

4ストロークパーソナルウォータクラフト用 ウォータジェットポンプの開発手法の構築

Establishment of a Development Method of Water Jet Pump for 4 Stroke Personal Watercrafts

土谷 政彦*
Masahiko TSUCHIYA

布施 知洋*
Tomohiro FUSE

渡部 尚*
Takashi WATANABE

要 旨

Honda初の4ストロークパーソナルウォータクラフト用ウォータジェットポンプを開発した。開発にあたっては、テストと計算結果のコリレーションを確認しながら、インテーク形状の最適化検討手法、翼型による特性予測計算手法およびウォータジェットポンプ性能を予測する設計ツールを確立した。これらを用いて出力が違ふ2種類の4ストロークエンジンそれぞれにマッチしたウォータジェットポンプを自社開発した。

ABSTRACT

Honda's first Water Jet Pump for Personal Watercraft installed 4 stroke engine has been developed. In the development, correlation of the calculation results with the actual test results was verified, and design tools such as an examination method of intake shape optimization, a characteristic calculation method for various aerofoil shapes, and a prediction method of Water Jet Pump performance were established. Using these tools, two Water Jet Pumps that matched each of 4 stroke engines with different output power have been developed.

1. まえがき

パーソナルウォータクラフト(以下、PWCという)の市場では、現在、2ストロークエンジンが主流である。しかし、環境意識の高まりにより2ストロークエンジン PWC の走行が規制されるようになり、さらにエミッション規制が行なわれることになった。そこで、排出ガスがクリーンで低騒音かつ快適な4ストロークエンジンを搭載した2機種のPWC(AquaTrax F-12/AquaTrax F-12X)を開発した。Fig. 1にAquaTrax F-12X の外観を示す。



Fig. 1 External view of AquaTrax F-12X

AquaTrax F-12 は排気量1235cm³の無過給エンジン、AquaTrax F-12X は同一排気量でターボチャージャーを装着した市販最高出力のパワープラントを有する。このPWCに最適なウォータジェットポンプの開発に際し、ポンプ性能のマッチングに加えて、4ストロークの過給機付きエンジンの出力特性に対応するため、キャビテーションを大幅に抑制しなければならなかった。そこで、ポンプ設計理論における各セクションの特性要因を分析し、新たに高効率ポンプを開発するための独自の「設計ツール」を構築した。

2. ウォータジェットポンプ概要

PWC は、一般的に軸流式もしくは斜流式のウォータジェットポンプによる推進力を利用している。ウォータジェットポンプは船底に突出した部品を必要としないのでPWCに適している。また、使用されるエンジンが比較的高回転であることも、高回転域での効率が良いとされるこれらのウォータジェットポンプ型式が選択されている理由である。開発した軸流ウォータジェットポンプの各セクションごとの役割を、Fig. 2 に示すレイアウトで説明する。

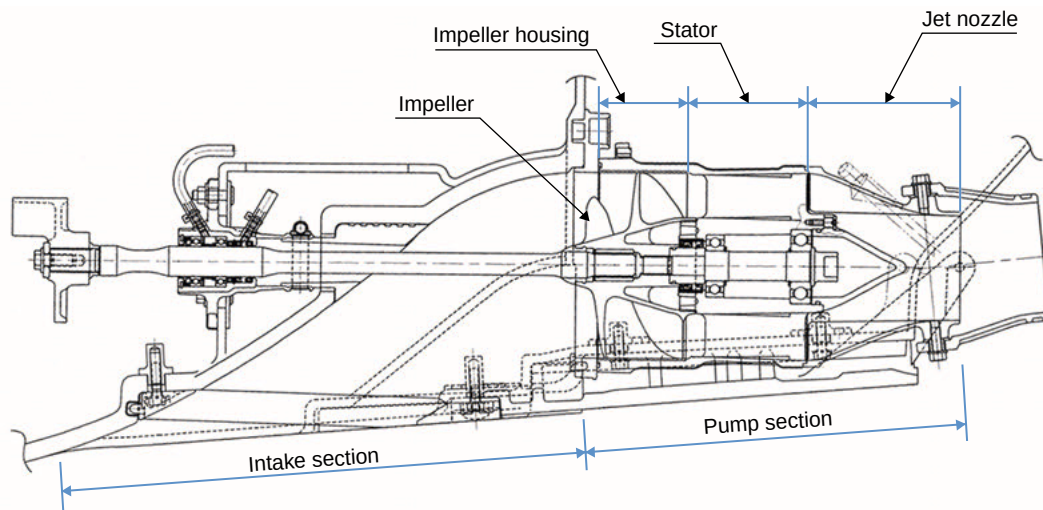


Fig. 2 Structure of developed water jet pump

2.1. インテーク部

インテーク部は、平坦な船底からインペラ手前まで水を導く曲がり管で、ウォータジェットポンプを構成する要素の一つであり、形状の良し悪しは走行性能に多大な影響を及ぼす大切な部分である。この開口部に設けられた櫛状のパーツ(インテークグレート)の形状、開口部形状、管の形状(特に高さ)、断面積、断面積変化率などがインテーク効率を左右する。

2.2. ポンプ部

軸流ウォータジェットポンプのポンプ部は、インペラを囲む円筒型のダクト(インペラハウジング)、ステータ、ジェットノズルの3つのセクションから成る。なお、本稿ではジェットノズルを便宜上ポンプ部に含むよう定義する。インペラはウォータジェットポンプの主要部品で、インテーク部から導かれた水にヘッドを与える(加圧する)ことで動力を伝える。ステータはインペラで生じた旋回流を回収し、運動エネルギーを効率よく推力に変換すると共に、インペラの軸支持を受け持つ強度部材にもなっている。ジェットノズルはポンプ部で加圧された水のヘッドを運動量に変換し、推力を得る。ジェットノズル出口径の選定は完成艇の性格を左右するポイントである。また、動圧が高いことから負圧式のビルジポンプが設置される場所である。

3. 開発のねらい

3.1. インテーク部

インテークダクトの形状決定にあたっては、キャビテーションの発生を最小限にすること、インテーク部内での圧力損失を最小にすることが重要である。船速のエネルギーが、どれだけインテークダクト内の動圧として回収されたかを表すパラメータを動圧回収率 ε として式(1)のように

定義する。

$$\varepsilon = \frac{Pa + Po}{Pa + \frac{1}{2g} V_{ship}^2} \quad (1)$$

Po : インペラ直前全圧

Pa : 大気圧

V_{ship} : 船速

g : 重力加速度

この値の大小が、特に高速域での推進効率を左右することが分かっているが、完成艇のテストで形状を改良することは、非常に工数が掛かる効率の悪い作業である。

そこで、インテーク部のスケールモデルを用い、インテーク部単体性能テストを行なった。この結果とComputational Fluid Dynamics(以下、CFD という)による計算結果とのコリレーションを確認することで、インテークダクト形状を検討する手法を開発する。

3.2. インペラ/ステータ翼型

翼の断面形状(翼型)には、翼弦長・キャンバ・翼厚がパラメータとして与えられる。そして、翼型そのものが、揚力係数(C_L)・抗力係数(C_D)といった翼の特性を左右する重要な要素となっている。また、翼面上に生じた圧力分布により、負圧がある限界を超え飽和水蒸気圧に達すると、キャビテーションと呼ばれる現象が発生する。過大なキャビテーションは、翼の特性を変化させ、効率が低下することに加え、キャビティが崩壊する時の衝撃波で、翼表面にエロージョン(壊食)を発生させ、破損に至ることもある。

ポンプ部の開発にあたっては、まず翼型による特性把握が必要である。実測による2次元翼特性計測結果をもとに、計算プログラムの最適化を図り、2次元翼の特性計算手法を開発する。

3.3. ポンプ部

既存の理論を用い、ポンプ部性能計算プログラムを作成する。そして、ポンプ部単体性能テストで計測した結果とのコリレーションを確認し、プログラムを改良して、ポンプ部の性能を予測する手法を開発する。

4. インテーク部の開発

4.1. インテーク部単体性能テスト

インテークダクト内の静圧の平均値を $\bar{a}_s$ とし、損失係数 ξ_s を式(2)のように定義する。

$$\xi_s = \frac{\frac{V_s^2}{2g} - \left(\bar{a}_s + \frac{V_i^2}{2g} \right)}{\frac{V_i^2}{2g}} \quad (2)$$

V_i : インペラ直前平均流速

V_s : インテーク前主流速

g : 重力加速度

Fig. 3 に示すインテーク部の2分の1スケールモデルを用いて、インテーク単体での損失係数測定、流れの可視化、流速分布の確認を行なった。スケールモデルは、キャビテーションタンネルの観測部上方部分に設置した。スケールモデルの後方に新規の流路を形成し、キャビテーションタンネル本体とは別のポンプで流速を可変させた。スケールモデル各部の圧力と流速を計測し、インテーク本体の形状違いとインテークグレートの形状違いでの損失係数を測定した。また、インペラのリーディングエッジ位置に櫛状のピトー管を組み込み、これを回転させてインペラ直前の流速分布を計測した。Fig. 4 に観測部の詳細、Fig. 5 にインペラ直前の流速分布の一例を示す。Fig. 4では、左下方にインテークグレート、中央右寄りのコーン形状部の両サイドに櫛状ピトー管が見える。このテストから、インテーク形状の影響によるインペラ直前の大きな流速差が確認できた。また、インテークダクト内の流れを可視化することで、性能への寄与が大きい部分を直接観察することができた。



Fig. 3 1/2 scale model of intake

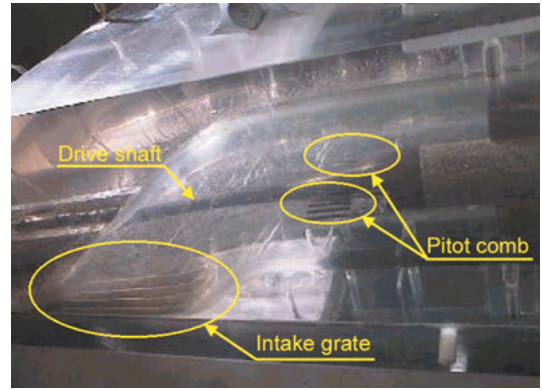


Fig. 4 Detail of intake 1/2 scale model

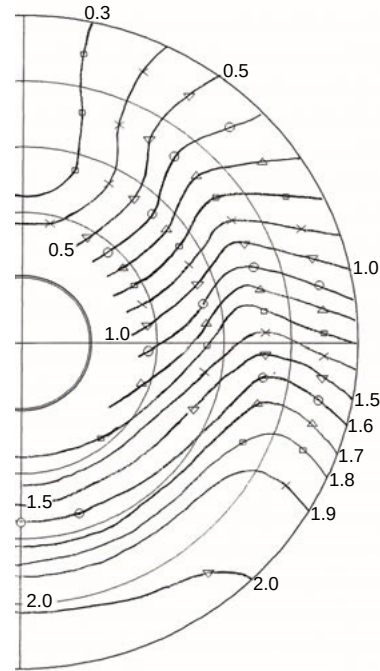


Fig. 5 Measurement result of velocity distribution inside intake duct

4.2. インテーク部設計ツール

市販の CFD ソルバーを用いて、インテーク単体性能テストと同じ形状での損失係数やインテーク内の流れの状態を確認した。そして、インテーク単体性能テストの計測結果と CFD による計算結果のコリレーションを確認し、計算条件の見直しを行った。

Fig. 6 は軸方向断面の流れ、Fig. 7 はインペラ直前のダクト断面での流速分布を示す。Fig. 6 と Fig. 7 から流速の速い部分は中心部より下に分布していることが分かる。吸入速度比 r を式(3)のように定義する。

$$r = V_s / V_i \quad (3)$$

CFD によるインテーク形状の案別検討の事例を Fig. 8 に示す。インテーク入口部を絞ることにより、Fig. 9に示すように、高速時($r=2.5$)の損失係数は減少するが、静止時($r=0$)

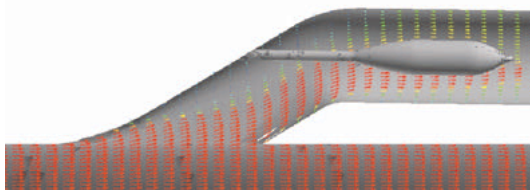


Fig. 6 Flow pattern inside intake duct by CFD
(Side view)

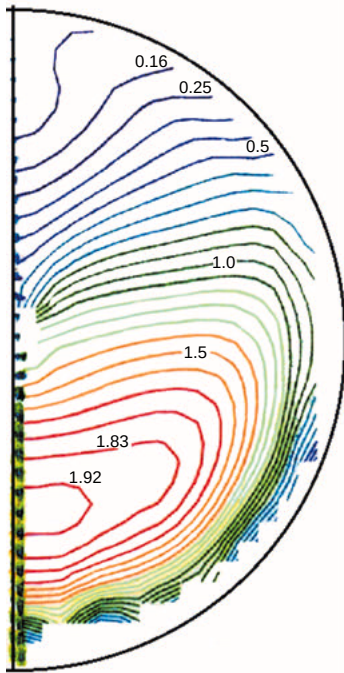


Fig. 7 Velocity distribution inside intake duct by CFD
(Front view)

の損失係数は逆に増大する。つまり、この例において、高速時と低速時の損失係数が最小となる形状はトレードオフの関係であることが分かった。

4.3. 計算結果と単体テスト結果のコリレーション

Fig. 5 と Fig. 7 から、インペラ直前の流速分布については、定性的に同様の傾向が見られることが分かった。また、Fig. 10 の CFD と実測のインテーク損失係数を比較したグラフから、CFDの結果はテスト結果と良い相関があることが確認された。この手法を用い、速度域によるバランスを考慮した損失係数の目標値を設定し、インテーク形状の改良を行なった。

5. 翼型の開発

5.1. 翼型設計ツール

既存の理論式をベースに2次元翼型の特性計算を行なうプログラムを作成した^{(1)~(3)}。PWCのウォータジェットポンプは、その使用条件が厳しいことから、キャビテーションが発生しやすいと推測できる。そのため、ノンキャビテーション状態とキャビテーション状態の両方について検討した。そして、こ

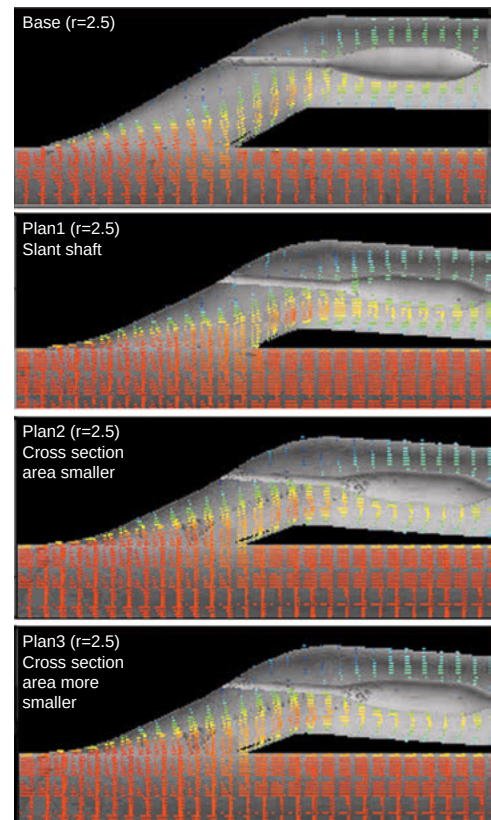


Fig. 8 CFD results of difference of flow pattern inside each intake

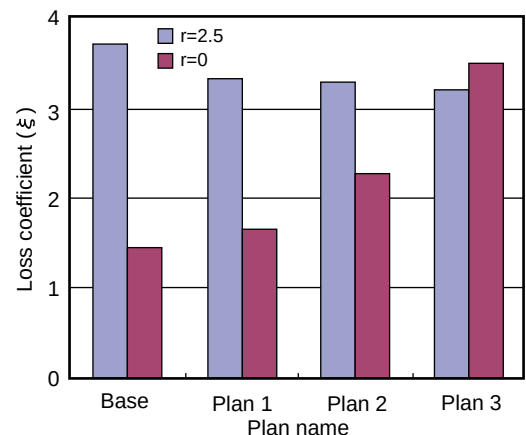


Fig. 9 Comparison of intake loss coefficient of various plans

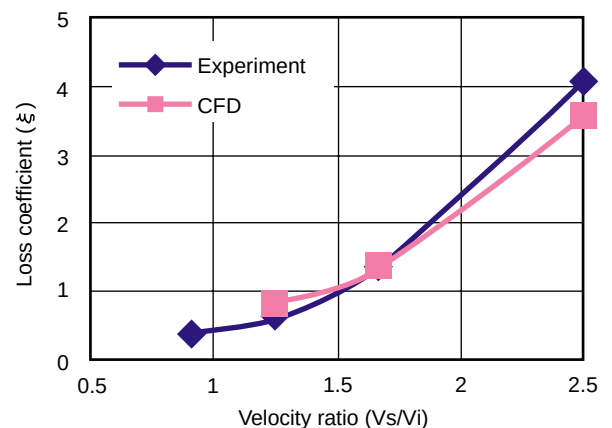


Fig. 10 Comparison of loss coefficients between experiment value and CFD value

の計算精度の確認のために NCI foil⁽⁴⁾を用いて特性計算値と実測値のコリレーションを確認した。この翼型を選択したのは、信頼できる実測値が得られる最も翼厚比(翼厚÷翼弦長×100)が小さい 3.86 のモデルであったためである。その結果、計算によって得られた揚力係数は実測値と良く一致し、抗力係数は定量的な差があるものの、実測結果の傾向を捉えていることが確認できた。しかし、我々が採用しようとしている翼厚比は3.0以下の領域である。更に計算精度を上げる検討を行なったが、より薄翼のデータが必要になったため超薄翼の特性データをテストで確認することにした。

5.2. 2次元翼特性テスト

実際の翼厚比を再現した Fig. 11 に示すテストピースを用いて、キャビテーションタンネルを使用し、2次元翼特性テストを行なった。このテストでは、2種類の翼型違いでのキャビテーションとノンキャビテーション状態の揚力・抗力とキャビテーション特性を測定し、超薄翼の特性データを得た。キャビテーション数 σ を式(4)のように定義する。これは、キャビテーションの発生しやすさを表すための尺度に用いられる数値である。Fig. 12 にテスト時の代表的なキャビテーション状態を示す。これらは、キャビテーションタンネル内の圧力(減圧)、迎角と流速を変化させ、キャビテーション数を調整しながら揚力と抗力を測定する過程で得られた、典型的なキャビテーション状態である。左から、バブルキャビテーション・シートキャビテーション・クラウドキャビテーションと呼ばれるものである。

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (4)$$

P : 流体の静圧

P_v : 流体の飽和水蒸気圧

ρ : 流体の密度

V : 流入速度

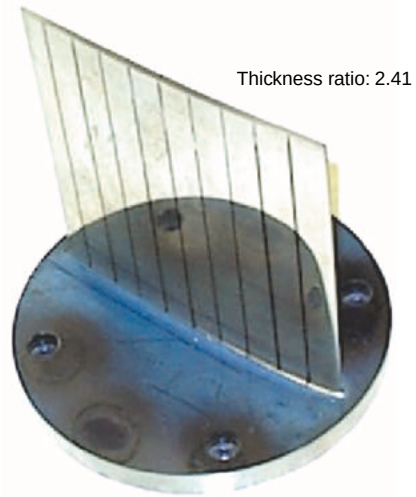


Fig. 11 Test piece of 2-dimentional aerofoil

5.3. 計算結果と特性テスト結果のコリレーション

5.2. 項で述べたテスト結果を用いて、5.1. 項に示した翼の特性計算プログラムを最適化し、未知の超薄翼型の特性が予測できる「翼特性予測計算プログラム」を完成させた。計算値と実測値の比較の一例を、Fig. 13 と Fig. 14 に示す。Fig. 13 は、迎角違いによる揚力係数・抗力係数・揚抗比をまとめたものである。Fig. 14 は、ある迎角において、キャビテーション数を変化させたときの揚力係数・抗力係数をまとめたものである。これらの結果より、作成したプログラムの予測計算精度は十分高いことが確認できた。

6. ポンプ部の開発

6.1. ノンキャビテーション状態

6.1.1. ポンプ部設計ツール

5.3. 項で完成した2次元の翼特性予測計算プログラムを3次元でのポンプ部性能計算プログラムに発展させた。本

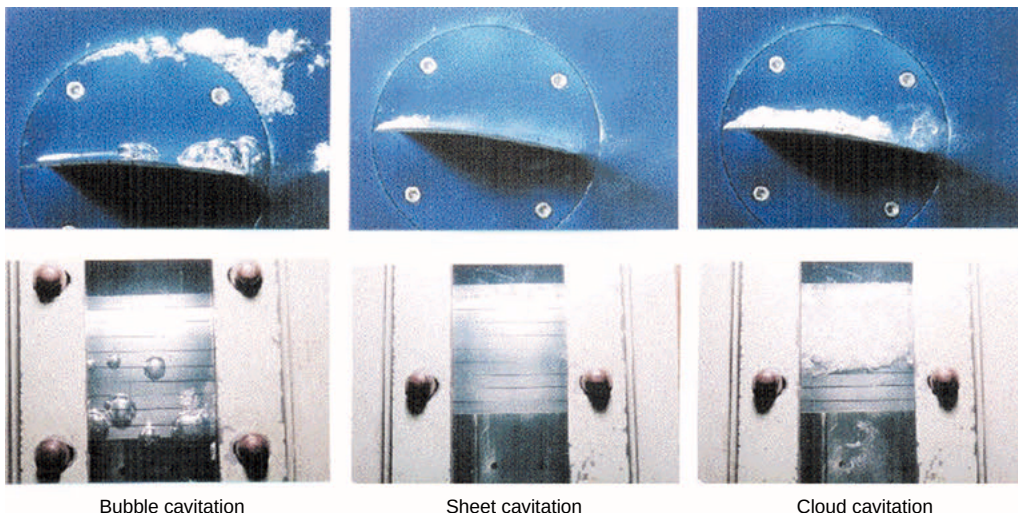


Fig. 12 Cavitations on 2-dimensional aerofoil

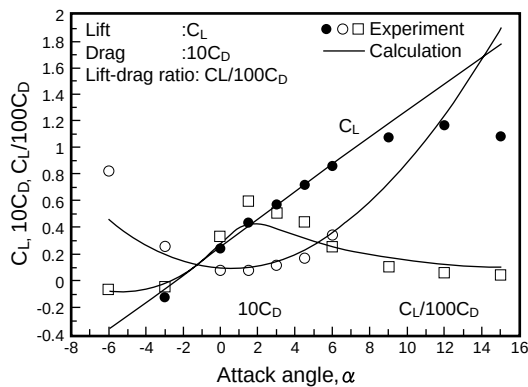


Fig. 13 Comparison of measurement results and calculation results in difference of attack angle

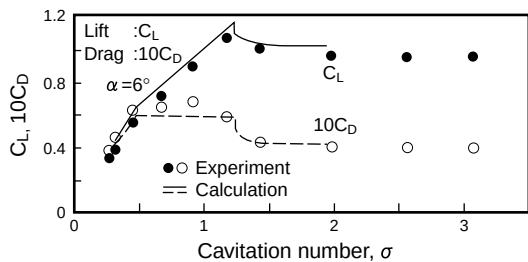


Fig. 14 Comparison of measurement results and calculation results in difference of cavitation number

プログラムは、インペラとステータの幾何形状を与えたポンプ部が均一流(一定流速分布の流れ)中においてノンキャビテーション状態で作動するときの性能を3次元揚力面理論により求めるものである。

6.1.2. ポンプ部性能単体テスト

実機のポンプ部を用いて、ノンキャビテーション状態でのポンプ部単体性能テストを行った。Fig. 15, 16にテストの実施状況を示す。このテストの過程では、下記の改良についても検討することができた。

- ・油膜法を用いて流線を可視化し、インペラ翼表面の実際の流線と計算時に想定した流線の違いを確認した。この結果により、計算アルゴリズムの最適化を図った。
- ・ビルジポンプ(ジェットノズルの動圧で発生する負圧を利用して、船内の水を排出するポンプ)効率を計測し、性能向上を図った。
- ・ステータ内部からノズルに至る強烈な旋回流を確認し、これを効率良く回収する手法を検討した。

Fig. 15 が、テスト装置に取り付けられたポンプ部である。入り口の流量/流速と、ポンプ部各部の圧力、インペラのトルクと回転数を測定することで、ポンプ性能(揚程係数、動力係数、ポンプ効率)データが得られる。Fig. 16 が本テストの稼働状態である。

6.1.3. 計算結果と単体テスト結果のコリレーション

6.1.2. 項のテスト結果を用いて、6.1.1. 項のポンプ部性能計算プログラムの係数項を調整し、設計したポンプの性能

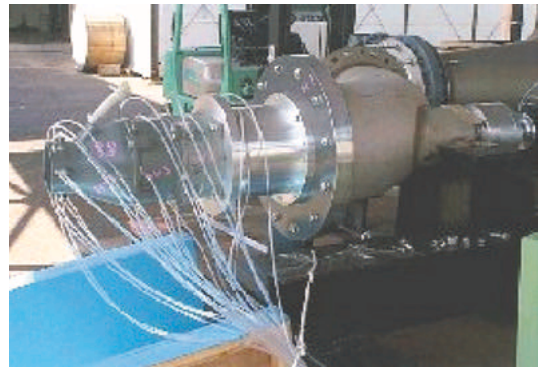


Fig. 15 Test equipment for water jet pump



Fig. 16 Test equipment for water jet pump in operating

が予測できるプログラムを完成させた。テストと実測の比較の一例を Fig. 17 に示す。この線図は、単体性能テスト結果と性能計算プログラム結果に、実走テストでのポンプ性能を重ねたもので、十分相関性が高いと判断できる。

6.2. キャビテーション状態

6.2.1. ポンプ部性能単体テスト

一般的な船用ウォータージェットポンプでは、ある定常運転条件での性能や効率を最適化すれば良い。しかし、PWCにおいては、最高速時の性能のみならず、停止からの全開発進や急激な加減速など非常に幅広い運転条件が求められる。高速回転するインペラは、キャビテーション発生の可能性が非常に高いが、上記理由から高速時のみ最適化を図る訳にもいかず、バランスの取れたキャビテーション性能が要求される。

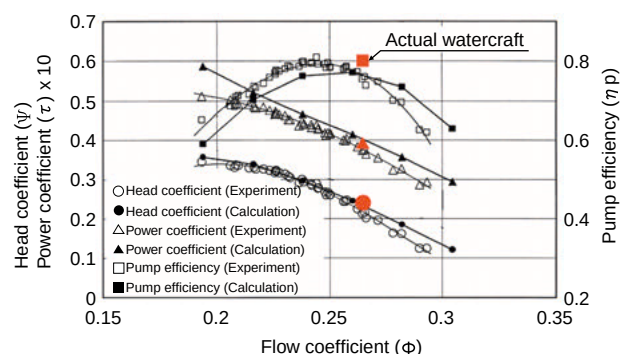


Fig. 17 Comparison of pump performance between measurement results and calculation results

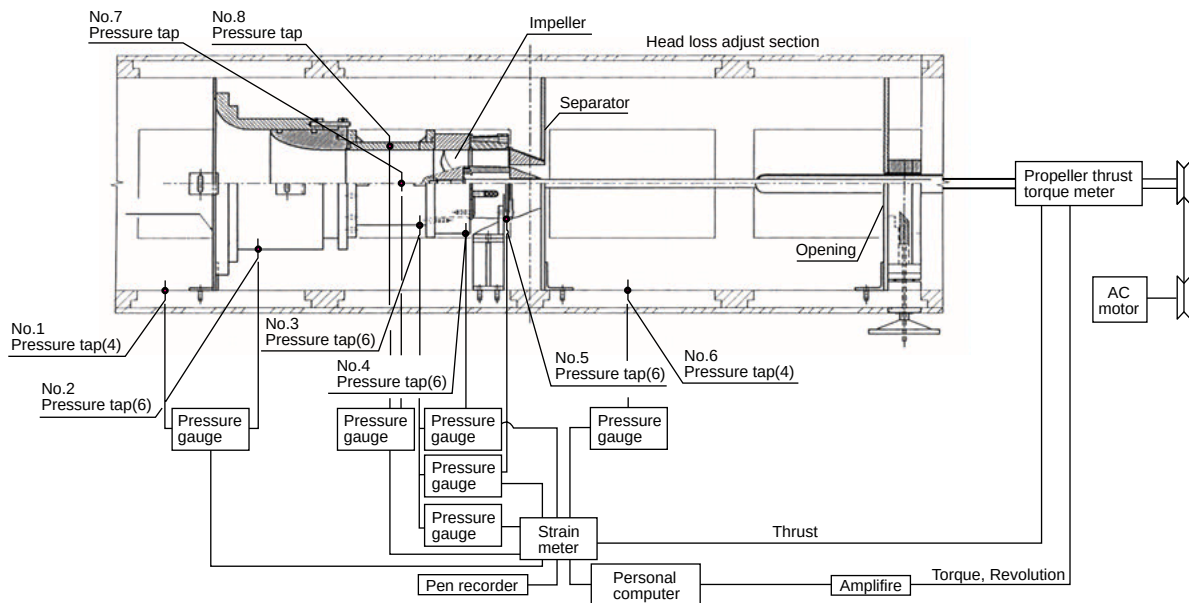


Fig. 18 Design of cavitation test equipment

加えて、開発した PWC は、4 ストロークエンジン特有のアイドル状態から最高回転数までの早い吹け上がり、ターボチャージャ装着による過給圧が上昇したときの急激な出力特性の変化によって、キャビテーションが発生しやすく、急加速時のエンジン回転数のオーバーシュート過多や加速感の不足が問題となった。対策として、キャビテーションを極限まで低減するウォータジェットポンプ開発の必要が生じた。

この現象を定量化、可視化し、広い運転状態でのキャビテーション性能を向上させるため、Fig. 18, 19 に示す実機のポンプ部をキャビテーションタンネルの流路に設置した単体テスト装置を考案した。

装置は、キャビテーションタンネルの観測部にポンプ部を組み込み、インペラのトルクとスラストが実測可能となるよう設計した。損失ヘッドを調整するため、ポンプ下流に設けた絞り弁で流量制御を行う。この装置では、減圧によるキャビテーションの可視化のみならず、Fig. 15 の単体テストでは計測できなかったスラストの値を得た。

実際のポンプ部のキャビテーション状態を可視化したことで、インペラ翼先端形状がキャビテーション発生に大きく寄与することが確認できた。また、この結果から最適形状についての傾向を把握することができた。

Fig. 20 は形状違いのインペラによるキャビテーション初生バケット図である。C12 と名付けたタイプのインペラが、最もキャビテーションが発生しにくい形状であることが確認できた。Fig. 21, 22 に実際のキャビテーションを観察した結果を示す。Fig. 21 がベースで、Fig. 22 が C12 タイプのインペラである。いずれも、高速域の同一速度の状態をシミュレートしており、翼形状を改良することでキャビテーションの発生が大幅に低減していることが確認できる。

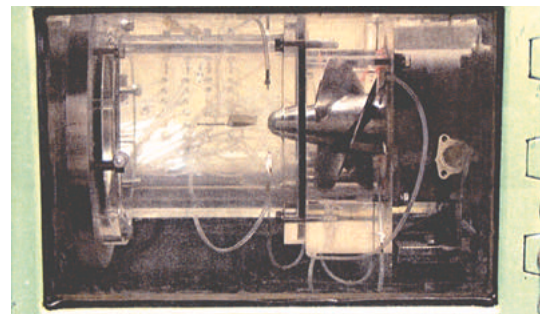


Fig. 19 Observation window of cavitation test equipment

7. 完成艇テスト

7.1. PWC に求められるウォータジェットポンプ性能

一般的なウォータジェットポンプの開発フローにおいては、まず完成艇の抵抗を推定し、エンジン最高出力にマッチしたポンプの吸収馬力を決定、ハウジング径やインペラとステータ設計、インテークまわりの形状検討、ノズル径の選定などを行なう。そして、完成艇のテストにおいては、PWC に求められるウォータジェットポンプ性能を評価する下記のポイントを目標性能通り満足することが必要である。

- ・スタート時や助走再加速時の推力が十分で、かつ有効に加速に使われているか。
- ・ライダの意志(スロットルコントロール)に忠実に推力が伝えられているか。
- ・スピン後等のオーバーレブ状態でのデッドスタート時に推力の復帰がスムーズか。
- ・フックアップ性能は十分か。

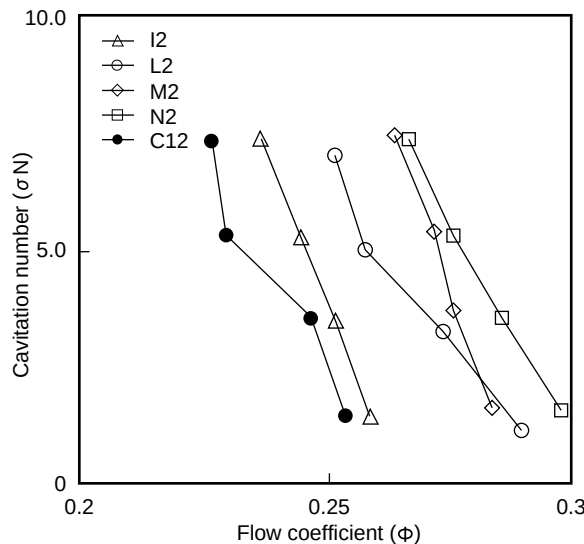


Fig. 20 Initial generation of cavitation by flow coefficient

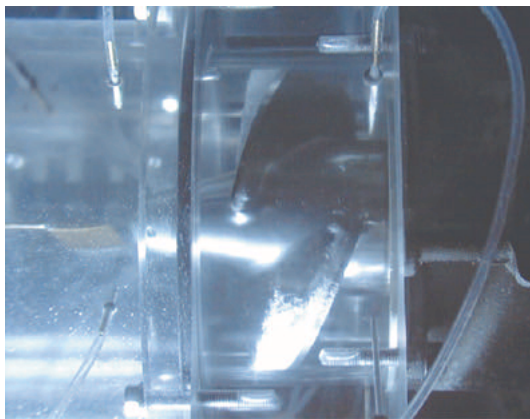


Fig. 21 Cavitation test result before improvement

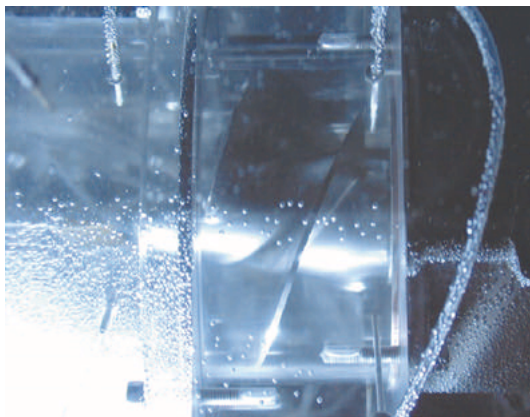


Fig. 22 Cavitation test result after improvement

7.2. 完成艇テスト結果

これまでの検討結果で設計したウォータジェットポンプについて、完成艇を用いてマッチングとフィーリング評価を行なった。基本性能に問題は無かったが、これまでの単体性能テストやキャビテーションテスト結果から得られたデータを基に改善を図り、トランジェント領域での吸収馬

力が高めになるようなチューニングを施し、さらに、エンジン出力特性を調整して加速感の持続や加速初期のフィーリング向上を達成した。

8. まとめ

出力が違う2種類の4ストロークエンジンにマッチしたウォータジェットポンプを自社開発した。開発にあたっては、下記に示す設計手法を確立し、独自のウォータジェットポンプ開発手法を構築した。

- (1) スケールモデルによる単体テストと CFD 計算結果のコリレーションを確認し、計算ノウハウを把握することによってインテーク損失係数を予測する手法を確立した。
- (2) 超薄翼の翼特性実測データと翼特性計算結果のコリレーションを確認し、未知の翼型の特性を予測する手法を確立した。
- (3) ポンプ部単体での性能テストと作成したポンプ部性能予測計算結果のコリレーションを確認し、ウォータジェットポンプ性能を予測する手法を確立した。

参考文献

- (1) 加藤洋治：キャビテーション，横書店，p.96 (1979)
- (2) Kinnas, S.A. and Fine, N.E.; A Numerical Nonlinear Analysis of the Flow around Two- and Three- Dimensional Partially Cavitating Hydrofoils, Journal of Fluid Mechanics, Vol.254, p.151-181 (1993)
- (3) 中武一明，安東潤，片岡克巳，吉武朗：簡便な一厚翼計算法，西部造船会会報，内 88 号，p.13, 21 (1994)
- (4) 山口一，加藤洋治，谷村正治，豊田真：トランス・キャビテーション・プロペラ用翼型に関する研究，日本造船学会論文集，第 182 号，p.49-57 (1997)

■ 著 者 ■



土谷 政彦



布施 知洋



渡部 尚