

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500542

研究課題名(和文)頸動脈血管4次元可視化と動脈硬化症評価システム

研究課題名(英文)Four-dimensional visualization of carotid artery and evaluation system for arteriosclerosis

研究代表者

横田 康成 (Yokota, Yasunari)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：00262957

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：様々な断面での頸部超音波Bモード画像から頸動脈の3次元形状およびその心拍動に伴う動き、つまり4次元可視化する手法を開発した。計算機画面上でマウスなどを操作することにより、様々な方向から頸動脈の3次元形状を観測することが可能であり、さらに視点を頸動脈内部に移動させることにより、あたかも人が血管内部に入り込んで観察しているかのように、動脈硬化の進行に伴い発生するプラークなどを観察可能である。また、3次元形状に加え心拍動による動きを入れた4次元可視化により、個々の断面を個別に観測していただけでは分かりにくかった局所的な動きの悪い部位を容易に見つけるようになり、動脈硬化症の診断が格段に容易になった。

研究成果の概要(英文)：In this study, a method for constructing and visualizing three dimensional shape including the movement corresponding to cardiac beat, that is, four dimensional shape of carotid artery from ultrasonic B-mode images for various section on cervix. The developed system enables user to observe the carotid shape from arbitrary viewpoints on computer display by graphical user interface. If viewpoint is set into internal carotid artery, user can observe plaque that is formed inside artery accompanying with arteriosclerosis progress as if he/she goes into artery. The four dimensional visualization facilitates detection a localized region at which the movement is unnatural compared to the surrounding regions on carotid artery. Though such a region is considered to be local lesion, it is very difficult to detect by individual observation of B-mode image for each carotid section. The result of this study is expected to provide us a new generation diagnostic manner for arteriosclerosis.

研究分野：生体情報工学

キーワード：超音波エコー画像 Bモード画像 頸動脈断面 心拍動 動脈硬化 診断支援 3次元形状可視化 心拍動の変動

## 1. 研究開始当初の背景

平成 13 年 4 月より労働者災害補償制度では、高血圧、糖尿病、肥満、高脂血症の全てを有する症例者に対して「頸動脈エコー検査」が導入された。本検査は、脳出血、脳梗塞などの主たる原因が動脈硬化によるという理由により、血管内壁の性状（高脂質、局所的脂質堆積、プラーク形状など）を超音波画像に基づき検査するものである。本検査は、一般に臨床検査技師により行われるが、左右頸動脈について約 15~30 分の時間を要するため被検者の負担は大きい。また、見落としがないように検査技師には高度な技術が要求されている。

更に、動脈硬化は経年的現象で生活の多様化により青年期から進行しその速度は個人差が大きい。そのため、青年期から全員が頸動脈超音波エコー検査を受診できるようにすることが望ましく、そのためには検査技師の技能に依存せずに「血管壁の鮮明な可視化、動脈硬化計測法とデジタル化によるカルテ記録」することを可能にする技術開発が急務である。

生体内部を可視化するためには、X 線法、核磁気共鳴法、超音波法などがあり臨床（検査、診断、治療）に広く応用されている。超音波法は、最も簡便であるが断層画像であるため器官の 3 次元的理解は経験に依存する問題がある。さらに、心拍動などにより器官自身が動く場合には、3 次元 + 時間軸の 4 次元的理解が必要であり、よりいっそうの経験が必要になる。動脈硬化症は血管内部壁面の形状変化（脂質物質（プラーク）の初生と成長がミリメートルサイズで局所的）、血圧変動による血管径の膨張・収縮の減少として現れるため、4 次元的理解が必要な対象である。動脈硬化症の診断を目的として、超音波法により頸動脈の 4 次元可視化を行う技術は皆無であり、その技術開発が求められている。

## 2. 研究の目的

頸動脈は、図 1 に示すように、総頸動脈 (common carotid) とそれが分岐した内頸動脈 (internal carotid)、外頸動脈 (external carotid) から構成される。この分岐部は血流が複雑であるためにプラークの好発部位となる。そのため、この分岐部を含む領域の頸動脈 4 次元可視化を目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 超音波 B モード断面像の計測、記録

本研究には、メディソン社製超音波検査装置 sonoace pico と中心周波数 7.5MHz のリニア型探触子（超音波プローブ）を使用した。本装置からのビデオ出力を DV 変換機 (ADVC-300, CANOPUS 社) によって  $x$  軸方向 540 画素、 $y$  軸方向 420 画素、サンプリング周波数（フレームレート）30(frame/sec) によりデジタルデータに変換し、コンピュータにより記録する。画像の解像

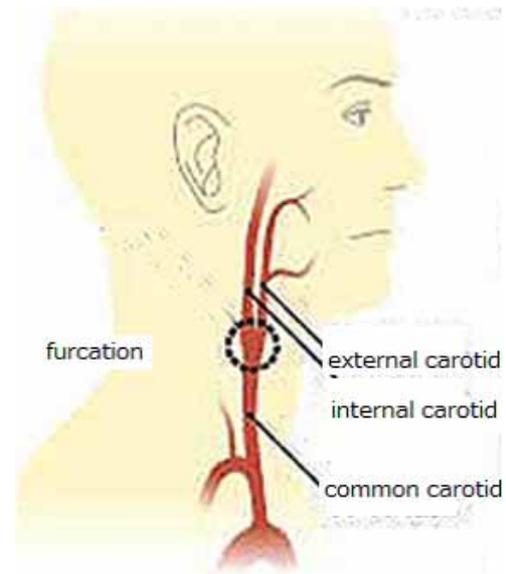


図 1: 頸動脈

度は 0.0713mm/pixel である。

超音波プローブを被験者の頸動脈に垂直にあてて、2-3 心拍を含むように 4 秒間の頸動脈短軸 B モード動画像を記録する。これを 5mm 間隔でスライドさせ、合計 50mm の計測範囲にわたって、同様の処理を繰り返す。この計測範囲には、総頸動脈、内頸動脈、外頸動脈とそれらの分岐部を含む。

### (2) 各断面における頸動脈の位置、形状の推定

ある断面における超音波 B モード画像列を  $f(x, y, t)$ ,  $x = 1, 2, \dots, N_x$ ,  $y = 1, 2, \dots, N_y$ ,  $t = 1, 2, \dots, N_t$  とする。

頸動脈内腔では超音波エコーの反射が弱く、頸動脈壁でエコーの反射が強いため、これらの画像において頸動脈はおおよそ楕円形に黒くくり抜かれたように観測される。実際、我々が超音波画像中の頸動脈を探す際にはそのような形状のものを探している。以下では、こうした形状に関する前提条件を利用して頸動脈の位置と形状を特定する方法を述べる。

まず、頸動脈内壁を適当な閉曲線のモデルで近似する。フーリエ記述子などを用いることにより、複雑な形状を表現できるが、ここでは、簡単化のため、1 次までのフーリエ記述子、つまり楕円で近似する。楕円は以下の方程式を満たす曲線として表わされる。

$$z^T A z = 1, \quad (1)$$

$$\text{where, } z = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} a & c \\ c & b \end{pmatrix}$$

$x_0, y_0$  は楕円の中心座標である。行列  $A$  の最小固有値を  $v_1$ 、最大固有値を  $v_2$  とすると、長軸半径は  $r_a = 1/\sqrt{v_1}$ 、短軸半径は  $r_b = 1/\sqrt{v_2}$ 、長軸の方位  $\phi$  は固有値  $v_1$  に対応する固有ベクトルで与えられる。楕円は、

これら 5 個のパラメータで位置と形状が特定される。また、頸動脈壁の厚みは一様に  $d(\text{mm})$  であるとする。そこで、便宜上、頸動脈の位置と形状を表すこれらのパラメータをまとめて  $\theta = (x_0, y_0, a, b, c, d)$  で表わす。パラメータ  $\theta$  をもつ楕円の内部にある画素  $(x, y)$  の集合を  $T(\theta)$ 、この楕円の外側  $d(\text{mm})$  までにある画素の集合を  $B(\theta)$  とする。この楕円が頸動脈内壁を表現しているならば、 $B(\theta)$  は頸動脈壁を表わすから、そこにある画素は高い輝度をもち、 $T(\theta)$  は頸動脈内腔を表わすから低い輝度をもつと考えられる。そこで、パラメータ  $\theta$  をもつ楕円が頸動脈内壁であるらしさを表わす尺度として次式を考える。

$$J(\theta) = \frac{1}{|B|} \sum_{(x,y) \in B(\theta)} f(x,y,t) - \alpha \frac{1}{|T|} \sum_{(x,y) \in T(\theta)} f(x,y,t) - \beta g(\theta) \quad (2)$$

$|\cdot|$  は集合  $\cdot$  の要素数、 $\alpha, \beta$  は重みであり、 $\beta$  は丸め誤差が生じない程度に十分大きな正数である。 $g(\theta)$  は一般的に考えられている頸動脈の形状の範囲から外れた場合に大きな値を取る適当な関数であり、以下の関数を用いる。

$$g(\theta) = \max(r_a/r_b - S, 0)^2 + \max(\sqrt{r_a r_b} - R_{max}, 0)^2 + \min(\sqrt{r_a r_b} - R_{min}, 0)^2 \quad (3)$$

$S$  は想定される長径と短径の比、つまり扁平率の上限、 $R_{max}, R_{min}$  は、想定される頸動脈等価半径の上限、および下限である。ただし、楕円の等価半径とは、その楕円と等しい面積をもつ真円の半径を表わす（以下では、単に楕円の半径と呼ぶ）。

すべてのフレームについて、この尺度  $J(\theta)$  を最大にする  $\theta$  を非線形最適化法により求める。フレーム  $t$  について求められた頸動脈の位置と形状を表すパラメータを  $\theta_t$  とすると、最終的に、パラメータの系列  $\theta_t, t = 1, 2, \dots, N_t$  が得られる。

パラメータ  $\theta$  の中の短軸半径を取り出した系列を  $r_b(t)$  とすると、これより、 $r_b(t)$  が極小値を取る拡張期、極大値をとる収縮期の時刻が分かる。これをすべての断面について行い、適当な時刻のシフト、時間軸の伸縮を行うことにより、同期を取ることが可能である。便宜上  $t = 1$  が拡張期を表すとする。断面の座標を表す変数を  $z$  とし、同期を取った後の 3 次元超音波画像列を  $f(x, y, z, t)$  で表す。

### (3) 3次元再構成と可視化

3次元可視化は、レンダリングとも言い、大きくボリュームレンダリングとサーフェスレンダリングの2種類がある。

離散化された3次元格子点  $(x, y, z)$  をボクセルという。ボリュームレンダリングは、透過率や反射率をパラメータに持つボクセルを描く手法であり、煙や炎や

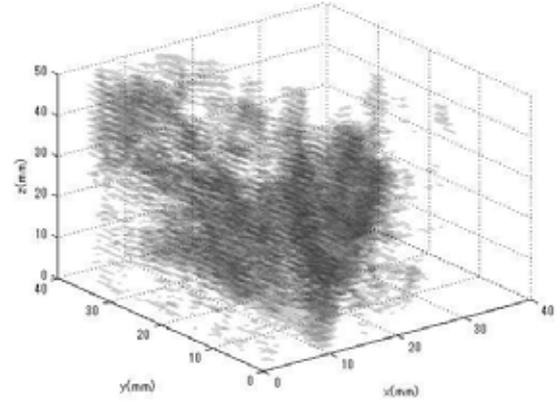


図 2: 周辺組織を含んだ頸動脈のボリュームレンダリング

雲などの表面の境界があいまいなものを描くのに利用される。

先ほど求めた 3 次元超音波画像列  $f(x, y, z, t)$  において、時刻  $t$  をある値に固定すれば、3 次元データとなる。 $f(x, y, z, t)$  は各ボクセルの輝度  $[0, 255]$  を表すが、これを反転させたものを透過率とする。つまり、輝度値が高いほど透過率を低くする。この方法によって頸動脈、周辺組織をボリュームレンダリングしたものを図 2 に示す。

図 2 を見ると、透過率が低く、黒く写っている組織があるのは確認できるが、頸動脈や他の組織の識別はほとんど不可能である。

一方、サーフェスレンダリングは、可視化したい対象の表面を可視化する手法である。そのため、ボリュームレンダリングとは異なり、可視化したい対象を特定する必要がある。例えば、頸動脈の内壁を可視化したい場合には、各断面での内壁を閉曲線で表現する必要がある。3. (2) では、各断面での頸動脈内壁を閉曲線で表現したが、さらに隣接する断面間を面（パッチという）で表現する必要がある。

3次元空間における面は、最低限 3 点あれば、一意に決定されることから、パッチは 3 角形を用いることが多く、本研究においても 3 角形パッチを採用する。隣接する断面の頸動脈内壁を表現するパッチの模式図を図 3 に示す。図 3 では見やすさを考慮し、大きなパッチで構成したが、実際には、もっと細かなパッチを用いて滑らかなサーフェスを構成する。

### (4) 4次元再構成と可視化

図 4 では、拡張期と収縮期についてサーフェスレンダリングした結果を示したが、その間のフェーズについてもサーフェスレンダリングを行い、順に描画することにより、心拍動に伴い収縮、拡張を繰り返す頸動脈の 3 次元形状、つまり 4 次元可視化が可能である。

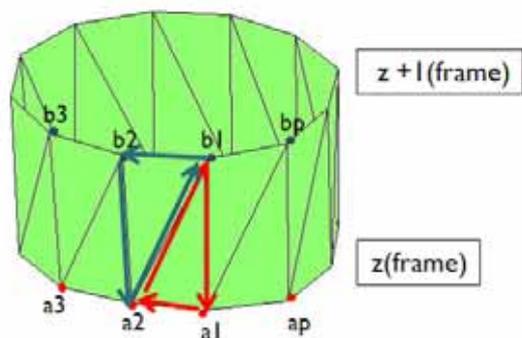


図 3: 隣接する断面の頸動脈内壁を表現するパッチ

#### 4. 研究成果

構成された頸動脈内壁のサーフェスを図 4 に示す。図 4(a),(b) は、それぞれ拡張期、収縮期の頸動脈サーフェスを表す。収縮期では、拡張期に比べ頸動脈が太くなっていることが分かる。図 4(c),(d) は、それぞれの頸動脈サーフェスを内部が見えるように、一定の面で切り取ったものを表す。この例では、健常者に対する結果であるが、プラークを有する患者に対しては、プラークを観察可能である。さらに、計算機画面上でマウスなどを操作することにより、様々な方向から頸動脈の 3 次元形状を観測することが可能であり、さらに視点を頸動脈内部に移動させることにより、あたかも人が血管内部に入り込んで観察しているかのように、動脈硬化の進行に伴い発生するプラークなどを描画することが可能になった。

紙上では描くことができないが、4 次元可視化により、個々の断面を個別に観測していただければ分りにくかった局所的な動きの悪い病変部位を容易に発見できるようになり、動脈硬化症の評価が格段に容易になった。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 11 件)

- ① 横田康成, 興津亮吾, 富岡亮太, 包 国傑, 四ツ谷輝久, 組み合わせ円筒モデルによる頸動脈男性係数推定法～頸動脈と周辺組織のファントムを用いた評価～, 電子情報通信学会, 技術報告, 2015 (5 月掲載予定) (査読無)
- ② F. Nogata, Y. Yokota, Y. Kawamura, Distribution of vibration of chest surface with heart movement, *Frontiers in Sensors*, vol.2, pp.26-31, 2014 (査読有)

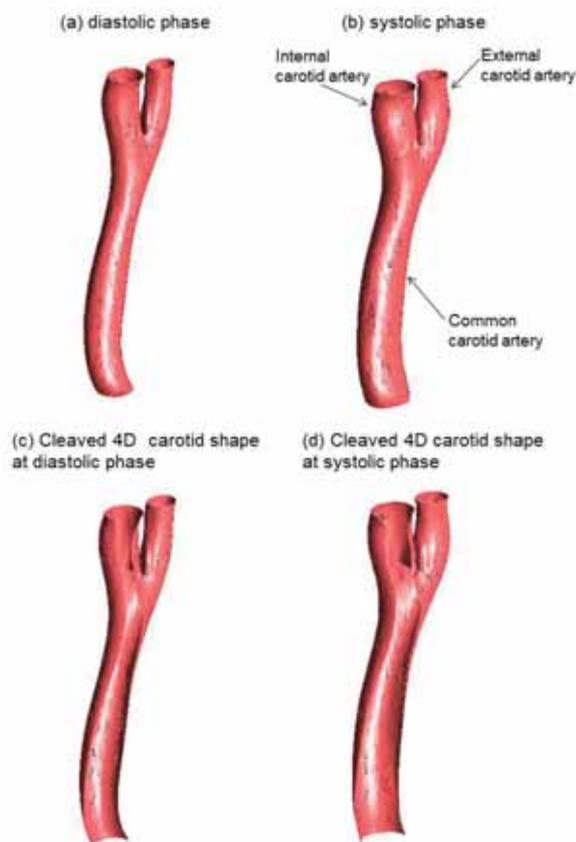


図 4: 頸動脈内壁のサーフェスレンダリング

- ③ Y. Kawamura, Y. Yokota, F. Nogata, M. Terawasa, T. Kamijyo, K. Okada, Dietary silicon intake is associated with stress-strain characteristic of bone and blood vessel in rat, *Proceedings of Life Engineering Symposium 2014*, pp.238-243, 2014 (査読有)
- ④ 興津亮吾, 富岡亮太, 四ツ谷輝久, 横田康成, 超音波 B-mode 画像による脈管系試験のためのファントムの開発とその特性評価, 電子情報通信学会, 技術報告, vol. MBE-114, no.361, pp.95-100, 2014 (査読無)
- ⑤ K.Ogawa, Y.Yokota, Interval estimation of carotid stiffness for arteriosclerosis diagnosis, *Proceedings of Life Engineering Symposium 2014*, vol. 29, pp.52-57, 2014 (査読有)
- ⑥ Yasunari Yokota, Yoko Kawamura, and Fumio Nogata, Compound Cylinder Model of Both Carotid Artery and the Surrounding Tissues for Evaluating the Degree of Arteriosclerosis, *IFMBE Proceedings of 6th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering*, vol. 45, pp.468-471, 2014 (査読有)
- ⑦ 興津亮吾, 富岡亮太, 四ツ谷輝久, 横田康成, 超

音波画像による脈管系試験のためのファントムの検討, 電子情報通信学会, 技術報告, vol. MBE-113, no.373, pp.31-35, 2013 ( 査読無 )

- ⑧ 横田康成, 河村洋子, 野方文雄, 動脈硬化指標のための頸動脈と周辺組織の組み合わせ円筒モデル, 電子情報通信学会, 技術報告, vol. MBE-113, no.373, pp.25-30, 2013 ( 査読無 )
- ⑨ 河村洋子, 横田康成, 梅田幸生, 心臓外科手術による頸動脈径変化に対する影響の検討, 電子情報通信学会, 技術報告, vol. MBE-113, no.373, pp.1-6, 2013 ( 査読無 )
- ⑩ 河村洋子, 横田康成, 梅田幸生, 頸動脈径自動検出システムを用いた心臓外科手術による頸動脈径変化に対する影響の検討, Proceedings of Life Engineering Symposium 2013, vol. 28, pp.183-188, 2013 ( 査読有 )
- ⑪ F. Nogata, Y. Yokota, Y. Kawamura, H. Morita, Y. Uno, W. R. Walsh, Audio-visual based recognition of auscultatory heart sounds with Fourier and wavelet analysis, Global Journal of Technology & Optimization, Transaction on Biomedical Engineering and Image Recognition, vol. 3, no. 1, pp.42-48, 2012 ( 査読有 )

[学会発表](計 3 件)

- ① 横田康成, 河村洋子, 野方文雄, 四ツ谷輝久, 動脈硬化のための頸動脈超音波エコー検査は正確か?, 日本生体医工学会誌, 生体医工学, vol. 53, Suppl.1, pp.154, 2015 (名古屋国際会議場 (愛知県・名古屋市), 2015.5.7-9)
- ② 河村洋子, 横田康成, 梅田幸生, 頸動脈径自動推定システムを用いた心臓外科手術による頸動脈径変化に対する影響の検討, 平成 25 年度日本生体医工学会東海支部大会東海支部学術集会, p.30, 2013 (スズケン本社 (愛知県・名古屋市), 2013.10.19)
- ③ 野方文雄, 横田康成, 河村洋子, ヒト頸動脈画像化と血流シミュレーション, 可視化情報全国講演会 2013 (vision3013), pp.1-2 (P8-30429), 2013 (会津大学 (福島県・会津若松市), 2013.9.27-28)

[図書](計 2 件)

- ① 信号処理の基礎, 森北出版 (情報工学レクチャーシリーズ), 横田康成 (単著, 148 頁), 2013
- ② 敗血症の診断/治療の実状と病態・メカニズムをふまえた開発戦略, 技術情報協会, 横田康成, 河村洋子, 松丸直樹, 白井邦博 (著書, 第 4 章 第 5 節 [2] 「心拍モニタリング技術・装置の開発」, pp.262-267 を分担執筆), 2013

[産業財産権]

取得状況 (計 7 件)

- ① 名称: 画像処理装置, 画像処理プログラム, 記憶媒体及び超音波診断装置  
発明者: 横田康成, 野方文雄, 河村洋子  
権利者: 岐阜大学  
種類: 特許  
番号: 特許第 5158679 号  
出願年月日: 平成 19 年 9 月 14 日  
取得年月日: 平成 24 年 12 月 21 日  
国内外の種別: 国内
- ② 名称: 画像処理装置, 画像処理プログラム, 記憶媒体及び超音波診断装置  
発明者: 横田康成, 谷口梨絵, 河村洋子, 野方文雄  
権利者: 岐阜大学  
種類: 特許  
番号: 特許第 5158690 号  
出願年月日: 平成 19 年 12 月 20 日  
取得年月日: 平成 24 年 12 月 21 日  
国内外の種別: 国内
- ③ 名称: 血管破裂指標の算出方法, 及び生体動脈評価装置  
発明者: 野方文雄, 横田康成, 河村洋子, 森田浩之, 宇野嘉弘  
権利者: 岐阜大学  
種類: 特許  
番号: 特許第 5187734 号  
出願年月日: 平成 20 年 1 月 25 日  
取得年月日: 平成 25 年 2 月 1 日  
国内外の種別: 国内
- ④ 名称: Image processing apparatus, image processing program, storage medium and ultrasonograph  
発明者: Yasunari Yokota, Yoko Kawamura, Fumio Nogata  
権利者: 岐阜大学  
種類: 特許  
番号: オーストラリア特許 2008341769  
出願年月日: 平成 22 年 6 月 24 日  
取得年月日: 平成 24 年 3 月 1 日  
国内外の種別: 国外
- ⑤ 名称: Image processing apparatus, image processing program, storage medium and ultrasonograph  
発明者: Yasunari Yokota, Yoko Kawamura, Fumio Nogata  
権利者: 岐阜大学  
種類: 特許  
番号: アメリカ特許 8,187,188  
出願年月日: 平成 22 年 6 月 16 日  
取得年月日: 平成 24 年 5 月 29 日  
国内外の種別: 国外
- ⑥ 名称: Image processing apparatus, image processing program, storage medium and ultra-

sonic diagnostic apparatus

発明者：Yasunari Yokota, Rie Taniguchi, Yoko Kawamura, Fumio Nogata

権利者：岐阜大学

種類：特許

番号：アメリカ特許 8,249,324

出願年月日：平成 22 年 6 月 16 日

取得年月日：平成 24 年 8 月 21 日

国内外の種別：国外

- ⑦ 名称：Image processing apparatus, image processing program, storage medium and ultrasonic diagnostic apparatus

発明者：Yasunari Yokota, Rie Taniguchi, Yoko Kawamura, Fumio Nogata

権利者：岐阜大学

種類：特許

番号：EPC 特許 2226012

出願年月日：平成 22 年 5 月 10 日

取得年月日：平成 24 年 6 月 20 日

国内外の種別：国外

[その他]

ホームページ等

<http://www1.gifu-u.ac.jp/~yktlab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

横田 康成 (YOKOTA, Yasunari)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号 00262957

### (2) 研究分担者

野方 文雄 (NOGATA, Fumio)

岐阜大学・工学部・名誉教授

研究者番号 70047629