平成29年度防衛装備庁 安全保障技術研究推進制度

成果報告書

海中での長距離・大容量伝送が可能な 小型・広帯域海中アンテナの研究

> 平成 30年 5月 機関名 日本電気株式会社

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、日本電気株式会社が実施した平成29年度「海中 での長距離・大容量伝送が可能な小型・広帯域海中アンテナの研 究」 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

海中では、海水が導電性を有するために、電磁波信号の減衰が避けられず長距離の信号伝送が 難しい。超低周波帯(kHz 未満)を使用した 100m 以上の長距離伝送に関する報告があるが、その 通信容量は数 10bps 程度と低い。本研究は、アンテナ近傍における電磁場(近接場)を有効に活 用することで、海中における長距離かつ大容量の通信の実現を目指すものである。

受託者による予備的な成果として、200kHz 帯で動作する近接場アンテナ(既存アンテナ)を 作製し、0.3m の伝送に成功している。この成果を元に近接場アンテナを低周波・広帯域化する ことで上記目的の実現を目指す。このため以下に示す研究を実施する。

① 低周波・広帯域アンテナ作製技術の構築

200kHz 帯で動作する既存の近接場アンテナ(既存アンテナ)を元に、電気容量及びインダクタンスを向上することで、100m 伝搬が期待できる周波数帯(研究開始時の想定値:10kHz)で動作するアンテナ(10kHz アンテナ)を作製する。

周波数を 10kHz まで低減するため以下の要素技術を構築し、10kHz アンテナに導入する。

- 誘電体層への高誘電率材料の導入による容量向上
- 誘電体層の薄層化による容量向上
- アンテナサイズを既存アンテナの 25cm×25cm から 48cm×48cm に大型化することによるイン ダクタンス向上

シミュレーション等の結果から、さらに周波数低減が必要となる場合は、新規誘電材料の探索、 最大 1m×1m までのアンテナサイズの大型化、コイルの多層化技術等の構築を行い、必要性能の 達成を目指す。

さらに、通信容量 1kbps に必要となる帯域幅を確保するため 10kHz アンテナに広帯域化回路を 付加し、最終的に 100m-1kbps を実証するためのアンテナ(最終アンテナ)を作製する。

海中近接場測定技術の構築

海中を伝搬する近接場の定量的測定を可能とするために海中投下型磁気センサを作製する。また、浮力や潮流等を生じる海中であっても、最大 20m 程度までアンテナ離間距離を可変した測定 を安定的に行うことができるスライド式海洋試験治具を作製する。20mの海洋試験結果から実海 洋測定における課題を抽出し、100mの海洋試験方法の決定及び海洋試験場の選定を行う。海洋試 験場は、海表面や海底面の影響が可能な限り低減できる様に十分な深度を有している必要がある。 決定した 100m 海洋試験方法に対応した海洋試験治具を作製する。

③ 小型水槽試験及び海洋試験の実施

小型水槽試験を実施し、塩水中での既存アンテナの近接磁界強度と受電力を離間距離 1m まで 測定する。この試験は磁気センサの動作確認も兼ねる。

次に、20m 海洋試験を実施し、海水中で既存アンテナの近接磁界強度と受電力を離間距離 20m まで測定する。スライド式海洋試験治具により正確に離間距離を可変することで、近接磁界強度 と受電力の距離依存を明らかにする。

さらに 100m 海洋試験を実施し、海水中で新たに作製した 10kHz アンテナを用いて 100m の直接 波伝送を確認する。確認できた場合は、最終アンテナを用いて変調信号を用いた 100m-1kbps 伝 送試験を実施する。 ④ 海中近接場伝搬シミュレーション技術の構築

海中で 100m 伝搬が可能な周波数(研究開始時の想定値:10kHz)を導出するために、ダイポー ルアンテナモデルを用いた長距離伝搬シミュレーション結果と実海洋における既存アンテナの 評価結果を比較分析することで、海中近接場の周波数/伝搬距離/磁界強度/受電力の関係を定量 的に抽出し、各周波数間における伝搬距離の関係性をスケールモデル分析により推定する。この 結果から、100m 以上の伝搬が可能な周波数を見積もり、10kHz アンテナの作製に反映する。

以上の研究により、実海洋において 100m-1kbps 伝送を実証し、海中近接場の利用による長距 離かつ大容量の海中無線電磁波通信の実現可能性を示す。

1. 1 研究開始時に設定した研究目標の達成度

本研究を通して、海中の電磁界の直接伝搬距離および通信の限界について試験および数値計算 から明らかにした。具体的には、数値計算により 7kHz の周波数を使用した場合、通信限界距離 は 20m と算定された。また、試験により 10kHz アンテナは、微小磁気ダイポールに比して、アン テナ近傍で 70dB 程度利得が高く、まさにこれが本研究で宣言した 10kHz アンテナの近接場によ る利得であることが明らかとなった。

結果として、海中における直接伝搬通信距離は、10kHz アンテナの設計変更等、いかなる手段 をもってしても 100m に達しないことが明らかとなったので、本研究は平成 29 年度をもって終了 とする。

1.2 研究課題終了後の将来性

本研究を通して、10kHz 程度の周波数の電磁界を用いた電磁界通信の限界距離は、100m には達 しないことが明らかとなったが、平成 28 年度の 200kHz アンテナの試験結果から、海底面および 海表面のマルチパスを用いた場合には、この限りではなく、伝搬距離、通信限界距離を大きく延 伸することができる可能性が示唆されている。今後の研究では、以上のようなマルチパスを効果 的に用いた海中電磁界通信について、体系化する研究は、諸所の産業および我が国の安全保障に 対して、有益なアプリケーションの創出をもたらす可能性が高い。

- 3 副次的成果や目標を超える成果
 特になし。
- 1. 4 論文、特許、学会発表等の研究の成果

29年度発表: 2017年10月4日

日豪多義性技術に係るシンポジウム

(Australia - Japan Multi-Function Technology Symposium) 「Wireless underwater power transfer and communication」

30年度: 電気情報通信学会 2018 年 9 月 14 日 ソサイエティ大会 「水中や海中における通信技術」シンポジウムにて発表予定 「水中におけるワイヤレス充電・通信のための電磁界解析(仮)」

1.5 研究実施体制とマネジメント

特になし。

1.6 経費の効率的執行

経費効率化の観点から、以下の通り予算執行を実施した。

・10kHz アンテナの製作サンプルの運用に関して、28 年度の仮作基板を最大限活用し、29 年度の 10kHz アンテナを製作し、20m 海上試験を行った。

2. 平成29年度(報告年度)の実施内容

2.1 実施計画

【1】 低周波・広帯域アンテナ作製技術の構築

【1】 – 1 20m海洋試験用10kHzアンテナの作製

平成28年度の条件抽出の結果に基づき、誘電体層への高誘電率材料(比誘電率11.6)導入、誘電体層の薄膜化(膜厚60-120um)、アンテナサイズの大型化(48cm×48cm)を導入した10kHzアンテナ2台を作製する。作製した10kHzアンテナの周波数特性の測定を行い、共振周波数が10kHz以下であることを確認する。

【1】-2 100m海洋試験用10kHzアンテナの作製

【3】-1の20m海洋試験の実施後に100m海洋試験を可能とするため、水深100mの水圧に耐える筐体 及び水密コネクターを導入することで、10kHzアンテナを100m海洋試験用10kHzアンテナに改良する。

なお、③-1の20m海洋試験結果及び④-1のシミュレーション結果にて、①-1で作製した10kHz アンテナでは、100mの伝搬が困難であると予想される場合は、容量の向上のため誘電体層へのさらな る高誘電率材料の導入及び誘電体層のさらなる薄膜化を導入した100m海洋試験用10kHzアンテナ2台 を新規に作製することとする。

【1】-3 広帯域化回路の設計

100m海洋試験用10kHzアンテナの共振周波数特性をもとに、通信容量1kbpsの通信性能を実現するための広帯域回路を設計する。帯域幅の目標値は2kHzとする。

【2】海中近接場測定技術の構築

【2】-1 20m海洋試験用測定冶具の作製

水平方向20m及び深度方向20mでの海洋試験に用いる治具を作製する。

水平方向の治具については、平成28年度に作製した測定治具を改良し、48cm×48cmサイズの10kHz アンテナを取り付け可能とする。

深度方向の治具については新規に作成する。この治具は海洋試験において浮力や潮流の影響を受け にくく、48cm×48cmサイズの10kHzアンテナの送信側と受信側を正確に対向させ、かつアンテナ離間 距離を2m毎に最大20mまで可変できることとする。材料は、測定に影響を与えにくく、かつ海洋試 験での操作性が高い、軽量な樹脂とする。

【2】-2 100m海洋試験用測定冶具の作製

【3】-1の20m海洋試験の結果をもとに問題点を抽出した上で、水平方向100m及び深度方向100mでの海洋試験に用いる治具を作製する。治具は、浮力や潮流の影響を受けにくく、安定した構造を有し、 48cm×48cmサイズの10kHzアンテナの送信側と受信側を正確に対向しつつ離間距離を可変できることとする。

水平方向の治具については、船または岸壁にアンテナを固定し、アンテナの離間距離は、レーザー 測距儀を用いることで正確に測定する。アンテナの離間距離は自由に調整でき、最大100mまで可変 できることとする。

深度方向の測定治具については、水圧の影響を受けにくい構造とする。アンテナの離間距離は20m 毎に最大100mまで可変できることとする。

【2】-3 測定システムの構築

10kHzアンテナの受電力を測定するためのシステムを構築する。また、測定に必要なプログラムを 作成する。 100mの海洋試験場の選定を新たに行う。平成28年度に実施した海洋試験場の周辺海域にて、20mの海洋試験を予定しているが、100m試験には深度が不十分である。100mの海洋試験場として選定する 海域は海表面や海底面の影響が可能な限り低減できる様に十分な深度を有している必要がある。

【3】 海洋試験の実施

【3】-1 20m海洋試験の実施

【1】-1で作製した10kHzアンテナ、【2】-1で作製した20m海洋試験用測定冶具、及び【2】-3 で構築した測定システムを用いて、アンテナ受電力の減衰特性の評価を実施する。

水平方向においては、アンテナの離間距離が0.5mから3mまでは0.5m間隔で、離間距離が3mから20m までは1m間隔で、アンテナの受電力を測定する。

送信側と受信側のアンテナを対向させた測定に加え、アンテナを水面に対し並行にした測定も行い、 アンテナの向きによって受電力が変化するかを確認する。

深度方向においては、10kHzアンテナの送信側と受信側の離間距離が20mまで2m間隔で、アンテナの 受電力を測定する。

また、平成28年度に作製した海中投下型磁気センサを用いて、水平方向及び深度方向の各離間距 離における、アンテナ離間方向と直交する面内の近接磁界分布を測定する。

さらに、水平方向及び深度方向の各離間距離におけるアンテナの受電力の測定結果から、海中での 減衰率を算出する。

【3】-2 100m海洋試験の実施

【1】-2で作製した100m海洋試験用10kHzアンテナ、【2】-2で作製した100m海洋試験用測定冶 具及び【2】-3で構築した測定システムを用い、【2】-3で選定した海域にてアンテナ受電力の減衰 特性の評価を実施する。受電力はスペクトラムアナライザを用いて測定する。

深度方向及び水平方向において、アンテナの送信側と受信側の離間距離が20mから100mまで、20m間 隔で受電力を測定する。水平方向及び深度方向の各離間距離におけるアンテナの受電力の測定結果か ら、海中での減衰率を算出する。

【3】-3 海面伝搬の影響解析

【3】-1の20m海洋試験及び【3】-2の100m海洋試験で得られた減衰率を、深度方向と水平方向 で比較し、海面伝搬の影響を受ける深度について明らかにする。

【4】 海中近接場伝搬シミュレーション技術の構築

【4】-1 海中近接場伝搬シミュレーション技術の構築(1回目)

【3】-1の20m海洋試験により得られた受電力の実測結果と、10kHz以下の周波数帯に関するシミ ュレーション結果の双方により、海中における電磁波の空間分布を明らかにする。

この結果に基づくシミュレーションの最適化を行った上で、100m伝送のシミュレーションを実施し、 100m伝送に適した周波数を算出する。この結果を①-2の100m海洋試験用10kHzアンテナ作製に反映 する。

【4】-2 海中近接場伝搬シミュレーション技術の構築(2回目)

【3】-2の100m海洋試験により得られた受電力の実測結果と10kHz以下の周波数帯に関するシミュレーション結果を比較することで、より広範囲の海中における電磁波の空間分布を明らかにする。

【5】 プロジェクトの総合的推進

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。

2.2 研究実施日程

				実	ţ	施	E	1	程			
業務項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①-1 20m海洋 試験用10kHzアン テナの作製	-											
 ①-2 100m海洋 試験用10kHzアン テナの作製 						未知	尾施					
①-3 広帯域化 回路の設計												
 ②-1 20m海洋 試験用測定治具 の作製 	•											
 ②-2 100m海洋 試験用測定治具の作製 						未第	尾施					
②−3 測定シス テムの構築	•											
③-1 20m海洋 試験の実施						\leftrightarrow						
③-2 100m海洋 試験の実施						未	実施					
③-3海面伝搬の 影響解析						未	実施					
 ④-1 海中近接 場伝搬シミュレ ーション技術の 構築(1回目) 	•											•
 ④-2海中近接 場伝搬シミュ レーション技 術の構築(2回 												
ロ) ⑤ プロジェク トの総合的推進	-											

2.3 研究成果の説明

【1】 低周波・広帯域アンテナ作製技術の構築

【1】 – 1 20m 海洋試験用 10kHz アンテナの作製

20m 海上試験用の 10kHz アンテナの作製手順は下記の通りである。

- 1. スパイラルパターン基板の製作
- 2. 高誘電体層を2枚のスパイラルパターン基板で挟み込みプレスしアンテナ本体を製作
- 3. アンテナ本体へのケーブル接続

4. ケーブル接続されたアンテナ本体を水密モールド加工する

上記のうち1、2は2016年度の研究成果にて製造条件、すなわちスパイラルパターン、高誘電体材料(ES-3346)、誘電体層厚、及びその他寸法条件は決定している。それらを図1に示す。

深度の 20m および 100m の海中で動作可能なアンテナの製造を実現するために重要となるのは 上記アンテナ製造プロセスのうちの 3 と 4 である。モールド材料は耐圧防水樹脂 Jellafin (SEC 社)を用いた。20m 試験用アンテナのモールドに先立ち、設計したモールド構造の耐水圧性を見る ため、テスト基板を作成して、100m 耐水圧タンクに 3 時間浸水させることにより漏水の有無を 確認した。

図-2 にモールド構造 (アクリルケース + ジェラフィンモールド)を示す。このモールド構造は、 10kHz アンテナとテスト基板で全く同一である。また、図-3 に、テスト基板のモールド後の写真 を示す。

図-3 に示した、モールド済みテスト基板の耐水試験条件は下記の通りであり、漏水がないこと を確認した。

〇水圧条件: 100m 深度の水圧にて3時間浸水

O確認条件:

・モールド/基板の外観破損、基板上の断線がないこと

・基板上の漏水ないこと(テストパターンによる 1000V 絶縁試験による確認。)

想定材料	材料定数	厚み	寸法
FR4(MCL-HE679G相当)	比誘電率4.2、誘電損:0.009	0.8 mm	480 mm 角
上層配線層	(導電率:5.8e7 S/m)	35 um	
高誘電率膜(ES-3346)	比誘電率11.6、誘電損:0.003	105 um	480 mm 角
下層配線層	(電率:5.8e7 S/m)	35 um	
FR4(MCL-HE679G相当)	比誘電率4.2、誘電損:0.009	0.8 mm	480 mm 角
	※1GHz測定定数(代表値)		



図-1 試作した 10kHz アンテナの構造概要図



図-2 10kHz アンテナおよびテスト基板 モールド構造図



図-3 テスト基板 モールド後の写真

以上の結果をもって、100m までの深度で動作可能なアンテナのモールド構造を確定し、送信用 アンテナ1台、受信用アンテナ1台をそれぞれ製作し、実際の20m 試験用アンテナに適用した。 20m 試験で使用したアンテナ基板は、2016年度の研究で作成した基板を用いて、それを上記に て確定したモールド構造にて封止した。 【1】-2 100m 海洋試験用 10kHz アンテナの作製

本項目は、未実施のため記載を割愛する。

【1】-3 広帯域化回路の設計

本項目は、未実施のため記載を割愛する。

【2】海中近接場測定技術の構築

【2】-1 20m海洋試験用測定冶具の作製

20m 海上試験を行うための吊架冶具を図-4の通り製作した。

本治具は上下吊架フレームとプーリーを用いて、アンテナ間の離間距離を調整する機能を有し、 離間距離は、連続的に可変であるので、2m間隔ごとの離間が可能である。この鉛直離間吊架冶具 を民船から吊架して測定を行うよう、フレーム、プーリー、ロープ長さ調整し、アンテナ離間距 離を一定に保った。また、送受信アンテナのケーブルはともにほぼすべてを海水中に沈下し、空 中でのケーブル間クロストークが発生しないよう配慮した。

離間距離は、最大 20m まで可能とし、アンテナの設置方向は水平設置と鉛直設置の両方を可能 とした。離間方向が水平の場合にも、本冶具の組み換えにて可能とした。



図-4 鉛直吊架冶具および設置する民船の概要図

【2】-2 100m 海洋試験用測定冶具の作製

本項目は、未実施のため記載を割愛する。

【2】-3 測定システムの構築

20m 海上試験のために構築した電気的測定系の概要を図-5 に示す。また、各々の測定器の型番と写真を含めた信号フロー図を図-6 に示す。

本測定では、特殊な自動制御を必要としなかったため、測定は全て手動にて行い、自動制御プ ログラム等は作成しなかった。

送信系は、シグナルジェネレータ WF1968 から電力増幅器 CBA100M-100 にて、電力増幅した信号を送信アンテナに送信する。送信アンテナに入力する電圧は 10Vrms (1W=30dBm に相当)、信号 周波数は 7kHz とした。

受信系は、受信アンテナで受信した信号を、低雑音増幅器 11909A にて 32dB 増幅し、シグナル アナライザ(スペクトラムアナライザ) N9010A に入力し測定する。なお、低雑音増幅器 11909A は、シグナルアナライザ N9010A の測定可能範囲を考慮して、離間距離が小さきときは接続せず、 離間距離が大きいときのみ接続し使用した。

試験海域としては、穴水湾に設けられたヨットハーバー(北緯 37.2 度、東経 136.9 度)付近の 海域のうち最大深度が 20m 程度確保できる海域を選定した。



図-5 電気的測定系図(民船上配置図)



図-6 電気的測定系図(信号フロー図)



図-7 試験海域

(3) 海洋試験の実施

【3】-1 20m海洋試験の実施

前述の項目【2】の記述に従って構築した、測定冶具、測定システムを用いて、試験海域において、試験を実施した。

測定は、鉛直離間、アンテナ水平設置のみを実施した。海域の制約から、アンテナの最大離間 距離は 17.5m まで測定した。

図-8 に試験時の写真を、図-9 に最大離間時 17.5m の時のシグナルアナライザに表示されたスペ クトラムの写真を示す。

本測定は、送受信アンテナ対向時の共振周波数である、7.0kHz にて実施した。

図-8 に示す通り、送受信測定器間のクロストークを避けるため、それぞれの測定器は試験船の 船尾と船首に離して配置した。また、送受信ケーブルは、ほぼすべてを海中に沈下させて、空中 でのケーブル間のクロストークの影響を排除した。なお、今後の試験では、クロストーク軽減の ため、受信系はすべて海中で解析し、解析後のデジタルデータを光ケーブルで船上まで伝送する よう測定系を設定した。

以下、試験結果について述べる。

図-10 にアンテナ鉛直離間(水平設置) 距離減衰特性の試験結果 (離間距離 1.0-17.5m)を示す。 1m から 3m までは 0.5m 間隔で、3.0m から 13m までは 1m 間隔で、13m から 14.5m までは 0.5m 間隔 で、14.5m から 17.5m までは 1m 間隔で各々測定した。

図-10の縦軸は受信電力の絶対値である。この結果から、1 -17.5m 間での距離減衰は約 120dB

である。

5-10m で、測定誤差および海底と海面の影響が完全には排除しきれていないため、若干の増減 があるが、おおむね単調減少の振る舞いを見せている。

本測定結果と理論値との比較は、【4】にて詳細を述べるが、この結果は有限要素法(FEM)による 数値計算結果に対して非常に良い一致を見せる。また、微小磁気ダイポールによる解析値に対し ては、1m以下の距離減衰で大きなマージンを持った特性となっており、これが10kHz アンテナの 持っている固有の利得といえる数値である。

アンテナ吊架時写真

・10kHzアンテナをデリックにて吊架(写真は垂直設置時)



 測定器配置写真
 ・測定ケーブルは、ほぼすべて海中に 沈下(写真は送信系)





ケーブル引出穴

図-8 試験時の写真

- 17.5m離間時のスペクトラムアナライザ測定画面
- ・最大離間時は受信アンプ(ゲイン=32dB)を使用。
- ・今回の試験に使用した測定システムの測定限界 (DANL)は約-110dBm ⇒ 16dBのマージン。

<u>17.5m離間時の測定結果</u>



図-9 最大離間時のスペクトラムアナライザに表示されたスペクトラム写真



図-10 アンテナ鉛直離間(水平設置) 距離減衰特性試験結果 (離間距離 1-17.5m)

【4】 海中近接場伝搬シミュレーション技術の構築

<u>【4】-1 海中近接場伝搬シミュレーション技術の構築(1回目)</u>

本項目においては、シミュレーション技術の構築として、シミュレーション手法および、得ら れたシミュレーション結果と【3】に記載の 20m 海上試験結果との比較および、海中での電磁界 を用いた通信限界について導出する。

シミュレーションは、2通りの数値計算手法により実施した。1つ目の数値計算方法は自由空 間における、微小磁気ダイポールの磁界に関する理論解を用いるものである。2つ目の数値計算 方法は、送信アンテナの概略的な有限要素モデルとしてモデル化し、有限要素法(FEM)により磁 界を計算するものである。前者は、実際のアンテナの磁界伝搬の下限を与えるものであると考え られる。下限と称することの意味は、アンテナの近傍における電磁界は、そのアンテナの方式、 動作周波数、アンテナの幾何学的サイズ、大きさによって決定される非常に複雑な場を形成して いるが、微小磁気ダイポールにおいては、波源を磁気双極子モーメントであると近似することに より、解析解を導いたことに起因して、微小磁気ダイポールは、その近傍領域、すなわち近接場 において、大きな減衰特性を与える。一方で、実際のアンテナでは、この近接場の減衰特性は、 微小磁気ダイポールより小さな減衰特性を示すものと想定されるが、この減衰量が小さいほど、 近接場をより有効に活用できているといえる。

シミュレーション結果の概要について述べる前に、まず、本研究で重要な位置づけとなってい る電磁界のアンテナの近接場について理論的な側面を述べ、有限要素法による計算結果、そして これらの数値計算結果と試験実測結果との比較を行う。 [A] 近接場の理論: 電磁界の支配方程式と微小磁気ダイポールモデルによる概観 電磁界の支配方程式は Maxwell 方程式である。^{[3][4]}

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{1}$$
$$\nabla \times \boldsymbol{E} + \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = 0 \tag{2}$$
$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \tag{3}$$
$$\nabla \times \boldsymbol{H} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} = \boldsymbol{j} \tag{4}$$

ここで、Bは磁東密度、Eは電界、Dは電東密度、Hは磁界、ρは電荷密度、jは電流密度である。 Eq. (1)、(2)、(3)、(4)の Maxwell 方程式からは、単純なモデルに対しては、解析解を得ること ができるが、本報で言及する自由空間における微小磁気ダイポールについては、3次元極座標系 において図-11に示す、微小電流ループおよびそれから発生する磁気双極子モーメントを仮定す ることで、下記の解が与えられる。^{[3][4]}

$$E_{\phi} = -\frac{j\omega\mu ISe^{-jkr}}{4\pi} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{jk}{r}\right)\sin\theta \qquad (5)$$

$$H_r = -\frac{ISe^{-jkr}}{2\pi} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{jk}{r^2}\right) \cos\theta \qquad (6)$$

$$H_{\theta} = \frac{ISe^{-jkr}}{4\pi} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{jk}{r^2} - \frac{k^2}{r} \right) \sin \theta$$
 (7)

$$E_r = E_\theta = H_\phi \tag{8}$$



図-11 微小磁気ダイポール 数理モデル

ここで、r、 θ 、 ϕ は各々3次元の極座標であり、 $E_{[\cdot]}$ 、 $H_{[\cdot]}$ は、3次元極座標系における電磁界の各方向成分を表す。また、 ω は動作角周波数、 μ は媒質の透磁率、Iは微小電流ループの電流を、Sは微小電流ループの面積を、kは電磁界の波数を表す。

磁界を計算するにあたっては磁界ベクトルの各成分を記述した、Eq. (6)、(7)、(8)を用いればよい。

海水中での近接場を論じるに当たっては、以下の事項の確認が必要となる。

まず、伝搬媒質が海水などの導電性を持つ場合については、波数kが複素数であり、その虚部が 損失を表すことに注意が必要である。

誘電体の誘電率に関する基礎理論は電子物性の基礎として確立されており、また、海水の誘電 分散についても、諸所の先行研究がある。^{[5][6]}

誘電体の波数は以下の通り計算される。

$$k = \frac{\omega}{c} = \omega \sqrt{\epsilon \mu} = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{9}$$

導電性媒質において、導電率σを用いて、誘電率は複素数となり、

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon' - j\frac{\sigma}{\omega} \tag{10}$$

と表せる。ここで、 ϵ' 、 ϵ'' は各々誘電率の実部と虚部を、 σ は導電率である。

Eq. (10)が、Eq. (5)、(6)、(7)の e^{-jkr} の因子における減衰をもたらす。具体的な物理現象として、導電率が渦電流損失をもたらすことにより電磁界のエネルギーが熱として消散する。

さらに、海水の場合、Eq. (10)の誘電率虚部は、実部に対してはるかに大きいため、Eq. (9)か らわかる通り、この項が主要因となって電磁波の波長が短縮される。海水の導電率を4 S/m とす ると、7kHz の波長の絶対値は、13.4mと計算される(真空中の波長は42.9km である)。これは、海 水中で電磁界の伝搬速度が、極端に遅くなっていることと等価である。

次に、近傍界(近接場)と遠方界の目安となる数値を Eq. (5)、(6)、(7)の考察から掲げることに する。Eq. (5)、(6)、(7)において、 $1/r^3$ 、 $1/r^2$ が近傍界を支配する項であり、1/rが遠方において 球面拡散減衰を表す項である。 $1/r^3$ 、 $1/r^2$ は、当然ながら球面拡散減衰項より、急速に減衰するこ とから、近傍界は急速に減衰することとなり、それは減衰曲線にも表れる。近傍解支配項が大きな 影響を及ぼす距離を測る一つの目安として、近傍界支配項と球面拡散減衰を表す項の大きさが同 等となる距離 r_0 に対して、 $r \leq r_0$ なる領域は近傍界と定義できる。 r_0 は、簡単に計算され、

$$\frac{1}{r^3} = \frac{k}{r^2} = \frac{k^2}{r} \longrightarrow r_0 = \frac{1}{k}$$
(11)

となる。

海水中において、7kHzの周波数に対しては、 $r_0 \approx 2.1 \, [m]$ である。ただし、これは、この数値は、 近傍界と遠方界の境界の目安となるものであり、実際には以下の考察の通り、距離減衰特性を勘 案して近傍界領域と呼べる距離を決定すればよい。

以上を考慮して、海水中のアンテナの近接場について以下に論じる。

図-12 に、海水中における、微小磁気ダイポールが作る磁界の大きさの距離減衰特性を示す。簡単のため、微小電流ループの電流を 1A、面積を 1 m²、周波数は後程述べる海上試験時の動作周波数 7kHz として計算した。図-12 を見ると、10m 付近から減衰の曲率が変化していることがわかる。

より明確に、距離減衰特性の変化を確認するため、距離減衰特性(dB)の距離に対する微分hを下 記の通り定義し、計算した結果を図-13に示す。

$$h(r)[dB/m] = \frac{\partial(20 \log|H|)}{\partial r}$$
(12)

図-13 から、先の Eq. (5)、(6)、(7)からの考察の通り 2m 付近から減衰率の増加が停滞し、10m からほぼ減衰が一定となっていることがわかる。しかしながら、実際にはr₀より、さらに遠方まで 近傍解支配項である1/r³、1/r²が影響を有しているため、急峻な限界の終端は、さらに遠方にま で伸びていることがわかる。この結果を踏まえて、我々は、近傍界領域を以下の式に基づき定義す る。

$$r_1 = \underset{r > r_0}{\operatorname{argmin}} |h(r) - h_d| \tag{13}$$

すなわち、減衰率の導関数h(r)がやがては定数関数に漸近していくことを前提として、その定数 関数あたいより大きなある目安 h_d [dB/m]と等しくなる、最小の距離を r_1 と定義する。7kHz の場合 には、 $h_d = 5$ [dB/m]と定義することにより、 $r_1 \approx 10$ [m]となる。この近傍界限界距離 r_1 について、 改めて図-12 を見ると、アンテナの最近傍 1cm から 10m までの減衰量は 190dB 程度となっている。 また、目安として 10cm から 1m までの減衰量は 120dB となっている。

最後に参考として、仮想的な計算として、仮に海水の誘電率が全て実部に転嫁された場合、すなわち波長短縮率はそのままに、渦電流損がないとした場合の計算結果を図-14 に示す。この計算は、海水の渦電流による損失を確認するのに有益である。

仮想的誘電率は以下の式の通り表せる。

 $\epsilon_{im} = |\epsilon' - j\epsilon''| = \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \tag{14}$

図-14 の 2 つの線は各々、海水の誘電率が実部に転嫁した仮想的誘電率_{€im}を設定した場合の減 衰曲線と、1cm から 10cm までの減衰曲線を線形補間した直線である。まず、図-14 からわかるこ とは、2m を過ぎた付近から、線形補間直線と仮想的誘電率_{€im}の減衰曲線が乖離し始める。

これは、前述の通り微小磁気ダイポールの近傍界支配項が減衰し終わり、より減衰が緩慢な球 面拡散項が支配的になっていくことに起因している。

次に、図-13 との比較でわかるように、やはり 2m を過ぎた付近から、実際の海水中の距離減衰 と乖離し始めており、これが渦電流による損失であることがわかる。

以上の考察からわかる通り、近傍界領域における減衰は、近傍界支配項の減衰特性が支配的で あり、したがって、実際のアンテナにおいてこの近傍界における減衰量を微小磁気ダイポールの それよりも軽減できれば、電磁界の遠方への伝搬を延伸する有益な効果をもたらすことが想定さ れる。以下に示す FEM 計算結果および実測結果から、この 10kHz アンテナの工学的利点を確認し ていくこととする。



図-12 海水中における微小磁気ダイポールの放射磁界強度 距離減衰特性



図-13 海水中における微小磁気ダイポールの放射磁界強度 距離減衰率



図-14 海水中における微小磁気ダイポールの放射磁界強度 距離減衰特性 (海水の誘電率虚部が全て実部に転嫁された場合の仮想計算結果)

[B] 有限要素法による 10kHz アンテナの磁界減衰特性数値計算

実際のアンテナに関して、Maxwell 方程式 Eq. (1)、(2)、(3)、(4)を解析的に解くことは、極め て困難であるため、数値解析手法を用いることとなる。本報告では、有限要素法(Finite Element Method=FEM)を用いることとする。

なお、FEM の数値計算を行うに当たって、離間距離が長距離となると、電磁界の減衰が著しく、 計算精度を補償することは極めて困難となる。この点については、順次高精度化を進めていくが、 本報においては、現時点での暫定の計算結果を示すこととする。

図-15 に有限要素モデルを示す。10kHz アンテナは、実際のスパイラルコイル、高誘電体、背面 シールドプレート等の構造をモデリングした。入力電力は 1W として計算している。

図-16 に、磁界の大きさ(磁界強度)の距離減衰曲線を示す。図-12 と比較すると、2m 以下の距離 において減衰特性が大幅に軽減されていることがわかる。この近傍界の減衰軽減が 10kHz アンテナ の電磁界伝搬距離延伸に対して有益な効果をもたらすことは前述のとおりである。図-17 に、磁界 ベクトルの計算結果を示す。10kHz アンテナの近傍界における減衰が、微小磁気ダイポールのそれ より小さい原因を解析的な数式等で示すことは容易ではないが、考えられる原因を 10kHz アンテナ の利点として、以下にリストアップしておく。ただし、磁界の大きさは対数表示で矢印の長さとし て表示している。

- 1. 10kHz アンテナは、2層の巻き数の多いスパイラルコイルにより構成されており、電流により生成される電界も電磁界生成に寄与するよう構成されている。また、2層のスパイラルコイル間はキャパシタとして動作するため、電界型アンテナとして、やはり電界を生成しそれが電磁界生成に寄与する。
- 2. 10kHz アンテナの適切な大きさによる影響。適切とは、アンテナが大きすぎ、近傍界にお ける電磁界のピークやディップを生じないという意味である。
- 3. 10kHz アンテナの生成する磁界が、微小磁気ダイポールのそれとは異なる。



図-15 10kHz アンテナおよび海水自由空間の有限要素モデル



図-16 10kHz アンテナの海中自由空間における磁界強度虚位減衰特性 FEM 計算結果



図-17 10kHz アンテナの海中自由空間における磁界分布 FEM 計算結果 (断面ベクトル図)



図-18 10kHz アンテナの海中試験結果および数値計算結果の比較

[C] 試験結果と数値計算結果の比較

図-18 に、試験での実測結果と微小磁気ダイポールおよび FEM による計算結果を並べて示す。図 -18 を見ると、まず FEM 計算結果と実測結果では、1m での減衰が FEM 計算の方が大きいことを除い て、傾向としてほぼ一致していることがわかる。また、微小磁気ダイポール計算結果については、 遠方の 50m 以降で漸近するように計算しているが、1-10m 付近から、実測との差異が小さくなって いることが確認できる。FEM と実測の比較結果から、本試験結果の妥当性が検証された。すなわち、 クロストーク等の影響が排除された上で、海水中での電磁界の伝搬が確認されたといえる。一方で、 微小磁気ダイポールの計算結果は、50m - 100m で FEM 結果に漸近するよう計算したわけであるが、 その結果、極近傍 1cm においては、FEM および実測結果より 70dB 程度大きくなっている。これは、 遠方において、10kHz アンテナと同等の受信電力を実現するためには、磁気ダイポールは、10kHz ア ンテナよりも 70dB 大きな電力を入力する必要があることを意味している。まさにこの差異が、 10kHz アンテナの近傍界における優位性であるといえる。加えて、アンテナ近傍における、微小磁 気ダイポールの計算結果と実測及び FEM の計算結果の差異が 10kHz アンテナによる近接場の影響 であると解釈できるが、Eq. (12)、(13)の指標を設けて導いた、近接場領域約 10m 程度の領域まで 確かに、上記の差異がみられる。

研究開始時の目標であった、100m 離間距離での減衰は約 350dB となっており、現実的に如何なる 電力を送信アンテナに入力しても、また受信アンテナで如何なる利得を稼ごうとも、通信を行うこ とは不可能であることが明示された。

[D] 現設計 10kHz アンテナによる伝搬/通信限界距離

ここでは、10kHz アンテナの現在の設計(共振周波数 7kz)による海中電磁界の電波および通信限 界距離について考察する。

図-18 にて、FEM 計算結果と実測が今回の試験の範囲内でよく合致していることを説明した。

本項では、この FEM 計算結果 図-16、図-18 を用いて、海水の自由空間条件で、10kHz アンテナの電磁界伝搬距離と通信限界距離について考察する。

電磁界の伝搬限界距離および通信限界距離を推定するにあたって、下記の前提条件を用いる。 【受信/通信限界距離推定条件】

•受信限界:

現実的な LNA のノイズレベル (1nV/√Hz≒-160dBm@50Ω系) にマージンを 20dB 程度見込んで-140dBm とする。

通信限界距離:

帯域中心から周波数偏差 10%で 10dB 低下とし、上記受信電力限界に 10dB のマージンをもって -130dBm を通信限界とする。

・入力電力:

50W を仮定して、10kHz アンテナの実測値とのフィッティング曲線から 0dBm@1m の理論曲線を 用いる。

上記、条件から FEM 計算結果 図-16 を用いて受信限界と通信限界は下記の通りとなる。

・受信限界: 23m(-140dBm 受信)

•通信限界: 20m (-130dBm 受信)

[E] 10kHz アンテナの更なる低周波化による伝搬距離/通信距離の延伸について

我々の 10kHz アンテナは広帯域の使用が可能なアンテナであり、海水中の共振周波数 7kHz より 低い帯域での動作も可能である。当然ながら、共振周波数以外での動作をさせた場合、送信効率は 低下することになるが、それに比して海水中での渦電流損による伝搬損失の軽減分が大きいのであ れば、そのような動作をさせることもまた有益である。当然ながら、動作周波数を低下させると、 通信レートも低下するが、それは通信システム側において、必要な通信距離と動作周波数のルック アップテーブル等を保持しておき、必要な通信距離に応じて、最大限高い動作周波数を使用する等、 動作周波数、通信レートを可変とするシステムを実現することが可能となる。

図-19 に 10kHz アンテナの動作周波数を 2kHz、5kHz、7kHz と変化させた場合の、磁界強度距離減 衰特性を示す。アンテナ極近傍が低周波動作させることにより低下しているのは、共振周波数以外 の周波数で動作させたことによる放射効率の低下が低下しているためである。しかし、10m を超え た付近から、低周波動作の方が磁界強度大きくなっており、これは、海水の導電率による減衰が、 低周波化により軽減されたためである。



図-19 10kHz アンテナを低周波化したときの海中自由空間における磁界強度虚位減衰特性 FEM 計算結果

【4】-2 海中近接場伝搬シミュレーション技術の構築(2回目)

本項目は、未実施のため記載を割愛する。

【5】 プロジェクトの総合的推進

(1)~(4)の項目について、設計資料を得るためプロジェクトを総合的に推進した。各項目に対する 具体的な留意点は下記のとおりである。

(1) 低周波・広帯域アンテナ作製技術の構築

前年度の設計資産および製作した試作基板を用いて、100m水深まで動作可能なアンテナを9月の 海上試験を目標として、設計・製造にかかわる業務イについての日程管理し、推進した。

(2) 海中近接場測定技術の構築

20m程度の垂直離間が可能な水平垂直離間の冶具、およびアンテナの間の受電力距離減衰特性を 測定可能な測定系を構築し、9月の20m海上試験に適用した。

(3)小型水槽試験及び海洋試験の実施

20m程度の垂直離間が可能な海域を穴水湾内の海域に決定し、社外協力者との交渉等を経て海中で20mの伝搬試験を行った。

(4) 海中近接場伝搬シミュレーション技術の構築

上記(3)の海上試験の結果との比較を行いつつ、理論的な知見からシミュレーション技術を 構築すること、それらを適切に運用することを推進した。結果として、有限要素法での計算結果 と試験結果に良く一致することを確認した、最終的に、10kHzアンテナでの伝搬および通信限界 距離の導出を行った。

3. 成果の外部への発表及び活動

29年度発表: 2017年10月4日

日豪多義性技術に係るシンポジウム (Australia - Japan Multi-Function Technology Symposium) 「Wireless underwater power transfer and communication」

30年度発表: 2018年9月14日

電気情報通信学会 ソサイエティ大会

「水中や海中における通信技術」シンポジウムにて発表予定

「水中におけるワイヤレス充電・通信のための電磁界解析(仮)」

4. まとめ、今後の予定

以下に、29年度の研究で得た成果を下記の通りである。本研究は、29年度をもって終了と する。

【1】低周波・広帯域アンテナ作製技術の構築

前年度の設計資産および製作した試作基板を用いて、100m水深まで動作可能なアンテナを 作成した。

【2】海中近接場測定技術の構築

20m程度の垂直離間が可能な水平垂直離間の冶具を作成した。また、アンテナの間の受電力 距離減衰特性を測定可能な測定系を構築した。

【3】小型水槽試験及び海洋試験の実施

20m程度の垂直離間が可能な海域を選定し、海底及び海面の影響を極力軽減した状態で、 20mの伝搬試験を行った。

【4】海中近接場伝搬シミュレーション技術の構築

20m離間数値シミュレーション行い、項目【3】の実測結果との比較を行い、両者の合致を確認 した。さらに、アンテナの低周波化等により最大限伝搬距離を延伸するための方策、及び 海中での伝搬距離について結果を得た。

<u>参考文献</u>

[1] S. Yoshida, *et. al.* "Underwater Wireless Power Transfer for non-fixed," IEEE AUV2016, pp. 177-180.

[2] S. Shizuno et. ai. "A Compact 35-Watt High Efficiency Wireless Power Transfer System Under

Seawater Environment, "European Microwave Conference, 2013, Unmanned Underwater Vehicle in the Ocean."

[3] 電子情報通信学会編 "アンテナエ学ハンドブック", 第二版, オーム社, 2008年, pp. 11-

20.

[4]後藤憲一他, "詳解 電磁気学演習", 共立出版, 1997年, pp. 325-338, 351-361.

[5] 酒井善雄他," 電気物性学",森北出版,1996年, pp. 183-198.

[6] R. Somaraju, *et. al.* "Frequency, temperature and salinity variation of the permittivity of Seawater," IEEE T Antenn Propag, **54**(3), 2006, pp. 3441-3448.

[7] E. F. Kester *et. al.* "Evaluation of Sommerfeld Integrals Associated with Dipole Sources above Earth," Scientific Report **43**, Univ of Colorad, 1979, pp. 1-88.

[8] K. A. Michalski, "Extrapolation Methods for Sommerfeld Integral Tails," IEEE T Antenn Propag, 46(10), 1998, pp. 1405-1418.

[9] M. Yusan *et. al.* "Computation of the Sommerfeld Integral Tails Using the Matrix Pencil Method," IEEE T Antenn Propag, **54**(4), 2006, pp. 1358-1362.

[10] J. Wang *et. al.* "Electromagnetic Fields Generated Above a Shallow Sea by a Submerged Horizontal Electric Dipole," IEEE T Antenn Propag, **65**(5), 2017, pp. 2707-2712.

[11] M. Dautta *et. al.* "Underwater vehicle communication using electromagnetic fields in shallow seas," 2017 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering, pp. 38-43.

以上