

共同注意の神経科学

定藤規弘 小池耕彦

はじめに

ヒト間の対面コミュニケーションは、物体を対象とした個体行動と同様にフィードバック情報により制御される。物体は知覚的なフィードバックを与えるが、それ自身は意図を持たず、ヒトとの社会的な関係性もない。一方で対面コミュニケーションにおいては、個体それぞれがパートナーから情報を得ることで、相手の意図を推測し、行動を予測できる。ここに対面コミュニケーションを特徴づける「相互予測性」が生じる。対面コミュニケーションにおける相互予測は、情報伝達の双方向性と同時性に依拠する¹⁾。相互予測はコミュニケーション行動が観察と関与を同時に含むことに起因しているため、コミュニケーションの神経基盤は各個体へ還元できない。近年のこの分野の研究では、2個体間相互作用を記述するために、主観性と間主観性という概念が用いられている¹⁾。いずれも元来は哲学の文脈において定義された用語であるが、Trevorthenによれば、主観性とは意図した目的が意識的に制御されていることを調整された行為によって示す能力、間主観性とは自身の主観的な制御を他者の主観性に合わせて調整する能力である。この定義によれば間主観性は、主観（私）と主観（他者）の「間」にあって、主観や客観（第三者視点）に還元できない「現象」を指す。近年の理論研究および実験研究により、この間主観性の問題は、予測される他者の行為に合わせて自分の行動を調整するという相互予測が必要とされる場において、どのように予測モデルが更新されていくかという問題として研究できる可能性が示されている。本研究では、多くのコミュニケーションの基盤となっている注意の共有としての「共同注意 (JA, joint attention)」を題材として、相互予測という概念により間主観性の問題へアプローチすることで、コミュニケーションの神経基盤を解明する手法を概観する。

共同注意と注意共有

共同注意とは、「対象物に関する対話的な社会的パートナーの間で、対象物に対する意識を共有するための注意の調整」と定義されている。たとえば親が視線や指差しなどで注意を向ける対象を指示し（始発的共同注意）、子がそれに追従して注意を向ける行動（応答的共同注意）がそれにあたる。これらは生後9ヵ月から12ヵ月の間に出現し²⁾、心の理論の前駆となること、言語習得に不可欠であること、また始発的共同注意の欠如が自閉症の初期徴候³⁾であることも知られているため、その神経基盤の解明は非常に重要である。

共同注意は、アイコンタクトと密接な関係を持つ^{4,5)}。通常対面2者はアイコンタクトをした後に共同注意を行い、同じ対象物に焦点を合わせた後、再びアイコンタクトをすることで同じものを見たかを確認し、対象物に対する共通の注意を確認する。またアイコンタクトは、個人Xが個人Yを観察し、Yが同時にXを観察する場合、XとYは互いに「私はあなたに注意を払っており、あなたが私に注意を払っていることを知っている」という意味で注意を共有していることから、相互注意 (mutual attention) と言われる。共有注意のメカニズムは、Baron-Cohenが心の理論の成り立ちを説明するために提案したモジュラーシステム^{6,7)}により説明されうる。モデルに含まれるモジュールは、視線方向検出器、意図性検出器、相互注意を検出するための相互注意メカニズム (MAM; mutual attention mechanism)、心の理論メカニズムの4つである。共同注意は、アイコンタクトによる相互注意の確認に始まり、開始者の意図の対象選択に伴う視線移動が応答者によって検出され、最後にアイコンタクトに戻ることで、同じ対象に対する意図の共有を確認することで完了する (図1)。こ

のため、共同注意の神経基盤を明らかにするためには、まずアイコンタクトによる MAM の神経基盤を解明する必要がある。

2 者の相互作用という観点から考えると、アイコンタクトは最も単純な自動模倣とみなすことができる。自動模倣とは、無意識的あるいは自動的な行動の模倣であり⁸⁾、それを介して目標指向的な協力を可能にする⁹⁾。自動模倣は人間の社会的相互作用の重要な要素であり¹⁰⁾、人間関係の形成や共感の生成に密接に結びついていることが知られている。自動模倣は、2 人以上の個人が短い時間内に同期した行動（例えば、顔の表情、体の姿勢、笑い、あくび）をとるという形で観察される⁸⁾。2 者間での行動の同時性、つまり無意識的な同期した行動の発生には、2 者の再帰的かつ実時間での相互作用を介した情報の流れが重要である¹¹⁾。このような背景から小池ら¹²⁾は、アイコンタクトにおける相互注意メカニズムは、参加者間の実時間性相互作用を検出するメカニズムであるとの仮説を立てて実験を行った。実時間での相互作用が存在するライブ状態での相互注視と、相手の映像が 20 秒遅れて提示される、すなわち実時間性相互作用の存在しない REPLAY 状態とを比較した。その結果、ライブ状態での視線を介した相互作用が小脳と前帯状皮質を活性化し、前帯状皮質と前島皮質の機能的接続性が向上することが明らかになった(図 2A, B)。この結果は、MAM がこれらの領域に存在する可能性を示唆する。

モデルの共有と 2 者間の神経同期

複数システムの相互作用は同期現象を引き起こす。この非線形ダイナミクス現象をあつかう数学的なモデルとして、2 つの振動子の間に働く相互作用は位相差の正弦関数に比例すると仮定する蔵本モデルが知られている¹³⁾。蔵本モデルによれば、振動子間の結合強度がある値を超えると、振動子間の振動(共鳴)が発生する。コミュニケーションにおいても同期現象はみられるが、その発生にはヒト個体間に働く相互作用として予測が重要であることが知られている。発達初期からみられるコミュニケーションである模倣¹⁴⁾を例にとってみよう。模倣は相手の動作を真似て、動作を共有するプロセスである。模倣には身体動作制御が必須であるが、動作制御においては、運動命令とその感覚的帰結の間の入出力関係が重要である。この関係を脳内で処理するメカニズムは、内部モデルと呼ばれている¹⁵⁾。運動命令の結果を予測するのが順モデルで、特定の結果を得るように運動命令を制御するのが逆モデルである¹⁵⁾。模倣

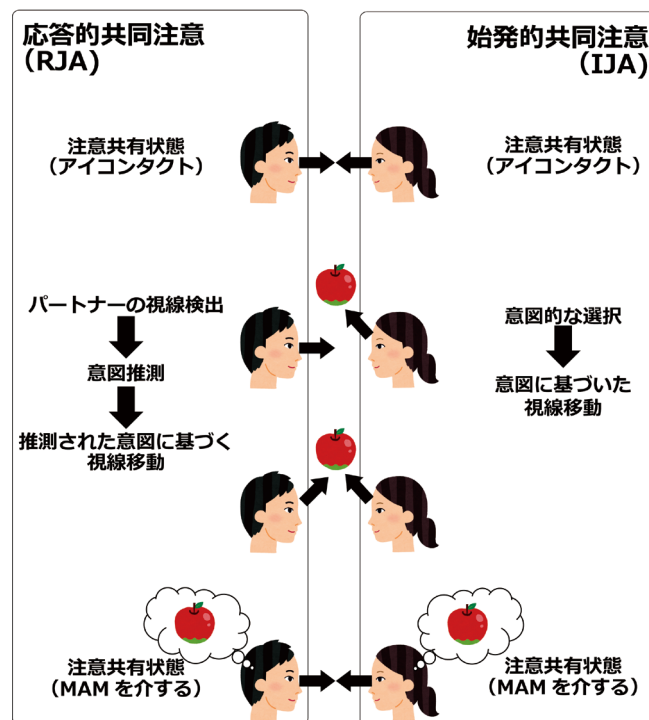


図 1 広義の共同注意モデル

IJA : initiative joint attention, MAM : mutual attentional mechanism, RJA : reactive joint attention.

者は、視覚的に提示された被模倣者の動きを運動表現に変換し、一連の運動命令を生成することで模倣を実現する。しかしこれは不良設定問題である。すなわち同じ視覚入力が、多くの原因(被模倣者の運動命令)によって生成されうるため、一意の解を得ることは困難である。脳内では不良設定問題を解決するために階層的予測符号化を用いているとの理論が提案されている。この理論によれば、高レベルの皮質階層の神経表象が低レベルの神経表象を予測する¹⁶⁻¹⁸⁾。例えば視覚的に提示された被模倣者の動きの知覚であれば、上位の階層から送られるトップダウンの予測(順モデル)と低レベルの表象の比較が予測誤差を生成し、上位層へとフィードバックされる。このメカニズムは多層にわたっており、各階層での予測誤差を最小化するように各々の順モデルが更新され、これが視覚入力(隠された)原因に対して階層的な説明を提供する¹⁹⁾。つまり階層的予測符号化のメカニズムは、隠された原因としての相手の運動命令と、それが生み出す結果、すなわち知覚される相手の運動表現を対応付けるものである²⁰⁾。このことは、模倣/被模倣の関係性においては、自己の行動(運動命令)の感覚的効果を予測するための順モデルは、他者の運

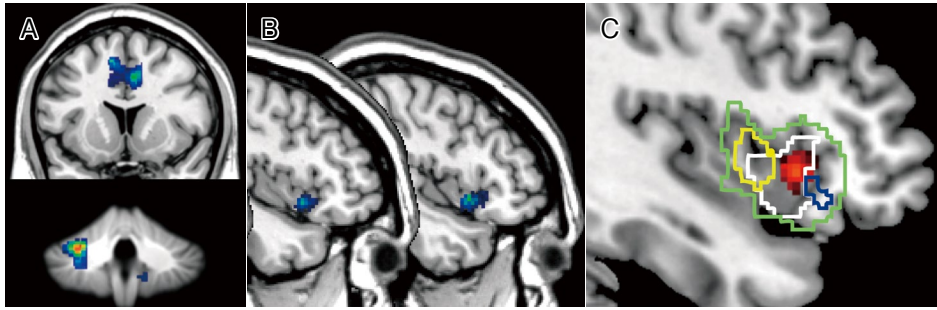


図 2

A) リアルタイムでのみつめあいを、録画された映像相手のそれと比較した場合、小脳および前帯状回の脳活動が上昇した。B) 前帯状回から右島皮質への機能的結合は、リアルタイムでのみつめあいで、録画された相手の映像をみつめあう条件と比較して増強されていた。C) 共同注意に関連した様々な機能は、前部島皮質を賦活する。緑色囲み：共同注意をする時に、一人で視線を動かす場合と比較して高い脳活動を示す領域。黄色囲み：始発的共同注意において、応答的共同注意に比べて高い脳活動を示す領域。青色囲み：応答的共同注意において、始発的共同注意に比べて高い脳活動を示す領域。白色囲み：始発的共同注意において自発的にターゲットを選択する場合に、実験者により指示されたターゲットを選択する場合に比較して高い脳活動を示す領域。赤色塗り：2者間での神経活動相関を示した領域。

動命令の推論において、他者の行動を解釈するための制約として使用される^{20,21)}。すなわち模倣中に模倣者が持つ逆モデルは、模倣者自身の順モデルを制約条件として被模倣者の感覚的行動結果を逆変換したものである。一方で被模倣者は、自分の行動の結果としての相手の反応を予測し監視することで、自分自身の順モデルを更新する。模倣者の運動出力は、模倣者の順モデルを反映しているため、これらの反復的な更新プロセスは、相互作用するエージェント間の個体間の神経同期をもたらさう。階層的予測符号化理論によれば、2者の相互模倣が成立するような条件においては神経活動の同期が出現し、神経活動の同期は双方の順モデルの共有を表象する¹⁹⁾。実際、2個体同時計測fMRIを用いた相互の顔表情模倣課題において、右下頭頂小葉で個体間神経同期が観察されており、これは行為の順モデルとしての行為内意図の共有と解釈されている²²⁾。

共同注意の神経基盤

模倣と同様に、共同注意においても視線の動かし方に関する順モデルがパートナーと共有されており、それにより相手の意図を理解し注意の共有がなされると考えることができる。注意共有の神経基盤を脳機能イメージングおよび神経同期の両側面から明らかにするために、我々は2個体同時計測fMRI実験を行った²³⁾。参加者には、画面の四隅に配置されたターゲットへの注意を共有させた。開始者は、4つのターゲットのうちの一つを意図的に共有対象として選択し、視線を移動する。別の条件では、実験者により指定されたターゲットを選択する。次いで追従者は開始

者の視線情報を利用して、同じターゲットへ視線を向ける。その後、二者はともにアイコンタクトへと戻り、互いが注意を向けた対象についての情報を共有する。

共同注意に特異的な個体間神経同期を描出するために、以下のような解析を行った。共同注意イベントごとに、タスク関連の神経活動を、一般線形モデルを用いてベータ値として推定した。次いでベータ推定値の時系列を用いて、異なる脳の相同領域間での神経同期（相関）を計算し、ペアと疑似ペアでの神経同期の強さの差を評価した。これにより、共同注意課題を遂行している最中に、ペア特異的かつ課題特異的に神経活動が同期して変動する領域を描出できる。階層的予測符号化理論¹⁹⁾によれば、神経同期が観察される領域は、第三者に向ける注意の順モデルが表象される領域と考えられる。

共同注意課題では、視覚野、腹側前頭前野のミラー系、大脳辺縁系（島皮質、前帯状皮質）などの広範囲な領域が活性化された。また右前部島皮質では、始発的共同注意と応答的共同注意に対応した機能的勾配がみられた。加えて右前部島皮質は、開始者による意図的なターゲット選択で、より強い脳活動がみられた。興味深いことに、右前部島皮質は、前出のベータ値を用いた解析により、共同注意課題関連活動の個体間神経同期を示すことが明らかとなった（図2C）。この結果は、相互模倣と同様に順モデルとしての注意内意図（すなわち特定の空間へ注意を向ける意図）共有が行われており、その基盤は右島皮質であることを示唆する。

以上の所見を取りまとめると、右前部島皮質はMAMの

一部であることが見つめ合い実験にて示されており¹²⁾, 右前部島皮質は, 共同注意における意図的選択と関連している。応答的共同注意により特異的に活性化される右島皮質は, 視線方向検出器の一部と考えられ, 右前部島皮質の一部は始発的共同注意によっても賦活しており, さらには, 右前部島皮質は始発的共同注意と応答的共同注意の活動が2者間で同期している。これらの結果から, 共同注意においては右前部島皮質が重要な役割を果たし, 具体的にはMAMにより視線方向検出と意図性検出が統合されて, 注意の順モデルとしての“注意内意図”が共有されると結論づけられる²³⁾。

共同注意の役割

ヒトは視線コミュニケーションを介して他者と情報を共有するが, これに大きな役割を果たすのが相互注意メカニズムであると考えられている。情報を共有する過程は他者の反応を予測するためにモデル化する機能と関連しており, その神経基盤は2者間での神経同期として観察可能であるとの考えに則り, アイコンタクトや共同注意の神経基盤を検討してきた。アイコンタクトは, 小脳, 前帯状皮質, 右前部島皮質を媒介とした, 共同注意の基礎となる相互注意メカニズムを形成する。また共同注意を用いた実験研究において, 他者をモデルとして取り込む働きは右前部島皮質によって担われており, それは個体間の神経同期として観察されることを示した。一連の研究の結果は, 大脳辺縁系ミラーシステム(前部島皮質-前帯状皮質)と小脳が, 他者の行動を予測するためにモデル化する機能に関連していることを示唆している。

今後の展望

発達心理学的には, 共同注意は心の理論の前駆とされているが, その発達軌跡の詳細や対応する神経基盤については不明の点が多い。言語コミュニケーションとの関係が示唆されることから, 共同注意の神経基盤と心の理論の神経基盤の関係を明らかにするためには, 言語を介した共同注意(つまり経験の共有)を解析することが重要である。心の理論は, 共同注意を基盤に言語的なコミュニケーションに伴い生成すると考えられることから²⁴⁾, 心の理論と共同注意の内部モデルは階層性を形成することが予想される。さらには, 共同注意の欠如は自閉症の初期徴候とされていることから, 前部島皮質をハブとしたネットワーク解析が

自閉症病態解明に向けて重要な手がかりを与えるものと期待される。

文献

1. Trevarthen C. Communication and cooperation in early infancy. In: Bullowa M, editor. Before speech: The beginning of human communication. Cambridge University Press; 1979. p.321-47.
2. Corkum V, Moore C. The origins of joint visual attention in infants. Dev Psychol. 1998; 34: 28-38.
3. Mundy P, Crowson M. Joint attention and early social communication: Implications for research on intervention with autism. J Autism Dev Disord [Internet]. 1997; 27: 653.
4. Striano T, Henning A, Stahl D. Sensitivity to interpersonal timing at 3 and 6 months of age. Interact Stud [Internet]. 2006; 7: 251-71.
5. Farroni T, Csibra G, Simion F, et al. Eye contact detection in humans from birth. Proc Natl Acad Sci [Internet]. 2002; 99: 9602-5.
6. Baron-Cohen S. How to build a baby that can read minds: cognitive mechanisms in mindreading. Curr Psychol Cogn. 1994; 13: 513-52.
7. Emery N. The eye have it: The neuroethology, function and evolution of social gaze. Neurosci Biobehav Rev [Internet]. 2000; 24: 581-604.
8. Prochazkova E, Kret ME. Connecting minds and sharing emotions through mimicry: A neurocognitive model of emotional contagion. Neurosci Biobehav Rev [Internet]. 2017; 80: 99-114.
9. Sebanz N, Bekkering H, Knoblich G. Joint action: Bodies and minds moving together. Trends Cogn Sci. 2006; 10: 70-6.
10. Chartrand TL, van Baaren R. Chapter 5 Human Mimicry. In: Advances in experimental social psychology [Internet]. New York: Elsevier; 2009. p.219-74.
11. Okazaki S, Hirotsu M, Koike T, et al. Unintentional interpersonal synchronization represented as a reciprocal visuo-postural feedback system: A multivariate autoregressive modeling approach. PLoS One. 2015; 10: e0137126.
12. Koike T, Sumiya M, Nakagawa E, et al. What makes eye contact special? Neural substrates of on-line mutual eye-gaze: a hyperscanning fMRI study. Eneuro [Internet]. 2019; 6: ENEURO. 0284-18.2019.
13. Kuramoto Y. Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators. Araki H, editor. International symposium on mathematical problems in theoretical physics. New York: Springer Verlag; 1975. p.420-2.
14. Meltzoff A, Moore K. Imitation of facial and manual gestures by human neonates. Science (80-). 1977; 12: 75-9.
15. Wolpert DM, Miall RC, Kawato M. Internal models in the cerebellum. Trends Cogn Sci. 1998; 2: 338-47.
16. Mumford D. On the computational architecture of the neocortex-II The role of cortico-cortical loops. Biol Cybern. 1992; 66: 241-51.
17. Rao RPN, Ballard DH. Hierarchical predictive coding model hierarchical predictive coding of natural images. Nat Neurosci. 1999; 2: 79.
18. Friston K. Hierarchical models in the brain. PLoS Comput Biol. 2008; 4: e1000211.
19. Friston K, Frith C. A Duet for one. Conscious Cogn. 2015; 36: 390-405.
20. Kilner JM, Friston KJ, Frith CD. Predictive coding: An account of the mirror neuron system. Cogn Process. 2007; 8: 159-66.
21. Friston K. A theory of cortical responses. Philos Trans R Soc B Biol Sci. 2005; 360: 815-36.
22. Miyata K, Koike T, Nakagawa E, et al. NeuroImage Neural substrates for sharing intention in action during face-to-face imitation. Neuroimage. 2021; 233: 117916.
23. Koike T, Tanabe HC, Adachi-Abe S, et al. Role of the right anterior insular cortex in joint attention-related identification with a partner. Soc Cogn Affect Neurosci. 2019; 14: 1131-45.
24. Baron-Cohen S. Mindblindness: An essay on autism and theory of mind [Internet]. Vol. 74, Learning development and conceptual change. Boston: MIT press; 1995. p.171.