

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04239

研究課題名（和文）空洞や金属物体を含む任意な地中構造によるイメージング情報からの特徴抽出への挑戦

研究課題名（英文）Challenge to extract features by imaging information for arbitrary underground structure with cavities and metallic scatterer

研究代表者

尾崎 亮介（OZAKI, Ryosuke）

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：00453910

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、空洞や金属物体を含む任意な地中構造の数理モデル化を行い、過渡電磁界の散乱問題における定式化ならびに数値解析手法を開発し、開発した数値解析技術を用いることでイメージング情報から地中構造に埋没された金属散乱体や空洞形状による特徴抽出を行うことを目的とする。主な研究成果は、次の通りである。(1)地下空洞が存在する地中構造の数値解析手法を開発した、(2)空洞サイズを差分応答波形の振幅差から推定可能であることがわかった、(3)複数の金属物体が埋設された構造における数値解析手法を開発した、(4)複数の金属物体が地中構造内に存在する場合のイメージング解析による特徴検出法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、任意な空洞や金属物体がある地中構造によってモデル化を行い、過渡電磁界の散乱問題における定式化ならびに高精度に解析できる数値解析手法を開発した。本研究で開発した数値解析法を用いて得られた成果により、地中埋設物の空洞や金属物体の特徴検出において電磁界時間応答による差分波形の振幅差から空洞サイズを識別できることを示した。またイメージング解析から地中構造内の金属物体からの散乱回折現象を可視化することで特徴検出を行える知見を得られた点に学術的意義がある。これは地中レーダ探査の分解能向上に期待できる成果であり社会インフラ整備の観点から社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have been developed both formulation and numerically technique to analyze for scattering problem of transient electromagnetic fields. The purpose of this study is to obtain the extract features for cavities and metallic scatterer buried in underground structure by using our developed method such as imaging information analysis method. The main research results are as following items. (1) We developed a numerical analysis method for cavities buried in subsurface structure. (2) It is possible to estimate cavity size from amplitude difference for differential waveform of electric and magnetic fields. (3) We developed a numerical technique for many metallic objects buried in underground structure. (4) We established features detection method by using imaging analysis for many metallic objects buried in underground structure.

研究分野：光・波動情報工学

キーワード：時間応答解析 高速逆ラプラス変換法 反射信号の差分波形 イメージング解析 物理現象の解明 非破壊検査 波動信号の情報処理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

1964年東京オリンピック開催時頃の高度経済成長期に建造されたトンネルや道路などの公共インフラは、50年という歳月が経過し老朽化が社会的な問題となっており、国内外の都市部において路面陥没事故などが相次いで発生している。このことに加えて地球温暖化現象の悪化によって線状降水帯がある地域にだけ集中する事例が相次いで発生し、特定な地域だけに長雨やゲリラ豪雨が降り続くことによって、河川崩壊や盛り土崩落事故、山間部によっては土砂崩れなどの自然災害に繋がる危険性が極めて高まってきている。このような地下構造の劣化をいち早く発見し調査することは路面陥没の事故発生率を減少させることができるため、大変重要な研究課題となる。このような老朽化した建造物の正確な探査や調査には、広範囲にわたって専門家同行による検査や調査が行われるため極めて時間や労力がかかり、効率が悪いことが指摘されている。例えば、交通インフラの路線等の探査や遊具などの調査には、専門家による打音検査等も用いて実施されていることがその一例として知られている。またこれまでに我が国で生じた事故として、2012年に発生した笹子トンネル天井板崩落事故や2016年に発生した福岡県博多駅前道路陥没事故等もまだ私たちの記憶に残されている。天井板崩落事故では、コンクリート構造にひびわれや遊離石灰が生じた結果、経年劣化されたものが崩落事故として発生したものと考えられる。

また、一般的な地下構造中には、水道管、電気・通信ケーブルなどが複雑に埋設されているが、老朽化による影響で錆から発生する亀裂や埋設管の緩みにより地中内部の空洞が形成され、路面陥没事故に繋がる要因の一つである。一方で、紛争地域などでは、地下構造中に埋められた地雷などの脅威によって、安全かつ安心な暮らしが脅かされている。特に、紛争中に一度埋められた地雷は、不発弾対策として発見し対処や処理をしなければ半永久的に地中内部に埋められたままの状態となり、地雷の効力はそのまま維持されてしまうため、その地域に暮らす住民達が地雷の脅威におびえた状態のままになってしまう。このような背景の下、研究代表者は、イメージング解析を用いて空洞や金属物体などによる散乱体情報の特徴抽出を行うことを考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、空洞や金属物体が存在する任意な地中構造を数値モデル化によって表現し、様々な電磁波の散乱体をイメージング情報から特徴抽出することを目的とし、モデル化された電磁波散乱問題による時間応答解析を併用した過渡電磁波散乱解析を数値的に解くことで研究を進める。そこで、本研究を進めるにあたり空洞や金属物体が存在する様々な散乱体を表現するためには、地中構造を正確に表現すること、つまり一般的に地中構造の電気定数である誘電率や透磁率が周波数の関数となる分散性媒質を表現しなくてはならず、その媒質中に空洞や金属物体が存在する任意な地中構造を表現することで本研究ははじめて実行可能である。これまでに研究代表者は、地中構造の誘電率分布を周波数の関数として表現できる数値的手法を備えており、本研究ではその数値的手法を用いて地中構造をモデル化し、過渡電磁波散乱問題を解析するため、時間応答解析が可能な高速逆ラプラス変換法をベースとして様々な数値的な手法を併用する事で研究を進めた。本研究では、主に次の課題について取り組むことで目的の達成を目指す。

- (1) 地中構造に任意な空洞形状が存在する場合の数値解析手法の開発
- (2) 地中構造内に任意な空洞形状のサイズや特徴検出を目的とした数値実験
- (3) 複数の金属物体が地中構造内に存在する場合の数値解析手法の開発と確立
- (4) 複数の金属物体が地中構造内に存在する場合のイメージング解析による特徴検出の検討

## 3. 研究の方法

本研究では、次の課題に対して以下の方法で研究を遂行した。

(1) 地中構造に任意な空洞形状が存在する場合の数値解析手法の開発  
任意空洞を含む地中構造による数値解析手法を開発するため、地中構造に傾斜した空洞と地中が交互に配列された山間部のような傾斜構造をモデル化し、数値解析手法の開発を行った。研究代表者が備えている地中構造の誘電率分布を周波数の関数として表現できる電氣的媒質定数を用いて、高速逆ラプラス変換(FILT; Fast Inversion of Laplace Transform)法をベースとして、地中構造に傾斜した空洞と媒質が交互に配列されたことを表現できる数値解析手法を実装することで実現した。実装した解析手法を用いて、様々な傾斜幅や厚さなどを変化することにより開発した数値解析手法の有効性を検証した。

(2) 地中構造内に任意な空洞形状のサイズや特徴検出を目的とした数値シミュレーション  
上記(1)で行った任意な空洞形状が存在する場合に適用可能で、開発した数値解析手法を用いて地中構造内に傾斜した空洞形状を考慮した場合の空洞サイズもしくは空洞深さなどの特徴検出を目的として、時間応答シミュレーションにより検討を行った。まずは、空洞深さがどの程度解析できるかを検証するため、空洞深さ、空洞幅、空洞形状を変化した場合に対して開発したコードによりシミュレーションによって研究を進めた。なお空洞検出を目的とした数値シミュレ-

シオンを行う途中開発した数値解析手法は精度良く解析できる事を検証済みであったが、ある空洞形状に対して数値的分散の影響を多く含むこと、ある時刻の時間応答波形に対して数値誤差を多く含むことが検証途中でわかった。そのため研究計画の一部を変更し本解析手法に実装するため、別解析手法の開発も同時に着手し研究を進めた。

### (3)複数の金属物体が地中構造内に存在する数値解析手法の開発と確立

地中構造に複数の金属物体が存在する数値解析手法を開発するためには、まずは電磁界の支配方程式であるマクスウェル方程式を出発点として、その方程式の中に複数の金属物体がある情報を組み込む事で、時間応答解析可能な定式化を開発する必要がある。しかしながら、通常の定式化では地中構造の深さ方向に金属物体がある場合、電磁界の未知変数に対する連立方程式の次元数が増大する難点があった。これを解決するためにマクスウェル方程式の境界条件式に点整合(PM; Point Matching)を行列形式として組み込んだ結果として、地中媒質いずれか1つの電磁界による未定係数に対する展開項数となるような定式化を実現した。実現した定式化を複数の金属物体が地中構造内に存在する数値解析コードに実装することで新たな数値解析手法の開発を可能とした。

### (4)複数の金属物体が地中構造内に存在する場合のイメージング解析による特徴検出の検討

複数の金属物体が地中構造内に存在する場合に対するイメージング解析手法による特徴検出を検討した。まずは、イメージング解析を行うため、時刻一定の空間変化に対する電磁界分布を解析する必要があるため、地中媒質内部における時間応答波形を検証した。併せて上記(3)で開発した数値解析手法に内部応答の解析手法を実装することで、地中媒質内部の反射、透過、散乱回折現象全ての物理現象解明について試みた。

## 4. 研究成果

### (1)地中構造に任意な空洞形状が存在する場合の数値解析手法の開発

任意空洞を含む地中構造による数値解析手法を開発するため、地中構造に傾斜した空洞と地中が交互に配列された山間部のような傾斜構造をモデル化し、数値解析手法を開発した。開発した数値解析手法は任意な傾斜された空洞形状に対応することが可能な計算手法である。図1に従来法と本解析した手法を比較した結果を示す。図1より、両者の結果は良く一致していることから開発した数値解析手法の正当性を検証した。

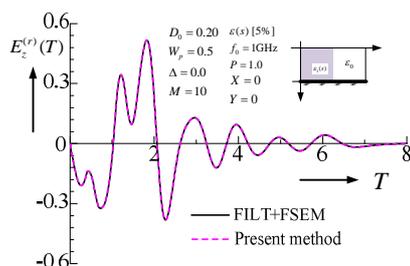


図1 開発した解析手法の比較検証

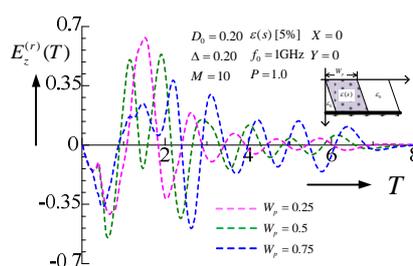


図2 空洞幅変化に対する時間応答波形

### (2)地中構造内に任意な空洞形状のサイズや特徴検出を目的とした数値シミュレーション

上記(1)で開発した数値解析手法を用いて任意な傾斜された空洞形状を検出するための検証を行った。図2は空洞幅を変化した場合の時間応答波形を示した。図2の結果より、空洞幅に伴った変化に付随して時間応答波形も同様に変化している様子が確認できる。これにより、開発した数値解析手法が効果的に動作しているため、有効性を確認した。図2の結果に基づいて空洞形状のサイズや特徴検出を目的とした数値シミュレーションを行った。結果として、空洞形状のサイズを変化した時間応答波形(電磁界の情報を用いて作成した差分応答波形)により、電磁界の差分を用いた振幅情報から空洞形状の特徴を検出できる見通しを得られた。またある空洞形状に対して数値分散の影響を多く含むことにより、本解析手法とは別の数値解析手法開発(研究計画の一部を変更し同時進行にて進めた電磁界過渡解析手法の開発)に着手した結果、定式化も含め開発手法の有効性や正当性の検証等に多くの時間を要してしましたが、基本的な地中媒質の多層化した構造モデルにおいて解析手法の開発に成功した。

### (3)複数の金属物体が地中構造内に存在する数値解析手法の開発と確立

電磁界の支配方程式であるマクスウェル方程式を出発点として、方程式中に複数の金属物体が配置した情報を組み込む事により、時間応答解析を少ない計算資源(電磁界の展開項数のみ)で解くことができるような数値解析手法の開発に成功した。加えて、開発した手法は、従来法(電磁界の未知係数による行列方程式)に比較すると、高精度に解析することが可能な手法であることを明らかにした。また解くべき連立方程式の次元数(行列数=未知係数の数)が少ないと、数値的な誤差が増大することも明らかにした。複数の金属物体が地中構造内にどんな配置になっても高精度に解析できることを示した。

(4)複数の金属物体が地中構造内に存在する場合のイメージング解析による特徴検出の検討  
 2つの金属物体が地中構造に存在する場合に対して、イメージング解析法によって特徴検出の有無について検討した結果として媒質内部の時間応答波形とイメージング解析結果を図3,4に示した。図3の地中媒質構造内の時間応答波形より、各成分に伴って電磁波がそれぞれの方向に減衰しながら伝搬している様子が確認できる。これらの時間応答波形に基づいて解析した電磁界分布の一例を示した。図4のイメージング分布から金属物体が2つに分離している様子が確認できる。これらの結果から、イメージング解析によって金属物体の特徴検出が行える見通しを得ることができた。

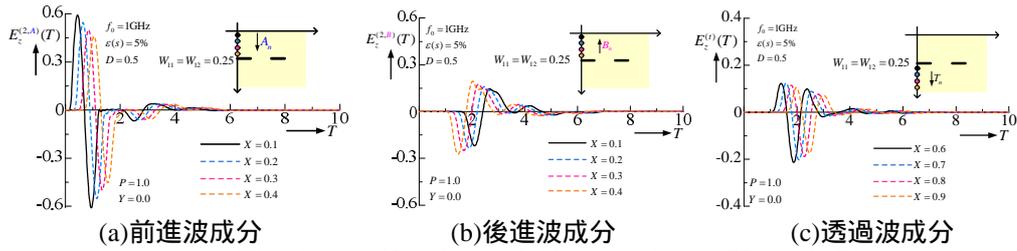


図3 地中媒質構造内における各成分の時間応答波形

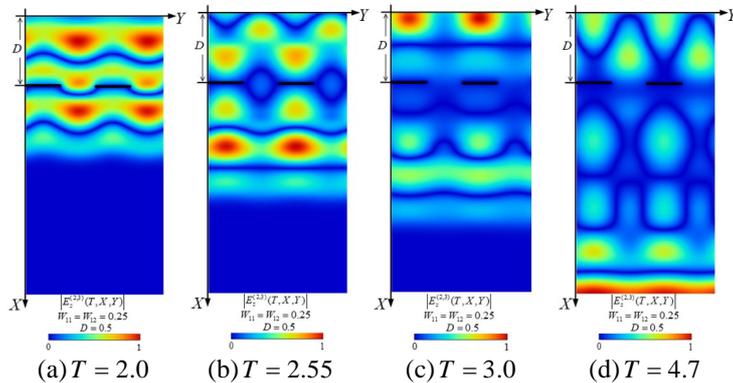


図4 地中媒質内に複数の金属物体を配列したイメージング解析の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 尾崎亮介, 王淳, 山崎恆樹	4. 巻 122
2. 論文標題 交互にストリップ導体を配置した分散性媒質のパルス応答解析 ~ 高次入射パルスによる検討 ~	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 19-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 尾崎亮介, 山崎恆樹	4. 巻 122
2. 論文標題 分散性媒質による電磁波の過渡散乱解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 79-84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 王淳, 尾崎亮介, 山崎恆樹	4. 巻 122
2. 論文標題 ストリップ導体配列による分散性媒質のパルス応答解析 ~ 電界と磁界による比較検討 ~	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Ozaki and T. Yamasaki	4. 巻 4
2. 論文標題 Transient Response Analysis of a Dispersive Periodic Grating After Deformation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 URSI Radio Science Letter	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.46620/22-0015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R. Ozaki and T. Yamasaki	4. 巻 E105
2. 論文標題 Numerical Analysis of Pulse Response for Slanted Grating Structure with an Air Regions in Dispersion Media by TE case	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transaction on Electronics	6. 最初と最後の頁 154-158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2021RES0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 尾崎亮介, 賀川智弘, 山崎恆樹	4. 巻 121
2. 論文標題 2段のストリップ導体を有する分散性媒質のパルス応答解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 25-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 尾崎亮介, 山崎恆樹	4. 巻 121
2. 論文標題 傾斜型と方形空洞を有する分散性媒質のパルス応答解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 98-103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 尾崎亮介, 山崎恆樹	4. 巻 121
2. 論文標題 台形型空洞を有する分散性媒質のパルス応答解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 73-78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 尾崎亮介, 王淳, 山崎恆樹	4. 巻 123
2. 論文標題 平面格子構造による分散性媒質内部波形に関する基礎検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 4-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 板谷健成, 尾崎亮介, 山崎恆樹	4. 巻 123
2. 論文標題 多層分散性媒質の時間応答解析に関する基礎研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 187-192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 尾崎亮介, 山崎恆樹	4. 巻 123
2. 論文標題 異なる深さにストリップ導体を持つ分散性媒質の電界分布解析-内部応答波形を含む導体長の影響-	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 75-80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 王淳, 尾崎亮介, 山崎恆樹	4. 巻 123
2. 論文標題 TE波によるストリップ格子構造に対する分散性媒質内部の磁界分布	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 45-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Itaya, R.Ozaki, and T. Yamasaki	4. 巻 E107-C
2. 論文標題 Fundamental Investigation of the Transient Analysis Technique for Multilayered Dispersive Media by FILT Combined with Continued Fraction Expanded Method	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Transaction on Electronics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/10.1587/transele.2023ESS0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Ozaki, C. Wang, and T. Yamasaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Analysis of Inside Response and Electric Field Distribution by Plane Grating in Dispersive Medium	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 URSI Radio Science Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 R. Ozaki and T. Yamasaki
2. 発表標題 Transient Response of Slanted Gratings in Dispersion Medium
3. 学会等名 URSI AT-AP-RASC 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 C.Wang, R. Ozaki, and T. Yamasaki
2. 発表標題 Analysis of Reflection Response Consists of Periodically Conducting Strips and Lossless Dielectric Layer in Dispersion Medium
3. 学会等名 URSI Japan Radio Science Meetings (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 王淳, 尾崎亮介, 山崎恆樹
2. 発表標題 分散性媒質に挟まれた無損失誘電体層からのパルス応答解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎亮介, 山崎恆樹
2. 発表標題 傾斜型空洞で構成された周期的分散性媒質の過渡応答解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎亮介, 王淳, 山崎恆樹
2. 発表標題 交互にストリップ導体を有する分散性媒質によるパルス応答解析 - 電界と磁界成分による応答波形の影響 -
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 板谷健成, 尾崎亮介, 山崎恆樹
2. 発表標題 層状媒質による電磁波の反射特性解析
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 干川雄太, 尾崎亮介, 山崎恆樹
2. 発表標題 ストリップ導体配列間に誘電体層を有する平面格子による電磁波の散乱
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾崎亮介, 山崎恆樹
2. 発表標題 交互にストリップ導体を配置した分散性媒質のパルス応答解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎亮介, 山崎恆樹
2. 発表標題 分散性媒質中に対称な台形型空洞を有するパルス応答解析
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Ozaki and T. Yamasaki
2. 発表標題 Transient Analysis of Dispersion Medium with Conducting Strips buried in Different Depth
3. 学会等名 The Applied Computational Electromagnetics Society(ACES) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C. Wang, R. Ozaki, and T. Yamasaki
2. 発表標題 Pulse Reflection Response for Dispersive Medium with Lossless Dielectric Layer and Perfectly Conducting Strips
3. 学会等名 URSI GASS 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Ozaki, C. Wang, and T. Yamasaki
2. 発表標題 Consideration of Inside Response Waveforms by Plane Grating in Dispersion Medium
3. 学会等名 URSI GASS 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 王淳, 尾崎亮介, 山崎恆樹
2. 発表標題 ストリップ格子を配列した分散性媒質の内部応答解析と電界分布
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 千川雄太, 尾崎亮介, 山崎恆樹
2. 発表標題 金属ストリップを配置した不均質誘電体格子による電界分布の解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 板谷健成, 尾崎亮介, 山崎恆樹
2. 発表標題 連分数展開法を用いた多層分散性媒質の過渡応答解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松岡恵大, 尾崎亮介, 山崎恆樹
2. 発表標題 コンクリート媒質の複素誘電率分布解析
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関