論文

津軽暖水渦と親潮冷水塊の境界の領域における 双方向音響伝搬の比較

鶴ヶ谷芳昭 (山陽精工)^{*1, †}, 後藤慎平 (東京海洋大学/JAMSTEC)^{*2}, 水谷孝一 (筑波大学大学院)^{*3},
菊池年晃 (防衛大学校)^{*4}

(2015 年 10 月 15 日原稿受付)

Abstract:

East of the Sanriku coast, there are three water masses, namely Tsugaru Warm current (TuWE), Kurisio extension, and Oyashio cold current (OyCWM). A current rip is generated in the region by which the warm water mass and the cold water mass are bounded. Sound propagation is influenced by the current rip region. In this study, bi-directional propagation along 41°N off the Sanriku coast is investigated. As a result, when the receiver was at a shallow depth with the sound source approaching from OyCWM to TuWE, the transmission loss (TL) is large until it approached the receiver near the shallow source. The combination of a shallow source and a deep receiver has a similar result. When the receiver comes close to the source, the TL decreases greatly because of the correspondence between the receiver position and the position of the bottom reflection. When the receiver is approached to the sound source in OyCWM from TuWE, the TL decreases as the receiver depth increases. Because the sound channel (SC) propagation predominates in OyCWM, the receiver depth can reduce the TL near the SC axis.

Classification: 音波伝搬

Key words: 音波伝搬, 潮目, 双方向, 津軽暖水渦, 親潮冷水塊

1. はじめに

日本の周辺海域における代表的な海流は3つ考えられる。1つは台湾の南方で北東に方向を変え、

南西諸島の北側の大陸棚の200m等深線に沿って通過し、四国沖、そして本州の太平洋岸を東行し、銚子沖から太平洋に流れ出している黒潮が上げら

Comparison of Bi-Directional Sound Propagation in a Current Rip Region between Tsugaru Warm Eddy and Oyashio Cold Water Mass

* 1 Yoshiaki TSURUGAYA (Sanyo PT)

* 2 Shinpei GOTOH (Tokyo University of Marine Science and Technology: TUMSAT/JAMSTEC)

* 3 Koichi MIZUTANI (University of Tsukuba)

* 4 Toshiaki KIKUCHI (NDA)

† E-mail: tsul@mvb.biglobe.ne.jp

れる。また1つは、九州の西側で分かれた黒潮が対馬の南側の水道を通り、対馬暖流と名称を変えて本州に沿って日本海を北上し、一部が津軽海峡を通過し、太平洋に抜けている。一方で千島列島に沿って南下する冷たい親潮は三陸沖から北緯39度付近まで達し、最終的には東行する¹⁾。したがって、本州の北部の東側に位置する三陸の太平洋側では、冷たい海水(冷水)と暖かい海水(暖水)とが複雑に存在している。

三陸沖の海域では千島列島に沿って南下する冷たい海水である親潮が存在している。また、津軽海峡を東行した対馬暖流は三陸海岸に沿って南下する。加えて、津軽半島の東方において、親潮の冷たい領域上に暖水の渦を形成する。一方で、銚子沖から東行し、太平洋に流れ出す黒潮は、流路が振動しており、その結果、黒潮統流または北上暖水と呼ばれる暖水域が北上している¹⁾。そのためこの海域においては、冷たい親潮と暖かい津軽暖流または黒潮統流が接する海域において潮目と呼ばれる海洋状態が発生する。

潮目の発生している領域においては、2つの流れが接するため、海面の浮流物が収束したり、魚群が多く集まったりする。また、衛星画像においても、海の表面の状態が変わるので潮目の存在を知ることができる²⁾。一方で、2つの性質の異なった水塊が接することは水温構造の急激な変化を生ずる。水中の音波伝搬において、当然、水温構造の急激な変化の影響を受け、音源が潮目領域を通過することによって音場が変化することは推察できる。さらに、海底が存在する場合、音波伝搬は海底地形の変化によっても影響を受ける。つまり、潮目領域においては深度方向の水温構造が距離方向で変化すること、加えて海底深度または海底の形状が変化することによって音波の伝搬形態が変化することは推定できる。鶴ヶ谷らは潮目領域における音波伝搬に関して、音源深度の影響、音源深度と受波器深度の関係、周波数の影響、海底地形の影響などの検討³⁻¹⁰⁾を行っている。音源が潮目領域を通過する場合、音速構造が変化すること

によって音場は変化していく。したがって、潮目に対して伝搬方向を変える場合、方向によって生じる音場は異なる。つまり、潮目を越えて近接する音源に対して、潮目の両方のサイドで受波した場合、伝搬損失の変化パターンは異なり、加えて、音場の形成には海底地形の変化の影響が重畳される。

ところで、このような海洋の音速構造が変化する海域の音波伝搬解析が過去成されてこなかった原因は2つ考えられる。1つは関連したデータを連続して取得または収集することが難しいことである。もう1つは、音波伝搬コードに入力するデータの密度が非常に疎であり、その環境における計算結果が妥当であるのかが不明なことである。前者に関しては分散しているデータからデータの関連づけを得ることによってデータ密度としては疎であるがある程度連続したデータは得られる。後者に関して、Computational Ocean Acousticsに記載されたデータと出力および観測値¹¹⁾から分析した結果、このような海域においてはおよそ2~3km間隔でデータを入力することによって比較的観測結果に一致した出力が得られることがわかった。

そこで、三陸沖の津軽暖流が形成する津軽暖流渦と親潮が接する北緯41度線に沿った水温構造において双方向の音波伝搬に関して海底地形の影響を含めて検討を行う。2章において、三陸沖を含む津軽東方海域の水塊の分布を示し、北緯41度線に沿った水温構造および音速構造を記述する。海底地形の影響下における音波伝搬に関しては、海底が平坦な場合、単調に傾斜している場合、および実海底形状に対応した場合について比較し、津軽側から親潮へと、親潮側から津軽側へと音源が移動する場合の双方向の音波伝搬の検討を3章に示す。4章において、潮目領域における海底深度変化の影響の下、音源が移動することによる双方向伝搬における伝搬損失の検討を行い、5章で、結果をまとめる。

2. 三陸沖の海洋環境

2.1 水塊分布

Fig. 1 に 11 月の東経 141 度から 145 度、北緯 39 度 10 分から 42 度までの津軽海峡東方海域の水塊分布を示す。この図は NOAA の衛星の赤外線画像から水塊の変化および流れを示したものである。流れを矢印で示す。津軽海峡を東行し、海峡を抜けた津軽暖流は主として三陸の沿岸に沿って南下する。また、一部の暖水は下北半島の東側に暖水渦を形成する。この暖水渦は比較的長期にわたって存在している。衛星の赤外線画像を見ると、この海域における暖水塊は暖水の補給がなくなると 2 週間程度で暖水塊周辺の水塊と区別ができなくなる。一方で、千島列島に沿って南西方向に流れる冷たい親潮は三陸海岸の沖に達する。親潮の冷たい水塊はメッシュで図中に示す。さらに、この海域の南側からは黒潮統流が北上しており、親潮との境界面においては渦などを発生し、複雑な境界の形態を示している。その暖かい水塊と冷たい水塊が接する海域においては潮目が生ずる。図中、破線の楕円で示された海域では特に強い潮目が発生する。接している領域においては両方の

水塊の混合を生じてはいるが、それぞれの水塊に補給される海水があるため、形状の変化はあるが境界は継続して存在する。

2.2 北緯 41 度線に沿った音速構造

Fig. 2 に津軽暖水渦と親潮冷水塊の接する北緯 41 度線に沿った 11 月の水温構造を示す。JODC の水温プロファイルと位置から水深 600m までの 2 次元の図を作成した。暖水渦の領域において、暖水はおおよそ深度 350m までであり、350m 以下は親潮冷水塊と同じ水温となっている。東経 143 度から 143 度 40 分にかけて津軽暖流渦の底

Fig. 2 Structure of temperature according to depth along 41°N'.

Fig. 1 Distribution of water mass off the coast of Sanriku, on the north-east part of Honshu-Island.

Fig. 3 Sound speed structure of points shown by arrows of Fig. 2.

の深さは浅くなり、東経 144 度では親潮の冷たい水塊と同じ水温構造を示している。また、親潮冷水塊においては水温が 2.5°C の差し込みが存在している。

Fig. 3 に Fig. 2 の下向き矢印のアルファベットで示した点の垂直音速構造を示す。海底までの水温に関しては潮目近くで、海底まで計測されている JODC データを用い、代表的に水深 1000m を 3°C 、水深 2000m から海底までを 1°C とした。音速プロファイルは塩分濃度を 35‰として水温プロファイルから Medwin の式¹²⁾を用いて求めた。また、海底の深度は海上保安庁が発行している海図の等深線の記述を用いた。a 点は津軽暖水渦 (TuWE) の音速構造であり、表面の音速は 1512.93 m/s、層深 (LD) は深度 80m である。その下は水温躍層であり、深度 600m で音速は 1476.339 m/s まで減少する。それ以上の深度では水圧の効果で音速は増大する。したがって、サウンドチャンネル (SC) 軸の深度を見ると、TuWE ではおおよそ 600m である。d 点は親潮冷水塊 (OyCWM) の音速構造であり、表面の音速は 1480.729 m/s、LD の深度は 30m、SC 軸は 165m である。b 点および c 点はその間の地点の音速構造であり、潮目を通して垂直音速構造が変化していることがわかる。図中破線で示すように、SC 軸は親潮の冷水域において約 165m であり、津軽暖水渦の領域において約 600m と SC 軸深度は深くなる。

Fig. 4 Outline of moving sound source and fixed receiving point.

3. 海底地形の影響による音波伝搬

音波伝搬の解析は Fig. 2 の双方向の矢印で示した間隔 120km の距離で行う。音源が潮目領域を通過するときの伝搬を検討するため **Fig. 4** に示すように受波点は固定し、音源を矢印の方向に順次移動させる。TuWE 側から音源が移動する場合は 120km 離隔した OyCWM に受波点を置き、逆に OyCWM 側から近接する場合は TuWE 内に受波点を置く。計算コードは広角度パラボリック方程式 (PE) の FOR3D¹³⁾を用いる。FOR3D を用い計算する場合の深度方向に関する計算間隔の制限と検討に用いる深度との関係および伝搬距離から計算に使用する音波の周波数は 100Hz とする。検討に使用する音源深度は 10m、100m、200m、300m および 450m まで 5 点、受波深度は 50m から 450m の同じく 5 点で行う。海底は砂泥の物性値を用いる¹⁴⁾。

本論文においては 1 つの平面 (深度-距離) にお

ける2次元での解析を行う。一方で、横方向の伝搬解析、つまり、3次元での解析が必要ではないのかという疑問を生じる。そこで、3次元解析が必要な海洋条件について考える。長距離音波伝搬において音波が横方向に伝搬するための条件は2つ考えられる。1つは海潮流などの流れがある場合、1つは海底地形による場合である。音波伝搬に対する潮流の影響に関してD. Leeらが報告している¹⁵⁾。メキシコ湾流内の潮流の存在する海域で525km 離隔した送受波器間の音波伝搬の検討を行っている。この距離での変位は1kmである。つまり、1km あたりの変位量を求めると $1\text{km}/(525\text{km}/2) \cong 3.8\text{m}$ であり、率に直すと0.38%である。この値は非常に小さいと言える。つまり、120km の伝搬距離を考えると50cm 弱の変位となる。次に、海底地形が音波伝搬に及ぼす影響に関して示す。メキシコ湾の Catche Tongue において水平方向の音波伝搬の観測結果が得られている¹⁶⁾。この海域での海底の最大傾斜は 18.5° であり、伝搬経路の変位は海底の傾斜角度によって生じている。一般的な大陸傾斜で3から 6° であり、

検討を行った津軽東方海域の海底地形は襟裳海谷に向かってなだらかに落ち込んでおり、伝搬方向に対する急峻な横方向の地形の変化はない。したがって、この海域における音波伝搬に関して2次元平面によって伝搬を解析することは適応していると考ええる。

3.1 海底深度を4000m 平坦とした場合の音波伝搬

11月のこの海域における水温は低下しており、本州の南側の海域と異なり、SC 軸は浅くなる。その結果、SC 伝搬が比較的浅深度で生じる。そこで、海底深度を4000m として、形成される音場を示す。Fig. 5 は音源深度を100m としたときの音場であり、この図においては地理上の位置に合わせるため a) は TuWE 側から、つまり左側から音波を放射し、音波は OyCWM 側に、b) は逆に OyCWM 側から、つまり図の右側から TuWE 側に向かって音波が放射された場合を示している。海底の位置(深度4000m)を実線で示している。音速構造が急速に変化する領域を双方向矢印で示す。図の濃淡に関しては右のスケールに

Fig. 5 Sound field radiated sound from each water mass.
SD;100m, a) from TuWE to OyCWM; b) from OyCWM to TuWE.

しめす。TuWE における層深(LD)は80mである。周波数が100Hzにおいて海面ダクト(SD)伝搬を形成するために必要なLDの深度は約140m以上¹⁷⁾であり、TuWE内でSD伝搬は生じない。したがって、音源から放射された音波は下向き屈折による伝搬となる。海底に向かった音波は海底反射(BB)による伝搬および収束帯(CZ)による伝搬を生じ、それらによって音場は形成される。一方、OyCWM側からの伝搬は、BB伝搬とCZ伝搬に加え、SC伝搬を生じ、それらによって音場は形成される。

3.2 海底深度を単調に変化させた場合の音波伝搬

0km点(TuWE側)における水深は1230mであり、120km点(OyCWM側)における水深は3200mである。そこで、海底の影響(海底の深度と角度)を検討するため、Fig. 4における0km点と120km点の深度を結び、単調に海底深度を変化させる。移動する音源による伝搬損失を固定点で捉えるため、受波点はTuWEからの伝搬に関

してはOyCWM内、Fig. 4において120kmの点に受波点を固定し、また、OyCWMからの伝搬に関しては0kmの点とする。

以下の図の表示はFOR3Dによる計算結果を用いるため、音源を図の左側に置いて表示するが、距離の表示に関してはTuWE側を0kmとし、OyCWM側を120kmとする。

3.2.1 津軽暖水渦側から親潮側へ

音源位置0km、音源深度(SD)10mの場合の音場をFig. 6に示す。a)は海底深度が4000m、b)は海底が1230mから3200mまで単調に深くなっている場合である。LDが浅く、海底が深い場合、音源から放射された音波は海面で反射した音波を含めて下向きに屈折し海底に向かう。海底に向かった音波はBB伝搬およびCZ伝搬に移行する。海底は砂泥であるため、海底の反射係数が小さく、2回目の海底反射で伝搬損失は-110dBを超える。一方、海底が1230mから単調に増大している場合は海底に向かう音波が4000mの海底ではなく

Fig. 6 Comparison of sound field with SD of 10m between flat bottom and inclined bottom. a) Flat bottom at the depth of 4000m; b) inclined bottom (depth: 1230 to 3200m)

浅い位置で海底反射する。傾斜海底において、海底が砂泥であることから海底反射による伝搬損失は大であること、加えて、海底が深い方向に傾斜していることから音波の伝搬方向は拡散し、伝搬損失はさらに増大する。その結果、約 20km で伝搬損失は -110 dB より大きくなる。これらの図において、 -110 dB を超える場合、図には表れないことを注記する。

次に、SD を深くし、200m とした場合の音場を Fig. 7 に示す。音源深度が増大したため、CZ による収束位置は SD が浅い場合に比して音源位置に近づく。海底における反射角度は海底の傾斜角度が加算される。そのため、音源の深度が増大したことによって、海底反射は屈折による伝搬に移行する。

さらに、SD を 450m とした場合の音場を Fig. 8 に示す。音源深度が深くなったために SC 伝搬を生じている。海底が単調に傾斜している場合は海底が 4000m の場合に比して約 20km 手間で

SC 伝搬が形成される。これは海底の傾斜角度によって音波の反射角度が変わったためである。

音源が水温構造の変化する領域を通過した場合の音場を Fig. 9 に示す。SD は 200m、移動する音源の位置は Fig. 5 における 40km 点、60km 点および 80km 点であり、それぞれ a), b) および c) で示す。また、上側の図は海底が平坦、下側の図は海底深度が単調に増大する場合である。水温構造が TuWE から OyCWM に変化するため、平坦な海底の場合の音波伝搬は音源の移動に伴って CZ 伝搬から CZ 伝搬 + SC 伝搬に変化する。傾斜海底においては海底が深くなるため、海底反射による伝搬は拡散し、一方で音波の海底への入射角と海底の傾斜角の関係で CZ 伝搬の距離周期が短くなる。また、海底深度が増大しているため 80km 位置では海底反射の角度が異なる外、CZ 伝搬および SC 伝搬は同じ形態に近づく。

3.2.2 親潮側から津軽暖水渦側へ

音源深度 (SD) 10m の OyCWM 側から TuWE

Fig. 7 Comparison of sound field with SD of 200m between flat bottom and inclined bottom. a) Flat bottom at the depth of 4000m; b) inclined bottom (depth: 1230 to 3200m)

Fig. 8 Comparison of sound field with SD of 450m between flat bottom and inclined bottom. a) Flat bottom in the depth of 4000m; b) inclined bottom (depth: 1230 to 3200m)

Fig. 9 Comparison of sound field by moving sound source with SD of 200m. Upper; flat bottom, lower; inclined bottom, a) source point: 40km from TuWE; b) 60km; c) 80km.

への場合の音場を **Fig. 10** に示す。a) は海底が平坦で深度が 4000m, b) は海底が 3200m から 1230m まで単調に浅くなる。ただし、距離表示は TuWE からを示している。LD が浅いため、

SD を形成せず、音源から放射された音波は海面で反射した音波を含めて下向きに屈折し海底に向かう。海底が 4000m の場合には海底に向かった音波は BB 伝搬および CZ 伝搬に移行する。一方、

Fig. 10 Comparison of sound field with SD of 10m between flat bottom and inclined bottom. a) Flat bottom at the depth of 4000m; b) inclined bottom (depth: 3200 to 1230m).

海底深度が単調に減少している場合は海底に向かう音波は浅い位置で海底反射し、海底反射による伝搬が卓越する。

次に、SDを200mとした場合の音場をFig. 11に示す。音波伝搬はBBとCZ伝搬に加えて、SDがSC軸深度より深いのでSC伝搬を生じ、それらの重畳によって音場が形成される。海底深度が浅くなっていくため、TuWEに近接するとCZ伝搬は消滅し、BBとSC伝搬によって音場が形成される。

SDを450mとした場合、音源深度が深くなったためにSC伝搬における音場は拡散する。これは参考文献3)で報告したとおりである。CZ伝搬に関しては海底深度が浅くなったためBB伝搬に移行する。

音源が音速構造の変化する領域を通過した場合の音場の変化をFig. 12に示す。SDは200mであり、移動する音源の位置はFig. 4における80km点、60km点および40km点であり、それぞれa)、

b) および c) で示す。また、上側の図は海底が平坦、下側の図は海底深度が単調に減少する場合である。音速構造がOyCWMからTuWEに変化するため、平坦な海底の場合は潮目領域を通過し、TuWEの領域に入ることによってBB+CZ+SC伝搬からSC伝搬が消滅し、BB+CZの伝搬形態となる。傾斜海底においては海底が浅くなること、およびTuWEの領域に入るため、BB+CZ+SC伝搬から最終的にCZおよびSC伝搬が消滅し、BB伝搬が卓越する。

3.3 実際の海底地形における音波伝搬

単調に傾斜している海底と同様に0km点(TuWE側)における水深は1230mであり、120km点(OyCWM側)における水深は3200mであるが、実際の海底は襟裳海谷に向かって階段状に深度を増大させている。3.2節と同様に信号を固定点で捉えるため、受波点はそれぞれの水塊内に固定する。

Fig. 11 Comparison of sound field with SD of 200m between flat bottom and inclined bottom. a) Flat bottom at the depth of 4000m; b) inclined bottom (depth: 3200 to 1230m) .

Fig. 12 Comparison of sound field when the sound source is moved at SD of 200m. Upper; flat bottom, lower; inclined bottom, a) source point: 80km from TuWE; b) 60km; c) 40km

3.3.1 津軽暖水渦側から親潮側へ

Fig. 13 に音源位置 0km, 音源深度が 10m の TuWE 側からの場合の音場を示す. 音場は BB 伝搬によって形成している. 最初の BB 位置での海

底傾斜は同じであるが, 2 回目の BB では海底傾斜が異なるため反射の方向は異なる. ところで海底は砂泥であり, しかも, 海底が深い方向に傾いている. その結果, 伝搬損失は大きく, 約 20km

Fig. 13 Comparison of sound field with SD of 10m between inclined and actual bottom. a) Inclined bottom; b) actual bottom.

で伝搬損失は -110 dB より大きくなる。次に、SD を 200 m とした場合の音場を **Fig. 14** に示す。単調に傾斜する海底は海底の傾斜角度の影響で 2 番目の BB 以降の伝搬は収束帯による伝搬を形成する。一方、実際の海底形状の場合は 3 番目の BB 以降収束帯を形成する伝搬となるが、収束の形態は異なる。さらに SD を 450 m とした場合、SD が SC 軸に近くなったため、SC 伝搬が卓越し、さらに海底が深くなるため、海底の影響を受けず、両方の海底地形において伝搬形態は似た状態を示す。

音源が音速構造の変化する領域を通過した場合の音場を **Fig. 15** に示す。SD は 200 m であり、移動する音源の位置は **Fig. 5** における 40 km 点、 60 km 点および 80 km 点である。それぞれ a)、b) および c) で示す。また、上側の図は単調に深度が増大する海底、下側の図は実際の海底形状の場合の音場である。海底形状が異なるため、BB の形態は異なる。しかし、SD が 200 m であるため、

CZ 伝搬を生じる。また、音速構造が変化する領域を通過すると SC 軸が浅くなるため、SC 伝搬を生じ、TL に対する寄与は大きくなる。 80 km 点を過ぎると、海底深度が増大し、CZ および SC 伝搬が卓越するため海底形状の違いによる音場の差異は少なくなる。

3.3.2 親潮側から津軽暖水渦側へ

親潮側からの音波伝搬において、SD が浅いと BB 伝搬と CZ 伝搬が主要な伝搬となる。海底が浅くなっていることおよび海底の傾斜によって、BB 後の音波の反射方向は海底の傾斜角度が加算され、CZ 伝搬の収束位置は音源位置側に近づく。また、海底が浅くなるにしたがって BB 伝搬が卓越する。SC 軸深度が約 165 m であるため、SD が増大すると SC 伝搬を生じ、音場の形成は SC 伝搬が卓越する。**Fig. 16** に SD が 200 m における音場を示す。1 回目の CZ 伝搬に関してはほぼ同じ伝搬を行うが、それ以降の伝搬は海底の位置の差異(深度と傾斜角度)による伝搬の差を生

Fig. 14 Comparison of sound field with SD of 200m between inclined and actual bottom. a) Inclined bottom; b) actual bottom.

Fig. 15 Comparison of sound field when the sound source is moved at SD of 200m. Upper; inclined bottom, lower; actual bottom, a) source point: 40 km from TuWE; b) 60 km; c) 80 km

じている。また、SC 伝搬が明確に表れる。SC 伝搬は SC 軸深度の変化に伴って中心となる深度も変化する。さらに、BB 伝搬を生じない限り、TuWE 内への音波の伝搬は非常に小さい。

音源が音速構造の変化する領域を通過した場合の音場を **Fig. 17** に示す。SD は 200m である。この領域において SC 軸は約 165m から 600m に変化するとともに海底は浅くなる。音源が 80 km

Fig. 16 Comparison of sound field with SD of 200m between inclined bottom and actual bottom. a) Inclined bottom; b) actual bottom.

Fig. 17 Comparison of sound field when the sound source is moved at SD of 200m. Upper; inclined bottom, lower; actual bottom, a) source point: 80 km from TuWE; b) 60 km; c) 40 km

点にある時、SC+CZ 伝搬および海底反射による海面付近の収束による伝搬を生じる。海底が単調に浅くなる場合、海底反射から海面付近の収束位置までの距離は約 40 km であるが、実際の海

底形状における距離は海底の深度の違いによって約 35 km と短くなる。60 km 点においては SC 軸が約 300 m であるため SC 伝搬と海底反射による伝搬が形成される。音源が音速構造の変化領域を

Fig. 18 Comparison of TL for bi-directional sound propagation. SD; 10 m, RD; 50 m, ▲; sound source moving from TuWE to OyCWM, ■; sound source moving from OyCWM to TuWE, a) flat bottom; b) actual bottom.

通過すると OyCWM から TuWE の水塊に入るため、SC 伝搬は消滅する。そして、BB による伝搬が形成される。その結果、海底地形の影響が強く現れ、受波位置における TL は海底の深度と傾斜角度によって大きく異なる。

4. 音源が移動する場合の音波伝搬

3 章において、海底形状による音波伝搬の変化および、形成される音場を示した。この章では音源が TuWE から OyCWM に向かってくる場合と、逆に、OyCWM から TuWE に向かってくる場合を比較する。距離に関しては TuWE 側を 0 km, OyCWM 側を 120 km で表示し、受波位置は固定で、TuWE サイドからの場合は 120 km 離隔した OyCWM 内とし、逆の OyCWM サイドからの場合は 0 km の TuWE 内に置く。

4.1 浅い音源 (SD: 10 m) と浅い受波器深度 (RD: 50 m)

Fig. 18 に双方向伝搬の比較を示す。a) は海底が深度 4000 m で平坦な場合、b) は実際の海底形状である。■印は OyCWM サイドから TuWE

内の受波点に音源がアプローチする場合、▲印は TuWE サイドから OyCWM 内の受波点にアプローチする場合である。この図において 40 km から 80 km の間において音速構造は変化する。

a) の平坦な海底において、TuWE サイドから音源がアプローチする場合(▲印)、音源から放射された音波は下向きに屈折し、BB 伝搬および CZ 伝搬を形成する。Fig. 6 (a) で見られるように音源の移動に伴い CZ の収束位置も移動する。その結果、移動に伴って 2ndCZ の収束、次に 1stCZ の収束が現れる。したがって、10 km の TL の減少は 2ndCZ であり、70 km は 1stCZ の収束である。それ以外の距離の 20 km から 60 km の間は BB による伝搬であり、TL は大きい。80 km からは海底反射の影響が現れ、TL は減少する。OyCWM サイドからの場合(■印)、110 km の TL の減少は 2ndCZ である。1stCZ 位置は 50 km である。40 km から 20 km までは BB による伝搬であり、TL は小さくなる。10 km における TL の増大は、海底反射による位置と受波位置とが一致していないためである。

b) の実際の海底において、TuWE サイドから音源が移動する場合、海底は深度 1230 m から 3200 m に増大する。Fig. 12 (b) で示すように、海底が浅いため CZ による伝搬は生ぜず、また、BB 伝搬は海底傾斜の影響によって TL は大きく、音源の近接に従って海底反射の影響が増大し、TL は減少する。しかし、90 km から 110 km においては BB 伝搬位置と受波位置が合致しないため TL は大である。OyCWM サイドからにおいては、海底が浅くなっていくため、TL は距離とともに減少する。

4.2 中深度の音源 (SD: 200 m) と中深度の受波器 (RD: 200 m)

Fig. 19 に実際の海底形状における双方向伝搬の比較を示す。TuWE サイドから音源が移動する場合(▲印)、Fig. 14 (b) に示すように傾斜した海底での BB によって収束帯を形成する伝搬を生じるため、TL は減少していく。70 km 位置から

Fig. 19 Comparison of TL for bi-directional sound propagation at actual bottom. SD; 200m, RD; 200m, ▲; sound propagation from TuWE to OyCWM, ■; sound propagation from OyCWM to TuWE.

はSC伝搬を形成し、TLはさらに減少するが、80km位置においては収束帯を形成する伝搬とSCによる伝搬位置が合致しないためにTLは増大する。

OyCWMサイドから音源が移動する場合(■印), Fig. 16 (b)に示すようにSC伝搬が卓越するが、SC伝搬の収束深度がSC軸に沿って深度が増大するため、TuWE内におけるTLは大きい。40km位置まで移動するとSC伝搬は消滅し、BBによる伝搬となる。以降の距離において、海底が浅くなっていくため、BB伝搬位置と受波位置が合致するとTLは減少するが、合致しない場合、TLは大である。

4.3 深い深度の音源 (SD: 450m) と深い深度の受波器 (RD:450m)

Fig. 20に実際の海底形状における双方向伝搬の比較を示す。TuWEサイドからアプローチする場合(▲印), SDが深いこと、および海底が1230mから深くなっていくため、SC伝搬を生じ、卓越する。したがって、TLは小さく、受波点への近接によってTLがさらに減少する。

OyCWMサイドからアプローチする場合(■印), SC伝搬が卓越するが、海底が浅くなることによってBBによるCZ伝搬を生じる。したがって、受波点のTLはSC伝搬とCZ伝搬の加算となるためTLは距離で変動する。10kmにおけるTLの減少はBB伝搬位置と受波点が一致したた

Fig. 20 Comparison of TL for bi-directional sound propagation at actual bottom. SD; 450m, RD; 450m, ▲; sound propagation from TuWE to OyCWM, ■; sound propagation from OyCWM to TuWE.

Fig. 21 Comparison of TL for bi-directional sound propagation at actual bottom. SD; 10m, RD; 200m, ▲; sound propagation from TuWE to OyCWM, ■; sound propagation from OyCWM to TuWE.

めである。

4.4 浅い深度の音源 (SD: 10m) と中深度の受波器 (RD: 200m)

Fig. 21に実際の海底形状における比較を示す。TuWEサイドからアプローチする場合(▲印), 音源深度が浅い(SD: 10m)ため、音源から放射された音波はすべて下向きに屈折し、海底に達する。海底は深くなる方向に傾斜しているため、BB伝搬によるTLは大きい。また、Fig. 13 (b)に比して音源深度が増大したことにより、受波位置(RD: 200m)とBB伝搬位置との関係によってTLは変動する。

OyCWMサイドからアプローチする場合(■印), 音源が浅いため音波は下向きに屈折し海底に達する。したがって、Fig. 3 (b)と同じ傾向を

示し、TLは大である。10kmにおけるTLの減少は受波深度とBB位置とが一致したためである。

4.5 中深度の音源 (SD: 200m) と浅深度の受波器 (RD: 50m)

Fig. 22 に実際の海底形状における比較を示す。TuWE サイドからアプローチする場合(▲印)、海底は深度が増大していくことおよび受波器深度が浅いため、BB 伝搬から CZ 伝搬に移行した音波が海面付近に収束することによる TL の減少がある。また、音速構造が急速に変化する領域(40~80km)を通過すると SC 伝搬を生じるが、受波器深度が浅いため、TL の減少は見られない。

OyCWM サイドからアプローチする場合(■印)、音源の近接による TL の減少は見られるが受波器深度が浅いため顕著な TL の減少は見られない。また、10km における TL の急激な減少は BB 反射位置と受波器位置が一致したためである。

5. まとめ

11 月の津軽暖水渦(TuWE)と親潮冷水塊(OyCWM)が接する領域において、北緯 41 度線に沿った水温構造を用い、音源が TuWE 側および OyCWM 側から、それぞれのサイドにアプローチする場合の音波伝搬を検討し、双方向伝搬に関して比較、検討した。

Fig. 22 Comparison of TL for bi-directional sound propagation at actual bottom, SD; 200 m, RD; 50 m, ▲; sound propagation from TuWE to OyCWM, ■; sound propagation from OyCWM to TuWE.

潮目領域において、暖かい TuWE から冷たい OyCWM に変化すると、海面付近の音速が約 1515 m/s から約 1480 m/s に減少する。また、SC 軸の深度は約 600 m から約 170 m に浅くなる。その結果、暖水域においては音源深度が浅いと音波は下向き屈折の伝搬となり、BB による伝搬、そして、海底が十分に深ければ CZ 伝搬を生じる。また、音源深度が SC 軸に近くなると、CZ 伝搬に加えて SC 伝搬を生じる。冷水域においては SC 軸が浅いため、SC 伝搬、CZ 伝搬と BB 伝搬を生じる。したがって、音源が潮目領域を通過することによって TL に対する BB, CZ, SC 伝搬の寄与が異なって現れる。さらに、海底地形は海底深度および傾斜角度によって BB, CZ 伝搬の形態を変化させ、結果として TL に対する寄与が変化する。特に、TuWE 側では海底深度が浅いため、音波は海底への透過とともに海底の角度による拡散によって TL は増大する。逆に、OyCWM 側から音源が近づくと海底が浅くなるため、音波は海面付近における収束と海底反射を生ずるが、受波位置によって TL に対する寄与は大きく異なる。

TuWE 領域では LD が浅いため音源から放射された音波は下向きに屈折する。したがって、海底が十分な臨界深度を有している場合、CZ 伝搬を生じるとともに BB 伝搬によって音場が形成される。しかし、BB 伝搬に関しては海底との反射回数が増大すると、音波の海底下への透過によって TL は増大する。一方、OyCWM 領域においては SC 軸深度が浅いため、SC 伝搬、CZ 伝搬および BB 伝搬を生じる。つまり、海底との相互作用のない伝搬が卓越する。音源が 2 つの水塊が接する領域を通過する場合、CZ 伝搬 + BB 伝搬から SC 伝搬 + CZ 伝搬 + BB 伝搬に移行、方向を逆にとすると逆の過程で音波伝搬は移行する。

海底が海底深度と海底傾斜の角度を変化させる場合、音源から放射された音波によって形成された音場が海底に接した時の海底深度と海底の傾斜の両方を考える必要がある。つまり、海底の傾斜

角度によって BB 伝搬が変化することを考慮する必要がある。普通、BB は海底に対して入射した角度と同じ角度で反射するため、平坦な海底の場合、入射するグレージング角と同じ角度で反射する。しかし、海底が傾斜している場合、海底が深くなる状態では、海底に対するグレージング角に海底の傾斜角を加えた角度で反射する。したがって、海底が深くなる方向の傾斜において海底反射した結果、音波の伝搬する角度の関係から CZ 伝搬に移行し、通常の転回深度より浅い深度で CZ 伝搬が発生する。逆に、海底が浅くなる場合、海底に対するグレージング角から海底の傾斜角を減じた角度で反射するため、BB を継続し、反射の周期は短くなる。また、受波位置に対して海底が浅くなっていく場合、BB 位置と受波位置が合致するか否かで TL は大きく異なる。

逆に、音源に対して受波器が近接する状態を考える。TuWE 内の音源に対して OyCWM 側から受波器が近接する場合、浅い音源に対して浅い深度の受波器が近接するときは受波器が音源に近接するまで TL は大である。浅い音源に対して深い深度の受波器が近接する場合においても近接するまで TL は大であり、近接し、海底反射位置と受波位置が合致すると TL は大きく減少する。逆に、OyCWM 内の音源に対して TuWE 側から受波器が近接する場合、受波器深度を深くすることによって TL は減少する。最終的に SC 伝搬が卓越するため、受波器深度は SC 軸付近が小さな TL を得ることができる。

参考文献

- 1) 杉本隆成編著, 海流と生物資源(成山堂書店, 東京, 2004), VI 章, p. 178-181.
- 2) 飯坂譲二監修, 日本写真測量学会編, 合成レーダ画像ハンドブック(朝倉書店, 東京, 1998), 第 3 章, p. 120-123.
- 3) Y. Tsurugaya, T. Kikuchi and K. Mizutani, "Sound propagation in boundary region between warm core ring and cold water mass of the east sea area off Tsugaru Strait," Proc. the 32nd of Symposium on Ultrasonic Electronics, 571-572 (2011).
- 4) 鶴ヶ谷芳昭, 菊池年晃, 水谷孝一, "潮目領域において音源と受波器の深さの変化によって生ずる音場の変動," 海音講論集, 97-98 (2012).
- 5) Y. Tsurugaya, T. Kikuchi and K. Mizutani, "An influence of frequency on sound propagation in a current rip region," Proc. the 33rd of Symposium on Ultrasonic Electronics, 401-402 (2012).
- 6) 鶴ヶ谷芳昭, 菊池年晃, 水谷孝一, "潮目領域における音波伝搬に対する海底深度の影響," 海音講論集, 81-82 (2013).
- 7) Y. Tsurugaya, T. Kikuchi and K. Mizutani, "Variation on sound propagation caused by topography of seabed in a current rip region," Proc. the 34th of Symposium on Ultrasonic Electronics, 537-538 (2013).
- 8) 鶴ヶ谷芳昭, 菊池年晃, 水谷孝一, "海底の地形変化による潮目領域における音波伝搬の比較," 海音講論集, 67-68 (2014).
- 9) Y. Tsurugaya, T. Kikuchi and K. Mizutani, "Sound propagation in a current rip region; From Tsugaru warm eddy side to Oyashio cold water mass," Proc. the 35th of Symposium on Ultrasonic Electronics, 565-566 (2014).
- 10) 鶴ヶ谷芳昭, 菊池年晃, 水谷孝一, "潮目領域における双方向音波伝搬に対する海底の影響," 海音講論集, 91-92 (2015).
- 11) F. B. Jansen, W. A. Kuperman, M. B. Potter and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, (AIP PRESS, New York, 1994), Chap. 1, p. 34.
- 12) H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, (ACADEMIC PRESS, New York, 1998), Chap. 3, p. 85.
- 13) D. Lee and M. H. Schultz, *Numerical Ocean*

- Acoustic Propagation in Three Dimension*, (World Scientific, Singapore, 1995), Chap. 8, p. 155-207.
- 14) 鶴ヶ谷芳昭, 水谷孝一, "内部波と転回音線の位置の関係が音波伝搬に与える影響," 海洋音響学会誌, **37** (1), 25-33 (2010).
- 15) A. R. Robinson and D. Lee (Eds.), *Oceanography and Acoustics Prediction and Propagation Models*, (AIP PRESS, New York, 1994), Chap. 9, p. 213-218.
- 16) J. D. Sagers, M. S. Ballard and D. P. Knobles, "Evidence of three-dimensional acoustic propagation in the Catoche Tongue," J. Acoust. Soc. Am. **136** (5), 2453-2462 (2014).
- 17) R. J. Urick, *Sound Propagation in The Sea*, (Defense Advanced Research Projects Agency, Washington, 1979), Chap.5, p. 5-5-5-6.