

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/335757278>



Article · August 2019

CITATIONS

0

READS

5

1 author:



Takahiko Koike

National Institute of Physiological Sciences, Japan

38 PUBLICATIONS 484 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

Neuroscience of Vision [View project](#)

Social interaction [View project](#)

ハイパースキャニング脳機能イメージング

小池 耕彦^{1†}

¹ 自然科学研究機構 生理学研究所 システム脳科学研究部門

要旨: ハイパースキャニングとは、コミュニケーション中の二者から同時に脳活動を計測し、二者間での脳活動相関といった形でコミュニケーションを特徴づける脳活動のハイパーパラメータを計算することで、コミュニケーションの神経基盤を描出することを目指す研究手法である。この研究手法は時折、非科学的であるとか意義を感じられないという反応に出くわす。本研究では、筆者の過去の研究経験をもとに、ハイパースキャニング研究をおこなう意義、脳活動の二者間相関が発生する機序、さらには実験計画を立てる際の注意点などを紹介する。またこれまでに行われた幾つかのハイパースキャニング研究を紹介するとともに、今後、さらなる検討が求められる点を議論する。

キーワード: コミュニケーション, 脳機能イメージング, ハイパースキャニング, ハイパーパラメータ

1. はじめに

近年の社会神経科学の分野において、二者もしくはそれ以上の人から同時に脳活動を記録するハイパースキャニング (Hyperscanning) と呼ばれる手法が、耳目を集めている。「ハイパー」と呼ばれているが、一般的な脳活動計測手法と比較して優れた最新の機械を使って計測をしているという意味ではない。一般的な脳機能イメージングが個人脳の活動をパラメータとして取得をするのに対して、二者以上の脳活動を計測することで、個人脳活動の二者間での時間相関^{*}という「ハイパーパラメータ」の議論が可能な手法という意味で、ハイパースキャニングと呼ばれている¹⁾。現在では、機能的磁気共鳴現象画像法 (functional magnetic resonance imaging; fMRI)、脳波 (electroencephalogram; EEG)、脳磁図 (magnetoencephalogram; MEG)、機能的近赤外分光法 (functional near-infrared spectroscopy; fNIRS) などの非侵襲脳機能イメージングデバイスを用いて研究がなされている²⁻⁵⁾。筆者は近年、主にこの手法を用いた研究に従事しているが^{4, 6-9)}、脳活動の二者間相関を計算していると説明すると、「脳活動の二者間相関というハイパーパラメータを研究する学術的意義はない。個人の脳活動を検討するだけで、社会性の神経基盤は解明できる」とか、「脳と脳が直接的に影響し合うようなことはない! 超能力の研究をしているのか? 非科学的だ!」といった反応をされる場合がある。このような反応の大方はハイパースキャニング研究の背後にある考え方が正確に理解されていないことに

よると思われる。本稿では、ハイパースキャニング研究の意義、脳活動相関の発生機序、さらに脳機能イメージング手法ごとの長所や短所について、近年のハイパースキャニング研究を例に触れる。最後に、ハイパースキャニング研究が進むべき方向についての議論を行いたい。

2. ハイパーパラメータを研究する意義

我々は二者間での脳活動相関を議論はするが、脳と脳が何らかの超自然的方法で情報をやりとりしていることを期待しているわけではない。例えば筆者らはみつめあい中の脳活動を記録し、二者の脳活動が相関することを報告しているが、「みつめあっている」と信じて画面上の録画された顔を見ているだけでは、脳活動は相関しない^{7, 8)}。つまり、「何も言わなくても、願えば相手に通じる」というロマンチックな現象は、おそらく存在しない。

二者がつながるメカニズムとして我々が想定しているのは、(1) 脳が体を動かして社会的キューを作り出し、(2) それが相手に知覚されて脳内で情報処理がされ、(3) 処理結果に基づいて相手の体が社会的キューを作り出し…という二者間での知覚運動ループを介した、ある種の共鳴現象である^{10, 11)}。そうであるならば、他者から送られてくる社会的キューを知覚する際の脳活動を、または他者に社会的キューを送る際の脳活動を個人から記録して解析するだけで十二分なのではないか? そうではないと考えられる理由が2つある。第1に、コミュニケーションとは一般的に、ダイナミックかつ非線形な相互作用性を持っており、単純に下位要素に還元できるものではない^{12, 13)}。第2に、ハイパー

2019年4月15日受付

[†] 〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町西郷中38

自然科学研究機構生理学研究所システム脳科学研究領域

小池 耕彦

E-mail: tkoiike@nips.ac.jp

^{*} 脳活動の二者間の関係性を研究する手法としては、相関係数だけでなく、コヒーレンスや因果関係解析など種々の方法が用いられているが、本稿では見通しをよくするために、「脳活動相関」という言葉で統一する。

パラメータ計算は、個人脳内でのネットワーク解析と同様に、脳活動間での位相や相関を検討することで、活動量とは異なる視点から神経基盤を検討できる。この2点について、以下で議論する。

2.1 コミュニケーションの相互作用性

コミュニケーションとは、言語情報や非言語情報を通して、知覚や感情や思考を他者に伝達する行為である。これを介して我々は、他者と意思が通じたとか気持ちが理解されたという感覚を得ることができる。コミュニケーションを支える神経基盤は、ハイパースキャニングの登場以前も、コミュニケーションする二者を客観的に知覚する際の脳活動、自分に対して社会的キューが送られてくるのを知覚する脳活動、もしくは主体的に社会的キューを他者に送る際の脳活動を、個人から計測して検討してきた¹²⁾。もしコミュニケーションの神経基盤が個人の脳内に閉じたものであるならば、2つ以上の脳機能イメージングデバイスを準備するコスト面の負担や、実験統制の困難さなどを考えても、個人脳を対象とした従来型の脳機能イメージング研究が有利である¹⁴⁾。しかしコミュニケーションは相互作用である。そこには他者に知覚されることを期待しない行動はなく、他者の行動を伴わない知覚はない。会話を例にとって考えてみよう。会話はターン制のコミュニケーションであり、発話者から聴取者へと一方向性に情報が流れるプロセスを交互に繰り返しているように思える。そうであれば会話の神経基盤は、(1)画面に向かって発話をする際の、そして(2)相手からのメッセージを理解する際の神経基盤へと還元できるようにみえる。しかし実際の会話は、そうではない。我々のチームの先行研究では、面白いネタを喋って相手を笑わせる大喜利課題中の脳活動をfMRIで記録し、この点を検討した¹⁵⁾。その結果、相手の笑いが自分の行動の結果である場合と、他者の行動の結果である場合を比較すると、脳活動のパターンは全く異なることを示した。この結果は、会話のようなターン制のコミュニケーションであっても、社会的キュー(例えば笑い)の知覚はそれ単独では存在しえず、自分が相手に働きかける行動をしたという文脈の効果を強く受けることを示す。つまりコミュニケーションは、再帰的な情報交換で他者と結びついている状態であり、単純に発話や聴取という一方向性の情報の流れのみで表現される下位プロセスへの還元はできない。相互作用性が脳に与える影響は、決して、他者が反応を返してくれるはずだという信念や事前知識、そして期待だけによっているわけではない。我々の研究チームは、パートナーのリアルタイムの映像とみつけあう条件と、録画された映像をみつける条件の間では、二者間での行動の相関、個人の脳活動、および二者間での脳活動相関が異なることを示した^{7,8)}。このとき被験者らは、自分が見ているものが全てリアルタイムの映像であると完全に信じ込んでいた。つまりこの結果は、相互作用が可能な場では、我々は相手と無意識的に行動をそろえる傾

向があること、また相互作用可能な場に対応した脳活動や脳活動相関が存在することを示しており、コミュニケーションを下位要素に還元するのではなく、その場での脳活動を二者から同時に記録して解析することの重要性を示唆している。

2.2 ハイパーパラメータの持つ意味

コミュニケーションが相互作用性を持ち、その最中の脳活動を記録する必要があったとしても、1人の脳活動のみを記録¹⁶⁾すれば十分なのではないだろうか?筆者の考えでは、二者の脳活動を同時に記録してハイパーパラメータを計算する方法は、個人の脳活動推定をする方法を否定するものではない。これらは異なる視点からコミュニケーションの神経基盤を導出する相補的な方法である。

コミュニケーションの神経基盤を検討するために一般的に用いられてきた差分法では、実験参加者に実験条件と対照条件をおこなわせて、各条件に対応した脳活動量を推定し比較する。そして脳活動量が実験条件で統計的に有意に高い脳領域を、その実験条件の神経基盤であると考え、脳波であれば事象関連電位(ERP: Event Related Potential)、fMRIでは一般線形モデル(GLM: General Linear Model)を用いて検討がなされてきた¹⁷⁾。これに対してハイパーパラメータを検討する方法では、行動-知覚ループを介して相互に影響を与え合うことにより¹⁰⁾、最終的に行動や脳活動の位相が揃うという仮定のもとに^{1,13,18)}、実験条件での個人の脳活動量ではなく、実験条件で相手との脳活動の位相差が小さくなるという指標を取り出し、神経基盤を描出する。

脳活動の相関または位相差によってのみ描出可能な神経基盤があるという考え方は、個人の脳内ネットワーク解析における仮説とほぼ同一である。脳は複数領域が協働するネットワークとして機能している。脳活動の時間変動が領域間どのように相関するかを指標として領域間ネットワークを描出する解析手法が、機能的結合性解析である¹⁹⁾。機能的結合性解析では、ある領域の実験条件における脳活動量が対照条件と比較して有意に増加していることではなく、脳領域間での活動パターンの位相差(相関)が条件間で変化することを指標として、実験条件の背後にある神経基盤を描出する。機能的結合性解析は、特定の実験課題をおこなわない覚醒安静時の自発性脳活動解析と結びついて大きな成功を収めている²⁰⁾。機能的結合性解析は、脳活動量というパラメータの検討から、領域間での脳活動量相関というハイパーパラメータの検討へと、パラダイム・シフトを起こしたと言えよう。

脳領域が個別に機能しているという仮定が現実的にはあり得ないのと同様、コミュニケーションをする二者が独立なシステムであることもあり得ない。活動量の検討と機能的結合の検討が、相補的な役割を占めながら個人脳機能の理解に寄与したのと同様、ハイパーパラメータを解析して神経基盤を描出する方法は、個人の脳活動を描出する方法と相補的な役割を持つことが期待される。

3. 被験者間の脳活動相関の発生機序

コミュニケーション中に、特定の領域で脳活動の二者間相関が観察されたとしても、ただちにそれを神経基盤として関連づけることは危険である。脳活動の二者間相関を引き起こすメカニズムには、幾つかの原因が存在しうるからである⁵⁾。これらのメカニズムを理解しておくことは、読者の立場としてはハイパースキャニング研究が報告する結果の妥当性を検討するために、また実験者の立場としては適切な実験計画を立案するのに寄与するだろう。

3.1 共通入力による同期

被験者間での脳活動相関が生まれる1つ目の原因は、二者への共通入力である⁵⁾。この種の脳活動相関を示した研究で最も有名なものは、Hasson et al. (2004)²¹⁾であろう。被験者はMRI装置内で、映画「続・夕陽のガンマン」を1人で視聴した。その後、被験者群の中からランダムに2名の被験者を選び出し、二者の相同な領域間で脳活動の時間相関を計算するという手順を繰り返した。解析の結果は、一般的なGLMを用いた脳活動研究と同様に、脳活動の二者間相関により顔関連領域などを描出できることを示した。この実験では皆が同じ映画を視聴していたわけだから、映画で顔が出てくる時間には顔関連領域の脳活動が高くなり、それ以外では低くなる。活動の時間変動は、映画で顔が出現する時間に依存することになり、顔映像の出現に合わせて被験者間相関が高くなる領域を探してくればそれを顔関連領域として描出できるわけである。この種の脳活動相関は、一般的にハイパースキャニング研究がターゲットとするような、コミュニケーションの相互作用性とは無関係なものであり、被験者が同じ入力を同じタイミングで受け取ったこと、すなわち共通入力に起因している点に、注意する必要がある。この効果は非常に強く、相互作用中のハイパースキャニング研究をおこなった場合でも、脳活動相関のかなりの部分は共通入力によるものとなる。この影響をできる限り排除する方法については、4章に示す。

3.2 一方向性の情報流による脳活動の同期

被験者間で一方向性の情報の流れがある場合にも、脳活動の相関は発生する⁵⁾。例えばテレビを見ている場合を想定すれば、テレビ内の出演者の行動を見ると、視聴者の脳活動は出演者の行動に影響され、また出演者の行動は彼らの脳活動に因っているから、結果として視聴者の脳活動は出演者のそれに影響されたものとなりうる。最初に話者を実験に呼び、他者に話しかけた際の脳活動と発話内容を記録する。次に、記録された発話内容を聞いている際の聴取者の脳活動を記録し、発話者と聴取者の脳活動の間で相関や因果関係を計算することで、一方向性の影響による二者間の相関を計算する研究も行われている^{22, 23)}。この方法のメリットの1つは、二者間での脳活動相関というハイパー

パラメータを計算するのに、2つの装置を必要としない点である。また別のメリットは、聴取者から話者へのいわばフィードバック信号を捨象したことにより、情報の流れる向きが明確に話者から聴取者への向きに限局されていることにある。これにより、2つの脳活動時系列信号に対して相互相関ではなく因果性解析を用いることが可能となり^{22, 23)}、またその結果の解釈も容易なものとなる。ただしこのような実験方法では、情報の出し手は受け手の反応を観察することはできず、情報が相手に伝わったという手ごたえ感¹⁵⁾などの検討は全くできないことに注意しなければならない。

3.3 相互作用による同期

3つ目が、主にハイパースキャニング研究のターゲットとなる、相互作用の影響である⁵⁾。二者はそれぞれ行動を介して情報を送り出し、また知覚を介して情報を受け取る能力を持つ。二者が相互に情報を入出力しあうことにより、2人の行動および脳活動が同期したものとなる^{4, 10, 11)}。このようなメカニズムを仮定した研究をおこなう場合には、脳活動の二者間相関を観察しているだけでは、どのようなプロセスが二者を繋いだかを議論することは極めて困難になる点に注意しなければならない。例えば、会話を発話者から聴取者へと一方向性のみ情報が流れる現象と仮定して実験をおこなって解析した場合には、発話と聴取に関係するプロセスが二者を繋いだと解釈できる^{22, 23)}。しかし発話者が聴取者の反応を伺いながら自由に発話するという、相互作用性の高い課題を考えると、発話者が聴取者の反応を伺うプロセス¹⁵⁾、聴取者が微表情による反応を発話者に返すプロセスなど、情報の再帰性に関連した複雑なプロセスが二者間の脳活動相関に影響しうる。そしてこれらプロセスの寄与分を切り分けることは、非常に困難である。適切な対照条件を準備したとしても、その実験統制自体が情報の再帰性に影響したり、コミュニケーションへの心理的な構えを変化させたりする場合もありえる。コミュニケーションは個別要素に還元できないゆえにハイパースキャニングが有用であるのは間違いないが、還元しなければコミュニケーションの詳細を理解できないというジレンマがあることに、注意しておかなければならない。

4. ハイパースキャニング研究の注意点

4.1 コントロール条件の統制

一般的な脳機能イメージング研究と同様に、ある実験条件において特異的に二者間での脳活動が存在し、その脳活動相関の発生には実験条件における認知プロセスが関与していると主張したい場合には、実験条件だけでなく適切な対照条件も準備しなければならない。3章でふれたように、コミュニケーション場面において脳活動相関が発生したからといって、必ずしもそれが実験条件における相互作用によって起きたものであるかは自明ではない⁵⁾。課題による共

通入力, 強い脳活動相関を引き起こす⁵⁾。また課題自体が, リズミカルに相手と相互作用するようなものである場合は, 課題自体がリズミカルな脳活動を引き起こし, 相関の擬陽性を引き起こす可能性がある⁵⁾。またあるコミュニケーションが, 実験者が仮説を立てたのとは異なるレベルの認知プロセスの同期を引き起こすこともありうる⁵⁾。後述する統計検定の段階での工夫も可能だが, 実験条件により検討したいコミュニケーションの要素だけを排除した対照条件の準備が必要であろう。

4.2 統計検定

脳活動相関がみられたときに, それがコミュニケーションによって引き起こされた統計的に有意な現象であることを示すために, 多くの研究では, 2つの方法がとられている。1つ目は, 実験条件と対照条件の間で相関の値に統計的に有意な差があることを示す, 一般的な脳機能イメージング研究で行われる差分法¹⁷⁾である。例えば筆者らは, みつめあうパートナーの映像がオンラインである場合(実験条件)とオフラインである場合(対照条件)での差を調べることで, オンラインのみつめあいの神経基盤を検討した⁸⁾。

しかし差分法では, 脳活動相関が条件間で異なることを示せるが, 実験条件でのみ二者が共通入力を受け取っており, それが二者間での脳活動相関を引き起こしている可能性を否定できない⁵⁾。この可能性を排除するために用いられるのが, ペア-非ペア間での相関の比較である。この方法では, 同じ実験条件の課題を行った被験者の中からランダムに2人を選び出して脳活動相関を計算する。2人が実際に一緒に課題をおこなっていた場合は相関値をペア群に, そうでない場合は非ペア群に割り当てる。非ペア群の被験者も同じ時間タイミングで課題を行っており, この群で観察される脳活動相関は, 課題が共通入力として加わることに由来するものである。よって, もしペア群と非ペア群とを比較して相関の値に差があれば, それはコミュニケーションしたことによるものであると結論できる^{6-9, 24)}。

5. ハイパースキャニング研究の実例

ハイパースキャニング研究で用いられる脳機能イメージング手法ごとに, その長所や短所, 研究を行う上で注意すべき点を, 近年の研究とともに紹介する。脳機能イメージング手法の長短所については, 主にハイパースキャニング研究に用いるという視点からの記載となっている。手法の詳細に興味のある読者は, 脳機能イメージング全般についての入門書を参考にいただきたい²⁵⁾。

5.1 fMRI を用いた研究

fMRI とは, 血液中の酸化/還元ヘモグロビンによって発生する磁場不均一性を, 磁気共鳴現象を用いて計測することで, 神経活動由来の血流変化を代理変数として脳活動を計測

する方法である。脳深部組織を含む全脳を比較的に高空間解像度(2 mm³程度)で計測できるため, 全脳に対して探索的な方法で二者間相関が存在する場所を検討できる。

反面, 狭い装置内においてあおむけで頭部を固定された形で実験に参加せざるをえない。さらに高磁場下での撮像となるため利用できる計測装置に限りがある。また, ほぼすべてのハイパースキャニング fMRI 実験は, Montague et al. (2002)¹⁾で提案されたのと同様に, 2台のスクアナを同期駆動することで実現されている。よってハイパースキャニング fMRI で計測可能なコミュニケーションとは, 基本的にはオーディオやビデオデバイスを介したものに限られる[†]。そのため, 実際におこなえるコミュニケーション課題の種類には限界がある。多く行われているのは, ネットワーク越しに行うことが簡単なゲームを用いた相互作用¹⁾, および高磁場に対応したカメラを用いた視線コミュニケーション研究である^{6-8, 24, 27, 28)}。その他の日常生活におけるコミュニケーションについては, 磁場対応デバイスを使ってうまく実験に落とし込む必要がある。例えば筆者らは, 協力して物を持ち上げるような共同作業の神経基盤を検討するために, 磁場対応の把持力センサを用いて実験を行っている⁹⁾。

fMRI は脳活動の代理変数として血液の磁場不均一性の時間変動を測定しているため, 時間解像度が低い点も注意しておく必要がある。例えば筆者らの研究は, デフォルトモードの解析と同様に脳活動の低周波ゆらぎに着目した解析をしており, 「みつめあいや共同注意を行っている状態では脳活動の二者間相関が存在する」ということを主張できるのみである^{6-8, 24)}。しかし実際には, 共同注意やアイコンタクトは, ある一瞬において起こる事象であり, その一瞬に二者間でのつながりが発生すると考えられる。一瞬で二者がつながるメカニズムについて議論が可能な, 新たな解析方法の開発が待たれる。

5.2 fNIRS を用いた研究

fNIRS とは, 近赤外線の吸光度が酸化/還元ヘモグロビンの間で異なることを利用し, 神経活動由来の血流変化を計測する方法である。頭皮上に固定されるセンサを利用して計測するため, 身体拘束度合いは比較的に低く, 実際の社会的な場面に近い実験課題を用いることができる³⁾。実際に対面した状態での脳活動を記録できる点²⁹⁾は, fMRI にはない大きな利点と言えよう。また近赤外光が灰白質に十分に届くか否かは頭蓋骨の厚さに大きく影響されるのだが, 逆説的に言えば, 頭蓋骨が比較的薄い乳幼児を対象とした非侵襲的脳活動記録法としては, 有望であろう^{30, 31)}。

ただし fNIRS をハイパースキャニングに用いる場合, いくつかの注意点がある。第1には, 脳活動とは無関係な頭

[†] ハイパースキャニング fMRI の最大の欠点である, 物理的な接触を伴うコミュニケーション²⁶⁾に関連したハイパーパラメータを取得できる環境を実現する, 2人の脳活動を1台のMRI装置で計測できるシステムの研究開発も行われている²⁷⁾。

皮上の血流の影響を強く受けることである。自由なコミュニケーションができるのはfNIRSの利点であるが、それによる行動や姿勢の同期^{13,18,32)}が、直接的に頭部皮膚血流の同期を引き起こし、それが脳活動同期の擬陽性を引き起こす可能性はあり、実験条件の厳密な統制が必要であろう。また一般的に10-20法に基づいた固定具を使ってセンサを頭部に固定するが、被験者間での頭や脳の形状は大きくばらつくため、センサが脳のどの位置に対応するかは、被験者間で大きく異なる。二者の同じセンサ間での脳活動相関を計算する方法の妥当性については議論が必要である。

5.3 脳波を用いた研究

脳波計測とは、シナプス後電位が時間的・空間的に加重されたものを、10-20法に従って頭皮上に配置された電極により電圧変化として計測する方法である。脳機能イメージング法の中では、もっとも長い歴史を持ち、ハイパースキャニング研究でも最も広く使われている³⁾。電極が身体に固定されているため、fNIRSと同様に、身体拘束度合いが低いという利点を持つ。安価で小型のポータブルデバイスも多く発売されていることから、身体の直接的な接触コミュニケーション²⁶⁾、親子でのコミュニケーション^{33,34)}、さらには教室における多人数での学習場面³⁵⁾といった、より現実的な場面における脳活動相関の検討がなされている。

脳波として計測される電流は頭皮上で拡散し、またセンサも頭皮上に32～256個ほど配置されるにとどまるため、fNIRSと同様に空間解像度は低い。また脳深部の活動も、信号源推定という方法により検出できるが、複数の信号源が存在する場合には不良設定問題となり、信号源を同定することは難しくなる²⁵⁾。そのため先行研究^{26,36)}では、信号源推定はおこなわずに10-20法に配置された電極間での脳活動相関という形で計算をおこなっている。またさらに複数の電極の情報を統合した形で、脳活動相関の条件差を検討する方法も用いられている³³⁾。

脳波計測は高時間解像度の電気信号を計測しているため、二者間活動相関が異なる周波数帯域においてどのように変動するかを検討できる^{33,36)}。しかし個人の脳活動レベルであってもそれぞれの周波数帯域が、どのようなプロセスの情報を反映しているかについては定かではない²⁵⁾。特定の周波数帯域に特異的な二者間脳活動相関が持つ意味については、さらなる議論が必要であろう。

5.4 MEGを用いた研究

脳磁図とは、錐体細胞の活動によって樹状突起内を流れている細胞内電流が作る磁界を、磁気センサを用いて計測する方法である。神経活動に伴う磁場変動を計測するため、脳波と同様に高い時間解像度を持っており、時間的に変動する認知プロセスの神経基盤を検討するのに向いている。また脳波と同様に、脳深部由来の活動は信号源推定で求めることになるが、脳内の透磁率の均一性が高いため、脳波計測よりは比

較的に良好な推定結果を得られることが多い。

MEGはfMRIと異なり磁場や電場にさらされることがないため、侵襲性は全くない。また脳波やfNIRSと異なりセンサを頭部に固定する必要もない。これらは他の脳機能イメージング手法と比較した、最も大きな利点であろう。この利点を生かして、金沢大学には親子の脳活動を同時計測可能なハイパースキャニングMEGが設置されている³⁷⁾。だがMEGは、頭部の動きに非常に弱い。そのため、動きの少ない実験課題を選定するか³⁸⁾、もしくは子供の動きを統制する方法に大きな注意を払うなどの工夫が必要であろう。

6. 新たな展開と今後の課題

6.1 多人数間での相互作用

実際の社会を考えると、必ずしもコミュニケーションは二者間で成立するものではなく³⁹⁾、例えば三者会談は日常茶飯事である。この場合、話者の交代や割込みのタイミングなど、二者での会話とは全く異なる要素が存在する。このような多人数間でのコミュニケーションの背後にどのような神経基盤があるかについての研究は、未だ端緒についたばかりである。安価かつ簡便に脳活動を計測できるfNIRSや脳波を用いて、多人数のコミュニケーションを検討した研究が行われ始めている。fNIRSを用いて4人での会話場面を記録解析した研究⁴⁰⁾や、教室における学習場面での多人数間での脳活動相関を検討した研究³⁵⁾がある。教育において相互作用性の重要性を報告した研究⁴¹⁾もあり、教育現場で起こっている現象を記述するためにハイパースキャニングを用いる方法は、有効なように思われる。ただしこれらの研究では、多人数を二者の組み合わせという形で解析を行っている。多人数での「同期」、第三者を介した間接的な影響、コミュニケーションの雰囲気といった潜在要素を介した相互作用をどのように取り扱うかについては、さらなる研究が待たれる。

6.2 二者の関係性の指標としてのハイパーパラメータ

厳密にはハイパースキャニングではないが、映画視聴中の脳活動の被験者間相関²¹⁾は、友人関係の深さと関連し、環境に対する関わり方の個人差を反映していると考えられている⁴²⁾。そうであれば、二者間の関係性が、被験者間相関という形で描出できる可能性はあるだろう。実際、コミュニケーションの質が二者間相関の値と相関しているとの報告もある^{33,35)}。近年の研究では、例えば自閉症のような社会性に難しさを抱える病態を、個人の脳活動の変調という視点ではなく他者との関わり方の難しさとして捉える研究も現れている⁴³⁾。他者とのつながりの特徴は、行動の相関でも捉えられるかもしれない。しかし他者と共有している情報は、必ずしも行動の相関として現れるとは限らない点に注意が必要である⁵⁾。行動の相関と脳活動の相関を二者間の関係性の指標として捉えることで、それをバイオマーカー

として利用する試みや、コミュニケーションの質の背後にある神経基盤の解明を目指す研究は、今後も増えていくと思われる。

6.3 脳機能への非侵襲的介入を用いた研究

ハイパースキャニング研究は、コミュニケーションが脳活動相関を伴うことを数多く報告している。しかし、脳活動相関はコミュニケーションの原因と結果のどちらを反映しているかは、定かではない。これを検討する1つの直接的な方法は、非侵襲的に脳活動へ介入して二者間同期を操作し、脳活動相関量とコミュニケーションの質を変化させる介入研究である。近年、数 mA 程度の交流電流で脳を直接的に刺激することで、脳活動に変調を与える非侵襲的介入手法である transcranial alternating current stimulation (tACS)⁴⁴⁾ や、ニューロフィードバック技術を用いることで、二者の脳活動を強制的にそろえる研究が行われている。しかし、二者間の脳活動同期を操作することによってコミュニケーションの質が変容するかについては、知見が別れている⁴⁵⁻⁴⁷⁾。またこの方法は簡単に、「電気刺激してあげることによってコミュニケーションがうまくできるようにしてあげよう」という、善意に基づいた一見正しそうな介入手法へと発展しうる。研究者は、「定型発達者の視点から見たコミュニケーションの質を上げることができるとしても、自分の意志と関係なく他者とつながるように仕向けることは倫理的に正しいのであろうか？そもそも他者とつながることは、無謬の善いことなのか？」という倫理的な問いについて熟考する必要があるだろう。

6.4 数理モデルを用いた研究

観察される被験者間相関がコミュニケーションの原因と結果かのどちらであるかを検討するためのもう1つの効果的な方法は、数理的なモデルを用いた研究である。筆者の知る限り、このような検討は、ほぼ行われていない。模倣-被模倣課題中の脳活動相関³⁶⁾が脳内の解剖学的結合と関連するかについてのシミュレーション実験⁴⁸⁾、およびみつめあい中の脳活動相関⁷⁾を蔵本振動子モデルによるシンプルな系で議論する試み¹⁴⁾などである。数理モデル研究の1つの大きな利点は、未知の現象に対する明快な予測を与えることである。モデルの予測が新たな現象をもよく説明すれば、それはモデルの妥当性を裏付ける。もし予測が実際に観察された現象と乖離していれば、それはモデルに何らかの過不足があることを示し、それを修正することで、現象の背後にあるメカニズムの理解へと1歩近づく。数理モデル研究と観察研究の融合は、ハイパースキャニングを介した社会的コミュニケーションの神経基盤の理解のために、今後必須となるであろう。

6.5 他者と繋がらないメカニズムの理解

行動および脳活動の相関がコミュニケーション中に発生

するメカニズムとしては、行動-知覚ループを介した相互の情報伝達により、同一の状態に引き込まれることが仮定されている^{10, 11)}。しかし我々は、引き込まれた安定状態で、いつまでも相手とつながり続けているわけではない⁴⁹⁾。また多くの研究者は、パートナーとの同期を共感などと結びつけて解釈し、それを間違いなく良いものと考えているが、相手の状態から影響を受けることは必ずしも良いことでもない。他者につながるメカニズムだけでなく、そこから離れるメカニズム⁵⁰⁾、また引き込まれないためのメカニズムの研究も、適切な他者とのつながりを理解する上では必要である。

6.6 一期一会のコミュニケーションの理解

ある1回のコミュニケーションは、その場限りの特別なものである。あなたと友人のかけがえのないひと時は、何度も繰り返して記録解析できるような類のものではない。ハイパースキャニング研究を含めた現在の脳機能イメージングは、ある課題を繰り返しておこなうときに平均的にどのような脳活動があるかを検討しており、ある1回のコミュニケーションの背後にあるメカニズムに言及することは難しい。またハイパースキャニング研究は、脳活動の時間相関を指標とすることから、コミュニケーションにおいて他者と結びついている状態における平均的な二者間でのつながりを描出可能で、他者につながったその瞬間に何が起きているかを知ることも難しい。我々が真に興味を抱いている、ある1度の特別な他者とのつながりが生まれた瞬間に何が起こるのかを解明するためには、実験方法、脳機能イメージング手法、解析手法などあらゆる点での進歩が求められるだろう。

7. まとめ

本論文では、コミュニケーションの神経基盤を理解するための新たな試みであるハイパースキャニング研究を紹介した。ハイパースキャニング研究に興味を抱かれた方は、数多くの英語レビュー論文が上梓されているので、そちらも参考にいただきたい^{2-5, 51)}。実は日本も、ハイパースキャニング研究の盛んな国である。世界でも非常に稀なハイパースキャニング fMRI や、ハイパースキャニング MEG も稼働中である。これらの施設を利用することで、コミュニケーションの神経基盤の理解がより一層進むことを期待している。

参考文献

- 1) Montague, P.: Hyperscanning: Simultaneous fMRI during linked social interactions, *Neuroimage*, 16, 1159-1164, (2002). DOI:10.1006/nimg.2002.1150
- 2) Konvalinka, I. and Roepstorff, A.: The two-brain approach: how can mutually interacting brains teach us something

- about social interaction?, *Frontiers Human Neuroscience*, 6, 215, (2012). DOI:10.3389/fnhum.2012.00215
- 3) Scholkmann, F., Holper, L., Wolf, U. and Wolf, M.: A new methodical approach in neuroscience: assessing inter-personal brain coupling using functional near-infrared imaging (fNIRI) hyperscanning, *Frontiers Human Neuroscience*, 7, 813, (2013). DOI:10.3389/fnhum.2013.00813
- 4) Koike, T., Tanabe, H. C. and Sadato, N.: Hyperscanning neuroimaging technique to reveal the “two-in-one” system in social interactions, *Neuroscience Research*, 90, 25-32, (2015). DOI:10.1016/j.neures.2014.11.006
- 5) Hasson, U. and Frith, C. D.: Mirroring and beyond: coupled dynamics as a generalized framework for modelling social interactions, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371, 20150366, (2016). DOI:10.1098/rstb.2015.0366
- 6) Tanabe, H. C., Kosaka, H., Saito, D. N., Koike, T., Hayashi, M. J., Izuma, K., Komeda, H., Ishitobi, M., Omori, M., Munosue, T., Okazawa, H., Wada, Y., Sadato, N. and Sciences, S. W.: Hard to “tune in” : neural mechanisms of live face-to-face interaction with high-functioning autistic spectrum disorder, *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 268, (2012). DOI:10.3389/fnhum.2012.00268
- 7) Koike, T., Tanabe, H. C., Okazaki, S., Nakagawa, E., Sasaki, A. T., Shimada, K., Sugawara, S. K., Takahashi, H. K., Yoshihara, K., Bosch-Bayard, J. and Sadato, N.: Neural substrates of shared attention as social memory: A hyperscanning functional magnetic resonance imaging study, *Neuroimage*, 125, 401-412, (2016). DOI:10.1016/j.neuroimage.2015.09.076
- 8) Koike, T., Sumiya, M., Nakagawa, E., Okazaki, S. and Sadato, N.: What makes eye contact special? Neural substrates of on-line mutual eye-gaze: A hyperscanning fMRI study, *ENEURO*, 6, ENEURO.0284-18.2019, (2019). DOI:10.1523/ENEURO.0284-18.2019
- 9) Abe, M. O., Koike, T., Okazaki, S., Sugawara, S. K., Takahashi, K., Watanabe, K. and Sadato, N.: Neural correlates of online cooperation during joint force production, *Neuroimage*, 191, 150-161, (2019). DOI:10.1016/j.neuroimage.2019.02.003
- 10) Noy, L., Dekel, E. and Alon, U.: The mirror game as a paradigm for studying the dynamics of two people improvising motion together, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 20947-20952, (2011). DOI:10.1073/pnas.1108155108
- 11) Froese, T., Iizuka, H. and Ikegami, T.: From synthetic modeling of social interaction to dynamic theories of brain-body-environment-body-brain systems, *Behavioral and Brain Sciences*, 36, 420-421, (2013). DOI:10.1017/S0140525X12001902
- 12) Schilbach, L., Timmermans, B., Reddy, V., Costall, A., Bente, G., Schlicht, T. and Vogeley, K.: Toward a second-person neuroscience, *Behavioral and Brain Sciences*, 36, 393-414, (2013). DOI:10.1017/S0140525X12000660
- 13) Knoblich, G., Butterfill, S. A. and Sebanz, N.: Psychological research on joint action: theory and data, in: *The Psychology of Learning and Motivation*, 59-101, (2011). DOI:10.1016/B978-0-12-385527-5.00003-6
- 14) 大平英樹: 脳活動の同期を導くメカニズム - 定藤論文へのコメント -, *心理学評論*, 59(3), 283-291, (2016). DOI: 10.24602/sjpr.59.3_283
- 15) Sumiya, M., Koike, T., Okazaki, S., Kitada, R. and Sadato, N.: Brain networks of social action-outcome contingency: The role of the ventral striatum in integrating signals from the sensory cortex and medial prefrontal cortex, *Neuroscience Research*, 123, 43-54, (2017). DOI:10.1016/j.neures.2017.04.015
- 16) Redcay, E., Dodel-Feder, D., Pearrow, M. J., Mavros, P. L., Kleiner, M., Gabrieli, J. D. E. and Saxe, R.: Live face-to-face interaction during fMRI: a new tool for social cognitive neuroscience, *Neuroimage*, 50, 1639-1647, (2010). DOI:10.1016/j.neuroimage.2010.01.052
- 17) Huettel, S. A., Song, A. W. and McCarthy, G. (監訳: 福山秀直): fMRI 原理と実践. メディカルサイエンスインターナショナル, (2016).
- 18) Kutz, C.: Acting together, *Philosophy and Phenomenological Research*, LXI, 1-31, (2000). DOI:10.2307/2653401
- 19) Biswal, B., Yetkin, F. Z., Haughton, V. M. and Hyde, J. S.: Functional connectivity in the motor cortex of resting, *Magnetic Resonance in Medicine*, 34(4), 537-541, (1995). DOI: 10.1002/mrm.1910340409
- 20) Fox, M. D. and Raichle, M. E.: Spontaneous fluctuations in brain activity observed with functional magnetic resonance imaging, *Nature Reviews Neuroscience*, 8, 700-711, (2007). DOI:10.1038/nrn2201
- 21) Hasson, U., Nir, Y., Levy, I., Fuhrmann, G. and Malach, R.: Intersubject synchronization of cortical activity during natural vision, *Science*, 303, 1634-1640, (2004). DOI:10.1126/science.1089506
- 22) Schippers, M. B., Roebroeck, A., Renken, R., Nanetti, L. and Keysers, C.: Mapping the information flow from one brain to another during gestural communication, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 9388-9393, (2010). DOI:10.1073/pnas.1001791107
- 23) Liu, Y., Piazza, E. A., Simony, E., Shewokis, P. A., Onaral, B., Hasson, U. and Ayaz, H.: Measuring speaker-listener

- neural coupling with functional near infrared spectroscopy, *Scientific Reports*, 7, 1-13, (2017). DOI:10.1038/srep43293
- 24) Saito, D. N., Tanabe, H. C., Izuma, K., Hayashi, M. J., Morito, Y., Komeda, H., Uchiyama, H., Kosaka, H., Okazawa, H., Fujibayashi, Y. and Sadato, N.: "Stay tuned" : inter-individual neural synchronization during mutual gaze and joint attention, *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 4, 127, (2010). DOI:10.3389/fnint.2010.00127
- 25) 宮内哲, 星詳子, 菅野巖, 栗城眞也:ブレインサイエンス・レクチャー 3, 徳野博信 (編): 脳のイメージング, 共立出版, (2016).
- 26) Goldstein, P., Weissman-Fogel, I., Dumas, G. and Shamay-Tsoory, S. G.: Brain-to-brain coupling during handholding is associated with pain reduction, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115, E2528-E2537, (2018). DOI:10.1073/pnas.1703643115
- 27) Lee, R. F.: Dual logic and cerebral coordinates for reciprocal interaction in eye contact, *PLoS One*, 10, e0121791, (2015). DOI:10.1371/journal.pone.0121791
- 28) Bilek, E., Ruf, M., Schäfer, A., Akdeniz, C., Calhoun, V. D., Schmahl, C., Demanuele, C., Tost, H., Kirsch, P. and Meyer-Lindenberg, A.: Information flow between interacting human brains: Identification, validation, and relationship to social expertise, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 201421831, (2015). DOI:10.1073/pnas.1421831112
- 29) Hirsch, J., Zhang, X., Noah, J. A. and Ono, Y.: Frontal temporal and parietal systems synchronize within and across brains during live eye-to-eye contact, *Neuroimage*, 157, 314-330, (2017). DOI:10.1016/j.neuroimage.2017.06.018
- 30) Minagawa, Y., Xu, M. and Morimoto, S.: Toward interactive social neuroscience: Neuroimaging real-world interactions in various populations, *Japanese Psychological Research*, 60, 196-224, (2018). DOI:10.1111/jpr.12207
- 31) Miller, J. G., Vritcka, P., Cui, Xu, Shrestha, S., Hadi Hosseini, S. M., Baker, J. M. and Reiss, A. L.: Inter-brain synchrony in mother-child dyads during cooperation, An fNIRS hyperscanning study, *Neuropsychologia*, 124, 117-124, (2019). DOI.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.12.021
- 32) Okazaki, S., Hirotani, M., Koike, T., Bosch-Bayard, J., Takahashi, H. K., Hashiguchi, M. and Sadato, N.: Unintentional interpersonal synchronization represented as a reciprocal visuo-postural feedback system: A multivariate autoregressive modeling approach. *PLoS One*, 10(9), e0137126, (2015). DOI:10.1371/journal.pone.0137126
- 33) Leong, V., Byrne, E., Clackson, K., Georgieva, S., Lam, S. and Wass, S.: Speaker gaze increases information coupling between infant and adult brains, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114, 201702493, (2017). DOI:10.1073/pnas.1702493114
- 34) Kinreich, S., Djalovski, A., Kraus, L., Louzoun, Y. and Feldman, R.: Brain-to-brain synchrony during naturalistic social interactions, *Scientific Reports*, 7, 1-12, (2017). DOI:10.1038/s41598-017-17339-5
- 35) Dikker, S., Wan, L., Davidesco, I., Kaggen, L., Oostrik, M., McClintock, J., Rowland, J., Michalareas, G., Van Bavel, J. J., Ding, M. and Poeppel, D.: Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom, *Current Biology*, 27, 1375-1380, (2017). DOI:10.1016/j.cub.2017.04.002
- 36) Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J. and Garnero, L.: Inter-brain synchronization during social interaction, *PLoS One*, 5, e12166, (2010). DOI:10.1371/journal.pone.0012166
- 37) Hirata, M., Ikeda, T., Kikuchi, M., Kimura, T., Hiraishi, H., Yoshimura, Y. and Asada, M.: Hyperscanning MEG for understanding mother-child cerebral interactions, *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 118, (2014). DOI:10.3389/fnhum.2014.00118
- 38) Zhou, G., Bourguignon, M., Parkkonen, L. and Hari, R.: Neural signatures of hand kinematics in leaders vs. followers: A dual-MEG study, *Neuroimage*, 125, 731-738, (2016). DOI:10.1016/j.neuroimage.2015.11.002
- 39) 大坊郁夫: 親密な対人関係を映す対人コミュニケーション, *対人社会心理学研究*, 4, 1-10, (2004). DOI:10.18910/5701
- 40) Nozawa, T., Sasaki, Y., Sakaki, K., Yokoyama, R. and Kawashima, R.: Interpersonal frontopolar neural synchronization in group communication: An exploration toward fNIRS hyperscanning of natural interactions, *Neuroimage*, 133, 484-49, (2016). DOI:10.1016/j.neuroimage.2016.03.059
- 41) Kuhl, P. K., Tsao, F. M. and Liu, H. M.: Foreign-language experience in infancy: effects of short-term exposure and social interaction on phonetic learning, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100, 9096-9101, (2003). DOI:10.1073/pnas.1532872100
- 42) Parkinson, C., Kleinbaum, A. M. and Wheatley, T.: Similar neural responses predict friendship, *Nature Communications*, 9, 332, (2018). DOI:10.1038/s41467-017-02722-7
- 43) Bolis, D., Balsters, J., Wenderoth, N., Becchio, C. and

- Schilbach, L.: Beyond autism: Introducing the dialectical misattunement hypothesis and a bayesian account of intersubjectivity, *Psychopathology*, 50, 355-372, (2017). DOI: 10.1159/000484353
- 44) Herrmann, C. S., Rach, S., Neuling, T. and Strüber, D.: Transcranial alternating current stimulation: a review of the underlying mechanisms and modulation of cognitive processes, *Frontiers Human Neuroscience*, 7, 1-13, (2013). DOI:10.3389/fnhum.2013.00279
- 45) Novembre, G., Knoblich, G., Dunne, L. and Keller, P. E.: Interpersonal synchrony enhanced through 20 Hz phase-coupled dual brain stimulation, *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12, 662-670, (2017). DOI:10.1093/scan/nsw172
- 46) Szymanski, C., Müller, V., Brick, T. R., von Oertzen, T. and Lindenberger, U.: Hyper-transcranial alternating current stimulation: Experimental manipulation of inter-brain synchrony, *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 1-15, (2017). DOI:10.3389/fnhum.2017.00539
- 47) Duan, L., Liu, W. J., Dai, R. N., Li, R., Lu, C. M., Huang, Y. X. and Zhu, C. Z.: Cross-brain neurofeedback: scientific concept and experimental platform, *PLoS One*, 8, e64590, (2013). DOI:10.1371/journal.pone.0064590
- 48) Dumas, G., Chavez, M., Nadel, J. and Martinerie, J.: Anatomical connectivity influences both intra- and inter-brain synchronizations, *PLoS One*, 7, e36414, (2012). DOI:10.1371/journal.pone.0036414
- 49) Cohn, J. F. and Tronick, E. Z.: Mother-infant face-to-face interaction: The sequence of dyadic states at 3, 6, and 9 months, *Developmental Psychology*, 23(1), 68, (1987). DOI: 10.1037/0012-1649.24.3.386
- 50) Dahan, A., Noy, L., Hart, Y., Mayo, A. and Alon, U.: Exit from synchrony in joint improvised motion, *PLoS One*, 11, 1-19, (2016). DOI:10.1371/journal.pone.0160747
- 51) Redcay, E. and Schilbach, L.: Using second-person neuroscience to elucidate the mechanisms of social interaction, *Nature Reviews in Neuroscience*, Epub ahead of print, (2019). DOI: 10.1038/s41583-019-0179-4

小池耕彦 (こいけ たかひこ)

2005 年京都大学大学院情報学研究科 博士課程指導認定退学,
2006 年京都大学博士 (情報学), 2006 年情報通信研究機構
未来 ICT 研究センター研究員, 2011 年自然科学研究機構生
理学研究所研究員. 現在, 自然科学研究機構生理学研究所助
教.