

4. プロパルサおよび キャビテーションの研究

右近 良孝

Research on Propulsor and Cavitation in the Ship Research Institute past Ten Years

By

Yoshitaka Ukon

Abstract

This paper reviews the development of propulsor- and cavitation research in the Ship Research Institute mainly past ten years. First part of this paper describes theoretical studies and related results on propulsor and cavitation; lifting-surface theories and lifting body theory on conventional propellers, design method of contra-rotating propeller, computer fluid dynamics developed recently, cavity flow theories on two-dimensional, three-dimensional hydrofoils, and marine propellers.

Second part presents studies on the evaluation of propeller performance including that under the condition of astern, air-drawing and wave. Measurement technique on pressure distribution of both model and full scale propellers and the flow field around a propeller working in complicated situations.

Third part explains recent remarkable activities on cavitation research, including cavitation inception, pressure fluctuation measurement induced by unsteady propeller cavitation, cavity thickness measurement, super-cavitating hydrofoils and propellers, cavitation noise measurement, measurement of erosion intensity and prevention of cavitation erosion for high speed propellers and rudders.

Finally future works to be tackled are discussed.

り精度良く計算することは原理上可能であるが、キャビテーションの発生範囲計算に応用できる様するためには、船用プロペラは薄翼であることからパネルの数を膨大に多くするか、パネルの形状や特異点分布を高次化することが必要である。更に、粘性計算を組み合わせる必要もあることから、現在のコンピュータの能力をしてもまだ実用的計算法とは言えないが、将来は、多くの機関でも使用されて行くようになるであろう。

2. 2 二重反転プロペラ

第二次オイルショックの後、省エネに関する関心が高まりと遊星歯車の分野の進歩にも助けられ、低回転大直径プロペラが採用される様になり、現在では低速船に対して普通のプロペラとなってきている。これに対して、省エネ・プロパルサとして原理的に明白な二重反転プロペラに対して80年代半ばにおいて研究が再び盛んに行われる様になってきた。前方プロペラが生じる旋回流エネルギーを後方プロペラが回収するという原理から、100年以上前から高効率率が期待された。しかしながら、70年代当時の研究では通常型プロペラより省エネとはならず²⁴⁾、又、軸系製作の難しさから造船界からは見捨てられていた。著者らは振動軽減の観点からも二重反転プロペラの有効性を見直すべく、変動圧力・水中騒音に関して、通常型プロペラとの比較を行った²⁵⁾。これとともに、LDVIによる計測を行って、二重反転プロペラ設計法の改良を行った。

70年代半ばに小久保によりMorganのオリジナル方法に基づく二重反転プロペラ設計法が開発されていた²⁶⁾。この方法では、Tachimindjiの計算に基づく誤った計算チャートにより前後プロペラの干渉速度計算していたため、ピッチ分布が不合理なものとなった。そこで、Lerbsの方法で提案されている source disk 法により前後プロペラの干渉速度を計算するなどの変更を行い、二重反転プロペラ設計法の改良を行った²⁷⁾。この方法に基づき、高速コンテナ船²⁷⁾や大型バルク・キャリア²⁸⁾、²⁹⁾、³⁰⁾に対して設計を行い、通常プロペラと比べて単独性能で前者は6%、後者は8%、自航状態でもそれぞれ前者は7%、後者は11%の省エネが得られた。これらの研究で二

重反転プロペラに対して、舵の影響の大きさが明らかにされた²⁸⁾。

2. 3 CFD

80年代半ばから兎玉によりIAFスキームに基づく二次元翼まわりの計算法が開発された³¹⁾、³²⁾。この方法の有効性は円柱やNACA0012についてのみ確かめられた。これに対して、船用プロペラの様な薄翼に対する上記コードの機能を調査した結果、翼前縁で圧力が振動するばかりかNACA4412に対して抗力も実験値の5倍となり、改良の必要が明かとなった。工藤らはグリッドの生成方法などに改良を加えたコードを開発し、薄翼での圧力分布計算を可能にしたばかりでなく、計算値は実験値に対して揚力が10%小さめ、抗力が40%大きめまでに改良を行った³³⁾。二次元小キャンパー薄翼に対して上記の様な研究の進展が得られたが、一方、高キャンパー薄翼に対しては解が収束せず、この種の翼に関する計算が現時点での研究の課題となっている。

この様な二次元翼の計算の他に、三次元翼についての計算が兎玉によって行われている³⁴⁾。Re数は 10^3 程度で、翼端近傍での圧力の振動が残っているが、翼端渦の形成のシミュレーションを可能としている。

前述の揚力体理論はポテンシャル理論であり、粘性の影響をより厳密に考慮するためには積分型境界層計算を行う粘性-非粘性干渉についての逐次計算が必要である。一方、粘性を直接考慮した計算法としては Navier-Stokes 方程式の差分解法に基づくCFDがあり、直接計算である点から最も発展性が期待できる。現在、プロペラに関するIAFスキームでの計算法が開発が進められているが、レイノルズ数が 10^3 程度におけるピッチ比5.0程度のプロペラについての計算が当面の目標となっている³⁵⁾。ピッチ比が大きいのは、プロペラ周りのグリッド生成技術上の制約による。プロペラ翼周りをグリッド生成すると、ある半径位置でのプロペラは翼列イメージで表現できるが、そのグリッドはピッチ比が1.0程度であると歪んでソルバーでの計算が収束しないことになる。この様な場合、宇都により研究されている zonal grid³⁶⁾やoverlapping grid 技術が有効となつ

てくる。また、翼端渦が生じる流場ではsolution adapted grid も考慮する³⁷⁾ 必要があるであろう。

2. 4 キャビテーション

花岡は、二次元翼に関して、部分及びスーパー・キャビテーション発生時の翼理論を詳細に解析的に展開し^{38), 39), 40), 41)}、三次元翼及びプロペラに関して解法の提案を行なっている⁴²⁾。著者は三次元翼の部分キャビテーションに関して揚力線理論を用いた逐次近似法により具体的な計算と2種類の翼について実験を行い、圧力分布に関して非常に良い一致を得ている⁴³⁾。精度の向上のため、揚力面理論と揚力線理論との組合せによる三次元部分キャビティ計算法を開発し、上記と異なる三次元翼について実験を行なった⁴⁴⁾。更に、この計算を三次元後退翼にも適用し、空洞モデルに関する基礎データを得た⁴⁵⁾。

以上は定常キャビティに関する理論であるが、定常翼に発生する部分キャビティは翼弦長の約60%より長くなると自励振動し、キャビティがほぼ前縁近傍によりちぎれるキャビティのbreak-off現象を起こす。児玉は非定常ポテンシャルを導入して、この現象のシミュレーションを試みた⁴⁶⁾。キャビティ表面が不安定に変形するまでの数値計算が行なわれた。

著者はプロペラ揚力面理論で得られる相当二次元翼を用いて船用プロペラキャビテーション発生範囲計算法を開発した^{47), 48)}。翼根側の厚翼域に対して、経験則に基づく揚力等価法でキャビティ長さを計算し、0.8Rより翼端側の薄翼域では、西山の二次元空洞理論によりキャビティ長さを計算し、0.7Rでは両者の平均値で与える実用的計算法であり、実験値との一致も比較的良好⁴⁹⁾。当時の新しい知見として、層流剥離や層流から乱流への遷移というきっかけがないとシート・キャビテーションが発生しないことが明らかになってきたので、相当二次元翼に対して境界層計算を行い、キャビテーションの初生判定をも組み込んだ計算法も発表した⁵⁰⁾。

3 プロペラ性能評価の研究

3. 1 プロペラ単独性能

3. 1. 1 プロペラ動力計

船研の曳航水槽には大型($T=200\text{k}$ 、 $Q=16\text{kg}\cdot\text{m}$ 、 $n=25\text{rps}$)、中型($T=80\text{kg}$ 、 $Q=4\text{kg}\cdot\text{m}$ 、 $n=50\text{rps}$)、小型($T=30\text{kg}$ 、 $Q=1.5\text{kg}\cdot\text{m}$ 、 $n=40\text{rps}$)の三種類の動力計があるが、小型を除き、老朽化が激しい。数年前、これらの動力計の一部更新のため、新型動力計($T=40\text{kg}$ 、 $Q=2\text{kg}\cdot\text{m}$ 、 $n=50\text{rps}$)が導入された。これは斜流時(最大斜流角 $\pm 30^\circ$)でのプロペラ性能(軸方向力とトルク)が計測できると回転数の設定がデジタル制御で、センサが歪ゲージとなっているのでコンピュータで回転数を変化させ、その時の非定常プロペラ性能の計測が可能である。

二重反転プロペラの性能を計測する二重反転プロペラ動力計は2組ある。一つは、単独性能と自航用に両用できる形式のものであるが、老朽化等のため、ゼロ・ドリフトが比較的大きく、低回転大直径プロペラ⁵¹⁾を考慮した二重反転プロペラの研究を遂行することが困難となり、新たに低容量($T=10\text{kg}$ 、 $Q=0.5\text{kg}\cdot\text{m}$ 、 $n=25\text{rps}$)の動力計を製作した。

キャビテーション水槽では模型船動力計(R-46; $T=70\text{kg}$ 、 $Q=4\text{kg}\cdot\text{m}$ 、 $n=33.3\text{rps}$)、主動力計(J-26; $T=600\text{kg}$ 、 $Q=30\text{kg}\cdot\text{m}$ 、 $n=60\text{rps}$)と斜流動力計(H'38; $T=200\text{kg}$ 、 $Q=10\text{kg}\cdot\text{m}$ 、 $n=50\text{rps}$)が用いられる。

3. 1. 2 通常型プロペラ単独性能計測

POTはルーチン・ワークとして実施されているが、近年、低回転大直径プロペラ⁵²⁾や小翼面積プロペラが主流となってきたため、プロペラ単独性能に及ぼすレイノルズ数影響がますます大きくなってきており、プロペラ回転数を動力計の容量いっぱいとしても、効率ばかりでなく、推力係数やトルク係数計測値がプロペラ回転数に対してなかなかフラットにならなくなってきている。また、POTの計測手順によって、ヒステリシスが生じることもあり、未だ完全に計測法として確立したとは言えない。

船舶は直進ばかりでなく、港内などの輻輳域では

減速や急停止もすることがある。このため、4象限POTに対する関心が高まっている。山口らは、4象限POTを行なうため、動力計の回転制御系の改良を行い、Wageninge-Bシリーズ並びに円弧翼断面プロペラを用いて計測を行い、NSMBの実験式を拡張した方法で計算した結果と比較し、良好な対応を得ている⁵³⁾。最近、HSPの翼端側での損傷や切損が問題となっており、これらはアスターン時に生じると考えられることから、停止性能と合わせてHSPについての4象限単独特性にも関心をもたれるようになってきた。

Fig.1に示すキャビテーション水槽におけるPOTは容量の観点から、かなり高レイノルズ数で計測を行なうことができる。

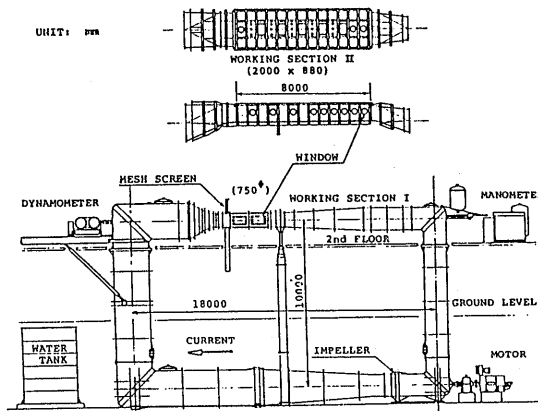


Fig.1 Configuration of SRI Large Cavitation Tunnel

しかしながら、キャビテーションの発生が避けられないことや側壁影響の除去など問題が生じる。側壁影響に関しては、古い方法ではあるが、Wood & Harrisの方法による補正が比較的良好的な値を与え、曳航水槽での計測値と良い一致が得られることが多い⁵⁴⁾。

海洋調査において用いられる曳航体ではプロペラを遊転させて発電することが考えられており、工藤らは遊転時のプロペラ特性の推定について調べた⁵⁵⁾。各種のプロペラについて計測を行い、その結果、CFDによる粘性計算を付加したプロペラ揚力面計算法が遊転領域でのプロペラ性能予測に有効であるこ

とを得た。

プロペラの没水深度によって空気吸込みを発生するかが決定されるが、翼端が水面に一致する程度の時でも荷重量が余程大きくならないと吸込みは起こさない。空気吸込みはまた、微妙なきっかけで発生する現象であり、プロペラ作動状態の履歴の影響を受け、又、レーキ角が大きい方が空気を吸込みにくいとの結果を得ている。一方、高速艇用プロペラや浅水域を航行するプロペラは水面より露出して作動することが多い。このため、空気吸込みを起し、プロペラ性能が大幅に変化する。このプロペラの空気吸込みに関する志波の研究¹⁾は有名である。近年、高速艇プロペラに関心が集まってきており、この種のプロペラの空気吸込み時の性能が問題となる。工藤らはプロペラレーキの空気吸込みに及ぼす影響を調べた⁵⁶⁾。通常型であるSRI-Bプロペラならびに高速艇プロペラと同程度の30°のレーキ角をもち、他の幾何学的形状は同じプロペラについて没水深度を変化させて単独性能試験を行なった。レーキ角が大きいと空気を吸込みずらくなるが、これは decreased pitch になったことと同等の効果によるものであることを明らかにした。高速艇プロペラの空気吸込み防止は、プロペラの性能、特に、加速性能向上の上からも重要である。

波浪中のプロペラ性能に関する研究が門井らにより行われている^{57)・58)}。

3.2 特殊プロペラ性能

この種のプロペラとして、推進性能部では二重反転プロペラの研究が行なわれている。80年代半ばには、二重反転プロペラと低回転大直径プロペラを組み合わせることにより、更に効率向上を狙ったものが考えられた。この考えに基づき、設計と実験を行い、良好な結果が得られたが、設計値と計測値との完全な一致は得られなかった。又、この二重反転プロペラは展開面積比が極端に小さくなり、このためレイノルズ影響が避けられず、回転数を種々変化した計測が不可欠であった。しかし、プロペラ単独性能試験では動力計の容量まで回転数を上げることができるが、自航試験では数rpmとなり、計測精度いっばいの計測となることも避けられなかった。

このため、プロペラ回転数の影響除去のため、プロペラ前縁への粗さをつけた自航試験も行なわれた。自航試験では、舵の位置や暑さを変化させて、その影響を調査し、有益なデータを得た。

スキューの比較的大きな3翼CPPについても門井により研究がなされ、その諸特性が明らかにされた^{59), 60)}。

現在、超電動船の開発が熱心に行われており、実験船の建造がなされるまでになっている。船研では超電導を推進装置としてではなく、流場制御に用いる研究が行われた。日夏は超電導効果によって層流域での剥離を抑え、ローレンス力により層流ばかりでなく乱流に於ても揚力並びに抗力を減少させることが可能であることを示した。又、瘦せた船に対しても伴流を狭くする効果があることが得られている^{61), 62)}。

Boseは約半年間船研に滞在し、Rotary Foil Propellerについて研究を行なった⁶³⁾。multiple stream tube理論モデルを用いた計算法を展開し、翼ピッチ角のsinusoidal変化やtrochoidal変化について比較計算し、実船計算も試みた。

特殊プロペラのうち、高速船用プロペラとしてウォーター・ジェットが最近もてはやされているが、船研では機関動力部が400m水槽において実験を行っている⁶⁴⁾。このプロペラはエンジンの一部ということとプロペラと比較して性能が悪いことが明確であったため、推進性能部としては研究が行われなかった。

3.3 プロペラ翼面圧力

プロペラについては揚力面理論の発達もあり、スラストやトルクなどの量より微量である圧力分布を計算することができる。揚力面計算法の開発が多く研究者によって行なわれるにつれて、翼面圧力計測も盛んに行なわれる様になってきた。船研でも武井は当時の最新の半導体圧力計を模型プロペラ表面(0.77R)に5カ所貼り付け、キャビテーション水槽において均一流中並びに不均一流中で計測を行なった^{65), 66), 67)}。均一流中に対して、計算値との対応は比較的良好であったが、不均一流中においては揚力変動や一部のデータを除き一致が悪かった。小

山らは非常に翼厚の大きい模型プロペラの中にチャンパーを形成し、圧力計を埋め込んで計測を行なったが、揚力を除いて良い一致が得られなかった⁶⁸⁾。

汎用プロペラである直径400mmφの青雲丸プロペラにこの方式を適用して計測を行なった結果、計測値が甚だしくばらついた。この原因を調査した結果、翼に加わる荷重により翼が変形し、その応力が圧力計の出力に影響したためと判明した⁶⁹⁾。このため、圧力計をプロペラ翼での接着面を最小にし、圧力計のまわりをゴム系の接着で充填することにより、圧力計への翼歪の影響を除去した⁷⁰⁾。計測の結果は、通常型プロペラ及びHSPに関して均一流中並びにワイヤ・メッシュによる不均一流中において核関数展開法による揚力面計算と良く一致するが、両者については正面側とHSPのみについては翼端側での不一致と背面側での波立ち現象が目だつ。この高精度計測法により揚力面理論の改善すべき点と既存理論の限界を明らかにした。一方、これに対して実船プロペラの翼面圧力の計測は実船でのスラスト計測の難しさと実船程度の高レイノルズ数におけるデータの必要性からプロペラ研究者並びに設計者にとって永年の夢であった。青雲丸の二種類のプロペラに対してSR206との共同研究において翼面圧力ならびに翼応力について実船計測を行なうことになった。現時点では、通常型プロペラについてしか計測が行われていないが、非常に有益なデータが得られた^{71), 72)}。まず、各プロペラ回転数に対して、スラスト一定で操船されたこともあり、Fig. 2に示すようにキャビテーション発生域を除き回転数に拘らず同じ圧力分布となり、再現性の良いデータが得られた。円周方向流速成分を考慮した実船推定伴流分布を用いた揚力面計算とは定性的にも定量的にもかなり良い一致が得られたが、正面側などでの不一致の点は模型プロペラでの計測と共通しており、既存揚力面計算法の問題点を明かにすることができた。

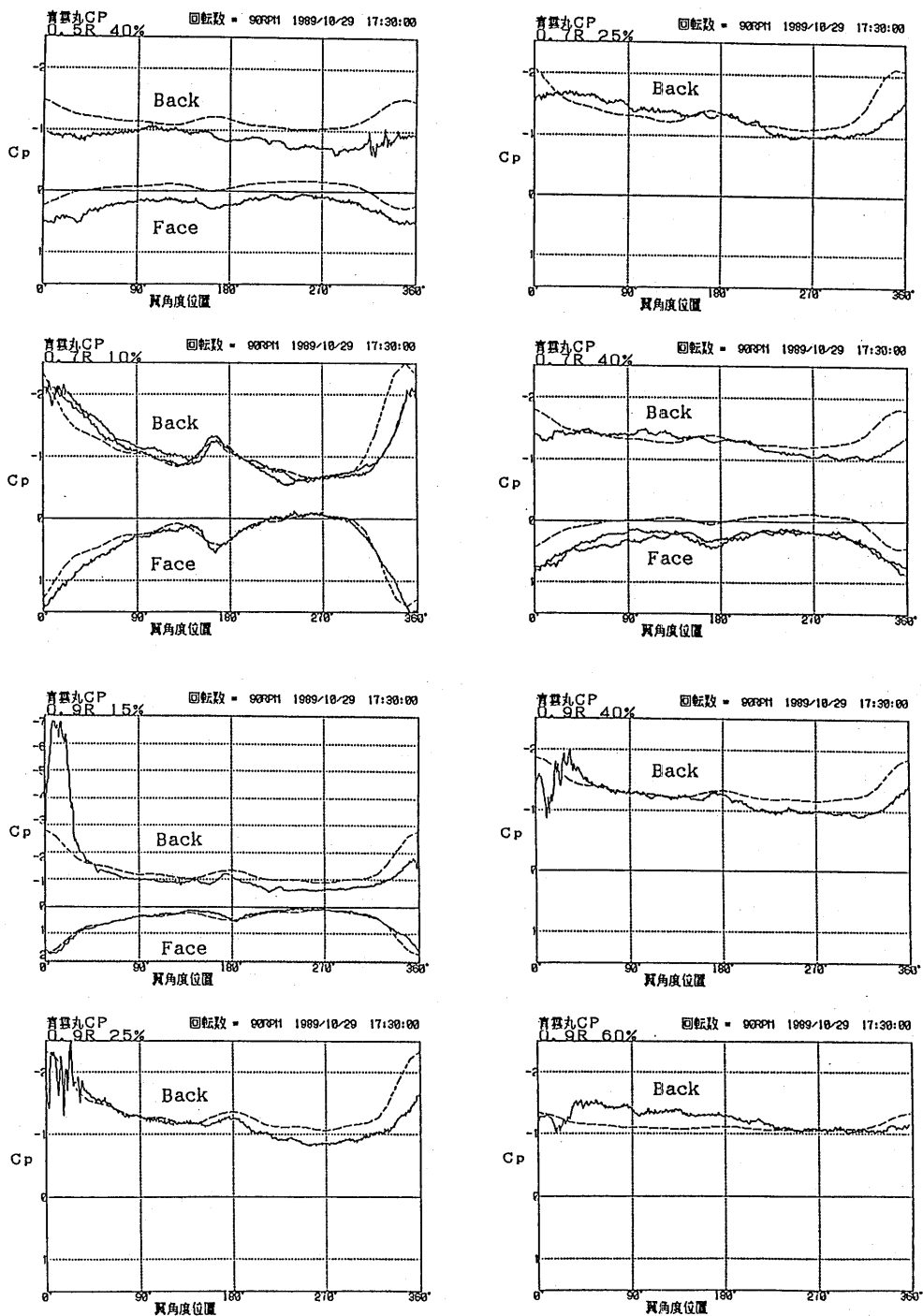


Fig.2 Variation of Pressure Distribution on propeller Blades

—— Measurement - - - - - Theory

3. 4 流場計測

プロペラや翼型まわりの流場計測が80年代前半におけるLDVの導入とともに活発に行なわれるようになってきた。LDVの実用化の努力は武井らによって専らキャビテーション水槽で行なわれた。均一流中のみならず、ワイヤ・メッシュ後方においてプロペラ作動していない時としている時についての計測を行なった。均一流中での計測に関しては無限翼数理論による計算値⁷³⁾と定性的な一致が得られたが、不均一流中ではPitot管との計測とも一致せず、LDVによる計測法の改良の必要性があった。模型船後方での計測も同様な傾向であった⁷⁴⁾。これらの計測は時間平均で行なわれたが、均一流中でもプロペラは回転するので、プロペラ後方の流れは非定常であることから、流場の瞬間計測の必要性が生じた。角川らはLDV用回転同期計測装置を制作し、作動するプロペラまわりの流場を瞬間的に計測したと同等な流場が得られる計測法を開発した⁷⁵⁾。この計測法を用いて、プロペラ後方の流場⁷⁶⁾や舵への流入速度計測⁷⁷⁾が行なわれた。

二重反転プロペラでは後方プロペラは前方プロペラの複雑な後流にあることから、精度の良い設計を行なうためには前後プロペラによって生じる干渉速度の決定が必要となり、この点、LDVはこの目的に最適である。黒部らはLDV計測精度向上のため、特に二次流れについて多点計測を行い、計測精度の確認を行なった。高速コンテナ船用の二重反転プロペラに関する計測の結果、通常プロペラ同様プロペラの前方での誘導速度は非常に小さく、又、二重反転プロペラの後方での円周方向の流速はほぼゼロとなっており、二重反転による回転流の回収が機能していることが分かった⁷⁸⁾。しかし、設計値よりも誘導速度の計測値は小さく、設計では過大な軸方向干渉速度を与えられていることが明らかになり、今後の設計法改良の貴重なデータが得られた²⁷⁾。

高速艇でよく用いられる斜流プロペラでは、プロペラ翼根部に発生するルート・キャビテーションによりルート・エロージョンが発生することが指摘されている。斜流角が大きくなると急激にエロージョンが発生することが知られているが、その理由は明白ではなかった。黒部らによるLDVなどでの流場計

測から翼根部では軸傾斜の増大とともにプロペラ流入角の振幅が増大するばかりでなく、平均流入角も増大することも見いだした⁷⁹⁾。

このように最近船研では、上記の様に複雑なプロペラ流場の計測ではLDVが非常に有効に利用され、理論の検証、モデル化や設計に生かされている。

4 キャビテーションの初生及び キャビティ構造の研究

4. 1 Headform

キャビテーションは発生すると種々の弊害をもたらすことから発生するかしないかを予測することは重要なテーマである。第11期ITTCではキャビテーションの初生計測の各機関でのバラツキを調べるため、半円球頭軸対称体 (ITTC Head Form)を用いて、初生観測を行なった。この供試体は層流剥離を起こすなど粘性の影響を強く受けるため、各機関により大幅にデータがばらついた。特に、船研の旧キャビ水槽でのデータは流速が低くなるにつれて初生値が著しく大きくなった。著者は同じ供試体を用い、新しく建設された大型キャビテーション水槽で計測を行なったが、やはり、同様の結果となった。検討の結果Gaseous Cavitationであることが明らかになったことから、脱気装置を導入して、再計測を行なった。その結果、層流剥離や乱流遷移に支配される合理的な初生値が得られる様になった⁸⁰⁾。第15期ITTCの供試体 (Foil-Headform の組合せ)の持回り試験に参加した⁸¹⁾。初生観測はハブ・ボルテックス・キャビテーション、翼背面キャビテーション、翼端渦キャビテーション、半円球キャビテーションの4種類のキャビテーション・パターンについて初生値を計測した。ハブ・ボルテックスと半円球頭キャビテーションにばらつきが多かったが、どの計測も船研のデータはばらつきの中心にあり、これらの結果も現在の知見から考えて、妥当である。

4. 2 翼型

二次元翼型は圧力分布の計測や計算がしやすいこ

とから、粘性とキャビテーションの初生の研究に利用される。船研でもキャビテーション水槽第1計測部に翼型計測部を取り付けることにより、二次元翼⁵⁰⁾や三次元翼^{45)、82)}の各種実験が行なわれている。キャビテーションの発生予測法の開発のために、初生予測法の確立が必要であり、このため各種翼型を用いて、圧力分布計測や三分力計測に並行して、初生計測が行なわれ、二次元翼境界層計算値との比較を行い、初生値 σ_i が層流剥離点の圧力係数や乱流遷移点での圧力係数と密接な関係があることも確かめた^{49)、50)}。黒部は二次元物体や円板に発生するキャビテーションの振動現象やリエントレント・ジェットについて調べ、キャビティ・モデルにつき、種々の検討を行なった⁸³⁾。

5 船尾振動の研究

5.1 変動圧力の研究

船体振動は舶用機関による振動ばかりでなく、プロペラも起振源となつてひきおこされる。プロペラによって誘起される振動も2種類あつて、その1つに不均一流中を作動するプロペラの各翼に加わる力のアンバランスが原因のシャフト・フォース（以前はベアリング・フォースと言われていた）がある。もう1つとしてプロペラに発生する非定常キャビテーションやプロペラ自身より誘起される変動圧力が船尾外板に伝達されて、これが大きな起振源となり、とりわけ船尾まわりで振動が引き起こされる。前者に関する船研における以前の研究は信頼性のあるデータをとるための実験的研究が中心であつた。これに対して、小山のプロペラ揚力面計算法の完成¹³⁾によつてシャフト・フォースがほぼ推定できることが分かつた。更に、伴流分布⁹⁴⁾ならびに翼数、翼面積比、スキュー分布といった幾何形状⁸⁵⁾とシャフト・フォースとの関係が明らかにされてきた⁸⁶⁾。現在は翼強度の観点から、特にCPPやHSPの一翼に加わる力の評価が問題となっている。

一方、後者の船尾変動圧力は積分量としてサーフェス・フォースと呼ばされる起振力となるが、これに関しては高橋・上田によつて先駆的研究が行われて

いる。旧キャビテーション水槽での平板を用いた変動圧力計測から、非定常キャビテーションの発生により、変動圧力が大幅に増加することを見出した⁸⁾。新しいキャビテーション水槽の運営が軌道にのるまでの間、実験的研究は曳航水槽で行われた。当時は、漁船の振動が大きな問題となつており、曳航水槽での計測に基づいて実船での振動発生の原因の推定の努力がなされた^{87)、88)、89)}。

新しく建設されたFig.1に示す船研の大型キャビテーション水槽では、次のような変動圧力計測法が用いられる。先づ、第1計測部では平板に圧力計を取り付け、伴流分布をワイヤ・メッシュでシミュレートする方法とダミー・モデルとワイヤ・メッシュの組合せでシミュレートする方法があり、各国の水槽とも前者の方法で計測が行なわれることが多い。一方、第2計測部では曳航水槽で用いられる最大長さ7mの模型船を取り付けて計測が行なわれる。平板を用いた計測が黒部らにより行われた⁹⁰⁾。一方、模型船を用いた船尾変動圧力計測は1973年頃から受託試験やSRとの共同研究を中心にいろいろと行われるようになってきた。キャビテーション水槽での模型試験の目的の一つはこの船尾変動圧力を高精度で計測することであり、これによつて実船での船尾変動圧力の予測及び軽減法の研究が可能となる。しかしながら、同時に以下に述べるいくつかの問題の存在も明らかになってきた。一方、理論に関してはキャビティ・ボリュームも含めて、予測法が確立していない^{91)、92)}。

5.2 伴流シミュレーション技術

まず、キャビテーション水槽での伴流分布が曳航水槽でのそれと一致するかが問題であつた。門井らは3隻の高速コンテナ船の相似模型を用いて、両水槽での伴流分布の比較を行った⁹³⁾。それぞれの長さは6.96m、5.80m、4.93mである。この結果、最も小さな模型船については船型がfineな事もあり、比較的良く一致したが、他の模型船に関しては伴流がかなり大きくなった。

SR174に関する共同研究では当時採用されはじめた低回転大直径プロペラ船の研究の一部として、キャビテーション水槽で変動圧力計測を担当した。しか

5. 3 気泡核制御技術と前縁粗さの添加の効果

キャビテーションの発生に水槽水中の気泡核が重要な役割をなすことは古くから知られている。キャビテーション試験は従来から、空気含有率を変えて試験が行われている。その根拠となるものとして、ITTCによって推奨された計測部における静圧で飽和空気含有率となるように設定する方法があるが、現実には観測がきれいにできるとか以前からの経験による場合が多い。近年、キャビテーションが伴流中で周期的に発生しないことが問題となってきた。空気含有量をITTCの基準やその倍としても、この現象を抑えることができなかった。この原因として、キャビテーション水槽水中の気泡核の数が実海域と比べて、格段に少ないこと、ならびに、近年のプロペラはMAUの様に前縁の負圧のピークをもって作動せず、ショック・フリーで作動することも挙げられる。模型試験ではこのため、初生段階(右廻りプロペラの左舷側)においてキャビテーションが発生しにくくなり、変動圧力波形がハーモニックにならず、振幅の解析値が見掛け上小さくなり、位相が遅れる傾向がある。この現象を克服する方法として、電気分解により水素気泡を水中へ供給する方法がある。このため、模型船船尾部の上流に水素気泡発生装置を取り付けて上流より気泡核を供給して試験を行なう。この方法はNSMB(現在のMARIN)で始められた方法で、キャビテーションの発生をかなり安定させることができ、変動圧力計測に有効である。もう1つの方法として、プロペラの前縁にカーボ・ランダムを塗布する方法である。この方法は上流にワイヤを張ったりすることもしなくてすむばかりでなく、プロペラ翼面上での乱流促進をすることにもなる。しかしながら、粗さそのものから微細なキャビテーションが発生し、プロペラでの初生が不明確になることや粗さ自身の抵抗によりプロペラ性能に変化が出ることが、今後の改善すべき点である。変動圧力に及ぼす両者の影響はほぼ同じであり、両者を併用することにより、より計測値の安定性は増す^{100), 101), 102), 103)}。

このような理由から実船計測との良い相関を得るために、船研独特の標準試験法として供試水中への核供給、プロペラ翼面上の乱流化及び実船推定伴流の

シミュレーションが採用されている。

5. 4 実船計測との相関及び水槽影響

キャビテーション試験水槽第1計測部(軸流方向不均一流)と第2計測部(三次元不均一流)で行なわれた計測例として、門井による高速コンテナ船の相似模型試験がある¹⁰⁴⁾。又、実船データが公表されている西独のコンテナ船“Sydney Express”プロペラに関する計測結果について述べる。本計測は日独科学技術協定に基づく共同実験の一部として行なわれたものである。ITTCにおける比較試験ではFig. 6に示す様に、変動圧力の振幅についての模型実験データは実船データと良い相関を示さないばかりでなく、計測時の模型プロペラの回転数により大きな影響を受けた。船研での平板を用いた計測でも後述の様に同様の現象が観測されていた。これに対して模型船を用いた方法では、変動圧力振幅についての模型実験データは2種類の試験条件及び計測位置のいずれに対しても実船計測値と良い一致が得られている。この様な実船計測との良い相関を得るために、前述のように供試水中への核供給、プロペラ翼面上の乱流化及び実船推定伴流のシミュレーションが採用が不可欠である。

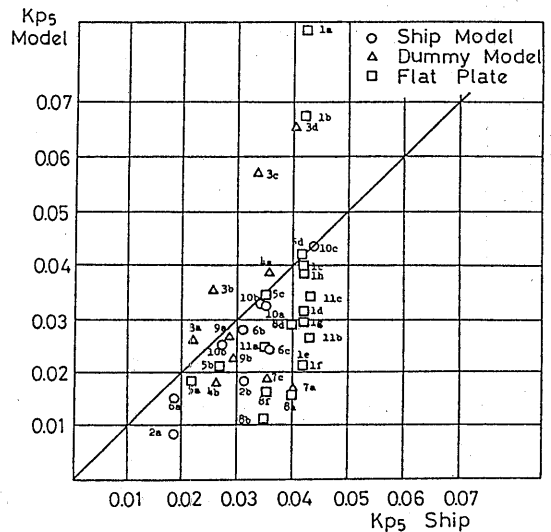


Fig.6 Comparison of Pressure Fluctuation Amplitude between Full Scale and Model

船研の第2計測部において模型船を用いて船尾変動圧力計測を行うことにより、ほぼ相似則の成立する計測値が得られる。しかしながら、第1計測部において平板を用いて計測するとFig. 7に示す様に計測時の模型プロペラ回転数により異なる計測値が得られる。この原因としてはキャビテーション水槽内の定在波、計測平板の振動、キャビテーション水槽本体の振動^{105), 106), 107), 108)}などが考えられている。このため、バネを用いて平板の支持方法を変化させ、平板の計測時の振動応答を調べた結果、平板は常用模型プロペラ回転数においてその固有振動

数が高いのでより低い周波数領域で計測が行われていることが明らかになり、一方、模型船では逆にその固有振動数が低いため、より高い周波数領域で計測が行われていることが明らかになり、両者は好対照な状態で計測が行われている。又、キャビテーション水槽本体の振動特性を調べるため、水槽の各壁をハンマーで叩いて、その共振周波数を加速度計を用いて調べた¹⁰⁹⁾。約117、128、155、175、180、200 Hzに共振点があり、5翼ではプロペラ回転数が20rps以上の計測で注意を払う必要がある。

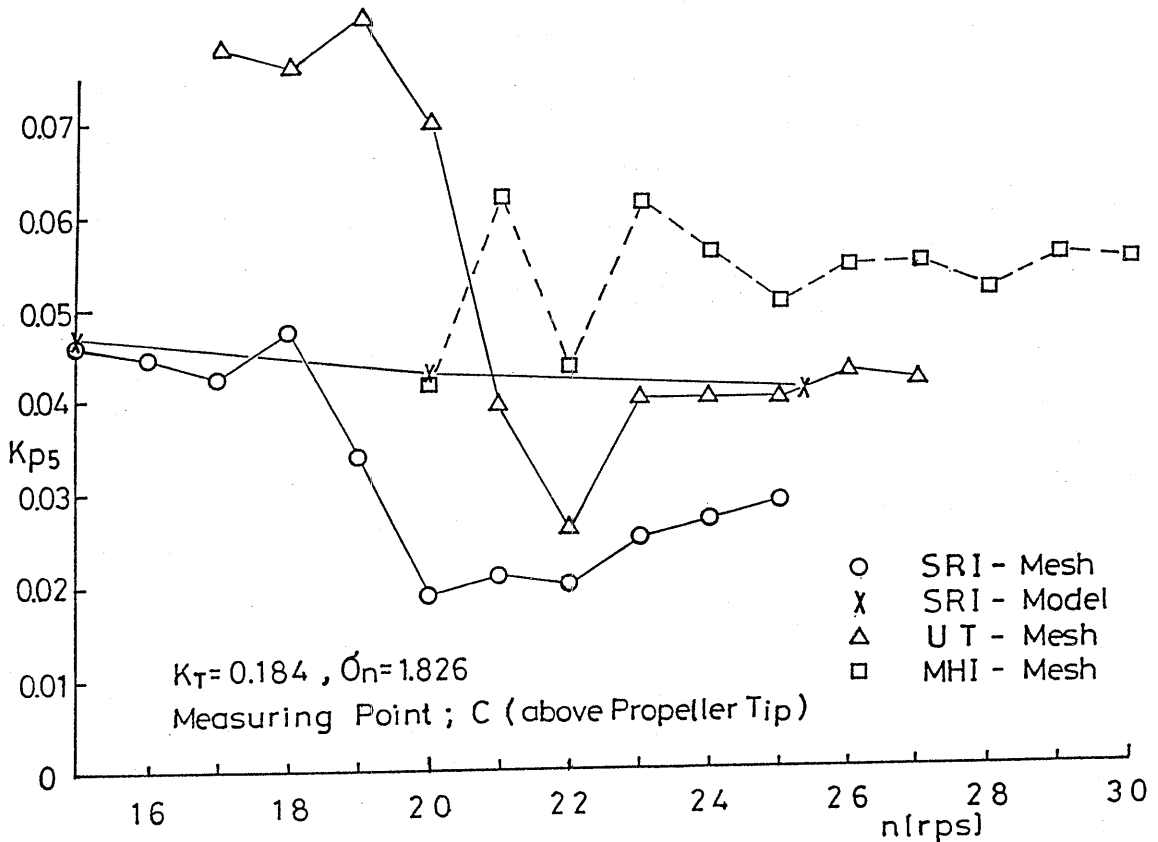


Fig. 7 Influence of Propeller Revolution Rate on Pressure Fluctuation Amplitude at First Blade Rate Harmonic

5.5 キャビティ形状計測技術

非定常キャビテーションにより誘起される変動圧力の理論による予測法として、数多くの方法が提案されているが、精度上克服すべき点が多い。キャビテーションの発生範囲に関しては粘性を考慮することにより、通常型プロペラに関しては比較的精度良く推定できる^{(48), (50), (91)}、キャビティ厚み分布、即ち、キャビティ・ボリュームの推定に関しては、既存法はいずれの方法も経験的な方法であり、普遍的な方法はない⁽⁹¹⁾。変動圧力の理論予測のためには、キャビティ・ボリュームの推定が第一で、これが与えられると変動圧力振動は比較的精度よく計算できると思われる⁽¹¹⁰⁾。このネックを解消するためには非定常キャビティ形状の計測が不可欠であり、現在、ステレオ・カメラ法、ピン・ゲージ法その他、船研で開発されたレーザ光散乱法^{(111), (112)}が提案されている。

これら方法のうち、レーザ光散乱法は模型プロペラばかりでなく、テレビカメラと組み合わせる方法

で実船プロペラのキャビティ形状計測^{(113), (114)}に用いられている。しかしながら、この方法は計測原理が簡明で比較的精度の高い計測値が得られる反面、計測時間がかかり、ルーチン・ワークには適さなかった。そこで、レーザ光の散乱とCCDカメラを用いた画像処理技術とを応用したキャビティ厚み分布計測技術を開発した⁽¹¹⁵⁾。本方法はパソコンによる自動計測であるため、既存のレーザ光散乱法と比べて多点計測が容易であり、ボリュームの計測も短時間で可能である。キャビティ形状の計測値に関してはFig. 8に示すように新計測法と既存法による計測値⁽⁹⁹⁾との一致は良く、計測点が多いので三次元形状計測としての解析精度が向上し、既存法の欠点が除去された。計測されたキャビティ・ボリュームの変化(二次の時間微分)もFig. 9に示すようにHSPの方がCPよりかなり小さく、変動圧力が小さくなることを示している。今回のキャビティ形状の計測データはキャビティ・ボリュームの予測計算法の開発に大きく寄与するものと考えられる。研究者を抱える船研の活躍する余地は大きい。

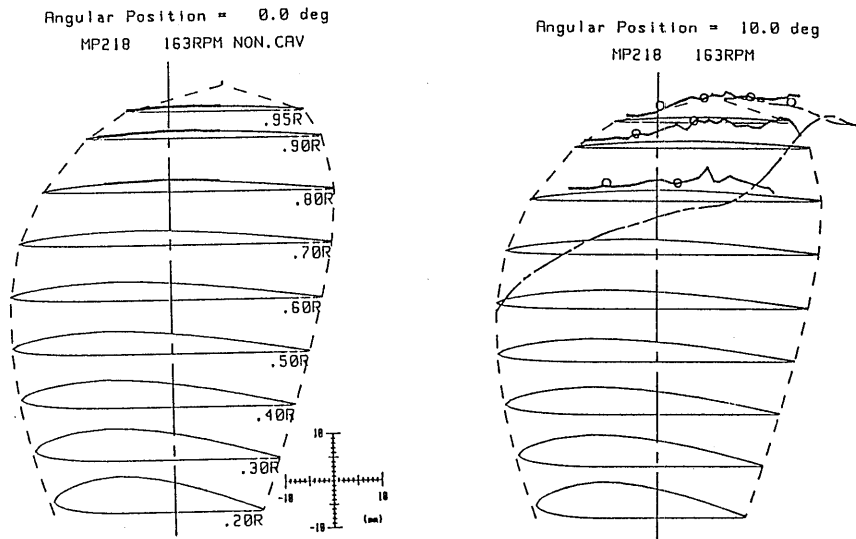


Fig. 8 (a) Cavity Thickness Distribution on CP

○ Previous Meas — Current Meas.

Angular Position = 30.0 deg
 MP220 163RPM NON.CRV

Angular Position = 40.0 deg
 MP220 163RPM

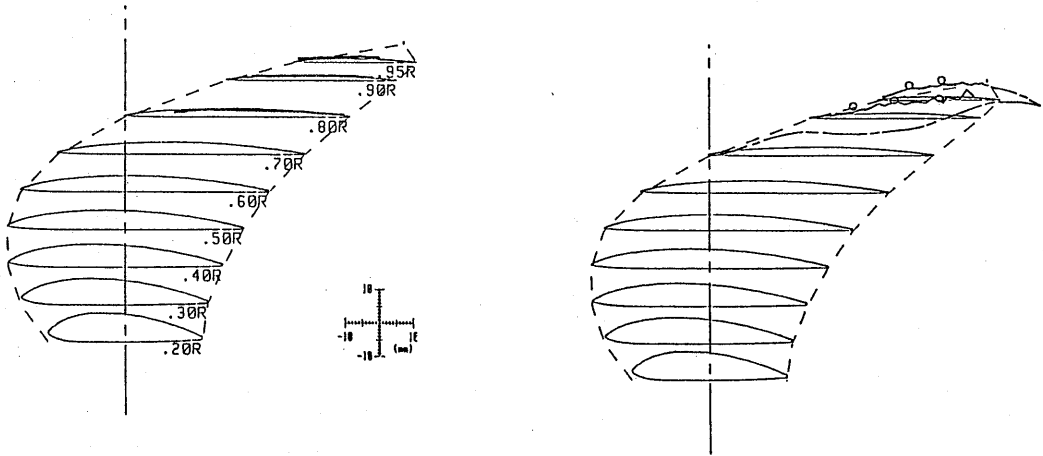


Fig.8 (b) Cavity Thickness Distribution on HSP

○ Previous Meas. — Current Meas.

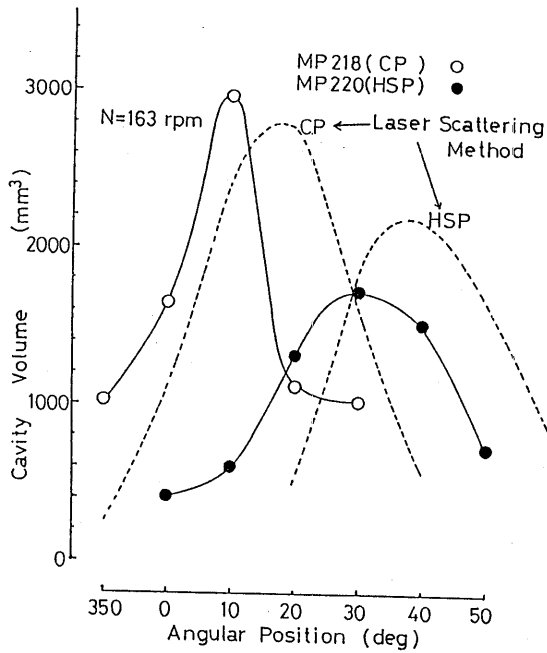


Fig.9 Comparison of Cavity Volume Variation between CP and HSP

6. キャピテーションを発生した翼型・プロペラ・舵の性能評価

近年、レジャー・ボートへの関心が高まってきている。この種のボートは船外機で駆動されることが多く、そのプロペラの性能向上へのニーズは大きい。この種のプロペラは半没水でかつスーパー・キャピテーション状態で使用される。スーパー・キャピテーション・プロペラ(以下、SCプロペラ)に関して諸外国においてシリーズ・テストが種々行なわれているが、最適性能SCプロペラ設計法なるものは確立されていない。これは特に、SCプロペラ性能解析法が開発されていないことが、大きな理由と思われる。船研では数多くの aerofoil型翼型のキャピテーション発生時における性能計測の他、いくつかのスーパー・キャピテーション翼型についても性能計測を行なっている。Fig. 10に3種類の翼型の各キャピテーション状態での揚抗比の比較を示す。

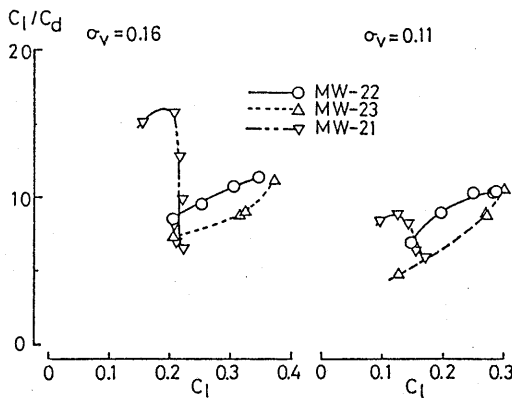


Fig.10 Lift Drag Ratio of S.C Wing Sections
MW-21はSRI-B翼型($f/c=2.9\%$, $t/c=5.0\%$)、MW-22は性能が良いと言われているプロペラの0.7R断面翼型($f/c=2.6\%$, $t/c=3.4\%$)、MW-23は性能が普通のプロペラの0.7R断面翼型で($f/c=3.4\%$, $t/c=2.3\%$)である。ノン・キャピテーション並びにキャピテーション状態 $\sigma_v=0.16$ ではMW-21が最も性能が良いが、この種のプロペラの作動条件である $\sigma_v=0.11$ ではMW-21が設計Clでは性能が悪くなり、MW-22と23では前者が広いCl並びに σ_v の範囲で揚抗比が高い。プロペラの性能と良い対応を示しており、二次元翼型試験に

よる性能評価及び最適翼型開発の可能性を示すものである。現在、より性能の良い翼型を開発中である。この他、加速時に空気吸込みを起こすと総合性能が悪くなるので、翼断面形状と同時にピッチ分布並びにレーキも考慮する必要がある。

現在、運輸省が中心となって50knの超高速船“テクノ・スーパー・ライナー”の構想の実現に向けて研究が開始されている。この様な超高速船ではプロペラからキャピテーションが発生するばかりかスーパー・キャピテーション状態となることによる大幅なスラスト低下や効率低下も避け難いことが予想される。ここでは、プロペラより効率が悪いと言われているウォーター・ジェットではなく、SCプロペラを採用した場合について考えてみた。

この種の船型では、SCプロペラとして有名なニュートン・レーダ型のプロペラを用いても、かなりの多軸としない限り、SCプロペラでは必要なスラストが得られない。そこで、このSCプロペラをタンデム型としたプロペラについてキャピテーション試験を行なった。 $K_T/J^2=0.274$ で $\sigma_v=0.597$ の時、単独のSCプロペラでは、効率は0.605で $K_T=0.215$ にまでスラスト低下するのに対して、タンデム化することによって効率は0.615で、必要なスラスト $K_T=0.425$ を発生させることができる。本実験は前後プロペラの位相を幾つか変化させて、最適の位相角で得られた結果であるが、既存のストックSCプロペラを組み合わせた実験により得られた結果であるので、前後プロペラの干渉を考慮した最適ピッチ分布を用いて設計することなどにより、更に性能の良いSCタンデム・プロペラ的设计が可能となる。

商船に関しては現在もMAU翼断面プロペラが多く使用されているが、キャピテーションの発生状況を勘案して修正されることが数少なくない。MAUプロペラは基本的には性能が主であり、キャピテーションは極めてマクロ的に考えられているだけであった。このため、造船所のニーズに対応できる様、船研でもポストMAUとして、キャピテーションの発生を考慮したプロペラ翼断面の開発が門井により行なわれた。SRI-aの翼断面¹¹⁶⁾と、これを改良したSRI-B翼断面^{117), 118), 119), 120)}の2つが挙げられ、後者に関しては3, 5, 6翼の設計チャートも用意されている。

7 水中騒音の研究

キャビテーション水槽においてプロペラからキャビティ崩壊時に発生する水中騒音を定量的計測し、実船での予測をするため、多くの研究がなされているが、閉塞された空間であるキャビテーション水槽内での計測に難しさが多く、研究者を閉口させている。このため、荒井はGHz程度の超高周波数の騒音に注目し、その波高頻度分布を計測して、キャビテーション・パターンの識別を試みた¹²¹⁾。一方、工藤はキャビテーション水槽での音の伝播を調べるためキャビテーション水槽において、一定の強さでランダム・ノイズを発生させて、水槽の各位置での音圧を計測した。この値をコントワ図にしたものをFig. 11に示す。

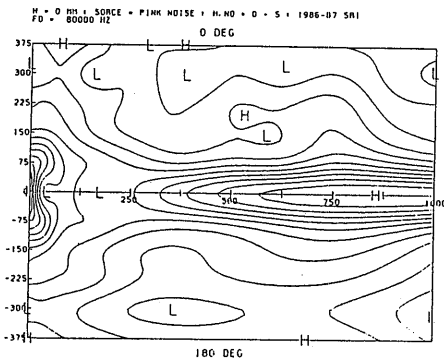


Fig. 11 Propagation of Random Noise at Vertical Plane in Circular Cavitation Tunnel Section

音は単純な距離減衰では伝播せず、水槽壁や窓での反射により、複雑に音圧が変化して伝播していくことが分かる。また、この様子は周波数によっても全く異なり、水中騒音を計測するハイドロフォンの配置位置により、計測値が異なることを意味し、絶対的、また定量的計測が難しいことが分かる¹²²⁾。キャビテーションの初生を騒音エネルギーの上昇をもって定義することが試みられ、4翼CPPの初生バケット図を作成した¹²³⁾が、騒音エネルギーの上昇と目視の初生では一致しないことに注意を要する。キャビテーション・パターンを騒音計測から判定できると大変有効であるが、水中騒音計測値を音紋解析の

手法を用いて解析し、キャビテーション・パターンとの対応が調べられた¹²⁴⁾。実船予測法は極めて経験的な方法が用いられているのみである。

8 エロージョンに関する研究

8. 1 エロージョン計測及び予測技術

船研でのエロージョンの研究では、SSPAで開発されたステンシル・インクによるエロージョン試験の導入¹²⁵⁾、¹²⁶⁾、¹²⁷⁾を始めとして、感圧フィルム(プレスケール)¹²⁸⁾、¹²⁹⁾及び純アルミ¹³⁰⁾を試験片とするエロージョン試験の船用プロペラへの適用を試みてきている。しかしながら、これらの方法は現在のところエロージョンの強さの相对比较に用いることができる程度であり、新しい定量的方法の確立が待望されている。

8. 2 エロージョン防止の研究

近年、一般商船の船用プロペラの軽荷重化により、エロージョンはあまり問題とならず、研究の停滞が目立つが、最近新しいキャビテーション・エロージョン発生判定基準が門井らによって提案された¹³¹⁾。一方、巡視艇を始めとする高速艇プロペラは斜流中を作動することもあり、実機で激しいルート・エロージョンの発生がしばしば見られる。超高速船の開発が目立っている昨今、高速の斜流状態でプロペラサが使用される限り、ルート・キャビテーションが深刻な問題となることは予想に難くない。

斜流中を作動する高速艇プロペラの流力性能やキャビテーション特性を調べるために、キャビテーション水槽で種々の計測が行なわれている。プロペラ軸の後流がプロペラ・キャビテーションに及ぼす影響やルート部での流場の可視化の他、LDVにより流場計測を行い、ルート部でのクラウド・キャビテーション発生の要因が明らかにされた⁷⁹⁾。

現在、ルート・エロージョンの防止を目的として、Fig. 12に示される様な“Pre - Prop Fin, PPF”について研究が行なわれている¹⁰⁹⁾。

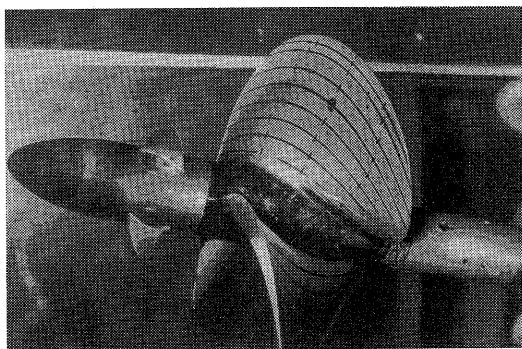


Fig. 12 Pre-Prop Fin and Propeller Model

これは高速艇プロペラの前方のシャフトに取り付けられる可変ピッチ、可変位相のフィンである。本フィンを取り付けることによって若干ではあるがフィンなしより効率が劣化することはなく、ルート・エロージョンを軽減することができる。プロペラの斜流角が 8° の時はフィンなしで発生したクラウド・キャビテーションを消すことができた。また、斜流角が 12° の時にはフィンを適切にセットすることによって、Fig. 13に示すようにエロージョンを軽減(ペイント・テストでの剝離面積 S を大幅に減少)させることができた。同時に計測された水中音圧の1/3オクターブ・バンド解析結果のうち、20kHzについての騒音計測結果はエロージョンと非常に良い相関があることが興味深い。

高速艇におけるエロージョンの問題のうち、プロペラ以外に舵に発生するエロージョン及び振動も大きな問題であり、極端な場合、舵板の一部を損失した例もあった。船研において、この原因究明のための試験を行い、プロペラ後流におかれた舵に発生する非定常キャビテーションのBreak-off現象が上記の問題の主な原因であることを明らかにした⁵⁴⁾。更に、Fig. 14(a)に示す、問題となった原形舵(1/4スケール)に対して種々の改良舵を設計・製作し、上記の種類のキャビテーションの発生の防止策を種々試みた。最終的にFig. 14(b)にスーパー・キャビテーション舵(1/4スケール)について試験を行い、良好な結果を得た。

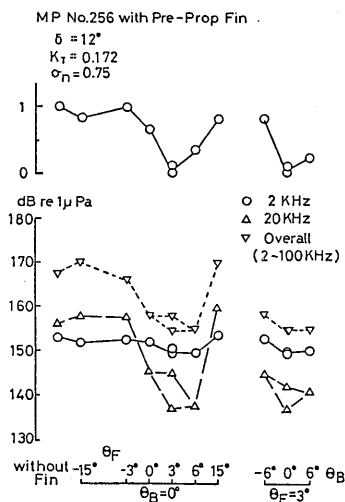
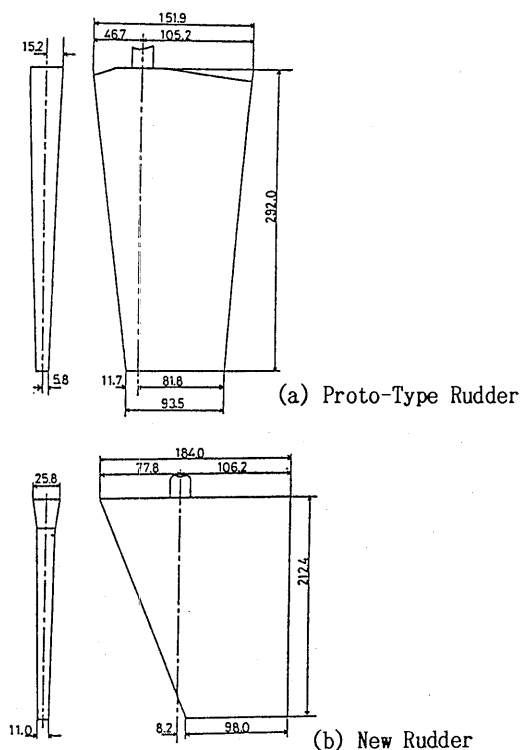
Fig. 13 Eroded Area of Paint and Cavitation Noise with Changing Pitch Angle θ_B and Phase Angle θ_F of PPF

Fig. 14 Geometric Shape of Rudder

であり、この計算の手法としてCFDはまさに打ってつけである。

9. 4 その他

この他、変動圧力の平板を用いた計測法、音響インテンシティ法を含めた水中騒音計測法、模型船舶後でのLDV計測など確立すべき課題が多い。これらの課題に対して永年の研究実績や大型施設と数多くの研究者を抱える船研の活躍する余地は大きい。

参考文献

- 1) Shiba, H.: Air-Drawing of Marine Propellers, Report of Transportation Technical Research Institute, No.9, 1953
- 2) 土田陽 : 4翼広幅推進器の単独性能、船舶試験所研究報告、1944年6月
- 3) Yokoo, K., Kitagawa, H. : Some Scale Effect Experiments on Propeller, Report of Transportation Technical Research Institute, No.43, August 1960
- 4) 矢崎敦生 : AU型プロペラ設計法に関する研究、運輸技術研究所報告、第11巻、第7号、Vol.11, No.7、1961年8月
- 5) Hanaoka, T. : Hydrodynamics of an Oscillating Screw Propeller, Proc. of the 4th Symp. on Naval Hydrodynamics, Washington, Aug. 1962, pp.
- 6) 菅井和夫 : II. プロペラ揚力面とその応用、第2回船舶プロペラ・シンポジウム、日本造船学会、東京、1971年11月、pp.25-46
- 7) 伊藤達郎、門井弘行 : IV. 船舶プロペラのキャビテーション(その2)、第2回船舶プロペラシンポジウム、日本造船学会、東京、1971年11月、pp.61-79
- 8) 高橋肇 : プロペラキャビテーションのSurface Forceに及ぼす影響に関する一考察、西部造船学会報、第49号、1975年2月、pp.255-285
- 9) 船舶技術研究所 : 船舶技術研究所20年史、船舶技術研究所、1983年3月
- 10) 推進性能部 : 大型キャビテーション試験水槽の建設について、船舶技術研究所報告、第14巻、第1号、1977年1月、pp.1-54
- 11) 花岡達郎 : 非定常プロペラ揚力面の数値解法(その1 基礎理論)、船舶技術研究所報告、第6巻、第5号、1969年、pp.1-14
- 12) 小山鴻一 : 新しい方法によるプロペラ揚力面の数値的解析、日本造船学会論文集、第132号、1971年12月、pp.91-98
- 13) 小山鴻一 : 不均一流中のプロペラ揚力面の実用計算法と計算例、日本造船学会論文集、第137号、1975年6月、pp.78-87
- 14) 小山鴻一 : 船舶プロペラにおける翼端特異性に関する研究(第1報)、日本造船学会論文集、第145号、1979年6月、pp.8-17
- 15) 小山鴻一 : 船舶プロペラにおける翼端特異性に関する研究(第2報)、日本造船学会論文集、第145号、1979年12月、pp.237-244
- 16) 小山鴻一 : 船舶プロペラにおける翼端特異性に関する研究(第3報)、日本造船学会論文集、第145号、1983年6月、pp.68-75
- 17) 花岡達郎 : プロペラの基礎理論-Ⅲ(discrete loading functionによるプロペラ揚力面の二つの解法)、船舶技術研究所報告、第14巻、第6号、昭和52年11月、pp.59-79
- 18) 小山鴻一 : doublet-lattice法によるプロペラ揚力面の数値計算、第32回船舶技術研究所研究発表会講演集、1978年12月、pp.31-34
- 19) Koyama, K. : On Application of the Lifting Surface Theory to Marine Propellers, Proc. of the 13th Symp. on Naval Hydrodynamics, Tokyo, Oct. 1980, pp.13-19

- 20) Ukon, Y.: Calculation of Three-Dimensional Steady Cavitation on Marine Propeller by Continuous Vortex/Source Panel Method, Ship Propulsion Division Tech. Memo. No.18, Ship Research Institute, Sep.1983
- 21) Koyama, K., Kakugawa, K., Okamoto, M.: Experimental Investigation of Flow Around a Marine Propeller and Application of Panel Method to the Propeller Theory, Proc. of 16th Symposium on Naval Hydrodynamics, Berkeley, July 1986, pp.
- 22) 小山鴻一: 揚力体理論に基づいたプロペラ周りのポテンシャル流の数値解析法(その1)、船舶技術研究所報告、第25巻、第5号、1988年9月、pp. 1-20
- 23) 小山鴻一: Morino 法における翼後縁条件に対する一考察、第54回船舶技術研究所研究発表会講演集、1989年11月、pp. 58-63
- 24) 門井弘行、小久保芳男、岡本三千朗: 二重反転プロペラに関する1試験例、推進性能部技術資料、Tech. Memo. No.19、1983年11月
- 25) 右近良孝、黒部雄三、荒井能: 二重反転プロペラのキャビテーション試験、第44回船舶技術研究所研究発表会講演集、1984年11月、pp. 98-103
- 26) 川上善郎、小久保芳男、柳原健: 推進法の差異が推進性能に及ぼす影響について、船舶技術研究所報告、第16巻、第2号、1979年3月、pp.13-33
- 27) 右近良孝他: 二重反転プロペラの設計について—高速コンテナ船への適用、西部造船会会報、第75号、1988年3月、pp.52-64
- 28) 佐々木紀幸、右近良孝、中武一明: 二重反転プロペラの研究(第2報)、西部造船会会報、第75号、1988年3月、pp.65-74
- 29) Sasaki, N., Ukon, Y., Nakatake, K.: Propulsive Efficiency of Ship with Counterrotating Propellers, Proc. of Int. Symp. on Ship Resistance and Powering Performance, Shanghai, April 1989, pp.116-123
- 30) Sasaki, N., Ukon, Y., Nakatake, N.: Design of Counterrotating Propellers Based on a Simplified Propeller Theory, PRADS 89, Varna, Sept. 1989
- 31) 児玉良明: 二次元翼まわりの流れに関する Navier-Stokes 方程式の数値解法”、第44回船舶技術研究所研究発表会講演集、1984年11月、pp.82-85
- 32) 児玉良明: 渦粘性モデルを用いた二次元翼型まわり高レイノルズ数流れに関するナビエ-ストークス方程式の数値解法”、第46回船舶技術研究所研究発表会講演集、1985年11月、pp. 89-93
- 33) 工藤達郎、右近良孝、岡本三千朗: CFDによる薄翼の性能計算、第52回船舶技術研究所研究発表会講演集、1988年12月、pp.41-44
- 34) 児玉良明: 船舶技術研究所におけるCFD研究の現状、第52回船舶技術研究所発表会講演集、1988年12月、pp.31-36
- 35) 児玉良明、松田登: プロペラまわり流場のNS Solver による計算、第54回、船舶技術研究所研究発表会講演集、1989年11月、pp.68-71
- 36) 宇都正太郎、小山鴻一、日野孝則: 2次元翼列まわりの粘性流の数値計算、第52回船舶技術研究所研究発表会講演集、1988年12月、pp.45-48
- 37) 宇都正太郎: 解適合格子を用いた翼列まわり粘性流の数値計算、第54回船舶技術研究所研究発表会講演集、1989年11月、pp.64-67
- 38) 花岡達郎: 任意翼型のキャビテーション流場の線型理論、日本造船協会論文集、第117号、1965年6月、pp.12-19
- 39) 花岡達郎: 任意翼型のキャビテーション流場

- の線型理論(その2 任意翼型の特性の計算法)、日本造船協会論文集、第118号、1965年12月、pp.1-8
- 40) 花岡達郎：任意翼型のキャビテーション流場の線型理論(その3 部分空洞の解法)、日本造船協会論文集、第119号、1966年6月、pp.18-27
- 41) Hanaoka, T. : Linearized Theory of Cavity Flow Past a Hydrofoil of Arbitrary Shape, Papers of Ship Research Institute, No.21, June 1967
- 42) 花岡達郎：部分空洞を生じた翼の三次元理論(その1 翼およびプロペラの揚力線理論)、日本造船学会論文集、第123号、1968年6月、pp.22-30
- 43) 右近良孝：三次元定常翼の圧力分布とキャビテーション、日本造船学会論文集、第138号、1975年、pp.93-104
- 44) 右近良孝、岡本三千朗、黒部雄三、原口富博：キャビテーションを発生した三次元翼の圧力計測、第32回船舶技術研究所研究発表会講演集、1978年12月、pp.35-38
- 45) Ukon, Y. : Cavitation Characteristics of a Finite Swept Wing and Cavitation Noise Reduction Due to Air Injection", Proc. of the Int. Symp. on Propeller and Cavitation, Wuxi, April 1986, pp.383-390
- 46) 児玉良明：二次元無揚力体上におけるAttached Cavity の成長、日本造船学会論文集、第148号、1980年12月、pp.17-23
- 47) 加藤洋治、右近良孝：第3編 第3章 プロペラキャビテーションの推定法、船型設計のための抵抗・推進シンポジウム、日本造船学会、東京、1979年7月、pp.189-216
- 48) 右近良孝：プロペラ・キャビテーション発生範囲の推定法、船舶研究所報告、第16巻、第6号、1979年11月、pp.83-104
- 49) 佐々木紀幸、永松秀一、右近良孝：船尾フィンとプロペラキャビテーション、西部造船協会会報、第61号、1980年11月、pp.99-111
- 50) Ukon, Y. : Partial Cavitation on Two-and Three-Dimensional Hydrofoils, and Marine Propellers, Proc. of 10th IAHR Symp., Tokyo, Sep. 1980, pp.195-206
- 51) 門井弘行：低回転大直径プロペラ船の推進性能の研究概要、第40回船舶技術研究所研究発表会講演集、第40回、1982年12月、pp.68-69
- 52) 門井弘行：低回転大直径プロペラ船の推進性能の研究—小面積比5翼SRI-B型Propellerの設計図表一、第42回船舶技術研究所研究発表会講演集、1983年12月、pp.11-14
- 53) 山口真裕、石坂純、小山鴻一：操船時のプロペラ性能について、第50回船舶技術研究所研究発表会講演集、1987年12月、pp.42-45
- 54) 右近良孝、工藤達郎、門井弘行、吉田三雄：高速艇舵の流力特性とキャビテーション、第48回船舶技術研究所研究発表会講演集、1986年11月、pp.88-91
- 55) 工藤達郎、右近良孝、岡本三千朗、鈴木茂：遊転時のプロペラ性能、第50回船舶技術研究所研究発表会講演集、1987年12月、pp.37-40
- 56) 工藤達郎他：空気吸込みに及ぼすプロペラ・レーキの影響、第54回船舶技術研究所研究発表会講演集、1989年11月、pp.54-57
- 57) 門井弘行、岡本三千朗、堀利文、足達宏之：波浪中における自動車専用運搬船のプロペラ負荷変動、第44回船舶技術研究所研究発表会講演集、1984年11月、pp.58-61
- 58) 門井弘行他：自動車専用運搬船の波浪中における推進性能に関する模型試験、船舶技術研究所報告、第23巻、第4号、1986年7月、pp.15-35
- 59) 門井弘行、岡本三千朗、板沢順、深沢正樹：3翼可変ピッチプロペラの諸特性、西部造船協会会報、第62号、1981年8月、pp.87-98

- 60) 門井弘行、岡本三千朗：3翼可変ピッチプロペラのキャビテーション特性、第40回船舶技術研究所研究発表会講演集、1982年12月、pp. 94-97
- 61) 日夏宗彦：電磁力による二次元翼周りの流場制御に関する研究、船舶技術研究報告、第24巻、第5号、1987年9月、pp.15-29
- 62) Hinatsu, M., Kodama, Y., Ukon, Y.: Study on Flow Control Using the MHD Effect, Proc. of 17th Symposium on Naval Hydrodynamics, den Haag, Sept. 1988
- 63) Bose, N.: Rotary Foil Propellers、船舶技術研究所報告、第24巻、第5号、1987年9月、pp.45-67
- 64) 佐藤義他：エアクション船の基礎的研究、船舶技術研究所報告、第23巻、第2号、1986年3月、pp.1-92
- 65) 武井幸雄、小山鴻一、黒部雄三、吉田三雄：プロペラ翼面圧力計測、第28回船舶技術研究所研究発表会講演集、1976年12月、pp.95-98
- 66) 武井幸雄、小山鴻一、黒部雄三、吉田三雄：プロペラ翼面圧力計測(第2報)ー均一流中でのキャビテーション発生時ー、第30回船舶技術研究所研究発表会講演集、1977年12月、pp.17-20
- 67) Takei, Y., Koyama, K., Kurobe, Y.: Measurement of Pressures on a Blade of a Propeller Model, Papers of Ship Research Institute, No.55, March 1979
- 68) 岡本三千朗、角川明、小山鴻一：プロペラ翼面圧力計測例、第46回船舶技術研究所研究発表会講演集、1985年11月、pp.102-105
- 69) 黒部雄三：大型模型プロペラを用いた翼面圧力計測法、第50回船舶技術研究所研究発表会講演集、1987年12月、pp.33-36
- 70) 右近良孝、黒部雄三、工藤達郎：通常型及びハイリースキュードプロペラの翼面圧力計測についてーキャビテーションが発生しない場合ー、日本造船学会論文集、第165号、1989年6月、pp.83-94
- 71) 右近良孝他：実船プロペラ翼面圧力計測ー通常型プロペラに関する計測ー、日本造船学会論文集、第168号、1990年12月、pp.65-75
- 72) Kato, H., Ukon, Y.: Full Scale Measurement of Propeller Blade Pressure and Inflow Velocity Distributions, Proc. of 19 ITTC, Vol.2, Madrid, Sept. 1990,
- 73) 角川明他：レーザー Doppler 流速計によるプロペラ近傍流場計測例、第38回船舶技術研究所研究発表会講演集、1981年12月、pp.37-40
- 74) 武井幸雄、角川明、児玉良明、堀利文：レーザー Doppler 流速計による船後伴流の計測、第40回船舶技術研究所研究発表会講演集、1982年12月、pp.90-93
- 75) 角川明、小山鴻一：LDVによるプロペラまわりの瞬間的な流場計測例、第42回船舶技術研究所研究発表会講演集、1983年12月、pp.27-30
- 76) 岡本三千朗、角川明、小山鴻一：均一流中におけるプロペラまわりの流場計測、第42回船舶技術研究所研究発表会講演集、1983年12月、pp.23-26
- 77) 小山鴻一、山口真裕、角川明、石坂純：LDVによるプロペラの後におかれた舵への流入速度分布の計測例、第42回船舶技術研究所研究発表会講演集、1983年12月、pp.31-34
- 78) 黒部雄三、右近良孝、工藤達郎、牧野雅彦：二重反転プロペラまわりの流場計測、第48回船舶技術研究所研究発表会講演集、1986年11月、pp.84-87
- 79) 黒部雄三他：斜流プロペラまわりの流場計測、第54回船舶研究発表会講演集、1989年11月、pp.50-53
- 80) 右近良孝、黒部雄三：ITTCヘッドフォームを用いたキャビテーション初生観測について、

- 第30回船舶技術研究所研究発表会講演集、1977年12月、pp.21-24
- 81) 門井弘行、黒部雄三、吉田三雄、牧野雅彦：ITTC Foil-Headform Combinationによるキャビテーション初生試験、船舶技術研究所報告、第20巻、第6号、1983年11月、pp.119-125
- 82) 右近良孝、黒部雄三、荒井能：退角付三次元翼のキャビテーションと水中騒音、第4回キャビテーションに関するシンポジウム、日本学術会議、1985年6月、pp.107-113
- 83) 黒部雄三：2次元物体および円板に発生するキャビテーションとその諸特性、船舶技術研究所報告、第16巻、第6号、1979年11月、pp.65-81
- 84) 高橋肇、小出達成、小山鴻一：プロペラ起振力に関する研究(第8報)―伴流分布とベアリングフォースの関係について―、第26回船舶技術研究所研究発表会講演集、1975年12月、pp.114-117
- 85) 小山鴻一：スキュー分布変化のベアリング・フォース軽減効果、第34回船舶技術研究所研究発表会講演集、1979年12月、pp.19-22
- 86) 石田駿一、小山鴻一：第3編 第4章 プロペラ起振力の推定法、船型設計のための抵抗・推進理論シンポジウム、日本造船学会、東京、1979年7月、pp.217-234
- 87) 高橋肇、上田隆康、菅井信夫、横尾直幸：プロペラ起振力に関する研究(第7報)―漁船のプロペラ起振力―、第26回船舶技術研究所研究発表会講演集、1975年12月、pp.110-113
- 88) 上田隆康他：漁船の推進性能とプロペラ起振力について、船舶技術研究所報告、第14巻、第4号、1977年7月、pp.1-31
- 89) 上田隆康、菅井信夫、横尾直幸：漁船のプロペラ起振力減少法に関する水槽試験例、船舶技術研究所報告、第16巻、第1号、1979年1月、pp.37-48
- 90) 黒部雄三、上田隆康：キャビテーション水槽におけるプロペラ変動圧力の計測例、第34回船舶技術研究所研究発表会講演集、1979年12月、pp.27-31
- 91) 右近良孝：第4章 プロペラ・キャビテーションの予測、第3回船用プロペラに関するシンポジウム、日本造船協会、東京、1987年7月、pp.135-182
- 92) Sasajima, T. & Ukon, Y.: ITTC Comparative Tests on Pressure Fluctuations Induced by Propeller Cavitation, Proc. of Int. Workshop on Cavitation, Wuxi, April 1989, pp.
- 93) 門井弘行、岡本三千朗、鈴木茂：キャビテーション試験水槽における模型船船尾の伴流分布、船舶技術研究所報告、第17巻、第3号、1980年5月、pp.87-97
- 94) 小山鴻一、右近良孝、岡本三千朗、児玉良明：キャビテーション水槽における船尾変動圧力計測―低回転大直径プロペラ装備船の実験―、第36回船舶技術研究所研究発表会講演集、1980年12月、pp.26-30
- 95) 児玉良明：大型キャビテーションタンネル第2計測部(模型船胴)におけるフローライナーによるWall Effectの軽減法、船舶技術研究所推進性能部技術資料、Tech. Memo) No.17, 1982年8月
- 96) 右近良孝他：広幅浅喫水船に装備されたハイスキュー・プロペラのキャビティ・ボリュームにより誘起される船尾変動圧力、船舶技術研究所報告、第19巻、第3号、1982年5月、pp.1-48
- 97) 児玉良明、上田隆康、横尾直幸、藤井弘道：199総ton型カーフェリーの船尾振動問題に関する水槽試験、第38回船舶技術研究所研究発表会講演集、1981年12月、pp.29-32
- 98) 児玉良明他：小型カーフェリーの船尾振動に

- 関する船底フィン効果に関する水槽試験、船舶技術研究所報告、第20巻、第5号、1983年9月、pp.93-116
- 99) 黒部雄三他：青雲丸の実船対応キャビテーション試験、船舶技術研究所報告、第20巻、第6号、1983年11月、pp.15-49
- 100) Ukon Y., Kurobe, Y.: Concerning Propeller Induced Hull pressure Fluctuation, Written Contribution to 17th ITTC, Proc. of 17th ITTC, vol.2, Goteborg, Sept. 1984
- 101) Ukon, Y. et al. : Experimental Evaluation on Cavitation and Propeller-Induced Pressure Fluctuations in a Cavitation Tunnel, Proc. of Int. Symp. on Cavitation, Sendai, April 1986, pp.221-226
- 102) Ukon, Y., Kurobe, Y., Saito, I.: Comparative Experiment on Hull Pressure Flutuations and Cavitation with the "Sydney Express" Propeller, Written Contribution to 18th ITTC, Proc. of 18th ITTC, Vol.2, Kobe, Oct. 1987, pp.102-
- 103) 右近良孝、黒部雄三：空気吹き出しによるプロペラ水中騒音・変動圧力の低減について、日本造船学会論文集、第163号、1988年6月、pp.79-87
- 104) 門井弘行、岡本三千朗、吉田三雄：模型船船尾伴流中とワイヤメッシュ法による伴流中のプロペラキャビテーションの比較試験、船舶技術研究所報告、第19巻、第3号、1982年5月、pp.17-27
- 105) Ukon, Y. et al.: Comparative Model Measurements on Pressure Fluctuations Induced by Propeller Cavitation", Proc) of Int. Symp. On Hull Pressure Fluctuations, ASME, San Francisco, Dec. 1989, pp.11-17
- 106) 黒部雄三、吉田三雄：水中の平板に取付けた圧力変換器におよぼす振動影響の研究、船舶技術研究所報告、第22巻、第3号、1985年5月、pp.
- 107) 黒部雄三他：変動圧力計測に及ぼす計測平板の振動影響、第52回船舶技術研究所研究発表会講演集、1988年12月、pp.49-52
- 108) 黒部雄三、工藤達郎、右近良孝：プロペラ・キャビテーションにより誘起される変動圧力に関する比較試験、第6回キャビテーションに関するシンポジウム、日本学会会議、東京、1989年6月、pp.77-86
- 109) 右近良孝：プロペラ・キャビテーションの研究の現状、第54回船舶技術研究所研究発表会講演集、1988年12月、pp.38-49
- 110) 黒部雄三、上田隆康：キャビテーションの発生したプロペラによる船尾変動圧力について—その基礎実験と軽減対策—、船舶技術研究所報告、第19巻、第1号、1982年1月、pp.49-72
- 111) Ukon, Y., Kurobe, Y.: Measurement of Cavity Thickness Distribution on Marine Propellers by Laser Scattering Technique, Written Contribution to 16th ITTC, Proc. of 16th ITTC, Vol.2, Leningrad, Aug. 1981, pp.241-245
- 112) 右近良孝、黒部雄三：レーザー光を利用したプロペラ翼面上のキャビティ厚み分布の計測、船舶技術研究所報告、第19巻、1982年1月、pp.1-12
- 113) 武井幸雄、児玉良明、角川明：青雲丸のプロペラ・キャビティ厚みの計測、第42回船舶技術研究所研究発表会講演集、1983年12月、pp.15-18
- 114) Kodama, Y., Takei, Y., Kakugawa, A. : Mesurement of Cavity Thickness on a Full Scale Ship Using Lasers and a TV Camera, Papers of Ship Research Institute, No.73, December 1983
- 115) 工藤達郎他：模型プロペラ翼面上に発生するキャビティ形状の計測、日本造船学会論文集、

- 第166号、1989年12月、pp. 93-103
- 116) 門井弘行 : SRI-aプロペラの系統的単独試験、第28回船舶技術研究所研究発表会講演集、1976年12月、pp. 90-94
- 117) 岡本三千朗、門井弘行、吉田三雄 : SRI-Bプロペラの設計図表、第34回船舶技術研究所研究発表会講演集、1979年12月、pp. 13-18
- 118) 門井弘行他 : SRI-B型プロペラの開発およびその諸特性、船舶技術研究所報告、第21巻、第6号、1984年11月、pp. 1-28
- 119) 門井弘行、岡本三千朗、鈴木茂、吉田三雄 : プロペラ幾何形状の変化がプロペラ特性に及ぼす影響(その1)、西部造船会会報、第78号、1989年8月、pp. 77-92
- 120) 門井弘行、岡本三千朗、鈴木茂、吉田三雄 : プロペラ幾何形状の変化がプロペラ特性に及ぼす影響(その2)、西部造船会会報、第80号、1990年8月、pp. 51-62
- 121) 荒井能 : キャビテーション騒音の研究、船舶技術研究所報告、第18巻、第4号、1981年7月、pp.
- 122) Ukon, Y., Kudo, T. : Acoustic Field Measurement in a Cavitation Tunnel, Written Contribution to 18th ITTC, Proc. of 18th ITTC, Vol. 2, Kobe, Oct. 1987, pp.
- 123) 荒井能、門井弘行 : キャビテーション初生の音響的検知の一方法について、第42回船舶技術研究所研究発表会講演集、1983年12月、pp. 19-22
- 124) 荒井能、右近良孝、黒部雄三、工藤達郎 : 音紋を用いてキャビテーション騒音の表示法について、第48回船舶技術研究所研究発表会講演集、1986年11月、pp. 92-95
- 125) 黒部雄三、武井幸雄、吉田三雄 : ペイントによるプロペラエロージョン試験、第32回船舶技術研究所研究発表会講演集、1978年12月、pp. 39-42
- 126) Kadoi, H., Sasajima, T. : Cavitation Erosion Prediction Using a "Soft Surface", Int. Shipbuilding Progress, Vol. 25, June 1978, pp. 141-150
- 127) Kurobe, Y., Takei, Y. : Propeller Erosion Test by Soft Surface Method using Stencil Ink proposed by the Cavitation Committee of the 14th ITTC, Papers of Ship Research Institute, No. 59, March 1980
- 128) 武井幸雄、右近良孝、黒部雄三 : 新しいソフトサーフェスによるキャビテーション・エロージョン試験、第34回船舶技術研究所研究発表会講演集、1979年12月、pp. 23-26
- 129) 武井幸雄、右近良孝、黒部雄三 : 種々のソフトサーフェスによるプロペラエロージョン試験、第36回船舶技術研究所研究発表会講演集、1980年12月、pp. 31-34
- 130) Ukon, Y. and Takei, Y. : An Investigation of the Effects of Blade Profile on Cavitation Erosion of Marine Propellers, Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects, No. 61, March 1981, pp. 81-97
- 131) 門井弘行、岡本三千朗、鈴木茂、吉田三雄 : SRI-B型プロペラの不均一流中キャビテーション性能、西部造船会会報、第80号、1990年8月、pp. 35-50
- 132) 森山文雄 : プロペラと舵の干渉特性の推定法について、第38回秋季船舶技術研究所研究発表会講演集、1981年12月、pp. 21-24