

Title	乳児の匂い物質が快・不快の乳児発声に対する母親の脳反応に与える影響：fNIRS研究
Sub Title	Effects of infant odors on maternal brain responses to pleasant and unpleasant infant vocalizations : an fNIRS study
Author	孫, 王書堯(Sun, Wanhshuyao) 玉田, 優衣(Tamada, Yui) 星野, 英一(Hoshino, Eiichi) 森本, 智志(Morimoto, Satoshi) 徐, 鳴鎬(Xu, Mingdi) 平澤, 佑啓(Hirasawa, Yukei) 白須, 未香(Shirasu, Mika) 岡本, 雅子(Okamoto, Masako) 東原, 和成(Touhara, Kazushige) 皆川, 泰代(Minagawa, Yasuyo)
Publisher	慶應義塾大学大学院社会学研究科
Publication year	2025
Jtitle	慶應義塾大学大学院社会学研究科紀要：社会学心理学教育学：人間と社会の探究 (Studies in sociology, psychology and education : inquiries into humans and societies). No.99 (2025.) ,p.[53]- 67
JaLC DOI	
Abstract	Maternal–infant attachment is shaped by various sensory cues, including visual, auditory, and olfactory stimuli. Infant cries evoke maternal empathy and caregiving behaviors, while infant odors activate reward-associated brain regions. However, the combined effects of these multimodal stimuli on maternal neural responses remain underexplored. This study examined how exposure to a chemically synthesized infant odor, based on compounds identified from the odor of real infants, influences maternal brain responses to infant vocalizations, specifically, pleasant (laughter) and unpleasant (crying) sounds, using functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS). The odor stimulus, previously shown to elevate oxytocin levels in mothers of young children, was applied in a within-participant design across sessions held on separate days: one under the infant odor condition and the other under an odorless control condition. A total of 27 mothers of infants aged 2–11 months participated in this study. The cerebral hemodynamic response was recorded using a 56-channel fNIRS system in which participants rated the pleasantness or unpleasantness of each vocalization. Laughter elicited decreased activity in the frontopolar area under both odor conditions. However, activities in the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) decreased significantly only in the odorless laughter condition, suggesting an odor-related modulation. No significant effects of infant odor were observed in the subjective ratings of the vocalizations. Generalized linear model (GLM) analyses revealed that the infant odor enhanced activation in the right superior temporal gyrus (STG) in response to crying stimuli, particularly when those cries were perceived as relatively unpleasant. In addition, mothers with lower depressive tendencies, as indicated by lower scores on the General Health Questionnaire (GHQ), exhibited moderate reductions in frontopolar activity during the infant odor-crying condition. These findings suggest that infant odor selectively enhances maternal neural sensitivity to negatively valenced infant cues, potentially promoting more adaptive caregiving responses. In mothers with fewer depressive symptoms, infant odor may also help mitigate brain activity

	associated with stress or anxiety elicited by infant distress. Future research should further explore the potential of infant odors to support maternal mental health and strengthen parent–infant bonding.
Notes	論文
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN0006957X-00000099-0053

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

乳児の匂い物質が快・不快の乳児発声に対する母親の脳反応に与える影響

—fNIRS 研究—

Effects of Infant Odors on Maternal Brain Responses to Pleasant and Unpleasant Infant Vocalizations: An fNIRS Study

孫 王書堯*・玉田優衣*・星野英一**・森本智志**・徐 鳴鎬**・平澤佑啓***・

白須未香***・岡本雅子***・東原和成***・皆川泰代*

Wanhshuyao Sun, Yui Tamada, Eiichi Hoshino, Satoshi Morimoto, Mingdi Xu, Yuhei Hirawaka, Mika Shirasu, Masako Okamoto, Kazushige Touhara and Yasuyo Minagawa

Maternal-infant attachment is shaped by various sensory cues, including visual, auditory, and olfactory stimuli. Infant cries evoke maternal empathy and caregiving behaviors, while infant odors activate reward-associated brain regions. However, the combined effects of these multimodal stimuli on maternal neural responses remain underexplored. This study examined how exposure to a chemically synthesized infant odor, based on compounds identified from the odor of real infants, influences maternal brain responses to infant vocalizations, specifically, pleasant (laughter) and unpleasant (crying) sounds, using functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS). The odor stimulus, previously shown to elevate oxytocin levels in mothers of young children, was applied in a within-participant design across sessions held on separate days: one under the infant odor condition and the other under an odorless control condition. A total of 27 mothers of infants aged 2–11 months participated in this study. The cerebral hemodynamic response was recorded using a 56-channel fNIRS system in which participants rated the pleasantness or unpleasantness of each vocalization. Laughter elicited decreased activity in the frontopolar area under both odor conditions. However, activities in the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) decreased significantly only in the odorless laughter condition, suggesting an odor-related modulation. No significant effects of infant odor were observed in the subjective ratings of the vocalizations. Generalized linear model (GLM) analyses revealed that the infant odor enhanced activation in the right superior temporal gyrus (STG) in response to crying stimuli, particularly when those cries were perceived as relatively unpleasant. In addition, mothers with lower depressive tendencies, as indicated by lower scores on the General Health Questionnaire (GHQ), exhibited moderate reductions in frontopolar activity during the infant odor-crying condition. These findings suggest that infant odor selectively enhances maternal neural sensitivity to negatively valenced infant cues, potentially promoting more adaptive caregiving responses. In mothers with fewer depressive symptoms, infant odor may also help mitigate brain activity

* 慶應義塾大学大学院社会学研究科

** 慶應義塾大学グローバルリサーチインスティテュート

*** 東京大学大学院農学生命科学研究科

associated with stress or anxiety elicited by infant distress. Future research should further explore the potential of infant odors to support maternal mental health and strengthen parent-infant bonding.

Key words : maternal-infant attachment, functional near-infrared spectroscopy, multimodal

キーワード：母子愛着，fNIRS 脳活動計測，マルチモーダル

序論

哺乳類動物における母子間の絆は様々な感覚刺激を介して築かれる。この感覚は「仔のかわいらしい顔」といった一般的に注目される視覚機能ばかりでなく、聴覚や嗅覚も重要な機能を果たす。例えば聴覚について、Schiavo et al. (2020) は仔マウスの苦痛な声に対する母マウスの母性行動は、聴覚皮質の固有な感受性と経験に依存した皮質活動とオキシトシンシステムの可塑的な相互作用により生じることを示した。また、仔ラットおよびマウスにおける孤立時の鳴き声反応は母子間の早期コミュニケーション行動の重要な要素であり、体温、扱われる状況、嫌悪的な感情の度合いの変化に応じて表出されることも報告された (Ehret, 2005; Hofer et al., 2002)。嗅覚については Nowak et al. (2007) により、雌羊と仔羊の嗅覚における統合的神経プロセスの共通基盤は早期の母子間の絆構築に関与し、仔羊の後の認知発達に繋がるということが明らかにされている。

これら（ヒト以外の）動物研究に触発され、ヒトにおいても母親にとって乳児から表出される感覚刺激（例：表情、声、匂い）の生物学的、社会的な重要性について数多くの研究がなされた。まず聴覚的情動刺激については、ネガティブな聴覚刺激である乳児の泣き声を聞くと養育者は嫌悪や苦痛を覚える一方、介助行動を始めとした利他的な行動、向社会的行動が誘発され、乳児の苦痛を軽減するために共感的な行動を取る (Batson & Shaw, 1991; Lin & McFatter, 2012)。さらに、脳磁図計を用いた Hoegholt et al. (2023) の研究では、0 歳児育児中の初産女性は大人の泣き声より、乳児の泣き声を聞く際に上側頭回 (STG: Superior Temporal Gyrus)、縁上回、後部帯状回などの他者理解および共感ネットワークがより強く活性化することが示された。一方、快の情動的視覚刺激に関して、乳児の母について検討した Minagawa et al. (2009a) では、よその子と比べ我が子の笑顔動画刺激に対して報酬系である右眼窩前頭皮質 (OFC: Orbitofrontal Cortex) がより強く反応し、その笑顔のかわいらしさの印象評定と脳活動に正の相関が見られた。

乳児の匂いに対する母親の反応について検討した、Schäfer et al. (2024) の磁気共鳴画像 (MRI: Magnetic Resonance Imaging) 研究によると、出産経験の有無に関わらず、乳児の体臭を嗅ぐ時に思春期後の体臭刺激よりも STG と中脳水道周囲灰白質 (PAG: Periaqueductal Gray) 間での機能的結合が強化された。さらには 0~3 歳児育児中の母親は未産女性と比べて、見知らぬ乳児の匂いを嗅ぐ際に内側眼窩前頭皮質 (mOFC: medial Orbitofrontal Cortex) を中心とした報酬ネットワーク内での結合が強化され、我が子の体臭に対して他の乳児の体臭を嗅ぐ際より尾状核と後帯状皮質、腹側淡蒼球と中前部 OFC、島皮質、側坐核の間で強い結合が確認された。ただ、主観的に我が子の匂いを選好する傾向は母親の愛着特性に影響され、母子愛着が比較的良好な母親はよその子と我が子の匂いを区別でき、我が子の匂いをより好む傾向が見られるが、愛着に問題がある母親はその傾向を示さなかった (Croy et al., 2019)。

上述のとおり乳児の感覚刺激が母親や親子愛着へ与えるポジティブで促進的な効果は、行動的にも脳機能的に明らかにされてきた。ただし、以上は基本的には単一モダリティの検討に留まる。日常的な親子関係では複数の感覚刺激が関与しており、それらは単に相加的効果にとどまらず異なる効果を示すことも考えられる。例えば、マウスやラットにおいて、母性は単一の感覚入力でなく、嗅覚と聴覚の両方を手がかりにして仔の位置把握を行っている (Nagasawa et al., 2012)。さらに、仔の体臭が母親の聴覚皮質における超音波音声 (USVs) への神経応答を増強し、嗅覚と聴覚の統合が母性行動を促進することが示されている (Cohen et al., 2011; Farrell & Alberts, 2002)。これらの知見をふまえると、本研究で用いる乳児特徴臭と泣き声という2つのモダリティが、単独では得られない母親の注意や愛着行動の促進効果を持つ可能性が考えられる。それにも関わらず、これまでにヒト乳児から表出される多感覚刺激を用いた研究は限られている。そこで本研究は、先行研究からも親子愛着で重要な役割を果たすことが示された聴覚、嗅覚に着目し、特に乳児の異なる声の処理における乳児嗅覚刺激の効果を脳機能レベルで明らかにすることを目的とした。近年、平澤他 (2022) は6ヶ月齢前の乳児臭を捕集し化学的成分を同定し、それを化学的に合成した乳児特徴臭物質が母親のオキシトシンを高める効果を確認した。そこで本研究は乳児特有の匂いと考えられるその乳児特徴臭物質を用いて、乳児の泣き声の聴覚処理における効果を検討する。具体的には乳児特徴臭条件と無臭条件との比較の下、乳児の快・不快音声を聞く際の育児中の母親の脳反応を近赤外分光法 (fNIRS: functional Near-Infrared Spectroscopy) により計測する。特に親子愛着や共感性に関与する脳部位に着目し、脳活動の違いばかりでなく、脳活動と母親自身の愛着指標・うつ傾向・共感性との関連性を検討した。

方法

参加者 実験参加者は0歳児育児中の母親27人であり、年齢は24歳から40歳 ($M = 33.15 \pm 3.81$) であった。育児中である乳児の月齢は2~11ヶ月 ($M = 6.48 \pm 2.90$) で、それらの乳児は第1子24名、第2子以降3名であった。全参加者は嗅覚同定能力測定用カードキット Open Essence (富士フイルム和光純薬 (株)) で嗅覚異常がないことが確認されている。

参加者はウェブやメールの実験公募によりリクルートされ、2回の来所による参加により謝金が支払われた。乳児の匂いを防ぐために、参加者は乳児連れではなく自分自身のみで参加した。事前に匂いの強い香水、柔軟剤、整髪剤等は前日から当日にかけて避けてもらうように指示されていた。本研究は慶應義塾大学文学部倫理委員会の承認 (承認番号 220140000) を得て行われ、全ての参加者には事前の実験内容の説明を行った後に同意書を得ている。

実験デザインと全体の手続き 本実験は参加者内デザインであり、各参加者が異なる2つの匂い条件 (乳児特徴臭、無臭) のfNIRS実験に1日以上離れた別日程で参加した。2つの実験における匂い条件順はカウンターバランスを取った。いずれの匂い条件でも、参加者に匂いの有無・詳細などを実験終了時までには開示せずに実験を行った。各fNIRS実験終了後に呈示された嗅覚刺激の種類や強度の印象を問う質問紙調査を実施した。母子愛着などを問う質問紙調査は初回実験の来所前にオンラインで実施した。嗅覚同定能力測定用カードキットによる嗅覚能力調査は初回実験終了後に自宅で行ってもらった。

嗅覚刺激 乳幼児の体臭の匂い物質として平澤他 (2022)・東原他 (2023) で使用された乳児特徴臭と同様の化学物質が使用された。表1の成分を溶媒として使用されるプロピレングリコール (PG) に溶解し、その溶液を50 μ Lビンにいれて呈示した。それらは研究開始時間の1.5時間前に、実験前日に洗

表 1. 乳児特徴臭の組成および使用量

Name	<i>M</i>
2-Pentylfuran	6.63×10^{-7}
2-Pyrrolidinone	7.50×10^{-4}
Valeraldehyde	7.50×10^{-5}
1-Octene	1.42×10^{-5}
Heptane	1.23×10^{-4}
trans-2-Heptene	2.38×10^{-4}
Acetophenone	1.81×10^{-6}
Phenylacetaldehyde	6.70×10^{-5}
Butanal	2.24×10^{-5}
3-Methylheptane	7.43×10^{-6}
(2R,3S) meso 2,3-Butanediol	1.62×10^{-3}
Nonanal	9.97×10^{-5}
2-Undecanol	4.07×10^{-5}
3-Heptanol	1.87×10^{-5}



図 1. 嗅覚刺激の提示方法

参加者のプローブ装着状態と匂い瓶の配置

浄した褐色瓶に $50 \mu\text{L}$ 投与された。統制条件では無臭の褐色瓶を呈示した。これら 2 条件の瓶は外からの見た目では全く区別がつかず、実際に事後の嗅覚刺激の強度や種類を問う質問紙の結果、無臭条件からも何等かの匂いを感じていた参加者が約 63%いた。

嗅覚刺激はスタンドに固定された褐色瓶で提示され、瓶の口が参加者の鼻先につく位置に設置された(図 1)。実験開始直前に実験者が瓶の蓋を開け、実験中は持続的に嗅覚刺激が提示されるようにした。参加者に対して、実験中は自然な呼吸で嗅ぐよう指示した。

実験室に他の匂いが干渉せず無臭に近い環境を保つため、実施場所となる防音室は参加者ごとに清掃を行い、換気を徹底した。また、実験者や実験室の近くに入出入りする人々も香水や香り付きの化粧品・

表 2. 参加者の特性：各質問紙の得点

質問紙	フルスコア	参加者得点範囲 (最小～最大)	平均値 (M)	標準偏差 (SD)
PBQ	125	0 ～ 53	17.11	11.80
GHQ	28	0 ～ 27	6.44	6.59
EQ	54	11 ～ 47	26.96	8.89

衣料用洗剤の使用を控え、実験中および実験室の清掃や嗅覚刺激の準備を行う際には白衣を着用した。

聴覚刺激 聴覚刺激は、乳児の泣き声とご機嫌声の2条件とし、それぞれ20秒間の音声ファイルを6種類使用した。これらの音声ファイルは別の実験で募集した生後9～11ヶ月児がStill Face実験中および実験前後の発声を録音し収集したものである。収集した音声のうち、ぐずりや泣きをネガティブ音声、喃語や機嫌のよい発声はポジティブ音声として分類した。これらの音声から事前に行った0～1歳児（0～21ヶ月； $M = 7.48 \pm 3.88$ ）育児中の母親31名を対象としたオンライン評定調査にて本実験で使用するものが選出された。提示された計29本の音声に対し、参加者は自身が感じた印象について「機嫌のよい」、「好きな」、「いとおいしい」、「ゆったりする」、「緊張した」、「動揺した」、「いたたまれない」、「ストレスのかかる」の8項目を、1「全くそう感じなかった」から5「強くそう感じた」の5段階評価を行った。本実験で、泣き声は「いたたまれない」の得点上位の音声、ご機嫌声は音声を聞いて「好きだ」、「いとおいしい」、「ゆったりする」ポジティブ得点上位の音声を選出された。泣き声は5段階中平均点が3.7以上の音声、ご機嫌声は3つの項目の合計点平均が12以上の音声を選ばれた。ベースライン刺激はピンクノイズを用いた。音声はスピーカーより65dB～70dBで呈示された。

事前質問紙 質問紙は以下の3種で、母子愛着についてのPBQ（Postpartum Bonding Questionnaire）、GHQ28日本版（General Health Questionnaire）、共感性を検討するEQ（Empathy Quotient）（Preti et al., 2011）の3尺度中、「認知的共感」、「情動反応性」の2尺度27問使用した。これらの結果を表2に示す。

fNIRS 実験の手続き fNIRSの計測は防音室で行われた。NIRSは日立メディコ社製光トポグラフィ装置（ETG-7000, (株)日立メディコ）を使用した。本実験ではTsuzuki et al. (2007)によるバーチャル・レジストレーションで計測チャンネルの確率的な脳部位推定を行うため、あらかじめ参加者の頭囲、鼻根と後頭結節の間、および左右耳介前点の間の頭表距離を計測した上で、国際10-20法に基づき前頭12チャンネル、左右側頭各22チャンネル装着した（図2）。左右側頭部では、3×5のプロープの後方から2列目の最下部に配置されたプロープをT3、T4に対応させた。また、前頭部では、3×3のプロープ配置の下列の中央のプロープをFpzに対応させた。

fNIRS実験はブロックデザインにて行われた。1つのブロック中（図3）にまずベースラインとしてピンクノイズが20～25s（平均22.5s）呈示され、次にターゲットであるご機嫌声または泣き声が20s呈示され、3sの無音状態を挟んで、参加者はターゲット音声に対して-3「非常に不快」から3「非常に快」の7段階の音声印象評定をマウスクリックで入力して行った。印象評定の制限時間は10sであるが、回答後にすぐ次のブロックが開始された。fNIRS計測において泣き声・ご機嫌声の音声条件はそれぞれ6ブロック含まれていたが、それらは疑似ランダムで呈示された。2つの音声条件を含む以上のセッション約10分の平均所要時間であった。匂い条件が異なる2回のfNIRS実験での音声呈示順は各

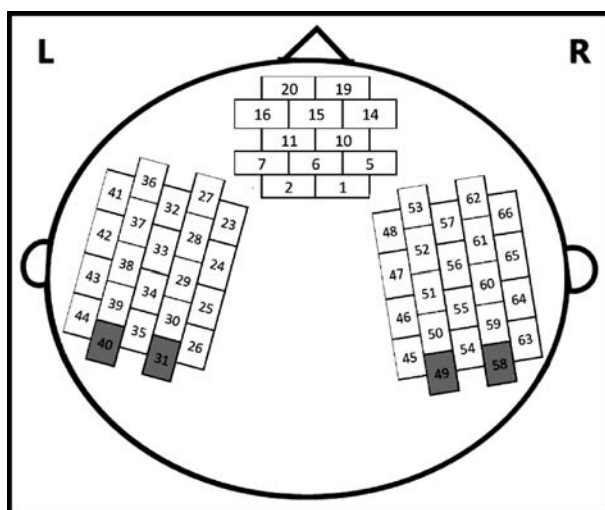


図 2. 測定チャンネル
頭頂から俯瞰した前頭部（12CH）と左右側頭部（22CH×2）の測定チャンネルの位置、灰色は除外チャンネル

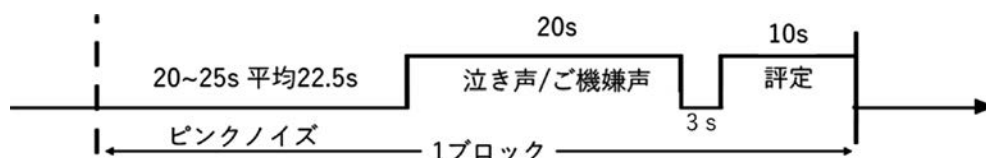


図 3. ブロックデザイン
ベースライン（ピンクノイズ）、ターゲット音声（鳴き声またはご機嫌声）、無音、印象評定で構成される 1 ブロックの流れ

参加者で異なっていた。音声刺激呈示と印象評定の回答を PsychoPy 2022 で制御した。

結果の処理法 数値解析ソフトウェア MATLAB (R2022b, The MathWorks Inc.) を使用し、サンプリング周波数 10 Hz で取得した光減衰データを、波長ごとのモル吸光係数 (molecular absorption coefficient) と照合して、修正 Beer-Lambert 法で酸素化ヘモグロビン (以下は Oxy-Hb: Oxygenated Hemoglobin)、脱酸素化ヘモグロビン (以下は Deoxy-Hb: Deoxygenated Hemoglobin) データへ変換した。

次のような過程と基準で前処理を行った。まず計測チャンネルの選択については、左右後頭の最後列（背側）の計 4 つのチャンネル（図 2 の CH31, CH40, CH49, CH58）は過剰なノイズが常にあったためすべての分析の対象から除外した。一人の参加者が特定のチャンネルにおいて一種類の聴覚刺激の 6 ブロックの中、3 つ以上のブロックが省かれた場合、該当する参加者のその嗅覚・音声条件における該当チャンネルのデータを除外した。次に、Yamada et al. (2012) の提案した血流動態分離法を適用した。この手法は、課題による血流変動では Oxy-Hb と Deoxy-Hb の変化が負の相関を示す一方、心拍、皮膚血流、運動アーチファクトなどによる全身的な信号では正の相関を示すという原理に基づいている。この原理を利用し、脳活動以外のノイズ成分を除去した。さらに、band pass filter では 0.5 Hz の 3 次パタ

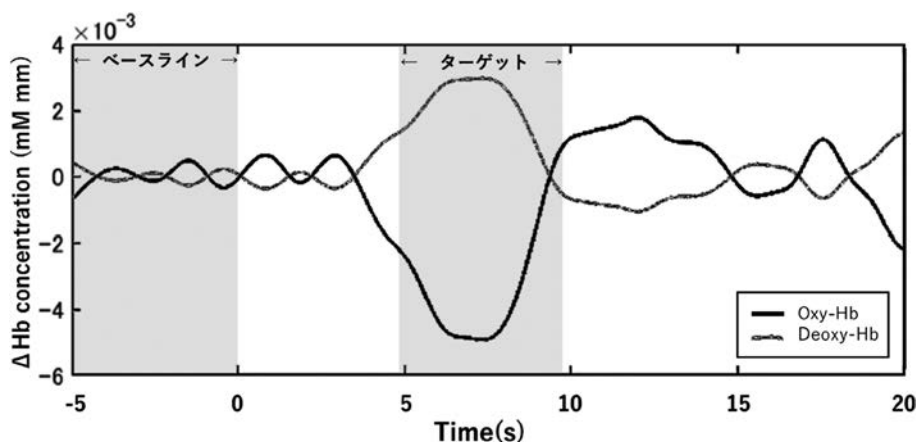


図 4. 総平均波形

全参加者全条件全チャンネルの Oxy-Hb・Deoxy-Hb 時系列変化の総平均波形

左の色枠はベースライン区間、中央の色枠はターゲット区間の解析ウィンドウを示す

ワースローパスフィルタと 0.02Hz の 5 次バターワースハイパスフィルタを適用し、0.02~0.5Hz 以外の周波数成分を除去した。そのうえ、ターゲット区間 20s の直前の 5s のベースラインを用いてターゲット区間をゼロ補正した。その後、全参加者の音声別全チャンネルの全ブロックについて Oxy-Hb 時系列変化の総平均を算出し（図 4）、反応ピークを求めたところターゲット開始後 7s であったので解析窓をそのピークの前後 2.5s であるターゲット開始後 4.5~9.5s の 5s と設定した。

各参加者の各チャンネルについてターゲット開始前ベースラインの 5s と、5s の解析窓の平均値を算出した。これらのデータを用いて各チャンネルでベースラインとターゲット解析窓の Oxy-Hb 変化量について t 検定を行った。条件間比較のために音声条件別乳児特徴臭と無臭の Oxy-Hb 変化量の差分の t 検定を行った。 t 検定の結果について False Discovery Rate 多重比較補正（以下は FDR 補正）を適用した。今回の解析では、匂いの効果を検討するために、単純に参加者内で嗅覚条件間の比較をするばかりではなく、参加者の母子愛着や印象評定の要因を考慮した二次的解析を次の通りの基準で行った。まず、先行研究に基づき親子愛着や共感性に関連する脳部位を考慮した関心領域（ROI: Region of Interest）を設定した。具体的に、感情刺激処理に関係する前頭前野（Landowska et al., 2018; Minagawa et al., 2009a; Minagawa et al., 2009b）、泣き声の聴覚処理に関与する聴覚野を含む STG（Hoegholt et al., 2023; Belin et al., 2000, 2018）、および社会脳の一部であり他者理解、社会的注意や共感に関連する（Hirsch et al., 2023; Schurz et al., 2014）側頭頭頂接合部（TPJ: Temporo-Parietal Junction）（今回の計測で含まれるのは縁上回と上側頭回後部）を ROI として設定した。この ROI 内の CH でベースラインとの比較が有意であった CH を更に絞った。次に絞った CH について Oxy-Hb 変化量と音声に対する主観印象評定や事前質問紙得点との相関分析を行って有意な相関が出た CH に対して一般線形モデル（GLM: Generalized Linear Model）を用いた二次的解析を行った。この相関分析では、質問紙および印象評定のスコアと① Oxy-Hb 変化量；② 乳児特徴臭条件と無臭条件での Oxy-Hb 変化量の差分との相関を検討した。二次的解析に選ばれた CH は匂いの効果と相関解析で有意となった質問紙項目（例、GHQ）の効果を検討する GLM を適用し各要因の主効果、交互作用を検討した。解析には統計解析ソフト

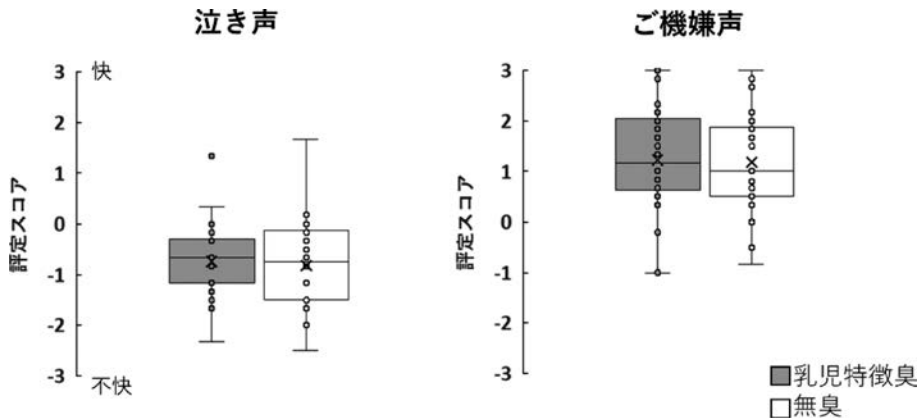


図 5. 条件別の音声の印象評定

泣き声とご機嫌声における匂い条件（乳児特徴臭・無臭）別の印象評定

トウェア R (4.4.1, R Core Team) を用いた。

印象評定は同じ聴覚刺激・嗅覚刺激 4 ペアずつ Wilcoxon の符号付き順位検定を行った。

結果

匂い条件別の音声印象評定 図 5 に条件別の音声の印象評定の結果を示す。乳児特徴臭と無臭の差は、どの音声条件でもみられず、乳児特徴臭は主観的印象に影響を及ぼさなかったことが示された。どちらの匂い条件でも泣き声を不快と捉え、ご機嫌声を快に捉える傾向にあり、実際に統計結果もこれを支持し、Wilcoxon の符号付き順位検定の結果、泣き声 vs ご機嫌声の差は乳児特徴臭条件 ($W = 377; p < .001$) も 無臭条件 ($W = 377; p < .001$) でも有意であった。

条件別の脳活動 図 6, 表 3 に各音声条件（泣き声, ご機嫌声）別の異なる匂い条件（乳児特徴臭, 無臭）での脳活動の強さ（Oxy-Hb 変化量の大きさ）をチャンネル（CH）別に示す。これらは各 CH においてベースラインとターゲットの t 検定を行い、FDR 補正を行った結果である。補正後は限られた CH のみに統計的有意差が見られた。どちらの声の条件においても前頭前野を中心とした脳活動の低下がみられたが、その中でも一部では増加がみられた。各条件別にみると、まず泣き声・乳児特徴臭条件では CH59（右 STG）の活動増加が有意傾向であった ($t = 3.034; p < .01; Q = .075$)。

一方、ご機嫌声・乳児特徴臭条件では CH16（前頭極）、CH50（右縁上回）には有意な活動低下が見られ ($Q < .05$)、CH14（前頭極）の活動低下が有意傾向であった ($Q = .076$)。ご機嫌声・無臭条件では CH1 と CH5（背外側前頭前野）、CH6, CH10, CH11, CH14（前頭極）、CH30（左縁上回）の活動が有意に低下した ($Q < .05$)。無臭と乳児特徴臭の匂い条件間を比較する t 検定を各音声条件において多重比較補正適用のうえで行ったが、両音声条件において有意な差がみられた CH はなかった。

次に、活動変動が強くみられた ROI の機能を検討するために、脳活動と印象評定や母子愛着等との関連を解析する。今回 ROI として検討した脳部位は、脳活動の強さが FDR 補正後に統計的に有意（傾向）であり、かつ先行研究によって音声処理、母子愛着や共感性に関連が認められる以下の領域、聴覚野を含む CH59（右 STG）、CH1 と CH5（背外側前頭前野）、CH10, CH11, CH14, CH16（前頭極）、

表 3. 各条件, 各 CH でのベースラインとターゲット区間の Oxy-Hb 変化量についての t 検定結果

条件	CH No.	推定脳部位	t	Q	p
泣き声・乳児臭	CH59	右 STG	3.03	0.075	0.005
	CH14	前頭極	-2.93	0.076	0.007
ご機嫌声・乳児臭	CH16	前頭極	-3.68	0.034	0.001
	CH50	縁上回	-3.41	0.034	0.002
ご機嫌声・無臭	CH1	背外側前頭前野	-2.99	0.039	0.006
	CH5	背外側前頭前野	-3.29	0.030	0.003
	CH6	前頭極	-3.43	0.030	0.002
	CH10	前頭極	-3.21	0.030	0.004
	CH11	前頭極	-3.38	0.030	0.002
	CH14	前頭極	-3.18	0.030	0.004
	CH30	縁上回	-2.89	0.043	0.008

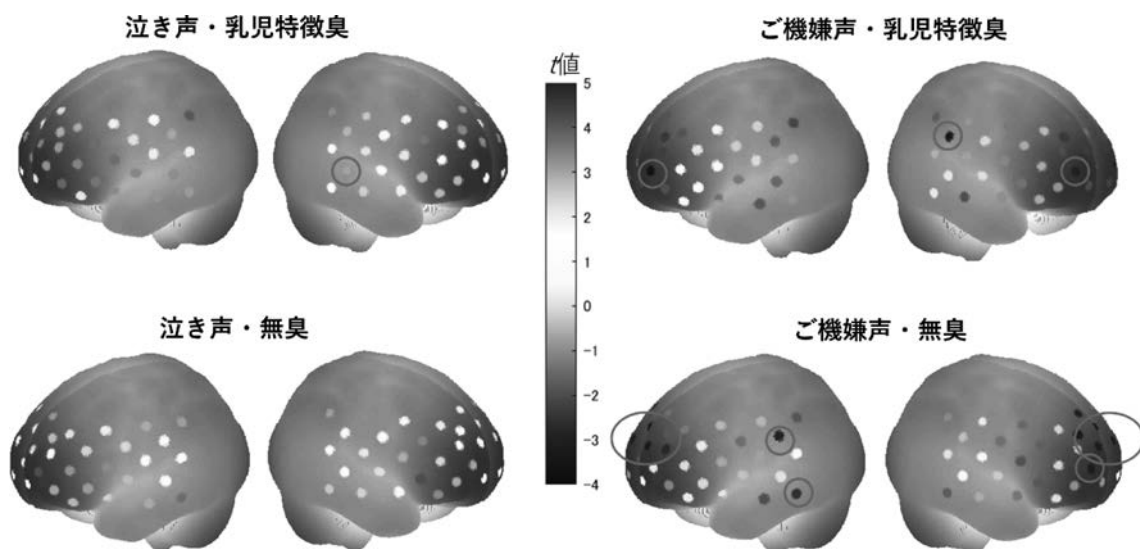


図 6. 条件別の脳活動

ベースラインとターゲットの t 検定結果に基づき, FDR 補正後有意 ($Q < 0.05$) または有意傾向 ($Q < 1$) を示したチャンネル (CH) を円で囲んで強調表示

CH30 と CH50 (縁上回) であった。このうち CH59 (右 STG), CH16 (前頭極) のみ有意な相関がみられた。具体的には無臭条件において泣き声に対する CH59 (右 STG) の脳活動と印象評定と負の相関 ($r = -0.53$; $p < .01$) がみられ, 不快である程脳活動が高まったことが示された。加えて, 泣き声に対する CH16 (前頭極) の匂い条件間の脳活動の差分 (乳児特徴臭-無臭) が GHQ (うつ傾向) と負の相関を示した ($r = -0.41$; $p < .05$), つまりうつ傾向が高いほど匂いの脳活動への効果が弱かった。

以上, 印象評定との相関がみられた CH59 (右 STG) と GHQ との相関がみられた CH16 (前頭極) についてより詳細に検討するために, それぞれ GLM による解析を行った。まず, 右 STG に関しては, 泣

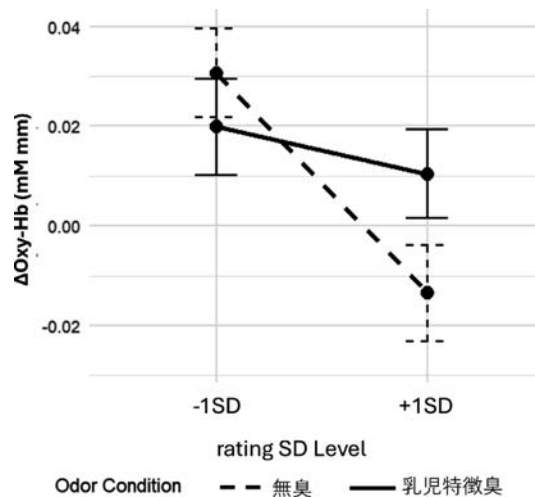


図 7. 泣き声に対する右 STG の脳活動と印象評定との関連

泣き声に対する印象評定が $\pm 1SD$ の場合における匂いによる脳活動 ($\Delta Oxy-Hb$) の違い

き声条件での脳活動を従属変数とし、匂い条件、音声に対する印象評定を独立変数とした主効果および交互作用の有意性を、参加者と試行をランダム効果とし検討した。その結果、乳児特徴臭でより脳活動が強いという匂いの主効果は有意傾向 ($\beta = 0.019$, $t = 1.90$, $p = 0.058$)、不快の印象評定でより脳活動が強いという印象評定の主効果が有意であった ($\beta = -0.021$, $t = -3.82$, $p < 0.001$)。匂いと印象評定の交互作用も有意であった ($\beta = 0.016$, $t = 2.11$, $p < .05$)。下位検定として泣き声に対する印象評定の $\pm 1SD$ にて単純傾斜分析を行った結果 (図 7)、 $+1SD$ でのみ匂いの主効果が有意であった ($\beta = 0.024$, $t = 2.06$, $p < .05$)。つまり、快評定が高い場合 (0.38 以上) において、匂いがあった方が泣き声に対する右 STG 活動が高いことが示された。

続いて前頭極については泣き声に対する CH16 の脳活動を従属変数とし CH59 と同様のモデルで独立変数の印象評定を GHQ に入れ替え解析をした。その結果、乳児特徴臭で脳活動の下がり方が小さくなるという匂いの主効果 ($\beta = 0.016$, $t = 1.96$, $p = 0.052$) が正の有意傾向を示した。匂いと GHQ の交互作用も有意傾向を示した ($\beta = -0.002$, $t = -1.94$, $p = 0.053$)。単純傾斜分析を行った結果、図 8 に示した通り GHQ が $+1SD$ (13.03 以上) において匂いの主効果が有意でなかったが ($\beta = -0.0065$, $t = -0.79$, $p = 0.43$)、GHQ が 0 (マイナス $1SD$ が範囲外なので、最小値である 0 を用いた) においては有意傾向を示した ($\beta = 0.016$, $t = 1.96$, $p = 0.051$)。すなわち、うつ傾向が低い場合に匂いの効果があることが示された。

考察

本研究は、オキシトシン分泌が促進される乳児匂い物質 (平澤他, 2022) を呈示することによって、育児中の母親が乳児の快・不快音声を聴取した際の脳反応に、無臭条件と比較した違いがみられるかを明らかにすることを目的とした。この目的のために乳児特徴臭、無臭条件における fNIRS 計測を行った結果、乳児表出の快・不快音声に対する脳反応の違いが明らかになった。不快刺激に対して右 STG

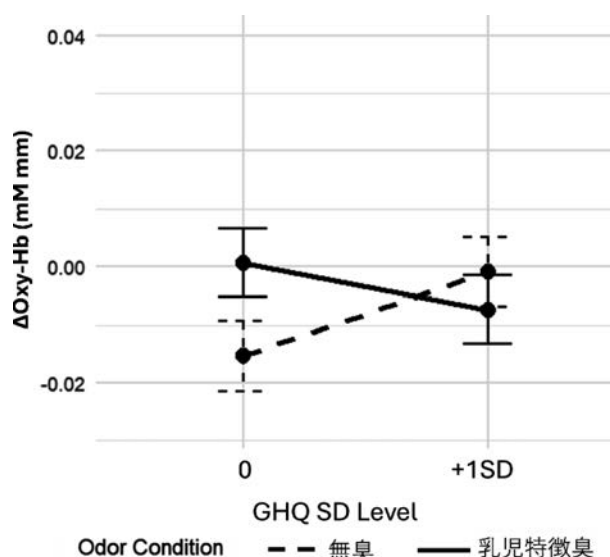


図 8. 泣き声に対する前頭極の脳活動と GHQ スコアの関連
GHQ が+1SD と 0 の場合における匂いによる脳活動 ($\Delta\text{Oxy-Hb}$) の違い

の活動が上がる傾向が示された一方、快刺激においては、前頭極や背外側前頭前野を中心とする前頭前野の活動低下が観察された。乳児特徴臭の効果は主に不快刺激である泣き声を聞く際にみられ、特に右 STG と前頭極で匂いの効果、加えて印象評定やうつ傾向との関係がみられた。このように脳活動において乳児特徴臭の効果のみられた一方、印象評定においては乳児特徴臭の効果のみられなかった。ただし、泣き声は想定通りご機嫌声より主観的に不快であったことが確かめられた。

以上の結果から、育児中の母親は乳児特徴臭によりオキシトシンの分泌が促進される（平澤他, 2022）ことで脳レベルでの活動変化が生じるものの、それが必ずしも印象評定などの意識的な認知変容に繋がるとは限らないことが示された。脳活動に関しては、泣き声・乳児特徴臭条件で活動が上がった右 STG は声領域（Voice Area）または Temporal Voice Patch と呼ばれるヒト声に特異的に反応する部位の一部であり（Belin et al., 2000, 2018）、特に右側は話者同定や情動プロソディーの知覚に関与する部位である。乳児の泣き声のプロソディー処理機能を反映していると考えられる。脳磁図計を用い母親に乳児声を呈示した研究でも帯状回を含む他者理解や共感のネットワークと同時に右 STG の活動も強くみられていたことから（Hoegholt et al., 2023）、本研究の場合も聴覚系の共感ネットワークの中で「入り口」の役割を果たしていたと考えられる。

一方、ご機嫌声条件では背外側前頭前野、前頭極、縁上回脳活動の低下がみられた。実際に情動喚起刺激を呈示して前頭前野の脳活動を計測した研究では、脳活動の低下がみられることが多数報告されている（Landowska et al., 2018, 平野他, 2015, 孫他, 2017）。上記の研究から感情喚起刺激に対して一度下降し次に上昇するという結果が一貫して示され感情価の大きさととの関連が示唆されているが、この結果は本研究とも一致している。Xu et al. (2017) は刺激の顕著性が異なる視覚刺激を使った脳機能実験において、背外側前頭前野、前頭極を含む前頭前野の活動減少が外部注意から由来することを示唆した。

これらのことからご機嫌声におけるこれらの脳部位の活動低下は背外側前頭前野、前頭極の活動も外部注意や初期の感情処理に関与すると考えられる。一方で縁上回は側頭頭頂接合部 (TPJ) という他者理解に関わる脳部位でもあり、共感性に関与している領域である。この他にも縁上回には感覚統合の役割や情動伝染への関与が報告されている (Hirsch et al., 2023)。したがって本研究でみられた縁上回の有意な脳活動もご機嫌声に対する共感性が関与していると考えられる。しかし、今回の活動は有意な Oxy-Hb の低下であり、この低下の機能については現時点では解釈できていない。

音声処理、親子愛着、共感性と密接に関わる ROI については印象評定や質問紙との関連からの検討を行った。右 STG については泣き声・乳児特徴臭で強い脳活動がみられたが、この領域の活動は泣き声聴取において匂い条件と印象評定に応じて異なることが GLM 解析後の単純傾斜分析で示された。泣き声を不快でないと感じる (快評定 0.38 以上の) 参加者群でのみ、無臭条件より乳児特徴臭条件での脳活動増加が有意であった。乳児特徴臭は泣きに不快感情を抱かない母親に乳児声の反応性を高める効果があり、特に泣きという警戒の乳児声への反応性を高めた。乳児特徴臭によりオキシトシン分泌が上がり (平澤, 2022)、一方で、オキシトシンの分泌上昇により子どもを守ろうとする行動が促進されることが知られているが (Bakermans-Kranenburg & van IJzendoorn, 2018; Rickenbacher et al., 2017)、このようなオキシトシンの育児敏感性効果は泣き声に不快感情を抱かない母親にのみ見られることが示された。

前頭極における乳児特徴臭の効果は、母親のうつ傾向に関連していることが本研究より示された。前頭極はご機嫌声に対して有意な活動がみられていたが、泣き声刺激に対する反応にのみ上述の効果が確認された。具体的には、泣き声を聞く際に前頭極の活動が下がるが、無臭条件より乳児臭条件のほうがその下がり小さい傾向が見られた。更なる下位検定を行った結果、うつ傾向が低い (GHQ スコアが 0) の母親においてのみ乳児特徴臭条件の方が泣き声に対する前頭極活動の下がり小さい傾向が見られた。先行研究では、不快な聴覚刺激に対して前頭前野の活動が低下したり (浅野他, 2011)、不安傾向が高まっている人が認知的制御課題に取り組む際に低下する (Yeung et al., 2021; Durán-Gómez et al., 2021) ことが示されているが、特に前頭極に注目すると、ネガティブな視覚刺激を見る際に前頭極の活動が低下し、さらに神経質傾向 (neuroticism) が高いほど活動低下がより顕著になることが報告されている (平野他, 2015; 孫他, 2017; Minagawa et al., 2009b)。他にも電気刺激による痛みで前頭極の活動が下がることが報告されている (Peng et al., 2018)。これらの先行研究の知見を踏まえると、本研究で見られた泣き声に対する前頭極の活動低下は母親が乳児の泣き声という情動刺激により生じた心理的ストレスや不安の高まりに関連すると推察される。それに対して、GHQ スコアが低い母親において乳児特徴臭が前頭極の活動低下を緩和する効果を示した点から、乳児特徴臭はうつ傾向が低い者においてその効果を発揮する可能性が示唆される。乳児特徴臭が前頭極の活動低下を緩和するメカニズムについては、乳児特徴臭によって分泌が促されるオキシトシンの関与が考えられ、オキシトシンが育児中の母親へ一時的抗不安作用に似た鎮静作用を有する (Niwayama et al., 2017) という結果からもこの点は支持される。

本研究にはいくつかの限界点がある。まず、ご機嫌声については匂いや母親の特性からの関係性が明確にできなかった点である。例えばご機嫌声・無臭条件では背外側前頭前野の活動低下が見られ、外部注意の強化が示唆される結果となったが、ご機嫌声・乳児特徴臭条件では背外側前頭前野の有意な脳活動が見られず、さらに背外側前頭前野に関して相関分析や GLM 分析においても有意な結果が確認できなかった。今回は快刺激も不快方向で捉える母親も一定数いたので刺激の選定などを含め今後の課題と

したい。他の問題点として、本研究では乳児特徴臭と無臭の比較を行ったが、乳児特徴臭ではなく、匂いの有無だけが効果の要因と解釈できる可能性がある。ただし、半数以上の参加者で無臭条件も何等かの匂いを感じていたのでこの可能性は低い。匂い物質の有無によって無意識に呼吸のペースが変化するなど自律神経の活動が変わってくる可能性がある。今後の研究ではコントロール臭を取り入れることでより精度の高い検討を行う必要がある。本研究では、一般的な乳児特徴臭と他者の乳児の音声を用いたが、Croy et al. (2019) の示唆した通り、母親は我が子とよその子の匂いを区別でき、前者のほうを好む傾向を示したため、自分の子ども由来の刺激を用いた場合、異なる結果が得られる可能性があり、今後の研究で検討が必要である。一方で多数の乳児から捕集して抽出された平均的あるいは、ある程度普遍的に共有されると考えられる乳児特徴臭（平澤, 2022）で効果が見られた点は意義深い知見と思われる。

本研究はオキシトシンの分泌を促す乳児特徴臭が乳児の情動発声聴取において及ぼす効果、すなわち育児敏感性の強化と不安など心理的負担の緩和効果を示した。この結果により、乳児特徴臭は育児支援や母子ケアの観点からも実用的な意義を持ち、親子間の愛着の強化に貢献する可能性が考えられる。今回は匂いの効果を脳活動レベルで主として観察したが、今後の展望として、実際の母子間における行動面の効果を検討することが課題である。具体的には母子間、または父子関の相互作用という双方向、又は母子間共同注意の三項関係的な場面での行動を評価することで、この乳児特徴臭が親子相互的な場面の行動変容を起こすかについて検討することは重要であろう。

謝辞

本研究は JSPS 科研費・特別推進研究「ヒトにおける嗅覚コミュニケーションの分子神経基盤」(代表・東原和成) (23H05410) の支援を受けたものである。本研究の実施にあたり、ご協力いただいた参加者の皆様、赤ちゃんラボのメンバーに心より感謝申し上げます。

引用文献

- 浅野 裕俊・弘重 暁・井出 英人 (2011). 機能的近赤外分光法を用いた快-不快音聴取時の脳活動評価 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌, 131(1), 149-154.
- Bakermans-Kranenburg, M. J., & van IJzendoorn, M. H. (2018). Oxytocin and Human Sensitive and Protective Parenting. *Current topics in behavioral neurosciences*, 35, 421-448.
- Batson, C. D., & Shaw, L. L. (1991). Evidence for altruism: Toward a pluralism of prosocial motives. *Psychological Inquiry*, 2(2), 107-122.
- Belin, P., Bodin, C., & Aglieri, V. (2018). A "voice patch" system in the primate brain for processing vocal information? *Hearing Research*, 366, 65-74.
- Belin, P., Zatorre, R. J., Lafaille, P., Ahad, P., & Pike, B. (2000). Voice-selective areas in human auditory cortex. *Nature*, 403(6767), 309-312.
- Cohen, L., Rothschild, G., & Mizrahi, A. (2011). Multisensory integration of natural odors and sounds in the auditory cortex. *Neuron*, 72(2), 357-369.
- Croy, I., Mohr, T., Weidner, K., Hummel, T., & Junge-Hoffmeister, J. (2019). Mother-child bonding is associated with the maternal perception of the child's body odor. *Physiology & Behavior*, 198, 151-157.
- Durán-Gómez, N., Guerrero-Martín, J., Pérez-Civantos, D., López-Jurado, C. F., Montanero-Fernández, J., & Cáceres, M. C. (2021). Night Shift and Decreased Brain Activity of ICU Nurses: A near-infrared spectroscopy study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(22), 11930.

- Elhret G. (2005). Infant rodent ultrasounds — a gate to the understanding of sound communication. *Behavior genetics*, 35(1), 19–29.
- Farrell, W. J., & Alberts, J. R. (2002). Stimulus control of maternal responsiveness to Norway rat (*Rattus norvegicus*) pup ultrasonic vocalizations. *Journal of Comparative Psychology (Washington, D.C. : 1983)*, 116(3), 297–307.
- 平野 亮典・山本 修一・柳澤 一機・網島 均 (2015). NIRS による視覚刺激呈示時の快・不快情動の評価. ヒューマンインタフェース学会論文誌, 17 (3), 297–306.
- 平澤 佑啓・白須 未香・岡本 雅子・東原 和成 (2022). 乳児に特徴的な体臭成分による母親のオキシトシン分泌促進効果 日本農芸化学会大会講演要旨集, 3I08-05.
- Hirsch, J., Zhang, X., Noah, J. A., & Bhattacharya, A. (2023). Neural mechanisms for emotional contagion and spontaneous mimicry of live facial expressions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 378(1875), 20210472.
- Hoegholt, N. F., Bonetti, L., Stevner, A. B. A., Andersen, C. E., Hughes, M., Fernandes, H. M., Vuust, P., & Kringelbach, M. L. (2023). A magnetoencephalography study of first-time mothers listening to infant cries. *Cerebral Cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 33(10), 5896–5905.
- Hofer, M. A., Shair, H. N., & Brunelli, S. A. (2002). Ultrasonic vocalizations in rat and mouse pups. *Current Protocols in Neuroscience, Chapter 8*.
- Landowska, A., Roberts, D., Eachus, P., & Barrett, A. (2018). Within- and Between-Session Prefrontal Cortex Response to Virtual Reality Exposure Therapy for Acrophobia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 362.
- Lin, H. C., & McFatter, R. (2012). Empathy and distress: two distinct but related emotions in response to infant crying. *Infant Behavior & Development*, 35(4), 887–897.
- Minagawa-Kawai, Y., Matsuoka, S., Dan, I., Naoi, N., Nakamura, K., & Kojima, S. (2009a). Prefrontal activation associated with social attachment: facial-emotion recognition in mothers and infants. *Cerebral Cortex*, 19(2), 284–292.
- Minagawa, Y. K., Naoi, N., & Kojima, S. (2009b). *A new approach to functional neuroimaging: Near Infrared Spectroscopy (NIRS)*. Keio University Centre for Advanced Research on Logic and Sensibility.
- Nagasawa, M., Okabe, S., Mogi, K., & Kikusui, T. (2012). Oxytocin and mutual communication in mother-infant bonding. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 31.
- Niwayama, R., Nishitani, S., Takamura, T., Shinohara, K., Honda, S., Miyamura, T., Nakao, Y., Oishi, K., & Araki-Nagahashi, M. (2017). Oxytocin Mediates a Calming Effect on Postpartum Mood in Primiparous Mothers. *Breast-feeding Medicine : The Official Journal of the Academy of Breastfeeding Medicine*, 12, 103–109.
- Nowak, R., Keller, M., Val-Laillet, D., & Lévy, F. (2007). Perinatal visceral events and brain mechanisms involved in the development of mother-young bonding in sheep. *Hormones and Behavior*, 52(1), 92–98.
- Peng, K., Yücel, M. A., Steele, S. C., Bittner, E. A., Aasted, C. M., Hoeft, M. A., Lee, A., George, E. E., Boas, D. A., Becerra, L., & Borsook, D. (2018). Morphine Attenuates fNIRS signal associated with painful stimuli in the medial frontopolar cortex (medial BA 10). *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 394.
- Preti, A., Vellante, M., Baron-Cohen, S., Zucca, G., Petretto, D. R., & Masala, C. (2011). The empathy quotient: A cross-cultural comparison of the Italian version. *Cognitive Neuropsychiatry*, 16(1), 50–70.
- Rickenbacher, E., Perry, R. E., Sullivan, R. M., & Moita, M. A. (2017). Freezing suppression by oxytocin in central amygdala allows alternate defensive behaviours and mother-pup interactions. *eLife*, 6, e24080.
- Schäfer, L., Köppel, C., Kre"zner-Kiel, D., Schwerdtfeger, S., Michael, M., Weidner, K., & Croy, I. (2024). The scent of cuteness-neural signatures of infant body odors. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 19(1), nsae038.
- Schiavo, J. K., Valtcheva, S., Bair-Marshall, C. J., Song, S. C., Martin, K. A., & Froemke, R. C. (2020). Innate and plastic mechanisms for maternal behaviour in auditory cortex. *Nature*, 587(7834), 426–431.
- Schurz, M., Radua, J., Aichhorn, M., Richlan, F., & Perner, J. (2014). Fractionating theory of mind: A meta-analysis of functional brain imaging studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 42, 9–34.
- 孫 怡・星野 英一・森本 智志・姜 娜・寺澤 悠理・皆川 泰代・木島 伸彦 (2017). 前頭葉における情動反応と気質・性格特性との関連 光脳機能イメージング学会第 20 回学術集会, 東京, P2-5.
- 東原 和成・平澤 佑啓・岡本 雅子・白須 未香 (2023). 分泌促進剤の製造方法および分泌促進剤 (特開 2023-22459). 日本

国特許庁.

- 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(4), 1506–1518.
- Xu, M., Hoshino, E., Yatabe, K., Matsuda, S., Sato, H., Maki, A., Yoshimura, M., & Minagawa, Y. (2017). Prefrontal Function Engaging in External-Focused Attention in 5- to 6-Month-Old Infants: A Suggestion for Default Mode Network. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 676.
- Yamada, T., Umeyama, S., & Matsuda, K. (2012). Separation of fNIRS signals into functional and systemic components based on differences in hemodynamic modalities. *PloS One*, 7(11), e50271.
- Yeung, M. K., Lee, T. L., & Chan, A. S. (2021). Depressive and anxiety symptoms are related to decreased lateral prefrontal cortex functioning during cognitive control in older people. *Biological Psychology*, 166, 108224.