

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560430

研究課題名(和文) 2次元電磁波バンドギャップ構造の導波理論とミリ波平面回路への応用

研究課題名(英文) Wave-Guiding Theory of Two-Dimensional Electromagnetic Structures and Its Application to Planar Millimeter Wave circuits

研究代表者

安元 清俊 (Yasumoto, Kiyotoshi)

福岡工業大学・付置研究所・研究員

研究者番号：60037926

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ波からミリ波帯で動作する小型で高性能・高機能の受動回路素子への応用を目指して、円柱ポストを周期的に配列した2次元平面導波路(ポスト壁導波路)の伝送特性およびポスト壁導波路で構成した平面回路の入出力特性を解析し、その結果を実験により検証した。理論解析では、我々が開発した2次元電磁波バンドギャップ構造に対する解析的な手法と数値解析コードを用いた。実験では、スケーリング則を利用してマイクロ波帯における等価な2次元平面導波路および平面回路を作製し、既設のマイクロ波モデル実験システムを使って伝送特性と入出力特性を評価した。

研究成果の概要(英文)：Aiming a practical use for miniaturized passive circuit components with high-performance operating in microwave to millimeter wave ranges, the propagation characteristics of guided modes in post-wall waveguides and post-wall waveguide based planar circuits were investigated both theoretically and experimentally. For the theoretical study, we used an analytical approach based on the T-matrix and lattice sums and a numerical code based on CIP algorithm, which have been developed by our group to characterize two-dimensional electromagnetic bandgap structures. For the experimental study, we designed the equivalent planar waveguides and circuit components working in microwave frequency by applying a scaling rule, and measured their input-output characteristics by using the existing microwave model experimental setup.

研究分野：電磁波工学

キーワード：マイクロ波・ミリ波 ポスト壁導波路 フォトニック結晶導波路 平面回路 受動素子

1. 研究開始当初の背景

(1) 無限に長い円柱から成る2次元電磁波バンドギャップ構造による電磁波の散乱・導波・放射問題を解析する独自の手法として、「格子和とT-マトリックスを用いた解析的手法」、「フーリエモード解析と一般化散乱行列を併用した数値解法」、及び「CIP (Constrained Interpolated Profile) 技法を用いた波動伝搬解析コード」を開発し、様々な構造に適用して、その有効性を実証した。

(2) 2次元電磁波バンドギャップ構造の実験モデルとしてマイクロ波帯のスケールモデルが利用できると考え、4GHz帯のマイクロ波を用いたスケールモデル実験装置を構築した。伝搬方向に様なポスト壁導波路の伝搬特性をモデル実験装置で測定し、その結果がCIP技法を用いた数値計算の結果によく一致することを確認した。

2. 研究の目的

マイクロ波・ミリ波集積回路への応用が期待されている2次元平面導波路は、上下を導体板で挟んだ誘電体基板内に金属ポストが周期的に配列された構造(図1参照)をしており、ポスト壁導波路(Post-Wall Waveguide)と呼ばれている。金属ポストの電磁波バンドギャップ効果で電磁波を横方向に閉じ込めることにより、方形導波管と同様の優れた伝送特性を保ちながら、小型化・集積化に適した構造になっている。このような平面導波路構造はプリント配線技術を使って容易に製作することができる。

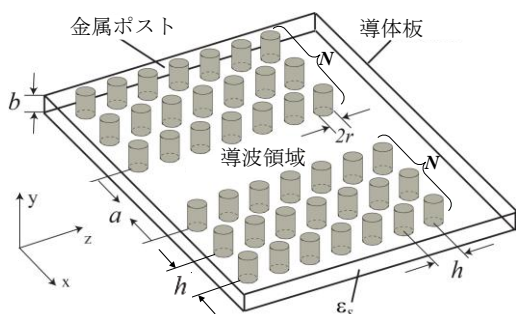


図1. 2次元平面導波路(ポスト壁導波路)

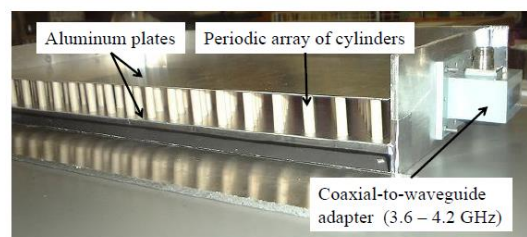
本研究の目的は報告者らが開発した2次元電磁波バンドギャップ構造に対する解析的手法と数値解法を使ってこの平面導波路の導波理論を究明するとともに、その結果を応用して、マイクロ波・ミリ波帯で動作する受動平面回路素子の設計に有用な知見を得ることである。

3. 研究の方法

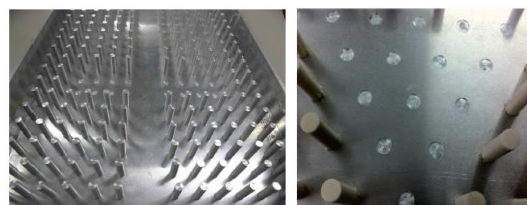
(1) 導波理論の研究では、① 格子和とT-マトリックスに基づく解析的手法および② CIP技法を適用した数値解法を用いた。①の手法は、個々の円柱ポストの材質や形状の特徴をT-マトリックスで表現し、その周期的

な配列が持つ電磁波的性質を格子和で評価するので、平面導波路の導波特性を見通し良く調べることができる。また、解析的手法であるので、摂動法等の近似解法の考えを取り入れることも容易である。②のCIP法は、双曲型の移流方程式を差分法で解く直接的数値解法で、従来の時間領域差分法よりも誤差拡散が少なく、計算精度が良いとされている。時間領域差分法では計算領域の外周部に吸収境界条件を設定することが必須であるが、CIP法はそのような吸収境界条件を必要としない。多くの数値演算パラメータを使用するCIP法の難点は、必要な計算機メモリ容量と計算量が他の差分法に比べて大幅に増加することであった。しかし、最近のパソコンの高性能化に伴い計算時間が短縮され、平面導波路のような2次元構造であれば、標準的なパソコンを使ってCIP法による数値解析が可能になった。

(2) モデル実験装置の外観を図2に示す。円柱ポストの周期構造を内包した管体のサイズは、幅が477.0mm、長さが485.5mmである。管体にはアルミニウム板を使用している。円柱ポストの直径を7.5mm、高さを29.1mmとし、円柱の素材にはアルミニウムとセラミックス誘電体の2種類を準備した。管体内で完全に周期的に配置した円柱ポスト列から一部のポストを取り去って線欠陥及び点欠陥を導入し、測定対象とする平面導波路を構成した。円柱ポストを配列するときは、精密な機械工作法を使ってアルミニウム板に周期的な案内孔を作製し、円柱ポストを案内孔に固定する方法を採った。この方法により、1μmの位置精度でポストを周期的に配列することができる。正方格子型と三角格子型の案内孔を作製した。入出力特性の測定では、Agilent Technologies E5071Cベクトルネットワークアナライザと対応周波数帯域が3.6GHz~4.2GHzの同軸導波管変換器を使用した。



(a) 側面からの外観



(b) 上面のアルミ板を取り除いた内部の構造

図2. マイクロ波帯でのモデル実験装置

#### 4. 研究成果

(1) 2次元電磁波バンドギャップ構造に対する格子和とT-マトリックスの手法を用いて、まず、ポスト壁導波路の導波問題を厳密に定式化した。その結果、導波特性は導波領域からポスト壁を見た時の一般化反射行列を使って議論できることを明らかにした。次に、一般化反射行列の主要要素の絶対値が1に近いとき、電磁界は導波領域内に十分に閉じ込められており、導波モードに対して長波長近似が適用できることを示した。長波長近似を用いれば、一般化反射行列は一般化反射係数に移行し、導波モードを決定する分散式は行列方程式からスカラー方程式へと簡略化される。円柱ポストの半径や周期長を変化させて様々なポスト壁導波路を解析し、提案する長波長近似の有効性と精度を実証した。

(2) 長波長近似を用いた分散式の解析から、考察しているポスト壁導波路に等価な方形導波管が定義できることを示し、その実効的な横幅を計算する方法を明らかにした。その結果、ポスト壁導波路の問題を等価な方形導波管の問題に置き換えることができるようになった。一般に、実効的な横幅はポスト壁導波路の幅よりも小さくなると理解されているが、隣り合うポスト間のギャップが広くなると、実効横幅がポスト壁導波路の幅よりも大きくなることを初めて明らかにした。

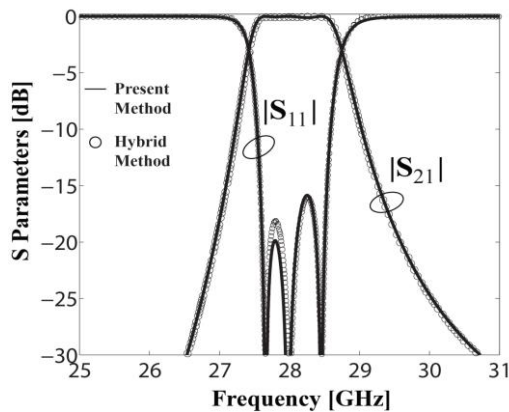
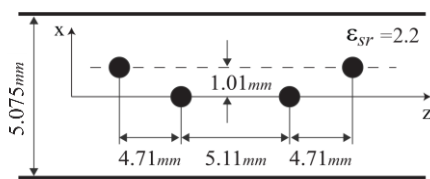
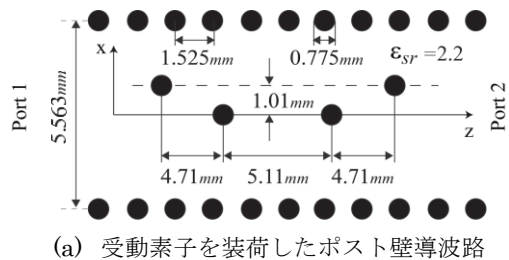
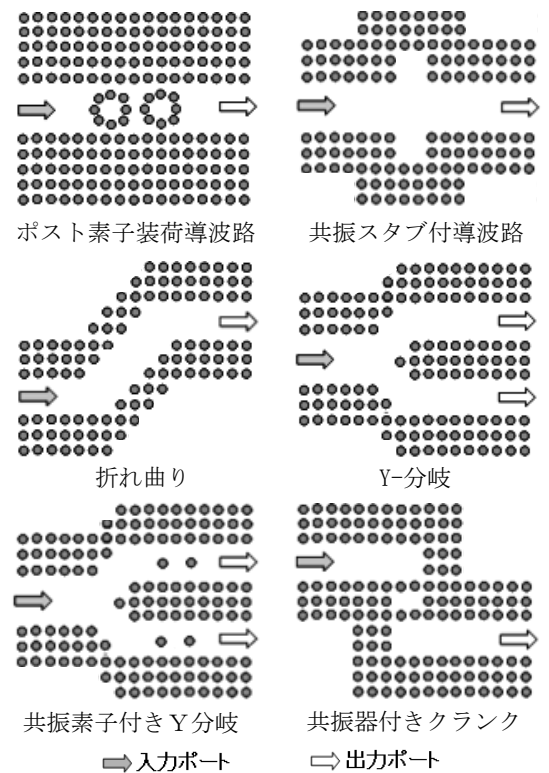


図3. ポスト壁導波路を利用した帯域フィルタ

(3) ポスト壁導波路は完全な閉構造の導波路ではなく、ポスト間のギャップ領域から横方向に漏洩する電磁波成分が存在する。この漏洩は伝搬モードの減衰を引き起こすので、漏洩損失と言われている。長波長近似を用いた分散式に対して摂動法を適用し、漏洩損失に対する二つの評価式を導き、その結果が他の数値解法による結果と良く一致することを確認した。ポスト壁導波路の中で広く応用されている構造は帯域通過型フィルタである。(2)で述べた等価な方形導波管モデルを使って、解析したフィルタ構造と入出力特性を図3に示す。

(4) 平行に配置された二つのポスト壁導波路間の結合を記述する結合モード理論を定式化し、結合モード方程式を導出した。その結果は、ポスト壁導波路で構成された方向性結合器の解析・設計に利用できる。

(5) 図4に示す導波路構造に対して、CIP法を用いて入出力特性の数値シミュレーションを行い、その結果をマイクロ波モデル実験により検証した。全ての構造について、数値シミュレーションの結果と実験結果は良く一致している。



(6) 三角格子型のポスト壁には、 $60^\circ$  および  $120^\circ$  の分岐導波路を容易に作製できるという利点がある。そこで、セラミックス円柱の三角格子配列を使ってX字型およびY字型の分岐導波路を作製し、一つの入力を二つから四つの出力に分配する回路をモデル実験装置で構成した。X字型分岐には四つのポ-

トがあり、その内の一つを入力ポート、残りを出力ポートとして利用した。分岐点を非対称にずらすことにより、入力をほぼ均等に三つの出力に分配することができた。Y字型分岐は、一段で利用すれば二つの出力が得られ、その後段にそれぞれもう一つのY字型分岐を接続して二段に従属接続すれば四つの出力が得られる。これらの出力が等分配回路として動作することを確認した。さらに、各出力導波路内に間隔が異なる一対の円柱ポストを共振器として配置したとき、それぞれの出力ポートに所望の周波数成分をドロップできることも確認した。

(7) ポスト壁による横方向への電磁界の閉じ込め効果をモデル実験と数値シミュレーションにより詳細に調べた。その結果、円柱ポストがアルミニウムの場合には、片側一層のポスト壁だけで電磁界は十分に閉じ込められることが判った。一方、セラミックスの円柱ポストでは、閉じ込めが不十分なため、電磁界の一部がポスト壁を透過して導波領域の外部に漏洩しながら伝搬する。アルミニウム円柱の場合と同様な閉じ込め効果を得るには、少なくとも片側2層のポスト壁が必要である。また、三角格子型の配列を用いて、60°の折れ曲がりをもつ二つを組み合わせた折れ曲がり導波路の曲り部の特性を調べた。曲り部の外側に局所的に円柱ポスト列を追加配置することにより、外部領域への漏れ放射を抑制できることを確認した。

(8) 正方格子型のポスト配列に直角曲りを二か所挿入してクランク型の曲り導波路を構成し、その伝送特性を実験で確認した。円柱ポストがセラミックスの場合には直角曲り一つにつき90%の透過率が得られたが、アルミニウムの場合には65%であった。この結果から、周期的なポスト配列内に種々の機能を有する複数の回路部品を配置し、その間をポスト壁導波路で接続して集積化するとき、セラミックス・ポストの直角曲りを用いれば、十分に高い伝送量が確保できることが判った。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 20件)

- ① Hiroshi Maeda, Kiyotoshi Yasumoto, Bending Loss in Two Dimensional Photonic Crystal Waveguide, Proc. of the 9th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems, 査読有(掲載決定), 2015
- ② Kiyotoshi Yasumoto, Hiroshi Maeda, Vakhtang Jandieri, Analysis of Post-Wall Waveguides Using a Model of Two-Dimensional Photonic Crystal Waveguides, Proc. of 2015 International Conference on Signal Processing and Communications, IEEE Conference Publications, 査読有, 2015, 74-79
- ③ Kiyotoshi Yasumoto, Hiroshi Maeda, Vakhtang Jandieri, Analysis of Post-Wall Waveguide Based Bandpass Filters Using a Model of Photonic Crystal Waveguides, Progress In Electromagnetics Research Symposium Abstract, Guangzhou, 査読有, 2014, 1732-1733 <http://piers.org/piersproceedings/piers2014Guangzhou.php>
- ④ Hiroshi Maeda, Kiyotoshi Yasumoto, Huili Chen, Daichi Ogata, and Kazuya Tomiura, Resonator in Two Dimensional Photonic Crystal Structure with Square Lattice by Metallic Pillars, Proc. of the 8th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems, 査読有, 2014, 313-317  
DOI: 10.1109/CISIS.2014.43
- ⑤ Hiroshi Maeda, Kiyotoshi Yasumoto, Experimental Study on Crank-shaped Waveguide in 2D Photonic Crystal, Proc. of the 17th International Conference on Network-Based Information Systems, 査読有, 2014, 576-579  
DOI: 10.1109/NBiS.2014.83
- ⑥ Hiroshi Maeda, Huili Chen, Kazuya Tomiura, Kiyotoshi Yasumoto, Numerical and Experimental Study on Confinement in Y-shaped Post Wall Branching Waveguide, Journal of Mobile Information Systems, 査読有, Vol.10, 2014, 217-228  
DOI: 10.3233/MIS-130183
- ⑦ Huili Chen, Yuting Bao, Jianming Jin, Hiroshi Maeda, Propagation Constant Measurement in Two Dimensional Post Array Waveguide with Triangular Lattice by Metallic Pillars, Proc. of the 5th International Workshop on Methods, Analysis and Protocols for Wireless Communication, 査読有, 2014, 357-361  
DOI: 10.1109/BWCCA.2014.89
- ⑧ Yuting Bao, Huili Chen, Jianming Jin, Hiroshi Maeda, Experimental Study on Crank-shaped Waveguide in 2D Post Array, Proc. of the 5th International Workshop on Methods, Analysis and Protocols for Wireless Communication, 査読有, 2014, 366-370  
DOI: 10.1109/BWCCA.2014.91
- ⑨ Hiroshi Maeda, Daichi Ogata, Naoki Sakuma, Noriyuki Toyomasu, Ryoma Nishi, Numerical Analysis of 1X4 Branch Waveguide in Two Dimensional Photonic Crystal Structure, Proc. of the 29th

- International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops、査読有、2014、366-369  
DOI: 10.1109/WAINA.2015.90
- ⑩ Kiyotoshi Yasumoto、Hiroshi Maeda、Vakhtang Jandieri、Coupled-Mode Analysis of Two-Parallel Post-Wall Waveguides、Proc. of 2013 International Symposium on Antennas and Propagation、IEEE Conference Publications、査読有、Vol. 2、2013、984-987  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=6717656&abstractAccess=no&userType=inst](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=6717656&abstractAccess=no&userType=inst)
- ⑪ Kiyotoshi Yasumoto、Hiroshi Maeda、Vakhtang Jandieri、Leakage Loss of Post-Wall Waveguides Based on a Model of Two-Dimensional Photonic Crystal Waveguides、Progress In Electromagnetics Research Symposium Abstracts、Stockholm、査読有、2013、547  
<http://piers.org/piersproceedings/piers2013Stockholm.php>
- ⑫ Hiroshi Maeda、Four-Branching Waveguide in 2D Photonic Crystal Structure for WDM System、International Journal of Space-Based and Situated Computing、査読有、Vol. 3、2013、227-233  
DOI: 10.1504/IJSSC.2013.058374
- ⑬ Hiroshi Maeda、Kazuya Tomiura、Huili Chen、Kiyotoshi Yasumoto、Studies on Loss Evaluation of Bending in Post Wall Waveguide for Microwave Transmission、Proc. of the 5th FTRA International Conference on Information Technology Convergence and Services、Springer's Lecture Notes in Electrical Engineering 253、査読有、Vol. 1、2013、333-340  
DOI: 10.1007/978-94-007-6996-0
- ⑭ Hiroshi Maeda、Kiyotoshi Yasumoto、Huili Chen、Kazuya Tomiura、Daichi Ogata、Numerical and Experimental Study on Y-shaped Branch Waveguide by Post Wall、Proc. of the 3rd International Workshop on Information Networking and Wireless Communications、査読有、2013、508-512  
DOI: 10.1109/NBiS.2013.84
- ⑮ Hiroshi Maeda、Kiyotoshi Yasumoto、Kazuya Tomiura、Huili Chen、Daichi Ogata、Resonance of Cavity in Two-Dimensional Square-Lattice Photonic Crystal by Metallic Pillars、Proc. of the 4th International Workshop on Methods, Analysis and Protocols for Wireless Communication、査読有、2013、422-426  
DOI: 10.1109/BWCCA.2013.74
- ⑯ Kiyotoshi Yasumoto、Hiroshi Maeda、Vakhtang Jandieri、Modal Analysis of Post-Wall Wave-guides Based on a Model of Two-Dimensional Photonic Crystal Waveguides、Progress In Electromagnetics Research Symposium Abstracts、Taipei、査読有、2013、442  
<http://piers.org/piersproceedings/piers2013Taipei.php>
- ⑰ Hiroshi Maeda、Yongmei Zhang、Hiroyuki Terashima、Study on X-Shaped Photonic Crystal Waveguide in 2D Triangular Lattice for WDM System、Journal of Mobile Multimedia、査読有、Vol. 8、2012、105-113  
<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2481544&CFID=680644965&CFTOKEN=40781470>
- ⑱ Hiroshi Maeda、Yongmei Zhang、Hiroyuki Terashima、An Experimental Study on X-shaped Branching Waveguide in Two-Dimensional Photonic Crystal Structure、Proc. of the 6th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems、査読有、2012、660-664  
DOI: 10.1109/CISIS.2012.136
- ⑲ Hiroshi Maeda、Huili Chen、Kazuya Tomiura、Takuya Shinohara、Numerical and Experimental Study on Confinement of Microwave in Dielectric and Metallic Post Array Waveguide、Proc. of the 2nd International Workshop on Information Networking and Wireless Communications、査読有、2012、562-566  
DOI: 10.1109/NBiS.2012.91
- ⑳ Hiroshi Maeda、Takuya Shinohara、Kazuya Tomiura、Huili Chen、Numerical and Experimental Study on Y-Shaped Branch by Post Array Waveguide、Proc. of the 3rd International Workshop on Methods, Analysis and Protocols for Wireless Communication、査読有、2012、494-497  
DOI: 10.1109/BWCCA.2012.88

[学会発表] (計 9 件)

- ① Kiyotoshi Yasumoto、Validation of Lossy Magneto-Dielectric Model for Perfect Electric Conductor、電子情報通信学会 2015 年総合大会、2015 年 03 月 10 日、立命館大学 びわこ・くさつキャンパス (草津市)
- ② Kiyotoshi Yasumoto、Lossy Magneto-Dielectric Model for Perfect Electric Conductor、第 67 回電気関係学会九州支部連合大会、2014 年 09 月 18 日、鹿児島大学 (鹿児島市)
- ③ Kiyotoshi Yasumoto、Analysis of Post-Wall Waveguide Filters Using a Model of Photonic Crystal Waveguides、

(グルジア共和国)

電子情報通信学会 2014 年総合大会、2014 年 03 月 20 日、新潟大学 (新潟市)

- ④ Kiyotoshi Yasumoto、Approximate Analysis of Leakage loss of Post-Wall Waveguides、第 66 回電気関係学会九州支部連合大会、2013 年 09 月 24 日、熊本大学 (熊本市)
- ⑤ Kiyotoshi Yasumoto、Coupled-Mode Formulation for Contra-directional Coupling between Two Parallel Photonic Crystal Waveguides、電子情報通信学会 2013 年ソサイエティ大会、2013 年 09 月 20 日、福岡工業大学 (福岡市)
- ⑥ Kiyotoshi Yasumoto、Analysis of Post-Wall Waveguide Using a Model of Photonic Crystal Waveguides、電子情報通信学会 2013 年総合大会、2013 年 03 月 19 日、岐阜大学 (岐阜市)
- ⑦ 篠原拓也、富浦和也、陳 慧麗、前田 洋、安元清俊、ポストアレイ導波路における電磁界の閉じ込めについて、電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、2012 年 10 月 26 日、宮崎大学 (宮崎市)
- ⑧ Kiyotoshi Yasumoto、Analysis of Post-Wall Waveguides Using a Model of Photonic Crystal、第 65 回電気関係学会九州支部連合大会、2012 年 09 月 24 日、長崎大学 (長崎市)
- ⑨ Kiyotoshi Yasumoto、Coupled-Mode Analysis of Two-Parallel Photonic Crystal Waveguides、電子情報通信学会 2012 年ソサイエティ大会、2012 年 09 月 13 日、富山大学 (富山市)

[図書] (計 1 件)

- ① Hiroshi Maeda、Numerical Technique for Electromagnetic Field Computation Including High Contrast Composite Material、InTech Open Access Publisher、Optical Communications、2012、41-54

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安元 清俊 (YASUMOTO, Kiyotoshi)  
福岡工業大学・付置研究所・研究員  
研究者番号： 6 0 0 3 7 9 2 6

### (2) 研究分担者

前田 洋 (MAEDA, Hiroshi)  
福岡工業大学・情報工学部・教授  
研究者番号： 5 0 2 6 4 0 7 3

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

ジャンディエリ ヴァクタン (JANDIERI, Vakhtang)  
Free University・電気情報工学科・教授