

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289118

研究課題名(和文) 高周波電波パルスの空間分布計測及び波源探査に関する研究

研究課題名(英文) Field distribution measurement and source localization of a radio-frequency pulse

研究代表者

八木 聡 (YAGITANI, Satoshi)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：30251937

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：メタマテリアル構造を持つ電波吸収板に入射した高周波電波(平面波、球面波)の電界振幅・位相の2次元分布を、表面に配列した抵抗により精度よく計測できることを確認した。2.4 GHz帯の電波吸収板(30 cm×30 cm)を設計・試作し、複数の計測点(8×8)を設け入射電波振幅・位相の2次元分布を高速に計測・可視化するシステムを構築した。また、計測した分布にアレイ信号処理を適用することで、波源位置の特定を行い、その性能を評価した。

研究成果の概要(英文)：A thin metamaterial absorber was used to measure two-dimensional (2-d) field distributions of radio-frequency (RF) waves incident on the absorber surface. The amplitude and phase distributions of the electric field components of a plane wave as well as of a spherical wave were shown to be detectable by using an array of lumped resistors on the surface. A metamaterial absorber of 30 cm by 30 cm was designed and fabricated to absorb a 2.4-GHz wave, where an 8x8 matrix of detectors were installed to measure the 2-d power and phase distributions of the incident wave field in real time. An array signal processing technique was applied to the measured field distributions, for estimating the source locations of the incident RF waves.

研究分野：電波情報工学

キーワード：電磁環境計測 高周波電波パルス 空間分布計測 可視化 波源探査

### 1. 研究開始当初の背景

近年の電子機器の高周波化・デジタル化に伴い、不規則かつ瞬間的に放射される電波ノイズパルスが、例えば工場や病院内で他機器に干渉し誤動作の原因となることが懸念されている。それに対処するには機器における電波ノイズパルスの発生源を特定し、電波シールド等を施すことによりその影響を取り除くことが必要である。電波ノイズが機器のどこから放射され、どのように伝搬して他機器に影響を与えるかは、機器稼働状態（動作モード、他機器との接続状況等）及び周辺環境（設置形態、人体の存在による電波の散乱等）に依存して時々刻々と複雑に変動する。そのため、実際に機器が稼働している現場で電波ノイズパルスの空間分布を定量的に計測し、逆問題としてその放射源の位置をリアルタイムで特定することがきわめて重要になる。従来、定常的な電波源に対しては、電磁界センサを空間的に走査する装置（アンテナポジショナ等）で電波の空間分布が計測され、それに基づいて波源の推定が行われてきた。しかし機械的な走査に時間がかかり、例えば1秒以下で変化するような電波パルスの空間分布を高速に計測して波源を特定することは困難であった。

一方、研究代表者はこれまで、マッシュルーム型メタ材料構造を持つ薄型電波吸収板の表面に入射して吸収された電波強度（電力）の2次元分布を高速に計測する手法を開発していた。もし電波強度分布と同時に位相分布を高速に計測できれば、逆問題を適用することで電波の到来方向が推定でき、遠方電波源の方向や近傍電波源の位置を特定できる。それにより、従来困難であった電波パルスの発生源をその場で特定する手法を確立できると考えられた。

### 2. 研究の目的

本研究では、メタ材料電波吸収板に、従来の入射電波の強度分布に加え、新たに位相分布の高速計測機能を付加し、2次元平面上での電波の強度・位相分布を同時に計測する。得られた電波の空間分布に逆問題解析手法を適用し、電波源の方向や位置の推定を試みる。それにより、不規則かつ瞬間的に放射される高周波（GHz帯）電波パルスの空間分布を高速に計測し、その放射源（電波源）の位置をその場ですぐに特定する手法を開発することを目的とする。これは従来にない電磁環境計測手法であり、電子回路基板からの電波ノイズパルス発生・伝搬の実測評価や、工場や病院での機器誤動作の原因となる電磁ノイズパルス発生源の探査等にきわめて有用となる。

### 3. 研究の方法

(1) 図1にメタ材料電波吸収板の構造を示す。この吸収板は誘電体薄板の表面に波長より十分小さいサイズの方型電極（ビアで

裏面グラウンドと接続）を配列したマッシュルーム型メタ材料構造を持ち、隣り合う方型電極間に抵抗  $R$  を接続したものである。この構造の表面インピーダンスは等価的にLCR並列回路となり、LC並列インピーダンスが無限大となる共振周波数では入射電波に対して人工磁気導体として働く。このとき  $R$  の値を入射電波のインピーダンスと整合させると、電波吸収板に入射した電波の電力が表面に配置した抵抗  $R$  で吸収される。

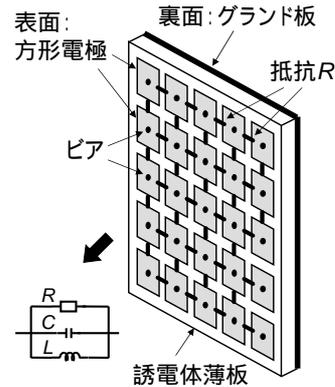


図1: メタ材料電波吸収板

このとき入射電波は反射（散乱）されないため、各抵抗の両端に発生する電圧の振幅・位相は板面上における電波（電界）の強度・位相にそのまま比例し（すなわち電波吸収板は理想的なアレイアンテナとして働き）、各抵抗の電圧振幅・位相を計測することで入射電波の強度・位相分布を計測できるはずである。この観点に基づき、遠方電波源から到来する平面波（垂直及び斜め入射）及び近傍電波源から放射された球面波（放射界）が電波吸収板に如何に吸収されるか、また表面の抵抗に生じる電圧の振幅・位相が入射電波の強度・位相を如何に反映するかを、理論及び電磁界シミュレーションにより解析・検証する。

(2) 数GHzの電波を吸収できるメタ材料電波吸収板（30 cm×30 cm）を設計・試作する。電波暗室にて試作電波吸収板に平面波を照射して反射特性を実測し、電波吸収性能を評価する。試作電波吸収板の裏面には8×8配列（64点）程度の計測点を設け、スペクトルアナライザや波形計測回路により各計測点における高周波パルス信号の振幅・位相の計測を行う。計測データをPCに転送し、入射電波の振幅・位相分布として画面上にリアルタイムで表示・可視化するシステムを構築する。標準アンテナ等からの電波を計測し、その計測精度を評価する。

(3) 電波吸収板面上で計測された入射電波の強度・位相分布に基づき、波源を特定する手法を検討する。MUSIC法等の高分解能到来方向推定法を適用することで、遠方電波源からの平面波の到来方向、並びに近傍電波源からの球面波の波源位置の推定を試みる。シミ

シミュレーションにより推定精度を確認し、併せて(2)で構築したシステムによる実測値を用いて複数波源の方向や位置を推定し、その性能を評価する。

#### 4. 研究成果

(1) 理論解析及び電磁界シミュレーションにより、メタマテリアル電波吸収板による入射電波の吸収・計測性能を評価した。

まず平面波に対して、各抵抗の電圧振幅・位相を計測することで入射電波の強度・位相分布を求められるかどうかを検証した。垂直入射の平面波に対しては、そのインピーダンス(377 Ω)と表面抵抗が整合し完全に吸収される場合、各抵抗の両端に発生する電圧の振幅・位相は板面上に入射した電波の電界成分の強度・位相にそのまま比例する(比例係数はセル周期)ことを理論的に確認した。一方、斜入射平面波に対しては、入射波のインピーダンスが入射角に応じて変化するため、特に入射角が大きくなると反射が大きくなる。その場合でも、平面波の反射率・吸収率により決まる合成電界成分に比例する電圧が抵抗に生じることを確認した。

次に、球面波等の空間的不均一性を持つ電波が吸収板に入射したときの吸収・計測性能を評価した。平面波スペクトル法を用い、フーリエ変換を用いて球面波を平面波の合成として表すことで、平面波(斜入射)の反射率・吸収率に基づいて球面波の反射・吸収を計算した。それにより、球面波に対しても各抵抗に生じる電圧はそれぞれの位置に入射した電界接線成分に比例することを示した。

以上により、吸収体表面に配列された抵抗が2次元センサアレイとして働き、各抵抗の電圧振幅・位相を計測することで入射電界の振幅(電力)・位相分布を求められることを確認した。

一方、有限サイズの吸収板を用いると端部における電波の反射・散乱により入射電波の分布が影響を受けることが分かったが、端部における抵抗値や電極形状を調整することで、反射・散乱を抑制した。

(2) 前節で述べた原理に基づき、メタマテリアル電波吸収板表面に入射し吸収された高周波電波の電力・位相分布を計測するシステムを試作した。システムの構成概要を図2に示す。

まず2.4 GHz帯の電波を計測するためのメタマテリアル電波吸収板(30 cm×30 cm)を設計・試作した。表面には30×30個のマッシュルーム型セル(10 mm角の方形電極)を2次元状に配列し、各セル間にはチップ抵抗を接続した。電波暗室にて試作電波吸収板に平面波を照射し、2.44 GHzで十分な吸収性能を持つことを確認した。

吸収板の裏面に8行×8列=64箇所の計測点を配置し、対応する抵抗の電圧(高周波信号)を取り出せるようにした。各計測点にお

ける信号を高周波スイッチにより高速に順次選択し2チャンネル(2ch)スペクトラムアナライザに入力することで、指定した周波数における各計測点の電圧振幅、及び吸収体上に設けた基準点との位相差を計測できるようにした。

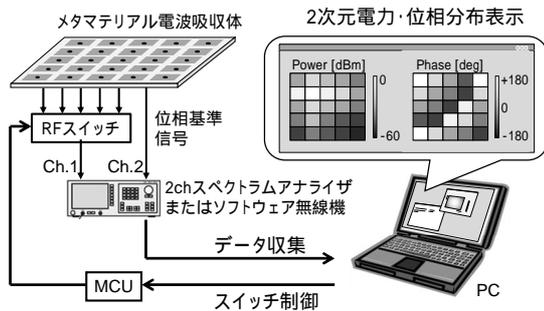


図2: 高周波電力・位相分布計測システム

さらにスペクトラムアナライザをソフトウェア無線機に置き換え、計測した高周波信号を中間周波数にダウンコンバージョンすることで、パルス信号波形を直接取得できるようにした。信号波形をスペクトル解析し、振幅及び位相を高速に演算することで、入射電波パルスの2次元電力・位相分布を高速(1秒以内)に計測できるシステムを構築した。計測した2次元電力・位相分布は、PC上で2次元カラーマップとして表示・可視化した。

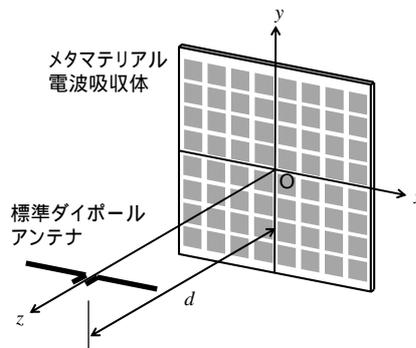


図3: 計測モデル

試作したシステムを用いて、電波暗室にて入射電波の電力・位相分布計測実験を行った。図3に計測モデルを示す。標準ダイポールアンテナを吸収板の中心から垂直に距離dだけ離して配置し、高周波球面波(2.44 GHz、-5 dBm、水平偏波)を放射した。

計測結果を図4に示す。図4(a)はd=10 cmのときの電力分布を示しており、左がシミュレーション値、右が計測値である。シミュレーション値では30×30個のパッチ間に挿入された全ての抵抗により計測される電力分布が示されており、計測値では8×8点に配置した計測点で実際に計測された値がモザイク状に示されている。シミュレーション値と実測値は同様の傾向を示している。上下端に見られる電力増加は吸収板端部からの反射・散乱の影響によるものである。

図 4(b)には距離  $d$  を 10 cm、20 cm、30 cm、60 cm と変えたときの  $x$  及び  $y$  方向 (同図(a)の点線) に沿った電力の比較を示す。計測結果 (シンボル) は誤差 3dB 以内でシミュレーション値 (線) と一致している。また図 4(c) (d)には、位相分布に対するシミュレーションと実測の比較を示す。吸収板中心付近では計測誤差が 10 度以内と小さいが、端部に近づくると 30~50 度ほどになる。これは電力の場合と同様に端部における反射・散乱の影響であると考えられる。

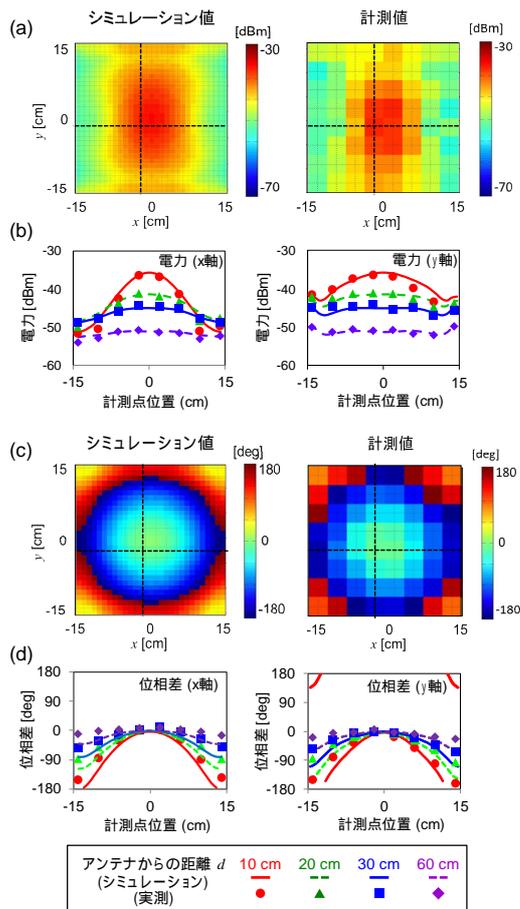


図 4 : 電力・位相分布計測結果

(3) 電波吸収板上で計測された入射電波 (電界) の振幅・位相分布に対して、アレイ信号処理手法を適用することで、波源探査を試みた。吸収板上に設けた計測点を 2 次元センサアレイとみなし、干渉計法及び MUSIC 法を用いることで、平面波の到来方向及び球面波の波源位置を推定する手法について検討を行った。特に MUSIC 法では、吸収板近傍に置かれた複数波源から放射される球面波を対象として、(1) で検討した理論解析に基づき吸収板上で計測されるはずの電界振幅・位相分布を求めることで、精度よい波源位置推定が可能であることを確認した。

MUSIC 法を用いて、シミュレーション及び実測により、波源位置推定の評価を行った結果の一例を述べる。図 3 で示した座標系において、2 つのコヒーレントダイポール波源 (2.44 GHz、-5 dBm、水平偏波) を、吸収板

の中心から  $z$  軸に対して +45 度、-45 度の方向で 20 cm の距離に置き、同時に球面波を放射した。吸収板中心付近の計測点 (16 箇所) で計測された電界振幅・位相分布に対し、MUSIC 法により波源位置を推定した。推定精度は信号の S/N 比により変化するが、例えば S/N 比 40 dB の場合、シミュレーションでは誤差 1 cm 以下、また (2) で構築したシステムによる実測結果では誤差 2~4 cm 程度で波源位置推定が可能であった。推定精度をさらに向上するには、図 4 で示した振幅・位相の計測誤差を抑えること等が必要であると考えられる。

以上の成果は、論文、国際・国内会議、及び展示会等において発表し、大きな反響が得られた。特に本研究で開発した計測手法は国内外でも前例のないものであり、高周波電波の電力・位相空間分布を手軽に計測し、波源を特定できる手法として、学界だけでなく産業界からも大きく注目されている。

今後は、電波吸収板による振幅・位相分布計測の精度向上及び高速化・高空間分解能化の実施、並びに複雑な形状を持つ波源の探査手法開発を行いたいと考えている。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

A. Ohmae, W. Li, I. Hoda, T. Suga, S. Yagitani, Direction-of-arrival estimation with Lüneburg lens and metamaterial absorber, Proc. 2016 International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, 2016, pp. 1018-1019.

<http://ieeexplore.ieee.org/document/7821309/>

R. Kanaura, R. Hayashi, S. Yagitani, T. Imachi, M. Ozaki, Y. Yoshimura, H. Sugiura, Development of a system for measuring power and phase distributions of radio waves, Proc. 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, 査読有, 2016, pp.1651-1653, DOI:10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601183

S. Yagitani, M. Ozaki, T. Imachi, R. Hayashi, R. Kanaura, Y. Yoshimura, H. Sugiura, Measurement and visualization of radio waves incident on thin metamaterial absorber, Proc. 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, 査読有, 2016, pp.384-385, DOI:10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601249

S. Yagitani, N. Tonooka, R. Kanaura, R. Hayashi, M. Ozaki, T. Imachi, Radio-frequency source estimation

using field distribution measured on metamaterial absorber surface, Proc. 37th Progress in Electromagnetic Research Symposium, 査読有, 2016, pp.4123,  
DOI:10.1109/PIERS.2016.7735549

H. Wakatsuchi, F. Gao, S. Yagitani, D. Sievenpiper, Responses of waveform-selective absorbing metasurfaces to oblique waves at the same frequency, Scientific Reports, 査読有, Vol.6, Article Number: 31371, 2016, pp.1-10, DOI:10.1038/srep31371

八木谷 聡, 金浦 諒平, 林 遼平, 井町 智彦, 尾崎 光紀, 吉村 慶之, 杉浦 宏和, 電波吸収体による高周波電波の電力・位相分布計測, 電子情報通信学会技術報告, 査読無, EMCJ2016-7, pp.35-40.

<http://www.ieice.org/ken/paper/20160415ob7S/>

R. Hayashi, R. Kanaura, S. Yagitani, T. Imachi, M. Ozaki, Y. Yoshimura, H. Sugiura, Radio-frequency power distribution measurement system using thin metamaterial absorber, Proc. 2016 International Workshop on Antenna Technology, 査読有, 2016, pp.157-160,  
DOI:10.1109/IWAT.2016.7434830S.

S. Yagitani, R. Hayashi, M. Ozaki, T. Imachi, Numerical and experimental evaluation of spherical wave absorption incident on a thin metamaterial absorber, Proc. 2015 URSI Atlantic Radio Science Conference, 査読有, 2015, 1 page, DOI:10.1109/URSI-AT-RASC.2015.7302956

R. Hayashi, S. Yagitani, M. Ozaki, Y. Yoshimura, H. Sugiura, Radio-frequency field distribution incident on a finite size thin metamaterial absorber, Proc. 2015 International Workshop on Antenna Technology, 査読有, 2015, pp.214-217,  
DOI:10.1109/IWAT.2015.7365323

S. Yagitani, N. Fukuoka, R. Hayashi, M. Ozaki, Numerical analysis of spherical wave absorption by a thin metamaterial absorber, Proc. 2014 International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, 2014, pp.205-206,  
DOI:10.1109/ISANP.2014.7026602

[学会発表](計16件)

S. Yagitani, R. Kanaura, M. Ozaki, T. Imachi, Numerical Analysis and visualization of spherical waves absorbed by a thin metamaterial

absorber, 19th International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2017.9.11-15, ペローナ(イタリア)

N. Tonooka, R. Kanaura, S. Yagitani, T. Imachi, M. Ozaki, Y. Yoshimura, H. Sugiura, MUSIC localization of radio-frequency sources using field distributions measured by metasurface absorber, 32nd URSI General Assembly and Scientific Symposium, 2017.8.19-26, モントリオール(カナダ)

外岡 直樹, 金浦 諒平, 八木 谷 聡, 井町 智彦, 尾崎 光紀, 吉村 慶之, 杉浦 宏和, 高周波電波空間分布計測による複数波源探査の検討, 電子情報通信学会総合大会, 2017.3.23, 名城大学(愛知県・名古屋市)

A. Ohmae, W. Li, I. Hoda, T. Suga, S. Yagitani, Direction-of-arrival estimation with Lüneburg lens and metamaterial absorber, 2016 International Symposium on Antennas and Propagation, 2016.10.28, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県・宜野湾市)

外岡 直樹, 金浦 諒平, 林 遼平, 八木 谷 聡, 井町 智彦, 尾崎 光紀, 吉村 慶之, 杉浦 宏和, 高周波電波空間分布計測による波源探査の一検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016.9.22, 北海道大学(北海道・札幌市)

金浦 諒平, 林 遼平, 八木 谷 聡, 井町 智彦, 尾崎 光紀, 吉村 慶之, 杉浦 宏和, 高周波電力・位相分布における干渉パターンの計測・可視化, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016.9.22, 北海道大学(北海道・札幌市)

R. Kanaura, R. Hayashi, S. Yagitani, T. Imachi, M. Ozaki, Y. Yoshimura, H. Sugiura, Development of a system for measuring power and phase distributions of radio waves, 2016 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2016.8.25, ソウル(韓国)

S. Yagitani, M. Ozaki, T. Imachi, R. Hayashi, R. Kanaura, Y. Yoshimura, H. Sugiura, Measurement and visualization of radio waves incident on thin metamaterial absorber, 2016 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2016.8.23, ソウル(韓国)

S. Yagitani, N. Tonooka, R. Kanaura, R. Hayashi, M. Ozaki, T. Imachi, Radio-frequency source estimation using field distribution measured on metamaterial absorber surface, 37th Progress In Electromagnetics Research Symposium, 2016.8.10, 上海(中国)  
八木 谷 聡, 金浦 諒平, 林 遼平, 井町 智

彦, 尾崎光紀, 吉村慶之, 杉浦宏和, 電波吸収体による高周波電波の電力・位相分布計測, 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, 2016.4.15, 金沢大学サテライト・プラザ(石川県・金沢市) 金浦諒平, 林遼平, 八木谷聡, 井町智彦, 尾崎光紀, 吉村慶之, 杉浦宏和, 高周波電波電力・位相空間分布計測システムの開発, 電子情報通信学会総合大会, 2016.3.16, 九州大学(福岡県・福岡市)

R. Hayashi, R. Kanaura, S. Yagitani, T. Imachi, M. Ozaki, Y. Yoshimura, H. Sugiura, Radio-frequency power distribution measurement system using thin metamaterial absorber, 2016 International Workshop on Antenna Technology, 2016.3.2, ココアビーチ(米国)

S. Yagitani, R. Hayashi, M. Ozaki, T. Imachi, Numerical and experimental evaluation of spherical wave absorption incident on a thin metamaterial absorber, 2015 URSI Atlantic Radio Science Conference, 2015.5.22, グランカナリア(スペイン) R. Hayashi, S. Yagitani, M. Ozaki, Y. Yoshimura, H. Sugiura, Radio-frequency field distribution incident on a finite size thin metamaterial absorber, International Workshop on Antenna Technology, 2015.3.5, ソウル(韓国)

S. Yagitani, N. Fukuoka, R. Hayashi, M. Ozaki, Numerical analysis of spherical wave absorption by a thin metamaterial absorber, International Symposium on Antennas and Propagation, 2014.12.4, 高雄(台湾)

R. Hayashi, N. Fukuoka, S. Yagitani, M. Ozaki, Y. Yoshimura, H. Sugiura, Radio-frequency field imaging with a metamaterial absorber, 2014 Asian Workshop on Antennas and Propagation, 2014.4.16, 金沢歌劇座(石川県・金沢市)

#### 〔その他〕

展示会への出展(計3件)

八木谷聡, 電波可視化シート~その場の電波が見える~, 第27回計量計測展(出展), 2016年9月28日~30日, 東京ビッグサイト(東京都)

八木谷聡, 電波可視化シート~その場の電波が見える~, イノベーション・ジャパン2015(出展), 2015年8月27日~28日, 東京ビッグサイト(東京都)

八木谷聡, 電波可視化スクリーン~その場の電波を映し出す~, イノベーション・ジャパン2014(出展), 2014年9

月11日~12日, 東京ビッグサイト(東京都)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

八木谷 聡(YAGITANI, Satoshi)  
金沢大学・電子情報学系・教授  
研究者番号: 30251937

##### (2) 研究分担者

尾崎 光紀(OZAKI, Mitsunori)  
金沢大学・電子情報学系・准教授  
研究者番号: 70422649

井町 智彦(IMACHI, Tomohiko)  
金沢大学・総合メディア基盤センター・准教授  
研究者番号: 60372489

##### (3) 連携研究者

なし

##### (4) 研究協力者

吉村 慶之(YOSHIMURA, Yoshiyuki)  
石川県工業試験場・電子情報部・主任研究員

杉浦 宏和(SUGIURA, Hirokazu)  
石川県工業試験場・電子情報部・専門研究員