

海中模擬食塩水内における塩ビ管近接ダイポールアンテナ間 伝送における位相定数と減衰定数の実験的推定

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

[†]新潟大学 〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050

^{††}千葉大学 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

^{†††}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番地 15

E-mail: [†]nishii@eng.niigata-u.ac.jp

あらまし 著者らは、浮体式洋上風力発電の保守点検用に海中電磁波通信システムの構築可能性を検討している。海中での無線通信は電磁波の減衰が大きいという問題がある。この問題を解決するために海中支持構造物に注目し、下部浮体コンクリート柱を導波路として利用し、伝搬損失を低減できると考えた。本稿では、環状コンクリート柱のスケールモデルに市販の塩化ビニル管を利用する。この塩化ビニル管を海水模擬食塩水内に沈め、ダイポールアンテナ間の伝送特性を測定し、環状誘電体柱の存在により、ダイポールアンテナ間の伝搬損失を低減できることを実験的に確認した。また、測定された伝送特性から位相定数と減衰定数を推定する。海中に存在する塩化ビニル管の解析から得られた位相定数および減衰定数と、測定結果から推定した位相定数および減衰定数と比較すると、類似した傾向があることを確認した。

キーワード 海水、環状コンクリート柱、電波伝搬、減衰定数、位相定数

Experimental Estimation of Phase and Attenuation Constants for Transmission between Dipole Antennas in Proximity to Vinyl Chloride Tubes in Simulated Submarine Salt Water

Naoki KUZU[†] Nozomu ISHII[†] Masaharu TAKAHASHI^{††} Qiaowei YUAN^{†††}

Qiang CHEN^{††††} and Hiroshi YOSHIDA^{†††††}

[†]Niigata University, 8050 Ikarashi2-cho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181 Japan

^{††}Chiba University, 1-33 Yayoicho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 Japan

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

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

^{†††††}Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15, Natsushima-cho, Yokohama 237-0061 Japan

E-mail: [†]nishii@eng.niigata-u.ac.jp

Abstract The authors have been studying the feasibility of building an undersea electromagnetic wave communication system for maintenance and inspection of floating offshore wind turbines. There is a problem of high attenuation of electromagnetic waves for wireless communication underwater. To solve this problem, the authors focused on underwater support structures and considered that the lower floating concrete column could be used as a waveguide to reduce propagation loss. In this report, commercially available polyvinyl chloride pipe is used for the scale model of annular concrete columns. A vinyl chloride tube with two dipole antennas in close proximity is submerged in a seawater simulated salt water. Transmission characteristics between the antennas are measured, and it is experimentally confirmed that the presence of an annular dielectric column can reduce the propagation loss between the dipole antennas. The phase and attenuation constants are estimated from the measured transmission characteristics. The phase and attenuation constants obtained from the analysis of vinyl chloride pipes in the sea and the regression from the measurement results show similar trends.

Keywords sea water, concrete column, radio propagation, attenuation constant, phase constant

1. はじめに

近年再生可能エネルギーの技術開発が進められており、洋上風力発電はその一つとして挙げられる。洋上風力発電設備の海中支持構造物のメンテナンスは、もっぱらダイバーらによる目視により実施されているのが現状である。経済産業省は、長崎県五島沖や新潟県村上沖をはじめとした約 20 の地域を洋上風力発電設置の促進区域や有望区域に設定している[1]。多くの地域で洋上風力発電の導入が進むと、メンテナンス技術者の不足が問題となる。現在のメンテナンス技術者は 700~1,000 人ほどであり[2]、2032 年までに 8,300 人が必要との予測もある[2]。海中での保守点検は、水中ドローンに搭載されたカメラによる映像を介した点検を導入することで、ダイバー人員不足に対応できる。しかし、通常水中ドローンは水上の母船とテザーで繋がれる。水中の支持構造物に絡まることなく移動するためには、テザーを必要としない無線制御の水中ドローンの導入が望ましい。海中における電波を用いた無線通信の問題点はその伝搬損失が大きいことに尽きる。10 kHz などの低い周波数であれば、海中における減衰は小さくなるが、カメラ映像などの大容量データ通信を行うための通信容量の確保は難しい。高い周波数を利用することにより、通信容量のバリアを克服することは可能であろうが、通信距離は十分に確保できない。例えば、海中で平面波伝搬を仮定するとき、100 dB の減衰に対して、周波数 10 kHz であれば距離 30 m を要するが、周波数 100 MHz では距離 3 m も要らない[3],[4]。このように、海中を伝わる伝搬経路のみで考えると、電波を利用した無線水中ドローンから母船や陸上の基地局までの通信は絶望的といえる。我々はこの困難を解決するために、海中通信が必要とされる周囲環境に着目した。すなわち、メンテナンス対象となるコンクリートを伝搬経路として使えないかと発想した。図 1 に示す洋上風力発電の構造体を例に取り上げると、水中ドローンから最も近いコンクリート壁まで海中を伝搬し、その後、コンクリート内部を伝搬し、さらにコンクリート表面から受信局である母船あるいは陸上基地局まで伝搬するといった経路である。直接海中を伝わる経路の場合、全経路にわたって電波は減衰を受ける。しかし、コンクリート内部を伝わる経路の場合、海水に比べてコンクリート内部での減衰が十分小さいため、伝搬経路全体で考えると、減衰を著しく抑制することが可能になるというシナリオである。具体的に、間欠的にカメラの映像データを視聴できればよいという前提をおき、周波数を 10 MHz とした場合にコンクリート内部を介する伝搬路がどの程度の減衰を示すのか、あるいは、伝送線路としてどのような振る舞いをするのか、さらにコンクリート内部導波構造と水

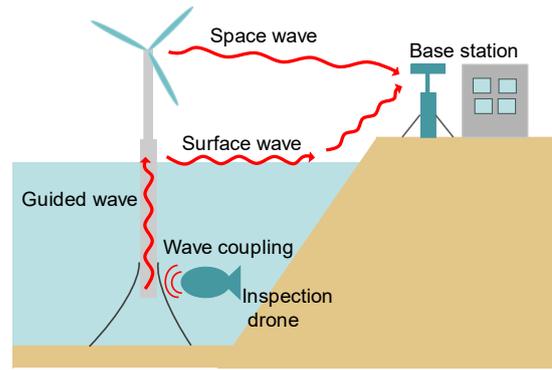


図 1：無線水中ドローンを利用した点検システム

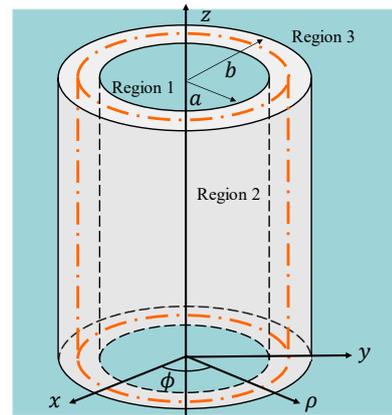


図 2：環状コンクリート柱のモデル

中ドローンアンテナとの結合度をどのように高めるのかといった問題を明らかにするため、我々は図 1 に示す洋上風力発電システムの下部浮体構造に着目し、検討を開始したところである[5]-[8]。

本稿では、下部浮体構造の存在により伝搬経路で被る減衰を大幅に減少できることを実験的に確認する。下部浮体構造を環状コンクリート柱とみなし、塩化ビニル管（以降、塩ビ管と記す）を用いたスケールモデルを利用して伝送特性測定を実施する。このスケールモデル実験系において、環状誘電体構造の存在の有無により伝送距離特性が明らかに異なることを実験的に確認する。すなわち、塩ビ管の存在により電波伝搬経路にわたる減衰が小さくなることを示す。また、海水模擬食塩水内に置かれた塩ビ管の減衰定数および位相定数に関して、解析により得られた値と測定された伝搬距離特性の直線回帰により得られた値を比較することで、塩ビ管を利用するスケールモデルの妥当性を確認する。

2. 環状コンクリート柱のモデル化

図 2 は、洋上風力発電の海中支持構造物である環状コンクリート柱の模式図である。表 1 に五島沖浮体式 2 MW 洋上風力発電システムの諸元を示す[9]。中心軸

表 1：環状コンクリート柱と塩化ビニル管の寸法

| | 環状コンクリート柱 | 塩ビ管 |
|------|-----------|--------|
| 内側直径 | 6.8 m | 77 mm |
| 外側直径 | 7.8 m | 89 mm |
| 長さ | 30 m | 600 mm |

を z 軸とするような円筒座標系 (ρ, ϕ, z) を設定する。環状コンクリート断面の内側半径 a 、外側半径 b とする。 $\rho < a$ および $\rho > b$ は海水で満たされており、それぞれ領域 1 および領域 3 と呼ぶことにする。また、 $a < \rho < b$ はコンクリートで満たされており、領域 2 と呼ぶことにする。この導波構造は、海水を完全導体 (PEC) と仮定すると、同軸線路とみなすことができる。つまり、カットオフ周波数 0 Hz の TEM モード相当の伝搬が可能となる。しかしながら、実際には海水は完全導体ではなく、電界の z 成分が存在するようになる。このようなモードは TM_{01} モードと呼ばれ、カットオフ周波数は 0 Hz である [5],[10]。このモードはアジマス方向の変化が 0 回のモードであるが、アジマス方向の変化が 1 回、2 回の EH_{11} , EH_{21} モードが高次モードとして寄与する。これらの高次モードの影響はカットオフ周波数よりも高い周波数で現れる [5],[10]。

環状コンクリート柱の内側 (領域 1) あるいは外側 (領域 3) に置いたダイポールアンテナを励振するときのコンクリート柱内外に生じる電磁界分布は確認されている [7]。また、FDTD 法による電磁界シミュレーションにより、環状コンクリート柱の表面近くで電界をインパルス励振した際に、軸に平行な直線に沿った電界もしくは磁界の分布も確認されている [8]。

3. 塩ビ管を利用したスケールモデル

下部浮体構造は、例えば、外側の直径は 7.8m、長さは 30 m であり [9]、我々のアイデアを実験的に検証するのは容易ではない。このため、スケールモデルを利用し [11]、実験室内に設置されている水槽内において伝送特性の距離特性を測定し、構造物の存在の有無による伝送特性の変化を調べることにした。

3.1. 環状誘電体柱に対するスケールモデル

領域 1 および領域 3 の海水が完全導体であると仮定する。すなわち、環状コンクリート柱および塩ビ管の断面のうち、領域 2 の部分に対してのみスケールモデルの適用を考える。通常スケールモデルでは、スケール前後で比誘電率は変化させないが [12]、今回のモデルでは比誘電率の変化も許容したスケールモデルを適用する必要がある。すなわち、長さに関するスケールファクタ n と比誘電率に関するスケールファクタ e を導入したスケール則を利用する。主だった量の変換則を表 2 にまとめる。

表 2：スケール変換表

| | 実モデル | スケールモデル |
|-----|------------|-----------------------------|
| 長さ | l | $l' = l/n$ |
| 周波数 | f | $f' = nf/\sqrt{e}$ |
| 導電率 | σ | $\sigma' = n\sqrt{e}\sigma$ |
| 誘電率 | ϵ | $\epsilon' = e\epsilon$ |
| 透磁率 | μ | $\mu' = \mu$ |
| 電界 | E | $E' = E/\sqrt{e}$ |
| 磁界 | H | $H' = H$ |

3.2. スケールモデルの設定

環状コンクリート柱および塩ビ管に対してスケールモデルを適用するためには、それぞれの比誘電率の値を知る必要がある。コンクリートの比誘電率は 6.3 とした [13]。塩ビ管の比誘電率は、同軸プローブ法 (SPEAG 社 DAK) により測定し、2.5 とした。

具体的にスケールファクタを決定する。環状コンクリート柱と塩ビ管の内外半径の平均値の比より、長さに関するスケールファクタは

$$n = 7.3 \text{ m} / 83 \text{ mm} = 87.95 \quad (1)$$

と与えられる。比誘電率に関するスケールファクタは

$$e = 2.5 / 6.3 = 0.397 \quad (2)$$

実モデルの周波数を 10 MHz とすれば、スケール変換後の周波数は

$$f' = nf/\sqrt{e} = 87.95 \cdot 10 \text{ MHz} / \sqrt{0.397} = 1396 \text{ MHz} \quad (3)$$

と与えられる。この理由で、1396 MHz を含む 25 MHz から 2 GHz までの範囲の周波数を 25 MHz 間隔で測定することにした。

3.3. スケールモデル実験系

図 3 に示すように、900 mm × 450 mm × 450 mm のガラス製の水槽に海水模擬食塩水を入れ、塩ビ管を食塩水中に沈める。塩ビ管の固定には、その固定部分による影響を可能な限り小さくするため、両端を釣り糸でつる。表 1 からわかるように、塩ビ管は環状コンクリート柱の内外径比率に近いものを選定している。

水中ドローンのアンテナはダイポールアンテナと仮定した。実験では、2 つのダイポールアンテナ間の伝送特性の距離特性を測定する。一方のダイポールアンテナは、塩ビ管の外側表面から距離 10 mm 離し、 z 方向に向け、固定する。もう 1 つのダイポールアンテナは、塩ビ管の外側表面から同じ距離だけ離し、 z 方向に向け、移動する。そして、2 つのダイポールアンテナの中心間の距離を変化させながら伝送特性 S_{21} をネットワークアナライザで測定する。なお、実モデルにおける 30 m はスケール変換後

$$l' = l/n = 30 \text{ m} / 87.95 = 341 \text{ mm} \quad (4)$$

となることから、ダイポール間距離は 60 mm から 450 mm まで 10 mm 間隔で変化させる。

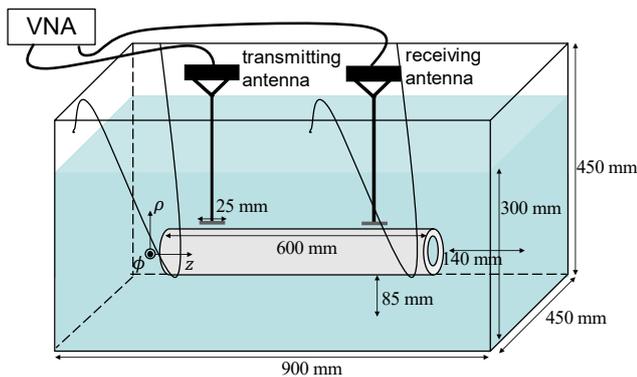
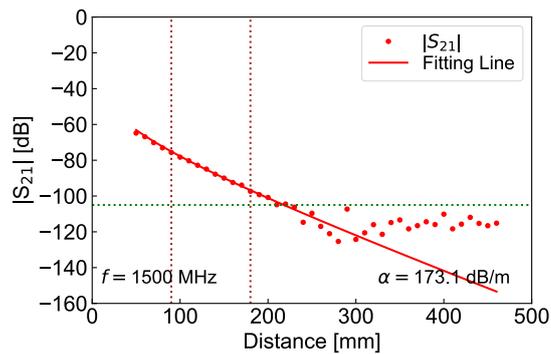


図 3：塩ビ管を挿入した実験系



(a) 周波数 1500 MHz

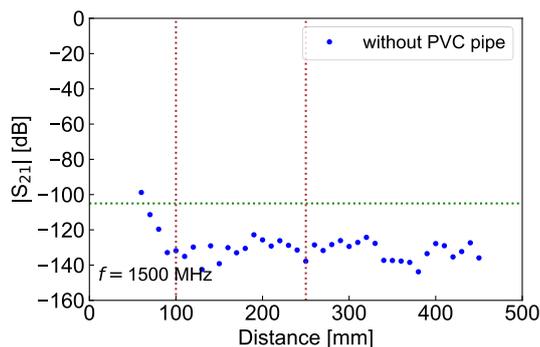
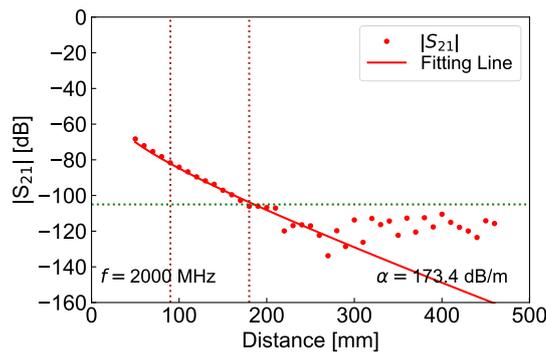


図 4：塩ビ管なしの場合の $|S_{21}|_{dB}$ の距離特性の例 (1500 MHz)



(b) 周波数 2000 MHz

図 5：塩ビ管ありの場合の $|S_{21}|_{dB}$ の距離特性の例

4. 海中でのダイポールアンテナ間の伝送特性

4.1. 塩ビ管なし・ありのスケールモデル実験

図 3 において塩ビ管をダイポールアンテナから十分に離れた場合、ダイポールアンテナ間の伝送距離特性について議論する。この場合の 1500 MHz における伝送距離特性を図 4 に示す。図から明らかなように、距離が 100 mm までは急激にレベルが低下するが、それ以降では例えば -130dB のレベル前後をふらついている。すなわち、距離を大きくする、まず直接波伝搬の挙動が観測され、その後、測定系の測定限界に達するとふらつきが観測され、事実上測定できていない状態に陥る。このように、塩ビ管が存在しないと、海中において電波は大きく減衰する。この挙動は 1500MHz に限らず、2000MHz までの周波数で観測される。

これに対して、塩ビ管をダイポールアンテナに近づけると、図 5 (a) に示したように、直接波伝搬の次に、コンクリート内の伝搬と考えられる振る舞いが観測されるようになる。このような塩ビ管なし・ありの対照実験においては、伝送距離特性に明らかな違いがある。図 5 (a) からわかるように、塩ビ管を近づけることで、信号の伝達距離が飛躍的に改善される。

4.2. 伝送距離特性に基づく減衰定数および位相定数の推定

図 3 に示す実験系において距離の関数 r として測定

された伝送特性 S_{21} を用いて、位相定数と減衰定数を推定する。減衰定数の推定は損失媒質中におけるフリスの伝達公式[12]

$$|S_{21}|^2 = (1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2) \frac{G_1 G_2 e^{-\alpha r}}{4\beta^2 r^2} \quad (5)$$

を用いる。ここで、2 つのアンテナの入力ポートをポート 1 および 2 としたときの S パラメータを考えており、 $G_1 G_2$ は二つのアンテナの利得の積に相当する。実際には、その dB 表示

$$|S_{21}|_{dB} + 20 \log_{10} r = -8.686\alpha r + A \quad (6)$$

を利用する。ここで、 A は距離に無関係な定数である。図 5 に示すように、アンテナ間距離 r を横軸、 $|S_{21}|_{dB}$ を縦軸とする散布図を作成する。続いて、あてはめ範囲を設定し、線形回帰を行う。

あてはめ範囲を設定する際は、測定データが距離に対して直線的に減少するような範囲を選ばなければならない。一例として、図 5 (a) について考える。230 mm よりも遠い距離では、測定限界に達し、データが大きくふらつくようになるばかりか、ある一定の値を前後にランダムな変動をするようになる。このようなデータを含めて回帰を行うと、正しい減衰定数の推定ができない。このため、周波数ごとに、測定データの直線的な減少の範囲を確認し、あてはめ範囲の上限を適切に指定する必要がある。

表 3：塩ビ管（VP75）解析における諸量

| 周波数 | f_{MHz} [MHz] | 100—4500 |
|---------------------------------------|------------------------|----------------------|
| 内側半径 | a [mm] | 38.5 |
| 外側半径 | b [mm] | 44.5 |
| コンクリート幅 | t [mm] | 6 |
| 領域 2 ($a < \rho < b$) の 比誘電率、導電率 | ϵ_{r2} | 2.5 |
| | σ_2 [S/m] | 1.0×10^{-6} |

位相定数 β の距離特性は

$$\angle S_{21} = -\beta r + B \quad (7)$$

と与えられる[12]。ここで、 B は距離に無関係な定数である。減衰定数の場合と同様に、横軸を距離 r とし、縦軸を $\angle S_{21}$ とする散布図を作成し、周波数ごとに直線的な減少をするあてはめ範囲の上限を指定することによって、位相定数 β を推定することができる。

5. 海中環状誘電体柱の減衰定数と位相定数

5.1. 解析により計算された減衰定数と位相定数

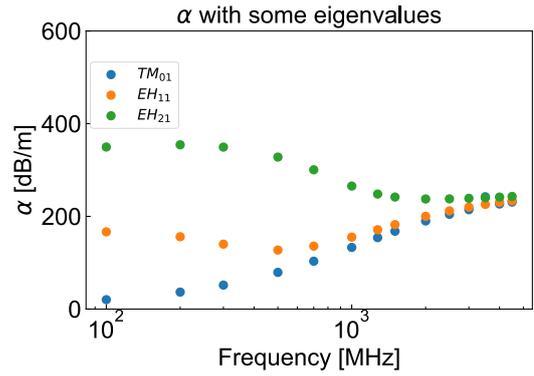
解析計算を行った際の諸量を表 3 に示す。領域 1 ($\rho < a$) および領域 3 ($\rho > b$) における海水の比誘電率および導電率は、計算式[14]により計算する。実験における液温は 22.1 °C とし、塩分濃度は 2.83 % とした。

解析により得られた減衰定数および位相定数の周波数特性を図 6 に示す。TM₀₁モード、EH₁₁モード、EH₂₁モードの 3 つのモードの減衰定数と位相定数を示した。図 6 (a) からわかるように、TM₀₁モードでは、周波数が高くなるにつれて、減衰定数も大きくなる傾向が現れている。EH₁₁モードおよびEH₂₁モードでは、それぞれ 1.5 GHz および 3.5 GHz よりも高い周波数において、TM₀₁モードと類似した周波数特性を示す。これらよりも低い周波数では、TM₀₁モードと異なり、大きな減衰定数を示す。この現象はカットオフ現象と考えられる。また、図 6 (b) からわかるように、位相定数は周波数が高くなるにつれて、位相定数も大きくなるが、100 MHz から 3.5 GHz の範囲ではモードにより位相定数に違いが生じている。

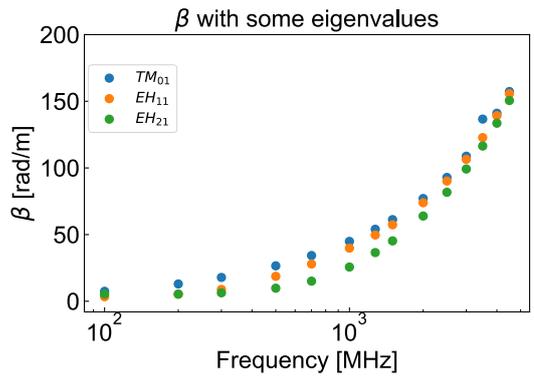
5.2. 塩ビ管ありスケールモデル実験により推定された減衰定数と位相定数

塩ビ管ありのスケールモデル実験により推定された減衰定数および位相定数を図 7 に示す。ここで、2 つのダイポールアンテナと塩ビ管表面との間の距離は 10 mm である。図中の赤い実線が対応する。これらの図には、解析により得られた TM₀₁モード、EH₁₁モード、EH₂₁モードの 3 つのモードに対する減衰定数および位相定数の周波数特性がプロットされている。

また、図 7 における代表的な周波数における減衰定数および位相定数の数値を表 4 に与える。この表で、



(a) 減衰定数



(b) 位相定数

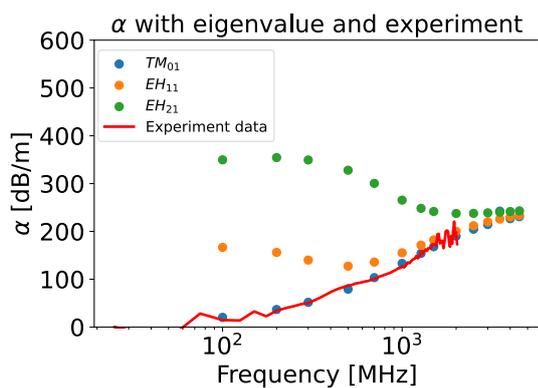
図 6：解析により得られた減衰定数および位相定数の周波数特性

解析値は最低次モードである TM₀₁モードに関する値を載せた。なお、誤差は解析値を基準としている。

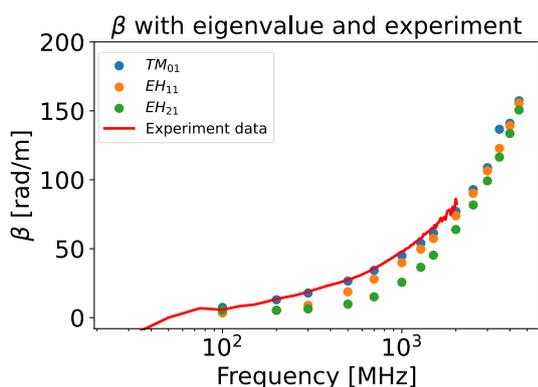
図 7 において、赤線で示された回帰値と青いドットで示された TM₀₁モードの解析値が重なっている。表 4 からわかるように、周波数 300 MHz から 2 GHz の範囲で、減衰定数および位相定数の回帰値はどちらも $\pm 10\%$ の範囲に収まっており、TM₀₁モードの結果に類似している。解析では、アンテナからの励振条件を考慮しておらず、与えられた構造にどのようなモードが支持されるのか、モードを特徴づける伝搬定数はどのような数値なのかを計算しているだけである。このような事情を勘案すると、減衰定数と位相定数の解析値と回帰値は、アンテナ結合の有無の違いがあるものの、傾向が類似していると考えられる。このことから、塩ビ管を用いたスケールモデルが電波の伝送線路として機能しており、海水中の環状誘電体とアンテナとの結合伝送は利用できる。

6. まとめ

無線通信を利用した、洋上風力発電設備における下部浮体コンクリート柱の保守点検システムを構築するために、下部浮体コンクリート柱を導波構造とみなし



(a) 減衰定数



(b) 位相定数

図 7：減衰定数および位相定数の解析値と回帰値

表 4：解析と回帰での減衰定数および位相定数の比較

(a) 減衰定数

| 周波数 [MHz] | 解析 [dB/m] | 回帰値 [dB/m] | 誤差 [%] |
|-----------|-----------|------------|--------|
| 300 | 51.7 | 50.2 | -2.9 |
| 500 | 79.2 | 87.1 | 10.0 |
| 1000 | 133.0 | 127.2 | -4.4 |
| 1275 | 154.2 | 153.0 | -0.78 |
| 1500 | 167.9 | 173.1 | 3.1 |
| 2000 | 190.1 | 173.4 | -8.8 |

(b) 位相定数

| 周波数 [MHz] | 解析 [rad/m] | 回帰値 [rad/m] | 誤差 [%] |
|-----------|------------|-------------|--------|
| 300 | 17.9 | 18.8 | 5.0 |
| 500 | 26.6 | 27.4 | 3.0 |
| 1000 | 44.9 | 48.0 | 6.9 |
| 1275 | 54.0 | 58.0 | 7.4 |
| 1500 | 61.2 | 67.1 | 9.6 |
| 2000 | 77.1 | 82.6 | 7.1 |

た海中・海上混合伝送路について検討した。下部浮体コンクリート柱とアンテナの結合を確認するため、塩ビ管を下部浮体コンクリート柱のスケールモデルとして利用し、海水模擬食塩水内での塩ビ管近接時のダイポールアンテナ間伝送特性計測を行い、伝送特性の距離特性から減衰定数および位相定数を推定した。また、解析によって得られた減衰定数および位相定数の周波数特性との比較も行った。その結果、塩ビ管のような環状誘電体の存在により、大幅に伝搬損失を低減できることを実験的に確認できた。また、直線回帰より推定された減衰定数や位相定数が、解析で得られた最低次モードである TM_{01} モードの減衰定数および位相定数に類似した傾向があることを確認した。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 23K26102 による。

文 献

- [1] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 着床式洋上風力発電導入ガイドブック (最終版), Mar, 2018.
- [2] 吉田, “洋上風力発電メンテナンス人材の育成の課題と取り組み,” 日本風力エネルギー学会誌, vol. 47, no. 1, May 2023.
- [3] 陳 他, “電波の海中応用へのアプローチ,” 信学技報, A・P2016-92, pp.25-28, Sep. 2016.
- [4] 吉田, “最新の水中無線技術の研究動向と将来展望,” 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, vol. 15, no. 4, pp.262-270, Mar. 2021.
- [5] 石井 他, “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, A・P2023-217, Mar. 2024.
- [6] J. Wang et al., “Coaxial-mode analysis of radio propagation utilizing hollow cylindrical concrete structures in seawater”, IEICE Tech. Rep., A・P2023-219, Mar, 2024.
- [7] 袁 他, “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, A・P 2023-218, Mar. 2024.
- [8] 石川 他, “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, A・P2023-220, Mar. 2024.
- [9] 上田, “五島沖浮体式 2 MW 洋上風車見学会,” 風力エネルギー, vol. 37, no. 3, pp.359-363, 2013.
- [10] C. A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [11] G. Sinclair, “Theory of models of electromagnetic systems,” Proc. IRE, pp. 1364-1370, Nov. 1948.
- [12] 石井 望, アンテナ基本測定法, コロナ社, 2011.
- [13] M. N. Soutsos, et al., “Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing,” NDT & E International, vol. 34, issue 6, pp.419-425, 2001.
- [14] Recommendation ITU-R P.527-6 (09/2021), Electrical Characteristics of the Surface of the Earth.