

## 浮体式洋上風力の円筒コンクリート構造物を利用した 海水中電磁波伝搬特性の研究

大和 紀仁<sup>†</sup> 袁 巧微<sup>†</sup> 石井 望<sup>††</sup> 高橋 応明<sup>†††</sup> 陳 強<sup>††††</sup> 吉田 弘<sup>†††††</sup>

<sup>†</sup>東北工業大学 〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1

<sup>††</sup>新潟大学 〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

<sup>†††</sup>千葉大学 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

<sup>††††</sup>東北大学 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

<sup>†††††</sup>海洋研究開発機構 〒237-0061 横須賀市夏島町 2-14

E-mail: <sup>†</sup>m242807@st.tohtech.ac.jp, <sup>†</sup>qwyuan616@tohtech.ac.jp, <sup>††</sup>nishii@eng.niigata-u.ac.jp  
<sup>†††</sup>omei@faculty.chiba-u.jp, <sup>††††</sup>qiang.chen.a5@ecei.tohoku.ac.jp, <sup>†††††</sup>yoshidah@jamstec.go.jp

あらまし 著者らは、浮体式洋上風力発電の一方式であるスパー型洋上風力発電に着目し、その支柱として用いられる環状コンクリート柱を伝送路とする海中無線電波通信システムについて検討してきた。環状コンクリート柱を電磁波の伝送路として利用することで、高い導電率を有する海水中における電磁波の急激な減衰を抑制できることが示されている。本稿では、環状コンクリート柱内を伝搬する電磁波の特性を明らかにすることを目的とし、MoM法およびMoM&MLFMM法を用いた電磁界解析を行った。具体的には、コンクリートの含水率の違いが電磁界分布に及ぼす影響、ならびに鉄筋の配置条件が電磁波伝搬特性に与える影響について検討した。

キーワード 海中無線通信、浮体式洋上風力発電、環状コンクリート柱、電磁波伝搬、モーメント法、鉄筋

## Electromagnetic Wave Propagation in Seawater Using Cylindrical Concrete Structures of Floating Offshore Wind Turbines

<sup>†</sup>Tohoku Institute of Technology, 35-1 Yagiyama Kasumicho, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi 982-8577, Japan

<sup>††</sup>Niigata University, 8050 Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181, Japan

<sup>†††</sup>Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

<sup>††††</sup>Tohoku University, 6-6-05 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

<sup>†††††</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC),  
2-14 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

E-mail: <sup>†</sup>m242807@st.tohtech.ac.jp, <sup>†</sup>qwyuan616@tohtech.ac.jp, <sup>††</sup>nishii@eng.niigata-u.ac.jp  
<sup>†††</sup>omei@faculty.chiba-u.jp, <sup>††††</sup>qiang.chen.a5@ecei.tohoku.ac.jp, <sup>†††††</sup>yoshidah@jamstec.go.jp

**Abstract** The authors have investigated an underwater wireless radio communication system using an annular concrete column employed as the support structure of a spar-type floating offshore wind turbine. By utilizing the annular concrete column as a transmission path for electromagnetic waves, it has been shown that the severe attenuation of electromagnetic waves in seawater, which has high electrical conductivity, can be suppressed.

In this paper, electromagnetic field analyses are performed using the Method of Moments (MoM) and the MoM combined with the Multilevel Fast Multipole Method (MLFMM) in order to clarify the propagation characteristics of electromagnetic waves inside the annular concrete column. Specifically, the effects of the moisture content of concrete on the electromagnetic field distribution and the influence of rebar arrangement on electromagnetic wave propagation characteristics are investigated.

**Keywords** Underwater Wireless Communication, Floating Offshore Wind Power Generation, Annular Concrete Column, Electromagnetic Wave Propagation, Method of Moments (MoM), Reinforcing Bar

## 1. はじめに

近年、再生可能エネルギー導入の拡大に伴い、洋上風力発電への関心が高まっている[1][2]。中でも、浮体式洋上風力発電の一方式であるスパー型洋上風力発電は、構造が比較的シンプルで既存の工法を用いて製造可能である点や、強い波浪や風の影響を受けやすい海域においても高い安定性を確保できる点などの利点を有しており、今後さらなる導入拡大が見込まれている。

一方、スパー型洋上風力発電設備は海中に大規模な構造物を有するため、設備の健全性や稼働状況を継続的かつ効率的に監視する技術が重要となる。従来、これらの点検・監視はダイバーによる作業が主であったが、人手不足や作業時の安全性の観点から課題が指摘されている。また、有索ドローンを用いた監視手法も提案されているものの、移動範囲の制限や運用上の煩雑さといった問題がある。このため、無索ドローンによる海中設備のリアルタイム監視を可能とする、海中—海上間の無線通信技術の確立が求められている。

海中無線通信としては、これまでに音響通信や光無線通信が検討されてきた。しかし、音響通信は伝搬速度が遅く、海洋環境の影響を受けやすいという課題があり、光無線通信も海水の濁りや外乱光の影響を受けやすい[3]。このように、従来手法はいずれも周囲環境の影響を受けやすく、安定した海中—海上間通信の実現には課題が残されている。

そこで、本研究では電磁波を用いた海中無線通信に着目する。一般に、電磁波は海水の高い導電率により急激に減衰するため、海中での長距離伝搬は困難であることが知られている[3]。一方、先行研究において、コンクリートと海水から構成される円筒構造内では、電磁波が主としてコンクリート領域内を伝搬する低損失な伝搬モードが存在することが理論的に示されている[4]。この知見は、コンクリート構造物を電磁波の伝送路として利用できる可能性を示唆している。

本報告では、これまでに示されてきた環状コンクリート柱を用いた海中—海上間無線通信の可能性に関する知見を踏まえ、環状コンクリート柱内を伝搬する電磁波の詳細な伝搬特性を明らかにすることを目的とする。電磁界解析ソフト FEKO を使い、モーメント法 (MoM) および MoM と多重極高速法 (MLFMM) を組み合わせた手法による電磁界解析を行う。具体的には、コンクリートの含水率の違いが電磁界分布に及ぼす影響、ならびに鉄筋の配置条件が電磁波伝搬特性に与える影響について検討する。

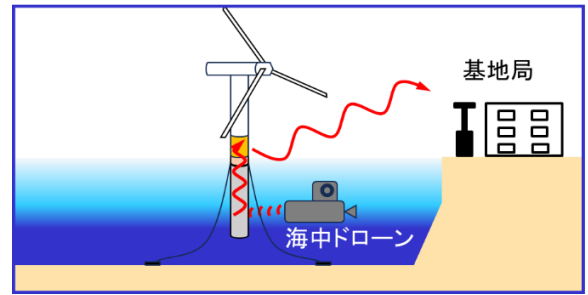


図1 海中ドローン運用による海中-海上通信

## 2. 含水率における電磁界分布と伝搬距離特性

図2は図1に示した浮体式洋上風力発電設備の環状コンクリート柱を用いた海中無線通信を想定した解析モデルを示す。環状コンクリート柱は、内径 $a = 6.8$  m, 外径 $b = 7.8$  m, 高さ $H = 30$  mの円筒構造としてモデル化した。本研究では、環状コンクリート柱が海中に完全に沈設されている状況を想定し、解析空間の自由空間を海水とした。このとき、海水の電気定数は比誘電率 $\epsilon_{\text{seawater}} = 72$ ,  $\sigma_{\text{seawater}} = 4.8$  S/mと設定した[5]。

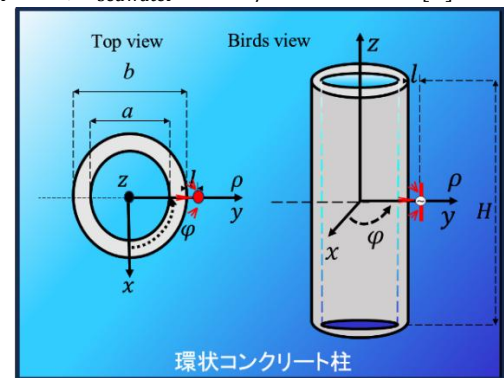


図2 解析モデル

海中ドローンからの信号放射を想定し、アンテナとして長さ $0.50$  mのダイポールアンテナを用いた。アンテナは環状コンクリート柱の外壁から $0.05$  m離れた位置に配置し、コンクリートモデルの高さ方向中央に設置した。また、先行研究においてアンテナを $z$ 方向励振が電磁波の減衰が小さいこと[6]が示されていることから本解析においてもアンテナの向きを $z$ 軸方向とした。解析周波数としては $10$  MHzとした。

環状コンクリート柱は打設後の経過期間により含水率が変化し、それに伴い電気定数も変化することが知られている[7]。そこで本解析では、コンクリートの含水率の違いが電磁界分布および伝搬特性に及ぼす影響を評価するため、以下の3条件を対象とした。すなわち、打設直後の乾燥状態として含水率 $0.2\%$ 、打設後1~2年経過した標準状態として含水率 $2.8\%$ 、および打設後数か月経過したやや湿潤状態として含水率 $5.6\%$ である。

コンクリートの電気定数はアンテナの動作周波数に対応させて設定した。各含水率条件における電気定数の詳細は表 1～表 3 に示す。

表 1 含水率 2.8%の標準状態における電気定数

| 周波数 [MHz] | 比誘電率 $\epsilon_1$ | 導電率 $\sigma_1$ [S/m] |
|-----------|-------------------|----------------------|
| 10        | 6.2               | $5.1 \times 10^{-4}$ |
| 30        |                   | $9.4 \times 10^{-4}$ |
| 100       |                   | $2.4 \times 10^{-3}$ |

表 2 含水率 0.2%の標準状態における電気定数

| 周波数 [MHz] | 比誘電率 $\epsilon_1$ | 導電率 $\sigma_1$ [S/m] |
|-----------|-------------------|----------------------|
| 10        | 4.8               | $6.0 \times 10^{-5}$ |
| 30        |                   | $1.8 \times 10^{-4}$ |
| 100       |                   | $6.0 \times 10^{-4}$ |

表 3 含水率 5.6%の標準状態における電気定数

| 周波数 [MHz] | 比誘電率 $\epsilon_1$ | 導電率 $\sigma_1$ [S/m] |
|-----------|-------------------|----------------------|
| 10        | 8.3               | $6.7 \times 10^{-3}$ |
| 30        |                   | $7.8 \times 10^{-3}$ |
| 100       |                   | $1.1 \times 10^{-2}$ |

本紙では 10MHz における電磁界分布の解析結果を図 3 に示す。解析面は、 $Z = 5, 10, 15$  m における XY 平面とした。また、10MHz における伝搬距離特性の解析結果を図 4 に示す。ここでは、 $\rho = 3.85$  m ( $\varphi = 90^\circ$ ) の位置における z 軸方向の伝搬距離特性の変化を解析した。

図 3～図 6 に、各含水率条件における電磁界分布および伝搬距離特性を示す。いずれの条件においても、環状コンクリート柱内では電磁界が柱内部に沿って分布し、電界の  $E_\rho$  成分および磁界の  $H_\phi$  成分を中心とした伝搬が確認できる。

含水率 0.2%の乾燥状態では、 $E_\rho$  成分および  $H_\phi$  成分の強度が励振源から離れた位置においても比較的高く維持されており、伝搬距離の増加に対する減衰が最も小さい。含水率 2.8%の標準状態では、各成分の強度は低下するものの、 $E_\rho$ - $H_\phi$  成分を主体とした伝搬が一定距離まで維持されている。

一方、含水率 5.6%のやや湿潤状態では、 $E_\rho$  成分および  $H_\phi$  成分ともに励振源から離れるにつれて急激に減衰しており、伝搬距離の増加に伴う損失が大きい。

以上より、環状コンクリート柱内における電磁波伝搬は、 $E_\rho$ - $H_\phi$  成分を主体とする伝搬モードによって支配されており、コンクリートの含水率が増加すると、これらの成分の減衰が増大してしまうことが確認できる。そのため、環状コンクリート柱内を伝搬する際に減衰を抑える構造的な工夫が必要になる。

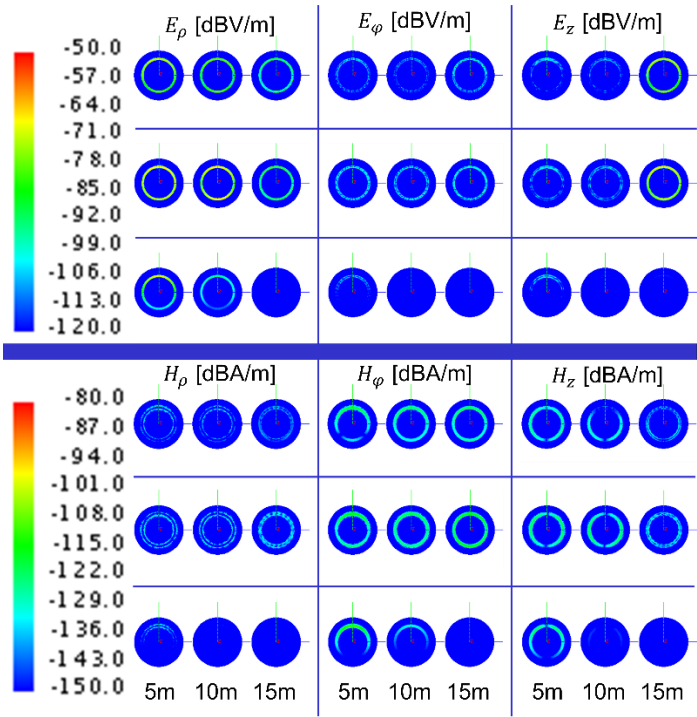


図 3 電磁界分布(上:電界,下:磁界)  
(上:標準,真ん中:乾燥,下:やや湿潤)

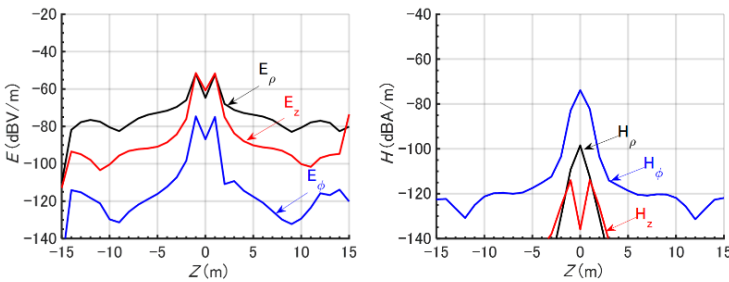


図 4 含水率 2.8%(左:電界,右:磁界)

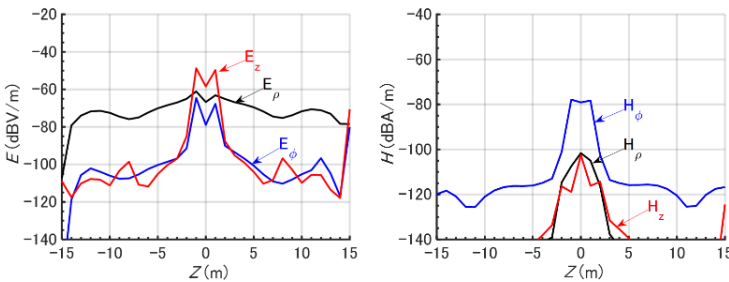


図 5 含水率 0.2%(左:電界,右:磁界)

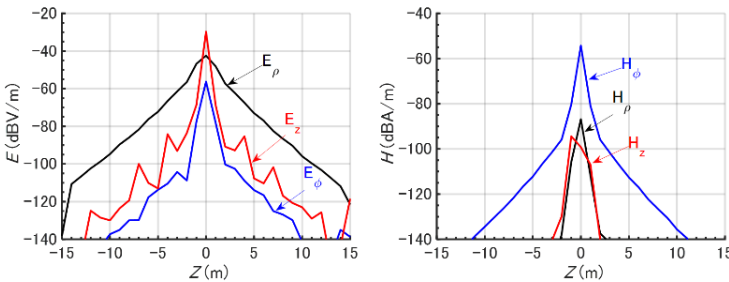


図 6 含水率 5.6%(左:電界,右:磁界)

### 3. 鉄筋の配置による伝搬距離特性

環状コンクリート柱内における電磁界の減衰を抑制する手法として、コンクリート柱内部への鉄筋の挿入がこれまでに検討されてきた。先行研究では、Z軸方向に伸びる鉄筋を挿入した場合においても、電磁界分布への影響は非常に小さいことが報告されている[8]。また、鉄筋を有する場合には、海中における電磁波の透過係数が鉄筋を有しない場合と比較して高くなることも示されている[9]。

本報告では、鉄筋の配置位置が電磁界伝搬特性に与える影響を詳細に評価するため、図7に示す二つのモデルについて解析を行った。一つは環状コンクリート柱の中心部に $\phi$ 方向へ鉄筋を挿入したモデルであり、もう一つは実際の鉄筋コンクリート柱構造に近い配置として、Z軸方向および $\phi$ 方向の双方に鉄筋を挿入したモデルである。なお、環状コンクリート柱の寸法は、いずれのモデルにおいても同一とした。鉄筋は完全導体(PEC)としてモデル化し、その寸法は実構造を参考に設定した[10]。また、コンクリートの電気定数には標準状態に相当する含水率2.8%の値を用いた。

解析周波数は10 MHz, 30 MHz, および100 MHzとし、計算手法としては、10 MHz および 30 MHz では MoM 法を用い、100 MHz では計算時間短縮のため MoM&MLFMM を組み合わせた手法を用いた。

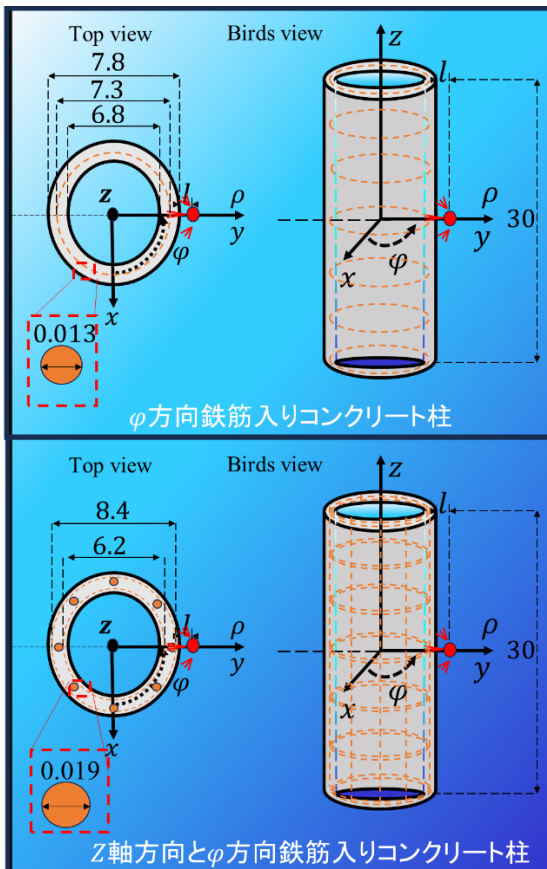


図7 解析モデル

$\phi$ 方向に挿入したモデルの各周波数における伝搬距離特性の解析結果を図8~10に示す。鉄筋を挿入していない場合の結果とほぼ一致することから $\phi$ 方向に挿入した時ではZ方向に挿入したモデルと同様に電磁界伝搬距離特性への影響は非常に小さいことが確認された。

Z軸方向と $\phi$ 方向どちらにも鉄筋を挿入したモデルの各周波数における伝搬距離特性を図11~13に示す。

これらの結果も同様に伝搬距離特性への影響は非常に小さいことが明らかになった。

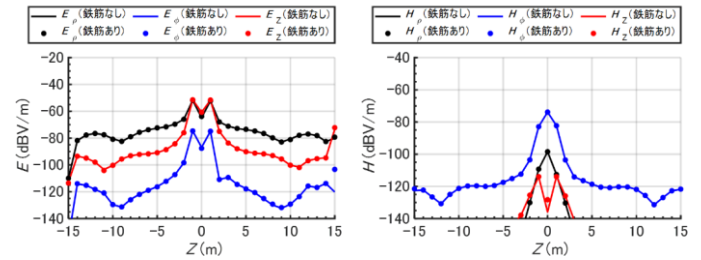


図8 10MHzにおける伝搬距離特性(左:電界,右:磁界)

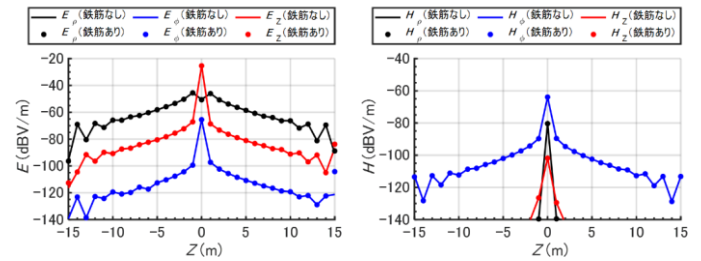


図9 30MHzにおける伝搬距離特性(左:電界,右:磁界)

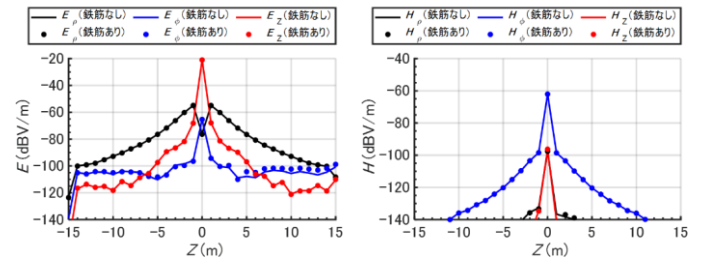


図10 100MHzにおける伝搬距離特性  
(左:電界,右:磁界)

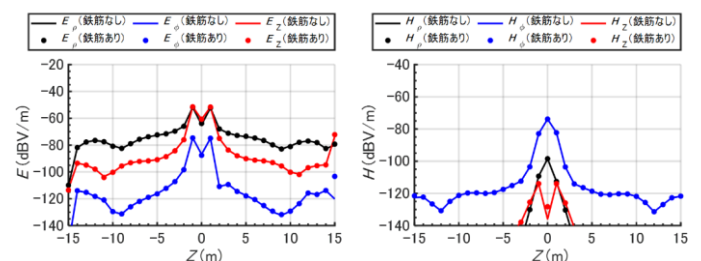


図11 10MHzにおける伝搬距離特性  
(左:電界,右:磁界)



## 文 献

- [1] 経済産業省 資源エネルギー庁 新エネルギー課, “再生可能エネルギー政策の動向”, 経済産業省, 東京, 2024.
- [2] N.Fujii, H. Sato, Q. Chen, N. Ishii, and M. Takahashi, “Measurement of propagation loss of radio waves in seawater,” *Journal of Transmission Engineering Research*, vol. 2016, no. 586-2, pp. 1-4, Dec. 2016.
- [3] 奥村 亮太, 福本 浩之, 藤野 洋輔, 大森 誓治, 伊藤 優弥, “完全遠隔無線制御型水中ドローンを実現する海中音響通信技術”, *NTT 技術ジャーナル*, vol.2023, pp.10-11, Jun.2023.
- [4] 石井 望, 葛生直暉, 高橋 応明, 袁 巧微, 陳 強, 吉田 弘, “海中環状コンクリート柱を利用した電波伝搬の固有モード解析”, *信学技報*, vol. 123, no. 441, AP2023-217, pp. 91-96, 2024 年 3 月.
- [5] Recommendation ITU-R P.527-6, “Electrical characteristics of the surface of the Earth,” International Telecommunication Union, pp. 1-5, Sep. 2021.
- [6] 袁 巧微, 大和 紀仁, 石井 望, 高橋 応明, 陳 強, 吉田 弘, “海中環状コンクリート柱を利用した電波伝搬の電磁界分布”, *信学技報*, vol. 123, no. 441, AP2023-218, pp. 97-101, 2024 年 3 月.
- [7] M. N. Soutsos, J. H. Bungey, S. G. Millard, M. R. Shaw, and A. Patterson, “Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing,” *NDT & E International*, vol. 34, no. 6, pp. 419-425, 2001.
- [8] 石川 魁人, 高橋 応明, 石井 望, 袁 巧微, 陳 強, 吉田 弘, “海中環状コンクリート柱を利用した電波伝搬の周波数解析”, *信学技報*, vol. 123, no. 441, AP2023-220, pp. 105-108, 2024 年 3 月.
- [9] 福家 智己, 高橋 応明, 石井 望, 袁 巧微, 陳 強, 吉田 弘, “鉄筋入り海中環状コンクリート柱を利用した電波伝搬の解析”, *信学技報*, vol. 125, no. 161, AP2025-60, pp. 5-9, 2025 年 8 月.
- [10] 宇都宮智昭, 吉田茂雄, 佐藤郁, 飛永育男, “2MW 級スパーク型浮体式洋上風力発電施設の構造設計について,” *土木学会論文集 B3(海洋開発)*, Vol.71, No.2, pp.I\_126-I\_131, 2015

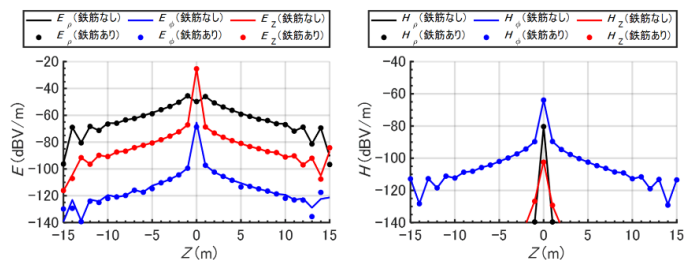


図 12 30MHz における伝搬距離特性

(左:電界,右:磁界)

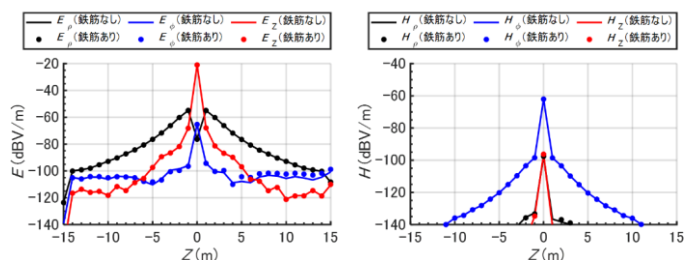


図 13 100MHz における伝搬距離特性

(左:電界,右:磁界)

## 4. まとめ

本報告では、スパーク型洋上風力発電設備の支柱として用いられる環状コンクリート柱に着目し、これを電磁波の伝送路として利用した海中無線通信システムの基礎検討として、柱内を伝搬する電磁波の特性を数値解析により評価した。電磁界解析には FEKO を用い、モーメント法 (MoM) および MoM と多重極高速法 (MLFMM) を組み合わせた手法を適用した。解析の結果、環状コンクリート柱内では電界の  $E_\phi$  成分および磁界の  $H_\phi$  成分を主体とした伝搬が生じていることが確認された。特に、含水率が低い乾燥状態ではこれらの成分の減衰が小さく、比較的長距離の伝搬が可能である一方、含水率が高い湿潤状態では励振源からの距離の増加に伴い急激な減衰が生じることが明らかとなった。このことから、環状コンクリート柱内の電磁波伝搬特性はコンクリートの含水率に強く依存することが示された。また、鉄筋配置が伝搬距離特性に与える影響について検討した結果、 $\phi$  方向に鉄筋を挿入した場合および  $Z$  軸方向と  $\phi$  方向の双方に鉄筋を挿入した場合のいずれにおいても、鉄筋を挿入していない場合とほぼ同様の伝搬距離特性が得られた。本解析条件においては、鉄筋配置の違いが電磁波伝搬特性に与える影響は極めて小さいことが確認された。

今後は、鉄筋本数の増加が電磁波伝搬距離特性に与える影響について、さらに検討を行う予定である。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 23K26102 により実施されたものである。