

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

福家 智己[†] 高橋 応明[†] 石井 望^{††} 袁 巧微^{†††} 陳 強^{††††} 吉田 弘^{†††††}

[†]千葉大学 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

^{††}新潟大学 〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

^{†††}東北工業大学 〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 35-1

^{††††}東北大学 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{†††††}海洋研究開発機構 〒237-0061 横須賀市夏島町 2-14

E-mail: [†]omei@faculty.chiba-u.jp, ^{††}nishii@eng.niigata-u.ac.jp, ^{†††}qwuyan616@tohtech.ac.jp,
^{††††}qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp, ^{†††††}yoshidah@jamstec.go.jp

あらまし 著者らは、浮体式洋上風力発電設備の保守作業効率化を目的として、海中電磁波通信システムの基礎検討を行ってきた。海中での電磁波減衰を抑える手法として、設備土台の環状コンクリート柱を電磁波の伝送路として利用し、減衰の低減に対する検討をしてきた。本稿では、海水中の環状コンクリート柱を模した円筒型モデルの近傍に微小ダイポールアンテナを設置することで、アンテナ間の透過係数から推定された減衰定数の周波数特性を確認した。さらに、セルサイズ縮小と計算時間短縮のため環状コンクリート柱を半円筒型に簡略化したモデルを用いて、伝搬特性を解析することで、半円筒型モデルの有効性を確認し、アンテナとコンクリート柱表面との距離の短縮が、透過係数の改善に有効であることを確認した。また、コンクリート柱内部の鉄筋が伝搬に与える影響を検討した。

キーワード 鉄筋, 海水, 環状コンクリート柱, 電波伝搬, FDTD 法, 洋上風力発電

Analysis of Radio Wave Propagation

Using Reinforced Hollow Cylindrical Concrete Structures in Sea Water

Tomoki Fukuie[†] Masaharu Takahashi[†] Nozomi Ishii^{††} Qiaowei Yuan^{†††} Qiang Chen^{††††} and
Hiromu Yoshida^{†††††}

[†]Chiba University, 1-33 Yayoicho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 Japan

^{††}Niigata University, 8050 Ikarashi2-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181 Japan

^{†††}Tohoku Institute of Technology, 35-1, Yagiyama Kasumicho, Taihaku-ku, Sendai 982-8577 Japan

^{††††}Tohoku University, 6-6-05 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579 Japan

^{†††††}JAMSTEC, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, 237-0061 Japan

E-mail: [†]omei@faculty.chiba-u.jp, ^{††}nishii@eng.niigata-u.ac.jp, ^{†††}qwuyan616@tohtech.ac.jp,
^{††††}qiang.chen.a5@ecei.tohoku.ac.jp, ^{†††††}yoshidah@jamstec.go.jp

Abstract The authors have been conducting basic research on seawater electromagnetic wave communication systems to improve the efficiency of maintenance work for floating offshore wind power generation facilities. To suppress electromagnetic wave attenuation in seawater, they have investigated using hollow cylindrical concrete columns of the facility's foundation as transmission paths for radio waves. In this study, small dipole antennas were installed near a cylindrical model simulating these hollow concrete columns in seawater, and the frequency characteristics of the attenuation constants estimated from the transmission coefficients between antennas were examined. Furthermore, a simplified semi-cylindrical model was used to reduce cell size and computation time, and its effectiveness was demonstrated by analyzing the propagation characteristics. It was also confirmed that reducing the distance between the antenna and the concrete surface improves the transmission coefficient. In addition, the influence of steel bars inside the hollow concrete columns on radio wave propagation was investigated.

Keywords Steel bar, Seawater, Hollow Cylindrical Concrete, Radio wave propagation, FDTD method, Offshore Wind Power Generation

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの一つとして洋上風力発電が注目されている。これは建設資材の搬入路や騒音問題を回避でき、設置場所の制約を受けにくいためである。日本では国土の約 70%が山地であり、生産活動や居住などの土地利用が平地に集中していることから、陸上の風力発電設備の多くは丘陵地に立地している。しかし、丘陵地では風況の変動や十分な設置面積の確保が難しく、大規模な風車の設置には限界がある。一方、日本は海岸線が長く、洋上の平均風速は陸上に比べて速く風の乱れも少ないため、良好な風況が得られる。そのため、洋上風力発電は安定した発電量が期待され、日本の電力供給において大きな潜在力を有すると考えられている[1]。しかし洋上風力発電には保守管理コストの増大という課題がある。これは、発電設備がアクセスの難しい洋上に設置されているためであり、現在は船舶で発電設備近くまで移動し、ダイバーや有線で制御される海中ドローンを用いて保守管理を行う手法が一般的である。しかし、ダイバーによる作業には安全面でのリスクが伴う。また、海中ドローンは制御用テザーを必要とするため操縦の自由度が低下し、テザーの絡まりによって複数台を同時に運用することが難しいといった問題がある。これらの課題を解決する手段として、海中ドローンと陸上を結ぶ無線通信の確立により、保守管理作業の効率化が期待される。

一般に、海洋における無線通信には音波が広く利用されている[2]。音波は電波や光波に比べて海水中での減衰が小さく、長距離通信に適しているためである。一方で、音波の海水中における伝搬速度は約 1.5 km/s と電波に比べて非常に低速であり、雑音の影響も大きい。また、海面や海底からの多重反射、塩分濃度や深度による回折波など、音波による通信には多くの課題が存在する[3],[4]。そこで本研究では、海中での電磁波応用の一例として、海中と海上にまたがる洋上風力発電設備のコンクリート構造物を電磁波の伝送路として活用する方法を提案している。これにより、海水中での電磁波伝搬損失を最小限に抑えつつ、構造物経由で海上へ信号を送信し、空気中で再放射することができる。図 1 にシステムのイメージを示す。本手法は、洋上風力発電設備の保守管理を自立型海中ドローンで行うことを想定しており、海中での電磁波伝搬による損失を最小限に抑えつつ、風車のコンクリート構造物を介した信号送受信を実現する有効な手段になると考えられる。本報告では、浮体式洋上風力発電設備の一種であるスパイ型構造を対象とし、風車の土台部分である海水中の環状コンクリート柱近傍における送受信アンテナ間の透過係数を解析し、周波数特性を評価した。また、本システムの実現に向けては、送受信アンテナと環状コンクリート柱表面との距離を短縮することが伝送効率向上に有効である[5]。しかし、円筒型モデルでは、FDTD (Finite-Difference

Time-Domain) 法のセルサイズの縮小に伴う計算コストの増加により、アンテナ-コンクリート間の最小距離は 0.20 m に制限されている。

本研究では、同等の計算時間でより小さいセルサイズを使用可能とするために、海水中の環状コンクリート柱を半円筒型に簡略化したモデルを作成し、その電磁波伝搬特性を検討した。さらに、半円筒型モデルにおけるコンクリート柱近傍の送受信アンテナ間の透過係数を解析し、減衰定数の評価を行うことで、半円筒型モデルの利用可能性を検討した。

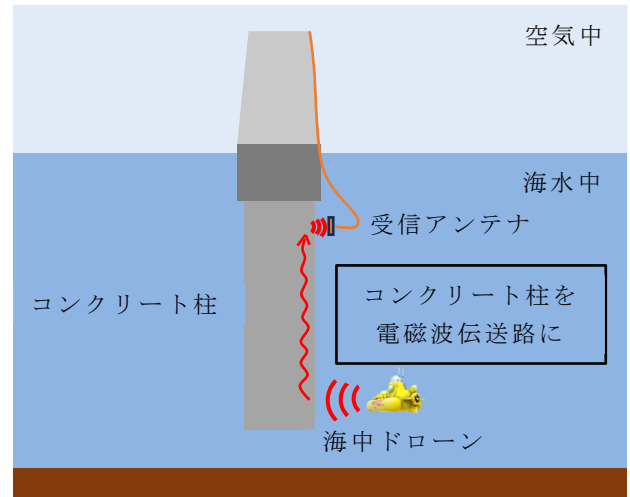


図 1 想定システム

2. 円筒型モデルにおける透過係数

図 1 に示すシステムのように、海中ドローンから海面付近の受信アンテナへ送信する場合、ドローンに搭載されたアンテナから放射された電磁波は海水中を伝搬してコンクリート柱に到達し、柱内部を伝送線路として伝搬されて到達することが想定される。したがって、本解析では海水中に配置した微小ダイポールアンテナによる励振を行い、送受信アンテナ間の透過係数を算出し、これを基に減衰定数を評価する。ここで、減衰定数は $z=30.0 \sim 40.0$ m における透過係数の平均変化率と定義した。

解析モデルを図 2 に示す。解析モデルは外径 7.8 m、内径 6.8 m、長さ 50.0 m のコンクリート柱と周囲の海水から構成されている。コンクリート柱の軸方向 (z 方向) には、直径 0.04m の鉄筋を模した PEC (Perfect Electric Conductor) が合計 144 本、動径方向に直径 0.04m の PEC が合計 25 本挿入した。解析には FDTD 法を用いた。微小ダイポールアンテナは送信・受信ともに z 軸に平行になるように配置し、 $z=20.0 \sim 48.0$ m の範囲で相互結合がないことを確認して 1.0 m 間隔に設置した。また、アンテナとコンクリート柱表面との距離は 0.20 m とした。電界は z 方向に励振し、入力信号にはガウシアンパルスを用いた。海水の誘電率は $\epsilon_r=71.7$,

$\sigma=4.80$ S/m と設定した。解析周波数は 10~100 MHz の範囲を 10 MHz 間隔で変化させ、各周波数におけるアンテナ間の透過係数や減衰定数の周波数特性を評価した。なお、アンテナ長は 0.24 m とし、整合は考慮していない。

コンクリートの電気定数はその含水率によって変化する[6]。本稿では、海水中のコンクリート柱の含水率を 2.8 % と仮定し、各周波数におけるコンクリートの電気定数を表 1 のように設定した。

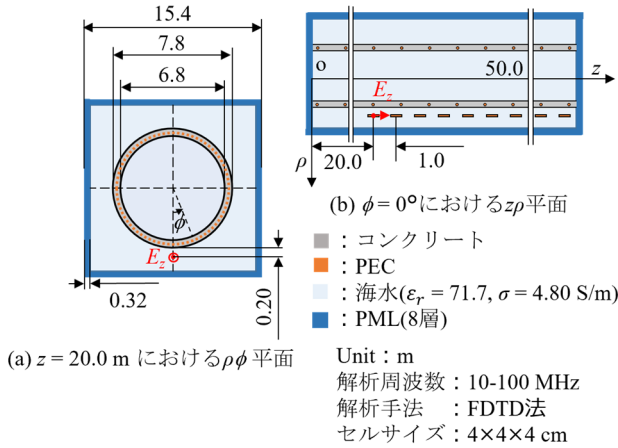


図 2 解析モデル

表 1 コンクリートの電気定数

周波数 [MHz]	比誘電率	導電率 [S/m]
10	6.33	5.13×10^{-4}
20	6.26	7.26×10^{-4}
30	6.20	9.39×10^{-4}
40	6.14	1.15×10^{-3}
50	6.09	1.37×10^{-3}
60	6.04	1.58×10^{-3}
70	5.99	1.79×10^{-3}
80	5.95	2.00×10^{-3}
90	5.91	2.22×10^{-3}
100	5.87	2.43×10^{-3}

解析による各周波数帯域における送受信アンテナ間の透過係数を図 3 に示す。周波数が高くなるにつれて、また送信アンテナからの距離が遠くなるにつれて、透過係数が低下した。表 2 に、各周波数帯域における透過係数から算出した減衰定数を示す。減衰定数は周波数の上昇に伴って増加している。これらは、伝搬距離の増加および、高周波数帯域での伝搬損失の増大によるものである。

3. 微小ダイポールの距離特性

円筒型モデルにおける透過係数の解析と同様に、半円筒型モデルにおいても海水の中に配置した微小ダイポールアンテナによる励振を行い、透過係数から算出した減衰係数を検討した。ここでは、減衰定数は $z=15.0 \sim 25.0$ m における

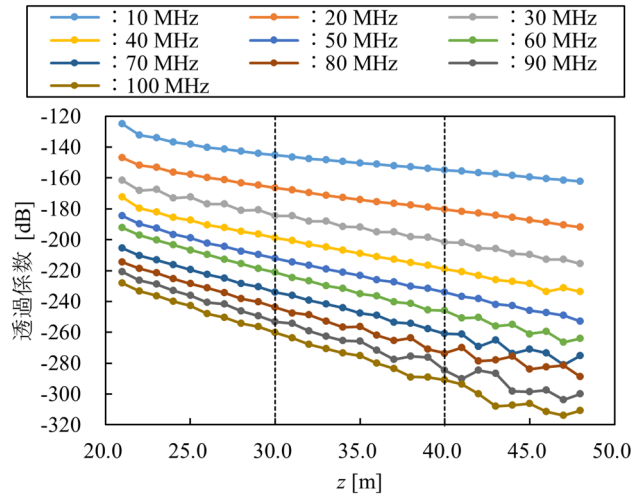


図 3 各周波数帯域における透過係数

表 2 各周波数帯域における減衰定数

周波数 [MHz]	減衰定数 [dB/m]	周波数 [MHz]	減衰定数 [dB/m]
10	0.93	60	2.51
20	1.37	70	2.68
30	1.72	80	2.89
40	2.01	90	3.02
50	2.18	100	3.19

透過係数の平均変化率として定義した。また、送受信ダイポールアンテナとコンクリート柱表面との距離（以下、アンテナ-コンクリート間距離）を変化させ、この距離が透過係数に与える影響についても検討した。

解析モデルを図 4 に示す。微小ダイポールアンテナは送信・受信ともに z 軸と平行になるように配置し、 $z=10.0 \sim 29.0$ m の範囲で 1.0 m 間隔に配置した。アンテナ-コンクリート間距離は 0.10~0.30 m の範囲を 0.02 m 刻みで変化させた。解析周波数は 10 MHz および 30 MHz とし、アンテナ長は 0.24 m とした。また、インピーダンス整合は考慮していない。

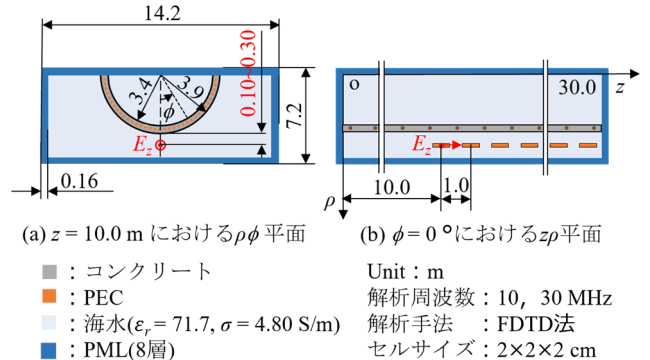


図 4 解析モデル

図 5 は、10MHz および 30MHz においてアンテナ-コンクリート間距離を変化させた際の送受信アンテナ間の透過係数を示す。また、表 3 は、図 5 のアンテナ-コンクリート間距離が 0.20 m の場合における 10 MHz および 30 MHz の透

過係数から算出した減衰定数である。まず、表3より、半円筒型モデルは円筒型モデルを用いた解析結果と概ね一致しており、半円筒型モデルで十分に評価できると判断した。

図5より、アンテナ-コンクリート間距離を短くすることで、透過係数が改善されており、アンテナ-コンクリート間距離に大きく依存している。

$z=20.0$ mにおける各アンテナ-コンクリート間距離の透過係数を図6に示す。両周波数ともに概ね線形の関係にあり、30 MHzにおける減衰は10 MHzの場合に比べて大きい。

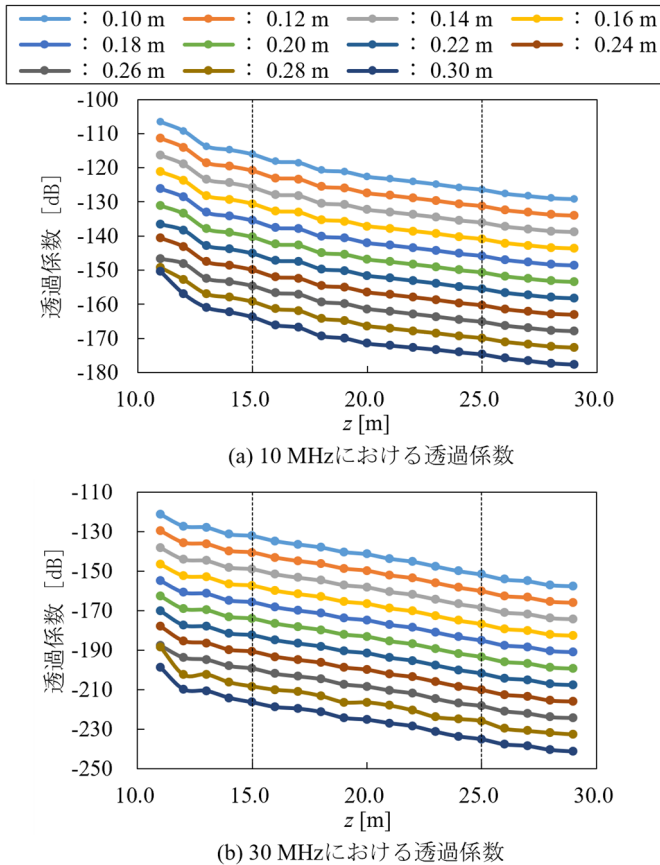


図5 アンテナ-コンクリート間距離ごとの透過係数
表3 減衰定数

周波数 [MHz]	減衰定数 [dB/m]
10	1.00
30	1.89

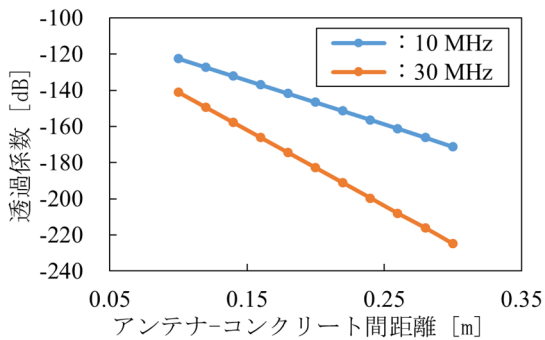


図6 $z=20.0$ mにおける透過係数

4. 鉄筋の影響

4.1. 鉄筋の有無

環状コンクリート柱内部における鉄筋の有無が電磁波の伝搬に与える影響を調査するため、図4に示した解析モデルから鉄筋を模した PEC を取り除いたモデルを用いて解析を行った。同様に海水中に配置した微小ダイポールアンテナによる周波数 10MHz で励振を行い、送受信アンテナ間の透過係数を算出した。

コンクリート柱内部の鉄筋の有無における送受信アンテナ間の透過係数を図7に示す。なお、図中の「鉄筋有り」の値は、図5の解析結果を用いた。これより、コンクリート柱内部に鉄筋が有る場合には、鉄筋が無い場合と比較して透過係数が高くなっている。図8には、コンクリート柱内部の鉄筋の有無における $z\rho$ 断面 ($\phi = 0^\circ$) の電界強度分布を示す。図8(a)より、鉄筋が無い場合にはコンクリート柱内部の電界強度分布は、 ρ 方向の距離によらずほぼ一様である。一方、図8(b)より、鉄筋が有る場合は、 z 方向の中央の鉄筋を境に、送信ダイポールアンテナが配置されている側のコンクリート柱内部で電界強度が強くなり、さらに、近傍の海水中も、鉄筋が無い場合と比較して電界強度が強くなった。これは、コンクリート柱内部の鉄筋が電界を反射したことにより、送信ダイポールアンテナ側のコンクリート柱内部およびその周囲の海水中で電界が強められるからである。この結果、鉄筋が有る場合には鉄筋が無い場合と比較して透過係数が高くなる。

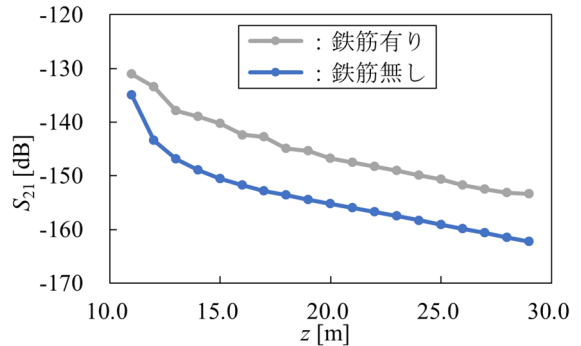


図7 鉄筋による透過係数

4.2. 鉄筋の位置

環状コンクリート柱内部における鉄筋の位置が電磁波の伝搬に与える影響を調査するため、図4に示した解析モデルから鉄筋の位置を変更したモデルを用いて解析を行った。図9に示すように、従来の半円筒型モデルでは、 $\rho\phi$ 平面において、鉄筋はダイポールアンテナの直上に配置されていたが、本検討では鉄筋と鉄筋の間の直下にダイポールアンテナを配置した。

コンクリート柱内部の鉄筋の位置における $z\rho$ 断面 ($\phi = 0^\circ$) の電界強度分布を図10に示す。鉄筋位置を変更した場合でも、送信ダイポールアンテナが配置されている側のコンクリート柱内部およびその近傍の海水中で電界強度が

強くなっている。また、図 10 の(a)および(b)を比較すると、鉄筋の位置に関わらず、コンクリート柱内部およびその近傍の電界強度分布はほぼ同様で、送受信アンテナ間の透過係数も一致した。

以上の結果から、鉄筋の位置は電磁波の伝搬に対して大きな影響を及ぼさない。

5. まとめ

本報告では、洋上風力発電設備の風車土台に相当する環状コンクリート柱を模したモデルにおいて、微小ダイポールアンテナを用いた電界励振を行い、送受信アンテナ間の透過係数から推定された減衰定数の周波数特性を確認した。また、セルサイズの縮小と計算時間短縮のため、環状コンクリート柱を半円筒型に簡略化したモデルを用いて、円筒型モデルと同様に送受信アンテナ間の透過係数から推定された減衰定数の周波数特性を解析した。その結果、円筒型モデルの解析結果と概ね一致し、半円筒型モデルは計算効率を高め、各特性を評価する手法として有用である。また、透過係数は、アンテナ-コンクリート間距離に大きく依存する。さらに、コンクリート柱内部の鉄筋が電磁波伝搬に与える影響について検討した結果、鉄筋が有ることにより、コンクリート柱内部およびその近傍の海水中における電界強度が高くなることが確認された。このことから、鉄筋入りの海中環状コンクリート柱は、海水中における電磁波の伝送線路として有用であると判断した。

今後は、鉄筋の配列や本数などが伝搬特性に与える影響のさらなる検討を進めるとともに、100 MHz の周波数帯域における半円筒型モデルを用いた伝搬特性の解析を行う予定である。

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。

文 献

[1] 鈴木英之, “浮体式洋上風力発電の開発動向と将来展望,” システム/制御/情報, vol.60, no.9, pp.363-368, 2016.

[2] H. Yoshida et al., “Study on land-to-underwater communication,” 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC 2011, Jan. 2011.

[3] 陳強, 高橋応明, 石井望, “電波の海中応用へのアプローチ,” AP2016-92, pp25-28, 信学技報, Sep2016.

[4] 大浜俊樹, 滝沢賢一, 井家上哲史, “海中における電磁波利用無線通信に関する一検討,” 信学技報, WBS2013-32, pp65-70, Oct. 2013.

[5] 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, May. 2024.

[6] M. N. Soutsos, J. H. Bungey, S. G. Millard, M. R. Shaw, A. Patterson, “Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing,” NDT & E International, 34(6), pp.419-425, 2001.

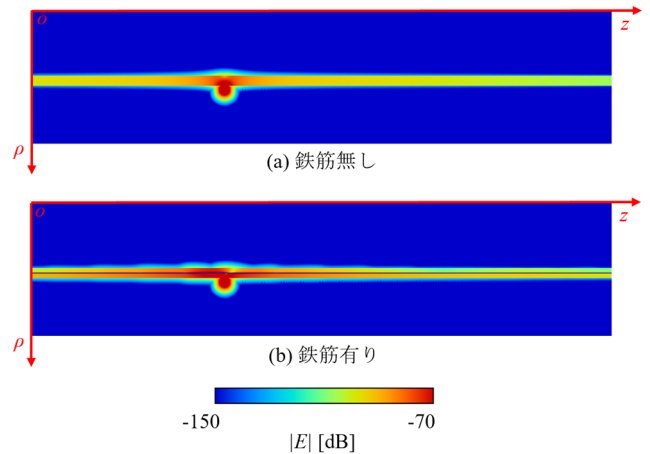
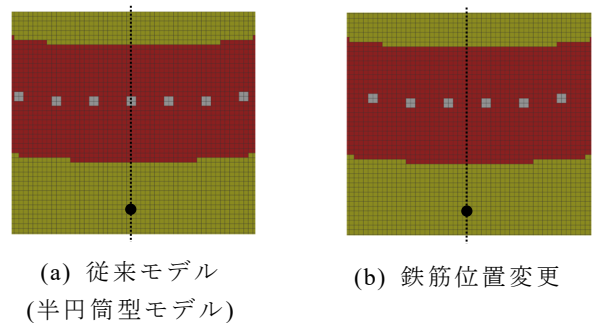


図 8 $z\rho$ 断面 ($\phi=0^\circ$) の電界強度分布



(a) 従来モデル
(b) 鉄筋位置変更
(半円筒型モデル)

■ : コンクリート
■ : PEC (鉄筋)
■ : 海水
● : ダイポールアンテナ

図 9 アンテナ配置 ($\rho\phi$ 平面)

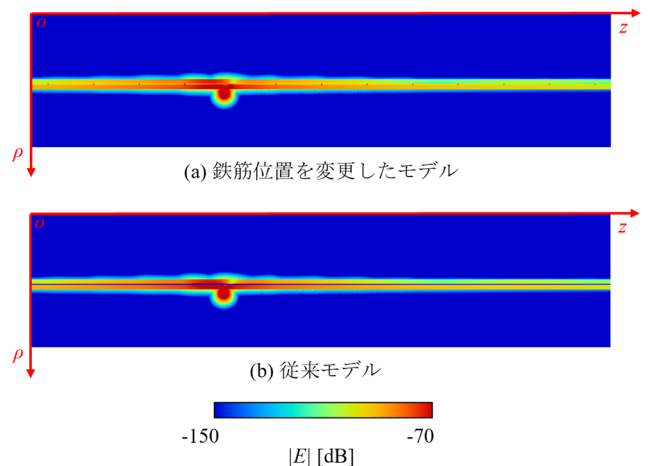


図 10 $z\rho$ 断面 ($\phi=0^\circ$) の電界強度分布