海中音の計測手法・評価手法のガイダンス

海洋音響学会

2021 年 3 月 22 日

海中音の計測手法・評価手法のガイダンス

はじめに

近年、洋上風力発電、資源探査、船舶から発せられる水中音の海洋生物への影響が懸念されており、海中の音がどのような影響をもたらすのか、科学的に評価する必要性が急速に高まっている。ところが、海中における音響の計測手法やその影響に関する評価手法はわが国では整備されておらず、環境アセスメントなどの様々な場面において、これらに関する情報を取りまとめる重要性が高まっている。

海洋音響学会では浅海域における海中音の計測手法およびその影響の評価手法について一定のガイダンスを示すため「海中騒音の評価手法研究部会」を組織した。本ガイダンスは、その検討結果をまとめたものである。

本部会で提案する実用的な海中音の計測手法及び評価手法は、音響物理学的な正確性を求めたものではない。現在、主に洋上風力発電の事業化に向けて多くの環境アセスメントが実施されており、事業者には、事業の実施にあたってあらかじめ環境への影響を評価し、重大な影響を回避または低減するための環境保全措置を講ずることが求められている。一方で、海中音の計測に関しては、計測目的によって異なる手法が採用されていることから、その影響を評価するにあたって必要かつ十分な情報を得るとともに相互に比較するための計測の条件を示す必要がある。

また、本ガイダンスでは、音源からの到達音と背景音を比較し、物理的なマスキング効果による可聴距離を求める手法を提示することを基本とし、個々の生物種への音暴露影響の評価については、対象としない。

なお、本研究部会で提案する海中音の計測手法及び評価手法は、将来の技術的な進展や対象音源の拡大によって改訂していくものとする。

2021年3月22日

特定非営利法人　海洋音響学会

海中騒音の評価手法研究部会員

部会長　赤松友成（笹川平和財団　海洋政策研究所）
部会員　會田義明（環境省）
今里元信（国立研究開発法人　海上・港湾・航空技術研究所）
遠藤保彦（（株）アクアサウンド）
鴨志田　隆（（株）アクアサウンド）
樹田行弘(国立研究開発法人　海洋研究開発機構)
阪本真吾（（株）ウインディーネットワーク）
澤隆雄(国立研究開発法人　海洋研究開発機構)
志村拓也(国立研究開発法人　海洋研究開発機構)
竹越哲郎（（株）オキシーテック）
土屋健伸（神奈川大学）
出口充康(国立研究開発法人　海洋研究開発機構)
松本さゆり（国立研究開発法人　海上・港湾・航空技術研究所）
三島　由夏（東京海洋大学）
宮本佳則（東京海洋大学）
森　和義（防衛大学）
(五十音順)

本ガイダンスへのご意見、記載の修正や改定案は、部会長（赤松）にお寄せください。
専用の受付メールアドレスはこちらです　noise-guidance@masj.jp

目次

海中の特定音の計測法ガイダンス（要約） 4
海中の背景音の計測法ガイダンス（要約） 5
本報告書の用語定義 6

１章　海中音とその影響
　１－１　海中音の性質 7
　１－２　海洋生物の音利用 7
　１－３　海中の人工音源と自然音源 8
　１－４　海洋生物への音暴露影響 9
　１－５　海洋生物の聴覚 12
　１－６　海中音の影響に関する議論 13
２章　浅海域での水中音計測の注意点 15
３章　水中音計測のガイダンス
　３－１　特定音計測の考え方 18
　３－２　背景音計測の考え方 20
４章　特定音の音源レベルと伝搬減衰係数の推定
　４－１　測定点の選定根拠 22
　４－２　音源レベルと伝搬減衰係数の推定 23
５章　水中音の影響評価 26
６章　水中音響技術
　６－１　水中マイクロホン 28
　６－２　水中マイクロホンの校正 28
　６－２　周波数スペクトル解析 30
７章　水中音の影響評価の調査設計
　７－１　海棲哺乳類の観察手法 32
　７－２　BACIデザインに基づいた調査設計 33
８章　我が国での水中音影響評価ガイドライン作成に向けた提言 35
参考文献 36

本ガイダンスの１章、２章、３章は、「海生生物と洋上風力発電～水中騒音計測と影響評価の考え方」環境アセスメント学会誌, 19(1): 29-34 (2021)の記述と重複がある。環境アセスメントの現場にいち早く情報を届けるため、本ガイダンス作成作業と並行して部会長の赤松が執筆した。また、７章は「洋上風力発電による音の影響」海洋と生物 39(5), 436-443 (2017)の記述と重複がある。転載については、環境アセスメント学会および出版社（生物研究社）の承諾済み。

海中の特定音の計測法ガイダンス（要約）

本ガイダンスは、水深150m以浅の浅海域における固定された特定の音源からの水中音の計測に適用する。音源として、海中工事に伴うくい打ち、基礎構築、洋上風力発電の稼働音を想定する。

・水中マイクロホンの数：1本

・設置水深：音源中心の水深（水深20mの海域に設置されたモノパイルであれば、音源中心の水深10m）。ただし浅い方向では現場水深の半分

・音源からの計測方向：3方向

① 深くなる沖合方向、②浅くなる沿岸方向、③等深線に沿った方向

・音源からの距離：188m, 375m, 750m, 1.5km, 3km, 6km※1

・計測時間：一地点の計測時間は3分間以上とする。その間に船舶音などが混入した場合、その時間を除く計測時間の総計を3分間以上とする。魚類のコーラスや船舶の輻輳時間帯などで、特定音に対する背景音のマスキングが大きい時間帯では計測しない。

・計測点数：各計測線で5点以上※2

※1 最大距離は音源中心から6kmとする。ただし背景音レベルと受信音レベルが等価となる距離が6kmを越えない場合、3kmあるいはそれ以下を計測最大距離とする。また、岸からの距離が6kmに満たない場合も、上記に準ずる。最小距離は音源中心から188mとする。また安全確保などによりこの距離に近づけない場合、375mまたは接近可能な最小距離とする。※2 計測点数が5点に満たない場合は、最小最大計測距離の範囲内で適宜測定点を追加し、総計5点以上とする。

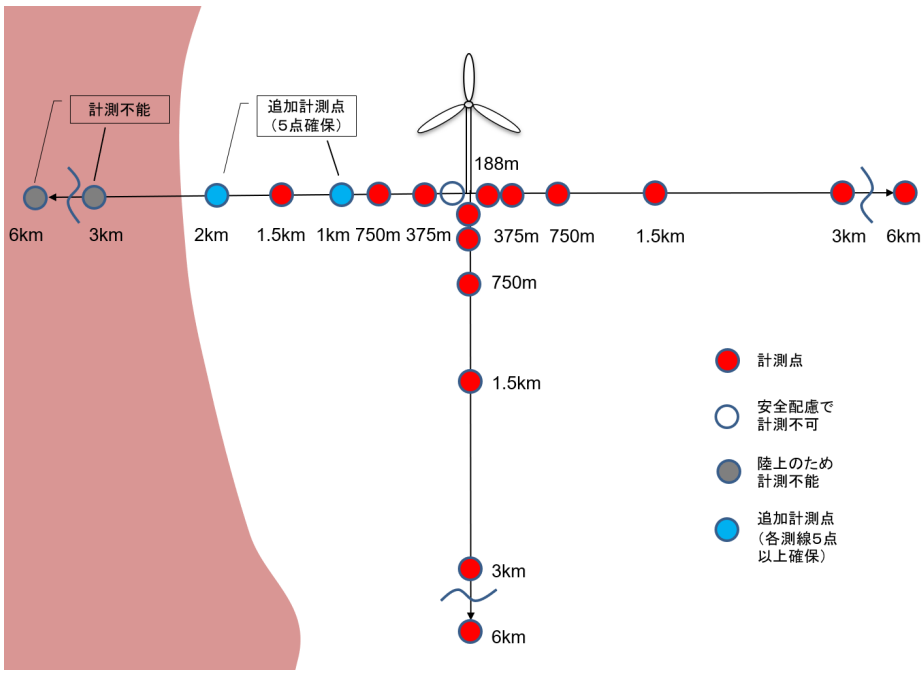

図１　特定音の計測方法

海中の背景音の計測法ガイダンス（要約）

本ガイダンスは、水深150m以浅の浅海域における背景音の計測に適用する。背景音とはその海域に通常存在する音波であり、水中マイクロホンなどの振動音や録音装置の電気的雑音を除く。音源としてテッポウエビなどに由来する生物音だけでなく、気象・海象の変化に伴う音波や、周辺を航行する船舶音も含む。すなわち評価対象とする特定音以外の水中音波をすべて含む。

・水中マイクロホンの数：1本
・設置水深：現場水深の半分
・観測期間：24時間連続。一回15日間以上
・観測回数：四季各1回（年4回）

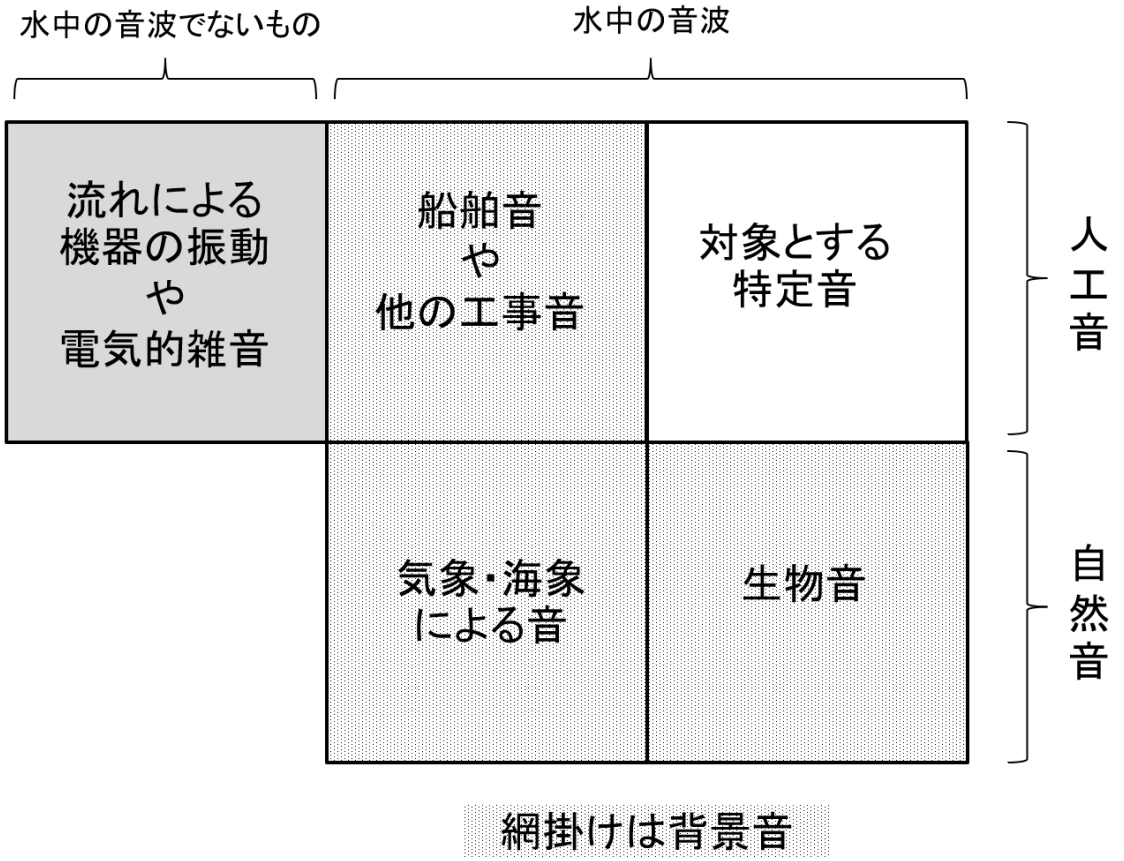

図２　特定音と背景音。背景音は特定音を除く純粋な音波であり、船舶音などの別の人工とテッポウエビや波浪など自然音源を含む。流れによる機器の振動や電気的雑音は水中音ではないため、背景音ではない。

本報告書の用語定義

本報告書で取り扱う手法は、現場で実施可能な海中音の実用的な計測・評価手法に関するものとする。

本研究部会の計測検討対象は、特定の音源からの音とその海域に存在する背景音とする。特定音は、評価対象として着目する音であり、杭打やエアガンによるパルス音や、船舶・洋上風車稼働音による連続音である。背景音は、海域に存在する音波を検討対象とする。背景音には、着目する特定音以外の人工騒音もふくまれる。たとえば洋上風力発電所の稼働音を特定音とした場合、周辺を航行する船舶騒音は背景音に分類する（図2参照）。

本ガイダンスは水深150mより浅い海域での計測に適用する。水深150mより深い海域での水中音計測方法は、たとえば船舶騒音を対象としたISO 17208-1:2016が発行されており、これに従う。対象とする周波数領域は10Hzから1kHzとする。人為的な海中騒音の多くがこの帯域に存在しているためである。

表1　本報告書の対象音と対象水域

対象音	対象海域
・特定音（パルス音）	浅海域
・特定音（連続音）	浅海域
・背景音	浅海域

用語定義

低周波：1kHz以下。下限は10Hz
パルス音の例：杭打ち、エアガン
連続音の例：船舶（停船中）、洋上風力（稼働中）
背景音の例：テッポウエビ、波浪
浅海域：=<150m
深海域：>150m　ISO 17208-1:2016を参考

１章　海中音とその影響

音は水中にも存在している。生物由来の音や、雨や波浪による音、船や工事などの人工的な音など、音源はさまざまである。本章では、水中とくに海中の音に関する一般的な性質や生物の音の利用、音の生物への影響などについて概観する。

１－１　海中音の性質

海中の音は大気中に届かない。海面でほとんどのエネルギーが反射されてしまうためである。このため、これまで海中工事や海中探査などの人間活動で海中に音波が放射されても、その影響を懸念する声はなかった。

水中では音が非常に遠くまで届く。たとえばインド洋で発した音波が大西洋のバミューダ沖で記録されている(Munk et al. 1994)。その伝播距離は1万数千kmに達する。航行中の船舶音や杭打ち音など、海中でよく発せられる人工音が10km以上離れた水中に到達し、観測者の耳で聞こえるのは珍しくない。一方、光は水中では10m～20m程度しか届かない。港湾域で工事をしているような状況では、1m先も見えない。水中では、音は光と比べ物にならないほど遠くまで届く。多くの海洋生物は音をよく利用しており、音に敏感である。空中では音速は1秒間に330m程度だが、水中では概ねその4.5倍、1秒間に1500m伝わる。光に比べればはるかに遅いが、伝達距離が長く影響は即時的である。

音の暴露による生物への影響は多く報告されている。問題は、適切に音を測定し、どこまで許容できるかを調査し、必要ならそれを抑制することである。振動・濁り・流れの影響も決して無視できないが、基本的には影響は短距離にとどまり、工事をしたときに発生する濁りや流れの改変の影響範囲は比較的狭く、一般に、数十メートル、数百メートル程度で収束する。これと比較して水中音は広範囲に瞬時に到達する特質から、生物への影響を検討するにあたって、留意しなければならない要因の一つとなっている。

１－２　海洋生物の音利用

近年、海洋動物の研究が大幅に進展した。とくに水中の生物音響では、米ソ冷戦終結以降の進歩が目覚ましい。海中の音を受信する潜水艦探知システムから得られるデータは高度な秘匿情報であったが、90年代初めに大型ヒゲクジラ類の研究にこのデータの使用が許可され、その行動や生態解明に大きく貢献した(Nishimura & Conlon 1994)。大型ヒゲクジラ類は、暖かい低緯度水域で繁殖し、夏が近づくと餌の豊富な高緯度海域に移動する。季節的な大回遊を行う種が多く、とくに繁殖海域では雄が決まったパターンで音声を発し、雌の誘因や自身の能力誇示に用いていると考えられている。なかでもザトウクジラの「歌」(Payne & McVay 1971)は有名で、日本でも小笠原諸島や沖縄周辺海域で冬になるとよく聞こえる。

水中で音を使っているのは大型のヒゲクジラだけではない。ハクジラの仲間であるイルカ類も、音による水中探査能力であるエコーロケーション能力をもっている(Au 1993)。文字通

り歯があり魚やイカを一尾ずつ捉えるため、魚群探知機と同じように超音波を発し、餌生物からの反射音を聴いて距離や方向を検知し、餌に接近する。希少生物として注目されるジュゴンも、ピヨピヨという小鳥のような声で鳴く。あまり知られていないが、多くの魚類も音を発する(Parmentier & Fine 2016)。たとえばスケトウダラは北の海で繁殖期に大きな集団を形成するが、このときに音を発する。トラフグやカワハギなどのフグの仲間、シログチやニベなどのニベ科魚類、ホウボウやカナガシラなどカサゴの仲間も音を発する。これらの音は威嚇や繁殖のため積極的に発せられており、なにかの動作に付随して出てしまっているものではない。

海洋動物の聴覚もよく調べられている。超音波を用いるイルカ類は当然のことながら数十kHzの超音波領域で感度が良い。一方で、ほとんどの魚類は数十Hzから数百Hzで最も聴覚感度が良い(Fay 1998)。ヒゲクジラは聴覚の直接計測例は極めて少ないが、数十Hzから数百Hzに主なエネルギーを持つ音声を発するため、同帯域での聴覚感度がよいと考えられる。

１－３　海中の人工音源と自然音源

海中には様々な人工的な音源がある。なかでも最も数が多いのは、船舶である。海運に伴い船舶から発せられる音がクジラや魚がコミュニケーションできる距離を縮め、場合によっては繁殖にも影響を及ぼしている可能性が指摘されている。例えばザトウクジラはオスが歌を歌ってメスに伝達する。仮に背景音が倍の大きさになったとすると、伝達距離が半分になる。するとオスの歌が届く面積は4分の1となり、メスがその歌を聞いてオスに会えるチャンスが減る。国際海事機関（IMO）では、海中騒音に関する議論がはじまっており、今後は船舶による放射音の抑制方法や、測定方法が大きな議題になっていくと予想される。

エアガンという海底油田などの層を見るための装置がある。高圧空気を水中で開放して強烈な音を発し、海底下に伝播させて石油層などから戻ってきた音を観測する。海底に埋まっている堆積物の層状構造が可視化できる。エアガンの運用は日本の海域でも既に何万平方キロメートルもの範囲で行われている※。

※http://www.jogmec.go.jp/news/release/news_06_000126.html

洋上風力発電についても、直径が100mを超える風車を建設する計画が多数進んでいる。建設時には着床式の支柱が海底に多数に打ち込まれるため、大きな音が生き物に影響を及ぼす可能性がある。運転中の稼働音は杭打ちに比べ小さいが、長期間にわたって連続的に放射される。低周波に感度のよい種類への長期影響については未知な部分が多い。

海洋開発で必ず問題になるのが漁業者との協調だが、それに伴う影響をどれだけ事前に評価し、コントロールできるかが重要なポイントである。イルカやクジラは希少種が多くシンボルとして注目されがちである。しかし、日本の海域では魚類への影響をしっかりと把握するほうが重要であろう。

一方で、海中には自然に発生する雑音も存在する。主要な音源は、沿岸域から絶え間なく発せられるテッポウエビなどのパルス音である(Lillis & Mooney 2018)。テッポウエビがはさ

みを打つときに真空の泡が発生し、これが崩壊するときに大きく短いパルス音が生じる(Versluis et al. 2000)。テッポウエビの音の場合はてんぷらを揚げるようなパチパチという音に聞こえる。低い周波数から高い周波数までまんべんなくエネルギーをもっている広帯域音である。気象や海象によっても水中音が生じる。降雨による広帯域音は、海表面から海中に放射される。荒天で波が砕け発生した泡からも広帯域音が発生する。

１－４　海洋生物への音暴露影響

前節で述べたように、水中音は自然由来のものも含め普通に存在している。通常の背景音レベルであれば、海洋生物に重大な影響を及ぼさない。しかし、通常に比べ暴露レベルが大きく暴露時間が長い場合には、生体への影響が報告されている。

水中音の生物への最も強い影響例として、音で動物プランクトンが死ぬと報告された(McCauley et al. 2017)。エアガンを発射したあとに動物プランクトンを採取して調べてみると、死亡数が増えた。動物プランクトンは音を聞く器官を特別に持っているわけではないが、音の衝撃波が当たると死んでしまう。動物プランクトンは海洋の一次生産を支える重要な種類である。エアガンのごく近くの限られた影響範囲とはいえ、これを世界中で運用したときに海洋生物の一次生産がどの程度の影響を受けるのかはわからない。

水中爆発音の魚への影響について日本で調べられた例がある(畠山ら 1997)。水中発破をかけたときにどういう種類の魚が、どのくらいの距離で死ぬかという実験で、1トン相当量の爆薬で発破をかけたときに死亡する生物種について、爆源から距離と音波の当たる方向ごとに整理された。いまでは動物倫理の問題で実施しにくい貴重なデータである。ガザミやアイナメ、ウナギは比較的強く、爆源から25mぐらいで死亡が確認された。カレイ、クルマエビなど、海底に生息する種は100mぐらいの距離で死亡した。一方、浮き袋を持っていて、比較的動き回る魚では150mとか200mで死亡が確認された。死因は内出血であった。いわば音で殴られたように器官が損傷し出血する。音の当たる方向によっても損傷率が異なっており、正面や背中からよりも、腹側から音が当たったときに斃死する確率が高かった。

今後、着床式の洋上風力発電設備の設置工事において特に巨大な杭を打ち込むような場合は、大きな音圧が発生する。工事中の杭打ち音は音源音圧レベル（音源から仮想的に１ｍの距離で測った音圧レベル）が大きく、百 m 以上離れていてもピーク値で 180dB re 1μPa を超える(Dahl et al. 2015)。杭のごく近傍であればさらに大きな暴露音圧となり組織破壊がおこりかねない。急激な圧力差によって内耳の有毛細胞や組織にダメージが及ぶ恐れがある。欧州の施工例では、杭の打ち始めに打ち込む力を軽減するソフトスタートや、周辺に音をよく吸収する空気の泡のカーテンを設置するなどの対策により、影響を抑える試みもなされているが、杭打ち音の影響については生物種にかかわらずしっかり調べ、影響範囲を算定しなければならない。一方、稼働中の音は数十 Hz の低い周波数帯域にほとんどのエネルギーがあり、音源音圧レベルも船舶のスクリューから発せられる音と同程度である。予想される影響はもっぱら行動学的なものだが、忌避となるか誘因となるかは不明である。

洋上風力発電の建設が海洋生物に与える影響として評価すべき項目は、環境省が 2017 年 3 月に発行した「洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会報告書」にまとめられている。この中で、「評価項目は工事および稼働の各段階で異なっており、工事中の水環境においては水中音・底質・水の濁りを選定することが考えられる」とされている。水中音は、稼働中についても「評価項目として選定することが考えられる」とされている。評価の対象として考えられる動物としては、海棲哺乳類・海棲爬虫類・魚類が挙げられている。これらは、工事中および稼働中、あるいは沿岸、沖合にかかわらず評価項目として挙げられている。

畠山らがまとめた「航空機騒音等が魚類の行動に及ぼす影響に係る資料収集等調査報告書」(日本水産資源保護協会 1988)は、現在においても人工騒音の魚類への影響を評価する際の指標として参照されており、30 年間にわたって引用され続けた研究成果である。しかし、そこに示されている音圧の威嚇レベルや誘引レベルはマダイで得られたデータである。海洋には膨大な種数の魚類がおり、その聴覚感度や音に対する反応行動は種によって大きく異なるだろう。

この事実は、魚類への騒音影響についてしっかりと取り組んだ研究例がこの 30 年あまりの間になかったことを示している。少なくとも水産有用種については沿岸域に生息するものと沖合を回遊するものに対し、信頼できるプレイバック実験や聴覚計測を行って、生理学的・行動学的な反応閾値レベルを明らかにすることが重要である。これは、洋上風力発電にとどまらず、たとえば養殖生簀の近くの道路工事や、沿岸の漁場近くでの橋梁建設、沖合での海底資源採掘の影響評価にも応用できる極めて経済的需要の高いプロジェクトとなろう。

頭足類のイカやタコの仲間も、音への暴露によって内耳が破壊されるという報告がある（Andre et al. 2011）。内耳には有毛細胞がありゼリー状の物質につつまれた突起部分が曲がると根元に接続している神経索が信号を伝え、振動を感じる。しかし、音に長時間暴露されると有毛細胞が密集している部分がささくれだっている様子が電子顕微鏡写真で確認された。

クジラでは行動変化の影響が多く報告されている。たとえば、潜水艦を探知するための低周波アクティブソナーという音源のコククジラへの影響がアメリカのカリフォルニア沖で計測された。その結果、音を出していないときクジラは直線的に回遊したが、音を発射すると、音源を避けるように遊泳したと示された*。

*https://www.whoi.edu/fileserver.do?id=57468&pt=10&p=40212

イルカに音を聞かせたときに、音を聞く感度が鈍くなってしまうという例がある。大きな音に暴露されたときに、一時的な聴覚感度の上昇(TTS; temporary threshold shifts）と呼ばれる反応がみられる。ヒトを含む哺乳類でよくみられる現象であり、イルカでも確認された。音暴露の前後で脳波を測り、聴覚閾値を調べる手法が用いられた。その結果、イルカでも一時的な聴覚感度の上昇が起こると確認された。なお暴露音圧レベルが大きすぎると聴覚感度の低下が一時的ではなく永続的となる(PTS; permanent threshold shifts）。

2016 年に米国大気海洋局(NOAA)の海洋漁業局が「海棲哺乳類の音響技術ガイダンス」を発

行した※。外部専門家委員の査読に加え、複数回のパブリックコメントを経て作成された、海棲哺乳類への音の影響評価基準をまとめたものである。多くの議論が積み残されているものの、海産哺乳類への音暴露における数値基準としては現在利用できる唯一のものである。

このガイダンスでは、内耳の有毛細胞に永続的なトラウマが残るレベルを影響評価の基準としている。このレベルを越えると器官に損傷が起こることからも推測されるように、基準値としてはかなり緩い。行動に影響が認められるレベルははるかに低いと考えられる。一方で、このガイダンスのように生理的に影響を与える基準は、計測値のばらつきが他の基準に比べ小さく合意形成もしやすい。

NOAA のガイダンスでは、音の暴露レベルと聴覚重みづけ関数という 2 つの概念が提案されている。これまでの騒音影響評価では、さらされた音の最大レベルを元に議論することが多かった。しかし、小さな音でも長く暴露されれば影響は大きいと考えられる。逆に大きな音でも継続時間が短ければ、影響は小さいだろう。そこで、対象とする生物の位置における音のエネルギーの時間積分値すなわち暴露レベルが提案された。これは一定期間に生物が受けた音の全エネルギーに相当する。積分する時間幅は 24 時間が提案されている。このガイダンスは洋上風力発電に限らず、あらゆる騒音暴露を想定して一般的な表現で書かれている。たとえば大型船の騒音ならその音源音圧レベルは風車稼働音より大きいが、一日に何度も通るものではないので、24 時間の音暴露レベルは限られている。しかし東京湾の観音崎沖であれば、通過船の回数だけ積分値が増える。風車稼働音のレベルは低いが連続して運転されているため、24 時間つまり 86,400 秒の積分を行うと音暴露レベルは 1 秒しか継続しない音に比べ 49dB 大きくなる。ガイダンスには最大値を用いた評価も併記されている。とくに大きなパルス音を発生する杭打ちについては最大レベルでの評価が推奨されている。

ハクジラ類は1000Hz以下で聴覚感度が悪く、ヒゲクジラ類は低周波で感度が良いと述べた。たとえば 100Hz の音を暴露した場合、物理的には同じ音圧レベルであってもヒゲクジラ類のほうが予想される影響は大きい。海棲哺乳類の聴覚は海洋生物の中でももっともよく測られており、多くの種で聴覚感度曲線が示されている。U 字型になる曲線の最小部が最高感度周波数を示している。聴覚重みづけ関数はこれを上下逆にひっくり返した形をしている。感度のよいところを基準値とし、それに比べ感度が悪い周波数領域は影響を割り引いて考える。想定されている生物群は、5 つしかない。低周波に感度が良いヒゲクジラ類、中周波に感度が良い多くのマイルカ科と大型のハクジラ類、高周波に感度が良いネズミイルカ科やセッパリイルカ属、鰭脚類のなかでやや高周波に感度が良いアザラシ類と、可聴域が比較的狭いアシカ類である。先述の NOAA のガイダンスでは、聴覚感度が測られた古今東西の文献を網羅し、それぞれの分類群で典型的な聴覚感度曲線をモデル化し、その逆数をとったものを聴覚重みづけ関数と定義している。

最終的な影響評価を判断する、永続的な聴覚感度の低下(PTS)は、実際にはほとんどの種で直接測られていない。測られているのは一時的に聴覚感度が低下するレベル(TTS)だけである。ただし PTS と TTS には一定の関係があることを利用して、PTS を推定している。ヒゲクジラ

類に至っては TTS すら計測されていないので、野外でのプレイバック実験や音声、内耳の解剖学的知見から聴覚感度曲線や内耳への影響を推定している。ちなみにこのガイダンスではヒゲクジラ類はナガスクジラもミンククジラもひとまとめにされているが、おそらく大型のナガスクジラはより低い周波数で感度が高い。聴覚重みづけ関数は改訂されなければならないが、これについてもデータが不足していることから、今のところ一つの重みづけ関数で代表している。

NOAA のガイダンスでは、最終的な成果の活用ツールとして、音のパラメータを入れると基準値を越える距離を算出してくれる便利なエクセルファイルが用意されている。対象とする分類群を選び、連続音かパルス音かを決め、音源音圧レベルとその音が 24 時間の間にどのくらい繰り返されるかを入力すると、聴覚に永続的な感度低下がみられる距離が表示される。
※http://www.nmfs.noaa.gov/pr/acoustics/guidelines.htm

１－５　海洋生物の聴覚

洋上風力発電や船舶など海洋利用で発せられる音波の周波数は、魚類やヒゲクジラの聴覚感度のよい数十Hzから数百Hzである(Slabbekoorn et al. 2010)。このため騒音が常時発生する風車の稼働音の場合、音声が騒音に紛れ、遠距離でのコミュニケーションができなくなる恐れがある。音響学ではこれをマスキング効果と呼ぶ。たとえれば、静かな湖畔では遠くまで声が届くが、うるさい交差点では横断歩道の反対側とも会話できない。低周波に感度のよい魚類の一部は、繁殖のために音声を発する。これがマスキングの影響を受けると、繁殖相手に正しく信号が届かなくなる。

周波数帯域で見ると、洋上風力発電の建設や風車稼働で発せられる音は数十Hzから数百Hzである（図3）(Duarte et al. 2021)。一方、聴覚感度の良い周波数帯域は種によってずいぶん異なる。魚は耳石をもっていることからもわかるように、音波に敏感である。水産分野では年齢査定に用いられることが多いが、本来は音刺激を感知する聴覚器官の一部をなしており、文字通り耳の機能をもっている。これまでの国内外での電気生理学的・行動学的実験により、魚類は数十～数百Hzの低周波に感度が良いことが知られている。ただし一部の硬骨魚類では100kHz以上で感度がある。低周波に感度が良いと推測されるもう一つの分類群はヒゲクジラ類である。シロナガスクジラやナガスクジラは数十Hz、そのほかの大型のヒゲクジラは数百Hzから数千Hzの音声を発することから、少なくとも発声周波数の帯域は聞こえるはずだ。風車稼働音の影響について言えば、魚類とヒゲクジラ類に着目すべきである。逆に小型鯨類への風車稼働音の影響は限定的であろう。なぜなら小型鯨類は1000Hz以下では聴覚感度が悪いうえ、洋上風力発電の稼働中の音は杭打ち音に比べはるかに放射されるエネルギーが小さいためである。なお、イカやタコなどの頭足類は、音圧は感じられず、水の振動成分のみ検知する。図3では周波数を横軸に、振動も含めて可聴域と記した。

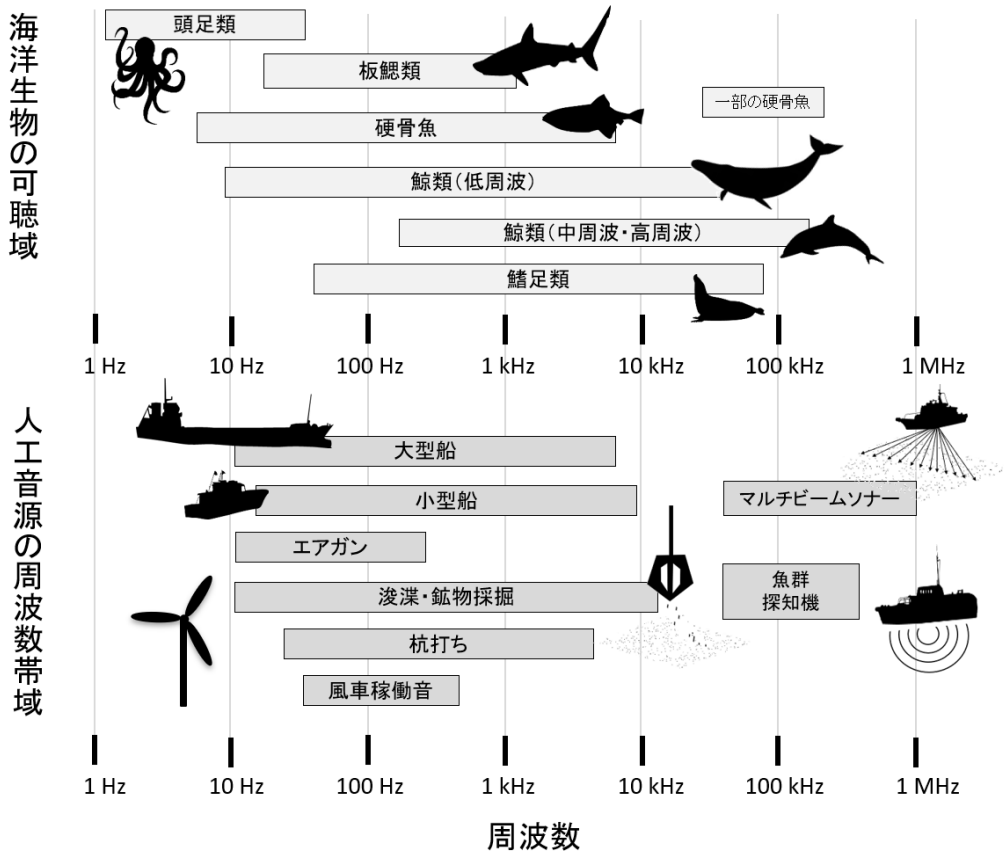

図3　洋上風力発電に関わる騒音と海洋生物の周波数範囲。Duarte et al. (2021), Slabbekoorn et al. (2010)を参考に、関連情報を取捨選択して作成した。

１－６　海中音の影響に関する議論

海中騒音の生物への影響については、国際的な議論になっている。既に船舶騒音に関する非強制ガイドラインがIMOから出されており、国連海洋会議や生物多様性条約締結国会議でも海中騒音問題が議論されはじめた。EUも、船舶騒音と水中騒音低減方法についてプロジェクトを組織し、すでに数年間の研究を完了し報告書を提出している。

我が国でも海中騒音の測定手法の標準化は急務となっている。海洋環境アセスメントの現場、特に洋上風力発電などを計画する際に、水中音を測定するよう求められることが多い。しかし測定方法についてのガイダンスが日本にはないことから、計測方法がまちまちで、結果の比較が困難になっている。

科学的には多くの水中マイクロホンで長期間にわたる測定を行うのが本来であるが、これには資金と時間を要する。環境アセスメントは純粋な科学研究とは異なり、生態系に重大な影響を及ぼさないように事前に配慮するのが目的である。そのため、手持ちの機材や限られた人員で測定できるガイダンスが必要である。

大気環境中における風力発電施設からの騒音の測定方法について、環境省が取りまとめた「風力発電施設から発生する騒音等測定マニュアル」では、環境中に存在する音を特定騒

音、暗騒音、残留騒音と分類し、残留騒音の測定方法として測定時期・期間、測定時間帯、観測時間等について記載している。なお、騒音というのは、人間の周波数別の聴覚特性を勘案して、人間が受ける刺激に換算したものを騒音といっている。したがって、生き物が違えば同じ音源でも受容性は異なる。水中の場合にはいろいろな聴覚特性を持った生き物がいるので、以下では残留騒音を背景音、特定騒音を特定音と記載する。

水中音の海洋生物への影響評価にあたっては、水中音の測り方の標準化と、予測評価手続きの明確化が必要である。本ガイダンスではその第一歩としての水中音の計測評価手法を提示したものである。今後の運用に応じて適宜改定を行い、実用的なガイダンスとしたい。

２章　浅海域での水中音計測の注意点

音波とは媒質を伝わる圧力の変化である。水中であれば媒質は水である。圧力変化に応じて電位差を生じる圧電素子を内蔵したものが水中マイクロホンであり、原理的には水中マイクロホンを水中に設置すれば、その場の音圧すなわち音の大きさを測れる。音圧は圧力を表す単位 Pa（パスカル）で表記される。音圧レベルというのは音圧の対数表記で dB が用いられる。水中音の音圧レベル表記を含む水中音響の基礎は下記のハンドブックが有用である。
http://oalib.hlsresearch.com/PocketBook%203rd%20ed.pdf

さて、水中音の測り方は実はそれほど単純ではない。とくに浅い海域で大きな構造物が低い周波数の音を発している場合は、いまだに博士論文が書けるほど奥深く複雑である。日本の沿岸水域で大規模に建設されようとしている着床式洋上風力発電にともなう騒音は、まさに浅いところに建てられた大きな構造物が低い音を発する状況であり、音場のシミュレーションは容易ではない。複雑さの原因のひとつは、海面による逆位相反射による干渉効果である。

凪いだ海面は完ぺきな音の反射体であり、鏡のように音波をはねかえす（図 4）。ただしその際には位相が逆転する。すなわち高い音圧が当たった時にはそれを相殺するような低い音圧の音波がはねかえる。ということは、水面直下では常に音圧は 0 つまり大気圧と同じである。水面は音波からすれば「押さば引け、引かば押せ」で、上から押さえている大気の圧力と常に平衡している。入射波とまったく同じ波形で圧力の正負をひっくり返した音波が水面から放射されていると考えると、物理的にはまったく同じ状況となる。すなわち逆位相反射波が水面から放射され、水面直下はすべてのノイズがキャンセルされて常に静穏である。

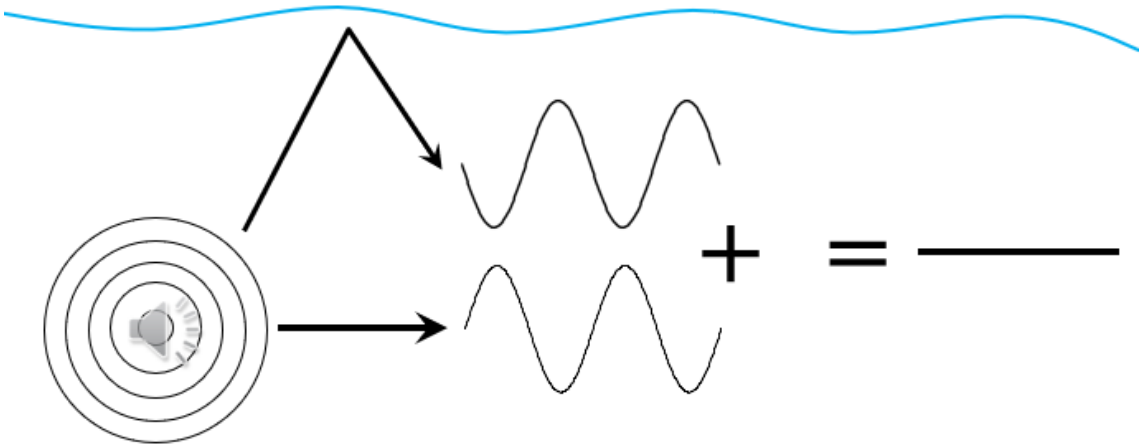

図 4　水面からの反射音は音圧の山と谷が直接到達する音と逆になっている。このため足し合

わせるとノイズキャンセル効果が生じ、0 になる。水面直下では圧力は常に大気圧と平衡し音圧が存在できない。

水面直下では原理的に音が存在できない。このため、水面直下に水中マイクロホンをおろしても、計測される音圧（大気圧からの変化）は 0 である。この影響は水面下にも及んでいる。音圧が一回上下を繰り返しもとに戻るまでに進む距離を波長というが、この波長の数倍程度の深さまでは水面からの逆位相反射の影響を受ける。ただし水面からの反射音と直接に到達した音では経路が異なるため、水中マイクロホンを深く沈めてたまたまその経路差が波長の半分となると、今度は音圧の正負が重なり合って大きくなる。このため、音源から同じ距離で水中マイクロホンを沈めながら音圧を測ると、受信音圧が水深に応じて上下する。洋上風車の稼働音の主要成分がある周波数を仮に 75Hz とすると、その波長は 20m である※。これは着床式の洋上風力発電ファームの建設海域の典型的な水深と同じであり、計測される音圧は水深の違いによる影響をもろに受ける。

水中での音響伝搬におけるもう一つの反射体は海底である。海底は固体であるため、水面のように反射波の位相反転は起こらず、水面のような完全な反射体でもない。吸収され、地質構造によってはいったん海底下に入った音波が境界面で反射され戻ってくることもある。浅い海域では水面反射と水底反射の両方の影響を受けるため、その両方からできるだけ離して水中マイクロホンを設置するのが望ましい。

洋上風力発電の場合、音源は点ではなく太い支柱である、放射される音の周波数成分はくい打ち音であれば広帯域、稼働音であれば増速器や発電機から発せられる特定の周波数とその整数倍音が卓越する。音源を点と仮定し、単一周波数しか含まず、水面反射しかない状況でも、計測音圧が場所によって大きく変わるのであるから、このような複雑な状況での音響伝搬を予測するのは難しいと想像できるだろう。もちろん、底質の反射と吸収特性が地図上に示されたデータを揃え、水中を多数のメッシュに区切った音響伝搬シミュレーションを行えば、洋上風車周辺の音圧分布の予測は可能である。しかし、定量的なシミュレーションに耐える精度の底質データは存在しないことが多い。

すべてのデータがそろったとしても、風車から発せられるもともとの音の大きさがわからなければ音場の定量的な予測はできない。もともとの音の大きさとは音源音圧と呼ばれ、仮想的に音源から 1m の距離で測ったときの受信音圧である。もし深い海で水面から十分離れたところに一つだけ小さな音源があれば、受信音圧は音源からの距離に反比例する。したがって距離 100m で受信音圧が 1 Pa であれば、音源音圧は 100Pa である。しかし巨大な風車は点音源とはみなせず、ある程度の距離から音圧を測らなければならない。上述した複雑な伝搬特性により、シミュレーションであっても計測音圧を音源音圧に逆算するのはむずかしい。卵が先か鶏が先かのような問題である。

だからといって、水中騒音アセスメントを行わないわけにはいかない。精度不十分でもなん

らかのガイダンスが必要である。そこで次章では、実験的に音源音圧レベルと伝搬特性を最小限の機材と人員で推定する方法を提案する。

本章をまとめると

① 音の大きさは音圧(Pa)であらわされる。音圧レベルは音圧の対数表記(dB)である。
② 海面や海底からの反射音により、受信される水中音圧は大きく変動する。音源から同じ距離であっても、水中マイクロホンの設置水深により計測値が異なる。
③ 音響伝搬シミュレーションは、データ確保が困難で予測精度が不十分である。

※水中の音速は毎秒 1500m。一秒間に 75 回音圧が上下動を繰り返すとすると、一回振動する間に音が進む距離は 20m で、これが波長である。

３章　水中音計測のガイダンス

３－１　特定音計測の考え方

特定の音源、たとえば杭打ちや海底掘削から発せられる音の測り方を考察する。

前章で述べたように、音源からの音波は均等に広がるわけではない。海表面からの多重反射環境が、水中音の計測を難しくしている原因のひとつである。静穏な水の表面は完全に近い音の反射体であり、表面からの反射波は直達波の逆位相となる。その結果、水面近くでは反射波と直達波があわさって音が完全にキャンセルされてしまう。つまり水面付近では音が存在しない。とくに着目する音波の波長以内の水深でこの効果は顕著である。たとえば200Hzの音波の波長は7.5mである。したがって、水中マイクロホンは少なくともこれより深く沈めなければならない。この効果は水面から離れるほど小さくなるので、水中マイクロホンをできるだけ深く沈めて測る必要がある。

水中音の計測を難しくしている原因の２つ目は、音源の大きさと形である。船舶や洋上風車の支柱は大きく、音は一点から放射されるわけでない。音は振動する音源全体から発せられるため、球面状ではなく円筒状あるいはもっと複雑な波面で拡散する。

国際標準化機構（ISO）は、2017年にISO18406という規格を発行した。これは水中のくい打ち音の計測規格である。水中マイクロホンは船上から垂らしても、ブイに据えつけてもよい。またこの基準によれば、水中マイクロホンの数は多いほど良い。１本目の水中マイクロホンの設置は、水面から測って計測現場（または最も浅いところ）の水深の半分とする。２本目は水面から水深の3/4の位置とする。これは水底から測れば水深の1/4だけ上方である。音源からの距離は750mとする。港湾などさらに浅い場合は、水中マイクロホンの音源からの設置距離は、現場水深の3倍とする。雑音の混入をできるだけ防ぐ工夫も必要である。すなわち流れによるケーブルの動揺や周辺の船舶や機械的・電気的雑音の混入に注意する。

船舶騒音については、水深150mより深い海域での計測方法については、2016年に制定された別のISO規格がある。測定位置については、音源からの距離は100m、あるいは船長より長く取ることを求めている。また水中マイクロホンは３つ用意し、船舶から見た角度が15°、30°、45°に垂下するとされている。船を深い水深の海域に移動させて測るのは大変であるが、複雑な形状の船体から出てきた音を再現性のある形で測るにはいまのところこの方法が現実的である。なお、浅い水域での船の騒音の測り方についてISOでも議論しているが、結論に至っていない。浅い水域での音の伝播と減衰は非常に複雑であるうえ、船が複雑な形状を持っている音源というのが厄介で、なかなか国際合意に至らない。

以上をまとめると、特定音の計測法として３つの問題点がある。水面反射音による干渉効果、大きな音源の複雑な形状による非等方的な音波拡散、浅い海での複雑な音の伝播である。以下に示すガイダンスは、ISO18406を参考にしながら修正を施したものである。国際基準を基にしたこの拡張により、数値シミュレーションによる算定が困難な音源音圧レベルと

伝搬減衰の推定を一挙に行う。推定手法の詳細は次章で述べ、本章では測定手法を示す。

まず、水中マイクロホンの数を１本とする。設置水深は音源中心の水深とする。たとえば水深20mの海域に設置されたモノパイルであれば、音源中心は水深10mすなわち現場水深の半分である。深くなる沖合方向では、水中マイクロホンの位置は同じ水深を維持する。上記の例の場合は10mである。浅くなる岸方向では現場水深の半分の深さとする。これは先に示した国際基準と同じである。一方でISO18406と異なるのはマイクロホンを１本だけしか使わない点である。複数の水中マイクロホンを用いるほうが良いのは明らかであるが、実際の計測において複数の水中マイクロホンを所定の水深に設置し、複数の定点で計測を行うのは難しい。水中マイクロホンが１本であれば、測深器を用いて水深を計測しその半分の水深まで垂下すればよく、ロープや錘など水中マイクロホンの設置系を変更しなくてよい。また沖合方向でマイクロホン水深を一定としたのは、音軸上での計測を企図したためと計測を容易にするためである。

音源からの計測距離については、国際基準を含みつつ拡張を試みる。音源から３方向。すなわち①深くなる沖合方向、②浅くなる沿岸方向、③等深線に沿った方向の３つの方向に計測線を設ける（図5）。計測点は音源からの距離で188m, 375m, 750m, 1.5km, 3kmで最大6kmの６点とする。国際基準で用いられている750mを基準に、二倍か二分の１の距離に測定点を設ける。750m という基準点はISO18406から流用したものである。この規格によれば、音源からの距離750mでこれまで多くの計測がなされてきた。過去の計測値との比較を行うため、基準距離は既存規格と同一ものを採用する。

背景音レベルと受信音レベルが等価となる距離、すなわち特定音が聞こえなくなる距離が6kmを越えない場合、3kmあるいはそれ以下を計測最大距離とする。また、岸からの距離が6kmに満たない場合も、上記に準ずる。最小距離は音源中心から188mとする。また安全確保などによりこの距離に近づけない場合375m、または接近可能な最小計測距離とする。上記の理由により各測線上の計測点数が５点に満たない場合は、最小と最大の計測距離の範囲内で適宜測定点を追加し、総計５点以上とする。これらの手法を図5にまとめた。

一測定点の録音時間は3分間以上とする。水中マイクロホンを水深の半分の位置に沈め、船舶のエンジンを切って録音を行う。その間に船舶騒音などが混入した場合、その時間を除く録音時間の総計を3分間以上とする。魚類のコーラスや船舶の輻輳時間帯などで、特定音に対する背景音のマスキングが大きいときは録音時間から外す。GPSを用いて計測船舶の位置を記録する。アンカーを用いた船舶の位置固定が困難な場合には、計測予定距離から大きく外れないよう、流される範囲を考慮して録音開始の停船位置を調整する。

水中マイクロホンおよび録音装置は、10Hzから1kHzの低周波音が記録できる仕様のものを用いる。水中マイクロホンは校正されているものとする。ただし校正信号の周波数は計測可能全帯域を用いなくてよい。圧電素子を用いる場合は一定の周波数で校正し、その校正値を低周波側と高周波側に用いる。詳細は６章に記載する。

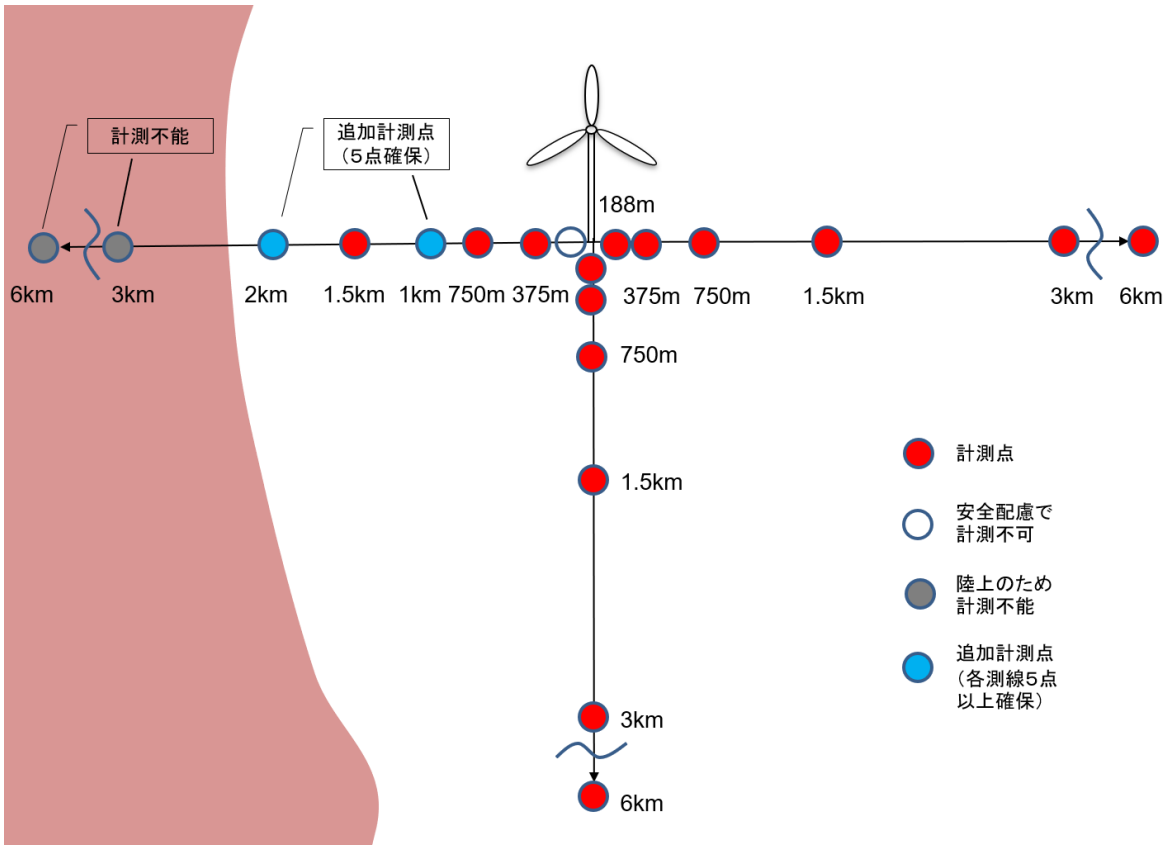

図5 特定音の計測方法（図1の再掲）

３－２　背景音計測の考え方

海中には自然に存在している背景音がある。沿岸域では、テッポウエビのテンプラ雑音がよく計測される。テッポウエビにはいくつかの種類があり、秋田県や北海道などの冷水域にも生息している(渡部守義 2017)。テッポウエビは威嚇のためにはさみをパチンと打ち、そのときに生じる真空の泡がはじけるときに大きくて短時間で収束するパルス状の音が発せられる。多数のテッポウエビが生息している海域ではこれがひっきりなしに聞こえてくるため、テンプラとも土砂降りの雨とも形容される音が水中に充満している。

このテンプラ雑音による背景音レベルは、周期的に変化する。一日 24 時間の日周変化と、月齢周期（実際には潮の満ち引きの強度）による変化。さらに季節的な増減がある。夜間にレベルが高い傾向があるが、これが逆転して昼間のほうが高くなることもある。また季節によって昼夜性が逆転する例も観測されている(Bohnenstiehl et al. 2016)。すなわち、ある海域の平均的な背景音レベルとその上下限値を知るためには、24 時間連続で少なくとも月齢周期の半分（15 日間）の水中録音を行い、これを季節ごとに一年間 4 回繰り返すのが必要最低ラインである。ある場所で数分間だけ背景音を測りとても静かな水域と判定されたとすると、音の影響範囲が大きく見積もられる。逆にテッポウエビが活発なタイミングでの録音データを使うと背景音レベルが高く、影響範囲が過小評価される。

以上をまとめると、背景音には３つの変動要因がある。すなわち、日周変動・月齢周期変動・季節変動である。残念ながら背景音計測に関して国際的に合意された基準は存在しない。本報告書では、背景音の計測ガイダンスを次のように示す。

まず、水中マイクの数を１本とする。海中の背景音の源は多様であり、水底に生息するテッポウエビから水上を航行する船舶、波浪など位置が特定できない音源も多い。そのため海底海面反射を抑えられる水柱の中心である水深の半分を計測点とする。上述したように背景音は変動が極めて大きい。この変動幅を理解するための測定ガイダンスとして、計測期間と回数について次の２つの条件を提案する。

・観測期間：24時間連続。一回15日以上
・観測回数：四季各1回（年4回）

すなわち、日周変動・月齢周期変動・季節変動のすべてを計測する方針である。ここに提案するのは最低条件である。これを満たさなければ測定値はその時の特別なものであり時間的な変化を把握できないと思われる。一方で、観測定点を増やし観測期間を延ばすのは推奨される。

計測装置としては据え置き型の水中録音機が必要となる。水深の半分の深さに浮遊させるため、アンカーと浮体を用い中途に録音機を固定する。海面上に浮体や旗を設置する方法と、切り離し装置を付加して計測系全体を水面下に没し回収のときに切り離して浮上させる方法の２種がある。設置深度が浅い場合は前者、設置深度が深い場合は後者が選択肢である。

４章　特定音の音源レベルと伝搬減衰係数の推定

本章では、特定音の音源レベルと距離減衰を見積もる。前章で得られた計測データから、この２つを同時に行う。すでに述べたように、海面反射による逆位相音のキャンセル効果により、海面に近いところの受信音圧は、距離に反比例ではなくもっと素早く減衰する。この傾向は浅いほど顕著であるため、洋上風車から岸方向には波長が水深より長い低周波音はほとんど伝搬しない。逆に、沖側には伝搬しやすい。岸に平行で等深線に沿った方向では、その中間的な減衰傾向がみられるはずである。

減衰量の距離依存性は実測するのが確実である。そこで、風車から岸方向、沖方向、等深線方向の３つの線状で音源からの距離 188m, 375m, 750m, 1.5km, 3km, 6km での受信音圧の計測をもとに、音源音圧レベルと伝搬減衰係数を推定する。

４－１　測定点の選定根拠

ここで、測定点の音源からの距離の選定根拠について述べる。基準距離 750m はこれまでの計測例が多いため、ISO18406 に準じて選定した。近傍から遠方まで伝搬状況を把握するため、測定点の音源からの距離は基準距離から２のべき乗で選ぶ。その下限と上限の選定根拠は以下である。

本ガイダンスの計測距離の下限値は近距離音場の外側とみなせる最小距離である。近距離音場とは、媒質（海水）の粒子変位と音圧が同位相で変化しない状況で、音場は極めて複雑で計測位置により大きく変化する。この領域では測定点を増やして精度を上げるのは難しい。

近距離音場の影響範囲 X0 は、音源の大きさ A と発せられる音波の波長 λ に依存するいくつかの推定式が存在するが（Foote 2014）、本ガイダンスでは（式 1）を採用する。

$$X0=(A^2) / \lambda \qquad \text{式 1}$$

ここで A=20m とした。音源の大きさは、洋上風力発電の円筒形の躯体のうち水没している部分の長さ、つまり水深と仮定した。発せられる音波の波長は、とくにくい打ちの場合は広範囲に広がるが、本ガイダンスの低周波の範囲である 1kHz を上限とする。稼働音の基底周波数を 50Hz とすると、考察すべき波長の範囲は以下である。

$$\lambda \text{ max } 30\text{m } (50\text{Hz}) - \text{min } 1.5\text{m } (1\text{kHz}) \qquad \text{式 2}$$

$$\therefore \quad X0 = 13.3\text{m} - 267\text{m} \qquad \text{式 3}$$

考察すべき周波数範囲での近距離音場の最大距離は、音源から 267m 程度と推定される。音圧

計測はこの付近から遠方で行うべきである。750m を基準とし上記の推定結果に従えば、音源からの最小計測距離は 750m の 4 分の 1 である 188m が適当である。

本ガイダンスの計測距離の上限値は、鏡像効果がみられる最大距離を越えるまでとする。鏡像効果とは、すでに述べた水面からの逆位相反射波との干渉効果のことで、音源からの距離が同じでも音源水深、受信水深と波長によって受信音圧が異なる。鏡像効果の影響を受ける最大距離 R0 は、次の式で求められる(Etter 1995)。

$$R0 = 4\pi Zs\ Zr / \lambda \qquad \text{式 4}$$

ここで、Zs, Zr はそれぞれ音源と受信点の水深である。仮に、音源の水深を 20m、受信するマイクロホンの水深を 20m とし、波長は式 2 の範囲とすると、鏡像効果の影響を受ける最大距離の範囲は以下である。

$$\therefore \quad R0 = 167m - 3349m \qquad \text{式 5}$$

なお水深 20m は、着床式洋上風力発電の建設水深あるいはコンテナ船が着岸可能な港の水深と同程度である。沖合にいけば水深はより深くなる。750m を基準として 2 倍ずつ距離を増やすと 6000m で R0 を越えるため、本ガイダンスでは 6000m を計測上限値とした。

本ガイダンスでは各測線で最低 5 点とした。この上下限値の間で測定点は多ければ多いほど良い。受信音圧と距離は物理的には相関関係があるのは明らかである。減衰係数を定量的に推定するために必要な計測点数は、計測水深や波長だけでなく現場の水深変化や底質、海面の荒れや水温分布にもより、確定できない。一方で 2 点または 3 点で直線近似の傾きである減衰係数を求めるのは誤差が大きいと考えられる。

４－２　音源レベルと伝搬減衰係数の推定

これまでに述べた方法で得られた各測線における音源からの距離および受信レベルを用いて、音源レベルと伝搬減衰係数を推定する（図 6)。

メートル単位での距離の常用対数値に対して得られた受信レベルすなわち音圧の対数値を図に示し、直線近似で伝搬減衰係数と音源レベルを求める。

$$（音源レベル\ SL）＝（受信レベル\ RL）＋（伝搬減衰係数\ A）\times \log_{10}（距離\ r\ (m)）$$

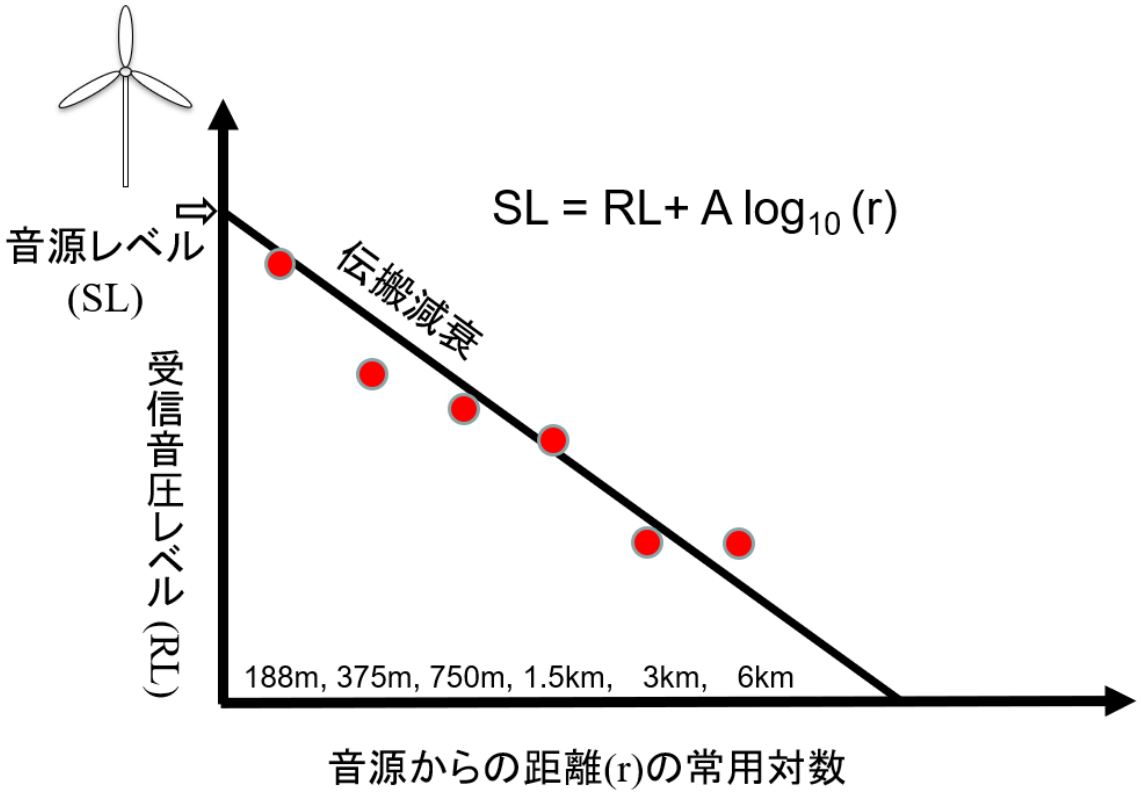

図 6　受信音圧レベルと測定点の音源からの距離を用いて、伝搬減衰係数と音源レベルを求める

ここで、音源レベル、受信レベルは音圧の対数表記である dB の値である。基準音圧は水中の場合 1μPa である。たとえば、1Pa と計測された音圧は百万 μPa つまり 10^6μPa であり、下記の式に従うと音圧レベルは 120dB である。音圧レベルは $20*\log_{10}$ (音圧 μPa)で計算できる。詳細は「海洋音響の基礎と応用」（海洋音響学会）を参照。

深い海で音波が四方八方に球面上に拡散していく場合、伝搬減衰係数 A は 20 となる。一方で、比較的浅く平坦な海では海面と海底の間で音波が円筒状に拡散していく。この場合、伝搬減衰係数は 10 となる。実際の伝搬減衰係数は、得られた 5 点ないし 6 点の受信音圧レベルと測定点の音源からの距離を用いて直線近似を行う。直線の傾きが伝搬減衰係数、切片が音源レベルである。なお、距離が音源付近の水深と同等以下の場合は球面拡散が予想されるが、先述の計測最小距離の選定理由で述べたように近距離音場での計測を避けるため、音源から 66.7m 以内では計測を行わない。そのため、音源近傍での球面拡散と円筒拡散の接続は行わず、遠方場で伝搬減衰係数は一定と仮定する。

着床式洋上風力発電の稼働音の場合、とくに浅くなる岸方向では鏡像効果が予想されるため、直達波と逆位相での干渉が起こるとこの係数が 20 より大きく（つまり減衰が強く）なるかもしれない。洋上風車は音源自体が大きく支柱全体から音波が放射される。海底に直接伝わる音

波もある。また多くの周波数成分を含む。こうした要因が絡み合うため、距離減衰係数はシミュレーションで予測するより実測したほうが確実である。

複雑な伝搬状況をたった１本の水中マイクロホンで測ろうとするのは、音響物理学的には未熟な計測方法だが、水中騒音アセスメントでは実行可能でコストも抑える必要がある。この計測ガイダンス案は、これらの妥協点を探ったものである。

音響伝搬で常に考慮されるのは吸収減衰である。水中を音波が長距離伝搬する場合、マグネシウムイオンの熱エネルギーとなって音のエネルギーが失われる。本ガイダンスで考察する低周波は1kHz以下である。1kHzの吸収減衰係数は世界のほとんどの海で1kmあたり0.1dB以下である(Ainslie and McColm 1998)。本ガイダンスの最大計測距離であっても1dB以下の寄与しかない。洋上風力発電や船舶騒音の主なエネルギーは数十から数百Ｈｚであるので、吸収減衰はこれより小さい。このため、本ガイダンスでは伝搬減衰以外の吸収減衰項を省いた。

５章　水中音の影響評価

水中音の影響範囲を限定するための簡便かつ信頼できる手法がある。この手法では、ある音源から発せられた音が、現場海域に自然に存在している音に紛れてしまう距離を指標にする。たとえ話でも述べたように、特定の音たとえば洋上風車の稼働音の音源レベルが同じであっても、背景音のレベルによって聞こえる距離は大きく変化する（図 7）。魚類が聞こえるぎりぎりの小さい音である聴覚閾値は、通常は背景音レベルより小さい。すなわち、生理的に聞こえる限界距離より実際に聞こえる距離のほうがずっと短い。図 5-1 は音の大きさも距離も対数で表記してあるので、横軸がすこし離れれば桁違いに短くなる。音の影響を誇張するために生理的に聞こえる限界距離を示している例が見受けられるが、現実的にはあまり意味がない。重要なのは音源レベルとその海域の背景音レベルを特定することである。この手法の便利なところは、影響を限定する範囲の算定に生物種特有のデータを用いない点である。すでに述べたように沿岸域では背景音レベルが生物の聴覚閾値より通常は大きいので、伝搬による距離減衰がわかれば聞こえる最大距離が計算できる。

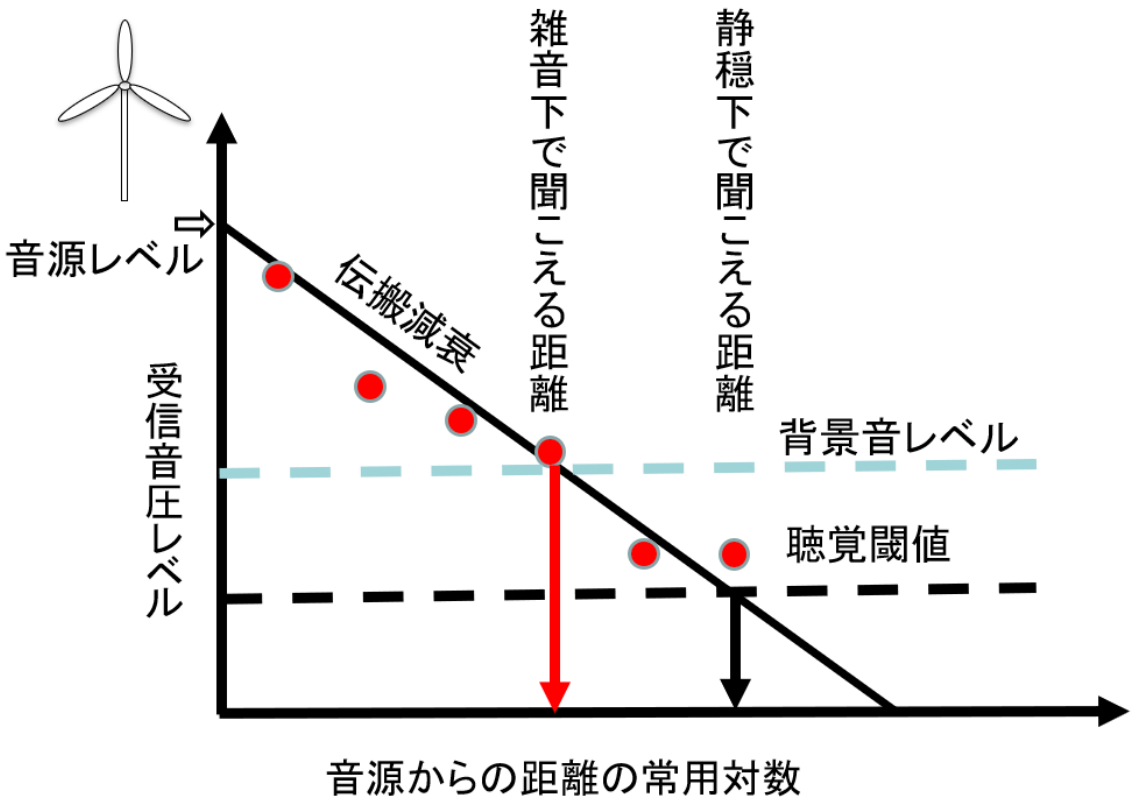

図 7　生物が聞こえる距離と、音源レベル、伝搬減衰、背景音レベル、聴覚閾値の関係

以上が、最も単純化した水中音の評価手法である。実際の影響評価にあたっては、周波数バ

ンドごとに聞こえるか否かの判定と、背景音の変動を考慮する必要がある。

小さな音でも特定の周波数にエネルギーが集中していれば、雑音に紛れにくい。歩行者用信号の音は、騒音下でもよく聞こえる。特定の音の周波数に近いところだけをみれば、そこに含まれる信号の音は雑音より大きい。受信側が音の周波数分析能力を持っている場合は、周波数ごとに聞こえるか否かを調べなければならない。そこで、記録されたデータから 1/3 オクターブバンドレベル※を算出する。各バンドにおける音源レベルと伝搬減衰および背景音レベルがわかれば、そのバンドにおいて雑音下で聞こえる最大距離が算出され、影響を受けない最小距離がわかる。実際の計算は難しくない。録音された音と背景音を 1/3 オクターブバンド分析器（またはその計算プログラム）にかければよい。各周波数で求めた 1/3 オクターブバンドレベルを音源からの距離で整理し、各周波数バンドの伝搬減衰係数を求める。本ガイダンスで考察している 1kHz 以下の音波であれば、減衰係数は実際にはどのバンドでもあまりかわらないだろう。最も卓越した音源のバンドに着目し、これがすでに求めてある背景音のバンドレベルに等しくなる距離を求めればよい。

３章で述べたように背景音は、日周期、月齢周期、季節の３つの周期的変動を示すことが多い。背景音レベルとしてその平均値と下限値を用いる。下限値は最も静かな環境であり、同じ音源レベルでは最も遠距離まで届く。実際のアセスメントにあたっては、工事を行う時間帯や希少生物が訪れる時間帯を考慮すると現実的である。工事を行う時間帯での背景音レベルを用いれば、その時間帯における工事音の最大到達距離を求められる。

※1 オクターブとは周波数の比が 2 である 2 つの音の対数周波数間隔である。周波数分析は細かい周波数バンド（たとえば 1 Hz）ごとにその成分の強度を計算するが、おおまかに音波の周波数ごとのエネルギー分布を知りたいときには 1 オクターブの範囲にあるすべての周波数成分の強度を足し合わせる。これがオクターブバンドである。1/3 オクターブバンドはこれをすこし細かくし、周波数が $2^{1/3}$ 倍（～1.26 倍)ごとの幅で、周波数成分の強度を足し合わせたものである。参考：水中音響の防衛庁規格：https://www.mod.go.jp/atla/nds/Y/Y0011B.pdf

６章　水中音響技術

６－１　水中マイクロホン

水中マイクロホンは、水中の音圧を電圧に変換する装置である。圧力変化に応じて生じた電圧を増幅し、録音機のような記録装置で保存する。音波は圧力の時間変化であるが、記録された波形は圧力に比例した数値の時間変化である。

水中マイクロホンによって受信できる周波数の範囲が異なるため、本ガイダンスで扱う1kHz 以下の低周波領域で平坦な受信特性をもっているものが望ましい。また水中マイクロホンによっては入射方向によって感度が異なる指向性をもつものもある。測定に使用する水中マイクロホンは無指向性受波器が望ましい。特定音は海面と海底反射が入り混じった波形であり、背景音も海底の生物音や海表面の波浪に伴う音である。計測するべき音波は全方位から入力されるため、無指向性受波器の使用が適している。

録音機も一体型の装置であれば、以下の注意は不要である。測定に用いる受波器は大きくわけて送受波器と受波器（増幅器内蔵型）の２種類ある。いわゆる水中マイクロホンは後者に該当する。増幅器を内蔵しない送受波器は、ケーブル長や指向性、最低受信音圧レベル等を考慮して使用する必要がある。一方、受波器（増幅器内蔵型）は仕様の特性値がわかればケーブル長などを意識せず使用できる。一般的な計測目的であれば、増幅器内蔵型の水中マイクロホンを用いて測定するのが望ましい。

６－２　水中マイクロホンの校正

特定音や背景音の計測に用いる水中マイクロホンは、感度校正がなされていなければならない。校正されていない水中マイクロホンでの音圧の計測値は、ほかの測定値と比較できない。

最も簡単な校正方法は、校正済みの水中マイクロホンとの比較によるものや、送波感度が既知の送波器（水中スピーカー）を用いた比較がある。いずれも基準となる水中マイクロホンかスピーカーが必要である。より精密な校正方法として、相互校正方法により測定した感度を一次校正で得た感度として取り扱う手法もある。これを行うには少なくとも 3 本の送受波器が必要で、制御・測定システムも複雑である。

ほとんどの水中マイクロホンは圧電型と呼ばれる受波器である。このタイプは、共振周波数付近の感度が極大となり、共振周波数の 1/2 以下の周波数は、概ね同一の受波感度になる（図 8）。従って水槽等において、測定可能な周波数で数ポイント感度校正すれば、便宜上問題ないと言える。この場合、受波感度を異なる周波数で数ポイント測定し、それらの値が概ね同一値であることを確認しなければならない。圧電素子が割れたり、モールドが剥がれたりしていると別の共振が現れ感度が変化するためである。

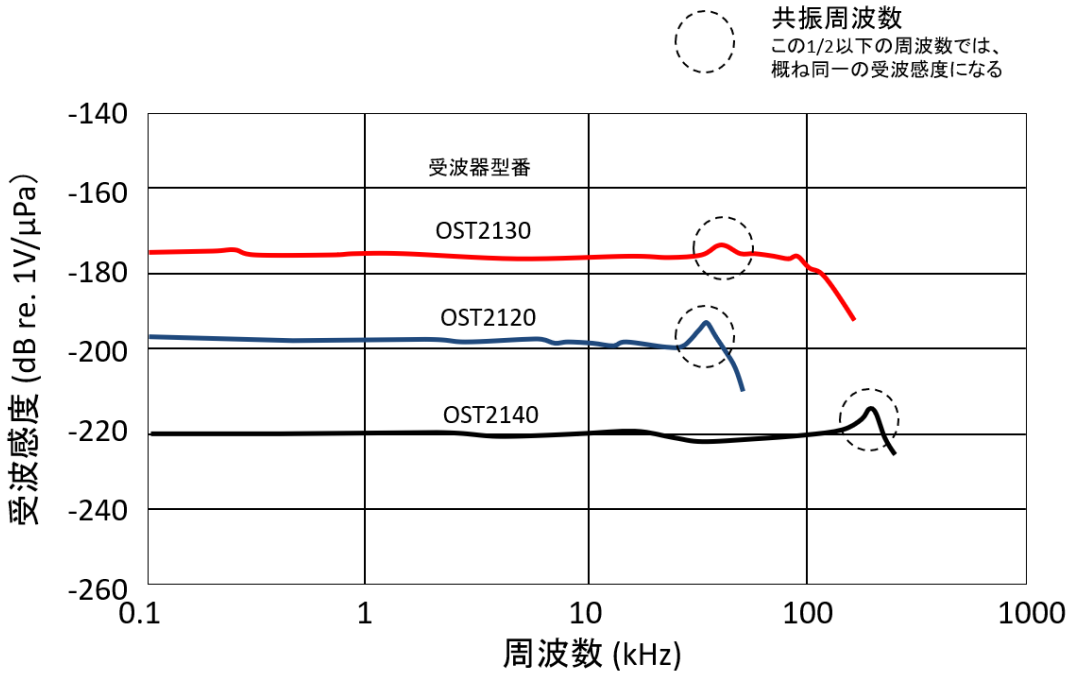

図８　校正に使用した水中マイクロホンの受波感度の周波数特性の例。感度の高い共振周波数が認められる。この周波数の 1/2 以下では、受波感度は概ね平坦となる。

上記で求めた測定周波数の上限値（共振周波数の 1/2 以下）での波長をλ、校正に使用する水中スピーカーまたは水中マイクロホンのどちらか大きい方の最大長さを A とした時、水中スピーカーと水中マイクロホンの器間距離は、近距離音場を避け　(A^2) / λ以上としなければならない。水中スピーカーと水中マイクロホンの水深は、現場水深の半分とする。この時、器間距離が変化しない様に各機材を水中で固定する。水槽を使用する場合は、壁面反射の影響を低減するためできるだけ水槽の中央に設置する。送波時の立ち上がり波形と立下り波形が鈍るため、波数は５波長以上を確保し、送波波形が安定する真ん中の３波長以上（多いほど正確になる）を測定対象とすること。たとえば 1kHz の音波であれば５波長は 7.5m である。したがって、水槽中心から壁までの往復距離が 7.5m 以上であれば、直達波と反射波を分離できる。1kHz での校正であれば、水槽は余裕をみて水深 8m 以上、一辺 8m 以上の大きさがよい。中心部に送受波器があれば、水面や壁面からの往復で 8m である。また、音源によってはパワーのかけすぎにより水中スピーカー表面に音響キャビテーション（流体中に音波を放射することにより局所的に生じる低圧部に発生する）が発生する可能性がある。バリバリという様な異音が聴音できる場合は、測定を中止し、専門家へ相談すること。共振周波数が十分に高ければ、10kHz の音波を使えば水深 1m 程度の水槽でも校正は可能である。ただし本ガイダンスで検討している 1kHz 以下の低周波音における水中マイクロホンの感度校正値として十分に精度が保証されるわけではない。なお上記の校正方法ではいずれも、購入時にセンサー部分と内蔵プリアンプ部分の周波数特性がそれぞれ既知でなければならない。

測定に用いる水槽は、壁面反射を低減した無響水槽あるいは十分な水深のある海や湖が望ましい。日本で水中音響校正サービスを商業ベースで提供しているのは、（株）オキシーテックである。https://www.seatec.jp/　音響校正設備を持つ公的研究機関は存在するが、一般向けのサービス提供は行っていない。

６－３　周波数スペクトル解析

海中には様々な音源が存在し、音源から放射される音波は音源毎に独自の周波数特性を持つ。水中音はそれらの音波の重ね合わせで構成され、録音機には音圧の時間波形として記録される。特定音や背景音を抽出し環境への影響を調べるためには、水中音の周波数毎のレベル計算が必要である。いわゆる周波数スペクトル解析である。

時間波形から周波数スペクトルを求める方法として一般的にフーリエ変換が用いられる。これは、時間波形を三角関数（正弦波、余弦波）の重ね合わせと考え、その三角関数の振幅を求めるものである。フーリエ変換は様々な分野で広く使われており解説本も数多く存在する。水中音の解析においても基本的にフーリエ変換を使用する。なお、水中音を測定するデバイス（水中マイクロホン、増幅器、フィルタ、録音機）は音響的な特性がすべての周波数で一様ではないので、厳密に音圧を計算する場合は周波数毎にデバイスの特性を補正する必要がある。

水中音は周波数スペクトルの特徴から大きく狭帯域音と広帯域音に分けられる。狭帯域音としては例えば洋上風力発電の稼働音が挙げられ、正弦波のような周波数帯域が狭い線スペクトル成分の単体または集合で構成される。広帯域音としては、例えば波浪や降雨、杭打ち音が挙げられ、周波数帯域の広い連続スペクトルで構成される。また、音の波形にの特徴からは、連続音とパルス音など継続時間による分類もある。水中音の解析を行う際は、このような時間及び周波数の特徴を踏まえて適切に解析方法を選択する必要がある。

周波数スペクトル解析のパラメータとしては、周波数分析幅、窓関数、オーバーラップ率、平均時間がある。周波数分析幅は、フーリエ変換をする時間波形の時間長の逆数で定義され、時間長が長ければ狭い幅になる。連続音の場合は、十分な長さの時間波形が確保できるので、周波数分析幅は 1Hz（すなわち時間長 1 秒）が採用される。また、パルス音の場合は、十分な長さの時間波形が確保できず必然的に周波数分析幅は広くなる。対象音の時間長に応じて分析幅を適切に設定する必要がある。窓関数は、フーリエ変換の離散化に伴い生じる時間波形の不連続性の影響を低減するためのものであり、hanning 窓がよく使用される。一方で、窓関数をかけると時間波形の両端の振幅が抑えられるため情報の欠落が懸念されるが、時間波形をオーバーラップさせながら切り出すことでその影響を低減できる。hanning 窓を採用する場合、オーバーラップ率は 50%が適当である。 1 つの時間波形のフーリエ変換では周波数毎のレベルのばらつきが大きく時間平均して安定化を図るが、平均時間は 1 分以上あれば十分である。

なお、フーリエ変換で計算される周波数毎のレベルはその周波数の分析幅で積分した値であり、広帯域音の場合は、周波数の分析幅に応じて結果が変わってしまう。そのため、結果を表現する統一的な基準が必要で、海中音では一般的に分析幅を 1Hz に規格化した値（dBre 1 μ Pa / √Hz）が用いられる。具体的には、周波数分析幅の常用対数を計算し 10 倍したものを補正量として差し引く(Urick 1983)。狭帯域音の場合はこの規格化により過小評価になる恐れがあるが、狭帯域音と広帯域音が混在する場合は、周波数分析幅 1Hz で解析することでこの問題は解決できる。

７章　水中音の影響評価の調査設計

海洋開発による海洋生物への影響評価にあたって、音を測るガイダンス以外にも 2 つの問題点がある。一つ目は海洋生物の観察そのものが困難であること、二つ目は影響を評価するための正しい調査設計がなされていないことである。一つ目は地道な実験の積み重ねが必要であるが、二つ目は調査段階の工夫で容易に回避できる。洋上風力発電の建設にあたっては、とくに水中音が注目され、それに対する感度が良い魚類や海棲哺乳類への影響が懸念されている。本章では、観察が容易な小型鯨類を例にとり、BACI（Before-After-Control-Impact）デザインに基づいた水中音の影響評価における調査設計について事例を示す。

７－１　海棲哺乳類の観察手法

洋上風力発電による環境影響は、風車の建設海域周辺に限定される。一方、その影響は建設中だけでなく稼働中も含め数年に及ぶ可能性がある。このような特性から、影響評価のための調査努力は広域に分散させるのではなく、建設海域に集中的に投入し、長期継続することが肝要である。

洋上風力発電周辺での海棲哺乳類の観察手法は、ハクジラ類に関しては定点設置型の受動的音響手法(Mellinger et al. 2007)を用いるのが適切である。ハクジラ類のなかでもとくにイルカの仲間のような小型鯨類は頻繁に音響探索音を発することが知られており、鳴音を確認することで存在確認だけでなく頭数算定や密度推定までできるようになってきた(Marqueset al. 2013)。すなわち、イルカ類に関しては観察の困難さは取り除かれている。

海棲哺乳類の調査では、従来は目視調査が行われてきた。しかし、小型鯨類の定点観測に関しては音響調査の発見能力が目視に勝っており(Kimura et al. 2009)、受動的音響調査が有効と示されている。小型鯨類は水中に没しているときには見えないが、鳴音は水中でも受信できる。加えて、実際の海の現場での目視調査は観察時間が昼間に限られ、各季節のある一日だけしか行われていないことも見逃しの要因である。音響調査の結果によれば、小型鯨類の現れる時間帯は昼間とは限らず、数日間観測されないこともよくある。洋上風力発電所の建設や稼働で音の影響が及ぶ最大範囲は 5 章で述べた。理想的にはこの範囲の内と外で 1 年程度の連続的な観察が必要である。音響調査であれば 24 時間連続した一か月間の定点観測は容易にできる。同じことは目視では極めて難しい。

一方で、ヒゲクジラ類と鰭脚類に関しては依然として目視調査が有効である。両者とも、発音頻度は季節的な変動を示す(Miksis-Olds & Parks 2011, Stafford et al. 2012)。すなわち、その海域に存在していても検出できない可能性がある。低い発音頻度をもとに生息密度推定を行う手法もないわけではないが、誤差が大きく、事業評価に用いることができるほど技術が熟していない。もちろん目視調査のもつ問題点は残る。今後増えると考えられる沖合での洋上風力発電のアセスメントにおいて、沿岸から離れた定点で何週間も海を見続ける目視調査は、非常に忍耐を要する。ケーブル伝送式の水中マイクロホンや無人機による高精細ビデオなど、これ

まで困難であった海棲哺乳類の観察に新しい技術が導入されるようになってきたので、これらを積極的に活用したい。また、ザトウクジラやナガスクジラなど繁殖期に雄が歌を歌う種類に関しては、繁殖期での発音頻度が高いため、海域に水中マイクロホンを沈めておくことで雄に関しては音響観測が有効である。

環境影響評価では、鯨類の資源量調査を行うわけではなく開発行為の影響を調べたいので、船を動かして広範囲を調べる意義は薄い。目視・音響にかかわらず、動き回りながら一日で調査を済ませる意味はあまりない。影響が想定される範囲内に試験区を、範囲外に対照区を少なくとも一点ずつ設定し、建設前・建設中・建設後の鯨類の出現状況を一定期間以上調べるのがよい。

７－２　BACI デザインに基づいた調査設計

事前・事後評価は、環境影響評価を行う上でたいへん重要である。陸上に比べ海洋生物の場合、水温や餌生物の状況によって、先週まで観察できたのに突然いなくなることはよく経験する。洋上風力発電を建てているときにどれほど精密に海棲哺乳類の調査を行おうとも、事前と事後の調査結果がなければ個体数が増えたのか減ったのかは議論できない。さらにこの変動が自然なものか、開発行為の影響によるものかを区別するためには、対照区の設定が必須である（図 9）。海棲哺乳類の観察数の減少が、建設の影響範囲内のみで起こったのか、その海域全体での自然の変動なのかは、対照区を設定しなければわからない。洋上風力発電の環境アセスメントの様々な報告書では、残念ながらこれら 2 つのもっとも基本的な要件を満たしていない調査結果が認められる。

政府の資金が入っている場合、これらの問題はやや改善される傾向にあった。たとえば NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）が 2015 年 9 月に発行した「着床式洋上風力発電導入ガイドブック」の別冊である「着床式洋上風力発電の環境影響評価手法に関する基礎資料」の 365 ページを参照いただきたい。資料は公開されており、ネットからダウンロードできる。これによれば、開発区におけるスナメリの音響的検出頻度は工事中には減少したが、工事後には事前調査レベルに回復している。図 9 の調査 3B のシナリオと同じである。ただ残念なことに、建設後の長期間のフォローアップがなされていない。

洋上風力発電の建設にあたり漁業協調が叫ばれている。発電所の構造物に、魚礁のように魚を集める効果が期待されている。漁場造成事業の数十年にわたる結果からも明らかなように、人工魚礁を入れて一年程度は、付着生物や小魚がつく程度で、蝟集効果は限られている。複雑な構造物の周辺に低次の生物が棲みつき、これを餌とする高次の漁獲対象種がやってくるのは二年後、三年後である。すなわちデータで魚礁効果を示したいのであれば、三年程度のフォローアップ調査が必要である。洋上風力発電の建設による漁業資源の蝟集、さらには稚魚の保護育成効果が実証されれば、事業推進と漁業協調の両方に利益がある。長期間にわたる調査は洋上風力発電のプラスの効果を示すのに役立つと思われる。なぜなら、建設直後だけでは建設中の影響が残り、風車による周辺生物への影響はネガティブと評価されがちだからだ。息の長い

信頼できるデータを提供することで、洋上風力発電建設の付加価値を高めることができるだろう。

調査1	工事前	工事中	工事後
開発区		少ない	
対照区			

調査2	工事前	工事中	工事後
開発区	多い	少ない	多い
対照区			

調査3A	工事前	工事中	工事後
開発区	多い	少ない	多い
対照区	多い	少ない	多い

調査3B	工事前	工事中	工事後
開発区	多い	少ない	多い
対照区	多い	多い	多い

図 9　環境影響評価における対照区と事前事後調査の重要性。開発区で工事中のみ行われた調査 1 では、比較対照するものがないため、工事の影響について何も言えない。開発区で工事前後にも実施した調査 2 では、工事により対象生物が減少したようにみえる。しかし、それが周辺でも起こった現象か否かはわからない。対照区を設定した調査 3A によれば、工事の影響が及ばないと考えられる対照区でも同様の減少が同じタイミングで生じており、工事そのものの影響は小さく自然変動であったと考えられる。一方、工事中でも対照区では多い傾向が続いた調査 3B の結果が得られたならば、開発区で工事中に一時的な減少が起こり、その後は元に戻ったと考えられる。

８章　我が国での水中音影響評価ガイドライン作成に向けた提言

海洋の背景音環境も生物相も欧州とは異なる我が国において、日本独自の海洋生物への音暴露基準を制定する必要を強く感じる。これから提案される可能性のある欧米の数値基準は静かな海での海棲哺乳類に重きを置いたものと予想される。元々背景音がうるさい日本さらにはアジアの沿岸域における魚類や海棲哺乳類を想定した基準づくりは、海洋の生態系へのインパクトを最小限に抑えながら私たちの生活を支えている海運業や漁業を守ることにもつながる。厳しすぎたり緩すぎたりする基準が決まってしまう前に、しっかりした科学的な証拠を集めておく必要がある。そこで、今後行うべき事項を箇条書きで整理する。

１．洋上風力発電を含む海洋開発に伴う音の信頼できる計測：まず影響の原因となる人工音の物理特性を正確に把握しておくことが重要である。それには計測方法の標準化と計測事例のデータベース化が必要である。これを元に、音暴露実験や影響評価が行われる。洋上風力発電の構造や施工法も進歩しており、過去の計測データが利用できない可能性がある。日本で運用される風車およびその工法ごとの工事音のカタログが整備されることが望ましい。
２．日本周辺の背景音マップの作成：基準となる自然の背景音の情報があまりにも少ないため、校正済みの水中録音機で長期間にわたる背景音の変化の記録が、影響要因となる特定音の影響範囲を算定する上で重要である。日本周辺の背景音に関するデータベースがあれば、環境影響評価等の場面において、海域での人工音の影響半径をある程度見積もることが可能となる。
３．注目すべき生物への音暴露実験：音響的に制御された広く深い環境での行動学的・生理学的影響を、各種の海棲哺乳類と魚類で行う必要がある。漁業が盛んな日本においては、とくに水産有用種でのデータ収集が重要である。時間と手間のかかる調査研究であるが、これがガイドライン策定のもっとも重要な基礎データとなる。なお、小さな水槽での音暴露実験には多くの注意点がある。水槽が小さく多重反射の影響が無視できない。水槽における音の再現実験での注意点は Akamatsu et al. (2002)にまとめられている。

本提言の 1 に関しては、前半部分が本ガイダンスの記述に対応する。一方で計測された水中音のデータベース化はこれからである。本提言の 2 に関しては、環境省が主導する全国の背景音計測プロジェクトで進行中である。本提言の 3 に関しては、今後の研究が期待される。

これらを進めることで、国際的にも信頼される日本独自の水中音暴露ガイドラインをつくることができるだろう。ひいては、私たちの生命線である貿易や食糧供給の安定化につながると考える。

参考文献

Akamatsu, T. Tsuyoshi Okumura, Nicola Novarini and Hong Y. Yan (2002), Empirical refinement applicable to the recording of fish sounds in small tanks. J. Acoust. Soc. Am. 3073-3082.

Ainslie, M. A., & McColm, J. G. (1998). A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. The Journal of the Acoustical Society of America, 103(3), 1671-1672.

Au, W.W.L. (1993) The sonar of dolphins. Springer-Verlag, New York, Berlin, London, Tokyo, pp.277.

André, Michel, et al. Low‐frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. Frontiers in Ecology and the Environment 9.9 (2011): 489-493.

Bohnenstiehl, D. R., Lillis, A., & Eggleston, D. B. (2016). The curious acoustic behavior of estuarine snapping shrimp: temporal patterns of snapping shrimp sound in sub-tidal oyster reef habitat. PloS One, 11(1), e0143691.

Dahl, P.H., de Jong, C.A.F., Popper, A,N. (2015) The underwater sound field from impact pile driving and its potential effects on marine life, Acoustics Today, 11(2), 18-25.

Duarte, C. M. et al. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science, 371(6529).

Etter, P. C. (1995). Underwater acoustic modeling: principles, techniques and applications. CRC Press.

Fay, R. R. (Ed.). (1998). Comparative hearing: fish and amphibians (Vol. 11). Springer Science & Business Media.

Foote, K. G. (2014). Discriminating between the nearfield and the farfield of acoustic transducers. The Journal of the Acoustical Society of America, 136(4), 1511-1517.

畠山良己，井上喜洋，武井司，阪口清次，藤井圭次，池田昭男，北川高司 (1997) 水中音の魚類に及ぼす影響, 水産研究叢書 47, 1-132.

Kimura, S., Akamatsu, T., Wang, K., Wang, D., Li, S., Dong, S., and Arai, N. (2009), Comparison of stationary acoustic monitoring and visual observation of finless porpoises, J. Acoust. Soc. Am., 125, 547-553.

Lillis, A., & Mooney, T. A. (2018). Snapping shrimp sound production patterns on Caribbean coral reefs: relationships with celestial cycles and environmental variables. Coral Reefs, 37(2), 597-607.

Marques, T. A., et al. (2013). Estimating animal population density using passive acoustics, Biol. Rev., 88, 287–309. http://doi.org/10.1111/brv.12001

McCauley, R. D., Day, R. D., Swadling, K. M., Fitzgibbon, Q. P., Watson, R. A., and Semmens, J. M. (2017). Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton. Nature Ecology & Evolution, 1(7), 0195.

Mellinger, D.K, Stafford, K.M., Moore, S.E., Dziak, R.P., and Matsumoto, H. (2007). An Overview of Fixed Passive Acoustic Observation Methods for Cetaceans. Oceanography, 20(4), 36-45.

Miksis-Olds, J. L., and Parks, S. E. (2011). Seasonal trends in acoustic detection of ribbon seal (*Histriophoca fasciata*) vocalizations in the Bering Sea. Aquatic Mammals, 37(4), 464–471. http://doi.org/10.1578/AM.37.4.2011.464

Moore, S. E., et al. (2012). Comparing marine mammal acoustic habitats in Atlantic and Pacific sectors of the High Arctic: Year-long records from Fram Strait and the Chukchi Plateau. Polar Biology, 35(3), 475–480. http://doi.org/10.1007/s00300-011-1086-y

Munk, W. H., Spindel, R. C., Baggeroer, A., and Birdsall, T. G. (1994). The heard island feasibility test. The Journal of the Acoustical Society of America, 96(4), 2330-2342.

Nishimura and Conlon (1994). IUSS dual use: Monitoring whales and earthquakes using SOSUS. Marine Technology Society Journal 27(4), 13-21.

Parmentier, E., and Fine, M. L. (2016). Fish sound production: insights. In Vertebrate sound production and acoustic communication (pp. 19-49). Springer, Cham.

Payne, R. S., and McVay, S. (1971). Songs of humpback whales. Science, 173(3997), 585-597.

社団法人日本水産資源保護協会 (1988) 航空機騒音等が魚類の行動に及ぼす影響に係る資料収集等調査報告書, 昭和 63 年 3 月, pp.113.

Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., Coers, A., ten Cate, C., and Popper, A. N. (2010). A noisy spring: The impact of globally rising underwater sound levels on fish. Trends in Ecology and Evolution, 25(7), 419–427. http://doi.org/10.1016/j.tree.2010.04.005

Urick, R. J. (1983). Principles of underwater sound – 3rd edition (本文での引用は下記訳本より ; 新家富雄 (監修), 三好 章夫 (翻訳) (2013) 改訂 水中音響学, pp.193-194)

Versluis, M., Schmitz, B., von der Heydt, and Lohse, D. (2000). How snapping shrimp snap: through cavitating bubbles. Science (New York, N.Y.), 289(5487), 2114–2117. http://doi.org/10.1126/science.289.5487.2114

渡部守義. (2007). 沿岸域環境モニタリングのためのテッポウエビ類の発音数分布観測調査および水域類型との相関関係. 海洋音響学会誌, 13(4), 33–38.