する必要はあるものの、回転数を変えることで流量を制御することは困難であることがわかる。

Fig. 4 はガイドベーン操作による貫流水車の変流量特性を示す。図中の Q_{wmax} はガイドベーン全開の時の流量を示す。効率、軸出力は回転数の増加と共に上昇し、 $nd/H^{1/2}=39.6$ 付近をピークとして、さらに高回転になると、下がり始める。流量の変化に対して、 $Q_w/Q_{wmax}=1.0$ の設計点より低い流量で若干高い効率を示し、流量 $Q_w/Q_{wmax}=0.8$ 付近から流量の減少に伴い効率が大きく下がる。このため効率が下がらない流量範囲はわずか $0.8 < Q_w/Q_{wmax}$ とせまい。実際の応用上は、ガイドベーンを 1:2 に分割した 2 枚とし、各自に操作することにより部分負荷効率を高める場合もあるが、一枚と比較してコストが高くなる。文献(4)では、マイクロ水力発電においてコストダウンのためにガイドベーンと調速機などの制御機構は一切省略すべきだとしている。

Fig. 5 に、任意落差、回転速度における効率と流量を示す。これを見ると、回転数に応じて最も効率が高い最適落差が存在することがわかる。一方、最高効率を示す回転数 n は落差が 2~3m の間では、ほぼ $n=270$ rpm を示し、回転数を変えなくても高い効率を得られることがわかる。特に、落差 H が 2~3m なら効率はほとんど落ちないが、流量 Q_w は 20%ほど大きく変わる。従って、貫流水車前後の有効落差を変えることにより流量 Q_w を制御しうることがわかる。

4. あとがき

貫流水車をマイクロ水力発電に適用する際に、可変速運転による効率向上は可能であるが、流量を制御することは出来ない。従来のガイドベーン操作による流量制御は低流量側で、効率の低下と同時に電動サーボモータなどの制御機構を必要とするためコストが上がる。貫流水車の簡素化と共に、もっと簡便な流量制御法の開発を行ってゆきたい。

参考文献

- 1) 北洞：“低落差貫流水車に関する研究”，横浜国大博士学位論文、1996
- 2) 清水・ほか 4 名、機論、61-591、B、Pp. 4024-4030、1995
- 3) Farrell C. et al., Journal of Energy Engineering, Vol. 113, No. 1, Pp. 1-13, 1987
- 4) Henderson D.S., IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 3, No. 3, Pp. 300-304, 1998

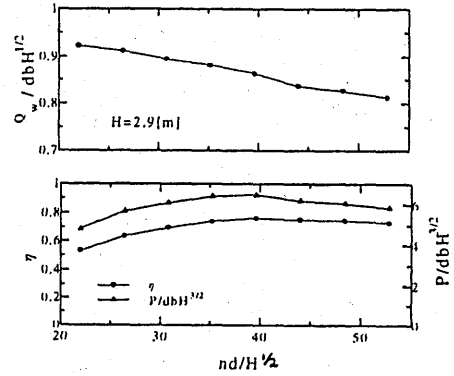


Fig. 3 Performance curves for variable speed

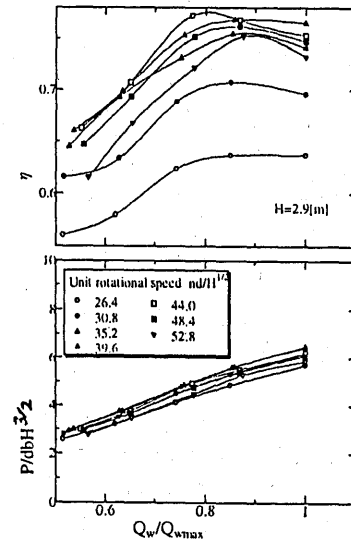


Fig. 4 Performance curves for variable flow

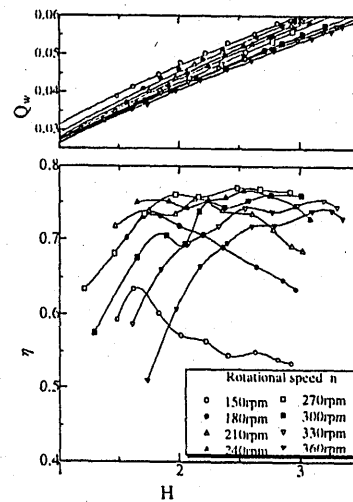


Fig. 5 Performance curves for variable head

(構造の簡素化、及び無拘束速度特性について)

An Application of Cross-Flow Turbine to Micro Hydroelectric Generation
(Investigation on Simplification of the Structure and Runaway Speed Characteristics)

○正 趙 林虎(横国大・院) 正 黒川 淳一(横国大) 正 松井 純 (横国大) 正 今村 博(横国大)

Linhu ZHAO, Junichi KUROKAWA, Jun MATSUI, Hiroshi IMAMURA,
Yokohama National University, Tokiwadai79-5, Hodogaya-Ku, Yokohama

Key words: Cross-Flow Turbine, Micro Hydro Power, Fluid Machinery

1. はじめに

発電量が100kW以下のマイクロ水力は、環境に優しい再生エネルギーであるが、従来の水車と発電方式をそのまま使うと、建設コストが割高となって実用的でない。本研究では、構造が簡単で安価な低落差貫流水車を、マイクロ水力発電へ実用化させることを目的として、ノズル内部のガイドベーンを除去し、ランナ室をコンパクト化するなど、可能な限り構造の簡素化を図った時の水車性能、及び無負荷状態における水車の無拘束速度特性について調べた。

2. 実験装置及び方法

実験装置の全体図を Fig. 1 に示す。実験装置は、放水槽、ポンプ、導水管、水車、及び発電機で構成される。導水管の途中には、流量測定用のオリフィスを設けた。水車の有効落差は、ポンプ出口に設けたバルブ開度の微調整により、一定値に設定する。水車部分の下方に吸出し管を設けることで、有効落差の基準面を放水槽水面とした。ランナ室内空気層の圧力は、空気バルブ開度により調整した。実験は、有効落差とランナ室内圧力を一定に保ち、発電機の負荷を変えることにより、水車の回転速度を変化させ、回転軸のトルク、オリフィス前後、及び各点の圧力を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 ガイドベーンの除去による性能変化

従来の水力発電においては、負荷変動に応じて流量調整用ガイドベーンの開度を変えることにより、発電周波数(水車回転数)の制御を行うが、调速機、サーボ・モーター等の付属設備が必要なので、コストが高くなる。

本研究では、ノズル内部にあるガイドベーンを除去し、負荷調整により回転数制御を行うことを考えている。ガイドベーン除去後のノズル形状は、文献(1)を参考にして修正し、Fig.2の形状とした。ガイドベーン除去後の効率は(Fig.4のA)、最高効率点で75%となり、ガイドベーンありの場合とほぼ等しい値が得られた。

3.2 ランナ室のコンパクト化

低落差に貫流水車を適用する場合、吸出し効果が重要となり、ランナ室と吸出し管が必要となる。従来の設計では、ランナ室の横幅は Fig.1 に示すように、室内自由表面があまり波打たない程度に広く取っている⁽²⁾。ランナ室が狭すぎると、低回転時にランナから出た流れが壁に当たり、衝突損失が起きるだけでなく、ランナ室上壁に設けた空気バルブからの空気

供給流路が遮断されてしまうため、ランナ内の流れがランナ軸に当たり、効率が低下する⁽³⁾。

そこで本研究では、ランナ室をコンパクト化し、ランナ内部に安定して空気を供給出来る方法を工夫した。Fig.2に示すように、ランナ側板に4つの空気ホールを設け、その中のNo.1のホールと同一位置に、ランナ室ケーシングにも外部から空気供給するための1つのホールを設けて、自然給気をした。運転時に外部から空気を入れると、入った空気はランナ室ケーシングと、ランナ側板の間の隙間(5mm)を通り、回転するランナ側板側のホールから、ランナ内部に流入する。

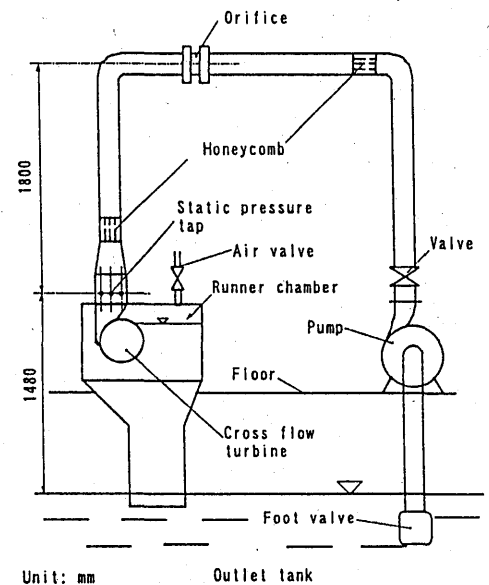


Fig. 1 Experimental setup

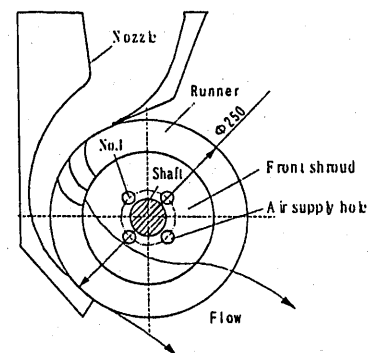


Fig. 2 Nozzle and runner

Fig.3に、新しく設計したランナ室の形状と、ランナ内に空気を供給して運転した時の最適回転数 ($nd/H^{1/2}=39.7$, n は回転数、 d はランナ径、 H は有効落差)における流れの状況を示している。

以下、従来のランナ室を用いてランナ室上壁より空気を供給するタイプをA形、コンパクト化したランナ室を用いてランナ内に空気を供給するタイプをB形と呼ぶことにする。

Fig.4には、回転速度変化に対する効率と単位軸出力の変化を示しているが、BとAを比べると、最適回転数より低回転側では、ランナから流出する流れがランナ室壁に当たって衝突損失が起るため、効率は幾分低下するが、高回転側で効率が約2%程度高くなっていることがわかる。これは、ランナ内への給気による吸出し効率の上昇と、ランナがほぼ完全に水中で回転するAの場合と比べて、ランナの回転抵抗が減少したためだと思われる。

Fig.5には単位水流量と、水に対する相対空気流量の変化を示しているを見ると、Aと比べてBの水流量はあまり変わっていないのに対し、空気流量は減少している。これは、ランナ室が狭くなったことと、吸出し効果を増やすためにランナ中心部の圧力を低くすることが出来たこと、そしてランナから水と一緒に吐き出された空気が、ランナ外周とランナ室壁との間の隙間から上昇して、ランナ内部に再流入することが原因だと思われる。

また、Fig. 3から水車効率を向上させるためには、ランナ室壁と噴流の間から流入する流れを減らすことが重要であることがわかる。そのためには、ランナ室の形状、特に出口部の形状を更に最適化する必要がある。

空気供給方式による無拘束速度特性の相違

ガイドベーンを除去すると、負荷がなくなった時の無拘束速度が上昇するという問題があり、回転速度の上昇を予め検討しておく必要がある。そこで、無負荷運転を行った。

Fig.4から、A,B両方式とも単位回転数 ($nd/H^{1/2}$) が75近くで無拘束状態になることがわかる。この値は、最適回転数の約1.89倍にあたる。

しかし、このとき発生するランナ室内の状況は、AとBで全く異なる。無拘束状態になるにつれて、ランナ外周部の圧力は高くなり、ランナ中心部の圧力は低くなる。そのため、Aでは空気がランナ内部に入れなくなり、ランナ内部の空気層は徐々になくなって、流れが軸に当り、最終的にはランナ室全体が水で充満される。これに対して、Bでは、無拘束状態に近付くほどランナ内部への空気供給量が増加し、無拘束状態になっても、ランナ内部の空気層がなくなって流れが軸に衝突することは起らない。従って、振動上からはBのほうが良いと思われる。

4. あとがき

ガイドベーンを除去し、しかもランナ室を著しく小型化すると、かなり広い回転数範囲で効率が向上した。この水車を用いた高効率なマイクロ水力発電システムを実現するには、ランナ室を最適化し、新しいランナ室に適合した高効率な吸出し管を設け、更にいつも最適回転数で運転出来るように、

安価な電力変換装置を用いた可変速発電システムを導入する必要がある。

参考文献

- 1) 福富、「マイクロ水力発電用クロスフロー水車の特性と内部流れ」、ターボ機械協会誌、28・3、Pp.156-163、2000
- 2) 豊倉・他3名、「貫流水車に関する研究(低落差への適用)」、機論B、53-491、Pp.2078-2084、1987
- 3) 北洞・他3名、「低落差貫流水車の性能向上への一寄与」ターボ機械協会誌、18-2、Pp.73-78、1990

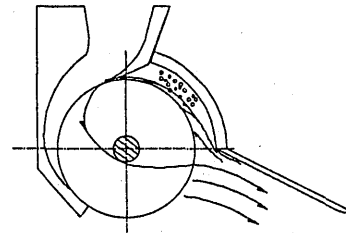


Fig.3 Flow in the new runner chamber ($nd/H^{1/2}=39.7$)

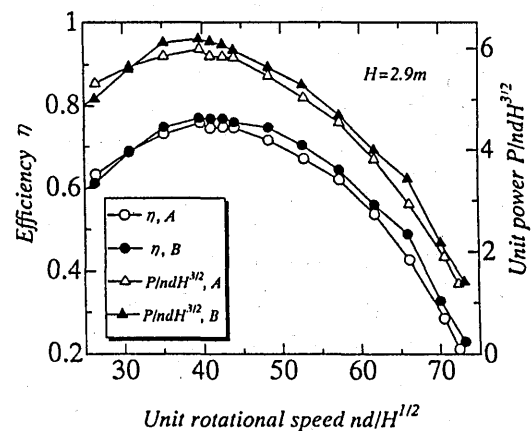


Fig.4 Comparison of efficiency and power

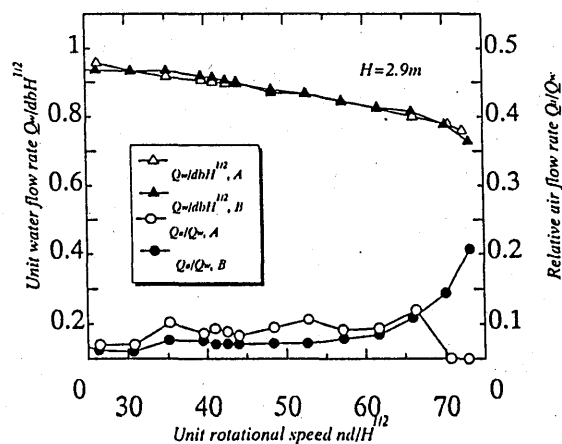


Fig.5 Comparison of water and air flow rates

可変速マイクロ水力発電システムの実用化に関する研究

A study on utilization of variable speed micro-hydropower system

○正 趙 林虎 (横国大・院) 正 黒川 淳一 (横国大) 正 松井 純 (横国大)
正 今村 博 (横国大) 正 塚本 直史 (富士・フォイトハイドロ) 正 大和 昌一 (富士電機)

Linhu ZHAO, Junichi KUROKAWA, Jun MATSUI and Hiroshi IMAMURA

Yokohama National University, Tokiwadai79-5, Hodogaya-Ku, Yokohama

Tadashi TSUKAMOTO, Voith Fuji, Tanabeshinden 1-1, Kawasaki-Ku, Kawasaki

Shoichi YAMATO, Fuji Electric Co., Ltd, Osaki 1-Chome, Shinagawa-Ku, Tokyo

The conventional variable head apparatus are not suitable for micro-hydropower because of the relatively high costs. In this study, a new variable speed system for micro-hydropower is developed. The system is based on the electronic load governor and is composed of several low-cost commercial power electronic elements. The experimental results showed that turbine performance at off-design operation and range of operating heads are improved by using this system. The performance characteristics of the simplified low-head cross-flow turbine are also investigated in wide range of head.

Key Words: Natural Energy, Micro-Hydro Power, Cross-Flow Turbine, Variable Head, Variable Speed Control

1. 緒言

水力はクリーンで再生可能な自然エネルギーであるが、経済性の高い大容量地点はほぼ開発つくされ、今後は中小水力や、これまで見捨てられていた既設多目的ダムの放流水、工場排水や農業用水など 300 kW 以下のマイクロ水力の有効利用が期待される。

既設多目的ダムの放流水を利用する場合、季節によるダム水位の変動のために水車の利用可能落差の変動が大きい。全国の多目的ダムにおいて、ダム水位の変動幅がダム高さの 35% 以上である地点は全地点数の 68% にも達する⁽¹⁾。また、長い管路をもつ浄水場では、静落差は一定であるものの、水量の変化による管路摩擦損失の変化のために、水車に利用できる有効落差は大きく変化する。

上記のような変落差対策として、これまで可動羽根機構の採用、巻線型誘導発電機の二次側励磁制御による可変速技術⁽²⁾などが実用化されたが、これらの方法は水車や電力変換装置の特殊設計を必要とするため、発生電力が少ないマイクロ水力に対してはコスト高く、採算性が悪い。

一方、空気機械や一部の汎用ポンプなどにおいて可変速制御による省エネルギー化が進み、汎用のインバータやコンバータ技術の進歩が目覚しく、400 kW クラスの汎用品が安価に入手できるようになってきた。

そこで本研究では、落差変動が大きいマイクロ水力の有効利用を目的として、汎用のインバータとコンバータを用いた実用的な可変速マイクロ水力発電システムを提案し、実験によりその有効性を検証した。水車はマイクロ水力用に簡素化された低落差貫流水車を用い、その変落差特性を調べるとともに、同期発電機を用いた独立型電源の場合と、かご型誘導発電機を用いて電力系統に連携する場合に分けて検討したが、今回は前者の結果のみについて報告する。

2. 実験装置

図 1 に供試水車の形状を示す。この水車は、低落差貫流水車をマイクロ水力に適用的ために、流量調整用のガイドベーンを除去し、ランナ内部への空気供給方法の工夫によるランナ室のコンパクト化等、可能な限り構造の簡素化を図るとともに、性能向上を図ったものである⁽³⁾。

そのノズルとランナの形状を図 2 に示す。ランナ羽根は 26 枚で、周方向から測った羽根出口角は 87° 、入口角は 30° である⁽¹⁰⁾。またランナはオーバーハング形式で、内部が観察

出来るよう側板は透明アクリル板により製作した。ノズル、ランナ、及びランナ室の流路幅はすべて等しく $b=150\text{mm}$ 、放水面からランナ中心までの高さ $H_s=1005\text{mm}$ である。

水はポンプより供給され、導水管、流量測定用のオリフイ

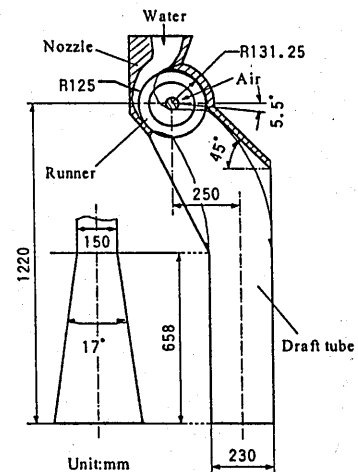


Fig.1 Cross-flow turbine

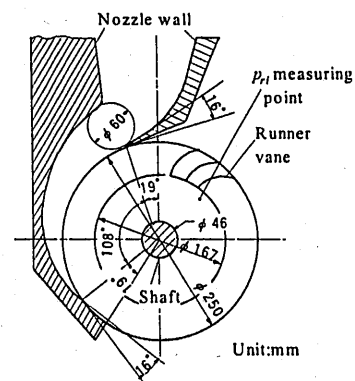


Fig.2 Nozzle and runner

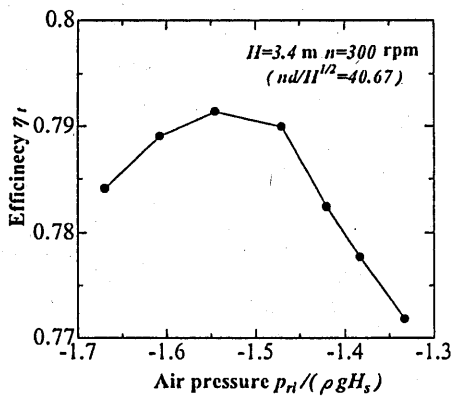


Fig.3 Effect of air pressure

スを経て、水車に導かれる。水車の有効落差（放水面を基準としたノズル入口の全ヘッド）は、ポンプ出口に設けたバルブ開度の微調整により一定値に設定する。貫流水車では、性能低下を避けるためにランナの中心部に空気を供給することが重要となるが、空気はランナ室内と外気の圧力差により自然給気され、空気量は空気バルブ開度により調整する。

3. 低落差貫流水車の変落差特性

低落差貫流水車の効率は、ランナ中心圧力 p_r の影響を強く受ける。吸出し効果を高め、横断流を増やすためには、ランナ中心部の圧力を低くした方が良いが、低すぎると流れがランナ軸に衝突し、効率が低下する。

そこで、 p_r が効率に及ぼす影響を調べ、その結果を図3に示す (H_s は放水面からランナ中心までの高さ)。同図より効率が最大となる最適ランナ内部圧力 (p_r)_{opt} が存在することがわかる。この時の流れの様子 (図1) を目視観察すると、流れはちょうどランナ軸の下方を通してランナ内部を貫流する。

この (p_r)_{opt} は落差の増加とともに図4の様に低下する。これは有効落差の増加により回転速度が速くなり、遠心力が増加するためである。また図4より、ランナ中心圧力 p_r を最適値に保ちさえすれば、水車の最高効率 (η_1)_{max} は変化しないことがわかる。

各有効落差において、ランナ中心圧力を最適値に保ち、回転速度を変化させた時の速度特性を図5に示す。横軸に単位回転速度 $nd/H^{1/2}$ をとってまとめると、有効落差の変化によらず効率曲線はほぼ一致し、最高効率となる単位回転速度 ($nd/H^{1/2}$)_{opt} は41前後であることがわかる。

これより有効落差 H が変化する時に、 $nd/H^{1/2}$ が ($nd/H^{1/2}$)_{opt} となるように水車の回転速度 n を調整すれば、有効落差の変化に係らずいつも最高効率点で運転できることがわかる。

定速度運転 ($n=\text{const}$) を行った時、有効落差の変化による流れの様子は図6の様に変化する。低落差側では流れが軸から離れ、横断流が減って効率が低下するが、高落差側では逆に横断流は増えるが、流れが軸に当たって効率が低下し、振動を起こす。また、落差が最適落差から離れ過ぎると、ランナペーンの前縁でキャビテーションが発生するので、実際に運転可能な落差範囲は制限されている⁽⁴⁾。

4. マイクロ水力発電システムの検討

4-1 定速度マイクロ水力発電システム 水力発電により発生された電気の品質として、電圧と周波数の安定性が問われる。

従来の水力発電に用いられて来た周波数制御方式は、負荷

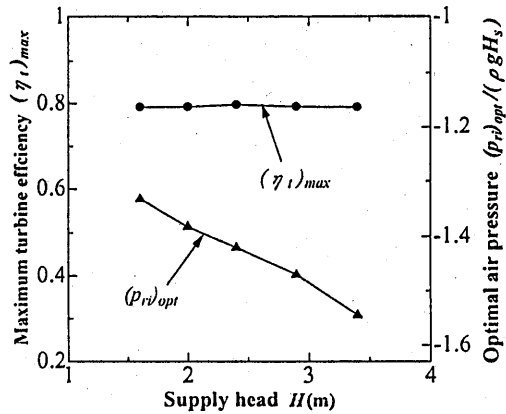


Fig.4 Effect of head

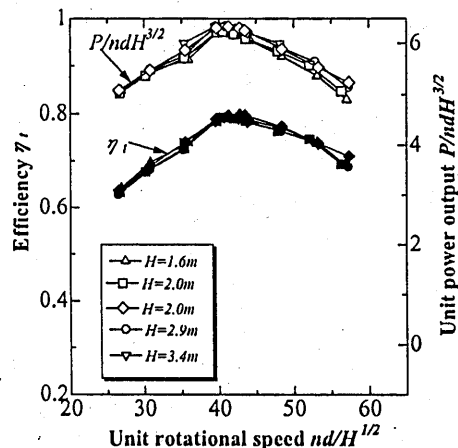


Fig.5 Performance curves for variable head

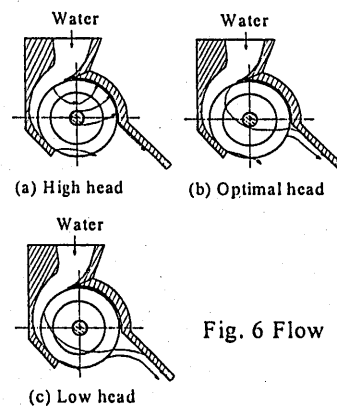


Fig. 6 Flow

変動に応じて流量を調整するが、調速機、サーボモーター等の複雑な付属装置が必要で、コストが高い。マイクロ水力発電においては、これらの付属装置を全部省略して流量調整を行わず、周波数制御はバラスト負荷を制御することにより行う方式を採用すべきである。

図7に、そのマイクロ水力発電システムの構成を示す。図の中で AVR は自動電圧調整装置、ELG は電子負荷調整装置の略字である。このシステムでは、AVR により励磁電流を調整することによって電圧を一定に保ち、水車入力と実負荷とのアンバランスは ELG によりバラスト負荷に消費させることによって発生電力の周波数を一定に保つ。この場合、必要と

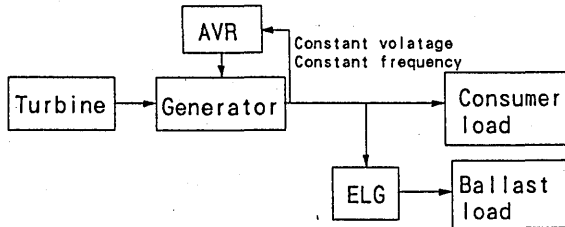


Fig.7 Constant speed system

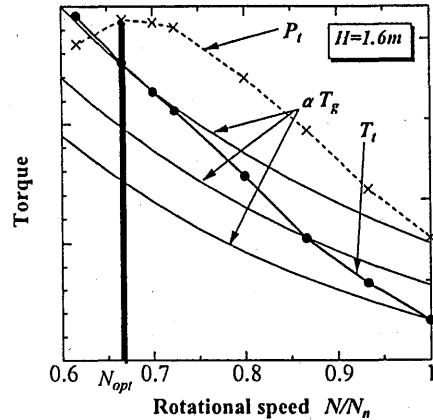


Fig.9 Speed control by ELG

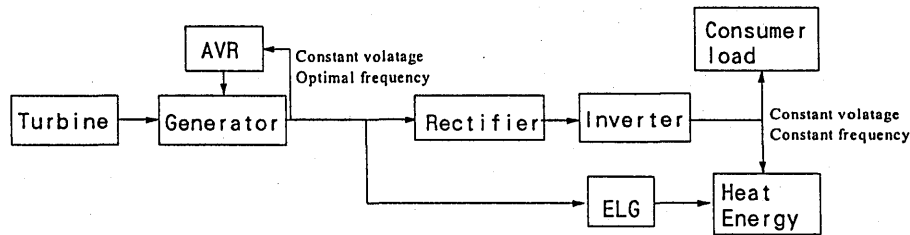


Fig.8 Variable speed micro-hydropower system

する制御装置のコストは従来の10%程度過ぎない⁽⁵⁾。

本研究で用いた発電機は、定格出力 2.5kW、定格回転数 $N_n=1500\text{rpm}$ の3相他励同期発電機である。AVRとELGともに市販品で、位相制御による制御方式を使っている。また実負荷には三相結線した白熱電球を、バラスト負荷には三相水中ヒーターを使っているため負荷率は1.0である。

4-2 可変速マイクロ水力発電システムの提案 定速度マイクロ水力発電システムの場合、発生電力の周波数を一定に保つためには、水車-発電機回転軸の回転速度は同期速度に一定にしなければならない。そのため、落差が変動すると水車の効率が低下するだけでなく、落差の変動の大きい時には運転不可能となる。

そこで落差が変動しても、可変速運転を行うことにより水車が効率よく運転出来る、図8に示すような可変速マイクロ水力発電システムを提案する。このシステムは、定速度マイクロ水力発電システムに、市販の整流器とインバータを加えて構築したものである。

このシステムにおいて、発電電圧は同じくAVRにより定格電圧に調整するが、ELGは水車-発電機回転軸の回転速度を、落差変動に応じた最適回転速度となるように、バラスト負荷を調整する。そのため発電機で発生した電力は、電圧は定格電圧であるものの、周波数が定格周波数でないので、一旦整流器により直流に整流され、その後インバータにより定格電圧、定格周波数の電流になおされて負荷に供給される。またこのシステムをコージェネレーション型にすれば、バラスト負荷を捨てるのではなく熱エネルギーとして回収可能であるので、運転可能な落差の範囲が広がるだけでなく、システム全体の効率も向上することになる。

可変速運転を行うことにより、水車側は効率よく運転出来るが、同期発電機は定格速度で運転するように設計されているので、以下同期発電機の特徴から可変速運転の実現可能性

を検証する。

1) 発電周波数(水車回転速度)の制御

一般的に同期発電機において、以下のような関係が成り立つ。

$$T_g = k_1 \Phi I$$

$$E_0 = k_2 \Phi N$$

$$\dot{E}_0 = \dot{V} + \dot{Z}_s i$$

ここで、 T_g は発電機入力トルク(N・m)、 Φ は磁束(wb)、

I は負荷電流(A)、 E_0 は電機子起電力(V)、 N は発電機の回転速度(rpm)、 \dot{V} は端子電圧(V)、 \dot{Z}_s は同期インピーダンス、 k_1 、 k_2 は発電機により決まる定数である。

簡単化のために、発電機の内部インピーダンスによる電圧降下を無視して $E_0 = V$ とすると、

$$T_g N = \frac{k_1}{k_2} V I$$

となり、AVRにより端子電圧 V を一定に保つことが出来れば、発電機の入力トルク・回転速度曲線は負荷電流 I のみより決まる。

同じく簡単化のために、水車と発電機間の伝達損失を無視し、その増速ギヤ比を α とすると、水車-発電機回転軸の回転速度は、図9において αT_g と水車出力トルク T_t が釣合う点で落ち着く。図9には、水車の出力(P_t)曲線も破線で表しているが、負荷電流 I を変えることにより発電機の入力トルク・回転速度曲線を変え、回転速度を N_{opt} となるように制御することが出来る。

2) 発電端子電圧の制御

$$V = \cos nt$$

$$E_0 = k_2 \Phi N \approx V$$

$$\Phi = \frac{V}{k_2 N}$$

上式からわかるように、可変速運転を行う時に発電電圧 V を一定に保つためには、回転速度に応じて励磁電流 I_f の調整により磁束 Φ を調整しなければならない。回転速度が定格回転速度を上回る時には問題ないが、回転速度が定格回転より低下し過ぎると、励磁電流 I_f を増やしても磁束 Φ が増えない、言わば磁気飽和現象が起こり、発電電圧を定格電圧に保つことが出来なくなる。

本研究ではギヤ比 1:5 の増速機を使っているため、発電機側の定格回転 $N_n=1500\text{rpm}$ は、水車側にとっては定格回転 $n_p=300\text{rpm}$ に相当し、その時の単位回転速度 $nd/H^{1/2}$ が $(nd/H^{1/2})_{pm}=41$ となる有効落差 H は 3.35m である。

図 10 に、水車の有効落差を低落差である $H=1.6\text{m}$ に設定して行った可変速実験の飽和曲線を示す。発電機の回転速度が定格回転速度の 70% までは定格電圧 200V を保つことが出来たが、それ以上回転速度を下げると定格電圧を保てなくなる。また回転速度が定格値の 60% までさがると、出力電圧がインバータの許容入力電圧の下限である 170V までさがり、自動運転停止となる。図 11 には、その時の効率変化を示す。

水車の有効落差を 1.6~3.4m の範囲で変化させて可変速運転を行い、その結果を図 12 に定速運転時と比較する。回転速度は定格回転の 70% まで、有効落差としては 50% までさげても可変速運転を行うことが可能であることがわかる。またその時、定速運転時に比べて水車単体の効率は 11%、システム全体の効率は 20% 増加した。

本研究では、有効落差が低下する場合について調べたが、有効落差が高くなる場合の可変速運転は、低回転運転時のような磁気飽和現象は起こらず、水車、発電機の機械的強度と、発電機、インバータ等の電氣的容量をオーバーしない限り、理論的にはまったく問題ない。

5. 結論

本研究では、落差の変動が大きいマイクロ水力において、実用的な可変速マイクロ水力発電システムの開発を行い、主に次のような結論を得られた。

(1) 従来のマイクロ水力発電システムに、安価な市販の整流器とインバータを組合せるだけで、落差の変動に対して効率よく運転できる可変速マイクロ水力発電システムが構築できた。

(2) 本システムの可変速運転可能範囲は、低回転域で同期発電機の磁気飽和現象により制限される。本研究範囲では、定格回転の 70% の低回転、設計落差の 50% の低落差まで運転可能であった。

(3) マイクロ水力用低落差貫流水車において、水車効率はランナ中心の圧力により強く影響され、最適値が存在する。有効落差の増加とともにこの最適圧力は直線的に低下するが、水車最高効率は一定値を保つ。

6. 参考文献

- (1) 新エネルギー財団、“多目的ダム変落差調査結果概要”、1999 年
- (2) 新エネルギー財団、“可変速システム導入マニュアル概成”、1999 年
- (3) 趙、他 4 名、日本機械学会東海支部第 50 期総会講演論文集、377、2001 年

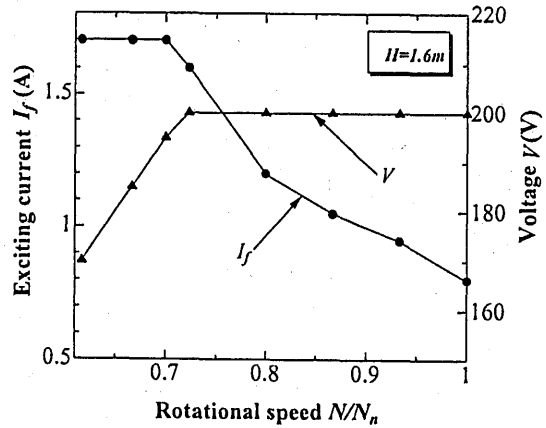


Fig.10 Saturation curve

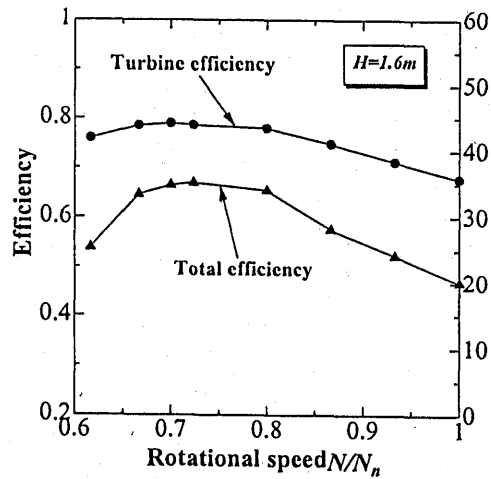


Fig. 11 Efficiency

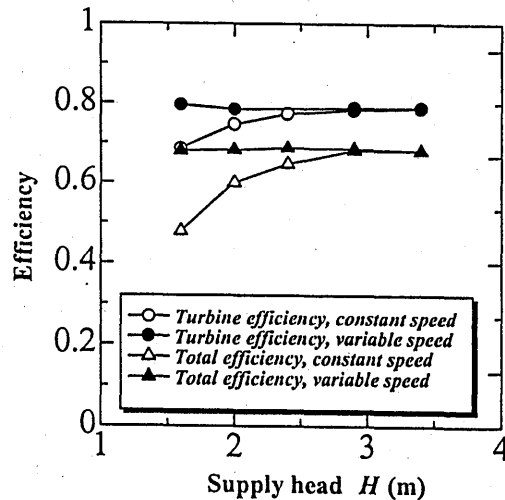


Fig.12 Effect of variable speed operation

- (4) 日本ターボ機械協会、“ハイドロタービン”、日本工業出版、1991 年
- (5) Henderson, D.S, IEEE Trans. on Energy Conversion, 300, Vol.13, No. 3, 1998 年