

水中音響通信システムの研究開発 ～Time Reversal - MIMO 通信と適応信号処理～

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 技術研究開発部門
海洋技術研究センター 水中音響技術研究グループ

出口 充康

はじめに

地球表面の約71%を占める海洋は、資源開発や安全保障の観点から極めて重要であるとともに、地球温暖化に伴う人間活動に起因する熱のおよそ90%を貯蔵する「熱浴」であることから、気候変動分野においても注目を集めている¹⁾。その広大な海域を調査・探査するため、これまで様々なロボティクス技術が用いられてきた。具体的には、研究者が自ら深海へ赴くための有人潜水船をはじめ、おもりにより沈降・着底して自律観測を行うランダーシステム、ケーブルを介して洋上オペレータがリアルタイム操作する遠隔型無人探査機ROV (Remotely Operated Vehicle)、およびケーブルに頼らず自律的に海中を探査できる自律型無人探査機AUV (Autonomous Underwater Vehicle) などが挙げられる。

これらの探査システムのうち、ROVを除くシステムはいずれも非有線（ケーブルレス）で運用される。そのため、運用中の制御や探査計画の変更、システム状態および収録データのリアルタイムモニタリングなど、水中における無線通信を必要とする場面は枚挙に暇がない。

しかし、陸上とは異なり、海水中では電磁波

が著しく減衰するため、通常われわれが陸上で用いている通信技術は必ずしも有効ではない。従って、音波を用いた通信、すなわち「水中音響通信」が不可欠となり、各国で精力的な研究開発が進められてきた。

本稿では、海洋研究開発機構（JAMSTEC）における取り組みを中心に、水中音響通信の最新の研究開発動向について解説する。

水中通信における波動伝搬とチャネル特性

陸上では電磁波を用いた通信が主流であるのに対し、海水中では電磁波の伝搬が困難であるため、水中音響通信が必要とされる。本節では、電磁波の伝搬限界について説明した後、水中音響通信固有のチャネル特性を簡潔に紹介する。

(1) 水中における電磁波・光通信の限界

質量比で海水の約96.5%は水分子であることから²⁾、電磁波に対する応答は基本的に純水中の物理特性に依存する。可視光より低い周波数（電波・赤外線）領域では水分子の配向分極や分子振動によってエネルギーが吸収され、可視光より高い周波数（紫外線以上）領域では電子励起などの物理現象によって吸収される。

これらの吸収メカニズムが存在しない領域と

して、純水中では目安として配向分極以下の低周波帯（数百 MHz 未満）と可視光領域で電磁波が伝搬可能となる。しかし、低周波領域における海水の電磁波応答は、純水とは大きく異なる³⁾。これは、海水には塩分（ナトリウムイオンや塩化物イオンなど）が含まれており、高い導電率を示すことに起因する。低周波の電場が印加されると、イオンの並進運動が水分子との衝突を引き起こし、結果としてそれらの運動エネルギーが熱として拡散する。更に、高周波化に伴う表皮効果や分子振動吸収の影響により、100kHz 以上の電波から赤外線に至る広大な周波数帯において電磁波は急速に熱変換されることから、それらの周波数帯を使用することは非常に困難である。

従って、海水中での電磁波通信としては可視光が主要な手段となる。しかし、海水中の光の波長がサブミクロンオーダーであるため、マリンスノーや懸濁物といった微小粒子による散乱の影響を強く受ける。その結果、非常に澄んだ海域であっても伝搬距離の上限は100m オーダーにとどまる。

一方、音波は適切な周波数を選択することで数 km～数百 km 以上まで伝搬させることが可能である。そのため、海水中において100m を超える通信距離を必要とする多くのアプリケーションにおいて、水中音響通信は不可欠な技術

となる。参考として、音波および電磁波通信におけるデータレートと通信距離の関係例を図1に示す。なお通信性能は使用装置や海域環境に大きく依存するため、本図は厳密な規定値ではなく、あくまで一般的な傾向を示す目安である点に留意されたい。

(2) 音波伝搬の物理特性と水中音響チャネル

前項で述べた通り、100 m 以遠の中・長距離の海中通信には音波が用いられるが、一般的な陸上通信と同様に、通信品質の上限は信号対雑音比 SNR (Signal to Noise Ratio) によって規定される。

SNR を見積もるにあたり、まず音響信号のエネルギー伝搬に注目すると、伝搬損失は海水による吸収損失と幾何減衰に大別される。幾何減衰は、エネルギー保存則に従い音波の拡散に起因して生じる減衰であり、周波数に依存しない減衰量を示す。一方、吸収減衰は海水の物理的性質によって生じるエネルギー減衰である。およそ 1 MHz より低い周波数ではホウ酸や MgSO_4 (硫酸マグネシウム) の化学的平衡状態が音波によって破られることでエネルギー吸収が生じるのに対し、およそ 1 MHz 以上の高周波領域では水分子の粘性によるエネルギー吸収が見られる。実際に観測される音波のエネルギーは、これらの減衰メカニズムによって減衰

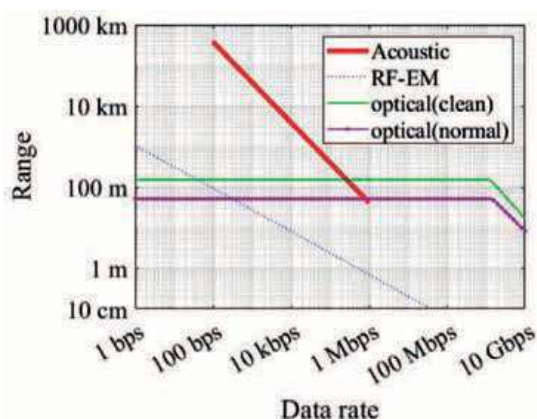


図1 水中通信におけるデータレートと通信距離との関係（文献4）を参考に作成）

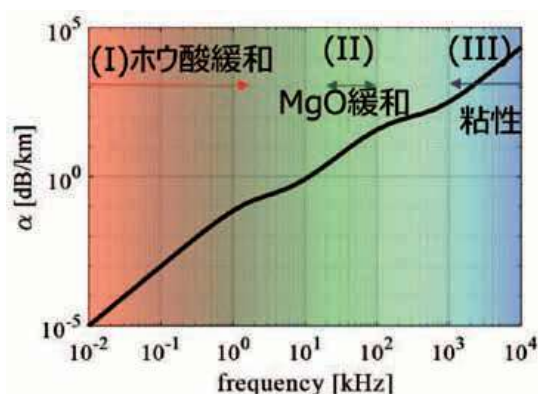


図2 吸収減衰計算例（文献5）～6）を参考に作成）