

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月28日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21560842

研究課題名（和文） 海水分子運動を考慮した深海中の電磁波伝播特性とアンテナの最適化に関する基礎研究

研究課題名（英文） Study of Underwater Electromagnetic Wave Propagation Based on Motions of Sea Water Molecules

研究代表者

吉田 弘（YOSHIDA HIROSHI）

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・グループリーダー

研究者番号：00359134

研究成果の概要（和文）： 実験的に、海中でも短波帯(数 MHz 程度まで)の電波が伝搬する可能性があることを見出した。この結果を検証し、かつ理論的に説明する為に、Maxwell の方程式において、海水個々の分子の電磁波応答を考慮する必要があると考えた。そこで、色々な環境で海中の伝搬を計測するとともに、モデルを考えて検討を進めた。結果、海中を電波が伝搬できるという、いくつかのデータを得たが、事象を説明可能なモデル構築までは達成できなかった。整備した実験ツールで今後も検証を進めたい。

研究成果の概要（英文）： We obtained some data which shows us that high frequency electromagnetic wave may propagate in sea water over hundreds meters. To describe this phenomenon, we prepared some propagation models taking motions of sea water molecules into account. But we did not achieve establishing an optimal model for the explanation. We intend to continue the study by using the tools made.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：海洋工学・電磁物理

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海中電磁波伝搬、海中分子運動、深海技術

1. 研究開始当初の背景

海中で電波が使えたら、という思いは、陸上や宇宙で電波通信の恩恵を受けている私たちとしては当然である。しかし、常識的には海中に入射した電波は、その導電率により急激な減衰が生じてしまう。2004年にリバプール大学の Lucas, Al-shamma'a らは実験的研究により、実際には短波帯の電波でも海中を伝搬できるが、アンテナ近傍での減衰量が大きいために観測にかかりにくい、とい

う論文を発表した。また彼らは、海中に浸すアンテナを真水で覆うとアンテナ効率が向上することを示していた。一方、本研究を実施した本人も彼らの実験結果と類似したデータを得ていたが、アンテナ周囲を真水のバッファ層で囲むと良いことは発見していなかった。彼らの得た知見を参考に、海中の電磁波伝搬基礎研究を進めるためには、海水を微視的に、つまり分子の運動を考慮してモデルを考えて行かなければならない。その立場

に立った実験的研究を開始した。

2. 研究の目的

海水をマクロな物質（導電率 σ 、誘電率 ϵ で表される均一で一様な媒質）として扱わずに、海水をマイクロな物質ととらえて海水を構成する分子の運動を考慮することで、これまでに詳しく研究されてこなかった、深海水の微視的電磁波物理を明らかにしていく。その物理に基づき、深海電磁波伝播特性を把握すると共に、電磁波エネルギーを深海中に効率良く放射するためのアンテナの基礎研究を実施する。この研究の成果により、これまでの「海中では電波は使用できない」という常識を打ち破り、極低周波から HF 帯（～30 MHz）までの周波数の電磁波を深海中で有効に使用できることを示したい。具体的には、これまで主として音波に限られていた海中通信や海中・海底探査のために、電磁波を利用することが出来るようにすることを目標としている。

3. 研究の方法

短波帯の海中伝搬特性を入念に調べるために、実際の海中で計測するためのアンテナと実験システムの構築、海水の電磁波透過特性をラボで調べるための、媒質を交換可能な導波管やファラデーケージの設計・製作、計測用アンテナシステムの設計・製作を行い、実験系を充実させた。また、並行してマクスウェルの方程式をコンピュータシミュレーションするために、通常の FDTD 法によるシミュレーションの他に、パーティクル法や、MHD 法によるシミュレーションコードを試作し、シミュレーションを行う。さらに、現象を説明するためのモデルを検討し、モデルの正当性を裏付けるために、パラメータを振った場合の特性等を検証する。

実験としては、周波数や出力を基本パラメータとして、実際の海中での電波伝搬特性をなるべく正確に測るようにした。（実海中では、潮流によりアンテナ姿勢が固定できない、周囲の物体により伝搬パスが形成されるなどの問題を取り除くことが難しい）ラボでは、カットオフ周波数の高い導波管を用いて、海水で満たした場合の信号伝達を観測することで、こういったモードで結合がされているかを示すデータを計測した。また、媒質を入れる空間を区分けした、シールド箱（ファラデーケージ）を製作し、媒質やパラメータを変えた場合の伝搬の状態を観測し、それらの変化から、モデルを検討した。

説明のためのモデルは、デバイの誘電体モデルを用い、論文等を参考に、パラメータ変更などを行いマクスウェルの方程式に入れて解く方法と、具体的な海水分子のクラスターモデルをイメージし、外部の電場磁場によ

ってそれらの分子がどのように振る舞うかを個別に検討するという2つのアプローチを取った。

4. 研究成果

(1) 実験1（実海水）

海洋研究開発機構岸壁における実験構成と結果を図1と図2に示す。海水との絶縁のために海水とアンテナの間にバッファ層を設けたダイポールアンテナを製作した。得られた伝搬特性はLucas¹の計測と似た特性を示した。近傍界では減衰が激しいが、遠方界では均一な媒質として計算した結果と異なり、減衰が緩やかになり、遠方まで到達する様相を示す。しかし、この計測は環境影響を受けにくく安定して計測が実施できるが、欠点は、海中以外のルート（たとえば、海底や岸壁の側面、ケーブル結合など）伝搬が計測値に含まれる可能性がある事である。そこで、同様のシステムで受信系のみ光ファイバケーブルを利用し、沖合で船から海中10mに吊下げて計測する試験も実施した。この試験ではアンテナ姿勢とアンテナ間距離を一定に保つことができず、正確なデータを得ることができなかった。

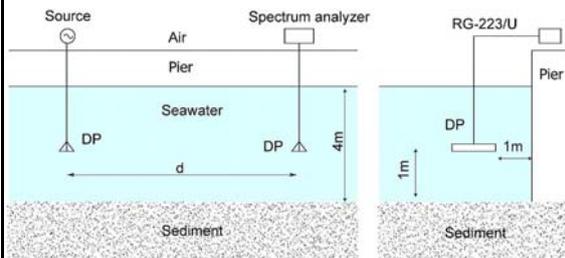


図1：実海中伝搬試験の実験構成．正面断面と側面断面図．

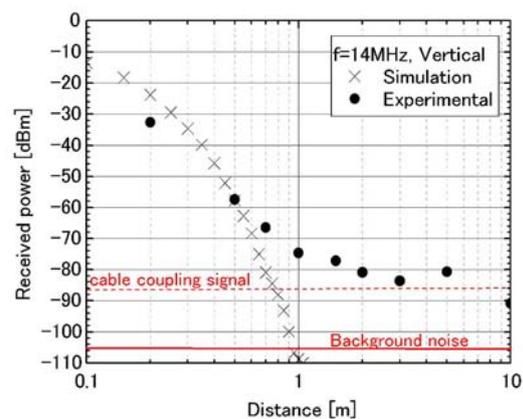


図2：実海中のHF帯電磁波伝搬特性．

¹ J. Lucas and C. K. Yip, “EM Wave Propagation in Seawater,” OCEANS’07 Tutorial, 18 June.

(2) 実験 2 (ラボ計測)

ラボ計測のために、周囲との相互作用を極力低減することができるファラデーケージ (図 3) を製作して伝搬計測を実施した。ケージの中は異なる媒質が入れられるようにアクリル水槽で 3 つに分離することができる。内寸は 100x40x41cm で、バッファ層は 25cm、伝搬層は 50cm とした。アンテナは絶縁ダイポールアンテナと絶縁ループアンテナの 2 種類を用意した (図 4)。それぞれの層の媒質を空気、水道水、海水 (擬似海水) とした場合の伝搬特性を計測した。表 1 に空気の場合を除いた組合せを示す。

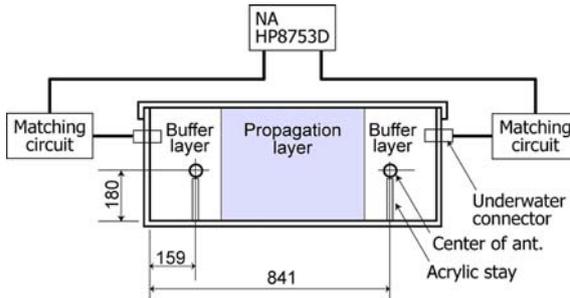


図 3: ファラデーケージの構造と試験接続図。

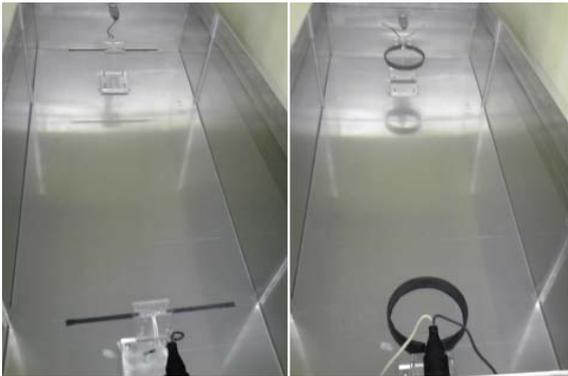


図 4: 水で満たしたファラデーケージとダイポール (左) とループアンテナ (右)。

表 1: 実験の組合せ

種別	組合せ		
	バッファ(L)	伝搬層	バッファ(R)
a	水道水	水道水	水道水
b	海水	海水	海水
c	水道水	海水	水道水

図 5 はファラデーケージの各層を表 1 の通りの組合せで伝搬計測した結果である。驚くべきことに、Type-C の伝搬層が海水で満たされている場合に、電磁波がケージのカットオフ周波数 (40MHz) 以上で伝搬している。この結果はすべての層を水道水で満たした場合の結果 (Type-A) と似ている。もちろん、バッファ層も海水で満たした Type-B は、電磁波

伝搬は観測にかからない。

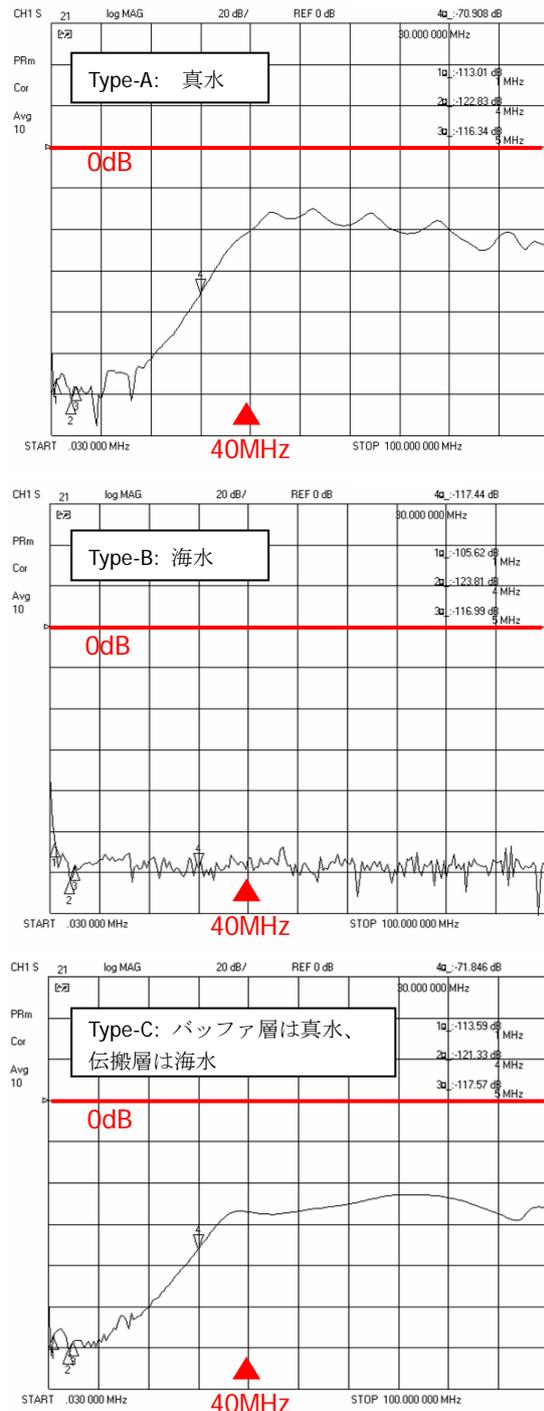


図 5: ファラデーケージで計測した電磁波伝搬の周波数特性。ダイポールアンテナの結果。

(3) 分子を考慮した検討

図 2 や図 5 の伝搬特性は、Maxwell の方程式で、海水を一樣均一な媒質 (導電率 σ 、誘電率 ϵ) として計算した場合にはあり得ない。そこで、電磁流体として海水をモデル化した。

Somraju²らの計算を参考にし、デバイの緩和率を計算に考慮しても、伝搬特性に大きな変化は得られなかった。つまり、短波帯の海水中伝搬は説明できない。

そこで、海水を図6のような分子レベルで直接的に考え、どのように電磁波が吸収されるかを根本的に考えた。

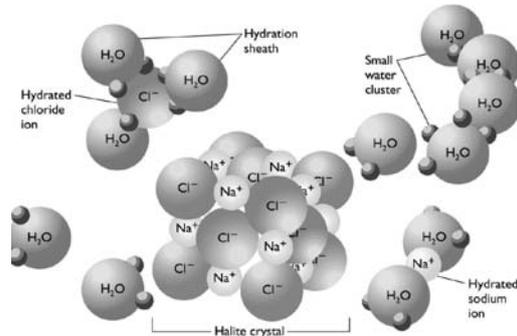


図6：海水分子の構成。

このようなハイドレーション構造にある各イオンを分離させ単独で運動させるためには10GV/mのオーダの電場が必要となる。また、クラスターのまま同サイズで動かすには100V/m程度は必要である。一方、図3の実験系の電界強度はアンテナ表面近傍で100V/m程度、伝搬層では0.1V/m程度である。また、Somrajuらは近傍界の電場強度では、海水の応答は変化しない事を確かめている。扱っている事象は、海水にも関わらず真水中の伝搬に似た特性であることから、水分子のみが伝搬に寄与していると考えられることもできる。可能性がある考え方は、遠方界（ポインティングベクトルで記述）の場合では、クラスターが応答せず水分子が振動し伝搬に寄与する、または、クラスターも分極しており振動に寄与するということであるが、この研究を終える時点ではその結論まで至らなかった。

(4) アンテナの構造

実験システムの構築を通して、様々なアンテナを設計製作した結果、アンテナは使用する波長のラジアン球(半径が $\lambda/2\pi$)以上の真水のバッファ層を有すると、高効率が見込まれることが分かっている。また、上述の中にも含まれていないが、実海域試験用にダイポールの他に、バッファ層付ループアンテナも製作している。

(5) その他

研究期間内に最終結論まで達せなかったが、試験設備を製作できたので、今後も引き続き資産を利用し研究を進めたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Hiroshi Yoshida, “Underwater Electromagnetics and Its Application to Unmanned Underwater Platforms,” Proc. Sym Underwater Technology 2013, UT2-13-1106, Tokyo, Japan, 2013. 査読無

② Yoshida, H.; Hyakudome, T.; Ishibashi, S.; Ochi, H.; Asakawa, K.; Kasaya, T.; Saito, T.; Okamoto, S.; "Study on Land-to-Underwater communication," 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 3-7 Oct. 2011, pp. 1-5. 査読有

[学会発表] (計2件)

① 吉田 弘, “海水中の電磁場応答に関する基礎研究 2,” 海洋理工学会・春季講演会 2013. 5. 17 東京海洋大学品川キャンパス

② 吉田 弘, “海水中の電磁場応答に関する基礎研究,” 海洋理工学会・春季講演会 2010. 5. 20 海洋研究開発機構東京事務所

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 弘 (YOSHIDA HIROSHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・グループリーダー

研究者番号：00359134

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

² Ram Somaraju and Jochen Trumpf, “Frequency, Temperature and Salinity Variation of the Permittivity of Seawater,” IEEE Trans. AP, 54, 11, pp. 3441-3447, 2006