

海水の複素誘電率測定における大型テストフィクスチャの提案

Suggestion of Large-Scale Test Fixture for Measuring Complex Permittivity of Seawater

都澤 優希
Yuki Miyakozawa

居村 岳広
Takehiro Imura

東京理科大学
Tokyo University of Science

1. まえがき

近年、海底マッピングや海底資源探索を目的として自律型水中ロボットの開発が盛んに行われている。水中ロボットの課題としてバッテリー問題がある。内蔵バッテリーを使用するとバッテリー交換の度にロボットを浮上させなくてはならず、危険性のある作業な上にロボットの運用効率も低下してしまう。そこでワイヤレス電力伝送を用いて海底に充電スポットを設置することで海底での充電が可能になり、運用効率の改善が見込めるとして、図1の様な海中ワイヤレス電力伝送の研究が行われている[1]。しかし、電界結合方式では送受電間に海水が存在すると電界に変化が生じ伝送効率が著しく低下してしまう。効率的な電力伝送を行うためには海水を含んだ送受電間のコンデンサの Q 値を向上させる必要がある。コンデンサの Q 値は海水の複素誘電率から算出可能である為、今回は実際に電力伝送実験で使用する予定のカプラ原寸大の大型テストフィクスチャを作成し複素誘電率の周波数特性を測定した。

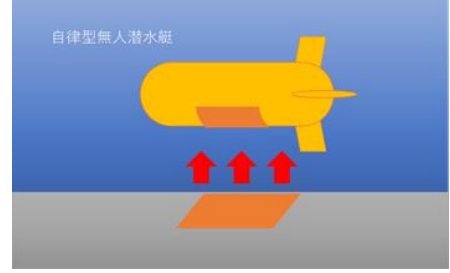


図1 水中ワイヤレス電力伝送(イメージ図)

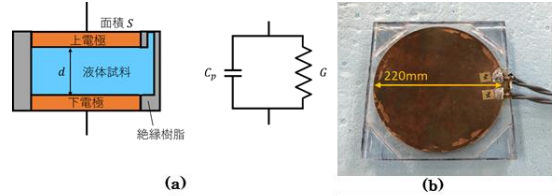


図2 テストフィクスチャ (a)構造 (b)写真

2. 複素誘電率

誘電率は式(1)のように複素誘電率として表すことができ、複素誘電率の虚数部は損失係数とも言われ式(2)で表される[2]。

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\omega\varepsilon_r'' \quad (1)$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} + \varepsilon_{r,d}'' \quad (2)$$

コンデンサの極板間に海水のような導電率性のある誘電物質がある場合、損失の原因として誘電緩和と導電現象がある[3]。式(2)からコンデンサの Q 値を求めると式(3)と求まる[4]。水における誘電緩和はデバイ型緩和に分類され、虚部 $\varepsilon_{r,d}''$ は純水、海水に関わらず 20GHz 付近でピークを得ると分かっており[5]、今回測定するのは20GHzより低周波であるため省略される。また、有効な導電率を σ_e として表した。

$$Q = \frac{\varepsilon_r'}{\varepsilon_r''} = \frac{\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,d}'}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,d}'' + \sigma} \cong \frac{\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,d}'}{\sigma_e} \quad (3)$$

3. 自作テストフィクスチャ

測定に当たって図2(a)のように平行平板型の自作フィクスチャを作成した。電極には直径 220mm の円形銅板を使用し極板間は 5mm で極板周りを絶縁性の高いエポキシ樹脂

で固定した(図2(b))。測定の際はインピーダンスアナライザで容量 C_p と抵抗 G を測定した値を用いて計算することで複素誘電率の値を得た。

4. 実験の概要と結果

今回は測定周波数 100Hz から 1MHz に適した容量法を用いて計測を行う。また、測定誤差を軽減するために 500mm の同軸ケーブルを用いて4端子対構造にして測定を行った(図3)。校正は図3のように自作テストフィクスチャと同じケーブルを用いて OPEN/SHORT 用と LOAD 用(100Ω 金属酸化皮膜抵抗器)のケーブルを用意して行った。測定には純水(AS ONE ASSWS-20)にマリンアート(SF-1)を溶かして人工海水を作成し使用した。人工海水はそれぞれ 0.5%から 1%ずつ増やし 5.5%まで 6 種類の割合で作成し純水での測定も行った。測定時に導電率計で人工海水の水温と導電率を測定し式(4)から実用塩分を導出した[6]。

$$S = 0.0080 - 0.1692k^{\frac{1}{2}} + 25.3851k + 14.0941k^{\frac{3}{2}} - 7.0261k^2 + 2.7081k^{\frac{5}{2}} \quad (4)$$

測定に使用した人工海水の水温と実用塩分を表1に示す。なお、実用塩分 39 は日本近郊の海水濃度とほぼ同等といえる。測定した複素誘電率の実部 ε_r' 、虚部 ε_r'' を図4(a)(b)に示す。図4(a)より純水(0.00%)の複素誘電率実部 ε_r' は 10kHz 以降で 70 に収束しており、一般的な誘電率(80)と近い値

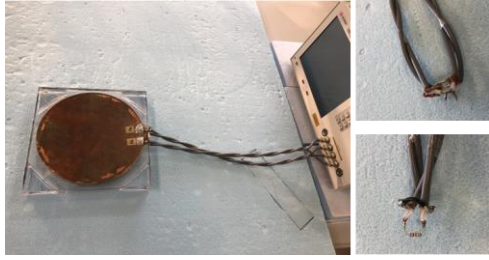


図 3 実験の様子

表 1 人工海水の海水濃度

塩分濃度[%]	実用塩分(PSU)	導電率[m/s]
0.5	6.2	8.8
1.5	17	22.2
2.5	29.7	37
3.5	39	47.1
4.5	49.6	58.4
5.5	58.6	67.6

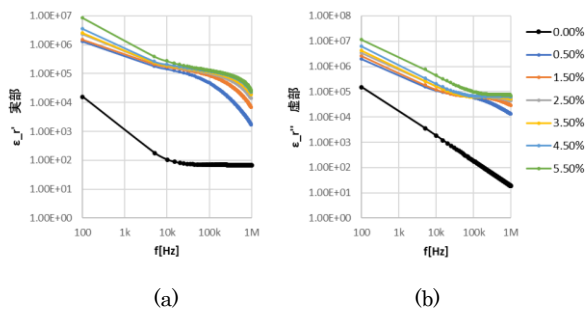


図 4 複素誘電率の周波数特性(a)実部(b)虚部

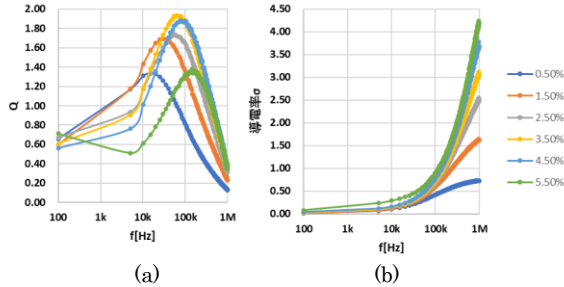


図 5 周波数特性(a)Q値(b)導電率

が得られた。複素誘電率の実部は100kHz付近で大きく減衰傾向に転じるが、虚部は海水濃度が高くなるにつれて 7.5×10^4 付近に収束する傾向が見られる。また、 $Q = \epsilon_r' / \epsilon_r''$ から導出した Q 値を図5(a)、導電率の転移を図5(b)に示す。図5(b)より導電率は10kHz付近から高周波になるにつれて上昇し、さらに海水濃度が高くなるほど上がり幅が大きくなることが分かる。図5(a)と比較すると丁度10kHz付近で導電率の上昇と共に Q 値も増幅し3.5%の人工海水では65kHzで最大値1.93を得られる。しかし、100kHz以降は導電率とは逆に Q 値は減少傾向になっている。これは10kHz以下では海水中のイオンがほとんど分極しきった状態(電気二重層)であったのに対し、100kHzから1MHzでは誘電緩和が発生したため Q 値の低下が見られたと考えられる。ただし、今回得られた結果は純粋な海水の特性だけでなく、自作テストフィクスチャ特有の特性と海水の特性が両方表れていると考えられる。

5. 結論

極板面積380cm²の自作テストフィクスチャを用いて海水の複素誘電率の測定を行い、100kHzから1MHzでは Q 値が海水濃度に反比例することが分かった。さらに3.5%の海水では65kHzで Q 値のピークが得られたことから65kHzでの電力伝送が好ましいと考えられる。

今後の課題としては、自作テストフィクスチャ特有の特性と海水自体の特性の分離や、サイズや形状を変えたときの検証を行いたい。

謝 辞

本研究の一部はJSPS科研費17H04915の助成を受けた物です。

文 献

- [1] R. Hasaba, K. Okamoto, T. Yagi, S. Kawata, K. Eguchi, and Y. Koyanagi, "High Efficient Wireless Power Transfer System for AUV with Multiple Coils and Ferrite under Sea," in *2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, 18-21 June 2019 2019, pp. 343-346, doi: 10.1109/WPTC45513.2019.9055653.
- [2] M. Tamura, K. Murai, and H. Matsukami, "Feasibility of Electric Double-Layer Coupler for Wireless Power Transfer Under Seawater," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. advpub, 2020, doi: 10.1587/transele.2019ECP5033.
- [3] 花井哲也, *不均質構造と誘電率*. 吉岡書店, 2000.
- [4] M. Tamura, Y. Naka, and K. Murai, "Design of Capacitive Coupler for Wireless Power Transfer Under Fresh Water Focusing on kQ Product," in *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, 10-15 June 2018 2018, pp. 1257-1260, doi: 10.1109/MWSYM.2018.8439174.
- [5] 逸. 山浦, "マイクロ波CTによる無侵襲温度分布計測の現状と問題点," *日本ハイパーサーミア学会誌*, vol. 12, no.2, pp.164-170, 1996, doi: 10.3191/thermalmedicine.12.164.
- [6] 柳. 哲雄, *海の科学—海洋学入門[第3版]*. 恒星社厚生閣, 2011.