

学位請求論文審査の要旨

報告番号 甲 第 号

氏名：白野陽子

論文題目：対人相互作用における社会的信号処理の発達：乳幼児の脳機能研究

審査担当者

主査：

慶應義塾大学文学部教授・大学院社会学研究科委員 文学博士 山本淳一

副査：

慶應義塾大学文学部教授 博士（医学） 皆川泰代

明治大学理工学部教授 博士（工学） 嶋田総太郎

論文要旨

子どもの健やかな発達には、他者との社会的相互作用が重要な役割を果たしている。例えば、生後2・3歳頃までの乳幼児の模倣や言語などの様々な学習において、他者との直接的な社会的相互作用のある現実場面（ライブ）での学習は可能でも、ビデオでの学習は困難であることが知られている。日常場面において、養育者は、子どもに対して、アイコンタクト、子どもの行動に随伴した刺激（随伴刺激）、声のピッチが高く抑揚をつけた話し方である対乳児音声など、多様な社会的手がかりを用いた働きかけを自然に行なっていることが知られている。こうした手がかり刺激は、社会的信号と呼ばれ、送り手がコミュニケーションを始めようとしていることを受け手に伝え、受け手が誰であるのか特定する機能に加え、受け手の注意を誘発する機能を有している。多くの先行研究において、これらの社会的信号が、乳幼児の学習を促進することが確かめられている。

成人において、他者の心的状態の理解（例：心の理論）にかかわる脳の中枢領域として、内側前頭前野（mPFC）、上側頭溝（STS）、頭頂側頭接合部（TPJ）領域が知られており、他の関連領域とともに、社会脳ネットワークを形成していると考えられている。乳幼児においても、顔、アイコンタクト、対乳児音声といった人間由来の社会的刺激の処理において、これらの脳領域の関与が明らかとなっている。しかし、これまでの脳機能研究は、刺激を画面上に提示し、それに対する神経活動を計測するに留まっているのが現状である。つまり、先行研究の多くは、ビデオやスピーカーを通じた一方向の刺激呈示であり、実際の対人相互作用場面における乳幼児の脳反応を調べた研究はほとんど行なわれていない。

近年、機能的近赤外分光法（fNIRS）を用いた、ライブでの刺激呈示における脳機能計測の可能性が確立されてきている。白野陽子君の一連の研究は、fNIRSを用い、対人相互作用にお

ける社会的信号処理にかかわる脳機能の発達を検討したものである。本研究の目的は、(1) 乳幼児における社会的信号処理の脳内基盤とその発達を明らかにする、(2) 社会的相互作用において重要な役割を果たす社会的信号を明らかにする、(3) 社会的刺激の処理に関わる脳活動と、母子の社会性との関連を明らかにする、(4) 社会的刺激の処理に関わる脳活動と、その後の言語と社会性の発達との関連を明らかにすることであった。本研究のすべての実験において、参加児の目の前にいる実験者がライブで刺激の呈示を行い、自然な対人相互作用における乳幼児の脳活動を計測した。

実験1では、他者との自然な社会的相互作用における乳幼児のfNIRS計測手法の確立を目的とし、2つの社会的場面（共同注意を伴う三項関係の相互作用、手遊び歌を歌う二項関係の相互作用）における12-14ヶ月児の右の側頭部の脳反応を計測した。その結果、実験者が社会的信号を一切呈示しなかった場面に比べ、実験者が対乳児発話（IDS）、アイコンタクト、随伴刺激といった複数の社会的信号を自然に呈示した2つの社会的場面では、右のSTS-TPJ領域において、活動が同様に増加した。主に右のSTS-TPJ領域は、成人において社会的認知機能を担う社会脳ネットワークの中心領域の一つであることが知られており、乳児においても右のSTS-TPJ領域が、社会的相互作用に特有の社会的信号の処理を担っていると考えられた。

実験2では、実験1において観察されたSTS-TPJ領域の脳活動が、具体的に社会的信号の何の要因の処理を反映していたのかについて明らかにするため、「アイコンタクト」と「随伴刺激」という2種類の社会的信号に要因を絞り、6-8ヶ月児と10-13ヶ月児の左右の側頭部の脳反応を検討した。その結果、アイコンタクトができる自然な状態の対人場面では、実験者が随伴刺激を呈示しない場合に比べ、実験者が随伴刺激を呈示する場合には、6-8ヶ月児において右のTPJ領域の活動がより大きくなった。一方、実験者が下を向いてアイコンタクトがとれない場合と、実験者とのアイコンタクトがとれる場合では、脳反応に違いは見られなかった。これらの結果から、右のTPJ領域が随伴性の処理に関与していること、そして、乳児期の対人相互作用において随伴刺激が重要な社会的信号であることが明らかとなった。10-13ヶ月児においては、TPJ領域の活動の増減に個人差が大きく、6-8ヶ月児よりも反応の検出が困難であったが、6-8ヶ月児と同様に、随伴刺激の処理における右のTPJ領域の関与が示唆された。

実験3では、右のTPJ領域が全般的な「随伴性」の処理に関与するのか、それとも特定の刺激特性を伴った随伴性の処理を行うのかを明らかにするため、社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激（笑いかけ）、社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激（目をそらす）、社会的に意味のない随伴刺激（LEDが光る）に対する6-8ヶ月児の左右の側頭部の脳反応を検討した。その結果、ネガティブな随伴刺激に対してはTPJ領域の強い活動は認められなかったが、ポジティブな随伴刺激と、社会的でない随伴刺激に対して、右のTPJ領域の賦活が認められた。全く異なる刺激特性をもった2種類の随伴刺激（笑顔とLED光）に共通して右のTPJ領域の賦活が見られたことから、随伴性についての領域一般的な要因の処理に、右のTPJ領域が関与している可能性が示された。しかし、ポジティブな随伴刺激はTPJ領域内の角回に相当するチャンネルにおいて活動の増加が見られたのに対し、社会的でない随伴刺激において活動の増加が見

られたのは、より前方の縁上回に相当するチャンネルであった。このことから、人間由来の社会的な随伴刺激は、他者の心的状態の理解にかかわるとされる角回で処理されるが、社会的でない随伴刺激の処理は、より注意との関連が強い前方のTPJ領域で処理されると考えられた。

実験4では、刺激の妥当性に疑問があったネガティブな随伴刺激のみ、「目をそらす」から「無表情になる」に変更を加えた以外は、実験3と同様の実験を行い、4-5ヶ月児と6-7ヶ月児の前頭部と右の側頭部の脳活動を検討した。その結果、6-7ヶ月児では、すべての随伴刺激に対して右のTPJ領域の賦活が認められた。また、活動の増加が見られたTPJ領域内の位置についても、これまでと一貫した結果が得られ、ポジティブな随伴刺激とネガティブな随伴刺激では角回に相当するチャンネルであったのに対し、社会的でない随伴刺激ではより前方の縁上回に相当するチャンネルであった。4-5ヶ月児においては、どの随伴刺激に対しても、右のTPJ領域の賦活は認められなかった。

前頭部の反応では、4-5ヶ月児、6-7ヶ月児ともに、ポジティブな随伴刺激に対してのみ、背内側前頭前野 (dmPFC) において有意な活動の変化が認められた。さらに、TPJ領域とdmPFC領域間の機能的結合の強度を分析した結果、6-7ヶ月児においてポジティブな随伴刺激とネガティブな随伴刺激を呈示した場合において、TPJ領域とdmPFC領域を繋ぐ機能的結合が検出された。4-5ヶ月児では、ポジティブな随伴刺激を呈示した場合のみ、TPJ領域とmPFC領域を結ぶ機能的結合の存在が示唆された。一方、社会的でない随伴刺激を呈示した場合においては、月齢にかかわらず、TPJ領域とdmPFC領域を繋ぐ機能的結合は検出されなかった。

これらの結果より、6ヶ月齢の乳児において、「随伴性」そのものの処理にTPJ領域が関与しており、さらに、社会的な随伴刺激と、社会的でない随伴刺激の処理を担っている脳内基盤は異なっているとする実験3の結果が支持された。また、実験4の結果から、ポジティブな随伴刺激の処理にdmPFC領域が関与しており、社会的刺激の処理を担うTPJ領域とdmPFC領域を繋ぐ社会脳ネットワークの一部が、生後約半年の乳児においてすでに形成されていることが示された。

さらに、6-7ヶ月児に比べ4-5ヶ月児では、社会的信号である随伴刺激の処理において、より未熟な脳内機構しか持たないことが示唆された。つまり、社会的信号の処理における社会脳ネットワークの形成は、生後6ヶ月頃に大きく進むと考えられた。生後6ヶ月頃は、運動・言語・認知機能が著しく発達する過渡期である。本研究において観察された社会脳ネットワークの発達の变化は、言語や認知機能における発達が、時期を前後して脳内において生じる社会脳ネットワークの成熟化によって支えられている可能性を示している。

また、本研究において、随伴刺激に対するTPJ領域の活動と、乳児の社会的行動との間に関連が示された。実験1では、実験者との歌遊びの場面において「実験者の顔」をよく見る12-14ヶ月児は、共同注意を伴うような複雑で高次なコミュニケーションにおいて、より大きなSTS-TPJ領域の賦活を示した。実験2では、母親との自由遊び場面において、母親の顔を見る頻度が多い乳児は、少ない乳児に比べて、随伴刺激に対するTPJ領域の活動の増加量が大きいことが明らかとなった。同様に、実験3では、母親との自由遊び場面において、母親の顔をよ

り長く見る乳児は、ポジティブな随伴刺激に対するTPJ領域の活動の増加量が、より大きくなる傾向が示された。実験4においては、随伴刺激に対するTPJ領域の活動と乳児の社会的行動との間に関連が認められなかったものの、これらの結果は、最も重要な社会的刺激である他者の顔へ選好が高い乳児は、随伴刺激に対する社会脳ネットワークが活発に機能していることを示唆している。

以上の研究を通して、4-5ヶ月児とは異なり、6-8ヶ月児では、機能分化のあるSTS-TPJ領域、それと繋がるdmPFC領域といった、成人に近い形の社会認知の脳内機構が形成されていることが明らかとなった。本研究のように、自然な社会的相互作用を実験的に統制しつつ社会脳機能を明らかにした研究は、世界に先駆けたものであり、fNIRSを用いてこそ可能となる世界初の知見である。本研究は、実際の日常場面に即した自然な社会的相互作用における、脳反応計測の可能性と重要性を示した、最先端の脳機能イメージング研究として位置付けられる。

審査要旨

2018年1月25日に行われた公開審査会では、(1) 労力を要する乳幼児の脳機能研究において、非常に大きな数のデータ収集を行なっている点、(2) 社会的信号に対する脳反応について体系的に実験的検討を重ね、説得力のある一貫した結果が得られている点が高く評価された。対人相互作用場面における脳機能計測は、近年、その重要性が活発に議論されており、主に成人を対象とした研究が少しずつ増えてきている。一方、乳幼児の社会脳機能に関する研究は、その学術的重要性に反して圧倒的に少ないのが現状であり、とりわけ実際の対人相互作用場面における計測は、世界でもまだ数えるほどしか行われていない。6ヶ月齢以降の乳児において、社会的信号である随伴刺激やアイコンタクトに対し、一貫して成人の社会脳ネットワークと一致した領域の賦活が見られたことは、社会的認知に関与する脳内機構の萌芽が、生後半年頃の乳児においてすでに認められることを示唆している。乳児の社会性にかかわる行動指標と脳反応の関係性についても同時に検討されており、他者の顔への注意と脳発達に関連があることが示されている。このように、自然な環境における乳幼児期の社会的信号に対する脳反応と、その発達過程を明らかにした本研究は、世界的に見ても大変貴重な知見を多く提供している。

公開審査会では、3名の審査者より様々な論点が提出され、研究成果の意義を深める討議がなされた。以下は、討議された論点と回答である。

(1) 社会的な刺激と非社会的な刺激をどのように区別できるのか。ロボットは社会的刺激になり得るのか。

回答： 本研究では、人間由来の刺激を社会的な刺激として定義したが、ロボットが人間らしい刺激特性を有していれば社会的な刺激として処理される可能性は十分にあると考えられる。

(2) 社会的な刺激と同様に、非社会的な刺激に対しても右のTPJ領域の賦活が見られているため、あえて区別する必要があるのか。

回答： 今回、非社会的な刺激であるLED光では、社会的な刺激よりも少し前方のTPJ領域において一貫した活動が見られている。また、行動指標との関連においても、社会的な刺激に対

する反応とは異なった結果が得られていることから、社会的な随伴刺激に対する反応と、非社会的な随伴刺激に対する反応は質的に異なっていたと考えている。

(3) 随伴性として、相手から返ってくる反応が社会的かどうかだけではなく、その前に自分が行う行動が社会的かどうかという点も関係してくるのではないかと考えている。

回答: おそらく関係すると考えられる。乳児では安定的に生起する行動のバリエーションが少ないために検討がなかなか難しいが、興味深い視点であり、今後検討していきたい。

(4) TPJ 領域と mPFC 領域がそれぞれ担っている役割は何であるのか。役割の違いをどのように考えているか。

回答: 成人において、TPJ 領域も mPFC 領域も他者の心的状態を類推するような課題で賦活が報告されている。TPJ は、mPFC よりも早い段階で行為の暫定的な意図の推論を行っており、mPFC は相手の特徴や社会的な文脈も考慮に入れた、より長期的かつ高次の推論に関与していると指摘されている。さらに TPJ 領域は、自己と他者の行為や意図の分離を担っていると考えられている。随伴刺激は、自分とは異なる行為者（他者）の存在を示していることから、自己と他者の分離を担っている TPJ 領域が賦活したと解釈できる。乳児において mPFC 領域がすでに高次の意図の推論に関与しているとは考えにくいですが、社会的刺激の処理を担う社会脳ネットワークの萌芽が乳児期から形成されており、社会的刺激に対してすでに TPJ 領域と mPFC 領域が連動した働きを示すことは十分に考えられる。

(5) 随伴刺激に対する左の下前頭回 (IFG) 領域の賦活をどのように解釈できるのか。

回答: IFG 領域はミラーニューロンシステムの中核領域の一つであり、他者の動作の目的の直感的な認知処理を担っているとされている。最近では、ミラーニューロンシステムと社会脳ネットワークが相互に作用していることが明らかになってきており、本研究においても、すでにミラーニューロンシステムが機能しており、TPJ と連動した働きが見られたと解釈することができる。

(6) もともと生得的に社会的ではない反応が、それに対して随伴刺激を与えられることで社会的な反応になっていくのではないかと考えている。そう考えると、反応の生成過程を明らかにできるような研究に繋げていける可能性があり、非常に興味深い。

回答: 新生児においてすでに認められる、目に対する選好のような一部の社会的行動以外は、そのような生成メカニズムである可能性が十分に考えられる。

(7) ブロックデザインを採用したことによって、一つ一つの刺激要素に対する一つ一つの反応が得られたというよりも、社会的相互作用によって生じた、安定状態 (steady state) を反応として検出したことになるのではないかと考えている。

回答: 特に実験 1 と 2 では脳反応の潜時が遅くなっており、他者との社会的相互作用に特有の状態あるいは文脈に対する反応が得られたと考えられる。実験 3 と 4 ではベースライン条件とターゲット条件の違いが随伴刺激の有無のみであり、各随伴刺激に対する反応として脳反応の潜時にばらつきが出たと考えている。

このような討議と並行して、いくつかの問題点も指摘され、以下のような回答を得た。

(1) ライブ刺激は刺激の統制が難しいのではないかと。ベースライン条件において実験者が無意識に社会的信号を出してしまっている可能性はないのか。

回答：刺激を厳密に統制しようとする、不自然な刺激になってしまう。本研究では、自然な社会的相互作用を再現するため、あえて厳密な刺激の統制は行わなかった。そのため、特に実験3と4では参加児間で脳反応の潜時にばらつきが出てしまっているが、今後解析方法を工夫することである程度は是正できると考えている。対人相互作用場面では、意識せずとも行動が同期する対人同期や引き込みといった現象が報告されており、実験者が意図していない刺激の呈示が行われていた可能性は否定できない。ライブ刺激を用いた実験と併せてビデオ刺激を用いた実験も行なっていく必要がある。

(2) 刺激を呈示するタイミングを統制するのが困難なライブ刺激を用いているので、モーションキャプチャーなどの新しい行動コーディングの技術と組み合わせた脳機能データの解析方法を検討するべきである。

回答：今後、計測中の行動を自動的に検出してくれるような新しい技術も積極的に取り入れ、特に参加児間で脳反応の潜時にばらつきのあった実験3と4について、事象関連の反応の分析を試みたい。

(3) 脳機能の分析に比べ、行動評価の分析が不十分である。脳機能データありきの分析ではなく、相手の顔を見るといったような行動の分析をもっと詰めていく必要があるのではないかと。

回答：母子間の相互作用が、その後の乳児の社会的認知の発達にどのように影響するのかについて興味があり、今後より詳細な行動の分析をしていきたいと考えている。

公開審査会で指摘された上記の論点は、研究成果の意義をさらに深め、今後の研究の可能性を押し広げるためのものであり、本研究で得られた知見の価値を損なうものではなかった。刺激の自然さを重視する、ライブ実験ならではの欠点を含めた研究の問題点については、著者自らが認識し、将来の課題として位置付けている。むしろ、まだ多くのことが未知な研究領域である乳幼児の社会脳研究において、これまでの先行研究とは異なったアプローチに果敢に挑戦し、根気強く実験を積み重ね、高い独自性と新規性を有する結果を丁寧に導いている点は高く評価できる。

上記全ての点を鑑みて、審査員一同は、本論文を白野陽子君への博士（心理学）の学位の授与に値するものと判断する。

以上