

令和 6 年 5 月 13 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K08046

研究課題名（和文）逐次近似再構成CT画像における高精度な空間分解能測定法の開発

研究課題名（英文）Method for determining spatial resolution with verification in iterative reconstruction CT images

研究代表者

大久保 真樹（Ohkubo, Masaki）

新潟大学・医歯学系・教授

研究者番号：10203738

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、逐次近似再構成（iterative reconstruction：IR）画像における高精度なslice sensitivity profile（SSP）測定法の開発を行った。考案法では、モデル化したSSPを用いて球体のシミュレーション画像を算出し、実際の球体ファントムの画像と一致するようにSSPのモデルパラメータを最適化する。考案法により得られたSSPから算出したシミュレーション画像は、真値である実際の球体の画像とよく一致し、SSPの測定精度が高いことが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

肺がんの早期発見のためには胸部CT検診およびコンピュータ支援診断（CAD）の普及が必要であり、CADの性能評価が重要となる。申請者らがこれまでに開発したVirtual Noduleを利用することで、各施設においてCADの性能を適確に評価することができるようになる。しかし、Virtual NoduleをIR画像に適用するためには、コントラストの低い画像から空間分解能を測定する必要があり、処理パラメータの設定によっては測定精度が低下する場合もある。本研究で開発したSSP測定法を用いることにより高精度なSSP測定が可能であり、Virtual NoduleのIR画像への適用が可能となる。

研究成果の概要（英文）：The computer-simulated nodule image ‘virtual nodule’ had been developed and demonstrated to be useful for evaluating the performance of computer-aided detection of lung cancer CT screening. To apply the virtual nodule to the iterative reconstruction (IR) images, it is necessary to measure the spatial resolution from images of the low-contrast phantom. The purpose of this study was to propose a method for determining the slice sensitivity profile (SSP) of IR images. In the proposed method, the simulation image of a sphere was calculated using a modeled SSP, and the model parameters were optimized so that the simulation image agreed to the actual image of the sphere phantom. The simulation image calculated using the SSP obtained by the proposed method showed a good agreement to the actual image; this is indicating the accuracy of the SSP. The possibility of application of the virtual nodule to the IR images was suggested.

研究分野：医学物理学・放射線技術学

キーワード：X線CT装置 スライス感度分布（SSP） 逐次近似再構成 空間分解能 肺がん コンピュータ支援診断（CAD）

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

CT装置の空間分解能指標である line spread function(LSF)や point spread function(PSF)あるいは slice sensitivity profile (SSP)は、その重要性が広く認識され多数の研究に利用されている。しかし、それらの指標の活用は装置の性能評価や、撮影・再構成条件による画質の違いの評価というような、基礎的な検討の枠内にとどまっている。空間分解能は画像の特性に大きく関わる重要な要因であるにもかかわらず、それを臨床画像で積極的に活用するような研究はほとんど行われていなかった。しかし、申請者らは空間分解能に基づいた CT 画像のコンピュータシミュレーション技術の開発を進めてきた。想定した被写体(生体内構造物)の CT 画像を高精度に算出する技術である。この技術を利用して、仮想肺内結節像“ Virtual Nodule ”の考案につながった。Virtual Nodule は肺がん CT 検診の普及に欠かせないコンピュータ支援診断システムの性能評価に有用であることが実証され、さらなる発展が期待されている。近年になり従来のフィルタ補正逆投影(filtered back-projection : FBP)法による再構成画像(FBP 画像)に代わって、新しい逐次近似再構成(iterative reconstruction : IR)法による画像(IR 画像)が広く普及してきており、Virtual Nodule の IR 画像への対応が急務となった。

2. 研究の目的

従来の FBP 画像における空間分解能は、金属球体、ワイヤやコイン等の高コントラストな微小物体を用いて測定が行われている。被写体は微小であるが高いコントラストであるため画像のコントラスト雑音比(contrast-to-noise ratio : CNR)が高く、解析は容易である。しかし、IR 画像の空間分解能は CNR に依存するため、従来の高コントラスト物体を用いることはできない。CNR の低い画像から空間分解能を測定する必要がある。

IR 画像の空間分解能測定は、円柱形の低コントラストファントムのエッジ領域を解析する手法が一般に用いられている。例えば、IR 画像のスキャン平面における LSF 測定法として米国医学物理学学会は、円柱のエッジ領域の画素値を解析し ESF (edge spread function)を求め、微分処理により LSF を算出する方法(circular edge 法)を推奨している。また、IR 画像の体軸方向の空間分解能指標である SSP の測定法として、コントラストの低い物体のエッジ面を傾斜させて利用する方法(傾斜エッジ法)を推奨している。しかし、いずれも CNR の低い画像から空間分解能を測定するため解析・処理が難しく、得られた LSF や SSP の精度が低下する場合もある。

申請者らはこれまでに FBP 画像において、CT 画像シミュレーションの理論を応用した PSF 測定法を開発した。測定した PSF からシミュレーション画像を算出し、撮影により得られた実際の画像と比較することによって PSF の精度を検証することができる。その精度検証の過程を測定に組み込むことにより、信頼性の高い PSF の決定を可能とした。この技術を適用することで、CNR の低い IR 画像においても精度の高い空間分解能の測定が実現できるものと期待される。

申請者らがこれまでに開発した Virtual Nodule を IR 画像に適用するためには、CNR の低い IR 画像から空間分解能を精度よく測定する必要がある。IR 画像における高精度な空間分解能(LSF/PSF および SSP)の測定法を考案することを最終目的とし、本研究ではまず、高精度な SSP 測定法の開発を行った。CT 画像シミュレーションの理論に基づいた SSP の精度検証を組み込むことにより、精度の高い SSP の測定を実現しようとするものである。

3. 研究の方法

(1) 使用機器および撮影・再構成条件

CT装置は、64列 CT(Ingenuity Elite, Philips Healthcare, The Netherlands)および 96列 CT (SOMATOM Force, Siemens Healthcare, Germany)の2機種を用いた。撮影・画像再構成条件を表1に示す。Philips の CT における画像再構成法は、FPB 法および iterative model reconstruction(IMR)、Siemens の CT は advanced modeled iterative reconstruction(ADMIRE)を用いた。

表 1. 撮影・画像再構成条件

Scanner	Ingenuity Elite (Philips)	SOMATOM Force (Siemens)
<i>Acquisition</i>		
Detector rows	64	96
Tube voltage (kV)	120	120
Tube current (mA)	664	180
Rotation time (s)	0.4	0.5
Pitch	0.797	0.6
<i>Reconstruction</i>		
Field of view (mm)	100	100
Slice thickness (mm)	1, 2	1, 2
Slice interval (mm)	0.1	0.1
Algorithm	FBP standard (B)	ADMIRE Bf44 level 3
	IMR Routine level 2	ADMIRE B157 level 3
	IMR Sharp-plus level 3	

(2) SSP 測定法の提案

式(1)の CT 画像の生成理論を仮定する。

$$CT(x,y,z) = Object(x,y,z) ** PSF(x,y) * SSP(z) \quad (1)$$

ここで、 $CT(x,y,z)$ はCT画像（スキャン平面 $x-y$ 、体軸方向 z ）、 $Object(x,y,z)$ は被写体関数である（**：2次元重畳積分、*：1次元重畳積分）。一様な球体を被写体とし、スキャン平面における積分（ $dx dy$ ）を仮定した場合、式（1）は式（2）のように表せる。

$$I(z) = O(z) * SSP(z) \quad (2)$$

ここで、 $I(z)$ と $O(z)$ は $CT(x,y,z)$ および $Object(x,y,z)$ のスキャン平面における積分によりそれぞれ得られた体軸方向のCT値プロファイルである。

考案法では、低コントラストの球体を含むCTテストファントムを用いて、細かいスライス間隔（0.1 mm）で球体を含む範囲を撮影した。得られた各スライスにおいて球体に関心領域（ROI）を設定し、ROI内の平均CT値を測定した（図1a）。この値を各スライス位置に対してプロットすることにより、 z 軸方向のCT値profile（ $I(z)$ ）を得た（図1b）。次に、CTテストファントムの低コントラスト球体と同一な大きさでコントラストの球体を仮定した被写体関数（ $Object(x,y,z)$ ）を数値データとして生成した。前述の $I(z)$ を得る手順と同様の手順で、 $Object(x,y,z)$ からCT値profile（ $O(z)$ ）を得た（図1c）。

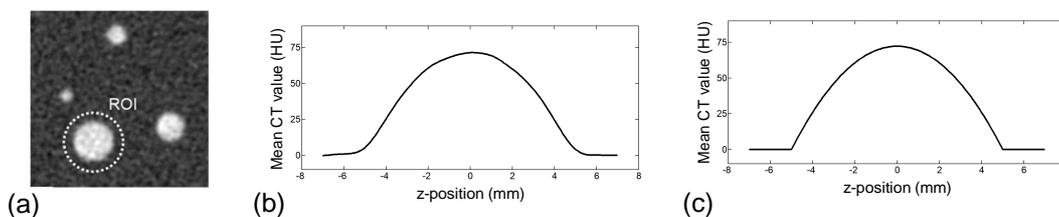


図1 . SSP 測定法

次に、SSPの形状を式（3）によりモデル化した。

$$SSP(z) = \exp[-z^2/(2a_1^2)] \times \cos(a_2\pi z) \quad (3)$$

ここで、 a_1 と a_2 は調整パラメータである。この $SSP(z)$ を用いて、式（2）より $O(z)$ との重畳積分により得られた結果を $I'(z)$ とする。この $I'(z)$ が、実際の画像から得られた $I(z)$ とよく一致する場合には、 $SSP(z)$ の精度が高いと考えられる。そこで、 $I'(z)$ と $I(z)$ の差異を二乗平均平方根誤差（root mean square error : RMSE）により評価し、それが最小となるように a_1 と a_2 の値を最適化することで $SSP(z)$ を決定する。

（3）従来法による SSP 測定との比較

FBP画像における従来のSSP測定法として、微小金属円板（コイン）ファントムを用いる方法（コイン法）がある。FBP画像のSSPは画像のCNRに依存しないことから、コイン法によって測定したSSPと、低コントラスト球体を用いて考案法によって測定したSSPを比較し、考案法の妥当性を検証した。コイン法で用いるコインファントム、および考案法で用いる低コントラスト球体ファントムの撮影・画像再構成条件は、表1に示すPhilipsのCTにおける条件とした。

（4）考案法による IR 画像の SSP 測定

考案法を用いてIR画像のSSP測定を行った。考案法では、 $I'(z)$ と $I(z)$ の差異を表すRMSEが最小となるように調整パラメータ a_1 、 a_2 を最適化し、SSPを決定する。結果として得られる最小のRMSEの値は、決定されたSSPから式（1）を用いて算出した $I'(z)$ が、真値である実際の画像から得られた $I(z)$ とどの程度一致するかを示すものであることから、SSPの精度を表す指標として用いた。

4 . 研究成果

（1）従来法による SSP 測定との比較

低コントラスト球体ファントムのFBP画像（スライス厚1 mm）から考案法によりSSPを測定した結果を図2aに示す。このSSPと、従来のコイン法により測定したSSPとを比較した結果を図2bに示す。これらのSSPはよく一致した。それぞれのSSPから得られた半値幅（full width at half maximum : FWHM）はいずれも1.1 mmであった。1/10幅（full width at tenth maximum : FWTM）は、考案法では2.0 mm、コイン法では1.9 mmであった。考案法により得られたSSPから算出した $I'(z)$ と、実際の画像から得られた $I(z)$ とを比較した結果を図2cに示す。それらの差異はほとんどみられず、RMSEは0.46 HUであった。これらの結果から、考案

法によって得られた SSP の精度が高いことが示された。

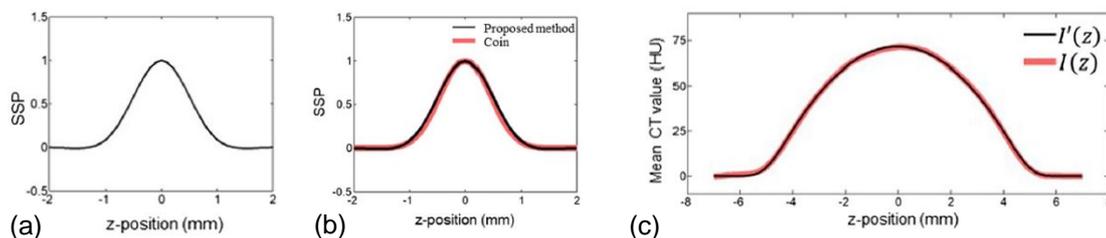


図 2 . SSP 測定結果 (FBP 画像)

(2) 考案法による IR 画像の SSP 測定

Philips CT の IR 画像 (スライス厚 1 mm、IMR Routine) において考案法により SSP を測定した結果を図 3a に示す。SSP の FWHM と FWTM は、それぞれ 1.1 mm と 2.0 mm であった。 $I'(z)$ と $I(z)$ はよく一致し、それらの RMSE は 0.39 HU であった (図 3b)。また、同じく Philips CT の IR 画像 (スライス厚 1 mm、IMR Sharp-plus) において考案法により SSP を測定した結果を図 4a に示す。SSP はアンダーシュート (負値) をもつ特異的な形状となった。 $I'(z)$ と $I(z)$ はよく一致し、RMSE は 0.57 HU であった (図 4b)。同様に、すべての条件における考案法による SSP の測定結果を表 2 にまとめた。いずれの条件においても RMSE は 0.65 HU 以下と小さく、 $I'(z)$ と $I(z)$ の差異が小さいことから、SSP の精度が高いということが確認された。

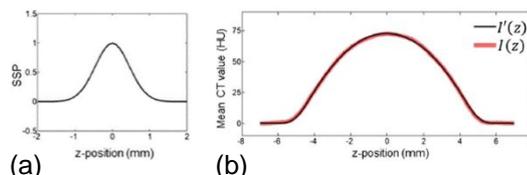


図 3 . SSP (IMR Routine)

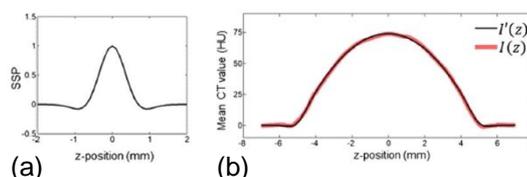


図 4 . SSP (IMR Sharp-plus)

表 2 . 考案法による SSP 測定結果

Algorithm	FBP B	IMR				ADMIRE			
		Routine		Sharp-plus		Bf44		B157	
Slice thickness (mm)	1	1	2	1	2	1	2	1	2
FWHM (mm)	1.1	1.1	2.0	0.7	1.8	1.2	2.1	1.3	2.6
FWTM (mm)	2.0	2.0	3.7	1.2	3.4	2.0	3.9	2.3	4.7
RMSE (HU)	0.46	0.39	0.24	0.57	0.29	0.52	0.51	0.61	0.65
α_1	0.58	0.46	0.86	0.48	0.78	0.62	0.91	0.64	1.10
α_2	0.37	0.00	0.00	0.72	0.00	0.38	0.00	0.28	0.00

(総括)

IR 画像の空間分解能は、低コントラストファントムを用いて CNR の低い画像から測定することから、ノイズを考慮した処理が必要となるため解析が難しい。処理パラメータの設定によっては測定精度が低下する場合もある。そこで、考案法では、モデル化した SSP からシミュレーション画像を算出し、実際の画像と比較することによって SSP の精度検証を行い、高精度な SSP の決定を可能とした。考案法は、IR 画像における高精度な SSP 測定法であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Narita Akihiro, Ohkubo Masaki, Fukaya Takahiro, Sakai Kenichi, Noto Yoshiyuki	4. 巻 78
2. 論文標題 A Study of 3D-NPS Analysis in CT Images Based on the Central Cross-section Theorem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Radiological Technology	6. 最初と最後の頁 342 ~ 347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.6009/jjrt.2022-1217	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 Narita Akihiro, Okamoto Kazuki, Toyonaga Kengo, Ohkubo Masaki	4. 巻 78
2. 論文標題 An Easy-to-use Method for CT Image Simulation with Parameter Optimization Using a Water Phantom	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Radiological Technology	6. 最初と最後の頁 732 ~ 740
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.6009/jjrt.2022-1222	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 Narita Akihiro, Ohkubo Masaki, Ohsugi Yuki, Sakai Kenichi, Fukaya Takahiro, Noto Yoshiyuki	4. 巻 78
2. 論文標題 A Study of Longitudinal NPS Measurement in CT Images Based on the Central Cross-section Theorem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Radiological Technology	6. 最初と最後の頁 719 ~ 725
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.6009/jjrt.2022-1267	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 Mugishima Daisuke, Narita Akihiro, Ohkubo Masaki	4. 巻 77
2. 論文標題 A Simple Method for Computationally Generating Metal Artifacts in CT Images for Treatment Planning: A Pilot Phantom Study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Radiological Technology	6. 最初と最後の頁 445 ~ 453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.6009/jjrt.2021_JSRT_77.5.445	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 Narita Akihiro, Ohkubo Masaki, Fukaya Takahiro, Noto Yoshiyuki	4. 巻 77
2. 論文標題 Central Slice Theorem-based Relationship between 1D-NPS Obtained by the Slit Method and 2D-NPS for CT Images	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Radiological Technology	6. 最初と最後の頁 828 ~ 832
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.6009/jjrt.2021_JSRT_77.8.828	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 Narita Akihiro, Ohkubo Masaki, Fukaya Takahiro, Noto Yoshiyuki	4. 巻 14
2. 論文標題 Method for determining slice sensitivity profile of iterative reconstruction CT images using low-contrast sphere phantom	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Radiological Physics and Technology	6. 最初と最後の頁 366 ~ 372
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12194-021-00636-0	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 Narita Akihiro, Ohkubo Masaki, Fukaya Takahiro, Noto Yoshiyuki	4. 巻 48
2. 論文標題 Technical Note: A simple method for measuring the slice sensitivity profile of iteratively reconstructed CT images using a non slanted edge plane	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Medical Physics	6. 最初と最後の頁 1125 ~ 1130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mp.14668	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 Narita Akihiro, Ohsugi Yuki, Ohkubo Masaki, Fukaya Takahiro, Sakai Kenichi, Noto Yoshiyuki	4. 巻 16
2. 論文標題 Method for measuring noise-power spectrum independent of the effect of extracting the region of interest from a noise image	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Radiological Physics and Technology	6. 最初と最後の頁 471 ~ 477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12194-023-00733-2	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 Ohsugi Yuki, Narita Akihiro, Ohkubo Masaki, Sakai Kenichi, Fukaya Takahiro, Noto Yoshiyuki	4. 巻 79
2. 論文標題 ヘリカルCTスキヤンの螺旋軌道におけるX線管の角度に依存したnoise power spectrumの測定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Radiological Technology	6. 最初と最後の頁 1144 ~ 1150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.6009/jjrt.2023-1363	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10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Yuki Ohsugi, Akihiro Narita, Masaki Ohkubo, Takahiro Fukaya, Yoshiyuki Noto
2. 発表標題 A Study of Longitudinal Noise Power Spectrum Measurement in CT Images Based on the Central Slice Theorem
3. 学会等名 第78回日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kengo Toyonaga, Akihiro Narita, Masaki Ohkubo, Kenichi Sakai, Takahiro Fukaya, Yoshiyuki Noto
2. 発表標題 Validation of Simplified CT Image Simulation with Optimization Using Multiple Machines
3. 学会等名 第78回日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒井健一、大久保真樹、成田啓廣、高橋直也、能登義幸
2. 発表標題 空間分解能に基づいたCT画像シミュレーションによるCT撮影時の線量決定方法の考案
3. 学会等名 第12回東北放射線医療技術学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本和樹、成田啓廣、大久保真樹
2. 発表標題 ファントム画像を用いた最適化を伴う簡易的CT画像シミュレータの考案
3. 学会等名 第77回日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大杉勇輝、成田啓廣、大久保真樹、深谷貴広、能登義幸
2. 発表標題 CT画像のNPS測定における中央断面定理に基づいた仮想スリット法の検討
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 深谷貴広、大久保真樹、成田啓廣、能登義幸
2. 発表標題 逐次近似再構成CT画像における傾斜エッジ法のエッジ角度がスライス感度プロファイル測定精度に及ぼす影響
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 Natsuki Ishizaka, Akihiro Narita, Masaki Ohkubo
2. 発表標題 A feasible approach to correct MTF measured by the circular-edge technique with image averaging in iterative reconstruction CT
3. 学会等名 第119回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daisuke Mugishima、 Akihiro Narita、 Masaki Ohkubo
2. 発表標題 A simple method for generating metal artifacts on CT image using forward projection
3. 学会等名 第119回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Okamoto、 Akihiro Narita、 Masaki Ohkubo
2. 発表標題 A method for evaluating the detrending technique in noise power spectrum measurements with a simplified CT image simulation
3. 学会等名 第119回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 深谷貴広、成田啓廣、大久保真樹
2. 発表標題 逐次近似再構成CT画像における球体ファントムを用いたSlice Sensitivity Profileの測定
3. 学会等名 第76回日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	成田 啓廣 (Narita Akihiro) (10770208)	新潟大学・医歯学系・助教 (13101)	

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
---------	---------