

電解質を媒体とする新たな 海中無線通信の開発

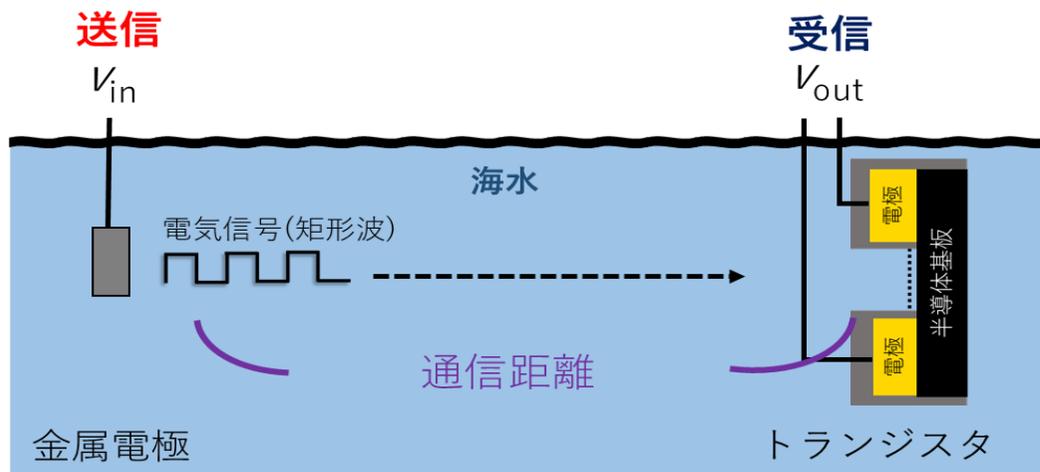
早稲田大学 基幹理工学部 電子物理システム学科
教授 川原田 洋

【謝辞】

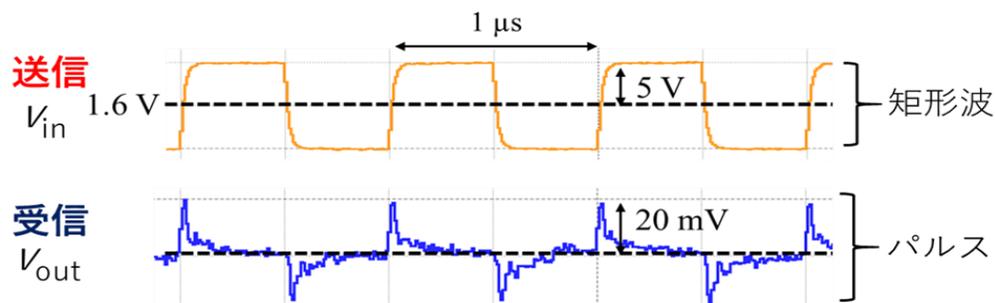
本研究の一部は、以下の機関の支援を得た。

- ・ サンシャイン水族館
- ・ 八景島シーパラダイス

海水中のMHzの信号

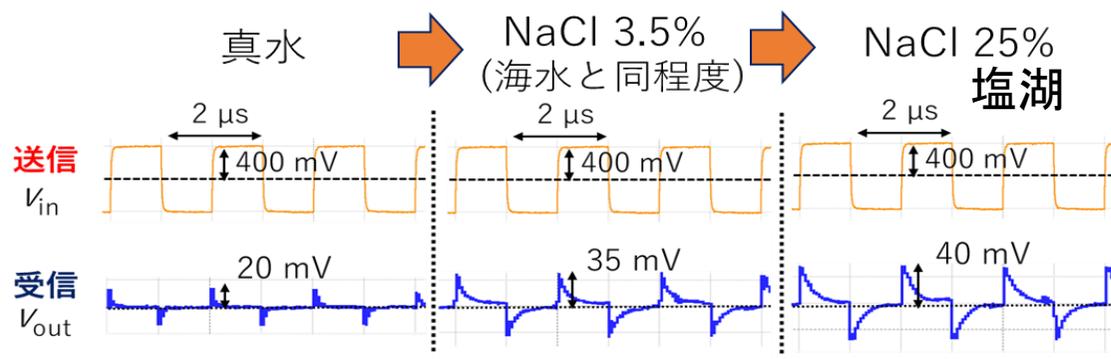


通信距離：1 m <周波数 1 MHz> @東京湾



矩形送信信号が電極およびFET表面の電気2重層容量にて微分波に。パルス信号として受信。

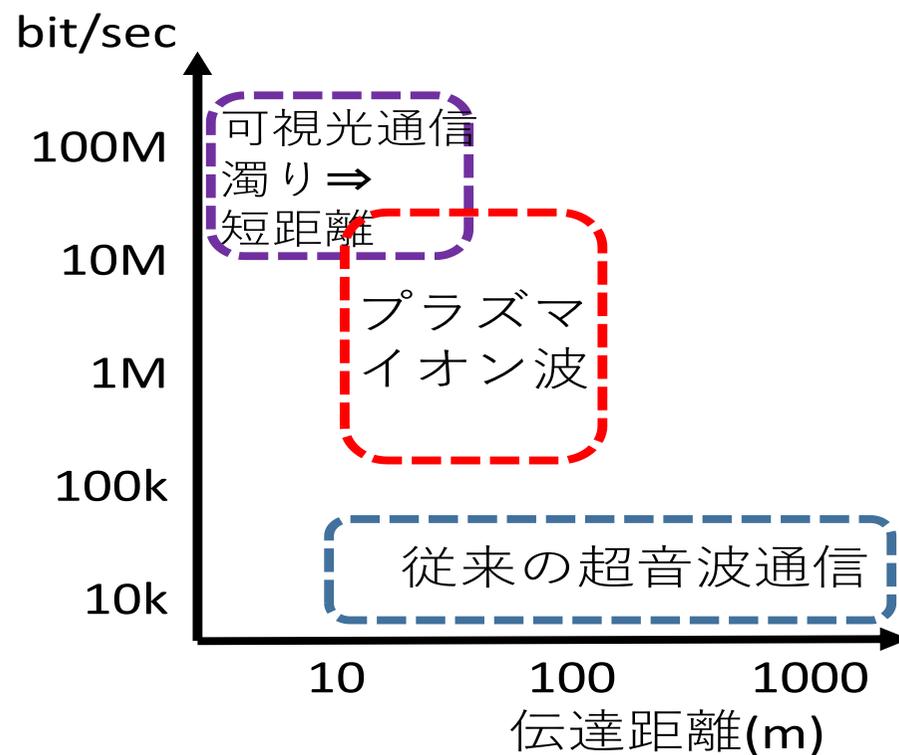
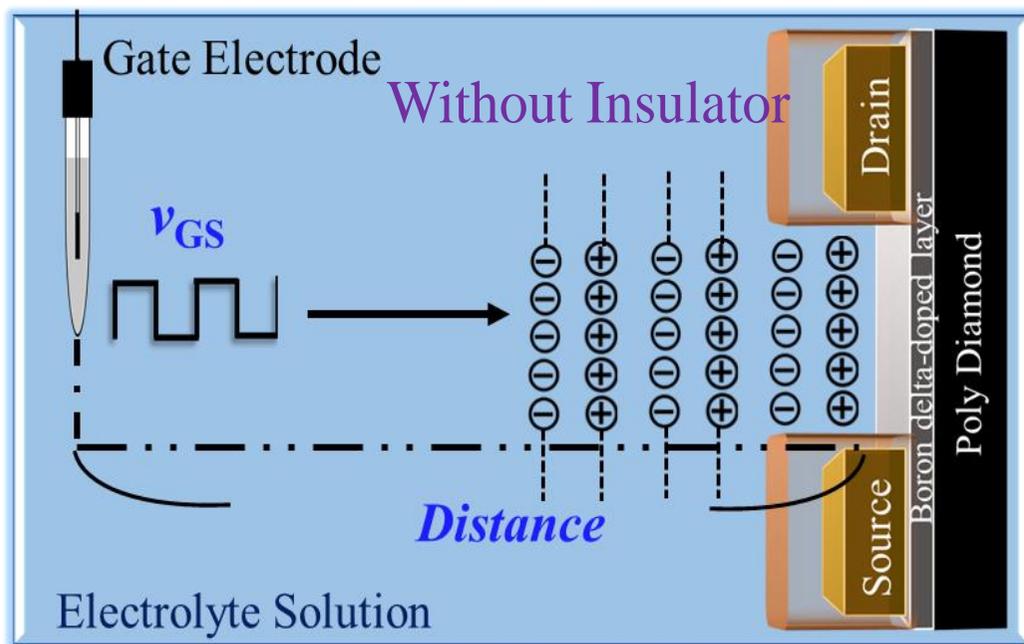
➤ 特徴：塩濃度(NaCl濃度)が高いほど有利



塩濃度が高いほど減衰しない。つまり、電磁波ではない。新たな伝搬機構解明が必要。

海水はプラズマ、その振動数はGHz

海水(液体電解質)はプラズマの一種、別名、「電解質プラズマ」。
1M塩水のプラズマイオン密度 $6 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ と非常に高い、
対応するプラズマ振動数は、イオン質量によるが、1GHz以上。
つまり、プラズマイオン波であればその伝搬周波数の上限は、GHz以上。



媒介とする波動は正負イオンが交互に振動するプラズマイオン波か。

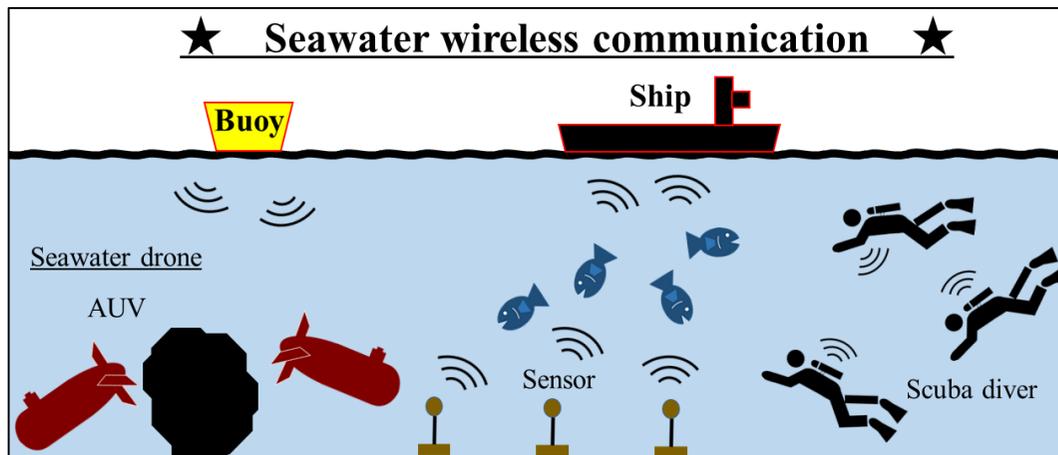
超音波通信: 距離は長いが情報量に限界。

可視光通信: の情報量が高いが、距離が海水の透明度に影響。

提案のプラズマイオン波は両者の欠点を補う。

【海中無線通信の用途】

- 海底資源の探査、開拓
→ 自律型水中ロボットの制御
- 海水のモニタリング(pH, 温度等)
→ 水中IoTの構築
- スキューバダイバー間通信



要求：移動体通信、海中という過酷な環境下で動作可能

【従来の海中無線通信^[1]】

[1] H. Kaushal and G. Kaddoum: IEEE access 4 (2016) 1518.

手法	海水での減衰	通信距離	速度	ノイズ
電磁波	高	短	高	強
音波	低	~ 数 km	低	弱
可視光波	低	~ 数百 m	高	弱

★ 従来の手法は、実用化に向けて課題がある ★

本研究：ダイヤモンド電解質溶液ゲートFETを用いた海中無線通信の開発

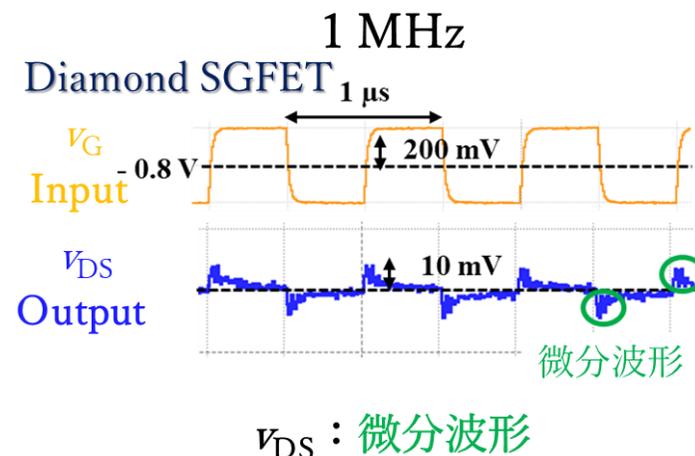
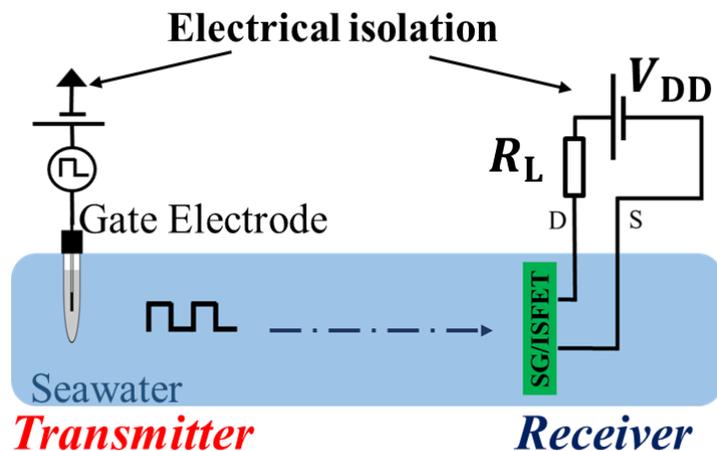
ダイヤモンド電解質溶液ゲートFETを用いた海中無線通信の動作検証例

【実験】

- 送信部：ゲート電極、受信部：ダイヤモンド電解質溶液ゲートFETとした際の、電解質溶液内での信号伝搬の調査
 - ➔ 閉空間：ビーカー、チューブ、水槽（@サンシャイン水族館）
- 海中での動作検証 ➔ 開空間：海中（@八景島シーパラダイス）

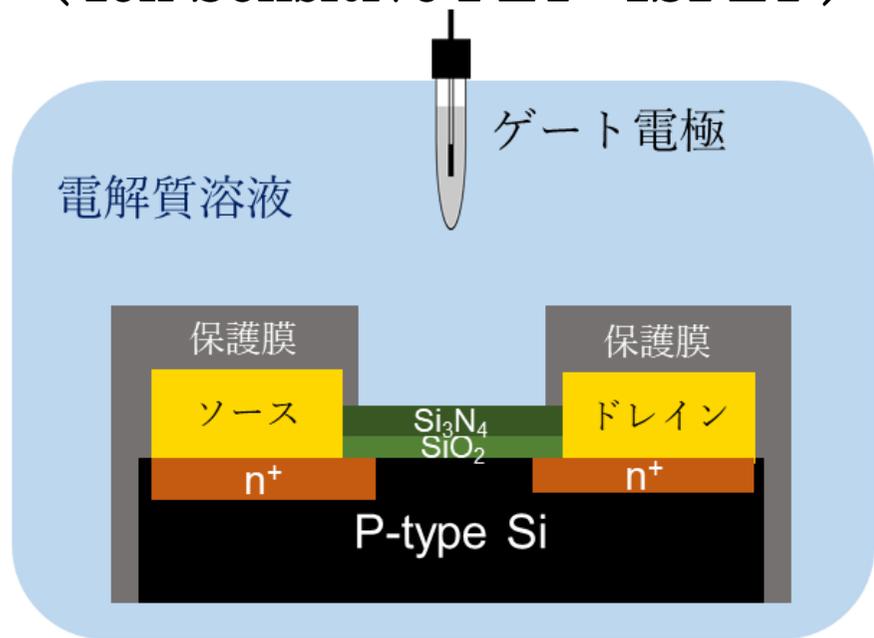
【結果】

- ダイヤモンド電解質溶液ゲートFETは、ゲート電極に印加したAC電圧に周波数応答し、微分波形を出力する
- 閉空間：25 m / 開空間：1 mの信号伝搬を確認

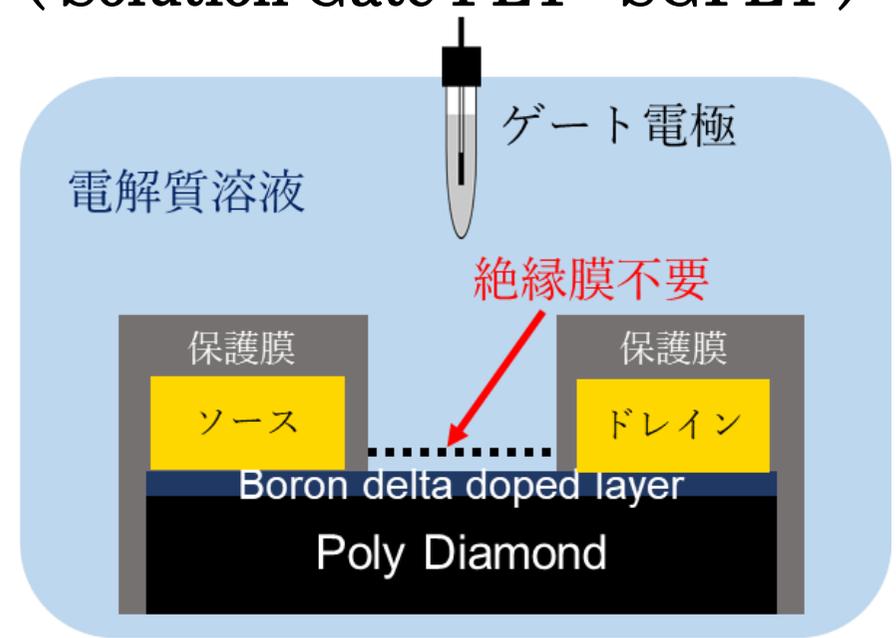


検出系のセンサ 2種 Si ISFET/Dia SGFET

Si - イオン感応性FET^{[1][2]}
(Ion Sensitive FET : ISFET)



ダイヤモンド電解質溶液ゲートFET^{[3][4]}
(Solution Gate FET : SGFET)



MOSFETのゲート金属 → 電解質溶液

Electrolyte Solution
Insulator
Semiconductor

ダイヤモンド
広い電位窓、化学的安定性

電気二重層 → 絶縁膜不要

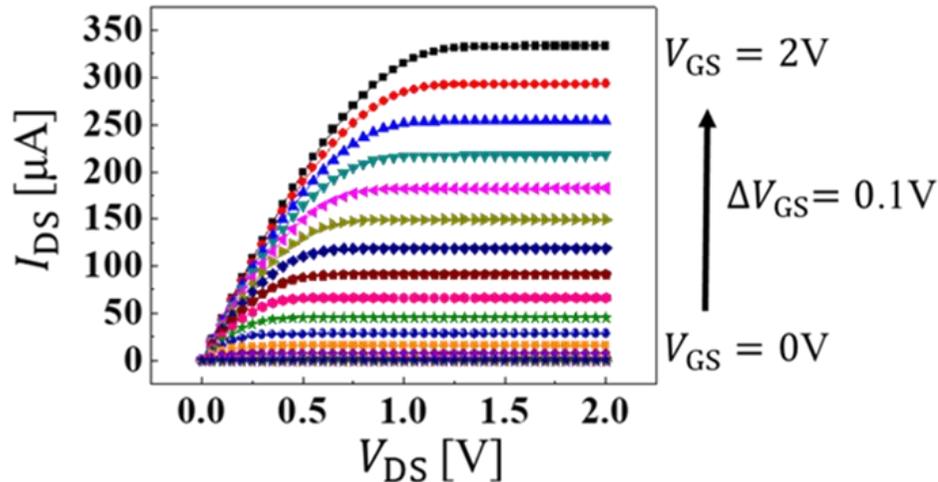
[1] P. Bergveld: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-17, 70 (1970).
[2] T. Matsuo. et al., *IEEE Trans on Biomedical Engineering*, BME-21, 485 (1974).

[3] H. Kwarada et al., *Phys.Status Solidi A*, 185,79,(2001).
[4] S. Kuga, H. Kwarada et al. *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 13251(2008)

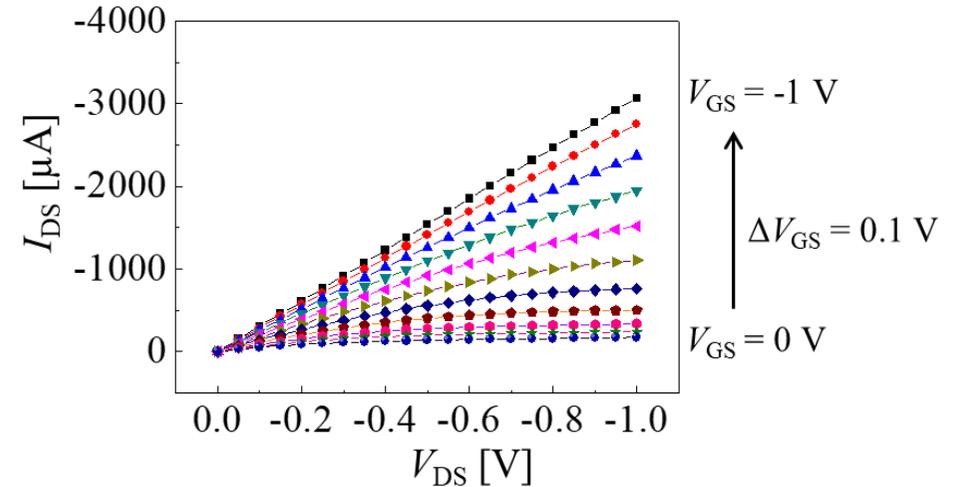
ISFET/SGFET静特性

➤ $I_{DS} - V_{DS}$ 特性

シリコンISFET : N-FET

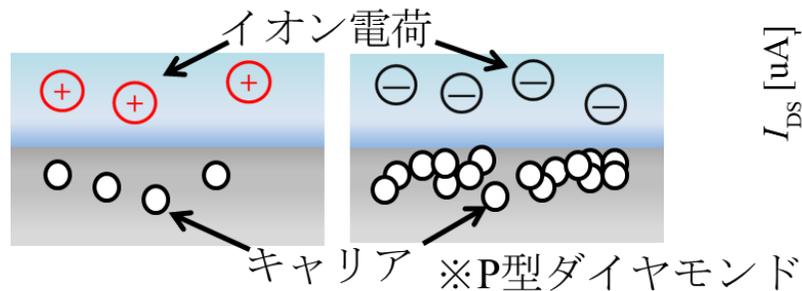


ダイヤモンドSGFET : P-FET

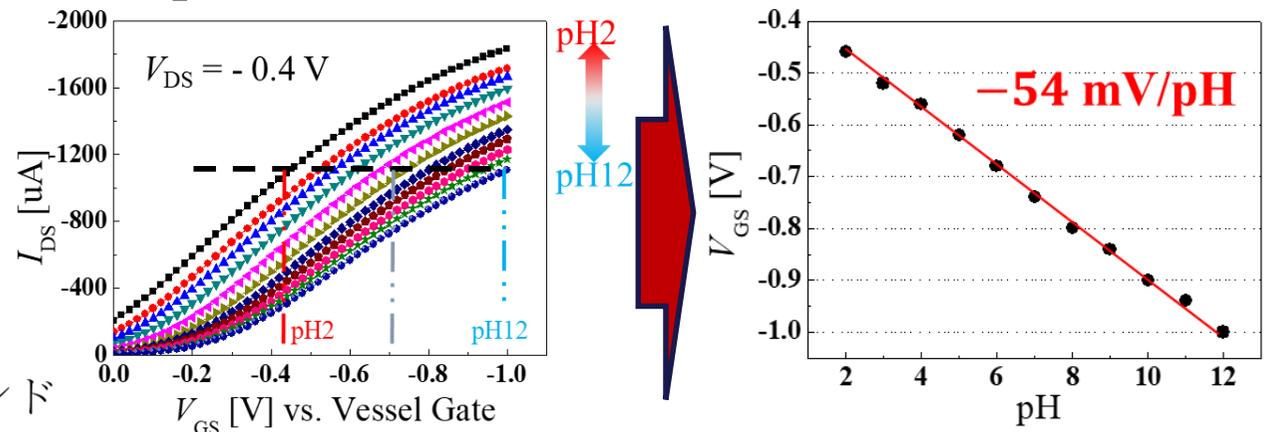


ゲート電極に印加するゲート電圧 V_{GS} によって、ドレイン電流を制御

電解質溶液内のイオンとチャンネルのキャリアの関係



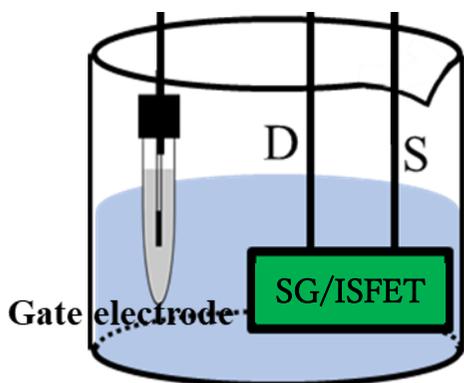
pH センシング(ダイヤモンドSGFET)



従来の応用先 : pH, DNA 等の化学・バイオセンサ

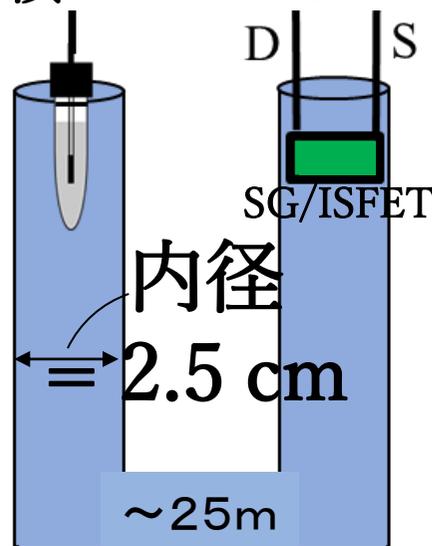
基礎実験・・・閉空間：溶液が容器（絶縁体）で囲まれている

I. ビーカー
距離 = 0.1 m



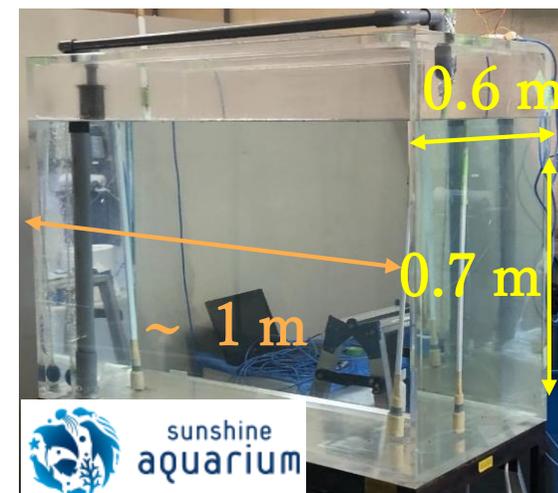
距離増加

II. チューブ
距離 = ~ 25 m
断面積 $\approx 4.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$



断面積増加

III. 大型水槽
距離 = ~ 1 m
断面積 $\approx 4.2 \times 10^{-1} \text{ m}^2$



@ サンシャイン水族館

溶液の体積増大

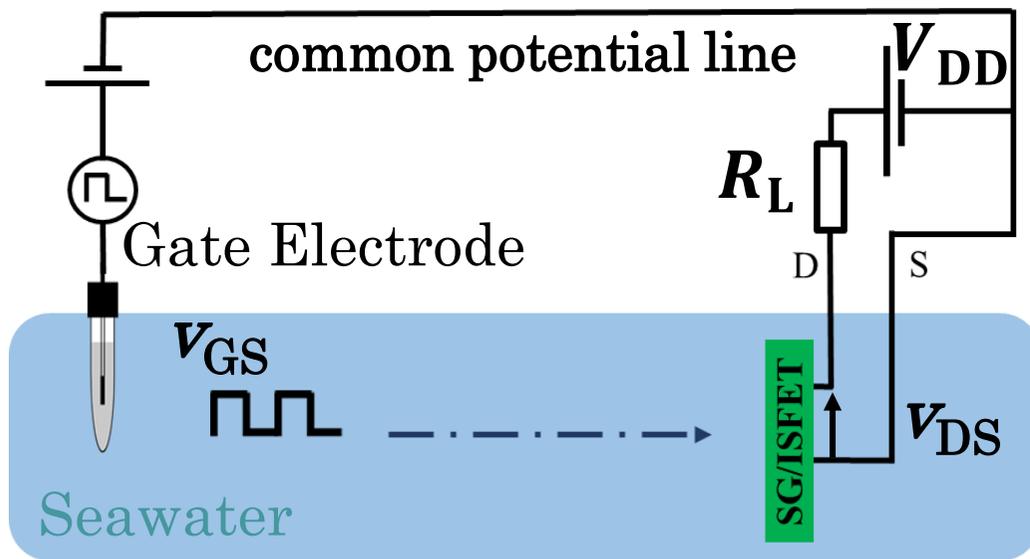
海中での実証実験・・・開空間：外海と繋がっている

IV. 海中
距離 = ~ 1 m
断面積 $\approx \infty$
溶液の体積: ∞



@ 八景島シーパラダイス

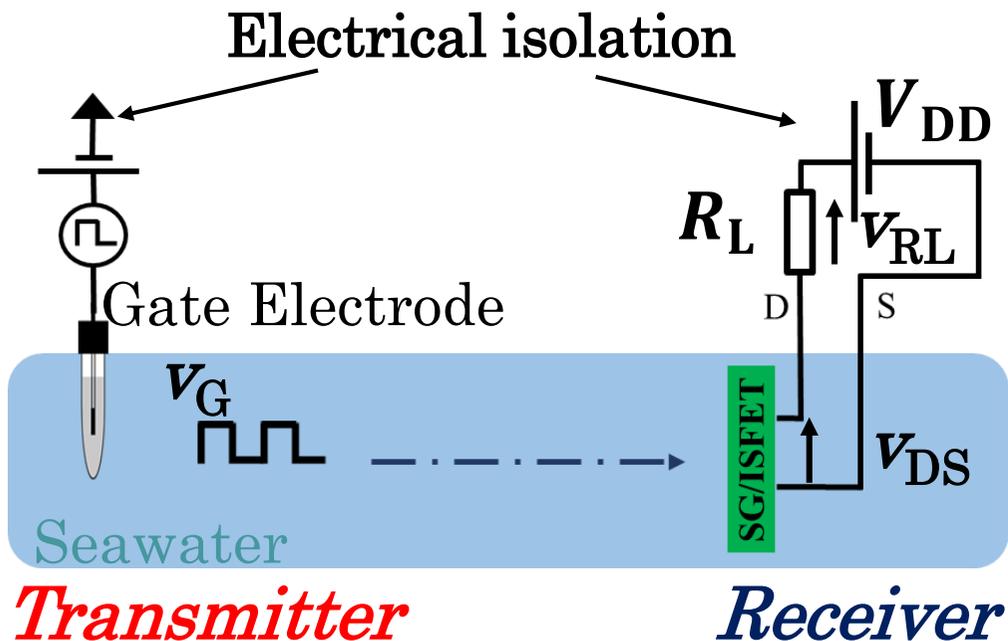
共通ソース → フローティング



我々の先行研究：共通ソース

トランジスタの電気回路を模倣
→ SGFETの基本的な電気特性の調査
スイッチング特性 ($V_{GS} - V_{DS}$)

共通ソース電位線により、
無線通信への応用には適さない



本研究：フローティング

共通ソース電位線を除去
→ 海中無線通信への応用可

⇔ 動作可能
信号検出したがメカニズムが不明

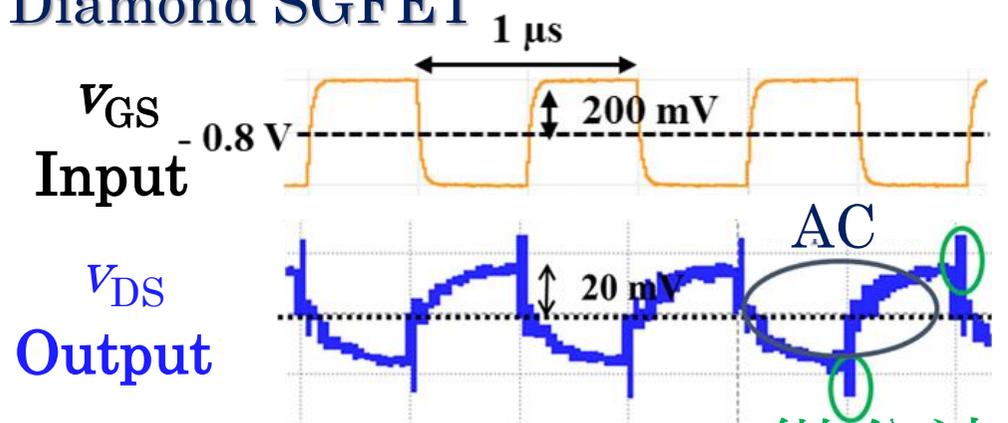
電解質溶液内での信号伝搬の調査
→ メカニズムの解明

共通ソース vs フローティング

(a) 共通ソース

1 MHz

Diamond SGFET

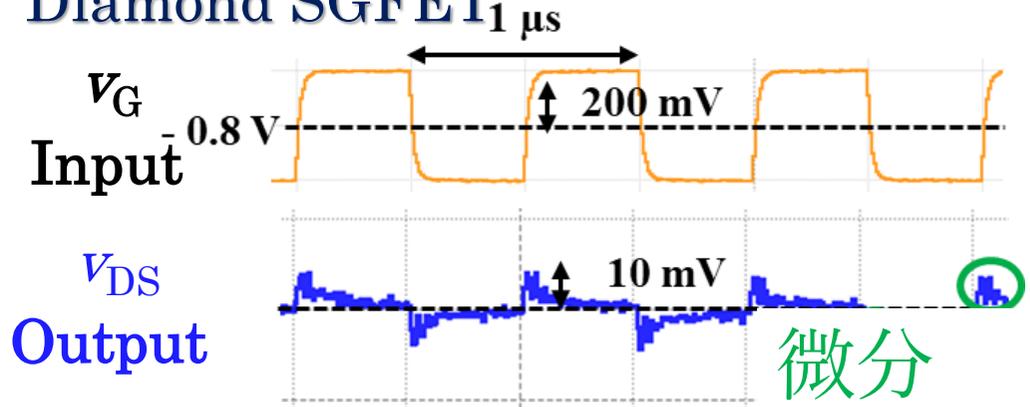


V_{DS} : 微分波形 + AC

微分波形

チューブ 1 m (内径 = 2.5 cm)
(b) フローティング

Diamond SGFET



V_{DS} : 微分波形

微分
波形

➤ 微分波形 : v_{GS}/v_G の電位の変化分に応答

➤ AC : v_{GS} の矩形波に反転応答

【ダイヤモンドSGFETの応答】

(a) 共通ソース

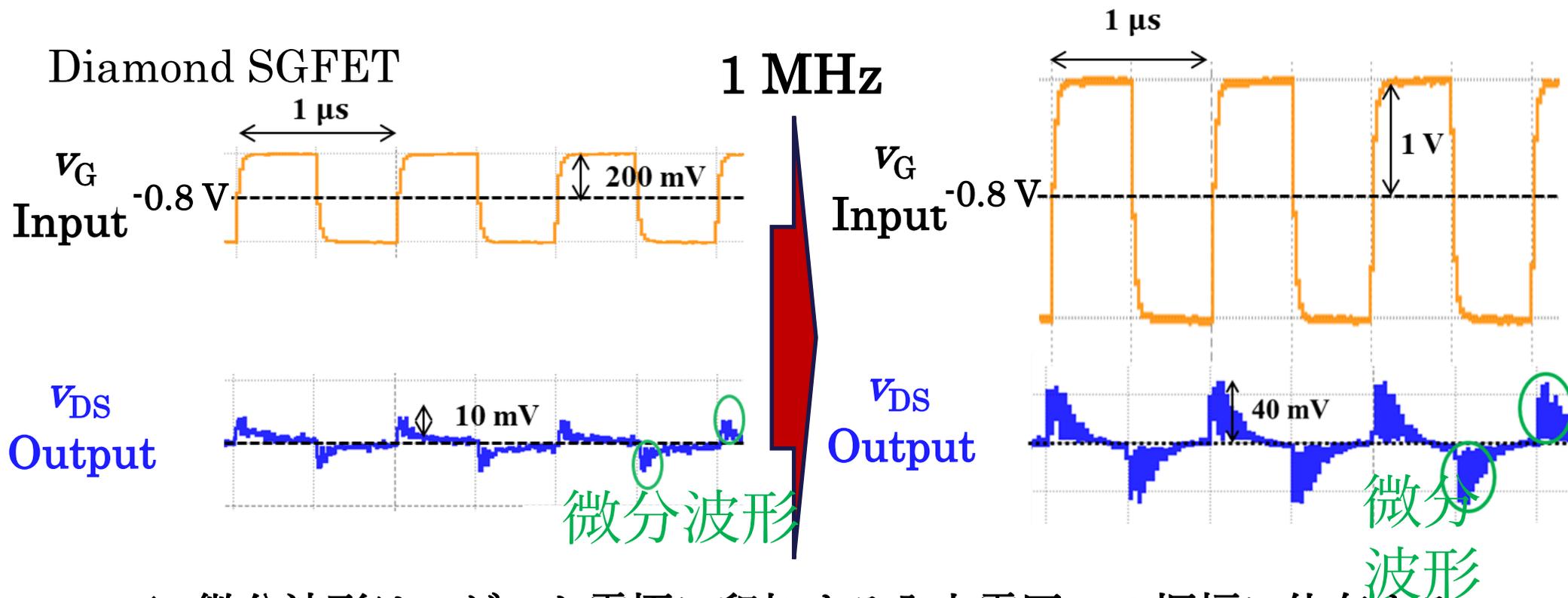
→ 微分波形 & AC

(b) フローティング

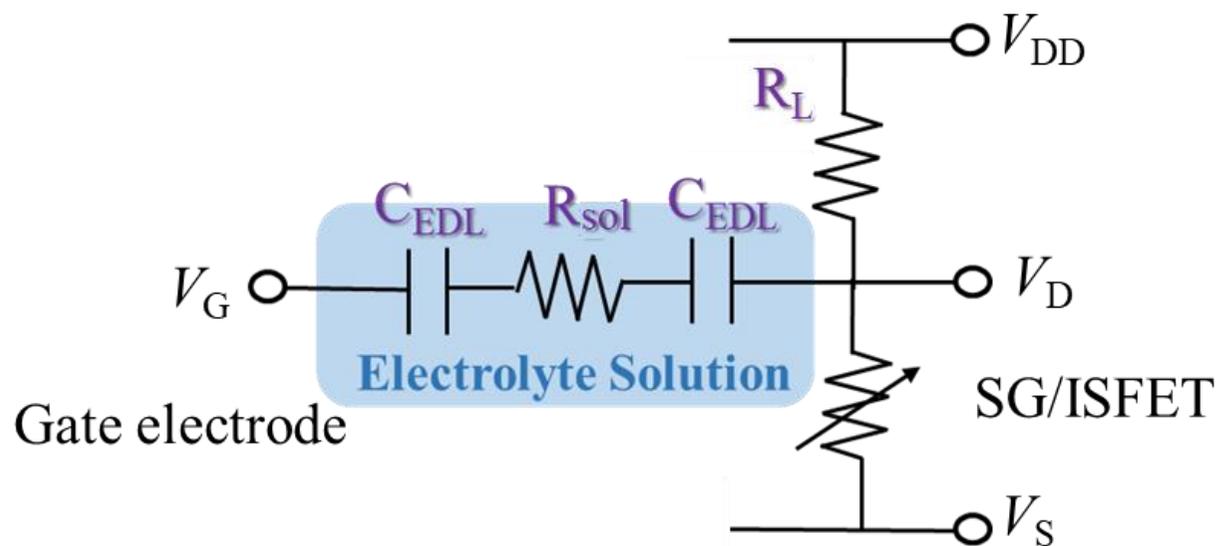
→ 微分波形のみ

◆ ダイヤモンドSGFETが、AC電圧 v_{GS}/v_G のどちらにも周波数応答

V_{DS} : 微分波形 + AC in (a) 共通ソース → 微分波形のみ in (b) フローティング



◆ 微分波形は、ゲート電極に印加する入力電圧 v_G の振幅に依存する



微分波形

CR回路が形成

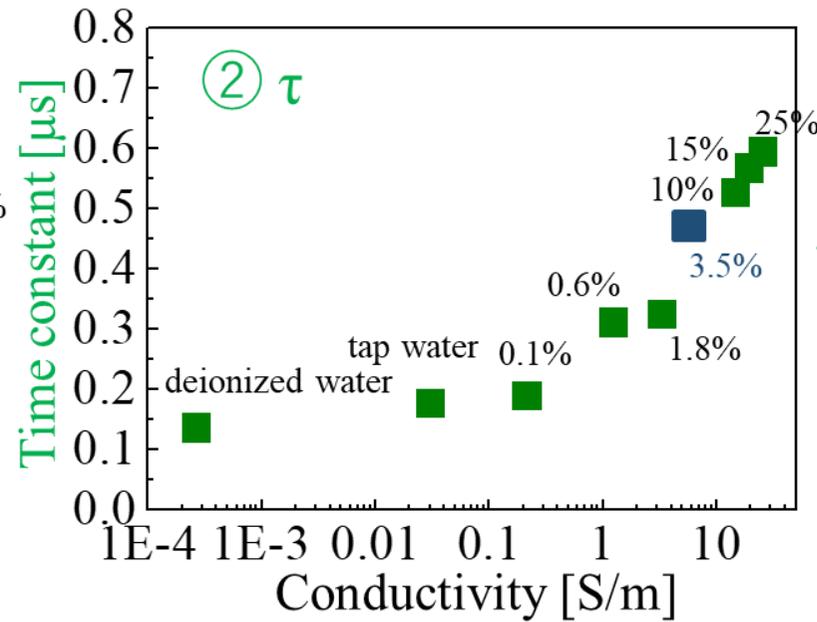
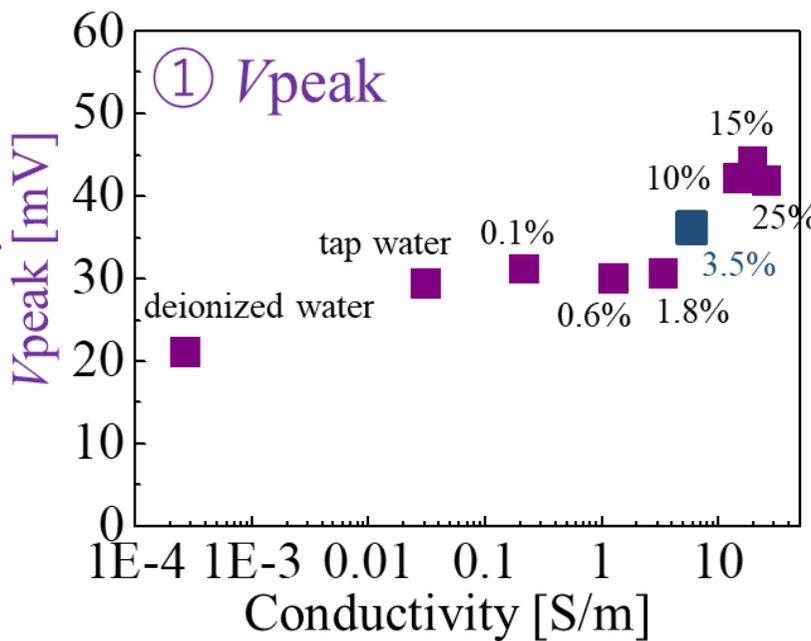
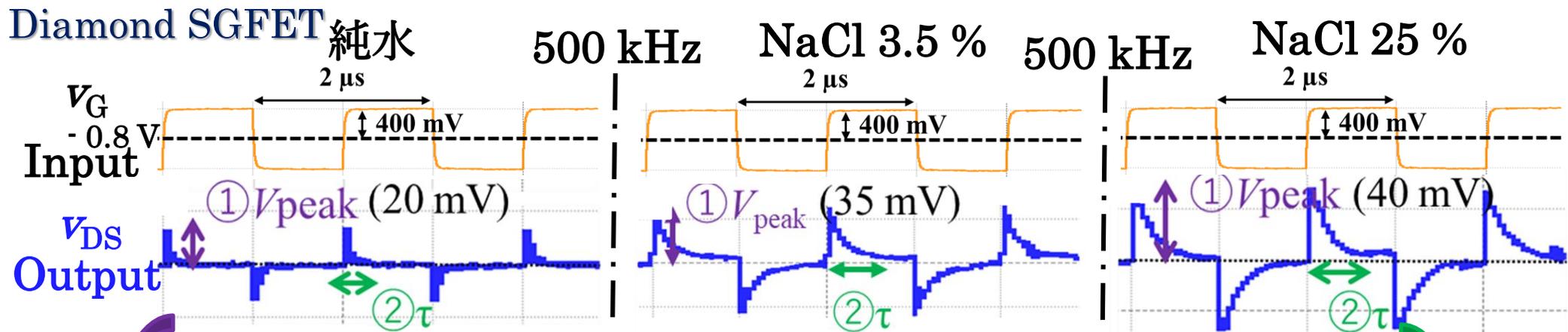
C_{EDL} : 電気二重層容量

R_{sol} : 溶液抵抗

R_L : 負荷抵抗(1 k Ω)

➡ ハイパスフィルタ

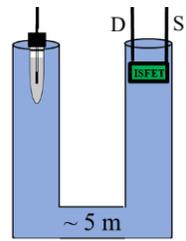
NaCl濃度の依存性



溶液の導電率の増加に伴い、

- ◆ 微分波形の振幅 V_{peak} 増加 --- 溶液抵抗 R_{sol} 減少
- ◆ 時定数 τ 増加 --- 電気二重層容量の増加

断面積の大きな系での測定 @水槽:サンシャイン水族館



チューブ
内径 = 2.5 cm
→ $A \approx 4.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

【断面積の増大】

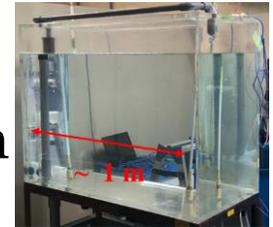


$A: \times 860$

$R_{\text{sol}}: 1/860$

水槽@水族館

幅 60 cm × 深さ 70 cm
→ $A = 4.2 \times 10^{-1} \text{ m}^2$

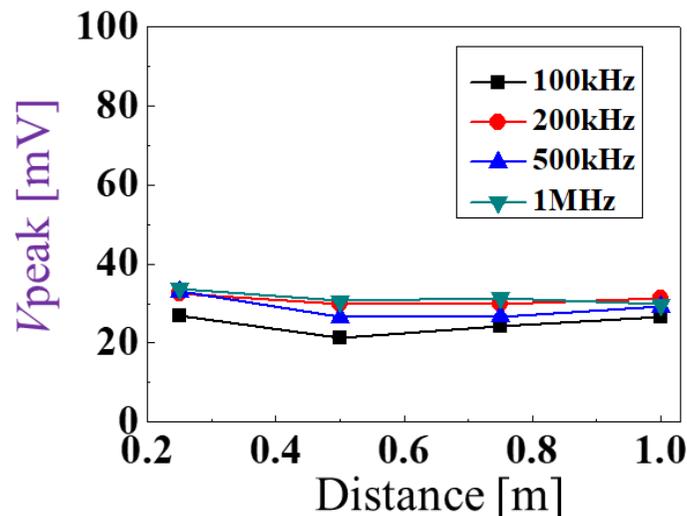
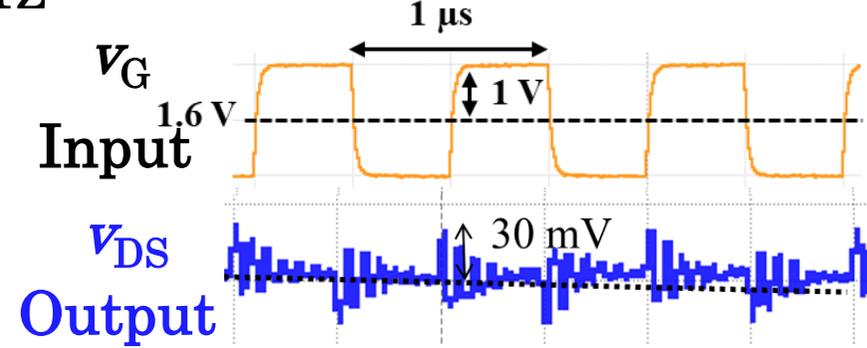
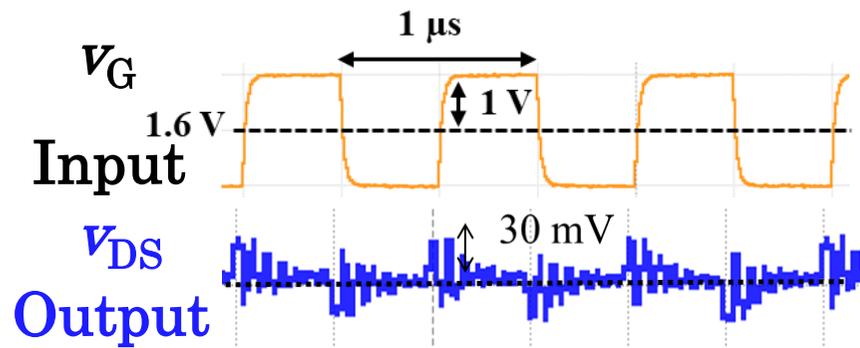


大型水槽 @水族館

距離 = 0.25 m

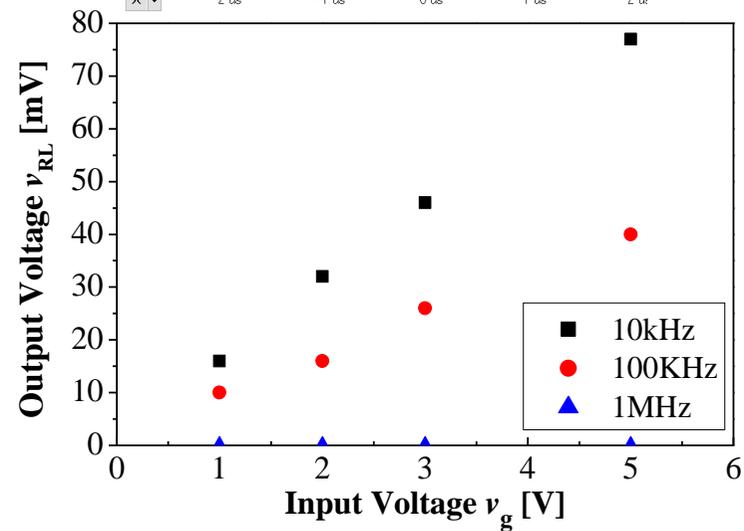
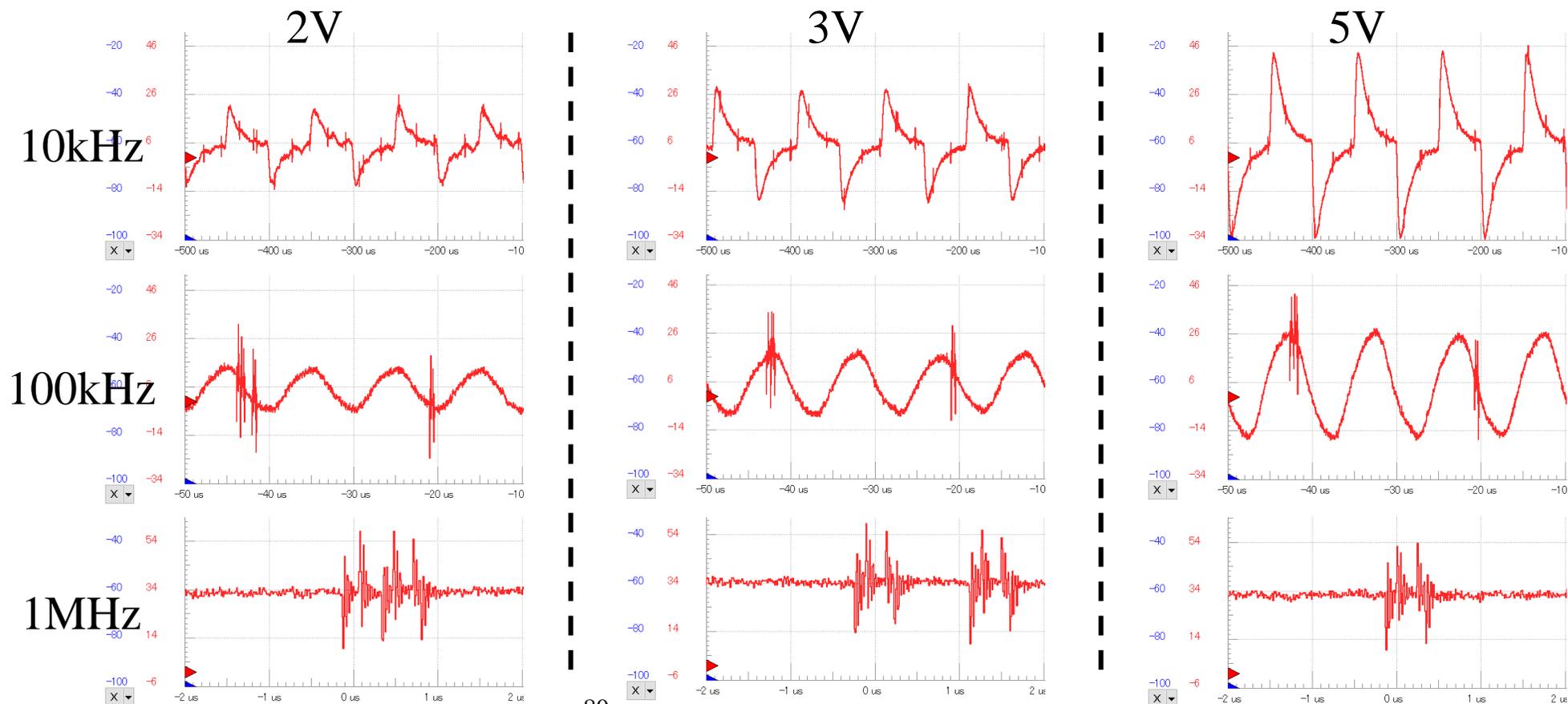
Si ISFET
1 MHz

距離 = 1 m



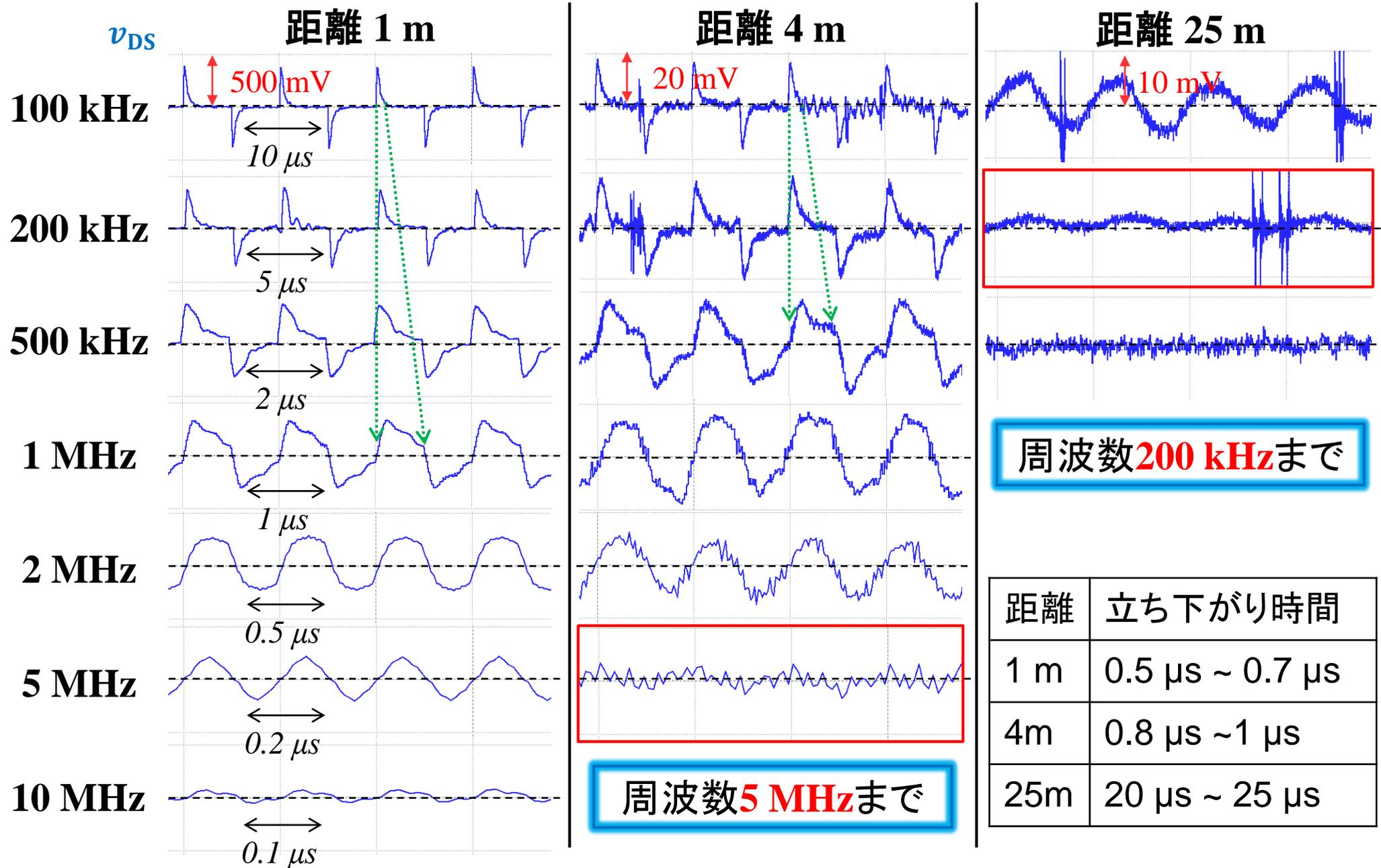
- ◆ 断面積の大きな系でも信号伝搬を確認
- ◆ 距離の増加に伴う減衰が小さい
- ➔ 広大な断面積を有する海中でも動作可能であることを示唆

25mチューブ入力電圧依存性 (SGFET)

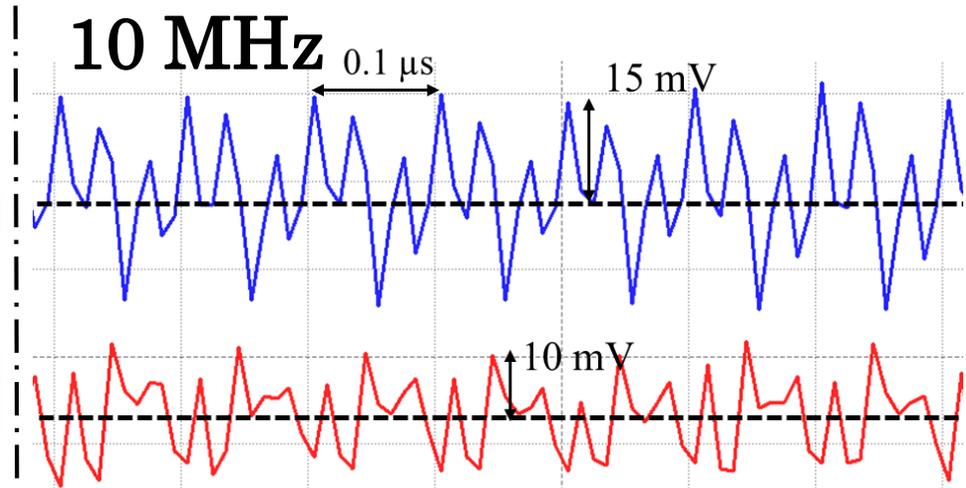
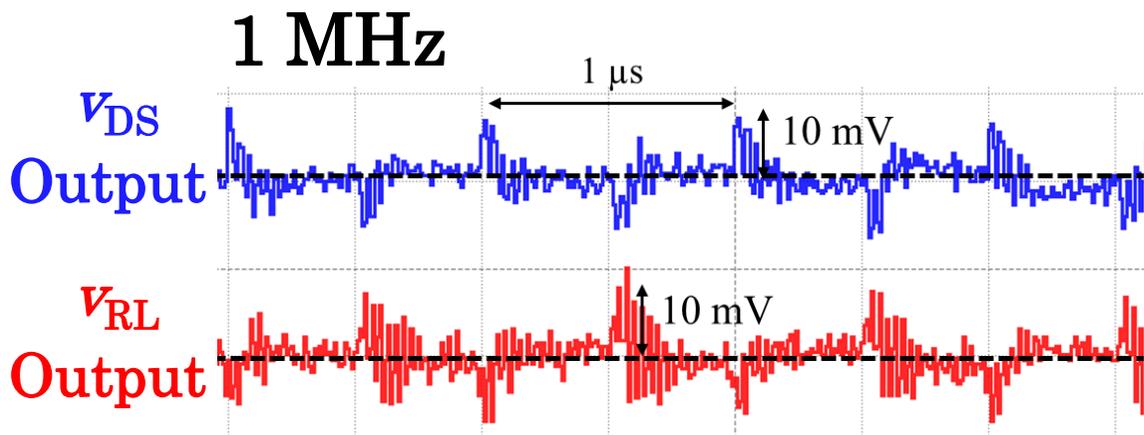
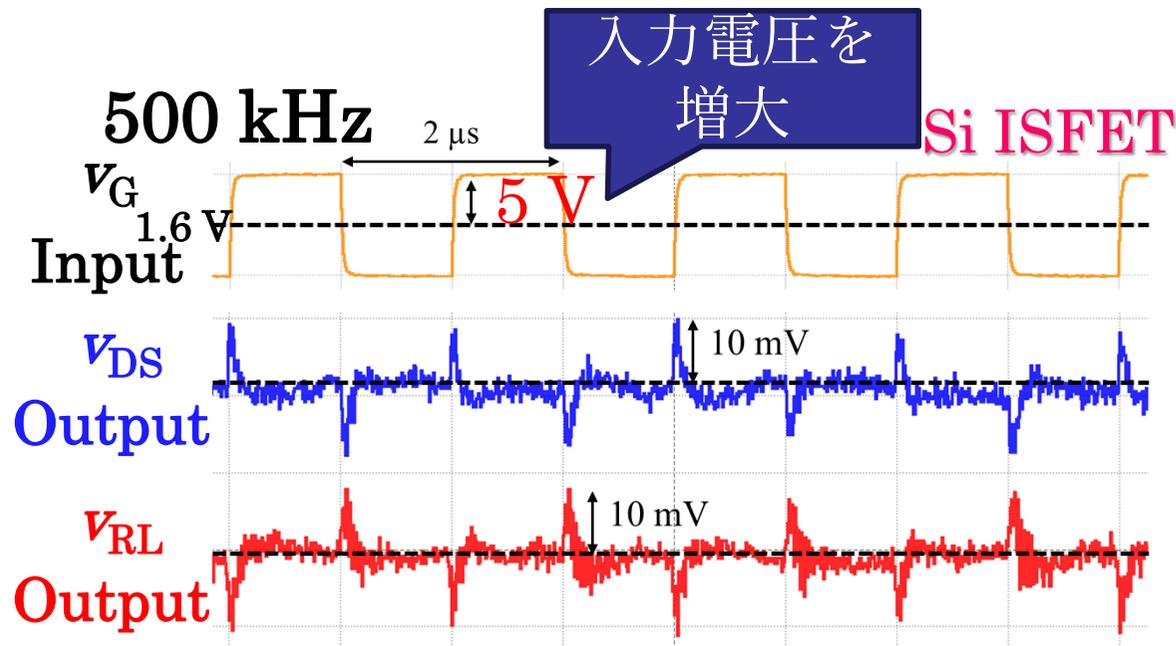


チューブでの距離1 m・4 m・25 mの比較

〈測定系〉 内径2.5 cm/入力振幅1 V・周波数100 kHz ~ 10MHz矩形波入力



海中(開空間)での動作検証



- ◆ Si ISFETが海中でも動作 → ゲート電極からSi ISFETへの信号伝搬を確認
- ◆ 5 V程度の高い入力電圧 v_G が必要:

弱電気魚：電気で探査・自衛・捕食

(ブラックゴースト・エレファントノーズフィッシュ)

淡水魚	ブラックゴースト (弱電気魚)	エレファントノーズ(弱 電気魚)	ウナギ・ナマズ (強電気魚)
外形			
電圧	~1V程度 周波数 ~kHz		800V
目的	探査		捕食(通電)
発生	電磁界、水中		
センサ	電気感受器官(体表面)		
標的	電気定位: 餌・障害物		
備考	同種に遭遇→周波数変更、混信を防ぐ		

https://www.ituaj.jp/?page_id=10993

新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来の海中通信技術である超音波技術の問題点であった周波数の限界(数十kHz)を電解質中の電気伝導により10MHz程度まで、改良することに成功。
- 電磁波(RF帯、マイクロ波帯)は液体電解質である海中で減衰。本技術は電磁波ではなく、イオン伝導あるいはプラズマイオン波と考えられ、信号は液体電解質中を伝搬。

想定される用途

- 海水閉空間での通信（現状技術）を生かすには、海水が閉空間に存在する系、例えば海底の構造物、海水タンク、海水パイプ、魚用いけす、醤油タンク内等への適用。フローティングで問題ない。
- 指向性が得れば、開空間である海中での近距離通信、海中ドローン制御、海底探査等、海洋に関する多角的な応用に展開可能。フローティングが必要。
- 一方、塩濃度が高い電解質中（血液、体液）での通信に着目。輸血用器具、マイクロ流路、人工血管、血管を通じた信号伝達、探索用プローブといったマイクロな応用へ展開も可能。この場合は共通ソースでもよい。

電解質中の通信実用化に向けた課題

- 現在、閉空間にて10MHzで数m、200kHzで25mの通信が可能。しかし、開空間の伝達距離(1m@5V)が未解決。
- 今後、指向性向上用の送信電極の最適化、受信部の大型化を行い、開空間に適用する設計を強化。
- 実用化に向けて、反射等による遅延を補償した通信方式を導入し、高周波化を確立する。

企業への期待

- 未解決の指向性については、送信電極形状の最適化により克服したい。
- 遅延波の補償技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、海中遠隔作業、海中機械制御、海中ロボットを開発中の企業、海洋分野の探査の展開を考えている企業には、将来的には、本技術の導入が有効との認識。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 水中通信装置及び水中通信方法
- 出願番号 : PCT/JP2019/34265
(JP,USに移行済み)
- 出願人 : 学校法人 早稲田大学
- 発明者 : 川原田洋、井山裕太郎
梶家美貴、蓼沼佳斗、新谷幸弘

本件と関連する産学連携の経歴

- 2011年-2018年 横河電機と共同研究実施
- 2013年 JST研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) 「過酷環境下でのpH計測制御を指向した堅牢性全固体ダイヤモンドトランジスタセンサの創製」
- 2014年-2017年 JST研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP) 産学共同促進ステージ・ハイリスク挑戦タイプ 「使用環境順応なダイヤモンド電界効果トランジスタ型全固体pHプローブの創製」

お問い合わせ先

早稲田大学

リサーチイノベーションセンター

知財・研究連携支援セクション (TLO)

TEL 03-5286-9867

FAX 03-5286-8374

e-mail contact-tlo@list.waseda.jp