

## 乳児期における音声模倣のメカニズムとその発達過程

今福 理博

### はじめに

模倣とは、個体が観察した他個体の身体動作や発話音声を再現することである。模倣には、「文化学習的側面」である知識の獲得と、「社会・情緒的側面」である個体間の親密性の促進という2つの機能があると考えられている (Over & Carpenter, 2012)。本稿では模倣の中でも、他者との face-to-face の対面場面で起こり、聴覚 (音声) 情報を必要とする音声模倣に焦点を当てる。ただし、音声模倣は対面場面では、他者の口唇部運動という視覚情報も用いられる。音声模倣は、ヒトでは生後6ヶ月の間に出現し、新生児模倣を除けば、身体模倣に比べて早期に発達する感覚-運動統合能力である (e. g., Iverson & Fagan, 2004)。乳児は、他者の声を真似する経験によって、周囲の言語環境の音声を学習する。また、日常場面では、乳児は音声模倣を通して、他者と顔表情の協調 (i.e. 他者との相互的な発話、視線や表情のやりとり) を行うことから、音声模倣は乳児期、及びそれ以降の社会認知能力の発達を支える重要な能力であるといえる。しかし、音声模倣のメカニズムやその発達過程については、その多くが未解明のままである。

本稿では、まず新生児期から乳児期の音声模倣について調べている発達研究をまとめた。それぞれの先行研究の参加児、刺激、評価 (反応)、実験方法、結果をまとめることで、音声模倣の発達過程について俯瞰する。次に、成人を対象とした神経科学的研究の知見に基づき、音声模倣のメカニズムについて検討する。近年、行動学的指標に加えて、神経科学的指標やその他の生理学的指標などの多面的な手法を用いることで、ヒトの心の働きの科学的説明が一層進んでいる。例えば、成人や自閉症者を対象とした研究では、感覚-運動統合の神経科学的基盤とされるミラーニューロンシステム (以下、MNS) が、音声模倣を含む模倣の生成過程に重要な神経回路である可能性を示唆する (e.g., Nishitani, Avikainen, & Hari, 2004; Nishitani & Hari, 2002)。他方で、MNSのみでは音声模倣を含む模倣の生成過程を説明するには不十分で、より高次の情報が模倣をいかに制御するかについて加味する必要があるとする説が提示されている (Wang & Hamilton, 2012)。本稿は、これら2つの仮説を中心に上げ、乳児期の音声模倣が生成されるメカニズムやその発達過程について検討し、今後の音声模倣メカニズムとその発達過程に関する研究について展望する。

### 1. 音声模倣の発達研究：新生児から乳児期にかけて

音声模倣は、自己が知覚した他者の発話音声を再現するものであり、感覚-運動統合能力を必

要とする。この音声模倣は、他者とのコミュニケーションに欠かせない発話・言語能力の発達に重要な役割を果たす学習形態の1つとして扱われてきた。新生児期からの音声模倣が注目されてきたのも、ヒトの社会的認知能力の発達の基盤となる現象であると考えられているためである (Suddendorf, Oostenbroek, Nielsen, & Slaughter, 2013)。しかし、新生児期や乳児期の音声模倣能力の高さと、後の社会的認知能力との関連性を直接的に実証した研究は皆無である。他方、新生児期から乳児期における音声模倣の発達過程を調べた研究や、刺激変数を操作して音声模倣のメカニズムを探索する研究は、1980年代から現在まで盛んに行われてきた。表1は、新生児期から乳児期までの音声模倣の発達過程について調べた研究をまとめたものである。具体的には、先行研究の参加児、刺激、評価(反応)、実験方法、結果について記載した。これらの研究は、新生児や乳児の音声模倣反応の評価として、口形、及び音声という行動指標を用いている。新生児期は発声を伴う口唇部運動が難しいことから「口形のみ」を、乳児期は発声を伴う口唇部運動が可能のため「音声」を音声模倣反応の指標としている。また、表中の結果の箇所について、「○」は模倣が生じたことを表し、「×」は模倣が生じなかったことを表す。

表1. 新生児から乳児期における音声模倣に関する先行研究

| 先行研究                       | 参加児                                                                  | 刺激                                                           | 評価           | 実験方法          | 結果                                                           |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------|---------------|--------------------------------------------------------------|
| Chen et al. (2004)         | 生後7日の新生児 (N=25)                                                      | (1) 聴覚刺激 (a)<br>(2) 聴覚刺激 (m)                                 | 口形           | 対面実験 (実験者-乳児) | (1) ○<br>(2) ○                                               |
| Coulon et al. (2013)       | 生後7日の新生児 (N=36)                                                      | (1) 聴覚刺激の条件 (aとi)<br>(2) 聴覚刺激の一致 (aとi)<br>(3) 聴覚刺激の不一致 (aとi) | 口形           | 単一提示 (モニター)   | (1) ○<br>(2) ○<br>(3) ×                                      |
| Joan (2007)                | 8, 16, 12, 14, 16, 18, 20ヶ月児 (縦断研究)<br>8, 10ヶ月児 (N=21), その他月齢 (N=20) | 視覚覚醒 (Aah, Ah-Eh)                                            | 音声           | 対面実験 (実験者-乳児) | 8ヶ月児では、Ah-Ehは16ヶ月児で、それぞれ50%の児が音声模倣を示した。                      |
| Ends & Meltzoff (1998)     | 3, 4, 5ヶ月児 (縦断研究)<br>それぞれ月齢 (N=24)                                   | 視覚覚醒 (a, i, uを含む単語)                                          | 音声           | 単一提示 (モニター)   | 3ヶ月児からの音声模倣が見られる。3-5ヶ月児において徐々に音素がa, i, uの音にカテゴリー化し、発音が明確になる。 |
| Papoušek & Papoušek (2001) | 2, 3, 5ヶ月児 (縦断研究)<br>それぞれ月齢 (N=47)                                   | 視覚覚醒<br>(母子対面と方向中の母親の発声)                                     | 音声           | 対面実験 (母親-乳児)  | 母親の発声に類似した音声も見られた割合 (2ヶ月児: 27.6%, 3ヶ月児: 52.2%, 5ヶ月児: 41.2%)  |
| Patterson & Wicker (1989)  | 4ヶ月児 (N=12)                                                          | (1) 視覚覚醒の一致 (aとi)<br>(2) 視覚覚醒の不一致 (aとi)                      | ○ 口形<br>○ 音声 | 顔面映写法 (モニター)  | (1) ○<br>(2) ×                                               |

### 1-1. 新生児期の音声模倣研究

Chen, Striano, & Rakoczy (2004) は、生後7日の新生児を対象に、聴覚刺激に対する音声模倣反応を調べた。その結果、他者が新生児と対面した状態で、/a/と/m/の聴覚刺激をそれぞれ提示した際に、新生児は聴取した音声に一致した口形運動 (/a/ならば口開け、/m/ならば口閉じ) を示した。このことは、直前まで胎内で肺が羊水に満たされており、/a/や/m/などの特定の音素を産出した経験が乏しいはずの新生児期から、ヒトは音声を自身の身体運動に変換するシステムをもつ可能性を示唆している。次に、生後16-82時間の新生児を対象とした研究では、モニター上に映る/a/、又は/i/を発話する他者に対する新生児の音声模倣反応を調べている (Coulon et al., 2013)。その際、参加児は、①視覚情報 (口の運動) のみの条件、②視覚と聴覚情報 (音声を伴う口の運動) が一致している条件、③視覚と聴覚情報が不一致している条件、の3種類の映像を観察した。実験の結果、新生児は視覚情報のみの条件と視覚と聴覚情報が一致している条件で、有意に他者の口唇部運動と一致した音声模倣反応を示した。一方で、視覚と聴覚情報が不一致している条件では、新生児は有意な音声模倣反応を示さなかった。これは、ヒトが新生

児期からすでに視覚情報と聴覚情報を統合的に知覚し、その感覚情報を自身の身体運動に変換する能力をもつ可能性を示唆している。ただし、この新生児期の音声模倣反応は、反応潜時が刺激提示から平均して 29.6 秒と遅いものであることが報告されている。そのため、新生児期では、感覚情報を自身の運動に変換するシステムは未だに発達途上である可能性が考えられる。

## 1-2. 乳児期の音声模倣研究

Kuhl & Meltzoff (1996) は、生後 3 ヶ月児が、3 種類の母音 (/a/, /i/, /u/) をそれぞれ含む語彙を発話する他者に対し、一致した音声を発することを示した。さらに、3 ヶ月児から 5 ヶ月児にかけて、音声模倣の際に音声/a/, /i/, /u/を明確に区別して発話できるようになることを実証した。また、Kuhl & Meltzoff (1996) では、乳児の音声模倣反応は、他者の発話から平均して約 3.8 秒間に生じたものを記録していることから、音声模倣の反応潜時がこの 3.8 秒以内であると推測できる。つまり、乳児期における音声模倣の反応潜時は、新生児期にみられる音声模倣の反応潜時 ( $M = 29.6$  秒; Coulon et al., 2013) よりも早いことがわかる。

以上の結果より、ヒトは新生児期から、外部環境の発話音声と口唇部運動という異種感覚情報 (視-聴覚情報) を統合的に知覚し、自身の運動に変換するシステムを有する可能性がある。さらに、音声模倣の反応潜時の結果は、乳児期の音声模倣を支える神経科学的基盤が、新生児期に比べて成熟している可能性を示唆している。ただし、新生児期と乳児期の音声模倣を支える神経科学的基盤が同一のものであるかについては、未だに明らかでないため、慎重に議論する必要がある。次章では、神経科学的指標を用いた成人研究の知見をまとめ、音声模倣を支えている神経科学的基盤からそのメカニズムについて検討する。

## 2. 音声模倣の神経科学的基盤：2 つの仮説からの検討

音声模倣には、どのような神経科学的基盤が存在するのだろうか。本章では、2 つの仮説をもとに音声模倣のメカニズムについて検討していく。

### 2-1. 音声模倣とミラーニューロンシステム (MNS) 仮説

MNS 仮説の研究背景としては、Rizzolatti らによって、マカクザルの F5 野でミラーニューロンという神経細胞が発見されたことが始まりである。マカクザルの F5 野は、ヒトの下前頭回 (IFG; inferior frontal gyrus) に対応する。このニューロンは、自己の運動実行時と他者の運動観察時に同じように活動する神経細胞であり、他者の行為を理解するための神経科学的基盤と考えられている (e.g., Rizzolatti & Luppino, 2001)。ヒトでは、他者行為の観察時に、運動の実行に関わる IFG 以外にも、感覚情報の符号化を担う上側頭溝 (STS; superior temporal sulcus) や運動の目標の符号化を担う下頭頂葉 (IPL; inferior parietal lobule) などの脳部位の関与が指摘されている。この脳内ネットワークは、総称してミラーニューロンシステム (MNS) と呼ばれている。また、その後の研究により、視覚情報のみならず、聴覚情報を自身の運動情報に変換する神経細胞、すなわち、視聴覚ミラーニューロンが発見されている (Kohler et al., 2002)。Kohler et al. (2002) は、ピーナッツの殻が割れる音など、ある特定の行為を連想する音を聴くと、サルのみラーニューロンが発火することを明らかにした。この実験結果は、ピーナッツの殻の割れる音

を知覚する際、自己がピーナッツを割るのに必要な運動の計画を同時に脳内で行っている可能性を示唆している。ヒトでは、この視聴覚ミラーニューロンは、音声の理解や模倣においても重要な役割を果たすと考えられている (乾, 2013)。

次に、模倣の神経科学的基盤が MNS である可能性を示す研究について紹介する。Iacoboni et al. (1999) は、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI; functional magnetic resonance imaging) を用いて、成人の参加者が、①他者の指運動を観察して同じ運動を実行する模倣課題、②他者の指運動の観察のみをする観察課題、③視空間的な位置手がかりに基づき指運動を実行する統制課題、の3つの課題時の脳活動を記録した。その結果、指運動の模倣課題時に MNS の賦活が最も高くなることを示し、指運動の模倣において MNS が関与することを実証した。また、模倣と MNS の関連を裏付ける証拠として、Heiser, Iacoboni, Maeda, Marcus, & Mazziotta (2003) は、反復経頭蓋磁気刺激法 (rTMS; repetitive transcranial magnetic stimulation) を用いて、MNS の一部であるブローカ野 (BA44) にパルス刺激を与えることで、参加者の MNS の活動を一時的に阻害し、その際に、参加者には指運動を要する模倣課題を実施した。その結果、ブローカ野を一時的に阻害された参加者のみ、模倣課題の成績が有意に低くなることがわかった。

模倣における MNS の関与は、発話運動の模倣においても認められている。Nishitani & Hari (2002) は、脳磁図 (MEG; magnetoencephalography) を用いて、他者の発話運動を観察・模倣時の脳神経活動を記録した。その結果、発話運動の観察・模倣時に、後頭皮質 (視覚情報処理)、側頭領域 (顔を含む身体の動きの処理)、下頭頂葉 (視覚的な運動情報の表象や注意)、下前頭葉 (運動の計画と実行)、一次運動皮質 (運動の産出) が時系列的に活動することがわかった。このことは、音声模倣の生成に、MNS が関与している可能性を示唆する。また、模倣と MNS の関連は、模倣の困難さが指摘されている自閉症スペクトラム障害児 (者) を対象とした研究においても指摘されている。自閉症スペクトラム障害 (以下、自閉症) とは、①社会的コミュニケーションと社会的相互作用の持続的な障害、②行動、関心、活動における固定的、反復的なパターンの2つの特性によって特徴づけられる発達障害である (American Psychiatric Association, 2013)。Nishitani et al. (2004) は、定型発達の成人と自閉症者が他者の発話運動を模倣している際の脳神経活動を、MEG を用いて調べた。その結果、自閉症者は定型発達者と同じ脳領域が活動するものの、定型発達者に比べて、前頭部の MNS である IFG の活動の反応潜時に遅延があることが明らかとなった。このような定型発達者と自閉症者における発話運動の観察・模倣時の脳神経活動の違いは、自閉症者にみられる模倣や社会的相互作用の不得手と関連している可能性がある。

これら一連の研究結果から、MNS が音声模倣の生成に関与していると考えられる。しかし、ここで2つの疑問が生じる (Wang & Hamilton, 2012)。1つ目は、模倣が生成される文脈をどのように考慮すべきかという点である。私たちは「他者が誰であるか、自分にとってどのような関係にある他者なのか」によって選択的に模倣行動を行うことがある (Over & Carpenter, 2012)。2つ目は、文脈による模倣の制御が関与する脳神経メカニズムについてである。この2つの疑問に対して、文脈による模倣の制御機能を考慮して議論を展開しているのが、STORM 仮説 (social top-down response modulation hypothesis) である。次稿では、音声模倣が、高次の情報により影響を受けている可能性について、STORM 仮説に基づき検討する。

## 2-2. STORM 仮説

STORM 仮説 (Wang & Hamilton, 2012) は、未だに音声模倣では検証されていないが、MNS による模倣行動が、自己に向けられた社会的シグナルという高次の情報により制御されることを主張する説である。

Wang らは、社会的コミュニケーションにおいて重要なシグナルとなるアイコンタクトに着目し、アイコンタクトが模倣行動に及ぼす影響について、行動学的、神経科学的な手法を用いて調べた。Wang, Newport, & Hamilton (2011a) は、他者が顔の前で手の動作をしている映像を参加者が視聴し、身体模倣を行うまでの反応潜時を調べた。刺激条件には、他者が参加者に対してアイコンタクトをしている直視条件と、アイコンタクトをしていない逸視条件があった。その結果、逸視条件に比べ、直視条件の際に、参加者はより早い模倣反応を示した。このことは、アイコンタクトが模倣行動を制御し、促進させる効果をもつことを示している。Wang, Ramsey, & Hamilton (2011b) は、Wang et al. (2011a) の直視条件、又は逸視条件に、模倣抑制条件を加えた手続きを設け、fMRI を用いて模倣行動の制御に関わる神経科学的基盤を調べた。その結果、参加者が模倣を実行している際には、感覚情報の符号化を担う STS と、運動の実行に関わる IFG の機能的な結合が強くなることがわかった。また、模倣抑制条件では、内側前頭皮質 (mPFC; medial prefrontal cortex) の活動が有意に高くなることが示された。この模倣抑制条件の結果は、自己と他者の随意的なコミュニケーションに重要となる、他者からの感覚情報と自己の運動表象を区別する役割を mPFC が担っている可能性を示している。さらに、模倣行動に対するアイコンタクトの効果の神経科学的基盤を調べた結果、アイコンタクトは mPFC に直接的な影響を与え、その mPFC を介して MNS の一部である STS との機能的な結合の強度を調整することで、模倣を制御することが明らかとなった (図 1)。まとめると、Wang et al. (2011b) の結果は、自己に向けられた社会的シグナルであるアイコンタクトという高次の情報が、MNS による模倣行動をトップダウン的に制御していることを示している。

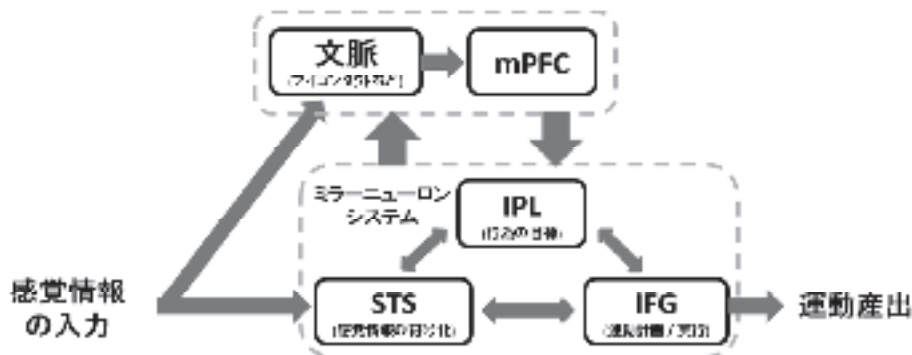


図 1. 模倣に関する脳の情報処理モデル (Wang & Hamilton, 2012 を一部改変)

STORM 仮説は、自閉症者における自発的な模倣の脆弱性についてもうまく説明する (Vivanti & Hamilton, 2014)。例えば、自閉症児は、社会的シグナルの知覚を必ずしも必要としない目標指向的動作については、その模倣スコアが定型発達児と変わらない。しかし、社会的シグナルの知覚が必要となる無意味な動作の模倣スコアは、自閉症児は定型発達児よりも有意に低くな

る (Hobson & Hobson, 2008)。STORM 仮説によれば、自閉症者における無意味な動作の模倣の脆弱性は、彼らの社会的シグナルの知覚の異質性を反映していると考えられる。

以上の成人研究の知見から、音声模倣には、感覚-運動統合の神経機構である MNS が関わりと考えられる。さらに、STORM 仮説より、音声模倣には MNS の働きによる実現だけでなく、自己に向けられた社会的シグナル (i.e. アイコンタクト) という高次な情報の影響を受ける可能性がある。したがって、音声模倣メカニズムとその発達過程を探るには、MNS の発達に加えて、社会的シグナルの知覚の発達を含む双方の視点が必要であろう。次章では、これら 2 つの観点から、主に乳児期の音声模倣メカニズムとその発達過程について言及する。

### 3. 音声模倣メカニズムに関する発達研究

上述した成人研究の知見から、MNS と自己に向けられた社会的シグナルの知覚の発達が、模倣の産出までのプロセスにおいて重要であると考えられる。この両者は、それぞれどのように発達し、音声模倣と関連しうるのだろうか。本節では、この両者の発達過程について紹介し、乳児期における音声模倣との関連性を考察した上で、今後の研究で実証すべき課題を述べる。

#### 3-1. 音声模倣に関わる MNS の発達：乳児期の知見から

MNS は、知覚した他者の動作を自己の内的な運動表象に対応づける働きをする。音声模倣の文脈では、発話音声 (聴覚情報) や口唇部運動を含む発話 (視-聴覚情報) を知覚する際に、感覚情報の符号化を担う STS に加え、自身の発話産出に関わる脳部位である IFG が活動する (Skipper, Nusbaum, & Small, 2005)。このような、発話音声や口唇部運動を含む発話に関する感覚情報の入力に対する運動野の活動は、生後どのように発達するのだろうか。Imada et al. (2006) は、MEG を用いて、新生児、6 ヶ月児、12 ヶ月児が母音/a/と子音+母音/pa/を継時的に聴取した際のミスマッチ陰性電位 (MMN; mismatch negativity) を記録した。この MMN は、継時的に提示された 2 つの情報を区別している時にみられる脳の電位反応である。その結果、感覚 (聴覚) 情報の符号化を担う上側頭領域は、新生児期からすでに活動することが示された。しかし、発話産出を担うブローカ野 (IFG に対応) は、新生児期では有意な脳活動は認められなかった。一方で、自身で音声を産出するようになる 6 ヶ月児、12 ヶ月児では、ブローカ野において有意な脳活動が認められた。このことは、音声模倣に関連する MNS が、生後半の乳児期から機能し始めている可能性を示している。ただし、MNS と音声模倣の関連については、未だに実証はされていない。Imada らの知見は、音声模倣に関連する MNS が、自身の発話産出経験に依り発達している可能性を示唆している。また、MNS は、感覚-運動統合システムであると考えられていることから、「感覚情報の入力から運動産出」という情報処理だけでなく、「運動能力が感覚情報の入力に影響を及ぼすこと」の重要性も指摘されている (e.g., Rauschecker & Scott, 2009)。リーチング運動に関しては、乳児期の自己の運動能力が、他者の行為理解 (他者のリーチングに対する予測的視線運動) に影響を及ぼしている可能性が示唆されている (Kanakogi & Itakura, 2011)。乳児は、生後 3 ヶ月前後から/a/, /i/, /u/などの母音を発話し始め、やがて/ba/, /da/, /pa/などの子音を含む音節を発話するようになる。これらを考慮すると、乳児期において自己のもつ構音能力が、音声模倣のしやすさに影響を及ぼしている可能性が考えられる。しか

し、乳児期にこの関係性を実証した知見はないため、今後検証していく必要があるだろう。

発話に関連する感覚-運動の比較照合が行なわれる過程を直接的に実証した知見としては、筋電図 (EMG; electromyography) を用いた研究が挙げられる。例えば, Berger & Hadley (1975) は、成人が他者の発話の映像を観察した時には、アームレスリングの映像を観察するよりも、自身の唇の筋電活動がより強くなることを示した。このことは、他者の運動を観察した際に、観察した運動の身体部位と同じ自己の身体部位が選択的に活性化される可能性を示唆している。このように、筋線維から発生する微細な筋肉からの活動電位を捉えることができる筋電図は、音声模倣の評価にも有用な指標であると考えられる。他方、fMRI や MEG などの神経科学的指標は、運動関連の脳活動部位や情報処理過程を特定することには優れているが、産出される運動反応を計測することは難しい。双方の指標を研究目的に合わせて用いることで、音声模倣メカニズムとその発達過程を検証する研究が行われていくことが望まれる。

### 3-2. 音声模倣に関わる MNS の発達：新生児期における可能性

これまでの知見から、乳児期には音声模倣に関連する MNS が機能していると考えられる。では、新生児期にはこの MNS は機能しているのだろうか。Lepage & Théoret (2007) は、生まれた時点で、原初的な MNS が仲介して感覚情報と運動情報を対応づけている可能性に言及している。Beachemin et al. (2010) は、ヒト新生児を対象に、母親、又は見知らぬ他者による発話音声 (母音/a/) を聴取時の脳反応を事象関連電位 (ERP; Event-related potential) により計測した。その結果、母親の声は、言語の処理に関連する左側頭部の活動を誘発した。一方で、見知らぬ他者の声は、音声一般の処理に関連する右側頭部の活動を誘発した。重要なことに、母親の声と見知らぬ他者の声に共通した脳反応が、右中心溝の電極で認められた。この右中心溝の脳反応は、運動前野又は補足運動野の活動を反映していると考えられる。このことから、新生児期にはすでに音声入力に対する運動情報の処理に関連した神経機構が存在している可能性が明らかとなった。ただし、この知見は Imada et al. (2006) とは一見矛盾しており、新生児期の音声入力に対する運動情報の処理に関する神経機構が自身の音声発話経験に基づくものであるのかについては議論の余地がある。Mampe, Friederici, Christophe, & Wermke (2009) は、胎内での母親声の聴取経験が、新生児期における自身の発声 (泣き声のイントネーション) に反映されている可能性を示す研究を報告している。彼らの研究の結果、語尾が上がる特徴をもつフランス語圏の新生児は、発声の後半にイントネーションのピークをもつ泣き声を示し、語尾が下がる特徴をもつドイツ語圏の新生児は、発声の前半にイントネーションのピークをもつ泣き声を示すことが明らかとなった。Mampe らは、胎内での音声聴取経験 (感覚情報の入力経験) が、胎外に出て間もない新生児の発声 (運動) に何かしらの影響を及ぼしている可能性を指摘する。

以上から、感覚-運動統合の神経機構である MNS の原初的な形体は、新生児期から存在している可能性が示唆された。ただし、この新生児期の神経機構が、乳児期以降にみられるものと同一であるかどうか、また、乳児期同様、音声模倣と関連しているかは不明なままである。

### 3-3. 社会的シグナルの知覚の発達

MNS に加えて、音声模倣の生成において重要であると考えられる自己に向けられた社会的シ

グナルの知覚 (Wang & Hamilton, 2012) は、生後どのように発達するのだろうか。また、社会的シグナルの知覚は、MNS による音声模倣の生成にどのように影響を及ぼすのだろうか。

定型発達児は、外部環境にあるヒトの顔、声、身体運動に関連する刺激を生後すぐに区別して選好を示す (Farroni et al., 2005; Simion et al., 2008; Vouloumanos & Werker, 2007)。これらのヒトに関連する刺激を、総称して社会的シグナルと呼ぶ。社会的シグナルに応答することは、他者からの学習機会を増やし、結果として社会的認知能力の発達につながる (Dawson, 2008)。さらに、社会的シグナルへの応答は、社会的認知能力の発達を担う脳神経回路の形成に広く影響を与えると考えられている (Dawson, 2008)。社会的シグナルの応答に関わる代表的な脳部位としては、感覚情報の符号化に関与することで知られている STS が挙げられる。STS は、その具体的な役割として、ヒトの口の動きを含む音声や視線などのコミュニケーションにおいて重要となる社会的シグナルの知覚処理を担う (Redcay, 2008)。また、アイコンタクトのような他者から自己に向けられた社会的シグナルの知覚については、主に mPFC がその役割を担う (Kampe, Frith, & Frith, 2003)。STORM 仮説が示しているように、自己に向けられた社会的シグナルは、模倣行動を制御し、促進する効果をもつ (Wang & Hamilton, 2012)。このような社会的シグナルの知覚は、どのように発達し、音声模倣の生成に貢献しうるのだろうか。先述した図 1 の模倣に関する脳の情報処理モデルから考えると、音声模倣の生成には、1) 感覚情報の入力から MNS に直接的に情報が伝達される経路と、2) mPFC を介して MNS (STS) を制御する経路の 2 つがあると考えられる。前者の経路は、音声模倣に重要となる発話音声 (聴覚情報) と口の動き (視覚情報) の知覚に関与し、MNS の発達に関与する。後者の経路は、アイコンタクトなどの自己に向けられた社会的シグナルの知覚に関与する。続いて、この 2 つの経路に関する社会的シグナルの知覚の発達についてそれぞれ述べ、音声模倣との関連について論じる。

まず、感覚情報の入力から MNS に直接的に情報が伝達される経路についてである。上述したように、音声模倣に関連する MNS が、生後半の乳児期から機能し始めている可能性は実証されている (Imada et al., 2006)。ここでは、乳児期のどのような感覚情報の入力経験が、音声模倣に関連する MNS の発達に寄与するかについて議論する。乳児は、生後 3 ヶ月から 5 ヶ月の間に母音を、7 ヶ月から規準喃語を発話し始める。この規準喃語を発話し始める時期に、乳児は発話者 (母語話者) の口唇部に注意を向けるようになる (Lewkowicz & Hansen-Tift, 2012)。このような発話に関連する感覚情報の入力は、乳児期の MNS の発達に寄与している可能性がある。発話知覚の文脈ではないが、ガラガラを鳴らしている他者を観察する経験を積むと、乳児は経験したガラガラの音声を聴取した場合に、MNS が活動するようになることが示されている (Paulus, Hunnius, & Bekkering, 2013)。このことは、乳児が他者の感覚-運動情報を知覚する経験により、MNS の発達に影響を及ぼす可能性を示している。しかし、他者発話の知覚経験と MNS の発達の関連については未だに実証されていない。また、発話者への注視パターンは、言語獲得とも関連する可能性が示されている。例えば、6 ヶ月児時点で発話者の口を注視していた乳児ほど、12 ヶ月時点での言語理解スコアが高くなる (Imafuku & Myowa-Yamakoshi, 2012)。このような知見は、発話に関連する感覚情報入力の個人差と言語獲得との関連性を示唆する重要な知見である。では、発話に関連する感覚情報の入力の経験が、どのように MNS の発達や音声模倣能力と関連して、言語獲得に寄与しうるのだろうか。今後、乳児期における発話情報

入力の個人差とMNSの発達、及び音声模倣との関連性を体系的に示す研究を行う必要がある。

次に、mPFCを介してMNS(STS)を制御する経路についてである。この経路には、アイコンタクトなどの他者から自己に向けられた社会的シグナルを知覚することが関連する。このような自己に向けられた視線(アイコンタクト)の知覚は、新生児期からみられることが知られている(Farroni, Csibra, Simion, & Johnson, 2002)。ただし、新生児期には上丘-視床枕-扁桃体という皮質下の経路が、アイコンタクトの検出を担うと考えられている(Johnson, 2005)。一方で、乳児期には、アイコンタクトの知覚の一端をmPFCが担う可能性を示唆する知見がある(Grossmann, Parise, & Friederici, 2010)。Grossmannらは、5ヶ月児を対象に、アイコンタクトありの顔刺激となしの顔刺激を提示し、その際の前頭葉の脳活動を近赤外分光法(NIRS; near-infrared spectroscopy)を用いて調べた。その結果、アイコンタクトなしの場合に比べて、アイコンタクトありの場合に、mPFC領域でより強い脳活動がみられた。また、自己に向けられた社会的シグナルの知覚におけるmPFCの関与は、視覚情報(アイコンタクト)のみならず、聴覚情報においても確認されている。Imafuku, Hakuno, Uchida-Ota, Yamamoto, & Minagawa (in press)は、生後6ヶ月の乳児を対象に、自己に向けられた社会的シグナルの1つである自己の名前と他者の名前を聴取時の前頭部の脳活動を、NIRSを用いて調べた。その結果、自己の名前を聴取している際に、他者の名前の聴取時に比べて、より強いmPFCの活動が誘発されることがわかった。これらの知見は、生後半の乳児が、すでに自己に向けられた社会的シグナルを選択的に知覚処理している可能性を示している。では、乳児期にみられる自己に向けられた社会的シグナルの知覚は、どのように音声模倣と関連しうるのだろうか。現在のところ、乳児期において、自己に向けられた社会的シグナルが、MNSによる音声模倣をどのように制御しているかを実証した知見はない。ヒト乳児を対象に、自己に向けられた社会的シグナルが、発達的にどのように音声模倣を制御するのかについて、実証的な研究を行う必要があるだろう。

以上から、感覚情報の入力からMNSに直接的に情報が伝達される経路は、乳児期にはすでに機能している可能性がある。また、乳児期において、自己に向けられた社会的シグナルの知覚に、mPFCが関与していることを示す知見は蓄積されている。しかし、mPFCを介してMNS(STS)を制御する経路が機能しているかどうかは未だに明らかでなく、行動学的にも、乳児期においてこの可能性を指示する知見は存在しない。今後は、行動学的、神経科学的な指標を用いて、双方の経路が音声模倣に及ぼす影響について検証することで、音声模倣の生成過程をより詳細に明らかにしていく必要がある。

## おわりに

本稿で議論してきた事項を3点にまとめ、今後の音声模倣メカニズムとその発達過程に関する研究について展望する。第1に、新生児期から乳児期にかけての音声模倣に関する発達研究をまとめ、参加児、刺激、評価(反応)、実験方法、結果について記述した。その結果、新生児期から乳児期にかけて、児は口形だけの模倣に加えて、音声を伴う模倣が可能になることがわかった。さらに、新生児期から乳児期にかけて、音声や発話に関する感覚情報を運動情報に変換して、それを再現するまでの反応潜時が早くなることがわかった。これは、音声模倣を支える神経科学的基盤が成熟したことを反映している可能性があることを示している。第2に、成

人を対象とした神経科学的研究の知見に基づき、音声模倣のメカニズムについて検討した。その結果、MNS と社会的シグナルの知覚の発達、音声模倣の生成において重要である可能性を示唆した。第3に、この両者の発達過程をまとめ、それぞれがいかに音声模倣と関連しうるかについて考察を行った。その結果、感覚情報の入力から MNS に直接的に情報が伝達される経路と、mPFC を介して MNS (STS) を制御する経路の双方の経路について、音声模倣に及ぼす影響を発達の観点から検証することが今後の課題であることがわかった。

新生児期から乳児期の音声模倣について調べている発達研究では、今までにそのメカニズムは言及されてこなかった。音声模倣のメカニズムとその発達過程を明らかにするためには、乳児期における音声模倣と、その神経科学的基盤であると考えられる MNS との発達の関連を検証する必要がある。さらに、STORM 仮説より、アイコンタクトなどの高次の情報が、音声模倣を制御している可能性が考えられる。これらを実証していくことで、乳児期における音声模倣のメカニズムとその発達過程を解明し、音声模倣研究の枠組みを発展させていきたい。

#### 謝辞

本稿の執筆にあたりご指導を賜りました、京都大学大学院教育学研究科の明和政子先生に心より御礼を申し上げます。また、平成 25 年度日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費 13J04767）の助成を受けた。

#### 引用文献

- American Psychiatric Association. (2013). Diagnostic and statistical manual of mental disorders. Fifth Edition: DSM-5. Washington, D. C: American Psychiatric Association.
- Beachemin, M., Gonzalez-Frankenberger, B., Tremblay, J., Vannasing, P., Martinez-Montes, E., Belin, P., et al. (2010). Mother and stranger: an electrophysiological study of voice processing in newborns. *Cerebral Cortex*, 21, 1705–1711.
- Berger, S. M., & Hadley, S. W. (1975). Some effects of a model's performance on an observer's electromyographic activity. *American Journal of Psychology*, 88, 263–276.
- Chen, X., Striano, T., & Rakoczy, H. (2004). Auditory–oral matching behavior in newborns. *Developmental Science*, 7, 42–47.
- Coulon, M., Hemimou, C., & Streri, A. (2013). Effects of seeing and hearing vowels on neonatal facial imitation. *Infancy*, 18, 782–796.
- Dawson, G. (2008). Early behavioral intervention, brain plasticity, and the prevention of autism spectrum disorder. *Development and Psychopathology*, 20, 775–803.
- Farroni, T., Csibra, G., Simion, F., & Johnson, M. H. (2002). Eye contact detection in humans from birth. *Proceedings of the National Academy of the United States of America*, 99, 9602–9605.
- Farroni, T., Johnson, M. H., Meron, E., Zulian, L., Faraguna, D., & Csibra, G. (2005). Newborns' preference for face-relevant stimuli: Effects of contrast polarity. *Proceedings of the National Academy of the United States of America*, 102, 17245–17250.
- Ferrari, P. F., Vanderwert, R. E., Paukner, A., Bower, S., Suomi, S. J., & Fox, N. A. (2012). Distinct EEG

- amplitude suppression to facial gestures as evidence for a mirror mechanism in newborn monkeys. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24, 1165–1172.
- 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, 201–205.
- Heiser, M., Iacoboni, M., Maeda, F., Marcus, J., & Mazziotta, J. C. (2003). The essential role of Broca's area in imitation. *European Journal of Neuroscience*, 17, 1123–1128.
- Hobson, R. P., & Hobson, J. A. (2008). Dissociable aspects of imitation: a study in autism. *Journal of Experimental Child Psychology*, 101, 170–185.
- Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, 286, 2526–2528.
- Imada, T., Zhang, Y., Cheour, M., Taulu, S., Ahonen, A., & Kuhl, P. K. (2006). Infant speech perception activates broca's area: a developmental magnetoencephalography study. *Neuroreport*, 17, 957–962.
- Imafuku, M., Hakuno, Y., Uchida-Ota, M., Yamamoto, J., & Minagawa, Y. (in press). “Mom called me!” behavioral and prefrontal response to self-name uttered by mother's voice in infants. *Neuroimage*. doi: 10.1016/j.neuroimage.2014.08.034
- Imafuku, M., & Myowa-Yamakoshi, M. (June 2012). Action-scanning and language-acquisition patterns in human infants. 18th Biennial International Conference on Infant Studies, Minneapolis, USA.
- 乾敏郎 (2013). 脳科学からみる子どもの心の育ち. ミネルヴァ書房.
- Iverson, J. M., & Fagan, M. K. (2004). Infant vocal–motor coordination: precursor to the gesture–speech system? *Child Development*, 75, 1053–1066.
- Johnson, M. H. (2005). Subcortical face processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 6, 766–774.
- Jones, S. S. (2007). Imitation in infancy: the development of mimicry. *Psychological Science*, 18, 593–599.
- Kampe, K. W., Frith D., & Frith, U. (2003). “Hey John”: signals conveying communicative intention toward the self activate brain regions associated with “mentalizing,” regardless of modality. *The Journal of Neuroscience*, 23, 5258–5263.
- Kanakogi, Y., & Itakura, S. (2011). Developmental correspondence between action prediction and motor ability in early infancy. *Nature Communications*, 2. doi:10.1038/ncomms1342
- Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M. A., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*, 297, 846–848.
- Kuhl, P. K. & Meltzoff, A. N. (1996). Infant vocalization in response to speech: vocal imitation and developmental change. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100, 2425–2438.
- Lepage, J. F., & Theoret, H. (2007). The mirror neuron system: grasping others' actions from birth? *Developmental Science*, 10, 513–523.
- Lewkowicz, D. J., & Hansen-Tift, A. M. (2012). Infants deploy selective attention to the mouth of a talking face when leaning speech. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 1–6.
- Mampe, B., Friederici, A. D., Christophe, A., & Wermke, K. (2009). Newborns' cry melody is shaped by their native language. *Current Biology*, 19, 1–4.

- Nishitani, N., Avikainen, S., & Hari, R. (2004). Abnormal imitation-related cortical activation sequences in asperger's syndrome. *Annals of Neurology*, 55, 558–562.
- Nishitani, N., & Hari, R. (2002). Viewing lip forms: cortical dynamics. *Neuron*, 36, 1211–1220.
- Over, H., & Carpenter, M. (2012). Putting the social into social learning: explaining both selectivity and fidelity in children's copying behavior. *Journal of Comparative Psychology*, 126, 182–192.
- Papoušek, M., & Papoušek, H. (1989). Forms and functions of vocal matching in interactions between mothers and their precanonical infants. *First Language*, 9, 137–158.
- Patterson, M., & Werker, J. F. (1999). Matching phonetic information in lips and voice is robust in 4.5-month-old infants. *Infant Behavior and Development*, 22, 237–247.
- Paulus, M., Hunnius, S., & Bekkering, H. (2013). Neurocognitive mechanisms subserving social learning in infancy: Infants' neural processing of the effects of others' actions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 8, 774–779.
- Rauschecker, J. P., & Scott, S. K. (2009). Maps and streams in the auditory cortex: nonhuman primates illuminate human speech processing. *Nature Neuroscience*, 12, 718–724.
- Redcay, E. (2008). The superior temporal sulcus performs a common function for social and speech perception: implications for the emergence of autism. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 32, 123–142.
- Rizzolatti, G., & Luppino, G. (2001). The cortical motor system. *Neuron*, 31, 889–902.
- Simion, F., Regolin, L., & Bulf, H. (2008). A predisposition for biological motion in the newborn baby. *Proceedings of the National Academy of the United States of America*, 105, 809–813.
- Skipper, J. I., Nusbaum, H. C., & Small, S. L. (2005). Listening to talking faces: motor cortical activation during speech perception. *Neuroimage*, 25, 76–89.
- Suddendorf, T., Oostenbroek, J., Nielsen, M., & Slaughter, V. (2013). Is newborn imitation developmentally homologous to later social-cognitive skills. *Developmental Psychology*, 55, 52–58.
- Vivanti, G., & Hamilton, A. (2014). Imitation in autism spectrum disorders. In Volkmar, F., Paul, R., Rogers, S., Pelphrey, K. (Eds) *The Handbook of Autism and Developmental Disorders*, 4th Edition, Vol 1 - Diagnosis, development and brain mechanisms, pp. 278–301, New York, Wiley.
- Vouloumanos, A., & Werker, J. F. (2007). Listening to language at birth: evidence for a bias for speech in neonates. *Developmental Science*, 10, 159–164.
- Wang, Y., & Hamilton, A. (2012). Social top-down response modulation (STORM): a model of the control of mimicry in social interaction. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 1–10.
- Wang, Y., Newport, R., & Hamilton, A. (2011a). Eye contact enhances mimicry of intransitive hand movements. *Biology Letter*, 7, 7–10.
- Wang, Y., Ramsey, R., & Hamilton, A. (2011b). The control of mimicry by eye contact is mediated by medial prefrontal cortex. *The Journal of Neuroscience*, 31, 12001–12010.

(日本学術振興会特別研究員 教育方法学講座 博士後期課程2回生)

(受稿2014年9月1日、受理2014年11月20日)

## 乳児期における音声模倣のメカニズムとその発達過程

今福 理博

音声模倣は、他者との face-to-face の対面場面で起こり、聴覚 (音声) 情報を必要とする。この音声模倣は、新生児期や乳児期という早い時期に発達する感覚-運動統合能力の 1 つであり、周囲の言語環境の音声进行学习することや情動情報を伝達することに重要な役割を果たすと考えられている。しかし、乳児期における音声模倣のメカニズムとその発達過程については明らかでない点が多い。本稿では、(1) 新生児期から乳児期にかけての音声模倣の発達研究の概括、(2) 成人における音声模倣に関する行動学、神経科学的な知見の概括、及び(3) 乳児期の音声模倣のメカニズムとその発達過程について考察し、今後の研究の方向性について論じた。

## Mechanisms and Developmental Process of Vocal Imitation in Infancy

IMAFUKU Masahiro

Vocal imitation takes place in the context of face-to-face interaction with the others and requires auditory (speech) information. This is one of the sensory-motor integration abilities and progress at early stage such as newborn and infant period. In addition, vocal imitation has been considered to play the crucial role in vocal learning in surrounding linguistic environment and transmission of emotion information. However, there is little evidence about mechanisms and developmental process of vocal imitation in infancy. In this review paper, I mentioned three components: (1) the summary of development research on voice imitation from the newborn to infant stage, (2) the summary of behavioral and neuroscientific evidence on voice imitation in adults, and (3) consideration of the mechanism and developmental process of voice imitation in infancy and the directions for future research.

**キーワード：** 音声模倣、ミラーニューロンシステム、社会的シグナル、乳児期

**Keywords:** Vocal imitation, Mirror neuron system, Social signal, Infancy

