#### 大型キャビテーション水槽における水中騒音計測 PS-6

流体設計系 \*白石 耕一郎,澤田 祐希,藤沢

#### 1. 序論

心が高まっており、当所大型キャビテーション水槽においてむことでインパルスを生じる逆の特性を持つ信号は、以下の も舶用プロペラに関する水中騒音評価のニーズが高まって いる. このような要望に応じるため、本水槽へ水中音響計測 システムを導入し、計測システムの高度化を図っている.

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用いられている 1),2). 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 3)を用いた大型キャビテーショ ン水槽における伝達関数計測法を構築した. そして、JBC 船 型の平行部を短縮した JBC パラカット (JBC-PC) 船型の模型 船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、その有効性について検証した.

## 2. Swept-Sine 法を用いた伝達関数計測

## 2. 1 概要

建築音響の分野や騒音制御の分野では、インパルス応答を 測定して空間の反響等の評価が行われる. これはインパルス 信号がすべての周波数範囲において均等なエネルギーを持 ち、これを放射して得られた応答が、原理的には音源と受音 点の間の音響的情報のすべてを含むためである. また、イン パルス応答は伝達関数を時間領域に変換したものである. し たがって,任意の空間におけるインパルス応答が得られれ ば、そのインパルス応答をフーリエ変換することによって伝 達関数を得ることができる.

#### 2. 2 Swept-Sine 法

直接的にインパルス信号を用いずにインパルス応答を算 出する方法として Swept-Sine 法がある 3). Swept-Sine 法で は、インパルスを時間的に引き伸ばしたものとして Swept-Sine 信号を用いる. Swept-Sine 信号の波形は(2.1)式で表さ れる. Swept-Sine 法の波形は、周波数領域で設計して、それ を逆フーリエ変換することで得られる.

$$S(k) = \begin{cases} exp\left(\frac{-j4m\pi k^2}{N^2}\right), & 0 \le k \le \frac{N}{2} \\ S^*(N-k), & \frac{N}{2} < k < N \end{cases}$$
 (2.1)

ここで、N/4、N=2nである.nは任意に設定する FFT の次 近年,海洋環境保護の観点から,船舶水中騒音に対する関 数である. なお,この信号から生成される音源信号と畳み込 特性を逆フーリエ変換することで求められる.

$$S^{-1}(k) = \begin{cases} exp\left(\frac{j4m\pi k^2}{N^2}\right), & 0 \le k \le \frac{N}{2} \\ S^{-1*}(N-k), & \frac{N}{2} < k < N \end{cases}$$
 (2.2)

(2.1) 式で表される Swept-Sine 信号を音響プロジェクタで 発振し、ハイドロホンを用いて、その水中音を計測する. そ して、計測した水中音のフーリエ変換に(2.2)をかけ合わせ ることによって、伝達関数を得ることができる. 図-1 に Swept-Sine 信号の時系列波形の一例を示す. この波形は,一 般的にスウィープ信号と呼ばれる波形の一種である.

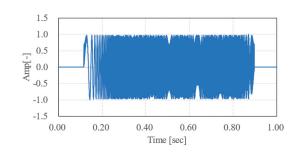


図-1 Swept-Sine 信号の時系列波形

## 2. 3 伝達関数による水中騒音計測結果の補正

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.

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f) \tag{2.3}$$

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.

$$X(f) = Y(f)/H(f) \tag{2.4}$$

伝達関数H(f)は前もって計測を行っているため既知であ 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 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.

#### 3. 水槽試験

# 3. 1 水槽試験概要

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2計測胴において実施した.対象船型は、JBC 船型の平行部を短縮した JBC パラカット (JBC-PC) 船型の木 製模型船 (船長 6.0m) を使用した. 模型プロペラは JBC-PC 船 型用に設計した模型プロペラ(直径 0.25m)を使用した.

### 3. 2 伝達関数計測

伝達関数及び水中騒音は,模型船船尾のプロペラ直上と計 測部右舷側の計測窓に取り付けた2つのハイドロホンを用い て計測を行った. また, 伝達関数計測において, Swept-Sine 信号を発信するための音響プロジェクタは、3Dプリンタで作 成した治具を用いてプロペラシャフトに取り付けた. 図-2 に 伝達関数計測時の写真を示す.

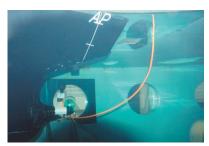


図-2 伝達関数計測時の写真

次に Swept-sine 法によって得られた伝達関数の結果 (実 部) を図-3 に示す. 図-3 より 75,000Hz 付近で振幅が最大に なっている. これは音響プロジェクタの共振周波数が 75,000Hz となっているためである.

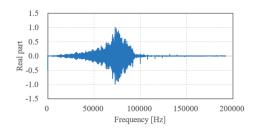


図-3 Swept-sine 法によって得られた伝達関数

#### 3. 3 水中騒音計測

キャビテーション試験において,水中騒音計測を実施し

た. 試験条件は、プロペラ回転数  $n_p = 25.0$  [rps]、スラスト係 数  $K_T = 0.171$ , キャビテーション数  $\sigma_n = 4.506$  である. 図-4に伝達関数の補正が無い水中騒音計測結果、図-5に伝達関 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 数の補正有りの水中騒音計測結果を示す. 図-4 と図-5 を比較 すると伝達関数の補正によって、船体ハイドロホンと計測窓 ハイド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.

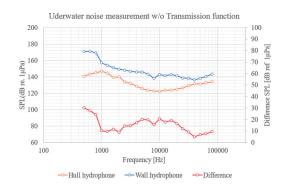


図-4 水中騒音計測結果(伝達関数補正無)

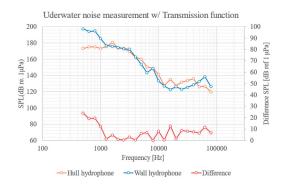


図-5 水中騒音計測結果(伝達関数補正有)

#### 4. まとめ

本研究では、Swept-Sine 法を用いた伝達関数の計測法を構 築し、JBC-PC 模型船を対象に伝達関数計測とキャビテーショ ン試験における水中騒音計測を実施した. その結果、キャビ テーション水槽内の反射及び距離影響を考慮した妥当な伝 達関数が得られることを確認した.

#### 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, 音響システムとディジタル処理, 電子情報通 信学会, pp. 158-159 (1995).