

浅海域における船舶騒音計測について

村山 智希*

1. はじめに

2023年7月のIMO/MEPC80において非強制であるが水中騒音管理計画の作成等を規定したガイドラインが採択された。それに合わせClassNKは2023年10月に新たなガイドライン「船舶水中騒音ガイドライン（第1.0版）」を発行した。2023ガイドライン（*1）に規定されているISO 17208-2準拠の深海域での船舶騒音計測に加え、ISOにおいて計測がより容易となる浅海域に対応した新たな規格ISO 17208-3の策定作業がすすめられており、EU（Saturn Project）ではその計測法に関する実証的な評価も進んでいる。

それらを鑑み、日本固有の制約、例えば水深や海流、航路等を考慮したシステムを検討中である。今回日本沿岸域（浅海域）における船舶騒音計測について検討の一部を紹介する。

2. 2023ガイドラインにおける音響計測

2023ガイドラインでは船舶騒音計測における諸元が提示されている。その計測条件に関して簡単に整理した。

2.1 計測箇所（2023ガイドライン5.2項抜粋）

次の2点が示されている

- (1) 水深が150m以上、もしくは船長の1.5倍以上のいずれか大きい方
- (2) 交通量の輻輳しない海域

※設定理由として、(1)は騒音の発生周波数の最大波長を発生元の大きさから勘案していると理解。

上記(2)は計測の安全性や計測における背景雑音の影響低減を意図していると理解。

2.2 計測条件（2023ガイドライン5.2項抜粋）

ビューフォート風力階級、風浪階級、主機関出力等規定されている。

※計測時における背景雑音、計測対象の信号レベルの大きさを掌握が目的と理解。

2.3 計測手順（2023ガイドライン5.4項抜粋）

次の手順が記載されている。

- (1) 計測は、機器の使用に精通した者により実施されること。
- (2) 計測中の船内においては、原則として、操船に必要な人員及び計測員以外の立ち入りは認められない。
- (3) 計測区間は、ハイドロホンを中心として $\pm 30^\circ$ の範囲とする。
- (4) 航行及び計測回数は、ハイドロホンを右舷側及び左舷側にして2回とする。
- (5) ハイドロホンまでの最接近距離は100mもしくは船長の大きい方以上とする。
- (6) 計測に使用するハイドロホンは全指向性で、3台を着底式、浮体式または支援船からの吊り下げて設置する。
- (7) ハイドロホンは事前に校正しておくこと。
- (8) 周波数帯域：10Hz～10kHz

以上「肝」となる部分を抽出してみたが、かなり詳細まで定められている。

これら提示された計測諸元を活かしながらも課題の提示、対策と共に計測環境を提案する。

* 沖電気工業株式会社

*1 2023年10月ClassNK発行 船舶水中騒音ガイドライン（第1.0版）

3. 計測方式の違いによる2つの方式

次頁図1、図2は2章に示したガイドラインを元にそれぞれ浮体式と着底式での計測イメージ図を示したものである。計測対象船舶に対し相対角度 $\pm 30^\circ$ に受波器を配置した場合、ガイドラインより水深は船長の1.5倍要とあるので、100mの船長で150m水深、その時計測系のCPA（Closest Point of Approach）から受波器アレイまでの水平距離は100m必要となる。同様に400m船長で水深は600m、CPAからの必要距離は400mに及ぶ。なお、船舶がCPAに向かい、船速を安定させるための距離、左舷右舷を計測するための旋回を考慮すると概略で計測に必要な海域エリアは数平方kmに及ぶと想定する。

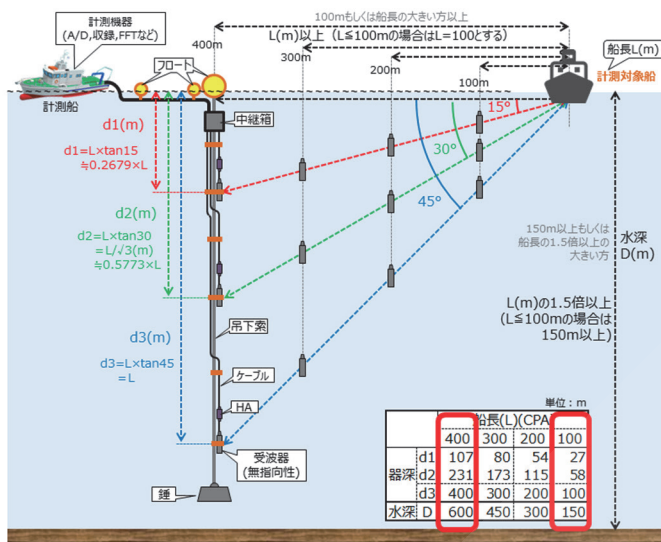


図1 浮体式イメージ図

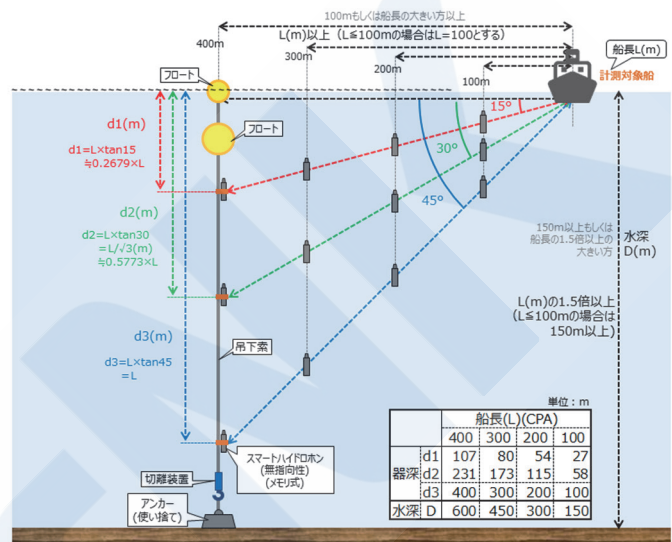


図2 着底式イメージ図

図2の着底式では図1のように計測船配置も考えられるが、受波器アレイの設置及び揚収の困難さから常設が望ましく、近傍の陸地まで有線で計測用及び給電用に光ファイバ、電線等を設置、陸地の計測所で計測するという形がより効率的である。その場合、海に係留式アレイが常設されることとなり航行船舶の障害となり得るので、海域立ち入り制限やその啓蒙、警告表示ブイ設置等が必要となる。また、浮体式、着底式共に実計測時には警戒船の配置等も状況に応じて必要と想定する。

4. 音響計測の課題と対策案

4.1 計測時の課題

まず、前述した船長400mの場合の必要水深600m確保に純粹に従った場合の候補海域を絞ってみる。次頁図3に示す通り、日本近海においては概ね赤い点線の外側となる。近くに海溝がある場合を除くが、沿岸から100km程度離隔しないと計測可能海域に到達しない。計測ポイントに到達したとしても深度600m以上の海域では3章図2の常設可能な着底式の場合、設置費用及び維持メンテナンス費用も膨大となることが容易に予測される。可能な方式は3章図1の浮体式かもしれないが、それにしても計測エリアまで出向いて投入計測準備から計測終了まで考慮すると費用が大きく嵩むことが容易に想定される。

2023ガイドラインに則り、水深600m以上のエリアに出向いて船舶騒音を計測すること自体は可能ではあろう。しかし、上述のように計測規模及び期間は大きかりなものとなる。「計測場所が遠方&手間を要する場所に限られる」ということが、実運用を見据えた場合の最初に想定できる第一の課題と言える。

では、逆にどのような場所、計測のタイミングが船主の負担減となるかを運用面から検討してみたい。まず、計測のタイミングとしては、新造船建造時、ないしは、保守メンテナンス（法定点検）時が良いと考える。

次に場所だが、造船所周辺で計測できるのが良いと考え、日本の主要造船所が集中する瀬戸内海を運用エリアと仮定してみた。この条件で計測システムの検討を始めてみる。次頁図4は日本の主要造船所の分布を示すが、船舶水中騒音の計測は新造時及び保守メンテナンス（法定点検）時に実施される場合、これらの造船所周辺で

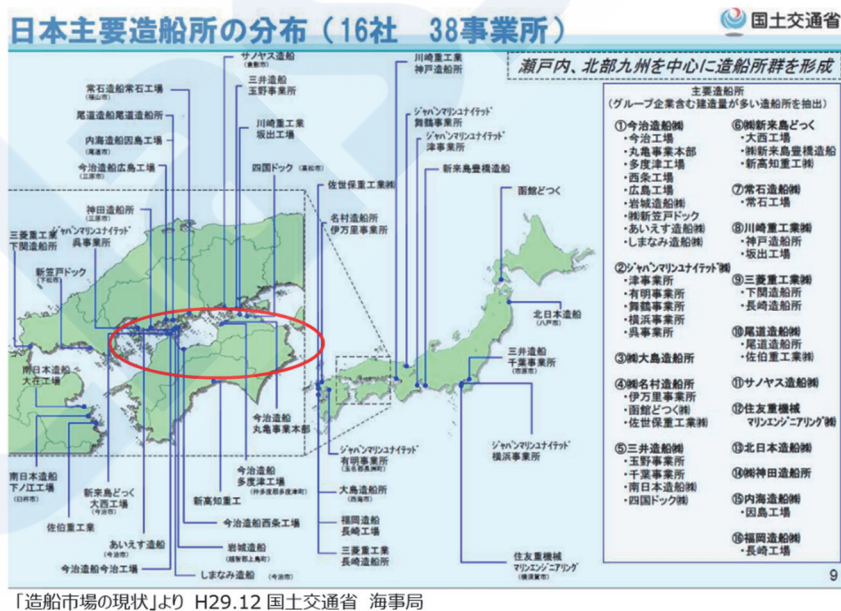
計測できることが望ましい。

但し、ご承知の通り瀬戸内海は前述した水深600mの確保どころか100mの水深確保も厳しい。



出典 国土交通省 国土地理院

図3 日本近海の水深 水深600mを確保できるエリア



「造船市場の現状」より H29.12 国土交通省 海警局

図4 日本の主要造船所の分布

ところで、そもそも、ガイドラインに「水深が150m以上、もしくは船長の1.5倍以上のいずれか大きい方」と謳われているが、技術的考察からその縛りを解くことを勘案してみる。まず一つ目のガイドライン記載の想定理由に、10Hz以上の周波数を計測対象としており、音速＝周波数×波長から10Hzにおける一波長の150m換算から来ている可能性がある。但し、水平方向のモード伝搬を考慮するに伝搬のモード理論の背景から、第一モード＝1/4波長＝150/4m＝37.5mの水深でも水平方向への伝搬自体は可能と考える（伝搬のカットオフ周波数

の図を後述)。

二つ目の想定理由として、計測時の海面、海底反射の影響を出来るだけ除去したいことから、海底反射のパス経路を出来るだけ長く取り距離減衰を狙って海底反射影響の低減を狙った可能性がある。但し、ある程度水深を確保して海底反射影響部分を多少軽減するにしても単一素子での計測では海面反射経路を含む干渉による影響は多分に残ると容易に予想される。

何れにしても上記二つ目の、海面、海底反射の計測への影響が非常に大きいと考える。それを加味し、第二の落とし込んだ真の課題として、「浅海域における海底及び海面反射の計測の影響を極力低減した計測方式を構築し、計測場所を出来るだけ近傍で確保する」を設定する。(再掲:「計測場所が遠方&手間を要する場所に限られる」を実運用を見据えた場合の最初に想定できる第一の課題としていた)

4.2 浅海域計測方法の提案

下記図5は瀬戸内海(平均水深38m)を適地と仮定した場合の左図及び上図が浮体式、右図及び下図が着底式の計測イメージとなる。水深が38mになっただけで2023ガイドラインと変わらないように見えるかもしれないが、よく見ると受波器の数が3個から5個に変わっている。何故深度が浅くなったところで受波器を増やす必要があるのか?これが、今回提言する計測方式による前述した課題解決策、「海面、海底反射波の干渉影響を平均化の効果によって低減させるため」という目的実現のため、シミュレーション結果を反映したものとなる。以降、マルチパスの影響をシミュレーション、考察した結果を示す。

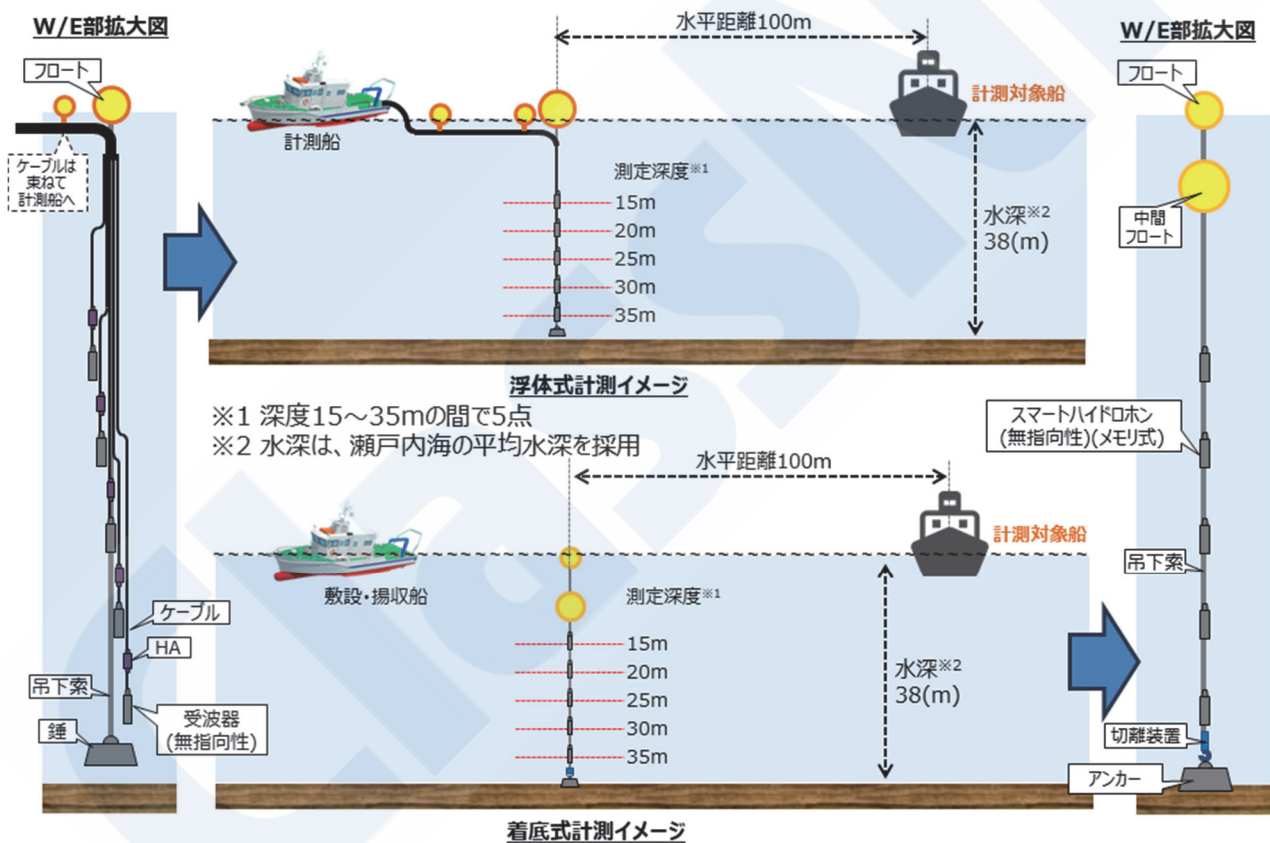


図5 浅海域における測定提案イメージ図

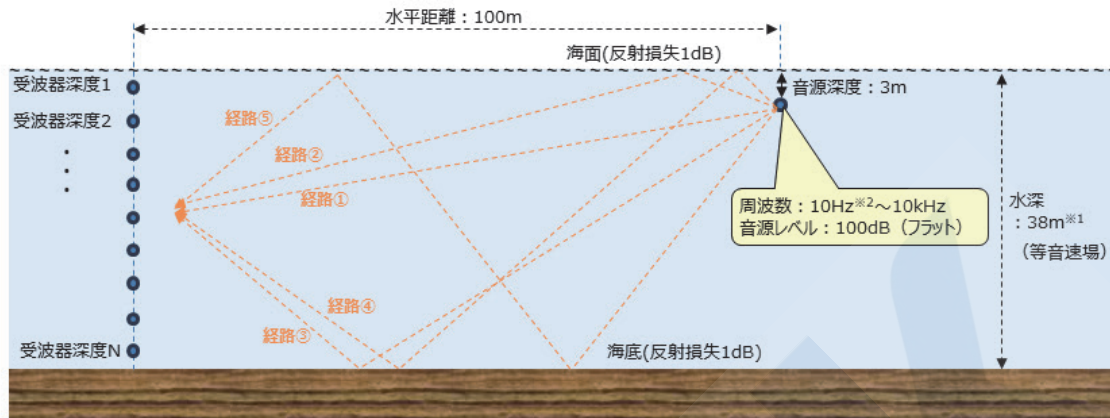
シミュレーションに当たっては、深度を2海域で考えてみた。一つは瀬戸内海の平均水深38m条件、もう一つは追加で豊後水道海域等を意図し、水深80mで考慮してみた。

4.2.1 瀬戸内海(平均水深38m)海域での検討

図6に瀬戸内海(水深設定38m)でのマルチパス環境下での音波干渉状況のシミュレーション設定内容を示す。

受波器深度を細かく振って深度毎のマルチパス干渉状況を示す。音源深度は3m、音の経路は①直接波、②海面一回反射経路、③海底一回反射経路、④海面(先)一回、海底(後)一回反射経路、⑤海底(先)一回、海面(後)一回経路の5経路の干渉結果を、伝搬条件を球面拡散として加味して加算して算出する。反射損失は海面、海底とも1dBと設定した。

なお、図6の右下に、先に後述すると記載した下限周波数は、剛体で閉じられた空間のカットオフ周波数（出典：海洋音響の基礎と応用）から、下限10Hzでも水深38mで何とか満たすことも示しておいた。



経路①～⑤の反射回数は下表の通り。

	海面反射	海底反射
経路①	0回	0回
経路②	1回	0回
経路③	0回	1回
経路④	1回(先)	1回(後)
経路⑤	1回(後)	1回(先)

※1 水深は、瀬戸内海の平均水深を採用

※2 下限周波数は、剛体で閉じられた空間のカットオフ周波数（下図）を採用

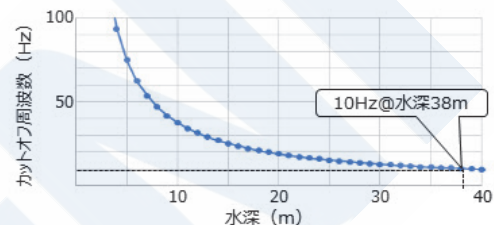


図6 マルチパスシミュレーション条件（瀬戸内海平均水深38m）

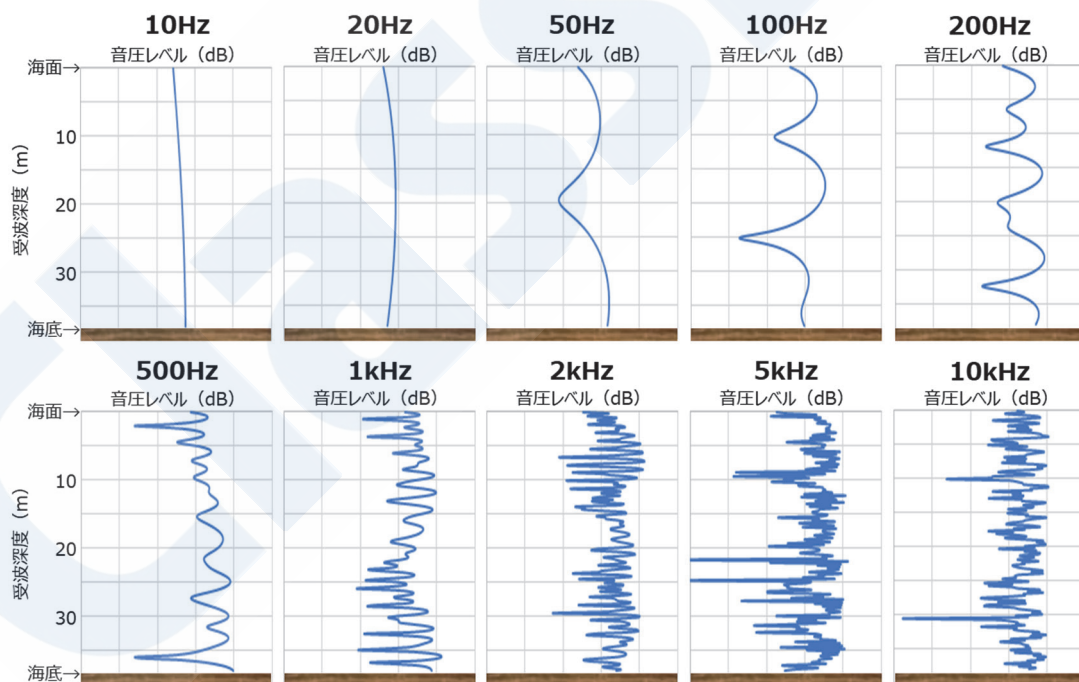


図7 受波器深度毎の周波数によるマルチパス干渉によるレベル変動状況

図7が、図6の条件の時に受波器深度を海面から海底まで振った時のマルチパスの加算によるレベル変動状況を周波数毎にプロットした結果である。そこから言えることは2点、「①周波数によって変動量は異なるものの、受波器深度によってマルチパスの経路差により干渉の影響が変化、音圧レベルに大きな変動が生じるので、（周波数にもよるが）受波器1個での計測は望ましくない」「②複数受波器を用い、音圧レベル変動の山谷を一様に受信し平均的なレベルを計測する方法が良い」である。

ここで、念のため、改めて干渉によりレベルが変動する原理を示しておく。

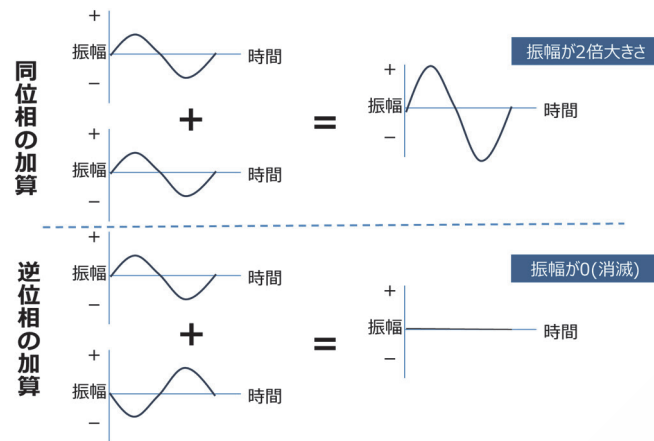


図8 二つの受波器の同位相加算，逆位相加算の様子

例)経路①と経路②の伝搬時間差による干渉の影響

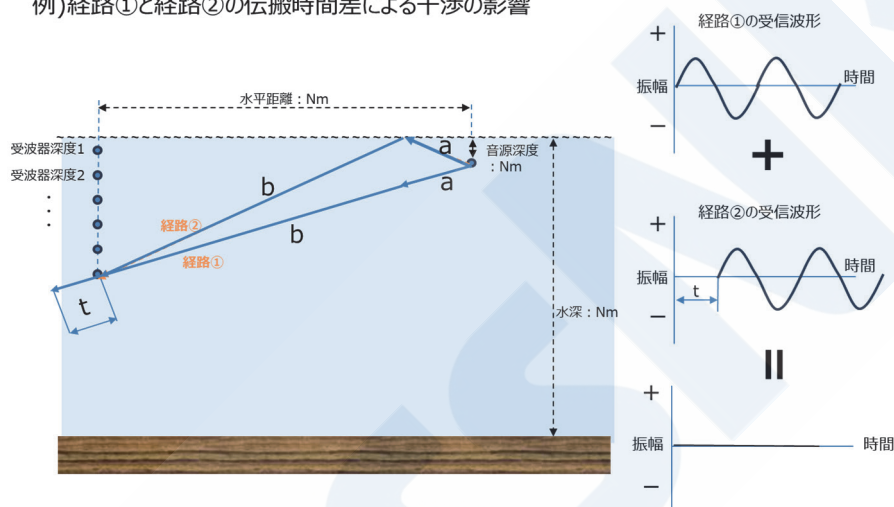


図9 経路差異の2波の加算状況（遅延時間が波長の半分ずれ逆相加算になった場合）

図8は、二つの波が干渉して、加算後にレベルが増加して2倍になる場合と、打ち消し合って消滅してしまう極端な例である。

図9では、図8の二つの波を直接波と海面反射波の干渉で例示する。反射波遅延時間 t が波長の整数倍であり同相である場合、レベルは仮に海面反射の減衰分及び経路長減衰差分を除くとした場合には、完全な同相加算となり2倍になる。逆に減衰の例として反射波の遅延時間 t が波長の整数倍に対して更に1/2波長分ずれていると、互いの波は打ち消し合う。海面反射減衰と経路差長分の減衰差がないとすると完全に逆相となり、打ち消し合って信号が消えてしまうことになる。

これらの干渉影響を簡易に低減するには、受波器を深度方向に何個か設置しての平滑化が効果的である。

（※海面、海底反射の影響を低減するもう一つの策に、計測アレイへの指向性の付与が挙げられるが、特に低周波においては音響開口が取れないことによる指向性形成が困難な点や、指向性付与＝システム規模の大幅な増大から、ここでは一番平易で効果があると考えられる多数の受波器による平滑化運用で勘案することとした）

ところで、図7の深度毎の受波器のレベル変動状況を再度横並びでプロット、「計測結果の暴れ方」状況を考察し、受波器の深度方向への何個かの設置例を提言したい。図10に受波器設置深度による周波数干渉状況を横並びで再掲する。

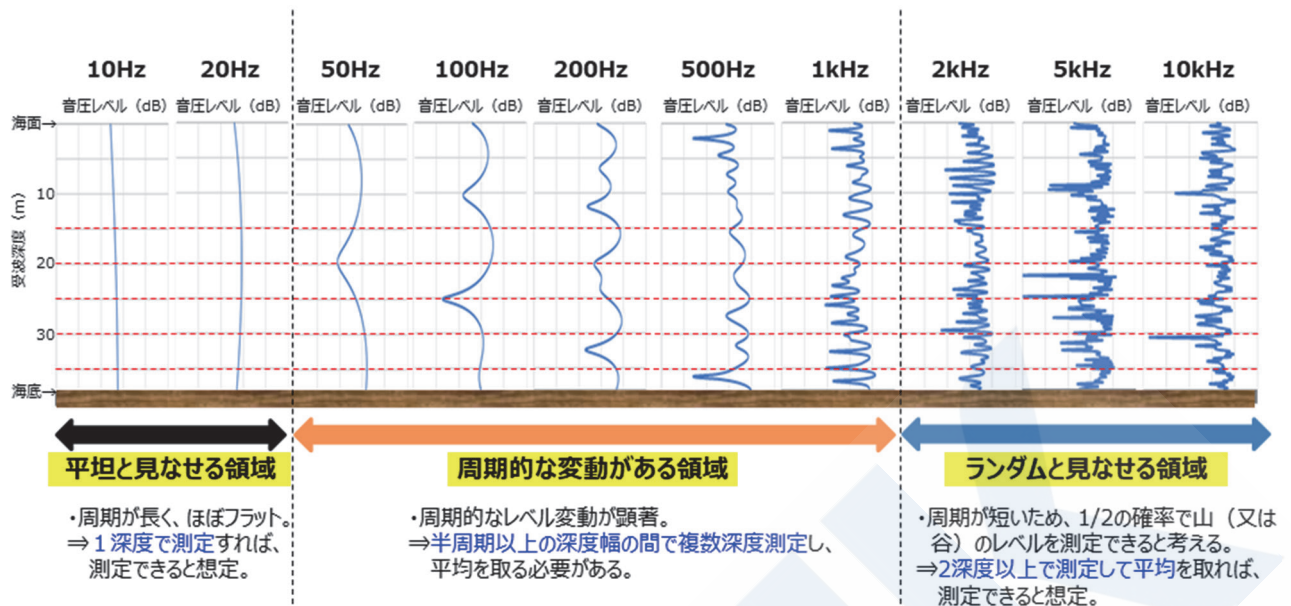


図10 周波数毎の受波器設定深度毎のレベル変動状況 追加考察（瀬戸内海水深38m）

ご覧の通り20Hz以下では干渉によるレベル変動周期は長く、ほぼフラット、1深度での計測でも基本的には計測できると想定する。50Hz～1kHz程度では周期的なレベル変動が顕著であると考え、半周期以上の深度幅の間で複数個の深度別計測を実施、平均を取る必要があると考える。2kHz以上では変動周期が短く2深度以上の計測で平均を取れば計測できると考える。

改めて要約、推奨する受波器数と設定深度を下記に記す。

- ① 周波数によって深度方向の音圧レベル変動の周期が異なり、3つの領域に分けられる。
- ② 複数受波器を使用して平均的なレベルを計測する方法として、以下の条件が良いと考える。
 - ・計測深度帯：15～35m（50Hzの結果において、約半周期をカバーするように設定）
 - ・受波器数：5個（50～500Hzの結果において、複数の山谷をカバーするように設定）
 深度15～35mの間で5点（15、20、25、30、35m）（図10の赤点線）計測を推奨したい。

なお、実際には船舶が一定速度で航走し、受波器アレイのCPAを横切って通過するわけだが、CPA通過の±数秒の時間計測を行うため、時間方向の平均も加わる。この数秒の航走距離分の経路差は少ないが、2kHz以上のランダムな経路差分の平均には更に十分寄与してくると考える。

4.2.2 豊後水道付近相当（平均水深80m）海域での検討

最後に水深条件を豊後水道付近相当、80m水深に変えてシミュレーションしてみた。設定条件を図11に、周波数毎の干渉状況と設置受波器の推奨深度を図12に示す。

経路の5経路含め、水深設定以外は設定条件は同じである。水深が深くなった分、カットフ周波数も5Hz付近まで下がってくる。

図12を見ていただいて分かるように水深38m時の場合と同様、マルチパスの干渉で受波器設定深度によって音圧レベルに大きな変動が生じるため、受波器1個での計測は望ましくない。水深38m時と同様、複数受波器を用い、音圧レベル変動の山谷を受信し、平均的なレベルを計測する方法が良い。

図12の結果を瀬戸内海（水深38m版）と同様に考察するに、ほぼ変わらない結論となった。

- ① 周波数によって深度方向の音圧レベル変動の周期が異なり、3つの領域に分けられることは同様である。
- ② 複数受波器を使用して平均的なレベルを計測する方法として、以下の条件が良いと考える。
 - ・計測深度帯：30～70m（20Hzの結果において、約半周期をカバーするように設定）
 - ・受波器数：5個（10～200Hzの結果において、複数の山谷をカバーするように設定）

⇒ 深度15～35mの間で5点（15、20、25、30、35m）（図10の赤点線）

敢えて水深38m（瀬戸内海）の場合との差異を記載すると、ランダムと見なせる領域が更に広がっている。

周期的な変動がある領域の計測が受波器数5個を生んでいる訳で、計測水深を更に深くすれば2023ガイドラインに近づき、3個の受波器の平均になってくると予想される。

既にお話した通り、2023ガイドラインに完全に則るとすると、水深確保のために計測適地は限定され、シス

テムは大型化し、船主負担も大きくなる。今後は、「場所を選ばず（あまり限定せず）、出来るだけ容易に計測できるシステムのより具体化」が継続検討課題となると考え、最後に今後の推進案に関して記載したい。

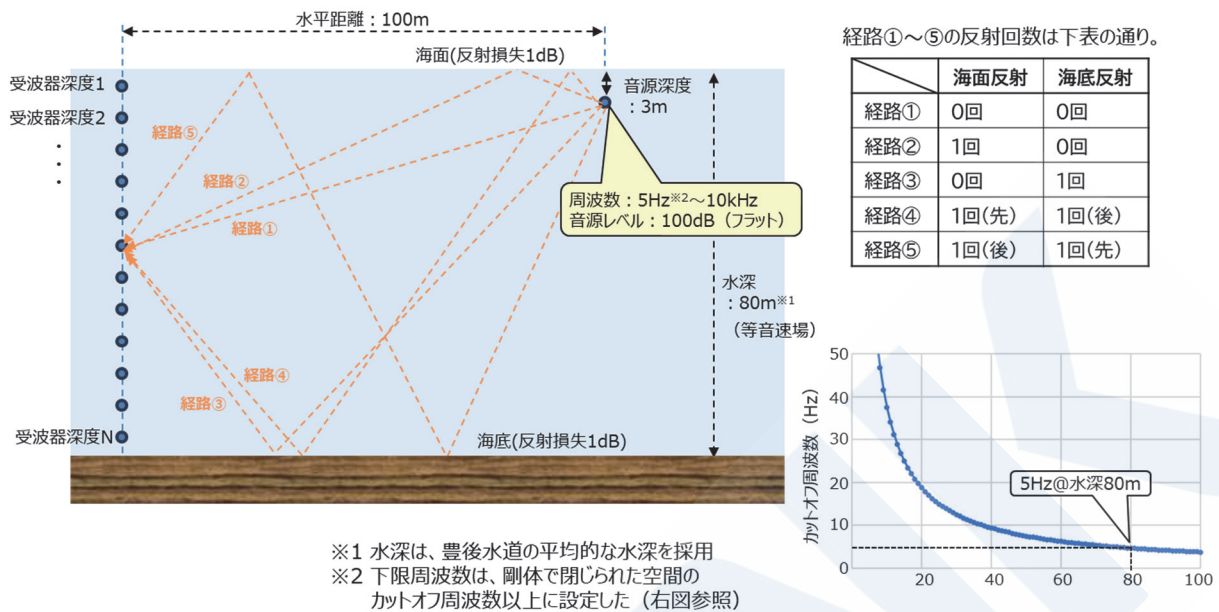


図11 マルチパスシミュレーション条件（豊後水道付近水深80m）

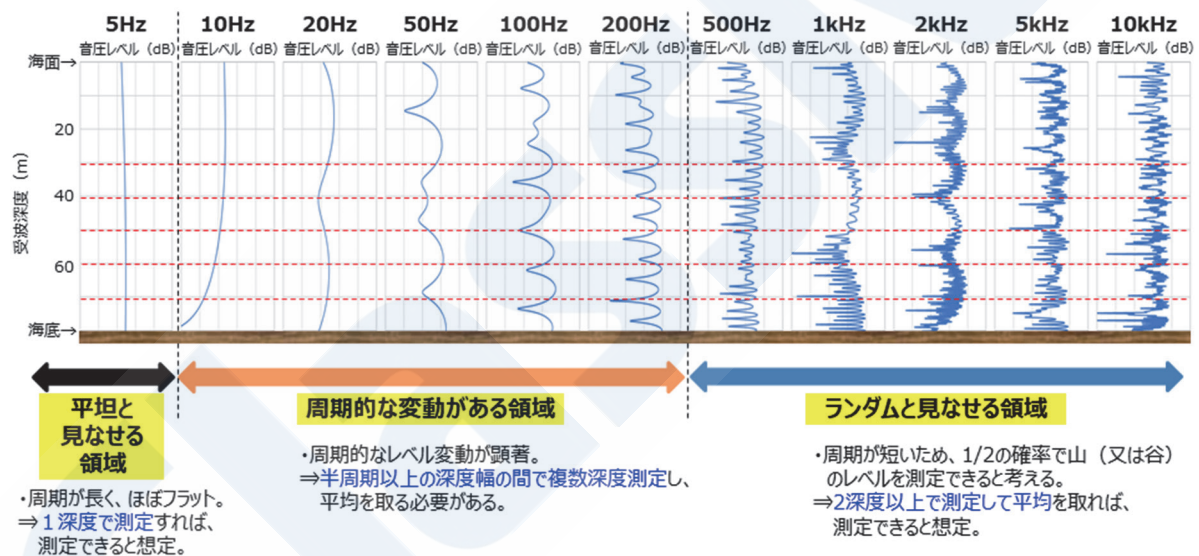


図12 周波数毎の受波器設定深度毎のレベル変動状況 追加考察（豊後水道付近水深38m）

5. 今後の推進案

今後想定される船舶騒音計測の規制を考慮し、日本に適した方法で、且つ船主にとって負担が少ない方法を海洋産業のステークホルダーの皆様と共に検討していく。

- ◆計測地候補を挙げ、要すれば状況に応じてシミュレーションのパラメータをより現実環境（水温、地形、水深等）に合わせ、シミュレーション精度を上げる。
- ◆実海域実データ又はシミュレーション結果を元に、より具体的に計測システムを構築、提案する。
- ◆出来るだけ早急に提案したシステムを具現化、実海域で計測の検証を試みる。