OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	脳活動計測による問題解決過程の分析と教育への応用
Author(s)	岡本, 尚子
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/497
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

平成二十一年度　博士学位論文

脳活動計測による問題解決過程の分析と教育への応用

大阪大学大学院人間科学研究科
博士後期課程　人間科学専攻
岡本 尚子

目　次

第１章　序論　1

要約 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.1.　神経科学と教育学の学際的研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.2.　教育学の立場から見た検討課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3
1.3.　目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
1.4.　論文の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・6
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・8

第２章　神経科学と教育学の学際的研究の発展　11

要約 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・11
2.1.　神経科学と教育学の学際的研究領域に関する動向・・・・・・・・・・・・・・・11
2.1.1.　政策的取り組み・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・11
2.1.2.　社会的関心・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・14
2.1.3.　研究者による見解・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・15
2.1.4.　算数・数学教育に関わる研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・18
2.1.5.　筆者の国際的な研究の経験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・20
2.2.　神経科学と教育学の学際的研究領域の確立に向けて・・・・・・・・・・・・・・23
参考文献 及び注・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・25

第３章　算数教育における現状と検討課題　28

要約 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・28
3.1.　全国学力・学習状況調査の特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・28
3.2.　全国学力・学習状況調査結果の分析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・29
3.2.1.　「数と計算」領域における現状と検討課題・・・・・・・・・・・・29
3.2.2.　「図形」領域における現状と検討課題・・・・・・・・・・・・・・34
3.3.　脳活動計測実験の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・41
3.3.1.　調査結果の分析に基づく実験課題の設定・・・・・・・・・・・・・41
3.3.2.　第５章から第８章における脳活動計測実験・・・・・・・・・・・・42
参考文献 及び注・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・44

第４章　非侵襲的脳活動計測装置の特徴　47

要約 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・47
4.1.　非侵襲的脳活動計測装置の比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・47
4.2.　光計測装置・EEG・ fMRI の研究動向 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・50
4.3.　近赤外分光法による光計測装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・53
4.3.1.　光計測装置で使用される近赤外光・・・・・・・・・・・・・・・・・53

4.3.2. ヘモグロビン濃度変化の算出・・・・・・・・・・・・・・・・・・55
4.3.3. ヘモグロビン濃度変化の分析時における留意点・・・・・・・・・・56
参考文献 及び注・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・57

第５章 「個別学習場面」における「計算」問題解決過程のヘモグロビン濃度変化 61
要約 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・61
5.1. 大学生を対象とした実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・61
5.1.1. 実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・61
5.1.2. 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・62
5.1.3. 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・65
5.1.4. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・71
5.1.5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・74
5.2. 小学生を対象とした実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・75
5.2.1. 実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・75
5.2.2. 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・75
5.2.3. 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・78
5.2.4. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・83
5.2.5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・85
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・86

第６章 「個別学習場面」における「図形」問題解決過程のヘモグロビン濃度変化 88
要約 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・88
6.1. 大学生を対象とした実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・88
6.1.1. 実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・88
6.1.2. 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・89
6.1.3. 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・93
6.1.4. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・99
6.1.5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 102
6.2. 小学生を対象とした実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・103
6.2.1. 実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 103
6.2.2. 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 103
6.2.3. 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 106
6.2.4. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 111
6.2.5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 113
参考文献 及び注・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 114

第７章 「ヒント提示学習場面」における「計算」問題解決過程のヘモグロビン濃度変化 115
要約 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 115
7.1. 大学生を対象とした実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 115
7.1.1. 実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 115

7.1.2. 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 116
7.1.3. 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 120
7.1.4. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 124
7.1.5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 126
7.2. 小学生を対象とした実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 126
7.2.1. 実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 126
7.2.2. 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 127
7.2.3. 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 131
7.2.4. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 141
7.2.5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 144
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 145

第８章 「ヒント提示学習場面」における「図形」問題解決過程のヘモグロビン濃度変化 148
要約 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 148
8.1. 大学生を対象とした実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 148
8.1.1. 実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 148
8.1.2. 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 149
8.1.3. 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 153
8.1.4. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 158
8.1.5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 160
8.2. 小学生を対象とした実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 161
8.2.1. 実験目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 161
8.2.2. 実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 162
8.2.3. 結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 165
8.2.4. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 174
8.2.5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 177
参考文献 及び注・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 178

第９章 総合論議 180
要約 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 180
9.1. 研究成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 180
9.1.1. 学際的研究動向の概観・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 181
9.1.2. 算数科における検討課題の整理・・・・・・・・・・・・・・・・ 182
9.1.3. 脳活動計測の実施と新たな分析方法の検討・・・・・・・・・・ 183
9.1.4. 教育学への応用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 189
9.2. 今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 191
参考引用文献 及び注 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 194

謝辞 197

第 1 章　序論

要約

本章では，神経科学と教育学の学際的研究の構築に向けて，これまでの研究動向を，神経科学と教育学との接点の視点から概観する。続いて，教育学の立場から神経科学にアプローチしていくために必要となる手法について検討する。これらを踏まえ，本論文の研究目的と章構成を述べる。

1.1.　神経科学と教育学の学際的研究

神経科学と教育学の学際的研究領域は，2 つの研究分野が融合を目指す新しい領域である（Varma et al. 2008，Geake 2009）。そこでは，人間を自然科学的視点と社会科学的視点から融合的に捉えた新しいモデルをつくり出す営みによって,双方の学問分野に多くの知見がもたらされることが期待されており，これまで，2 つの研究分野には大きな隔たりがあることが指摘されながらも，融合の確立に向けての努力がなされてきている（Bruer 1997，Geake 2005，Ansari and Coch 2006，Goswami 2006，Willingham 2009）。今後はさらに，互いが具体的な研究手法を提示していくことで，研究目的や研究方法などの相違を共通理解し，双方の歩み寄りの中で学際的研究が推進されていかなくてはならない。

ところで，これまでの研究動向を概観してみると，神経科学と教育学の学際的研究領域が新興したのは，必然の流れであったと考えられる。まず，神経科学研究の世界的な拡大の発端となったのが，アメリカ合衆国が 1990 年から実施した「Decade of the Brain（脳の 10 年）」プロジェクトであった。これは神経科学の立場から出発した取り組みであったが，すでにその中には教育学的視点が含まれていた。「Decade of the Brain」プロジェクトとは，アルツハイマー

病の予防と治癒が発足の大きな推進力となったが，多くの国民が苦しむ各種の精神・神経疾患の研究を中心に，発達障害，学習・記憶，リハビリテーションなどが重点分野に設定されたプロジェクトであった（Williams 1992，厚生省 1997，Leibing 2008）。脳を直接的な対象として，学習力や記憶力の減退を予防したり，その能力を回復させたりする試みは，教育学における学習に大きく関連する内容であったわけである。神経科学が本格的な研究の緒に就いたときには，すでに教育学を近接領域と捉えていたといえる。

一方，「Decade of the Brain」プロジェクトの発足から約 10 年後の 1999 年に，OECD（Organisation for Economic Co-operation and Development：経済協力開発機構）-CERI（Centre for Educational Research and Innovation：教育研究革新センター）が「Learning Sciences and Brain Research（学習科学と脳研究）」プロジェクトを，また，2002 年には日本の文部科学省が「脳科学と教育」研究に関する検討会を発足させた（OECD 2002, 文部科学省 2002）。これらは，教育学側から発足したものであり，とりわけ，OECD-CERI による「Learning Sciences and Brain Research」プロジェクトは，「読み書き能力（Literacy）」，「計算能力（Numeracy）」，「生涯学習（Lifelong learning）」が主要な研究課題として設定され，一生を通じて教育はどうあるべきかを考える上で神経科学の知見の活用が図られた（OECD 2007）。たとえば，日本は「生涯学習」を担当し，認知症を含めた研究を進めた結果，リハビリテーションの一環としての学習の重要性が唱えられ，医学を中心とする神経科学と教育学の接近が見られた。生涯学習の視点においても，神経科学との接点がみられるようになったわけである。

また，こうした流れの中で，日本においては，簡便な脳活動計測装置の開発に連動して，臨床的な脳活動計測実験を伴う教育側からのアプローチが先駆的に行われてきた（Chance et al. 1993）。たとえば，大石（2006）は，大学生

を対象に，英語学習をテーマとして，近赤外分光法による光計測装置（以下，光計測装置と記す）を用いた脳活動計測実験を実施している。実験結果より，初級学習者から上級学習者になるにつれ，脳活性（oxygenated hemoglobin（以下，oxyHb と記す）の増加）パターンが，無活性型，過剰活性型，選択的活性型，自動活性型へと変化することを報告している。黒田（2007）は，大学生を対象に，算数科の中から幾何に関する内容を実験課題に用いて，光計測装置による脳活動計測実験を行う実証的な研究を実施している。実験から，方略獲得前は，deoxygenated hemoglobin （以下，deoxyHb と記す）の増減幅の拡大と上下変動の増加が確認されるが，方略の獲得によって，増減幅が収束するとともに，上下変動が沈静化することを報告している。前者は oxyHb の増加部位に，後者は deoxyHb の波形に特に着目することで，学習における変化を検出しようとした研究であるといえる。

1.2.　教育学の立場から見た検討課題

教育学から神経科学へのアプローチは，当初，それほど強いものではなかった。その背景には，神経科学の持つ専門性が，教育学との接点を見いだせないほどの溝を感じさせたからである。しかし，教育学側にも，新たな評価方法の確立のために，他の領域との新たな融合的研究に着手し，知見を得ることが希求されていた。教育学が新たな評価方法を模索していた要因には，学習歴の多様化や指導内容･方法の説明責任の高まりへの対応といったことだけではなく，21 世紀の国際社会の中で，必要性が高まると考えられる創造力やコミュニケーション力をも評価していく重要性の出現があった（中込･黒木 2001，秋田 2002，李 2002）。たとえば，全国学力・学習状況調査では，従来型とは異なる活用力を問う問題が設定され，新たな能力を評価していこうとする動きが出てきている。しかし，これまでの教育学で用いられてきた行動観察を中心とした手法

だけでは，学習者の内面や思考プロセスを評価するには十分ではないという問題が存在した。そこで，生体情報を含めた評価の可能性が検討され，とりわけ思考を司る根幹の器官である脳自体を計測したデータは，生体情報の中で最も有用な評価の指標となると考えられたわけである。ここ数年，脳活動データを用いた学習状況の評価の研究は本格化しており，学習者の状況把握の一指標としての可能性は現実味を帯びつつある（岡本・黒田 2005，黒田 他 2005，黒田・岡本 2006，岡本 他 2006）。

今後，この点での教育学への還元を意図し，教育学の立場から神経科学にアプローチしながら学際的研究を確立していくには，実験の対象を実際の学習者の年齢とすること，実験環境をより実際の教室空間へ近づけていくこと，データ分析を精緻化することなどが必要になると考えられ，具体的には，図 1-1 に記したようなモデルが提案できる（黒田 2006）。図 1-1 左図は，研究の段階を示したものである。第 1 段階では，学習者が 1 人で学習する個別学習を，第 2 段階では，教師の関与がある学習を，第 3 段階では学習者同士で学びあう学習を対象とし，1 つずつ実験要素を段階的に増やしていくことで，実際の教室空間に近い学習を再現しようとするものである。

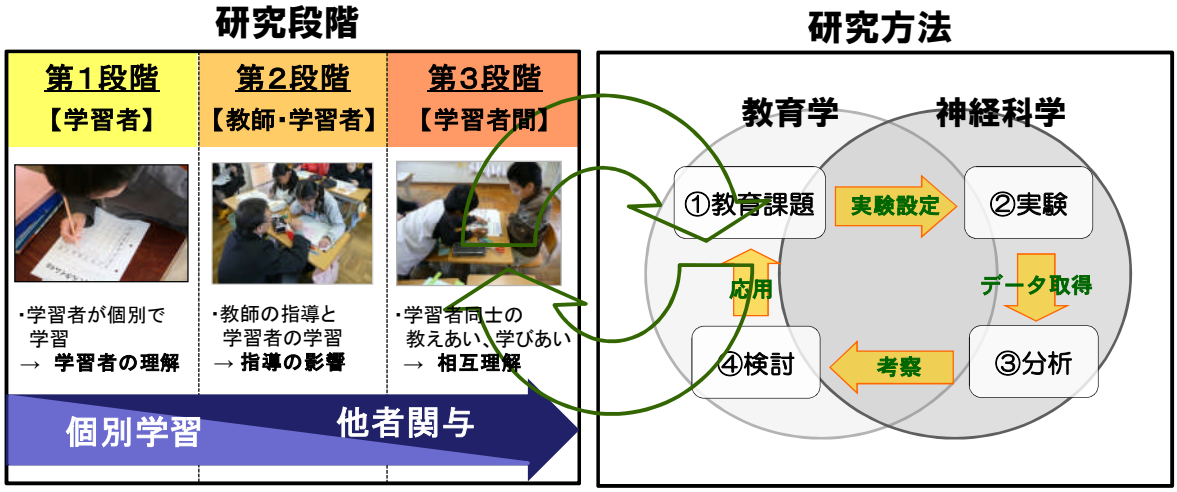


図 1-1　研究実施のモデル図

図 1-1 右図は，左図のそれぞれの段階において用いる研究手法のモデルを示したものである。まず，①教育学の分野から，教育的な問題点を整理する。次に,教育学と神経科学の双方の手法を交えて実験課題,実験環境の設定を行い，②神経科学の手法を用いて脳活動計測実験を実施し，データ取得を行う。③取得データの分析を実施した後，教育学と神経科学の双方の視点から分析結果を考察する。最後に④教育への応用を踏まえて，教育学の立場から検討を行う。こうしたモデルを循環させていくことで，教育学と神経科学の学際領域の構築に近づいていくと考えられる。

1.3. 目的

既述の点を踏まえ，本研究では，大学生と小学生を対象に，計算課題，図形課題を実験課題に設定した脳活動計測実験をとおして，問題解決過程における脳活動の特性を分析することを目的とする。また，実験においては，通常の問題解決のみならず，教師の関わりとして，ヒント提示を問題解決過程に行うことで，その影響による脳活動データの特性についても調べる（図 1-1 の第 1 段階，第 2 段階の初期に該当）。さらに，学習者の特性を説明できる新たな脳活動データの分析手法を探る。具体的には,次の 4 点を達成項目として設定する。

(1) 神経科学と教育学の学際的研究のこれまでの動向を概観し，今後の留意点と方向性を明確化する。

(2) 脳活動計測実験の実験課題の設定に向けて,算数科の主要な領域である「数と計算」，「図形」の 2 領域について，児童の学習実態と検討課題を整理する。

(3) 光計測装置を用いて，大学生と小学生を対象に脳活動計測実験を実施し，脳活動データから問題解決過程の特性を考察する。また,脳活動データの新たな分析手法を検討する。

(4) 脳活動計測実験によって得られた成果について，教育研究への適応を検討するとともに，神経科学と教育学の学際的研究の可能性について言及する。以上，(1) これまでの研究動向の概観と今後の留意点と方向性の明確化，(2) 算数・数学教育における問題点の整理，(3) 脳活動計測実験の実施・考察と新たな分析手法の検討，(4) 神経科学の教育研究への適応と学際的研究の可能性の検討を達成項目とする。

1.4. 論文の構成

本論文は，図 1-2 のように展開する。まず，第 1 章においては，研究背景として，これまでの神経科学と教育学の学際的研究の経緯を，両者の学問の接点を中心に概観し，検討課題を述べる。これらを踏まえて，研究の目的を設定する。

次に，第 2 章においては，神経科学と教育学の学際的研究について，「政策的取り組み」の進展，「社会的関心」の方向，議論されてきた「研究者の見解」，「算数・数学教育に関わる研究」の観点から動向を整理する。これらに筆者の共同研究の経験を含め，学際的研究における留意点や方向性を明確化する。

第 3 章では，全国学力・学習状況調査における算数科の「数と計算」領域，「図形」領域に関わる結果分析をとおして，教育学の視点から，算数科の現状と検討課題を明らかにする。この内容をもとに，脳活動計測実験での実験課題・実験環境の設定を行う。

第 4 章では，非侵襲的に脳活動計測が可能な複数の装置について，教育研究の観点から特徴を比較し，本研究で用いる光計測装置について説明を行う。

第 5 章から第 8 章の各章では，大学生と小学生を対象に，第 3 章において検討した実験課題を用いて，光計測装置による脳活動計測実験を実施する。大学生を対象とした実験を基礎実験に，小学生を対象とした実験を主実験に位置づ

ける。第 5 章と第 6 章では，学習者が 1 人で問題解決を行う場面の実験を，第 7 章と第 8 章では，教師の関与の 1 つとしてヒント提示が行われる場面の実験を実施する。それぞれについて，「数と計算」領域に関する実験課題（第 5 章・第 7 章），「図形」領域に関する実験課題（第 6 章・第 8 章）を用いる。

最後に，第 9 章においては，第 1 章から第 8 章までの内容を総括することで，今後の課題を述べ，神経科学と教育学の学際的研究領域の可能性を検討する。

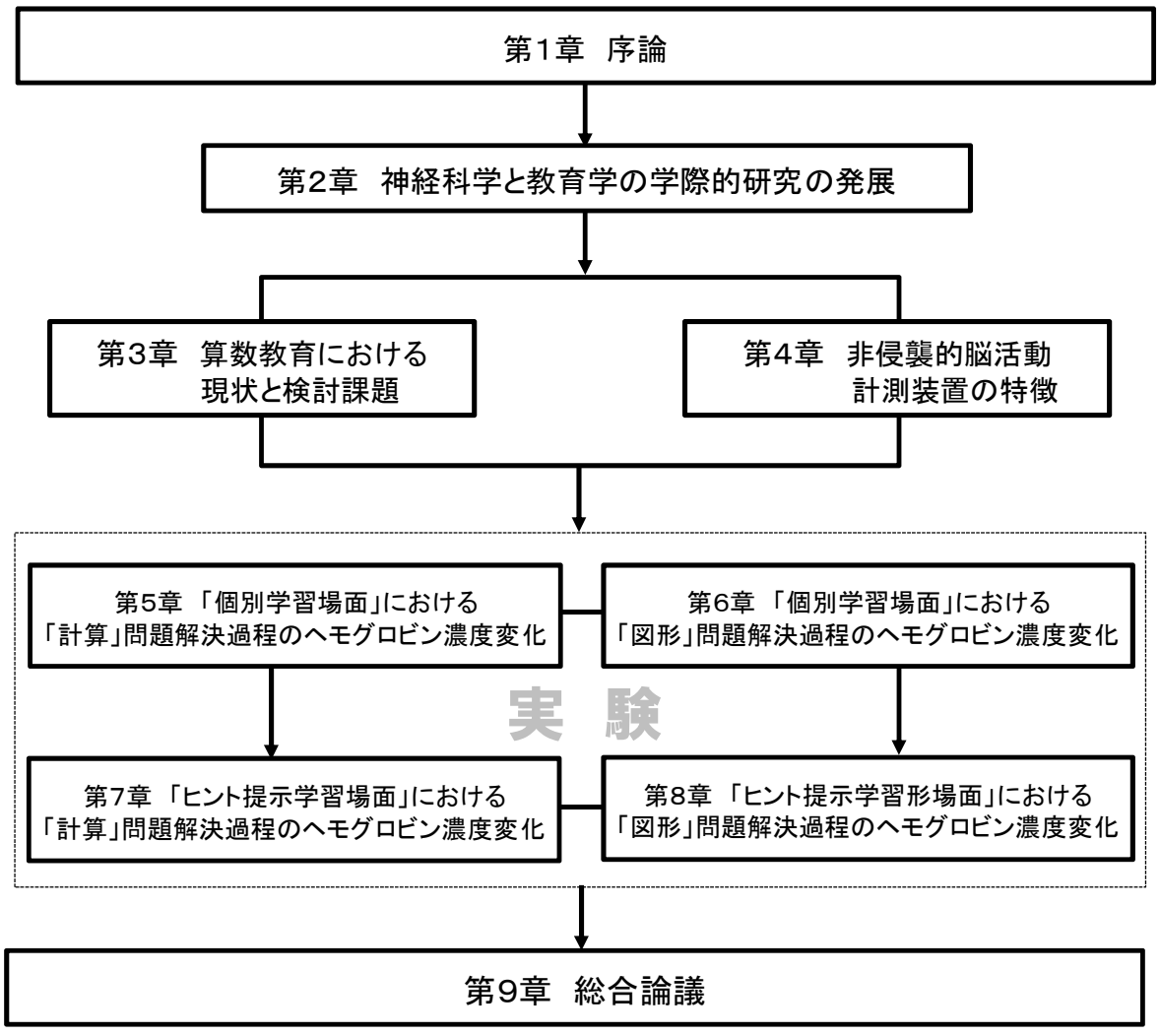


図 1-2　本論文の構成

【参考文献】

秋田美代（2002）「数学における創造性と創造的態度との因果関係」数学教育学会誌，Vol.43，No.3･4：69-80

Ansari, D. and Coch, D. (2006) “Bridges over troubled waters: education and cognitive neuroscience” *TRENDS in Cognitive Sciences*, Vol.10, No.4: 146-151

Bruer, J. T. (1997) “Education and the brain: A Bridge Too Far” *Educational Researcher*, Vol.26, No.8: 4-16

Chance, B. , Zhuang, Z. , Unah, C. , Alter, C. and Lipton, L. (1993) “Cognition-activated low-frequency modulation of light absorption in human brain,” *Neurobiology*, Vol. 90, 1993, pp. 3770-3774

Geake, G. J. (2005) “Educational neuroscience and neuroscientific education: Insearch of mutual middle-way” *Research Intelligence*, Vol.92: 10-13

Geake, G. J. (2009) “The Brain at School: Educational Neuroscience in the Classroom” Open University Press, Berkshire

Goswami, U. (2006) “Neuroscience and education: from research to practice?” *Nature Reviews Neuroscience*, Vol.12: 2-7

厚生省（1997）「厚生白書－「健康」と「生活の質」の向上をめざして（平成9年版）」厚生問題研究会，東京

黒田恭史（2007）「脳科学の算数・数学教育への応用」ミネルヴァ書房，京都

黒田恭史，江田英雄，山内留美，岡本尚子，菅井勝雄，前迫孝憲（2005）「生体情報を指標とした学習評価の可能性について」日本教育工学会第21回全国大会講演論文集：719-720

黒田恭史，岡本尚子（2006）「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，Vol.47, No.1･2：37-44

Leibing, A. (2008) “Entangled Matters -Alzheimer’s, Interiority, and the ‘Unflattening’ of the World” *Culture, Medicine and Psychiatry*, Vol.32, No.2: 177-193

文部科学省（2002)「「脳科学と教育」研究に関する検討会の開催について」（http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/003/kaisai/020301.htm）(2009 年 11 月 14 日現在)

中込雄治，黒木伸明（2001)「多様な考え方を引き出し特殊と一般の構造を見いだす幾何教材の開発」数学教育学会誌，Vol.43，No.3･4：27-35

OECD (2002) “Understanding the Brain: Towards a New Learning Science” OECD, Paris（小泉英明 監修，小山麻紀 訳（2005)「脳を育む 学習と教育の科学」明石書店，東京）

OECD (2007) “Understanding the Brain: The Birth of a Learning Science” OECD, Paris

大石晴美（2006）「脳科学からの第二言語習得論 英語学習と教授法開発」昭和堂，京都

岡本尚子，黒田恭史（2005）「脳計測の数学教育への応用の可能性について」数学教育学会夏季研究会発表論文集：58-61

岡本尚子，黒田恭史，前迫孝憲（2006）「脳内生体情報活用による教育工学研究の実際と可能性」日本教育工学会第 22 回全国大会講演論文集：277-278

李雪花（2002）「日・中遠隔協同学習における創造性の一考察」数学教育学会誌，Vol.43，No.1･2：53-6

Varma, S., McCandliss, B. D. and Schwartz, D. L. (2008) “Scientific and Pragmatic Challenges for Bridging Education and Neuroscience” *Educational Researcher*, Vol.37, No.3: 140–152

Williams, M. (1992) “The Decade of the Brain” Edited by: Bristol, A. J. “Annual Reports in Medicinal Chemistry” Academic Press, California: 1-10

Willingham, T. D. (2009) “Three problems in the marriage of neuroscience and education” *Cortex*, Vol.45: 544-545

第２章　神経科学と教育学の学際的研究の発展

要約

神経科学と教育学の学際的研究は,非侵襲的脳活動計測装置の発展を背景に,1990 年代から世界的に広まりを見せ，1990 年代後半以降，本格的に研究が実施されてきた。

そこで，本章では，1990 年代後半から現在に至るまでの約 10 年間の神経科学と教育学の学際的研究領域の国内外の特徴と変遷について，「政策的取り組み」がどのように進展してきたのか，「社会的関心」はどのような点に向けられてきたのか,「研究者の見解」としてどのようなことが議論されてきたのか，「算数・数学教育」に関わってどのような研究がなされてきたのかの 4 つの観点から動向を整理する。加えて，筆者がアメリカ合衆国及びシンガポールに約 1 年間滞在し，研究分野の異なる研究者らとの国際的な共同研究を実施した経験に言及することで，学際的研究における具体的な問題点や利点をまとめる。

2.1.　神経科学と教育学の学際的研究領域に関する動向

2.1.1.　政策的取り組み

神経科学と教育学の学際的研究に関する国際機関における政策的な取り組みとして，OECD（Organisation for Economic Co-operation and Development：経済協力開発機構）-CERI（Centre for Educational Research and Innovation：教育研究革新センター）によるプロジェクトが挙げられる。OECD-CERI は，いわゆる学校教育における学習のみならず，生涯を通じた学習の理解のために，1999 年より「Learning Sciences and Brain Research（学習科学と脳研究）」を開始した。第 1 期の 1999 年から 2002 年の活動についての報告書内では，研究目的として次の 3 点が挙げられている（OECD 2002）。

1 つ目は，研究分野に関わることとして，「認知神経科学，心理学，教育，健康，政策など」の各分野の創造的な取り組みと分野間での対話を発展させることである。2 つ目は，研究分野間の相互貢献に関わることとして，「認知神経科学が教育と教育的政策に提供できることは何か」，逆に「教育と教育的政策が認知神経科学に提供できることは何か」を問い，相互に理解を図りながら研究を推進することである。そして，3 つ目は教育学の進展を期待するものとして，「教育分野が他の分野の力を借りて「人間の学習」を理解する」ことへの神経科学の貢献についてである。OECD は，このプロジェクトにおいて，神経科学の研究者と教育学の研究者のみならず，政策立案者と研究者の連携をも促すことで，科学的知見による教育の改善と神経科学の発展の可能性を探ろうとした。とりわけ，神経科学から教育学への一方通行ではない，相互の対等な交流の必要性を早い段階で提唱したことは注目すべき点である。その後，OECD によるプロジェクトは，第 1 期における神経科学の研究者，教育学の研究者，政策立案者による学際的研究領域の可能性の探求を基礎に，より教育政策に関連し，かつ応用可能性の高い第 2 期の研究へと移行した。具体的には，「読み書き能力（Literacy）」，「計算能力（Numeracy）」，「生涯学習（Lifelong learning）」の 3 つのネットワークを中心に活動が行われた。2007 年の報告書では，認知機能，記憶などの脳に関わる概説とともに，上記の 3 つのネットワークによる活動成果を報告している（OECD 2007）。

OECD-CERI が発足して 2008 年で 40 年となったが，その記念イベントにおいても，「神経科学と教育の学際的研究」は，最も重視する課題として取り上げられた[注 1]。世界の神経科学者，教育学者，政策立案者らによるフラットな対話の場を実現し，学習者，親などを含め「Learning Sciences and Brain Research」に興味を持つすべての人々を対象として，神経科学と教育の改善に向けての精力的な活動が継続されてきている。

一方，日本国内における組織的な取り組みとしては，2002 年に設置された文部科学省による「「脳科学と教育」研究に関する検討会」の発足がある。研究の推進方策では，集中して取り組むべき研究として，創造性の涵養，教育課程・教育方法の開発，環境要因と脳への影響の 3 つを取り上げ，検討がなされた（文部科学省 2002）。本検討会の座長は，OECD-CERI による「Learning Sciences and Brain Research」プロジェクトにおける「生涯学習」研究ネットワークの議長である伊藤正男氏であり，メンバーには，上記研究ネットワークに参画した小泉英明氏らがいた。したがって，これらの策定には，OECD での世界的な議論の成果が反映されていると考えられる。研究内容には，教育課程や教育方法などの開発が項目として取り上げられ，積極的に神経科学の成果を教育研究へ活かしていこうとする姿勢が読み取れる。ただし，委員の中での教育学関係者は，教育心理学，発達心理学などの心理学関係の研究者が中心であり，教育学の研究者は少数であった。

上記の検討会は，2003 年に最終報告がなされたが，その後も理化学研究所が「脳を育む」プロジェクトを，科学技術振興機構が戦略的創造研究推進事業（CREST）「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」[注 2] 社会技術研究「心身や言葉の健やかな発達と脳の成長」（コホート研究）を開始し，大規模な研究が進められた。また，文部科学省は 2005 年に「情動の科学的解明と教育等への応用に関する検討会」を，2006 年に「情動の科学的解明と教育等への応用に関する調査研究会議」を発足した。文部科学省によるこれらの検討会，調査研究会議は，医学的知見の蓄積や非侵襲的な脳機能計測の実現を背景に，子どもの情意面を科学的に解明し，それを教育へ応用しようとしたものである。委員の人選に関しては，幅広い分野の専門家の参画を得るように配慮していることが明記され，調査研究会議においては，公立幼稚園，小学校，中学校の園長，校長が委員に含まれている。教育現場を踏まえた研究の検討と，研究成果の教

育現場への応用を踏まえていたことがうかがえる。ただし，教育学研究者の名前は少なく，神経科学と学校教育現場の直接的な関わりが，果たして学校現場への適切な応用につながるかどうかは，慎重に検討すべき点であるといえる。

2.1.2. 社会的関心

脳の問題は，国内外において，研究者のみならず，一般社会に対しても大いなる関心を引き起こすものである。とりわけ，一般社会においては，関心や期待の大きさ故に，より身近な生活に応用可能で，明快な論評は，その真偽が十分に検討される間もなく，「神経神話」として急速に広がる傾向にある。いかに良質な研究成果で,教育研究への応用の可能性が高いものであったとしても,拡大解釈によってそれが神経神話の発端となり，誤った見解が波及する可能性がある（Christodoulou and Gaab 2009）。

たとえば，国際的には，OECD が 2002 年の報告書において「大脳半球優位性（右脳か左脳か）」をはじめ，3 項目について，さらに，2007 年の報告書においては,「使用しているのは脳の 10%であること」,「睡眠中の学習」など,神経神話の事例を 8 事項に増やし，その真偽についての検討の必要性を提示するとともに注意を喚起している（OECD 2002，2007）。また，こうした神経神話が一瞬にして学校現場を席巻する状況に対して，研究者も警告を鳴らしている。Goswami（2006）は，学校現場での神経神話の浸透の状況について,「現段階では，教師は，多くの脳を基盤とした学習パッケージの受け手である。これらのパッケージのいくつかには,驚くほどの間違った情報が含まれているが,そのようなパッケージが,多くの学校で使用されている。」と問題視している。また，教師の置かれた状況についても，「教師は脳を基盤とした学習会に出席することを奨励するためのメールを 1 年間で 70 通以上受ける。」という報告事例を取り上げ，如何に状況が深刻であるかを指摘している。

日本においても，一般市民の脳に対する関心は高く，現在，多数の脳に関連する書籍，商品が販売されている。とりわけ，「脳トレ」に代表されるように，脳に効く，脳を活性化というキャッチフレーズの商品について，中・高年齢層を対象とした商品が多いことは，日本の特徴的な傾向であるといえる。これには，OECD のプロジェクトにおける「生涯学習」の分野を日本が中心的に担当し，認知症に関する研究で成果をあげてきたという経緯も影響していると考えられる。ただし，そうした認知症での臨床事例の成果を学校教育現場の教育方法に積極的に活用していこうとする傾向も見られ，「百ます計算」の流行はその代表例である（陰山 2002，川島 2001）。これらの社会的状況は過剰傾向気味ともいえ，近年になって神経科学研究の立場から教育学へ向けて，加藤（2007）が，脳の活性化＝プラス効果とすることの問題点についての指摘を行っている。また，上記の流行が，一部の企業と連携している点に，研究者が自由に言論することへの制限を余儀なくされているという問題についても言及している。

2.1.3. 研究者による見解

神経科学と教育学の学際的研究領域の構築には，その難しさが指摘されながらも，実現へ向けての方策が研究者らによって議論されてきた。

海外において，認知科学，科学哲学の専門家である Bruer（1997）は，神経科学と教育学の議論が高まる中，両者をつなぐにはあまりにその距離が遠いと指摘し，唯一の方策として，認知心理学を足場に，神経科学と教育学を間接的につなぐ道があるとした。教育学と認知心理学の間には 50 年に及ぶ確立した「橋」があり，神経科学と認知心理学の間には 10 年の「橋」があることを指摘した上で，2 つの「橋」によって神経科学と教育学をつなぐ方法を具体的に提案した。認知心理学を，神経科学と教育学の間の安定した足場とすることで，

最終的に，神経科学が，教育実践について教育者に有用な見解を提供し，神経科学と教育学をつなぐ大規模な「橋」になることを期待したといえる。同時期，Byrnes and Fox（1998）もまた，両分野の間の隔たりの大きさと，その間を取り持つ研究者の存在の重要性を指摘している。すなわち，「認知科学の発展と教育心理学の発展の間の歴史的な交流の接点を考え合わせると，多くの教育心理学者は，認知神経科学研究における潜在的な「情報価値」の点で同じ議論を行っている。」とし，両者の共有部分を突破口に，学際的研究領域の確立を行うことを提唱している。また，発達心理学者の Goswami（2004）は，神経科学の教育研究への応用の実現可能性を明らかにした上で，教育心理学者と認知心理学者がイニシアチブを取ることで，神経科学と教育学の橋渡しをすることの重要性に言及している。

一方，近年の Varma et al.（2008）の研究では，これまでの検討事項を，カテゴリーに整理，分類することで，問題の所在を明確化しようとする試みがなされている。具体的には，共同研究を検討する上で必要となる「科学的」概念と「実践的」概念を設定し，前者には「方法，データ，理論，哲学」の４項目を，後者には「費用，タイミング，制御，結末（報酬）」の４項目を置いている。そして，全項目について，「困難性（悲観主義的見解）」と「可能性（楽観主義的視点）」について記し，将来その範囲内のいずれかの地点に議論が収束するであろうことを予測している。たとえば，「実践的」概念の「制御」項目における「困難性」としては，「もし教育が制御を神経科学に譲歩するならば，その独自性を決して取り戻すことはできない。」と記しており，「可能性」としては，「神経科学が教育のためにできることは何かを問うのではなく，教育が神経科学のために何ができるかを問うべきである。」と記している。また，「Educational Neuroscience（教育神経科学）」という新たな学際的研究領域の立ち上げが，教育学と神経科学の関係をより協力的にすることを指摘し，新

しい学際的研究領域の確立にあたって 2 つの提案を行っている。提案の 1 つは「学問ではなく分野への焦点化：自分たちの学問を強調することをやめ，自分たちの問題を強調させること」であり，もう 1 つは「競争ではなく協調への焦点化：教育学者と神経科学者が，互いを競争者ではなく協力者として見ること」である。神経科学と教育学が，同じ問題意識に支えられ，相手の立場を踏まえた上で交流を持つことの必要性が唱えられているといえる。

1990 年代後半と現在の両者に共通することとしては，教育学と強いつながりを持つ分野を通して神経科学との橋架けを考えている点が挙げられる。とりわけ，認知心理学を要と考えている点が特徴であるといえる。認知心理学は，教育学と関連深い「学習」を含めた認知過程を研究対象としてきており，現在では認知科学分野の一つとして神経科学とも研究分野が重なる。

また，時代の変遷に伴い，初期の段階と現在との間に変化が生じたこととしては，主に 2 点が挙げられる。1 つは，神経科学と教育学の対等性が繰り返し指摘されるようになったことである。これは，裏返して言えば，この間，神経科学の優位性が目立ってきたことによる指摘であるといえる。もう 1 つは，神経科学と教育学の学際的研究の可能性と困難性について，具体的な研究活動との対応関係が明確化されるとともに，研究領域の全体像がおぼろげながら明らかになり，整理されてきたことである。こうした流れを背景に，現在イギリスでは，Centre for Educational Neuroscience [注 3] が設立され，学習と教授への実際的な貢献に向けた神経科学の応用と橋渡しを目的に，教育学，認知神経科学，発達心理学の研究者らによって，組織的な研究が進められている。

日本国内においては，近年になって，徐々に神経科学と教育学の学際的研究について，双方の立場から意見がなされるようになってきている。たとえば，神経科学の立場から，加藤（2007）は，神経科学側からの問いかけに対する教育学側のアクションや，教育学側からの神経科学への積極的な働きかけが乏し

いことを指摘している。教育の現場からの実情を提示していくことで，神経科学の活性と，教育研究への還元を促進することを提案している。また，教育学の立場から，安彦（2005）は，神経科学者の提案に対して，教育学の関わりが弱いこと指摘し，神経科学の知見を取り入れた学校カリキュラムの開発の可能性について論じている。黒田・岡本（2006）は，教育史上の議論を背景に，現在の神経科学と教育学が果たしうる可能性と問題点について検討し，教育学研究者の学際的研究への積極的な参加が重要であることに言及している。緩利・田中（2007）は，神経科学と教育学の間のずれを考察することで，両者を架橋するためにヒトの認知に関わる概念に着目する必要性を指摘している。

最近になり，ようやく日本においても神経科学と教育学の学際的研究についての議論がなされるようになってきた。こうした議論において重要なことの一つとして，研究分野間での言葉の共通理解を緻密に行っていくことが挙げられる。たとえば「学習」という同一の用語であっても，研究分野間で意味の異なるものとして捉えられており，それらを相互に理解し合う作業を粘り強く行っていく必要がある。今後は，議論を如何に継続し，問題を共同で解決しながら，日本の将来に向けた指針にしていくことができるかが問われている。

2.1.4.　算数・数学教育に関わる研究

言語教育と並んで，算数・数学教育は世界的に重要な課題として位置づけられ，神経科学との研究が進められてきた。たとえば，Goswami（2004）は，脳活動計測装置によって現段階で得られている成果をもとに，これまでの算数・数学教育でなされてきた活動について検討を行っている。脳活動データについての明確な解釈が定まっていないこともあり，教育に対する具体的な提言は避けているが，指を用いた計算などについての再考の機会を提供している。また，計算障害（dyscalculia）の発見や，それらの障害を持つ子どもたち個々人のカ

リキュラム開発にも活かせる可能性を提案している。一方，OECD では，第 1 期研究において，計算障害の原因究明や，数学的な困難を持つ学習者への支援ツールの開発に関する研究など，特別な支援の必要な児童・生徒に対する研究が中心に行われた（OECD 2002）。その後，第 2 期研究に移ると，より一般的な数学カリキュラムの検討を行うべく，研究が進められた。現代社会に生きる子どもたちが将来必要となる能力を踏まえた上で，数学を学ぶ意義を神経科学の観点から議論し，カリキュラム開発への適用可能性について複数の方法が検討されるようになった（OECD 2007）。

算数・数学教育に関する神経科学研究は，初期の段階では計算障害などの特別な支援を必要とする児童・生徒に関する研究が中心になされてきた側面があるが，現在では通常の学級の多数の児童・生徒に対する算数・数学教育にまで展開していこうとする傾向が読み取れる。

国内における算数・数学教育と神経科学の学際的研究は 2000 年以降，少しずつ成果が報告されるようになった。心理学の視点から，岡・宮谷（2003）は，数学における暗算を，数字の知覚や計算の実行，計算結果の記憶などが複合する情報処理過程として捉え，その過程を神経科学の知見を用いて検討することで，暗算の特性を明らかにしようとしている。馬場他（2008）は，数学の基礎となる数判断の心的過程の脳活動を計測することにより，学習メカニズムを解明することを目指している。数学における，より基礎的な活動の解明をもとに，複雑な数学における活動の検討に活かそうという試みであるといえる。

算数・数学教育学の視点からは，黒田他（2004），岡本他（2006）が図形領域に関する課題を用いて，また，岡本・黒田（2008），Okamoto et al.（2008）は計算領域に関する課題を用いて，脳活動計測を行い，神経科学的知見と教育学的知見の双方から考察を行っている。とりわけ，通常の児童を直接対象とした実験にも着手しており，これらの成果が明確化すれば，具体的な算数・数学

教育の改善への活用が期待される。

現状では，上記前者の心理学的実験と後者の教育学的実践が併存する形で，研究が蓄積されてきているが，最大の検討課題は，数学学習時の脳活動の特徴を明らかにしたことを，どう算数・数学教育の指導に役立てるのかという具体的な道筋を示すことにある。この点を慎重に克服することが，神経科学と教育学の学際的研究の成否に大きく関わっているといえる。

2.1.5.　筆者の国際的な研究の経験

筆者は，2008 年度の約 1 年間，アメリカ合衆国とシンガポールで神経科学と教育学の学際的研究に関する国際的な共同研究に参加する機会を得た。実際の経験をとおして，研究を進める上での問題点や議論が必要となる点が明らかとなった。問題点とその要因や，打開策などを以下に記し，整理することとする。

共同研究において，まず，問題となったことは，国の違いに起因するもので，各国の学校段階における教育方法や教育内容の相違によって生じる実験環境や実験条件の設定の難しさである。今回は，日本，アメリカ合衆国，シンガポール，トルコ，マレーシア，オーストラリアの研究者が集まったが，それぞれに学んできた内容が異なった。たとえば，除法の筆算方法は，とりわけヨーロッパでは日本の形式と異なり，初期の段階では筆算自体の共通理解を図ることに難しさがあった。図 2-1 は，331÷7 について，日本とトルコそれぞれの除法の筆算形式を示したものである。除数と商の位置が異なることが分かる。

また，日本では乗法を「九九」として，1×1 から 9×9 までを覚えるが，11×11 や 12×12 までを覚える国もあり，1 つの問題についても各人が持つ印象が異なった。これらのことは，学齢期の子どもを被験者とする場合には特に重要な内容であり，「被験者の出身国を限定するのか」，「上記の国で汎用できる課題を作製するのか，そうである場合，学年はどうするのか」などから議論

しなければならなかった。今回の共同研究では，国による違いの影響がないような問題を設定することを基本としながら，必要な場合には，実験前に「学校教育を受けた国」，「実験課題の内容が理解できるか」を調査する事前アンケートを実施することとした。

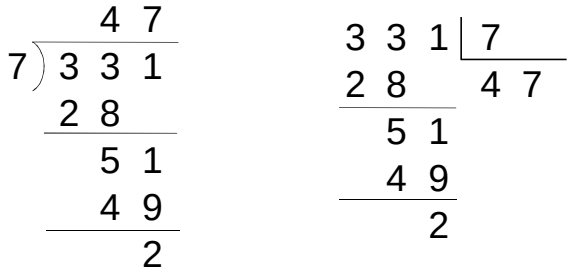


図 2-1　331÷7 の筆算形式
（左図：日本の形式，右図：トルコの形式）

次に問題となったことは，分野の違いに起因するもので，研究者によって，研究目的が異なった点である。すなわち，研究者によって，何を明らかにしたいのか，ゴールは何であるのかが異なったわけである。この共同研究では，教育学，医工学，看護学，心理学の分野の研究者が参加した。いずれの研究者も神経科学と教育学の学際的研究の重要性を認識し,その確立を目指していたが,検討したい内容はそれぞれであった。筆者を含めた教育学の研究者は「理解や方略獲得のプロセス」を，医工学の研究者は「分かる瞬間」を，看護学の研究者は「ある実験課題の遂行が，他の実験課題の遂行に及ぼす影響」を，心理学の研究者は「難度の違いが及ぼす影響」をテーマとしていた。このことは，各分野が独自に持つ研究方法にも関わっており，実験課題の設定やブロックデザインにおける重要な内容となった。「全員が解答可能な実験課題を設定するのか，実験途中でひらめきを必要とする実験課題を設定するのか」，「簡単な問題を反復させるのか，難度の高い問題を数問にするのか」などについて，共有

点を探っていく作業を重ねる必要があった。今回の共同研究では，それぞれの分野の目的を共有した上で，いくつかの実験段階を設定し，より統計的に処理しやすい単純な条件から，複雑な条件へと移行する計画をたてることで，各分野の主目的がいずれかの段階で達成されるようした。各段階においても，各分野の目的のうち，少なくとも１つ以上の要素が含まれるような実験課題，条件を設定することとした。実験段階の関連と，各段階内での関連から，それぞれの分野の立場が明らかになるとともに，共通点を見いだすことにつながった。

また，上述した議論においては，各分野が持つ用語が問題となった。たとえば，看護学の研究者がテーマと考えていた「ある実験課題の遂行が，他の実験課題の遂行に及ぼす影響」は，教育学における「Transfer （転移）」に該当するが，この用語は当該の看護学の研究者と教育学の研究者の間でのみ共有できる用語であった。専門用語については，それぞれの分野が重視する研究内容を反映している場合が少なくないため，議論の際には用語を発端に，その研究分野の背景についてまで議論を行い，共有を図るように努めた。このことで，用語の内容の理解にとどまらず，研究分野の接点を探る機会となった。

これらの共同研究による成果をまとめると，次の２点になる。

まず，１点目は，教育に関わる各国の問題を共通理解し，それらをどのように解決するのかについての交流が可能であったことである。すなわち，日本における教育の問題が世界でも共通のものであるのか,共通のものではない場合，各国のどのような違いがその要因となっているのかなどを検討することができたことである。教育の問題は各国の独自性に起因する部分が大きいといえるが，交流を進める中で，世界的な問題との接点を見いだし，国内での問題を国際的な問題として捉え返すことが可能となった。

２点目は，研究分野の違いによる研究目的，方法，対象に関する差異の共通理解がなされ，新たな学際的研究領域における目的の意識化が図られるように

なったことである。各分野の研究者が互いの研究手法についての違いを，研究分野の背景を含めて議論しあうことで，神経科学と教育学の新たな学際的研究領域を構築するためにはどのような設定が必要なのかが話し合われるようになったわけである。

2.2.　神経科学と教育学の学際的研究領域の確立に向けて

過去 10 年間にわたって，世界的に，神経科学と教育学の学際的領域研究の可能性と問題点が，理論的，実践的ベースで検討されてきた。そこでは，今後を予測するにあたって重要となる概念項目を設定した上で，それぞれにおける可能性と限界を予測し，同時にその論的根拠と実現可能性が明らかにされてきた。後続の研究者らは，これらを一つの羅針盤としながら，それまでの知見を取り込むことによって，批判的，建設的に研究を構築し直すという作業を可能としてきたといえる。

しかしその一方で，いまだ，神経科学と教育学の橋渡しに関する研究は十分ではなく，加えて，双方の研究分野の歩み寄りと協力を十分に持たないまま，神経科学の教育への応用が論じられ，実践される傾向も見られる。

今後，教育学研究への実りある成果と，神経科学への貢献を具体化していくためには，上記の点に対する議論の高まりが必要となるであろう。そして，教育神経科学という新たな分野の確立には，具体的な実験方法を含む科学的検証の問題と，両分野を支える哲学の問題について，相互にその特徴を紹介し，共有化の可能性を探っていかなくてはならない。

以下では，学際的研究のさらなる進展に向けて，現段階で考えられる検討項目を挙げ，その留意点を示すことで，具体的な方向性に向けた指針づくりのための視点を提示する。

【各研究分野を支える規範の問題】

(1) 研究領域：各専門分野の既存の境界を出ることなく，既に共同研究が可能な領域のみで研究を行うのではなく，境界を越えて共同研究を可能とするための方策を共同で構築する。

(2) 理論と実践：各分野内での既存の理論と実践の関係を重視し，分野を越える理論と実践の関係性への言及を控えるのではなく，各研究分野の理論と実践の関係を共有し，理論と実践の相互交流について，研究分野を越えた可能性を検討する。

(3) 臨床実験と教育実践：臨床実験と教育実践の相互交流をせず，臨床実験結果をそのまま教育実践に適用するのではなく，臨床実験と教育実践の相互交流を行うことで実験結果を再吟味し，教育実践への適用方法についての検討と実証的な検証を行う。

(4) 研究の相互貢献：一方通行の研究成果の応用のみを追究するのではなく，相互に研究成果を貢献しあえる関係を積極的に模索しながら構築する。

【科学的検証方法に関わる問題】

(5) 実験制御と結果の問題：研究分野間に存在する実験制御の方法の違いを問わず，得られた結果のみに注目するのではなく，各研究で使用する課題内容と制御方法を相互に検討し，実験結果の意味と実際の適用可能性について議論する。

(6) 再現性の問題：実験結果は再現可能なもののみとし，再現不可能な実験結果は考察対象外とするのではなく，原則的には，再現可能な実験結果を採用しながらも，子ども，成人とも，生涯をとおして変化するため，それらの影響を踏まえた考察を試みる。

(7) 量的研究と質的研究：統計処理によって得られた実験結果をもとに，それらを一律に教育実践に適用するのではなく，統計処理とケーススタディーを組み合わせて実験結果を分析し，どのような対象と場面に適用可能かを

検討する。

(8) 個体間格差：年齢や性別など，明確に異なる個体間の差のみを基準に，実験結果の分析と適用方法を検討するのではなく，実験課題に対する適正や背景などをも踏まえ，総合的に分析し，各タイプに応じた適用方法を検討する。

【参考文献】

安彦忠彦（2005）「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，第 15 号：1-18

馬場伊美子，岩崎祥一，井上正雄（2008）「数判断の脳活動－近赤外光脳機能イメージングによる予備実験－」数学教育学会春季年会発表論文集：218-220

Bruer, J. T. (1997) “Education and the brain: A Bridge Too Far” *Educational Researcher*, Vol.26, No.8: 4-16

Byrnes, J. P. and Fox, N. A. (1998) “The Educational Relevance of Research in Cognitive Neuroscience” *Educational Psychology Review*, Vol.10, No.3: 297-342

Christodoulou, A. J. and Gaab, N. (2009) “Using and misusing neuroscience in education-related research” *Cortex*, Vol.45: 565-557

Goswami, U. (2004) “Neuroscience and education” *British Journal of Educational Psychology*, Vol.74, No.1: 1-14

Goswami, U. (2006) “Neuroscience and education: from research to practice?” *Nature Reviews Neuroscience*, Vol.12: 2-7

陰山英男（2002）「本当の学力をつける本　学校でできること家庭でできること」文藝春秋，東京

加藤忠史(2007)「「脳を鍛える」ブームの根底にあるもの」教育学研究, Vol.74, No.2：14-23

川島隆太（2001）「自分の脳を自分で育てる」くもん出版，東京

黒田恭史，江田英雄，菅井勝雄，前迫孝憲（2004）「合同図形弁別過程における脳内の血液動態の分析」日本教育工学会論文誌，Vol.28，No.2：131-140

黒田恭史，岡本尚子（2006）「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，Vol.47，No.1･2：37-44

文部科学省（2002)「「脳科学と教育」研究に関する検討会の開催について」（http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/003/kaisai/020301.htm）(2009 年 11 月 21 日現在)

OECD (2002) “Understanding the Brain: Towards a New Learning Science” OECD, Paris,（小泉英明 監修，小山麻紀 訳（2005)「脳を育む 学習と教育の科学」明石書店，東京）

OECD (2007) “Understanding the Brain: The Birth of a Learning Science” OECD, Paris

岡直樹，宮谷真人（2003）「暗算の過程に関する研究（１）－事象関連電位による検討－」日本心理学会第 67 回大会発表論文集：748

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, Vol.48, No.6：101-107

Okamoto, N., Eda, H., Kuroda, Y. and　Maesako, T. (2008)　“Effectiveness of NIRS in Educational Research”. *WAC- International Forum on Multimedia an Image Processing*: 526. 1-6

岡本尚子，黒田恭史（2008）「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，Vol.48，No.1･2：73-80

Varma, S., McCandliss, B. D. and Schwartz, D. L. (2008) “Scientific and Pragmatic Challenges for Bridging　Education and Neuroscience” *Educational Researcher*, Vol.37, No.3: 140–152

緩利誠，田中統治（2007）「脳科学と教育の間　－カリキュラムへの応用方法を中心に－」教育学研究，Vol.74，No.2：24-35

【注】

１）OECD-CERI

http://www.oecd.org/dataoecd/38/18/38446790.pdf（2009 年 11 月 19 日現在）

２）科学技術振興機構，戦略的創造研究推進事業（CREST）「脳の機能発達と学習メカニズムの解明」http://www.brain-l.crest.jst.go.jp/ （2009 年 11 月 19 日現在）

３）Centre for Educational Neuroscience

http://www.educationalneuroscience.org.uk/（2009 年 11 月 19 日現在）

第 3 章　算数教育における現状と検討課題

要約

神経科学の知見を教育学へ活かしていくためには，脳活動計測実験全体の設計を教育学の立場から検討し，設定して行かなくてはならない。現在の学習内容や，子どもの学習実態を正確に把握し，実験課題の設定に役立てていく必要があるといえる。

そこで，本章では，日本における全国規模調査である全国学力・学習状況調査の算数科から，主要な領域である「数と計算」，「図形」に関する結果の分析を通して，算数教育における子どもの学習実態と検討課題を浮き彫りにし，実験課題の設定を行う。

3.1. 全国学力・学習状況調査の特徴

現在の教育における実態を把握するにあたって,2007 年度から実施された全国学力・学習状況調査は，次の 2 点で有効な指標となる。

1 つ目は，本調査が，原則として，小学校第 6 学年と中学校第 3 学年の児童・生徒の全員を対象に実施された悉皆調査であった点である（市川 2009）。これまでも文部科学省の主導で，小・中学校教育課程実施状況調査や特定の課題に関する調査が行われてきているが,これらは,無作為抽出による調査であり，たとえば，平成 15 年度小・中学校教育課程実施状況調査の対象は，小・中学校ともに全国の 8%の児童・生徒であった（国立教育政策研究所 教育課程研究センター 2005）。全国学力・学習状況調査は，抽出校の学校特性や地域特性などの要因によって，全国的な傾向を示さない可能性への懸念がなく，抽出調査では把握しきれなかった可能性のある日本の児童・生徒の現状を正確に調査することが可能となる。

２つ目は，PISA（Programme for International Student Assessment）やTIMSS（Trends in International Mathematics and Science Study）などの国際的な学力調査における日本の順位の低下を背景に，生活習慣や学習環境に関する質問紙調査が実施されるとともに，算数科の調査では，従来型のものとは形式の異なる問題が設定された点である（OECD 2007，Mullis et al. 2008，田中 2009）。すなわち，日本の従来型の筆記試験を踏襲した，主として「知識」に関する調査である算数Ａに加え，主として「活用」に関する調査である算数Ｂが設定された点である。どの程度知識が習得されたかということのみではなく，新しい形式の問題を解決する際，習得した知識の活用において，どのような点に課題があるのかを，知識の習得と比較しながら検討することが可能となる（黒田・岡本 2007，黒田 2008）。

そこで，以下では，2007 年度，2008 年度，2009 年度に実施された３回の全国学力・学習状況調査の算数科の内容を取り上げ，子どもの学習実態と検討課題を整理する。なお，調査問題と調査結果は国立教育政策研究所のホームページ[注1]からデータを取得した。

3.2.　全国学力・学習状況調査結果の分析

3.2.1.「数と計算」領域における現状と検討課題

表 3-1 は，全国学力・学習状況調査における，乗法と除法の一般的な計算問題を取り上げ，問題の内容と正答率を示したものである。

正答率は，73.0%から 95.4 %の間である。乗法と除法の種類別に見ると，乗法（①，②，④）の正答率はおよそ 85%であり，小数の含まれる計算（①，②）と整数の計算（④）の大きな違いは見られない。一方，除法（③，⑤，⑥）の正答率は 73.0%から 95.4%となっており，小数の含まれる計算（③，⑥）は，整数の計算（⑤）よりも約 15%から 20%程度，正答率が低い。なおかつ，小数

の含まれる除法（③，⑥）は，小数の含まれる乗法（①，②）よりも正答率が低い。除法は，商を第何位に何をたてるかなど，乗法よりも判断を求められる難しさがあるとともに，演算構造が複雑であるため，計算過程やアルゴリズムの意味の理解が不十分である場合が多い。小数の計算では，これらの課題が顕著に現れたと考えられる。

表 3-1　乗法，除法の計算問題と正答率

	出題元	問題	正答率
①	2007 年度 算数 A 1 (2)	27×3.4	85.6%
②	(3)	9.3×0.8	84.8%
③	(4)	12÷0.6	73.0%
④	2008 年度 算数 A 1 (2)	52×41	86.5%
⑤	2009 年度 算数 A 1 (3)	204÷4	95.4%
⑥	(4)	48.1÷1.3	80.5%

表 3-2 は，1 つの式に 2 演算が含まれた計算問題の内容とその正答率を示したものである。表 3-2 の⑦は 3＋2×4 で乗法・加法，⑧は 80－30÷5 で除法・減法の組み合わせとなっており，それぞれ乗法，除法から計算することが求められる。

正答率を見ると，いずれもおよそ 70%程度である。整数の乗法のみの計算（表 3-1－④）と，整数の乗法・加法の計算（表 3-2－⑦）の正答率を比較すると，前者が 86.5%，後者が 71.1%となり，後者の方が 15%程度低い。また，同様に，整数の除法のみの計算（表 3-1－⑤）と，除法・減法の計算（表 3-2－⑧）を比較すると，前者が 95.4%，後者が 67.0%となり，後者の方が 30%程度低い。演算が一種類の計算に比べ，計算順序に規則がある四則混合の計算は，正答率が

低いといえる。⑦，⑧について誤答内容を見ると，式の頭である加法，減法から計算して解答を導いた児童が，⑦は 23.3%，⑧は 26.1%となっており，誤答者の約 80%は計算順序による間違いである。このことより，演算が一種類の計算練習は，繰り返して練習が行われているとともに，反復練習によって手順が体得され，それを機械的に適応できるが，四則が混合した計算は，計算順序の判断が必要となることに難しさがあると考えられる。

表 3-2　四則が混合した計算問題と正答率

	出題元	問題	正答率
⑦	2008 年度 算数 A 1 (5)	3＋2×4	71.1%
⑧	2009 年度 算数 A 1 (6)	80－30÷5	67.0%

次に，上記の一般的な計算問題とは出題方法が異なる「数と計算」の問題を取り上げる。図 3-1 は，小数の乗法・除法において，被乗数・被除数が，積・商よりも大きくなるものを選ぶ問題である。

表 3-3 より，正答率は 45.3%であり，半分以上の児童が正答できていない。完全正答ではなかったが正答のいずれかのみを選んだ児童は 4.7%である。誤答内容を見ると，乗法であれば積が被乗数より大きくなると考えた解答（「**1**，**2**」と解答：4.4%）や，演算の種類に関係なく，乗数・除数が 1 以上となれば，積・商が被乗数・被除数より大きくなると考えた解答（「**1**，**3**」と解答：12.0%）がある。このように，図 3-1 の問題では，半分以上の児童が完全正答に至らず，誤認識や不理解となっているが，通常の計算問題に同様の割合で誤答が見られるわけではない。表 3-1 における，乗数・除数が 1 以上の小数の計算（表 3-1－①，⑥）と，1 未満の正の小数の計算（表 3-1－②，③）の正答率を見ると，73.0%から 85.6%となっており，図 3-1 の問題の 45.3%よりも高い。このこと

より，通常の計算問題は解答できるが，計算式における被乗数・被除数，乗数・除数，積・商の関係の理解が不十分であると指摘できる。とりわけ，１未満の正の小数の特性と，それを踏まえた演算構造の理解に課題があることが考えられる。

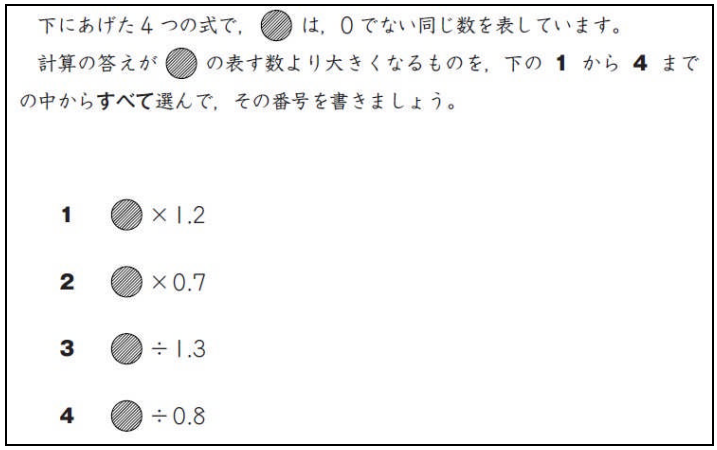


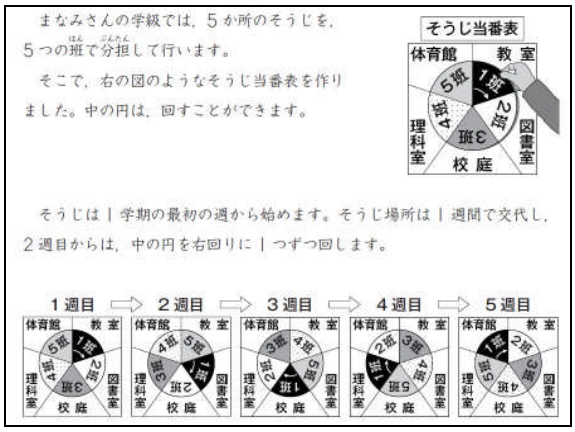
図 3-1　2008 年度　算数 A 3

表 3-3　図 3-1 の問題における解答率

解答	解答率
【正答】**1，4**	【正答率】45.3%
1 あるいは **4**	4.7%
1，2	4.4%
1，3	12.0%
上記以外	23.9%
無解答	9.7%

さらに，「数と計算」に関する文章題[注2]を取り上げる。図 3-2 は，そうじ当番表を題材に，現実的な事象における規則性を見つけ，それを変数の考えを取り入れた立式によって表現する問題である。$3+5\times x=y$（$x\geqq 0$，$0<y\leqq 15$）と

なる式を表し，yの数値を答えとして解答させる（例：3＋5×2＝13　答え 13 週目）問題である。



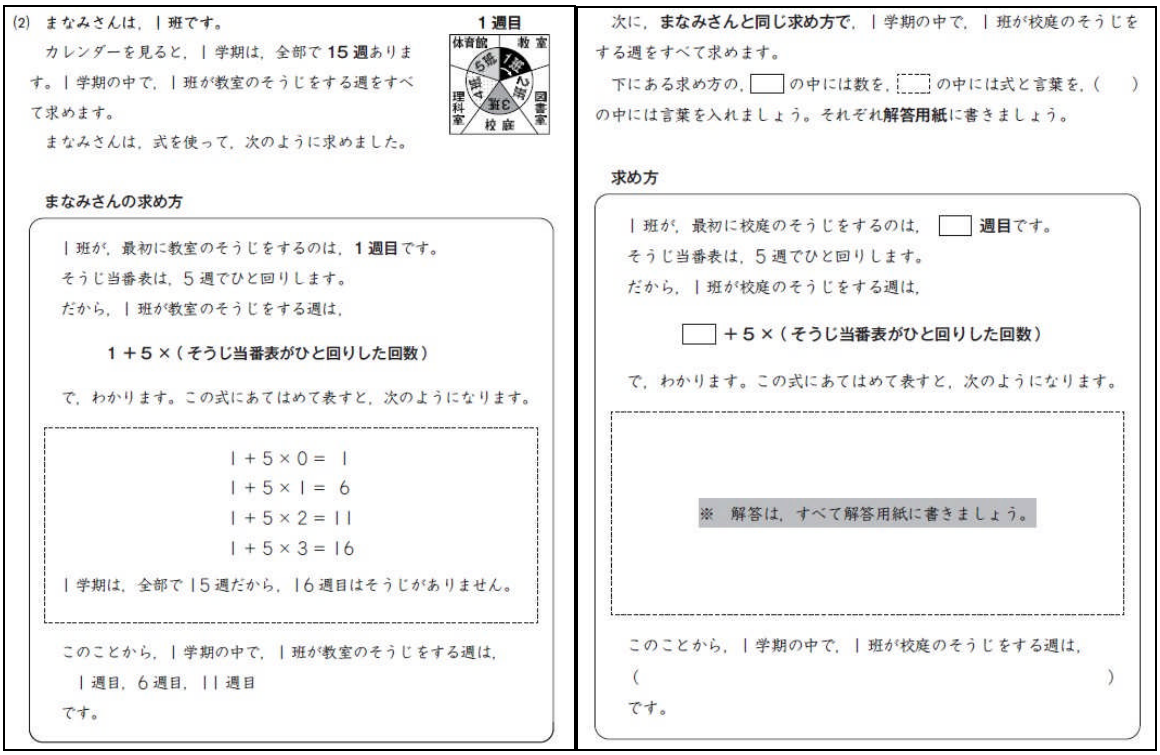


図 3-2　2008 年度　算数 B 4 (2)

表 3-4 より，正答率は 38.5%であり，上記の図 3-1 に取り上げた被乗数と乗数などの大小関係を問う問題の 45.3%よりもさらに低い。誤答内容を見ると，立式は正しく，答えも条件に合う 15 週までの週を記述しているが，計算に誤

りがあった児童（表 3-4「○立式，×答え（15 週目までの週を解答）」）は 10.8%である。計算の誤りの例としては，表 3-2 の問題で最も多かった誤答と同様に，乗法・加法の混合した式において，乗法から計算するべきところを，式の頭である加法から行ったもの（例：3＋5×2＝16）が予想される。

また，誤答として，立式はできず，答えのみを正しく記述した児童（表 3-4「×立式，○答え」）は 5.1%である。事象を式に表すことができず，順に数えていくことで答えを導いたといえる。この児童は，具体的な操作（数える）では答えを導けるものの，そこに至るプロセスとして規則性を一般化することに課題がある。さらに，「無解答」ではないが，立式も答えも正答でなかった児童（表 3-4「上記以外」）は，44.0%である。「無解答」であった児童を除いて，正しい立式ができなかった児童は 49.1%（表 3-4「上記以外」44.0%，「×立式，○答え」5.1%）となり，約半数の児童は，何らかの記述はしているものの，式化ができていない。普段から，式を単なる計算として捉えているため，その式の持つ意味の理解が不十分であるとともに，式の各項についての変数の考え方が不十分であると考えられる。

表 3-4　図 3-2 の問題における解答率
（立式は□に記述する式，答えは(　)に記述する週を示す）

解答	解答率
【正答】○立式，○答え	【正答率】38.5%
○立式，×答え（15 週目までの週を解答）	10.8%
×立式，○答え	5.1%
上記以外	44.0%
無解答	1.6%

3.2.2. 「図形」領域における現状と検討課題

図 3-3 は，平行四辺形の向かい合う辺の長さは等しいという性質を用いて，辺の長さを求める問題である。正答率は 92.7%であり，90%以上の児童が正答している。

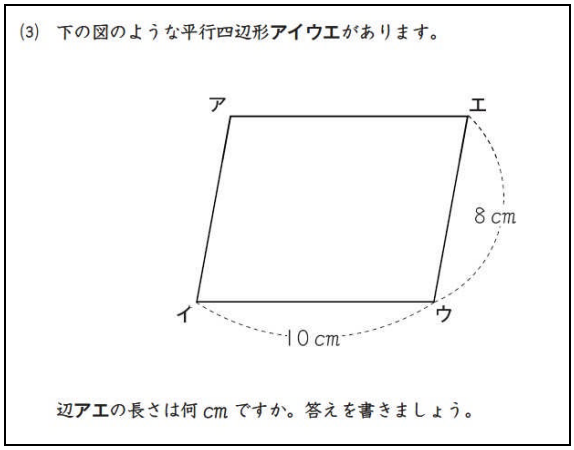


図 3-3　2009 年度　算数 A 5 (3)

一方，図 3-4 は，平行四辺形の辺カキと辺オクの 2 辺の長さが同じであるといえる理由を選択する問題である。長さや面積ではなく，結論に対する根拠を問う問題であるといえる。

表 3-5 より，正答率は 65.3%である。平行四辺形の同じ性質を利用する上記の図 3-3 と比較すると，正答率は 27.4%低い。図形の性質を利用して長さを求めることはできるものの，逆に，根拠の判断となる性質を答えることが不十分であるといえる。誤答内容を見ると，図形の性質として誤った選択肢である「**2** 平行四辺形は，4 つの辺の長さが等しいから」を選んだ児童の割合（3.1%）は，5 つの選択肢の中では最も低く，角度に関する性質の選択肢である「**4** 平行四辺形は，向かい合っている角の大きさが等しいから」を選んだ児童の割合（3.4%）は，次に低い。誤答の中では，辺に関する記述である「**5** 平行四辺形は，向かい合っている辺が平行だから」の平行四辺形の定義を選択した割合（19.9%）が最も高い。誤答の傾向としては，平行四辺形の定義，性質として

正しいものの中から，辺に関するものを選んでいるが，条件に適切なものを選択できていないことが読み取れる。このことから，平行四辺形の定義，性質は覚えられているが，それが図形の判断の根拠や理由として適応されるものであることへの認識が弱いといえる。長さや面積などを算出する練習問題の反復だけではなく，判断の根拠として図形の性質を確認したり，活用したりする練習が必要となる。また，このことは，中学校での論証，証明の問題の素地となる点で重要である。

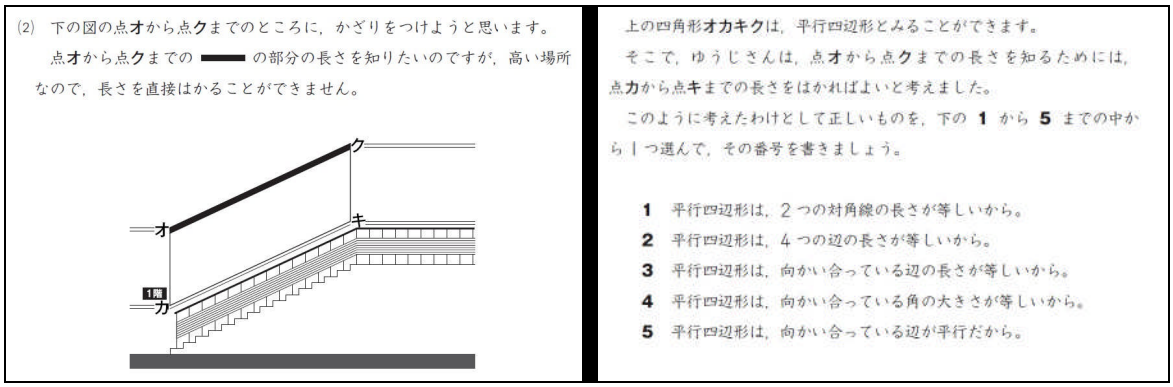


図 3-4　2009 年度　算数 B 1 (2)

表 3-5　図 3-4 の問題における解答率

解答	解答率
【正答】**3**	【正答率】65.3%
1	5.6%
2	3.1%
4	3.4%
5	19.9%
上記以外	0.6%
無解答	2.2%

次に，図形の操作・活用に関する問題を取り上げる。図 3-5 は，4cm×5cm の長方形に，2cm×1cm のカード敷き詰める 2 通りの方法と，敷き詰めに必要なカード数を問う問題である。複数の同じ形をした小さな図形を，大きな図形の構成要素と見なし，その配列を考えることが求められる。

表 3-6 より，正答率は 79.2%である。また，正答には至らなかったが，敷き詰め方の図を 1 通り以上描けた児童は，8.3%（「○図，×答え」1.8%，「△図（1 通りのみ），○答え」4.6%，「△図（1 通りのみ），×答え」1.9%）である。このことより，正答であった児童を含めて，87.5%の児童は，敷き詰め方を 1 つ以上描けたといえる。

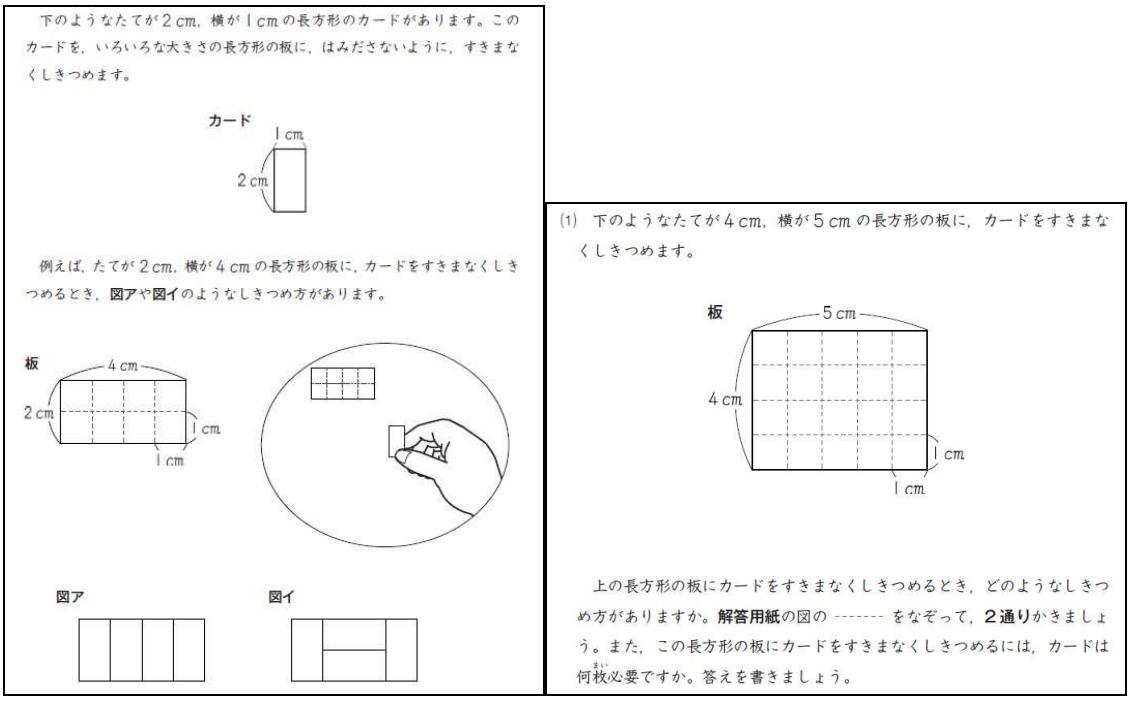


図 3-5　2009 年度 算数 B 4 (1)

表 3-6　図 3-5 の問題における解答率
（図は敷き詰め方，答えはカードの必要枚数を示す）

解答		解答率
【正答】	○図（2 通り），○答え	【正答率】79.2%
	○図（2 通り），×答え	1.8%
	△図（1 通りのみ），○答え	4.6%
	△図（1 通りのみ），×答え	1.9%
	上記以外	10.1%
	無解答	2.5%

一方，図 3-6 は，図 3-5 の続きとなっている問題[注 3]で，5cm×7cm の長方形に，2cm×1cm のカードを敷き詰められないことの理由を説明する問題である。2 つの図形の関係から，敷き詰められないことの判断となる客観的な根拠を示すことが求められる。

表 3-7 より，正答率は 56.3%である。カードの敷き詰め方を考える図 3-5 の問題の正答率と比較すると，22.9%低い（敷き詰め方を 1 つ以上描けた割合と比較すると，31.2%低い）。誤答内容を見ると，「無解答」が 17.4%と最も多く，誤答児童の約 40%を占める。また，面積に着目することが分かった児童（表 3-5「①」に該当）は，「無解答」の次に多く，11.5%であるものの，これらの児童も，どのように調べればよいかの判断方法を提示できるまでには至っていない。これらのことより，簡単な図形の具体的な操作はできるものの，複数の図形の特徴とその関係を踏まえて，論理的な判断を行うことに課題があると考えられる。

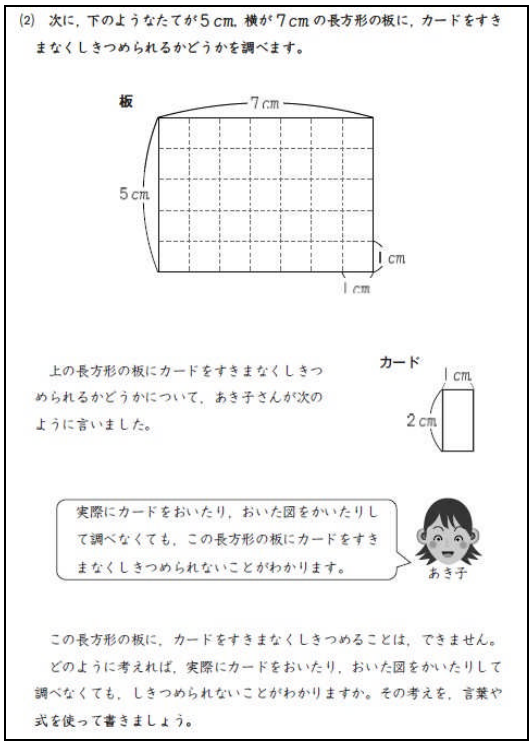


図 3-6　2009 年度 算数 B 4 (2)

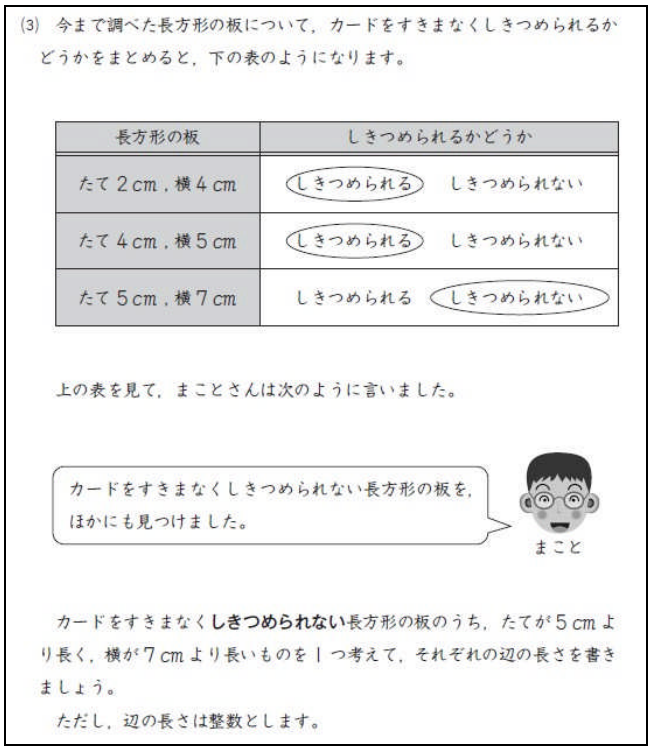
表 3-7　図 3-6 の問題における解答率

（①「何を」，②「どのように」調べ，③何を確かめるのか）

解答	解答率
【正答】①，②，③／①，②／①，③	【正答率】56.3%
②，③	0.3%
③	3.0%
②	0.5%
①	11.5%
上記以外	10.9%
無解答	17.4%

さらに，図 3-7 は，図 3-6 の続きとなる問題[注 4]で，敷き詰めの枠となる長方形の 2 辺の長さと，2cm×1cm のカードの敷き詰めの可否が示された表から，

カードを敷き詰められない場合の長方形の辺の組み合わせ（縦＞5cm，横＞7cm）を解答させる問題である。枠となる長方形の辺の長さと，敷き詰めるカードの辺の長さから,その関係と規則を読み取り,図形を構成できない場合を，条件に照らし合わせて，具体的に提示することが求められる。



(3)　今まで調べた長方形の板について，カードをすきまなくしきつめられるかどうかをまとめると，下の表のようになります。

長方形の板	しきつめられるかどうか
たて２cm，横４cm	（しきつめられる）　しきつめられない
たて４cm，横５cm	（しきつめられる）　しきつめられない
たて５cm，横７cm	しきつめられる　（しきつめられない）

上の表を見て，まことさんは次のように言いました。

カードをすきまなく**しきつめられない**長方形の板のうち，たてが５cmより長く，横が７cmより長いものを１つ考えて，それぞれの辺の長さを書きましょう。

ただし，辺の長さは整数とします。

図 3-7　2009 年度 算数 B 4 (3)

表 3-8 より，正答率は 49.0%であり，約半分の児童が正答できていない。また，図 3-6 の敷き詰められない場合の判断方法の説明を行う問題の正答率よりも 7.3%低い。すなわち，判断方法の説明は行えるが，条件に合わせた具体例を提示できていない児童がいることが指摘される。誤答内容を見ると，最も多いものが「偶数と偶数の組み合わせ」の 15.7%であり，次に多いものが「奇数と偶数の組み合わせ」の 12.3%である。面積（縦×横）が奇数とならなければならないことから，解答は「奇数と奇数」の組み合わせである必要があるが，誤答内容では，「偶数と偶数」，「偶数と奇数」の割合が高い。このことより，

図形の特徴から構成の可否をあらかじめ計画的に推測し，それを具体的に検証するという視点が弱いことに課題があるといえる。

表 3-8　図 3-7 の問題における解答率
（縦と横の辺の長さの組み合わせ（単位：cm））

解答	解答率
【正答】奇数と奇数の組み合わせ（縦＞5，横＞7）	【正答率】49.0%
5 と 7 の組み合わせ	4.5%
奇数と奇数の組み合わせ（上記以外）	9.1%
奇数と偶数の組み合わせ	12.3%
偶数と偶数の組み合わせ	15.7%
上記以外	0.4%
無解答	8.9%

3.3.　脳活動計測実験の概要

3.3.1.　調査結果の分析に基づく実験課題の設定

教育学の立場から脳活動計測実験における実験課題を設定するために，上記では，全国学力・学習状況調査の算数科の結果をとおして，「数と計算」領域，「図形」領域それぞれについての児童の実態と検討課題を分析してきた。先行研究の知見を踏まえ，検討課題をまとめると，次の 4 点が挙げられる（町田 1978，横地 1980，横地 2001，菊池 2007）。

(1) 決められた手順に沿って行う単純な計算問題に比べ，演算構造やアルゴリズムを問うような，手順が一様ではなく，判断を伴う問題に課題がある。

(2) 式の中が全て数値で，一般的な答えを問う問題に比べ，文字式を含めた，変数の考えを用いる問題に課題がある。

(3) 長さをはじめとして，図形内の具体的な数値を求める問題に比べ，その根

拠や理由として図形の性質を考える問題に課題がある。

(4) 簡単な図形の具体的な操作や，試行錯誤による図形の操作よって解決できる問題に比べ，各図形の性質を踏まえて規則を見つけだし，それらをもとに論理的に予想や計画を立てて解決する問題に課題がある。

これらの「数と計算」領域，「図形」領域の検討課題を概観すると，共通点として，機械的な手順の体得や反復練習などによって，答えを求めることができても，答えまでのプロセスの表現や，そこでの関係性を理解することが不十分であることが挙げられる。したがって，教育学の視点から脳活動計測の実験課題を設定するならば，次の点を踏まえた課題を設定する必要がある。

(1)「数と計算」領域：一般的な計算問題の答えを求めさせるだけではなく，計算過程や演算構造を，文字式の形式を用いて考えさせる。

(2)「図形」領域：長さ，面積，体積などを求めさせたり，試行錯誤の操作で解決させたりせず，図形の性質を用いて論理的に図形の構成を考えさせる。

3.3.2.　第 5 章から第 8 章における脳活動計測実験

第 5 章から第 8 章における脳活動計測実験においては，上述の内容を踏まえた「数と計算」領域と「図形」領域に関する実験課題を設定する（以下，「計算問題」，「図形問題」と記す）。また，実験環境としては，学習者が 1 人で学習を行う場面を想定した「個別学習場面」，教師から助言を与えられる中での学習場面を想定した「ヒント提示場面」の 2 つを設定し，それぞれの場面において，計算問題と図形問題を行う。図 3-8 は，図 1-1 で示した研究段階と対応させ，第 5 章から第 8 章までの実験概要を記したものである。計算問題と図形問題の内容とその特徴をまとめると以下のようになる。なお，各章の実験では，大学生を基礎実験，小学生を主実験に位置づけている。

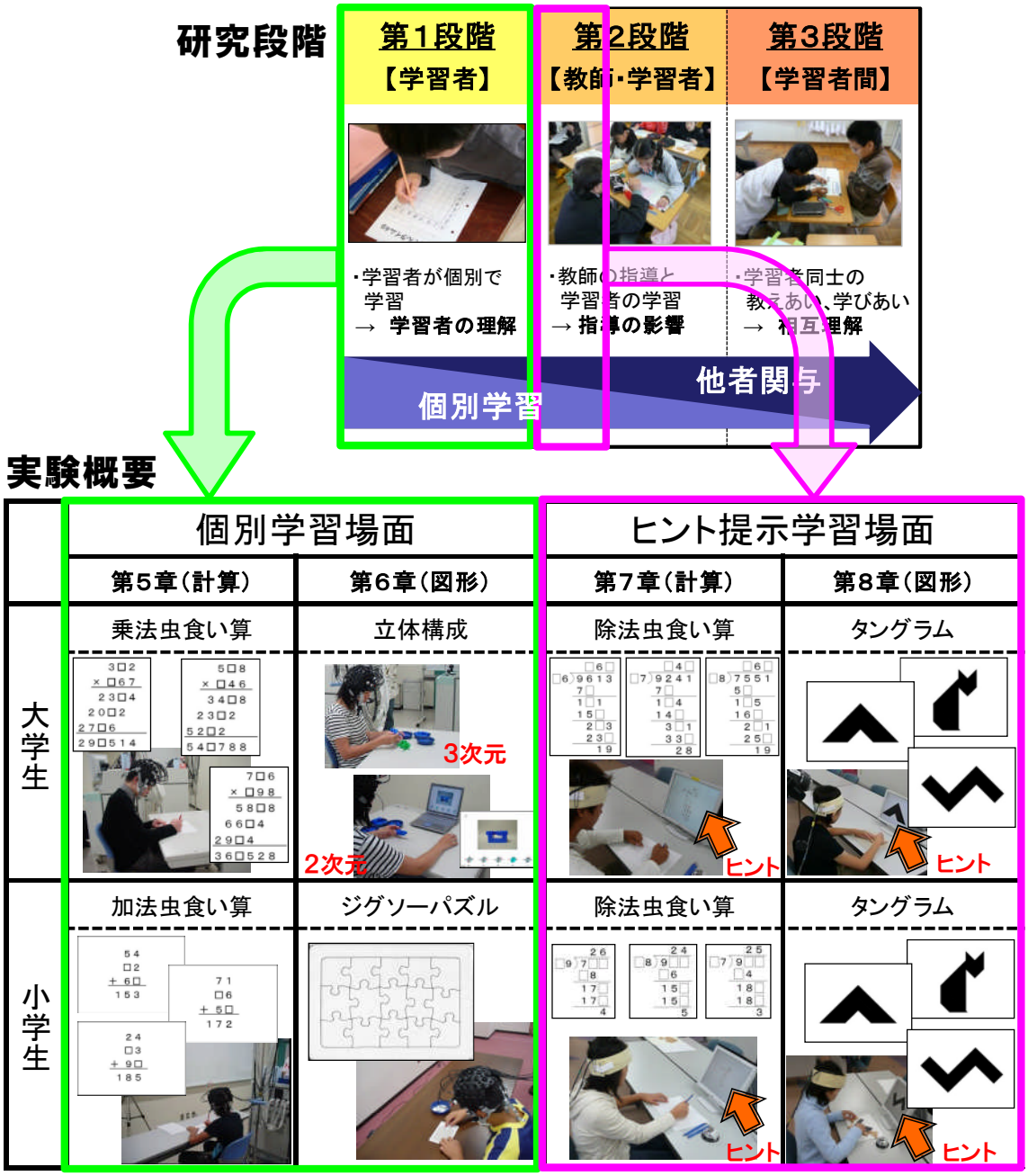


図 3-8　第 5 章から第 8 章における実験課題と実験環境の設定

(1)計算問題（第 5 章・第 7 章）：「虫食い算」を計算問題として設定する。虫食い算とは，計算過程の空欄に適切な数字を埋める問題である。一般的な計算のように一定の手順を遂行するのではなく，演算構造を考え，周囲の数字から適切な数字を算出する必要がある。また，解答部分が□の形式で表示されていることより，文字式の要素を含めるものであるといえる。具体的に，

第 5 章では，大学生に乗法の虫食い算を，小学生に加法の虫食い算を設定する。また第 7 章では，大学生，小学生とも除法の虫食い算を設定する。

(2) 図形問題（第 6 章・第 8 章）：「図形の構成」を図形問題として設定する。図形の構成とは，見本と同じ平面図形や立体図形を作製する問題である。面積や体積の求積などの公式によって答えを求める問題ではなく，各図形の性質や合同などを考えながら，順序だてて論理的に解決する必要がある。具体的に，第 6 章では，大学生にブロックを用いた立体構成を，小学生にジグソーパズルを設定する。第 7 章では，大学生，小学生とも，タングラム[注 5]を用いた図形構成を設定する。

【参考文献】

市川伸一（2009）「全国学力テストで何が変わったか」現代教育科学，No.638（2009/11），明治図書，東京：5-7

菊池乙夫（2007）「調査結果の分析・評価・説明責任は学力保障の視点で」現代教育科学，No.611（2007/8），明治図書，東京：58-61

国立教育政策研究所 教育課程研究センター（2005）「平成 15 年度小・中学校教育課程実施状況調査結果の概要」（http://www.nier.go.jp/kaihatsu/katei_h15/H15/03001000000007001.pdf）（2009 年 11 月 12 日現在）

黒田恭史（2008）「算数・数学教育内容の再構築 ： 全国学力・学習状況調査を活かすためには」教育学研究，Vol.75，No.2：169-179

黒田恭史，岡本尚子（2007）「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発表論文集：9-12

町田彰一郎（1978）「数と計算における意味と形式について」数学教育学会研

究紀要，Vol.19 / No.1･2：22-37

Mullis, I.V.S., Martin, M.O., and Foy, P. (2008) “TIMSS 2007 International Mathematics Report” TIMSS & PIRLS International Study Center, Boston College, Massachusetts (http://timss.bc.edu/timss2007/PDF/TIMSS2007_InternationalMathematicsReport.pdf)（2009 年 11 月 12 日現在）

OECD (2007) “PISA 2006 Science Competencies for Tomorrow’s World Volume 1 – Analysis” OECD, Paris

田中耕治（2009）「学力の実態分析から授業改善へ」現代教育科学，No.638（2009/11），明治図書，東京：8-10

横地清（2001）「数学教育学の形成について」数学教育学誌，Vol.42，No.1･2：17-25

横地清 編（1980）「数学教育学序説 上」ぎょうせい，東京

【注】

１）国立教育政策研究所　全国学力・学習状況調査

2007 年度調査問題，調査結果（2009 年 11 月 12 日現在）

http://www.nier.go.jp/tyousa/mondai.htm

http://www.nier.go.jp/tyousakekka/tyousakekka.htm

2008 年度調査問題，調査結果（2009 年 11 月 12 日現在）

http://www.nier.go.jp/08tyousa/08mondai.htm

http://www.nier.go.jp/08chousakekka/index.htm

2009 年度調査問題，調査結果（2009 年 11 月 12 日現在）

http://www.nier.go.jp/09chousa/09mondai.htm

http://www.nier.go.jp/09chousakekka/index.htm

２）図 3-2 の全国学力・学習状況調査による領域の分類は「数量関係」である。

３）図 3-5 の全国学力・学習状況調査による領域の分類は「数と計算」，「数量関係」である。

４）図 3-6 の全国学力・学習状況調査による領域の分類は「数と計算」，「数量関係」である。

５）タングラム：別名，知恵の板，またはタンゲームともいう。正方形の板を切って，三角形 5 個，正方形 1 個，平行四辺形 1 個の計 7 個に分けた小片を様々な形に並べる中国のパズルである。

第４章　非侵襲的脳活動計測装置の特徴

要約

非侵襲的な脳活動計測装置の開発が，神経科学と教育学の学際的研究への道を開く大きな契機の１つとなったが，各装置の特性により，教育研究での利用可能性は異なる。

そこで，本章では，脳活動計測装置について教育研究の利用可能性の観点から比較を行う。これを踏まえて，本研究において用いる近赤外分光法による光計測装置の特徴について言及する。

4.1.　非侵襲的脳活動計測装置の比較

1990 年代以降，fMRI（functional Magnetic Resonance Imaging），近赤外分光法による光計測装置（以下，光計測装置と記す）など，複数の非侵襲的脳活動計測装置が臨床実験の場に普及した（Ogawa et al. 1990，Chance et al. 1993）。非侵襲的に計測が可能という特徴により，診断や治療に結びつく研究から認知や思考を対象とした研究で使用されるようになり，教育研究においても利用可能性が高まった。ただし，こうした装置は，当初，医療機器として開発されたものであり，とりわけ，教育研究における利用のしやすさという視点から見た場合，医療使用とは異なる特性を持つ。

表 4-1 は，教育研究での使用可能性，教育への応用可能性の観点から，重要であると考えられる 10 項目を挙げ，主要な非侵襲的脳活動計測装置として，fMRI，PET（Positron Emission Tomography），MEG（Magneto Encephalo Graphy），光計測装置，EEG（Electroencephalo- gram）の 5 種類の比較を行ったものである。各項目の一般的な特徴を記すと次のようになる（武田 2003，小川・上野 2007）。

・購入費用，維持費用：fMRI，PET，MEG は，購入に億単位，維持に数千万単位の費用がかかる一方，光計測装置や EEG は数百万円程度から数千万円で購入でき,維持費も廉価であるため,購入や維持が比較的容易である。

・装置可動性：fMRI，PET，MEG は，装置自体を移動させることは困難であるが，光計測装置，EEG は実験室や教室などに移動可能である。

・非侵襲性：いずれの装置も非侵襲に計測が可能な装置であるが，PET は計測前に薬剤の投与が必要である。また，PET は，次回の計測までに，約半年から 1 年の期間をあける必要がある。

・非拘束性：fMRI，PET，MEG は，基本的に仰臥状態での計測であるが，光計測装置，EEG は通常姿勢（着席姿勢，筆記姿勢など）での計測が可能である。とりわけ，光計測装置は，多少の動きが伴う計測も可能である。

・検査着への更衣： fMRI，PET，MEG（とりわけ，MEG）は，計測時に検査着への更衣が必要となる場合があるが，光計測装置，EEG は，通常着衣しているもので計測が可能である。

・静音性：fMRI は計測音が大きいが，PET，MEG，光計測装置，EEG はほとんど計測音がない。

・他者入室：fMRI，PET，MEG の場合，計測中，計測室に被験者以外が入室することは困難であるが，光計測装置，EEG は，被験者以外の他者が同室し，被験者と対話することも可能である。

・空間分解能：fMRI の空間分解能が高く，より深部の計測も可能である。光計測装置は，頭皮から比較的浅い部分の計測である。

・時間分解能：MEG の時間分解能が極めて高い。光計測装置，EEG は，時系列における連続的な計測が可能である。

これらより，教育研究においては，光計測装置と EEG が利用しやすいことが分かる。

表 4-1　教育研究における活用の視点から見た脳活動計測装置の比較

	fMRI	PET	MEG	光計測装置	EEG
購入費用（廉価さ）	△	△	△	◎	◎
維持費用（廉価さ）	△	△	△	◎	◎
装置可動性	△	△	△	◎	◎
非侵襲性	◎	○	◎	◎	◎
非拘束性	△	△	△	○	○
検査着への更衣の不必要性	○	○	△	◎	◎
計測時の静音性	△	○	◎	◎	◎
計測室への他者入室	△	△	△	◎	◎
空間分解能	mm	mm	cm	cm	cm
時間分解能	sec	min	msec	msec	msec

ただし，一般的な脳機能計測実験では，fMRI，PET，MEG は，深部の計測が可能であることや空間分解能，時間分解能が大変優れていることなどの利点から，信頼性の高い装置として高頻度で用いられている。さらに，医療においては有用性が高く，たとえば，PET はアルツハイマー病や癌，MEG はてんかんの診断などに，実用的に用いられている（伊藤 2008, Drzezga 2009, Vikram and Iyer 2008，野守 2009，Paulini et al. 2007，白石 2008）。

また，こうした装置に関連して，MRI は，圧迫感や計測音が軽減された開放型の装置の開発が進み，立位姿勢や座位姿勢での計測が可能な装置もあることから，fMRI への応用が期待されている（Harada et al. 2005，松浦他 2002，坂口 2002a，坂口 2002b，矢部他 2003）。PET についても，圧迫感の少ない開放型の装置の開発が進められている（Yamaya et al. 2008）。これらは，計

測時の患者の負担軽減や，手術室での検査など，医療での問題を解決するための開発であるが，教育研究での使用可能性の高まりにつながるものであるといえる。

4.2. 光計測装置・EEG・ fMRI の研究動向

教育学の観点からは，光計測装置と EEG の使用可能性が高いことを既述したが，これらの装置は開発や普及の時期が異なり，研究動向が異なると考えられる。そこで，以下では，光計測装置と EEG とともに，近年の脳活動計測研究において，多く用いられている fMRI を加え，3 つの装置の研究動向を概観し，その特徴について言及する。

図 4-1 は，科学・技術・医学・社会科学分野に関わる英語論文のデータベースである Science Direct [注 1] を用い，2000 年から 2009 年までの 10 年間における，光計測装置，EEG，fMRI のヒトの脳に関する論文数の推移を調べた結果である（2009 年 11 月 26 日現在）。検索語として，光計測装置については“NIRS, brain, human”を，EEG については“EEG, brain, human”を，fMRI については“fMRI, brain, human”を用いた。光計測装置の検索語にある NIRS とは，近赤外分光法の英名である Near Infra-Red Spectroscopy を示している。縦軸が論文数（本）を，横軸が西暦（年）を表し，図中の実線が“NIRS, brain, human”，破線が“EEG, brain, human”，点線が“fMRI, brain, human”の検索結果を示している。なお，縦軸の目盛りは 1000 本ごとであるが，EEG，fMRI に比べて NIRS の論文数が少ないため，NIRS のみ，縦軸を 0 から 200 本としたグラフを右に作成した。

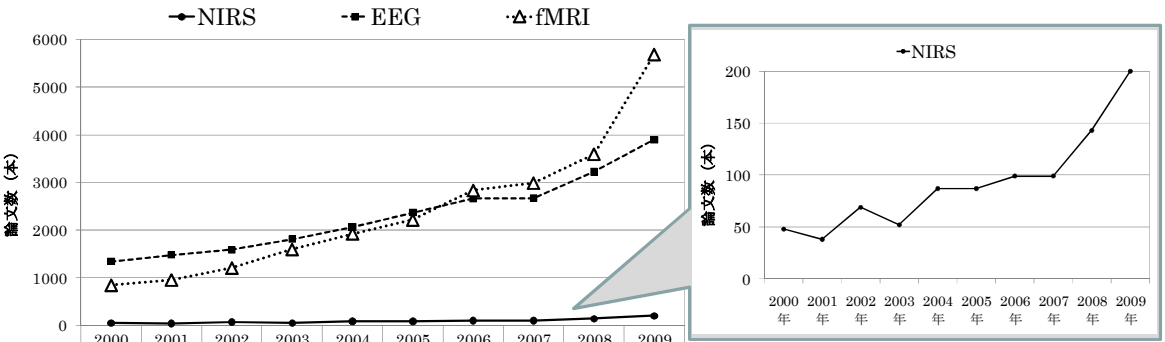


図 4-1　NIRS，EEG，fMRI の論文数の推移
（2009 年は 11 月 26 日まで）

図 4-1 より，2000 年から 2009 年の 10 年間の論文数は，NIRS に比べて，EEG，fMRI が大幅に多い。10 年間の論文総数を比較すると，EEG は NIRS の約 25 倍（EEG：230108 本，NIRS：922 本），fMRI は NIRS の約 26 倍（fMRI：23823 本，NIRS：922 本）である。EEG の論文数が多い要因は，NIRS よりも開発と普及の時期がはやく，すでに医療における診断で用いられていたことが考えられる。一方，fMRI と NIRS は概ね同じ時期に普及が始まったといえるが，fMRI の論文数が多い要因としては，すでに MRI が多くの病院に導入されていたことや，fMRI のデータ分析，解釈の方法について一定の確立がなされ，合意が得られている部分が大きいことが考えられる。

また，10 年間での変化を見るといずれの装置についても増加が見られる。2000 年と 2009 年の論文数を比較すると，増加の割合が多いものから，fMRI（6.7 倍），NIRS（4.1 倍），EEG（2.9 倍）となり，fMRI の増加が顕著である。2000 年から 2005 年では，EEG が fMRI より論文数が多いものの，2006 年以降は逆転し，fMRI の方が多くなっていることからも fMRI の急速な拡大が読み取れる。

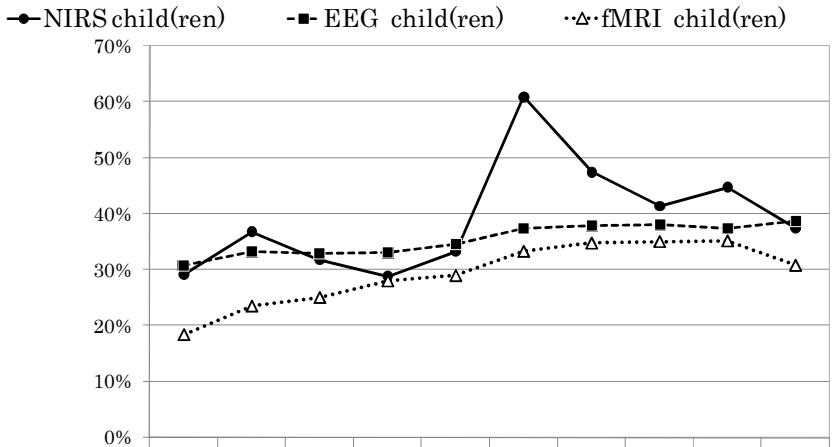
ただし，各装置の推移を見ると，光計測装置と EEG は 2007 年からの増加数が，10 年間で最も顕著である。fMRI についても，2008 年から 2009 年にかけての増加が最大になっていることを併せると，ヒトの脳機能を対象とした研究が，近年，急速に進展しており，その中で，光計測装置や EEG についても脳計測装置の１つとして拡大していることが予想される。反応，記憶といった脳機能のみならず，学習や理解などのより高次な脳機能や，より日常に近い行為時における脳機能の解明を目指す動きが高まってきていることを反映していると考えられる。

図 4-2 は，図 4-1 で用いた検索語に“child(ren)”を加えた“NIRS, brain, human, child(ren)”,“EEG, brain, human, child(ren)”,“fMRI, brain, human, child(ren)”の語を用いて検索を行い，その数が図 4-1 の論文数に占める割合を示したものである（2009 年 11 月 26 日現在）。

図 4-2 より，いずれの装置も child(ren)が含まれる論文数の割合は 10 年間で増加傾向にあり，2000 年と 2009 年を比較すると，NIRS は 9%，EEG は 8%，fMRI は 13%の増加となっている。増加幅は，fMRI が最も大きいが，fMRI は，いずれの年においても child(ren)が含まれる論文の割合が 3 つの装置の中で最も少ない。10 年間の論文総数に対して child(ren)が含まれる割合を算出すると，NIRS が 41%，EEG が 36%，fMRI が 31%となり，NIRS が最も多いことが分かる。

これらのことより，脳活動計測に関する研究において，子どもへの言及が増えてきているが，とりわけ，計測装置としては光計測装置が，より子どもに対する活用可能性が高いといえる。実際，近年では，光計測装置を用いて乳児の脳活動計測を行った研究報告が増えてきている（Bortfeld et al. 2007，Otsuka et al. 2007，Taga et al. 2007，Watanabe et al. 2008）。そこで，本研究では，小学生を対象とした実験を実施するため，脳活動計測装置として光計測装置を

用いることとする。



	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年
NIRS child(ren)	29%	37%	32%	29%	33%	61%	47%	41%	45%	38%
EEG child(ren)	31%	33%	33%	33%	35%	37%	38%	38%	37%	39%
fMRI child(ren)	18%	23%	25%	28%	29%	33%	35%	35%	35%	31%

図 4-2　NIRS，EEG，fMRI の論文（図 4-1）のうち child(ren)が含まれる論文数の割合の推移（2009 年は 11 月 26 日まで）

4.3.　近赤外分光法による光計測装置

光計測装置は，近赤外光の生体への透過性を利用して，ヘモグロビン濃度変化を算出できる装置である。つまり，近赤外光を頭皮から照射し，それが脳内を通過することによって，どの程度減衰したのかの値をもとに，ヘモグロビン濃度変化を算出している。以下では，光計測装置の原理を概観する。

4.3.1.　光計測装置で使用される近赤外光

光計測装置で使用される近赤外光は，一般的に 750 nm から 1200nm の範囲の近赤外光が対象である。通常，近赤外光とは 750 nm から 2500nm の光を指すが，生体計測においてはおよそ 750 nm から 1200nm を対象としている。これは，この範囲の波長の光が生体を通過しやすいためである。すなわち，光計測装置は，光が生体を通過することによってどの程度減衰したかを計測するた

め，光が生体を通過できなければならない。生体において光を吸収する物質の光吸収が小さくならなければならないわけである。生体計測において，主に光を吸収する物質は，ヘモグロビンと水である。そのため，本装置では，ヘモグロビンと水の双方での光吸収が小さい領域の光を使用しており，それが近赤外光（750 nm から 1200nm）に該当する。具体的には，400 nm から 800nm が水の光吸収は少ないがヘモグロビンの光吸収が大きく，1200 nm から 10000nm がヘモグロビンの光吸収が少なく，水の光吸収が大きいため，およそ 750 nm から 1200nm が適切な範囲となる。

本研究においては光計測装置として，図 4-3 に示した島津製作所製の OMM-3000（第 5 章・第 6 章）と，浜松ホトニクス製の NIRO-200（第 7 章・第 8 章）を使用するが，前者の OMM-3000 は 780nm，805nm，830nm の 3 波長[注 2]を，後者の NIRO-200 は 775nm，810nm，850nm の 3 波長[注 3]を採用している。両者とも 750 nm から 1200nm の範囲の波長となっていることが分かる。装置によって波長は異なり，必ずしもこの範囲にあるとは言い切れないが，光計測装置には基本的に 750 nm から 1200nm 付近の近赤外光が用いられている。

図 4-3　本研究で使用する光計測装置
（左：OMM-3000（島津製作所），右：NIRO-200（浜松ホトニクス））

4.3.2.　ヘモグロビン濃度変化の算出

光計測装置は，近赤外光が脳内を通過することによって，どの程度減衰したのかという吸光度（Absorbance：Abs）変化の計測値をもとに，ヘモグロビン濃度変化を Modified Lambert Beer の法則に則って算出している（江田 2001）。

まず，吸光度とは，光が物質を通過することによって，物質の種類，濃度，量に伴い，ある一定のパラメータに従って吸収される度合いを数値化したものを指す。光計測装置では，照射プローブと受光プローブを計測部位に装着することにより，プローブ間の吸光度を計測できる。図 4-4 に，OMM-3000（島津製作所）と NIRO-200（浜松ホトニクス）のプローブを示した。装着にあたっては，近赤外光が皮下 2cm から 3cm まで到達するよう，照射プローブと受光プローブ間に約 3cm が必要とされる。

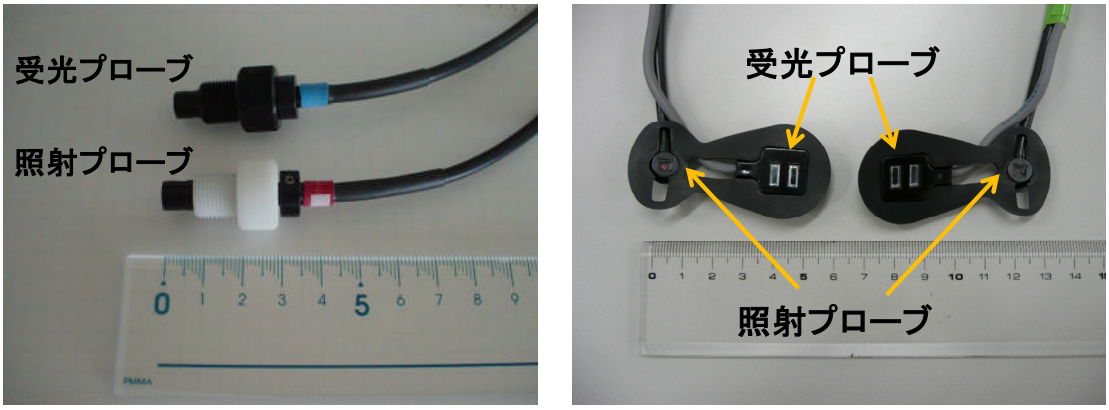


図 4-4　光計測装置の照射プローブと受光プローブ
（左：OMM-3000（島津製作所），右：NIRO-200（浜松ホトニクス））

次に，ヘモグロビン濃度変化を算出する際に用いられる Modified Lambert Beer の法則とは，Lambert Beer の法則を拡張したものである。拡張前の Lambert Beer の法則は，照射光（*I0*）と検出光（*I*）との強度比を対数にした値を吸光度（Abs）とするとき，光が透明体の物質に入射すると，吸光度（Abs）

が吸収濃度（C）と光路長（d）の積に比例して増加するという法則であり，以下の式に表される。

$$\mathrm{Abs} = -\log(I/I0) = \varepsilon\, \mathrm{Cd}$$

これを拡張させた Modified Lambert Beer の法則は，ヘモグロビンの絶対量ではなく，相対量を測定するための方法であり，生体組織を通過することによる様々な不確定要素を勘案している。Lambert Beer の法則における検出光（I）は光の強度変化（ΔI）に，吸光度（Abs）は吸光度変化（ΔA）に，光路長（d）は平均光路長（＜d＞）に，濃度（C）は濃度変化（ΔC）になり，これに散乱変化（ΔS）を加えて，次のように式化される。

$$\Delta \mathrm{A} = -\log(\Delta I/I_0) = \varepsilon\, \Delta \mathrm{C} \langle \mathrm{d} \rangle + \Delta \mathrm{S}$$

光計測装置によって算出されるヘモグロビンの種類は，酸素化ヘモグロビン（oxygenated hemoglobin；以下，oxyHb と記す），脱酸素化ヘモグロビン（deoxygenated hemoglobin;以下,deoxyHb と記す）の 2 種類[注 4]であるため，上記の式を用いて 2 変数を一意に求めるには 2 式以上が必要となる。そこで，光計測装置は 2 つ以上の波長を用いることで，2 式以上を設定している。

4.3.3. ヘモグロビン濃度変化の分析時における留意点

光計測装置によって算出されるヘモグロビン濃度変化の種類は，酸素を有した oxyHb と，酸素を放出した deoxyHb であるが，これらのヘモグロビン濃度変化は，相対変化量であるため，データの分析にあたっては，実験開始時や特定の時点などを 0 とするベースライン補正が行われる。ベースラインの設定には，実験開始時の値を 0 次関数として設定するものや，実験開始時と終了時の値を結び 1 次関数として設定するものなど，いくつかの方法があるが，本来の波形を損なわない方法を用いることが重要である（Eda et al. 2005，黒田 2007）。加えて，ヘモグロビン濃度変化は相対変化であり，ベースライン補正

を行っていることから， oxyHb，deoxyHb を同じグラフ内に示した場合，両者の量としての大小関係をグラフの数値から単純に比較できないことに留意が必要である。

また，本研究において使用する光計測装置である OMM-3000（島津製作所）と NIRO-200（浜松ホトニクス）は，設定されているヘモグロビン濃度変化の単位が異なる。OMM-3000 は mM・mm（ミリモーラー・ミリメートル），NIRO-200 は μmol/L（マイクロモル／リットル）を設定している。数値としては概ね，OMM-3000 が 0±0.1，NIRO-200 が 0±10 の間に収束するが，両者の間に 100 倍，1/100 の関係があるわけではなく，互いに数値として比較することはできない。これは，それぞれが計測に使用している近赤外光の波長や，ヘモグロビン濃度変化の算出に用いる式の定数が異なることによる。ただし，いずれの装置も近赤外光を用いて吸光度変化を計測し，Modified Lambert Beer の法則に則ってヘモグロビン濃度変化を算出している。数値としての比較はできないが，波形としての変化は比較可能であるといえる。

【参考文献】

Bortfeld, H., Wruck, E. and Boas, A. D. (2007) “Assessing infants' cortical response to speech using near-infrared spectroscopy” *NeuroImage,* Vol.34: 407-415

Chance, B., Zhuang, Z., Unah, C., Alter, C. and Lipton, L. (1993) “Cognition-activated low-frequency modulation of light absorption in human brain” *Neurobiology*, Vol. 90: 3770-3774

Drzezga, A. (2009) “Diagnosis of Alzheimer's disease with [18F] PET in mild and asymptomatic stages” *Behavioural Neurology*, Vol.21, No.1-2: 101-115

江田英雄（2001）「21 世紀の科学をつくるー脳の謎に挑む６　～光計測で脳活動をみる～」，数理科学，No.461：76-83

Eda, H., Kuroda, Y., Maesako, T. and Sugai, K. (2005.1.11.申請) “Body Activity Measurement Device” U.S.A. Patent No. 7,386,335 (2008.6.10. 承認)

Harada, K., Tsubouchi, K., Chiba, T. and Fujie, G. M. (2005) “ Manipulators for intrauterine fetal surgery in an Open MRI – report on first prototype” *International Congress Series*, Vol.1281: 1365

伊藤健吾（2008）「PET/SPECT によるアルツハイマー病の診断を目的とした臨床試験」臨床放射線，Vol.53 No.7，金原出版，東京：885-892

黒田恭史（2007）「脳科学の算数・数学教育への応用」ミネルヴァ書房，京都

松浦博満, 野口景司, 椎名勝也（2002)「被検者・検者にやさしいオープン MRI」*Radiology Frontier,* Vol.5, No.1: 67-70

野守裕明(2009)「肺癌をみつける-PET 診断の意義」臨牀と研究, Vol.86 No.7, 大道学館出版部，福岡：840-848

Ogawa, S. , Lee, T. M. , Kay, A. R. and Tank, D.W. (1990) “Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87(24):9868-72

小川誠二，上野照剛 監修（2007）「非侵襲・可視化技術ハンドブック～ナノ・バイオ・医療から情報システムまで～」エヌ・ティー・エス，東京

Otsuka, Y., Nakato, E., Kanazawa, S., Yamaguchi, K. M., Watanabe, S. and Kakigi, R. (2007) “Neural activation to upright and inverted faces in infants measured by near infrared spectroscopy” *NeuroImage,* Vol.34:

399-406

Paulini, A., Fischer, M., Rampp, S., Scheler, G., Hopfengärtner, R., Kaltenhäuser, M., Dörfler, A., Buchfelder, M. and Stefan H. (2007) “Lobar localization information in epilepsy patients: MEG - a useful tool in routine presurgical diagnosis” *Epilepsy Research*, Vol.76, No.2-3: 124-130

坂口義博（2002a）「垂直型オープン MRI 装置における立位撮像用傾斜台の有用性の検討」日本放射線技術学会雑誌 第 30 回秋季学術大会一般研究発表予稿集：1187

坂口義博（2002b）「座位脊髄 MRI 撮像法の検討」日本放射線技術学会雑誌 第 30 回秋季学術大会一般研究発表予稿集：1187-1188

白石秀明（2008）「目でみるてんかん MEG の新しい解析法」Epilepsy，Vol. 2 No.2，メディカルレビュー社，大阪：84-86

Taga, G., Homae, F. and Watanabe, H. (2007) “Effects of source-detector distance of near infrared spectroscopy on the measurement of the cortical hemodynamic response in infants” *NeuroImage,* Vol.21: 1204-1214

武田常広 著，電子情報通信学会 編（2003）「脳工学」コロナ社，東京

Vikram, R. and Lyer, R.B. (2008) “PET/CT imaging in the diagnosis, staging, and follow-up of colorectal cancer” *Cancer Imaging*, Vol.8, Suppl A: S46-51

Watanabe, H., Homae, F., Nakano, T. and Taga, G. (2008) “Functional activation in diverse regions of the developing brain of human infants” *NeuroImage,* Vol.43: 346–357

矢部京之助，大築立志，笠井達哉 編集（2003）「入門運動神経生理学：ヒト

の運動の巧みさを探る」市村出版，東京

Yamaya, T., Inaniwa, T., Minohara, S. and Yoshida, E. (2008) “A proposal of an open PET geometry” *Physics in Medicine and Biology*, Vol.53: 757-773

【注】

１）Science Direct

http://www.sciencedirect.com/（2009 年 11 月 26 日現在）

２）株式会社島津製作所 OMM-3000

http://www.med.shimadzu.co.jp/products/om/qa03.html#03（2009 年 11 月 26 日現在）

３）浜松ホトニクス株式会社 NIRO-200

http://jp.hamamatsu.com/resources/products/sys/pdf/jpn/niro200.pdf（2009 年 11 月 26 日現在）

４）oxyHb と deoxyHb の総和である総ヘモグロビン（total hemoglobin）を求める場合もある。

第５章　「個別学習場面」における「計算」問題解決過程のヘモグロビン濃度変化

要約

学習者が１人で行う学習を想定した「個別学習場面」における「計算」問題解決過程の脳内ヘモグロビン濃度計測を行い，問題解決過程の特徴がどのようにヘモグロビン濃度変化に反映されるのかを検討する。第１節では大学生を対象に乗法の虫食い算を，第２節では小学生を対象に加法の虫食い算を実験課題に設定する。

5.1.　大学生を対象とした実験

5.1.1.　実験目的

本実験の目的は，小学生を対象とする実験の基礎実験として，大学生を対象に計算問題解決時の脳内ヘモグロビン濃度計測を実施し，問題解決過程における特徴がどのように反映されるのかを明らかにすることである。計算問題として，既知の手順に沿うことで解決が可能な「筆算」と，演算構造を考えながら解決方法を導出する必要がある「虫食い算」を設定した。具体的な達成項目として次の３点を設定する。

(1) 筆算と虫食い算の特性の違いを踏まえ，正誤，所要時間，事後の感想から，両問題について，解決過程の特徴を考察する。

(2) oxyHb（oxygenated hemoglobin）と deoxyHb（deoxygenated hemoglobin）の変化を上記の結果と照合し，問題解決時の特徴がどのようにヘモグロビン濃度変化に反映されるのかを，両問題の比較を併せて検討する。

(3) 小学生を対象とした実験に向けて，計算問題の演算の種類，桁数，問題数，時間設定などの改良すべき点を検討する。

5.1.2.　実験方法

(1)　実験環境

本実験は，被験者ごとに単独で実施した。実験者は，課題の遂行状況の観察者（実験の説明と問題用紙の差し替えを含む）と，機器操作者の 2 名とした。実験に際しての阻害要因はなく，被験者は課題に専念できる環境であった。

(2)　実験概要

実験期間：2005 年 12 月～2006 年 6 月のうち 12 日間

実験場所：立命館大学内実験室

被験者：考察対象は大学生 9 名（男性 4 名，女性 5 名；20 歳～25 歳，平均 21.2 歳(標準偏差 1.75)）とした。実験は大学生 12 名を対象に実施したが，データが不安定であった 3 名を考察対象外とした。

事前に，実験遂行における安全性と実験結果の扱いに関して説明を行い，実験の遂行とその結果の発表について被験者から文書で同意を得た。

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んだ。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した（図 5-1）。

光計測装置：OMM－3000（島津製作所製）

計測部位：前頭前野を中心に 13 箇所とした。プローブは，前額部を覆うように，格子状に 10 箇所配列し，13 箇所（1～13 チャンネル(以下，CH と記す)）を計測できるように設定した（図 5-2）。各プローブ間の距離は 3cm であった。前頭前野を計測の対象部位としたのは，毛髪によるノイズが少ないこと，思考や判断などの高次な活動を司るとされていることによる。

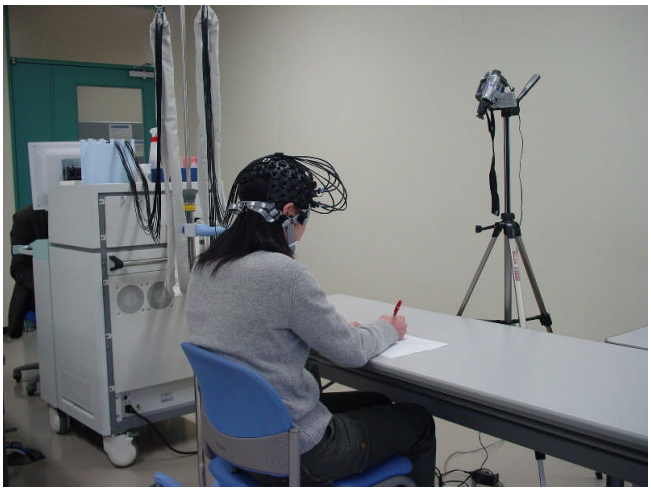


図 5-1　実験遂行場面

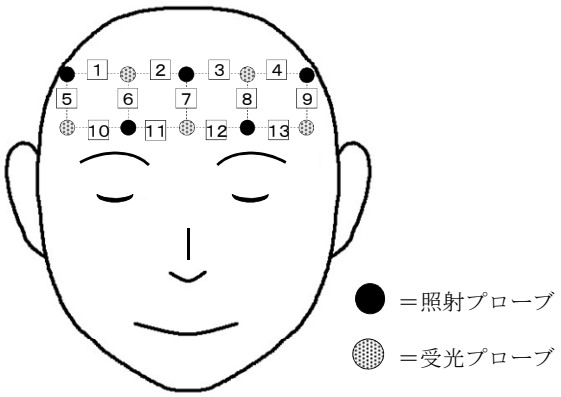


図 5-2　光計測装置のプローブの装着図（数字は CH を表す）

(3)　実験課題

実験課題は計算問題として，乗法の筆算，乗法の虫食い算を設定した（岡本・黒田 2005, 岡本・黒田 2006a, 岡本 他 2006a, 岡本 他 2006b, 岡本 他 2006c, 黒田・岡本 2007a）。筆算は，虫食い算との比較を行うための問題である。課題全体としては，筆算 3 試行（筆算①～筆算③）の後，虫食い算 3 試行（虫食い算①～虫食い算③）を行う合計 6 試行とし，その遂行順序を図 5-3 に図示した。

筆算は 1 試行につき 5 問，虫食い算は 1 試行につき 1 問を設定した。これは，

脳活動計測を伴わない予備実験において，筆算 5 問の所要時間が，解決方法を導き出す必要がある虫食い算①の解決時間と概ね同様となる傾向にあったためである。

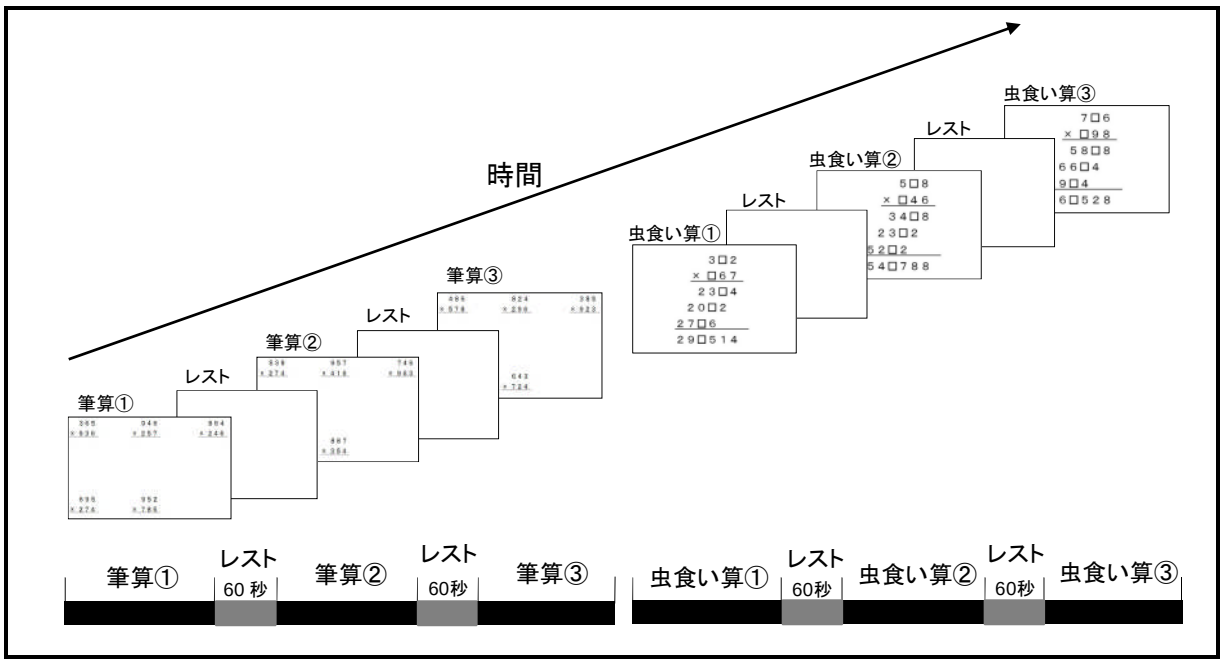


図 5-3　実験課題遂行順序

図 5-4，5-5 は，筆算の 1 試行目（筆算①），虫食い算の 1 試行目（虫食い算①）を示したものである。問題の難度の統一を図るため，筆算，虫食い算とも，それぞれの問題を 3 桁×3 桁＝6 桁とし，計算途中の桁数や繰り上がりの場所をそろえた。また，虫食い算の空欄数は 3 試行とも 6 つとし，空欄の位置も同一とした。問題の桁数，繰り上がりの場所，空欄の位置などは，予備実験により調節を行って決定したものである。問題用紙は，筆算，虫食い算の全てを A4 サイズ横置きとし，筆記により解答させることとした。思考過程や解決過程が紙上に残るよう，消しゴムの使用は禁止し，修正は取り消し線により行うように指示を行った。

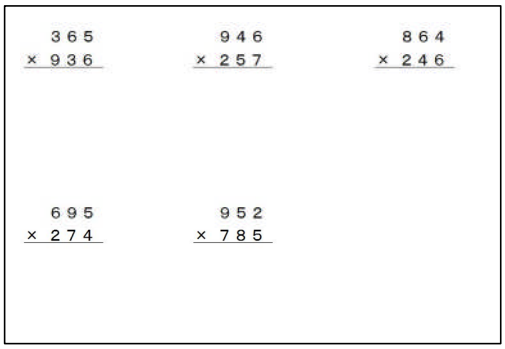


図 5-4　筆算①

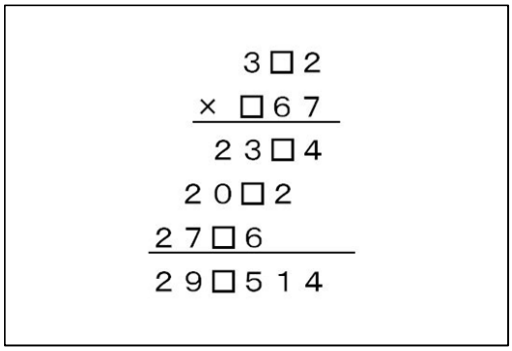


図 5-5　虫食い算①

(4)　実験手順

被験者は，次の手順に従って，実験遂行を行うこととした。

1. プローブを装着する（実験者が行う）。
2. 課題遂行方法の説明を受ける。
3. 筆算：閉眼・安静状態の後，実験者の「始め」の合図とともに開眼し，筆算①を開始する。筆算①が終了後，被験者は「できました」と言い，閉眼・安静状態で 60 秒休憩する。「始め」の合図で開眼し，筆算②を開始する。以下，筆算③まで同様に実施する。
4. 虫食い算：閉眼・安静状態の後，実験者の「始め」の合図とともに開眼し，虫食い算①を開始する。虫食い算①が終了後，被験者は「できました」と言い，閉眼・安静状態で 60 秒休憩する。実験者の「始め」の合図で開眼し，虫食い算②を開始する。以下，虫食い算③まで同様に実施する。
5. プローブを外す（実験者が行う）。
6. 感想を記述，口述する。

5.1.3.　結果

(1)　行動観察結果

①データ取得

12 名に実験を実施したが，安定したデータを取得でき，考察対象とできたのは 9 名であった。考察対象外となった 3 名は，データが不安定であり，これらの被験者には実験途中，とりわけ虫食い算①において頭を動かす動作が多く見られた。事後の感想には，「虫食い算に変わったときは，混乱してしまった」，「普段，悩むときは体を動かしている」との記述が見られた。

②正誤

被験者 9 名の平均正答率は，筆算が 88%，虫食い算が 95%であった（筆算は，最終的な解答により正誤を判断し，虫食い算は，各空欄について正誤を判断した）。誤答箇所を確認した結果，いずれも計算ミスによるものであった。特に，虫食い算については，事後の感想記述時に回答させた解決方法を確認したが，誤った解決方法を行った被験者は見られなかった。

③所要時間

図5-6，図5-7は，筆算，虫食い算，それぞれについての被験者9名の平均所要時間（秒）を表したグラフである。特徴として，次の点が挙げられる。

【図5-6（筆算）より】

・筆算①から筆算②にかけて約20秒の短縮が見られたが，筆算②から筆算③にかけては2秒の短縮であった。

・標準偏差は，筆算①，②，③の3試行が類似していた。

【図5-7（虫食い算）より】

・虫食い算①，②，③と試行を経るごとに所要時間が短縮し，虫食い算①から虫食い算②にかけては約50秒，虫食い算②から虫食い算③にかけては約40秒の短縮が見られた。

・標準偏差は，虫食い算①，②，③と試行を経るごとに小さくなった。

【図5-6，図5-7（比較）より】

・1試行目（①）の所要時間は，虫食い算の方が長いが，2試行目以降は（②，

③）は，筆算の方が長い。

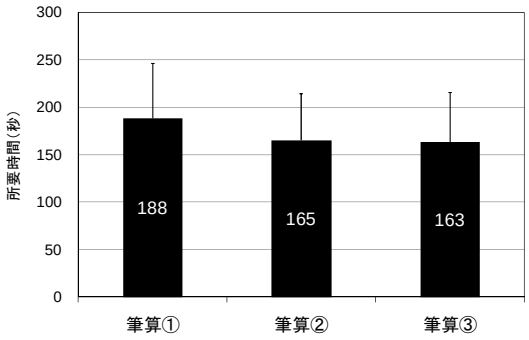


図5-6　筆算の平均所要時間

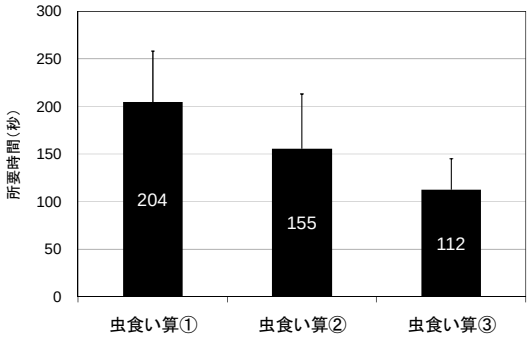


図5-7　虫食い算の平均所要時間

図5-8，図5-9は，筆算，虫食い算，それぞれについての各被験者の所要時間を示したグラフである。虫食い算（①～③の合計）の所要時間が長い被験者から順に，被験者A1～A9とした。1つの棒が1人の被験者の3試行分（①～③）の所要時間を表しており，黒色が1試行目（①），灰色が2試行目（②），白色が3試行目（③）の所要時間を示す。特徴として，次の点が挙げられる。

【図5-8（筆算）より】

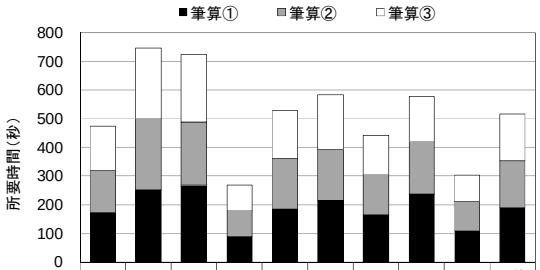
・被験者9名中5名は，試行を経るごとに所要時間が短縮した。残りの4名は，筆算②から筆算③で増加が見られた。

【図5-9（虫食い算）より】

・被験者 9 名中 8 名は，試行を経るごとに所要時間が短縮した。（被験者 A2 は虫食い算①から②にかけて 3 秒増加した。）

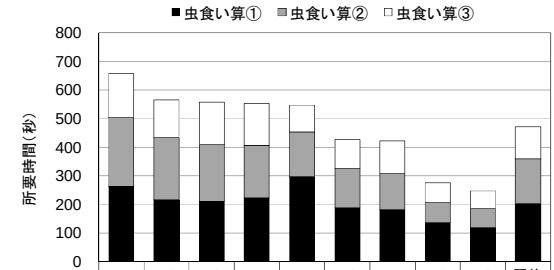
【図 5-8，図 5-9（比較）より】

・各被験者について，筆算の所要時間の短さと，虫食い算の所要時間の短さは必ずしも一致しなかった。



	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	平均
□筆算③	155	246	235	90	166	193	137	157	93	163
■筆算②	147	249	221	89	179	177	141	182	101	165
■筆算①	172	252	268	90	184	215	165	238	109	188

図5-8　筆算の所要時間



	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	平均
□虫食い算③	153	131	145	146	94	100	114	69	60	112
■虫食い算②	240	219	200	183	154	137	126	69	69	155
■虫食い算①	265	216	211	223	299	189	181	137	118	204

図5-9　虫食い算の所要時間

④事後の感想

事後の感想記述において，次の特徴が見られた。

・いずれの被験者も「筆算と虫食い算の，どちらの方が難度が高かったか」の質問に対し，「虫食い算」と回答した。

・9名中8名が，自由記述欄に「最初は手順がわからなくてとまどった」，「どこから解くのかを考えなければならなかった」に類する回答を行った。

・9名中3名が，自由記述欄に「筆算で疲れました」，「時間がかかって大変でした」に類する回答を行った。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果

被験者9名のヘモグロビン濃度変化について，右側と左側のデータに変化の形状の違いがある被験者は認められなかった。いずれの被験者も左右のヘモグロビン濃度変化の特徴は類似していた。また，いずれの被験者もdeoxyHbは0付近で推移する傾向にあり，大幅な変化が見られた被験者は確認できなかった。

光計測装置のデータは相対変化量を示すため，類似した特徴を示す被験者であっても，異なる被験者のデータを加算平均などの数値として操作し，分析することは，各個人のデータが示す変化の特徴を捨象してしまう可能性がある。そこで，以下では，被験者9名のうち，虫食い算の所要時間が最長であった被

験者 A1，平均所要時間と類似した所要時間であった被験者 A4，所要時間が最短であった被験者 A9 を取り上げ，ヘモグロビン濃度変化の結果に言及することとする。なお，被験者間の比較については，相対変化量であることに十分な注意を保ちつつ，その特徴の可能性に言及する。

考察対象とする計測部位は,13 箇所のうち,左前額部の 12CH もしくは 13CH とする（図 5-2 参照）。この部位は，毛髪の影響がなく，データが安定しており，さらに左側は学習といった高次な活動における論理的，言語的処理が優位であるとされるためである。なお，上述のとおり，本実験においては右側と左側のデータに変化の形状の違いがある被験者は認められなかった。

ヘモグロビン濃度変化をグラフ化するにあたっては，試行ごとの変化に着目するために，各試行の開始時を 0 とするベースライン補正を行った。

①被験者 A1

図 5-10 は，被験者 A1 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。図 5-10，図 5-11，図 5-12 のグラフはいずれも，縦軸がヘモグロビン濃度変化（mM・mm）を，横軸が所要時間（秒）を表し，両軸とも全てのグラフのスケールを統一した。したがって，横軸は最も所要時間の長い被験者 A1 の虫食い算に統一することになり，その他のグラフでは右側に空白が生じた。グラフ内の黒色線が oxyHb，灰色線が deoxyHb の変化を示している。

図 5-10 より，特徴として次の点が挙げられる。

・筆算において，oxyHb は各試行で増加しており，増加幅はいずれの試行も同程度であった。
・筆算において，deoxyHb は，全体をとおして 0 付近で推移した。
・虫食い算において，oxyHb はいずれの試行も増加したが，虫食い算①の増加が顕著であった。虫食い算②，③の増加幅は同程度であり，虫食い算①のおよそ半分程度であった。

・筆算の各試行における oxyHb の増加幅と，虫食い算②，③の増加幅は同程度であった。

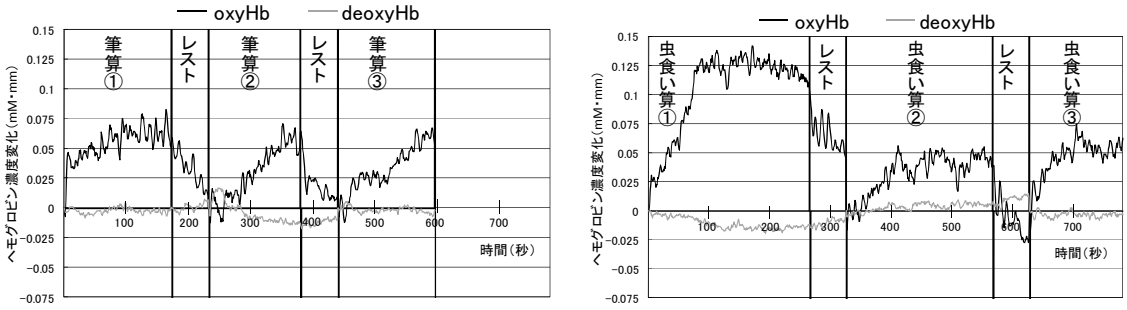


図 5-10　被験者 A1 のヘモグロビン濃度変化（12CH）
（左図：筆算時，右図：虫食い算時）

②被験者 A4

図 5-11 は，被験者 A4 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。

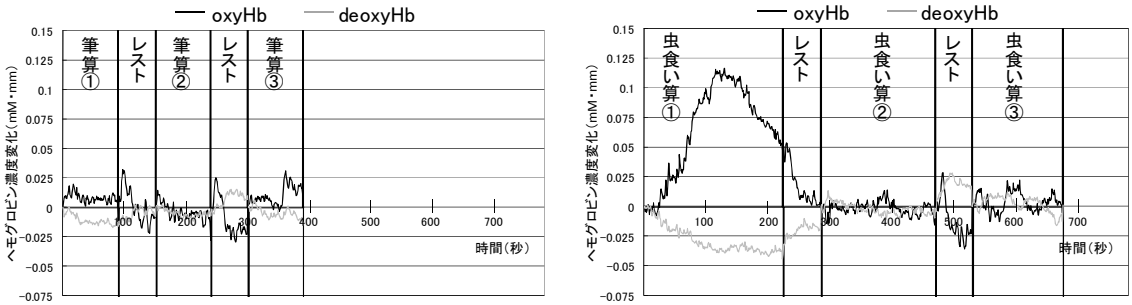


図 5-11　被験者 A4 のヘモグロビン濃度変化（13CH）
（左図：筆算時，右図：虫食い算時）

・筆算において，oxyHb，deoxyHb とも大幅な増減は見られず，0 付近で推移する傾向にあった。

・虫食い算において，oxyHb は虫食い算①の増加が顕著であった。虫食い算②，③は 0 付近で推移する傾向にあった。

・虫食い算において，deoxyHb は虫食い算①で減少が見られた。虫食い算②，

③は 0 付近で推移する傾向にあった。

・筆算の 3 試行と，虫食い算②，③は oxyHb，deoxyHb とも，0 付近で推移するという同様の変化であった。

③被験者 A9

図 5-12 は，被験者 A9 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。

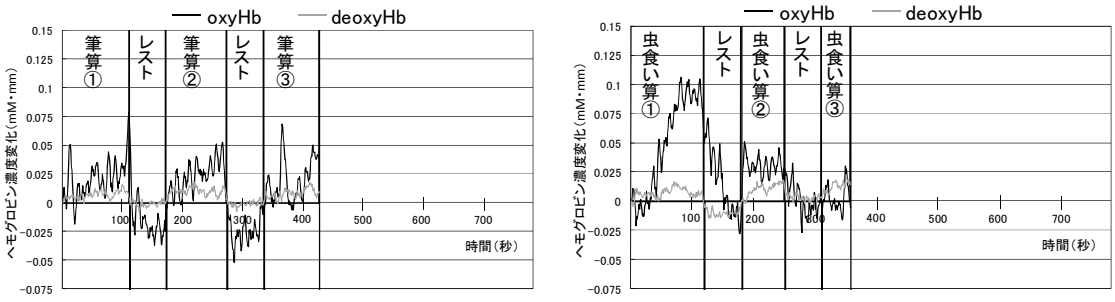


図 5-12　被験者 A9 のヘモグロビン濃度変化（12CH）
（左図：筆算時，右図：虫食い算時）

・筆算において，oxyHb は各試行で増加しており，増加幅はいずれの試行も同程度であった。

・筆算において，deoxyHb は，全体をとおして 0 付近で推移する傾向にあった。

・虫食い算において，oxyHb は虫食い算①の増加が顕著であり，試行を経るごとに増加幅が減少した。

・虫食い算において，deoxyHb は，全体をとおして 0 付近で推移する傾向にあった。

・筆算の各試行における oxyHb の増加幅と，虫食い算②，③の増加幅は同程度であった。

5.1.4.　考察

(1)　全体の行動観察結果，事後の感想より

12 名に実験を実施した結果，安定したデータを取得でき，考察対象とできたのは 9 名であった。考察対象外となった 3 名は，実験途中に頭を動かす動作が多く見られたことから，体動がデータの不安定さを招いた一因に考えられる。実験前には，頭を動かさないように指示を行ったが，「普段，悩むときは体を動かしている」との感想があったように，とりわけ虫食い算①の解決方法の模索時には焦りや集中などから，無意識的に頭を動かしたと予想できる。小学生への実験では，事前に指示を繰り返すことにより，十分に留意事項として伝える必要があるといえる。また，こうした状況が生じないよう，難度が過度に高い問題設定とならないように考慮する必要がある。乗法をより簡単な演算へ変更する，桁数を減らす，虫食い算の空欄数を減らすなどの改良が必要となる。

正答率について，被験者 9 名の平均値は，筆算が 88%，虫食い算が 95%であった。誤答はいずれも計算ミスであったこと，また，虫食い算の解決方法に誤りがなかったことから，被験者は実験課題の内容を正しく理解し，遂行したと判断した。

所要時間について，被験者 9 名の平均値を見ると，筆算，虫食い算ともに，試行を経るごとに短縮が見られたが,短縮時間は虫食い算の方が顕著であった。また，標準偏差は，筆算の 3 試行ではおよそ一定であったが，虫食い算では試行を経るごとに小さくなった。筆算は既に解決方法を習得しており，その方法を適応する機械的な作業の要素が強いため，試行全体をとおして内容の捉え方が変化せず，大幅な時間短縮が見られなかったと考えられる。確認された時間短縮は慣れによるものであったといえる。また，筆算の場合，通常，各被験者の計算速度は，各被験者に依存し，大幅な変化は見られないことから，標準偏差がほぼ一定であったといえる。

一方，虫食い算は「最初は手順がわからなくてとまどった」，「難度が高い」

とあるように，はじめに解決方法を考えなければならなかったため，虫食い算①の所要時間が長くなったと考えられる。ただし，解決方法が分かった後は筆算よりも計算の数が少なかったため，所要時間の短縮が進み，標準偏差も小さくなったと予想される。実際に 9 名それぞれの所要時間の推移を見ると，試行ごとの短縮がなされたのは，筆算において 5 名であったが，虫食い算においては 8 名であり，ほとんどの被験者に短縮が見られた。

なお，事後の感想において，9 名中 3 名に「筆算で疲れました」，「時間がかかって大変でした」との記述が見られたことから，小学生を対象とした実験においては，負担を軽減できるよう筆算の必要性の可否，時間設定などの点に検討が必要であることが示唆された。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果より

被験者 A1，A4，A9 の 3 名の被験者のヘモグロビン濃度変化を見ると，いずれの被験者も，筆算の 3 試行は oxyHb，deoxyHb とも同様の変化（増加幅）を示した。具体的に，oxyHb は，被験者 A1，A9 では増加が認められ，被験者 A4 では 0 付近で推移する傾向にあった。deoxyHb については，3 名とも同様で，0 付近で推移する傾向にあった。筆算はいずれも問題の捉え方が変化しなかったため，全試行とも同様の変化となったことが考えられる。ただし，被験者間での比較を行うと，所要時間の長い被験者ほど，oxyHb の増加が顕著であった。つまり，被験者を所要時間の長い方から順に，短くなるように並べると，被験者 A1，A9，A4 となり，この順に増加幅の値が小さくなった。所要時間の長さを被験者の感じている難度と捉えると，難度の高さが oxyHb の増加幅に反映されたと推測できる。

虫食い算については，被験者 A1，A4，A9 の 3 名とも，虫食い算①における oxyHb の増加が最も顕著であり，虫食い算②，③の増加幅は縮小した。虫食い算①では，どこからどのように解いていくのかについて解決方法を導き出さな

ければならず，ここで難度の高さを感じたことが，oxyHb の顕著な増加に反映したと考えられる。虫食い算②，③では，解決方法を獲得し，こうした難度の高さを感じなかったため増加幅が縮小したと予想できる。また，被験者間での比較を行うと，所要時間の長い被験者ほど，虫食い算①での oxyHb の増加が顕著であった。つまり，被験者を所要時間の長い方から順に，短くなるように並べると，被験者 A1，A4，A9 となり，この順に増加幅の値が小さくなった。これは，筆算と同様の特徴であり，難度の高さが oxyHb の増加幅に反映されたことが推測できる。

なお，いずれの被験者についても，解決方法を獲得した虫食い算②，③における oxyHb の増加幅は，筆算と同程度の増加幅となる傾向にあったが，このことから，解決方法の獲得後の虫食い算は，筆算と同程度の難度となったことを示している可能性が考えられる。

5.1.5. まとめ

本実験では，同じ桁数の筆算と虫食い算の問題解決過程における，脳内ヘモグロビン濃度変化を検討した。その結果を実験目的で述べた達成項目に沿ってまとめると次のようになる。

(1) 平均的に，筆算，虫食い算ともに所要時間は試行ごとに減少する傾向にあったが，虫食い算の方が減少幅が大きかった。筆算はすでに解決方法を獲得していたが，虫食い算は解決方法を導出する必要があり，解決方法の模索から獲得への移行が，大幅な所要時間の短縮につながったといえる。

(2) 筆算は，いずれの試行も同程度のヘモグロビン濃度変化であったが，虫食い算は，難度が高いと考えられる解決方法の模索時に oxyHb が大きく増加した。解決方法の獲得後は，筆算と同程度の変化となった。このことから，oxyHb の増加幅の大きさに，難度の高さが反映された可能性が考えられた。

(3) 小学生を対象とした実験においては，安定したデータの取得，身体的・精神的な負担の軽減のために，実験前の指示の工夫，簡単な演算（加法）への変更，桁数や虫食い算の空欄数の縮小，筆算の不要性などについて検討が必要であることが示唆された。

5.2. 小学生を対象とした実験

5.2.1. 実験目的

本実験の目的は，小学生を対象に，計算問題解決時の脳内ヘモグロビン濃度計測を実施し，問題解決過程における特徴を明らかにすることである。計算問題として，演算構造を考えながら解決方法を導出する必要がある「虫食い算」を設定した。具体的な達成項目として次の 3 点を設定する。

(1) 小学生を対象に計測することが可能であるかを検討する。

(2) 正誤，所要時間，事後の感想から，虫食い算の問題解決過程の特徴を考察する。

(3) oxyHb と deoxyHb の変化を上記の結果と照合し，問題解決過程の特徴がどのようにヘモグロビン濃度変化に反映されるのかを考察する。

大学生での基礎実験を踏まえて，小学生用に実験課題や実験環境を調節，設定し，上記の項目の達成を図る。

5.2.2. 実験方法

(1) 実験環境

本実験は，被験者ごとに単独で実施した。実験者は，課題の遂行状況の観察者（実験の説明を含む）と，機器操作者の 2 名とした。実験に際しての阻害要因はなく，被験者は課題に専念できる環境であった。

(2) 実験概要

実験期間：2006 年 7 月のうち 2 日間

実験場所：立命館大学内実験室

被験者：小学校第 5 学年児童 4 名（男子 2 名，女子 2 各；10 歳 2 名，11 歳 2 名）とした。

事前に，実験遂行における安全性と実験結果の扱いに関して説明を行い，実験の遂行とその結果の発表について被験者と保護者から文書で同意を得た。

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んだ。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した（図 5-13）。

図 5-13　実験遂行場面

光計測装置：OMM－3000（島津製作所製）

計測部位:身体的に過度な負担とならないよう,前頭前野の 4 箇所に限定した。

プローブは，前額部に，水平に 5 箇所配列し，4 箇所（1～4CH）を計測できるように設定した（図 5-14）。各プローブ間の距離は 3cm であった。前頭前野を計測の対象部位としたのは，毛髪によるノイズが少ないこと，思考や判断などの高次な活動を司るとされていることによる。

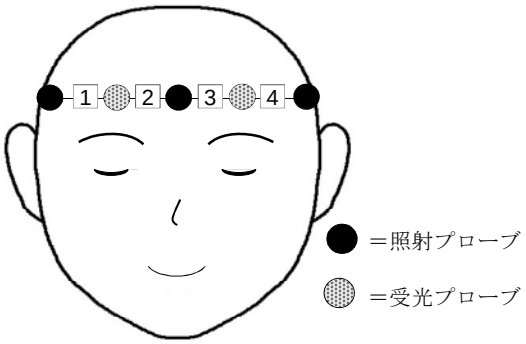


図 5-14　光計測装置のプローブの装着図（数字は CH を表す）

(3)　実験課題

大学生を対象とした実験より，実験課題の難度と実験時間の検討の必要性が示唆された。そこで，難度が高くなりすぎないよう，実験課題は計算問題として，加法の虫食い算を設定した（岡本・黒田 2006b，岡本 他 2006d，黒田・岡本 2007b，岡本・黒田 2008，Okamoto et al. 2008，Eda et al. 2008）。また，大学生を対象とした実験では，「筆算で疲れました」との感想が見られたとともに，虫食い算内において，解決方法の獲得過程の変化が検出可能であったことから，比較としての筆算問題は設定しないこととした。

課題全体としては，1 試行に 1 問を設定し，3 試行を行った（試行①～③）。実験時間が極力短くなるよう，レストは設定せず，3 試行を連続して行うこととした（図 5-15）。被験者へは 3 枚の問題用紙を重ね，左上をステープラーでとめて提示し，問題用紙 1 枚（1 試行）終了ごとに被験者自身が問題用紙をめくり，遂行するよう指示した。分析に際しては，ビデオの録画映像からデータを試行ごとに分割し，その特徴について検討する。

虫食い算の内容は，2 桁＋2 桁＋2 桁＝3 桁の筆算形式であり，一の位，十の位ともに繰り上がりのあるものを設定した。空欄数は各試行 2 箇所とした。空欄の位置は 3 問とも同じ場所に設定し，難度の統一を図った。問題用紙は A4 サイズ横置きとし，全て筆記により解答するものとした。思考過程や解決過程

が紙上に残るよう，消しゴムの使用は禁止し，修正は取り消し線により行うように指示を行った。

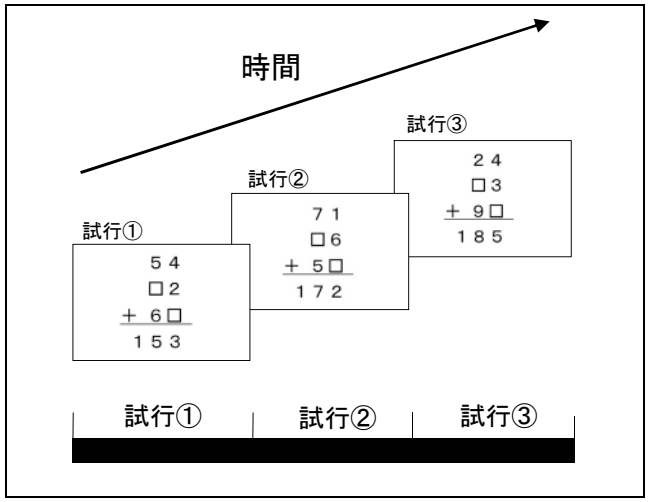


図 5-15　実験課題遂行順序

(4)　実験手順

被験者は，次の手順に従って，実験遂行を行うこととした。なお，「2.課題遂行方法の説明」では，頭を動かさないよう十分に指示を行った。

1. プローブを装着する（実験者が行う）。

2. 課題遂行方法の説明を受ける。

3. 閉眼・安静状態の後，実験者の「始め」の合図とともに開眼し，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（実験者が行う）。

5. 感想を記述，口述する。

5.2.3.　結果

(1)　行動観察結果

①データ取得

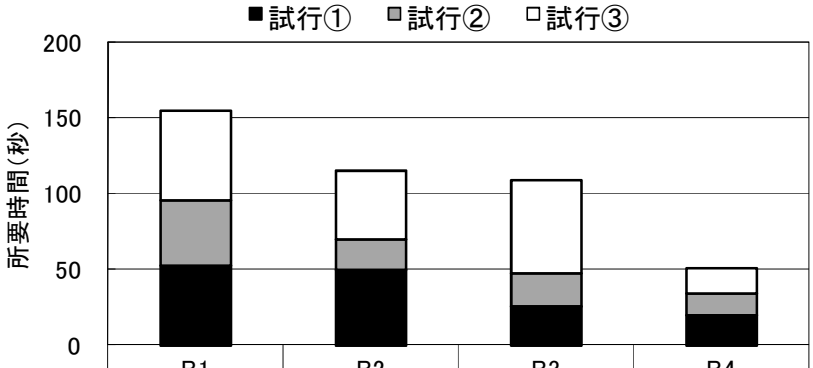
実験実施に際して，被験者にプローブの装着による身体的負担や問題難度の高さによるストレスを過度に強いることなく，円滑に実験を実施することができた。また，データ取得は適切になされた。

②正誤

被験者 4 名中 3 名はすべて正答，あとの 1 名は 6 箇所の空欄のうち 5 箇所が正答であった。1 名について，誤答箇所を確認した結果，誤答の要因は計算ミスであった。また，事後の感想記述時に回答させた解決方法を確認したが，誤った解決方法を行った被験者は見られなかった。

③所要時間

図 5-16 は，被験者 4 名それぞれの所要時間を示したものである。所要時間の長い被験者から順に，被験者 B1，B2，B3，B4 とした。1 つの棒が 1 人の被験者の 3 試行分（試行①～③）の所要時間を表しており，黒色が試行①，灰色が試行②，白色が試行③の所要時間を示す。特徴として，次の点が挙げられる。



	B1	B2	B3	B4
□試行③	59	46	62	17
■試行②	43	20	22	14
■試行①	52	50	25	20

図 5-16　虫食い算の所要時間

・被験者 B1 の所要時間（試行①～③）は，被験者 4 名中最長であり，最短である被験者 B4 のおおよそ 3 倍であった。

・被験者 B2，B3 の所要時間（試行①～③）は類似しており，最短である被験者 B4 のおおよそ 2 倍であった。

・被験者 B1 の所要時間は，他の被験者に比べ，3 試行いずれも長い傾向にあり，試行による大幅な違いが見られなかった。

・被験者 B2，B3 の所要時間は，試行によって長さが異なった。試行②は，両被験者とも所要時間が短かった。

なお，ここでは被験者による所要時間の特徴の差異が大きく，その特徴をもとにした複数のタイプが考えられたため，被験者全体の所要時間の平均値については議論しないこととした。

④事後の感想

事後の感想記述において，次の特徴が見られた。

・被験者 B1 は，「繰り上がりなどが難しく，計算が大変であった」と回答した。

・被験者 B2 は，「虫食い算は普段行わない計算であったため，難しかった」と回答した。

⑤行動観察結果による被験者分類

所要時間の長さには 3 つのタイプがあった。そこで，以下では所要時間の長さをもとに，被験者を 3 つの群に分類して検討を行うこととする。分類は次のとおりである。

・第Ⅰ群：被験者 B1。被験者 4 名中，所要時間が最長であり，被験者 B4 の約 3 倍の所要時間であった群。

・第Ⅱ群：被験者 B2，B3。被験者 4 名中，所要時間は中程度であり，被験者 B4 の約 2 倍の所要時間であった群。

・第Ⅲ群：被験者 B4。被験者 4 名中，所要時間が最短であった群。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果

光計測装置のデータは相対変化量を示すため，類似した特徴を示す被験者であっても，異なる被験者のデータを加算平均などの数値として操作し，分析することは，各個人のデータが示す変化の特徴を捨象してしまう可能性がある。そこで，以下では，上述した各群から１名を取り上げ，ヘモグロビン濃度変化の結果に言及する。

考察対象とする計測部位は，4 箇所のうち中央 2 つの 2CH（以下，右側と記す），3CH（以下，左側と記す）とする（図 5-14 参照）。この部分が，両端の 1, 4CH に比して, 毛髪によるノイズや瞬きによるプローブのずれが少なく，安定的なデータ取得ができたためである。

また，ヘモグロビン濃度変化をグラフ化するにあたっては，レストを設定しなかったため，各試行の開始時を 0 とするのではなく，実験開始時のみを 0 とするベースライン補正を行った。

①第Ⅰ群（被験者 B1）

図 5-17 は，被験者 B1 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。図 5-17，図 5-18，図 5-19 のグラフはいずれも，縦軸がヘモグロビン濃度変化（mM・mm）を，横軸が所要時間（秒）を表し，両軸とも全てのグラフのスケールを統一した。したがって，横軸は最も所要時間の長い被験者 B1 に統一することになり，その他のグラフでは右側に空白が生じた。グラフ内の黒色線が oxyHb, 灰色線が deoxyHb の変化を示している。①, ②, ③はそれぞれ試行①, ②，③を遂行している時間帯であり，この時間帯の区分はビデオ録画映像にて行った。

図 5-17 より，特徴として次の点が挙げられる。

・oxyHb は，左側において，試行①から③にかけて増加傾向にあった。

・oxyHb は，右側において，試行①～③それぞれで増加した。

・deoxyHb は，左側において，試行①で増加したが，その後は均衡を保った。

・deoxyHb は，右側において，試行①～③それぞれで増加した。

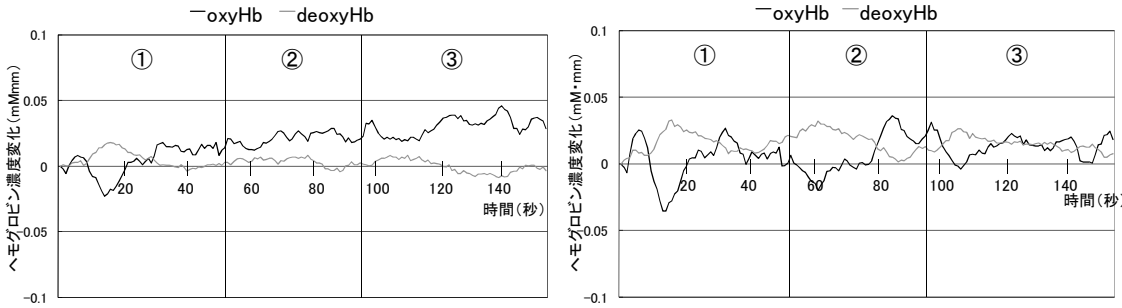


図 5-17　被験者 B1 のヘモグロビン濃度変化
（左図：左側の結果，右図：右側の結果）

②第Ⅱ群（被験者 B2）

2 名の被験者が分類された第Ⅱ群からは，所要時間が長く，事後の感想からも難度の高さを感じていたことが明確な被験者 B2 を取り上げる。図 5-18 は，被験者 B2 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。以下の特徴は，第Ⅱ群に共通するものである。

・oxyHb は，左右両側とも，所要時間の長い試行（①，③）において増加が顕著であった。

・deoxyHb は，左右両側とも，全体的に 0 付近で推移した。

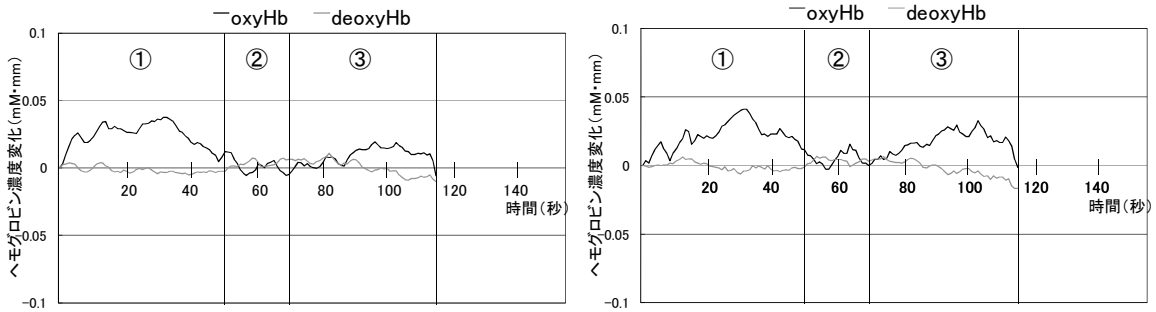


図 5-18　被験者 B2 のヘモグロビン濃度変化
（左図：左側の結果，右図：右側の結果）

③第Ⅲ群（被験者 B4）

図 5-19 は，被験者 B4 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。

・oxyHb は，左右両側とも，試行①の開始直後に増加が見られたが，その後は減少し，0 付近で推移した。

・deoxyHb は，右側において，試行①の開始直後に増加が見られたが，その後は左右両側とも，やや減少傾向にあった。

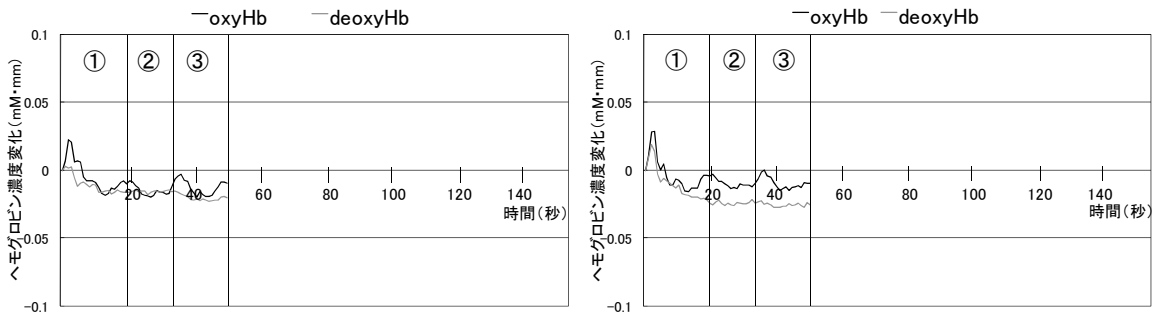


図 5-19　被験者 B4 のヘモグロビン濃度変化
（左図：左側の結果，右図：右側の結果）

5.2.4.　考察

(1)　全体の行動観察結果，事後の感想より

身体的，精神的なストレスにより実験の遂行が困難となった被験者はなく，円滑に実験を実施することができた。また，全被験者について，適切にデータを取得することができた。

正誤について，4 名中 3 名は全箇所正答，あとの 1 名は 1 箇所が誤答であった。誤答は計算ミスであったこと，また，解決方法に誤りがなかったことから，いずれの被験者も実験課題の内容を正しく理解し，遂行したと判断した。

所要時間については，3 つのタイプが認められたため，これを基準に被験者

を３群（第Ⅰ群～第Ⅲ群）に分類した。所要時間の長さが被験者の感じる難度の高さを反映していると考えると，第Ⅰ群（被験者 B1），第Ⅱ群（被験者 B2，B3），第Ⅲ群（被験者 B4）の順に，感じる難度の高さは高，中，低となる。事後の感想を見ると，第Ⅰ群の被験者 B1 は，計算自体に困難を感じていたことがうかがえ，難度の高さを感じていたと考えられる。また，第Ⅱ群の被験者 B2 は，虫食い算が普段とは異なる計算であったことに，難度を感じていたことがうかがえる。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果より

所要時間が最長であった第Ⅰ群（難度：高）は，右側では，oxyHb，deoxyHb とも，試行全体をとおして増加した。左側では，oxyHb は試行①から増加傾向にあり，deoxyHb は試行①で増加後，均衡を保った。これらのことより，感じる難度が高い場合，総じて oxyHb，deoxyHb ともに高い値を示す傾向にあり，とりわけ deoxyHb の増加が顕著であることが特徴と考えられる。

また，deoxyHb 増加部位の詳細を見ると，試行①では左右両側に増加が見られたが，試行②，③では右側のみとなっていた。これは試行①から②にかけて deoxyHb 増加部位が右側へ局所化したことが予想され，要因としては，解決方法の理解と問題に対する慣れが考えられる。なお，oxyHb の減少と deoxyHb の増加が同時期に生じているが，これは oxyHb が deoxyHb に変化したことによる相対的な変化であったと考えられる。

所要時間が中程度であった第Ⅱ群（難度：中）は，左右両側において，oxyHb は所要時間の長い試行では増加が顕著であり，deoxyHb は全体的に均衡を保った。これらのことより，感じる難度が中程度の場合，左右両側とも，oxyHb は増加するが，deoxyHb は増加しない傾向にあると考えられる。なお，被験者 B2，B3 とも試行②の所要時間が短いのは，計算が行いやすい数字が問題に使われていたためと考えられる。

所要時間が最短であった第Ⅲ群（難度：低）は，右側，左側の oxyHb（右側のみ deoxyHb）が試行①の開始直後に増加が見られるが，その後は右側，左側両側とも減少傾向にあった。これらのことより，感じる難度が低い場合，総じてヘモグロビン濃度は増加しない傾向にあると考えられる。なお，試行①の開始直後の一過的な oxyHb（及び deoxyHb）の増加は，課題開始によるもの，あるいは焦りや緊張などを反映した可能性が考えられる。

5.2.5. まとめ

本実験では，虫食い算の問題解決過程における，脳内ヘモグロビン濃度変化を検討した。その結果を実験目的で述べた達成項目に沿ってまとめると次のようになる。

(1) 本実験では，小学生を被験者として，安定したデータ取得が可能であった。事前の説明において，体動に十分に注意するよう指示するとともに，実験設定にあたっては，身体的・精神的負担を考慮して，装着方法の簡便化，実験課題数の縮小と内容の低難度化，時間の短縮などに留意した。

(2) 所要時間，事後の感想の結果から，感じていた難度が高い群，中程度の群，低い群の 3 群に被験者を区分した。

(3) 上記の 3 群のヘモグロビン濃度変化の特徴について検討した結果，課題の難度が高いと感じた被験者では，oxyHb，deoxyHb とも増加が見られた。また，この場合，理解や慣れにより，deoxyHb の増加部位の局所化がなされる可能性が考えられた。課題の難度が中程度であったと考えられる被験者では，oxyHb の増加が顕著であった。課題の難度が低いと感じた被験者では oxyHb，deoxyHb ともに増加は見られなかった。このことから，難度の高さが oxyHb，deoxyHb の増加に反映された可能性が考えられた。

【参考文献】

Eda, H., Kuroda, Y., Okamoto, N. and Maesako, T. (2008) “NIRS evaluates the thinking process of Mushi-kuizan task” *SPIE- Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, Vol.6850: 02･1-6

黒田恭史，岡本尚子（2007a）「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－」佛教大学教育学部論集，Vol.18：1-11

黒田恭史，岡本尚子（2007b）「加法筆算と虫食い算遂行時における脳内ヘモグロビン濃度変化の特徴―小学校第５学年を対象として―」数学教育学会春季年会発表論文集：111-113

岡本尚子，黒田恭史（2005）「計算課題遂行時の脳内ヘモグロビン濃度変化の特徴について」第９回数学教育学会大学院生部研究会発表論文集：27-30

岡本尚子，黒田恭史（2006a）「加法・乗法遂行時における脳内ヘモグロビン濃度変化の差異について」数学教育学会夏季研究会発表論文集：1-6

岡本尚子，黒田恭史（2006b）「加法課題遂行時における小学生の脳内ヘモグロビン濃度変化の特徴」第 10 回数学教育学会大学院生部会発表論文集：13-18

岡本尚子，黒田恭史（2008）「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，Vol.48, No.1･2：73-80

岡本尚子，黒田恭史，前迫孝憲（2006a）「計算課題遂行時の前頭前野におけるマッピング －ヘモグロビン濃度を指標として－」日本教育工学会研究報告集 JSET06-6：151-154

岡本尚子，菅井勝雄，前迫孝憲，黒田恭史（2006b）「乗法・除法における順思考と逆思考がもたらす脳内ヘモグロビン濃度変化の差異について」日本教育工学会研究報告集 JSET06-1：1-8

岡本尚子，山内留美，黒田恭史（2006c）計算過程における順思考と逆思考がもたらす脳内ヘモグロビン濃度変化の特徴，数学教育学会春季年会発表論文集：155-157

岡本尚子，山内留美，黒田恭史，前迫孝憲（2006d）「加法課題遂行時における脳内ヘモグロビン濃度変化の特徴について」教育システム情報学会研究報告，Vol.21，No.1：19-24

Okamoto, N., Eda, H., Kuroda, Y. and Maesako, T. (2008) “Effectiveness of NIRS in Educational Research” *World Automation Congress, International -Forum on Multimedia and Image Processing*: 526･1-6

第 6 章　「個別学習場面」における「図形」問題解決過程のヘモグロビン濃度変化

要約

学習者が 1 人で行う学習を想定した「個別学習場面」における「図形」問題解決過程の脳内ヘモグロビン濃度計測を行い，問題解決過程の特徴がどのようにヘモグロビン濃度変化に反映されるのかを検討する。第 1 節では大学生を対象にブロックを用いた立体図形の構成を，第 2 節では小学生を対象にジグソーパズルを用いた平面図形の構成を実験課題に設定する。

6.1.　大学生を対象とした実験

6.1.1.　実験目的

本実験の目的は，小学生を対象とする実験の基礎実験として，大学生を対象に図形問題解決時の脳内ヘモグロビン濃度計測を実施し，問題解決過程における特徴がどのように反映されるのかを明らかにすることである。図形問題として，面積や体積の求積などの公式によって答えを求める問題ではなく，図形の合同や構造を考える必要のある問題を設定した。具体的には，見本と同じ立体を作製するという問題において，見本を実物の立体（3 次元情報）とした「実物問題」と，見本をディスプレイ画面に映された写真（2 次元情報）とした「ディスプレイ問題」を設定した。具体的な達成項目として次の 3 点を設定する。

(1) 正誤，所要時間，事後の感想から，実物問題とディスプレイ問題の両問題について，解決過程の特徴を考察する。

(2) oxyHb（oxygenated hemoglobin）と deoxyHb（deoxygenated hemoglobin）の変化を上記の結果と照合し，問題解決時の特徴がどのようにヘモグロビン濃度変化に反映されるのかを，両問題の比較を併せて検討する。

(3) 小学生を対象とした実験に向けて，構成する図形の種類，問題数，時間設定などの改良すべき点を検討する。

6.1.2. 実験方法

(1) 実験環境

本実験は，被験者ごとに単独で実施した。実験者は，課題の遂行状況の観察者（実験の説明と見本立体の差し替えを含む）と，機器操作者の 2 名とした。実験に際しての阻害要因はなく，被験者は課題に専念できる環境であった。

(2) 実験概要

実験期間：2005 年 12 月～2006 年 6 月のうち 10 日間

実験場所：立命館大学内実験室

被験者：考察対象は大学生 8 名（男性 2 名，女性 6 名；19 歳～25 歳，平均 21.1 歳(標準偏差 1.54)）とした。実験は大学生 12 名を対象に実施したが，データが不安定であった 4 名を考察対象外とした。

事前に，実験遂行における安全性と実験結果の扱いに関して説明を行い，実験の遂行とその結果の発表について被験者から文書で同意を得た。

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んだ。被験者後方よりビデオカメラにて，課題遂行時の被験者の手元を録画した（図 6-1）。

光計測装置：OMM－3000（島津製作所製）

計測部位：前頭前野を中心に 13 箇所とした。プローブは，前額部を覆うように，格子状に 10 箇所配列し，13 箇所（1～13 チャンネル(以下，CH と記す)）を計測できるように設定した（図 6-2）。各プローブ間の距離は 3cm であった。前頭前野を計測の対象部位としたのは，毛髪によるノイズが少ないこと，思考や判断などの高次な活動を司るとされていることによる。

図 6-1　実験遂行場面
（左図：実物問題，右図：ディスプレイ問題）

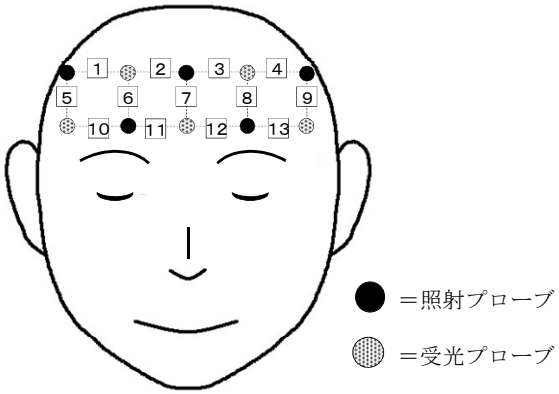


図 6-2　光計測装置のプローブの装着図（数字は CH を表す）

(3)　実験課題

実験課題は図形問題として，ダイヤブロック[注1]を用いた立体図形の構成を設定した。提示された見本立体と同じ立体を構成するという問題である（岡本 他 2005，岡本 他 2006）。見本を 3 次元情報である実物立体とした「実物問題」と，見本を 2 次元情報であるディスプレイ画面上の写真とした「ディスプレイ問題」を設定した（図 6-1 参照）。課題全体としては，実物問題 4 試行（実物①～④）の後，ディスプレイ問題 4 試行（ディスプレイ①～④）を行う合計 8 試行とし，その遂行順序を図 6-3 に図示した。

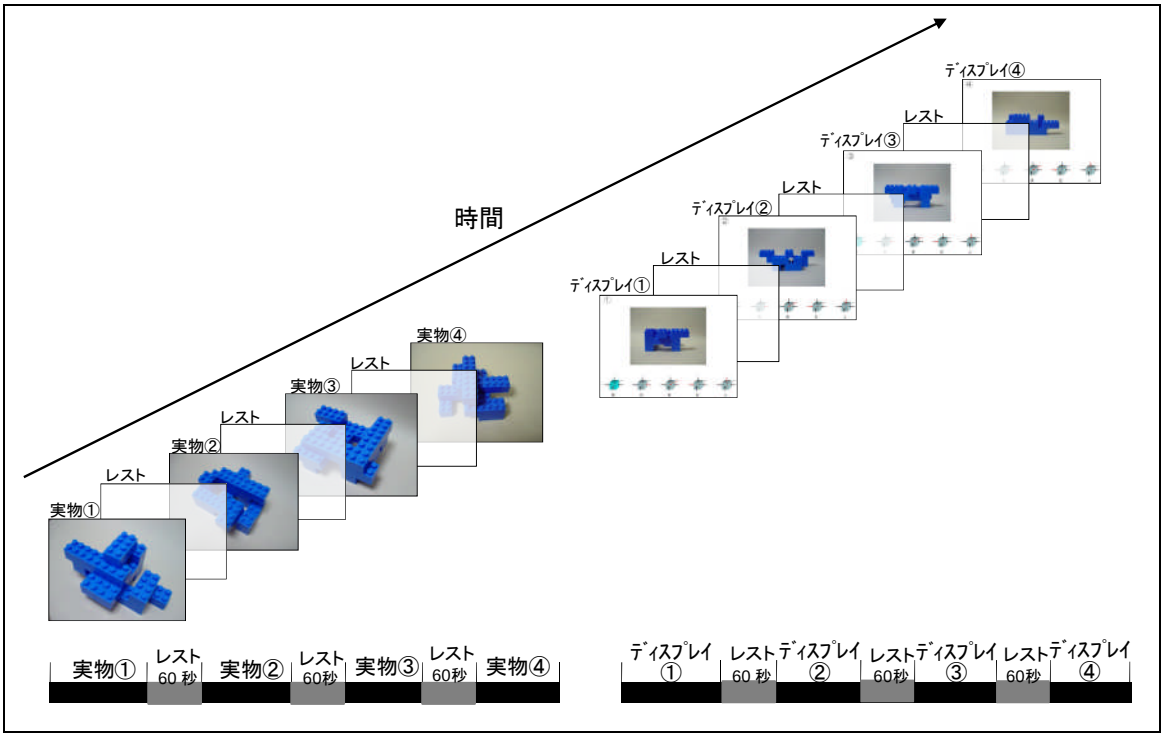


図 6-3　実験課題遂行順序

実物問題における見本の立体は，底面が見えないよう台紙を貼付し，被験者が実際に手にとって観察できるようにした。底面に台紙を貼付したのは，ディスプレイ問題と条件をそろえるためである。ディスプレイ問題では，見本の立体を前・右・後・左・上から撮影した写真をそれぞれ 1 スライドに 1 枚表示したものを用意し，被験者がマウス操作によって，観察したい部分の写真を随時選択しながら取り組めるようにした。図 6-4 は，実際に提示した見本となる立体の写真の 1 つ（ディスプレイ①の右側からの写真）であり，写真の下に表示された前・右・後・左・上をそれぞれクリックすると各写真が表示されるように設定を行った。いずれの問題も合計ブロック数は 11 個に統一し，全て形の異なる立体見本を設定した。使用するブロックは大中小の 3 種類とした。

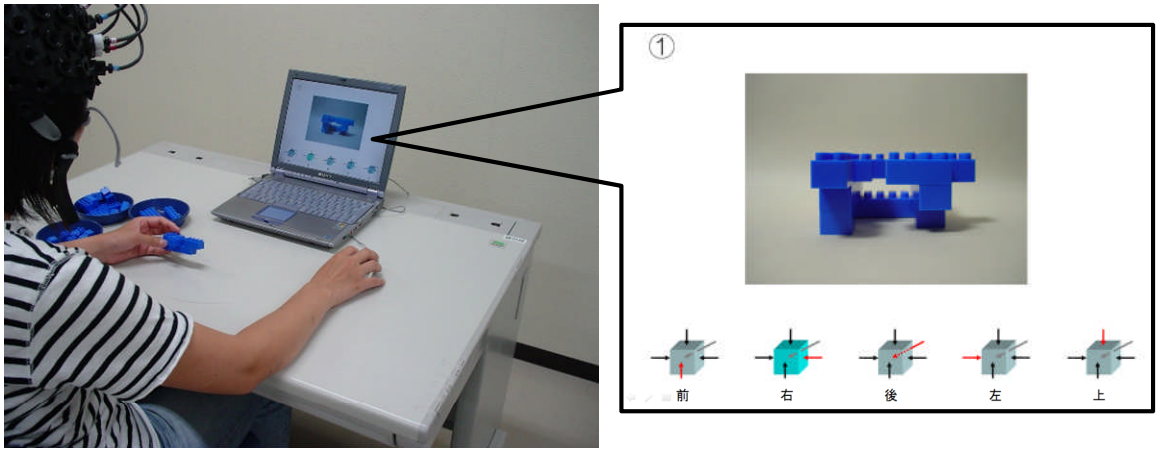


図 6-4　ディスプレイ問題で提示した見本となる立体の写真

(4)　実験手順

被験者は，次の手順をとることとした。

1. プローブを装着する（実験者が行う）。
2. 課題遂行方法の説明を受ける。
3. 実物問題：閉眼・安静状態の後，実験者の「始め」の合図とともに開眼し，実物①を開始する。実物①が終了後，被験者は「できました」と言い，閉眼・安静状態で 60 秒休憩する。実験者の「始め」の合図で実物②を開始する。以下，実物④まで同様に実施する。
4. ディスプレイ問題：閉眼・安静状態の後，実験者の「始め」の合図とともに開眼し，ディスプレイ①を開始する。ディスプレイ①が終了後，被験者は「できました」と言い，閉眼・安静状態で 60 秒休憩する。実験者の「始め」の合図でディスプレイ②を開始する。以下，ディスプレイ④まで同様に実施する。
5. プローブを外す（実験者が行う）。
6. 課題遂行時の感想を記述，口述する。

6.1.3.　結果

(1)　行動観察結果

①データ取得

12名に実験を実施したが，安定したデータを取得でき，考察対象とできたのは8名であった。考察対象外となった4名は，データが不安定であり，これらの被験者には実験途中，ブロックの操作時に頭が動く様子が多く見られた。

②正誤

被験者8名中7名についてはブロックの置き間違いは見られず，全問正しく立体を構成した。ブロックを置き間違えた被験者1名においても，間違い箇所は課題全体を通して1箇所であった。

③所要時間

図6-5，図6-6は，ディスプレイ①の所要時間が著しく長かった被験者1名を除く，被験者8名中7名の平均所要時間（秒）を表したグラフである。特徴として，次の点が挙げられる。

【図6-5（実物問題）より】

・実物①から実物③にかけて所要時間が減少し，17秒の短縮が見られた。

・標準偏差は，実物①，②，③，④とも類似していた。

【図6-6（ディスプレイ問題）より】

・ディスプレイ①，②，③，④と試行を経るごとに所要時間が減少し，ディスプレイ①からディスプレイ④にかけて123秒の短縮が見られた。

・標準偏差は，ディスプレイ①，②，③，④と試行を経るごとに小さくなった。

【図6-5と図6-6（比較）より】

・実物①～③，ディスプレイ①～③の所要時間をそれぞれ比較すると，いずれもディスプレイ課題の方が長かった。とりわけ，実物①とディスプレイ①を比較すると，ディスプレイ①は実物①の約2倍の時間を要した。

・実物①から実物③における減少（17秒）と，ディスプレイ①からディスプレイ④における減少（123秒）を比べると，実物課題の方が減少幅が小さかった。

・ディスプレイ①の標準偏差は，全体を通して最大であった。

・実物①～③，ディスプレイ①～③の標準偏差をそれぞれ比較すると，いずれもディスプレイ問題の方が大きかった。

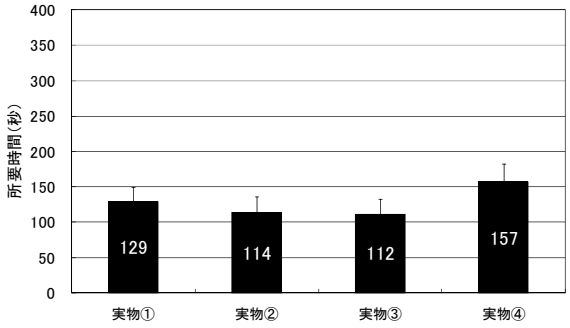


図6-5　実物問題の平均所要時間

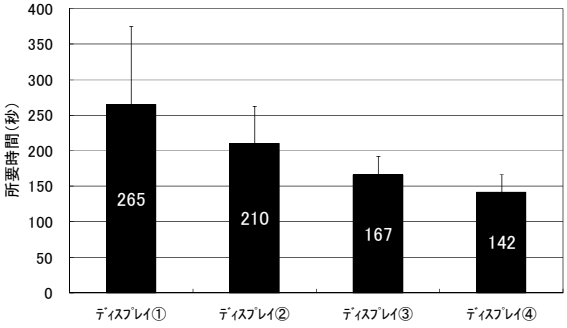
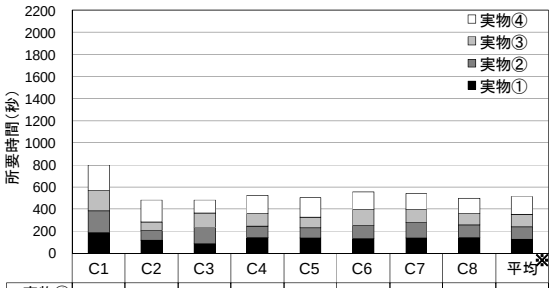


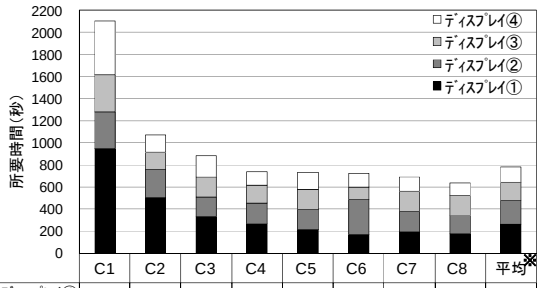
図6-6　ディスプレイ問題の平均所要時間

図6-7，図6-8は，実物問題，ディスプレイ問題，それぞれについての各被験者の所要時間を示したグラフである。ディスプレイ問題（①～④の合計）の所要時間が長い被験者から順に，被験者C1～C8とした。1つの棒が1人の被験者の4試行分（①～④）の所要時間を表しており，黒色が1試行目（①），濃い灰色が2試行目（②），薄い灰色が3試行目（③），白色が4試行目（④）の所要時間を示す。なお，グラフ内の平均はC1を除いた平均値を表しており，図6-5，6-6に示した平均所要時間の値である。特徴として，次の点が挙げられる。



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	平均※
□実物④	233	202	119	166	175	163	140	135	157
▒実物③	181	73	128	114	99	144	118	106	112
■実物②	199	93	151	98	90	114	143	111	114
■実物①	186	117	84	146	140	135	138	144	129

図6-7　実物問題の所要時間



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	平均※
□ディスプレイ④	487	158	189	124	155	123	129	112	142
▒ディスプレイ③	335	155	184	159	183	111	187	185	167
■ディスプレイ②	334	256	178	188	180	320	185	164	210
■ディスプレイ①	945	502	330	269	215	169	192	177	265

図6-8　ディスプレイ問題の所要時間

（※図6-7，6-8の平均はC1を除いた平均値。図6-5，6-6の値である。）

【図6-5（実物問題）より】

・被験者8名中5名は，実物①から実物②にかけて所要時間が短縮した。

・被験者8名中7名は，実物③から実物④にかけて所要時間が増加した。

・被験者C1は，いずれの試行においても所要時間が被験者8名中最長であり，被験者C1以外の被験者の平均所要時間（実物①～④）と比較すると，約1.6倍（800秒）の時間を要した。

【図6-6（ディスプレイ問題）より】

・被験者8名中7名は，ディスプレイ①からディスプレイ②にかけて所要時間が短縮した。

・被験者C1は，いずれの試行においても所要時間が被験者8名中最長であり，被験者C1以外の被験者の平均所要時間（ディスプレイ①～④）と比較すると，約2.7倍の時間（2101秒）を要した。

【図6-5と図6-6（比較）より】

・いずれの被験者も，実物問題（実物①～④）よりもディスプレイ問題（ディスプレイ①～④）の方が所要時間が長かった。

④事後の感想

事後の感想記述において，次の特徴が見られた。

・いずれの被験者も「実物問題とディスプレイ問題の，どちらの方が難度が高かったか」の質問に対し，「ディスプレイ問題」と回答した。

・被験者C1は，「ディスプレイ①をはじめようとした時に，どうやって取り組めばいいか分からなくなった」と回答した。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果

被験者 8 名のヘモグロビン濃度変化について，C1 を除いて右側と左側のデータに，変化の形状の違いがある被験者は認められなかった。いずれの被験者も左右のヘモグロビン濃度変化の特徴は類似していた。C1 については，ディスプレイ①の deoxyHb について，右側では増加し，左側では増加しないという違いが認められた。その他の部分については，左右での大幅な違いは見られなかった。

光計測装置のデータは相対変化量を示すため，類似した特徴を示す被験者であっても，異なる被験者のデータを加算平均などの数値として操作し，分析することは，各個人のデータが示す変化の特徴を捨象してしまう可能性がある。そこで，以下では，被験者 9 名のうち，ディスプレイ①の所要時間が著しく長く，実物問題，ディスプレイ問題ともに所要時間が最長であった被験者 C1 と，所要時間とその推移傾向が 7 名の平均所要時間の特徴と類似した被験者 C4 を取り上げ，ヘモグロビン濃度変化の結果に言及することとする。なお，被験者間の比較については，相対変化量であることに十分な注意を保ちつつ，その特徴の可能性に言及する。

考察対象とする計測部位は，13 箇所のうち，右前額部の 11CH とする（図 6-2 参照）。この部位は，毛髪の影響がなく，データが安定しており，さらに右側は学習といった高次な活動における空間処理が優位であるとされるためである。なお，上述のとおり，本実験においては右側と左側のデータに変化の

形状の違いがある被験者は認められなかった。

ヘモグロビン濃度変化をグラフ化するにあたっては，試行ごとの変化に着目するために，各試行の開始時を 0 とするベースライン補正を行った。

①被験者 C1

図 6-9 は，被験者 C1 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。図 6-9，図 6-10 のグラフはいずれも，縦軸がヘモグロビン濃度変化（mM・mm）を，横軸が所要時間（秒）を表し，両軸とも全てのグラフのスケールを統一した。したがって，横軸は最も所要時間の長い被験者 C1 のディスプレイ問題に統一することになり，その他のグラフでは右側に空白が生じた。グラフ内の黒色線が oxyHb，灰色線が deoxyHb の変化を示している。なお，灰色の網掛け部分は確認作業を行った時間帯を表す。確認作業とは，立体が概ね完成した後に，見本と作製した立体を同定する作業を行っている時間を指し，ブロックの操作は行われていない時間帯である。この時間帯は，ビデオの録画映像をもとに特定した。

図 6-9 より，特徴として次の点が挙げられる。

・実物問題において，oxyHb は実物①の増加幅が最も大きく，試行を経るごとに減少した。

・実物問題において，deoxyHb は各試行においてやや増加するが，試行を経るごとに増加幅が減少する傾向にあった。

・ディスプレイ問題において，oxyHb はディスプレイ①の増加幅が最も大きく，ディスプレイ②以降は増加が抑制される傾向にあった。

・ディスプレイ①の oxyHb の増加幅は，実物①よりもやや大きく，ディスプレイ②以降の増加幅は，実物③，④と同程度であった。

・ディスプレイ①において，deoxyHb は増加が著しく，最後まで増加が継続した。ディスプレイ②以降ではやや増加するが，ディスプレイ①よりも増加幅

は小さかった。（ディスプレイ①の deoxyHb の増加は右側のみで認められた。）

・ディスプレイ①の deoxyHb の増加幅は，実物①のおよそ 3 倍程度であり，ディスプレイ②以降の増加幅は，実物③，④と同程度であった。

・実物問題，ディスプレイ問題，いずれの確認作業においても，oxyHb，deoxyHb 双方とも増加が見られた。

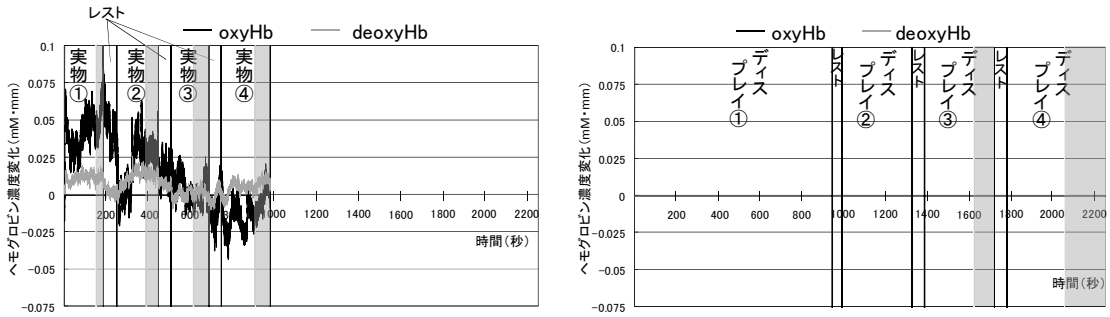


図6-9　被験者C1のヘモグロビン濃度変化（10CH）
（左図：実物問題，右図：ディスプレイ問題）

②被験者 C4

図 6-10 は，被験者 C4 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。

・実物問題において，oxyHbは実物①で増加幅が最も大きく，試行②以降の増加幅は実物①よりも抑制される傾向にあった。

・実物問題において，deoxyHbは実物①で減少傾向が見られ，実物②以降ではやや増加する傾向にあった。

・ディスプレイ問題において，oxyHbはディスプレイ①の増加幅が最も大きく，試行を経るごとに増加幅が減少する傾向にあった。

・ディスプレイ①のoxyHbの増加幅は実物①と同程度であり，ディスプレイ②

以降は，実物②以降と同程度，あるいはやや高い傾向にあった。

・ディスプレイ問題において，deoxyHbはディスプレイ①において減少傾向が見られ，ディスプレイ②以降ではやや増加する傾向にあった。

・ディスプレイ②以降のdeoxyHbの増加幅は，実物②以降よりもやや高い傾向にあった。

・ディスプレイ問題の確認作業において，oxyHb，deoxyHb 双方とも増加が見られた。（他の被験者 7 名中（C1 を除く）5 名においても，同様の傾向が見られた。）

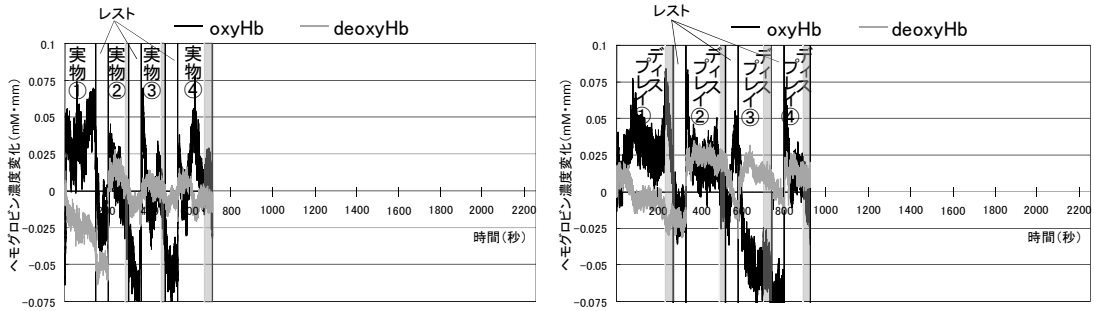


図6-10　被験者C4のヘモグロビン濃度変化（10CH）
（左図：実物問題，右図：ディスプレイ問題）

6.1.4. 考察

(1)　全体の行動観察結果，事後の感想より

12名に実験を実施した結果，安定したデータを取得でき，考察対象とできたのは8名であった。考察対象外となった4名は，ブロックの操作時に頭が動く様子が多く見られたことから，体動がデータの不安定さを招いた一因に考えられる。見本の立体や作製する立体を手に取ったり,机に戻したりする動作に加え，ブロックを手に取り，机から離れた位置で立体を構成したことが，体動につながったと考えられる（図6-1参照）。小学生を対象とした実験では，常時，机上

で操作できるものが望ましいといえる。

正誤について，被験者8名中7名についてはブロックの置き間違いは見られず，全問正しく立体を構成した。ブロックを置き間違えた被験者1名においても，間違い箇所は課題全体を通して1箇所であり，被験者は課題の内容を正しく理解し，課題を遂行したと判断した。

所要時間について，いずれの被験者も実物課題よりもディスプレイ問題に時間を要した。事後の感想において，全被験者ともディスプレイ問題の方が難しいと回答したことから，難度の高さが所要時間の長さにつながったといえる。また，ディスプレイ問題に著しく時間を要した被験者 C1 を除く 7 名の平均値より，実物問題，ディスプレイ問題ともに試行を経るごとに所要時間が短縮する傾向が読みとれたが，短縮幅はディスプレイ問題の方が大きかった。とりわけ，ディスプレイ①からディスプレイ②にかけての短縮が顕著であり，実際に 8 名中 7 名に時間の短縮が見られた。さらに，ディスプレイ①の標準偏差は全体をとおして最大であったが，ディスプレイ②では半減した。このことから，ディスプレイ①では解決方法を獲得する過程であり，難度が高かったことが所要時間に個人差を生じさせたが，ディスプレイ②ではほとんどの被験者が解決方法を獲得し，それぞれの所要時間が短縮した結果，所要時間の個人差も縮小したと考えられる。なお，実物問題において，実物①から実物③では所要時間の減少傾向が見られるのに対し，実物③から実物④にかけて増加がみられるのは，被験者 8 名中 7 名の所要時間が増加しているためであり，ブロックの構成が複雑であったことが所要時間の増加の要因であると考えられる。

平均所要時間の算出から除いた被験者 C1 の所要時間は，実物問題，ディスプレイ問題ともに，8 名中最長であり，実物問題（800 秒）とディスプレイ問題（2101 秒）を合わせて約 40 分を要した。他の被験者の平均と比較して，実物問題が約 1.6 倍，ディスプレイ問題が約 2.7 倍の時間であった。小学生を対

象とした場合，問題解決のみで 40 分の時間は負担が大きいため，より難度の低い問題を設定する必要がある。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果より

被験者 C1 ついて，実物問題においては，oxyHb は実物①の増加幅が最も大きく，その後は試行ごとに増加幅が減少した。deoxyHb についても，試行を経るごとに増加幅が減少する傾向にあった。試行を進めるごとに解決方法をつかみ,慣れが生じたことがヘモグロビンの増加の抑制につながったと考えられる。ディスプレイ問題については，所要時間が問題全体をとおして最長であったディスプレイ①において，oxyHb，deoxyHb とも増加幅が最大となった。とりわけ，deoxyHb の増加は，実物問題やディスプレイ②以降と比べて顕著（約 3 倍）であり，問題の開始から終了まで増加が継続した。他の被験者と比較しても deoxyHb の増加幅は最大であった。被験者 C1 のディスプレイ①の所要時間は全被験者の中で最長であり，事後の感想においても「ディスプレイ①を始めようとした時に，どうやって取り組めばいいか分からなくなった」と回答した。このことから，ディスプレイ①において，相当な難度の高さを感じていたと考えられ，このことが oxyHb と，とりわけ deoxyHb の増加に反映されたと予想される。（deoxyHb の増加は右側のみで生じたことから，oxyHb に対して，deoxyHb の方が局所的に増加が生じる傾向があると考えられる。）ディスプレイ②以降は，所要時間の短縮とともに，oxyHb，deoxyHb ともに増加幅は縮小し，実物問題と同程度となった。ただし，実物課題，ディスプレイ課題の双方とも，見本と作製した立体を同定する確認作業時には，oxyHb，deoxyHb の両方の増加が見られた。ブロックの操作は行われておらず，行動観察からでは見比べの作業と判断されうる確認作業であるが，負荷の高い活動であったことが予想される（黒田・岡本 2005）。

被験者 C4 について，実物問題の oxyHb は，実物①の増加幅が最も大きく，

その後は試行ごとに増加幅が減少した。これは，被験者 C1 と同様に，試行を進めるごとに解決方法をつかみ,慣れが生じたことによると考えられる。一方，deoxyHb は，実物②から実物④ではやや増加が見られるが，実物①では減少した。実物①の減少は，oxyHb の増加幅が実物①で大きかったことより，oxyHb が増加したことによる影響を受けた相対的な変化であることが推測できる。ディスプレイ問題についても実物問題と同様であり，oxyHb はディスプレイ①の増加幅が最も大きく，その後は試行ごとに増加幅が減少する傾向にあった。deoxyHb はディスプレイ①で減少傾向に，ディスプレイ②からディスプレイ④ではやや増加が見られた。ただし，oxyHb，deoxyHb とも，ディスプレイ問題の 2 試行目以降（ディスプレイ②～④）の増加幅は，実物問題の 2 試行目以降（実物②～④）よりも高い傾向にあった。ディスプレイ課題の方が難度が高いと答えていることからも，全体をとおしてディスプレイ課題の方に難度を感じていたと考えられる。また,ディスプレイ課題においては,確認作業時に oxyHb, deoxyHb とも増加する傾向にあったことから，ディスプレイ課題における確認作業は，負荷の高い活動であることが予想される。なお，この傾向は，被験者 C1 を除く他の被験者 7 名中 5 名にも見られたことから，共通性の高い特徴であるといえる。

6.1.5.　まとめ

本実験では，立体構成の問題解決過程における，脳内ヘモグロビン濃度変化を検討した。その結果を実験目的で述べた達成項目に沿ってまとめると次のようになる。

(1) 総じて実物問題よりもディスプレイ問題の方が難しく，ディスプレイ問題の難度の感じ方には，個人差が大きかった。

(2) 問題解決によって oxyHb, deoxyHb ともに増加する傾向にあった。ただし，

とりわけ難度が高いと考えられる場合には deoxyHb の増加が顕著となった。また，ディスプレイ問題では，行動観察からでは見比べの作業と判断されうる確認作業で，oxyHb，deoxyHb の増加が多くの被験者で見られた。これらのことから，難度の高さが oxyHb，deoxyHb の増加に反映された可能性が考えられた。

(3) 小学生を対象とした実験においては，所要時間が過度に長くならないよう，難度を下げ，問題数を減らすことや，体動を防ぐため，常に机上での作業となるような平面図形に関する問題に変更することなどの検討の必要性が示唆された。

6.2. 小学生を対象とした実験

6.2.1. 実験目的

本実験の目的は，小学生を対象に，図形問題解決時の脳内ヘモグロビン濃度計測を実施し，問題解決過程における特徴を明らかにすることである。図形問題として，図形の性質や合同などを考える必要のある「ジグソーパズル」を設定した。具体的な達成項目として次の 3 点を設定する。

(1) 小学生を対象に計測することが可能であるかを検討する。

(2) 正誤，所要時間，事後の感想から，ジグソーパズルの問題解決過程の特徴を考察する。

(3) oxyHb と deoxyHb の変化を上記の結果と照合し，問題解決過程の特徴がどのようにヘモグロビン濃度変化に反映されるのかを考察する。

大学生での基礎実験を踏まえて，小学生用に実験課題や実験環境を調節，設定し，上記の項目の達成を図る。

6.2.2. 実験方法

(1)　実験環境

本実験は，被験者ごとに単独で実施した。実験者は，課題の遂行状況の観察者（実験の説明を含む）と，機器操作者の 2 名とした。実験に際しての阻害要因はなく，被験者は課題に専念できる環境であった。

(2)　実験概要

実験期間：2006 年 7 月のうち 2 日間

実験場所：立命館大学内実験室

被験者：小学校第 5 学年児童 4 名（男子 2 名，女子 2 各；10 歳 2 名，11 歳 2 名）とした。

事前に，実験遂行における安全性と実験結果の扱いに関して説明を行い，実験の遂行とその結果の発表について被験者と保護者から文書で同意を得た。

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んだ（図 6-11）。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した。

光計測装置：OMM－3000（島津製作所製）

図 6-11　実験遂行場面

計測部位:身体的に過度な負担とならないよう,前頭前野の 4 箇所に限定した。

プローブは，前額部に，水平に 5 箇所配列し，4 箇所（1～4CH）を計測できるように設定した（図 6-12）。各プローブ間の距離は 3cm であった。前頭前野を計測の対象部位としたのは，毛髪によるノイズが少ないこと，思考や判断などの高次な活動を司るとされていることによる。

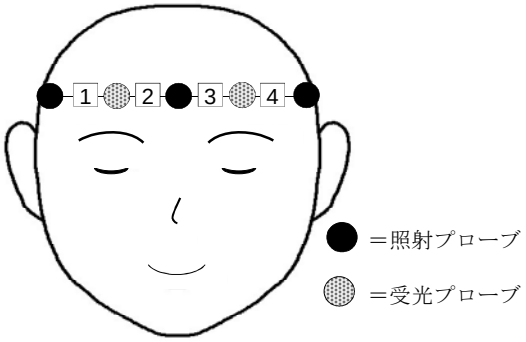


図 6-12　光計測装置のプローブの装着図（数字は CH を表す）

(3)　実験課題

大学生を対象とした実験より，実験課題の難度，問題数，平面図形への変更について，検討の必要性が示唆された。そこで，問題の内容を理解しやすいよう，また，常時，机上で作業ができるよう，実験課題は図形問題として，ジグソーパズルを設定した（黒田・岡本 2006）。また，問題数は 1 問とし，ビデオ録画映像を用いた解決方法の観察結果との照合により考察を行うこととした。

実験に用いたジグソーパズルは，図6-13に示したものである。ピース数は15であり，サイズは縦10.5cm，横15.0cmであった。

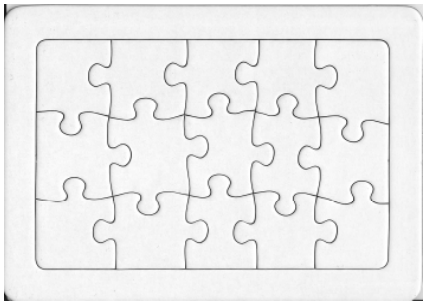


図6-13　実験に用いたジグソーパズル

(4)　実験手順

被験者は，次の手順に従って，実験遂行を行うこととした。

1. プローブを装着する（実験者が行う）。

2. 課題遂行方法の説明を受ける。

3. 閉眼・安静状態の後，実験者の「始め」の合図とともに開眼し，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（実験者が行う）。

5. 感想を記述，口述する。

6.2.3.　結果

(1)　行動観察結果

①データ取得

実験実施に際して，被験者にプローブの装着による身体的負担や問題難度の高さによるストレスを過度に強いることなく，円滑に実験を実施することができた。また，データ取得は適切になされた。

②正誤

いずれの被験者も，間違いはなく，最後までパズルを完成させた。ジグソーパズルの遊び方を知らない被験者はいなかった。

③所要時間

図 6-14 は，被験者 4 名それぞれの所要時間を示したものである。所要時間の長い被験者から順に，被験者 D1，D2，D3，D4 とした。特徴として，次の点が挙げられる。

・被験者 D1 の所要時間は，被験者 4 名中最長であり，最短である被験者 D4 のおおよそ 3 倍（3.4 倍）であった。

・被験者 D2 の所要時間は，被験者 4 名中 2 番目に長く，最短である被験者 D4

のおおよそ 2 倍（2.3 倍）であった。

・被験者 D3 と D4 の所要時間は類似し，被験者 D1，D2 よりも短かった。

なお，ここでは被験者による所要時間の特徴の差異が大きく，その特徴をもとにした複数のタイプが考えられたため，被験者全体の所要時間の平均値については議論しないこととした。

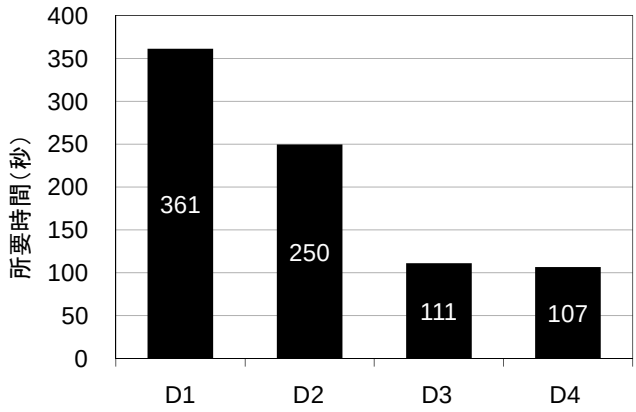


図6-14　ジグソーパズルの所要時間

④事後の感想

事後の感想記述において,難度について質問を行った。「とても難しかった」，「まあまあ難しかった」，「あまり難しくなかった」，「簡単だった」から選択させた結果，次の特徴が見られた。

・被験者D1，D2は，難度について「まあまあ難しかった」と回答した。

・被験者D3，D4は，難度について「あまり難しくなかった」と回答した。

⑤解決方法の観察

被験者の課題遂行時のビデオ録画映像を用いて，各被験者がどのように問題解決を行ったのかについて観察を行った。その結果，解決方法に次の特徴が見られた。

・被験者D1は，無作為にピースを手に取り，4，5箇所に当てはめてみるが，異

なる場合は諦め，また次のピースを手に取るという作業が中心であった。直線や直角の部分がないピースでも，台紙の周囲や角の部分に当てはめてみる作業が多く見られた。また，ピースと台紙の図形が合同である場合であっても，図形の回転ができず，当てはめられないことが多数あった。残りのピースが少なくなってきた後半では，手を止めてピースの図形と台紙の図形を見比べてから当てはめる場面が観察された。

・被験者D2は，無作為にピースを手に取り，1，2箇所に当てはめてみるが，異なる場合は諦め，また次のピースを手に取るという作業が中心であった。直線や直角の部分がないピースでも，台紙の周囲や角の部分に当てはめてみる作業が見られたが，合同であることの見当がついた場合には，図形を回転させて当てはめることができた。残りのピースが少なくなってきた後半では，手を止めてピースの図形と台紙の図形を見比べてから当てはめる場面が観察された。

・被験者D3，D4は，まず，直線や直角の部分があるピースを，台紙の周囲や角の部分に埋めていき，最後に真ん中の部分を埋めた。

⑥行動観察結果による被験者分類

所要時間の長さには３つのタイプがあった。そこで，以下では所要時間の長さをもとに，被験者を３つの群に分類して検討を行うこととする。分類は次のとおりである。

・第Ⅰ群：被験者 D1。被験者 4 名中，所要時間が最長であり，被験者 D3，D4 の約 3 倍の所要時間であった群。

・第Ⅱ群：被験者 D2。被験者 4 名中，所要時間は中程度であり，被験者 D3，D4 の約 2 倍の所要時間であった群。

・第Ⅲ群：被験者 D3，D4。被験者 4 名中，所要時間が最短であった群。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果

光計測装置のデータは相対変化量を示すため，類似した特徴を示す被験者であっても，異なる被験者のデータを加算平均などの数値として操作し，分析することは，各個人のデータが示す変化の特徴を捨象してしまう可能性がある。そこで，以下では，上述した各群から１名を取り上げ，ヘモグロビン濃度変化の結果に言及する。

考察対象とする計測部位は，4 箇所のうち 2CH とする（図 6-12 参照）。2，3CH が，両端の 1，4CH に比して，毛髪によるノイズや瞬きによるプローブのずれが少なく，安定的なデータ取得ができ，さらに右側（2CH）は学習といった高次な活動における空間処理が優位であるとされるためである。なお，右側（2CH）と左側（3CH）で変化の形状に違いがある被験者は認められなかった。

また，ヘモグロビン濃度変化をグラフ化するにあたっては，実験開始時のみを 0 とするベースライン補正を行った。

①第Ⅰ群（被験者 D1）

図 6-15 は，被験者 D1 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。図 6-15，図 6-16，図 6-17 のグラフはいずれも，縦軸がヘモグロビン濃度変化（mM・mm）を，横軸が所要時間（秒）を表し，両軸とも全てのグラフのスケールを統一した。したがって，横軸は最も所要時間の長い被験者 D1 に統一することになり，その他のグラフでは右側に空白が生じた。グラフ内の黒色線が oxyHb，灰色線が deoxyHb の変化を示している。

図 6-15 より，特徴として次の点が挙げられる。なお，図中の灰色の網掛け部分は，手を止めてピースと台紙の図形を見比べてから当てはめた場面を指す（網掛け部分以外は，無作為に当てはめてみる作業が中心であった）。

・oxyHbは，増減を繰り返し，灰色の網掛け部分で増加が顕著になった。

・deoxyHbは，はじめに増加し，概ねその値で推移した。

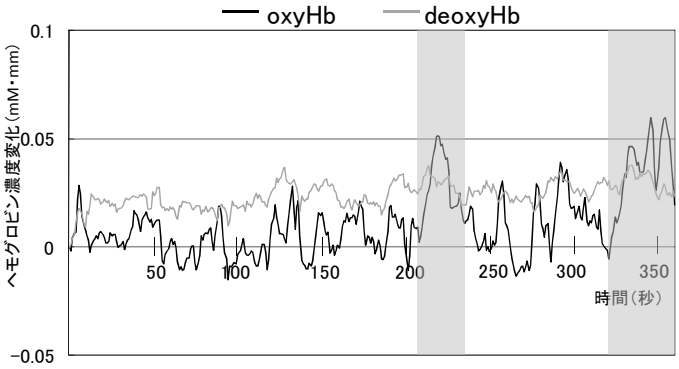


図6-15　被験者D1のヘモグロビン濃度変化

②第Ⅱ群（被験者 D2）

図 6-16 は，被験者 D2 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。なお，図中の灰色の網掛け部分は，手を止めてピースと台紙の図形を見比べてから当てはめた場面を指す（網掛け部分以外は，無作為に当てはめてみる作業が中心であった）。

・oxyHbは，増減を繰り返し，灰色の網掛け部分で増加が顕著になった。

・deoxyHbは，やや減少する傾向にあった。灰色の網掛け部分では減少幅が拡大した。

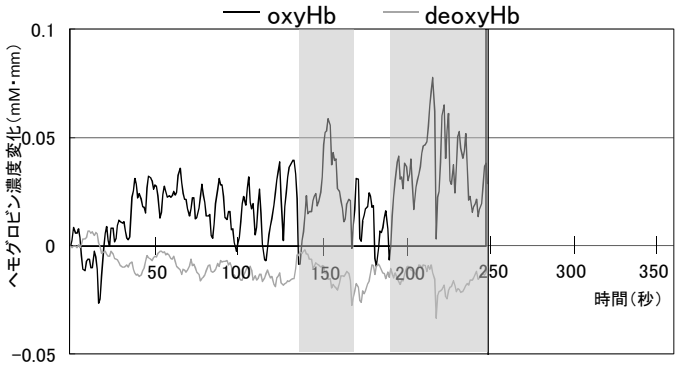


図6-16　被験者D2のヘモグロビン濃度変化

③第Ⅲ群（被験者 D3）

２名の被験者が分類された第Ⅲ群からは，より第Ⅲ群のヘモグロビン濃度変化の特徴を表している被験者 D3 を取り上げる。図 6-17 は，被験者 D3 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。以下の特徴は，第Ⅲ群に共通するものである。

・oxyHb は，前半において増減が見られたが，後半は 0 付近で推移した。

・deoxyHb は，概ね 0 付近で推移する傾向にあった。

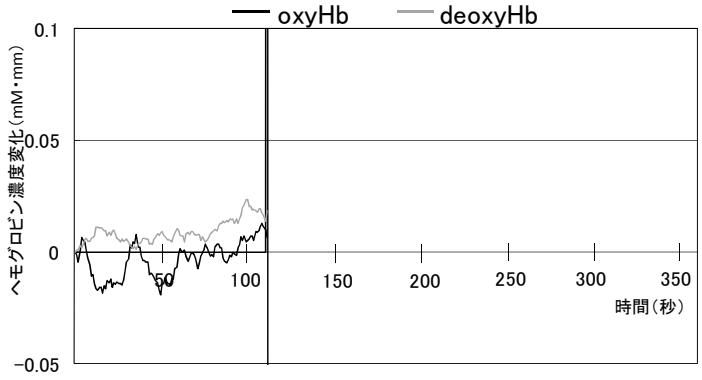


図6-17　被験者D3のヘモグロビン濃度変化

6.2.4. 考察

(1) 全体の行動観察結果，事後の感想より

身体的，精神的なストレスにより実験の遂行が困難となった被験者はなく，円滑に実験を実施することができた。また，全被験者について，適切にデータを取得することができた。

正誤に関しては，いずれの被験者も最後まで正しくパズルを完成させ，誤答は見られなかった。ジグソーパズルの遊び方を知らない被験者はいなかったことからも，いずれの被験者も実験課題の内容を正しく理解し，遂行したと判断した

所要時間については，３つのタイプが認められたため，これを基準に被験者を３群（第Ⅰ群～第Ⅲ群）に分類した。所要時間が最長であった群を第Ⅰ群（被

験者 D1），次に長かった群を第Ⅱ群（被験者 D2），最短であった群を第Ⅲ群（被験者 D3，D4）とした。

第Ⅰ群の被験者は，事後の感想において「まあまあ難しかった」と回答しており，解決方法の観察からは，念頭での合同の判断ができない場合が多く，無作為に複数の箇所にピースを当てはめる作業が見られた。所要時間が最長であったことを併せると，4 名の被験者の中では，特に高い難度を感じていたと考えられる。第Ⅱ群の被験者は，事後の感想において「まあまあ難しかった」と回答しており，解決方法の観察からは，無作為に 1，2 箇所にピースを当てはめていく作業が見られた。ただし，第Ⅰ群とは異なり，合同である見当がついた場合はピースを回転させて当てはめることができた。このことから，ある程度の難度の高さを感じていたが，Ⅰ群よりも低い難度であったと考えられる。第Ⅲ群の被験者は，事後の感想において「あまり難しくなかった」と回答しており，解決方法の観察からも，各ピースの図形の性質を判断しながら，計画的に問題を解決したことがうかがえた。解決方法を獲得していたといえ，4 名の被験者の中では，感じていた難度は最も低かったと考えられる。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果より

感じていた難度が高かったと考えられる第Ⅰ群では，全体をとおして無作為にピースを当てはめる操作が見られ，oxyHbは増減を繰り返し，deoxyHbは増加した値で推移する傾向にあった。ただし，残りのピースが少なくなった後半では，手を止めてピースと台紙の図形を見比べてから当てはめる場面が見られ，ここではoxyHbの増加が顕著であった。このことから，ピースを当てはめる試行錯誤の操作に伴ってoxyHbが増減し，とりわけ合同の可否の判断を念頭で行う場合にはoxyHbが顕著に増加したと予想できる。また，終始高い難度を感じていたことがdeoxyHbの増加とその値の維持に反映したと考えられる。

感じていた難度が中程度であったと考えられる第Ⅱ群は，第Ⅰ群と同様に，

全体をとおして無作為にピースを当てはめる操作が見られ，oxyHbは増減を繰り返した。また，残りのピースが少なくなった後半では，手を止めてピースと台紙の図形を見比べてから当てはめる場面が見られ，ここではoxyHbの増加が顕著であった。ただし，第Ｉ群で見られたdeoxyHbの増加は確認されなかった。このことから，ピースを当てはめる試行錯誤の操作に伴ってoxyHbが増減し，とりわけ合同の可否の判断を念頭で行う場合にはoxyHbが顕著に増加したが，難度が第Ｉ群ほど高くなかったため，deoxyHbは増加が見られなかったと考えられる。

感じていた難度が低かったと考えられる第Ⅲ群は，解決方法を獲得しており，計画的に問題解決を行ったといえ，前半にoxyHbの増減が見られたが，後半はoxyHb，deoxyHbとも0付近で推移する傾向が見られた。計画的な解決により，難度は低かったため，ヘモグロビン濃度は増加しない傾向にあったと考えられる。

6.2.5.　まとめ

本実験では，ジグソーパズルの問題解決過程における，脳内ヘモグロビン濃度変化を検討した。その結果を目的で述べた達成項目に沿ってまとめると次のようになる。

(1) 本実験では，小学生を被験者として，安定したデータ取得が可能であった。実験設定にあたっては，身体的・精神的負担を考慮して，装着方法を簡便化した。また，実験課題を，常時，机上で操作できる平面図形のものへ変更し，問題数の縮小を行うことで，時間の短縮に留意した。

(2) 所要時間，事後の感想の結果から，感じていた難度が高い群，中程度の群，低い群の３群に被験者を区分した。

(3) 上記の３群のヘモグロビン濃度変化の特徴について検討した結果，課題の

難度が高いと感じた被験者では，oxyHb，deoxyHb とも増加する傾向が認められた。課題の難度が中程度であったと考えられる被験者では，oxyHb の増加が顕著であった。課題の難度が低いと感じた被験者では oxyHb，deoxyHb ともに増加しない傾向にあった。このことから，難度の高さが oxyHb，deoxyHb の増加に反映された可能性が考えられた。

【参考文献】

黒田恭史，岡本尚子（2005）「立体製作時と確認時の脳内ヘモグロビン濃度変化の特徴について」日本教育実践学会第8回研究大会発表論文集：59-60

黒田恭史，岡本尚子（2006）「計算課題と図形課題遂行時における小学生の脳内ヘモグロビン濃度変化の特徴」数学教育学会秋季例会発表論文集：37-39

岡本尚子，江田英雄，山内留美，菅井勝雄，前迫孝憲，黒田恭史（2005）「立体作製時における脳内ヘモグロビン濃度の変化について」日本教育工学会第21回全国大会講演論文集（課題研究）：147-150

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Vol.48，No.6 (2006/6)：101-107

【注】

１）ダイヤブロック：株式会社河田が発売しているブロックの玩具である。

第 7 章　「ヒント提示学習場面」における「計算」問題解決過程のヘモグロビン濃度変化

要約

教師が助言を行うもとでの学習を想定した「ヒント提示学習場面」における「計算」問題解決過程の脳内ヘモグロビン濃度計測を行い，ヒント提示による問題解決過程の特徴がヘモグロビン濃度変化にどのように反映されるのかを検討する。実験課題は，除法の虫食い算とし，第 1 節では大学生を対象に，第 2 節では小学生を対象に実験を実施する。

7.1.　大学生を対象とした実験

7.1.1.　実験目的

本実験の目的は，小学生を対象とする実験の基礎実験として，大学生を対象にヒント提示のある計算問題解決時の脳内ヘモグロビン濃度計測を実施し，ヒントを用いた問題解決過程の特徴がヘモグロビン濃度変化にどのように反映されるのかを明らかにすることである。計算問題としては，既知の手順に沿うことで解決が可能な「筆算」と，演算構造を考えながら解決方法を導出する必要がある「虫食い算」を設定し，「虫食い算」においてヒント提示を行う。具体的な達成項目として次の 3 点を設定する。

(1) 虫食い算におけるヒント提示が，問題解決過程にどのような特徴や変化をもたらすのかを，正答率，所要時間，事後の感想をもとに考察する。

(2) ヘモグロビン濃度変化の結果を上記の結果と照合し，ヒント提示のどのような特徴がヘモグロビン濃度変化に反映されるのかを，両問題の比較を併せて検討する。

(3) 小学生を対象とした実験に向けて，計算問題の演算の種類，ヒント提示の

設定などの改良すべき点を検討する。

7.1.2.　実験方法

(1)　実験環境

本実験は，被験者ごとに単独で実施した。実験者は，課題の遂行状況の観察者（実験の説明と問題用紙の差し替えを含む）と，機器操作者の 2 名とした。実験に際しての阻害要因はなく，被験者は課題に専念できる環境であった。

(2)　実験概要

実験期間：2009 年 9 月のうち 2 日間

実験場所：佛教大学内実験室

被験者：大学生 3 名（男性 3 名；19 歳，20 歳，21 歳）とした。

事前に，実験遂行における安全性と実験結果の扱いに関して説明を行い，実験の遂行とその結果の発表について被験者から文書で同意を得た。

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んだ。被験者後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した（図 7-1）。

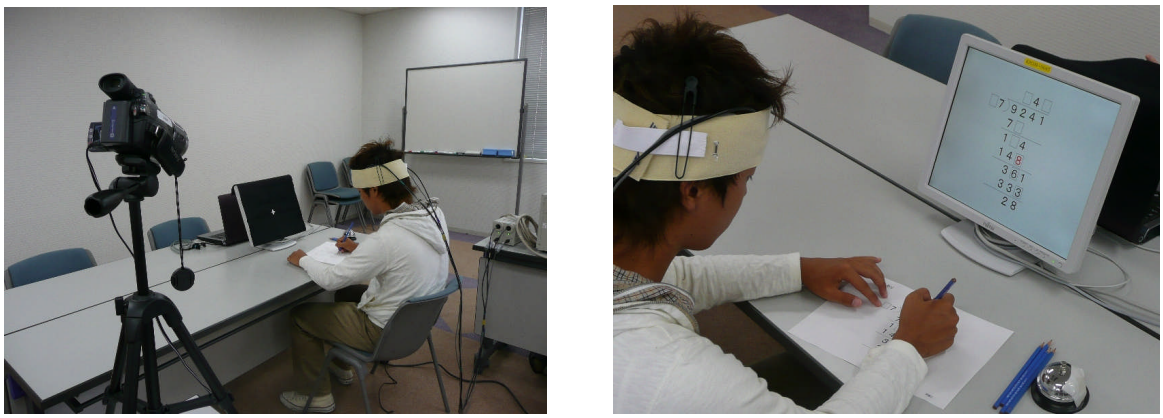


図 7-1　実験遂行場面
（左図：筆算，右図：虫食い算）

光計測装置：NIRO－200（浜松ホトニクス製）

計測部位：前頭前野を 2 箇所とした。プローブは，前額部に 4 箇所配列し，2 箇所（右側，左側）を計測できるように設定した（図 7-2）。各プローブ間の距離は 3cm であった。前頭前野を計測の対象部位としたのは，毛髪によるノイズが少ないこと，思考や判断などの高次な活動を司るとされていることによる。

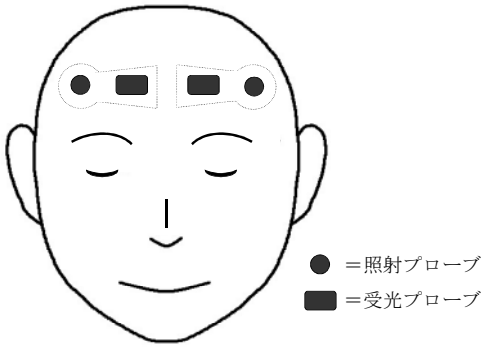


図 7-2　光計測装置のプローブの装着図

(3)　実験課題

実験課題は計算問題として除法の筆算,除法の虫食い算を設定した。筆算は，虫食い算との比較を行うための問題である。演算として除法を設定したのは，脳活動計測を伴わない予備実験において乗法と除法を実施したところ，乗法は桁数が多いことによる難しさがあり，除法の方がより演算構造を考える必要があることが確認されたためである。

課題全体としては，筆算 1 試行（4 分間）の後，虫食い算 3 試行（虫食い算①～虫食い算③）を行う合計 4 試行とし，その遂行順序を図 7-3 に図示した。筆算は，1 枚に 10 問を記したものを 5 枚重ねて被験者に提示し，4 分間解答を続ける 1 試行とした。虫食い算では，1 試行の制限時間を 4 分間として，1 試行に 1 問を 3 試行行うこととした。筆算を 3 試行とせず，1 試行としたのは，

第 5 章の大学生を対象とした計算問題の実験において，筆算で疲れたとの感想があり，なおかつ，筆算の 3 試行はヘモグロビン濃度変化に大きな差異が見られなかったためである。1 試行の制限時間を 4 分間としたのは，虫食い算におけるヒント提示に関係しており，詳細については後述する。

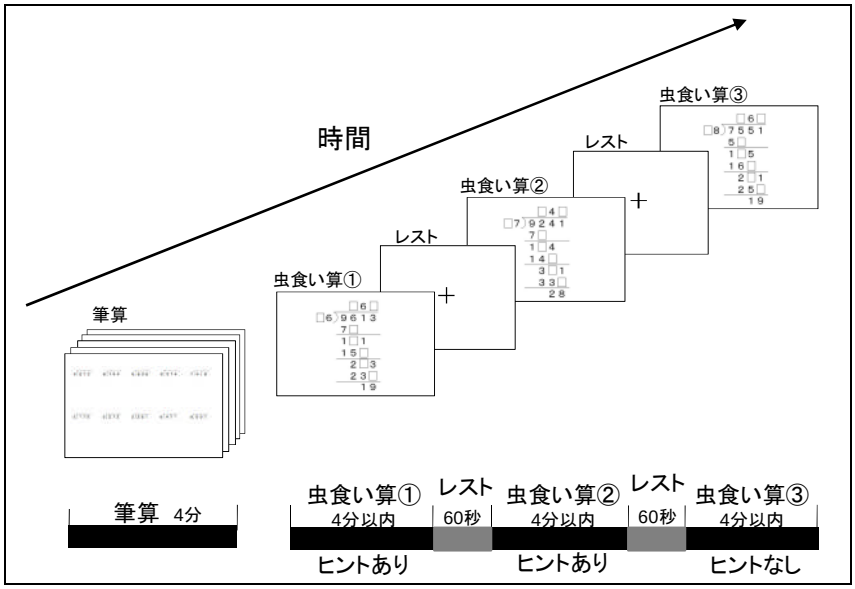


図 7-3　実験課題遂行順序

図 7-4，7-5 は，筆算の 1 枚目，虫食い算の 1 試行目（虫食い算①）を示したものである。被験者の疲れを考慮して，筆算は虫食い算よりも桁数を減じ，3 桁÷1 桁＝2 桁あまり 1 桁を設定した。筆算問題内の難度の統一を図るため，計算途中の桁数や繰り下がりの場所を統一した。虫食い算は，4 桁÷2 桁＝3 桁あまり 2 桁を設定した。筆算問題内の難度の統一を図るため，計算途中の桁数や繰り下がりの場所をそろえるとともに，虫食い算の空欄数は 3 試行とも 8 つとし，空欄の位置も同一とした。問題の桁数，繰り上がりの場所，空欄の位置などは，予備実験により調節を行って決定したものである。問題用紙は，筆算，虫食い算の全てを A4 サイズ横置きとし，筆記により解答させることとした。思考過程や解決過程が紙上に残るよう，消しゴムの使用は禁止し，修正は取り

消し線により行うように指示を行った。

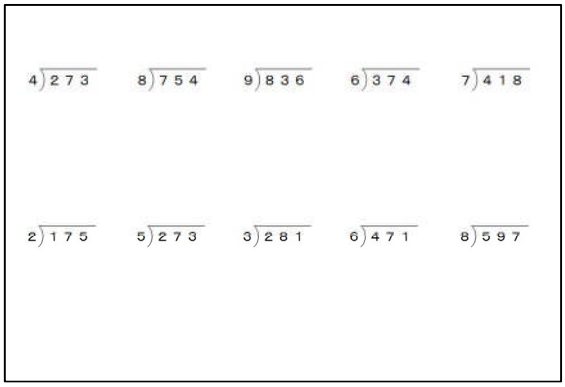


図 7-4　筆算 1 枚目

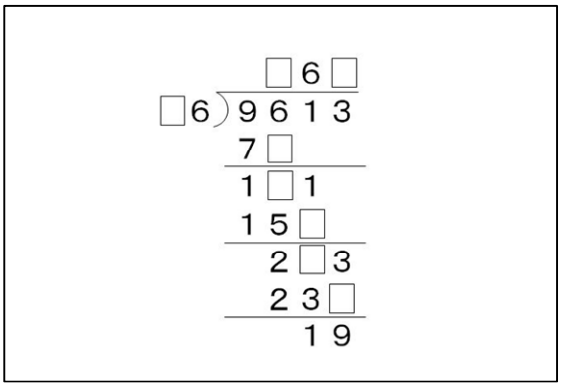


図 7-5　虫食い算①

本実験では，虫食い算①，②において，教師の助言を想定したヒント提示を行った。ヒントは，被験者の前に置いたディスプレイ上に，虫食い算の空欄部分の数字（答え）を 30 秒ごとに 1 箇所ずつ提示するものとした（図 7-1 参照）。数字の提示順序は，図 7-6 に示したⓐからⓗの順であった。この提示順序が，解決手順の 1 つとなっており，被験者にとっての有効なヒントとなることを意図した。提示間隔を 30 秒としたのは，予備実験において，被験者が焦らず，飽きない時間設定として適切であると判断したためである。ヒント提示のない虫食い算③では，ディスプレイ上に問題のみを表示させた。

なお，先述した筆算，虫食い算，それぞれの試行の制限時間を 4 分間とした理由は，ヒント提示のある虫食い算①，②において，全てのヒントを参照した場合，約 4 分間（30 秒×8 回提示＝240 秒）で終了し，これに統一したためである。各試行の制限時間が 4 分である旨は，事前に被験者に説明を行った。

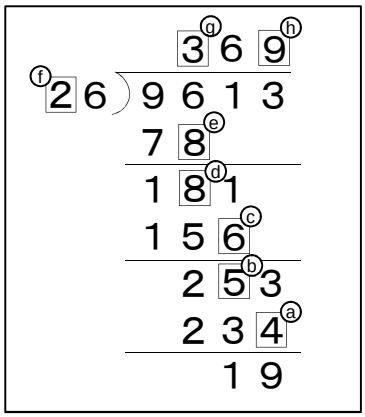


図 7-6　ヒント提示の順序（虫食い算①）

(4)　実験手順

被験者は，次の手順に従って，実験遂行を行うこととした。

1. プローブを装着する（実験者が行う）。
2. 課題遂行方法の説明を受ける。
3. 筆算：黒地シート上の注視点「＋」を安静状態で注視し，実験者の「始め」の合図とともに解答を開始する。4分後，実験者の「やめてください」の指示により解答を終了する。注視点を注視し，安静状態をとる。
4. 虫食い算：黒地シート上の注視点「＋」を注視，安静状態の後，実験者の「始め」の合図とともに虫食い算①の解答を開始する。解答終了後，被験者は手元のベルを鳴らして終了の合図を行う。その後，注視点を注視し，安静状態で60秒休憩する。実験者の「始め」の合図とともに虫食い算②の解答を開始する。以下，虫食い算③まで同様に実施する。ただし，虫食い算③は，4分以内に解答を終了できない場合，4分経過時に実験者の指示により終了する。
5. プローブを外す（実験者が行う）。
6. 感想を記述，口述する。

7.1.3.　結果

(1)　行動観察結果

①データ取得

３名に実験を実施し，いずれの被験者についても安定したデータを取得できた。

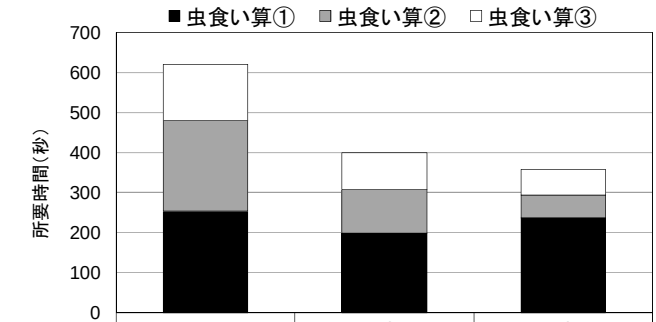
②正誤

被験者３名の平均正答率は，筆算，虫食い算ともに100%であった。

虫食い算については,事後の感想記述時に回答させた解決方法を確認したが,誤った解決方法を行った被験者は見られなかった。

③所要時間

図7-7は，筆算，虫食い算，各被験者の所要時間を表したグラフである。所要時間の長い被験者から順に，被験者E1，E2，E3とした。1つの棒が1人の被験者の3試行分（虫食い算①～③）の所要時間を表しており，黒色が虫食い算①，灰色が虫食い算②，白色が虫食い算③の所要時間を示す。特徴として，次の点が挙げられる。



	E1	E2	E3
□虫食い算③	140	91	63
■虫食い算②	227	110	57
■虫食い算①	253	198	237

図 7-7　虫食い算の所要時間

・いずれの被験者も,虫食い算①から虫食い算②にかけて所要時間が短縮した。

・2名の被験者（E1，E2）は，試行を経るごとに所要時間が短縮した。

・他の1名の被験者（E3）は，虫食い算①から虫食い算②にかけて大幅に所要時間が短縮し（180秒），虫食い算②から虫食い算③にかけて短縮はなされなかった（6秒増加）。

④事後の感想

事後の感想記述において，次の特徴が見られた。

・いずれの被験者も「はじめは解き方が分からなかったが，虫食い算①でのヒントにより,虫食い算②からは解けるようになった」に類する回答を行った。

・2 名の被験者（E1，E2）は，「虫食い算②では，ヒントを確認に使用した」に類する回答を行った。

・各試行について，感じた難度を 5 段階（1：簡単，2：やや簡単，3：普通，4：やや難しい，5：難しい）で評価するよう求めた結果，いずれの被験者も，虫食い算①から虫食い算②にかけて難度が下がった。（虫食い算①，②，③の順に，被験者 E1，E2 が，5，4，2 と評価し，被験者 E3 は，4，2，2 と評価した。）

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果

被験者 3 名のヘモグロビン濃度変化について，右側と左側のデータに変化の形状の違いがある被験者は認められなかった。いずれの被験者も左右のヘモグロビン濃度変化は類似しており，deoxyHb は 0 付近で推移する傾向にあった。さらに，3 名の被験者の全体的なヘモグロビン濃度変化は，類似した特徴を示す傾向にあった。

光計測装置のデータは相対変化量を示すため，類似した特徴を示す被験者であっても，異なる被験者のデータを加算平均などの数値として操作し，分析することは，各個人のデータが示す変化の特徴を捨象してしまう可能性がある。そこで，以下では，試行ごとに所要時間が短縮した被験者 E1，E2 のうち，総

所要時間が長く，より難度の高さを感じていたと考えられる E1 を取り上げ，ヘモグロビン濃度変化の結果に言及することとする。

考察対象とする計測部位は，左側とする（図 7-2 参照）。左側は学習といった高次な活動における論理的，言語的処理が優位であるとされるためである。なお，上述のとおり，本実験においては右側と左側のデータに変化の形状の違いがある被験者は認められなかった。

ヘモグロビン濃度変化をグラフ化するにあたっては，試行ごとの変化に着目するために，各試行の開始時を 0 とするベースライン補正を行った。

図 7-8 は，被験者 E1 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。筆算，虫食い算のグラフとも，縦軸がヘモグロビン濃度変化（μmol/L）を，横軸が所要時間（秒）を表し，2 つのグラフの各軸はスケールを統一した。したがって，横軸は所要時間の長い虫食い算に統一することになり，筆算のグラフでは右側に空白が生じた。グラフ内の黒色線が oxyHb，灰色線が deoxyHb の変化を示している。また，虫食い算①，②にある縦の破線は，ヒント提示を行った時点を示した線である。

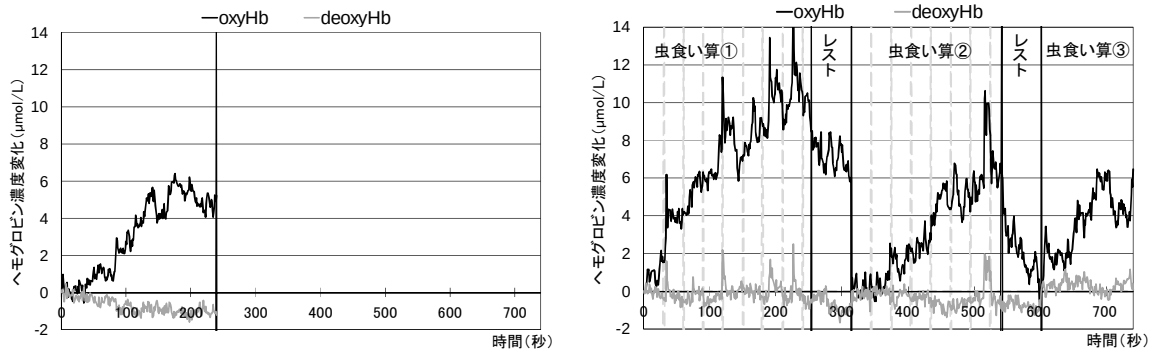


図 7-8　被験者 E1 のヘモグロビン濃度変化（左側）
（左図：筆算，右図：虫食い算）

図 7-8 より，特徴として次の点が挙げられる。

・筆算において，oxyHb は増加した。

・筆算において，deoxyHb は，0 付近で推移した。

・虫食い算において，oxyHb はいずれの試行も増加したが，虫食い算①の増加が顕著であり，虫食い算②，③と試行を経るごとに増加幅が減少した。

・虫食い算算において， deoxyHb は，全体をとおして 0 付近で推移した。

・筆算の oxyHb の増加幅と，虫食い算③の増加幅は同程度であった。

7.1.4. 考察

(1) 全体の行動観察結果，事後の感想より

3 名に実験を実施した結果，いずれの被験者についても安定したデータを取得できた。また，「はじめは解き方が分からなかったが，虫食い算①でのヒントにより，虫食い算②からは解けるようになった」との感想から，除法は演算構造を考えさせる問題としては適切であり，ヒントが有効に働くことが明らかとなった。ただし，虫食い算①，②と続けてヒント提示を行った結果，虫食い算②のヒントを確認のために利用する被験者がいたため，虫食い算①，②のいずれで解決方法を完全に獲得したかの確証を得ることが困難となった。小学生を対象とした実験では，大学生のように事後の感想を詳細にとることが難しいため，ヒント提示をどの試行で行うかを検討する必要があるといえる。また，身体的・精神的なストレスが過度とならないよう，桁数を減らす，虫食い算の空欄数を減らすなどの改良についても検討が必要となる。

正答率について，被験者 3 名は筆算，虫食い算ともに 100%であり，誤答はなかった。虫食い算の解決方法に誤りがなかったことからも，被験者は実験課題の内容を正しく理解し，遂行したと判断した。

所要時間については，被験者 3 名とも虫食い算①から虫食い算②にかけて短縮が見られた。「はじめは解き方が分からなかったが，ヒントにより，虫食い

算②からは解き方が分かった」との感想から，ヒントが有効に働き，解決方法の獲得に至ったことで虫食い算①から虫食い算②にかけて短縮が見られたといえる。また，試行を経るごとに所要時間が短縮した２名の被験者は，感じていた難度も試行を経るごとに「5，4，2」と下がっており，所要時間と難度に対応関係が見られた。虫食い算①から虫食い算②にかけて大幅に所要時間が短縮し，虫食い算③にかけては短縮がなされなかった残りの１名の被験者については，感じていた難度は「4，2，2」となった。虫食い算①から虫食い算②にかけて大幅に低下し，その後は変化がない特徴は，所要時間と対応しているといえる。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果より

虫食い算①における oxyHb の増加が最も顕著であり，虫食い算②，③の増加幅は縮小した。虫食い算①では，所要時間が長く，感じていた難度も「5」と評価していた。ヒントを活用している場合であっても，どのように解いていくのかについて解決方法を導き出さなければならず，ここで難度の高さを感じたことが，oxyHb の顕著な増加に反映したと考えられる。ただし，その後，虫食い算②，③では oxyHb の増加幅が減少した。虫食い算②，③では所要時間の減少が見られ，難度の評価も「4，2」と下がったことから，虫食い算①のヒントによって解決方法を獲得し，理解が進んだことで難度が下がり，増加幅の縮小につながったと予想できる。

また，所要時間が最も短く，難度の評価が「2」となった虫食い算③における oxyHb の増加幅は，虫食い算の増加幅と同様となったことから，解決方法の獲得後の虫食い算③は，虫食い算であっても，通常の筆算と同様の難度となったことを示している可能性が考えられる。

なお，これらの所要時間の減少，難度の低下，oxyHb の増加幅の減少の関係は，他の２名の被験者（E2，E3）についても同様の傾向を示した。

deoxyHbについては,全体に0付近で推移する傾向にあることから,deoxyHbが増加する程の難度の高さはなかったと考えられる。

7.1.5. まとめ

本実験では，筆算とヒント提示を用いた虫食い算の問題解決過程における，脳内ヘモグロビン濃度変化を検討した。その結果を目的で述べた達成項目に沿ってまとめると次のようになる。

(1) いずれの被験者に対しても，虫食い算の問題解決にヒント提示が有効に機能し,試行の進行とともに,所要時間の減少,感じる難度の低下が見られた。

(2) ヒントを参照し，それが有効に機能している際にも，解決方法の模索時である場合にはoxyHbの増加が見られた。ヒント提示の利用による解決方法の獲得後は，oxyHbの増加幅は減少し，最終的には筆算と同程度の変化となった。このことから，oxyHbの増加幅の減少に，解決方法の模索から獲得への変化が反映された可能性が考えられた。

(3) 小学生を対象とした実験においては，1試行目でのヒント提示が有効に機能し，解決方法を獲得したかどうかを検証可能な実験設定とする必要があることが示唆された。

7.2. 小学生を対象とした実験

7.2.1. 実験目的

本実験の目的は，小学生を対象に，ヒント提示のある計算問題解決時の脳内ヘモグロビン濃度計測を実施し，ヒントを用いた問題解決過程の特徴がヘモグロビン濃度変化にどのように反映されるのかを明らかにすることである。また，ヘモグロビン濃度変化の新たな分析方法についても検討することとする。具体的な達成項目として次の3点を設定する。

(1) 演算構造を考えながら解決方法を導出する必要がある「虫食い算」の問題解決過程におけるヒントが，小学生の問題解決にどのような影響をもたらすのかを，正誤，所要時間，事後の感想から明らかにする。

(2) ヒントが問題解決過程に及ぼす影響が，ヘモグロビン濃度変化にどのように反映されるのかを明らかにする。

(3) ヘモグロビン濃度変化の新たな分析方法として，周波数解析を行い，その特徴について考察する。

大学生での基礎実験を踏まえて，小学生用に実験課題や実験環境を調節，設定し，上記の項目の達成を図る。

7.2.2. 実験方法

(1) 実験環境

本実験は，被験者ごとに単独で実施した。実験者は，課題の遂行状況の観察者（実験の説明と問題用紙の差し替えを含む）と，機器操作者の 2 名とした。実験に際しての阻害要因はなく，被験者は課題に専念できる環境であった。

(2) 実験概要

実験期間：2007 年 12 月～2008 年 2 月のうち 4 日間

実験場所：佛教大学内実験室

被験者：小学校第 6 学年児童 8 名（男子 4 名，女子 4 名；男子 1 名が 11 歳，その他の 7 名は 12 歳）とした。

事前に，実験遂行における安全性と実験結果の扱いに関して説明を行い，実験の遂行とその結果の発表について被験者と保護者から文書で同意を得た。

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んだ。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した（図 7-9）。

計測部位：前頭前野を 2 箇所とした。プローブは，前額部に 4 箇所配列し，2 箇所（右側，左側）を計測できるように設定した（図 7-10）。各プローブ間の距離は 3cm であった。前頭前野を計測の対象部位としたのは，毛髪によるノイズが少ないこと，思考や判断などの高次な活動を司るとされていることによる。

図 7-9　実験遂行場面

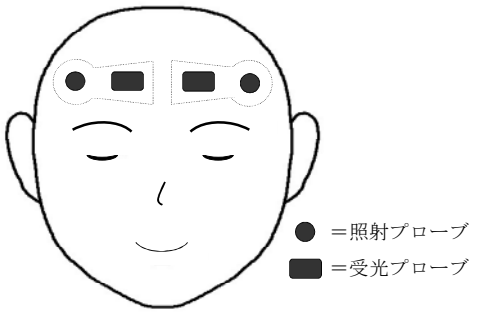


図 7-10　光計測装置のプローブの装着図

(3)　実験課題

実験課題は，計算問題として除法の虫食い算を設定した（Eda et al. 2008，岡本 他 2008，岡本・前迫 2009，岡本 他 2009a，Okamoto 2009，Okamoto and Maesako 2009）。第 5 章での小学生を対象とした計算問題の実験において，虫食い算のみでも考察が可能であったことから，比較としての筆算問題は

設定しないこととした。

課題全体としては，1 試行に 1 問の問題を 3 試行（試行①～③）行う設定とし，その遂行順序を図 7-11 に図示した。第 5 章の実験ではレストを設けなかったが，本実験ではレストを設定することとした。これは，計測箇所が 4 箇所（第 5 章）から 2 箇所（本実験）に減少したことで，装着に要する時間が短縮したためである。ただし，時間設定は大学生を対象とした実験での 60 秒よりも短くし，45 秒とした。

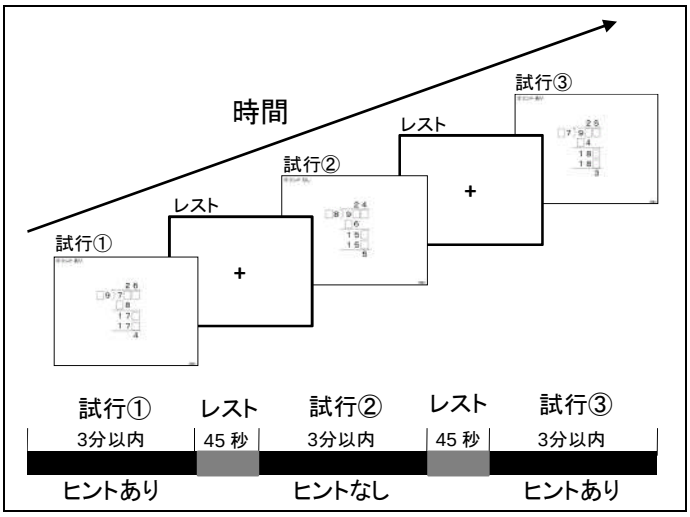


図 7-11　実験課題遂行順序

虫食い算の内容は，3 桁÷2 桁＝2 桁あまり 1 桁の筆算形式とした。難度の統一を図るため，計算途中の桁数や繰り下がりの場所をそろえるとともに，虫食い算の空欄数は 3 試行とも 6 つとし，空欄の位置も同一とした。問題用紙は A4 サイズ横置きとし，全て筆記により解答するものとした。思考過程や解決過程が紙上に残るよう，消しゴムの使用は禁止し，修正は取り消し線により行うように指示を行った。

本実験では，試行①，③において，教師の助言を想定したヒント提示を行うこととした。大学生を対象とした実験では，虫食い算①，②と連続してヒント

提示を行ったが，その結果，虫食い算②のヒントを確認のために利用する被験者がおり，虫食い算①，②のいずれで解決方法を完全に獲得したかの確証を得ることが困難となった。そこで，試行②のヒント提示を行わないことにより，ここで解決方法の獲得の可否を検証することとした。試行③では，ヒント提示を行い，解決方法を獲得した被験者と，未獲得の被験者で，ヒントがどのように影響するのかを検証することとした。

ヒントは，被験者の前に置いたディスプレイ上に，虫食い算の空欄部分の数字（答え）を 30 秒ごとに 1 箇所ずつ提示するものとした（図 7-9 参照）。数字の提示順序は，図 7-12 に示したⓐからⓕの順であった。この提示順序が，解決手順の 1 つとなっており，被験者にとっての有効なヒントとなることを意図した。提示間隔を 30 秒としたのは，予備実験において，被験者が焦らず，飽きない時間設定として適切であると考えられたためである。また，1 試行が 3 分程度（30 秒×6 回提示＝180 秒）であれば，身体的・精神的にストレスが過度とならず，問題解決に集中できると判断したためである。ヒント提示のない試行②では，ディスプレイ上に問題のみを表示した。

なお，各試行の制限時間は 3 分間としたが，これは，ヒント提示のある試行①，③において，全てのヒントを参照した場合，約 3 分間（30 秒×6 回提示＝180 秒）で終了し，これに統一したためである。各試行の制限時間が 3 分である旨は，事前に被験者に説明を行った。

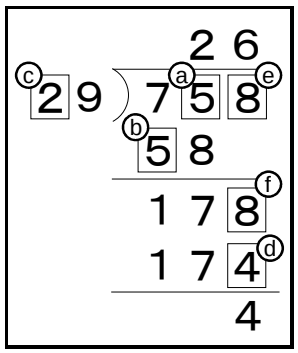


図 7-12　ヒント提示の順序（試行①）

(4)　実験手順

被験者は，次の手順に従って，実験遂行を行うこととした。

1. プローブを装着する（実験者が行う）。

2. 課題遂行方法の説明を受ける。

3. 黒地シート上の注視点「＋」を注視，安静状態の後，実験者の「始め」の合図とともに試行①の解答を開始する。解答終了後，被験者は手元のベルを鳴らして終了の合図を行う。その後，注視点を注視し，安静状態で60秒休憩する。実験者の「始め」の合図とともに試行②の解答を開始する。以下，試行③まで同様に実施する。ただし，試行②は，3分以内に解答を終了できない場合，3分経過時に実験者の指示により終了する。

5. プローブを外す（実験者が行う）。

6. 感想を記述，口述する。

7.2.3.　結果

(1)　行動観察結果

①データ取得

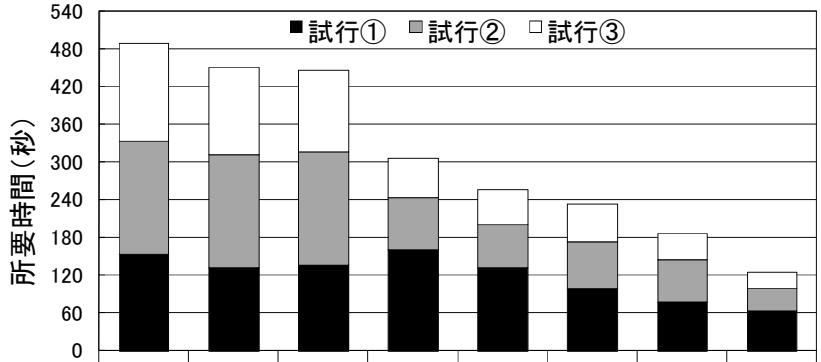
実験実施に際して，被験者にプローブの装着による身体的負担や問題難度の高さによるストレスを過度に強いることなく，円滑に実験を実施することができた。また，データ取得は適切になされた。

②正誤

被験者 8 名を，総所要時間の長い順から被験者 F1～F8 とおく。5 名（被験者 F4～F8）は全箇所正答（3 試行×6 箇所）であり，3 名（被験者 F1～F3）は試行②において未解答があった（試行①，試行③は全 6 箇所正答）。3 名のうち，2 名（被験者 F1，F3）は，試行②の全 6 箇所が未解答であり，1 名（被験者 F2）は 5 箇所が未解答であった。

②所要時間

図 7-13 は，各被験者の所要時間を示したグラフである。総所要時間の長い被験者から順に，被験者 F1～F8 とした。1 つの棒が 1 人の被験者の 3 試行分（試行①～③）の所要時間を表しており，黒色が試行①，灰色が試行②，白色が試行③の所要時間を示す。特徴として，次の点が挙げられる。



	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
□試行③	156	139	131	62	55	61	42	25
■試行②	180	180	180	83	69	73	67	36
■試行①	154	132	136	161	132	100	78	64

図 7-13　虫食い算の所要時間

・被験者 F1，F2，F3 は，試行①から試行③をとおして，所要時間が長かった。ヒント提示のある試行①と試行③の所要時間は概ね同様で，6 箇所中 4 箇所から 5 箇所目のヒントが提示された時点で解答を終了した。また，試行②は制限時間の 3 分以内に解答することができなかった。

・被験者 F4，F5，F6 は，試行①の所要時間は被験者 F1，F2，F3 と同程度であるが，試行②，③と試行を経るごとに所要時間の短縮が見られた。ヒント提示のある試行①と試行③を比較すると，約半分程度の所要時間に減少し，試行③では 6 箇所中 1 箇所から 2 箇所目程度のヒントで解答に至った。また，ヒント提示のない試行②においても，制限時間の半分以下で解答した。

・被験者 F7，F8 は，試行①の段階から所要時間が短く，6 箇所中 2 箇所目のヒント提示で解答することが可能であった。試行②，試行③においても，さらに時間短縮がなされた。

なお，ここでは被験者による所要時間の特徴の差異が大きく，その特徴をもとにした複数のタイプが考えられたため，被験者全体の所要時間の平均値については議論しないこととした。

④事後の感想

表 7-1 は，事後の感想記述において，除法筆算の虫食い算の経験の有無と，各試行で感じた難度を 5 段階評価（5：難しい，4：少し難しい，3：普通，2：少し簡単，1：簡単）で求めた結果を示したものである。特徴として次の点が挙げられる。

・被験者 F1，F2，F3 は，いずれも虫食い算の経験が無かった。全体を通して難度が高いと回答しており，試行②，③になっても難度が高いと感じる傾向が続いた。

・被験者 F4，F5，F6 は，いずれも虫食い算の経験が無いものの，難度はそれほど高くなかった。各被験者によってその変化は異なるが，試行③では難度が低い傾向にある点は共通していた。

・被験者 F7，F8 は，いずれも虫食い算の経験が有り，試行①から試行③を通して難度が低かった。

次に，事後の感想の記述，口述による回答における特徴的な内容として，次の点が挙げられる。

・被験者 F1，F2，F3 は，「試行①，③はヒントをそのまま写した箇所が多かった」，「試行①，③はヒントに頼れたが，試行②はヒントがなかったのでどうしたらいいか分からなかった」に類する回答を行った。

・被験者 F4，F5，F6 は，「試行①でヒントがなければ，試行②，③を解くこ

とができなかった」，「試行①のヒント提示の順序が役立った」，「試行③では，ヒントをほとんど参考にしなかった」に類する回答を行った。

・被験者 F7，F8 は，「試行①を見たとき，やり方はすぐに分かったので，ヒントは最初から見なかった」，「はじめは緊張したが，だんだん慣れてきてやりやすくなった」に類する回答を行った。

表 7-1　経験の有無と難度の 5 段階評価

経験・試行 / 被験者	経験	試行①	試行②	試行③	平均
F1	無	5	5	5	5.0
F2	無	3	5	4	4.0
F3	無	5	5	5	5.0
F4	無	3	1	1	1.7
F5	無	4	3	3	3.3
F6	無	1	3	2	2.0
F7	有	2	2	2	2.0
F8	有	1	1	1	1.0

⑤行動観察結果による被験者分類

正誤，所要時間，事後の感想の結果には 3 つのタイプがあった。そこで，以下ではこれらをもとに，被験者を 3 つの群に分類して検討を行うこととする。分類は次のとおりである。

・第Ⅰ群：被験者 F1，F2，F3。試行①のヒントを解決方法の獲得に活かすことができなかったため，ヒント提示のない試行②は解答できず，試行③においてもヒント提示が必要であった。

・第Ⅱ群：被験者 F4，F5，F6。試行①のヒント提示を解決方法の獲得に活かすことができたため，試行②，③では独力で解決が可能であった。

・第Ⅲ群：被験者 F7，F8。課題遂行当初からヒントを必要とせず，独力で解決に至った。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果

被験者８名のヘモグロビン濃度変化について，右側と左側のデータに変化の形状の違いがある被験者は認められなかった。いずれの被験者も左右のヘモグロビン濃度変化の特徴は類似していた。

光計測装置のデータは相対変化量を示すため，類似した特徴を示す被験者であっても，異なる被験者のデータを加算平均などの数値として操作し，分析することは，各個人のデータが示す変化の特徴を捨象してしまう可能性がある。そこで，以下では，上述した各群から１名を取り上げ，ヘモグロビン濃度変化の結果に言及する。

考察対象とする計測部位は，左側とする（図 7-12 参照）。左側は学習といった高次な活動における論理的，言語的処理が優位であるとされるためである。なお，上述のとおり，本実験においては右側と左側のデータに変化の形状の違いがある被験者は認められなかった。

ヘモグロビン濃度変化をグラフ化するにあたっては，試行ごとの変化に着目するために，各試行の開始時を 0 とするベースライン補正を行った。

①第Ｉ群（被験者 F1）

終始ヒントを必要とした第Ｉ群からは，所要時間が最長で，ヘモグロビン濃度変化が顕著であった被験者 F1 を取り上げる。

図 7-14 は，被験者 F1 のヘモグロビン濃度変化の結果である。図 7-14，図 7-15，図 7-16 のグラフはいずれも，縦軸がヘモグロビン濃度変化（μmol/L）を，横軸が所要時間（秒）を表し，両軸とも全てのグラフのスケールを統一した。したがって，横軸は最も所要時間の長い被験者 F1 に統一することになり，その他のグラフでは右側に空白が生じた。グラフ内の黒色線が oxyHb，灰色線が deoxyHb の変化を示している。また，試行①，③にある縦の破線は，ヒント提示を行った時点を示した線である。

図 7-14 より，特徴として次の点が挙げられる。以下の特徴は第Ｉ群に共通

するものである。

・oxyHb は，試行①～③それぞれで増加傾向にあり，いずれも増加が継続する右上がりの波形であったが，とりわけ試行②の増加が顕著であった。

・deoxyHb は，oxyHb の増加時には減少傾向に，oxyHb の減少時には増加傾向にあった。

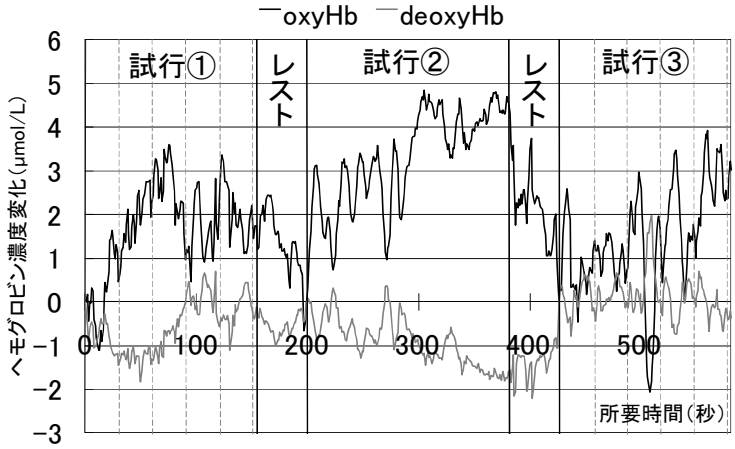


図 7-14　被験者 F1 のヘモグロビン濃度変化

②第Ⅱ群（被験者 F4）

試行②から独力で解決可能になった第Ⅱ群からは，平均的な所要時間の被験者 F4 を取り上げる。図 7-15 は，被験者 F4 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。以下の特徴は第Ⅱ群に共通するものである。

・oxyHb は，所要時間が最長である試行①では最後まで増加が継続し，右上がりの波形となった。所要時間が短くなる試行②，③では，0 付近において推移する傾向にあった。

・deoxyHb は，いずれの試行も 0 付近で推移し，増減がほとんど見られなかった。

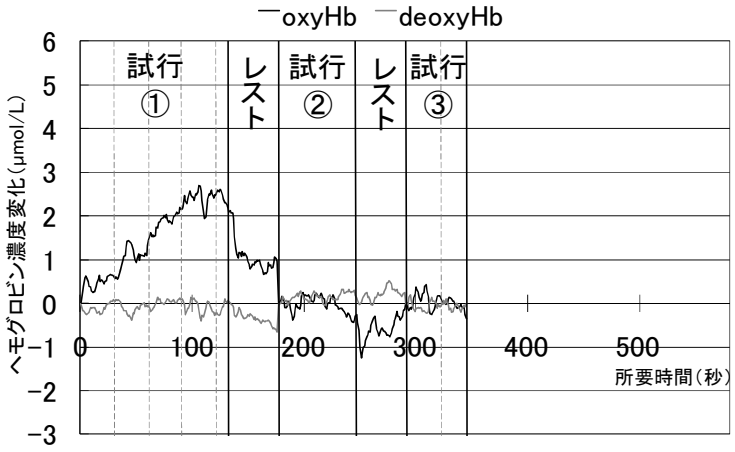


図 7-15　被験者 F4 のヘモグロビン濃度変化

③第Ⅲ群（被験者 F7）

終始ヒントを必要とせず自力で解決可能であった第Ⅲ群からは，所要時間の長い被験者 G7 を取り上げる。図 7-16 は，被験者 F7 のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。以下の特徴は第Ⅲ群に共通するものである。

・oxyHb，deoxyHb ともに，いずれの試行も 0 付近で推移し，増減がほとんど見られなかった。

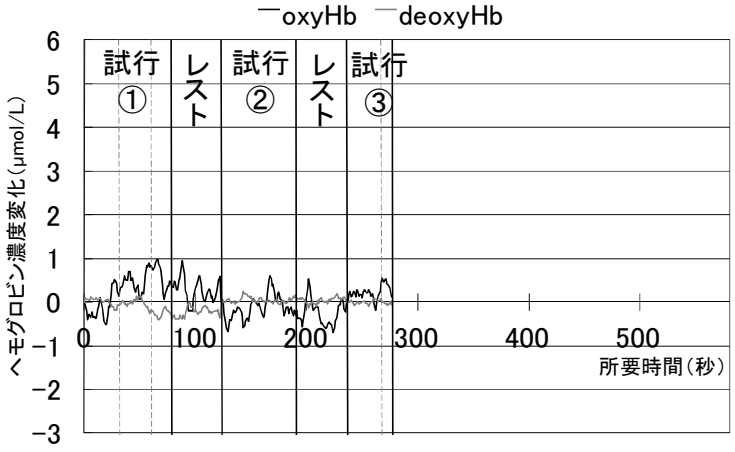


図 7-16　被験者 F7 のヘモグロビン濃度変化

(3)　ヘモグロビン濃度変化の周波数解析結果

ヘモグロビン濃度変化についての細かな増減（上下変動）は，これまでノイズと見なされて処理されることが少なくなかった。しかし，この増減は，同一被験者内でも実験課題や試行によって差異が見られる場合があり，何らかの情報を有した信号であると考えられる（岡本 他 2009b）。そこで，ヘモグロビン濃度変化の新たな分析方法の１つとして，上記で特徴的な変化を示した oxyHb の周波数解析を行い，試行の違いによる特徴について言及することとする。

周波数解析には，一般的なソフトウェアとして Microsoft の Excel 2007 を使用し，フーリエ解析を実施した（図 7-17）。表 7-2 には，解析時に用いた Excel のシートを示した。手順としては，次の 3 段階であり，「もとデータ」，「出力値」，「振幅」は，表 7-2 と対応している。

1. フーリエ解析の対象となる，「もとデータ」を入力する。
2. 図 7-17 の要領で，フーリエ解析を実施し，「出力値」を算出する。「出力値」は一般的に複素数（a＋bi）として表される。
3. 「出力値」の複素数の絶対値（$\sqrt{(a^2+b^2)}$）を算出する。これが，最終的なグラフ化のデータである「振幅」となる。

Excel のフーリエ解析は，高速フーリエ変換（Fast Fourier Transform: FFT）であり，この場合，データ数 N は 2 のべき乗でなければならない（$N=2^n$）との制限がある（金丸 2007）。つまり，16，32，64，128 といったデータ数が必要となるわけである。本実験でのサンプリング間隔は 1 秒であり，所要時間がそのままデータ数を示している。分析にあたっては，試行の変化による特徴を見るべく，試行ごとの分析を行うこととしたため，各被験者について所要時間が最短であった試行に合わせて，データ数を設定した。すなわち，被験者 F1，F2，F3 については 128 データ，被験者 F4，F5，F6，F7 については 32 デー

タ，F8 については 16 データを用いて分析を行った（図 7-13 参照）。また，分析にあたっての周波数の上限は，サンプリング間隔が 1 秒であったことから，通常，1Hz と考えられるが，高速フーリエ変換の場合は，標本化定理により分析可能な周波数が半分となるため，0.5Hz が上限となる。分析結果は，0.5Hz を上限として，もとのデータ数に合わせた周波数刻みで出力され，データ数が多いとより細かな刻みで結果が算出される。そこで，ここでは，32 データを用いる被験者が最も多いことから，この被験者に合わせ，128 データの場合は出力値 4 つずつを順に加算したデータを用いることとした。このことにより，1 データあたりが持つ周波数帯域数が，128 データと 32 データで統一されることになる。周波数解析においては，周波数帯として議論を行うことが多く，特定の周波数帯を加算する手法は一般的である。

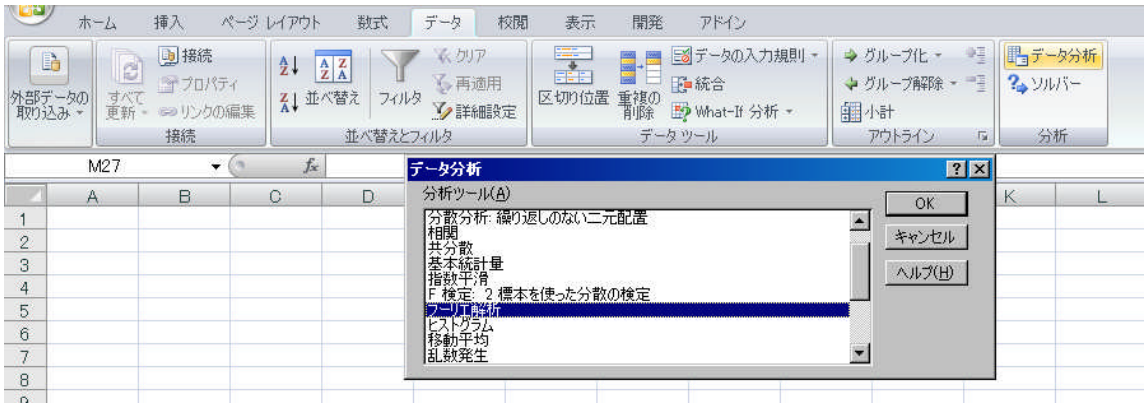


図 7-17　Excel によるフーリエ解析

表 7-2　Excel でのフーリエ解析時のシート例

もとデータ	出力値	周波数	振幅
0	211.78	0.00	211.78
−0.01	−61.1777888991788+34.09083318460071	0.01	70.03504
0.18	18.0686958265221+26.0347618721229i	0.02	31.69048
−0.43	0.381941141505169+33.9931039530981i	0.02	33.99525
0.02	9.93054344371823+14.2021753420549i	0.03	17.32967
−0.02	25.7090563430802+18.963995528912i	0.04	31.94665
0.31	4.29680698710081+17.5831253675785i	0.05	18.10052
0.25	−4.23329915017985+0.782854152344984i	0.05	4.305076

これらの手法を用いて，oxyHb の周波数解析を行った結果，２つの特徴的なタイプが確認された。１つは，第Ⅰ群を中心に見られた特徴であり，もう１つは，第Ⅲ群を中心に見られた特徴である。第Ⅱ群は，総所要時間の長い被験者の方が第Ⅰ群の特徴を，総所要時間の短い被験者の方が第Ⅲ群の特徴を示す傾向が強かった。以下では，2 つのタイプとして，第Ⅰ群の被験者 F1 と，第Ⅲ群の被験者 F7 を以下に取り上げることとする。

①第Ⅰ群（被験者 F1）

図 7-18 は，被験者 F1 の oxyHb の周波数解析結果を示したグラフである。図 7-18，図 7-19 は，いずれも縦軸が振幅を，横軸が周波数（Hz）を表しているが，分析のもとのデータ数が異なるため，縦軸，横軸は統一されていない。ただし，横軸は概ね同様の値となっている。グラフ内の黒色実線が試行①，灰色が試行②，黒色破線が試行③の周波数解析結果を表している。

図 7-18 より，特徴として次の点が挙げられる。なお，以下の特徴は，第Ⅰ群に類似する傾向があった。

・0.2Hz 付近において，試行①，③の振幅が大きい（図中矢印）。

・試行②では，上記の振幅は認められない。

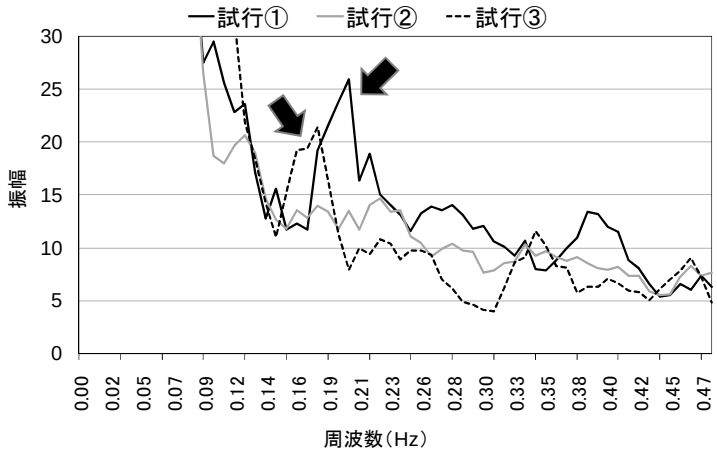


図 7-18　被験者 F1 の周波数解析結果

②第Ⅲ群（被験者 F7）

図 7-19 は，被験者 F7 の oxyHb の周波数解析結果を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。なお，以下の特徴は，第Ⅲ群に類似する傾向があった。

・0.27Hz 付近において，試行①，②よりも試行③の振幅が大きい（図中矢印）。

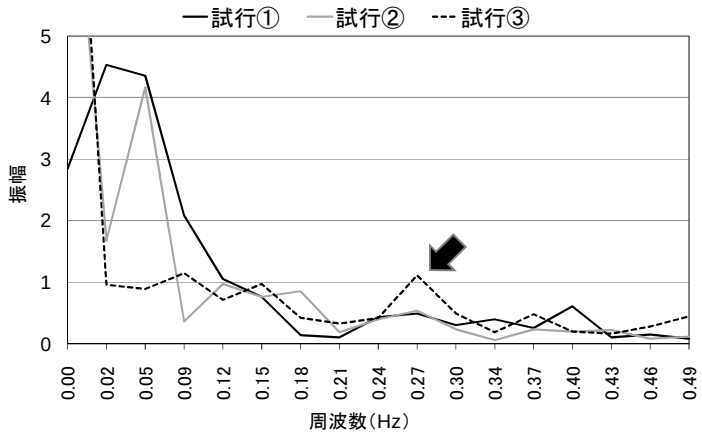


図 7-19　被験者 F7 の周波数解析結果

7.2.4. 考察

(1) 全体の行動観察結果，事後の感想より

身体的・精神的なストレスにより実験の遂行が困難となった被験者はなく，円滑に実験を実施することができた。また，全被験者について，適切にデータを取得することができた。

正誤について，ヒント提示のある試行①，③は，いずれの被験者も全箇所正答であり，実験課題の内容は正しく理解していたといえる。試行②については，8 名中 5 名（被験者 F4～F8）は正答であったが，8 名中 3 名（被験者 F1～F3）は，試行②において未解答があり，解決方法を獲得できていなかった。

所要時間については，正誤，事後の感想の内容と併せて分類した 3 つの群（第Ⅰ群～第Ⅲ群）について述べる。まず，第Ⅰ群の被験者 3 名（F1～F3）は，試

行①，③の両試行において参照したヒント数は同数で，所要時間も同様であった。感じた難度が試行全体を通して高かったことと，「試行①，③はヒントをそのまま映した箇所が多かった」との事後の感想より，ヒントに依存して解答を行い，解決方法を獲得することができなかったといえる。

第Ⅱ群の被験者３名（F4～F6）は，所要時間が試行を経るごとに短縮されていることと，「試行①でヒントがなければ，試行②，③を解くことができなかった」との感想より，試行②からは解決方法を獲得し，独力で解決することができるようになったといえる。

第Ⅲ群の被験者２名（F7，F8）は，試行①から所要時間が短く，「ヒントは最初から見なかった」との感想より，開始当初から解決方法を獲得していたといえる。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果より

第Ⅰ群では，全試行を通して oxyHb の増加が見られたが，最後まで解決方法を獲得できなかったことから，全ての試行で未理解の状態が続いていたことが反映されたと考えられる。とりわけ，ヒント提示のない試行②での oxyHb の増加が顕著であるのは，ヒント提示が行われず自力解決が求められたため，解決方法を独力で導き出さなければならない状況になったことが影響したと推測できる。一方，deoxyHb は oxyHb と逆の変化を示す傾向にあったが，これは oxyHb の大幅な増減による相対的な変化であったことが考えられる。

第Ⅱ群では，方略獲得に伴い oxyHb の増加（試行①）から，増加の抑制（試行②，③）への変移が見られたが，これは，解決方法を獲得し効率的に解決可能になったためと予想される。また，deoxyHb は第Ⅰ群とは異なり，全試行を通して大幅な増減が見られなかった。第Ⅰ群は，「ヒントをそのまま写した箇所が多かった」との感想が見られるが，第Ⅱ群は，試行②から解決方法を獲得していることから，試行①においてはヒントが有効に機能し，解決方法を導く

思考が促されたことで，解決方法の獲得の方向に進んでいったと考えられる。解決方法の導出のための思考の促進と，解決方法の獲得への方向性が，deoxyHb が oxyHb の相対的な変化を受けなかった要因に考えられる。

第Ⅲ群では，oxyHb と deoxyHb の大幅な変化が見られなかったが，これは除法筆算の虫食い算の経験があり，開始直後から解決方法の獲得がなされ，効率的に解決できたことによると予想される。第Ⅱ群における，方略獲得後の状態と同様の状態が，当初より見られたと考えられる。

(3)　ヘモグロビン濃度変化の周波数解析結果より

oxyHb の周波数解析の結果より，0.25Hz を中心とした周波数における振幅の大きさに着目した。第Ⅰ群では試行①，③で振幅が大きく，第Ⅲ群では試行③で振幅が大きくなるという，2 つのタイプを確認できた。第Ⅱ群については，被験者によって異なったが，所要時間が長い第Ⅰ群に近い被験者は上記の第Ⅰ群の特徴を，一方，所要時間が短く第Ⅲ群に近い被験者は上記の第Ⅲ群の特徴を示す傾向にあった。

心拍変動の周波数解析を行うと，一般的に 0.05Hz を中心とした低域周波数成分，0.1Hz を中心とした中域周波数成分，0.25Hz を中心とした高域周波数成分の 3 つのピークに分けられるとされる（Pomeranz et al. 1985，Akselrod et al. 1985，Malliani et al. 1991）。このうち，0.25Hz を中心とした（0.2～0.4Hz 付近）高域周波数成分は，呼吸に一致した心拍変動であることが知られている（小松・木村 1995）。1 回の呼吸が概ね 4 秒であると考えると 0.25Hz 付近の周波数が呼吸成分を反映したものであることが理解できる。ただし，このピークは，副交感神経遮断剤の投与により，減少，あるいは消失することから，この帯域は副交感神経によって支配されていることが考えられている（景山 1983，廣田 他 1994）。副交感神経は，いわゆるリラックス時に活発となる神経であり，これが遮断されたときに消失することは，リラックス状態にない，

緊張状態時に消失することを指す。つまり，心拍変動の周波数解析における0.25Hz付近の振幅は，緊張状態が高い場合に消失し，緊張状態が低い場合に現れると考えられている（本多 1997，後藤 他 2002）。

これらを踏まえて，oxyHbの周波解析結果を見ると，最後まで解決方法を獲得できなかった第Ⅰ群においては，ヒント提示のある試行①，③において0.25Hzを中心とする周波数帯で大きな振幅が確認されたが，ヒント提示のない試行②にはそれは見られなかった。「試行①，③はヒントに頼れたが，試行②はヒントがなかったのでどうしたらいいか分からなかった」との事後の感想から，試行①，③ではヒントに頼ることができる安心感により緊張状態は低かったと考えられるが，試行②では解決方法の未獲得状態で自力解決を求められたことにより緊張状態が高まったと考えられる。これらを考え併せると，試行①，③では緊張状態が低く，0.25Hzを中心とする付近の周波数帯における大きな振幅が現れたが，試行②では緊張状態が高くなり，振幅が見られなかったと予想される。

また，第Ⅲ群については，試行①，②よりも試行③において，0.25Hz付近の周波数帯の振幅が大きくなった。「はじめは緊張したが，だんだん慣れてきてやりやすくなった」との事後の感想から，試行を経るごとに慣れが生じ，緊張状態が軽減されたと考えられる。これらを考え併せると，試行①，②では緊張状態にあり，0.25Hz付近の周波数帯における大きな振幅は見られなかったが，試行③では緊張状態が低くなり，大きな振幅が現れたと予想される。

7.2.5. まとめ

本実験では，虫食い算の問題解決過程にヒント提示を行い，脳内ヘモグロビン濃度変化を検討した。その結果を目的で述べた達成項目に沿ってまとめると次のようになる。

(1) 大学生を対象とした実験では，全員に対してヒントが有効であったのに対し，小学生を対象とした本実験では，ヒントが有効に機能しなかった群，ヒントが有効に機能した群，ヒントが不要であった群の 3 つの群が存在した。

(2) 上記のヒントについての 3 つの群それぞれで，ヘモグロビン濃度変化に異なる特徴が見られた。ヒントが有効に機能しなかった群は，解決方法を最後まで獲得できず oxyHb の増加が続いた。ヒントが有効に機能した群は，途中から解決方法を獲得できたことによって oxyHb が増加から抑制へと転じた。ヒントが不要であった群は，はじめから解決方法を獲得しており，oxyHb の増加は見られなかった。このことから，oxyHb の増加から抑制への変化に，解決方法の獲得過程の変化が反映された可能性が考えられた。

(3) oxyHb の周波数解析により，ヒントが有効に機能せず，解決方法を最後まで獲得できなかった群では，ヒント提示時に 0.25Hz を中心とする周波数帯付近で振幅が見られ，解決方法を獲得した，および獲得していた群では，最後の試行で振幅が見られた。このことから，oxyHb の 0.25Hz 付近での振幅に，緊張状態が反映されたことが考えられた。

【参考文献】

Akselrod, S., Gordon, D., Madwed, B. J., Snidman, C. N., Shannon, C. D. and Cohen, J. R. (1985) “Hemodynamic regulation: investigation by spectral analysis” *American Journal of Physiology –Heart and Circulatory Physiology*, Vol.249: H867-875

Eda, H., Kuroda, Y., Okamoto, N. and Maesako, T. (2008) “Measuring the Moment of Understanding while Solving Mathematical Puzzles”, *World Automation Congress, International Forum on Multimedia and Image Processing: 530･1-6*

後藤貴文，松浦弘毅，村本健一郎（2002）「心拍変動解析による自律神経機能の推定」電子情報通信学会技術研究報告．MBE，ME とバイオサイバネティックス，102(507)：13-16

廣田昭久，三浦恵理，小林能成，高原光恵（1994）「呼吸性不整脈：副交感神経機能の新たな指標」上智大学心理学年報，Vol.18：61-75

本多薫（1997）「自己回帰スペクトル解析による心拍変動と精神的負荷強度との関係」情報処理学会全国大会講演論文集，第 55 回後期(4)：86-87

景山茂（1983）「心電図 R-R 間隔の変動と自律神経系：生理学的意義と糖尿病性自律神経障害への応用」神経内科，Vol.19：119-126

金丸隆志（2007）「Excel で学ぶ理論と技術 フーリエ変換入門」ソフトバンククリエイティブ，東京

小松徹，木村智政（1995）「心拍変動－周波数解析を中心に」医学のあゆみ，Vol.173，No.13：1011-1015

Malliani, A., Pagani, M., Lombardi, F. and Cerutti, S. (1991) “Cardiovascular Neural Regulation Explored in the Frequency Domain” *Circulation*, Vol.84, No.2: 482-492

Okamoto, N. (2009) “Usability of nirs data for analyzing student learning processes” *Neuroscience 2009 (Society for Neuroscience)*: 473.12/EE122

岡本尚子，黒田恭史，前迫孝憲（2008）「ヒント提示の認識の差異がもたらす脳活動の特徴」日本教育工学会研究報告集 JSET08-1：141-148

岡本尚子，黒田恭史，前迫孝憲，江田英雄（2009a）「授業場面を想定した学習過程時の NIRS による脳活動の特徴－小学生を対象とした虫食い算課題におけるヒント提示実験を通して－」教育実践学研究, Vol.10, No.2: 11-20

岡本尚子，黒田恭史，前迫孝憲，江田英雄（2009b）「光計測装置による脳活

動データ波形の分析」日本教育工学会第25回全国大会講演論文集:965-966

Okamoto, N. and Maesako, T. (2009) “Practical Research of Education and Brain Science” Edited by Kobayashi, T., Ozaki, I. and Nagata, K. “Brain Topography and Multimodal Imaging” Kyoto University Press, Kyoto: 133-135

岡本尚子，前迫孝憲（2009）「算数課題を用いた光脳機能イメージング実験」第 11 回 日本光脳機能イメージング研究会抄録集：13

Pomeranz, B., Macaulay, J. B. R., Caudill, A. M., Kutz, I., Adam, D., Gordon, D., Kilborn, M. K., Barger. C. A., Shannon, C. D., Cohen, J. R. and Benson, H. (1985) “Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis” *American Journal of Physiology –Heart and Circulatory Physiology*, Vol.248: H151-153

第８章　「ヒント提示学習場面」における「図形」問題解決過程のヘモグロビン濃度変化

要約

教師が助言を行うもとでの学習を想定した「ヒント提示学習場面」における「図形」問題解決過程の脳内ヘモグロビン濃度計測を行い，ヒント提示による問題解決過程の特徴がヘモグロビン濃度変化にどのように反映されるのかを検討する。実験課題は，タングラムとし，第 1 節では大学生を対象に，第 2 節では小学生を対象に実験を実施する。

8.1.　大学生を対象とした実験

8.1.1.　実験目的

本実験の目的は，小学生を対象とする実験の基礎実験として，大学生を対象にヒント提示のある図形問題解決時の脳内ヘモグロビン濃度計測を実施し，ヒントを用いた問題解決過程の特徴がヘモグロビン濃度変化にどのように反映されるのかを明らかにすることである。図形問題としては，面積や体積の求積などの公式によって答えを求める問題ではなく，図形の性質や構造，合同などを計画的に考える必要のある「タングラム[注 1]」による図形の構成を設定し，ヒント提示を行う。具体的な達成項目として次の 3 点を設定する。

(1) タングラムにおけるヒント提示が，問題解決過程にどのような特徴や変化をもたらすのかを，正答率，所要時間，事後の感想をもとに考察する。

(2) ヘモグロビン濃度変化の結果を上記の結果と照合し，ヒント提示のどのような特徴がヘモグロビン濃度変化に反映されるのかを検討する。

(3) 小学生を対象とした実験に向けて，見本図形の提示方法，ヒント提示の設定などの改良すべき点を検討する。

8.1.2.　実験方法

(1)　実験環境

本実験は，被験者ごとに単独で実施した。実験者は，課題の遂行状況の観察者（実験の説明を含む）と，機器操作者の 2 名とした。実験に際しての阻害要因はなく，被験者は課題に専念できる環境であった。

(2)　実験概要

実験期間：2007 年 8 月～9 月のうち 10 日間

実験場所：佛教大学内実験室

被験者：考察対象は大学生 10 名（男性 4 名，女性 6 名；20 歳～22 歳，平均 21.4 歳(標準偏差 0.8)）とした。実験は，13 名を対象に実施したが，データが不安定であった 3 名を考察対象外とした。

事前に，実験遂行における安全性と実験結果の扱いに関して説明を行い，実験の遂行とその結果の発表について被験者から文書で同意を得た。

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んだ。被験者後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した（図 8-1）。

光計測装置：NIRO－200（浜松ホトニクス製）

計測部位：前頭前野を 2 箇所とした。プローブは，前額部に 4 箇所配列し，2 箇所（右側，左側）を計測できるように設定した（図 8-2）。各プローブ間の距離は 3cm であった。前頭前野を計測の対象部位としたのは，毛髪によるノイズが少ないこと，思考や判断などの高次な活動を司るとされていることによる。

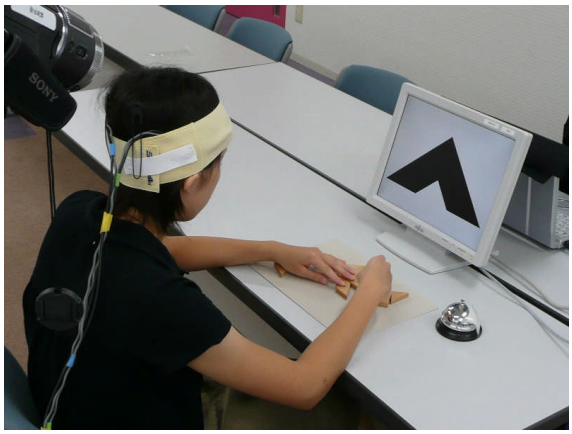


図 8-1　実験遂行場面

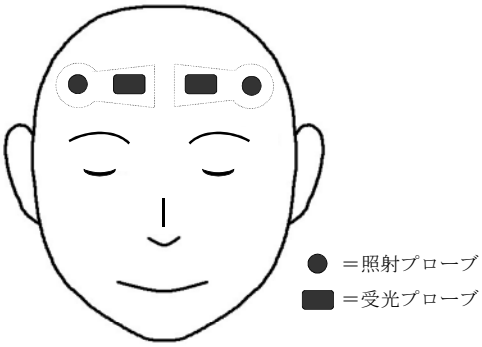


図 8-2　光計測装置のプローブの装着図

(3)　実験課題

実験課題には，図 8-3 に示すようなタングラムと呼ばれる 7 ピースの板を用いて，ディスプレイに提示される実物大の見本図形と同一の図形を構成する問題を設定した（岡本・黒田 2007, 岡本 2008）。タングラムの 7 ピースの板は，直角二等辺三角形 5 枚（大 2 枚，中 1 枚，小 2 枚），平行四辺形 1 枚，正方形 1 枚である。

第 6 章での大学生を対象とした図形問題では，立体図形の構成としてブロックの構成を設定したが，ブロック操作の体動によってデータが不安定になる傾向にあった。そこで，本実験では，体動が生じにくいよう，常時，机上での操作ができる平面図形の構成としてタングラムを設定した。また，第 6 章での実

験において，2 次元の見本による図形の構成のみでも，問題解決過程を検討できたため，比較となる問題は設定しないこととした。

図 8-3　実験で使用したタングラム

課題全体としては，図形を 1 つ構成する試行を，3 試行（試行①～③）行うこととし，その遂行順序を図 8-4 に図示した。ディスプレイに提示した見本図形は，脳活動計測を伴わない予備実験において難度が概ね同じ程度と思われるものを 3 つ選び，設定した。

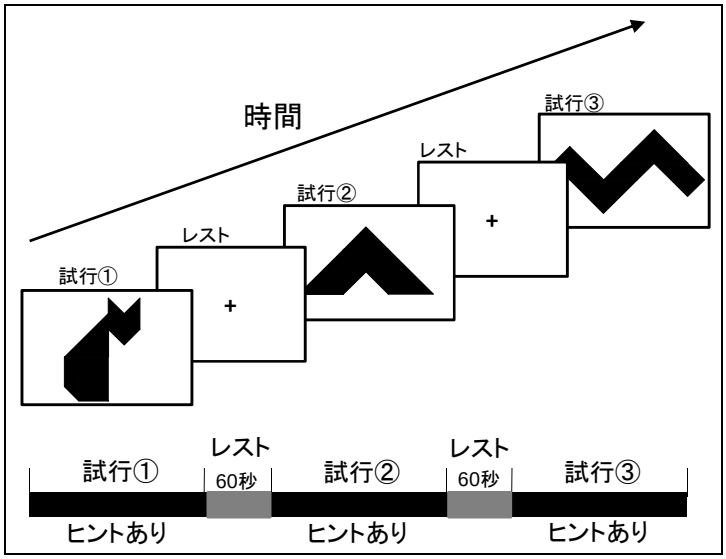


図 8-4　実験課題遂行順序

本実験では，各試行において，教師の助言を想定したヒント提示を行うこととした。ヒントは，ディスプレイ上の見本図形の中のピースを，45 秒ごとに 1 つずつ明らかにしていくものとした。具体例として，図 8-5 に，試行③におけるヒント提示の順序（ⓐ～ⓕの順）を示した。なお，ヒントの提示間隔を 45 秒としたのは，予備実験において，一定の思考の時間を保証しながらも，1 つ目のヒント提示前に解答にたどり着いてしまうことが起こりにくい条件に適正な時間であると考えられたためである。

ヒント提示の順序については，小さい図形から順に明らかになるような設定とした。大きい図形から明らかにすると，初期の段階で大部分が分かり，解答が見える場合が多い。この場合，残りの部分の図形の構成方法が限定されるため，それぞれの図形の性質を踏まえた論理的な思考による問題解決がなされにくいと考えたためである。

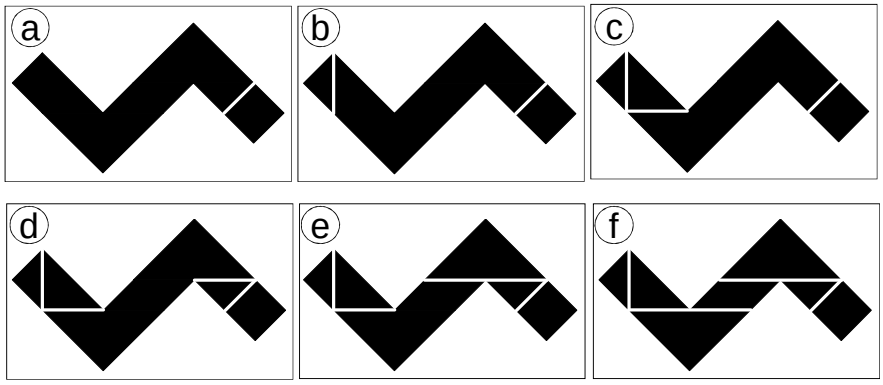


図 8-5　ヒント提示の順序（試行③）

(4)　実験手順

被験者は，次の手順に従って，実験遂行を行うこととした。

1. プローブを装着する（実験者が行う）。

2. 課題遂行方法の説明を受ける。

3. 黒地シート上の注視点「＋」を注視，安静状態の後，実験者の「始め」の合図とともに試行①の解答を開始する。解答終了後，被験者は手元のベルを鳴らして終了の合図を行う。その後，注視点を注視し，安静状態で60秒休憩する。実験者の「始め」の合図とともに試行②の解答を開始する。以下，試行③まで同様に実施する。
4. プローブを外す（実験者が行う）。
5. 感想を記述，口述する。

8.1.3. 結果

(1)　行動観察結果

①データ取得

13 名に実験を実施したが，安定したデータを取得でき，考察対象とできたのは 10 名であった。考察対象外となった 3 名は，データが不安定であり，これらの被験者には実験途中，ピースをディスプレイ上の見本図形上に重ね合わせる行動が見られた。

②正誤

10 名中 6 名は，全問正答であった。その他の 4 名は，各 1 箇所（1 名は問題①，3 名は問題③）が誤答であった。誤答は，平行四辺形を縦長方向に置くか，横長方向に置くのかの間違いであり，全体としての形は見本と類似していた。

③事後の感想

事後の感想記述，口述において，次の特徴が見られた。

・10 名中 8 名は，「最初図形を見たときは，どこから手をつけていいかわからなかったが，ヒントが順に出てきたことで解きやすくなった」に類する解答を行った。
・上記以外の 10 名中 2 名は「自分が今考えていないところのヒントが出てく

るため，ヒントによって思考を止められた」，「ヒントが出るたびに作り直した」に類する解答を行った。

・各試行について，感じた難度を 5 段階（1：簡単，2：やや簡単，3：普通，4：やや難しい，5：難しい）で評価するよう求めた結果，10 名の平均値は，難度の低いものから順に，試行①：3.4，③：3.5，②：3.7 となった。

・考察対象外となった被験者 3 名は，「見本の大きさとピースの大きさのどこが同じかが分かりにくかった」に類する解答を行った。

④所要時間

図 8-6 は，被験者 10 名の各試行の平均所要時間を表したグラフである。縦軸の目盛り間隔は，ヒント提示間隔と同様に，45 秒とした。特徴として，次の点が挙げられる。

・10 名の平均所要時間が短い問題から並べると，試行①，③，②の順となるが，問題②，③は，ヒント提示回数が同数の 4 回である。

・標準偏差は，試行①，③，②の順に大きくなり，平均所要時間が長い場合に標準偏差も大きくなる。

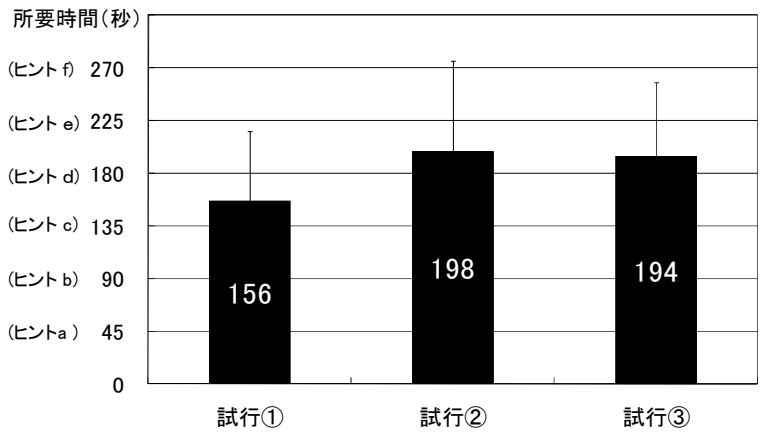
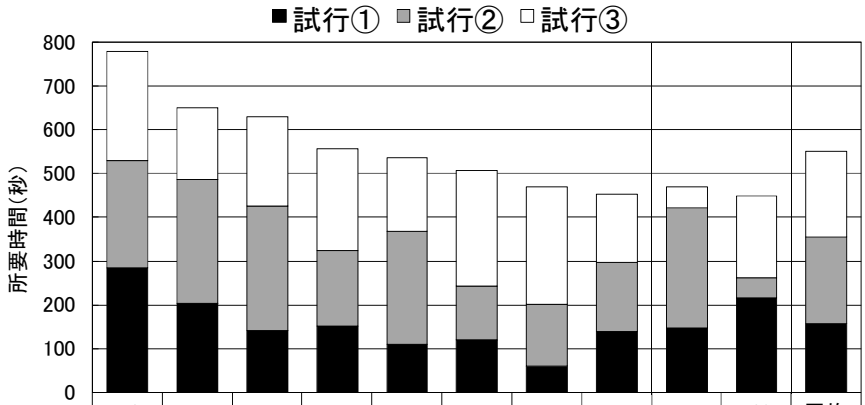


図 8-6　タングラムの平均所要時間

図 8-7 は，上述した事後の感想を踏まえ，被験者 10 名を「ヒントが順に出てきたことで解きやすくなった」と回答した 8 名と，「ヒントによって思考を止められた」と回答した 2 名に分けて各被験者の所要時間を示したグラフである。前者の 8 名のうちで所要時間が短い被験者から，被験者 G1～G8 とし，後者の 2 名のうちで所要時間が短い被験者から，被験者 G9～G10 とした。1 つの棒が 1 人の被験者の 3 試行分（試行①～③）の所要時間を表しており，黒色が試行①，灰色が試行②，白色が試行③の所要時間を示す。特徴として次の点が挙げられる。

・被験者G1から被験者G8の8名は，試行①，②，③いずれの問題も45秒以上となり1回以上ヒントを見ている。

・被験者G9, G10の2名は，ヒントを見ずに完成させた問題がある。(両者とも，45秒を2，3秒経過しているため，ヒント提示は行われていたが，ヒントは見ていなかったと述べた。)



	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	平均
□試行③	250	165	204	234	169	264	268	154	48	187	194.3
■試行②	246	282	284	172	258	122	140	159	274	47	198.4
■試行①	283	203	140	150	109	120	60	138	147	214	156.4

図 8-7　タングラムの所要時間

⑤行動観察結果による被験者分類

事後の感想，所要時間から，被験者には 2 つのタイプがあった。以下では，被験者を 2 つの群に分類して検討を行うこととする。分類は次のとおりである。

・第Ⅰ群：被験者 G1～G8。ヒントが有効に機能し，それを活用して問題解決がなされた。いずれの問題もヒントを 1 回以上活用した。

・第Ⅱ群：被験者 G9，G10。ヒントが被験者の思考に合わず，有効に機能しない傾向にあった。ヒントを参照せずに解決できた試行があった。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果

被験者 10 名のヘモグロビン濃度変化について，右側と左側のデータに変化の形状の違いがある被験者は認められなかった。いずれの被験者も左右のヘモグロビン濃度変化は類似していた。

光計測装置のデータは相対変化量を示すため，類似した特徴を示す被験者であっても，異なる被験者のデータを加算平均などの数値として操作し，分析することは，各個人のデータが示す変化の特徴を捨象してしまう可能性がある。そこで，以下では，第Ⅰ群と第Ⅱ群からそれぞれ 1 名ずつを取り上げ，結果に言及することとする。

考察対象とする計測部位は，右側とする（図 8-2 参照）。右側は学習といった高次な活動における空間処理が優位であるとされるためである。なお，上述のとおり，本実験においては右側と左側のデータに変化の形状の違いがある被験者は認められなかった。

ヘモグロビン濃度変化をグラフ化するにあたっては，試行ごとの変化に着目するために，各試行の開始時を 0 とするベースライン補正を行った。

①第Ⅰ群（被験者 G7）

第Ⅰ群からは，第Ⅱ群の特徴と類似して所要時間が短い試行（①）があった被験者 G7 を取り上げる。

図 8-8 は，被験者 G7 のヘモグロビン濃度変化の結果である。図 8-8，図 8-9

のグラフはいずれも，縦軸がヘモグロビン濃度変化（μmol/L）を，横軸が所要時間（秒）を表し，両軸とも 2 つのグラフのスケールを統一した。したがって，横軸は所要時間の長い被験者 G7 の図 8-8 に統一することになり，図 8-9 のグラフでは右側に空白が生じた。グラフ内の黒色線が oxyHb，灰色線が deoxyHb の変化を示している。また，各試行にある縦の破線は，ヒント提示を行った時点を示した線である。図 8-8 より，特徴として次の点が挙げられる。以下の特徴は第Ⅰ群に共通するものである。

・oxyHb は，試行①，②，③とも右上がりに増加した。増加幅は，所要時間が長い問題の方が大きい傾向にあった。

・oxyHb は，各ヒント後の変化を見ると，一旦減少する傾向にある。

・deoxyHb は，0 付近で推移する傾向にあった。

・deoxyHb は，各ヒント後の変化を見ると，一旦増加する傾向にある。

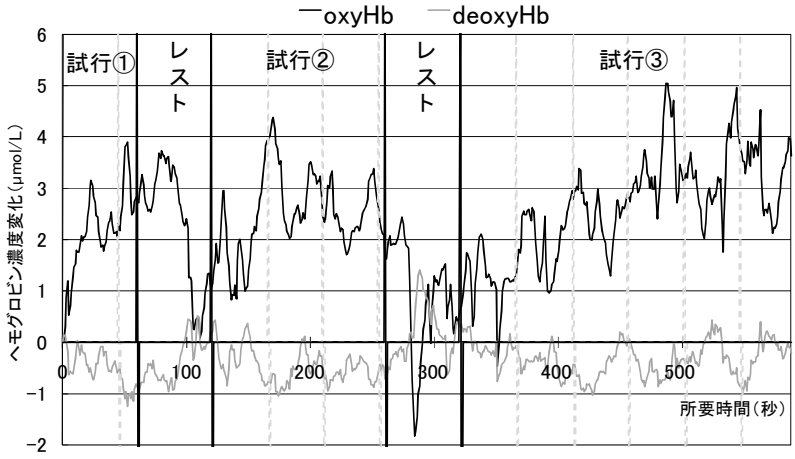


図 8-8　被験者 G7 のヘモグロビン濃度変化

②第Ⅱ群（被験者 G10）

第Ⅱ群からは，所要時間が短い被験者 G10 を取り上げる。図 8-9 は，被験者 G10 のヘモグロビン濃度変化の結果である。特徴として次の点が挙げられる。以下の特徴は第Ⅱ群に共通するものである。

・oxyHb は，大幅な増加は確認できず，所要時間の短い試行（②）では，ほとんど増加しなかった。第 I 群と比較すると，右上がりの増加は見られず，増加幅も小さかった。

・oxyHb は，各ヒント後の変化を見ると，一旦増加する傾向にある。

・deoxyHb は，0 付近で推移する傾向にあった。

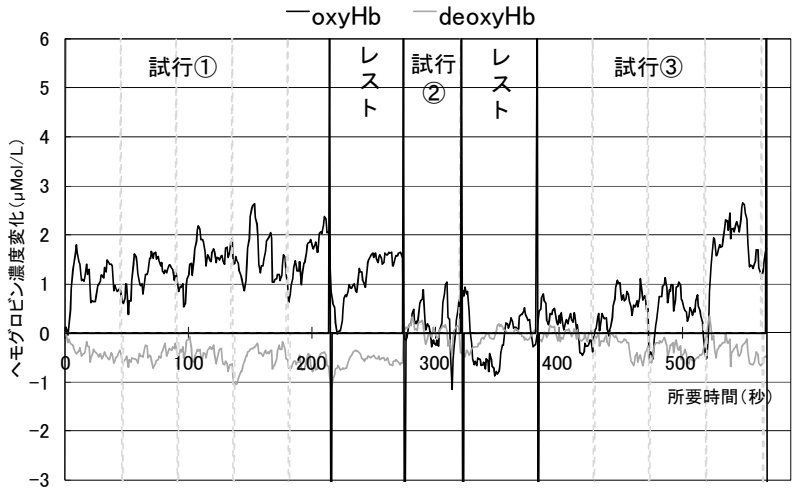


図 8-9　被験者 G10 のヘモグロビン濃度変化

8.1.4.　考察

(1)　全体の行動観察結果，事後の感想より

大学生 13 名を対象に実験を実施した結果，安定したデータを取得でき，考察対象とできたのは 10 名であった。考察対象外となった 3 名は，ピースをディスプレイ上の見本図形上に重ね合わせる行動が見られたことから，体動がデータの不安定さを招いた一因に考えられる。これらの 3 名の被験者は，事後の感想において「見本の大きさとピースの大きさのどこが同じかが分かりにくかった」と回答していることから，ディスプレイに示された実物大の見本図形と手元のピースに距離があったことが問題であったといえる。小学生を対象とした実験では，手元に見本図形を記したシートを置くことを検討する必要性がある。

正誤については，10 名中 6 名が全問正答であり，その他の 4 名についても誤答は 1 箇所であったことから，被験者は実験課題の内容を正しく理解し，遂行したと判断した。誤答の内容は，全て平行四辺形の縦横の方向の置き間違いであり，全体としての形は見本と類似していたため，被験者自身が間違いに気づかなかったといえる。小学生を対象とした実験では，見本図形を記したシート上でタングラムによる図形の構成をさせることで，誤答を回避できると考えられる。

所要時間については，被験者 10 名の平均所要時間が試行①，③，②の順に増加し，標準偏差もこの順に大きくなった。また，被験者 10 名の難度の平均値も，試行①，③，②の順に高くなっており，所要時間が長いほど，難度が高く，個人差が大きいという結果となった。ヒントの活用による解決方法の獲得や慣れなどが要因と考えられる所要時間の短縮は見られず，各試行によって難度が異なったといえる。

ヒントの有効性の点については，ヒントが有効に機能し，それを活用した第Ⅰ群と，ヒントが被験者の思考に合わず，有効に機能しない第Ⅱ群があることが考えられた。ただし，ヒントの活用により解決方法を獲得し，所要時間の短縮にまで至った被験者は認められなかった。第Ⅰ群では，全被験者が全ての試行において 1 回以上ヒントを参照しており，ヒントを活用しながら問題解決をしたことがうかがえた。一方，第Ⅱ群は，ヒントを参照せずに解決できた問題があり，また全体の所要時間も短かった。解決方法について自身の方針があり，ヒントが被験者を混乱させた可能性があった。ただし，本実験では，全試行において，ヒント提示を行ったため，ヒント提示がない場合にどのようであったかの比較ができなかった。小学生を対象とした実験では，ヒント提示の有無による比較が可能となる設定が必要であるといえる。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果より

ヒントが有効に機能し，それを活用した第Ⅰ群について，oxyHb は，いずれの試行においても右上がりに増加した。また，増加幅は，所要時間が長い問題の方が大きい傾向にあった。難度と所要時間に対応があることを踏まえると，各試行における解決方法を導出する難しさが，oxyHb の増加に反映したと考えられる。deoxyHb は，全体的な変化としては 0 付近で推移したが，各ヒントの変化を見ると一旦増加する傾向にあった。「ヒントが順に出てきたことで解きやすくなった」との事後の感想から，ヒントが提示されることで，その後の思考が促された結果，deoxyHb が増加したと考えられる。oxyHb のヒント後の減少は，deoxyHb の増加による相対的な変化であることが予想される。

ヒントが被験者の思考に合わず，有効に機能しない傾向にあった第Ⅱ群について，oxyHb は，第Ⅰ群のような顕著な増加は確認できず，1 つ目のヒント提示前に解決できた所要時間の短い試行では，ほとんど増加しなかった。全体的な所要時間は第Ⅰ群よりも短く，ヒントを必要とせずに解決できた試行があることから，第Ⅰ群よりも感じていた難度は低かったと考えられ，このことが oxyHb の増加が小さかった要因であると考えられる。また，deoxyHb が 0 付近で推移したのも，高い難度を感じなかったためと予想される。ただし，ヒント後の変化を見ると，oxyHb は一旦増加する傾向にあった。「ヒントによって思考を止められた」，「ヒントが出るたびに作り直した」との事後の感想から，ヒントが被験者に混乱を来したと考えられ，焦りやストレスを感じたことが一時的な oxyHb の増加につながった可能性がある。

8.1.5.　まとめ

本実験では，ヒント提示を用いたタングラムの問題解決過程における，脳内ヘモグロビン濃度変化を検討した。その結果を実験目的で述べた達成項目に沿ってまとめると次のようになる。

(1) タングラムにおけるヒント提示が，問題解決に有効に機能した被験者群と，思考にそぐわずに有効に機能しなかった被験者群に分かれた。後者の群では，ヒント提示が混乱をもたらした可能性が考えられた。なお，ヒント提示が被験者に解決方法の獲得をもたらし，所要時間を短縮に至らせることはなかった。

(2) ヒントが有効に機能した群は，各試行において解決方法を導出する難しさを反映したと考えられる oxyHb の増加が見られた。また，ヒント後には思考が促進されたと考えられる deoxyHb の増加が確認できた。一方，ヒントが有効に機能しなかった群は，感じていた難度はそれほど高くなかったと考えられ，oxyHb の顕著な増加は見られなかった。ただし，ヒント後には混乱による焦りやストレスを反映したと予想される oxyHb の増加が見られた。このことから，oxyHb の増加に，解決方法の模索の難度の高さが反映された可能性が考えられた。また，ヒント後の deoxyHb の増加に思考の促進が，ヒント後の oxyHb の増加に焦りが反映された可能性が予想された。

(3) 小学生を対象とした実験においては，見本図形の輪郭とその大きさを正しく把握させるために，手元に見本図形の輪郭を記したシートを置くことや，ヒント提示の有無の影響を考察するために，ヒント提示を行わない試行を設定することの必要性が示唆された。

8.2. 小学生を対象とした実験

8.2.1. 実験目的

本実験の目的は，小学生を対象に，ヒント提示のある図形問題解決時の脳内ヘモグロビン濃度計測を実施し，ヒントを用いた問題解決過程の特徴がヘモグロビン濃度変化にどのように反映されるのかを明らかにすることである。また，ヘモグロビン濃度変化の新たな分析方法についても検討することとする。具体

的な達成項目として次の 3 点を設定する。

(1) 図形の性質や構造，合同などを計画的に考える必要のある図形の構成として「タングラム」の問題解決過程におけるヒントが，小学生の問題解決にどのような影響をもたらすのかを，正誤，所要時間，事後の感想から明らかにする。

(2) ヒントが問題解決過程に及ぼす影響が，ヘモグロビン濃度変化にどのように反映されるのかを明らかにする。

(3) ヘモグロビン濃度変化の新たな分析方法として，周波数解析を行い，その特徴について考察する。

大学生での基礎実験を踏まえて，小学生用に実験課題や実験環境を調節，設定し，上記の項目の達成を図る。

8.2.2. 実験方法

(1) 実験環境

本実験は，被験者ごとに単独で実施した。実験者は，課題の遂行状況の観察者（実験の説明と見本図形シートの差し替えを含む）と，機器操作者の 2 名とした。実験に際しての阻害要因はなく，被験者は課題に専念できる環境であった。

(2) 実験概要

実験期間：2007 年 12 月～2008 年 2 月のうち 4 日間

実験場所：佛教大学内実験室

被験者：小学校第 6 学年児童 8 名（男子 4 名，女子 4 名；男子 1 名が 11 歳，その他の 7 名は 12 歳）とした。

事前に，実験遂行における安全性と実験結果の扱いに関して説明を行い，実験の遂行とその結果の発表について被験者と保護者から文書で同意を得た。

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んだ（図 8-10）。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した。

計測部位：前頭前野を 2 箇所とした。プローブは，前額部に 4 箇所配列し，2 箇所（右側，左側）を計測できるように設定した（図 8-11）。各プローブ間の距離は 3cm であった。前頭前野を計測の対象部位としたのは，毛髪によるノイズが少ないこと，思考や判断などの高次な活動を司るとされていることによる。

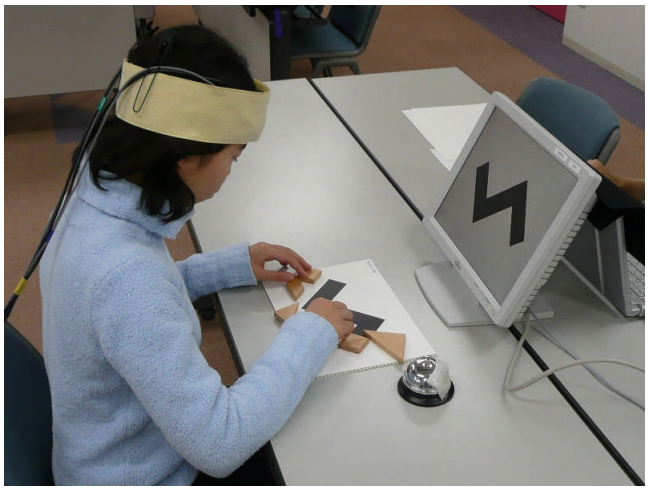


図 8-10　実験遂行場面

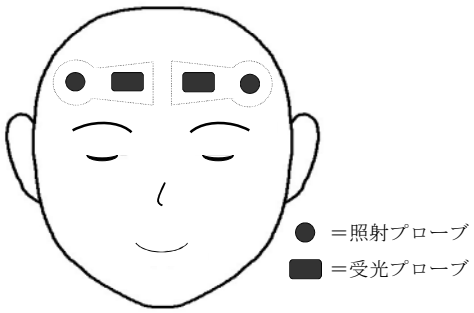


図 8-11　光計測装置のプローブの装着図

(3)　実験課題

実験課題には，大学生を対象とした実験と同様に，タングラムを用いて，ディスプレイに提示される実物大の見本図形と同一の図形を構成する問題を設定した（岡本・黒田 2008，Kuroda et al. 2009，Okamoto et al. 2009）。見本図形の大きさと輪郭を正しく把握させ，誤答を防ぐために，被験者の手元にはディスプレイに提示された見本図形が実物大で記されたシートを用意し，シート上で図形を構成させることとした（図 8-10 参照）。

課題全体としては，図形を 1 つ構成する試行を，3 試行（試行①～③）行うこととし，その遂行順序を図 8-12 に図示した。ディスプレイに提示した見本図形は，大学生を対象とした実験で用いたものと同じ図形を設定した。

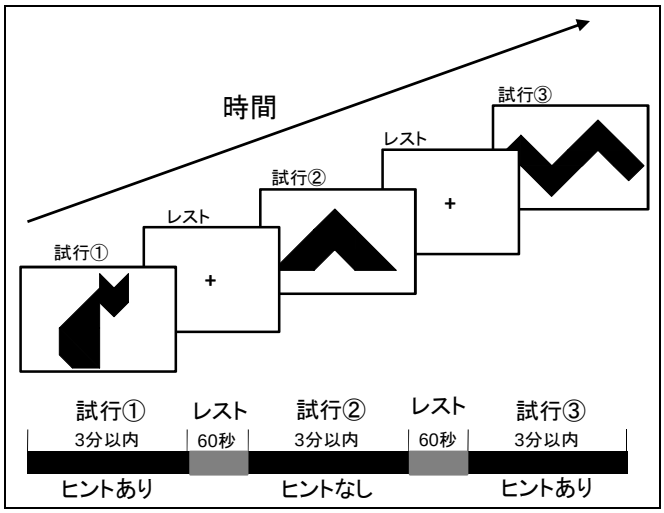


図 8-12　実験課題遂行順序

ヒント提示の有無がもたらす問題解決の特徴の差異を検討するため，本実験では，試行①，③において，教師の助言を想定したヒント提示を行うこととした。ヒントは，ディスプレイ上の見本図形の中のピースを，30 秒ごとに 1 つずつ明らかにしていくものとし，提示順序は大学生を対象とした実験と同一とした。ヒント提示を 30 秒間隔としたのは，予備実験において，被験者が焦らず，

飽きない時間設定として適切であると考えられたためである。また，1 試行が 3 分程度（30 秒×6 回提示＝180 秒）であれば，身体的・精神的にストレスが過度とならず，問題解決に集中できると判断したためである。ヒント提示のない試行②では，ディスプレイ上に見本図形のみを表示した。

なお，各試行の制限時間は 3 分間としたが，これは，ヒント提示のある試行①，③において，全てのヒントを参照した場合，約 3 分間（30 秒×6 回提示＝180 秒）で終了し，これに統一したためである。各試行の制限時間が 3 分である旨は，事前に被験者に説明を行った。

(4)　実験手順

被験者は，次の手順に従って，実験遂行を行うこととした。

1. プローブを装着する（実験者が行う）。
2. 課題遂行方法の説明を受ける。
3. 黒地シート上の注視点「＋」を注視，安静状態の後，実験者の「始め」の合図とともに試行①の解答を開始する。解答終了後，被験者は手元のベルを鳴らして終了の合図を行う。その後，注視点を注視し，安静状態で60秒休憩する。実験者の「始め」の合図とともに試行②の解答を開始する。以下，試行③まで同様に実施する。ただし，試行②は，3分以内に解答を終了できない場合，3分経過時に実験者の指示により終了する。
5. プローブを外す（実験者が行う）。
6. 感想を記述，口述する。

8.2.3.　結果

(1)　行動観察結果

①データ取得

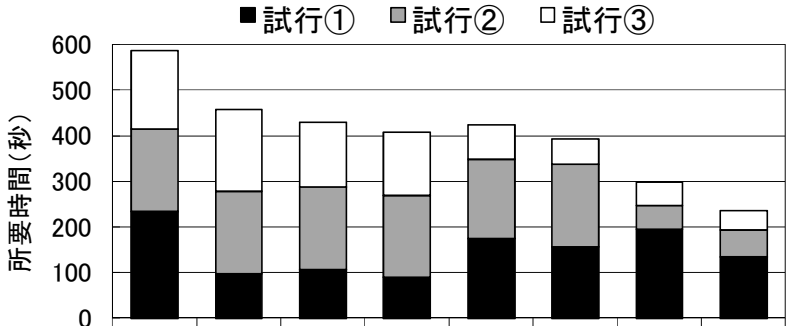
実験実施に際して，被験者にプローブの装着による身体的負担や問題難度の高さによるストレスを過度に強いることなく，円滑に実験を実施することができた。また，データ取得は適切になされた。

②正誤

ヒント提示のある試行①，③は，８名いずれの被験者も全問正答であった。ヒント提示のない試行②は，８名中３名が制限時間の３分以内に完成させ，残りの５名は未完成であった。

③所要時間

図8-13は，各被験者の所要時間を表したグラフである。基本的に総所要時間の長い被験者から順に，被験者H1～H8としたが，所要時間の変移の特徴を踏まえ，被験者H4，H5の所要時間の順序は逆となっている。1つの棒が1人の被験者の3試行分（試行①～③）の所要時間を表しており，黒色が試行①，灰色が試行②，白色が試行③の所要時間を示す。特徴として，次の点が挙げられる。



	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
□試行③	172	180	143	137	76	56	50	44
■試行②	180	180	180	180	172	180	52	58
■試行①	235	98	107	90	176	157	196	135

図8-13　タングラムの所要時間（秒）

・8名中6名（H1～H6）は，ヒント提示のない試行②が制限時間内（180秒）に解答に至らなかったか，180秒近い時間を要した。

・上記の6名中4名（H1～H4）は，試行①，②に比べ，試行③での所要時間の短縮は見られなかったが，残りの2名（H5，H6）は，試行①，②に比べ，試行③で大幅な所要時間の短縮がなされた。

・8名中2名（H7，H8）は，試行①からヒントのない試行②にかけて，所要時間の大幅な短縮がなされ，試行③にかけてもさらに所要時間の短縮が見られた。

なお，ここでは被験者による所要時間の特徴の差異が大きく，その特徴をもとにした複数のタイプが考えられたため，被験者全体の所要時間の平均値については議論しないこととした。

③事後の感想

表 8-1 は，事後の感想記述において，タングラムの経験の有無と，各試行で感じた難度を 5 段階評価（5：難しい，4：少し難しい，3：普通，2：少し簡単，1：簡単）で求めた結果を示したものである。特徴として次の点が挙げられる。

表 8-1　経験の有無と難度の 5 段階評価

試行／被験者	経験	試行①	試行②	試行③	平均
H1	有	4	4	3	3.7
H2	有	3	5	4	4.0
H3	有	3	4	2	3.0
H4	有	3	5	3	3.7
H5	有	1	2	3	2.0
H6	有	1	4	2	2.3
H7	有	5	2	3	3.3
H8	有	2	1	1	1.3

・いずれの被験者も，タングラムで遊んだ経験があった。

・被験者 H1，H2，H3，H4 は，感じていた難度の平均値が高かった。とりわけ，ヒント提示のない試行②の難度が高いと感じていた。

・被験者 H5，H6 は，感じていた難度の平均値は低い傾向にあった。（被験者 H5 は，難度が高い順序を 1，2，3 と書いた可能性がある。）
・被験者 H7，H8 は，試行①から試行②にかけて，難度が低下し，試行②の難度は他の被験者に比べて低かった。

次に，事後の感想の記述，口述による回答における特徴的な内容として，次の点が挙げられる。

・8 名中 4 名（H1～H4）は，「試行①では，焦ったが，ヒントが出るのを待っていた」，「試行②では，ヒントがないので無理だと思った」，「試行③では，ヒントをもとに考えた」に類する回答を行った。
・8 名中 2 名（H5，H6）は，「大きいピースがどこにはいるか考えた」，「ヒントに頼らないようにしようと思った」に類する回答を行った。
・8 名中 2 名（H7，H8）は，「まずは見当をつけた」，「だんだんと慣れてきた」に類する回答を行った。

⑤行動観察結果による被験者分類

所要時間，事後の感想の結果には 3 つのタイプがあった。そこで，以下ではこれらをもとに，被験者を 3 つの群に分類して検討を行うこととする。分類は次のとおりである。

・第Ⅰ群：被験者 H1，H2，H3，H4。ヒントのない試行②では解決が難しく，所要時間の短縮がなされなかった群。
・第Ⅱ群：被験者 H5，H6。ヒントのない試行②では解決が難しかったが，試行③で所要時間が短縮した群。
・第Ⅲ群：被験者 H7，H8。ヒントのない試行②でも解決に至り，試行②，③で所要時間が短縮した群。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果

被験者８名のヘモグロビン濃度変化について，第Ⅰ群以外は，右側と左側のデータに変化の形状の違いがある被験者は認められず，左右のヘモグロビン濃度変化の特徴は類似していた。第Ⅰ群は，試行③の deoxyHb について，右側では増加が優位であるという違いが認められた。その他の部分については，左右での大幅な違いは見られなかった。

光計測装置のデータは相対変化量を示すため，類似した特徴を示す被験者であっても，異なる被験者のデータを加算平均などの数値として操作し，分析することは，各個人のデータが示す変化の特徴を捨象してしまう可能性がある。そこで，以下では，上述した各群から１名を取り上げ，ヘモグロビン濃度変化の結果に言及する。なお，被験者間の比較については，相対変化量であることに十分な注意を保ちつつ，その特徴の可能性に言及する。

考察対象とする計測部位は，右側とする（図 8-11 参照）。右側は学習といった高次な活動における空間処理が優位であるとされるためである。

ヘモグロビン濃度変化をグラフ化するにあたっては，試行ごとの変化に着目するために，各試行の開始時を0とするベースライン補正を行った。

①第Ⅰ群（被験者 H3）

終始ヒントを必要とした第Ⅰ群からは，群内で所要時間が中間である４名中２名のうち，ヘモグロビン濃度変化が，より顕著に第Ⅰ群の特徴を示した被験者 H3 を取り上げる。

図8-14は，被験者H3のヘモグロビン濃度変化の結果である。図8-14，図8-15，図8-16のグラフはいずれも，縦軸がヘモグロビン濃度変化（μmol/L）を，横軸が所要時間（秒）を表し，両軸とも全てのグラフのスケールを統一した。したがって，横軸は最も所要時間の長い被験者H3に統一することになり，その他のグラフでは右側に空白が生じた。グラフ内の黒色線がoxyHb，灰色線がdeoxyHbの変化を示している。また，試行①，③にある縦の破線は，ヒント提示を行っ

た時点を示した線である。

図8-14より，特徴として次の点が挙げられる。以下の特徴は第Ⅰ群に共通するものである。

・oxyHbは，試行①，②では右上がりに増加したが，増加幅は試行①が顕著であった。試行③では，一度減少した後，増加する傾向にあった。

・deoxyHbは，試行①，②では減少傾向が見られたが，減少幅は試行①の方が大きかった。試行③では増加後，その値を維持する傾向にあった（試行③のdeoxyHbの増加は右側のみで認められた。）

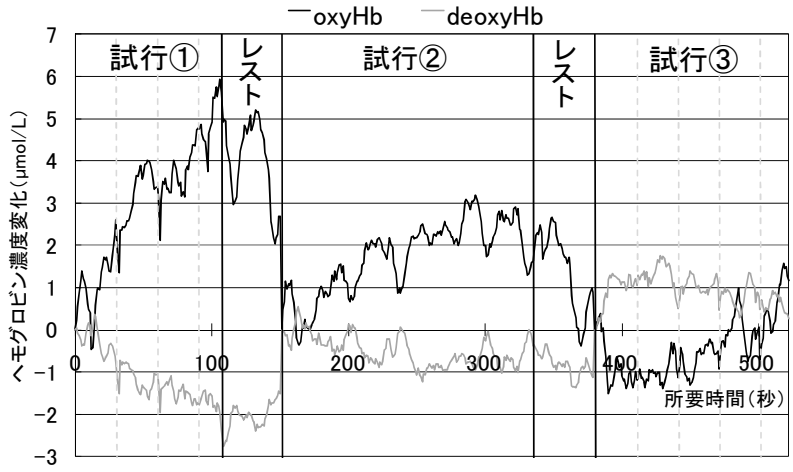


図8-14　被験者H3のヘモグロビン濃度変化

②第Ⅱ群（被験者 H5）

第Ⅱ群からは，所要時間が試行ごとに減少した被験者H5を取り上げる。図8-15は，被験者H5のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。以下の特徴は第Ⅱ群に共通するものである。

・oxyHbは，いずれの試行においても増加するが，試行を経るにしたがって，増加幅は縮小した。

・deoxyHbは，いずれの試行においても減少が見られるが，試行を経るにしたがって，減少幅は縮小する傾向にあった。

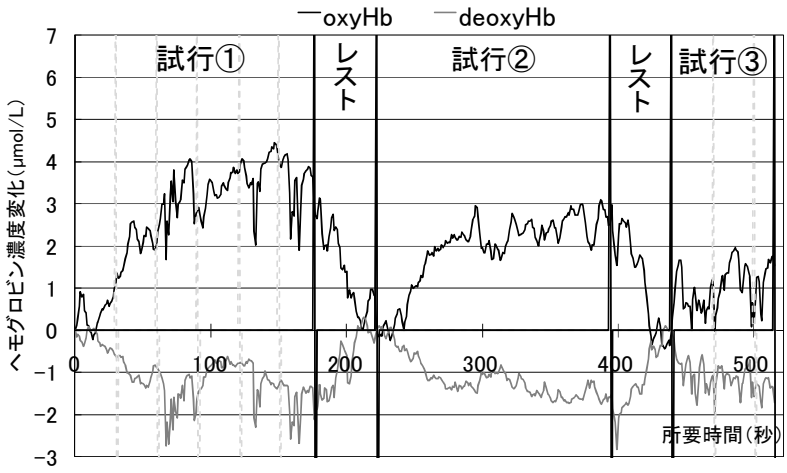


図8-15　被験者H5のヘモグロビン濃度変化

③第Ⅲ群（被験者 H7）

第Ⅲ群からは，試行①から試行③にかけての所要時間の短縮幅が大きかった被験者H7を取り上げる。図8-16は，被験者H7のヘモグロビン濃度変化を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。以下の特徴は第Ⅲ群に共通するものである。

・oxyHbは，試行①では右上がりに増加するが，試行②，③では0付近で推移した。

・deoxyHbは，全試行をとおして0付近で推移した。

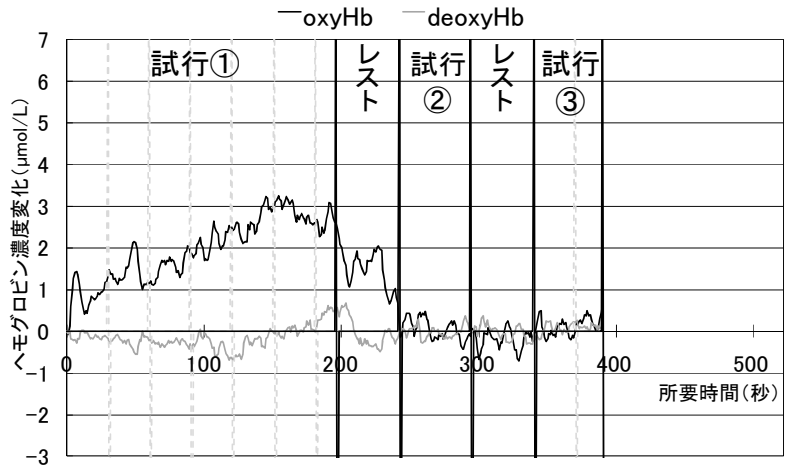


図8-16　被験者H7のヘモグロビン濃度変化

(3)　ヘモグロビン濃度変化の周波数解析結果

「第 7 章 7.2.3. (3) ヘモグロビン濃度変化の周波数解析結果」において既述した方法を用いて，各試行の oxyHb について周波数解析を行った。第 7 章と同様，サンプリング間隔は 1 秒であり，所要時間がそのままデータ数を示している。分析にあたっては，試行の変化による特徴を見るべく，試行ごとの分析を行うこととしたため，各被験者について所要時間が最短であった試行に合わせて，データ数を設定した。すなわち，被験者 H1 については 128 データ，被験者 H2，H3，H4，H5 については 64 データ，H6，H7，H8 については 32 データを用いて分析を行った（図 8-13 参照）。出力値の周波数刻みがデータ数に依存する問題については，32 データが最小のデータ数であり，3 名の被験者がいること，および，第 7 章で 32 データに合わせたことから，ここでも 32 データの被験者に合わせることとした。128 データの場合は出力値 4 つずつを順に加算，64 データの場合は出力値 2 つずつを順に加算することで，1 データあたりが持つ周波数帯域数を統一した。

これらの手法を用いて，oxyHb の周波数解析を行った結果，２つの特徴的なタイプが確認された。1 つは，第Ⅰ群に見られた特徴であり，もう 1 つは，第Ⅲ群と第Ⅲ群に見られた特徴である。以下では，2 つのタイプとして，第Ⅰ群の被験者 H1 と，第Ⅲ群の被験者 H8 を取り上げることとする。

①第Ⅰ群（被験者 H1）

図 8-17 は，被験者 H1 の oxyHb の周波数解析結果を示したグラフである。図 8-17，図 8-18 は，いずれも縦軸が振幅を，横軸が周波数（Hz）を表しているが，分析のもとのデータ数が異なるため，縦軸，横軸は統一されていない。ただし，横軸は概ね同様の値となっている。グラフ内の黒色実線が試行①，灰色が試行②，黒色破線が試行③の周波数解析結果を表している。

図 8-17 より，特徴として次の点が挙げられる。なお，以下の特徴は，第Ⅰ

群に類似する傾向があった。

・0.2Hz 付近において，試行①，③の振幅が大きい（図中矢印）。

・試行②では，上記の振幅は認められない。

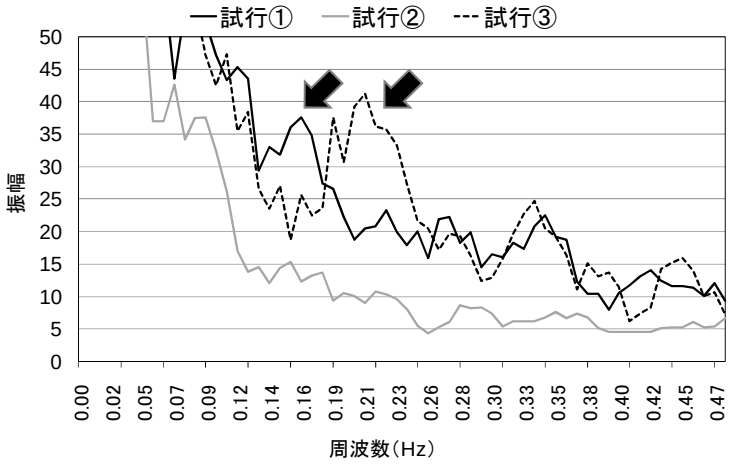


図 8-17　被験者 H1 の周波数解析結果

②第Ⅲ群（被験者 H8）

図 8-18 は，被験者 H8 の oxyHb の周波数解析結果を示したグラフである。特徴として次の点が挙げられる。なお，以下の特徴は，第Ⅱ群，第Ⅲ群に類似する傾向があった。

・0.3Hz 付近において，試行①，②よりも試行③の振幅が大きい（図中矢印）。

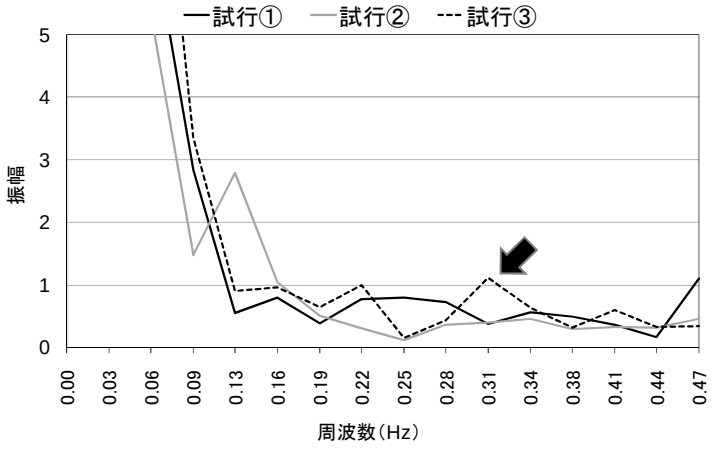


図 8-18　被験者 H8 の周波数解析結果

8.2.4. 考察

(1) 全体の行動観察結果，事後の感想より

身体的・精神的なストレスにより実験の遂行が困難となった被験者はなく，円滑に実験を実施することができた。また，全被験者について，適切にデータを取得することができた。

正誤については，全被験者ともヒント提示のある試行①，③において誤答はなく，正しく図形を構成できた。また，いずれの被験者もタングラムで遊んだ経験があり，実験課題の内容は正しく理解していたといえる。

所要時間については，正誤や事後の感想と併せて分類した３つの群（第Ⅰ群～第Ⅲ群）について述べる。まず，第Ⅰ群の被験者４名（H1～H4）は，ヒント提示のない試行②を制限時間内に解答に至ることができず，ヒント提示のある試行①から試行③にかけても所要時間の短縮は見られなかった。事後の感想から，試行①では，できないことに焦りながらヒントに依存する傾向があり，試行②では，ヒント提示がないために難度が高く，諦めた様子がうかがえる。ただし，試行③では，ヒントに依存せず，ヒントをもとに解決方法を導こうとしたと考えられる。

第Ⅱ群の被験者２名（H5，H6）は，ヒント提示のない試行②について，１名は制限時間内に解答に至ることができず，もう１名は制限時間に近い時間を要した。しかし，試行①，②に比べ，試行③で大幅な所要時間の短縮がなされ，試行③からは，解決方法を獲得した可能性が考えられる。事後の感想からも，感じていた難度は全体的に高くなく，ヒントをうまく活用することにより，解決方法を導いたことがうかがえる。

第Ⅲ群の被験者２名（H7，H8）は，ヒントの有無にかかわらず，試行を経るごとに所要時間が短縮した。試行①から試行②における所要時間が大幅に短縮し，感じていた難度も低下したことから，試行②からは解決方法を獲得して

いたといえる。事後の感想からも，見当をつけながら計画的に考えていたことがうかがえる。

(2)　ヘモグロビン濃度変化結果より

第Ⅰ群では，oxyHb は，試行①，②では増加したが，試行①での増加が顕著であり，増加幅は試行①から試行②にかけて減少した。反対に，deoxyHb は，試行①，②では減少し，減少幅は試行①から試行②にかけて縮小した。事後の感想から，試行①では解決しなければならないという焦りを感じながら，解決方法を模索していたと考えられ，このことが oxyHb の増加と deoxyHb の相対的な減少につながったと考えられる。試行②では，ヒント提示がなく難度が高まったことによる諦めが oxyHb の増加幅の減少につながり，相対的に deoxyHb の減少幅が縮小したと予想される。試行③では，deoxyHb が増加し，oxyHb は一旦減少後，増加する傾向にあった。事後の感想から，試行③では試行①のような焦りはうかがえず，ヒントを活用して積極的に解決方法の模索を行った姿勢が見られたことから，難度の高さを感じながらも，ヒントによって思考が促進されたことが deoxyHb の増加に反映されたと考えられる。（deoxyHb の増加は右側で優位であったことから，oxyHb に対して，deoxyHb の方が局所的に増加が生じる傾向があると考えられる。）ただし，試行①と比べて，所要時間の短縮が見られなかったことから，解決方法の獲得にまでは至らなかったといえる。また，oxyHb の減少は，deoxyHb の増加による相対的な変化であったことが推測される。

第Ⅱ群では，oxyHb は各試行で増加が見られたが，増加幅は試行を経るにしたがって縮小した。反対に，deoxyHb は各試行で減少が見られたが，減少幅は試行を経るにしたがって縮小した。試行①，②では，ヒント提示の有無にかかわらず，解決方法の模索が行われ，試行③では解決方法を獲得したことが，oxyHb の増加幅の縮小につながったと考えられる。deoxyHb の減少幅の縮小は，

oxyHb の増加幅の縮小に伴う相対的な変化であると予想できる。

第Ⅲ群では，oxyHb は，試行①で増加し，試行②，③では増加が抑制された。deoxyHb は，全試行をとおして 0 付近で推移した。試行①ではヒントを活用しながら計画的に考えたことで，解決方法を獲得でき，試行②，③では短時間で解決に至ったと考えられる。計画的な解決方法の模索から獲得への変化が，oxyHb の増加とその抑制につながったと考えられる。

群間（被験者間）での比較を行うと，試行①の oxyHb の増加幅は，大きい群から順に，第Ⅰ群，第Ⅱ群，第Ⅲ群となる。所要時間は長い群から順に，第Ⅲ群，第Ⅱ群，第Ⅰ群となり，反対の順序となるが，事後の感想やその後の所要時間の推移から見ると，難度の高さや焦りは第Ⅰ群，第Ⅱ群，第Ⅲ群の順に少なくなったと考えられ，このことが oxyHb の増加幅に反映された可能性が考えられる。

(3)　ヘモグロビン濃度変化の周波数解析結果より

oxyHb の周波数解析の結果より，0.25Hz を中心とした周波数における振幅の大きさに着目した。第Ⅰ群では試行①，③で振幅が大きく，第Ⅱ群，第Ⅲ群では試行③で振幅が大きくなるという，2 つのタイプを確認できた。

「第 7 章 7.2.4.(3) ヘモグロビン濃度変化の周波数解析結果より」において既述したように，心拍変動の周波数解析を行うと，0.25Hz を中心とした帯域に 1 つのピークが見られ，これは，呼吸に一致した心拍変動であることが知られている。この帯域は，リラックス時に活発となる副交感神経によって支配されていると考えられており，緊張状態時にはピークが減少，あるいは消失するとされている。つまり，心拍変動の周波数解析における 0.25Hz 付近の振幅は，緊張状態が高い場合に消失し，緊張状態が低い場合に現れるといえる。

これらを踏まえて，oxyHb の周波解析結果を見ると，最後まで解決方法を獲得できなかった第Ⅰ群においては，ヒント提示のある試行①，③において

0.25Hz を中心とする周波数帯で大きな振幅が確認されたが,ヒント提示のない試行②にはそれは見られなかった。事後の感想において，ヒント提示のない試行②は，ヒント提示のある試行①，③に比べて感じていた難度が高かったことから，試行①，③ではヒントに頼ることができる安心感により緊張状態は低かったが,試行②では解決方法の未獲得状態で自力解決を求められたことにより,諦めは生じたものの，緊張状態が高まったと考えられる。これらを考え併せると，試行①，③では緊張状態が低く，0.25Hz を中心とする付近の周波数帯における大きな振幅が現れたが，試行②では緊張状態が高くなり，振幅が見られなかったと予想される。行動観察結果とヘモグロビン濃度変化結果から，試行②では，問題解決の諦めが見られることを上述したが，周波数解析結果を踏まえると，緊張状態にあったことが予想され，諦めと緊張状態は別の指標であると考えられる。

また，第Ⅱ群，第Ⅲ群については，試行①，②よりも試行③において，0.25Hz 付近の周波数帯の振幅が大きくなった。第Ⅱ群，第Ⅲ群は，それぞれ試行②，試行③から解決方法を獲得しており，「だんだんと慣れてきた」との事後の感想から，試行を経るごとに慣れが生じ，緊張状態が軽減されたと考えられる。これらを考え併せると，試行①（および試行②）では，解決方法の未獲得段階で緊張状態にあり,0.25Hz 付近の周波数帯における大きな振幅は見られなかったが，試行③では解決方法の獲得と慣れによって緊張状態が低くなり，振幅が見られるようになったと予想できる。

8.2.5.　まとめ

本実験では，タングラムの問題解決過程にヒント提示を行い，脳内ヘモグロビン濃度変化を検討した。その結果を実験目的で述べた達成項目に沿ってまとめると次のようになる。

(1) 大学生を対象とした実験では，ヒント提示が混乱を招いた場合がある可能性が考えられたが，小学生ではそのような場面は確認されず，次の 3 つの群が存在した。はじめはヒントに頼りヒント提示がなければ諦めたが，最終的にはヒントを活用して解決方法の模索を行った群。ヒントを活用しながらも，ヒント提示がない場合には自身で解決方法を模索し，最終的に解決方法の獲得に至った群。ヒントを活用しながら計画的に考えを進め，早い段階で解決方法を獲得した群。

(2) 上記の 3 つの群のヘモグロビン濃度変化は次のようであった。まず，1 つ目の群について，ヒントを頼りにしていたときには oxyHb が増加したが，諦めによって oxyHb の増加幅は抑制され，その後のヒント活用による解決方法の模索により deoxyHb が増加した。途中で解決方法を獲得した 2 つ目，3 つ目の群は，解決方法の獲得前は oxyHb の増加が見られたが，獲得後は oxyHb の増加は抑制された。deoxyHb の増加は見られなかった。このことから，oxyHb の増加から抑制への変化に，解決方法の獲得過程が反映された可能性が考えられた。

(3) oxyHb の周波数解析により，上記の解決方法を獲得できなかった 1 つ目の群では，ヒント提示時に振幅が見られ，途中で解決方法を獲得した 2 つ目，3 つ目の群では，最後の試行で振幅が見られた。このことから，oxyHb の 0.25Hz 付近での振幅の大きさが，緊張状態の低さを反映したことが考えられた。

【参考文献】

Kuroda, Y., Okamoto, N., Chance, B., Nioka, S., Eda, H. and Maesako, T. (2009) “Visualization of children’s mathematics solving process using near infrared spectroscopic approach” *SPIE- Society of Photo-Optical*

Instrumentation Engineers, Vol.7174: 71741Z1-Z8

岡本尚子（2008）「学習時のヒント提示がもたらす脳内ヘモグロビン濃度変化の特徴」大阪大学教育学年報，Vol.13：43-54

岡本尚子，黒田恭史（2007）「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：5-10

岡本尚子，黒田恭史（2008）「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：215-217

Okamoto, N., Kuroda, Y., Chance, B., Nioka, S., Eda, H. and Maesako, T. (2009) “Measurement of brain activation difference during different mathematical tasks by near infrared spectroscopy” *SPIE- Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, Vol.7174: 71741M1-M8

【注】

1）タングラム：別名，知恵の板，またはタンゲームとも言う。正方形の板を切って，三角形 5 個，正方形 1 個，平行四辺形 1 個の計 7 個に分けた小片を様々な形に並べる中国のパズルである。本実験では，株式会社ハナヤマ製のものを用いた（図 8-3）。大きさは，正方形の一辺が 10cm，厚みが 1cm のもので，木製であった。

第 9 章　総合論議

要約

本章では，研究目的で述べた 4 点の達成目標に沿って，成果の総括を行う。とりわけ，第 5 章から第 8 章において実施した実験結果については，4 つの章の知見を比較，集約して議論する。最後に，研究成果を踏まえ，今後の課題を述べる。

9.1. 研究成果

本研究における達成目標は次の 4 点であった。

(1) 神経科学と教育学の学際的研究のこれまでの動向を概観し，今後の留意点と方向性を明確化する。

(2) 脳活動計測実験の実験課題の設定に向けて，算数科の主要な領域である「数と計算」，「図形」の 2 領域について，児童の学習実態と検討課題を整理する。

(3) 光計測装置を用いて，大学生と小学生を対象に脳活動計測実験を実施し，脳活動データから問題解決過程の特性を考察する。また，脳活動データの新たな分析手法を検討する。

(4) 脳活動計測実験によって得られた成果について，教育研究への適応を検討するとともに，神経科学と教育学の学際的研究の可能性について言及する。

以下では，これらの(1) 学際的研究動向の概観，(2) 算数科における検討課題の整理，(3) 脳活動計測の実施と新たな分析方法の検討，(4) 教育学への応用について言及することとする。(1)から(3)については，前章までの内容の総括を行い，これらを踏まえて(4)についての議論を行う。

9.1.1.　学際的研究動向の概観

第 2 章においては，まず，神経科学と教育学の学際的研究が本格化した 1990 年代後半から現在に至るまでの約 10 年間の研究について，「政策的取り組み」がどのように進展してきたのか，「社会的関心」はどのような点に向けられてきたのか，「研究者の見解」としてどのようなことが議論されてきたのか，「算数・数学教育」に関わってどのような研究がなされてきたのかの 4 つの観点から整理した。「政策的取り組み」としては，OECD（Organisation for Economic Co-operation and Development）や文部科学省などの大規模な組織的研究が進められてきており，神経科学と教育学の学際的領域が，世界的に重要な研究領域として位置づけられていることが読みとれた。しかしその一方で，「社会的関心」が神経神話を拡大させている側面が国内外で危惧されており，これが教育学へも影響を及ぼしていることが明らかとなった。「研究者の見解」としては，教育学から神経科学への関わりの弱さが指摘され，神経神話の教育学への影響に対応するためにも，教育学から神経科学への積極的な関わりを持ち，互いの協力のもとで学際的研究領域を構築することの重要性が示唆された。また，実際に行われている学際的研究の中で，「算数・数学教育」に関する脳活動計測の研究は，いくつかの結果を示しているが，脳活動計測結果をどのように算数・数学教育へ還元していくのかの方途を探ることが課題となっていることが考えられた。

次に，研究分野の異なる研究者らとの国際的な共同研究を実施した筆者の経験から，神経科学と教育学の学際的研究領域を構築する上での留意点と成果を述べた。留意点としては，国の違いによる教育内容の相違点，研究分野の違いによる研究目的の相違点を考慮し，互いに価値観を共有できるような議論をする必要があることを論じた。成果としては，国内での教育学の問題を国際的な問題として捉え返すことが可能となる点や，議論を通じて学際的研究領域にお

ける目的の意識化が図られるようになったことを挙げた。

最後に，学際的研究領域を構築するための今後の方向性として，「統計処理による実験結果を一律に教育実践に適用するのではなく，統計処理とケーススタディーを組み合わせて結果を分析し，適用可能性を検討すること」や「年齢や性別など，明確に異なる個体差のみを基準に実験結果の分析と適用方法を検討するのではなく，実験課題に対する適正や背景などをも踏まえ，総合的に分析し，各タイプに応じた適用方法を検討すること」などを提案した。

9.1.2. 算数科における検討課題の整理

第 3 章においては，日本における全国規模調査である全国学力・学習状況調査の算数科から，主要な領域である「数と計算」，「図形」に関する結果の分析を行い，検討課題を整理した。その結果，「数と計算」，「図形」の両領域とも，機械的な手順の体得や反復練習などによって，答えを求めることができても，答えまでのプロセスの表現や，そこでの関係性を理解することが不十分であることが挙げられ，各領域では次の点を踏まえた実験課題設定を行う必要性が考えられた。

「数と計算」（計算問題）：一般的な計算問題の答えを求めさせるだけではなく，計算過程や演算構造を，文字式の形式を用いて考えさせる。

「図形」（図形問題）：長さ，面積，体積などを求めさせたり，試行錯誤の操作で解決させたりせず，図形の性質を用いて論理的に図形の構成を考えさせる。

そこで，脳活動計測実験では，計算問題として「虫食い算」を設定することとした。虫食い算は，一般的な計算のように一定の手順を遂行するのではなく，演算構造を考え，周囲の数字から適切な数字を算出する必要がある問題である。また，図形問題として「図形の構成」を設定することとした。具体的には，ブ

ロックの構成，ジグソーパズル，タングラムを用いたが，いずれも面積や体積の求積などの公式によって答えを求める問題ではなく，各図形の性質や合同などを考えながら，順序だてて論理的に解決する必要がある問題である。

9.1.3. 脳活動計測の実施と新たな分析方法の検討

第5章から第8章においては，「個別学習場面」と，「ヒント提示学習場面」の2種類の実験条件を設定し，双方において計算問題と図形問題を実験課題とする脳活動計測実験を実施した。これらの実験結果から明らかになった問題解決時の前頭前野におけるヘモグロビン濃度変化の特徴を以下に整理する。

(1) 個別学習場面

基礎実験としての大学生を対象とした計算問題（3桁×3桁の筆算と虫食い算）では，筆算は既習の事項であったため，試行の進行に伴う所要時間の大幅な短縮は見られず，虫食い算は1試行目で所要時間が長かったが，2試行目以降は解決方法を獲得したため所要時間が大幅に短縮した。

大学生を対象とした図形問題(ブロック構成の実物問題とディスプレイ問題)でも同様に，実物問題では所要時間の大幅な短縮は見られず，全被験者が難度の高さを感じていたディスプレイ問題は1試行目で所要時間が長かったが，2試行目以降は解決方法を獲得したため所要時間が大幅に短縮した。

計算問題，図形問題の双方の結果を考え併せると，解決方法を模索する段階ではoxyHbの増加が顕著となり，解決方法の獲得によってoxyHbの増加幅が抑制されるといえる。また，解決方法の模索段階で，とりわけ長い時間を要し，感じていた難度が高かったと考えられる被験者は，oxyHbの増加とともにdeoxyHbについても増加が顕著となることが確認できた。oxyHbの増加は，前頭前野の左右両側で，deoxyHbの増加は片側で見られた。

一方，主実験である小学生を対象とした計算問題（2桁＋2桁＋2桁の虫食い

算），図形問題（ジグソーパズル）では，大学生のように解決方法の獲得によると考えられる所要時間の短縮はなく,被験者間の所要時間が大きく異なった。所要時間の長さ（長，中，短）は，感じていた難度の高さ（高，中，低）を示すと考え，それぞれについてヘモグロビン濃度変化を考察した。

いずれの問題においても，感じていた難度が高かったと考えられる被験者では， oxyHb のみならず deoxyHb の増加が顕著であった。この場合，理解や慣れにより，deoxyHb の増加部位が両側から片側へ局所化がなされる可能性が考えられた。感じていた難度が中程度であったと考えられる被験者では，oxyHb の増加が顕著であり，deoxyHb の大幅な変化は認められなかった。感じていた難度が低かったと考えられる被験者では oxyHb, deoxyHb ともに増加は見られず，0 付近で推移した。感じている難度が中程度，あるいは低い場合には，右側，左側とも，oxyHb，deoxyHb は類似した変化を示した。

(2)　ヒント提示学習場面

基礎実験としての大学生を対象とした計算問題（3 桁÷1 桁の筆算，4 桁÷2 桁の虫食い算）では，虫食い算においてヒント提示を実施した。いずれの被験者も，虫食い算の解決方法は知らなかったが，1 試行目のヒントが有効に機能したことで解決方法の獲得に至り，2 試行目以降は，所要時間の減少，感じる難度の低下が見られた。

大学生を対象とした図形問題（タングラム）でヒント提示を実施した結果，全被験者にヒントが有効であった上記の計算問題の場合とは異なり，問題解決に有効に活用した群と，思考にそぐわずに有効に活用できなかった群に分かれた。なお，ヒント提示が被験者に解決方法の獲得をもたらし，所要時間を短縮に至らせることはなかった。

これらの大学生の結果を併せてヘモグロビン濃度変化の特徴を考えると，まず,ヒントを活用しながら解決方法を模索している段階では oxyHb の増加が見

られ，解決方法の獲得後は，oxyHb の増加幅は減少した。また，各ヒント後には，思考が促進されたと考えられる一時的な若干の deoxyHb の増加が見られる場合があった。しかし，ヒントが思考にそぐわずに有効に活用できなかった場合には，被験者自身に解決方法があり，感じていた難度はそれほど高くなかったと考えられ，oxyHb の顕著な増加は見られなかった。ただし，ヒント後には自身の思考にそぐわないことによる混乱や焦りを反映したと予想される一時的な oxyHb の増加が見られた。いずれの場合においても，右側，左側とも，oxyHb，deoxyHb は類似した変化を示した。

主実験である小学生を対象とした計算問題（3 桁÷2 桁の虫食い算）でヒント提示を実施した結果，大学生では全被験者がヒントの有効な活用によって解決方法を獲得したが，小学生では，その他に，ヒントを活用したが解決方法が獲得できなかった被験者とヒントが不要であった被験者が存在した。

小学生を対象とした図形問題（タングラム）でヒント提示を実施した結果，大学生のようにヒント提示が思考にそぐわないと感じた被験者は確認できなかった。また，上記の小学生の計算問題の場合のように，ヒントが不要である被験者は存在せず，ヒントを活用して解決方法の獲得に至ることができた被験者と，はじめはヒントに頼りヒント提示がなければ諦めたが，最終的にヒントを活用して解決方法の模索を行った被験者が存在した。

これらの小学生の結果を併せてヘモグロビン濃度変化の特徴を考えると，まず，ヒントを活用しながら解決方法の模索を行っている場合には oxyHb の増加が顕著であった。ただし，感じている難度が高い状況下で，思考活動が促進されると deoxyHb の増加傾向が見られる可能性が考えられた。解決方法の模索後，ヒントが有効に機能して解決方法を獲得できた場合には，oxyHb は増加から抑制へと転じた。ヒントが不要であった場合は，はじめからヘモグロビン濃度は増加しなかった。一方，解決方法が獲得できないまま，ヒント提示がなくなる

と，自力解決を求められたことにより oxyHb の増加幅が拡大する場合と，諦めたことにより増加幅が縮小する場合が確認できた。総じて，右側，左側とも，oxyHb，deoxyHb は類似した変化を示したが，deoxyHb の増加は，片側で生じる傾向にあった。

(3)　個別学習場面とヒント提示学習場面

個別学習場面とヒント提示学習場面の実験結果を比較すると，前者の個別学習場面では，いずれの被験者も独力で解決方法を獲得するという同様の状況となり，ヘモグロビン濃度変化には，被験者の感じる難度が大きな要素として反映されたといえる。一方，後者のヒント提示学習場面では，同一のヒント提示であっても，解決方法の獲得の可否が被験者によって異なり，この結果がヘモグロビン濃度変化に反映された。また，ヒント提示は，各被験者の問題解決状況を変化させ，この状況についてもヘモグロビン濃度変化に反映がなされたと考えられた。つまり，ヒントによる混乱，ヒント依存によるヒント提示がない場面での諦め，ヒント提示がなくなることによる自力解決の必要性など，個別学習場面では生じなかった状況がうまれ，それがヘモグロビン濃度変化として検出できた。さらに，ヘモグロビン濃度変化の側面から，個別学習場面では難度が高いと考えられる場合に見られた deoxyHb の顕著な増加が，ヒント提示場面ではほとんど観察されなかったことから，ヒントは被験者の感じる難度や高い思考状態を軽減している可能性が考えられた。

このように，個別学習場面に加えて，ヒント提示場面の実験を実施したことによって，教室空間での学習における教師の関与を要素として実験に取り込むことができた。これは，第 1 章（図 1-1），第 3 章（図 3-8）で述べた研究段階における第 1 段階の学習者の個別学習環境から，第 2 段階の教師と学習者の環境へと移行できたことを示すものであるといえる。実験で設定した環境やヒントの内容は，実際の教室での授業とは異なるが，一斉授業における教師から

学習者への指導，助言という点では，教室空間での学習の一部を再現できたと考えられる。というのも，一斉授業において，同一の指導を行った場合，学習者の理解はそれぞれであり，さらに，教師の助言によって混乱したり，教師の助言がなくなると解答を諦めたりする場面は少なくないためである。

上述の実験成果の教育学への還元を考えると，まず個に応じた指導の重要性が指摘できる。このことは，これまでも教育学研究において十分に指摘されてきたことであるが，学習者の行動のみならず，ヘモグロビン濃度変化からも学習過程の個人差が検出されたことから，脳活動の視点からも，その重要性が指摘できるといえる。また，教師の助言方法や助言時機についての重要性を再認識する必要があることを指摘できる。助言は，学習の感じる難度を軽減し，理解を促進する利点がある一方で，学習者の思考の機会を減らす可能性がある。実験では，行動観察から，ヒントに依存して自力解決を諦める被験者が確認され，それがヘモグロビン濃度変化にも反映されたが，さらに，ヘモグロビン濃度変化から,個別学習場面では難度が高い場合に見られた deoxyHb の顕著な増加が，ヒント提示学習場面ではほとんど検出できなかった。現時点で deoxyHb の増加の是非を問うことはできないが，ヒント提示の有無が脳活動として異なる変化を示すことから，助言が学習者に及ぼす影響の重要性を再認識する必要があると考えられる。

(4)　新たな分析手法としての周波数解析

これまではノイズとして見なされる傾向にあったヘモグロビン濃度変化の細かな増減に着目し，ヘモグロビン濃度変化の新たな分析手法として，周波数解析（高速フーリエ変換）を行った。計算問題，図形問題ともに試行数が同数であったヒント提示学習場面の実験のうち,主実験であった小学生のデータから,全体として特徴的な変化を示した oxyHb を分析対象とした。

周波数解析の結果,最後まで解決方法を獲得できなかった被験者においては,

ヒント提示時に 0.25Hz 付近の周波数帯で大きな振幅が確認され，方略を獲得した被験者においては，後半の試行で同様の周波数帯での振幅が確認されるようになった。

一般に，心拍変動の周波数解析を行うと，0.25Hz（0.2～0.4Hz）を中心とした周波数帯域に 1 つのピークが見られ，これは呼吸に一致した心拍変動を示していることが知られている。1 回の呼吸が概ね 4 秒であると考えると 0.25Hz の周波数であることが理解できる。ただし，このピークは，緊張状態が高い場合に消失すると考えられている。

この視点からヘモグロビン濃度変化の周波数解析結果を見ると，最後まで解決方法を獲得できなかった被験者においては，ヒントが提示される試行では 0.25Hz を中心とした付近の周波数帯で大きな振幅が確認されたが，ヒントが提示されない試行ではその振幅は見られなかった。事後の感想とも照合すると，ヒントが提示される場合は，ヒントを活用できるという安心感があり緊張状態は低かったが，ヒントが提示されない場合は，解決方法の未獲得状態で自力解決を求められたことにより緊張状態が高まったと予想され，被験者の緊張状態が周波数解析結果に反映したと考えられる。また，問題解決途中で解決方法を獲得した被験者や，はじめから解決方法を獲得していた被験者においては，ヒント提示の有無にかかわらず，後半の試行において 0.25Hz 付近の周波数帯での振幅が確認される傾向にあった。所要時間の短縮や，事後の感想とも照合すると，理解が進んだことや慣れが生じてきたことにより緊張状態が軽減され，このことが周波数解析結果に反映したと予想される。

ヘモグロビン濃度変化の周波数解析により，被験者の緊張状態の低さが 0.25Hz 付近の振幅の大きさに反映されたことが考えられた。周波数解析が新たなヘモグロビン濃度変化の分析方法として利用できる可能性が見出されたといえる。

9.1.4.　教育学への応用

実験結果より，脳活動データの教育学への応用として，次の 2 段階における可能性が考えられる。

(1) 学習者の学習状況を診断する上での，生理学的「客観」指標としての活用

(2) 教師の指導方法を改善する上での，生理学的「分析」指標としての活用

まず,1 つ目の学習状況の診断における活用とは,学習者の感じている難度，焦り，解決方法の獲得過程，思考状態，緊張状態など，行動観察からでは検出の難しい学習状況を，生理学的に把握する客観指標としての活用である。これまで，教育学においては，動作や表情の読みとりを含め，学習者の学習状況を把握，評価するために複数の方法が考案されてきたが，学習者がどのような状態にあるのかという詳細な把握を客観的に行える方法はほとんど見られなかった（平山 1997）。たとえば，梶田（1983）は，主要な学習状況の把握（評価）方法として，標準テスト，教師作成テスト，質問紙法，問答法，観察記録法，レポート法，製作物法の 7 つを挙げ，各方法の特質を，「実態把握の深さ」と「評価の客観性」の観点について表 9-1 のように整理している。表内の○印は，その点に関し優れていることを，×印は劣っていることを表しているが，いずれの方法も「実態把握の深さ」と「評価の客観性」のどちらかが優れており，両者の点で優れたと判断されるものは見いだせない。学習者の実態を深く把握しようとすると客観性の点で問題があり，客観性を保証しようとすると皮相的な面になりがちだという問題があるわけである。具体的に,教師作成テストは，選択法，真偽法などの客観性を重視すると，その背景において，どの点が，どの程度の理解であったのかの把握が不十分になることが少なくない。一方，レポート法は，どの点について，どの程度理解しているのかについては深く把握できるが,その評価には教師の価値観や各学習者への感情などの影響が否めず，

客観性が高いとは言い切れなくなる。

脳活動計測実験からは，被験者の感じる難度の高さや解決方法の模索がoxyHb，deoxyHbの高さに，緊張状態が0.25Hzを中心とする周波数の振幅に反映される可能性などが考えられた。現在は，各ヘモグロビン濃度変化の特徴が学習状況のどのような要素を反映した可能性があるのかを，所要時間や事後の感想との照合により考察している段階である。しかし，今後データを蓄積していくことで，ヘモグロビン濃度変化の計測結果から，被験者の感じている難度や解決方法の獲得状況，緊張状態などを判定できるようになれば，脳活動データが，これまでの教育学では持ち合わせていなかった「実態把握の深さ」と「評価の客観性」の双方を有する学習状況の診断の指標として活用できる可能性がある。

表 9-1　各評価方法の方法論的特質（梶田（1983）より）

特質 / 評価方法	実態把握の深さ	評価の客観性
標準テスト	×	○
教師作成テスト	×	○
質問紙法		○
問答法	○	
観察記録法	○	×
レポート法	○	×
製作物法	○	×

○印はその点に関し優れていることを，×印は劣っていることを表す。

次に，2つ目の指導方法の改善における活用とは，1つ目の学習状況の診断を踏まえ，教師が，どのような説明が効果的であったのか，どのタイミングで助言を行うことが学習者にとって有益であったのかなど，自身の省察だけでは

判断の難しい指導方法の改善について，生理学的に分析する指標として活用することである。これまで，教育学においては，どの内容において，またどのような学習者に対して，どの指導方法が有用であるのかという点については，多数の研究がなされてきた。たとえば，算数・数学教育においては，ある程度の知識を得ている学習者の理解を発展させるために，固定概念を問い直す「概念くだき」を図ること，計算方法や公式などの技法を習得した後の理解を確立するために，正当性を問う「ゆさぶり」の発問を行うこと，学習者自身に思考させたり，間違いに気付かせたりするために，意図的に沈黙を設けることなどがある（手島 1985，小西 1990，菊池 2006）。しかし，これらを一斉授業で全学習者に同じ方法を用いた場合，学級全体としてはうまくいったように見えても，学習者によっては，理解を深化させるために行った「概念くだき」や「ゆさぶり」が，混乱を招いてしまうことも少なくない。

脳活動計測実験からは，ヒントによる混乱が oxyHb の増加に，ヒント提示による思考の促進が deoxyHb の増加に，ヒントが提示されないことによる諦めが oxyHb の増加幅の減少に反映される可能性などが考えられた。また，ヒントが被験者の感じる難度を軽減しており，それが deoxyHb を増加させないことに反映されている可能性が予測された。今後，ヘモグロビン濃度変化の計測結果から，教師の指導方法の影響を評価できるようになれば，脳活動データが，これまでの教育研究における知見をより効果的に用いるための指標として活用できる可能性がある。

9.2. 今後の課題

本研究での算数課題を用いた「個別学習場面」，「ヒント提示学習場面」における脳活動計測実験より，難度の高低とヘモグロビン濃度の関係，解決方法の獲得の可否とヘモグロビンの関係の可能性が明らかになった。その結果，学

習者の思考過程におけるヘモグロビン濃度変化や，ヒント提示場面での問題解決過程におけるヘモグロビン濃度変化が明確になったが，今後は，学習者に対する他者関与のヘモグロビン濃度変化を対象とすることで，より教育への還元可能性が高まると予想される（岡本・黒田 2008）。併せて，今回は，ヘモグロビン濃度変化を周波数解析することで，緊張状態を検討できる可能性が明らかとなったが，今後は複数の生体情報を同時に計測することで，データの精緻化を図ることができると考えられる。

具体的に，まず，上記の1つ目の課題は，第7章，第8章での「ヒント提示学習場面」での実験により，第1章（図1-1），第3章（図3-8）で述べた研究段階の第1段階（学習者の個別学習環境）から，第2段階（教師と学習者の環境）へと移行できたことを踏まえ，第2段階の発展として，指導時の教師の脳活動計測を行い，その後，指導を受ける学習者と指導を行う教師の脳活動計測を同時に行うことである。教室での学習を左右する教師の脳活動の計測・考察をもとに，教師と学習者が相互に及ぼす影響を脳活動のデータをとおして検討する。さらに，第3段階では，教え合い，学び合いの視点から，学習者同士の脳活動計測を行う。これまで，学校現場では，他者に教えることが理解につながるとして，学習者同士での教え合い，学び合いの方法が用いられてきた。学習者という同じ立場でありながら，教える場合と教えてもらう場合ではどのような差異があるのかを脳活動計測により調べることで，この学習が持つ特性を考察する。また，第2段階の教師と学習者のデータと比較することで，教師による指導と，学習者同士の学びの差異について検討する。

2つ目の課題は，心拍，呼吸のデータとヘモグロビン濃度変化の周波数解析結果を照合するために，ヘモグロビン濃度変化と心拍数，呼吸数の同時計測を行うことである。また，ヘモグロビン濃度変化における心拍の周波数帯を分析するために，サンプリング間隔を短くして高周波成分のデータを取得すること

である。第7章，第8章の小学生を対象とした実験結果について，新たな分析手法として周波数解析を行った結果,0.25Hz付近の周波数帯に心拍呼吸性成分に関するデータが反映している可能性が考えられたため，これを実際に心拍，呼吸のデータと照合して検証を行っていくことで，データの精緻化が図られるといえる。

ところで，今後，神経科学と教育学の学際的研究領域を確立していく上で，教育学はどのような分野と関わりを持つことが重要となるであろうか。

まず1つは，脳活動計測装置の開発への関与が考えられる。光計測装置は，他の脳活動計測装置よりも，教育研究での利用がしやすいことは第4章で述べたが，教室空間を想定した実験設定，あるいは教室への装置の持ち込みを考えた場合，さらに教育研究での利用可能性の高いものとなることが望まれる。たとえば，可動性を高めるために計測装置自体を軽量化すること，学習時の阻害要因とならないようプローブを軽量化すること，教室の任意の場所にいる複数の学習者の計測が行えるようプローブを無線化すること，装着時の負担を軽減するために装着方法を簡略化すること，購入可能性を高めるために低価格化することなどが考えられる。実際に，現在では計測箇所を減らすことで低価格化が進んでおり，また，子どもへの利用を意図して軽量化，無線化した携帯可能な装置の開発が進められている（Eda and Eura 2007）。今後，教育学の立場から，どのような装置であれば利用可能性が高まるのか，より有用なデータを取得するためにはどのような改良が必要かなどを積極的に提言できるか否かが，教育学での脳活動計測研究を左右すると予想される。

もう1つの教育学の関わりとしては，神経科学に関する倫理面の議論への関与が考えられる。現在，神経科学と倫理に関しては，脳神経倫理学（Neuroethics）[注1]という分野が立ち上がり，主に欧米では，神経科学者だけでなく神学者や哲学者が参画して，倫理面での議論を行っている（Gazzaniga

2005）。とりわけ，神経科学分野では，非侵襲的のみならず侵襲的に脳活動を計測して，その信号処理によって機器を制御する技術である Brain-Machine Interface（BMI）の研究が進められていることもあり，人格操作や人間性の視点から脳神経倫理学に関する議論が高まっている（川人 2009, 福士・佐倉 2007, Mizushima et al. 2009）。現在のところ，教育学において，神経科学に関する倫理的な問題が表面化したり，賛否両論を呼ぶような問題となったりするようなことは見受けられない。しかし，脳活動データは，これまでの教育学が扱うことのなかった各学習者についての生理学的客観指標となる可能性があり，データ取得の可否，データの活用方法など，倫理面での議論は不可欠になってくると考えられる。こうした議論は，データの危険性と有用性を再認識することであり，さらには，教育学の問題にとどまらず，広く脳活動データの意味を問うことにつながる。今後，脳神経倫理学は，多数の分野の研究者を取り巻きながら拡大していくと予想されるが，そこで教育学の立場から積極的な発言を行い，他の分野とともに議論が行えるかの可否が，相互に貢献可能な神経科学と教育学の学際的研究領域の構築を方向付けるであろう。

【参考・引用文献】

Eda, H. and Eura, S. (2007) “Development of Portable NIRS system for measurement of the brain activation” *Neuroscience 2007 (Society for Neuroscience)*: 102.2/ZZ4

福士珠美，佐倉統（2007）「Brain-Machine Interface (BMI)研究開発のための倫理とガバナンス －日米における取り組みの現状と将来展望－」電子情報通信学会技術研究報告，ニューロコンピューティング，Vol.107, No.263：59-62

Gazzaniga, S. M. (2005) “The Ethical Brain” The Dana Press, Washington,

DC.（マイケル・S. ガザニガ　梶山あゆみ 訳（2006）「脳のなかの倫理－脳倫理学序説－」紀伊國屋書店，東京）

平山満義 編著（1997）「子どもの理解度は測れるか」協同出版，東京

梶田叡一（1983）「教育評価」有斐閣，東京：166

川人光男（2009）「脳情報通信とブレイン・マシン・インタフェース」バイオフィードバック研究，Vol.36，No.2：101-107

菊池乙夫（2006）「算数科「問題解決学習」に対する批判と提言」明治図書，東京

小西繁(1990)「算数における「ゆさぶり」-発問とその効果」児童心理 ，Vol.44，（1990/12），金子書房，東京：1888-1892

Mizushima, N., Isobe, T. and Sakura, O. (2009) “ Neuroethics at the Benchside: a preliminary report of research ethics consultation in BMI studies” *Neuroscience Research*, Vol.65, Suppl. 1: S134

岡本尚子，黒田恭史（2008）「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発表論文集：5-8

手島勝朗（1985）「算数科問題解決の授業」明治図書，東京

【注】

１）脳神経心理学：ガザニガ（2006）は，脳神経倫理学について，次のように言及している。

「『ニューヨークタイムズ』紙のコラムニスト，ウィリアム・サファイアが「神経倫理学（Neuroethics）」という新語を作り，「人間の脳を治療することや，脳を強化することの是非を論じる哲学の一分野」と定義した。（中略）私は神経倫理学をこう定義したい：病気，正常，死，生活習慣，生活哲学といった，人々の健康や幸福に関わる問題を，土台となる脳メカニズムについ

ての知識に基づいて考察する分野である，と。」

謝辞

本論文をまとめるにあたり，多くの方々からご指導，ご支援をいただいた。

光産業創成大学院大学准教授 江田英雄先生には,本研究で利用した近赤外分光法による光計測装置について，原理，使用法，解析法などを一から細やかにご指導いただいた。また，光計測装置のみならず，脳活動計測技術全般に関する発展の経緯も教授いただき，脳科学研究を行うにあたっての基盤を作っていただいた。感謝の意を表したい。

立命館大学情報理工学部知能情報学科 篠田博之先生には，臨床実験の場を提供していただき，研究交流の場を持っていただいた。また，当時，篠田研究室においてポストドクトラルフェローとして在籍されていた山内留美氏(現 グラスゴーカレドニアン大学ビジョンサイエンス学科）には，実験に立ち会っていただくとともに，データ分析についての議論の時間を持っていただいた。篠田博之先生と研究室の皆様のご支援に感謝の意を表したい。

学部生時の指導教官である佛教大学准教授 黒田恭史先生には,脳科学と教育という研究のきっかけを作っていただき，教育学分野における脳研究についての素地を固めていただいた。実験時には，いつも立ち会っていただき，教育研究の視座からデータ分析をすることの重要性をご指導いただいた。感謝の意を表したい。

博士後期課程 2 年時に，アメリカの University of Pennsylvania，シンガポールの National Institute of Education において共同研究を行う機会を得ることができ，海外の研究者との交流の中で様々なことを学ばせていただいた。

University of Pennsylvania 名誉教授 Britton Chance 先生には，枝葉末節にこだわらず，研究の根幹を見抜くことで，本質的な問題に挑戦することの重要性を教えていただいた。そして何より，96 歳という齢でありながら，どのよ

うなときも研究を最優先される姿から，研究に真摯に向かい続けることの偉大さと尊さを学ばせていただいた。同大学研究員の Shoko Nioka 氏には，英語での研究発表の場を何度も設けていただき，発表方法，発表内容など，丁寧にご指導をいただいた。国際的な研究動向を指導いただくとともに，医学，工学，教育学の融合的な脳科学研究の臨床実験の場をつくっていただいた。

National Institute of Education 准教授 Kerry Lee 先生には心理学の，准教授 Swee Fong Ng 先生には算数・数学教育学の世界的な動向，研究内容，実験設計などを丁寧にご指導いただくとともに，国際的な教育研究の視点と各国が持つ教育文化の視点の関連についても学ばせていただいた。海外では，全ての先生方，研究員の方々に，大変親切にしていただいた。構成員の一人として実験や会議へ参加することを快く許可していただき，いつも熱心に耳を傾けていただいた。こうした場に身を置けたことで，国際的な共同研究の重要性を，身をもって学ばせていただいた。極めて貴重な経験をさせていただくことができたことに感謝の意を申し上げたい。

教育工学研究室の皆様には，授業，研究など，様々な面でアドバイスやご協力をいただいた。特に，先輩の方々には，研究を進めるにあたり，日頃より有益なご助言をいただいた。また，同輩の皆様には，研究をはじめとして，様々な面で相談に乗っていただいた。本研究室の皆様の暖かいご支援に，感謝の意を示したい。

最後に，大阪大学大学院教授 前迫孝憲先生，大阪大学名誉教授 菅井勝雄先生，大阪大学大学院助教 森秀樹先生，前助教 西端律子先生（現 畿央大学准教授）に感謝の意を捧げたい。

現在の指導教官である前迫孝憲先生には，実験課題設定やデータ解釈といった細部から，神経科学と教育というテーマの重要性や先見性についてご指導いただいた。また，学際的，国際的な研究を奨励していただき，多様な研究領域，

研究場所での研究を経験させていただいた。先行研究の少ないテーマで，ここまで研究を進めることができたのは，ひとえに先生のご指導とご助言があったからである。菅井勝雄先生には博士前期課程の 1 年間という短い期間ではあったが，指導教官として師事していただいた。教育工学研究を長年続けてこられた先生からは，「教育工学とは何か」という本質的な問いから出発して研究を考える大切さを教えていただいたように思う。教育工学研究の道を歩み始めた時期に，このような研究の哲学をご教示いただけたことは，この上ない喜びである。森秀樹先生，西端律子先生には，事務的な事柄でのご支援にとどまらず，研究の進捗状況をいつも気にかけていただき，折に触れ，励ましの言葉をいただいた。こうしたお心遣いは，研究を進める上での大きな心の支えとなった。指導教官の先生方，助教の先生方のご指導をいただき，5 年間の博士前期・後期課程を充実したものとして過ごせたことに，謝意を表したい。

誠に多くの方々のご指導，ご支援により，研究を進め，本論文を作成することができた。ここに記して心からの感謝の意を表し，筆をおくことにしたい。