原著

ORIGINAL ARTICLE

NIRS を用いた脳活動計測技術がもたらす教育神経科学の可能性

黒田 恭史¹, 岡本 尚子², 前迫 孝憲³¹ 京都教育大学 教育学部 数学科² 立命館大学 産業社会学部 現代社会学科³ 大阪大学 大学院人間科学研究科 人間科学専攻

(平成 26 年 11 月 6 日受理, 平成 27 年 1 月 29 日掲載決定)

Possibility of Research in Educational Neuroscience by Measurement of Brain Activity Using Near Infra-red Spectroscopy

Yasufumi Kuroda¹, Naoko Okamoto², Takanori Maesako³¹Department of Mathematics, Faculty of Education, Kyoto University of Education²Department of Social Sciences, College of Social Sciences, Ritsumeikan University³Department of Human Sciences, Graduate School of Human Sciences, Osaka University

(Received November 6, 2014, Accepted January 29, 2015)

要 旨

近赤外分光法 (NIRS ; Near infra-red spectroscopy) による光計測装置は, 計測時における被験者のより自然な活動を保証する脳活動計測システムである. この装置の開発により, 医学, 工学, 認知科学などの研究分野のみならず, 教育学においても神経科学的なアプローチをとることが可能となってきた. 教育学研究の分野において脳活動計測実験を構築するにあたっては, 教室空間での学びの特徴を含んだ実験条件を設定することが重要となる. たとえば, 教師と学習者の関係は, その典型的な特徴の一つである.

本研究では, 近赤外分光法による光計測装置を用いて, 教師役の被験者と学習者役の被験者のペアの同時脳活動計測を実施した. 学習者役はタングラムに取り組み, 教師役は学習者役を観察して彼らにヒント提示する役割とした. 実験の結果, ヒント提示前後の脳活動は, 教師役と学習者役で異なる変化を示すことが明らかとなった.

キーワード : NIRS, 教育神経科学, 数学教育

Abstract

A near infra-red spectroscopic device is a system used to measure brain activity, which allows subjects to perform actions more naturally while the measurements are being performed. The development of this device has made it possible for a neuroscientific approach to be used not only in the medical, engineering, and cognitive science research fields, but also in the field of education. While designing an educational research experiment measuring brain activity, it is important that the experimental conditions reproduce conditions typically found in the classroom. An example of these would be the relationship between teachers and students.

In this study, we used a near-infrared spectroscopic device to take simultaneous measurements of the brain activity of pairs of subjects. One of the subjects played the role of a teacher and the other played the role of a student. Subjects playing the student role were required to solve tangram puzzles, while subjects playing the teacher role observed them and gave them hints. We found significant differences when comparing brain activity before and after giving or receiving hints in subjects acting as teachers as well as subjects acting as students.

Key words : NIRS, educational neuroscience, mathematics education

1. 背景

光を用いて脳の酸素状態を計測する近赤外分光法 (Near Infra-red Spectroscopy, 以下 NIRS とする) が、脳研究のみならず教育学へも応用され始めている。本稿では、まず教育学の視点から神経科学 (Neuroscience) と教育学との関係を述べ、教育神経科学という新しい分野を紹介する。従来の脳研究の知見は、そのままでは教育学に適用しにくい。記憶や認知など、それぞれの分野で異なる使われ方をする用語が多く、教育分野の枠組みで捉えなおす必要がある。教育学と神経科学の背景をふまえて従来の知見を述べ、教育学分野での NIRS を用いた脳研究の可能性を述べる。

1.1 教育学が神経科学に求めること

経済協力開発機構 (OECD ; Organisation for Economic Co-operation and Development) の教育研究革新センター (CERI ; Centre for Educational Research and Innovation) は、1999 年より「学習科学と脳研究」プロジェクトを開始した¹⁾。教育学と神経科学の学際的研究が、この時点より組織的研究として位置づくようになった。日本においても、2001 年より文部科学省による「脳科学と教育」プロジェクトが開始され、注意力、意欲などの情意面、教育課程、教育方法などの内容面、設備、空間などの環境面の充実が中心的課題として取り上げられるようになった²⁾。これらは、複雑・多様化する今日の教育問題に対して、これまでの行動観察、テスト計測、統計的分析などの社会科学的アプローチだけでは解決不能事態が生じてきたことに因る³⁾。すなわち、エビデンス・ベースド・ラーニングに代表されるように、客観的データと科学的根拠をもってして、現在の教育問題の解決に挑むという機運が高まってきたと言える。たとえば、創造力の育成は、21 世紀の教育における重要な課題の一つであるが、そのメカニズムの解明と指導方法の確立に向けては、これまでの教育学の知見に加えて、生理学的データの集積・分析と活用が不可欠である⁴⁾。

教育学と神経科学の学際的な研究を推進するもう一つの要因としては、1990 年代以降の脳活動計測装置の開発・発展が挙げられる。それまで脳の研究は、動物実験や脳損傷患者に対する治療・診断が中心であったが、現在では、健康な成人や子どもを対象とした脳機能の特徴解明を目的とした計測が実施されるようになった。とりわけ近赤外分光法による光計測装置は、身体的拘束性が低く、非侵襲的に計測が可能であることから、通常の筆記姿勢を保持したまま計測可能であるという点で、教育学研究へのメリットが大きい⁵⁾。傷病や老年期などの脳機能の低下に伴う記憶・学習能力維持の計測だけではなく、学齢期の生徒を対象とした、成長段階における学習時の発見・理解過程の計測が可能となったのである⁶⁾。

1.2 教育神経科学の確立

教育学における生理学的アプローチのニーズと、神経科学分野の脳活動計測装置の発展は、「教育神経科学 (Educational Neuroscience)」という新たな学際的研究領域の確立へと進展した⁷⁾。教育学と神経科学との間では、「学習」が共用キーワードとなるが、学際的研究を推進

していく上では、これらの使用方法が必ずしも同一でないことに十分な注意が必要である⁸⁾。すなわち、教育学での学習は、主に学齢期段階の「学習」を意味し、これまで獲得していなかった解答方略を発見することや、教師などの他者からの関与のもとに理解の促進がなされるといった文脈で使用されることが多い。一方、神経科学では、広く成人期・老齢期段階の「学習」までを守備範囲とし、記憶・習熟の維持や改善が対象となることが多い。むしろ、双方の研究領域は、人の認知を対象としている点で重複する部分が少なくないが、十分な整理と共通理解が図られなくてはならない⁹⁾。現在では、教育学と神経科学が互いに貢献可能な方途を探る試みが始まっている¹⁰⁾。神経科学の誤った応用としての「神経神話」が、教育学に及ぼす影響が決して小さくないことから、慎重な姿勢と継続的な議論を行っていくことが望まれる¹¹⁾。

1.3 数学教育学から見た実験課題

一般に、人を対象とした医学・生理学研究の中では、数学に関連する実験課題が用いられることが多い。簡単な計算問題や図形の記憶問題などは、国際的に共通する記号であることから、各国の被験者が同じ条件で回答可能であることなどが、数学の実験課題を採用するメリットと言える。ただし、脳研究では研究対象を一般化して議論することが多く、個人の特性などはノイズとして扱われてしまう。教育学では、一般的な議論もさることながら、個人の特性を活かす方向も無視できない。また、心理実験においては、なるべくヒトの関与による影響を除去するため、実験が無機的なものとなる傾向がある。教育学では、教師と生徒の存在を前提とすることが多く、従来の脳研究の実験課題から得られた知見を、そのままの形で応用することは難しい。したがって、たとえ同様の数学課題を用いたとしても、議論する研究分野が異なれば、実験の方法や解釈に差異が生じる。ところで、数学教育の中で育成すべき能力としては、記憶、習熟、理解、類推、方略獲得、法則発見、閃き、創作 (作問) がある¹²⁾。たとえば、計算領域では、記憶・習熟・理解・類推に指導の重点が置かれ、図形領域では、理解、方略獲得、閃きに指導の重点が置かれる場合が多い¹³⁾。このように、領域による特性によって、重視されるべき能力育成が異なっていると言える。今後の知識基盤社会を支える人材育成を標榜するとき、記憶、習熟以上に、法則発見、閃き、創作 (作問) などの能力育成が重要となるが、それらの具体的な指導方法については、各教師の経験則に委ねられることが多く、十分に確立されているわけではない。そのため、効果的な指導法の確立が急務となっており、これらに貢献することのできる実験課題を設定する必要がある¹⁴⁾。

1.4 脳活動データの数学教育学への応用

脳活動データの分析方法には、大きく二つの視点がある。一つは脳の各部位における賦活の可否を調べる空間分解能を重視する視点であり、もう一つは脳の同一部位における賦活の度合いの時間的経過を調べる時間分解能を重視する視点である。これらは独立なものではなく、

相互に関連するものであるが、数学教育学への応用を企図した際には、時間分解能の視点がより重要となる。というのも、問題解決過程における発見や閃きは、時間経過の中で生じる現象であるため、解法を発見する前、発見時点、そして発見した後の時系列における同一部位の脳活動変化の特徴解明が、発見や閃きのメカニズムを明らかにすることにつながると考えられるからである¹⁵⁾。

NIRSは照射プローブと検出プローブとを頭皮上に置いて、プローブ間のヘモグロビンを計算する装置である。時間分解能は、秒、もしくは、秒以下である。照射と検出プローブの組み合わせによりマッピング画像を作成することもできるが、空間分解能よりも時間分解能の点で、他の脳機能計測装置と比べたメリットがある。また、計測のために大型の装置の中に入る必要がない。プローブを装着しただけの自然な状態での計測が可能になるため、教師と生徒のような状況での脳計測が可能である。

NIRSは波長800 nm付近の近赤外光を2波長以上用いて、光減衰を計測し、生体の酸素状態を推測する。複数波長の光計測値の時間変化が、血液中の酸素化ヘモグロビン(以下、oxyHb)の変化と、脱酸素化ヘモグロビン(以下、deoxyHb)の変化に由来するという仮定のもと、分光学の基礎原理を応用して計算を行う。計測した光減衰値から、oxyHb変化とdeoxyHb変化を計算し、それらの時間変化に基づいて生体の酸素状態を推測する。髪の毛は光を減衰させてしまうために、NIRSでは前額部の計測データを議論することが多い。前額部にてoxyHbが増加したならば、その部位で酸素を含んだ血液が増加したことを示す。これはその部位の神経が賦活したことにつながる。

岡本らはNIRSを用いて、学習時の生徒の前額部を計測した¹⁶⁾。理解した状況を客観的に捉えることを目的として、虫食い算課題を用いた。虫食い算課題のメリットは、同程度の難易度の問題を複数作り出すことができる点であり、複数回の試行でも「慣れ」が生じる危険が少ない。この虫食い算課題を小学生に与えた時の、小学生の前額部を計測し、虫食い算の解けない児童、途中から解けるようになった児童、最初からスムーズに解ける児童の、3通りのNIRS波形を得た。解けない児童は、最初からoxyHbが増加し最後まで増加したままだった。最初からスムーズに解ける児童は、終始oxyHbが上昇せずに答えを出した。途中から解けるようになった児童は、最初はoxyHbが上昇したが、解けた瞬間にoxyHbが減少した。この場合に、oxyHbは解けた後に数秒かけて最初の状態まで減少した。以上のデータから、ヘモグロビン計測が脳の状況を捉えることがわかり、理解した瞬間をNIRSでとらえることに成功したと言える。また、“oxyHbの増加、すなわち脳の活性化”という一元的な解釈は必ずしも正しくなく、oxyHb増加は真剣に考えている状態で、理解した後ではoxyHbは増加しなくなるという知見が示された。この研究は教育学において非常に注目されたが、教育現場にとっての要望に必ずしもすべて応えたわけではない。教育現場では、教師と生徒、それも複数の生徒が存在することがほとんどであることに因る。

1.5 複数人の脳活動同時計測

教育学の臨床分野で扱う場面は、他者との情報交流が遮断された個人学習ではなく、教室空間などでの複数の人が交流する中での集団学習である。1名の教師と数十名の生徒という集団において、日常的な教育が全国各地で実施されている。

従って、脳活動計測実験においても、こうした複数人の関係が存在する状況下での実験環境の構築が重要となる¹⁶⁾。すなわち、課題解決過程における複数人の脳活動同時計測実験である。もちろん、実験スタート時から多人数を対象に行うのではなく、最小単位の2名から始めて、徐々に人数を増やしながら計測データの蓄積と分析を行うことが望ましい。その際、学習者に対しては、課題遂行時の発見や閃きの過程における脳活動の特徴を解明するとともに、教師に対しては、課題遂行時の学習者の観察や関与過程における脳活動の特徴を解明することに重点を置く。

2. 目的

虫食い算課題で、小学生が理解した瞬間をNIRSでとらえた知見を受け、本研究では、教師役と学習者役の2名を1組として、両者の同時脳活動計測を実施する。脳活動計測にはNIRS装置を用いる。

実験課題は、観察・関与の良し悪しが発見や閃きに大きく影響する図形領域から、7枚の図形のピースを運動させ、指定された形を構成するタングラムを設定する。タングラム課題は、教育学で使われる図形課題としては非常に一般的なものである。しかし、本実験のように、教師役と学習者役の脳活動計測の課題として用いられた先行研究はない。学習者役は指定された形を構成し、教師役はそれらを観察して適宜ヒント提示を行う役割とする。タングラムを用いるメリットは、純粋に図形構築のみのヒントを与えることができることである。虫食い算では数字を扱うために、ヒント提示には“数字を読む”という言語の要素が入り込む。数字を読む時の声の大きさなどに個人差があり、実験の統制が難しい。その点タングラム課題では、教師が学習者にヒントを提示する時に図形の位置を示すだけでよく、言語の影響など排除することができる。

本稿では、この「教授－学習」関係における脳活動、とりわけ、ヒント提示前後の双方の脳活動に着目して、その特徴を明らかにすることを目的とする。

3. 対象と方法

大学生8組(2名1組)を対象にして、NIRS装置にて脳計測を行った。対象と方法を以下に述べる。

3.1 実験概要

脳活動計測実験の概要は以下のとおりである。

実験期間：2014年4月～9月

実験場所：京都教育大学 実験室

被験者：大学生16名(2名1組、男性11名、女性5名；20.7±0.8歳)。教育学を専攻し同程度の教育レベルをバックグラウンドに持つ16名の学生から、男女の区別なくランダムに2名ずつ選んで1組に

した。その1組の2名に対して、それぞれランダムに「教師役(Teacher's role)」と「学習者役(Student's role)」を割り当てた。誰とペアを組むことになるか、実験を開始するまで被験者には知らせなかった。また、既に実験を済ませた被験者に対しては、実験内容を口外しないように指導し、16名全員が実験開始時に初めての実験遂行となるよう条件を統一した。

計測方法：近赤外分光法による光計測装置 NIRO-200 (浜松ホトニクス) を用いて、2名1組の左前頭前野 (左前額部) 各1か所の脳活動を同時に計測した。NIRO-200は、もともと左右の同時計測が可能のように、2組のプロンプを備えている。今回は、この2組のうちの一つを教師側に、もう一つを学習者側に装着して、2名の同時計測を可能とした。

3.2 実験課題・環境設定

問題解決時における発見や閃き場面を創出し、それらの前後の脳活動を計測する目的のもと、図形領域の実験課題を設定することとした。装置装着による被験者の負担や、問題解決に至る過程をある程度コントロールするため、タングラム(7つのピースを用いて、指定された形を構成するパズル)を実験課題に採用した。タングラムは、図形領域の中の平面図形の移動や合同変換に関する内容であり、学習者役においては、方略策定と試行錯誤を繰り返しながら指定された形に配置することから、方略獲得や閃きの能力を必要とする実験課題である。また、教師役においては、学習者の方略獲得や閃きを誘発するようなヒント提示の内容とタイミングが要求される。

実験は、被験者を「教師役(Teacher's role)」と「学習者役(Student's role)」の2名1組のペアに設定して行った。学習者役の役割は、タングラムに取り組むことである。一方、教師役の役割は、学習者役がタングラムに取り組む様子を観察しながら、ヒントを提供することである。1試行(Trial)1問として3試行を実施した。各試行の制限時間は、90秒間とし、試行間には90秒間の休憩(Rest)を設けた(Fig.1)。

教師役から提供されるヒントは、教師役の手元にある同様の実験課題用紙とピースを用いて、1回につき1ピ

ースの置き方を提示するものである。ヒントを提示するタイミングは、制限時間内に指定された形を完成させるという条件のもと、教師役、学習者役のいずれかがヒントが必要だと判断した場合に手元のベルを鳴らして知らせることとした。すなわち、ヒントを提示するのは教師役であるが、制限時間内であれば、双方とも任意のタイミングでヒント提示を提案したり、ヒント提示を要求したりできる。1試行あたりのヒント回数に制限は設けなかった(7ピースのため、最大7回)。

環境設定としては、教師役と学習者役を横に並んで座らせ、教師役の手元にはヒント提示用のピースを、学習者役の手元には解答用のピースを配置した。ヒント提示・要求のためのベルは双方に用意し、残り時間を把握できるように、両者に見える位置にタイマーを設置した。模範解答は教師役のみに確認できる位置に置いた(Fig.2)。

本実験は、京都教育大学研究倫理委員会の審議・承認を得て行ったものである(番号:1404)。

Fig.2 Experimental set-up for simultaneous measurement of brain activity of teacher's role subject and student's role subject.

4. 結果

最初にタングラムを用いた実験課題の成績を行動観察データとして示し、続いてNIRSによる脳計測データを示す。

4.1 行動観察データ

被験者全8組(A~H組)とも、制限時間内に全ての問題(試行1~試行3)を間違いなく完成させた。

Table 1は、各組の所要時間である。試行別の所要時間と、1試行あたりの平均所要時間を示している。各試行の制限時間が90秒間であり、それまでに完成させるようヒント提示が行われた結果、20秒間から90秒間でいずれの問題も完成に至った。各試行の平均所要時間は、長い方から試行2、試行1、試行3となった。

Table 2は、各試行において提示されたヒント数の合計を示したものである。各試行最大7回のヒント提示が可能であり3試行あるため、1組につき最大21回(=7×3)のヒント提示が可能である。全体として8組あるため全

Fig.1 Experimental procedure.

Table 1 Performance time (s) for each trial of all pairs.

Pair	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Mean
A	69	53	20	47.3
B	41	57	44	47.3
C	70	90	39	66.3
D	67	47	66	60.0
E	65	80	56	67.0
E	36	53	49	46.0
G	58	71	75	68.0
H	21	55	48	41.3
Mean	53.4	63.3	49.6	55.4

Table 2 Total number of hints provided for all pairs.

Trial 1	Trial 2	Trial 3	Total
8	14	7	29

組のヒント最大総数は168回 (= 21×8) である。今回提示された8組のヒントの総数は29回であり、試行2が14回で最も多く、続いて試行1の8回、試行3の7回という順であった。各試行における、所要時間の長短とヒント数の多少が対応するという特徴が見られた。

Table 3は、各組において提示されたヒント数を示したものである。「教師提案 (Teachers' offer)」, 「学習者要求 (Students' request)」は、教師役と学習者役のいずれがヒントの提示を求めたかを示している。教師役がベルを鳴らしてヒントを提示した場合は「教師提案」、学習者役がベルを鳴らしてヒントを求めた場合は「学習者要求」とした。ヒント数29回において、教師提案によるヒント提示が20回、学習者要求によるヒント提示が9回と、教師提案の方が11回多い結果となった。また、各組による最多回数は7回、最少回数はヒント提示なしの0回であった。

Table 3 Number of hints for each pair classified as teachers' (teacher's role subjects') offer or students' (student's role subjects') request.

	A	B	C	D	E	F	G	H	Total
Teachers' offer	4	1	4	2	3	5	1	0	20
Students' request	0	0	1	5	1	1	1	0	9
Total	4	1	5	7	4	6	2	0	29

4.2 実験時間全体的脳活動データ

Fig.3は、全8組の教師役と学習者役の脳活動データを示したものである。試行1～試行3のそれぞれの開始時におけるoxyHb, deoxyHbのデータを0として時系列変化を示した。各試行における破線は、ヒント提示時を示したものであり、Pair Aの図においては試行1において2回、試行2で2回、試行3で0回のヒント提示が行われた。

一般的に脳の賦活は、oxyHbの増加と、それによるdeoxyHbの相対的な減少によって説明され、oxyHbが主要な指標として用いられることが多い。そこで、以下では、oxyHbを指標とし、主にヒント前後の変化に着目して分析を実施する。

Table 4は、試行1～試行3における教師役と学習者役のoxyHbの同一時間帯における差を算出し、その絶対値の平均を示したものである。Fig.3のF組の場合、試行1では、他の試行と比べて、教師役と学習者役の差が小さく、Table 4にある平均値も1.12と大きくない。一方、試行2と試行3では、学習者役のoxyHbは大きく増加するものの教師役のoxyHbはそれほど大きく増加しないことから、両者の差が大きくなり、Table 4の数値もそれぞれ2.55, 2.28と試行1の場合の2倍以上となった。最も差が小さい組はA組、最も差が大きい組はH組であり、その差は3倍以上であった。総じて、学習者役のoxyHbの方が教師役のoxyHbよりも高い傾向にあった。なお、最も両者の差が小さいA組においてのみ、教師役のoxyHbが学習者役のoxyHbより増加傾向にあった。また、各試行の平均では、試行2が最も差が小さく、試行1が最も大きいという特徴が見られた。

4.3 ヒント提示時に着目した局所的脳活動データ

ヘモグロビン全体の動きに対して、ヒントを提示する前後の局所的なヘモグロビンの動きに着目した。

Fig.4は、Pair Eの試行2の1回目のヒント提示前5秒間とヒント提示後10秒間の教師役と学習者役のoxyHbのデータを、ヒント提示時点の値を0として示した、典型的な事例の一つである。

オレンジ色線で示す教師役のoxyHb (Teacher's role と記載) は、ヒント提示前のマイナスからヒント提示後のプラスへと変化した。また赤線で示す学習者役のoxyHb (Student's role と記載) は、ヒント提示前のプラスからヒント提示後のマイナスへと変化した。教師役と生徒役とで、ヒント提示前後で、oxyHbの変化が異なる。このヒント提示前後のoxyHbの変化に着目し、ヒント提示数29回すべてに対して、教師役、学習者役、それぞれのヒント提示前後のoxyHbをまとめた。その際、oxyHb波形のばらつきを除去するために、波形のピーク値ではなく平均値を計算した。NIRS解析は変化量を計算するために、変化の基準を示すベースラインを設定せねばならない。従来は計測開始時の値や、イベント発生時の値がベースラインに設定された。今回はヒント提示時をベースラインとした。すなわち、ヒント提示時点の値を0として、ヒント提示前の5秒間と、ヒント提示後の10秒間の平均値を正(+), 負(-)の値に分類し、ヒント前後の脳活動の変化を分類した。ヒント提示後を5秒間とせず、10秒間とした理由は、教師役がベルの音によりヒント提示のためにピースを置くまでに生じた平均所要時間が約5秒間であったことによる。すなわち、ヒント提示後の5秒間はピースを置く時間、その後の5秒間がヒント提示の効果を検証する時間となるために、提示後は時間を余分に取ることとした。

ここでは、ヒント提示前後に関して、教師役か学習者役のいずれの脳活動データか、ヒントが教師提案なのか

Fig.3 Changes in oxyHb and deoxyHb of teacher's role subjects and student's role subjects during tasks.

Table 4 Mean data of difference of changes in oxyHb between teacher's role subject and student's role subject for each trial of all pairs.

Pair	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Mean
A	1.55	1.08	0.68	1.10
B	1.00	0.52	2.11	1.21
C	1.31	1.41	1.08	1.26
D	1.68	0.59	1.67	1.32
E	1.03	1.39	2.94	1.79
E	1.12	2.55	2.28	1.98
G	3.64	1.07	1.54	2.08
H	4.82	3.01	2.80	3.55
Mean	2.02	1.45	1.89	1.79

Fig.4 An example of changes in oxyHb of teacher's role subject and student's role subject for five seconds before hint and ten seconds after hint.

学習者要求なのか、という2通りの分類を行った。第1分類に沿って教師役の脳活動データの特徴を Table 5 に、学習者役の脳活動データの特徴を Table 6 に示した。第2分類に沿って教師提案時の脳活動データの8組の平均を Fig.5 に、学習者要求時の脳活動データの8組の平均を Fig.6 に示した。

Table 5 Classification of changes of oxyHb's mean data of "teacher's role subjects" from five seconds before hints to ten seconds after hints.

	-⇒+	+⇒-	+⇒+	-⇒-	Total
Teachers' offer	10	1	2	7	20
Students' request	4	3	1	1	9
Total	14	4	3	8	29

Table 6 Classification of changes of oxyHb's mean data of "student's role subjects" from five seconds before hints to ten seconds after hints.

	-⇒+	+⇒-	+⇒+	-⇒-	Total
Teachers' offer	3	7	5	5	20
Students' request	1	4	3	1	9
Total	4	11	8	6	29

Fig.5 Mean data of oxyHb of five seconds before hints and ten seconds after hints for all teacher's role subjects and all student's role subjects in the case where hints were provided by "teachers' offer" (N=20).

Fig.6 Mean data of oxyHb of five seconds before hints and ten seconds after hints for all teacher's role subjects and all student's role subjects in the case where hints were provided by "students' request" (N=9).

まず、第1分類の教師役か学習者役かに対する結果を記す。

Table 5 は、教師役のヒント前後の oxyHb の変化を分類したものである。すなわち、教師役の oxyHb を対象に、8組のヒント提示数29回の各ヒントについて、教師提案 (Teacher's offer) の20回と、学習者要求 (Student's request) の9回について oxyHb の変化を分類したものである。教師役において、教師提案の場合、「-⇒+」が最も多く、20回中10回と半数であった。続いて、「-⇒-」が7回であり、全体的にあまり分散しなかった。学習者要求の場合、教師提案と同じく「-⇒+」が9回中4回と最も多いが、「+⇒-」も3回あり、全体的に分散する傾向にあった。

Table 6 は、学習者役のヒント前後の oxyHb の変化を分類したものである。すなわち、学習者役の oxyHb を対象に、8組のヒント提示数29回の各ヒントについて、教師提案 (Teacher's offer) の20回と、学習者要求 (Student's request) の9回について oxyHb の変化を分類したものである。学習者役において、教師提案の場合、「+⇒-」が20回中7回と最も多いが、「+⇒+」と「-⇒-」がそれぞれ5回あり、全体的に分散する傾向にあった。学習者要求の場合、教師提案と同じく「+⇒-」が9回中4回と最も多いが、「+⇒+」も3回あり、全体的に分散する傾向にあった。

続いて、第2分類のヒントが教師提案なのか学習者要求なのかという場合の脳活動の結果を記す。

Fig.5 は、Table 5, Table 6 で用いた教師提案時 (20回) の oxyHb の値から、ヒント提示前5秒間と提示後10秒間について、教師役と学習者役の平均値と標準誤差を算出したものである。Fig.6 は、同様にして算出した、学習者要求時 (9回) の教師役と学習者役の oxyHb の平均値と標準誤差である。

Fig.5 は教師提案時 (20回) の教師役と学習者役の oxyHb の値から、ヒント提示前5秒間と提示後10秒間について、oxyHb の平均値と標準誤差を算出したものである。Fig.5 より教師役では、ヒント前からヒント後にかけて oxyHb の増加が認められた ($t(19)=2.97, P<0.01$)。一方、学習者役では、ヒント前からヒント後にかけて oxyHb が減少する傾向にあった ($t(19)=1.98, P<0.1$)。教師役と学習者役の二者間では、ヒント前の oxyHb において差異が認められ ($t(19)=3.12, P<0.01$)、ヒント後においても二者間に差が生じる傾向にあった ($t(19)=1.95, P<0.1$)。

Fig.6 は学習者要求時 (9回) の教師役と学習者役の oxyHb の値から、ヒント提示前5秒間と提示後10秒間について、oxyHb の平均値と標準誤差を算出したものである。Fig.6 より教師役では、ヒント前からヒント後にかけて oxyHb 増加が見られたが、有意差は認められなかった ($t(8)=1.65, n.s.$)。学習者役では、ヒント前に減少し、ヒント後に増加する傾向が見られたが、有意差は認められなかった ($t(8)=0.12, n.s.$)。教師役と学習者役の二者間では、ヒント前の oxyHb において差異が認められ ($t(8)=3.73, P<0.01$)、ヒント後においては二者間に差は認められなかった ($t(8)=0.28, n.s.$)。

5. 考察

5.1 行動観察データ

全 8 組の正答率が 100% であったことから、被験者らは実験の意図を正しく理解し、ヒント提示を行うことで、制限時間内に解答に至るよう課題に取り組んだと判断される。

組別の所要時間については、各試行の平均においても、回数を重ねる毎に短縮されるという習熟の効果は見られなかった。図形課題の場合、同一のピースを用いた場合においても、構成する形の違いにより、その難度が変化するためと考えられる。

各試行におけるヒント数については、所要時間の平均が最長の試行 2 において最も多く、所要時間が最短の試行 3 において最も少ないことから、課題難度の高低と、所要時間の長短、ヒント数の多少の間には関係性があることが示唆された。

組別のヒント数については、各組の所要時間と、ヒント数の間に、明確な傾向は見られなかった。また、教師提案と学習者要求のヒント数を比較すると、学習者要求が教師提案の約半分であったが、これは、学習者役が教師役からのサポートに頼らず、自力解決を志向したことによると推測される。H 組では、ヒント提示が 1 度も行われなかったが、正答率 100%、所要時間が最短であったことから、学習者役がスムーズに解答を行ったために、ヒント提示が必要ないと判断したと考えられる。

5.2 実験時間全体的脳活動データ

教師役と学習者役の oxyHb に着目し、両者の差が小さい場合と大きい場合において、それぞれどのような特徴があるのか、その要因として何が考えられるのかについて検討する。

二者間差平均がいずれの試行も小さい傾向にある A 組～F 組の場合、教師役と学習者役の両者が増加することにより差が小さい場合と、両者があまり増加しないことにより差が小さい場合が見られた。いずれの場合においても、教師役が、学習者役の状況を共有しようと心情を推察したことにより、二者の脳活動の差が小さくなったことが予想される。これは、計算領域の除法虫食い算を課題として教師役と学習者役の実験を実施した場合においても同様の傾向が見られたことから、教師役が学習者役に心情的寄り添いを行う際に共通して見られる傾向であると考えられる¹⁷⁾。

二者間差平均が大きい G 組、H 組の場合、学習者役の oxyHb の顕著な増加に対して、教師役の増加は小さい傾向にあった。ヒント数がいずれも 2 回、0 回と少ないことから学習者役は自力解決を志向して oxyHb が増加する傾向にあるのに対して、教師役側は極力ヒントを提示せずに自力解決に委ねるという意味において、脳活動の増加が見られなかったのではないかと推測される。すなわち、教育的観点からあえて心情的寄り添いをせず、学習者の自力理解を客観的に観察したと考えられる。

続いて、試行毎に比較すると、試行 2 での二者間差が小さい結果となった。これは課題の難度が高かったために、教師役が解決への関与を意識し、学習者の解答状況を正確に把握することで、適切なヒント提示を準備

したためでないかと考えられる。そのことが、教師役の oxyHb の増加を促進し、二者間差平均の減少につながったと推測される。

5.3 ヒント提示時に着目した局所的脳活動データ

ヒント提示前後の局所的な脳活動変化に着目し、動一場面における教師役と学習者役の立場の違いによる差異の特徴は何であるのか、また、ヒントが教師提案の場合と学習者要求の場合においても差が存在するのかについて、その要因も踏まえ検討する。

教師役の場合、教師提案と学習者要求の両方を合わせた計 29 回のヒントの内、oxyHb が「 $- \Rightarrow +$ 」へと変化したのが、14 回と半数以上であったことから、全般的にヒント提示前から後にかけて増加が継続するという傾向が見られた。ヒント提示前の増加は、学習者を観察する過程において、ヒント提示の有無の判断が迫られたためであると考えられる。そのことは学習者要求のヒントの際にも当てはまり、学習者がヒントを要求するのではないかと推測が同様の脳活動に反映したのではないかと予想される。一方、ヒント提示後の増加は、教師役が適切と考える場所にヒントのピースを 1 枚置き、これが効果的に学習者の課題解決に機能したかどうかを確認しようとしたためであると考えられる。なお、学習者からのヒント要求の場合、脳活動データが一定とならない傾向にあるが、これは、ヒント要求が意図せぬ場面で生じるなど、教師役の置かれた状況が多様となることに因ると考えられる。

学習者役の場合、教師提案と学習者要求の両方を合わせた計 29 回の内、oxyHb が「 $+ \Rightarrow -$ 」へと変化するものが 11 回と最も多かったことから、全般的にヒント提示前から後にかけて減少が継続するという、教師役と逆の傾向が見られた。ヒント提示前の減少は、ヒント提示への依存や課題遂行に対する諦めなどが影響したのではないかと考えられる。一方、ヒント提示後の減少は、教師役から提供されたヒントにより、課題遂行に対する安心が影響したのではないかと考えられる。ただし、学習者役においては、「 $+ \Rightarrow +$ 」が 8 回、「 $- \Rightarrow -$ 」が 6 回と、特徴が分散する傾向にあることから、ヒント提示直前まで解答への努力を惜しまなかった場合や、ヒント提示により課題解決に積極的に取り組むようになったなどの可能性が考えられ、慎重な議論が必要である。

6. 結論

本稿では、教育神経科学の臨床的研究として、図形課題遂行時における教師役と学習者役の脳活動データを計測し、それらの特徴について検討した。

その結果、明らかになったことを整理すると次の 2 点となる。

- 1) 脳活動の全体的な特徴としては、学習者役は課題遂行に伴い全般的に増加する傾向にあるが、教師役は学習者役の増加に呼応するように増加する場合と、増加しない場合が存在する。これは、教師役が学習者役を観察する過程において、学習者に心情的に寄り添うか、客観的に距離を置くかの違いによるものであると考えられる。教師は、学習者の解決状況を適切に判断

し、使い分けていく必要があることが示唆された。

- 2) 脳活動のヒント提示前後の局所的な特徴としては、教師役はヒント提示前後を通して増加状態が継続するが、学習者役はヒント提示前後を通して逆に減少する状態が継続する傾向にあった。特に、教師役において、この傾向が顕著であった。これは、ヒント提示が、教師役においては試行全体の中で脳が顕著に賦活する時間帯であり、高い思考状態であるためと推測される。教師役から学習者役へのヒント提示という関与において、その時期と内容を決定することが極めて重要であることが示唆された。

学習過程の各時点において、関与する側 (教師役) と関与される側 (学習者役) の双方の脳活動は、いくつかの特徴的な傾向を持って呼応し、問題解決の方向へと向かうことが明らかになった。とりわけ、教師提案によるヒント提示時に、学習者の脳活動が沈静化する一方で、教師側の脳活動が賦活するという事実は、教育における効果的な指導方法の構築や、問題解決に至るための関与の仕方を検討する上で示唆に富むものであると言える。また、脳計測という観点からは、教育学のような新しい分野に対しても、非拘束で計測できるメリットを持つ光を使った計測手法が有効であることが強く示唆された。

今後の課題としては以下の点が考えられる。

現在の学校現場では、学力が多様化する子どもの個々の実態に応じて、指導方法を選択・実施するとともに、そこで用いた指導方法が適切であったのかを説明することが求められるようになった。教師が、一律の内容を一斉指導すればよいという時代は終わり、集団指導でありながらも、個別指導ができる能力が求められている。個々人の正確な学習実態把握の必要性が高まっており、客観的指標を用いた測定・評価が希求されている。しかし、学校現場は上記の要請に対して対応することのできる態勢と、教員の意識改革が未だ十分になされているわけではない。とりわけ、客観的指標を用いた測定・評価の点については、旧来のペーパーテスト形式に頼る傾向にあり、今日的・世界的研究動向からの新しい評価観には十分に対応できていない現状がある。その意味で、神経科学との学際的研究は一つの突破口になると考えることができる¹⁸⁾。今後、教育神経科学における知見が、教育における新しい客観的評価指標としての役割を担うことにつながれば、教育学は次の研究ステージに移ることができる¹⁹⁾。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金 (24330252, 25885105) の交付を受けて行った成果である。

利益相反の開示

利益相反なし。

参考文献

- 1) OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development): Understanding the Brain: Towards a New Learning Science, 2002, OECD. (小泉英明 監修, 小山麻紀 訳: 脳を育む 学習と教育の科学, 2005, 明石書店)
- 2) 文部科学省: 「脳科学と教育」研究に関する検討会の開催について, 2002.
(URL: http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/003/kaisai/020301.htm), (2014年10月10日現在)
- 3) 黒田恭史編著: 数学科教育法入門, 共立出版, 21-31, 2008.
- 4) 黒田恭史: 知の創成力の育成と脳科学, 第34回日本科学教育学会年会: 209-210, 2010.
- 5) D.A. Boas, C.E. Elwell, M. Ferrari, G. Taga: Twenty years of functional near-infrared spectroscopy: introduction for the special issue. *NeuroImage*, 85: 1-5, 2014.
- 6) 黒田恭史: 脳科学の算数・数学教育への応用, 2007, ミネルヴァ書房.
- 7) U. Goswami: Neuroscience and education: from research to practice?. *Nature Reviews Neuroscience*, AOP, published online, 12: 2-7, 2006.
- 8) J.T. Bruer: Education and the brain: A bridge too far. *Educational Researcher*, 26 (8): 4-16, 1997.
- 9) J.P. Byrnes, N.A. Fox: The educational relevance of research in cognitive neuroscience. *Educational Psychology Review*, 10 (3): 297-342, 1998.
- 10) S. Varma, B.D. McCandliss, D.L. Schwartz: Scientific and pragmatic challenges for bridging education and neuroscience, *Educational Researcher*, 37 (3): 140-152, 2008.
- 11) 加藤忠史: 「脳を鍛える」ブームの根底にあるもの. *教育学研究*, 74 (2): 14-23, 2007.
- 12) 黒田恭史編著: 初等算数科教育法, 2010, ミネルヴァ書房.
- 13) 齋藤昇, 秋田美代: 数学の図形領域における創造性の発達に関する研究, *全国数学教育学会誌*, 9: 181-191, 2003.
- 14) 横地清: 数学教育学の形成について. *数学教育学会誌*, 42(1・2): 17-25, 2001.
- 15) 黒田恭史, 岡本尚子: 数学教育の脳科学の数学教育への応用の可能性とその限界. *数学教育学会誌*, 47(1・2): 37-44, 2006.
- 16) 岡本尚子, 黒田恭史: 計算課題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*, 48(1・2): 73-80, 2007.
- 17) M. D. Lieberman: Education and the social brain. *Trends in Neuroscience and Education*, 1: 3-9, 2012.
- 18) 安彦忠彦: 脳科学的観点から見たカリキュラム開発. 早稲田大学大学院教育学研究科紀要, 15: 1-18, 2005.
- 19) 緩利誠, 田中統治: 脳科学と教育の間ーカリキュラムへの応用方法を中心にー. *教育学研究*, 74 (2): 24-35, 2007.

著者紹介

黒田 恭史 (Yasufumi Kuroda)

2004年大阪大学大学院人間科学研究科修士。博士 (人間科学)。佛教大学教授を経て、2014年京都教育大学教授。現在に至る。数学教育学会業務執行理事。

岡本 尚子 (Naoko Okamoto)

2010 年大阪大学大学院人間科学研究科
修了。博士(人間科学)。日本学術振興
会特別研究員 PD(京都大学)を経て、
2013 年立命館大学准教授 現在に至る。
日本教育工学会、数学教育学会会員。

前迫 孝憲 (Takanori Maesako)

1978 年東京工業大学大学院総合理工学
研究科システム科学専攻修了。博士(工
学)。東京工業大学助教授、大阪大学助
教授を経て、1996 年大阪大学教授 現
在に至る。教育システム情報学会会長。