研究

北極海での音波伝搬特性に氷の横波が与える影響

土屋 健伸

(神奈川大・工, 神奈川大ハイテクリサーチセンター) *¹松本 さゆり (港湾空港技術研究所) *²

穴田 哲夫, 遠藤 信行

(神奈川大・工, 神奈川大ハイテクリサーチセンター) *³

kenshin@kanagawa-u.ac.jp

(2006年12月7日原稿受付)

Abstract :

Characteristics of pulse propagation in Arctic Ocean were calculated by elastic Parabolic Equation (PE) method based on rotated Padé approximation. It was assumed that the transmitter was placed at 100 m of depth and that the frequency was 20 Hz. Propagation loss was estimated with the condition that the propagation path was 300 km when the thickness of the ice layer was changed. To estimate the arrival time of pulses, a simulation of eigen rays was used by ray theory. The sound pressure field in the vertical plane changed in proportion to the increment of the thickness of ice. It was predicted that the effect of an ice layer on the sea surface would be great because the last pulse incidents that occurred at a small grazing angle in the ice layer generated a shear wave. Therefore, the transmission loss was large compared to there being no ice. It is shown that we had to take account of the ice layer in sound propagation in Arctic Ocean.

分類：音波伝搬

キーワード：北極海，海表面氷層，弾性放物型方程式法，伝搬パルス波，横波

1. はじめに

温暖化現象に代表される地球環境変動の原因究明や海底下の資源探査という目的から，極域での環境観測をより効率的に行う手法の確立が求められて

いる．その一つ的手段として水温や塩分濃度，海流分布といった海洋環境の広域観測が長期間可能である海洋音響トモグラフィが挙げられる¹⁾．海洋音響トモグラフィのための先見予測や測定後のデータ

Influence by Shear Wave of Ice with Sea-surface to Sound Propagation Characteristics in Arctic Ocean using Elastic Parabolic Equation Method

* 1 Takenobu TSUCHIYA (Faculty of Engineering, Kanagawa University, Kanagawa University High-Tech Research Center)

* 2 Sayuri MATSUMOTO (The Port and Airport Research Institute)

* 3 Tetsuo ANADA, Nobuyuki ENDOH (Faculty of Engineering, Kanagawa University, Kanagawa University High-Tech Research Center)

解析, 例えば順問題解析のために音波伝搬の解析精度を上げることは重要である。また, 近年, 北極海や南極海など海水下の計測, 探索に無人自走型潜水調査艇 (Autonomous Underwater Vehicle : AUV) を利用することが提案・計画されている。人間にとってアプローチしにくい極域での観測手法²⁾としてその成果が期待されている。AUV のオペレーションに用いられている音響通信の速度の向上やエラーの減少などの性能向上のためには, 極域での音波伝搬特性を予め調べることが重要である。

北極海域において, 海洋音響トモグラフィを行うための研究や開発課題の一つとして, 北極海音波伝搬解析プログラムの開発が挙げられる。低中緯度の太平洋海域では深度 1000 m 付近に SOFAR 軸と呼ばれる音速極小層が存在し, この軸に沿って音波が伝搬する。これに対して, 北極海域は海面を軸とした半チャンネル構造の音速プロファイルであり, 音波は海面に向かって屈折しながら伝搬する³⁾。さらに北極海域の多くは夏季でも厚い多年氷で覆われており, 音波は海水底面で反射を繰り返しながら伝搬する。したがって, 海水底面の反射特性を考慮して, 音場を精度良く計算する解析方法の開発が必要となる。

音速が早く堅い材質である海水はその弾性的な性質により横波が発生するため, 流体型の PE 法では反射特性を高精度に解析することはできない。そこで本報告では弾性放物型方程式法を用いて, 海水底面での反射特性を高精度に解析することで, 北極海における音波伝搬解析の精度向上を試みる。ここでは海表面が弾性体の氷で覆われている海域を想定して, 弾性ならびに流体放物型方程式法の双方を用いて定常音場の解析を行う。それらの結果を比較することで弾性放物型方程式法の有効性を確認する。さらに氷の厚さを変化させて受波点での周波数特性とパルス波形の振幅にどのような変化が現れるかを確認する。

2. 弾性放物型方程式法による音場解析^{4, 5)}

本章では弾性体モデルにおける PE 法の定式化について述べる。弾性体モデルにおける解析では主

に変位と応力の関係で表されるが, 音圧分布の算出や Padé 級数による近似を容易にするため, 膨張度 Δ (dilatation) を導入して解析を行う。膨張度 Δ に変換した方程式を示した後に Padé 級数による近似方法を述べる。なお本章では弾性体は等方性を仮定して解析を行っている。

まず問題を簡単にするため, 水平方向 y を無視し, 伝搬距離方向 x と深度方向 z の 2 次元問題として捉える。水平方向を無視した 2 次元弾性波動方程式は式(1)となる。

$$\begin{aligned} & (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 \Delta}{\partial z^2} + \rho \omega^2 \Delta \\ & + 2 \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \omega^2 \frac{\partial \rho}{\partial z} w + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial z} + 2 \frac{\partial \mu}{\partial z} \right) \frac{\partial \Delta}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial z} \Delta \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで, w は深度方向の変位, λ, μ は Lamé 定数であり, 媒質を表す物理定数である。減衰は音速を複素数にすることにより考慮される。密度 ρ , 縦波音速 c_p , 横波音速 c_s , 音波の波長を λ_w とおき, 縦波, 横波の一波長当りの減衰係数をそれぞれ β_p [dB/ λ_w], β_s [dB/ λ_w] とすると縦波及び横波の複素音速はそれぞれ $c_p = c_p / (1 + i\eta\beta_p)$, $c_s = c_s / (1 + i\eta\beta_s)$ として表される。ここで ω は角周波数, $\eta = (40\pi \log_{10} e)^{-1}$ である。Lamé 定数 λ, μ は縦波と横波の音速から, $\lambda = \rho (c_p^2 - 2c_s^2)$, $\mu = \rho c_s^2$ である。この波動方程式は深度方向の変位 w を含んでいるので, w についての波動方程式も同時に解く必要がある。水平方向を無視した w の波動方程式は式(2)となる。

$$\begin{aligned} & \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \rho \omega^2 w + (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} \\ & + 2 \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial \lambda}{\partial z} \Delta = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式(1), (2)を以下の式(3)の形に書き換える。

$$L \frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathbf{P} + \mathbf{M} \mathbf{P} = 0 \quad (3)$$

ここで、各行列式 L, P, M は以下で表される。

$$L = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & 2 \frac{\partial \mu}{\partial z} \\ 0 & \mu \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} \Delta \\ w \end{pmatrix}$$

$$M_{11} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \rho \omega^2 \\ + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial z} + 2 \frac{\partial \mu}{\partial z} \right) \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial z} \right)$$

$$M_{12} = \omega^2 \frac{\partial \rho}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$$M_{21} = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\partial \lambda}{\partial z}$$

$$M_{22} = \mu \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \rho \omega^2 + 2 \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z}$$

式(3)を以下のように因数分解する。

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} - ik_0 \sqrt{1+X} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} + ik_0 \sqrt{1+X} \right) P = 0 \quad (4)$$

ここで $k_0 = \omega / c_0$ は基準波数、 c_0 は基準音速である。 X は L, M を含む微分演算子であり、次式で表される。

$$X = \frac{L(M - k_0^2 L^{-1})}{k_0^2} \quad (5)$$

式(4)から前進波のみを取り出し、海洋環境が伝搬距離方向に緩やかに変化すると仮定し、 P を緩やかに変化する項と深度方向の Ψ に分離すると、次式の一方伝搬弾性波動方程式が得られる。

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = ik_0 (-1 + \sqrt{1+X}) \Psi \quad (6)$$

式(6)を解けば音場の解を得ることができる。しかし、式(6)は微分演算子行列を含んだ平方根であるために簡単には解くことができないので、通常はTaylor展開やPadé級数展開などの有理多項式展開を用いて近似を施す。

式(6)を計算するための近似を行った後、有限差分法による弾性放物型方程式法の定式化を行うことで、計算機上での音場解析が可能となるが、その手

順の説明は冗長になるのでこの場では割愛する。

3. 北極海の伝搬特性の解析

3.1 北極海の伝搬特性の概要

第1章で述べたように北極海における音波伝搬の特徴はその音速プロファイルと海表面の氷の反射特性によって決まる。音速プロファイルは海面近傍での変化はあるが、深度に対してほぼ直線的に増加するため、音は海面方向に曲げられる。海面に向かった音波は表面の海水によって反射して伝搬方向を海底方向に変えるが、音速プロファイルの影響によって再度海面へと向かって伝搬する。つまり、何度も海表面の氷に反射しながら遠距離を伝搬していく。ここで水と海水の境界面の反射特性を考えると横波を考慮する場合としない場合では、横波が発生した分、海水へ反射するエネルギーが減少して差が生じる。また、氷に入射した音波は、氷が薄い場合にはそのまま海表面に達し、さらに反射して水中へ戻ってくる場合もありえる。また氷と海水の境界面に入射する音波の入射角によっても横波の発生量が大きく変わってくるため、音波の伝搬経路と氷に対する入射角が予め把握できれば、北極海でのパルス伝搬特性の把握と検討の助けとなる。

3.2 伝搬解析モデルと音線理論による伝搬特性の把握

まず音波の伝搬経路と北極海での基本的な伝搬特性を把握するために音線理論を用いて計算を行った。Fig. 1(a)に北極海における音波伝搬の解析領域を示す。伝搬距離300 km、深度3.5 kmの領域を考えた。海底からの反射は無いものとして考え、海底を吸収層とした。氷の厚さを d [m]とし、本節での計算では0 mとした。音源ならびに受波器の深度を100 mとし、伝搬距離300 kmにおいて深度94 mから106 mを通過する音線を受波パルス列とした。なお、この音線計算では音波の放射角度として仰角を18度から-18度(俯角18度)まで角度を0.01度刻みで変えて計算した。また、角度が大きく海面で多重反射する音線は、反射損失によって長距離伝搬し

Fig. 1 (a) Analysis model of sound propagation in Arctic Ocean using parabolic equation method. (b) Sound speed profile in Arctic Ocean.

ないために計算から除外した。北極海の音速構造は深度350 mまでは温度、塩分濃度の変化が大きいため、強い音速勾配を持つが、350 mからは水温、塩分濃度の変化は小さく圧力のみが音速に影響を与えるため、単調増加してその傾きも緩やかになる。そこで本解析では式(7)に示す2本の直線で近似した音速プロファイルを設定して解析を行った⁶⁾。

$$\begin{aligned} c(z) &= 0.05z + 1439.5 & 0 \leq z \leq 350 \text{ m} \\ c(z) &= 0.016z + 1451.4 & 350 \leq z \leq 3500 \text{ m} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで z は深度[m]である。式(7)に基づいて計算した音速プロファイルをFig. 1(b)に示す。このようなプロファイルは半ダクト構造と呼ばれ、表面に音波をトラップするダクトが形成されており、音

波は主に音速勾配の大きい表面のダクトに捕われて伝搬することになる。

音線理論を用いて解析した固有音線の伝搬経路をFig. 2に示す。Fig. 2中の角度は仰角を表している。ここで、縦軸とした深度方向に比べて横軸とした距離方向が非常に長いので、Fig. 2では横軸のスケールを40倍に縮小している。そのため図中では、大きな入射角度で海面に向かって見られるが、実際には仰角約 ± 17 度までの音線のみが表示されている。海底付近で転回する音線は仰角16.3度で放射した音線である。Fig. 2に見られるように、北極海において音線は海面に向かって屈折し、海表面で反射を繰り返しながら伝搬している。また仰角・俯角ともに角度の小さい音線の大部分は海面付近を伝搬している。このような音線は海表面での反射回数が多いため、海表面が海水で覆われている場合、その影響を大きく受けると考えられる。角度が大きい音線の内、仰角10.4度では音波は深度1 km程度で下方転回するが、仰角16.4度では3.4 kmでほぼ海底付近まで到着しているために伝搬距離が幾分長くなる。

Fig. 3に仰角に対する到達時間を示す。仰角が大き

Fig. 2 Ray trace in Arctic Ocean.

Fig. 3 Arrival time v.s. radiation angle used by ray theory.

いと伝搬距離は幾分長くなるが、音速が早い領域を音波が進行しているために音線の到達時間は早くなる。仰角が小さくなるにつれて、到達時間は遅くなる。

3.3 放物型方程式法による北極海域での音波伝搬解析モデル

本節では、前節のFig. 1と同様な北極海海洋モデルにおいて、放物型方程式法を用いた音波伝搬解析を行う。Padé級数展開にはRotated Padé係数⁷⁾を用いた。この時、刻み幅とPadé級数の近似次数 n 、回転角 θ は収束テストを行い決定した。その結果、伝搬距離方向の刻み幅は10 m、深度方向の刻み幅は1 m、Padé係数の近似次数を $n = 12$ 、回転角を $\theta = 90$ 度とした。音源の周波数は20 Hzである。

本モデルで用いた海水の音響パラメータをTable 1に示す⁶⁾。パラメータは文献中の実測データより引用した。本モデルでは弾性体モデルと流体モデルの双方の計算を行うが、流体モデルにおいては横波の音速と減衰定数をゼロとして解析を行った。また極域の海水の底面は大きくうねり、複雑な形状を示しているが、長距離伝搬のために低周波音源を用いる場合では波長が長くなるために形状の影響は少ないと言える。一方、高速通信を行うためにビットレートを上げるためには高周波での解析が必要となり、海水底面の形状の影響を考慮しなければならない。今回の解析では周波数は20 Hzであるため、海水底面は平坦として伝搬計算を行った。

PE法の定常音場解析においては初期条件(初期音場)を与える必要がある。流体モデルで良く用いられるGreeneのWide angle source⁸⁾を式(8)に示す。

$$s(z) = \sqrt{k_0} (1.4467 - 0.4201 k_0^2 z^2) \exp\left(\frac{-k_0^2 z^2}{3.0512}\right) \\ p(z) = s(z - z_0) - s(z + z_0) \quad (8)$$

本手法において求める値は音圧 p ではなく膨張度 Δ と深度方向の変位 w であるから、初期条件には膨張度と深度方向の変位を与える必要がある。膨張度 Δ の初期条件は波長を λ_w とすると $p = \lambda_w \cdot \Delta$ の関係から次式で与えることができる⁹⁾。

Table 1 Acoustical parameters of media in Arctic Ocean.

	ρ [g/cm ³]	c_p [m/s]	a_p [dB/ λ_w]	c_s [m/s]	α_s [dB/ λ_w]
medium					
Water	1.0	Fig. 1(b)	0.0	0.0	0.0
Ice	1.0	3000	0.18	1400	1.08

$$\Delta(z) = p(z) / \lambda_w(z) \quad (9)$$

深度方向の変位については海底や海水が音源から十分遠方にあると仮定すれば、

$$w(z) = 0$$

とすれば良い。本章ではGreeneのWide angle sourceと式(9)より求めた膨張度の深度分布を初期音源として用いる。

3.4 北極海域における定常音場解析の結果ならびに考察

Fig. 1で示した海洋モデルにおける定常音場の解析結果について示す。Fig. 4(a)に弾性PE法による2次元伝搬損失分布図、Fig. 4(b)に流体PE法による2次元伝搬損失分布図を示す。この時、氷の厚さは4 mとした。Fig. 4を見て分かるように僅かではあるが、弾性体モデルの伝搬損失の値が大きい。これは前節で述べたように弾性体を適用したモデルを解析することによって氷の反射面での損失が増加したためだと考えられる。Fig. 5(a)に氷の厚さが4 m時の音源深度100 mにおける距離方向の伝搬損失分布図を示す。弾性体モデルと流体モデルの音圧差は音源近傍で大きく違い、その後のモデル間のレベル差はほぼ一定に保たれている。その平均レベル差はFig. 5(a)において弾性体モデルが流体モデルより約8.78 dB低くなっている。Fig. 2の音線経路図を見て分かるように音源深度100 mでの分布は音源からの仰角の小さい音線の影響を強く受ける。Fig. 5(b)に氷の厚さが8 mの時の音源深度100 mにおける伝搬損失分布図を示す。Fig. 5(a)と同様に、音源近傍で大きく違い、その後レベル差は一定

Fig. 4 Transmission loss distribution (a) calculated by elastic parabolic equation method (b) calculated by fluid parabolic equation method.

に保たれている．その平均レベル差はFig. 5(b)で約5.5 dBである．

以上のことから海表面が氷で覆われた北極海で音波伝搬を高精度に解析するためには，弾性PE法を用いて解析する必要があると言える．

4. 北極海域中での伝搬パルス波の解析と氷の厚さの影響

前章において北極海における伝搬解析に弾性PE法が有効であることが示されたので，本章では弾性PE法を用いて北極海における伝搬パルス波の解析を行う．PE法は定常音場を解析する手法なので，

Fig. 5 Transmission loss distribution when depth is 100 m. (a) Ice thickness is 4 m. (b) Ice thickness is 8 m.

そのままでは受波パルスを計算することはできない．そこで対応する送波パルスの周波数帯域に応じた解析をPE法で行い，角周波数 ω を変化させて求めた受波地点での伝達関数と送波パルスの周波数成分を畳み込み演算することで受波パルスを推定する．解析で用いたガウス状の包絡線を持つパルス波形の計算式を式(10)に示す．

$$s(t) = \sin(\omega(t-t_0)) \exp(-20.0(t-t_0)^2) \quad (10)$$

ここで t は時間[s]， t_0 はガウス状包絡線が最大となる時間を表す．本解析では $t_0 = 0.5$ [s]とした．解析モデルと音速プロファイルは前章と同じFig. 1を用いた．音源の周波数は長距離伝搬を考慮して中心周波数を20 Hzとし，周波数帯域幅20 Hzの間を0.2 Hz刻みで計101点の周波数について伝搬特性

を計算した。式(10)より求めた時間波形をFig. 6(a)に、周波数スペクトルをFig. 6(b)に示す。前章同様に伝搬距離方向、深度方向の刻み幅はそれぞれ10 m, 1 m, Padé級数の近似次数は $n = 12$, $\theta = 90$ 度とした。また北極海域伝搬における氷の厚さがパルス波の振幅に与える影響を明確にするために、氷が無い場合と厚さが4, 6, 8 mの3種類、計4種類の条件についてパルス波解析を行った。

まず、解析結果として周波数特性を求め、氷に覆われていない海洋モデルと海水で覆われている海洋モデルについて弾性PE法を用いて計算した結果を比較する。Fig. 7(a)に海面が氷に覆われていない海洋モデルにおける受波地点での伝搬損失の周波数特性を示す。海水で覆われていない場合を見ると低周波数領域でやや伝搬損失が大きくなっていることが分かる。また、その平均値は約90 dB程度となっ

ている。Fig. 7(b)に氷の厚さが4 mの海洋モデルにおける受波地点での伝搬損失の周波数特性を示す。高周波部でも約90 dB, 平均が約103 dBであり、氷無しの場合と比べて約15 dBの伝搬損失が増加した。特に顕著な差が現れているのが低周波域で、周波数が12.2 Hzにおいて最大30 dB以上の差が現れた。Fig. 7(c)に氷の厚さが6 m, Fig. 7(d)に氷の厚さが8 mの海洋モデルにおける受波地点での伝搬損失の周波数特性を示す。これらも同様に高周波域ではピークならびにディップの位置が変化するが、平均的な損失量に大きな差が無く、Fig. 7(a)で102.1 dB, Fig. 7(b)で102.3 dBとなっており、ほぼ変化していない。氷の縦波、横波の減衰定数は一波長あたりの減衰量であるため、周波数が上がると波長が短くなることから、氷内部でのトータルの音波の減衰を考えると高周波部で減衰するはずである。しかしながら解析結果では厚さが変化し、減衰量が大きくなってあまり変化が表れていない。これは水中での波長が十分長いために減衰特性は大きく変化せず、高周波部とはいっても減衰量に大きな差がないためである。一方、低周波域では損失量は大きくなり、厚さに伴って損失量は大きくなっている。これらの結果が示すことは、氷の厚さによる受波の周波数特性は低周波部が大きく減衰し、その原因となるのは水と氷との境界面での反射特性であるということである。反射特性の変化はその周波数特性と共にFig. 2からも分かるように入射角の変化による点である。

以上をまとめると、海水で覆われることにより、300 kmの伝搬距離で約15 dBほど伝搬損失が大きくなり、さらに低周波での損失が大きくなる。このことから海水の有無の条件は音波伝搬に与える影響が大きいことを示している。

周波数特性の結果から海水の有無が音波伝搬に与える影響が大きいことが分かったので、次に周波数特性より逆フーリエ変換を用いて受波波形を推定し、海水が伝搬パルス波へ与える影響を明らかにする。

弾性PE法により推定した深度100 mにおける受波パルス波形をFig. 8に示す。Fig. 8中の波形形状は包絡線を表示している。太線が海水で覆われて

Fig. 6 Wave form of sound source calculated by eq. (4.7) for estimation of sound propagation characteristics in Arctic Ocean. (a) Time domain (b) Frequency domain.

Fig. 7 Characteristics of spectrum of transmission loss of the Arctic Ocean when distance x is 300 km, and depth z is 100 m. (a) Sea surface without Ice. (b) Ice thickness d is 4 m. (c) Ice thickness d is 6 m. (d) Ice thickness d is 8 m.

いない場合、海水の厚くなるにつれて振幅が減少している。図中のスケールで1～5秒の約4秒間でそれぞれ8本のパルスが確認でき、これはFig. 3の音線理論で得られた結果と一致する。3.7～4.7秒付近で到達するパルスは、音速の遅い浅い深度を伝搬してきたパルスである。放射パルスのパルス長が約0.3秒間であるのに対して、約1秒間のパルス長を持ったパルスが受波されたのは、複数本の音線が同時に到達したためである。到達時間の早いパルスは音速が速く深い深度を伝搬してきたパルスである。音線理論で考えると、これらのパルスも2本の音線がほぼ同時刻に受波されている。

海水の有無、及び厚さの変化により、到達時間に大きな差は現れていないが位相が僅かにずれていることが分かる。また振幅は海水で覆われている場合

の方が小さく、海水により音波が減衰している。伝搬時間の遅いパルスは海面近くのダクトにトラップされて伝搬するため海水での反射回数も多く、最も影響を受けている。特に4.5秒付近のパルスは海水で覆われていない場合と比べて、パルス長が短くなっていることが分かる。これらはFig. 2の音線経路図から読み取ると仰角が $\pm 5 \sim 7$ 度で放射された音線であり、海面ダクトにトラップされ伝搬する音線である。一方、伝搬時間の速いパルスの振幅は同程度であり、ほとんど影響を受けていないことが分かる。また、海水の厚さが変化するとその振幅に違いが表れているが、これは海水の厚さが変化することにより、海水への入射角度が変化したためだと考えられる。

伝搬パルスの深度特性について検討するために、Fig. 9(a)に氷が無い海洋モデルにおける時間領域

での伝搬損失分布をカラーマップで示す。Fig. 9(b)に氷の厚さが4 mの海域モデルにおける時間領域での伝搬損失分布をカラーマップで示す。カラーマップ中の横一線を選択し、一定の深度での変化を見ると、時間経過と共に到達するパルスが読み取れ

Fig. 8 Received waveforms calculated by elastic parabolic equation.

る。同様に氷の厚さが6 mの結果をFig. 9(c)に、氷の厚さが8 mの結果をFig. 9(d)に示す。深度が浅いほど多くのパルスを受波している。最も違いが表れているのは、4.5秒付近に到達するパルスである。深度500 m、1000 mといった海面ダクト外での受波波形を見ると、深度100 mより多くのパルスが受波されていることが分かる。これは深度100 mでは多数の音線がほぼ同時に受波され1本のパルスを形成しているのに対し、深い深度で受波されるパルスは海面ダクトにトラップされない音線のみを受波しているためである。そのため、経路の違う音線を複数受波することができる。また、この図からも海水で覆われている場合の方が、伝搬損失が大きくなると読み取れる。これらのことから、海水で覆われた海域での海洋音響トモグラフィでは、到達時間の早いパ

Fig. 9 Transmission loss distribution in time domain. (a) Sea surface without Ice. (b) Ice thickness d is 4 m. (c) Ice thickness d is 6 m. (d) Ice thickness d is 8 m.

ルスが海水の影響を受け難いため音線同定には有効であると考える。

これらの解析結果は北極海域における海洋音響トモグラフィのための先見データとして、また海水で覆われた海域での伝搬特性を把握する上での有効なデータである。以上のことから北極海域の音波伝搬解析において、弾性PE法を用いることで伝搬特性の有効な予測と把握ができると言える。

5. まとめ

本報告では弾性放物型方程式法を用いて、海水底面での反射特性を高精度に解析することで、北極海における音波伝搬解析の精度向上を試みた。まず、海表面が弾性体の水で覆われている海域を想定して、弾性ならびに流体放物型方程式法の双方を用いて定常音場の解析を行い、振幅値を比較、検討した。その結果、双方の解析結果に有意差が生じることが分かった。氷の厚さが4 m, 8 mを想定した場合、深度100 mにおいてそれぞれ平均で約9 dB, 5.5 dBほど弾性体モデルの方の伝搬損失が大きいことが分かった。このことから北極海域においては弾性放物型方程式法がより精度良い伝搬特性を解析できることが分かった。さらに氷の厚さを変化させることで受波点での周波数特性とパルス波形の振幅に与える影響を確認した結果、海水が表層に存在することによって低周波での損失が大きくなり、パルス波形の立ち上がりが鋭くなることが分かった。以上の結果より、弾性放物型方程式法によって北極海域での音波伝搬をより正確に捉えることができたと言える。

また、北極海のような海水によって海面の反射条件が変化する海域においては、氷の厚さや表面の粗さなど、周波数や音源の位置によって特性が大きく変化することが予測される。今後は、海洋音響トモグラフィに最適な周波数を探すために周波数や音源位置を変えて同様の解析を行い、氷の厚さと伝搬特性の関係をより正確に求める。さらに、AUVの音響通信に使用される高周波数でのバースト状波形の伝搬解析と高周波化に伴う海水底面の粗さを考慮した反射波解析を行い、その特性を明確にする予定である。

謝辞

本研究の一部は文部科学省ハイテクリサーチセンタープロジェクトならびに科学研究費補助金 基盤研究 (C) #18500386, 若手研究 (B) #18700445の補助を受けて行った。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) W. Munk, P. Worcester, C. Wunsch, *Ocean Acoustic Tomography* (Cambridge Univ. Press, New York, 1995) p. 433.
- 2) 志村拓也, 越智寛, 渡邊佳孝, "Active Time Reversalによる音響通信の基礎研究," 海洋音響学会, **32**(4), 254-263 (2005).
- 3) 海洋音響学会, 海洋音響の基礎と応用, (成山堂出版, 東京, 2004) p. 79-82.
- 4) 尾上守夫, 固体弾性論の基礎, (オーム社, 東京, 1982年) 3章, p. 45-47,
- 5) T. Mitsuno, T. Tsuchiya, T. Anada and N. Endoh, "Elastic Parabolic Equation for Sound Propagation in shallow Water Overlying an Elastic Bottom Using Complex Padé Approximation," *Jpn. J. Apl. Phys.*, **41**(5B), 3530-3533 (2002).
- 6) P. J. Sutton, P. F. Worcester, G. Masters, B. D. Cornuelle, "Ocean mixed layers and acoustic pulse propagation in the Greenland Sea," *J. Acoust. Soc. Am.*, **94**(5), 1517-1526 (1993).
- 7) M. D. Collins, "high-order Padé approximation for accurate and stable elastic parabolic equation with application to interface wave equation," *J. Acoust. Soc. Am.* **89**(3), 1051-1057 (1991).
- 8) D. Lee, and M. H. Schlitz, *Numerical Ocean Acoustic Propagation in Three Dimensions* (World Scientific, Singapore, 1995) p.79-117.
- 9) D. D. Ellis and D. M. F. Chapman, "A simple shallow water propagation model including shear wave effects," *J. Acoust. Soc. Am.* **78**(6), 2087-2095 (1985).