

令和元年6月24日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14517

研究課題名(和文)海中・海底下における電波伝搬媒質の交流電気特性計測手法の研究

研究課題名(英文) Study of in-situ measurement of underwater complex dielectric constant in frequency of under 10 MHz

研究代表者

吉田 弘 (YOSHIDA, Hiroshi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・部長

研究者番号：00359134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：海中低周波電磁波の応用を目指し、これまで明確に計測が成されていないと思われる、短波帯以下の周波数の海中複素誘電率の計測方法の開発に取り組んだ。計測部は市販のLCRメータをベースに、耐圧容器に収納してin-Situ計測ができるようにシステム開発を行った。容量法のセンサ部は3次試作まで行ったが、研究期間中に正しい複素誘電率の計測まで到達できなかった。しかしながら、海中で複素誘電率を計測するために必要なセンサ構造を試行錯誤により細かく検討することができた。研究期間終了後も、製作したセンサと計測装置を用いて引き続き研究を行い、上記の目標を達成する予定であり、その成果を論文誌上で報告したい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海中での交番電流や磁界の海底下探査利用は古くからなされており、数十kHzの周波数は潜水艦に向けた低速通信に利用されているが、これら以外の応用はなかった。しかし、海中での音波利用は限界があり他の媒体をもちいた通信や測位の手法が求められている。こうした要求にこたえるためには、海中の低周波電磁波伝播と海中送受信アンテナの研究が必須であるが、これらのバックグラウンドパラメータである複素誘電率が重要となる。しかし、in-situの海中の複素誘電率計測例はなく、また導電性が支配的である海水の誘電率を計測する手法が確立されていない。このような背景から本研究の目的が達せられることには非常に大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：To realize complex dielectric constant of seawater in frequency of under 10 MHz, I have tried to develop an in-situ dielectric meter. The research work consists of two major parts: development of an in-situ measurement unit and of an underwater sensor unit. A commercial LCR-meter and its remotely control system are installed in a pressure hull for the measurement unit. A capacitive sensor is adapted as the sensor unit but it is difficult to remove errors caused by sensor configuration and extract capacitive term which becomes very small in seawater. I had tried making prototypes three times during this research period. In the end of the research, unfortunately, I could not reach the goal. In future I will conduct this research and then reach the goal.

研究分野：海中電磁気学

キーワード：海水 複素誘電率 導電率 深海 容量法

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

広大な海域を有する日本にとって海洋産業は新規開拓が期待される分野であるが、石油などの大きな産業が見つかっていないために国内産業界の進出は消極的である。海洋の産業化のアイデアは、広大な海を詳しく調査して、海を知る事で得られるはずである。そのためにやらねば成らない事は非常に多いが、その一つとして、テレメトリと測位の方法を劇的に変える事を提案する。現在は、これらの媒体には音波以外は利用されていない。しかし、いくらデジタル技術を駆使しても海中音波の利用の高度化は飽和状態にある。

研究代表者はこれまでに、海中・海底下のテレメトリや測位を、音波だけでなく電波で補完する事を目的とした、海中電磁波の基礎研究を実施してきた。それら一連の研究において、海中でも電波（短波帯以下）はある程度伝搬できるという結果を得てきている。しかし、海中での正確な電磁波特性計測は道具立てが難しく、計測値が本当に正しいかどうかを判断できるような装置は確立できていない。これまでの研究を通じて、テレメトリを正確に行うためには、伝搬媒体の電気的特性（誘電率と導電率）を現場において対象の周波数で計測することが必須であることが分かっている。空気中では伝搬する場を占める空気の物理量は、電磁波伝搬に大きく影響を与えにくい。海中では温度や塩分濃度が伝搬特性に無視できない変化を与えるためである。また、長波から短波の周波数では導電性が高く、誘電率を正確に計測することが難しいため、過去の研究データが殆ど無い。そこで本研究では、長波から短波の周波数帯における海水の複素誘電率を正確に深海環境で計測する装置を考案し、試作と海中試験を実施する。

2. 研究の目的

海中・海底の調査には、センサ、プラットフォーム、通信・測位が必要である。テレメトリと測位の伝搬媒体としては音波のみが利用されている。しかしデジタル技術を駆使しても音波の海中利用には物理的限界がある。海中・海底下での新しい伝搬媒体として電磁波を利用できるようにして、調査手法のパラダイムシフトをおこしたい。海中・海底下で有効に電磁波を利用するためには、媒体の電磁気的特性（特に誘電率と導電率）の現場計測が必要である。しかし、目標である海水の長波から短波帯の誘電率計測は導電性が強いために難しく殆ど報告が無い。本研究では、交流（長波帯から短波帯）の誘電率を、海中または海底下で計測する方法を開発して試作機を海中で評価する。

3. 研究の方法

(1) 計測手法の検討

海中での誘電率計測を実現するために、2種類の誘電率計測方法

- ・容量法（コンデンサ法）
- ・同軸法

について情報を収集し検討を行った。これらを海中に入れた場合について、センサ部に着目して検討を行ったが、後者の同軸法においてはセンサ部よりも計測部に問題があることが分かったため、容量法のみ絞って検討を進めた。同軸法では、精密に反射を計測するためにネットワークアナライザが必要であるが、研究期間中に入手可能でかつ海中に持ち込めるものを調査した結果、該当品はダイナミックレンジが所要値を下回ることが分かった。よって同軸型センサは本研究の対象から外した（本報告書を書いている2019年においては、ネットワークアナライザの小型化と低価格化が進み始めていることから、この問題は数年後にはなくなると思われる）。センサ部は容量型のみとして詳細な検討を行った。

計画当初はコンデンサ方においては所有のLCRメータを利用する予定であったが、非常に古く安定性が低下していることと、廃盤品であるため、同じ計測気を2つ用意してのクロスチェックができないことから、新たにLCRメータを選定し購入した。

(2) デスクトップモデルの試作

検討結果に基づきセンサ部の設計と製作を行った。容量法は平行平板間に被測定媒体を挟み込んでキャパシタンスとコンダクタンスを計測して複素誘電率を算出する。この方法では、海水が平行平板間以外のところに入りこむことで計測値にエラーを発生させることが容易に予想できる。これを避けるために、センサ部の設計にあたっては、計測用電極とフリンジングの影響を減衰させるガード電極の間は既知の誘電体で満たし、圧力に耐えられるようにする。電極には、なるべく容量値が大きく得られるように、直径100ミリの金属円盤を用いた。海水に暴露する事により、導電性が支配的となることから、電極の構造は次の3種類を比較することとした。

- ① 2端子型で電極は海水に暴露
- ② 2端子型で電極を薄い誘電体で囲み海水から絶縁
- ③ 4端子型で電極は海水に暴露

デスクトップモデルにおいては、センサ部のみを海水水槽に沈めて計測を行った。温度と塩分濃度をパラメータとして電気的特性の計測を行い、試作した装置の性能を評価した。

(3) 実海域試験装置の試作

測定装置を海中ロボットに搭載することを前提に海中試験器を製作した。計測部は4端子法

LCR メータを部品単位に分解し、耐圧容器に収納した。これを外部から遠隔操作できるように、光通信装置やリレーを組み込み、電源をバッテリーから供給できるように設計製作した。センサ部は(2)項で最適化したものを耐圧構造にし、計測部と水柱ケーブルで接続して使用するようにした。当初計画では、海中ロボットに搭載する予定であったが、計測部とセンサ部の製作にそれぞれ時間を割いたため、海中試験は他の試験研究で製作した海中のフレームに搭載して動作実験を行った。

(4) 海域試験

計画時点では、①岸壁での動作確認、②浅海での海水電気特性計測試験、③深海ロボットに搭載した状態での深海での海水電気特性計測と、3ステップに分割して行う予定であった。しかしながら、予算が計画より少なかったことと、3.(1)項の基礎開発で大きく時間を要した為、実海域試験は、①の岸壁での動作試験まで行うに留まった。

4. 研究成果

当初の研究計画は2年であったが、計測部、センサ部ともに製作に時間を要したため、研究期間を延長して3年間で研究を実施した。とくにセンサ部の設計・製作・実験は、試行錯誤の繰り返しを行い、3年度目においてようやく所望の形状に仕上がったが、当初期間内に評価を行うまでに至らなかった。また、開発費用も当初計画よりかなりオーバーしたため、本装置の応用を目標とした他の試験研究と共用することを前提に、そちらの予算も使用した。以下に研究成果を列記する。

(1) 計測部の試作

海中で複素誘電率を計測する装置として、HIOKIのIM3536(4 Hz ~ 8 MHz, 1mΩ, 最大計測ケーブル長 4 m)を選定した。この装置は330 x 230 x 119 mmの外形であり、AC 100 Vで動作することから、このままでは海中に持ち込むことが難しい。そのため、IM3536をパーツに分解して耐圧容器内に収納するとともに、インバータと遠隔操縦のための光・電気コンバータを用意した。また、海水中の自然電位は10 V前後になることから、外部バイアス回路を追加し、各電源のオンオフとバイアス回路の有無を選択するために、リレー制御基板を追加した。海中電源には別耐圧容器に収納したリチウムイオン電池を利用した。計測部のブロックダイアグラムを図1に示す。本装置は最終的にΦ330 x 670 mmの耐圧容器に収納し、海中で動作試験を実施した。

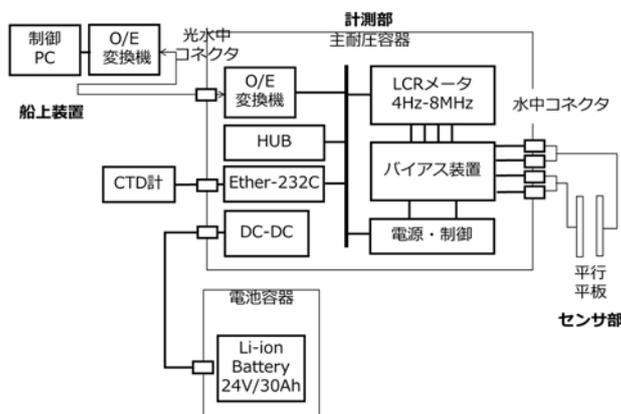


図1: 計測部のシステムブロック図

(2) センサ部の試作

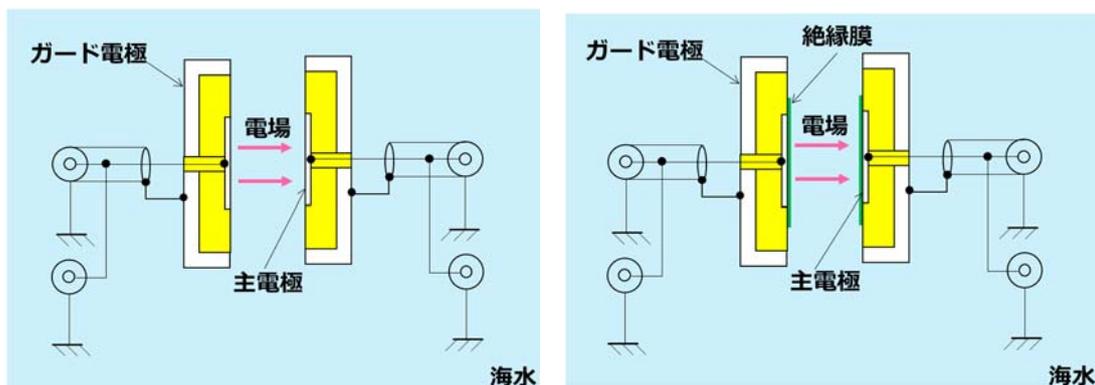
センサ部の1次試作は手加工したが、電極面の平行度を保つことと、防水を確実にすることが手加工では困難であり、検討に値するデータを計測するに至らなかった。二次試作品では、設計図面を描き、メーカーに詳細設計と製作を依頼した。図2がセンサ部の二次試作である。200 x 200の外形のテフロン樹脂を基材として、電極、ガード電極、補助電極を作成した。これらの電極類はSUS316Lで製作した。電極直径はΦ120として、平行度は0.05 mm未満としたうえで、

- ・ 主電極—補助電極間距離：2 mm, 10 mm
- ・ 主電極—主電極間距離：10 mm (補助電極無), 30 mm, 50 mm, 100 mm

が選択できるように製作した。図3にセンサ部である平行平板電極の構成について、① 2端子型で電極は海水に暴露(図3a)、② 2端子型で電極を薄い誘電体で囲み海水から絶縁(図3b)、③ 4端子型で電極は海水に暴露(図3c)に分けて示した。

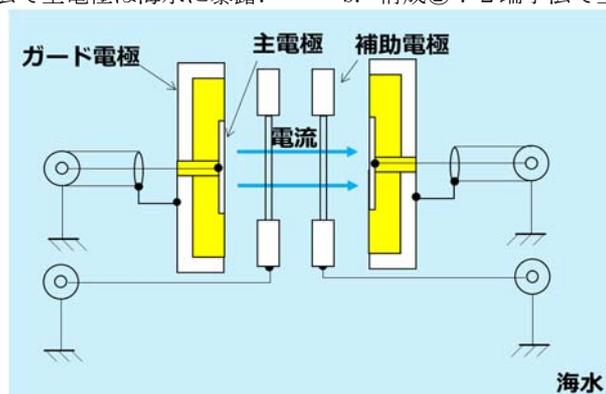


図2. センサ部二次試作（4端子の時の構成）の外観



a. 構成①：2端子法で主電極は海水に暴露.

b. 構成②：2端子法で主電極は海水から絶縁.



c. 構成③：4端子法で主電極は海水に暴露

図3. 平行平板電極の構成（第2試作）

4端子法では電気二重層を打ち消した導電率の精密な計測にのみ使用する。これらのセンサ部を用いて、人工海水で満たした試験水槽で計測を実施。この時の計測器は、クロスチェック用にもう一台購入（別予算）したIM3536を用いた。

結論から言うと、このセンサ部で計測したデータは、純水に関してはもっともらしい値が出たが、海水では何を計測しているかよくわからないデータを得た。これでは、本研究が目指す、新しい手法による高導電率媒質の誘電率計測が達成されない。図4に疑似海水の導電率を計測した例を示す。構成は①と③の電極が暴露しているタイプである。疑似海水の導電率は2 S/mである。4端子法のケースが寄り正しい値を計測しているはずであり、1 kHzの場合には1.8 S/mを示している。いずれの方法でも高周波側では導電率が大きく低下している。LCRメータによる計測は、高周波電流と電圧を計測していることから、高周波領域では当然海水に含まれるイオンによるエネルギー吸収が発生するため、受電電圧が低下しその結果、交流導電率は低下する。本研究の主目的は複素誘電率の計測であるため、誘電率の評価に交流導電率も含まれてくることから、導電率単体での細かな評価は行わなかった。

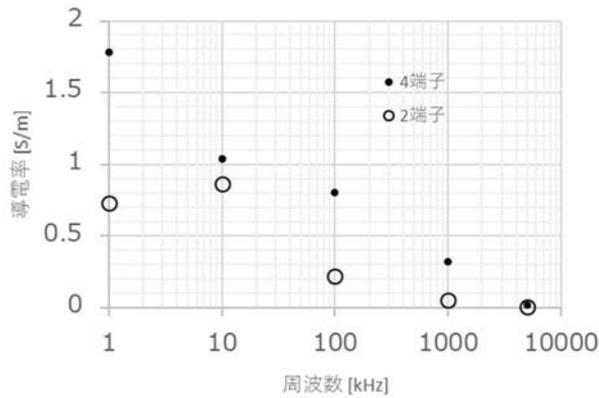


図 4. 導電率の周波数依存性. 4 端子法と 2 端子法の比較.

図 5 は複素誘電率計測の実部データである. 純水を○で, 疑似海水 ($\sigma = 2 \text{ S/m}$) を✕で示した. 凡例がないが, ・は同じセンサで計測した空気中の比誘電率である. また, 黒色が構成①電極暴露型, 赤色が②電極絶縁型のデータである. 赤線は比誘電率が 80 を示している. 純水ではばらつきがあるものの, おおむね 80 を示している. しかし, 低周波側と高周波側の挙動が, 暴露型と絶縁型で全く別の傾向を示している. さて, ターゲットの海水の誘電率は絶縁型で計測すると, 非常に低い値を示している. 一方, 暴露型では非常に高い値を示し, かつ 10 kHz を超える周波数では L 性になって計測が不能となった.

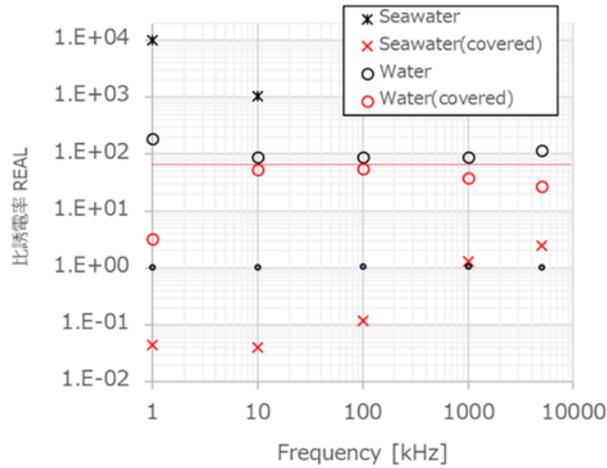


図 5. 代表的な誘電率計測結果 ($\sigma = 2 \text{ S/m}$)

この原因は, 図 6 に示したインピーダンス特性でわかるように, 計測系が 10 kHz より少し上において, 共振を起こして誘導性に移行している (図 6 の赤色の領域) ためである. 1 MHz においても別の共振点が見受けられる. この要因として, センサ部を大きく製作したために較正に反映されていないコネクタより先の部分の誘導性成分が見えてきていることと, センサ部の系がすべて海水に浸っているために, 海水が電流路となり思わぬ経路を形成しているためと考えられる. 特に製作後に金属平行平板の取付構造の防水方法に問題があり, エポキシ系接着剤で防水を各部に施したために, 理想とは異なるパラメータが付加されている.

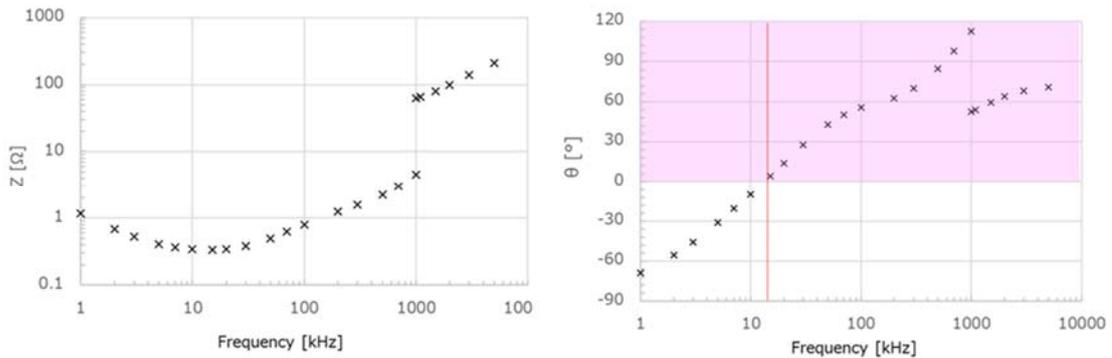


図 6. 構成①による海水のインピーダンス特性計測結果

センサ部の第 2 試作においては, 上述のように, 実際に作成して試験をおこなうと, 構造上の問題があり, 計測値に影響を与えていることが予想された. よって, 構造にパッチを当て

た 2 次試作品で原因を追究するよりも、現状で問題と思われている点を改修した 3 次試作を製作の方が早道と考え、第 3 次試作に取り掛かった。

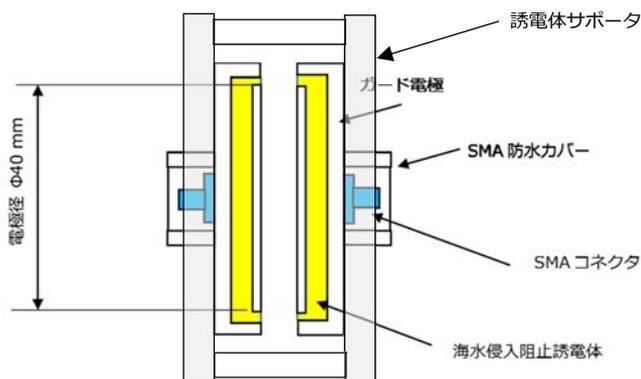


図 7. センサ部の第 3 次試作構造。

図 7 は第 3 次試作の構造図である。余分な誘導性を持たないように電極部を小さくし、全体構造も小さくした。キャリブレーションをなるべくセンサ部の平行平板に近い所で取れるように、水中同軸コネクタではなく、小型の SMA コネクタを採用して、構成を行いメイティング後にシリコンシーラントで防水する構造とした。本センサ部の製作には細かな調整が必要で、研究協力をお願いしたメーカーの構造設計エンジニアと構造案を検討し、最終形が決定するまで、数か月を要した。

本センサの製作完了は、本研究期間一杯までかかったため、残念ながら本報告書には、3 次試作品をもちいた計測結果を掲載できないが、研究助成終了後も評価を継続し、計画したゴールに到達する予定である。

(3) 今後

当初計画を達成するため、机上試験においてセンサ 3 次試作を用いたセンサの最適化、開発した海中計測部を用いた実海域での実用化を目指す。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 吉田 弘, ”海中電磁界計測装置の開発,” 2018 年電子情報通信学会総合大会.
2. 吉田 弘, 菅 良太郎, 佐藤 良, 滝沢 賢一, 松田 隆志, 児島 史秀, “海中電磁界計測装置の実験的研究,” 2018 年 電子情報通信学会ソサエティ大会.

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：町田 薫紀

ローマ字氏名： (MACHIDA, Shigenori)