

脳と自己と他者：関係性の科学

藤井 直敬*

要旨：従来脳機能を理解するための実験環境では、社会環境や他者との相互作用などの制御もしくは予測困難な要素は極力排除されてきた。一方、脳が人工システムと異なるユニークな機能は、予測不可能な環境の中で、いかに効率よく目的を達成するかという適応能力にある。しかし、その適応機能を理解しようとしても、適応機能が発現するための予測不可能性は、これまでの脳科学の実験環境では排除されており、その脳の最もユニークな性質を研究対象にできなかった。そこで我々は、サルの社会的上下関係にもとづく社会的行動選択を対象とし、その中で適応的行動選択の神経メカニズムを、新しく開発した多次元生体情報記録手法を用いて明らかにした。その手法は、新しい脳科学を切り開く可能性を示したが、さらなる適応機能の理解には、ブレインマシンインターフェイス技術を用いた、脳と実験者の双方向コミュニケーション技術を応用することが必要であろう。

Key Words：脳，社会性，自己と他者，操作可能性，関係性

はじめに

脳という巨大なネットワークシステムを、私たち科学者は過去100年以上にわたって理解しようと努力を続けてきた。その機能を理解するためのアプローチは、分子レベルから、個体レベルまでさまざまであり、すでに膨大な知識が蓄積されている。これらの研究は、ヒトのそれのみならず、神経系の情報伝達機能を理解するという視点から、無脊椎動物を含む多様な生物の神経系をも対象とし、すべての生物が遺伝子による情報表現という共通のメカニズムを持つことから、さまざまな知見が統合され、動物種を超えた共通の神経機能理解が進んできた。

特に昨今の分子生物学の進展は目覚ましく、分子というモノを対象とした操作により、分子と機能の因果関係を明らかにすることが可能となり、それによって神経ネットワーク機能の分子レベルでの理解が進んできた。特に、モノと機能の因果関係を議論できるという点は、従来の現象観察を

中心とした脳科学が相関関係にしか言及することができなかったことを考えると大きな説得力を持つ。そのため、分子生物学によって、脳機能をモノに還元して理解できる可能性が拓かれつつあると言われてきた。

1. ネットワーク機能体としての脳

しかし一方、果たしてそれですべての脳機能が理解可能なのかという疑問は依然残っている。脳は、100億とも1000億ともいわれる神経細胞が形成する情報ネットワーク機能体である。この神経細胞一つ一つを人口60億の地球上のヒトになぞらえて、脳のネットワークをヒトのネットワークとして置き換えて考えてみよう。分子レベルでの神経機構の理解は、神経細胞一つの内部構造の理解に等しい。このたとえでいうならば、分子レベルでの理解により、ヒト一人の振る舞いを完璧に予

Brain, Self and Other: Science of Relationship

*独立行政法人理化学研究所 脳科学総合研究センター 適応知性研究チーム, BTCC 双方向性BMI研究ユニット

Naotaka Fujii : Laboratory for Adaptive Intelligence BTCC Interactive Brain Communication Unit Brain Science Institute, RIKEN

想できるということになるだろう。とするならば、モノに還元して脳機能を理解するということは、極端に言うなら、60億人分の振る舞いのパターンを個別調査することで、ヒトが構成している社会ネットワーク全体の挙動も予測できるといっているのに近いかもしれない。この一見当たり前のように見える考え方は、ネットワークが実現する機能というものが、単なる個別の要素の積み重ねであるという誤解から生じている。

実際、各ネットワーク要素は、ネットワークに組み込まれることで、活動に制限が加わり、適応的機能変化が起きる。つまり、要素はネットワークに組み込まれた時点で、自由度が下がり、オリジナルとは異なる機能を表現ようになる。逆にネットワーク側からみると、ネットワーク全体がもつ機能は、そのネットワーク構造とそれによって定義される個別要素間の関係性によって決定される。構造と関係性の変化によって、ネットワークの持つ機能は常に変化するのである。ということは、個別の要素を切り離して、その機能を詳細に理解しても、それをネットワークに組み込んだ時の機能を理解していることにならないのは自明であろう。たとえローカルな一塊のネットワークを切り出して、そのすべての機能を明らかにしたとしても、それがさらに大きなネットワークの一部である限り、その切り出されて明らかにされた機能が全体に組み込まれた時に同じように機能しているという保証は一切無い。

それは、丁度鎖国状態の日本社会の仕組みが、鎖国を解くことで大きく変わったことと似ている。脳内ネットワークの一部を切り出して理解しようとしている現状の脳科学は、日本を鎖国状態にして、その閉じた境界のなかで構成された、安定状態での江戸時代の日本の仕組みを理解しようとすることに近い。しかし現実には、幕末から明治維新にかけて、開国による世界との相互接続が始まることで、日本人の意思とは一向におかまひなく、日本は変わらざるを得なかった。そして、逆に、日本が世界と繋がったことは、周辺国家へ、そして世界へと大きな影響を与えることになった。つまり、江戸の日本を理解したからといって、世界の一部に組み込まれた明治のそして現在

の日本を予想することは不可能である。

一見脳科学とは関係のなさそうな、私たちが知っているこの歴史的な事実は、ある閉じたネットワークの機能が、たとえそのネットワークの構成要素や内部構造がまったく変わらないとしても、外部と繋がることで根本的に変わりうるということを、誰にでもわかる形で示している。鎖国の前も後も、日本を構成するヒトそのものは、あまり変わりはなかった。しかし、世界と繋がることで、日本人それぞれが適応的に変化した。それまでくすぶっていた人々が、突然光を放って政治に参加するようになり、日本と言う国家の仕組みも大きく変わった。それは予想不可能な変化であった。

そのような社会と同じ性質を、脳も持っていることは間違いなさだろう。なぜなら、それは社会や神経ネットワークのような、動的情報ネットワークの持つ基本的な性質であるからだ。その機能を理解するには、部分の詳細ではなく全体としての機能を、関係性を通じて見渡すことが重要なのである。そう考えると、モノから見る視点では全体を十分に見渡すことが難しいことは明らかである。

2. これまでの試み

それでは、脳という機能を知るために私たち科学者が行ってきた作業は、その視点で考えるなら、どのような意味を持つだろうか。具体的に私が専門とする、サルを使った電気生理学を例にしてそれを考えてみる。

私が行ってきた電気生理学的アプローチでは、実験動物（私の場合にはサル）の脳内に電極を刺入し、神経細胞活動を記録することを行う。その場合、サルはある特定の課題を実行し、その課題内部でのさまざまな課題条件のどの変数が脳神経細胞活動と相関があるかということを探索する。サルは予め課題のトレーニングを十分行っており、実験中に課題を間違えることはあまりない。課題要求は複雑で、実験中には殆ど気を抜くことができない。そのため、課題の成功率を9割以上に保つには、殆ど機械のように課題をこなさざる

を得ない。

実際に過去半世紀にわたって蓄積されてきたサルを使った実験データは、ほぼ上記のような社会的に閉じられた人工的環境で、しかも機械のように行動を続ける単一の実験動物から記録解析されたものと言ってよい。その実験環境には、予想外の出来事は殆ど生じることなく、そのため問題解決のための創造的知性は一切必要とされない。勿論他個体との相互作用は存在しない。実験課題は事前に十分に吟味され、特定の仮説を検証するために必要なさまざまな条件が準備され、その条件間での神経活動の違いを比較することで、神経細胞活動が示す可能性を狭めていく。同時に記録できる神経細胞活動は通常多くても数十個程度で、記録部位は脳のごく限られた領域からのみ行われる。そして実験は数ヵ月から数年に及び、その期間に記録される神経細胞活動を、さも同時に記録したかのように解析を行う。そのために、実験動物の行動は機械的でステレオタイプであることが期待される。なぜなら、1年前の行動と今の行動に差があるとしたら、異なる時期に記録したデータを、同一のデータベースとして扱うことができないからである。

しかし、従来の手法で蓄積されてきた知見にはさまざまな問題がある。最大の問題は、課題のオーバートレーニングのせいで脳内部に課題に最適化された回路ができていて、私たちが観察しているのが、課題によって人為的に作られたシステムなのではないかという疑問である。前述の通り、実験動物は神経細胞活動記録の時点では、長期間のトレーニングによって極めて高い課題遂行能力を獲得している。とするなら、私たちは見たいと思っているものを実験動物の脳の中に作り込んで、単にそれを見ているという可能性がある。

この問題を、さまざまな年間行事がある小学校のある特定のクラスでの子供たちの活動を神経細胞活動になぞらえてみるとわかりやすい。子供1人は神経細胞一つである。まず学芸会で演劇をしてみる。そこでは演技の上手な子供が選ばれ、練習によって段々演技のタイミングや仕草が固定されてくるだろう。次は、運動会だ。そこでは、運動の上手な子供が全面に出るだろう。それでは合

唱大会はどうだろう。当然歌の上手な子供が表に出るだろう。つまり、小学生達は集団としてあらゆることに対処できる柔軟な能力をもっている。しかし、従来の脳科学では、演劇を行っているときの、しかも演技が完成された状態での子供の活動状態だけを見て、彼らの能力全体を推し量っているのに等しい。

脳の素晴らしいところ、そして私たちが一番知りたいことは、ヒトが大抵のことは練習次第で何でもできるのはなぜなのかということだ。しかし、そのような状況に適応的に対応して行動を切り替える適応機能に関しての脳科学的研究はあまり進んでいない。もし、その適応機能の仕組みを知りたいのなら、上の子供達の例で言うならば、学芸会だけでなく、運動会、合唱大会などの多様な環境条件での子供達の活動を調べ、なぜ多様な状況に対応した適応的行動を行えるのかを知る方法を探らなければならない。

また、脳活動の計測が、脳の極めて限られた範囲の、しかも限られた数の神経細胞からしか行われておらず、ネットワークとしての脳機能を議論するにはまったく不十分だということも大きな問題である。なぜなら、前述の通り、関係性を通じて全体の機能を理解するには、部分ではなくできるだけ広い範囲からの記録が必要だからである。

脳科学は今まで、そのように見たいものを見るために環境を作り込み、そして脳を作り込み、その作り込みの中でのみ脳を観察してきた。なぜそのようなことになったのか。それはひとえに、記録解析に関するさまざまな技術的困難のためである。さらに脳が社会というネットワークの一部であるという視点が欠けていたことも大きい。

3. ネットワーク理解に必要なもの

神経細胞は確かにそれ一つでは、単独の情報素子ではあるが、単独で機能することは決してなく、常に他の神経細胞との間にネットワークを作っている。そしてその小さなネットワークが集まって特定の機能単位を作り、その沢山の機能単位が相互に繋がることで、脳という階層的神経ネットワ

ークができあがっていると考えられる。

同様に、脳、つまり私たちは、神経細胞が一つでは情報素子として機能しないように、決して一人では社会的に機能しない。常に他者との関係性を、家族、学校、会社などをベースとして複数持っているのがヒトである。それは、生まれた瞬間から始まり、死ぬまで続く。つまり、社会も、個人つまり脳を基本要素とした多層的ネットワーク構造を持っていると言い換えることができる。とするならば、極端な話、神経細胞ひとつから、社会を語るということも原理的に可能ということになる。なぜなら、一つの神経細胞から始まり脳が構成され、身体や環境、そして他者などさまざまな要素が相互に繋がることで形成される多層的ネットワークが、社会ネットワークそのものであるから。つまり、多層的神経細胞ネットワーク構造とその社会への拡張がヒトの社会であり、神経細胞抜きには社会は文字通り根底から崩れるという相互依存性を持っているのである。

そこで、脳を理解するやり方を、そのネットワーク的視点で考え直してみることにする。まず重要なのは、研究対象の脳を社会と断絶させないということである。従来の実験方式は、実験動物を完全に社会環境から断絶させ、極めて人工的な環境下で実験を行っていた。これは予測不可能な要素が実験環境に入り込むことを嫌ったせいであるが、そこを削ってしまえば、適応的機能は発現しない。特にヒトの知性を誘導するきっかけとなったといわれる社会的知性は、他者との関係性の中にしか発現しない。とするならば、脳を社会環境から隔離してしまう実験環境は、ある意味で脳の最も重要な機能を殺しているということになる。極端な話、機能的に死んだ脳の仕組みを明らかにしようとしてきたのが従来脳科学と言ってよいかもしれない。

また、脳を適応的ネットワークとして理解するためには、より広い範囲からの同時記録を行う必要がある。先の鎖国の例でもわかる通り、ネットワークはその一部を取り出して理解するということが原理的に不可能である。なぜなら、ネットワークに組み込まれた関係性に依存して発現する機能が沢山あるからだ。とするならば特定の部位の

脳活動を、他脳領域との関係性という視点で捉えることが重要となる。神経細胞の一つ一つのスパイクと呼ばれる活動電位は、それだけではまったく意味を成さず、他の脳領域との間に、その情報が流れ込むことで初めて情報として意味を持つ。つまり、ネットワークとしての脳機能を理解するには、ネットワーク上の関係性を中心とした脳活動解析を行う必要がある。しかし、脳活動を慢性的に多点から計測するという技術は未だ十分確立された技術とは言えない。

以上の点を踏まえると、あらゆる状況下で適応的に働く脳機能の仕組みを知りたいとすると、まったく新しいアプローチが必要となることがわかる。特にそのアプローチでキーワードとなるのが関係性である。関係性は、多層的神経ネットワークシステムとしての社会のあらゆるレイヤーに存在している。そして、そのいずれの関係も、その他のレイヤーに相互に影響を及ぼし、常に変化している。つまり、実験環境に関係性という変数を確保し、それを研究対象とすることが今までの脳科学に決定的に欠けていたことであり、これからの脳科学が取り組むべき課題だと言えるだろう。そこで、そのような関係性を重視した形での脳科学の道筋を探るため、我々はここ数年サルを用いた社会性脳研究について取り組み始めた。以下にその概要を簡単に記す。

4. サルの社会性研究

私たちが始めた研究はサルの個体間相互作用中の脳活動計測である。これは、2頭のサルの間で、空間競合を人為的に発生させることで、個体間に社会的上下関係にもとづく適応行動を誘導することが可能であるという発見による。従来、ニホンザルの間にはヒトのそれに類似した社会的上下関係があることが知られている。群れにはボスザルがおり、それを頂点としてピラミッド型の社会構造が構成され、各個体はその地位に応じて行動を切り替えるとされる。

そこで、実際の個体間相互作用がどのようなものかを調べるために、2頭のサルを相対させた。

まず2頭のサルを向かい合わせて座らせた。この時は両者の距離はお互いの顔に手が届く距離、つまり必要ならば相手の手から口からエサを奪うことも可能な距離である。この状態で両者の中央にエサを置くと、激しい争いが発生する。どちらのサルも我先にエサを取ろうとするし、エサを取られたサルは怒りの表情を見せ、相手を威嚇する。しかし、この関係は長くは続かない。ある程度、この競合が続くと、突然どちらかのサルがエサに手を伸ばすことを止めるようになるのである。このきっかけはまったくわからないが、一旦どちらかが相手に遠慮を見せるようになると、以後その関係は拡大し、遠慮を始めたサルは徐々にエサを取らなくなってくる。この両者の関係は数日間かけて定着する。実際の自然環境下での上下関係がどのように決定されるかはわからないが、おそらく類似の過程で起きるのではないと思われる。つまり、サルは初見の相手には、自分が上だという態度で臨む。そして、お互いが上位同士のサルとして相手に譲ることなく鏝迫り合いをしばらく繰り返して、少し弱気が出てきた方が一旦相手に譲歩すると、それは両者の合意事項として定着し、固定される。そして一旦確立すると長期間維持されつづける。

しかし、気をつけなければならないのは、その上下関係とそれに伴う行動選択が絶対的ではないことである。これは、定着、固定、維持の流れからすると矛盾するように見えるが、実はそうでは無い。たとえば、上位のサルの注意が目の前の競合空間から離れて、遠くの方に向いていることがある。そのような時には目の前の競合空間は、下位のサルにとっては競合空間ではなくなってしまう。そのため、その瞬間には下位のサルからは社会的な抑制が外れ、競合空間に置かれたエサに躊躇無く手を伸ばせるようになる。しかし、もし次の瞬間に上位サルの注意が競合空間に戻ってくると、当然のことながら下位のサルに抑制がかかり、競合空間からエサをとることを止める。つまり、個体の相対的位置による競合空間の構造、個体間上下関係についての各個体の持つ社会的履歴、そしてそれぞれのサルの注意空間情報が混ざることによって、瞬間的な社会的環境文脈ができあがり、その

個体毎に異なる個別の文脈変化に伴ってサル達が各々行動を最適化していることが推察された。

この現象は、わたしたちの社会的行動選択過程のメカニズムについて、非常に重要なことを示している。まず、最も重要なことは、わたしたちの行動は、瞬間の社会文脈依存的に決定されるものであるということである。サルの場合は、上位サルの注意が空間のどこに向いているかということが、下位のサルにとっての社会文脈を決める上で最大の参照項目である。そのため下位のサルに要求される社会的認知機能は、上位サルの注意の方向を理解し、そして上位サルが何をしようとしているかを推定することである。

次に重要なのが、抑制が社会行動の根本であるということである。他者の存在がわたしたちに影響を及ぼすのは、その殆どが抑制と違って間違いない。他者が自分と空間を共有することで競合が自然に発生し、それを何らかの形で解決しない限り安全な社会を構成することができない。そのような社会的進化的圧力が、サルやヒトに社会的行動抑制を促し、脳もそれに合わせて機能の最適化を行ったのであろう。

5. 共同注視と意図推定

そのような抑制を軸とした社会的脳機能には、他者の意図推定能力が欠かせない。特に視線の動きから相手の注意を読み取る、共同注視というメカニズムは、私たちの社会的適応行動に必須の機能だといえる。たとえば、自閉症の患者は、いわゆる社会盲と呼ばれる状態で、他者との社会的コミュニケーション能力が欠如する。その社会盲の原因が共同注視機能の欠如にあるのではないかとされているのである。

私たちの実験でも、上下関係の明らかな2頭のサルのうち、上位のサルにハーフミラーのゴーグルをかけさせる実験をしてみたことがある。すると、下位のサルから見て、上位のサルの目が見えない場合、下位のサルの社会的抑制が完全に外れることが観察された。つまり、上位のサルの目を見ることで、その注意の対象を読み取り、それに

応じて行動選択を適応的に選択していた下位のサルは、上位のサルの目がゴールのハーフミラーに隠れて見えなくなると、とたんに競合空間に躊躇無く手を伸ばすようになった。つまり、上位サルの視線を失うことで社会文脈が変わり、それによって抑制が外れるのである。この現象は、社会的抑制を実現している脳内機能の一つとして、共同注視が極めて重要な要素であることを示している。

6. 適応的脳活動

それでは、そのような抑制機能がどのように脳内で表現されているのだろうか。私たちは、予備実験として大脳皮質連合野のうち2ヵ所、頭頂葉と前頭前野から神経細胞活動を記録した。まず頭頂葉の神経細胞は、他者との社会的競合がない場合には、自己の身体運動に反応を見せるだけであり、近くに他者が居ても、その他者の動きを認知している様子は見られなかった。しかしながら、2頭のサルの間に競合関係が発生すると、頭頂葉の神経細胞はその反応様式を切り替え、自己と他者の行動の両方に反応するように変化する。つまり、頭頂葉の神経機能が社会文脈の変化に対応して組み立て直されたのである。

一方の前頭前野は、上位のサルでは、他者が自分の身体空間に入ってくることで、神経細胞活動を上昇させる傾向にあり、逆に下位のサルの前頭前野は、それとは逆に神経細胞活動を低下させる傾向が見られた。これは、頭頂葉のように瞬間に起きる個別の運動に対する反応というよりも、実験環境の背後に流れる課題文脈もしくはそれにもとづくルールそのものを表現している様子が窺われた。

これらの神経細胞活動が示す、社会適応的な活動様式は、従来の実験環境では記録解析することができなかった。なぜなら、複数のサルを実験環境に置き、しかもそれぞれの個体の行動に自由な選択肢を与えるという実験を行った研究者はいなかったからだ。我々は、この実験を通じてサル間の社会的適応機能とそれに関係する脳内神経細胞

活動の変化を見つけることができた。しかしながら、前述した通り、社会的脳機能を理解するには、脳をネットワークという視点で観察し、そして解析を行わなければならないのである。我々の実験環境は、まだその段階に到達しているとは言いがたい。

7. 操作脳科学という試み

それでは、私たちの行ってきた予備実験をどのように発展させることで、自己と他者、そして社会との関係性に基づく適応的脳機能を明らかにすることができるのであろうか。まずそのためには、脳内の多領域から同時に脳活動を記録する技術が必要である。これに関しては、現在開発中の脳表多電極記録手法と、脳深部多電極記録手法を同時に使用することで解決できると考えられる。もし、この多電極脳内記録手法が構築できるとしたら、次に必要とされるのは、そこから脳内部の関係性を記述する手法の開発である。この解析手法は未だ完成されているとは言いがたく、しかも時系列に従って変化していく関係性構造をいかに理解し、行動と結びつけ、その因果関係を明らかにするかという問題を解決しなければならない。

また、当然ながら、脳活動を記録している環境は現実的な予測不可能な環境である必要がある。なぜならば、我々が知りたいと願っている、ヒト知性の根源である適応的脳機能とは、予測不可能な環境に対応して最適な行動を選択する能力であるからだ。とするならば、課題環境に予測不可能性を組み込む、もしくは残しておくことは必須であろう。さらにその環境適応機能に加えて、社会的な要素が加わることで、より複雑な行動戦略が必要とされる。なぜなら、そのような社会的要素を付け加えることで生じる、他者との相互作用とそれに対応した適応行動の脳内メカニズムを理解するという態度が、従来脳科学で欠如していたことだからである。

それでは、そのような予測不可能な他者を含む社会環境で、脳内多領域から記録を取るだけで、脳の適応機能を理解するための準備は終わりなの

だろうか。おそらくそれだけでは十分とは言えないだろう。この研究をすすめるにあたって、私たちが挑戦しなければならないトピックは二つある。一つは一回性の克服。もう一つは操作性の獲得である。

一回性の克服とは何か。それは、従来の脳科学が脳機能を明らかにする時に用いていた手法、つまり複数回数同じ課題行動を繰り返したときの脳活動を平均化し、その平均的活動から、課題行動と神経活動との相関を確かめるというやり方である。この平均を用いる手法は、課題の特定の側面を知るためには有用であるが、課題試行毎に異なる条件についての関連を知ることはできない。なぜなら平均化によって、その条件はキャンセルされてしまうからだ。しかし、私たちの脳は、一瞬の判断を常に行い、行動を毎回最適化している。この試行毎の最適化のプロセスを知るためには、一回性を前提とした解析手法を用いる必要がある。それはどのような手法を用いれば良いのだろうか。実は一つだけ答えが見つかっている。それはBrain Machine Interface (BMI) と呼ばれる技術を用いた、リアルタイムで情報をデコーディングする技術である。我々は、このリアルタイム解析技術を課題制御の中に組み込むことで、一回性

の問題が克服できるのではないかと考えている。また、操作性の問題も、同じくBMIで用いられる電気刺激による情報フィードバック技術によって、克服できる可能性がある。これは、電極を通じて、適切な脳の場所に適切なタイミングで電流を流すことで、脳内にリアルタイムで情報を与える技術である。

これらのBMI技術によって、脳と外部の観測システムの間で双方向性の情報伝達技術が確立されることで、脳内ネットワーク内の情報処理機構に介入することが可能になると思われる。分子生物学は、モノを通じて、脳機能を操作しようとしているが、モノと情報が直結することはない。あくまで、モノは情報表現のためのプラットフォームに過ぎず、情報そのものではないのである。

もし私たち脳科学者が脳の機能を真に理解したいとするなら、その理解のために操作対象とするものは、情報そのものであって、モノではあり得ない。自己と他者、そして環境と、常に動的に構造が変化し続ける世界の中で、脳もまた変化を続けている。その脳の最も重要なメカニズム、社会的適応知性を理解するための準備は今整いつつある。これからの脳科学は、関係性の脳科学であり、操作脳科学の時代なのである。