

脳の非侵襲イメージング

Non-invasive Human Neuro-imaging

定藤 規弘*

Norihiro Sadato

本日は、脳の非侵襲的イメージング法を使って社会的能力の発達理解へのアプローチについて話します。私どもの研究目的は、社会能力を人間が獲得する過程の神経基盤を解明したいということです。生物学的基盤を明らかにして、発達モデル構築へ寄与するというアプローチを採っています。

方法としては、行動の定量的な観察と脳機能イメージングを用い、発達認知科学に新しい局面をもたらしたいと考えています。

「社会能力」は、他人の性質あるいは意図を正確に認知するための情報過程と定義されます。その発達は、他者との関係において、子どもあるいは人間の示す行動パターン・感情・態度・概念の経時的変化と考えられます。

脳機能イメージングは、人間の行動の背後にある心理的過程を脳の特定の構造と対応させる手法です。機能的MRIが現在最も普及した方法です。局所の神経活動が局所脳血流と対応するという現象に基づき、特定の課題を遂行している最中に、脳血流の変動の空間的パターンを描出することによって、特定の心的過程の神経基盤が明らかになるという原理です。

このスライドはMRI装置を示します(図1)。非常に強い静磁場を形成する超伝導磁石と、電波を発射して、返ってくる電波を検出するコイルの二つからなる装置です。これは、現在、大きな病院には必ず存在している医療器具です。コイルをかぶって静磁場の中に入った人間が、特定の課題を行います。例えば、非常に単純な視覚課題で、特定の光刺激を与える、止める、与える、止めるということをする、それに応じて血流が増加する、減少する、増加する、減少するというパターンを、簡単にとらえることができます。この場合光を与えているので、視覚処理を行う後頭葉の部分が非常に強く活動することがわかります(図2)。非常に単純なケースを示しましたが、現在機能的MRIを使って、時間的な解像度で大体秒単位、空間的解像度でミリメートルのオーダーで、自分自身の脳の活動を全脳にわたって描出することができます。例えば、これは約3分データを採っていますが、30分でも3時間でもデータを採

* 大学共同利用法人自然科学研究機構生理学研究所教授

核磁気共鳴断層画像装置

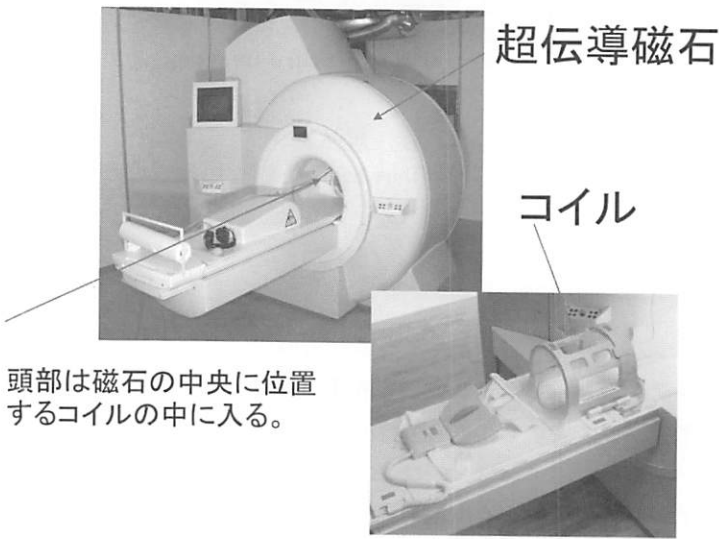


図 1

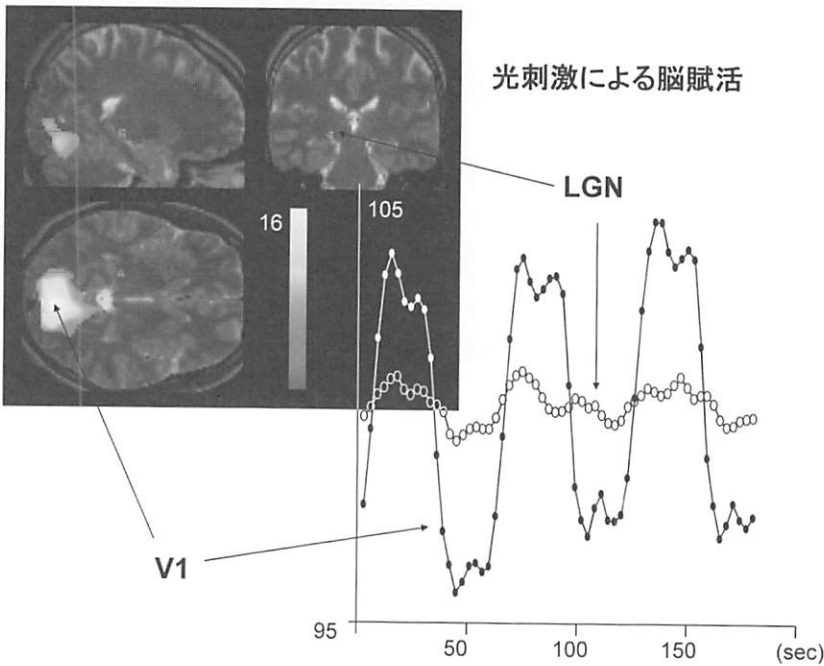


図 2

ることは可能です。

私どもは、現在こういう道具立てを持っていますが、これを社会能力の発達とどう結び付けるかが重要なポイントです。社会能力は、非常に複雑な高次脳機能と考えられるので、要素へ還元する必要があります。この際、どうかたちで還元するかというと、発達過程を使います。すなわち、社会能力の発達は、要素過程の経時的出現というとらえ方をしてみます。要素過程を成人において脳定位して、それから得られた情報を社会能力発達モデルの構成に利用します。得られる情報は、主に場所の情報で、現在は場所によって非常にたくさんの情報が脳科学の領域から抽出することが可能です。それを最後に、発達過程での行動観察並びに脳定位によってモデルを検証するという過程を考えています。

これがその図式です（図3）。社会能力の素過程に関しては、その発達過程において行動解析をする必要があります。それで取り出した要素的な過程を人間における脳定位によって、その神経基盤を明らかにしてモデルを作って、それを検証するというループを回そうということです。

技術的には、このイメージング手法は、成人から年少者に向けて適用範囲が拡大しつつあります。これをさらに進めるといことも同時に推進する必要があります。

社会能力の要素過程ですが、発達心理学者によって非常に詳しく調べられています。私どものところでは、現在こういう要素過程をしらみつぶしに神経基盤を描出しています（図4）。この一連の流れで非常に重要なのは、心の理論です。これは、他人の意図、感情状態を忖度する能力です。

この能力を調べるためには、いろいろな実験手法があります。例えば子どもであったら、他人の信じていることが必ずしも現実社会と一致しないということを、人形劇の中で示すことができます。スライドにお示ししている1995年の実験では、ミキサーやジューサーなどのいろいろな台所道具の写真を見せて、被験者は「コロンブスがそれを見たら、その機能を推定できるか」という質問を受けます。これを、「イエス」・「ノー」で回答させます。

この場合では、コロンブスという他者の心的状態を忖度するという課題を実際に課しているということです。そのときに出てきた脳の活動で特に重要なのは、前頭葉の内側部分です。同様な他者の心的状況を忖度する課題というのは、これ以外にも非常にたくさんのバリエーションがあって、必ずこの場所が出てきます。これは、心の動き、あるいは心的過程にかなり重要な役割を果たすと考えられています（図5）。

今日の話は、「向社会行動」に話を絞ります。これは、実際に特定の行動を行うという意味で、他人の気持ちを理解するという認知的なことのあとに行動の決定というものが入ってきます。この場合の向社会行動の定義は、他者を利するための自発的な行為という利他主義です。

利他主義というのは、いろいろな定義がありますが、人間において特に重要なこの行動の特徴は、他者を利するための自発的な行為が、遺伝的に無関係な個体で成立するということです。これは、人の社会を形成する要因の一つと考えられています。その動因は何かというのが

脳機能画像法を用いた 社会能力発達へのアプローチ

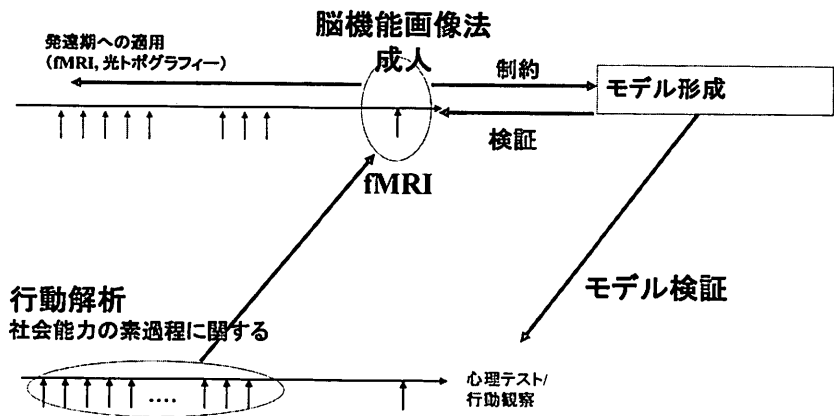


図 3

社会能力の発達

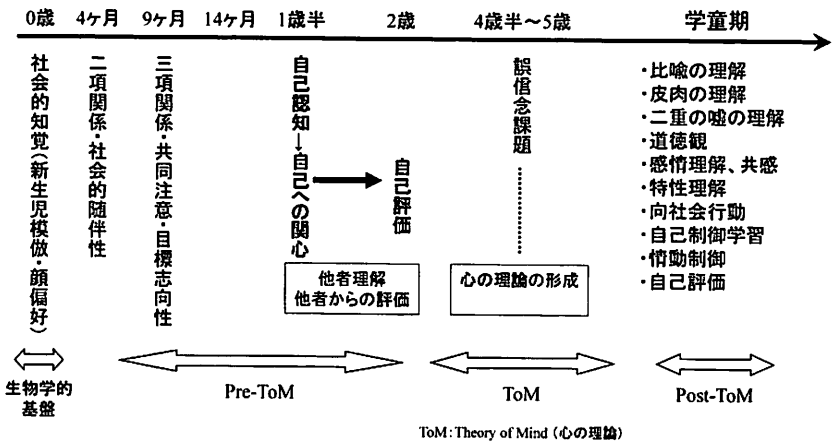


図 4

NeuroReport 6, 1741-1746 (1995)

Modeling other minds

Vinod Goel, Jordan Grafman,^{CA}
Norihiro Sadato¹ and Mark Hallett¹

Cognitive Neuroscience and ¹Human Motor
Control Sections, NIH/NINDS/MNB, Building 10,
Room 5S209, 10 Center Drive MSC 1440,
Bethesda, MD 20892-1440, USA

様々な道具を視覚提示

「コロンブスが見たら、その機能を推測できるか？」

Yes/Noで回答

他者の心的状態を忖度(心の理論)

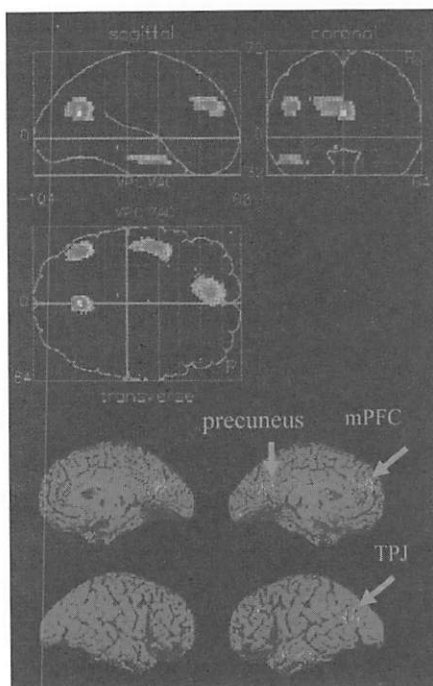


図 5

問いになります。

人間の行動のモデルを提示することが人文系の学問において非常に重要ですし、実際に経済学においてはそういうモデルが存在します。すなわち、経済理論における基本仮説、理性人モデルは、人間は金銭報酬とそれにかかる金銭コストの費用を最大にするように理性的に振舞います。こういう仮定によって経済理論は組み立てられています。

基本的に、これは利他行動の側面を無視したモデルと考えられます。経済活動ですから、おおかたはそれでいいですが、必ずしもすべてを説明するわけではありません。具体的に言うと、利他行動はこの中では非常に説明しにくいです。

例えば、非常に単純な例として寄付という行為があります。全損行為ですから、理性人モデルでは説明がつきません。そうすると、当然モデルの拡張をしなければいけないわけですが、この場合の拡張は、報酬は金銭に限らないという方向でなされます。これは、「社会交換モデル」と名前が付けられています。その際に、金銭報酬のところに「社会的報酬」という言葉が入ります。

こういう拡張は、それなりの観測データ、実証データがあって提唱されます。一つの例を示します。日本でも郊外で見られる無人販売所では、品物を取ってお金を入れます。そのときに他人がいないため、売り上げとなくなった商品の個数の比は、向社会行動の定量的指標になります。実際に、イギリスの大学の一つのカフェテリアの無人販売所で、1週間で消費されたミ

ルクの量と売り上げの間の比をプロットしました。比が多ければ多いほど、そのときの利用者の向社会行動は多かったということを意味します。

ここで一つ操作（manipulation）をしてみます。お金を入れるボックスの前にポスターを張っておきます。このポスターは2種類あって、一つは非常に大きな目が写っている写真です。もう一つは花です。奇数週に目の写真、偶数週に花の写真をボックスの前に張っておきます。奇数週のときは、繰り返し売り上げが多くなりました。これは、他人の目の効果です。実際の人でなくても目で十分だということです。これによって社会的に望ましい行動が増えるということです。これは一つの例ですが、この効果は色々な実験により存在することが知られています。

実際に主観的に私たちの生活を振り返ってみても、他人からの評判は、日常生活において多くの影響を持ちます。社会心理学的な研究でも、他人の目の影響はあります。これとは少しレベルが変わりますが、利他性の進化に関する理論的な研究という方面からも、「他人からのよい評判は重要である」と言われています。

人特有の利他性の進化に関する理論的研究においては、血縁関係になく直接のお返しも期待できない他者に利益を与える行為を特性として含んでいる個体が、なぜ自然淘汰を通して生き延びるのかということが重要な問いとなっています。

この際に導入される考えを一つ挙げると、互惠性です。互惠性というのは、協力すると協力し返す、「目には目を、歯には歯を」ということです。しかし、これでは、必ずしも生き延びられないということが知られています。理論家は、ここにもう少しひねった互惠性を入れていきます。間接互惠性（indirect reciprocity）というもので、「A」が「B」を助ける、それが故に「C」が「A」を助けるわけです。すなわち、「A」という答えが協力的であるという評判によって「C」が協力をするというシステムがあるならば、種としての人間は生き延びることができるといことです。

ここにおいて、評判というシステムが重要になってきます。また、評判が報酬、すなわち特定な行為を駆り立てるようなものであるという必要があります。報酬の定義は、報酬を得るために必要な特定の行為を起こさせ、それを強化させるようなものです。これには、快楽（Hedonic）と動機（motivation）という、二つの特徴があります。「得るとうれしい」という快楽と、「それを得たい」という動機を惹起するという二つの構成要素（component）があります。この二つのコンポーネントがあれば、その何かは報酬として考えることができます。

次の問いは、報酬の神経基盤はどこにあるかということです。これは神経科学領域でよく調べられていることですが、頭の真ん中にあり運動をコントロールする領域の線条体が、報酬に非常に大きく関係しているということが、動物実験や人間の実験でもよく知られています。

いくつかの種類、例えば食物・性的刺激は、個体自身の維持に必要ですし、子孫の維持に必要です。お金は少し抽象的ですが、いずれも報酬系を賦活するということがよく知られています。

次に、他人からのよい評判は報酬であるかどうかということを調べます。この場合の実験は非常に簡単で、お金と同じような部分が、社会報酬を得たときに起こるか、あるいは特定の向社会行動を遂行する際に、その部分の活動は変わるかということを調べます。

実際には、お金をあげる、社会報酬をあげるという実験をします。お金をあげる実験は、ギャンブル課題です。どれか選んでお金が出てくる。「60」というのは、「あなたは60円を得ました」ということです。実際、実験が終わったら、ここの数字の総計をあげますので、実際に得たということになります。これは、ごく普通の金銭報酬課題です。

この実験のポイントは、社会報酬をどうやって与えるかということです。この実験は、事前にビデオカメラの前で自己紹介をしたり、いろいろな質問紙に答えてもらいます。次の実験のときに、「あなたの資料を8人の委員会が調べて、あなたを評価します。8人の人たちの評価の結果は、機能的MRIをやっている最中に、あなたの写真と一緒に示します」というストーリーになっています。

ここで、この被験者の顔とこの言葉が出てくると、これは8人委員会のだれかが、「あなたのことを信頼できる」と評価してくれたということを意味します。写真が違ったら、あなたではないということです。これとこれを引き算すれば、こちら側はほめられたというわけですから、このときは報酬を受け取っているわけで、これに比べて活動が高いはずです。そして、その場所は、報酬系に違いないという予想です。

この場合に、与えた言葉自身が報酬になるかどうかは、あらかじめ調べておきます。全く別のグループで、どのぐらいの報酬価であるかということを調べておいて、それに基づいて報酬の高を調整します。結論から言うと、「ほめ」は実際に線条体を活性化します。金銭報酬を多く得た場合は、この場所の活動が強く、少ししかない場合には低く、なかった場合は活動しません。

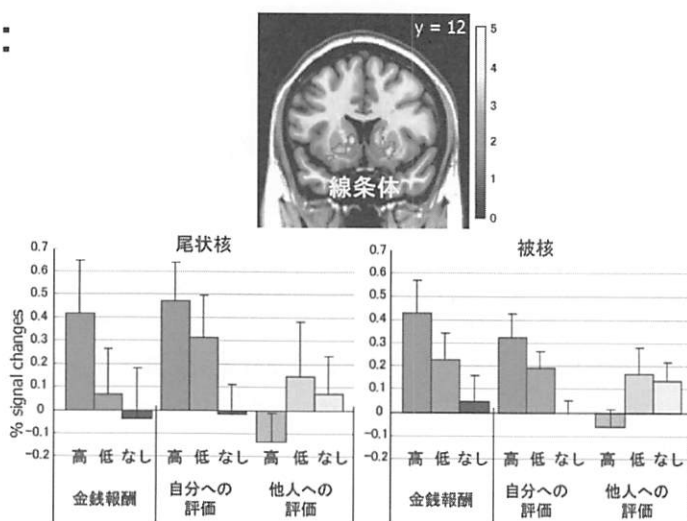
自分への評価は社会報酬になります。高い社会報酬を得たときには同じ線条体に強い活動が、低い場合にはそれよりも弱く、ない場合には活動しません。金銭報酬と全く同じパターンを示します。同じ言葉が他人に向けられたときには、この場所は活動しません。ですから、金銭報酬と自分へのよい評価は、同じ部位で同じ活動パターンを示したことになります。

報酬系として知られた線条体が、良い評判を得たときに活動することから、少なくとも、良い評判は、得られてうれしいという快楽要素を満たしているということがわかります(図6)。

次は、実際に行動を決定するときに、この領域は報酬に関係しているかということです。ほめられることが社会報酬ならば、実際に意思決定中に処理されているかどうかというのが次の問いです。

その際には、私たちは寄付という行為を使っています。実験課題は、あらかじめインターネットで78の寄付行為を受ける団体を勉強しておいてもらって、機能的MRIの中では、そこに寄付をするかしないかをその時点で決めてもらいます。2回示して、他人の目がある場合と他

結果:



金銭報酬と自分への良い評価は、同じ脳部位(線条体)で、同じ活動パターンを示した

図 6

人の目がない場合の二つの状況を作ります。

私たちの予想は、他人の目がある場合には、向社会行動である寄付行為が増えるはずで、そのときには恐らく報酬系に何らかの変化があるはずだということです。これは、イメージングで十分観察することができます。寄付行為の有無は、ボタン押しをさせますからわかります。具体的には、インターネットのチャリティーのバージョンを全部調べておきます。

実験室ではこういうスクリーンが出ます。これが団体で、寄付をするかしないかというセットになっています。「寄付をする」を選ぶと、こちら側に「○」が付きまゝす。このセットアップでは、この人たちがこれを見られるようになっています。実験室の裏に2人の人間が座っていて、被験者の反応をここで見ていますということを、あらかじめ説明しておきます。これは、寄付行為が見られているということが、この2人の顔が存在することによってわかります。その対照は、人がいないということを示しています。このときは、どちらを選んでも他人の目効果はないという状況を作ります。

このときに頭の中に何が起きているかということですが、あらかじめ500円を与えておいて寄付するという行為をした場合、観察者が存在している場合に、内的な報酬のほか社会的報酬としてよい評判という報酬がこれにプラスされると想定されます。もし他人がいた場合に寄付をしなければ、自分に500円与えるという金銭報酬のほかに社会的コストを付加したと考えられます。

結果: fMRIデータ

意思決定時の脳活動

関心領域 (線条体) 内で p (FWE) < 0.05 、右線条体は $p < 0.005$ (uncorrected) で活動が見られた

予想

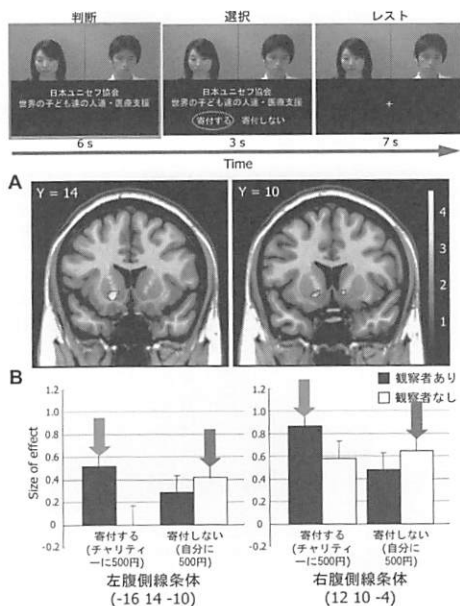


図 7

そうすると、線条体のパターンとしては、寄付するときに他人の目があれば社会報酬が積み上げられて、観察者があるときに寄付をしないで自分で500円を取れば、金銭報酬はあるけれど社会コストが付加されるという状態が出ます。

実際にこれを見ると、観察者がある場合には、確かに向社会行動が増えています。あまり寄付をうける団体のミッションが重要でない中ぐらいのときにその効果がはっきり出ます。線条体の活動は、予想どおりのパターンを示しています。

このように意思決定時において、褒めあるいは良い評判も金銭報酬と同様に腹側線条体で処理されていることが示されました。これは、恐らく金銭と社会報酬という異なるスケールのもを変換する役割を果たしている可能性があります。ですから、社会報酬は快楽要素 (Hedonic Component) もあるし、動機要素 (Motivational Component) も存在するということです、これは報酬 (reward) であるということです (図 7)。

社会報酬と金銭報酬の違いはどこにあるかというと、脳機能画像の所見からは、前者の場合、心の理論で非常に重要だった内側の前頭葉の部分が活動します (図 8)。実際に、自分自身の評判の理解のためには、他人が自分をどう見ているかという他人の考えに対しての考えという意味でのメタ表象が必要で、それには内側前頭前野が非常に重要であると考えられています。

今示したのは、人間の行動を「報酬」ということで比較的直裁に切り分けられる可能性があるということです。ただし、これは最初のステップだという留保が付きまします。

社会報酬と金銭報酬の違い

二つの報酬の違いは?

– 自分自身の評判の理解にはメタ表象の形成が必要 (Amodio & Frith, 2006).

– mPFC (内側前頭前野)

- 自己参照過程 (Johnson et al., 2002; Kelley et al., 2002)
- 心の理論 (Gallagher & Frith, 2003)
- 他者から見た自己に関する知識 (Ochsner et al., 2005)

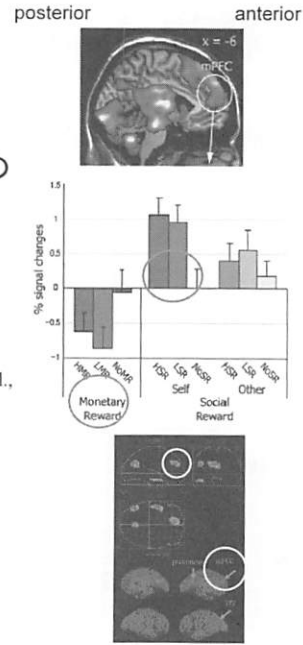
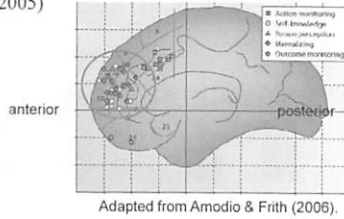


図 8

こういう所見から、私たちは、現在、向社会行動の発達モデルの検証へ進もうとしています。脳科学と教育研究の関係性について簡単に述べます。

脳科学は、心と脳の間を調べます。教育研究は、特定の能力を上げるという介入 (intervention) です。インターベンションである以上、それは脳科学とは全く別の検証手法が使われます。それには介入研究とコフォート研究があります。

発達コフォートは、いろいろな介入がしにくい場合には、非常に強力な手法です。例えば、「長時間保育は子どもの発達にどう影響を及ぼすか」という問いに対する答えは、コフォートでないと出ません。日本においてもコフォート研究の予備的な研究が一つあります。ほめるという行動が、実際に子どもの発達に影響を及ぼすかどうか。答えは、「イエス」です。しかし、非常に短い期間の観察ですので、大きな留保があります。

親がほめるという育児観を持っているということと、18カ月における社会能力の間には強い関係があります。同時に、親がほめるという行動をやっているかどうかという生起頻度を18カ月のときに計測しておいて、30カ月の社会能力の育ちを調べると、強い相関があります。

最後に強調したい点として、あくまで私論ですが、応用脳科学の一つと考えられる社会実装においては、認知神経学的研究と発達コフォートの組み合わせが、強力な手法になり得ます。どうぞご清聴ありがとうございました。