

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

白石 耕一郎*

1. 緒言

商業船舶から発生する水中騒音が海洋生態系に与える影響については、国際海事機関（International Maritime Organization : IMO）において重要な課題として議論されている。2014年4月に開催された第66回海洋環境保護委員会（Marine Environment Protection Committee : MEPC 66）にて「海洋生物への悪影響に対応するための商業船舶からの水中騒音の低減に関する指針」（MEPC.1/Circ.833）が承認された。この指針は強制力を持たないものの、船舶の設計、建造、運用、保守の各段階における水中騒音低減のための方向性が提示されている。その後、2023年1月の第9回船舶設計・建造小委員会（Sub-Committee on Ship Design and Construction : SDC 9）において、指針の修正案が作成され、同年7月のMEPC 80にて、本修正案は「船舶からの水中騒音の低減のための改正指針」（MEPC.1/Circ.906）として承認された。改正指針には、水中騒音管理計画の策定が新たに盛り込まれている。この管理計画は、船舶の水中騒音の基準値設定、削減目標の策定、技術的・運用的な削減手法、および定期的な監視・評価という要素から構成されている。

このような状況を背景として、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所（以下、海上技術安全研究所）では、実船の水中騒音レベルを算出するための水中騒音の簡易推定法の開発を進めている。本推定法は、設計段階の情報で実船の水中騒音レベルを推定できるという特徴がある。先行研究においては、Brownの式とHOPE Lightを組み合わせることによって、実船のプロペラキャビテーションノイズの速度影響を把握できることを明らかにしている¹⁾。また、水中騒音推定精度の向上を目指して、キャビテーション面積の推定精度の改良を行っている²⁾。数値解析を活用してプロペラ回転数、前進係数、キャビテーション数などの主要因子を変動させてキャビテーション面積を推定し、その結果からデータベースを構築している。このデータベースをもとに、実用的なキャビテーション面積推定図表（以下、DBチャート）を作成している。そして、DBチャートを用いてキャビテーション面積を推定し、その値とBrownの式を用いて水中騒音レベルを算出している。

本稿では、海上技術安全研究所が開発している水中騒音の簡易推定法（以下、簡易推定法）を紹介する。そして、大島南沖におけるバルクキャリアの水中騒音の実船計測結果と簡易推定法の推定結果を比較し、本手法の有効性を検証した結果について報告する。

2. 水中騒音の簡易推定法

簡易推定法では、水中騒音の簡易推定式であるBrownの式を活用し、対象船舶の水中騒音レベルを算出する³⁾。この式に必要なパラメータについては、海上技術安全研究所が開発した船型要目最適化プログラム“HOPE Light”を利用して推定を行う⁴⁾。HOPE Lightへの入力データは、対象船のAISデータから抽出したものを使用する。従来法では、Burrillのチャート⁵⁾を用いてキャビテーション面積を推定していたが、このチャートは高速艇を主な対象としているため、一般商船に適用した場合にはキャビテーション面積を過小評価する傾向が見られた。そこで、改良法では、一般商船を対象としたキャビテーション面積推定チャートである「DBチャート」を新たに構築し、これを活用することでキャビテーション面積の推定精度を向上させ、結果として水中騒音推定法の精度も高めている。以下では、具体的な水中騒音レベルの推定方法について説明する。

2.1 Brownの式

簡易推定法では、船舶から放出される水中騒音は、Brownの式を用いて推定する³⁾。Brownの式は、実船の水中騒音計測結果から導出された経験式である。Brownの式を(1)式に示す。Brownの式では、プロペラ回転数、プロペラ直径、翼数、そして、キャビテーション面積に基づいて、約100Hz～10kHzの広帯域における水中騒

* 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所 流体設計系

音レベル (Sound Pressure Level : SPL) の上限を推定することができる。

$$SPL = 10 \log \left(\frac{n^3 D_p^4 Z}{f^2} \right) + 10 \log \left(\frac{A_c}{A_D} \right) + K \quad (1)$$

ここで、 SPL : 水中騒音レベル[dB], f : 周波数[Hz], K : 定数 (プロペラ : $K = 163$, スラスター : $K = 170$), n : プロペラ回転数[rps], D_p : プロペラ直径[m], Z : 翼数[-], A_c/A_D : キャビテーション面積比[-], A_c : キャビテーション面積[m²], A_D : プロペラディスク面積[m²]である。

簡易推定法では、Brownの式に必要な n と D_p はHOPE Lightを用いて推定する。HOPE Lightの概要は2.2節に述べる。翼数は、4翼に設定した。また、キャビテーション面積比の A_c/A_D は、数値計算を用いて新たに作成したDBチャートから推定する。DBチャートの概要は2.3節に述べる。

2.2 HOPE Light

簡易推定法では、対象船の水中騒音レベルの推定に必要なパラメータを、船型要目最適化プログラム“HOPE Light”を用いて求める⁴⁾。本プログラムは、対象船の推進性能だけでなく、操船性、保針性等も求めることができる。また、対象船に適した主機関や補機等の燃料消費量も推定できるという特徴がある。

HOPE Lightの基本的な入力として、対象船の船種と主要目が必要である。これらの入力データは、AISデータと主要目データベースから取得できる。HOPE Lightから得られた計算結果から水中騒音レベルの簡易推定式であるBrownの式に必要なパラメータを抽出する。そして、水中騒音レベル推定のためのExcelシートを作成し、そのシートとHOPE Lightを連携することで、水中騒音レベルの算出を行う。

2.3 DBチャート

簡易推定法では、一般商船を対象としたDBチャートを新たに作成し、本チャートを用いてキャビテーションの発生面積を推定する。DBチャートの作成方法を以下に示す。まず、基準となるプロペラを選定し、そのピッチや展開面積を修正したプロペラ群を生成する。これらのプロペラ群について、数値解析を活用してプロペラ荷重度とキャビテーション数を変化させた際のキャビテーション面積を算出する。その後、数値計算から得られたキャビテーション面積のデータを整理することでDBチャートを構築する。

キャビテーション面積は揚力等価法⁶⁾を用いて求める。揚力等価法の適用の際に必要な伴流中のプロペラ翼表面の圧力分布の計算には九州大学が開発した簡便なパネル法 (SQCM : Source and Quasi-Continuous Method) に基づく非定常プロペラ性能計算法^{7), 8)}を用いる。

DBチャートを作成するための原型プロペラとしてMAUプロペラを用いた⁹⁾。プロペラの翼数は4翼に設定した。プロペラのピッチ比と展開面積比を変更することで20枚のプロペラ群を生成した。そして、伴流分布としてバルクキャリア船型であるJBC¹⁰⁾、コンテナ船型であるKCS¹¹⁾、タンカー船型であるKVLCC2¹¹⁾の3種類を用いた。これら3船型の伴流分布を図1-図3に示す。また、DBチャートの内訳を表1に示す。20枚のプロペラ群を3種類の伴流分布において、プロペラ荷重度とキャビテーション数を変更してキャビテーション面積の最大量を推定し、その結果を整理することでキャビテーション面積推定チャートを作成する。本論文では、対象プロペラは、展開面積比 $a_E=0.6$ 、ピッチ比 $H/D_p=0.6$ の場合、MAU0606と表す。また、伴流分布がJBCで対象プロペラがMAU0606の場合のDBチャートはJBC-MAU0606と表す。

表1 Detail of cavitation occurrence area estimation charts.

Item	Num. of items	Parameter
Propeller Blade	1	MAU
Expand Blade Area Ratio (a_E)	4	0.4, 0.5, 0.6, 0.7
Pitch Ratio (H/D_p)	5	0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0
Wake Distribution	3	JBC, KCS, KVLCC2
Number of Charts	60	-

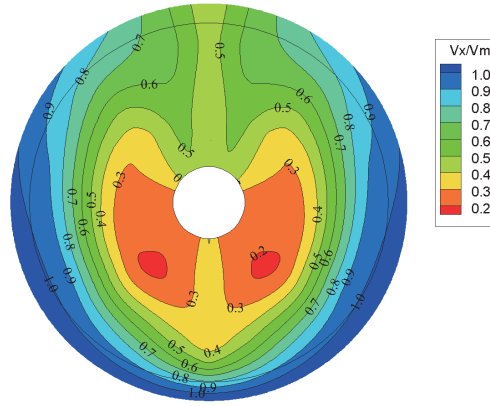


図1 Wake distribution of JBC.

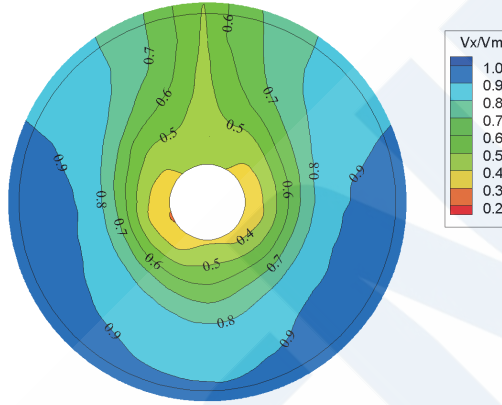


図2 Wake distribution of KCS.

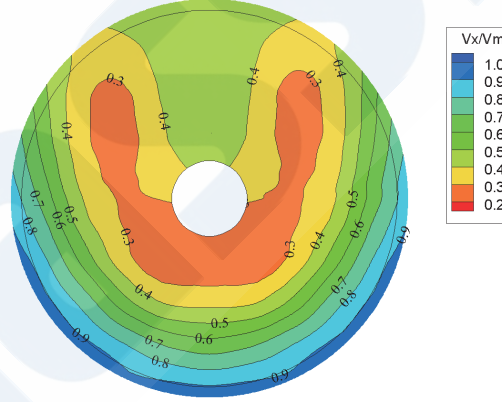


図3 Wake distribution of KVLCC2.

作成したDBチャートの一例として、伴流分布がJBCで、以下に示す6種のプロペラのキャビテーション面積を推定した結果を図4・図9に示す。

- ・展開面積比シリーズ：JBC-MAU0506, JBC-MAU0606, JBC-MAU0706
- ・ピッチ比シリーズ：JBC-MAU0607, JBC-MAU0608, JBC-MAU0609

図4・図9は、横軸にキャビテーション数 $\sigma_{0.7R}$ をとり、縦軸にプロペラ荷重度 τ_c をとって、キャビテーションを発生させない上限を与える。 $\sigma_{0.7R}$ と τ_c はそれぞれ(2)式と(3)式で表される。プロペラ半径 $0.7R$ 位置の周速度 V_R は(4)式で表される。

$$\sigma_{0.7R} = \frac{p - e}{1/2\rho V_R^2} \quad (2)$$

$$\tau_c = \frac{T}{1/2\rho A_P V_R^2} \quad (3)$$

$$V_R = \sqrt{V_A^2 + (0.7D_p\pi n)^2} \quad (4)$$

ここで、 τ_c ：プロペラ荷重度[-]、 T ：スラスト[N]、 ρ ：流体密度[kg/m³]、 A_p ：プロペラ投影面積[m²]、 V_A ：プロペラ流入速度[m/s]、 V_R ：プロペラ半径0.7R位置の周速度[m/s]、 $\sigma_{0.7R}$ ：キャビテーション数（0.7R位置）[-]、 p ：プロペラ半径0.7R位置の水圧[Pa]、 e ：水蒸気圧[Pa]、 D_p ：プロペラ直径[m]である。

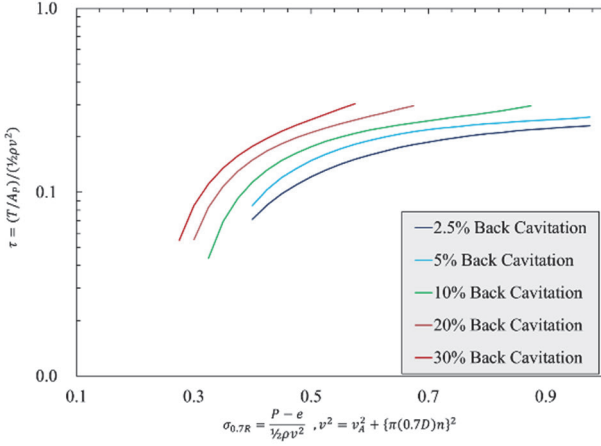


図4 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0506.

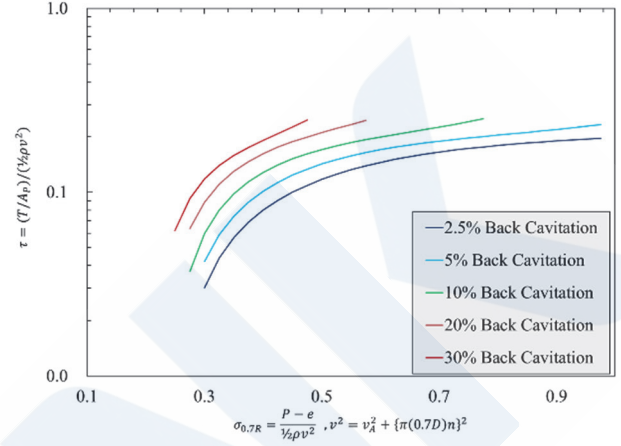


図5 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0606.

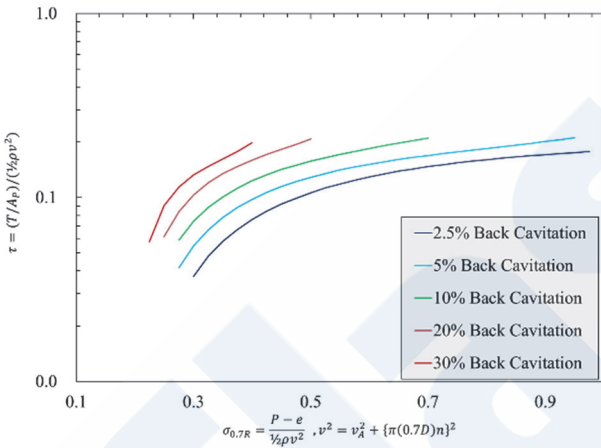


図6 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0706.

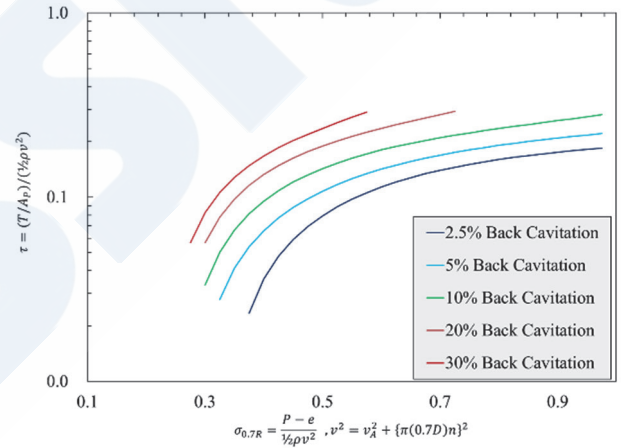


図7 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0607.

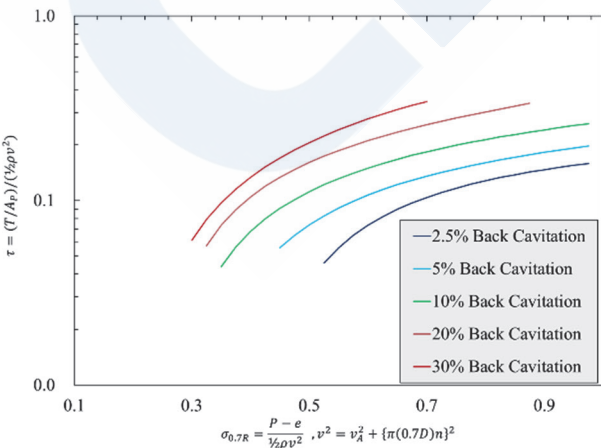


図8 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0608.

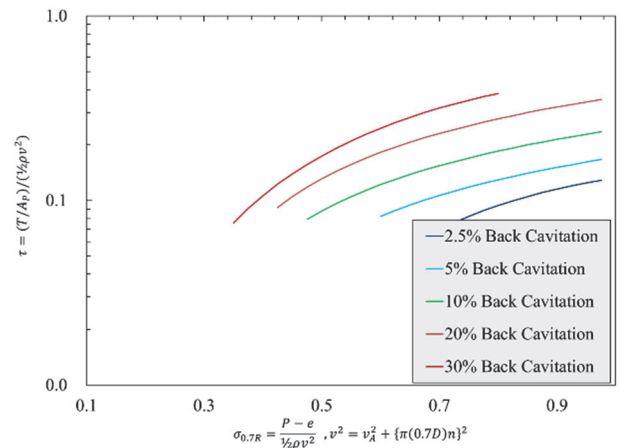


図9 Cavitation occurrence area estimation chart: JBC-MAU0609.

2.4 水中騒音推定法への実装方法

2.3節で述べたDBチャートをHOPE Lightに組み込み、DBチャートからキャビテーション面積を推定する機能を追加した。具体的には、本システムはHOPE Lightから出力される対象船のプロペラのピッチ比と展開面積比、そして、対象船の伴流分布に対応したDBチャートを探索する。そして、探索したチャートに基づいて、HOPE Lightから出力される対象船のプロペラ荷重度とキャビテーション数に応じたキャビテーション面積を算出する。その結果をBrownの式に代入することで、対象船の水中騒音レベルを推定する。

3. 実船計測データによる検証

簡易推定法の精度検証を行うために、実船計測による水中騒音データとの比較検証を実施した。過去の水中騒音対策検討プロジェクトにおいて取得された大島南沖での水中騒音実測値と、簡易推定法による推定結果を比較することで、簡易推定法の精度検証を行った。

3.1 大島南沖の実船計測の概要

水中騒音対策検討プロジェクトでは、大島南沖の海中にハイドロホンを設置し、付近を航行する船舶の水中騒音データを収集している。本データを活用し、簡易推定法と実船計測結果の比較検証を実施した。実船計測データの詳細に関しては、Sakai他の論文¹²⁾に詳述されている。本解析においては、船長100m以上の大型船の実船計測結果を対象とした。また、大型船の測定データから、潮流の影響が限定的で、設計船速から航行船速が著しく乖離していないデータを選別した。具体的には、以下のようなフィルタリング条件を適用した。

- ・AISの対地船速と対水船速の差異が1kt以上のデータは潮流影響が顕著と判断し除外した。
- ・測定時の船速が設計船速の30%未満となっているデータは、異常値として除外した。

選別した実船計測データから、バルクキャリア5隻を抽出し、各船舶について水中騒音レベルの推定を行い、実船計測結果との比較を行った。抽出した対象船の主要目一覧を表2に示す。

表2 Principal particulars and ship speeds of bulk carriers used for verification.

No.	L_{pp} [m]	B [m]	D [m]	V_s [knot]
203	195	32	13	10
208	225	32	15	14
231	178	32	12	14
246	229	43	14	12
282	288	45	18	13

3.2 実船計測結果と推定結果の比較

3.1節に述べた対象船について、簡易推定法の従来法と改良法を用いて、実船の水中騒音レベルの推定を行い、推定結果と実船計測結果の比較を行った。図10-図14にバルクキャリアを対象とした実船計測結果と従来法と改良法による水中騒音推定結果を示す。図中の青マーカーのラインが実船計測結果、紺の破線が従来法の推定結果、赤の実線が改良法の推定結果を示している。図10-図14より、従来法に比べ改良法では水中騒音レベルの推定値が増加し、実船計測結果により近づく結果となっている。

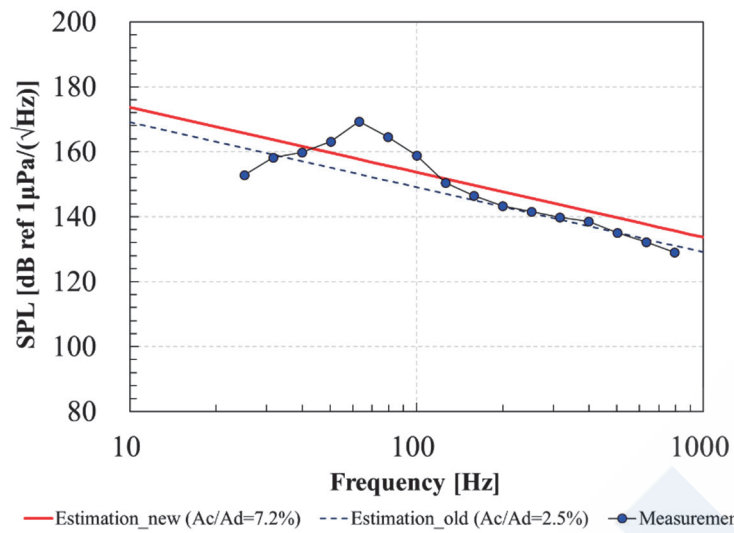


図10 The results of No.203 bulk carrier (L_{pp} =195m, V_S =10kt).

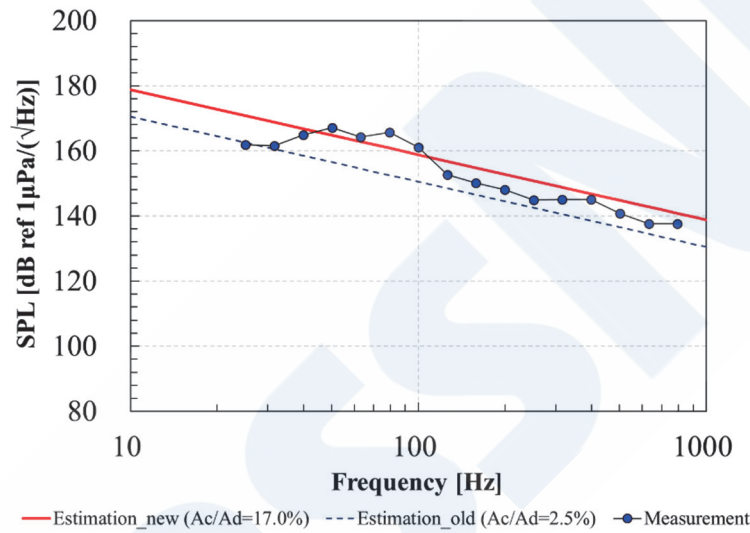


図11 The results of No.208 bulk carrier (L_{pp} =225m, V_S =14kt).

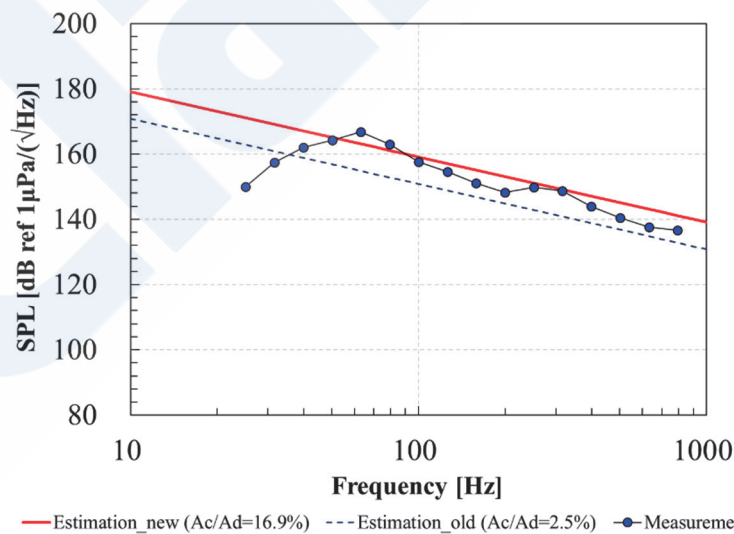
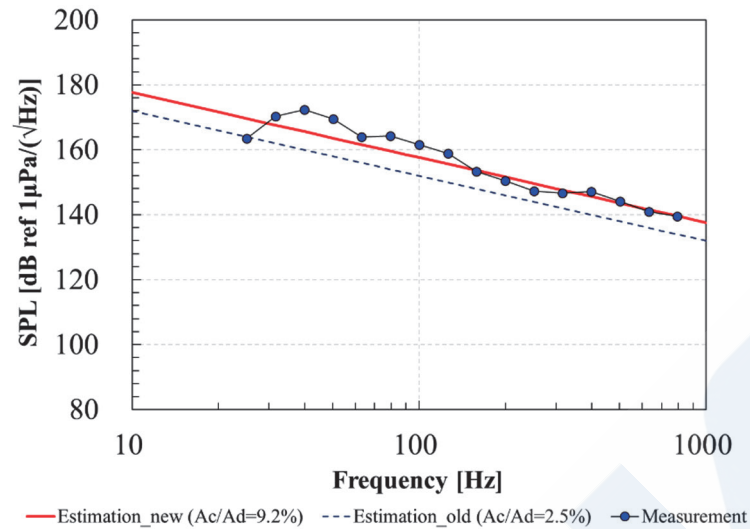
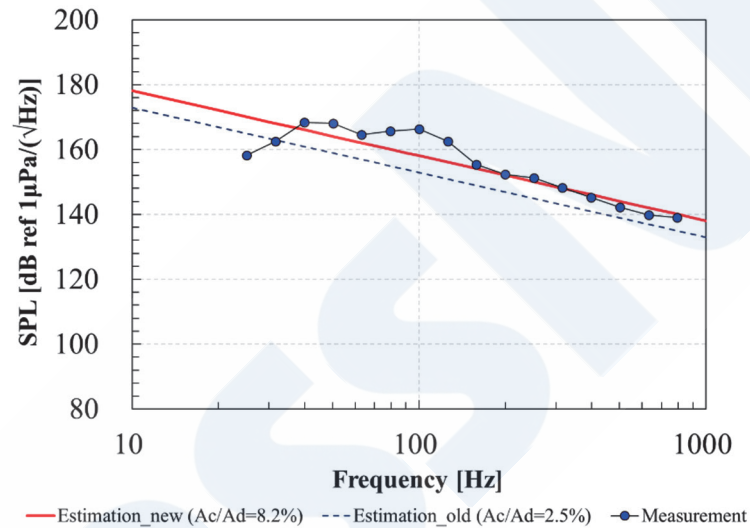


図12 The results of No.231 bulk carrier (L_{pp} =178m, V_S =14kt).


 図13 The results of No.246 bulk carrier ($L_{pp}=229\text{m}$, $V_s=12\text{kt}$).

 図14 The results of No.282 bulk carrier ($L_{pp}=288\text{m}$, $V_s=13\text{kt}$).

3.3 考察

3.2節に示した実船計測値と簡易推定法の推定結果を定量的に評価するため、両者の誤差評価を実施した。1/3オクターブバンドの各中心周波数における計測値と推定値の二乗平均平方根誤差（RMSE：Root Mean Square Error）を算出し、従来法と改良法のRMSE比較により、推定精度の検証を行った。評価対象とした中心周波数は、25, 32, 40, 50, 63, 79, 100, 126, 158, 200, 251, 316, 398, 501, 631, 794[Hz]である。表3および図15にバルクキャリアに関するRMSE評価結果を提示する。従来法のRMSEが7.0[dB]であるのに対し、改良法では5.2[dB]という結果が得られ、約1.8[dB]（約26%）の精度向上が認められた。改良法の精度が向上した主な要因としては、プロペラのピッチ比と展開面積比、さらに伴流分布を考慮したキャビテーション面積推定チャートであるDBチャートを活用することで、プロペラ形状と船体形状を反映したキャビテーション面積をより正確に推定できるようになり、キャビテーション面積の予測精度が高まったことが考えられる。

表3 Results of RMSE assessments of bulk carriers.

No.	L_{pp} [m]	V_s [knot]	$RMSE_{old}$ [dB]	$RMSE_{new}$ [dB]
203	195	10.2	6.6	6.2
208	225	13.5	6.6	4.6
231	178	14.0	6.9	6.9
246	229	11.7	7.6	3.4
282	288	13.1	7.4	4.7
Average			7.0	5.2

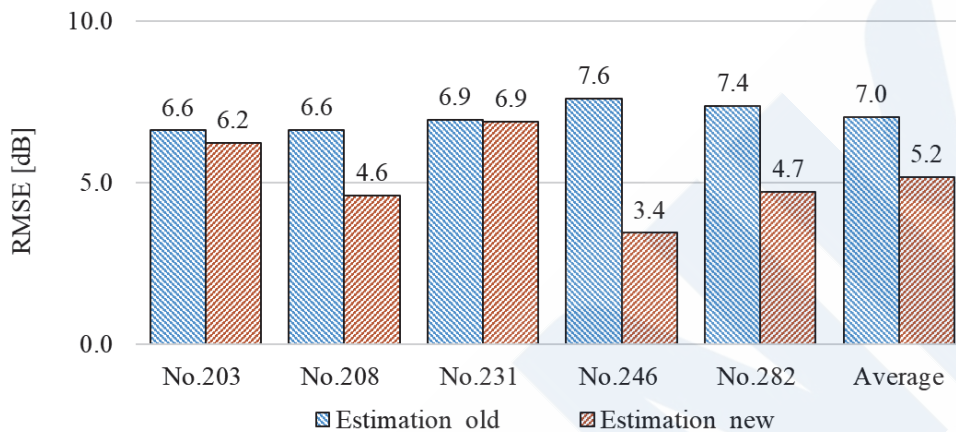


図15 Comparison of RMSEs for bulk carriers.

4. 結言

本稿では、設計段階の情報で実船の水中騒音レベルを推定できる水中騒音の簡易推定法を紹介した。簡易推定法では、一般的な商船を対象としたキャビテーション面積の予測チャートであるDBチャートを構築し、このDBチャートとBrownの式を組み合わせることにより、水中騒音レベルの予測精度を向上させている。紹介した簡易推定法の特徴は以下の通りである。

- ・ 数値計算を活用し、通常の商船を対象とした独自のDBチャートを開発したことで、従来のBurrillチャートを用いた方法と比較して、キャビテーション面積の予測精度を高めている。
- ・ DBチャートを用いることで、プロペラの形状や船尾伴流分布を考慮したキャビテーション面積を高い精度で予測することが可能である。
- ・ 対象船のキャビテーション面積をDBチャートにより予測し、その結果をBrownの式に代入することにより、当該船舶の水中騒音レベルを推定する。
- ・ 大島南域で実施した水中騒音の実船計測データと比較検証し、改良を加えた簡易推定法の精度評価を行った。検証対象とした5隻のバルクキャリア船全てにおいて、改良法はBurrillのチャートを用いた従来法と比較して、水中騒音レベルの予測精度が向上していることを確認した。
- ・ 実船計測結果と簡易推定法について、1/3オクターブバンド分析における中心周波数でのRMSE値を評価した結果、平均RMSE値は従来法の7.0[dB]から改良手法では5.2[dB]へと減少しており、約26%の精度改善が達成され、より正確に水中騒音レベルを予測できる。

簡易推定法は、船舶の設計段階における水中騒音の評価や、IMOのガイドラインに準拠した水中騒音管理計画の策定において、極めて有効なツールとなることが期待される。

謝辞

本稿に記載した研究の一部は、日本財団の助成事業として一般財団法人日本船舶技術研究協会が実施する水中騒音対策検討プロジェクトの調査研究として行われた。また、報告した研究の一部はJSPS科研費JP22H01708の助成を受けて実施された。ここに関係各位に深く謝意を表する。

参考文献

- 1) K. Shiraishi, K. Kume, D. Arakawa and H. Kamiirisa, Verification of simplified underwater radiated noise estimation tool using Brown's formula, Proceedings of INTERNOISE2023, 2023.
- 2) K. Shiraishi, D. Arakawa, Y. Kawanami and K. Kume, Improvement of Simplified Estimation Method for Propeller Cavitation Noise, Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 39, pp. 771-775, 2024.[in Japanese]
- 3) N. A. Brown, Cavitation Noise Problems and Solutions, Proceedings of International Symposium on Shipboard Acoustics, 21-38, 1976.
- 4) Y. Ichinose and K. Kume, A Program named "HOPE Light" for Optimizing Hull-Form Dimensions, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.15, No.4, 2016. [in Japanese]
- 5) Burrill, L. C. and Emerson, A., Propeller Cavitation, Further Tests on 16 in Propeller Models in the King's College Cavitation Tunnel, International Shipbuilding Progress, Vol. 10, No. 104, pp. 119-131, 1963.
- 6) H. Kato and Y. Ukon, Estimation Methods for Propeller Cavitation, Symposium on Resistance and Propulsion Theory for Ship Hull Design, pp. 189-216, 1979. [in Japanese]
- 7) J. Ando, S. Maita and K. Nakatake, A Simple Surface Panel Method to Predict Steady Marine Propeller Performance, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 1995, Issue 178, pp. 61-69, 1995. [in Japanese]
- 8) S. Maita, J. Ando and K. Nakatake, A Simple Surface Panel Method to Predict Unsteady Marine Propeller Performance, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 1997, Issue 182, pp. 71-80, 1997. [in Japanese]
- 9) A. Yazaki, M. Takahashi and J. Minataka, Open Water Test Series of Modified AU-type Five-Bladed Propeller Models of Area Ratio 0.80, Journal of Zosen Kiokai, Vol. 1967, No. 122, 1967.
- 10) Proceedings of Tokyo 2015 a Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, Vol. II & Vol. III, 2015.
- 11) L. Larsson, F. Stern and M. Visonneau, Numerical Ship Hydrodynamics / An assessment of the Gothenburg 2010 Workshop, 2014.
- 12) M. Sakai, R. Haga, T. Tsuchiya, T. Akamatsu and N. Umeda, Statistical analysis of measured underwater radiated noise from merchant ships using ship operational and design parameters, The Journal of the Acoustical Society of America, Acoustical Society of America (ASA), Vol. 154, No. 2, pp. 1095-1105, 2023.