船舶水中騒音ガイドラインとIMO等の動向

開発本部　技術研究所

1. はじめに

本年1月に本会では，サービスや研究開発に関する海事産業等の方々の様々のニーズを聴取するとともに，共同研究等の新しいコラボレーション創生の機会を作ることを目的としたClassNK R&D Forum（以下，Forumとする）を開催した。Forumの講演テーマとして，あらたな環境問題として世界的に関心の高まっている船舶水中騒音を取り上げた。本稿はForumでの「IMOにおける船舶水中騒音低減に関する議論の動向」及び「船舶水中騒音ガイドラインへの対応について」の講演を取りまとめたものである。

本稿ではIMO水中騒音ガイドライン制定の経緯，水中騒音の特性，各国における船舶水中騒音低減に向けた取組の動向，本会及び他船級協会が発行したガイドラインの概要，船舶水中騒音低減のための技術課題及び今後の本会の取組等について概説する。

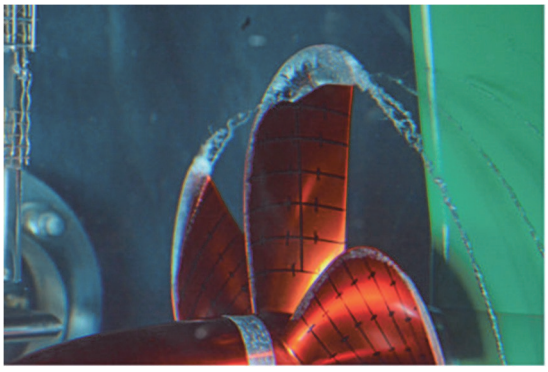
2. IMO水中騒音ガイドライン制定の経緯

2000年代初頭において，水中騒音の海洋生物への影響や石油ガス産業が海底油田開発等で使用する海中の音響機器への影響に対して関心が高まり，IMOにおいても商船から放射される水中騒音レベルの低減に関する議論が行われた。2008年開催のMEPC 58において米国から，プロペラキャビテーション，機関振動に起因する船舶由来の水中騒音に対して，設計段階での騒音対策の考慮，運航方法の改善を含むガイドライン策定の提案（MEPC 58/19）がなされたが，水中騒音計測手法及び大型商船の騒音対策に様々な課題があることから非義務的なものとなり，2014年開催のMEPC 66にて，最初の水中騒音ガイドライン（MEPC.1/Circ.833）[1]が承認された。

3. 水中騒音の特性

水中騒音は，船舶に搭載される主機及び補機等に起因する振動が船体構造を伝播し船体外板から放射される構造騒音，船体と流体の摩擦等に起因する流体騒音及びプロペラキャビテーション（**写真1**）[2]に起因するプロペラ騒音に大別される。プロペラ翼が流れの遅い船体近傍を通過する際に翼面の圧力が低下し，局所的に膨大な量のキャビテーション気泡が成長・収縮のリバウンドを経て崩壊のプロセスを経る。その際に広帯域の騒音が発生する。プロペラ翼が周期的に通過することによるキャビテーションの体積変動によって引き起こされる翼通過周波数（翼数×回転数）の高調波成分のピークを生じさせる。

写真1　舶用プロペラキャビテーション　（水槽試験）



特に船尾流れの不均一度が高く，高効率のプロペラを求められる大型肥大船の場合，プロペラキャビテーションに起因し水中に放射される船舶水中騒音が支配的である。さらに，水中騒音そのものが性能となる調査船や艦艇等では，主機に対する防振支持や電気推進等の構造騒音を低減する対策を講じることができるが，日本の船舶建造の大宗を占める大型肥大船の場合，起振力の大きな大型ディーゼル主機等が船体に直付けされており，かつ防振支持等の対策を講じることが困難であり，低速航行等によりキャビテーション騒音が低減した場合に主機等に起因する騒音が顕在化することは留意すべきである。

水中においては1,000Hz以上の高い周波数の音は減衰が大きく，遠くまで届かない。ただし，船舶が発する音は，周波数が低い音が多く水中での減衰効果はあまり期待できない。水中音の音速は水温に影響されるため，海中の水温分布により，一般に水中音は“海底方向”に曲がっていく。一般的な伝播距離は数km～数十kmと言われる。しかしながら，深さとともに水温分布及び音速が変わってゆくとき，季節によっては音速の極小部をもつサウンドチャネルと呼ばれる海洋中の領域が生じるため，音波は，屈折による鉛直方向への発散がなくなり遠距離では円筒発散に近くなる．その結果，遠方まで影響を及ぼすことがある。

船舶からの水中騒音による生物への影響として次のことが挙げられている。生物の行動変化，聴覚感度の悪化，極端な場合は聴覚器官の損傷及び生息分布域や回遊経路への影響等である。なお，影響を受けやすい周波数は生物種によって異なる。（**図1**）[3)]

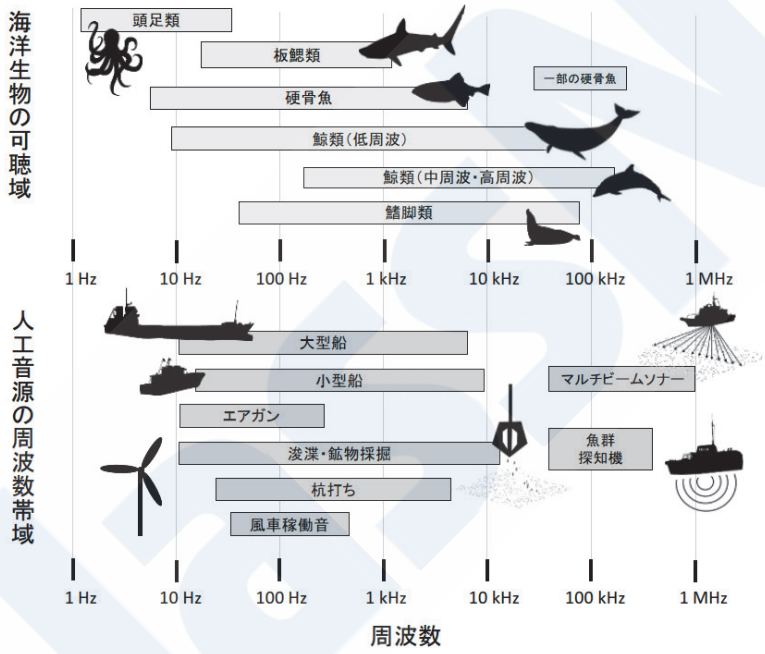


図1　水中騒音と海洋生物の可聴域

4. 船級協会の水中騒音ガイドライン

2014年に承認されたIMOガイドライン（以下，2014ガイドライン）に対応した船舶水中騒音に関するガイドラインを発行している船級協会は8機関あり，本会では，2023年10月に「船舶水中騒音ガイドライン（第1.0版）」を発行した。

本ガイドラインは設計要件，水中騒音計測および検査等の6章及び騒音低減対策例等をまとめた添付資料で構成されている。他船級協会同様，海底での音響反射の影響が極限されるISO 17208-1,-2に準拠した深海域での音響計測評価について規定している。本会の場合，水深150mまたは船長の1.5倍の大きい方以上という規定のほか（**図2**），ハイドロホンと計測対象船の航路位置（**図3**）を規定しており，本会独自の基準騒音レベル（**表1**及び**図4**）に基づきノーテーション（SUN-Controlled, SUN-Advanced）を付与することとしている。

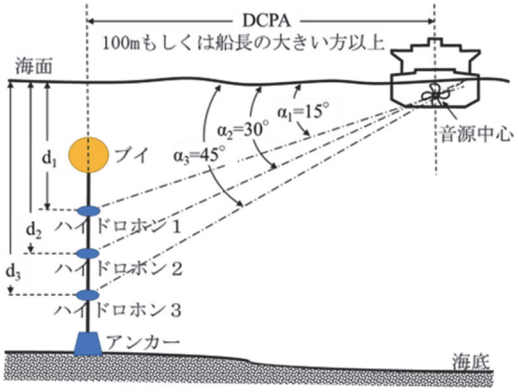


図2　着底式ハイドロホン設置例

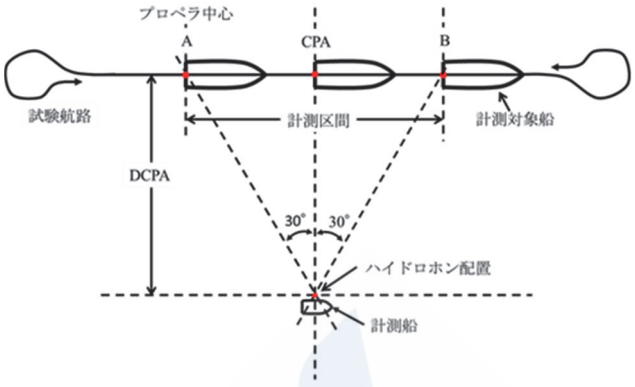


図3　水中騒音測定構成（試験航路等）

表1　基準騒音レベル（1/3オクターブバンド）

周波数	限界音圧レベル(1/3 オクターブバンド) dB re 1μPa @1m			
f(Hz)	**SUN-Controlled**		**SUN-Advanced**	
20	175	SPL=4.365*LN(f)+161.9	160	SPL=4.365*LN(f)+146.9
50	179		164	
100	173	SPL=-8.288*LN(f)+211.3	158	SPL=-8.288*LN(f)+196.3
1,000	154		139	
10,000	135		120	

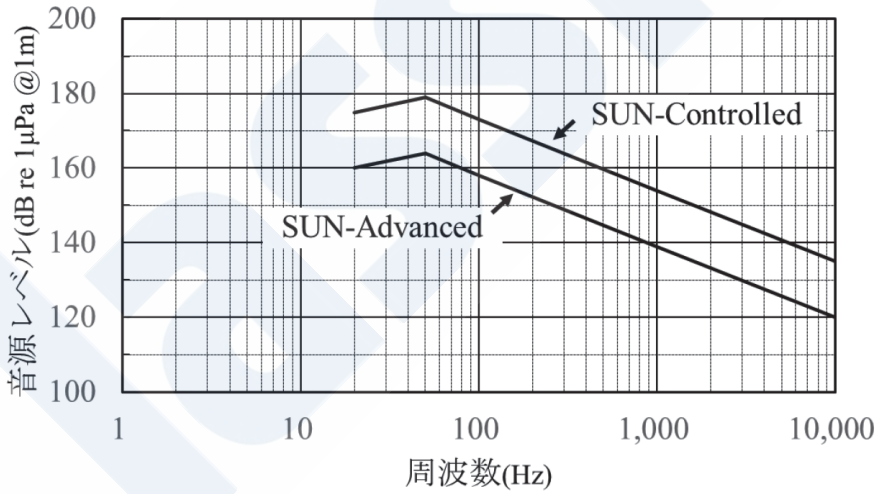


図4　基準騒音レベル（1/3オクターブバンド）

5. 船舶水中騒音の研究動向等とIMOガイドライン見直しの議論

5.1　各国における船舶水中騒音研究動向

EUにおいては，船舶水中騒音に関するSATURNとPIAQUOの2つの研究プロジェクトが実施されてきた。

SATURNは，船舶水中騒音による環境汚染は，海洋生物のコミュニケーション，採餌，捕食者からの回避行動を混乱させる可能性があるという観点に立っており，生物音響学の専門家を中心とした学際的なチーム構成となっている。

・水中騒音の発生源と，それが様々な海洋生物にどのように影響するかの理解を深める。
・水中騒音が海洋生態系に及ぼす影響（短期的および長期的な影響を含む）を特定する。
・これらの影響を軽減し，水中騒音による環境汚染を減らすためのソリューションを開発する。

以上の3項目を当該プロジェクトの目的としている。研究目標として，船舶水中騒音が生物に与える影響を測

定・評価するための標準と試験法の開発，商船等の船種の水中騒音の定量化等が挙げられている。プロジェクトの成果として，今後の船舶水中騒音管理に実効あるものとして重要である浅水域での騒音計測に関する報告書[4]や貨物船の速度をわずかに低下させるだけで，海洋哺乳類への騒音の影響が大幅に減少することに関する論文[5]等が公表されている。

PIAQUOは2019年から開始されたプロジェクトで，水中騒音汚染を最小限に抑えることにより，海上交通が海洋生物に及ぼす音響的影響を軽減させることを目的としている。このプロジェクトは，水中騒音低減を実現するソリューションを考案するメーカー及び研究所等が中心となっている。水中音響分野に強みのある，艦艇[6]及び艦艇搭載センサー等を開発・製造している企業等も参画している。

PIAQUOプロジェクトの主な目標は以下のとおりである。

・水中騒音の排出を減らすための改良されたプロペラの開発。
・周辺環境で発生する水中騒音レベルを自己推定し，キャビテーションをリアルタイムで自己検出する船舶搭載システムの開発。
・海上の音響ブイによって測定された実際の音害データを含むデータベースを使用した，水中騒音の排出を削減するための船主向けの意識向上プログラムの創出。
・PAM（パッシブ音響リアルタイムマッピング）とAUV（水中無人機）を用いた，周囲の生態系と海上交通の調整機構の創出。
・船舶からの水中騒音問題に対処するための，公的機関および民間ステークホルダー向けの意思決定ツールの社会実装。

それらの目標が達成された場合の，定置ブイ，船舶搭載システム及び無人機を統合した水中騒音管理の将来像が示されている。[7]

プロジェクトの成果として，ジェノバ港に設置された定置音響ブイによって，近傍を通過する個々の船舶からの水中騒音の評価が既に行われている。また，水中騒音船指数（NSI）という概念も当該プロジェクトで開発され，船主と管理者が要求に応じて水中放射騒音の状況と対策の進行状況等を追跡，認識するために利用することが考えられている。[8]

カナダにおいては，バンクーバー港に入港する船舶の水中騒音を継続的に計測，評価をしている。静粛な船舶に対する入港料減免等の優遇措置を与えるEcoAction Program[9]によって船舶水中騒音放射削減のインセンティブとしている。船級から水中騒音低減対策に関するノーテーションが付与された場合，入港料減免率としては最大となる75%が適用される。また，日本国産メーカーのプロペラ等の装着も減免の対象となる。

日本国内においても，日本財団の助成事業「船舶関係諸基準に関する調査研究」の一環として日本船舶技術研究協会による「水中騒音対策検討プロジェクト」が2015年から実施され，その中で様々の実証的な研究がなされている。その一例として，定期貨客船が就航する小笠原諸島の父島海域でザトウクジラを対象とした，船舶が通過した際における鯨類の反応行動調査（目視観測及び音響観測）が実施された。対象船の騒音暴露による鯨類への聴覚器官の損傷は考え難いこと及び鯨類の行動を分析した結果その生態に悪影響を与えているという明確な結論は得られなかったという所見が得られている。また，大型商船の航路となっている深度約300mの伊豆大島近海にハイドロホンを設置し，約500隻の通過船舶からの水中放射雑音レベルを取得して,通過船舶のAIS情報及び計測日の深度方向の海水温度分布情報を基にそのソースレベルを求めた。そのデータは本会の船舶水中騒音ガイドラインの基準騒音レベル策定の基本データとなっている。

5.2　水中騒音ガイドラインの見直しの議論

一度策定された2014ガイドラインだが，十分な数の大型商船への採用・実施がされていないこと加えて技術革新や科学的知見の蓄積により，ガイドラインの見直しが必要との認識のもと，2021年開催のMEPC 76においてカナダ，豪州及び米国の提案により新規作業計画が審議された（文書MEPC 75/14）。この他，欧州諸国を含む多くの加盟国・環境団体から14本の文書が提出され，SDC小委員会でガイドライン見直しとその後の行動計画の審議を開始することが決定された。同時に，IMO主導による世界規模の水中騒音プロジェクト（GloNoise Partnershipプロクジェクト）の実施についても検討が開始された。

2年間の議論を経て，2023年開催のMEPC 80において，あらゆる商用船舶（貨物船／旅客船，新造船／既存船）を対象とした，改正ガイドラインが承認された（MEPC.1/Circ.906：以下，2023ガイドライン）[10]。

さらに改正ガイドラインに対するフィードバックとベストプラクティスに関する情報，及び騒音低減を実現するためのメカニズムを確立するための情報の収集を主な目的とする「経験蓄積期間（EBP）」が2026年末ま

でに設定された。

5.3　2023ガイドラインの概要

2023ガイドラインの大きな変更点は，船舶から放射される水中騒音低減を実効あるものとするための騒音管理計画の作成が規定されたことである。それに記載される主要な項目は以下のとおり。

・ベースラインとなる騒音レベルの設定（予測または実測によるものとする）
・目標とする騒音削減レベルの設定（段階的な強化の可能性あり）
・船舶にどのような技術面・運航面の措置を実施したか騒音削減アプローチの記載
・騒音削減措置の効果の定期的なモニタリングと評価
・水中騒音管理計画の主要関係者の役割

2014ガイドラインでは，水中騒音低減にコミットするステークホルダーは，船舶設計者，建造者及び運航者のみであったが，2023ガイドラインでは以下のようにステークホルダーの拡大とその果たすべき役割が規定された。

・船主：管理計画の策定・実施
・造船所：騒音要件を満たす設計・建造
・運航者：目標値や地域要件に適合した運航
・旗国海事当局：インセンティブ付与といった支援的取組
・船級協会：水中騒音予測手法，実海面での水中騒音計測試験，認証等の支援

これらの規定を実行するためのワークフローチャートがIMOによってまとめられており，それを抜粋したものを**図5**に示す。

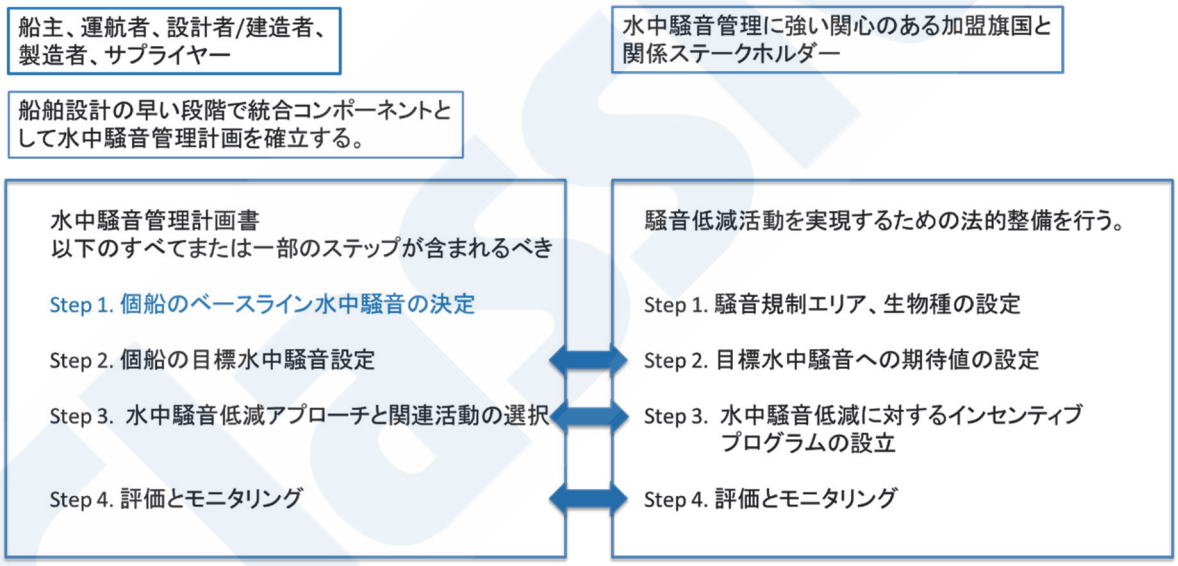


図5　2023ガイドライン　ワークフローチャート（抜粋）

6.　2023ガイドラインへの本会の対応等について

2023ガイドラインでは「船級協会は合理的かつ実行可能な予測，試験，適切な水中騒音ノーテーション，認証などを通じて船主／建造所を支援する」と役割が規定されており，**図5**左側の水中騒音管理計画の各Stepに船級協会が関与することが期待されている。Step 1. 個船のベースライン水中騒音決定については「標準的な装置／機関を使用した通常の運転条件下でのベースライン水中騒音を予測する。実際に計測されることが望ましい」と規定されている。2014ガイドラインでは海面反射影響等が少ない深海域における計測法ISO 17208-1,-2に準拠することとなっているが，大型商船での計測はその高額な計測費用のため経済的なインセンティブがなく，計測例は限定的である。今後は合理的かつ経済的に実行可能な浅海域での水中騒音計測法ISO17208-3に準拠するものと考えられる。ISO17208-3規格は2025年中に正式に承認される予定であるが，海面反射影響の除去，試験海面のキャリブレーション等，計測精度に関する課題がある。なお，浅海域での水中騒音計測に係る技術的課題については，本号の「浅海域における船舶騒音計測について」の記事で解説しているので参照されたい。

2023ガイドライン付則には，船舶設計の最適化のための計算モデルの種類と水中放射雑音低減のための技術として以下のものが例示されている。

1．流体騒音：CFD等を用いた船体周囲流場及びプロペラ性能の解析技術によって，キャビテーション等によって発生する水中騒音を予測。
2．構造騒音：FEM，BEM，SEA等の解析技術を用いた，主機等に起因する水中騒音予測。
3．水中騒音伝播：音線理論，ノーマルモード法等の水中騒音の長距離伝搬予測手法によって，船舶の水中騒音が対象となる生物等に与える影響を予測。

これらの技術は対潜水艦戦に代表される軍事と密接に結びついた領域でもあり，欧米等の先進的な軍需技術をベースとした一般商船にとって過度な規制が導入されないように留意する必要があるものと考えている。なお，本会は，1.の流体雑音の簡易推定法について調査を実施し，その成果は本号「海洋環境保全に向けた船舶水中騒音予測ツールの開発と活用」の記事で解説しているので参照されたい。

水中騒音管理計画書のStep2からStep4の各段階に対しても本会として今後取り組んでいくが，その基本的な考え方は以下の通りである。

Step 2.　個船の目標水中騒音設定：

ベースラインからの削減目標を，削減の絶対値，削減率，船級協会の船舶水中騒音ルール等に合わせて設定することと規定されており，本会として情報収集と情報発信を実施していく。

Step 3.　水中騒音低減アプローチと関連活動の選択：

設計，運用技術，またはそれらを組み合わせたアプローチの組み合わせを特定し，選択することと規定されており，水中騒音低減のための船体付加物の取り付けや最適運行手法等に対するノーテーション付与について検討していきたい。

Step 4.　評価とモニタリング：

水中騒音低減アプローチの有効性を定期的に評価し，必要に応じて対応することと規定されており，船上に取り付けられる水中騒音モニタリングシステムの認証や船体クリーニング等の規則化等について検討していきたい。

船舶水中騒音規制について現時点ではその着地点について不透明感があるものの，本会は船級協会として関連ステークホルダーとの対話を深めつつ，合理的かつ実現可能な手法やツール等の整備を行い，船舶水中騒音にかかる懸念の解消に努めていく。

参考文献

1) IMO，GUIDELINES FOR THE REDUCTION OF UNDERWATER NOISE FROM COMMERCIAL SHIPPING TO ADDRESS ADVERSE IMPACTS ON MARINE LIFE
2) 三井昭島研究所HP：https://akishima-labo.co.jp/modeltest/propellerperformancetest/
3) 赤松友成：海洋音響学会2023年度第1回シンポジウム「水中音の計測と評価」，水中の音とその影響～ガイダンス概要
4) SATURN Technical Report, 2023：Final Report on Vessel URN Measurements
5) Charlotte R. Findlay et., Science Advances, 2023，Small reductions in cargo vessel speed substantially reduce noise impacts to marine mammals
6) Naval Group：https://www.naval-group.com/en/environment
7) PIAQUO GOALS：http://lifepiaquo-urn.eu/en/goals/
8) URN：https://urn.quiet-oceans.com/
9) Port of Vancouver：EcoAction Program https://www.portvancouver.com/media/documents/ecoaction-program-brochure
10) IMO，REVISED GUIDELINES FOR THE REDUCTION OF UNDERWATER RADIATED NOISE FROM SHIPPING TO ADDRESS ADVERSE IMPACTS ON MARINE LIFE