

プロペラ翼端渦キャビテーションの水中放射雑音予測

Study on Prediction of Underwater Radiated Noise from Propeller Tip Vortex Cavitation



山田 卓慶* ¹ Takuyoshi Yamada	石井 佑樹* ² Yuki Ishii
佐藤 圭* ³ Kei Sato	西野 宏* ⁴ Hiroshi Nishino
大島 明* ⁵ Akira Oshima	川北 千春* ⁶ Chiharu Kawakita

海洋調査船等、水中音響機器を使用する船舶では、それら機器を有効に運用するため、船体から水中に放射される雑音を設計段階で精度よく予測し、これを低減することが重要である。そこで、主要な雑音源の一つである、プロペラに発生する翼端渦キャビテーション雑音を、翼端渦やキャビテーションに関する理論的なモデルと、当社における実験結果にもとづく知見とを組み合わせる手法を構築した。この結果、キャビテーションによる雑音が支配的となる周波数領域の雑音を 3dB 以内で予測することが可能となった。

1. はじめに

海洋調査船等の船舶では、さまざまな水中音響機器を使用している。それらの水中音響機器を有効に運用するためには、船舶自身から発生し水中に放射される雑音を低減することが必要である。このため、これらの船舶の設計においては、主機等の機械装置や、プロペラ(推進器)から発生する雑音を設計段階で精度良く予測し、これらを低減する対策を設計に織り込むことが重要である。そこで、本稿では、主要な雑音源の一つであるプロペラに着目し、その中でも、海洋調査船等の比較的静粛な船舶で特に重要となる翼端渦キャビテーションについて、その雑音予測手法の検討を行った。

キャビテーションとは、高速で流れる流体や、あるいは流体中を高速で移動する物体の周辺で、流体の圧力が低下することで、その流体が液体から気体に相変化する現象であり、例えば流体の流れる配管内やポンプ、船舶のプロペラの周辺で発生する。このキャビテーションは、流体が液体から気体に相変化する際に大きな体積変化を伴うこと、また、圧力が上昇すると急激に液体に戻る(崩壊)から、これを適切に管理しなければ、機器の振動や騒音、材料の破壊(エロージョン)の原因となる。

船舶のプロペラの周辺で発生するキャビテーションには、[図1](#)に示すように様々な形態があり⁽¹⁾、例えば、シートキャビテーションは、大きな体積変動を伴い、船体振動の重要な原因の一つとなる。しかし、海洋調査船等の比較的静粛な船舶では、設計上の工夫により、通常の運航で大規模なキャビテーションが発生することはなく、その雑音予測において重要となるのは、主に、翼端渦キャビテーションと呼ばれるものとなる。この翼端渦キャビテーションとは、プロペラの翼端から下流側に放出される渦において、その中心部で流体の圧力が低下することによって発生するもので

*1 総合研究所流体研究部

*2 総合研究所振動研究部

*3 総合研究所流体研究部 技術士(船舶・海洋部門)

*4 総合研究所振動研究部 主席 工博

*5 MHIソリューションテクノロジーズ(株)長崎支社 第二技術部 主査

*6 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 流体設計系 流体制御研究グループ長

ある。そのため、この翼端渦キャビテーションによる雑音を予測するためには、次の3つのステップが必要と考えられる。

- (1) 翼端渦内の圧力低下の予測
- (2) 翼端渦内に発生するキャビテーションの予測
- (3) キャビテーションから発生する雑音の予測

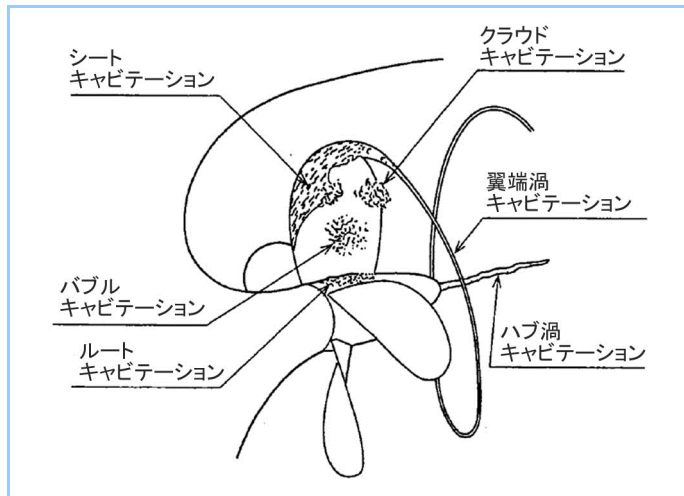


図1 プロペラの周辺で発生するキャビテーション

次章以降、上記3つのステップについて述べるとともに、最後に、構築した手法による予測値を実船での計測結果と比較し、その妥当性を示す。

2. 翼端渦キャビテーションによる雑音の予測手法

(1) 翼端渦内の圧力低下の予測

翼端渦による圧力低下を予測するには、まず、翼端渦の構造を予測しなければならない。ここでは、McCormick⁽²⁾にならい、翼端渦の構造として、ランキン渦を仮定することとした。ランキン渦とは、粘性の影響が卓越する渦中心部分と、渦としての旋回流れが卓越する外側部分からなる渦である。この渦の構造を特徴づける量としては、渦の強さと、渦中心部分の大きさの2つがあるが、本稿ではこれらをそれぞれ次のように求めることとする。

渦の強さ: 翼端渦の強さは、翼端渦の発生源である、プロペラ翼の先端付近における荷重の大きさに関連する。そこで、プロペラ翼周りの流動計算法を用いて、翼端付近の荷重を算出し、これを用いて渦の強さを算出する。

渦中心部分の大きさ: McCormick や大島らの検討⁽³⁾にならい、渦中心部分の大きさは、プロペラ翼の翼端付近に発生する境界層(物体表面近くの、流速が小さくなる領域)の厚さに関連するとして、プロペラ翼周りの流動計算法を用いて算出する。

上記の手法で翼端渦の構造を仮定することにより、図2に示すような翼端渦内の圧力分布を求めることができる。なお、渦の強さや渦中心部分の大きさの算出にあたって、具体的にプロペラ翼端のどの位置の荷重や境界層の厚さを、どのように利用するかは、当社における各種実験による知見を反映している。

(2) 翼端渦内に発生するキャビテーションの予測

(1)の予測手法で求めた翼端渦内の圧力低下によって、どのようなキャビテーションが形成されるかを予測する。ここで、キャビテーションは圧力が最も低くなる渦中心部で発生し、翼端渦内の低圧力によって成長すると考えると、キャビテーション気泡の成長運動を表す Rayleigh-Plesset の式を用いて、翼端渦内に発生するキャビテーション気泡の大きさと、その周囲の圧力を算出することができる。

(3) キャビテーションから発生する雑音の予測

(2)の予測手法で求めた翼端渦の中でのキャビテーション気泡が、どのような雑音を発生するかを予測する。まず、ある大きさの単一のキャビテーション気泡が崩壊する(急激に液体に戻る)際に発生する雑音を、Blake⁽⁴⁾にならって図3に示すスペクトル(周波数ごとの雑音の強さの特性)で表現する。この雑音のスペクトルは、キャビテーション気泡の消滅過程に対応する3つの周波数帯ごとに、それぞれ数式で表現されている。

次に、船体の下流側に設置されたプロペラが、一回転中にどのようなキャビテーション気泡を生成するかを(1)及び(2)の予測手法で時々刻々計算し、これらを積分することで、ある単位時間あたりに、どのような大きさのキャビテーション気泡がいくつ生成され崩壊するかを算出する。このキャビテーション気泡の大きさと数に応じて、単一のキャビテーション気泡の雑音を重ね合わせることで、プロペラ全体での翼端渦キャビテーションによる雑音のスペクトルを求めることができる。

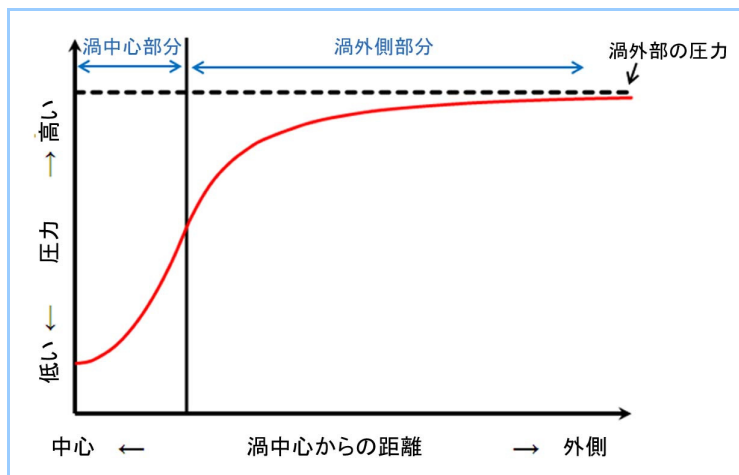


図2 翼端渦内の圧力分布

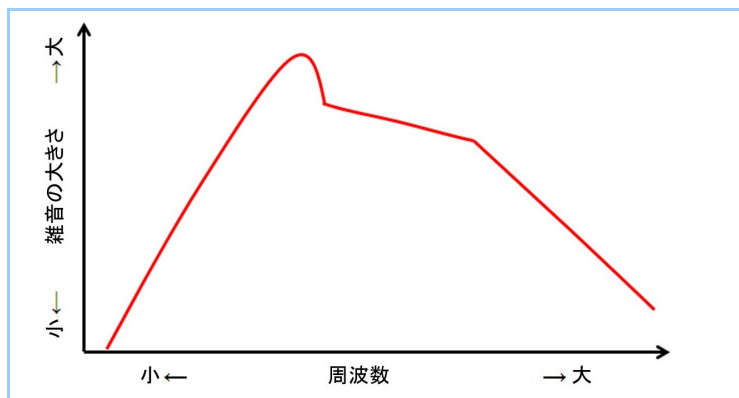


図3 単一のキャビテーション気泡から発生する雑音のスペクトル

3. 構築した予測手法の検証

前章までで構築した雑音の予測手法の精度検証を行うため、表1に示す3隻の船(船A~C)について雑音の予測計算を行い、実船での雑音計測結果と比較した。なお、本稿の予測手法は翼端渦キャビテーションが対象であるので、あらかじめ模型試験で翼端渦キャビテーションの発生が確認された運転状態を選定した。

実船での雑音は、対象船から離れた位置に配置した観測船から海中に設置した水中マイクにより計測した。また、計測値は、対象船と水中マイク設置位置の距離に応じて、海面の影響も考慮して音源レベルに補正している。

表1 予測手法の検証に用いた船の主要目

	船A	船B	船C
長さ[m]	約 100	約 120	約 90
幅[m]	約 16	約 19	約 14
深さ[m]	約 9	約 13	約 9
排水量[ton]	約 4000	約 9000	約 4000
主機定格出力[kW]	約 6000	約 7000	約 4000
プロペラ直径[m]	約 4	約 4	約 3

船A～Cの予測計算値と実船での計測値の比較を、それぞれ図4～6に示す。船A(図4)について、周波数が低い部分で、実船での計測値の方が大きくなっている。これは、実船ではプロペラ以外の機械音等が計測されており、プロペラ雑音以外の成分が低周波数部分で卓越するためと考えられる。

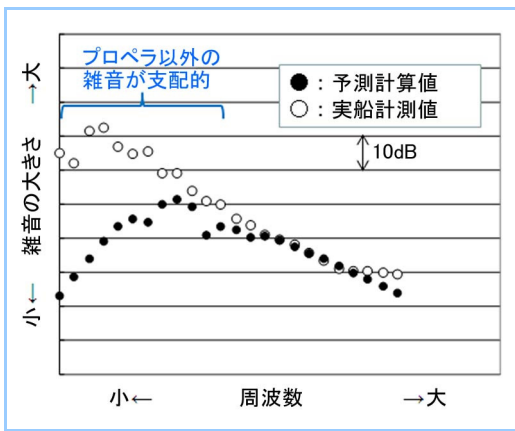


図4 予測計算値と実船計測値の比較(船A)

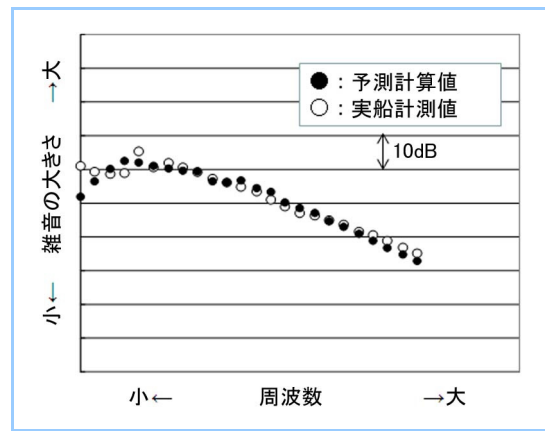


図5 予測計算値と実船計測値の比較(船B)

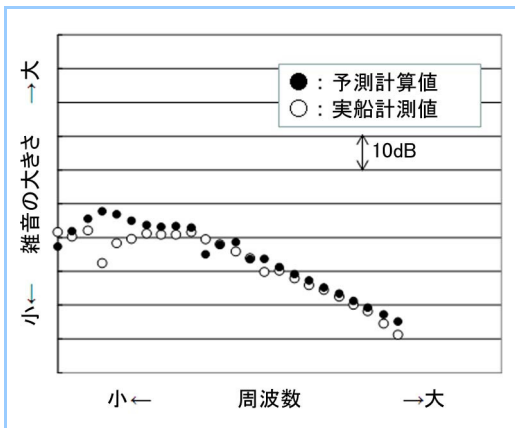


図6 予測計算値と実船計測値の比較(船C)

実際に、船Aでプロペラ停止時(停船したまま、プロペラを作動させずに主機のみを作動させた場合)とプロペラ作動時の雑音計測値を図7に示す。この結果、プロペラを停止しているにもかかわらず、低周波数部分では雑音が小さくなっておらず、プロペラ以外からの雑音が支配的であることがわかる。

そこで、プロペラからの雑音と考えられる高周波数側の3点の周波数(“周波数1”～“周波数3”とする)を抽出し、予測計算値と実船計測値の比較した結果を図8に示す。この結果、予測計算値と実船計測値の相違は、概ね±3dB であり、この予測手法がプロペラ設計において有効な精度を持つと考えられる。

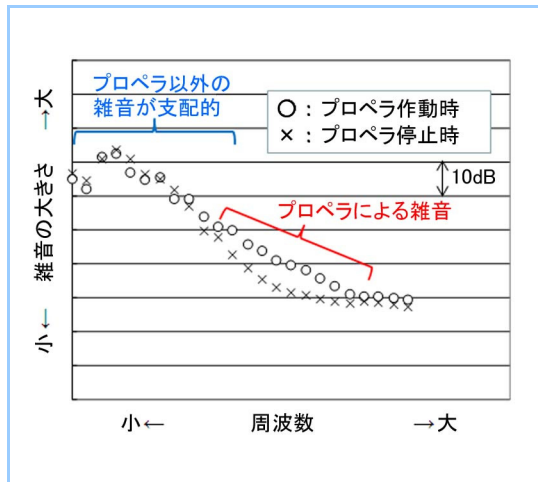


図7 プロペラ作動時と停止時の雑音の比較 (船A)

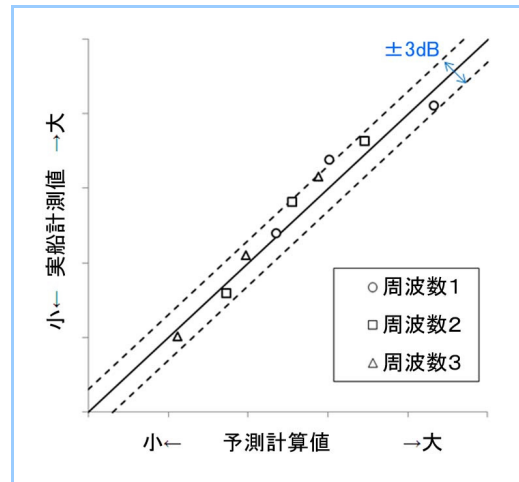


図8 予測計算値と実船計測値の比較 (船A～C)

4. まとめ

プロペラに発生する翼端渦キャビテーション雑音を、翼端渦やキャビテーションに関する理論的なモデルと、当社における実験結果にもとづく知見とを組み合わせる手法を構築した。また、この手法による予測結果を、実船での計測結果と比較することで、この予測手法が実用的な精度をもつことを検証できた。今後、本手法を用いて、当社船舶の低雑音性能を確実に確保していく。

また、本予測手法は、比較的基礎的な理論モデルをベースとするものであるが、数値シミュレーションや、実験における詳細な流場計測による翼端渦流れの分析も進められており、今後、現象のより詳細な理解と適切なモデル化により、更なる予測精度の向上を進めていく。

参考文献

- (1) 大島明他, 高精度キャビテーション予測によるプロペラ騒音の低減, 三菱重工技報 Vol.34 No.5 (1997) p.338～341
- (2) McCormick, B.W., "On Cavitation Produced by a Vortex Trailing From Lifting Surface", Journal of Basic Engineering Transaction of ASEM, Vol.84 No.3 (1962) p.369～379
- (3) Oshima, A., "Study on Tip Vortex Cavitation Inception of Propeller", The 2nd International Symposium on Cavitation (1994) p.367～372
- (4) Blake, W., Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration, Academic Press, Volume I (1986) p.404～413