

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：13301  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21H01338  
研究課題名（和文）高周波電磁波の3次元空間分布の高速計測に関する研究

研究課題名（英文）Study of 3d measurement of radio wave distribution

## 研究代表者

八木谷 聡 (Yagitani, Satoshi)

金沢大学・電子情報通信学系・教授

研究者番号：30251937

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：電子機器等から放射される高周波（GHz帯）電磁波の3次元空間分布を立体的に計測・評価する手法を開発した。複数の周波数選択板（FSS）を組み合わせたメタマテリアル構造を利用することで、入射した電磁波を透過させながら、電界または磁界の2次元分布を計測する平面型センサを考案した。複数のセンサを空間的に重ねて配列することで、電磁波の3次元空間分布を同時に計測するシステムを試作し、その有効性を評価した。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

今回開発した電磁界3次元空間分布計測センサを用いると、波源の近傍から周辺への電磁波の放射・伝搬を包括的に計測・評価できるようになり、環境電磁工学やアンテナ・伝搬分野における学術的意義は大きい。またこれは、これからのSociety 5.0社会において無線通信機器が急増する中で、電磁干渉の原因となる電磁波ノイズ発生源の探査や、ノイズの発生・伝搬メカニズムを解明するための実測評価にきわめて有用である。

研究成果の概要（英文）：A technique has been developed to measure and evaluate the three-dimensional spatial distribution of radio frequency (GHz band) electromagnetic waves emitted by electronic devices. Using a metamaterial structure consisting of frequency-selective surfaces (FSS), we designed a planar sensor that measures the two-dimensional distribution of an electric or magnetic field while transmitting the incoming electromagnetic waves. A stack of multiple sensors was used to simultaneously measure the three-dimensional spatial distribution of electromagnetic waves, which can be quite effective for measuring the generation and propagation mechanisms of electromagnetic noise emissions.

研究分野：電磁波工学

キーワード：高周波電磁波 3次元空間分布 メタマテリアル センサアレイ 電磁環境計測

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

ICT 社会の発展により身の回りに電子機器が急増し、機器から放射された電磁波ノイズが他機器に干渉して誤動作の原因となりうる電磁環境問題への対策が重要となっている。それらに対処するには機器における電磁波ノイズの発生源及び伝搬経路を特定し、効果的なシールド等の対策を施す必要がある。従来、誘電体基板上に導体電極を配列した 2 次元メタサーフェス型電波吸収体を電磁界センサアレイとして利用し、電磁波の 2 次元分布を高速に計測する手法が開発され、入射電磁波における電界ベクトルや磁界ベクトルの 2 次元分布が計測されてきた。しかし計測範囲は 2 次元平面にとどまっておらず、機器から発生した電磁波が立体的 (3 次的) に伝搬していく様子を把握することは困難であった。

### 2. 研究の目的

電子機器等から放射される高周波 (GHz 帯) 電磁波の 3 次元空間分布を立体的に計測・評価する手法を開発する。3 次元メタマテリアル (導体格子の周期構造) を電界及び磁界の 3 次元分布を検出するためのセンサアレイとして利用し、波源周辺における電磁波の空間変化を高速に一括計測することを目的とする。それにより、波源の近傍から周辺への電磁波の放射・伝搬を包括的に評価する手法を確立する。これは従来にない電磁環境計測手法であり、電子機器における電磁波ノイズ発生源の探査や、ノイズが他機器へどのように伝搬し影響を与えるか等の実測評価にきわめて有用となる。

### 3. 研究の方法

(1) 従来は、2 次元メタマテリアル (メタサーフェス) で電波吸収体を構成し、電磁界センサアレイとして利用し電磁界 2 次元分布を計測していたが、入射波を吸収するため電磁環境を乱していた。それに対しここでは、入射波を透過させながら同時に電磁界 2 次元分布を検出するメタサーフェス電磁界センサの検討を行う。電磁界シミュレーションによりその構造を設計し、特性を解析する。それに基づき電磁波透過型の電磁界センサを試作し、実測により性能を評価する。

(2) 複数の電磁波透過型電磁界センサを重ねて配列することで、等価的に電磁界の 3 次元分布計測センサとしてはたらかせ、入射電磁波の 3 次元空間分布を同時に計測することを試みる。電磁界シミュレーションによりその構造を設計し、特性を解析する。それに基づき電磁界 3 次元計測システムを構築し、実測により性能を評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 電磁波透過型電界分布検出手法の検討

電磁波の 3 次元空間分布を計測するためには、センサとして用いる 2 次元メタサーフェスができるだけ入射波を乱さない (反射せずにそのまま透過させる) ことが必要である。そこで入射波を透過させる周波数選択板 (Frequency Selective Surface: FSS) の構造に着目し、複数の FSS を組み合わせることで、入射波をほぼ透過させながら同時に 2 次元平面上の電界分布を計測できる「電磁波透過型電界センサ」の構造を理論計算 (引用文献 ) 及び電磁界シミュレーションにより検討した (引用文献 )。その結果、異なる形状を持つループスロット型 FSS を誘電体基板 (xy 面に配置) の表面と裏面に配置し、共振周波数を調整することで、特定の周波数において入射波をほぼ透過させながら FSS に装荷した抵抗 (x 方向に  $R_x$ 、y 方向に  $R_y$ ) の電圧により電界 x 成分及び y 成分の 2 次元分布を計測できるセンサ構造 (図 1) を考案した (引用文献 )。電磁界シミュレーションにより構造を最適化した結果、例えば図 2 のように周波数 1.97 GHz において入射波をほぼ透過 (-1dB 以下の損失) させながら抵抗電圧により電界を計測できる性能が得られた (この例では入射電界は y 成分のみを持ち、 $R_y$  に計測可能な電圧が生じている)。

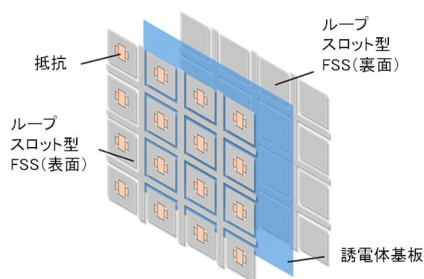


図 1: 電磁波透過型電界センサ

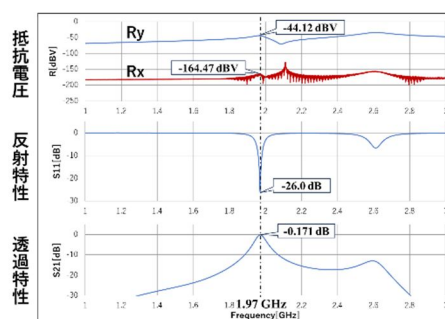


図 2: 抵抗電圧・反射・透過特性

## (2) 電磁波透過型磁界分布検出手法の検討

一方の「電磁波透過型磁界センサ」については、図3のように、表面に3軸シールドループ構造(xyzの3方向)裏面にグリッド型FSS構造を持つメタサーフェスを用い、電磁界シミュレーションにより設計を行った。図4のように、特定の周波数範囲(1~1.3GHz)で入射波をほぼ透過(-2dB以下の損失)させながら各ループ内に装荷した抵抗の電圧により磁界xyz成分の2次元分布を計測できることが示された(この例では入射磁界はx成分のみを持ち、Rxに計測可能な電圧が生じている)(引用文献)

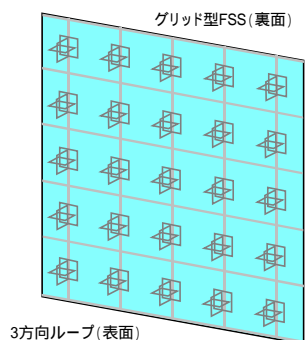


図3: 電磁波透過型磁界センサ

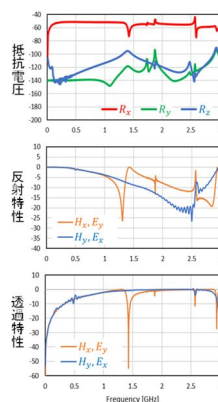


図4: 抵抗電圧・反射・透過特性

## (3) センサの組み合わせによる電磁界3次元分布計測手法の検討

電界計測型、磁界計測型ともにそれぞれ複数枚のセンサ(30cm×30cm)を試作し、電波暗室にてダイポールアンテナからGHz帯の電磁波(球面波)を照射して、センサ単体の2次元電磁界計測性能を評価するとともに、複数のセンサを空間的に前後に重ねて配列することで入射波の3次元空間分布計測を試みた。図5は一例として、x向きダイポールアンテナからz方向に10cmの距離にセンサ#1、そこから6.4cmの距離にセンサ#2、さらに6.4cmの距離にセンサ#3を置くことで、アンテナから放射される磁界(1.25GHz)の3次元分布を計測した結果である。センサ間の結合などにより共振周波数や透過電磁波分布の乱れが生じるものの、測定値はおおよそ理論値と似た分布が得られており、本手法の有効性が示された(引用文献)。今後は計測制度の向上が必要であると考えられる。

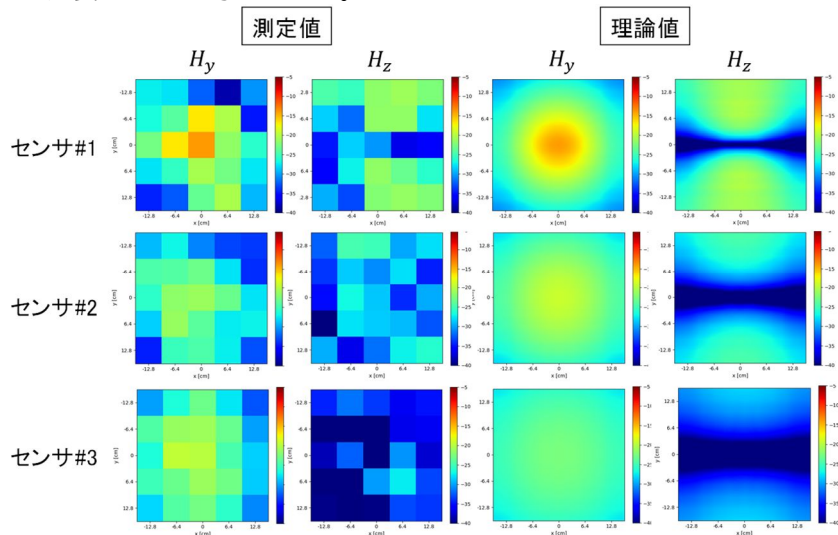


図5: 磁界3次元分布計測結果

### <引用文献>

- T. Nguyen Van et al., "Plane-wave spectrum analysis of spherical wave absorption and reflection by metasurface absorber," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E106-B, No. 11, pp. 1182-1191, 2023.
- S. Yagitani et al., "Design of a non-invasive FSS sensor for monitoring radio waves," *Proc. 3rd URSI AT-AP-RASC*, 2022.
- S. Yagitani et al., "Design and analysis of electromagnetic transparent sensors for monitoring radio wave distribution," *Proc. 4th URSI AT-AP-RASC*, 2024.
- 伊藤 他, "電磁波透過基板を用いた磁界計測センサの基礎検討," *電子情報通信学会技術報告*, vol.123, no.346, EMCJ2023-103, pp.87-92, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 NGUYEN VAN Tu, YAGITANI Satoshi, SHIMIZU Kensuke, NISHI Shinjiro, OZAKI Mitsunori, IMACHI Tomohiko	4. 巻 E106.B
2. 論文標題 Plane-Wave Spectrum Analysis of Spherical Wave Absorption and Reflection by Metasurface Absorber	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 1182 ~ 1191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2023EBP3035	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 Taiga Miyai, Satoshi Yagitani, Shota Nakamura, Shinkuro Fujino, Shin-ichi Tanimoto, Akihiro Tatsuta, Tomohiko Imachi, and Mitsunori Ozaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Equivalent Circuit Analysis of Stacked Metasurface Absorber for Broadband Measurement of Field Distributions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the XXXV URSI General Assembly and Scientific Symposium	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 杉野将太郎, 八木谷聡, 清水大樹, 藤野新九郎, 谷本真一, 竜田明浩, 井町智彦, 尾崎光紀	4. 巻 123
2. 論文標題 スタック型メタサーフェス電波吸収体の等価回路による特性評価	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術報告	6. 最初と最後の頁 81-86
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 伊藤直也, 八木谷聡, 尾崎光紀, 井町智彦	4. 巻 123
2. 論文標題 電磁波透過基板を用いた磁界計測センサの基礎検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術報告	6. 最初と最後の頁 87-92
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 Satoshi Yagitani, Yuki Furui, Naoya Ito, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi	4. 巻 -
2. 論文標題 Design and analysis of electromagnetic transparent sensors for monitoring radio wave distribution	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the 4th URSI Atlantic Radio Science Conference	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 Satoshi Yagitani, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi	4. 巻 -
2. 論文標題 Design of a non-invasive FSS sensor for monitoring radio waves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 3rd URSI Atlantic and Asia-Pacific Radio Science Conference	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 宮井 大雅, 八木谷 聡, 中村 匠汰, 藤野 新九郎, 谷本 真一, 竜田 明浩, 井町 智彦, 尾崎 光紀	4. 巻 EMCJ-2022
2. 論文標題 メタサーフェス電波吸収体の広帯域化に関する一検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術報告	6. 最初と最後の頁 21-26
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 Satoshi Yagitani, Kensuke Shimizu, Shinjiro Nishi, Atsuya Sakano, Hirofumi Segawa, Takuya Tsubota, Tomohiko Imachi, and Mitsunori Ozaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Measurement of Electric Field Vector Distribution with a Metasurface Structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the XXXIV URSI General Assembly and Scientific Symposium	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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計9件(うち招待講演 2件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Taiga Miyai, Satoshi Yagitani, Shota Nakamura, Shinkuro Fujino, Shin-ichi Tanimoto, Akihiro Tatsuta, Tomohiko Imachi, and Mitsunori Ozaki
2. 発表標題 Equivalent Circuit Analysis of Stacked Metasurface Absorber for Broadband Measurement of Field Distributions
3. 学会等名 XXXV URSI General Assembly and Scientific Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉野将太郎, 八木谷聡, 清水大樹, 藤野新九郎, 谷本真一, 竜田明浩, 井町智彦, 尾崎光紀
2. 発表標題 スタック型メタサーフェス電波吸収体の等価回路による特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会環境電磁工学研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤直也, 八木谷聡, 尾崎光紀, 井町智彦
2. 発表標題 電磁波透過基板を用いた磁界計測センサの基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会環境電磁工学研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Satoshi Yagitani, Yuki Furui, Naoya Ito, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi
2. 発表標題 Design and analysis of electromagnetic transparent sensors for monitoring radio wave distribution
3. 学会等名 4th URSI Atlantic Radio Science Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Satoshi Yagitani, Mitsunori Ozaki, and Tomohiko Imachi
2. 発表標題 Design of a non-invasive FSS sensor for monitoring radio waves
3. 学会等名 3rd URSI Atlantic and Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AT-AP-RASC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮井 大雅, 八木谷 聡, 中村 匠汰, 藤野 新九郎, 谷本 真一, 竜田 明浩, 井町 智彦, 尾崎 光紀
2. 発表標題 メタサーフェス電波吸収体の広帯域化に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会環境電磁工学研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Patimapon Soynoi, Satoshi Yagitani, Tomohiko Imachi, and Mitsunori Ozaki
2. 発表標題 Performance Evaluation of Circular Patch Metasurface Absorber
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Yagitani, Kensuke Shimizu, Shinjiro Nishi, Atsuya Sakano, Hirofumi Segawa, Takuya Tsubota, Tomohiko Imachi, and Mitsunori Ozaki
2. 発表標題 Measurement of Electric Field Vector Distribution with a Metasurface Structure
3. 学会等名 XXXIV URSI General Assembly and Scientific Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八木谷 聡
2. 発表標題 視えない電磁界を可視化する
3. 学会等名 第33回電気・電子機器のEMC ワークショップ 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

・金沢大学研究者情報 (八木谷 聡) <a href="http://ridb.kanazawa-u.ac.jp/public/detail.php?id=2281">http://ridb.kanazawa-u.ac.jp/public/detail.php?id=2281</a>
---

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
研究分担者	尾崎 光紀  (Ozaki Mitsunori)  (70422649)	金沢大学・電子情報通信学系・准教授   (13301)	
研究分担者	井町 智彦  (Imachi Tomohiko)  (60372489)	金沢大学・先端宇宙理工学研究センター・准教授   (13301)	

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
---------	---------