

# プロペラの Tip Vortex Cavitation Bursting と プロペラ非定常計算結果の相関

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\*\*

Bursting Phenomenon of Propeller Tip Vortex Cavitation and its Relationship  
with the Result of Numerical Simulation of Propeller in Unsteady Condition

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 causes severe high-frequency vibration, but estimation of it by numerical computation is not yet realized. In this study the authors made model experiments to observe the bursting phenomena and measured the pressure fluctuations caused by that, changing two propellers, wake distributions, thrust coefficients and cavitation numbers parametrically. After analyzing frequency of it we found that there would be two methods to suppress the bursting phenomenon: stabilizing the tip vortex cavitation or reducing the volume of cavitation. We also did numerical fluid simulations around a propeller in non-cavitating, unsteady condition and compared the strength of tip vortex along the circumference and its derivatives. As a result the phenomena were parameterized by the time derivative of the strength of tip vortex, and if it was higher than a certain value, tip vortex cavitation bursted. Therefore there is the possibility to predict the occurrence of bursting phenomenon by numerical analysis.

## 主 な 記 号

$D = 250 \text{ mm}$	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
$\Gamma$ [m <sup>2</sup> /sec.]	循環
$\sigma_n = \frac{p_\infty - p_v}{\rho n^2 D^2 / 2}$	キャビテーション数

## 1. は じ め に

ハイリースキュードプロペラ (highly skewed propeller, 以下 HSP と略す) 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。ここで低周波振動とは、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。

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。昨今この HSP において、プロペラの翼端から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) においてパースティング現

\*東京大学大学院工学系研究科

\*\*三井造船昭島研究所

\*\*\*三井造船

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

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。

前報<sup>1)</sup>にて著者らはこの TVC のパ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、現象を詳細に観察することで、発生原因および挙動特性を明らかにした。本論文の前半ではさらに変動圧力の周波数解析を行い、パースティング現象におけるキャビテーションの挙動と圧力変動との対応を系統的に調べ、現象の特性および改善案を提示している。

一方、実験的手法では TVC の強さやその安定性を定量的に調査するのは困難である。本論文の後半ではさらなる現象解明のため、非定常流場中で作動するプロペラの数値シミュレーションを行い、その結果とパースティング現象との関連を調べた。著者らの知る限り、現時点では数値シミュレーションによるパースティング現象の予測方法は確立されておらず、そのため実船に装備するまで問題が顕在化しない。したがって数値計算によってパースティング現象の発生が予測できると、船舶設計にとって非常に有効である。本研究ではパースティング現象の予測法について、一定の見解を示している。

## 2. 実験の概要

実験に利用した 2 種の模型プロペラ、伴流分布、実験装置類は前報<sup>1)</sup>と同じなので説明は割愛する。

この実験における可変パラメタは伴流、推力係数  $K_T$ 、キャビテーション数  $\sigma_n$  およびプロペラであるが、本研究では伴流、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。この実験条件も、前報と同じである。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。

## 3. プロペラ変動圧力波形の解析

高周波域の圧力変動を捉える目的で、ハイドロフォンによって計測された圧力変動を解析した。以下に計測された圧力変動、およびその周波数解析結果を示すとともに、

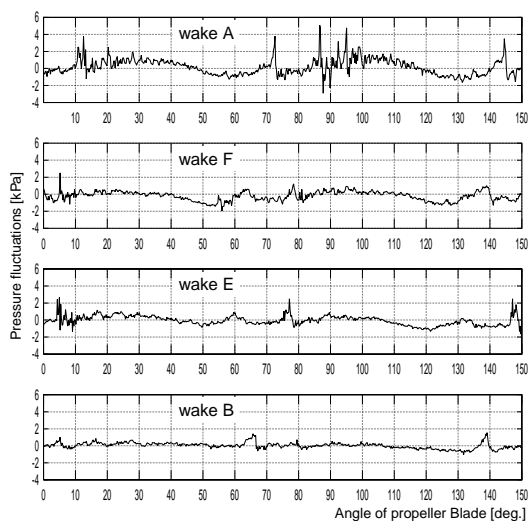


Fig. 1: Pressure fluctuations with different wakes measured by the hydrophone. Propeller I,  $K_T = 0.175$  and  $\sigma_n = 1.90$ .

キャビテーションの様子と突き合わせて考察する。

周波数成分は、1 次成分 (150 Hz) ~ 6 次成分 (900 Hz) までを低次、7 次成分 (1050 Hz) ~ 16 次成分 (2400 Hz) までを高次とし別々の図に示す。

### 3.1 伴流分布の影響

Table 1 の No.1 に示した実験条件で、伴流分布の変動圧力への影響を調べた。各伴流で計測された圧力変動を Fig. 1 に示す。図中縦軸は変動圧力を、横軸はプロペラ翼角位置を表す。

この図から、パーストの発生する伴流 A の圧力変動が最も大きく、パーストの発生しない伴流 B では、非常に小さいことが分かる。実際、キャビテーションの様子を比較すると、伴流 A のときにはパーストが起こるのに対し、伴流 B ではほとんど見られない。

すべての伴流分布で比較すると、圧力変動の大きい順に  $A \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow B$  となる。(Fig. 1 はこの順に並べてある。) この傾向は前報<sup>1)</sup>で述べた伴流分布の傾向と一致する。したがって伴流分布の違いがパースティング現象に及ぼす影響はたいへん大きいと言える。

### 3.2 推力係数の影響

これ以降は最も激しいパースティング現象が見られる伴流 A を用いた計測結果について議論する。また計測された圧力変動を周波数解析し、その値を無次元変動圧振幅  $K_P$  で表した結果を用いる。

Table 1 の No.2 に示した実験条件で、推力係数の変動圧力への影響を調べた。なおプロペラ I を用いている。計測された圧力変動を周波数解析した結果を Fig. 2 (低周波

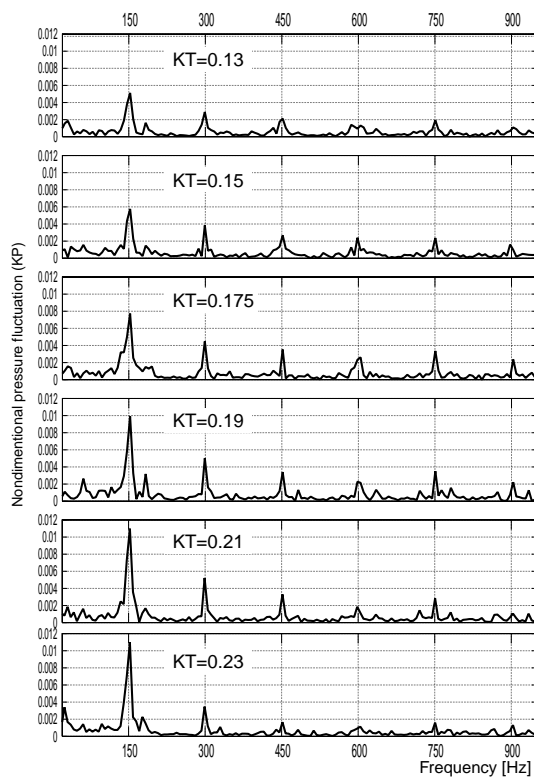


Fig. 2: Low frequency components of non-dimensional pressure fluctuations with different thrust coefficients. Propeller I, wake A,  $\sigma_n = 1.90$ .

成分), Fig. 3 (高周波成分) に示す。図中横軸は周波数で、150 Hz が 1 次成分すなわちプロペラ基本周波数、300 Hz が 2 次成分、以下 150 の倍数の周波数が調和成分を表す。縦軸は無次元変動圧振幅  $K_P$  である。

低周波成分の Fig. 2 から、1 次 (150 Hz) と 2 次 (300 Hz) の値は推力係数が高くなるにつれて大きくなっていることがわかる。これは推力係数の増加にともないシートキャビテーションの体積が増えるので、その体積変動が計測されているためである。

高次の値を比べると 6 次 (900 Hz) 以上の次数では、プロペラ基本周波数の倍数以外の周波数での数値が大きくなり、広い範囲で圧力変動が計測される。推力係数による変化を見ると、 $K_T = 0.13$  の場合が小さく、0.15 ~ 0.21 の場合は大差ない。そして  $K_T = 0.23$  の場合の圧力変動が最も小さい。

まず  $K_T = 0.13$  の場合に圧力変動が小さい理由だが、これは、キャビテーションの発生量そのものが少なくなったことにより、バーストが弱まったからと考えられる。TVC のバースティング現象自体は観察される。キャビテーシ

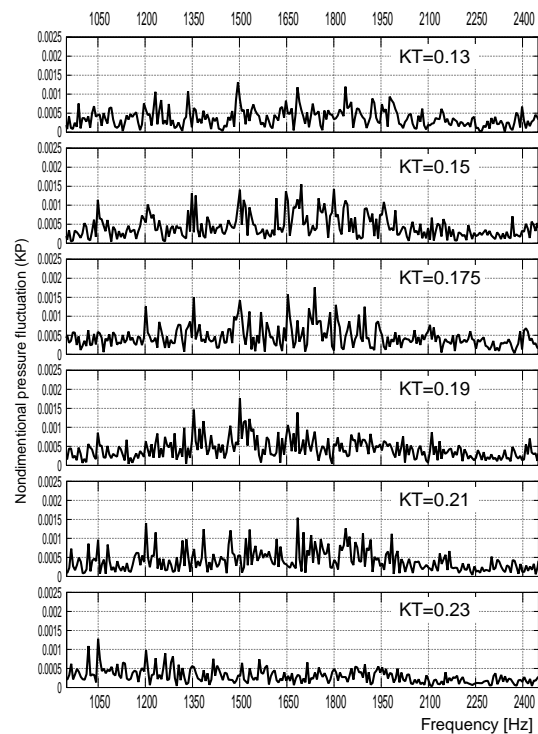


Fig. 3: High frequency components of non-dimensional pressure fluctuations with different thrust coefficients. Propeller I, wake A,  $\sigma_n = 1.90$ .

ンの量とバースティング現象との相関は、次節でさらに詳しく検討する。

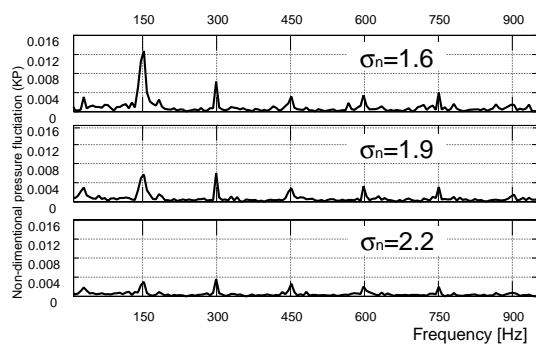
また、 $K_T = 0.23$  のときには、発生するシートキャビテーションの量が他の推力係数のものにくらべて非常に多い。さらに、プロペラ翼角が小さいときから TVC を放出する。放出された TVC は安定しており、バースティング現象は観察できなかった。他の推力係数では、全ての条件においてバースティング現象が観察された。

### 3.3 キャビテーション数の影響

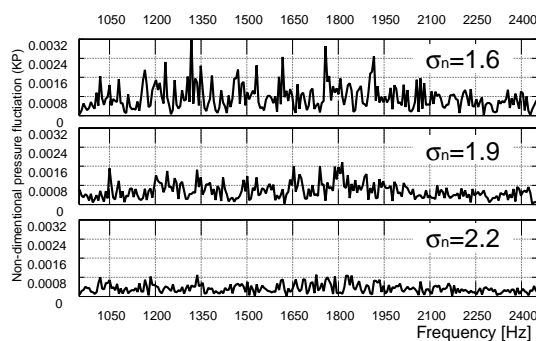
Table 1 の No.3 に示した実験条件で、キャビテーション数の変動圧力への影響を調べた。計測された圧力変動を周波数解析した結果を Fig. 4 に示す。

キャビテーション数が大きくなるにつれて、つまりキャビテーションの量が減るにつれて、圧力変動は小さくなってゆく。特に低次の 1 次と 2 次に顕著に現れているが、これは低次の周波数成分ではキャビテーションの体積変化による振動が支配的だからである。

しかし一方で高次においても、低次と同様に圧力変動は小さくなっている。したがってキャビテーションの体積減少は、低次の圧力変動のみならず、バースティングによ



(a) Low frequency components



(b) High frequency components

Fig. 4: Frequency components of non-dimensional pressure fluctuations with different cavitation numbers. Propeller I, wake A,  $K_T = 0.175$ .

る高次の圧力変動にも影響していることが分かる。キャビテーションの量を減らす方法は、パーストによる圧力変動を抑える効果がある。

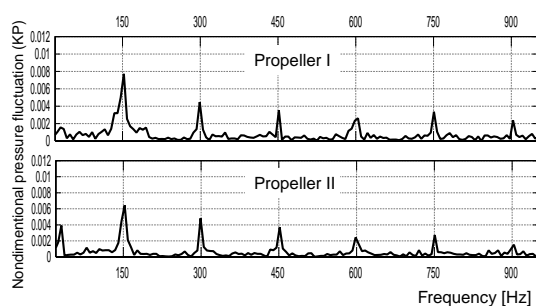
ただしキャビテーションの様子を観察したところ、キャビテーション数を変化させてもパーストは発生している。したがってキャビテーションの体積を減らす方法でパースト自体を止めることはできない。

前の節とこの節で示した結果から、パースティング現象による高次の圧力変動を低減させるためには、2つの方策が考えられる。すなわち TVC を安定化してキャビテーションの体積の変動を抑える方法と、キャビテーションの量そのものを減らす方法とである。ただしこれらの方法は通常お互いに排他的である。

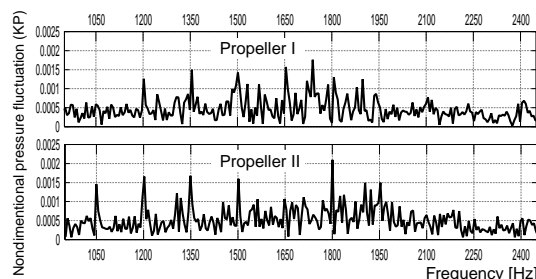
#### 3.4 ピッチ分布の違いによる影響

ピッチ分布の異なるプロペラ I, II について、 $K_T = 0.175$  のときのキャビテーションの様子と圧力変動を比較する。計測された圧力変動を周波数解析した結果を Fig. 5 に示す。

それぞれのプロペラに発生するキャビテーションの様子は前報<sup>1)</sup>で述べているが、まとめると翼面に発生するシートキャビテーションはプロペラ I の方が多く、TVC につ



(a) Low frequency components



(b) High frequency components

Fig. 5: Frequency components of non-dimensional pressure fluctuations with different propellers. Wake A,  $K_T = 0.175$ ,  $\sigma_n = 1.90$ .

いてはプロペラ I, II でほとんど差がなかった。

変動圧力を比較すると、低次では、プロペラ II の無次元変動圧振幅の値が小さくなっている。パーストに起因する高次の無次元変動圧振幅の値も、プロペラ II は I よりわずかに小さくなっている。つまり改善の効果はあるものの些少である。

キャビテーションの様子の違いを踏まえて考えると、この改善の理由はキャビテーション自体の量が減ったため、翼端渦強さを抑えたことによる効果はほとんど無かったと考えるのが妥当であろう。したがって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。

ところで 3.2 に述べたように、推力係数が 0.23 のときには翼端渦が強く放出され、TVC は安定しておりパーストは観測されない。このことから、今回プロペラ II に採用した翼端渦を抑えるピッチ分布とは逆に、翼端渦を強めるようなピッチ分布に変更する、あるいは翼端付近の翼断面にスーパーキャビテーション翼型を採用するなど、安定な TVC を発生させるようなプロペラ形状に変更することで、高次の変動圧を抑えられる可能性がある。この手法はキャビテーション発生量の増加を意味し、エロージョンや低次の船尾変動圧の増加をまねくおそれがあるので安易な採用はできないが、検討に値するであろう。

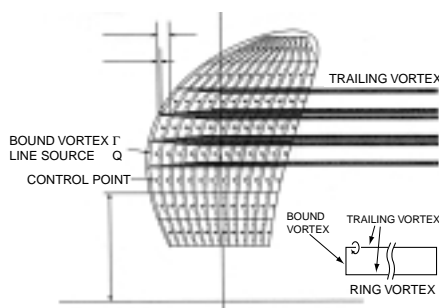


Fig. 6: Arrangement of line sources and horse shoe vortices on a propeller blade

#### 4. プロペラ非定常計算

この節以降では、数値シミュレーションについて述べる。数値解析を行う目的は、実験では計測が難しい翼端からの放出渦強さ、およびその変化率を調べ、バースティング現象との相関を調査するためである。

##### 4.1 数値解析手法

本研究では著者のひとりである石井が開発した数値解析プログラムを用いた。この節では数値解析プログラムについて、その概略を説明するが、数値解析手法の詳細については石井の論文<sup>2-5)</sup>を参照されたい。

このプログラムは解析手法として渦格子法を用いており、非圧縮、非粘性流体中のプロペラの挙動を解析できる。渦格子法の特徴として、プロペラの幾何形状を自由に表現できることが挙げられる。

本研究では TVC に着目しているため、ここでは特に翼から放出される渦がプログラム中でどのように表現されているかを Fig. 6 を用いて説明する。この図のようにプロペラ翼面を  $M \times N$  個の四角形要素に分割し、それぞれの四角形要素上  $1/4$  翼弦長位置に馬蹄渦 (horse shoe vortex) と線吹き出し (line source) を置く。馬蹄渦は半径方向の束縛渦 (bound vortex) と、そこから翼弦長方向に伸びる後引き渦 (trailing vortex) から構成され、翼のキャンバー面上から翼後縁を経てプロペラ後方へと流出するように配置する。非定常計算では渦からの誘導速度はリング渦 (ring vortex) として計算される。

本プログラムは定常計算、準定常計算、非定常計算を行うことができ、また今回は利用していないが、キャピテーション状態の計算も行える。また本プログラムの利点として、プロペラ後流自由渦の変形を考慮して計算を行っている点が挙げられる。ただし非定常計算においては、準定常計算で求めた後流渦形状を用いる。

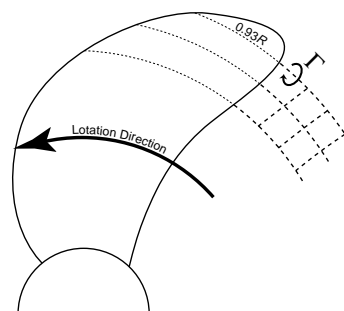


Fig. 7: Trailing vortices and the circulation to be compared

##### 4.2 計算条件

上に述べたように本プログラムは定常計算、準定常計算、非定常計算を行うことができ、またキャピテーション状態の計算も行えるが、本研究での計算条件は全て非定常・非キャピテーション状態とした。TVC のバースティング現象は船尾伴流の影響によるので非定常計算の必要がある。またキャピテーション状態の計算は非キャピテーション状態にくらべて精度が出ないので、翼端渦強さを詳細に比較するには非キャピテーション状態が良いと判断した。非キャピテーション状態での計算を選択した得失については、7. で議論する。

計算条件は Table 1 に示した実験条件に合わせた。ただし非キャピテーション状態の計算なので、キャピテーション数は考慮していない。推力係数  $K_T = 0.13 \sim 0.23$  まで 6 点、使用した伴流分布も A, B, E, F の 4 種類を用いた。伴流分布の詳細は前報を参照されたい。基準としている計算条件は、やはり実験条件と同じく、使用伴流 A, 推力係数  $K_T = 0.175$  である。

数値計算結果のうち、特に TVC の特性に関連があると思われる、翼端からの放出渦強さとその変化率について詳しく比較した。

#### 5. 放出渦強さの比較

$0.93R$  位置から後流に放出される後引き渦 (Fig. 7) の強さの比較を行った。横軸にはプロペラ翼角を、縦軸には、以下の式に表されるように渦強さ (循環) を無次元化した値をとる。このとき下流に向かって右回りを正とする。

$$\Gamma^* = \frac{\Gamma}{2\pi RW}$$

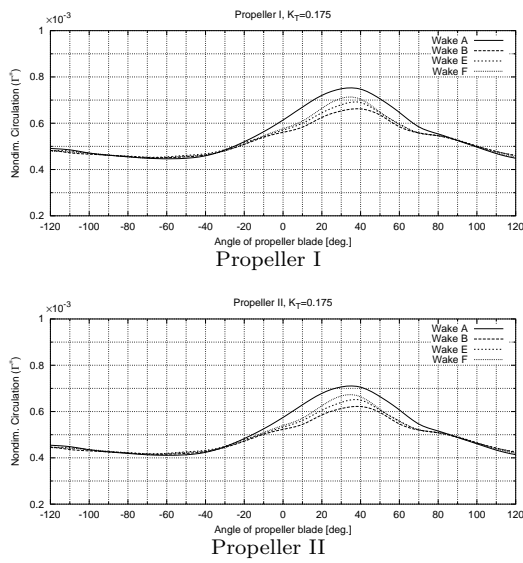


Fig. 8: Comparison of non-dimensional circulations of trailing vortices along circumference with different wake distributions

- $\Gamma^*$  無次元循環
- $\Gamma$  0.93R 位置の循環
- R プロペラ半径
- W 0.93R 位置に流入する流速

伴流別の放出渦強さを Fig. 8 に示す。放出される渦強さはプロペラ翼角  $35^\circ$  付近で最大となる。このプロペラは  $36^\circ$  のスキュー角がついているので、渦強さが最大値となるのは翼端がプロペラ軸のほぼ真上に来ているときだと分かる。そしてその最大値は、大きい順に伴流  $A \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow B$  となる。これは、前報で述べたパーストの激しい順と同じである。

一方、推力係数を変化させたときの放出渦強さを Fig. 9 に示す。この図から分かるように、推力係数が高いほど、翼端から放出される渦は強くなり、 $K_T = 0.23$  が最大である。

前報<sup>1)</sup>あるいは本論文の 3.2 で述べているように、 $K_T = 0.23$  の条件では TVC は安定しており、パースティング現象はほとんど見られない。また圧力変動も最も小さい。このことから、伴流分布を変えた結果だけを考えると、放出渦強さがパースティング現象の支配的パラメタであるようにも見えるが、推力係数を変えた結果からはそうは言えないことが分かる。

3.3 や 3.4 で議論したように、パースティング現象による圧力変動には、TVC の安定性が大きく関わる。したがって放出渦強さそのものよりも、その変化率を調べるべきだ

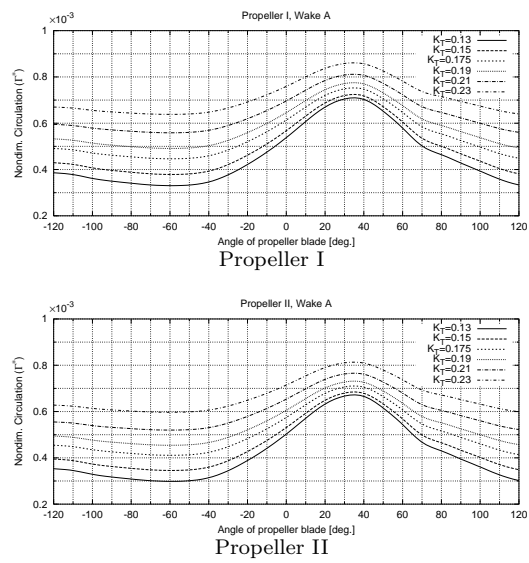


Fig. 9: Comparison of non-dimensional circulations of trailing vortices along circumference with different thrust coefficients

と考えられる。

## 6. 放出渦強さの変化率の比較

放出渦強さ (無次元循環  $\Gamma^*$ ) の安定性を議論するため、その翼角に対する変化率  $d\Gamma^*/d\theta$  を調べることにする。このとき  $\theta$  はラジアン単位で微分する。翼角位置の違いは時間の違いに対応するので、 $d\Gamma^*/d\theta$  は時間変化率に対応する。その大小は TVC の安定性に直接かかわると思われる。

伴流別の放出渦強さの変化率を Fig. 10 に、推力係数を変化させたときの放出渦強さの変化率を Fig. 11 に示す。

この変化率と実験時のパースティング現象の様子とを比較すると、伴流別に変化率を取った Fig. 10 で、変化率の最大値を基準として、パーストが発生する伴流と発生しない伴流の二つに分けられることが分かった。すなわち、

- パーストが発生する  $\rightarrow$  変化率の最大値  $> 2.3 \times 10^{-4}$
- パーストが発生しない  $\rightarrow$  変化率の最大値  $< 2.3 \times 10^{-4}$

さらに推力係数を変化させたときの放出渦強さの変化率について、その最大値を比較する。変化率の最大値が  $2.3 \times 10^{-4}$  より低いのは、推力係数  $K_T = 0.23$  のときである。前述のように、このときは実際にパーストが発生しない。

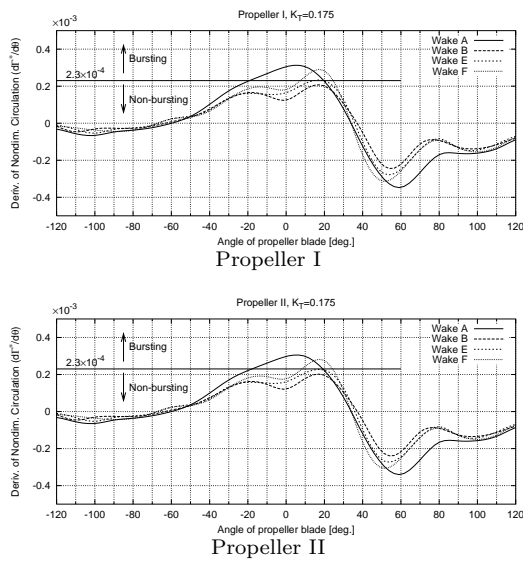


Fig. 10: Comparison of derivatives of non-dimensional circulations of trailing vortices along circumference with different wake distributions

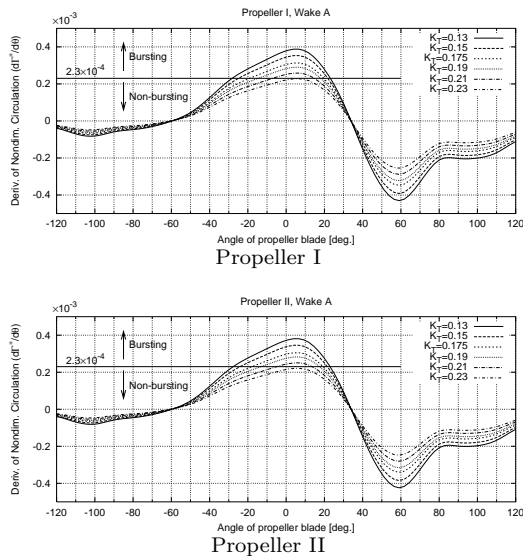


Fig. 11: Comparison of derivatives of non-dimensional circulations of trailing vortices along circumference with different thrust coefficients

## 7. 考 察

上記の結果から、伴流の違いや推力係数の違いに関わらず、TVCを放出しはじめる角度における放出渦強さの変化率で、バーストが発生するかないかを分けることが

できた。放出渦強さの変化率が支配パラメタとなるのは、変化率が大きい程、渦が不安定になりやすいからと思われる。

本研究の場合は  $2.3 \times 10^{-4}$  という基準で分けることができた。この数値自体は、翼面の要素分割数によって値が変わるので、一般性のある値ではない。しかし翼後縁から放出される渦強さは、その計算手法によらず物理的に決まるはずである。したがってこの渦強さの変化率を評価する適切な手法を見だし、またさらに実験結果との対応や検証が進めば、非定常・非キャピテーション状態の数値計算結果を用いて、一般性のある方法でバースティング現象の有無を判断できる可能性がある。これは理論面のみならず現実のプロペラ設計技術の面からも非常に興味深い。

変化率が最大となるのは、翼角が  $10^\circ \sim 20^\circ$  である。プロペラのスキュー角が  $36^\circ$  であることを考えると、変化率の最大値は伴流の低速域に翼端が入る角度に対応する。したがって前報<sup>1)</sup>で述べたように、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が、バースティングの原因となっていることが示唆される。

以上本論文ではバースティングの原因を、翼端が伴流の低速域に入る際の後流渦の変化率で導き出そうとしたが、翼端が低速域から抜け出る際にも後流渦の変化率が最小となり急激な流速変化が生じる部分が存在する。本論文の Fig. 10, Fig. 11 では最大値側の閾値は最小値側でも正負が入れ替わるが、ほとんど同程度の数値になることが見て取れる。渦強さの急激な変化が TVC やバースティング現象に及ぼす具体的な影響、増加(最大値)と減少(最小値)のどちらの影響が大きいのかなどは不明で、今後の研究課題である。

ところで推力係数  $K_T = 0.13$  のときは、3.2 で述べたようにキャピテーションの発生量そのものが少なく、バーストが弱まって高次の変動圧振動が若干抑えられている。しかし放出渦強さの変化率は最も大きい。

本研究ではバースティング現象について、非キャピテーション状態の数値シミュレーション結果を用いて議論している。これはキャピテーション状態の計算では、翼端からの放出渦強さについて精度の良い計算ができない可能性があるため、現実にはキャピテーションがなければ発生しない現象の調査であっても、あえて非キャピテーション状態の計算結果と比べるべきだと判断したからである。したがってキャピテーションの量が減ってバーストが弱まっている状態を読み取れないのは当然である。

一方、キャピテーションの量、特にシートキャピテーションの量に関しては、その数値解析方法の研究は盛んであり、良い精度で推定できるようになっている。(たとえば石井,<sup>5)</sup> 安東ら<sup>6)</sup>など) したがってキャピテーション状態・非キャピテーション状態の2種類の数値計算を行い、

その結果を突き合わせることで、バースティング現象の有無だけではなく、その激しさを定量的に推定するなど、さらに精度の高い推定ができそうに思われる。この点は今後の課題である。

## 8. ま と め

プロペラの TVC に発生するバースティング現象の特性を調査するため、本研究では 2 種類のプロペラと 4 種類の伴流分布を用い、推力係数や伴流分布を変えて変動圧計測を行い、周波数解析を行って比較した。また、プロペラ非定常計算を行い、特に翼端からの放出渦強さとその変化率を求め、実現象との比較を行った。

得られた結果は、以下のとおりである。

1. バースティングによる変動圧力を低減するには、2 つの方法が考えられる。TVC を安定化させて圧力変動を止める方法と、キャビテーションの量そのものを減らす方法である。
2. バーストの発生は、放出渦強さの変化率の違いによってほぼ決まる。無次元化した放出渦強さの変化率の最大値がある値 (本研究では  $2.3 \times 10^{-4}$ ) より高いか低いかで、バーストが発生するか、しないかに分けることができる。放出渦強さの変化率が翼端渦の安定性に関わるからと思われる。
3. キャビテーションの量を数値解析などによって推定し、その結果と本研究で用いた手法とを組み合わせることで、さらに詳細な推定ができる可能性がある。この点は今後の課題である。

## 参 考 文 献

- 1) 金野 祥久, 若林 和明, 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 現象の発生機構, 日本造船学会論文集 第 188 号, (2000).
- 2) 石井 規夫, 井手 敏治, プロペラ後流渦と揚力面の数値解析, 日本造船学会論文集 第 160 号, (1986), pp. 54-65.
- 3) 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, (1990), pp. 77-88.
- 4) 石井 規夫, プロペラキャビテーションの 3 次元数値解析, 日本造船学会論文集 第 170 号, (1991), pp. 125-136.
- 5) 石井 規夫, 流場解析に基づく船用プロペラ特性推定法の研究, 大阪大学博士論文, (1993).
- 6) 安東 潤, 松本 大輔, 毎田 進, 大橋 訓英, 中武 一明, 簡便なパネル方による 3 次元定常キャビテーションの計算, 日本造船学会論文集 第 186 号, (1999),

pp. 17-27.

- 7) 若林 和明, プロペラの Tip Vortex Cavitation Bursting とプロペラ非定常計算結果の相関に関する研究, 東京大学修士論文, (2000).