

# 初期発声発達における社会的相互作用バイアスの役割

How infant-caregiver interactions affect the early development of vocalization

浅田 稔

Minorou Asada

大阪大学大学院 工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka University

Vocal communication is a unique means to bilaterally exchange messages in real-time. Vocal interactions between an infant and a caregiver seems to be the developmental origin of such communication, and one of the big mysteries of how the infant learns to vocalize the mother tongue of the caregiver. Many theories claim to explain the infant's capability of imitation based on acoustic matching. However, acoustic qualities of the infant and the caregiver are quite different and therefore cannot fully explain imitation. Instead, the interaction itself may have an important role, but the mechanism is still unclear. In this article, we review studies addressing this problem using constructive approaches based on cognitive developmental robotics. First, we review the early development of infant speech perception and articulation from observational studies in developmental psychology and neuroscientific imaging studies. Next, computational modeling approaches are explained. Then, constructive approaches with real robot experiments and computer simulations are introduced to discuss how infant-caregiver interactions affect the early development of vocalization. Finally, future issues pertaining to the development of language communication are discussed.

## 1. はじめに

言語コミュニケーションのヒトにユニークな能力であり、進化的にも発達的にも多様にアプローチする必要がある [Deacon 98]. 本稿では、発達の過程に焦点を置き、特に、養育者の社会的相互作用のバイアスが初期の発声発達に影響を与えていることを、著者らのグループを主に参照しながら様々な観点から議論する [浅田 12, Yoshikawa 03, Miura 07, Ishihara 09, Miura 12, Howard 14]. 基礎となる考え方は、認知発達ロボティクス [Asada 09, Cangelosi 15] であり、パラダイムシフトの可能性や人工共感にも及ぶ [Asada 11, Asada 14].

## 2. 音声知覚と構音の初期発達：行動学的視点

発達心理の分野では、乳児と養育者間の相互作用の重要性が主張されていた [Michael H. Goldstein 08]. ここでは、いくつかを概観する。表 1 にまとめを示す。

言語非依存から言語依存に発達する [Werker 02]. ユニバーサルな母音の知覚 [DeCasper 86, Trehub 73, Eimas 74] から、母語によるマグネット効果 [Kuhl 91, Kuhl 92] の発生、R-L 識別の退化 [Eimas 74, D.Eimas 75]. 乳児の範疇化能力 [Kuhl 79, Kuhl 83], さらに、声道の正規化能力の示唆 [Lieberman 80] にまで至る。

初期の音声もどき [Oller 80, Stark 78] から母音に似た発声、さらに養育者の音声に適応していく [Kuhl 96]. この過程で、唇や舌の制御 [Kent 81], 喉頭の降下 [Sasaki 77], 加えて神経系の発達にか寄与 [Oller 80].

養育者のマザリーズ [Liu 03] への乳児の好み [Cooper 90] とそれによる乳児の発声頻度の向上と母語への偏り [Werker 07], 相互模倣による更なる相互作用 [Kokkinaki 00] の促進が見られる [Bloom 87, Masataka 94, Pélaez-Nogueras 96].

表 1: 初期音声知覚・構音・相互作用発達

M	Development of Perception	Interaction	Development of Articulation
-1	Discrimination between mother's voice and other's [DeCasper and Fifer, 1980]	Motherese [Werker et al., 2007, Liu et al., 2003] Infants' preference to motherese [Cooper and Aslin, 1990]	
-2	Discrimination /s/ & /l/ and /l/ & /u/ [Trehub, 1970] ~4		
-3	Discrimination /b/ & /p/, /d/ & /g/, and /r/ & /l/ [Eimas et al., 1971, Eimas, 1974, 1975] Imitation of mother's voice with different f [Lieberman, 1980]	Caregiver's imitation with high frequency [Kokkinaki and Kugiumtzakis, 2000]	Cooing [Oller, 1980, Stark, 1978]
-4	2~ Discrimination /a/ & /i/ and /i/ & /u/ [Trehub, 1970]	Infants' promotion of mother's contingent responses [Bloom et al., 1987] Infants' vowel-like cooing promotes mother's imitation [Pelaez-Nogueras et al., 1996]	Laughing, lib vibration, screechy voice, scream, whisper [Oller, 1980] Shape change in oral cavity, improvement of tongue movements [Kent, 1981a,b] Decent of epiglottis [Sasaki et al., 1977]
-5		Mother's imitation promotes infant's cooing [Pelaez-Nogueras et al., 1996]	Transient bubbling (gone in case of infants with auditory disorder) [Oller, 1986]
-6	Normalization of vocal tract length, magnet effect [Kuhl, 1979, 1983]	Infant's responses to motherese [Masataka, 1992]	

## 3. 音声知覚・構音の神経心理学的研究

音声とジェスチャーの強いリンクが示唆されている [Raymond W. Gibbs 06]. 言語と系列動作に共通の脳領域があり [Ojemann 94], 動詞の黙読時に運動野の EEG 活動が記録されている [Pulvermueller 99]. PET では、左の運動前野が (動物名などではなく) 道具に関する言葉により活動する [Grafton 97]. MRI では、手の動作を考えただけでブローカ野が活動する [Tanaka 02]. ブローカ野は、運動実行時に [Iacobini 96], 他者の行動知覚時に [Decety 97], さらに、メンタルシミュレーション時にも活動する [Grafton 97]. これらから、ブローカ野は、音声生成のみでなく、身体運動系列全般に関与する [Grezes 01, Rizzolatti 98].

言語能力にほど遠い 3ヶ月時ですら言語音声にตอบสนองする MRI 研究がある (逆再生時にはなし) [Dehaene-Lambertz 02]. 新生児にも同様の傾向がある [Gervain 08]. MEG 研究では、

連絡先: 浅田 稔, 大阪大学大学院 工学研究科, 〒 565-0871  
大阪府吹田市山田丘 2-1, Tel.(06)6879-7347, Fax.-4843,  
asada@ams.eng.osaka-u.ac.jp

音声運動野は初期(新生児)には、音声に応答しないが、発声とその知覚経験により活性化される [Imada 06].

#### 4. モデリングアプローチ

モータ理論は [Lieberman 67], 当初から、音声知覚と構音過程の強い連携を示唆してきた。40年後に、三つの主張が再確認された [Galantucci 06].

1. 音声処理は特別 [Lieberman 89]. → 支援証拠少なく逆に、一般知覚との共通性がある [Massaro 99].
2. 音声知覚は、ジェスチャー知覚 [Lieberman 85]. → 支援証拠 [Browman 95, Kelso 95]
3. 運動システムは、音声知覚のためにリクルートされる [Lieberman 67]. → MNS に示唆されるように、運動システムが知覚を意味づける。

音声とジェスチャーの関係は、相互に引き込み動的過程を構成する [Iverson 99].

音声知覚のモデリングでは、事前知識を必要とせずに、英語と日本語で母音カテゴリーを EM アルゴリズムによって獲得するモデル [Vallabha 07] や、mixture of Gaussians を用いた統計学習による音声カテゴリー獲得モデルがある [McMurray 09].

構音過程のモデリングでは、ニューラルネットワークを用いた DIVA (Directions Into Velocities of Articulators) モデル [Guenther 94] が著名である。バブリング期の運動パラメータとそれによる得られる感覚の結合学習もある [G. 04]. RNNPB を用いて、連続音声空間から母音を自己組織化する研究もある [Kanda 09].

複数エージェントによる言語創発のモデル化では、プリミティブな音声構音能力しかないエージェント間の相互作用により、離散化した音声コードを自己組織化する手法 [Oudeyer 05] や、人間の “combinatorial phonology” を進化させるモデル [Boer 10] などが提案されている。

マルチモダルからの言語獲得モデルでは、音声処理、コンピュータビジョン、機械学習を用いて単語を獲得するモデル [Roy 02], 身体運動などによって指示される意図が重要な働きをもつ乳幼児語彙学習モデル [Yu 05], 相互排他規範に基づく曖昧さ最小化による語彙学習モデル [Yoshikawa 08], 相互に拘束しあうマルチモダルマッピングに基づき、音声模倣と語彙獲得の同時発達モデル [Sasamoto 10], 好奇心に基づく語彙獲得もできる [Ogino 06] などが提案されている。

この他にも多くのモデルが提案されているが [Rasanen 12], ほとんどがエージェント間で同じ音声知覚・発声システムの共有が仮定されている。しかし、親子間では、声道長、喉頭の位置などの違い [Vorperian 07] により、音声の質がかなり異なる [Howard 14]. これがポイントで、異なる音声特性を超えて、共通の母音が獲得できるか (対応付け問題)?

表 2 に上記アプローチをまとめた。これらは、図 1 にまとめられる。すなわち、模倣的相互作用を通じて、共有母音を自己組織化する手法 [Oudeyer 05, Boer 10], 養育者の発声から養育者の母音カテゴリーを統計的に推定する手法 [McMurray 09, Vallabha 07, Yu 05, Roy 02, Sasamoto 10, Yoshikawa 08, Ogino 06], 発声の自己モニタリングを通じて運動制御が発達するモデル [Kanda 09, Guenther 94, G. 04] に分かれる。

対応付け問題を解決するには、音声相互作用の全体のダイナミクスを考慮する必要がある。これは、図 1 の大きな破線楕円であり、表 2 の最下段に対応する。

表 2: 音声知覚・構音・相互作用のモデリング手法

	Development of Perception	Correspondence between Perception and Other Modalities (ex., vision, articulation)	Development of Articulation
<b>No Interaction</b>	[Rasanen 12]	[Guenther et al. 06] [Guenther 94] [Kanda et al. 09] [Westermann & Miranda 04]	
<b>Caregiver's Scaffolding</b>	[McMurray et al. 09] [Vallabha et al. 08]	[Yu et al. 05] [Roy & Pentland 02]	
<b>Mutual Interaction</b>	[Boer & Zuidema 10]	[Sasamoto et al. 10] [Yoshikawa et al. 08] [Ogino et al. 06] [Oudeyer 05]	
<b>Mutual Interaction between Agents with Different Body Structures</b>		[Yoshikawa et al. 03] [Miura et al. 07, 12] [Ishihara et al. 09] [Howard & Messum 14]	

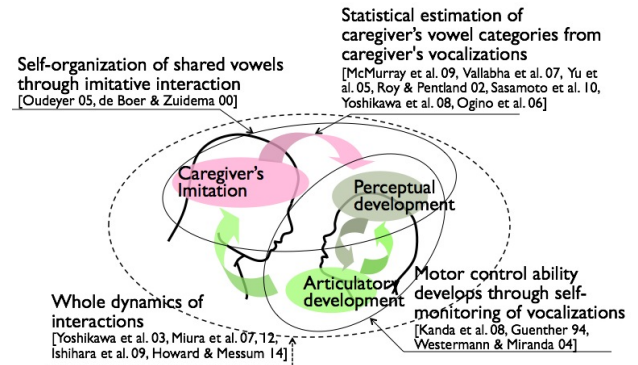


図 1: 音声コミュニケーションのモデリング手法 ([Ishihara 13] から摘要)

#### 5. 音声コミュニケーションの全体ダイナミクスのモデル化

##### 5.1 養育者の肯定的態度のバイアスの役割

一般に、予断や期待は、我々の知覚にバイアスを与える [Fisher 64]. 未熟な乳児の行動に対する養育者の肯定的な解釈や模倣は、乳児の社会的能力を発達させる [Rochat 04]. これを人間とロボットの間に関係に適応したのが Yoshikawa et al. [Yoshikawa 03] である。養育者のオウム返し模倣により “Burpy” と呼ばれるボーカルロボットが母音のカテゴリー及び発声能力を獲得する。

同様の実験で、Miura et al. [Miura 07] は、養育者に模倣される意味を単に対応付けを知らせるだけでなく、ロボットの発声を養育者の母語に導くことが大きいと議論している。これを定式化したのが、Ishihara et al. [Ishihara 09] で、感覚運動マグネット効果と自己鏡映効果の二つのバイアスの効果を示した。図 2 は、その相互模倣メカニズムである。これらの研究では、養育者は常々乳児を模倣すると仮定されているが、実際は 2 割以下で、それも完全ではない。Miura et al [Miura 12] は、この状況を考慮して、乳児 (学習者) 側の自己鏡映バイアスにより母音カテゴリー獲得を可能にした。

上記三つの著者らの研究を参考に、Howard and Messum [Howard 14] は、Elija と呼ばれるシミュレーション乳児を構築し、初期自己学習期間に獲得した音素 (母音, 子音) を固定化することで、養育者との実時間相互作用を可能にし、異なる言語間の音素差や単語の獲得にまで拡張した。

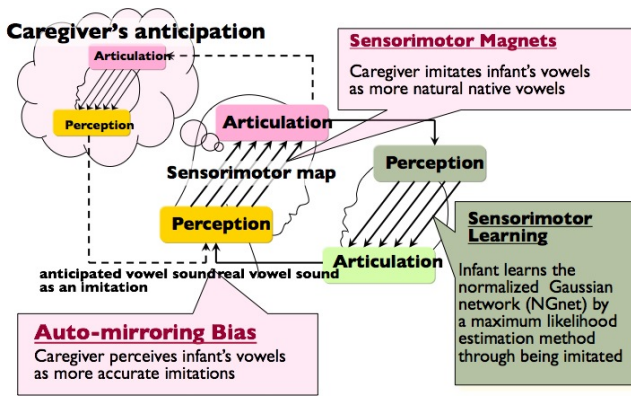


図 2: 相互模倣メカニズム ([Ishihara 13] から摘要)

表 3: 相互作用を主体とした 4 つの手法の比較

	独立した初期自己学習による要素発見	養育者の肯定的態度によるバイアス効果	学習者の戦略
A [Yoshikawa et al. 03]	なし。実ロボットをつかって、相互作用時にエネルギーや顕著性等の規範で学習	オウム返し模倣による教示。肯定的態度のバイアスあり。但し、バイアスの客観的証拠なし。	聴覚層と構音層内での SOM 学習とそれらの間のヘブ学習。後者はエネルギーや顕著性等の規範に修正
B [Miura et al. 07, 12]	なし。多数の離散固定要素準備。但し、相互作用時にエネルギーや顕著性等の規範で学習	非模倣が多い実際の応答パターンに基づく応答シミュレーション	自己鏡映バイアスによる要素音素の絞り込みと精鋭化
C [Ishihara et al. 09]	なし。連続空間のシミュレーション内に GMN として分散	感覚運動マグネットバイアスと自己鏡映バイアスによる相互作用モデル化。シミュレーションによる検証。	GMN による音楽表現とそのパラメータの相互作用時の調整
D [Howard & Messum 14]	あり。A や B と同じエネルギーや顕著性等の規範で初期要素発見	英語、ドイツ語、フランス語のネイティブ養育者による応答の解析により肯定的態度の影響の客観的検証。	初期学習で固定化した要素音素パターンの記憶と再生(相互作用)による精鋭化

## 6. 討論

以上討論してきた 4 つの研究 [Yoshikawa 03, Miura 07, Ishihara 09, Miura 12, Howard 14] について、それらを幾つかの項目で比較したまとめを表 3 に示す。この順で以降は、A, B, C, D で参照する。D の Eliza は、著者らの 3 つの研究 A, B, C のエッセンスをうまくとりまぜた結果、シミュレーション乳児で実時間の応答を可能にしている。そのポイントは、相互作用と独立した初期自己学習で選択した要素音素を固定化し、相互作用時はそれらを検索・再生するのみに徹したことである。選択過程の規範は A や B の規範になっている。相互作用時におけるバイアスの解析も A や C の例を参考にしていると思われる。単語学習では、固定した音素組合せによるもので、音素と音素の渡りなどに関するリアリティは望めず、空気の流体制御機構、人工声帯、舌や口唇を含む声道形状制御を可能にする実ボコーラルロボットの役割りはある [Sasamoto 13, Endo 14b, Endo 14a]。

## 謝辞

本稿をまとめるにあたり吉川雄一郎博士 (阪大)、石原尚博士 (阪大)、三浦勝司博士 (現: 富士通)、笹本勇輝博士 (現: 富士通) の協力を得た。ここに感謝する。また、科学研究費補助金特別推進研究 (24000012) の補助を受けた。

## 参考文献

[Asada 09] Asada, M., Hosoda, K., Kuniyoshi, Y., Ishiguro, H., Inui, T., Yoshikawa, Y., Ogino, M., and Yoshida, C.: Cognitive developmental robotics: a survey, *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 1, pp. 12–34 (2009)

[Asada 11] Asada, M.: Can cognitive developmental robotics cause a paradigm shift?, in Krichmar, J. L. and Wagatsuma, H. eds., *Neuromorphic and Brain-Based Robots*, pp. 251–273, Cambridge University Press (2011)

[Asada 14] Asada, M.: Towards Artificial Empathy, *International Journal of Social Robotics*, Vol. 6, p. (to appear) (2014)

[Bloom 87] Bloom, K., Russella, A., and Wassenberg, K.: Turn taking affects the quality of infant vocalizations, *Journal of Child Language*, Vol. 14, pp. 211–217 (1987)

[Boer 10] Boer, de B. and Zuidema, W.: Multi-agent simulations of the evolution of combinatorial phonology, *Adaptive Behavior*, Vol. 18, pp. 141–154 (2010)

[Browman 95] Browman, C. and Goldstein, L.: Dynamics and articulatory phonology, in Port, R. and Gelder, van T. eds., *Mind as motion: Explorations in the dynamics of cognition*, chapter 7, pp. 175–194, MIT Press (1995)

[Cangelosi 15] Cangelosi, A. and Schlesinger, M.: *Developmental Robotics - From Babies to Robots -*, MIT Press (2015)

[Cooper 90] Cooper, R. P. and Aslin, R. N.: Preference for infant-directed speech in the first month after birth, *Child development*, Vol. 61, pp. 1584–1595 (1990)

[Deacon 98] Deacon, T. W.: *The Symbolic Species: The co-evolution of language and the brain*, W. W. Norton & Company, New York, London (1998)

[DeCasper 86] DeCasper, A. J. and Spence, M. J.: Prenatal maternal speech influences newborns' perception of speech sounds, *Infant Behavior and Development*, Vol. 9, pp. 133–150 (1986)

[Decety 97] Decety, J., Grezes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M., Procyk, E., Grassi, F., and Fazio, F.: Brain activity during observation of actions Influence of action content and subject's strategy, *Brain*, Vol. 120, pp. 1763–1777 (1997)

[Dehaene-Lambertz 02] Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S., and Hertz-Pannier, L.: Functional Neuroimaging of Speech Perception in Infants, *Science*, Vol. 298, pp. 2013–2015 (2002)

[D.Eimas 75] D.Eimas, P.: Auditory and phonetic coding of the cues for speech: discrimination of the /r-l/ distinction by young infants, *Perception and Psychophysics*, Vol. 18, pp. 341–347 (1975)

[Eimas 74] Eimas, P. D.: Auditory and linguistic processing of cues for place of articulation by infants, *Perception and Psychophysics*, Vol. 16, pp. 513–521 (1974)

[Endo 14a] Endo, N., Kojima, T., Ishihara, H., Horii, T., and Asada, M.: Design and Preliminary Evaluation of the Vocal Cords and Articulator of an Infant-like Vocal Robot "Lingua", in the *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. Vol.USB, Thu12-3.8 (2014)

[Endo 14b] Endo, N., Kojima, T., Sasamoto, Y., Ishihara, H., Horii, T., and Asada, M.: Design of an Articulation Mechanism for an Infant-like Vocal Robot "Lingua", in the *3rd Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems (Living Machines 2014)*, pp. 389–391 (2014)

[Fisher 64] Fisher, S.: Depressive affect and perception of up-down, *Journal of Psychiatric Research*, Vol. 2 (1), pp. 25–30 (1964)

[G. 04] G., W. and E., R. M.: A new model of sensorimotor coupling in the development of speech., *Brain and Language*, Vol. 89, pp. 393–400 (2004)

[Galantucci 06] Galantucci, B., Fowler, C. A., and Turvey, M. T.: The motor theory of speech perception reviewed, *Psychon Bull Rev.*, Vol. 13, pp. 361–377 (2006)

[Gervain 08] Gervain, J., Macagno, F., Cogoi, S., Penä, M., and Mehler, J.: The neonate brain detects speech structure, *Proceedings of National Academy of Science of the USA*, Vol. 105, pp. 14222–14227 (2008)

[Grafton 97] Grafton, S. T., Fadiga, L., Arbib, M., and Rizzolatti, G.: Premotor cortex activation during observation and naming of familiar tools, *Neuroimage*, Vol. 6, pp. 231–236 (1997)

[Grezes 01] Grezes, J. and Decety, J.: Functional Anatomy of Execution, Mental Simulation, Observation, and Verb Generation of Actions: A Meta-Analysis, *Human Brain Mapping*, Vol. 12, pp. 1–19 (2001)

[Guenther 94] Guenther, F. H.: A Neural Network Model Of Speech Acquisition And Motor Equivalent Speech Production Running title: Speech acquisition and motor equivalence, *Biological Cybernetics*, Vol. 72, pp. 43–53 (1994)

[Howard 14] Howard, I. S. and Messum, P.: Learning to Pronounce First Words in Three Languages: An Investigation of Caregiver and Infant Behavior Using a Computational Model of an Infant, *PLoS One*, Vol. 9, No. 10, pp. e110334: 1–21 (2014)



- [Iacobini 96] Iacobini, M., Woods, R. P., and Mazziotta, J. C.: Brain-behavior relationships: Evidence from practice effects in spatial stimulus-response compatibility, *J. Neurophysiol.*, Vol. 76, pp. 321–331 (1996)
- [Imada 06] Imada, T., Zhang, Y., Cheour, M., uTaulu, S., Ahonen, A., and Kuhl, P. K.: Infant speech perception activates Broca's area: a developmental magnetoencephalography study, *Neuroreport*, Vol. 17, No. 10, pp. 957–962 (2006)
- [Ishihara 09] Ishihara, H., Yoshikawa, Y., Miura, K., and Asada, M.: How Caregiver's Anticipation Shapes Infant's Vowel Through Mutual Imitation, *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 4, pp. 217–225 (2009)
- [Ishihara 13] Ishihara, H.: [http://www.gcoe-cnr.osaka-u.ac.jp/media/handouts/BU04\\_Ishihara.pdf](http://www.gcoe-cnr.osaka-u.ac.jp/media/handouts/BU04_Ishihara.pdf) (2013)
- [Iverson 99] Iverson, J. M. and Thelen, E.: Hand, Mouth and Brain The Dynamic Emergence of Speech and Gesture, *Journal of Consciousness Studies*, Vol. 6, No. 11–12, pp. 19–40 (1999)
- [Kanda 09] Kanda, H., Ogata, T., Takahashi, T., Komatani, K., and Okuno, H. G.: Continuous Vocal Imitation with Self-organized Vowel Spaces in Recurrent Neural Network, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4438–4443 (2009)
- [Kelso 95] Kelso, J. A. S. ed.: *Dynamic Patterns: the self-organization of brain and behavior*, MIT Press/ Bradford Books (1995)
- [Kent 81] Kent, R. D.: Sensorimotor aspects of speech development, in Aslin, R. N., Alberts, J. R., and Petersen, M. R. eds., *Development of perception: Vol.1*, pp. 161–189, Academic Press, New York (1981)
- [Kokkinaki 00] Kokkinaki, T. and Kugiumutzakis, G.: Basic aspects of vocal imitation in infant-parent interaction during the first 6 months, *Journal of reproductive and infant psychology*, Vol. 18, pp. 173–187 (2000)
- [Kuhl 79] Kuhl, P. K.: Speech perception in early infancy: Perceptual constancy for spectrally dissimilar vowel categories, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 66, pp. 1668–1679 (1979)
- [Kuhl 83] Kuhl, P. K.: Perception of auditory equivalence classes for speech in early infancy, *Infant Behavior and Development*, Vol. 6, pp. 263–285 (1983)
- [Kuhl 91] Kuhl, P. K.: Human adults and human infants show a "perceptual magnet effect" for the prototypes of speech categories, monkeys do not, *Perception & Psychophysics*, Vol. 50, pp. 93–107 (1991)
- [Kuhl 92] Kuhl, P. K., Williams, K. A., Lacerda, F., Stevens, K. N., and Lindblom, B.: Linguistic experience alters phonetic perception in infants by 6 months of age, *Science*, Vol. 255, pp. 606–608 (1992)
- [Kuhl 96] Kuhl, P. K. and Meltzoff, A. N.: Infant vocalizations in response to speech: Vocal imitation and developmental change, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 100, pp. 2415–2438 (1996)
- [Liberman 67] Liberman, A., Cooper, F., Sharikweiler, D., and Studdert-Kennedy, M.: Perception of the speech code, *Psychological Review*, Vol. 74, pp. 431–461 (1967)
- [Liberman 85] Liberman, A. M. and Mattingly, I. G.: The motor theory of speech perception revised, *Cognition*, Vol. 21, pp. 1–36 (1985)
- [Liberman 89] Liberman, A. M. and Mattingly, I. G.: A specialization for speech perception, *Science*, Vol. 243, pp. 489–494 (1989)
- [Lieberman 80] Lieberman, P.: On the development of vowel production in young children, in Yeni-Komshian, G. H., Kavanage, J. F., and Ferguson, C. A. eds., *Child phonology: Vol.1*, pp. 113–142, Academic Press, New York (1980)
- [Liu 03] Liu, H.-M., Kuhl, P. K., and Tsao, F.-M.: An association between mothers' speech clarity and infants' speech discrimination skills, *Developmental Science*, Vol. 6, pp. F1–F10 (2003)
- [Masataka 94] Masataka, N. and Bloom, K.: Acoustic Properties That Determine Adult's Preference for 3-Month-Old Infant Vocalization, *Infant Behavior and Development*, Vol. 17, pp. 461–464 (1994)
- [Massaro 99] Massaro, D. W.: Multiple Book Review of Speech perception by ear and eye: A paradigm for psychological inquiry, *Behav. Brain Sci.*, Vol. 12, pp. 741–794 (1999)
- [McMurray 09] McMurray, B., Aslin, R. N., and Toscano, J. C.: Statistical learning of phonetic categories: insights from a computational approach., *Developmental Science*, Vol. 12, pp. 369–378 (2009)
- [Michael H. Goldstein 08] Michael H. Goldstein, J. A. S.: Social Feedback to Infants' Babbling Facilitates Rapid Phonological Learning, *Psychological Science*, Vol. 19, pp. 515–523 (2008)
- [Miura 07] Miura, K., Yoshikawa, Y., and Asada, M.: Unconscious anchoring in maternal imitation that helps finding the correspondence of caregiver's vowel categories, *Advanced Robotics*, Vol. 21, pp. 1583–1600 (2007)
- [Miura 12] Miura, K., Yoshikawa, Y., and Asada, M.: Vowel Acquisition based on an Auto-Mirroring Bias with a Less Imitative Caregiver, *Advanced Robotics*, Vol. 26, pp. 23–44 (2012)
- [Ogino 06] Ogino, M., Kikuchi, M., and Asada, M.: Active lexicon acquisition based on curiosity, in *The 5th International Conference on Development and Learning (ICDL'06)* (2006)
- [Ojemann 94] Ojemann, G. A.: Cortical stimulation and recording in language, in Kertesz, E. A. ed., *Localization and neuroimaging in neuropsychology. Foundations of neuropsychology.*, pp. 35–55, Academic Press, San Diego (1994)
- [Oller 80] Oller, D. K.: *The emergence of the sound of the speech in infancy*, pp. 93–112, Academic Press, New York (1980)
- [Oudeyer 05] Oudeyer, P.-Y.: The self-organization of speech sounds, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 233, No. 3, pp. 435–449 (2005)
- [Pélaez-Nogueras 96] Pélaez-Nogueras, M., Gewirtz, J. L., and Markham, M. M.: Infant vocalizations are conditioned both by maternal imitation and motherese speech, *Infant Behavior and Development*, Vol. 19, p. 670 (1996)
- [Pulvermueller 99] Pulvermueller, F.: Words in the brain's language, *Behav. Brain Sci.*, Vol. 22, pp. 253–336 (1999)
- [Rasanen 12] Rasanen, O.: Computational modeling of phonetic and lexical learning in early language acquisition: existing models and future directions, *Speech Communication*, Vol. 54, No. 9, pp. 975–997 (2012)
- [Raymond W. Gibbs 06] Raymond W. Gibbs, J.: *Embodiment and Cognitive Science*, Cambridge University Press (2006)
- [Rizzolatti 98] Rizzolatti, G. and Arbib, M. A.: Language within our grasp, *Trends in Neurosciences*, Vol. 21, No. 5, pp. 188–194 (1998)
- [Rochat 04] Rochat, P.: *THE INFANT'S WORLD*, chapter 4, Harverd University Press (2004)
- [Roy 02] Roy, D. and Pentland, A.: Learning words from sights and sounds: a computational model, *Cognitive Science*, Vol. 26, pp. 113–146 (2002)
- [Sasaki 77] Sasaki, , Levine, , Laitman, , and Crelin, : Postnatal developmental descent of the epiglottis in man, *Archives of Otolaryngology*, Vol. 103, pp. 169–171 (1977)
- [Sasamoto 10] Sasamoto, Y., Yoshikawa, Y., and Asada, M.: Mutually constrained multimodal mapping for simultaneous development: modeling vocal imitation and lexicon acquisition, in *The 9th International Conference on Development and Learning (ICDL'10)*, pp. CD-ROM (2010)
- [Sasamoto 13] Sasamoto, Y., Nishijima, N., and Asada, M.: Towards understanding the origin of infant directed speech: A vocal robot with infant-like articulation, in *IEEE International Conference on Development and Learning, and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob 2013)*, pp. (CD-ROM) (2013)
- [Stark 78] Stark, R. E.: Features of infant sounds: The emergence of cooing, *Journal of Child Language*, Vol. 5, pp. 379–390 (1978)
- [Tanaka 02] Tanaka, S. and Inui, T.: Cortical involvement for action imitation of hand/arm postures versus finger configurations: An fMRI study., *Neuroreport*, Vol. 13, No. 13, pp. 1599–1602 (2002)
- [Trehub 73] Trehub, S. E.: Infants' sensitivity to vowel and tonal contrasts, *Developmental Psychology*, Vol. 9, pp. 91–96 (1973)
- [Vallabha 07] Vallabha, G. K., McClelland, J. L., Pons, F., Werker, J. F., and Amano, S.: Unsupervised learning of vowel categories from infant-directed speech, *Proc. of National Academy of Sciences USA*, Vol. 104, pp. 13273–13278 (2007)
- [Vorperian 07] Vorperian, H. and Kent, R.: Vowel acoustic space development in children: A synthesis of acoustic and anatomic data, *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, Vol. 50, pp. 1510–1545 (2007)
- [Werker 02] Werker, J. F. and Tees, R. C.: Cross-language speech perception: Evidence for perceptual reorganization during the first year of life, *Infant Behavior and Development*, Vol. 25, pp. 121–133 (2002)
- [Werker 07] Werker, J. F., Pons, F., Dietrich, C., Kajikawa, S., Fais, L., and Amano, S.: Infant-Directed Speech Supports Phonetic Category Learning in English and Japanese, *Cognition*, Vol. 103, pp. 147–162 (2007)
- [Yoshikawa 03] Yoshikawa, Y., Koga, J., Asada, M., and Hosoda, K.: A constructivist approach to infants' vowel acquisition through mother-infant interaction, *Connection Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 245–258 (2003)
- [Yoshikawa 08] Yoshikawa, Y., Nakano, T., Asada, M., and Ishiguro, H.: Multimodal joint attention through cross facilitative learning based on  $\mu$ X principle, in *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Development and Learning* (2008)
- [Yu 05] Yu, C., Ballard, D., and Aslin, R.: The Role of Embodied Intention in Early Lexical Acquisition, *Cognitive Science* (2005)
- [浅田 12] 浅田 稔: 音声の知覚と発声の発達過程の構成的理解 –認知発達ロボティクスによる音声発達–, *人工知能学会誌*, Vol. 27, No. 6, pp. 600–611 (2012)