

新生児が母親の声を聴くときの 前頭葉—側頭葉間の機能的結合

Persistent functional connectivity between frontal and temporal cortices
while neonates hear their mothers' voice

内 田 真理子¹⁾
UCHIDA-OTA Mariko
有 光 威 志²⁾
ARIMITSU Takeshi
矢田部 清 美³⁾
YATABE Kiyomi
池 田 一 成²⁾
IKEDA Kazushige
高 橋 孝 雄²⁾
TAKAHASHI Takao
皆 川 泰 代⁴⁾
MINAGAWA Yasuyo

[Abstract]A past neurological study revealed that the mother's voice more enhances the emotional processing (amygdala and the frontal pole) and the phonological language processing (Broca's area and left superior temporal area) in the brain of infants than the stranger's voice (Dehaene-Lambertz et al., *Brain & Language*, 114, 53-65, 2010). However, it has been unknown in what way these cortical areas are reciprocally associated. In the present study, we tried to use an analytic method based on the cross-correlation in order to examine the persistent functional connectivity between cortical areas. The results showed that the right temporal areas (the superior temporal area and the temporal pole) were highly correlated with the frontal areas (the frontal pole, Broca's area, and the dorsolateral prefrontal area) while neonates hear their mothers' voice, whereas no fronto-temporal correlations were observed while hearing stranger's voice. These results suggest that the frontal and temporal cortices in the neonatal brain would be functionally connected and the right temporal areas could play an important role in recognizing mother's voice.

1) 日本女子大学人間社会学部心理学科

2) 慶應義塾大学医学部小児科

3) 慶應義塾大学先導研究センター

4) 慶應義塾大学文学部

はじめに

生まれたばかりの赤ちゃんが何らかの理由により母子分離を余儀なくされる場合、母親の声を聴かせることの効果について検討されることがある。例えば、新生児集中治療室 (NICU) に入院している早期産児に母親の録音音を聴かせると、児の心肺機能の調整能力が改善されたという研究報告 (Doheny et al., 2012) などが挙げられる。赤ちゃんの健やかな発育にとって「母親の声」が重要な役割を果たし得ることは間違いない。それでは、赤ちゃんはどのくらい発達した神経メカニズムによって母親の声を認識しているのだろうか。

1970年代後半、乳児や新生児が自分の母親の声と他人の声を聴き分けている、ということが行動科学的手法によって証明された (Mehler et al., 1978; DeCasper and Fifer, 1980)。その後、脳波や機能的磁気共鳴画像法、近赤外分光法等による脳機能イメージング技術が発展し、乳児や新生児が母親の声をどのように認識しているかについて、神経科学的に説明されるようになった (deRegnier et al., 2000; Therien et al., 2004; Saito et al., 2009)。最も明瞭な結果を示した Dehaene-Lambertz et al. (2010) によれば、生後2ヶ月の乳児に母親の声を聴かせると、左上側頭回や縁上回 (言語処理機能を司る脳領域)、そして、扁桃体や島皮質や前頭眼窩野 (情動評価機能を司る脳領域) の応答性が高まった。これらの領域は、知らない人の声よりも母親の声に対して明らかに強く応答したことから、母親の声を認識するときに重要な役割を果たす領域として考えられた。

以上の研究をベースにして、乳児が母親の声を認識するときに依拠する神経メカニズムを次のように想定してみる。第一に、乳児の脳は、側頭領域 (上側頭回など) の言語処理機能だけでなく、前頭領域 (前頭眼窩野) の情動評価機能まで動員して母親の声を認識している。第二に、前頭眼窩野は、上側頭回から母親の声についての何らかの手がかりを受け取り、情動評価に利用している可能性がある。もしそうだとすれば、上側頭回と前頭眼窩野は直接的または間接的に連絡している可能性がある。なお、最近の脳機能画像研究 (Homae et al., 2011) や拡散テンソル画像研究 (Leroy et al., 2013) では、上側頭回とブローカ野近傍あるいは背外側前頭領域の神経連絡が乳児や新生児の脳で形成されている可能性を示している。上側頭回からの情報はブローカ野などを中継し、前頭眼窩野に間接的に伝わっている可能性もある。第三に、親しい人物の声を聞き分ける能力に関連した脳領域として右側頭極が知られているが (Nakamura et al., 2001; Belin and Zatorre, 2003; Olson et al., 2007)、赤ちゃんにとって親しみのあるはずの母親の声を聴かせても右側頭極は応答しなかった (Dehaene-Lambertz et al., 2010)。このことから、生後間もない頃には右側頭極は機能的に発達していない可能性がある。

本研究では、以上に挙げた様々な皮質領域 (前頭眼窩野、背外側前頭領域、ブローカ野、側頭極、上側頭領域、縁上回) を関心領域として選び、赤ちゃんが母親の声を聴くときに、これらの領域間にどのようなネットワーク (機能的結合) が形成されるかを調べることにした。具体的には、新生児に母親の声を聴かせたときの各皮質領域の活動を光トポグラフィにより計測し、皮質領域間で活動パターンがどのくらい類似しているかを調べた。その結果を以下に報告する。

方法

計測対象者

生後2～7日の新生児37名(男17名, 女20名)が本研究の計測に参加した。新生児の出生時体重は平均3097 g (2532–3560 g), 在胎週数は平均39.3週(37–41週), 計測時の修正週数は平均40.0週(38–42週)だった。出生時の聴性脳幹反応検査により, 聴覚能力はいずれの新生児も正常であることが分かっていた。なお, 本研究は慶應義塾大学病院の倫理審査委員会より承認を得た上で行われた(No.20090189)。また, 計測は新生児の保護者からインフォームド・コンセントを得た後で実施された。

刺激と手続き

計測中, 母親声と知らない女性の声(以下より未知声と呼ぶ)という2種類の音声刺激をランダムな順序で新生児に聴かせた。これらの音声刺激は, 新生児の母親あるいは別の新生児の母親(計測に参加する新生児にとっては知らない女性)が日本語の絵本を読んでいるときに録音した音声から作られた。声の高さ, 発話速度, 抑揚の大きさ(基本周波数の変化範囲)に関する対乳児音声(Cooper and Aslin, 1990)の音響特徴が読み手間で同程度になるように, 録音前に読み手に対しての指導が行われた。音声刺激は, 新生児の頭部から45 cm離れたスピーカーから67 dBの音圧で提示された。1試行毎にどちらかの音声刺激を15秒間に渡って流した。試行間のインターバルは10秒とし, その間は音を流さなかった。新生児が体を動かしたりぐずったりすることなく, 各刺激条件につき5試行以上計測を成功した時点で, その新生児の計測を終了した。なお, 計測中の新生児は仰臥姿勢だった。

計測は慶應義塾大学病院の検査室で実施された。新生児の局所皮質血液ヘモグロビン濃度変化信号(hemoglobin concentration changes: Hb changes)は, 光トポグラフィ(ETG-4000, 日立メディコ)によって前頭部と左右側頭部の計46点から計測された(図1)。プローブの照射部と受光部の距離は2 cmに設定され, 照射光の強さは二種類の波長(695 nmと830 nm)それぞれ1.5 mWに設定された。受光プローブにおけるサンプリングレートは10 Hzだった。新生児の頭部にプローブホルダーを装着する際には国際10/20法を参照し, 計測チャンネルNo.11とNo.12の中点, No.23とNo.24の中点, No.26とNo.27の中点がそれぞれT3, T4, Fpzに一致するように装着した(図1)。以上の装着方法はバーチャルレジストレーション法(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, これにより各計測チャンネルに大脳新皮質の解剖学的名称(Rorden and Brett, 2000)が割り当てられた。バーチャルレジストレーション法は現在までのところ成人脳に適用されるツールだが, Arimitsu et al. (2011)によれば, 新生児の頭部サイズ(34 cm程度)に対してプローブの照射部と受光部の距離が2 cmであれば, バーチャルレジストレーション法を新生児へ適用することも可能である。本研究も同様の条件を満たすため適用した。

信号の前処理

修正 Lambert-Beer 法則に従い (Cf., Maki et al., 1995), 計測信号は酸素化ヘモグロビン濃度変化

(oxy-Hb: oxygenated hemoglobin concentration changes) と脱酸素化ヘモグロビン濃度変化 (deoxy-Hb: deoxygenated hemoglobin concentration changes) に変換された (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)。oxy-Hb と deoxy-Hb の時系列には帯域通過フィルタ (0.03 ~ 0.30 Hz) がかけられた。今回のような刺激構成の場合、通常は時系列を1試行単位に分割して平均解析などを行う。しかし、以下の相関解析に用いる時系列は複数周期を含む長さを必要とする。そこで本研究では2試行単位で時系列を分割することにした。つまり、2試行連続して母親声が提示された区間と、2試行連続して未知声が提示された区間を各々抽出した。各区間は、1試行目の音声刺激前0.1秒から2試行目の音声刺激後9.9秒までを含む時系列 (50秒長) のブロックとして区切られた。背景ノイズを差し引くために各ブロックの前後0.1秒 (1 point) を利用した一次ベースラインフィッティングが施された。非常に大きな信号変動 (± 0.3 mM-mm を超える変動、または計測中信号の1SDを超える変動) を含むブロックについては、体動か全身性血流のアーチファクトが混入したとみなし、以下の分析の対象から除いた。また、頭皮上へのプローブの設置が不十分だったために適切な信号が得られなかったチャンネルも解析対象から除いた。

相互相関に基づく機能的結合の分析

各ブロックにおけるチャンネル間の機能的結合の強さを評価するために、私たちは式1に示す相互相関係数 $C(\tau)$ を計算した。

$$C(\tau) = \int x_i(t) x_j(t + \tau) dt \quad (\text{式1})$$

式1において、 x_i と x_j は各々チャンネル i とチャンネル j のブロック時系列を正規化した波形、 t は時刻を表す。タイムラグ τ を -3.1 ~ 3.1 秒の範囲で変化させ、 $C(\tau)$ の絶対値が最大になるときのタイムラグを T とし、最大相互相関係数 $C(T)$ を機能的結合の強さとして定義した。 $C(T)$ の絶対値が1に近づくほどチャンネル間の機能的結合が強いこと (チャンネル間の波形が類似していること) を意味し、 $C(T)$ が0に近づくほど機能的結合が弱いことを意味する。強い機能的結合の検出閾値となる $C(T)_{\text{threshold}}$ を決めるために、私たちは、両刺激条件の区別なく全ての対象新生児から得られた全てのチャンネルペアの $C(T)$ をデータサンプルとする分布を作り、分布の中央値よりも大きな値となる $C(T)$ については機能的結合が強いと判定することにした。さらに、母親声と未知声で機能的結合の強さに違いが現れるチャンネルペアを特定するために、チャンネルペア毎に刺激条件間で $C(T)$ の差の検定を行った (Wilcoxon の両側順位和検定, $\alpha = 0.05$)。ただし、以上の解析において x_i と x_j の変動が時間差なく同期する場合 ($T = 0$ 秒) は、チャンネル間の結合関係を解釈することが難しいため解析対象外とした。

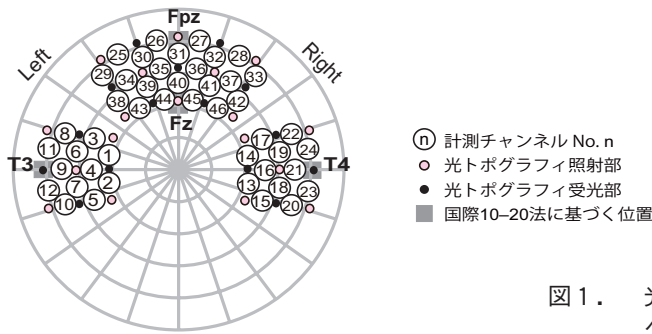


図 1. 光トポグラフィによる局所皮質血液ヘモグロビン濃度変化の計測位置

表 1. 関心領域と計測チャンネルの対応

関心領域	channel No.	標準脳座標			チャンネルが 関心領域を含む割合
		x	y	z	
前頭眼窩領域 (Orbito frontal area), 左	26	-12.87	71.46	-3.23	0.771
前頭眼窩領域 (Orbito frontal area), 右	27	15.02	71.07	-3.32	0.615
背外側前頭領域 (Dorsolateral prefrontal cortex, area 46), 左	34	-35.32	57.95	18.71	0.917
背外側前頭領域 (Dorsolateral prefrontal cortex, area 46), 右	37	37.66	58.54	18.50	0.789
ブローカ野 (Broca's area), 左	38	-45.01	41.70	27.39	0.922
ブローカ野 (Broca's area), 右	42	47.08	41.58	27.84	0.944
上側頭領域前部 (anterior part of Superior Temporal area), 左	8	-61.92	2.82	-0.67	0.651
側頭極 (Temporal Pole), 右	22	61.82	7.54	1.23	0.510
上側頭領域 (Superior Temporal area), 左	7	-68.08	-34.95	21.36	0.471
上側頭領域 (Superior Temporal area), 右	18	69.11	-29.43	21.09	0.462
縁上回 (Supramarginal gyrus), 左	5	-63.10	-46.38	36.54	0.905
縁上回 (Supramarginal gyrus), 右	15	65.25	-41.34	36.07	0.923

結果

本研究における関心領域を、前頭眼窩野、背外側前頭領域、ブローカ野、上側頭領域、縁上回、側頭極とした。また、これらの関心領域に対応する計測チャンネルを表 1 に示した。これらの領域は上述の先行研究で注目された領域に相当し、本研究ではこれらの関心領域に対応するチャンネルと残りの計チャンネルの機能的結合が調べられた。全チャンネルペアの最大相互相関係数 $C(T)$ をデータサンプルとする分布は図 2 のようになった。 oxyHb , deoxyHb のどちらの分布も $C(T) = 0$ を境に二峰性を示したが、 $C(T) > 0$ (正の相関) となるデータが全体の 80.25% (oxyHb), 85.63% (deoxyHb) を占めた。そこで $C(T) < 0$ (負の相関) に該当するデータを解析対象外とし、 $C(T) > 0$ の範囲の分布から中央値をもとめ、検討すべき強い機能的結合の閾値を $C(T)_{\text{threshold}} = 0.673$ (oxyHb), $C(T)_{\text{threshold}} = 0.758$ (deoxyHb) とした。そして、各刺激条件につき、チャンネルペア毎に対象新生児の $C(T)$ を平均し、その値が上記の閾値より大きいチャンネルペアを図 3 に示した。母親声を聴いたときには、 deoxyHb を指標とした場合に、右側頭部と前頭皮質を結ぶ長距離の機能的結合が検出された (図 3A 下段)。具体的には、右側頭極と前頭極の結合 (図 3A の a, 平均 $C(T) = 0.806$), 右上側頭領域と左背外側前頭領域の結合 (図 3A の b, 平均 $C(T) = 0.783$), 右上側頭領域と Broca 野の結合 (図 3A の c, 平均 $C(T) = 0.762$) である。一方、未知声を聴いた

ときには deoxyHb を指標とした場合でも近傍チャンネル間の機能的結合しか検出されなかった (図 3B 下段)。ただし, a, b, c の結合について母親声と未知声で有意差はなかった ($p > 0.6$, effect size $r < 0.12$)。その他, どちらの刺激条件においても, oxyHb で機能的結合を評価した場合 (図 3A, B 上段) より deoxyHb で評価した場合の方が機能的結合を検出し易いという傾向があった。参考までに, 図 3A における a, b, c に該当する実際の波形を図 4 に示した。特に, 前頭極に対して右側頭極の波形は 0.5 ~ 1 秒程度先行する傾向が多く見られた (図 4A)。

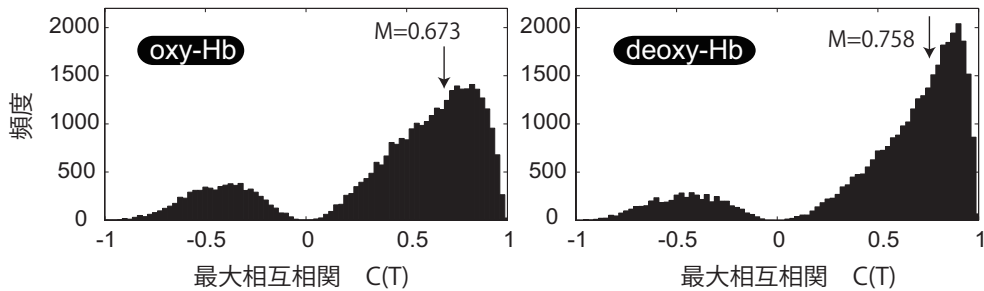


図 2. 全チャンネルペアから得られた最大相互相関係数 $C(T)$ の分布

oxyHb に基づいて計算した $C(T)$ のヒストグラムを左側に, deoxyHb に基づいて計算した $C(T)$ のヒストグラムを右側に示す。矢印は $C(T) > 0$ における分布の中央値 M を指す。

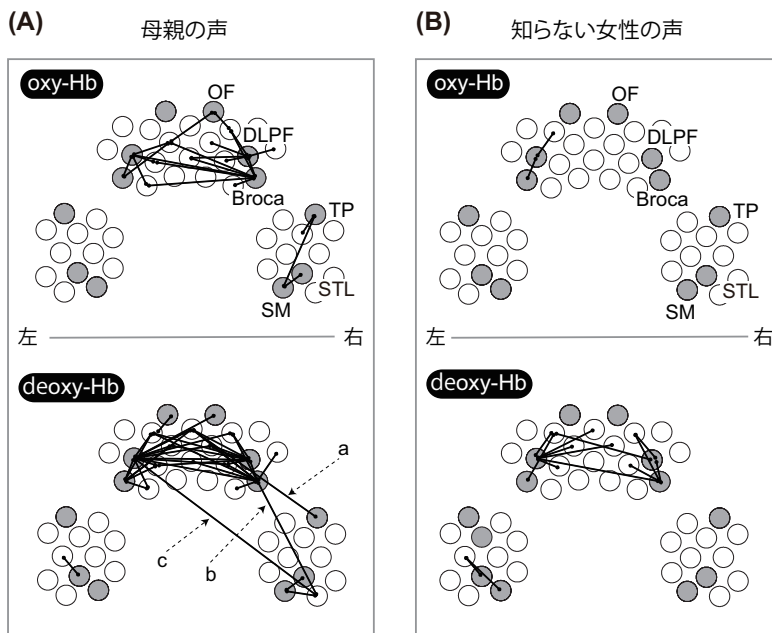


図 3. 母親声条件と未知声条件の機能的結合マッピング比較

(A) 母親声条件で検出された機能的結合。(B) 未知声条件で検出された機能的結合。(A)(B)ともに, 強い機能的結合のチャンネルペアを実線で結び表示した。また, oxyHb での検出結果を上段に, deoxyHb での検出結果を下段に示した。(A) における a は右側頭極と前頭極の結合 (channel-No.22 & 31), b は右上側頭領域と左背外側前頭領域の結合 (channel-No.20 & 34), c は右上側頭領域と Broca 野の結合 (channel-No.20 & 37) を指す。その他, OF: orbitofrontal area (前頭眼窩野), DLPF: dorsolateral prefrontal area (背外側前頭領域), Broca: inferior frontal area (ブローカ野), TP: temporal pole (側頭極), STL: superior temporal lobe (上側頭領域), SM: supramarginal area (縁上回)。

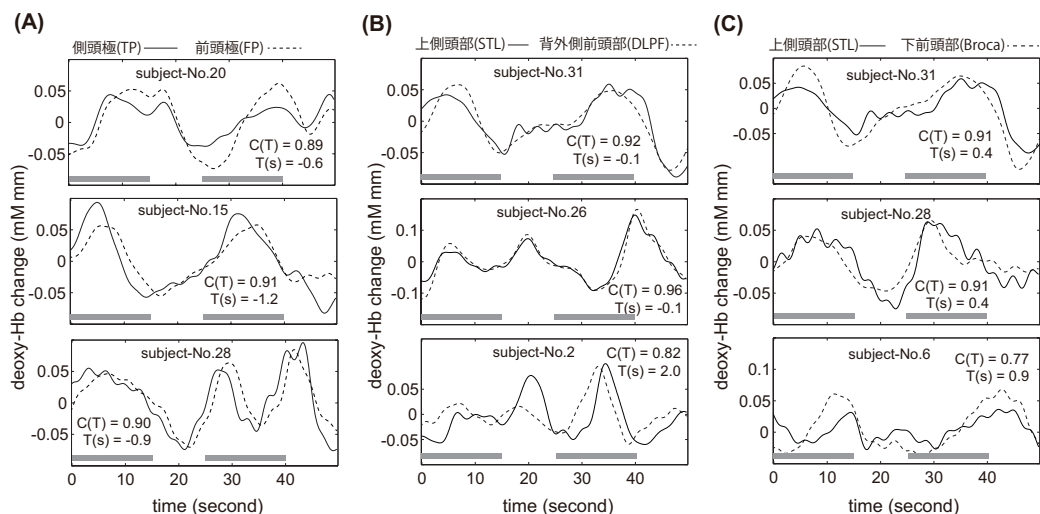


図4．母親声を聴いている時の前頭部と側頭部の deoxyHb 波形

(A) 右側頭極と前頭極。(B) 右上側頭領域と左背外側前頭部。(C) 右上側頭領域と右下前頭領域。各グラフでは、個別の新生児の或るブロック区間における二つの計測チャンネルの波形を示している。母親声の音刺激が提示されている時間区間を灰色の横棒で表示した。

考察

本研究で私たちは、新生児に母親の声を聴かせたときに活性化する皮質領域間ネットワークを相互相関解析により検出することを試みた。対照条件として知らない女性の声も聴かせ比較した結果、知らない女性の声よりも母親の声を聴く時の方が、より多くの皮質領域間で神経活動の類似性が抽出され、それは前頭皮質と側頭皮質という比較的離れた領域間においても検出された。以上の結果は、大脳新皮質における神経ネットワークが新生児の頃から既に広範囲に形成されている可能性を示すものである。以下では、実際に観測された機能的ネットワークがどのような働きをし得るのかについて考察する。

観測されたネットワークの機能について

私たちが最初に予想していた、情動評価機能を担う前頭眼窩野と言語処理機能を担う上側頭領域の機能的結合は、結果的に検出されなかった。しかし代わりに、重要と思われる二種類の機能的結合を検出した。そのひとつが、右側頭極と前頭極の機能的結合である。実は、霊長類や成人の脳において、側頭極という領域は扁桃体や前頭極（前頭眼窩野）と解剖学的に連絡していることが知られている (Kondo et al., 2003; Liu et al., 2013)。本研究は、同様の解剖学的連絡が新生児の脳において少なくとも部分的に形成されている可能性を示したことになる。また、側頭極は、情動的・対人関係的なエピソード記憶の表象機能を担う領域と考えられているが (Kondo et al., 2003; Olson et al., 2007)、特に右側頭極は、知っている人の声からそれが誰であるかを識別するときに強い応答性を示す (Nakamura et al., 2001; Belin and Zatorre, 2003)。以上のことから類推して、

新生児の脳では、右側頭極におけるエピソード記憶の表象系が既に機能しており、新生児はそのような記憶情報に基づいて母親の音声を認識している可能性がある。

本研究において検出された第二の機能的結合は、言語機能を担う上側頭領域から前頭領域への機能的結合である。左半球の上側頭領域からの機能的結合は近傍領域に限られたが、右半球の上側頭領域からの機能的結合は対側の背外側前頭領域にまで及ぶことが分かった。新生児の上側頭領域の機能は既に左右半球で分化しており、左上側頭領域は言語の音韻に応答性が高いが (Dehaene-Lamberts et al., 2002; Peña et al., 2003; Sato et al., 2011; Minagawa-Kawai et al., 2011), 右上側頭領域は言語の韻律に応答性が高い (Homae et al., 2006; Arimitsu et al., 2011)。また、背外側前頭領域の機能は、注意やワーキングメモリを制御し、状況に合わせて「今、注意を向けるべきこと」をシフトさせていくことである (Smith and Jonides, 1999; Curtis et al., 2003)。以上のことから類推して、新生児が母親の声を聴くとき、特に韻律、つまり話者 (母親) の感情や文脈によって変化する声の強さや抑揚に対して、注意を向けている可能性がある。

まとめ

以上の結果と考察から、生まれたばかりの新生児は、母親の声の感情的側面に注意を向け、それをエピソード記憶に基づいて解釈するための神経ネットワークを、脳内に構築済みの可能性がある。赤ちゃんにとって母親の声は、胎児の頃から与えられ続けた感覚刺激である。母親の声は振動として胎内に伝わり、胎児の皮膚感覚や前庭器官、聴覚神経系を刺激する (Krueger, 2010)。例えば、緩やかな韻律で発せられた母親の声と子宮壁の軟らかい感触を関連づけた記憶、あるいは、母親の強張った声と高鳴る母体の心拍音や子宮壁の硬い感触を関連づけた記憶が、新生児の右側頭極に表象されているのかもしれない。そして、そのような記憶が母親の声を聴いてよみがえり、冒頭で紹介した例のように、NICU で治療を受けている児の心臓機能 (Cf., Doheny et al., 2012) に影響を与えているのかもしれない。

謝辞

本研究にご協力くださった保護者の皆様、慶應義塾大学病院小児科スタッフの皆様、計測を支えてくださった慶應義塾大学文学部の石井清香氏、松崎敦子氏に心より感謝申し上げます。

文献

- Arimitsu T, Uchida-Ota M, Yagihashi T, Kojima S, Watanabe S, Hokuto I, Ikeda K, Takahashi T, Minagawa-Kawai Y, 2011. Functional Hemispheric specialization in processing phonemic and prosodic auditory changes in neonates. *Frontiers in Psychology*, 2, 202.
- Belin P, Zatorre RJ, 2003. Adaptation to speaker's voice in right anterior temporal lobe. *Neuroreport*, 14(16), 2105-2109.
- Cooper RP, Aslin RN, 1990. Preference for infant-directed speech in the first month after birth. *Child Development*, 61, 1584-1595.
- Curtis CE, D'Esposito M, 2003. Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends Cogn Sci.*, 7(9):415-423.
- DeCasper AJ, Fifer WP, 1980. Of human bonding: Newborns prefer their mother's voice. *Science*, 208, 1174-1176.

- Dehaene-Lambertz G, Dehaene S, Hertz-Pannier L, 2002. Functional neuroimaging of speech perception in infants. *Science*, **298**(5600), 2013-2015.
- Dehaene-Lambertz G, Montavont A, Jobert A, Alliol L, Dubois J, Hertz-Pannier L, Dehaene S, 2010. Language or music, mother or Mozart? Structural and environmental influence on infants' language networks. *Brain & Language*, **114**, 53-65.
- deRegnier R, Nelson CA, Thomas KM, Wewerka S, Georgieff MK, 2000. Neurophysiologic evaluation of auditory recognition memory in healthy newborn infants and infants of diabetic mothers. *The Journal of Pediatrics*, **137**(6), 777-784.
- Doheny L, Hurwitz S, Insoft R, Ringer S, Lahav A, 2012. Exposure to biological maternal sounds improves cardiorespiratory regulation in extremely preterm infants. *J Matern Fetal Neonatal Med.*, **25**(9):1591-4.
- Homae F, Watanabe H, Nakano T, Asakawa K, Taga G, 2006. The right hemisphere of sleeping infant perceives sentential prosody. *Neurosci Res.*, **54**(4), 276-280.
- Homae F, Watanabe H, Nakano T, Taga G, 2011. Large-scale brain networks underlying language acquisition in early infancy. *Frontiers in psychology*, 2:93.
- Kondo K, Saleem KS, Price JL, 2003. Differential connections of the temporal pole with the orbital and medial prefrontal networks in macaque monkeys. *Journal of Comparative Neurology*, **465**(4), 499-523.
- Krueger C, 2010. Exposure to Maternal Voice in Preterm Infants: A Review. *Adv Neonatal Care*. **10**(1): 13-20.
- Leroy F, Glasel H, Dubois J, Hertz-Pannier L, Thirion B, Mangin JF, Dehaene-Lambertz G, 2011. Early maturation of the linguistic dorsal pathway in human infants. *J Neurosci.*, **31**(4), 1500-1506.
- Liu H, Qin W, Li W, Fan L, Wang J, Jiang T, Yu C, 2013. Connectivity-based parcellation of the human frontal pole with diffusion tensor imaging. *J Neurosci.*, **33**(16):6782-90.
- Maki A, Yamashita Y, Ito Y, Watanabe E, Koizumi H, 1995. Spatial and temporal analysis of human motor activity using non-invasive NIR topography. *Medical Physics*, **22**, 1997-2005.
- Mehler J, Bertoncini J, Barrière M, Jassik-Gerschenfeld D, 1978. Infant recognition of mother's voice. *Perception*, **7**(5), 481-497.
- Minagawa-Kawai Y, van der Lely H, Ramus F, Sato Y, Mazuka R, Dupoux E, 2011. Optical brain imaging reveals general auditory and language-specific processing in early infant development. *Cerebral Cortex*, **21**(2), 254-261.
- Nakamura K, Kawashima R, Sugiura M, Kato T, Nakamura A, Hatano K, Nagumo S, Kubota K, Fukuda H, Ito K, Kojima S, 2001. Neural substrates for recognition of familiar voices: a PET study. *Neuropsychologia*, **39**(10), 1047-1054.
- Olson IR, Plotzker A, Ezzyat Y, 2007. The Enigmatic temporal pole: a review of findings on social and emotional processing. *Brain*, **130**, 1718-1731.
- Peña M, Maki A, Kovaci D, Dehaene-Lambertz G, Koizumi H, Bouquet F, Mehler J, 2003. Sounds and silence: an optical topography study of language recognition at birth. *Proc Natl Acad Sci U S A.*, **100**(20):11702-11705.
- Rorden C, Brett M, 2000. Stereotaxic display of brain lesions. *Behav. Neurol.* **12**, 191-200.
- Saito Y, Fukuhara R, Aoyama S, Toshima T, 2009. Frontal brain activation in premature infants' response to auditory stimuli in neonatal intensive care unit. *Early Human Development*, **85**, 471-474
- Sander D, Grandjean D, Pourtois G, Schwartz S, Seghier ML, Scherer KR, Vuilleumier P, 2005. Emotion and attention interactions in social cognition: brain regions involved in processing anger prosody. *Neuroimage*, **28**(4):848-58.
- Sato H, Hirabayashi Y, Hifumi TH, Kanai M, Ashida T, Konishi I, Uchida-Ota M, Konishi Y, Maki A, 2012. Cerebral hemodynamics in newborn infants exposed to speech sounds: A whole-head optical topography study. *Hum Brain Mapp* **33**:2092-2103.
- Smith EE, Jonides J, 1999. Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*. **283**(5408):1657-61.
- Therien JM, Worwa CT, Mattia FR, deRegnier RO, 2004. Altered pathways for auditory discrimination and recognition memory in preterm infants. *Developmental Medicine & Child Neurology*, **46**(12), 816-824.
- Tsuzuki D, Jurcak V, Singh AK, Okamoto M, Watanabe E, and Dan I, 2007. Virtual spatial registration of stand-alone functional NIRS data to MNI space. *NeuroImage*, **34**, 1506-1518.