平成31年度 防衛装備庁 安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書 「海水の微視的電磁場応答の研究と海底下センシングへの応用」

令和2年 5月 国立研究開発法人情報通信研究機構

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推 進制度による委託業務として、国立研究開発法人 情報通信研究機構が実施した平成31年度「海水 の微視的電磁場応答の研究と海底下センシングへ の応用」の成果を取りまとめたものです。 1. 委託業務の目的

1.0 委託業務の目的

本委託業務は、巨視的電磁場応答¹に加え、微視的電磁場応答²を考慮した海水及び海 底下媒質の電磁場応答に基づく、海底下埋設物検出に関する基礎研究を行う。

具体的には、海水中に設置するアンテナ周囲に真水等のバッファ層を設けることで、従 来とは異なる巨視的電磁場応答に関する研究に加え、これまで明らかになっていない海 水及び海底下媒質の微視的電磁場応答の解明を目指しつつ、並行してこれらの電磁場応 答に基づく海底下センシングシステムに関する研究を行い、海底下埋設物検出の高精度 化及び効率化を目指した基礎研究を行う。

微視的電磁場応答の研究については、効率良くエネルギー伝送が可能な周波数帯やア ンテナ等の指針が明らかになった段階で、その成果を海底下センシングシステムに反映 する。

海水及び海底下媒質の電磁場応答に基づく海底下センシングシステムについては、以 下の埋設物検出条件を満足することを最終目標に研究を実施する。

● 深度 200m 以浅において、海底面からの深さ数メートル以内、埋設物の表面積は数 + cm×数+ cm~1m×1m 以下、材料としては、誘電体又は金属及びこれらの複合物を検出 できること。

センシングシステムは海中プラットフォーム(作業型 AUV 等)に搭載できること。
海中プラットフォームの航行高度は海底面から1メートル以下であること。

※1:巨視的電磁場応答とは海水及び海底下媒質の誘電率、導電率及び透磁率等を一様・均一とみなした電磁場応答をいうが、アンテナ周囲に真水等のバッファ層を設けることで、これまでの海水中の電磁波応答とは異なる結果が部分的に得られている。

※2:微視的電磁場応答とは海水及び海底下媒質を構成する個々の分子やイオンクラ スターの特性を考慮した電磁場応答である。仮説ではあるが、特定の周波数では、分子や イオン等の寄与により、運動エネルギーへの変換率が低くなり、効率的にエネルギー伝送 ができる可能性を有する。

1

1.1 研究開始時に設定した研究目標の達成度

前節1.0で示した最終目標を達成するため、「電磁場応答特性の解明」、「電磁場応答モ デルとシミュレータの構築」、「浅部海底下埋設物検出方法の研究」、「海底下センシングシス テム製作と浅海域試験の実施」、以上4つの実施項目を設定するとともに、各項目には小項 目を設定した。図1-1-1に本研究における実施項目間の関係を示す。各実施項目における研 究目標の成果及び設定した目標への達成度について以下に述べる。



図 1-1-1 本研究における実施項目間の関係

実施項目1. 電磁場応答特性の解明

1-1 電磁場応答測定系の構築

海中における巨視的電磁場応答(周波数帯 10kHz から 10MHz まで)である Sパラメータ を測定するため、海中アンテナ、ネットワークアナライザ、各種センサ群(カメラ、CTD (電気導電率・水温・深度)計、傾斜計、高度計等)等を用いた測定系を構築した。測定系 の外観を図 1-1-2 に示す。この測定系には、実施項目 1-2 で製作する微視的電磁場応答セ ンサを搭載し、巨視的と微視的の電磁場応答を同時に測定できるよう、微視的電磁場応答セ ンサ搭載用インターフェースを用意した。海中アンテナは真水バッファ層を有するアンテ ナを採用し、アレイ構成における Sパラメータの測定が行えるよう、複数のアンテナを設置 できるようにした。各種計測機器及び制御機器は耐圧容器に収容し、光ファイバを介して、 船上からの制御及びデータ収集が行えるように構築した。浅海域における測定を想定して いることから、深度 50mまでの耐圧設計とした。埋設物に起因する微弱な電磁場応答を測 定できるよう、130dB以上の測定ダイナミックレンジを得るために、海中におけるケーブル 揺動による影響を受けないRFコネクタを海洋研究開発機構(再委託機関)において新規設 計し、各海中アンテナ及び耐圧容器におけるRFインターフェースのすべてに実装した。R Fコネクタの外観を図 1-1-3 に示す。通常のRFコネクタのように点で接触するのではな く、面で接触する構造を採用することで、海流によってコネクタへの圧力がかかった場合で も、安定した測定が行えるようになる。構築したこの測定系をベースとして、実施項目 4-1 における海底下センシングシステムの製作も実施した。以上のとおり、本実施項目について は、当初の計画どおり研究を実施し、研究成果をえることができた。関連成果は IEEE 主催 の国際会議(査読付)に投稿し、採録された[1]。



図 1-1-2 構築した電磁場応答測定系の外観



図 1-1-3 RFコネクタの外観

1-2 微視的電磁場応答の測定系構築

海水中における電波伝搬に関する新たな理論の構築をめざして、微視的電磁場応答の解 明に取り組んだ。表 1-1-1 に、海水中における巨視的及び微視的な電波伝搬の扱い方につい て示す。巨視的においては、海水を導電率・比誘電率・比透磁率によって表現するのに対し て、微視的においては海水を構成する粒子を個別に扱う。この考え方に従えば、「電磁波エ ネルギーが海水中の水分子のダイポールモーメントの振動子のみに寄与し、分子の移動や イオンの移動への寄与がほとんどない場合、海水中の電磁波は純水中と同じ損失量で伝搬 する状態が生じうる」という仮説が立てられる。

表 1-1-1	巨視的電磁場応答	と微視的電磁場応答との比較
---------	----------	---------------

	巨視的		微視的
•	海水の電磁気特性を ε, μ, σ の3つ のパラメータで規定 物質によっては ε のテンソル積 を用いる	•	水分子とイオン(クラスター) の電磁応答を個別に考える それぞれの粒子のエネルギーの 入出力を考慮
•	全体のエネルギーのみ表現	•	粒子毎のエネルギーを表現

巨視的な観測を通じて、微視的な現象を裏付けるデータ取得を目指した評価装置を開発 した。図 1-1-4 に示す計測用センサを開発した。一次試作の構造では、海水に浸かる給電ケ ーブルと海水との間で生じる容量結合が測定時に問題となった。これを踏まえて二次試作 を行い、ガード電極間を共通アースとする工夫を行っている。このセンサを用いた評価装置 として、図 1-1-5 に示す実験室水槽において任意の電磁場を印加できる装置と、海中におい て計測が行える装置を開発した。後者の評価装置を実施項目 1-1 で製作した測定系に搭載 し、巨視的電磁場応答との同時測定を行った。得られた結果の一部は国内学会で発表した [2]。その詳細は「2. 平成31年度(報告対象年度)の実施内容」に記載している。



(b) 平行平板プローブ構造(二次試作)図 1-1-4 評価用センサの構造





(a) 実験室における水槽を用いた評価装置(ブロック図及び外観)



(b)海水中で利用可能な評価装置(測定系へ搭載した様子)図 1-1-5 製作した評価装置の概要

実施項目 1-2 においては、当初の仮説を検証し、新理論を構築するところまでは到達でき なかったものの、実験用水槽を用いた計測を実施し、微視的でのみ考えられる現象の解明に 取り組んだ。試行錯誤の結果、複素誘電率をベースにして計測したデータと、後述のシミュ レーション結果から、系へのエネルギー移動など、ある程度仮説を支持できると思われる結 果が得られたが、研究成果は、仮設を検証し新理論にまで進展させるには不十分であること がわかった。しかし、本研究により微視的な電磁波応答評価のための実験系はどのように構 築すべきかの知見を得ることができた。これらの結果をもとにして、論文誌への投稿準備中 である。今後、モデルと計測手法の最適化を継続して行うことで、本研究成果にもとづく新 たな理論の構築をめざしていく。

1-3 巨視的電磁場応答及び微視的電磁場応答の測定

実施項目 1-1 で構築した巨視的電磁場応答測定系に、実施項目 1-2 で製作した微視的電 磁場応答センサを搭載し、浅海域における擬似埋設物(金属及び誘電体)に対する電磁場応 答の測定を実施した。測定対象周波数は10kHz、100kHz、1MHz、10MHz として、電波発射の ために実験試験局を開局した。測定は静岡県沼津市(駿河湾)において実施した。図 1-1-6 に電磁場応答測定時の様子を示す。浅海域の海底面に擬似埋設物を設置して測定を行い、擬 似埋設物からの電磁場応答特性を測定した。図 1−1−7 に測定した応答の例(Sパラメータの 位相値)を示す。横軸はアンテナに対する擬似埋設物(ステンレスメッシュ)の相対的な位 置であり、その位置が変化することで、電磁場応答であるSパラメータの位相が変化するこ とがわかる。測定結果より、得られる信号対雑音電力比及び擬似埋設物に対する応答の大き さにもとづき、海底下埋設物センシングに用いる周波数選定を 100kHz 及び 1MHz を対象と することとした。また、測定データは実施項目 2-1 におけるシミュレータ構築において、シ ミュレーションにおけるモデルパラメータ(海底下媒質の電気的特性等)を決定するために 利用した。得られた測定データは、実施項目 2-1 及び実施項目 3-1 の成果とともに国際会 議の依頼講演として発表を行うとともに[3]、誌上論文へ投稿済である。なお、測定系に搭 載した微視的電磁場応答センサの測定に関しては実施項目 1-2 に記載した。以上のとおり、 本実施項目については、当初の計画どおり研究を実施し、研究成果をえることができた。



図 1-1-6 電磁場応答測定の様子(上:浅海域(水深 30m)に測定系を着底させた様子、下:船上において光ファイバ経由で測定系の制御・データ取得を実施している様子)



図 1-1-7 電磁場応答測定の結果例

実施項目2. 電磁場応答モデルとシミュレータの構築

2-1 巨視的電磁場応答シミュレータの構築と最適化

巨視的電磁場応答シミュレータの構築に関して、真水バッファ層付き海中アンテナ (10MHz) モデルに対して、実施項目1-3における実測結果にもとづき、有限要素法におけ るメッシュ構成等のシミュレーション条件の最適化を行った。図1-1-8には、真水バッファ 層付き微小ループアンテナに対して、メッシュ構成の最適化を行った例を示す。中央のルー プが導体(銅)であり、外側ループがアンテナエレメント、内側ループがインピーダンスマ ッチング用である。同軸ケーブルの信号線はインピーダンスマッチング用ループの終端に、 同軸ケーブルの接地(GND)はアンテナエレメントとインピーダンスマッチング用の接合部 にそれぞれ接続している。アンテナエレメントの先端(同軸ケーブルの対向側)には同じ導 体(銅)製の平面板があり、そこにコンデンサを取り付けた構成としている。アンテナエレ メントの周囲には真水バッファ層を設けている。これはアンテナエレメントが海水に近接 するとアンテナの特性が変化してしまうのを防ぐためである。また海水中での水圧に耐え るためにも重要な役割を果たしている。さらに外側にはアクリル製の容器で真水を覆って いる。



図 1-1-8 海中アンテナ(真水バッファ層付き微小ループアンテナ)に対するメッシュ構成の最適化(海中アンテナを上から見た図。左:最適化前、右:最適化後)

このようなシミュレーションモデルに対して、海底面近傍における電界分布及び S パラ メータの評価を目的としたシミュレータを構築した。図 1-1-8 で示した海中アンテナモデ ルに対するシミュレーション結果例を図 1-1-9 に示す。シミュレーション結果と実測結果 を比較し、伝搬距離に対する S₂₁の減衰特性はほぼ一致することを確認した。また、海中ア ンテナとしては、図 1-1-10 に示すように、微小ダイポールアンテナに対するシミュレーシ ョンモデルも構築した。黄色の金属棒は銅で、長さは 395mm、直径 20mm の円柱の形状とな っている。また、ループアンテナと同様に給電点及び金属棒の一部の周囲には真水バッファ 層を設けている。バッファ層のサイズは直径 100mm、長さは 500mm とした。2 つの金属は同 軸ケーブルからそれぞれ信号と GND を配線しており、上部にコネクタを取り付ける構造と している。シミュレーション結果として、アンテナのスミスチャートを示しており、インピ ーダンスはほぼ 50 オームになっていることがわかる。試作したアンテナによる実測値と比 較すると、整合回路素子値やアンテナ構造の差から完全には一致してないものの、傾向はほ ぼ一致していることがわかる。



(a)海中アンテナを上から見た時の電界分布



(b)海中アンテナを上から見た時の磁界分布



(c) Sパラメータ(S21)の実測値との比較

図 1-1-9 真水バッファ層付き微小ループアンテナに対する電磁場応答シミュレーション結果の例



(a) 真水バッファ層付き微小ダイポールアンテナのモデル(1MHz 用)



(b) スミスチャート(左:シミュレーション結果、右:試作アンテナの実測値) 図 1-1-10 微小ダイポールアンテナに対する電磁場応答シミュレーション

シミュレーション手法として、ここまでは有限要素法を用いた結果を示した。本研究においては、FDTD 法を用いた場合においてもメッシュ最適化を行い、有限要素法と同様のシミュレーション結果が得られることを確認している。

以上のとおり、本実施項目については、当初の計画どおり研究を実施し、研究成果をえる ことができた。得られた研究成果は、実施項目 1-3 及び 3-1 の内容とともに国際会議にお ける依頼講演として発表[3]した他、国内学会発表も行った[4]。また、埋設物センシングシ ミュレーションとして実施項目 3-1 の成果とともに国内学会にて発表を行った[5, 6]。

2-2 微視的電磁場応答シミュレータの構築

海水を構成する粒子(水分子及びイオン)と電磁場との相互作用によって、海水中における電磁場の新たな伝搬メカニズムの表現をめざした研究として、微視的電磁場応答シミュ レータの構築に取り組んだ。実計測結果とあわせた新理論の構築までは到達できなかった ものの、当初の計画通り研究を実施した。 海水の微視的電磁場応答をシミュレーションによって解明するためには、海水を構成す る粒子間のエネルギーの交換と、外部から印加される電磁波から海水を構成する粒子への エネルギー入力、これらを評価する必要がある。海水を構成する粒子間のエネルギー交換の 評価には、古典分子動力学法をベースにした相互相関関数を用いた評価を行った。特に正確 な電磁場応答を求めるため、電磁場項を付加したシミュレーションモデルを構築した。古典 分子動力学法は古典力学的に粒子ごとの振る舞いを解く方法であり、以下に示す式のとお り、電磁気(外場)による外力としてローレンツ力による項を加えた。

$$m_i \frac{dx_i^2}{dt^2} = F_i = -\nabla_i \phi$$

$$\vec{F} = q \left[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right]$$

粒子間の内部力は、次式のとおり、クーロン力と Lennard-Jones ポテンシャルの和によって 記述する。

$$\phi_{ij} = \frac{e^2 q_i q_j}{4\pi\varepsilon_0 r_{ij}} + 4\epsilon_{ij} \left[\left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^6 \right]$$

以上の手法にもとづき、粒子間のエネルギー交換についてシミュレーションを行った。海水 を構成する粒子(H₂0とNa⁺)の組み合わせごとに相互相関関数を求めた。図1-1-11に示す ように、水分子(H₂0)→Na⁺イオンへのエネルギー移動が大きくなるという結果が得られた。 また、図1-1-12には、外部から印加される電磁場の有無に対する相互相関関数の変化を示 す。青は外場が無い場合、オレンジは外場として1kV/mが印加されている場合である。外場 が印加される場合、水分子からNa⁺イオンへのエネルギー輸送が大きくなる傾向を確認した。



図 1-1-11 相互相関関数による粒子間のエネルギー交換(回転運動と並進運動を考慮)

 10^{-3}

 10^{-4}

10-3

Straight-

straight



図 1-1-12 粒子間で交換されるエネルギーの相互相関関数

得られたシミュレーション結果において、回転運動を行う水分子と並進運動を行うイオ ンとの間に、エネルギー交換が発生する理由が不明であった。そこで、今年度の古典 MD 法 によるシミュレーションのデータから、水分子も回転運動を行いながら他の粒子とぶつか り合い並進運動をしており、そのためにイオンとエネルギー交換ができると考えられる事 がわかった。しかし、そのように考えると、正弦波で振動する電場に対して調和振動する分 極水分子の回転エネルギーはどのように消費されるのかがわからない。シミュレーション で使用している周波数においては、水分子のみの振動に起因する見かけの摩擦によって熱 運動に変換されるエネルギーは少ないはずであり、イオンが介在するものと考えられる。系 の温度上昇、水分子の振動、水分子・イオンの変位量を観察すると、外場による水分子の振 動は外場を印加しても一定であるが、イオンの変位量は次第に大きくなることがわかった。 この結果は、イオンの移動に消費されるエネルギーが増えることを示している。また、イオ ンと同じ方向に水分子も変位することがわかった。温度上昇は、時間に対して線形関数では なく指数関数で上昇している。これらのシミュレーション結果より、水分子の振動エネルギ ーは、イオンによって消費されていると考えられる。しかしながら、エネルギーの輸送メカ ニズムについては未解明である。詳細な検討結果は、「2.平成31年度(報告対象年度) の実施内容」に記載している。

また、実施項目 1-2 において得られた結果より、印加した電磁場のエネルギーが海水を構成する粒子へ移動する際、変位電流であるか導電電流であるかによって、そのエネルギー効率が異なるのではないかという疑問が生じた。これを調べるために、導電電流が表現できない古典分子動力学法ではなく、第一原理にもとづく密度汎関数法によるモデルを作成した。表 1-1-2 に第一原理計算における条件、図 1-1-13 にシミュレーション用モデルのイメージを示す。シミュレーションにおいては、系内の荷電密度の時間発展及びイオンの移動をシミュレーションすることで、導電電流の有無に対する電磁波から粒子へのエネルギー移動について評価を行った。しかしながら、これまでのシミュレーション結果からは、導電電流の 有無に対する有意な差は確認されていない。詳細な検討結果は、「2. 平成31年度(報告

条件	説明		
水分子数	113 個		
イオン数	Na:7個、Cl:7個		
金属基板	Al(111) 2 層		
絶縁体層	Si 1 層		
基板面積	14.3168Å×14.87844Å		
印可電圧	50MV/m (Constant- μ 法)		
温度	293K		
時間刻み	0.5fs		
第一原理計算条件	計算方法:密度汎関数法		
	交換相関関数:PBE		
	波動関数カットオフ:10Ry		
	電荷密度カットオフ:80Ry		
	擬ポテンシャル:ウルトラソフト擬ポテンシャル		

表 1-1-2 第一原理計算における条件



図 1-1-13 第一原理計算を用いたシミュレーション用モデルのイメージ

以上の結果について評価をしたところ、一部のシミュレーション結果からは仮説を裏付 ける結果が得られたものの、その根拠づけは十分でなく、巨視的電磁場応答シミュレーショ ンに統合可能なモデル構築までは至らなかった。今回の研究を通じて、シミュレータの構築 及び粒子間及び外場(電磁場)とのエネルギー交換のモデル作成に関する知見が得られた。 これらの知見を活かして今後も関連研究に取り組む。微視的電磁場応答に関する研究成果 は、国際会議へ投稿済みである。

2-3 巨視的・微視的電磁場応答統合シミュレータの構築

巨視的電磁場応答と微視的電磁場応答の統合シミュレータ構築に関する研究を行った。 実施項目 2-2 で示した通り、微視的電磁場応答を反映できるモデル構築には至らなかった が、巨視的・微視的電磁場応答統合シミュレータとして、微視的電磁場応答モデルを反映す るためのパラメータを定義し、これを実装する段階まで構築した。

図 1-1-14 に統合シミュレータ解析メッシュのイメージを示す。シミュレーションのベー スとしては FDTD 法を用いる。微視的電磁場応答を考慮する領域に対してのみ、サブグリッ ト法と呼ばれるアルゴリズムを採用し、小さなメッシュを局所的に構成する。これは、巨視 的電磁場応答のみを考慮する領域において、微視的電磁場応答を考慮する領域と同一のメ ッシュサイズを適用すると、シミュレーションに要する演算量が膨大になってしまうため である。微視的電磁場応答による寄与を反映するため、巨視的電磁場応答の解析において新 たな項を追加できるように FDTD 法を改修した。微視的電磁場応答の解析に必要なパラメー タ(温度、塩分濃度、境界条件等)を設定ファイルに定義し、これらパラメータによる微視 的電磁場応答の効果を新たに設けた項によって反映させる。このような構成を用いること で、現実的な演算量において統合シミュレーションが実行できるようになる。



図 1-1-14 統合シミュレータ解析におけるメッシュ分割のイメージ

実施項目3. 浅部海底下埋設物検出方法の研究

3-1 海中アンテナアレイの研究

海中アンテナアレイに関する研究については、海水中で利用可能なアンテナとして、実施 項目 2-1 で構築したシミュレータも活用し、2 種類(微小ループ型と微小ダイポール型)の 真水バッファ層付アンテナを製作した。アンテナ製作においては、海水中においてインピー ダンス整合が取れるよう、純水バッファ層のサイズ、エレメント長、整合回路の最適化を行 い、海中アンテナに関する知見を得た。図 1-1-15 は製作した真水バッファ層付き微小ルー プアンテナ(1MHz 用)である。外形寸法は幅 500mm、奥行き 200mm、高さ 550mm、重量 45.1kg である。共振周波数は同調コイル巻き数とコンデンサ容量で調整し、巻き数は 13、コンデ ンサ容量は 1000pF とした。コイルには被覆付きの線材を使用することで、周囲の水の影響 を小さくしている。インピーダンスはピックアップコイルで調整を行い、巻き数は 2 とし た。*S*₁₁の振幅値は、海水中において-24.5dB であった。気中では-7.8dB であったことから、 海水中においてより良好な整合特性が得られることがわかる。このとき、海水中における VSWR 値は 1.13 である。また、スミスチャートより、インピーダンスは 44.8-j2.3Ω である ことがわかった。



(a) 外観



(b)特性(左:S₁₁の振幅値、右:スミスチャート)
図 1-1-15 真水バッファ層付き微小ループアンテナ(1MHz 用)

しかしながら、微小ループアンテナは、周波数帯域幅が狭く、送受信アンテナ間の共振周 波数にずれが生じると応答測定が困難になる。また、コイルサイズが周波数に依存するため、 低周波になるとサイズが大きくなってしまう。これらの課題を解決するため、真水バッファ 層付き微小ダイポールを製作した。周波数帯域は、10kHz、10kHz、1MHz 及び 10MHz として、 センシング時におけるアレイ配置が行えるよう、小型・軽量化を考慮してエレメントの半分 のみ覆うバッファ層を設けた。図 1-1-16 に一次試作品の外観を示す。中心の塩ビ管の中に 整合回路を配置し、塩ビ管の中は真水で満たしている。製作したアンテナに対する測定結果 を図 1-1-17 に示す。*S*₂₁測定時、送受アンテナ間距離は中心で約 30cm とした。製作したそ れぞれのアンテナで特性が若干異なるものの、それぞれの希望する中心周波数で反射が小 さくなっており、送受信アンテナ間で十分に伝達できていることがわかった。この真水バッ ファ層付き微小ダイポールアンテナの二次試作を行い、実施項目 4-1 で使用する海底下埋 設物センシングシステム用アンテナとした。バッファ層厚みの最適化に関する検討も行っ ており、その内容は「2. 平成31年度(報告対象年度)の実施内容」に記載している。



左:10kHz 用、右:100kHz 用





左:1MHz 用、右:10MHz 用 図 1-1-16 真水バッファ層付き微小ダイポールアンテナ(1 次試作)





(b) 100kHz 用



図 1-1-17 真水バッファ層付き微小ダイポールアンテナの特性

また、アンテナアレイの配置方法の最適化に向けて、送受信アンテナの間隔を変えて検討 を行った。実施項目 2-1 で構築したシミュレータを用いて、送信アンテナと受信アンテナの 間隔を変えた場合(1.25m 及び1.75m)における擬似埋設物(金属板、厚さ1mm、サイズ1m四方)の有無に対する Sパラメータ(S₂₁)の差を求めた。図1-1-18にシミュレーションモデル示す。アンテナには真水バッファ層付き微小ダイポールアンテナを用いた。図中の薄い茶色で示した部分が海底土であり、その含水率は25%とした。海底面からの高度は0.5mとした。シミュレーション結果を図1-1-19に示す。アンテナ間隔が1.25mの場合、埋設深さ約50cmにおいて埋設物の有無の差がほぼなくなる。一方、アンテナ間隔を1.75mとすると、埋設深さ約80cmまで埋設物の有無の差が確認できる。このことから、アンテナ間隔を広げた方がより深い埋設位置まで検出できる可能性がある。しかしながら、海水による電波の減衰量が大きいことから、アンテナ間隔を1.75mとすると信号対雑音電力比を得るために積分回数を増やす必要があり、センシングシステムを搭載するプラットフォームの揺動などの影響を受けやすくなる。このことから、送受信アンテナ間隔は1.25mとしてシステム構築を行うこととした。



図 1-1-18 アンテナアレイ構成の検討用シミュレーションモデル



図 1-1-19 アンテナ間隔を変えた時の埋設物有無に対する S₂₁パラメータ差のシミュレ ーション結果(擬似埋設物:金属板)

さらに、海底下センシングで使用する送信波形について最適化を検討し、単一周波数波 (無変調波)を使用することとした。車載レーダ等で使用されるようなチャープ波(周波数 掃引波)の利用についても検討したが、海中で使用する低周波数帯における海中アンテナの 周波数帯域幅は狭く、掃引によるメリットがほぼ得られないことがわかった。

以上のとおり、本実施項目については、当初の計画どおり研究を実施し、研究成果をえる ことができた。得られた研究成果は、実施項目 1-3 及び 2-1 の内容とともに国際会議にお ける依頼講演として発表した[3]他、国内学会でも発表を行った[4]。国内また、海底下セン シングのシミュレーション結果については、実施項目 2-1 の成果とともに国内学会で発表 を行った[5, 6]。

3-2 スパース信号処理を用いた埋設物検出アルゴリズムの研究

スパース信号処理を用いた埋設物検出アルゴリズムの研究については、実施項目 1-3 で 得られた擬似埋設物に対する電磁場応答の測定結果及び実施項目 2-1 で得られたシミュレ ーション結果をもとにして、得られた電磁場応答から埋設物の位置及び材質を推定する問 題を定式化した。検出対象となる海底下媒質おいて埋設物の数は1つと仮定することでス パース性を導入し、解法としてはL1正則化を用いたスパース推定法を導入することで計 算量の低減を図った。このアルゴリズムを用いることで、埋設物の位置だけでなく材質の推 定も可能になる。以上のとおり、本実施項目については、当初の計画どおり研究を実施し、 研究成果をえることができた。得られた研究成果は、国内発表で1件[7]の発表を行うとと もに、特許1件を出願中であり、また国際会議へ投稿予定である。詳細は別冊に記載した。

3-3 海中電磁場応答・アンテナ・実海域試験に関する研究

海中電磁場応答・アンテナ・実海域試験に関する研究については、海中アンテナとして半 露出型(エレメントを完全に絶縁する絶縁型でもなく、完全に海中に露出する露出型でもな い)微小ダイポールアンテナの最適化条件を見出した。露出部分が長いと電極面積が増加す ることで送信アンテナにおいては電流量が増加し、露出部分が短いと電極間隔が増加する ため受信アンテナにおける電位差が増加することがわかった。また、そのアンテナに対する 性能評価手法を明確にした。水槽を用いた実験室内でのアンテナ性能評価においては、海水 によるアンテナのインピーダンス低下が著しいことから、ラジアン球程度のサイズの水槽 でアンテナ自体の性能評価が行えることがわかった。その詳細は「2. 平成31年度(報告 対象年度)の実施内容」に記載している。

実施項目 1-1 で構築した測定系に静電場測定用センサを搭載し、実海域での静電場計測 による海底埋設物探知を実施し、静電場による埋設物検知に関する測定データを得た。図 1-1-20 に静電場測定用センサを搭載した測定用フレームの外観を示す。複数センサを搭載し て、擬似埋設物の位置を変えたときの静電場計測を行った。結果の一部を図 1-1-21 に示す。 結果より、埋設物が金属である場合には、埋設物の位置変化に応じた静電場の変化が観測さ れることが確認された。以上のとおり、本実施項目については、当初の計画どおり研究を実 施し、研究成果をえることができた。詳細は「2. 平成31年度(報告対象年度)の実施内 容」に記載している。



図 1-1-20 測定用フレームに搭載した静電場測定用センサ(図中 CH1~CH3)



(a) 擬似埋設物なし(b) アルミニウム板図 1-1-21 擬似埋設物の移動に対する静電場測定値の変化

実施項目4. 海底下センシングシステム製作と浅海域試験の実施

4-1 海底下センシングシステムの製作及び海中プラットフォームへの搭載と試験の実施

実施項目1~3における研究成果にもとづき、浅海域試験で用いる海底下センシングシ ステムの設計及び実装を行った。海底下センシングシステムの製作にあたっては、深度は 200m以浅を想定し、作業型AUV等の海中プラットフォームに搭載できるよう、重量は200kg 以下、容積は2m×2m×1m以内とした。さらに、海中プラットフォームとのインターフェー スを具備し、センシングシステムの遠隔操作を可能とした。また、海中アンテナにおける電 磁場応答測定データの記録と、埋設物検出のための信号処理をリアルタイムで行える構成 を実装する必要がある。これらの要求仕様を満たすよう、海底下センシングシステムの全体 設計を行なった。設計にあたっては、実施項目4-2として、再委託機関である海洋研究開発 機構との打ち合わせを通じて、センサの高耐圧化、計測装置の耐圧容器への収納方法、海中 プラットフォームへの搭載方法等について意見交換を行った。

図 1-1-22 に設計した海底下センシングシステムの系統図を示す。本システムは制御部、 送信部、受信部、遠隔操作部から構成され、リチウムイオンポリマー電池によって駆動する。 制御部は、情報通信研究機構が所有する海中チャネルサウンダで使用した耐圧容器を活用 し、システムを構成する各装置の制御、各種センサ(カメラ、CTD計、高度計、傾斜計、 微視的電磁場応答センサ、静電場測定用センサ等)とのインターフェース、洋上からの遠隔 操作を行うための光ファイバとのインターフェース、及びセンサ計測データの記録用マイ クロサーバを実装した。送信部には、海底下埋設物センシングを行うための電波送信装置を 収容し、制御部とは水中イーサケーブルで接続される。複数の周波数帯における無変調波及 び変調波を送信できるよう、ハードウェアにはソフトウェア無線機を採用した。送信する電 波はパワーアンプによって増幅し、送信アンテナより発射する。送信部と受信部との間は光 ファイバケーブルによって接続し、Radio-over-Fiber (ROF)を介して周波数同期を確立 した。なお、海中における電波の発射にあたっては、実験試験局免許を取得した。



図 1-1-22 海底下センシングシステムの系統図

図 1-1-23 にシステム受信部の系統図を示す。受信部には、最大4本のアンテナによる受 信信号波形を計測するため、低雑音増幅器及び計測機器(ベクトルネットワークアナライザ /IQアナライザまたは4ポート計測器)から構成される。また、受信信号波形に対するリア ルタイム信号処理が行えるよう、信号処理用ハードウェアを搭載した。これによって、埋設 物検出アルゴリズムを海中のみで動作できる構成とした。また、洋上からの遠隔制御及び遠 隔監視が行えるよう、光ファイバケーブルとのコネクタを有する。



図 1-1-23 海底下センシングシステムにおける受信部系統図

図 1-1-24 に遠隔操作部の系統図を示す。遠隔操作部は、洋上から海中に投入したシス テムの制御及び監視を行う部分である。制御部及び受信部とは光ファイバケーブルによっ て接続する。0/E コンバータによって光・電気の各信号を相互に変換し、RJ45 コネクタの LAN ケーブルを Gbit スイッチングハブと接続することで、陸上 PC から海中システムの遠 隔制御・監視を可能としている。海中システムには多数のセンサ及びスイッチから構成さ れることから、作業性及び視認性の向上を目的として外部モニタへ接続する。



図 1-1-24 海底下センシングシステム 遠隔操作部系統図

図 1-1-25 に海底下センシングシステム及びシステムを構成する各部の外観を示す。海中 アンテナは実施項目 3-1 で製作した真水バッファ層付き微小ダイポールアンテナを使用す る。整合回路を含む容器内を真水で満たすことで、海中アンテナとしての動作を向上させつ つ、水圧へ耐性が得られる構造としている。表 1-1-3 に海底下センシングシステムを構成す る各耐圧容器の寸法及び重量を示す。海中投入部の耐圧性能は水深 50m とした。各部の空中 重量は合計 135kg となり 200kg 以下、容積は 2m×2m×1m 以内に収められる。以上のとおり、 作業型 AUV 等の海中プラットフォームに対して搭載可能な容積及び重量として、センシン グシステムを製作できた。なお、本研究における埋設物検出試験は、作業型 AUV を用いず に、FRPで製作した吊下フレームにシステムを搭載して実施した。理由としては、作業型 AUV を用いた場合、海底下埋設物とセンシング用海中アンテナ間の配置について再現性を得 ることが困難であることによる。



(a) 海中投入システムの外観(実施項目 1-1 の図を再掲)



(b) 制御部(左)と送信部(右)の外観



(c) 受信部(左)とバッテリー(右)の外観



(d) 海中アンテナ(左)の外観と遠隔操作部(右)図 1-1-25 海底下センシングシステムを構成する各部の外観

構成部	寸法 [mm]	空中重量 [kg]
制御部	φ 330×470(突起除く)	34
送信部	φ297×540(突起除く)	21
受信部	φ 330×670(突起除く)	33
バッテリー	φ267×337(突起除く)	21
(制御部・送信部用)		
バッテリー	φ267×337(突起除く)	21
(受信部用)		
パワーアンプ	φ144×282(突起除く)	5

表 1-1-3 海底下センシングシステムの寸法及び重量(海中プラットフォーム搭載部分)

実海域試験においては、浅海域において複数種類の擬似埋設物(サイズや電気的特性を変 えたもの)を用意して、実装した海底下センシングシステムによる電磁場応答を用いた海底 下埋設物の原理検証を行った。平成30年度に本センシングシステムを製作し、最初の試験 を静岡県沼津市の駿河湾において、測定用バージ(水深は約30mの海域)において行った。 図 1-1-26に試験の様子を示す。前述のとおり、構築した試験系においては、海底下センシ ングシステムをフレームに搭載し、擬似埋設物と海底土を模した土嚢をパレットに載せ、こ のパレットをレール上で移動させることで、アンテナと擬似埋設物との配置を再現できる。 海中に吊下した試験系は海底に着底させて、ダイバーが擬似埋設物を所定の位置(-120cm~ +120cmの範囲)に移動させることで、配置の再現性が得られるように試験を実施した。試 験においては、擬似埋設物として、金属(ステンレス製のメッシュ)、誘電体(発泡スチロ ール)、および金属と誘電体の複合物を用いた。



(a) 測定用バージ(左)とバージから海中へシステムを吊下する様子(右)



(b) 試験系の構成



(c) ダイバーによる擬似埋設物の移動





(d) 試験で用いた擬似埋設物(上:金属、下左:誘電体、下右:複合物) 図 1-1-26 海底下センシングシステムを用いた模擬埋設物検出試験

平成 30 年度に得られた試験結果にもとづき、最終年度には擬似埋設物による検出試験を 実施した。試験は静岡県沼津市の駿河湾において実施した。試験の様子を図 1-1-27 に示す。 試験実施海域については、複数の擬似埋設物に対して、多様なアンテナ及び擬似埋設物の配 置に対する応答を測定できるよう、ダイバーの潜水時間を長くすることが必要になったた め、平成 30 年度における試験海域(水深約 30m)よりも浅い海域において実施した。複数 の擬似埋設物に対して検出試験を実施した。前年度同様、海中アンテナは送信・受信ともに フレームに固定して設置した。試験用の擬似埋設物の上に海底土を模した土嚢を置き、擬似 埋設物と土嚢をパレット製台車の上に載せて、台車をレールで移動させることでアンテナ と擬似埋設物との配置を変えて、検出試験を実施した。



(a) 埋設物検出試験の様子(海中へのシステム投入)



(b) 金属板・アルミ(左から、500mm×500mm、500mm×1000mm、1000mm×1000mm)



(c) 誘電体・ポリカーボネート (1000mm×1000mm)



(d) 誘電体・肉(左:500mm×500mm、右:500mm×1000mm)



(e) 金属と誘電体の複合物(金属板とポリカーボネートを重ねたもの)図 1-1-27 埋設物検出試験の様子
検出試験の条件を表 1-1-4 に、結果の一例を図 1-1-28 に示す。埋設深さについて、実施 項目 3-1 では 50cm 以深での可能性示したが、パレットの重量耐性及び実際に海底を掘るこ とは困難であることから、試験における埋設深さは 10cm とした。埋設物検出結果には、擬 似埋設物の候補材質を金属(アルミ)及び誘電体(ポリカーボネート、比誘電率=3)の 2 つとして、埋設物の候補位置(レール上で擬似埋設物を移動することから一次元で表示、真 上から見た図)に対する尤度値分布(左:擬似埋設物を金属と仮定したときの尤度、中:擬 似埋設物を誘電体としたときの尤度)と、カメラ撮影画像への埋設物推定位置の表示結果

(右)を示している。この検出試験においては、ダイバーが擬似埋設物を移動させるのでは なく、埋設物を載せたパレット製台車には前後にロープを結び、陸上からいずれの方向にも 曳けるようにして、連続的に擬似埋設物位置を変えて検出試験を実施した。送信アンテナは 図における原点に配置し、受信アンテナはANT2,ANT3,ANT4の計3か所に配置した。測定 時刻に対する検出結果を示しているが、実際には1秒間隔で検出結果は得られる。尤度値が 高いほど、埋設物が存在する可能性が高い(値域は0~255とした)。尤度値が最大となる位 置(擬似埋設物の推定位置)に「×」をプロットし、この位置をカメラで撮影した画像上に 赤い■で表示した。また、候補材質(金属または誘電体)のうち、より高い尤度値が得られ た材質名をカメラ画像の上に表示し、材質推定の結果とした。この試験は、擬似埋設物を金 属板としているが、すべての検出結果において埋設物の材質を金属として推定し、位置の推 定も高い精度で行えることを確認した。前述のとおり、この推定は約1秒間隔で得られるこ とから、航行する海中プラットフォームへ搭載した場合においても、精度の高い海底下埋設 物センシングが行える可能性が示せた。詳細については、「2.平成31年度(報告対象年 度)の実施内容」に記載している。

以上のとおり、本実施項目については、当初の計画どおり研究を実施し、研究成果をえる ことができた。以上で示した結果より、「1.0 委託業務の目的」に示した海底下センシ ングシステムに関する最終目標を達成すること確認した。システム設計に関する研究成果 は、国内学会において発表した[8]。

項目	当初の目標	試験条件			
深度	200m 以浅	約 10m			
埋設深さ	数m以内	10cm			
擬似埋設物のサイズ	数10cm×数10cm~1m×1m	1m×1m以下			
	以下				
擬似埋設物の材質	金属、誘電体、これらの複	金属、誘電体、これらの複			
	合物	合物			
作業型 AUV への搭載可能性	म]	म			
海底面からの高度	1m 以下	50cm			

表 1-1-4 海底下埋設物検出試験における条件





(ア) 測定時刻:14時04分34秒





(イ) 測定時刻:14時05分39秒





(ウ) 測定時刻:14時06分02秒



(エ) 測定時刻:14時08分00秒





(オ) 測定時刻:14時08分48秒

図 1-1-28 擬似埋設物の位置を連続的に変えた場合の試験結果(左:各埋設物候補に対す る尤度値、右:カメラ画像への埋設物位置推定結果(赤い■)の表示)

4-2 海中プラットフォームへの搭載と試験の実施への支援

構築したセンシングシステムを自律型無人潜航機(AUV)へ搭載して運用可能であること を検証するため、海洋研究開発機構が所有するAUV「おとひめ」への搭載設計を行い、電気・ 機械インターフェースともに問題なく搭載可能であることを確認した。図1-1-29 設計した 海底下センシングシステムの機器配置図を示す。実施項目 4-1 で製作した海底下センシン グシステムを「おとひめ」への搭載するにあたっては、受信アンテナ本数を3本として、「お とひめ」下部のスキッドを後方に900 mm 延長することで、航行性能を保ちながら搭載でき る。各種耐圧容器(制御部(CONT)、送信部(TX)、受信部(RX))については、重量からモー メントを考慮して x-y 平面内に均等に配置した。実際には、これらの機材に加えて、システ ム搭載によって増加した水中重量を補うために、空いたスペースに浮力材を搭載する。また、 電気インターフェースとしては、開発したセンシングシステムの消費電力は最大 480W であ り、「おとひめ」の搭載バッテリー容量は 3.5kWh であることから、3 時間程度の埋設物セン シングが行える見積もりを得ている。詳細な検討結果は、「2. 平成 3 1 年度(報告対象年 度)の実施内容」に記載している。

以上のとおり、本実施項目については、当初の計画どおり研究を実施し、研究成果をえる ことができた。センシングシステムの作業型 AUV への搭載可能性に関する成果は国際会議 において採択され、発表した[9]。





図 1-1-29 作業用 AUV「おとひめ」へのシステム搭載イメージ

参考文献

[1] K. Takizawa, R. Suga, T. Matsuda, H. Yoshida and F. Kojima, "Underwater Channel Sounder (UCS) for Characterizing Radio Propagation in Seawater,"2018 OCEANS -MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO) (2018年5月) (査読付)

[2] 吉田, 菅, 滝沢, 松田, 佐藤, 児島, "海中電磁界計測装置の実験的研究,"電子情報通 信学会ソサイエティ大会(2018年9月).

[3] T. Matsuda, K. Takizawa, R. Suga, R. Sato, H. Yoshida and F. Kojima, "Research and Development on Radio Communication in Seawater、" the 21th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications(2018年11月)(依頼講演)

[4] 松田, 滝沢, 菅, 佐藤, 吉田, 児島, "海中アンテナの開発と電波伝搬特性の測定," 電子情報通信学会ソサイエティ大会(2018年9月)

[5] 松田, 滝沢, 菅, 吉田, 児島," 電波を用いた海底下埋設物センシングのシミュレーション評価,"電子情報通信学会ソサイエティ大会(2019年9月)

[6] 松田,滝沢,菅,吉田,児島,"電波を利用した海底下埋設物センシングシステムの検 出能力についての一考察,"電子情報通信学会ソサイエティ大会(2020年3月)

[7] 滝沢, 菅, 松田, 吉田, 児島, "海中における電波源位置推定に関する一検討,"電子情報通信学会ソサイエティ大会(2019年9月)

[8] 菅, 滝沢, 松田, 吉田, 児島, "電波を用いた海底下埋設物センシングシステムの開発," 電子情報通信学会ソサイエティ大会(2019年9月)

[9] H. Yoshida, K. Takizawa, T. Matsuda, R. Suga, M. Deguchi, T. Kasaya, R. Sato, and F. Kojima, "Concept of an underwater exploration system for shallow layer under the seabed by electromagnetic waves、" The 13th SEGJ International Symposium (2018年11月) (査読付) 1.2 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や、目標を超える成果

本研究において、海底下センシングの原理実証を当初の目標どおりの条件で達成するこ とを海域試験において確認した。また、本研究成果の副次的成果として、海中における電波 を用いた高速データ通信の利用可能性を見出すことができた。具体的には、送信・受信にお ける複数アンテナを利用した無線通信技術であり、アンテナアレイ間の空間相関の測定結 果より海中におけるアンテナ間隔の最適値が明らかになり、海中アンテナの開発から比帯 域幅 10%に迫る広帯域海中アンテナを開発することができた。これまでに、2本の海中アン テナを送信・受信の双方で用いることで、1MHz帯を用いて、1Mbpsに迫る世界的に見ても トップクラスの周波数利用効率となる通信速度を達成している。今後、さらなる改良を行う ことで、電波の特長である等方性と保守の容易さを生かした無線通信技術とすることをめ ざしている。また、構築した電磁界シミュレータによって、海底下における電波伝搬特性に おいて、海水中よりも電波の減衰量が低くなる周波数帯が存在する可能性を確認した。この 特長を利用して、海底下媒質を積極的に使用することで、海中における通信距離の延伸等、 新しい研究開発の方向性を見出すことができた。また、初年度、従来の海中ケーブル用コネ クタでは、RF信号のケーブルとしてはコネクタ接合部の不安定さから利用できないこと が明らかになった。これを解決するため、再委託先の海洋研究開発機構において、コネクタ 接合部の構造を新規設計し、新しい海中用RFコネクタを実装した。これを用いることによ って、ダイナミックレンジ 130dB を超える電磁場応答の測定系を構築することができた。

1.3 研究課題の発展性(間接的成果を含む)

本研究を通じて、電波による海底下浅部の埋設部探査を行える可能性を示し、その原理検 証を浅海域において実施した。本研究に関連する研究開発を引き続き行うことで、研究成果 の産業界への展開も期待できると考えている。具体的には、港湾設備におけるインフラ点検 等における水中ロボットへの研究成果の実装をめざすには、海中アンテナの小型化が必要 となる。これを実現するため、情報通信研究機構ではメアンダラインまたはヘリカル等のア ンテナ素子形状最適化や、純水バッファ層の体積最小化を検討している。また、今回の研究 では、金属及び代表的な誘電体を海底下浅部埋設物とした原理検証を実海域において実施 した。今後、様々な電気的特性を持つ埋設物の検出、より深い埋設深さに対する検出、複雑 な構造を持った埋設物に対する検出など、実用へ向けた課題は多くあり、この課題に対して、 情報通信研究機構では電磁界シミュレーションで様々な埋設物やより深い埋設深さに対す る検出精度検証に取り組んでいる。 1.4 論文、特許、学会発表等の研究の成果

研究期間を通じて、積極的な研究成果の発表に努めた。国際学会発表は IEEE Oceanic Engineering Society 主催の国際会議を含む計3件の発表を行った。研究成果に関するファクトデータは以下のとおり。

国際学会発表	3件(1件は依頼講演、2件は査読付)
国内学会発表	6件
展示会への出展	3件

以上に加えて、誌上論文を1件投稿済(測定系の構築と測定結果)、国際学会発表を1件投 稿済(微視的電磁場応答シミュレーション)、特許出願(埋設物検出手法)を1件手続中で ある。今後も、期間中に得られた研究成果をもとに、論文や国際会議へ投稿していく予定で ある。

また、海中における電磁波利用に関する国内研究活動を推進するため、国内の海中電磁波 利用に関心を持つ研究者とともに、2019 年電子情報通信学会ソサイエティ大会において公 募シンポジウムを開催し、その後、電子情報通信学会通信ソサイエティ内に研究専門委員会 (水中無線技術特別研究専門委員会)を立ち上げに参画した。

1.5 研究実施体制とマネジメント

海洋研究開発機構が再委託先として参画することで、海水中における計測装置の運用手 法や海水及び海底下の電気的特性に関する知見を得ることができた。これによって、情報通 信研究機構が有する電磁界シミュレーション・信号処理・システム実装に関する知見ととも に、最終目標である海底下センシングの実証へとつなげることができた。

研究を進めるにあたっては、両機関の知見の共有や研究進捗状況を確認することを目的 として、毎年4回程度の技術検討会を実施した。特に、実海域試験は両機関が参加して実施 し、試験時に得られる貴重な経験を共有できるようにした。また、得られた研究成果を積極 的に学会及び展示会において発表することで、海中における電磁波利用及び海底下センシ ング技術に関する有識者からの意見を得て、適宜、研究の進め方へ反映させた。

1.6 経費の効率的執行

研究実施にあたって、既存の資産を最大限に活用することによって、経費の効率的な執行 を行った。具体的には、巨視的電磁場応答の測定結果検証に必要なシミュレーションには既 存のシミュレータライセンス及び計算機を活用して構築した他、電磁場応答測定に必要な 各種センサや海中アンテナ等の構成部品は既存のものを活用した。これらの効率的な執行 によって、毎年度、複数回の実海域試験を行うことが可能になり、限られた予算の範囲で、 世界的にも例のない電波による海底下センシング試験の実証に向けた貴重なデータ取得を 実海域で数多く行うことができた。以上のとおり、各研究課題の達成に必要な外注の発注や 装置の購入に関して、既存の設備をうまく活用しながら優先度をつけて遂行することで、最 終目標の達成に向けた研究を実施することができた。 2. 平成31年度(報告対象年度)の実施内容

2.1 平成31年度の実施計画

実施項目1 電磁場応答特性の解明

1-2 微視的電磁場応答の測定系構築(担当:海洋研究開発機構)

2018 年度までに、微視的電磁場応答特性を計測する為にセンサシステムを製作し、電磁 場応答測定系へ搭載した。2019 年度は、当該センサシステムを利用し、実験用水槽におい て海水の電磁気的計測を実施する。また、得られた計測データを評価し、測定方法の最適化 を実施した上で、海中アンテナのバッファ層厚みの依存性を評価する。これらの計測データ を微視的電磁場応答の仮説と照らし合わせ、仮説の検証を行う。

実施項目2 電磁場応答モデルとシミュレータの構築

2-2 微視的電磁場応答シミュレータの構築(担当:海洋研究開発機構)

これまで行ってきた、古典分子動力学法を用いたシミュレーションによって明確になっ た、微視的な海水の電磁波応答を解明するための困難さについて整理し、それらを解決する 手段を可能な範囲で実施した上で、海水を構成する分子とイオンの電磁場応答についてま とめる。具体的には、分子・分子間、イオン・イオン間及び分子・イオン間でのエネルギー 交換量を明確にする手法の検討並びに海水中の導電電流を媒介する電子の効果の第一原理 による検討を進め、これらの成果をまとめる。これらの結果が巨視的シミュレーションに反 映可能だと分かった場合には反映を行う。

実施項目3 浅部海底下埋設物検出方法の研究

3-1 海中アンテナアレイの研究(担当:情報通信研究機構)

2018 年度までに開発した海中アンテナ(バッファ層付等)について、必要に応じて、マ ッチング並びにアンテナ及びバッファ層のサイズの調整を行うことで、放射特性の向上を 継続する。また、海底下センシングに向けたアンテナアレイ構成の最適化を行うため、アン テナ間相関の測定を実施し、さらにセンシングに必要なアンテナ個数及びその配置構成に ついて、実施項目2で構築した巨視的電磁場応答シミュレータを活用しつつ、実験用水槽や 浅海域における評価を継続する。また、海底下センシングで使用する信号波形については、 単一周波数波(連続波)、チャープ波等を候補として、実施項目2で構築したシミュレータ を用いた評価及び製作した海中アンテナを用いた場合の応答波形の分析を行い、最適な送 信波形を決定する。 3-2 スパース信号処理を用いた埋設物検出アルゴリズムの研究(担当:情報通信研究 機構)

2018 年度に開発した埋設物検出アルゴリズムについて、実施項目1で得られた測定結果 及び実施項目2で構築した電磁場応答シミュレータを活用し、検出性能の向上を図る。具体 的には、スパース信号処理を適用するため、実施項目4における実験結果及びシミュレーシ ョン結果から、検出対象とする空間の構成方法並びに検出問題の定式化及びその解法につ いて最適化を進める。また、3-1と連携して、最終目標に記載した検証条件を満たすため に必要となるパラメータ(電磁場応答の観測サンプル数、アンテナ数等)を特定し、実施項 目4における実験結果及びシミュレーション結果から、これを決定する。

3-3海中電磁場応答・アンテナ・実海域試験に関する研究(担当:海洋研究開発機構)

3-1 及び 3-2 に関する評価を適切に行うため、バッファ層厚みの効果に関する検討結果や 電極型アンテナの電極構造に関する検討結果などを反映した海中アンテナの最適化条件及 び海洋研究開発機構で開発したアンテナ性能評価装置を用いたアンテナ性能評価手法を明 確にする。また、静電場計測方法の検討及び装置の製作並びに 4-1 で用いる海中プラットフ ォームへの搭載を行う。

実施項目4 海底下センシングシステム製作と浅海域試験の実施

4-1 海底下センシングシステムの製作及び海中プラットフォームへの搭載と試験の 実施(担当:情報通信研究機構)

2018 年度の実施項目 4 で得られた研究成果を踏まえつつ、海底下センシングシステムの 改修を実施し、海中プラットフォームへ搭載する。実海域試験においては、浅海において複 数種類の人工の海底下埋設物(埋設深さ・サイズ・電気的特性を変えたもの)を用意して、 海底下センシングシステムによる埋設物の検出精度を評価する。試験は、実験用水槽及び海 洋研究開発機構内の岸壁で実施する他、駿河湾の浅海域において 3 回実施する計画である。 また、人工の海底下埋設物の検出方法が確立できた場合、実海域における自然の海底下埋設 物の検出試験にも挑戦する。

4-2 海中プラットフォーム搭載と試験の実施への支援(担当:海洋研究開発機構)

海洋研究開発機構が有する海中試験のノウハウ、及び海中電磁気システム評価のノウハ ウを海底下センシングシステム製作と浅海域試験のために提供する。特に、海底下埋設物の 計測手法とその評価方法について支援する。

実施項目5 プロジェクトの総合的推進

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、運営委員会や技術検討 会の開催等、参画各機関の連携・調整にあたる。 特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて調 査或いは外部有識者を招聘して意見を聞くなど、プロジェクトの推進に資する。

委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、 本研究の更なる進展に努める。なお、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従 い事前に発表内容等を通知する。

2.2 平成31年度の研究実施日程

実施項目	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1-2 微視的電磁場応答の測定系構築	•											
2-2 微視的電磁場応答シ ミュレータの構築	•											
3-1 海中アンテナアレイ の研究	-											
3-2 スパース信号処理を用 いた埋設物検出アルゴリズム の研究	•						-					
3-3 海中電磁場応答・アン テナ・実海域試験に関する研究	•											
4-1 海底下センシングシス テムの製作、海中プラットフォ ームへの搭載と試験の実施	•											
4-2 海中プラットフォーム 搭載と試験の実施への支援						•						
5 プロジェクトの総合的推進	•											-

2.3 平成31年度の研究成果の説明

実施項目1 電磁場応答特性の解明

1-2 微視的電磁場応答の測定系構築(担当:海洋研究開発機構)

(概要)

海中で電磁波伝搬を実験的に計測していると異常伝搬を計測することがある。ここでい う異常伝搬とは伝搬中の減衰が理論的に推察される量より遥かに少ない場合を指す。しか も異常伝搬は一時得られる現象であり再現性に乏しい。もし、異常伝搬が存在して、それ を制御できるのであれば海水中の電磁波利用は飛躍的に向上する。この異常伝搬が存在す るか否かを考察するために、「電磁波エネルギーが海水中の水分子のダイポールモーメン トの振動にのみ寄与し、分子の移動やイオンの移動への寄与がほとんどない場合に、海水 中の電磁波は、純水中と同じ伝搬損失で伝搬する状態が存在することがある」という仮説 をたてた。この仮説を検証するためには、海水をマクロパラメータである、導電率 σ 、比 誘電率 ϵ_r 、比透磁率 μ_r で表すことでは不十分で、海水を構成する粒子を個別に扱わなけ ればならない(表 1-2-1)。

表 1-2-1 マクロ描像とミクロ描像

マクロ	ミクロ
 海水の電磁気特性をε,μ,σの3つのパラメータで規定 物質によってはεのテンソル積を用いる 	 水分子とイオン(クラスター) の電磁応答を個別に考える それぞれの粒子のエネルギーの 入出力を考慮
• 全体のエネルギーのみ表現	• 粒子毎のエネルギーを表現

電磁場のエネルギーが海水を構成する粒子と相互作用する場合に、場と粒子、ならびに粒子と粒子の間のエネルギー交換を考察することによって、先の仮説が検証できるのではないかと考えた。そこで、

- 電磁場から海水を構成する分子とイオンへのエネルギー移動量を個別に評価すること
 で、水の分極分子のダイポール振動に多くのエネルギーを注入可能であるか調査する。
- ② 海水を構成する分子とイオン間のエネルギー交換を個別に評価し、ダイポール振動から分子とイオンの並進運動にエネルギーが移動しないように制御することができるか調査する。

が必要であると考えた。最初のステップとして、電磁場から各海水粒子へのエネルギー移動 量と、各粒子間のエネルギー交換を個別に評価する手法を考え、評価が可能となれば、その 手法をマクロの評価手法に反映することを本研究の課題とした。手法としては、粒子シミュ レーションによって①、②の項目を評価するとともに、マクロ的実験手法によって、微視的 な状態の観測が可能であれば、シミュレーション結果を裏付けることができるので、その観 測手法について検討して評価を行う。

本項目では、マクロな実験からミクロな状態が評価できるかを検討するために、

- デスクトップの水槽において、海水に任意の電磁場を印加できる状態を構築し、条件を 振った際のマクロパラメータの通常の値からの変化を捉える
- 実海中でもマクロパラメータが計測できる装置を構築し、異常伝搬が現れた際にベースとなるパラメータを観測する環境を整える
- 電磁場と海水粒子とのエネルギーの交換に影響すると推測される、海中アンテナと海水の間に設ける「純水バッファ層」の効果をアンテナ間伝送効率によって評価する

ことを行った。当年度は、デスクトップ評価装置を向上させ、海水に電磁場を複数の手法で 印加させた場合の電磁パラメータの計測を実施し、それらの変化を捉えることができた。し かし、異常伝搬と思われる現象を再現することはできなかった。また、深海中で電磁マクロ パラメータ(複素誘電率)が計測できるセンサシステムを完成させ、4-1項で開発した電磁 波センシングシステムの海中フレームに同時搭載し、実海域でセンシング評価を行なって いる際のマクロパラメータの計測を実施した。しかし、ここでも異常伝搬は現れていないた め、異常伝搬時のマクロパラメータは計測できていない。一方、純水バッファ層の効果の評 価は、異なるバッファ厚みのアンテナを海水中に投入して伝送効率を計測することによっ て実施し、厚みの依存性があることを明確にした。これらの計測データのうち、先の仮説に 照らし合わせて考察できるのは最後の純水バッファ層の厚みの結果だけである。この結果 から電磁場から海水粒子のエネルギー移送は、電磁場の送受信源であるアンテナから直接 海水にエネルギーを印加するのではなく、水分子のダイポールモーメントの振動だけにエ ネルギーを渡し、純水の水分子から海水中の水分子にエネルギーを受け渡した方が全体の エネルギー損失が少ないことと、アンテナが作る電磁場の成分が純水の水分子に多く入る ほど効率が上昇すると思われる。

(詳細)

1) デスクトップ評価装置

海水の電磁マクロパラメータを計測するために、海中埋没型平行平板型プローブを開発 してきた。当年度は海中埋没で発生していた問題点(計測前の較正手法)を新たな治具を用 意することで解決し、より正しいと思われる計測値を得ることができるようになった。プロ ーブの最終形状を図 1-2-1 に示す。また、プローブ測定では交流電流を海水に印加すること から、外場として海水に印加する電磁場と干渉する。これによって計測値が乱れることから、 プローブ部の電磁遮蔽を検討したが、結果的にプローブのガード電極同士を共通アースす ることで、外場の影響を 10~20 dB 低減できることがわかった。

計測装置には複素誘電率を計測するための LCR メータと、電気化学ポテンシャルも計測 可能な周波数アナライザを用いた。評価の結果、電気化学ポテンシャル計測では外部電磁場 を加えた場合の海水の変化について、LCR メータ以上のデータを捉えることができなかった ため、評価は LCR メータによる複素誘電率計測に統一した。 図 1-2-2 と図 1-2-3 は 2 年間で開発してきた計測装置の最終形のブロック図と外観写真 である。図 1-2-3 の写真にはブロック図に記載のないマイクロスコピックカメラがある。こ のカメラは水分子やイオンの動きをマクロに捉えることを考え、海水の一部に油のエリア を設定し、油と水によって形成されるコロイドが可観なサイズになることを期待して儲け たものであるが、評価温度が室温であるため、完全に水と油が分離してコロイド化が観測で きなかったため評価に加えていない。これは今後、洗剤などの低温でもコロイド化を促して くれる追加材料を検討し評価を行う予定である。平成 3 1 年度の試験において、実施項目 4-1 で製作するセンシングシステムで計測する周波数は、100 kHz 及び 1 MHz であることを踏 まえて、ここでは LCR メータの計測範囲から、複素誘電率の計測範囲を 100 Hz~1MHz に設 定した。また、外場の周波数は、10 kHz と 100 kHz を選んだ。



図 1-2-1 海中現場測定型平行平板プローブ(左:片側の構造図、右:分解状態の外観写



図 1-2-2 デスクトップ計測装置のブロックダイヤグラム



図 1-2-3 デスクトップ計測装置の外観

図 1-2-4 は、計測システムの性能を評価するために、外場のない状態において、海水の塩 分濃度を変化させた場合の複素誘電率の実部である。測定系の寄生 LC の影響による共振点 や変曲点が生じずに、非常に綺麗な計測結果を示している。



図 1-2-4 デスクトップ計測装置で計測した複素誘電率の実部

図 1-2-5 は外部電磁場の影響を複素誘電率で観測した一例である。外場は海中に設置した真鍮電極間に整合回路を通して交流信号(9kHz)を印加している(図 1-2-2 参照)。外場無し、電極への印加電力0 dBm、+20 dBmの3 通りを実施した。図の左が複素比誘電率の実

部 (比誘電率を示す) であり、右図は虚部 (導電率を角周波数と真空中の誘電率で割った値) を示す。外部電場を海水に印加すると、そのレベルに応じて複素比誘電率は上昇する(外場 がない時に比して 1.4%、 1.9%)。実部は静電容量の増加を表しているが、根本的には計測 電流の実部の増大を意味している。つまり抵抗値の減少である。この結果は、シミュレーシ ョンで観測される、外場がある場合には水分子のダイポールモーメントが揃いランダムな 衝突が減少することを示している。虚部については、外場の印加により 1.9%、 2.4%の値の 上昇がみられる。外場によりイオンの移動方向が揃ってくると、分子もそれに連なって動き、 ランダムな熱雑音の中に秩序ある運動が現れて、イオンの平均速度を上昇させると考えら れる。図 1-2-6 は外場の加え方を導電電流とした場合と変位電流のみとした場合の差異を 示す。これまでの海水中のアンテナ実験では導電電流による印加の方が海水にエネルギー を移送する効率が高い傾向がある(ただし、後述の量子シミュレーションでは今のところ導 電電流の方が優位という結果は得ていない)。なお両者の波源の出力端の電力は0dBm で同 じであるが、海水への結合効率が容易に求められないため、複素誘電率に与える効果を振幅 量で比較することは難しい。この定量化の手段が今後の計測の課題である。図1-2-6を見る と、両者の複素誘電率(実部)の変化にはオーダを超えた差がない。正弦波状の振幅は観測 周波数と外部電磁場の周波数のビートであり、特に意味は無いと考えている。



図 1-2-5 外部電磁場の印加の有無による複素誘電率実部の比較(観測周波数:10 kHz)



図 1-2-6 導電電流を主成分として印加した場合と変位電流のみで印加した場合の差異

2) 海中現場型計測装置

世界で初めての海中複素誘電率計測装置を開発するため、較正された市販の LCR メータ を分解して耐圧容器に収納し、空気中から遠隔制御できるように光ファイバ通信をインタ ーフェースに利用した装置の開発を進めてきた(図 1-2-7)。一方、センサプローブはすで に所有していたプローブを評価し、問題点を改善しながら最終的に海中で利用できる形に 仕上げた。このプローブは1)で説明したものと同じである。



図 1-2-7 現場型海中計測システムの計測部とセンサプローブ(情報通信研究機構が開発した海中計測フレームへアドオン搭載)

当年度はこの現場型計測装置を実施項目 4-1 項で説明するセンシングシステムに搭載し、 海底下埋設物の計測と同時に、バックグランドの海水の複素誘電率を計測し、異常伝搬が生 じていないかと、センシングシステムの計測中に海水パラメータが変化しないかを確認し た。実験は、2019 年 8 月と 2020 年 2 月の 2 回に分けて静岡県沼津市の三津浜岸壁で実施し た。図 1-2-8 は 2 月に計測した海中の複素誘電率である。(a) は実部で比誘電率を表す。(b) は虚部で角周波数 ω で割ると導電率となる。図には時間をずらして計測した 3 つのデータ が記載されている。時間経過に従って複素誘電率は増加する傾向がある。(b) の 200Hz ~ 300Hz にディップ点があるが、電流の電圧に対する計測位相が 90°を超えてしまった為で ある。これはキャリブレーション値のずれによると考えられる。この時点のキャリブレーションは平行平板センサプローブの給電端でコネクタを外して open/short 較正を行っていた が、3 月に行った最終的なラボ試験で、センサプローブの電極面で short 較正を行えるよう に改良し、より計測精度が得られるようになっている。計測値は一般に ε_r =70~80 と言われ ている値より遥かに大きい、実計測では 100 kHz をこえると 80 に近づく事がわかっている が、平行平板型での計測複素誘電率は必ず低周波側で大きくなる。

図 1-2-9 はセンシングシステムによる海底下埋設物の探査試験中における、比誘電率の 時間変化をプロットしたものである。もし、探査用の電磁波によって海水パラメータが変化 すると比誘電率が変化するが、特に特異な挙動は観測されていない。

以上のように、現場型計測装置は完成し、任意の海中において一つの指標となると考えて いる複素誘電率を計測できるようにはなった。しかし、この計測装置の主たる目的は、異常 伝搬が発生しているかと、外場をかけることによって海水のバックグランドパラメータが 変化していないかを計測することであるため、今回の試験の程度では変化を捕まえること ができなかった。試験の回数を多数回こなすような、より実践的な場ではじめて威力を発揮 すると思われる。



(a) 複素誘電率の実部

(b) 複素誘電率の虚部

図 1-2-8 現場型海中計測システムで計測した複素誘電率



図 1-2-9 アクティブな電磁探査中の複素誘電率の時間変化

3) 海中アンテナの純水バッファの効果

この効果を計測するために、これまでに同じエレメントを有する異なる純水層の厚みを もつ複数のアンテナを作成して試験してきた。当年度は、海中でより精密な計測を可能とす る環境を、別プログラムで実施してきた海水計測水槽を用いて実現した。この水槽は、約2 m 角の水槽で、プログラムで *X*-*Y*方向に1 mm 単位で自動的にアンテナを移動させることが できる装置であり、これを用いてアンテナの評価ができるようになった。

さて、水槽については完成したばかりであり、この装置で計測できるアンテナの準備が研 究期間内には終了しなかったため、実海中で評価したデータを図 1-2-10 に示す。アンテナ 間が非常に近い場合は、電界結合が優勢なためにバッファの厚みを変化させたときよりも、 配置のずれによる減衰量の変化が大きい。しかし、アンテナ間を離していき、水中波長と同 等の距離以上になると(図中の円)、厚い方が減衰が少なくなる傾向がある。近傍のアンテ ナ同士の直接結合を無視すると、バッファ層(純水層)が海水中で占める割合が大きくなる と、アンテナから出た電磁波エネルギーが一旦水分子のダイポールモーメントを駆動し(損 失小)、純水のダイポールモーメントの振動が海水の水分子に移動するというシナリオが考 えられる。つまり、バッファ層の厚みによって、海水を構成する粒子へのエネルギー移送が 選択的に可能かもしれないと考えられる。ただし、その効果は全体的にみればほんの僅かで あり、バッファ層を大きくしたところで、最終的には分子やイオンへのエネルギー移送が発 生するということと理解できる。



図 1-2-10 アンテナの純水バッファ層を変化させた場合の送受信アンテナ間の減衰量

実施項目2 電磁場応答モデルとシミュレータの構築

2-2 微視的電磁場応答シミュレータの構築(担当:海洋研究開発機構)

(概要)

本研究項目では、海水を構成する分子とイオンに対して、電磁場からのエネルギーの入り 方や、分子とイオン間でのエネルギーの交換に、粒子の種類による差異が発生するかについ て粒子シミュレーションを用いて調べてきた。過去2年間は古典分子動力学(MD)法によっ てエネルギーの移動を調べてきたが、実験データから電磁場が「変位電流」として海水にエ ネルギーが移動する場合と「導電電流」として移動する場合で、エネルギー効率が違うのは ないかという疑問が生じた。これを調べるためには、導電電流(自由電子)が表現できない 古典 MD 法ではなく、第一原理による手法を用いる必要がある。そこで、新たに第一原理に もとづく密度汎関数法によるモデルを作成した。導電電流と変位電流を同じモデルで分離 して計算するモデルの構築に時間を要したが、計算可能と思われるモデルを用意し計算を 行った。系内の電荷密度の時間発展ならびにイオンの動きで、導電電流があるときと無い時 の電磁波からのエネルギー移動の評価を試みた。両者の計算結果に違いはあるが、エネルギ ーの入り方により発生したと思われる有意な差を観測できなかった。一方、磁場と電場と電 磁場を分けた古典 MD 計算においては、磁場は海水にエネルギーを供給できないことがわか った。磁場がイオンを加速するためには速度が必要であるが、熱運動はランダムでありベク トル平均はゼロになるためと思われる。よって、海水にエネルギーを注入するのは電場であ り、時間変動する電場が水分子の回転運動とイオンの並進運動を増加させる。

|粒子間のエネルギー交換については、古典 MD 法による計算結果に、相互相関関数法を適 用することで、水分子同士、イオン同士、水分子とイオンの間のエネルギー交換について評 価した。昨年度の検討では、回転運動を行う水分子と並進運動を行うイオンの間にエネルギ ー交換が発生する理由が不明であったが、今年度の古典 MD 法によるシミュレーションのデ ータから、水分子も回転運動を行いながら他の粒子とぶつかり合い並進運動をしており、そ のためにイオンとエネルギー交換ができると考えられる事がわかった。しかし、そのように 考えると、正弦波振動する電場によって調和振動する分極水分子の回転エネルギー自体は どのように消費されてしまうのか。計算している周波数では、水分子のみの振動により見か けの摩擦が起きて熱運動に変換される量は少ないはずであり、必ずイオンが介在するはず である。系の温度上昇の特性と水分子の振動、水分子・イオンの変位量を観察すると、外場 による水分子の振動の振幅は電場をかけ始めた時点から一定であるが、イオンの変動量は 次第に大きくなっていく。ということは、イオンの移動に使用されるエネルギーが大きくな っていくことを示している。また、この時に正イオンと同じ方向に水分子も変位している。 温度上昇も時間とともに線形ではなくエクスポーネンシャルに上昇している。これらの計 算結果から、先の疑問である、水分子の振動エネルギーはイオンによって消費されていると 裏付けられる。未解明なのはエネルギー輸送のメカニズムのみである。

以上のように、最終年度においては、疑問であった海水の電磁場応答について、電磁場か ら粒子へのエネルギー輸送過程と、粒子間のエネルギー交換について解明できた部分があ る。しかし、完全な描像を理解するための結果は得られなかった。よって、マクロシミュレ ーションに反映することはできなかった。

(詳細)

1) 第一原理シミュレーションによる海水へのエネルギー注入メカニズム解析

このシミュレーションでは、海水に変化する電場(変位電流)を加えた場合と、直接電流 (導電電流)を流した場合で、電磁場から海水に注入されるエネルギー効率が変化するかど うかを確認する。第一原理計算は時間発展を追える(電子の動きを表す)手法が少ないが、 密度汎関数法を用いたモデルを製作した。デバイスに電場を加えた場合の界面の物理を探 るためによく使われる、片側が金属、反対側が真空で、その間に評価材料(ここでは海水) がある構造を用い、金属と海水の間の絶縁層(シリコン膜)の有無によって、導電電流か変 位電流かを分離できるようにモデル化した。ある電場をかけた時の電流量を計測すること で、系に入ったエネルギー量を計測したかったが、この計算では電流の発散がゼロ(div *i* = 0)とできなかったため、電荷密度での評価とした。また、イオンの変位も観測した。表 2-2-1に計算条件を、図 2-2-1に計算モデルを図示する。

図 2-2-2 が計算結果の一例で、上側がステップ電場を加えてから 140 fs 後の差電荷密度 の空間配置(計算初期からの電荷密度の z軸の変化量)、下側がアルミ板上のイオン変位の 時間変動である。差電荷密度は、時間とともに海水の中央の差電荷がマイナス(電子が減る) になっていった結果である。導電電流がある場合は中心部の電子の残りが少ない(=早く移 動?)ようにも見られるが、確定したことが言える有意なデータではないと思われる。アル ミ板におけるイオンの変位の差異も説明できるデータではない。計算時間が 0.14 ps と海 水の振る舞いを評価するために必要な 10 ns のスケールに対して、一万分の一の時間と十 分でないことから期待する変化が現れていない可能性もある。以上のことから、初めての試 みである第一原理計算の結果は、エネルギー輸送を説明できるような結果とはならなかっ たが、モデルの作りかた、シミュレーション上の課題などは抽出することができた。

条件	説明
水分子数	113 個
イオン数	Na:7個、Cl:7個
金属基板	Al(111) 2 層
絶縁体層	Si 1 層
基板面積	$14.3168\text{\AA} imes 14.87844\text{\AA}$
印可電圧	50MV/m (Constant- μ 法)
温度	293К
時間刻み	0.5fs
第一原理計算条件	計算方法:密度汎関数法
	交換相関関数:PBE
	波動関数カットオフ:10Ry
	電荷密度カットオフ:80Ry
	擬ポテンシャル:ウルトラソフト擬ポテンシャル

表 2-2-1 第一原理計算の条件



図 2-2-1 第一原理計算のモデル



図 2-2-2 第一原理計算結果(σ = 28 S/m、 T = 20 ℃、 E_{ext} = 50 MV/m、 t =140 fs)

2) 古典 MD 計算による解析

汎用オープンコードの LAMMPS を用いた古典 MD 法の計算では、電子の振る舞いを無視し た電磁場を海水へ印加した場合の粒子シミュレーションと、粒子間のエネルギー交換のシ ミュレーションを実施した。今年度のモデルでは、外場として正弦波の完全な電磁場を用い、 必要に応じて電場または磁場のない場合についても計算を行った。粒子に与える力の方程 式を

$$m_i \ddot{\boldsymbol{r}}_i = \boldsymbol{f}_i + q_i \boldsymbol{E}(t) + q_i \boldsymbol{v}_i \times \boldsymbol{B}(t) \qquad (2-2-1)$$

とし、与える電場と磁場の式を

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t)(0i + 0j + 1k) \qquad (2-2-2)$$

$$B(t) = B_0 \cos(\omega t)(1i + 0j + 0k) \qquad (2-2-3)$$

とした。また、海水の導電率によって一意に電場と磁場の関係が決まるとして、式 2-2-4、 式 2-2-5の関係を用いた。

$$E = Z \frac{B}{\mu} \tag{2-2-4}$$

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{2\pi f \times 4\pi \times 10^{-7}}{\sigma}} e^{i\frac{\pi}{4}} \qquad (2-2-5)$$

以上の計算におけるパラメータを表 2-2-2 に示す。

項目	説明
計算モデル	水のみのモデル、及びイオンを含むモデル • イオン: Na ⁺ イオン及びCl ⁻ イオン • 塩分濃度:可変パラメータ • 計算セルサイズ:~10nm程度
圧力	1 atm
相互作用ポテンシャル	水分子:SPC/Eポテンシャル イオン:Lennard-Jonesポテンシャル
シミュレーション時間	~10ns程度
使用コード	LAMMPSベース

表 2-2-2 古典 MD 法による計算のパラメータ

最初に、電磁場による計算結果と電場のみ、または磁場のみのイオンの変位量の計算結果 を図 2-2-3 に示す。電場のみと電磁場の同条件の差異は粒子運動の初期条件が異なる程度 の差しか見受けられないが、磁場のみと電磁場の場合の差異は完全に異なる。磁場のみでは、 磁場強度が 10 T と実験室で発生するのが簡単ではないレベルにも関わらず、粒子は全く影 響を受けていない。電磁場にするとイオンは正弦波振動する。掲載していないが水分子のダ イポールモーメントも同様である。このことから、磁場は海水粒子にエネルギーを渡すこと ができないと言える。この理由は粒子の平均速度が0であり、vx B力が出せないためと考える。ただし、古典 MD 法では海水中の電子の効果は表現できないため、海水中にある自由 電子の効果を加味すると、変化が現れる可能性はある。



図 2-2-3 海水イオンの場の違いによるレスポンス差

実施項目3 浅部海底下埋設物検出方法の研究

3-1 海中アンテナアレイの研究(担当:情報通信研究機構)

(概要)

2018 年度までに開発した海中アンテナ(バッファ層付)について、純水バッファ層のサ イズ最適化の検討を行った。また、海底下センシングに向けたアンテナアレイ構成の最適化 を行うため、アンテナアレイの配置方法について、実施項目2で構築した巨視的電磁場応答 シミュレータを活用し、送受信アンテナの間隔を変えて検討を行った。波形についてはチャ ープ波も想定していたが、今回の業務で製作したアンテナでは帯域が狭く効果が小さい。 AUV の移動速度などを考慮して、現状では連続波が適切と考える。

(詳細)

1) 海中アンテナの純水バッファ層のサイズの最適化検討

これまで実測結果をもとにメッシュの最適化を行った巨視的電磁場応答シミュレータに 対して、アレイ配置のしやすさやアンテナの扱いやすさ、帯域の広さを考慮して、アンテナ を微小ダイポールアンテナのモデルを作成してきた。図 3-1-1 はシミュレーションでの評 価モデルである。黄色の金属棒は銅で、長さは 395mm、直径 20mm の円柱となっている。ま た、ループアンテナと同様に給電点及び金属棒の一部の周囲には純水のバッファ層をつけ ている。バッファ層の大きさは直径 100mm で長さは 500mm とした。バッファ層は金属をす べて覆ってはおらず半分はむき出しの状態である。2 つの金属は同軸ケーブルからそれぞれ 信号と GND を配線しており、上部に同軸のコネクタを取り付ける構造としている。



図 3-1-1 シミュレーション中のアンテナモデル

ここでは、純水のバッファ層の大きさがアンテナの性能に与える影響を検証し、最適なバ ッファ層のサイズを決定する。アンテナの動作周波数は、これまでのセンシング測定実験か ら一番扱いやすい 1MHz を対象とする。アンテナのバッファ層のサイズについては図 3-1-2 のように、バッファ層の長さ方向と厚み方向をそれぞれ変化させる。また、図 3-1-3 のよう に送受信アンテナを配置し、送受信アンテナ間の *S*₂₁の減衰量をもって評価を行った。送受 信アンテナの距離は 125cm で固定とする。



図 3-1-2 アンテナの純水バッファ層の最適化のためのモデル調整





図 3-1-3 バッファ層のサイズ評価のための送受信アンテナの位置

まずは、海中アンテナの純水バッファ層の長さを変化させた場合のシミュレーション結 果を図 3-1-4 に示す。横軸は海中アンテナの純水バッファ層の長さ、縦軸は送受信アンテナ の *S*₂₁ (減衰の伝送特性)を示している。純水バッファ層は 80cm で電極の先が 0.5cm だけむ き出しになっている状態である。10cm から 40cm までは純水バッファ層を長くするにつれて 減衰は小さくなり、40cm を超えてからは徐々に減衰が増大し、70cm あたりからは急激に減 衰が大きくなっている。40cm はアンテナ長のほぼ半分で、1 MHz の場合では最適な純水バッ ファ層の長さになっていることが分かる。



図 3-1-4 海中アンテナの純水バッファ層の長さを変化させた場合の S21 (減衰)

次に、海中アンテナの純水バッファ層の厚みを変化させた場合のシミュレーション結果 を図 3-1-5 に示す。バッファ層の長さは先ほどの結果を考慮し、40cm としている。横軸は 海中アンテナの純水バッファ層の厚み、縦軸は送受信アンテナの S₂₁ (伝送特性) を示して いる。これまで評価や実際に製作している海中アンテナのバッファ層の厚みは4cm である。 シミュレーション結果からおよそ 1.2cm の厚みから送受信アンテナ間の減衰が急激に小さ くなっていることが分かる。またそれ以上からは少しずつ減衰は小さくなっているが、送受 信間の海水の部分が短くなり純水の部分が長くなるため、その分だけ減衰が小さくなるこ とも考えられる。つまり、1MHz の周波数では最低 1.2cm くらいの厚みのバッファ層の厚み を設けることで、十分な効果が得られることがわかる。



図 3-1-5 海中アンテナの純水バッファ層の厚みを変化させた場合の S21

2) 海底下センシングに向けたアンテナアレイ構成の検討

次に、アンテナの配置方法によるセンシング可能な埋設深さの検証を行い、アンテナアレ イの配置方法の検討を行った。図 3-1-6 はシミュレーションで使用したモデルである。実験 との整合をとるため、図 3-1-7 と同じアンテナ配置としている。送信アンテナと受信アンテ ナの距離は 1.25m、送受アンテナと海底面までの距離は 0.5m とした。海底下センシングの 対象となる埋設物を海底面からの距離を変えながら、送受信アンテナ間の電波伝搬特性を 解析し、センシング可能な埋設深さの検証を行った。ここでは、擬似埋設物の大きさは 1m 四方、厚みは金属(銅) 1mm、誘電体(ポリカーボネート) 5mm としている。また、土の含水 率は 25%とした。





図 3-1-7 実際に行った実験でのアンテナ配置

図 3-1-8 は埋設深さごとの各埋設物の位置での、埋設物の有無での S₁減衰量の差分を示 している。擬似埋設物は金属板(銅板)を用いた。埋設物の位置 0cm が送信アンテナの真下 に、埋設物の中央がある場合をあらわしている。埋設物の深さは 10cm (D10) から 60cm (D60) までとしている。シミュレーション結果から埋設物の深さが浅い (10cm) ほど埋設物の有無 での減衰量の差が大きくなっていることから、センシングでの埋設物の判別がしやすいこ とが分かる。埋設物の位置が深くなると埋設物の有無の減衰量の差が小さくなっていき、判 別が難しくなっている。約 50cm ではほぼ差がなくなっており、送受信アンテナ間の距離が 125cm のアンテナ配置では埋設深さの検出能力は 50cm より浅い深さまでということが分か る。また、図 3-1-9 は埋設物として誘電体 (ポリカーボネート)を用いた場合の結果を示し ている。金属の場合と同様に、埋設物の深さが浅いほど埋設物の有無の減衰量の差が大きく なっており、深くなるほど差は小さくなっている。図 3-1-10 に埋設深さを変えた場合の埋 設物無との減衰量の差分を示す。埋設物の位置は 60cm とした。誘電体は金属と比べて、深 くなるにつれての埋設物の有無の減衰量の差が小さくなる速さが早くなっており、約 40cm で差分がほぼなくなっている。



図 3-1-8 埋設深さごとの各埋設物位置での S₂₁減衰量の埋設物無との差分 (金属)



図 3-1-9 埋設深さごとの各埋設物位置での埋設物無との S₂₁減衰量の差分 (誘電体)



図 3-1-10 埋設物の有無による埋設深さを変えた場合の減衰量の差分 (金属と誘電体の比較、埋設物の位置 60cm)

図 3-1-11 は埋設深さごとの各埋設物の位置での、埋設物の有無での Su 位相の差分を示 している。擬似埋設物は金属板(銅板)を用いた。減衰量のグラフと同様に、埋設物の位置 0cm が送信アンテナの真下に、埋設物の中央がある場合をあらわしている。埋設物の深さは 10cm (D10) から 60cm (D60) までとしている。シミュレーション結果から、位相の場合でも 埋設物の深さが浅い (10cm) ほど埋設物の有無での差が大きくなっていることから、センシ ングでの埋設物の判別がしやすいことが分かる。埋設物の位置が深くなると埋設物の有無 の位相の差が小さくなっていき、判別が難しくなっている。位相の場合でも約 50cm ではほ ぼ差がなくなっており、送受信アンテナ間の距離が 125cm のアンテナ配置では埋設深さの 検出能力は 50cm より浅い深さまでということが分かる。また、図 3-1-12 は擬似埋設物と して誘電体(ポリカーボネート)を用いた場合の結果を示している。誘電体の場合では、深 くなるほど差は小さくなっているものの金属に比べて位相の差が小さく、判別が難しくな っている。図 3-1-13 に埋設深さを変えた場合の埋設物の無との位相の差分を示す。埋設物 位置は 60cm とした。金属の場合は深くなるにつれて、埋設物の有無の位相の差が小さくな り、約 50cm で差分がほぼなくなっているが、誘電体はあまり変化がない。これは減衰量の 結果と合わせて、金属か誘電体かの判別に利用できる可能性がある。



図 3-1-11 埋設深さごとの各埋設物位置での S₂₁位相の埋設物無との差分 (金属)



図 3-1-12 埋設深さごとの各埋設物位置での埋設物無との S₂₁位相の差分 (誘電体)



図 3-1-13 埋設物の有無による埋設深さを変えた場合の S₂₁位相の差分 (金属と誘電体の比較)

次にアンテナアレイの配置方法の検討のため、送受信アンテナ間隔を変えてシミュレーションを行った(図 3-1-14)。図 3-1-15 はアンテナ間隔を 1.75 m に変えた場合の埋設深さごとの各埋設物位置での擬似埋設物(金属板)無との S₂₁位相の差分を示している。1.25mの場合と異なり、深さが 20cmの方がより大きな変化となっている。



図 3-1-15 アンテナ間隔 1.75m の場合の埋設深さごとの各埋設物位置での埋設物無との S21 位相の差分(金属)
図 3-1-16 はアンテナ間隔を変えた場合の擬似埋設物(金属板)有無の S₂₁ 減衰量の比較 を示している。アンテナ間隔が 1.25m の場合には埋設物位置 60cm、アンテナ間隔が 1.75m の場合には埋設物位置 90cm における結果を示している。アンテナ間隔が 1.25m の場合は約 50cm で変化がなくなっていたが、1.75m では約 80cm まで埋設物の有無での変化がみられる ことから、アンテナ間隔を広げた方がより深い位置の埋設物を検出可能となる。しかし、海 水での電波の減衰量は大きいため、あまり送受信アンテナ間隔を離しすぎるとそもそもの 変化も検出が困難となる。

以上のことから、検出できる範囲で送受信アンテナ間隔を変えた場所でのアンテナ配置 をすることで、深さ方向の検出もできる可能性があり、送受信アンテナ間隔の距離を変えた 複数の設置が適切と考える。



図 3-1-16 アンテナ間隔を変えた場合の埋設物(金属板)有無の S21 減衰量の比較

3) 送信波形についての考察

送信波形については、これまで各使用周波数の連続波を使用している。これは測定用のプ ラットフォームが移動した場合においても、測定に影響を受けにくく、安定してセンシング できるため、有効な手段であると考えられる。また地上でのセンシングでもよく用いられて いる周波数を変えながら測定を行う、チャープ波についても利用の可能性を考えてみたが、 図 3-1-17 のように低い周波数で小型に作られている海中アンテナの周波数帯域は狭く、製 作した海中アンテナの利用可能な周波数帯域では効果は得られない。また周波数をスイー プするには一定以上の時間が必要なためプラットフォームの移動速度に制限がかかること が考えられる。特に低速移動となると安定した航行が難しくなることから、一定以下の速度 にはできない場合もある。そこで、現状の海中アンテナ、測定装置、プラットフォームを考 慮すると連続波が安定してセンシングできると考えられる。



図 3-1-17 海中アンテナの帯域 (S11 反射特性から)

3-2 スパース信号処理を用いた埋設物検出アルゴリズムの研究(担当:情報通信研究 機構)

(概要)

埋設物検出アルゴリズムについて、これまでの実施項目1及び実施項目2の成果を活用 し、検出性能の向上を図った。課題3-1との連携によって、海底下浅部の擬似埋設物に 対する検出実験を行い、最終目標に記載した検証条件を満たすために必要となるパラメー タ(アンテナ配置等)を決定した。

研究内容の主たる記載は別冊にあります。

3-3 海中電磁場応答・アンテナ・実海域試験に関する研究(担当:海洋研究開発機構)

(概要)

- 海中アンテナの最適化条件を明確にするために、主として用いている半露出型電極アンテナ(実施項目3-1で用いている海中アンテナ)について、国内のアンテナ知見者とディスカッションを行い、さらに、微視的シミュレーションの結果を考察することによって、海中でのアンテナ動作について適正と思われる結論を得た。また、動作について理解したことから、開発してきたアンテナ性能評価手法が適正であることがわかった。
- 静電ポテンシャル計測装置を製作し、実施項目4-1で用いる海中プラットフォーム へ搭載して海底下の埋設物の同時計測を行い、金属体であれば、静電ポテンシャルの 計測法でも、埋設物の探知とおおよその大きさを知ることができることがわかった。

(詳細)

1) 半露出型電極アンテナの動作解析と評価方法

これまで、経験的に海中で用いるダイポール型アンテナ(電場反応型アンテナ)は、そ のエレメントを海水から絶縁するのでもなく、完全に海水に露出するのでもなく、半分の 長さを海水に露出すると性能が良いことが分かっており、その構造のアンテナを利用して きた。海中における各アンテナの性質は下記の通りである。

- 絶縁ダイポールアンテナはインピーダンスの実部はゼロに近く、リアクタンスは非常に大きくなる(ただし、2mのエレメントの場合は、周波数が1 MHz を超えると100 オーム以下に低下する)。
- ・ 露出ダイポールは、実部は数オームで虚部はほぼゼロとなる。

効率はアンテナ長が2mのときで、

- 絶縁ダイポール:周波数10 kHz~10 MHz で-60 dB 程度。
- ・ 露出ダイポール:周波数の低域側で -40 dB で、周波数が1 MHz を超えると絶縁ダイポ ールよりも効率が低下する。

いずれのアンテナ構造をとったとしても、入力インピーダンスが非常に低いため、マッチン グ回路の損失がとても重要となる。図 3-3-1 は別プロジェクトで検討をしている異なるア ンテナにおける伝送効率の変化の計算結果である。絶縁アンテナは赤色、露出アンテナは黒、 エレメントの半分だけ露出した場合が青で書かれている。このデータをみると、露出型か半 露出型が絶縁型より海中性能が高い。しかし、シース厚み=純水バッファ層の厚みを十分と っての計算は行っていないため、完全に絶縁型が悪いとは言い切れない。このことは、実施 項目 1-2 のデスクトップ実験では、アンテナを海水の外に置いた場合は、海水へのエネルギ ー注入効率には導電電流と変位電流で有意な差が見られなかったことから、バッファ層が 薄いために単純にアンテナエレメントが海水に近く、上述のようにインピーダンスが低く マッチングが取れないことによると推定できる。



図 3-3-1 海中ダイポールアンテナのエレメントの海水暴露部の面積を変化させたときの同 じアンテナ間の伝送効率計算。出典: H. Sato, *et al.* "Dipole antenna with sheathcover for sweater use," ISAP 2017.

また、別の検討では、半露出型アンテナの伝送効率は、露出部分の長さにはあまりよら ず変化しないことがわかっている。露出型についてはエレメントの覆いが、

・長いと電極間隔が広がるため、特に受信アンテナにおける電位差が増大

・短いと電極面積が増加し、特に送信アンテナにおいては電流量が増大

と言える。また、FDTD (時間領域差分法) によるシミュレーションでは、

・電界の海水中での広がりが、露出部がエレメントの半分の時に最大となる

という結果もある。粒子シミュレーションにおいては、

・磁界ではイオン・分極は、励起されない。

・電界によるイオンが加速(導電電流)し、分極振動もドライブされる

などと言える。

海水におけるアンテナ評価は、上記の考察から、海水におけるアンテナのインピーダンス 低下の影響が著しいことから、10 kHz であっても、ラジアン球程度のサイズの水槽を用い ればアンテナ自体の特性に大きな影響は与えないと思われる。また、空気層での反射波の影 響を 20 dB 以上低下させたいときは、100 kHz で被測定アンテナの周囲が 1m以上海水とな るような水槽が利用可能である。さらに影響を抑えたいときは、石井らによるアンテナの相 似則を使い、周波数を MHz オーダまで上げればより小さな水槽であっても、水槽サイズの影響を受けないアンテナ計測が可能となる。

2) 静電ポテンシャルによる計測

昨年度までに製作した銀一塩化銀電極と、データロガーを用いて、計測フレームに搭載し て擬似埋設物の探査試験を行った(図 3-3-1)。電磁波の送信アンテナ(フレーム中央)を 基準として、両サイドに120 mmの間隔をあけて計測電極を取り付け、ロガーの近くにリフ アレンス電極を配置して計測を実施した。図 3-3-2 に計測電極と測定対象の配置図(上面図 と側面図)を示す。擬似埋設物上に厚み10 cmの土嚢を載せることにより埋設状態を模擬し ている。プラスティック製の可動台車に載せた擬似埋設物と土嚢を、海中のダイバーが人力 で移動させる。移動したときのリファレンス電極に対する差電位を CH1~CH3 の各電極で計 測する。計測したポテンシャルは海中ロガーにより、50 ms 間隔で記録する。試験は 2019 年 11 月と 2020 年 2 月の 2 回に渡って実施したが、いずれも CH1 のデータが飽和したため、 評価は CH2 と CH3 のデータを使って行った。海中では金属がある場合に負のポテンシャル が観測できる。



図 3-3-1 計測フレームに搭載した静電ポテンシャル計



図 3-3-2 静電ポテンシャルの計測コンフィグレーション

図 3-3-3 は 2019 年 11 月 14 日に沼津市の三津浜岸壁で計測した海中の自然ポテンシャル である。擬似埋設物は(a)何もない場合、(b) 1 m x 1 m アルミ板、(c) 1 m x 1 m ポリカ ーボネート板の 3 種類を用い、x 方向の位置を±100 cm の範囲で移動させたときのポテン シャル変化を計測した。CH2 は x = -21 cm、 CH3 は x = -141 cm である。グラフが全体的 にランダムに変動してしまっているのは、擬似埋設物を移動するために金属製の酸素ボン べを背負ったダイバーが移動しているためと思われる。特に、擬似埋設物を動かす直前から、 擬似埋設物の移動時の変化が大きく、擬似埋設物の移動が終わっている間の変動は小さく なっている。なお、グラフ中の赤色の縦線は擬似埋設物が移動を開始する点で、ダイバーは この前後で海中を移動している。



図 3-3-3 擬似埋設物を動かした時の静電ポテンシャルの変化(2019 年 11 月 14 日計測)

電磁波を用いたアクティブな計測方法では、計測時だけダイバーに影響のない点に移動 してもらえば良いが、静電ポテンシャルでは常時計測状態であることに加え、広がりが大き い自然電位を計測しているため、ダイバーの影響を取り去ることはできなかった。

図 3-3-3 のアルミ計測のデータを注意して観測すると、(a) (c) とは明らかに違う様相が確 認できる。10:50:49 の点から擬似埋設物を-100 cm から+100 cm に移動している。ダイバー の接近によって大きな山がでてしまっているが、橙の横線に注目すると、-100cm からプラ ス側に移動していくと CH2 では最終的にダイバー効果がなくなると、-100cm のラインから 0.03 V 低下している。一方、CH3 では、0.08 V 低下している。 CH2 は-21 cm にあるため、 -100cm→+100cm の移動ではポテンシャルが一旦低下し、-21cm で最低値となり、+100cm で 最初より若干低い値となるが、計測値はそのようになっている。CH3 は-141cm であるから、 移動とともにポテンシャルは低下し+100cm で最低値となる。グラフはそのような傾向を示 すとともに、この値は他の時間における+100cm の値に等しい。このような傾向は擬似埋設 物なしとポリカーボネートでは現れていない。





(b)アルミニウム板

図 3-3-4 擬似埋設物を動かした時の静電ポテンシャルの変化(2020 年 2 月 18 日計測)

図 3-3-4 は同じ計測を 2020 年 2 月 18 日に同じ場所で行った結果である。(a) は擬似埋設 物なし、(b) はアルミニウム板の場合である。(a) では前回と同じように、擬似埋設物の位 置を変化させるタイミングの前後でポテンシャルの変動が発生しているが、ダイバーの移 動による影響であると思われる。注意深く移動直後のデータをみても、一貫性のある傾向は 読み取れない。一方(b)のデータを見ると、移動開始の直後に意味のある変化が読み取れる。(b)の CH3(下の図)が明確な傾向を捉えている。15:57:30 から擬似埋設物を正の方向に動かし CH3 電極に近づけて行くとポテンシャルは 0.05V 低下する。16:01:38 から負の方向に移動すると、ポテンシャルは 0.05V 上昇している。CH2 では、V 字の変化が読み取れるはずであったが、リニアに変動していないだけでその傾向は読み取れなかった。

以上の観測結果をまとめると

- ・ 金属の擬似埋設物が移動することによるポテンシャルの変動は理論に似通った傾向を 示す。
- ・ その他の物体では埋設物の移動に相関のあるポテンシャル変動は観測されない。
- ・ 金属を装着したダイバーの作るポテンシャルが大きくノイズとなる

ことがわかった。これらの結果から、静電ポテンシャルの計測によって、海底下埋設物の検知は金属であれば行える可能性があることがわかった。

実施項目4 海底下センシングシステム製作と浅海域試験の実施

4-1 海底下センシングシステムの製作及び海中プラットフォームへの搭載と試験の実施(担当:情報通信研究機構)

(概要)

平成 30 年度の実施項目4では、システムの設計と一部の製作が目標であったが、計画を 前倒しでシステム設計と製作を実施完了することができた。また、海中プラットフォームへ の搭載も実施済みである。

そこで平成31年度は、まず、平成30年度の実施項目4で得られた知見を踏まえつつ、海 底下センシングシステムの改修および実験を効率よく実施するため、海底下センシングシ ステムの改修項目および実験方法の改善点を抽出した。

システムの改修と実験方法の改善を行った後、静岡県沼津市のオキシーテック周辺の浅 海域において3回試験を実施した。海底下センシングシステムの改修および実験方法の改 善を行ったことで、前年度までに起きていた問題を解決し、十分な実験時間を確保すること ができた。実験結果から、「擬似埋設物があった場合」と「擬似埋設物がない場合」の受信 信号のレベル差および位相差を見ることで、埋設物の有無を判断できることを確認できた。 また、「3-2スパース信号処理を用いた埋設物検出アルゴリズムの研究」で実施したスパー ス信号処理を用いた埋設物検出アルゴリズムを海底下センシングに適用することで、海底 下の有無だけではなく、金属か誘電体か判別可能であることを実証した。

(詳細)

海底下センシングシステムの製作

平成 30 年度の実施項目4では、システムの設計と一部の製作が目標であったが、計画を 前倒しでシステム設計と製作を実施完了することができた。

平成 30 年度に製作した海底下センシングシステムの系統図を図 4-1-1 に示す。センシン グシステムは大きく分けると制御部、送信部、受信部、遠隔操作部及び電池から構成される。 図 4-1-2 に製作した、耐圧容器に入れた制御部、送信部、受信部、バッテリー及びパワーア ンプを示す。制御部、送信部、受信部、センサ類およびバッテリーはそれぞれ耐圧容器へ収 納し、深度 200m 以浅までの海中で利用可能な設計とした。

制御部は、情報通信研究機構が保有する海中チャネルサウンダで使用した耐圧容器を活用 し、改修して使用した。制御部は、海底下埋設物センシング実験を行う際に必要なセンサ類 (ネットワークカメラ、LED ライト、CTD 計、高度計、姿勢角センサ)を搭載するためのイ ンターフェースを有している。また、陸上からの遠隔操作を行うため光ファイバケーブルを 接続するためのコネクタを有している。さらに、センサが計測したデータを記録するため、 小型 PC を実装している。



図 4-1-1 海底下センシングシステム系統図



(a) 制御部容器外観



(b) 送信部容器外観



(c) 受信部容器外観



(d) バッテリー容器外観



(e) パワーアンプ容器外観

図 4-1-2 製作した耐圧容器・フレーム・アンテナ固定治具

送信部は、制御部と水中ケーブル(Ethernet および電源供給用)で接続されている。送 信信号源としてソフトウェア無線機を搭載している。発射する信号は、送信部と接続された パワーアンプで増幅され、送信アンテナから放射される。

受信部は、送信部から発射された電波を受信するための受信アンテナが搭載されている。 受信した信号の検出分解能を高めるためには、アンテナをアレイ化する必要がある。そこで、 受信部には最大4本の受信アンテナを取り付けることが可能な構成とした。受信アンテナ アレイで受信した信号は、受信した信号を増幅するための低雑音増幅器(LNA)を介して計 測機器(VNA/IQアナライザ、もしくは、4ポートネットワークアナライザ)へ受信信号が 入力される。受信した信号に対して、リアルタイムに水中で信号処理を行うため、信号処理 用のハードウェアを受信部に搭載し、埋設物検出アルゴリズムを信号処理用のハードウェ アに実装した。受信部に含まれる装置のうち、4 ポートネットワークアナライザを開発した。 図 4-1-3 に外観を示す。埋設物センシングにおいては、4 本のアンテナを用いたアレイ構成 を検討していることから、4 チャネル同時計測が行える構成としている。測定対象周波数帯 は 10kHz~10MHz とした。測定値のうち、位相計測には高い分解能を持つ必要があることか ら、計測した位相は 20 ビットのビット幅で数値を出力できるようにしている。これにより、 10⁻³[deg]以下の微小な位相変化を計測できるようにした。このように微小な変化量を計測 する装置であることから、外来放射雑音による計測への影響を低減するため、図の写真に示 すように金属製の筐体とした。また、陸上からの遠隔操作・監視を行うため光ファイバケー ブルを接続するためのコネクタを有しており、制御部・送信部と受信部にそれぞれ電源供給 用のバッテリーを搭載し電源供給を行う構成とした。



図 4-1-3 4 ポートネットワークアナライザ 外観図

図 4-1-4 には、船上においてセンシングシステムの制御を遠隔制御部から行っている様 子を示している。遠隔操作部は、制御部および受信部に接続されている光ファイバケーブル を接続するための 0/E コンバータを有する。0/E コンバータによって光信号と電気信号を変 換し、RJ45 コネクタの LAN ケーブルを Gbit スイッチングハブと接続することで、陸上の PC から、海中のセンシングシステムを遠隔操作・監視することが可能である。

また、陸上からの遠隔操作・監視を行うため光ファイバケーブルを接続するためのコネク タを有しており、制御部・送信部と受信部にそれぞれ電源供給用のバッテリーを搭載し電源 供給を行う構成とした。



図 4-1-4 遠隔制御部

海中プラットフォームへの搭載

当初計画では海中プラットフォームとして海洋研究開発機構が所有する作業型自律無人 探査機「おとひめ」を利用する構想であった。しかしながら、実際にモノづくりを進め、海 域試験を繰り返すうちに、本システムの評価を正確に行うためには、既知の埋設物に対して cmオーダの位置誤差で探査実験を行う必要があることが判明した。しかし、「おとひめ」を 利用して海中の絶対位置計測誤差を10 cm 以下のレベルに保ちながら試験を行うことは非 常に難しいため、専用の計測装置を利用する必要があるということになった。検討の結果、 情報通信研究機構で製作して評価に用いている吊下フレームを海底に設置し、擬似埋設物 のほうを動かすと良いと結論した。よって、海洋研究開発機構が担当する予定の搭載検討に ついては、情報通信研究機構が実施した。吊下フレームへの搭載方法の検討し、設計した容 器を搭載した状態の海底下センシングシステム吊下フレーム外観図を図 4-1-5 に示す。平 成 30 年度実施項目 1-2 微視的電磁場応答の測定系構築(担当:海洋研究開発機構)中に ある、微視的電磁場応答特性として海水中の分子・イオンクラスター等の振る舞いを計測す るセンサも含めて吊下フレーム上段に搭載可能か検討した結果、搭載可能であることを確 認できた。実際に、海底下センシングシステムを吊り下げフレームに搭載した様子を図 4-1-6 に示す。



図 4-1-5 海底下センシングシステム 耐圧容器搭載時の吊下フレーム外観図



図 4-1-6 海底下センシングシステムを吊り下げフレームに搭載した様子

海底下センシングシステムの改修(二次製作)

平成 31 年度は、まず、平成 30 年度の実施項目 4 で得られた知見を踏まえつつ、海底下センシングシステムの改修および実験を効率よく実施するため、海底下センシングシステムの改修項目および実験方法の改善点を抽出した。抽出した海底下センシングシステムの改修項目および実験方法の改善点を以下に示す。

海底下センシングシステムの改修項目および実験方法の改善点

- 1) 受信容器の容器内温度上昇抑制
- 2) 擬似埋設物を動かすためのレールの設置方法
- 3) 実験時、擬似埋設物の埋設深さをどのように深くするか
- 4) 実験時間の確保

これらの検討事項の詳細について、以下に示す。

1) <u>受信容器の容器内温度上昇抑制</u>

2019 年 2 月に静岡県沼津市で実験を行った際、受信容器内の温度が上昇したことにより VNA 内部の CPU パフォーマンス低下(動作が遅くなる、電源シャットダウン)する現象が確 認された。また、測定条件を変えていないに関わらず、*S*₂₁ 測定時に測定結果が変動するこ とが確認された。これは VNA 内部の恒温槽付水晶発信器から発振される周波数が容器内の 温度変化により変動したためである。本研究で検討している海底下に埋設された物体を検 出する手法では、海底下に埋設物がある場合とない場合での *S*₂₁ のレベル、位相の変化量を 用いて海底下に埋設された物体を検出しなくてはならないため、測定結果が温度変化によ り変動することは好ましくない。以上の理由から、受信容器の容器内温度上昇抑制するため、 平成 31 年度は実験を行う前に、受信容器の改修を行うことにした。

平成 30 年度に製作した受信容器は、MC ナイロンの蓋とアクリルパイプで構成されてお り、受信容器外に放熱されにくい構造となっている。そこで、海中において受信容器内の熱 が容器外へ放熱しやすくするため、受信容器の蓋は、熱伝導性が MC ナイロンよりも高いア ルミとすることにした。また、受信容器内部のモジュールを固定するための治具の材料もア ルミにし、治具と発熱量が大きいモジュールを可能な限り接触させ、モジュールから発生す る熱を治具に逃すことにした。さらに、治具とアルミの蓋は熱が伝導するように固定した。 このような構造とすることで、海中において受信容器の容器内温度上昇を抑制することが 可能となる。改修前と改修後の受信容器を図 4-1-7 に示す。



図 4-1-7 改修前と改修後の受信容器

2) 擬似埋設物を動かすためのレール、擬似埋設物の投入・回収方法

2019年2月に静岡県沼津市で実験を行った際、擬似埋設物および擬似埋設物移動用レー ルの海中への投入方法は吊り下げフレームに擬似埋設物と擬似埋設物移動用レールをロー プで繋ぎ、フレーム・擬似埋設物・レールを同時に海中へ投入する方法であった。この方法 は、海中に投入された後、擬似埋設物とレールを繋ぐロープはダイバーによって外される。 この方法で実際に作業を行ってみると、当初想定していた以上に時間を要し、測定できる時 間が減ってしまうことが明らかになった。そこで平成31年度は、十分な測定時間を確保す るため、擬似埋設物を動かすためのレール、擬似埋設物の投入・回収方法について検討した。 検討した結果、フレームとレールはリジッドに固定し海中に投入することで、海中でのダイ バーの作業を減らすことができるようになるため、測定時間を確保できるとの結論に至っ た。また、レールの強度が弱く擬似埋設物を動かす際にレールがたわんでしまい、ダイバー が海中で動かしにくくなってしまうことがあったため、レールの補強も行うことにした。改 修前と改修後のレールを図 4-1-8 に示す。



図 4-1-8 改修前と改修後のレール固定方法

3) 実験時、擬似埋設物の埋設深さをどのように深くするか

2019年2月に静岡県沼津市で実験を行った際、擬似埋設物の埋設深さ(擬似埋設物の上 においた土嚢の厚さ)は10cmでのみ測定を行った。今後、開発した海底下センシングシス テムの適用限界を検証するためには、他の埋設深さを検討する必要がある。一方で、レール 上の擬似埋設物をダイバーが手で押し測定ポイントへ移動させ実験を行っているため、擬 似埋設物の埋設深さを変化させるために、擬似埋設物の上に置く土嚢の量を増やすと、重く なるため海中でダイバーが手で押すことができなくなってしまう。そのため、実験的に、擬 似埋設物の埋設深さを変えた検討を行うのではなく、シミュレーションで検討を行うこと にした。埋設深さを変えた場合のシミュレーションによる検討についての詳細は「3-1 海 中アンテナアレイの研究」で記載した。

4) 実験時間・場所の確保

2019年2月の実験はバージで実施した。バージ付近の水深は30m程度である。ダイバー が手作業によって、センシングシステムの着底場所の調整、擬似埋設物の移動は行っていた。 しかしながら、30mまで潜水すると、窒素酔いや、浮上する際に減圧症という症状が出るリ スクが高まるため、潜水時間は1ダイブ目であっても最大30分ほどしか確保できないこと が判明した。そのため、30mよりも浅い海域で実験を実施しなければ実験時間は確保できな いため、平成31年度の実験では、前年度に実施した実験と同様な実験を行うことができる 浅い海域を探し、実験時間を確保する方針とした。

試験の実施

平成31年度の海底下センシング試験は、静岡県沼津市のオキシーテック周辺の浅海域 において3回実施した。実海域で実験を実施できる日時は限られている。そこで、円滑に 実海域試験を実施するため、上述の3回以外に、製作した海底下センシングシステムの動 作確認を実験用水槽及び海洋研究開発機構内の岸壁、神奈川県横須賀市の久里浜港におい て、システムの動作確認を実施した。

1) 平成 31 年度の実海域試験日程@静岡県沼津市のオキシーテック周辺の浅海域

第1回:令和元年	8月26日~30日
第2回:令和元年	11月11日~15日
第3回:令和2年	2月17日~21日

2) <u>実海域試験実験場所</u>

図 4-1-9 に示す静岡県沼津市の株式会社オキシーテック社周辺の岸壁(水深 10m 程 度)



図 4-1-9 実験場所

試験の概要

平成 31 年度の実海域試験は、浅海において複数種類の人工の海底下埋設物(埋設深さ・ サイズ・電気的特性を変えたもの)を用意して、海底下センシングシステムによる埋設物の 検出精度を評価した。使用した周波数は、前年度までの結果をもとに検討した結果、100kHz 及び 1MHz で検討した。また、アンテナアレイの配置も3種類用意し実験を行った。試験は、 実験用水槽及び海洋研究開発機構内の岸壁、神奈川県横須賀市の久里浜港において、システ ムの動作確認を実施した他、駿河湾の浅海域(静岡県沼津市の株式会社オキシーテック社周 辺の岸壁)において3回実施した。さらに、平成 31 年度の初めに検討した海底下センシン グシステムの改修項目および実験方法の改善点の効果を確認した。

測定手順

まず海中へセンシングシステムを投入する準備を行なった。遠隔操作部の設置状況を図 4-1-10 に示す。遠隔操作部は岸壁にコンテナハウスを用意し、コンテナハウス内に展開し た。遠隔操作部の主要部は、ラップトップ PC、外部モニター、スイッチングハブおよび 0/E コンバータである。海中の装置と船上の制御系とは光ファイバで接続されている。送信部の ノートパソコンでは、ソフトウェア無線機の制御を行い、制御部用の PC では測定装置に搭 載した各種センサ(姿勢角、CTD 計、高度計、カメラ等)及び RF 装置(パワーアンプ等) の制御及びデータ収録を行っている。受信部用のノートパソコンでは、プログラミング言語 MATLAB を用いた電磁場応答測定(データ収録)を行っている。海中にいるダイバーと連絡 を取るため、海中通話器を設置し、ダイバーの作業風景やセンシングシステムの状況を確認 するため、バージから海中へカメラを投入し、バージ内の実験室にモニターを設置した。



図 4-1-10 遠隔操作部の設置状況

準備が終わった後、クレーンで測定装置を海中へ投入し、海底下センシングシステムに搭載されているセンサ類の動作確認を行った。いずれのセンサも、海中において正常に動作することを確認した。また、各センサはリアルタイムで遠隔操作・監視が可能であり、データも記録できていることが確認できた。センシングシステムを海中から回収後、容器に浸水がないか確認したが、浸水していることなく、製作した容器は、水密性が確保できていることについても確認できた。

海底下センシングシステムが正常に動作していることを確認できた後、海底下センシン グシステムが搭載された吊り下げフレームとレールを固定した。その様子を図 4-1-11 に示 す。まず、海底下センシングシステムが搭載された吊り下げフレームをクレーンで吊る。続 いて、レールと海底下センシングシステムが搭載された吊り下げフレームを FRP パイプと クランプを用いて仮固定する。図 4-1-11 (b)中、矢印で示した FRP パイプが吊り下げフレ ームとレールを固定するパイプである。その後、レールにパレットを設置し、パレット上に 擬似埋設物を置き、土嚢で覆い、高度を調整した後、海底下センシングシステムが搭載され た吊り下げフレームを完全に固定する。高度の微調整は、吊り下げフレームをクレーンで吊 っているため容易に行うことができる。



(a) フレームの吊り上げ風景



(b) 吊り下げフレームとレールの固定(仮止め)



(c) 擬似埋設物の準備風景



(d) 高度の調整図 4-1-11 測定準備風景

製作した海底下埋設物センシングシステムの正常動作を確認できたため、浅海域におけ る海底下埋設物センシング試験を駿河湾内にて行った。図4-1-12に海底下埋設物センシン グシステムを海中に投入し、実験を開始した際の様子を示す。海底下埋設物センシングシス テムを海中に投入したのとほぼ同時にダイバーが潜行開始した。陸上と海中のダイバーは 海中通話器によって連絡を取り、作業を進める。ダイバーの誘導によって海底下埋設物セン シングシステムが着底後、レール上の擬似埋設物をダイバーが手で押し測定ポイントへ移 動させ実験を開始する。



(a) 海底下センシングシステム 投入の様子



(b) 投入に用いたクレーン



(c) 海中通話器 図 4-1-12 海底下センシングシステム 投入の様子

図 4-1-13 に、海中における擬似埋設物に対する電磁場応答測定の構成を示す。パレット 上に擬似埋設物を置き、その上に海底土壌を模擬した土嚢を置く。パレットには車輪を取り 付け、レール上を動かすことによって、アンテナとの相対的な位置を変えて、電磁場応答の 変化を測定する。パレットは 100mm もしくは 200mm の間隔で移動させた。測定におけるア ンテナ高度は 500mm とした。



図 4-1-13 海中における擬似埋設物に対する電磁場応答測定の構成

図 4-1-14 に測定に使用した擬似埋設物を示す。金属、誘電体(ポリカーボネート、肉)、 および金属と誘電体の複合物を用いた。複合物は、金属とポリカーボネートを重ねて、金属 と誘電体の複合物とした。また、埋設物がなかった場合についても測定を行った。なお、2019 年 2 月に静岡県沼津市で実験を行った際、受信容器内の温度が上昇したことにより VNA 内 部の CPU 動作不良(動作が遅くなる、電源シャットダウン)する現象が確認されていたが、 平成 31 年度の初めに受信容器の蓋等を改修したことにより、実験期間中を通して VNA 内部 の CPU 動作不良は確認されなかった。そのため、海中において受信容器の容器内温度上昇を 抑制することができたと言える。



(a) 金属 (左から、500mm x 500mm x 1,000mm x 1,000mm x 1,000mm)



(b) ポリカーボネート



(c)肉(左:500mm x 500mm、 右:500mm x 1,000mm)



(d) 金属と誘電体の複合物図 4-1-14 測定に用いた擬似埋設物

図 4-1-15 に、測定に用いたアンテナ配置を示す。送受信アンテナ間隔や偏波面を変えて、 3 通りで検討した。アンテナ配置2は、偏波の影響を検討するため、4本ある受信アンテナ のうち半分は送信アンテナと同じ偏波面、残りの半分は送信アンテナと直交するように配 置した。アンテナ配置3は、(c)は送信アンテナと各受信アンテナの間隔を変えた配置であ る。



(c) アンテナ配置 3 図 4-1-15 測定に用いたアンテナ配置

測定結果

1) 周波数を変えた場合の電磁場応答測定結果の比較

図 4-1-16 に電磁場応答測定結果(周波数:1MHz、擬似埋設物:金属1,000mm X 1,000mm、 埋設物の埋設深さ(=土嚢の厚さ): 100mm アンテナ配置1とした場合)を示す。図4-1-17 に は、周波数を100kHzとして、擬似埋設物:金属1,000mmm X1,000mm、アンテナ配置1とし た場合の測定結果を示す。横軸にはパレット中心の位置、縦軸には測定した S21を示す。横 軸が 0cm の位置は、レールの中心の位置(=アンテナ配置1の場合、送信アンテナの真下 に、埋設物の中央がある状況)である。なお、位置-60cm のときに送信アンテナと受信アン テナ Rx1及び Rx 2の中心に擬似埋設物が存在する位置関係となり、位置+60cmのときに送 信アンテナと受信アンテナ Rx3 及び Rx 4 の中心に擬似埋設物が存在する位置関係となる。 図 4-1-16 の 1MHz で測定した結果より、Rx 1 及び Rx 2 の場合、+20cm から+100cm の位置で は、S21のレベル・位相はほぼ一定であることが確認できる。一方で、-100cmから 0cmの間 では、S21のレベル・位相は変化しており、位置-60cmの位置で S21のレベル・位相が最も大 きく変化していることが確認できる。これは、送信アンテナと受信アンテナの中心に擬似埋 設物が存在する位置関係のとき、送信アンテナから送信された電波が最も強く擬似埋設物 で反射され、受信アンテナで受かるためであると考えられる。 同様に、Rx3 及び Rx 4 では、 -20 cm から-100 cm の位置では、 S_{21} のレベル・位相はほぼ一定であり、位置+60 cm において S21 のレベル・位相が最も大きく変化している。これらの結果から、擬似埋設物と海中アン テナとの位置関係により、電磁場応答は変化することを確認し、電磁場応答の観測によって 埋設物の有無を判別できる可能性があると言える。

続いて、図 4-1-17 の 100kHz で測定した結果より、送信アンテナと受信アンテナの中心に 擬似埋設物が存在する位置関係 (Rx 1,2 の場合-60cm、Rx 3,4 の場合+60cm)のとき、他の 位置と比べて *S*₂₁ のレベルが高くなっていることが確認できる。しかしながら、1MHz の結果 と比較すると、*S*₂₁ のレベルが高い位置と低い位置の差が小さいことが確認できる。また、 1MHz の測定結果では、送信アンテナと受信アンテナの間に擬似埋設物がある状況の時に *S*₂₁ が変化することが確認できたが、100kHz の場合は全体的に緩やかに *S*₂₁ が変化している。 1MHz の電磁波の海中での波長がおよそ 1.5m なのに対し、100kHz の海中での波長は約 5m で あるため、波長に対して擬似埋設物が小さいためであると考えられる。今回の測定条件にお いて 100kHz を用いた場合、1MHz の場合よりも電磁場応答の観測によって埋設物の有無を判 別しにくいことを意味する。

これらの結果より、平成31年度の検討は1MHzで行うこととした。



(周波数:1MHz、擬似埋設物:金属1,000mm X1,000mm、アンテナ配置1)



(周波数:100kHz、擬似埋設物:金属1,000mm X1,000mm、アンテナ配置1)

2) アンテナ配置を変えた場合の電磁場応答測定結果の比較

アンテナ配置を変えた場合の電磁場応答測定を行った。検討したアンテナ配置は、図 4-1-15 に示したとおりである。図 4-1-15 (b) は受信アンテナの向きが変えた場合の電磁場応 答を測定するため、受信アンテナのうち2本を送信アンテナと直交するように配置した。図 4-1-15 (c) は送信アンテナと各受信アンテナの間隔を変えた配置である。

図4-1-18にアンテナ配置2として電磁場応答を測定した結果の例を示す。周波数は1MHz、 擬似埋設物は金属1,000mm X1,000mmとして測定した。測定した結果、送信アンテナと平行 になるように配置された Rx1 および Rx3 は、アンテナ配置1の測定結果と同様に、送受信 アンテナ間に擬似埋設物がある場合にレベルが大きく変化していることが確認できる。一 方、送信アンテナに対して直交に配置された Rx2 および Rx4 は、Rx1 および Rx3 の受信レベ ルよりも 10dB 以上低く、埋設物の位置によってほぼレベルの変動がないことが確認できる。 そのため、受信アンテナは送信アンテナと平行に設置した方が海底下センシングに有効で あることが示唆された。この結果は、実施項目 3-1 のアンテナアレイの配置に関する研究で 活用した。



(周波数:1MHz、擬似埋設物:金属1,000mm X1,000mm、アンテナ配置2)

図 4-1-19 に、アンテナ配置 3 で測定系にアンテナを取り付けた様子を示す。図 4-1-20 に アンテナ配置 3 として電磁場応答を測定した結果の例を示す。周波数は 1MHz、擬似埋設物 は金属 1,000mm X 1,000mm として測定した。送信アンテナと受信アンテナの距離は、Rx 1: 200cm、Rx 2: 177.5cm、Rx 3: 122.5cm、Rx 4: 100cm とした。送信アンテナの中心は、-100cm の位置にある。結果より、この配置では、意味があると思われる結果を得ることがで きなかった。受信アンテナ間の距離が近かったため、電磁結合の影響などがあったためと考 えられる。Rx 3 のみ、これまでの測定結果と似たような結果が得られているため、送受信 アンテナ間の間隔や受信アンテナ間の距離が重要なパラメータになると考えられる。図 4-1-21 には、アンテナ配置 3 として、擬似埋設物を誘電体(ポリカーボネート)1,000mm X 1,000mm としたときの結果を示す。結果より、図 4-1-20 に示した測定結果と同様に、意味 があると思われる結果を得ることができなかった。これらの結果を実施項目 3-1 のアンテ ナアレイの配置に関する研究で活用した。



図 4-1-19 アンテナ配置3で測定系にアンテナを取り付けた様子



(周波数:1MHz、擬似埋設物:金属1,000mm X1,000mm、アンテナ配置3)



(周波数:1MHz、擬似埋設物:金属と誘電体(ポリカーボネート)の複合物1,000mm X1,000mm、アンテナ配置3)

3) 擬似埋設物の大きさ・種類を変えた場合の電磁場応答測定結果の比較

図 4-1-22 から図 4-1-25 に擬似埋設物の種類を変えた場合の電磁場応答測定結果を示す。 周波数は 1MHz、アンテナ配置は図 4-1-12(a)のアンテナ配置 1、高度は 59cm とした。図 4-1-22 から図 4-1-25 に示した測定結果で使用した擬似埋設物は

- ・擬似埋設物がない場合
- ・誘電体 (ポリカーボネート): 1,000mm x 1,000mm
- ・誘電体(豚肉):500mm x 500mm
- ・金属 (アルミ板):1,000mm x 1、000mm

である。結果より、これまでの検討結果と同様に送信アンテナと受信アンテナの中心に擬似 埋設物があった場合に S₂₁の変化量が大きくなる傾向が確認できる。図 4-1-26 に、Rx1 の擬 似埋設物を変えて得られた電磁場応答測定結果(|S₂₁|)を示す。この結果からは、電磁場応 答測定結果(|S₂₁|)は、埋設物の種類が変わってもわずかな差しかないことがわかる。この 結果を踏まえて、実施項目 3-2 で実施したスパース信号処理を用いた埋設物検出アルゴリ ズムの研究に活かした。

続いて、図 4-1-27 に、擬似埋設物を金属(500mm X 500mm)とした際の、電磁場応答測定 結果の例を示す。周波数は 1MHz、アンテナ配置 1 として測定した。金属(500mm X 500mm) の結果は送信アンテナと受信アンテナの中心に擬似埋設物があった場合に S_{21} の変化量が、 図 4-1-22 に示した金属(1,000mm X 1,000mm)の測定結果($|S_{21}|$)と比較すると小さくなる ことが確認できる。この結果も、実施項目 3-2 で実施したスパース信号処理を用いた埋設物 検出アルゴリズムの研究に活かした。


図 4-1-22 測定結果

(周波数:1MHz、擬似埋設物:なし(パレットの上に土嚢が置いてある状態)、アンテナ 配置 1)



図 4-1-23 測定結果

(周波数:1MHz、擬似埋設物:誘電体(ポリカーボネート)1,000mm X 1,000mm、アンテ ナ配置1)



(周波数:1MHz、擬似埋設物:肉500mm X 1,000mm、アンテナ配置1)



(周波数:1MHz、擬似埋設物:金属1,000mmm X1,000mm、アンテナ配置1)



図 4-1-26 異なる埋設物に対する電磁場応答の違い (周波数:1MHz、アンテナ配置1)



(a) $|S_{21}|$



図 4-1-27 測定結果

(周波数:1MHz、擬似埋設物:金属 500mmm X 500mm、アンテナ配置1)

4) 実使用状況を想定した電磁場応答測定

当初計画では、図4-1-28に示すような、海底面からの高度約1m程度で航行する作業型 自律無人探査機(Autonomous Underwater Vehicle: AUV)等に搭載した海底下センシングシ ステムによって、物理的な接触なく検出できる技術を開発することを目指していた。しかし ながら、AUV を用いたセンシング実験では、再現性のある実験データを得ることは難しいと 判断したため、平成 30 年度以降の検討では、海底下センシングシステムをフレームに搭載 し、海底下センシングシステムと擬似埋設物の相対的な位置が把握できる状況で実験を行 ってきた。この方法では、海底下センシングシステムと擬似埋設物の相対的な位置が把握で きるため、再現性のあるデータを取得することが可能ではあるものの、実際の使用状況とは 大きく異なる。そこで、実際の海底下センシングシステム使用状況を想定し、海底下の埋設 物と海中プラットフォームの位置関係が連続的に変化する状況で測定を行った。測定方法 を図 4-1-29 に示す。パレットにロープを結びつけ、陸上からこのパレットを牽引すること で、ことによって擬似埋設物の位置を連続的に動かした。さらに海底下センシングシステム に搭載されている 4 本の受信アンテナで同時に連続的に測定を行うため、図 4-1-3 に示し た4ポートネットワークアナライザを使用した。実施項目 3-2のアルゴリズムを適用する ためには、4つの受信アンテナをスイッチで順番に切り替えて測定するのではなく、4本の 受信アンテナで同時に連続的に測定する必要があると判断したためである。



図 4-1-28 本研究開発において対象とする海底下センシング技術



図 4-1-29 本研究開発において対象とする海底下センシング技術

図 4-1-30 に擬似埋設物の位置を連続的に変えて測定した際の測定結果の一例を示す。周 波数は 1MHz、擬似埋設物は金属 1,000mm X 1,000mm とし、擬似埋設物の位置を-100cm から +100cm まで連続的に移動(Rx1 および Rx2 側から Rx3 および Rx4 の方向に擬似埋設物は移 動する)させ、4ポートネットワークアナライザを用いて連続測定した。なお、Rx1 用の LNA(低雑音ノイズアンプ)の故障が発覚したため、Rx1 の結果は参考までに掲載している。 結果より、サンプル数 20 の付近から Rx2 のレベル、位相が変化していることが確認できる。 同様にサンプル数が 45 付近から Rx3、Rx4 のレベル・位相の変化が確認できる。以上のこと から4ポートネットワークアナライザを用いて、複数アンテナを用いて連続測定ができる ことが確認できた。この結果を実施項目 3-2 の埋設物検出アルゴリズム開発に役立てた。



図 4-1-30 測定結果

(周波数:1MHz、擬似埋設物:金属1,000mm X1,000mm、アンテナ配置1、4ポートネットワークアナライザで連続測定)

5) スパース信号処理を用いた埋設物検出アルゴリズムを使用した浅海域試験

製作した海底下センシングシステムを用いた浅海域試験として、擬似埋設物の位置を連続的に変えた時の擬似埋設物の検出試験の様子を示す。最終目標を満たすよう、試験の条件として、擬似埋設物は金属(アルミメッシュ)、埋設深さは10 cm、アンテナ高度は50 cmとした。アンテナアレイ構成は、実施項目 3-1 及び 3-2 の成果にもとづき、送信アンテナは中央に配置して、受信アンテナ数は3本とした(図中の ANT1 は使用しない)。アンテナアレイ構成を含む試験系の構成を図 4-1-31 に示す。試験において、擬似埋設物及び土嚢を載せた台車にはロープを結び、陸上からこの台車を牽引することで、(0,0)→(0,+60)→(0,-60)へ連続して移動させた。擬似埋設物の中心位置は土嚢の中心と一致している。





図 4-1-31 試験系の構成(左:アンテナアレイの構成、右:擬似埋設物の中心位置)

試験結果の一部を時系列で図 4-1-32 に示す(実際は1秒間隔で検出結果が得られている ものの、一部のみ抜粋して掲載した)。結果として、擬似埋設物の候補として金属または誘 電体(ポリカーボネート、比誘電率=3)とした場合の尤度値分布と、カメラ撮影画像への 埋設物推定位置の表示結果を示す。尤度値は、実施項目 3-2の成果における評価関数(ノル ム)を全候補位置に対して求めた結果から計算した。高い尤度値であるほど、埋設物が存在 する可能性が高いことを示している。なお、尤度値の値域は0~255の範囲とした。尤度値 が最大となる位置(擬似埋設物の推定位置)に「×」をプロットし、この位置をカメラで撮 影した画像においては赤い■で表示している。候補とする材質(金属または誘電体)のうち、 より高い尤度値が得られた材質名を材質の推定結果としてカメラ画像の上に表示するよう にした。結果より、連続的に埋設物の位置を移動させる場合において、すべての検出結果で 埋設物の材質を金属とした計算した際により高い尤度値が得られることがわかった。また、 埋設物位置の推定も高い精度で行えることを確認した。この試験において、推定結果は約1 秒間隔で得られたことから、航行する海中プラットフォームへ搭載した場合においても、精 度の高い海底下埋設物センシングが行える可能性を示した。





(ア) 測定時刻:14時04分34秒





(イ) 測定時刻:14時05分39秒





(ウ) 測定時刻:14時06分02秒





(工) 測定時刻:14時08分00秒





(オ) 測定時刻:14時08分48秒

図 4-1-32 擬似埋設物の位置を連続的に変えた場合の試験結果(左:各埋設物候補に対す る尤度値、右:カメラ画像への埋設物位置推定結果(赤い■)の表示)

4-2 システムの AUV 搭載検討(担当:海洋研究開発機構)

(概要)

当初計画では作業型 AUV に試作システムを搭載して評価する計画であったが、AUV を用 いた場合には、埋設物位置の計測精度が数mとなってしまい、目標となる1m以下の海底 下埋設物の探査評価ができない事がわかった。そこで2年度目に海中プラットフォームを AUV から吊下げ型のフレームに変更した。当年度の目標は「海底埋設物の計測手法と評価 方法についての支援」であるが、最終年度であることから、開発した試作システムが既存 の AUV に搭載できるかどうかについても検討をおこなった。

(詳細)

1) 埋設物計測と評価

埋設物の計測・評価の支援として、複数台のカメラを用いた埋設物位置の把握を提案した。

2) AUV への搭載設計検討

海洋研究開発機構で運用している作業型自律無人探査機「おとひめ」へ、開発したシス テムが搭載できることを、機械・電気システムの両面から検討した。その結果、「おとひ め」に搭載して運用可能であることを図面上で確認した。

機械的インターフェースの設計

実施項目4-1で製作するセンシングシステムは、1つの送信アンテナと4つの受信ア ンテナ、3つの耐圧容器(送信、受信、制御)で構成されている。「おとひめ」への搭載に 当たっては、受信アンテナアレイを2x2から、3x1に縮小し、「おとひめ」下部のス キッドを後方に900mm延長することで、航行性能を保ちながら搭載できる。耐圧容器は 重量からモーメントを考慮して x-y平面内に均等に配置した。図4-2-1に設計した機器配 置図を示す。実際には、これらの機材に加えて、機材分の増加した水中重量を補うための 浮力材を空いたスペースに搭載する。



図 4-2-1 AUV「おとひめ」にシステムを搭載した場合の配置図

電気的インターフェースの設計

電気インターフェース(I/F)で考慮しなければいけないのは、通信 I/F、電源 I/F、ノイズの回り込みの 3 点である。ノイズは搭載しない限り判明しないため、前者 2 項目について検討した。

センシングシステムの通信 I/F は Ethernet を用いた UDP/IP、TCP/IP である。一方、「お とひめ」のシステム内通信も TCP/IP、 UDP/IP であるため、センシングシステムの IP アド レスとポートを「おとひめ」システムと干渉しないように設定すれば、問題なく「おとひめ」 のシステムの通信と同居することが可能である。

開発したセンシングシステムの消費電力(表4-2-1)は、計測時で最大で480 Wである。 一方、「おとひめ」の搭載バッテリーのエネルギーは3.5 kWh であり、待機時電力が200 W 程度である。センシングシステムは海底面からの高度を0.5 ~ 1 m で航走するため、低速 で航行しなければならない。ここでは、調査時の航行速度を0.4 ノットに設定する。この 速度であると、消費電力は400W程度に増加する。すると、計測時の所望電力は400 W + 480 W = 880 W となる。現状の「おとひめ」のバッテリーからセンシングシステムに電源を供給 した場合、フル充電のバッテリーを利用した場合には、連続で約4時間の運用が可能であ る。実際には探査目標エリアまでの移動と、探査後のリカバリーにも電力が必要であるから、 一例として水深200 m の熱水鉱床エリアである、大室ダシに潜航することを考えると、表 4-2-2 のような収支となる。なお、潜航と浮上はバラスト(錘)を利用し、20 m/分で移動 すると仮定した。つまり200 m の深度であると10分を要する。また、水平移動距離は500m と仮定し、その時の速力は1ノットで消費電力は700 W とする。表から、この探査では約3 時間の観測ミッションが実現可能という事がわかる(電池使用率88%)。ただし、速度が0.4 ノットであることから、探査距離は1.2海里、つまり2.2 km程度である。これを延長する 場合には、「おとひめ」にアドオンのバッテリーを搭載すればよい。

	送信系[W]	受信系 [W]	全体 [W]	
待機時	60	144	204	
計測時	264	216	480	

表 4-2-1 センシングシステムの消費電力

行程	船~目標深度	水平移動	探査	浮上~揚収	トータル
所要時間 [h]	0.5	0.3	3	0.5	4.3
センシングシステム[\]	0	204	480	0	-
おとひめ [W]	200	700	400	200	-
全電力[₩]	200	904	880	200	-
全エネルギー[W・h]	100	271	2,640	100	3, 111

表 4-2-2 センシングシステムの消費電力

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営するため、特に浅海域試験の実施に向 けた進捗状況の確認及び計画の合理化を目的とした技術検討会を開催し、参画機関間の連 携及び調整を図った。

また、本研究開発に関する外部有識者からの意見を得て、本プロジェクトを推進させるため、国内最大級の展示会(ワイヤレス関連技術としてワイヤレステクノロジーパーク201

9 (図 5-1)、マイクロ波関連技術としてマイクロウェーブ展2019)へ出展した。

受託業務の実施により得られた成果については、「3. 成果の外部への発表及び活動」に 記載のとおり、国内及び海外の学会において、積極的な発表を行った。



(a) 展示ブース全体



(b) 説明中の様子 図 5-1 ワイヤレステクノロジーパーク 2019 への出展

3. 成果の外部への発表及び活動

国際学会発表

- 1) H. Yoshida, K. Takizawa, T. Matsuda, R. Suga, M. Deguchi, T. Kasaya, R. Sato, and F. Kojima, "Concept of an underwater exploration system for shallow layer under the seabed by electromagnetic waves、" The 13th SEGJ International Symposium (2018年11月) (査読付)
- 2) T. Matsuda, K. Takizawa, R. Suga, R. Sato, H. Yoshida and F. Kojima, "Research and Development on Radio Communication in Seawater、" the 21th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (2018年11月) (依頼講 演)
- 3) K. Takizawa, R. Suga, T. Matsuda, H. Yoshida and F. Kojima, "Underwater Channel Sounder (UCS) for Characterizing Radio Propagation in Seawater,"2018 OCEANS -MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO) (2018年5月) (査読付)

口頭発表

- 1) 松田, 滝沢, 菅, 佐藤, 吉田, 児島, "海中アンテナの開発と電波伝搬特性の測定," 電子情報通信学会ソサイエティ大会(2018年9月).
- 2) 吉田, 菅, 滝沢, 松田, 佐藤, 児島, "海中電磁界計測装置の実験的研究,"電子情報通 信学会ソサイエティ大会(2018年9月).
- 3) 滝沢, 菅, 松田, 吉田, 児島, "海中における電波源位置推定に関する一検討,"電子情報通信学会ソサイエティ大会(2019年9月).
- 4) 松田, 滝沢, 菅, 吉田, 児島, " 電波を用いた海底下埋設物センシングのシミュレー ション評価, "電子情報通信学会ソサイエティ大会(2019年9月).
- 5) 菅, 滝沢, 松田, 吉田, 児島, "電波を用いた海底下埋設物センシングシステムの開発," 電子情報通信学会ソサイエティ大会(2019年9月).
- 6) 松田, 滝沢, 菅, 吉田, 児島, "電波を利用した海底下埋設物センシングシステムの検 出能力についての一考察, "電子情報通信学会ソサイエティ大会(2020年3月).

出展

- 1) "電波を利用した海中ワイヤレス技術," ワイヤレステクノロジーパーク2018, 2018年5月.
- 2) "電波を利用した海中ワイヤレス技術," ワイヤレステクノロジーパーク2019, 2019年5月.
- 3) "電波を利用した海中ワイヤレス技術," MWE2019 (マイクロウェーブ展), 2019 年 11 月.

4. まとめ、今後の予定

本研究では、巨視的電磁場応答に関する研究に加えて、これまで明らかになっていない海 水及び海底下媒質の微視的電磁場応答の解明を目指しつつ、並行してこれらの電磁場応答 に基づく海底下センシングシステムに関する研究を行い、海底下埋設物検出の高精度化及 び効率化を目指した基礎研究を行った。電磁場応答特性の解明、電磁場応答モデルとシミュ レータの構築、浅部海底下埋設物検出方法の研究、海底下センシングシステム製作と浅海域 試験を計画通り実施し、製作したシステムによる実測および構築したシミュレータを用い て、電磁場応答による海底下センシングの可能性を検証した。

3年間の研究期間を通して、以下に示すとおり、研究開始時に設定した最終目標を達成す る成果が得られたと考えている。

本研究の最終目標

- 海底面・海底下浅部埋設物の検出(誘電 体、金属もしくはその複合体)
- ▶ 埋設物の大きさは数10 cm四方 ~ 1 m四方
- 、微視的電磁場応答への取り組みと埋設物 検出への適用
- ▶ 微視的・巨視的電磁場モデルとシミュレー タ開発
- ▶ 海中アンテナの最適化
- ▶ スパース性を利用した埋設物検出信号処理
- > プラットフォームには高度1m以下で航行する深海探査機を利用
- ▶ ゴールの技術熟成度はTRL~4 (試作機 試験レベル)

本研究の最終成果

- 海底面・海底下浅部埋設物の検出を 確認(金属・誘電体・複合物)
- 50cm~1 m四方の埋設物を検知で きることを確認
- 微視的電磁場応答の適用可能性を検 証
- > 微視的・巨視的電磁場モデルとシミュ レータを開発
- ▶ 海底下センシング用の海中アンテナを改良・製作
- ▶ 埋設物検出信号処理を開発・システム から得られた値を使って検証
- ▶ 深海探査機に搭載可能なシステムを製作
- > センシングシステム試作機による試験を 実施

今後の予定としては、本研究を通じて得られた海水アンテナ設計手法をもとに今後、海中 アンテナの小型化に関する研究に取り組む予定である。小型化によって、分散配置するアン テナ数を増やすことができ、配置パターンの柔軟性や使用する複数周波数帯の併用が可能 になり、埋設物電気的特性の埋設物検出アルゴリズムとの組み合わせによって、海底下埋設 物の検出精度の向上にも寄与するものと考えている。また、新たな理論構築をめざした海水 中における微視的電磁場応答については、本研究期間では理論の構築までは至らなかった が、センサやシミュレータの試作を行い、知見が得られている。引き続き検討を進めていき、 海水中における電磁波利用における新たな理論構築をめざしていく。