

■1 群 (信号・システム) - 10 編 (超音波信号処理)

6 章 水中音響

■1 群 - 10 編 - 6 章

6-1 海洋における音波の伝搬

(執筆者：土屋健伸) [2009 年 4 月]

6-1-1 海水中での音の伝搬と解析

空気中とは異なり，水中や固体中では光・電磁波は透過しにくい物理的な性質をもっている．一方，音波は，気体・液体・固体を問わず良好な透過性をもっており，光では検知が難しい物体の内部構造を比較的容易に検出できる．海洋もその表面を除くと，ほとんどが光の届かない世界であり，音響技術の利用が不可欠な領域である．昔から音は空気より伝搬しやすいたことが知られている．1490 年には，レオナルド・ダ・ヴィンチが水中に管の先端を入れて，遠ざかる船の音の観測に成功している．17 世紀から 18 世紀にかけて音響の理論と実験の照合が盛んに行われ，1826 年にはコラードン (Colladon) とスターム (Sturm) によって水中音速の測定実験が行われた．近代の海洋音響技術が確立する契機となったタイタニック号の悲劇から 2 年後にはフェッセンデン (Fessenden) によって氷山の位置を知る装置が開発されている．海洋内を伝搬する音波に関する研究はその後も発展を遂げていき，今日に至っている¹⁾．

海洋において音波を利用するためには海洋中を伝搬する音波の状況把握が必要である．海洋中の音波は，屈折，反射，回折，散乱，吸収など様々な影響を受けて変化する．これらの伝搬状況を把握するために多くの海洋観測・実験が実施されると同時に伝搬過程をコンピュータで解析する種々の方法が提案された．現在に至るまで，観測・実験，解析のどちらも盛んに研究が行われている．海洋での音波伝搬は海面，海底をもつ構造から距離 r ，深度 z ，方位角 θ の円筒座標で考えることが一般的である．このとき波動方程式は

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) p \quad (6 \cdot 1)$$

と表される．ここで， $c(r, z, \theta)$ は海洋の音速構造， $p(r, z, \theta, t)$ は音圧である．音波の伝搬は，この波動方程式をある境界条件のもとで解くことで把握できる．ここで海洋の音速構造 $c(r, z, \theta)$ は場の関数であり，場が複雑になるに従って解析が困難になること，また海洋のような非常に長距離な伝搬を解くには，直接的に波動方程式の解を求めるには膨大な計算資源が必要であること，などから海洋での音波伝搬問題を解くためには適当な近似が必要となる場合が多い．海洋内部の音波伝搬を解析する手法は大きく大別して，[1. 幾何学的音線理論による解析]，[2. 波動理論による解析] の二つに分類できる．音線理論は高周波近似に基づいており，伝搬経路が可視化されるために物理的な解釈が容易である．また近似ゆえに回折や音波の振幅などは正確には求められないが，音の軌跡を表示するために物理的な現象の把握は取りやすい．一方，波動理論に基づく伝搬解析手法は，適用海域や計算に要求される精度，計算時間などを照らし合わせて，波動方程式を適宜近似または直接的に解くことで解を得る方法であり，様々な方法が取られている．しかしながら，高周波近似である音線理論も，近年，様々な工夫を凝らすことで比較的正確な音圧分布を得られるようになってきており，音線理論と波動理論，二つの手法の特徴も明瞭ではなくなっている．そして，波動理論に基づく解析手法に関しても計算機の能力が向上して境界条件における計算負荷も相対的に減少したこ

とから、その弱点も克服されつつある²⁾。

6-1-2 海水中の音速プロファイル

流体中の音圧 p はよく知られているように、 $p = P - P_0$ で表される。ここで P は流体中での瞬時圧力、 P_0 は流体中での平衡圧力である。ここで、熱伝導や粘性の効果を無視すると音速 c は以下の式(6・2)で表される。

$$c = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (6 \cdot 2)$$

ここで K は断熱時の体積弾性率、 γ は非熱、 ρ は密度であり、温度 T や圧力 P によってその値は変化する。海水中では温度や圧力はもちろん、塩分濃度 S 、深度 Z も音速に影響するため、音速を求めるための種々の経験式が報告されている。ここでは比較的簡単に音速を求めることができるマッケンジー (Mackenzie) の式を示す³⁾。

$$\begin{aligned} c(T, S, Z) = & 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 \\ & + 1.340(S-35) + 1.630 \times 10^{-2}Z + 1.675 \times 10^{-7}T^2 \\ & - 1.025 \times 10^{-2}T(S-35) - 7.139 \times 10^{-13}TZ^3 \end{aligned} \quad (6 \cdot 3)$$

媒質中の音速が一定であれば、音波は直線的に進む。しかし、媒質中の音速に分布が存在する場合、音波は音速の小さい方向に曲がりながら伝搬する。ここで海洋のある位置における深さ方向の音速変化を考える。太平洋中緯地帯においては、海表面近くでは太陽熱のために音速が速いが、深度が深くなるにつれて水温が低下するため音速は減少していく。しかし、ある程度の深さからは静圧力が高くなるために音速は再び増加する。その結果、よく知られているように図 6・1(a)のような深度 - 音速分布を示す。音速プロファイルは場所や時間の関数であるために多種多様であるが、ここでは典型的な例としてムンク (Munk) の音速プロファイルを示す⁴⁾。音速が極小となる深度付近に音源を設置して音波を照射すると、前述したように音波は音速の小さい方向に曲がりながら伝搬するために音波が深度 (垂直) 方向に拡がらず、長距離を伝搬する。このように音波が減衰せずに伝搬するチャンネルを SOFAR (Sound Fixing and Ranging) チャンネルと呼ぶ。その音波の伝搬の様子を音線理論で計算し可視化した図が図 6・1(b)である。音波が SOFAR チャンネルに沿いながら伝搬していく様子が分かる。

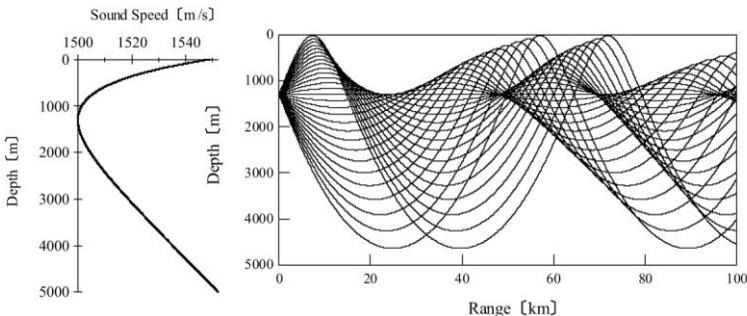


図 6・1 太平洋中緯度帯での音波伝搬 (a) 音速プロファイル (b) 音線理論による伝搬経路の可視化

6-1-3 音波伝搬に伴う減衰

音波が媒質中を伝搬する場合には、いくつかの理由によってエネルギーが減少する。このような音波の伝搬に伴う減衰は、媒質中での減衰と媒質境界での減衰に分類される。前者は吸収、拡散による減衰であり、後者は散乱、反射、透過による減衰に分けられる。海洋内の音波伝搬において、長距離伝搬距離では媒質中の減衰が重要となる。一方、近距離や浅い海の音波伝搬では、散乱や反射における減衰が重要である。

吸収による音波の減衰とは、音波が伝搬する場合に音響エネルギーが熱などのほかのエネルギーに変換するために発生する減衰である。吸収に起因する単位距離当たりの減衰量である吸収係数 $[\alpha/m]$ は次式で与えられる⁵⁾。

$$\alpha = \frac{Af_1f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{Bf_2f^2}{f_2^2 + f^2} + Cf^2 \quad (6\cdot4)$$

ここで第1項、第2項はそれぞれ海水中のホウ酸と硫酸マグネシウムによる吸収損失を表し、第3項は真水の吸収係数である。また、 f_1 と f_2 はホウ酸と硫酸マグネシウムの緩和時間に関連した周波数、 A, B, C は温度と圧力の関数である。図6・2に式(6・4)を用いて計算した海水の周波数に対する減衰特性を示す。長距離音波伝搬に用いられるような100 Hz以下の周波数では吸収係数の値は小さいが、kHz以上の領域では大きな値となる。更に低周波の領域であっても太平洋を横断するような超長距離伝搬においては、かなり音波が減衰することに注意する必要がある。

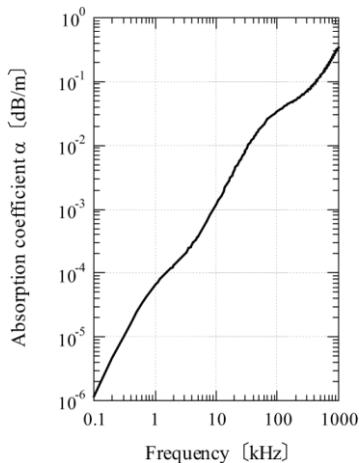


図 6・2 海水の吸収係数の周波数特性

音波伝搬において、音波が空間的に広がって伝搬する場合には単位面積当たりの音響エネルギーが減少する。この減衰を拡散減衰と呼ぶ。拡散減衰は音波がどのように波面を形成して伝搬するかによって決定され、以下に述べる3種類に分類される。ここで拡散による伝搬損失を TL と表すこととする。

- (1) 音波が平面波として伝搬する場合、吸収減衰を無視すれば、平面波は減衰せずに伝搬する。この場合、拡散損失はないという。つまり $TL=0$ である。
- (2) 伝搬する音波の波長に比べて小さな音源から音波が放射されている場合、音波は球面状の波面を保ちながら 3 次元面内を拡散伝搬していく。この場合を球面拡散と呼び、音源からの伝搬距離を r とおくと $TL=20 \log r$ である。
- (3) 浅い海や太平洋中の伝搬のように、深度に比べて距離が非常に大きい、薄い媒質中を伝搬する場合には、音波は深度方向には拡散せず、水平方向の 2 次元面内だけで円筒状に拡散する。この拡散を円筒拡散と呼び、 $TL=10 \log r$ で表すことができる。

媒質境界面での減衰は散乱、反射、透過がある。一般に、音波は、伝搬する途中で媒質が変わると、この 2 媒質の境界面で透過・反射する。例えば、海洋中を伝搬する音波が魚に当たったとすると、魚の体表面で音波が反射する。更には、海水中の気泡もよく音波を反射することが知られている。このように比較的小さな物体との境界面での反射により音波が四方八方に拡散する現象を散乱と呼ぶ。更に、これら散乱波により発生する残響が問題となることがある。

海洋内の音波伝搬において海面や海底での反射は音波の減衰に大きくかかわる。海水から海底面に音波が入射する場合、多くは境界面に対して斜めに入射する。この場合、よく知られているように音圧振幅の反射係数 R は式(6・5)となる。

$$R = \frac{z_2 \cos \theta_1 - z_1 \cos \theta_2}{z_2 \cos \theta_1 + z_1 \cos \theta_2} \quad (6 \cdot 5)$$

ここで、 z_1 、 z_2 はそれぞれ入射側と透過側の媒質の固有音響インピーダンスである。 θ_1 、 θ_2 はそれぞれ透過角並びに入射角を表す。

海底に斜め入射した場合の反射係数の絶対値を計算した例を図 6・3 に示す。この例では、海底媒質の音速が海水の 1.1 倍速い音速を仮定している。図から完全に全反射する臨界角は 65.6° であり、入射角が 43.2° のときには反射がゼロとなりすべての音響エネルギーが海底下に透過することが分かる。このように海底堆積層の音響特性が、海洋内の音波伝搬に大きな影響を与えることが考えられる。

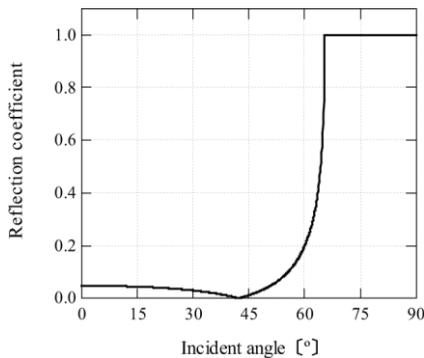


図 6・3 斜め入射時の反射係数の変化

■参考文献

- 1) 海洋音響学会編, “海洋音響の基礎と応用,” 成山堂書店, pp.7-13, 2004.
- 2) R.J. Urick 著, 三好章夫訳, “水中音響学,” エスケイビー社, p.108, 2007.
- 3) K.V. Mackenzie, “Nine-term equation for the sound speed in the Ocean,” J. Acoust. Soc. Am., vol.70, no.3, pp.807-812, 1981.
- 4) W. Munk, P. Worcester and C. Wunsch, “Ocean Acoustic Tomography, Cambridge University Press, London, 1995.
- 5) F.H. Fisher and V.P. Simons, “Sound absorption in sea water,” J. Acoust. Soc. Am., vol.62, no.S1, pp.S13-S13, 1977.

■1 群 - 10 編 - 6 章

6-2 海洋の計測

(執筆著者：蜂屋弘之) [2010年3月]

6-2-1 水中での位置の計測

船や潜水船などの航走体や、水中物体など位置を知りたい物体（以下測定目標）の位置決定を行うには LBL (Long Base Line), SBL (Short Base Line), SSBL (Super Short Base Line) 方式がある。この名称は測位に用いる送受波器の間隔であるベースラインの長さによる。

(1) LBL 方式

LBL 方式は、図 6・4 に示すように海底に 3 個以上の基準点を設置し、その基準点座標上での測定目標の位置を求める方式である。この基準点間の距離が相対的に長いので Long Base Line 方式と呼ばれる。基準点にはトランスポンダと呼ばれる装置が設置される。トランスポンダは音響による質問信号を受信すると応答信号を送信する。この結果、潜水船などの測定目標が信号を送るとトランスポンダまでの往復の伝搬時間 I を観測できることになり、水中の平均音速 c を用いれば、 $R=c \cdot t/2$ とトランスポンダまでのスラントレンジ (slant range: 斜距離) R が求められる。

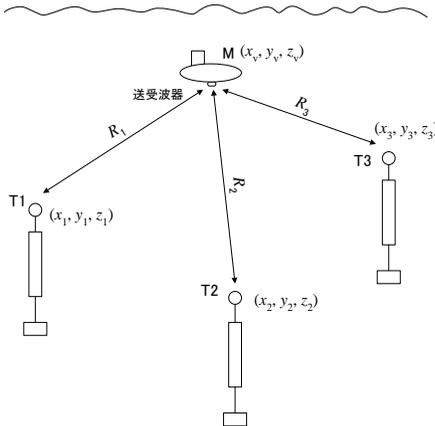


図 6・4 LBL 方式による測位

トランスポンダ 1 個の応答では、伝搬距離で決まる半径をもつ球面上のどこかにいることになる。トランスポンダ 2 個 (T_1, T_2) の場合は、 T_1, T_2 を中心とする二つの球面 A, B が交差した円周 S の上のどこかにいることしか分からない。トランスポンダが 3 個 (T_1, T_2, T_3) となれば二つの球面が交差した円周と T_3 を中心とする球面 (三つの球面) が重なることで形成される二つの交点どちらかに測定目標があることになる。4 個のトランスポンダがあれば、最終的に一つの 3 次元位置が決まることになるのが、位置測定の基本原理である。3 個のトランスポンダでは、 T_1, T_2, T_3 がつくる平面の面対称な位置に解が 2 点存在する。1 点に決定するためには、数学的にはもう一つの基準点が必要になるわけであるが、実際上はトランスポ

ンダが海底付近に設置されているため面対称の位置にあるもう一点は現実的な解ではないなど既知の情報があるので、通常は三つのトランスポンダがあれば測定目標の位置が決定できる。これは、GPS による位置計測と同じ原理である。三つのトランスポンダの質問信号と応答信号は周波数を変えるなどして混信を防いでいる。

(2) SBL (Short Base Line) 方式

SBL 方式は、一般に海上船舶と海底または曳航体などに設置されたトランスポンダとの相互位置を測定するために用いられる。船底に3個から4個の受波器と1個の送波器を設置し、送波器から海底に設置または潜水船などに装備したトランスポンダへの質問信号に対する応答信号を各受波器で受信し、往復の伝搬時間を測定して得られる距離からトランスポンダとの相対位置を算出する。船上側にベースラインが設けられ、ベースライン長が測定目標までの距離に対して短い、基本的な原理はLBLと同様である。

(3) SSBL (Super Short Base Line) 方式

SSBL 方式は、LBL、SBL 方式のような複数の伝搬時間を用いるのではなく、音波の波長と同程度と非常に短い間隔で設置された受波器アレーを用いて、音波の到来角度を受波器間の位相差として測定し、受波器アレーと一つのトランスポンダ間の伝搬時間から求められる距離と組み合わせて、図 6・5 に示すように位置を計測する方法である。USBL (Ultra Short Base Line) と呼ばれることもある。

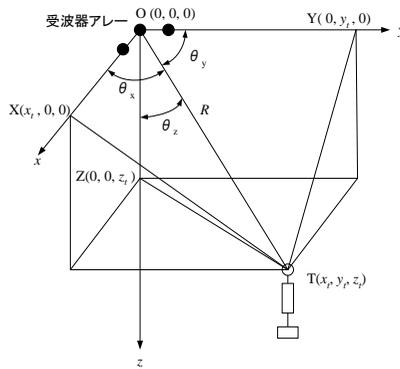


図 6・5 SSBL 方式による測位

3 次元的な音波の到来方向を求めるためには、最低三つの受波器を用いることが必要である。図 6・5 において、 xy 平面に受波器アレーがあれば、 OXT 、 OYT 平面で測定される音波の到来角度 θ_x 、 θ_y を用いると、 OZT 平面内での音波到来角度 θ_z は、

$$\cos^2 \theta_z = 1 - \cos^2 \theta_x - \cos^2 \theta_y \quad (6 \cdot 6)$$

を満たす。測定目標の位置は、

$$\begin{aligned} x &= R \cos \theta_x & y &= R \cos \theta_y \\ z &= R \sqrt{1 - \cos^2 \theta_x - \cos^2 \theta_y} \end{aligned} \quad (6 \cdot 7)$$

となる。z はマイナスとなる解もあるが、図のような標準的な場合は、受波器アレーとトランスポンダの相対関係からプラス側のみ考えればよい。R はトランスポンダと受波器間の斜距離で、船上とトランスポンダ間の音波による質問・応答の伝搬時間から求められる。SSBL方式は、SBL方式よりも更にベースラインの長さが短いので、誤差解析の結果示したように、xy方向の位置精度はよくない。しかし、実装がSBL方式より更に容易で効率のよい測定が可能である。

6-2-2 水中における速度の計測

水中における超音波のドップラー効果を利用し、移動体の前後方向及び左右方向の対地または対水速度を測定する装置をドップラーソナーと呼ぶ。ドップラー効果を用いて船速の測定に利用する場合は、音波のビームを海底に向けて送波する。図6・6に示すように船底に前後対称に音波を送波することを考える。適当な周波数の音波を用いて、海底からの反射波が得られれば、対地速度に対応したドップラー周波数を測定できる。

水平方向の速度成分を v_x 、垂直方向の速度成分を v_y とすると、前方に送波された音波の周波数 f_0 と反射波の音波の周波数 f_r の差であるドップラー周波数 $f_{d1} = f_0 - f_r$ は、速度成分が音速 c に対して十分小さい ($c \gg v_x$, $c \gg v_{xy}$) とし、近似的に

$$f_{d1} = \frac{2(v_x \sin \theta + v_y \cos \theta)}{c} f_0 \quad (6 \cdot 8)$$

である。また、後方に送波された音波の反射波のドップラー周波数 f_{d2} は

$$f_{d2} = \frac{2(-v_x \sin \theta + v_y \cos \theta)}{c} f_0 \quad (6 \cdot 9)$$

となる。前方、後方に送受波された音波のドップラー周波数の差を用いれば

$$v_x = \frac{(f_{d1} - f_{d2})c}{4f_0 \sin \theta} \quad (6 \cdot 10)$$

となり、水平方向成分 v_x が求められる。同様に、ドップラー周波数の和を用いれば、

$$v_z = \frac{(f_{d1} + f_{d2})c}{4f_0 \cos \theta} \quad (6 \cdot 11)$$

となり垂直方向の速度成分を v_z が求められる。このように速度の垂直・水平成分を分離できることがビームの対称配列の一つの利点である。更に、この値はビーム方向が垂線に対して傾いていた場合、前後のビームで効果が逆となるため、前後方向に音波を送波した計測を用いることで、単一ビームによる計測に比べ、誤差を小さくすることができる。

ドップラーソナーは船舶の離着岸時の衝突・接触を避けるため微速制御の監視に活用されることも多いが、前後方向だけでなく左右方向の移動や回転なども検出する必要がある。そのため、音波ビームは前後方向だけでなく左右方向の運動も検出できるように設定されている。前後・左右の4方向にビームを形成する方法、3方向でこれを兼ねる方法などがある。

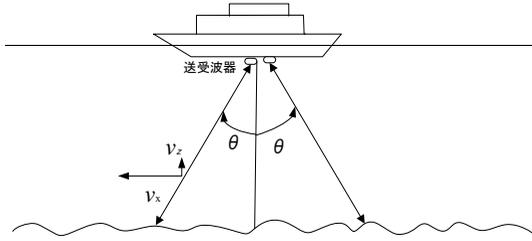


図 6・6 ドップラーソナーによる対地速度計測

6-2-3 海底面の計測

海底面の形状を精度良く効率的に計測する方法としてマルチナロービームを用いた計測装置について述べる。図 6・7 に示すように、船の進行方向に対して縦方向に一系列の送波器群を、横方向に受波器群を配置する。送波ビームは船の左右に広く前後に狭い扇形をし、受波ビームは左右が狭く前後が広い扇形をしている。この結果、送波用及び受波用のファンビームの重なった部分に、指向幅の狭いビームが合成される。

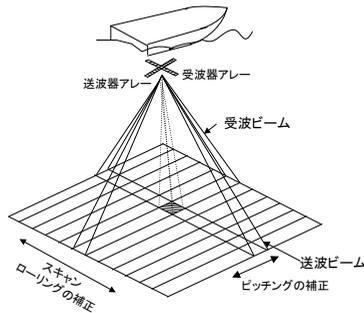


図 6・7 マルチナロービームを用いた海底面計測

この音響ビームは指向特性が非常に鋭いので、船の動揺に対して正確に音響ビームが船の直下を向くように、船体の動揺をパーティカルジャイロなどで計測し、複数の送波器ごとに超音波の位相を電子的に変化させ、常に真下にビームが向くようにしている。一方、受波は複数の受波器により受波された信号に時間遅延をかけて信号位相を制御することにより一回の受波で複数方向の反射波を分離して検出する。船の動揺による影響も補正している。こうして一度の送波で複数のビームによるスキャンを行うことができ効率よく精密な海底地形の調査が行われている。

6-2-4 海洋の広域計測手法

従来の海洋観測では m 個の測定点から m 個の点観測値が得られる。しかし、海洋中に s 個の送波器と r 個の受波器を設置し、音波を送受波器間に伝搬させれば、図 6・8 に示すように水平方向に計 $r \times s$ 個の経路が存在し、従来の点観測に比べ、非常に広い範囲の情報を得る

ことができる。更に、音源・受波器対を含む垂直面内には p 個の分解可能な音波伝搬経路がある。深度数千 m、距離数百 km の海洋伝搬では、分離できる音波伝搬経路は通常 10 程度である。これらの経路は別々の垂直軌道を持ち、かつ音源と受波器の深度を適当に調整すると、海面から海底付近まで音波が通過するようにでき、深度方向の情報も得られる。これらの経路を伝搬する音波伝搬時間は、温度により変化する音速と海流の流速の情報を含んでおり、逆問題を解くことにより、温度分布・流速構造の推定が行われる。周囲の計測情報から内部の音速分布、流速分布を求める手法は海洋音響トモグラフィと呼ばれる。

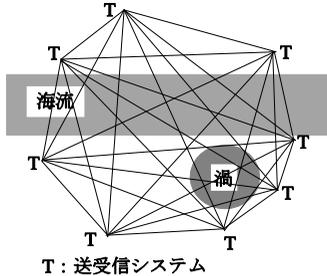


図 6・8 海洋音響トモグラフィの送受波器配置

深度 z 、距離 x の地点の音速が $c_0(x, z)$ とすると、ある一対の送受波器間を音速分布と送受波器配置によって決まる経路 Γ に沿って伝搬する音波の伝搬時間 T は

$$T = \int_{\Gamma} \frac{ds}{c_0(x, z)} \quad (6.12)$$

と記述できる。 ds は Γ に沿った微小距離である。音速が温度により $\delta c(x, z)$ だけ変化し、更に流速が $u(x, z)$ であるとする、伝搬時間は

$$T^{\pm} = \int_{\Gamma} \frac{ds}{c_0(x, z) + \delta c(x, z) \pm u(x, z)} \quad (6.13)$$

となる。符号 \pm は、流れに沿って音波伝搬する場合を $+$ 、逆らって伝搬する場合が $-$ をとる。伝搬経路 Γ は音速変化、流速によって大きく変化しないと近似している。このとき、双方方向の伝搬時間の和と差を用いて

$$\begin{aligned} \Delta s &= \frac{1}{2}(T^+ + T^-) - T \approx \int_{\Gamma} \frac{c_0 - \delta c}{c_0^2} ds - T = - \int_{\Gamma} \frac{\delta c}{c_0^2} ds \\ d &= \frac{1}{2}(T_n^+ - T_n^-) \approx - \int_{\Gamma} \frac{\delta c}{c_0^2} ds \end{aligned} \quad (6.14)$$

である。このように双方方向の伝搬を行えば、伝搬時間の中に含まれる温度変動による音速変化の成分 Δs と、流速による成分 d を分離して観測できる。

■1群 - 10編 - 6章

6-3 水産音響

(執筆者：古澤昌彦) [2009年3月]

水中音響の1分野としての水産音響は、魚群探知機に代表される漁業用音響技術、計量魚群探知機に代表される水産調査用音響技術、水生生物の発音や聴覚を扱う生物音響の分野からなるが、ここでは前二者を扱う。

6-3-1 水産音響の基礎

水産音響の対象は、魚類が主ではあるが、イカなどの軟体動物、クジラなどの水生哺乳類、最近では海藻やプランクトンまで、すなわち水生生物のほとんどに及んでいる。周波数15～500 kHz程度の音波で、数ms程度の短いパルスを送波し、そのエコーをとらえるパルスエコー法を応用することが多い。現在では、大きさが0.1 mmオーダーのカイアシ類などの動物プランクトンを数MHzの音波で計測する技術や、1 kHzといった低い音波で鰾の共振を利用する方法も出現している。

魚の音響探知や各種計測の基礎は、ソーナー方程式である。1尾の魚のエコーの音圧の2乗(強さ)は、図6・9に示したように、 P_0 を送波音圧、 r を魚までの距離、 $D(\theta)$ を指向性関数、 α を吸収係数、 T_S をターゲットストレングス(略称TS)の線形量(dB量との関係は $TS = 10\log T_S$)とすると、

$$P^2 = P_0^2 D^4(\theta) \frac{1}{r^4 10^{0.2\alpha r}} T_S \quad (6 \cdot 15)$$

となる。

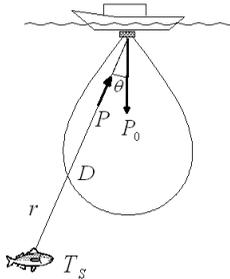


図 6・9 単体エコーのソーナー方程式

ビームに対して大きな魚群の場合のソーナー方程式は、 c を水中音速、 τ をパルス幅、 Ψ を等価指向角、 S_V を体積散乱強度(略称SV)、 Ω を立体角、 n を分布密度とすると、体積散乱理論により

$$P^2 = P_0^2 \frac{1}{r^2 10^{0.2\alpha r}} \frac{c\tau}{2} \Psi S_V$$

$$\Psi = \int_{4\pi} D^4 d\Omega \quad (6 \cdot 16)$$

$$S_V = n T_S$$

となる。残響体積が r^2 の特性で増加するので、距離特性が $1/r^2$ となる。魚群がビームの開きに対して大きくない場合は、 Ψ の積分範囲は魚群の存在範囲としなければならない。

魚の TS は上式からも分かるように、水産音響における中心的ファクターであり、理論モデルによる方法、制御状態で計測する方法、自然状態で計測する方法などにより、研究されてきた。TS を決める要因は、大きさ、周波数、鰾 (有鰾魚の場合)、体の質 (無鰾魚の場合)、姿勢などがあり複雑である。しかし、有鰾・無鰾の別と姿勢分布が分かれば、幾何散乱領域においては、大体

$$TS = TS_{cm} + 20 \log L \quad [\text{dB}] \quad (6 \cdot 17)$$

によって与えることができる。TS_{cm} は魚の体長 L を cm 単位としたときの規準化 TS である。図 6・10 は、日本産主要魚種について 4 周波で測定した規準化 TS を示した (文献 1)。最大 TS (姿勢を変えたときの最大値) と、遊泳姿勢が 5° 頭を下げた状態を平均、標準偏差が 15° の正規分布に従うとして平均した姿勢平均 TS を示している。

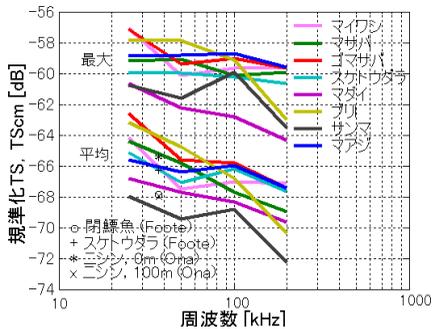


図 6・10 日本産有用魚種の規準化ターゲットストレンクス

6-3-2 漁業用音響技術

水産音響技術は魚群探知機を中心として発達してきた。現在では、高度デジタル化、液晶画面を利用した各種のカラー表示、次項で述べる計量魚群探知機の技術を取り入れた魚体長や魚群量などの定量化、GPS やレーダとの複合化などの方向に発展している。図 6・11 に市販の魚群探知機の周波数とビーム幅の関係を、送信パワーをパラメータとして示した。一般に、高周波は高分解能 (ビーム幅小) となり、高パワーでは送受波器を大きくする必要からビーム幅が小さいことが分かる。

魚群探知機は自船の直下付近しか観測できないので、遠方も探知できるようにビームを面的に走査する漁業用ソナーが活用されている。送受波器を機械的に旋回するサーチライトソナー、円筒状アレイを用い傘型の面内を高速電子走査する全周スキヤニングソナー、球状アレイもしくは円筒と半球アレイの合成によって各種の走査が可能な全方向ソナーなど各種のソナーが出現している。漁業用ソナーは、もとは大型旋網船から導入が始まったが、現在では中型以上の各種の漁船に搭載されるまでになった。

多層ドップラー流速計 (ADCP) と同じ原理で、3 層の流速を調べる漁業用のドップラー潮

流計も多く使用されている。この装置ももとは旋網の網なりを予想するために導入されたが、現在では多くの漁船に搭載され、船速計（ログ）としても使用されている。

そのほか、トロール網の網口の監視用のトロール用魚群探知機やソーナー、旋網の裾の深度を監視する網深度計など、魚網の監視に超音波機器が活用されている。

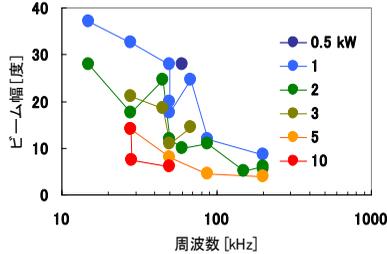


図 6・11 市販魚群探知機の周波数とビーム幅の関係（古野電気(株) 提供）

6-3-3 水産調査用音響技術

魚の量を測定する原理は、式(6・16)の体積散乱理論であるが、ビームより大きな魚群という条件は一般に満たされず、疎に分布する魚の計量も必要である。そこで、次式によるエコー積分方式が開発された。

$$\langle P^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i^2 \quad (6 \cdot 18)$$

すなわち、時間軸（距離 r 軸）をそろえ、式(6・15)及び式(6・16)のエコーパワー P^2 をエコー種別にかかわらず、多くの送信回数 N または広域に対して集合平均する。この結果を式(6・16)の P^2 の代わりに使えば、魚のいない空間も含む平均 SV を得ることができる。それを調査海域の平均 TS で割り、調査体積をかけて、資源尾数を求めることができる。

平均 TS を決定するには、式(6・17)の規準化 TS を与えればよいが、極力調査域で自然状態の TS を計測し、規準化 TS の精度を上げたい。そこで、最近の計量魚群探知機ではスプリットビーム法を用いた TS 測定機能を備えている。スプリットビーム法は $SSBL$ 音響測定と同様に、受波器を4分割し、前後・左右方向のエコーの到達時間差を位相差として測定し、魚の方位を知り、それにより式(6・15)の D を知る。

魚に超小型の超音波送信機（ピンガ）を装着して、主に魚の行動生態を調べるバイオテレメトリー技術が活躍している。ピンガ音を調査船で追跡する方式、ハイドロフォンを適当に離して配置してピンガ音の到達時間差から LBL 方式で行動を知る方式、また、コード化した音波を定置受信器で受け、付近をピンガを装着した魚が通過したことを知る待ち受け方式が、それぞれ用途と対象によって使い分けられる。

■参考文献

- 1) Y. Miyahana, K. Ishii, and M. Furuswa, "Measurements and analyses of dorsal-aspect target strength of six species of fish at four frequencies," Rapp. P.-v. Reun. Cons. int. Explor. Mer, vol.189, pp.317-324, 1990.

■1 群 - 10 編 - 6 章

6-4 水中通信

(執筆者：越智 寛) [2009 年 4 月]

海水中では、電磁波の減衰が大きいため、ほとんどの場合音波が用いられている。特に通信距離が数百 m 以上では音響以外の手法はない。しかしながら、使用帯域が制限されること、多数のまた時間スプレッドの大きなマルチパスが存在すること、深度により異なる音速による音波の屈折が生ずること、フェージング、大きな時間的变化、音速が比較的遅いことによる大きなドップラシフトが生ずることなどのために、水中音響通信路は、高速通信にとって極めて厳しい通信路である。このような通信路における通信を実現するための研究が様々な行われてきた。ここ 30 年における音響通信の進展の歴史が、文献(1-4)においてレビューされている。また、これまで浅海域での高速通信は極めて困難であるとされてきたが、近年は、浅海での通信も様々な進展を見せている。

6-4-1 通信路等化

水中音響通信路は、特に浅海域においては、海面や海底面での反射・干渉により多数のマルチパス波が混入する(図 6・12)。音速が約 1,500 m/s と遅いために(空中の音速に比べれば約 5 倍の速さであるが、電波に比べれば約 2 万分の 1 である)、これらの遅延拡散量は非常に長いものとなる。更には、送受波器の相対運動、海面の波浪風浪、内部波などによって急激な時間変化が生じ、これらによって大きなドップラ拡散が発生し、通信路特性が時々刻々と変化する。これらに対処するために、位相遷移変調(PSK: Phase shift keying)のような振幅一定のコヒーレント変調方式と適応判定帰還型等化器(DFE: Decision feedback equalizer)、空間ダイバーシティを組み合わせたものがしばしば用いられる⁵⁾。図 6・13 に、復調機の例⁶⁾を示す。この復調機は位相補償ブロックをもち、ドップラ補償も組み合わせて行うようになっている。また、K チャネルの入力をもち、チャネルごとにフィードフォワードのフィルタリングを行い、位相補償を行った後、合成してシンボルレートで信号判定を行い、その結果をフィードバックフィルタで補正している。また、フィードフォワードフィルタ、フィードバックフィルタの係数は、1 シンボルごとに(アダプティブに)更新していき、通信路の変化に追従できるようにしている。更新アルゴリズムとして、LMS (Least mean square)、RLS (Recursive least-squares) アルゴリズムがよく用いられる。これらの通信路等化技術を用いて、高速音響通信が実現されてきている。

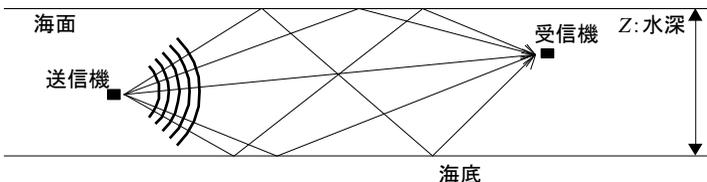


図 6・12 水中通信路の音波伝搬模式図

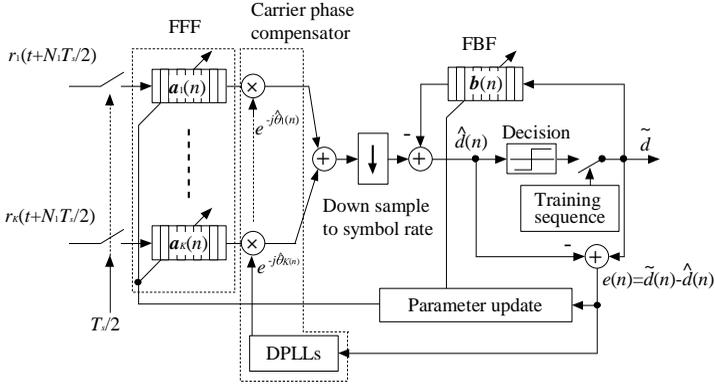


図 6・13 マルチチャンネル DFE 受信機のブロック図

6-4-2 マルチキャリア変調

広帯域の単一搬送波を用いた変復調方式による水中音響通信の研究・開発が徐々に進められてきたが、近年、許容伝送帯域を多数の狭帯域に分割し、多数の搬送波を用いて通信を行う方式についての研究が進められてきている。従来からマルチキャリアの通信も行われていたが、各サブキャリアの間にガード帯域を設けて、サブキャリア間の干渉を防ぐことが行われていた。したがって、許容帯域内に使用しない周波数帯域が存在し、周波数利用効率の面で不利になっているとともに、各サブキャリアに対して従来の変復調方式を適用していた。これに対し、各サブキャリアに互いに直交性をもたせることにより、図 6・14 に示すように、周波数軸上において重なりが生ずるほどにサブキャリアの周波数を近づけることができ、帯域の有効利用が図れるにもかかわらず、各サブキャリアが互いに干渉しないように配置が可能な、直交周波数分割多重 (OFDM : Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) 方式が用いられるようになった。図中の T_s はシンボルレートであり、 Δf はサブキャリアの周波数間隔である。これらのサブキャリアは、FFT アルゴリズムを用いて効果的に識別可能であり、複雑な時間領域での等化器を構成せずとも、復調器が比較的簡単に実現できる。OFDM においては、同じ帯域の広帯域単一キャリアの変調と同程度のデータレートをもつ。すなわち、低変調速度の多数の狭帯域信号の組合せとみなせる。このことから、通信路等化器が簡単に構成できる。

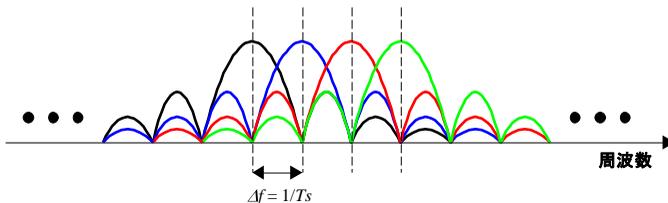


図 6・14 OFDM 変調信号の周波数配置

マルチパスによる符号間干渉の影響を取り除くために、通信路で発生する最大遅延よりも長いガードインターバルを挿入することにより、OFDM における等化は比較的簡単に行うことができる。このガードインターバルは、サブキャリアの直交性を維持するためにシンボルの最後の部分をコピーしたものが用いられる。

OFDM の狭帯域サブキャリアはドップラシフトに極めて敏感である。水中音響通信におけるキャリア間隔周波数が運動に伴う通常のドップラシフトに比べて低い場合、通信システムは広帯域ドップラに対応しなければならない。OFDM の場合にはサブキャリアをまたがる不均一ドップラシフトを引き起こす。ドップラ補償の最尤解を求める計算は非常に膨大なものであるため、より簡単な解が必要である。ドップラシフトの補償アルゴリズムについて文献 7, 8) のように、いくつかの提案がなされている。水中音響通信路では、サブキャリアの直交性を保持することが難しいといわれてきたが、近年のドップラ補償アルゴリズムの進展により、実現されるようになった。

■参考文献

- 1) M. Stojanovic, "Recent Advances in High-Speed Underwater Acoustics Communications," IEEE J. Oceanic Eng., vol.21, pp.125-136, 1996.
- 2) D.B. Kilfoyle and B. Baggeroer, "The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry," IEEE J. Oceanic Eng., vol.25, pp.4-27, 2000.
- 3) M. Chitre, S. Shahabudeen, L. Freitag and M. Stojanovic, "Recent Advances in Underwater Acoustic Communications & Networking," Proc. Oceans'08, Quebec, Canada, CD-ROM, 2008.
- 4) 海洋音響学会編, "海洋音響の基礎と応用," 成山堂書店, 東京, 2004.
- 5) M. Stojanovic, "Adaptive multichannel combining and equalization for underwater acoustic communications," J. Acoust. Soc. Am., vol.94, pp.1621-1631, 1993.
- 6) H. Ochi, Y. Watanabe and T. Shimura, "Experiments on Acoustic Communication with Quadrature Amplitude Modulation in Multipath Environment," Jpn. J. Appl. Phys., vol.43, pp.3140-3145, 2004.
- 7) M. Stjanovic and L. Freitag, "Low Complexity OFDM Detector for Underwater Acoustic Channels," Proc. Oceans'06, Boston, Mass., CD-ROM, 2006.
- 8) B.S. Sharif, J. Neasham, O.R. Hinton and A.E. Adams, "A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communications," IEEE J. Oceanic Eng., vol.25, pp.52-61, 2000.