

# プロペラの Tip Vortex Cavitation Bursting 現象の 発生機構

正員 金野祥久\*    学生員 若林和明\*  
 正員 山口一\*    正員 前田正二\*  
 正員 石井規夫\*\*    正員 副島俊二\*\*\*  
 正員 木村校優\*\*

Generation Mechanism of Bursting Phenomena of Propeller Tip Vortex Cavitation

by Akihisa Konno, *Member*    Kazuaki Wakabayashi, *Student Member*  
 Hajime Yamaguchi, *Member*    Masatsugu Maeda  
 Norio Ishii, *Member*    Shunji Soejima, *Member*  
 Koyu Kimura, *Member*

## Summary

Bursting phenomenon of tip vortex cavitation of a propeller causes high frequency vibration, but its mechanism is not elucidated yet. In this study the authors made the experiment that used two kinds of propellers and changed some experimental conditions such as wake distributions, and examined the burst phenomenon with high speed video camera. We also measured flow distribution around the tip vortex. As a result we found that in the burst phenomenon big pressure fluctuations were measured twice, and it depended strongly on the flow distribution of the wake. With the bursting wake tip vortex moved below downstream and was bigger and slower than that of non-bursting wake so that it interfered in the cavitation of the next blade.

## 主な記号

$c$	[mm]	翼のコード長
$D = 250$	mm	プロペラ直径
$K_P = \frac{\Delta P}{\rho n^2 D^2}$		無次元変動圧振幅
$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$		推力係数
$n$	[rps]	プロペラ回転数
$p_\infty$	[Pa]	絶対水圧
$p_v$	[Pa]	飽和水蒸気圧
$V_a$	[m/sec.]	プロペラ前進速度
$\rho = 1.0 \times 10^3$	kg/m <sup>3</sup>	水の密度
$\sigma_n = \frac{p_\infty - p_v}{\rho n^2 D^2 / 2}$		キャビテーション数

## 1. はじめに

船用プロペラが水中で回転するとき、キャビテーションが発生し周囲に圧力変動をもたらす。このとき、放出された変動圧力が船尾振動を誘起する力であり、一般にサーフェース・フォース (surface force) と呼ばれる。船尾振動が激しくなると、船舶の計器や船員の居住性に問題が生じ、ひどい場合には船体に亀裂が生じることもある。

キャビテーションによる圧力変動を抑制する方法の一つとして、プロペラをハイリースキュードプロペラ (highly skewed propeller, 以下 HSP と略す) に変えるという手段がある。HSP はスキュー角を大きく採ることによりプロペラ翼の半径方向のキャビテーションの発生・消滅に位相差をつくり出し、従来型のプロペラ (コンベンショナルプロペラ) で問題となったシートキャビテーションの体積変化による低周波振動を軽減させるねらいのもとに研究・開発された<sup>1-3)</sup>。なお本論文での低周波振動とは、翼数×プロペラ回転数 で表されるプロペラ基本周波数と、その5-6倍までの調和成分を意味する。

\*東京大学大学院工学系研究科

\*\* (株) 三井造船昭島研究所

\*\*\* (株) 三井造船

原稿受理 平成 12 年 7 月 10 日

秋季講演会にて講演 平成 12 年 11 月 16, 17 日

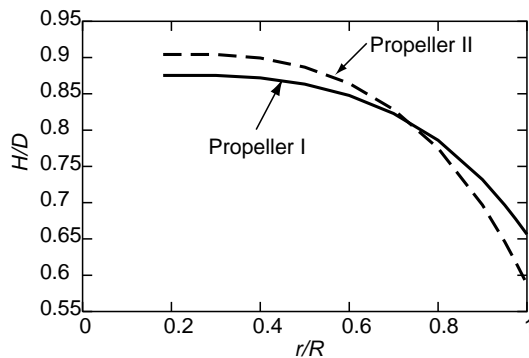


Fig. 1: Pitch distribution of propeller I and II

HSPはその構造上、翼端渦 (tip vortex) が強く排出されることがある。この翼端渦によって発生するチップヴォルテックスキャビテーション (tip vortex cavitation, 以下 TVC) は、特殊な条件下でないかぎり船尾振動に与える影響は小さいと考えられていた<sup>4)</sup>。

しかし、昨今この HSP において、プロペラの翼端から発生する TVC においてバースティング現象が発生し、その変動圧力は大変大きく激しい船尾振動をもたらすことが分かってきた。特に高周波振動が問題となっている。この現象は、プロペラの翼面シートキャビテーションが翼端から流れ出るように集まる際、TVC となって放出され、プロペラ後流でバーストすることにより起こると考えられる。

バースト現象あるいはバースティングという言葉の定義は確立されていないが、本研究では、本来安定してプロペラから放出される TVC が急激な収縮・リバウンドを起こし、周囲に圧力変動を及ぼす現象を Tip Vortex Cavitation Bursting としている。現象の詳細は本論文中で詳述する。

これまで国内外で行われた TVC についての研究は、大島ら<sup>5)</sup>、石井<sup>6)</sup>、Hordnes et al.<sup>7)</sup>などによってなされているが、バースティングに関する研究は前例が少ない<sup>8)</sup>。

本研究ではこの TVC のバースティング現象をキャビテーショントンネルで再現し、現象の発生原因および基本的特性を実験的に調査する。なお、次報<sup>9)</sup>にてこのバースティング現象の推力係数との関連やプロペラ非定常計算との関連について論じている。

## 2. 実験装置と実験の概要

### 2.1 模型プロペラ

ピッチ分布のみ異なる 2 種類のプロペラを用いて実験を行った。プロペラの直径は 250 mm、ボス比 0.18、翼数 5 翼、スキュー角 36° のハイリースキュードプロペラ。アルミ製で、表面の電食防止のためアルマイト加工を施して

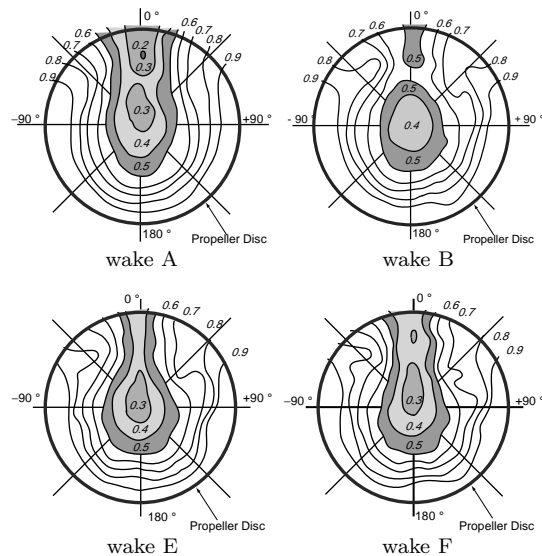


Fig. 2: Wake distributions

ある。

著者らの過去の研究<sup>8)</sup>から TVC のバースティング現象には翼端からの放出渦の強さの影響が考えられるので、2 種のプロペラではそれぞれピッチ分布を変えている (Fig. 1)。以降、翼端でのピッチが大きい方をプロペラ I、小さい方をプロペラ II と呼ぶことにする。プロペラ I の方がプロペラ翼端からの放出渦強さが大きいと考えられる。

実験の際には安定したキャビテーションを発生させるため、プロペラブレード前縁の  $0.57R \sim 0.97R$  ( $R$ : プロペラ半径) の領域に、約 1.5 ~ 3 mm 幅でカーボン粉を塗付して粗さをつけた。カーボン粉の大きさは 150 mesh (直径 1/150 inch 以下) である。

### 2.2 キャビテーショントンネル

本研究での実験は、東京大学船用プロペラキャビテーショントンネル・プロペラ用試験部を用いて行った。試験部は一辺 450 mm の正方形断面で、主流方向の寸法は 2200 mm である。

試験部静圧は、試験部左舷側の観察窓中央にある静圧孔から測定する。

### 2.3 伴流分布

プロペラは通常、船舶後流の不均一な流れの中で作動している。この状態をキャビテーショントンネルで再現するため、トンネルにベースとなるメッシュと調整用のステータを取り付けて軸方向の 1 次元不均一流れを模擬する。

本研究では、著者らが過去に行った実験<sup>8)</sup>の際に作成した伴流 2 種と、これら伴流の中間にあたる伴流 2 種、あわせて 4 種類の伴流分布を作成し、11 連櫛形ピトー管を用いて流速分布を計測した後、実験に供した。過去の論文<sup>8)</sup>

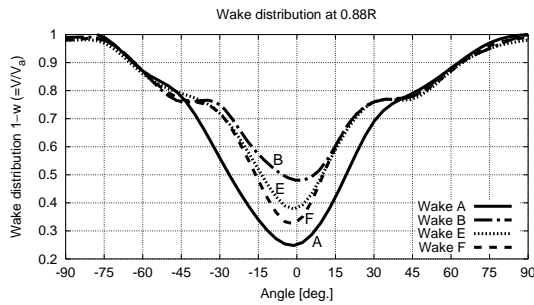


Fig. 3: Wake distributions at 0.88R

との整合をとるため、伴流分布の名称を A, B, E, F とする。それぞれの伴流の流速分布を Fig. 2 に示す。

図中の角度の値は、 $0^\circ$  がプロペラ直上を、 $\pm 180^\circ$  がプロペラ最下点を表し、プラス側が右舷側、マイナスが左舷側を表す。等値線の数値は、プロペラ前進速度  $V_0$  を 1 とした数値で表している。

特徴として、流速低下部の幅をほぼ一定とし、その低下量を変えている。伴流分布 A は上部  $45^\circ$  での流速の落ち込みが激しいのに対し、B は流速が緩やかに変化する。 $0.88R$  位置での各伴流の流速分布を書き出すと Fig. 3 のようになり、この特徴が明瞭である。

著者らの過去の実験から、伴流 A はバーストが発生し、伴流 B は発生しないことが分かっている。また伴流 E は B に近い流速分布、F は A に近い流速分布なので、バーストの激しい順に  $A \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow B$  となる。この傾向は本論文でも実証している。

#### 2.4 プロペラ変動圧力計測装置

プロペラによる変動圧力の計測のため、試験部上面に 9 個の圧力センサを、右舷側壁にハイドロフォンを設置した。配置図を Fig. 4 に示す。圧力センサは共和電業 (株) の PS-2KA を、ハイドロフォンは B&K 社の Type 8103 を用いた。

これら計測装置の出力電圧をトランジェントレコーダ (理研電子 (株) の TCFL-8000SR) に、最小  $20 \mu\text{sec}$ 。毎のサンプリング時間間隔で AD 変換してメモリに記憶させる。そしてその記憶内容をパーソナルコンピュータに取り込むために、GP-IB インターフェイスを用いている。これらの計測システムによって記録されたデータをもとに、種々の解析を行った。

なお本研究においてバースティング現象に起因する変動圧力は  $1 \text{ kHz}$  以上のオーダーだったのに対し、圧力センサの計測限界は  $1.5 \text{ kHz}$  である。したがって本研究中では、主にハイドロフォンによる計測結果を扱っている。

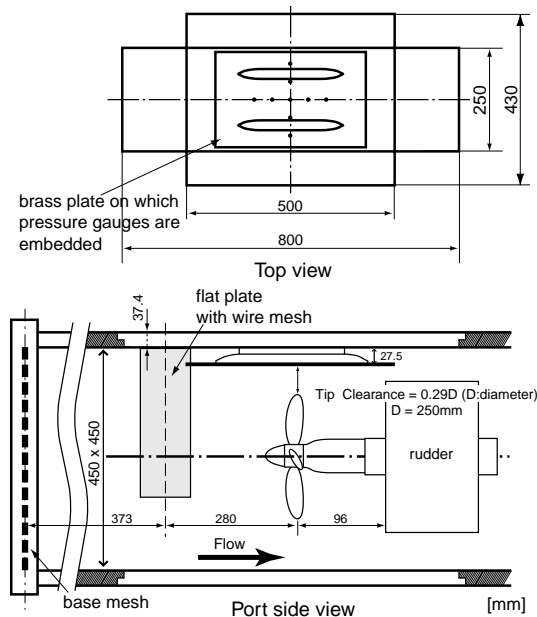


Fig. 4: Test arrangement of the propeller and pressure gauges for measurement of pressure fluctuations

Table 1: Experimental conditions

—	wake	$K_T$	$\sigma_n$
No.1	A, B, E, F	0.175	1.90
No.2	A	0.13–0.23	1.90
No.3	A	0.175	1.6–2.2

#### 2.5 キャピテーションの観察

現象分析のために、キャピテーションスケッチと写真撮影、高速度デジタルビデオカメラ ((株) フォトロン) の FASTCAM-ultima) による撮影も行った。トランジェントレコーダと高速度ビデオカメラはプロペラの回転パルスに同期した動作ができるので、変動圧計測の際には圧力変動と映像とを同時に記録し、突き合わせて比較した。撮影位置は右舷後方から、ビデオ撮影速度は毎秒 18,000 コマとした。

#### 2.6 プロペラ翼端渦付近の流場計測

本論文の後半では、バースティング現象が観察される伴流 A と観察されない伴流 B とを用い、非キャピテーション状態でプロペラ翼端渦付近の流場計測を行っている。プロペラは I のみを用い、計測には主流の計測と同様、1 次元レーザー流速計を用いた。

#### 2.7 実験条件

この実験における可変パラメタは伴流、推力係数  $K_T$ 、キャピテーション数  $\sigma_n$  およびプロペラであるが、本研

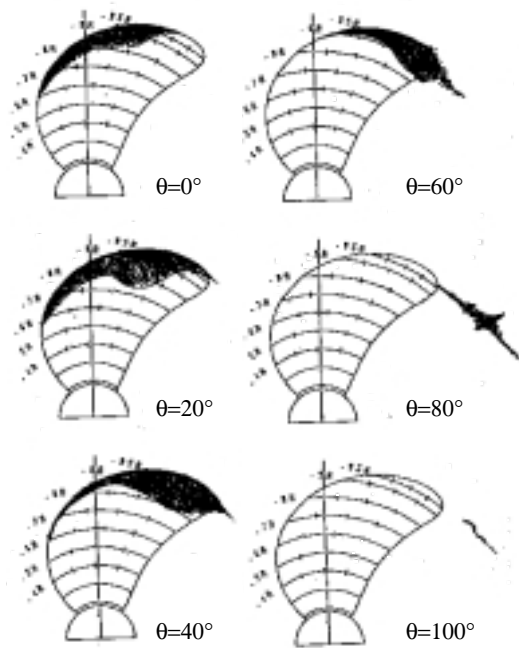


Fig. 5: Cavitation patterns. Propeller I, wake A,  $K_T = 0.175$ ,  $\sigma_n = 1.90$

究では伴流，推力係数，キャビテーション数のうち2つを固定し，1つを変化させて系統的に実験を行った。プロペラは各実験条件においてI・IIの両方を用いた。このとき基準としている実験条件は，使用伴流A，推力係数  $K_T = 0.175$ ，キャビテーション数  $\sigma_n = 1.90$  である。詳しい実験条件を Table 1 に示す。

なお翼端渦まわりの流場計測の際には，使用伴流A， $K_T = 0.17$ ，非キャビテーション状態に固定して行った。詳細は5.で述べる。

### 3. キャビテーションの挙動

以下ではキャビテーションの様子をスケッチした図を示しながら，キャビテーションの挙動について説明する。キャビテーションのスケッチは挙動が分かりやすい反面，特に変動の大きなTVCの部分で作成者によって描き方に差が出るので，条件ごとの比較には不向きである。そこで説明の文章はスケッチだけに頼らず，高速度ビデオ映像やストロボ同期ビデオ映像などを比較参照しながら執筆した。

#### 3.1 パースティング現象の起こる伴流Aのとき

伴流A， $K_T = 0.175$ のときのキャビテーションのスケッチを Fig. 5 (プロペラI)，Fig. 7 (プロペラII) に示す。 $\theta$  はプロペラ回転角 (ジェネレータラインの角度) で

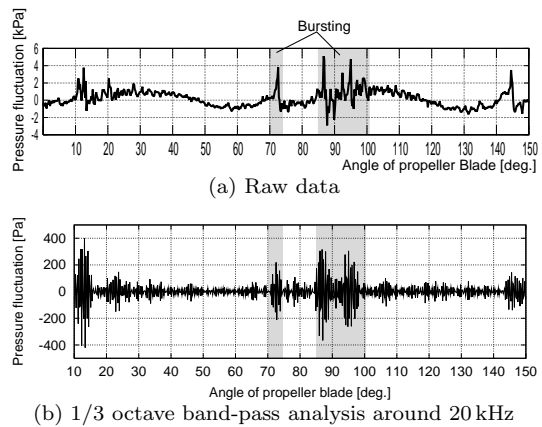


Fig. 6: Pressure fluctuation. Propeller I, wake A,  $K_T = 0.175$ ,  $\sigma_n = 1.90$

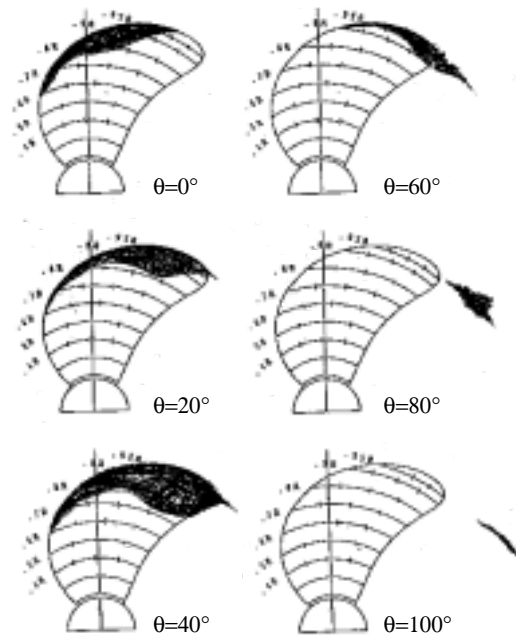


Fig. 7: Cavitation patterns. Propeller II, wake A,  $K_T = 0.175$ ,  $\sigma_n = 1.90$

ある。また，プロペラIについては同じ実験条件下でハイドロフォンによって計測された圧力変動を Fig. 6 に示す。キャビテーションの時間変動は，以下のようである。

- $\theta = 0^\circ \sim 10^\circ$

シートキャビテーションが発生する。その大きさは，半径方向は  $0.6R$  から  $0.95R$  まで，翼弦長方向は  $0.25c$  程度までである。 $0.8R \sim 0.95R$  の領域では，シートキャビテーションの後縁が膨らんで大きくなっている。

プロペラ I, II を比較すると、この膨らみはプロペラ I のほうが大きい。

- $\theta = 20^\circ$

翼端から TVC が出始める。0.8R 位置の翼弦長方向 0.25c ~ 0.75c にかけてシートキャビテーションの後縁が膨らみを持つ。この部分はキャビテーションの厚さが最も厚くなっているところであり、最も不安定な部分でもある。

プロペラ I の TVC の大きさはプロペラ II よりわずかに大きい。

- $\theta = 30^\circ \sim 50^\circ$

これまでシートキャビテーションだった部分が、TVC に巻き込まれて翼端からはみ出すように後流に流れ出る。このとき 0.8R 位置の後縁から翼端までが分厚いシートキャビテーションに覆われる。

プロペラ I は、この分厚いシートキャビテーションが安定しているが、プロペラ II では不安定で、シートキャビテーションが少し乱れる。

- $\theta = 60^\circ$

先ほどまで 1 本に見えていた TVC が、根本で 2 本の渦キャビテーションに分かれる。一方は翼端から、もう一方はシートキャビテーションの後縁付近から出ている。その下流では 2 本の渦キャビテーションが複雑に絡み合って 1 つの TVC になってゆく。翼面上にはまだシートキャビテーションが残っている。

- $\theta = 70^\circ$

TVC がパーストを起こし、1 回目の大きな圧力変動が計測される。主に 2 つの渦キャビテーションが複雑に絡まりながら大きな TVC を構成している。

パースト時の TVC の様子は、プロペラ I・II で差はない。

- $\theta = 80^\circ \sim 100^\circ$

$\theta = 80^\circ$  のときに、TVC の大きさが最大になり、2 回目の大きな圧力変動が計測される。このときキャビテーション内の気泡が収縮、リバウンドをしているのが観察されるので、圧力変動はこの気泡の振動によるものと思われる。 $\theta = 90^\circ$  や  $\theta = 100^\circ$  になっても TVC の一部がプロペラ後流に残り、次の翼と干渉している。

Fig. 6(b) に示した 20kHz まわりで 1/3 オクターブ帯域フィルタをかけた結果を見ると、パーストが起こるときに高周波の振動成分が観測されており、パースティング現象が高周波振動の原因となっていることが分かる。その振幅の最大値は、後に示すパースティングが見られない場合 (Fig. 9(b)) のおよそ 4 倍である。

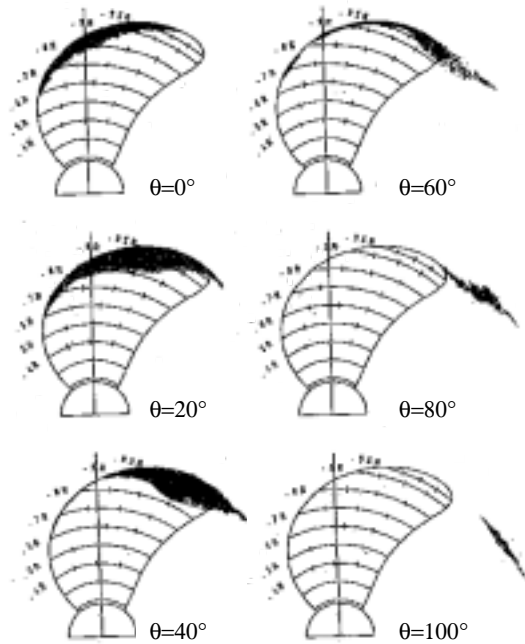
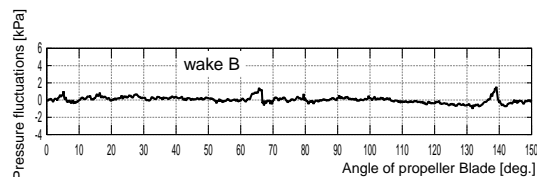
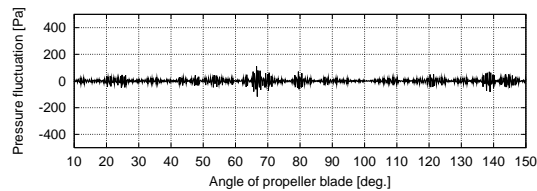


Fig. 8: Cavitation patterns. Propeller I, wake B,  $K_T = 0.175$ ,  $\sigma_n = 1.90$



(a) Raw data



(b) 1/3 octave band-pass analysis around 20 kHz

Fig. 9: Pressure fluctuation. Propeller I, wake B,  $K_T = 0.175$ ,  $\sigma_n = 1.90$

### 3.2 パースティング現象の見られない伴流 B のとき

伴流 B を用い、それ以外は前節と同じ実験条件 ( $K_T = 0.175$ ,  $\sigma_n = 1.90$ ) のときのキャビテーションのスケッチを Fig. 8 (プロペラ I), Fig. 10 (プロペラ II) に示す。またそのときのプロペラ I の圧力変動を Fig. 9 に示す。

- $\theta = 0^\circ \sim 10^\circ$

シートキャビテーションが発生する。半径方向は

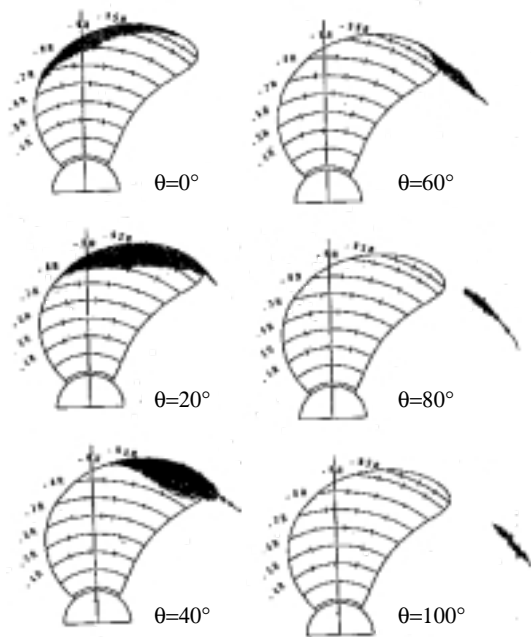


Fig. 10: Cavitation patterns. Propeller II, wake B,  $K_T = 0.175$ ,  $\sigma_n = 1.90$

0.6R~0.95R である。パーストの起こる伴流 A と比べるとその発生量は小さくなっている。また、シートキャビテーションの厚さはどの半径位置でも同じぐらいで、伴流 A と違い特に厚いところはない。

- $\theta = 20^\circ$   
TVC が発生する。シートキャビテーションの発生量はプロペラ I の方が多い。
- $\theta = 30^\circ \sim 50^\circ$   
シートキャビテーションが翼端へ移動してゆく。TVC も発達するがそれほど乱れることなく細長い。
- $\theta = 60^\circ \sim 70^\circ$   
 $\theta = 60^\circ$  のときに TVC が 2 つに分かれて絡みあっているのが分かる。 $\theta = 70^\circ$  の TVC の大きさは安定しておりパーストの起きる伴流 A と比べるとかなり小さい。
- $\theta = 80^\circ \sim 100^\circ$   
TVC が残っているが大変細長いものである。

Fig. 9 を見ると、伴流 A と比べて高周波の圧力変動が明らかに減少している。

### 3.3 伴流 E, F の場合

以降、紙面の都合によりプロペラ I についてのみスケッチを載せる。

伴流 E, F を用い、それ以外は前節と同じ実験条件

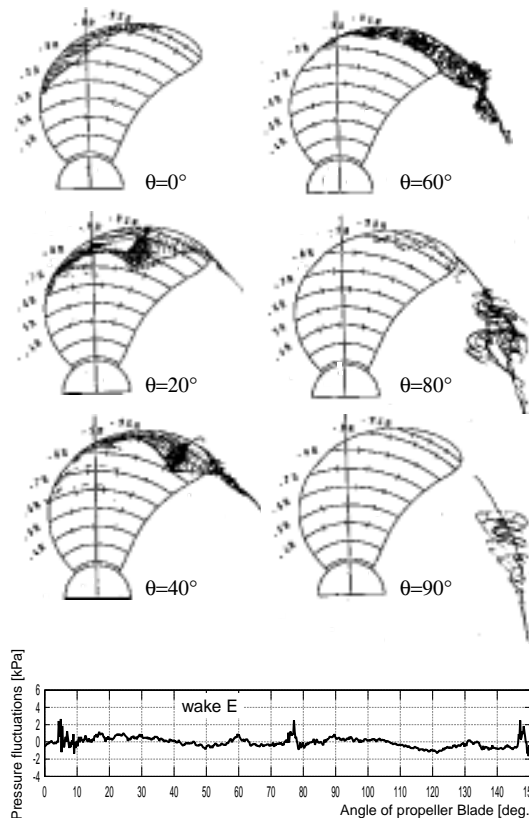


Fig. 11: Cavitation patterns and pressure fluctuation. Propeller I, wake E,  $K_T = 0.175$ ,  $\sigma_n = 1.90$

( $K_T = 0.175$ ,  $\sigma_n = 1.90$ ) のときのキャビテーションのスケッチを Fig. 11 (伴流 E), Fig. 12 (伴流 F) に示す。

- $\theta = 0^\circ \sim 10^\circ$   
シートキャビテーションが発生する。伴流 A に比べると発生量が少なく、安定している。伴流 B よりも多い。伴流 E と F では F のほうが多い。
- $\theta = 20^\circ$   
翼端から TVC が発生する。伴流 A の TVC と同じぐらいの渦の大きさである。渦の長さは伴流 E, F の方が長い。
- $\theta = 30^\circ \sim 50^\circ$   
TVC が発達してゆく。翼面を覆うシートキャビテーションの発生量は伴流 B より多く、また TVC が伴流 B のものより不安定である。伴流 E と F では F のシートキャビテーションの方がいくぶん大きい。
- $\theta = 60^\circ$   
シートキャビテーションが TVC へ移行する。そのため TVC は翼後縁付近では不安定になっているが、下流の翼から離れた部分は安定している。伴流 E と F

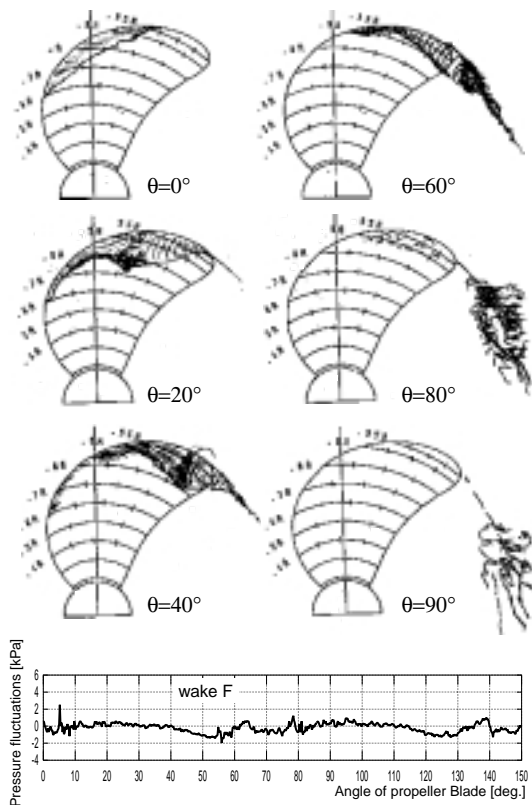


Fig. 12: Cavitation patterns and pressure fluctuation. Propeller I, wake F,  $K_T = 0.175$ ,  $\sigma_n = 1.90$

では、Fの方がシートキャビテーションが不安定で、TVCもいくぶん大きい。

- $\theta = 70^\circ \sim 100^\circ$

TVCに完全に移行する。 $\theta = 70^\circ$ から、TVCのバーストが観察できる。伴流Aと比較しても、見かけはほとんど変わらない。 $\theta = 90^\circ$ のときには、TVCはほとんど消えて残っていない。

伴流ごとのバースティング現象の様子を比較すると、バーストの激しい順にA → F → E → Bとなる。これは2.3で述べた伴流分布の傾向と一致しており、バースティング現象に対する伴流分布の影響の大きさを示している。

#### 4. 推力係数の影響

Table 1のNo.2に示した条件で、推力係数を変化させた場合のキャビテーションの挙動について述べる。実験は $K_T = 0.13, 0.15, 0.175, 0.19, 0.21, 0.23$ の4通りを行っているが、紙面の都合からこの節では推力係数が最小の0.13の場合と最大の0.23の場合について、図を掲げて説明する。それぞれFig. 13, Fig. 14であり、紙面の都合でプロペラIのみを示す。なお $K_T = 0.175$ の場合は前

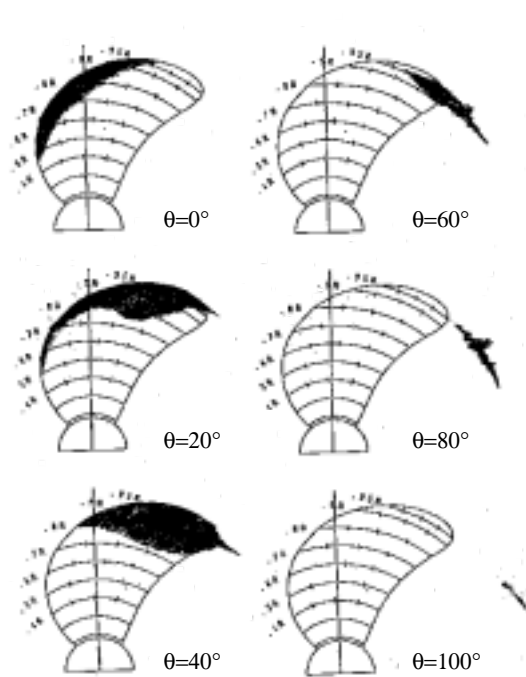


Fig. 13: Cavitation patterns. Propeller I, wake A,  $K_T = 0.13$ ,  $\sigma_n = 1.90$

節の伴流Aの場合がそれにあたるので、合わせて参照されたい。

#### 4.1 $K_T = 0.13$ のとき (Fig. 13)

- $\theta = 0^\circ \sim 10^\circ$

シートキャビテーションが発生する。その大きさは、半径方向は $0.6R$ から $0.95R$ まで、翼弦長方向は $0.25c$ までである。プロペラIIは、シートキャビテーションの量が少なく切れ切れとなり、プロペラIのようにきれいに発生しない。

- $\theta = 20^\circ$

翼端からTVCが出はじめる。 $0.8R$ 位置の翼弦長方向 $0.25 \sim 0.75c$ にかけてシートキャビテーションの後縁が膨らみを持つ。この部分はキャビテーションの厚さが最も厚くなっており、最も不安定な部分でもある。シートキャビテーション全体の発生量はプロペラIの方が多い。

- $\theta = 30^\circ \sim 50^\circ$

シートキャビテーションの最も厚くなっている部分が翼の後縁へ向かって移動していくとともにシートキャビテーションの発生する位置が $0.8R$ 付近からとなる。 $\theta = 50^\circ$ の時には、シートキャビテーションの最も厚い部分が翼後縁にかかり、TVCが不安定になる。

- $\theta = 60^\circ$

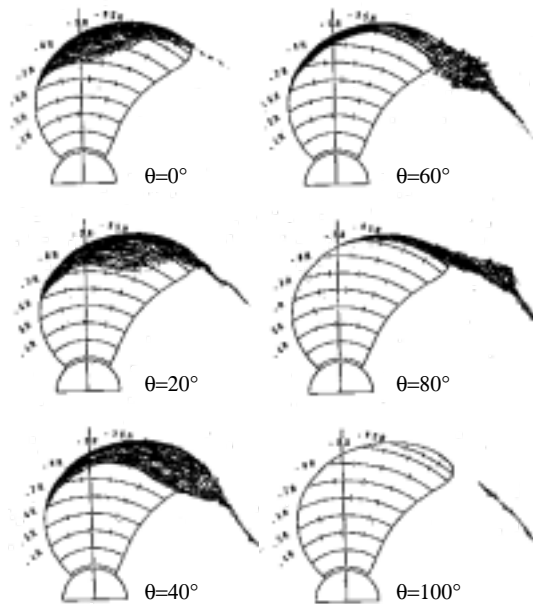


Fig. 14: Cavitation patterns. Propeller I, wake A,  $K_T = 0.23$ ,  $\sigma_n = 1.90$

シートキャビテーションのほとんどの部分が TVC に移行する。TVC が 2 つに分かれているところを観察できる。

プロペラ I とプロペラ II とでは、プロペラ I の方が TVC が大きい。

- $\theta = 70^\circ$

翼面上にはほとんどシートキャビテーションは見られない。完全に TVC に移行している。その TVC は両方のプロペラでバーストを起こしている。

プロペラ I では TVC が翼後縁に触れているのに対し、プロペラ II では翼後縁から離れた位置にある。プロペラ II の方が、バースト時のキャビテーション量が少ない。

- $\theta = 80^\circ \sim 100^\circ$

TVC はほとんどなく、消えかかっている。

#### 4.2 $K_T = 0.23$ のとき (Fig. 14)

- $\theta = 0^\circ$

この角度ですでにかなり発達した TVC が見られる。プロペラ I と II とでは、I の TVC の方が長く大きい。

- $\theta = 10^\circ \sim 50^\circ$

シートキャビテーションの厚さが他の  $K_T$  と比べるとはるかに厚い。翼端からの TVC は安定していて、細く長いものである。

- $\theta = 60^\circ \sim 70^\circ$

TVC は細長く安定しているが、シートキャビテーションが TVC に移行するときに翼の後縁で激しくキャビテーションが動く。それに合わせて次の翼面上のシートキャビテーションが動くのがわかる。

他の  $K_T$  と違って、TVC にあまり変化が見られない。

- $\theta = 80^\circ \sim 100^\circ$

この角度になっても TVC が消えることなく安定して残っている。この点はこの場合と異なる。プロペラ後流では、前の翼から放出された TVC が残っている。プロペラ II では、何本もの TVC が見られる。

以上観察してきたことをまとめると、推力係数が最小の 0.13 のときには、発生するシートキャビテーションの量が少なく、TVC の量も少なかった。しかしバースティング現象は観察された。

また、推力係数が最大の 0.23 のときには、発生するシートキャビテーションの量が他の推力係数のときにくらべて非常に多い。さらに、プロペラ翼角が小さいときから TVC を放出する。放出された TVC は安定しており、バースティング現象は観察されなかった。なお他の推力係数では、全ての条件において TVC がバーストした。

#### 4.3 キャビテーション数、プロペラの違いなど

Table 1 の No.3 に示した実験条件で、キャビテーション数を変更して行った実験では、どのキャビテーション数の条件においてもバースティング現象が観察された。紙面の都合上、詳しい説明とスケッチ図面は省略する。

プロペラ I とプロペラ II の比較では、すでに比較してきたようにプロペラ II の方がシートキャビテーションの発生量が少なくなっており、TVC もいくぶん小さい。しかしそれ以外には、バースティング現象の様子を含めて、あまり違いがみられない。

プロペラ II ではプロペラ翼端のピッチを低減し、翼端渦強さを押さえている。これによってバースティング現象に変化は見られなかったことから、プロペラ翼端渦の強さそのものでは、バースティング現象を整理できないと思われる。次報<sup>9)</sup>では TVC の安定性に関わるとされる翼端渦強さの変化率を数値解析により調べ、バースティング現象の整理を試みている。

#### 5. プロペラ翼端渦まわりの流場計測

TVC のバースティング現象解明のため、バーストが起こる伴流 A と起こらない伴流 B とで、翼端渦まわりの流場計測を行い、バーストを起こしているプロペラ回転角前後の位置での渦構造を調査した。

計測条件は  $K_T = 0.17$ 、非キャビテーション状態とし、プロペラ I を用いた。計測位置は、プロペラからかすかに TVC を発生させ、その位置および観測可能範囲との兼ね



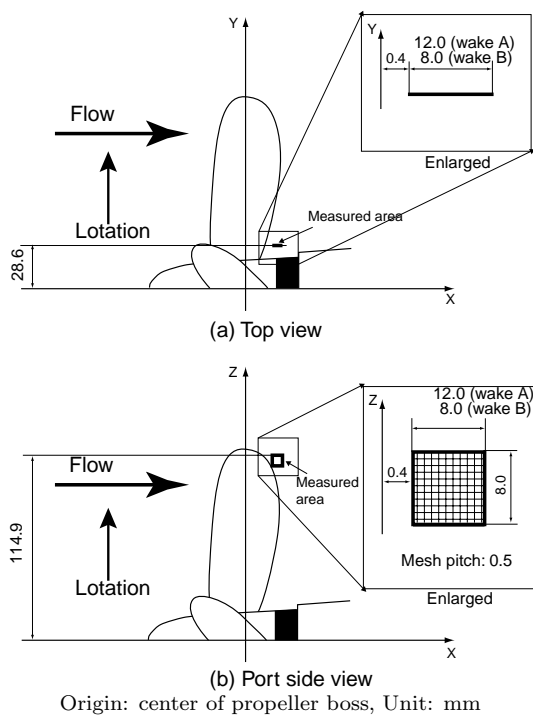


Fig. 15: Measurement area of flow velocity distribution around tip vortex

合いから, Fig. 15 のように決めた。

Fig. 16 にプロペラ回転角度  $\theta = 72^\circ$  における流速分布の非定常成分を示す。非定常成分はプロペラ 16 回転分のデータから平均して求めた。図中スケールとしてプロペラ前進速度  $V_a$  の  $1/10$  を用いている。この図から, 伴流 A の渦の直径は 14 mm ほど, 伴流 B の渦は 8 mm ほどで, 伴流 A の方がおよそ 2 倍ほど大きいことが読み取れる。また, ベクトルの大きさも伴流 A の方がわずかに大きく, 渦強さが B よりも強いことが示唆される。

また各プロペラ回転角度ごとの流速分布図と高速度ビデオカメラで撮影した TVC の様子とを突き合わせ, 渦の移動方向と速度を調べた結果が Fig. 17 である。図のように, 伴流 A の渦は上流から下流へ斜め下向きに移動しているのに対し, 伴流 B ではほぼ水平に移動している。また渦の移動速度は, 伴流 A が約 2.5 m/sec., 伴流 B が約 3.6 m/sec. で伴流 A の方が遅い。

## 6. 考 察

以上に述べてきた観察と計測の結果をまとめると, パーストが起こるときのキャビテーションの挙動は, 次のようである。

1. シートキャビテーションが発生する。

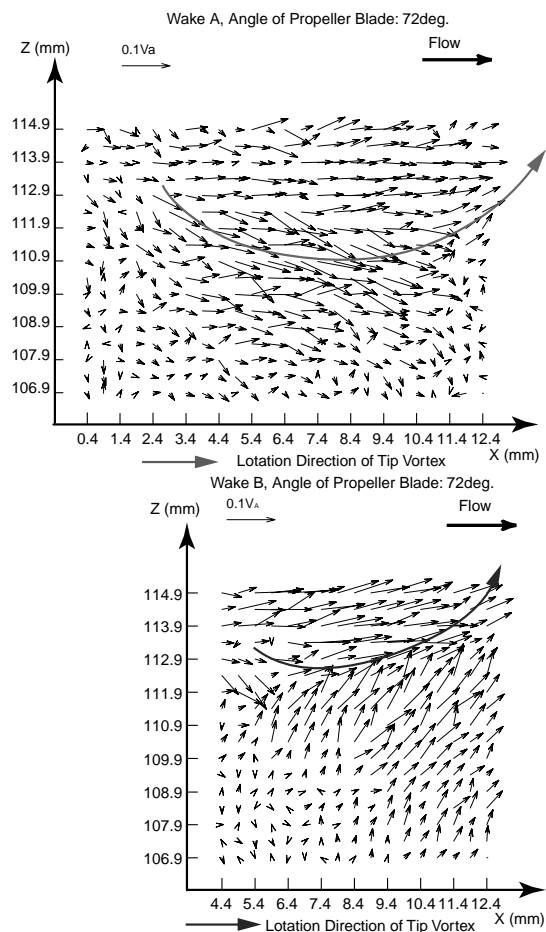


Fig. 16: Velocity distributions around propeller tip vortex.  $K_T = 0.17$ ,  $\theta = 72$  deg.

2. 伴流分布の急激な変化領域での, 翼の幾何的流入迎角の急激な変化, キャビテーション体積の急激な増大, シートキャビテーションの不安定化などの現象を伴いながら, TVC が発生する。
3. 翼後縁の TVC よりも内側から, もう 1 本の渦キャビテーションの発生, および不安定なシートキャビテーションから TVC への急激な放出
4. TVC の渦形状が不安定になる。
5. 1 度目の TVC のバースト
6. 翼後縁付近から発生した 2 本目の渦キャビテーションの渦と TVC とが絡み合い, TVC が肥大する。
7. 2 度目の TVC のバースト
8. 下流側への TVC の移動量が不足
9. 次に回転してくる翼に, 前の翼の TVC がかかる。(このとき次の翼には, 既にシートキャビテーションが発生している)

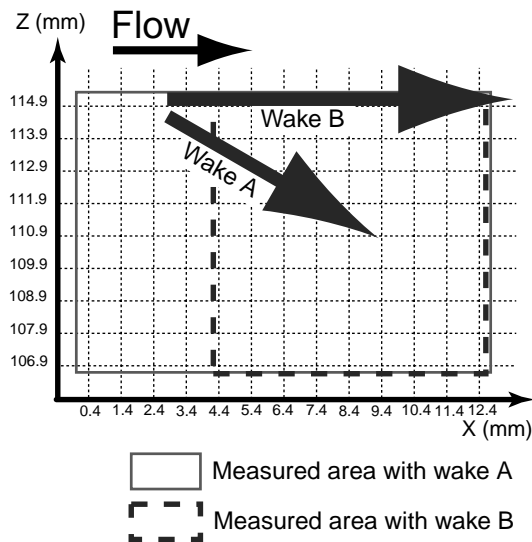


Fig. 17: Moving direction of propeller tip vortex

10. 2 に戻る。

## 7. ま と め

本研究では TVC のパースティング現象の解明を目的とし、パースティング現象をキャビテーションタンネル内で再現してその様子を観察するとともに、プロペラ変動圧力の測定と解析、プロペラ翼端渦まわりの流場計測を行った。そして以下の知見を得た。

1. パースティングの一連の現象中に 2 回の大きな圧力変動がある。1 度目のパーストのとき、前の翼の TVC と翼面上のシートキャビテーションが干渉して、シートキャビテーション後縁が大きく盛り上がりながら不安定となる。これが翼後縁から TVC に放出されるときに、シートキャビテーション後縁から放出される渦キャビテーションと TVC とが絡みながら激しく膨張・収縮を繰り返して崩壊する。
2. 2 度目のパーストは、1 度目のパーストで激しく乱れながら回転している渦の上流に次の翼が接近し、急激に流れを遮ることにより、TVC が再び激しく膨張、収縮を繰り返し、そのとき TVC 中の気泡群が数回ランダムに崩壊することによる。
3. パーストによる変動圧力は、伴流の流速分布によって大きく異なる。
4. パースティング現象の起きやすい伴流 A を用い、推力係数やキャビテーション数を変えた実験を行ったところ、推力係数が 0.23 で大きな安定した TVC が発生する場合のみ、パースティング現象が観察されなかった。他の場合はパースティング現象が観察された。

5. プロペラ翼端のピッチを低減し、翼端渦強さを押さえたプロペラ II を用いても、パースティング現象に変化は見られなかった。プロペラ翼端渦の強さそのものでは、パースティング現象を整理できないと思われる。
6. 翼端渦のプロペラ後流への移動速度はパーストを発生させる伴流 A の方が遅く、移動方向は斜め下方である。

本研究の一部は東京大学工学部、清水 幸一君 (現 マツダ (株)) の卒業研究<sup>11)</sup>として行われたことを付記する。また本実験に際し、東京大学工学部、後藤 達也君、丸亀 力君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 日本造船研究協会 第 183 研究部会、「船尾振動・騒音の軽減を目的としたプロペラ及び船尾形状の研究」報告書, (1983).
- 2) 日本造船研究協会 第 206 研究部会、「ハイスケードプロペラの実船性能」研究成果発表会, (1991).
- 3) 山崎 正三郎, ハイスケードプロペラの研究, 広島大学工学部船舶工学科博士論文, (1986).
- 4) 加藤 洋治, キャビテーション (増補版), 横書店, (1990).
- 5) 大島明, 星野徹二, プロペラ渦キャビテーションによる変動圧力, 日本学術会議 キャビテーションに関するシンポジウム (第 7 回), (1992), pp. 109-113.
- 6) 石井 規夫, チップボルテックスのプロペラ性能に及ぼす影響について, 日本造船学会論文集 第 168 号, (1991), pp. 77-88.
- 7) Ivar Hordnes, Sheldon I. Green, Sea Trials of the Ducted Tip Propeller, Journal of Fluid Engineering, Vol.120, (1998), pp. 808-817.
- 8) 前田 正二, 山口 一, 清水 幸一, 若林 和明, 加藤 洋治, 副島 俊二, 石井規夫, プロペラの Tip Vortex Cavitation の Bursting 現象, キャビテーションに関するシンポジウム (第 10 回), (1999), pp. 161-165.
- 9) 若林 和明, 金野 祥久, 山口 一, 前田 正二, 石井 規夫, 副島 俊二, 木村 校優, プロペラの Tip Vortex Cavitation Bursting とプロペラ非定常計算結果の相関, 日本造船学会論文集 第 188 号, (2000).
- 10) 大島 明, 笹島 孝夫, 模型プロペラのキャビテーション・パターンの安定化, 日本学術会議 キャビテーションに関するシンポジウム (第 4 回), (1985), pp. 123-130.
- 11) 清水幸一, プロペラの Tip Vortex Cavitation の Bursting 現象に関する研究, 東京大学卒業論文, (1999).