

## PS-24 大型キャビテーション水槽における計測技術の高度化

流体設計系 \* 白石 耕一郎、澤田 祐希

### 1. はじめに

大型キャビテーション水槽におけるキャビテーション評価の高度化を目的として、伝達関数を用いた水中騒音の補正方法、および多視点型ラインセンシング法を用いたキャビテーション形状計測法の開発を行っている。本論文では、初代青雲丸模型プロペラを対象に、開発手法を用いて水中騒音計測とキャビテーション形状計測を行ったので、その計測結果について報告する。

### 2. 伝達関数を用いた水中騒音計測の補正

キャビテーション水槽は閉鎖空間であるため、音の反射及び残響の影響が大きく、実際の水中騒音を計測することが困難である。その反射と残響影響を補正する方法として、伝達関数を用いる方法がある<sup>1)2)</sup>。伝達関数はある空間において音響計測を行う場合に、空間内の残響やノイズの影響を取り除くための関数である。キャビテーション水槽の伝達関数を計測し、水中騒音計測結果を補正することで、反射及び残響の影響を取り除いた計測が可能である。本研究では、伝達関数の計測方法として室内音響分野で用いられている Swept-Sine 法<sup>3)</sup>を用いて大型キャビテーション水槽における伝達関数を計測する。そして、初代青雲丸 HSP の模型プロペラを用いたキャビテーション試験において水中騒音計測を実施し、伝達関数による補正法の有効性を検証した。

#### 2.1 水中騒音計測結果の補正

直接的にインパルス信号を用いずにインパルス応答を得る方法として Swept-Sine 法がある<sup>3)</sup>。Swept-Sine 法では、インパルスを時間的に引き伸ばした Swept-Sine 信号を用いる。Swept-Sine 信号を音響プロジェクトアンプで発振し、その水中音をマイクロホンによって計測し、伝達関数を取得する。

キャビテーション水槽において計測した伝達関数 $H(f)$ を用いて、測定した水中騒音の補正を実施する。まず、計測した水中騒音にフーリエ変換を行い、フーリエスペクトル $X(f)$ を算出する。キャビテーション水槽における音場について、線形応答が成立すると仮定した場合、以下の式が成立する。

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f) \quad (2.1)$$

ここで、 $X(f)$  : 反射影響を除去した水中騒音のフーリエスペクトル、 $H(f)$  : キャビテーション水槽の伝達関数、 $Y(f)$  : 計測した水中騒音のフーリエスペクトルである。したがって、反射影響を取り除いた水中騒音を得るためには、計測した水中騒音のフーリエスペクトル  $Y(f)$  を伝達関数  $H(f)$  で割る必要がある。この関係は次式で与えられる。

$$X(f) = Y(f)/H(f) \quad (2.2)$$

伝達関数 $H(f)$ は前もって計測を行っており、既知であるので、上式を計測した水中騒音のフーリエスペクトル  $Y(f)$  に適用することで反射影響を補正した水中騒音のフーリエスペクトル  $X(f)$  が得られる。このフーリエスペクトルをパワーに換算すると狭帯域での水中騒音レベルが算出できる。同様に 1/3 オクターブバンド解析を行うことで、1/3 オクターブバンド幅での水中騒音レベルが算出できる。

#### 2.2 水槽試験における検証

伝達関数計測及び水中騒音計測試験は、当所大型キャビテーション水槽第1計測胴において実施した。供試模型プロペラは、初代青雲丸 HSP (φ250mm) を使用した。図-1 に水槽試験風景の写真を示す。



図-1 伝達関数計測時及び模型プロペラの写真

水中騒音計測を実施した試験条件は、プロペラ回転数  $n_p = 22.0$  [rps]、スラスト係数  $K_T = 0.201$ 、キャビテーション数  $\sigma_n = 2.99$  である。この条件は、実船のプロペラ回転数  $n_p = 163$  [rps] に相当する。計測胴と変動圧板に取り付けた2本のマイクロホンを用いて水中騒音を計測した。図-2 に水中騒音計測結果について伝達関数補正後の結果を示す。図-2 より伝達関数の補正によって、変動圧板マイクロホンと計測胴マイクロホンの音圧レベル(SPL)の差が低減していることが確認できる。

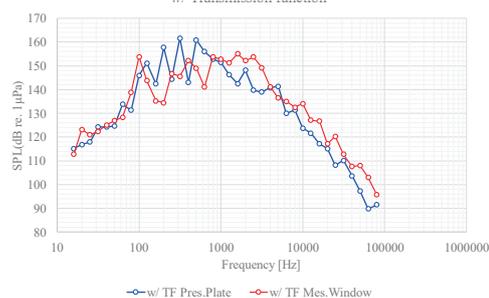


図-2 伝達関数補正後の水中騒音計測結果

次に、水槽試験における水中騒音計測結果について ITTC の実船換算法<sup>1)</sup>を用いて実船推定を行った。水中騒音の実船推定結果を図-3 に示す。伝達関数補正によって、実船計測結果と良好に一致することが確認できる。

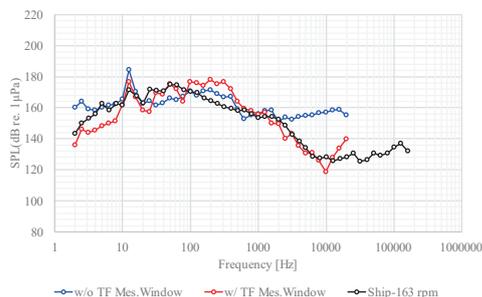


図-3 実船の水中騒音レベル推定結果

### 3. 多視点型ラインセンシング法によるキャビティ形状計測

著者らは、水中物体の三次元形状を高精度に計測可能な多視点型ラインセンシング法を開発している。本計測法は、組合せライン CCD 法<sup>4)</sup>に多視点ステレオの概念を導入し、計測精度とロバスト精度を向上させている。そして、初代青雲丸 HSP の模型プロペラを対象に、キャビティ形状計測を実施し、その有効性について検証した。

#### 3.1 多視点型ラインセンシング法

本研究で用いる多視点型ラインセンシング法は、著者らが開発した組合せライン CCD 法<sup>4)</sup>を拡張したものである。カメラモデルとして透視投影モデルを使用する。これによって、キャビテーション水槽の計測窓による屈折影響を考慮することが可能となり、精度の向上が可能である。また、多視点ステレオの原理を導入することで、4 台以上のラインセンサーを使用することができ、計測のロバスト性を向上することが可能である。計測手順は、まず、計測対象物にレーザーを照射して発生する散乱光を複数台のラインセンサーで撮影する。それぞれの撮影画像のピーク位置から透視投影モデルにもとづき、計測点の三次元位置を算出する。ラインセンサーは受像素子が横一列に並んでおり、一般的なエリアセンサに比べ、高解像度でありながら、スキャンレートも非常に高いという特徴がある。ラインセンサーとして、ライン CCD カメラやライン CMOS カメラ等を使用することができる。本研究で開発した三次元形状計測装置の外観写真と構成を図-4 に示す。

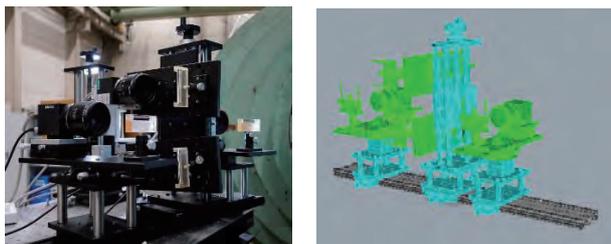


図-4 多視点型ラインセンシング法を用いた三次元形状計測システム

#### 3.2 キャビティ形状計測

開発したキャビティ形状計測システムを用いて、初代青雲丸 HSP の模型プロペラの翼形状とキャビティ形状計測を行った。試験条件は、プロペラ回転数  $n_p = 22.0$  [rps]、スラスト係数  $K_T = 0.201$ 、キャビテーション数  $\sigma_n = 2.99$  である。

図-5 にプロペラ位相角 50[deg]のキャビティ形状計測結果を示す。左図がスチルカメラによるキャビテーション観察結果、右図に多視点型ラインセンシング法を用いたキャビティ形状計測結果を示している。図-5 より、新たに構築した計測システムによって、翼面上のキャビティ形状を計測できていることが確認できる。また、従来困難だった翼端渦キャビテーションの形状も捉えられていることが確認できる。



図-5 キャビティ形状計測結果(プロペラ位相角 50[deg])

#### 4. まとめ

本論文では、伝達関数を用いた水中騒音の補正方法と多視点型ラインセンシング法を用いたキャビティ形状計測法を紹介した。伝達関数では、初代青雲丸 HSP 模型プロペラを対象に伝達関数計測と水中騒音計測を実施し、その結果から実船の水中騒音を推定した結果が実船計測結果と良好に一致することを確認した。また、多視点型ラインセンシング法を用いたキャビティ形状計測では、多視点ステレオの導入及び光学系の改良によって、計測精度とロバスト性を向上させた。その結果、従来計測が困難だった翼端渦キャビテーションの形状も捉えることが可能であることを示した。

#### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP19K04871 と JSPS 科研費 JP22H01708 の助成を受けて行った。ここに謝意を示す。

#### 参考文献

- 1) ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02-01-05, Model-Scale Propeller Cavitation Noise Measurement, pp.1-22 (2017).
- 2) G. Tani, et al., Aspects of the measurement of the acoustic transfer function in a cavitation tunnel, Applied Ocean Research, Vol.87, pp.264-278 (2019).
- 3) 大賀寿郎他, 音響システムとデジタル処理, 電子情報通信学会, pp.158-159 (1995).
- 4) 白石耕一郎他, 組合せライン CCD 法を用いた船用プロペラに生じるキャビテーションの形状計測法, 日本船舶海洋工学会論文集, 33 巻, pp.219-230 (2021).