

発達科学におけるニューロイメージングの役割  
～光によるニューロイメージング法を中心に～

牧敦、山本由香里

(連絡先)

(株)日立製作所 基礎研究所

〒350-0359

埼玉県比企郡鳩山町赤沼 2520

tel: 049-296-6111, fax: 049-296-6006, email: [maki@rd.hitachi.co.jp](mailto:maki@rd.hitachi.co.jp)

要旨 (400字程度)

これまで、脳の活動を画像として観察する、ニューロイメージングの手法がいくつか開発されてきた。現在、これらのニューロイメージング法を用いた発達研究の試みが、積極的に進められている。ニューロイメージング法は、従来の行動学的アプローチによって蓄積されてきた知見を、脳科学の立場から客観的に解釈する手段としての役割を担っている。これまでの行動学的手法によるアプローチは、刺激による反応時間など客観的な計測指標に基づいてはいるが、あくまでも入力（刺激）に対する出力（反応）を計測するものであり、入出力の間にある内部のメカニズムについては、ブラックボックスのままであった。しかし、ニューロイメージング法を用いることによって、内部メカニズムとしての脳の働きを客観的に評価できるようになり、発達研究の間口が広がった。本稿では、近年開発されたニューロイメージング法の意義と、乳幼児発達の研究に使われ始めた NIRT 法の現状と今後の展開について述べる。

1. 発達研究の意義と行動学的手法

子を持つ親であれば、子供の能力をできるだけ伸ばしてあげたいと願うものである。しかし、現状では、能力を伸ばすにはとにかく訓練せよと言うほかはない。問題なのは、その訓練の方法や時期についての明確な指針が無いことである。例えば、羽の生え揃わない雛鳥に飛び方を教えようとしていないだろうか？身体的発達の段階に合わせた適切な訓練の機会を与えないと、全く無駄な時間を過ごすことになるばかりか、危険な状況を作り出してしまふこともありえるだろう。それでは、人として伸ばしたい能力とは何であろうか？ハワード・ガードナーは、7つの能力（言語能力・数的処理能力・空間処理能力・芸術能力・運動能力・他人とうまくやる能力・自己認識能力）を提唱している。仮に、これらの人として伸ばすべき能力とすると、身体の発達もさることながら、全ての能力に連関のあ

る脳発達の把握はとても重要であることは言うまでもないだろう。脳の発達段階を客観的に把握できるようになれば、個々人の能力の伸長を図る訓練や教育方法が見えてくる可能性がある。一足飛びに実現することは難しいが、訓練や教育方法の策定は、発達研究が社会に貢献できるひとつの出口であろう。

これまでの脳の発達研究は、主に行動学的な実験手法を用いて行われてきた。行動学的なアプローチでは、被験者に対して環境の変化（刺激）を与え、行動の変化を観測する。行動は、受容器への刺激(五感)-中枢神経(脳・脊髄)の興奮-効果器(主に筋肉)の反応という一連の流れで起きるものと考え、環境と行動の変化を比較することによって、被験者の能力を明らかにしようとする。そして、その研究の多くは、その中間にある中枢神経の働きま度を考察しようとする。

幼児の能力を評価する古典的な方法では、質問に対する返答内容によって評価を行っていたが、必ずしも明瞭な結果を得られるとは限らなかった。これは、言葉によってその能力を評価しようとする、幼児の主観や思考が影響するためであろうと考えられている。その良い例として、言葉による評価と行動による評価で、大きく結果が異なることを示した実験がある<sup>(1)</sup>。それまで4歳の子供には量の保存能力がないと言われていたが、この実験では、行動で評価することによって2歳半ばでもその能力があることを明らかにした(図1参照)。このような研究から、幼児の脳発達を行動によって客観的に評価できることがわかってきた。その後、様々な行動指標が考案され、発達研究の加速につながった。

代表的な行動指標としては、圧力センサーを入れた人工の乳首を吸う回数<sup>(2)</sup>、注視時間<sup>(3)</sup>等が挙げられる。行動学的なアプローチは、安全で倫理的にも障害が少ないため、比較的容易に計測が行える。このような行動学的な手法を用いた長年の研究によって、様々な脳発達に関する知見が蓄えられてきた。しかし、行動学的な手法は、入力と出力の観測にとどまっているため、発達研究に携わる認知科学者の間では、実際に処理を行う脳の活動を観測したいという要望は根強い。このような背景から、発達研究にニューロイメージング法が取り入れられ始めた。

## 2. ニューロイメージング法の意義

ニューロイメージング法は、一言で言うと脳の活動を画像として計測する方法であり、脳活動に伴う微弱な電磁界変化を計測する方法と、局所的な血流変化を計測する方法に大別される。発達研究に用いることができるニューロイメージング法は、脳波計(Electro-encephalography: EEG)<sup>4</sup>、脳磁計(Magneto-encephalography: MEG)<sup>(5)</sup>、機能的MRI(functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI)<sup>(6,7,8)</sup>、近赤外光トポグラフィ(Near Infra-Red light Spectroscopic topography: NIRT)<sup>(9)</sup>など、無侵襲の方法に限られる。これらニューロイメージング法と行動学的な研究手法を比較すると(図2)、ニューロイメージン

グ法が、従来の行動学的手法と相反するものではなく、情報を付加する役割を持つことがわかる。すなわち、脳の活動をニューロイメージング法で計測することにより、より生物学的裏付けをもった能力の理解が可能になる。

それでは、脳活動を観測することによって、脳の何を理解することができるのか？ひとつは、脳の機能局在性であろう。その発端は、言語障害のある脳損傷患者の死後の解剖から、左側頭部に言語中枢が存在していること発表した1861年のブローカの研究である<sup>(10)</sup>。また、脳外科手術中の脳に電極を刺して行ったペンフィールドの実験は、全身の運動・感覚機能が地図のように大脳皮質上に分布していることを明らかにした<sup>(11)</sup>。これらの研究から、脳の部位と機能の関連性に興味を持たれ、脳の機能局在を探る多くの研究が進められてきた。そして、ニューロイメージング法の出現によって、安全に機能の局在を可視化できるようになり、その研究対象を健常者へと広げていくことが可能になった。

視覚や聴覚など基本的な機能の存在する場所は、誰でも大体同じであると考えられている。従って、健常者の標準的な脳機能地図を書き出すことができれば、脳損傷による機能障害も予測できるようになるであろう。しかし、発達に応じた機能局在の地図はまだ詳細に書かれておらず、今後の重要な課題となる。まずは、脳内に局在する機能領域が、発達に応じてどのように変化していくのかを探っていくことになるであろう。

一方、機能局在とは別に、脳をシステムと捉えたアプローチ方法も重要である。機能局在を還元論的な方法で突き詰めていくと、いわゆる「おばあちゃん細胞」仮説に行き着き、機能単位の発見が重要ということになる。しかし、局在する機能は脳の中で互いにつながり、脳は全体的なシステムとして機能している。従って、局在する機能間のつながり（機能関連性）と発達との関連性も重要な課題であろう。

成人の脳の機能局在性と機能関連性については、ニューロイメージング法を用いて既に多くの研究が行われているが、発達に伴う変化を系統的に観測し明らかにしていくことがこれからの課題である。胎児から乳幼児にかけての脳機能計測も進められており<sup>(12-19)</sup>、今後赤ちゃんから子供の脳機能計測が着実に進められていくであろう。しかし、表1に示すように各ニューロイメージング法の特徴は多様であり、子供に用いる場合には、それぞれに適した使い方がある。

神経群の活動を計測する EEG, MEG は、早い刺激に対する応答信号を捉える事が可能である。この特徴を生かして、音節に対する反応の馴化・脱馴化を計測した研究により、新生児の脳が音節を弁別していることや<sup>(20)</sup>、音節の学習を睡眠中に行っていること<sup>(14)</sup>が示唆されている。さらに、部位毎の脳活動信号の時間変化を解析することによって、神経活動の伝播を時空間的に観測することができるため、機能関連性を明らかにすることも可能である<sup>(21)</sup>。しかし、EEG の場合には、電極を頭に取り付けられて計測するため、動きを抑止できない乳幼児の計測も原理的に可能であるが、MEG の場合には困難であろう。従って、MEG は動きの少ない睡眠中の脳活動の計測により適しているといえる。また、より高次の脳活動（例えば会話を聞いたときの脳活動）では、より多くの神経群が活動するため、EEG

や MEG の信号源推定や時間情報の獲得は難しくなる。

一方、fMRI・NIRT では、脳活動に伴う血流変化を計測する。この血流変化は、エネルギー代謝に必要なグルコースや酸素の供給量を調節していると考えられている。これらの方法は、ミリ秒程度の短い刺激よりも秒程度の長い刺激による脳活動を観測することに適している。この場合、実際に血流変化の起こる領域のサイズは機能領野単位であり、数 cm<sup>2</sup> 以上の広さで変化が起こる<sup>(22)</sup>。従って、空間分解能が fMRI に対して優れない NIRT であっても、ほぼ同じような画像として観測することが可能である<sup>(23,24)</sup>。fMRI は、3 次元的に脳の活動をマッピングできるため、ニューロイメージング法の主要な技術としての地位を確立している。世界中で脳科学の研究ツールとして使用されており、乳児の言語活動の計測にも用いられた<sup>(15)</sup>。しかし、fMRI を乳幼児の脳機能計測に使用することには、いくつか懸念される点がある。ひとつには、乳幼児の体動の影響を抑えるために、被験者を特別なベッドに固定しなければならないこと、さらには、音の鳴り続ける狭い空間内での計測は、日常的な環境とは懸け離れており、特殊な心理状態を作り出すことが挙げられる。一方、NIRT は日常的な環境下で計測することができるため、授乳中の脳活動計測など<sup>(25)</sup>、従来では考えられなかった様々なアプローチによる発達研究が可能である。しかし、fMRI のように広く世界中で普及するためには、脳科学研究による多くの知見蓄積とともに、信号処理法など技術的な課題克服も含めた研究への取り組みが必要である<sup>(26,27)</sup>。

fMRI・NIRT 共に、活動する領野の画像計測ができるため、機能局在の研究に適しているが、異なる計測部位の相関を評価することによって機能領野間の関連性を調べることも可能である<sup>(28)</sup>。

ここに挙げたニューロイメージング方法は、すべて発達研究に応用可能であるが、用途や適用年齢はそれぞれ異なってくるであろう。日常的な環境下での計測が不可欠な場合には EEG や NIRT を、早い刺激に対する脳活動の計測を重視する場合には EEG や MEG を、脳全体の活動の計測を重視する場合には fMRI が適している。また、より高次な脳活動の場合には、fMRI・NIRT など、血流変化を計測する手法が向いている。脳発達の段階的な解明を目指した、全年齢層を通した脳機能計測には、現状では EEG・NIRT の選択が適当であろう。今後は、明らかにしたい事柄に応じてニューロイメージング法を選択し、統合的な発達研究が進められていくのではないだろうか。次章以降は、筆者らが開発してきた新しいニューロイメージング法である NIRT について述べる。

### 3. 近赤外光トポグラフィ(NIRT)の原理と現状

NIRT とは、生体透過性の高い 800 nm 近傍の近赤外光を用いて血流変化を計測する手法であり、大脳皮質機能を脳表面に沿ってマッピングすることを目的として開発された。トポグラフィを英語で記述すると Topography (地勢図) となるが、topo- とはギリシャ語の topos に由来し「場所」を意味する。Topography の原義は地形図を指し、概念としては地図上の各点にもう 1 次元の情報を載せたものである。脳の表層を形成する大脳皮質の脳

地図（機能地図、髄鞘化地図、解剖地図）は古くからトポグラフィック・マッピング（topographic mapping, topogram）と称されてきた<sup>(29)</sup>。そのため、近赤外光を用いて大脳皮質の機能を計測する方法を、近赤外光トポグラフィ(NIRT)と呼ぶ。

人間の頭部は外側から内側に向かって、頭皮（脂肪層を含む）頭蓋骨、硬膜・軟膜、脳脊髄液層、大脳皮質（灰白質）、白質の順に層状構造を成している。頭皮上から光ファイバーで照射した近赤外光は、成人頭部で約 20 mm 程度の深部にまで到達し、白質や灰白質（大脳皮質）で散乱して再び頭皮外に戻ってくる。この散乱・反射光を、照射位置から 30 mm 程度離れた位置にある光ファイバーで集光し、検出された散乱・反射光の強度変化から大脳皮質での脳活動に伴う血流変化を捉えることができる。大脳皮質の局所血流変化と脳活動とは密接にリンクしており、この局所血流変化を計測することによって脳活動の計測が可能となる。NIRT 法では、この局所血流変化を多点で計測し、脳活動を静止画像及び動画像として可視化する（図 3）。

発達研究に用いる場合には乳幼児が被験者となるため、安全規格で決められている以上に安全性に配慮する必要がある。特に懸念されることは、光照射による温度上昇である。物質に光を照射すると、吸収された光のエネルギーが熱に変換され、温度上昇が起こる。例えば、遠赤外ストーブを暖かく感じるのは、生体の主要構成物質である水が遠赤外光を吸収しその光エネルギーが熱に変換されることによる。しかし、NIRT で使用される 800 nm 近傍の近赤外光は、遺伝子に吸収される紫外光・色素たんぱくで吸収される可視光・水に吸収される遠赤外光と比べて、生体物質による吸収が非常に少ない。従って、他の波長の光と比べて熱が発生しにくい。ただし、近赤外光は生体による吸収が少ないため、照射された光が生体深部まで到達してしまう（それ故に、脳活動計測が可能であるのだが）。このことは、照射された光のエネルギーは、他の光より深い所まで伝達されることを意味しており、生体内部での温度上昇を評価する必要がある。そこで、NIRT 法を発達研究に適用する前に、使用する光を生体（腕）に照射して、内部の温度変化を計測した（図 4）<sup>(30)</sup>。この研究によって、計測時に照射される光の強度 3 mW 以下では、生体内部の温度上昇はほぼ無視できるレベルであることが確認されている。

発達研究の出口は、教育や訓練方法への展開であることは既に述べた。しかし、臨床医療の視点に立つと、発達研究の手法が脳機能障害の診断支援方法として応用できる可能性がある。現在の脳機能障害の診断は、行動・反応の観察と MRI・X 線 CT で撮影した解剖画像から間接的に行われている。しかし、健常乳幼児の行動学的知見やニューロイメージング法による脳機能画像が蓄積されれば、直接的に脳機能診断の支援を行える可能性が高い。特に、言語発達遅滞のように、乳児期には行動としてなかなか現れないような障害の場合、ニューロイメージング法によって早期に発見できる可能性がある。

既に、NIRT 法が乳児脳機能の診断支援として適用された例がある。この計測は、周産期の

胎盤剥離により大脳未形成となった乳児に対して、視覚機能の残存を確認するために行われた<sup>(31)</sup>。この乳児の場合、母親の観察では光を感じている印象があり、また MRI 所見から視覚野近傍の大脳皮質の残存が確認されていた。そのため、視覚機能が働いている可能性を調べるため、光に対する後頭部での脳血流変化を計測した。NIRT では、照射光を変調しているため、外乱光のある明るい場所でも計測できるという特長がある。しかし、計測に使用された光は、脳波検査に用いられる強い点滅光であったため、検出器に影響を与える可能性があった。そこで、点滅光による活動が起こらないと考えられる小脳を視覚野に対する対照計測部位とするため、視覚野と考えられる大脳皮質と小脳を同時に計測できるように光ファイバーを配置した(図5)。その結果、図5内のグラフで示すように、血液量の増加が視覚野のある大脳皮質でのみ計測され、この乳児は少なくとも光を感じていることが明らかとなった。

このような発達研究の積み重ねにより、信頼性の高い脳機能の評価方法が確立すれば、臨床医療でも使用できるようになるであろう。患者ごとに症状が異なる臨床では、多様な評価方法が必要となる。そのような意味でも、発達研究が広く行われ、より多くの経験と知見が蓄積されることは有意義である。

健常者を対象とした発達研究では、複数の被験者の計測信号から標準的な脳機能を理解しようとする。個々の脳の発達段階を客観的に把握することが大切な課題であることは最初に述べたが、テンプレートとなる標準的な脳機能の知見が無ければ、個々の脳機能を理解することは難しい。従って、現在の発達研究の一つの目標として、受精してから死に至るまで続く脳機能の発達のテンプレートを構築することが挙げられる。しかし、脳のもつ機能は多様であり、一度に全てを網羅した研究は不可能である。

脳発達研究には様々な興味深いアプローチが考えられるが、現在筆者らは言語発達に注力して研究に取り組んでいる。言語発達は社会的な能力に深く関わっており、言語遅滞の早期発見により早い段階で療育などへのフィードバックが可能になれば、社会的な能力の向上につながると考えられるからである。また、外国語教育に対するヒントが得られる可能性もある。

研究の第一歩として、生まれた直後の新生児の言語音に対する脳活動の計測を行った<sup>(19)</sup>。この研究では、生後3 - 5日以内の乳児の左右側頭部を NIRT で計測し、a)通常の会話音を聞かせた時、b)その会話の逆回しの音を聞かせた時、c)何も聞かせない時の脳活動に伴う血流変化を観測した(図6)。その結果、言語音を聞いた場合に、大人の言語野・聴覚野に相当する部位で、顕著な脳活動が見られた。このことは、生まれた直後の新生児の脳に言語音を他の音と弁別する処理する能力が備わっていることを示唆している。この能力は、遺伝的なものなのか？あるいは、胎内で学習したものなのか？答えは研究の進展を待たなければならないが、今後明らかにされるであろう。

#### 4. 今後の展開

発達には、環境に強い影響を受けることは想像に難くない。しかし、環境変化は、あらかじめプログラムされた遺伝子発現を引き起こす場合と、中枢神経・筋肉系の学習や強化を引き起こす場合に大別される。中枢神経や筋肉を持たない植物の場合には、遺伝子発現によって固体内の構造や代謝を変化させて、環境への適応を図る<sup>(32)</sup>。一方、動物は遺伝子以外に中枢神経・筋肉系を持っており、学習や強化によって行動を変化させて環境へ適応することもできる。本稿では脳を中心に書いてきたが、発達は環境変化による遺伝子発現と中枢神経の学習・強化の相互作用から成るものであり、遺伝子の方向から見た研究も不可欠であろう。しかし、人の遺伝子操作を積極的に行うことはできないため、現在は遺伝子異常のある人を対象とした研究が行われている。その場合も、最終的には行動・認知・脳機能の計測が必要であり、これからの発達研究には、ニューロイメージング法が大きな役割を果たしていくと考えられる。

拙稿を読むと、ニューロイメージング法は、発達研究に必要な全ての機能を備えているとの錯覚を覚えるかもしれない。しかし、現実に研究を進める上での障壁は山積している。特に NIRT は、生体の画像計測装置としては歴史が浅く、応用研究とともに計測技術の研究も同時進行していく必要がある。特に、光ファイバーキャップ・信号処理技術・自律神経由来の血流変動の分離など、重要な課題が残されている。また、異なるニューロイメージング法を組み合わせた複合的な計測手法を確立し、脳機能の統合的理解を図ることも重要になるであろう。

ニューロイメージング法全般に共通した課題は、信号の発生機序の解明である。全ての方法に関して、信号の発生機序と意味が理解されていないと言っても過言ではない。従って、動物を使った生理実験により、信号の発生機序の解明を目指した研究も進められている<sup>(33)</sup>。このような基盤的な研究は、その意義を理解されないことが多いが、ニューロイメージング法の信号の理解を助け、脳発達を深く理解することに役立つ。今後、大いなる飛躍が望まれる研究課題である。

#### おわりに

発達研究を加速するためには計測技術の高度化が必要なことではあるが、主役は人であることを忘れてはいけない。計測技術は、計測される対象に興味を持って初めて生まれる。技術を作る研究者や技術者も、発達研究に携わる心理学・認知科学・医学の研究者と一緒に、計測対象である人を覗きこむ姿勢が不可欠である。筆者の個人的な経験で恐縮だが、生まれた直後の新生児に手作り光ファイバーキャップをかぶってもらった時、直後に手で剥ぎ取られたことがある。この時強く実感したことは、そのキャップが良い出来ではなかったということではなく、当たり前かもしれないが、生後間もない新生児にも体性感覚野のマップが既にできているということであった。その子は、既に自分の頭の位置を知っており、不快な気持ちも知っており、そして手の使い方まで知っていた。この経験が、

さらに乳幼児の脳機能に強い興味を持つきっかけとなり、次の技術開発へのモチベーションとなった。現象に興味を持って初めて、新しい計測技術が生まれてくるのであろう。今後も、異分野の研究者と協力し合って、発達研究に貢献して行きたい。

#### 参考文献

- <sup>1</sup> J. Mehler and T. G. Bever, *Science* **158**, 141 (1967).
- <sup>2</sup> R. L. Fantz, *Science*, **140**, 296(1963).
- <sup>3</sup> H. Held et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **77**(9), 5572(1980).
- <sup>4</sup> W. G. Walter, , *Scientific American*, June 54(1954).
- <sup>5</sup> D. Brenner, et al., *Science*, **199**, 81(1978).
- <sup>6</sup> K. K. Kwong, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **89**, 5675(1992).
- <sup>7</sup> S. Ogawa, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **89**, 5951(1992).
- <sup>8</sup> P. A. Bandettini, et al., *Magn. Reson. Med.* **25**, 390(1992).
- <sup>9</sup> A. Maki, et al., *Med Phys.*, **22**, 1997(1995).
- <sup>10</sup> P. Broca, *Bull. Soc. Anat. (Paris)*, **6**, 330. (1861).
- <sup>11</sup> W. Penfield and E. Boldrey, *Brain*, **60**, 389(1937).
- <sup>12</sup> H. G. Vaughan Jr., *Biol Psychiatry*, Oct;10(5),513(1975).
- <sup>13</sup> R. T. Wakai, et al., *Am. J. Obstet. Gynecol.*, 174(5):1484(1996).
- <sup>14</sup> M. Cheour, et al., *Nature* **415**, 599(2002).
- <sup>15</sup> G. Dehaene-Lambertz, et al., *Science* **298**, 2014(2002).
- <sup>16</sup> 牧敦, *科学*, **71**, 733(2001).
- <sup>17</sup> Y. Minagawa-kawai, et al. *Neuroreport* **13**(5) , 581(2002).
- <sup>18</sup> G. Taga, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **100**, 10722(2003).
- <sup>19</sup> M. Pena, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **100**, 11702 (2003).
- <sup>20</sup> G. Dehaene-Lambertz Dehaene et al., *Nature* **370**, 292(1992).
- <sup>21</sup> A. Christophe and J. Morton., *Nature*, **370**, 250(1992).
- <sup>22</sup> M. M. Haglund, et al., *Nature* **358**, 668 (1992).
- <sup>23</sup> Y. Noguchi, et al., *HBM* **17**, 88(2002).
- <sup>24</sup> K. Suzuki, et al. *Cerebral Cortex*, **13**, 517(2003).
- <sup>25</sup> 長谷川武他, *小児神経学*, **35**, S115(2003).
- <sup>26</sup> H. Koizumi, et al., *Appl. Opt.*, **42**(16), 3054(2003).
- <sup>27</sup> 牧敦, 小泉英明, *BME*, **17**, 61(2003).
- <sup>28</sup> B. Biswal, et al., *Magn Reson Med.*, **34**(4), 537(1995).
- <sup>29</sup> 小泉英明 他, *計測と制御* , **42** , 402(2003).
- <sup>30</sup> Y. Ito, et al., *J. Biomed. Opt.* **5**, 383(2000).
- <sup>31</sup> K. Kogure et al., *Brain Function & Brain Computing Workshop*, January 23, 1998, Baltimore.
- <sup>32</sup> 植物生理学、(培風館)、増田芳雄 著
- <sup>33</sup> Masamoto et al., *J Cereb Blood Flow Metab.*, **23**(9):1075(2003).



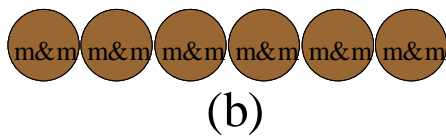
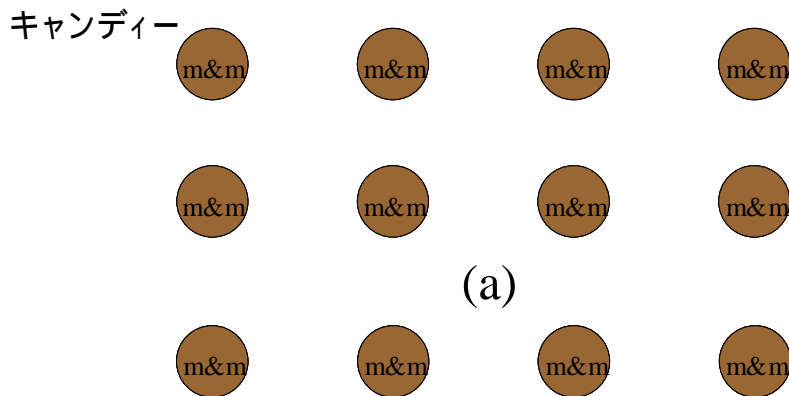
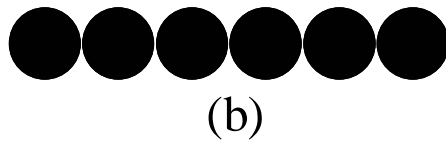
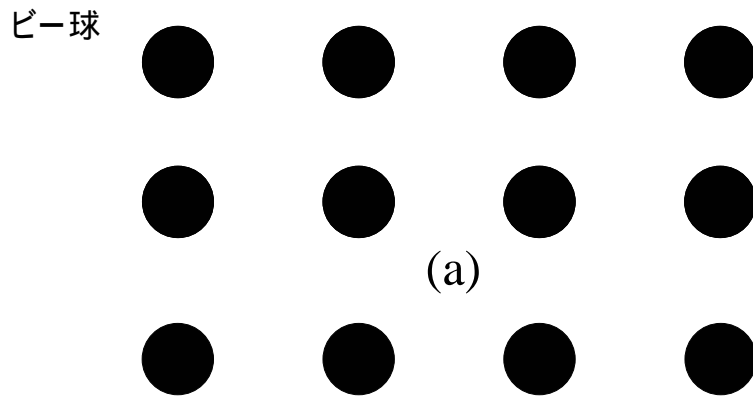


図1 子供の量の保存能力の実験:ビー球とキャンディ(a)のパターンで、「上下の段でどちらが多い?」と聞くと、どちらの場合でも「同じ」と答える。次に、(b)のパターンに変えて、ビー球の場合には「上下の段でどちらが多い?」聞き、キャンディーの場合には「上下の段で多いほうを食べていいよ」言う。すると、ビー球の場合には、4歳の約8割の子供が「上の列が多い」と答えるが、キャンディーの場合には約6割が正しいほうの下の列を食べる。(文献1より改変)

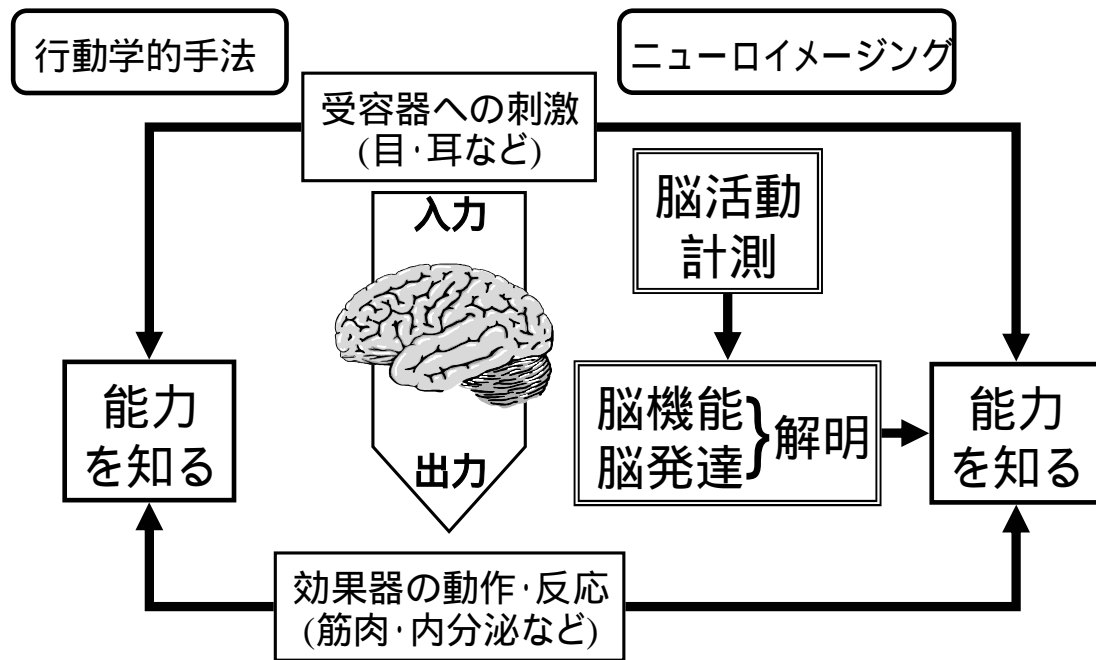


図2 行動学的手法とニューロイメージング法を用いた研究手法。行動学的手法では、入力(刺激)と出力(反応)から人の能力を知ろうとする手法。ニューロイメージング法を用いることにより、入力と出力に加え、脳の情報を付加することができる。



図3 計測風景と近赤外光トポグラフィ画像: (a)光ファイバーキャップには、光を照射する光ファイバー(赤)と脳内を通過してきた散乱光を集光する光ファイバ(青)が固定されている。それぞれの先端は頭皮上に当てられている。(光トポグラフィ®ETG-7000:日立メディコ製) (b)近赤外光トポグラフィで計測された脳活動画像(日立メディコカタログより抜粋)。

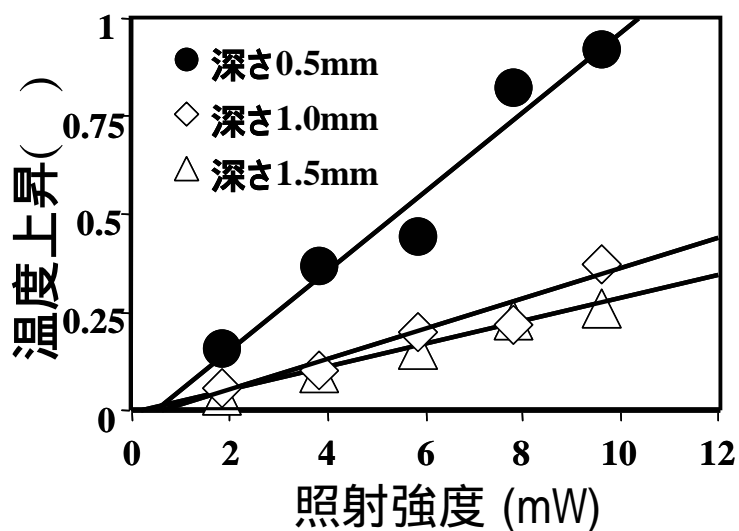


図4 成人の腕に近赤外光を照射した時の温度変化: 成人腕に麻酔し、熱電対を腕に刺入して温度を計測した。計測位置は光照射位置直下である。実際に脳機能計測に用いられるパワー3mWを照射したとき、最も表層に近い、深さ0.5mmにおける温度変化は約0.25、より深い位置では、ほぼ無視できる温度変化であった。(東京警察病院・渡辺英寿氏との共同研究)

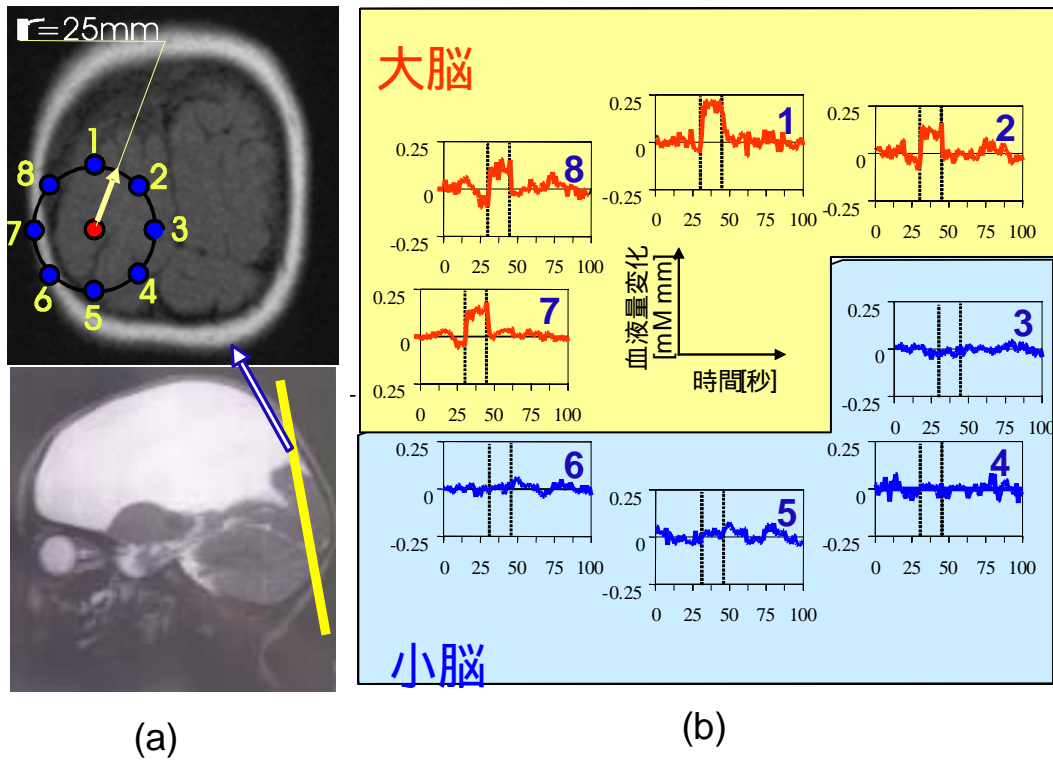


図5 周産期の胎盤剥離による大脳未形成児(1歳)の脳機能計測: (a) 上図は、光ファイバーの配置を後頭部のMRI画像上に表示したもの。赤丸が光を照射した位置で青丸が光を検出した位置。下図は、矢状断のMRI画像上に、黄色線で上図画像の撮影位置を示したもの。(b) 脳波診断で使用される白色の点滅光(18 Hz)を見せたときの血液量変化の時間波形。たての2本線が点滅光を見せた期間。(小暮医院・小暮久也氏との共同研究)

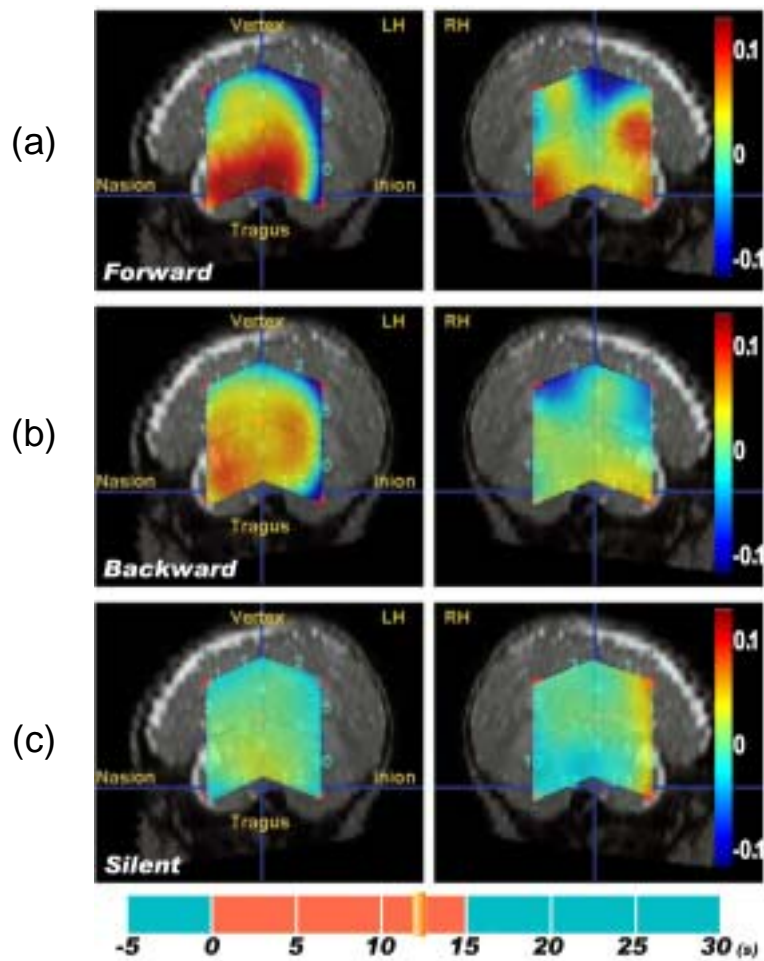


図6 生後2 - 5日(平均2.7日)の言語音に対する脳活動画像。画像は、血液量変化に相当するtotal-Hbを表しており、12人の平均時間波形から再構成した。MRI画像は2ヶ月の乳児の画像。(a) 会話音を聞いたとき、(b)会話音の逆回しを聞いたとき、(c)何も聞かないときの脳活動画像を示している。会話音を聞いたときに、左半球の言語聴覚野近傍で、統計的に有意な反応が観測された。また、他の刺激時には有意な反応は得られなかった。(イタリア国際高等研究所・J. Mehler氏グループとの共同研究)

表1 発達研究に使用できるニューロイメージング法

	計測信号	時間分解能(s)	空間分解能(mm) <sup>*</sup>	装置サイズ	自然な環境下での計測 (騒音・拘束性・姿勢)	機能局在	機能関連性
EEG	神経群活動	0.001 ~	20 ~	小 <sup>**</sup>			
MEG	神経群活動	0.001 ~	2 ~	大 <sup>**</sup>			
fMRI	血行動態変化 (脱酸素化Hb)	1 ~	0.5 ~	大 <sup>**</sup>	×		
NIRT	血行動態変化 (酸素化/脱酸素化Hb/ 血液量)	0.1 ~	25 ~	小			可能性あり

\*EEG・MEGに関しては信号源の数が既知の場合

\*\*外来の電磁波を防ぐシールドルームが必要