

令和 7 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2024

課題番号：21K12121

研究課題名（和文）放射線治療で得られる疎な医用画像情報に対する深層画像処理の安定要件の探索

研究課題名（英文）Investigation of Stability Requirements for Deep Learning-Based Image Processing of Sparse Medical Imaging in Radiation Therapy

研究代表者

今江 禄一（Imae, Toshikazu）

東京大学・医学部附属病院・副診療放射線技師長

研究者番号：80420222

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、放射線治療で得られる疎な医用画像情報に対し、安全かつ有効に利用可能な深層画像処理の要件を勘案した上で、深層画像処理の安定化を図ることを目的とした。研究期間内には、基本情報の取得と蓄積・環境整備、MVCT画像に対する画質改善を行う深層学習処理の提案および適切なデータ数の探索、CT画像に対する深層学習処理（拡散モデル）を用いた逐次近似再構成法の提案、深層画像処理を用いた臓器のセグメンテーション、生体変動を含む特徴量を用いた予後予測、低線量率小線源治療後の再発に影響を及ぼす線量特徴量の抽出を行い、安全かつ有効に利用可能な深層画像処理について、その有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、放射線治療で得られる疎な医用画像情報に対し、安全かつ有効に利用可能な深層画像処理の要件を勘案した上で、深層画像処理の安定化を図ることを念頭に置いたデータ解析法や画質改善法、また、適切な学習データ数に関する提案を行った。医用画像に対する深層学習の適用範囲は広く、本研究の成果は、放射線治療で得られる医用画像に対する深層学習の適用方法を示したことであり、研究の実施によって得られた知見は学会発表や論文投稿を通して公表した。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to stabilize and evaluate deep learning-based image processing techniques for the safe and effective application to sparse medical images in radiation therapy. We performed data acquisition, enhanced image quality for MVCT, proposed a deep learning-based iterative reconstruction method for CT, conducted organ segmentation and prognosis prediction, and extracted dose-related features associated with recurrence. These results demonstrate the clinical applicability and utility of deep image processing methods.

研究分野：放射線治療

キーワード：放射線治療 疎な 医用画像情報 深層画像 安定要件

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在の医療において、X線撮影やX線コンピュータ断層撮影 (computed tomography: CT)、核磁気共鳴画像法、陽電子放出断層撮影などに代表される医用画像は、診断や治療の評価に不可欠な存在である。特に、放射線治療において医用画像は、治療計画の作成や高精度化する照射精度の担保、正当な治療効果判定など多くの場面で重要な役割を果たしている。

放射線治療では治療計画にCT画像が広く用いられ、治療計画は対象内の標的や正常組織の位置を同定して適切な照射法を選択した上で、標的には目標線量を投与し、かつ、周囲の正常組織への線量はできるだけ低減させることが基本方針となる。この基本方針は高精度な照射法である強度変調放射線治療の実施によって達成され、良好な抗腫瘍効果と副作用の軽減につながっている。また、治療期間内にコーンビームCT (cone-beam CT: CBCT) やメガボルトCT (mega-voltage CT: MVCT) 画像を用いた画像誘導放射線治療 (image-guided radiotherapy: IGRT) を実施することによって、照射対象である患者の形態変化への対応や照射位置精度の担保がなされている。IGRTに用いる医用画像は位置合わせを主たる目的とするため、収集時間や被ばく線量を考慮して患者から取得される情報量が少ない (疎な) 情報を基にして構築される。このため、IGRTに用いる医用画像は一般的な医用画像よりも画質が低く、画像診断や治療計画、治療効果判定には使用されていない。一方、放射線治療による抗腫瘍効果は治療期間の初期の段階でも見られるといった報告[1]もあることから、治療期間内で日々得られる疎な医用画像情報は、放射線治療の抗腫瘍効果および副作用に関する生体情報を含有している可能性があり、これを抽出するための新たな技術の開発が期待される。

近年の情報処理技術の発展に伴い、医用画像に対して深層学習を用いた画像生成や解析 (以下、深層画像処理) が適用され始めており[2]、従来困難であったモダリティ間の画像変換[3]や画質改善[4]、また、人間が検出不可能な新たな情報の抽出が期待されている。しかし、放射線治療の医用画像に適用、例えば、画質改善を行う場合には臓器の位置の保存や線量計算の精度が重要となるといった特有の問題が存在する。また、深層学習処理の自由度が高いために解析の安定条件に課題があるのが現状である。これら課題に対して、現状では深層画像処理は放射線治療で得られる疎な医用画像情報に応じたネットワークの安定化が十分とは言えず、臨床現場で汎用的に利用されていない状況である。

2. 研究の目的

放射線治療で得られる疎な医用画像情報に対し、安全かつ有効に利用可能な深層画像処理の要件を勘案した上で、深層画像処理の安定化を図ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 基本情報の取得と蓄積、環境整備

本研究では高精度放射線治療を実施する患者を対象とし、その基本情報の取得と蓄積を行った。対象疾患および治療法は、頭頸部腫瘍に対する強度変調放射線治療、限局性前立腺癌に対する体幹部定位放射線治療、頭蓋内腫瘍に対する頭部定位放射線治療、低強度造血幹細胞移植前の全身照射における強度変調放射線回転照射法などとした。併せて、治療期間内に得られるIGRT用のCBCTやMVCT画像を蓄積し、深層学習処理 (画質改善、セグメンテーションなど) への利用について検討した。

疎な医用画像情報に対して深層学習処理を行う場合、良好な結果が得られる設定条件が存在する一方、汎化性能の低下や過度に変形が生じるといった不安定な結果が出力されることがある。深層学習処理を実施するためにはネットワークおよびパラメータの選定、データの確保が必要であると共に、大量の計算処理を実施可能な環境の整備が必要となる。先行研究の調査と共に深層画像処理の実施に必要な高性能ワークステーションおよびストレージといった計算環境の整備を行った。

(2) MVCT画像に対する画質改善を行う深層学習処理の提案および適切なデータ数の探索

研究代表者の施設では、頭頸部腫瘍に対する強度変調放射線治療の位置合わせにはMVCTを用いている。治療直前に取得されるMVCT画像の画質は位置合わせを主たる目的とするため、一般的なX線CT装置 (治療計画用) で使用されるキロボルトCT (kilo-voltage CT: kVCT) よりも画質が劣るのが現状であった。MVCT画像に対して画質改善を行う深層学習処理を提案し、適切なデータ数の探索を行った。使用したネットワークは深層学習の一つであるサイクル敵対的生成ネットワーク (cycle generative adversarial network: CycleGAN) を基礎として作成し、データ数については、MVCTは16スライス (患者2名) から2745スライス (患者137名)、kVCTは16スライス (患者2名) から2824スライス (患者98名) とした。CycleGANは対でない (unpaired) 画像群、いわゆる教師なし学習によって画像ドメイン間の変換が可能であることが利点として挙げられ、ネットワークの評価には患者の解剖学的な位置 (解剖学的構造) の保持を念頭に置いた。

(3) CT 画像に対する深層学習処理（拡散モデル）を用いた逐次近似再構成法の提案

CT 画像の再構成には種々の方法が提案されており、開発当初から解析的再構成法であるフィルタ補正逆投影法（filtered back projection：FBP 法）が主流であった。近年では、情報処理能力の向上により、統計的再構成法である逐次近似再構成法が臨床現場においても利用されている。本研究では、逐次近似再構成法に対し深層学習処理（拡散モデル）を組み込むことにより、少ない（疎な）投影画像から CT 画像の再構成を行う方法の提案を行った。特に、解剖学的構造の変化を抑制するため、拡散モデルにおける元画像にノイズを加える工程とノイズを除去する工程の程度を調整、かつ、適切な投影数を探索した。生成した画像に対して患者の生体構造の保持およびノイズに重点を置いて評価を行った。

(4) 深層画像処理を用いた臓器の判別（セグメンテーション）

限局性前立腺癌に対する体幹部定位放射線治療を実施した患者とし、CT 画像と CT 画像および MRI 画像を用いて臓器の囲いを示すデータセットを用意した。ここで、臓器は前立腺、精嚢、膀胱、直腸とした。学習は、マトリクスサイズ $128 \times 128 \times 128$ とした 3 次元のデータセットを用いた。20 症例（2560 枚）の画像を学習データおよび検証データに分けて学習および検証を行った。また、セグメンテーションにおいて、学習に用いるデータ数やハイパーパラメータなどの学習条件の適正化を試み、類似度についてはダイス係数を用いて評価した。

(5) 生体変動を含む特徴量を用いた予後予測

放射線治療で得られる疎な医用画像から抽出した特徴量を用いて、予後予測が可能であるか検討を行った。対象は同時化学放射線療法を受けた食道扁平上皮がん患者とし、治療期間内に得られる CBCT 画像から特徴量を抽出し、予後予測に寄与する特徴量を明確にした。また、疎な医用画像の有効利用に関する研究の一環として、院外心停止患者の頭部 CT 画像の画像特徴量から神経学的予後を予測する研究を行った。

(6) 低線量率小線源治療後の再発に影響を及ぼす線量特徴量の抽出

局所前立腺癌に対するヨウ素 125 シードを用いた低線量率小線源治療後の再発に影響を及ぼす線量特徴量を抽出した。線量分布に対してフィルタ処理を行い、特徴量を抽出した。特徴量の抽出後にランダムに学習群とテスト群に分け、ネットワークの精度評価を行った。有意な線量特徴量を探索し、予後良好な患者とそれ以外の患者を判別可能であるか評価した（図 1）。

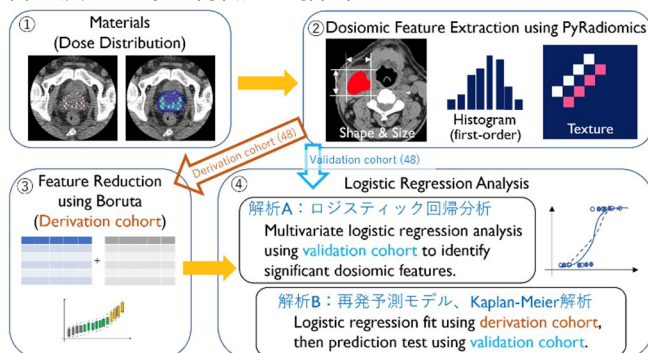


図 1 低線量率小線源治療後の再発に寄与する線量特徴量の抽出

4. 研究成果

(1) MVCT 画像に対する画質改善を行う深層学習処理の提案および適切なデータ数の探索

深層学習を用いた画像処理は、一般的に数千～数万といった多くの画像を用意し、それを処理するだけの大量の計算コストが必要とされていた。本研究では、図 2 に示すように、数百の対でない MVCT および kVCT 画像の画像群を用いて、良好な画質改善および解剖学的構造の保持を行うことが可能であることを示した。これは、位置合わせを主たる目的としていた MVCT 画像に対して深層画像処理を用いて画質改善することにより、放射線治療の再計画や適切な治療効果の判定につながる。また、適切なデータ数の探索を行うことにより、限られた医用画像および計算環境の資源を有効活用する手法を提案した。得られた知見について論文投稿を行い、採択された。

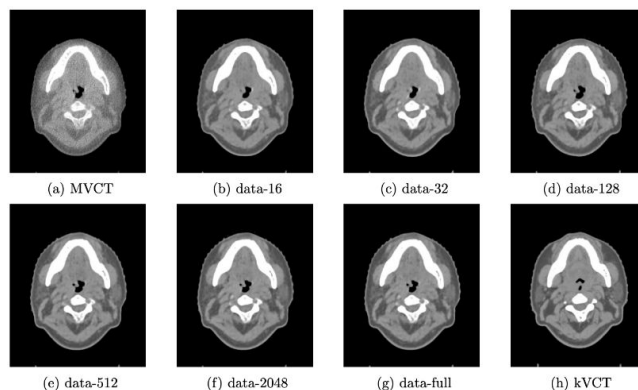


図 2 MVCT 画像に対する画質改善の至適データ数の探索

(2) CT 画像に対する深層学習処理（拡散モデル）を用いた逐次近似再構成法の提案

疎な投影画像から CT 画像再構成を行う手法として、拡散モデルと逐次近似再構成法を融合した深層学習処理を開発した。提案法は比較的単純な手法にもかかわらず、通常の $1/10$ の投影数でも良好な再構成画像を得ることが可能であることを示した。本研究に関して、arXiv (<https://arxiv.org/>) に保存し、成果について学会発表を行った。

(3) 深層画像処理を用いた臓器の判別 (セグメンテーション)

深層画像処理を用いた臓器のセグメンテーションについて、計算の繰り返し回数やハイパーパラメータの探索を行った 図3 に学習回数の違いによるセグメンテーションの違いを示す (前立腺: 水色, 精嚢: 黄色, 膀胱: 青色, 直腸: 緑色, 左列: CT 画像, 中央: 正解画像, 右列: 生成画像). 学習初期 (上段) ではすべての臓器で類似度が低く, 学習が進むにつれて類似度が向上する (下段) ことが観察された. また, 学習する際の CT 画像における CT 値の対象範囲および臓器ごとの重み係数を変更し, 類似度との関係について検討を行った.

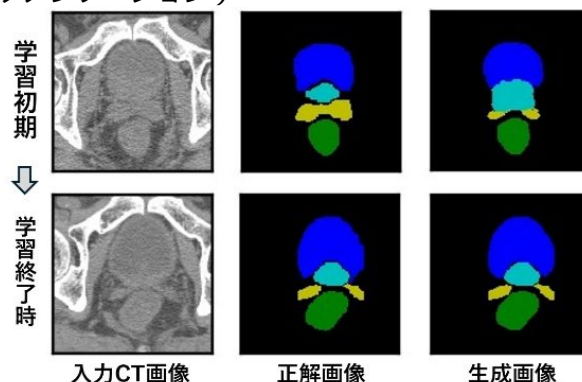


図3 学習回数の違いによる判別能の違い

(4) 生体変動を含む特徴量を用いた予後予測

対象は同時化学放射線療法を受けた食道扁平上皮がん患者として, 放射線治療で得られる疎な医用画像 (CBCT 画像) から抽出した治療期間中の生体変動を含む特徴量を用いて予後予測を行った. 本研究では, 特徴量の変化量をデルタレディオミクスと定義し, 予後に影響を及ぼす特徴量を明らかにした. 得られた研究成果は論文として国際学術誌に掲載された. また, 院外心停止患者の頭部 CT 画像の画像特徴量から神経学的予後を予測する研究についても 医用画像 (CT) から得られる高次元の画像特徴量と患者予後との関係を網羅的に解析することで予後予測に有用である特徴量の組み合わせを明らかにした. 得られた研究成果は論文として国際学術誌に掲載された.

(5) 低線量率小線源治療後の再発に影響を及ぼす線量特徴量の抽出

局所前立腺癌に対するヨウ素 125 シードを用いた低線量率小線源治療後の再発に影響を及ぼす線量特徴量を抽出した. 本研究では, 線量分布に対して特徴量を抽出した点に独創性を有する. 有意な線量特徴量は 4 つ特定され, そのうち 3 つについては, 予後良好な患者とそれ以外の患者をより強く判別することが示された. 得られた研究成果は論文として国際学術誌に掲載された.

<引用文献>

1. Zhu L, Wang H, Zhu L, Meng J, Xu Y, Liu B, et al. Predictive and prognostic value of intravoxel incoherent motion (IVIM) MR imaging in patients with advanced cervical cancers undergoing concurrent chemo-radiotherapy. *Sci Rep.* 2017;7(1):11635.
2. Han X. MR-based synthetic CT generation using a deep convolutional neural network method. *Med Phys.* 2017;44(4):1408-19.
3. Zhu J-Y, Park T, Isola P, Efros AA. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2017:2242-51.
4. Kida S, Kaji S, Nawa K, Imae T, Nakamoto T, Ozaki S, et al. Visual enhancement of Cone-beam CT by use of CycleGAN. *Med Phys.* 2020;47(3):998-1010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nakamoto Takahiro, Yamashita Hideomi, Jinnouchi Haruka, Nawa Kanabu, Imae Toshikazu, Takenaka Shigeharu, Aoki Atsushi, Ohta Takeshi, Ozaki Sho, Nozawa Yuki, Nakagawa Keiichi	4. 巻 117
2. 論文標題 Cone-beam computed-tomography-based delta-radiomic analysis for investigating prognostic power for esophageal squamous cell cancer patients undergoing concurrent chemoradiotherapy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physica Medica	6. 最初と最後の頁 103182 ~ 103182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejmp.2023.103182	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ozaki Sho, Kaji Shizuo, Nawa Kanabu, Imae Toshikazu, Aoki Atsushi, Nakamoto Takahiro, Ohta Takeshi, Nozawa Yuki, Yamashita Hideomi, Haga Akihiro, Nakagawa Keiichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Training of deep cross modality conversion models with a small dataset, and their application in megavoltage CT to kilovoltage CT conversion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Medical Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mp.15626	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakamoto Takahiro, Nawa Kanabu, Nishiyama Kei, Yoshida Kosuke, Saito Daizo, Horiguchi Masahito, Shinya Yuki, Ohta Takeshi, Ozaki Sho, Nozawa Yuki, Minamitani Masanari, Imae Toshikazu, Abe Osamu, Yamashita Hideomi, Nakagawa Keiichi	4. 巻 125
2. 論文標題 Neurological prognosis prediction for cardiac arrest patients using quantitative imaging biomarkers from brain computed tomography	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physica Medica	6. 最初と最後の頁 103425 ~ 103425
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejmp.2024.103425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakano Masahiro, Kaji Shizuo, Kawakami Shogo, Tsumura Hideyasu, Imae Toshikazu, Tanaka Yuichi, Fujii Kyohei, Kainuma Takuro, Yamazaki Ryosuke, Uchida Ayaka, Kaneko Hijiri, Fujino Mako, Hata Chizu, Murakami Yu, Hashimoto Masatoshi, Ishiyama Hiromichi	4. 巻 20
2. 論文標題 Dosimetric predictors of biochemical failure in patients with localized prostate cancer treated with Iodine-125 low-dose-rate brachytherapy	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Radiation Oncology	6. 最初と最後の頁 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s13014-025-02619-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 名和 要武
2. 発表標題 救急医療における頭部CT画像のRadiomics解析
3. 学会等名 第4回『医学と数理』研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾崎 翔
2. 発表標題 深層ニューラルネットワーク及び拡散モデルを用いた逆問題解析手法の開発とそのCT画像再構成への応用
3. 学会等名 第4回『医学と数理』研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Ozaki, S. Kaji, K. Nawa, T. Imae, and K. Nakagawa
2. 発表標題 Iterative CT reconstruction with deep neural networks
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Radiological Physics and Technology (ICRPT) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Ozaki, S. Kaji, K. Nawa, T. Imae, and K. Nakagawa
2. 発表標題 Iterative reconstruction of MVCT with deep neural networks
3. 学会等名 The European Society for Radiotherapy and Oncology (ESTRO) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今江禄一, 三枝茂輝, 中田健太, 境紀行, 野沢勇樹, 山下英臣, 岩永秀幸, 阿部修.
2. 発表標題 強度変調放射線回転照射法を適用した全身照射における位置誤差に関する検討
3. 学会等名 第51回日本放射線技術学会秋季学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Nakamoto, K. Nawa, K. Nishiyama, K. Yoshida, D. Saito, M. Horiguchi, Y. Shinya, K. Nakagawa
2. 発表標題 Computed tomography-based radiomics for classifying neurological prognosis of cardiac arrest patients
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Radiological Physics and Technology (ICRPT) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鍛冶静雄
2. 発表標題 深層学習によるCT画像変換
3. 学会等名 第3回 京大 ハイデルベルク大 理研 ワークショップ「医学と数理」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ozaki S, Kaji S, Nawa K, Imae T, Aoki A, Nakamoto T, Ohta T, Nozawa Y, Haga A, Nakagawa K.
2. 発表標題 Image quality enhancement of medical images by use of deep learning with a small amount of training data
3. 学会等名 Interdisciplinary Science Conference in Okinawa (ISCO 2023) -Physics and Mathematics meet Medical Science- (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ozaki S, Kaji S, Nawa K, Imae T, Aoki A, Nakamoto T, Ohta T, Nozawa Y, Haga A, Nakagawa K
2. 発表標題 Denoising and Contrast Enhancement of MVCT Using Deep Learning-based Methods
3. 学会等名 第121回日本医学物理学会学術大会, 神奈川, 2021.4.15-18
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ozaki S, Kaji S, Nawa K, Imae T, Aoki A, Nakamoto T, Ohta T, Nozawa Y, Haga A, Nakagawa K
2. 発表標題 Training modality conversion models with small data and its application to MVCT to kVCT conversion
3. 学会等名 ESTRO 2021 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今江禄一, 青木淳, 竹中重治, 松田佳奈子, 三枝茂輝, 鍛冶静雄, 岩永秀幸, 阿部修
2. 発表標題 深層学習を用いて画質改善した位置合わせ用CBCT上における線量分布の再構築
3. 学会等名 第49回日本放射線技術学会秋季学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鍛冶静雄
2. 発表標題 パーシステントホモロジーを用いた医用画像解析
3. 学会等名 データサイエンスと生命医科学研究のフロンティア
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 尾崎翔、鍛冶静雄、名和要武、今江禄一、中川恵一
2. 発表標題 デノイジング拡散確率モデルを用いたCT画像再構成の研究
3. 学会等名 第43回医用画像工学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 S. Ozaki, S. Kaji, K. Nawa, T. Imae, and K. Nakagawa
2. 発表標題 Iterative CT reconstruction with diffusion model
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Radiological Physics and Technology (ICRPT) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap: 今江禄一 https://researchmap.jp/m035402 東京大学医学部附属病院 放射線科 放射線治療部門 > 研究・業績 http://u-tokyo-rad.jp/works/index.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	名和 要武 (Nawa Kanabu) (00456914)	東京大学・医学部附属病院・助教 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	鍛冶 静雄 (Kaji Shizuo) (00509656)	九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・教授 (17102)	
研究分担者	竹中 重治 (Takenaka Shigeharu) (10623564)	東京大学・医学部附属病院・診療放射線技師 (12601)	
研究分担者	仲本 宗泰 (Nakamoto Takahiro) (10808877)	北海道大学・保健科学研究院・助教 (10101)	
研究分担者	尾崎 翔 (Ozaki Sho) (60615326)	東京大学・医学部附属病院・特任助教 (12601)	
研究分担者	山下 英臣 (Yamashita Hideomi) (70447407)	東京大学・医学部附属病院・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関