

逆思考課題遂行時における学習過程の特徴

—ヘモグロビン濃度変化のマッピングを通して—

黒田恭史・岡本尚子

〔抄 録〕

近年、脳活動計測装置の開発により、通常姿勢の学習過程における脳活動の変化を計測することが可能となった。本稿では、乗法の虫食い算を課題（逆思考課題）として設定し、大学生を対象に、課題遂行時の前頭前野13箇所における3種のヘモグロビン濃度変化の計測実験を実施した。得られた結果をもとに、課題遂行による前頭前野におけるヘモグロビン濃度変化の特徴について検討した。

実験の結果、前頭前野の広範な部位で増加が見られる酸素化ヘモグロビン、総ヘモグロビンと、特定の部位のみで増加が見られる脱酸素化ヘモグロビンの2つの変化のタイプがあることが明らかとなった。課題遂行時に、血液は前頭前野全域に流入するとともに、神経活動は特定の部位で起こり、酸素が消費されることが明らかになった。

キーワード 逆思考, 虫食い算, 脳科学, 近赤外分光法 (NIRS)

1. 研究背景

基礎、基本の徹底が叫ばれるようになって以来、四則計算の習熟を指向し、計算練習を反復する取り組みが各地の小学校で行われている。計算問題の代表例としては、「百ます計算」が挙げられるが、その内容については、学年あるいは授業の進度に応じた問題を設定している学校も見受けられ、基礎的な計算能力の向上にとどまらず、授業に連動した算数能力の向上につながっている実践も少なくない。また、こうした取り組みは、多くが授業の導入段階で行われていることから、計算能力の向上に加え、授業に向かう姿勢や授業の雰囲気づくりとしての役割も担っているといえる。

ただし、簡単な計算練習が脳を活性化させるという脳科学による報告を背景に、小学校高学年、さらには中学校においても1桁+1桁のような簡単な計算を行う実践も見られる。しかし、簡単な計算練習が脳を活性化させるとの報告は、簡単な計算練習がさらに難度の高い問題を容易に感じさせたり、速やかに解けるようにしたりすることを保障するものではない。

また、計算指導においては、正しい答えをよりはやく導き出すことができるようになるだけでなく、本来的な目的として計算過程（アルゴリズム）における各手順の持つ意味や、加減乗除の計算の違いに着目し、その特徴を捉えるといったことが重要となる。というのも、児童が桁数の多い新たな計算課題に直面したときに、自力解決の糸口となるためである。

ところで、計算における一手順が持つ意味や演算構造について考えさせるためには、逆思考を必要とする文章題、あるいは虫食い算（筆算過程等の穴を埋める課題）を用いる方法がある。逆思考とは、例えば、既知数から未知数（文字）を求めるために、通常とは逆の思考手順を踏まなくてはならない思考を指し、一方、通常の筆算の思考手順を順思考とよぶ。文章題、虫食い算ともに、未知数（文字）の導入を必要とする部分において逆思考を用い、演算構造、あるいは筆算過程への着目を必要とすることから、加減乗除それぞれの特徴や計算過程を考える上での重要な内容となる（横地 1969）。

算数科の教科書で、虫食い算が取り扱われる学年は、表1のとおりである（一松 他 2005a, 2005b, 清水 他 2005a, 2005b）。尚、表記の学年は、それぞれが取り扱われている最低学年を示す。

表1 虫食い算の扱われる学年

			虫食い算
加法	繰り上がり無	(2桁 + 2桁)	第2学年
	繰り上がり有	(2桁 + 2桁)	第2学年
減法	繰り下がり無	(2桁 - 2桁)	第2学年
	繰り下がり有	(2桁 - 2桁)	第2学年
乗法		(2桁 × 2桁)	第3学年
除法		(3桁 ÷ 2桁)	第4学年

文章題における逆思考問題は、第2学年から加法、減法が、第3学年から乗法、除法が扱われており、第4学年以降においては、加減乗除のうち2つ以上の演算の選択を必要とする問題が取り扱われている。一般に、同演算、同桁の問題であっても、逆思考は順思考問題を学習した後に取り扱われている。これは逆思考の問題が、順思考の問題に比して難しいとされていることによる。しかし、逆思考問題が理解困難な子どもに対して有効な指導方法が確立されてきたわけではない。というのも、逆思考の場合、順思考にあるような一定の解決手順があるわけではなく、各問題に応じて手順を適切に選択・活用しなくてはいけないことから、具体的な指導法を考案することが困難なためである。また、理解の可否に関する個人差が大きく、学習者個々人の分析が重要となることも、指導法確立の際の課題となっており、多方面からの実証的なデータの集積・分析を必要としている。

1990年代初頭に医療機器として開発された近赤外線による光計測装置（以下、光計測装置と記す）は、脳内のヘモグロビン濃度変化を計測する装置である（江田 2001）。頭皮から非侵襲

的に計測が可能である点、身体的拘束性が低く通常姿勢における計測が可能である点、時系列データが取得可能である点に特徴があることから、教育研究への活用が期待されている。計測可能なデータは、酸素を有した酸素化ヘモグロビン (以下, oxyHb と記す), 酸素放出した脱酸素化ヘモグロビン (以下, deoxyHb と記す), oxyHb と deoxyHb の総和である総ヘモグロビン (以下, totalHb と記す) の3種である。

光計測装置による実験では、これまでその多くがイメージングといった機能を用いて計測結果が表示され、それらをもとに検討が行われてきた。つまり、複数計測部位におけるヘモグロビン濃度の時系列変化 (増減) を、平面上に色の変化を用いて図示したものにより検討が行われてきた。これらの図は、oxyHb, deoxyHb, totalHb それぞれで結果が示されるが、一般に、変化の大きい totalHb, あるいは oxyHb のみを対象に分析が行われてきた。しかし、この間の研究により、神経活動による酸素消費の指標となる deoxyHb は、難度の高さを感じたときに増加すること、またそれに伴い oxyHb が減少すること等が明らかになってきている (岡本 他 2006)。従って、現在、数多く実施されているイメージングによる学習過程の分析にあっても、3種のヘモグロビンデータの関連性を踏まえた検討が重要となる。

2. 研究目的

本稿では、大学生を対象に、光計測装置を用い、逆思考課題遂行時における前頭前野13箇所におけるヘモグロビン濃度変化 (oxyHb, deoxyHb, totalHb の3種類) を計測し、マッピング (複数部位の同時計測結果の作製) を実施する。その分析をもとに、次の2点を明らかにする。

- 1) 逆思考課題遂行時におけるヘモグロビン濃度変化の時系列の特徴、及びマッピングによる部位毎のデータの特徴を明らかにする。
- 2) ヘモグロビン濃度変化のデータによる、学習者の思考過程の特徴の明示化の可能性について検討する。

3. 方法

3.1. 実験環境

測定者は、課題遂行状況の観察者と、機器操作者の2名とする。実験に際しての阻害要因 (騒音, 他の視覚情報, 空調不良等) はなく、被験者は課題に専念できる環境である。

3.2. 実験概要

- (1) 実験期間: 2005年12月
- (2) 実験場所: 立命館大学情報理工学部実験室

- (3) 被験者：1名（22歳，女性，大学生）
- (4) 計測方法：被験者は椅子に座り，光計測装置を装着して課題に取り組む。被験者前方よりビデオカメラにて，課題遂行時の問題用紙と被験者の手元を録画する。
- (5) 計測装置：光計測装置（OMM - 3000：島津製作所製）
- (6) 計測部位：前額部に，3cm間隔で10箇所プローブを装着し（図1），格子状に13箇所（1～13チャンネル（以下，CHと記す））を計測する（図2）。



図1 プローブ装着の様子

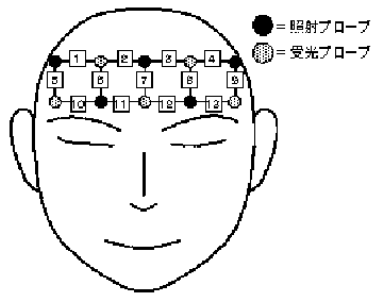


図2 プローブ配列図（数字はCH）

3.3. 実験課題

実験課題は，乗法の虫食い算とし，3桁×3桁，積が6桁となるものを設定した（図3）。□の個数は，6箇所とした。解答方法は筆記とし，問題用紙のサイズはA4（横置き）とした。

尚，図3内には，解答方法説明のために，（ア）と（イ）の枠を示しているが，実験に用いたものには，この記述はない。

虫食い算における□の求め方の一つは，最初に図3内の（イ）に着目し，（イ）の中の□を算出することにより他を求める方法である。つまり，（イ）は， $\square + 2 = 1$ となることから， $\square + 2 = 11$ であることが分かり， $\square = 9$ と算出できる。（イ）の中の $\square = 9$ であることから，（ア）は2394であり，式との対応でいうと， $3\square 2 \times 7 = 2394$ である。従って， $(300 + 10 \times \square + 2) \times 7 = 2394$ であるから， $3\square 2 = 342$ となる。同様に，他の□も上下の数値の関係から算出することができる。

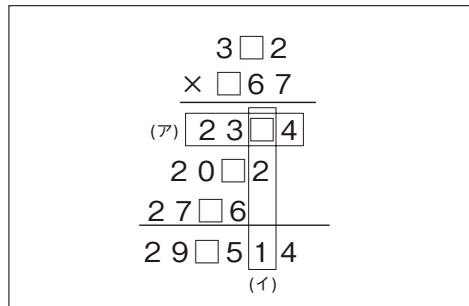


図3 実験課題 (実物は A4サイズ)

3.4. 試行段階

被験者は、次の手順をとることとする。

- ①プローブ装着。
- ②課題遂行方法の説明を受ける。
- ③閉眼・安静状態の後、計測者の「始め」の合図とともに解答を開始する。解答終了後、「できました」と言い、閉眼する。
- ④プローブを外す。

4. 結果

4.1. 正誤・所要時間

- ・ 6箇所全て正答であった。
- ・ 所要時間は211秒であった。

4.2. ヘモグロビン濃度

4.2.1. 3種のヘモグロビンについて

光計測装置によって計測可能なデータは、酸素を有した oxyHb, 酸素を放出 (消費) した deoxyHb, oxyHb と deoxyHb の総和である totalHb である。神経活動によって酸素が消費されることから、神経活動がなされた部位で oxyHb が酸素を放出して deoxyHb に変化し、deoxyHb の増加が計測される (加藤 2005)。

4.2.2. ヘモグロビン濃度変化

図4は、13CH 計測時の光計測装置のディスプレイ画面であり、部位毎の3種類のヘモグロビン濃度変化の時系列の推移が示されている。図5は、課題遂行中における1 CH ~ 13CH それぞれの totalHb の変化を示したグラフである。図6は、1 CH ~ 13CH の totalHb の変化の平均値 (太曲線) と標準偏差 (上下の細曲線2本) を示したものである。同様に、図7, 図8は oxyHb の, 図9, 図10は deoxyHb の変化を示したグラフである。

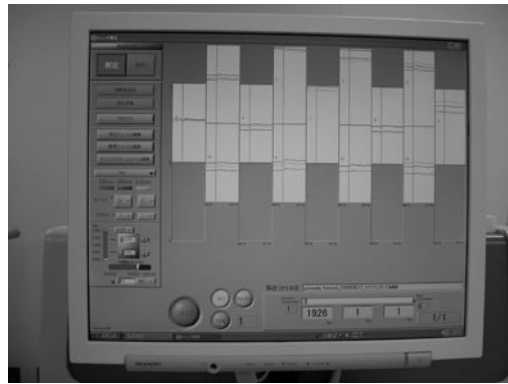


図4 13CH計測中の各部位でのヘモグロビン濃度の変化のグラフ

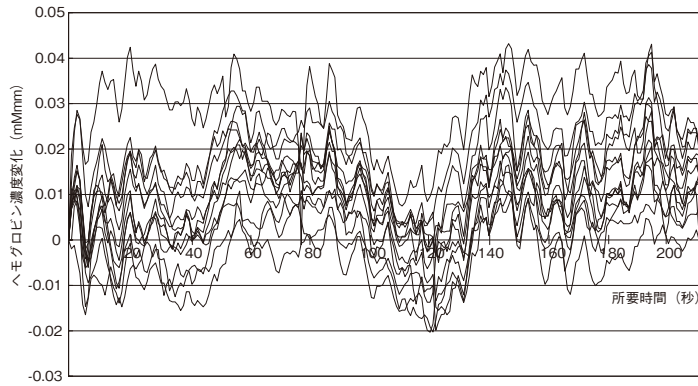


図5 totalHb 濃度変化（1～13CH）

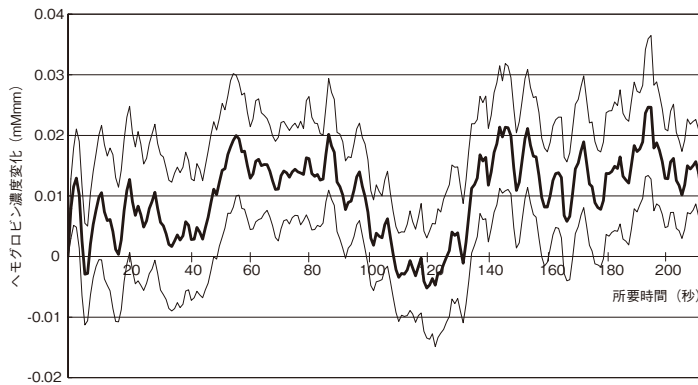


図6 totalHb 濃度変化（平均値，標準偏差）

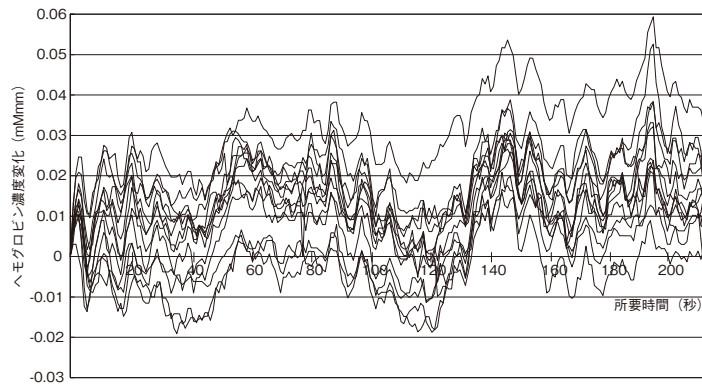


図7 oxyHb 濃度変化 (1~13CH)

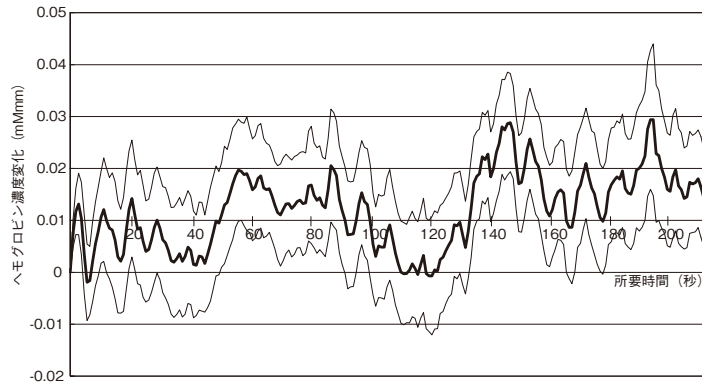


図8 oxyHb 濃度変化 (平均値, 標準偏差)

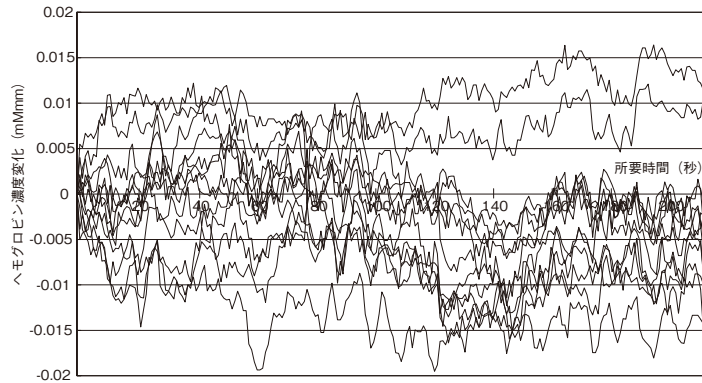


図9 deoxyHb 濃度変化 (1~13CH)

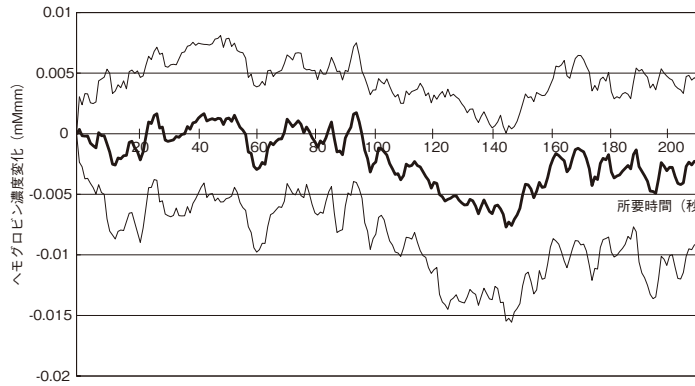


図10 deoxyHb 濃度変化（平均値，標準偏差）

図5～図10のグラフより，次の特徴が挙げられる。

- ・ totalHb は，課題遂行中頃で全体的に低下するが，課題全般を通して正の値で推移する。
- ・ totalHb で，とりわけ前半部の増加幅の大きい部位は13CHである。
- ・ totalHb は，課題遂行全般を通して，各部位が類似した変化を示す。
- ・ oxyHb は，課題遂行中頃で全体的に低下するが，全般を通して正の値で推移する。totalHb と類似した変化を示す。
- ・ oxyHb で，とりわけ中後半部の増加幅の大きい部位は11CHである。
- ・ oxyHb は，課題遂行全般を通して，各部位が類似した変化を示す。
- ・ deoxyHb は，課題遂行全般を通して，全体の平均はなだらかに減少傾向にあるが，各部位は正の値と負の値に分かれて推移し，後半部での差が大きくなる傾向にある。
- ・ deoxyHb で，とりわけ中後半部の増加幅の大きい部位は13CHと12CHである。
- ・ deoxyHb は，課題遂行全般を通して，各部位が異なる変化を示す。

次に，図5～図10のグラフにおける各部位の傾向をより明確化するため，それぞれ1秒あたりの平均変化量を算出した結果を用いて考察を行う。図11は，totalHb について，1CH～13CHの各CHにおける1秒あたりの平均変化量を示したグラフである。同様に，図12はoxyHb，図13はdeoxyHb について，各CHの平均変化量を示したグラフである。

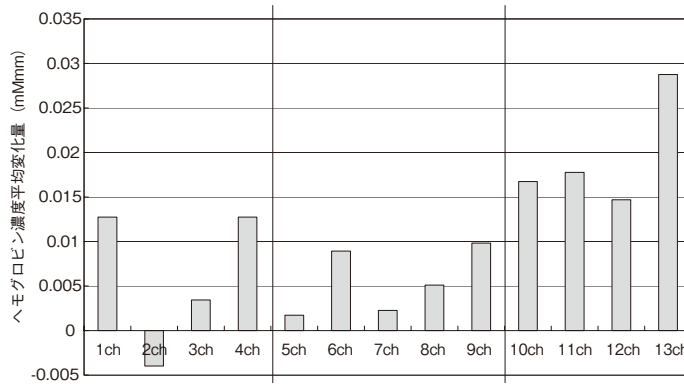


図11 totalHb 濃度平均変化量

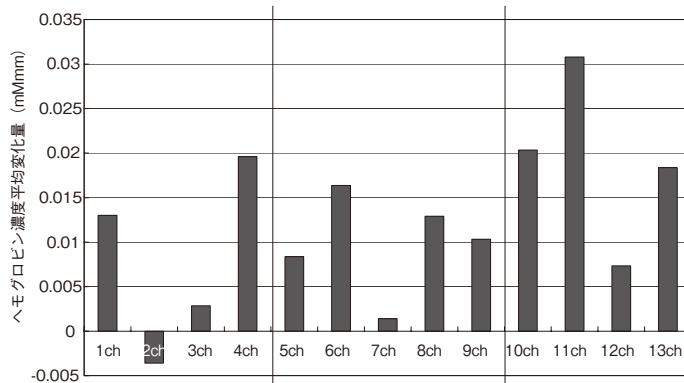


図12 oxyHb 濃度平均変化量

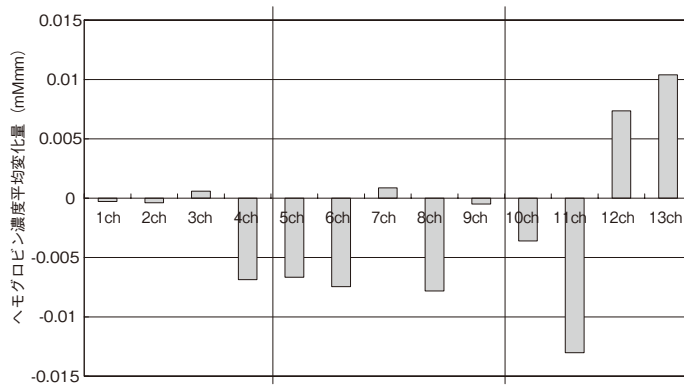


図13 deoxyHb 濃度平均変化量

図11～図13より，次の特徴が挙げられる。尚，以下では，プローブの配列から，1 CH～4 CHを上段，5 CH～9 CHを中段，10CH～13CHを下段として記す（図2参照）。

- ・ totalHb は，ほとんどが正の値である（2 CHのみ負の値）。
- ・ totalHb は，上中下段のうち，下段の値が最大である。
- ・ totalHb は，最大値13CH，最小値2 CHである。

- ・oxyHb は、ほとんどが正の値である（2 CH のみ負の値）。
- ・oxyHb は、上中下段のうち、下段の値が最大である。
- ・oxyHb は、最大値11CH, 最小値2 CH である。
- ・deoxyHb は、負の値が多い（9CH 分／13CH 分）。
- ・deoxyHb は12CH, 13CH の値が高い。
- ・deoxyHb は、最大値13CH, 最小値11CH である。

5. 考察

5.1. 正誤

6 箇所全てで正答であったことより、被験者は課題の内容を正しく理解し、遂行したと判断した。

5.2. ヘモグロビン濃度変化

ヘモグロビンの全量を示す totalHb が、課題遂行全般を通して正の値であり、また、平均値においても 2 CH 以外で全て正の値であることから、課題遂行時には、遂行前を上回る量のヘモグロビンが流入したといえる。これは、酸素を有した oxyHb の増加によるものであるといえ、両者は類似した傾向をもつ。

酸素消費によって生じる deoxyHb は、各部位によってその差が大きいという特徴が見られた。とりわけ、課題遂行時中後半部の左側（12CH, 13CH）での増加が顕著であり、その他の部位ではむしろ減少傾向にある。課題遂行にあたり、多くのヘモグロビン（oxyHb）が流入してくるものの、神経活動による酸素消費は、特定の部位のみで行われたことが考えられる。

部位に関して、上、中、下段で分類すると、3種のデータとも下段の値が最大（deoxyHb は、12CH, 13CH で高い値）であることより、計算遂行時においては、前頭前野の中でも下段に該当する部分で最も血液の流入と酸素消費が多いことが明らかになった。

下段の右側（10CH, 11CH）と左側（12CH, 13CH）で比較すると、oxyHb は右側が優位であるのに対し、deoxyHb は左側が優位である。つまり、deoxyHb の増加部位である左側で、oxyHb は右側のような大きな増加が見られない。これは、oxyHb が deoxyHb に変化したことによる結果と考えられる。尚、13CH に関しては、deoxyHb の増加が大きいものの、oxyHb も高い値となり、totalHb は最大値となっている。これは oxyHb の流入量が極めて多く、deoxyHb に変化後も oxyHb が残った結果と考えられる。

結語

逆思考課題遂行時の前頭前野におけるヘモグロビン濃度変化（13箇所分）について、考察を

行った。得られた知見をまとめると、次の3点になる。

- (1) 課題遂行により、広範囲で新たにヘモグロビンが流入するが (totalHb, oxyHb 増加)、神経活動による酸素消費 (deoxyHb 増加) は特定の部位のみで生じ、その傾向は、課題遂行後半部で顕著となる。
- (2) 前頭前野における活動部位については、下段での活動 (totalHb, oxyHb, deoxyHb 増加) が最も活発である。また、下段において、神経活動 (deoxyHb 増加) は、右側より左側の方が優位である。
- (3) 上記の二つの知見より、学習者の思考過程における変化を、前頭前野における3種類のヘモグロビン濃度の時系列変化とマッピングにより、明示化することの可能性が示された。今後は、課題種別、被験者の思考方法の違いによる活動部位の特性について検討を試みていく予定である。このことを通して、ヘモグロビンデータが学習者の思考・学習特性を把握するための一指標としての可能性について、さらに追究していきたい。

[参考文献]

- 江田英雄 (2001) 光計測で脳活動をみる. 数理科学, 461, サイエンス社, 東京 :77-83
- 一松信 他40名 (2005a) みんなとまなぶしょうがっこうさんすう1ねん～小学校算数6年. 学校図書, 東京
- 一松信 他40名 (2005b) 教師用指導書 第一部実践編 みんなとまなぶしょうがっこうさんすう1ねん～小学校算数6年. 学校図書, 東京
- 加藤俊徳 (2005) COE (脳酸素交換機能マッピング) —光機能画像法原理の利用—. 小児科, 46 (8) : 1277-1292
- 岡本尚子, 江田英雄, 山内留美, 前迫孝憲, 小池敏英, 黒田恭史 (2006) 立体構成課題における前頭前野の酸素消費の特徴について. 臨床脳波, 48 (6) : 101-107
- 清水静海 他42名 (2005a) わくわくさんすう1ねん～わくわく算数6年. 新興出版啓林館, 大阪
- 清水静海 他42名 (2005b) わくわくさんすう1ねん～わくわく算数6年 指導書 第2部 詳説. 新興出版啓林館, 大阪
- 横地清編著 (1969) 講座・算数授業の改造 第1巻 思考と学力. 明治図書, 東京 :133-141

[付記]

本稿の1, 2, 5, 6については黒田恭史が, 3, 4については岡本尚子が執筆を担当した。

本研究は、平成18年度佛教大学特別研究費、及び平成17～18年度文部科学省科学研究費補助金 (特定領域研究: 理数科系教育) (代表者: 黒田恭史) [課題番号: 17011064] の助成を受けている。

(くろだ やすふみ 教育学科)

(おかもと なおこ 大阪大学大学院人間科学研究科)

2006年10月19日受理