

〈一般研究課題〉 南海トラフ地震の想定震源域を監視する  
自律型無人潜水機への非接触充電器の試作  
助成研究者 愛知工業大学 元谷 卓



## 南海トラフ地震の想定震源域を監視する 自律型無人潜水機への非接触充電器の試作

元谷 卓  
(愛知工業大学)

### Prototype Wireless Charging System for an Autonomous Underwater Vehicle Monitoring the Assumed Epicenter of Nankai Trough Earthquake

Suguru Mototani  
(Aichi Institute of Technology)

#### Abstract :

In this study, the aim of the project is to construct an undersea wireless charging system for long term continuous operation for Autonomous Underwater Vehicle (AUV) monitoring the assumed epicenter area of the Nankai Trough earthquake. A simulation model based on the actual measurement environment was created, and the power transmission efficiency was compared when the receiving coil tilted from 0 to 60 degrees in the vertical direction of the transmission coil surface. The power transmission efficiency in the sea was 13.5% when the transmitting coil and the receiving coil faced each other. The transmission efficiency when tilted 60 degrees was 14.3%. The simulation results indicated that wireless power supply is possible even when the receiving coil is greatly tilted due to the influence of the tidal current in the sea.

#### 1. はじめに

近年、日本近海の排他的経済水域 (EEZ) の海底には、ハイテク製品に欠かせないレアメタルやレアアースを多く含む熱水鉱床、マンガン団塊、コバルトリッチクラストなどの海底資源が注目されている。しかし、これらの海底資源は水深800 m以深の海底に存在している[1, 2]。このため、海底資源の開発には海底探査機が用いられており、その発展として自律型無人潜水機(AUV : Autonomous Underwater Vehicle)が開発されている。内蔵バッテリーで動作しているAUVは、潜航

調査のたび人手によるバッテリー交換，あるいは充電を行う必要がある。この充電作業は，荒れた海表面を数名のダイバーがAUVへクレーンブロック取り付けの作業を行っており，非常に危険な作業である。AUVを吊り上げずに充電することができれば，作業リスクの大幅な軽減につながると考えられる[3]。そこで，海底に充電ステーションを設置し，AUVが充電ステーションの近くにいる時に非接触充電を行うことで作業環境の改善や，長期間の稼働ができ，広い範囲の探査が可能になると考えられる。これまでに，コイルを垂直に並べることで10 m級の長距離伝送を行うことや，スパイラルコイルを重ね合わせることで送電/受電コイル間の位置ずれによる影響を低減する研究が行われている[4, 5]。

海中非接触充電は，コイルに防水対策を施す必要がある。先の研究で，送電/受電コイルが純水・海水に濡れた場合，防水対策を施した場合における送電/受電コイル間の電力伝送特性を明らかにしてきた[6, 7]。これまでに，ガラス球と立体スパイラルコイルを用いた海中非接触充電の電力伝送特性について電磁界シミュレーションを行った。従来型であるヘリカルコイルを使用した海中非接触充電との比較を行い，海中非接触充電における立体スパイラルコイルの優位性を示した[8]。海中では潮流などの影響により送電/受電コイルを正対の状態に維持することが難しく，送電/受電コイル間に角度ずれが生じると考えられる。そこで，本稿では立体スパイラルコイルを用いた海中非接触充電における送電/受電コイルの角度ずれによる電力伝送効率への影響を実機実験および電磁界シミュレーションにより明らかにする。

## 2. 実験およびシミュレーション条件

### 2-1. 耐圧ガラス球

深海6500 mまで潜る海底探査機は，約680 kgf/cm<sup>2</sup>の水圧が海底探査機全体にかかる。そのため電子機器などを保護するため水圧対策が必要となる。例として，江戸っ子一号という海底探査機は水圧が一点に集中しないように，図1に示すような球状の耐圧ガラスが用いられている[9]。また，金属と違いガラスケース内部の磁界は遮蔽されないため，磁界を用いた非接触充電との相性も良い。そこで，ガラス球に沿った形状のコイルを用いることで，従来型であるヘリカルコイルよりもガラス球内部を有効に使用でき，送電コイルとの距離も短くできる。

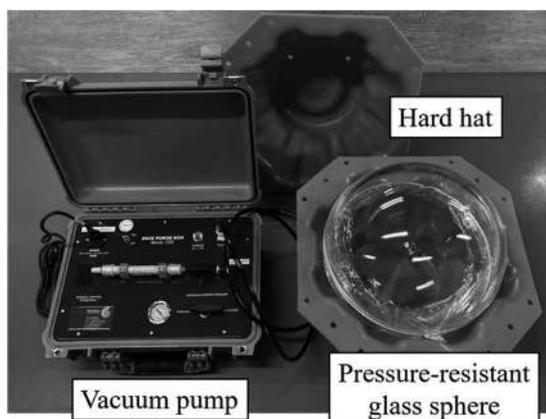


図1 真空ポンプと耐圧ガラス球



図2 作製した非接触充電基板

## 2-2. 耐圧ガラス球を用いたシミュレーションモデル

シミュレーションモデルは、実際の海中を想定して耐圧ガラスによって防水対策を施した送電/受電コイルをコイル間隔100 mmに固定したものを作成した。また、受電コイルにはヘリカルコイルと立体スパイラルコイルの2種類を作成した。これらの電磁界シミュレーションを行い、それぞれのSパラメータを取得した。Sパラメータとは、入力電力と反射電力との関係を表すものである。送電/受電コイルを2端子対回路としてみた場合、入力側から入る波を $a_1$ 、出る波を $b_1$ 、出力側から入る波を $a_2$ 、出る波を $b_2$ とすると、式(1)の関係が成り立つ。また、伝達を表す $S_{21}$ は式(2)で表される。この $S_{21}$ を二乗すると電力になり、伝送効率 $\eta_{21}$ は式(3)で求めることができるため、各特性を計算し評価、検討をする。非接触充電において反射による電力損失は、ないため伝送効率の計算では $S_{11}$ は考慮しない。

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{b_1} \quad (2)$$

$$\eta_{21} = S_{21}^2 \times 100(\%) \quad (3)$$

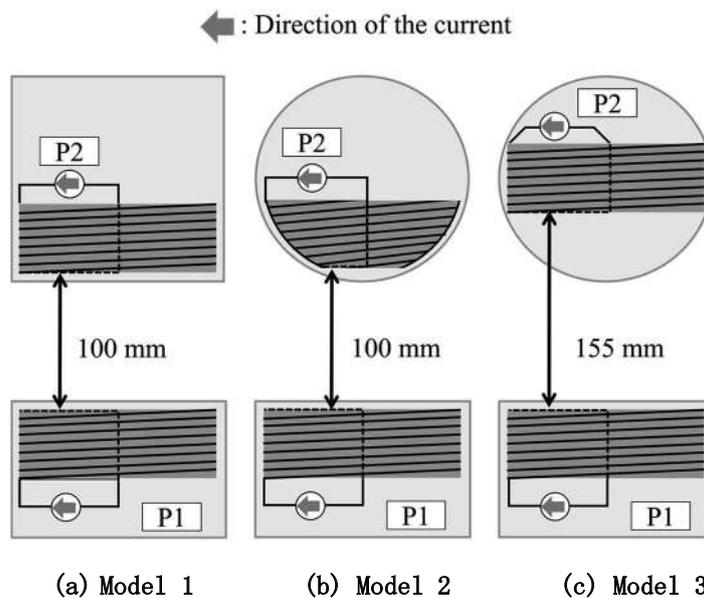


図3 異なるコイル形状のシミュレーションモデル

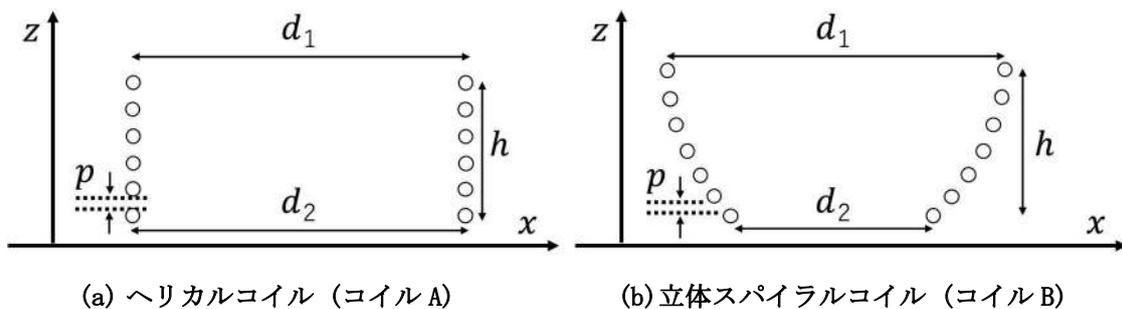


図4 コイルデザイン

表1 コイルパラメータ①

	Coil A	Coil B
Wire thickness: $\phi$	1.0 mm	1.0 mm
Coil pitch: $p$	1.0 mm	1.0 mm
Turns	45	50
Coil height: $h$	90 mm	100 mm
Top diameter: $d_1$	280 mm	280 mm
Bottom diameter: $d_2$	280 mm	202 mm
Inductance: $L$	712 $\mu$ H	709 $\mu$ H
Capacitance: $C$	4.92 nF	4.94 nF

図3(a)は受電側にヘリカルコイル(以後コイルA)を立方体ガラスケースに設置したモデルを、図3(b)は受電側に立体スパイラルコイル(以後コイルB)をガラス球に設置したモデルを、図3(c)は受電側にコイルAをガラス球に設置したモデルをそれぞれ示している。送電側にはコイルAを用いた。

耐圧ガラスモデルには、江戸っ子一号に使用されている岡本硝子製のガラス球を想定した上で、コイルA及びコイルBをそれぞれ作成した。コイルAは線径 $\phi$ : 1.0 mmの銅線を線間距離 $p$ : 1.0 mmの間隔で作成した。コイルAは外径 $d_1$ : 280 mm、インダクタンス $L$ : 712  $\mu$ Hである。このコイルに静電容量 $C$ : 4.92 nFのコンデンサを直列に接続したものを受電側の共振器に使用したモデルを作成した。また、コイルBはコイルAと同様の銅線を用いて線間距離 $p$ : 1.0 mmの間隔で作成した。コイルBは、直径330 mm、厚さ15 mmのガラス球内を沿うように作成し、外径 $d_1$ : 280 mm、内径 $d_2$ : 202 mm、インダクタンス $L$ : 709  $\mu$ Hである。このコイルに静電容量 $C$ : 4.94 nFのコンデンサを直列に接続したものを受電側の共振器に使用した海中非接触充電モデルを作成する。共振周波数を85 kHzとしてコイルのインダクタンスの値から静電容量を決定した。コイルAとコイルBのインダクタンス値を一致させるようにコイルを作成した。両コイルは形状が異なるため、巻き数は一致しない。それぞれのパラメータをまとめたものを図4および表1に示す。

電磁界シミュレーションは、MurataSoftware製Femtetを用いて有限要素法により解析を行った。メッシュはアダプティブメッシュ法により自動的に作成された。入力電力は10 Wとした。また、送電/受電コイル間の距離は図3(a), (b)においては100 mm、図3(c)においては155 mmとなっている。解析空間は回り込む磁束を考慮しコイルの直径280 mmの5倍である1400 mmを基準として、1400 mm  $\times$  1400 mm  $\times$  1500 mmとした。

### 2-3. 簡易実機モデルによる実験条件

図5に実験風景を示す。本実験では、角度ずれが伝送効率へ及ぼす影響について明らかにする。図5に実験構成を示す。図6における点a-b間の距離は100 mmで一定とした。図6に示すように送電コイルに対して受電コイルの角度ずれ $\theta$ を0度から60度まで10度ずつ変化させたときの伝送効率の変動について調査する。点a-b間の距離を一定にするために図5における受電側のケースに100 mmの軸を取り付けた。また、実験の際は図5における点aの位置を動かさないように受電側のケース及び軸を傾けて角度ずれ $\theta$ を変化させた。実際の海中を想定して防水対策を施した送電/受電コイ

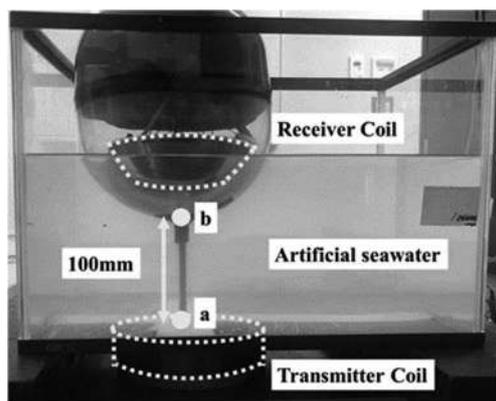


図5 簡易実機モデルの実験構成

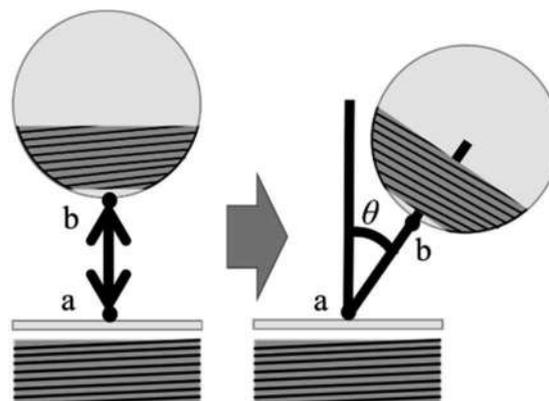


図6 コイルの角度ずれ

表2 コイルパラメータ②

	Coil C	Coil D
Wire thickness: $\phi$	0.8 mm	0.8 mm
Turns	40.875	49.5
Coil height: $h$	36.1 mm	45.2 mm
Top diameter: $d_1$	158 mm	148 mm
Bottom diameter: $d_2$	158 mm	115 mm
Inductance: $L$	390 $\mu$ H	390 $\mu$ H
Quality factor: $Q$	143	152
Parasitic resistance: $r$	1.45 $\Omega$	1.36 $\Omega$
Capacitance: $C$	9.00 nF	9.00 nF

ル及び実験システムを作製した。実験では、立体スパイラルコイルを用いた海中非接触充電における送電/受電コイルの角度ずれによる伝送効率への影響を簡易実機実験および電磁界シミュレーションにより明らかにする。送電側の回路は直列LC回路であり、受電側の回路は直列RLC回路である。SS方式の非接触充電により実験を行った。また、負荷として受電側の回路に $R_L : 10 \Omega$ の抵抗を用いた。送電コイルはヘリカルコイル(コイルC)、受電コイルには立体スパイラルコイル(コイルD)を作製した。コイルCとコイルDのインダクタンス値を一致させるようにコイルを設計した。ただし、両コイルは形状が異なるため、巻き数は一致しない。それぞれのパラメータは、HIOKI製LCRメータIM3536を用いて測定した。結果をまとめたものを表2に示す。静電容量は共振周波数を85 kHzとしてコイルのインダクタンスの値から決定した。本実験では、耐圧ガラス球の代用として耐圧ガラスと同じく磁界を遮蔽しない素材であるポリスチレン樹脂製プラスチックケースを用いた。実験環境は海水を想定した疑似海水で水槽を満たし、その中に防水ケースにて防水した受電側の非接触給電システムを沈め実験を行った。作製した海水の塩分濃度及び導電率を塩分計(アズワン製TS-391)、電気伝導率計(HORIBA製ES-71)を用いて測定を行った。作製した海水の塩分濃度は3.5%、導電率は5.27 S/mであった。

表2に示す簡易実機モデルのコイルパラメータを電磁界シミュレーションに反映させ、送電コイルと受電コイル間の結合係数と電力伝送効率を求める。パワーアナライザ(IWATSU製PPA1530)を用いて送電/受電側の電力を測定する。測定値より伝送効率を導出する。HIOKI製LCRメータIM3536を用いて結合係数を測定する。

### 3. 実験およびシミュレーション結果

#### 3-1. 耐圧ガラス球を用いたシミュレーション結果

図7にシミュレーションによって求められたSパラメータと式(3)より導出した伝送効率のグラフを示す。破線が立体ガラスケースにコイルAを設置したモデル、実線がガラス球にコイルBを設置したモデル、二重線がガラス球にコイルAを設置したモデル、点線が共振周波数である85 kHzの位置をそれぞれ示している。グラフより全てのグラフが周波数85 kHzの時に最大効率になっていることが確認できる。また、前項で述べたように周波数85 kHzから周波数が変化すると効率は急激に低下している。最大効率はそれぞれガラスケースにコイルAを設置したモデル1の場合88.4%、ガラス球にコイルBを設置したモデル2の場合83.3%、ガラス球にコイルAを設置したモデル3の場合59.1%である。

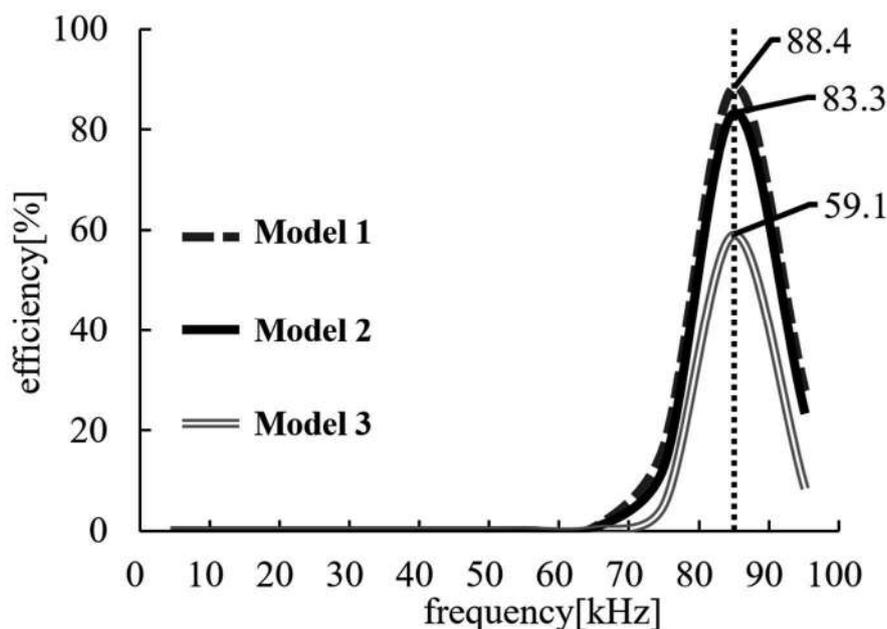


図7 各コイルモデルの電力伝送効率のシミュレーション結果

#### 3-2. 簡易実機モデルの実験およびシミュレーション結果

コイルの角度 $\theta$ による結合係数の実験結果を図8(a)に示す。シミュレーションにより導出した結合係数の結果を図8(b)に示す。図9(a)に実験値より導出した電力伝送効率のグラフを示す。図9(b)にシミュレーション結果を式(3)より導出した電力伝送効率を示す。実験とシミュレーションより導出した結合係数より、結合係数は角度が大きくなるにつれて大きくなる傾向があることが明らかになった。実験とシミュレーションより導出した電力伝送効率より、角度ずれが起きてもほぼ一定であることが明らかになった。

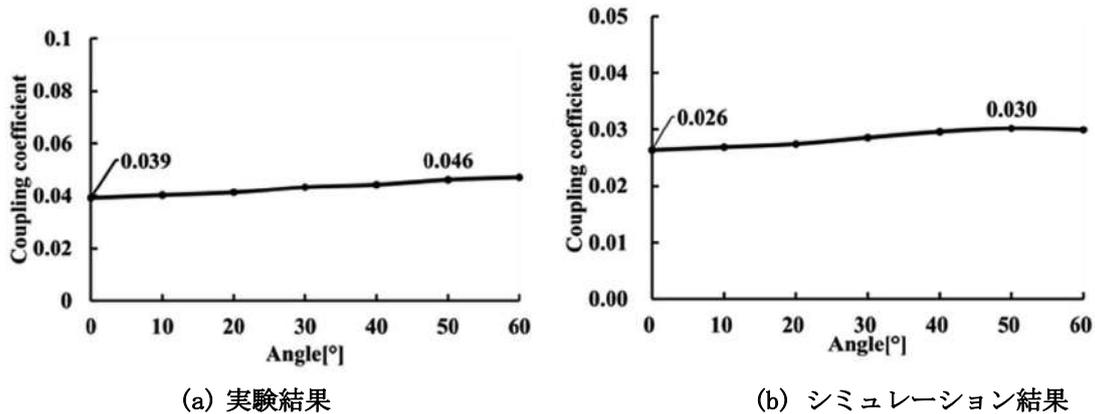


図8 送電/受電コイル間の結合係数

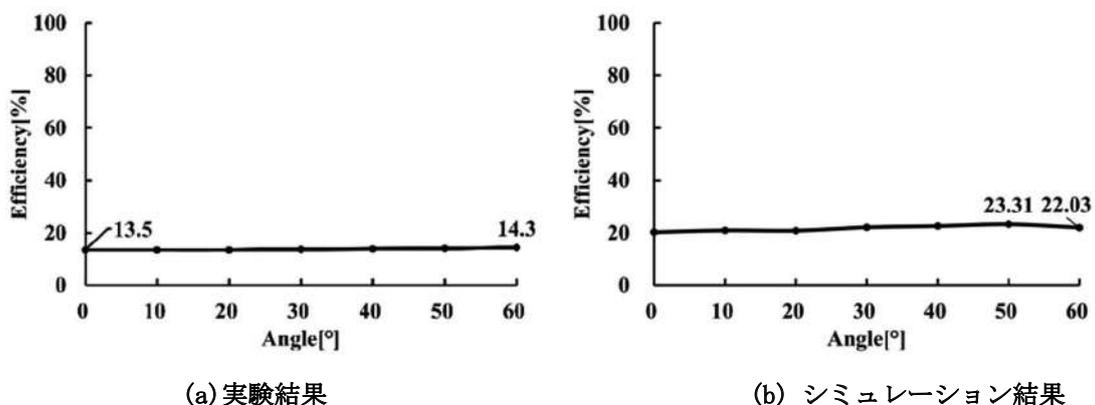


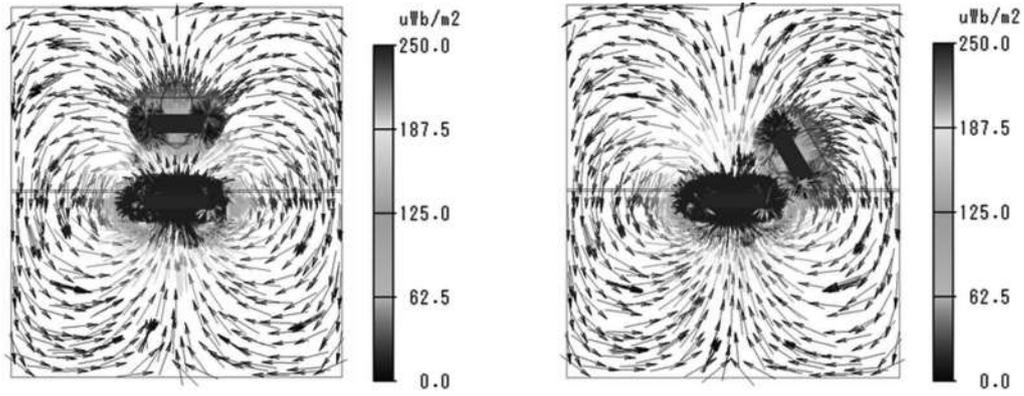
図9 電力伝送効率

### 3-3. 簡易実機モデルの磁束密度結果

図10にシミュレーションより得られた角度ずれ $\theta$ が0度と60度の磁束密度の要素ベクトルを示す。図10より角度ずれが10度と60度の間において、受電コイル付近における磁束密度に大きな違いは見られない。したがって、本実験において角度ずれ $\theta$ の変化によって受電コイル付近における鎖交磁束の変化が小さいことが分かった。本実験では角度ずれ $\theta$ の変化に伴い受電コイルと送電コイルの中心位置にずれが生じる。一般的にコイル間の中心位置のずれが発生すると鎖交磁束が減少し伝送効率が低下する。しかし、図10の結果より本実験では角度ずれの発生に伴い生じるコイル間の中心位置のずれによる鎖交磁束の大きな違いは確認できなかった。

図11に角度ずれ $\theta$ が0度と60度の時の送受電コイル付近における磁束密度のコンター図を示す。図11より、角度ずれ $\theta$ が0度と60度の時の送受電コイルの周囲の磁束密度には大きな違いは見られない。そこで、磁束密度のグラフを作成し詳細な比較を行う。

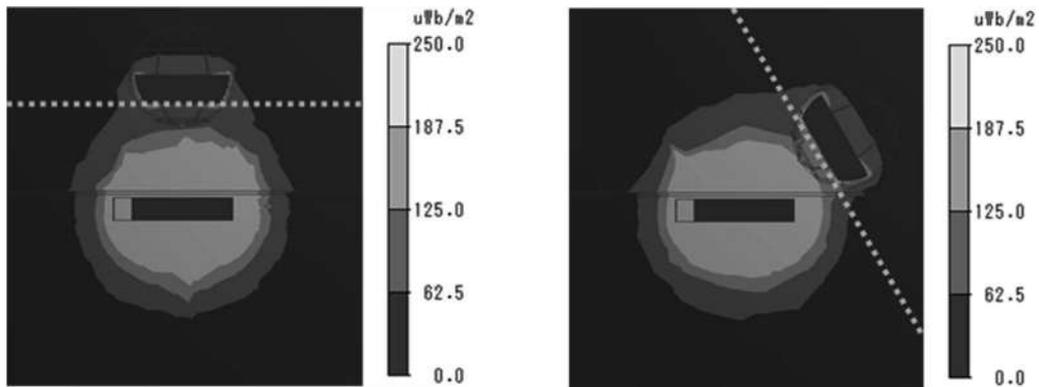
図12に図11中の破線に沿って受電コイル下部周囲の磁束密度の数値をグラフにしたものを示す。グラフの中心が受電コイルの中心であり、グラフ中に受電コイルの下部の直径 (115 mm) を示す。図12においてコイル付近の磁束密度が大きく、それ以外の部分の磁束密度は弱いことが確認できる。それぞれグラフ中に磁束密度が特に大きかった点を示す。図12より、角度ずれ $\theta$ が0度の時よりも60度の時の磁束密度の方が大きくなった。図12(a)より角度ずれ $\theta$ が0度の磁束密度の最大値は $213 \mu\text{Wb}/\text{m}^2$ 、図12(b)より角度ずれ $\theta$ が60度の時の磁束密度の最大値は $219 \mu\text{Wb}/\text{m}^2$ であった。



(a) 角度ずれ 0°

(b) 角度ずれ 60°

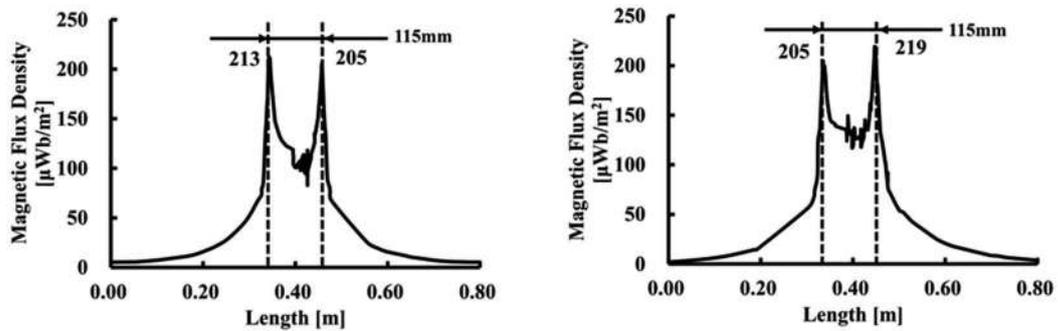
図10 磁束密度ベクトル図



(a) 角度ずれ 0°

(b) 角度ずれ 60°

図11 磁束密度コンター図



(a) 角度ずれ 0°

(b) 角度ずれ 60°

図12 受電コイル表面の磁束密度

#### 4. まとめ

本稿では立体スパイラルコイルを用いた海中非接触充電における角度ずれ $\theta$ による伝送効率の影響について報告を行った。実験およびシミュレーション結果より、コイルの角度ずれ $\theta$ を変化させた場合の電力伝送効率の変動が小さく、安定した伝送が可能であることが明らかになった。したがって、実環境において立体スパイラルコイルを用いた海中非接触充電は、潮流の影響を受ける環境においても安定した電力伝送が可能である。

## 参考文献

- [1] Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, JOGMEC NEWS, Vol. 28, pp 2-13, 2012.  
<https://www.jogmec.go.jp/content/300376592.pdf> (参照2022-5-29).
- [2] Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, JOG-MEC NEWS, Vol. 40, pp 2-9, 2015.  
<https://www.jogmec.go.jp/content/300236988.pdf> (参照2022-5-29).
- [3] 木船, 上松, 佐藤, AUV向け非接触給電装置の基礎検討, 半導体電力変換研究会, Vol. 115, No. 112, pp. 29-32, 2015.
- [4] 江口, 川田, 岡本, 柳場, 小柳, 磁界結合によるポジションフリー海中ワイヤレス電力伝送システムの実験検討, 電子情報通信学会論文誌B, Vol. J101-B, No. 11, pp. 958-967, 2018.
- [5] 佐藤, 木船, 米田, 水中探査機向けマルチコイル型非接触給電装置のコイル配置の検討, 電気学会論文誌D, Vol. 139, No. 1, pp. 13-21, 2016.
- [6] 権田, 元谷, 道木, 鳥井, 海中非接触給電における給電・受電コイルを格納した防水ケース内の空気層の厚みの効果, 電学論C, Vol. 138, No. 12, pp. 1478-1484, 2018.
- [7] 権田, 佐光, 元谷, 道木, 鳥井, 磁界共振結合型海中非接触給電における防水ケース内の空気層の効果と電力伝送の評価, 日本AEM学会誌, Vol. 26, No. 1, pp. 160-165, 2018.
- [8] 山本, 元谷, 道木, 鳥井, 立体スパイラルコイルを用いた非接触給電の伝送特性, 日本AEM学会誌, Vol.29, No. 2, pp. 315-320, 2021.
- [9] 江戸っ子一号, <https://edokko1.jp/>, (参照2022-5-29).