

研究種目：	基盤研究(S)
研究期間：	2005～2009
課題番号：	17100003
研究課題名(和文)	非侵襲的脳機能画像法を用いた社会能力発達過程の解明—複数個体間相互作用の定量とその神経基盤の解析
研究課題名(英文)	Elucidation of the process by which social skills develop using noninvasive functional neuroimaging to quantitate multiple individual interactions and analyze their interaction
研究代表者	
	定藤 規弘 (NORIHITO SADATO)
	生理学研究所・大脳皮質機能研究系・教授
	研究者番号:00273003

研究成果の概要：社会能力の正常な獲得過程において順序だてて出現する行動里標に注目し、それらの神経基盤を抽出した。社会的信号に対する選好性である生物感は初期視覚処理を担う領域で表象される事、共感や語用論において心の理論が重要である事、恐れ刺激に対する扁桃体での自動的な神経反応が文化的な同調を受ける事を示した。さらにヒトの向社会行動の誘因の一つである社会報酬が金銭報酬獲得時と同様に報酬系を賦活する事を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	53,600,000	16,080,000	69,680,000
2006年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2007年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2008年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2009年度	0	0	0
総計	74,000,000	22,200,000	96,200,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：心の理論、対面コミュニケーション、機能的MRI

1. 研究開始当初の背景

他者と円滑に付き合う能力を社会能力と呼び、社会生活をおくる上で必須の能力で、言語性・非言語性のコミュニケーション能力を基盤とした高次脳機能と捉えられる。その神経基盤および発達期における獲得過程については不明の点が多い。

2. 研究の目的

発達期における社会能力の正常な獲得過程を実証的に解析するとともに、獲得過程に

おける病態を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

対面コミュニケーションを含む社会能力の神経基盤およびその発達過程を、行動観察・定量と脳機能イメージングを組み合わせ、乳児から学童、成人にいたるまで一貫して解析する。5歳ごろに通過することが知られている「心の理論」以前の萌芽過程および、

「心の理論」以後の、他者の心的状態を付度する能力 (mentalizing) の発達過程を、複数個体間の社会的相互作用の定量およびその神経基盤を画像化することにより明らかにする。乳幼児から 10 歳までの各年代における社会行動およびその萌芽行動を、統制された条件下で観察記録する。複数の個体の相互作用を、個体の発する社会的信号を視線の動きとして捉える。近赤外光を用いた光学式動態計測を行うことにより、視線の位置と方向を 6 次元ベクトルの時系列データとして記録する。動的因果関係に基づいた時系列解析モデルを用いて解析することにより、複数の個体間の相互作用を定量する。社会的相互作用の発達を、経時的に追跡する。一方、これらの行動に反映されている心的過程の神経基盤を抽出するために、2 台の MRI を用い、成人ならびに学童を対象に、視線を含む個体間の相互作用を伴う行動課題を遂行している最中の脳活動を描出する。これによって描出された領域に絞って、近赤外線トポグラフィー (NIR) を用いて非拘束条件下で、乳幼児期における神経基盤の変化を描出する。

4. 研究成果

(1) 生物感の神経基盤

ヒトは生後 3 ヶ月頃から生物的動き (biological motion) に対して敏感であり、6 ヶ月ころには、自己推進する物体に意図を付与する。これらは社会的信号に対する選好性が発達初期から発現している証拠とされている。生物感の神経基盤を明らかにするために、28 人の成人被験者を対象に機能的 MRI を行った。自己推進する幾何図形に対して追跡者や障害物を付加することにより、生物感を増強させた。生物感と相関して増強する神経活動領域として、後頭極に近い kinetic occipital area (KO) と外側後部紡錘状回に位置する lateral occipital area (LO) が描出された。通常生物学的動きに反応するとされる上側頭溝領域には相関が見られず、生物感は比較的に初期視覚処理を担う領域で表象されると考えられた (Morito, et al. 2009)。

(2) 感情理解における文化的同調の影響

感情の表出と理解は社会能力の重要な要素である。乳幼児は生後 9 ヶ月までに、感情内容を含むコミュニケーション理解が可能となるとされている。その発達には生物学的な側面と文化的側面が関与するとされている。恐れ表情を視覚的に提示することにより、扁桃体の神経活動が増強することは良く知られており、感情理解における重要な神経基盤の一部であると考えられている。この反応が、文化的側面によりどのような影響を受けるかを、成人を対象に機能的 MRI を用いて検証した。日本在住の日本人と米国在住の

白人に対し、日本人の恐れ表情、白人の恐れ表情を提示しつつ、扁桃体の神経活動を計測した。いずれのグループでも、扁桃体は、同じグループの恐れ表情に対してより強く活動した。この所見は、恐れ刺激に対する自動的な神経反応が、文化的な同調を受けるということを証拠づけるものである (Chiao et al. 2008)。

(3) 2 個体間の共同注意

共同注意は、2 者間において、第三者 (物) への注意を共有することを指し、コミュニケーションにおいて基本的な役割をはたすと考えられており、限られた注意やワーキングメモリにもかかわらず、生後 6-12 ヶ月ではやくも出現する。新生児模倣の存在を考慮すると、共同注意には、生得的な「共鳴」システムの存在が予想される。その神経基盤を明らかにするために、2 台の MRI を用いて視線による共同注意課題遂行中の脳活動を計測した。視線の変化に関与する活動は生物感の神経基盤、ならびに上側頭溝に加えて、両側下前頭前野、内側前頭前野に見られ、視線の変化により惹起された注意の共有に関係する領域は左頭頂～前頭前野であった。

(4) 自己認知と自己意識

ヒトは 1 歳半～2 歳頃頃から鏡に映る自分の顔を見て、それが自分であると気づき (視覚的自己認知)、3-4 歳の幼児期になると自分の姿や行動を自分で評価し、恥ずかしさなどの自己意識情動を経験するようになる (自己評価)。このような自己評価を伴う自己意識の形成過程にいたる途上で、自己の姿をみることに對する「照れ」が観察され、自己への関心を反映するものとされる。顔写真を用いて視覚的自己認知、自己への関心、自己評価に関わる神経基盤の違いを明らかにすることを目的として機能的 MRI を行った。他者顔に比べて自己顔を評価しているときに、右側前頭一頭頂ネットワークが強く賦活していた。右側前頭領域の活動は 2 箇所に分かれて存在しており、ブロードマンエリア (BA) 6/44 に相当する運動前野領域の活動は自己の外見と関連する公的自己意識尺度 (自己への関心) を反映した。一方 BA 45/46 に相当する下前頭回付近の領域の活動は自己評価の結果生じる恥ずかしさの強度と関係していた。自己認知と自己への関心が獲得される 1 歳半から 2 歳は、他者の行為を模倣し始める時期であり、自己認知および他者行為の模倣は、ともに運動前野の賦活を伴うことから、運動前野が機能し始める時期にあたる可能性がある。一方、自己評価が始まるのとはほぼ同時期に自伝的な記憶を思い出すことが可能となるなど、高次の自己関連情報の処理に関与する下前頭回は、運動前野よりも遅れて発達す

ると考えられる。このように、本研究の結果は、ある機能に対応する神経基盤を特定し、さらにそれらの機能の発達時期を考慮することで、その神経基盤の発達時期をある程度予測できるという新たな可能性を提案するものである。さらに、「自己への関心」という従前発達心理学において等閑視されてきた心的過程が、自己評価とは独立な神経基盤をもつことをしめした。このことは脳機能画像が制約条件を与えることによって、発達心理モデルの生成と検証に寄与する一例である (Morita et al. 2008; Sadato et al. 2008)。

(5) 対面コミュニケーションにおける感覚統合、学習、遺伝多型

人間における発声と唇の動きの感覚統合は、2歳6ヶ月までに、学習により形成されるとされる。社会能力の素過程としての対面コミュニケーションの神経基盤を、脳機能イメージングを用いて解析した。特に対面コミュニケーションにおける口の動きと発声の統合(視聴覚統合)の神経基盤を描出すると共に (Saito et al. 2005)、それらに対する聴覚脱失の影響 (Sadato et al. 2005) を明らかにした。さらに、視聴覚統合の学習過程について、遅延見本課題を応用することにより明らかにした (Tanabe et al. 2005)。対面コミュニケーションにおいて、人間の顔は、情動、認知の両面において重要な情報源であり、その信号は自動的に評価されていると考えられている。機能的 MRI をもちいることにより、顔刺激に伴う扁桃体の賦活が、セロトニン関連遺伝子多型によって異なることが判明した (Iidaka, et al. 2005)。対面コミュニケーションにおいて、重要な役割を果たす人間の顔の脳内処理について、fMRI と脳波を組み合わせることで、さらに検討を加えた (Iidaka et al. 2006ab)。

(6) 共感(empathy)と心の理論の関係

共感とは、他者の感情変化の知覚、他者視点獲得、情動的反応からなる。4歳から6歳で、他者の信念がその情動反応に影響を及ぼすことを理解し始め、共感の重要な里標であることから、共感には心の理論が関与する可能性がある。特に共感の観点から物語理解を研究した。物語理解とは、時間、空間、因果関係、主人公の心的状態といった複数次元の心的表象をたえず更新することであり、この動的な心的表象は、状況モデルと呼ばれる。感情情報を含んだ物語を読むことで生成される状況モデルは、心の理論の神経基盤によって表象されるという仮説をたてて fMRI を行った。23人の健常被験者が、3種類の異なる感情価を持つ状況説明文章と、同一のターゲット文から構成される文章を読んだ。つまり、ターゲット文を読むことによって状況モ

デルの更新を促す課題を用いた。同一のターゲット文を用いることで、異なる感情価を持つ状況モデルが更新されることにより、それに応じた状況モデルの神経基盤を賦活させると予測した。予測通り、ターゲット文に関連した脳活動は、心の理論の神経基盤の一部である背内側前頭前野と側頭極に加え、感情の評価に関連する外側前頭眼窩皮質において、ネガティブな感情価を持った状況の文脈を与えた場合に相関した。したがって、状況モデルの感情の次元は、感情評価の神経基盤と心の理論の神経基盤によって表象されていることが明らかになった (Komeda et al. in preparation)。

空間的な他者視点獲得は、状況モデルの重要な要素である。"今、ここ (here and now)" の視点は、登場人物が目的の場所に存在する状況を表し、物語理解のために使用される。同時に、"今、そこ (there and now)" の視点は、登場人物が他の場所に存在する状況を表し、読み手は、物語理解における登場人物の視点に立たなければならない。18名の正常な成人被験者および機能的磁気共鳴画像法を使用して物語理解における登場人物(主人公)の感情を理解する際の空間的な他者視点取得に関連する神経基盤を検討した。被験者は、二文で構成される文章を読み後半の文章において主人公の感情を推測した。一文目に登場する主人公と二文目で生起する出来事が同じ場所条件 (here and now) と異なる場所条件 (there and now) を設定した。異なる場所条件の方が、同じ場所条件よりも後部帯状回と右側頭頭頂接合部において有意な賦活を示した。両条件とコントロール条件を比較した際には、後部帯状回と右側の側頭頭頂接合部に加えて、心の理論の神経基盤と目される背内側前頭前野と側頭極において有意な賦活を確認した。後部帯状回と右側の側頭頭頂接合部は心の理論の神経基盤の一部として、状況モデルの空間的な他者視点取得という次元を表象すると考えられた (Mano et al. 2009)。

(7) 向社会行動

ヒトの向社会行動 (prosocial behavior) の発達においては、共感の一部としての他者視点獲得が必要であるが、必ずしも十分ではないとされている。向社会行動の誘因の一つとして「他者からの良い評判の獲得」を想定し、まず「社会的行動の誘因となる他者からの良い評判の獲得は、金銭報酬獲得時と同様に報酬系を賦活させる」という仮説のもと実験を行った。機能的核磁気共鳴装置内で、19人の成人被験者に、他者からの良い評判と金銭報酬を知覚させると、報酬系として知られる線条体の賦活が共通して見られた。これは、

他者からの良い評判は報酬としての価値を持ち、脳内において金銭報酬と同じように処理されているということを示している (Izuma et al. 2008)。

(8) 語用論

相手が嘘をついているかどうかの理解は、話者の欺く意図の推量とその道徳的価値判断の要素からなっており、3歳ころに前者が、後者は6歳ころに獲得されることから、これらは異なる神経基盤を持つことが予想される。同一のシナリオを提示し、道徳判断と嘘判断を行わせたところ、左側頭葉、背内側前頭前野、外側前頭眼窩皮、尾状核、左側頭頭頂接合部、右小脳が共通して賦活された。嘘判断と道徳判断を比較したところ、左外側前頭前野、両側頭頭頂接合部と右の上側頭溝が賦活された。左側頭頭頂接合部は向社会的嘘の場合、反社会的嘘にくらべてより強い活動をきたした。このことから、嘘判断は、社会規範に基づく道徳判断と欺く意図の推量のそれぞれに対応する異なる神経活動により表象されており、左側頭頭頂接合部が両者に関与している可能性が示された (Harada et al. 2009)。皮肉理解には高次の心の理論を要すると考えられ、定型発達においては7歳ころに通過する一方自閉症スペクトラム群では、比喩にくらべ皮肉の理解に障害のあることが知られている。皮肉の神経基盤を描出したところ (Uchiyama et al. 2006; Uchiyama et al. submitted), 心の理論の神経基盤の一部が関与すること、比喩の神経基盤とは異なることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 56 件 すべて査読有)

- ① Bengtsson SL, Ullen F, Ehrsson HH, Hashimoto T, Kito T, Naito E, Forssberg H, Sadato N (2009) Listening to rhythms activates motor and premotor cortices. *Cortex* 45:62-71.
- ② Chiao JY, Harada T, Komeda H, Li Z, Mano Y, Saito D, Parrish TB, Sadato N, Iidaka T (2009) Dynamic Cultural Influences on Neural Representations of the Self. *J Cogn Neurosci*. (in press)
- ③ Hagura N, Oouchida Y, Aramaki Y, Okada T, Matsumura M, Sadato N, Naito E (2009) Visuokinesthetic perception of hand movement is mediated by cerebro-cerebellar interaction between the left cerebellum and right parietal cortex. *Cereb Cortex* 19:176-186.
- ④ Harada T, Itakura S, Xu F, Lee K, Nakashita S, Saito DN, Sadato N (2009) Neural correlates of the judgment of lying: A functional magnetic resonance imaging study. *Neurosci Res* 63:24-34.
- ⑤ Izuma K, Saito DN, Sadato N (2009) Processing of the Incentive for Social Approval in the Ventral Striatum during Charitable Donation. *J Cogn Neurosci*. (in press)
- ⑥ Mano Y, Harada T, Sugiura M, Saito DN, Sadato N (2009) Perspective-taking as part of narrative comprehension: a functional MRI study. *Neuropsychologia* 47:813-824.
- ⑦ Tanabe HC, Sadato N (2009) Ventrolateral prefrontal cortex activity associated with individual differences in arbitrary delayed paired-association learning performance: A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience* 160:688-697.
- ⑧ Akatsuka K, Noguchi Y, Harada T, Sadato N, Kakigi R (2008) Neural codes for somatosensory two-point discrimination in inferior parietal lobule: an fMRI study. *Neuroimage* 40:852-858.
- ⑨ Chiao JY, Iidaka T, Gordon HL, Nogawa J, Bar M, Aminoff E, Sadato N, Ambady N (2008) Cultural specificity in amygdala response to fear faces. *J Cogn Neurosci* 20:2167-2174.
- ⑩ Chiao JY, Harada T, Komeda H, Li Z, Mano Y, Saito D, Parrish TB, Sadato N, Iidaka T (2008) Neural basis of individualistic and collectivistic views of self. *Hum Brain Mapp*. (in press)
- ⑪ Hayashi MJ, Saito DN, Aramaki Y, Asai T, Fujibayashi Y, Sadato N (2008) Hemispheric asymmetry of frequency-dependent suppression in the ipsilateral primary motor cortex during finger movement: a functional magnetic resonance imaging study. *Cereb Cortex* 18:2932-2940.
- ⑫ Izuma K, Saito DN, Sadato N (2008) Processing of social and monetary rewards in the human striatum. *Neuron* 58:284-294.
- ⑬ Maki Y, Wong KF, Sugiura M, Ozaki T, Sadato N (2008) Asymmetric control mechanisms of bimanual coordination: an application of directed connectivity analysis to kinematic and functional MRI data. *Neuroimage* 42:1295-1304.
- ⑭ Miyawaki Y, Uchida H, Yamashita O, Sato MA, Morito Y, Tanabe HC, Sadato N, Kamitani Y (2008) Visual image reconstruction from human brain activity using a combination of multiscale local image decoders. *Neuron* 60:915-929.
- ⑮ Mizuno K, Tanaka M, Ishii A, Tanabe HC, Onoe H, Sadato N, Watanabe Y (2008) The neural basis of academic achievement motivation. *Neuroimage* 42:369-378.

- ⑩ Morita T, Itakura S, Saito DN, Nakashita S, Harada T, Kochiyama T, Sadato N (2008) The role of the right prefrontal cortex in self-evaluation of the face: a functional magnetic resonance imaging study. J Cogn Neurosci 20:342-355.
- ⑪ Murase M, Saito DN, Kochiyama T, Tanabe HC, Tanaka S, Harada T, Aramaki Y, Honda M, Sadato N (2008) Cross-modal integration during vowel identification in audiovisual speech: a functional magnetic resonance imaging study. Neurosci Lett 434:71-76.
- ⑫ Nakashita S, Saito DN, Kochiyama T, Honda M, Tanabe HC, Sadato N (2008) Tactile-visual integration in the posterior parietal cortex: a functional magnetic resonance imaging study. Brain Res Bull 75:513-525.
- ⑬ Toyoda H, Kashikura K, Okada T, Nakashita S, Honda M, Yonekura Y, Kawaguchi H, Maki A, Sadato N (2008) Source of nonlinearity of the BOLD response revealed by simultaneous fMRI and NIRS. Neuroimage 39:997-1013.
- ⑭ Uchiyama Y, Toyoda H, Honda M, Yoshida H, Kochiyama T, Ebe K, Sadato N (2008) Functional segregation of the inferior frontal gyrus for syntactic processes: a functional magnetic-resonance imaging study. Neurosci Res 61:309-318.

[学会発表] (計 70 件)

- ① Sadato N (2009.3.2) The Neural Basis of Social Reward and Decision-Making. ESF-JSPS Frontier Science Conference Series for Young Researchers Social Cognitive Neuroscience (Maratea, Italy).

[その他] ホームページ

<http://www.nips.ac.jp/fmritms/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

定藤規弘 (SADATO NORIHIRO)
生理学研究所・大脳皮質機能研究系・教授
研究者番号：00273003

(2) 研究分担者

眞弓光文 (MAYUMI MITSUHUMI)
福井大学・医学部・教授
研究者番号：70135581

中井昭夫 (NAKAI AKIO)
福井大学・医学部・助教
研究者番号：50240784

松木健一 (MATSUKI KEN-ICHI)
福井大学・教育地域科学部・教授
研究者番号：10157282

小枝達也 (KOEDA TATSUYA)
鳥取大学・地域学部・教授
研究者番号：70225390

大野耕策 (OHNO KOUSAKU)
鳥取大学・医学部・教授
研究者番号：70112109

板倉昭二 (ITAKURA SHOJI)
京都大学・文学部・准教授
研究者番号：50211735

尾崎 統 (OZAKI TORU)
統計数理研究所・予測制御研究系・教授
研究者番号：00000208
(2005～2007年度)

米倉義晴 (YONEKURA YOSHIHARU)
福井大学・高エネルギー医学研究センター・教授
研究者番号：60135572
(2005年度)