

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

海中環境に対する騒音影響調査手法の開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-06-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 平井, 由季乃 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1929

博士学位論文

海中環境に対する騒音影響調査手法の開発

令和元年度

(2020年3月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

応用環境システム学専攻

平井由季乃

1.	緒言	1
1.1.	研究の背景.....	1
1.2.	研究の目的と実施項目	3
1.3.	本論文の構成.....	4
2.	海中環境に対する騒音影響調査のために必要な基礎的事項.....	6
2.1.	背景雑音の分類と成因	6
2.2.	可聴周波数帯域による海生哺乳類の分類.....	8
2.3.	人為雑音が海生哺乳類に与える影響	9
2.4.	海生哺乳類に対する影響調査のための評価基準	10
2.5.	船舶放射雑音の軽減のための世界の動き	11
2.5.1.	国際海事機関 (IMO)	11
2.5.2.	欧州連合 (EU)	12
2.5.3.	カナダ	12
3.	海中環境に対する騒音影響調査のために必要な音響計算.....	13
3.1.	基礎的な音響計算.....	13
3.1.1.	ピーク音圧レベル (Peak Sound Pressure Level: SPL_{peak})	13
3.1.2.	RMS 音圧レベル (Root-Mean-Square Sound Pressure Level: SPL_{rms})	13
3.1.3.	音響曝露レベル (Sound Exposure: SEL)	13
3.1.4.	音源音圧レベル (Source Level: SL)	13
3.1.5.	伝搬損失 (Transmission Loss: TL)	14
3.1.6.	吸収損失 (Absorption Loss: LA)	14
3.1.7.	拡散損失 (Spreading Loss: LS)	14
3.1.8.	受波音圧レベル (Received Level: RL)	15
3.2.	実海域における現実的な音波伝搬.....	15
3.3.	本研究で用いる音波伝搬解析法.....	15
3.3.1.	放物線型方程式の解法	16
3.3.2.	FOR3D の入力ファイル	18
4.	本研究で想定する音源.....	22
4.1.	船舶放射雑音の概要.....	22
4.2.	船舶放射雑音が海洋生物に与える影響.....	22
4.3.	本研究における音源.....	23
5.	対象船からの放射雑音の計測.....	27
5.1.	計測の概要.....	27
5.1.1.	目的.....	27
5.1.2.	実施日程.....	27
5.1.3.	実施海域.....	27
5.1.4.	計測システム	28
5.2.	計測の結果.....	30

6.	対象船からの放射雑音の音波伝搬シミュレーション	36
6.1.	音波伝搬シミュレーションの概要	36
6.1.1.	目的	36
6.1.2.	音波伝搬シミュレーションの諸設定	36
6.1.3.	音波伝搬シミュレーションに入力した海洋環境データ	38
6.1.4.	受波音圧レベルの算出方法	44
6.2.	音波伝搬シミュレーションの結果	45
6.3.	海洋環境パラメータが音波伝搬シミュレーション結果に与える影響の検証	48
6.3.1.	海底質が音波伝搬シミュレーション結果に与える影響	48
6.3.2.	音速が音波伝搬シミュレーション結果に与える影響	52
7.	音響曝露レベル推定システムの開発	58
7.1.	音響曝露レベルマップの概要	58
7.1.1.	目的	58
7.1.2.	音波伝搬シミュレーションの諸設定	58
7.1.3.	音波伝搬シミュレーションに入力した海洋環境データ	59
7.1.4.	音響曝露レベルの算出方法	60
7.1.5.	音響曝露レベルマップの構築	60
7.2.	音響曝露レベルマップ	61
7.3.	音響曝露レベル推定システムを使用した影響調査の例	69
8.	結言	71
	参考文献	73
	研究業績	77
	謝辞	79

1. 緒言

1.1. 研究の背景

人間は海洋から多くの恩恵を受けながら生活している。漁業などの食料資源はもちろん、石油やガスなどの天然資源、そしてエネルギー効率に優れた船舶による海上輸送など枚挙にいとまがない。しかし、人間が海洋で様々な機器を使って活動すると、雑音を生じる。これらの雑音は「人為雑音」と呼ばれる。人為雑音のなかでも、船舶放射雑音は、世界中の海洋を航行する膨大な数の船舶から発せられるうえ、低周波音であるため海水による吸収損失が小さく海中を遠距離まで伝搬する (Wenz, 1962)。また、人間活動の増加によって人為雑音の音圧レベルは増加の一途を辿っており、船舶由来の雑音については、1960年代から1990年代までの間で約3倍に増加している (Andrew *et al.*, 2002; Mc Donald *et al.*, 2006; Andrew *et al.*, 2011) (Fig. 1.1)。

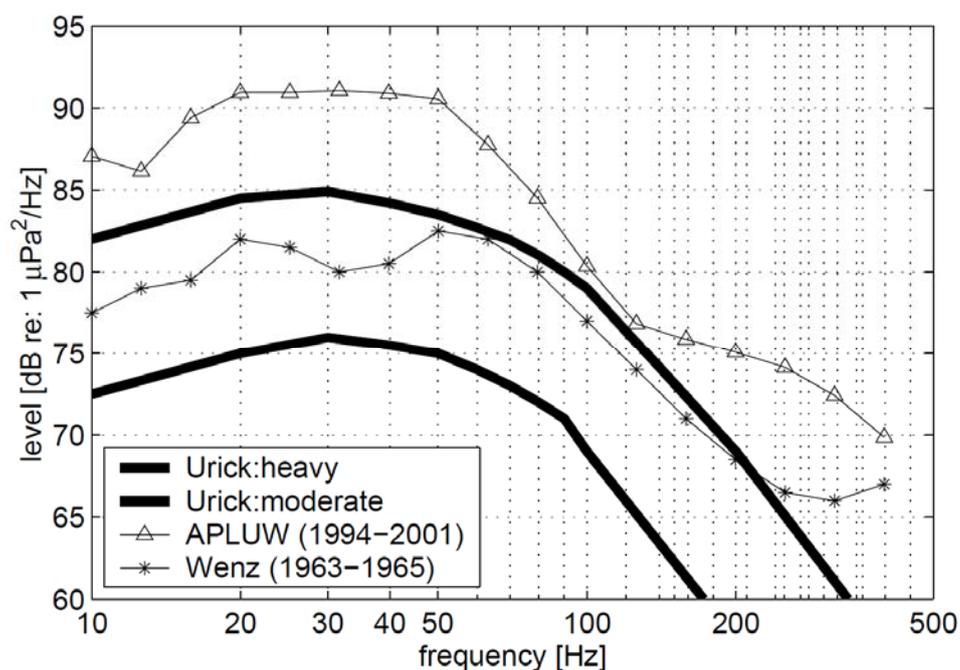


Fig. 1.1 1960年代と1990年代の背景雑音の計測結果の比較

Andrew *et al.*, (2002)より引用

海洋に生息する生物は、主に視覚よりも聴覚に依って行動する種が多く、鯨類や鰐脚類等の海生哺乳類は、仲間とのコミュニケーションや、獲物や捕食動物の存在など周囲環境の情報の把握も聴覚に依っている (Richardson *et al.*, 1995)。そのため、人為雑音は海洋生物に対して悪影響を与える「騒音」となり得る (Fig. 1.2)。特に、船舶放射雑音の周波数帯域はヒゲクジラ等の大型の海生哺乳類が仲間とのコミュニケーションに使用する周波数帯域と重なっているため、影響が大きいと考えられている (Richardson *et al.*, 1995)。

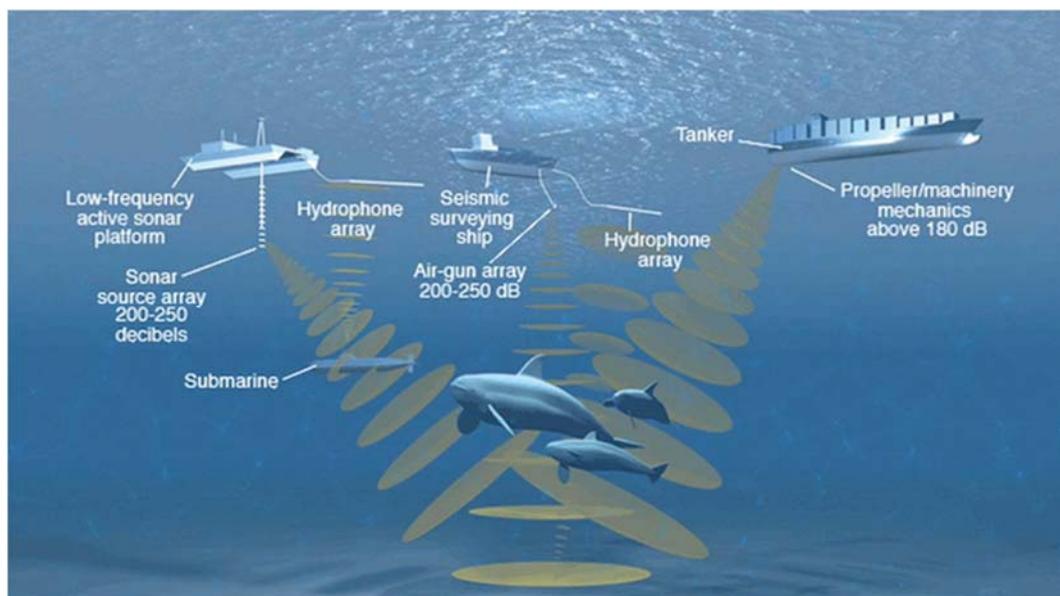


Fig. 1.2 人為雑音源と海生哺乳類

<http://sanctuaries.noaa.gov/science/sentinel-site-program/noise.html> より引用

人為雑音が海洋生物に与える影響が注目され始めたのは 1970 年代である (Payne and Webb, 1971). 米国では 1972 年に海生哺乳類保護法 (Marine Mammal Protection Act: MMPA) が, 1973 年に絶滅危惧種法 (Endanger Species Act: ESA) が施行され, 両法律により指定されている生物に影響を与える雑音が発生する事業を行う場合には事前にアメリカ海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA) の国立海洋漁業局 (National Marine Fisheries Service: NMFS) の認可が必要になった (Amy, 2015). 1990 年代以降, 人為雑音が海洋生物に与える影響を明らかにするために, 海中における生物の聴覚や雑音に対する反応の研究は急速に増加した. それらの研究結果を基に, 1995 年には米国で海生哺乳類について聴覚障害を引き起こすとする受波音圧レベルの閾値が世界で初めて制定された (NMFS, 1995). 1995 年以降, 各国でガイドラインが制定され, 地震探査のエアガン等の雑音源使用時にその距離内に海生哺乳類発見した場合に音源を停止する Safety Zone の設定など, 影響緩和へ向けた取り組みが盛んに行われてきた.

近年は, 短期的には聴覚障害を引き起こす可能性が小さい船舶放射雑音などの騒音でも, 長時間曝露することによって摂餌や交尾を中断させる行動阻害などを引き起こし, 個体数の減少や生息地の変化など深刻な事態につながるという研究結果が多く報告されており (Bejder *et al.*, 2006; Lusseau 2004; Williams *et al.*, 2006; Lusseau and Bejder, 2007), 船舶放射雑音についても国際的に規制の導入に向けた機運が高まっている. 生物多様性条約 (Convention on Biological Diversity: CBD) の下に置かれている締約国会合においては, 2010 年から水中騒音の影響に関する検討が開始され, 海生哺乳類等の海洋生物に悪影響を与えている可能性がある船舶放射雑音の軽減のために必要な措置を講ずべきとの指摘がなされた (赤松, 2019). また, 国際海事機関 (International Maritime Organization: IMO) においては, 2014 年 4 月に船舶放射雑音対策のための非義務のガイドラインが策定されている (日本小型造船工業会ら, 2019). 今後, CBD における議論の動向等によっては,

IMOにおいて、船舶放射雑音を定量的かつ義務的に軽減するための更なる方策を検討すべきとの議論が起きる可能性もある。

船舶放射雑音を定量的に軽減するためには、海洋生物に影響を与えるとする受波音圧レベルの閾値が必要であるが、広範囲かつ長期間にわたって影響を調査した研究はこれまでほとんど行われておらず (Neenan *et al.*, 2017)、閾値を設定するためのデータは不足している。そこで、現在、各国は海洋生物に対する影響の調査に取り組んでいる。日本でも、日本船舶技術研究協会が「船舶水中騒音の海洋生物への影響に関する調査研究 (水中騒音プロジェクト)」(日本船舶技術研究協会, 2015) を立ち上げ、2015年から2017年にかけて、小笠原村父島周辺海域において、貨客船運航時のザトウクジラの反応行動の調査等を行った。

影響調査の際には、騒音曝露時の海洋生物の反応行動を観察し、何らかの反応行動を示した時の受波音圧レベルのデータを収集する。実海域における調査では海洋生物の受波音圧レベルを直接計測することは不可能であるため、計算によって推定する。

これまで注目されてきた聴覚障害については、影響を引き起こす可能性があるのは地震探査のエアガンなどの大音圧音源からごく近距離のみである。地震探査は一般的に1000 m以上の大深度域で行われるため、音源直下の水深をDとした場合、影響は音源からD以上の距離では発生しないと考えられる。そのため、受波音圧レベルの推定には、音波が球面拡散するとして距離のみの関数である拡散損失を仮定した、簡易的な伝搬損失の式を用いることが一般的であった。

しかし、行動阻害等については、音源から遠距離 (音源直下の水深より大きい距離) の位置においても影響を引き起こす可能性がある。遠距離における受波音圧レベルの推定では留意すべき点が多くある。音波は実際の海中においては単純に拡散するのではなく、音速プロファイルの勾配による屈折と海面や海底による反射・吸収を繰り返すことによって多様な伝搬経路を通り、それらが干渉し合うことで複雑に伝搬する (NRC, 2003)。水温・塩分・圧力によって決定される音速、海底地形や海底の底質分布は、季節や海域によって大きく異なり、これらのパラメータは伝搬状況に大きな影響を与える (NRC, 2003)。特に、水中騒音プロジェクトで調査を実施している小笠原村父島周辺海域のように船舶放射雑音の波長に対して水深が小さい海域においては、その影響は支配的である。そのため、受波音圧レベルは従来のように理想的な拡散を仮定した伝搬損失の式によって正確に推定することはできず、対象とする海域・時期の正確な海洋環境を考慮して求める必要がある (NOAA, 2016)。また、船舶放射雑音のような連続音の影響は受波音圧レベルを曝露時間で積分した音響曝露レベル (Sound Exposure Level: SEL) によって評価する必要があるが (NOAA, 2016)、航行中の船舶と移動を続ける対象生物の間の海洋環境は相対的に変化し続けるため、理想的な拡散を仮定した伝搬損失の式で推定した音響曝露レベルはことさら不正確である可能性が高い。

1.2. 研究の目的と実施項目

前節で述べたように、近年、船舶放射雑音の軽減に向けて、各国が海生哺乳類に対する行動阻

害等を対象とした影響調査を実施している。しかし、船舶放射雑音の波長に対して水深が小さい海域においては、従来の手法によって音響曝露レベルを正確に推定することは難しく、高精度な音響曝露レベルの推定手法が必要とされている。そこで本研究では、国際社会に定量的データを提供する水中騒音プロジェクトの調査の一貫として、行動阻害等を対象とした影響調査手法を開発することを目的とし、対象とする海域・時期の海洋環境および対象生物と音源の移動を考慮した音波伝搬シミュレーションによる音響曝露レベルの推定手法を提案する。

本研究においては以下に示す項目を実施した。

まず、音源である小笠原村父島-母島間を1日1回運航する定期貨客船の水中放射雑音について、浅海域である小笠原村父島周辺海域における伝搬特性等を調査するために貨客船運航時および非運航時に定点におけるハイドロフォンによる音響計測を行った。

次に、海洋環境パラメータを入力したPE法(Parabolic Equation Method)による音波伝搬シミュレーションの精度を検証するために、貨客船と定点を結ぶ6経路について定点における受波音圧レベルを音波伝搬シミュレーションによって推定し、計測値との比較を行った。その際、従来の手法である理想的な拡散を仮定した伝搬損失の式による推定値との比較も行った。また、海洋環境パラメータが受波音圧レベルの推定精度に与える影響を検証するために、現実と乖離した海底質を入力した場合、経路の距離方向の音速の入力点数を増やした場合についても同様の比較を行った。

最後に、移動する対象船と対象生物間の伝搬経路における海洋環境の相対的変化を考慮した音響曝露レベルの推定を可能にするために、同様の手法のシミュレーションによって小笠原村父島周辺海域の半径10 km円内における音響曝露レベルの時間変化データ(音響曝露レベルマップ)を構築した。その際、海洋環境が音響曝露レベルの推定精度に与える影響を検証するため、従来手法である球面拡散および浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく音響曝露レベルマップも構築し、3つのマップをコンター図として描画し比較を行った。さらに、MATLAB上で対象生物の観測位置・時刻データを入力すると構築した音響曝露レベルマップから伝搬経路内の海洋環境の相対的変化を考慮して音響曝露レベルを推定するシステムを開発した。また、影響調査の例として対象生物の2つの移動パターンを仮定し、移動に伴って変化する音響曝露レベルを開発したシステムを用いて各マップから推定し比較を行った。

1.3. 本論文の構成

第1章では、第1節で研究背景として水中騒音問題を概説し、第2節で本研究の目的および実施項目を述べた。

第2章では、海中環境に対する騒音影響調査に必要な基礎的事項として、背景雑音の分類と成因(第1節)、可聴周波数帯域による海生哺乳類の分類(第2節)、人為雑音が海洋生物に与える影響(第3節)についてまとめ、影響に対応する動きとして、鯨類への影響調査のための評価基準(第4節)および人為雑音影響緩和のための世界の動き(第5節)を紹介する。

第3章では、海中環境に対する騒音影響調査に必要な音響計算として、基礎的な音響計算(第1節)および実海域における現実的な音波伝搬(第2節)についてまとめ、海洋環境パラメータを

入力可能な音波伝搬シミュレーションの重要性を示した後に、本研究で用いる音波伝搬解析手法（第3節）を紹介する。

第4章では、本研究の想定音源である貨客船の放射雑音について、船舶放射雑音の概要（第1節）とともに船舶放射雑音が海洋生物に与える影響（第2節）をまとめ、本研究で想定した貨客船の放射雑音（第3節）について述べる。

第5章では、対象船からの放射雑音の計測について、計測の概要（第1節）では実施日時や計測システムを示し、計測の結果（第2節）では取得したデータに基づき対象海域の伝搬特性等について述べる。

第6章では、対象船からの放射雑音の音波伝搬シミュレーションについて、音波伝搬シミュレーションの概要（第1節）で諸設定や入力した海洋環境パラメータなどを、音波伝搬シミュレーションの結果（第2節）で計測値と音波伝搬シミュレーションおよび拡散を仮定した伝搬損失の式による推定値の比較結果を、海洋環境パラメータが音波伝搬シミュレーションの精度に与える影響の検証（第3節）では海洋環境パラメータの入力の正確さが推定精度に与える影響について考察を述べる。

第7章では音響曝露レベル推定システムの開発について、音響曝露レベルマップの概要（第1節）では諸設定や入力した海洋環境パラメータ、音響曝露レベルの算出過程等を示し、音響曝露レベルマップ（第2節）では音波伝搬シミュレーションおよび各種拡散を仮定した伝搬損失の式によって構築した音響曝露レベルマップをコンター図として比較した結果について述べる。音響曝露レベル推定システムを使用した影響調査の例（第3節）では仮定した対象生物の移動パターンにおける音響曝露レベルの推移を開発したシステムを用いて各マップから推定し比較した結果について述べる。

第8章では結言として本論文のまとめを述べる。

2. 海中環境に対する騒音影響調査のために必要な基礎的事項

2.1. 背景雑音の分類と成因

海中に存在する雑音は、「背景雑音 (Background Noise)」と呼ばれ、「周囲雑音 (Ambient Noise)」と「自己雑音 (Acoustic Self-noise)」に分類される (海洋音響学会, 2004). 周囲雑音はさらに、自然由来の「海中雑音 (Ocean Noise)」と人間活動由来の「人為雑音 (Anthropogenic Noise)」に分類される (海洋音響学会, 2004). 背景雑音の分類を Fig. 2.1 に図示した. 周囲雑音は潜水艦に搭載するソナー設計のために古くから研究されてきた (Wenz 1962; Knudsen *et al.*, 1948; Ross, 1976; Urick, 1983). 特に, Wenz (1962) が背景雑音スペクトルをまとめた Wenz 曲線 (Fig. 2.2) は現在も広く使われている. 海洋生物の立場から見た人為雑音は、「水中騒音 (Underwater Noise)」もしくは「海中騒音 (Ocean Noise)」と呼ばれる.



Fig. 2.1 海中における背景雑音の分類

自然由来の雑音である海中雑音の主な成因は波浪である. また, 熱雑音および乱流雑音も成因のひとつである (海洋音響学会, 2004). それに加えて, 地殻変動が活発な地域では地震や火山活動, 極域では氷塊運動による雑音が存在し, 背景雑音の支配的成因となっている場合もある (Richardson *et al.*, 1995). 海域によっては, 生息する海生哺乳類や魚類, 甲殻類が発する雑音も成因となる (Dahlheim, 1987; Cato, 1992). さらに雨や雹等の天候の変化も海中雑音を著しく増加させる.

人間活動由来の雑音である人為雑音源としては, 主に以下が挙げられている. (NOAA, 2016a).

- ・ 船舶
- ・ アクティブソナー
- ・ 地震探査
- ・ 水中爆発
- ・ 杭打ち
- ・ 再生可能エネルギー発電装置
- ・ 浚渫
- ・ 砕氷
- ・ 掘削

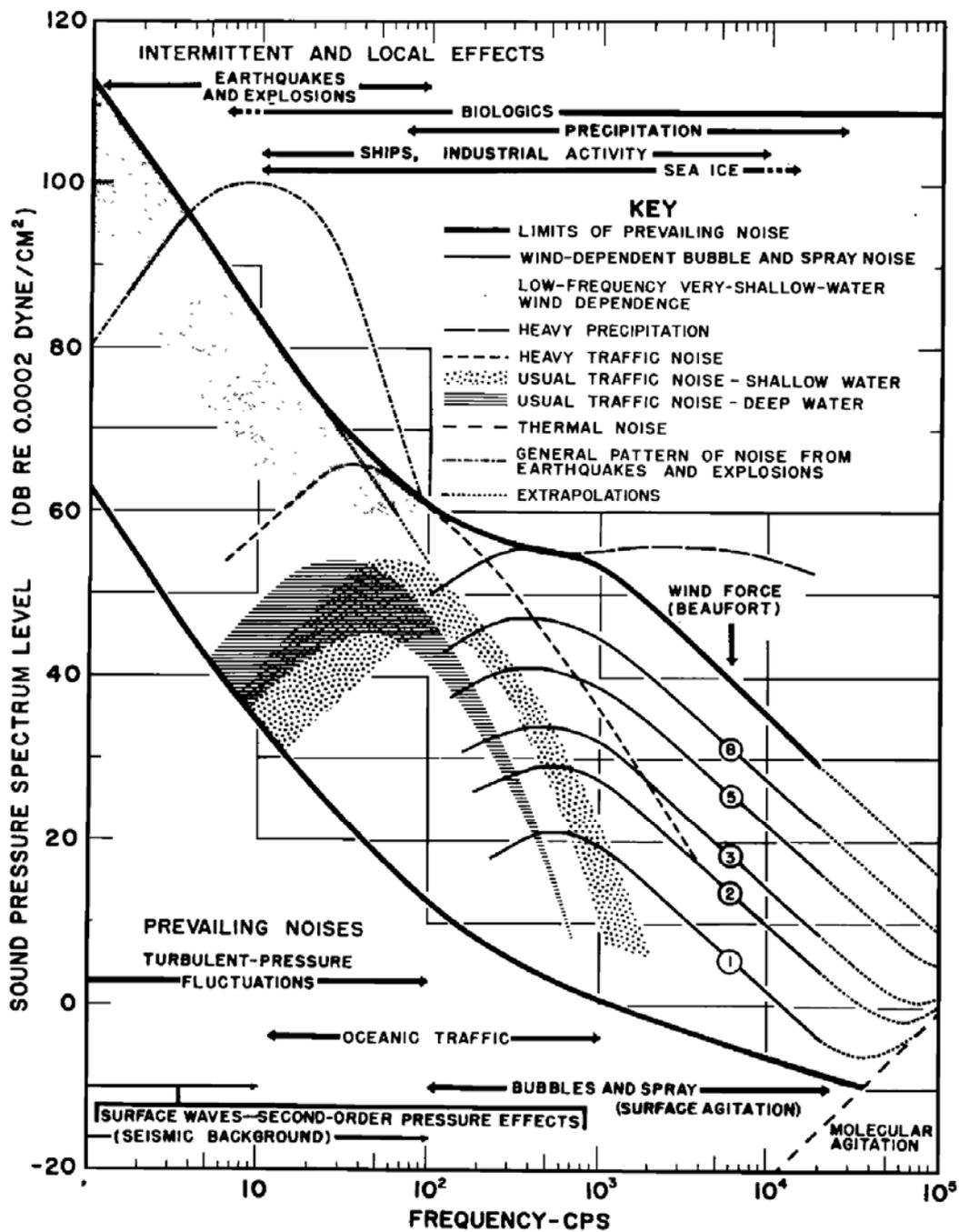


Fig. 2.2 背景雑音の周波数スペクトル
Wenz, (1962)より引用

この中でも、船舶放射雑音は低周波（20-300 Hz）であるため海水による吸収損失が小さく遠距離まで伝搬する。さらに、航行中の多数の船舶からの船舶放射雑音が合成されると、背景雑音の支配的成因となる（Richardson *et al.*, 1995）。また、船舶放射雑音は多くの海生哺乳類の使用周波数帯域と重なっており（Fig. 2.3）、大きな影響を与える可能性がある。

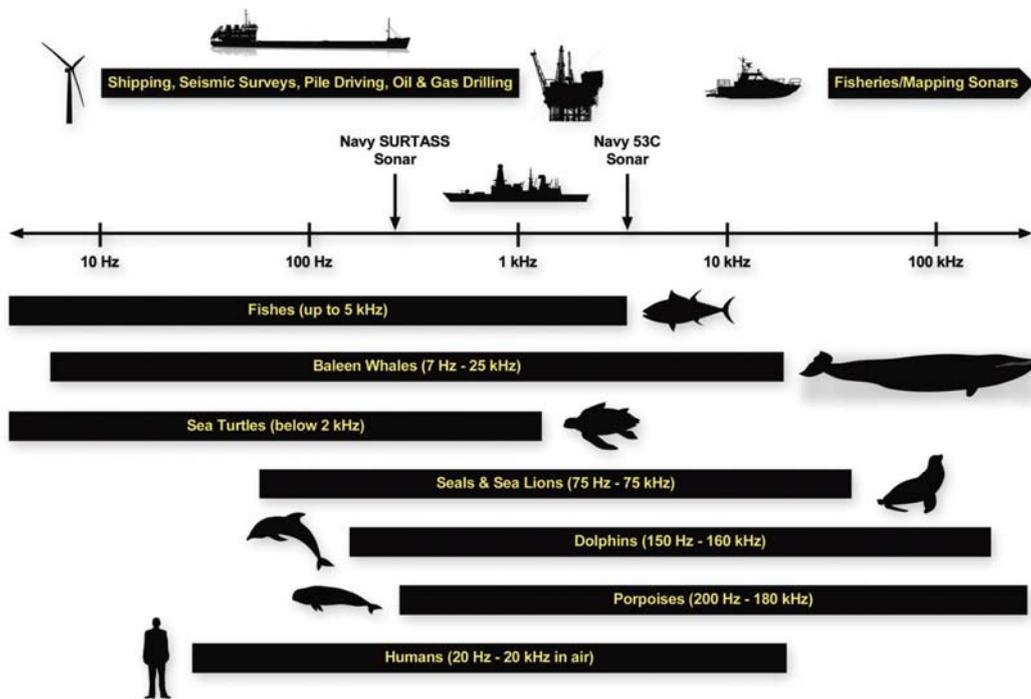


Fig. 2.3 人為雑音源の周波数帯域と海洋生物の可聴周波数帯域
Amy, (2015)より引用

2.2. 可聴周波数帯域による海生哺乳類の分類

人為雑音が海生哺乳類に与える影響を調査するためには海生哺乳類の聴覚特性を理解することが不可欠である。海生哺乳類の可聴周波数帯域は種によって異なり、一般的に Table 2.1 のように分類されている (NOAA, 2016b)。これらの値は、ハクジラ類・鰭脚類については直接計測された聴覚データに基づいているが (Southall *et al.*, 2007; Erbe *et al.*, 2016)、ヒゲ鯨については直接計測されたデータが存在せず、解剖 (Parks *et al.*, 2007a)、鳴音 (Ricahardson *et al.*, 1995; Wartzok and Ketten, 1999)、生物分類、音に対する行動反応 (Reichmuth, 2007) の研究に基づいた推定値である。

Table 2.1 可聴周波数帯域による海生哺乳類のグループ
NOAA (2016b)より引用

聴覚グループ名	可聴周波数帯域
低周波数帯域のクジラ目： Low-Frequency Cetacean (LF) (ヒゲクジラ)	7 Hz to 35 kHz
中周波数帯域のクジラ目： Mid-Frequency Cetacean (MF) (イルカ, ハクジラ, アカボウクジラ, ハンドウイルカ)	150 Hz to 160 kHz
高周波数帯域のクジラ目： High-Frequency Cetacean (HF) (ネズミイルカ, コマッコウ, カウイルカ, イロワケイルカ, ダンダラカマイルカ, ミナミマイルカ)	275 Hz to 160 kHz
鰭脚類アザラシ科： Phocid Pinnipeds (PW) (アザラシ)	50 Hz to 86 kHz
鰭脚類アシカ科： Otariid Pinnipeds (OW) (アシカ, オットセイ)	60 Hz to 39 kHz

2.3. 人為雑音が海生哺乳類に与える影響

人為雑音が海生哺乳類に与える影響については、対象とする種、音源の種類及び特性、環境、さらに観察された影響について、多岐にわたって研究されている。与える影響は受波音圧レベルの大きさによって決まる。主な影響として、物理的傷害 (Physical injury)、聴覚障害 (Hearing impairment)、行動阻害 (Behavioral disturbance)、マスキング (Masking) 等が挙げられる (NOAA, 2016a)。以下にこれらの影響を概説する。

物理的傷害

爆発音源によって、近距離にいる海生哺乳類が死亡もしくは深刻な障害を受けることである。具体的には、共振による体内組織の損傷、体内組織や血液中での気泡の形成、爆発による外傷、そして爆発によって誘発された座礁による死亡などが挙げられる。

聴覚障害

大音圧の人為雑音への曝露によって引き起こされる生理的難聴のことである。数分から数日間の一時的なもの (Temporary Threshold Shift: TTS) と永久的なもの (Permanent Threshold Shift: PTS) に分けられる。一時的な難聴を複数回繰り返すことで永久的な聴覚障害につながる場合もある (Richardson *et al.*, 1995)。

行動阻害

人為雑音への曝露によって、海生哺乳類が通常の行動を中断することである。例えば、移動方向や速度の変更、鳴音の増加や減少、社会的行動や摂餌の変化、雑音源の回避などである。雑音曝露時の反応は、種、年齢、性別、身体状態、個体の経験によって異なることに注意する必要がある。

ある (Richardson *et al.*, 1995; Southall 2007 *et al.*). また、長期的な影響として、ホエールウォッチング船による慢性的な行動阻害が個体数に影響を与えることや (Lusseau and Bejder, 2007), 頻繁な回避行動によって、繁殖機会の減少や死産の増加 (Lusseau, 2004), 摂餌機会の減少, 移動時間の増加による摂取エネルギー量の減少と消費エネルギー量の増加 (Williams, 2006) を引き起こすことが明らかになっている.

マスキング

人為雑音によって、海生哺乳類が仲間との通信やエコーロケーションのために発した鳴音や、生存のために重要な情報である環境音 (波や氷塊運動, 獲物や敵が発する音) がかき消されることである (Payne and Webb, 1971; Richardson *et al.*, 1995). これは人為雑音が鳴音や環境音の受波音圧レベルより十分に大きい場合に起こる. マスキングに対する適応手段として、鳴音の周波数帯域のシフト (Parks *et al.*, 2007; Iorio and Clark, 2010) や音圧レベルを増加させる等の行動 (Dahlheim, 1987; Iorio and Clark, 2010) が観測されている.

2.4. 海生哺乳類に対する影響調査のための評価基準

海生哺乳類に対する人為雑音の影響を評価するために様々な研究機関および研究者によって提案された評価基準を概説する. これらの基準は捕獲した動物を用いた数少ない聴覚実験データに基づいており、実海域ではほとんど検証されていないことに注意する必要がある.

NMFS のガイドライン (1995)

アメリカ海洋大気庁 (NOAA) の国立海洋漁業局 (NMSF) は、RMS (Root-Mean-Square) 音圧レベルを用いて世界で初めて評価基準を設定した.

NMFS はガイドラインとして、海生哺乳類保護法 (MMPA) が定めた「レベル A ハラスメント: 海生哺乳類に聴覚障害を引き起こす可能性がある基準」として鯨類に対し受波 RMS 音圧レベル 180 dB re 1 μ Pa, 鯨脚類に対し 190 dB re 1 μ Pa, さらに、「レベル B ハラスメント: 海生哺乳類の行動を阻害する可能性がある基準」として両類に対し受波 RMS 音圧レベル 160 dB re 1 μ Pa と設定した. NMFS は、これらは予防的な値であると説明している.

Southall らの研究結果 (2007)

Southall らは、人為雑音が海生哺乳類に与える影響について包括的な総説を発表し、曝露時間を考慮した曝露音圧レベル (Sound Exposure Level: SEL) とピーク音圧レベル (Peak Sound Pressure Level: SPL_{peak}) の両方の基準を提案した (Southall *et al.*, 2007). 永久的聴覚障害 (PTS) は鯨類に対しては音響曝露レベル 198 dB re 1 μ Pa²s, ピーク音圧レベルは 230 dB re 1 μ Pa, 鯨脚類に対しては 186 dB re 1 μ Pa²s および 218 dB re 1 μ Pa, 一時的聴覚障害 (TTS) は鯨類に対して音響曝露レベル 183 dB re 1 μ Pa²s, ピーク音圧レベル 224 dB re 1 μ Pa, 鯨脚類に対しては 171 dB re 1 μ Pa²s および 212 dB re 1 μ Pa と設定された.

NOAA (2016) のガイダンス

アメリカ海洋大気庁 (NOAA) は 2006 年に初めてガイダンスを発表し、鯨類に対して PTS を 215 dB re 1 μ Pa²s, TTS を 195 dB re 1 μ Pa²s と設定した。ガイダンスは、パブリックコメントによる更新を複数回行い、2016 年 8 月に最終版が発表された (NOAA, 2016b)。最終版では、海生哺乳類の可聴周波数帯域グループ毎に音源がインパルス波と非インパルス波 (連続波) の場合についてそれぞれ基準値が設定された。インパルス波については、音響曝露レベルだけでなく、ピーク音圧レベルも定められた。本研究で扱うザトウクジラは低周波帯域のクジラ目のグループ LF (Table 2.1) に分類されており、非インパルス波の PTS が 199 dB re 1 μ Pa²s, TTS が 179 dB re 1 μ Pa²s と設定されている。また、インパルス波については、PTS が 183 dB re 1 μ Pa²s および 219 dB re 1 μ Pa, TTS が 168 dB re 1 μ Pa²s および 213 dB re 1 μ Pa と設定されている (Table 2.2)。

Table 2.2 NOAA が定めた海生哺乳類に聴覚障害を引き起こす受波音圧レベル閾値
NOAA (2016b) より引用

	非インパルス		インパルス			
	TTS	PTS	TTS		PTS	
グループ	SEL [dB re 1 μ Pa ² s]	SEL [dB re 1 μ Pa ² s]	SEL [dB re 1 μ Pa ² s]	SPL _{peak} [dB re 1 μ Pa]	SEL [dB re 1 μ Pa ² s]	SPL _{peak} [dB re 1 μ Pa]
LF	179	199	168	213	183	219
MF	178	198	170	224	185	230
HF	153	173	140	196	155	202
PW	199	219	175	226	203	232
OW	181	201	188	212	185	218

2.5. 船舶放射雑音の軽減のための世界の動き

2.5.1. 国際海事機関 (IMO)

IMO は 2004 年に海洋環境保護委員会 (Marine Environment Protection Committee: MEPC) において船舶放射雑音による海洋生物への悪影響に関する審議を開始した。そして、2008 年 10 月の MEPC 58 において、2009 年 7 月の MEPC 59 に新たな議題として「商船からの放射雑音による海洋生物への悪影響」を加えることを決定した。その結果として、2014 年には、商船からの放射雑音の最小限化および海洋生物への悪影響の軽減を目的とした非強制の技術的ガイドラインが承認された。この非強制のガイドライン「海洋生物への悪影響に対処するための商船からの水中騒音の軽減に関するガイドライン」(MEPC.1/Circ.833) は、水中騒音問題に関するステークホルダーへの一般的な助言として採択された。

2.5.2. 欧州連合 (EU)

EU は、2008 年の海洋戦略枠組み指令 (Marine Strategy Framework Directive: MSFD) において、加盟国に自国海域における水中騒音評価のための監視プログラムを設定することを求めた。欧州委員会は、水中騒音の評価、監視、分布マップの作成を優先すべき課題とし、海底の地震探査におけるエアガンの使用や杭打ち工事等の監視や、主に船舶のチップボルトテックスキャビテーションの帯域である 1/3 オクターブ帯域 63-125Hz (中心周波数) の監視とモデル化を求めている。この課題を支援するために、欧州委員会は、「AQUO (Achieve Quieter Oceans by shipping noise footprint reduction)」および「SONIC (Suppression Of underwater Noise Induced by Cavitation)」プロジェクトへの補助金を給付し、商船からの放射雑音の評価と軽減に関する非強制ガイドラインの作成をプロジェクト参加企業・組織に求めた。AQUO プロジェクトおよび SONIC プロジェクトは 2012-2015 年に実施された第 7 次フレームワークプログラム助成プロジェクトであり、それぞれ新造船の放射雑音軽減のための現実的な設計を提案するステークホルダー向けのガイドラインと北海を航行する船舶からの放射雑音の測定と軽減のためのガイドラインを作成した。両プロジェクトの成果は、「AQUO-SONIC ガイドライン」として、水中騒音の軽減に関する勧告とデータ提供を行っている。なお、このガイドラインは数値的な勧告は行っていない。

2.5.3. カナダ

カナダでは、バンクーバー港が、海生哺乳類の保護プログラム「ECHO (Enhancing Cetacean Habitat and Observation Program)」を推進しており、バンクーバー港では 2 か所のモニタリングステーションによって周辺海域の騒音レベルが記録されている。また、「EcoAction」プログラムによって、所有船の騒音軽減技術に投資する船主に対し港湾使用料の割引を行うというインセンティブを実施している。

3. 海中環境に対する騒音影響調査のために必要な音響計算

3.1. 基礎的な音響計算

3.1.1. ピーク音圧レベル (Peak Sound Pressure Level: SPL_{peak})

エアガンの単発発振のようなインパルス波の場合、ピーク音圧レベルはある時間領域で測定された瞬間的な最大音圧値であり、以下の式で表される (JASCO, 2011).

$$SPL_{peak}(zero - to - peak) = 20 \log_{10}(\max(|P(t)|)) [\text{dB re } 1\mu\text{Pa}] \quad (1)$$

3.1.2. RMS 音圧レベル (Root-Mean-Square Sound Pressure Level: SPL_{rms})

非インパルス波 (連続波) を扱う場合、RMS 音圧レベルが使用される。連続音を発する雑音源としては、船舶、ソーナー、掘削等が挙げられる。RMS 音圧レベルは時間領域で測定された波形のうち時間窓 T の区間を二乗平均平方根とした音圧レベルであり、以下の式で表される (JASCO, 2011).

$$SPL_{rms} = 20 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \right) [\text{dB re } 1\mu\text{Pa}] \quad (2)$$

3.1.3. 音響曝露レベル (Sound Exposure: SEL)

長時間にわたって放射される非インパルス波 (連続波) を扱う場合、音響曝露レベルが使用される。音響曝露レベルは人為雑音を含む背景雑音の音圧レベルを人為雑音への曝露時間 T で積分したエネルギーである。積分区間は評価の対象とする雑音の持続時間に応じて設定する。例えば、1 隻の船舶のみが航行する静粛な海域においてはその運航時間で積分する。また、複数の船舶が絶え間なく航行する輻輳海域においては積分区間を 24 時間で区切った音響曝露レベル (SEL_{24h}) を使用する場合もある (JASCO, 2011).

$$SEL = 10 \log_{10} \left(\int_0^T p^2(t) dt \right) [\text{dB re } 1\mu\text{Pa}^2\text{s}] \quad (3)$$

3.1.4. 音源音圧レベル (Source Level: SL)

音源音圧レベルは音源からの基準距離 (通常は 1 m) における見かけ上の音源音圧レベルである。実際には音源の音圧レベルは 1 m のような近距離で測定できることは少なく、遠距離における測定値から伝搬過程を逆算して推定される (Gisiner, 2016).

3.1.5. 伝搬損失 (Transmission Loss: TL)

伝搬損失は音波が音源から受波点に伝搬するまでに損失した圧力である。伝搬損失は以下に示す吸収損失と拡散損失の和で表される。

3.1.6. 吸収損失 (Absorption Loss: LA)

音波が海水中を伝搬する際には、ホウ酸や硫酸マグネシウム分子の共鳴による緩和吸収および水分子の粘性吸収によって吸収損失が生じる。吸収損失は距離 r [m]として αr と表される。減衰定数 α [dB/m]は、水素イオン指数 pH, 水温 T [°C], 塩分 S [ppt], 深度 z [m]の海水中を伝搬する周波数 f [kHz]の音波について以下の式によって計算される (Francois and Garrison, 1982a; Francois and Garrison, 1982b)。

$$\alpha = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{\frac{pH-8}{0.56}} + 0.52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) \frac{S}{35} \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-\frac{z}{6}} + 4.9 \times 10^{-4} f^2 e^{-\frac{T}{27} + \frac{z}{17}} \text{ [dB/km]} \quad (4)$$

ここで,

$$f_1 = 0.78 \frac{S^{\frac{1}{2}}}{35} e^{\frac{T}{26}} \text{ [kHz]}$$

$$f_2 = 42 e^{\frac{T}{17}} \text{ [kHz]}$$

である。式 (4) より、音波の周波数が高いほど、海水中を伝搬したときの吸収損失は大きくなる。本研究では、音源として扱う最大の周波数 125 Hz において α は 0.002 dB/km 以下であり、かつ伝搬距離は 10 km 以下であることから吸収損失は無視した。

3.1.7. 拡散損失 (Spreading Loss: LS)

理想的な拡散損失としては下記の 3 つが使用される。

球面拡散損失

音源のごく近くなど、境界の影響を無視できる音場 (自由音場) において音波は球の面方向に均一に伝搬し、音源からの距離 r [m] における LS は以下の式で表される (海洋音響学会, 2004)。

$$LS = 20 \log_{10} r \quad (5)$$

円筒拡散損失

浅海域など、海面や海底の影響が無視できない場合、海は大きな 2 次元導波管として機能するため、音波は円筒の周方向に均一に伝搬し、音源からの距離 r [m] における LS は以下の式で表される (海洋音響学会, 2004)。

$$LS = 10 \log_{10} r \quad (6)$$

浅海拡散損失

音波は音源の近くでは球面状に伝搬するが、球面波が海面や海底に到達した後は円筒状に伝搬する。水深 H [m]よりも大きい距離 R [m]では、 LS は以下の式で表される (海洋音響学会, 2004)。

$$\begin{aligned}LS &= 20 \log_{10} H + 10 \log_{10} \frac{R}{H} \\ &= 10 \log_{10} H + 10 \log_{10} R \quad (7)\end{aligned}$$

3.1.8. 受波音圧レベル (Received Level: RL)

受波音圧レベルは任意の深度・音源からの相対距離における音場の強度である。音場は深度・距離に応じて変化するので計測を行った深度・距離を明記する必要がある。音源からの距離 r における受波レベルは以下の式 (ソーナー方程式) で表される (海洋音響学会, 2004)。

$$RL = SL - TL \quad (8)$$

3.2. 実海域における現実的な音波伝搬

実際の海中における音波伝搬は、3.1.7 に示した理想的な拡散だけでなく、音速の深度方向の勾配に起因する屈折や海面反射・海底反射に大きく影響される (NRC, 2003)。そのため、実海域における現実的な音波伝搬はごく近距離では 3.1.7 に示した理想的な拡散と一致するが、それ以上の距離においては過小もしくは過大評価となってしまう。また、音速の深度方向の勾配は海域や時期によって大きく異なり、海底反射を決定づける海底地形や底質の分布は不均一で非常に複雑な構造をもつ (海洋音響学会, 2004)。このように複雑な音波伝搬の現象を正確に推定するためにはコンピュータ計算モデルを用いる必要がある (NRC, 2003)。海底・海面をもつ海洋での音波伝搬は距離 r 、深度 z 、角度 θ を変数とする円筒座標で考え波動方程式を解く必要がある。このような波動方程式を解く音波伝搬解析法は大きく下記の 3 つに分類できる (海洋音響学会, 2004)。また、各分類における代表的な解析法を下記に示す。

高周波近似を用いる解析法

音線理論 (ray theory)

距離に依存しない (range independent) 解析法

ノーマルモード法 (normal modes method)

距離に依存する (range dependent) 解析法

放物型方程式法 (parabolic equation method)

3.3. 本研究で用いる音波伝搬解析法

本研究は低周波の船舶放射雑音を扱うものであり、海生哺乳類の行動阻害を引き起こす可能性がある範囲を調査するために長距離の解析を行う。そのため、3.2 に示した高周波近似を用いる解析法や、距離に依存しない解析法を使用することはできない。したがって、本研究では距離に依存する解析法である放物線型方程式法のコンピュータ計算モデル FOR3D (D.Lee & M.H. Shultz, 1995) を使用して音波伝搬解析を行う。FOR3D では3次元解析を行うことが可能だが、実際の海洋において音波の水平方向の屈折は無視することができ (NRC, 2003)、解析に要する時間を大幅に削減できることから、本研究では2次元解析を行う。

3.3.1. 放物線型方程式の解法

放物線型方程式の解法について以下に述べる。海洋環境が方位方向に変化のないものとして伝搬方向の距離を r 、深度を z とした2次元音場を考えた場合、ヘルムホルツ方程式は

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + k_0^2 n^2 p = 0 \quad (9)$$

と表される。ここで、 $P(r, z)$ は音圧、 $\rho(z)$ は密度、 k_0 は基準波数、 $n(r, z)$ は屈折率である。海洋環境が伝搬距離方向に緩やかに変化すると仮定し、この解を深度方向の波動場 $u(r, z)$ と伝搬距離方向のハンケル関数の変数分離形として表すと、

$$P(r, z) = u(r, z) H_0^{(1)}(k_0 r) \quad (10)$$

ハンケル関数を遠方界近似 ($k_0 r \gg 1$) し、進行波のみの局所解を考えると、

$$u(r + \Delta r, z) = e^{-\delta} e^{\delta \sqrt{1+X^+Y^+}} u(r, z) \quad (11)$$

$$\delta \equiv i k_0 \Delta r \quad (12)$$

ここで、

$$X^+ = n^2(r, z) - 1 + \frac{1}{k_0^2} \rho(z) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (13)$$

$$Y^+ = \frac{1}{k_0^2 r^2} \rho(z) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (14)$$

広角化のために平方根演算子に高次有理関数近似を行うと、

$$\begin{aligned} & u(r + \Delta r, z) \\ &= e^{-\delta} e^{\delta \left(1 + \frac{1}{2} X^+ - \frac{1}{8} (X^+)^2\right)} e^{\frac{1}{2} \delta Y^+} u(r, z) \end{aligned} \quad (15)$$

が得られる。この式に深度方向の密度および音速から求めた屈折率の分布を代入して Δr ごとに逐次計算を行い、Fig. 3.1 に示すように等間隔に設けられた格子点における音圧分布を求める。深度方向の音速・密度分布は、解析空間の距離方向の始点と終点、また必要であれば間の任意の点に入力する。その際、海底については、到達した音波は反射および浸透するため、海底領域にも海水領域と同様に深度方向の音速・密度分布を入力する。海面については海水と空気の音響特性インピーダンスの差が大きいため到達した音波は完全反射すると仮定し、音圧がゼロとなる条件を設けている。このような手法で計算を行うため、放物線型方程式法では実海域における距離方向の環境変化を考慮して解析を行うことができる。距離方向の海洋環境の変化については、想定し

ている音波の波長以下の距離メッシュで読み取る必要はないと考えられるが，本研究においては対象海域の水深に対して想定している音波の波長が大きいため，可能な限り詳細に読み取った．

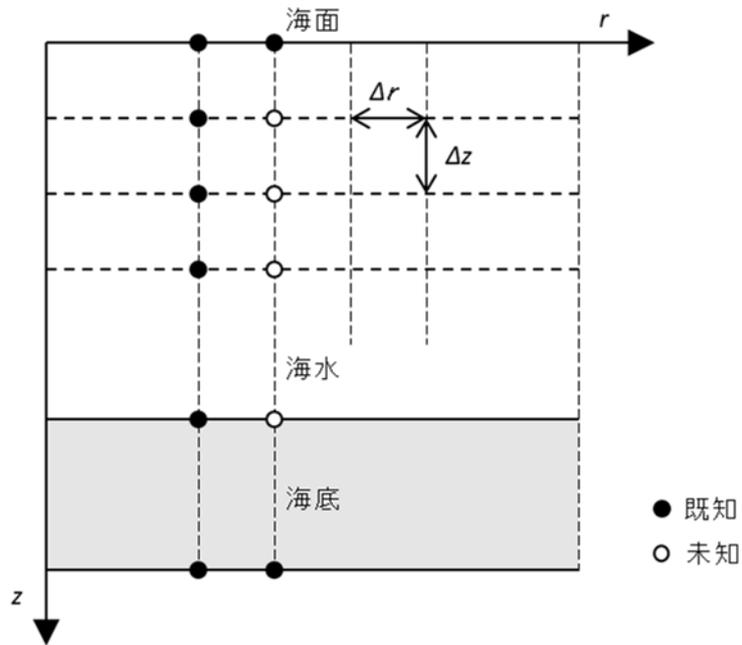


Fig. 3.1 放物線型方程式の解法

3.3.2. FOR3D の入力ファイル

FOR3D プログラムは、Fortran によって記述されており、メインルーティンプログラムとサブルーティンプログラムによって構成されている。計算時にはコンパイルを行い、実行ファイルを作成する。通常メインルーティンは変更されることがなく、サブルーティンを変更するだけでよい。サブルーティンは、入力ファイルとパラメータファイルで構成されており、計算時には主に入力ファイルの周波数、音源深度、各媒質層の層厚、深度方向の音速プロファイル、密度、吸収係数を設定する。FOR3D の入力ファイルを下記に示す。

```
LINE  INPUT DATA
1     TITLE
2     NDIM
3     FRQ,ZS,C0,ISF,RA,ZA,N,IHNK,ITYPES,ITYPEB,ITYPPW,ITYPSW,FLDW,NSEC
4     RMAX,DR,WDR,WZ1,WZ2,WDZ,WDTH,PDR,PDZ,PDTH,ISFLD,ISVP,IBOT
5     DOUGRA,NDIV
6     U1,U2,U3,U4,U5,U6,U7,U8,U9,U10,U11,U12
7     KBOT
8     R1,Z1  **      IF KBOT = 0, BOTTOM PROFILE IS IN RUNSTREAM.
9     R2,Z2  *       RANGE, WATER DEPTH (METERS).
      .      **      -1,-1 MARKS END OF THIS PROFILE.
      .      ***     ENTER PROFILE FOR EACH SECTOR BOUNDARY.
      .      **      PORT BOUNDARY FIRST.
N     .      *       IF KBOT NE 0, UBOTTOM IS CALLED. OMIT
N+1   -1,-1 **      LINES 8 THRU N+1.
N+2   RSVP                                     *
N+3   KSVP
N+4   NLYRS(L)
N+5   ZLYR(I,L),RHO(I,L),RHOG(I,L),BETA(I,L),BETAG(I,L)
N+6   ZSVP(1,L),CSVP(1,L)
N+7   ZSVP(2,L),CSVP(2,L)
N+M   ZSVP(J,L),CSVP(J,L)
```

入力ファイルの各項目の説明を下記に示す。

TITLE = USER NOTE. 80 CHARACTERS MAXIMUM.

NDIM = NUMBER OF DIMENSIONS.

FRQ = FREQUENCY (HZ)

ZS = SOURCE DEPTH

C0 = REFERENCE SOUND SPEED. IF C0 = 0.0, C0 IS SET TO AVERAGE SPEED IN FIRST LAYER.

ISF = STARTING FIELD FLAG.

0 = GAUSSIAN.

1 = USER FIELD.

2 = GREENS STARTER.

RA = HORIZONTAL RANGE FROM SOURCE TO STARTING FIELD. RA IS SET TO 0.0 IF ISF = 0.

ZA = DEPTH OF STARTING FIELD AT RANGE RA. IF ZA = 0.0, ZA IS SET TO MAX DEPTH OF BOTTOM LAYER IN FIRST PROFILE. IF ITYPEB = 2 OR 3 AND ZA = 0.0, ZA IS SET TO (4/3)*MAX DEPTH OF BOTTOM LAYER. IF ITYPEB = 3 AND ZA NOT ZERO, THE ARTIFICIAL BOTTOM LAYER IS EXTENDED TO ZA METERS PROVIDED THAT ZA IS GREATER THAN OR EQUAL TO MAX DEPTH OF BOTTOM LAYER IN FIRST PROFILE.

N = NUMBER OF EQUISPACED RECEIVERS IN STARTING FIELD. IF N = 0, N IS SET SO THAT THE RECEIVER DEPTH INCREMENT IS EQUAL TO 1 METER. IF N IS GREATER THAN MXN N IS SET TO MXN.

IHNK = HANKEL FUNCTION FLAG. IHNK = 0, DON'T USE HANKEL FUNCTION.

IHNK = 1, DIVIDE STARTING FIELD BY HANKEL FUNCTION, THEN MULTIPLY THE SOLUTION FIELD BY HANKEL FUNCTION BEFORE COMPUTING PROPAGATION LOSS. IF STARTING FIELD IS GAUSSIAN, IHNK SHOULD BE SET TO 0. IF STARTING FIELD IS ELLIPTIC, IHNK SHOULD BE SET TO 1.

ITYPES = TYPE OF SURFACE

0 - PRESSURE RELEASE. SCON3D SETS SURY AND SURX = 0.0

1 - USER SUPPLIES SURFACE CONDITION. SEE SUBROUTINE USCON3D.

2 - SPARE.

ITYPEB = TYPE OF BOTTOM

0 - PRESSURE RELEASE. BCON3D SETS BOTY AND BOTX = 0.0

1 - USER SUPPLIES BOTTOM CONDITION. SEE SUBROUTINE UBCON3D.

2 - SPARE.

3 - ABSORBING LAYER INTRODUCED - FLAT BOTTOM

4 - SPARE

ITYPPW = TYPE OF PORT SIDEWALL BOUNDARY CONDITION

0 - FIELD ALONG PORT SIDEWALL IS SET TO 0.0

1 - USER SUPPLIED. SEE SUBROUTINE UPORT3D.

2 - MODEL GENERATES 2D SOLUTION IF NDIM = 3.

ITYPSW = TYPE OF STARBOARD SIDEWALL BOUNDARY CONDITION

0 - FIELD ALONG STARBOARD SIDEWALL IS SET TO 0.0

1 - USER SUPPLIED. SEE SUBROUTINE USTBD3D.

2 - MODEL GENERATES 2D SOLUTION IF NDIM = 3.

FLDW = WIDTH OF FIELD IN DEGREES. IGNORED IF NDIM = 1.

NSEC = NUMBER OF SECTORS IN FIELD. IGNORED IF NDIM = 1. NUMBER OF SOLUTIONS = NSOL = NSEC+1.

RMAX = MAXIMUM RANGE OF SOLUTION

DR = RANGE STEP. IF DR = 0, DR IS SET TO 1 METER. IF BOTTOM OF PROBLEM IS NOT FLAT, DR IS RECOMPUTED SO THAT MAX DEPTH IS EITHER INCREMENTED OR DECREMENTED BY DZ. SOLUTION IS COMPUTED EVERY DR METERS.

WDR = RANGE STEP AT WHICH SOLUTION IS WRITTEN ON DISK. IF WDR NOT 0, AN OUTPUT DISK FILE IS ASSIGNED. WDR IS ROUNDED TO NEAREST DR.

WZ1 = FIRST RECEIVER DEPTH AT WHICH SOLUTION IS WRITTEN ON DISK.

WZ2 = LAST RECEIVER DEPTH AT WHICH SOLUTION IS WRITTEN ON DISK.

WDZ = DEPTH INCREMENT AT WHICH SOLUTION IS WRITTEN ON DISK. ROUNDED TO NEAREST DZ.

WDTH = AZIMUTHAL INCREMENT AT WHICH SOLUTION IS WRITTEN ON DISK. ROUNDED TO NEAREST DTH.

PDR = RANGE STEP AT WHICH SOLUTION IS PRINTED. ROUNDED TO NEAREST DR.

PDZ = DEPTH INCREMENT AT WHICH SOLUTION IS PRINTED. ROUNDED TO NEAREST DZ.

PDTH = AZIMUTHAL INCREMENT AT WHICH SOLUTION IS PRINTED. ROUNDED TO NEAREST DTH.

ISFLD = 0 - DON'T PRINT STARTING FIELD.

= 1 - PRINT STARTING FIELD.

ISVP = 0 - DON'T PRINT SOUND VELOCITY PROFILE.

= 1 - PRINT SOUND VELOCITY PROFILE.

IBOT = 0 - DON'T PRINT BOTTOM DEPTHS.

= 1 - PRINT BOTTOM DEPTHS.

DOUGRA = RANGE AT WHICH TO SWITCH FROM CRANK-NICOLSON METHOD TO DOUGLAS METHOD. IF DOUGRA = 0, USE CRANK-NICOLSON METHOD ONLY. SUGGESTED VALUE IS 5000 METERS.

NDIV = IF DOUGRA NE 0, N IS DIVIDED BY NDIV RESULTING IN ONLY N/NDIV SOLUTIONS IN DEPTH. SPEED UP IS NDIV TIMES. SUGGESTED VALUE IS 5.

U1-U12 = USER VARIABLES - REAL, SINGLE PRECISION. SEE HARVARD SUBROUTINE HARVARD.F FOR EXAMPLE.

KBOT = BOTTOM PROFILE FLAG.

= 0 - BOTTOM PROFILE IN INPUT RUNSTREAM.

= NOT ZERO. PROFILE IS SUPPLIED BY SUBROUTINE UBOTTOM. USER WRITES UBOTTOM. IF NSOL IS LARGE, UBOTTOM IS PREFERRED METHOD OF INPUT. BOTTOM PROFILE AT LEFTMOST SECTOR BOUNDARY.

R1,Z1 = RANGE AND DEPTH OF WATER.

R2,Z2 = ETC.

-1,-1 = MARKS THE END OF THIS BOTTOM PROFILE.

RSVP = RANGE OF SOUND SPEED PROFILES.

KSVP = SVP FLAG.

= 0 - SOUND SPEED PROFILES IN INPUT RUNSTREAM.

=NOT ZERO. PROFILE (LINES N+4 THRU N+M) IS SUPPLIED BY USER. USER WRITES SUBROUTINE USVP3D. KSVP MAY BE USED IN COMPUTED GOTO STATEMENT TO TRANSFER CONTROL IN USVP3D. IF NSOL IS LARGE, USVP3D IS PREFERRED METHOD OF INPUT.

NLYRS(L) = NUMBER OF LAYERS. IF ITYPEB = 3, PROGRAM INSERTS AN ARTIFICIAL LAYER AND INCREMENTS NLYRS(L) BY 1. SEE NOTE 2.

ZLYR(I,L) = MAX DEPTH OF LAYER I IN PROFILE.

RHO(I,L) = DENSITY IN LAYER I (G/CM**3).

RHOG(I,L) = DENSITY GRADIENT IN LAYER I (G/CM**3/M).

BETA(I,L) = ATTENUATION IN LAYER I (DB/WAVELENGTH). IF BETA(I,L) IS NEGATIVE, ATTENUATION IS COMPUTED.

BETAG(I,L) = ATTENUATION GRADIENT IN LAYER I (DB/WAVELENGTH/M).

ZSVP(1,L) = DEPTH TO TOP OF LAYER I

CSVP(1,L) = SPEED OF SOUND AT TOP OF LAYER I

ZSVP(J,L) = DEPTH TO BOTTOM OF LAYER I

CSVP(J,L) = SPEED OF SOUND AT BOTTOM OF LAYER I IF ONLY ONE SVP INPUTTED, IT IS USED THRU ENTIRE PROBLEM. IF MORE THAN ONE SVP INPUTTED, LAST SVP IS USED THRU REMAINDER OF PROBLEM.

4. 本研究で想定する音源

4.1. 船舶放射雑音の概要

船舶放射雑音は、機械雑音と流体雑音の2つに大別される。機械雑音とは、船内の主機および補機の作動時の振動が船体を伝搬して水中に放射される雑音である。流体雑音とは、プロペラキャビテーション、船体周りの流れ、船首部の海面で発生する砕波による雑音の総称である。このうちプロペラキャビテーション雑音は船舶放射雑音の80-85パーセントを占める支配的な要素である (Ross, 1976)。船舶放射雑音の軽減は、海洋調査船や漁船、漁業調査船、艦艇では以前から取り組まれてきた。その目的は、海洋調査船については音響機器の精度を十分に発揮すること、漁船や漁業調査船については雑音による生物の行動変化を防ぐこと、艦艇については音響機器の精度を十分に発揮し、非探知能力を向上させることである。一方で、これらの目的をもたない一般商船では、ほとんど取り組まれていない。

船舶放射雑音の軽減手法はさまざまある。以下に、機械雑音と流体雑音について分けて述べる。機械雑音の軽減手法としては、主に以下の4つが挙げられる。

- (1) 音源となる機器の変更・改良
- (2) 機器架台や配管などの振動伝搬経路への対策
- (3) 接水船体外板への対策
- (4) 上記(1) - (3)を組み合わせた対策

このうち最も有効な方法は(1)である。

流体雑音の支配的成因であるプロペラキャビテーション雑音の軽減手法としては、主に以下の4つが挙げられる。

- (1) プロペラ荷重度の最適化
- (2) 伴流分布の一様化
- (3) 翼端ピッチの低減
- (4) 運航速度の低減

(1)は推進効率の向上に繋がるが、(3)は推進効率の悪化に、また(4)は運航効率の悪化に繋がる。

4.2. 船舶放射雑音が海洋生物に与える影響

船舶放射雑音が海生哺乳類、特にヒゲクジラ類に与える影響については数十年にわたり調査が行われ、行動阻害やマスキングを中心とするさまざまな影響が明らかにされてきた。観測例が多い影響としては、遊泳ルートや速度、呼吸間隔(ブロウの間隔)、潜水時間(尾ビレを高く上げて潜水した時点から次の浮上後のブロウまでの時間)、浮上時間(浮上後最初のブロウの時点から次の潜水までの時間)や鳴音の変化などがある。鳴音については、発声率や発声レベル、周波数の変化が観測されている。水中騒音プロジェクトにおいてもこれらの影響について調査を実施した。以下にヒゲクジラ類に対する船舶放射雑音の調査事例を示す。

1980年代に北極海において行われたホッキョクジラの調査では、小型船が高速で接近した場合に、船舶が遠ざかることによって採餌や社会行動の中断および水面浮上時間の減少が観測された (Richardson et al., 1982, Greene, 1985, Richardson et al., 1985, Jonson et al., 1986) . また、1980年代にメキシコ沖において行われたコクジラの調査では、船舶放射雑音曝露時に鳴音の発声率や発声レベルの増加が観測された (Dahlheim, 1987, Dahlheim and Castellote, 2016) . 米国アラスカ州 Glacier Bay 国立公園において行われたザトウクジラの調査では、観光船からの放射雑音により背景雑音のレベルが 1.0 dB 増加するごとに発声レベルが 0.8 dB 増加することが示された (Frankel and Gabriele, 2017, Fournette al., 2018) . また、2010年代のナガスクジラの調査では、大型船からの放射雑音により背景雑音のレベルが増加すると、鳴音の帯域幅、ピーク周波数、および中心周波数の低下が観測された (Castellote et al., 2012) .

4.3. 本研究における音源

本研究では、父島—母島間を定期運航する貨客船（以下対象船と記す）からの水中放射雑音を音源として扱う。対象船の外観を Fig. 4.1 に、要目を Table 4.1 に示す。対象船には Half モード，Full モード，NaviFull モードの3つの運航モードがあり、運航位置によってモードの変更を行う。対象船の航路を Fig. 4.2 に示す。



Fig. 4.1 対象船の外観

Table 4.1 対象船の要目

全長 L _{OA} [m]	65.21
船幅 B [m]	12.00
計画喫水 [m]	3.40
型深さ [m]	6.34
総トン数 [t]	453 (GT), 410 (DWT)
推進器	プロペラ (4翼) 2基 バウスラスト 1基
主機	ディーゼル機関 2台
計画喫水からのプロペラ中心の深さ[m]	2.4
通常運航時 (NAVIFULL) の船速 [knot]	16.8
通常運航時 (NAVIFULL) の主機回転数 [rpm]	748.9 (Port side) 741.2 (Starboard side)
通常運航時 (NAVIFULL) のプロペラ回転数 [rpm]	267.5 (Port side) 264.7 (Starboard side)



Fig. 4.2 対象船の航路

シミュレーション実施時の対象船の水中放射雑音のスペクトルは水中騒音プロジェクトによって取得されたものを使用する。スペクトルの計測は、2017年1月26日に水深約300mの西伊豆宇久須沖においてISO/DIS 16554.3に準拠して実施された。計測の概要をFig. 4.3に示す。この計測で得られたハイドロフォンの受波音圧レベルから、(音源音圧レベル) - (球面拡散損失 $20\log r$) = (受波音圧レベル) として対象船の音源音圧レベルを求めた。音源音圧スペクトルの0-1200 Hzの範囲を拡大したものをFig. 4.4に、0-200 Hzの範囲を拡大したものをFig. 4.5に示す。Fig. 4.4を見ると、400 Hz, 560 Hz, 1130 Hz 付近に鋭いピークがあることがわかる。これは機械雑音である。次にFig. 4.5を見ると、54 Hz 付近に広帯域のピークがあることがわかる。プロペラキャビテーション雑音は(プロペラ回転数[rps]) × (プロペラブレード数)の整数倍の周波数付近にピークが表れる性質をもつ。表1の対象船要目から、対象船の場合には約18の倍数の周波数にピークが表れることが考えられる。これをふまえてFig. 4.5を見ると、18 Hz 付近と72 Hz 以上については、ほとんどピークは表れていないが、36 Hz 付近、54 Hz 付近のピークはプロペラキャビテーション雑音であることがわかる。

シミュレーション実施時の音源深度はTable 4.1の要目内の計画喫水からのプロペラ中心の深さより2.4 mとした。プロペラ軸深度は荷荷状況によって変化するが、水中騒音プロジェクトの調査によって23回の航海において出港時の喫水の最大値と最小値の差は0.225 mであることが報告されている。また、気象庁が公開している小笠原村父島の潮汐観測データによると、第4章の計測を実施した2017年5月15-17日の潮位は一日で50 cm以上の変動がある。そのため、荷荷状況によるプロペラ軸深度の変化が音波伝搬に与える影響は無視できると考えられる。

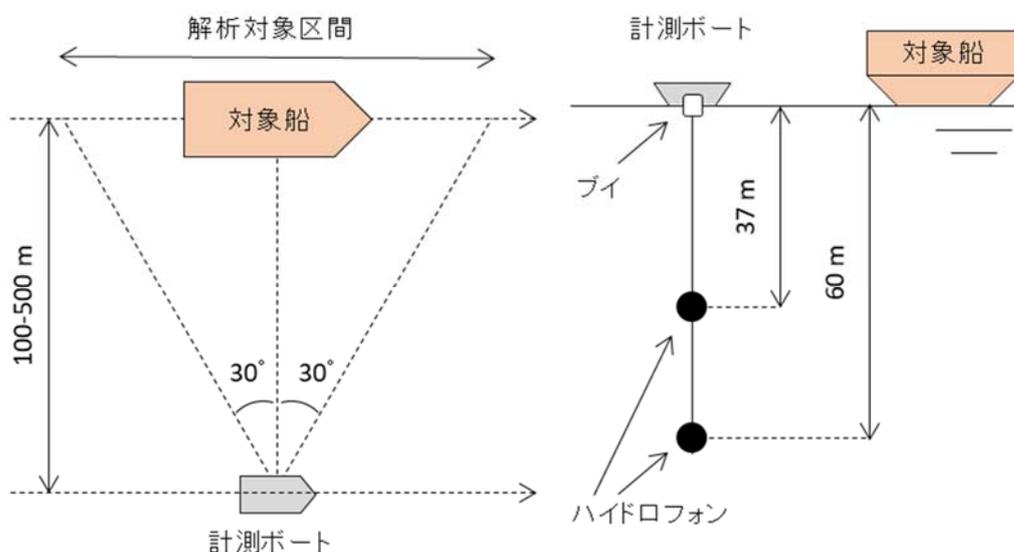


Fig. 4.3 西伊豆における対象船の音源スペクトル計測の概要

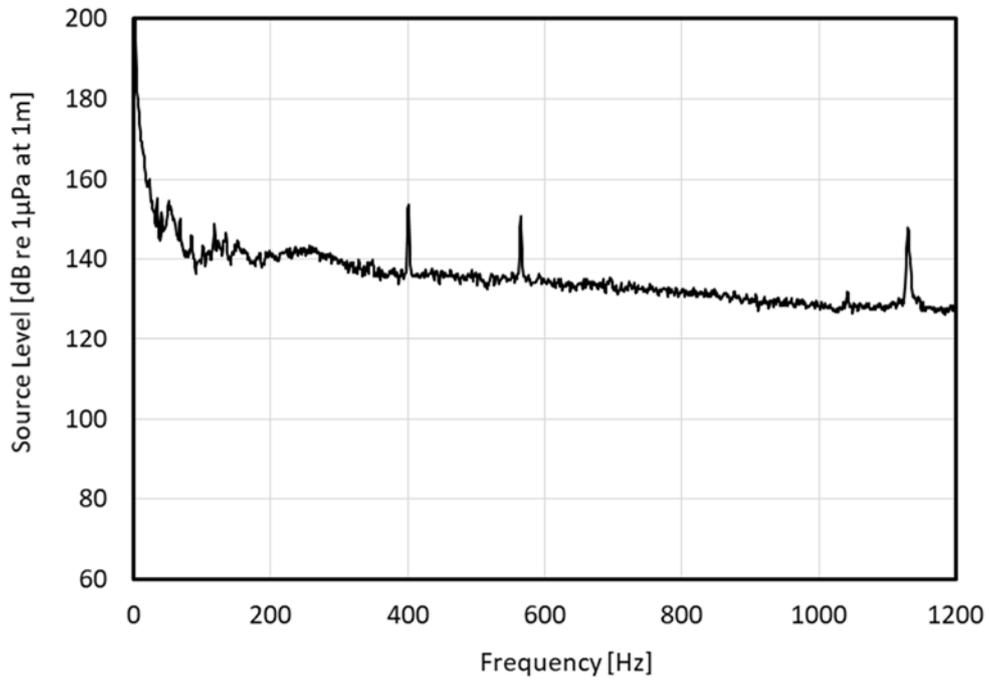


Fig. 4.4 西伊豆で計測された対象船の音源スペクトル (0-1200 Hz)

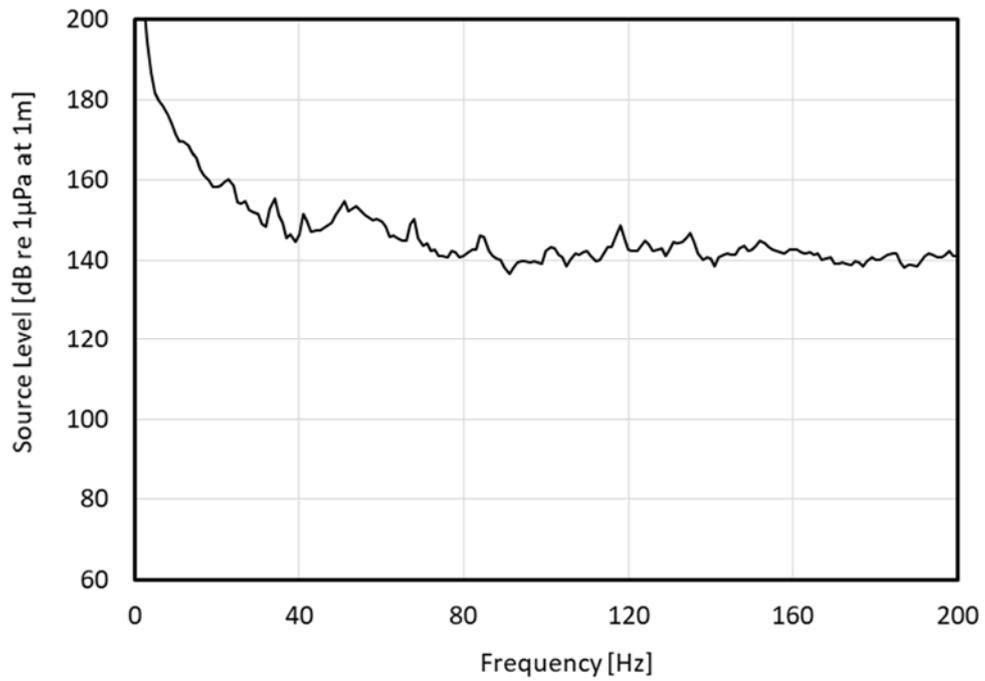


Fig. 4.5 西伊豆で計測された対象船の音源スペクトル (0-200 Hz)

5. 対象船からの放射雑音の計測

5.1. 計測の概要

実施概要を以下に示す。

5.1.1. 目的

父島－母島間を定期運航する貨客船からの水中放射雑音をハイドロフォンによって計測し、小笠原海域における伝搬特性等を調査することを目的とする。特に、対象船のプロペラキャビテーションの中心周波数である 50 Hz（波長約 30 m）に対し、ザトウクジラの目視観測例が多い父島周辺の深度 50 m 以下の海域は浅海とみなせることから、カットオフ現象が発生する可能性がある点に注目して調査を行った。

5.1.2. 実施日程

対象船の運航スケジュールにあわせて実施した。Table 5.1 に示す。計測①，②は対象船運航時の放射雑音を，計測③は計測①，②と同じ位置における対象船非運航時の背景雑音を計測した。背景雑音については，よう船の都合により計測①，②の前後に対象船からの放射雑音の影響がない状況で計測を実施できなかったため，計測③として別の日程で実施した。

Table 5.1 計測実施日程

	実施日	対象船運航スケジュール				計測位置及び時刻
		父島発	母島着	母島発	父島着	
計測①	2017/05/15	12:30	14:30	—	—	二見湾口 12:30-14:30 計測深度 10m
計測②	2017/05/17	07:30	09:30	—	—	二見湾口 07:30-08:30 計測深度 20m
計測③	2017/05/16	—	—	14:00	16:00	二見湾口 07:30-08:30 計測深度 10m

5.1.3. 実施海域

実施海域は東京都小笠原村父島の二見湾である。計測位置はザトウクジラの目視観測データが集中している海域の中心付近を選定した。計測位置の座標は（27°05'00.00" N, 142°10'37.00" E）である。また，この点は第 7 章で音響曝露レベルマップを構築する海域の中心点とした。計測位置の水深は 50 m である。計測深度はザトウクジラの潜水深度を考慮して 10 m および 20 m とした。計測位置および対象船の運航経路の一部を Fig. 5.1 に示す。計測の際は計測船からアンカーを下ろ

し，計測実施時間全体にわたって位置を保持した．



Fig. 5.1 計測位置と対象船の航路

5.1.4. 計測システム

計測に用いたハイドロフォンは Ocean Sonics 社の Smart Hydrophone シリーズの「ic Listen HF (SB35-ETH)」である。「ic Listen HF」は従来のアナログ型ハイドロフォンに信号処理機能，メモリおよびバッテリーが搭載されているものである．そのため，プリアンプやフィルタ，A/D コンバータ等が不要であり，計測した音響データは wav ファイルとして内蔵メモリに記録される．「ic Listen HF」の外観を Fig. 5.2，受波特性を Fig. 5.3，雑音特性を Fig. 5.4 に示す．なお，実用周波数範囲は，10 Hz-200 kHz である．

ハイドロフォンによる海中音の計測は，一般的には計測船からハイドロフォンを直接吊下する方法がとられる．しかし，今回計測を行った海域は波浪が大きく，この方法では計測船の動揺や舷側に打ち付ける波による雑音が生じる可能性があったため，本計測では計測船から回収用のロープを付けたブイを経由してハイドロフォンを吊下した．設置方法の概観を Fig. 5.5 に示す．ブイは直径 200 mm のプラスチックブイ，ロープはハイドロフォン吊下用および回収用ともに金剛打ちの直径 6 mm ナイロン製ロープを使用した．



Fig. 5.2 ic Listen HF の外観

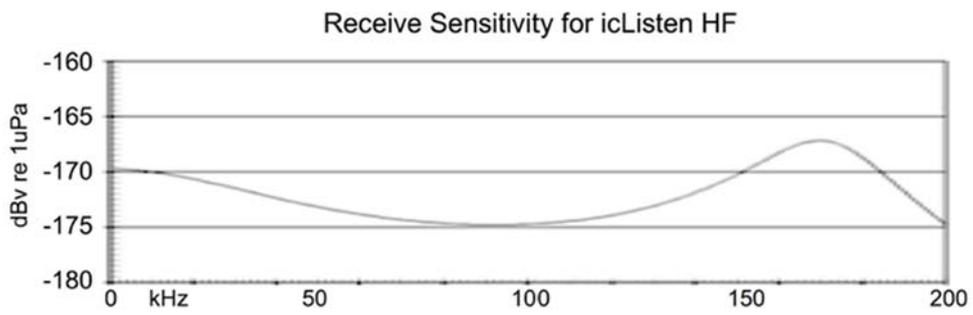


Fig. 5.3 ic Listen HF の受波感度

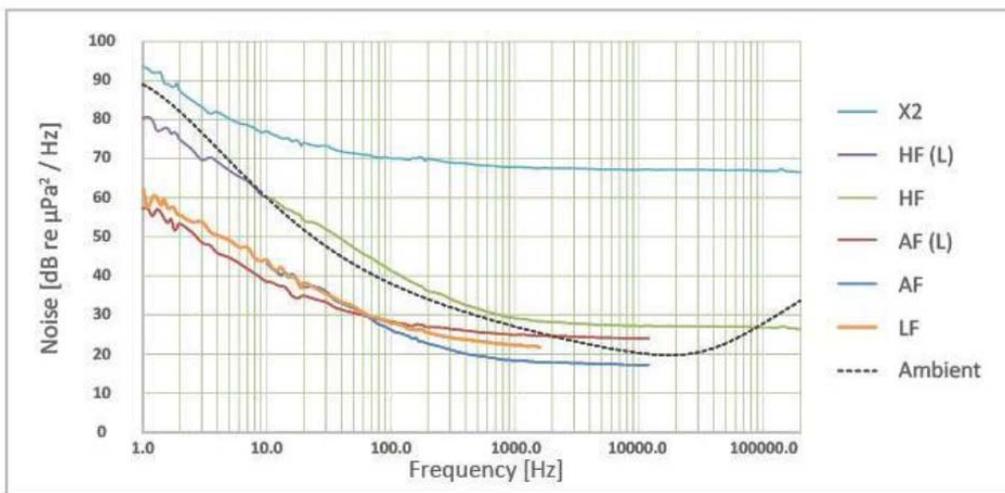


Fig. 5.4 ic Listen HF の雑音特性

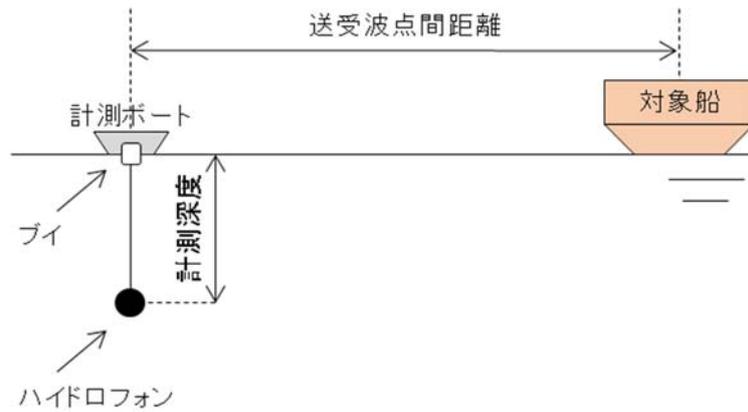


Fig. 5.5 小笠原における対象船の放射雑音計測の概要

5.2. 計測の結果

本計測で取得した wav ファイルを Ocean Sonics 社の Smart Hydrophone シリーズ専用のソフトウェアである「Lucy」を使用して解析した。計測①～③で取得した wav データから作成したスペクトラムチャートを Fig. 5.6 に示す。計測①についてのみ図内に送受波点間距離と時刻を示す。対象船は二見湾口を出る時刻（計測①では 12:35 頃、計測②では 07:35）から運航モードを変更しながら徐々に船速を増加させる。計測位置と対象船位置間の距離は、計測①では 12:39、計測②では 07:39 頃に最接近距離 0.85 km に達して以降は単調に増加するため、受波音圧レベルは単調に減少すると考えられる。これらのことから、スペクトラムチャート上で対象船からの雑音を明瞭に確認できるのは出港時刻（計測①では 12:30、計測②では 07:30）から計測位置と対象船位置間の距離が 5 km となる時刻（計測①では 12:50、計測②では 07:50）頃までであることがわかる。計測①において 12:49 以降に現れるピークは対象船以外の行合船からの雑音であるため、以後の計測①～③の解析では出港後 17 分間を対象とする。

計測①、計測②において、対象船が NAVIFULL モードで運航し、船速が定常状態となった出港後 13 分経過時のスペクトルの 0-1200 Hz の範囲を拡大したものを Fig. 5.7, Fig. 5.9 に、0-200 Hz の範囲を拡大したものを Fig. 5.8, Fig. 5.10 に示す。また、計測③の対象船非運航時の背景雑音の 0-1200 Hz の範囲を拡大したものを Fig. 5.11 に、0-200 Hz の範囲を拡大したものを Fig. 5.12 に示す。以下にそれぞれについての考察を述べる。

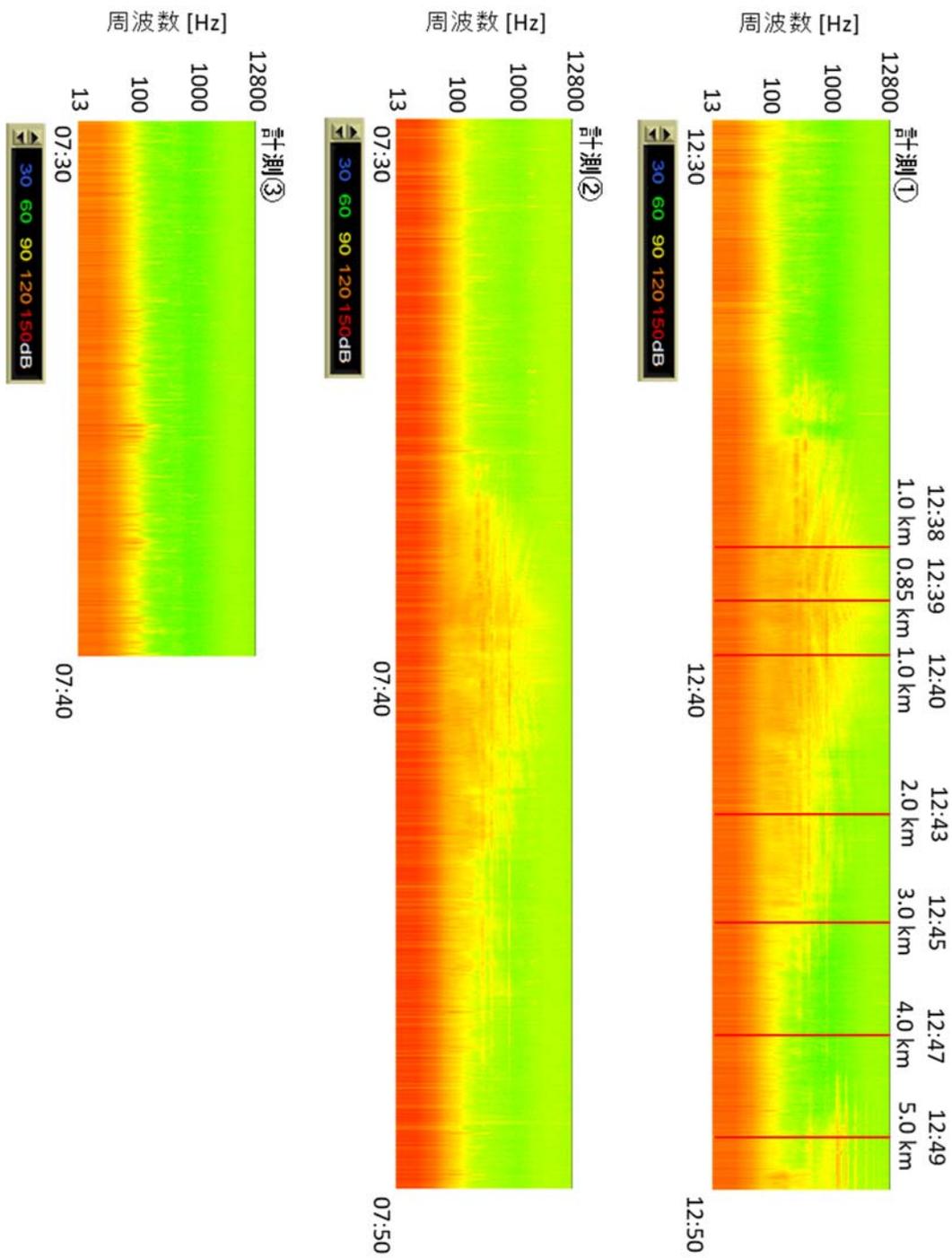


Fig. 5.6 小笠原における計測①-③のスペクトラムチャート

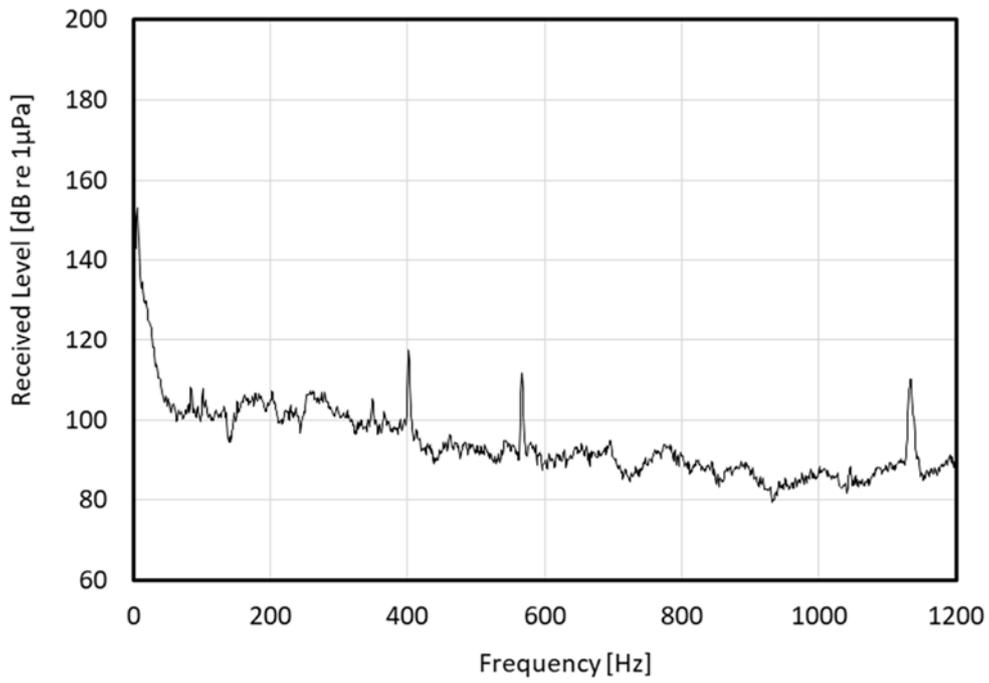


Fig. 5.7 小笠原の計測①における対象船出航 13 分後の受波スペクトル (0-1200 Hz)

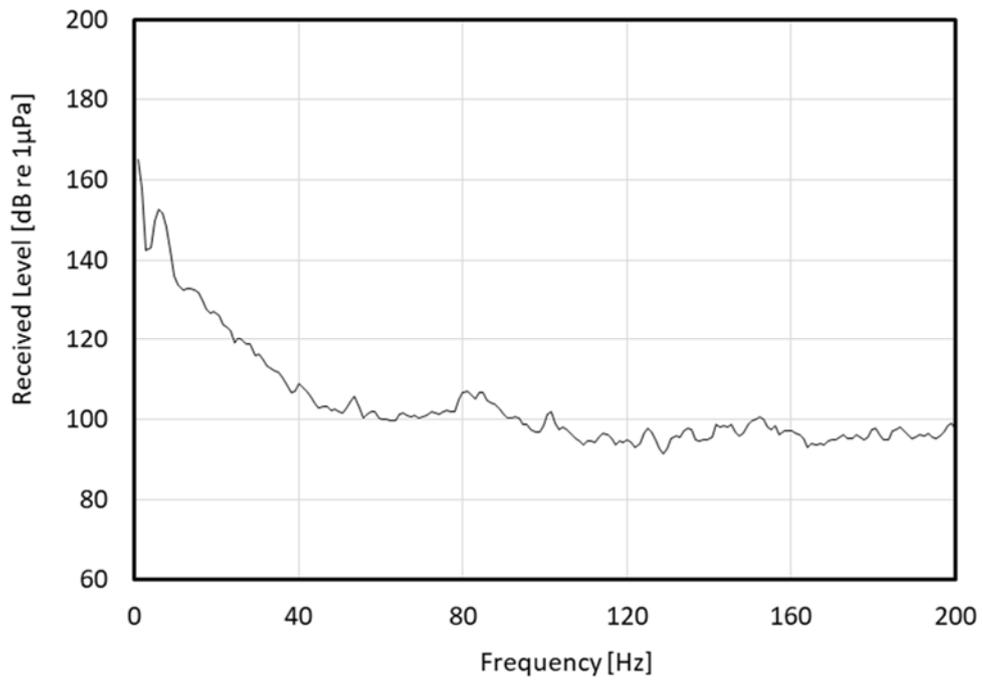


Fig. 5.8 小笠原の計測①における対象船出航 13 分後の受波スペクトル (0-200 Hz)

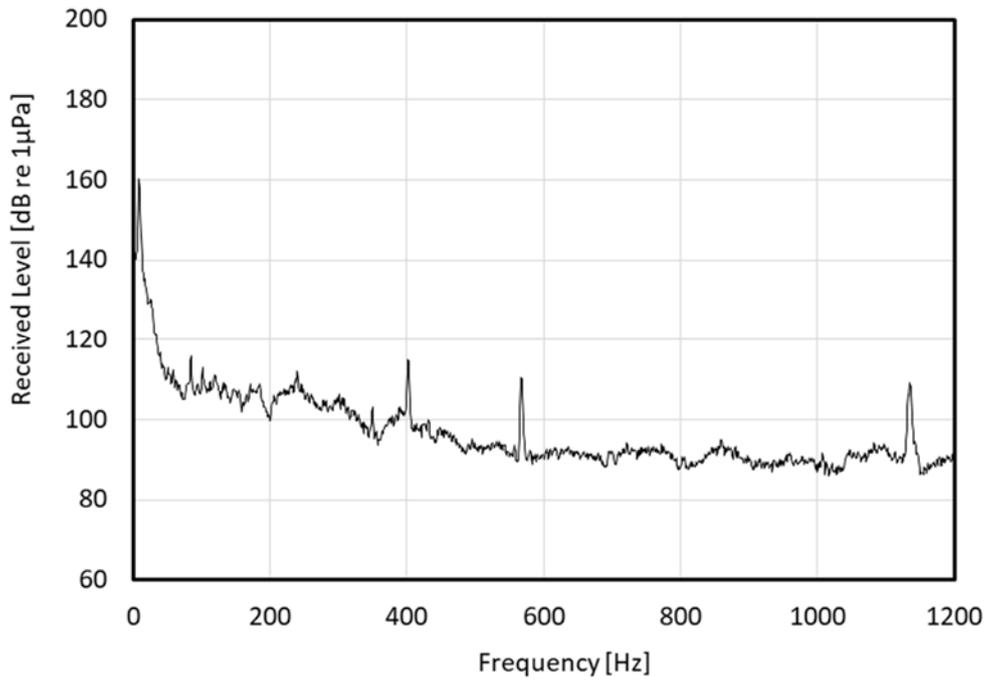


Fig. 5.9 小笠原の計測②における対象船出航 13 分後の受波スペクトル
(0-1200 Hz)

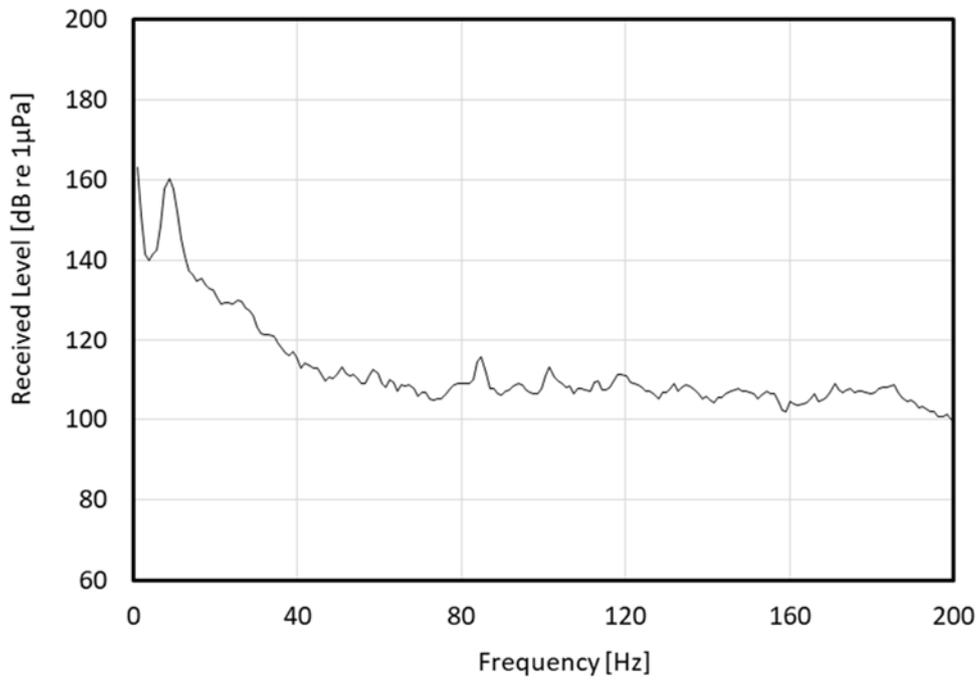


Fig. 5.10 小笠原の計測②における対象船出航 13 分後の受波スペクトル
(0-200 Hz)

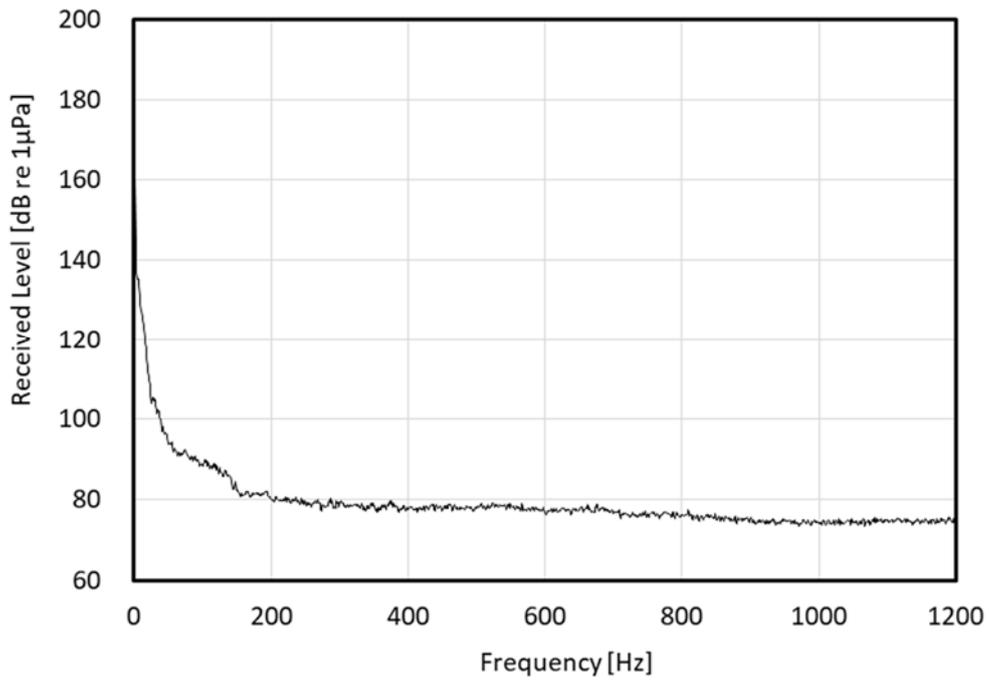


Fig. 5.11 小笠原の計測③における受波スペクトル (0-1200 Hz)

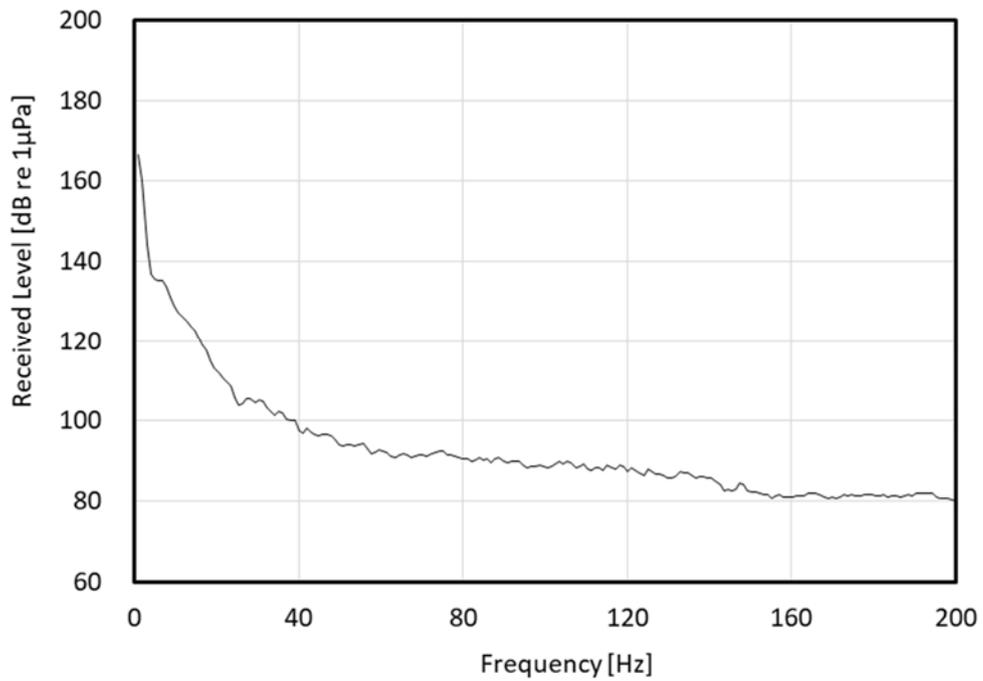


Fig. 5.12 小笠原の計測③における受波スペクトル (0-200 Hz)

(1) 計測①

Fig. 5.6 において計測①を見ると、対象船からの放射雑音は、12:00 に出航後 12:35 頃までは確認できず、地形的に遮蔽されていることがわかる。対象船が二見湾口付近を通過する 12:36 頃以降から 12:47 頃までは明瞭に確認できる。また、対象船が計測位置に最接近した 12:39 (送受波点間最接近距離 0.85 km) 頃の受波音圧レベルが最大である。12:50 頃に現れるピークは行合船からの雑音であるので、ここでは考察の対象としない。

Fig. 5.7 を見ると、Fig. 4.4 と同様に 400 Hz, 560 Hz, 1130 Hz 付近に機械雑音の鋭いピークがあることがわかる。しかし Fig. 5.8 を見ると、50 Hz 付近にプロペラキャビテーション雑音らしいピークは明瞭には表れていない。これは、船舶雑音の伝搬経路である対象船位置と計測位置の水深は最大で 50 m と極めて浅いために、中心周波数が 50 Hz 付近 (波長 30 m 程度) である対象船のプロペラキャビテーション雑音はカットオフ現象により急激に減衰し、背景雑音にマスキングされていることが原因であると考えられる。

(2) 計測②

Fig. 5.6 において計測②を見ると、対象船からの放射雑音は、07:00 に出航後 07:35 頃までは確認できず、地形的に遮蔽されていることがわかる。対象船が二見湾口付近を通過する 07:36 頃以降から 07:47 頃までは明瞭に確認できる。また、対象船が計測位置に最接近した 07:39 (送受波点間最接近距離 0.85 km) 頃の受波音圧レベルが最大である。

Fig. 5.9 を見ると、Fig. 4.4 と同様に 400 Hz, 560 Hz, 1130 Hz 付近に機械雑音の鋭いピークがあることがわかる。しかし Fig. 5.10 を見ると、50 Hz 付近にプロペラキャビテーション雑音らしいピークは明瞭には表れていない。これは、船舶雑音の伝搬経路である対象船位置と計測位置の水深は最大で 50 m と極めて浅いために、中心周波数が 50 Hz 付近 (波長 30 m 程度) である対象船のプロペラキャビテーション雑音はカットオフ現象により急激に減衰し、さらに計測実施時は海象が悪くうねりが 2-3 m あり、風波もシーステート 3 程度であったため、背景雑音にマスキングされていることが原因であると考えられる。

また、Fig. 5.9, Fig. 5.10 を Fig. 5.7 Fig. 5.8 と比較すると、0-1200 Hz 全体にわたって計測②は計測①よりも受波音圧レベルが大きいことがわかる。これは計測位置の水深が 50 m であるため、計測深度が水深の midpoint により近い計測②の方が海面や海底からの反射波がより多く合成されているためであると考えられる。

(3) 計測③

Fig. 5.6 において計測③を見ると、対象船非運航時の背景雑音の周波数帯は主に 0-100 Hz であることがわかる。

6. 対象船からの放射雑音の音波伝搬シミュレーション

6.1. 音波伝搬シミュレーションの概要

実施概要を以下に示す。

6.1.1. 目的

影響調査の際に対象生物の受波音圧レベルの推定に使用する音波伝搬シミュレーション手法について、第5章で記した計測値との比較によってその精度を検証することを目的とする。

6.1.2. 音波伝搬シミュレーションの諸設定

(1) 使用したコード

シミュレーションは、3.3節に記した、伝搬経路において海洋環境パラメータの入力が可能なPE法 (parabolic equation method) のコードFOR3Dを用い2次元で行った。シミュレーションの刻み幅は距離方向2 m、深度方向2 mとした。

(2) 音源

音源は125 Hzの連続波とした。対象船のプロペラキャビテーション雑音の中心周波数は50 Hz付近であるが、第5章の計測結果に示したように、ザトウクジラの目視観測例が多い海域において中心周波数50 Hzのプロペラキャビテーション雑音はカットオフ現象により明瞭に確認することができなかった。しかし、ザトウクジラの鳴音の周波数帯域を考慮すると、400 Hz程度までの雑音については悪影響を与える可能性がある。そのため、第5章の計測結果から背景雑音にマスキングされていないと判断した卓越周波数のひとつである125 Hzについて比較を行った。

音源深度は対象船のプロペラ深度である2.4 m、送波音圧レベルは4.3節に記した対象船の水中放射雑音のスペクトルから143.78 dB re 1 μ Pa at 1mとした。

(3) シミュレーション経路

シミュレーション経路は、対象船が父島から母島に向かう航路において第5章に記した計測位置と対象船位置間の距離が1.0 km、2.0 km、3.0 km、4.0 km、および最接近距離0.85 kmとなる時刻の2点間を結ぶ6本の経路とした。各経路及び出港時刻からの経過時間をFig. 6.1に、各経路の出港時刻からの経過時間および送受信点間距離をTable. 6.1に示す。また、各時刻をFig. 5.6のスペクトラムチャート上に赤線で示した。



Fig. 6.1 計測とシミュレーションの比較経路

Table 6.1 各経路の詳細

	出港後の経過時間 [min]	送受信点間距離 [km]
経路 1	8	1.0
経路 2	9	0.85
経路 3	10	1.0
経路 4	13	2.0
経路 5	15	3.0
経路 6	17	4.0

6.1.3. 音波伝搬シミュレーションに入力した海洋環境データ

3.3.2 に示したように、FOR3D で音波伝搬シミュレーションを行うために必要な入力ファイルには、送信点・受信点と必要であればその間の任意の点における海面から海底層の下端までの音速プロファイルを示す。送信点から受信点に向かう距離方向で、海洋環境（海底の勾配・海底質・海水の音速プロファイル）が距離方向に変化しない場合は、送受信点の2点の音速プロファイルのみでよい。しかし、3つのパラメータのうちどれかひとつでも変化する場合は、変化する点における音速プロファイルも記述する必要がある。入力ファイルの作成例を Fig. 6.2 に示す。また、Fig. 6.2 の距離方向 10 m 毎の位置において、各パラメータの変化の有無および音速プロファイルの要否を Table 6.2 に示す。

本研究で使用した海洋環境データを以下 (1) - (3) に示す。音波伝搬シミュレーションの際には、海底地形と海底質のデータを重ねた図に各経路を記入し、海洋環境データを読み取り入力ファイルを作成した。距離方向の海洋環境の変化については可能な限り詳細に読み取った。

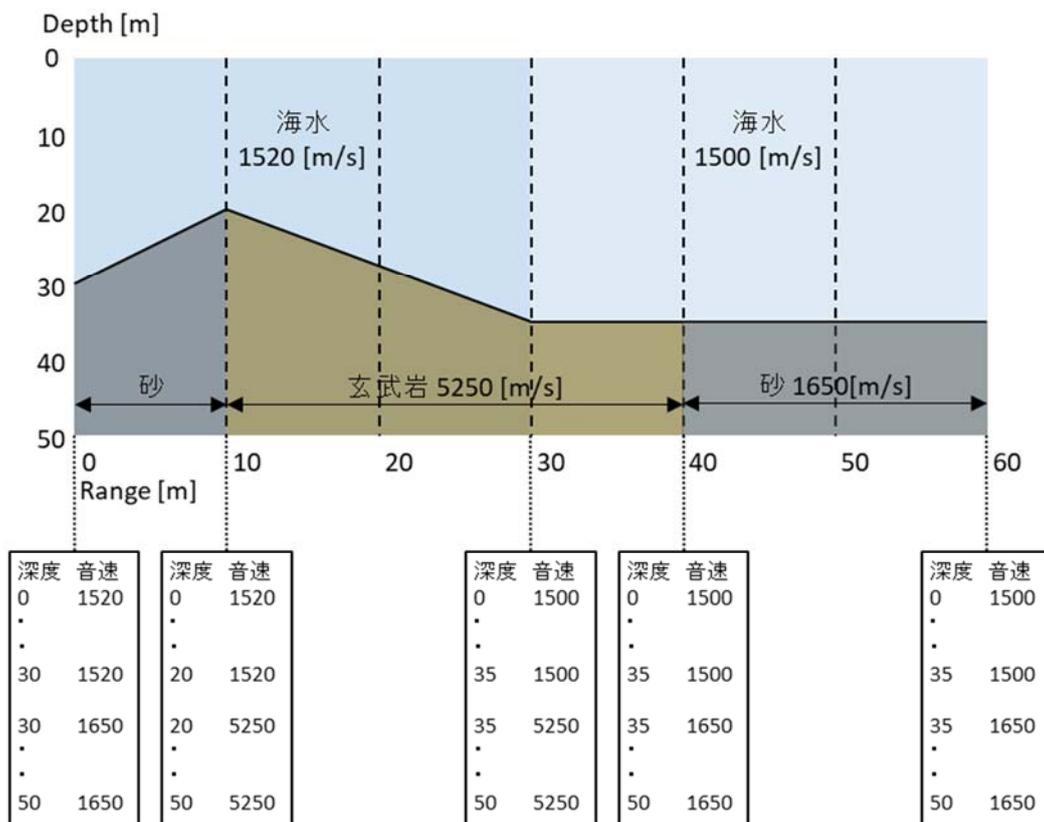


Fig. 6.2 入力ファイルの作成例

Table 6.2 各位置の音速プロファイルの要否

		0 m	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m
		送信点						受信点
距離 方向 変化	海底の勾配	—	○	×	○	×	×	—
	海底質	—	○	×	×	○	×	—
	海水の音速 プロファイル	—	×	×	○	×	×	—
音速プロファイル要否		○	○	×	○	○	×	○

(1) 海底地形

各経路の海底地形を求めるために使用した、海上保安庁から取得した等深線図を Fig. 6.3 に示す。この図から、すべての経路において最大水深は 100 m 以下であることが読み取れる。



Fig. 6.3 等深線図

(2) 海底質

各経路の海底質を求めるために使用した、日本水路協会が刊行している海底地質構造図を Fig. 6.4 に示す。また、各底質の音響パラメータを Table 6.2 に示す。この図から、経路 1-6 において経路に分布する海底質は玄武岩と砂のみであることが読み取れる。海底地質構造図からは堆積層の厚さは不明であるため、全経路において図に従った底質を海底下 1500 m まで設けた。

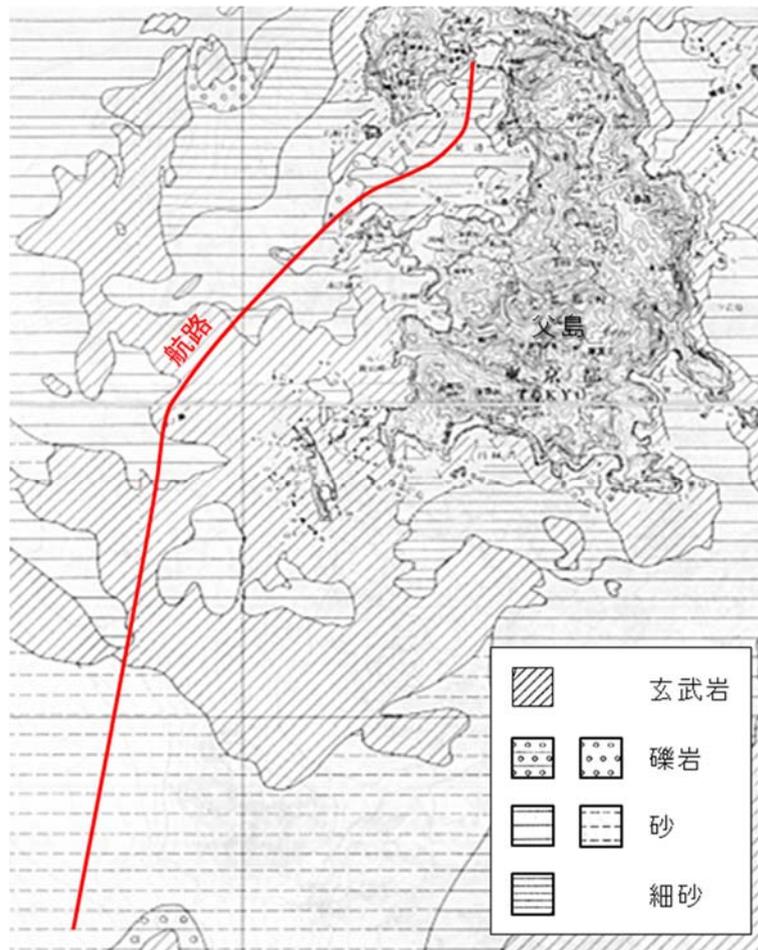


Fig. 6.4 海底地質構造図

Table 6.2 地質音響パラメータ
Jensen (1994)と Xavier (2002)より引用

	密度 [kg/m ³]	音速 [m/s]	吸収係数 [dB/m/kHz]
細砂	1950	1725	0.80
砂	1900	1650	0.80
礫岩	2200	2400	0.20
玄武岩	2700	5250	0.10

(3) 音速プロファイル

シミュレーションの全経路に使用した音速プロファイルは 2017 年 4 月 5 日に二見湾付近 (27°06'26.62" N, 142°09'02.38" E) にて CTD で計測された深度方向の水温・塩分データを以下の UNESCO の式で音速に変換したものである。CTD 計測によって得られた水温, 塩分およびそれらを変換して得られた音速を Fig. 6.5 に示す。この図から, 音速は海面から海底まで±1 m/s 以内とほぼ一定であることがわかる。

$$c(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^2 + D(T, P)S^3$$

ここで, T を水温[°C], S を実用塩分[psu], P を実用塩分[kg/cm³]とし,

$$\begin{aligned} C_w(T, P) = & (C_{00} + C_{01}T + C_{02}T^2 + C_{03}T^3 + C_{04}T^4 + C_{05}T^5) \\ & + (C_{10} + C_{11}T + C_{12}T^2 + C_{13}T^3 + C_{14}T^4)P \\ & + (C_{20} + C_{21}T + C_{22}T^2 + C_{23}T^3 + C_{24}T^4)P^2 \\ & + (C_{30} + C_{31}T + C_{32}T^2)P^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A(T, P) = & (A_{00} + A_{01}T + A_{02}T^2 + A_{03}T^3 + A_{04}T^4) \\ & + (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3 + A_{14}T^4)P \\ & + (A_{20} + A_{21}T + A_{22}T^2 + A_{23}T^3 + A_{24}T^4)P^2 \\ & + (A_{30} + A_{31}T + A_{32}T^2)P^3 \end{aligned}$$

$$B(T, P) = B_{00} + B_{01}T + (B_{10} + B_{11}T)P$$

$$D(T, P) = D_{00} + D_{01}P$$

Coefficients	Numerical values	Coefficients	Numerical values
C00	1402.388	A02	7.166E-5
C01	5.03830	A03	2.008E-6
C02	-5.81090E-2	A04	-3.21E-8
C03	3.3432E-4	A10	9.4742E-5
C04	-1.47797E-6	A11	-1.2583E-5
C05	3.1419E-9	A12	-6.4928E-8
C10	0.153563	A13	1.0515E-8
C11	6.8999E-4	A14	-2.0142E-10
C12	-8.1829E-6	A20	-3.9064E-7
C13	1.3632E-7	A21	9.1061E-9
C14	-6.1260E-10	A22	-1.6009E-10
C20	3.1260E-5	A23	7.994E-12
C21	-1.7111E-6	A30	1.100E-10
C22	2.5986E-8	A31	6.651E-12
C23	-2.5353E-10	A32	-3.391E-13
C24	1.0415E-12	B00	-1.922E-2

C ₃₀	-9.7729E-9	B ₀₁	-4.42E-5
C ₃₁	3.8513E-10	B ₁₀	7.3637E-5
C ₃₂	-2.3654E-12	B ₁₁	1.7950E-7
A ₀₀	1.389	D ₀₀	1.727E-3
A ₀₁	-1.262E-2	D ₁₀	-7.9836E-6

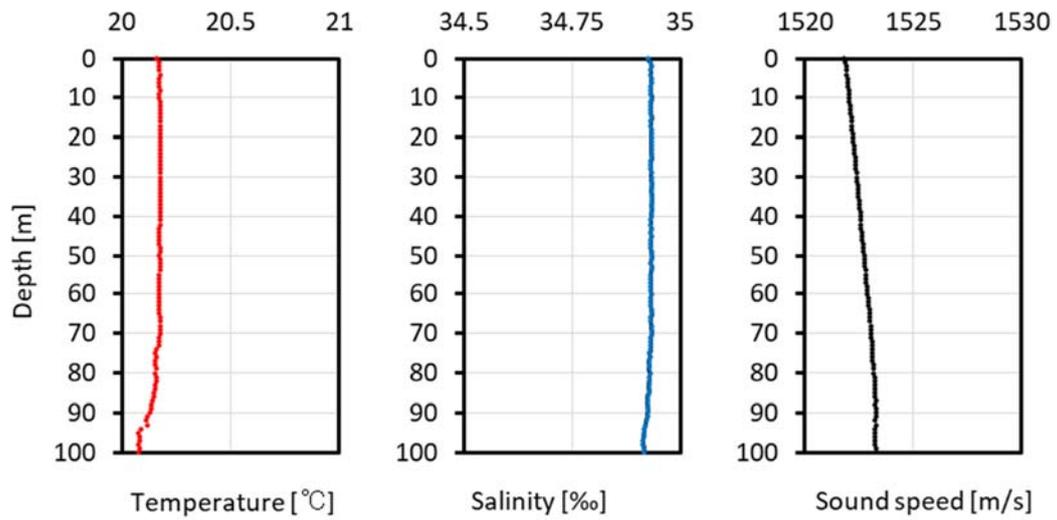


Fig. 6.5 CTD 計測位置における水温・塩分・音速の鉛直プロファイル

6.1.4. 受波音圧レベルの算出方法

各経路について、6.1.3 に示した海洋環境データを入力し、音波伝搬シミュレーションによって 125 Hz の連続波の深度 10 m, 20 m における伝搬損失を求め、式 (8) に示したソーナー方程式を用いて第 5 章の計測位置における受波音圧レベルを算出した。Range=0 [m]を各経路における対象船の位置とし、計測位置までの底質および水深の断面図を Fig. 6.6 に示す。

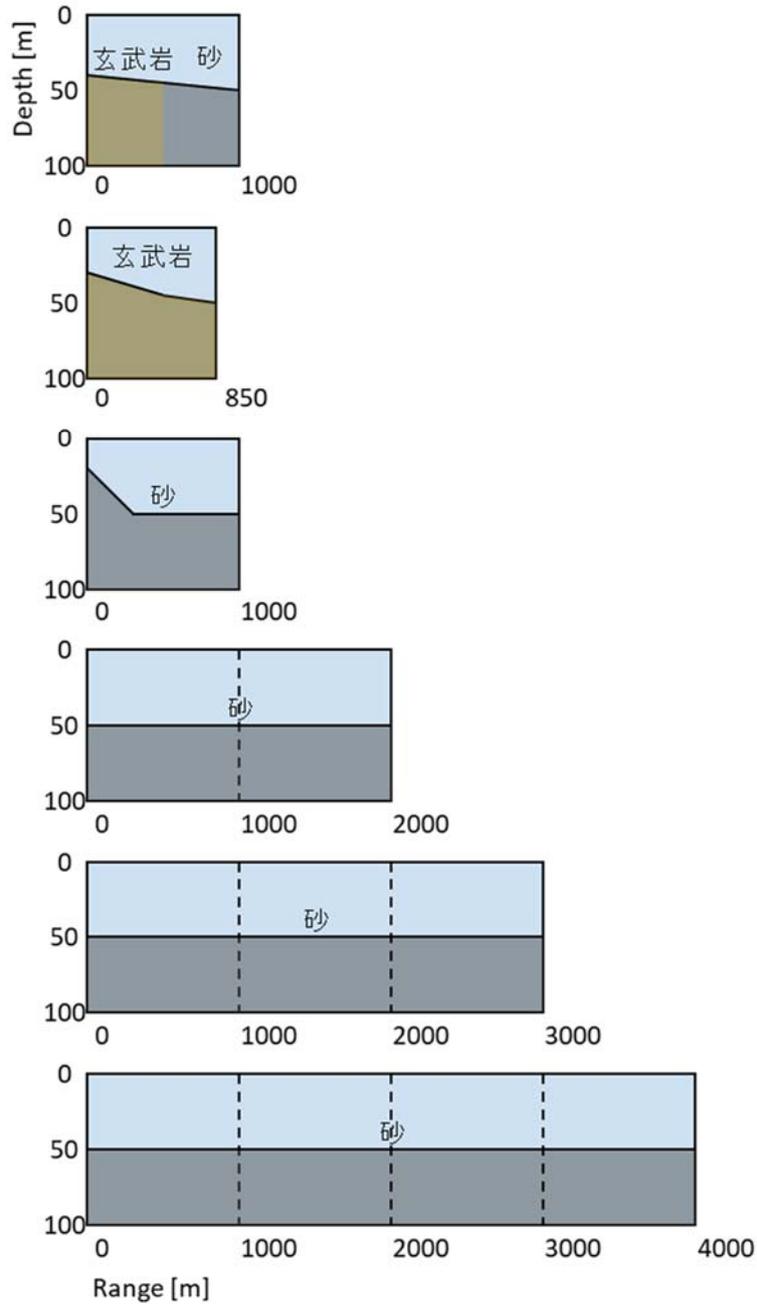


Fig. 6.6 シミュレーションに入力した経路 1-6 の海洋環境

6.2. 音波伝搬シミュレーションの結果

実施した音波伝搬シミュレーションの結果を以下に示す。Fig. 6.7 にシミュレーション経路 1-6 の伝搬損失分布を示す。図中に海底を白線で示した。この図から、音波は海面と海底間での反射を繰り返しながら伝搬していることがわかる。

計測①（計測深度 10 m）、計測②（計測深度 20 m）におけるハイドロフォンの受波音圧レベル、音波伝搬シミュレーションおよび従来手法によって求めた音圧受波レベルを Fig. 6.8, Fig. 6.9 にそれぞれ示す。従来手法としては、式 (5) - (7) に示した球面拡散、浅海拡散、円筒拡散を仮定して伝搬損失を計算した。なお、Fig. 6.8, Fig. 6.9 において、横軸は Table 6.1 に示した出港後の経過時間である。

Fig. 6.8, Fig. 6.9 を見ると、両計測深度において、125 Hz の計測値に最も近い値を示しているのは浅海拡散を仮定した伝搬損失の式によって求めた受波音圧レベル、次に近い値を示しているのは音波伝搬シミュレーションによって求めた受波音圧レベルである。なお、各経路の音波伝搬シミュレーションによって求めた受波音圧レベルと計測値の差には、経路の底質や海底地形による傾向は見られない。

また、深度 10 m, 20 m どちらにおいても全体として音波伝搬シミュレーションによって求めた受波音圧レベルが計測値に最も近い変化傾向を示している。このことから、カットオフ周波数以上の周波数については、音源から 4 km 程度の範囲内であれば浅海拡散を仮定した伝搬損失の式によって十分な精度の受波音圧レベルの推定が可能であるが、より広範囲について影響調査を行う場合には過大評価となる可能性もあるといえる。

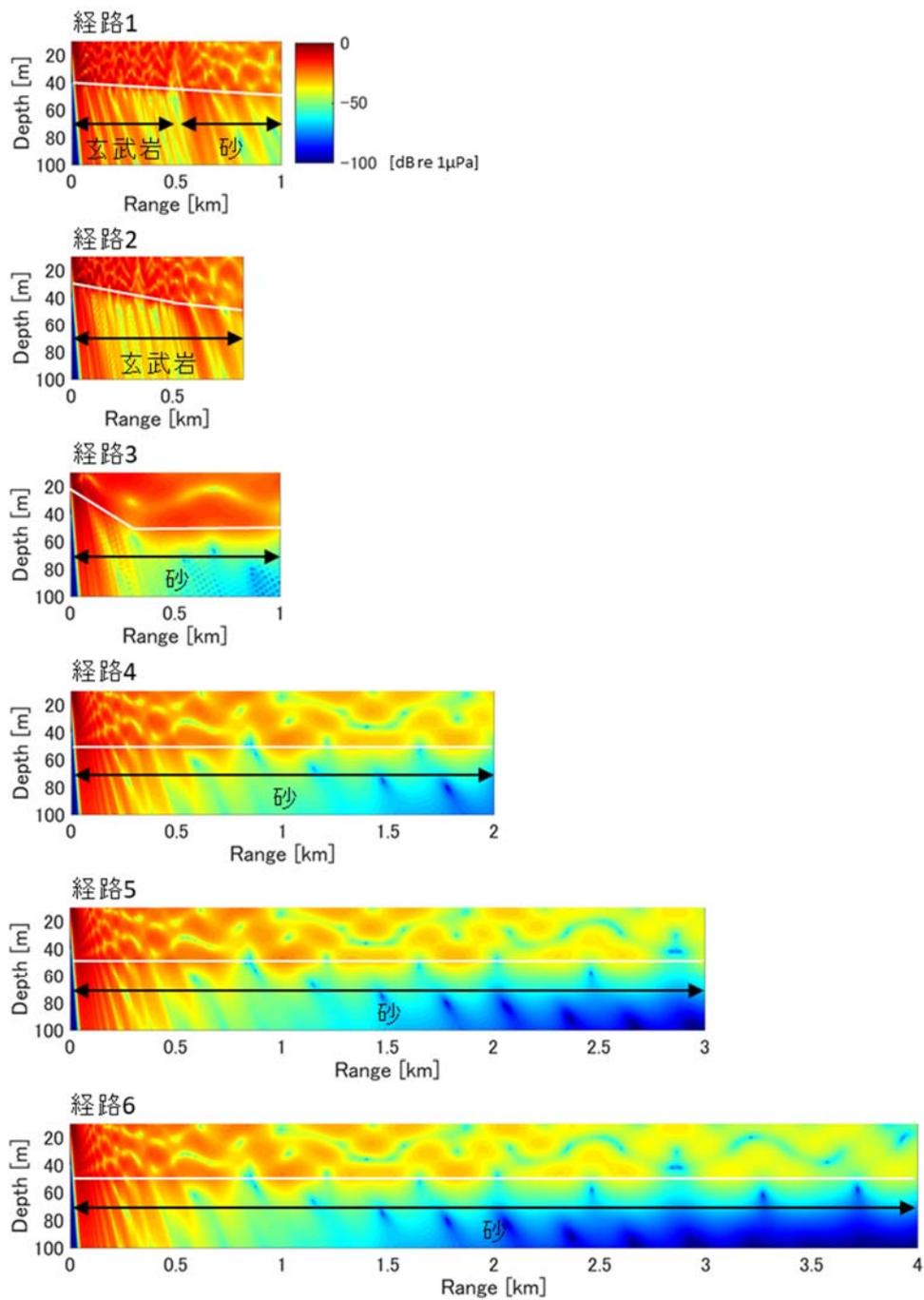


Fig. 6.7 シミュレーションによって求めた経路 1-6 の伝搬損失 (125 Hz)

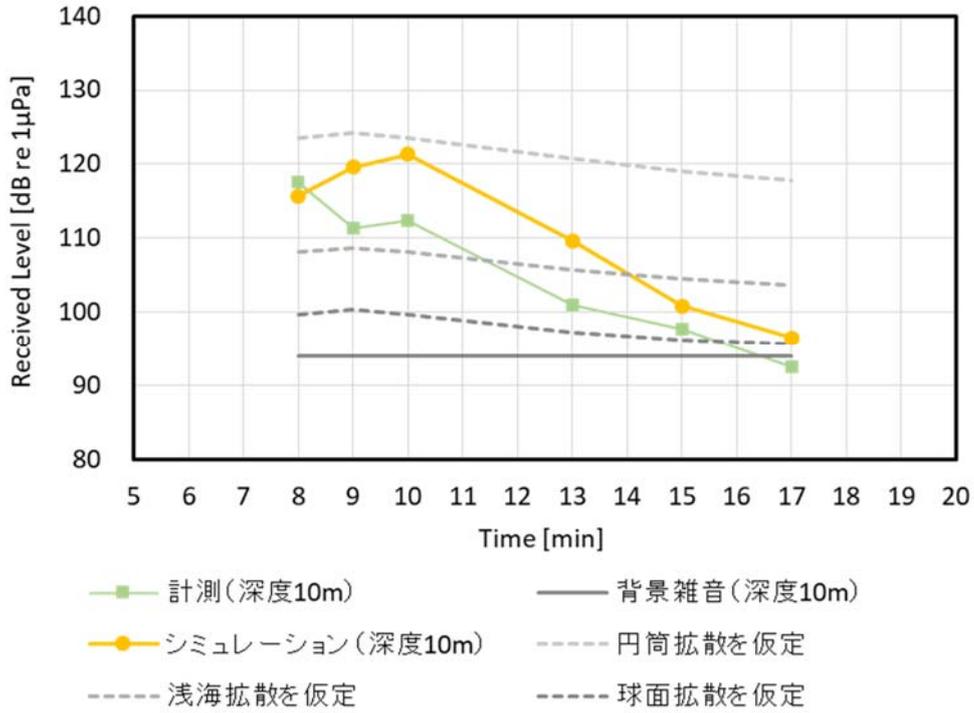


Fig. 6.8 各手法で求めた計測位置（深度 10m）における 125Hz の受波音圧レベル

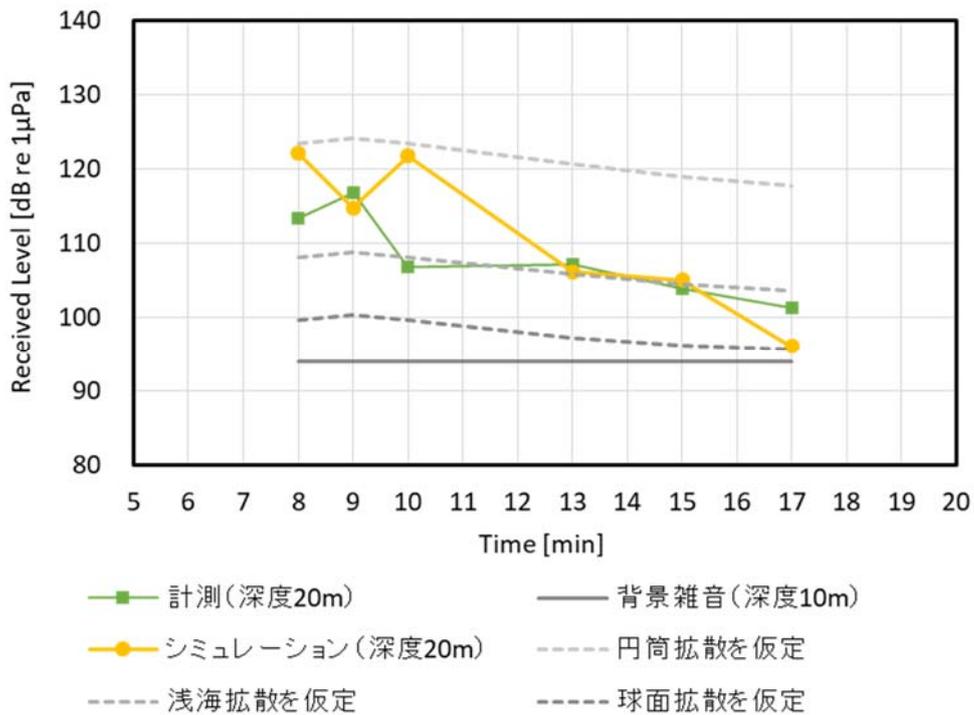


Fig. 6.9 各手法で求めた計測位置（深度 20m）における 125Hz の受波音圧レベル

6.3. 海洋環境パラメータが音波伝搬シミュレーション結果に与える影響の検証

次に海洋環境パラメータが音波伝搬シミュレーション結果に与える影響の検証を行った。

6.3.1. 海底質が音波伝搬シミュレーション結果に与える影響

まず、海底質がシミュレーション結果に与える影響を検証するために、125 Hz の連続波について経路 1-6 において海底質をすべて砂、もしくは玄武岩とした 2 ケースのシミュレーションを行った。シミュレーションによって求めた両ケースの伝搬損失を Fig. 6.10, Fig. 6.11 に示す。また、計測位置の深度 10 m における受波音圧レベルを Fig. 6.12, Fig. 6.13 に示す。Fig. 6.12, Fig. 6.13 において、横軸は Table 6.1 に示した出港後の経過時間である。

Fig. 6.10 と Fig. 6.11 を比較すると、海底質をすべて玄武岩としたケースの方が海底による損失が小さく、全体として大きい値を示すことがわかる。また、複数の異なる伝搬経路を通った音波によって形成される干渉パターンに注目すると、海底質をすべて砂としたケースの方が粗く、同じ距離における深度方向の値のばらつきが大きい。この結果から、海底質が砂である位置において計測を行った場合、波浪等によるハイドロフォンの変位によって計測値が大きく変動する可能性があるといえる。

Fig. 6.12 を見ると、実際の経路 1-6 には砂が多く分布するため、海底質をすべて砂としたケースは計測値と近い値を示しており、両値の差は最大で約 10 dB である。一方で、Fig. 6.13 を見ると、海底質をすべて玄武岩としたケースは海底損失が小さく距離の増加に伴って受波音圧レベルがほとんど減少しないため、時間の経過とともに計測値との差が増大しており両値の差は最大で約 25 dB である。この結果から、音波伝搬シミュレーションの際に現実と乖離した海底質を入力した場合、結果に大きな誤差が生じることがわかった。

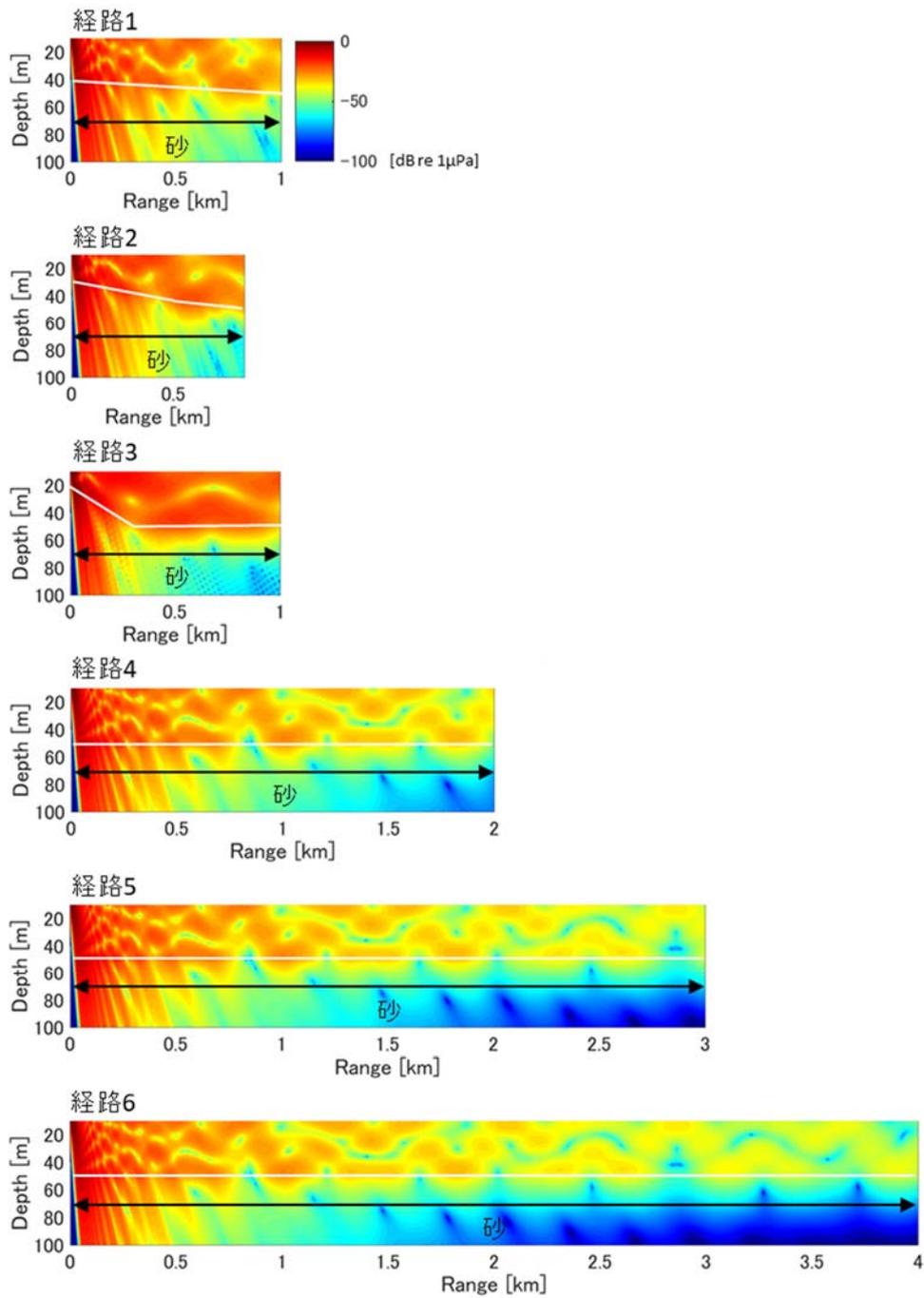


Fig. 6.10 底質をすべて砂としたシミュレーションによって求めた
経路1-6の伝搬損失

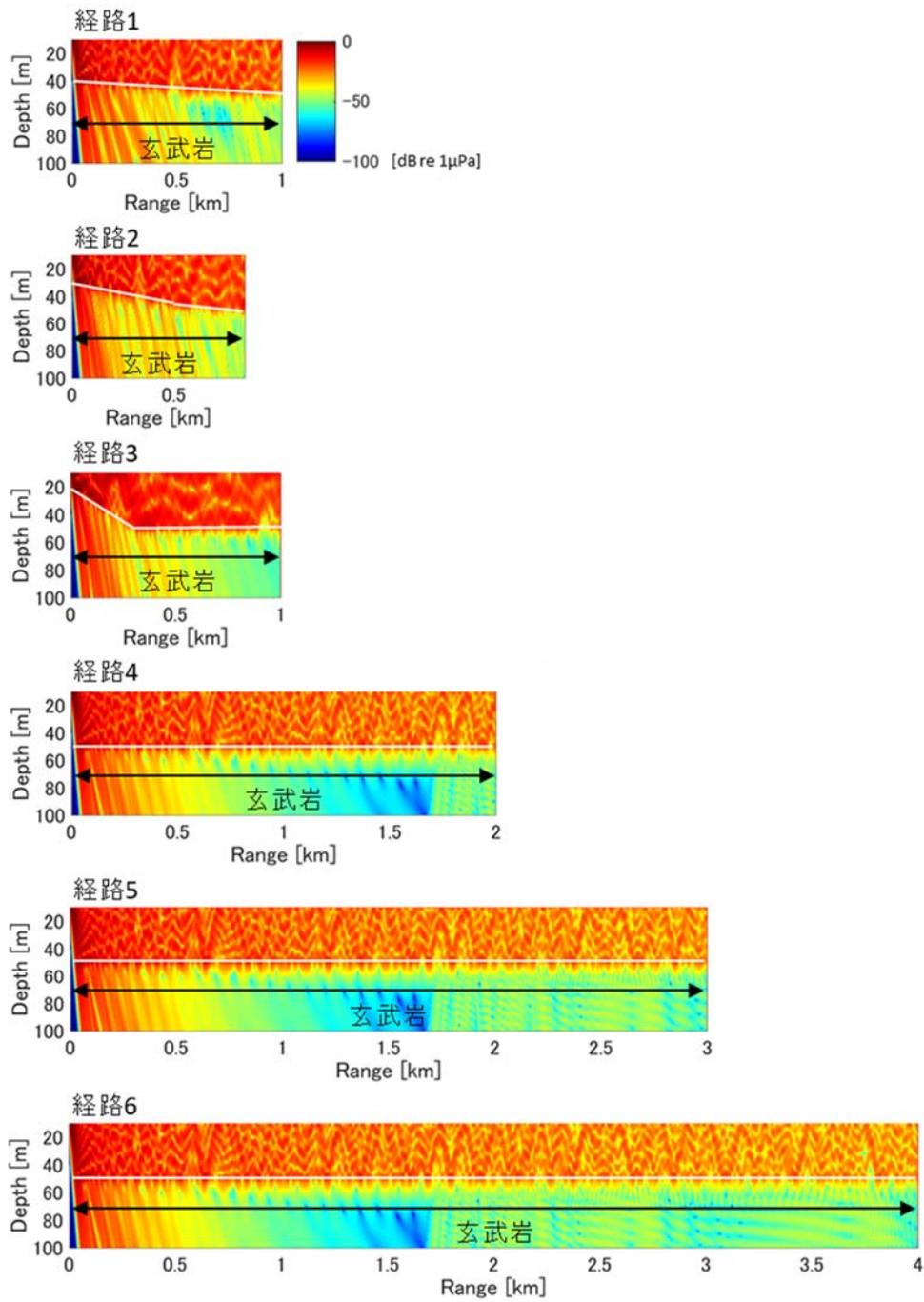


Fig. 6.11 底質をすべて玄武岩としたシミュレーションによって求めた
経路1-6の伝搬損失

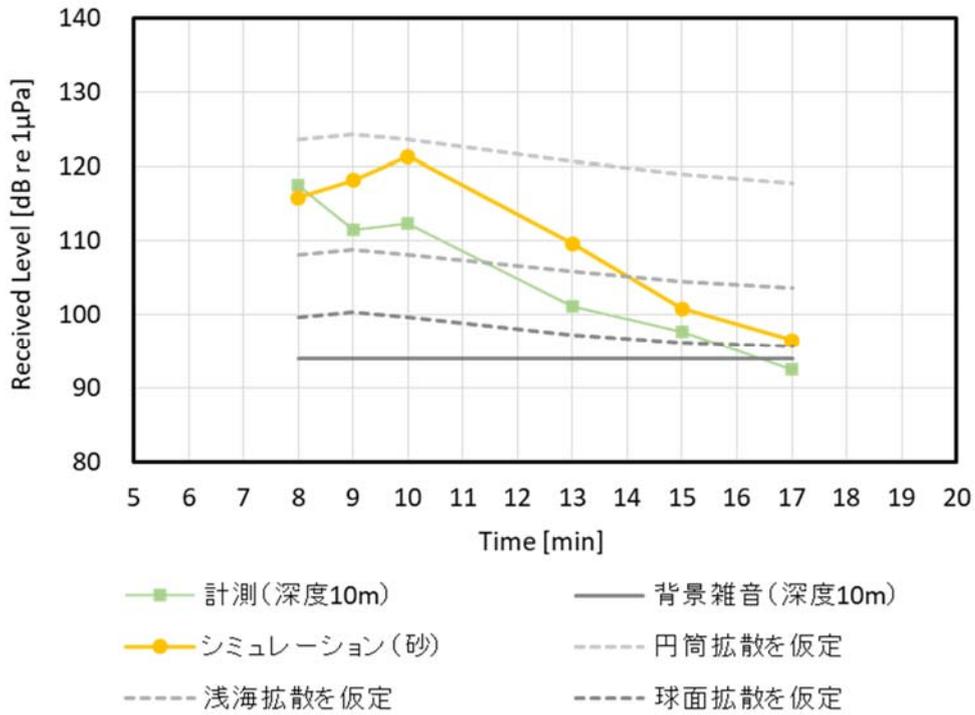


Fig. 6.12 底質をすべて砂としたシミュレーションと計測位置(深度10m)における音圧受波レベル

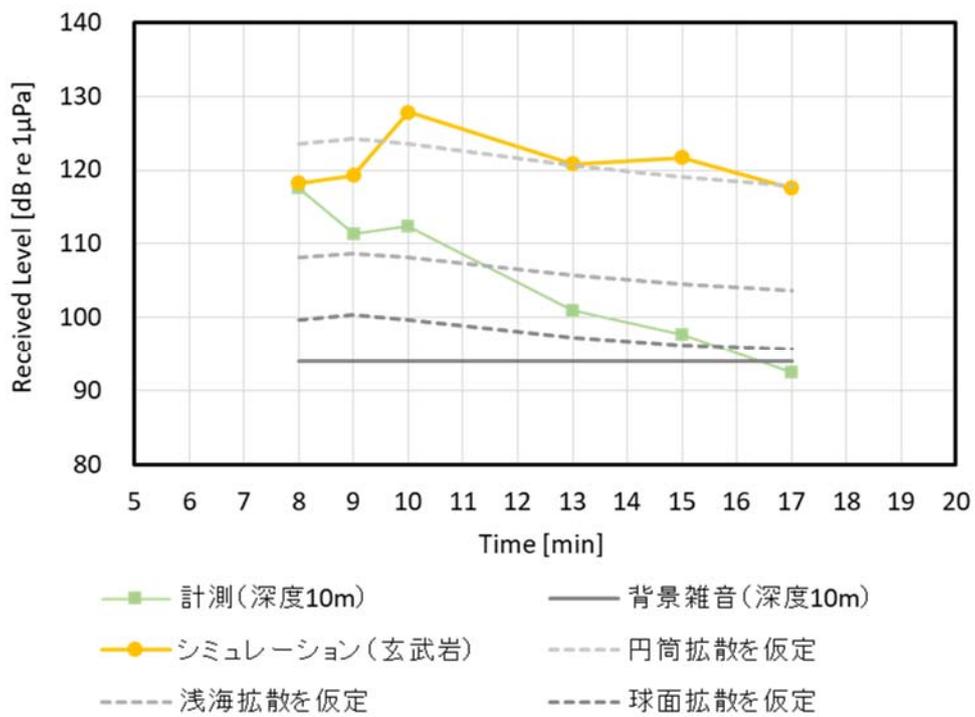


Fig. 6.13 底質をすべて玄武岩としたシミュレーションと計測位置(深度10m)における音圧受波レベル

6.3.2. 音速が音波伝搬シミュレーション結果に与える影響

次に、音速が音波伝搬シミュレーション結果に与える影響を検証するために、対象船位置と計測位置間の距離が 5 km となる経路を設定し、経路全体にわたって 1 点の音速を入力した場合と 1 km おきに 6 点の音速を入力した場合の 2 ケースについて 125 Hz の連続波のシミュレーションを行った。音速は 2018 年 5 月に実施した CTD 計測によって得られた深度方向の水温、塩分データを UNESCO の式で変換して求めた。設定した経路と CTD 計測を実施した位置を Fig. 6.14 に、使用した CTD 計測器の外観を図 6.15 に、各位置における CTD 計測の結果および計測結果から算出した音速を Fig. 6.16 に示す。さらに、これらのデータを入力した両ケースのシミュレーションによって求めた伝搬損失を Fig. 6.17, Fig. 6.18 に示す。また、深度 10 m における伝搬損失を Fig. 6.19, Fig. 6.20 に、その差を Fig. 6.21 に示す。

Fig. 6.16 を見ると、音速は全点において 1522.5-1526 m/s の範囲内であり、大きな差はないといえるが、位置によって深度方向の勾配の正負が異なることがわかる。Fig. 6.17 と Fig. 6.18 および Fig. 6.19, Fig. 6.20 を比較すると、経路全体にわたってほとんど同じ値を示していることがわかる。Fig. 6.21 より両ケースの差は最大でも 0.8 dB であることから、音波伝搬シミュレーションの際に入力する音速については、5 km 程度の範囲内であれば 1 点の鉛直方向プロファイルを任意の位置の音速として入力しても結果に影響を与えないことがわかった。

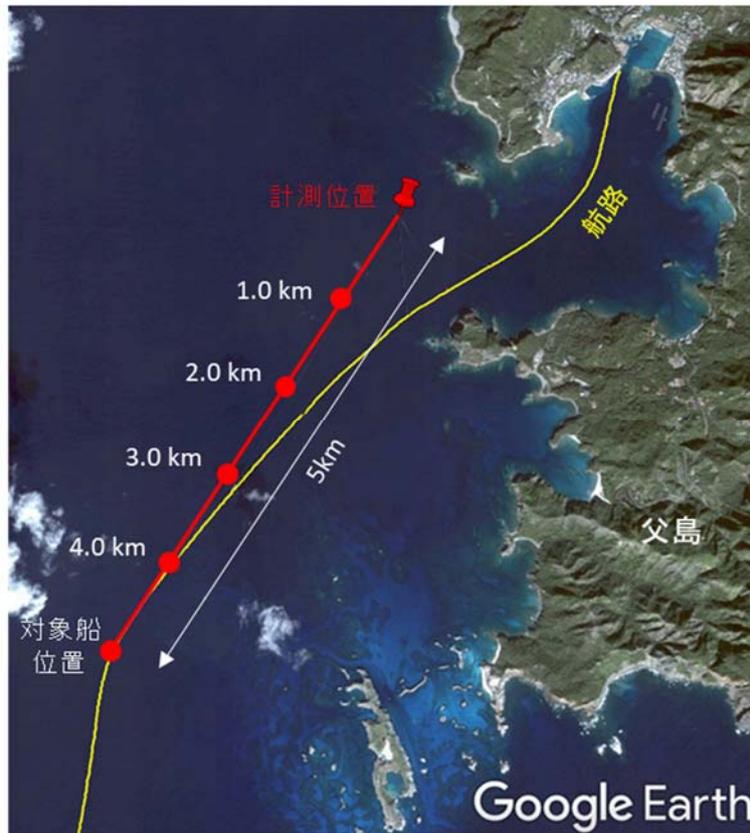


Fig. 6.14 両ケースのシミュレーションの比較経路および CTD 計測実施位置



Fig. 6.15 CTD 計測器の外観

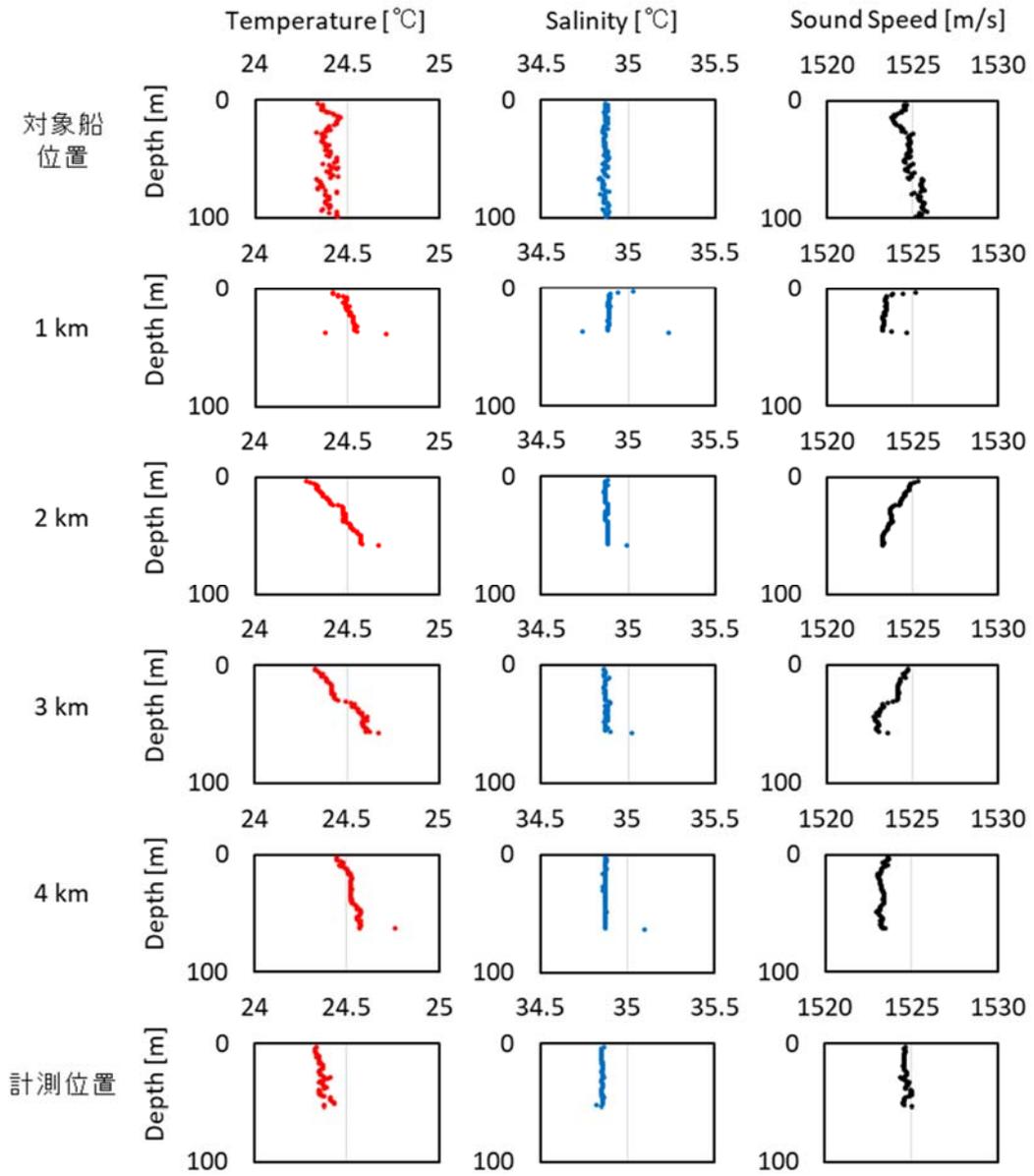


Fig. 6.16 各位置における水温・塩分・音速の鉛直プロファイル

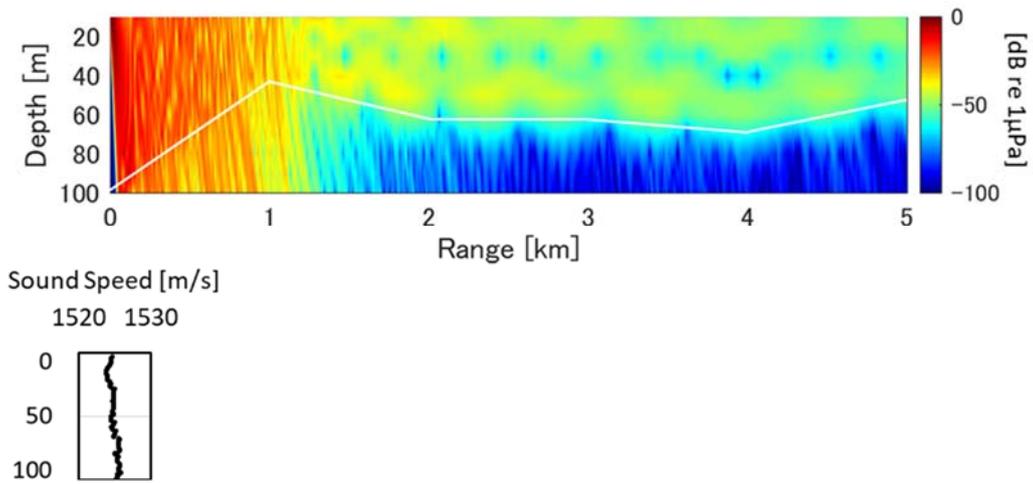


Fig. 6.17 0 km 位置における音速を全点に入力したシミュレーションによって求めた伝搬損失

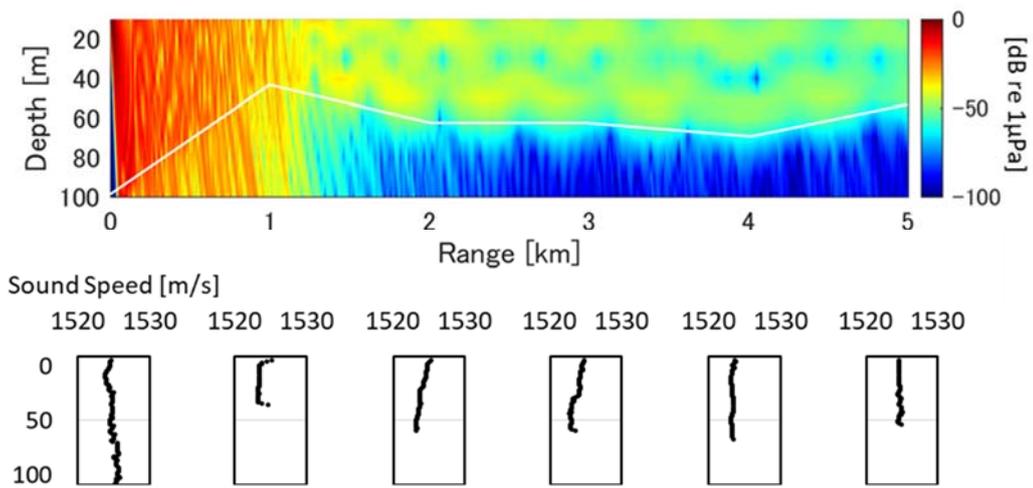


Fig. 6.18 1 km 毎に CTD 計測で得られた音速を入力したシミュレーションによって求めた伝搬損失

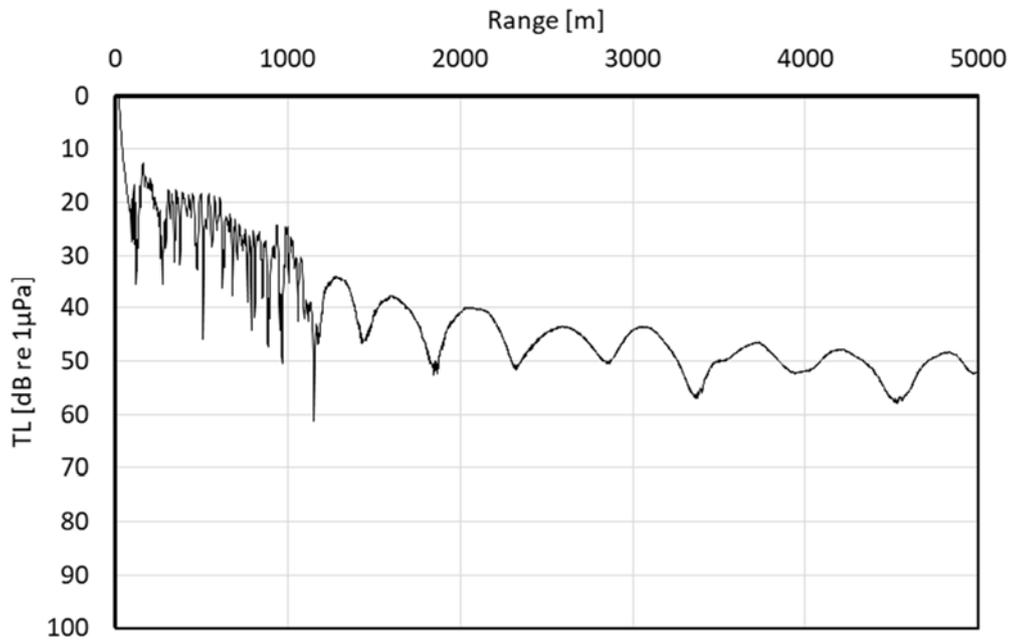


Fig. 6.19 0 km 位置における音速を全点に入力したシミュレーションによって求めた伝搬損失（深度 10 m）

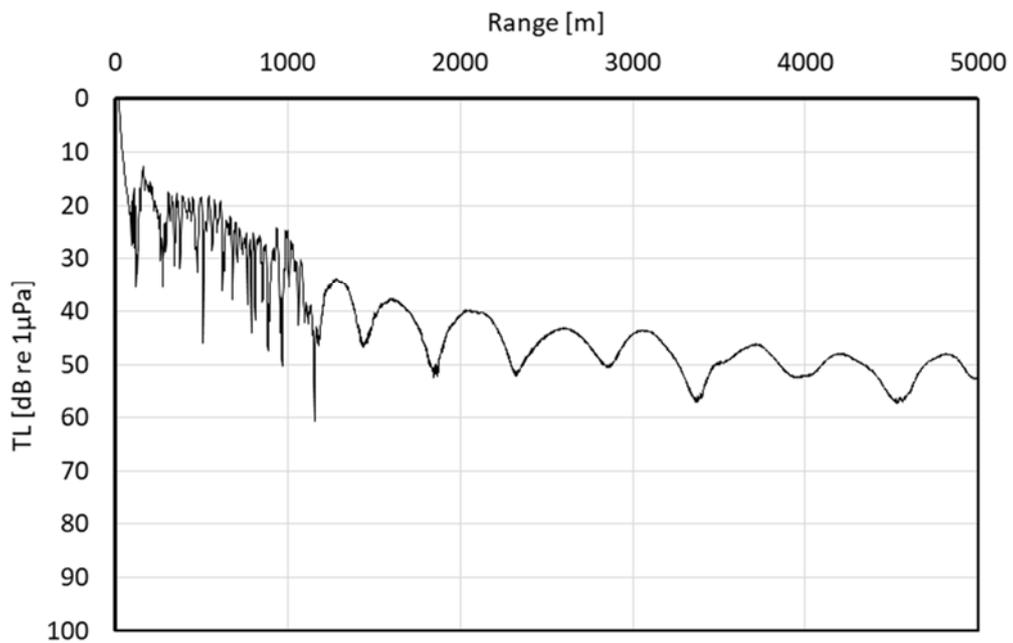


Fig. 6.20 1 km 毎に CTD 計測で得られた音速を入力したシミュレーションによって求めた伝搬損失（深度 10 m）

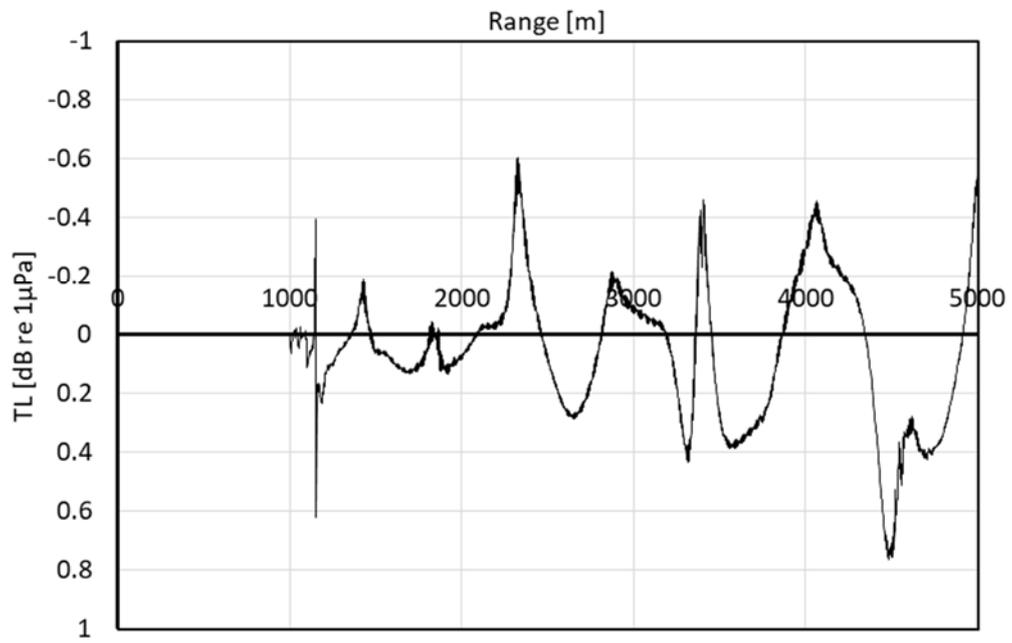


Fig. 6.21 両ケースのシミュレーションによって
求めた伝搬損失の差 (深度 10 m)

7. 音響曝露レベル推定システムの開発

7.1. 音響曝露レベルマップの概要

概要を以下に示す.

7.1.1. 目的

第 6 章で精度を検証した音波伝搬シミュレーション手法を使用して対象範囲内における音響曝露レベルの時間変化データ (音響曝露レベルマップ) を構築し, 移動する対象船と対象生物間の伝搬経路における海洋環境の相対的变化を考慮した音響曝露レベルの推定を可能にするシステムの開発を目的とする.

7.1.2. 音波伝搬シミュレーションの諸設定

(1) 使用したコード

6.1.2 と同様である.

(2) 音源

音源は対象船が湾外を運航する際の NaviFull モードの放射雑音スペクトルの最大卓越周波数である 50 Hz の連続波とした. 音源深度は対象船のプロペラ深度である 2.4 m, 送波音圧レベルは対象船の運航モードによって異なるため, 4.3 節に記した対象船からの水中放射雑音のスペクトルから, 湾内を運航する出港後 8 分間は Half モードであるとして 141.78 dB re 1 μ Pa at 1m, 湾から離れる出港 8 分後-18 分後は Full モードであるとして 153.29 dB re 1 μ Pa at 1m, 母島に向けて直進する出港 18 分後-30 分後は NaviFull モードであるとして 154.73 dB re 1 μ Pa at 1m とした.

(3) 対象範囲・時間

マップの対象範囲は, 第 5 章の計測位置を中心とする半径 10 km の円内とした. 対象範囲を Fig. 7.1 に示す. 対象時間は対象船が対象範囲内を運航している出港後 30 分間とした. シミュレーション経路は, 対象範囲内における対象時間内 2 分毎の対象船位置を起点とする角度方向 5° 刻みの放射状の経路である. また, 第 5 章で述べたように, 出港後約 6 分間は対象船の放射雑音は地形的に遮蔽され湾外まで伝搬しないため, 出港 6 分後の時刻をシミュレーションの開始時刻とした. 各時刻におけるシミュレーション経路の例を Fig. 7.2 に示す.

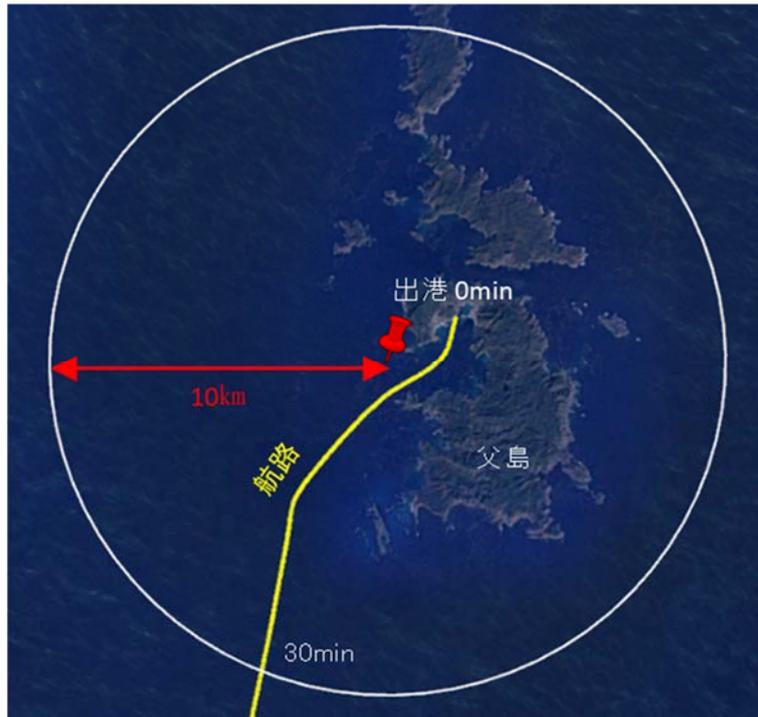


Fig. 7.1 音響曝露レベルマップの対象範囲

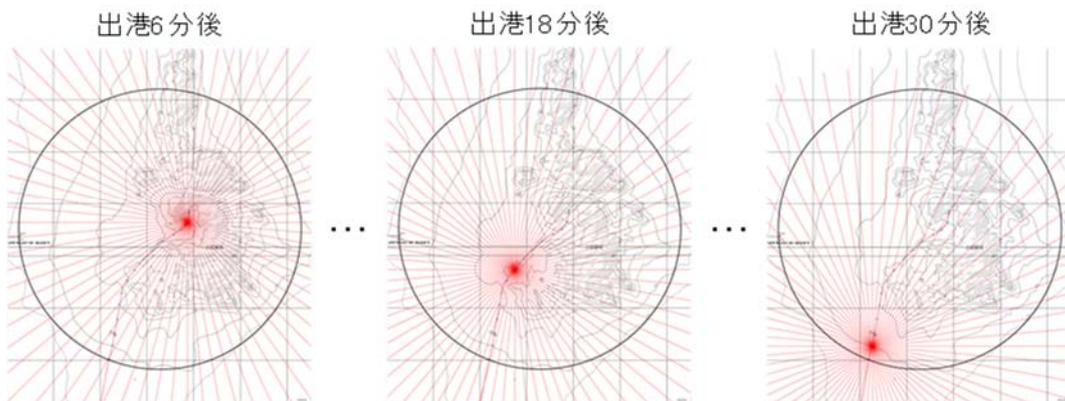


Fig. 7.2 各時刻におけるシミュレーション経路

7.1.3. 音波伝搬シミュレーションに入力した海洋環境データ

本研究で使用了海洋環境データを以下 (1) - (3) に示す. 音波伝搬シミュレーションの際には, 海底地形と海底質のデータを重ねた図に各経路を記入し, 海洋環境データを読み取り入力ファイルを作成した. 距離方向の海洋環境データの変化については可能な限り詳細に読み取った.

(1) 海底地形

6.1.2 と同様である.

(2) 海底質

6.1.2 と同様である.

(3) 音速プロファイル

6.1.2 と同様である.

7.1.4. 音響曝露レベルの算出方法

各時刻の各経路についてシミュレーションによって深度 10 m の伝搬損失を求め、式 (8) に示したソナー方程式を用いて距離方向 10 m 毎の受波音圧レベルを算出した. さらに、対象時間全体の 30 分間にわたる音響曝露レベルを求めた. 対象船が各時刻において 2 分間その位置に留まっているものとし、式 (3) に示した音響曝露レベルを求める式を下記のように変形して求めた. $P_S(t)$ は対象船からの放射雑音の受波音圧値[μPa], P_B は対象船非運航時の背景雑音の 50 Hz 成分の受波音圧値[μPa], T は 2 分毎の曝露時間ステップ, P_T ($T=0, 1, \dots, 12$) は各時刻 (出港後 6, 8, ..., 30 分) における全体の背景雑音の受波音圧値[μPa]である. P_B は第 5 章の計測③で取得したスペクトルから平均値を求めた.

$$\begin{aligned} SEL &= 10 \log_{10} \left[\int_0^T \{P_S(t) + P_B\}^2 dt \right] \\ &= 10 \log_{10} \left(\sum_{T=0}^{12} P_T^2 \cdot 120 \right) \end{aligned}$$

7.1.5. 音響曝露レベルマップの構築

各時刻の各経路について 7.1.4 に示した方法で求めた距離方向 10 m 毎の音響曝露レベルを、各時刻のファイルに極座標系で並べて格納した. Fig. 7.2 からわかるように、各時刻によってデータの存在する位置が異なる. そこで、MATLAB 上で対象範囲内に直行座標系の格子点を設定し、各時刻について各格子点に値を内挿した.

7.2. 音響曝露レベルマップ

音響曝露レベルマップを以下に示す。海洋環境が音響曝露レベルの推定精度に与える影響を調べるため、従来手法である球面拡散および浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく音響曝露レベルマップも構築した。

各手法に基づいて構築した対象船出港30分後の音響曝露レベルマップをFig. 7.3に示す。また、音波伝搬シミュレーション、球面拡散および浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づいて構築した対象船出港6分-28分後の音響曝露レベルマップをそれぞれFig. 7.4, Fig. 7.5, Fig. 7.6に示す。

Fig. 7.3を見ると、どの手法による音響曝露レベルマップにおいても、航路に沿って最も値が大きい範囲が存在しており、その値は音波伝搬シミュレーションおよび浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく音響曝露レベルマップでは約135-140 dBであるのに対し球面拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく音響曝露レベルマップでは約125-130 dBと小さい。航路から離れた142°9.00'以西の範囲においては、各手法によって値は異なっており、大きい順に浅海拡散を仮定した伝搬損失の式が約135 dB、音波伝搬シミュレーションが125-135 dB、球面拡散を仮定した伝搬損失の式が約125 dBである。

Fig. 7.3 および Fig. 7.4, Fig. 7.5, Fig. 7.6 で時間の経過に伴う音響曝露レベルの変化を見ると、球面拡散および浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づいて構築した音響曝露レベルマップでは全体として値の大きい範囲は地形的に遮蔽されない限りは均一に広がっているのに対し、音波伝搬シミュレーションに基づいて構築した音響曝露レベルマップでは、海洋環境の影響を受けて複雑に広がっていることがわかる。特に二見湾口を通過する前後の航路付近に注目すると、音波伝搬シミュレーションに基づく音響曝露レベルマップでは従来手法に基づく2つの音響曝露レベルマップに対し、航路から離れるにつれ値が急激に減衰していることがわかる。これは、二見湾口付近は水深20 m程度と50 Hzの音源の波長に対して浅いことにより発生するカットオフ現象を再現できているためである。

音波伝搬シミュレーションに基づく音響曝露レベルマップを見ると、出港直後-約14分後に対してそれ以後では航路上の値が大きい。これは、航路直下の底質が出港直後-約14分後は砂であり、それ以後では吸収係数の小さい玄武岩等であるためである。このように、音響曝露レベルマップには底質による影響が顕著に表れる。しかし、6.3.1に示したように、現実と乖離した海底質を入力した場合、音波伝搬シミュレーションの結果には大きな誤差が生じる。そのため、影響調査を実施する際には調査実施海域の底質を十分調査し音波伝搬シミュレーションに基づく音響曝露レベルによって評価することで調査精度が上がると考えられる。また、調査実施海域の底質についての情報が不十分である場合には、浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく音響曝露レベルによって評価をした方が大きな誤差を防ぐことができる。

さらに、音波伝搬シミュレーションに基づく音響曝露レベルマップでは、航路から約3 km以上離れると、船舶放射雑音の影響は見られない。このことから、影響調査のために音響曝露レベルマップを構築する際には、人為雑音源が背景雑音レベルまで減衰する範囲までを対象とすることによって、計算コストを削減できる可能性が明らかになった。今回行った音波伝搬シミュレーションについて、対象範囲を航路から3 kmの範囲まで縮小し、波長を考慮して海洋環境データの入

力を距離方向 30 m メッシュとした場合について考える. 海洋環境データを入力する点の数は, 測線の合計距離を海洋環境の入力メッシュで除すと, $(3 \text{ km} \times 360^\circ \times 12 \text{ 回}) \div 30 = 432$ 点である. これは, 手動で入力することが現実的に可能な量であるといえる.

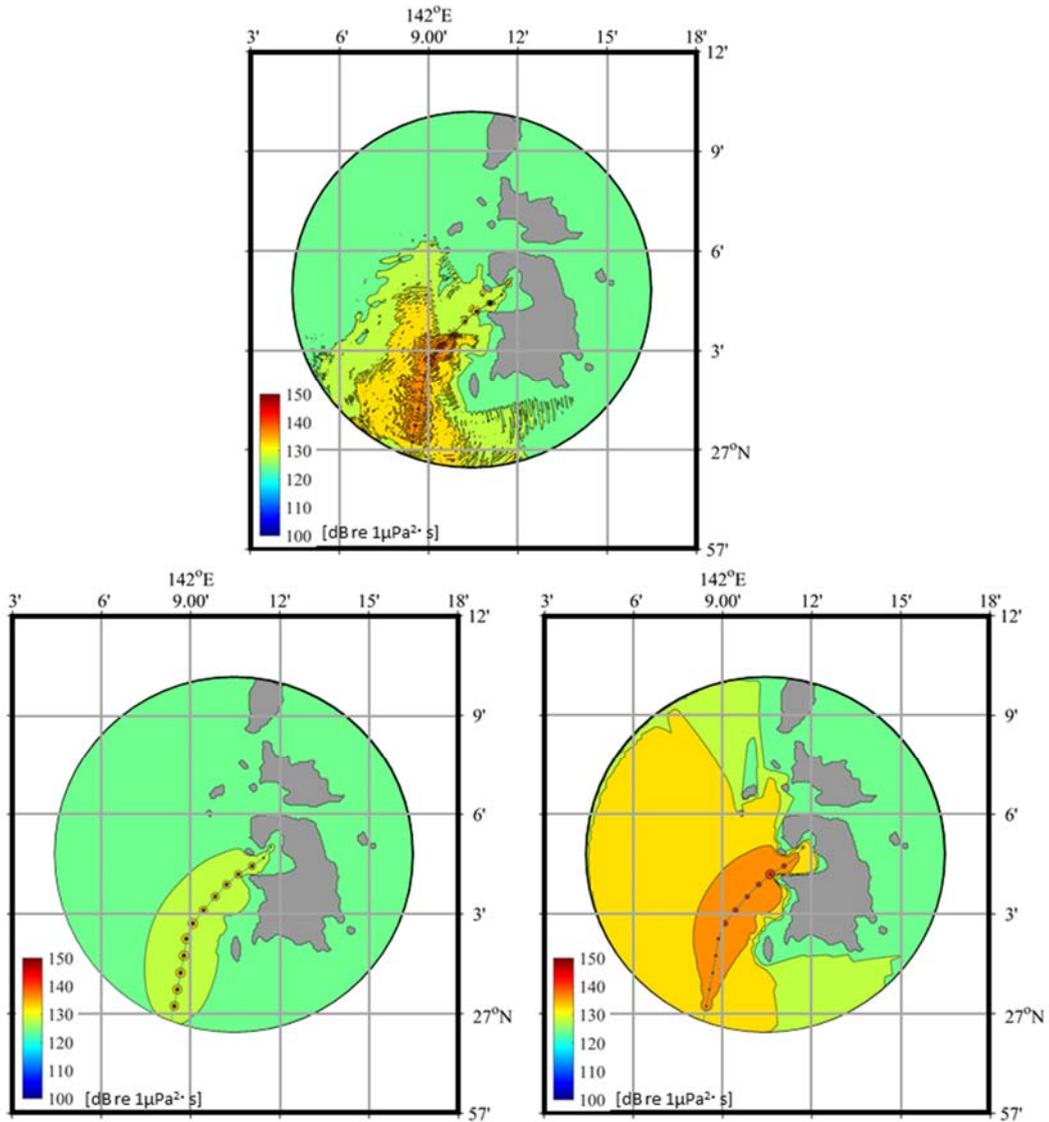


Fig. 7.3

上段：音波伝搬シミュレーションに基づく音響曝露レベルマップ

下段左：球面拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく音響曝露レベルマップ

下段右：浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく音響曝露レベルマップ

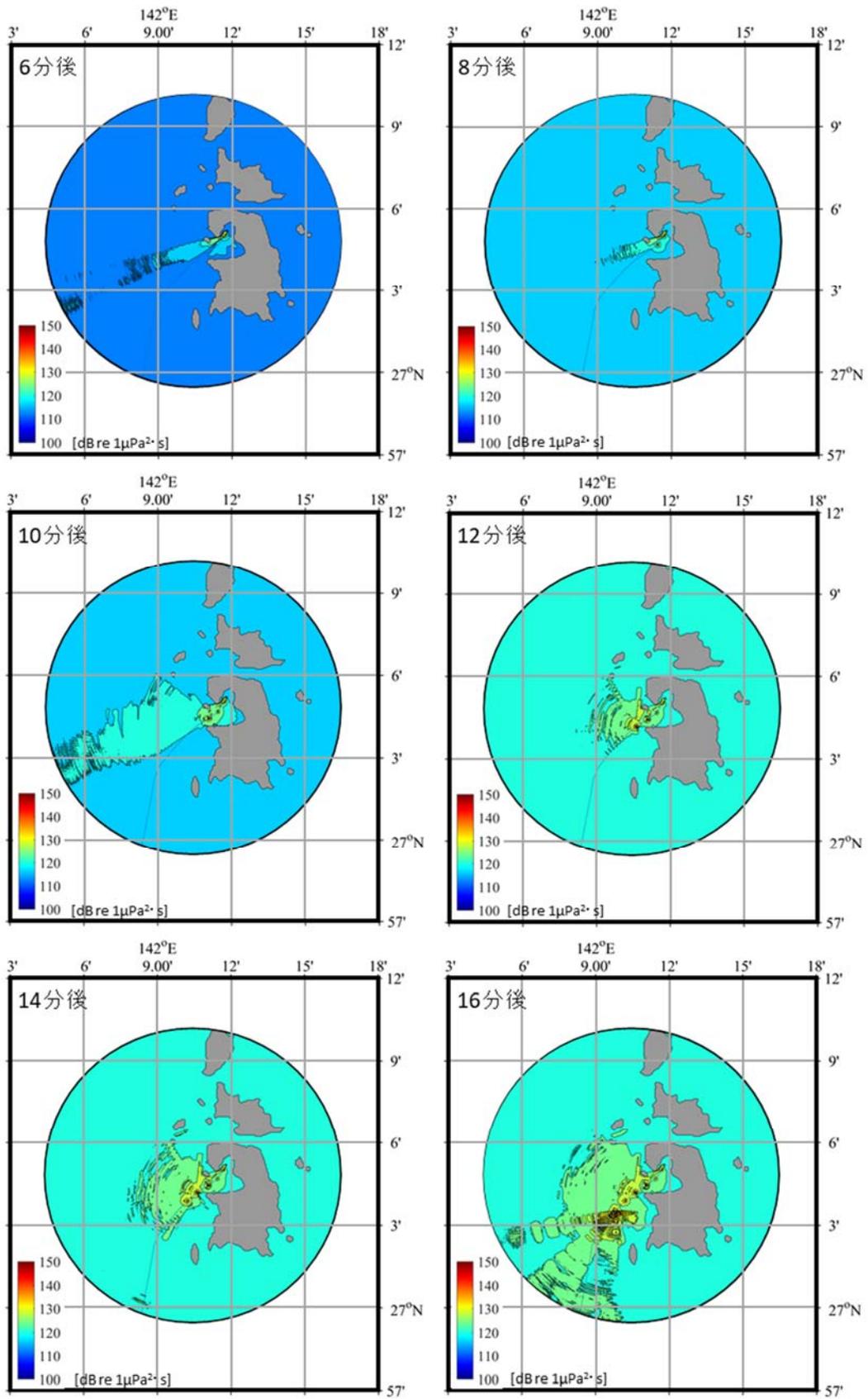


Fig. 7.4 (1/2) 音波伝搬シミュレーションに基づく音響曝露レベルマップ

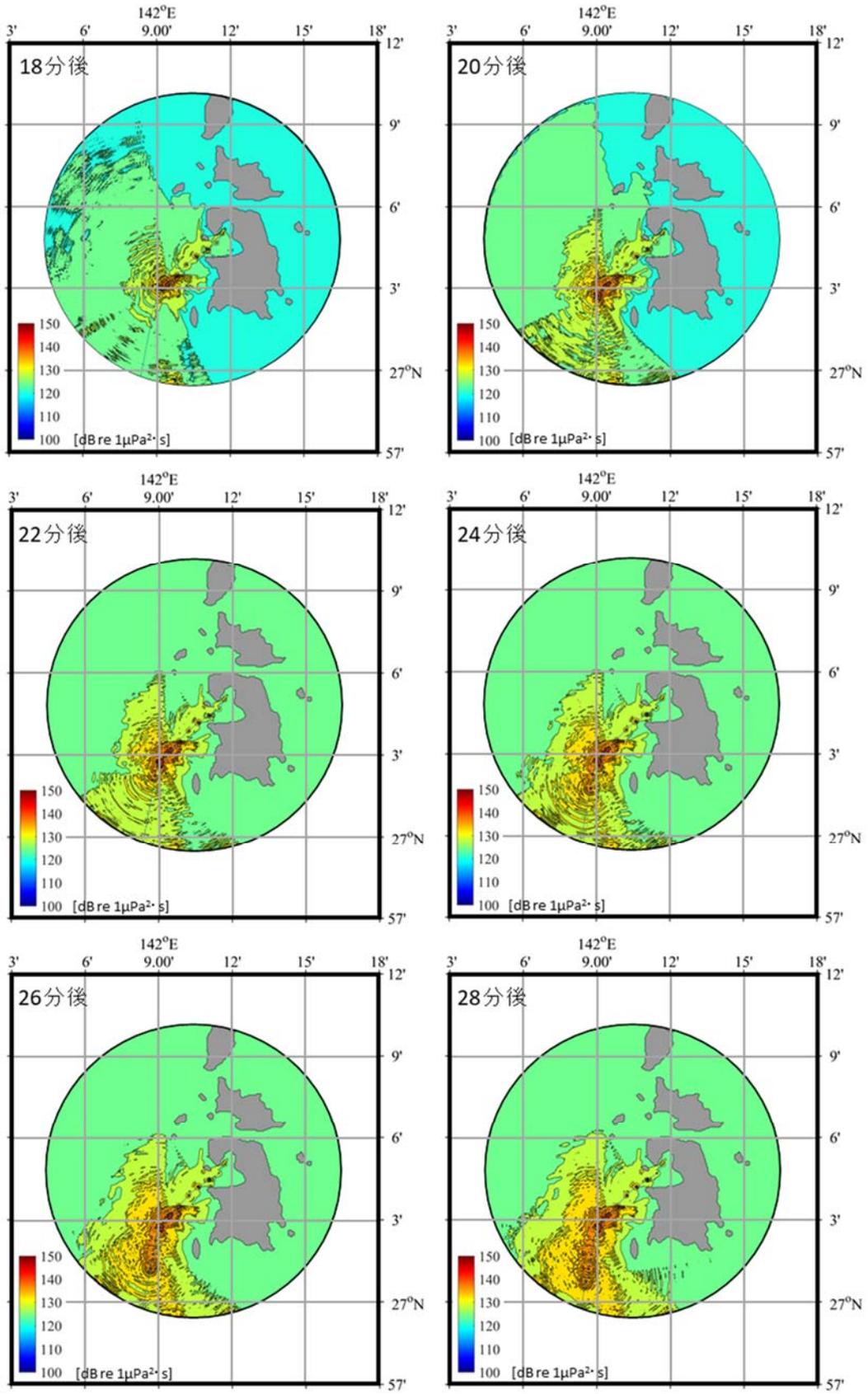


Fig. 7.4 (2/2) 音波伝搬シミュレーションに基づく音響曝露レベルマップ

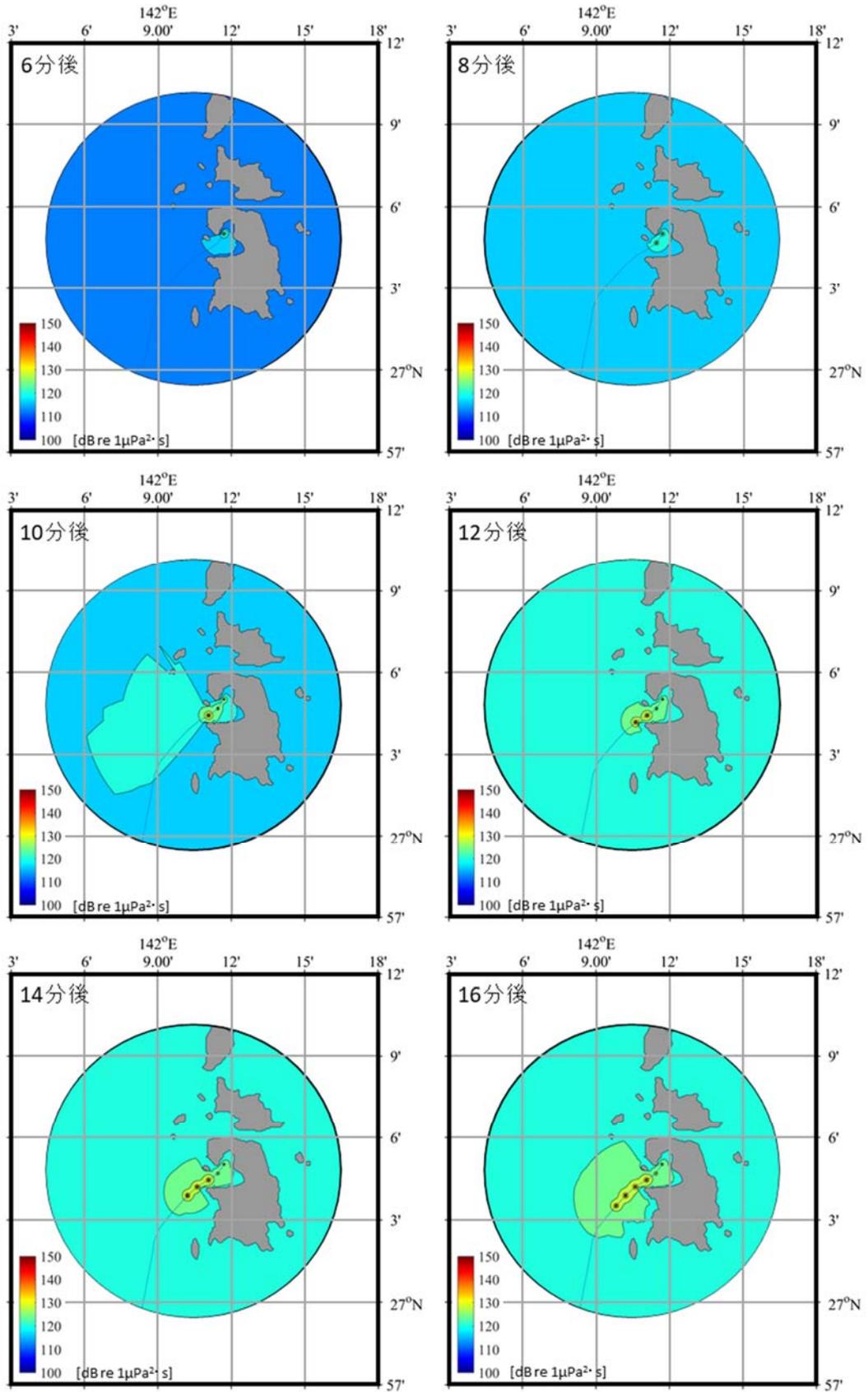


Fig. 7.5 (1/2) 球面拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく
音響曝露レベルマップ

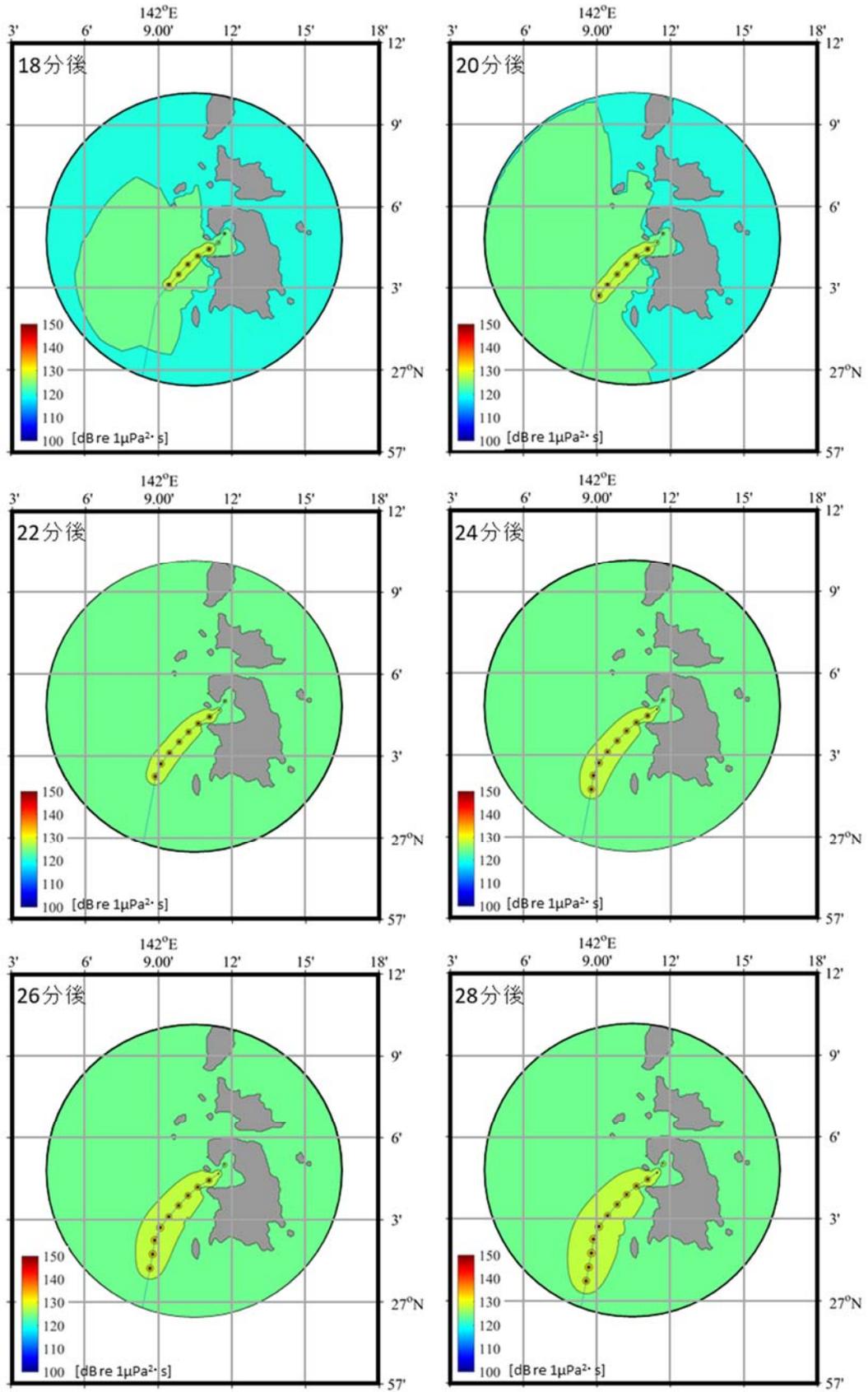


Fig. 7.5 (2/2) 球面拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく
音響曝露レベルマップ

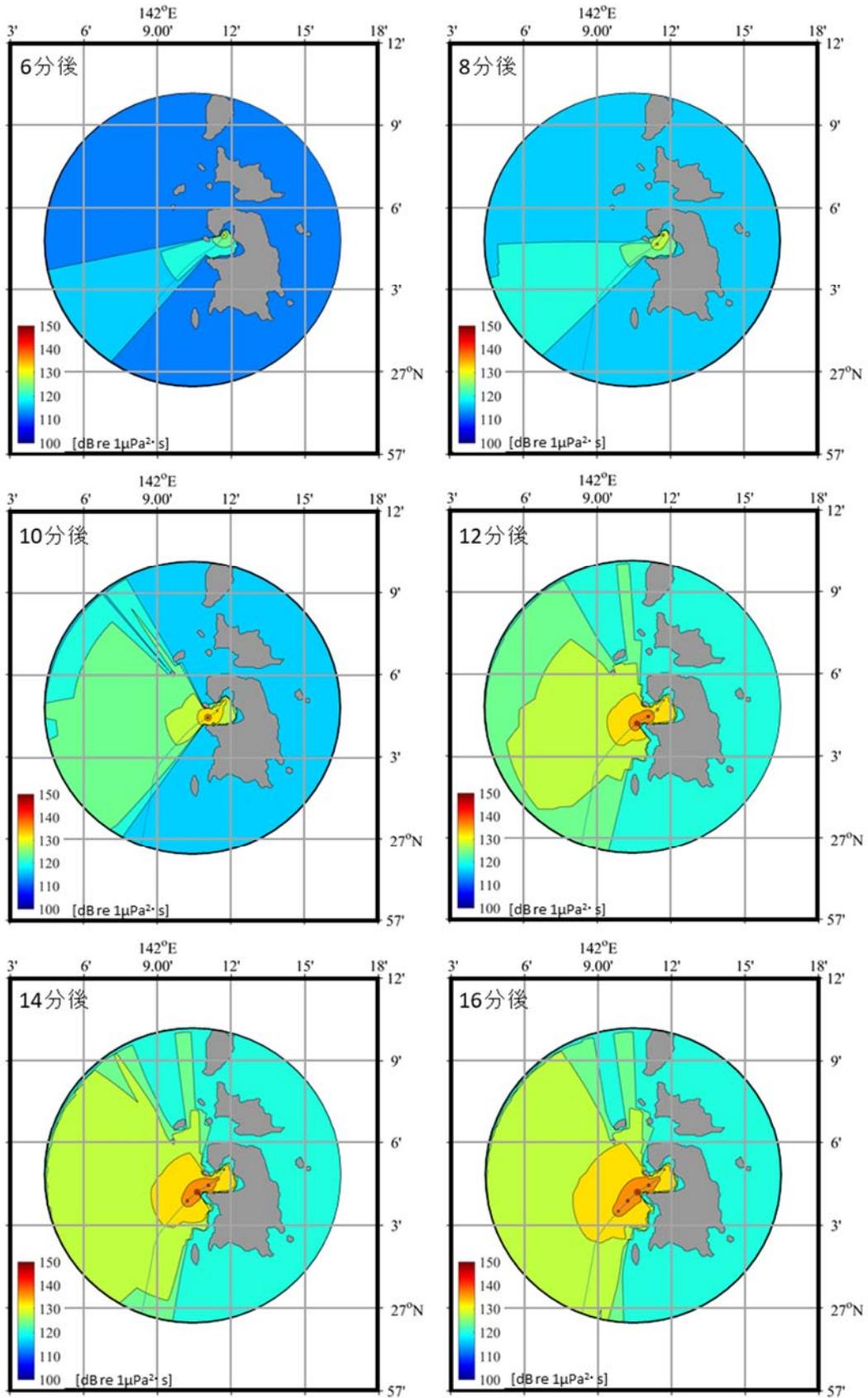


Fig. 7.6 (1/2) 浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく
音響曝露レベルマップ

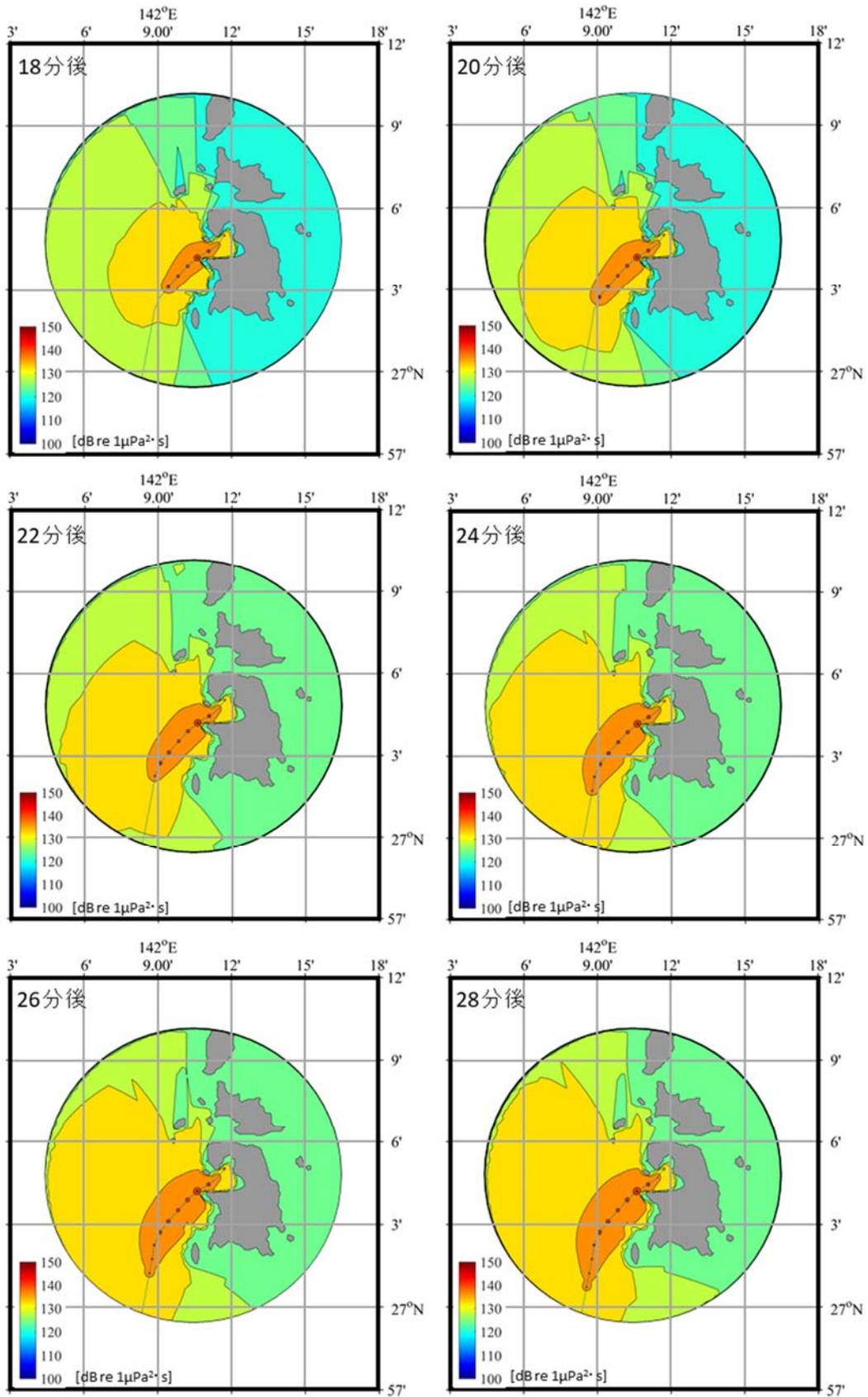


Fig. 7.6 (2/2) 浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく音響曝露レベルマップ

7.3. 音響曝露レベル推定システムを使用した影響調査の例

構築した音響曝露レベルマップを用い、MATLAB上で対象生物が観測された位置・時刻データを入力すると伝搬経路内の海洋環境の相対的变化を考慮した音響曝露レベルを推定するシステムを開発した。開発したシステムを用い、影響調査の例として対象生物の2つの移動パターンを仮定し、移動に伴って変化する音響曝露レベルを推定した。移動パターンは実際にザトウクジラが多く観測される二見湾の西側において、Fig. 7.7に示すように、対象船の航路に沿って進むパターン（航跡1）と、対象船の航路から離れるパターン（航跡2）の2つとした。音響曝露レベルは音波伝搬シミュレーション、浅海拡散及び球面拡散を仮定した伝搬損失の式に基づいて構築した音響曝露レベルマップを用いて推定し、各結果を比較した。その結果をTable 7.1に示す。なお、対象生物は12:30:00から最初の観測の12:40:00までは12:40:00に観測された位置、12:40:00から12:50:00までは12:50:00に観測された位置、12:50:00から13:00:00までは13:00:00に観測された位置いたと仮定した。

Table 7.1から読み取れることを以下に示す。まず、12:40:00の時点において、航跡1、航跡2どちらにおいても浅海拡散を仮定した推定値は最も大きく、他の手法による推定値と約7 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ の差がある。また、音波伝搬シミュレーションおよび球面拡散を仮定した推定値は同程度の値を示している。しかし、音波伝搬シミュレーションによる推定値は、時間の経過に伴って増加し、13:00:00の時点では浅海拡散を仮定した推定値の方に近くなっている。13:00:00の時点においては、音波伝搬シミュレーションによる推定値と他の手法による推定値を比較すると、球面拡散を仮定した推定値との差は航跡1において約7 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ 、航跡2において約5 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ である。これは、2つの航跡の下には他の海底質よりも海水に対する比音響インピーダンスが大きい玄武岩が分布しており、球面拡散を仮定した推定値は海底反射の影響を加味していないことにより過小評価となっているためである。一方で、浅海拡散を仮定した推定値との差は航跡1において1 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ 、航跡2において約3 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ と小さい。

Table 2に示したNOAAが定めた海生哺乳類に聴覚障害を引き起こす受波音圧レベル閾値を見ると、低周波数帯域を使用する生物グループ（LF）に対する非インパルス音について、永久的な聴覚障害（PTS）および一時的な聴覚障害（TTS）の閾値の差は20 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ である。これをふまえると、航跡1において他の手法に対して約7 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ の差が発生した球面拡散を仮定した推定は、不正確な調査結果を導く可能性があるといえる。また、第6章に記したように、音源から5 km程度の範囲内においては浅海拡散を仮定した伝搬損失の式によって十分な精度の受波音圧レベルの推定が可能であるが、より広範囲について影響調査を行う場合には過大評価となる可能性もある。今回の例ではどちらの航跡も2 km程度であったため音波伝搬シミュレーションによる推定値と浅海拡散を仮定した推定値は近い値を示したが、より音源音圧レベルが大きいタンカー等について半径5 km以上の範囲で影響調査を行う場合においては、浅海拡散を仮定した推定も不正確な調査結果を導く可能性があるといえる。

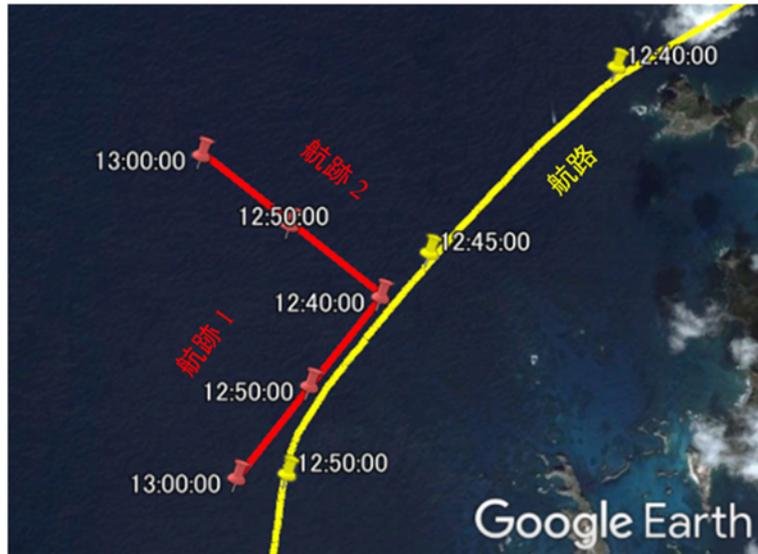


Fig. 7.7 仮定した対象生物の軌跡

Table 7.1 各手法によって求めた音響曝露レベル

航跡	音響曝露レベル [dB re 1 μ Pa ² s]					
	1			2		
推定手法	シミュレーション	球面拡散	浅海拡散	シミュレーション	球面拡散	浅海拡散
12:40:00	120.1	120.7	127.7	120.1	120.7	127.7
12:50:00	135.8	128.5	137.1	131.6	126.6	135.5
13:00:00	137.4	130.6	138.4	133.1	128.3	136.5

8. 結言

近年、世界中の海洋を航行する膨大な数の船舶から放射される雑音が海洋生物に与える影響が注目され始め、国際的に規制の導入に向けた機運が高まっている。特に CBD や IMO では定量的かつ義務的な削減に向けた議論が起きる可能性もある。しかし、船舶放射雑音が海洋生物に与える影響については定量的なデータが十分ではないため、各国が影響の調査に取り組んでいる。日本でも、日本船舶技術研究協会が水中騒音プロジェクトを立ち上げ、2015 年から 2017 年にかけて、小笠原村父島周辺海域において、貨客船運航時のザトウクジラの反応行動の調査等を行った。

実海域における影響調査の際には騒音曝露時の海洋生物の受波音圧レベルを計算によって推定する必要がある。これまで注目されてきたエアガン等の大音圧音源による聴覚障害については、影響を引き起こす可能性があるのは音源からごく近距離（音源直下の水深 D ）のみであるため、受波音圧レベルの推定には、理想的な拡散を仮定し、距離のみの関数である簡易的な伝搬損失の式を用いることが一般的であった。しかし、船舶放射雑音については、音源音圧レベルは大きくはないものの持続時間が長いため、近距離における聴覚障害よりも、長時間の雑音への曝露によってより広範囲において行動阻害やマスキングを引き起こすことが問題視されている。数 km の音波伝搬においては、音波は海洋環境の影響を大きく受ける。特に小笠原村父島周辺海域のような浅海域においてはその影響は支配的である。そのため、従来の手法である理想的な拡散を仮定した伝搬損失の式では正確に推定することができない。また、連続音である船舶放射雑音の影響は受波音圧、対象とする海域・時期の海洋環境および音源と対象生物の移動を考慮した音波伝搬シミュレーションによる音響曝露レベルの推定手法を提案し、以下の項目を実施した。

まず、音源である小笠原村父島—母島間を 1 日 1 回運航する定期貨客船の水中放射雑音について、浅海域である小笠原海域における伝搬特性等を調査するために貨客船運航時および非運航時に定点におけるハイドロフォンによる音響計測を行い、小笠原村父島周辺海域の音波伝搬特性について調べた。その結果、当該海域においては対象船が湾内を航行しているときには地形的遮蔽によって湾外には雑音が伝搬しづらいことや、対象船のプロペラキャビテーション雑音のピークである 50 Hz 付近の成分は背景雑音にマスキングされやすいことを明らかにした。

次に、海洋環境パラメータを入力した PE 法による音波伝搬シミュレーションの精度を検証するために、貨客船運航時の貨客船と定点を結ぶ 6 経路においてシミュレーションによって 125 Hz の連続音について定点の深度 10 m および 20 m における受波音圧レベルを推定し、計測値および従来手法である理想的な拡散を仮定した伝搬損失の式による推定値と比較を行った。また、海洋環境パラメータが受波音圧レベルの推定値に与える影響を検証するために、現実と乖離した海底質を入力した場合、経路の距離方向の音速の入力点数を増やした場合についても同様の比較を行った。その結果、音圧レベルに、浅海拡散を仮定した伝搬損失の式、PE 法による音波伝搬シミュレーションによって求めた受波音圧レベルの順に計測値に近い値を示した。なお、各経路の音波伝搬シミュレーションによって求めた受波音圧レベルと計測値の差には、経路の底質や海底地形による傾向は見られなかった。また、深度 10 m, 20 m どちらにおいても全体としてシミュレーションによって求めた受波音圧レベルが計測値に最も近い変化傾向を示した。このことから、カットオフ周波数以上の周波数については、音源から 4 km 程度の範囲内であれば浅海拡散を仮定した

伝搬損失の式によって十分な精度の受波音圧レベルの推定が可能であるが、より広範囲について影響調査を行う場合には過大評価となる可能性があることが明らかになった。また、現実と乖離した海底質を入力した場合、結果に大きな誤差が生じること、5 km 程度の範囲内であれば1点の鉛直方向プロファイルを任意の位置の音速として入力しても結果に影響を与えないことを明らかにした。

最後に、移動する対象船と対象生物間の伝搬経路における海洋環境の相対的変化を考慮した音響曝露レベルの推定を可能にすることを目的とし、貨客船運航時の小笠原村父島周辺海域の半径10 km 円内において、同様の手法のシミュレーションによって音響曝露レベルの時間変化データ（音響曝露レベルマップ）を構築した。その際、海洋環境が音響曝露レベルに与える影響を検証するため、従来手法である球面拡散および浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく音響曝露レベルマップも構築し、3つのマップをコンター図として描画し比較を行った。さらに、MATLAB上で対象生物の観測位置・時刻データを入力すると構築した音響曝露レベルマップから伝搬経路内の海洋環境の相対的変化を考慮して音響曝露レベルを推定するシステムを開発した。また、影響調査の例として対象生物の2つの移動パターンを仮定し、移動に伴って変化する音響曝露レベルを開発したシステムを用いて各マップから推定し比較を行った。3つのマップのコンター図を比較した結果、影響調査を実施する際には、調査実施海域の底質を十分調査し音波伝搬シミュレーションに基づく音響曝露レベルによって評価することで調査精度が上がることを示した。また、調査実施海域の底質についての情報が不十分である場合には、浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づく音響曝露レベルによって評価をした方が大きな誤差を防止できることを示した。ただし、浅海拡散を仮定した伝搬損失の式に基づいて音響曝露レベルを推定する場合、カットオフ現象を再現できないため音源の波長に対して水深が小さい海域では不正確な可能性が高い点に注意する必要がある。音波伝搬シミュレーションに基づく音響曝露レベルマップの構築コストについては、対象範囲や海洋環境データの読み取りメッシュを必要最小限化することによって、海洋環境データの入力点数を手動で入力することが現実的に可能な量まで削減できることを示した。さらに、3つのマップから推定した対象生物の移動に伴って変化する音響曝露レベルを比較した結果、NOAAによる海生哺乳類に聴覚障害を引き起こす閾値をふまえると、球面拡散を仮定した推定は不正確な調査結果を導く可能性があることを示した。また、第6章の結果から音源から5 km以上の広範囲においては浅海拡散を仮定した推定は過大評価となるため、より音源音圧レベルが大きいタンカー等について広範囲の影響調査を行う場合においては、浅海拡散を仮定した推定も不正確な調査結果を導く可能性があることを考察した。

海上輸送の発達や北極海航路の利用拡大に伴い、船舶放射雑音は今後も増加が予想される。一方で、サステナブルな海洋利用を目指す動きは世界的に高まっており、海洋保護区や海洋空間計画が注目を集めている。そのため、将来的には本研究で開発したシステムを任意の音源および海域で利用できるように発展させることが望まれる。そのようなシステムの実現は、広大な排他的経済水域をもつ我が国の海洋保全に大いに貢献するだろう。

参考文献

- Amy R. Scholik-Schlomer. (2015). Where the Decibels Hit the Water: Perspectives on the Application of Science to Real-World Underwater Noise and Marine Protected Species Issues. *Acoustic Today*, Summer, **11**(3), 36-44.
- Andrew, R.K., B.M. Howe, J.A. Mercer, and M.A. Dzieciuch. (2002). Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. *Acoustic Research Letters Online*, **3**(2), 65-70.
- Andrew, R.K., B.M. Howe, and J.A. Mercer. (2011). Long-time trends in ship traffic noise for four sites off the North American West Coast. *Journal of Acoustic Society of America*, **129**(2), 642-651.
- Bejder, L., A. Samuels, H. Whitehead, and N. Gales. (2006). Interpreting short-term behavioral responses to disturbance within a longitudinal perspective. *Animal Behavior*, **72**, 1149-1158.
- Castellote, M., C. Clark, and M. Lammers. (2012). Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biol. Conserv.* **147**, 115–122.
- Cato, D.H. (1992). The Biological contribution to the Ambient Noise in waters near Australia. *Acoustics Australia*, **20**(3), 76-80.
- Clark, C.W., W.T. Ellison, B.L. Southall, L. Hatch, S.M. Van Parijs, A. Frankel, D. Ponirakis. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis, and implication. *Marine Ecology Progress Series*, **395**, 201–222.
- Dahlheim, M.E. (1987). *Bio-acoustics of gray whale (Eschrichtius robustus)*, Univ. British Columbia, Vancouver, B.C.
- Dahlheim, M.E., and M. Casrellote. (2016). Changes in the acoustic behavior of gray whales *Eschrichtius robustus* in response to noise. *Endanger. Species Res.* **31**, 227–242.
- Erbe, C., C. Reichmuth, K. Cunningham, K. Lucke, and R. Dooling. (2016). Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. *Marine Pollution Bulletin*, **103**, 15-38.
- Fofonoff, N.P. and R.C. Millard Jr. (1983). Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO technical papers. No. 44.
- Fournet, M.E.H., L.P. Matthews, C.M. Gabriele, S. Haver, D.K. Mellinger, and H. Klinck. (2018). Humpback whales *Megaptera novaeangliae* alter calling behavior in response to natural sounds and vessel noise. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **607**, 251–268.
- Francois R.E., G.R. Garrison. (1982a). Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *Journal of Acoustic Society of America*, **72**(3), 896-907.
- Francois R.E., G.R. Garrison. (1982b). Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption, *Journal of Acoustic Society of America*, **72**(6), 1879-1890.
- Frankel A.S., and C.M. Gabriele. (2017). Predicting the acoustic exposure of humpback whales from cruise and tour vessel noise in Glacier Bay, Alaska, under different management strategies. *Endanger. Spec. Res.* **34**, 397–415.
- Gisiner. R.C. (2016). Sound and Marine Seismic Surveys. *Acoustic Today*, Winter, **12**(4), 10-18.

- Greene, C.R. (1985). "Characteristics of waterborne industrial noise," in Behavior, Disturbance Responses and Distribution of Bowhead Whales *Balaena mysticetus* in the Beaufort Sea, 1980-84 (NTIS PB87-124376; MMS 85-0034), ed. W. J. Richardson (Washington, DC: LGL Ecology Research Association Inc.).
- Greene, C.R. and W.J. Richardson. (1988). Characteristics of Marine Seismic Survey Sound in the Beaufort Sea. *Journal of Acoustic Society of America* **83**(6), 2246-2254.
- Hildebrand, J.A. (2005). *Marine Mammal Research: Conservation Beyond Crisis, Impacts of Anthropogenic Sound*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland.
- Iorio, L.D. and C.W. Clark. (2010). Exposure to seismic survey alters blue whale acoustic communication. *Biology Letters*, **6**, 51-54.
- JASCO Applied Sciences. (2011). *Noise and the Effects on Marine Mammals: A Pocket Handbook* 3rd Edition.
- Jensen, F.B., W.A. Kuperman, M.B. Porter, and H. Schmidt. (1994). *Computational Ocean Acoustics*. American Institute of Physics, New York.
- Johnson, S.R., C.R. Greene, R.A. Davis, and W.J. Richardson. (1986). Bowhead Whales and Underwater Noise Near the Sandpiper Island Drillsite, Alaskan Beaufort Sea, Autumn 1985 (Report for Shell Western Exploration and Production). King City, ON: LGL Ltd. Environmental Research Associates and Greeneridge Sciences.
- Knudsen, V.O., R.S. Alford and J.W. Emling. (1948). Underwater Ambient Noise. *Journal of Marine Research*, **7**(3), 410-429.
- Lee, D. & M.H. Shultz. (1995). *Numerical Ocean Acoustic Propagation in Three Dimensions*. World Scientific, Singapore.
- Lurton, X. (2002). *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*. London, Springer Praxis Books.
- Lusseau, D. (2004). The hidden cost of tourism: Detecting long-term effects of tourism using behavioral information. *Ecology and Society*, **9**(1), 2.
- Lusseau, D. and Bejder, L. (2007). The long-term consequences of short-term responses to disturbance experiences from whale watching impact assessment. *Int J Comp Psych*, **20**, 228-236.
- McDonald, M.A., J.A. Hildebrand and S.M. Wiggins. (2006). Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *Journal of Acoustic Society of America*, **120**(2), 711-718.
- Munk, W.H., R.C. Spindel, A. Baggeroer, and T.G. Birdsall. (1994). The Heard Island Feasibility Test. *Journal of Acoustic Society of America*, **96**(4), 2330-2342.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2016a). *Ocean Noise Strategy Roadmap*. Silver Spring, Maryland: National Oceanic and Atmospheric Administration.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2016b). *Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts*. Silver Spring, Maryland, National Oceanic

- and Atmospheric Administration.
- National Research Council. (2003). *Ocean Noise and Marine Mammals*, National Academic Press, Washington, D.C.
- Neenan S.T.V., P.R. White, T.G. Leighton, and P.J. Shaw. (2017). Modeling vessel noise emissions through the accumulation and propagation of Automatic Identification System data, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Vol. 27, 070017.
- Nieukirk, S.L., K.M. Stafford, D.K. Mellinger, R.P. Dziak and C.G., Fox. (2004). Low-frequency whale and seismic airgun sounds recorded in the mid-Atlantic Ocean. *Journal of Acoustic Society of America*, **115**(4), 1832-1843.
- Nowacek, D.P., L.H. Thorne, D.W. Johnston and P.L. Tyack. (2007). Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review*, **37**(2), 81-115.
- Parente, C.L., Pauline de Araújo, J., and Elisabeth de Araújo, M. (2007). Diversity of cetaceans as tool in monitoring environmental impacts of seismic surveys. *Biota Neotropica* **7**(1), 49-56.
- Parks, S. E., C. W. Clark and P. L. Tyack. (2007). Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *Journal of Acoustic Society of America*, **120**(2), 711-718.
- Parks, S.E., D.R. Ketten, J.T. O'malley and J. Arruda. (2007). Anatomical Predictions of Hearing in the North Atlantic Right Whale. *THE ANATOMICAL RECORD*, **290**, 734-744.
- Payne, R., and D. Webb. (1971). Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales. *Annals of the New York Academy of Sciences* **188**, 110-141.
- Reichmuth, C. (2007). Assessing the hearing capabilities of mysticete whales. A proposed research strategy for the Joint Industry Programme on Sound and Marine Life on 12 September.
- Richardson, W.J., R.A. Buchanan, C.W. Clark, E.M. Dorsey, and M.A. Fraker. (1982). Behavior, Disturbance Responses, and Feeding of Bowhead Whales *Balaena mysticetus* in the Beaufort Sea, 1980-1981 (No. PB-86-152170/XAB United States NTIS, PC A20/MF A01. GRA English). Bryan, TX: LGL Ecological Research Associates, Inc.
- Richardson, W.J., M.A. Fraker, B. Würsig, and R.S. Wells. (1985). Behaviour of bowhead whales *Balaena mysticetus* summering in the Beaufort Sea: reactions to industrial activities. *Biol. Conserv.* **32**, 195–230.
- Richardson, W.J., C.R. Greene, C.I. Malme, D.H. Thomson. (1995). *Marine Mammals and Noise*, Academic Press, San Diego, CA.
- Richardson, W.J., G.W. Miller, C.R. Greene. (1999). Displacement of mitigating bowhead whales by sounds from seismic surveys in shallow waters of the Beaufort Sea. *Journal of Acoustic Society of America*, **196**(4), 2281.
- Ross, D. (1976). *Mechanics of Underwater Noise*, Pergamon Press, New York.
- Shockley, R.C., J. Northrop, P.G. Hansen and C. Hartdegen. (1982). SOFAR propagation paths from Australia to Bermuda: Comparison of signal speed algorithms and experiments. *Journal of Acoustic Society of America*, **71**(1), 51-60.

- Southall, B., J. Berkson, D. Bowen, R. Brake, J. Eckman, J. Field, R. Gisiner, S. Gregerson, W. Lang, J. Lewandski, J. Wilson, and R. Winokur. (2009). Addressing the Effects of Human-Generated Sound on Marine Life. Interagency Task Force on Anthropogenic Sound and Marine Environment of the Joint Subcommittee on Ocean Science Technology, January 2009, 72.
- Southall, B.L., A.E. Bowles, W.T. Ellison, J.J. Finneran, R.L. Gentry, C.R. Greene, Jr., D. Kastak, D.R. Ketten, J.H. Miller, P.E. Nachtigall, W.J. Richardson, J.A. Thomas, and P.L. Tyack. (2007). Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals*, **33**(4), 411-521.
- The National Petroleum Council (NPC). (2011). OFFSHORE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT OF SEISMIC AND OTHER GEOPHYSICALEXPLORATION WORK. Working Document of NPC North American Resource Development Study, Paper #2-9.
- Urick, R.J. (1983). *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed. McGraw-Hill, New York.
- Vedenev, A. and A. Shatravin. (2014). Deliverable report: D4.57– Safety zones and noise exposure criteria for marine mammals exposed to anthropogenic noise. Arctic Climate Change Economy and Society, Project no. 265863.
- Wartzok, D., and D.R. Ketten. (1999). Marine mammal sensory systems. Pages 117-175 in J.E. Reynolds III and S.A. Rommel, eds. *Biology of Marine Mammals*. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press.
- Wenz, G.M. (1962). Acoustical Ambient Noise in the Ocean: Spectra and sources, *Journal of Acoustic Society of America*, **34**(12), 1936-1956.
- Williams, R., D. Lusseau, and P.S. Hammond. (2006). Estimating relative energetic costs of human disturbance to killer whales (*Orcinus orca*). *Biological Conservation*, **133**(3), 301-311.
- JOGMEC 物理探査船グループ. (2014). 三次元物理探査船「資源」による調査活動についての報告. *Analysis*, **48**(5).
- 赤松友成. (2017). 海中騒音が生物に及ぼす影響, *海洋音響学会誌*, **44**(2), 83-85.
- 海洋音響学会. (2004). *海洋音響の基礎と応用*, 成山堂書店, 東京.
- 土屋利雄, 後藤慎平, 平井由季乃. (2015). 地殻構造探査システム (MCS) のエアガン音源の海中伝搬に関する研究～高出力エアガン音源は遊泳する海棲ほ乳動物に影響を与えるか?～”, *信学技報*, **115**(186), 43-48.
- 土屋利雄. (2011), 海洋音響計算 WEB サイト <http://www.tsuchiya2.org> の作成・公開, *海洋音響学会誌*, **38**(2), 79-87.
- 一般社団法人日本中小型造船工業会, 一般社団法人日本船舶技術研究協会. (2019). 欧州における船舶の水中騒音対策に係る技術開発動向調査
- 一般社団法人日本船舶技術研究協会. (2016). 船舶水中騒音の海洋生物への影響に関する調査研究. 2015 年度報告書.

研究業績

学術雑誌への発表論文 (主筆のみ)

平井由季乃, 清水悦郎, 土屋利雄, 後藤慎平, 布田浩二, 日吉善久. (2016). ARGO データと Google Earth の海底地形データを用いた海棲ほ乳動物に対するエアガン音波の影響調査手法, 海洋音響学会誌, **43**(4), 249-262.

H., Yukino, Etsuro S., Toshio T. ESTIMATION OF SOUND EXPOSURE LEVEL BASED ON RELATIVE MOVEMENT OF SHIP AND WHALE. (2017) 24th International Congress on Sound and Vibration 2017 (ICSV24), vol. 7, 5057-5063.

平井由季乃, 清水悦郎, 土屋利雄. (2019). 海洋環境と送受信点の移動を考慮した音響曝露レベル推定手法の検討, 海洋音響学会誌, **43**(4), 249-262.

平井由季乃, 清水悦郎, 土屋利雄. (2019). 船舶からの水中への放射雑音, 日本マリンエンジニアリング学会誌, **54**(4), 112-116.

国際学会発表 (主筆のみ)

H., Yukino, Toshio T., Shinpei G., Etsuro S., Koji F. (Dec. 2016). Long range sound propagation modeling for assessing seismic survey noise impacts on marine mammals. 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan.

H., Yukino, Etsuro S., Toshio T. (Jul. 2017). ESTIMATION OF SOUND EXPOSURE LEVEL BASED ON RELATIVE MOVEMENT OF SHIP AND WHALE. 24th International Congress on Sound and Vibration 2017.

H., Yukino, Etsuro S., Toshio T. (Oct. 2017). Measurement and Modelling of Ship Noise in Shallow Water. The 38th Symposium on Ultra Sonic Electronics.

国内学会発表 (主筆のみ)

平井由季乃, 土屋利雄, 後藤慎平, 清水悦郎, 山本富士夫, 布田浩二, 日吉善久. (2016年3月). アルゴデータを用いた MCS 探査による海棲ほ乳動物への影響事前調査手法, 日本音響学会.

平井由季乃, 土屋利雄, 後藤慎平, 清水悦郎, 山本富士夫, 布田浩二, 日吉善久. (2016年5月). アルゴデータと GMT の海底地形データを用いたエアガン音波の長距離伝搬調査, 海洋音響学会.

平井由季乃, 土屋利雄, 後藤慎平, 布田浩二. (2016年8月). 大出力音源が海棲ほ乳動物に与える影響の評価手法と緩和策, 電子情報通信学会.

平井由季乃, 清水悦郎, 土屋利雄. (2017年3月). 浅海域における船舶放射雑音の伝搬状況の推定, 日本音響学会.

平井由季乃, 清水悦郎, 土屋利雄. (2017年5月). 水中雑音源と対象生物の移動を考慮した曝露音圧レベルの推定手法, 日本船舶海洋工学会.

平井由季乃, 清水悦郎, 土屋利雄. (2018年5月). 音波伝搬シミュレーションを用いた曝露音圧レベルマップ, 日本船舶海洋工学会.

平井由季乃, 清水悦郎, 土屋利雄. (2018年10月). 船舶からの水中への放射雑音, 日本マリンエンジ

ニアリング学会.

著作物

一般財団法人日本船舶技術協会. 船舶水中騒音の海洋生物への影響に関する調査研究 (二〇一六年度報告書) (2017年6月).

一般財団法人日本船舶技術協会. 船舶水中騒音の海洋生物への影響に関する調査研究 (二〇一七年度報告書) (2018年6月).

平井由季乃, 浅海域における船舶放射雑音の計測と伝搬シミュレーション (2018年6月) 超音波テクノ

表彰等

平井由季乃. (2016年7月). ハイドロフォン搭載 Argo フロートを使用した全球的四次元海洋音響環境モニタリングシステム導入の提言, 海洋政策学会

東京海洋大学 学長賞 (2016年9月).

謝辞

本研究を行うにあたり，多大なるご指導やご助言を頂いた東京海洋大学学術研究院清水悦郎教授および東京海洋大学博士研究員の土屋利雄博士に深謝するとともに，厚く御礼申し上げます。また，業務と修学の両立にご理解を示し，応援していただいた防衛装備庁の方々にお礼を申し上げます。

また，生活面を支えてくれた家族への感謝の気持ちを申し上げたく，謝辞にかえさせていただきます。