

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04876

研究課題名(和文)コネクタレス海洋探査システムの開発に向けた基礎研究

研究課題名(英文)Fundamental Study for the Development of Connector-Less Ocean Exploration System

研究代表者

石渡 隼也 (ISHIWATA, Junya)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・研究プラットフォーム運用開発部門・技術主任

研究者番号：60834645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：海洋探査機器等で用いられる海中および海中着脱コネクタ浸水への問題解決のため、コネクタを非接触コイルに置き換えることでコネクタを排することを図ったコネクタレス海洋探査システムを提案し、システム実現に向けた基礎研究を実施した。  
本研究において、異なる径同士や多対一といった様々なコイル関係における伝送特性、耐圧容器に使用される金属や海水が伝送効率に与える影響、その影響抑制対策効果等をシミュレーションや実験等により評価した。これらの結果を用いて、母船、ROVおよび海中構造物で構成されるコネクタレス海洋探査システムにおける実現性を考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状の海洋探査システムにおけるコネクタ浸水という問題に対する抜本的な対策として、非接触伝送技術を用いてコネクタを排することを図ったコネクタレス海洋探査システムを提案し、シミュレーションおよび実験により、基礎的な伝送特性を明らかにし、システムの実現性を考察した。  
この成果により、海洋探査における運用面および費用面の向上に資するコネクタレス海洋探査システム開発が期待される。また、本研究で得た並列構成や超多段システムにおける非接触伝送の基本特性は、海洋探査システムのみならず、コネクタにて給電および通信を行う他分野へでの活用が期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to solve the problem of water exprodure in dry and wet mate connectors used in equipments for ocean exploration, we have proposed "Connector-Less Ocean Exploration System " by replacing the connectors with a non-contact coil to realize the system. We carried out basic research for this purpose.

In this study, we evaluated transmission characteristics in various coil relationships such as different diameters and many-to-one location, the effect of metal used in pressure vessel, and seawater on transmission efficiency, and the effect of measures to suppress the effect by simulations and experiments.

On the base of these results, we conducted a feasibility assesment of "Connector-Less Ocean Exploration System" consisting of a mother ship, ROV, and underwater structures as an exsample of this system.

研究分野：海中工学

キーワード：非接触伝送 伝送効率 伝送コイル 海中コネクタ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

地震計測用などで海底に設置された海中構造物からのデータ抽出や給電は、ROV（Remotely Operated Vehicle：無人海中探査機）にて海中着脱コネクタを接続して行われている。海中着脱コネクタは、接続および取り外し作業のみならず、取り付け後にもコネクタ間の浸水のリスクが存在する。同様に、ROV、AUV（Autonomous Underwater Vehicle：自律型巡航探査機）や海中構造物に用いられる一般的な海中コネクタにおいても、経年劣化や、整備において多回数抜き差しされた海中ケーブル終端コネクタと耐圧容器蓋上の海中コネクタ間で浸水し、その影響で短絡が起こり耐圧容器回路内部に過電流が流れて海中ケーブルと回路が損傷するといったリスクが存在する。こうした不具合対応のためのダウンタイムが発生するとともに、予防策として日常の十分なメンテナンス、予備品の確保などが必要となることから、コネクタ浸水リスクに対する抜本的な解決策の考案が望まれる。

### 2. 研究の目的

本研究の主目的は、海洋探査システムにおける海中着脱コネクタおよび海中コネクタの浸水リスクの問題を抜本的に解決することである。そのため、図1に示すような、海中探査機や海中構造物における海中着脱コネクタおよび海中コネクタを非接触コイルに置き換えて、搭載機器への給電および通信を行う、コネクタレス海洋探査システムを提案する。このシステム開発に向け、基礎伝送特性の把握からシステム実現性評価といった基礎研究を実施する。本システム構築により、コネクタ接続に存在する浸水リスクが無くなることで、メンテナンス性の向上、整備および故障対応のダウンタイムの削減が期待される。さらに、海中着脱コネクタ接続といった高度なROVの操作技術を必要としないため、データ抽出や給電作業が簡易となるメリットを得る。

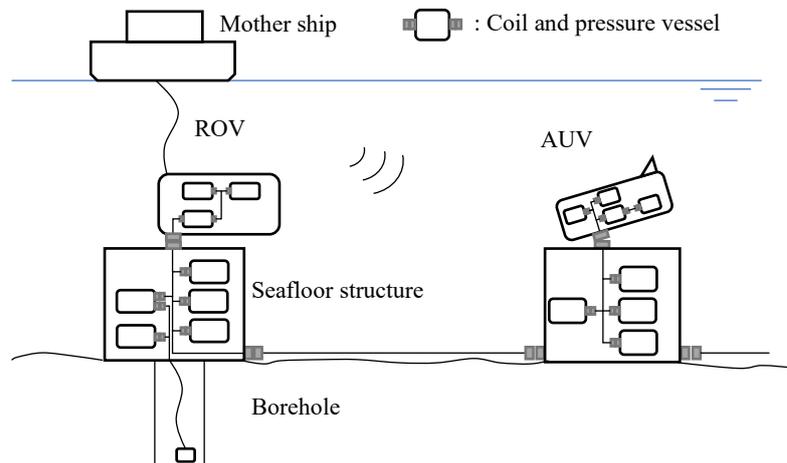


図1 コネクタレス海洋探査システム<sup>1)</sup>

### 3. 研究の方法

(1) 雌雄で嵌合するコネクタと異なり、非接触コイルでは理想的にコイルが相対するとは限らないため、コイルの距離や中心ずれなど配置に対する伝送特性を評価する必要がある。また、搭載する耐圧容器の大きさにより、必ずしも同径コイルにより伝送が行われるわけではないため、異なる径での伝送特性を評価する必要がある。そこで、同径および異なる径のコイルを作成し、実験により①同径コイル間の距離を変えての一对一伝送、②異なる径コイル間の一对一伝送および③並列配置による二対一および二対二伝送の伝送構成における伝送効率を得ることで基礎的な伝送特性を評価する。

評価対象として、海洋探査システムでは電子機器を格納する耐圧容器の蓋上および伝送ケーブル先端に取り付けられたコイルによる非接触伝送を想定するが、ここでは基本的な伝送特性を把握するため、気中におけるコイル及び伝送ケーブルのみによる基礎的な実験を行う。

(2) 海中探査機等に搭載される電子機器は、金属製の耐圧容器に格納されている。非接触コイルはこの耐圧容器蓋に取り付けられるため、コイル周辺に存在する海水および金属といった周囲環境が非接触伝送に与える影響を評価する必要がある。さらに、金属影響に対する影響抑制対策を施し、その効果を評価する必要がある<sup>1)2)</sup>。

評価にあたって、耐圧容器蓋および伝送ケーブル先端に取り付けられたコイルによる非接触伝送を評価対象として想定する。ここで、コイル周辺には耐圧容器に用いられる金属材料および海水が存在する環境となるが、シミュレーションおよび実験実施にあたってのモデル化において、環境への等価のものとしてコイル外周に円筒を配置、内周に海水を存在させることで、伝送環境を模擬する。このコイル外周の円筒の材質として、耐圧容器によく使われるステンレス、海中構

造物として鉄を円筒の材質として選定する。また、コイル内部には海水があるものとする。ここで、伝送効率への金属の影響を除去するために、コイルと金属との間に銅膜を設けている。さらに銅膜とコイルの内側にもフェライト層 (FSF131 材) を巻き付け、コイルの磁力線を銅層に到達しないようフェライト層内に閉じ込めることで更に損失の軽減を図る。シミュレーションモデルを図 2 に、金属パイプ内に金属影響対策を施したコイルがある実験の様子を図 3 に示す。

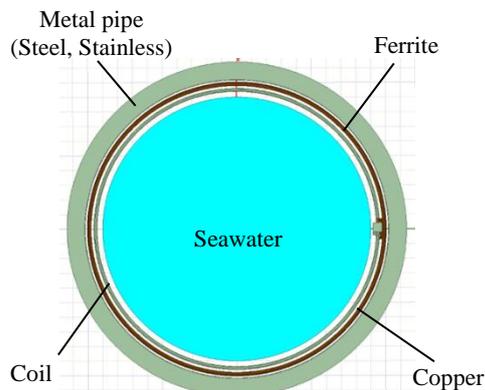


図 2 シミュレーションモデル<sup>1)2)</sup>



図 3 実験の様子<sup>1)</sup>

(3) コネクタレス海洋探査システムの開発に向け、そのシステムの実現性を評価する必要がある。母船、ROV および海洋構造物上の海中コネクタおよび海中着脱コネクタを非接触コイルに置き換えたコネクタレス海洋探査システムにおいて、(1)および(2)にて得られた評価結果を基に、母船から供給された電力が ROV、海洋観測および海中構造物上の搭載機器への程度供給されていくかを電力計算により求めることで、システムの実現性を評価する<sup>3)</sup>。

図 4 に検討に用いたコネクタレス海洋探査システムを示す。ここで、ROV は海洋研究開発機構所有の無人探査機「かいこう」を参考とする<sup>4)</sup>。具体的な ROV 構成として、ROV はランチャーとビークルから構成され、ランチャーには母船から給電があるものとする。ランチャーはビークルを繰り出すための油圧パワーユニットで作動するケーブルウィンチ、および観測装置としてソナーや高度計などセンサを搭載するものとする。ビークルは、自航用のスラスタ、マニピュレータおよびソナーやカメラといった観測装置を搭載するものとする。海中構造物はバッテリー稼働の定点観測用各種センサを搭載するものとし、本稿では ROV からの給電対象とする。これらのセンサやバッテリーは耐圧容器内に格納されており、ROV および海中構造物内において、受電部から海中ケーブルを介し直列に 3 段で接続された耐圧容器が配置されるものとする。

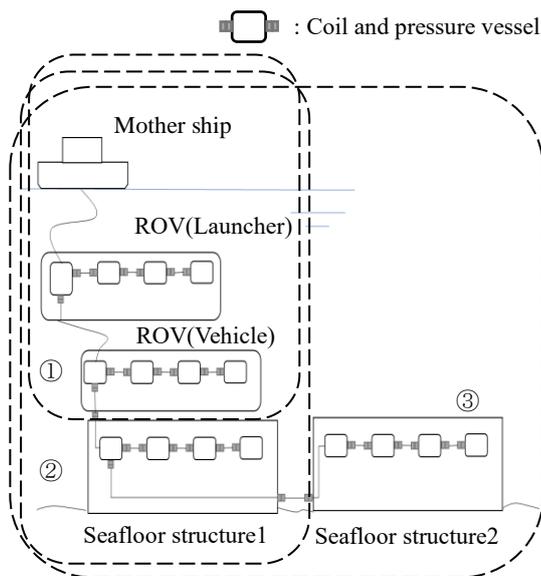


図 4 実現性評価に用いたシステム構成<sup>3)</sup>

耐圧容器蓋には通常海中コネクタが取り付けられているが、本稿で実現性評価を行うコネクタレス海洋探査システムでは、海中コネクタの代わりに非接触コイルを置き換え、非接触伝送により耐圧容器間の給電、通信が行われる。実現性評価にあたっては、①母船・ROV、②母船・ROV・海中構造物 1 基、および③母船・ROV・海中構造物 2 基の 3 ケースで実施する。また図 4 に示した構成とは別に、コネクタレス海洋探査システムのさらなる展開として、海底ネットワークや海底下の掘削孔内センサなど海底探査システムへの展開を想定した、超多段式非接触通信および給電シミュレーションを実施し、超多段非接触構成におけるシステム実現性を評価する。

4. 研究成果

(1) 海中コネクタおよび海中着脱コネクタに代わる非接触伝送用のコイルについて、①同径コイル間の距離を変えての対一伝送、②異なる径コイル間の対一伝送、③並列配置による二対一および二対二伝送、といった様々なコイル配置関係において、気中における非接触伝送実験を実施し、基礎的な伝送特性を評価した。以下、①～③のケースにおける評価結果を述べる。

① 同径のコイル間の距離変化による共振周波数変化はほぼ無いことがわかった。特に周波数が低くなるにつれて電磁波の波長が長くなることから、コイル間距離の影響はより小さくなる。このことから、周波数帯域に無関係な電力伝送においては、低周波数帯を選択することが望ましいといえる。一方、高周波数（本研究におけるケースでは 20MHz）では、コイル間距離 5mm で 80%、20mm で 40%程度まで伝送効率が低下することがわかった。通信信号伝送においては、できる限りコイル間距離を狭める配置が必要である。

② 相対するコイルの中心軸をずらして伝送評価を行った。結果として小径コイルが大径コイルの円周内で相対している場合、伝送効率の低下が見られず、コイル配置の物理的制約は極端に厳しくないことがわかった。一方、直列共振を起こす周波数においては回路のミスマッチングが起これ、伝送特性が悪化するため、伝送周波数選定に留意する必要があることがわかった。

③ 並列配置による二対一および二対二伝送においては、②同様に伝送周波数選定に留意する必要があるが、基本伝送特性は伝送が行われる対一のコイル関係にのみ依存し、並列配置による伝送特性への影響がないことがわかった。

実際にはコイルの形状や、使用する耐圧容器の材質など様々な伝送環境、および給電あるいは通信といった使用用途があり、それに応じた周波数選定が必要となる。しかし、高周波電源、負荷のインピーダンスは構成される回路によって様々な値となるため、状況に応じた最適な負荷インピーダンスを調整することで、できる限り高い伝送効率を得る必要があることが、本研究の実施過程で明らかになった。そこで、任意の受動 2 ポート回路に対して最適負荷抵抗を探す kQ 積理論を用いて、コイル形状および周囲環境といったある伝送条件下での最大伝送効率を明らかにした<sup>1)</sup>。

この最大効率条件は電源（1 次側）のインピーダンスに関係なく負荷インピーダンスだけに關係し、その最適化によりどの程度効率が得られるかを予測することができる。また、電源側に制約がないために、電源側から見た負荷インピーダンスを調整することにより、電源電圧を変えずに所要電力供給が可能となる<sup>5)</sup>。海洋探査システムにおいては、耐圧容器に内部のスペース制約があることから、抵抗など小型の素子を用いた負荷調整で任意の伝送周波数選択が可能になり、運用上からも大きいメリットを得ることになる。

さらに、実験では自作のコイルを使用しており、このコイル製作誤差による巻き線容量が生じることがあったため、コイル巻線の高精細撮影を行い、伝送効率に影響を及ぼしうるズレが確認でき、今後の課題が認められた。

(2) コイル周辺に存在する海水および金属といった周囲環境が非接触伝送に与える影響および、その金属影響に対する影響抑制対策の効果を評価した。

鉄がコイル外周に存在するケースの伝送効率について、シミュレーションおよび実験結果を図 5 に示す<sup>1)</sup>。縦軸は S パラメータ、横軸は周波数となっており、S パラメータは 2 入力 2 出力回路の透過及び反射特性を示す S11～S22 の 4 種のパラメータであり、ここでは入力信号と出力信号の透過特性を評価する S21 を伝送効率として使用している。

破線で表されるシミュレーション結果および実線で表される実験結果それぞれに着目すると、気中の伝送効率に比べ海水、鉄が存在することで伝送効率が低下し、フェライト層および銅膜により伝送効率が改善されていることがわかる。

同様にステンレス（SUS316）がコイル周辺に存在するケースにおいて検討を行った。その結果、鉄と同様に、ステンレスによる伝送効率への影響と、フェライト層および銅膜による改善効果を確認した。また、ステンレスは、銅に比べて導電率が 1/40 程度しか無く、鉄に比べても 1/7 程度と低いため、このパイプ内にコイルを挿入すると導電損失が増加する。しかし鉄のように強磁性体ではないので、磁束がステンレス内に取り込まれるため電力消費が起こる事はなく、表面電流による消費だけであるので、むしろ鉄よりも影響は小さくなることがわかった。

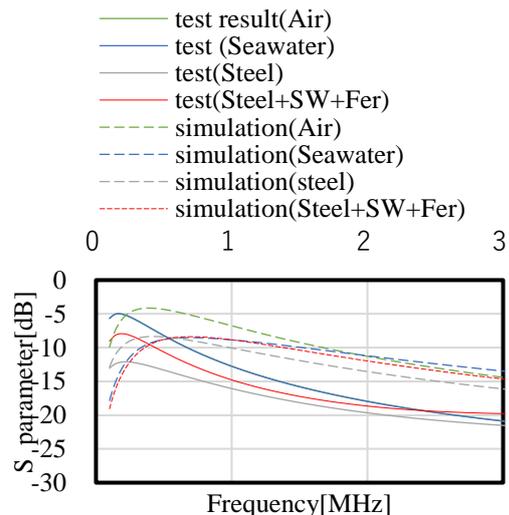


図 5 シミュレーションおよび実験結果<sup>1)</sup>

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

(3) 図4の①におけるランチャーおよびビークルから構成されるROVにおいて、ビークル3段目の耐圧容器においても観測機器を動作し得る電力を得られることがわかった<sup>3)</sup>。なお、今回の検討ケースにおいては、非接触ではなくコネクタ接続による最適な電力設計がされたROVを参考としているため、スラストなど駆動させる油圧パワーユニットといった消費電力の大きい装置を動かすには、母船からの初期供給電力を増加させる必要はあるものの、消費電力の大きい装置を前段、小さい装置を後段にするといった配置検討を行うことで、海中コネクタを非接触コイルに置き換えられる見込みを得た。また、ROVのランチャーを用いないビークル単独航海であれば、ランチャーのビークル繰り出し用ウィンチや制御・観測装置、ランチャーとビークルをつなぐケーブルにおける電力消費が無くなる。このビークル単独航海を想定し、ビークルのみで油圧パワーユニットおよび各種装置の使用を想定した場合、より大きい電力を搭載機器に供給できることになる。

また、②のROVを介して海中構造物への給電を行うケースについては、海中構造物内の搭載機器に対し、家庭用の電気自動車と同程度の給電が可能であることがわかった<sup>3)</sup>。また、ROV着座用のプラットフォームを用いてROVでの電力消費を抑えることで、より大きい電力を得られる。

③については、海中構造物上にビークルが着座可能なプラットフォームを有することを想定したうえで、本検討ケースの条件において、海中構造物2基目の3段目の耐圧容器にて25kVA程度の給電が可能である結果を得た<sup>3)</sup>。

さらに、コネクタレス海洋探査システムの展開に向けた、超多段非接触伝送システムを想定した非接触通信および給電シミュレーションを実施し、コイル段数、コイル巻き数および増幅装置有無など種々の条件における、給電時間とセンサ稼働可能時間の関係を明らかにした。

### <参考文献>

- 1) 石渡隼也, 井上朝哉, 栗井郁雄: コネクタレス海洋探査システム開発に向けた非接触伝送特性の周囲環境の影響考察, 日本船舶海洋工学会令和2年秋季講演会, 2020.
- 2) 石渡隼也, 井上朝哉, 栗井郁雄: 海中における多段式非接触伝送技術の基礎検討, 第2回水中無線技術研究会, 2020.
- 3) 石渡隼也, 井上朝哉, 栗井郁雄: コネクタレス海洋探査システム開発に向けたシステムの実現性評価, 日本船舶海洋工学会令和3年秋季講演会, 2021.
- 4) [https://www.jamstec.go.jp/maritec/j/boarding/guide\\_ship/doc/kaiko.pdf](https://www.jamstec.go.jp/maritec/j/boarding/guide_ship/doc/kaiko.pdf).
- 5) 栗井郁雄: 磁界結合共振器型WPTシステムの設計法—四つのインピーダンス変換法の有効利用—, 信学技報, 第238号, pp. 31-38, 2016

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石渡隼也、井上朝哉、粟井郁雄
2. 発表標題 コネクタレス海洋探査システム開発に向けた非接触伝送特性の周囲環境の影響考察
3. 学会等名 令和2年日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石渡隼也、井上朝哉、粟井郁雄
2. 発表標題 海中における多段式非接触伝送技術の基礎検討
3. 学会等名 第2回水中無線技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石渡隼也、井上朝哉、粟井郁雄
2. 発表標題 コネクタレス海洋探査システム開発に向けたシステムの実現性評価
3. 学会等名 令和3年日本船舶海洋工学会秋季講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究分担者	井上 朝哉  (INOUE Tomoya)  (10359127)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・研究プラットフォーム 運用開発部門・主任研究員    (82706)	

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
---------	---------