

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18796

研究課題名（和文）液体電解質中の分極による縦波を利用した新原理の海洋通信

研究課題名（英文）Marine communication based on a new principle using longitudinal waves generated by polarization in a liquid electrolyte

研究代表者

川原田 洋（Kawarada, Hiroshi）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90161380

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：新方式の塩水中の無線通信，海水管での通信を提案した．この方式は，塩濃度の上昇で活性である．少なくとも距離50 mまで1 Mbps以上のデータ伝送を行える．複雑形状のチューブやパイプ等でも可能である．電気伝導を基礎とするので，不透明な環境でも問題ない．しかし，塩水が海と接していない環境が必要である．海はアース電位となり，信号が短絡されるからである．淡水化プラントや醤油工場のように塩濃度の高い液体が存在するプラントの容器やパイプ内壁検査用小型ドローンなどの応用がある．電気伝導，イオン・プラズマ振動等の立場から，伝送機構を明らかにした．信号の減衰を小さくし，伝送距離を長くする手法を検討した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、大規模の淡水化技術、海洋生物の陸上養殖が盛んになり、水と食料の確保の両面から塩水環境での情報収集が重要で、日本でもスマート漁業として進行中である。従来からの超音波技術と開発途上の可視光通信という競合技術があるが、本技術は両技術の間を補完できる。現在、100kHz-10MHz間で1E7m/s-1E8m/sの速度で、50m程度の到達距離である。さらに100m程度まで延伸すれば、海面や海底の反射の影響や濁りの影響もないため、音波よりも情報量が高く、光と異なり濁り影響を受けないため、浅い海での実用化が可能である。また、電解質中の分極した縦波という新たな波動伝搬の開拓として意義がある。

研究成果の概要（英文）：A new method of wireless communication in salt water and seawater pipes was proposed. This method is active as the salt concentration increases. It can transmit data at 1 Mbps or more up to a distance of at least 50 m. It can also be used in tubes and pipes with complex shapes. Since it is based on electrical conduction, it does not pose a problem in opaque environments. However, it requires an environment where the salt water is not in contact with the sea, because the sea is at earth potential and the signal is short-circuited. Applications include small drones for inspecting containers and pipe inner walls in plants where high-salt liquids exist, such as desalination plants and soy sauce factories. The transmission mechanism was clarified from the standpoint of electrical conduction, ion and plasma vibrations, etc. Methods were examined to reduce signal attenuation and increase the transmission distance.

研究分野：電気電子工学およびその関連分野

キーワード：海洋通信 塩水通信 プラズマ・イオン波

# 液体電解質中の分極による縦波を利用した新原理の海洋通信

研究代表者 川原田 洋

## 1. 研究開始当初の背景

近年、世界規模の海底地質調査、海洋生物生態調査等の海洋探査が盛んになり、日本近海でも多種多様の調査が進行中である。遠隔操作型無人探査機(Remotely Operated Vehicle, ROV)が利用される。海水中において、電波は低周波(1kHz 以下)を除いて減衰係数が大きい

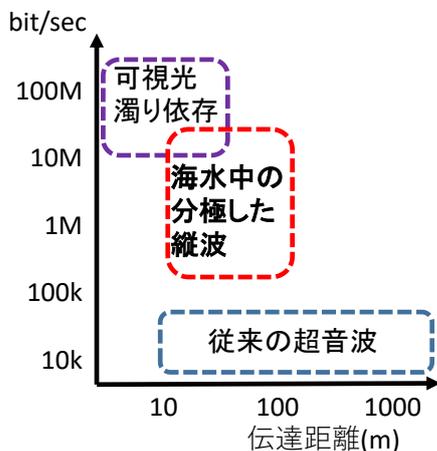


図 1. 海中における各種通信媒体による伝達距離と情報量の比較。超音波通信の距離は長いが情報量に限界。可視光通信の情報量は高いが、距離が海水の透明度に影響される。提案の分極した縦波は両者の欠点を補う。

ため、情報量の高い電波通信(1MHz 以上)は困難である。従って、無線通信は超音波技術となる。数千mの深さでの通信が可能だが、100kbit/s 以下の伝達特性のため、リアルタイム動画計測による遠隔制御の ROV は不可能である。一方、海岸線での浅い海では、羽田空港滑走路など海底の柱で支える構造物、石油プラントのパイプライン、河口周辺での環境計測用海底センサネットワークが存在する。これらの保守検査には ROV が使用されるが、超音波での無線通信では、水深が 20-30m だと海面や海底という上下境界での反射波、柱等の海底構造物の反射波による位相遅れが、音速という遅い波のため大きな問題となる。一方、最近注目される発光ダイオードや半導体レーザーによる可視光は海底の濁りの影響受け、陸に近い浅い海での使用は制限される。

従来からの超音波技術と開発途上の可視光通信という競合技術があるが、本技術は両技術の間を補完できる(図 1)。現在、100kHz-10MHz 間で  $10^7\text{m/s}$ - $10^8\text{m/s}$  の速度で、25m 程度の到達距離である。100m 程度まで延伸すれば、海面や海底の反射の影響や濁りの影響もないため、音波よりも情報量が高く、光と異なり濁り影響を受けない(図 1) ため、浅い海での実用化が可能である。また、電解質中の分極した縦波という新たな波動伝搬の開拓として意義がある。

## 2. 研究の目的

本提案では、海水中に入力信号(矩形波)を電気 2 重層容量と抵抗からなる微分回路にてパルス信号として検出し(図 2)、100kHz 以上 1GHz 程度までのデジタル通信技術を開発する。対象とする波動は従来の縦波の超音波、横波である電磁波ではなく、縦波となる正負イオンあるいは分極した分子による分極波である(図 2)。これにて到達距離 100m(1MHz)を目指す。本提案は世界的に先例のない電解質中の信号伝搬方式であり、液体電解質中の電気信号伝搬という全く新たな分野の開拓となり、伝搬機構の解明を目指す、

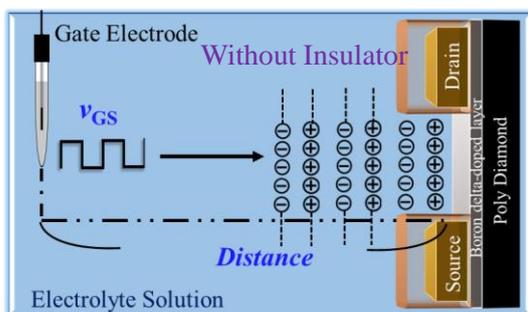


図 2 正負のイオン或いは分子内の正負分極が振動伝搬する分極波である可能性が高い。(b) 上、東京湾での送受信。矩形送信信号が電極および SGFET 表面の電気 2 重層容量にて微分波となり、パルス波と受信される。

## 3. 研究の方法

電磁波は通常は横波であり、双極子アンテナで電解質中に入射すると正負イオンを進行方向に直交する方向に大きく移動させ、エネルギーを吸収され、減衰にいたる。縦波であれば、この減衰が非常に少ない。真空中での縦波は不可能だが、媒質中は可能である。送信側を単一極として、図 2 に示すように電位変化を与え、正負イオンまたは分子の分極による縦波が作製される。この分極した波を、バイオセンサとして開発してきたダイヤモンド電解質溶液ゲート電界効果トランジスタ (Electrolyte Solution Gate FET : SGFET) のチャンネルを 2 次元面の受信器(図 2) とする新たな海中無線通信を提案する。

上記のような電解質中で動作する電気 2 重層 FET を受信デバイスとして用いた前例は見当

たらず、今までにない独自の海洋通信方式である。海水は～3%塩が溶けた電解質溶液で過酷な環境であり、シリコン系 FET のように絶縁膜を利用する FET だと 1 時間程度で劣化する。ダイヤモンド SGFET の表面には絶縁層が必要ない (図 2(a)) ので海水イオンの侵入による劣化がなく、長期利用に優れる。さらに、FET 型よりも単純な電極構造での検討も行った。

## 4. 研究成果

### 4.1 フローティング回路でのパルス信号伝播

共通電位線を取り去り、参照電極及び SGFET のそれぞれをフローティングとして送信部を参照電極、受信部を SGFET とした無線での塩水中での信号伝送を検証した。フローティングの結果では、共通ソースで確認できる矩形波入力振幅を反転した振幅が観測されず、入力電圧  $v_G$  の立ち上がり及び立ち下りの電位の変化分、つまり微分波形のみがドレイン電圧の変化として、1~10 MHz で観測された。振幅が観測されない理由としては、共通電位線が無いことで入力電圧  $v_G$  の直流成分 ( $V_{Bias}$ ) の影響を受けないためである。

図 3 は各濃度の溶液における距離 4 m でのダイヤモンド SGFET の 1 MHz のスイッチング特性の一例である。純水の場合、信号の減衰が著しく、1m 以上で出力電圧の振幅  $V_{peak}$  が観測できなかった。NaCl 濃度 3.5% と 25% においては、入力電圧  $v_G$  に対し出力電圧  $v_{RL}$  は周波数応答し、NaCl 溶液の濃度が高いほど振幅  $V_{peak}$  が増加した。図 3 は各濃度の距離と出力電圧の振幅  $V_{peak}$  の関係でもある。各濃度における振幅  $V_{peak}$  は距離によって減衰したが、いずれの距離においても NaCl 溶液の濃度が高いほど振幅  $V_{peak}$  は増加した。信号伝播が電磁波であれば、NaCl 濃度の上昇、つまり、イオン濃度の上昇により、吸収が大きくなり、今回の NaCl 濃度による伝播の上昇は説明できない。

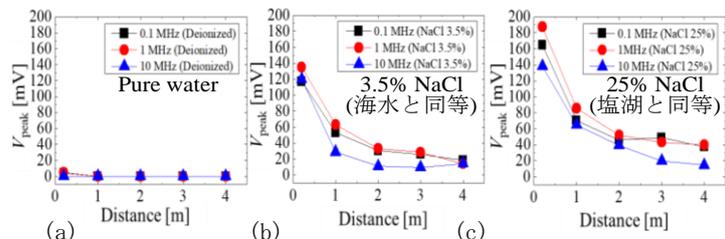


図 3 ダイヤモンド SGFET の各媒質での出力電圧。入力電圧は 1V 共通。(a) 純水、(b) 3.5%NaCl (海水)、(c) 25%NaCl (塩湖と同等)。

### 4.2 単純な金属受信電極で塩水中での情報伝達

FET チャンネル表面での信号検出は FET の動作機構上興味深いですが、塩水での信号の伝導機構を考え、しかも応用範囲を拡大するには、より単純な系の信号伝達の必要がある。そこで、FET を除去し、受信側も金属棒での塩水水管の信号伝達の測定系を図 7 に示す。

#### 4.2.1 絶縁性チューブでの電

#### 気伝導情報伝達

先ほどの内径 2.5 cm の絶縁性の PVC 製チューブを電解質水溶液で満たし、ステンレス棒を送信電極、受信電極としてそれぞれ絶縁性チューブの両端で溶液に浸した(図 4)。送信電極に振幅 1 V、周波数 10 MHz までの矩形波電圧  $v_{in}$  を印加し、受信電極に生じる電位  $v_{out}$  を出力信号として測定した。なお、移動体無線通信システムとして実用化することを想定し、送信器の GND と受信器の GND を独立させた (フローティング)。ここでは、電解質溶液として、0.25 % NaClaq ( $\sigma = 5.6 \text{ mS/cm}$ )、人工海水 ( $\sigma = 48 \text{ mS/cm}$ )、3.5 % NaClaq ( $\sigma = 60 \text{ mS/cm}$ ) を使い、塩濃度に対する搬送波の伝送特性を評価した。また、送受信電極間距離に対応する絶縁性チューブの長さを 1, 5, 10 m と伸ばし、伝搬距離の増加に伴う出力の変化を評価した。距離特性の測定では、電解質溶液として 3.5 % NaClaq を用いた。

図 5 に周波数 1 MHz の入力信号に対する、伝搬距離 5 m, 10 m における出力信号を示す。距離の増加に伴う、信号減衰が確認できる。さらに、周波数 0.5 MHz では距離 25m においても周波数応答した。



図 4 単純な受信電極での塩水管あるいは塩水路での通信の概要図

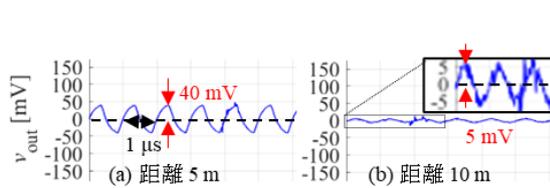


図 5. 距離変化と出力信号の相関

#### 4.2.2 矩形, 距離 20 m の塩水路での LC フィルタ導入時の出力信号伝搬の周波数特性<sup>1</sup>

図 6 で, 平面波水路 (1m×1m× 20m) と測定装置を水槽の外にした場合を示す. ここではインダクタ並列接続によるバンドパスフィルタ(BPF)を, 水槽内にて実測した結果を示す. 図 7(a)は, 台座上での, 電極挿入深さ 0.5 m において, 振幅 5 V の正弦波入力電圧に対する距離 20 m での出力電圧 FFT 上でのピーク値で, 縦軸は (1 V 基準の dB 表示;  $20 \log_{10}|V_{out}|$  [dBV]) で, 接続するインダクタンス値ごとに比較した. インダクタンス値ごとに最大のピーク値を示した周波数 (共振周波数) を示している. なお, 電極挿入深さ 0.5 m における出力の周波数特性である. 図 7(b)は, 振幅 15.8 V の正弦波入力電圧に対する距離 20 m での出力電圧 FFT 上でのピーク値の周波数特性を, 接続するインダクタンス値ごとに比較したものである. インダクタンス値ごとに最大のピーク値を示した周波数 (共振周波数) を示している. 縦軸は FFT 上のピーク値そのままの値である. 図 7(a)と比較して入力電圧が 3 倍以上 (約+10 dB) になっているので, 出力電圧のピーク値も全体的に上がった. 共振周波数は, 振幅 5 V と場合と概ね同様であり, 共振器の有効性が示された.

#### 4.2.3 送信器から空中へ放射される電磁波 (送信電極のみを海水外へ出した系) の影響

電磁波の影響は, 入力電圧 5 V では距離 3 m において

Background 雑音を超える出力電圧のピークは確認できなかった. 距離が広がるにつれて空中の電磁波は減衰すると考えられるので, 電圧 5 V の場合, 少なくとも距離 3 m 以上であれば, 空中を伝搬した電磁波の影響は出力電圧に影響を与えないと考えられる. 同様に入力電圧 15 V, 50 V の場合, 距離 6 m, 11 m において出力電圧のピークは確認できなかったため, それ以上の距離であれば, 空中の電磁波の影響はないと考えられる.

#### 4.2.4 断面の大きな系—海水プール内の特性<sup>2</sup>

深さの異なる 25m 塩水プール (25m×11m×0.35m, 25m×15m×0.9m, 導電率  $\sigma$  53.63 mS/cm) で主に入力電圧 50V での結果について述べる. 図 8(a) に距離 11 m, 15 m, 25 m における入力電圧 0 V 出力電圧の FFT ピーク値の周波数特性を示す. 距離 11 m では, 入力電圧 50 V の場合でも 15 V の場合 (図はなし) と同様に, 周波数 1 MHz ~ 5 MHz で, 他の周波数よりも高いピークを示している. 距離 15 m では, 入力電圧 15 V では周波数応答が確認できなかった 2 MHz 以降の周波数に対しても, 入力電圧 50 V では確認ができた. 距離 25 m では, 周波数 5 MHz 未満では出力電圧のピークは出現しないが, 周波数 5 MHz ~ 8 MHz で, バックグラウンドと比べ, 明瞭な高いピークを示した. 一部の周波数では, 距離 15 m よりも高いピークを示している (-49.6 dB@7 MHz).

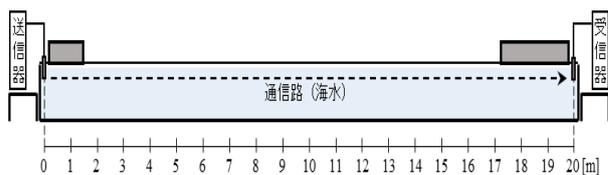
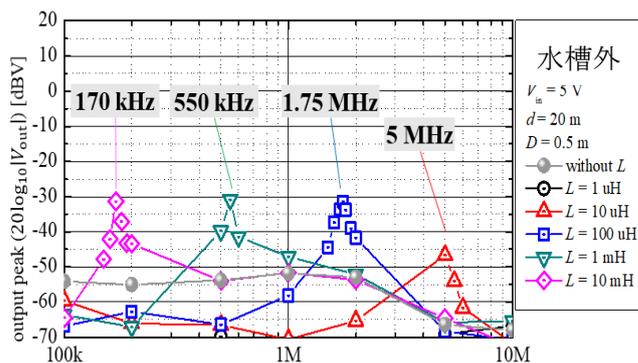
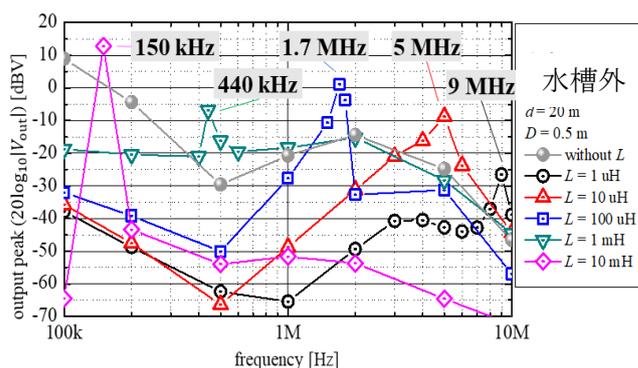


図 6. 絶縁性内壁の平面波水槽 (1m×1m×20m) と金属製台座および測定装置の位置関係. 測定器は台座外で水槽の外側.



(a) 水槽外, 5V



(b) 水槽外, 15.8V (送信器アース)

図 7  $d = 20$  m 塩水槽での深さ  $D = 0.5$  m における正弦波入力電圧に対する出力電圧 FFT 上でのピーク値の周波数特性, インダクタンス値ごとの比較. ピーク値は  $20 \log_{10}|V_{out}|$  で表示. (a) 入力振幅 5V. 測定器水槽外. (b) 入力振幅 15.8V (送信器アース) 測定器水槽外.

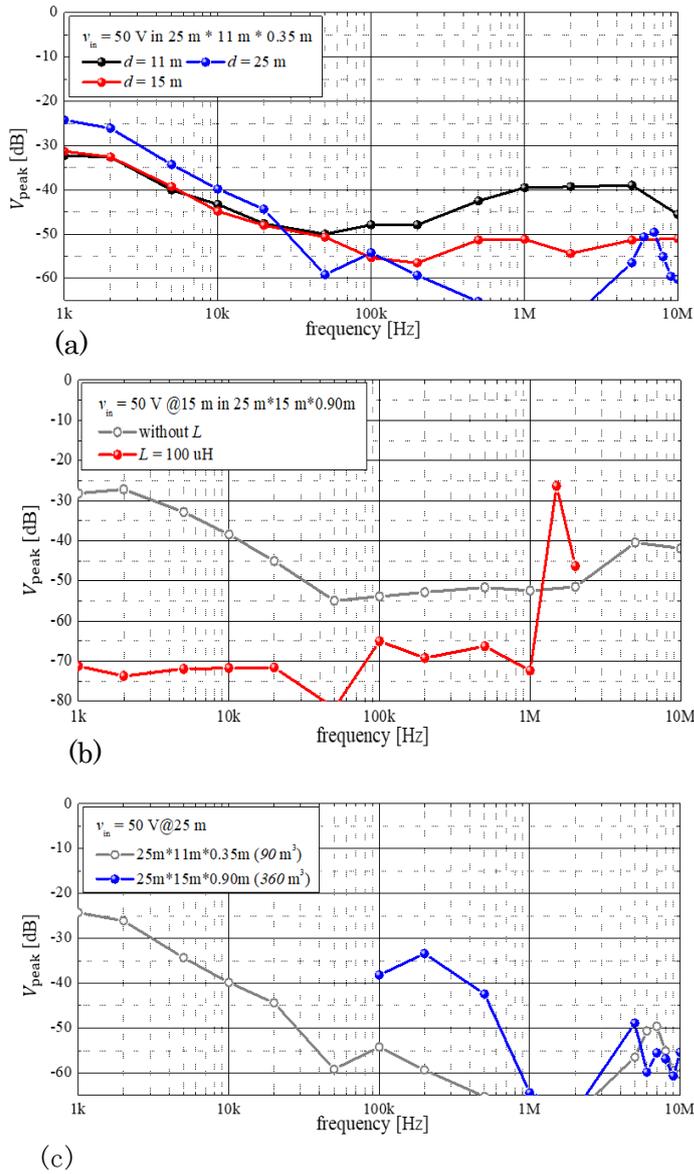


図8 塩水プール(25m×11m×0.35m, 25m×15m×0.9m)での入力電圧 50V に対する出力電圧 FFT ピーク値  $V_{\text{peak}} = 20 \log_{10} |V_{\text{out}}|$  の周波数特性の比較 (a) 距離 11m, 15m, 25m.  $L$  なし. (b) 距離 15 m (赤:  $L = 100$   $\mu\text{H}$ , 白抜き:  $L$  なし) (c) 距離 25 m (青: 水深 0.90m, 白抜き: 水深 0.35m).  $L$  なし.

新方式の塩水中の無線通信, 海水管での通信を提案した. この方式は, 塩濃度の上昇で活性である. 少なくとも距離 50 m まで 1 Mbps 以上のデータ伝送を行える. 複雑形状のチューブやパイプ等でも可能である. 電気伝導を基礎とするので, 不透明な環境でも問題ない. しかし, 塩水が海と接していない環境が必要である. 海はアース電位となり, 信号が短絡されるからである. 淡水化プラントや醤油工場のように塩濃度の高い液体が存在するプラントの容器やパイプ内壁検査用小型ドローンなどの応用がある. 電気伝導, イオンプラズマ振動等の立場から, 伝搬機構を明らかにした.

<sup>1</sup> 川原田洋, 佐藤弘隆, 野本玲於奈, 正留康太, "塩水の電気伝導性に着目した海水通信", 電子情報通信学会 コミュニケーションシステム研究会 (CS) (北九州国際会議場), 2023 年 3 月 2 日 (特別招待講演)

<sup>2</sup> K.Masadome, H. Kawarada et al., "Propagation of Potentiometric Signals Based on Electric Conduction of Sea Water", IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation, (ISAP 2023) Malaysia, Oct. 30-Nov. 2, 2023.

図 8(b)に距離 15 m における入電圧 50 V 出力電圧の FFT ピーク値の周波数特性を,  $L = 100$   $\mu\text{H}$  のインダクタンスを挿入した共振回路の場合とインダクタンスなしの場合とで比較して示す. 3.3 の室内実験での結果を受けて,  $L = 100$   $\mu\text{H}$  では周波数 1 MHz ~ 2 MHz 間で共振し, 最大電圧が予想されたため, 周波数 1.5 MHz で測定したところ, Background 雑音の電圧レベルが抑えられ, 周波数 1.5 MHz でインダクタなしの場合より 20dB 以上も高い信号レベルを得た. 海水プールにおいても, BPF の有効性が確認できた.

図 8(c)に距離 25 m における入力電圧 50 V 出力電圧の FFT ピーク値の周波数特性を, 水深 0.35m と 0.9m の 25 m プールで比較して示す. 周波数 1 MHz と 2 MHz で周波数応答が確認できず, 5 MHz 以上に高いピークを示した. また, 100 kHz ~ 500 kHz においてで, 水深 0.9m の方が 0.35m に比べ, 20 dB 以上高いピークが得られた. さらに 50m プールの実験にて 0.1-1 MHz と 5-8MHz の信号が検出された.

## 5. まとめ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Masadome, H. Sato, L. Nomoto, Y. H. Chang, H. Kawarada
2. 発表標題 Propagation of Potentiometric Signals Based on Electric Conduction of Sea Water,
3. 学会等名 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, (ISAP 2023) Kuala Lumpur, Malaysia, Oct. 30-Nov. 2, 2023 (Oral, Nov. 1, 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 正留康太、佐藤弘隆、野本玲於奈、張育豪、川原田洋
2. 発表標題 電解質溶液内のイオンを媒介とする海水パイプ中の無線通信
3. 学会等名 電子情報通信学会 2022年ソサイエティ大会 通信ソサイエティ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川原田 洋, 佐藤弘隆, 野本玲於奈, 正留康太
2. 発表標題 塩水の電気伝導性に着目した海水通信
3. 学会等名 電子情報通信学会 コミュニケーションシステム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤弘隆, 正留康太, 野本玲於奈, 川原田洋
2. 発表標題 海水のイオン導電性を利用した海中無線通信 ~ 海水管, 漁業用いけす内のワイヤレスリアルタイムモニタリングが可能に ~
3. 学会等名 第22回 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 無線通信システム及び無線通信方法	発明者 川原田洋，佐藤弘 隆，野本玲於奈，正 留康太	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、22151JP01	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------