

水中放射雑音予測技術を用いた船舶の静粛性向上

Underwater Noise Prediction and Development of Special Purpose Ships



提供：海洋研究開発機構

石井 佑樹^{*1}
Yuki Ishii

宮脇 一弘^{*2}
Kazuhiro Miyawaki

佐藤 圭^{*3}
Kei Sato

田崎 智^{*4}
Satoshi Tasaki

森本 紘之^{*5}
Hiroyuki Morimoto

池田 幸一郎^{*6}
Koichiro Ikeda

当社グループは最新鋭の特殊船を長年にわたり多数継続して建造している。これらの特殊船は、調査機器の性能を十分発揮し、かつ海洋生物の逃避行動を局所化するために、船自身からの水中放射雑音を低減することが重要である。当社グループは、実験データ及び大規模解析技術を活用した広周波数領域の水中放射雑音予測手法を開発し、特殊船の航行速度に対応した静粛化設計を可能とした。建造後の計測では、本予測手法が良好な精度を有していること、並びに水中放射雑音レベルの低い、静粛性に優れた船舶であることを確認した。

1. はじめに

四方を海に囲まれた我が国では、沿岸・沿岸水域の総合的な海洋調査研究の継続的な実施や、海洋に埋蔵されている鉱物やエネルギー源などの海洋資源の活用が重要な課題となっている。また、地球の海洋環境や気候変動のメカニズムを解明し、地球や生物の起源を探究するための研究による国際的な貢献も重要である。このような背景のもと、当社グループは、官公庁、大学、海洋研究機関、海洋資源開発機関、海洋開発会社向けに、海洋研究船/調査船/探査船/練習船/ケーブル敷設船等の特殊船を多数建造している⁽¹⁾。

水中音響システムを用いた調査機器の性能を十分に発揮し海洋生物の逃避行動を局所化するためには、これらの船舶は船自身からの水中放射雑音を低減することが重要である。海洋生物への影響については、1995年に国際海洋探査協議会(ICES:International Council for the Exploration of the Sea)が水産研究に従事するすべての船舶からの水中放射雑音の要求レベルを提案しており、図1に示す広周波数領域(1Hz-100kHz)において低レベルの水中放射雑音が定められている⁽²⁾。

当社グループは、実験データと大規模解析技術を用いて船舶からの広周波数領域における水中放射雑音を予測する技術を開発し、特殊船の静粛化設計を可能にした。本報では、これらの概要について述べる。

*1 総合研究所振動研究部 主席研究員

*2 三菱造船(株) マリンエンジニアリングセンター下関設計部 課長

*3 総合研究所流体研究部 主席研究員 技術士(船舶・海洋部門)

*4 総合研究所振動研究部 主席チーム統括

*5 総合研究所 振動研究部

*6 総合研究所振動研究部 博士(工学)

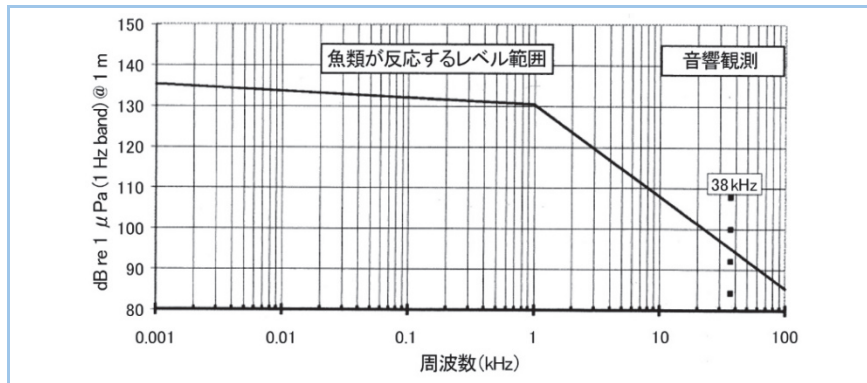


図1 ICES が提案する水産研究に従事する船舶の水中放射雑音要求レベル

2. 水中放射雑音予測技術

水中放射雑音を低減する船舶の設計には、流体雑音と機械雑音の低減を必要とする。ここでは、船舶からの水中放射雑音に大きく寄与するプロペラ雑音及び機械雑音の予測方法の概要と対策の種類について述べる。

2.1 プロペラ雑音⁽³⁾

特殊船のプロペラ雑音予測における最も重要な現象は、図2に示す内、プロペラ翼端渦キャビテーションである。プロペラ翼端渦キャビテーションによる雑音を予測するには、次の3段階の予測が必要と考えられる。

- ① 低圧力プロペラ渦の予測
- ② プロペラ翼端に発生するキャビテーションの予測
- ③ キャビテーションによるノイズの予測

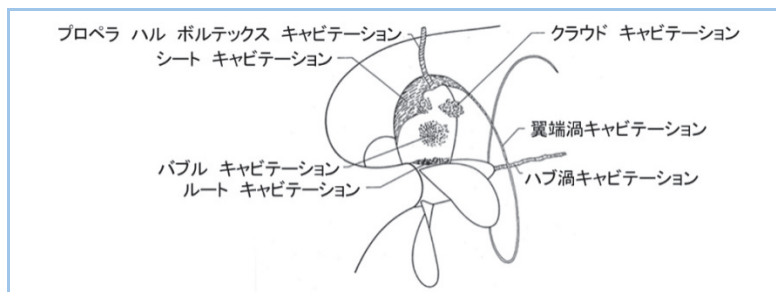


図2 プロペラの周辺で発生するキャビテーション

当社は、翼端渦とキャビテーションに関する理論モデルと実験結果に基づく知見を組み合わせ、プロペラ翼端渦キャビテーションによる水中放射雑音を予測する手法を確立した。図3に示すように、予測値と実船計測値の差は概ね±3dB 以下であり、この予測法が特殊船のプロペラ雑音設計に有効な精度を有することを確認した。

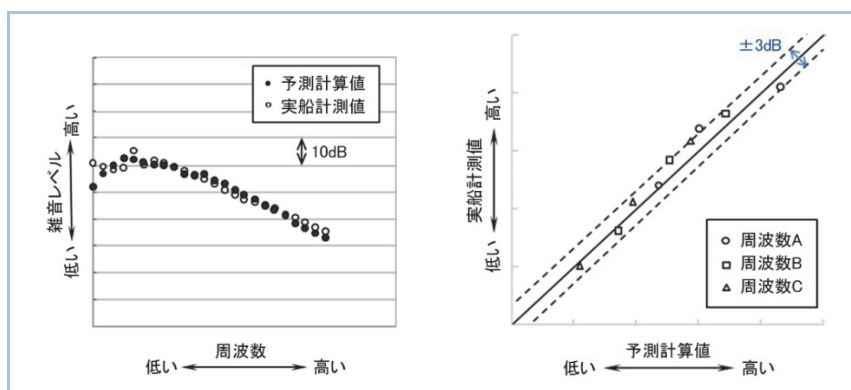


図3 プロペラ雑音の予測計算値と実船計測値の比較

2.2 機械雑音

船舶に搭載された主機関、補機等から発生する音響及び振動エネルギーは、船体内外の空気・水中及び船体構造を伝搬し、船体内外部に拡散する。

空気伝搬音は三次元的に拡散するのに対し、固体伝搬音は梁や板などの構造物を伝搬するため伝搬距離に比べて拡散面積が小さく、またすべての構造物が音響放射に寄与するため放射面積が広がる。さらに船舶のような鋼板構造では、構造要素の内部減衰が小さく固体伝搬音は空気伝搬音に比べて支配的である。

図4に船舶の固体伝搬音による水中放射雑音の発生メカニズムを示す。予測において重要なパラメータは、音源レベル、伝搬経路の特性、音響放射特性である。ここで、音源レベルや船舶構造材料の特性は、理論的に求めるのは困難であるため通常は実機計測データを用いる。このため、船舶の雑音予測では、船体構造の固体伝搬音の推定が重要となる。

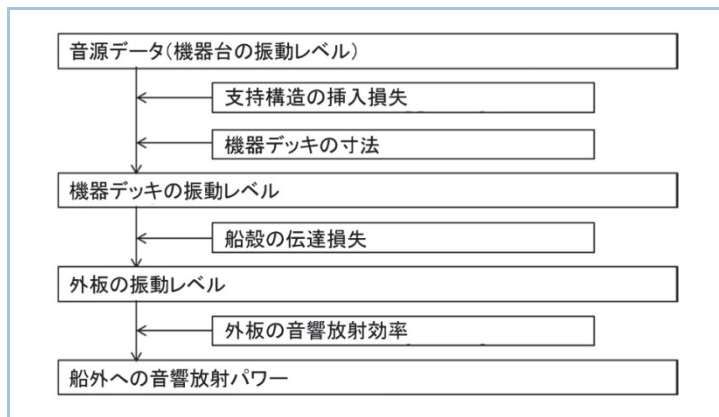


図4 船舶の固体伝搬音による水中放射雑音の発生メカニズム

船舶は、振動や音響エネルギーの伝搬経路が複雑な構造物であり、振動や雑音の発生源が多様で、計算周波数の範囲も非常に広く、各構造要素は複雑な振動特性を呈する。当社では、機械雑音について、固体伝搬音が伝わる船体構造と水中の周波数領域の特性を考慮し、高周波領域に関しては複雑な高次振動特性を持つ薄板構造における固体伝搬音を解析する手法としてSEA(Statistical Energy Analysis:統計的エネルギー解析法)を、低周波数領域に関しては狭帯域で固体伝搬音と水中放射雑音の応答を解析する手法として大規模FEM(Finite Element Method:有限要素法)及びFMBEM(Fast-Multipole Boundary Element Method:高速多重極境界要素法)を適用している。

(1) 高周波数領域(約100Hz以上)

船舶の水中放射雑音を体系的に解析するため、当社ではSEAハウスコードを開発し、実際の船舶に関して船内騒音や水中放射雑音の静粛化設計に適用している。本項では、機械雑音に対する高周波領域の水中放射雑音予測への本予測システム適用の概要について述べる。

SEAの複数サブシステムのパワーフロー方程式は次式で表される。

$$\Omega YE = W_0, \quad (1)$$

$$Y = DY_c D^t N^{-1} + Y_d, \quad D = [d_{ij}], \quad (2, 3)$$

$$Y_c = [\text{diag} \cdot \eta_{cij}], \quad \eta_{cij} = \eta_{ij} N_i, \quad (4, 5)$$

$$Y_d = [\text{diag} \cdot \eta_i], \quad N = [\text{diag} \cdot N_i], \quad (6, 7)$$

$$W_0^t = [W_{01}, W_{02}, \dots, W_{0n}], \quad E^t = [E_1, E_2, \dots, E_n], \quad (8, 9)$$

ここで、 N_i , η_i , η_{ij} , W_{oi} 及び E_i は振動モード数, 内部損失率, 結合損失率, 入力パワー及びサブシステムのエネルギーであり, 添え字 i 及び j はサブシステムを示す。 d_{ij} は, サブシステム i から j へのパワーフローの場合は1, サブシステム j から i へのパワーフローの場合は-1となり, サブシステム i と j にパワーの伝達がない場合には0となる。すべてのサブシステムについて式(1)を解くことによって, 各サブシステムのエネルギーを求めることができる。式(1)を解くためには, 構造系の SEA パラメータを与える必要があり, 図5に SEA による固体伝搬音解析フローを示す。各パラメータは理論と実機計測データによって与えられる⁽⁴⁾。

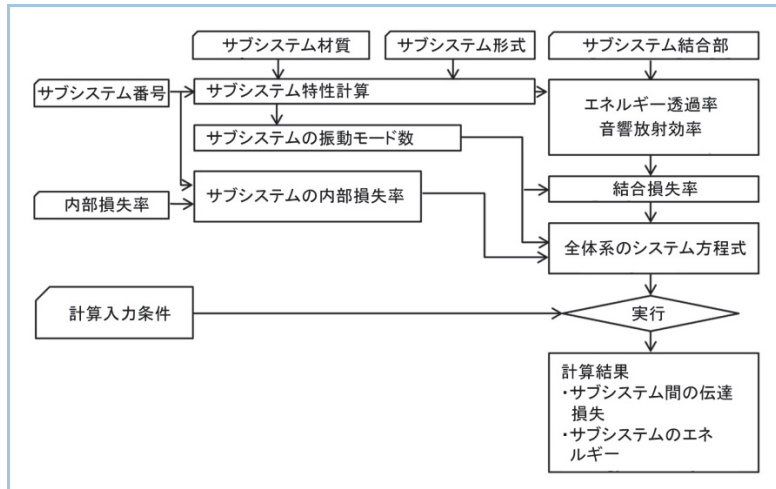


図5 SEAの解析フローチャート

船体外板から放射される水中音は, 船体外板をサブシステムに分割し, 個々のサブシステム i からの音圧 p_i を加算することにより求められる。したがって, 音源から $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ だけ離れた受音点の音圧 p は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 p^2 &= \sum_i p_i^2 \\
 &= (\rho c)^2 \frac{1}{2\pi} \sum_i \sigma_i \int \frac{ds_i}{x^2 + y^2 + z^2} \langle v_i^2 \rangle,
 \end{aligned} \tag{10}$$

ここで, ρ , σ_i , s_i 及び $\langle v_i^2 \rangle$ は, 水中における音響インピーダンス, ならびに個々のサブシステム i の音響放射効率, 面積及び空間二乗平均速度である。当社のシステムでは, SEA により船底板の各サブシステムの振動レベル $\langle v_i^2 \rangle$ を求め, ある点での音圧レベルを式(10)で推定している。

(2) 低周波数領域(約 100Hz 以下)

低周波数領域では搭載機器の起振周波数における各振動モードの応答振幅と位相を狭帯域で予測・評価することが重要であり, 大規模 FEM(図6: 仮想流体質量要素を含む数十万要素のモデル規模)を用いて船体構造の固体伝搬音を予測している。船全体の大規模計算は当社大規模計算機で実現しており, 合わせて計算時間短縮のために以下の手法を用いている。

- ・波長と相互作用を考慮した流体と構造のメッシュサイズチューニング
- ・流体の影響を考慮した振動モード合成法
- ・部分構造合成法

水中放射雑音については, 従来の BEM(Boundary Element Method: 境界要素法)では船舶サイズの大規模計算が困難であったため, 高速多重極法と組み合わせた FMBEM を適用することで数百万要素という大規模解析を実現した。図7に示す FMBEM モデルは, 水面反射の影響を考慮した鏡像モデルである。

これらの手法により, 低周波数領域における固体伝搬音と水中放射雑音の詳細な予測が可能となった。

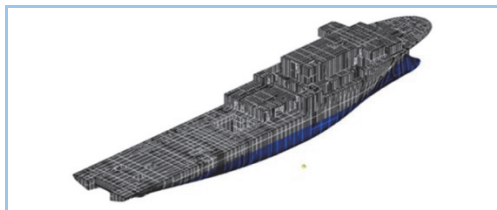


図6 特殊船の大規模 FEM モデル例



図7 特殊船の FMBEM モデル例

2.3 水中放射雑音対策設計

設計段階では、これらの予測手法を用いて、プロペラのキャビテーションを抑制するプロペラ翼形状、搭載機器の起振周波数を考慮した支持架台や防振支持、固体伝搬音を考慮した船体構造の制振材施工範囲などの水中放射雑音低減のための設計を行った。

3. 水中放射雑音計測

船舶からの水中放射雑音を確認するため、計測船を用いて遠方場の水中音を計測した。図8に ISO17208-1:2016 に準拠して海底からの音響反射を無視できる深海域で実施した計測概略図を示す。計測対象の特殊船は計測船の近くを往復し、特殊船と計測船には DGPS (Differential Global Positioning System) を搭載して二隻の距離を時々刻々と計測した。なお、ハイドロホンは海況によりノイズが発生する可能性があるため、ハイドロホンケーブル等に対しノイズ対策を施した。

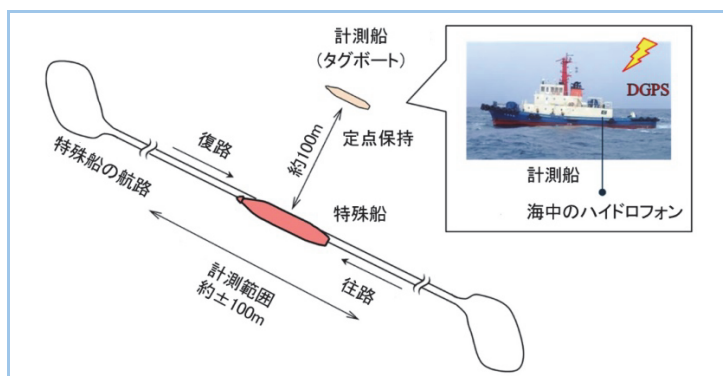


図8 特殊船の水中放射雑音計測概要

4. 結果

図9は、ある特殊船の水中放射雑音スペクトルの予測計算値と実船計測値の比較を示しており、両者のスペクトルパターンは良く一致し、本予測手法が妥当であることを確認した。当社グループは、本予測技術を用いて設計段階における各種対策を行っており、例えばICES 提案レベルを満足する等、それぞれの特殊船に求められる水中放射雑音レベルに応じて静粛性に優れた船舶を開発・建造している。

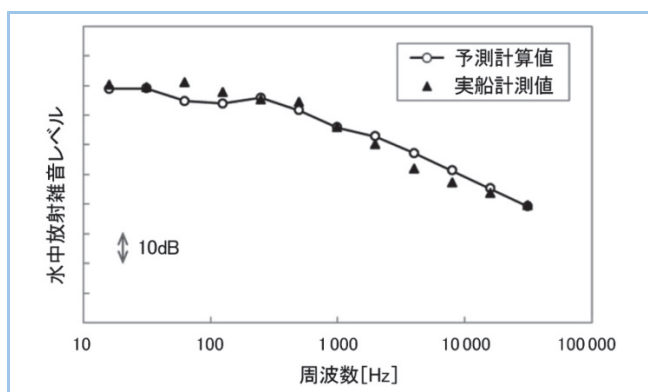


図9 水中放射雑音の予測計算値と実船計測値の比較

5. まとめ

本報では、船舶のプロペラや機械による水中放射雑音の予測手法を紹介し、さらに、予測した水中放射雑音のスペクトルパターンが実船の計測結果と良く一致することを確認して、これら予測技術の妥当性について示した。

当社グループは、本予測技術を用いて、プロペラのキャビテーションを抑制するプロペラ翼形状、搭載機器の起振周波数を考慮した支持架台や防振支持、固体伝搬音を考慮した船体構造の制振材施工範囲などの特殊船の水中放射雑音低減のための設計を行っており、今後も船舶の静粛性向上の確保を実現していく。

参考文献

- (1) 首藤雄太ほか, 特殊船技術開発への取組み -当社の特殊船建造実績及び海底広域研究船“かいめい”の建造-, 三菱重工技報, Vol. 53 No. 4, (2016) p.30~35
- (2) Mitson, R.B. Underwater noise of research vessels review and recommendations, Cooperative research report, No.209, International Council for the Exploration of the Sea, (1995)
- (3) 山田卓慶ほか, プロペラ翼端渦キャビテーションの水中放射雑音予測, 三菱重工技報, Vol. 53 No. 2, (2016) p.54~58
- (4) 本田巖ほか, 固体音伝搬解析法の船舶騒音予測への適用, 三菱重工技報, Vol. 29 No. 5, (1992) p.436~441