

We-mode neuroscience に向けて 2 個体同時計測 fMRI を用いた相互主体性へのアプローチ

定 藤 規 弘

自然科学研究機構生理学研究所

Towards we-mode neuroscience: An approach to inter-subjectivity
using hyperscanning functional MRI

Norihiro SADATO

National Institute for Physiological Sciences

Development of social cognition is embedded in real-time social interactions between individuals, i.e., inter-subjectivity. To depict its neural underpinning, we have conducted a multi-brain approach utilizing hyperscanning fMRI that enables depiction of the neural activities of the two brains during a real-time interaction, i.e., joint attention. Hyperscanning fMRI of pairs of adults performing joint attention showed inter-individual neural synchronization in the right inferior frontal gyrus after all of the task-related effects were modeled out. To explore how the joint attention and eye-contact generates the state of shared attention, we conducted hyperscanning fMRI in which pairs of participants performed a real-time mutual gaze, before and after the joint attention task. During the mutual gaze, eye-blink synchronization, a behavioral index of shared attention, increased after the joint attention. The increase of eye-blink synchronization correlated positively with the increase of inter-individual neural synchronization within the right inferior frontal gyrus during mutual gaze. This enhanced neural synchronization also correlated positively with enhanced eye-blink synchronization during the previous joint attention. Thus, shared attention is represented and retained by pair-specific neural synchronization of the right inferior frontal gyrus. Furthermore, we have also successfully treated the two brains as a single unit, in order to understand the neural substrates of inter-subjectivity. We will apply this “two-in-one” strategy to various behavioral milestones of the development of social cognition from mutual imitation to prosocial behavior. Our “two-in-one” strategy using hyperscanning fMRI will become an indispensable and ground-breaking method to open the new field of “inter-subjectivity” social neuroscience.

Key words: cerebral blood flow, inferior frontal gyrus, hyperscanning functional MRI, joint attention, mutual gaze, eye-blink, social cognition, action representation, Hebbian association, intersubjectivity

キーワード：脳血流，右下前頭回，2 個体同時計測機能的 MRI，共同注意，見つめ合い，瞬き，社会能力，行為表象，ヘブ学習，相互主体性

1. はじめに

対面コミュニケーションは、物理的世界に於ける個体行動と同様、フィードバック情報により制御されるが、物体は意図を予期出来ず、また社会的な関係性も持たない一方で、2 個体間コミュニケーションにおいては、それぞれが相手からの情報によって相手の行動を予期でき、ここに対面コミュニケーションにおける「双方向性」と「同時性」が生じる。対面コミュニケーションの「双方

向性」と「同時性」は、2 個体間の社会的相互行動が観察と関与を同時に含むことに起因し、各個体へ還元され得ない。2 個体間相互作用を記述するための概念として主観性 (subjectivity) と間主観性 (inter-subjectivity) が定義された (Trevarthen, 1979)。いずれも元来哲学の文脈において定義された用語であるが、Trevarthen により乳幼児の示す社会的随伴性を記述するための概念として再定義された。すなわち、主観性とは、意図した目的が意識的に制御されていることを、調整された行

為によって示す能力、間主観性とは、自身の主観的な制御を他者の主観性に合わせて調整する能力である。この定義から、間主観性は、主観（私）と主観（他者）の「間」にあって、主観や客観（第三者視点）に還元できない「現象」を指す。例えば、注意の共有としての「共同注意」、感情の共有としての「共感」、意図の共有としての「行為理解」が挙げられる。近年、鯨岡（2006）は、inter-subjectivity が3つの概念を含むことを指摘した。(1)「あなた」の主観のある状態（意図、感情等）が、「わたし」の主観の中にある感じとしてわかること、(2) 不特定多数の主観にあまねく抱かれている共通の観念や考え、(3)「思い」にしたがって行動する存在としての「わたし」という主体が、他の主体との関係において成り立つ（わたしたち）という理解に基づいて、相手に配慮しつつ自分の思いを貫くという対人関係としての相互主体性である。(1) は心理的共有、(2) は社会規範、(3) は (1) (2) を基盤とした実践的な社会的相互行動として捉えることが出来る。このため、他者の意図や精神状態に影響を与える試みとしてのコミュニケーションの神経基盤を明らかにするためにこれら3要素を分別しつつ相互主体性の行動指標並びに対応する神経活動を解析することが必須である。

2. 機能的MRI

2.1 原理

近年、機能的磁気共鳴画像（機能的MRI）による非侵襲的脳機能画像の発達が、神経活動の空間的分布とその連関状態をヒト脳で観測することを可能にし、高次脳機能の解明に有用である。局所の神経活動、特にシナプス活性とそのブドウ糖代謝とは平行し、さらに、局所脳血流は酸素供給を媒介としてブドウ糖代謝と平行しているため、局所の脳血流の変化を測定して画像化することにより、局所脳神経活動の変化を評価できる。脳血流計測とその画像化は、1980年代まではPET (Positron Emission Tomography) に代表される放射性同位元素を用いる核医学的手法で研究されていた。

MRIは、水素原子の核磁気共鳴現象を利用した画像法である。生体内に豊富にある水の水素原子は、均一静磁場下に置くと特定の周波数のラジ

オ波を吸収（共鳴）、放出（緩和）する（核磁気共鳴現象）。この現象は静磁場と平行にコイルをおくことにより徐々に減衰する交流電流として検出でき、この交流電流は磁気共鳴（MR）信号と呼ばれる。線形傾斜磁場（Lauterbur, 1973）を用いてこのMR信号に埋め込まれた空間位置情報をCTの原理により取り出す。得られた画像は、主に生体内組織間の組成の違いに起因する水素原子の分布密度と緩和速度の違いを反映する。このため撮影パラメータを変更することによりさまざまな組織間のコントラストを強調した画像を得ることができる。

機能的MRIは、神経活動亢進時に起こる、血管内の血液酸素化のバランスの局所的变化による、わずかな信号増強をとらえることによって脳血流変化を画像化する手法（Blood Oxygen Level Dependent method, BOLD法）（Ogawa & Lee, 1990）を基本技術として形成されている。酸化ヘモグロビンと還元型ヘモグロビンは、磁性的性質が異なり（Pauling & Coryell, 1936）、還元型ヘモグロビンが血管内に存在することにより、血管周囲の磁場の局所的不均一が惹起される。局所磁場不均一の存在により、MR信号は、それが存在しない場合より小さくなる。神経活動亢進時には、脳血流の増大により、脳組織の酸素摂取を上回る酸素が供給されるため、局所還元型ヘモグロビンが減少する。このためMR信号が増加する。この方法の利点は、全脳の脳血流変化を秒程度の時間解像度、ミリメートル程度の空間解像度で記録できる点である。一方酸素代謝を介しているため、BOLD法による信号変化と、血流変化並びに神経活動変化は、厳密には非線形関係にある。その主因は組織の酸素摂取率の非線形性である（Toyoda et al., 2008）が、機能的MRIの実践においては、一次近似により線形時不変系（linear time invariant system）として扱われている（Boynton et al., 1996）。

2.2 差分法による脳機能マッピング

心理過程の定量化はDondersの差分法（Donders, 1868, 再掲1969）にその源を発している。Dondersは特定の心理過程とその対照過程を用意し、それらに要する時間を計測し、反応時間の差を取ることによって、特定の心理過程を抽出し定量することに成功した。同様の手法を用いて、特定の心理

過程に対応する脳血流増加領域を脳内空間分布として同定することを脳機能地図と呼び、1980年代にはO-15標識水とPETを用いた脳血流計測によって確立された。1990年代、この手法とBOLD法を結びつけることによって、ヒトの認知機能と脳神経活動を対比付ける有力な手段としての機能的MRIが成立した。さらにMRIは、高分解能の解剖学的情報の上に、経頭蓋磁気刺激や経頭蓋直流電気刺激などによる神経活動への干渉結果を統合出来る(Cohen et al., 1997)ため、機能的検証を含めた脳機能地図の研究は大幅に進んだ。

2.3 Resting state functional MRI

差分法による脳機能マッピングは、機能局在を前提とした手法である一方で、(時間分解能10分程度の、O-15水を用いたPET計測に比較して)機能的MRIの比較的高い時間分解能(1秒程度)を利用して、局所間の関係性を神経活動の相関として捉える手法としてのネットワーク解析が展開しつつある。特定の課題を遂行しない状態でのこのような解析のことをresting state functional MRIと呼ぶことがある。その端緒は、Biswalら(1995)によって報告された、運動課題を行っていないにもかかわらず一次運動野を含む運動関連領域のBOLD信号のゆらぎが相関するという所見にある。この発見によって、課題を賦課せずに、大域的機能ネットワークを解析する可能性が開かれた。一方で、PETを用いた研究で、安静時に活動が高く、課題遂行時に活動の低下する領域の存在することが知られていたが、Raichleら(2001)により、default mode networkとして概念化された。その後、安静状態において、脳代謝レベルで複数の脳部位が共振して複数の広域ネットワーク群を形成している現象が観察された。この脳信号の自発的な「揺らぎ」とその神経領域間の同期を「resting state networks (RSNs)」と呼び、高次脳機能との関連性が示唆されている。RSNは入力 of 解釈と行為の準備のために脳の保持している環境の内部モデルを表象しているといわれ(Berkes et al., 2011)、個体の神経活動と行動を結びつけるためにネットワークの状態を評価することが重要である。

3. 2 個体同時計測法 (hyperscanning fMRI)

上記の進展は、いずれも個体脳を基盤としたネットワーク解析である。これを基盤として、特定課題を行っていない時の局所神経活動の相関としてのresting state network研究は、対面で相互作用しつつある2者によって形成される神経活動をも対象とするところまで展開している。

3.1 社会脳研究に於ける2個体同時計測の重要性

社会認知とは、他者の意図を正確に認知する情報処理過程である(Brothers, 1990)。社会認知能力の神経基盤についての研究を社会脳科学と呼び、近年その展開は著しい。その焦点は他者の心的状態を把握する能力に当てられており、その神経基盤として2つの独立した大域的ネットワークとしてのmirror neuron systemとmentalizing networkが注目されている。前者は、社会認知をシミュレーションとして説明する根拠とされており、他者の運動意図を「一人称」的(first person's perspective)に把握することを可能とする(Rizzolatti & Sinigaglia, 2010)。これに対して後者は、社会認知を理論として説明する根拠とされており、推論・省察的すなわち「第三者」的の把握(third person's perspective)を可能とする(Frith & Frith, 2006)。これらの立場は、異なる実験パラダイムを用いており(cf. Keysers & Gazzola, 2007)、それぞれ社会認知の或る側面を説明している一方、いずれも社会的相互作用を避けて他者を第三者的に観察することによりその内的状態を推論させる点に特徴がある(isolation paradigm, Schilbach et al., 2013)。これらのアプローチでは相互作用を捨象しているため、通常の双方向的な対面コミュニケーションにおいて、この2つのネットワークがどのように関与するのかは、不明である。実際社会認知には、相互作用と情動的な関与(emotional engagement)が関わっているが、それらに対する実験的アプローチの要となるのが、社会的相互作用時の2個体同時計測である(second-person approach, Schilbach et al., 2013)。

3.2 脳機能の捉え方：入出力系と自律系

機能的MRIを始めとする多くの脳機能画像法は、個体脳機能を入出力系(input-output system)

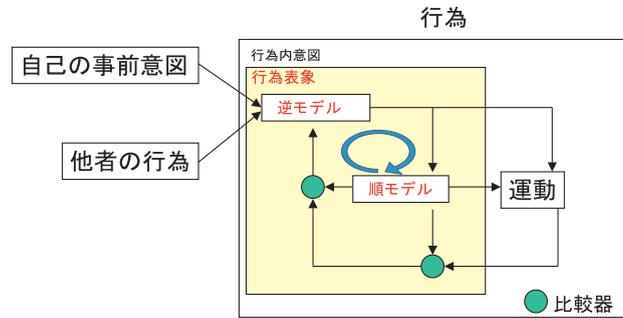


図1 内部モデルによる自他の行為表象。Jeannerod (2006) に基づく。

(Llinas 2001) として捉えてきた。すなわち、外界との相互作用により駆動し、外部要因がシステム動作を決定するため、入力共通していれば同じような動作が期待される。一方で、個体脳機能を自律系とみなす視点も存在している。すなわち、その活動は内在的に駆動されており、外部要因はシステム動作を変調するものとみなされる。resting state network (特定課題を行っていない時の局所神経活動の相関) に関する研究は、このような見方によっている。これらの2つの見方を複数脳機能計測に当てはめると、入出力系の考えでは、ペア特異的な状態に対応する神経基盤描出困難である一方、自律系とみなすならば、特定課題を行っていない時の個体間局所神経活動の相関によってペア特異的な神経活動を同定することができる。

2 個体同時計測は、hyperscanning fMRI として Montague ら (2002) により精力的に開発されてきたが、主に経済ゲームを介した相互作用を扱っており、被験者自身から発する視聴覚コミュニケーション信号をやり取りする際の同時計測は、我々の開発したシステムが最初である (Saito et al., 2010)。本システムは、人間の局所脳活動を反映する局所脳血流を、時間的には秒オーダー、空間的には mm オーダーの解像度で、全脳にわたって計測できる高磁場磁気共鳴断層装置 2 台、これを同期させる中央制御システム、そして脳血流計測中の 2 個体の間で視線、音声、表情などのコミュニケーション信号を仲介する中継システムから構成され、脳局所での神経活動を時系列データとして取り出して、2 個体間の神経活動の同期状態を描出することが出来る。このことにより、実際の

社会的相互作用が起こっている際の神経活動を詳細に調べることが可能となる。

4. 非言語性対面コミュニケーションの神経基盤

非言語性対面コミュニケーションの神経基盤を調べるにあたり、発達過程における社会能力の行動里標を考慮することは有益である。特に注目しているのは新生児模倣 (Meltzoff & Moore, 1977) であり、自動模倣が発達の最初期から存在することを示していることから、その後に出現する社会的随伴性や共同注意などの行動里標の基盤となっていることが予想される。

4.1 自動模倣における行為内意図と内部モデル

対面コミュニケーションが、相手の内部状態に対して影響を及ぼそうとする相互作用であるとするならば、他者の意図を正確に認知し (Brothers, 1990) これにより他者の行為を予測して自己の行動を決定することが必要である。意図には、行為に先立ち、行為を因果するものであり行為内意図と、事前意図がある。行為の中には、身体運動と、その身体運動の裏側に張り付いている行為内意図があり、それが因果作用を起こす。また、これを二つ合わせた行為に対して、さらに因果作用を及ぼす事前意図がある (Searle, 1983; 図1)。システム神経科学においては、運動制御のモデルに基づく行為内意図のモデルが提唱されている (Wolpert et al., 2003)。即ち行為内意図は、運動司令の感覚的結果の予測 (順モデル) と、感覚的結果を生成する運動司令の制御 (逆モデル) からな

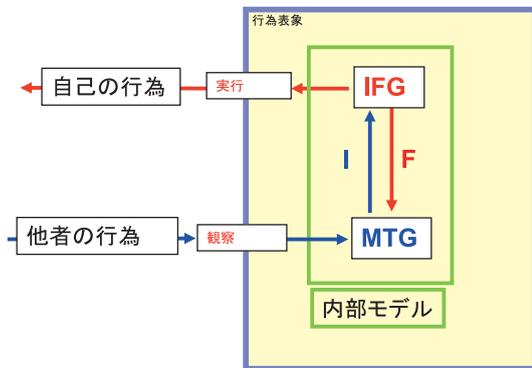


図2 Sasaki et al. (2012)に基づく自動模倣の神経基盤。F, forward model; I, inverse model; IFG, inferior frontal gyrus; MTG, middle temporal gyrus.

る。自己の事前意図と他者の行為入力が共に逆モデルを起動しうるとするモデルに基づく、乳児から成人まで広く観察される自動模倣は順モデルと逆モデルが密接に関連していることにより起こることが予想される。人においては下前頭葉が中側頭葉と解剖学的に直接連絡していること、共に mirror neuron system を形成していることを考慮して、佐々木ら (Sasaki et al., 2012) は、中側頭葉から下前頭葉への方向性を持つ結合 (effective connectivity) が逆モデル、下前頭葉から中側頭葉への effective connectivity が順モデルを表象することを予想し、機能的 MRI 実験を行った。24 名の被験者に、他者が 2 つのボールを右手掌で回転させるのを観察しその際の回転速度の変化を検出する課題を課した。その間、被験者自身が 2 つのボールを手掌でさせる／させない条件を設定した。右上肢の筋電計測から、他者の右手運動を観察することにより自動模倣の起こることが判明した。その際、中側頭葉から下前頭葉への方向性を持つ結合 (effective connectivity) は増強し、一方被験者がボールを回す際には減少したことから、逆モデルに対応すると考えられた。一方下前頭葉から中側頭葉への effective connectivity はその逆パターンをしめし、順モデルに対応すると考えられた (Sasaki et al., 2012)。つまり自動模倣の神経基盤は逆モデルを表象する MTG から IFG に向かう結合であることが判明した (図 2)。

4.2 共同注意とアイコンタクトの神経基盤

共同注意とは、2 個人がある物体への注意を共

有することであり、アイコンタクトから始まる。アイコンタクト (相互注視) は対面コミュニケーションに於いて重要な役割を担い、また共同注意の発達を促すものと考えられている。通常視線を介した共有で 6～12 ヶ月ころに出現し、他人の意図を付度する能力 (心の理論) の萌芽であり、言語発達の前駆と目され、さらにその欠如は自閉症の早期兆候とされている (Corkum & Moore, 1998; Mundy et al., 1986, 2009)。

共同注意の神経基盤については先行研究がある。共同注意 (JA) には、それを開始する IJA と、相手の視線に反応する RJA があるが、それらの神経基盤の異同については議論のあるところである。Williams ら (2005) は、対象に対する注意の共有に絞った課題を行った。共同注意条件の際には、移動する点刺激をアバターが目で追いかける刺激が提示された。一方で非共同注意条件の際には移動する点刺激とアバターの視線移動は一致しないように設定されていた。被験者は点刺激を追視するように求められた。共同注意条件に対応する脳賦活部位は前部帯状回であった。Laube et al. (2011) は右上側頭溝と右紡錘状回が、RJA の際の視線ならびに頭部方向の処理に関連していることを示した。Redcay ら (2010, 2012) は、二者間で共同注意を遂行する課題を用いて、IJA と RJA の神経活動の異同を検討した。RJA では腹側内側前頭前野が、IJA では頭頂間溝と中前頭回が活動することを示した。IJA と RJA に共通の神経活動は、背側内側前頭前野、右過前頭回、ならびに右後上側頭溝に見られた。一方、バーチャルリアリティを用いた機能的 MRI 実験で、Schilbach ら (2010) は IJA に特異的な活動を両側腹側線条体に、RJA 特異的な活動を腹側内側前頭前野に認めた。

以上のごとく共同注意の神経基盤については、未だ定説はない。特に個体間の相互作用である「共有」の神経基盤を明らかにするためには、2 個体の神経活動を同時に記録解析することが必須であるが、先行研究は 1 個体計測に基づくものであった。そこで、2 台の MRI を用いて 2 個人間の相互作用中の神経活動を同時に計測するシステムを開発して、共同注意とアイコンタクト時の神経活動を計測した (Koike et al., 2016; Saito et al., 2010; Tanabe et al., 2012)。

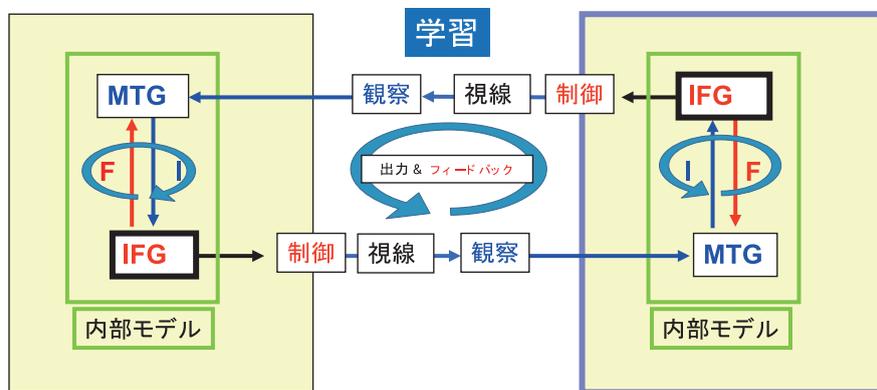


図3 Koike et al. (2016) に基づく共同注意課題により学習され創発した個体間神経同期の神経基盤。F, forward model; I, inverse model; IFG, inferior frontal gyrus; MTG, middle temporal gyrus.

課題は相互注視（見つめ合い）を基調に、共同注意課題時に視線のやり取りを行うものであった。全ての共同注意課題関連脳活動を、モデルにより取り除いた残差時系列を用いて二者の脳時系列データのボクセル毎の相関を取ったところ、右下前頭回においてペア（同時計測した二者）の方が非ペア（同時計測していない二者）よりも相関の高いことが分かった。このことはこの領域が相互注視している際の意図の共有に参与していることを示すものである（Saito et al., 2010）。

この実験系を自閉症スペクトラム（ASD）患者と正常者のペアに適用して、同様の計測を行ったところ、ASDの相手をした正常者は、正常者の相手をした正常者に比べて、共同注意課題の成績が悪かった。ASD-正常者ペアでは、正常者-正常者ペアでみられた、右下前頭回での個体間“共鳴”が消失していた。この領域と右上側頭溝の機能的結合は、ASDの相手をした正常者でのみ低下しており、その強度は共同注意課題の成績と正相関していた。このことは、共同注意の成績は、アイコンタクトを介した間主観性にも依存することを示唆する（Tanabe et al., 2012）。

共同注意がどのように注意の共有を生成するのか、そして注意共有の記憶が残存するかを検証するために、2日に亘る2個体同時計測機能的MRI実験を行った。1日目にペアとなった被験者は先ず見つめ合いのみを行い、その後共同注意課題を行った。2日目に見つめ合いを再び行った。瞬きの同調は注意共有の行動指標と考えられる

（Nakano & Kitazawa, 2010）が、共同注意課題中は瞬きの同調が増加し、確かに注意共有が起こっていることが判明した。この瞬きの同調は、2日目の見つめ合いの際にも残存しており、1日目の見つめ合いからの同調の増強度合いは、右下前頭野の個体間同期の強さと相関していた。一方で、右下前頭葉の個体間同期の強さは、前日の共同注意課題中の瞬きの同調程度と相関していた。これらの結果は、注意共有はペア特異的な神経同期に依って表象・記憶され、個人レベルに還元できない現象であることが明らかになった。つまり、神経活動の個体間同期が、2個体の相互作用による学習という個体間特異的な創發現象の神経基盤であることを、初めて明確にしたものである（Koike et al., 2016）。

さらに神経活動の個体間同期増強の見られた右下前頭葉は、IJA, RJAのいずれでも賦活化されていた。右下前頭葉が中側頭葉と共にmirror neuron systemを形成していることを考慮すると、右下前頭葉の神経活動の個体間同期増強は、MTGからIFGに向けた機能結合（Sasaki et al., 2012）により表象される逆モデルが学習によって結合された結果と考えることが出来る。実際MTGとIFGの個体内機能結合は共同注意課題後に増強し、その増強度は、IFGの個体間同期増強度と正相関する。以上から、共同注意による学習という2個体間特異的な創發現象は、mirror neuron systemを介したものであることが判明した（図3）。

5. おわりに

5.1 社会能力発達の理解に向けて

社会能力発現機構とその発達の理解は、心理学モデルの構成と検証にかかっている。脳機能画像法は、脳という場を制限条件として与えることにより、心理モデルの構成と検証に寄与する。通常心理モデルは、ある心的過程（ならびに付随する行動）を説明するために形成されるが、その心的過程に対応する脳構造から得た情報を用いてモデル形成が可能となる。この際、その脳構造に関する現在の脳科学全般の知識を利用することができる。この点で、脳機能画像法は、現在膨大な知見の集積しつつある脳科学領域の情報を、人間の発達心理学に結びつけるための接点を形成する。実際、機能的MRIを用いて、社会能力の発達行動里標の神経基盤が明らかになりつつある（定藤, 2010）。しかしながら、人間の社会行動は、個体間の相互作用によるものであり、その相互作用中の神経活動を同時に記録解析することが、人間の社会能力の神経基盤を知るためには必須である。本論で紹介したとおり、2台のMRIを用いたhyperscanning fMRIによって、即時的な双方向性コミュニケーションの神経基盤を解明する事が可能となりつつある。Hyperscanning fMRIで示された個体間の「共鳴」は、他者との関係性における2個体間の広域ネットワークの個体間共振と社会能力発現の関係性を示唆するものであり、今後「こころ」の神経基盤にアプローチするための重要な手段となりうる。冒頭に述べた社会認知の重要な要素である意図理解との関係では、行為内意図理解はmirror neuron network, 事前意図理解はmentalizing networkが夫々の神経基盤と想定されるが、対面コミュニケーションに於けるこれらの両者の相互作用を明らかにすることが当面の課題と考えられる。

5.2 言語コミュニケーションへの展開と応用

急速なグローバル化に伴い、第二言語（特に英語）運用能力の育成に対する社会的な期待と要求が高まっているが、その学習メカニズムには不明の点が多い。第二言語運用能力向上のためにはコミュニケーション場面における相互作用が重要であることが知られている。一方で、言語的コミュ

ニケーションを含む社会能力が他者とのかかわり合いの中で創発的に発達することは、他者との相互作用自体に社会能力習得を推進する内在的な駆動力が存在することを示唆している。社会能力の発達におけるそのような駆動力の生成機序を解析することにより、ヒトを社会的存在たらしめる道筋が明らかになるとともに、その条件を人為的に再構築することにより第二言語習得を促進し得る。「双方向性」と「同時性」によって特徴付けられる対面コミュニケーションの機構並びに神経基盤を明らかにするためには、相互作用している2個体を同時に観察・解析することにより、2個体間相互作用としての間主観性の心理的、神経科学的モデルを作成することが必要であり、hyperscanning fMRIを用いた実験と理論構築を平行して進める必要があろう。

5.3 精神病理学との対話

精神医学の一領域である精神病理学は、対人関係の学、自己と他者の「あいだ」の学とされている。自己存在の危機的事態である統合失調症という病態に治療者として深く関わることにより、間主観性を含む形而上学的な存在論の諸問題を日常性内部の現実的な問題に引き寄せるため、臨床哲学とも言われる。Hyperscanning fMRIによって推進される間主観性の脳科学の目的は、「あいだ」を「あいだ」たらしめている生物学的基盤を明らかにすることである。精神病理学領域との対話・連携を積極的に進めることにより、“自己と他者とその「あいだ」の物質的基盤からの理解”を目指しつつ、哲学・医学・認知神経科学を止揚する「総合的人間科学」を展望することが可能になる。

5.4 社会実装への展望

現代社会における問題の多くは、人間の精神や社会的行動に関連しており、その解明にはヒトとモデル動物を用いた脳の研究が不可欠であり、かつその社会実装が望まれている。自己と他者の関係を考慮しつつ行動を決定していく人間の社会能力の正常発達過程を、遺伝子、脳神経活動レベル、神経回路レベルから行動レベルまで一貫して画像化して理解することにより、自閉症をはじめとする社会能力障害の病態解明に資することが出来る。その結果を社会に適用するためには、人で

の検証システムとしての発達コホート研究と有機的に連携することにより、基礎研究成果を社会実装するための道筋を形成することが重要である。これにより、科学技術の加速度的な発展による情報化、少子化、高齢化などによる生活環境や社会環境の劇的な変化のなかで、人が本来有する能力と個性を適切に発揮することを支える研究を推進する効果が期待される。ヒトの社会性について、その物質レベルから個体ならびに集団行動レベルにいたる統合的理解を目指し、心理学、経済学、認知科学、神経科学、医学、工学、進化生物学、霊長類学からコンピュータ科学にいたるまで、広汎な真に学際的な研究の推進が強く望まれる。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省脳科学研究戦略推進プログラムにより実施された課題D：「社会的行動を支える脳基盤の計測・支援技術の開発」および日本学術振興会科学研究費助成事業（基盤研究（S）21220005、（A）15H01846）の成果である。

文 献

- Berkes, P., Orbán, G., Lengyel, M., & Fiser, J. (2011). Spontaneous cortical activity reveals hallmarks of an optimal internal model of the environment. *Science*, *331*, 83–87.
- Biswal, B., Yetkin, F. Z., Haughton, V. M., & Hyde, J. S. (1995). Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI. *Magn Reson Med*, *34*, 537–541.
- Boynton, G. M., Engel, S. A., Glover, G. H., & Heeger, D. J. (1996). Linear systems analysis of functional magnetic resonance imaging in human V1. *J Neurosci*, *16*, 4207–4221.
- Brothers, L. (1990). The social brain: A project for integrating primate behaviour and neurophysiology in a new domain. *Concepts in Neurosci*, *1*, 27–51.
- Cohen, L. G., Celnik, P., Pascual-Leone, A., Corwell, B., Falz, L., Dambrosia, J., Honda, M., Sadato, N., Gerloff, C., Catala, M. D., & Hallett, M. (1997). Functional relevance of cross-modal plasticity in blind humans. *Nature*, *389*, 180–183.
- Corkum, V., & Moore, C. (1998). The origins of joint visual attention in infants. *Dev Psychol*, *34*, 28–38.
- Donders, F. C. (1969). On the speed of mental processes. *Acta Psychol*, *30*, 412–431.
- Frith, C. D., & Frith, U. (2006). The neural basis of mentalizing. *Neuron*, *50*, 531–534.
- Jeannerod, M. (2006). Motor cognition. What actions tell the self. Oxford: Oxford University Press.
- Keysers, C., & Gazzola, V. (2007). Integrating simulation and theory of mind: From self to social cognition. *Trends Cogn Sci*, *11*, 194–196.
- Koike, T., Tanabe, H. C., Okazaki, S., Nakagawa, E., Sasaki, A. T., Shimada, K., Sugawara, S. K., Takahashi, H. K., Yoshihara, K., Bosch-Bayard, J., & Sadato, N. (2016). Neural substrates of shared attention as social memory: A hyperscanning functional magnetic resonance imaging study. *Neuroimage*, *125*, 401–412.
- 鯨岡 峻 (2006) ひとがひとをわかるということ 相互主体性と相互主体 ミネルヴァ書房。
- Laube, I., Kamphuis, S., Dicke, P. W., & Thier, P. (2011). Cortical processing of head- and eye-gaze cues guiding joint social attention. *Neuroimage*, *54*, 1643–1653.
- Lauterbur, P. C. (1973). Image formation by induced local interaction: Examples employing nuclear magnetic resonance. *Nature*, *243*, 190–191.
- Llinas, R. (2001). I of the Vortex: From Neurons to Self. Cambridge, MA: MIT press.
- Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, *198*, 75–78.
- Montague, P. (2002). Hyperscanning: Simultaneous fMRI during linked social interactions. *Neuroimage*, *16*, 1159–1164.
- Mundy, P., Sigman, M., Ungerer, J., & Sherman, T. (1986). Defining the social deficits of autism: The contribution of non-verbal communication measures. *J Child Psychol Psychiatry*, *27*, 657–669.
- Mundy, P., Sullivan, L., & Mastergeorge, A. M. (2009). A parallel and distributed processing model of joint attention, social-cognition and autism. *Autism Res*, *2*, 2–21.
- Nakano, T., & Kitazawa, S. (2010). Eyeblick entrainment at breakpoints of speech. *Exp Brain Res*, *205*, 577–581.
- Ogawa, S., & Lee, T. M. (1990). Magnetic resonance imaging of blood vessels at high fields: In vivo and in vitro measurements and image simulation. *Magn Reson Med*, *16*, 9–18.
- Pauling, L., & Coryell, C. (1936). The magnetic properties of and structure of hemoglobin, oxyhemoglobin and carbonmonoxyhemoglobin. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *22*, 210–216.
- Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proc Nat Acad Sci U S A*, *98*, 676–682.
- Redcay, E., Dodell-Feder, D., Pearrow, M. J., Mavros, P. L., Kleiner, M., Gabrieli, J. D. E., & Saxe, R. (2010). Live face-to-face interaction during fMRI: A new tool for social cognitive neuroscience. *Neuroimage*, *50*, 1639–1647.

- Redcay, E., Kleiner, M., & Saxe, R. (2012). Look at this: The neural correlates of initiating and responding to bids for joint attention. *Front Hum Neurosci*, 6, 169.
- Rizzolatti, G., & Sinigaglia, C. (2010). The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: Interpretations and misinterpretations. *Nat Rev Neurosci*, 11, 264–274.
- 定藤規弘 (2010) 社会能力の発達過程—脳機能画像法によるアプローチ— 脳と発達, 42, 185–190.
- Saito, D. N., Tanabe, H. C., Izuma, K., Hayashi, M. J., Morito, Y., Komeda, H., Uchiyama, H., Kosaka, H., Okazawa, H., Fujibayashi, Y., & Sadato, N. (2010). “Stay tuned”: Inter-individual neural synchronization during mutual gaze and joint attention. *Front Integr Neurosci*, 4, 127.
- Sasaki, A. T., Kochiyama, T., Sugiura, M., Tanabe, H. C., & Sadato, N. (2012). Neural networks for action representation: A functional magnetic-resonance imaging and dynamic causal modeling study. *Front Hum Neurosci*, 6, 236.
- Schilbach, L., Wilms, M., Eickhoff, S. B., Romanzetti, S., Tepest, R., Bente, G., Shah, N. J., Fink, G. R., & Vogeley, K. (2010). Minds made for sharing: Initiating joint attention recruits. *J Cogn Neurosci*, 22, 2702–2715.
- Schilbach, L., Timmermans, B., Reddy, V., Costall, A., Bente, G., Schlicht, T., & Vogeley, K. (2013). Toward a second-person neuroscience. *Behav Brain Sci*, 36, 393–414.
- Searle, J. R. (1983). Intentionality. An essay in the philosophy of mind. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tanabe, H. C., Kosaka, H., Saito, D. N., Koike, T., Hayashi, M. J., Izuma, K., Komeda, H., Ishitobi, M., Omori, M., Munesue, T., Okazawa, H., Wada, Y., & Sadato, N. (2012). Hard to “tune in”: Neural mechanisms of live face-to-face interaction with high-functioning autistic spectrum disorder. *Front Hum Neurosci*, 6, 268.
- 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.
- Trevarthen, C. (1979) Communication and cooperation in early infancy: A description of primary intersubjectivity. In: M. Bullowa (Ed.), *Before speech the beginning of interpersonal communication* (pp.321–347). Cambridge: Cambridge University Press.
- Williams, J. H. G., Waiter, G. D., Perra, O., Perrett, D. I., & Whiten, A. (2005). An fMRI study of joint attention experience. *Neuroimage*, 25, 133–140.
- Wolpert, D. M., Doya, K., & Kawato, M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Phil Trans R Soc L B*, 358, 593–602.

— 2016. 8. 28 受理 —