

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19300287  
 研究課題名（和文）脳内生体情報を用いた計算・図形処理過程における学習モデルの構築

研究課題名（英文）The structure of learning model during calculation and diagram processing using brain biological information

研究代表者  
 黒田 恭史（KURODA YASUFUMI）  
 佛光大学・教育学部・准教授  
 研究者番号：70309079

## 研究成果の概要：

本研究の目的は、計算課題と図形課題遂行時の脳活動を計測・分析することを通して学習モデルの構築を行い、指導方法の改善に活かすことである。大学生延べ51名、小学生延べ16名を対象に、計算課題と図形課題を用いて脳活動計測を実施した結果、課題の種別、難度の差、方略獲得の有無によって脳活動に特徴的な傾向が生じることが明らかになった。それをもとに学習モデルの構築と、脳活動データの教育への応用を提案した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	6,500,000	1,950,000	8,450,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学・教育工学

キーワード：脳科学，代数教育，幾何教育，数学教育，学習モデル

## 1. 研究開始当初の背景

1990年代後半以降、学習時の脳活動データを安全に計測する技術の発展により、経済協力開発機構（OECD）の「学習科学と脳プロジェクト」や、日本の文部科学省の「脳科学と教育」研究に関する検討会の発足など、脳科学の研究成果を教育に活かそうとする動きが世界的規模で広まってきた。

この背景には、少子化による個々の子どもへの期待感の高まりや、社会から教育への要請の多様化が、急速に広まってきたことなどに加えて、実際の学校現場では、学習者の多様化に対応した教育方法の開発が喫緊の課

題となっていることが挙げられる。すなわち、集団全体としての能力の向上と同時に、個々の能力の的確な把握と適正な教育の提供が求められているといえる。そのためには、従来の正答率、解答内容、所要時間といった行動観察に加え、学習時の脳活動データ等、各種データを取得・分析し、学習者の理解の様相を示す学習モデルの構築と、迅速に教育改善に活かしていくための具体的な方法を確立していく必要がある。

ところで、近赤外分光法（NIRS：Near Infra-red Spectroscopy）による光計測装置は、装着が容易、安全、そして通常の学習姿

勢での計測が可能であるという特徴を持つことから、教育研究への応用が期待されている。成人だけでなく、子どもへの使用も容易であることから、未習の内容を実験課題とすることで、理解に至る過程を観察・計測することが可能であり、学習モデルの構築にも有効になると考えられる。但し、この装置が医学研究での診断・治療による使用が主流であったため、目的の異なる教育研究への利用に際しては、実験で使用する課題設定、年齢・学習履歴を含めた被験者の選定、教育研究の文脈でのデータ分析とその解釈等、十分な検討のもと研究を推進していく必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、数学教育における計算領域と図形領域を対象とし、課題遂行時の脳活動を計測・分析することを通して学習モデルの構築を行い、それらを指導方法の改善に活かすことである。具体的には、下記の3点を明らかにする。

- (1) この間の脳科学と教育研究の動向について先行研究及び実施調査をもとに概観し、新たな学際的研究のあり方について検討する。
- (2) 課題遂行時に被験者が理解に至る過程を現出可能な計算と図形に関する実験課題を開発し、それらを用いて脳活動計測を実施するとともに、双方のデータの特徴を比較・検討する。
- (3) 実験によって得られた分析結果をもとに、学習モデルの構築を行い、算数・数学に関する学習者の理解過程の特徴の生理学的解明と、教育方法の改善に活かすことのできる知見を見いだす。

## 3. 研究の方法

脳活動計測による学習モデルの構築と指導法の改善に向けて、次の手順に沿って、研究を遂行した。

### (1) 世界的研究動向の調査方法

#### ①文献研究

脳活動計測機器の急速な普及が始まった1998年以降の先行研究を対象に、脳科学の教育研究の応用の事例を集積し、被験者特性、実験課題の種別、成果の応用方法の視点から整理・分析した。

#### ②海外研究者との国際研究交流

脳科学の教育研究への応用に関する世界的な研究拠点である、ペンシルバニア大学医学部 (UPENN: アメリカ)、及び教育研究に脳科学の視点を導入する実績を持つ国立教育研究機関 (NIE (National Institute of Education): シンガポール) に滞在し、研究

スタッフとの継続的な会議により、現状までの研究の到達点、今後の研究課題、そして新たな実験実施のための環境設定について議論し、それらを纏めた。

## (2) 脳活動計測実験方法

### ①被験者の選定

先行実験では、安定的な脳活動データの取得と実験後の詳細な聞き取り等のデータが取得可能な成人 (大学生) を対象とした。本実験では、教育への具体的な応用を目途とすべく、実験課題 (以下、タスクと記す) で取り上げる内容を学習する時期に該当する子ども (小学生) を対象とすることとした。

### ②実験課題の開発

脳活動計測実験用の計算及び図形領域のタスクを考案した。計算領域では虫食い算を、図形領域ではタングラムを題材として、定期的にヒントが提示される実験環境を設定し、課題遂行時に理解に至る過程が現出・計測できるようにした (図1, 図2)。なお、タスクの開発に際しては、大学生を対象とした先行実験での問題点を検討し、小学生を対象とした本実験では改良したものを使用するようにした。

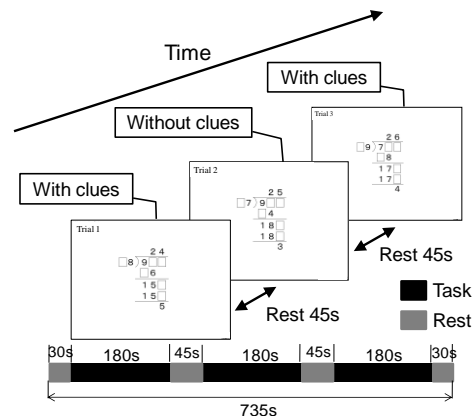


図1 計算タスク (虫食い算)

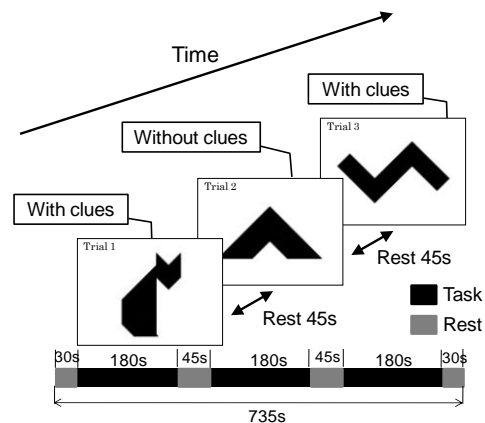


図2 図形タスク (タングラム)

### ③計測方法

脳活動計測に際しては、本科研費によって購入した近赤外線による光計測装置 (NIRO-200: 浜松ホトニクス社製) を用い、前頭前野を水平に2カ所計測した (図3)。実験は騒音、照明、空調等に不良のない、佛教大学内の実験室にて実施した。被験者の課題遂行場面を、ビデオカメラにて録画し、実験後に被験者に録画映像を視聴させながら各時間帯での思考状態を口述させるようにした。

● 照射プローブ    ■ 受光プローブ

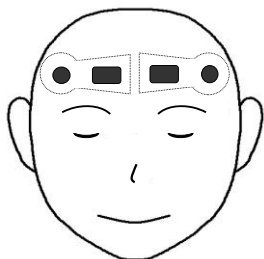


図3 脳活動計測部位 (前頭前野)

### ④分析方法

脳活動データの分析に際しては、計算及び図形タスク遂行時の行動観察 (正答率、解答時間、事後の感想等) との照合を通して、特徴的なデータ変化が、学習過程のどのような要因に関連しているのかを特定しながら進めるようにした。最初に、詳細な行動観察結果のある大学生を対象とした実験を分析し、その後、そこで得られた知見を参考に、小学生を対象とした実験の分析を行った。

#### (3) 学習モデルの構築方法

実験によって得られた知見をもとに、計算領域と図形領域に関する学習モデルの構築を試みた。また、得られた学習モデルから、双方の教育内容における効果的な指導方法等について提案した。

## 4. 研究成果

### (1) 世界的研究動向の調査結果

#### ①文献研究より

脳科学と教育研究の学際的研究の開始時期、政策推進側の代表者の一人である Bruer, J. T. (1997) は、「Education and the Brain: A Bridge Too Far」の論文において、脳科学と教育研究の間に横たわる溝の大きさと深さを、全世界の研究者に植え付けた。それから今日までの約10年、双方の研究者らによるたゆまぬ努力と協力の結果、同時に指摘された問題点は少しずつ解決の方向へと向かい、現在では双方の研究者による共同研究のもと、臨床データによる分析と成果の発表が

行われるようになった。

#### ②海外研究者との国際研究交流より

研究代表者は文献による先行研究に学びつつ、2008年4月から9月まで、UPENNに滞在し、脳活動計測技術の開発者の一人である Chance, B.博士とともに、医学研究と教育研究の接点を構築すべく議論を重ねた。とりわけ、医療の診断・治療技術として進化してきた、計測技術と分析手法を、どのように教育研究の臨床実験に適用していくのかといった点を重点課題として、その具体的な方法の開発を試みた。

また、2008年10月から翌年3月まで、NIEに滞在し、教育心理学者の Lee, K.博士らとともに、実験分析結果の教育研究への活用の方法について検討した。その中で、これまで脳活動の活性化に着眼点が置かれ、脳活動の沈静化については、消極的な解釈が多かったが、むしろ教育研究での理解の過程を検討する際には、沈静化に着目することが重要であるとの共通認識を得ることができた。こうした議論の成果をもとに、3種類の難度の異なる実験課題を新たに開発し、シンガポールの大学生25名を対象に脳活動計測を実施・分析し、脳活動データの沈静化の特徴と理解の過程における役割を検証した。

#### (2) 脳活動計測実験結果

計算と図形領域から実験用タスクを開発し、大学生と小学生を被験者に脳活動計測実験を行った。実験は、大学生を対象とした先行実験、小学生を対象とした本実験、そして大学生を対象とした追実験の3段階に大別され、以下、それぞれの実験結果の概要と成果について記す。

##### ①先行実験結果：大学生対象

計算領域より乗法と除法の筆算及び虫食い算タスクを、図形領域よりタングラムを用いたタスクを開発し、大学生延べ27名 (計算タスク11名、図形タスク17名) を対象に、光計測装置による脳活動計測実験を行った。

乗法と除法の筆算タスク及び虫食い算タスクでは、乗法、除法とも虫食い算タスクでのヘモグロビン濃度変化の上昇が顕著であった。また、いずれの虫食い算タスクも、被験者間の解答所要時間差 (乗法に顕著) が大きかったため、それを均一化するための方策が必要であることが検討課題となった。そこで、小学生を対象とした実験に向けて、ヘモグロビン濃度変化が大きかった虫食い算で、所要時間差の比較的小さかった除法を取り上げ、ヒントが定期的に提示される除法虫食い算タスクを開発することとした。このヒン

ト提示により、解答時間をコントロールすることができるとともに、ヒントを参考に理解に至る過程が検討可能になると考えた。

一方、タングラムを用いた図形タスクでは、被験者間の解答時間の差をコントロールするため、予めヒント提示をタスク過程に組み込むようにした。また、各試行における難度の調整のため、17名の被験者を二つのグループに分け、試行の順序を入れ替えて実験を実施し、適正な順序を設定するようにした。実験の結果、課題遂行により、方略獲得群と方略未獲得群に分かれ、方略獲得群は、獲得前後で、ヘモグロビン濃度の上昇が抑制されるようになり、方略未獲得群は、ヘモグロビン濃度の上昇が最後まで継続するという結果となった。なお、小学生用には、より課題遂行がスムーズになるよう、手元に解答画像の輪郭図を置くこととした。

### ②本実験結果：小学生対象

先行研究で用いた各タスクをもとに、小学生用にヒント提示方法を改良した計算タスクと図形タスクを開発し、小学生延べ16名（計算タスク8名、図形タスク8名；同一被験者に双方のタスクを実施）を対象に、光計測装置による脳活動計測実験を行った。

実験の結果、8名の計算タスクと図形タスクの各試行(Trial 1, 2 and 3)におけるヘモグロビン濃度変化の平均値を算出すると、いずれのタスクにおいても Trial 1,2 で高く、Trial 3 で減少するという同様の傾向が見られた(図4)。

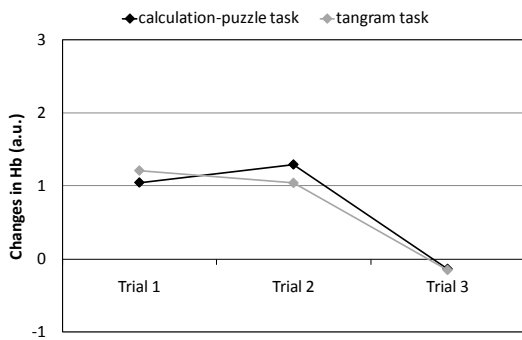


図4 計算・図形の試行毎のヘモグロビン

また、行動観察及び事後の観察より、計算タスクと図形タスクの双方で、方略獲得群 (Type B, C) と方略未獲得群 (Type A) に分かれることが明らかになり、各群でのヘモグロビン濃度変化の平均値を算出すると、課題方略の獲得の有無によって、ヘモグロビン濃度変化に差異が生じることが明らかになった(図5)。とりわけ、計算タスクでは、被験者の方略獲得の有無により脳活動データに大差が見られ、方略未獲得群ではヘモグロ

ビンが上昇を続けるという学習者の特性が検出された。図形タスクでは、方略の獲得の有無では計算タスク程の大差が見られず、問題別の脳活動データに大差が見られた。

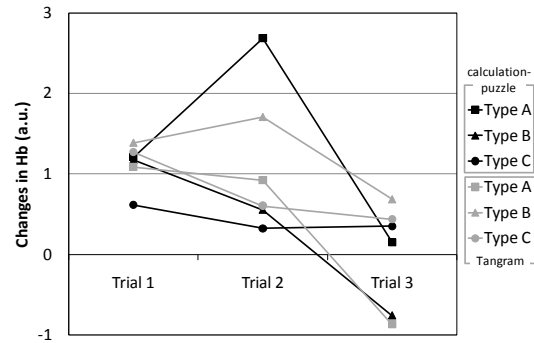


図5 計算・図形のタイプ別ヘモグロビン

### ③追実験結果：大学生対象

先行実験におけるタスクの難度調整段階において、同一領域で難度の異なる実験タスクを実施し、脳活動データを分析すると、各被験者の得手不得手のレベルによって、脳活動に差が生じることが明らかになった。そこで、同一領域内のタスクの難度を段階的に変化させた際の脳活動の特徴を検証し、学習モデルの精緻化に活かすこととした。

シンガポールの大学生(院生含)延べ25名を対象に、難度の異なる3種類の加法をランダムに提示するタスクを用いて、光計測装置による脳活動計測実験を行った。タスクの提示順序は、Easy, Medium, Difficultの3種類の難度のものを、それぞれ5ブロック(5問/ブロック；計25問)ずつ用意し、15ブロック(計75問)をランダムに提示するようにして、難度によるヘモグロビン濃度の特徴を検証した(図6)。

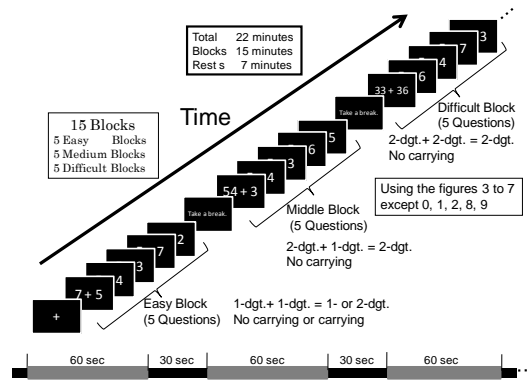


図6 加法タスク

実験の結果、課題遂行時の脳活動の変化が山型の被験者18名(72%)の平均グラフ(図7)では、Difficult, Medium, Easyの順にoxyHbの濃度が高い結果となり、タスクの難度とヘ

ヘモグロビン濃度の高低が対応することが明らかになった。また、それらに対応しない被験者の場合、難度による解答時間や正答率の差が小さい等、被験者が難度差を感じていないことが明らかになった。

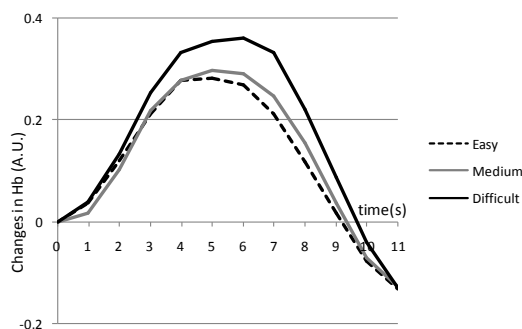


図7 OxyHbの平均のグラフ (N=18)

### (3) 学習モデルの構築

#### ① 先行実験結果より

幾何課題における、方略獲得の有無の問題は、図形の構成要素を瞬時に判別することが可能となるかどうかといった幾何課題特有のものであり、学習効果を高めるための方策を考える上での知見を得る際に有効なデータとなる。

#### ② 本実験結果より

計算課題では、被験者の方略獲得の有無により脳活動データに大差が見られ、方略未獲得群ではヘモグロビンが上昇を続けるという学習者の特性(学習モデル)が検出されたことから、方略獲得に関する十分な指導の必要性が示唆された。図形課題では、方略の獲得の有無では計算課題程の大差が見られず、問題別の脳活動データに大差が見られるという学習モデルが検出されたことから、一つの解法に習熟させるよりも、多くのタイプの問題に取り組みさせることの必要性が示唆された。

#### ③ 追実験結果より

同一領域の難度の異なる課題では、タスクの難度とヘモグロビン濃度の高低が対応するという学習モデルが検出された。また、それらに対応しない場合、被験者が難度差を感じていないことから、一斉授業であっても各学習者に適正な難度の問題を提供することの必要性が示唆された。

### (4) 要約

本研究の目的は、計算と図形タスク遂行時の脳活動計測を通して学習モデルの構築を行い、指導方法の改善に活かすことであったが、一連の研究により得られた成果を要約すると次のようになる。

#### ① 世界的な研究動向の調査にあつては、1990

年代後半から脳科学と教育の学際的研究が開始され、現在では双方の研究者らによる共同研究が世界的規模で展開されていることを示した。また、海外研究者との研究交流を通して、今後の研究に関する検討課題の共有化と、それらに基づく国際共同実験を実施した。

② 脳活動計測実験にあつては、3段階の実験を通して、計算タスクと図形タスク遂行時の脳活動に特徴的な傾向があることを解明した。とりわけ、理解過程の特徴をもとにした被験者のグルーピングにより、脳活動データの差異が顕著に示された。また、同一種の内容であっても、難度の細かな差異が脳活動に影響を及ぼすことが明らかになった。

③ 学習モデルの構築にあつては、実験結果の分析より、計算領域と図形領域の双方について提案を行った。各学習モデルより、計算領域では理解に関する習熟過程の必要性が、また図形領域では多様なタイプの問題に取り組みさせることの重要性が示唆された。一方、タスクの難度に関わっては、それが細かな差異であっても脳活動に影響していることから、指導に際しては、各学習者の理解レベルに応じた適切な難度の問題を提供することの必要性が示唆された。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 黒田恭史, 岡本尚子, 解答場面と説明場面の差異がもたらす脳内ヘモグロビン濃度変化の特徴, 佛教大学教育学部論集, 査読無, 19, 2008年, 55-68
- ② 岡本尚子, 黒田恭史, 計算遂行時の前頭前野におけるヘモグロビン濃度変化の特徴, 数学教育学会誌, 査読有, 48(1・2), 2008年, 73-80
- ③ 黒田恭史, 算数・数学教育内容の再構築と連動した学力の評価, 日本教育学会誌「教育学研究」, 査読有, 75(2), 2008年, 169-179

[学会発表] (計 1 3 件)

- ① KURODA Yasufumi, OKAMOTO Naoko, Britton CHANCE, NIOKA Shoko, EDA Hideo, MAESAKO Takanori, Visualization of children's mathematics solving process using near infrared spectroscopic approach, SPIE-The International Society for Optical Engineering, 23 January 2009, San Jose, in Press, 査読有
- ② OKAMOTO Naoko, KURODA Yasufumi, Britton CHANCE, NIOKA Shoko, EDA Hideo, MAESAKO Takanori, Measurement of brain activation difference during different

- mathematical tasks by near infrared spectroscopy, SPIE, 23 January 2009, San Jose, in Press, 査読有
- ③ EDA Hideo, KURODA Yasufumi, OKAMOTO Naoko, MAESAKO Takanori, Measuring the Moment of Understanding while Solving Mathematical Puzzles, WAC-International Forum on Multimedia and Image Processing, 28 September 2008, Hawaii, 530・1-6, 査読有
- ④ OKAMOTO Naoko, EDA Hideo, KURODA Yasufumi, MAESAKO Takanori, Effectiveness of NIRS in Educational Research, WAC, 28 September 2008, Hawaii, 526・1-6, 査読有
- ⑤ 岡本尚子, 黒田恭史, 脳科学と数学教育学の学際的研究の可能性についての動向, 数学教育学会夏季研究会(関西エリア)発表論文集, 2008年7月27日, 大阪教育大学, 25-32, 査読無
- ⑥ 黒田恭史・岡本尚子, 脳科学の数学教育への応用に関する研究動向と今後の方向性, 数学教育学会春季年会発表論文集, 2008年3月23日, 近畿大学, 212-214, 査読無
- ⑦ 岡本尚子, 黒田恭史, 図形課題におけるヒントの役割と脳活動の特徴, 数学教育学会春季年会発表論文集, 2008年3月23日, 近畿大学, 215-217, 査読無
- ⑧ 岡本尚子, 黒田恭史, 前迫孝憲, ヒント提示の認識の差異がもたらす脳活動の特徴 -小学生を対象として-, 日本教育工学会研究報告集, 2008年3月1日, 名古屋大学, JSET08-1, 141-148, 査読無
- ⑨ EDA Hideo, KURODA Yasufumi, OKAMOTO Naoko, MAESAKO Takanori, NIRS Evaluates the Thinking Process of Mushi-kuizan Task, SPIE, 19 January 2008, San Jose, Vol.6850, 685002・1-6, 査読有
- ⑩ 黒田恭史, 岡本尚子, 同一問題における解答場面と説明場面の差異がもたらす脳生理学的特徴, 日本教育実践学会第10回研究会発表論文集, 2007年11月10日, 上越教育大学, 31-32, 査読無
- ⑪ 岡本尚子, 黒田恭史, 図形課題遂行時における助言がもたらす脳活動の特徴, 第11回数学教育学会大学院生部会発表論文集, 2007年9月22日, 東北大学, 5-10, 査読無
- ⑫ 岡本尚子, 黒田恭史, 授業場面を想定した学習時における脳内生体情報の取得に向けて, 数学教育学会夏季研究会(関西エリア)発表論文集, 2007年6月16日, 佛教大学, 5-8, 査読無
- ⑬ 黒田恭史, 岡本尚子, 今後に求められる算数・数学の「学力」について -学力

調査・実態調査をもとにして-, 数学教育学会夏季研究会(関西エリア)発表論文集, 2007年6月16日, 佛教大学, 9-12, 査読無

[図書] (計 1 件)

- ① 黒田恭史編著, 共立出版, 数学科教育法入門, 2008年, 総300頁(内63頁担当)

[産業財産権]

○取得状況(計 1 件)

名称: Body Activity Measurement Device.  
 発明者: Hideo Eda, Yasufumi Kuroda, Takanori Maesako, Katsuo Sugai  
 権利者: NICT; National Institute of Information and Communications Technology in Japan  
 種類: Patent  
 番号: 7,386,335  
 取得年月日: June 10, 2008  
 国内外の別: 国外 (U.S.A.)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

黒田 恭史 (KURODA YASUFUMI)  
 佛教大学・教育学部・准教授  
 研究者番号: 70309079

### (2) 研究分担者

(2007年度のみ)

前迫 孝憲 (MAESAKO TAKANORI)  
 大阪大学・大学院人間科学研究科・教授  
 研究者番号: 00114893

(2007年度のみ)

江田 英雄 (EDA HIDEO)  
 光産業創成大学院大学・統合エンジニアリング分野・准教授  
 研究者番号: 00395237

### (3) 連携研究者

(2008年度のみ)

前迫 孝憲 (MAESAKO TAKANORI)  
 大阪大学・大学院人間科学研究科・教授  
 研究者番号: 00114893

(2008年度のみ)

江田 英雄 (EDA HIDEO)  
 光産業創成大学院大学・光医療・健康分野・准教授  
 研究者番号: 00395237

### (4) 研究協力者

岡本 尚子 (OKAMOTO NAOKO)  
 大阪大学・大学院人間科学研究科・博士後期課程  
 学術振興会特別研究員 DC