平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高機能マイクロ水力発電装置に用いる高効率タービン

(トルネードタービン)の開発」

研究開発成果等報告書

平成26年 3月

- 委託者 近畿経済産業局
- 委託先 公立大学法人 大阪府立大学

目次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
(1)研究開発の背景	3
(2)研究開発の目的及び目標	3
1-2 研究体制	5
(1)研究組織(全体)	5
(2)管理体制	5
(3)管理員及び研究員	6
(4)経理担当者及び業務管理者	7
1-3 成果概要	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	10
第2章 本論	11
2-1 大阪府立大学高専(構造の CAD 設計と流れの実験的解析)	11
(1) 模型実験装置の概要と製作	11
1) 模型実験の概要	11
2)実験装置の改良	12
3) RP 装置によるモデルの成形	13
4)ケーシング上部の仕様	14
5)ケーシング下部の仕様	14
6) タービン回転軸周りの仕様	15
7)タービン部の組み立て	16
8) トルクメータ	17
9)非接触回転計	18
(2)性能確認実験	18
1)実験内容	18
(3) 実験結果	20
(4) 考察	22

2-2 大阪府立大学(流れのシミュレーション)	23
(1) 実施目標と実施方法	23
(2) 実施内容	23
1) 複合パラメータにおける羽根の最適形状	23
2) タービン入口導入部のガイド羽根設置効果	28
3) タービン上にガイド羽根を設置した場合	30
4) タービンと外周容器の隙間が及ぼす影響	32
5) タービン羽根高さをねじり方向に変化させた場合	33
6) 最適化タービンを用いた入口流速・形状の影響	35
2-3 CAD/CAM試作と全体の装置開発(株式会社エイワット)	39
(1)実施計画	39
(2) 実施内容	39
1) タービンの設計	39
2) タービンの製作	41
3)ガイドベーン・ドラフトチューブ・本体部の製作	42

第1章 研究開発の概要

低炭素化未利用エネルギーの開発と自律分散エネルギー供給システムの普及要請に応え るため、日本の河川に適応した低落差対応で適用水量範囲が広く、高効率・ローコストで メンテナンスフリーなマイクロ水力発電装置用の縦型トルネードタービンを切削加工技術 の高度化により開発する.流体力学の原理を最大限利用する三次元ブレード形状は、構造 計算と流体シミュレーション技術にて効率的に設計し、水流実証実験を経て最適化する.

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1)研究開発の背景

低炭素社会実現に向けて、太陽光発電、風力発電などの再生可能エネルギー開発を支援 する様々な施策が行われている.再生可能エネルギーの一つとされている水力発電におい ては、大規模設備を利用した発電の研究は進められてきたものの、平野部など電力消費者 の居住する地域に小規模な水力発電装置を設ける試みは進んでいないのが実状である.低 落差、小水量、工事費用、水利権など、小規模水力発電特有の課題に対する打開策が見出 されてこなかったことがその一因と考えられる.しかしながら電力ニーズは増加の一途を 辿っており、地産地消の自律分散型地域エネルギー需給システム構築への期待も日毎に高 まっている.特にこの地産地消の自律分散エネルギー供給システムは、東日本大震災に端 を発する原発事故の教訓から、震災復興後の近未来の地域社会のエネルギー供給システム を設計する上でその重要性を大きく増している.

(2)研究開発の目的及び目標

従来型の水力発電装置は、表1-1.1に示すように開放周流型、クロスフロー型、プロペラ型、フランシス型、カプラン型そして、らせん型まで数多くの形態が用いられてきており、それぞれ得手不得手があった.しかしながら、本研究で目的とする低落差対応で小型高効率低コスト、かつ保守や生物環境対応の全てを満足するものは存在していない.

(保守や生物環境対応とは、ごみが絡みにくく、魚類などが巻き込まれても損傷を受けな いシステムを指している.)そこで本研究では、下図の全ての項目を満足する「トルネー ド型」と示した革新的な高効率水車システムを研究開発する.具体的な内容としては、高 効率・ローコストでメンテナンスフリーなマイクロ水力発電装置用の直径 200mm~300mmの トルネードタービンを切削加工技術の高度化により開発する.流体力学の原理を最大限利 用する三次元ブレード形状は、構造計算と流体シミュレーション技術にて効率的に設計し、 水流実証実験を経て最適化することにより、最終的に総合効率 70%の1~5KW のマイクロ 水力発電システムの構築を目標にする.そうすることで、小水力発電システムの普及を促 進させ、地域分散エネルギー供給の中核システムとして膨大な未利用エネルギーの活用に 貢献することを目指す.

種類	開放周流型	クロスフロー 型	プロペラ型	フランシス型 カプラン型	らせん型	トルネード型
構造 タイプ		XIN-2		St FA-Y		
タービン 形状						P
低落差	0	O	0	O	O	0
高効率範囲	Δ	\bigtriangleup	0	O	O	0
設備の大き さ	大	大	小	大	大	小
導入コスト	高	高	低	高	高	低
保守・生物 環境対応	0		×		0	Ø

表1-1.1 水力発電装置の種類と構造

1-2 研究体制

(1)研究組織(全体)



(2) 管理体制

事業管理機関 [公立大学法人大阪府立大学]



再委託先

株式会社エイワット



(3)管理員及び研究員

【事業管理機関】 公立大学法人大阪府立大学

管理員

氏名	所属・役職	<u>実担当施内容</u> <u>(番号)</u>
角谷 佳則	地域連携研究機構 地域連携研究推進課 産学官連携室 室長	5



氏名	所属・役職	<u>実施内容担当</u> <u>(番号)</u>
須賀 一彦	大学院 工学研究科 機械系専攻 機械工学分野 教授	1
藤原 德一	工業高等専門学校 校長	12

金田 昌之	大学院 工学研究科 機械系専攻 機械工学分野 准教授	1
里中 直樹	工業高等専門学校 総合工学システム学科 機械システムコース 准教授	12
上村 匡敬	工業高等専門学校 総合工学システム学科 メカトロニクスコース 准教授	12

【再委託先】 株式会社エイワット研究員

Ę	氏 名	所属・役職	実施担当内容(番号)
柴田	政明	代表取締役	1234
柴田	規之	製造部工場長	234
竹尾	敬三	新エネルギー事業部 事業開発部長	1234
北口	亮吉	新エネルギー事業部 部長	234

(4)経理担当者及び業務管理者

(事業管理機関)

公立大学法人大阪府立大学

(経理担当者)	地域連携研究機構	地域連携研究推進課	岡本	公明
		産学官連携室 専門	月役		
(業務管理者)	地域連携研究機構	地域連携研究推進課	角谷	佳則
		産学官連携室 室長			

(再委託先)

株式会社エイワット

(経理担当者) 総務部 経理担当(業務管理者) 代表取締役

柴田ひとみ 柴田 政明 1-3 成果概要

以下に成果の概要を記述する.

構造・流れ等のシミュレーション

(公立大学法人大阪府立大学,株式会社エイワット) 公立大学法人大阪府立大学は、府立大学高専で CAD により試作されたタービンの基本モ デル(3 枚羽根トルネードタービンの半径高さ比 1.0)を用いて,基本モデル周りの流 動数値シミュレーションを実施した.タービンの回転を反映するために、まずは容器が 回転する系を考案し、基礎的なデータを収取した. その後、タービンそのものが回転し ているシミュレーションに改良し, 諸元を様々に変更したモデル周りの流動を数値シュ ミレーションすることで、形状合理化への指針を明らかにすることを試みた.さらに、 府立大学高 専 では 基本モデルを成型加工し,モデル構造に対しての流動解析実験を実 施した.そこでは水流の方向と羽根の捩じり方向の関係を確認した.そして,水流の回 転方向とタービン羽根の捩じり方向が同じ方向の場合に回転出力が得られることを確 認した.本流動解析実験の結果をシミュレーションに反映させ,最適諸元に関して,最 適な羽根枚数,タービン羽根高さ,タービン高さ,容器形状,ガイド羽根の有無を見出 し、タービン半径高さ比に関しては、タービン径に応じた最適値があることを見出した. その結果各タービンにおける最適な回転数や,性能を見積もることができた.さらに, 製造時の状況を鑑みて、タービンとケーシングの隙間が性能に及ぼす影響についても検 討し、実機レベルで許容できる隙間を提示することができた. タービン出口の流動可視 化実験も実施し、旋回流の存在を確認することができた. なお、平成 23 年度に 20%の 目標とした解析誤差については、高専での実験装置による具体的なタービン出力性能の 計測値を得るまでに至らなかったため、定性的な評価にとどまった.

②CAD/CAM試作(切削加工)

(公立大学法人大阪府立大学,株式会社エイワット) 公立法人大阪府立大学は,事前シミュレーションにより設計CAD化されたデータを, CAD/CAMデータに変換し,株式会社エイワットとともに,切削加工の最適化シミ ュレーションを行った.株式会社エイワットは,シミュレーションに基づき,素材選定, 加工方法の選定,切削工具の選定,治工具の検討,切削液の選定を行い,実機タービン の試作を行った.合わせて,ガイドベーン,ドラフトチューブ,本体部の製作を行った. 23 年度に府立大学高専で設計CAD化されたデータを元にエイワットチームでCAD/ CAMデータに変換し,それを元に24 年度に導入された 5 軸加工装置により,タービ ンの切削加工を行った.当初目標としたデータの時間短縮 10%,加工時間 10%,段取 り時間 10%は優に達成できた.

② 実機テスト・フィードバック,全体の装置開発(発電装置等)

(株式会社エイワット)

株式会社エイワット敷地内に実機サイズの水理実験装置を作製して,タービン性能試験, 発電機実装試験,ガイドベーン装着試験,ドラフトチューブ装着試験,ケーシング実装 試験などの実機テストを行った.実験から得られたデータと,設計 CAD,流体シミュレ ーション計算機などからシミュレーションして得られたデータを比較し,それぞれにフ ィードバックすることで改良を重ねた.発電機(1kw~5kw)の発電機の選定を行い, 各発電機の性能曲線,特性などを把握し,同時に制御方法を検討し,タービン全体の性 能評価を実施した.

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公立大学法人大阪府立大学	地域連携研究機構	地域ì	重携研	究推進課産学官連携室
		笹谷	幸裕	(sasatani@iao.osakafu-u.ac.jp)
		本間	克己	(khonma@iao.osakafu-u.ac.jp)
				Tel: 072 254 9169
				Fax:072 254 9874

第2章 本論

以下,研究開発実施内容・成果につき,実施場所ごとにまとめて記述する.

2-1 大阪府立大学高専(構造のCAD設計と流れの実験的解析)

大阪府立大学高専では、タービン構造の三次元 CAD による設計ならびに模型実験装置の 設計、製作、流れの実験的解析を実施した.三次元 CAD データは府立大学での流れ場の数 値解析およびエイワットにおける実機製作のために提供した.また、府立大学高専で模型 実験装置を製作するためにも利用した.また、府立大学と連携しトルネード型タービンが 稼働している際のタービン周りの可視化実験とシミュレーション結果から基本モデルを改 良しより性能の高いタービン形状を開発することを目指した.

(1) 模型実験装置の概要と製作

1) 模型実験の概要

実験装置で使用するポンプと貯水タンクは既存のものを利用している.フレームには穴 あき L 字アングルを用いて M10 のボルトで連結した.図 2-1.1 には実験装置の外観図を示 し,図 2-1.2 に実験装置の簡略図を示す.また,表 2-1.1 に実験装置の仕様を示す.

装置下部の水槽からポンプで水を汲み上げ装置上部のタンクに水を導き,図中のタンク 下部のドレンホースからタービン部に流入させる.ポンプからタンクへの水の供給量は, 図中の流量調整バルブで制御可能であり,タンク下部の 0N/0FF 式のバルブでタービンへの 流入を瞬時に開放・遮断が可能である.



図 2-1.1 実験装置の CAD による概観図



図 2-1.2 実験装置の簡略図

タンクの 幅×奥行×高さ[m]	0.42×0.42×1.0
装置全体の 幅×奥行×高さ[m]	$1.9 \times 0.6 \times 2.3$
測定可能なヘッド差[m]	1.1~1.8
タービン入口とタンクの距離	600mm

表 2-1.1 実験装置の仕様

実験装置の概観図および概略図を以下に示す.



図 2-1.3 実際の実験装置の概観図

2) 実験装置の改良

実験装置の改良として、これまではブレーキ用のギヤードモータに 3Ωの抵抗を用いていたが、今年度では 100Ωの可変抵抗を用いることにより、負荷を変えて回転数を調整することが可能になった.可変抵抗器の外観図を図 2-1.4 に示す.

また本実験では、ポンプー台だけでは供給水量よりもタービンによる吐出し量が大きく ヘッド差を一定にするのが困難だったため、ポンプ二台を並列に設置した.実験装置の改良 前と改良後の外観図を図 2-1.5 に示す.



図 2-1.4 可変抵抗器の外観



図 2-1.5 改良前と改良後の実験装置の外観図

3) RP 装置によるモデルの成形

RP(Rapid Prototyping)とは、製品開発において用いられる高速試作手法である.その最大の特長は、3次元 CAD データを元に、直接物体形状を成形可能であることである.本研究では、模型の製作期間を極力短くするために RP 装置を使用して府大の数値シミュレーションの結果から各諸元のパラメータを決めたモデルの成形を行った.

本研究では RP 装置 Dimension SST768 および Mojo により作成したタービン,ケーシング を用いて実験装置を作成した.これ府立大学高専で実験するためのモデルであるため実機 の基本モデルとは形状は同一であるが大きさは異なる,



図 2-1.6 RP で成形したタービン基本モデル

表 2-1.2 タービンの仕様

直径×高さ[mm]	100×75 (4:3)
羽根の枚数	3
羽根の高さ[mm]	10

4) ケーシング上部の仕様

ケーシング上部は、タンクから落下してくる流水を時計回りに回転する方向に向きを変 え、タービンに導くことを主な機能として、実験装置とタービン部を固定し、後に説明す るケーシング下部も固定するためのいわばタービン部のグランドである.図2-1.7にケー シング上部の CAD による概観図および実際の概観図を示す.また、図中にケーシング上部 を通過する水の流れのイメージを赤い矢印で表す.表2-1.3には、ケーシング上部の仕様を 示す.



図 2-1.7 ケーシング上部の CAD および実物概観図

幅×奥行×高さ[mm]	$196\!\times\!176\!\times\!45$
タービンが入る穴の直径[mm]	110
ホース接続部の内径[mm]	34

表 2-1.3 ケーシング上部の仕様

5) ケーシング下部の仕様

ケーシング下部は、ケーシング上部を通過した流水を水槽へ導くためのものである.シ ミュレーションによってケーシング下部は、タービンの形状に沿うように絞った形状(スプ ライン形状)とすることでトルクが増大することがわかったため、この形状を採用した.ま た、タービン部を通過する水の流れを観察するため、透明なアクリル素材で作成し、成形方 法には真空成形法を用いた.真空成形は、真空成形器と型を使用し成形を行った.完成後の ケーシング下部の外観図を図 2-1.8 に示す.そして、図 2-1.9 にケーシング上部と下部を 接合した様子を示す.また、表 2-1.4 にケーシング下部の仕様を示す





図 2-1.8 完成したケーシング下部 図 2-1.9 ケーシング上部と下部を接合した様子

表 2-1.4 ケーシング下部の仕様

曲面部の 最大直径×高さ×最細部内径[mm]	$120 \times 63 \times 40$
アクリルパイプの 長さ×内径[mm]	800×40

6) タービンの回転軸周りの仕様

ケーシング上部にタービンを固定するために、タービンの回転軸周りの部品を作成した. 設計は、他の CAD 同様に Pro/E で行った.ケーシング上部と固定するため板は、厚み5mmのアクリル板を加工して作成した.これは、実験装置と固定するためのグランド板でも ある.また,このアクリル板に RP で成型した,ベアリング固定台を取り付け,φ12のア ルミ棒をベアリングに通し,アルミ棒にタービンを固定する.ベアリングには,グリスを 塗りこみ,回転抵抗を抑えると共にさびの発生を予防した(ベアリングはステンレス製だ が念のため).タービンの上下方向の位置を正確に決めて固定するために,同じく RP でス ペーサーを成型し,タービンとベアリングの間に挿入した.また,図2-1.10には実際に作 成したタービンの回転軸周りの部品を示す.



図 2-1.10 実際の回転軸周り部品の概観図

7) タービン部の組み立て

完成したケーシング上部,ケーシング下部,タービン軸周り部品,およびタービンを組 み立ててタービン部が完成した.また,内部圧力の上昇による水漏れを防ぐために,それ が予想される箇所にパッキンを挟む.タービン部は,実験装置にボルトで固定されている ため,簡単に取り外すことができ,またタービン部自体もボルトのみで固定されているの で,簡単に分解できる.図 2-1.11 に組み立てたタービン部の概観図を示す.



図 2-1.11 組み立てが完了したタービン部の概観図

8) トルクメータ

タービンのトルクを測定するために、Unipulse 社製「UTM-0.3Nm」トルクメータを使用した. このトルクメータはひずみゲージを利用したもので、図中の内部構造図の細い板状の部品がひずみゲージである. このひずみゲージを挟んだ両側の軸を互い違いの方向にねじることで、ひずみが起こり、電圧が発生する仕組みである. 出力は 0.3Nm のトルクがかかると 5V を出力する仕様になっている. また、トルクメータの出力を表示するために、同じく Unipulse 社の「F377A デジタル指示計」も購入した.

このトルクメータの特徴は、ブラシなどの接触部分が無く、無線でひずみゲージの変位 を送信するため、回転抵抗が非常に少ない.また、地面に固定しなくても空中で宙づりに できることである.図 2-1.14 にトルクメータを取り付けたタービン部の概観図を示す



図 2-1.12. トルクメータを取り付けたタービン部の概観図

トルクメータは、図のようにタービンとブレーキをかけるギヤードモータの間に、カップ リングを介して接続されている.ギヤードモータは、ブレーキをかけるために使用した. モータの端子どうしを直接つなげるとあまりにもブレーキがかかりすぎるため、間に可変 抵抗を挟んでいる.また、可変抵抗を用いることにより負荷率を変えることが可能である. 表 2-1.5 にギヤードモータと可変抵抗の仕様を示す.

ギヤードモータの品名	A0-8016 タミヤギヤードモーター 380K20
ギア比	1 : 20
可変抵抗器	100Ω

表 2-1.5 ギヤードモータと抵抗の仕様

9) 非接触型回転計

タービンの回転数を測定するため、非接触型回転計を用意した. 図 2.1-15 にその概観図 を示す.下準備として、まずタービン軸の一部に付属の反射シールを貼る. 次に、タービ ン軸が回転し始めたら、回転計から光をシールに照射する.シールに当たった光は反射し てくるので、その周波数を読み取り回転数が表示される.



図 2-1.15 非接触型回転計の概観図

(2) 性能確認実験

昨年の実験ではヘッド差に対しての流量,回転数,トルクなのどの関係を調べる実験を行い,トルネード型タービンと既存の水車としては最も用いられているフランシス水車の性能比較を行った.実験結果からトルネード型タービンはフランシス水車よりも優れた性能を持っていることがわかった.

今年度は、トルネード型タービンのより詳細なデータを得て実機開発にフィードバック するために圧力ヘッド差を一定にした状態で、回転数とトルクの関係、回転数と流量の関 係(時間による平均値),回転数と水車出力の関係,水車効率、無拘束速度,比速度のデータ を取得した.

1) 実験内容

トルネード型タービンには,正巻と逆巻の2種類があるが,昨年度のデータより正巻のほうが優れた性能を持っていることがわかったので,実験では正巻のみを使用している. (1)回転数とトルクの関係

圧カヘッド差を一定にし,ギヤードモータに接続した可変抵抗の抵抗値を最大にした状態から徐々に抵抗値を減少させ抵抗値が最小になるまで逐一,任意の各回転数におけるトルクを測定した.

(2)回転数と流量の関係

測定したいヘッド差から上下 X cmの範囲中の水の体積(タンクの断面積×2X)を計算し, 上 X cmから下 X cmまで液面が下がる時間を測定し,その値で割ることによって,そのヘッ ド差の流量を求める.今回の実験では,X は 5.0を基本とした.5.0では液面の観察が厳し い場合は4.0や3.0を用いた.

(3)回転数と水車出力の関係

水車出力は次式より求めることができる.

$$P = T\omega = T \cdot \left(\frac{2\pi N}{60}\right)$$

$$P:$$
 P: 水車出力[W]
$$T: \land \nu \land p[N \cdot m]$$
N: 回転数[rpm]

(4)水車効率

水車効率は次式より求めることができる.

$$\eta = \frac{T}{\rho \mathrm{gQH}} \cdot \left(\frac{2\pi N}{60}\right)$$

T:トルク[N・m] N:回転数[rpm] ρ:水の密度(1000[kg/m³]) g:重力加速度[m/s²] Q:流量[m³/s] H:圧力ヘッド差[m]

(5) 無拘束速度

水車の無拘束速度は, 圧力ヘッド差およびガイドベーンの入り口弁の開度を一定に保っ た状態で, 水車が無負荷の状態で回転する回転速度のことをいう. また, この無拘束速度の うち最大のものを最大無拘束速度といい, 一般に水車の設計を行う際は, 無拘束速度で回転 した場合の各部の遠心力による耐力を充分考える必要がある.

実験方法としては、トルネード型タービンに接続しているギヤードモータとトルクメー タを取り外し、圧力ヘッド差を一定に保った状態でトルネード型タービンを回転させ、非接 触回転計を用い、無拘束速度を測定した.

(6)比速度

比速度とは、ある水車と相似な大きさの水車を与え、有効落差 1[m]のもとで相似な状態で 運転して 1[kW]の出力を発生するときの回転速度のことをいい、m-kw 基準である. 水車の比 速度は次の慣用式で求められる.

$$N_{sp} = N \frac{\sqrt{P}}{H^{\frac{5}{4}}}$$

N_{sp}:比速度[m-kW] N:回転数[rpm] P:出力[kW] H:ヘッド差[m] (3) 実験結果

(1)回転数とトルクの関係

回転数とトルクの関係のグラフを図 2-1.16 に示す.



図 2-1.16. 回転数とトルクの関係

(2)回転数と流量の関係

回転数と流量の関係のグラフを図 2-1.17 に示す.



図 2-1.17. 回転数と流量の関係

(3)回転数と水車出力の関係

回転数と水車出力の関係を図 2.1-18 に示す.



図 2.1-18. 回転数と水車出力の関係

(4)回転数と水車効率の関係

回転数と水車効率の関係を図 2.1-19 に示す.



図 2.1-19. 回転数と水車効率の関係

(4) 考察

(1)回転数とトルクの関係について

図 2.1-16 の結果より,どのヘッド差においても,回転数が増加するにつれてトルクの値 が減少していることから回転数とトルクは反比例の関係があることがわかる.

(2)回転数と流量の関係について

図 2.1-17 の結果より, ヘッド差が高くなるほど流量が多く, これはヘッド差が高くなるほど水の位置エネルギが増加するためであると考えられる.また, どのヘッド差においても回転数が増加するにつれて, 流量が減少している.これは回転数が増えることで水に大きな遠心力が働き少しの間, タービン周りに停滞するからであると考えられる.

(3)回転数と水車出力の関係について

図 2.1-18 の結果より,ヘッド差が高くなるほど水の位置エネルギが増加するためヘッド 差が高いほど水車出力は高い値を示している.また,一般の水車と同じように回転数が増加 するにつれて出力が増加しある回転数を超えると出力が減少していることが結果から読み 取れる.これらの結果より模型のトルネード型タービンの定格回転数は700~800rpm に設定 するのが妥当である.

(4)回転数と水車効率の関係について

図 2.1-19 の結果より,水車効率は水車出力と同様に山形のグラフになっていることがわかる.

水車出力はヘッド差が高いほど大きな値を示しているが、水車効率は、ヘッド差が高いほ ど低い値を示している.これは流量が増加するにつれて流速が大きくなり速度損失が大き くなるためであると考えられる.一般に速度損失は次式で与えられる.

$$\frac{\rho v^2}{2}$$

ρ:流体の密度[kg/m³]v:流体の速度[m/s]

2-2 大阪府立大学(流れのシミュレーション)

(1) 実施目標と実施方法

公立大学法人大阪府立大学は、昨年度実施した流動数値シュミレーションデータに基づ き、タービン仕様の最適諸元の絞り込みを行い、三次元 CAD による模型実験装置ならびに 実機試験機の設計指針を提供した.昨年度の数値シミュレーションにより,羽根の基本諸 元単独での最適値(羽根枚数,長さ,ねじり角度など)を明らかにできた.そこで今年度 はまず複数パラメータを同時に考慮した数値シミュレーションを実施し、羽根の最終最適 形状を明らかにした. 今年度は, 出力向上を目的として羽根裾野部分へのガイド羽根の設 置効果を検討する.一方で、タービン出力は羽根周辺形状や流れの影響も強く受けること から、羽根への導入部にガイド羽根を設置した際の効果についても検討した. さらに株式 会社エイワットにおける実機試験機の製作指標とするために、羽根とケーシングの隙間が 出力に及ぼす影響も明らかにし、さらに実機での流量と予想されうる出力についてのデー タを得た. 流動の数値シミュレーション用の解析ソフトとして引き続き"OpenFOA M[®]"を採用した.本研究用に導入したOpenFOAM[®]は,ハードウェア(ビジュアル・ テクノロジー社製VT64WorkStation 46000) に予めインストールされたバンドルモデ ルと呼ばれるものである. 基本的な解析手法は前年度と同様で、タービン羽根の回転を模 擬した. これにはOpenFOAM®に実装されている Multiple Reference Mesh (MFR)を 導入した. MFR は回転領域で遠心力とコリオリ力を付加したもので,相対的にタービン羽根 の回転を表現できる.シミュレーションに際しては前年度同様、府立大学高専で作成した CAD データを元に Caedium によって、4 面体格子からなる計算格子を作成した.

(2) 実施内容

1) 複合パラメータにおける羽根の最適形状

昨年度の知見に基づき,羽根のねじり角度を固定した場合で,羽根高さ,タービンを変 化させた場合の効果を検討した.

ねじり角度 360°の場合の解析結果を図 2-2.1 に示す.タービン羽根高さの影響を調査 した結果,羽根高さ 30mm の出力が最も高くなる一方で,効率は 50mm が良好であること がわかった.次にタービンの高さ (=縦横比)を変えた場合,効率では 325mm が良いもの の,出力では 275mm のものが良いという結果となった.

23



(a) タービン羽根高さの影響



(b) タービン高さの影響

図 2-2.1 ねじり角度 360°におけるタービン形状が性能に及ぼす影響

ねじり角度を 180°とした場合の結果を図 2-2.2 に示す.出力ベースで考えると羽根高 さは 30mm の方が良好となり,効率については両者ともほぼ同等の性能を有することがわ かった.また羽根高さについてもそれほど差異はみられないものの,275mm のものが最 も良いことがわかった.羽根枚数に関してはこれまでと同様に3枚羽根の出力が最も高 くなることがわかった.

以上の結果より,ねじり角度 180°,羽根高さ 30mm,タービン高さ 225mm が最も適して いることが明らかとなった.





(b) タービン高さの影響



図 2-2.2 ねじり角度 180°におけるタービン形状が性能に及ぼす影響(羽根高さ 30mm, タービン高さ 325mm)

2) タービン入口導入部のガイド羽根設置効果

次に、タービンの裾野箇所(入り口)の整流効果を狙い、ガイド羽根を設置した際の効 果を検討した. 概要を図 2-2.3 に示す. タービン形状は上述で得られた最適形状である、 ねじり角度 180°、羽根高さ 30mm、タービン高さ 225mm のものを用いた. ここではガイ ド羽根の枚数についても併せて検討した.

解析モデル並びに結果を図 2-2.4 に示す.ここでは基礎的な検討のため,ガイド羽根形 状は湾曲した板となっており,周方向に等間隔に設置している.流入してきた流れがガ イド羽根に衝突する個所では圧力が高くなっていることがわかる.タービン性能につい ては,残念ながら出力・効率共にガイド羽根なしのものと比較して激減することが確認 された.その主な理由としては,図に示すように,タービン羽根の回転位置に伴い流路 面積が極端に小さくなることで圧力損失が増大するためと考えられる.特に流入口に最 も近いガイド羽根では流れの向きが大きく変えられていることからタービン背面の圧力 が高くなることで,流体のエネルギーの損失につながっていることがわかった.



(a)3 枚羽



(b)6 枚羽





Power output and efficiency results show that GB=3 is better than GB=6. Both of them do not have positive effects on the improvement of turbine performances.

図 2-2.3 タービン入り口にガイド羽根を設置した場合

3) タービン上にガイド羽根を設置した場合

流入部近傍においてより大きな動力を稼ぐため、タービンの裾野部分にガイド羽根を設置した効果について検証した. 解析モデルおよび結果を図 2-2.4 に示す. ベースとなっているタービンはこれまでと同様に、羽根枚数 3、直径 300mm、羽根高さ 30mm をベースとしており、タービン高さも解析パラメータとしている. なおここでは、タービン羽根ねじり方向を逆とした場合の解析も実施した.



(a)タービン上のガイド羽根配置図



(b)従来型(反時計回り) (c)ねじり方向を逆にした場合(時計回り) 図 2-2.4 羽根裾野部分にガイド羽根を設置した場合のモデル図

解析結果を図 2-2.5 に示す. Counter Clockwise (反時計回り)が従来のねじり方向であ る.反時計回りの結果を先述のガイド羽根の無いものと比較すると,出力,効率ともに わずかではあるが高くなることがわかった.また,ねじり方向が逆の時計回りの場合, 出力は若干下がるものの,効率では高くなる結果を得た.ねじり方向が逆の場合でもそ れなりの結果が得られたのは,羽根の裾野部分やガイド羽根での抗力駆動が促進された ためと考えられる.つまり,ねじり方向が逆の場合,タービン下流部で流れを妨げるも のの,タービン上流部での効果がそれを補っているといえる.また,タービン高さに関 してはこれまでと同様に,225mmの出力が最も高くなることが分かった.しかしながら, 実際のタービンの作製においてはマシニングセンタによる削り出しを行っているため, 本タービン形状の製造コストに見合うほどの性能アップにはならないため,現時点での 採用は見送った.



図 2-2.5 タービン上のガイド羽根設置効果

4) タービンと外周容器の隙間が及ぼす影響

数値解析におけるタービンと容器の隙間は任意に設定でき,隙間が小さいほど良好な性能となることは明白である.一方で実機試験機の作製を鑑みると,どの程度までの隙間が許容されるかによって製造コストが変わってくる.そこでここでは,隙間がタービン性能に及ぼす影響について数値解析を行った.設定した隙間は5~30 mmとし,それぞれに応じた外周部を CAD で設計した.解析モデルを図 2-2.8(a)に示す.5 mmのものが明確に示すように,隙間が大きく異なっていることがわかる.

解析結果を同図(b)にまとめる.予想通り,隙間が 30mm のものでは極端に性能が悪くなることが証明された.一方で,隙間が 5mm と 10mm ではそれほど大きな差異がみられなかったことから,実際の製造工程において隙間は 10mm 程度まで許容できることが示された.



Gap = 5 mm



Gap = 10 mm



Gap = 20 mm Gap = 30 mm (a) 隙間を変えたモデル形状



 (b) 各種タービン性能

図 2-2.8 タービンと容器の隙間を変えた場合のタービン性能

5) タービン羽根高さをねじり方向に変化させた場合

これまでの研究より、タービンの入り口(裾野部分)におけるロスが大きい可能性が指摘されてきた.そこで、ねじりの進行方向に応じて羽根高さが高くなるような羽根を設計し、その性能評価を行った.すなわち、裾野の羽根高さを0として、先端部のねじりに進むにつれて高くなる.形状並びに性能比較図を図2-2.9に示す.ここでは羽根枚数3、入口流速を2.4m/sとしている.VBはVariable Blade(可変羽根)の略で今回変更した形状のものである.タービンとケーシングの隙間は10mmとした.図から、可変羽根のほうが効率、出力ともに低くなることがわかった.特に、低回転数領域においては、本形状の性能は非常に悪いものとなった.



図 2-2.9 可変羽根の形状および性能

さらに、入口流速(流量)の影響についての解析も実施した.先の V=2.4m/s と、3.6m/s を比較した結果を図 2-2.10 に示す.流速が大きくなったことにより、出力に大きな改善 がみられることからがわかる.特に、高回転数域においてタービン性能が大きく向上す ることがわかった.さらに詳細に考察するために、代表的な回転数における圧力分布を 図 2-2.11 に示す.低回転数時においてはいずれの場合でも、裾野部分の圧力分布が滑ら かになっておらず、これが性能低下をもたらしていることがわかる.回転数が高くなる につれて、出口付近の負圧が顕著となることがわかった.



図 2-2.10 可変高さ羽根における入口流速の影響



図 2.2-11 可変高さ羽根における各回転数での圧力分布

6) 最適化タービンを用いた入口流速・形状の影響

これまでの検討から,最適なタービン形状が概ね明らかとなった.そこで,実機装置との整合性を図り,理想的な条件におけるデータを得るため,エイワット側から提示された流量データを参考にして,流量を変化させた場合を検討した.

まず,入口流速をパラメータとして,これまでの解析に用いた 2.4m/s に追加して, 3.6m/s,4.8m/s での解析を行った.なお,回転数のレンジも広めに解析した.

結果を図 2-2.12 に示す.流量が増大することで、ヘッドが大きくなるため、出力も増大 する.また回転数が高いほどヘッドも出力も増大する.一方で効率に関しては各流量に おいて最適値が存在し、2.4m/s では 400rpm 程度であるが、その他では概ね 700rpm あた りに最適値があることがわかった.



図 2-2.12 入り口流速に応じたタービン性能

次に,流入口部分の形状についての最終検討を実施した.これはエイワットの実機製造時において流入部のケーシング形状に制限があるとの観点から,様々な形状に応じたタ ービン性能評価を数値解析により実施することを目的とし,体積流量を 0.1625m³/s に 固定した場合について検討した.

まず,従来型の入口形状を相似とした場合において,1 つの大きさで比較した.概要な らびに結果を図 2-2.13 に示す.先の場合と比較して流量が大きく増加しているため,出 力はかなり大きくなる.大小で比較すると,入り口面積の小さい方の出力が大きくなる ことがわかった.さらにここでは効率の算出方法について見直しを行い,入り口の圧力 と運動エネルギーの和からのトルクとして算出しなおした.その結果,一般的に論じら れるような効率と遜色ないことがわかり,本タービンの基本性能の高さが明らかとなっ た.

次に,入口の等価直径を同一とした際の入口形状を変えた場合の解析も実施した.入口 流速は 2.3m/s とし,高さが 100mm と 200mm で比較した.(それぞれの高さに応じて外周 部の径も異なる)モデル及び結果を図 2-2.14 に示す.出力でみると,高さの大きい 200mm の方が良いことが明らかとなった.



図 2-2.13 入り口断面積を相似形で変えた場合のタービン性能

図 2-2.14 入り口等価直径を同一(300mm)にした場合のタービン性能

2-3 CAD/CAM試作と全体の装置開発(株式会社エイワット)

(1) 実施計画

CAD/CAM試作に関して,以下①~③の項目を各シミュレーションの結果に基づ き実施し,実装レベルでの試作を行う。

① データ変換(CAD/CAM)と情報高度化,切削方法の最適化:

3 次元 CAD "Pro/ENGNEER4.0" によるトルネードタービンの実装モデルデータを,3 次元 CAD/CAM "Mastercam X Mill Level3 Solid Multi Axis(同時 5 軸モジュール)に データ変換を行い,本年度は昨年度に引き続き実装レベルで、CAD/CAM 上で加工シミ ュレーションを行う.

② タービンの製作:

3 次元 CAD/CAM "Mastercam X Mill Level3 Solid Multi Axis(同時 5 軸モジュール) のデータを 5 軸加工機 MU500VA-L OSP-P200M にデータ入力後,本年度は昨年度に引き 続き実装レベルで、5 軸加工機で加工補正を行いタービンの試作を行う.

③ ガイドベーン・ドラフトチューブ・本体部の製作:本体部のケーシング構造の流体シミュレーションの結果を元に、本体部のケーシングの内部構造の設計変更を行い、ケーシングパーツの製作を行う.

④ 実機テスト・フィードバック

水理実験装置を使用して、タービン性能試験,発電機実装試験,ガイドベーン装着試 験、ドラフトチューブ装着試験などの実機テストを行う.実機テストの結果を元に水理 実験装置の改造を行う.

(2) 実施内容

1) タービンの設計

公立大学法人大阪府立大学,大阪府立大学工業高等専門学校とともに作成された3次 元 CAD "Pro/ENGNEER4.0"によるトルネードタービンのモデルデータを,3次元 CAD/CAM "Mastercam X Mill Level3 Solid Multi Axis(同時5軸モジュール)に昨年度同様デー タ変換を行った.その後に,3次元 CAD/CAM"Mastercam X Mill Level3 Solid Multi Axis(同 時5軸モジュール)上で,サーフェス作成,ツールパスの作成,ツールパスの確認を行い, 昨年同様、加工シミュレーションを経て切削方法の最適化を行った.ただ、本年度は流 体シミュレーションの結果を元に新たなプログラミングを実施したので、昨年同様シミ ュレーションに時間を要した。

上記データを5軸加工機MU500VA-L(0SP-P200M仕様)にデータ入力を行い、昨年度同様 試作を行った.本年度は加工方法及び刃物の選定を何度も変更したので、昨年度に比べ て数倍の加工時間を要した。 ツールパスの作成(加工シュミレーション)

【1】 サーフェスを作成したのちに、後の加工シミュレーション動作速度を向上させるため、下記のようなソリッドモデル(図 2-3.1)を作成した。昨年度は捻じれ1回転で加工シミュレーションを行ったが、本年度は流体シミュレーションの結果を踏まえて捻じれ0.5回転で加工シミュレーションを行った。

図 2-3.1 *ϕ* 300 × 225 円錐

【2】 上記ソリッドモデルの活用により、粗溝 捻じれ 0.5 回転 (図 2-3.2)、溝中仕上げ、 溝仕上げ (図 2-3.3) のシミュレーション動作速度の大幅な短縮が図られた。

図 2-3.2 Ø 300×225 粗溝 捻じれ 0.5 回転

図 2-3.3 ¢ 300 × 225 溝仕上げ 捻じれ 0.5 回転

2) タービンの製作

本年度は昨年度の実装レベルでの製作を引き続き行った。捻じれ1回転のワークの加工方 法、クランプ方法、仕様刃物などの変更などに伴い、プログラムを何度も変更して製作を 行った。それに加えて流体シミュレーションなどの結果から捻じれ0.5回転のワークの加 工も行った。捻じれの違いによる切削体積の変化により、加工方法を効率的に行うために プログラム及び刃物の変更、切削スピードの変更を行った。ただ、効率化を優先し、刃物 径を大きくすると振動及び放熱性が悪くなり、刃物の破損、ワークの変形などが起こり、 結果ワークを何度も破損することになった。

図 2-3.4 5 軸加工機にてタービン実切削中

3)ガイドベーン・ドラフトチューブ・本体部の製作
 全体の装置開発:発電機の選定,制御システムの開発を行った。

実験施設

実機実験については前年度の結果及び流体シミュレーションの結果を元に、下記の要領 にて改造を行った。

① ケーシング部の改造

上面図 142 7 大司法 ートパルフ マンホール 바케술 マンキール 水竹片 ¢ 1920 水中ポンプ 送水田 ARN タンクさし ペキルタンク2も 既存地下タンク トルネードタービン ●★タンク ケージング古住 側断面図 * 🏚 壮 パネルタンク21 棄靁機 5600 ング本体 ブレーキ 計測室 トルク計 ドタービン ₩ 443.6 Ē GL 送水用 **ま**木タンク 既存地下タンク 水中ポンプ 改造部ケーシング

流路実験装置構成図

図 2-3.5 流路実験装置改造①

図 2-3.6 ケーシング全体図

ファイル名:変更前-変更後.npcad

図 2-3.7 ケーシング断面図(改造前)

ファイル名:変更前-変更後.npcad

図 2-3.8 ケーシング断面図(改造後)

図 2-3.9 ケーシング改造部

図 2-3.10 ケーシング組立(改造後)

図 2-3.11 ケーシングにタービン装着(改造後)

図 2-3.12 流路実験装置に組み込み(改造後)

図 2-3.13 流路実験装置に組み込み後水理実験

貯水槽及び管路改造:水理試験において水流の安定及びデータ計測時間を長くする必要 があるために、貯水槽4トンの増設とバイパス配管の増設を行った。

図 2-3.14 流路実験装置改造②構成図

図 2-3.15 流路実験装置改造②画像

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報(未出願 又は未公開の産業財産権等又は未公開論文)、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、 通例の取扱いにおいて非公開とする.ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する 法律(平成11年法律第42号)に基づく情報開示請求の対象の文書となります.