

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：32610

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01197

研究課題名（和文）臨床用MR装置およびCT装置を用いた出土木材年輪年代測定法の開発

研究課題名（英文）Development of nondestructive tree-ring measurement using clinical MRI and CT for dendrochronology

研究代表者

森 美加（Mori, Mika）

杏林大学・保健学部・学内講師

研究者番号：90737165

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：臨床用画像検査機器（MRI装置、CT装置およびDBT：Digital breast tomosynthesis）を年輪年代学へ応用し、種々の保存状態の木質文化財の非破壊年輪年代測定法の確立を目的とした。

CTは乾燥木材（伝世品など）、MRIは高含水率の木材（出土材、水浸保存木材）の撮像に適していた。開発したMRIによる0.05mmでの超高分解能撮像では、出土材模擬試料による年輪曲線は光学スキャナを用いた従来法と高い一致を示した。PEG保存処理後木材の年輪測定はDBTが適していた。木質文化財の保存状態に適した臨床用画像検査機器を選択することで非破壊的で詳細な年輪測定が可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木質文化財の年代測定法としては放射性炭素年代測定法および年輪年代測定法があるが、双方とも資料を切り出したり、年輪を露出させるために表面を研磨したりといった工程があり、貴重な資料の一部を破壊しなくてはならない。

そこで臨床用画像検査機器（MRI装置、CT装置およびDBT：Digital breast tomosynthesis）を年輪年代学へ応用し、種々の保存状態の木質文化財に対する非破壊画像化および年輪年代測定法を確立する。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to establish a nondestructive tree-ring measurement for wooden cultural properties in various preservation states by applying clinical imaging equipment such as MRI, CT, and DBT (Digital breast tomosynthesis) to dendrochronology. CT was suitable for imaging dry wood (e.g., handed down art objects) while MRI was suitable for imaging waterlogged wood (e.g., excavated wooden artifacts, preserved wood in water). The tree-ring curve created by ultra-high-resolution imaging at 0.05 mm spatial resolution using MRI, which we developed as a new imaging method, was consistent with the conventional method using an optical scanner. DBT was found suitable for tree-ring measurement of wood preserved with PEG. It was possible to perform a nondestructive and detailed tree-ring measurement by selecting a clinical image device based on the preservation state of the wooden cultural assets.

研究分野：放射線学，文化財科学

キーワード：MRI CT デジタルブレストトモシンセシス 高分解能撮像 木質文化財 非破壊解析 年輪年代学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

木質文化財の年代測定法は放射性炭素年代測定法と年輪年代測定法が一般的である。これらの方法の最大の問題点は破壊的測定法であることである。

近年、非破壊年代測定にはマイクロフォーカス X 線 CT による方法が注目されている。この方法の利点は高解像度という点であるが、欠点としては対象は伝世品などのような乾燥した木質文化財に限定され、水浸保存や薬剤保存処理後の木質文化財に対しては解析が困難である点が上げられる。

2. 研究の目的

臨床用画像検査機器 (MRI 装置, CT 装置および DBT : Digital breast tomosynthesis) を年輪年代学へ応用し、種々の保存状態の木質文化財の非破壊年輪年代測定法の確立を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 木材の保存状態の違いによる臨床用画像検査機器の適性

スギ現生材から作成した保存処理模擬木材試料(乾燥保存, 水浸保存, PEG(polyethylene glycol) 含浸中, PEG 含浸後) に対し MRI および CT で撮像し、年輪描出能を評価した。さらに出土材(水浸保存および PEG 処理後のヒノキ下駄) に対しても同様に評価した。

(2) 臨床用 CT および MRI の木材含水率による描出能の影響の検討

気乾から飽水状態まで段階的に含水率を調整した試料を Optical scanner (従来法; リファレンス), 臨床用 CT および MRI を使用して撮像し、含水率による各装置の年輪描出能を評価した。

(3) 臨床用 MR 装置を用いた水浸出土木材の超高解像度撮像法の開発

臨床 MR 装置を用いて高空間分解能かつ広い領域の超高解像度撮像法 ultra-high resolution T2WI (uHR-T2WI) を開発した。MRI の空間分解能は、FOV をマトリックスサイズで除して得られる。通常、臨床で使用されるマトリックスサイズは 512、FOV は約 20~45 cm (最小) であり、空間分解能は 0.9~0.4 mm 程度である。最大マトリックスサイズは 1024 に制限されているため、高空間分解能撮像をするには FOV を制限すればよい。SE 法の T2WI を用い、TR, TE, FOV, マトリックスサイズ, スライス厚の組み合わせを調整して空間分解能が最も高い画像を得られる撮像条件となるよう uHR-T2WI の最適化を行った。最適化した撮像条件にて水浸保存の木材を模擬したヒノキおよびブナの試料全域を撮像、得られた画像を用いて撮像範囲内の年輪幅を測定し、年輪曲線を作成した。さらに木質文化財に対しても uHR-T2WI にて撮像し、年輪曲線を作成した。

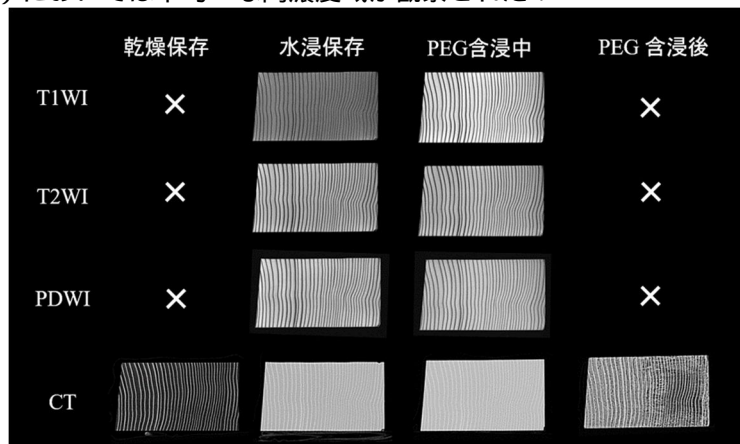
(4) Digital Breast Tomosynthesis を用いた PEG 処理木材の非破壊画像化の検討

PEG 処理後の木材に対し、X 線管電圧を 25 kV から 120 kV まで変化させて X 線撮影し、得られた各画像データより管電圧による年輪描出能を評価した。撮影条件を最適化した DBT にて撮影した PEG 処理後木材の画像より年輪曲線を作成、光学スキャナ (リファレンス) との一致を評価した。

4. 研究成果

(1) 木材の保存状態の違いによる臨床用画像検査機器の適性

各保存処理模擬木材試料の光スキャナ画像、CT および MRI の撮像結果を示す。T1WI, T2WI および PDWI は水浸木材や PEG 処理中といった水分を多く含む試料では明瞭に年輪が確認できたが、水分が極めて少ない乾燥保存および PEG 含浸後の木材では MRI で全く信号が得られなかった。CT は乾燥保存の木材において年輪が明瞭であった。それに対し、水浸木材および PEG 含浸中の木材では全体的に CT 値が高くなり、早材と晩材のコントラスト差が少ないため、年輪の判別が困難であった。一方、PEG 含浸後の木材は全体として年輪を視認でき、辺材 (木材の樹皮側: 画像の右側) においては不均一な高濃度域が観察された。

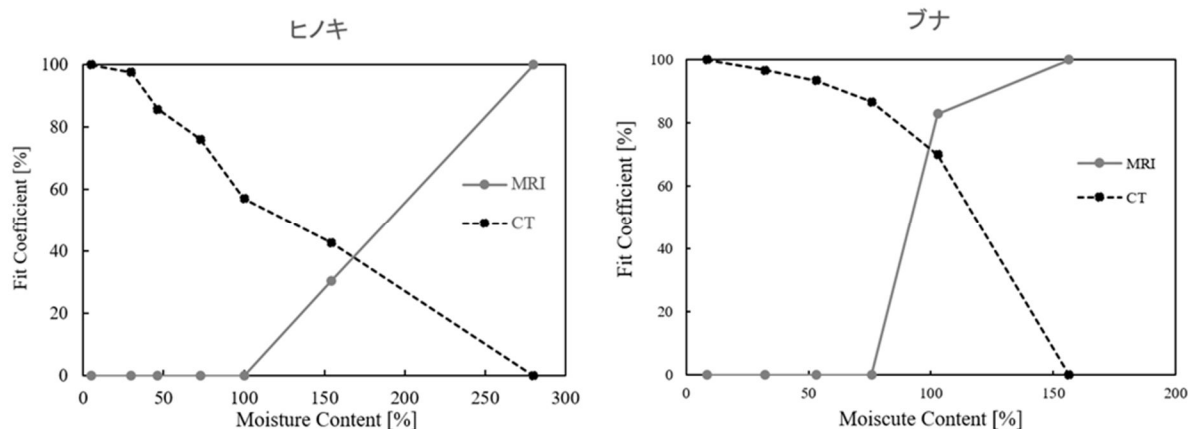


MRI は飽水状態の木材（水浸保存木材）では年輪が明瞭に描出された。その理由として、晩材は仮道管（広葉樹では導管）の密度が高く、細胞壁が厚いため、水分の入り込むスペースが少ないためそれほど信号は高くないが、早材は水を多く取り込むことができるため高くなり、この差により MRI による年輪の表示が可能になったと考えられる。これまで、水浸木材に対する年輪測定や木材内部構造の非破壊画像化は難しかったが、MRI を用いることで可能となる。

(2) 臨床用 CT および MRI の木材含水率による描出能の影響の検討

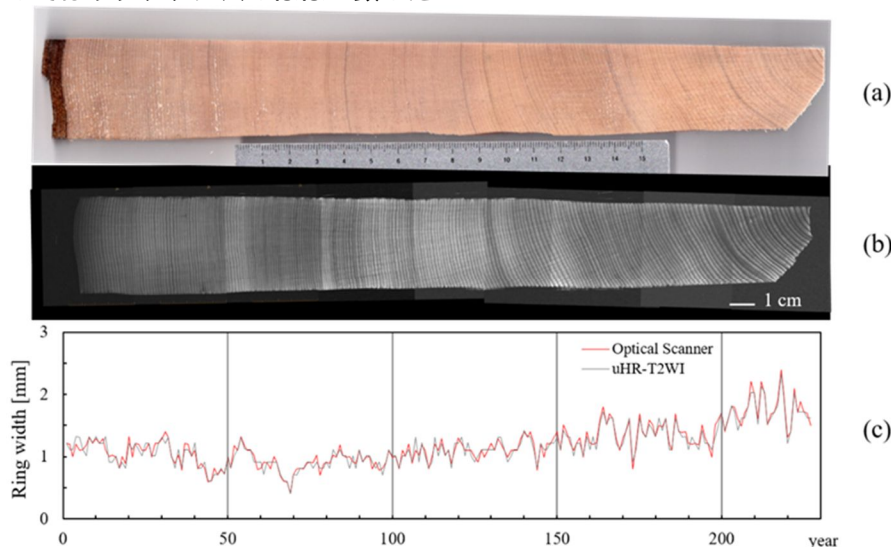
CT は気乾状態の木材（乾燥保存）に適しており、木材の含水率が低い場合、木材中の乾燥している部分が多く、その部分の年輪は視認可能であった。しかしながら、含水率の上昇とともに CT での年輪を視認可能な領域が減少していき、飽水状態ではヒノキ、ブナともに早材と晩材のコントラストが消失した。CT では早材に水分が多く含浸された状態においては晩材との CT 値の差がほとんどなく、コントラストがつかないため、年輪の判別が不能となったと考えられる。

MRI は飽水状態の木材（水浸保存木材）では年輪が明瞭に描出された。その理由として、晩材は仮道管（広葉樹では導管）の密度が高く、細胞壁が厚いため、水分の入り込むスペースが少ないためそれほど信号は高くないが、早材は水を多く取り込むことができるため高くなり、この差により MRI による年輪の表示が可能になったと考えられる。これまで、水浸木材に対する年輪測定や木材内部構造の非破壊画像化は難しかったが、MRI を用いることで可能となる。

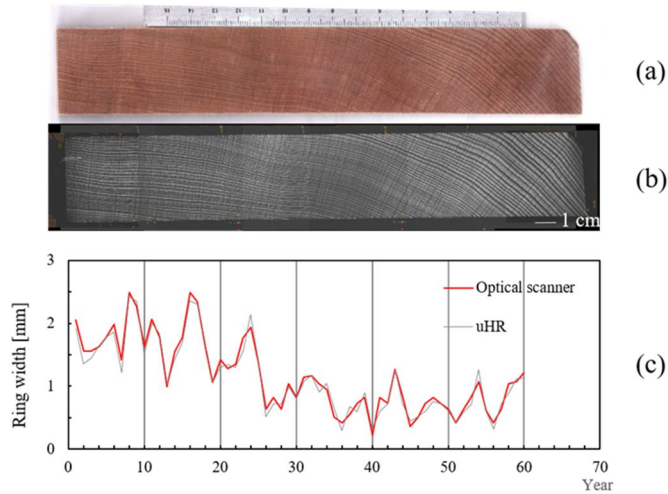


(3) 臨床用 MR 装置を用いた水浸出土木材の超高解像度撮像の検討

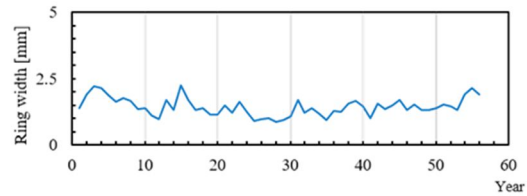
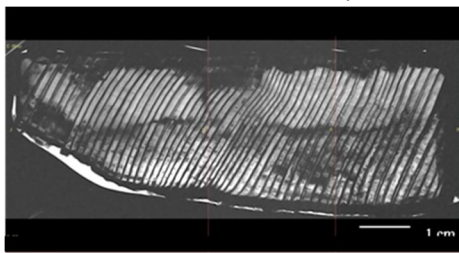
ヒノキの水浸木材試料全体を空間分解能 0.05 mm の uHR-T2WI で撮像した画像を示す。uHR-T2WI においてすべての年輪は明瞭であり、Optical scanner と比較しても遜色がないことが明らかとなった。年輪曲線においても信号の低下している樹皮側でやや相違が見られるものの、全体としてはリファレンスとほぼ一致した。



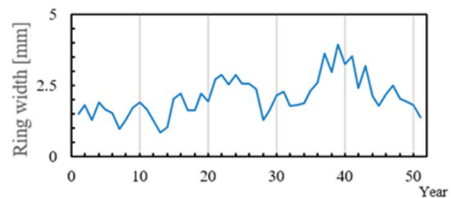
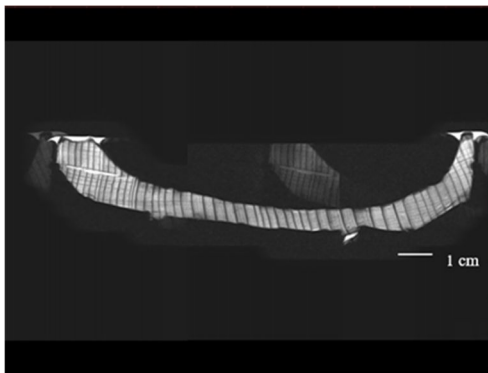
次にブナの水浸木材試料全体の画像空間分解能 0.05 mm の uHR-T2WI で撮像した画像を示す。年輪幅の広い部分においては早材から晩材に向かっての濃度勾配と晩材と早材の境目である年輪境界が明瞭に描出された。また、広葉樹ではその特徴である放射組織（年輪に直行するように走る構造）も視認できた（図 5.7b）。年輪曲線ではブナの試料の年輪が短軸方向であるため年輪数は 60 層と少ないが、uHR-T2WI とリファレンスは一致した。



木質文化財（ヒノキゲタ下駄およびブナの漆木椀）を uHR-T2WI にて撮像，年輪測定した．ヒノキ下駄は目視において表面の目詰まりと劣化が見られ，デジタルカメラでも部分的にしか年輪をとらえられなかったが，uHR-T2WI では年輪が明瞭であり，内部の劣化の様子も描出された．



ブナ漆木椀は表面に漆の塗装があるため塗装内部の年輪は確認できないが（図 5.3b），uHR-T2WI では年輪が明瞭に描出され，かつ現生材の試料で見られた早材から晩材にかけての濃度勾配が出土木材でも同様に確認できた．

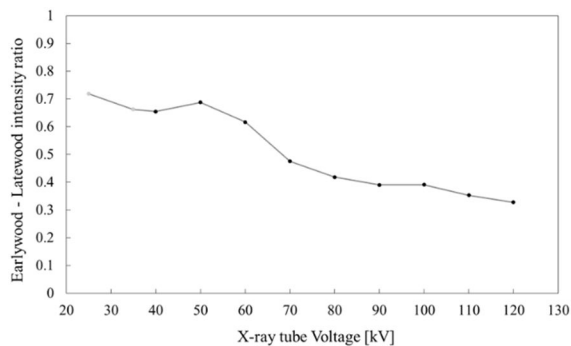


uHR-T2WI を用いられた画像ではヒノキ下駄，ブナ漆木椀ともに年輪が明瞭に描出されたため，年輪曲線の作成が可能であった．

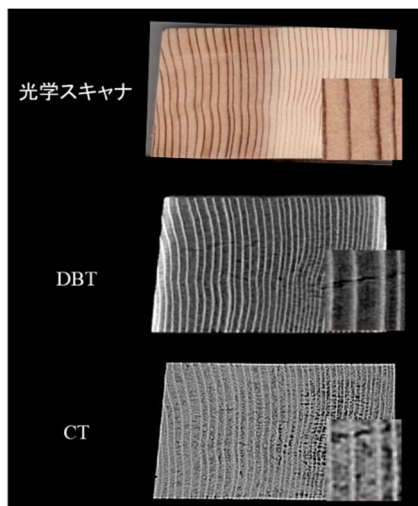
uHR-T2WI 法は，試料全体を小さい FOV で複数回にわたって撮像，得られた高空間分解能画像を合成することで Optical scanner に匹敵する年輪曲線を得ることが可能であった．

(4) Digital Breast Tomosynthesis を用いた PEG 処理木材の非破壊画像化の検討

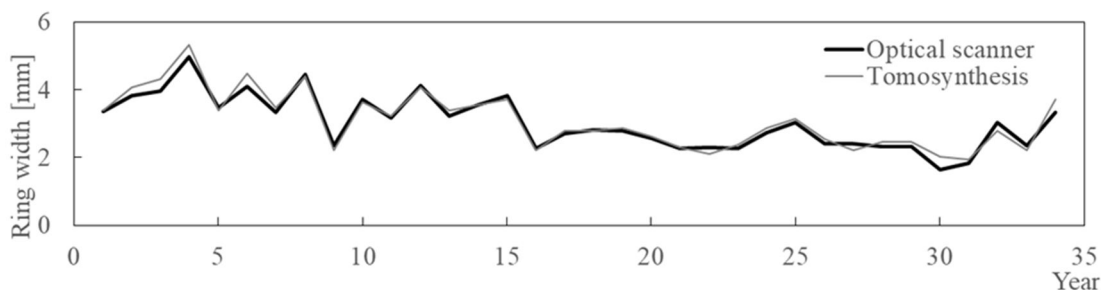
PEG 含浸木材における各管電圧と年輪描出能の関係を示す．年輪描出能は管電圧 25 kV で最も大きく，管電圧が高くなるにしたがって小さくなっていき，管電圧 70 kV を越えると急激に低下した．



撮影条件を最適化した DBT の画像を示す。管電圧を 25 kV と低く設定したため低コントラスト分解能が上昇し、早材に多く含まれる PEG の影響をほとんど受けずに晩材が明瞭に描出された。DBT では、1 mm 厚で再構成された断層像であるため、高さ方向の年輪の歪みや木材中の PEG との重なりが排除され、年輪が明瞭にボケなく描出された。



DBT 画像より作成した年輪曲線を示す。縦軸は年輪幅（実測値）である。本研究で使用した試料の年輪数は 33 層と少ないが、DBT とリファレンスは極めて高い一致を示した。DBT はコントラストの強調が可能で、かつ、3 次元的な可視化が可能であるため PEG 含浸後の木材の年輪の描出に優れており、非破壊的に詳細な内部構造の観察の手法の一つとして有用であった。



(5) まとめ

種々の保存状態（乾燥保存、水浸保存、PEG 含浸中、PEG 含浸後）の出土木材を想定し、臨床用画像検査機器非破壊年輪計測の適応範囲および MRI による高空間分解能撮像法について検討した。

乾燥保存の木材の撮像には CT が適しており、PEG 含浸中の木材は T1WI、水浸保存の木材には T2WI が適していることが明らかとなった。

水浸木材に対し、高解像度で広範囲なスキャンが可能である臨床 MRI を用いた年輪幅測定法（uHR-T2WI）を開発、年輪曲線の作成とリファレンスによる年輪曲線との照合をおこなった。その結果、Optical scanner に匹敵する年輪曲線を得られた。至適空間解像度は 0.05 mm であった。uHR-T2WI による現生材のヒノキとブナの年輪曲線はリファレンスと高い一致がみられ、年輪測定の方法としての有効性が実証された。

さらに PEG 処理後木材に対しては DBT の低管電圧を用いることで、コントラストの強調が可能で、かつ、3 次元的な可視化が可能であるため木材の年輪の描出に優れており、非破壊的に詳細な内部構造の観察の手法の一つとして有用であった。

臨床用画像検査機器にはさまざまな種類があるが、それぞれの特徴を知り、木質文化財材の保存状態に適したモダリティを選ぶことで年輪年代学の調査対象となる資料の適応範囲が大きく広がるであろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mika Mori, Shigehide Kuhara, Kuninori Kobayashi, Sinya Suzuki, Masahisa Yamada., Atsushi Senoo	4. 巻 57 (2019) 125630
2. 論文標題 Non-destructive tree-ring measurements using a clinical 3T-MRI for archaeology	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Dendrochronologia	6. 最初と最後の頁 1頁-10頁
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125630	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 Mika Mori, Shigehide Kuhara, Sinya Suzuki,	4. 巻 61 (2020) 125708
2. 論文標題 Visualization of the internal structure of Polyethylene Glycol Impregnated wood using Digital Breast Tomosynthesis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Dendrochronologia	6. 最初と最後の頁 1頁-6頁
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125708 Get rights and content	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 森 美加
2. 発表標題 Feasibility study of visualizing tree-ring structures of dried wood with Ultra-short Echo Time (UTE) magnetic resonance imaging (MRI) for chronological measurement
3. 学会等名 Japanese Society of Magnetic Resonance in Medicine (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森 美加
2. 発表標題 Feasibility study of ultra-high-resolution magnetic resonance imaging (uHR-MRI) by using a clinical MRI for non-destructive tree-ring measurement of archaeological wood
3. 学会等名 European Society for Magnetic Resonance in Medicine & Biology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森 美加
2. 発表標題 Feasibility study of visualizing annual ring structures of dried wood with Ultra Short Echo Time (UTE) magnetic resonance imaging (MRI) for chronological measurement
3. 学会等名 European Society for Magnetic Resonance in Medicine & Biology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森 美加
2. 発表標題 Feasibility study of visualizing tree-ring structures of waterlogged wood by Deep-Learning Reconstruction
3. 学会等名 ESMRMB 2019, 36th Annual Scientific Meeting, Rotterdam, NL (国際学会)
4. 発表年 2019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	芝生 春菜 (Shibo Haruna) (20784606)	杏林大学・保健学部・助教 (32610)	
研究分担者	久原 重英 (Kuhara Shigehide) (60781234)	杏林大学・保健学部・教授 (32610)	
研究分担者	山田 昌久 (Yamada Masahisa) (70210482)	首都大学東京・人文科学研究科・客員教授 (22604)	

6. 研究組織（つづき）

	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	小林 邦典 (Kobayashi Kuninori) (90723867)	杏林大学・保健学部・特任教授 (32610)	