

# PEM

---

---

## 第3回 光応用電磁界計測研究会

— 光計測及び一般 —

PEM2022-13～15

2023年 2月24日 (金)

Web 開催

主 催：電子情報通信学会

光応用電磁界計測特別研究専門委員会

連 催：電気学会 光応用・視覚／計測 合同研究会

協 賛：IEEE Instrumentation & Measurement Tokyo/Japan  
Sections Joint Chapter

**第3回 光応用電磁界計測研究会**  
**電気学会 光応用・視覚／計測 合同研究会連催**  
**プログラム**

議 題 テーマ「光応用計測及び一般」

2023年 2月 24日（金）

(Web) 14:40 ~ 14:45 研究会開催にあたって

電子情報通信学会 光応用電磁界計測特別研究専門委員会 委員長 佐々木愛一郎

(Web) 14:45 ~ 16:05 電子情報通信学会 光応用電磁界計測研究会講演 座長 日景 隆（北海道大学）

PEM2022-13 第5世代移動通信システムSub-6GHz周波数帯における植込み型医療機器 EMIのばく露偏波依存特性

◎津村楓奈, 西川拓次, 脇 修平, 日景 隆（北海道大学）

井山隆弘, 東山潤司, 鈴木恭宜（NTTドコモ）

PEM2022-14 機械学習を利用した磁界式端末位置推定システムの精度検証

◎宮地皇河, 佐々木愛一郎（近畿大学）

PEM2022-15 可視光を利用した生体等価ファントム内部の温度分布測定

◎山崎祥他, 水野麻弥, 長岡智明（情報通信研究機構）

場 所： Web 開催

主 催： 電子情報通信学会光応用電磁界計測特別研究専門委員会  
（ <http://www.ieice.org/~pem/> ）

連 催： 電気学会 光応用・視覚／計測 合同研究会

協 賛： IEEE Instrumentation & Measurement Tokyo/Japan Sections Joint Chapter

本予稿集に掲載された論文等の著作権は著者に帰属します。

発行年月日：2023年2月24日

発行所：(一社)電子情報通信学会

光応用電磁界計測(PEM)特別研究専門委員会

## 第5世代移動通信システム Sub-6GHz 周波数帯における 植込み型医療機器 EMI のばく露偏波依存特性

津村 楓奈<sup>†</sup> 西川 拓次<sup>†</sup> 脇 修平<sup>†</sup> 日景 隆<sup>†</sup> 井山隆弘<sup>‡</sup> 東山潤司<sup>‡</sup> 鈴木恭宜<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>北海道大学 大学院情報科学院 〒060-0814 札幌市北区北14条西9丁目

<sup>‡</sup>株式会社NTTドコモ 〒239-8536 神奈川県横須賀市光の丘3-6

E-mail: <sup>†</sup> { f\_tsumura, t\_nishikawa, s\_waki, hikage } @wtmc.ist.hokudai.ac.jp

あらまし 無線通信において高周波数帯の電波利用が拡大し、植込み型医療機器（植込み型心臓ペースメーカー／植え込み型除細動器：以降、ペースメーカー）の電磁干渉（EMI: Electromagnetic Interference）特性に関する十分な調査及び検討が求められており、電磁界シミュレーションを用いた評価法の構築を目的として検討を行っている。本稿では、第5世代移動通信システムの5G Sub6周波数帯(3.7 GHz, 4.5 GHz)において、ペースメーカーコネクタ部への電波ばく露によって、ペースメーカーに生じる干渉誘起電圧の偏波依存性を有限要素法に基づく電磁界シミュレーションにより推定する。解析にはEMI評価試験で使用される疑似人体(ファントム)中にペースメーカーを配置した高精度数値モデルを用いる。ペースメーカー近傍に半波長ダイポールアンテナを設置し、電波を照射した際にコネクタ部から混入する干渉誘起電圧の特性と、ばく露電磁界の偏波の関係について検討する。

キーワード 植込み型医療機器 EMI, 干渉誘起電圧, 有限要素法

## Exposure Polarization Dependence of Active Implantable Medical Device EMI in the 5G Sub-6 GHz Band

Fuuna TSUMURA<sup>†</sup>, Takuji NISHIKAWA<sup>†</sup>, Shuhei WAKI<sup>†</sup>, Takashi HIKAGE<sup>†</sup>,

Takahiro IYAMA<sup>‡</sup>, Junji HIGASHIYAMA<sup>‡</sup>, and Yasunori SUZUKI<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Information Science and Technology, Hokkaido University

Kita14, Nishi9, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-0814 Japan

<sup>‡</sup> NTT DOCOMO, INC. 3-6 Hikarinooka, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-8536 Japan

E-mail: <sup>†</sup> { f\_tsumura, t\_nishikawa, s\_waki, hikage } @wtmc.ist.hokudai.ac.jp

**Abstract** The use of radio waves in the high-frequency band is expanding in wireless communications, and there is a need to fully investigate and study the electromagnetic interference (EMI) characteristics of active implantable medical devices (implantable cardiac pacemakers/implantable cardioverter-defibrillators: hereinafter referred to as "pacemakers"). We have been studying the electromagnetic interference (EMI) characteristics of pacemakers with the aim of developing an evaluation method using electromagnetic simulation. In this paper, we estimate the polarization dependence of the interference-induced voltage generated in a pacemaker connector by exposure to radio waves in the 5G Sub6 frequency band (3.7 GHz and 4.5 GHz) of the 5th generation mobile communication system using electromagnetic field simulations based on the finite element method. A high-precision numerical model of a pacemaker placed in a simulated human body (phantom), which is used in EMI evaluation tests, is used in the analysis. A half-wavelength dipole antenna is installed near a pacemaker to investigate the relationship between the polarization of the exposed electromagnetic field and the characteristics of the interference voltage that is introduced at the connector when the antenna is irradiated by radio waves.

**Keywords** Active Implantable Medical Device EMI, Interference Voltage, Finite Element Method

### 1. まえがき

携帯電話などに代表される各種電波利用機器が植

込み型心臓ペースメーカーおよび植込み型除細動器  
(ICD: Implantable Cardioverter Defibrillator) 等の植込

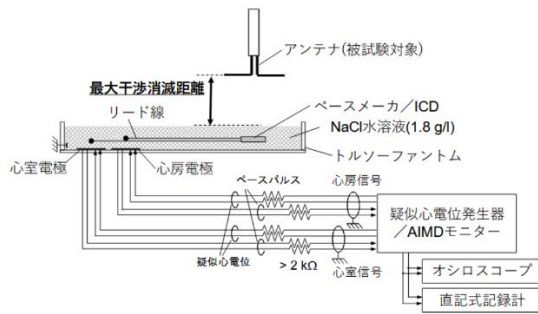


図 1. 植込み型医療機器 EMI の影響調査

表 1. ペースメーカおよびファントムの電気定数

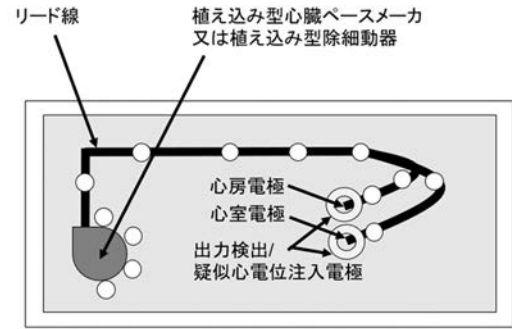
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
Pacemaker CAN, Lead		Perfect Electric Conductor
コネクタ被覆 (Silicon)	3	-
Acrylic case	2.7	-
NaCl 水溶液	3.7 GHz	76.9
	4.5 GHz	75.8

表 2. FEM 解析条件

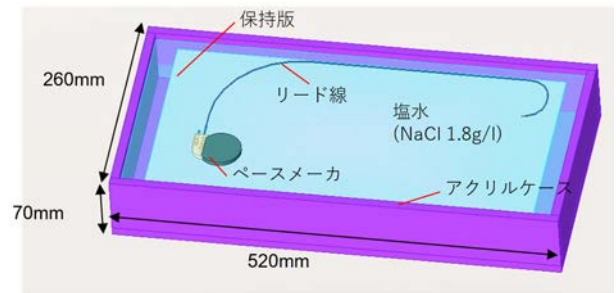
FEM Solver	Direct Solver
Order of Basis Function	2
Boundary Condition	2 <sup>nd</sup> order radiation boundary condition
Estimation frequency	3.7, 4.5 [GHz]
FEM mesh	Cond. Edge: 0.2×estimation conductor width Cond. Vertex: 0.2×0.3×estimation conductor width

み型医療機器に及ぼす電磁干渉影響 (EMI) について調査・研究が進められており[1]~[3], また, それら調査結果に基づき影響防止のための指針[4]が運用されている. 著者らはこれまでに, 携帯電話, RFID 機器あるいはワイヤレス電力伝送機器等が植込み型医療機器に与える電磁干渉影響について, 心臓ペースメーカおよび ICD 実機を用いた実験調査結果を報告するとともに, 数値解析に基づく影響評価手法の提案を実施している[5],[6].

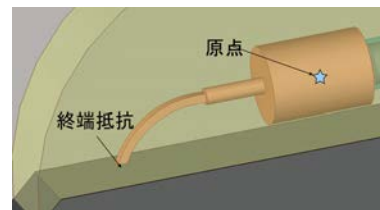
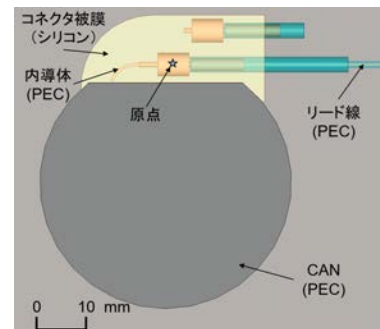
植込み型医療機器 EMI の影響調査においては, 市場投入されている機種の中から網羅性を考慮し選定された複数の心臓ペースメーカおよび ICD (以降, ペースメーカ) の実機を用いて実施されている[3]. ペースメーカ実機を, NaCl 水溶液で満たされた疑似人体 (トルソーファントム: 図 1)中に配置し, ファントムと被試験機器である電波利用機器間の干渉距離および臨床的影響度合いが評価される. ペースメーカの EMI は, 内



(a)



(b)



(c)

図 2. ペースメーカ EMI 試験用横置き型平板トルソーファントムとペースメーカモデル

(a) 試験用ファントム, (b) トルソーファントムモデル, (c)ペースメーカモデル

部のセンシング回路の入力に心電位と類似した信号あるいは明らかに閾値レベルを超える振幅の干渉信号が誘起された場合に引き起こされるが, 実機ペースメーカの内部回路に生じる干渉信号 (以降, 干渉誘起電圧) を外部から取得することは困難である.

携帯電話や RFID など各種電波利用機器に対するペースメーカ EMI 評価において, 最大干渉消滅距離の測定が行われているが, これら測定では, EMI の発生は確

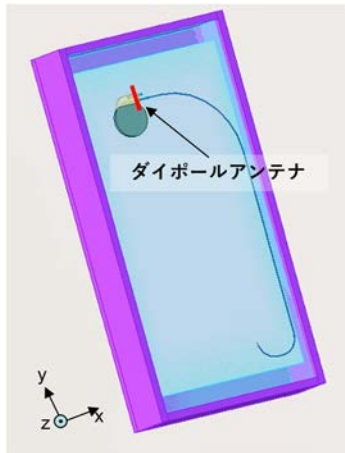


図 3. 干渉誘起電圧評価系の全体モデル

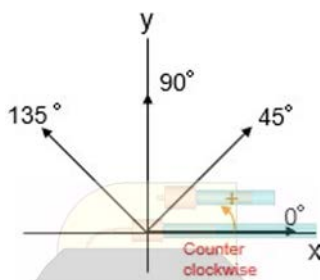


図 4. アンテナ設置角度

認できるものの、ペースメーカーに干渉電圧を取得するような機能はなく、影響の原因となる干渉誘起電圧を直接取得することはできない。

従来の検討から、数百 MHz から 3 GHz 程度以下の携帯電話周波数帯においては、ペースメーカー本体とリードの接続点であるコネクタ部が主に外部電磁界と結合することにより内部回路に干渉誘起電圧を生じさせることが知られている[7]。これまで携帯電話による埋め込み型心臓ペースメーカーの電磁干渉を予測するためのモデルの検討[8]、人体近傍電界通信機器による植え込み型医療機器への誘導電圧の検討[9]、移動端末による植込み型ペースメーカーの干渉電圧の研究[10]等、干渉誘起電圧評価に関する検討例はあるものの、ペースメーカーコネクタ部と外部電磁界の結合機序に関してばく露電波に対する干渉誘起電圧の偏波依存性を詳細に検討した報告例はない。

本報告では、EMI 評価試験で用いられる疑似人体に組み込んだペースメーカー数値モデルを用い、半波長ダイポールアンテナ近傍におけるペースメーカーに生じる干渉誘起電圧のばく露偏波の角度依存特性について数値シミュレーションにより推定する。ペースメーカー/リードコネクタ回路部の構造を実機に基づき高精度に再現した数値モデル[11]を用い、第 5 世代移动通信システムにおける 6 GHz 未満の周波数帯(以下、Sub6 帯)の一部である 3.7 GHz 及び 4.5GHz のダイポールアン

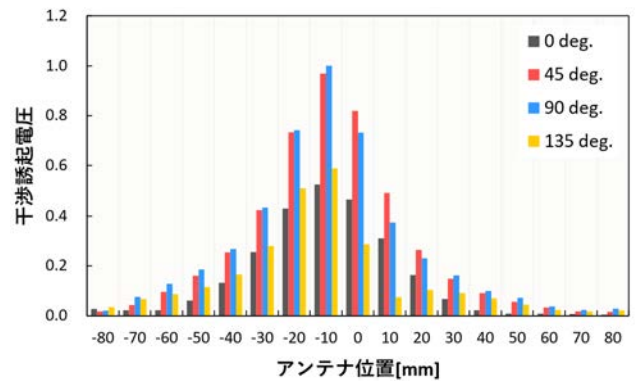


図 5 各偏波照射時における電波照射位置-干渉誘起電圧特性のばく露偏波依存性(@3.7 GHz)

テナを、ペースメーカーのコネクタ部近傍に設置する。偏波はペースメーカーのリード線挿入方向を始線として、アンテナを  $0^\circ$  から  $135^\circ$  まで反時計回りに  $45^\circ$  ずつ回転させ、計 4 つの角度において干渉誘起電圧を取得し、干渉誘起電圧の偏波依存特性を評価する。

## 2. ペースメーカーに生じる干渉誘起電圧評価のための高精度数値解析モデル及び干渉誘起電圧評価結果

携帯電話/スマートフォンを対象としたペースメーカー EMI 評価試験は、図 2(a)に示すような横置き型の平板トルソーファントムが用いられる[3]。このファントムは Irnich ら考案のモデル[1]を基に開発された。内部を 0.18 重量%濃度の NaCl 水溶液[12]で満たしたアクリル製の水槽構造をしており、ペースメーカーは接続されたリードとともに保持板上に配置される。リードの先端は、疑似心電信号を提供すると同時にペースメーカーが発するペーシング信号を取得する機能を有するリング電極の上で終端される[2][3]。シミュレーションにおいては、図 2(b)に示す板の厚みが 1 cm で均一であるトルソーファントムモデルと図 2(c)に示すペースメーカーモデルを用い、ファントム近傍に配置したアンテナからの放射電波により内導体の先端とペースメーカー本体(CAN)の間に設置された終端抵抗( $1M\Omega$ )に誘起される電圧を干渉誘起電圧として評価する。解析に用いたペースメーカーの数値モデルは、ペースメーカー本体(CAN)に心室用リード(VVI モード: 心室でペーシング、心室の自己心拍を感知)が接続されたモデルであり、CAN、リードおよびコネクタ回路部について実機に基づき寸法と形状を高精度に再現した。なお、リードには、ユニポーラ(単極)型およびバイポーラ(双極)型の 2 種類があるが、本稿では単極リードをモデル化している。リードは  $1M\Omega$  の高インピーダンス負荷を介して CAN と接続した[13],[14]。

解析は、市販の有限要素法電磁界シミュレータを用いる。図3にアンテナとファントムを含む解析空間を示す。ペースメーカー表面からアンテナまでの距離を20mm、ダイポールアンテナの中心を図2(c)に示す原点に一致させて配置する。図4にアンテナの設置角度を示しており、 $0^\circ$ （電界の振動方向が図3のX軸と平行）から反時計回りに $45^\circ$ 刻みで $135^\circ$ まで計4つの偏波で電波を照射し、干渉誘起電圧についてFEMの手法を用いた電磁界解析により評価した。シミュレーションに用いたペースメーカー/ファントムモデルの電気定数および解析条件を表1および表2にまとめて示す。

図5にFEM解析により得られた、3.7GHzにおけるペースメーカーに生じる干渉誘起電圧を示す。ファントムの短手方向(X軸方向)に対して、コネクタ中心位置を原点とし、10mm間隔で $\pm 80$ mmの範囲で電波照射位置を変化させて解析する。また、アンテナ入力電力を1mWとし、取得した干渉誘起電圧の最大値が1となるように規格化している。同図から、各偏波毎に干渉誘起電圧の最大値は異なっており、 $0^\circ$ 偏波が最も小さく、 $90^\circ$ 偏波が最も大きい。3.7GHzにおいては約1.9倍の差異があり、これは終端抵抗が接続されている内導体がY軸方向に伸びていることから電界の向きがY軸方向である $90^\circ$ 偏波を照射した時に干渉誘起電圧が最も大きくなったと考えられる。また、偏波干渉誘起電圧の最大値をとる位置が $X = -10$ mmであることから終端抵抗が接続されている内導体の構造がペースメーカーに生じる干渉誘起電圧に強い影響を与えていると考えられる。今後、電気光変換器を組み込んだ疑似ペースメーカーを用いた干渉誘起電圧測定結果[15]との比較により、シミュレーション結果の妥当性を検証する予定である。

### 3. むすび

ペースメーカー実機を高精度に再現した数値モデルを利用し、Sub6周波数帯電波ばく露時における干渉誘起電圧の偏波依存特性についてFEMシミュレーションにより評価した。解析結果より、近傍電磁界において、ばく露電磁波の偏波により干渉誘起電圧特性に大きな差異が生じる可能性があることを明らかにした。今後、ペースメーカーコネクタ部の構造と偏波特性に起因する干渉誘起電圧のばらつき評価について検討を予定している。

### 文 献

[1] W. Irnich, L. Bats, R. Muller, and R. Tobisch, "Electromagnetic interference of pacemaker by mobile phones", PACE, vol. 19, pp. 1431-1446, Nov. 1996.  
 [2] 不要電波問題対策協議会, "～医用電気機器への電波の影響を防止するために～携帯電話端末等

の使用に関する調査報告書", 1997.  
 [3] 総務省, "電波の医用機器等への影響に関する調査研究報告書," 2001-2006, "電波の医療機器等への影響に関する調査研究報告書," 2007-2014, "電波の医療機器等への影響に関する調査報告書," 2015-2017, "電波の植込み型医療機器及び在宅医療機器等への影響に関する調査等報告書," 2018-2019.  
 [4] 総務省, "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," 2018.  
 [5] S. Futatsumori, Y. Kawamura, T. Hikage, T. Nojima, B. Koike, H. Fujimoto, T. Toyoshima, "In vitro Assessment of Electromagnetic Interference Due to Low-Band RFID reader/writers on Active Implantable Medical Devices", Journal of Arrhythmia, Vol.25, No. 3, pp. 142-152, Jan. 2010.  
 [6] N. Tanaka, T. Hikage, T. Nojima: "FEM Simulations of Implantable Cardiac Pacemaker EMI Triggered by HF-Band Wireless Power Transfer System," IEICE TRANSACTIONS on Electronics, Vol.E99-C, No.7, pp.809-812, July 2016.  
 [7] 豊島 健: "ペースメーカー/ICD 治療の工学的問題点," Therapeutic Research, Vol. 28, Iss.2, pp. 236 - 241, 2007.  
 [8] J. Wang, O. Fujiwara, T. Nojima: "A model for predicting electromagnetic interference of implanted cardiac pacemakers by mobile telephones," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 48, Iss. 11, pp.2121-2125, 2000.  
 [9] 芳野裕樹, 多氣昌生, "人体近傍電界通信機器による植え込み医療機器への誘導電圧の検討," 信学技報, EMCJ2010-74, Nov. 2010.  
 [10] Y. Endo, K. Saito, S. Watanabe, M. Takahashi, K. Ito, "Study of Interference Voltage of an Implanted Pacemaker by Mobile Terminals," IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 58, No. 1, pp. 30-39, Feb. 2016.  
 [11] 孫 津韜, 伊藤涼音, 日景 隆, 野島俊雄: "3D-FEM シミュレーションを用いた4G/LTE 周波数帯植込み型医療機器 EMI 評価法の検討", 信学技報, vol. 120, no. 83, EMCJ2020-16, pp. 29-32, 2020年7月.w  
 [12] ANSI/AAMI PC69:2007 Active implantable medical devices-Electromagnetic compatibility-EMC test protocols for implantable cardiac pacemakers and implantable cardioverter defibrillators.  
 [13] 大塚 敦生, 日景 隆, 石岡 諒汰, 東山 潤司, 井山 隆弘, 鈴木 恭宜: "第5世代移動通信システム Sub-6GHz 周波数帯における電界型及び磁界型アンテナ近傍での植込み型医療機器干渉誘起電圧推定," 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J105-C, No.5, pp. 157-166, 2022.  
 [14] 西川拓次, 日景 隆, 井山隆弘, 東山潤司, 鈴木恭宜: "5G Sub-6 周波数帯における植込み型医療機器 EMI のばく露偏波依存特性推定", 信学技報, vol. 122, no. 67, EMCJ2022-20, pp. 30-33, 2022年6月.  
 [15] 西川拓次, 日景 隆, 井山隆弘, 東山潤司, 鈴木恭宜: "電気光変換器を用いた4Gおよび5G周波数帯電波ばく露による植込み型医療機器 EMI 評価のための干渉誘起電圧測定", 信学技報, vol. 122, no. 372, EMCJ2022-74, pp.12-16, 2023年1月.

# 磁界式端末位置推定システムの推定精度向上に関する検討

宮地 皇河<sup>†</sup> 佐々木 愛一郎<sup>†</sup>

近畿大学工学部 〒739-2116 広島県東広島市高屋うめの辺 1 番

E-mail: <sup>†</sup> {1910930081a, aisasaki}@hiro.kindai.ac.jp

**あらまし** 近年の IoT 技術の普及に伴い、屋内位置推定技術の需要が高まると考えられる。我々のグループでは、磁界を用いた端末位置推定の研究に取り組んでおり、機械学習を利用した磁界式端末位置推定法を世界に先駆けて提案してきた。これまでの研究により、実システムにおける本手法の一定の有効性を確認することができたが、位置推定精度の観点からは未だに課題が残っている。そこで本研究では実システムにおける推定精度低下の原因の 1 つである不要信号混入の影響を低減する手法を提案し、その有効性を確認したので報告する。

**キーワード** 磁界, 位置推定システム, 機械学習, ニューラルネットワーク

## A Study on Improving the Estimation Accuracy of Magnetic Field-Based Positioning System

Kouga MIYAJI<sup>†</sup> Ai-ichiro SASAKI<sup>†</sup>

Faculty of Engineering, Kindai University 1 Takaya-Umenobe, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-2116 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {1910930081a, aisasaki}@hiro.kindai.ac.jp

**Abstract** With the recent diffusion of IoT technology, the demand for indoor positioning technology is expected to increase. Our group has been studying magnetic field-based positioning system, and has proposed the world's first magnetic field-based positioning system using machine learning. Although we were able to confirm a certain level of effectiveness of the actual system in our previous study, there are still issues to be addressed in terms of position estimation accuracy. In this study, we proposed a method to reduce the influence of unwanted signal contamination in the measurement system, which is one of the causes of inaccurate estimation, and confirmed the effectiveness of the proposed method through verification.

**Keywords** Magnetic Field, Positioning System, Machine Learning, Neural Network

### 1. 背景

位置推定技術の需要は、近年の IoT 技術の普及を考えるとますます増えていくと考えられる。端末位置推定法としては電波を用いる方式が活発に研究されている[1]–[3]。しかし電波を利用している性質上、物体での反射や減衰など、障害物の影響を避けるのは困難であり、高い位置精度を実現するのは容易でない。そこでターゲットレンジを数 m 以内の近距離に限れば、障害物の影響を受けにくい特性をもつ磁界を用いた方式が、推定精度の観点において最も有望であると考えられる。実際に海外では磁界を利用した位置推定法が活発に研究されている[4]–[8]。

磁界式位置推定は、端末(Tx)が発する磁界信号  $\mathbf{B}$  を複数のセンサ(Rx)で検出し、その情報を元に端末位置の推定を行うというものである。我々のグループではこれまでに、機械学習を用いた磁界式端末位置推定法

を世界に先駆けて提案してきた[9]–[11]。機械学習には、複数の Rx が検出する磁界信号  $\mathbf{B}$  と端末の位置  $\mathbf{r}$  で構成された訓練データ  $\{\mathbf{B} \rightarrow \mathbf{r}\}$  が必要になる。一般に機械学習によって得られる予測関数の性能を向上させるためには、多数の訓練データが必要であるが実際のシステムから得るには時間やコストがかかるため、訓練データの取得は難しい課題となっている。しかし、磁界式位置推定では訓練データを計算で生成することができるため、機械学習との親和性が極めて高い。当然この手法では、Rx が実際に検出する信号の値  $B_{\text{meas}}$  と計算で得た信号の値  $B_{\text{ideal}}$  が近いほど推定精度は高くなると考えられるが、実システムにおいては誤差が生じているため、推定精度向上における課題となっている。本研究では、この誤差の原因である不要信号混入の影響を低減する手法を提案し、有効性を検討したので報告する。

## 2. 機械学習を利用した位置推定の原理と課題

磁界を用いた位置推定は、図 1 に示すように端末 (Tx) が磁界を発生させ、複数のセンサ (Rx) が受信する磁界信号  $B$  をもとに行っている。図上の Rx は 4 つ設置されているが、必ずしも 4 つに限らない。

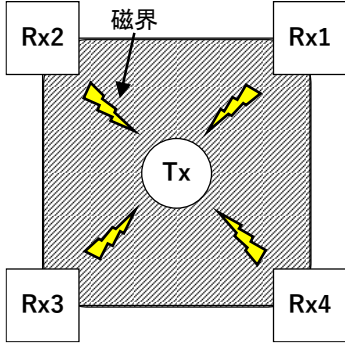


図 1 実験に使用した位置推定システム

ここで、本研究で使用している磁界式位置推定システムの構成を図 2 に示す。ファンクションジェネレータ (FG) から Tx に交流電圧を印加し磁界信号が発生する。信号は測定範囲の 4 隅に固定されたセンサ (Rx1~4) で受信し、スイッチ (SW1~4) を制御回路で切替えることにより各 Rx の磁界信号をスペクトラムアナライザ (SA) で計測している。スイッチの切替は FG1, FG2 が生成する直流電圧をデジタル信号とみなすことで 4 通りの動作を実現している。SA で計測した各 Rx の磁界信号のデータは PC に転送される。

本来の位置推定では、端末の空間回転自由度を考慮する必要があるが、本実験では端末 Tx の角度を固定し Tx の磁気モーメントが常に  $z$  方向を向くように配置した。またセンサ Rx には一軸コイルを利用し、磁界の  $z$  成分のみを検出した。

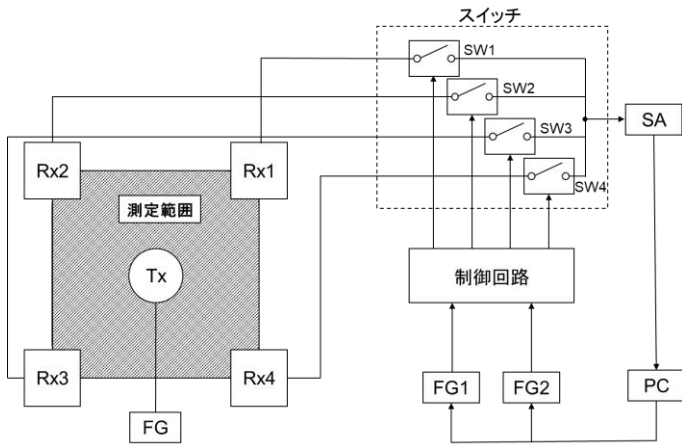


図 2 実験に使用した位置推定システム

ここで、機械学習を利用した磁界式端末位置推定の原理を示す。機械学習を用いて端末位置推定を行うに

は、図 2 に示す測定範囲内の送信端末 Tx の様々な位置に対して、4 つの Rx が受信する磁界信号  $B$  を予め計算し、以下の形式の訓練データを生成する必要がある。

$$\{B^{(1)}, B^{(2)}, B^{(3)}, B^{(4)}\} \rightarrow \mathbf{r}^{(t)} \quad (1)$$

ここで  $B^{(k)}$  は  $k$  番目の Rx が受信する磁界、 $\mathbf{r}^{(t)}$  は Tx の正解位置を表す。このような多数の訓練データを元に機械学習することで、Rx が受信した磁界データから端末の位置を推定する予測関数  $\mathbf{P}$  を得る。

$$\mathbf{r}^{(p)} = \mathbf{P}(B^{(1)}, B^{(2)}, B^{(3)}, B^{(4)}) \quad (2)$$

ただし  $\mathbf{r}^{(p)}$  は Tx の推定位置であり、正解位置  $\mathbf{r}^{(t)}$  の近似値とみなせるので、予測関数  $\mathbf{P}$  の推定精度評価指標として次式の推定誤差  $d$  を定義する。

$$d := \|\mathbf{r}^{(t)} - \mathbf{r}^{(p)}\|_2 \quad (3)$$

磁界式位置推定においては、Rx が受信する磁界信号を計算によって高い精度で得られるため、機械学習に用いる訓練データも計算で生成することができる。Rx が受信する磁界信号は次式によって得ることができる。

$$B_{\text{ideal}}^{(k)} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2(z^{(k)} - z^{(t)})^2 - (x^{(k)} - x^{(t)})^2 - (y^{(k)} - y^{(t)})^2}{\{(x^{(k)} - x^{(t)})^2 + (y^{(k)} - y^{(t)})^2 + (z^{(k)} - z^{(t)})^2\}^{5/2}} \quad (4)$$

ここで  $(x^{(t)}, y^{(t)}, z^{(t)})$  は Tx の位置、 $(x^{(k)}, y^{(k)}, z^{(k)})$  は  $k$  番目の Rx の位置である。よって、(4)式を利用し以下の訓練データを生成することができる。

$$\{B_{\text{ideal}}^{(1)}, B_{\text{ideal}}^{(2)}, B_{\text{ideal}}^{(3)}, B_{\text{ideal}}^{(4)}\} \rightarrow \mathbf{r}^{(t)} \quad (5)$$

図 3 に本研究の改善課題である、不要信号混入の概念図を示す。本システムでは、経路切替のためのスイッチを利用することで、各 Rx が受信した磁界信号を計測している。しかし実際には、スイッチ接続先の Rx 以外の Rx からの信号がわずかながら混入することが明らかになっている。このような不要信号混入の影響は、特に Tx が Rx 近傍に存在する場合に大きく、推定精度低下の主要因となっている。

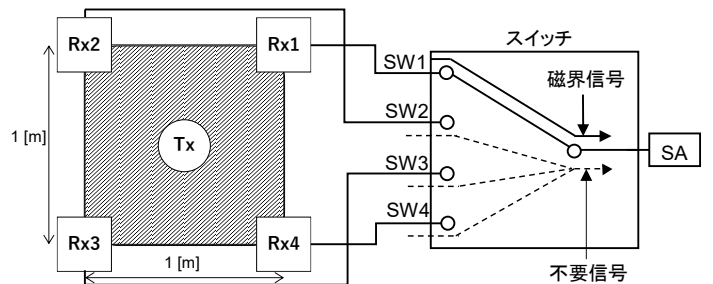


図 3 位置推定システムにおける不要信号混入の概念

### 3. 提案手法

そこで筆者は、不要信号混入を考慮した訓練データを計算する手法を考案し、実システムにおける推定精度の改善に取り組んでいる。不要信号混入の影響は、(6)式でモデル化するのが妥当と考えられる。ここで、 $B_{ideal}^{(k)}$  は不要信号混入を考慮していない磁界の計算値、 $B_{real}^{(k)}$  は不要信号混入を考慮した磁界の計算値を表す。カップリング係数  $C_{ij}$  は信号混入の程度を表しており、実測で得た。

$$\begin{pmatrix} B_{real}^{(1)} \\ B_{real}^{(2)} \\ B_{real}^{(3)} \\ B_{real}^{(4)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{ideal}^{(1)} \\ B_{ideal}^{(2)} \\ B_{ideal}^{(3)} \\ B_{ideal}^{(4)} \end{pmatrix} \quad (6)$$

(6)式から、以下の不要信号を考慮した訓練データの生成することができる。

$$\{B_{real}^{(1)}, B_{real}^{(2)}, B_{real}^{(3)}, B_{real}^{(4)}\} \rightarrow \mathbf{r}^{(t)} \quad (7)$$

### 4. 検証結果

提案手法の改善効果を評価するために、不要信号混入を考慮した訓練データ(7)と不要信号混入を考慮していない訓練データ(5)を別々に機械学習し、同一の検証データを使用して位置推定精度の検証を行った。

訓練データと検証データの取得位置を図4に示す。訓練データは、図4の  $x$ - $y$  平面と  $x$ - $z$  平面で構成される  $1\text{ m}^3$  の空間において、 $0.1\text{ m}$  間隔に配置されている格子点(●)計648点で計算し取得した。検証データは、高さ  $z=3\text{ cm}$  における  $x$ - $y$  平面上の  $0.13\text{ m}$  間隔に配置されている格子点(×)計49点を実システムで計測して取得した。

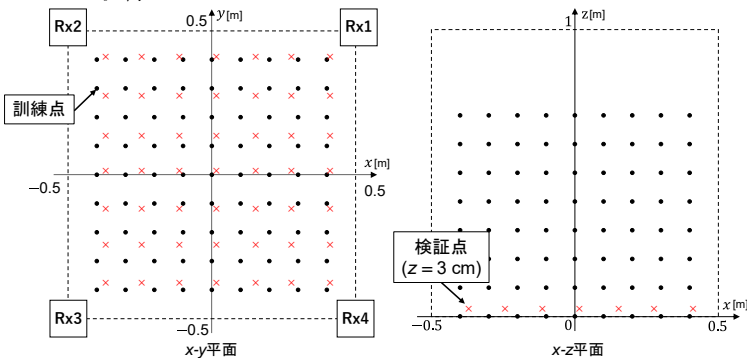
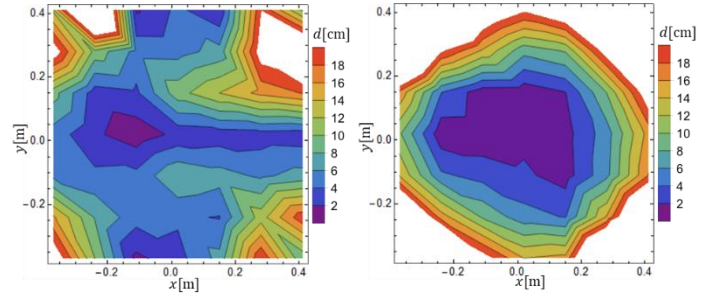


図4 訓練データと検証データの取得位置

図5(a)に、提案手法を適用した訓練データを機械学習させて位置推定を行った場合の推定誤差の分布図を示す。また図5(b)に、従来法の訓練データを機械学習させ位置推定を行った場合の推定誤差の分布図を示す。また、提案手法と従来法の推定誤差  $d$  に関するヒストグラムを図6に示し、推定誤差  $d$  の平均値を表1に示す。



(a) 提案手法 (b) 従来法

図5 推定誤差  $d$  の二次元分布図

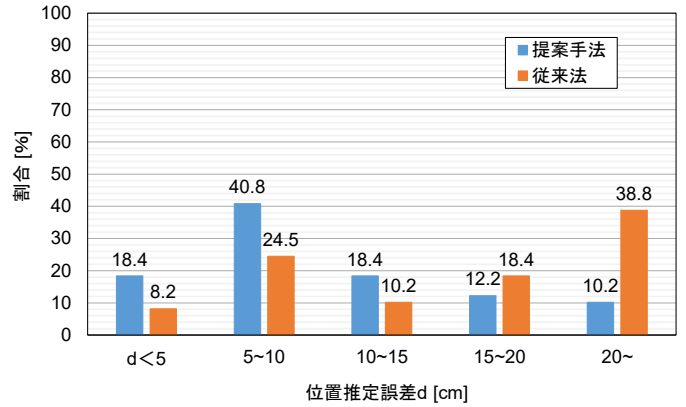


図6 位置推定誤差のヒストグラム比較

表1 各手法の推定誤差平均

	提案手法	従来法
推定誤差平均	10.8 cm	19.6 cm

図5より、推定精度の高いエリアが従来法に比べ拡大していることがわかる。また図6では、 $d < 5\text{ cm}$  となる割合が8.2%から18.4%に増え、 $d \geq 20\text{ cm}$  となる割合が38.8%から10.2%に減少していることが確認できる。さらに表1に示すように、提案手法を適用することで推定精度が約9cm向上することを確認した。以上の結果より、提案手法の一定の有効性を実証することができた。

### 5. まとめ

本研究では、磁界式位置推定システムにおける不要信号混入の影響を低減し、推定精度を向上させるために、不要信号のカップリングを考慮した訓練データ計算法を提案し検証を行った。検証は、提案手法の改善効果を評価するために、提案手法を適用した訓練データと従来法による訓練データを別々に機械学習し、同一の検証データを用いて位置推定検証を行い、結果を比較した。結果として、提案手法を適用することで従来法より推定精度の高いエリアを拡大することができ、推定誤差平均の比較から、提案手法を適用することで推定精度が約9cm向上したことを確認した。以上の

結果から、推定精度向上に提案手法が有効であることを実証することができた。

## 文 献

- [1] P. Davidson and R. Piché, “A survey of selected indoor positioning methods for smartphones,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol.19, no.2, pp.1347–1370, 2nd Quart., 2017.
- [2] X. Guo, N. Ansari, F. Hu, Y. Shao, N. R. Elikplim, and L. Li, “A survey on fusion-based indoor positioning,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol.22, no.1, pp.566–594, 1st Quart., 2020.
- [3] A. Nessa, B. Adhikari, F. Hussain, and X. N. Fernando, “A survey of machine learning for indoor positioning,” *IEEE Access*, vol.8, pp.214945–214965, Dec. 2020.
- [4] V. Pasku et al., “Magnetic field-based positioning system,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol.19, no.3, pp.2003–2017, 3rd Quart., 2017
- [5] A. Sheinker, B. Ginzburg, N. Salomonski, L. Frumkis, and B.-Z. Kaplan, “Localization in 3-D using beacons of low frequency magnetic field,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.62, no.12, pp.3194–3201, Dec. 2013.
- [6] A. Sheinker, B. Ginzburg, N. Salomonski, and A. Engel, “Localization of a mobile platform equipped with a rotating magnetic dipole source,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.68, no.1, pp.116–128, Jan. 2019.
- [7] V. Pasku, A. D. Angelis, M. Dionigi, G. D. Angelis, A. Moschitta, and P. Carbone, “A positioning system based on low-frequency magnetic fields,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.63, no.4, pp.2457–2468, Apr. 2016
- [8] T. E. Abrudan, Z. Xiao, A. Markham, and N. Trigoni, “Underground incrementally deployed magneto-inductive 3-D positioning network,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.54, no.8, pp.4376–4391, Aug. 2016.
- [9] A. Sasaki and E. Ohta, “Magnetic-field-base position sensing using machine learning,” *IEEE Sensors J.* vol. 20, no. 13, pp. 7292–7302, Jul. 2020.
- [10] A. Sasaki, “Effectiveness of artificial neural networks for solving inverse problems in magnetic field-based localization,” *Sensors*, vol. 22, no. 6, 2022, Art. no. 2240.
- [11] A. Sasaki and K. Fukushima, “Machine-learning approach for solving inverse problems in magnetic-field based positioning,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E105-A, no. 6, pp. 994–1005, Jun. 2022.

# 可視光を利用した生体等価ファントム内部の 高空間分解能な温度分布測定

山崎 祥他<sup>†</sup> 水野 麻弥<sup>†</sup> 長岡 智明<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail: <sup>†</sup> syamazaki@nict.go.jp, <sup>†</sup> {mmizuno, nagaoka}@nict.go.jp

あらまし 電波ばく露による温度上昇の評価に利用されてきた光ファイバー温度計等のセンサーサイズは 1 mm 程度であることから、THz 帯 (0.1 THz から 1 THz) の電波ばく露によって誘起される体表から深さ数 100  $\mu\text{m}$  領域の温度上昇を 3 次元で高精度に測定することは困難である。そこで本研究では、温度感受性蛍光プローブを添加した生体等価ファントムを作製し、共焦点レーザー走査型顕微鏡による蛍光強度測定から、ファントム内部の温度分布を可視化し、さらに従来法と比較して高い空間分解能で温度測定が可能であるか検討した。

キーワード THz 波, 温度分布測定, 生体等価ファントム, 温度感受性蛍光プローブ

## Temperature Measurement in a Tissue-equivalent Phantom by Visible Light with a high spatial resolution

Shota Yamazaki<sup>†</sup> Maya Mizuno<sup>†</sup> and Tomoaki Nagaoka<sup>†</sup>

<sup>†</sup> National Institute of Information and Communications Technology 4-2-1 Nukuikitamachi, Koganei, Tokyo, 184-8795  
Japan

E-mail: <sup>†</sup> syamazaki@nict.go.jp, <sup>†</sup> {mmizuno, nagaoka}@nict.go.jp

**Abstract** The sensor size of temperature measurement devices such as fiber-optic thermometers, which have been used to evaluate temperature increases caused by exposure to electromagnetic waves, is about 1 mm. Therefore, it is difficult to accurately measure the temperature rising, specifically within a depth of a few hundred micrometers below the skin surface, induced by exposure to THz waves (0.1 THz to 1 THz). In this study, we developed a tissue-equivalent phantom including fluorescence thermoprobes for temperature measurement with a higher spatial resolution than that of traditional thermometers and visualized the temperature distribution inside the tissue-equivalent phantom using a confocal laser scanning microscopy.

**Keywords** THz wave, Temperature distribution measurement, Tissue-equivalent phantom, Fluorescence thermoprobe

### 1. はじめに

次世代無線通信 (B5G/6G) では THz 帯の電波利用が想定されているが [1], これまでに人体に対する THz 帯の電波ばく露評価はほとんど行われていない。THz 帯の電波は高周波帯で水に強く吸収される性質があり [2], 低周波帯の 0.1 THz であっても水分含有量の多い生体組織では数 100  $\mu\text{m}$  程度の表層でほとんどの電磁エネルギーが吸収され、温度上昇を引き起こすことが知られている。しかし、従来の電波ばく露による温度上昇評価に利用されてきた光ファイバー温度計等のセンサーサイズは 1 mm 程度であることから、THz 帯の電波ばく露によって誘起される体表から深さ数 100  $\mu\text{m}$  の領域の温度分布を 3 次元で高精度に測定することは困難である。そこで本研究では、温度感受性蛍光プローブを添加した生体等価ファントムを作製し、共焦点レーザー走査型顕微鏡による蛍光強度測定から、

ファントム内部の温度分布を可視化し、さらに 0.1 THz から 1 THz の電波が到達する表皮深さ約 100  $\mu\text{m}$  以下の空間分解能で取得できるか検討した。

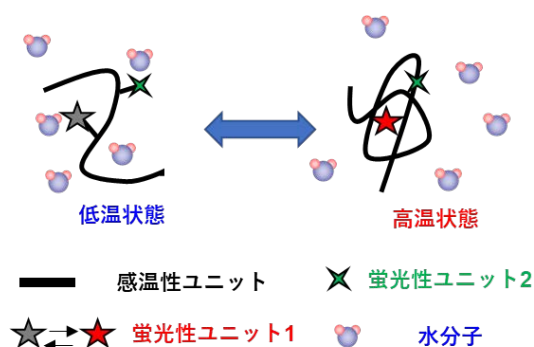


図 1 温度感受性蛍光プローブの構造変化

## 2. 実験方法

本研究では、温度感受性蛍光プローブとして Cellular Thermoprobe for Fluorescence Ratio [3]を使用した。図1に示すように、この温度感受性蛍光プローブは感温性ユニットと2種類の蛍光性ユニットから構成される。感温性ユニットは低温環境で伸張した親水性の構造をとり、一方で温度上昇が起きると周りに配位していた水分子が解離し、疎水性の収縮構造へと変化する。また、可視光励起により蛍光を発する蛍光性ユニット1 (Ex: 458 nm/Em: 560-620 nm) は周囲に水が存在すると量子収率が下がることで蛍光強度が低下し、周囲の水が排除されると蛍光強度が上昇するという特徴をもつ。そのため、感温性ユニットの温度依存的な構造変化を蛍光性ユニット1の蛍光強度変化から評価できる。加えて、リファレンスとなる温度変化に影響されない蛍光性ユニット2 (Ex: 458 nm/Em: 490-520 nm) を組み合わせることで、2種類の蛍光性ユニットの蛍光強度比から、プローブの濃度非依存的な温度測定が可能である。さらに、この温度感受性蛍光プローブは分子レベルで温度計として機能するため、その空間分解能は蛍光を検出する顕微鏡の感度に依存し、共焦点レーザー走査型顕微鏡であれば数10  $\mu\text{m}$  ~ 数100  $\mu\text{m}$  の空間分解能での温度測定が期待できる。

## 3. ファントム内部の温度分布の可視化

図2に温度感受性蛍光プローブを添加した生体ファントムをガラスヒータによって加熱し、蛍光強度を共焦点レーザー走査型顕微鏡により取得した結果を示す。22°Cの温調条件と比較して、ガラスヒータを40°Cに設定したファントムでは蛍光性ユニット1の蛍光強度が顕著な上昇を示した。一方で、蛍光性ユニット2の蛍光強度に変化は認められず、温度の影響を受けないリファレンス蛍光として使用できることを確認した。また、得られた蛍光性ユニット1と2の蛍光強度比から、ファントム内部の温度分布を可視化することに成功した。

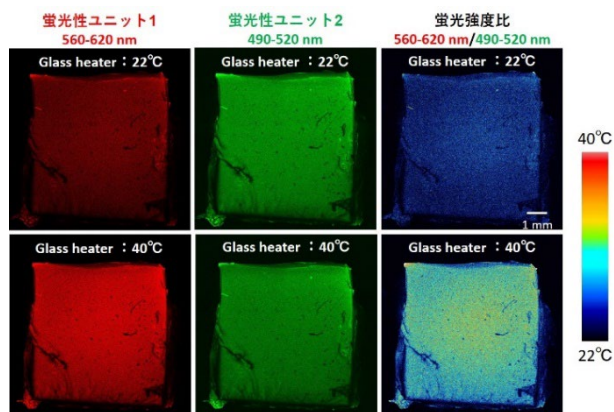


図2 ファントム内部の温度分布の可視化

## 4. 空間分解能の解析

次に、本手法の空間分解能について検討を行った。共焦点レーザー顕微鏡の空間分解能は実測した単独の光源から発せられる蛍光の半値全幅 (FWHM: Full Width at Half Maximum) により定義される。そこで、図3に示すように直径が約20  $\mu\text{m}$  の蛍光発光サイズである蛍光ビーズをファントムへ埋包し、共焦点レーザー顕微鏡により蛍光のピーク強度プロファイルを取得し、半値全幅を解析することで空間分解能を算出した。その結果、10倍対物レンズを使用することで横方向および深さ方向の分解能が20  $\mu\text{m}$  に達していることを確認した。

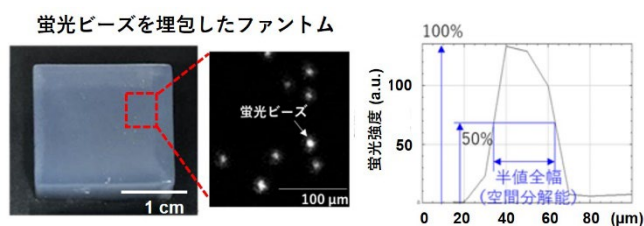


図3 蛍光ビーズを使用した空間分解能の解析例(横方向)

## 5. まとめ

本研究では温度感受性蛍光プローブを生体等価ファントムに添加することで、ファントム内部の温度分布を横方向および深さ方向について20  $\mu\text{m}$  の空間分解能で可視化できることを確認した。そのため、本手法によりこれまで困難であった0.1 THzから1 THzの電波ばく露により温度上昇する生体表面から深さ数100  $\mu\text{m}$  の領域の温度分布を従来法と比較して高精度に測定できると考えられる。今後は温度分解能についても解析し、また測定装置や試料に由来する測定のばらつきについても検討を行う。

## 謝辞

本研究は総務省委託研究(JPMI10001)の支援により実施された。

## 文献

- [1] O'Hara JF, Ekin S, Choi W, Song I. A Perspective on Terahertz Next-Generation Wireless Communications. *Technologies*. 7, 43, 2019.
- [2] Siegel P. H. Terahertz Technology in Biology and Medicine. *IEEE transactions on microwave theory and techniques* 52, 10, 2438-2447, 2004.
- [3] Uchiyama S, Tsuji T, Ikado K, Yoshida A, Kawamoto K, Hayashi T, Inada N., A cationic fluorescent polymeric thermometer for the ratiometric sensing of intracellular temperature. *Analyst*. 140, 4498-506, 2015.

## 光応用電磁界計測 (PEM) 特別研究専門委員会について

電子情報通信学会 光応用電磁界計測(PEM)特別研究専門委員会は、平成 24 年 4 月に発足した研究専門委員会です。PEM 研は、急速に進化・変貌を遂げつつある電磁界環境を正確に評価・計測するために、電磁界と光・物質との多彩な応答を利用した、新しい電磁界計測技術を追究することを目標としています。アンテナや電磁両立性等の電磁界計測分野と光センサ・光デバイス等の応用光学分野の専門家がコアメンバーです。対象とする電磁界は、アンテナや高周波回路だけでなく、プラズマ電磁界、宇宙到来電磁波など、人工および自然発生電磁界全般を含みます。また、それらと関連性の深い各種の現象についても議論したいと考えています。光・電磁界・マイクロ波・アンテナ等の様々な最先端研究分野を有機的かつ横断的に結びつけた新しい研究領域を開拓して、その成果を社会へ還元することを目指しています。

### <委員名簿>

委員長	佐々木 愛一郎	近畿大学
副委員長	日景 隆	北海道大学
	土屋 明久	神奈川県立産業技術総合研究所
幹事	勝山 純	横河電機株式会社
幹事補佐	She Yuanfeng	産業技術総合研究所
	山崎 祥他	情報通信研究機構
専門委員	石井 望	新潟大学
	石山 和志	東北大学
	市川 潤一郎	住友大阪セメント株式会社
	一條 淳	株式会社精工技研
	菅野 敦史	情報通信研究機構
	近藤 順悟	日本ガイシ株式会社
	齊藤 一幸	千葉大学
	笹川 清隆	奈良先端科学技術大学院大学
	佐藤 源之	東北大学
	鈴木 敬久	東京都立大学
	セツト ジイヨン	東京大学
	染野 薫	株式会社レスターコミュニケーションズ
	田上 周路	高知工科大学
	田島 公博	NTT アドバンステクノロジー株式会社
	羽賀 望	群馬大学
	東山 潤司	株式会社 NTT ドコモ
	久武 信太郎	岐阜大学
	平田 晃正	名古屋工業大学
	深沢 徹	三菱電機株式会社
	柳澤 幸樹	株式会社多摩川電子
顧問	大西 輝夫	情報通信研究機構
	黒川 悟	産業技術総合研究所
	陳 強	東北大学
	水野 麻弥	情報通信研究機構
	村田 博司	三重大学

## ☆ 技術報告書の販売

PEM 研究会では、技術報告書を販売しております。

技術報告書(サンプル) → [https://www.ieice.org/~pem/link/TR\\_sample/TR\\_sample.pdf](https://www.ieice.org/~pem/link/TR_sample/TR_sample.pdf)

ご購入を希望される方は幹事団アドレスまでご連絡ください。

幹事団アドレス: [pem-info@mail.ieice.org](mailto:pem-info@mail.ieice.org)

## ☆ 協賛展示・広告の募集

PEM 研究会では、協賛展示・広告を募集しております。

ご協賛頂ける場合には、以下のフォーマットに必要事項をご記入の上、幹事団宛てにご送付願います。

フォーマット → [https://www.ieice.org/~pem/link/sponsorship/sponsorship\\_format.docx](https://www.ieice.org/~pem/link/sponsorship/sponsorship_format.docx)

幹事団アドレス: [pem-info@mail.ieice.org](mailto:pem-info@mail.ieice.org)

## ☆ Facebook “Pem 研究会（光で電波を測る）”

Facebook に PEM 研究会のページをつくりました。PEM 研究会の活動紹介や光応用電磁界計測の情報を発信しています。

フォロー、「いいね！」をよろしくお願いします。



## ☆ PEM 研究会コミュニティサイト “PEM-com”

PEM 研究会のコミュニティサイト「PEM-com」を開設しています。このサイトは、PEM 分野の技術交流活性化のための様々な情報発信に活用しています。

現在、チュートリアル記事等を公開しています。

URL: <http://pem.main.jp/>

