

氷結したサロマ湖における海中電磁波伝搬の基礎検討

加藤 涼介[†] 高橋 応明[†] 吉田 弘[‡] 石井 望^{††} 陳 強^{†††}

[†] 千葉大学 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

[‡] 海洋研究開発機構 〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2 番地 15

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

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

E-mail: [†] affa2167@chiba-u.jp, [‡] yoshidah@jamstec.go.jp,

^{††} nishii@eng.niigata-u.ac.jp, ^{†††} chenq@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 電波を利用した海中測位システムの基礎検討として、海中における電波の減衰量について解析を行った。本報告では、海表面が氷結した冬のサロマ湖における海中電波の伝搬試験結果の妥当性を示し、同環境における電波の減衰量に対する考察を述べる。また、他の形状のアンテナを用いた場合の減衰量に関する考察も併せて報告する。

キーワード サロマ湖, 海中電磁波, 微小ループアンテナ, 微小ダイポールアンテナ, FDTD 法

Fundamental study of electromagnetic wave propagation in the sea at frozen Saroma lake

Ryosuke KATO[†] Masaharu TAKAHASHI[†] Hiroshi YOSHIDA[‡]

Nozomu ISHII^{††} and Qiang CHEN^{†††}

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

[‡] Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, 237-0061 Japan,

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

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

E-mail: [†] affa2167@chiba-u.jp, [‡] yoshidah@jamstec.go.jp,

^{††} nishii@eng.niigata-u.ac.jp, ^{†††} chenq@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract As a basic study of an undersea positioning system using electromagnetic waves, we investigated an attenuation of electromagnetic waves in the sea. In this report, we show the validity of the result of the propagation experiment in the frozen Saroma lake in winter and indicate our thoughts of the attenuation of electromagnetic waves in the situation. We also report the attenuation in case of using antennas which have different shape.

Keywords Saroma lake, Electromagnetic waves in the sea, Infinitesimal loop antenna, Infinitesimal dipole antenna, FDTD method

1. はじめに

近年私たちの国では、海洋の様々な利用方法が検討され始め、新たな海洋産業を創出するための技術の開発が進んでいる[1]。従来、海洋における無線通信システムにおいては、音波の利用が主流であった。これは音波が電波や光波に比べ、海水中で減衰が小さく、遠方通信に適しているためである。一方、音波は海中における伝搬速度が 1.5 km/s であるので、電波に比べかなり低速である。また、海中では雑音が多く発生していて、海面や海底、岸壁からの多重反射の影響も大きい。さらに、海水温度や塩分濃度、深度による回折の

影響も考慮する必要がある[2]。光波に関しては海水中の濁りによる散乱減衰が大きく、通信の不安定性や、通信容量、速度といった観点から、水中における通信は適さないとされる[3]。電波は減衰量の大きさが問題として挙げられ、従来は電波による海中通信は出来ないと考えられていた。しかし、その減衰量を利用した場合、反射波や回折波の影響を無視できると考えられるため、海水中における電波利用、特に浅海における利用を考える余地は十分にあるといえる。

1960年代までに、海水中における電波の伝搬については MHz 帯以下における通信の研究が盛んに行われ

ていた[4]-[5]。それらの研究結果により、海中における電波の伝搬損失が急激に増大することがわかったため、当時の技術ではその先の進展が望めず、海水中における電波の利用について展開されなかった。しかし、1990年代に英国において、海水中のMHz帯電波の伝搬実験が行われたことに加え、前述した音波、光波の海中で利用する場合の不安定性から、海水中における電波利用の可能性を再び探る動きがある[6]。現在は無線通信技術、デジタル通信技術、計算電磁気学が飛躍的に向上したため、1960年代に比べ、海水中の通信に関する議論や検討が再度活発化している[7]-[9]。

先行研究において、海水中での100 dB減衰の伝搬距離と周波数の関係がシミュレーションで求められている。その結果、10 kHzのVHF帯であれば、理論上1 m当たり3.5 dBの減衰に止めることができ、30 m以上の距離を伝えることが報告されている[10]。ゆえに、海中における電波を利用したシステムの活用が期待される。

ここで、海中を伝わる電波を利用したシステムの一つとして、海表面が氷で覆われている北極のような環境下における海上・海中間の無線通信技術の開発を考える。近年、地球温暖化による地球全体への影響が騒がれている。北極圏の氷の融解も深刻な問題の一つであり、海面の上昇や生態系への影響、気候変動に対する影響など、地球温暖化が北極圏へもたらす被害は甚大である[11]。こういった地球温暖化による問題に対処するため、北極圏の氷の厚さや氷層の残存面積を逐次確認する必要がある。北極圏では凍結した海表面における反射により、音波や光波は使用できない。そのため、地球温暖化が北極圏へ与える影響の調査や北極海の豊富な海底資源の探索に使用する無線通信媒体として、電磁波の利用を考える。

本報告では、海表面が氷結した環境における、電波を利用した海中測位システムの基礎検討として、冬のサロマ湖における海中電波伝搬試験の結果とシミュレーションにより得られた結果を比較し、伝搬試験の結果の妥当性を評価するとともに、同環境における電波の伝搬に関する考察を述べる。

2. 実測環境

実測環境の概観を図1(a)に、実測に使用した受信用のハーフシース付きダイポールアンテナを図1(b)に、送信用のループアンテナを図1(c)に示す。また、アンテナを含めた実測環境の断面図を図1(d)に示す。実測環境は北極圏での電波利用を考え、2月の氷の張ったサロマ湖の湖上にて実測を行った。北海道の北端に位置するサロマ湖はオホーツク海の水が絶えず流入しているため、汽水湖となっており、疑似的な海として考えるに十分な環境といえる[12]。水深は実測で約6 mとなっており、氷の厚さもROV (Remotely operated vehicle)を用いて音波測定した結果、位置による変動も少なく約50 cmであった。実測環境における水中の比誘電率は約80、導電率 σ は約2.5 S/mである。氷上に送信用のループアンテナ(9.90 m × 3.30 m × 0.06 m)を配置し、受信アンテナは水深4.0 mの位置にハーフシース付きダイポールアンテナ(2.0 m)[13]を沈め、y軸に平行になるように固定した。送信用のループアン

テナ[14]は10 kHzの場合、銅リッツ線により複数のループを形成し、プラスチックコンデンサにより整合を取っている。100 kHzの場合は幅50 mm、厚さ0.5 mmの銅板により、シングルループアンテナを構成している。配置としては偏波面を考慮し、x軸方向にループ面を向け、長辺がy軸に平行となるように置いた。送信アンテナの位置をx軸の正方向に移動させながら、各地点における受信電力を計測した。なお、図で示されていないが、送信アンテナは移動させる際の簡便さと塩分の多く含んだ雪に出来る限り触れさせないことを考慮し、高さ約0.5 mのプラスチック製のそり上に固定している。動作周波数は実際の海中における電波利用を想定し、VHF帯の10 kHzと100 kHzを使用した。



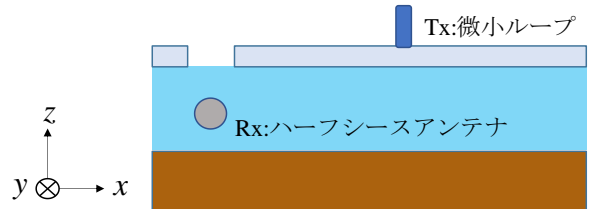
(a) 概観



(b) 受信用ダイポールアンテナ



(c) 送信用ループアンテナ

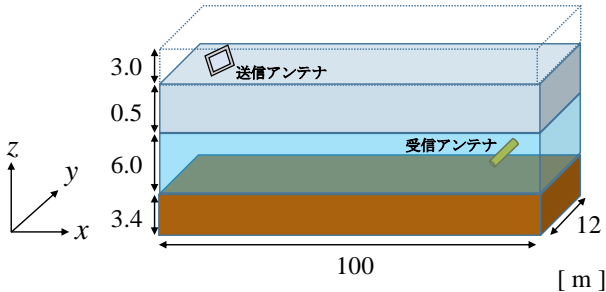


(d) 実測環境の断面図

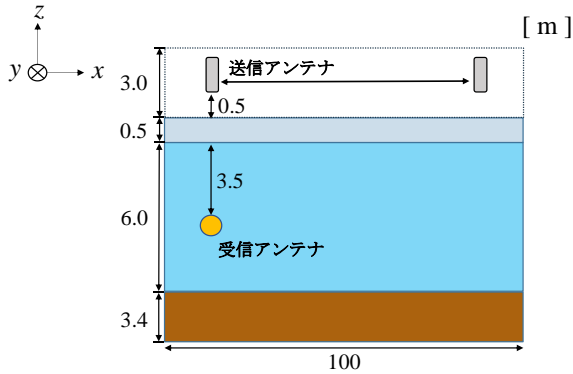
図1 実測環境

3. 解析モデル

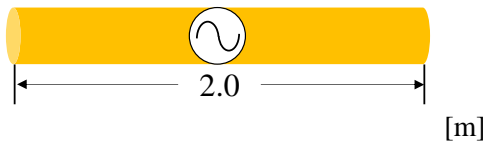
数値解析に用いた受信ダイポールアンテナを図 2(a)に、送信用のループアンテナを図 2(b)に、それらのアンテナを含めた解析モデルの全体図を図 2(c)に示す。また、送受信アンテナの中心点を基準にした実測環境の断面図を図 2(d)に示す。



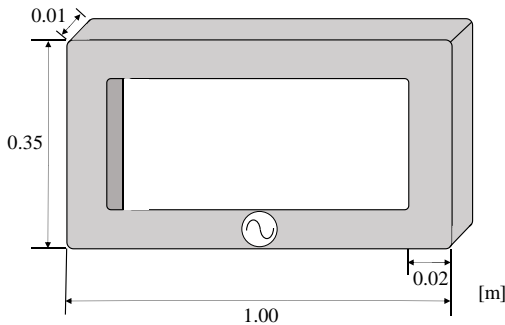
(a) 全体図



(b) 断面図



(c) 受信ダイポールアンテナ



(d) 送信用ループアンテナ

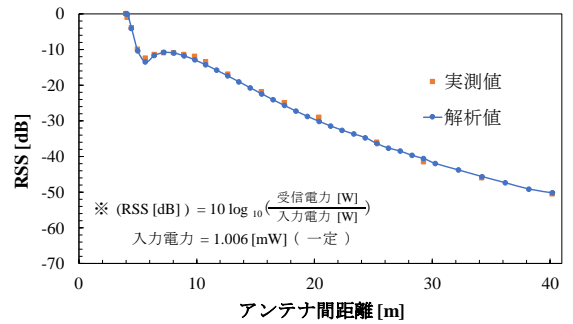
図 2 実測環境を模擬した解析モデル

解析モデルは自由空間，氷層 ($\epsilon_r = 100$, $\sigma = 0.1 \text{ S/m}$)，海水 ($\epsilon_r = 80$, $\sigma = 2.5 \text{ S/m}$)，海底 ($\epsilon_r = 30$, $\sigma = 0.5 \text{ S/m}$) の 4 層から構成されている。氷上に送信用のループアンテナ (1.00 m × 3.50 m × 0.10 m)，水深 4.0 m の位置に長さ 2.0 m の受信ダイポールアンテナを配置

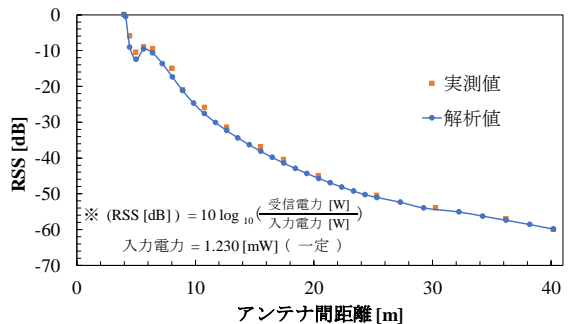
した。実際のループアンテナは青い長方形の型の周上に銅リッツ線または銅板を複数回巻き付けることでループを構成しているが，計算時間の都合により，実際のループの構造と寸法に合わせる事が困難であるため，実測に近い大きさ，かつ少量の計算で済むように完全導体による一回巻きのループアンテナで代用した。動作周波数が 10 kHz と 100 kHz の VHF 帯であり，空気中での波長がそれぞれ約 30 km と約 3 km，海中での波長がそれぞれ約 3.3 km と約 330 m となる。したがって，アンテナの寸法と波長を比較した場合，送受信ともに微小なアンテナであるとみなせる。受信アンテナの軸に対し，垂直な面上で送信アンテナを移動させることも含め，ループアンテナの多少の寸法，ループの構造の違いは電波の減衰傾向に影響しないものとする。送信アンテナを，受信アンテナの直上から x 軸正方向に 1.0 m 間隔で位置を変え，それぞれの地点における受信電力を算出した。ここで，送信アンテナは実測同様水面から 0.5 m 上方の面で移動させている。解析手法は FDTD 法を使用した。

4. 実測値と解析値の比較

受信電力強度 (RSS) の実測値と解析値の比較を図 3 に示す。



(a) 10 kHz



(b) 100kHz

図 3 RSS とアンテナ間距離の関係

送信アンテナが受信アンテナの真上にある時の受信電力強度で正規化している。10 kHz, 100 kHz とともに，実測値と解析値がアンテナ間距離 40 m 付近まで同様の減衰傾向を示している。特徴的な部分として，10 kHz,

100 kHz とともに、アンテナ間距離が 5 m の付近で RSS の落ち込みが確認される。これは受信される偏波が変化したことが原因と考える。媒質 1 から媒質 2 を見込んだ屈折率 n と誘電率 ϵ 、導電率 σ の関係式を以下に示す。

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \omega - j\sigma_2}{\epsilon_1 \omega - j\sigma_1}} \quad (1)$$

ここで、 ω は角周波数である。海中の電氣的な性質は比誘電率ではなく、導電率に大きく依存する。そのため、氷層、あるいは海中に入射する電波はほぼ垂直に入射する。このため、水平に少しループアンテナを移動させると、受信される偏波が大きく変化する。ループアンテナはループ面に平行な方向に放射される偏波が大きいため、グラフのような減衰傾向が現れると考えられる。

この結果により、様々な外因が存在する実際の海中での電波伝搬は、誘電率と導電率が均一な簡易モデルを用いて十分解析可能であり、また、VHF 帯を使用した場合、送信アンテナの近傍界における RSS は送信アンテナの寸法の多少の違いは無視できると判断できる。

5. 送信アンテナの検討

海水は導電率 σ が 2.5 の導電媒質であるため、空気との境界面に平行に放射された電波であっても、境界面上で大きく屈折し、海中では垂直に伝搬することが予想される。図 2 の xz 平面 ($y = 0$) 上における電界強度の伝搬の様子を図 4 に示す。図 4 より、氷層に入射した電波が境界面で大きく屈折し、海中ではほぼ垂直に伝搬している様子が分かる。

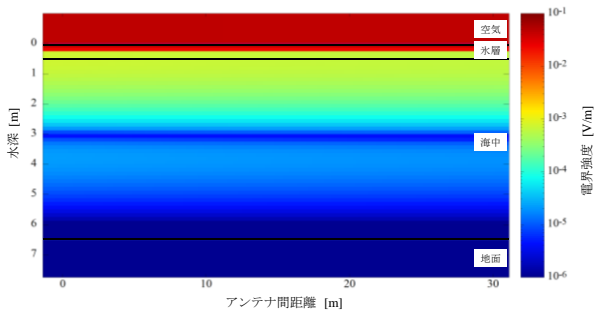
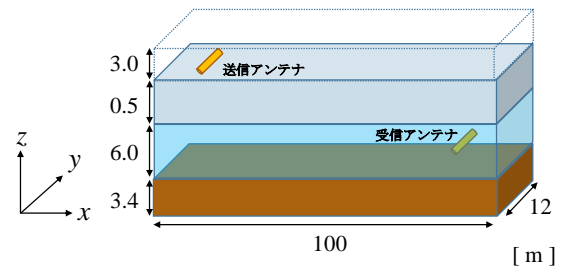
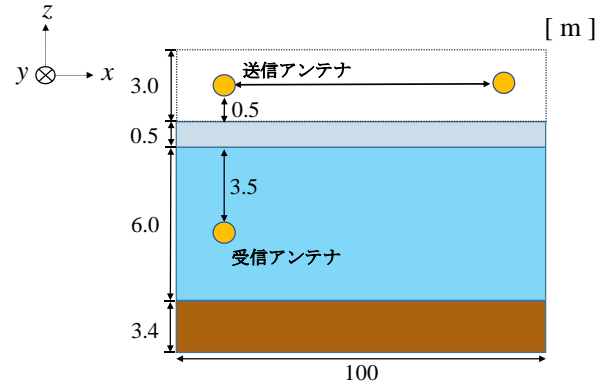


図 4 ある時点での海中における電界強度分布
氷層の上に配置した送信アンテナをダイポールアンテナに変更した場合の減衰量の解析も行った。送信アンテナをダイポールアンテナに変更した場合の解析モデルを図 5(a)に、その断面図を図 5(b)に示す。解析モデルの寸法、電気定数、送受信アンテナの配置や動作周波数、解析手法は図 2 に示すモデルの場合と全て同じであり、送信アンテナをそれぞれの地点に移動させた時の受信電力を算出した。

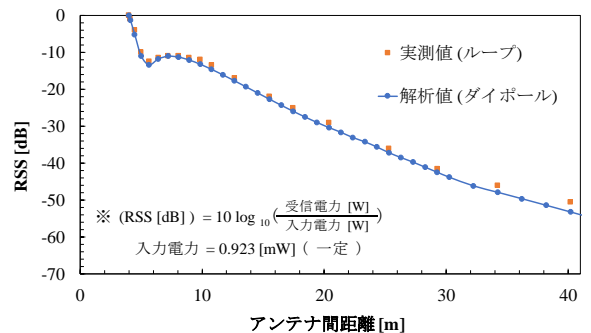


(a) 全体図

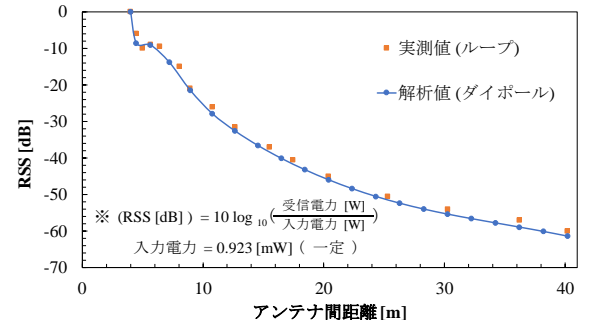


(b) 断面図

図 5 送受信共にダイポールの場合の解析モデル
送信アンテナをダイポールにした場合の解析値と実測値の比較のグラフを図 6 に示す。



(a) 10 kHz の解析値と実測値の比較



(b) 100 kHz の解析値と実測値の比較

図 6 送受信共にダイポールを使用した場合の解析
図 2 と同様、送信アンテナが受信アンテナの真上にある時の RSS をもとに正規化してある。ダイポールアンテナの場合も、図 3 の解析結果と同様、10 kHz、100 kHz とともに実測値と解析値がアンテナ間

距離 40 m 付近まで同様の減衰傾向を示している。一方、アンテナ間距離 5 m 付近の RSS の減衰が 10 kHz ではループによる解析と同様の減衰の傾向を示しているが、100 kHz に関しては若干減衰が緩やかになっている。これはダイポールアンテナの軸に垂直な方向への均一な指向性が RSS の減衰を抑えているものと考えられる。なお、10 kHz に関してはほとんどの傾向がなかったため、波長が長くなるにつれて、偏波による影響が少なくなると考える。

これらの結果により、アンテナ形状を変化させた場合、RSS に関してある程度偏波による影響を受けるが、おおむね減衰傾向が一致することが確認できた。ループアンテナの解析には非常に膨大な計算時間が必要となるが、ダイポールアンテナで代替することにより、計算時間を大幅に短縮できる。

6. まとめと今後の展望

今回、海表面が氷結した環境における電波を利用した海中測位、通信システムの基礎検討として、冬のサロマ湖における海中電波の伝搬試験を行い、試験結果と解析結果の比較を行なった。その結果、今回の試験の結果が解析結果と非常によく一致していることから、試験の結果の妥当性が示された。また、氷層の上から電波を送信した際の海中アンテナの RSS に関して、受信される偏波が変化する位置で減衰傾向が変化することを確認した。次に、解析モデルに関しては海面上の波のない環境であれば、電気定数の統一された簡易的なモデルによって海中の電波伝搬が十分解析可能であることが示された。送信アンテナを微小ループアンテナ、微小ダイポールアンテナのどちらでも RSS の減衰傾向はほぼ一致することが確認された。

今後の課題として、RSS を用いて海中アンテナの位置推定を行う場合、RSS とアンテナ間距離は 1:1 に対応していることが求められる。今回得られた海中における減衰傾向では、アンテナ間距離 5m 付近の偏波面が変化する点において、その要件が満たされないため、海氷面が凍結した環境での海中位置推定手法についても検討を行う予定である。また、実環境では、受信電力強度を使用するため、環境ノイズに埋もれない程度のダイナミックレンジを確保するための検討を行う予定である。

文 献

- [1] 吉田弘, “海中における電磁波伝搬とその応用”, 「宇宙・海洋・地中へ拡がるマイクロ波応用」ワークショップ, 大阪, Jan. 2016.
- [2] 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”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.113, no275, WBS2013-32, pp.k65-70, Oct. 2013.
- [3] (社)海洋産業研究会, “水中音響通信の高度化による海洋産業の発展と新事業創出等 効果に関する調査研究報告書”, (社)日本機械工業連合会・(社)海洋産業研究会, 東京, 2005.
- [4] R.K.Moore, “Radio communication in the sea”, IEEE Spectrum, vol.4, no.11, pp.4251, Nov. 1967.
- [5] M.Siegel and R.King, “electromagnetic propagation between antennas submerged in the ocean”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.21, no.4, pp.507-513, Jul. 1973.
- [6] A. I. Al-Shamma'a, A. Shaw and S. Saman, “Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through sea-water”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.52, no.4, pp.507-513, Jul.1973
- [7] H.Yoshida et al., “Study on land-to-underwater communication”, 2011 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia in Communications (WPMC), Brest, 2011
- [8] K.Shizuno, S.Yoshida, M.Tanomura and Y.Hama, “Long distance high efficient underwater wireless charging system using dielectric-assist antenna”, 2014 Oceans – St. John’s, NL, 2014
- [9] 加藤涼介, 高橋応明, 陳強, 石井望, 吉田弘, “電磁波を用いた 3 次元海中位置推定システムの検討”, 電子情報通信学会 通信講演論文集 1, B-2-1, pp.166, March 2019.
- [10] 陳強, 高橋応明, 石井望, “電波の海中応用へのアプローチ”, 信学技報, AP2016-92, pp.25-28, Sep. 2016.
- [11] 山内恭, “南極・北極に見る地球温暖化の現状と将来 —南極・北極は本当に温暖化しているのか?”, ヒマラヤ学誌, No.10, 212-220, 2009.
- [12] 白澤邦男, 藤芳義裕, 前川公彦, “サロマ湖の水理および海氷環境”, 月刊海洋号外海氷生態系, 号外 30, pp.50-61, Aug. 2002.
- [13] H.Sato, N.Fujii, Q.Chen, N.Ishii, M.Takahashi, R.Suga, K.Uesaka and H.Yoshida, “Dipole Antenna With Sheath-Cover for Seawater Use”, International Symposium on Antennas and Propagation 2017, Phuket, Oct 2017.
- [14] 吉田弘, 佐藤良, 加藤涼介, 高橋応明, 石井望, 陳強, “冬季サロマ湖における低周波電磁波の氷上から海中への伝播特性”, 信学技報, AMT2019-01, pp.1-6, Jun. 2019.