

**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：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560391

研究課題名(和文) 超伝導受信フィルタを用いた高感度・低干渉特性を実現するミリ波帯タグ読取装置の研究

研究課題名(英文) Fundamental Study on Tag Interrogator with Improved High-Sensitivity and Low-EMI Capability Using Millimeter-wave and Superconducting Filter Technology

研究代表者

日景 隆 (HIKAGE, TAKASHI)

北海道大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：30312391

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：RFID(Radio Frequency Identification)は、次世代センサーネットワークの構築等、ユビキタス社会を支えるキーデバイスとして期待されている。生活環境で用いられる電波利用機器であるところのRFIDは、誰もが安全・安心に利用できることがその広範な普及に必要な不可欠な条件となる。本基盤研究課題では、心臓ペースメーカー等に代表される植込み型医療器への電磁干渉影響低減の観点から、RFIDタグ読み取り装置の読取感度向上と低干渉特性の両立を超伝導受信フィルタおよびミリ波帯電波利用により実現するための基本技術検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Radio-frequency identification (RFID) technology that supports non-contact automatic recognition along with fast data reading, multi-target recognition and invisible recognition, is expected to be an essential component for realizing ubiquitous society. However, the electromagnetic fields from the devices, when they are employed in our living environment, raises concern that they may cause other electronic devices to malfunction due to electromagnetic interference (EMI). The EMI faced by active implantable medical devices (AIMDs) has become a very controversial issue in recent years. A fundamental study on next generation tag interrogator which was applied mm-wave and superconducting filter technology was carried out in this research that was expected to achieve improved high-sensitivity and low-EMI capability from the stand point of AIMDs EMI issues in particular.

研究分野：工学

キーワード：超伝導受信フィルタ マイクロ波・ミリ波 タグ読取装置 植え込み型医療機器 電磁環境適合性

## 1. 研究開始当初の背景

RFID(Radio Frequency Identification)システムによる他機器への電磁干渉、特に各種医療機器に対する干渉問題は、早急に取り組むべき重要な課題となっている。RFIDシステムは、来たる高度IT社会においてセキュリティー認証や商品トレース等に代表される情報管理サービスのためのフロントエンドとなる重要な技術である。例えば、センサーネットワーク、ロボット等により国民一人一人の日常生活をサポートするユビキタス&ユニバーサルタウンを実現することが検討されているが、実現には誰もが安全・安心に利用できる電磁環境基盤(電磁環境両立性)の確立が必要不可欠である。RFIDにおける電磁環境両立性(EMC: Electro-Magnetic Compatibility)について、例えば、複数のRFIDタグ読取装置間での電磁干渉とそれによる読取性能の低下、回避技術の課題等があげられるが、研究代表者が考える特に重要で不可避な課題は、植え込み型医療機器に代表される医用機器に対する干渉影響である。RFIDが広く生活環境においても用いられるようになるにしたがい、植え込み型医療機器装着者がタグ読み取り装置に近づく可能性が増加するのは必然である。植込み型心臓ペースメーカーや除細動器における障害発生は、装着者の人命に関わる恐れがあるため、これを防止することは最重要である。RFIDタグ読取装置(RFID R/W)は用いる周波数帯により電磁誘導型あるいは電波型に区分されるが、いずれの方式のRFID R/Wにおいても、医用機器への干渉影響問題が存在することが明らかになっている。

我が国において、植え込み型心臓ペースメーカー/除細動器の装着者数は、平成23年には50万人以上に達し、高齢化社会の到来に鑑み今後も増加が見込まれる。世界的にもこれは同様の傾向である。これら医療機器に対する綿密な電磁干渉影響の調査実施とともに、適切な対応と対策は不可避である。これまでに、携帯電話やRFID等の電波利用機器による植え込み型医用機器への干渉影響について国内外において複数の調査研究が行われ、利用者に対する指針(警告)等が示されている。RFID機器については2007年に総務省が公表した「各種電波利用機器の電波が植込み型医療機器へ及ぼす影響を防止するための指針」において、据置きタイプRFID機器(高出力型950MHz帯パッシブタグシステム)のうちの一部の機器について最大75cmの距離で植込み型心臓ペースメーカーに対する干渉影響が観測されたことが報告されており、植込み型医療機器の装着者に対して高出力型950MHz帯パッシブタグシステムが設置されている場所および同タイプ機器についての注意喚起ステッカ貼付場所の半径1m以内には近づかないこととする指針の追加が行われた。通信距離を長くできる電波型RFID機器は様々なアプリケーションへの適用が期

待されるものの、電磁干渉を緩和する新技術の開発は未だ十分に行われていない。今後さらに多様化するRFID技術の利用・発展のため、積極的な干渉緩和の技術開発が必要不可欠である。

## 2. 研究の目的

本研究は、電波型RFIDリーダライタ(RFID R/W)の飛躍的な高感度化を実現し、医療器等に代表される他機器への電磁干渉において影響緩和を実現するための基盤研究である。

RFIDにおけるミリ波帯の適用技術については、Pekka Pursulaら(IEEE Trans. on Microwave Theory & Techniques, Vol. 56, No. 10, pp. 2221-2228, Oct. 2008, IEEE Trans. on Microwave Theory & Techniques, Vol. 59, No. 4, pp. 1166-1173, Apr. 2011)海外の研究者による報告例がある。また、超伝導フィルタの適用による感度向上技術については携帯電話基地局装置への適用に関して多くの報告例がありこれまでに研究代表者らも検討を実施してきている。本研究では、これら技術をRFID R/Wへ応用することで、従来性能を大幅に更新する読取性能と低干渉特性を両立する新技術の創成を目指す。このような干渉緩和技術の提案や報告は、国際的にも未だ為されておらず、先駆性が高い。

以下の3項目の主要な技術課題に取り組む。

(1) 数値シミュレーション技術を用いたRFIDシステムの電波による電磁干渉影響評価技術の開発を行う。これまで研究代表者らが検討を行ってきたRFIDシステムにおける医療器への干渉影響発生要因についての調査に基づき、ミリ波帯(~30GHz)まで拡張した電磁干渉影響評価系(R/Wアンテナおよび植え込み型医用器を含む仮想空間の電磁界評価)を高精度な数値シミュレーションにより構築し、送信電波と電磁干渉発生の関係について定量化するための評価手法を構築する。

(2) 超伝導フィルタ適用によるミリ波帯RFID R/Wの受信感度向上を評価し、感度向上により実現されるR/Wからタグへの送信出力の低減効果について明らかにする。

(3) 上記検討に基づき、干渉緩和効果の定量的評価を実現し、超伝導フィルタ装荷型ミリ波R/Wの優位性を明確化する。

## 3. 研究の方法

(1) 研究代表者らが開発した大規模電磁界解析に基づくRFID R/Wの植え込み型心臓ペースメーカー/ICD干渉影響評価のためのプログラムをミリ波帯(~30GHz)まで対応拡張し、植込み型医療器に対する干渉影響評価ツールを実現する。研究代表者らは複数の心臓ペースメーカーおよびICD実機を用いた電磁干渉評価に関する実験調査を実施してきており、国内外で販売・流通している多くの植込み型医療器に対する干渉影響データベースを有している。これら調査において用いられるペ

一メーカーおよび ICD の干渉試験系を忠実に数値モデル化することで、実用的かつ高精度な干渉影響評価と推定を実現する。

(2) 超伝導フィルタの受信系適用による RFID R/W の感度上昇効果とミリ波帯電波の利用による電磁干渉影響低減効果の定量評価を実施する。ミリ波帯 R/W アンテナとタグのシステムについては研究室レベルの試作装置が文献等で報告されているが、入手できる機器はない。そこで、文献の実験結果に基づき、超伝導フィルタを装荷したミリ波 RFID R/W の感度上昇効果を確認する。加えて、開発した高精度数値シミュレーションに基づく干渉影響評価ツールを用いて、R/W アンテナ周囲の環境条件も考慮した干渉影響推定を実施し、電磁環境両立性における優位性および実現可能性について明らかにする。

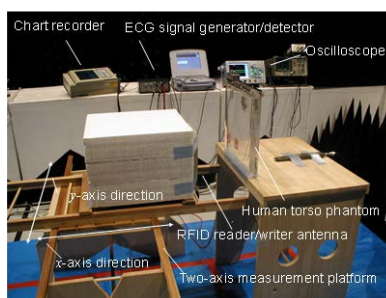
#### 4. 研究成果

(1) 高精度な数値シミュレーションによる電磁干渉影響評価法について検討を行い、植込み型医療器に対する干渉影響評価法を開発した。実験データに基づく RFID 読取装置の電磁干渉影響評価プログラムを高周波数帯までに拡張し、植込み型医療器に対応する干渉影響評価ツールを実現した。RFID システムの電波による電磁干渉影響評価のための試験系について図 1 に示す。試験時、ペースメーカあるいは ICD は人体に植え込まれた状況と同じように動作させる必要があり、そのために濃度を調整された NaCl 水溶液 (0.18 重量%濃度：1.8 g/l) で内部を満たされた模倣的人体 (ファントム) が用いられる (図 2)。ペースメーカ/ICD には、本体から血管部を通じて心房、心室あるいはその両方に向かうリードが接続されており、試験時ファントムにおいては図 2 に示すように心房、心室を模倣しそれぞれの疑似的な心電を伝えるための電極が配置される。なお、ペースメーカ/ICD 本体、リードおよび心房/心室電極はいずれも NaCl 水溶液中にある。同試験において干渉影響は被試験 RFID 装置のアンテナからファントム表面までの距離を変化させながらペースメーカ/ICD の正常動作に不具合が生じないことを調査される。すなわち、研究背景にて示した高出力型 950MHz 帯パッシブタグシステムにおいては、アンテナ-ファントム間の距離を 75cm より近づけた場合に不具合を生じるペースメーカがあることが示している。本研究課題では、数値シミュレーションによる電磁干渉影響評価法の構築において、ペースメーカを含む上記試験ファントムを高精度に再現し、ファントム内に配置されたペースメーカ本体の内部に高抵抗負荷 (1M オーム) を仮定した上でそれを介してリードを接続する。同負荷に生じる電圧 (干渉誘起電圧) を指標として干渉特性の定量化を実現した。

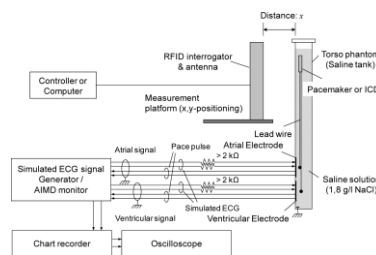
①時間領域差分 (FDTD) 法に基づく電磁界解析を用いた植え込み型心臓ペースメーカ/

ICD 電磁干渉影響評価のための、大規模かつ高速な評価手法の開発を行った。図 3(a) に数値モデルを示す。ミリ波帯 (30GHz) の評価を実現するため、かつ同軸構造であるリードを精度よく再現するため、FDTD 解析においては最小セルサイズを 0.1mm とした。また、同周波数帯において NaCl 水溶液の誘電率は 950MHz 帯と比べ 1/2 程度、損失正接は 3 倍程度の値を用いた。

②有限要素法 (FEM) に基づく電磁界解析を用いた植え込み型心臓ペースメーカ/ICD 電磁干渉影響評価のための評価手法の開発を行った。図 3(b) に示すように、ファントム内のリード配置の形状をより試験モデルに近くなるように製作した。FDTD 用数値モデルと同様リードは同軸構造とした。FDTD 用数値モデルと FEM 用数値モデル、それぞれを用いた場合について 950MHz 帯と 30GHz 帯の電波をファントムに向け照射した場合の干渉誘起電圧について評価し、ミリ波帯適用の場合の干渉誘起電圧の低下を定量化した。さらに、FDTD 用モデルにおいて直線的に近似したリードのモデル化に起因して評価結果に誤差が生じることを明らかにした。



(a) 試験系概要



(b) ブロック図

図 1. ペースメーカ/ICD 実機の電磁干渉評価試験系

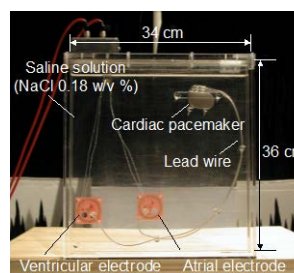
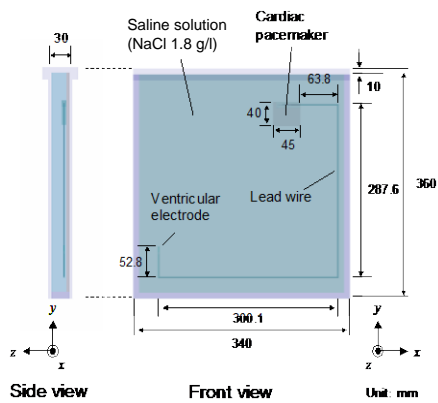
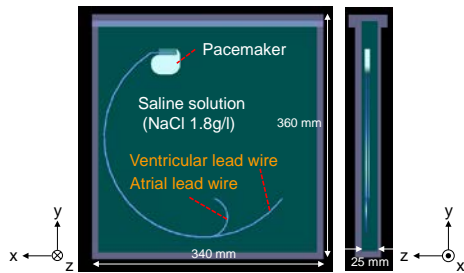


図 2. ペースメーカ/ICD 干渉試験用疑似人体



(a) FDTD 用数值モデル



(b) FEM 用数值モデル

図 3. 干渉影響評価用ファントム数值モデル

(2) 超伝導フィルタの受信系適用による読取装置の感度上昇およびミリ波帯電波の利用による干渉影響低減効果の見積もりを行い、さらに開発した数值シミュレーションに基づく評価ツールを用いて干渉特性について定量的評価を行った。

①マイクロ波帯(1GHz)/準ミリ波帯(20GHz)信号が電子機器に及ぼす電磁干渉影響について、ペースメーカを模擬し試作した低周波増幅器(トランジスタ回路/オペアンプ回路)を用いた基礎的な干渉評価実験を行い、用いた回路の場合、機器誤作動の原因となる干渉信号発生がや約 16 dB/oct で減少し、ミリ波帯の電波においてはマイクロ波帯に比較し大幅に低下する傾向があることを明らかにした。ただし、ペースメーカ/ICD の場合は本体がチタン製の容器で密閉されており、かつ製造業者によっては EMI 対策がされており、この値より減少率は低下する。

②ミリ波帯 RFID の実現可能性検討について、実験結果を含む文献資料に基づき調査を行った。Stefano Pellerano ら (IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 45, NO. 8, AUGUST 2010), Pekka Pursula ら (IEEE Trans. on Microwave Theory & Techniques, Vol. 59, No. 4, pp.1166-1173, Apr. 2011) は 60GHz 帯のミリ波タグ読み取り装置について実験的な検討より有効性および実現可能性を明らかにしている。さらに、A. K. M. Baki ら (JOURNAL OF NETWORKS, VOL. 9, NO. 12, DECEMBER 2014, pp. 3215-3220, Dec. 2014) は、UHF 帯とミリ波帯の RFID システムの比較

を行い、ミリ波帯適用の優位性について述べている。また、Christian Carlowitz ら (2012 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems, pp.1-4, Nov. 2012) は 30GHz 帯の RFID タグを用いた場合の通信距離 6m 程度の送受信特性について議論している。いずれの場合も実験結果に基づき実現可能性が示されている。本研究課題では、次に示す超伝導受信フィルタの適用を考慮し、30GHz 帯のミリ波 RFID を評価対象として選択することとした。

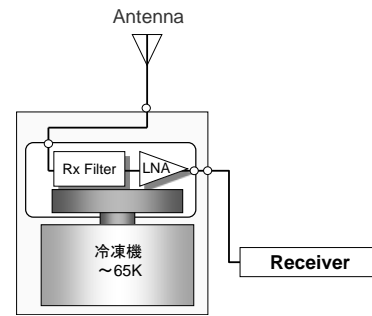


図 4. RFID 受信系への超伝導技術の適用

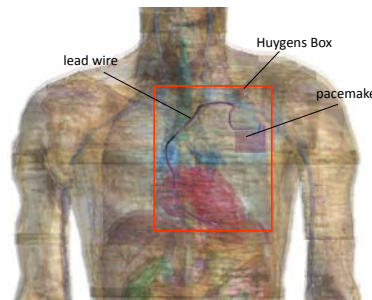


図 5. 人体を考慮した干渉影響評価の数值モデル例

③ 超伝導受信フィルタ適用による高感度化について文献に基づく見積もりを行った。研究代表者らは、携帯電話基地局用の超伝導送受信フィルタの研究において、受信系に超伝導技術を適用することにより、常温の受信系では実現できない高感度な受信特性が得られることを実験により確認している。マイクロ波周波数帯において超伝導は銅などの金属と比べて 3 ケタ程度低い抵抗値となり、熱雑音を低減できる。本課題では、図 4 に示すようにフィルタに加えて低雑音増幅器 (LNA) もともに冷却することでさらなる高感度化を実現した場合を想定した。すなわち、LNA を冷凍機の中に置くことで、LNA 自身の熱雑音を低減し、さらに超伝導フィルタによる高選択の受信により不要な周波数帯の信号により LNA で生じる相互歪の減少が期待できる。これらより本課題における超伝導受信フィルタ適用による高感度化は、環境温度を 300K とすれば、65K 程度まで冷却する冷凍機を用いることで 3 倍程度の上昇と見込めることを示した。すなわち、同一の通信距離を考えた

場合には1/3程度の出力とすることが可能と見込まれる。

④ ①および③の見込みに基づき、(1)において構築した数値シミュレーションに基づく評価ツールを用いて干渉特性について評価を行った。UHF帯のRFIDを用いて実験により取得された干渉距離から算出される誘起電圧を基準とした場合、本課題で検討した30GHz帯RFIDの場合の干渉誘起電圧は1/10以下であることを示した。

(3) 送受信機器間の環境条件、具体にはアンテナ間距離や人体の存在等(図5)、装置周囲の電波環境条件を変化させた場合の受信特性および送受信装置近傍における植込み型医療器の電磁干渉影響度合いについて評価例を取得した。

本研究成果は、未利用周波数資源有効利用への貢献に加え、RFID技術の飛躍的適用範囲拡大や高性能化を達成可能など産業発展への寄与も期待される。

## 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15件)

- (1) T. Hikage, M. Shirafune, T. Nojima, and H. Fujimoto, In-vitro Assessment of Electromagnetic Interference Due to Electric Vehicle Wireless Power Transfer System on Active Implantable Medical Device, International Symposium on Medical Information and Communication Technology, 査読有, 2015, pp.59-62.
- (2) T. Hikage, T. Ono, H. Suda, T. Nojima, and H. Fujimoto, Active Implantable Medical Device EMI Assessments for Radio Frequency Identification Interrogators Operating in LF, HF, and UHF Bands, Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, 2015, pp.18-21.
- (3) T. Hikage, M. Shirafune, T. Nojima, A Numerical Assessment Methodology Based on Interference Voltage for Pacemaker EMI Triggered by Magnetic Resonance Wireless Power Transfer Coils, IEEE International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications, 査読有, 2014, pp.1-4.
- (4) 小野泰伴, 日景 隆, 野島俊雄, 有限要素法による磁界共振型ワイヤレス電力伝送コイル近傍の植込み型心臓ペースメーカー干渉誘起電圧推定, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 246, 査読無, 2014, pp.19-22.
- (5) T. Hikage, M. Shirafune, T. Nojima, AN ESTIMATION OF INDUCED VOLTAGE AT IMPLANTABLE CARDIAC PACEMAKER DUE TO MAGNETIC RESONANT WIRELESS POWER TRANSFER COILS USING FINITE ELEMENT METHOD, XXXI URSI GENERAL ASSEMBLY AND SCIENTIFIC SYMPOSIUM, KE01.3, 査読有, 2014, pp.1-4.
- (6) T. Hikage, T. Ono, T. Nojima, T. Nagaoka, S. Watanabe, NUMERICAL EVALUATION OF LOCAL SAR IN ANATOMICAL PHANTOM IMPLANTED WITH METALLIC OSTEOSYNTHESIS PLATES EXPOSED TO 2GHZ RF FIELDS, URSI GENERAL ASSEMBLY AND SCIENTIFIC SYMPOSIUM, KB02.4, 査読有, 2014, pp.1-4.
- (7) Takashi Hikage, Taisuke Ono, Toshio Nojima, Tomoaki Nagaoka and Soichi Watanabe, Numerical Modeling for SAR Evaluation in Human Implanted with Osteosynthesis Plates of mandibular fractures, BioEM2014, 査読有, 2014, pp.97-99.
- (8) H. Fujimoto, T. Toyoshima, T. Hikage, T. Nojima, A New Improved Electrode for the Human Body Model: Application for EMI Assessment of Active Implant Medical Devices, 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 査読有, 2014, pp.218-221.
- (9) T. Hikage, M. Shirafune, T. Nojima, Implantable Cardiac Pacemaker EMI Triggered by HF-band Wireless Power Transfer Coils, 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 査読有, 2014, pp.222-225.
- (10) T. Suzuki, T. Hikage, T. Nojima, Numerical Assessment Method for Implantable Cardiac Pacemaker EMI Triggered by 10MHz-band Wireless Power Transfer Coils, IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications, 査読有, 2013, pp.1-3, DOI:10.1109/IMWS-BIO.2013.6756262.
- (11) Takashi Hikage, Takuma Suzuki, and Toshio Nojima, Numerical Assessment Method for Implantable Cardiac Pacemaker EMI Triggered by 10MHz-band Wireless Power Transfer Coils, Joint Workshop of URSI Commission K and ICNIRP, 査読有, 2013, p.38.
- (12) Takashi Hikage, Masami Shirafune, Toshio Nojima, Hiroshi Fujimoto, and Takeshi Toyoshima, In vitro Assessment of EMI from RFID Interrogator on Implantable Cardiac

Pacemakers and Implantable Cardioverter Defibrillators, International Symposium on Electromagnetic Theory, 査読有, 2013, pp. 1140-1143.

- (13) 日景 隆, 河村由文, 野島俊雄, 藤本裕, 豊島 健, RFID 機器による植込み型心臓ペースメーカーおよび植込み型除細動器電磁干渉の実験的評価法, 電気学会電磁環境研究会資料, EMC-13-9, 査読無, 2013, pp. 37-40.
- (14) 鈴木琢馬, 河村由文, 日景 隆, 野島俊雄, 磁界共振型ワイヤレス電力伝送アンテナによる植込み型医療機器EMIの数値評価法, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.112, no.157, EST2012-34, 査読無, 2013, pp. 157-160.
- (15) Takashi Hikage, Yoshifumi Kawamura, Toshio Nojima, Numerical Estimation on Active Implantable Medical Device EMI due to Magnetic Resonance Wireless Power Transmission Coils, 34th Annual Conference of The Bioelectromagnetics Society, 査読有, 2012, pp. 87-89.

[学会発表] (計 9 件)

- ① 日景 隆, 電気光変換器を用いた植込み型医療機器EMI評価のための干渉誘起電圧測定系, 2015年電子情報通信学会総合大会, 2015年03月11日, 立命館大学(草津市).
- ② 小野泰伴, 強制照射・サーモグラフィ法を用いた埋め込み金属プレートによるSAR上昇の実験的推定, 2014年電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2014年10月26日, 北海道科学大学(札幌市).
- ③ 政木 遥, HF帯ワイヤレス電力伝送コイル近傍における植込み型心臓ペースメーカー干渉誘起電圧のFEM解析—心房・心室リードの比較—, 2014年電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2014年10月26日, 北海道科学大学(札幌市).
- ④ 日景 隆, 非接触充電器による植込み型医療機器EMIのin vitro試験, 2014年電子情報通信学会総合大会(招待講演), 2014年3月20日, 新潟大学(新潟市).
- ⑤ 鈴木琢馬, 有限要素法を用いた磁界共振型ワイヤレス電力伝送コイル近傍における植込み型心臓ペースメーカー干渉誘起電圧の推定—単極・双極モードの比較—, 2013年電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2013年10月20日, 室蘭工業大学(室蘭市).
- ⑥ 小野泰伴, 無線電力伝送コイル近傍界による植込み型医療機器EMIのFDTD解析, 013年電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2013年10月20日, 室蘭工業大学(室蘭市).
- ⑦ 鈴木琢馬, 磁界共振型非接触電力伝送

の電磁界による植込み型心臓ペースメーカー端子誘起電圧の数値推定—送受信コイルの位置ずれによる影響—, 2012年電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2012年10月20日, 北海道大学(札幌市).

- ⑧ 入江洋平, 植込み型心臓ペースメーカーEMI試験用平板トルソーフアントムの数値シミュレーションモデルの開発, 2012年電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2012年10月20日, 北海道大学(札幌市).
- ⑨ 日景 隆, 数値計算を用いた非接触電力伝送コイル近傍における植込み型医療機器EMI評価法, 電子情報通信学会WPT(第二種研究会)技術研究報告, 2012年7月31日, 情報通信研究機構(東京都)

[その他]

ホームページ等

<http://wtmc.ist.hokudai.ac.jp/hikage/records.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

日景 隆 (HIKAGE TAKASHI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号：30312391