

はじめての脳科学

Neurotycho BEGINS を使った脳科学入門



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

はじめに

このテキストは、元々は中学生、高校生向けの脳科学入門書を作ってみようという気持ちから書き始めました。中心に据えたかったのは、わたしたちが新しく作成した **Neurotycho BEGINS** というウェブアプリケーションです。

これまでの脳科学の教科書や教材で、自分で手を動かして、インタラクティブに脳の働きを学習できるものはありませんでした。あったとしても、科学的な実際のデータに基づくものというよりは、すでに知られている知見を、CG を使ってまるで見てきたように美しく作りこんだ、科学の現実とは乖離した映像ばかりでした。

しかし、それでは脳の真実は伝わりません。脳はそんなに美しくないし、単純でもありません。世間に流布している、脳に関する知識や報道のほとんどは、誰にでも1分で分かる程度に簡略化され、いろいろな要素が切り捨てられています。もし脳に関する基礎的な知識を持たないまま、そのような報告を読むと盲目的に信じがちです。脳科学に限らず、誰でも自分の知らないことに関しては専門家の言うことを素直に信じてしまうのは、経済学だろうが宇宙物理学だろうが同じです。

脳科学は過去半世紀以上間に莫大な量の知見を蓄積してきました。その中ではこれまでの人間観に変更を加えなければならないようなインパクトのある仕事もたくさん出てきました。そのような現代で、それを勉強する機会がほとんどないというのは問題だと思うのです。残念ながら、現在の日本で脳に関する教育を受けられるのは大学に入ってからです。しかも大学でも脳科学に関する系統的なカリキュラムを教養レベルで持っているところは多くはありません。

現代に生きるわたしたちは、脳に関しては、誰もが基礎的な知識を持つべきだと僕は思います。なぜなら、脳を知ることは自分を知ることだからです。盲目的に一般に流布している脳に関する知識を信じるということは自分を見誤る可能性を秘めています。

このテキストの目的は、わたしたち研究者が実際に目にしている最先端のデータや結果、そして解析のプロセス、そこでの考え方などを共有することで、脳科学というものが何なのかを知ってもらうことです。もちろん、脳研究分野は多岐にわたります。本書では、わたしたちが専門にしている、サルを対象にした神経生理学という研究分野からの知見をお見せします。

ここには、まだ正解はありません。科学には途中成果しかないからです。誰かがきれいに整形した美しい現実もありません。これは本当の入り口にすぎませんが、おそらくわたしたちが直面する、脳を学ぶときに湧き起こる様々な制限や困難がこのテキストで紹介する中に出てきます。そのほとんどが投げっぱなしに見えるかもしれません。

しかし、それらの途中のプロセスを一般の人々と共有することは、これまであまり行われていませんでした。脳科学の知見として、いままでみなさんに伝えられてきたことは、そのほとんどが分かりやすく噛み砕かれた、美しい結果だけでした。それでは、本当の科学の面白さをみなさんにお伝えすることはできないと思うのです。なぜなら、様々な制限と困難を打ち破るところに科学の面白さがあるからです。

そして、その試行錯誤の過程に科学の面白さのコアがあるのです。これまでの科学書やテキストは、その一番面白いところを伝えようとしていなかったのではないかと思います。プロセスを共有することは難しいからです。一番おいしいところをわざわざ削って届けるなんて、まるで落語の「目黒の秋刀魚」ですが、それでも十分おいしいのが脳科学の面白いところですよ。

そういう意味で、わたしたちがこのテキストで行おうとしているプロセスを共有する試みが成功するかどうか分かりません。ここでは、実際に脳から記録された神経活動データを実際にみなさんに解析してもらいます。その過程で、従来明らかにされてきた脳の機能局在や、運動制御のしくみを学び、さらには社会的適応行動のしくみのような全く新しいテーマにも挑戦します。

繰り返しますが、このテキストで出てくる結果は、絶対的な正解ではありません。こうやればこう見えるという見方を示しているだけです。脳のような複雑なシステムは、何をどのような視点で見るかによって答えが変わってくるからです。

「正解がないなんて意味がない」と思うか、「自分なりの正解を見つけよう」と思うか、そのような脳科学の現実をどのように感じるかはみなさん次第です。しかし、このテキストを読んで、自分でいろいろとやってみることで、これまでの「何々をすれば脳が活性化する」というような似非科学的な言説に対しては、そのおかしさを指摘できるような知識と、バイアスのかかった言説に対する耐性が身につくと思います。

わたしたちは知らないことには盲目的になります。ここで多少なりとも脳に

についての知識や考え方を身につけることで、脳のこと、自分のこと、社会のことを考えるときの基礎体力を身につけることができると信じています。

それは、これからの世界を生きていく上での必須の教養なのではないかと思えます。なぜなら、これからますますたくさんの脳に関する知見が世の中に流布していくからです。わたしたちはその内容の是非を盲目的に信じるのではなく、自分でその意味を考えないといけなくなります。このテキストが、その一助となることを心から願っています。

なお、このアプリケーションの開発には、当チーム所属で東京大学大学院生の大杉くん、研究員の柳川くん、ボランティアで参加してくださった松尾さん、そしてウェブ版アプリケーションの開発をサポートしていただいたソニー教育財団の桐原さんを始めとする多くのみなさまのお世話になりました。心から感謝いたします。

本テキストは、まずは未完のベータ版として発行し、順次情報を書き加える形でアップデートしていく予定です。内容について分かりにくいところ、間違っているところなどをご指摘いただければ、以後の改訂でアップデートしていきます。よろしくお願ひします。

藤井 直敬

Version: 0.1.3

わたしたちと脳

誰でも1つずつ持っている脳。いまこの文章を読んでいるのも脳だし、みなさんの目や頭、そして身体を動かしているのも脳。学校の成績で悩んだり、好きな人に告白されて喜んだりするのも脳。脳という特別な臓器のおかげで、わたしたちの生活はとても豊かで味わい深いものになっています。

もちろん、脳を特別な臓器だと考えるのは間違いで、脳と身体はしっかりとつながっているから、脳と身体をひとかたまりのシステムだと考えるほうが良いという考え方もあります。

脳を特別だと考える考え方、脳と身体を一体だと考える考え方、どちらの考え方に従っても、脳＝自分という考え方は間違いないように思えます。しかし、それすら間違いだという人もいます。そういう人は、自分というもの（こころ）は、脳の外にあると考えていて、脳とか身体というのは単なる乗り物にすぎないのだと考えています。

そういう「こころ」と身体は離れているという考え方を心身二元論といい、「こころ」と身体は一体だと考える考え方は心身一元論と言います。みなさんはどちらの考え方のほうがしっくり来るでしょうか。

こころが脳もしくは身体の外にあるのか、それとも中にあるのかという議論は、みなさんからしたら一見馬鹿げた質問に見えるかもしれませんが、でも、この問題は昔から哲学者や科学者の中で本当に大真面目に議論されていることなのです。みなさんはどう思うでしょう。僕は自分がただの乗り物だと考えるのはつまらないなと思います。身体あつての自分だし。身体抜きの自分なんて想像できません。でも、自分というものが脳の中にどのように存在しているのかがまだ分からないので、自分が外にあるという可能性も否定できません。

非常に有名なペンフィールドというカナダの研究者は、脳の中をくまなく探して、結局脳の中にこころを見つけることができなかつたと言って、晩年心身一元論から二元論へと考えを変えました。

みなさんは、自分がこの世の中に存在しているとして、その主体はどこにあると感じていますか。みなさんの本体がいる場所を指さしてみてください。さあ、どこを指さすでしょうか。

実際に学生のみなさんにこの質問を投げかけてみると、頭を指さす人もいますし、心臓を指さす人もいます。自分の立っている、もしくは座っている場所をさす人もいますね。しかし、あなた自身はどこにいますかと聞かれて、自分

以外の場所、たとえば天国のような自分の身体から離れた場所をさす人はあまりいません。

それでも百歩譲って、もし、自分自身は脳の外にいて、脳を通じて身体を動かしているのだとしたら、自分のことを科学的に理解しようとするときに、非常に困ったこととなります。なぜなら、自分の居場所がどこだか分からないから。つまり、こころと身体は分かれているという二元論的な考え方に立つと、自分のことを調べるのがとても大変なこととなります。なぜなら、自分のことを知るには、どこにいるか分からない（もしかしたら天国で神様の横にいるかもしれない）自分に対して、自分自身で問いかける以外に方法がないからです。

実のところ、そのような自分のこころに自分で問いかけるやり方はこれまで数千年にわたり、様々な宗教者や哲学者たちが続けてきた方法です。もちろんそれらの試みが、必ずしもこころと脳を分けて考えていたわけではありませんが、こころの問題を自分との対話によって解決しようという考え方は、こころが物理的にどこにあるかという問題をあまり重要なものとして考えていないのではないかと思うのです。

これまで非常にたくさんの精力的な試みが続けられてきましたが、それは結果的にはあまり芳しいものではありませんでした。それでも、それが続けられてきた理由は、わたしたちは心底自分のこと他人のことを理解したいと思い、しかしこれまでは自問自答以外の方法がなかったからだと思います。

もちろん脳や自分に関する疑問を、自分自身に問いかけて自分で考えるということは意味のあることだと思います。特に何が問題なのかという問いを立てるという点でその方法は非常に有用な方法です。しかし、一方でその問いに対する答えを見つけるという点ではあまりうまくいっていません。

なぜなら、問題解決プロセスのすべてにおいて言葉を用いるため、各人の主観的な考え方が強く反映されがちだからです。同じ言葉を用いても、その意味は人それぞれで、意味を共有する最初のステップから大きな困難があるのです。僕が考える「こころ」と、みなさんが考える「こころ」は、きっと同じではないでしょう。「こころ」という議論の対象の意味付けすら共有できないのに、各自の定義に基づいて議論することに、はたしてどんな意味があるのかは疑問です。そのため、「こころ」に関して、客観的に問題の本質を共有し、議論し、相互に同意するということがうまくいきませんでした。

科学というものは、世の中の現象のしくみを、誰が見ても同じように理解で

き、そして理解したしくみ通りに物事が起きることを予測し、そして予測通りに物事が起こることを確認することで理解が正しかったと確認する学問です。ですから、「こころ」のように、それぞれの人が主観的に異なった理解をする場合、つまり共有することができない個別の考え方をあまり科学的な理解とは呼ばれません。

たとえば、アイスクリームの新商品をみんなで目隠しをして食べ、感想を言い合うということを考えてみてください。ある人は甘み控えめでおいしいと言い、別な人は甘さには触れず酸味がきついと言うかもしれません。同じものを食べても、人それぞれ感じ方と表現のしかたが違うので、言葉を通じた感想を聞いただけでは、本当に同じアイスクリームを食べているのだろうかという疑問に思うでしょう。

アイスクリームの味一つをとっても、友達とその味や感触を言葉でうまく共有できないのであれば、「自分」や「こころ」というような、とりとめもなく、しかも非常に複雑なシステムのしくみを、言葉だけで表現して理解することはとても難しいことが分かるのではないかと思います。

一方、自分というものが脳の中にあると限定するならば、自分のことを知りたいときには脳に聞けば良いということになります。なぜならその場合、自分自身は脳の中に何らかの形で表現されていることになるからです。

こころは脳の中にある

こころは自分の身体の外ではなくて中にあるという一元論的な考え方は、脳と身体という実際に存在するモノを対象として考えることができるので、一般的な科学の考え方に馴染みが良いと言われます。場所さえ分かれば、あとはその中を探っていけば良いからです。この、調べる対象が決められるかどうかはとても重要なことです。その意味は、目の前に宝箱があるのと、宝箱を隠した場所を示した地図があるのと同じくらい違います。

たとえば、先ほどのアイスクリームの例を考えてみると分かりやすいかもしれません。そのおいしさの秘密を明らかにするのに、二元論では食べた人に感想を聞く以外にやり方がありません。その場合には、きっと同じアイスクリームをたくさんの人で何度も食べて、一生懸命舌で味わってたくさん言葉で説明することになるでしょう。

一方、一元論的な考え方だと、アイスクリームを味わうことだけでなく、そ

ものの成分を精密に分析して原材料を特定し、さらに作り方を推定し、実際に作ってみて、オリジナルと区別がつかない同じ味が再現できるかという検証を行うことができるでしょう。もちろん、1回で同じ味を再現できるとは限りません。そのため、このプロセスを何度も試行錯誤して繰り返すことで、徐々に正解に近づけていくのです。

そう考えると、どちらのほうが新商品のアイスクリームについてより深く理解できると思うのでしょうか。僕はどう考えても前者より後者のアプローチのほうが、より有利な気がします。

脳のしくみ

これまで、科学としての脳研究は半世紀以上にわたって精力的に続けられてきました。しかし、脳というただの物質からわたしたちのこころが生まれるしくみは未だに皆目分かっていません。それでも、こころに関係する知識量は、過去数千年のそれとくらべて飛躍的に増大し、莫大な量になっていると断言していいと思います。

ヒトの脳はたった1キロ半程度の重さしかありません。脳単体で使うエネルギーはたかだか数十ワットです。電球1つくらいのエネルギーでこころという複雑なメカニズムを実現しているということに、素朴な驚きを覚えない人はいませんか。考えてみてください、イマドキの高性能のデスクトップコンピュータは下手をすると数百ワットの電力を使いますが、ヒトの脳の持つ能力の一部ですら十分に再現することは成功していません。

もちろん、莫大な桁数の数値計算のようにコンピュータには簡単にできて、脳には簡単にできないことはたくさんあるので、どちらが優れているということはありません。単純に脳のしくみは既存の計算機のしくみとは異なっているらしく、脳の動作原理は極めて断片的にしか分かっていません。そのため、断片的な動作原理に基づいて明らかになった脳のしくみに関するわたしたちの知識は断片的なものになりがちです。

そんな脳科学の現状をさして、口の悪い物理学者たちは「脳科学っていうのはケプラー以前の未熟な学問だ」と言ったりします。ケプラーは、太陽系の惑星運行のモデルを立てた16世紀の人ですが、その業績は、複雑な惑星運行という自然のしくみを計算式で説明することができたという意味で非常に画期的なことでした。以降の物理学の発展はそこから始まったと言われます。つまり、

脳科学は未だその根本原理一つ確立できていないという点で、物理学と比べて400年近く遅れているという批判なのです。

みなさんは、本物の脳を見たことがあるでしょうか。普通はありませんよね。でも写真などで見たことはあるでしょう。実際に見てみると、脳は本当に不思議な器官です。見た目は、ただのふわふわしたやわらかい豆腐のようです。肉眼で見る限りつるつるした均一な組織に見えます。

顕微鏡を使って見てみると、大脳皮質と呼ばれる、みなさんが脳と聞いて最初にイメージする脳の表面部分は、多少のこぼこがあったり厚みが違ったりしても、基本的には厚さ2-3ミリ程度の6層の層構造からなる比較的均一な構造になっていることが分かります。

そんな層構造の中に神経細胞と呼ばれる細胞とグリア細胞と呼ばれる細胞、そしてそれらに栄養を供給する血管系がたくさん詰まっているのです。

たぶんみなさんは、いままで一度くらいはニューロンという言葉聞いたことがあるのではないかと思います。そのニューロンが神経細胞のことです。ヒトの脳の場合は、ニューロンが1つの脳の中に100億個以上詰め込まれていると言われていて、それが作る複雑な神経回路の中を複雑な情報が流れているのです。一方、ニューロンを支えて、一緒に働いているのがグリア細胞と呼ばれる細胞です。この細胞も情報ネットワークに参加していることが最近分かってきました。

神経細胞は、神経細胞の本体である細胞体から軸索と呼ばれるケーブルのような部位を伸ばして、別の神経細胞と連絡をとります。神経細胞と神経細胞が接する場所をシナプスと呼び、そこを通じて情報がやりとりされています。2つの神経細胞がつながる面であるシナプスは、電子顕微鏡で見ればその間に隙間があることが分かりますが、その隙間は普通の光学顕微鏡では分からないくらいに狭く、ぴったりとくっついています。

基本的には神経細胞と神経細胞の間を流れる情報は、0か1のデジタル情報です。送り手の神経細胞が活動を変化させ、普段の安静な状態から活動状態になることを0から1になると考えてください。情報の送り手が活動状態になり、受け手の神経細胞が0から1の活動状態に変化したり、1から0の安静状態に変化したりすれば、情報は伝わったこととなります。前者を興奮性の伝達、後者を抑制性の伝達と言いますが、抑制と興奮のしくみは少し難しいので詳細は省きます。

いずれにしても、送り手の神経細胞の活動状態が切り替わり、受け手の細胞の活動を変化させようとする、シナプスの隙間で様々な化学物質がやりとりされ、そのやりとりの結果が受け手の神経細胞に伝わり、それが連鎖的に起こることによって神経細胞が作るネットワークの中を情報が広がっていくのです。この情報伝達に関係する化学物質のことを神経伝達物質と呼びます。

もしかしたら、みなさんの中にはドーパミンだとかセロトニンだとかという言葉聞いたことがある人がいるかもしれません。それらの物質が神経伝達物質として働くことで、脳の中を情報がかけめぐり、脳の複雑な働きが実現されているのです。なので、それらの物質がなくなってしまうと、世の中からお金がなくなるのと同じように、大変なことになると思います。

たとえば、ドーパミンという神経伝達物質がなくなると何が起きるかというと、パーキンソン病という病気になります。この病気にかかると、手足を動かすことが大変になります。その後、顔から表情が消え、うつ病のような精神症状が出現したりします。パーキンソン病の症状に対して、脳内にドーパミンを補充してやると症状が改善することから、脳の中でドーパミンが伝える情報が欠けたことで、そういう運動症状や精神症状が出るのだと考えられています。

それではみなさん、たくさんの人が片手に手旗を持って1列に並んでいる様子を少し想像してみてください。並んでいる人たちには、前の人の手旗が上がったら自分の手旗を上げ、前の人下げたら自分の手旗も下げるように頼みます。この場合、前の人との間に何の障害もなければ、情報は前から後ろに向かって最後の人まで正しく伝わるでしょう。しかし、途中の誰かが居眠りしたり、目隠しされたりして、信号を見逃したり、上げようとした手を誰かに邪魔されたりすると、情報は前から後ろへきちんと伝わりません。

実際の神経細胞の情報伝達の様子もそれと似ています。シナプスでも、目隠しのような、情報の流れを調節するしくみが何種類も知られていて、シナプスひとつをとってもそのしくみをまだまだ十分に明らかにできていないとは言えません。

さらに、実際の神経細胞の連絡は手旗の例のように1対1で、かつ一直線につながっているような単純な構造ではありません。1つの神経細胞が何万ものシナプスを通じてたくさんの神経細胞へ同時に情報を送り出しています。逆に受け手の側も、たくさんの神経細胞から異なる種類の情報が同時に送り込まれています。結果的に送り手が送り出し、受け手の側が伝達する情報が単純な0

と1のデジタル情報の羅列だとしても、受け手の細胞の中では、複数の情報が混ざり合い、手旗信号の例のような直線的な単純ではない、極めて複雑なしくみが隠れていると考えられています。

混雑した山手線の中で伝言ゲームをすることを考えてみてください。はたして最初の車両から最後の車両まで伝言を正しく伝えられるでしょうか。誰の情報を受け取って誰にそれを手渡せば良いのかが分からないとき、情報は正しく伝えられるでしょうか。それを考えれば、電車の中の人の数よりはるかに多い100億の神経細胞が詰まっている脳内の情報伝達が破綻しないのは奇跡に思えます。

脳を観察する

それでは、そんな脳のしくみを調べるには、脳のどこに注目して観察すればいいのでしょうか。脳の中には神経細胞だけではなくて、化学伝達物質や、イオン、タンパク質、遺伝子などいろいろなものが存在しています。そのどれもがネットワークの中で重要な役割を果たしているのは、その1つでもなくなったら様々な病気が起きることから明らかです。なので、何が重要で何が重要でないとは全く言えず、重要なものは何と聞かれれば、「全部」と言うしかありません。でも、脳の中で起きていること全部を、一度に観察することは技術的に大変困難です。

たとえば、みなさんが宇宙人だとして、地球人のことを理解しようとしたら、何から調べるでしょうか。たとえば、60億のうちのたった一人の人の行動だけを、離れたところからつぶさに観察するでしょうか。それとも、一人の人を中心にした、周辺の友達関係に注目するのもいいでしょう。物流に注目して人の消費行動から意思決定のしくみを理解するという間接的なアプローチもありかもしれません。

しかし、世界の中の誰か一人について詳しく調べたとしても、残りの60億の人はどうなのだという疑問に答えることができませんよね。一方、物流のような間接的な要素を見たからと言って、みなさん一人一人の気持ちを理解したことにはなりません。

ここで覚えておいてほしいことは、世界中の人々が作っているすごく複雑な社会のしくみや、たくさんの神経細胞が作っている脳内の巨大ネットワークのようなものは、何を対象にして観察するかによって見えるものが変わるとい

ことです。宇宙人大好きという人を観察すれば、地球人は友好的であるという結論になりますが、逆のことも簡単に起こりえます。

それと同じように、わたしたち科学者が同時に観察することができる脳の範囲というのは限られています。それは結局、様々な技術的な制限のせいなのですが、脳全体を観察したいと思っても、そこに含まれている情報が莫大なせいで、それがうまくできないのです。

それは、デジカメで写真を撮るときに、レンズをマクロにするか広角にするかの違いと似ています。広い範囲を写したいときは、画面の細かいディテールは失われます。一方、マクロで撮影すると、ディテールは確保できても、撮影できる範囲が極端に狭まり背景の情報を記録することができません。つまり全体を見失うのです。

同じように、神経細胞の活動を1つずつ調べることはそんなに難しくありません。脳に電極を刺せば良いのです。しかし、それを同時に100億個の細胞に対して行うことは現実的ではありません。ヒトの髪の毛の本数は10万本程度だそうですから、髪の毛の10万倍の密度で電極を脳に刺して100億の神経細胞から信号を取り出すというのは不可能です。

通常、電極で記録する神経活動というのは、電極の先端を神経細胞に近づけて、その活動に伴って変化する細胞近くの電圧の変化を記録します。神経細胞の活動は、電気的な変化として記録することができるのです。

つまり、脳の中のたくさんの点から電圧測定ができれば、脳の中のたくさんの場所の活動の様子が観察できることになります。その時、電極のインピーダンスという抵抗値を調整することで観察できる範囲を調整することができます。このインピーダンスという値は、デジカメのズームや広角と似たようなものと思ってください。インピーダンスが高いと狭い範囲から、低いと広い範囲からの信号を記録することができます。これはマイクの指向性とも似ています。

そういう意味で脳活動を直接記録する方法の場合は大雑把に2種類あります。一つは神経細胞活動を一つ一つ丁寧に記録する方法。この場合はインピーダンスが高い電極を使います。もう一つは、たくさんの神経細胞の活動が混ざったフィールドポテンシャルというものを記録する方法です。こちらはインピーダンスが低い電極を使います。どちらの場合も手術が必要で、脳に電極を刺す、もしくは脳の表面に電極を配置する必要があります。

一方、脳の外から脳内の電気活動を記録する方法として、MEG（脳磁計）と

いう方法と、みなさんにおなじみの脳波があります。

また、脳の外側から、脳の中の活動を間接的に知る方法として、脳内のエネルギー消費を観察対象にすることもあります。それは先の地球人観察の例で言うなら、物流を観察することに近いでしょう。そのような方法としては、**fMRI** という脳内の血の流れを観察する方法や、**PET** という脳内を循環する特定の物質をモニターする方法もあります。

その他にも脳内から脳活動を記録する方法がいくつもありますが、それぞれに特徴があり、すべての点において理想的な方法はまだありません。

バランスの良い計測

理想的な方法というのはどういう意味でしょうか。当然ながら理想は研究者ごとに違いがありますが、脳の活動を調べるのに重要な要素は、観察のスピードと観察可能な範囲の2点です。

まず、観察のスピードというのは、一秒間に何回脳活動を観察できるかという意味です。実際の神経細胞の活動を記録すると分かりますが、普通の神経細胞の活動のスピードは1秒間に最大でもせいぜい100Hz程度です。これは、1秒間に活動状態に100回なるということで、言い換えれば0.01秒に1回オンとオフを切り替えるということです。

もし、そのような細胞を観察するのに、1秒に1回しか観察できないとしたらどうでしょうか。それで十分神経細胞の性質を理解できると言えるでしょうか。1秒に1回の観察では100Hzと110Hzの違いを区別するのは難しいですよね。

たとえばうちのネコは1日に何回も寝たり起きたりします。そういうネコの活動の様子を知りたいと思えば、やはり1日中付きっきりで頻繁に観察しないと分かりません。もし1日のうち昼と夜の2回しか観察しないとすれば、夜行性か昼行性かの結論を出すことすら難しいです。

それと同じで、神経細胞が発する電気的な信号を記録しようとしたら、十分に速いスピードで頻繁に観察する必要があります。これは、たくさんの神経が集まった細胞集団の活動の総和を反映していると言われるフィールドポテンシャルにおいても同じことです。

一方、脳の血流を測る**fMRI**のような場合は、血流の変化が十分遅いので、電気信号の記録ほどには頻繁な観察は必要ありません。ネコのように頻回に寝

たり起きたりしない、わたしたちヒトの場合は、せいぜい1日に数回の観察で十分活動の様子が分かります。あるヒトに会うのは、朝より夜のほうが多いとなれば、このヒトは夜型のヒトなんだと分かりますよね。

それでは、観察の範囲が重要であるとはどういう意味でしょうか。これは、どれくらい広範囲から脳活動を記録できるかということの意味します。電気的な記録は、電極の数が増えれば増えるほど広い範囲から記録が可能です。つまり、広い範囲から記録したいと思えば、その分電極の数が必要になることになります。

しかし、この電極の数は、様々な技術的な理由から制限があり、今のところ数百、最大でも500本くらいの電極しか使えません。となると、ある決まった範囲から記録を取りたいとすると、使える電極の本数が少なくなればなるほど、電極の密度を減らすか、あきらめて記録の範囲を減らすしかありません。

これはやはり先ほどのデジカメの例と似ています。電極の数はデジカメの場合はCCDの画素数になりますが、画素数が決まっているときに、どの範囲を撮影するかを決めると、自動的に画素1つあたりが撮影できる範囲が決まります。

たとえば、目の前のアリのマクロで撮影すると、細かいアリの身体の様子が撮影できます。しかし、風景を撮影する場合には、アリはただの黒い点にしかありません。アリを詳しく観察したいときに、それでは困りますね。

ですから、私たちは写真を撮るときには、観察したい対象に応じて、レンズを調節して画素の密度を最適にします。神経活動の記録も同じで、電極の密度を調整することが観察において最も重要な要素になります。

神経細胞活動を記録する方法には、電極を用いる以外にも、脳内の電気的な変化を光の変化に変える特殊な物質を使って、カメラ映像から活動を取り出す方法もあります。その場合は、まさにカメラの焦点をどこに合わせて、どれだけの範囲を撮影するかということが重要な要素になります。

実際は、それぞれの研究者が、それぞれの観察したい対象に応じて、様々な方法を最適化して用いています。ある人は、タンパク質だけに注目し、別な人は脳全体に注目したりしている。ということは、それぞれの研究者が見ている、もしくは考えている脳の現実は、結構異なっているという可能性が高いと言えるでしょう。それは、アリの形態をマクロで詳しく見ている人と、それをただの黒い点だと見ている人の間に、アリに対する大きな認識の違いがあるのと同じです。

逆に言うなら、どこに観察の焦点を定めるかに応じて、見ることのできないことも決まってしまうことにもなります。この見ることのできないことがあるという意識を持ち続けるということは非常に大事な事なのですが、私たちは目に見えるものに引きずられるのでついついその点を忘れがちです。これは、脳科学に限らず、生活のあらゆる場面で重要なことだと思います。

社会と脳

僕の研究室では、社会の中での脳の働きを調べようということを大きな研究テーマに掲げています。

一般に広く行われている脳研究は、その殆どが脳単体を研究対象としていました。ですから、身の回りの人々や環境がどのような影響を脳に及ぼすかについての研究はあまり行われてきませんでした。

しかし、みなさんの日常を考えてみればすぐに分かると思いますが、他人や環境の影響を受けない瞬間というのはほとんどありません。わたしたちは、社会の影響を非常に強く受けている生き物なのです。

たとえば誰かに言われた何気ない一言をずっと引きずることもあるでしょう。目の前の誰かの視線が気になって本当はやりたいと思っていることができないこともあるでしょう。面接や発表のときに緊張しすぎて失敗したことはありませんか。

本当なら気にしなくてもいいことを気にすること、そして逆にそれを上手に使って、思い通りに他人を動かしたりすること。そういうなんとなく理屈に合わないのだけれども、誰の日常でも明らかに存在する、自分と社会の関係を気にする脳のしくみを、社会脳と呼びます。

もし、みなさんがのび太で、ジャイアンから「木に登って柿を取ってこい」という命令を直接受けたら、おそらく嫌でもなんでも従うでしょう。でも、同じ命令をスネ夫から受けても従わない。しかし、同じスネ夫の命令でも、もしスネ夫の横でジャイアンがニヤニヤしていたとしたらどうでしょう。つまり、私たちは、1対1の関係だけでなく、社会という広いソーシャルネットワークの中の一部として存在し、その中の関係性の影響を強く受けるのです。

そのような社会脳という脳機能は、見たり、聞いたり、思い出したり、考えたりのような様々な脳の働きのすべてを総合的に必要します。なぜなら、みなさんが過去に経験した様々な出来事が、複雑に絡み合っていて、現在の状況が生まれてい

るからです。そして、現在というものは常に変化し、過去へと蓄積されていきます。

そのため、私たちは現在の環境の変化に迅速に対応しなければいけません。常に身の回りの状況をモニターし、それに応じて自分の振る舞いを調整することは、私たちが社会の中で生きる上で非常に重要な能力です。そこでは合理性よりも自分と身の回りの環境との関係性が重要な要素なのです。

そのような身の回りの状況を、少し難しい言葉で言えば「文脈」と言います。同じことをなじみのある言葉で簡単に言うなら「空気」と言っても良いかもしれませんが、つまり、社会脳は、空気を読んで社会的に正しい行動を行うために必要な脳機能だと言っても良いかもしれません。

社会脳がどれだけ大事かは、空気を読み違えたときの経験を思い出してもらうだけで十分だと思います。誰でも一度や二度の経験はあると思いますが、すごく「痛い」ですよね。

友達同士で大騒ぎしている部屋に、先生や偉い人が突然入ってきたら、その瞬間に場が「シーン」と凍りつきます。もし、そういう場面でも同じようにはしゃぎ続けると、間違いなく周りから止められます。それは、その行動がその場の文脈に相応しくない逸脱した行動だからです。

そのような現実的な社会環境では、何が正しくて何が正しくないかについて絶対的な正解はありません。わたしたちの普段の生活では、ある行動がある文脈では正しいのに、別な文脈では完全に否定されることはしばしばです。そのように、「行動の意味や価値を決めるのは自分自身ではなく外部である」というわたしたちの社会の特徴は、非常に不合理なものですが、人々に対して強力な影響力を持っています。

それは、その影響を受けるわたしたちの脳に、そのような性質があることが原因だと考えるのが自然だと思います。なぜなら、そのような社会脳の働きは、人種や地域を問わないからです。もちろん、それぞれの土地や文化に根ざしたルールはあるでしょう。しかし、場の空気が人々の行動を簡単に変えてしまうという点は、人種を問わず、あらゆるヒトの脳に共通してみられる特徴だと思うのです。それは、社会脳という共通の脳機能の存在を仮定することで理解できます。

社会脳を調べるには

それでは、そのような社会脳を研究するにはどうすればいいでしょうか。考えてみてください。記憶の研究をするなら、何かを覚えてもらうというような記憶に直接関連した実験を行います。運動制御のしくみを調べるなら、運動のいろいろな条件に応じて脳がどのように働いているかを調べればいいでしょう。しかし、世の中を見回しても、社会脳にしか関係しない特有の行動は見つかりません。むしろ、わたしたちの行動のすべてが社会脳の一部だと言っていいでしょう。

これまでも、社会脳という考え方はあったのですが、それを脳科学で取り扱うことはあまりありませんでした。その理由は大きくは技術的な問題点からです。

これまで説明した通り、社会脳というのはものを見たり、聞いたり、思い出したり、考えたりというような様々な脳機能を統合した結果実現される複雑な総合機能だと考えられます。そういう脳の働きは、脳の中の1カ所が働くことで実現されているのではなくて、むしろ脳全体を使って処理していると考えるのが正しいと思うのです。

だとすると、社会脳を研究するには、脳全体を対象にして脳の働きを調べなければいけません。さらにそういう時の脳は、普段と同じかそれに近い、他者が存在する、自然な社会環境に囲まれている必要があります。つまり、従来行われてきた実験方法のように、脳の働きを調べるときに、fMRIのスキャナーの中で頭を固定したり、実験室の中に閉じ込めて外部と隔離したりしなければいけないとすると、社会環境文脈に応じて行動を切り替えるしくみという、本来の意味での社会脳の研究はできないことになります。

いまでも、ヒトを対象としてそのような実験環境を整えることはできていません。しかし、わたしたちの研究室では、ニホンザルを使って社会脳研究に必要な実験環境を作ることに成功しました。みなさんもお存知の通り、ニホンザルは群れで暮らす社会的な動物です。ボスザルを中心とした上下関係が存在し、その上下関係がそれぞれのサルの行動の基準になっています。

たとえば、あるサルの前に大好物のサツマイモが転がっているとします。周りに誰もいなければそれを食べることに何の問題も生じません。しかし、そのサルの隣にそのサルよりも上位のサルがいたとしたらどうでしょうか。その場合にサツマイモを手にするのは上位のサルです。下位のサルはサツマイモに目を向けることはあっても、それに手を伸ばすことはありません。

つまり、そこでは他者（上位サル）がいることで、行動のレパトリーが大きく制限を受けているのです。サルにみられる、このような「がまん」のしくみが、社会脳の基本にあるとわたしたちは考えています。

サルの行動で面白いのは、隣に強いサルがいたとしても、その上位サルがサツマイモに注意を払っていないことが分かれば、下位のサルはさっさとそれを手にとって逃げていくことです。

つまり、上位のサルが、いまどこに注意を払っているかということが、下位のサルには重要で、それによって瞬間の文脈が決まります。文脈というのは、他者がどこに注意をはらっているかという情報を含んでいますから、常に変化するものです。なぜなら注意は常に移動し続けているからです。となると、上位のサルが近くにいる下位のサルが、文脈に沿った正しい行動を行うには、上位のサルの行動と注意に常に気を使わなければいけません。それができない、空気を読めないサルは、空気を読めないヒトと同じように、ボスザルとの間に社会的な問題を抱えることになります。

そのような、瞬間の文脈の変化に応じて、瞬時に行動を切り替えるサルの様子は、まさにヒトが状況に応じて行動を切り替えるのと同じように見えます。サルとヒトは進化的につながっていますから、サルの社会的な行動のしくみが、ヒトのそれにも組み込まれているという考え方はそんなにおかしな考え方ではありません。

そのようなサルの脳活動を計測するのに、わたしたちが使っているのは、**ECoG (Electrocorticography)**と呼ばれる電極です。これは直径 2 ミリ程度の円盤状の白金電極で、これを脳の表面にたくさん配置します。この電極を使って記録できる脳活動は、脳の表面から記録されるフィールドポテンシャルです。この電極はインピーダンスが低いので、神経細胞一つ一つの活動を区別することはできない代わりに、電極周辺数ミリの範囲にあるたくさんの神経細胞集団の活動を反映した信号を記録していると考えられています。もし **ECoG** 電極を 5 ミリ間隔程度で配置するなら 300 チャンネルもあれば左右の脳表面全体からの同時記録が可能です。これは十分現実的な数ですし、密度を 2 倍にすることも現在の技術で十分可能です。

さらに、この記録方法は、頭を固定する必要がありません。これは、これまでの実験方法から比べると非常に大きな利点です。なぜなら、行動に制限のない、現実的な社会環境の中で脳活動を記録できるからです。

つまり現状では、現実的社会環境下で、脳全体から同時に神経活動を記録して、社会脳のしくみを理解しようとしたら、サルを対象にした ECoG 電極を使った脳活動記録方法以外に方法がありません。

もともと ECoG 電極は、てんかんという病気の患者さんの診断目的に使われるものでした。ただ、てんかん患者さんの場合は異常があると思われる脳の部位にしか電極を入れることがありません。そのため、たとえ技術的に可能でも、脳全体を電極で覆うということは行われておらず、社会脳のしくみを調べるといった目的にはあまり向いていません。また、ヒトの場合は、皺が多いので、皺の中を調べるのが難しい ECoG 電極では、たとえ全脳表を覆ったとしても、皺の中の記録がとれないのであれば、全体を観察して理解することは困難です。

もちろん、たとえ脳の一部だとしても、患者さんの協力があれば、電極が入っている脳部位に応じた実験を行うことが可能です。世界中で、実際にそのような実験は数多く行われています。しかし、脳全体を使う社会脳という脳の働きを理解するには、それではまだ十分とは言えないのです。

がまんと選択

それでは、サルを使った社会性実験というのはどういうものなのでしょう。実は、自由な社会環境の中で、脳活動を記録しながら社会性実験を行っている研究室はほとんどありません。そこで、わたしたちが行っている実験の様子を一例として紹介しましょう。

一般に、わたしたちの研究分野で、サルに何かをやらせようことを、課題と言います。たとえば、サルの目の前にリンゴやサツマイモなどのエサを置いて、それにサルが手を伸ばし、口に運んで食べるという動作を行う課題を到達運動課題、もしくはリーチング課題と言います。リーチングというのは何かを手を伸ばすという意味です。

この課題は、特別なトレーニングは必要のない、簡単な課題です。なんと言っても、目の前に置かれたおいしいエサに手を伸ばして食べるだけですから、サルの立場から考えても、これ以上簡単な課題はありません。サルは、目の前にエサが置かれたら、そのエサが置かれた場所に応じて、右手か左手のどちらかの手をどのように伸ばすかを決め、その決定に従って手を動かし、エサをつかんだら、口に運んでモグモグと食べます。

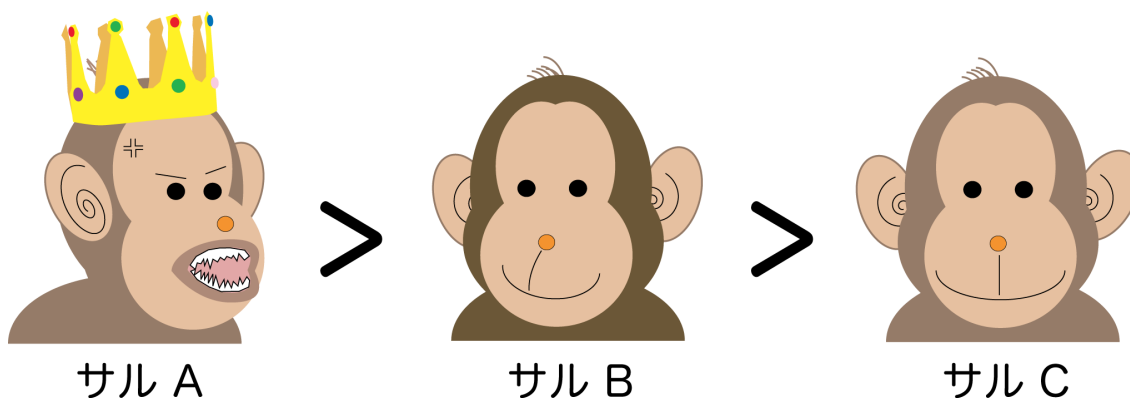
では、これまで 1 頭だったところに、もう 1 頭のサルを連れてきたらどうで

しょうか。サルの目の前に置かれる餌は1つ、そこには2頭のサル。そういう状況で何が起きるかと言えば、当然ながら両者の間に競争が起きます。何と言っても、勝者は1人しかいないのですから。

となると、どちらのサルもエサを手に入れるために我先に手を伸ばすようになります。出遅れると相手に取られてしまうからです。では、そういう2頭のサルが何度もその課題を繰り返すとどうなるのでしょうか。彼らはいつまでも争いを続けるのでしょうか。

実は、面白いことに、初めて出会った同士のサルは、エサを前にすると我先にエサに手を伸ばしますが、30分程これを繰り返すと、一方のサルがエサを取ることがやめるようになります。これは、わたしたちがやめろと言って止めるのではなく、なぜか自主的に諦めるようになるのです。いったん片方のサルがエサ取りを諦めると、両者の間の上下関係が決まります。もちろん、諦めたほうのサルが下位です。いったん一方が諦めると、その上下関係は長期間維持されます。つまり、「勝負あった」ことになるわけですね。このような課題を、わたしたちは社会的エサ取り課題と呼んでいます。

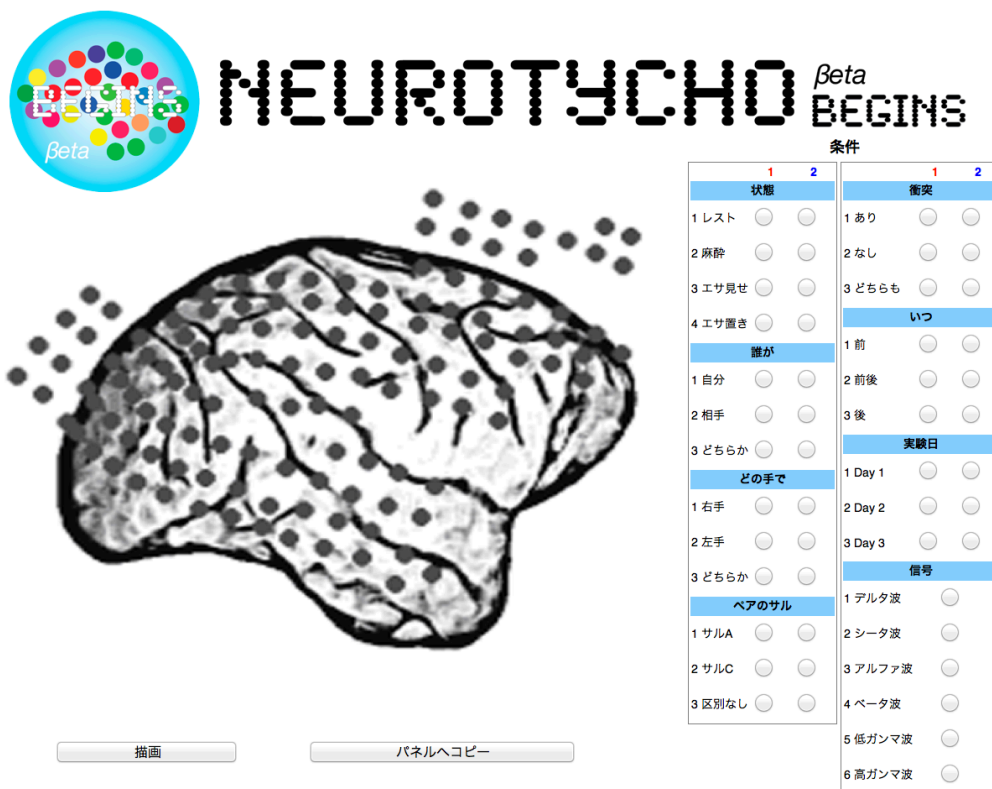
複数のサルを対象にして、そのような課題を行うと、どのペアについても似たような形で決着が付きまます。たとえばここにA、B、Cの3頭のサルがいて、A対B、B対C、A対Cの競合の結果 $A > B > C$ の順番がついたとします。すると、3頭の間ではAは常に上位だし、Cは下位です。しかし、Bに関しては相手に応じて上位と下位を切り替える様子を観察することができます。つまり、AやCと一緒にいるときのBの行動と脳活動を観察すれば、社会的な行動選択のしくみを明らかにできると考えられます。



脳活動を見る

それでは、これからそのようなサル B の脳活動を一緒に解析してみましよう。今回わたしたちは、このサル B の社会的エサ取り課題中の脳活動を調べることができるソフトウェアを作ってみました。

まずはこちらのページ (<http://begins.neurotycho.org/>) を、コンピュータのブラウザで開いてみてください。下の図のような画面が出ましたか？ 出ない場合は、URL が間違っているかもしれないので、よく確認してください。



NEUROTYPCHO ^{Beta} BEGINS

条件

	1	2		1	2
状態			衝突		
1 レスト	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1 あり	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2 麻酔	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	2 なし	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3 エサ見せ	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	3 どちらも	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4 エサ置き	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	いつ		
誰が			1 前	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
1 自分	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	2 前後	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2 相手	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	3 後	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3 どちらか	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	実験日		
どの手で			1 Day 1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
1 右手	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	2 Day 2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2 左手	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	3 Day 3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3 どちらか	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	信号		
ベアのサル			1 テルタ波	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
1 サルA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	2 シータ波	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2 サルC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	3 アルファ波	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3 区別なし	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	4 ベータ波	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
			5 低ガンマ波	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
			6 高ガンマ波	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

描画 パネルへコピー

ここに出ているのは、脳の模式図と電極の位置、そして解析に必要ないろいろな条件です。脳の模式図の上には、グレーの丸が並んでいますよね。この丸の一つ一つが電極の位置を表しています。

この脳はニホンザルの脳で、右半球を真横から見えています。図の右側が脳の前の方、左側が脳の後ろになります。電極が、脳から飛び出したところがありますが、これは脳の内側に折り曲げて入っている電極を、外側に折り返して、見えるように表示してあります。

まず、覚えておいてほしいことは、脳には右半球と左半球の 2 つがあるとい

うことです。つまり、左右の脳が 1 対になって、1 つの脳が出来上がっているのです。

この図では、脳の表面に 10 本程度の線が入っていますが、これは脳の表面にある皺です。この皺を境にして表面を内側に折り込むことで、脳の表面積が増えるというしくみになっています。頭蓋骨の容積が決まっているときに、脳の機能を増やすには、進化的には脳の表面積を増やす以外に方法がなかったでしょう。サルからヒトに進化する途中で、脳の皺の数はどんどん増え、脳の表面積も大きくなりました。比較的古い霊長類であるマーモセット等には皺がほとんどありませんが、ヒトの脳には入り組んだ非常に複雑な皺があります。

ニホンザルの場合、皺の数はヒトほどではありませんが、皺を境にして内側に折れ込んだ部分の表面積の割合は、表面に露出した部分の面積と比べて少なくありません。ですから、この電極が表面しか覆っていないということは、大脳皮質のすべてを観察しているわけではないということ覚えておいてください。もちろん、皺の奥に隠れている神経細胞活動が全く表面から見えないかという、必ずしもそうでないかもしれませんが、しかし、基本的には表面に見えている場所以外にもたくさんの情報が隠れていることは、こころに留めておいてください。

さてこれ以上は、言葉で説明するより、まずはいじってみましょう。まず、画面上にいくつかのボタンが 2 列に並んでいますね。それでは、ブラウザでアプリケーションを開いて、

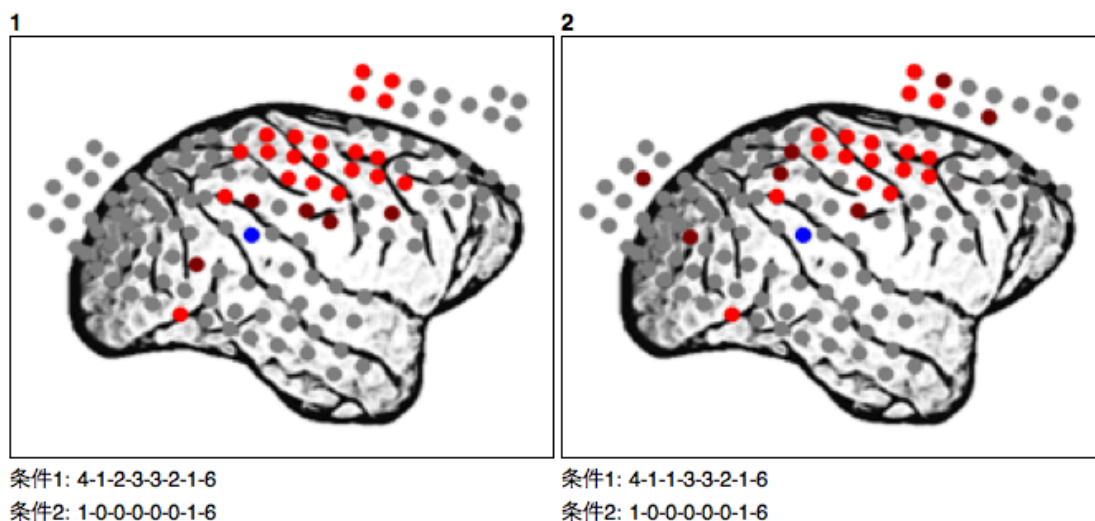
左側の列（条件 1 の列）を上から順番に、“エサ置き”、“自分”、“左手”、“区別なし”、“どちらも”、“前後”、“Day 1”、“高ガンマ波”、右側の列（条件 2 の列）を“レスト”、“Day 1”、にセットしてください。

これ以後、しばらくは、“ペアのサル”、“衝突”、“実験日”に関しては、“区別なし”、“どちらも”、“Day 1”で固定しておいてください。これらは左右両方（条件 1 の列と条件 2 の列）を押さないと進みませんから気をつけてください。

条件を上記の通りにセットして「描画」ボタンを押すと、脳の表面に色がつかれましたね。下にあるパネルの 1 を押した後に、コピーボタンを押してください。この図がコピーされましたね。それでは、条件を左側の列を“エサ置き”、“自分”、“右手”、“区別なし”、“どちらも”、“前後”、

“Day 1”、“高ガンマ”、右側の列を“レスト”、“Day 1”、にセットしてください。「描画」ボタンを押して、コピーボタンを押してください。

少し赤い電極が減りましたね。この2つの図の赤い電極は、サルが左手もしくは右手を使って、目の前にあるエサに手を伸ばす運動をしたときの、脳活動の高ガンマ帯域と呼ばれる周波数の強さが増えた場所を示しています。増えたというからには、何かと比較して増えたり減ったりしていると言っているはずですが。この場合の比較対象は、サルがじっとしている（レスト）状態と手を動かしたときの比較の結果を表しています。



それでは、この図から、私たちは何を読み取ることができるのでしょうか。まず行動に関して、レストのときと比べて一番違うのは手を動かす運動を行っているかどうかという違いです。

では、手を動かす運動を行うときに必要なのは、手を動かすことだけでしょうか。なんだか変な質問ですが、もう少し分かりやすく言い換えると、手を動かすときに、手を動かす以外に、脳がやらないといけないことはなんでしょうか。腕を実際に動かす脳の立場になって考えてみましょう。

まず、エサに手を伸ばして口に入れるには、エサが置かれるその場所をきちんと確認しないといけません。もちろん、それが本当にエサなのか、エサだとしたら好きなエサか嫌いなエサかも確かめないとはいけませんね。石ころや嫌いなエサなら手を伸ばす必要がありませんから。

次に、その場所に手を動かすための運動の計画を立てましょう。関節の角度とか、筋肉の動かし方とか結構たくさんを決めなければいけません。みなさんも、実際に手を膝の上に置いた安静な状態から、目の前にある何かをつかむように腕を動かしてみてください。腕を動かすには、つかむ動作をする腕以外の身体の他の部分も総合的に動かす必要があることが分かりますね。つまり、エサに手を伸ばすリーチング運動は、一見単純な腕だけの運動に見えますが、実は複雑な全身運動なのです。

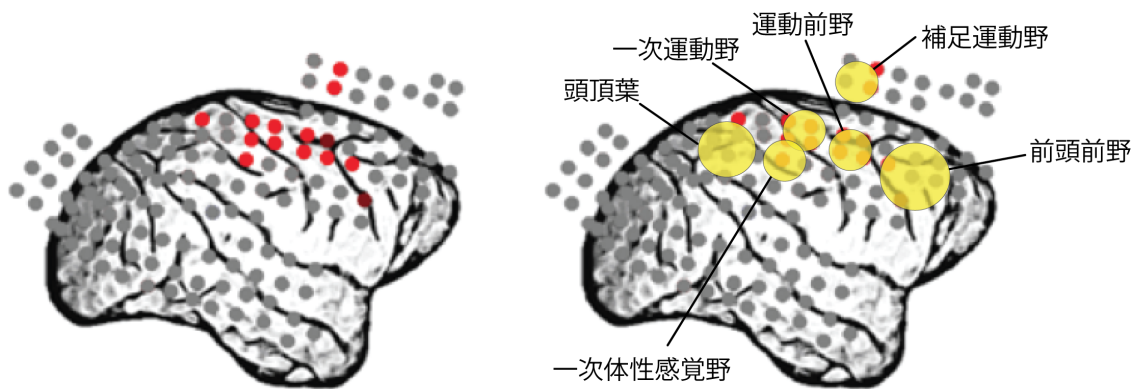
立てた計画を行うには、さあ始めるぞというきっかけの信号も必要です。もちろん、それをいつどういうタイミングで行うかという計画も立てなければいけません。

さらに、運動の途中で、予定通りに手が動いているかを確認しつつ、もしずれていたとしたら運動軌道のリアルタイムでの修正も必要です。そして手がエサに触れたなら、それをしっかり握って、触感を確かめることも大事です。エサに見えて、実は偽物かもしれませんからね。もし、その触感が期待通りだったら、口に運んで食べることになります。口に入れる直前に、少し匂いを嗅ぐかもしれません。口の中では、モグモグとおいしく味わいます。

エサに手を伸ばすという単純な運動の背後では、そのようなたくさんの情報処理を脳は行っているのです。もちろん、上にあげた例は、あくまで脳が行っていることの一部でしかありません。実際は、周りに仲間の誰がいて、その個体が何をしようとしているか、敵はいないか、風の匂いはどうだなど、環境の中に埋め込まれた際限なくたくさんの情報が同時に処理されている可能性があります。

さて、これだけたくさんのことが行われているとしたら、この赤い点のどこがどんなことに関係しているのかが分からないといけません。そこで、別の見方をしてみましょう。

左側の列を“エサ置き”、“自分”、“左手”、“前後”、“高ガンマ波”、右側の列を“エサ置き”、“自分”、“右手”、“前後”、“高ガンマ波”にセットして描画、3にコピーしてください。



そうすると、先程よりも大分狭い範囲に赤い点が集まりましたね。この点は、右側から、前頭前野、運動前野、補足運動野、一次運動野、一次体性感覚野、頭頂葉と呼ばれる場所です。まず、先ほどと比べて、赤い電極の数が半分以下になりました。これはなぜでしょうか。

実は、先ほど比較の対象にしていたのは、“レスト”、つまりサルが運動していない安静状態の脳活動でした。一方、今回の比較対象は、同じサルが右手でエサを取りに行ったときの脳活動の状態です。つまりこの2つの条件の間では、動かしている腕は左右で違いますが、それ以外の要素、たとえば、エサの種類や場所を最初に確認するところとか、運動を始める開始信号等の共通要素を含んでいると考えられます。

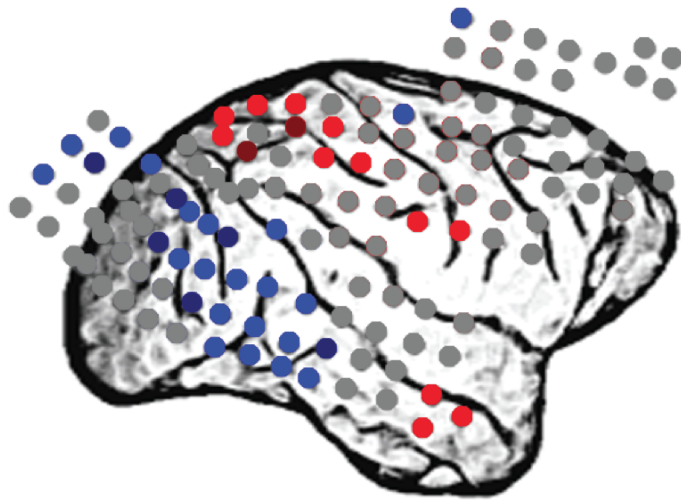
ここで、赤く表示されている電極は、その信号が、2つの条件で比較したときに違うということを示しています。つまり、この比較では、右手を動かすときと、左手を動かすときに同じように働く共通部分は現れてこないのです。

たとえば、手を前に伸ばすときに、両足を踏ん張るとします。その踏ん張る動作が、右手を動かすときと、左手を動かすときにあまり変わらないとしたら、このような比較をしたときには、踏ん張る動作に関する脳活動には差が出て来ません。つまり、この赤く表示されている脳の場所は、左手を使ったリーディング運動を行うときに、特異的に活動する部位というように考えることができるでしょう。こういう場所を運動関連領域というふうに言います。

一般に私たちの脳は、右半球なら左半身、左半球なら右半身についての運動情報処理を行います。もちろん、場所によっては、運動の左右区別をしない部位もありますが、この図は、その両方に共通のところは引き算されているので表示されていません。

それでは、次に別の周波数の様子を見てみましょう。今度は以下の通りにセットしてみてください。

左側の列を“エサ見せ”、“どちらか”、“どちらか”、“前後”、“ベータ波”、右側の列を“エサ置き”、“どちらか”、“どちらか”、“前後”、“ベータ波”にセットして描画してください。



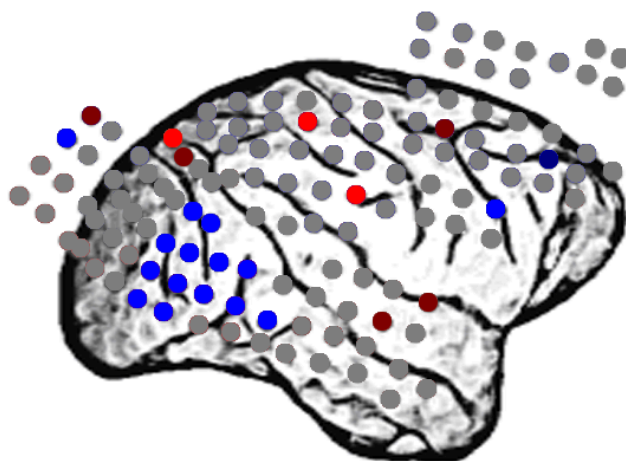
出ましたか。今度は赤と青できれいに分かれましたね。中央3分の1が赤く、左下3分の1が青いですね。これが何を表すかということ、赤い部分、頭頂葉、一次体性感覚野と側頭葉では、ベータ帯域と呼ばれる周波数の強さが、サルにエサを見せたときのほうが手を動かしているときより強く、一方の青い点で示された腹側視覚野と呼ばれる部分は、エサに手を伸ばすときのほうが、エサを見るときよりも強いということになります。

一般にベータ帯域の活動の強さは、神経活動の強さと逆に変化すると言われています。そう考えると、エサを見たときに神経細胞が活動しているのは青い点で示された腹側視覚野で、腕を動かすときに活動しているのは、赤い点で示された頭頂葉、前頭前野と側頭葉になります。

それでは、その視覚野の活動が、エサを見る前と、見た後でどう変化するかを見てみましょう。今度は、再びガンマ帯域の活動を比較します。以下のように

にセットして描画してください。

左側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“前後”、“高ガンマ波”、右側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“後”にセットしてください。



さあ、どうなったのでしょうか。先ほどベータ帯域で活動を変化させた腹側視覚野が同じように青くなっていますね。これは、エサを見た直後に、ガンマ帯域が強くなっているということを示しています。ガンマ帯域は、比較的神経細胞の活動の変化と相関があると考えられており、それを踏まえて考えると、この後ろ側の部分、つまり視覚野が、モノを見ることに重要な役割を果たしていることが推察されます。

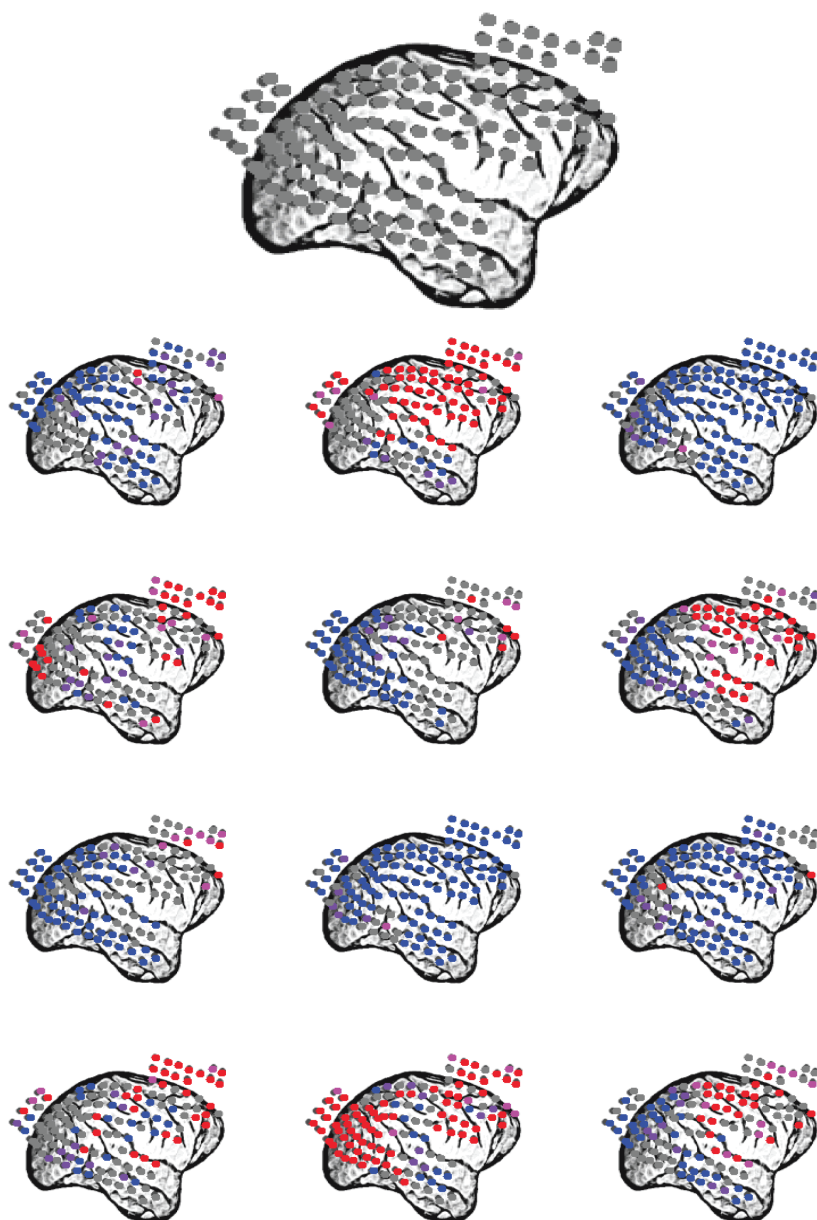
脳地図を作ってみよう

さて、ここまで何枚かの図をみなさんと一緒に作ってきましたが、どう思いましたか。なんだか複雑ですよ。初めてこういう作業をするみなさんは、多分何がなんだか分からないと思います。

正直言うならば、わたしたち研究者もよく分かっていないというのが本当のところですよ。

これまでの図を作るのに、みなさんが変えた条件は、「状態」が、1) レスト、2) エサ見せ、3) エサ置きの3種類。「誰が」は自分の1種類。「どの手で」は、1) 右手、2) 左手、3) どちらかの3種類。「いつ」が1) 前、2) 前

後、3) 後の3種類、「信号」が1) ベータ波、2) 高ガンマ波の2種類でした。
これを計算すると、片側の条件だけで、レスト(1) × 信号(2) = 2と、状態(2) × 誰(1) × どの手で(3) × 時間窓(3) × 信号(2) = 36の合計38通りの条件が選べますから、単純に38 × 38 = 1444種類の図を作ることができるわけです。



もし時間があるなら、この1444通りの図を次々に作ってみてください。
面倒くさいなと思う人は、適当に10枚くらいの図を、条件を適当に変えて作
ってみてください。そして、可能なら、それを10枚程度プリントして、机の

上に並べてみてください。もし、それも面倒だというのであれば、上の図をよく見てください。

それをざっと俯瞰してみて一体何を感じるでしょうか？ どの図が、どの条件で作られたかは忘れてください。とりあえず図だけをよく見てください。

これまでみなさんと作ってきた図もそうでしたが、赤くなったり青くなったりする場所にかたまりがあると感じませんか。もし、それぞれの電極が脳活動ではなくノイズと呼ばれる脳活動以外の信号だけを拾っていたとしたら、このような条件間の比較で、1つの条件に応じて活動が高まる場所がひとかたまりに集まる必要はありません。むしろ、脳の場所によらない信号であるなら、このような活動が高まる場所は脳全体に散らばるはずですよ。

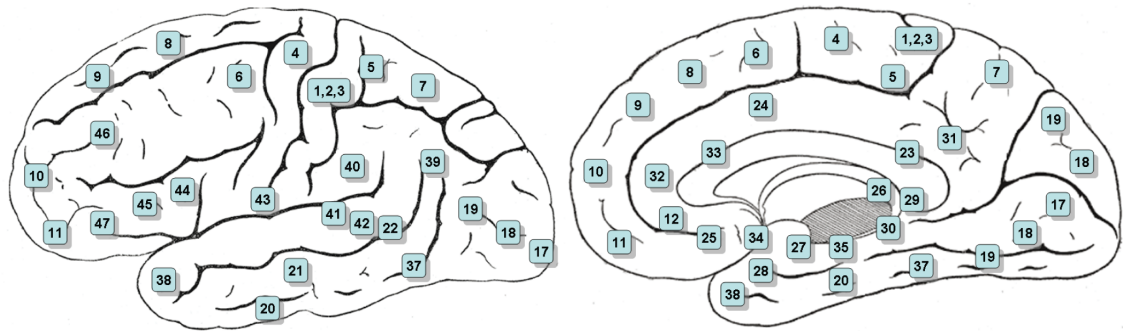
しかし、現実のデータは、そうはなっていないようです。何かの条件を設定して条件間の脳活動を比較すると、ある特定の場所が大小様々なひとかたまりになって現れてきます。このような特徴を、脳の機能局在と言います。

機能局在というのは、脳のある部分が特定の働きをしているということです。たとえば、八百屋とタクシーの運転手では仕事の内容が全然違いますよね。でも、仕事の内容が違っていても人がやっているという点では同じですよ。

大脳皮質の実際もそれに似ています。大脳皮質のそれぞれの場所は、すでにお話ししたように6層の層構造を共通に持っているのですが、それぞれの脳部位で取り扱っている情報の種類や処理の内容が異なっていると考えられています。そのように、場所によって異なる情報処理機能が行われているという考え方が機能局在という考え方なのです。

脳のしくみについて、これまでいろいろな側面から研究されて来ましたが。たとえば、大脳皮質に6層あるといっても、その6層の厚みというのはそれぞれの場所で異なっています。同じ6層のショートケーキがあったとして、それぞれの層の厚みというのは、お店によって微妙に異なりますよね。それと同じで、ある場所の第4層は厚いとか、第2層が薄いとか、詳しく調べてみると場所ごとに層構造に違いがあることが分かっています。このような比較を組織学的な比較と言いますが、それを元に脳部位を分類した地図があります。

一番有名な脳地図はブロードマンという人がいまから100年前の20世紀初期に作った脳地図ですが、これはヒトの脳部位を組織学的な特徴によって52の領野に分類したものです。



出典 (Wikipedia)

同じような方法でサルの脳地図も作られています。ここで注意してほしいのは、この脳地図は、脳の働きとは関係なく、それぞれの脳部位の大脳皮質を薄くスライスしたものを光学顕微鏡で覗いて、各層の細胞の分布の特徴を詳しく調べることによって作られたものだということです。これを組織学的分類と言います。

理屈の上では、ブロードマンの脳地図で分類される組織学的な脳部位の違いは、各脳部位の働きの違いと、直接関係は無いはずですが。しかし実際は、それぞれの脳部位の脳活動を元にした機能的特徴によって作られる機能的脳地図と比較的一致していることが確かめられています。

たとえば、ブロードマンの4野と呼ばれる部位は、機能的には一次運動野と呼ばれますが、その前方にあるブロードマン6野とよばれる運動前野とは、果たしている役割が異なっているらしいことが知られています。

様々な研究の結果、脳活動に基づいて作られる機能地図は組織学的な地図よりも少し細かく分類されて来ました。たとえばブロードマン6野は、現在では単なる運動前野という一括りではなく、運動前野背側部、運動前野腹側部、補足運動野などに分けられ、それらはさらに前後に2つに分けられると考えられています。

それでは、そのような機能地図をみなさんも作る事ができるでしょうか。

それは、簡単です。先に示したようなたくさんの条件を元にした脳活動マップをたくさん作ってプリントしてみてください。もしくは数ページ前の図をプリントしてよく見てみてください。それらの図をじっと見ていると、おそらく

それぞれの図の中にいくつかのかたまりが見えるでしょう。それが見えたら、かたまりの周りに境界線を引いてみましょう。

その境界線は、その図を作るときの条件を元にした機能的な境界線です。そしてそれを複数の図で作ってみましょう。そしてそれを重ねあわせるとどうでしょうか。ある時にはひとかたまりだった領域が、別の図ではAとBというように分かれていたりすることでしょう。そして、Aから分かれたBが別の図ではCと一緒になったりしています。そういう作業を10か20くらいの図を元にして、A、B、C...という感じで脳全体を切り分けてみてください。



その結果を、上の図に書き込んでみてください。いくつくらいの領域に分けることができたでしょうか？ 僕がやってみたところ、大体15前後の領域に分けることができました（下図参照）。

僕には事前に脳内の機能地図に関する知識がありますから、おそらくみなさんとは違う分け方をしている可能性があります。特に違うのは、僕が脳の溝を領域の境界線に引きがちだということだと思います。

脳の溝というのは、そこから脳の表面が内側に折れ込んでいるので、溝を境にした2つの領域は、一見隣り合っているように見えて、実は折れ込んだ部分を考慮に入れると距離的には随分離れているのです。谷にかかる橋を渡るより、谷を降りてもう一度登るのでは距離が随分違うのと同じですね。そのため、脳の溝は各脳領域の境界になっていることが多いのです。



しかし、そういうことを知らなくても、このアプリケーションで作る図は、その溝の位置できちんと境界が現れることが多く、専門家のわたしたちも驚くばかりです。それはすなわちわたしたちの ECoG 電極が記録している内容が、電極周辺の局所情報だけを選択的に集めているということを意味しています。

このような脳機能地図を作る作業は、これまで大学院を出た博士研究者が何年もの詳細な作業を積み重ねてようやく作ることができる貴重なものでした。しかしながら、ECoG 電極による全脳記録という新しい手法を用いることで、このように誰にでも簡単に作ることができるようになりました。10年前にはあり得なかったことです。

全体像を捉えること

このように簡単に脳地図が作れるようになった状況は、衛星写真のワンショットで正確な地図が手に入るということと似ています。江戸時代に伊能忠敬が17年もかけて日本中をくまなく計測して初めて詳細な日本全土地図ができましたが、いまは Google マップを見れば、誰にでもそれが無料で手に入ります。日本の地形を知るのに、どちらが理想的な方法だと思いますか。伊能忠敬が現在生きていたら、きっと衛星にしようよと言うのではないかと思います。

もちろん、衛星写真には解像度の問題点がありますから、万能ではありません。しかし、衛星写真のおかげで全体像を捉えることが非常に簡単になりました。この全体像をいったんつかんだ後に、衛星では捉えきれない細かいところ

を確かめるために全国に足を運ぶということは、利用価値の高い地図の作製には必要です。それは、Google マップに Google ストリートビューが後から加わったのと同じ順番ですね。全体像があるからローカルの詳細がいきるのです。

しかし、これまでの神経科学は、全体像を構築することなく、細部へ細部へとどんどん突き進んできました。なぜなら、全体像を構築する方法がなかったからです。それは伊能忠敬が衛星写真を持っていなかったのと同じです。伊能忠敬は細部を積み重ねることで正確な地図を作りました。しかし、それがあらゆるケースで成功するとは限りません。

全体像を持たなくても、細部の積み重ねで全体像に到達できるのは、全体が比較的小さい時だけです。もし、伊能忠敬が同じやり方でユーラシア大陸の地図を作るとしたら、きっと途中で諦めたことでしょう。日本だからできたのです。

脳科学においても、細部の積み重ねで全体像がいつかは作れるだろうというのが、当初の期待でした。しかし、現実には脳に関する細部の知識がいくら積み重なっても、全体像の構築にはほど遠いというのが脳科学者の実感ではないかと思います。脳の構造や働きに関する情報はあまりに莫大だからです。

そういう意味で、ECoG 電極を用いた脳活動記録というのは、全体像をつかむのには最適だとわたしたちは考えています。脳がいくつの領野に分かれていて、それらが、どういう時にどういふ変化をするのか。つまり、全体の中の一部という視点を常に持ちながら部分を見るということが、非常に重要なことなのです。

現在のわたしたちの ECoG 電極には問題点もあります。それは、脳の表面からしか記録ができないということです。脳には溝がありますから、その内側からも記録する必要がありますし、脳の深い場所には、たくさんの皮質下核と呼ばれる、重要な構造もあります。ECoG 電極はそれらの活動を記録することができません。

しかし、衛星写真が記録することができない洞窟や深い谷があったからといって、衛星写真の価値が下がらないのと同じで、ECoG 電極を用いた記録手法は、それだけで大きな意味を持っていると思います。深い場所から記録するには別な方法を合わせて使えば良いのです。

なにより、これまでみなさんが実際に手を動かしてマップを作ったように、実に簡単にそれぞれの脳部位の特徴をあぶり出すことは、いままでのどの方法

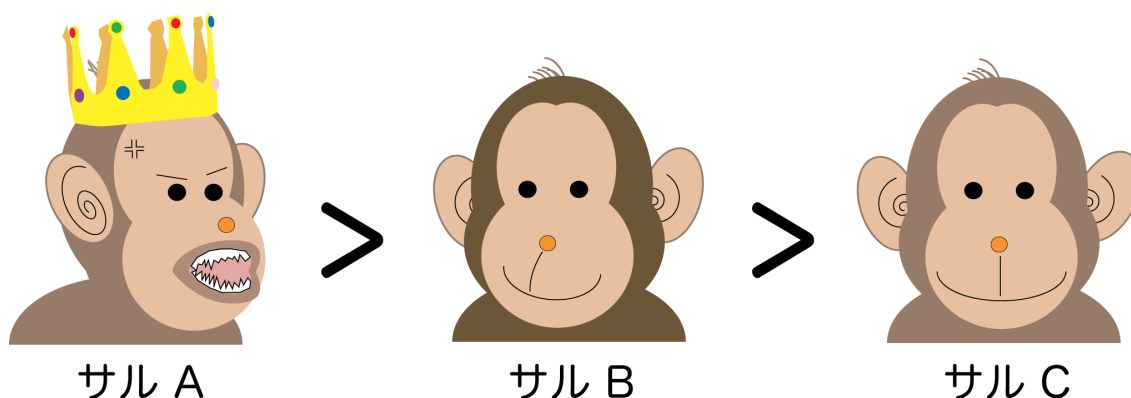
でもできなかったことです。たとえば、fMRI を使って同じことをやろうとしても、ほとんど前処理をしない生データのレベルで、ここまで簡便にマップを作ることはできないでしょう。ましてや、空間解像度が低い脳波では、このようなマップを作ることすらできません。

現在の ECoG 電極は、まだ荒削りですが、この方法を洗練させていくことで、これまでになかった精密かつ大規模な脳活動記録ができるようになると思っています。ECoG 電極は、衛星写真の解像度が上がるのと同じ道をたどるでしょう。

他者関係と自分

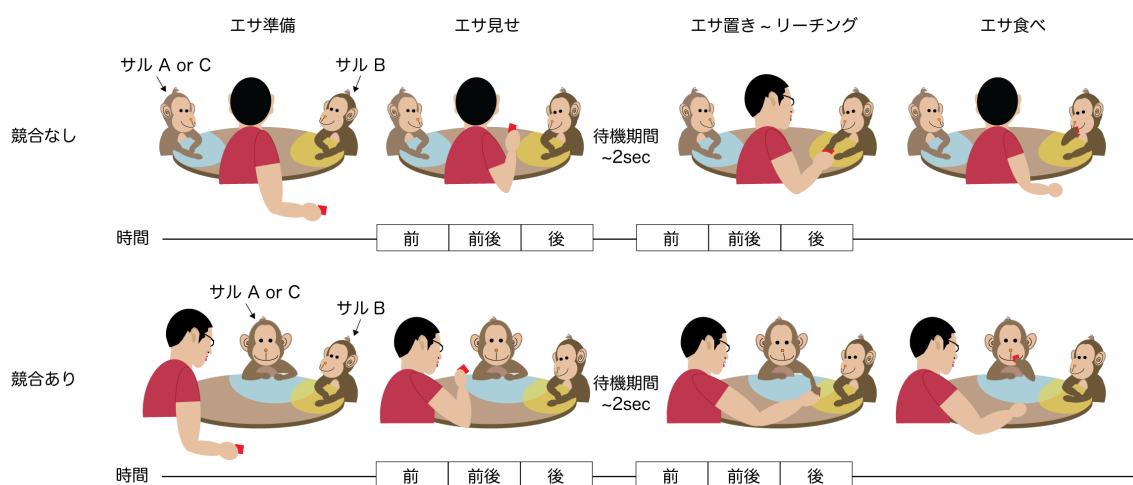
これまで、みなさんと一緒に進めて来た解析では、社会的な関係性の影響については無視してきました。しかし、このアプリケーションで扱っているデータの中には、いくつかの社会的な関係性が混ざっています。

まず、この実験では、記録しているサルを B とすると、そのサルよりも上位のサル A か、そのサルより下位のサル C が同じ環境と一緒にいました。



そして、2頭が座る相対的な位置は、向かい合わせ、もしくは隣り合わせの2種類がありました（下図参照）。向かい合わせの場合には、2頭の距離は十分離れているので、1つのエサをめぐる対立は起きません。しかし、2頭が隣り合わせの場合には、エサをめぐる衝突が起きます。ただ、隣同士に座っているからといって、衝突が常に起きるのではなく、両者が共有している場所でだけ起きます。つまり、隣り合わせに座っていても、上位のサルは手が届かないけれど、下位のサルなら手が届くという場所に置かれたエサは下位のサルのもので、下位のサルが我慢しなければいけないのは、上位のサル、下位のサルの

両方が手を伸ばせる場所にエサが置かれたときだけです。



課題のながれ

この実験では、エサがどこに置かれるかは、エサを置く実験者の手が動き始めるまで分かりません。それは、衝突がある場合もない場合も同じです。

まず、実験者はサルにこれから与えるエサを見せます。そして、サルがそれを目で見るのを確認して、数秒待ってからどちらかのサルの前にエサを起きます。サルは、実験者がエサをどこに置くかをよく見て、自分が取っても良い場所に置かれることを確認したら、その場所に対して腕を伸ばしてエサを手に取り、口に運んで食べます。

もし、両者の間にエサをめぐる確執や逡巡が生じるとするなら、エサが置かれる少し前から始まるはずです。

それでは、そのようなときの脳の変化の様子を時間の経過を通じて見てみましょう。

まず左側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“サル A”、“あり”、“前”、“Day1”、“高ガンマ波”、右側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“サル A”、“あり”、“前後”、“Day1” にセットしてください。

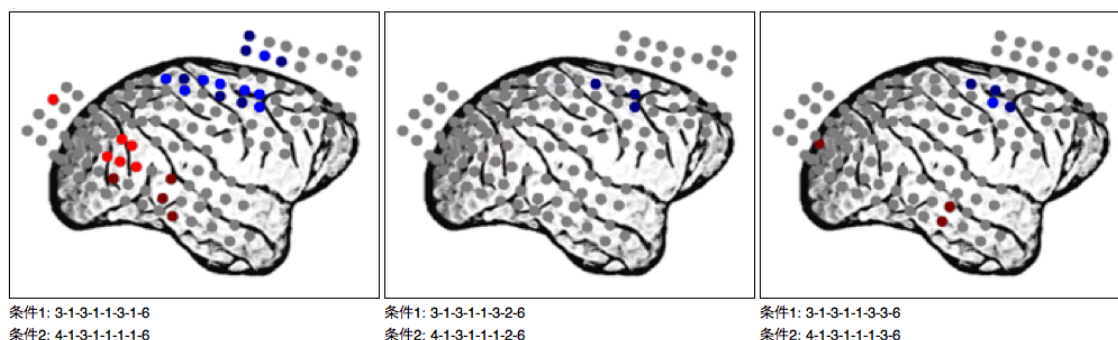
全く変化はないですね。これは、エサを見せる前とエサ見せの瞬間の脳活動の比較ですが、特に何も起きていません。これは、“Day2” にしても変わりありません。

それでは、次は左側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“サル A”、“あり”、“前後”、“Day1”、“高ガンマ波”、右側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“サル A”、“あり”、“後”、“Day1” にセットしてください。

またもや、Day1 から 3 まで変化はないですね。

続いて、左側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“サル A”、“あり”、“後”、“Day1”、“高ガンマ波”、右側の列を“エサ置き”、“自分”、“どちらか”、“サル A”、“あり”、“前”、“Day1” にセットしてください。何か出て来ましたね。

それでは、日にちを変えて 3 日間を比較してみてください。Day1-3 で共通なのは、運動前野と呼ばれる場所の 2-3 本の電極ですが、この部分がエサへ手を伸ばす運動の準備期間に活動を増やしていると考えられます（下図参照）。

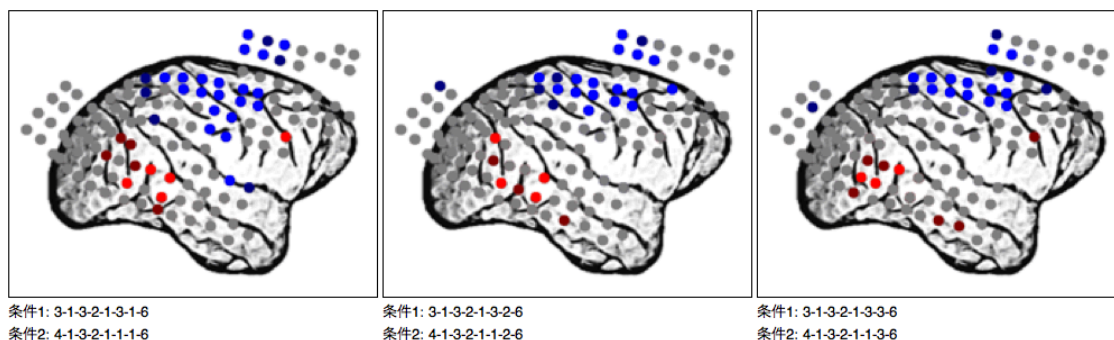


この時記録しているサルは、上位のサル A と一緒にとり合っ座っています。つまり非常に抑制がかかった状態であることとなります。それでは、となりに自分より下位のサル C が座っている時の脳活動はどうなっているのでしょうか？

左側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“サル C”、“あり”、“後”、“Day1”、“高ガンマ波”、右側の列を“エサ置き”、“自分”、“どちらか”、“サル C”、“あり”、“前”、“Day1” にセットしてください。

今度はどうでしょう。先ほどよりも広い範囲の電極に色がつきました。この傾向は Day1-3 に共通ですね（下図参照）。他の条件は変えずに実験日を変えて

比較してみてください。



どうやら、この期間、つまり、エサが提示されてこれから目の前に置かれようとしている時間帯の脳活動は、隣に自分より上のサル A がいるか、下のサル C がいるかで違っている様子です。

大きく異なっているのは、青く表示されている補足運動野、運動前野、一次運動野、一次体性感覚野です。一方、左側下の赤いところ、この部位は腹側視覚経路と呼ばれる視覚処理に関わる場所です。

これらの部位が活動することは、エサを取るために必要な脳内の情報処理の順番を考えれば当然なのかもしれません。腹側視覚経路の情報は、エサが何であるかという、モノの形の認知に関係があると言われていいますから、これから取ろうとしているエサが何かを知るためには、その経路で情報が処理されなければいけません。これは、エサ見せの後に強く出ています。

一方の運動野と体性感覚野での活動は、これから行わなければならない運動の準備活動を行うという点で運動前に活動が高まっていることを示しています。ですからそのこと自体はおかしなことではありません。

面白いのは、上位のサル A が隣にいるだけで、これらの視覚処理と準備活動と思われる脳活動が抑制されているらしいことです。

ここで比較した2つの条件では、サル B がサル A と一緒の時も、サル C と一緒の時も、どちらもサル B がその後の時間帯でエサを獲得した場合だけを比較しています。ですから、サル B がエサ取りを行ったという点に関しては同じです。2つの条件で異なっているのは、運動開始前のエサ取りに関わる社会的な軋轢の部分だけなのです。そして、どうやらこの図を通じてわたしたちはその社会的な軋轢と逡巡を脳活動の違いとして観察することに成功しているのでは

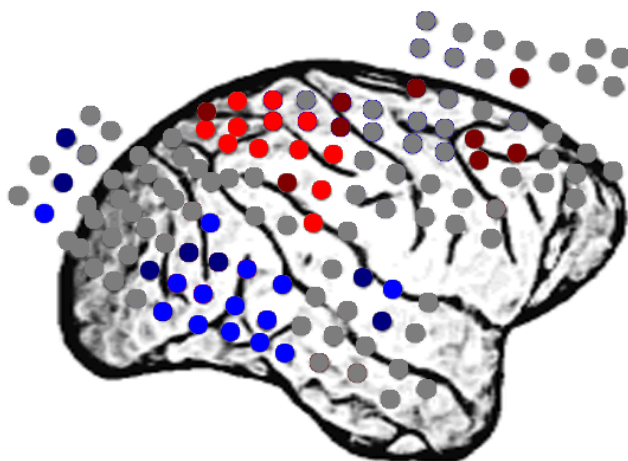
ないかと思えます。

それでは、他の周波数ではどうでしょうか。同じような手順でベータ帯域の変化を見てみましょう。

左側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“サル C”、“あり”、“前後”、“Day1”、“ベータ”、右側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“サル C”、“あり”、“後”、“Day1” にセットしてください。

先ほどと同じようにほとんど変化がありませんね。それでは、ガンマ帯域で変化が出たのと同じ、社会的な確執と逡巡が起きている時間帯を見てみましょう。

左側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“サル C”、“あり”、“後”、“Day1”、“ベータ”、右側の列を“エサ置き”、“自分”、“どちらか”、“サル C”、“あり”、“前”、“Day1” にセットしてください。

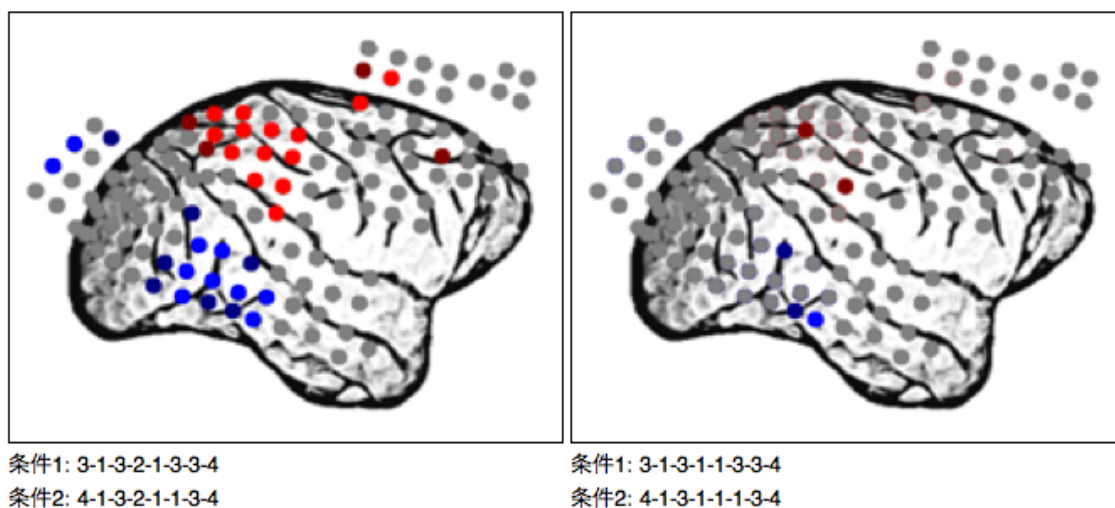


すると、先ほどまでは何もなかった場所がいくつか赤くなりました。この赤いかたまりのうち、後ろ側の大きなかたまりは頭頂葉と呼ばれる場所で、主に自分の身体を中心とした空間認識に関係している場所とされています。ここで赤いということは、条件1から2を比較したときに、条件1の時のほうが、

活動が強いということを意味します。言い換えると、条件1の時間帯から条件2の時間帯に移る途中で、頭頂葉のベータ帯域の活動が下がったこととなります。この傾向は Day1-3 でほぼ同じです。

それでは、高ガンマ波で見たように、相手が変わった時の活動を比較してみましょう。

左側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“サル A”、“あり”、“前後”、“Day3”、“ベータ”、右側の列を“エサ見せ”、“自分”、“どちらか”、“サル A”、“あり”、“後”、“Day3” にセットしてください。

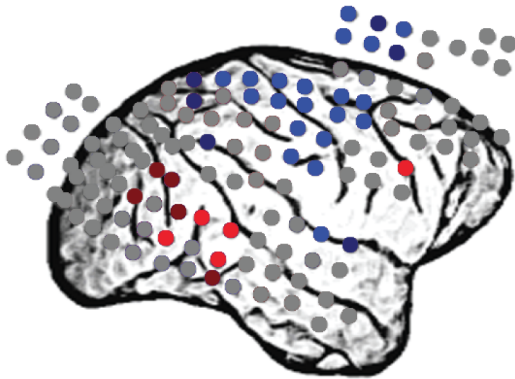


上の図は、Day3のサルBがサルCとペアの時（左図）とサルAとペアの時（右図）のベータ帯域の活動の違いを表しています。見て分かる通り、頭頂葉の赤いかたまりと、腹側視覚経路の青いかたまりがなくなっています。

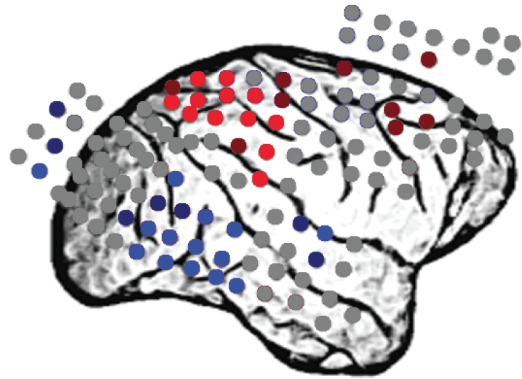
この時間帯は、まだ手を動かす前で、しかもどこにエサが置かれるか分からないのでエサを手に入れる可能性はどちらのサルにもあります。しかしながら、この時点で誰がとなりに座っているかによって、脳内の活動様式が異なっているようです。

それではここで、もう一度周波数のところだけを変えて、ガンマ帯域の図を作ってベータ帯域の図と比べてみて下さい（下図参照）。なんとなく両者がジグソーパズルのピースのように見えませんか。ガンマ帯域で変化する場所と、ベータ帯域で変化する脳の場所が異なっているけれども、2つの図を重ねると、腹側視覚経路の重なりを除くと、パズルのピースのようにぴったりです。

高ガンマ波



ベータ波



これは一体どういう意味なのでしょう。正直なところわたしたちにもよく分かりません。しかし、脳領域ごと、時間ごとに、異なる周波数帯域で異なる情報が表現されているということは確かなようです。となると、すべての周波数帯域で同じことを調べてみる必要があるでしょう。その膨大な組み合わせの中から、何らかの再現性のある法則性を見つけることで、その意味が少しずつ明らかになっていくでしょう。

ここで示したような、社会的な文脈、つまり、他者との関係性に応じて脳活動を変える、適応的な脳内のメカニズムはこれまでほとんど明らかにされていませんでした。みなさんがクリックしてあぶり出した、社会的文脈に応じて変化する脳活動は、まさにこれまで誰も知らなかった最先端の知見なのです。

しかし、ガンマ波だとか、ベータ波だとかいう周波数ごとに異なる情報が表現されていることが分かったとしても、それにどのような機能的な意味があるのかはまだ明らかになっていません。実は、違いを見つけることは比較的簡単なのですが、その意味を理解することは難しいのです。

脳を調べるということ

これまで、いくつかの解析をみなさんと行ってきました。もしみなさんが、中学生や高校生で、全く脳の研究について知識や経験がないとしたら、結構難しい話だったかもしれません。

特に、今回作った解析アプリケーションを使って、いろいろな条件を設定して比較するということは、自分自身で試行錯誤を繰り返してようやくイメージがつかめるものです。ですから、みなさんには時間の許す限り、様々な条件間の比較を行ってみて、具体的なイメージをつかんでほしいのです。

その時に重要なことは、条件間の比較だけではなくて、異なる日のデータ間の比較です。もし、何か面白い結果があぶり出されても、それは単なる偶然である可能性や、気がつかない何か他の原因がその結果に影響を及ぼしている可能性があるからです。しかし、もし同じ比較の結果が3日間のデータで共通して見られたとしたら、それは偶然である可能性が低いはずです。さらにそれが何日にもわたって、そして複数の個体を通じて、同じように観察されたとしたら、それはおそらく何かの真実をつかんだと言えるかもしれません。

わたしたち研究者は、どういう条件と条件を比較すれば良いのかということをご過去半世紀以上の間、いろいろと探してきました。そして、その結果、脳内の機能地図が徐々に明らかになってきたのです。

みなさんがこのアプリケーションを通じて見てきた脳の活動の様子は、ほとんどがこれまで60年近くの間蓄積されてきた知識と合致しています。すなわち、みなさんはあっという間に60年分の研究成果を概観したと言っても良いかもしれません。

そしてそれだけではなく、みなさんは、社会的適応行動に応じて脳活動が変化する、これまで知られていなかった様子も明らかにしました。これらの観察の結果は、少なくともこの条件下ではまちがっていないと思います。しかし、同じ事が別なサルで観察できるかは分かりません。もちろん同じサルでも何日間にも渡って同じような結果が観察できなければ信用できる結果とは言えません。

さらに、運動に使う腕の左右や、その時それぞれのサルがどこを見ていたのか、実験者がどこを見ていたのか等、極めてたくさんの条件がこの課題の中には埋め込まれています。それらの絡み合った条件をほぐして、本当の意味での脳の真実を明らかにすることが、脳科学が目的とすることです。

つまり、これまでみなさんと一緒に見てきた脳の働きは、まだまだ入り口に過ぎないのです。ここから、たくさんの追加実験を行い、さらに詳細な解析を行い、様々な可能性を排除し、最後に残る普遍的な結果の中に、脳の本当の姿があると言えるでしょう。

2011/9/15 版はここまで。

内容は適宜アップデートされていきます。