

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04005

研究課題名(和文) 超低コストプラスチック成型高性能ミリ波導波管スロットアレー平面アンテナの開発

研究課題名(英文) Development of Low-cost plastic-molding high-performance millimeter-wave slotted waveguide planar array antenna

研究代表者

榊原 久二男 (Sakakibara, Kunio)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50359759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：プラスチック成型の構造に金属メッキする低コストな製造方法を前提とした、本製造方法の限界の寸法を考慮に入れて、車載ミリ波レーダや高速無線通信用に、広帯域な導波管アンテナを設計した。設計周波数79GHzにおける、プラスチック成型に金属メッキ試作品の実験の結果、利得15dBiの周波数帯域12.5GHzという広帯域特性が得られた。また、これを2次元アレーに拡張して設計した結果、利得30dBiの周波数帯域幅14.9GHzを電磁界解析で確認した。

研究成果の概要(英文)：A low-cost broadband slotted waveguide array antenna is developed for automotive radar and high speed wireless communication systems in the millimeter-wave band. The size limitations in manufacturing for plated plastic are taken into account in the design of the waveguide antenna. As a result of the measurement of the waveguide antenna fabricated by plated plastic in the 79GHz band, the bandwidth of gain higher than 15dBi was 12.5GHz. This technique is applied to a two-dimensional array. The bandwidth of gain higher than 30dBi was 14.9GHz. Broadband characteristics were achieved in high-gain and medium-gain ranges.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：アンテナ ミリ波 導波管 プラスチック成型 広帯域

### 1. 研究開始当初の背景

近年、自動車の「衝突安全」性能が格段に向上することで死亡事故が減少している。その一方で、交通事故数そのものは増加の一途をたどり、自動車の「予防安全」技術が注目されている。中でも自動車レーダは、自動車の情報化の一環として、国内では 2003 年に一般車用に製品化されてから 10 年以上の歳月が経過しているものの、普及には至っていない。ところが近年、富士重工業から「ぶつからないクルマ(アイサイト)」が発売されて以来、一般市民への認知度が急激に高まった。しかしこのシステムに使われているレーダは、ステレオカメラ技術を使った近距離を監視するセンサであるため、時速 30km/h 以下での走行時にのみ車両を停止できる制限付きの装置である。他の自動車メーカーでは、高速走行時の周辺走行環境をリアルタイムに監視できる高性能なセンサの実現のために、ミリ波レーダの開発が進められている。

2003 年のミリ波レーダ製品化後、ミリ波通信システムと併せてミリ波応用の普及を推し進めるために、装置の低コスト化が進められている。中でも半導体高周波回路技術の発展は著しく、これまでコストの高い GaAs でしか必要性能を実現できなかったのが、コストの低い SiGe でもできるようになり、高性能を維持しつつ低コスト化が急速に進んでいる。すべての構成部品に対して、高性能を有しつつ低コスト化が急務となっており、アンテナも例外ではない。

ミリ波レーダ・通信システムの構成部品の中でアンテナは、必要な指向性を実現するための空間的な大きさが原理的に決まり、小型化に限界があるため、低コスト化が難しい構成部品である。アンテナが薄型で低コストにできれば、装置全体の小型化・低コスト化において大きな役割を果たす。

これまでに各方面でミリ波アンテナが開発されている。欧米では性能とコストを重視してレンズアンテナや反射鏡アンテナが開発されたのに対し、国内では薄型を重視し、平面アンテナで高性能化・低コスト化が進められている。日立化成(株)がトリプレート伝送線路を用いて、高性能なアレーアンテナを開発しており、国産ミリ波レーダの初期段階では様々なメーカーのレーダに使われ、このアンテナがデファクトスタンダードであった。近年では、東工大で拡散接合方式による、高性能でこれまでより低コストな導波管アンテナが開発されている。

研究代表者はこれまで、導波管アンテナを始め、マイクロストリップアンテナ、レンズアンテナ等の車載ミリ波レーダ用アンテナの研究により、それらの設計技術を蓄積した。一方で、マイクロストリップ線路はミリ波帯で損失が大きくなるのに対し、導波管は閉じられた空間を電磁波が伝送するため、放射損、導体損とも小さく、導波管アンテナはミリ波帯でも高性能が期待できる。ところが金属の



図 1. プラスチック成型導波管スロットアンテナ

立体構造であるため、一般に製造コストが高い問題がある。この問題を解決するために、金属成形でも製造可能な新規なアンテナ構造を開発した結果、2 枚の金属板を貼り合わせるだけで構成可能な導波管アンテナを実現した。図 1 に示すように、同じ設計の導波管アンテナをプラスチック成型に金属メッキで試作したところ、金属導波管と比較しても遜色のない特性が得られたため、さらなる低コスト化を進めながら、金属導波管を超える高性能を狙って、プラスチック成型品を金属メッキする製造方法を導波管アンテナに適用する技術開発に至った。

### 2. 研究の目的

高速走行時でもリアルタイムに周辺走行環境を監視できるミリ波レーダの全車普及を目的として、高性能かつ低コスト化のためのミリ波技術の開発が急務である。また、直進性の高いミリ波を用いた通信では、高利得な単指向性アンテナを用いた一対一通信の利用が有効である。

そこで本研究では、元来、導波管伝送線路が有する低損失性を生かした導波管スロット平面アンテナで薄型・高性能を実現し、プラスチック成型品に金属メッキを施すことにより超低コストで高性能なアンテナを実現する。応募者はこれまでに、簡易な構成でも高性能を実現する導波管スロットアンテナの設計技術を開発しており、この技術に加えて、プラスチック成型ならではの課題解決とアンテナ構造の設計自由度によって、さらに高性能なアンテナの実現を試みる。

### 3. 研究の方法

従来の導波管アンテナは、素子配列の自由度が高いことから導波管広壁にスロットを設けていた。しかし中空導波管構造を形成するためには、狭壁のいずれかの位置で貼り合わせざるを得ない。狭壁は導波管断面方向に強い高周波電流が流れるため、ミリ波帯では貼りあわせた間隙から電磁波が漏れ出し、深刻な損失が発生する。これを回避するため、応募者はこれまで一貫して導波管の狭壁にスロットを設ける方法を採用し、その設計技術を確立した。その結果、図 2 に示すように、高周波電流が原理的にゼミとなる導波管広壁の中央で導波管を貼りあわせることがで

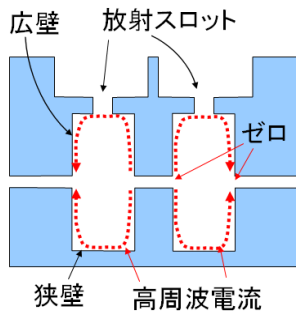


図2. 導波管壁面に流れる高周波電流

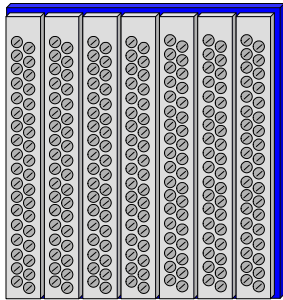


図3. デジ列指向性形成方式のアンテナ

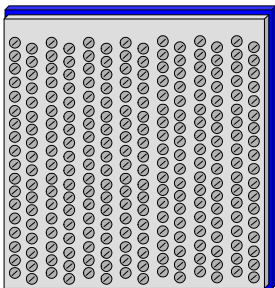


図4. 単指向性高利得広帯域アンテナ

き、アンテナの損失が格段に小さくなって、ミリ波に適した導波管形成方法を見出した。

本研究では、プラスチック成型品を金属メッキする製造方法ならではの製造上の制約条件（必要強度を確保するための壁厚、型を抜くために必要な最小導波管幅・最小スロット幅など）での課題を解決するとともに、新たに得られる自由度を活用して特性を向上させる。まず、現在のミリ波レーダの主流であるデジ列指向性形成方式に適した、図3に示す複数アンテナ構成のうちの1チャンネル分の縦長形状のアンテナを開発する。次に、高速ミリ波通信システム用に図4に示す単指向性の高利得で広帯域を低コストで実現する究極なアンテナ開発にチャレンジする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 広帯域導波管放射素子

本研究で提案する広帯域な導波管放射素子の構造を図5に示す。中空導波管の狭壁面に放射スロットを配置し、それぞれに溝を形成した2枚の板を導波管広壁中央で、張り合わせるにより本アンテナは製作される。

結合量増加と反射抑制のためにポストを配置している。ポストにより放射スロット付近の電力密度が高くなるため、放射量が増大する。また、ポストの高さと位置を調整することで、放射スロットからの反射波と逆相同振幅の反射波を作り出し、互いに打ち消し合うことで反射を抑制する。さらに、ポスト高さ  $Ph$  を高くすることで放射スロット付近の電磁界が強くなり、放射量を増大させることができる。ところが、導波管張り合わせ構造の制約からポスト高さ  $Ph$  が広壁幅の半分を超えられないという制限があることや、反射波の振幅が大きくなることにより放射素子が狭帯域になるという問題がある。そこで、導波管に絞り構造 (Iris\_h) を設けそこに放射スロットを切ること、ポスト高さ  $Ph$  が低くても十分な放射量が得られるようにした。そして、従来構造はスロットとポストの2つの反射を相殺していたが、提案構造では、スロットとポストと絞りの3つの反射を相殺するため、1つ当たりの反射は小さくなり、ポストの高さを低くできる。さらに、放射スロットの上部に長方形キャビティを配置することで共振構造の電気的体積を増加させ広帯域化を図った。

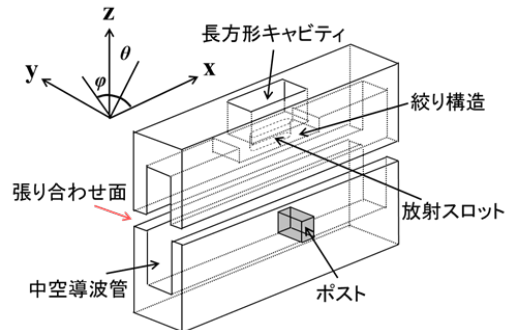
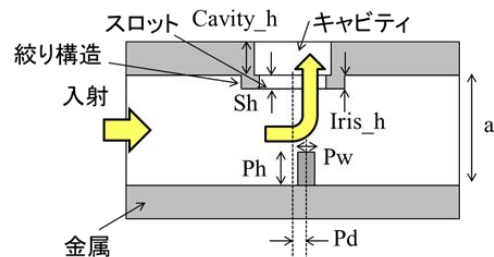
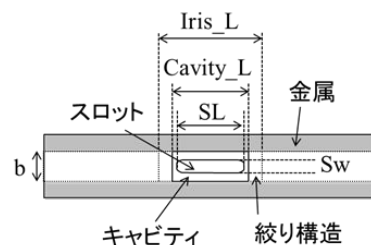


図5 導波管狭壁絞り部にキャビティ付きスロットを切った放射素子の提案構造



(a) 側面



(b) 上面

図6 放射導波管及び放射素子のパラメータ

解析対象の放射素子のモデルとして、キャビティや絞り構造の効果を確認するため、ポスト、放射スロットからなる従来構造に加え、キャビティのみを付加したモデル、絞り構造のみを付加したモデル、両方を付加したモデルの4種類を設計、解析した。放射導波管及び放射素子の各パラメータを図6に示す。放射スロット長  $SL$ 、ポスト高さ  $Ph$ 、放射スロットの中心からのポストずれ(ポスト位置)  $Pd$  を調整することで、アレーにおける所望の放射分布に必要な素子ごとに異なる結合量を実現した。

各放射素子の解析結果について示す。キャビティと、絞り部放射スロット構造、それぞれの広帯域化への効果を定量的に評価するため、ポスト、放射スロットからなる従来構造に加えて、キャビティのみを付加した構造、絞り構造のみを付加した構造、両方を付加した構造の4つを解析した。従来構造と他3種の構造を比較することで、キャビティの効果、絞り構造の効果、両方を組み合わせた効果を明らかにする。

まず、結合量  $C = 60\%$  のときの4構造の反射特性と、絞りあり・キャビティありの終端整合素子の反射特性を図7に示す。結合量  $C$  は次式で計算され、各素子について入射電力に対してどれだけの割合で放射するかを表す。

$$C = (1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2) \times 100 \quad [\%]$$

最も帯域幅が狭いのは、絞りなし・キャビティなしの従来構造で、 $-20\text{dB}$  帯域幅が  $1.9\text{GHz}$  となった。続いて絞りのみの構造で  $2.5\text{GHz}$ 、キャビティのみの構造で  $8.6\text{GHz}$ 、最も広いのは絞り、キャビティともありの構造で  $14.3\text{GHz}$  となった。終端整合素子は全電力が放射し ( $C = 100\%$ ) 反射が無いように設計した放射素子である。絞り構造とキャビティを用いることによって、終端整合素子でも  $7.3\text{GHz}$  の帯域が得られた。結合量を維持しながら、キャビティや絞り構造の付加によって帯域が広がることが確認できた。

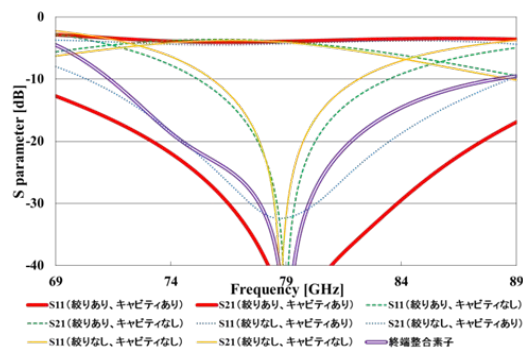


図7 各構造の反射特性 ( $C = 60\%$ )

## (2) プラスチック成型広帯域リニアアレーアンテナ

24素子2列アレーを中央で分割し、2つの12素子アレーそれぞれに中央から給電する構造とする。設計した24素子部分トーナメント進行波励振ミリ波導波管狭壁スロットアレーの構造

ント進行波励振ミリ波導波管狭壁スロットアレーの構造を図8に示す。2分岐給電回路の中央入力ポートから給電し、E面T分岐とE面H面複合バンドを介して非対称4分岐給電回路に給電する。非対称4分岐給電回路には4つの終端整合3素子アレーが接続されており、24素子アレー全体でテイラー分布となるように分配比の異なる非対称4分岐給電回路とする。各放射素子は本研究で提案するキャビティと絞り部放射スロット構造を取り入れた構造である。また、各3素子アレーの終端素子は無反射整合となるように設計した。

導波管の組み立ては、製作のし易さから、溝構造を貼り合わせる方式とするが、導波管壁を流れる電流を遮るように隙間ができると、電磁波の漏れが発生する。そこで、導波管の狭壁にスロットを切る方式とすることにより、電流が導波管の長手方向成分だけになる導波管広壁中央で貼り合わせる構成をとることができる。これにより、放射導波管と給電導波管の2層からなる本アンテナは、図9に示すように、それぞれの広壁の中央で貼り合わせた3枚の金属板で構成することができる。

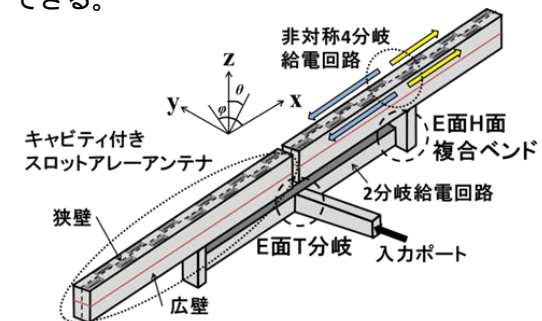


図8 24素子部分トーナメント進行波励振ミリ波導波管狭壁スロットアレーの構造

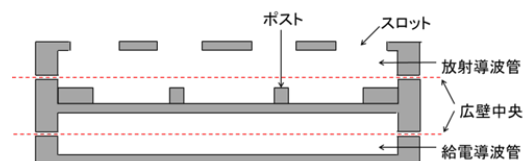


図9 導波管アンテナの組み立て方法

提案構造の放射素子を用いて24素子部分トーナメント進行波励振ミリ波導波管スロット平面アレーアンテナを設計、解析し、放射素子単体を広帯域化させることで、アレー全体でどれだけ広帯域に寄与するかを確認する。前節の広帯域な放射素子を用いることで、アレー全体の反射特性が広帯域化し、キャビティを用いることで指向性が絞られ指向性利得が上昇すると考えられる。

放射素子単体を広帯域なものに変更することによりアレー全体の反射特性の帯域改善を狙う。設計周波数を  $79\text{GHz}$  に変更するに伴い、広壁幅を  $3.3\text{mm}$  に狭めることでカットオフ周波数を高周波化した。

24素子部分トーナメント進行波励振ミリ

波導管スロット平面アレーアンテナの利得の周波数特性を図 10 に示す。提案モデルでは 72.0GHz-86.6GHz (帯域幅 14.6GHz) で 15dBi 以上、ピーク利得 20.7dBi が得られた。従来モデルの 15dBi 帯域幅 73.0GHz-80.4GHz (帯域幅 7.4GHz) と比較すると、提案モデルでは 2 倍の帯域幅が得られており、利得の周波数特性が改善されている。図 11 に示す写真にあるように、アンテナを試作し、特性を実験で評価した。その結果、図 10 に示すように、実験でも利得が 15dBi 以上となる周波数帯域幅 12.5GHz が得られ、広帯域特性を実証した。

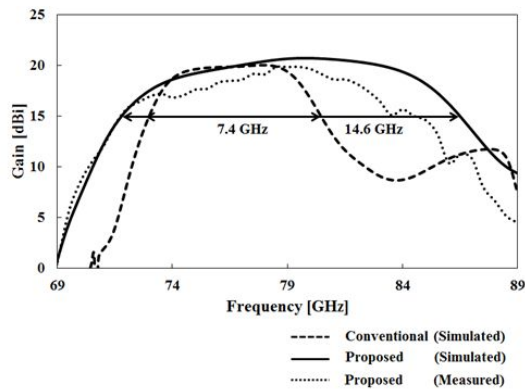


図 10 利得の周波数特性

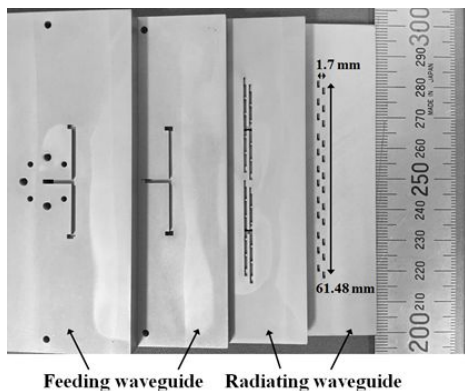


図 11 試作したアンテナ(プラスチック基板 4 枚)

導波管スロットアレーアンテナの放射素子として用いるポスト付スロット素子について、ポストの高さを低くしても大きい結合量を得られるように導波管狭壁に絞りを形成し、そこに放射スロットを切る構造を取り入れた。この構造は、広帯域化にも効果があり、電気的体積を増加させるキャビティと併用したところ、放射素子単体の広帯域化に大きい効果があることがわかった。放射素子単体の -20dB 帯域幅は、結合量が 60% のときに 14.3GHz、末端整合素子でも 7.3GHz が得られた。

さらに、提案の放射素子を、部分トーナメント進行波振ミリ波導波管スロット平面アレーアンテナに用いたところ、ブロードサイド方向の利得は、ピーク利得が 20.7dBi、72.0GHz-86.6GHz (14.6GHz 幅) で 15dBi 以上

となり、従来素子を使った場合の約 2 倍の帯域が得られた。実験でも広帯域特性を確認している。

### (3) 広帯域 2 次元アレーアンテナ

前述の 2 列の導波管からなるアンテナを 1 つのサブアレーとし、これを、図 12 に示すように 16 個配列し、E ベンドと E 面 T 分岐からなるトーナメント給電回路により給電することにより、32 列の 2 次元高利得アレーを構成した。

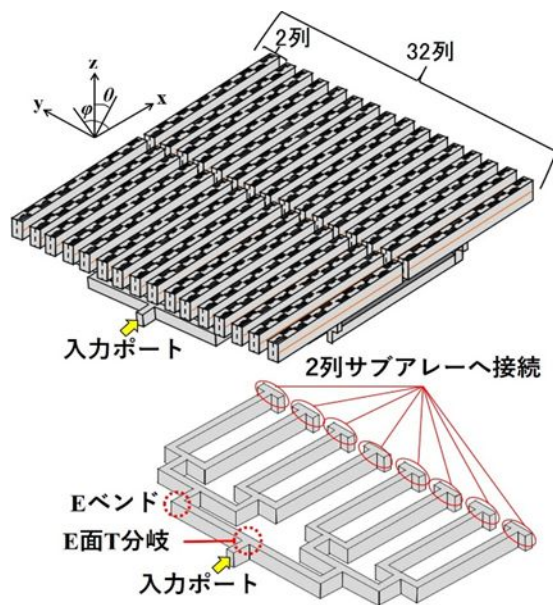


図 12 部分並列給電二層構造導波管スロットアレー32 列アンテナとトーナメント給電回路の構造

列数を増加した際の、設計周波数 79GHz での利得は 2 列、4 列、8 列、16 列それぞれで、20.8dBi、24.7dBi、28.0dBi、31.3dBi となり、アンテナ効率はそれぞれ 48%、67%、76%、83% となった。最大列数である 32 列アンテナの利得の周波数特性を図 13 に示す。設計周波数 79GHz における利得は 34.5dBi、アンテナ効率は 87% が得られた。また、14.9GHz の帯域幅で 30dBi 以上の利得となり、広帯域かつ高利得な特性が得られた。

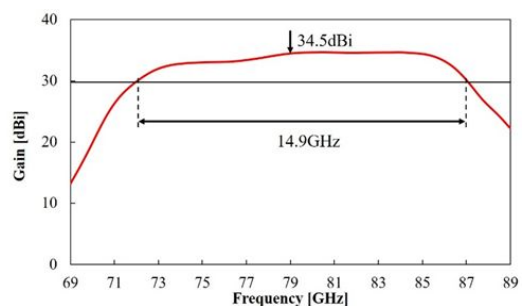


図 13 部分並列給電二層構造導波管スロットアレー32 列アンテナの利得の周波数特性

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 3 件)

Yuki Ishikawa, Kunio Sakakibara, Yuta Suzuki, Nobuyoshi Kikuma, Millimeter-Wave Topside Waveguide-to-Microstrip Transition in Multilayer Substrate, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 査読有, Vol. 28, No. 5, 2018, pp. 380-382, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8320283/>

Yuichi Hirayama, Kunio Sakakibara, Haruki Umemura, Katsuhiro Miyazaki, Nobuyoshi Kikuma, Effect of Wall-Surrounded Slot on Stepped Narrow Wall for Bandwidth Enhancement of Partially Parallel-Feeding Waveguide Traveling-Wave Array, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 査読有, Vol. 65, No. 8, 2017, pp. 3976-3985, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7936566/>

Kunio Sakakibara, Kunihiro Ohkawa, Yutaka Aoki, and Nobuyoshi Kikuma, RF Performance of Layer-Structured Broadband Passive Millimeter-Wave Imaging System, International Journal of Antennas and Propagation, 査読有, Vol. 2016, Article ID 6894676, 11 pages, Dec. 2015, <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2016/6894676/>

### 〔学会発表〕(計 60 件)

梅村晴貴, 榊原久二男, 菊間信良, 壁面内狭壁段差上スロットを用いた部分並列給電二層構造広帯域高利得導波管アレーの設計, 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会 技術報告, 2018 年 2 月

Kunio Sakakibara, Yuichi Hirayama, and Nobuyoshi Kikuma, Bandwidth Enhancement of Partially Parallel-feeding Travelling-wave Array Using Waveguide Narrow-wall Cavity Slot on Iris in Millimeter-wave Band, 2016 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2016

平山雄一, 榊原久二男, 菊間信良, 導波管狭壁絞りにキャビティ付スロットを切った部分トーナメント進行波励振ミリ波平面アレーアンテナの広帯域化, 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会 技術報告, 2015 年 11 月.

### 〔産業財産権〕

出願状況 (計 4 件)

名称: 導波管スロットアンテナ

発明者: 榊原久二男, 平山雄一, 園寄智和, 赤井洋

権利者: 国立大学法人名古屋工業大学, NTN 株式会社

種類: 特許

番号: 2015-210830

出願年月日: 2015/10/27

国内外の別: 日本

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://aplab.web.nitech.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

榊原 久二男 (SAKAKIBARA, Kunio)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 5 0 3 5 9 7 5 9