

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560527

研究課題名(和文) 固体天体内部探査地中レーダ用超広帯域アンテナの最適化設計に関する研究

研究課題名(英文) Research on optimized design of broadband antenna of a ground penetrating radar for subsurface sounding of solid bodies in the solar system

研究代表者

真鍋 武嗣 (Manabe, Takeshi)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50358991

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：固体天体探査地中レーダ用超広帯域アンテナとして、薄型平面構造のテーパースロットアンテナの一種であるVivaldiアンテナに着目し、広帯域化という観点からアンテナについて非線形最適化手法である粒子群最適化手法(PS)を用いてその導体形状の最適化を行った。その結果、地中レーダとして要求される300MHz～900MHzの帯域にわたって反射損失10dB以上の広帯域特性を実現することができた。さらにこの設計に基づいて試作したアンテナについて、電波暗室内および地球上でのフィールド実験を行い、固体天体探査地中レーダとして必要とされる電的特性とターゲット検出性能がほぼ実現できていることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We proposed the use of the Vivaldi antenna as a broadband antenna of a ground penetrating radar (GPR) for subsurface sounding of solid bodies in the solar system. The shape of the printed conductors of the Vivaldi antenna was optimized by the particle-swarm optimization method from the view point of broadening the operating bandwidth. As the result, we could achieve the return loss of more than 10 dB over a frequency band between 300 MHz and 900 MHz that satisfies the requirement for currently proposed GPR system. According to this design, an engineering model of the antenna was fabricated and tested in an radio anechoic chamber and actual field. As the results of these test measurements, we confirmed that the fabricated Vivaldi antenna can be used as the GPR antenna for subsurface detection.

研究分野：電波工学

キーワード：地中探査レーダ 超広帯域アンテナ Vivaldiアンテナ 粒子群最適化手法 パルス圧縮

## 1. 研究開始当初の背景

月、火星、小惑星などの浅層内部構造の探査は、これ等の天体の起源や形成過程を知る上で重要であるばかりでなく、将来のこれ等の天体への有人探査に向けての有益な情報を得るためにも非常に重要である。このため従来、探査機による重力測定なども行われているが浅層の内部構造の把握は困難である。一方、月や惑星などの内部構造のレーダによる探査は、古くは Appolo 17 号の ALSE に始まり、近年では我が国の我が国の「かぐや(SELENE)」LRS による月の観測や、欧州(ESA)の Rosetta/CONSORT による彗星核の観測、NASA の MRO/SHARAD による火星の観測などがあり、例えば、月の内部構造については「かぐや(SELENE)」の LRS(Lunar Radar Sounder)により高度 100km の月周回軌道から地下数 km に至る地層構造などが数十 m 程度の距離分解能で観測されているが、いずれも長波長/低周波の HF 帯や VHF 帯を用いているために月面溶岩チューブや小惑星の岩塊構造などの詳細な浅層内部構造は困難であった。

このような中で将来の月・小惑星探査のために、UHF 帯以上の高周波数帯の地中レーダ(GPR)を、これらの天体に近接タッチダウンする探査機やこれ等の天体に着陸するローバーに搭載して、これ等の天体の表層から数十 m から百 m 程度までの浅層内部構造を詳細に観測することが検討されている。このような UHF 帯以上の周波数帯を用いた GPR で数 100MHz 以上の広帯域幅の信号を送受信することにより地中で十数 cm 以内の分解能を実現することができるが、GHz 帯以上の高周波数帯を用いた場合には地中での探査深度は十 m 程度以内に限られてしまう。このため我々は天体の数十 m までの浅層内部構造探査を十数 cm 以内の高分解能での探査を目標として、300MHz から 900MHz の UHF 帯の超広帯域パルス圧縮レーダの検討を進めている。

このような宇宙機搭載地中レーダ用のアンテナでは超広帯域性と宇宙機への搭載に適した小型軽量性が求められる。このような目的に適したアンテナとして、薄型平面構造のテーパースロットアンテナである Vivaldi アンテナが原理的に超広帯域化が可能なアンテナとして注目されておりすでに地雷探査レーダなどへの適用が検討されている。しかしながらこの Vivaldi アンテナは誘電体基板上の導体パタンの複雑な形状によりアンテナの広帯域特性が大きく変化するため設計法が確立されておらず従来は試行錯誤による設計に頼らざるを得なかったため、宇宙機搭載等のためのサイズや重量の制限の下での最適設計の手法の確立が望まれていた。

## 2. 研究の目的

惑星探査機やローバでは高電圧を用いたモノパルスレーダの利用が困難であるため、

固体天体の地下数十 m までの浅層内部構造を十数 cm 以内の高い分解能で探査するためには、UHF 帯の 600MHz 付近を中心として ±300 MHz 程度の超広帯域幅で動作するパルス圧縮レーダ送受信機と送受信アンテナが必要である。

本研究では、このような固体天体探査地中レーダ用で必要とされる超広帯域アンテナとして、薄型平面構造のテーパースロットアンテナの一種である Vivaldi アンテナに着目し、宇宙機やローバーの重量制限と限られたエンベロープの中で超広帯域特性を実現するための Vivaldi アンテナの最適化設計手法を確立し、この設計手法に基づいて、固体天体探査地中レーダ用超広帯域アンテナのブレッドボードモデルを試作し、評価試験により設計手法の有効性を明らかにする。

さらに、別途試作する固体天体探査地中レーダのブレッドボードモデルと組み合わせて地中探査の模擬実験を行うことによりこのアンテナの地中探査への有効性を明らかにする。

Vivaldi アンテナについては、1 GHz 以上の周波数帯ではさかんに研究されているが、UHF 帯の 300MHz~1GHz では構造が大型となるためこれまであまり利用されていなかった。本研究では高誘電率の誘電体基板を用いることと基板上の導体パタンの最適化設計により従来の物に比べて大幅な小型化が期待でき、これにより我が国の今後の月・小惑星探査ミッションへの貢献が期待できる。

Vivaldi アンテナについては従来その広帯域性は謳われているがその形状を所望の特性に合わせて最適化する統一的な手法が無かったためその設計は多くの場合試行錯誤に頼らざるを得なかった。本研究で、その設計において多変量非線形最適化手法である粒子群最適化法を取り入れることにより効率的に最適化設計法を確立することにより、用途に応じた最適化設計が可能となれば、固体天体内部探査レーダのみならず、地雷探査用レーダや超広帯域無線(UWB)分野での利用の拡大への貢献が期待できる。

## 3. 研究の方法

本研究では、固体天体探査地中レーダ用超広帯域アンテナとして、薄型平面構造のテーパースロットアンテナの一種である Vivaldi アンテナに着目し、地中レーダ用アンテナとしての要求仕様の決定、その要求仕様を宇宙機やローバーの重量制限と限られたエンベロープの中で実現するための最適化設計手法の検討、最適化手法を用いた固体天体探査地中レーダ用超広帯域アンテナ設計、ブレッドボードモデルを試作および評価試験により設計手法の有効性を明らかにする。さらに、別途試作する固体天体探査地中レーダのブレッドボードモデルと組み合わせて地中探査の模擬実験を行うことによりこのアンテナ

ナの地中探査への有効性を明らかにする。

(1) 固体天体探査用地中レーダ用超広帯域アンテナの仕様検討

探査機やローバに搭載して、月・小惑星等の固体天体の地表面から数十mまでの浅層内部構造を十数 cm 以内の高分解能で探査するパルス圧縮方式の地中レーダにおいて、距離分解能を高めるためには送信信号に必要な周波数帯域幅を確保する必要があるが、一方、必要な探査深度を得るためには送信信号の上限周波数を出来る限り低くする必要がある。さらに探査深度と他の機器との電磁適合性の観点から地中以外への不要放射を極力小さくする必要がある。このような観点から、現実的に想定される探査環境を想定したシミュレーション等によりアンテナに要求される放射パターン、反射損失(return loss)の周波数特性などの仕様について検討する。

(2) アンテナの最適化設計

上記で検討された電気性能仕様を、宇宙機やローバへの搭載を考慮して、可能な限り小型軽量のアンテナを設計する。小型軽量で超広帯域が実現できるアンテナとして Vivaldi アンテナを想定する。Vivaldi アンテナの形状は図1に一例を示したように、基板上的複雑な曲線的な導体パターンを規定する多数のパラメータで記述することが可能であるが、これ等のパラメータに対する電気特性の依存性が複雑であるため、多くの場合その設計は試行錯誤に寄っていた。本研究では、Vivaldi アンテナの設計を多数のパラメータに関する電気特性の最適化と捉え、その手法として粒子群最適化手法(PSO)を適用し、アンテナの電磁界解析手法である FDTD 法と組み合わせてパラメータの最適化を行う。具体的には粒子群最適化(PSO)アルゴリズムの検討、アンテナ形状の適切なパラメータ化の決定、PSOとFDTDを組み合わせた最適化プログラムの実装と、最適化計算によるパラメータの決定によるアンテナ設計を行う。

(3) アンテナ BBM の試作

上記の設計結果に基づき、固体天体探査地中レーダ用超広帯域アンテナのブレッドボードモデル(BBM)の一次試作を行う。

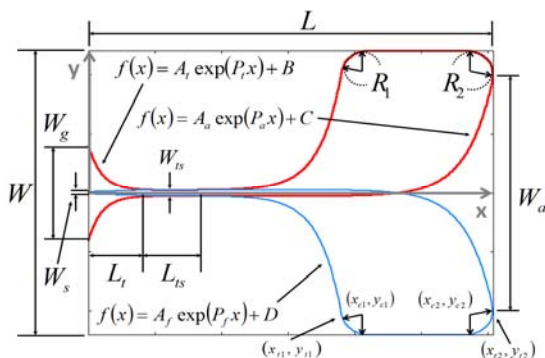


図1 Vivaldi アンテナと形状パラメータ

(4) アンテナ BBM の電気性能試験とその結果の評価検討

試作したアンテナについて周波数帯域内の遠方界放射パターンおよび反射損失(return loss)の周波数特性を、電波暗室において測定し、その結果について評価検討する。

(5) 地中レーダ模擬実験

試作したアンテナを別途開発した固体天体内部探査地中レーダ BBM と組み合わせて、電波暗室内での模擬ターゲット検出実験、さらに、実際のフィールドで地中に埋設したターゲットの模擬実験を行うことにより本アンテナの固体天体内部探査への有効性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 固体天体探査用地中レーダ用超広帯域アンテナの仕様検討

月や惑星・小惑星等の固体天体の地表面下数十m以内の地下構造を固体天体の表面上のローバや表面上空でタッチダウンする探査機に搭載したレーダとして、Linear FM チャープ方式のパルス圧縮レーダを想定してレーダのシステムとアンテナの仕様の検討を行った。固体天体表面の誘電的特性が Apollo 計画で取得された月面のレゴリスや岩石と同程度とした場合、1 GHz 以上の周波数帯では土壌による吸収損失により地下数十 m 以上の探査は困難であり、一方、VHF 帯以下の周波数帯ではアンテナのサイズが大きくなるため、UHF 帯の 300 MHz~900 MHz の Linear FM チャープレーダとした。この広帯域をカバーでき軽量の平面がアンテナで地中外への不要放射を低減できるアンテナとして Vivaldi アンテナを用いることとした。

(2) アンテナの最適化設計

Vivaldi アンテナは指数関数的な広がりを持つ滑らかな端面をした導体板を誘電体の両面に持つ進行波型アンテナであり、特定の周波数のみで共振する現象が起きず、優れた広帯域性を実現している。この広帯域性を実現するための導体板部分の形状が複雑であるため、アンテナ設計の際にはその形状を決める多数の設計パラメータを決めて与える必要があるが、その多くがフリーパラメータとなる。これまでの Vivaldi アンテナの設計ではこの設計パラメータを試行錯誤により決定されることが多かった。

本研究では Vivaldi アンテナの形状を決める設計パラメータを図1のように設定し、導体板部分の形状を指数関数型の関数の形で定義する。このように設計パラメータをできる限り指数関数の形で定義することにより、すべてのパラメータを幾何的に設定してきた従来の Vivaldi アンテナの設計よりも少ないパラメータで記述し、アンテナ形状の最適化をこれらの指数関数のパラメータの最適

化ととらえ、これらの指数関数のパラメータを、非線形最適化の手法の一つである粒子群最適化手法(PSO)により最適化することととらえ、PSOによりパラメータ空間内で粒子の位置が決まるとアンテナ形状が決定する。決定したアンテナの形状が最適かどうかの判断には給電力に対する反射損失を表わす  $S_{11}$  パラメータを使用した。今回設計するアンテナは使用帯域が 300~900 MHz と広帯域であるため、使用帯域内での  $S_{11}$  パラメータの最大値を評価関数とし、この評価関数を最小化するモデルを最適解とした。また  $S_{11}$  パラメータを使用帯域内で -10 dB 以下に抑えることを設計目標とした。最適化の過程で  $S_{11}$  の計算には電磁界解析手法である FDTD 法 (Finite-Difference Time-Domain Method) を用いた。誘電体基板としては、できるだけアンテナの物理形状を小型にするため、比誘電率 9.8 のセラミック熱硬化性ポリマー複合材を用いることとした。基板のサイズは、基板の帯域の最低周波数が 300 MHz で基板の比誘電率が 9.8 であることなどから、 $367 \times 387$  mm とした。

PSO による最適化の繰り返し計算は複数回行ったが、どの計算においても初期設定における探索空間内に配置する粒子の数は 10 個、繰り返し探索回数は 200 回として探索を行った。

図 2 に、上記のようにして PSO により最適化された Vivaldi アンテナの  $S_{11}$  パラメータの周波数特性を計算した結果 (PSO-model) を、筆者等のグループの先行研究で試行錯誤によって得られた最も良い特性のアンテナ形状の Vivaldi アンテナの  $S_{11}$  パラメータの計算結果 (Old-model) と比較して示した。

使用帯域内 (300~900MHz) の反射損失  $S_{11}$  の最大値で比べると、PSO-model が -11.13 dB、Old-model が -7.64 dB となり、約 3.5 dB 改善され、PSO を用いた最適化により使用帯域 (300~900 MHz) 内で、10dB 以上の反射損失 ( $S_{11} \leq -10$  dB) を実現することができた。

図 3 はアンテナ性能の評価関数である使用帯域内での  $S_{11}$  の最大値の PSO における各探索回数における推移を示したものである。図中の実線はそれまでの探索における最適値 (global best) での評価関数の値を示し、点

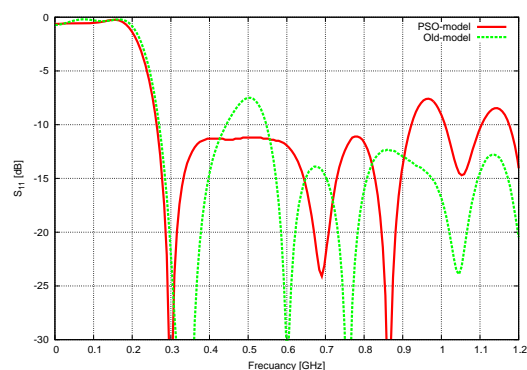


図 2:  $S_{11}$  の周波数特性の PSO による設計結果と試行錯誤による設計結果の比較

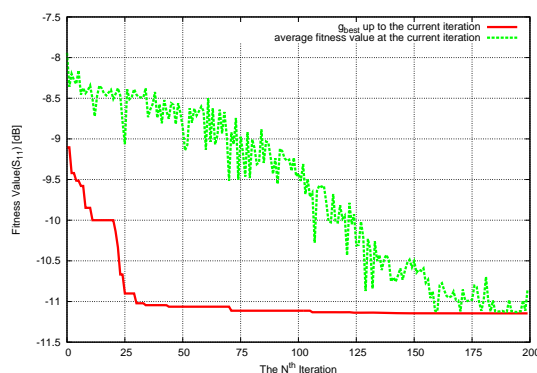


図 3: 評価関数( $S_{11}$ )の繰り返し回数による推移

線は各探索回におけるすべての粒子の評価関数の平均値を示している。この図から探索回数約 140 回で最終的に最適となるアンテナ形状にたどりついていることが分かる。またすべての粒子の評価関数の平均値が 200 回の探索を経て global best の値に近づいていることから粒子が最適解まわりに収束していることが確認できる。

### (3) アンテナ BBM の試作

上記の PSO による最適設計に基づき Vivaldi アンテナを試作した。アンテナの誘電体基板には Rogers 社製の比誘電率 9.8、厚さ 3.17 mm のセラミック熱硬化性ポリマー複合材 (TMM-10i) を使用した。図 4 に試作したアンテナの写真を示す。

### (4) アンテナ BBM の電気性能試験とその結果の評価検討

試作した Vivaldi アンテナの  $S_{11}$  パラメータをベクトルネットワークアナライザ (Vector Network Analyzer: VNA) によって実測した結果を FDTD 法による計算値と比較して図 5 に示す。図 5 より使用帯域内 (300~900 MHz) で実測値とシミュレーション値がよく一致していることが分かる。また測定された  $S_{11}$  パラメータの使用帯域内での最大値は -9.46 dB であり、設計目標値の -10 dB 以下をほぼ達成していることが確認できた。

600 MHz における E 面放射パタンの測定結果を図 6 に FDTD 法による計算結果と比較して示す。ここで Vivaldi アンテナの誘電体板と平行な面を E 面 (E-Plane) としている。図

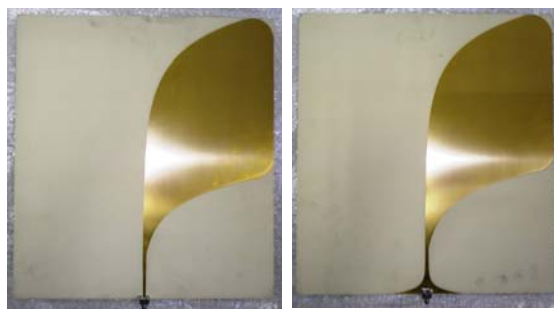


図 4: 試作した Vivaldi アンテナ (左: 表面, 右: 裏面)

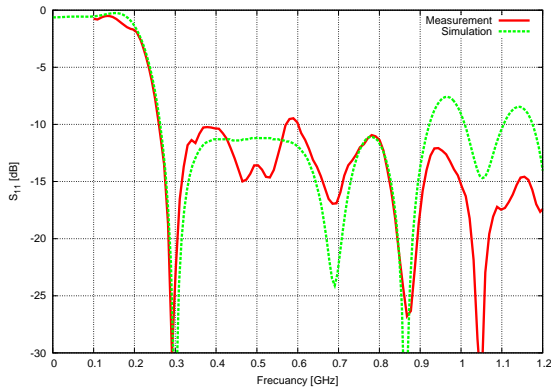


図 5: S11 の実測値と設計値の比較

より放射パターンにおいても各周波数それぞれ実測値とシミュレーション値が非常によく一致していることが確認できる。

#### (5). 地中レーダ模擬実験

試作したアンテナを別途開発した固体天体内部探査地中レーダ BBM と組み合わせて、電波暗室内においてコーナリフレクタを模擬ターゲットとしたターゲット検出実験を行った。図 7 に電波暗室での測定の様子を示す。実験では 1 辺 40cm の 3 面コーナリフレクタを模擬ターゲットとし、レーダからの距離 2 m ~ 10 m の範囲で測定を行った結果、全ての距離でエコーの検出が確認できた。図 8 にレーダからの 4m の距離でターゲットを視線方向に垂直に移動させた時に得られたエコープロファイルと、このプロファイルに Kirchhoff マイグレーション処理を行った結果を示す。この図よりターゲットからのエコー

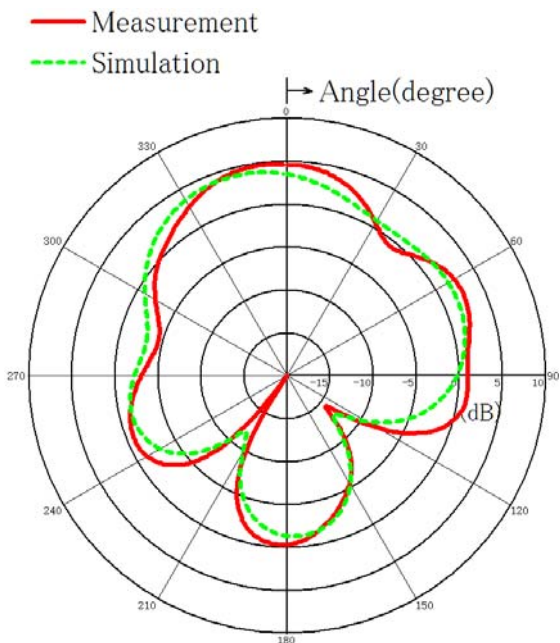


図 6: 600 MHz における E 面放射パターンの実測値と設計値の比較

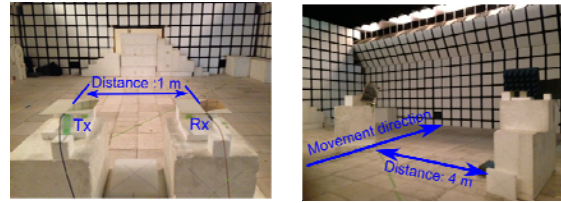


図 7 電波暗室での実験の様子

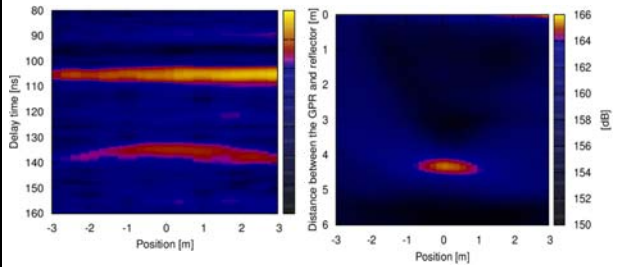


図 8 電波暗室でのターゲットの検出結果 (左:migration 前, 右: migration 結果)

ーが良好な分解能で結像されていることが確認できる。

さらに、実際のフィールドで地中に埋設したターゲットの模擬実験を行った。図 9 にフィールド実験の様子を示す。地表面から 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 3 m に埋設した直径 10cm の鋼管の検出を試みたが、地表面から 0.2 m の鋼管はマイグレーションにより検出することができたが、0.5 m より深いターゲットについては明瞭に検出することができなかった。この原因として、レーダ本体と送信、受信アンテナを接続するための長さ数 m のケーブル間のカップリングおよび、フィールド実験で不要放射の空間への放射を防ぐためのシールドボックスの影響などが考えられるが、これらについては今後の研究課題である。

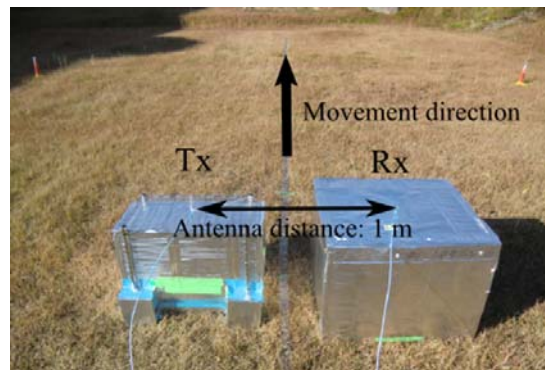


図 9: フィールド実験の様子

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 15 件)

- ① 西堀俊幸, 宮本英昭, 真鍋武嗣, 新原隆史, 臼井寛裕, 小熊みどり, 逸見良道, 火星探査ローバ搭載用地中レーダーの検討状況, 第15回宇宙科学シンポジウム, 2015年1月6日, 宇宙科学研究所(相模原市).
- ② 宮本英明, 西堀俊幸, 真鍋武嗣, MELOS 火星ローバによる地中レーダ探査, 第47回月・惑星シンポジウム, 2014年8月4日~6日, 宇宙科学研究所(相模原市).
- ③ 宮本英昭, 西堀俊幸, 真鍋武嗣, 小松吾郎, 臼井寛裕, 新原隆史, James Dohm, 逸見良道, 佐藤毅彦, 山岸明彦, 地中レーダーによる火星マリネレス峡谷の内部構造と生命探査, 第47回月・惑星シンポジウム, 2014年8月4日~6日, 宇宙科学研究所(相模原市).
- ④ 伊藤琢博, 片山雷太, 葛山祐子, 真鍋武嗣, 西堀俊幸, 春山純一, 松本岳大, 宮本英昭, UHF 帯固体惑星内部探査レーダの開発と試作評価試験, 第14回宇宙科学シンポジウム, 2014年1月9日~10日, 宇宙科学研究所(相模原).
- ⑤ 片山雷太, 真鍋武嗣, 伊藤琢博, 西堀俊幸, PSO による固体惑星内部探査レーダ用 Vivaldi アンテナの最適設計, 平成25年度電気関係学会関西連合大会, 2013年11月16日~17日, 大阪電気通信大学(寝屋川市).
- ⑥ 伊藤琢博, 真鍋武嗣, 西堀俊幸, GPR による固体惑星内部探査の検討, 平成25年度電気関係学会関西連合大会, 2013年11月16日~17日, 大阪電気通信大学(寝屋川市).
- ⑦ 伊藤琢博, 片山雷太, 葛山祐子, 真鍋武嗣, 西堀俊幸, UHF 帯固体惑星内部探査レーダについての検討と試作評価試験, 日本学術会議電気電子工学委員会 URSI 分科会非電離媒質伝搬・リモートセンシング小委員会第577回 URS-F 会合, 2013年11月1日, 同志社大学(京田辺市).
- ⑧ T. Ito, R. Katayama, T. Manabe, T. Nishibori, J. Haruyama, T. Matsumoto, and H. Miyamoto, Preliminary study of a ground penetrating radar for subsurface sounding of solid bodies in the solar system, 2013 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2013), 2013年10月23日~25日, 南京(中国).
- ⑨ 伊藤琢博, 片山雷太, 真鍋武嗣, 西堀俊幸, 春山純一, 松本岳大, 宮本英昭, 地中レーダによる固体惑星内部探査の基礎検討, 第57回宇宙科学技術連合講演会, 2013年10月9日~11日, 米子コンベンションセンター(米子市).
- ⑩ 伊藤琢博, 真鍋武嗣, 西堀俊幸, 固体惑星内部探査用地中レーダの基礎検討,

2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013年9月17日~20日, 福岡大学(福岡市).

- ⑪ 宮本英昭, 西堀俊幸, 真鍋武嗣, 伊藤琢博, 片山雷太, 松本岳大, 春山純一, MELOS 火星ローバによる地中レーダ探査, 第46回月・惑星シンポジウム, 2013年8月5日~7日, 宇宙科学研究所(相模原市).
- ⑫ H. Miyamoto, T. Nishibori, T. Manabe, T. Ito, T. Matsumoto, R. Katayama, and J. Haruyama, HGPR, a ground penetrating radar for future landing and touch-down missions to solid bodies, AOGS 10th Annual Meeting, 2013年6月24日~28日, Brisbane (Australia).
- ⑬ 片山雷太, 真鍋武嗣, 西堀俊幸, PSO による固体惑星内部探査レーダ用 Vivaldi antenna の最適設計, 2013年電子情報通信学会通信総合大会, 2013年3月19日~22日, 岐阜大学(岐阜市).
- ⑭ 松本岳大, 宮本英昭, 西堀俊幸, 真鍋武嗣, 春山純一, 伊藤琢博, 固体天体内部探査用地中レーダGPRの開発状況, 日本惑星学会秋季講演会, 2012年10月24日~26日, 神戸大学(神戸市).
- ⑮ 片山雷太, 真鍋武嗣, 西堀俊幸, PSO 法を用いた固体惑星内部探査レーダ用 Vivaldi antenna の最適化, 2012年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, 2012年9月11日~14日, 富山大学(富山市).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

真鍋 武嗣 (MANABE, TAKESHI)  
大阪府立大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 50258991

### (2) 研究分担者

西堀 俊幸 (NISHIBORI, TOSHIYUKI)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・テクノロジスト  
研究者番号: 80280361