

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246148

研究課題名(和文)無線情報エネルギー伝送技術を用いた再利用宇宙機用ワイヤレス安全監視システムの研究

研究課題名(英文)Wireless Safety Monitoring Sensor System for a Reusable Spacecraft Using the Wireless Information Energy Transmission Technology

研究代表者

川崎 繁男(KAWASAKI, Shigeo)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：40266367

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,900,000円

研究成果の概要(和文)：無線情報エネルギー伝送技術を適用したICセンサタグのネットワーク化による宇宙機用安全監視システムを構築した。これは、ハイブリッド集積回路によるセンサICタグ、集積回路技術による小型基地局と制御、データ通信、および、無線電力伝送をコントロールするファームウェア等で構成された。システムを実現するため実験局免許も取得し、S帯2.45GHz・Zigbeeによるワイヤレスセンサネットワーク情報・データ通信に関わる情報伝達と、マイクロ波によるC帯5.8GHz無線電力伝送の両立を、再利用宇宙機RVTモデル機で検証し、完全ハーネスフリーの再利用宇宙機用ワイヤレス安全監視システムの実現性を実証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the wireless safety monitoring sensor system by a IC sensor-tag applying the wireless communication/sensor and power transmission technology was demonstrated. This system consists of RF-ICs and the IC sensor-tag by a hybrid integrated circuit, a compact base station and firmware to control data sending, sequence, and wireless powering. We obtained the official experiment license to realize the system and proved the compatibility of sensor information and data sending by the Zigbee operating at 2.45 GHz with microwave power transmission at 5.8 GHz in the reusable spacecraft prototype model. From this study, we are confirmed that the wireless safety monitoring sensor system for the complete harness-free reusable spacecraft is feasible using the wireless information/communication and power transmission technology.

研究分野：工学・航空宇宙工学

キーワード：ヘルスマニタリング ワイヤレスセンサネットワーク 無線電力伝送

## 1. 研究開始当初の背景

地球規模でエネルギー問題と環境問題の解決を図る太陽発電衛星や航空輸送並みの一般人の宇宙旅行などの未来の宇宙利用を現実のものとするためには、今日の使い捨て型ロケットを単に「再使用できるもの」に変革するだけでは不十分であるという認識に立ち、帰還し何度も飛行する液体水素ロケットの試作研究と飛行実験を通じて、航空機的繰り返し運用を目指したシステムの実証研究を推進してきた (Inatani, Naruo et al., 2001 他)。そのような運用を目指す上でさらなる発展が必要であると考えた技術課題のひとつに、機体のヘルスマニタリング技術がある。これは、これまでの使い捨て型ロケットの考え方にはなかった、飛行中のフェイルセーフやアポート機能の付加、繰り返し運航におけるターンアラウンド作業の効率化・省力化の観点から不可欠な技術である。

しかし、ロケットのような宇宙輸送機では、その状態を正確に知るために膨大な計測点数が必要な一方で、宇宙機に特徴的な制約である重量リソースの制限により、有線センサを膨大な点数に配置しての安全監視や計測は困難であった。その結果として、これまでのロケットでは、飛行前の点検に膨大な時間をかけて飛行時の不具合の発生頻度を抑え込んでいた。このような背景より、宇宙輸送機を航空機的に運用するための革新的なヘルスマニタリングシステムとして、研究代表者の川崎がこれまで情報通信の分野で成果をあげてきた無線情報エネルギー伝送技術 (Kawasaki, 2007 他) を適用した超小型軽量無線通信センサデバイスとそれらのネットワークによる Space-by-Wireless システムを提案する。

## 2. 研究の目的

ワイヤレスセンサネットワークに関する研究は、国内外で盛んに行われており、センサ間のネットワーク論理、多入力多出力通信

環境などソフトウェアに関する部分の先行研究や技術として、金属壁やパイプなどで狭い通信空間しか確保できない環境での情報通信パスの確立法は、本研究でも積極的に活用する方針である。一方、本研究で特徴的なことは、データ情報のみならず、電力供給をも無線で行うことにあり、これにより完全にワイヤレスなシステムとなって、宇宙輸送機のペイロード低減や輸送機に適用する際に重要なシステムのメンテナンス性が向上する。

再使用宇宙輸送機を「航空機のように」運航するためのヘルスマニタリング技術を確立するためには、信号のやり取りのみならず、電力をも無線で供給可能な完全ワイヤレスかつ超小型薄型のセンサ付き IC タグを開発し、そのセンサタグ群と小型基地局群を MIMO (多入力多出力。IEEE802.11.n: 利用周波数 5.2 - 5.7GHz) 技術でネットワーク化することにより、飛行中のフェイルセーフやアポート、地上でのターンアラウンド時間の短縮といった、航空機では当然の機能を宇宙輸送機においても実現するためのヘルスマニタリングシステムを構築することを目標とする。

センサ IC タグは機体内への取り付けが可能な形態とし、また、センサ IC タグと基地局との間は無線で結ぶため、各種状況・形態でのモニタリングに容易に対処できる。このように、複数のモニタリングセンサと間の情報通信無線化はもちろん、情報エネルギー伝送を無線で行う研究は画期的であり、現在までに行われた例はなく、本研究の独創的な点となっている。実運用の面では、モニタリングの配線・セッティングに非常に少ない労力と時間ですむ。また、高速センシング情報を小型無線基地局よりネットワークを通じて機体システム側にフィードバックすることにより、危険回避・安全対策を自動化できる特徴を有する。

### 3. 研究の方法

本研究では、4年間の研究期間内に、小型平面アンテナ付の通信用超小型送受信チップに、超小型低消費電力のセンサを実装し、バッテリーレスの無線センサ IC タグを実現する。これに加え、情報通信だけでなく、センサタグに無線で駆動電力を供給する小型基地局を試作し、複数のセンサ IC タグを識別してセンサ IC タグと基地局との間で MIMO 技術を使った情報通信とエネルギー伝送を無線で行えるサブシステムを構築し Space-by-Wireless システムの機能実証の検討を行う。

本研究計画では、基本的には提案するヘルスマonitoringシステムの概念実証に重点を置き、IC タグのセンサの種別は限定せず幅広い監視対象に対応できることを考えているが、宇宙輸送機の運用で重要な極低温燃料、特に水素ガスの漏洩についての適用を重視したいと考える。

### 4. 研究成果

#### (1) 技術成果

初年度、第2年度は、実際のハードウェア開発の面からのフィジビリティスタディにより、本研究での通信方式は MIMO を用い、基地局として発射時の振動に耐えられるコンパクトサイズであること、また、センサタグは、できるだけ薄膜構成とし、センサデータの伝送レートに応じて、薄型バッテリーを付加することとした。

5.8GHz で動作する約 3mm 四方の MMIC 高出力アンプをセラミックパッケージに封入し、出力 200mW 以上で動作させることができた。温度センサについては原型センサタグとして、無線電力伝送によるワイヤレスセンサとしての動作は確認できた。

再使用ロケットのプロトタイプモデルを用いたロケット内通信実験を、MIMO を用いて行った。2.4GHz 帯を用いた 2 素子アレー

で、80Mbps 以上の伝送速度が良質な通信を保って行うことができた。また、周波数 2.25GHz の GaN 高出力高効率アンプを用いて、無線電力伝送によるワイヤレス給電で、ミニカーをバッテリーレスで走行させることができた。送受電アンテナの距離は、1.2m 程度であった。

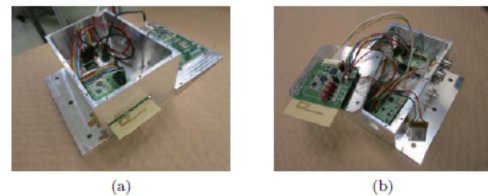


Figure 15: Photographs of the fabricated base station and the sensor node: (a) the base station and (b) the sensor node.

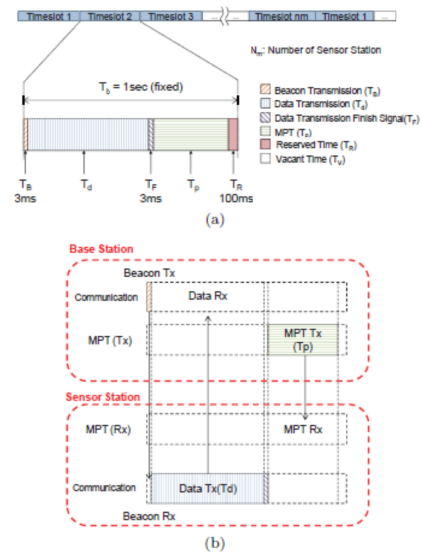


Figure 2: The scheduling for the time division operation: (a) the total sequence and (b) the details in one time slot.

第3年度は、実機を用いた通信と無線電力伝送の基礎データを得ることと、通信機と無線電力電送機の双方に対して、基本試作を行なった。再使用ロケット RVT 内にダミータンクを設置し、さらに基地局とセンサタグを想定した MIMO を最大 4 台設置し、相互のデータ通信状況を計測した。評価はスループットで行い、10Mbps 以上の通信速度が得られた。これの実験結果により、基地局、および、センサタグの配置に関する基礎データを得た。これに加えて、無線電力伝送用の基

礎実験を 5.8GHz で行い、マイクロワットオーダーの微弱電力エネルギーハーベストではあるが、電力伝送が可能であることを確認することができた。

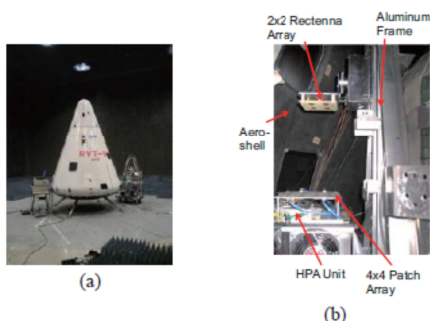


Fig. 4. Measurement setup of the system evaluation using the RVT: (a) outside of the RVT and (b) MPT antenna inside the RVT.

MIMO 環境の中でのガスセンサに関する実験は RVT 内では行なわず、温度センサとともに Zigbee (動作周波数 2.4GHz) を使って独立的行なった。温度センサ、水素ガスセンサともに、ワイヤレスセンサとして動作し、PC の表示画面にデータが表示されるのを確認した。

センサタグの通信ハードウェアとして、Triquint の GaN チップを電力伝送の送電 HPA 用と高耐圧 Rectifier 用として、また通信の受信用として、X 帯用および Ka 帯用 LNA モジュールを試作した。設計に用いた非線形 FET モデルの正確さに問題があったが、本研究の目的の基礎データが得られた。さらに、温度センサを Zigbee に取り付け、RVT を用いたワイヤレスヘルスマonitoring センサネットワークの基礎確認実験を行なった。RVT に装着された状態で、基礎動作を確認できた。

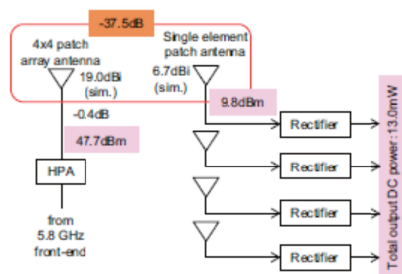


Fig. 6. Consideration of power budget of the proposed system.

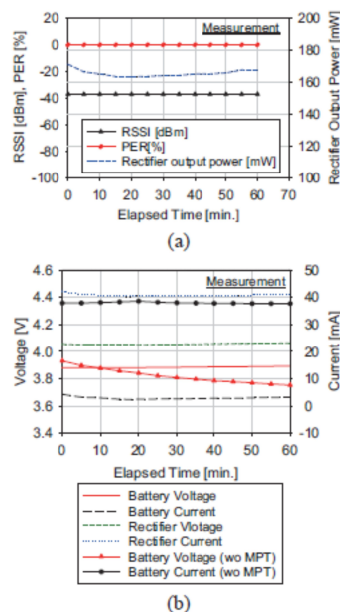


Fig. 5. Measurement results of balance of electric energy: (a) the RSSI, the PER and the rectifier output power and (b) the battery voltage and current.

上記試作したセンサ IC タグ、基地局、通信制御ソフトウェアを用いたヘルスマonitoring ワイヤレスセンサシステムによる機体筐体内での電波通信試験は、実機の例として、再使用宇宙用実験機 RVT を用いて実施した。再使用宇宙機 RVT 内で、S 帯動作のワイヤレスセンサネットワーク (Zigbee 準拠) と C 帯動作のマイクロ波無線電力伝送 (出力: 10W) を距離 25cm で同時に動作させた。マイクロ波電力伝送においては、小型バッテリーへの充電を周波数・時間多重分割で制御を行い、大きな電力が送電されても、コマンドやデータ伝送に支障がないことを確認した。すなわち、電力伝送とデータ伝送を同時に行えるかの情報通信とマイクロ波無線電力伝送の両立性の検証の基礎データを得た。さらに、エクストラサクセスとして、RF電力伝送による受電、および、光照射による太陽電池によるミクスドエネルギーハーベスタ方式を用い、距離 25cm で、2つの発電のミックスで、最大 300mW のレクテナ出力を得た。電波ハーベスタと太陽電池によるハーベスタの合計の整流器からのミクスド DC 出力を得たのは、今後の宇宙機のエネルギーハーベスタによる電力確保のための基礎データとして、

たいへん価値のあるものである。

RVT内において、距離25cm以上の見通し外センサデータ送受信、および、無線送電局出力10W、見通し距離25cmを同時に行う送受電実験において、基地局データ受信点のRSSI (Received Signal Strength Indicator) および PER (Packet Error Rate) を測定し、データ受信電力-60dBm下で、エラーフリー (1%以下) の結果が得られた。実験に用いた試作品はプロトタイプであり、大きさは12cm × 10cm × 3cmである。マルチセンサ (温度、圧力、水素ガス) 対応の基地局とし、各種センサデータや高速データ送信のため、周波数分割、および、時分割の通信・無線電力伝送用ソフトウェアからなる一連のシステムの開発を行った。モニタ対象として特に水素漏洩に着目するため、本研究の成果は将来の水素社会インフラ構築にも直結する。

#### (2) 今後の展開

更なる小型コンパクト化のため、Siや化合物半導体の各種モノリシック集積回路を接合させる新たな概念のICチップ技術の導入を検討する。この目的は、高速データ通信レート、宇宙環境試験への対処であるが、低価格化も視野に入れる。シングルtoマルチ通信プロトコルやマルチディテクター・マルチパルス検知方式などの誤作動防止のためのソフトウェアの開発も行っていく。最終的には、フライングテストベッドへ搭載して、飛行・運用における実証試験までを検討・実施する。

本研究課題で得られる成果は、宇宙輸送システムのみならず、例えば、活動中の宇宙飛行士の健康診断センサなどにも応用できる。また、水素漏洩検知システムが実現できれば、水素自動車・飛行機や水素ステーションの水素漏洩監視といった、将来の水素エネルギー社会のインフラ構築、に広く貢献・寄与できる。

#### 5. 主な発表論文等

(H23-H26年度：年次は若返り順)

#### [雑誌論文](計12件)

1. S. Yoshida, N. Hasegawa, and S. Kawasaki, "The aerospace wireless sensor network system compatible with microwave power transmission by time and frequency division operations," J of Wireless Power Transfer, vol. 2, Feb. 2014, 査読有, [DOI: http://dx.doi.org/10.1017/wpt.2015.2](https://doi.org/10.1017/wpt.2015.2), Cambridge University Press 2015, 24 April 2015.
2. Yuta Kobayashi, Atsushi Tomiki, Shinichiro Narita, and Shigeo Kawasaki, "Experimental Evaluation of an X-band GaN High Efficiency Onboard SSPA for Deep Space Missions," 査読有, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, vol. TBD, no. TBD, pp. TBD.
3. Yuta Kobayashi, Satoshi Yoshida, Zen-ichi Yamamoto, and Shigeo Kawasaki, "S-band GaN on Si Based 1kW-Class SSPA System for Space Wireless Applications," 査読有, IEICE Trans. Electron., vol. E96-C, no. 10, pp. 1245-1253, Oct. 2013.
4. Satoshi Yoshida, Takumasa Noji, Goh Fukuda, Yuta Kobayashi, and Shigeo Kawasaki, "Experimental Demonstration of Coexistence of Microwave Wireless Communication and Power Transfer Technologies for Battery-free Sensor Network Systems," 査読有, IJAP special issue on Wireless Powering of Sensors and Biochemical Devices, volume 2013 (2013), Article ID: 357418, pp. 1-10, 2013. [http://dx.doi.org/10.1155/2013/357418](https://doi.org/10.1155/2013/357418)  
(他8編)

#### [学会発表](計21件)

1. Hasegawa N, Yoshida S, Furuta S, Moriguchi Y, Kawasaki S, "The 20 W C-band lightweight GaN HPA for wireless sensor and power transmission in a spacecraft", IEEE Wireless Power Transfer Conference 2014, 査読有, IEEE WPTC 2014, Article number 6839618, 8-9 May 2014, Jeju Korea, pp. 21 - 23.
2. G. Fukuda, S. Yoshida, Y. Kai, N. Hasegawa and S. Kawasaki, "Evaluation on Use of Modulated Signal For Microwave Power Transmission", European Microwave Conference 2014, 査読有, EuMC22-4, Rome, Oct. 8th 2014,

- pp. 425-428.
3. H. Sakaki, T. Kuwahara, K. Nishikawa, S. Yoshida, S. Kawasaki, "Analysis of Rectifier RF-DC Power Conversion Behavior with QPSK and 16QAM Input Signals for WiCoPT System," 査読有, TH3C-3, 2014 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2014), Sendai, Nov. 2014.
  4. R. Takamori, K. Nishikawa, Y. Maru, S. Kawasaki, "Interference Analysis of Dual-Band WiCoPT System for Wireless Sensor network in RVT," 査読有, WE3F-3, 2014 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2014), Sendai, Nov. 2014.
  5. S. Kawasaki, "(Keynote Speech) The green energy harvesting winds by the RF / microwave power transmission," 基調講演, WPTC2013, pp. 111-114, Perugia, Italy, May 2013.
  6. S. Yoshida, G. Fukuda, T. Noji, S. Tashiro, Y. Kobayashi, and S. Kawasaki, "Wide Power Range Operable 3-Stage S-Band Microwave Rectifier with Automatic Selector Based on Input Power Level," 査読有, IMS2013, WE3G-4, Seattle, USA, June 2013.
  7. C. M. Wu, J. Choi, S. Kawasaki, T. Itoh, "A Novel Miniaturized Polarization Orthogonalizing Active Retrodirective Antenna Array for Satellite Use", 査読有, IMS2013, TH3C-3, Seattle, June 2013.
- (他 14 編)

〔図書〕(計 1 件)

1. 川崎繁男(分筆), 2.1.2 アクティブ集積アンテナ, 篠原真毅監修「宇宙太陽発電」電子情報通信学会編, 2012 年 5 月

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rfaia.isas.jaxa.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

川崎繁男 (KAWASAKI, Shigeo)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：4 0 2 6 6 3 6 7

(2)研究分担者

稲谷芳文 (INATANI, Yoshifumi)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：1 0 1 6 8 4 0 3

成尾芳博 (NARUO, Yoshihiro)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：7 0 1 5 0 0 5 0

三田 誠 (MITA, Makoto)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：4 0 3 7 0 1 0 0

丸 祐介 (MARU, Yusuke)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：2 0 5 2 4 1 0 1

(3)連携研究者

吉田賢史 (YOSHIDA, Satoshi)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：5 0 7 5 1 8 3 0

宮地晃平 (MIYAJI, Akihira)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・招聘研究員

研究者番号：4 0 7 3 4 0 9 1

西川健二郎 (NISHIKAWA, Kenjiro)

鹿児島大学工学部電気電子工学科・教授

研究者番号：8 0 6 1 0 2 4 5

(4)研究協力者

ITOH, Tatsuo

カリフォルニア大学ロサンゼルス校・教授