

博士論文 平成 29 (2017) 年度

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

慶應義塾大学大学院社会学研究科

白野陽子

目次

1. 序論	6
1.1. 社会的認知	6
1.2. 発達初期における社会的相互作用の役割	7
1.3. 社会的信号	8
1.4. 随伴性	9
1.5. 社会脳ネットワーク	10
1.6. TPJ 領域の役割	11
1.7. 乳幼児の社会脳ネットワーク	11
1.8. 本研究の目的	13
2. 実験 1：自然な社会的相互作用における 12 ヶ月児の脳反応	16
2.1. 目的	16
2.2. 方法	16
2.2.1. 実験参加児	16
2.2.2. 刺激・装置	17
2.2.3. fNIRS の装置と計測方法	19
2.2.4. 手続き	19
2.2.5. 手続きのフィデリティ	20
2.2.6. データの処理法	21
2.3. 結果	23
2.3.1. fNIRS 計測中の行動	23
2.3.2. fNIRS 計測の結果	25
2.3.3. 脳反応と社会性の関連	28
2.4. 考察	29
3. 実験 2：社会的相互作用におけるアイコンタクトと随伴性の有無に対する脳反応	33
3.1. 目的	33
3.2. 方法	34
3.2.1. 実験参加児	34
3.2.2. 刺激・装置	35
3.2.3. fNIRS の装置と計測方法	36
3.2.4. 手続き	37

3.2.5. 手続きのフィデリティ	39
3.2.6. データの処理法	39
3.3. 結果	41
3.3.1. fNIRS 計測中の行動	41
3.3.2. fNIRS 計測の結果	43
3.3.3. 脳反応と社会性の関連	47
3.3.4. フォローアップ結果（2歳時点での言語と社会性の発達スコア）	50
3.4. 考察	51
4. 実験3：随伴刺激の違いによる脳反応の検討	57
4.1. 目的	57
4.2. 実験3-1：社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激（Social-positive 条件）	58
4.2.1. 目的	58
4.2.2. 方法	58
4.2.2.1. 実験参加児	58
4.2.2.2. 刺激・装置	59
4.2.2.3. fNIRS の装置と計測方法	60
4.2.2.4. 手続き	60
4.2.2.5. 手続きのフィデリティ	60
4.2.2.6. データの処理法	60
4.2.3. 結果	61
4.2.3.1. fNIRS 計測中の行動	61
4.2.3.2. fNIRS 計測の結果	63
4.2.3.3. 脳反応と社会性	64
4.2.4. 考察	65
4.3. 実験3-2：社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激（Social-negative 条件）	68
4.3.1. 目的	68
4.3.2. 方法	68
4.3.2.1. 実験参加児	68
4.3.2.2. 刺激・装置	69
4.3.2.3. fNIRS の装置と計測方法	69

4.3.2.4. 手続き	69
4.3.2.5. 手続きのフィデリティ	69
4.3.2.6. データの処理法	69
4.3.3. 結果	70
4.3.3.1. fNIRS 計測中の行動	70
4.3.3.2. fNIRS 計測の結果	70
4.3.3.3. 脳反応と社会性	71
4.3.4. 考察	71
4.4. 実験 3-3 : 社会的に意味のない随伴刺激 (Non-social 条件)	72
4.4.1. 目的	72
4.4.2. 方法	72
4.4.2.1. 実験参加児	72
4.4.2.2. 刺激・装置	73
4.4.2.3. fNIRS の装置と計測方法	73
4.4.2.4. 手続き	74
4.4.2.5. 手続きのフィデリティ	74
4.4.2.6. データの処理法	74
4.4.3. 結果	74
4.4.3.1. fNIRS 計測中の行動	74
4.4.3.2. fNIRS 計測の結果	75
4.4.3.3. 脳反応と社会性	76
4.4.4. 考察	78
4.5. 総合考察	80
5. 実験 4 : 随伴刺激の違いによる脳反応の検討 : 乳幼児における社会脳	
ネットワーク	83
5.1. 目的	83
5.2. 実験 4-1 : 社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激 (Social-positive	
条件)	84
5.2.1. 目的	84
5.2.2. 方法	84
5.2.2.1. 実験参加児	84
5.2.2.2. 刺激・装置	85

5.2.2.3.	fNIRS の装置と計測方法	85
5.2.2.4.	手続き	86
5.2.2.5.	手続きのフィデリティ	86
5.2.2.6.	データの処理法	86
5.2.3.	結果	87
5.2.3.1.	fNIRS 計測中の行動.....	87
5.2.3.2.	fNIRS 計測の結果	89
5.2.3.3.	皮質領域間の機能的結合	96
5.2.3.4.	脳反応と社会性.....	97
5.2.4.	考察	98
5.3.	実験 4-2: 社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激 (Social-negative 条件)	100
5.3.1.	目的	100
5.3.2.	方法	101
5.3.2.1.	実験参加児	101
5.3.2.2.	刺激・装置	102
5.3.2.3.	fNIRS の装置と計測方法	102
5.3.2.4.	手続き	102
5.3.2.5.	手続きのフィデリティ	102
5.3.2.6.	データの処理法	103
5.3.3.	結果	103
5.3.3.1.	fNIRS 計測中の行動.....	103
5.3.3.2.	fNIRS 計測の結果	104
5.3.3.3.	皮質領域間の機能的結合	107
5.3.3.4.	脳反応と社会性.....	110
5.3.4.	考察	110
5.4.	実験 4-3: 社会的に意味のない随伴刺激 (Non-social 条件)	112
5.4.1.	目的	112
5.4.2.	方法	113
5.4.2.1.	実験参加児	113
5.4.2.2.	刺激・装置	114
5.4.2.3.	fNIRS の装置と計測方法	114
5.4.2.4.	手続き	114

5.4.2.5. 手続きのフィデリティ	114
5.4.2.6. データの処理法	114
5.4.3. 結果	115
5.4.3.1. fNIRS 計測中の行動	115
5.4.3.2. fNIRS 計測の結果	116
5.4.3.3. 皮質領域間の機能的結合	118
5.4.3.4. 脳反応と社会性	120
5.4.4. 考察	123
5.5. 総合考察	125
6. 総合考察	130
6.1. 本研究の目的と結果のまとめ	130
6.2. 乳幼児における社会的信号処理の脳内基盤	133
6.3. 乳幼児期における社会脳ネットワークの発達	135
6.4. 社会的相互作用における随伴性の重要性	137
6.5. 母子の社会性および言語・社会性発達との関連	138
6.6. 本研究の限界と改善すべき点	139
6.7. 本研究の意義と今後の展望	141
7. 引用文献	143
8. 関連業績	162
9. 謝辞	165

1. 序論

1.1. 社会的認知

人間は社会的存在であり、人間を理解する上で他者との社会的コミュニケーションに関連する社会的認知能力の解明は必要不可欠である。例えば、霊長類において全脳に対する新皮質の割合の種間比較を行なった Dunbar (1998)は、新皮質の割合と相関があったのは生態的な要因ではなく、集団のグループサイズであることを発見した。この結果より、霊長類の新皮質は社会的環境に適応するために進化したとする社会脳仮説を提唱している。社会的認知は、広義には「自分と同種の生物への行動を支える認知過程」と定義される (Adolphs, 1999)。社会的認知は特に霊長類において観察され、集団生活を送る上で必要な社会的行動を支える高次の認知機能である。人間の社会的認知に関しては、「他者の意図や信念などの内的状態の理解を可能にする情報処理過程」と定義することができる (Adolphs, 2009)。

人間の社会的認知には多様な側面があるが、代表的な機能として心の理論 (Theory of Mind, あるいは mentalizing) がある。心の理論とは、他者の表情や言動、行動から相手の心的状態を類推、理解する機能を指す (Baron-Cohen, Leslie, & Frith, 1985; Premack & Woodruff, 1978)。完全な心の理論は一般的に 4~5 歳頃に獲得されると言われているが、例えば社会的コミュニケーション及び対人的相互作用に持続した困難さを示す自閉症スペクトラム障害 (ASD) 児においては、心の理論の障害が報告されている (Baron-Cohen et al., 1985)。さらに、誤信念課題に通過する高機能 ASD 成人においても、他者の心的状態を「自発的に」推論する力が弱いことが知られている (Senju, Southgate, White, & Frith, 2009)。人間が社会生活を送るうえで心の理論は極めて重要な機能を有しているが、その発達過程についてはほとんどわかっていない。先行研究より 15 ヶ月の乳児でも他者の誤信念を理解しているという証拠が示されており (Onishi & Baillargeon, 2005)、乳幼児期において、すでに心の理論の萌芽が確認されている。しかし、こうした高次の社会的認知能力を乳幼児がどのように獲得・向上させているのかについては、多くのことが明らかにされていない。そのため本研究では、社会的相互作用における社会的刺激 (人間に由来する刺激) への乳児の脳反応を計測し、高次の社会的認知機能を支える社会脳ネットワークの発達を明らかにすることを目的とした。

1.2. 発達初期における社会的相互作用の役割

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、他者との社会的接触が著しく少ない社会的に隔離された環境で育った子どもは、認知・行動面において、様々な機能障害を示すことが知られている (Chugani et al., 2001; Eluvathingal et al., 2006; Nelson et al., 2007; Rutter, 1998)。また、生後 2-3 歳頃までの、乳幼児の模倣や単語などの様々な学習において、他者との社会的相互作用のある生の学習（以降ライブと呼ぶ）は可能でも、ビデオでの学習は困難であることがわかっており、video deficit 効果として知られている (Anderson & Pempek, 2005; Barr, 2010)。この現象は、模倣課題 (Barr & Hayne, 1999; Barr, Muentener, & Garcia, 2007; Barr, Muentener, Garcia, Fujimoto, & Chávez, 2007; Hayne, Herbert, & Simcock, 2003; Krcmar, 2010; Nielsen, Simcock, & Jenkins, 2008)、対象の探索課題 (Deocampo & Hudson, 2005; Schmitt & Anderson, 2002)、単語の学習課題 (DeLoache et al., 2010; Krcmar, 2010; Krcmar, Grela, & Lin, 2007; Linebarger & Walker, 2005; Robb, Richert, & Wartella, 2009) など、様々な課題において確認されている。例えば、英語圏に住む 9-10 ヶ月児を対象に、ライブとビデオでの中国語学習の効果を比較した実験では、ライブでの学習を行なった乳児のみ、中国語に特有の音素の弁別が可能であったことが示されている (Kuhl, Tsao, & Liu, 2003)。同様に、日本語圏に住む 5-6 ヶ月児と 9-10 ヶ月児に対し、ライブまたはビデオで人形の名前を学習させた研究では、やはりライブでの学習を行なった乳児のみ、人形と名前の関係性を学習できたことが示され (Hakuno, Omori, Yamamoto, & Minagawa, 2017)、乳児期の学習における社会的相互作用の重要性が指摘されている。また、機能的近赤外分光法 (functional near-infrared spectroscopy: fNIRS) を用いた脳機能イメージング研究では、6-7 ヶ月の乳児は、ライブ条件では人とももの動きに対して異なる反応を示したが、ビデオ条件では 2 種類の動きに対する反応に違いは観察されなかった (Shimada & Hiraki, 2006)。事象関連電位 (event-related potentials: ERPs) を使った別の研究では、18 ヶ月児は、二次元よりも三次元の対象に対してより早く反応することがわかっている (Carver, Meltzoff, & Dawson, 2006)。これらのことから、現実世界とバーチャルな世界に対する乳幼児の反応は異なっており、ライブ刺激よりも感覚情報の乏しいビデオ刺激の処理は、乳幼児にとってより困難であることが明らかとなっている。

1.3. 社会的信号

一般的に養育者は子どもに対してアイコンタクト、体を撫でる、子どもの行動に随伴した刺激、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 (infant-directed speech: IDS) 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 (Bornstein, Tamis-LeMonda, Chun-Shin, & Haynes, 2008; Csibra, 2010; Papoušek & Papoušek, 1989)。こうした社会的信号は直示的信号 (ostensive signal) 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、情報の送り手に対する受け手の注意を誘発する機能があるとされる (Csibra, 2010; Csibra & Gergely, 2009)。乳児はこのような自己に向けられた (自己関連の) 他者の行動あるいは行動の変化に対して、高い感受性を示すことが明らかとなっている (Grossmann, 2015)。実際これらの社会的信号が、乳幼児期において言語などの学習を促進することが、多くの研究で確かめられている (Altwater-Mackensen & Grossmann, 2015; Elsabbagh et al., 2013; Gros-Louis, West, & King, 2014; Nicely, Tamis-LeMonda, & Bornstein, 1999; Senju & Csibra, 2008; Tamis-LeMonda, Bornstein, & Baumwell, 2001; Weisleder & Fernald, 2013)。例えば、大人が乳児の発声に時間的に随伴させた反応を行なうことで、乳児の発声頻度が高まることはよく知られている (Dunst, Gorman, & Hamby, 2010; Pelaez, Virués-Ortega, & Gewirtz, 2011a; Ramey, Hieger, & Klisz, 1972; Rheingold, Gewirtz, & Ross, 1959; Weisberg, 1963)。また、母親が10分間乳児の喃語に対して随伴模倣を行なった場合と、母親がタイミングをずらして模倣した場合の乳児の喃語を比較評価した研究では、母親が随伴模倣行なった条件において、乳児はより複雑で発達した喃語を多く発生させることがわかっている (Goldstein, King, & West, 2003; Goldstein & Schwade, 2008)。音声知覚の学習においても、IDS (Liu, Kuhl, & Tsao, 2003; Singh, Nestor, Parikh, & Yull, 2009)、アイコンタクト (Wu, Tummeltshammer, Gliga, & Kirkham, 2014)、乳幼児の行動に随伴した反応 (Miller & Gros-Louis, 2013; Rollins, 2003)、社会的な接触 (Seidl, Tincoff, Baker, & Cristia, 2015) といった様々な社会的信号の促進効果が認められている。乳幼児期の理解・表出語には、養育者との相互作用場面において多く使用されるような単語 (あいさつ語など) の占める割合が大きいこともわかっている (小椋, 1999)。

1.4. 随伴性

自分の行動に時間的に近接して後続する外界事象は随伴的反応性 (contingent responsiveness あるいは contingent responsivity) と呼ばれ、時間的な随伴性を持った随伴刺激はアイコンタクトと同様に非常に強力な社会的信号であるとされている (Csibra, 2010; Hiraki, 2006; Kuhl, 2007)。例えば、母親と6ヶ月児の相互作用場面において、多くの相互随伴的動作を示す母子の乳児は、随伴的動作が多くない母子の乳児に比べ、音声知覚における発達が早いとする結果が報告されている (Elsabbagh et al., 2013)。また、2歳児を対象にライブでの学習、モニターを介したオンラインの学習、モニターを介したオフラインの学習の効果を比較した研究では、随伴刺激のあるライブ、あるいはオンラインのビデオ学習を行なった幼児のみ新規単語 (動詞) の意味を正しく獲得したことが示されている (Roseberry, Hirsh-Pasek, & Golinkoff, 2014)。このような随伴刺激に対する感受性は生後間もない乳児においても見られることが、母子の授乳行動を調べた研究からわかっている (正高, 1993)。授乳の際、乳児はリズムカルに母乳を吸った後、吸うのを数秒間休む。その間母親は、乳児をあやしたりゆすったりしてもっと吸うように働きかけを行なうが、最初はタイミングが合わず、乳児が母乳を吸うのを邪魔してしまったりする。ところが、生後2週間を過ぎる頃になると、乳児が吸うのを止めたタイミングで母親が働きかけを行ない、それに応じて乳児が再度吸い始めるといったスムーズな交互交代行動が見られるようになる。正高 (1993) は、生後2週間の乳児を対象に、乳児が吸うのを休んでいるタイミングで母親の働きかけを受ける群と、ランダムなタイミングで働きかけを受ける群の吸啜反応を比較した。その結果、合計の吸啜時間に差はなかったにもかかわらず、ランダムなタイミングで母親の働きかけを受けた群では、休憩の頻度が有意に高くなった。この結果は、母親の随伴的反応性を確認するために、乳児はあえて休憩を多くして母親の反応を観察していると解釈することができる。また、生後2-3ヶ月の乳児と、別室にいる母親が、モニターを介して相互作用している様子を観察した研究では、母親の映像に時間的な遅延がない条件と、ある条件における、乳児の反応を比較した (Murray & Trevarthen, 1985)。その結果、遅延がない条件に比べ、遅延がある条件では、映像への注視や笑顔といった反応が減少し、反対に泣き・ぐずりといった反応が増加することが示された。母親とのモニターを介した社会的相互作用において、乳児が随伴刺激のない (遅延がある) 条件よりも、随伴刺激のある (遅延がない) 条件を選好

するとした結果は、他の先行研究においても確認されている (Nadel, Carchon, Kervella, Marcelli, & Reserbat-Plantey, 1999; Stornark & Braarud, 2004)。さらに別の研究では、母親よりも応答性が低い、あるいは高い、見知らぬ大人（別の乳児の母親）との社会的相互作用場面では、母親との社会的相互作用場面よりも、乳児の笑顔や発声が少なくなることがわかっている (Bigelow & Rochat, 2006)。これらの研究結果は、乳児が随伴刺激の受動的な受け手ではなく、随伴刺激を能動的に要求していることを示唆している (Csibra, 2010)。

1.5. 社会脳ネットワーク

成人の社会的認知能力に関わる脳領域については、fMRI (functional magnetic resonance imaging) や PET (positron emission tomography) といった空間分解能に優れた脳機能イメージング法を用いた実験がすでに数多く行なわれている。社会的認知に関わる脳の中心領域として、前頭前野 (prefrontal cortex: PFC)、紡錘状顔領域、扁桃核、上側頭溝 (superior temporal sulcus: STS)、側頭頭頂接合部 (temporoparietal junction: TPJ) 領域が知られており、これらの領域が社会脳ネットワーク (mentalizing network) を形成していると考えられている (Adolphs, 2003, 2009; Brothers, 1990; Frith & Frith, 1999)。心の理論に関する脳機能イメージング研究のレビューを行なった Carrington and Bailey (2009) は、PFC, STS, TPJ, 前帯状回 (anterior cingulate cortex: ACC) といった脳領域が、心の理論の中核領域であると結論づけている。中でも TPJ (主に角回) 領域と内側前頭前野 (medial PFC: mPFC) は、誤信念課題や社会的失言課題などの心の理論の働きに関与する領域として数多くの研究で報告されている (Amodio & Frith, 2006; Gallagher & Frith, 2003; Mitchell, Banaji, & Macrae, 2005; Santiesteban, Banissy, Catmur, & Bird, 2012; Saxe & Kanwisher, 2003; Schurz, Radua, Aichhorn, Richlan, & Perner, 2014; van der Meer, Groenewold, Nolen, Pijnenborg, & Aleman, 2011)。先行研究より、TPJ 領域は、mPFC よりも早い段階で行為の暫定的な目的や意図の推論と、自己と他者の行為や意図の分離を行なっており、mPFC 領域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な心的状態の推論を行なっているとする社会脳ネットワークの仮説が提唱されている (Gallese, Keysers, & Rizzolatti, 2004; Keysers & Gazzola, 2007; Saxe & Powell, 2006; Uddin, Iacoboni, Lange, & Keenan, 2007; Van Overwalle, 2009)。実際の日常場面において我々が他者の行為 (例: 机の上のチョコレートに手を伸ばす) を知覚する際、低次な行為の意図

理解（例：チョコレートが食べたいのだろう）だけでなく、相手の心的状態についてのより高次の類推（例：甘いものは好きでないはずなのに、よほどお腹が空いているのだろう）を能動的に（半ば自動的に）行なっている。そのため高次の心的状態の推論を必要としないような課題においても、mPFCの賦活が見られると考えられている (Van Overwalle, 2009)。興味深いことに、TPJ領域は、正しい信念や事実よりも誤った信念や不確かな事実の処理においてより強い反応を示すが、mPFCはどちらに対しても同程度の反応を示すことがわかっている (Saxe & Powell, 2006; Sommer et al., 2007)。また、前頭葉の損傷患者は、単純な他者視点取得課題よりも欺き課題のようなより難易度の高い課題においてより顕著な困難さを示すことが明らかとなっている (Stuss, Gallup, & Alexander, 2001)。

1.6. TPJ領域の役割

TPJ領域は、頭頂葉と側頭葉が接合する領域に存在し、後部上側頭回 (posterior STS: pSTS)、縁上回、下頭頂小葉 (inferior parietal lobule: IPL)、角回にまたがる脳領域である (Donaldson, Rinehart, & Enticott, 2015)。TPJ領域は、社会的認知の他にも様々な認知機能との関連が指摘されており、Posner課題などにおける視覚的な注意の再定位 (Corbetta & Shulman, 2002)、言語処理 (Binder, Desai, Graves, & Conant, 2009)、運動主体感 (sense of agency) や体外離脱体験などの身体意識 (Blanke & Arzy, 2005; Farrer et al., 2003)においてもTPJの関与が示されている。運動主体感の研究では、環境内に変化をもたらした行為の主体を、自己ではなく他者などの外部に帰属する判断を行なう際に角回が賦活することが知られている (Haggard, 2017)。関連する複数のPETとfMRI研究結果のメタ分析を行なった研究から、角回を含むTPJ領域は「non-agency」の神経相関であることが示唆されている (Sperduti, Delaveau, Fossati, & Nadel, 2011)。これらことから、TPJ領域には複数の下位領域があり、それぞれ機能が分化している可能性が指摘されている (Carter & Huettel, 2013; Kubit & Jack, 2013; Scholz, Triantafyllou, Whitfield-Gabrieli, Brown, & Saxe, 2009)。

1.7. 乳幼児の社会脳ネットワーク

これまで乳児を対象としたERP研究から、乳児は発達初期より社会的刺激に対して特異的な脳反応を示すことが明らかとなっている。例えば、顔 (de Haan & Nelson, 1997; de Haan, Pascalis, & Johnson, 2002; Halit, de Haan, & Johnson, 2003),

表情 (Stahl, Parise, Hoehl, & Striano, 2010), 自分に向けられた視線 (Farroni, Csibra, Simion, & Johnson, 2002), 生物らしい動き (Hirai & Hiraki, 2005; Reid, Hoehl, & Striano, 2006), 共同注意 (Hoehl, Reid, Mooney, & Striano, 2008; Hoehl, Wiese, & Striano, 2008; Parise, Reid, Stets, & Striano, 2008; Striano, Reid, & Hoehl, 2006)などの社会的刺激に対して, 乳児の脳は選択的な反応を示すことが報告されている。また, 脳波よりも空間分解能に優れた fNIRS を用いた脳機能イメージング研究より, 成人と同様に乳児においても社会的刺激の処理には, PFC や STS, TPJ 領域が関わっていることが示されている。前頭葉にある PFC 領域の計測を行なった先行研究では, 自分に向けられた視線 (Grossmann et al., 2008; Grossmann, Parise, & Friederici, 2010), 自分の名前を呼ばれたとき (Grossmann, Parise, et al., 2010; Imafuku, Hakuno, Uchida-Ota, Yamamoto, & Minagawa, 2014), IDS (Saito et al., 2007), 自分の母親の笑顔 (Minagawa-Kawai et al., 2009) に対して PFC 領域が選択的に反応することを明らかにしている。また, 共同注意場面における 5 ヶ月児の脳反応を調べた fNIRS 研究では, 相手が乳児に視線を向けた後に, ものへと視線を移す条件では, ものが無い方向へ視線を移す条件や最初に乳児を見ずにものへと視線を向ける条件に比べて左の背側前頭前野 (dorsal PFC: dPFC) の活動が増加することが示されている (Grossmann & Johnson, 2010)。さらに, 乳児が注意を向けた方向に相手も視線を向ける条件, つまり相手が乳児の視線を追従するような条件においても, dPFC の活動の増加が認められている (Grossmann, Lloyd-Fox, & Johnson, 2013)。STS や TPJ 領域といった側頭葉の反応については, 正立顔 (Otsuka et al., 2007), 自分に向けられた視線 (Grossmann et al., 2008), 目・口・手の動き (Lloyd-Fox, Blasi, Everdell, Elwell, & Johnson, 2011), 顔の動画 (Lloyd-Fox et al., 2009)といった社会的刺激に対する賦活が確認されている。また, 随伴刺激について, 乳児自身の上半身の動きを撮影しつつ, 遅延のないビデオフィードバックと, 3 秒の遅延のあるビデオフィードバックを与えた際の 5 ヶ月児の側頭部の反応の比較を行なった Filippetti, Lloyd-Fox, Longo, Farroni, and Johnson (2014)は, 遅延のないビデオフィードバックに対して右の pSTS 領域が反応することを明らかにした。さらに Filippetti et al. (2014)は, 実際に乳児が頬を実験者にブラシでなでられている場面のビデオフィードバックを行なったところ, 遅延のある条件ではなく, 遅延のない条件において, 同様の脳部位において活動の増加が見られたと報告している。

このように, 成人と同様に乳児においても, 社会的刺激の処理には PFC, STS,

TPJ 領域が関与していることが明らかになってきている。しかしながら、いずれの研究も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、実際の日常場面における乳児の反応を反映していない可能性がある。このため、実際に「人間」が乳児と対面し、自然な相互作用場面における脳活動変化を検討する必要がある。しかし、現状としては fMRI や PET ではそのような自然場面の計測は不可能であるし、技術的には計測可能な fNIRS や脳波計でも、実際の他者との相互作用場面における脳反応を調べた研究はほとんど行なわれていない (Naoi & Minagawa-Kawai, 2009; Parise et al., 2008; Striano et al., 2006; Urakawa, Takamoto, Ishikawa, Ono, & Nishijo, 2014)。実際の社会的相互作用場面における乳児の脳反応を調べた数少ない fNIRS 研究の一つとして、Lloyd-Fox, Széplaki-Köllöd, Yin, and Csibra (2015)がある。この研究では、実験者が自分に向かって歌っている条件と、他の乳児に向かって歌っている条件での 6 ヶ月児の脳反応を比較検討した。その結果、自分に向かって歌っている条件においてのみ、右の下前頭回 (inferior frontal gyrus: IFG) 領域と STS 領域の活動が有意に増加することが示された。このような実際の社会的相互作用場面における乳幼児の脳反応の計測はほとんど行なわれておらず、検討が不十分である。加えて、先述したようなモニターやスピーカーから呈示する社会的刺激に対する脳反応の発達研究さえもその数は限られており、乳幼児期の社会脳発達についてはあまり多くのことはわかっていない (Grossmann, Oberecker, Koch, & Friederici, 2010)。さらにこれまでの乳幼児研究では、行動計測と脳活動計測が個別に検討されることが多く、社会的刺激に対する両者の反応がどのように対応するかについては明らかにされていない。

1.8. 本研究の目的

以上の先行研究からも示されたとおり、乳幼児の社会的刺激に対する脳機能発達については多くのことが明らかにされていないが、その脳活動計測についての手法としては、近年、特にライブの相互作用における fNIRS 計測の可能性が確立されてきた。そこで、本研究は、社会的認知活動の中でも社会的相互作用における社会的信号に着目し、社会的信号処理における脳機能の発達を明らかにすることを目的とした。本研究では、社会的信号を「実際 (ライブ) の人間が出している直示的信号」として定義して実験を行なった。このために、刺

激呈示をすべて参加児の目の前にいる実験者がライブで行ない、乳幼児における社会的相互作用の脳内基盤とその発達的变化についての検討を行なった。脳活動の計測には、大脳皮質の酸化ヘモグロビン (oxygenated-hemoglobin: oxy-Hb) と脱酸化ヘモグロビン (deoxygenated-hemoglobin: deoxy-Hb) の濃度変化を非侵襲的に計測可能な fNIRS を用いた。fNIRS は参加児の動きに関する制限が少なく、fMRI では不可能であったライブ刺激呈示が可能である (Lloyd-Fox et al., 2015)。また、脳波よりも空間分解能が優れているため、脳活動位置をある程度推定することができる。本研究では先行研究において社会的信号との関連が認められている STS-TPJ 領域を中心とする側頭領域と前頭領域の一部に着目し (Lloyd-Fox et al., 2015)、以下の 4 つの目的で実験を行なった。(1) 乳幼児において社会的信号の処理を担っている脳領域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 (図 1)。

実験 1 では、他者との自然な遊び場面での社会的信号に対する脳反応の計測手法の確立を目的とし、2 つの社会的場面 (共同注意、歌を歌う) における 12 ヶ月児の r (右) STS-TPJ 領域の計測を行なった。実験 2 では、2 種類の社会的信号 (アイコンタクトと乳児の行動に随伴させた刺激) の有無を独立変数とし、左右の側頭部、前頭部と頭頂部の一部の脳反応を検討した。実験 2 においては、6-8 ヶ月児と 10-13 ヶ月児における脳活動の計測を行ない、発達的变化についての検討を行なった。また、実験者や母親との遊び場面における参加児の視線や社会的行動についての評価を行ない、脳反応との関連を調べた。さらに、その後の言語発達との関連を調べることで、乳児期の社会的認知と言語獲得との関連についても検討した。実験 3 では、随伴刺激の違いによる脳反応の検討を目的とし、社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激、社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激、社会的に意味のない随伴刺激の有無をそれぞれ独立変数として 6-8 ヶ月児の脳反応を計測した。実験 2 と同様に、脳反応と社会性との関連についても検討した。実験 4 では、実験 3 と同様に随伴刺激の違いによる脳反応の検討を目的として側頭部と同時に前頭部の脳反応を計測し、皮質領域間の機能的結合についての検討を行なった。さらに、4-5 ヶ月児と 6-7 ヶ月児における脳活動の計測を行ない、初期の乳児期における発達的变化についての検討を行

なった。

実験1

社会的相互作用への反応 (rSTS-TPJ領域)

12-14M



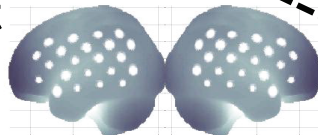
•共同注意(三項関係)

•二者間の相互作用(二項関係)

実験2

社会的信号への反応
(左右の側頭部)

6-8M & 10-13M



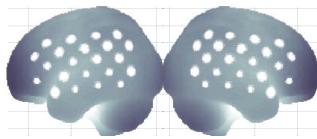
•随伴刺激(笑顔・随伴模倣・随伴反応)

•アイコンタクト(非随伴)

実験3

様々な随伴刺激(左右の側頭部)

6-8M

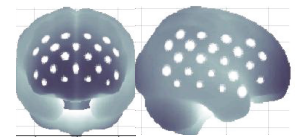


- ポジティブ(笑顔)
- ネガティブ(目をそらす)
- 非社会的(光る)

実験4

様々な随伴刺激(前頭と側頭部)

4-5M & 6-7M



- ポジティブ(笑顔)
- ネガティブ(無表情)
- 非社会的(光る)

図1. 本研究の実験概略

2. 実験 1：自然な社会的相互作用における 12 ヶ月児の脳反応

2.1. 目的

これまでの先行研究の多くは、ビデオやスピーカーを通じた一方向的かつ人工的な刺激呈示に留まっており、実際の日常場面における乳児の反応を反映していない可能性があった (Shimada & Hiraki, 2006)。このため、実際のモデルが乳児と対面し、自然な相互作用場面における脳活動変化を検討する必要がある。しかしながら、実際の他者との相互作用場面における脳反応を調べた fNIRS 研究はほとんど行なわれておらず、その計測手法も充分には確立されていない (Lloyd-Fox et al., 2015)。そこで本実験では、(1) ライブによる刺激呈示を行ない、本研究の目的とする自然な社会的相互作用場面における乳児の脳活動の計測に fNIRS が有用であるか検討した。さらに実験 1 では、(2) 2 種類の異なる社会的相互作用 (Joint Attention (JA) 条件：絵本に対する共同注意を伴う三項関係の相互作用, Interaction (I) 条件：手遊び歌を歌う二項関係の相互作用) 場面において、アイコンタクト、IDS、随伴刺激といった社会的信号に対する 12-14 ヶ月児の脳反応を検討した。特に、社会的信号の処理において rSTS-TPJ 領域が果たしている役割に焦点を当てて検討を行なった。成人と同様に乳児においても社会的刺激の処理には STS-TPJ 領域が関与していることが明らかとなっていることから (Lloyd-Fox et al., 2011; Lloyd-Fox et al., 2009; Otsuka et al., 2007)、実験者との社会的相互作用のないベースライン条件に比べて、社会的相互作用のある JA 条件と I 条件では STS-TPJ 領域の活動が増加すると予想した。さらに、成人や子どもを対象とした先行研究において pSTS-TPJ 領域は誤信念課題といった心の理論課題との関連が認められており (Kobayashi, Glover, & Temple, 2007; Schurz et al., 2014; Wiesmann, Schreiber, Singer, Steinbeis, & Friederici, 2017)、また、発達初期において共同注意が心の理論の発達の重要な基礎をなすと考えられることから (Charman et al., 2000)、共同注意を促す JA 条件では、単純な二者間の相互作用である I 条件よりも pSTS-TPJ 領域の活動の増加が大きくなると予想した。

2.2. 方法

2.2.1. 実験参加児

解析の基準を通過した、12-14 ヶ月児 30 名 (女児 10 名) のデータを採用した。本実験はロンドンで実施しているが、すべての乳児は英語を母語としており、特に健康上の問題のない定型発達児であった。この他にも 4 名の乳児が参加し

たが、それぞれ実験の手続きに不備があった（3名）、fNIRS計測中のぐずりにより計測不能であった（1名）ため今回の解析には加えなかった。30名の実験参加児のうち、ビデオ撮影に不備のあった2名は計測中の行動データが得られなかったため、fNIRSデータのみ採用した。同様に、30名中9名の実験参加児において、それぞれ動きによるノイズ混入のためfNIRSデータの解析が困難であった（4名）、fNIRS計測中のぐずり・不注意により各刺激条件の試行を必要数採用できなかった（3名）、fNIRS計測に不備があった（1名）、プローブの装着を嫌がった（1名）ため、fNIRSデータの分析からは除外し、計測中の行動データのみ解析した。そのため、最終的な解析に用いたのは、計測中の行動データ28名（日齢 $M=396.7\pm 23.8$, 女児9名）、fNIRSデータ21名（日齢 $M=388.4\pm 19.7$, 女児10名）であった。fNIRSデータを採用した21名の実験参加児の頭囲、頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ、前額を介した左右の耳介前点間の長さの平均値は、順に47.3 cm ($S.D. = 1.4$), 26.9 cm ($S.D. = 1.3$), 22.9 cm ($S.D. = 1.0$)であった。本研究の実施にあたり、実験参加児の保護者に対して研究参加について事前に説明し、同意を得た。本研究は Department of Psychological Science, Birkbeck, University of London における研究倫理委員会の承認を得て実施した（参照番号：131451）。

2.2.2. 刺激・装置

乳児の前に座った実験者が刺激を呈示した。fNIRS計測では基本的にベースライン区間と比較したターゲット区間のヘモグロビン濃度の相対変化量を測定する。そのため、まずベースライン条件として、実験者は乳児との相互作用が生じることを避けるために目を伏せ、黙った状態で動くおもちゃの呈示を行なった。ベースライン条件用として多少の音が出る4種類のおもちゃが用意され、実験者は試行ごとにランダムにおもちゃを選んで呈示した。ターゲット条件としては、Joint Attention (JA) 条件と Interaction (I) 条件の2条件を設定した（図2）。JA条件では、実験者は絵本を使って乳児の共同注意を促すような遊びを実施した。具体的には、実験者が乳児と目を合わせる、絵本を指差す、絵本に出てくる動物の名前を呼ぶという自然な共同注意場面を再現した。I条件では、実験者は常に乳児の顔を見ながら手遊び歌（例：きらきら星）や手を使った遊び（例：いないいないばあ）を行なった。これらは、JA条件においては「実験者」、「乳児」、「もの」の三項関係の相互作用場面での乳児の脳反応を、I条件におい

では「実験者」と「乳児」の二項関係の相互作用場面での脳反応を検討することを意図していた。乳児の注意を喚起するため、どちらの条件においても実験者は対乳児音声（infant-directed speech: IDS）や対乳児動作を使用し、目を大きく開き笑いかけるといったポジティブな態度で刺激を呈示した。実験ではスピーカーから20秒ごとに短いビーブ音が呈示され、試行の開始と終了を実験者に合図した。30名中15名は実験者Aが、8名は実験者Bが、4名は実験者Cが、残りの3名は実験者Dが遊びの相手となって実験を行なった。これら4人の実験者はすべて女性であった。実験者には事前に予備実験の様子を撮影した訓練ビデオを見てもらった上で以下の教示を行なった。(1) 試行の切り替えが自然に行なわれるように、ビーブ音が呈示された後は動作や話しかけを素早く完結させてから次の試行に移る、(2) 試行が終わったら、おもちゃや絵本は実験者の左横にあるテーブルに毎回戻す、(3) I条件で行なう4種類の手遊び歌を覚え、歌は試行ごとに変える、(4) ターゲット条件ではIDSや対乳児動作を用いてアイコンタクトを取りながらポジティブな態度で刺激の呈示を行なう、(5) ベースライン条件では乳児が飽きないようにおもちゃを動かしながら呈示するが、目は伏せてアイコンタクトを避ける。実験の様子は乳児の左側に位置したカメラによって記録され、ベースライン条件において実験者が目を合わせたり、笑いかけを行なったりしたことがビデオで確認された2名分のデータについては、実験の手続きに不備があったとして分析から除外した。

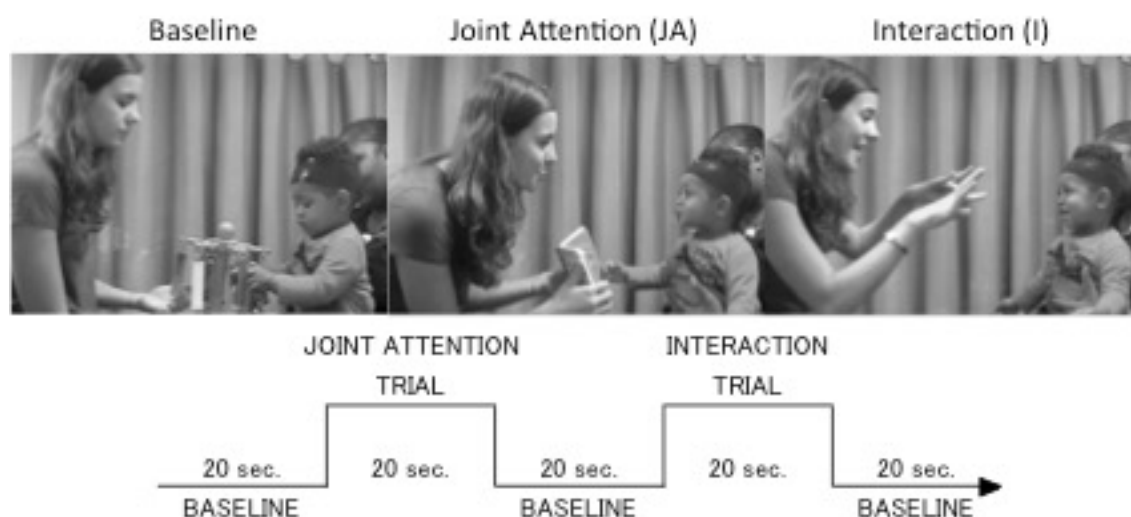


図2. 実験の様子（上）と実験で用いたブロックデザイン（下）

2.2.3. fNIRS の装置と計測方法

脳活動の計測には、780nm と 850nm の二波長の連続光を用いた多チャンネル fNIRS 計測装置 (UCL-NIRS mini topography system; Everdell et al., 2005) を使用した。6つの照射プローブと4つの検出プローブを2cm間隔で乳児の右側頭部に配置し、下前頭領域から後部側頭領域までの全12チャンネルの計測を行なった (図3)。プローブパッドの下行中央に位置する照射プローブが、それぞれの乳児において国際10-20法のT4と重なるように配置され、この下行がT6, T4, F8を結んだラインに沿うようにプローブパッドを装着した。fNIRS操作を担当した (乳児への刺激の呈示を行なった実験者とは別の) 実験者は、スピーカーから出力されるビーブ音を聞いてfNIRSシステムに試行の開始と終了を知らせるためのトリガー信号を手動で入力した。

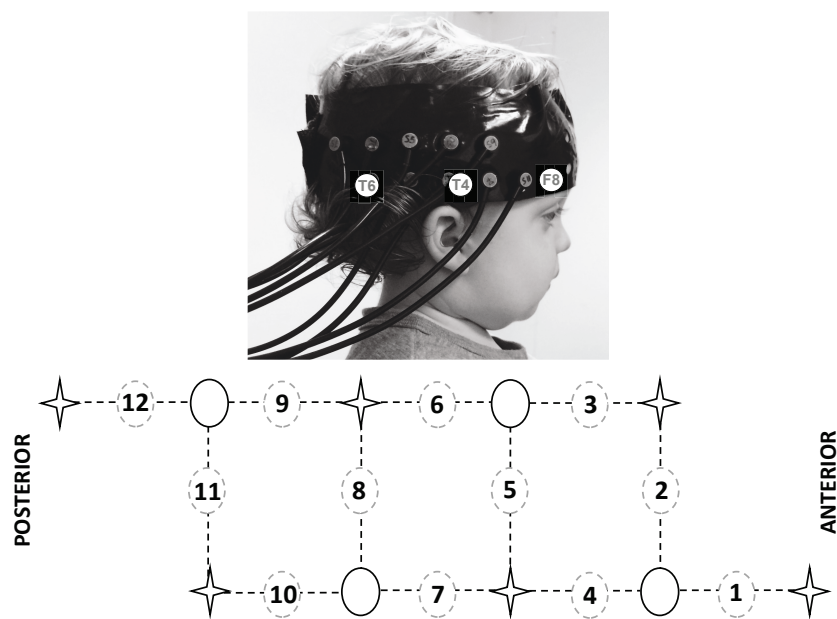


図3. 実験1で用いたfNIRSプローブパッドとプローブ配置。国際10-20法におけるT4がプローブの下行中央 (チャンネル4と7の間) に位置するように配置された。右側頭部に配置した照射プローブ (星) と検出プローブ (丸) の間の12チャンネル (点線丸) における脳活動を計測した。

2.2.4. 手続き

実験は自然な明るさの部屋で実施した。乳児は保護者のひざの上に座り、実験者がfNIRSプローブパッドを乳児の頭に装着した。実験者である女性は乳児

と向かい合うように正面に座り、刺激の呈示を行なった。保護者には、乳児がぐずったり泣いたりした場合を除き、実験中は乳児に話しかけなどの働きかけを行なわないよう事前に教示した。fNIRS の計測手法はブロックデザインを採用し、2種類のターゲット条件（JA 条件と I 条件）はベースライン条件と交互に複数回呈示された（図 2）。ターゲット条件の呈示順は、JA, I, I, JA, I, JA, JA, I, JA, I の順番で繰り返され、ターゲット試行とベースライン試行の長さはどちらも 20 秒であった。各ターゲット条件を最大 6 試行ずつ行ない、乳児がぐずった、もしくは飽きたと実験者に判断された場合は途中で実験を中止した。

2.2.5. 手続きのフィデリティ

それぞれの実験者によって刺激の呈示が適切に行なわれたことを確認するため、実験の意図を知らない心理学専攻の大学院生が実験者の行動（IDS・発話内容の簡潔さ・ポジティブな表情や声・動作の流暢性）に関する評価を行なった。評価は、全参加児の約 25%（各実験者について 2 ビデオずつ）について 20 秒インターバル記録法を用いて実施した。その結果、実験者の各行動が正しく観察された試行の割合は、IDS が 100%（実験者 A：100%，実験者 B：100%，実験者 C：100%，実験者 D：100%）、発話内容が 97%（実験者 A：100%，実験者 B：100%，実験者 C：88%，実験者 D：100%）、ポジティブな表現が 88%（実験者 A：100%，実験者 B：100%，実験者 C：94%，実験者 D：56%）、動作の流暢性が 88%（実験者 A：100%，実験者 B：100%，実験者 C：94%，実験者 D：56%）であった。同様に、全参加児の約 25%（各実験者について 2 ビデオずつ）について実験者が乳児に視線を向けている時間の割合を試行ごとに算出した。実験者の注視率は行動コーディングソフト（GenobsX, Tokyo, Japan）を用いて 100 ms 単位でサンプリングされた。その結果、乳児の顔への実験者の平均注視率は、JA 条件 $40.7 \pm 18.2\%$ （実験者 A： $48.7 \pm 9.9\%$ ，実験者 B： $57.5 \pm 9.3\%$ ，実験者 C： $35.9 \pm 15.7\%$ ，実験者 D： $20.9 \pm 12.7\%$ ）、I 条件 $96.2 \pm 4.5\%$ （実験者 A： $95.7 \pm 4.6\%$ ，実験者 B： $96.8 \pm 6.9\%$ ，実験者 C： $96.5 \pm 3.2\%$ ，実験者 D： $95.6 \pm 3.3\%$ ）であった。実験者 A と B に比べ、実験者 C と D の JA 条件における乳児への平均注視率は 10%以上低い結果となった。本実験のデザインは参加者内計画であったため、実験者の態度の違いが条件間の活動の差に与えた影響は小さいと考えられたが、実験者 C と D が刺激の呈示を行なった 5 名の参加児

を除いて fNIRS データの再解析を行なったところ、全体的な結果に違いは見られなかった。

2.2.6. データの処理法

fNIRS 計測中の乳児の行動を記録したビデオデータについて行動コーディングを行ない、3 種類の従属変数を条件間で比較した。それらの従属変数は、(1) 「実験者の顔」と「もの (I 条件については実験者の手)」に対する注視率、(2) 「実験者の顔」と「もの (I 条件については実験者の手)」の間の視線の切り替え行動の回数、(3) 3 種類の社会的行動 (発声・笑顔・指差し) の生起時間割合であった。実験刺激への注視率は、試行ごとに注視時間が試行全体の長さ (約 20 秒) に占める割合として算出した。共同注意の指標となる視線の切り替え行動は、「実験者の顔」から「もの」、もしくは「もの」から「実験者の顔」への視線の移動回数として定義した。それぞれの社会的行動については、発声はぐずりや泣き声といったネガティブな発声を除いたポジティブまたは中性的な発声、笑顔は口角が上がった状態もしくは笑い声を立てている状態、指差しは一本の指 (主に人差し指) を伸ばし、特定のものを指し示している状態として定義した。試行ごとにそれぞれの生起時間が試行全体の長さ (約 20 秒) に占める割合として算出し、条件別に平均した。行動評価の採用基準については、実験刺激 (実験者の顔ともの) への注視率が 20%以上の試行とし、各条件最低 2 試行の有効データが得られた乳児のみを採用した。3 種類の従属変数それぞれについて、全参加児の平均値から $\pm 3SD$ 以上に相当する値を示した参加児は外れ値として除外して分析を行なった。それぞれの従属変数は、行動コーディングソフト (GenobsX, Tokyo, Japan) を用いて 100 ms 単位でサンプリングされた。ビデオ撮影に不備のあった 2 名については、計測中の詳細な行動データが得られなかったため行動評価の解析からは除外した。3 人目の (乳児への刺激の呈示を行なった実験者と fNIRS 操作を担当した実験者とは別の) 実験者がオンラインで行っていた計測中の乳児の反応の記録より、この 2 名の参加児の実験刺激への注視率は各試行 50%以上であったことが確認されたため、fNIRS データの解析には含めることとした (2 名の参加児を除いて fNIRS データの再解析を行なったところ、全体的な結果に違いは見られなかった)。

脳反応については、fNIRS で得られた oxy-Hb 濃度の相対変化量を神経活動の指標として用いた (Obrig & Villringer, 2003)。解析では、まず、(1) 実験刺激 (実

験者の顔とももの)への注視率が一定基準(ターゲット条件:50%以上,ベースライン条件:20%以上)に満たなかった試行と,(2)検出光量の変化をとらえたfNIRS信号について,アーチファクトによる信号変動を含むチャンネルを一定の基準(光の減衰率における変動係数が30%を超えたあるいはパワーの総和に対する単位周波数あたりのパワーが50%を超えたチャンネル)で除外した(Blasi, Phillips, Lloyd-Fox, Koh, & Elwell, 2010; Lloyd-Fox et al., 2009)。fNIRS信号に1.7 Hzのローパスフィルタを適用した後,刺激呈示4秒前からの44秒間を1ブロック(1ブロック=前のベースライン試行4秒+実験試行20秒+後ろのベースライン試行20秒)として分割し,背景ノイズを差し引くために各ブロックの前後4秒を利用した一次ベースラインフィッティングを行なった。その後,今回の実験参加児の年齢を考慮し平均光路長の値(differential pathlength factor)を5.13(Duncan et al., 1995)として計算した修正Beer-lambert則に基づいてoxy-Hbとdeoxy-Hb濃度の相対変化量(μM)を算出した。その際に体動アーチファクトによって非常に大きな信号変動を含む(oxy-Hb濃度の変化量がベースライン区間では $\pm 3.5 \mu\text{M}$,ターゲット区間では $\pm 15 \mu\text{M}$ を超えた)試行は除外した(Blasi et al., 2010; Lloyd-Fox et al., 2009)。その上で,JA条件とI条件それぞれ3試行以上と,全チャンネル数の2/3にあたる8チャンネル以上が残った乳児のみをその後の解析対象とした。

採用基準を通過した乳児それぞれのデータについて,JA条件とI条件についてチャンネルごとに加算平均を行なった。一般に,神経活動に伴う脳血流変化の典型パターンは,oxy-Hb濃度の増加およびdeoxy-Hb濃度の(比較的小さい)減少であるとされている(Lloyd-Fox, Blasi, & Elwell, 2010)。このヘモグロビン反応の解析にあたって,本実験は実際の社会的相互作用中の脳活動計測という新しい手法を取り入れた探索的研究であり,乳児やチャンネルによって変化量が最大となった反応ピークの潜時がどのように異なっているか調べるため,ターゲット区間において3つの解析窓(刺激呈示開始後15-20秒,20-25秒,25-30秒)を設定した。各解析窓におけるoxy-Hbの平均変化量と,刺激呈示前4秒間のベースラインにおける平均変化量についてチャンネルごとに t 検定を行なった。その結果を基にベースラインからのoxy-Hbの有意な変化を示しているチャンネルと解析窓を選択し,JA条件とI条件間で t 検定を用いて比較した。今回の解析では,oxy-Hbの有意な変化のみを報告し,oxy-Hbとdeoxy-Hbが同じ方向に変化した場合は,統計的に有意な変化であったとしても脳活動を反映して

いるとは言い難いため結果には含めなかった（グループ解析においてそのような反応を示したのはチャンネル 10 においてのみであった）。多重比較の補正には false discovery rate (FDR)を適用した。本実験はまだ探索的研究の段階であることから、FDR を用いた多重比較の補正無しの場合の結果も合わせて分析した。

2.3. 結果

2.3.1. fNIRS 計測中の行動

28名の参加児の有効試行数（ベースライン試行を含む）の平均は 20.9 ($S.D. = 4.8$) であり、合計計測時間の平均は 7.0 分 ($S.D. = 1.6$) であった。条件別の有効試行数の平均は、JA 条件 5.1 ($S.D. = 1.3$)、I 条件 4.9 ($S.D. = 1.2$) であった。参加児ごとの実験刺激への平均注視率は、ベースライン条件 0.86 ($S.D. = 0.09$)、JA 条件 0.89 ($S.D. = 0.08$)、I 条件 0.77 ($S.D. = 0.13$) となり、実験刺激である「実験者の顔」と「もの (I 条件では実験者の手)」への注視時間は I 条件において最も短くなった。

fNIRS 計測中の乳児の行動について、まず、実験刺激である「実験者の顔」と「もの (I 条件は実験者の手)」に対する条件別の注視率を図 4 に示す。ベースライン条件と JA 条件においては、乳児は「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が長く、I 条件においては「実験者の手」よりも「実験者の顔」への注視時間が長い傾向にあった。「実験者の顔」と「もの (I 条件は実験者の手)」に対する注視率を従属変数とする、実験条件要因（ベースライン条件・JA 条件・I 条件）×実験刺激要因（実験者の顔・もの）の 2 要因について対応のある分散分析を行なった。その結果、実験条件要因の主効果 ($F(2, 50) = 10.825, p < 0.001, \eta^2_p = 0.302$)と実験刺激要因の主効果 ($F(1, 25) = 197.825, p < 0.001, \eta^2_p = 0.888$)が統計的に有意であったのに加え、実験条件要因と実験刺激要因の有意な交互作用 ($F(2, 50) = 960.463, p < 0.001, \eta^2_p = 0.975$) が認められた。Bonferroni 法を用いた下位検定の結果、実験刺激全体への注視時間は、I 条件においてベースライン条件 ($p = 0.008$)や JA 条件 ($p = 0.002$)よりも有意に短くなったが、ベースライン条件と JA 条件の間には有意差は認められなかった ($p = 0.810$)。また、ベースライン条件、JA 条件、I 条件の全条件において、「実験者の顔」と「もの」への注視時間の間に有意差が認められ (すべて $p < 0.001$)、ベースライン条件と JA 条件においては、乳児は「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が長く、I 条件においては「実験者の手」よりも「実験者の顔」への注視時間が長いことが統

計的にも支持された。

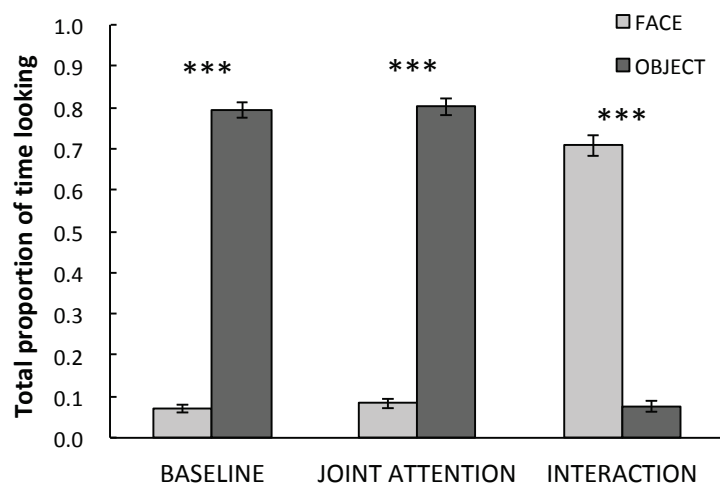


図 4. 「実験者の顔」と「もの (I 条件については実験者の手)」への平均注視率 (** $p < 0.001$). エラーバーは標準誤差を示す。

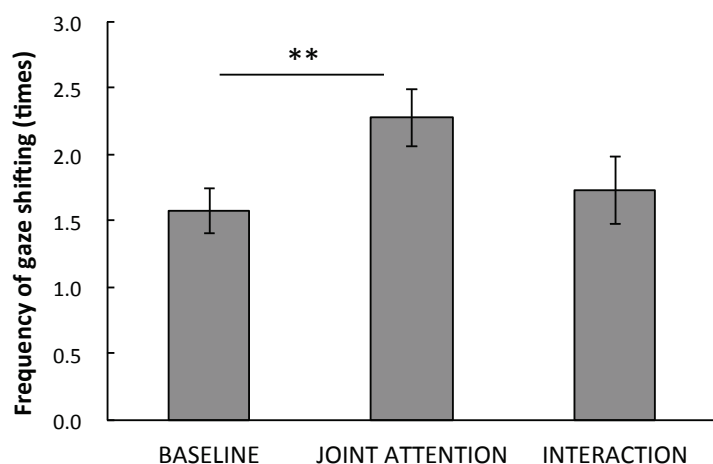


図 5. 「実験者の顔」と「もの (I 条件については実験者の手)」の間の視線の平均切り替え回数 (** $p < 0.010$). エラーバーは標準誤差を示す。

次に、「実験者の顔」と「もの (I 条件については実験者の手)」の間の視線の平均切り替え回数を図 5 に示す。ベースライン条件や I 条件に比べ、JA 条件における視線の切り替え回数が最も多くなる傾向にあった。「実験者の顔」と「もの (I 条件については実験者の手)」の間の視線の平均切り替え回数について、参加児内要因である実験条件要因 (ベースライン条件・JA 条件・I 条件) を独

立変数とした 1 要因の分散分析を行なった。その結果、実験条件要因の有意な主効果が認められ ($F(2, 54) = 4.039, p = 0.023, \eta^2_p = 0.130$), Bonferroni 法を用いた下位検定の結果、ベースライン条件に比べて JA 条件では視線の切り替え回数が有意に多いことが明らかとなった ($p = 0.008$)。JA 条件と I 条件間には有意差は認められなかった ($p = 0.134$)。

最後に、条件ごとの 3 種類の社会的行動（発声・笑顔・指差し）の生起時間割合を図 6 に示す。社会的行動（発声・笑顔・指差し）の生起時間割合を従属変数とした、実験条件要因（ベースライン条件・JA 条件・I 条件）×行動要因（発声・笑顔・指差し）の 2 要因について対応のある分散分析を行なった。いずれも有意な主効果は認められなかったが（どちらも $p > 0.050$ ）、実験条件要因と行動要因の有意な交互作用が認められた ($F(1.68, 32.00) = 3.921, p = 0.036, \eta^2_p = 0.171$, Greenhouse-Geisser 補正)。Bonferroni 法を用いた下位検定の結果、乳児の発声の生起時間は、ベースライン条件において I 条件よりも有意に長くなったが ($p = 0.038$), JA 条件との間に有意差は認められなかった ($p = 0.136$)。笑顔や指差しにおいては条件間で有意差は認められなかった（すべて $p > 0.050$ ）。

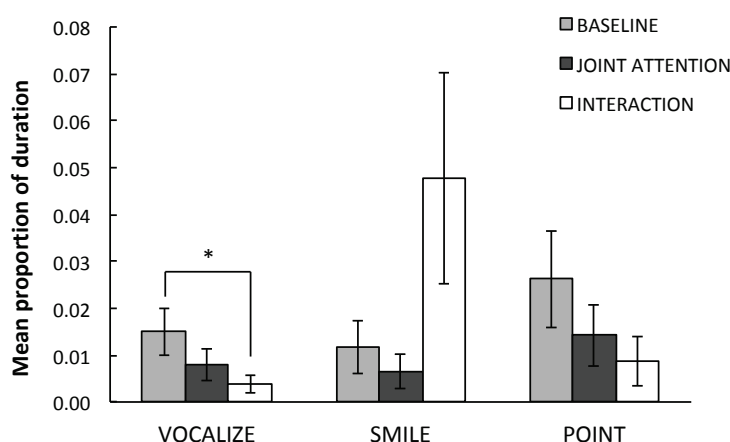


図 6. 社会的行動（発声・笑顔・指差し）の平均生起時間割合 (* $p < 0.050$)。エラーバーは標準誤差を示す。

2.3.2. fNIRS 計測の結果

21 名の参加児の有効試行数（ベースライン試行を含む）の平均は 22.9 ($S.D. = 2.7$) であり、合計計測時間の平均は 7.7 分 ($S.D. = 0.9$) であった。条件別の有効試行数の平均は、JA 条件 5.7 ($S.D. = 0.8$), I 条件 5.4 ($S.D. = 0.8$) であ

った。体動アーチファクトが混入したため除外された全参加児のチャンネルの割合は 0.012 であった。

ベースラインからの oxy-Hb の有意な増加が見られたチャンネルは、多重比較の補正がない場合 JA 条件では 5 チャンネル (Ch5, Ch6, Ch7, Ch8, Ch9), I 条件では 4 チャンネル (Ch5, Ch6, Ch8, Ch9) であった (表 1, 図 7, 図 8)。JA 条件の Ch5 と Ch8, I 条件の Ch5 において、脳活動変化の開始時間が最も早く、持続時間も長くなった (いずれも刺激呈示開始後 15-30 秒にわたって活動が持続)。特に、多重比較の補正後にもベースラインからの有意な oxy-Hb の増加が認められたのは JA 条件においてのみであった (図 7)。

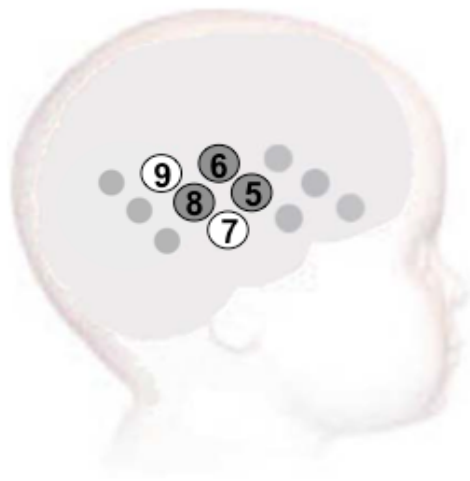
ベースラインからの有意な oxy-Hb の濃度変化を示したチャンネルと解析窓について、JA 条件と I 条件における変化量を対応のある t 検定により直接的に比較した。その結果、Ch8 の 20-25 秒の解析窓において JA 条件の oxy-Hb 増加量が I 条件よりも有意に大きいことが示された ($t(20) = 2.443, p = 0.024, d = 0.56$)。I 条件の oxy-Hb の増加量が JA 条件よりも有意に大きくなったチャンネルは見られなかった。

4-7 ヶ月の乳児において、脳表のプローブ位置を標準脳座標系に変換し、計測チャンネルの位置推定を行なった先行研究の結果 (Lloyd-Fox et al., 2014) と、参加児の頭の大きさを参照することにより、計測脳部位の推定を行なった。有意な活動の変化を示したチャンネルの位置推定の結果、Ch6, Ch8, Ch9 は STS-TPJ 領域に位置しており、Ch5, Ch7 は STS-TPJ 領域と中側頭領域との境界付近に位置していることが示された。

表 1. ベースラインからの有意な oxy-Hb の濃度変化を示したチャンネルと解析窓 (* $p < 0.050$)

	Channel	Time window (s)	t (20)	p (uncorrected)	p (FDR-corrected)	r
JA > Baseline	5	15-20	3.23	0.004	0.030 *	0.59
	5	20-25	3.92	0.001	0.014 *	0.66
	5	25-30	3.79	0.001	0.014 *	0.65
	6	25-30	2.99	0.007	0.042 *	0.56
	7	20-25	2.20	0.040	0.143	0.44
	8	15-20	2.88	0.009	0.042 *	0.54
	8	20-25	3.83	0.001	0.014 *	0.65
	8	25-30	3.58	0.002	0.017 *	0.62
	9	25-30	2.23	0.037	0.143	0.45
I > Baseline	5	15-20	3.02	0.007	0.075	0.56
	5	20-25	2.93	0.008	0.075	0.55
	5	25-30	3.30	0.004	0.075	0.59
	6	25-30	2.33	0.031	0.197	0.46
	8	25-30	3.15	0.005	0.075	0.58
	9	25-30	2.15	0.044	0.201	0.43

Joint Attention > Baseline



Interaction > Baseline

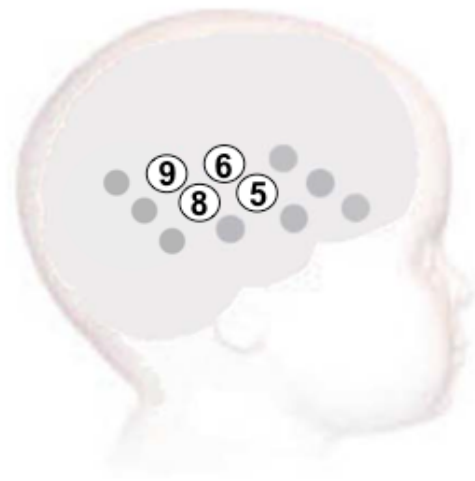


図 7. JA 条件と I 条件においてベースラインからの有意な oxy-Hb の増加を示したチャンネル (グレーが FDR 補正あり $p < 0.05$, 白が FDR 補正無し $p < 0.05$ を表す)

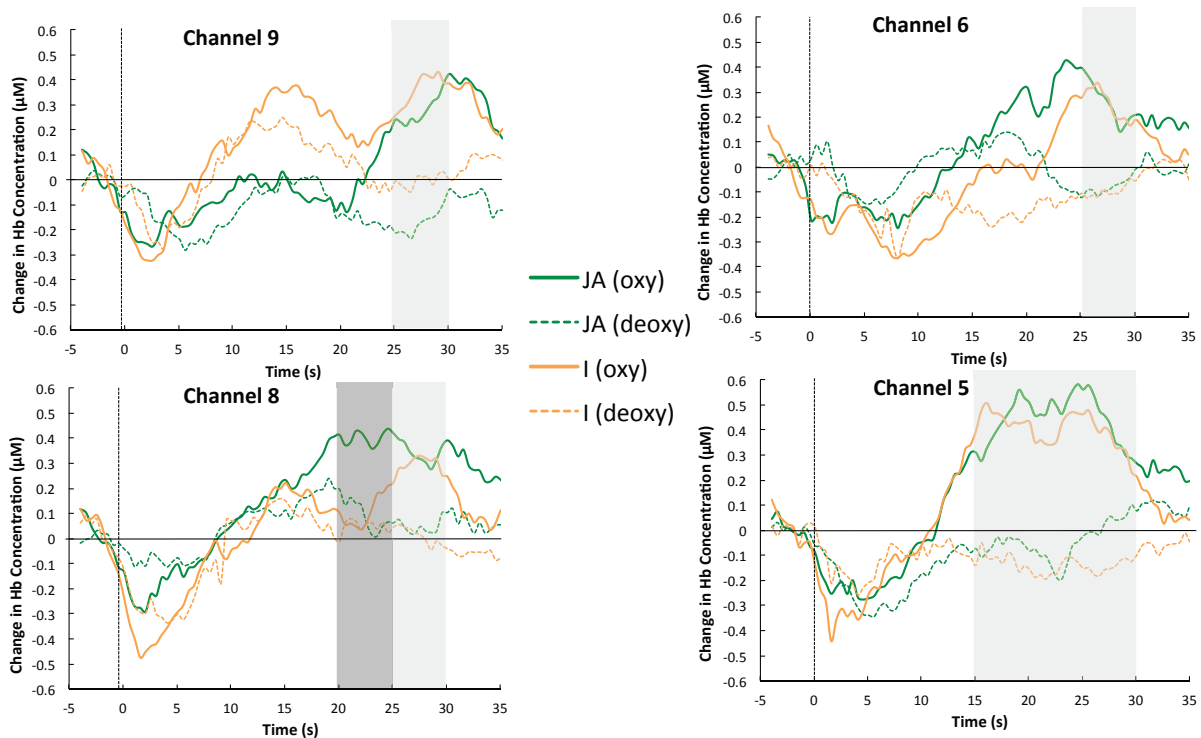


図 8. JA 条件と I 条件における oxy-Hb と deoxy-Hb 濃度変化量の時系列変化。薄い灰色は JA 条件と I 条件の両条件においてベースラインからの有意な oxy-Hb の増加を示した解析窓を表し、濃い灰色は oxy-Hb の変化量について JA 条件と I 条件間で有意差が認められた解析窓を表す。

2.3.3. 脳反応と社会性の関連

条件別の脳反応と計測中の行動との関連を検討するため、ベースラインからの有意な oxy-Hb の増加を示したチャンネルの中でも後方の STS-TPJ 領域に相当し、JA 条件と I 条件における反応に唯一有意差のあった Ch8 の oxy-Hb の最大変化量（20-30 秒の解析窓）と「実験者の顔」への注視率との相関を調べた。まず、JA 条件における Ch8 の脳活動の変化と「実験者の顔」への注視率 ($r(19) = 0.180, p = 0.462$)、または「もの」への注視率 ($r(19) = 0.139, p = 0.571$)との間に有意な相関は認められなかった。つまり、JA 条件と I 条件における脳反応の大きさの違いは、JA 条件において参加児がどの程度「実験者の顔」（あるいは「もの」）へ注意を向けたかという行動指標では説明されないことが示された。興味深いことに、JA 条件ではなく I 条件における「実験者の顔」への注視率と JA 条件における Ch8 の oxy-Hb の最大変化量との間に有意な正の相関が認められた ($r(19) = 0.518, p = 0.023$)。このことから、I 条件において「実験者の顔」により長く注

意を向けた参加児は、JA 条件における STS-TPJ 領域の脳反応が大きいことが示された (図 9)。一方、I 条件における「もの」への注視率と JA 条件における Ch8 の oxy-Hb 変化量との間には有意な相関は認められず ($r(19) = 0.071, p = 0.772$)、I 条件における「実験者の顔」への注視率と I 条件における Ch8 の oxy-Hb 変化量との間においても、統計的に有意な相関は認められなかった ($r(19) = 0.236, p = 0.330$)。

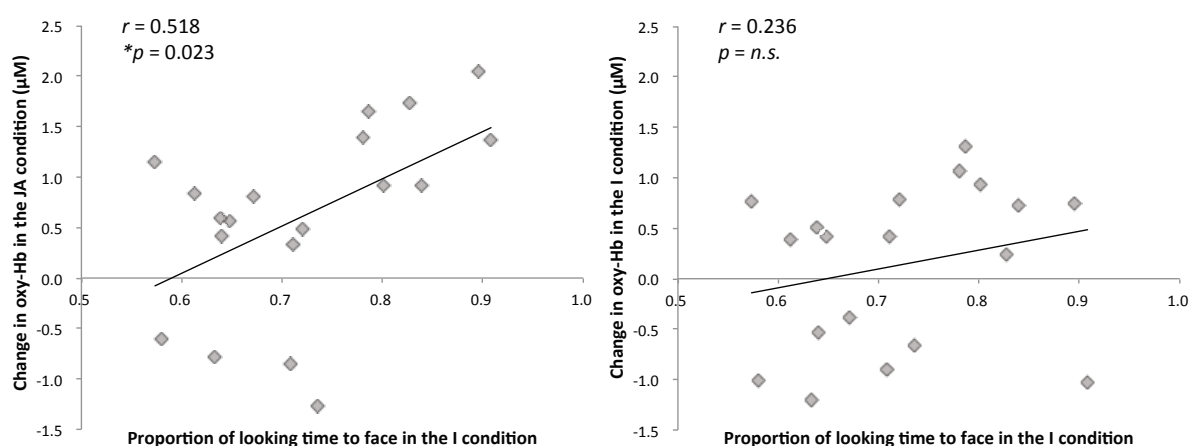


図 9. 参加児ごとの、I 条件における「実験者の顔」への注視率と、JA 条件 (左) と I 条件 (右) における Ch8 (STS-TPJ 領域) の oxy-Hb 濃度変化量を示した散布図 (* $p < 0.050$)

2.4. 考察

本実験の目的は大きく 2 つあった。第一に、ライブによる刺激呈示を用いた自然な社会的相互作用場面における乳幼児の脳活動の計測に fNIRS が有用であるか検討することであった。第二に、2 種類の異なる社会的相互作用 (JA 条件：絵本に対する共同注意を伴う三項関係の相互作用, I 条件：手遊び歌を歌う二項関係の相互作用) 場面において、アイコンタクト, IDS, 随伴刺激といった社会的信号に対する 12-14 ヶ月児の脳反応を検討することであった。特に、社会的信号の処理において rSTS-TPJ 領域が果たしている役割に焦点を当てて実験を行なった。

fNIRS 計測中の行動を分析した結果、JA 条件と I 条件間で乳児の反応に違いが認められた。具体的には、JA 条件では「実験者の顔」への注視率よりも「もの」への注視率が有意に高かったが、I 条件においては「もの (実験者の手)」

よりも「実験者の顔」への注視率が高くなった。共同注意能力の指標となる「実験者の顔」と「もの（I条件については実験者の手）」の間の視線の切り替え行動の回数についての分析を行なった結果、ベースライン条件よりもJA条件では回数が有意に多くなったものの、JA条件とI条件の間に統計的な有意差は認められなかった。また、計測中の乳児の発声は、ベースライン条件においてI条件よりも有意に長く観察された。実験者の反応がないベースライン条件においては「もの」の、おもちゃが呈示されないI条件においては「実験者の顔」の顕著性（salience）が高くなるため、刺激の選好に大きな偏りが生じることはあらかじめ予想されていた。しかし、JA条件において実験者は乳児の共同注意を促すような働きかけを行っており、乳児の反応に対する応答性も高かったのにもかかわらず、「実験者の顔」よりも「もの」への注視率が予想よりもかなり高くなった。視線の切り替え回数においては、ベースライン条件に比べJA条件では有意に多くなっているものの、注視率においてはベースライン条件とJA条件間に違いが認められなかった。これら結果から、(1) 共同注意の増加は必ずしも相手の顔に対する注視時間の増加には繋がらないこと、(2) 共同注意場面において乳児が相手の顔を参照する時間は非常に短いことが明らかとなった。

次に、fNIRSデータの解析の結果、実験者との社会的相互作用のないベースラインに比べ、実験者との社会的相互作用のあるJA条件とI条件では、rSTS-TPJ領域において脳活動の増加が見られた。さらに、社会的信号の発信源である「実験者の顔」に対する注視率は、I条件に比べてJA条件ではかなり低かったのにもかかわらず、STS-TPJ領域におけるoxy-Hb濃度の増加量は、I条件よりもJA条件において、より大きくなることが明らかとなった。さらに、I条件における「実験者の顔」への注視率と、JA条件におけるpSTS-TPJ領域の活動との間に有意な正の相関が認められた。このことから、大人とのコミュニケーションに積極的な乳児は、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、より大きな脳反応を示すことが示唆された。これらは、STS-TPJ領域が、単純な相互作用よりも高度なコミュニケーション形態である共同注意の処理に大きく関与しているとする仮説と矛盾しない結果である。この結果は、共同注意が、さらに高度な社会的認知である心の理論の前段階であるとする社会的認知の発達モデルを支持するものである (Butterworth & Jarrett, 1991; Mundy & Newell, 2007; Tomasello, Carpenter, Call, Behne, & Moll, 2005)。

JA条件とI条件では反応の大きさに違いがあったものの、活動が見られたチ

チャンネルや時系列変化については概ね条件間で一致していた。特に STS-TPJ 領域の中央あるいは前方に位置するチャンネル (Ch6 と Ch5) において、非常に類似した反応が見られた。これらは、単に人の声に選択的に反応する側頭領域 (voice-selective area) の活動を反映している可能性が考えられる。今回の実験では、社会的信号を排除するため、ベースライン条件において実験者は乳児への話しかけを行なわなかった。そのため、ベースライン条件において乳児が聞いたのはおもちゃから出る音のみであり、人の声は呈示されなかった。成人や乳児を対象とした先行研究より、人の声以外の音を聞いた時に比べ、人の声を聞いた時には STS 領域の前方もしくは中央部において活動の増加を示すことが明らかとなっている (Belin & Grosbras, 2010; Belin, Zatorre, Lafaille, Ahad, & Pike, 2000; Bethmann & Brechmann, 2014; Blasi et al., 2011; Grossmann, Oberecker, et al., 2010; Lloyd-Fox et al., 2017; Lloyd-Fox, Blasi, Mercure, Elwell, & Johnson, 2012)。つまり、人の声を聞くことができたターゲット条件 (JA 条件と I 条件) では、人の声の呈示がなかったベースライン条件に比べ、voice-selective area の活動が増加したために、ターゲット条件に対する STS-TPJ 領域の賦活が観察されたと解釈できる。しかし、今回観察された脳反応のすべてが、人の声に対する反応であったとは考えにくい。その理由として、本実験で認められた活動は、STS 領域の後方から TPJ 領域にまで及んでおり、先行研究で報告されている領域とは完全に一致はしていない。さらに、後方の STS-TPJ 領域 (Ch8) における脳活動と、乳児の社会的刺激への選好との間に関連が見出されたことから、特に後方の STS-TPJ 領域における脳活動は、社会的信号に対する選択的な脳反応を反映していたと考えられる。

本実験の限界としては、今回使用した fNIRS システムのプローブ数に限りがあったため、右側頭部の計測しか行えなかった点が挙げられる。乳児期における社会脳ネットワークの解明には、より広範囲にわたる脳領域の計測が必須である。また、本実験では、社会的信号のないベースライン条件と、複数の社会的信号が呈示されるターゲット条件との比較を行なっており、STS-TPJ 領域がどの社会的信号に反応したのか明らかになっていない。それぞれの社会的信号に対する脳反応の違いを検討し、発達初期における社会的認知の特性を明らかにする必要がある。

Cristia et al. (2013)によると、乳幼児を対象とした fNIRS 研究のほとんどは、新生児から 8 ヶ月児までの低月齢の乳児における計測を行なっており、9 ヶ月以降

の乳児を対象とした研究は数少ない。高月齢の乳児に対する研究が盛んではない大きな理由として、参加児の動きに対する制約が比較的少ない fNIRS においても、計測中はある程度おとなしくしている必要があり、動きの増える高月齢の乳幼児においては計測が困難になるためであると考察されている。さらに (Cristia et al., 2013) は、9 ヶ月以降の高月齢の乳児では、低月齢の乳児に比べて脱落率が高くなると報告している。12-14 ヶ月の乳児を参加児とした本実験では、34 名中 21 名の有効データを得ることができ、脱落率は 38% (実験者による手続きの不備を除けば 30%であった) であった。この脱落率は、fNIRS 研究の高月齢児における平均的な脱落率よりも低く、さらに乳児を対象とした事象関連電位 (event-related potential: EPR) 研究の 49% という脱落率よりも低い値であった (Stets, Stahl, & Reid, 2012)。本実験の結果は、自然な社会的相互作用での脳活動計測における fNIRS の高い有用性を裏付けるとともに、参加児の注意を維持できるような課題を設定することで、高月齢の乳幼児でも fNIRS を使った脳計測が十分に可能であることを示している。

3. 実験 2：社会的相互作用におけるアイコンタクトと随伴性の有無に対する脳反応

3.1. 目的

実験 1 より，自然な社会相互作用での fNIRS 計測の有用性が示された。さらに，対人相互作用場面における社会的信号の処理には，rSTS-TPJ 領域が関与していることが示された。しかし，この脳活動が具体的に社会的信号の何の処理を反映していたのかについては明らかにできなかった。先行研究より，新生児でも自分に向けられた視線に選択的な反応を示すことが明らかとなっており，発達の初期段階から他者の視線の向きに敏感に反応していることが示されている (Batki, Baron-Cohen, Wheelwright, Connellan, & Ahluwalia, 2000; Farroni et al., 2002; Hoehl, Reid, et al., 2008)。また，乳幼児におけるライブ学習とビデオ学習の効果の違いは，随伴刺激の有無によるものであるとする結果が報告されており (Nielsen et al., 2008; Roseberry et al., 2014; Troseth, Saylor, & Archer, 2006)，社会的認知における随伴刺激の重要性が指摘されている (Hiraki, 2006)。そこで本実験では，「アイコンタクト」と「随伴刺激」という 2 つの社会的信号に注目し，(1) 2 種類の異なる社会的信号に対する左右の STS-TPJ 領域を中心とする側頭部，前頭部と頭頂部の一部の脳反応の検討を行なった。さらに，(2) 6-8 ヶ月齢群と 10-13 ヶ月齢群の反応を比較し，乳児期における発達的变化を検討する，(3) 社会的信号に対する STS-TPJ 領域の活動と，自由遊び場面における母子の社会的コミュニケーション能力の関連を検討する，(4) 社会的信号に対する STS-TPJ 領域の活動と，その後の乳児の社会性と言語能力の関連を検討することを目的とした。乳児期における発達的变化を検討するため，実験 2 では，日本語圏の 6-8 ヶ月児と 10-13 ヶ月児を対象とした。乳児と目が合うたびに笑いかけを行なうなど，乳児の反応に対して実験者が随伴刺激を呈示しながら遊ぶ Contingent 条件と，アイコンタクトはあるが実験者が随伴刺激を遅らせて呈示しながら遊ぶ Non-contingent 条件を行ない，実験者とのアイコンタクトや社会的相互作用のないベースライン条件との乳児の反応を比較した。「アイコンタクト」と「随伴刺激」はともに，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直示的信号としての機能を有している。そのため，もし STS-TPJ 領域が社会的信号の検出を担っているとすれば，Contingent 条件と Non-contingent 条件において同様の脳活動が観察されるはずである。しかし，もし STS-TPJ 領域が社会的信号の有無を反映するだけでなく，

社会的信号の強度ないし質の処理にも関与しているとすれば、アイコンタクトとIDSのみのNon-contingent条件よりも、アイコンタクトとIDSに加えて随伴刺激も呈示されるContingent条件において、STS-TPJ領域の活動がより大きくなると予測された。また、Non-contingent条件とContingent条件における脳活動の差を調べることで、アイコンタクトと随伴刺激という2つの社会的信号に対する脳反応の違いを検討した。

3.2. 方法

3.2.1. 実験参加児

解析の基準を通過し、最終的にデータを採用した実験参加児は、6-8ヶ月齢群20名（女児9名）、10-13ヶ月齢群24名（女児13名）であった。すべての乳児は日本語を母語としており、発達において非定型性がないことが新版K式発達検査より確認されている（生澤・松下・中瀬, 2002）。この他にも6-8ヶ月齢群9名、10-13ヶ月齢群31名の乳児が参加したが、それぞれプローブの装着を嫌がった（26名）、fNIRS計測中のぐずり・不注意により計測不能であった（13名）、実験の手続きに不備があった（1名）ため、今回の解析には加えなかった。20名の6-8ヶ月齢群のうち2名の実験参加児において、ビデオ撮影に不備があった（1名）、調査中のぐずり・不注意により各刺激条件の試行を必要数採用できなかった（1名）ため、計測中の行動データ分析からは除外し、fNIRSデータのみ採用した。逆に、動きによるノイズ混入のためfNIRSデータの解析が困難であった1名については計測中の行動データのみ採用した。そのため、6-8ヶ月齢群において最終的な解析に用いたのは、計測中の行動データ18名（日齢 $M = 231.2 \pm 27.5$, 女児8名）、fNIRSデータ19名（日齢 $M = 229.2 \pm 27.5$, 女児9名）であった。同様に、10-13ヶ月齢群の24名のうち2名の実験参加児において、ビデオ撮影に不備があった（1名）、調査中のぐずり・不注意により各刺激条件の試行を必要数採用できなかった（1名）ため、計測中の行動データ分析からは除外し、fNIRSデータのみ採用した。また、24名中4名の10-13ヶ月齢群において、それぞれ動きによるノイズ混入のためfNIRSデータの解析が困難であった（2名）、fNIRS計測中のぐずり・不注意により各刺激条件の試行を必要数採用できなかった（2名）ため、fNIRSデータの分析からは除外し、計測中の行動データのみ解析した。そのため、10-13ヶ月齢群において最終的な解析に用いたのは、fNIRS計測中の行動データ22名（日齢 $M = 350.9 \pm 24.1$, 女児11名）、fNIRSデ

一タ 20 名（日齢 $M = 351.6 \pm 26.0$, 女児 11 名）であった。fNIRS データを採用した 6-8 ヶ月齢群 19 名の頭囲, 頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ, 頭頂を介した鼻根から後頭結節までの長さの平均値は, 順に 44.0 cm ($S.D. = 1.4$), 28.8 cm ($S.D. = 1.6$), 28.0 cm ($S.D. = 1.6$)であり, 10-13 ヶ月齢群 20 名の頭囲, 頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ, 頭頂を介した鼻根から後頭結節までの長さの平均値は, 順に 45.8 cm ($S.D. = 1.3$), 29.9 cm ($S.D. = 2.2$), 29.1 cm ($S.D. = 1.3$)であった。本研究の実施にあたり, 実験参加児の保護者に対して研究参加について事前に説明し, 同意を得た。本研究は慶應義塾大学文学部・文学研究科・社会学研究科における研究倫理委員会の承認を得て実施した（受理番号：15032-1, 15032-1-1）。

3.2.2. 刺激・装置

実験では, 実験者である成人女性が, 乳児の前で IDS による話しかけを行ないながら, ハンドパペットまたは絵本を呈示した (図 10)。実験者の発話内容については事前に大まかな台本を作り, 参加児間で大きく異ならないように統制した。ターゲット条件として, 実験者が出す社会的信号に違いを持たせた, Contingent 条件と Non-contingent 条件の 2 条件を設定した (表 2)。Contingent 条件では, 実験者は常に乳児の顔を見ながら話しかけと視覚刺激の呈示を行なったのに加え, 乳児と目が合うたびに笑いかけを行なうなど, 乳児の反応に対して即座に随伴刺激を呈示した。実験者が呈示した随伴刺激として, (a) 乳児と目があったら笑いかけを行なう, (b) 乳児が発声したら音声模倣を行なう, (c) 乳児の行動に対して説明的な反応を返す (例: 乳児が手に取ったり指差したりしたものの名前を教える) の 3 パターンがあった。笑いかけは, 乳児が実験者から視線をはずすまで持続した。Non-contingent 条件では, Contingent 条件と同様に, 実験者は常に乳児の顔を見ながら話しかけと視覚刺激の呈示を行なったが, 乳児の反応に対しては約 3 秒の遅延時間 (Filippetti et al., 2014) を設けた後に反応した。つまり, Non-contingent 条件において実験者は即時的な随伴刺激は呈示しなかった。各ターゲット試行と比較するベースライン試行では, 実験者はアイコンタクトを避けるため, 常に顔を下に向けた状態で話しかけと視覚刺激の呈示を行なった。乳児の注意を喚起するため, どの条件においても実験者は IDS と対乳児動作を使用した話しかけを行なった。実験 1 とは異なり, すべての参加児に対して同じ実験者が遊び相手となって実験を行なった。実験者は, イ

ヤホンから呈示される音を合図に試行の切り替えを行なった。実験の様子は乳児の右側と正面に位置した 2 台のカメラによって記録された。

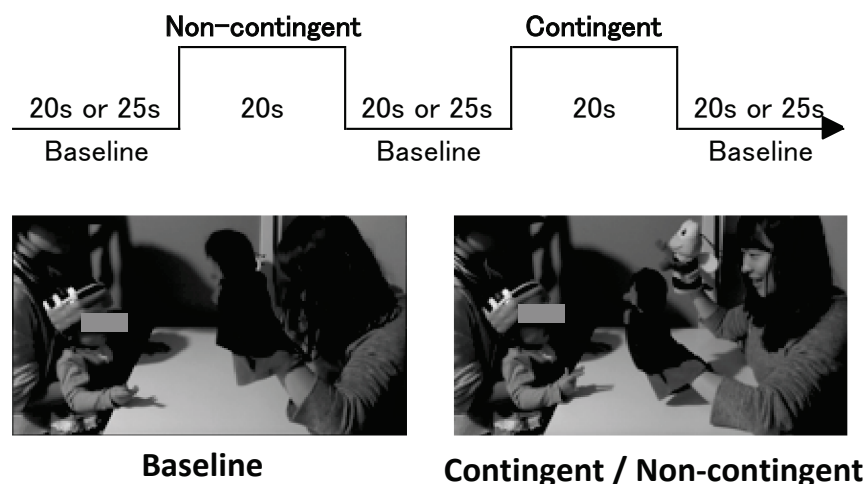


図 10. 実験の様子（下）と実験で用いたブロックデザイン（上）

表 2. ベースライン条件，Non-contingent 条件，Contingent 条件における各々の社会的信号の有無。Non-contingent 条件において実験者は乳児の行動に対して約 3 秒の遅延時間をおいた後に反応を返した。

	IDS	アイコンタクト	随伴刺激
Baseline	✓	-	-
Non-contingent	✓	✓	3秒の遅延
Contingent	✓	✓	✓

3.2.3. fNIRS の装置と計測方法

脳活動の計測には，780nm と 830nm の二波長の連続光を用いた，多チャンネル fNIRS 計測装置 (ETG-7000, Hitachi Medical Co., Japan) を採用した。検出プローブにおけるサンプリングレートは 10Hz であった。計測部位は左右の側頭部（下前頭領域から後部側頭領域まで）とした。8 つの照射プローブと 7 つの検出プローブを交互に縦 3×横 5 の長方形状に 2cm 間隔で配置したプローブパッドを，乳児の左右の側頭部に一枚ずつ装着した（図 11）。左右それぞれに 22 チャンネルあったため，計 44 チャンネルにおいて計測を行なった。このとき，プローブパッドの下行中央に位置する照射プローブが，それぞれの乳児において国際 10-20 法の T3, T4 と重なるように配置され，この下行が Fp1, Fp2,

T3, T4, O1, O2 (horizontal reference curve) を結んだラインに沿うようにプローブパッドを装着した。以上の装着方法は仮想レジストレーション法 (Okamoto et al., 2004; Okamoto & Dan, 2005; Tsuzuki et al., 2007) が提供するレジストレーション結果を利用するための装着基準に適合しており、これにより MNI (Montreal Neurological Institute) 標準脳座標系における各計測チャンネルの位置推定を行なった (Brett, Johnsrude, & Owen, 2002)。成人を対象にした推定法であるが、プローブ間隔を通常の 3 cm から 2 cm に変更したことで、この方法が乳児にも適用できるものとした (Imafuku et al., 2014)。各計測チャンネルに対応する大脳新皮質の解剖学的名称は、the LONI Probabilistic Brain Atlas (LPBA40) に基づいて割り当てられた (Shattuck et al., 2008)。fNIRS システムに試行の開始と終了を知らせるためのトリガー信号の入力は、PC (MDV-AGX9030S, mouse computer) 上の心理学実験用ソフトウェア SuperLab5 (Cedrus Corporation) を用いて行なった。また、この PC からは、実験者への手掛かり音の出力も同時に行なっていた。

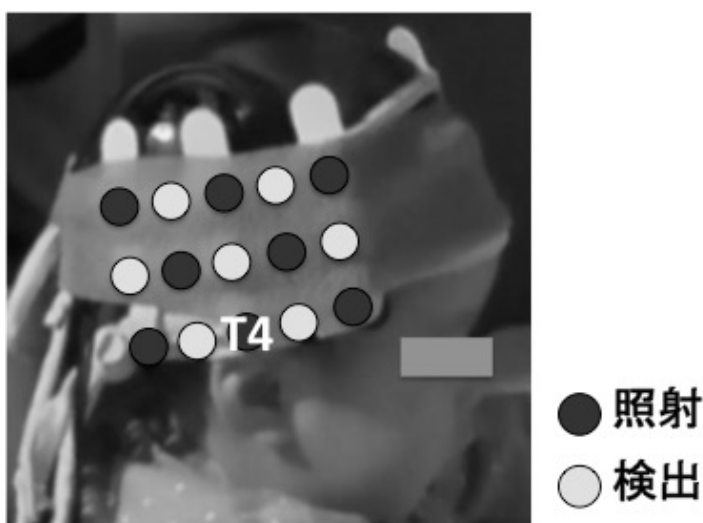


図 11. 実験で用いた fNIRS プローブパッドとプローブ配置。国際 10-20 法における T4 がプローブの下行中央に位置するように配置された。左右の側頭部にそれぞれ配置した照射プローブ (黒) と検出プローブ (グレー) の間の 22×2 チャンネルにおける脳活動を計測した。

3.2.4. 手続き

実験は防音室で実施した。乳児は保護者のひざの上に座り、実験者が fNIRS

プローブパッドを乳児の頭に装着した。実験者である女性は、乳児と向かい合うように 50 cm 離れた正面に座り、刺激の呈示を行なった。保護者には、乳児がぐずったり泣いたりした場合を除き、実験中は乳児に話しかけなどの働きかけを行なわないよう事前に教示した。実験者の女性は毎回同じグレーの上着を着用し、母親は計測中に実験者が見えないよう頭にサンバイザーを装着した。fNIRS の計測手法はブロックデザインを採用し、2 種類のターゲット条件 (Non-contingent 条件と Contingent 条件) はベースライン条件と交互に複数回呈示された (図 10)。2 条件のターゲット条件は、同じ条件が 3 回連続しないよう疑似ランダム化した順序で呈示した。ターゲット条件の時間は 20 秒とし、ベースライン条件の時間は、20 秒または 25 秒であった。各ターゲット条件を最大 8 試行ずつ行ない、乳児がぐずった、もしくは飽きたと実験者に判断された場合は途中で実験を中止した。

fNIRS 計測終了後、母親は乳児と一緒に自然な明るさの部屋に移動し、母親と乳児の自由遊び場面の観察を行なった。乳児用の絵本 2 冊、ハンドパペット 2 体、ボール 2 つが置かれたカーペットの上で、母親と乳児が 3 分間一緒に遊んでいる様子を、1 台のビデオカメラで撮影した。母親には、(1) どのような遊びでもよいので普段家で一緒に遊ぶ時のように自由に遊んで欲しいこと、(2) カーペットの上のおもちゃは使っても使わなくても構わないことの 2 点について教示を行なった。実験者は母子がカメラフレームに収まっているか確認するために定期的に部屋に入室したが、それ以外は部屋には母親と乳児の二人きりであった。

乳児期における STS-TPJ 領域の脳活動とその後の発達との関連を検討するため、2 歳時点での発達と言語能力について、質問紙によるフォローアップ調査を行なった。fNIRS 計測において有効な fNIRS データが得られた参加児が 2 歳になった時点で、KIDS 乳幼児発達スケール (タイプ B) (三宅ら, 1991) と日本語マッカーサー乳幼児言語発達質問紙「語と文法」(小椋・綿巻, 2004) を送付し、保護者に回答を依頼した。KIDS 乳幼児発達スケール (タイプ B) は 9 つの検査領域 (運動・操作・理解言語・表出言語・概念・対子ども社会性・対成人社会性・しつけ・食事) から構成されており、領域別の発達指数と総合発達指数を算出することができる。日本語マッカーサー乳幼児言語発達質問紙「語と文法」は、16-36 ヶ月児を対象としており、表出語彙と文法の発達を評価するための質問紙である。本実験では、KIDS 乳幼児発達スケールの社会性に関連する検査領

域である「対子ども社会性」および「対成人社会性」の発達指数と、「総合」発達指数、日本語マッカーサー乳幼児言語発達質問紙の「表出語彙」得点の4項目を分析対象とした。

3.2.5. 手続きのフィデリティ

実験者によって刺激の呈示が適切に行なわれたことを確認するため、実験の意図を知らない心理学専攻の大学生が実験者の行動（IDS・発話内容の簡潔さ・ポジティブな表情と声・動作の流暢性）に関する評価を行なった。評価は、全参加児の約25%について20秒インターバル記録法を用いて実施した。その結果、実験者の各行動が正しく観察された試行の割合は、ベースライン条件ではIDSが100%、発話内容が100%、ポジティブな表現が100%、動作の流暢性が100%、Non-contingent条件ではIDSが100%、発話内容が100%、ポジティブな表現が100%、動作の流暢性が100%、Contingent条件ではIDSが100%、発話内容が100%、ポジティブな表現が100%、動作の流暢性が100%であった。実験1のJA条件とは異なり、実験2のターゲット条件において、実験者は常に乳児の顔を見ながら話しかけを行なったため、実験者が乳児に視線を向けている時間の評価は行なわなかった。

3.2.6. データの処理法

fNIRS計測中の乳児の行動を記録したビデオデータについて行動コーディングを行ない、2種類の従属変数を条件間で比較した。それらの従属変数は、(1)「実験者の顔」と「もの」に対する注視時間、(2)3種類の社会的行動（発声・笑顔・指差し）の生起時間であった。それぞれの社会的行動の定義については、実験1と同様であった。行動評価の採用基準として、(1)実験刺激（実験者の顔ともの）への注視率が50%に満たなかった試行、(2)ぐずりや泣きといったネガティブな反応の生起時間割合が50%以上の試行、(3)乳児が一度も実験者の顔に視線を向けなかった試行は分析から除外した。その上で、ベースライン条件、Non-contingent条件、Contingent条件において、最低2試行ずつの有効データが得られた乳児のみを解析対象とした。2種類の従属変数それぞれについて、全参加児の平均値から $\pm 3SD$ 以上に相当する値を示した参加児は、外れ値として除外して分析を行なった。それぞれの従属変数は、行動コーディングソフト（GenobsX, Tokyo, Japan）を用いて100ms単位でサンプリングされた。

検出光量の変化をとらえた fNIRS 信号は、Matlab (The MathWorks, Inc.) を基にする fNIRS 用解析ソフトである、Platform for Optical Topography Analysis Tools (POTATo) (Hitachi Ltd.) にて解析した (Sutoko et al., 2016)。POTATo にてまずは光量データを修正 Beer-Lambert 則にてヘモグロビン濃度の相対変化量 (単位はヘモグロビン・モル濃度と光路長の積より mM mm と表記) に変換した。その後以下の要領で前処理を行なった。(1) 実験刺激 (実験者の顔とも) への注視率が一定基準 (ターゲット条件: 50%以上, ベースライン条件: 20%以上) に満たなかった試行, (2) ぐずりや泣きといったネガティブな反応の生起時間割合が 50%以上の試行, (3) 乳児が一度も実験者の顔に視線を向けなかった実験試行, (4) 体動アーチファクトによって非常に大きな信号変動を含む (0.4 秒中に平均から $\pm 2SD$ 以上の fNIRS 信号の変化があった) 試行を除外した。その上で、Non-contingent 条件と Contingent 条件についてそれぞれ 2 試行以上の有効データが得られた乳児のみをその後の解析対象とした。採用基準を通過した乳児のデータに 5 秒の移動平均を適用した後、刺激呈示 5 秒前からの 45 秒間を 1 ブロック (1 ブロック=前のベースライン試行 5 秒+実験試行 20 秒+後ろのベースライン試行 20 秒) として分割した。背景ノイズを差し引くために各ブロックの前後 5 秒を利用した一次ベースラインフィッティングを行なった。その後、各乳児のデータについて Non-contingent 条件と Contingent 条件についてチャンネルごとに加算平均を行なった。目視によって、oxy-Hb と deoxy-Hb 濃度の鏡像的な変化、同期した変化、広範囲にわたって脳活動由来とは考えにくい大きな変化が確認されたチャンネルを除外した。その結果、左右に 1 枚ずつ配置した各 22 チャンネルのプローブパッドの 1/2 (11 チャンネル) 以上のチャンネルが残ったプローブパッドのみをグループ解析の対象とした。そのため、左右どちらも残らなかった乳児はその後の解析からは除外された。

全参加児の全チャンネルデータの総平均を算出し、刺激呈示開始後 5-20 秒の間の反応ピークを中心とした前後 2.5 秒間 (合計 5 秒間) をターゲット区間の解析窓 (刺激呈示開始後 17.5-22.5 秒) とした。この解析窓における oxy-Hb 濃度の平均変化量と、刺激呈示前 5 秒間のベースラインにおける平均変化量について、チャンネルごとに t 検定を行なった。その結果を基にベースラインからの oxy-Hb の有意な増加を示しているチャンネルを選択し、Non-contingent 条件と Contingent 条件間で t 検定を用いて比較した。多重比較の補正には false discovery rate (FDR) を適用した。実験 1 と同様に、FDR を用いた多重比較の補正無しの場

合の結果も合わせて分析した。

母親との自由遊び場面を記録した 3 分間のビデオデータについて、母親と乳児それぞれの社会的行動の行動コーディングを行なった。乳児に対する母親の積極的な働きかけを評価するため、乳児の行動に対する母親の随伴刺激の回数を調べた。具体的には、(a) 乳児の発声に対する随伴模倣、(b) 乳児の行動に対する音声模倣以外の随伴反応（例：乳児の発声に対する相づちを打つ、乳児の行動をオノマトペで表現する、乳児が手に取ったり指差したりしたものの名前を教える）が、乳児の行動から 2 秒以内に生じた回数を計測した。さらに、母親主導の遊び（例：母親がおもちゃを乳児の目の前で動かす、歌を歌う、いないいないばあをする）の持続時間も記録した。乳児の社会的行動として、母親の顔を見る（社会的参照を行なう）回数と持続時間を計測した。

3.3. 結果

3.3.1. fNIRS 計測中の行動

18 名の 6-8 ヶ月齢群の有効試行数の平均は、Non-contingent 条件 5.2 ($S.D. = 1.8$)、Contingent 条件 5.0 ($S.D. = 2.0$)、ベースライン条件 9.3 ($S.D. = 3.7$) であった。22 名の 10-13 ヶ月齢群の有効試行数の平均は、Non-contingent 条件 4.6 ($S.D. = 1.6$)、Contingent 条件 4.9 ($S.D. = 1.8$)、ベースライン条件 8.4 ($S.D. = 2.7$) であった。6-8 ヶ月齢群の実験刺激への平均注視時間（秒）は、Non-contingent 条件 18.0 ($S.D. = 1.2$)、Contingent 条件 17.8 ($S.D. = 1.3$)、ベースライン条件 17.3 ($S.D. = 1.3$) となり、10-13 ヶ月齢群の実験刺激への平均注視時間（秒）は、Non-contingent 条件 17.2 ($S.D. = 1.9$)、Contingent 条件 16.9 ($S.D. = 2.1$)、ベースライン条件 17.3 ($S.D. = 1.5$) であった。

まず、実験刺激である「実験者の顔」と「もの」に対する条件別の注視時間を図 12 に示す。どの条件においても、「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が長い傾向にあった。また、6-8 ヶ月齢群と 10-13 ヶ月齢群の間に差はほとんど見られなかった。「実験者の顔」と「もの」に対する注視時間を従属変数とする、月齢要因（6-8 ヶ月齢・10-13 ヶ月齢）×実験条件要因（ベースライン条件・Non-contingent 条件・Contingent 条件）×実験刺激要因（実験者の顔・もの）の后者 2 要因に対応のある 3 要因分散分析を行なった。その結果、実験刺激要因の有意な主効果 ($F(1, 38) = 203.503, p < 0.001, \eta^2_p = 0.843$) が認められ、月齢や実験条件に関係なく、「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が有意に

長いことが統計的にも支持された。さらに、実験条件要因と実験刺激要因の有意な交互作用も認められた ($F(1.66, 63.00) = 22.094, p < 0.001, \eta^2_p = 0.368$, Greenhouse-Geisser 補正)。Bonferroni 法を用いた下位検定の結果、「実験者の顔」への注視時間は、ベースライン条件において Non-contingent 条件と Contingent 条件よりも有意に短く、反対に「もの」への注視時間は、ベースライン条件において他の 2 条件よりも有意に長いことが示された (すべて $p < 0.001$)。その他の有意な主効果や交互作用は認められなかった (すべて $p > 0.050$)。

次に、3 種類の社会的行動（発声・笑顔・指差し）の生起時間を従属変数とした、月齢要因（6-8 ヶ月齢・10-13 ヶ月齢）×実験条件要因（ベースライン条件・Non-contingent 条件・Contingent 条件）×行動要因（発声・笑顔・指差し）の後者 2 要因に対応のある 3 要因分散分析を行なった（図 13）。その結果、行動要因の有意な主効果 ($F(1.43, 44.43) = 10.462, p = 0.001, \eta^2_p = 0.252$, Greenhouse-Geisser 補正)、実験条件要因と行動要因の有意な交互作用 ($F(3.01, 93.32) = 6.082, p = 0.001, \eta^2_p = 0.164$, Greenhouse-Geisser 補正)、月齢要因と実験条件要因と行動要因の有意な交互作用 ($F(3.01, 93.32) = 2.944, p = 0.037, \eta^2_p = 0.087$, Greenhouse-Geisser 補正)が認められた。その他の有意な主効果や交互作用は認められなかった (すべて $p > 0.050$)。Bonferroni 法を用いた下位検定の結果、10-13 ヶ月齢群における発声の生起時間は、Non-contingent 条件において、ベースライン条件 ($p = 0.009$)、および Contingent 条件 ($p = 0.016$)よりも有意に長くなった。6-8 ヶ月齢群の発声の生起時間においては、どの条件間にも有意差は認められなかった (すべて $p > 0.050$)。一方、10-13 ヶ月齢群の笑顔の生起時間は、Contingent 条件においてベースライン条件よりも有意に長くなった ($p = 0.017$)。6-8 ヶ月齢群の笑顔の生起時間においても、Contingent 条件では、ベースライン条件 ($p = 0.245$)および Non-contingent 条件 ($p = 0.877$)に比べて長くなる傾向を示したが、統計的には支持されなかった。さらに、10-13 ヶ月齢群の指差しの生起時間は、Non-contingent 条件において Contingent 条件よりも有意に長い傾向があり ($p = 0.070$)、また、ベースライン条件 ($p = 0.066$)および Non-contingent 条件 ($p = 0.096$)では、この指差しの生起時間が 6-8 ヶ月齢群よりも 10-13 ヶ月齢群において長くなる傾向を示した。

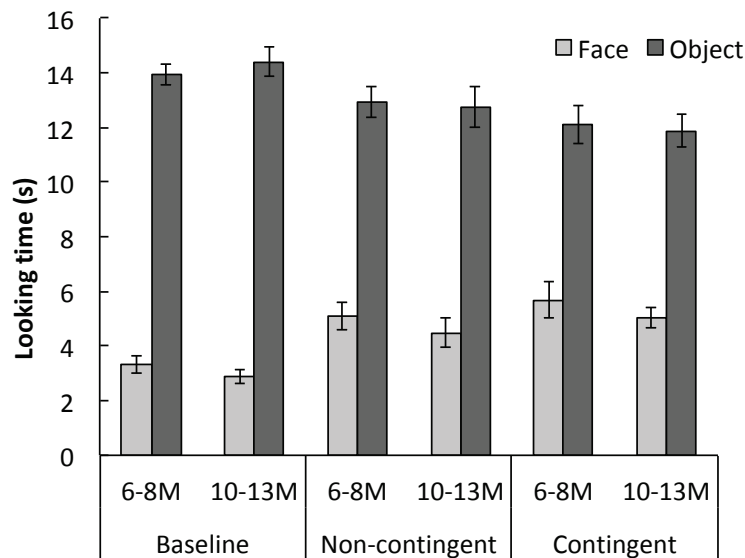


図 12. 6-8 ヶ月齢群と 10-13 ヶ月齢群における「実験者の顔」と「もの」への平均注視時間。エラーバーは標準誤差を示す。

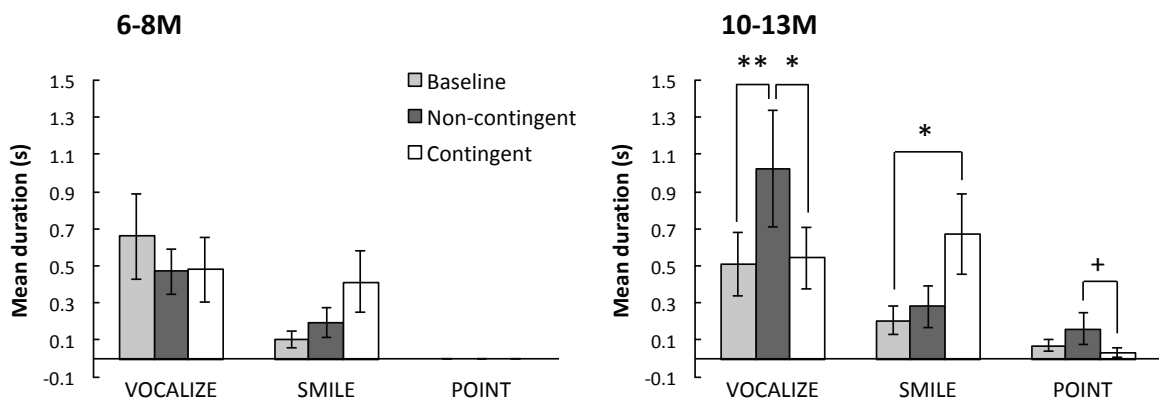


図 13. 6-8 ヶ月齢群（左）と 10-13 ヶ月齢群（右）における社会的行動（発声・笑顔・指差し）の平均生起時間（+ $p < 0.100$, * $p < 0.050$, ** $p < 0.010$ ）。エラーバーは標準誤差を示す。

3.3.2. fNIRS 計測の結果

19名の6-8ヶ月齢群の有効試行数の平均は Non-contingent 条件 5.1 ($S.D. = 1.7$), Contingent 条件 5.1 ($S.D. = 2.0$) であった。20名の10-13ヶ月齢群の有効試行数の平均は Non-contingent 条件 4.8 ($S.D. = 1.6$), Contingent 条件 5.2 ($S.D. = 1.5$) であった。体動アーチファクトが混入したため除外された全参加児のチャンネルの割合は 0.082 であった。

ターゲット区間の解析窓（刺激呈示開始後 17.5-22.5 秒）における oxy-Hb 濃度の平均変化量と、刺激呈示前 5 秒間のベースラインにおける平均変化量について、チャンネルごとに t 検定を行なった。その結果を図 15 に示す。6-8 ヶ月齢群の結果では、多重比較補正後に有意な oxy-Hb の増加が見られたチャンネルは、Contingent 条件における rTPJ 領域に相当する Ch40 ($t(16) = 4.097$, FDR 補正後 $p = 0.037$, $d = 1.41$)のみであった（チャンネル配置については図 14 参照）。多重比較の補正無しの場合、Non-contingent 条件の 3 チャンネル（Ch4: $t(17) = 2.284$, $p = 0.036$, $d = 0.77$, Ch36: $t(16) = 2.717$, $p = 0.015$, $d = 0.94$, Ch41: $t(18) = 2.207$, $p = 0.041$, $d = 0.72$)において、ベースラインからの有意な oxy-Hb の増加が見られた。有意な活動の変化を示したチャンネルの位置推定の結果、Ch4 は左の上側頭回（superior temporal gyrus: STG）あるいは中側頭回、Ch36 は右の IFG、Ch40 は右の角回、Ch41 は右の中前頭回に位置していることが示された。Contingent 条件においてベースラインからの有意な oxy-Hb 濃度変化を示した Ch40 について、条件間の変化量を対応のある t 検定により直接的に比較した。その結果、Contingent 条件の oxy-Hb 増加量が Non-contingent 条件よりも有意に大きいことが明らかとなった ($t(16) = 2.121$, $p = 0.050$, $d = 0.86$)（図 16）。さらに、特に反応の大きかった、Contingent 条件における Ch40（角回）と、Non-contingent 条件における Ch36（IFG）の oxy-Hb 変化量の関連を調べたところ、有意な正の相関が認められた ($r(15) = 0.571$, $p = 0.026$)。このことから、Contingent 条件において rTPJ 領域の反応が大きかった乳児は、Non-contingent 条件における rIFG 領域の反応も大きかったことが示された。

10-13 ヶ月齢群の結果では、両ターゲット条件において多重比較補正後に oxy-Hb の変化が有意であったチャンネルは認められなかった（図 17）。多重比較の補正無しの場合、Contingent 条件の 4 チャンネル（Ch22: $t(19) = -2.140$, $p = 0.046$, $d = 0.68$, Ch38: $t(18) = -2.420$, $p = 0.026$, $d = 0.78$, Ch39: $t(18) = -2.949$, $p = 0.009$, $d = 0.96$, Ch43: $t(18) = -2.110$, $p = 0.049$, $d = 0.68$)において、ベースラインからの有意な oxy-Hb 変化が認められた。計測領域の推定を行なった結果、Ch22 は左の中前頭回、Ch38 は右の縁上回あるいは中心後回、Ch39 は右の縁上回あるいは角回、Ch43 は右の縁上回であった。しかし、いずれのチャンネルも oxy-Hb 濃度の有意な減少を示した。

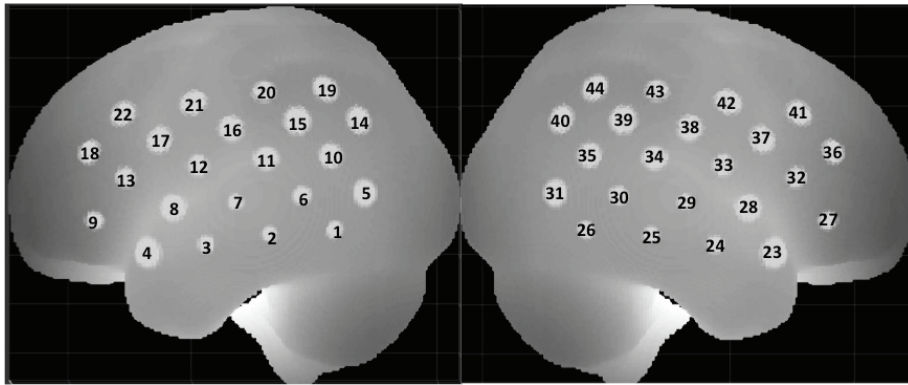


図 14. 実験 2 と 3 で用いられたチャンネル配置。

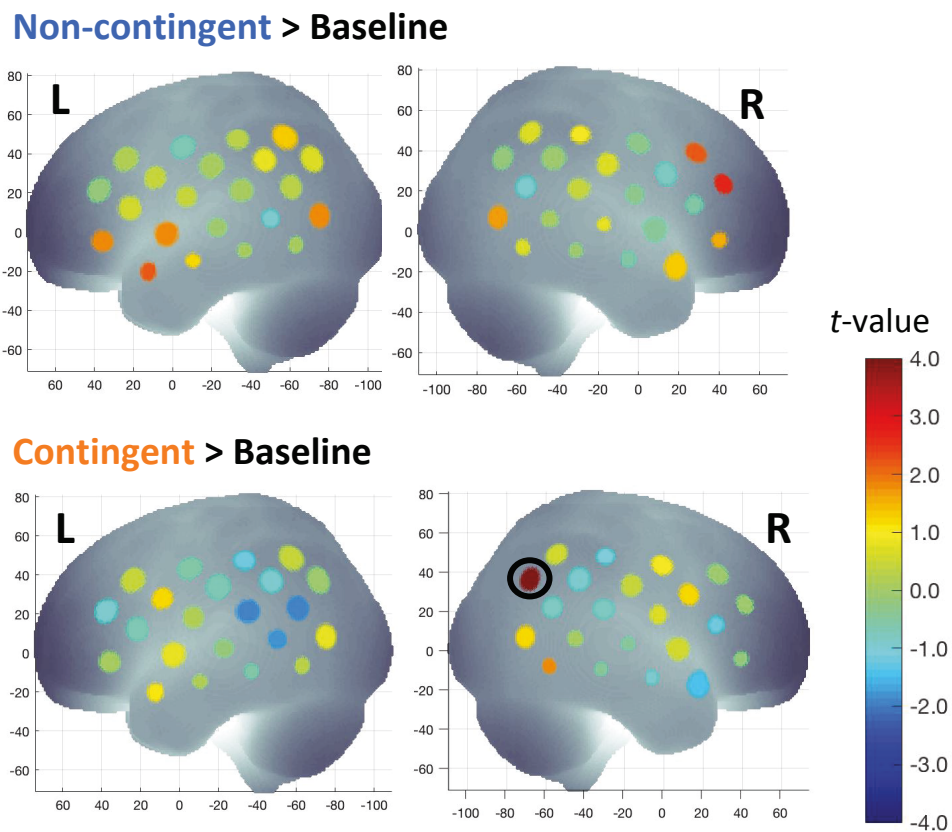


図 15. 6-8 ヶ月齢群の Non-contingent 条件（上）と Contingent 条件（下）におけるベースラインからの oxy-Hb 濃度の変化量を表した t -map。丸印が付けられたチャンネルは、有意な活動の増加が認められた Ch40（右の角回）を表す。

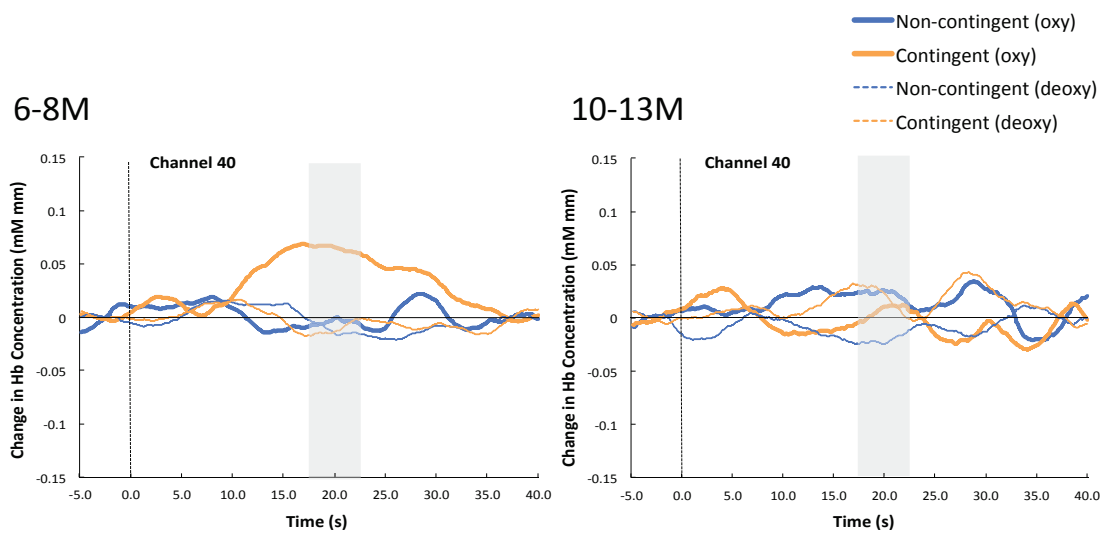


図 16. Ch40 における 6-8 ヶ月齢群（左）と 10-13 ヶ月齢群（右）の各条件でのヘモグロビン濃度の時系列変化。薄い灰色の区間は解析窓を表す。

Non-contingent > Baseline

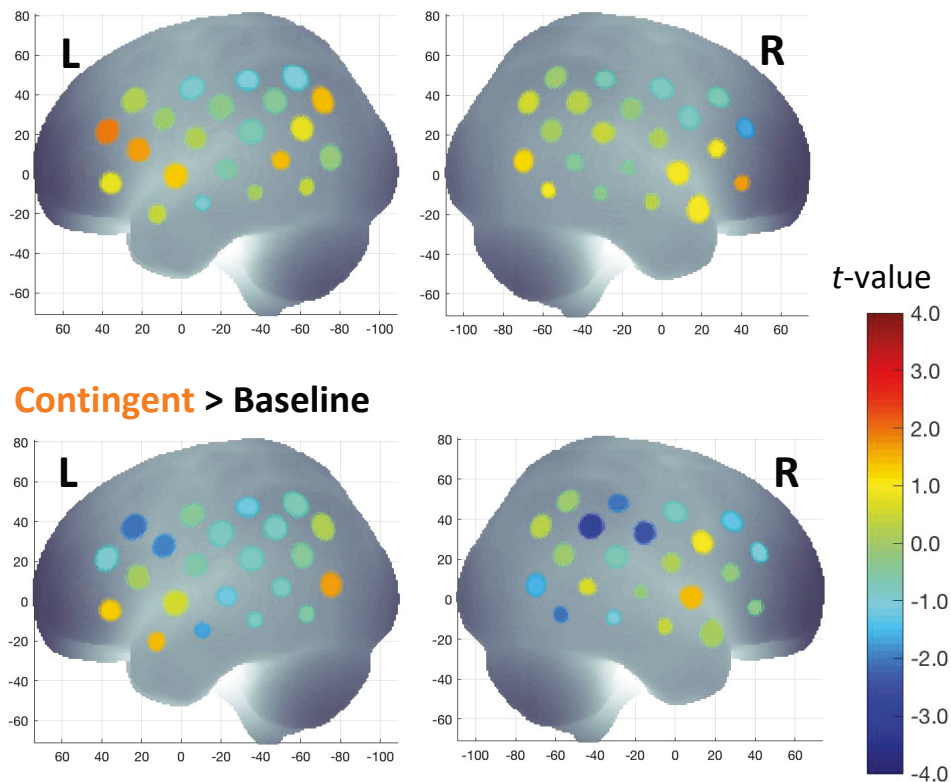


図 17. 10-13 ヶ月齢群の Non-contingent 条件（上）と Contingent 条件（下）におけるベースラインからの oxy-Hb 濃度の変化量を表した t -map

3.3.3. 脳反応と社会性の関連

6-8 ヶ月齢群の Contingent 条件においてベースラインからの有意な oxy-Hb 濃度変化を示した rTPJ 領域 (Ch40) の活動と、自由遊び場面における母親や乳児の社会的行動との関連を検討した。まず、Contingent 条件における乳児の Ch40 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数、随伴反応の回数、母親主導の遊びの持続時間との間に有意な相関は認められなかった (表 3)。また、Contingent 条件における乳児の Ch40 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における乳児の母親の顔への注視時間との間にも有意な相関は見られなかったが、10-13 ヶ月齢群において母親の顔を見る頻度との間に有意傾向のある正の相関が示された。そこで、自由遊び場面における乳児の社会的参照行動 (母親の顔を見る行動) の頻度によって、母親の顔を見る回数の多い Rich eye contact 群 (6-8M: 8 名, 10-13M: 9 名) と、見る回数の少ない Poor eye contact 群 (6-8M: 8 名, 10-13M: 8 名) の 2 群に中央値で分類し、それぞれの群の Ch40 における oxy-Hb 変化量を比較した (図 18)。その結果、6-8 ヶ月児と 10-13 ヶ月児ともに、Rich eye contact 群の oxy-Hb 増加量の方が Poor eye contact 群よりも大きくなり、この傾向は統計的にも支持された。Ch40 における oxy-Hb 変化量について、月齢要因 (6-8 ヶ月齢・10-13 ヶ月齢) × 社会性要因 (Rich eye contact 群・Poor eye contact 群) の 2 要因について対応のある分散分析を行なった結果、月齢要因の有意な主効果 ($F(1, 29) = 7.534, p = 0.010, \eta^2_p = 0.206$) と、社会性要因の有意な主効果 ($F(1, 29) = 10.118, p = 0.003, \eta^2_p = 0.254$) が認められた。このことから、自由遊び場面において母親の顔を見る回数の多い Rich eye contact 群は、見る回数の少ない Poor eye contact 群に比べ、Contingent 条件における rTPJ 領域の活動が大きいことが明らかとなった。一方、Non-contingent 条件における乳児の Ch40 の oxy-Hb 変化量においては、10-13 ヶ月齢群において自由遊び場面における乳児の母親の顔への注視時間との間に有意な負の相関、母親の顔を見る回数との間に有意傾向のある負の相関が示され、母親の顔を見る時間や頻度の多い 10-13 ヶ月児は Non-contingent 条件における rTPJ 領域の活動が小さいことが示唆された (表 3)。Contingent 条件と Non-contingent 条件における計測中の乳児の「実験者の顔」への注視時間と、Contingent 条件における rTPJ 領域 (Ch40) の活動との間には、有意な相関は認められなかった (Contingent 条件: $r(30) = -0.146, p = 0.440$; Non-contingent 条件: $r(30) = -0.099, p = 0.602$)。つまり、Contingent 条件における脳活動の増加は、計測中に乳児がどの程度「実験者の顔」へ注意を向けたかと

いう行動指標では説明されないことが示された。

次に、自由遊び場面における乳児の母親の顔を見る行動と、母親の乳児に対する働きかけの関係について検討を行なった。10-13ヶ月齢群においては、母親の顔を見る頻度と有意な相関を示す母親の社会的行動は認められなかった（随伴模倣： $r(20) = 0.093, p = 0.698$ ；随伴反応： $r(20) = -0.142, p = 0.550$ ；母親主導の遊び： $r(20) = -0.028, p = 0.907$ ）。同様に、母親の顔を見る持続時間においても母親の社会的行動との有意な相関は見られなかった（随伴模倣： $r(20) = 0.192, p = 0.416$ ；随伴反応： $r(20) = -0.026, p = 0.914$ ；母親主導の遊び： $r(20) = -0.053, p = 0.823$ ）。6-8ヶ月齢群においては、母親の顔を見る頻度と有意な相関を示す母親の社会的行動は認められなかったが（随伴模倣： $r(17) = 0.134, p = 0.609$ ；随伴反応： $r(17) = -0.018, p = 0.945$ ；母親主導の遊び： $r(17) = 0.242, p = 0.350$ ）、母親の顔を見る持続時間において、母親の随伴模倣（ $r(17) = 0.611, p = 0.009$ ）および母親主導の遊びの持続時間（ $r(17) = 0.501, p = 0.041$ ）との間に有意な正の相関が認められた（図19）。つまり、自由遊び場面において母親の顔を見る時間の長い乳児の母親は、乳児の発声を随伴模倣する頻度が高く、乳児の遊びへの積極的な介入時間も長いことが示された。乳児の母親の顔への注視時間と母親の随伴反応との間には有意な相関は見られなかった（ $r(17) = -0.147, p = 0.574$ ）。

表3. Contingent条件とNon-contingent条件におけるCh40のoxy-Hb変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数、随伴反応の回数、母親主導の遊びの持続時間および乳児の社会的参照行動の持続時間、頻度との相関係数。括弧内はp値を表す（+ $p < 0.100$, * $p < 0.050$ ）。

	Mother			Infant	
	Contingent imitation	Contingent response	Initiation of interaction	Attention to face (duration)	Attention to face (freq.)
Contingent					
6-8M (N = 16)	0.306 (0.248)	-0.369 (0.160)	0.332 (0.208)	0.239 (0.373)	-0.067 (0.807)
10-13M (N = 17)	0.101 (0.699)	-0.133 (0.612)	-0.063 (0.810)	0.393 (0.118)	0.456 (0.066)+
Non-contingent					
6-8M (N = 16)	-0.006 (0.983)	0.519 (0.557)	-0.204 (0.449)	0.020 (0.941)	0.252 (0.347)
10-13M (N = 17)	0.072 (0.785)	0.084 (0.750)	0.230 (0.374)	-0.488 (0.047)*	-0.434 (0.081)+

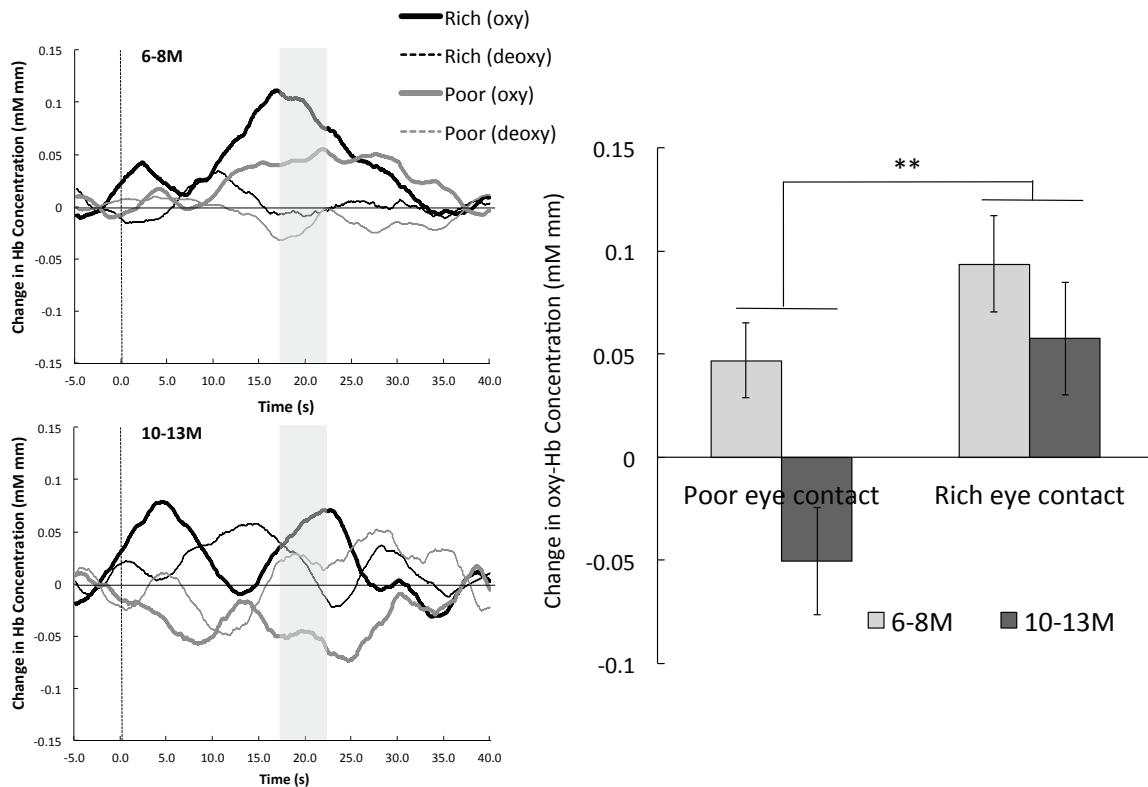


図 18. Rich eye contact 群と Poor eye contact 群における rTPJ 領域(Ch40)の oxy-Hb 変化量の比較 (右) と時系列変化 (左) (** $p < 0.010$)

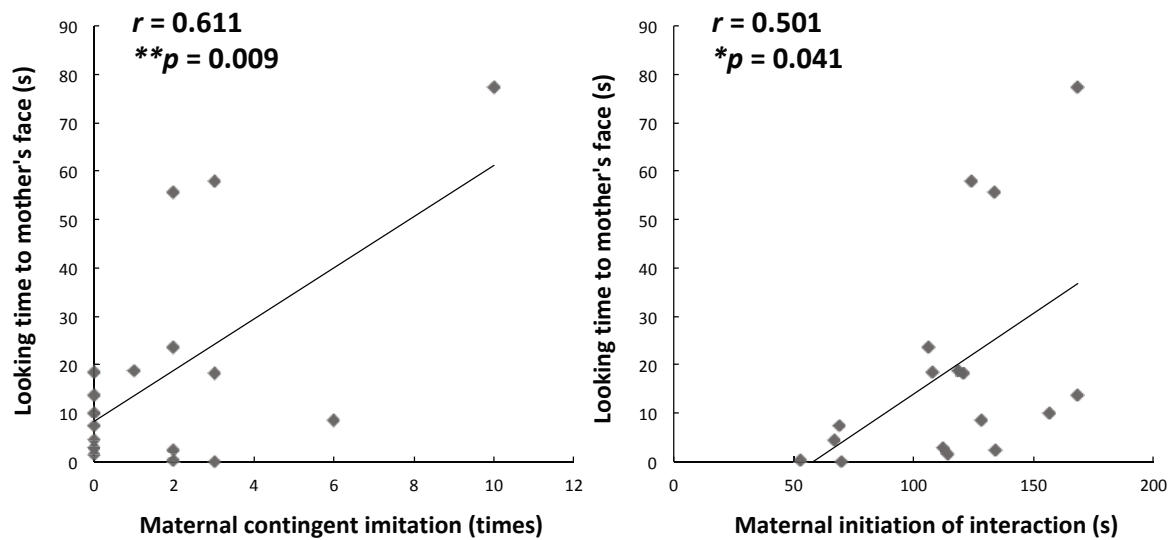


図 19. 自由遊び場面の 6-8 ヶ月齢群における, 母親の顔への注視時間と, 母親の随伴模倣の回数 (左) と母親主導の遊びの持続時間 (右) の相関 (* $p < 0.050$, ** $p < 0.010$)

3.3.4. フォローアップ結果（2歳時点での言語と社会性の発達スコア）

乳児期における rTPJ 領域の脳反応と、その後の言語と社会性の発達を検討するため、参加児が 2 歳の時点において、質問紙によるフォローアップ調査を行った。現在のところ 10-13 ヶ月齢群では 71%（12 名）の参加児の回答が得られているが、6-8 ヶ月齢群では 41%（7 名）の参加児の回答しか回収できていないため、10-13 ヶ月齢群のデータのみ予備的に解析した。KIDS 乳幼児発達スケール（タイプ B）における「総合」発達指数、下位項目である「対子ども社会性」と「対成人社会性」における発達指数、日本語マッカーサー乳幼児言語発達質問紙における「表出語彙」得点と、Contingent 条件および Non-contingent 条件における Ch40 の oxy-Hb 変化量との相関を算出した。その結果、Contingent 条件における Ch40 の oxy-Hb 変化量において、総合発達 ($r(11) = 0.551, p = 0.079$) および対成人社会性 ($r(11) = 0.530, p = 0.094$) との有意傾向のある正の相関が認められ、表出語彙 ($r(12) = 0.591, p = 0.043$) との間には有意な正の相関が認められた（図 20）。この結果から、Contingent 条件においてより強い脳反応を示した参加児は、2 歳時点において全体的な発達が早く、成人とのより高度なやりとりが可能であり、表出語彙も多いことが示唆された。対子ども社会性との間には有意な相関は見られなかった ($r(11) = 0.196, p = 0.563$)。Non-contingent 条件における Ch40 の oxy-Hb 変化量においては、すべての項目と有意な相関は認められなかった（総合発達： $r(11) = 0.234, p = 0.489$ ；対子ども： $r(11) = 0.441, p = 0.174$ ；対成人： $r(11) = 0.404, p = 0.218$ ；表出語彙： $r(12) = 0.373, p = 0.232$ ）。

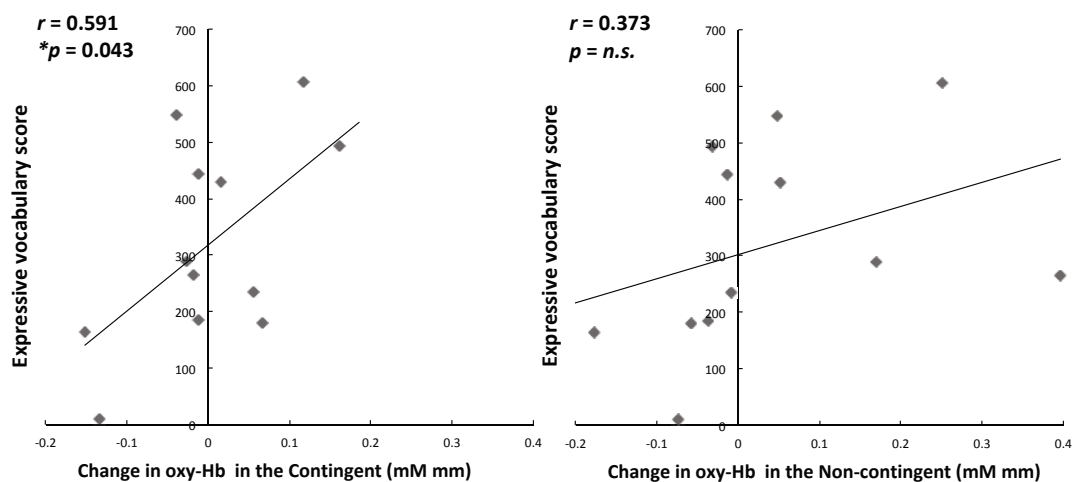


図 20. 参加児の 2 歳時点での表出語彙得点と、Contingent 条件（左）と Non-contingent 条件（右）における Ch40 の oxy-Hb 変化量 (* $p < 0.050$)

3.4. 考察

本実験の目的は、(1) 乳児期における「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対する左右の側頭部、前頭部と頭頂部の一部の脳反応を検討すること、(2) 6-8 ヶ月齢群と 10-13 ヶ月齢群の反応を比較することで、社会的信号処理を担う脳機能について初期の発達的变化を明らかにすること、(3) 社会的信号に対する STS-TPJ 領域の活動と、自由遊び場面における母子の社会性との関連を検討すること、(4) 乳児期における社会的信号に対する STS-TPJ 領域の活動と、その後の言語発達との関連を検討することであった。

fNIRS 計測中の乳児の行動反応を分析した結果、「実験者の顔」と「もの」への注視時間については、条件にかかわらず乳児は「実験者の顔」よりも「もの」を有意に長く注視することが明らかとなった。この結果は、「もの」が呈示された場合には、「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が有意に長くなるとした実験 1 の結果と一致していた。このことから、共同注意場面において乳児が相手の顔を参照する時間は、ものを参照する時間よりも短いことが、実験 2 においても確認された。しかし、実験 1 の JA 条件における 12-14 ヶ月児の結果と比較すると、Contingent 条件における「実験者の顔」への注視率は、6-8 ヶ月齢群、10-13 ヶ月齢群ともに平均 25%以上あり、10%程度であった実験 1 の倍以上の結果となった。これは参加児の月齢の違いによる発達的变化であると解釈できる。つまり、共同注意能力の発達に伴った、ものへの注意の増加を反映している可能性があった。計測中の発声、笑顔、指差しの生起時間においては、参加児の月齢による発達的变化が観察された。6-8 ヶ月齢群においては、条件間でこれらの生起時間に有意差は見られなかったが、10-13 ヶ月齢群では、発声の生起時間が Non-contingent 条件において他の 2 条件よりも有意に長くなった。この結果は、実験 1 において実験者が随伴刺激の呈示を行なわなかったベースライン条件（実験 1 ではアイコンタクトもなかった）において乳児の発声の生起時間が増加したのと同様の反応であると考えられた。実験者の顔が完全に見えない実験 2 のベースライン条件とは異なり、Non-contingent 条件では乳児と顔と顔を向かい合わせている状況にもかかわらず、実験者の応答性が低かったために発声が増加したと解釈できる。この結果は、自然な対人相互作用場面と比較して、相手が無表情のまま無言で乳児の顔を注視し続けるような still-face 場面では、ネガティブな発声だけでなく中性的あるいはポジティブな発声も増加するとした研究結果とも一致している (Delgado, Messinger, & Yale, 2002; Goldstein,

Schwade, & Bornstein, 2009)。Non-contingent 条件において、Contingent 条件よりも乳児の指差しの生起時間が増加する傾向があったのも同様の反応であると考えられた。また、10-13 ヶ月齢群の笑顔の生起時間は、ベースライン条件に比べ、Contingent 条件において有意に長くなることがわかった。このことから、実験者が下を向いていたベースライン条件よりも、自然な相互作用に近い Contingent 条件において、乳児のポジティブな反応が増加することが示された。これらの結果は、乳児期の対人相互作用場面において、相手の行動に応じて自分の反応を調整するような行動が、発達に伴って増加することを示唆している。

一方、fNIRS 計測結果においては、ターゲット条件間で 6-8 ヶ月齢群の脳反応に違いが認められた。具体的には、実験者が随伴刺激を呈示する Contingent 条件においては、ベースラインに比べ、主に角回に相当する rTPJ 領域の活動が有意に増加したが、Non-contingent 条件ではこの活動の増加は見られなかった。また、左の TPJ 領域では有意な活動は認められなかった。成人において、社会的刺激の処理は左半球よりも右半球が有意であるとされており (Gallagher & Frith, 2004; Mosconi, Mack, McCarthy, & Pelphrey, 2005; Otsuka et al., 2007; Pelphrey, Viola, & McCarthy, 2004), 成人と同様の活動が、6-8 ヶ月児においても随伴性に関与する社会的刺激に対して見られることが示された。これらの結果から、rTPJ 領域は単に社会的信号の有無を検出するだけでなく、社会的信号の強度ないし質の処理も行なっていることが示された。さらに、この rTPJ 領域における活動の変化量について、条件間での比較を行なったところ、Non-contingent 条件よりも Contingent 条件において活動が有意に大きいことが示された。10-13 ヶ月齢群においては、どちらのターゲット条件においてもベースラインからの有意な oxy-Hb の増加を示したチャンネルは観察されなかったが、少なくとも 6-8 ヶ月齢の乳児では、他者との社会的相互作用において随伴刺激がより重要な社会的信号であることが示唆された。

また、この社会的信号に対する rTPJ 領域の活動と、自由遊び場面における乳児の社会的行動との間に関連が認められ、母親の顔を見る頻度の多い乳児は、Contingent 条件における rTPJ 領域の活動の増加量が大きいことが示された。先行研究において、アイコンタクトの少なさや自分に向けられた視線に対する反応性の低さは、ASD 診断の予測変数となる可能性が示されており (Elsabbagh & Johnson, 2010; Elsabbagh et al., 2012; Zwaigenbaum et al., 2005), 乳児期における他者の顔（特に目）への適切な注意がその後の社会的認知機能の発達にとって重

要であることがわかっている。自由遊び場面における乳児の母親の顔への注視行動と、Contingent 条件における rTPJ 領域の活動との関連は、10-13 ヶ月齢の乳児においても認められており、成人と同様に乳児においても、他者の心的状態に対する感受性と rTPJ 領域の活動には関連があることが示唆された (Santesteban et al., 2012; Saxe & Kanwisher, 2003)。また、10-13 ヶ月齢群における rTPJ 領域の脳反応と、その後の言語と社会性の発達の個人差を予備的に検討した結果、Contingent 条件においてより大きな脳活動を示した参加児は、2 歳時点において全体的な発達が早く、成人との対人場面においてより高い社会性を示し、表出語彙も多くなる可能性が示された。このことから、乳児期における高次な社会的信号への応答性の高さが、その後の社会性や言語能力の予測変数となることが示唆された。

さらに、多重比較の補正無しの場合では、6-8 ヶ月齢群の Non-contingent 条件において rIFG 領域に相当するチャンネルで活動の増加が見られた。実験者が顔を下に向けていたベースライン条件と比較し、実験者が顔を上げて乳児に視線を向けていた Non-contingent 条件において IFG 領域の活動が増加したことから、IFG 領域が他者とのアイコンタクトの処理に関与していることが示唆された。成人を対象とした実験では、鏡やモニターを介して他者と相互注視（見つめ合う）を行なうような課題において pSTS、mPFC、ACC といった社会脳ネットワークに加え、IFG 領域（特に右の IFG 領域）の賦活が報告されている (Cavallo et al., 2015; Redcay et al., 2010; Redcay, Kleiner, & Saxe, 2012; Saito et al., 2010; Tanabe et al., 2012)。本実験の結果は、すでに乳児期において、IFG 領域が同様の役割を担っている可能性を示している。また、社会的相互作用中の 6 ヶ月児の脳反応を調べた実験では、実験者が自分に向かって歌っている条件では、他の乳児に向かって歌っている条件に比べて右の IFG 領域と STS 領域の活動が有意に増加することが報告されている (Lloyd-Fox et al., 2015)。Contingent 条件においては rIFG 領域の活動の増加は認められなかったものの、Contingent 条件において rTPJ 領域の反応が大きかった乳児は、Non-contingent 条件における rIFG 領域の反応も大きいことが示されており、発達初期より IFG 領域が社会的信号の処理にかかわっている可能性は十分に考えられた。

今回の実験では、10-13 ヶ月の高月齢児においては、どちらのターゲット条件に対しても活動の増加は認められなかった。10-13 ヶ月齢群において反応が見られなかった要因として次のように説明できると考えられる。第一に、9 ヶ月以上

の高月齢児においては体動や髪の毛の量の増加によって信号対ノイズ (S/N) 比が低下し、脳活動の計測が困難になることが知られている (Cristia et al., 2013)。実験 2 では、白人の乳児に比べて髪の毛の量が多く、髪の毛の色も黒い日本人の乳児を対象としていたこともあり、多くのアーチファクトの混入によって脳活動由来の信号の抽出が上手くいかなかった可能性があった。この可能性を棄却するためには、より多くの乳児のデータを収集し、データの採用基準をより厳しくするなどして fNIRS 信号の質を高める必要がある。第二に、ベースライン条件においても実験者はIDSによる話しかけを行っていたため、すでにrTPJ領域における社会的信号の処理は行なわれており、アイコンタクトや随伴刺激といった別の社会的信号が追加された場合でも活動に変化は生じなかった可能性があった。つまり、6-8 ヶ月齢の乳児では複数の社会的信号 (IDS・アイコンタクト・随伴刺激) によってのみ rTPJ 領域の大きい活動が引き起こされるが、10-13 ヶ月齢の乳児では、単一の社会的信号 (IDS) でも十分に反応することが考えられる。この問題は、社会的信号が一切呈示されないベースライン条件と、単一の社会的信号が呈示されるターゲット条件における乳児の脳活動の計測を行なうことで検討できる。第三に、10-13 ヶ月齢では個人差が大きくなるためにグループ解析では有意な活動として観察されなかった可能性があった。事実、自由遊び場面における乳児の社会的参照行動の回数によって 2 群に分類した結果、6-8 ヶ月児ではどちらの群においても rTPJ 領域の活動は増加していたのに対し、10-13 ヶ月児では母親の顔を見る回数の少ない群の rTPJ 領域の活動は減少していた。また、今回の結果において、10-13 ヶ月齢群の rTPJ 領域の活動とその後の発達との関連も認められた。さらに、多重比較の補正無し場合では、Contingent 条件の Ch39 (右の縁上回あるいは角回) と Ch43 (右の縁上回) において oxy-Hb 濃度の有意な減少が認められている。これらの分析結果を踏まえると、今回の 10-13 ヶ月齢群の結果の少なくとも一部は、実際の脳活動を反映したものであり、6-7 ヶ月齢群と同様に随伴刺激の処理に rTPJ 領域が関与している可能性があった。今後 10-13 ヶ月齢群のサンプル数をさらに増やし、個人差を考慮した解析を行なうことで、発達的变化についてのより詳細な検討が可能となるであろう。

本実験の限界として、非常に高い脱落率 (64%) に示されているように、10-13 ヶ月齢群の計測が困難であったことが挙げられる。そのためサンプルに偏りが生じていた可能性があり、結果の普遍性について疑問が残った。この点につい

て、fNIRS 計測が可能であった参加児とそうでなかった参加児について、新版 K 式発達検査の結果の比較検討を行なった。その結果、fNIRS 計測が可能であった 10-13 ヶ月齢群 20 名の検査領域ごとの平均発達指数は、姿勢運動領域 92.3 ($S.D. = 15.9$)、認知・適応領域 90.4 ($S.D. = 15.0$)、言語・社会領域 97.0 ($S.D. = 22.9$) となり、全領域の発達指数は 91.7 ($S.D. = 14.4$) であった。一方、プローブパッドの装着を嫌がるなどしたために fNIRS 計測ができなかった 10-13 ヶ月齢群 33 名 (1 名はぐずったために発達検査も実施できなかった) の検査領域ごとの平均発達指数は、姿勢運動領域 101.6 ($S.D. = 13.2$)、認知・適応領域 97.9 ($S.D. = 9.1$)、言語・社会領域 101.8 ($S.D. = 15.2$) となり、全領域の発達指数は 99.2 ($S.D. = 7.4$) であった。検査領域ごとの発達指数について、計測可否要因 (計測可能群・計測不可能群) \times 検査領域要因 (運動・認知・言語・全領域) の後者の要因に対応のある 2 要因分散分析を行なった。その結果、有意な交互作用は認められなかったが ($F(1.86, 94.88) = 0.399, p = 0.657, \eta^2_p = 0.008$, Greenhouse-Geisser 補正), 計測可否要因の有意な主効果が認められた ($F(1, 51) = 5.443, p = 0.024, \eta^2_p = 0.096$)。つまり、fNIRS 計測ができなかった参加児に比べて、fNIRS 計測が可能だった参加児では全体的に発達が遅い可能性があった。全領域の発達指数が 80 未満であった 5 名の参加児 (5 名とも全領域の発達指数は 70 以上であった) を除いて fNIRS データの再解析を行なったところ、全体的な結果に違いは見られなかった。しかし、サンプルに偏りがあることから、10-13 ヶ月齢群の結果の解釈には注意が必要であると言えた。また、本実験では随伴刺激のバリエーション (笑顔・音声模倣・説明) が多く、定義も曖昧であったため、より厳密な刺激の統制を行なう必要があった。随伴刺激として呈示する刺激を 1 種類に絞ることで、刺激のモダリティを統一し、条件間の違いをより明確に定義できると考えられた。

上述の様な課題が残されているが、本実験の結果は、社会脳ネットワークの中心領域の一つである rTPJ 領域が、6-8 ヶ月齢においてすでに、対人相互作用における随伴刺激といった高次な社会的信号の処理に関与していることを明らかにした。このような自然な相互作用について特定の脳活動機能を評価する研究は、fMRI や脳波計でも不可能であり、fNIRS を用いて可能となる世界初の知見である。この TPJ 領域は成人において心の理論との関連が指摘されており (Gallagher & Frith, 2003; Saxe & Kanwisher, 2003; van der Meer et al., 2011), 本実験の結果は社会的相互作用における rTPJ 領域の活動が、共同注意や心の理論とい

った高次社会的認知機能の発達に寄与している可能性を示すものである。

4. 実験 3 : 随伴刺激の違いによる脳反応の検討

4.1. 目的

実験 2 より、rTPJ 領域の反応が、社会的信号の質や強度に関係しており、少なくとも 6-8 ヶ月の乳児において、随伴刺激が強力な社会的信号であることが明らかとなった。実験 2 において実験者が行なった随伴刺激は、(a) 乳児と目があつたら笑いかける、(b) 乳児が発声したら音声模倣を行なう、(c) 乳児の行動に対して説明的な反応を返す（例：乳児が手に取ったり指差したりしたものの名前を教える）の 3 パターンあり、モダリティの異なる様々な反応を含む広義の定義であった。そのため、刺激の統制を厳密に行なうことが困難であった。また、実験 2 では笑顔や音声模倣といった対人相互作用においてポジティブな意味を持つ随伴刺激の呈示を行なったが、特に低月齢の乳児は行動レパートリーが少なく、発声や指差しなどの反応もほとんど生起しなかった。よって、呈示した随伴刺激の大半は、アイコンタクトが生じた際の笑顔であったため、rTPJ 領域が刺激の「随伴性」そのものではなく、笑顔という特定の刺激の随伴性に選択的に反応していた可能性が残されていた。もし rTPJ 領域が刺激の「随伴性」そのものに反応しているのであれば、ネガティブな意味を持った随伴刺激や、人間由来の反応ではない（社会的に意味のない）随伴刺激に対しても同様に賦活すると考えられる。そこで実験 3 では、(1) rTPJ 領域の反応は、「随伴性」についての領域一般的な要因の処理を反映しているのか、「社会的刺激の随伴性」に特有の要因の処理を反映しているのか、それとも「笑顔の随伴性」に特有の要因の処理を反映しているのかを明らかにすることを目的とした。この目的のために実験 3 では、(i) 社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激（Social-positive 条件）、(ii) 社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激（Social-negative 条件）、(iii) 社会的に意味のない随伴刺激（Non-social 条件）に対する左右の側頭部、前頭部と頭頂部の一部の脳反応を検討した。実験 2 と同様に、(2) 随伴刺激に対する rTPJ 領域の脳活動と、自由遊び場面における母子の社会性との関連についても検討を行なった。ベースライン条件とターゲット条件の刺激を可能な限り統制するために、実験 3 では、随伴刺激を返すタイミングをアイコンタクトが生じた場合のみに限定し、随伴刺激も各条件において 1 種類のみとしてそれぞれの条件について独立に実験を行なった。すべての条件の計測を完全に行なうことができた参加児は少なかったため、条件によって参加児の構成は一部異なっていた。実験 3 では、個人差の大きかった高月齢

の乳児の計測は行なわず、比較的個人差の小さかった 6-8 ヶ月児を対象とした。

4.2. 実験 3-1：社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激（Social-positive 条件）

4.2.1. 目的

実験 3-1 では、社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激（笑いかけ）に対する、左右の側頭部、前頭部と頭頂部の一部の脳反応を検討した。さらに、ポジティブな社会的信号に対する TPJ 領域の活動と、自由遊び場面における母子の社会性との関連についても検討を行なった。実験 2 と同様に、実験者である成人女性が乳児の前で IDS による話しかけを行ないながらハンドパペットまたは絵本を呈示し、ターゲット条件において実験者は乳児と目が合ったら即座に笑いかけを行なった。ベースライン条件では、実験 2 のように顔を下に向けずアイコンタクトができる自然な状態であるが、目が合ってから笑いかけを行なうまでに、約 3 秒間の遅延時間を設けた。つまり、実験 2 で行なった Non-contingent 条件をベースライン条件とし、随伴刺激のあるターゲット条件における脳反応との直接的な比較を行なうことで実験 2 の結果が再現されるか検討した。参加児は日本語圏の 6-8 ヶ月児とした。

4.2.2. 方法

4.2.2.1. 実験参加児

解析の基準を通過した、6-8 ヶ月児 27 名（女児 11 名）のデータを採用した。すべての乳児は日本語を母語としており、発達において非定型性がないことが新版 K 式発達検査より確認されている（生澤他, 2002）。この他にも 8 名の乳児が参加したが、それぞれ fNIRS 計測中のぐずりにより計測不能であった（5 名）、プローブの装着を嫌がった（3 名）ため、今回の解析には加えなかった。27 名中 6 名の実験参加児は、計測中のぐずり・不注意により刺激条件の試行を必要数採用できなかった（3 名）、動きや髪の毛によるノイズ混入のため fNIRS データの解析が困難であった（3 名）ため、fNIRS データの分析からは除外し、計測中の行動データのみ解析した。逆に、ビデオ撮影に不備があった 1 名については計測中の行動データ分析からは除外し、fNIRS データのみ採用した。そのため、最終的な解析に用いたのは、計測中の行動データ 26 名（日齢 $M = 210.6 \pm 20.0$, 女児 10 名）、fNIRS データ 21 名（日齢 $M = 210.2 \pm 20.5$, 女児 9 名）であった。fNIRS

データを採用した 21 名の実験参加児の頭囲，頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ，頭頂を介した鼻根から後頭結節までの長さの平均値は，順に 43.8 cm (*S.D.* = 1.5), 29.2 cm (*S.D.* = 1.2), 28.9 cm (*S.D.* = 1.7)であった。本研究の実施にあたり，実験参加児の保護者に対して研究参加について事前に説明し，同意を得た。本研究は慶應義塾大学文学部・文学研究科・社会学研究科における研究倫理委員会の承認を得て実施した（受理番号：15032-1-1）。

4.2.2.2. 刺激・装置

刺激と装置は以下の点を除き，実験 2 と同じであった。実験 3 は，ターゲット条件は Social-positive 条件の 1 条件のみであった。ターゲット試行において，実験者は，常に乳児の顔を見ながら IDS による話しかけと視覚刺激の呈示を行ない，さらに乳児と目が合うたびに即座に笑いかけた（図 21）。笑いかけは，乳児が実験者から視線をはずすまで持続した。ベースライン条件では，実験者は同様に乳児の顔を見ながら IDS による話しかけと視覚刺激の呈示を行なったが，乳児と目が合った場合は約 3 秒後に笑いかけた。つまり，ベースライン条件において実験者は即時的な随伴刺激の呈示は行なわなかった。

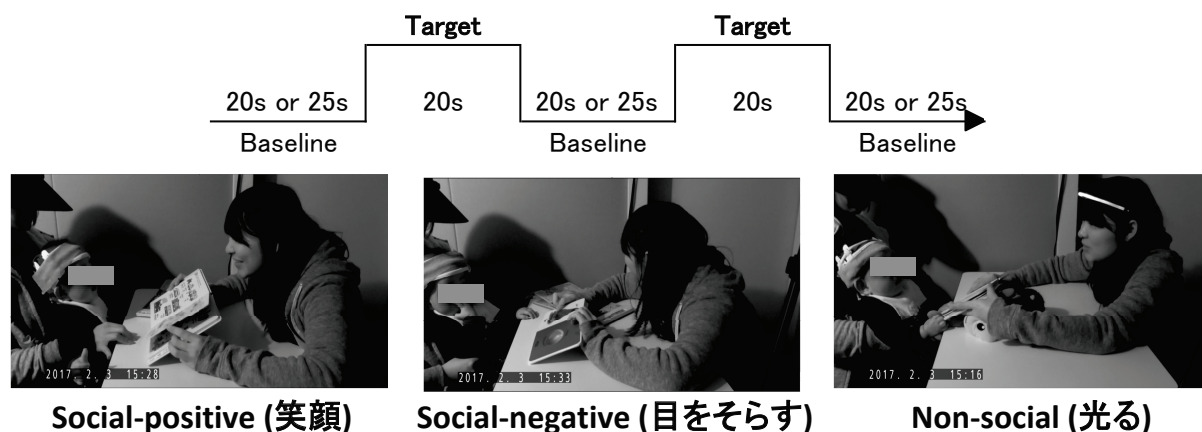


図 21. 実験の様子（下）と実験で用いたブロックデザイン（上）。実験者は乳児と目が合うたびに，実験 3-1 の Social-positive 条件では笑いかけ，実験 3-2 の Social-negative 条件では目をそらす，実験 3-3 の Non-social 条件では頭のデバイスを光らせて反応した。

4.2.2.3. fNIRS の装置と計測方法

fNIRS の装置と計測方法は実験 2 と同じであった。

4.2.2.4. 手続き

実験手続きは以下の点を除き、実験 2 と同じであった。fNIRS の計測手法はブロックデザインを採用し、1 種類のターゲット条件 (Social-positive 条件) はベースライン条件と交互に複数回呈示された (図 21)。ターゲット条件の時間は 20 秒とし、ベースライン条件の時間は、20 秒または 25 秒であった。ターゲット条件を最大 8 試行行ない、乳児がぐずった、もしくは飽きたと実験者に判断された場合は途中で実験を中止した。実験 2 と同様に、fNIRS 計測終了後は、母親との自由遊び場面の観察を行なった。

4.2.2.5. 手続きのフィデリティ

実験者によって刺激の呈示が適切に行なわれたことを確認するため、実験の意図を知らない心理学専攻の大学生が、実験者の行動 (IDS・発話内容の簡潔さ・ポジティブな表情と声・動作の流暢性) に関する評価を行なった。評価は、全参加児の約 25% について 20 秒インターバル記録法を用いて実施した。その結果、実験者の各行動が正しく観察された試行の割合は、ベースライン条件では IDS が 100%、発話内容が 100%、ポジティブな表現が 94%、動作の流暢性が 100%、ターゲット条件では IDS が 100%、発話内容が 100%、ポジティブな表現が 100%、動作の流暢性が 100% であった。

4.2.2.6. データの処理法

データの処理法は以下の点を除き、実験 2 と同じであった。fNIRS 計測中の乳児の社会的行動について、参加児の月齢が実験 1・2 よりも低く、指差し行動はほとんど観察されなかったため、実験 3 では乳児の発声と笑顔のみをコーディングした。fNIRS 信号の解析におけるターゲット区間の解析窓は、実験 2 と同様に、刺激呈示開始後 5-20 秒の間の反応ピークを中心とした前後 2.5 秒間 (合計 5 秒間) とし、刺激呈示開始後 16.6-21.6 秒に設定された。fNIRS データについて、3 試行以上の有効データが得られた乳児のみを採用した。実験 1・2 と同様に、FDR を用いた多重比較の補正無しの場合の結果も合わせて分析した。

4.2.3. 結果

4.2.3.1. fNIRS 計測中の行動

26名の参加児の有効試行数の平均は、ターゲット条件 5.1 ($S.D. = 1.4$), ベースライン条件 5.7 ($S.D. = 1.6$) であった。実験刺激への平均注視時間 (秒) は、ターゲット条件 18.0 ($S.D. = 1.5$), ベースライン条件 18.0 ($S.D. = 1.6$) であった。

fNIRS 計測中の乳児における「実験者の顔」と「もの」に対する平均注視時間を図 22a に示す。いずれの実験条件においても「もの」への注視が長い傾向にあった。実験刺激である「実験者の顔」と「もの」に対する注視時間を従属変数とする、実験条件要因 (ベースライン条件・ターゲット条件) × 実験刺激要因 (実験者の顔・もの) の 2 要因とも参加者内要因の 2 要因分散分析を行なった。その結果、実験刺激要因の有意な主効果 ($F(1, 25) = 48.895, p < 0.001, \text{partial } \eta^2 = 0.662$) が認められ、「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が有意に長いことが統計的にも支持された。実験条件要因の有意な主効果と交互作用は認められなかった (どちらも $p > 0.050$)。

社会的行動 (発声・笑顔) の生起時間は、どちらの生起時間もベースライン条件よりもターゲット条件において長くなる傾向を示した (図 23a)。2 種類の社会的行動 (発声・笑顔) の生起時間を従属変数とした、実験条件要因 (ベースライン条件・ターゲット条件) × 行動要因 (発声・笑顔) の 2 要因とも参加者内要因の 2 要因分散分析を行なった。その結果、実験条件要因の有意な主効果 ($F(1, 24) = 9.527, p = 0.005, \eta^2_p = 0.284$), 実験条件要因と行動要因の有意な交互作用 ($F(1, 24) = 4.570, p = 0.043, \eta^2_p = 0.160$) が認められた。行動要因の有意な主効果は認められなかった ($F(1, 24) = 3.110, p = 0.091, \eta^2_p = 0.115$)。Bonferroni 法を用いた下位検定の結果、ターゲット条件では、ベースライン条件に比べ、発声 ($p = 0.018$) と笑顔 ($p = 0.010$) の生起時間がどちらも有意に長くなった。

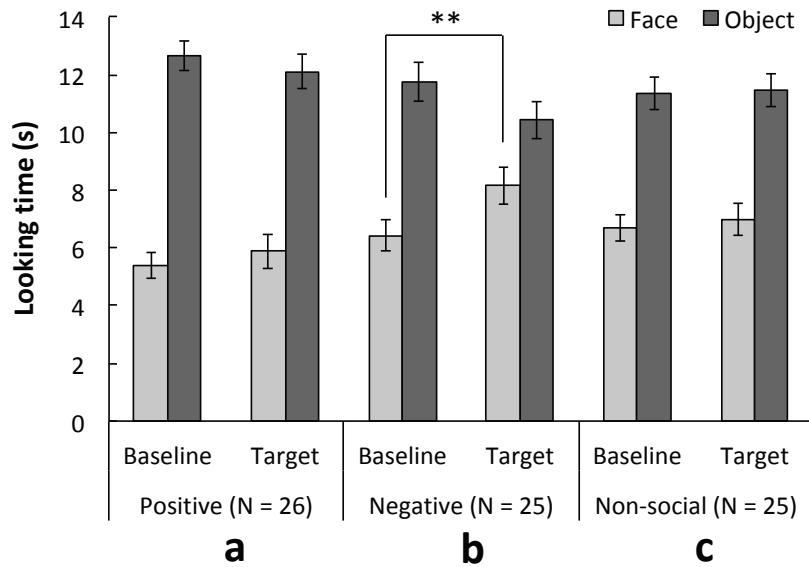


図 22. 実験 3-1 の Social-positive 条件 (a), 実験 3-2 の Social-negative 条件 (b), 実験 3-3 の Non-social 条件 (c) における「実験者の顔」と「もの」への平均注視時間 (** $p < 0.010$)。エラーバーは標準誤差を示す。

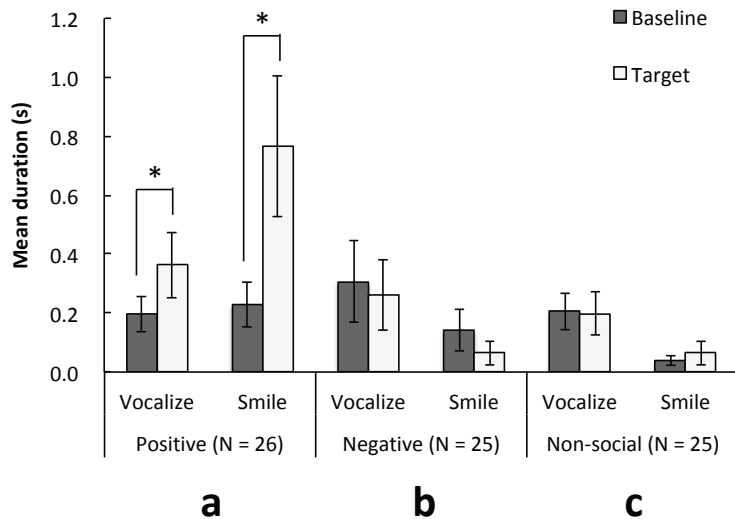


図 23. 実験 3-1 の Social-positive 条件 (a), 実験 3-2 の Social-negative 条件 (b), 実験 3-3 の Non-social 条件 (c) における社会的行動の平均生起時間 (* $p < 0.050$)。エラーバーは標準誤差を示す。

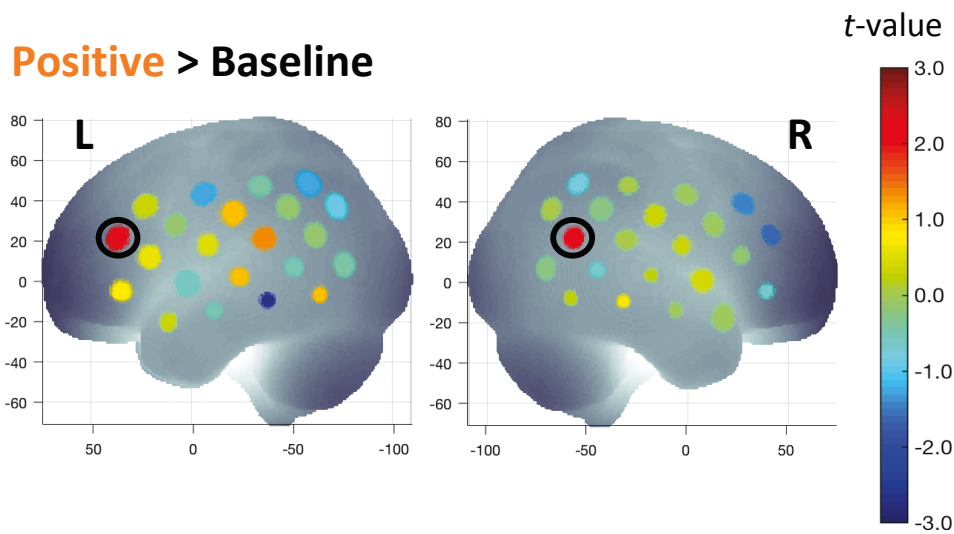


図 24. 実験 3-1 の Social-positive 条件におけるベースラインからの oxy-Hb 濃度の変化量を表した t -map。丸印が付けられたチャンネルは、有意な活動の増加が認められた Ch18（左の中前頭回または IFG）と Ch35（右の角回）を表す。

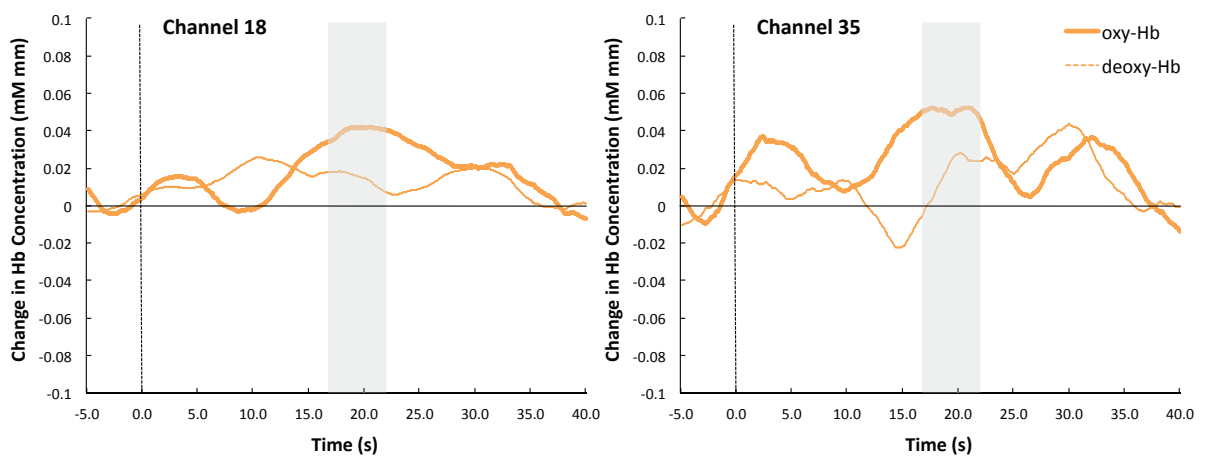


図 25. Ch18（左）と Ch35（右）におけるターゲット条件でのヘモグロビン濃度の時系列変化。薄い灰色の区間は解析窓を表す。

4. 2. 3. 2. fNIRS 計測の結果

21名の参加児のターゲット条件における有効試行数の平均は、5.8 ($S.D. = 0.8$)であった。体動アーチファクトが混入したため除外された全参加児のチャンネルの割合は 0.199 であった。ターゲット区間の解析窓（刺激呈示開始後 16.6-21.6 秒）における oxy-Hb 濃度の平均変化量と、刺激呈示前 5 秒間のベースラインに

おける平均変化量についてチャンネルごとに t 検定を行なった。その結果を図 24 に示す (チャンネル配置については図 14 参照)。各チャンネルは異なるレベルの活動を示したが、ターゲット条件において多重比較補正後に有意な oxy-Hb の変化を示したチャンネルは認められなかった。多重比較の補正無しの場合では、左の中前頭回あるいは IFG に相当する Ch18 ($t(18) = 2.372, p = 0.029, d = 0.77$) と、rTPJ 領域である角回に相当する Ch35 ($t(15) = 2.250, p = 0.040, d = 0.79$) において有意な oxy-Hb の増加が見られた (図 25)。ベースラインからの有意な活動の増加が見られた Ch18 (左の中前頭回あるいは IFG) と Ch35 (右の角回) の oxy-Hb 変化量の関連を調べたところ、有意傾向のある正の相関が認められた ($r(15) = 0.492, p = 0.063$)。このことから、ターゲット条件において rTPJ 領域の反応が大きかった乳児は、左の中前頭回あるいは IFG 領域の反応も大きかったことが示された。

4.2.3.3. 脳反応と社会性

ターゲット条件においてベースラインからの有意な oxy-Hb 濃度変化を示した左の IFG 領域 (Ch18) および rTPJ 領域 (Ch35) の活動と、自由遊び場面における母親や乳児の社会的行動との関連を検討した。まず、Ch18 および Ch35 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数、随伴反応の回数、母親主導の遊びの持続時間との間に有意な相関は認められなかった (表 4)。Ch18 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における乳児の母親の顔への注視時間または頻度との間にも有意な相関は見られなかったが、Ch35 において母親の顔への注視時間との間に有意傾向のある正の相関が示された。つまり、自由遊び場面において母親の顔を見る時間の長い乳児は、ターゲット条件における rTPJ 領域の脳反応が大きいことが示された (図 26)。実験 2 と同様、ターゲット条件における計測中の乳児の「実験者の顔」への注視時間と、左の中前頭回または IFG 領域 (Ch18) および rTPJ 領域 (Ch35) の活動との間には有意な相関は認められなかった (Ch18: $r(19) = -0.196, p = 0.421$; Ch35: $r(16) = 0.197, p = 0.466$)。自由遊び場面における乳児の母親の顔を見る行動と、母親の乳児に対する働きかけの関係について検討は実験 3-3 にてまとめて行なった。

表 4. ターゲット条件における Ch18 と Ch35 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数、随伴反応の回数、母親主導の遊びの持続時間および乳児の社会的参照行動の持続時間、頻度との相関係数。括弧内は p 値を表す ($+p < 0.100$)。

	Mother			Infant	
	Contingent imitation	Contingent response	Initiation of interaction	Attention to face (duration)	Attention to face (freq.)
Ch18 (IPFC; $N = 19$)	-0.003 (0.991)	-0.141 (0.565)	0.153 (0.532)	0.230 (0.343)	0.256 (0.290)
Ch35 (rTPJ; $N = 16$)	0.404 (0.121)	0.331 (0.211)	-0.021 (0.939)	0.472 (0.065)+	0.383 (0.143)

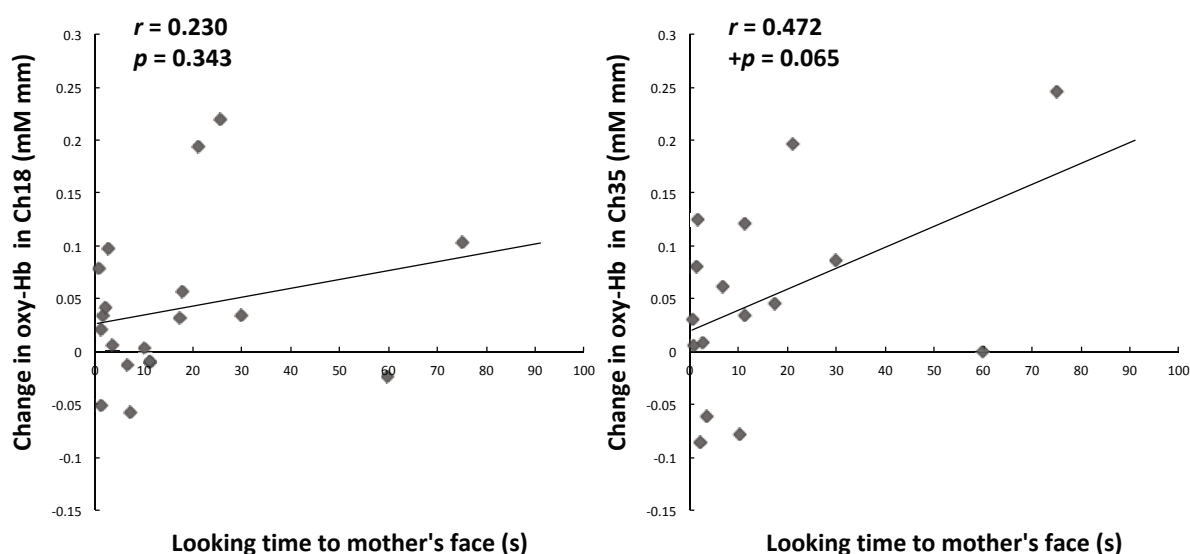


図 26. 自由遊び場面における乳児の母親の顔への注視時間と、ターゲット条件における Ch18 (左) と Ch35 (右) の oxy-Hb 変化量の相関 ($+p < 0.100$)

4.2.4. 考察

本実験の目的は、(1) 社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激 (笑いかけ) に対する左右の側頭部の活動を検討する、(2) ポジティブな社会的信号に対する TPJ 領域の活動と、自由遊び場面における母子の社会性との関連を検討することであった。fNIRS 計測中の乳児の行動反応を分析した結果、実験 1・2 と同様に、「実験者の顔」と「もの」への注視時間については、ベースライン条件とターゲット条件のどちらの条件においても、乳児は「実験者の顔」よりも「もの」を有意に長く注視することが明らかとなった。実験 2 の 6-8 ヶ月齢群においては、発声と笑顔の生起時間に条件間の差は見られなかったが、実験 3-1 においては、発声と笑顔の生起時間が、ベースライン条件よりもターゲット条件にお

いて長くなった。笑顔の生起時間が、随伴刺激のあるターゲット条件において増加する傾向は、実験 2 の 10-13 ヶ月齢群と一致していた。しかし、発声の生起時間は実験 1 の 12-14 ヶ月児や実験 2 の 10-13 ヶ月児とは逆の傾向を示した。これは、実験 1・2 の高月齢の乳児においては、ベースライン条件や Non-contingent 条件において、応答性の低い実験者の注意を引くための中性的な発声が増加したのに対し、実験 3-1 の 6-8 ヶ月児では、ターゲット条件において、応答性の高い実験者への笑顔の増加に伴った笑い声などのポジティブな発声が増加したためであると考えられた。本実験では中性的な発声とポジティブな発声の切り分けは行なわなかったが、今後は発声の感情価 (valence) についての詳細な分析を行なうことで、乳児の社会的行動の発達的变化についてのより深い議論が可能となるであろう。

一方、fNIRS 計測の結果では、実験 2 と同様に、ポジティブな随伴刺激に対して rTPJ 領域において活動の増加が認められた。実験 3-1 において oxy-Hb の増加が見られたチャンネルは、実験 2 とは位置が多少異なっていたが、計測領域の推定によると、実験 2 と同様の脳領域 (角回) に相当するチャンネルであった。また、左の TPJ 領域では有意な活動は実験 2 と同様に認められなかった。これら実験 3-1 の結果は、実験 2 の結果を再現したことから、初期の乳児期において、rTPJ 領域は、随伴刺激という高次な社会的信号の処理に関与しているとする実験 2 の結果が支持された。さらに、自由遊び場面において母親の顔を見る時間が長い乳児は、随伴刺激に対する rTPJ 領域の活動の増加量が大きくなる傾向が示された。このことから、実験 3-1 においても、乳児における他者の心的状態に対する感受性と rTPJ 領域の活動には関連があることが示唆された。

実験 2 の結果とは異なり、ターゲット条件において、rTPJ 領域だけでなく左の中前頭回あるいは IFG において活動の増加が認められた。実験 2 では、Contingent 条件 (実験 3-1 のターゲット条件に相当) においては両側の IFG 領域において活動の増加は見られなかったが、Non-contingent 条件 (実験 3-1 のベースライン条件に相当) において右の IFG 領域の活動の増加が認められた。IFG (運動前野を含む) 並びに前部 IPL は、ミラーニューロンシステム (mirror neuron system: MNS) の中枢として知られており、手や口唇などの動作の知覚、実行、模倣において同様の反応を示すことがわかっている (Gallese et al., 2004; Iacoboni, 2005; Rizzolatti & Craighero, 2004; Uddin et al., 2007)。mPFC, TPJ, ACC といった社会脳ネットワークが他者の心的状態の高次な理解に寄与している一

方で、MNSは他者の動作の目的や意図の、より低次な理解の処理を担っているとされている (Trapp et al., 2014)。最近ではこの2つの独立したネットワークが、相互に作用していることが明らかとなってきた (Hawco et al., 2017; Marsh & Hamilton, 2011; Van Overwalle & Baetens, 2009)。実際に成人を対象としたfMRI研究より、他者と共感するような課題 (Carr, Iacoboni, Dubeau, Mazziotta, & Lenzi, 2003; Zaki, Weber, Bolger, & Ochsner, 2009)、ものを使った他者との相互作用に関連した課題 (Ciaramidaro, Becchio, Colle, Bara, & Walter, 2014; Trapp et al., 2014)、心の理論課題 (Wolf, Dziobek, & Heekeren, 2010)などにおいて2つのネットワークの関連が多く示されている。中でも、TPJはIPLに近接していることから、Van Overwalle and Baetens (2009)は、TPJ領域がMNSとの仲介役を担っている可能性が高いと指摘している。生後12ヶ月の乳児においても、単純な他者の行為の意図理解が可能であることが示唆されていることから (Woodward, 2003)、本実験の結果は、発達初期より、少なくとも一部のMNSは機能しており、さらに、TPJとの連動した働きが見られたと解釈できる。しかし、実験2のContingent条件においては、両側のIFG領域において活動の増加は認められず、乳児期におけるIFG領域の役割については、この時期には頑健でない可能性も考えられる。今後より詳細な検討が必要である。

実験1・2のベースライン条件においては、実験者は乳児と目を合わせず、社会的相互作用が一切生じないような条件設定であったのに対し、実験3のベースライン条件では、実験者は乳児と目を合わせた自然な話しかけを行なった。つまり、実験3においてベースライン条件とターゲット条件との違いは、随伴刺激の呈示の有無のみであった。本実験では、純粹に随伴刺激に対する脳反応を検討するため、意図的にこのような条件設定を行なったが、ベースライン条件とターゲット条件の刺激の違いを小さくしたことで、ターゲット条件におけるベースラインからの活動の増加量が小さくなる可能性があった。実際に、実験1・2と比較して、今回の実験で観察されたrTPJ領域の活動の増加量は小さく、多重比較の補正を適用した場合には有意な活動は認められなかった。しかし、補正無しの場合に有意であったチャンネルのoxy-Hb変化の効果量はどれも大きい値を示し、実質的な差は大きいことが示されている。さらに、実験3-1で脳活動の変化が観察された脳領域(右の角回)は、実験2の結果と一致していた。これらのことから、本実験の結果は、信頼性の高い結果であると考えられた。

4.3. 実験 3-2：社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激（Social-negative 条件）

4.3.1. 目的

実験 3-2 では、実験 3-1 と同様に 6-8 ヶ月児を対象として、社会的に意味はあるがネガティブな随伴刺激（目をそらす）に対する、左右の側頭部、前頭部と頭頂部の一部の脳反応を検討した。さらに、ネガティブな社会的信号に対する TPJ 領域の活動と、自由遊び場面における母子の社会性との関連についても検討を行なった。実験 2・3-1 と同様に、実験者が乳児の前で IDS による話しかけを行ないながらハンドパペットまたは絵本を呈示し、ターゲット条件において実験者は乳児と目が合ったら即座に乳児から顔と目を背けた。ベースライン条件では、実験 3-1 と同様に目が合ってから目をそらすまでに約 3 秒間の遅延時間を設けた。

4.3.2. 方法

4.3.2.1. 実験参加児

解析の基準を通過した、6-8 ヶ月児 26 名（女児 11 名）のデータを採用した。すべての乳児は日本語を母語としており、発達において非定型性がないことが新版 K 式発達検査より確認されている（生澤他, 2002）。この他にも 5 名の乳児が参加したが、それぞれ fNIRS 計測中のぐずりにより計測不能であった（3 名）、プローブの装着を嫌がった（2 名）ため、今回の解析には加えなかった。26 名中 8 名の実験参加児は、動きや髪の毛によるノイズ混入のため fNIRS データの解析が困難であった（7 名）、計測中のぐずり・不注意により刺激条件の試行を必要数採用できなかった（1 名）ため、fNIRS データの分析からは除外し、計測中の行動データのみ解析した。逆に、ビデオ撮影に不備があった 1 名については計測中の行動データ分析からは除外し、fNIRS データのみ採用した。そのため、最終的な解析に用いたのは、計測中の行動データ 25 名（日齢 $M=211.8\pm 19.4$, 女児 11 名）、fNIRS データ 18 名（日齢 $M=211.9\pm 21.6$, 女児 8 名）であった。fNIRS データを採用した 18 名の実験参加児の頭囲、頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ、頭頂を介した鼻根から後頭結節までの長さの平均値は、順に 43.7 cm ($S.D. = 1.7$), 29.4 cm ($S.D. = 1.3$), 28.8 cm ($S.D. = 1.8$)であった。本研究の実施にあたり、実験参加児の保護者に対して研究参加について事前に説明し、同意を得た。本研究は慶應義塾大学文学部・文学研究科・社会学研究科における研究倫理委員

会の承認を得て実施した（受理番号：15032-1-1）。

4.3.2.2. 刺激・装置

刺激と装置は以下の点を除き、実験 3-1 と同じであった。ターゲット条件は Social-negative 条件の 1 条件のみであり、ターゲット条件では実験者は常に乳児の顔を見ながら IDS による話しかけと視覚刺激の呈示を行ない、さらに乳児と目が合うたびに乳児から目と顔をそらす反応を行なった（図 21）。この反応は、乳児が実験者から視線をはずすまで繰り返し行なった。

4.3.2.3. fNIRS の装置と計測方法

fNIRS の装置と計測方法は実験 2 と同じであった。

4.3.2.4. 手続き

手続きは実験 3-1 と同じであった。

4.3.2.5. 手続きのフィデリティ

実験者によって刺激の呈示が適切に行なわれたことを確認するため、実験の意図を知らない心理学専攻の大学生が、実験者の行動（IDS・発話内容の簡潔さ・表情の一貫性・動作の流暢性）に関する評価を行なった。評価は、全参加児の約 25%について 20 秒インターバル記録法を用いて実施した。その結果、実験者の各行動が正しく観察された試行の割合は、ベースライン条件では IDS が 100%、発話内容が 100%、表情の一貫性が 100%、動作の流暢性が 100%、ターゲット条件では IDS が 100%、発話内容が 100%、表情の一貫性が 100%、動作の流暢性が 100%であった。

4.3.2.6. データの処理法

データの処理法は以下の点を除き、実験 3-1 と同じであった。fNIRS 信号の解析におけるターゲット区間の解析窓は、実験 2・3-1 と同様に、刺激呈示開始後 5-20 秒の間の反応ピークを中心とした前後 2.5 秒間（合計 5 秒間）とし、刺激呈示開始後 12.5-17.5 秒に設定された。

4.3.3. 結果

4.3.3.1. fNIRS 計測中の行動

25名の参加児の有効試行数の平均は、ターゲット条件 5.0 ($S.D. = 1.3$), ベースライン条件 6.1 ($S.D. = 1.4$) であった。実験刺激への平均注視時間 (秒) は、ターゲット条件 18.6 ($S.D. = 1.3$), ベースライン条件 18.2 ($S.D. = 1.3$) であった。

fNIRS 計測中の乳児における「実験者の顔」と「もの」に対する平均注視時間を図 22b に示す。いずれの実験条件においても、「もの」への注視が長い傾向にあった。実験刺激である「実験者の顔」と「もの」に対する注視時間を従属変数とする、実験条件要因 (ベースライン条件・ターゲット条件) × 実験刺激要因 (実験者の顔・もの) の 2 要因について対応のある分散分析を行なった。その結果、実験刺激要因の有意な主効果 ($F(1, 24) = 13.151, p = 0.001, \eta^2_p = 0.354$) が認められ、「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が有意に長いことが統計的にも支持された。さらに、実験条件要因と実験刺激要因の有意な交互作用 ($F(1, 24) = 5.996, p = 0.022, \eta^2_p = 0.200$) も認められた。Bonferroni 法を用いた下位検定の結果、「実験者の顔」に対する注視時間は、ベースライン条件よりもターゲット条件で有意に長く ($p = 0.008$), 反対に「もの」に対する注視時間は、ターゲット条件よりもベースライン条件において長くなる傾向があった ($p = 0.058$)。

2 種類の社会的行動 (発声・笑顔) の生起時間については、ベースライン条件とターゲット条件間で大きな違いは見られなかった (図 23b)。実験条件要因 (ベースライン条件・ターゲット条件) × 行動要因 (発声・笑顔) の対応のある 2 要因分散分析の結果、有意な主効果と交互作用は認められなかった (すべて $p > 0.050$)。

4.3.3.2. fNIRS 計測の結果

18名の参加児のターゲット条件における有効試行数の平均は、5.5 ($S.D. = 1.2$) であった。体動アーチファクトが混入したため除外された全参加児のチャンネルの割合は 0.249 であった。ターゲット区間の解析窓 (刺激呈示開始後 12.5-17.5 秒) における oxy-Hb 濃度の平均変化量と、刺激呈示前 5 秒間のベースラインにおける平均変化量についてチャンネルごとに t 検定を行なった。その結果、多重比較の補正無しの場合であっても、有意な oxy-Hb の変化が見られたチャンネル

は観察されなかった（図 27）。

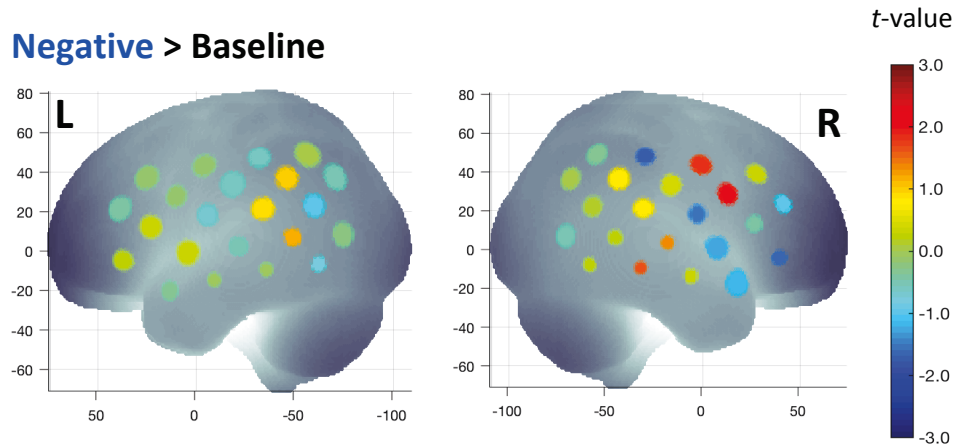


図 27. 実験 3-2 の Social-negative 条件におけるベースラインからの oxy-Hb 濃度の変化量を表した t-map

4.3.3.3. 脳反応と社会性

Social-negative 条件では、STS-TPJ 領域においてベースラインからの有意な oxy-Hb の変化は認められなかったため、自由遊び場面における母親や乳児の社会的行動との関連の検討は行なわなかった。

4.3.4. 考察

本実験の目的は、(1) 社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激（顔と目を背ける）に対する左右の側頭部の活動を検討する、(2) ネガティブな社会的信号に対する TPJ 領域の活動と、自由遊び場面における母子の社会性との関連を検討することであった。fNIRS 計測中の乳児の行動反応では、これまでの結果と異なり、「実験者の顔」と「もの」への注視時間についてベースライン条件とターゲット条件で有意差が認められた。具体的には、ベースライン条件に比べ、ターゲット条件では「実験者の顔」への注視時間が有意に長くなった。この結果は、目が合うたびに目を背けるといふ相手の反応が乳児にとって見慣れない刺激であったために、新奇刺激を選好する乳児では注視時間が増加したという解釈が考えられる (Fantz, 1964)。このように、行動評価においては条件間で違いが見られたが、脳活動においては、多重比較の補正無しの場合であっても、条件間で有意な差を示したチャンネルは観察されなかった。そのため、脳活動と母

子の社会性との関連についての検討は行なわなかった。この結果は、ネガティブな随伴刺激に対して、rTPJ 領域は賦活しない可能性を示している。しかし、目をそらすという反応が、乳児にとって本当にネガティブな意味を持っているのかについては議論の余地がある。なぜなら、上述した通り、今回は目をそらすという行動が、乳児にとって見慣れない新規刺激であった点が強調され、ネガティブな側面を持たなかったことが考えられるからである。また、ポジティブな随伴刺激（笑顔になる）に比べ、ネガティブな随伴刺激（目をそらす）では、刺激の物理的な変化量が大きく、単純な比較が困難であった。そのため、次の実験においては他のネガティブな反応（例：無表情）に対する脳活動を検討する必要があった。

4.4. 実験 3-3：社会的に意味のない随伴刺激（Non-social 条件）

4.4.1. 目的

実験 3-3 では、社会的に意味のない随伴刺激に対する、左右の側頭部、前頭部と頭頂部の一部の脳反応を検討した。さらに、非社会的な随伴刺激に対する TPJ 領域の活動と、自由遊び場面における母子の社会性との関連についても検討を行なった。今回はこのために、実験者というヒトが発する信号ではなく、人工的なモノが光るといった信号を用いた。具体的には、実験者の頭に LED 光を発するデバイスを付け、乳児に対して随伴刺激の呈示を行なった。実験 2・3-1・3-2 と同様に、実験者が乳児の前で IDS による話しかけを行ないながらハンドパペットまたは絵本を呈示し、ターゲット条件において実験者は乳児と目が合ったら即座に実験者の頭に付けたデバイスを点灯させた。ベースライン条件では、目が合ってからデバイスが光るまでに 3 秒間の遅延時間を設けた。実験 3-1・3-2 と同様に参加児は日本語圏の 6-8 ヶ月児とした。

4.4.2. 方法

4.4.2.1. 実験参加児

解析の基準を通過した、6-8 ヶ月児 25 名（女児 11 名）のデータを採用した。すべての乳児は日本語を母語としており、発達において非定型性がないことが新版 K 式発達検査より確認されている（生澤他, 2002）。この他にも 9 名の乳児が参加したが、それぞれ fNIRS 計測中のぐずりにより計測不能であった（6 名）、実験の手続きに不備があった（1 名）、プローブの装着を嫌がった（2 名）ため、

今回の解析には加えなかった。25 名の実験参加児のうち 2 名について、動きによるノイズ混入のため fNIRS データの解析が困難であった (1 名)、計測中のぐずり・不注意により刺激条件の試行を必要数採用できなかった (1 名) ため、fNIRS データの分析からは除外し、計測中の行動データのみ解析した。そのため、最終的な解析に用いたのは、計測中の行動データ 25 名 (日齢 $M = 209.9 \pm 20.3$, 女児 11 名), fNIRS データ 23 名 (日齢 $M = 210.8 \pm 20.5$, 女児 11 名) であった。fNIRS データを採用した 23 名の実験参加児の頭囲、頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ、頭頂を介した鼻根から後頭結節までの長さの平均値は、順に 43.8 cm ($S.D. = 1.6$), 29.5 cm ($S.D. = 1.3$), 28.8 cm ($S.D. = 1.6$) であった。本研究の実施にあたり、実験参加児の保護者に対して研究参加について事前に説明し、同意を得た。本研究は慶應義塾大学文学部・文学研究科・社会学研究科における研究倫理委員会の承認を得て実施した (受理番号: 15032-1-1)。

4.4.2.2. 刺激・装置

刺激・装置は以下の点を除き、実験 3-1 と同じであった。ターゲット条件は Non-social 条件の 1 条件のみであり、実験者は常に乳児の顔を見ながら IDS による話しかけと視覚刺激の呈示を行ない、さらに乳児と目が合うたびに実験者の頭につけた Facelooks と呼ばれるデバイス (蜂須・Pan・利根・Bourreau・鈴木, 2017) を白く点灯させた (図 21)。点灯は、乳児が実験者から視線をはずすまで持続した。ベースライン条件において、実験者は、乳児の顔を見ながら IDS による話しかけと視覚刺激の呈示を行なったが、乳児と目が合った場合は 3 秒後にデバイスが光った。実験者は乳児と目が合っていると判断した場合に足元のフットペダルを押すことで、刺激の制御を行なっている PC (ThinkPad T450S, lenovo) へと信号を送った。光るデバイスへは、この PC 上の (mbed (ARM Ltd.)) を用いて C++ 言語によってプログラミングされた) プログラムから Bluetooth 機能を利用して刺激のオンオフを知らせる信号を送り、刺激の制御を行なった。ターゲット条件では実験者がフットペダルを押したのと同時に光るように、ベースライン条件では押してから 3 秒の遅延時間をおいた後に自動で光るように設定された。

4.4.2.3. fNIRS の装置と計測方法

fNIRS の装置と計測方法は、以下の点を除き、実験 2 と同じであった。fNIRS

システムに試行の開始と終了を送信するためのトリガー信号の入力は、刺激の制御を行なっているのと同じ PC (ThinkPad T450S, lenovo) 上のプログラムを用いて行なった。また、この PC からは、実験者への手掛かり音の出力も同時に行なっていた。

4.4.2.4. 手続き

手続きは実験 3-1 と同じであった。

4.4.2.5. 手続きのフィデリティ

実験者によって刺激の呈示が適切に行なわれたことを確認するため、実験の意図を知らない心理学専攻の大学生が、実験者の行動 (IDS・発話内容の簡潔さ・表情の一貫性・動作の流暢性) に関する評価を行なった。評価は、全参加児の約 25%について 20 秒インターバル記録法を用いて実施した。その結果、実験者の各行動が正しく観察された試行の割合は、ベースライン条件では IDS が 100%、発話内容が 100%、表情の一貫性が 100%、動作の流暢性が 100%、ターゲット条件では IDS が 100%、発話内容が 100%、表情の一貫性が 94%、動作の流暢性が 100%であった。

4.4.2.6. データの処理法

データの処理法は以下の点を除き、実験 3-1 と同じであった。fNIRS 信号の解析におけるターゲット区間の解析窓は、実験 2・3-1・3-2 と同様に、刺激呈示開始後 5-20 秒の間の反応ピークを中心とした前後 2.5 秒間 (合計 5 秒間) とし、刺激呈示開始後 17.2-22.2 秒に設定された。

4.4.3. 結果

4.4.3.1. fNIRS 計測中の行動

25 名の参加児の有効試行数の平均は、ターゲット条件 5.2 ($S.D. = 1.5$)、ベースライン条件 5.8 ($S.D. = 2.0$) であった。実験刺激への平均注視時間 (秒) は、ターゲット条件 18.4 ($S.D. = 1.3$)、ベースライン条件 18.0 ($S.D. = 1.4$) であった。

fNIRS 計測中の乳児における「実験者の顔」と「もの」に対する平均注視時間を図 22c (左) に示す。これまでと同様、いずれの実験条件においても、「も

の」への注視が長い傾向にあった。実験刺激である「実験者の顔」と「もの」に対する注視時間を従属変数とする、実験条件要因（ベースライン条件・ターゲット条件）×実験刺激要因（実験者の顔・もの）の2要因について対応のある分散分析を行なった。その結果、実験刺激要因の有意な主効果 ($F(1, 24) = 25.539, p < 0.001, \eta^2_p = 0.516$)が認められ、「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が有意に長いことが統計的にも支持された。実験条件要因の有意な主効果と交互作用は認められなかった（どちらも $p > 0.050$ ）。

2種類の社会的行動（発声・笑顔）の生起時間については、ベースライン条件とターゲット条件間で大きな違いは見られなかった（図 23c）。実験条件要因（ベースライン条件・ターゲット条件）×行動要因（発声・笑顔）の参加者内要因の2要因分散分析の結果、行動要因の有意な主効果 ($F(1, 22) = 6.917, p = 0.015, \text{partial } \eta^2 = 0.239$)が認められ、笑顔よりも発声の生起時間が有意に長いことが示された。実験条件要因の有意な主効果と交互作用は認められなかった（どちらも $p > 0.050$ ）。

4.4.3.2. fNIRS 計測の結果

23名の参加児のターゲット条件における有効試行数の平均は、5.3 ($S.D. = 1.3$)であった。体動アーチファクトが混入したため除外された全参加児のチャンネルの割合は0.236であった。ターゲット区間の解析窓（刺激呈示開始後17.2-22.2秒）におけるoxy-Hb濃度の平均変化量と、刺激呈示前5秒間のベースラインにおける平均変化量について、チャンネルごとにt検定を行なった。その結果を図28に示す（チャンネル配置については図14参照）。各チャンネルは異なるレベルの活動を示したが、ターゲット条件において、多重比較補正後に有意なoxy-Hbの変化を示したチャンネルは認められなかった。多重比較の補正無しの場合では、2つのチャンネルにおいて有意にoxy-Hbの増加が認められた。それらのチャンネルは、左の中心前回に相当するCh17 ($t(16) = 2.358, p = 0.031, d = 0.81$)と、rTPJ領域であるpSTGあるいは縁上回に位置するCh34 ($t(16) = 2.154, p = 0.047, d = 0.74$)であった（図29）。ベースラインからの有意な活動の増加が見られたCh17（左の中心前回）とCh34（右のpSTGあるいは縁上回）のoxy-Hb変化量の関連を調べたところ、有意な相関は認められなかった ($r(12) = 0.470, p = 0.123$)。

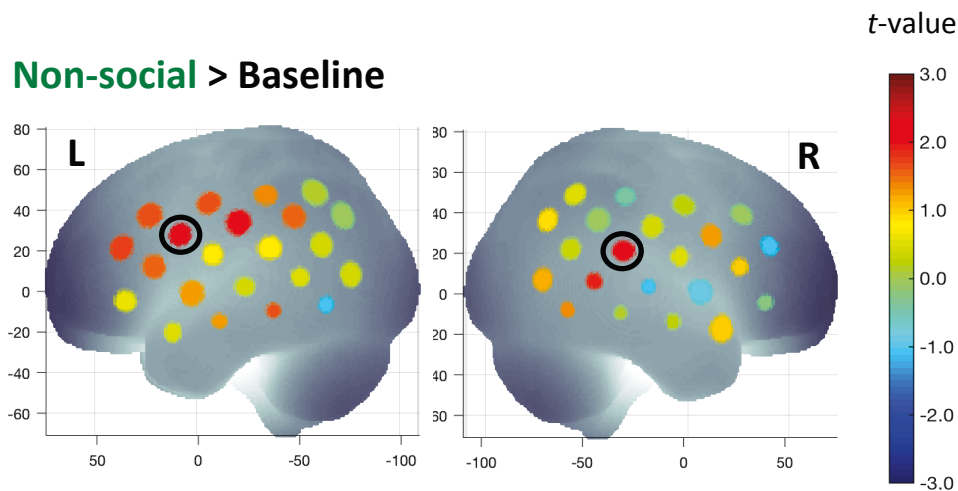


図 28. 実験 3-3 の Non-social 条件におけるベースラインからの oxy-Hb 濃度の変化量を表した t -map。丸印が付けられたチャンネルは、有意な活動の増加が認められた Ch17（左の中心前回）と Ch34（右の STG または縁上回）を表す。

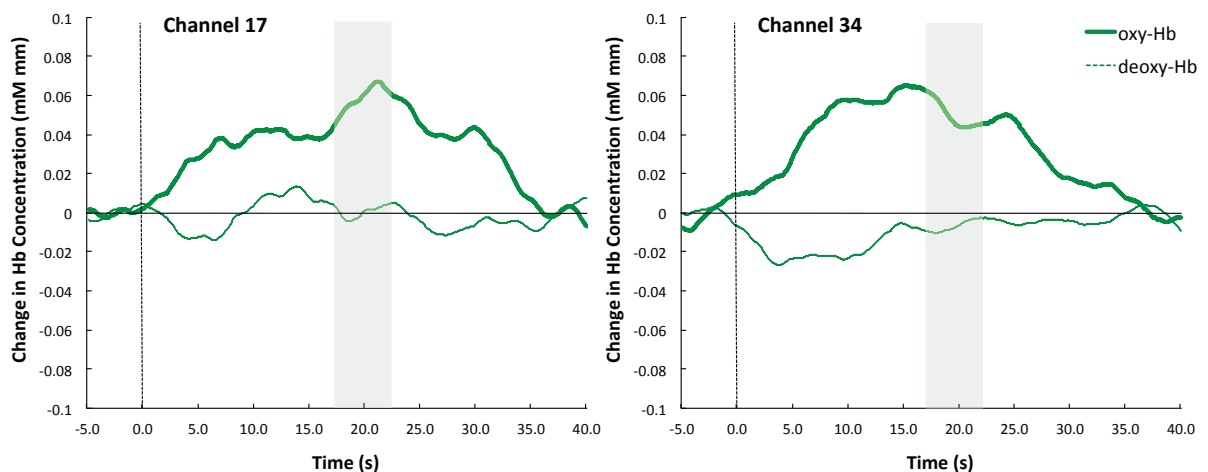


図 29. Ch17（左）と Ch34（右）におけるターゲット条件でのヘモグロビン濃度の時系列変化。薄い灰色の区間は解析窓を表す。

4.4.3.3. 脳反応と社会性

ターゲット条件においてベースラインからの有意な oxy-Hb 濃度変化を示した左の中心前回 (Ch17) および rTPJ 領域 (Ch34) の活動と、自由遊び場面における母親や乳児の社会的行動との関連を検討した。その結果、Ch17 および Ch34 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数、随伴反応の回数、母親主導の遊びの持続時間との間に有意な相関は認められず、さ

らに、Ch17 および Ch34 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における乳児の母親の顔への注視時間または頻度との間にも有意な相関は見られなかった(表 5)。また、ターゲット条件における計測中の乳児の「実験者の顔」への注視時間と、左の中心前回 (Ch17) および rTPJ 領域 (Ch34) の活動との間に、有意な相関は認められなかった (Ch17: $r(17) = 0.041$, $p = 0.876$; Ch34: $r(17) = 0.370$, $p = 0.144$)。このことから、実験 3-3 のターゲット条件における脳活動の増加は、計測中に乳児がどの程度「実験者の顔」へ注意を向けたかという行動指標では説明されないことが示された。

表 5. ターゲット条件における Ch17 と Ch34 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数、随伴反応の回数、母親主導の遊びの持続時間および乳児の社会的参照行動の持続時間、頻度との相関係数。括弧内は p 値を表す。

	Mother			Infant	
	Contingent imitation	Contingent response	Initiation of interaction	Attention to face (duration)	Attention to face (freq.)
Ch17 (left precentral gyrus; $N = 17$)	-0.251 (0.330)	-0.269 (0.296)	0.122 (0.640)	-0.040 (0.880)	0.055 (0.835)
Ch34 (rTPJ; $N = 17$)	0.023 (0.931)	0.029 (0.912)	-0.138 (0.597)	-0.108 (0.679)	-0.055 (0.835)

次に、実験 3-1・3-2・3-3 における参加児について、自由遊び場面における乳児の母親の顔を見る行動と、母親の乳児に対する働きかけの関係について検討を行なった。その結果、乳児の母親の顔を見る持続時間と、母親の随伴模倣 ($r(30) = 0.452$, $p = 0.012$) および母親の随伴反応 ($r(30) = 0.367$, $p = 0.046$) との間に、有意な正の相関が認められた (図 30)。同時に、母親の顔を見る持続時間と母親主導の遊びの持続時間 ($r(30) = 0.355$, $p = 0.055$) との間に、有意傾向のある正の相関が認められた (図 31)。つまり、自由遊び場面において母親の顔を見る時間の長い乳児の母親は、乳児の発声を随伴模倣する頻度と乳児の行動に随伴した反応を返す頻度が高く、また乳児の遊びへの積極的な介入時間も長い傾向があることが示された。母親の顔を見る頻度においては、母親の随伴模倣 ($r(30) = 0.297$, $p = 0.111$) および随伴反応 ($r(30) = 0.197$, $p = 0.298$) との間には有意な相関は認められなかったが、母親主導の遊びの持続時間 ($r(30) = 0.468$, $p = 0.009$) との間に有意な正の相関が認められた (図 31)。この結果から、自由遊び場面において母親の顔を見る頻度の多い乳児の母親は、乳児の遊びへの積極的な介入時間が長いことがわかった。

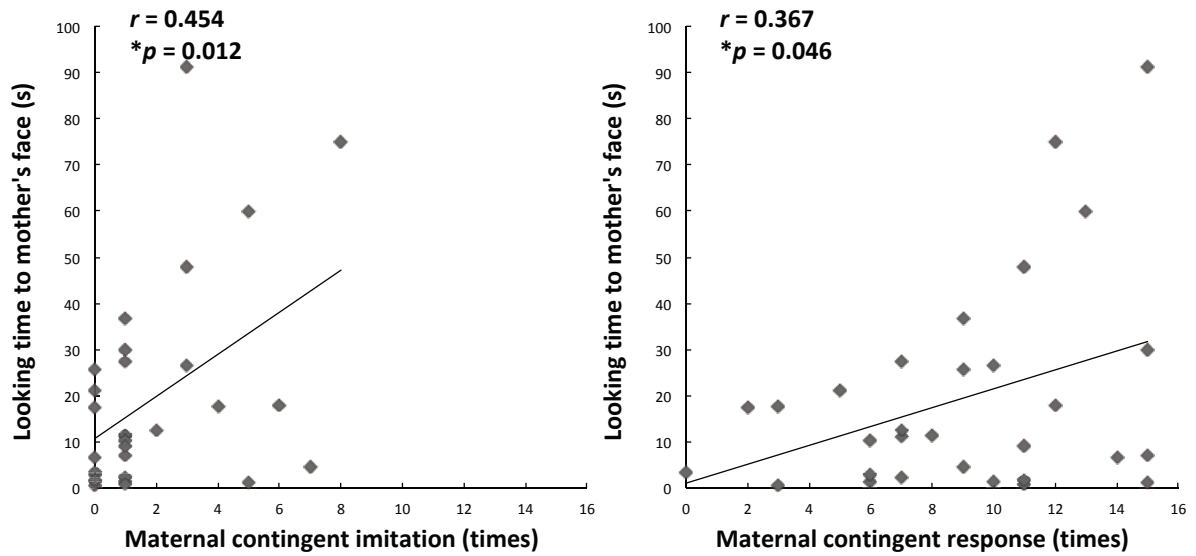


図 30. 自由遊び場面における母親の顔への注視時間と、母親の随伴模倣の回数（左）と随伴反応の回数（右）の相関（* $p < 0.050$ ）

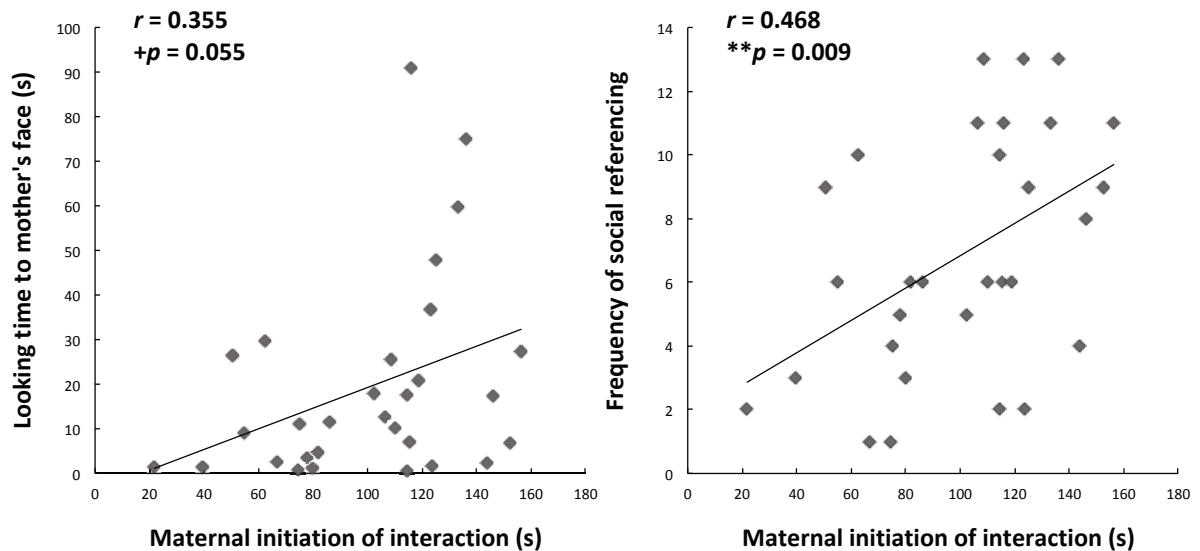


図 31. 自由遊び場面における母親主導の遊びの持続時間と、母親の顔への注視時間（左）と母親の顔を見る回数（右）の相関（+ $p < 0.100$, * $p < 0.050$ ）

4.4.4. 考察

本実験の目的は、(1) 社会的に意味のない随伴刺激（LED が光る）に対する左右の側頭部の活動を検討する、(2) 社会的に意味のない随伴刺激に対する TPJ 領域の活動と、自由遊び場面における母子の社会性との関連を検討することで

あった。fNIRS 計測中の乳児の行動反応を分析した結果、これまでと同様に、「実験者の顔」と「もの」への注視時間については、ベースライン条件とターゲット条件のどちらの条件においても、乳児は「実験者の顔」よりも「もの」を有意に長く注視することが明らかとなった。また、計測中の社会的行動の生起時間については、ベースライン条件とターゲット条件間で統計的な有意差は認められなかった。

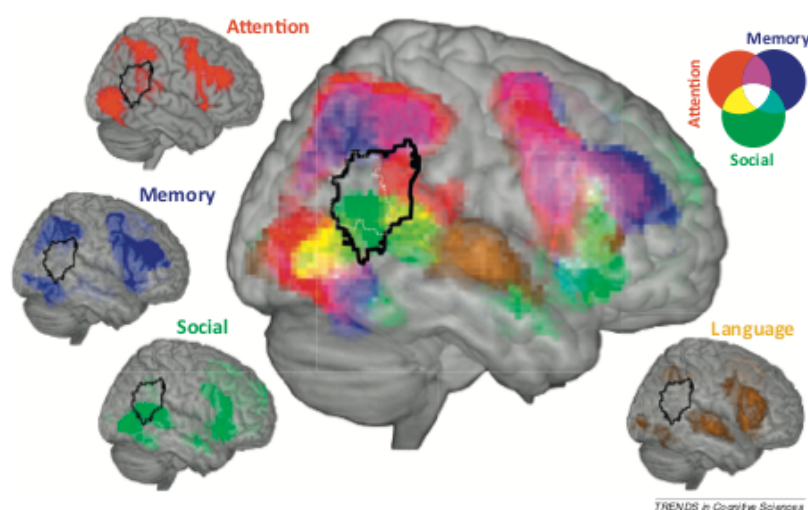


図 32. Carter and Huettel (2013)における、注意・記憶・言語・社会性に関連する課題での TPJ 領域（黒線）の活動を測定した先行研究のメタ分析結果。それぞれに関連する課題において報告される確率の高い活動領域が色ごと（注意：赤，記憶：青：言語：黄，社会性：緑）に示されている。

fNIRS 計測の結果では、実験 2・3-1 と同様に、社会的に意味のない随伴刺激に対して、rTPJ 領域において活動の増加が認められた。しかし、実験 3-3 において oxy-Hb の増加が見られたチャンネルは、実験 2・3-1 とは位置が異なっており、計測領域の推定によると、pSTG あるいは縁上回に相当するチャンネルであった。先行研究より、同じ TPJ 領域内でも場所によって機能が分化しており、心の理論などの社会的認知には角回を中心とした TPJ 領域の後方、注意の再定位が求められるような課題においては縁上回を中心とした前方領域の関連が指摘されている（図 32）（Carter & Huettel, 2013; Decety & Lamm, 2007; Kubit & Jack, 2013）。これらのことから、実験 3-3 において観察された rTPJ 領域の活動は、社会的刺激の処理を反映していたのではなく、注意由来の反応であった可能性が

考えられる。また、ターゲット条件において左の中心前回において活動の増加が認められた。中心前回の下部は IFG 領域に含まれることから、Ch17 における脳活動は、実験 3-1 と同様に MNS の働きによるものである可能性があった。さらに、実験 2・3-1 において観察された、自由遊び場面における乳児の社会的参照行動と、随伴刺激に対する rTPJ 領域の活動との間に、有意な関連は認められず、ポジティブな随伴刺激に対する脳反応とは性質が異なっていたことが考えられる。以上の結果は、社会的刺激に関与する TPJ における機能分化が、6-8 ヶ月児において既に成人と同様に発達していることを示唆している。

4.5. 総合考察

実験 3 の目的は、(1) rTPJ 領域が随伴性についての領域一般的な要因を処理しているのか、それとも社会的刺激に特異的な処理を行なっているのかを明らかにすること、(2) 随伴刺激に対する rTPJ 領域の活動と、自由遊び場面における母子の社会性との関連を検討することであった。fNIRS 計測中の乳児の行動反応を分析した結果、実験 1・2 と同様に、「実験者の顔」と「もの」への注視時間については、ベースライン条件とターゲット条件のどちらの条件においても乳児は、「実験者の顔」よりも「もの」を有意に長く注視することが明らかとなった。また、ネガティブな随伴刺激を呈示した実験 3-2 においてのみ、「実験者の顔」への注視時間について、ベースライン条件とターゲット条件で有意差が認められた。具体的には、ベースライン条件に比べ、ターゲット条件では「実験者の顔」への注視時間が有意に長くなった。計測中の発声と笑顔の生起時間においては、ポジティブな随伴刺激の呈示を行なった実験 3-1 においてのみ、条件間の有意差が認められ、ターゲット条件においてベースライン条件よりも発声と笑顔の生起時間が長くなることがわかった。

一方、fNIRS 計測結果においては、実験 2 と同様に、ポジティブな随伴刺激に対して、rTPJ 領域 (Ch35) の活動の増加が認められた。実験 3-1 において脳活動の増加が見られたチャンネルは、実験 2 (Ch40) に隣接するチャンネルであったが、脳部位は実験 2 と同じ角回に相当していた。実験 3-2 のネガティブな随伴刺激に対しては、両側の STS-TPJ 領域の活動は認められなかった。実験 3-3 においては、社会的な意味を持たない随伴刺激に対して、rTPJ 領域 (Ch34) の反応の増加が認められた。しかし、この領域は、実験 2・3-1 とは位置が少し異なっており、pSTG あるいは縁上回に相当する脳部位であった。成人において

TPJ 領域内の機能分化が示されており、心の理論などの社会的認知には、角回を中心とした TPJ 領域の後方の賦活がより多く報告されているのに対し、注意を再定位するといった Posner 課題に代表されるような注意関連の処理には、縁上回を中心とした前方領域の関連が多く指摘されている (Carter & Huettel, 2013; Decety & Lamm, 2007)。これらのことから、実験 3-3 において観察された rTPJ 領域の活動は、社会的刺激の処理を反映していたのではなく、注意由来の反応であった可能性が考えられた。以上のことから、rTPJ 領域は、全体として社会的信号である「随伴性」の検出にかかわっているが、rTPJ 内の領域によって処理をする随伴刺激の質が異なってくることを示唆された。つまり、社会的な（人間由来の）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解釈できる。社会的かつネガティブな随伴刺激については、刺激の妥当性に問題が残ったため、実験 3 の結果からは結論付けることは難しい。したがって、刺激を変えた検討を行なった上での考察が必要である。

本実験においても、ポジティブな随伴刺激に対する rTPJ 領域の活動と、自由遊び場面における乳児の社会的行動との間に関連が認められ、母親の顔を見る時間の長い乳児は、ターゲット条件における rTPJ 領域の活動の増加量が多い傾向があることが示された。本実験の結果は、実験 1・2 の結果を支持するものであり、自然な遊び場面における他者の顔への注意と社会的刺激の処理に関連する脳活動との関連を示唆している。興味深いことに、社会的でない随伴刺激に対する rTPJ 領域の活動と、自由遊び場面における乳児の社会的参照行動との間には、関連は認められなかった。この結果は、社会的刺激であるポジティブな随伴刺激に対する脳活動と、社会的でない随伴刺激に対する脳活動は、同様に rTPJ 領域内で生じているものの、性質の異なる処理過程を反映している可能性を示している。

また、実験 3-1・3-3 では、左の IFG 領域近辺において活動の増加が認められた。この結果は、TPJ 領域を含む社会脳ネットワークと関連した、IFG 領域を中心とする MNS の働きを反映している可能性が考えられた。しかし、本実験では主に側頭部の反応に焦点を当てていたため、前頭部は一部の領域の活動しか計測することができなかった。そのため、社会的認知に関与する PFC 領域の働きについては、ほとんど明らかにできなかった。多くの先行研究より、成人における社会脳ネットワークの中核として、PFC 領域（主に mPFC 領域）が社会的

認知機能に關与していることが明らかとなっており，社会脳ネットワークの發達の解明にはより詳細な前頭部の活動の検討が必須である。また，社会脳ネットワークにおいて，中心的な役割を担っているとされる mPFC と TPJ 領域間の機能的結合の検討を行なうことで，乳児期における社会的相互作用の脳内基盤を明らかにできるであろう。

5. 実験 4：随伴刺激の違いによる脳反応の検討：乳幼児における社会脳ネットワーク

5.1. 目的

実験 1・2・3 より、乳児においても、社会的信号の処理に pSTS-TPJ 領域が関わっていることが明らかとなった。この結果は、成人で報告されている社会脳ネットワークの中心領域の一つである STS-TPJ 領域が、6-8 ヶ月齢の乳児でも機能しており、それらは実験 3-3 の結果から、社会的な随伴性によりのみ関与していることが示唆された。しかし、STS-TPJ 領域と同様に社会的刺激の処理において重要な役割を果たしていると考えられている mPFC 領域を含む前頭部の活動については検討できていない。また、社会的信号の処理における、異なる脳領域間の機能的結合を検討することで、社会脳ネットワークの解明のために非常に有益な示唆を与えることが期待される。そのため実験 4 では、実験 3 と同様の実験を行ない、(1) 随伴刺激に対する前頭部、右側頭部、右頭頂部の一部の脳反応を計測するばかりでなく、(2) mPFC 領域と rTPJ 領域両者の機能的結合の検討を行なった。また、(3) 6-7 ヶ月児だけでなく、4-5 ヶ月児の計測も行なうことで、初期の乳児期における発達的变化についても検討した。さらに、(4) 随伴刺激に対する rTPJ および mPFC 領域と、自由遊び場面における母子の社会性との関連についても検討を行なった。実験 3-2 においてベースライン条件との違いが見られなかった Social-negative 条件については、実験刺激を変更した。具体的には、「顔や目をそらす」という反応から、乳児と目が合うたびに笑顔の状態から「無表情になる」という随伴刺激を採用した。成人を対象とした先行研究より、TPJ 領域が、MNS からの動作の知覚情報の入力を受け、mPFC よりも早い段階における行為のより低次な目的や意図の類推を行なっている一方、mPFC 領域は、自他に関する知識や社会的規範・文脈を考慮した、より長期かつ高次な心的状態の類推を行なっていると考えられている (Gallese et al., 2004; Keysers & Gazzola, 2007; Saxe & Powell, 2006; Uddin et al., 2007; Van Overwalle, 2009)。新生児期より見られる社会的信号に対する選択的な反応は、乳児期の後半から出現する共同注意や単純な意図理解、さらには幼児期以降の、より高次な相手の意図・信念の理解に繋がる前段階であると考えられる。また、TPJ 領域と mPFC 領域は、成人の社会的認知において中心的な役割を担っているが、乳児期の社会的刺激の処理においても、STS-TPJ 領域と PFC 領域が重要な役割を果たしていることが徐々に明らかとなってきている (Grossmann, 2015)。これらのことから、社会的

信号である随伴刺激に対し、TPJ 領域と並行した mPFC 領域の活動の増加が認められると予想された。

5.2. 実験 4-1：社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激（Social-positive 条件）

5.2.1. 目的

実験 4-1 では、社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激（笑いかけ）に対する、前頭部、右側頭部、右頭頂部の一部の脳反応を検討した。実験 3-1 と同様に、実験者が乳児の前で IDS による話しかけを行ないながらハンドパペットまたは絵本を呈示し、ターゲット条件では実験者は乳児と目が合ったら即座に笑いかけを行ない、ベースライン条件では目が合ってから笑いかけを行なうまでに約 3 秒間の遅延時間を設けた。実験 4-1 では、(1) 社会的にポジティブな随伴刺激に対する、右側頭部並びに前頭部の活動の検討、(2) rTPJ 領域と mPFC 領域の機能的結合の検討、(3) rTPJ 領域および mPFC 領域における活動と、自由遊び場面における母子の社会性の関連の検討、(4) 乳児期の初期における社会脳ネットワークの発達的变化の検討を行なうことを目的とした。参加児は日本語圏の 4-5 ヶ月児と 6-7 ヶ月児とした。

5.2.2. 方法

5.2.2.1. 実験参加児

解析の基準を通過し、最終的にデータを採用した実験参加児は、4-5 ヶ月齢群 17 名（女児 10 名）、6-7 ヶ月齢群 20 名（女児 7 名）であった。すべての乳児は日本語を母語としており、発達において非定型性がないことが新版 K 式発達検査より確認されている（生澤他, 2002）。この他にも 4-5 ヶ月齢群 3 名、6-7 ヶ月齢群 3 名の乳児が参加したが、それぞれプローブの装着を嫌がった（4 名）、fNIRS 計測中のぐずり・不注意により計測不能であった（2 名）ため、今回の解析には加えなかった。4-5 ヶ月齢群において最終的な解析に用いたのは、fNIRS 計測中の行動データ、fNIRS データともに 17 名（日齢 $M = 157.2 \pm 17.3$, 女児 10 名）であった。20 名の 6-7 ヶ月齢群のうち、動きによるノイズ混入のため fNIRS データの解析が困難であった 1 名については計測中の行動データのみ採用した。そのため、6-7 ヶ月齢群において最終的な解析に用いたのは、計測中の行動データ 20 名（日齢 $M = 204.0 \pm 12.7$, 女児 7 名）、fNIRS データ 19 名（日齢 $M = 203.6 \pm$

13.0, 女児 7 名) であった。fNIRS データを採用した 4-5 ヶ月齢群 17 名の頭囲, 頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ, 頭頂を介した鼻根から後頭結節までの長さの平均値は, 順に 42.4 cm (*S.D.* = 1.5), 28.8 cm (*S.D.* = 1.2), 28.2 cm (*S.D.* = 1.4) であり, 6-7 ヶ月齢群 19 名の頭囲, 頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ, 頭頂を介した鼻根から後頭結節までの長さの平均値は, 順に 43.6 cm (*S.D.* = 1.1), 29.9 cm (*S.D.* = 1.2), 29.4 cm (*S.D.* = 1.3) であった。本研究の実施にあたり, 実験参加児の保護者に対して研究参加について事前に説明し, 同意を得た。本研究は慶應義塾大学文学部・文学研究科・社会学研究科における研究倫理委員会の承認を得て実施した (受理番号: 15032-1-1)。

5.2.2.2. 刺激・装置

刺激と装置は以下の点を除き, 実験 3-1 と同じであった。実験 4 では正確な遅延時間を設けるため, 実験 3-3 で用いた刺激呈示用のデバイス (蜂須他, 2017) を乳児に見えないように実験者の足に装着し, デバイスの振動を手がかりにして刺激の呈示を行なった。実験者は乳児と目が合っていると判断した場合に足元のフットペダルを押すことで, 刺激の制御を行なっている PC (ThinkPad T450S, lenovo) へと信号を送った。デバイスへは, この PC 上の (mbed (ARM Ltd.) を用いて C++言語によってプログラミングされた) プログラムから Bluetooth 機能を利用して刺激のオンオフを知らせる信号を送り, 刺激の制御を行なった。ターゲット条件では実験者がフットペダルを押したのと同時に振動するように, ベースライン条件では押してから 3 秒の遅延時間をおいた後に振動するように設定された。

5.2.2.3. fNIRS の装置と計測方法

fNIRS の装置と計測方法は, 以下の点を除き, 実験 2 と同じであった。fNIRS システムに試行の開始と終了を知らせるためのトリガー信号の入力は, 刺激の制御を行なっているのと同じ PC (ThinkPad T450S, lenovo) 上のプログラムを用いて行なった。また, この PC からは, 実験者への手掛かり音の出力も同時に行なっていた。計測部位は前頭部と右の側頭部 (下前頭領域から後部側頭領域まで) とし, 8 つの照射プローブと 7 つの検出プローブを, 交互に縦 3×横 5 の長形状に 2cm 間隔で配置したプローブパッドを乳児の前頭と右の側頭部に一枚ずつ装着した (図 35 参照)。前と右それぞれに 22 チャンネルあったため,

計 44 チャンネルにおいて計測を行なった。このとき、前頭のプローブパッドの下行中央に位置する照射プローブが、それぞれの乳児において国際 10-20 法の Fpz と重なるように配置され、この下行が Fp1, Fp2, T3, T4, O1, O2 (horizontal reference curve) を結んだラインに沿うようにプローブパッドを装着した。右の側頭部に配置したプローブパッドの位置は実験 2 と同じであった。

5.2.2.4. 手続き

実験手続きは実験 3-1 と同じであった。

5.2.2.5. 手続きのフィデリティ

実験者によって刺激の呈示が適切に行なわれたことを確認するため、実験の意図を知らない心理学専攻の大学生が、実験者の行動 (IDS・発話内容の簡潔さ・ポジティブな表情と声・動作の流暢性) に関する評価を行なった。評価は、全参加児の約 25% について 20 秒インターバル記録法を用いて実施した。その結果、実験者の各行動が正しく観察された試行の割合は、ベースライン条件では IDS が 100%、発話内容が 100%、ポジティブな表現が 85%、動作の流暢性が 96%、ターゲット条件では IDS が 100%、発話内容が 100%、ポジティブな表現が 100%、動作の流暢性が 100% であった。

5.2.2.6. データの処理法

データの処理法は以下の点を除き、実験 3-1 と同じであった。fNIRS 信号の解析におけるターゲット区間の解析窓は、プローブパッドごとに、刺激呈示開始後 5-20 秒の間の反応ピークを算出し、この反応ピークを中心とした前後 2.5 秒間 (合計 5 秒間) とした。そのため、4-5 ヶ月齢群の前頭プローブにおいては、刺激呈示開始後 2.5-7.5 秒、側頭プローブにおいては、刺激呈示開始後 3.8-8.8 秒に設定された。6-7 ヶ月齢群の前頭プローブにおいては、刺激呈示開始後 2.5-7.5 秒、側頭プローブにおいては、刺激呈示開始後 4.6-9.6 秒に設定された。fNIRS データについて、2 試行以上の有効データが得られた乳児のみを採用した。実験 1・2・3 と同様に、FDR を用いた多重比較の補正無しの場合の結果も合わせて分析した。

実験 4 では、脳活動の変化量の解析に加え、皮質領域間の機能的結合の強さの評価を行なった。ベースライン条件とターゲット条件を合わせた oxy-Hb の時

系列変化について、ターゲット条件において有意な活動の増加が認められたチャンネルのうち、pSTS-TPJ 領域 (Ch34, Ch35, Ch38, Ch39, Ch40, Ch43, Ch44) と背内側前頭前野 (dorsomedial PFC: dmPFC) 領域 (Ch16, Ch20, Ch21) に該当するチャンネルをシードとして、その他の 43 チャンネル (参加児ごとに体動アーチファクトによる信号変動を含む試行やチャンネルは脳活動の分析と同じ基準で除外した) との間の相関係数 (r) を Matlab (The MathWorks, Inc.) の “corrcoef” 関数を用いて算出し、参加児間で平均した (このようにして求められる相関を領域間の機能的結合と呼び、2 つの異なるチャンネルで計測された oxy-Hb 濃度が似たような時間的变化を示して活動が同期している場合、相関係数 (r) は高くなるため領域間の機能的結合が強いと考える)。その後、算出された相関係数 (r) を正規分布に近似させるために Fisher の z 変換を適用し、チャンネルペアごとの $z(r)$ 値について、検定値を 0 とする、1 サンプルの t 検定を行なった。脳活動量の解析と同様に、機能的結合の解析においても FDR を用いた多重比較の補正無しの場合の結果も合わせて分析した。

5.2.3. 結果

5.2.3.1. fNIRS 計測中の行動

17名の4-5ヶ月齢群の有効試行数の平均は、ベースライン条件 6.5 ($S.D. = 1.3$), ターゲット条件 5.9 ($S.D. = 1.3$) であった。20名の6-7ヶ月齢群の有効試行数の平均は、ベースライン条件 6.0 ($S.D. = 1.8$), ターゲット条件 5.4 ($S.D. = 1.4$) であった。4-5ヶ月齢群の実験刺激への平均注視時間 (秒) は、ベースライン条件 18.9 ($S.D. = 0.7$), ターゲット条件 19.1 ($S.D. = 0.9$) となり、6-7ヶ月齢群の実験刺激への平均注視時間 (秒) は、ベースライン条件 18.4 ($S.D. = 1.3$), ターゲット条件 18.9 ($S.D. = 1.0$) であった。

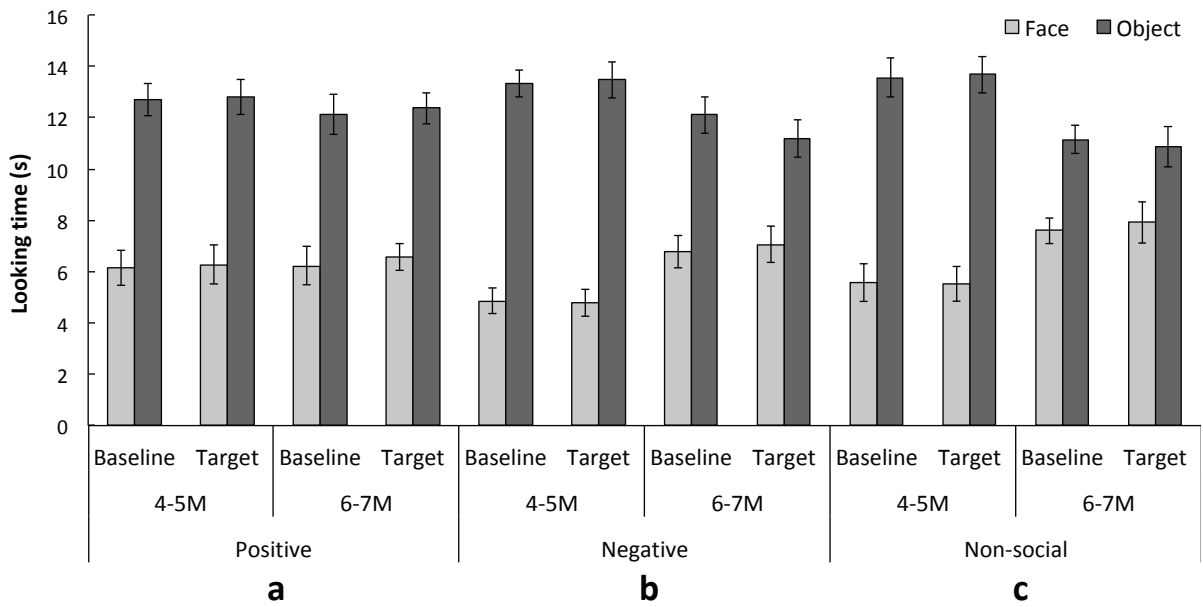


図 33. 実験 4-1 の Social-positive 条件 (a), 実験 4-2 の Social-negative 条件 (b), 実験 4-3 の Non-social 条件 (c) における 4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群「実験者の顔」と「もの」への平均注視時間

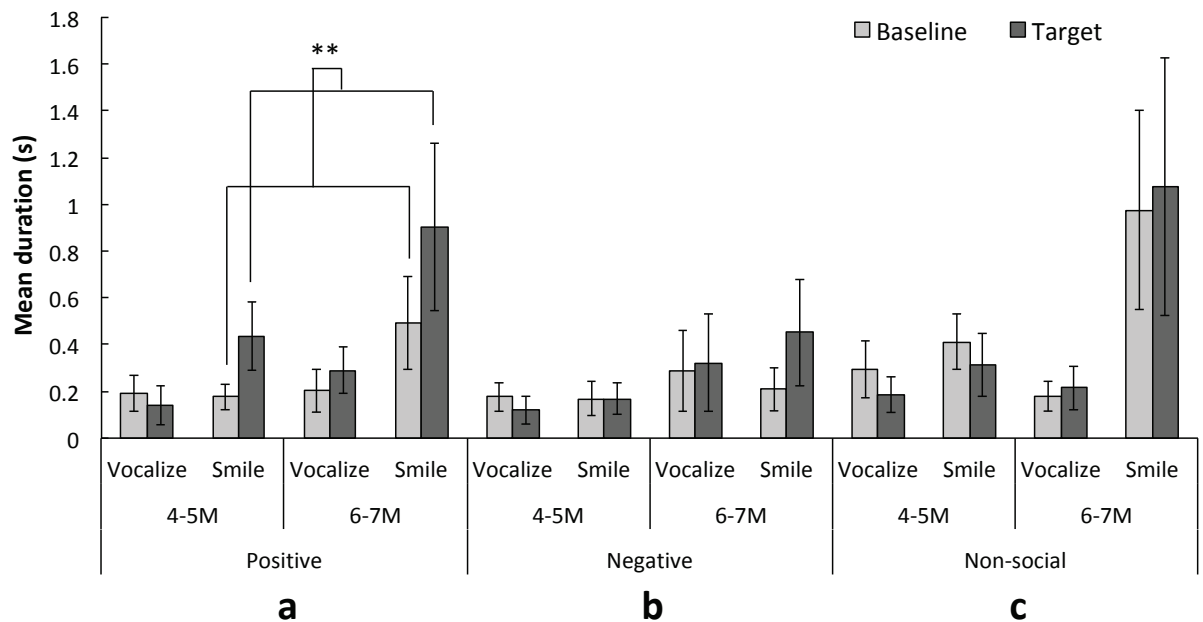


図 34. 実験 4-1 の Social-positive 条件 (a), 実験 4-2 の Social-negative 条件 (b), 実験 4-3 の Non-social 条件 (c) における社会的行動の平均生起時間 (** $p < 0.010$)。エラーバーは標準誤差を示す。

まず、実験刺激である「実験者の顔」と「もの」に対する条件別の注視時間を図 33a に示す。いずれの実験条件においても、「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が長い傾向にあった。また、4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群の間に差はほとんど見られなかった。「実験者の顔」と「もの」に対する注視時間を従属変数とする、月齢要因 (4-5 ヶ月齢・6-7 ヶ月齢) × 実験条件要因 (ベースライン条件・ターゲット条件) × 実験刺激要因 (実験者の顔・もの) の後者 2 要因に対応のある 3 要因分散分析を行なった。その結果、実験条件要因の有意な主効果 ($F(1, 35) = 5.741, p < 0.022, \eta^2_p = 0.141$) と、実験刺激要因の有意な主効果 ($F(1, 35) = 45.963, p < 0.001, \eta^2_p = 0.568$) が認められた。このことから、月齢に関係なく、ベースライン条件よりもターゲット条件において実験刺激全体への注視時間が有意に長いことが示された。また、月齢や実験条件に関係なく、「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が有意に長いことが統計的にも支持された。その他の有意な主効果や交互作用は認められなかった (すべて $p > 0.050$)。

次に、2 種類の社会的行動 (発声・笑顔) の生起時間を従属変数とした、月齢要因 (4-5 ヶ月齢・6-7 ヶ月齢) × 実験条件要因 (ベースライン条件・ターゲット条件) × 行動要因 (発声・笑顔) の後者 2 要因に対応のある 3 要因分散分析を行なった (図 34a)。その結果、実験条件要因の有意な主効果 ($F(1, 33) = 8.041, p = 0.008, \eta^2_p = 0.196$) と、実験条件要因と行動要因の有意な交互作用 ($F(1, 33) = 7.642, p = 0.009, \eta^2_p = 0.188$) が認められた。Bonferroni 法を用いた下位検定の結果、笑顔の生起時間は、ターゲット条件においてベースライン条件よりも有意に長いことがわかった ($p = 0.004$)。その他の有意な主効果や交互作用は認められなかった (すべて $p > 0.050$)。

5.2.3.2. fNIRS 計測の結果

17 名の 4-5 ヶ月齢群のターゲット条件における有効試行数の平均は、5.8 ($S.D. = 1.3$) であった。19 名の 6-7 ヶ月齢群のターゲット条件における有効試行数の平均は、5.5 ($S.D. = 1.1$) であった。体動アーチファクトが混入したため除外された全参加児のチャンネルの割合は 0.215 であった。

ターゲット区間の解析窓における oxy-Hb 濃度の平均変化量と、刺激呈示前 5 秒間のベースラインにおける平均変化量について、チャンネルごとに t 検定を行なった。その結果を図 36 に示す (チャンネル配置については図 35 参照)。各チャンネルは異なるレベルの活動を示したが、4-5 ヶ月齢群、6-7 ヶ月齢群ともに

ターゲット条件において多重比較補正後に有意な oxy-Hb の変化を示したチャンネルは認められなかった。多重比較の補正無しの場合では、4-5 ヶ月齢群において、右の dmPFC 領域に相当する Ch21 ($t(15) = 2.321, p = 0.035, d = 0.82$)において有意な oxy-Hb の増加が見られた (図 37)。6-7 ヶ月齢群では、左の dmPFC 領域に相当する Ch20 ($t(16) = -2.653, p = 0.017, d = 0.91$) において有意な oxy-Hb の減少と、rTPJ 領域である角回に相当する Ch40 ($t(14) = 2.204, p = 0.045, d = 0.81$)において有意な oxy-Hb の増加が認められた (図 38)。ベースラインからの有意な活動の変化が見られた Ch20 (左の dmPFC) と Ch40 (右の角回) の oxy-Hb 変化量の関連を調べたところ、有意な相関は認められなかった ($r(14) = -0.043, p = 0.884$)。

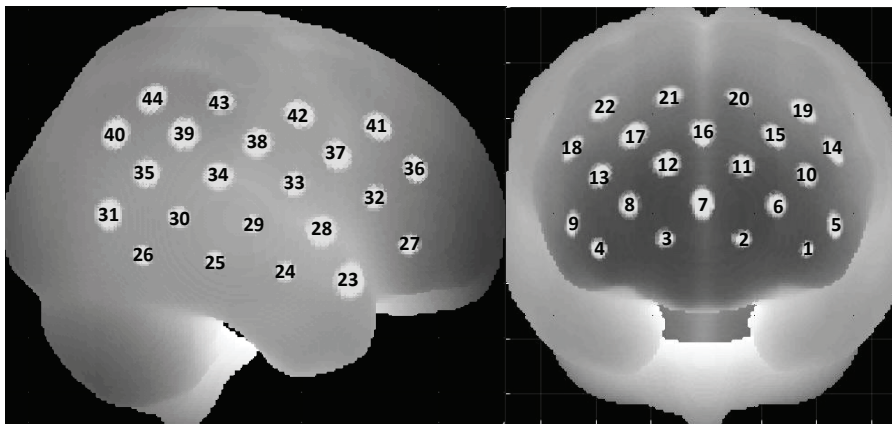
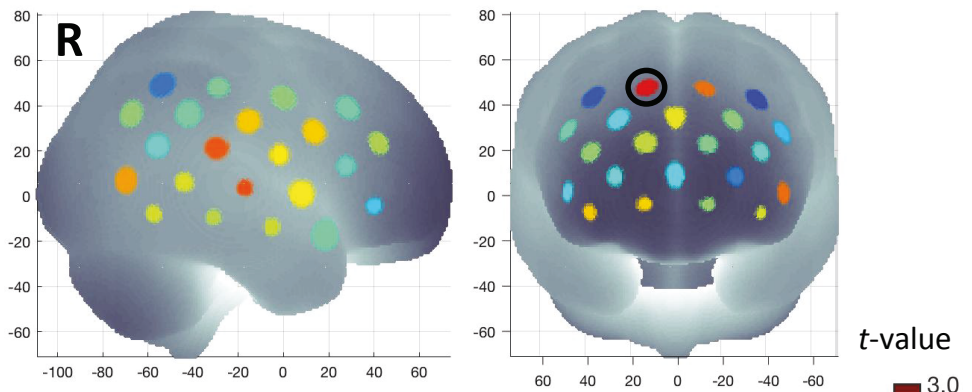


図 35. 実験 4 で用いられたチャンネル配置。

Positive > Baseline

4-5M



6-7M

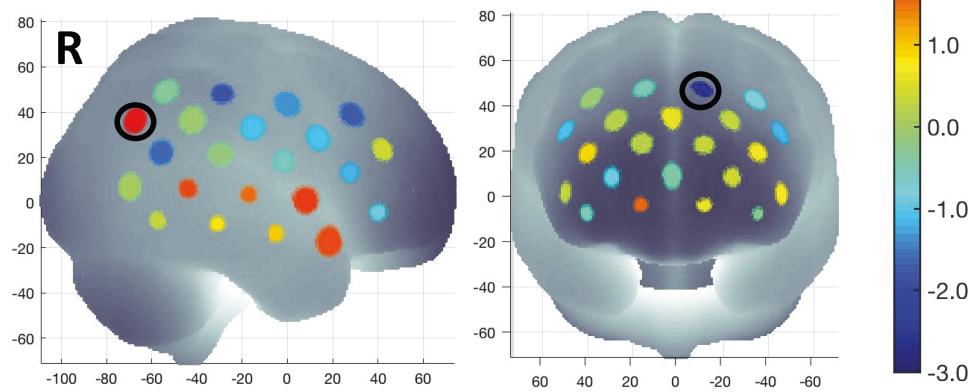


図 36. 4-5 ヶ月齢群（上）と 6-7 ヶ月齢群（下）のターゲット条件におけるベースラインからの oxy-Hb 濃度の変化量を表した t -map。丸印が付けられたチャンネルは、有意な活動の変化が認められた Ch20 (左の dmPFC), Ch21 (右の dmPFC), Ch40 (右の角回) を表す。

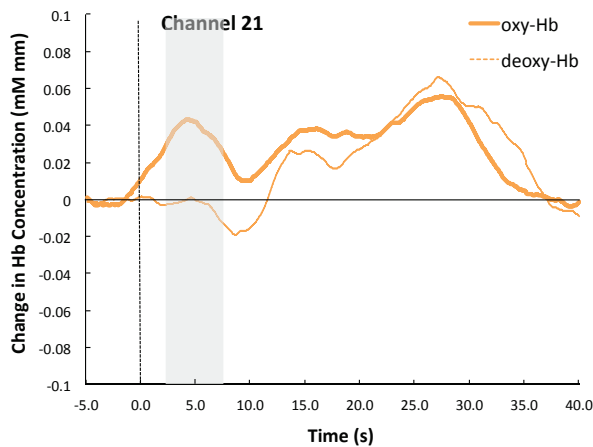


図 37. 4-5 ヶ月齢群の Ch21 (右の dmPFC) におけるターゲット条件でのヘモグロビン濃度の時系列変化。薄い灰色の区間は解析窓を表す。

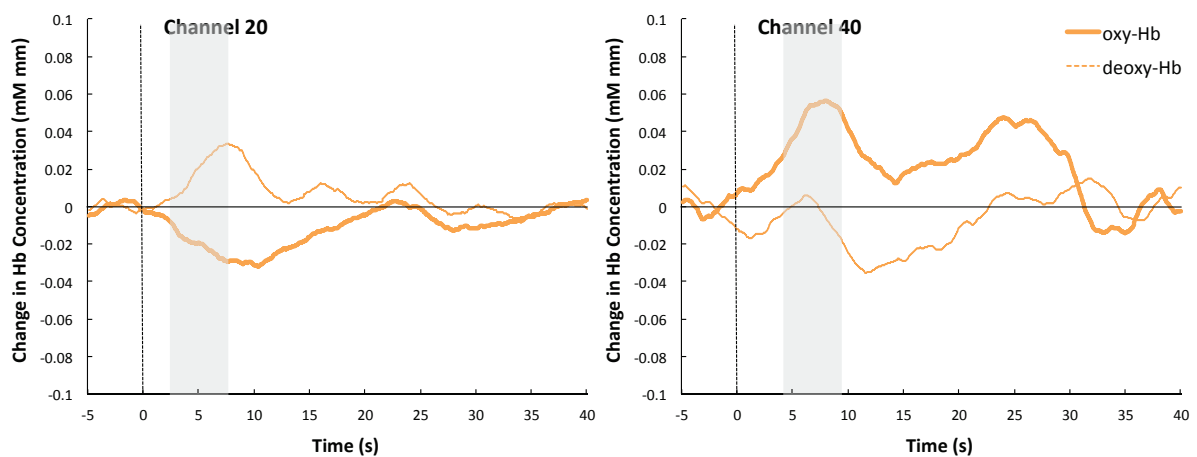


図 38. 6-7 ヶ月齢群の Ch20 (左の dmPFC) と Ch40 (右の角回) におけるターゲット条件でのヘモグロビン濃度の時系列変化。薄い灰色の区間は解析窓を表す。

今回、6-7 ヶ月齢群の Ch40 (右の角回) の oxy-Hb の時系列変化において、早いピークと遅いピークの2つの反応ピークが観察された(図 38)。その原因を探るため、ターゲット条件における「実験者の顔」への注視時間によって、「実験者の顔」を見る時間の長い Rich eye contact 群 (4-5M: 6名, 6-7M: 8名) と、見る時間の短い Poor eye contact 群 (4-5M: 6名, 6-7M: 7名) の2群に中央値で分類し、それぞれの群の Ch40 における oxy-Hb の時系列変化を比較した(図 39)。その結果、ターゲット条件の Ch40 において有意な活動の増加が見られた6-7 ヶ月児

では、Rich eye contact 群と Poor eye contact 群の反応ピークが大きく異なっていることが明らかとなった。具体的には、ターゲット条件において「実験者の顔」をよく見る Rich eye contact 群の反応ピークは早く、あまり見ない Poor eye contact 群の反応ピークは遅くなっていた(実験 3-1 においても複数の反応ピークが観察されたが、「実験者の顔」への注視時間の違いによる反応ピークのずれは認められなかった)。ターゲット条件の Ch40 において活動の増加が認められなかった 4-5 ヶ月児では、Rich eye contact 群と Poor eye contact 群の oxy-Hb 変化量に大きな差は見られなかった。6-7 ヶ月齢群の Rich eye contact 群と Poor eye contact 群それぞれについて、Ch40 における刺激呈示開始後 5-20 秒の間の反応ピーク (Rich eye contact 群: 6.6 秒, Poor eye contact 群: 26.0 秒) を算出し、この反応ピークを中心とした前後 2.5 秒間 (合計 5 秒間) の oxy-Hb 濃度の平均変化量と、刺激呈示前 5 秒間のベースラインにおける平均変化量について、 t 検定を行なった。その結果、ベースラインからの oxy-Hb 濃度の増加について、多重比較の補正を行なった場合でも有意な変化として検出されるような、低い p 値と非常に大きな効果量が示された ($t(14) = 4.978, p < 0.001, d = 1.82$)。

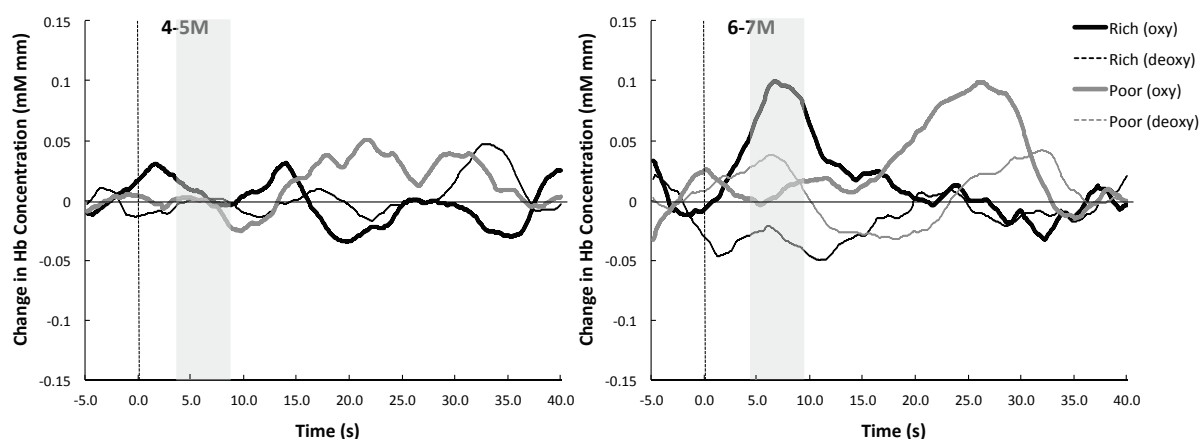


図 39. 4-5 ヶ月児 (左) と 6-7 ヶ月児 (右) の Rich eye contact 群と Poor eye contact 群における rTPJ 領域 (Ch40) のヘモグロビン濃度の時系列変化。薄い灰色の区間は最初のグループ解析で用いられた解析窓を表す。

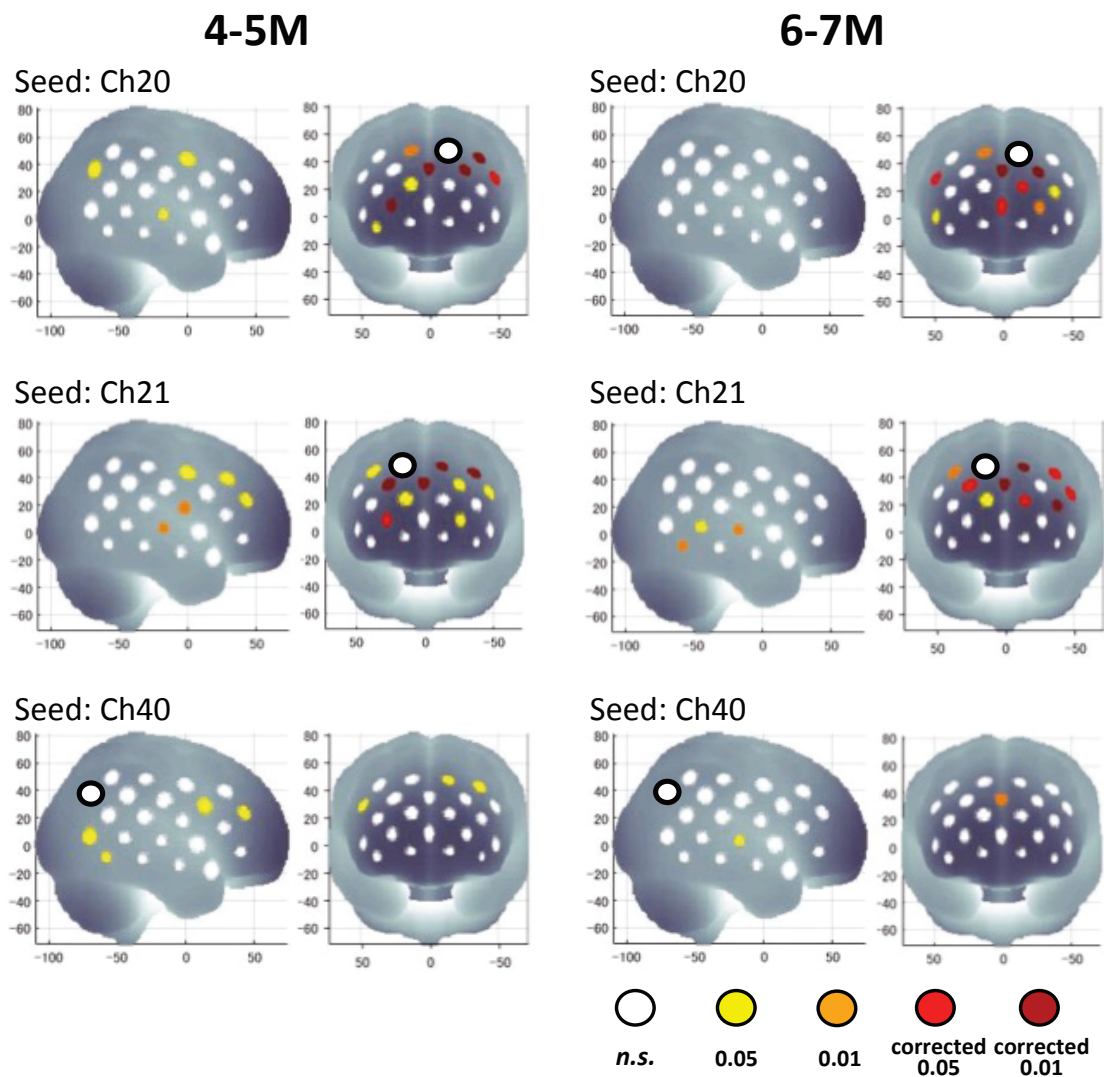


図 40. 実験 4-1 (Social-positive 条件) の 4-5 ヶ月齢群 (左) と 6-7 ヶ月齢群 (右) におけるシードのチャンネルとの機能的結合の強さ (p 値)。黒丸で示されているチャンネルはシードである Ch20 (左の dmPFC), Ch21 (右の dmPFC), Ch40 (右の角回) を表す。濃い赤が FDR 補正あり $p < 0.010$, 赤が FDR 補正あり $p < 0.050$, オレンジが補正無し $p < 0.010$, 黄色が補正無し $p < 0.050$, 白が補正無し $p > 0.050$ を表す。

表 6. 実験 4-1 (Social-positive 条件) の 4-5 ヶ月齢群において皮質領域間の機能的結合が認められたチャンネルペア (* $p < 0.050$, ** $p < 0.010$, *** $p < 0.001$)。ターゲット条件において有意な活動の増加を示した Ch20 (左の dmPFC), Ch21 (右の dmPFC), Ch40 (右の角回) をシードとした。

Seed	Channel	t	df	p (uncorrected)	p (FDR-corrected)	d
4-5M						
Ch20	4	2.78	7	0.0274	0.1472	1.39
	8	4.50	14	0.0005	0.0043 **	1.64
	12	2.19	16	0.0435	0.1761	0.75
	14	3.57	16	0.0025	0.0182 *	1.23
	15	5.06	16	0.0001	0.0012 **	1.74
	16	7.59	15	0.0000	0.0000 ***	2.68
	19	6.79	15	0.0000	0.0001 ***	2.40
	21	7.55	15	0.0000	0.0000 ***	2.67
	29	2.17	16	0.0451	0.1761	0.75
	40	2.51	12	0.0274	0.1472	0.98
	42	2.25	14	0.0412	0.1761	0.82
Ch21	6	2.43	14	0.0292	0.0605	0.89
	8	3.71	14	0.0023	0.0254 *	1.35
	12	2.33	16	0.0332	0.1015	0.80
	14	3.17	16	0.0059	0.0562	1.09
	15	2.26	16	0.0378	0.0628	0.78
	16	9.28	15	0.0000	0.0000 ***	3.28
	17	3.31	16	0.0044	0.0058 **	1.13
	19	4.52	15	0.0004	0.0012 **	1.60
	20	7.31	16	0.0000	0.0000 ***	2.51
	29	3.09	15	0.0075	0.0855	1.09
	33	3.79	16	0.0016	0.0462 *	1.30
	36	2.59	14	0.0213	0.0254 *	0.95
	37	2.12	15	0.0509	0.1022	0.75
	41	3.05	15	0.0080	0.0605	1.08
	42	3.01	15	0.0087	0.0628	1.07
Ch40	18	2.27	12	0.0426	0.2805	0.89
	19	2.53	11	0.0278	0.2805	1.03
	20	2.51	12	0.0274	0.2805	0.98
	26	2.25	11	0.0457	0.2805	0.92
	31	2.28	11	0.0437	0.2805	0.93
	36	2.47	10	0.0333	0.2805	1.05
	37	2.84	11	0.0160	0.2805	1.16

表 7. 実験 4-1 (Social-positive 条件) の 6-7 ヶ月齢群において皮質領域間の機能的結合が認められたチャンネルペア (* $p < 0.050$, ** $p < 0.010$, *** $p < 0.001$)。ターゲット条件において有意な活動の増加を示した Ch20 (左の dmPFC), Ch21 (右の dmPFC), Ch40 (右の角回) をシードとした。

Seed	Channel	t	df	p (uncorrected)	p (FDR-corrected)	d
6-7M						
Ch20	6	3.08	12	0.0096	0.0590	1.21
	7	4.03	16	0.0010	0.0104 *	1.38
	9	2.62	7	0.0344	0.1646	1.31
	10	2.64	17	0.0173	0.0930	0.88
	11	3.34	16	0.0042	0.0300 *	1.14
	15	4.40	16	0.0004	0.0064 **	1.51
	16	7.30	14	0.0000	0.0002 ***	2.67
	18	3.39	16	0.0038	0.0300 *	1.16
	21	4.95	14	0.0002	0.0046 **	1.81
Ch21	10	4.71	14	0.0003	0.0048 **	1.72
	11	2.99	14	0.0097	0.0418 *	1.09
	12	2.56	14	0.0228	0.0890	0.93
	14	4.01	14	0.0013	0.0129 *	1.46
	16	5.18	13	0.0002	0.0046 **	1.96
	17	3.39	14	0.0044	0.0209 *	1.24
	19	3.77	13	0.0023	0.0168 *	1.42
	20	4.95	14	0.0002	0.0046 **	1.81
	22	3.93	14	0.0015	0.0129 *	1.44
	26	3.50	12	0.0044	0.0209 *	1.37
	29	3.68	10	0.0043	0.0209 *	1.57
	30	2.41	10	0.0364	0.1304	1.03
Ch40	16	3.22	11	0.0081	0.3480	1.32
	29	2.26	10	0.0477	0.5893	0.96

5. 2. 3. 3. 皮質領域間の機能的結合

ターゲット条件において有意な活動の増加を示した, dmPFC 領域に相当する Ch20 と Ch21, そして rTPJ 領域に相当する Ch40 をシードとして, 皮質領域間の機能的結合の強さを検討した。4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群において検出されたチャンネル間の機能的結合を, それぞれ図 40, 表 6, 表 7 に示す。4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群ともに PFC 領域内を繋ぐ短距離の機能的結合が多く検出されたが, 異なる皮質領域間をまたぐ長距離の機能的結合はほとんど検出されなかった。ただし, 社会脳ネットワークの中核である dmPFC と TPJ 領域間の機能的結

合は、4-5 ヶ月齢群では Ch20 (左の dmPFC) と Ch40 (右の角回) の間に、6-7 ヶ月齢群では Ch40 (右の角回) と Ch16 (dmPFC) の間に多重比較の補正無しの場合において検出された。

5.2.3.4. 脳反応と社会性

実験 4-1 においてベースラインからの有意な oxy-Hb 濃度変化を示した dmPFC 領域 (Ch20 と Ch21) および rTPJ 領域 (Ch40) の活動と、自由遊び場面における母親や乳児の社会的行動との関連を検討した (表 8)。6-7 ヶ月齢群の Ch40 の oxy-Hb 変化量として、Rich eye contact 群と Poor eye contact 群それぞれの反応ピークを中心とした前後 2.5 秒間の oxy-Hb 濃度の平均変化量を採用した。まず、4-5 ヶ月齢群の Ch21 (右の dmPFC) の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴反応の回数との間に有意傾向のある負の相関が認められ、乳児への随伴反応を行なう頻度の高い母親の乳児は、ターゲット条件における右の dmPFC 領域の脳反応が小さい傾向にあることが示された。また、4-5 ヶ月齢群の Ch40 (右の角回) の oxy-Hb 変化量と、母親主導の遊びの持続時間との間にも有意な負の相関が認められ、乳児の遊びへの積極的な介入時間が長い母親の乳児は、ターゲット条件における rTPJ 領域の脳反応が小さいことが示された。さらに、6-7 ヶ月齢群の Ch40 (右の角回) の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴反応の回数との間に有意傾向のある正の相関が認められ、乳児への随伴反応を行なう頻度の高い母親の乳児は、ターゲット条件における rTPJ 領域の反応が大きい傾向にあることが示された。6-7 ヶ月齢群の Ch20 と Ch21 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数、随伴反応の回数、母親主導の遊びの持続時間との間に有意な相関は認められなかった。さらに、どちらの月齢群においても、ターゲット条件における Ch20, Ch21, Ch40 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における乳児の母親の顔への注視時間または頻度との間に有意な相関は見られなかった。また、ターゲット条件における計測中の乳児の「実験者の顔」への注視時間と、ターゲット条件における rTPJ 領域 (Ch40) の活動との間には、有意な相関は認められなかった (4-5M : $r(12) = 0.207, p = 0.518$; 6-7M : $r(15) = -0.153, p = 0.586$)。自由遊び場面における乳児の母親の顔を見る行動と、母親の乳児に対する働きかけの関係について検討は実験 4-3 にてまとめて行なった。

表 8. 4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群のターゲット条件における Ch20, Ch21, Ch40 の oxy-Hb 変化量と, 自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数, 随伴反応の回数, 母親主導の遊びの持続時間および乳児の社会的参照行動の持続時間, 頻度との相関係数。括弧内は p 値を表す ($+p < 0.100$, $*p < 0.050$)。

	Mother			Infant	
	Contingent imitation	Contingent response	Initiation of interaction	Attention to face (duration)	Attention to face (freq.)
4-5M					
Ch20 (N = 17)	0.028 (0.916)	0.099 (0.707)	0.071 (0.786)	-0.096 (0.713)	0.062 (0.814)
Ch21 (N = 16)	0.057 (0.834)	-0.486 (0.056)+	0.104 (0.701)	-0.103 (0.703)	-0.246 (0.358)
Ch40 (N = 12)	0.145 (0.654)	0.022 (0.945)	-0.599 (0.040)*	0.112 (0.728)	0.391 (0.209)
6-7M					
Ch20 (N = 17)	0.314 (0.219)	0.020 (0.940)	-0.020 (0.941)	0.375 (0.138)	0.372 (0.141)
Ch21 (N = 15)	0.312 (0.257)	0.193 (0.491)	-0.073 (0.797)	0.265 (0.339)	0.266 (0.338)
Ch40 (N = 15)	0.070 (0.804)	0.502 (0.056)+	-0.110 (0.696)	-0.387 (0.154)	0.022 (0.938)

5.2.4. 考察

本実験の目的は, (1) 社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激 (笑いかけ) に対する, 右側頭部並びに前頭部の活動を検討する, (2) rTPJ 領域と mPFC 領域の機能的結合を検討する, (3) rTPJ 領域および mPFC 領域における活動と, 自由遊び場面における母子の社会性との関連を検討する, (4) 乳児期の初期における社会脳ネットワークの発達的变化を検討することであった。まず, fNIRS 計測中の乳児の行動反応を分析した結果, 実験 1・2・3 と同様に, ベースライン条件とターゲット条件のどちらの条件においても, 乳児は, 「実験者の顔」よりも「もの」を有意に長く注視することが明らかとなった。また, 実験 2 の 10-13 ヶ月児, 実験 3-1 の 6-8 ヶ月児と同様に, 4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群の笑顔の生起時間は, ベースライン条件に比べてターゲット条件において有意に増加した。このことから, 実験者が笑いかけるというポジティブな随伴刺激に対し, 乳児のポジティブな反応が増加することが示され, 乳児が相手の随伴刺激に敏感に反応していたことが計測中の行動からも明らかとなった。

fNIRS 計測の結果では, 実験 2・3-1 と同様に, 6-7 ヶ月齢群ではポジティブな随伴刺激に対して rTPJ 領域における活動の増加が認められた。実験 4-1 において oxy-Hb の増加が見られたチャンネルは, これまでと同様に (実験 2 と相同チャンネル, かつ実験 3-1 と隣接するチャンネル), 角回に相当するチャンネルであった。この結果から, 実験 4-1 の結果は, 実験 2・3-1 の結果を再現したと考えられ, 乳児期において, rTPJ 領域は随伴刺激という高次の社会的信号の処理に関与しているとするこれまでの実験結果が支持された。4-5 ヶ月齢群において

は、ポジティブな随伴刺激に選択的な側頭部の活動増加は見られず、随伴刺激に対する rTPJ 領域の反応は、生後半年を過ぎる頃に確立する可能性が示された。一方、ポジティブな随伴刺激に対する前頭部の反応では、4-5 ヶ月齢群において、右の dmPFC 領域に相当するチャンネルにおいてベースラインからの有意な活動の増加が認められ、6-7 ヶ月齢群では、左の dmPFC 領域において有意な活動の減少が認められた。6-7 ヶ月齢群のターゲット条件において、dmPFC 領域の活動が減少した理由は現時点では明確ではないが、本実験の結果は、ポジティブな随伴刺激の処理における mPFC 領域の早期からの関与を示唆するものであった。

さらに、領域間の機能的結合では、検出された機能的結合の多くは隣接した領域を結ぶ距離の短いものであったが、4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群ともに、前頭と側頭部を繋ぐ長距離の機能的結合が認められた。また、どちらの月齢群においても、(多重比較の補正がない場合の結果ではあるが) 社会脳ネットワークの中核とされている rTPJ 領域と mPFC 領域間の機能的結合が検出された。静睡眠時の脳活動を計測した先行研究より、生後 1 年の間に異なる領域を結ぶ長距離の機能的結合が著しく発達し、2 歳頃には成人のような複雑な機能的結合を獲得することがわかっている (Fransson, Åden, Blennow, & Lagercrantz, 2011; Gao et al., 2009; Homae et al., 2010)。本実験の結果も、乳児期において社会的刺激の処理を担う社会脳ネットワークの一部の機能的結合が、未熟な形ではあるがすでに形成されていることを示唆している。

実験 2・3-1 の結果とは異なり、実験 4-2 では、自由遊び場面における母親の顔への注意と rTPJ 領域の活動の間に関連は認められなかった。この結果は、実験 4-1 の参加児の月齢が、実験 2・3-1 の参加児よりも小さかったことが要因の一つであると考えられる。実験 2・3-1 では 6-8 ヶ月児を対象としていたのに対し、実験 4-1 では詳細な発達的变化を捉えるため、6-7 ヶ月児のみを対象とした。生後 6-8 ヶ月の時期は粗大運動の発達が著しく (生澤他, 2002)、月齢が半月違うだけでも、座位の安定、腹臥位での方向転換、腹這い前進といった運動能力に大きな差が出てしまうことがあった。本研究では、自然な母子相互作用における乳児の社会的行動を観察するために、自由遊び場面における母親および乳児の姿勢や位置関係についての教示は一切行なわなかった。そのため、自発的な姿勢の移行がまだ見られないような乳児の場合、母親との位置関係によっては、母親の顔を見るのが困難であったり、反対に母親の顔を受動的に見続けたりといった場面があった。よって、特に月齢の小さかった実験 4-1 の結果は、参加児

本来の注意傾向を反映していなかった可能性があった。社会的認知機能の発達には、「自発的な」社会的刺激への注意が重要であることから (Senju et al., 2009), 乳児の母親の顔に対する自発的な注意を、より公正に計測できるような遊び場面の設定が必要であると考えられる。

本実験では、参加児によって、ターゲット条件の oxy-Hb 変化量のピークが大きく異なっていた。具体的には、fNIRS 計測中に「実験者の顔」を見る時間の長い乳児の反応ピークは早く、反対に「実験者の顔」をあまり見ない乳児の反応ピークは遅くなった。実験者の顔への注視時間が長い乳児は、早いタイミングから「実験者の顔」を見ている可能性が高く、そのためにポジティブな随伴刺激に対する脳反応も早く生じたと考えられた。しかし、なぜ実験 4-1 においてのみ、このような大きな反応ピークのずれが生じたのかについては疑問が残った。同時に実験 4-1 では、rTPJ 領域だけでなく、全体の反応ピークも早くなったため、解析窓も実験 2・3-1 よりも早い潜時で設定された。これらの反応時間やパターンの違いが生じた理由は明確ではないが、以下の可能性が考えられる。実験 3-1 では、「実験者の顔」への注視時間に依存した反応ピークの違いは見られなかったが、参加児ごとの反応ピークには多少のばらつきがあり、全体の oxy-Hb 濃度の時系列変化においても、実験 4-1 と同様に複数の反応ピークが観察された。したがって、早く顔を見る乳児が両実験においても存在するが、実験 4 では多少の月齢の違いのためか、実験 4 により多く存在した可能性も考えられる。このような参加児ごとの反応のタイミングの違いを生む要因については、「実験者の顔」に対する注視時間だけでなく、「実験者の顔」を見たタイミングも考慮に入れた、より詳細な分析を行なうことで今後明らかにできると考えられる。実験 4-1 においては反応のタイミングに個人差があったものの、これまで一貫してポジティブな随伴刺激に対する rTPJ 領域（角回）の活動の増加が認められており、非常に再現性の高い結果であると考えられた。

5.3. 実験 4-2：社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激（Social-negative 条件）

5.3.1. 目的

実験 4-2 では、実験 4-1 と同様に 4-5 ヶ月児と 6-7 ヶ月児を対象とし、社会的に意味はあるがネガティブな随伴刺激に対する、前頭部、右側頭部、右頭頂部の一部の脳反応を検討した。実験 3-2 では、ネガティブな刺激として実験者は乳

児から目をそらすことを行なったが、実験 4-2 では、実験者は乳児と目が合うたびに笑顔の状態から無表情になった。自然な対人相互作用場面と比較して、相手が無表情のまま無言で乳児の顔を注視し続けるような still-face 場面では、目をそらしたりぐずったりといった乳児のネガティブな反応が増加することが知られている (Delgado et al., 2002; Rochat, Striano, & Blatt, 2002; Tronick, Als, Adamson, Wise, & Brazelton, 1978)。そのため、無表情が乳児にとってネガティブな意味を持っている可能性は高いと考えられた。実験では、実験者が乳児の前で IDS による話しかけを行ないながら常に笑顔でハンドパペットまたは絵本を呈示し、ターゲット条件において実験者は乳児と目が合ったら即座に顔を無表情に変化させた。ベースライン条件では目が合ってから実験者が無表情になるまでに約 3 秒間の遅延時間を設けた。実験 4-2 では、(1) 社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激（無表情になる）に対する、右側頭部並びに前頭部の活動の検討、(2) rTPJ 領域と mPFC 領域の機能的結合の検討、(3) rTPJ 領域および mPFC 領域における活動と、自由遊び場面における母子の社会性の関連の検討、(4) 乳児期の初期における社会脳ネットワークの発達的变化の検討を行うことを目的とした

5.3.2. 方法

5.3.2.1. 実験参加児

解析の基準を通過し、最終的にデータを採用した実験参加児は、4-5 ヶ月齢群 18 名（女児 13 名）、6-7 ヶ月齢群 19 名（女児 7 名）であった。すべての乳児は日本語を母語としており、発達において非定型性がないことが新版 K 式発達検査より確認されている（生澤他, 2002）。この他にも 4-5 ヶ月齢群 1 名、6-7 ヶ月齢群 6 名の乳児が参加したが、それぞれプローブの装着を嫌がった（4 名）、fNIRS 計測中のぐずり・不注意により計測不能であった（3 名）ため、今回の解析には加えなかった。18 名の 4-5 ヶ月齢群のうち、ビデオ撮影に不備があった 1 名については計測中の行動データ分析からは除外し、fNIRS データのみ採用した。また、18 名中 3 名の 4-5 ヶ月齢群において、それぞれ動きによるノイズ混入のため fNIRS データの解析が困難であった（2 名）、fNIRS 計測中のぐずり・不注意により各刺激条件の試行を必要数採用できなかった（1 名）ため、fNIRS データの分析からは除外し、計測中の行動データのみ解析した。そのため、4-5 ヶ月齢群において最終的な解析に用いたのは、計測中の行動データ 17 名（日齢 $M =$

160.7±14.5, 女児 13 名), fNIRS データ 15 名(日齢 $M = 159.7 \pm 15.4$, 女児 11 名)であった。19 名の 6-7 ヶ月齢群のうち, 動きによるノイズ混入のため fNIRS データの解析が困難であった 1 名については, 計測中の行動データのみ採用した。そのため, 6-7 ヶ月齢群において最終的な解析に用いたのは, 計測中の行動データ 19 名(日齢 $M = 203.3 \pm 13.7$, 女児 7 名), fNIRS データ 18 名(日齢 $M = 204.4 \pm 13.3$, 女児 6 名)であった。fNIRS データを採用した 4-5 ヶ月齢群 15 名の頭囲, 頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ, 頭頂を介した鼻根から後頭結節までの長さの平均値は, 順に 42.3 cm ($S.D. = 1.0$), 28.7 cm ($S.D. = 1.3$), 28.3 cm ($S.D. = 1.3$) であり, 6-7 ヶ月齢群 18 名の頭囲, 頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ, 頭頂を介した鼻根から後頭結節までの長さの平均値は, 順に 43.5 cm ($S.D. = 1.2$), 29.8 cm ($S.D. = 1.0$), 29.2 cm ($S.D. = 1.0$)であった。本研究の実施にあたり, 実験参加児の保護者に対して研究参加について事前に説明し, 同意を得た。本研究は慶應義塾大学文学部・文学研究科・社会学研究科における研究倫理委員会の承認を得て実施した(受理番号: 15032-1-1)。

5.3.2.2. 刺激・装置

刺激と装置は以下の点を除き, 実験 4-1 と同じであった。ターゲット条件では実験者は常に乳児の顔を見ながら IDS による話しかけと視覚刺激の呈示を常に笑顔で行ない, さらに乳児と目が合うたびに即座に無表情となった。乳児が実験者から視線をはずすまで無表情を維持し, 視線が完全にはずれたのち笑顔に戻った。ベースライン条件では目が合ってから無表情になるまでに 3 秒間の遅延時間を設けた。

5.3.2.3. fNIRS の装置と計測方法

fNIRS の装置と計測方法は実験 4-1 と同じであった。

5.3.2.4. 手続き

手続きは実験 4-1 と同じであった。

5.3.2.5. 手続きのフィデリティ

実験者によって刺激の呈示が適切に行なわれたことを確認するため, 実験の意図を知らない心理学専攻の大学生が, 実験者の行動(IDS・発話内容の簡潔さ・

笑顔から無表情への変化・動作の流暢性)に関する評価を行なった。評価は、全参加児の約 25%について 20 秒インターバル記録法を用いて実施した。その結果、実験者の各行動が正しく観察された試行の割合は、ベースライン条件では IDS が 100%、発話内容が 100%、無表情への変化が 92%、動作の流暢性が 100%、ターゲット条件では IDS が 100%、発話内容が 100%、無表情への変化が 96%、動作の流暢性が 100%であった。

5.3.2.6. データの処理法

データの処理法は以下の点を除き、実験 4-1 と同じであった。fNIRS 信号の解析におけるターゲット区間の解析窓は、プローブパッドごとに、刺激呈示開始後 5-20 秒の間の反応ピークを算出し、この反応ピークを中心とした前後 2.5 秒間 (合計 5 秒間) とした。そのため、4-5 ヶ月齢群の前頭プローブにおいては、刺激呈示開始後 10.5-15.5 秒、側頭プローブにおいては、刺激呈示開始後 8.6-13.6 秒に設定された。6-7 ヶ月齢群の前頭プローブにおいては、刺激呈示開始後 17.4-22.4 秒、側頭プローブにおいては、刺激呈示開始後 11.6-16.6 秒に設定された。

5.3.3. 結果

5.3.3.1. fNIRS 計測中の行動

17名の4-5ヶ月齢群の有効試行数の平均は、ベースライン条件 5.8 ($S.D. = 1.7$)、ターゲット条件 4.8 ($S.D. = 1.8$) であった。19名の6-7ヶ月齢群の有効試行数の平均は、ベースライン条件 5.4 ($S.D. = 1.6$)、ターゲット条件 5.1 ($S.D. = 1.3$) であった。4-5ヶ月齢群の実験刺激への平均注視時間 (秒) は、ベースライン条件 18.2 ($S.D. = 0.9$)、ターゲット条件 18.2 ($S.D. = 1.9$) となり、6-7ヶ月齢群の実験刺激への平均注視時間 (秒) は、ベースライン条件 18.9 ($S.D. = 1.2$)、ターゲット条件 18.2 ($S.D. = 1.1$) であった。

実験刺激である「実験者の顔」と「もの」に対する条件別の注視時間を図 33b に示す。いずれの実験条件においても、「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が長い傾向にあった。また、4-5ヶ月齢群よりも6-7ヶ月齢群において、「実験者の顔」への注視時間が長い傾向にあった。「実験者の顔」と「もの」に対する注視時間を従属変数とする、月齢要因 (4-5ヶ月齢・6-7ヶ月齢) × 実験条件要因 (ベースライン条件・ターゲット条件) × 実験刺激要因 (実験者の顔・も

の) の後者 2 要因に対応のある 3 要因分散分析を行なった。その結果、実験刺激要因の有意な主効果 ($F(1, 34) = 67.280, p < 0.001, \eta^2_p = 0.664$) が認められ、月齢や実験条件に関係なく「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が有意に長いことが統計的にも支持された。さらに、月齢要因と実験刺激要因の有意な交互作用 ($F(1, 34) = 5.595, p < 0.024, \eta^2_p = 0.141$) が認められた。Bonferroni 法を用いた下位検定の結果、「実験者の顔」への注視時間は、4-5 ヶ月齢群よりも 6-7 ヶ月齢群において有意に長く ($p = 0.012$)、反対に「もの」への注視時間は、4-5 ヶ月齢群よりも 6-7 ヶ月齢群において有意に短くなる傾向があった ($p = 0.056$)。その他の有意な主効果や交互作用は認められなかった (すべて $p > 0.050$)。

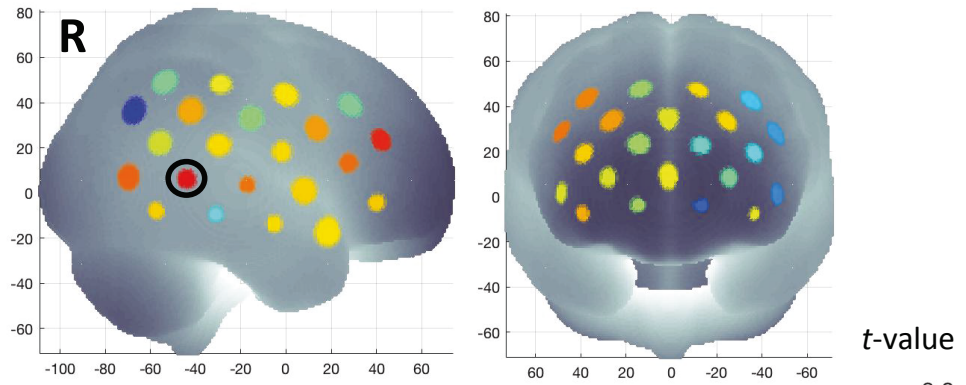
2 種類の社会的行動 (発声・笑顔) の生起時間については、どちらの月齢群においても、ベースライン条件とターゲット条件間で大きな違いは見られなかった (図 34b)。2 種類の社会的行動 (発声・笑顔) の生起時間を従属変数とした、月齢要因 (4-5 ヶ月齢・6-7 ヶ月齢) × 実験条件要因 (ベースライン条件・ターゲット条件) × 行動要因 (発声・笑顔) の後者 2 要因に対応のある 3 要因分散分析を行なった結果、有意な主効果と交互作用は認められなかった (すべて $p > 0.050$)。

5.3.3.2. fNIRS 計測の結果

19名の4-5 ヶ月齢群のターゲット条件における有効試行数の平均は、5.2 ($S.D. = 1.7$) であった。19名の6-7 ヶ月齢群のターゲット条件における有効試行数の平均は、5.1 ($S.D. = 1.3$) であった。体動アーチファクトが混入したため除外された全参加児のチャンネルの割合は 0.273 であった。

Negative > Baseline

4-5M



6-7M

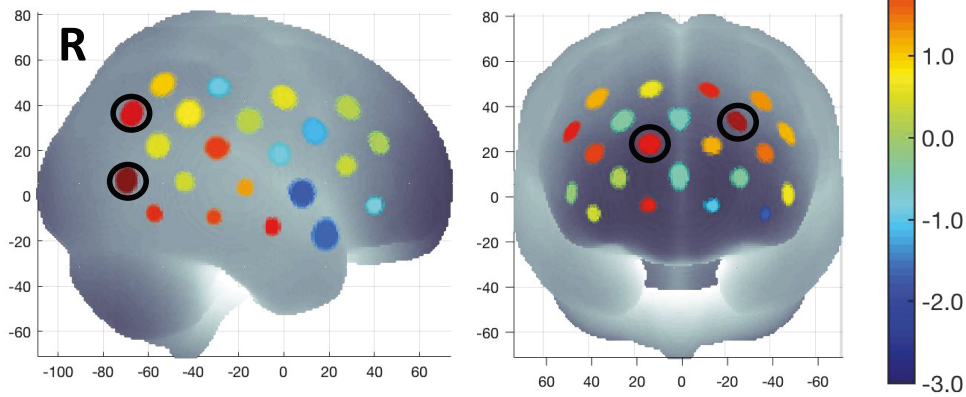


図 41. 4-5 ヶ月齢群（上）と 6-7 ヶ月齢群（下）のターゲット条件におけるベースラインからの oxy-Hb 濃度の変化量を表した *t*-map。丸印が付けられたチャンネルは、有意な活動の増加が認められた Ch30（右の中側頭回）、Ch12（右の中前頭回）、Ch15（左の上前頭回）、Ch31（右の中後頭回あるいは下側頭回）、Ch40（右の角回）を表す。

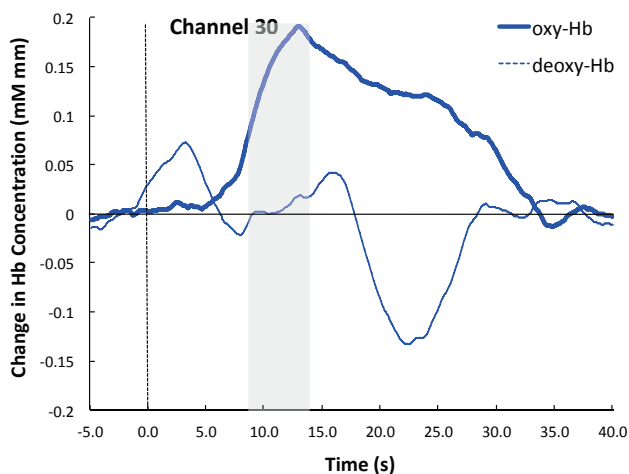


図 42. 4-5 ヶ月齢群の Ch30 (右の中側頭回) におけるターゲット条件でのヘモグロビン濃度の時系列変化。薄い灰色の区間は解析窓を表す。

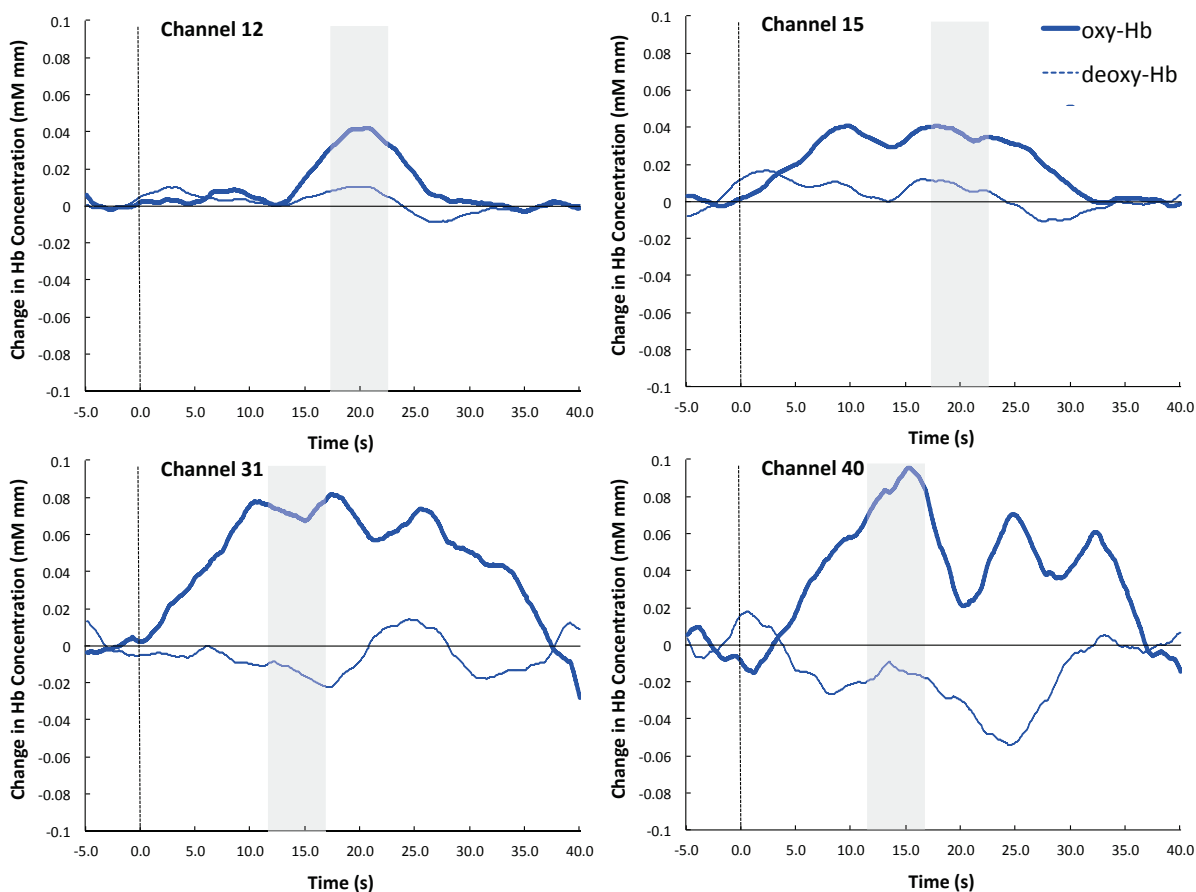


図 43. 6-7 ヶ月齢群の Ch12 (右の中前頭回), Ch15 (左の上前頭回), Ch31 (右の中後頭回または下側頭回), Ch40 (右の角回) におけるターゲット条件でのヘモグロビン濃度の時系列変化。薄い灰色の区間は解析窓を表す。

ターゲット区間の解析窓における oxy-Hb 濃度の平均変化量と、刺激呈示前 5 秒間のベースラインにおける平均変化量について、チャンネルごとに t 検定を行った。その結果を図 41 に示す（チャンネル配置については図 35 参照）。各チャンネルは異なるレベルの活動を示したが、4-5 ヶ月齢群、6-7 ヶ月齢群ともに、ターゲット条件において多重比較補正後に有意な oxy-Hb の変化を示したチャンネルは認められなかった。多重比較の補正無しの場合では、4-5 ヶ月齢群において、右の中側頭回に相当する Ch30 ($t(9) = 2.304, p = 0.047, d = 1.02$)において有意な oxy-Hb の増加が見られた（図 42）。6-7 ヶ月齢群では、右の中前頭回に相当する Ch12 ($t(16) = 2.169, p = 0.045, d = 0.75$), 左の上前頭回に相当する Ch15 ($t(14) = 2.769, p = 0.015, d = 1.01$), 右の中後頭回あるいは下側頭回に相当する Ch31 ($t(13) = 3.577, p = 0.003, d = 1.35$), rTPJ 領域である角回に相当する Ch40 ($t(12) = 2.383, p = 0.035, d = 0.93$)において有意な oxy-Hb の増加が認められた（図 43）。ベースラインからの有意な活動の変化が見られた Ch40（右の角回）と、Ch12（右の中前頭回）および Ch15（左の上前頭回）の oxy-Hb 変化量の関連を調べたところ、有意な相関は認められなかった（Ch40 と Ch12: $r(12) = 0.391, p = 0.209$; Ch40 と Ch15: $r(11) = -0.209, p = 0.538$ ）。また、実験 4-1 と同様に、6-7 ヶ月齢群の Ch40 において、複数の反応ピークが観察されたが、「実験者の顔」への注視時間の違いによる反応ピークのずれは認められなかった。

5.3.3.3. 皮質領域間の機能的結合

6-7 ヶ月齢群のターゲット条件において有意な活動の増加を示した rTPJ 領域に相当する Ch40（右の角回）をシードとして、皮質領域間の機能的結合の強さを検討した。4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群において検出されたチャンネル間の機能的結合を図 44 と表 9 に示す。4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群ともに、rTPJ 領域内を繋ぐ短距離の機能的結合が検出されたが、特に 6-7 ヶ月齢群において、rTPJ 領域と前頭領域間をまたぐ長距離の比較的強い機能的結合が多く検出された。社会脳ネットワークの中枢である dmPFC と TPJ 領域間の機能的結合は、6-7 ヶ月齢群においてのみ、多重比較補正付きで有意な強い結合として、Ch40 と Ch20 間に検出された。

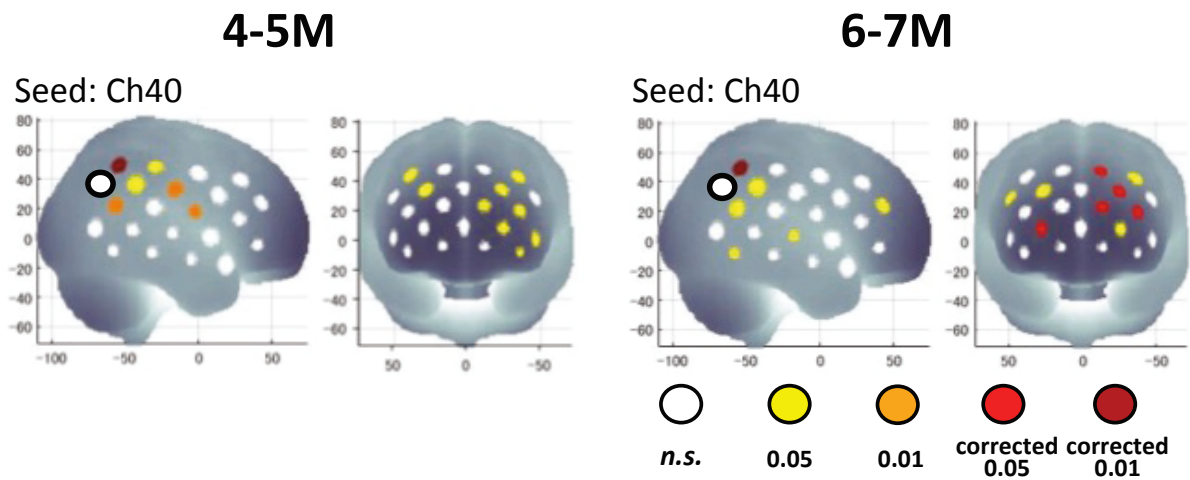


図 44. 実験 4-2 (Social-negative 条件) の 4-5 ヶ月齢群 (左) と 6-7 ヶ月齢群 (右) におけるシードのチャンネルとの機能的結合の強さ (p 値)。黒丸で示されているチャンネルはシードである Ch40 (右の角回) を表す。濃い赤が FDR 補正あり $p < 0.010$, 赤が FDR 補正あり $p < 0.050$, オレンジが補正無し $p < 0.010$, 黄色が補正無し $p < 0.050$, 白が補正無し $p > 0.050$ を表す。

表 9. 実験 4-2 (Social-negative 条件) の 4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群において皮質領域間の機能的結合が認められたチャンネルペア (* $p < 0.050$, ** $p < 0.010$, *** $p < 0.001$)。ターゲット条件において有意な活動の増加を示した Ch40 (右の角回) をシードとした。

Seed	Channel	t	df	p (uncorrected)	p (FDR-corrected)	d
4-5M						
Ch40	1	2.89	6	0.0278	0.1085	1.54
	5	2.83	5	0.0367	0.1140	1.63
	6	2.31	9	0.0463	0.1326	1.03
	10	3.09	10	0.0115	0.0620	1.32
	11	3.16	10	0.0102	0.0620	1.35
	15	3.09	10	0.0115	0.0620	1.32
	17	2.88	10	0.0164	0.0776	1.23
	19	2.44	9	0.0371	0.1140	1.09
	22	3.12	10	0.0108	0.0620	1.33
	33	3.77	9	0.0044	0.0620	1.68
	35	4.48	7	0.0029	0.0618	2.24
	38	3.26	9	0.0098	0.0620	1.46
	39	2.68	7	0.0316	0.1132	1.34
	43	2.96	8	0.0180	0.0776	1.40
44	5.47	9	0.0004	0.0170 *	2.45	
6-7M						
Ch40	6	2.33	9	0.0448	0.1285	1.04
	8	3.57	10	0.0051	0.0436 *	1.52
	10	3.54	12	0.0041	0.0436 *	1.39
	11	3.26	12	0.0068	0.0490 *	1.28
	15	3.82	11	0.0028	0.0407 *	1.56
	17	2.31	11	0.0414	0.1285	0.94
	18	2.75	12	0.0177	0.0952	1.08
	19	2.56	12	0.0248	0.1184	1.01
	20	4.77	10	0.0008	0.0163 *	2.03
	26	2.87	10	0.0166	0.0952	1.23
	29	2.25	13	0.0421	0.1285	0.85
	35	2.42	9	0.0389	0.1285	1.08
	36	2.39	12	0.0339	0.1285	0.94
	39	2.37	11	0.0374	0.1285	0.97
44	5.16	10	0.0004	0.0163 *	2.20	

5.3.3.4. 脳反応と社会性

実験 4-2 においてベースラインからの有意な oxy-Hb 濃度変化を示した rTPJ 領域 (Ch40) の活動と、自由遊び場面における母親や乳児の社会的行動との関連を検討した (表 10)。その結果、4-5 ヶ月齢群の Ch40 (右の角回) の oxy-Hb 変化量と、母親の随伴反応の回数との間に、有意傾向のある正の相関が認められた。この結果から、乳児への随伴反応を行なう頻度の高い母親の乳児は、ターゲット条件における rTPJ 領域の脳反応が大きい傾向があることが示された。6-7 ヶ月齢群の Ch40 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数、随伴反応の回数、母親主導の遊びの持続時間との間に有意な相関は認められなかった。さらに、4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群ともに、ターゲット条件における Ch40 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における乳児の母親の顔への注視時間または頻度との間に、有意な相関は見られなかった。また、ターゲット条件における計測中の乳児の「実験者の顔」への注視時間と、ターゲット条件における rTPJ 領域 (Ch40) の活動との関連では、4-5 ヶ月齢群において有意傾向のある正の相関が認められたが ($r(10) = 0.558, p = 0.094$)、6-7 ヶ月齢群では有意な相関は認められなかった ($r(13) = 0.091, p = 0.768$)。つまり、ターゲット条件において「実験者の顔」を長く見る 4-5 ヶ月児は、ターゲット条件における rTPJ 領域 (Ch40) の活動が大きい傾向が示されたが、ターゲット条件の Ch40 において有意な活動の増加が見られた 6-7 ヶ月児では「実験者の顔」への注視時間との関連は認められなかった。

表 10. 4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群のターゲット条件における Ch40 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数、随伴反応の回数、母親主導の遊びの持続時間および乳児の社会的参照行動の持続時間、頻度との相関係数。括弧内は p 値を表す ($+p < 0.100$)。

	Mother			Infant	
	Contingent imitation	Contingent response	Initiation of interaction	Attention to face (duration)	Attention to face (freq.)
4-5M (N = 11)	-0.153 (0.653)	0.574 (0.065)+	-0.122 (0.720)	-0.232 (0.493)	-0.301 (0.368)
6-7M (N = 13)	-0.296 (0.325)	0.063 (0.837)	-0.119 (0.698)	-0.109 (0.724)	-0.091 (0.767)

5.3.4. 考察

本実験の目的は、(1) 社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激 (無表情になる) に対する、右側頭部並びに前頭部の活動を検討する、(2) rTPJ 領域と mPFC

領域の機能的結合を検討する、(3) rTPJ 領域および mPFC 領域における活動と、自由遊び場面における母子の社会性との関連を検討する、(4) 乳児期の初期における社会脳ネットワークの発達の变化を検討することであった。まず、fNIRS 計測中の乳児の行動反応を分析した結果、これまでと同様に同様に、ベースライン条件とターゲット条件のどちらの条件においても、乳児は「実験者の顔」よりも「もの」を有意に長く注視することが明らかとなった。実験 3-2 では、ベースライン条件よりもターゲット条件において、「実験者の顔」への注視時間が長くなったが、本実験においては、条件間の注視時間に違いは認められなかった。実験 3-2 では「実験者の顔」への注視時間が有意に増加したことから、実験者の目をそらすという行動は乳児にとって新規性が高かったと考えられた。しかし、実験 4-2 では、「実験者の顔」に対する注視時間に条件間で有意差は認められず、また、Social-positive 条件と比較しても「実験者の顔」への注視時間に大きな違いは認められなかった。そのため、無表情になるという行動は、乳児にとってある程度見慣れた刺激であり、ネガティブ刺激として妥当性が高かったと考えられた。さらに、4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群ともに、発声と笑顔の生起時間は短く、条件間にも違いは見られなかった。よって、ネガティブな随伴刺激に対する計測中の乳児の行動変化は認められなかった。一方、実験 4-1 とは異なり、「実験者の顔」への注視時間は、4-5 ヶ月齢群よりも 6-7 ヶ月齢群において有意に長くなり、社会的相互作用場面における相手の顔への選好に発達の变化が認められた。

実験 3-2 では、ネガティブな随伴刺激（目をそらす）に対する側頭部の反応の増加は認められなかった。そのため、実験 4-2 では、刺激を変更し、乳児にとってよりネガティブな意味をもつと考えられる随伴刺激（無表情になる）を用いて実験を行なった。その結果、6-7 ヶ月齢群の前頭部と右側頭部の複数のチャンネルにおいて、ネガティブな随伴刺激に対する活動の増加が認められた。さらに、ポジティブな随伴刺激と同様に、ネガティブな随伴刺激に対しても、右の角回において活動の増加が認められた。このことから、刺激の物理的特性にかかわらず、社会的な随伴刺激の処理において、右の角回が重要な役割果たしていることが示唆された。しかし、社会的な随伴刺激であったとしても、乳児が見慣れない行動の場合には、rTPJ の活動は促進されないと考えられた。4-5 ヶ月齢群においては、右の中側頭回において活動の増加が認められたが、rTPJ 領域の賦活は認められなかった。この結果は、随伴刺激に対する rTPJ 領域の反応は、

生後半年以降に確立するという実験 4-1 の結果を支持している。また、実験 4-2 の 4-5 ヶ月齢群においては、rTPJ 領域だけでなく、dmPFC 領域においても活動の増加は認められなかった。さらに、領域間の機能的結合では、6-7 ヶ月齢群においてのみ、社会脳ネットワークの中枢とされている rTPJ 領域と mPFC 領域間の機能的結合が検出された。このことから、社会的信号である随伴刺激の処理にかかわる社会脳ネットワークは、生後 6 ヶ月頃に大きく発達すると考えられた。

実験 4-2 においても、実験 4-1 と同様に、自由遊び場面における母親の顔への注意と rTPJ 領域の活動との間に関連は認められなかった。この結果については二通りの解釈が可能である。まず一つ目は、ネガティブな随伴刺激に対する rTPJ 領域の反応と、乳児の母親の顔への注意傾向との間に関連はないとする解釈である。これまでの実験において、ポジティブな随伴刺激に対する rTPJ 領域の活動と、乳児の母親の顔への選好には正の相関があることが示されており、もしこの解釈が正しい場合、ポジティブな随伴刺激に対する反応性の高い乳児は、必ずしもネガティブな随伴刺激に対する反応性が高いわけではないことになる。二つ目として、実験 4-1 と同様に、実験 4-2 の参加児の月齢が、実験 2・3-1 の参加児よりも小さかったため、参加児の運動能力による制約のために、参加児本来の注意を計測できなかったことが要因であると解釈できる。この解釈が正しい場合、本来であれば、参加児の母親の顔への選好と、ネガティブな随伴刺激に対する rTPJ 領域の活動との間に、正の相関が認められるはずである。つまり、ポジティブな随伴刺激に対する反応性の高い乳児は、ネガティブな随伴刺激に対する反応性も高くなると考えられる。しかし、実験 4-1 と 4-2 のどちらにも参加した乳児 9 名について、Social-positive 条件と Social-negative 条件における Ch40 の oxy-Hb 変化量の相関を調べた結果、有意な相関は認められなかった ($r(9) = 0.130, p = 0.738$)。この結果は、ネガティブな随伴刺激に対する rTPJ 領域の反応と、乳児の母親の顔への自発的な注意との間に関連はないとする解釈を支持するものであるが、サンプル数が少ないため、今後参加児を増やしてさらなる検討を行なう必要がある。

5.4. 実験 4-3：社会的に意味のない随伴刺激 (Non-social 条件)

5.4.1. 目的

実験 4-3 では、社会的に意味のない随伴刺激に対する、前頭部、右側頭部、

右頭頂部の一部の脳反応を検討した。実験 3-3 と同様に、実験者が乳児の前で IDS による話しかけを行ないながらハンドパペットまたは絵本を呈示し、ターゲット条件において実験者は乳児と目が合ったら即座に実験者の頭に付けたデバイスを点灯した。ベースライン条件では、乳児と目が合ってからデバイスが光るまでに 3 秒間の遅延時間を設けた。実験 4-3 では、(1) 社会的に意味のない随伴刺激 (LED が光る) に対する、右側頭部および前頭部の活動の検討、(2) rTPJ 領域と mPFC 領域の機能的結合の検討、(3) rTPJ 領域および mPFC 領域における活動と、自由遊び場面における母子の社会性の関連の検討、(4) 乳児期の初期における社会脳ネットワークの発達的变化の検討を行なうことを目的とした。実験 4-1・4-2 と同様に、参加児は日本語圏の 4-5 ヶ月児と 6-7 ヶ月児とした。

5.4.2. 方法

5.4.2.1. 実験参加児

解析の基準を通過し、最終的にデータを採用した実験参加児は、4-5 ヶ月齢群 17 名 (女児 10 名)、6-7 ヶ月齢群 18 名 (女児 8 名) であった。すべての乳児は日本語を母語としており、発達において非定型性がないことが新版 K 式発達検査より確認されている (生澤他, 2002)。この他にも、4-5 ヶ月齢群 3 名、6-7 ヶ月齢群 5 名の乳児が参加したが、それぞれプローブの装着を嫌がった (4 名)、fNIRS 計測中のぐずり・不注意により計測不能であった (3 名)、実験の手続きに不備があった (1 名) ため、今回の解析には加えなかった。17 名の 4-5 ヶ月齢群のうち 2 名の実験参加児において、ビデオ撮影に不備があった (1 名)、調査中のぐずり・不注意により各刺激条件の試行を必要数採用できなかった (1 名) ため、計測中の行動データ分析からは除外し、fNIRS データのみ採用した。そのため、4-5 ヶ月齢群において最終的な解析に用いたのは、計測中の行動データ 15 名 (日齢 $M = 162.6 \pm 13.8$, 女児 9 名)、fNIRS データ 17 名 (日齢 $M = 162.8 \pm 14.3$, 女児 10 名) であった。18 名の 6-7 ヶ月齢群のうち、動きによるノイズ混入のため fNIRS データの解析が困難であった 1 名については計測中の行動データのみ採用した。そのため、6-7 ヶ月齢群において最終的な解析に用いたのは、計測中の行動データ 18 名 (日齢 $M = 206.7 \pm 12.5$, 女児 8 名)、fNIRS データ 17 名 (日齢 $M = 206.5 \pm 12.9$, 女児 8 名) であった。fNIRS データを採用した 4-5 ヶ月齢群 17 名の頭囲、頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ、頭頂を介した鼻根から後

頭結節までの長さの平均値は、順に 42.9 cm (*S.D.* = 1.2), 29.1 cm (*S.D.* = 1.1), 28.7 cm (*S.D.* = 1.1)であり、6-7ヶ月齢群 17名の頭囲、頭頂を介した左右の耳介前点間の長さ、頭頂を介した鼻根から後頭結節までの長さの平均値は、順に 43.5 cm (*S.D.* = 1.0), 29.9 cm (*S.D.* = 1.2), 29.6 cm (*S.D.* = 1.3)であった。本研究の実施にあたり、実験参加児の保護者に対して研究参加について事前に説明し、同意を得た。本研究は慶應義塾大学文学部・文学研究科・社会学研究科における研究倫理委員会の承認を得て実施した（受理番号：15032-1-1）。

5.4.2.2. 刺激・装置

刺激・装置は実験 3-3 と同じであった。

5.4.2.3. fNIRS の装置と計測方法

fNIRS の装置と計測方法は実験 4-1 と同じであった。

5.4.2.4. 手続き

手続きは実験 4-1 と同じであった。

5.4.2.5. 手続きのフィデリティ

実験者によって刺激の呈示が適切に行なわれたことを確認するため、実験の意図を知らない心理学専攻の大学生が、実験者の行動（IDS・発話内容の簡潔さ・表情の一貫性・動作の流暢性）に関する評価を行なった。評価は、全参加児の約 25%について 20 秒インターバル記録法を用いて実施した。その結果、実験者の各行動が正しく観察された試行の割合は、ベースライン条件では IDS が 100%，発話内容が 100%，表情の一貫性が 100%，動作の流暢性が 100%，ターゲット条件では IDS が 100%，発話内容が 100%，表情の一貫性が 100%，動作の流暢性が 100%であった。

5.4.2.6. データの処理法

データの処理法は以下の点を除き、実験 4-1 と同じであった。fNIRS 信号の解析におけるターゲット区間の解析窓は、プローブパッドごとに、刺激呈示開始後 5-20 秒の間の反応ピークを算出し、この反応ピークを中心とした前後 2.5 秒間（合計 5 秒間）とした。そのため、4-5ヶ月齢群の前頭プローブにおいては、

刺激呈示開始後 6.7-11.7 秒, 側頭プローブにおいては, 刺激呈示開始後 7.1-12.1 秒に設定された。6-7 ヶ月齢群の前頭プローブにおいては, 刺激呈示開始後 2.6-7.6 秒, 側頭プローブにおいては, 刺激呈示開始後 16.4-21.4 秒に設定された。

5.4.3. 結果

5.4.3.1. fNIRS 計測中の行動

15名の4-5ヶ月齢群の有効試行数の平均は, ベースライン条件 6.3 ($S.D. = 1.8$), ターゲット条件 5.9 ($S.D. = 1.1$) であった。18名の6-7ヶ月齢群の有効試行数の平均は, ベースライン条件 6.6 ($S.D. = 1.3$), ターゲット条件 6.1 ($S.D. = 1.2$) であった。4-5ヶ月齢群の実験刺激への平均注視時間(秒)は, ベースライン条件 19.1 ($S.D. = 0.6$), ターゲット条件 19.2 ($S.D. = 0.6$) となり, 6-7ヶ月齢群の実験刺激への平均注視時間(秒)は, ベースライン条件 18.7 ($S.D. = 0.9$), ターゲット条件 18.8 ($S.D. = 1.2$) であった。

実験刺激である「実験者の顔」と「もの」に対する条件別の注視時間を図 33c に示す。いずれの実験条件においても, 「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が長い傾向にあった。また, 実験 4-2 と同様に, 4-5ヶ月齢群よりも6-7ヶ月齢群において, 「実験者の顔」への注視時間が長い傾向にあった。「実験者の顔」と「もの」に対する注視時間を従属変数とする, 月齢要因(4-5ヶ月齢・6-7ヶ月齢) × 実験条件要因(ベースライン条件・ターゲット条件) × 実験刺激要因(実験者の顔・もの)の后者2要因に対応のある3要因分散分析を行なった。その結果, 実験刺激要因の有意な主効果 ($F(1, 31) = 38.077, p < 0.001, \eta^2_p = 0.551$) が認められ, 月齢や実験条件に関係なく, 「実験者の顔」よりも「もの」への注視時間が有意に長いことが統計的にも支持された。さらに, 月齢要因と実験刺激要因の有意な交互作用 ($F(1, 31) = 6.879, p < 0.013, \eta^2_p = 0.182$) が認められた。Bonferroni法を用いた下位検定の結果, 「実験者の顔」への注視時間は, 4-5ヶ月齢群よりも6-7ヶ月齢群において有意に長く ($p = 0.022$), 反対に「もの」への注視時間は4-5ヶ月齢群よりも6-7ヶ月齢群において有意に短くなった ($p = 0.009$)。その他の有意な主効果や交互作用は認められなかった(すべて $p > 0.050$)。

2種類の社会的行動(発声・笑顔)の生起時間については, どちらの月齢群においてもベースライン条件とターゲット条件間で大きな違いは見られなかった(図 34c)。2種類の社会的行動(発声・笑顔)の生起時間を従属変数とした, 月齢要因(4-5ヶ月齢・6-7ヶ月齢) × 実験条件要因(ベースライン条件・ター

ゲット条件) × 行動要因 (発声・笑顔) の後者 2 要因に対応のある 3 要因分散分析を行なった結果, 有意な主効果と交互作用は認められなかった (すべて $p > 0.050$)。

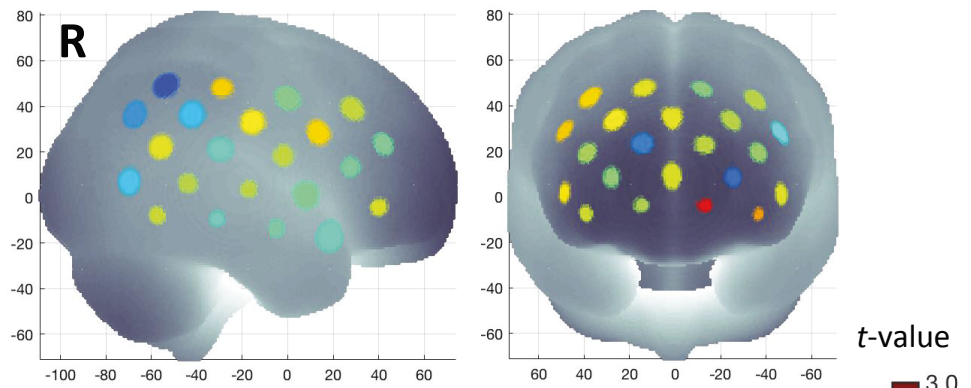
5.4.3.2. fNIRS 計測の結果

19名の4-5ヶ月齢群のターゲット条件における有効試行数の平均は, 5.8 ($S.D. = 1.1$) であった。19名の6-7ヶ月齢群のターゲット条件における有効試行数の平均は, 6.2 ($S.D. = 0.9$) であった。体動アーチファクトが混入したため除外された全参加児のチャンネルの割合は 0.198 であった。

ターゲット区間の解析窓における oxy-Hb 濃度の平均変化量と, 刺激呈示前 5 秒間のベースラインにおける平均変化量について, チャンネルごとに t 検定を行なった。その結果を図 45 に示す (チャンネル配置については図 35 参照)。各チャンネルは異なるレベルの活動を示したが, 4-5 ヶ月齢群, 6-7 ヶ月齢群ともに, ターゲット条件において多重比較補正後に有意な oxy-Hb の変化を示したチャンネルは認められなかった。また, 多重比較の補正無しの場合においても, 4-5 ヶ月齢群では有意な oxy-Hb の変化を示したチャンネルは認められなかった。6-7 ヶ月齢群では, 右の中前頭回に相当する Ch12 ($t(17) = -2.408, p = 0.028, d = 0.83$) と右の中側頭回に相当する Ch24 ($t(11) = -2.454, p = 0.032, d = 0.99$)において有意な oxy-Hb の減少, rTPJ 領域である pSTG あるいは縁上回に相当する Ch34 ($t(14) = 2.145, p = 0.050, d = 0.78$)において有意な oxy-Hb の増加が認められた (図 46)。Ch24 においては, deoxy-Hb も同様に減少していることから, 解析で取り除けなかった体動アーチファクトが混入していると考えられた。ベースラインからの有意な活動の変化が見られた Ch12 (右の中前頭回) と, Ch34 (右の pSTG あるいは縁上回) の oxy-Hb 変化量との関連を調べたところ, 有意な相関は認められなかった ($r(15) = -0.017, p = 0.952$)。

Non-social > Baseline

4-5M



6-7M

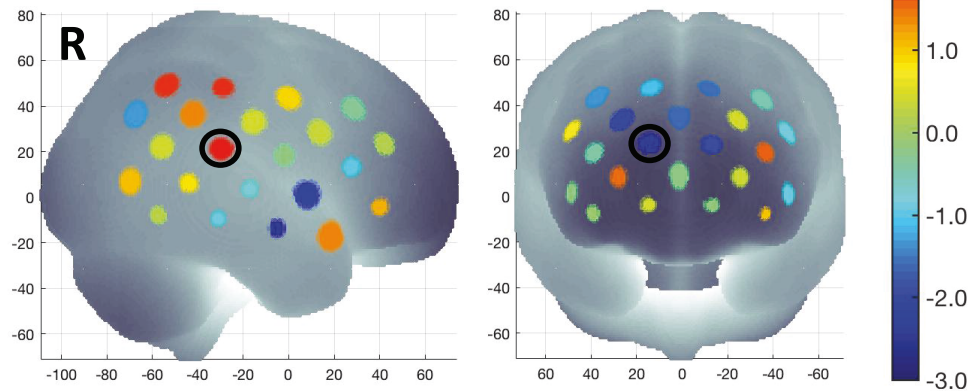


図 45. 4-5 ヶ月齢群（上）と 6-7 ヶ月齢群（下）のターゲット条件におけるベースラインからの oxy-Hb 濃度の変化量を表した t -map。丸印が付けられたチャンネルは、有意な活動の変化が認められた Ch12（右の中前頭回）と Ch34（右の pSTG または縁上回）を表す。

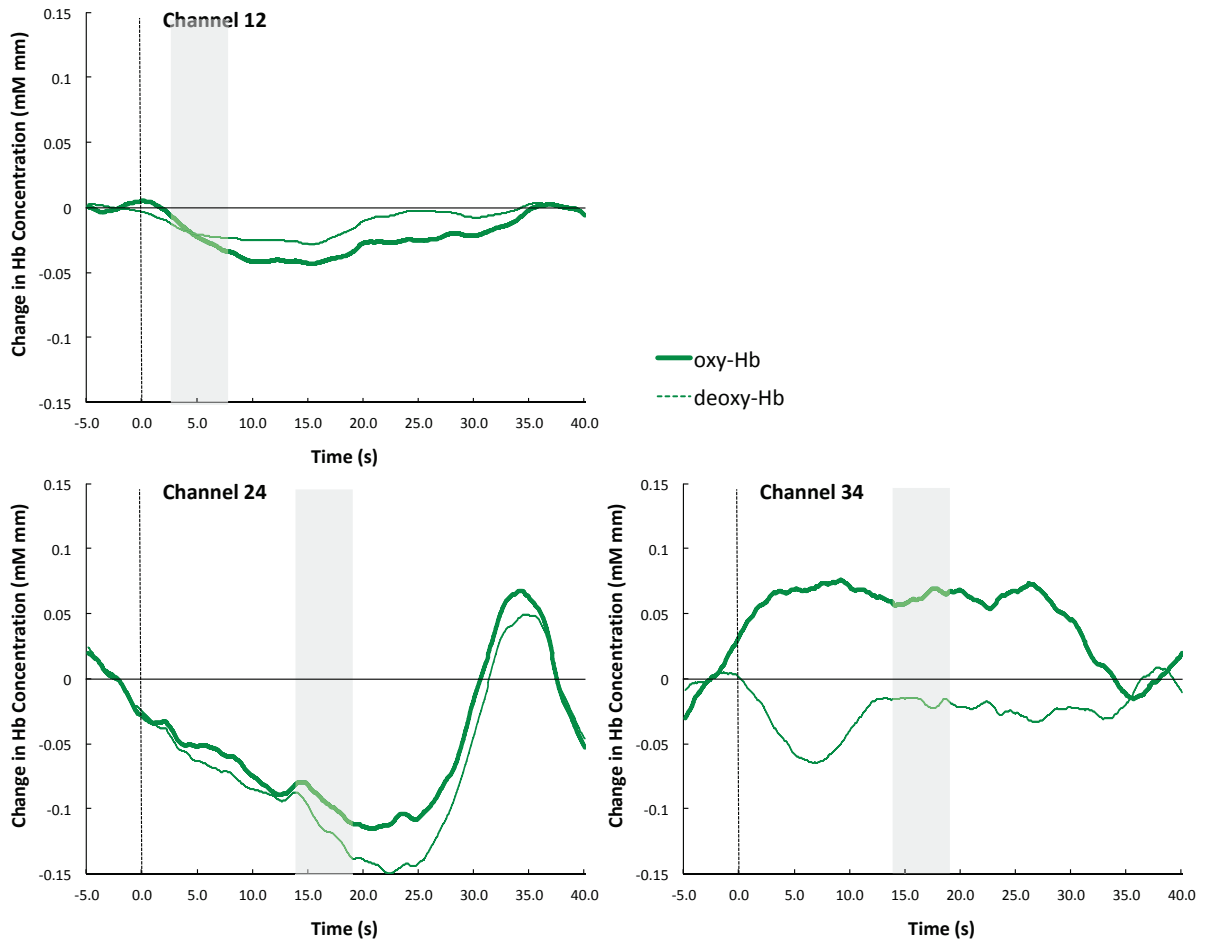


図 46. 6-7 ヶ月齢群の Ch12 (右の中前頭回), Ch24 (右の中側頭回), Ch34 (右の pSTG あるいは縁上回) におけるターゲット条件でのヘモグロビン濃度の時系列変化。薄い灰色の区間は解析窓を表す。

5. 4. 3. 3. 皮質領域間の機能的結合

6-7 ヶ月齢群のターゲット条件において有意な活動の増加を示した Ch34 (STS-TPJ 領域である右の pSTG あるいは縁上回) をシードとして、皮質領域間の機能的結合の強さを検討した。4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群において検出されたチャンネル間の機能的結合を図 47 と表 11 に示す。4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群ともに、側頭領域と頭頂領域内の短距離の機能的結合が多く検出された。とりたてて 6-7 ヶ月齢群においては、rTPJ 領域と前頭領域間をまたぐ長距離の機能的結合が多く検出された。しかし、どちらの月齢群においても、社会脳ネットワークの中枢である dmPFC と TPJ 領域間を繋ぐ機能的結合は検出されなかった。

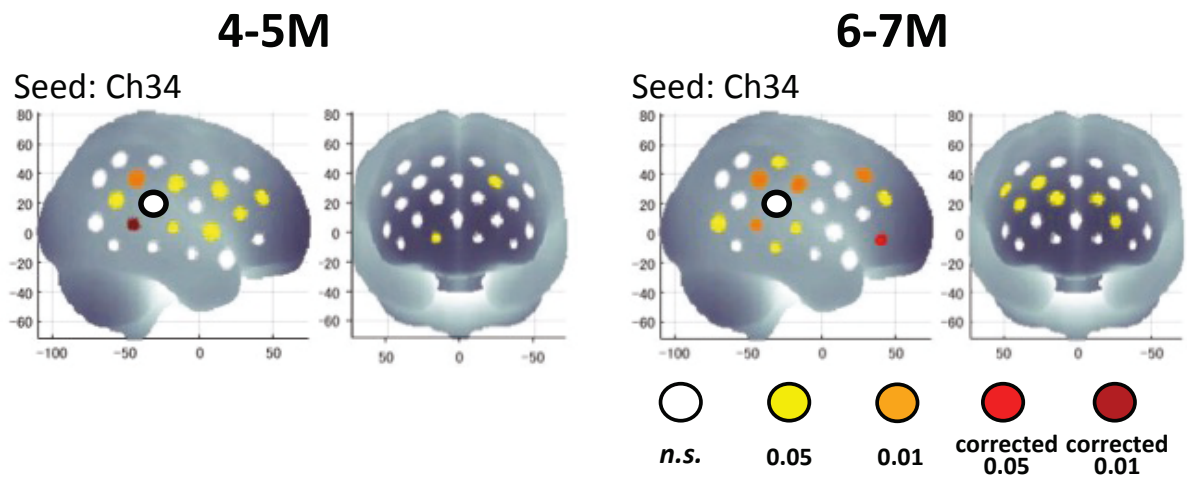


図 47. 実験 4-3 (Non-social 条件) の 4-5 ヶ月齢群 (左) と 6-7 ヶ月齢群 (右) におけるシードのチャンネルとの機能的結合の強さ (p 値)。黒で示されているチャンネルはシードである Ch34 (右の pSTG または縁上回) を表す。濃い赤が FDR 補正あり $p < 0.010$, 赤が FDR 補正あり $p < 0.050$, オレンジが補正無し $p < 0.010$, 黄色が補正無し $p < 0.050$, 白が補正無し $p > 0.050$ を表す。

表 11. 実験 4-3 (Non-social 条件) の 4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群において皮質領域間の機能的結合が認められたチャンネルペア (* $p < 0.050$, ** $p < 0.010$, *** $p < 0.001$)。ターゲット条件において有意な活動の増加を示した Ch34 (右の pSTG または縁上回) をシードとした。

	Seed	Channel	t	df	p (uncorrected)	p (FDR-corrected)	d
4-5M							
	Ch34	3	-2.72	7	0.0298	0.1477	1.36
		15	2.96	13	0.0111	0.1477	1.12
		28	2.79	11	0.0175	0.1477	1.14
		29	2.35	13	0.0352	0.1512	0.89
		30	5.51	12	0.0001	0.0057 **	2.16
		32	2.25	12	0.0439	0.1715	0.88
		35	2.45	13	0.0295	0.1477	0.92
		36	2.58	13	0.0228	0.1477	0.98
		37	2.42	13	0.0309	0.1477	0.91
		38	2.86	12	0.0143	0.1477	1.12
		39	3.66	12	0.0033	0.0707	1.43
6-7M							
	Ch34	6	2.18	13	0.0484	0.1301	0.82
		11	2.77	13	0.0160	0.1056	1.05
		12	2.68	14	0.0179	0.1056	0.98
		13	2.55	13	0.0241	0.1056	0.96
		17	2.23	12	0.0453	0.1301	0.88
		18	2.28	14	0.0388	0.1301	0.83
		25	2.55	9	0.0312	0.1219	1.14
		27	4.31	13	0.0008	0.0364 *	1.63
		29	2.22	13	0.0444	0.1301	0.84
		30	3.45	11	0.0054	0.0662	1.41
		31	2.21	13	0.0454	0.1301	0.84
		36	2.54	13	0.0246	0.1056	0.96
		38	3.46	10	0.0062	0.0662	1.47
		39	3.58	13	0.0033	0.0662	1.35
		41	3.03	13	0.0096	0.0829	1.15
	43	2.67	11	0.0219	0.1056	1.09	

5. 4. 3. 4. 脳反応と社会性

実験 4-3 において、ベースラインからの有意な oxy-Hb 濃度変化を示した rTPJ 領域 (Ch34) の活動と、自由遊び場面における母親や乳児の社会的行動との関連を検討した (表 12)。まず、4-5 ヶ月齢群の Ch34 (右の pSTG または縁上回) の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数、随伴反応の

回数、母親主導の遊びの持続時間との間に有意な相関は認められなかった。6-7ヶ月齢群においては、Ch34のoxy-Hb変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数との間に有意な負の相関が認められた。このことから、乳児への随伴模倣を行なう頻度の高い母親の乳児は、ターゲット条件におけるrTPJ領域の脳反応が小さいことが示された。また、4-5ヶ月齢群のターゲット条件におけるCh34のoxy-Hb変化量と、自由遊び場面における乳児の母親の顔への注視時間または頻度との間に有意な相関は見られなかったが、6-7ヶ月齢群のターゲット条件におけるCh34のoxy-Hb変化量と、自由遊び場面における乳児の母親の顔への注視頻度との間に有意な負の相関が認められた(図48)。つまり、自由遊び場面において母親の顔を見る頻度の高い6-7ヶ月児は、ターゲット条件におけるrTPJ領域の活動が小さいことが示された。また、ターゲット条件における計測中の乳児の「実験者の顔」への注視時間と、ターゲット条件におけるrTPJ領域(Ch34)の活動との間には、有意な相関は認められなかった(4-5M : $r(9) = -0.234, p = 0.544$; 6-7M : $r(15) = -0.149, p = 0.597$)。

次に、自由遊び場面における乳児の母親の顔を見る行動と、母親の乳児に対する働きかけの関係について検討を行なった。まず、母親の顔を見る頻度と、母親の随伴模倣および随伴反応の回数との間には、4-5ヶ月齢群(随伴模倣 : $r(23) = 0.016, p = 0.941$; 随伴反応 : $r(23) = -0.132, p = 0.548$)、6-7ヶ月齢群(随伴模倣 : $r(27) = 0.148, p = 0.463$; 随伴反応 : $r(23) = -0.163, p = 0.416$)ともに、有意な相関は認められなかった。さらに、4-5ヶ月齢群では母親の顔を見る持続時間と、母親の随伴模倣および随伴反応の回数との間に、有意な相関は認められなかった(随伴模倣 : $r(23) = -0.106, p = 0.630$; 随伴反応 : $r(23) = -0.106, p = 0.631$)。6-7ヶ月齢群においては、母親の顔を見る持続時間と母親の随伴模倣の回数との間には有意な相関は見られなかったが($r(27) = 0.159, p = 0.430$)、母親の顔を見る持続時間と随伴反応の回数との間に、有意傾向のある負の相関が見られた($r(23) = -0.331, p = 0.091$)。このことから、6-7ヶ月齢群において、乳児への随伴反応を行なう頻度の高い母親の乳児は、母親の顔を見る時間が短いことが示唆された。乳児の母親の顔を見る行動と母親主導の遊びの持続時間との関連においては、4-5ヶ月齢群(持続時間 : $r(23) = 0.438, p = 0.037$; 頻度 : $r(23) = 0.360, p = 0.092$)、6-7ヶ月齢群(持続時間 : $r(27) = 0.437, p = 0.023$; 頻度 : $r(27) = 0.392, p = 0.043$)ともに、有意な正の相関が認められた(図49)。このことから、自由遊び場面において母親の顔を見る時間や頻度の多い乳児の母親は、乳児の遊びへの積極的な介入時

間が長いことが示された。

表 12. 4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群のターゲット条件における Ch34 の oxy-Hb 変化量と、自由遊び場面における母親の随伴模倣の回数、随伴反応の回数、母親主導の遊びの持続時間および乳児の社会的参照行動の持続時間、頻度との相関係数。括弧内は p 値を表す (* $p < 0.050$)。

	Mother			Infant	
	Contingent imitation	Contingent response	Initiation of interaction	Attention to face (duration)	Attention to face (freq.)
4-5M (N = 11)	-0.261 (0.438)	0.305 (0.362)	-0.475 (0.140)	-0.139 (0.683)	-0.161 (0.637)
6-7M (N = 14)	-0.621 (0.018)*	-0.284 (0.325)	0.241 (0.406)	0.030 (0.919)	-0.535 (0.049)*

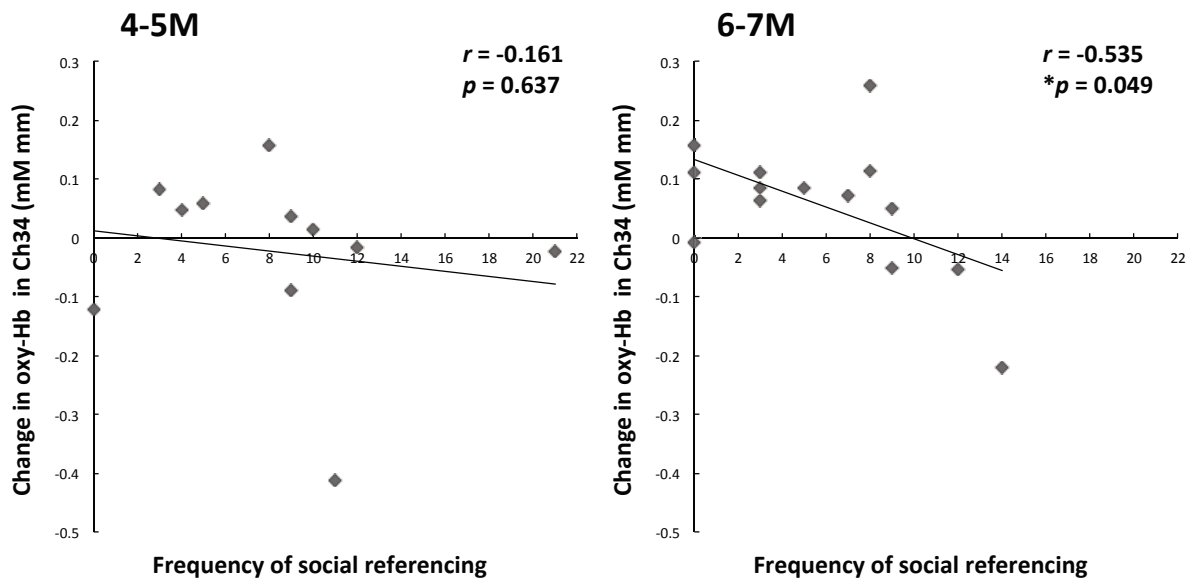
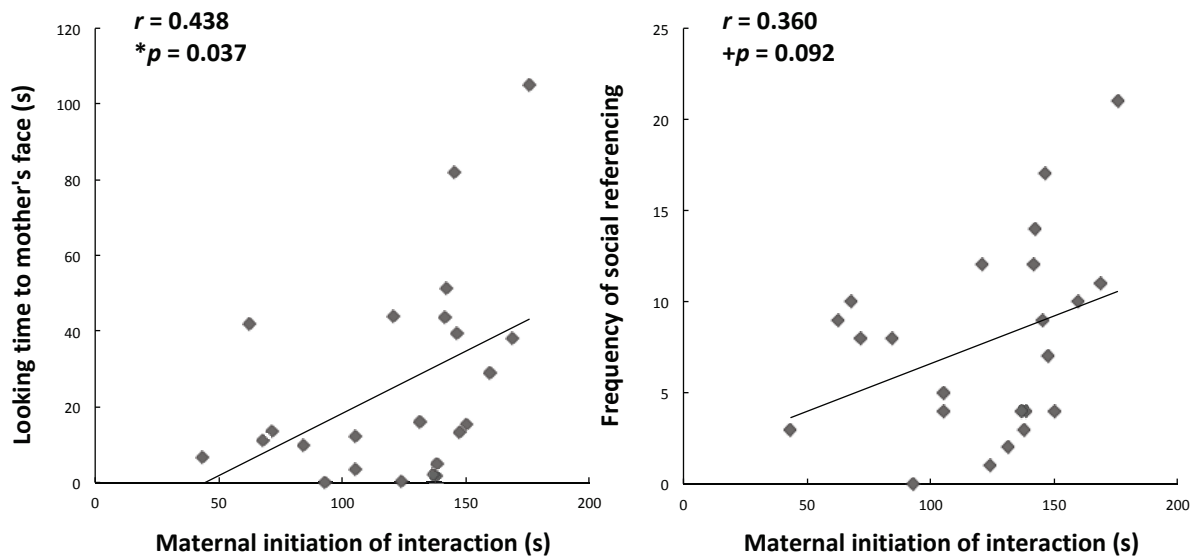


図 48. 4-5 ヶ月齢群 (左) と 6-7 ヶ月齢群 (右) の自由遊び場面における乳児の母親の顔への注視頻度と、ターゲット条件における Ch34 の oxy-Hb 変化量の相関 (* $p < 0.050$)

4-5M



6-7M

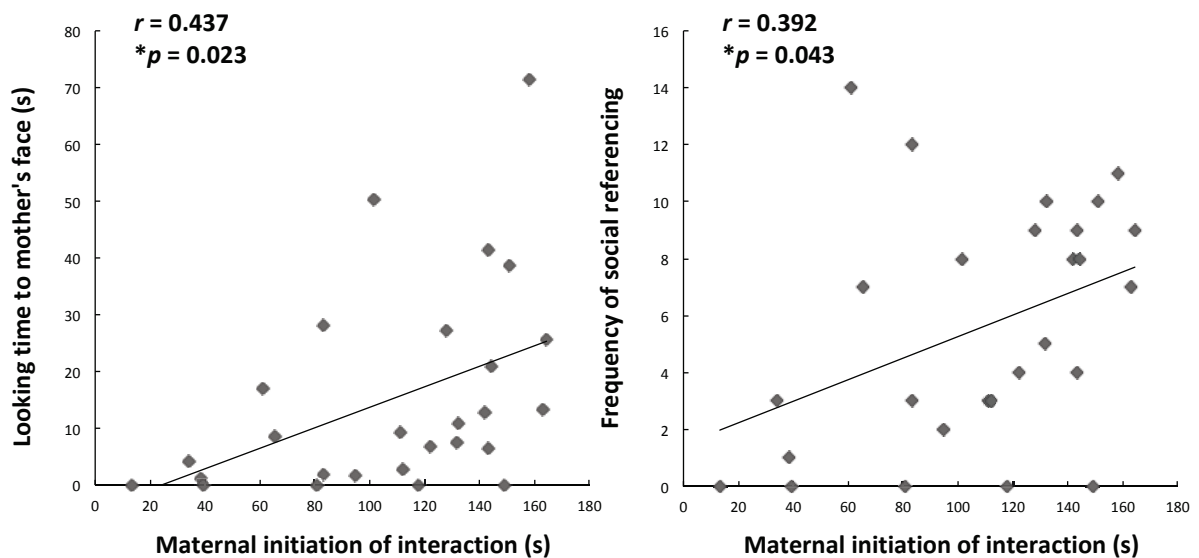


図 49. 4-5 ヶ月齢群（上）と 6-7 ヶ月齢群（下）の自由遊び場面における母親主導の遊びの持続時間と、母親の顔への注視時間（左）と母親の顔を見る回数（右）の相関（ $+p < 0.100$, $*p < 0.050$ ）

5.4.4. 考察

本実験の目的は、(1) 社会的に意味のない随伴刺激（LED が光る）に対する、右側頭部および前頭部の活動を検討する、(2) rTPJ 領域と mPFC 領域の機能的結合を検討する、(3) rTPJ 領域および mPFC 領域における活動と、自由遊

び場面における母子の社会性との関連を検討する、(4) 乳児期の初期における社会脳ネットワークの発達的变化を検討することであった。まず、fNIRS 計測中の乳児の行動反応を分析した結果、これまでの実験と同様に、ベースライン条件とターゲット条件のどちらの条件においても、乳児は「実験者の顔」よりも「もの」を有意に長く注視することが明らかとなった。さらに、実験 4-2 と同様に、「実験者の顔」への注視時間は、4-5 ヶ月齢群よりも 6-7 ヶ月齢群において有意に長くなり、社会的相互作用場面における相手の顔への選好に発達的变化が認められた。また、4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群ともに、発声と笑顔の生起時間において条件間の違いは見られず、月齢による違いも認められなかった。このことから、社会的でない随伴刺激に対する計測中の乳児の行動変化は見られないことがわかった。

fNIRS 計測の結果では、これまでの実験と同様に、6-7 ヶ月齢群では社会的に意味のない随伴刺激に対し、rTPJ 領域の活動の増加が認められた。さらに、実験 4-3 において oxy-Hb の増加が見られたチャンネルは、実験 3-3 の結果と一致しており、pSTG あるいは縁上回に相当するチャンネルであった。このことから、実験 4-3 の結果は、実験 3-3 の結果を再現したと考えられ、実験 4-3 において観察された rTPJ 領域の活動は、ポジティブあるいはネガティブな随伴刺激といった社会的刺激の処理ではなく、実験 3-3 と同様に、注意由来の反応を反映していたと考えられた (図 32)。また、4-5 ヶ月齢群においては、社会的でない随伴刺激に選択的な側頭部の活動の増加は見られず、随伴刺激に対する rTPJ 領域の反応は、生後半年を過ぎる頃に確立することを示唆する実験 4-1・4-2 の結果と一致した。また、実験 4-3 の 6-7 ヶ月齢群では、右の中前頭回においてベースラインからの有意な活動の減少が認められたものの、dmPFC 領域における活動の変化は認められなかった。同様に 4-5 ヶ月齢群においても、ターゲット条件における dmPFC 領域の賦活は認められなかった。さらに、実験 4-1・4-2 の結果とは異なり、4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群ともに社会脳ネットワークの中枢とされている rTPJ 領域と mPFC 領域間の機能的結合は検出されなかった。これらの結果は、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ことを示唆している。

さらに、rTPJ 領域 (pSTG あるいは縁上回) の活動と、自由遊び場面における母親や乳児の社会的行動との関連を検討した結果、母親の随伴模倣の回数および乳児の母親の顔を見る回数との間に、有意な負の相関が認められた。実験

2・3-1・4-1 では、母子の社会的行動と rTPJ 領域の活動との間に負の相関は認められておらず（実験 4-1 の 4-5 ヶ月齢群では、rTPJ 領域の活動と母親主導の遊びの持続時間との間に負の相関が見られるが、4-5 ヶ月齢群はターゲット条件において rTPJ 領域の有意な活動の増加を示さなかった）、この結果は社会的でない随伴刺激に対する rTPJ 領域の反応は、ポジティブな随伴刺激に対する反応とは質が異なっていることを示唆する結果であった。自由遊び場面における母親の顔への選好は、乳児の社会的刺激に対する選好を反映しているとする、社会的刺激（例：母親の顔）への興味が低い乳児は、普段より非社会的刺激（例：おもちゃ）に対してより多くの注意を向けていると考えられる。そのため、社会的刺激への選好が低い（自由遊び場面において母親の顔をあまり見なかった）乳児では、そうでない乳児に比べて、非社会的刺激（LED が光る）への反応性が高くなったと考えられる。しかし、先述したように、実験 4 では参加児の月齢が低かったこともあり、自由遊び場面における乳児の行動データは、参加児本来の注意傾向を反映していなかった可能性があった。そのため、乳児の社会性と脳反応の関連については、今後さらなる検討が求められる。

5.5. 総合考察

実験 4 の目的は、(1) 随伴刺激に対する前頭部、右側頭部、右頭頂部の一部の脳反応を検討すること、(2) mPFC 領域と rTPJ 領域両者の機能的結合の検討を行なうこと、(3) 初期の乳児期における社会的刺激の処理に関連する脳機能の発達的变化について検討すること、(4) 随伴刺激に対する rTPJ および mPFC 領域と、自由遊び場面における母子の社会性との関連を検討することであった。fNIRS 計測中の乳児の行動反応を分析した結果、実験 1・2・3 と同様に、「実験者の顔」と「もの」への注視時間については、ベースライン条件とターゲット条件のどちらの条件においても、乳児は「実験者の顔」よりも「もの」を有意に長く注視することが明らかとなった。また、これまでの実験と同様に、実験 4 においても、「実験者の顔」と「もの」への注視時間においてターゲット条件とベースライン条件に有意差は見られなかった。実験 4 では 2 つの月齢群（4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群）において計測を行なっており、Social-negative 条件と Non-social 条件においては、「実験者の顔」への注視時間が、4-5 ヶ月齢群よりも 6-7 ヶ月齢群において有意に長くなり、社会的相互作用場面における相手の顔への選好に、発達的变化が認められた。計測中の発声と笑顔の生起時間において

は、ポジティブな随伴刺激の呈示を行なった実験 4-1 のみ条件間の有意差が認められ、4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群の笑顔の生起時間は、ベースライン条件よりもターゲット条件において長くなった。

fNIRS 計測結果においては、Social-positive, Social-negative, Non-social 条件すべてにおいて、6-7 ヶ月齢群では随伴刺激に対する rTPJ 領域の賦活が認められた。活動の増加が見られた rTPJ 領域内の位置も、実験 2・3 の結果と一致しており、Social-positive と Social-negative 条件は角回に相当するチャンネルであったのに対し、Non-social 条件はより前方の pSTG あるいは縁上回に相当するチャンネルであった。これらの結果は、刺激の物理的特性にかかわらず、rTPJ 領域全体として「随伴刺激」の検出に関与しているが、随伴刺激の質によって、rTPJ 内で処理される領域が異なるとする実験 3 の結果を支持している。よって、社会的な（人間由来の）随伴刺激は、高次な社会的認知機能（心の理論）に関与している角回で処理されるが、社会的でない随伴刺激の処理は、注意との関連が指摘されている、より前方の TPJ 領域で処理されると考えられる。さらに、4-5 ヶ月齢群においては、どの条件においても、随伴刺激に対する rTPJ 領域の賦活は認められず、随伴刺激に対する rTPJ 領域の反応は、生後半年以降に確立する可能性が示された。6-7 ヶ月齢群の前頭部の反応では、ポジティブな随伴刺激に対してのみ、dmPFC 領域において有意な活動の変化が認められた。また、rTPJ 領域と dmPFC 領域間の機能的結合の強さを分析した結果、6-7 ヶ月齢群の Social-positive と Social-negative 条件において、rTPJ 領域と dmPFC 領域を繋ぐ機能的結合が検出された。一方、この結合は、Non-social 条件では検出されなかった。4-5 ヶ月齢群の前頭部の反応では、rTPJ 領域の反応とは異なり、ポジティブな随伴刺激に対して、dmPFC 領域の賦活が認められた。また、rTPJ 領域と mPFC 領域間の機能的結合においては、Social-positive 条件では、rTPJ 領域と dmPFC 領域を結ぶ機能的結合の存在が示唆されたが、他の 2 条件においては認められなかった。これらの結果から、(1) 生後 6 ヶ月以降において、随伴性についての領域一般的な要因の処理に rTPJ 領域が関与していること、(2) 社会的な（人間由来の）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おり、社会的な随伴刺激は高次な社会的認知機能（心の理論）に関与している角回で処理されるが、社会的でない随伴刺激の処理は注意との関連が指摘されているより前方の TPJ 領域で処理されること、(3) 生後 4 ヶ月以降において、ポジティブな随伴刺激の処理に mPFC 領域が関与していること、(4)

社会的刺激の処理を担う社会脳ネットワークの一部の機能的結合が、生後約半年の乳児においてすでに形成されていること、(5) 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、より未熟な脳反応を示すことが示唆された。

実験2・3-1の結果とは異なり、実験4では、自由遊び場面における母親の顔への注視行動とrTPJ領域の活動の間に、はっきりとした関連は認められなかった。これは、実験4の参加児(6-7ヶ月児)の月齢が実験2・3-1の参加児(6-8ヶ月児)よりも小さかったことが要因の一つであると考えられた。寝返りができるようになったばかりで座位も安定しない乳児の場合、母親がとった姿勢によっては母親の顔を見る機会そのものが制限されてしまうことがあった。例えば、母親が後ろから乳児の座位を支えるようにして座り、一緒に絵本を読むような姿勢の場合、乳児が母親の顔を見るためには体や顔をひねって後ろを向くか、体をのけぞらせないと母親の顔を見ることはできず、運動機能が未発達な乳児では困難であった。反対に、仰向けの乳児の顔を母親が常に覗き込むようにして手遊び歌を歌って遊ぶような場合では、母親の顔への注意が当然ながら多くなった。普段の生活場面における社会的刺激への自発的な注意が、その後の社会的認知機能の発達の基礎をなしていると考えられることから、最も重要な社会的刺激である母親の顔に対する自然な注意を、個々の運動能力に差が大きい乳児においても公正に測れるような遊び場面の設定を、今後考えていく必要がある。

本実験では、月齢の低い4-5ヶ月児においても計測を行なったが、4-5ヶ月児では、社会的信号である随伴刺激に対し、6-7ヶ月児よりも未熟な脳反応を示すことが明らかとなった。月齢が数ヶ月しか変わらないにもかかわらず、6-7ヶ月児では随伴刺激に対してrTPJ領域の賦活が見られたのに対し、4-5ヶ月児では随伴刺激に対するrTPJ領域の活動の増加は認められなかった。また、社会脳ネットワークの中核とされているrTPJ領域とmPFC領域を繋ぐ機能的結合も、6-7ヶ月児では4-5ヶ月児に比べ、より強くなることが示唆された。これらの結果から、社会的信号である随伴刺激の処理における社会脳ネットワークは、生後6ヶ月頃までに大きく発達すると考えられた。乳児は生後6ヶ月頃から規準喃語を発するようになり、単語学習も可能になるなど(Bergelson & Swingley, 2012; Hakuno et al., 2017; Minagawa, Hakuno, Kobayashi, Naoi, & Kojima, 2017)、乳児期の音声の産出と知覚の発達において重要な過渡期である。また、この頃は人見知

りが始まる時期でもあり、運動機能だけでなく言語・認知機能も著しく発達する。こうした言語・認知機能は、周囲の大人との社会的相互作用を通して獲得されていくため、同時期に社会脳ネットワークの著しい成熟化が進むと考えられる。

実験 4-2 では、実験 3-2 と異なり、ネガティブな随伴刺激に対して、側頭と前頭部の複数のチャンネルにおいて活動の増加が認められた。活動が認められた脳領域は、Social-positive 条件よりも広範囲に及んでおり、oxy-Hb 変化の効果量も大きい値を示した。また、異なる皮質領域間を繋ぐ長距離の機能的結合も、Social-negative 条件では Social-positive 条件に比べ、より多く検出された。これら結果は、社会的にポジティブな随伴刺激よりも、ネガティブな随伴刺激の処理において、社会脳ネットワークの活性が高くなったことを示唆している。成人において、ポジティブな刺激よりもネガティブな感情価をもつ刺激に対してより注意が向きやすく、感受性が高く、影響を受けやすい傾向 (negativity bias) があることが知られており (Ito, Larsen, Smith, & Cacioppo, 1998; Peeters & Czapinski, 1990), 中性的な刺激よりもネガティブな刺激に対し、PFC 領域の活動がより増加することがわかっている (Ozawa, Matsuda, & Hiraki, 2014; Van Dillen, Heslenfeld, & Koole, 2009)。乳児においては、生後 7 ヶ月でポジティブな顔 (喜び) とネガティブな顔 (恐怖, 怒り) を弁別できることが知られている (Nelson & De Haan, 1996)。また、成人と同様に、中性的あるいはポジティブな刺激よりも、ネガティブな刺激に対する反応がより大きくなることが示されており、この反応は生後半年以前の乳児には見られないことがわかっている (Leppänen & Nelson, 2012; Vaish, Grossmann, & Woodward, 2008)。本実験では、ポジティブな刺激とネガティブな刺激に対する反応の直接的な比較は行なっていないものの、ポジティブな刺激において PFC 領域の活動が減少したのに対し、ネガティブな刺激においては PFC 領域の活動が増加した。これは、先行研究の結果と矛盾しない結果である。これらの結果から、6-7 ヶ月児の Social-negative 条件における右の前頭極 (Ch12) や、左の背外側前頭前野 (dorsolateral PFC: dlPFC) (Ch15) といった、dmPFC 領域以外の PFC 領域における有意な活動の増加は、ネガティブな刺激に特有の反応であったと考えられる。

実験 4 では、参加児間で反応ピークに大きなずれがあったことや、自由遊び場面における母親の顔への注意と、rTPJ 領域の活動の間に関連が認められなかったことなど、これまでの実験とは多少異なる点も示された。しかし、生後 6

ヶ月以降の乳児において、様々な随伴刺激に対する rTPJ 領域の活動の増加が繰り返し観察され、これまでと一貫した結果が得られている。また、社会的信号の処理に関与する脳反応について、4-5 ヶ月児と 6-7 ヶ月児の間に違いが認められ、生後 6 ヶ月頃に社会脳ネットワークの活性が高まることが明らかとなった。さらに、とりわけ 6-7 ヶ月児においては、社会脳ネットワークの中心領域のある rTPJ 領域と dmPFC 領域の機能的結合が検出された。このことから、遅くとも 6-7 ヶ月児では、対人相互作用において、社会脳ネットワークの一部が機能していることが示された。

6. 総合考察

6.1. 本研究の目的と結果のまとめ

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。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に留まっており、実際の日常場面における乳幼児の反応を反映していない可能性があった (Lloyd-Fox et al., 2015)。本研究では、4つの実験すべてにおいて、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ない、自然な対人相互作用における乳幼児の脳活動を、fNIRSを用いて計測した。先行研究において社会的信号との関連が認められている、STS-TPJ 領域を中心とする側頭部と、mPFC 領域を中心とする前頭部に着目し、実験 1 では右の側頭部、実験 2・3 では左右の側頭部、前頭部と頭頂部の一部、実験 4 では前頭部、右の側頭部、頭頂部の一部における乳幼児の脳反応を検討した。

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 (JA 条件: 絵本に対する共同注意を伴う三項関係の相互作用, I 条件: 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 rSTS-TPJ 領域の計測を行なった。その結果、実験者との社会的相互作用のないベースラインに比べ、実験者との社会的相互作用のある JA 条件と I 条件では、rSTS-TPJ 領域の脳活動が増加した。さらに、rSTS-TPJ 領域における脳反応は、I 条件よりも JA 条件においてより大きくなることが明らかとなった。また、歌遊びの場面において「実験者の顔」をよく見る乳児は、共同注意を伴うような複雑で高次の社会的相互作用において、より大きな脳反応を示すことが示唆された。

実験 2 では、「アイコンタクト」と「随伴刺激」という2種類の社会的信号の有無を独立変数とし、2つの対人相互作用場面 (Non-contingent 条件: アイコンタクト, Contingent 条件: アイコンタクトと随伴刺激) における 6-8 ヶ月児と 10-13 ヶ月児の左右の側頭部、前頭部と頭頂部の一部の脳反応を検討した。その結果、6-8 ヶ月児では、実験者が随伴刺激を呈示する Contingent 条件において、角回に相当する rTPJ 領域の活動が増加し、この活動は、Non-contingent 条件よりも有

意に大きくなった。一方、10-13ヶ月児では、社会的信号に対する rTPJ 領域の増加は認められなかった。しかし、6-8ヶ月児と同様に、10-13ヶ月児においても、自由遊び場面における母親の顔をみる行動と、随伴刺激に対する rTPJ 領域の反応との間に関連が認められた。以上は、10-13ヶ月児においても、6-8ヶ月児と同様に、rTPJ 領域が随伴刺激処理に関与しているが、発達による社会性の個人差の広がりにより、グループ平均による活動の強さが捉えにくくなることを示唆した。さらに、10-13ヶ月児における rTPJ 領域の脳反応と、その後の言語および社会性の発達の個人差を検討した結果、随伴刺激に対してより大きな脳活動を示した乳児は、2歳時点において全体的な発達が早く、成人との対人場面においてより高い社会性を示し、表出語彙も多くなる可能性が示された。

実験 3 では、複数の異なる随伴刺激への脳反応の検討を目的とし、社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激 (Social-positive 条件：笑いかける)、社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激 (Social-negative 条件：目をそらす)、社会的に意味のない随伴刺激 (Non-social 条件：LED が光る) に対する、6-8ヶ月児の左右の側頭部、前頭部と頭頂部の一部の脳反応を計測した。その結果、実験 2 と同様に、ポジティブな随伴刺激に対し、角回に相当する rTPJ 領域において活動の増加が認められた。また、ネガティブな随伴刺激に対しては、両側の STS-TPJ 領域において強い活動は認められなかった。社会的な意味を持たない随伴刺激に対しては、pSTG あるいは縁上回に相当する rTPJ 領域において反応の増加が認められた。さらに、自由遊び場面において母親の顔を見る時間の長い乳児は、Social-positive 条件における rTPJ 領域の活動の増加量が大きい傾向にあることが示された。

実験 4 では、実験 3 と同様に複数の異なる随伴刺激への脳反応の検討を目的とし、社会的に意味のあるポジティブな随伴刺激 (Social-positive 条件：笑いかける)、社会的に意味のあるネガティブな随伴刺激 (Social-negative 条件：無表情になる)、社会的に意味のない随伴刺激 (Non-social 条件：LED が光る) に対する、4-5ヶ月児と 6-7ヶ月児の前頭部、右の側頭部、頭頂部の一部の脳反応を計測した。その結果、6-7ヶ月児では、Social-positive, Social-negative, Non-social 条件すべてにおいて、随伴刺激に対する rTPJ 領域の活動の増加が認められた。活動の増加が見られた rTPJ 領域内の位置は、Social-positive と Social-negative 条件は角回に相当するチャンネル、Non-social 条件はより前方の pSTG あるいは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、どの条件において

も、随伴刺激に対する rTPJ 領域の賦活は認められなかった。また、rTPJ 領域と dmPFC 領域間の機能的結合の強さを分析した結果、6-7 ヶ月児の Social-positive と Social-negative 条件において、rTPJ 領域と dmPFC 領域を繋ぐ機能的結合が検出されたが、Non-social 条件では検出されなかった。4-5 ヶ月齢児においては、Social-positive 条件において rTPJ 領域と mPFC 領域を結ぶ機能的結合の存在が示唆されたが、他の 2 条件においては認められなかった。また、実験 4 のみ、どちらの月齢群も、自由遊び場面における母親の顔への注視行動と rTPJ 領域の活動の間に、関連は認められなかった。

以下本研究の 4 つの目的に関連してそれぞれ 6.2.-6.5.にて考察する。

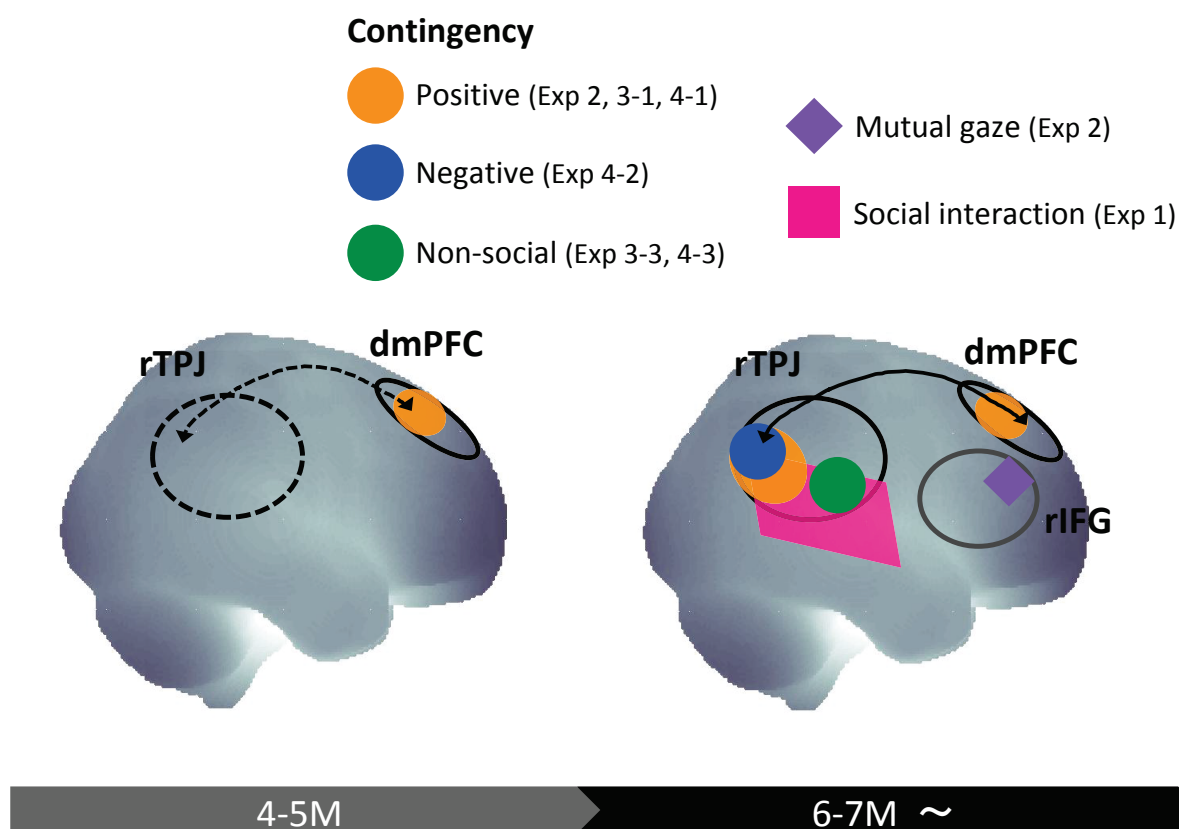


図 50. 本研究の結果の概略。4-5 ヶ月齢の乳児(左)と 6-7 ヶ月齢以降の乳児(右)において社会的信号への反応が認められた皮質領域を表す。オレンジがポジティブな随伴刺激(実験 2・3-1・4-1)、青がネガティブな随伴刺激(実験 4-2)、緑が社会的でない随伴刺激(実験 3-3・4-3)、紫がアイコンタクト(実験 2)、ピンクが社会的相互作用(実験 1)の処理に関与する皮質領域を示す。矢印は皮質領域間の機能的結合を表す。

6.2. 乳幼児における社会的信号処理の脳内基盤

本研究における一連の実験では、生後 6-7 ヶ月齢以降の乳児において、実際の対人相互作用における社会的信号（随伴刺激）に対し、一貫して rTPJ 領域の活動の増加が認められた（図 50 右図）。発達的变化については次章で考察することとし、ここでは主に 6-8 ヶ月児の結果から、社会的信号処理の脳内機構について考察を行なう。まず、実験 1 では、実験者が社会的信号を一切呈示しなかったベースラインに比べ、実験者が 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 つのターゲット条件では、広範囲の rSTS-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（Carrington & Bailey, 2009; Van Overwalle, 2009）、(a) rSTS-TPJ 領域における脳活動（の少なくとも一部）は、社会的相互作用に特有の社会的信号の処理を反映した活動であると考えられた（図 50 右図のピンク部）。

実験 2 では、実験 1 において観察された rSTS-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って左右の側頭部の脳反応を検討した。その結果、6-8 ヶ月児において、実験者の呈示した社会的信号が IDS のみであったベースラインと比較し、IDS に加えてアイコンタクトと随伴刺激の呈示を行なった Contingent 条件において活動の増加を示したのは、rTPJ 領域（角回）のみであった（図 50 右図のオレンジ部）。一方、IDS とアイコンタクトのみを社会的信号として呈示した Non-contingent 条件では、rTPJ 領域の活動の増加は認められなかった。さらに、Contingent 条件における rTPJ 領域の活動は、Non-contingent 条件よりも有意に大きいことが示された。これらのことから、(b) rTPJ 領域が随伴性の処理に関与していること、そして、(c) 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。社会的信号の強度および刺激特性の異なる Contingent 条件（IDS+アイコンタクト+随伴刺激）と Non-contingent 条件（IDS+アイコンタクト）では、活動の大きさに違いが見られたことから、(d) rTPJ 領域は単に社会的信号の検出を担っているだけでなく、随伴性の有無によって変化する社会的信号の強度ないし質の処理にも強く関与していることが示唆された。アイコンタクトに対しては、rIFG 領域において活動の増加が認められた（図 50 右図の紫部）。成人を対象とした実験より、他者とのアイコンタクトにおいて、IFG

領域 (特に右の IFG 領域) の賦活が報告されていることから (Cavallo et al., 2015; Redcay et al., 2010; Redcay et al., 2012; Saito et al., 2010; Tanabe et al., 2012), (e) すでに乳児において IFG 領域が成人と同様にアイコンタクトの処理を担っている可能性が示された。実験 1 では, 右の側頭部の計測しか行なわなかったが, 実験 2 においては, 左の側頭部の活動も同時に検討した。しかし, 随伴刺激およびアイコンタクトに対して賦活が見られた領域は, 主に右半球に位置していた。成人において, 社会的刺激の処理は, 左半球よりも右半球が有意であることがわかっており (Gallagher & Frith, 2004; Mosconi et al., 2005; Otsuka et al., 2007; Pelphrey et al., 2004), (f) 社会的刺激の処理に関して, 6-8 ヶ月齢の乳児でも左右半球の機能側性化が見られることが示唆された。

実験 3 では, rTPJ 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 (笑いかける), 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) に対する左右の側頭部の脳反応を検討した。その結果, 6-8 ヶ月児において, ネガティブな随伴刺激に対しては rTPJ 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 (図 50 右図のオレンジ部) と社会的でない随伴刺激 (図 50 右図の緑部) に対して, rTPJ 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 rTPJ 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, rTPJ 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 rTPJ 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 pSTG あるいは縁上回に相当するチャンネルであった。このことから, 随伴刺激の刺激特性によって rTPJ 内で処理される領域が異なることが示唆された。つまり, 社会的な (人間由来の) 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。これは, 乳児は, 社会的 (人間由来の) 刺激に対して非社会的な刺激よりも強い反応を示すと多くの先行研究 (de Haan et al., 2002; Hirai & Hiraki, 2005; Johnson, Dziurawiec, Ellis, & Morton, 1991; Lloyd-Fox et al., 2009) の結果と一致する結果である。

実験 4 では, 実験 3 と同様の刺激を用いて (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), 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 rTPJ 領域の賦活が認められた。また, 活動の増加が見られた rTPJ 領域内の位置についても, 一貫した結果が得られ, ポジティブな随伴刺激 (図 50 右図のオレンジ部) とネガティブな随伴刺激 (図 50 右図の青部) 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 (図 50 右図の緑部) ではより前方の pSTG あるいは縁上回に相当するチャンネルであった。また, 前頭部の反応では, ポジティブな随伴刺激に対してのみ, dmPFC 領域において有意な活動の変化が認められた。さらに, rTPJ 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ヶ月児の Social-positive と Social-negative 条件において, rTPJ 領域と dmPFC 領域を繋ぐ機能的結合が検出されたが, Non-social 条件では検出されなかった。これらの結果より, (g) 6ヶ月齢の乳児において, 「随伴性」そのものの処理に rTPJ 領域が関与していること, (h) 社会的な (人間由来の) 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おり, 社会的な随伴刺激は, 高次な社会的認知機能 (例: 心の理論) に関与している角回で処理されるが, 社会的でない随伴刺激の処理は, 注意との関連が指摘されているより前方の TPJ 領域で処理されること, (i) ポジティブな随伴刺激の処理に dmPFC 領域が関与していること, (j) 社会的刺激の処理を担う rTPJ 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。

以上の結果をまとめると 6-8ヶ月の乳幼児の対人相互作用場面での社会的信号処理において図 50 右図で示されるような, 機能分化のある STS-TPJ 領域, それと繋がる dmPFC 領域, そして相互注視に関与する IFG 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示された。

6.3. 乳幼児期における社会脳ネットワークの発達

本研究では, 実験 2 において 6-8ヶ月齢群と 10-13ヶ月齢群の比較, 実験 4 において 4-5ヶ月齢群と 6-7ヶ月齢群の比較を行ない, 乳児期の社会的認知機能における発達的变化についての検討を試みた。前節で述べたように, 6-8ヶ月児においては, 社会的信号である随伴刺激の処理において一貫して rTPJ 領域の関与が認められた。一方, 実験 2 の 10-13ヶ月齢群においては, 「アイコンタクト」および「随伴刺激」に対する左右側頭部 (前頭と頭頂部の一部も含む) の活動

の増加は認められなかった。しかし、多重比較の補正無しの場合において、rTPJ 領域（右の縁上回あるいは角回）の活動が減少したことや、自由遊び場面において母親の顔をよく見る乳児は、角回における活動が大きかったことから、10-13 ヶ月児においても、随伴刺激の処理には rTPJ 領域が関与していると考えられた。10-13 ヶ月児においては、rTPJ 領域の活動の増減に個人差が大きく、そのためにグループ解析では反応が検出されにくい可能性があった。つまり、共同注意といった複雑で高次なコミュニケーションが可能になる乳児期の後半にかけて、社会的刺激に対する脳反応の個人差が拡大することが示唆された。

実験 4 の 4-5 ヶ月齢群と 6-7 ヶ月齢群の比較においても、脳反応に違いが認められた。6-7 ヶ月児では、すべての随伴刺激に対して rTPJ 領域の賦活が認められたが、4-5 ヶ月児においては、どの条件においても随伴刺激に対する rTPJ 領域の賦活は認められなかった（図 50 左図）。この結果から、rTPJ 領域の随伴刺激処理の機能およびその機能分化は、生後半年以降に確立する可能性が示された。一方、前頭部の反応では、6-7 ヶ月児と同様に、ポジティブな随伴刺激の処理における dmPFC 領域の賦活が認められ（図 50 左図のオレンジ部）、すでに生後 4 ヶ月以降の乳児において、ポジティブな随伴刺激の処理に mPFC 領域が関与していることが示された。さらに、rTPJ 領域と dmPFC 領域間の機能的結合においては、Social-positive 条件において、rTPJ 領域と mPFC 領域を結ぶ機能的結合の存在が示唆された。このことから、生後 4 ヶ月において、rTPJ 領域と dmPFC 間を結ぶ社会脳ネットワークの萌芽が認められると考えられた。しかし、6-7 ヶ月児においては、Social-negative 条件においても rTPJ 領域と dmPFC 領域間の機能的結合が検出されているが、4-5 ヶ月児では検出されなかった。社会的信号である随伴刺激に対する rTPJ 領域の反応や、rTPJ 領域と dmPFC 領域間の機能的結合の結果から、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。乳児は生後 6 ヶ月頃から規準喃語を発するようになり、この頃から単語学習や表情の弁別も可能になることが知られている (Bergelson & Swingley, 2012; Hakuno et al., 2017; Leppänen & Nelson, 2012; Minagawa et al., 2017; Vaish et al., 2008)。同時に、この頃は人見知りや腹這いが始まる時期でもあり、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。

6. 4. 社会的相互作用における随伴性の重要性

成人において、TPJ 領域は、高次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示されている (Carrington & Bailey, 2009; Van Overwalle, 2009)。本研究では、乳児においても、rTPJ 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ことが示唆されており (実験 1)、さらに、この社会的相互作用における rTPJ 領域の活動は、社会的信号の一つである随伴刺激がある場合に、特に大きくなることが明らかとなった (実験 2)。また、異なる刺激特性をもった複数の随伴刺激に対し、rTPJ 領域の活動が同様に増加することが確認された (実験 3・4)。これらの結果から、乳児期の社会的相互作用において、「随伴性」が重要な社会的信号であることが示唆された。以前より、乳幼児期の対人相互作用における随伴性の重要性が指摘されており (Csibra, 2010; Hiraki, 2006; Kuhl, 2007)、乳幼児におけるビデオ学習の困難さは (video deficit 効果)、ビデオ刺激における随伴性の欠如によるものである可能性が示されている (Roseberry et al., 2014)。また、大人の随伴刺激は、乳幼児の行動に対して強化子として機能することが知られており、乳児の発声に随伴させた大人の反応は、乳児の発声頻度を増加させることがわかっている (Dunst et al., 2010; Pelaez et al., 2011a; Ramey et al., 1972; Rheingold et al., 1959; Weisberg, 1963)。この効果は、発達障害リスクのある乳児においても確認されており (Pelaez, Virués-Ortega, & Gewirtz, 2011b)、発達障害児への早期療育において、乳幼児の発声、アイコンタクト、共同注意などの介入手続きに随伴反応や随伴模倣が多く用いられている (Ishizuka & Yamamoto, 2016; Neimy, Pelaez, Carrow, Monlux, & Tarbox, 2017)。

随伴刺激は、アイコンタクト、IDS、社会的接触などと同様に、直示的信号としての機能を有している (Csibra, 2010; Csibra & Gergely, 2009)。序論 (1.3.) で述べた通り、直示的信号は受け手の注意を誘発し、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、受け手を特定する機能があり、乳幼児の社会性発達や学習において重要な信号である。しかし、それぞれの直示的信号の信号強度には、差がある可能性があった。実験 2 において、IDS のみが呈示されるベースライン条件と、IDS とアイコンタクトが呈示される Non-contingent 条

件間の脳反応に、違いは認められなかった（アイコンタクトの呈示は rTPJ 領域の活動を増加させなかった）。しかし、IDS とアイコンタクトが呈示される Non-contingent 条件よりも、アイコンタクトと IDS に加えて随伴刺激も呈示される Contingent 条件では、rTPJ 領域の活動がより大きくなる（随伴刺激の呈示が rTPJ 領域の活動を増加させた）ことが示された。本研究の結果から、随伴刺激には、対人相互作用において、様々な直示的信号の中でもとりたてて重要な機能があると考えられた。社会的相互作用は、乳児の行動に大人が反応し、さらにその大人の反応によって乳児の行動が変化するというように、お互いの行動が相互に影響し合うことで成立する。要するに、随伴性の存在が、社会的相互作用そのものであると考えられる。日常場面において、直示的信号である自分に向けられた視線や IDS の存在は、その後の社会的相互作用の生起を必ずしも予測しないが、随伴刺激の存在は、自分との社会的相互作用が可能な他者の存在を確実に示している。この予測力の違いが、随伴刺激と他の社会的信号に対する反応の違いを生み出していると考えられる。

6.5. 母子の社会性および言語・社会性発達との関連

本研究において、随伴刺激に対する rTPJ 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 pSTS-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 rTPJ 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 rTPJ 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 rTPJ 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の選好が高い乳児は、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。他者の顔は、多くの社会的信号の発信源であり、日常場面において他者の顔をよく注視する乳児は、社会的刺激を知覚する機会もそれだけ多くなると考えられる。それにより、社会的刺激の処理を担う神経回路の発達がより促進される可能性があった。事実、アイコンタクトの少なさや、自発的な他者の顔への注

意は、ASD 診断の予測変数となる可能性が示されており (Elsabbagh & Johnson, 2010; Elsabbagh et al., 2012; Neimy et al., 2017), 乳児期における他者の顔への適切な注意が、その後の社会性の発達にとって重要であることが指摘されている。また、実験 2・3・4 において、乳児の母親の顔を見る行動と、母親の社会的行動との間に関連が認められており、自由遊び場面において母親の顔をよく見る乳児の母親は、乳児の発声を随伴模倣する頻度が高く、乳児の遊びへの積極的な介入時間も長いことが示された。しかし、本研究の結果からは、母子の社会的行動の因果関係までは明らかにできておらず、乳児の社会的刺激への自発的な注意に影響を与える環境要因については、さらなる検討が求められる。

本研究の結果は、成人と同様に乳児においても、他者の心的状態に対する感受性と、心の理論の中枢領域の一つである rTPJ 領域の活動の関連を示唆しており (Santesteban et al., 2012; Saxe & Kanwisher, 2003), 乳児期における rTPJ 領域の活動が、その後の乳児の社会性の予測変数になり得ると考えられた。そこで、実験 2 の 10-13 ヶ月齢群における rTPJ 領域の脳反応と、その後の言語と社会性の発達との関連を予備的に (まだ一部の参加児の回答しか得られていないため) 検討した。その結果、随伴刺激に対してより大きな脳反応を示した乳児は、2 歳時点において全体的な発達が早く、成人との対人場面においてより高い社会性を示し、表出語彙も多くなる傾向が示された。このことから、乳児期における社会的相互作用への rTPJ 領域の反応性の大きさが、その後の社会性や言語能力の予測変数となることが示唆された。

6.6. 本研究の限界と改善すべき点

本研究では、自然な社会的相互作用における脳内基盤を明らかにすることが目的の 1 つであったが、この自然さを重要視したために逆に実験としては統制できない点があり、下記に述べるように何点か生じた。本研究では、脳活動の検出力を高めるために、すべての実験でブロックデザインを採用した。ブロックデザインでは、一回の刺激に対する反応の変化を計測するのではなく、複数回呈示される刺激への反応が加算されるため、より安定した反応を得ることができる。しかし、本研究では、自然な状態で乳児の目を見る行動に合わせて刺激の呈示を行なったため、一つのブロック内に呈示する刺激の回数やタイミングが参加児間で異なっていた。そのため、特に実験 4-1 の **Social-positive** 条件では、参加児ごとの反応ピークに大きなずれが生じてしまった。実験 3-1 や実験 4-2

においても、参加児全体の oxy-Hb 濃度の時系列変化において、複数の反応ピークが観察されており、参加児間で反応のタイミングにばらつきがあったことが示唆された。この反応のずれにより、活動の平均変化量が、本来よりも低くなってしまった可能性があった。実際に、実験 4-1 において、反応が早かった乳児と遅かった乳児で解析窓を変えた分析を行なった結果、ベースラインからの活動の増加量について、非常に大きな効果量が示された。実験 2 において、反応のタイミングに個人差が小さかった理由としては、ベースライン条件からターゲット条件への移行の際に、実験者が顔を上げる動作を毎行なっていたためであると考えられた（ベースライン条件では実験者はアイコンタクトを避けるために顔を下に向けていた）。つまり、実験者の大きな動きに参加児の注意が惹きつけられ、各ブロックの早い段階で、実験者の顔を見る乳児が多かったためである可能性があった。今後は、反応のタイミングのずれを是正するような分析手法（例えば、参加児ごとに解析窓を設定する、行動コーディングの結果を基に最初の刺激が呈示されたところに反応のオンセットを合わせるなど）を検討する予定である。また、今後は、ブロックデザインだけでなく、事象関連（event-related）デザインの計測についても考えていく必要がある。

本研究は、すべて実験者がライブで刺激呈示を行なった。そのため、刺激の統制が非常に難しいという問題があった。ベースライン条件では、実験者は随伴刺激の呈示を行なわなかったが、乳児の注意を維持するために話しかけやおもちゃ（ハンドパペットあるいは絵本）の呈示を継続して行なった。そのため、ベースライン条件においても、何かしらの実験者の動作に、随伴性が生じていた可能性が残されていた。成人において、モニターを介して他者との相互注視を行なう際、お互い注意を共有する（共同注意）ような課題の後では、瞬きのタイミングが自然と同期することが報告されている (Koike et al., 2016)。この結果は、オンラインの対人場面においては、何もしていなくても、無意識的に相互作用が生じている可能性を示唆している。そのため、今後はベースライン条件における実験者の無意識的な随伴刺激の呈示を、可能な限り無くすような工夫が必要である。例えば、実験者によるハンドパペットや絵本の呈示に代えて、モニターによる刺激の呈示を行なうことで、実験者の随伴的動作を統制できると考えられた。しかし、おもちゃを使った三項関係の相互作用場面において、乳児が実験者の顔を注視する回数は非常に限られており、安定的な注意を得るためには、実験者の積極的な働きかけ（話しかけやおもちゃの呈示）が必要で

あった。また、日常に即した自然な遊び場を再現するために、ライブでの刺激呈示は重要な要素であり、実際の対人相互作用における計測において、刺激を完全に統制することはやはり困難である。そのため、ライブ刺激を用いた実験と併せ、ビデオ刺激のみを用いた実験（例えば、モニター上の刺激に乳児が視線を向けると刺激が変化する）を同時に行なうことで、随伴刺激に対する反応について、より信頼性の高い検討が可能となるであろう。

6.7. 本研究の意義と今後の展望

本研究の結果は、社会脳ネットワークの中核である rTPJ 領域と dmPFC 領域が、6-7 ヶ月齢において、すでに対人相互作用における随伴刺激という高次な社会的信号の処理に関与していることを明らかにした。また、rTPJ 領域と dmPFC 領域を繋ぐ機能的結合が、遅くとも生後 6-7 ヶ月において、すでに形成されていることを明らかにした。さらに、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、6-7 ヶ月児よりも未熟な脳反応を示すことが明らかとなり、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 ヶ月頃に促進されることが明らかとなった。本研究において、乳児の社会的刺激への自発的な注意と、rTPJ 領域の活動との間に関連が見出され、社会的相互作用場面における rTPJ 領域の活動が、共同注意や他者の意図理解といった高次社会的認知機能の発達に寄与している可能性が示された。本研究のように、実際の対人相互作用において特定の脳活動機能を評価する研究は、fMRI や脳波計でも不可能である。実際に近年一人称の個人のみを検討する社会脳機能研究ばかりでなく、2nd person neuroscience や we-mode (Gallotti & Frith, 2013) と呼ばれるような他者との関わりにおける社会認知研究が重要視されており、この分野において、成人の fNIRS 研究が広く活用されてきている (Jiang et al., 2015)。そのような中で、乳幼児の fNIRS を用いた相互作用研究については、発達の観点からも大変重要であるにもかかわらず、乳幼児計測の特殊な技術を要することもあり、限られた研究しか行われていない。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。これまでの先行研究の多くは、より厳密な刺激統制が可能なビデオやスピーカーを用いた一方向の刺激呈示に留まっていた。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。

今後は、成人や子どもにおける随伴刺激への脳反応を検討することで、社会的相互作用に關与する脳機能の発達についてより多くの知見を提供であろう。本研究では、乳児において、社会的な（人間由来の）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ことが考えられた。しかし、成人におけるコミュニケーションでは、非社会的な刺激を使った相互作用がしばしば観察される。例えば、ドライバーの間では、車のヘッドライトを使った簡単な意思疎通が日常的に行なわれている。また、海の上に連続して点滅する光を見つけた場合、モールス信号を使って誰かがメッセージを送っているように感じるかもしれない。つまり、我々は、社会的でない刺激が他者の意図を反映し得ることを経験によって学習している。そのため、成人や子どもにおいては、社会的でない随伴刺激に対しても、社会脳ネットワークが活性化する可能性がある。また、先行研究において、TPJ 領域は聴覚情報よりも視覚情報に基づいた意図の推論を行なっているとする指摘がなされている (Van Overwalle, 2009)。そのため、本研究では視覚的な随伴刺激が使われていたために、rTPJ 領域の關与が認められた可能性があった。今後、視覚刺激だけでなく、聴覚刺激や触覚刺激といった異なるモダリティの刺激を用いることで、TPJ 領域の機能的な役割がより一層明確になるであろう。本研究において、乳児期における随伴刺激への rTPJ 領域の反応性の大きさが、その後の社会性や言語能力の予測変数となることが示唆された。今後、对人的相互作用に持続した困難さを示す ASD などの発達障害リスク児に対して同様の計測を行なうことで、非定型発達児の早期スクリーニングに重要な手がかりを提供できると考えられる。

7. 引用文献

- Adolphs, R. (1999). Social cognition and the human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(12), 469-479.
- Adolphs, R. (2003). Cognitive neuroscience of human social behaviour. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(3), 165-178.
- Adolphs, R. (2009). The social brain: Neural basis of social knowledge. *Annual Review of Psychology*, 60, 693-716.
- Altwater-Mackensen, N., & Grossmann, T. (2015). Learning to match auditory and visual speech cues: Social influences on acquisition of phonological categories. *Child Development*, 86(2), 362-378.
- Amodio, D. M., & Frith, C. D. (2006). Meeting of minds: The medial frontal cortex and social cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(4), 268-277.
- Anderson, D. R., & Pempek, T. A. (2005). Television and very young children. *American Behavioral Scientist*, 48(5), 505-522.
- Baron-Cohen, S., Leslie, A. M., & Frith, U. (1985). Does the autistic child have a “theory of mind” ? *Cognition*, 21(1), 37-46.
- Barr, R. (2010). Transfer of learning between 2D and 3D sources during infancy: Informing theory and practice. *Developmental Review*, 30(2), 128-154.
- Barr, R., & Hayne, H. (1999). Developmental changes in imitation from television during infancy. *Child Development*, 70(5), 1067-1081.
- Barr, R., Muentener, P., & Garcia, A. (2007). Age-related changes in deferred imitation from television by 6- to 18-month-olds. *Developmental Science*, 10(6), 910-921.
- Barr, R., Muentener, P., Garcia, A., Fujimoto, M., & Chávez, V. (2007). The effect of repetition on imitation from television during infancy. *Developmental Psychobiology*, 49(2), 196-207.
- Batki, A., Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Connellan, J., & Ahluwalia, J. (2000). Is there an innate gaze module? Evidence from human neonates. *Infant Behavior & Development*, 23(2), 223-229.
- Belin, P., & Grosbras, M.-H. (2010). Before speech: Cerebral voice processing

- in infants. *Neuron*, *65*(6), 733-735.
- Belin, P., Zatorre, R. J., Lafaille, P., Ahad, P., & Pike, B. (2000). Voice-selective areas in human auditory cortex. *Nature*, *403*(6767), 309-312.
- Bergelson, E., & Swingle, D. (2012). At 6-9 months, human infants know the meanings of many common nouns. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(9), 3253-3258.
- Bethmann, A., & Brechmann, A. (2014). On the definition and interpretation of voice selective activation in the temporal cortex. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 499.
- Bigelow, A. E., & Rochat, P. (2006). Two-month-old infants' sensitivity to social contingency in mother–infant and stranger–infant interaction. *Infancy*, *9*, 313-325.
- Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W., & Conant, L. L. (2009). Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, *19*(12), 2767-2796.
- Blanke, O., & Arzy, S. (2005). The out-of-body experience: Disturbed self-processing at the temporo-parietal junction. *Neuroscientist*, *11*(1), 16-24.
- Blasi, A., Mercure, E., Lloyd-Fox, S., Thomson, A., Brammer, M., Sauter, D., et al. (2011). Early specialization for voice and emotion processing in the infant brain. *Current Biology*, *21*(14), 1220-1224.
- Blasi, A., Phillips, D., Lloyd-Fox, S., Koh, P. H., & Elwell, C. E. (2010). Automatic detection of motion artifacts in infant functional optical topography studies. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, *662*, 279-284.
- Bornstein, M. H., Tamis-LeMonda, C. S., Chun-Shin, H., & Haynes, O. M. (2008). Maternal responsiveness to young children at three ages: Longitudinal analysis of a multidimensional, modular, and specific parenting construct. *Developmental Psychology*, *44*(3), 867-874.
- Brett, M., Johnsrude, I. S., & Owen, A. M. (2002). The problem of functional localization in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*, 243.

- Brothers, L. (1990). The social brain: A project for integrating primate behavior and neurophysiology in a new domain. *Concepts in Neuroscience, 1*, 27-51.
- Butterworth, G., & Jarrett, N. (1991). What minds have in common is space: Spatial mechanisms serving joint visual attention in infancy. *British Journal of Developmental Psychology, 9*(1), 55-72.
- Carr, L., Iacoboni, M., Dubeau, M.-C., Mazziotta, J. C., & Lenzi, G. L. (2003). Neural mechanisms of empathy in humans: A relay from neural systems for imitation to limbic areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 100*(9), 5497-5502.
- Carrington, S. J., & Bailey, A. J. (2009). Are there theory of mind regions in the brain? A review of the neuroimaging literature. *Human Brain Mapping, 30*(8), 2313-2335.
- Carter, R. M., & Huettel, S. A. (2013). A nexus model of the temporal-parietal junction. *Trends in Cognitive Sciences, 17*(7), 328-336.
- Carver, L. J., Meltzoff, A. N., & Dawson, G. (2006). Event-related potential (ERP) indices of infants' recognition of familiar and unfamiliar objects in two and three dimensions. *Developmental Science, 9*, 51-62.
- Cavallo, A., Lungu, O., Becchio, C., Ansuini, C., Rustichini, A., & Fadiga, L. (2015). When gaze opens the channel for communication: Integrative role of IFG and MPFC. *NeuroImage, 119*(Supplement C), 63-69.
- Charman, T., Baron-Cohen, S., Swettenham, J., Baird, G., Cox, A., & Drew, A. (2000). Testing joint attention, imitation, and play as infancy precursors to language and theory of mind. *Cognitive Development, 15*(4), 481-498.
- Chugani, H. T., Behen, M. E., Muzik, O., Juhasz, C., Nagy, F., & Chugani, D. C. (2001). Local brain functional activity following early deprivation: A study of postinstitutionalized Romanian orphans. *NeuroImage, 14*(6), 1290-1301.
- Ciaramidaro, A., Becchio, C., Colle, L., Bara, B. G., & Walter, H. (2014). Do you mean me? Communicative intentions recruit the mirror and the mentalizing system. *Social Cognitive and Affective Neuroscience, 9*(7),

- 909-916.
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*(3), 215-229.
- Cristia, A., Dupoux, E., Hakuno, Y., Lloyd-Fox, S., Schuetze, M., Kivits, J., et al. (2013). An online database of infant functional near infrared spectroscopy studies: A community-augmented systematic review. *PLoS ONE*, *8*(3), 1-10.
- Csibra, G. (2010). Recognizing communicative intentions in infancy. *Mind and Language*, *25*, 141-168.
- Csibra, G., & Gergely, G. (2009). Natural pedagogy. *Trends in Cognitive Sciences*, *13*, 148-153.
- de Haan, M., & Nelson, C. A. (1997). Recognition of the mother's face by six-month-old infants: A neurobehavioral study. *Child Development*, *68*(2), 187-210.
- de Haan, M., Pascalis, O., & Johnson, M. H. (2002). Specialization of neural mechanisms underlying face recognition in human infants. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(2), 199-209.
- Decety, J., & Lamm, C. (2007). The role of the right temporoparietal junction in social interaction: How low-level computational processes contribute to meta-cognition. *Neuroscientist*, *13*(6), 580-593.
- Delgado, C. E. F., Messinger, D. S., & Yale, M. E. (2002). Infant responses to direction of parental gaze: A comparison of two still-face conditions. *Infant Behavior & Development*, *25*(3), 311-318.
- DeLoache, J. S., Chiong, C., Sherman, K., Islam, N., Vanderborght, M., Troseth, G. L., et al. (2010). Do babies learn from baby media? *Psychological Science*, *21*(11), 1570-1574.
- Deocampo, J. A., & Hudson, J. A. (2005). When seeing is not believing: Two-year-olds' use of video representations to find a hidden toy. *Journal of Cognition and Development*, *6*(2), 229-258.
- Donaldson, P. H., Rinehart, N. J., & Enticott, P. G. (2015). Noninvasive stimulation of the temporoparietal junction: A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *55*, 547-572.

- Dunbar, R. (1998). The social brain hypothesis. *Brain*, *9*(10), 178-190.
- Duncan, A., Meek, J. H., Clemence, M., Elwell, C. E., Tyszczyk, L., Cope, M., et al. (1995). Optical pathlength measurements on adult head, calf and forearm and the head of the newborn infant using phase resolved optical spectroscopy. *Physics in Medicine and Biology*, *40*.
- Dunst, C. J., Gorman, E., & Hamby, D. W. (2010). Effects of adult verbal and vocal contingent responsiveness on increases in infant vocalizations. *CELL Reviews*, *3*, 1-11.
- Elsabbagh, M., Hohenberger, A., Campos, R., Van Herwegen, J., Serres, J., de Schonen, S., et al. (2013). Narrowing perceptual sensitivity to the native language in infancy: Exogenous influences on developmental timing. *Behavioural Sciences*, *3*(1), 120-132.
- Elsabbagh, M., & Johnson, M. H. (2010). Getting answers from babies about autism. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(2), 81-87.
- Elsabbagh, M., Mercure, E., Hudry, K., Chandler, S., Pasco, G., Charman, T., et al. (2012). Infant neural sensitivity to dynamic eye gaze is associated with later emerging autism. *Current Biology*, *22*(4), 338-342.
- Eluvathingal, T. J., Chugani, H. T., Behen, M. E., Juhász, C., Muzik, O., Maqbool, M., et al. (2006). Abnormal brain connectivity in children after early severe socioemotional deprivation: A diffusion tensor imaging study. *Pediatrics*, *117*(6), 2093-2100.
- Everdell, N. L., Gibson, A. P., Tullis, I. D. C., Vaithianathan, T., Hebden, J. C., & Delpy, D. T. (2005). A frequency multiplexed near-infrared topography system for imaging functional activation in the brain. *Review of Scientific Instruments*, *76*, 093705.
- Fantz, R. L. (1964). Visual experience in infants: Decreased attention to familiar patterns relative to novel ones. *Science*, *146*(3644), 668-670.
- Farrer, C., Franck, N., Georgieff, N., Frith, C. D., Decety, J., & Jeannerod, M. (2003). Modulating the experience of agency: A positron emission tomography study. *NeuroImage*, *18*(2), 324-333.
- Farroni, T., Csibra, G., Simion, F., & Johnson, M. H. (2002). Eye contact detection in humans from birth. *Proceedings of the National Academy*

- of Sciences of the United States of America*, 99, 9602-9605.
- Filippetti, M. L., Lloyd-Fox, S., Longo, M. R., Farroni, T., & Johnson, M. H. (2014). Neural mechanisms of body awareness in infants. *Cerebral Cortex*.
- Fransson, P., Åden, U., Blennow, M., & Lagercrantz, H. (2011). The functional architecture of the infant brain as revealed by resting-state fMRI. *Cerebral Cortex*, 21(1), 145-154.
- Frith, C. D., & Frith, U. (1999). Interacting minds--A biological basis. *Science*, 286(5445), 1692-1695.
- Gallagher, H. L., & Frith, C. D. (2003). Functional imaging of 'theory of mind'. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(2), 77-83.
- Gallagher, H. L., & Frith, C. D. (2004). Dissociable neural pathways for the perception and recognition of expressive and instrumental gestures. *Neuropsychologia*, 42, 1725-1736.
- Gallese, V., Keysers, C., & Rizzolatti, G. (2004). A unifying view of the basis of social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(9), 396-403.
- Gallotti, M., & Frith, C. D. (2013). Social cognition in the we-mode. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(4), 160-165.
- Gao, W., Zhu, H., Giovanello, K. S., Smith, J. K., Shen, D., Gilmore, J. H., et al. (2009). Evidence on the emergence of the brain's default network from 2-week-old to 2-year-old healthy pediatric subjects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(16), 6790-6795.
- Goldstein, M. H., King, A. P., & West, M. J. (2003). Social interaction shapes babbling: Testing parallels between birdsong and speech. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(13), 8030-8035.
- Goldstein, M. H., & Schwade, J. A. (2008). Social feedback to infants' babbling facilitates rapid phonological learning. *Psychological Science*, 19(5), 515-523.
- Goldstein, M. H., Schwade, J. A., & Bornstein, M. H. (2009). The value of vocalizing: Five-month-old infants associate their own noncry vocalizations with responses from caregivers. *Child Development*,

- 80(3), 636-644.
- Gros-Louis, J., West, M. J., & King, A. P. (2014). Maternal responsiveness and the development of directed vocalizing in social interactions. *Infancy, 19*(4), 385-408.
- Grossmann, T. (2015). The development of social brain functions in infancy. *Psychological Bulletin, 141*(6), 1266-1287.
- Grossmann, T., & Johnson, M. H. (2010). Selective prefrontal cortex responses to joint attention in early infancy. *Biology Letters, 6*, 540-543.
- Grossmann, T., Johnson, M. H., Lloyd-Fox, S., Blasi, A., Deligianni, F., Elwell, C., et al. (2008). Early cortical specialization for face-to-face communication in human infants. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 275*, 2803-2811.
- Grossmann, T., Lloyd-Fox, S., & Johnson, M. H. (2013). Brain responses reveal young infants' sensitivity to when a social partner follows their gaze. *Developmental Cognitive Neuroscience, 6*(Supplement C), 155-161.
- Grossmann, T., Oberecker, R., Koch, S. P., & Friederici, A. D. (2010). The developmental origins of voice processing in the human brain. *Neuron, 65*(6), 852-858.
- Grossmann, T., Parise, E., & Friederici, A. D. (2010). The detection of communicative signals directed at the self in infant prefrontal cortex. *Frontiers in Human Neuroscience, 4*.
- 蜂須拓・Yadong Pan・利根忠幸・Baptiste Bourreau・鈴木健嗣 (2017). 赤外線通信により物理的対面を計量するウェアラブルデバイス. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 22(1), 11-18.
- Haggard, P. (2017). Sense of agency in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience, 18*(4), 196-207.
- Hakuno, Y., Omori, T., Yamamoto, J., & Minagawa, Y. (2017). Social interaction facilitates word learning in preverbal infants: Word-object mapping and word segmentation. *Infant Behavior & Development, 48, Part B*, 65-77.
- Halit, H., de Haan, M., & Johnson, M. H. (2003). Cortical specialisation for

- face processing: Face-sensitive event-related potential components in 3- and 12-month-old infants. *NeuroImage*, *19*(3), 1180-1193.
- Hawco, C., Kovacevic, N., Malhotra, A. K., Buchanan, R. W., Viviano, J. D., Iacoboni, M., et al. (2017). Neural activity while imitating emotional faces is related to both lower and higher-level social cognitive performance. *Scientific Reports*, *7*, 1244.
- Hayne, H., Herbert, J., & Simcock, G. (2003). Imitation from television by 24- and 30-month-olds. *Developmental Science*, *6*(3), 254-261.
- Hirai, M., & Hiraki, K. (2005). An event-related potentials study of biological motion perception in human infants. *Cognitive Brain Research*, *22*(2), 301-304.
- Hiraki, K. (2006). Detecting contingency: A key to understanding development of self and social cognition. *Japanese Psychological Research*, *48*(3), 204-212.
- Hoehl, S., Reid, V., Mooney, J., & Striano, T. (2008). What are you looking at? Infants' neural processing of an adult's object-directed eye gaze. *Developmental Science*, *11*, 10-16.
- Hoehl, S., Wiese, L., & Striano, T. (2008). Young infants' neural processing of objects is affected by eye gaze direction and emotional expression. *PLoS ONE*, *3*(6), 1-6.
- Homae, F., Watanabe, H., Otobe, T., Nakano, T., Go, T., Konishi, Y., et al. (2010). Development of global cortical networks in early infancy. *The Journal of Neuroscience*, *30*(14), 4877-4882.
- Iacoboni, M. (2005). Neural mechanisms of imitation. *Current Opinion in Neurobiology*, *15*(6), 632-637.
- 生澤雅夫・松下裕・中瀬惇（編）（2002）．新版 K 式発達検査 2001 実施手引書．
京都：京都国際社会福祉センター．
- Imafuku, M., Hakuno, Y., Uchida-Ota, M., Yamamoto, J., & Minagawa, Y. (2014). "Mom called me!" Behavioral and prefrontal responses of infants to self-names spoken by their mothers. *NeuroImage*, *103*, 476-484.
- Ishizuka, Y., & Yamamoto, J. (2016). Contingent imitation increases verbal interaction in children with autism spectrum disorders. *Autism*, *20*(8),

- 1011-1020.
- Ito, T. A., Larsen, J. T., Smith, N. K., & Cacioppo, J. T. (1998). Negative information weighs more heavily on the brain: The negativity bias in evaluative categorizations. *Journal of Personality and Social Psychology, 75*(4), 887-900.
- Jiang, J., Chen, C., Dai, B., Shi, G., Ding, G., Liu, L., et al. (2015). Leader emergence through interpersonal neural synchronization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112*(14), 4274-4279.
- Johnson, M. H., Dziurawiec, S., Ellis, H., & Morton, J. (1991). Newborns' preferential tracking of face-like stimuli and its subsequent decline. *Cognition, 40*(1), 1-19.
- Keysers, C., & Gazzola, V. (2007). Integrating simulation and theory of mind: From self to social cognition. *Trends in Cognitive Sciences, 11*(5), 194-196.
- Kobayashi, C., Glover, G. H., & Temple, E. (2007). Children's and adults' neural bases of verbal and nonverbal 'theory of mind'. *Neuropsychologia, 45*(7), 1522-1532.
- Koike, T., Tanabe, H. C., Okazaki, S., Nakagawa, E., Sasaki, A. T., Shimada, K., et al. (2016). Neural substrates of shared attention as social memory: A hyperscanning functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage, 125*(Supplement C), 401-412.
- Krcmar, M. (2010). Can social meaningfulness and repeat exposure help infants and toddlers overcome the video deficit? *Media Psychology, 13*(1), 31-53.
- Krcmar, M., Grela, B., & Lin, K. (2007). Can toddlers learn vocabulary from television? An experimental approach. *Media Psychology, 10*(1), 41-63.
- Kubit, B., & Jack, A. I. (2013). Rethinking the role of the rTPJ in attention and social cognition in light of the opposing domains hypothesis: Findings from an ALE-based meta-analysis and resting-state functional connectivity. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 323.
- Kuhl, P. K. (2007). Is speech learning 'gated' by the social brain? *Developmental Science, 10*(1), 110-120.

- Kuhl, P. K., Tsao, F. M., & Liu, H. M. (2003). Foreign-language experience in infancy: Effects of short-term exposure and social interaction on phonetic learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *100*, 9096-9101.
- Leppänen, J. M., & Nelson, C. A. (2012). Early development of fear processing. *Current Directions in Psychological Science*, *21*(3), 200-204.
- Linebarger, D. L., & Walker, D. (2005). Infants' and toddlers' television viewing and language outcomes. *American Behavioral Scientist*, *48*(5), 624-645.
- Liu, H.-M., Kuhl, P. K., & Tsao, F.-M. (2003). An association between mothers' speech clarity and infants' speech discrimination skills. *Developmental Science*, *6*(3), 1-10.
- Lloyd-Fox, S., Begus, K., Halliday, D., Pirazzoli, L., Blasi, A., Papademetriou, M., et al. (2017). Cortical specialisation to social stimuli from the first days to the second year of life: A rural Gambian cohort. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *25*, 92-104.
- Lloyd-Fox, S., Blasi, A., & Elwell, C. E. (2010). Illuminating the developing brain: The past, present and future of functional near infrared spectroscopy. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *34*, 269-284.
- Lloyd-Fox, S., Blasi, A., Everdell, N., Elwell, C. E., & Johnson, M. H. (2011). Selective cortical mapping of biological motion processing in young infants. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*, 2521-2532.
- Lloyd-Fox, S., Blasi, A., Mercure, E., Elwell, C. E., & Johnson, M. H. (2012). The emergence of cerebral specialization for the human voice over the first months of life. *Social Neuroscience*, *7*(3), 317-330.
- Lloyd-Fox, S., Blasi, A., Volein, A., Everdell, N., Elwell, C. E., & Johnson, M. H. (2009). Social perception in infancy: A near infrared spectroscopy study. *Child Development*, *80*, 986-999.
- Lloyd-Fox, S., Richards, J. E., Blasi, A., Murphy, D. G. M., Elwell, C. E., & Johnson, M. H. (2014). Coregistering functional near-infrared spectroscopy with underlying cortical areas in infants. *Neurophotonics*, *1*(2), 025006.

- Lloyd-Fox, S., Széplaki-Köllöd, B., Yin, J., & Csibra, G. (2015). Are you talking to me? Neural activations in 6-month-old infants in response to being addressed during natural interactions. *Cortex*, *70*, 35-48.
- Marsh, L. E., & Hamilton, A. F. d. C. (2011). Dissociation of mirroring and mentalising systems in autism. *NeuroImage*, *56*(3), 1511-1519.
- 正高信男 (1993). 0歳児がことばを獲得するとき：行動学からのアプローチ. 東京：中央公論新社.
- Miller, J. L., & Gros-Louis, J. (2013). Socially guided attention influences infants' communicative behavior. *Infant Behavior & Development*, *36*(4), 627-634.
- Minagawa, Y., Hakuno, Y., Kobayashi, A., Naoi, N., & Kojima, S. (2017). Infant word segmentation recruits the cerebral network of phonological short-term memory. *Brain & Language*, *170*, 39-49.
- Minagawa-Kawai, Y., Matsuoka, S., Dan, I., Naoi, N., Nakamura, K., & Kojima, S. (2009). Prefrontal activation associated with social attachment: Facial-emotion recognition in mothers and infants. *Cerebral Cortex*, *19*, 284-292.
- Mitchell, J. P., Banaji, M. R., & Macrae, C. N. (2005). General and specific contributions of the medial prefrontal cortex to knowledge about mental states. *NeuroImage*, *28*(4), 757-762.
- 三宅和夫 (監修)・大村政男・高嶋正士・山内茂・橋本泰子 (編) (1991). KIDS 乳幼児発達スケール手引き. 東京：発達科学研究教育センター.
- Mosconi, M. W., Mack, P. B., McCarthy, G., & Pelphrey, K. A. (2005). Taking an "intentional stance" on eye-gaze shifts: A functional neuroimaging study of social perception in children. *NeuroImage*, *27*, 247-252.
- Mundy, P., & Newell, L. (2007). Attention, joint attention, and social cognition. *Current Directions in Psychological Science*, *16*, 269-274.
- Murray, L., & Trevarthen, C. (1985). Emotional regulation of interactions between two-month-olds and their mothers. In T. M. Field & N. A. Fox (Eds.), *Social Perception in Infants* (pp. 177- 197). Norwood, NJ: Ablex Publishers.
- Nadel, J., Carchon, I., Kervella, C., Marcelli, D., & Reserbat-Plantey, D. (1999). Expectancies for social contingency in 2-month-olds.

- Developmental Science*, 2(2), 164.
- Naoi, N., & Minagawa-Kawai, Y. (2009). Cerebral responses to joint attention episodes in infants. In Y. Minagawa-Kawai, N. Naoi & S. Kojima (Eds.), *A new approach to functional neuroimaging: Near-infrared spectroscopy (NIRS)* (pp. 82-86). Tokyo: Keio University Press.
- Neimyo, H., Pelaez, M., Carrow, J., Monlux, K., & Tarbox, J. (2017). Infants at risk of autism and developmental disorders: Establishing early social skills. *Behavioral Development Bulletin*, 22(1), 6-22.
- Nelson, C. A., & De Haan, M. (1996). Neural correlates of infants' visual responsiveness to facial expressions of emotion. *Developmental Psychobiology*, 29(7), 577-595.
- Nelson, C. A., Zeanah, C. H., Fox, N. A., Marshall, P. J., Smyke, A. T., & Guthrie, D. (2007). Cognitive recovery in socially deprived young children: The Bucharest early intervention project. *Science*, 318(5858), 1937-1940.
- Nicely, P., Tamis-LeMonda, C. S., & Bornstein, M. H. (1999). Mothers' attuned responses to infant affect expressivity promote earlier achievement of language milestones. *Infant Behavior & Development*, 22(4), 557-568.
- Nielsen, M., Simcock, G., & Jenkins, L. (2008). The effect of social engagement on 24-month-olds' imitation from live and televised models. *Developmental Science*, 11(5), 722-731.
- Obrig, H., & Villringer, A. (2003). Beyond the visible—imaging the human brain with light. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 23(1), 1-18.
- 小椋たみ子 (1999). 縦断観察による日本語獲得児の語彙の発達: 一語発話期. 神戸大学発達科学部研究紀要, 6(2), 1-14.
- 小椋たみ子・綿巻徹 (2004). 日本語マッカーサー乳幼児言語発達質問紙「語と身振り」手引. 京都: 京都国際社会福祉センター.
- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., et al. (2004). Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for

- transcranial functional brain mapping. *NeuroImage*, 21(1), 99-111.
- Okamoto, M., & Dan, I. (2005). Automated cortical projection of head-surface locations for transcranial functional brain mapping. *NeuroImage*, 26(1), 18-28.
- Onishi, K. H., & Baillargeon, R. (2005). Do 15-month-old infants understand false beliefs? *Science*, 308(5719), 255-258.
- Otsuka, Y., Nakato, E., Kanazawa, S., Yamaguchi, M. K., Watanabe, S., & Kakigi, R. (2007). Neural activation to upright and inverted faces in infants measured by near infrared spectroscopy. *NeuroImage*, 34.
- Ozawa, S., Matsuda, G., & Hiraki, K. (2014). Negative emotion modulates prefrontal cortex activity during a working memory task: A NIRS study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 46.
- Papoušek, H., & Papoušek, M. (1989). Intuitive parenting: Aspects related to educational psychology. *European Journal of Psychology of Education*, 4(2), 201-210.
- Parise, E., Reid, V. M., Stets, M., & Striano, T. (2008). Direct eye contact influences the neural processing of objects in 5-month-old infants. *Social Neuroscience*, 3(2), 141-150.
- Peeters, G., & Czapinski, J. (1990). Positive-negative asymmetry in evaluations: The distinction between affective and informational negativity effects. *European Review of Social Psychology*, 1(1), 33-60.
- Pelaez, M., Virués-Ortega, J., & Gewirtz, J. L. (2011a). Contingent and Noncontingent Reinforcement With Maternal Vocal Imitation and Motherese Speech: Effects on Infant Vocalizations. *European Journal of Behavior Analysis*, 12(1), 277-287.
- Pelaez, M., Virués-Ortega, J., & Gewirtz, J. L. (2011b). Reinforcement of vocalizations through contingent vocal imitation. *Journal of Applied Behavior Analysis*, 44(1), 33-40.
- Pelphrey, K. A., Viola, R. J., & McCarthy, G. (2004). When strangers pass: Processing of mutual and averted social gaze in the superior temporal sulcus. *Psychological Science*, 15.
- Premack, D., & Woodruff, G. (1978). Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behavioral and Brain Sciences*, 1(04), 515-526.

- Ramey, C. T., Hieger, L., & Klisz, D. (1972). Synchronous reinforcement of vocal responses in failure-to-thrive infants. *Child Development, 43*(4), 1449-1455.
- Redcay, E., Dodell-Feder, D., Pearrow, M. J., Mavros, P. L., Kleiner, M., Gabrieli, J. D. E., et al. (2010). Live face-to-face interaction during fMRI: A new tool for social cognitive neuroscience. *NeuroImage, 50*(4), 1639-1647.
- Redcay, E., Kleiner, M., & Saxe, R. (2012). Look at this: The neural correlates of initiating and responding to bids for joint attention. *Frontiers in Human Neuroscience, 6*, 169.
- Reid, V. M., Hoehl, S., & Striano, T. (2006). The perception of biological motion by infants: An event-related potential study. *Neuroscience Letters, 395*(3), 211-214.
- Rheingold, H. L., Gewirtz, J. L., & Ross, H. W. (1959). Social conditioning of vocalizations in the infant. *Journal of Comparative and Physiological Psychology, 52*(1), 68-73.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience, 27*, 169-192.
- Robb, M. B., Richert, R. A., & Wartella, E. A. (2009). Just a talking book? Word learning from watching baby videos. *British Journal of Developmental Psychology, 27*, 27-45.
- Rochat, P., Striano, T., & Blatt, L. (2002). Differential effects of happy, neutral, and sad still-faces on 2-, 4- and 6-month-old infants. *Infant and Child Development, 11*(4), 289-303.
- Rollins, P. R. (2003). Caregivers' contingent comments to 9-month-old infants: Relationships with later language. *Applied Psycholinguistics, 24*(2), 221-234.
- Roseberry, S., Hirsh-Pasek, K., & Golinkoff, R. M. (2014). Skype me! Socially contingent interactions help toddlers learn language. *Child Development, 85*(3), 956-970.
- Rutter, M. (1998). Developmental catch-up, and deficit, following adoption after severe global early privation. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 39*(4), 465-476.

- Saito, D., Tanabe, H., Izuma, K., Hayashi, M., Morito, Y., Komeda, H., et al. (2010). "Stay tuned": Inter-individual neural synchronization during mutual gaze and joint attention. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 4(127).
- Saito, Y., Kondo, T., Aoyama, S., Fukumoto, R., Konishi, N., Nakamura, K., et al. (2007). The function of the frontal lobe in neonates for response to a prosodic voice. *Early Human Development*, 83(4), 225-230.
- Santiesteban, I., Banissy, Michael J., Catmur, C., & Bird, G. (2012). Enhancing social ability by stimulating right temporoparietal junction. *Current Biology*, 22(23), 2274-2277.
- Saxe, R., & Kanwisher, N. (2003). People thinking about thinking people: The role of the temporo-parietal junction in "theory of mind". *NeuroImage*, 19(4), 1835-1842.
- Saxe, R., & Powell, L. J. (2006). It's the thought that counts: Specific brain regions for one component of theory of mind. *Psychological Science*, 17(8), 692-699.
- Schmitt, K. L., & Anderson, D. R. (2002). Television and reality: Toddlers' use of visual information from video to guide behavior. *Media Psychology*, 4(1), 51-76.
- Scholz, J., Triantafyllou, C., Whitfield-Gabrieli, S., Brown, E. N., & Saxe, R. (2009). Distinct regions of right temporo-parietal junction are selective for theory of mind and exogenous attention. *PLoS ONE*, 4(3), e4869.
- Schurz, M., Radua, J., Aichhorn, M., Richlan, F., & Perner, J. (2014). Fractionating theory of mind: A meta-analysis of functional brain imaging studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 42, 9-34.
- Seidl, A., Tincoff, R., Baker, C., & Cristia, A. (2015). Why the body comes first: Effects of experimenter touch on infants' word finding. *Developmental Science*, 18(1), 155-164.
- Senju, A., & Csibra, G. (2008). Gaze following in human infants depends on communicative signals. *Current Biology*, 18, 668-671.
- Senju, A., Southgate, V., White, S., & Frith, U. (2009). Mindblind eyes: An absence of spontaneous theory of mind in Asperger syndrome. *Science*, 325(5942), 883-885.

- Shattuck, D. W., Mirza, M., Adisetiyo, V., Hojatkashani, C., Salamon, G., Narr, K. L., et al. (2008). Construction of a 3D probabilistic atlas of human cortical structures. *NeuroImage*, *39*(3), 1064-1080.
- Shimada, S., & Hiraki, K. (2006). Infant's brain responses to live and televised action. *NeuroImage*, *32*, 930-939.
- Singh, L., Nestor, S., Parikh, C., & Yull, A. (2009). Influences of infant-directed speech on early word recognition. *Infancy*, *14*(6), 654-666.
- Sommer, M., Döhl, K., Sodian, B., Meinhardt, J., Thoermer, C., & Hajak, G. (2007). Neural correlates of true and false belief reasoning. *NeuroImage*, *35*(3), 1378-1384.
- Sperduti, M., Delaveau, P., Fossati, P., & Nadel, J. (2011). Different brain structures related to self- and external-agency attribution: a brief review and meta-analysis. *Brain Structure and Function*, *216*(2), 151-157.
- Stahl, D., Parise, E., Hoehl, S., & Striano, T. (2010). Eye contact and emotional face processing in 6-month-old infants: Advanced statistical methods applied to event-related potentials. *Brain & Development*, *32*(4), 305-317.
- Stets, M., Stahl, D., & Reid, V. M. (2012). A meta-analysis investigating factors underlying attrition rates in infant ERP studies. *Developmental Neuropsychology*, *37*(3), 226-252.
- Stornark, K. M., & Braarud, H. C. (2004). Infants' sensitivity to social contingency: A double video study of face-to-face communication between 2- and 4-month-olds and their mothers. *Infant Behavior & Development*, *27*(2), 195-203.
- Striano, T., Reid, V. M., & Hoehl, S. (2006). Neural mechanisms of joint attention in infancy. *European Journal of Neuroscience*, *23*, 2819-2823.
- Stuss, D. T., Gallup, J. G. G., & Alexander, M. P. (2001). The frontal lobes are necessary for 'theory of mind'. *Brain*, *124*(2), 279-286.
- Sutoko, S., Sato, H., Maki, A., Kiguchi, M., Hirabayashi, Y., Atsumori, H., et al. (2016). Tutorial on platform for optical topography analysis tools.

- Neurophotronics*, 3(1), 010801-010801.
- Tamis-LeMonda, C. S., Bornstein, M. H., & Baumwell, L. (2001). Maternal responsiveness and children's achievement of language milestones. *Child Development*, 72(3), 748.
- Tanabe, H. C., Kosaka, H., Saito, D. N., Koike, T., Hayashi, M. J., Izuma, K., et al. (2012). Hard to “tune in”: Neural mechanisms of live face-to-face interaction with high-functioning autistic spectrum disorder. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 268.
- Tomasello, M., Carpenter, M., Call, J., Behne, T., & Moll, H. (2005). Understanding and sharing intentions: The origins of cultural cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 28(5), 675-735.
- Trapp, K., Spengler, S., Wüstenberg, T., Wiers, C. E., Busch, N. A., & BERPohl, F. (2014). Imagining triadic interactions simultaneously activates mirror and mentalizing systems. *NeuroImage*, 98(Supplement C), 314-323.
- Tronick, E., Als, H., Adamson, L., Wise, S., & Brazelton, T. B. (1978). The infant's response to entrapment between contradictory messages in face-to-face interaction. *Journal of the American Academy of Child Psychiatry*, 17(1), 1-13.
- Troseth, G. L., Saylor, M. M., & Archer, A. H. (2006). Young children's use of video as a source of socially relevant information. *Child Development*, 77(3), 786-799.
- Tsuzuki, D., Jurcak, V., Singh, A. K., Okamoto, M., Watanabe, E., & Dan, I. (2007). Virtual spatial registration of stand-alone fNIRS data to MNI space. *NeuroImage*, 34, 1506-1518.
- Uddin, L. Q., Iacoboni, M., Lange, C., & Keenan, J. P. (2007). The self and social cognition: The role of cortical midline structures and mirror neurons. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(4), 153-157.
- Urakawa, S., Takamoto, K., Ishikawa, A., Ono, T., & Nishijo, H. (2014). Selective medial prefrontal cortex responses during live mutual gaze interactions in human infants: An fNIRS study. *Brain Topography*, 1-11.
- Vaish, A., Grossmann, T., & Woodward, A. (2008). Not all emotions are

- created equal: The negativity bias in social-emotional development. *Psychological Bulletin*, *134*(3), 383-403.
- van der Meer, L., Groenewold, N. A., Nolen, W. A., Pijnenborg, M., & Aleman, A. (2011). Inhibit yourself and understand the other: Neural basis of distinct processes underlying theory of mind. *NeuroImage*, *56*(4), 2364-2374.
- Van Dillen, L. F., Heslenfeld, D. J., & Koole, S. L. (2009). Tuning down the emotional brain: An fMRI study of the effects of cognitive load on the processing of affective images. *NeuroImage*, *45*(4), 1212-1219.
- Van Overwalle, F. (2009). Social cognition and the brain: A meta-analysis. *Human Brain Mapping*, *30*(3), 829-858.
- Van Overwalle, F., & Baetens, K. (2009). Understanding others' actions and goals by mirror and mentalizing systems: A meta-analysis. *NeuroImage*, *48*(3), 564-584.
- Weisberg, P. (1963). Social and nonsocial conditioning of infant vocalizations. *Child Development*, *34*(2), 377-388.
- Weisleder, A., & Fernald, A. (2013). Talking to children matters: Early language experience strengthens processing and builds vocabulary. *Psychological Science*, *24*(11), 2143-2152.
- Wiesmann, C. G., Schreiber, J., Singer, T., Steinbeis, N., & Friederici, A. D. (2017). White matter maturation is associated with the emergence of Theory of Mind in early childhood. *Nature Communications*, *8*, 14692.
- Wolf, I., Dziobek, I., & Heekeren, H. R. (2010). Neural correlates of social cognition in naturalistic settings: A model-free analysis approach. *NeuroImage*, *49*(1), 894-904.
- Woodward, A. L. (2003). Infants' developing understanding of the link between looker and object. *Developmental Science*, *6*(3), 297-311.
- Wu, R., Tummeltshammer, K. S., Gliga, T., & Kirkham, N. Z. (2014). Ostensive signals support learning from novel attention cues during infancy. *Frontiers in Psychology*, *5*, 251.
- Zaki, J., Weber, J., Bolger, N., & Ochsner, K. (2009). The neural bases of empathic accuracy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *106*(27), 11382-11387.

Zwaigenbaum, L., Bryson, S., Rogers, T., Roberts, W., Brian, J., & Szatmari, P. (2005). Behavioral manifestations of autism in the first year of life. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 23(2), 143-152.

8. 関連業績

学位論文

Hakuno, Y. (2014). Optical imaging of infant brain activation in response to social and non-social stimuli during real life interactions. MSc Psychological Research Dissertation, MSc Cognitive Neuroscience and Neuropsychology, Department of Psychological Sciences, Birkbeck, University of London.

学術論文

(査読あり)

Hakuno, Y., Omori, T., Yamamoto, J., & Minagawa, Y. (2017). Social interaction facilitates word learning in preverbal Infants: word-object mapping and word segmentation. *Infant Behavior and Development*, 48, 65-77.

白野陽子・皆川泰代 (2017). 共同注意場面における話者の視線が乳児の注視行動に与える影響: 話者の顔と対象物への注意の検討. 慶應義塾大学大学院社会学研究科紀要, 83, 35-45.

Minagawa, Y., Hakuno, Y., Kobayashi, A., Naoi, N., & Kojima, S. (2017). Infant word segmentation recruits the cerebral network of phonological short-term memory. *Brain and Language*, 170, 39-49.

Imafuku, M., Hakuno, Y., Uchida-Ota, M., Yamamoto, J., & Minagawa, Y. (2014). "Mom called me!" Behavioral and prefrontal responses of infants to self-names spoken by their mothers. *NeuroImage*, 103, 476-484.

Cristia, A., Dupoux, E., Hakuno, Y., Lloyd-Fox, S., Schuetze, M., Kivits, J., Bergvelt, T., van Gelder, M., Filippin, L., Charron, S., & Minagawa-Kawai, Y. (2013). An online database of infant functional near infrared spectroscopy studies: A community-augmented systematic review. *PLoS ONE*, 8(3), 1-10.

Minagawa-Kawai, Y., Cristia, A., Long, B., Vendelin, Hakuno, Y., Dutat, M., Filippin, L., Cabrol, D., & Dupoux, E. (2013). Insights on NIRS sensitivity from a cross-linguistic study on the emergence of phonological grammar. *Frontiers in Psychology*, 4, 170.

森澤範子・白野陽子・皆川泰代 (2013). 乳児音声聴取における視聴覚情報利用の発達変化: 母親と他者の場合. 音声研究, 17(3), 77-85.

(査読なし)

Hakuno, Y., Omori, T., Yamamoto, J., & Minagawa-Kawai, Y. (2012). A Preliminary Study on Infants' Learning of Word-Object Relations: The Role of Social Interaction. In S. Watanabe (Ed.), *CARLS Series of Advanced Study of Logic and Sensibility Vol.5 2011* (pp. 127-136). Tokyo: Keio University Press.

国際学会・シンポジウム等における発表

(口頭発表)

Hakuno, Y. & Minagawa, Y. Neural activations to mutual gaze and contingent responsiveness during live interactions in infancy. The Functional Near Infrared Spectroscopy Conference 2016, Paris, France. (October 2016).

(ポスター発表)

Hakuno, Y., Hata, M., Hachisu, T., Suzuki, K., & Minagawa, Y. Neural activations to social and non-social contingent responses during live interactions in infancy. Africa Regional International Meeting for Autism Research 2017, 24, Stellenbosch, South Africa. (September 2017).

Hakuno, Y., Pirazzoli, L., Blasi, A., Johnson, M. H., & Lloyd-Fox, S. Optical imaging of infant brain activation in response to social and non-social stimuli during real life interactions. The XX Biennial International Conference of Infant Studies, 3-010 (66), New Orleans, USA. (May 2016).

Hakuno, Y. & Minagawa-Kawai, Y. Effects of talker's behavior on infants' attention to a face and object during word learning. The XIX Biennial International Conference on Infant Studies, 3-028 (21), Berlin, Germany. (July 2014).

Hakuno, Y., Omori, T., Yamamoto, J., & Minagawa-Kawai, Y. Infants' learning of word-object relations: The role of social interaction. The XVIII Biennial International Conference on Infant Studies, 3-023 (18), Minneapolis, USA. (June 2012).

Morisawa, N., Hakuno, Y., & Minagawa-Kawai, Y. Infants' observation of mother and non-mother faces: The role of audiovisual information and effects of mother-infant bonding. The XVIII Biennial International Conference on Infant Studies, 1-033 (27), Minneapolis, USA. (June 2012).

Hakuno, Y., Omori, T., Yamamoto, J., & Minagawa-Kawai, Y. Infants' learning of word-object relations: The role of social interaction. The Global COE

international symposium on Toward an Integration of Logic and Sensibility from Neuroscience to Philosophy, Tokyo, Japan. (September 2011).

国内学会・シンポジウム等における発表

(口頭発表)

白野陽子・皆川泰代. 社会的インタラクション時における乳児の視線と脳反応. 慶應義塾大学戦略的研究基盤形成支援事業・コミュニケーション行動の生涯発達研究拠点：第2回 fNIRS セミナー, 東京, 2016年9月.

白野陽子. 社会的相互作用時における社会的刺激への12ヶ月児の脳反応の検討. 赤ちゃん学会若手部会第2回研究合宿, 滋賀, 2014年9月.

(ポスター発表)

白野陽子・秦政寛・蜂須拓・鈴木健嗣・皆川泰代. 乳児の社会的相互作用における随伴性に関与する脳反応. 光脳機能イメージング学会第20回学術集会, P2-6, 東京, 2017年7月.

白野陽子・秦政寛・皆川泰代. 乳児の社会的相互作用における社会的信号への脳反応：アイコンタクトと随伴刺激. 日本赤ちゃん学会第17回学術集会, P-51, 久留米, 2017年7月.

白野陽子・皆川泰代. 社会的シグナルへの乳児の視線と脳反応に関する予備的研究. 日本赤ちゃん学会第16回学術集会, P-06, 京都, 2016年5月.

白野陽子・皆川泰代. 話者の視線行動の違いが乳児の注視パターンに与える影響—単語学習時における顔とオブジェクトへの注意配分の検討—. 日本赤ちゃん学会第15回学術集会, P-12, 香川, 2015年6月.

白野陽子・大森貴秀・山本淳一・皆川泰代. 乳児における単語分節化と語意獲得(2) 社会的相互作用が果たす役割. 日本赤ちゃん学会第13回学術集会, P-59, 福岡, 2013年5月.

白野陽子・大森貴秀・山本淳一・皆川泰代. 乳児における単語分節化と語意獲得: 社会的相互作用が果たす役割. 日本赤ちゃん学会第11回学術集会, P-18, 岐阜, 2011年5月.

9. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方々のご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

はじめに、本研究にご参加頂いたすべてのお子さまと保護者の皆さまに心より感謝申し上げます。

指導教授である慶應義塾大学文学部 教授 皆川泰代先生には、長年にわたり懇切なご指導を賜りました。研究者としてだけでなく、人としても尊敬する先生の下、楽しみながら研究を続けることができました。乳幼児研究の基礎から論文の執筆に至るまで、いつも温かく、そして丁寧にご指導頂きましたことに、厚く御礼申し上げます。

慶應義塾大学文学部 教授 山本淳一先生には、ゼミや研究会を通して長きにわたり様々なご指導を賜りました。私の研究について、行動分析学の立場から、大変貴重なご助言を頂きましたこと、また、ご多忙の中、主査を務めて頂きましたことに、深く感謝申し上げます。

ロンドン大学バークベック校 Sarah Lloyd-Fox 先生、ケンブリッジ大学 教授 Mark H. Johnson 先生には、実験 1 の計画の立案から研究の遂行、論文の執筆に至るまで懇切なご指導を賜りました。先生方のご指導を通して、自然な環境との相互作用において乳幼児の発達を捉えることの大切さを学びました。心より感謝申し上げます。

慶應義塾大学文学部心理学専攻の先生方には、ゼミや発表などで多くのご助言を賜り、共同研究者である、慶應義塾大学先導研究センター 秦政寛さん、筑波大学システム情報系 蜂須拓さん、ロンドン大学バークベック校 Laura Pirazzoli さんには、本研究の実施に際しまして多大なご助力を頂きました。

慶應義塾大学先導研究センター 星野英一さん、ロンドン大学バークベック校 Anna Blasi 先生には、データの分析に際しまして、国際基督教大学教養学部直井望先生には、実験 2 に関しまして、慶應義塾大学赤ちゃんラボ 石井清香さんには、参加児のリクルートに際しまして、多大なご協力を賜りました。

浅野路子さん、阿部和大さん、安井愛可さん、増田れいさん、宮原冴佳さん、白野明子さんをはじめ、本研究のデータ収集・データ分析に際して多くのご支援・ご協力を頂いた皆さまに、心より感謝申し上げます。

最後に、いつも温かく見守り、支えてくれた家族に心から感謝いたします。ありがとうございました。