



SEMINAR REPORT

脳活動を変調して視覚的な意識体験を生み出す脳の仕組みに迫る



国立研究開発法人情報通信研究機構
脳情報通信融合研究センター
主任研究員
大阪大学大学院 生命機能研究科
招聘准教授
天野 薫 氏

NICT の天野と申します。私は「脳活動を変調して視覚的な意識体験を生み出す脳の仕組みに迫る」ということで、最近の脳科学でわかってきたことをご紹介したいと思います。私が行っているのは基礎研究なので、応用については次の講演者の茨木氏をご紹介くださると思います。

はじめに

まず、私が所属している組織を簡単にご紹介したいと思います。脳情報通信融合研究センター (CiNet) は、NICT と大阪大学と ATR の 3 つ組織が一体となって立ち上げた研究所です。オープンしたのは 2013 年 4 月で、この 5~6 年活発に活動している比較的新しい研究センターです。国立大学の敷地内 (大阪大学吹田キャンパス) に総務省が研究所の建屋を建てるという非常に珍しいケースです。

学生も含めて 200 名程の研究者が在籍しています。システム神経科学という、人の脳をシステムとして理解する研究を行っています。私自身は視覚、モノを見ることに関する研究を行っていますが、それ以外に、運動を研究している人、理論的なことを研究している人、ブレイン・マシン・インタフェース (BMI) を研究している人など、非常に多数のメンバーが在籍しています。

人の脳を対象としているので、非侵襲的に傷つけることなく脳活動を計測する必要があります。そういった計測法の中でポピュラーなのが核磁気共鳴画像法 (MRI) と脳磁計 (MEG) と呼ばれている装置です。磁場の強度が上がると空間解像度が上がり、より細かい空間スケールでの脳活動を調べることができ

るのですが、我々は装置にかなり恵まれていて、7 テスラと非常に磁場の強い最新式の MRI を保有しています。それ以外に、病院等で普及しているような 3 テスラの MRI も 3 台持っていて、さらに MEG、動物用の MRI も保有しています。

この MRI は色々な計測ができます。Blood Oxygenation Level Dependent (BOLD) 効果を使った機能的 MRI (fMRI)、つまり脳のどこが働いているかを見る非常にポピュラーな計測方法があります。これは当時ベル研にいらした小川誠二先生が発明されたものです。小川先生には特別顧問ということで、セミナーなどにお越しいただいております。

一般的な話として、人の脳を計測する装置にはトレードオフがあります。本日は、fMRI を使った研究と、MEG を使った研究の両方をご紹介しますが、それぞれには一長一短があります。空間的にも時間的にも細かく見られる手法は、現状では存在していません。

fMRI は、そもそも測っているのが脳内の電氣的活動そのものではなく、電氣的な活動に伴って生じる血流の変化を見ているので、時間的にはあまり細かく見ることはできません。概ね数秒程度のスケールで、ゆっくりとした脳活動の変化しか計測できません。一方、大きなメリットは、何といたっても空間分解能が高いことです。先ほどお話ししたような 7 テスラの最新の MRI を使うと、1 ミリ以下の解像度で計測できるので、脳のどこが働いているかを見るのには非常に強力な手法となります。MEG と比べると、圧倒的に広く使われている手法です。

一方で、MEG は、MRI と違って脳の電氣的活動、すなわち興奮性シナプス電位 (Excitatory Postsynaptic Potential : EPSP) を測っています。血流による間接的な計測ではなく、直接電氣的な活動を測っているので、時間分解能はミリ秒オーダーで細かく見るができます。脳波も、基本的には MEG と同じ原理なので、同様に時間的に細かく見るができます。空間分解能に関しては、図 1 ではケース・バイ・ケースとしています。それが、それ相応の分解能が得られるのは活動が局在している場合に限られます。実験デザインをうまく工夫することで特定の脳領域がピンポイントで活動しているような場合は、かなり高精度で推定できますが、一般に我々が何かものと考えているときは、脳の多くの領域が同時に活動していて、どの領域で脳活動が生じているのかを調べるのには難しいという問題があります。

いずれにしても、時間的にも空間的にも解像度が高い手法は、

現状では存在していないので、実験の目的に応じて装置を使い分けする必要があります。実際、本日前半にご紹介するような空間的に細かく見る必要がある研究では fMRI を使い、アルファ波のような 1 秒間に 10 回程度振動するような波を見たいときは MEG を使うというように、目的に応じて装置を使い分けします。

	fMRI (機能的MRI)	MEG (脳磁計)
計測対象	血流	電気的活動
時間分解能	低い(s)	高い(ms)
空間分解能	高い(mm)	ケースバイケース

完璧な計測手法は存在しないため、目的に応じて装置を使い分け

図1 各種脳計測装置の時空間分解能

以上はごく一般的な話です。私は、従来の相関関係を調べる研究から因果関係に迫っていこうというアプローチで研究を行っています。

その一例として、デコーディッドニューロフィードバック法というのがあります。被験者に自分の脳活動の状態をリアルタイムにフィードバックさせて、現在の状態を被験者自身が把握しながら、そのフィードバックを基に自分で自分の脳活動を変えていくニューロフィードバック法というのがありますが、その中でもかなり進化した方法がデコーディッドニューロフィードバック法です。

この方法を用いた研究を2つご紹介します。1つは全くの基礎研究で、脳活動をニューロフィードバック法で変調することで、白黒の画像に色がついて見えるように変えられたという話です。もう1つは、技術的には同じような方法を使っているのですが、将来的に心的外傷後ストレス障害（PTSD）の治療等にもつながり得ると考えられる、少し応用を意識した研究をご紹介します。具体的には、脳活動の変調による恐怖記憶の軽減という話です。この2つは、fMRI の空間分解能を使って初めてできた研究です。

他には、アルファ波をターゲットとした研究も行っています。皆さんもリラックスするとアルファ波が出ることはご存じかと思いますが、これは時間的に細かく見ないと調べることができないので、fMRI ではなく MEG を使っています。

研究して具体的にわかったことは、従来あまり積極的な機能を果たしていないと考えられてきたアルファ波に、視覚情報処理のクロック、情報処理のリズムを刻むようなファンクションがあるのではないかということがわかってきました。これもご紹介したいと思います。

視知覚の神経相関から因果へ

本日もご紹介させていただく内容は、新聞でも報道されています。視知覚の研究は「操られる脳 色を勘違い (2017.07.01)」というタイトルで、恐怖記憶は「恐怖記憶 書き換え可能? PTSD 治療に道 (2016.11.22)」というタイトルで報道いただきました。また、アルファ波の研究に関しても、「目の錯視 アルファ波関係 (2017.10.12)」というタイトルでご紹介いただきました。

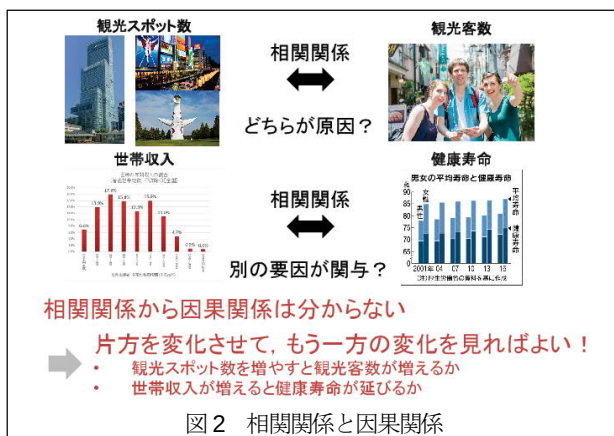
先ほど相関関係から因果関係に迫っていこうという話をしましたが、まずは脳ではなく一般的な話をしたいと思います。

図2左上の画像は大阪の観光スポットですが、観光スポットの数と観光客の数は、普通に考えると相関があると思われます。ただし、どちらが原因でどちらが結果なのかは、必ずしも自明ではありません。観光スポットが色々と充実しているから観光客数が増えたのか、アクセスが良いなどの観光客数が増えるような別の理由があって、それに伴って観光スポット数が次第に増えていったのか、どちらが原因でどちらが結果なのかという因果関係は、相関関係からは直にはわかりません。

また、世帯収入と健康寿命も、おそらく相関関係にあるかと思われそうですが、これも教育レベルの高さなどの別の要因が関与していて、収入が増えたら寿命が長くなるというような単純な因果関係にあるのではないと思われます。

一般的な記事や報道などでも、相関関係と因果関係を混同したようなものを見かけますが、実際には相関関係から因果関係はわかりません。

それでは、どうしたらよいのか。これは単純な話でして、要するに、片方を変化させてもう一方の変化を見ればよいということです。観光スポットの例では、観光スポット数を増やしてみても本当に観光客数が増えたのであれば、増やしたのが原因であったということになります。世帯収入の例では、収入を増やして寿命が増えるかどうかを見てみれば、因果関係があるのか無いのか調べられます。このケースではおそらく因果関係はないと思いますが。



これは脳の話にも適用されます。私が研究対象としている視知覚を例にとりて説明したいと思います。「見え」、すなわち視知覚は、脳内情報処理の結果であることが知られています。人は、カメラのように外界から入ってきたものをそのまま写し取っているのではなく、入ってきたものを脳が解釈した結果を知覚していることがわかっています。カメラと異なる情報処理を示唆する典型例が錯視で、目に入ってくる情報と我々が感じている情報が一致しないことが問題になります。私のアルファ波の研究でも錯視を使っているのですが、人固有の脳内情報処理の結果として錯視が見えていると考えられます。錯視のメカニズムを調べることで、人がどのように脳内情報処理をしているかを調べられるので、重要な手がかりとなります。錯視は見ておもしろいというだけでなく、脳の研究にも役立っているのです。

図3は、蛇の回転錯視と呼ばれているものです。実際には止まっているものがウニョウニョと回転して知覚されるもので、目に入ってくる情報は完全に静止しているけれども、脳の解釈の結果として回転運動が知覚されるというものです。

他には、チェッカーボードシャドウ錯視というMITのエーデルソン教授により発表された錯視図形があります。影のかかっている状況を脳が瞬時に判断して、明るさの補正をして、タイルの明るさが同じなのに違って見える現象です。また、運動誘発盲というのは、周辺視野に呈示した静止画像の周りにコントラストの高い刺激を運動させることで、静止刺激の知覚が妨害されるという錯視現象です。

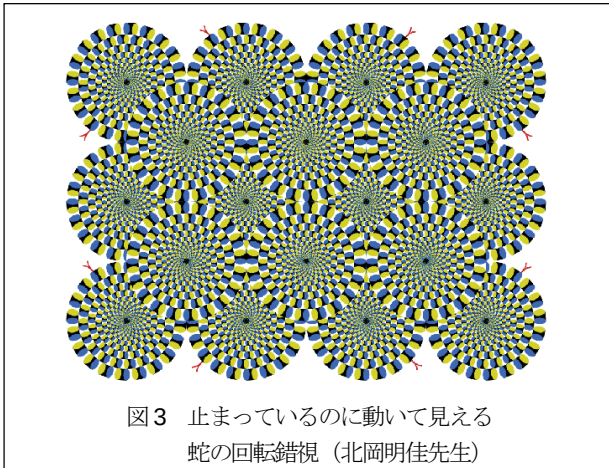


図3 止まっているのに動いて見える
蛇の回転錯視（北岡明佳先生）

これらの錯視は、脳がカメラとは違う情報処理をしているという例でしたが、この錯覚の例を使って因果関係と相関関係が異なることを図4にて説明したいと思います。

視知覚に 관련된脳活動、例えば、色を感じるのどのような情報処理をしているのか、丸い形が見えるのどのような処理をしているのかを調べたいと考えたとします。もっとも典型的な方法は、赤い色のついた丸い物体を被験者に見せて、MRIあるいはMEGで被験者の脳の活動を計測する。そうすると、この辺りとこの辺りが活動していたので、色あるいは形の情報処理には、おそらくこの領域とこの領域が関係しているのであろうとなります。これが、まさに従来の相関関係を調べる研究であって、リンゴの絵を見るということと、そのときに反応している脳活動が相関している、対応していることを調べることになります。

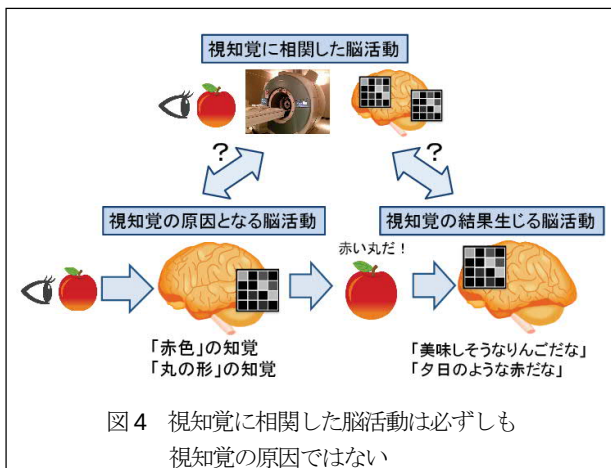


図4 視知覚に 관련된脳活動は必ずしも
視知覚の原因ではない

これをもう少し詳しく見てみると、目に画像が入ってきて、何らかの情報処理が行われて、その結果赤い丸いものとして知覚が成立しているのですが、「見え」を生み出す、赤で丸いという知覚を生み出す脳活動がどうなっているかについて、我々は特に興味を持って調べています。しかし、赤い色の丸を見せているときの脳活動を単純に測ってしまうと、見えた結果に付随して生じる脳活動、例えば、リンゴの絵なら「おいしそうなりんごだな」、「夕日のような赤だな」というような、人間なら当然あると思われる付随して感ずることまで測ってしまいます。赤いリンゴを見せながら単純にそのような脳活動を測ってしまうと、本当に「見え」をつくり出している脳活動と、見えた結果付随して生じた認知的な脳活動など、すべてを含んだものになってしまいます。つまり、従来の相関を調べる研究では、原因なのか結果なのか切り分けできない問題があるのです。これは、観光客の数の話と全く同じ原理なのです。

そこで行われるのが、因果を調べるための脳活動を変調する手法です。

図5の相関解析は、先ほどお話しした従来の方法による赤色の丸の知覚であり、他の行動であったり複雑な認知課題であったりと、被験者が行っている際の脳活動が変わるときには、ここここはどのように反応しましたと調べることができます。しかしながら、そこで得られた脳活動が本当に知覚・行動・認知を生み出しているのか、あるいは付随的に生じているだけなのかを切り分けできないのが問題でした。

そこで、脳活動を強制的に変えるのです。人を対象としているので直接脳に電極を差し込んで電流を流すようなことはできませんが、非侵襲的に脳を操作する方法は色々提案されていて、磁気刺激、電流刺激、ニューロフィードバックなどの方法があります。これらの方法で脳活動のある状態Aから別の状態Bに強制的に変えてやったとき、知覚・行動・認知が変われば、実験者が意図してAからBに状態を変えた脳活動こそが原因で、知覚・行動・認知が生じていることになります。これは、観光スポットの数を増やして観光客数が増えれば、それは因果関係にあるというのと全くもって同じ原理となります。

非侵襲的に脳を操作する方法は色々ありますが、このあとニューロフィードバック法と電流刺激の話をしてしたいと思います。

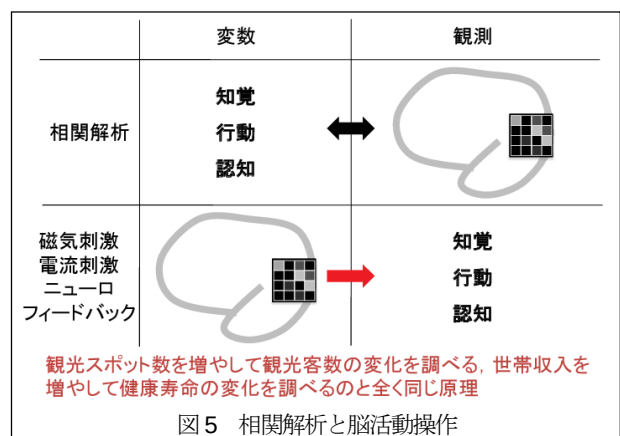


図5 相関解析と脳活動操作

デコーディッドニューロフィードバック法

前半は、デコーディッドニューロフィードバック法を用いました。ニューロフィードバックは、自分で自分の脳活動を変え

ていく方法ですが、デコーディング技術も同時に組み合わせているところが目新しいです。

この方法では、まず、重要であろうと思われる脳のターゲット領域を実験者が決めます。その領域の活動状態はfMRIで測ります。同時に目標とするボクセルパターン、すなわち、その領域の最終的にこうなりたいという目標の脳活動パターンを事前に用意しておきます。目標とするパターンに対して現状のパターンがどの程度近いのか、両者の相関を計算します。目標と現状の脳活動が近ければ、図6右に示すフィードバックの丸が大きくなり、かけ離れていれば小さくなることで、被験者は現状の脳活動が期待されているものに近いのか遠いのかわかります。この丸が大きくなるように、できるだけ頑張って脳活動をしてくださいということが被験者への教示になります。なので、被験者はとにかくこの丸が大きくなるように、ゲーム感覚で脳活動を色々と試行錯誤させることになります。

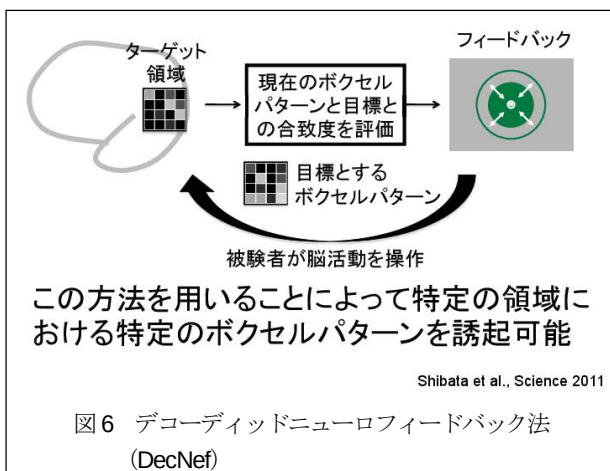


図6 デコーディッドニューロフィードバック法 (DecNef)

試行錯誤を続けることで、ターゲットの脳領域の活動が実験者の意図したような活動パターンにしたいに変化していきます。本日の講演は基礎研究の話が中心ですが、患者さんへの応用も考えられます。例えば、何か精神疾患のある人の脳活動を正常なパターンに近づけていくことも考えられます。この方法を用いることで、脳の特定の領域において特定のボクセルパターンをつくり出すことができます。

実は、後頭部領域の活動を全体的に上げ下げするようなニューロフィードバック法は以前から存在していましたが、脳内で表現されている情報は領域全体の活動の大小のような単純な情報表現ではなく、より細かい空間スケールで細かい情報が表現されていると考えられます。この方法を使うと、全体の活動の大小ではなく、白黒の濃淡で表現されるボクセルパターンを目標に近づけることができるので、操作できる種類が領域全体の上げ下げに比べて圧倒的に大きいという利点があります。

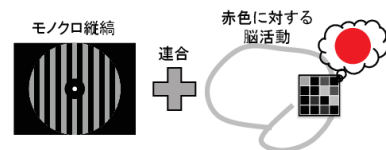
脳活動の変調による色知覚の創造

この方法を使って、1つ目の研究では、モノクロの縦縞で色の知覚をつくり出しました。具体的には、被験者に見せているのはモノクロの縦縞の映像なのですが、被験者は事前に赤色を見ているときに生ずる脳活動を計測しておいて、脳活動が目標パターンになるようにトレーニングを行う。つまり、実際に見ているのはモノクロ画像なのに、赤色を見ているときに生ずる

ような脳活動が出せるように自分で自分の脳活動を変えていく訓練をした結果、モノクロの縦縞に色がついて見えるようになるのかどうか調べました(図7)。

これは結構ハードな実験で、4日間に被験者さんに来てもらって実験しました。0日目は、色デコーダの作成で、赤色を見ているときになる目標の脳活動パターンを調べるための実験です。その準備が終わったら、1~2週間のブランクを置いて、3日間連続してニューロフィードバックの訓練を行います。被験者は装置の中に入って、丸の大きさが毎日変わるので、それが大きくなるように自分で自分の脳活動を変えていく訓練を1時間ほど行う。最後に、色の見え方がどのように変わったのか、心理実験で測定する。このような流れになっています。

モノクロの縞と、色に対する低次視覚野(V1/V2)のボクセルパターンをニューロフィードバックを用いて連合し色の知覚を生じさせる



モノクロの縦縞に色が付いて見えるか？

Amano et al., Current Biology 2016

図7 脳活動の変調で色知覚を創れるか？

0日目に行った色デコーダの作成について簡単に説明します。非常に単純な方法です。図8に示すように、赤・緑・グレーの3色の縦縞と横縞のトータル6種類の刺激を被験者にランダムに提示して、画像が12秒間現れて12秒間暗くなるのを繰り返すパターンとなっています。

要するに、赤色を見ているときの脳活動と緑色を見ているときの脳活動を機械学習の方法で区別する。具体的には、Sparse Logistic Regression (SLR) という機械学習アルゴリズムを用いて、脳活動パターンから赤色を見ているのか緑色を見ているのかを推定するデコーダを構成しました。これで100%当てられるのではなく、大体70%ほどの確率で今見ている色が赤か緑かを当てられることが確認できました。

なお、このSLRは、単純に赤色か緑色かで0.1の情報を示すのではなく、今見ているのが赤色の可能性が高いのか緑色の可能性が高いのかを、0から1までの連続値で示します。その連続値を次のフィードバックで使うことになります。

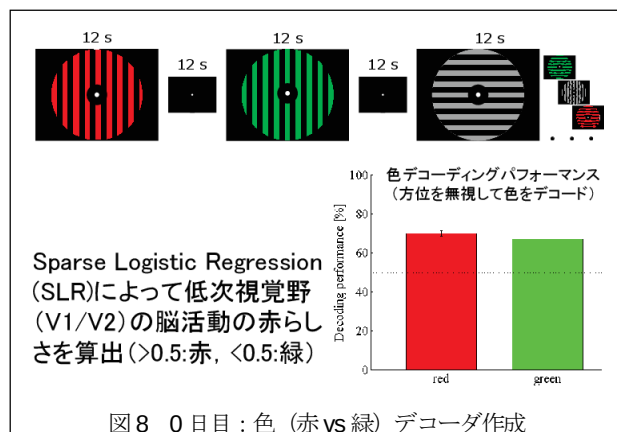
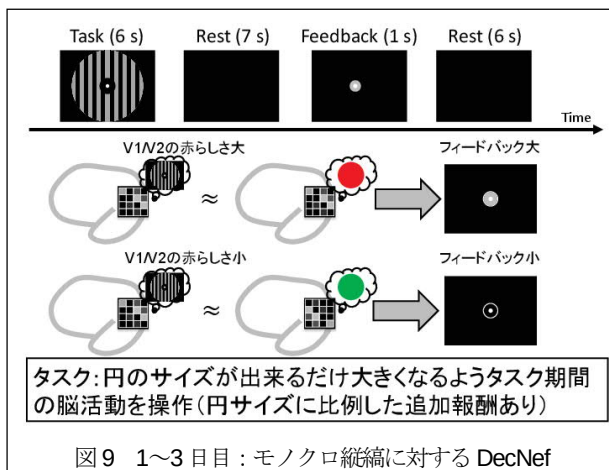


図8 0日目：色(赤vs緑)デコーダ作成

図9が、本番のニューロフィードバックの実験方法です。これ以降、一切色の付いた画像を被験者に見せません。モノクロの縦縞を6秒間被験者に見せて、7秒間のブランクの後、1秒間のフィードバックの丸が現れる。このフィードバックの丸は毎日大きくなったり小さくなったりします。どうして大きさが変わるのかというと、実際に見せているのはモノクロの縦縞ですが、赤色や緑色を見ているときの脳活動は事前の実験でわかっているため、モノクロの縦縞を見ているときの脳活動がたまたま赤色を見ているときに近ければ丸が大きくなり、緑色を見ているときに近ければ丸が小さくなるからです。

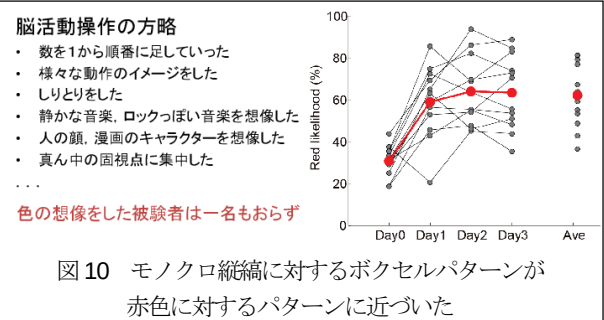
被験者への課題は、この丸のサイズができるだけ大きくなるように、モノクロの縦縞が現れているときの脳活動を操作してもらうことです。そこで、丸のサイズに比例した追加報酬がもらえるということで、「このように考えたらよいのかな?」、それとも「あのようによいのかな?」とゲーム感覚で試行錯誤しながら、丸が大きくなるように訓練してもらいます。



「脳活動の制御をしてください」と言われると多くの人は困惑しますが、すぐ思いつく方法としては、数を順に足していくとか、何か動作をイメージするとか、テレビのシーンを思い浮かべるとかが挙げられます。赤色の脳活動に近づくようにしてほしいので、陽に赤色を想像するのが最も直接的なやり方なのですが、色の実験だと被験者に一切伝えていないので、実際にはめいめいに思い浮かんだ方法で脳活動を変化させていくことになります。

これは全く関係ないことをしているように思えますが、図10のグラフは、実験者が期待するような形で脳活動が変化していったことを示しています。縦軸は、モノクロの縦縞の脳活動がどの程度赤色に近いのかを示した値です。Day0のニューロフィードバックを行う前の段階では30%程度だったのが、Day1～3でニューロフィードバックを行うことで60～65%ほどになりました。見ているのは全くモノクロの縦縞なのですが、それに対する脳の反応は赤色を見ているときの状態に徐々に近づいて行きました。これでニューロフィードバックによって近づいて行ったことがわかりました。

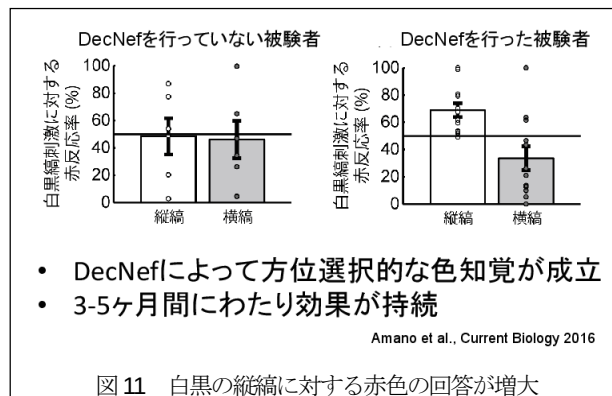
最後に、本当にこれで見え方も変わったのか、心理実験で確認しました。ニューロフィードバックを行っていない被験者にも、比較のため実験に参加してもらいました。ここでは、モノクロの縞模様を見せて、それが赤色に見えるか緑色に見えるかの2者選択で答えてもらいました。そうすると、赤色でも緑色



でもないモノクロなので、答えはランダムになって、平均すると50:50という結果になりました(図11左)。一方、ニューロフィードバックを3日間行った後に同じ実験をすると、縦縞を見ながら赤色の脳活動を出すように訓練した被験者ですが、縦縞が赤っぽく見えるようになっていることがわかりました(図11右)。両者に見てもらったのは全く同じもののなのに、モノクロの縦縞が赤っぽく見えるようになって、横縞はむしろ緑色の回答が増えて、赤色の回答が減る傾向が見られました。

つまり、縦縞、横縞どちらも赤っぽく見えるのではなく、実験に用いた縦縞と赤色の脳内の表現に結び付きが生じて、縦縞においてのみ方位選択的に赤色の知覚が成立したことになります。もともと、反応率を見てもわかるように、強烈な赤色が見えているわけではありません。赤色と緑色で強制的に選択してもらって、赤色の回答の方が少し多い程度の本当にうっすらとした知覚になっています。

このように、自分で自分の脳活動を変えていくニューロフィードバック訓練によって、縦縞でも横縞でも同じようにはではなく、縦縞で特異的に赤色が見えるようになりました。さらに言うと、3～5ヶ月後に来てもらって全く同じ実験を行っても、色の「見え」が持続していることがわかりました。



この実験では、モノクロの縦縞を見せながら赤色を見ているときに生ずるような脳活動を出すようにニューロフィードバック訓練をした結果、縦縞が鮮やかな赤色に見えるのではないが、赤っぽく見えるようになったことがわかりました。

今回、脳活動の操作の対象としたのは、低次視覚野と呼ばれる視覚野の入り口のところですが、その領域においても方位情報と色情報を対応づけるような連合学習が生ずることを示したのは科学的に意義があります。要するに、意図する形で脳活動を変化させた結果、見え方が変わったということであって、変化した脳活動が原因で赤色の「見え」が生じたのであろうといえるわけです。

脳活動の変調による恐怖記憶の軽減

2 つ目の研究では、色知覚とほとんど同じテクニックを使っていますが、対象が色の「見え」ではなく恐怖記憶です。ご存じのように、PTSDはトラウマ経験がきっかけで継続的にストレス症状が続くことです。心理学では、古くから恐怖条件づけということで研究されています。例えば、列車の画像が何か恐怖とともに体験された結果、列車の画像を見るだけで恐怖が生じてしまう状態のことです。一般的に臨床で行われている治療法は暴露療法と呼ばれている方法で、恐怖を感じるような画像を患者さんに繰り返し見せると、最初のうちは怖くても徐々に怖くないものだとして理解することで、恐怖が軽減していくという方法です。ただし、初期段階では強い恐怖を感じるし、フラッシュバックといって、一旦消えても、また恐怖がよみがえってしまう問題もあります。

そこで、我々は、恐怖を感じている画像を直接見せるのではなく、画像に対応した脳活動を出すようにして、要するに脳活動のレベルで訓練することで、同じような恐怖減少の効果が得られないかと考えました。

まず、準備段階として恐怖条件づけを行いました(図12)。これは、患者さんを対象とした実験ではなく、普通の健常者を対象とした実験なので、人工的に微弱な恐怖を植えつける必要があります。どのようにしたかというと、赤の縞あるいは緑の縞を4秒間表示した後、最後に微弱な電気ショックが手に与えられる。そうすると、どちらの色の縞を見ても被験者は次第に身構えるというか、一定の恐怖を感じるような状態になります。

このような状態を人工的に作り出した後にするニューロフィードバックは、図8の色の実験と全く同じで、モノクロの縞を見せながら赤色の脳活動を出すように訓練します。実は、図12の実験では、半分の被験者は赤色の脳活動を出すように、残り半分の被験者は緑色の脳活動を出すように訓練しました。

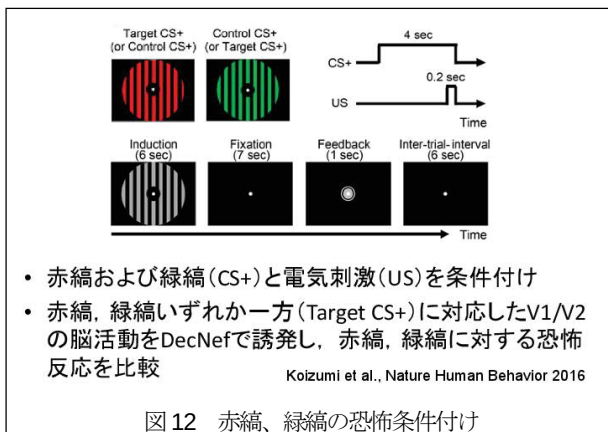


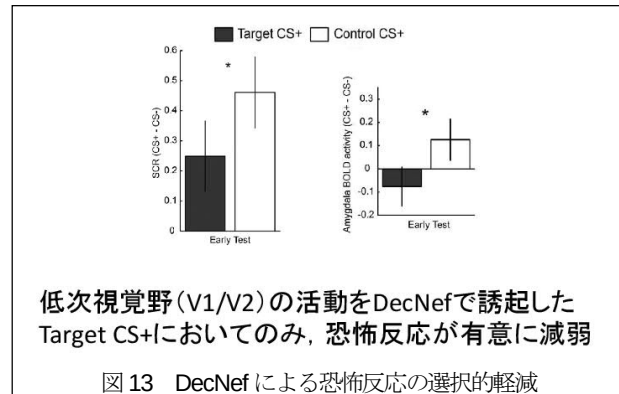
図12 赤縞、緑縞の恐怖条件付け

図13に最終結果を示します。図13左のグラフは、Target CS+が訓練した方で、Control CS+が訓練していない方です。元々赤の縞に対しても緑の縞に対しても同等程度の恐怖を感じていたのが、ニューロフィードバックを行うことで赤色の脳活動あるいは緑色の脳活動を出すようにして、生理的な恐怖反応を軽減しています。また、図13右のグラフが示すように、恐怖に対応していると考えられる脳領域の扁桃体の活動も減少することがわかりました。

従来の臨床的な方法が恐怖と感ずる映像を直接見せて行うの

に対して、この実験では恐怖と対応した脳活動を出すように訓練することで、恐怖が軽減できるようになりました。ここでの重要なポイントは、図8の縞模様の実験では、被験者が数を数えたり何か楽しいことを思い浮かべたりと、全く色とは関係ない方法で脳活動を操作していたように、この実験でも、被験者がニューロフィードバック訓練中に全く関係ないことを行っていました。なので、被験者は恐怖を感じることなく脳活動を誘起し、その結果恐怖反応が軽減したということになります。

ここまではfMRIを使って自分で自分の脳活動を変えるようにして、モノクロの縞縞に色がついて見えるようになった、恐怖を軽減することができたという話です。

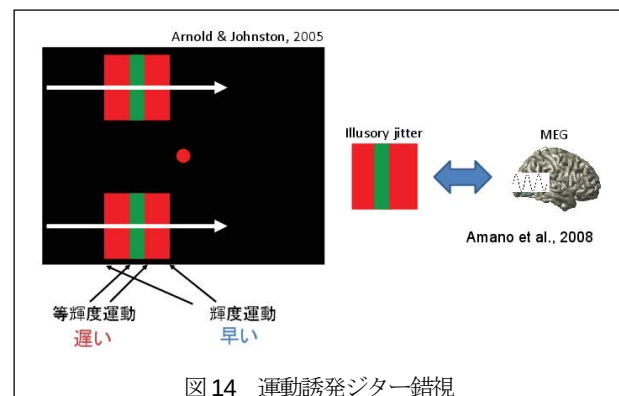


電気刺激にアルファ周波数の変調

後半は、がらんと話が変わってアルファ波の話です。アルファ波は、8~13 Hzの神経律動と呼ばれるもので、脳の電気的な振動です。目を閉じたりリラックスしたりすると強くなるもので、基本的に覚醒度が落ちたときに強く出てきます。このため、アルファ波は脳のアイドリング状態、何もしていない状態を反映しているもので、積極的な機能は持っていないのではないかと考えられてきました。

しかし、最近の研究で得られた数々の証拠から、視覚情報処理、モノを見ることと関係しているらしいことがわかってきました。もともと、因果関係がわかっていません。アルファ波と視覚機能はどうも対応しているようだが、視知覚の情報処理する上で本当にアルファ波が効いているのか、それとも付随的に生じているだけなのか、切り分けができていません。

そのため、運動誘発ジター錯視と呼ばれる現象を使って実験しました(図14)。黒の背景を明るさが同じ赤と緑の画像が動くような動画になっています。明るさが同じ赤と緑の境目の速



度は、明るさが違う赤と黒の境目に比べて動く速度がゆっくりと知覚されます。そうすると、コンピューター上では同じ速度で動いていても、赤や緑の境目の方が赤と黒の境目に比べて相対的に置いていかれてしまうことになります。緑の遅れと実際には遅れていないことの齟齬が生じて、それを補正するために、遅れては戻し遅れては戻しという処理が脳内で行われて、ブルブルと揺れて感じられるのです。

この補正するリズムは、脳のアルファ波のリズムで形成されていることを実証しました。この現象を使った実験は、実はかなり前に行っていて、そのときの心理実験でもブルブルという揺れが 10 Hz 程度であることがわかりました。さらに、この錯視が見えているときの脳活動を測ると 10 Hz 程度でした。これは、まさにアルファ波ということになります。図 15 の MEG スペクトラムは、横軸が周波数で縦軸がパワーで、10 Hz 帯の脳活動が増えています。どうも 10 Hz ぐらいの揺れの「見え」と 10 Hz の脳活動が対応しているようだということがわかりました。

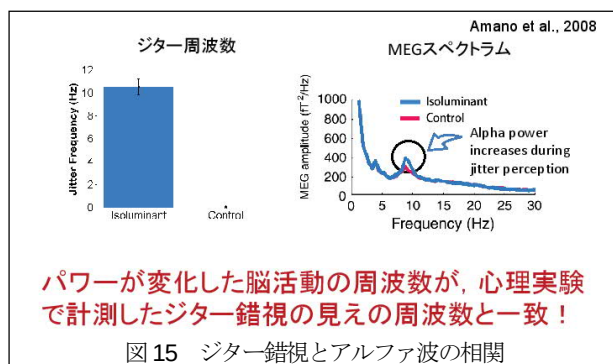


図 15 ジッター錯視とアルファ波の相関

これで、錯視を見ているときにアルファ波が増えたことはわかりましたが、アルファ波が錯視を生み出すプロセスに関与しているのか、それとも揺れて見えた結果付随して生じているだけなのか切り分けできていません。相関関係から因果関係がわからないという問題があります。そこで、今回 2 つの実験を行って、因果関係があることを実証しました。

1 つ目の実験は非常にシンプルなものですが。アルファ波は個人差があって、同じ動画を見せても、元々アルファ波が遅い人は動画を見ても遅く揺れて見えて、元々速い人は速く見えるのではないかと考えました (図 16)。アルファ波の測定は、各人の持っている固有のリズムを測るために、錯視を観察しているときではなく、目を閉じて何も見ていないときに行いました。そのため、このときのアルファ波は、錯視から影響を受けたとは考えにくいのです。

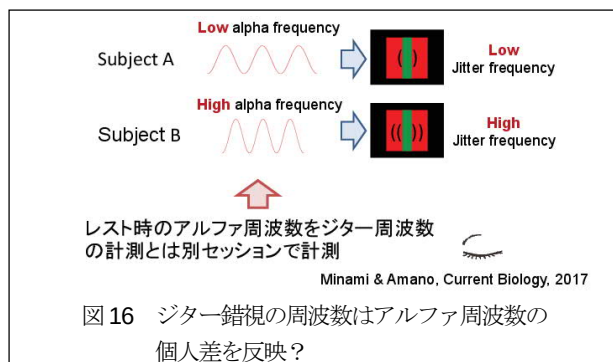
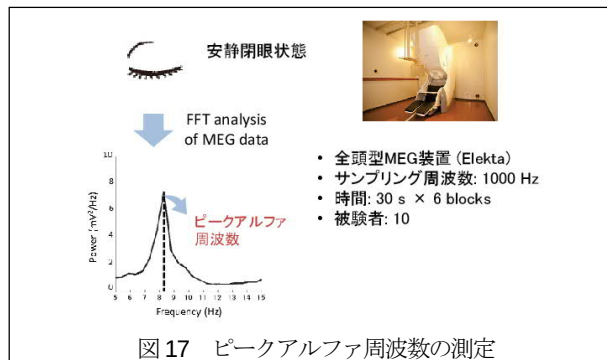


図 16 ジッター錯視の周波数はアルファ周波数の個人差を反映？

ピークアルファ波の実験は、時間分解能を優先して MEG で行いました。被験者に目を閉じて装置の中に入ってもらって、脳活動を 1 kHz のサンプリング周波数で測定します。データを FFT すると、図 17 左下のようなスペクトラムが得られました。とてもきれいな山が見えるので、このピーク周波数で個々の被験者のアルファ波の周波数を定義することができます。



一方、心理実験では、図 18 に示すように、上側には錯視の絵を表示して、下側には本当に揺れている画像を表示して、本当に揺れている方を 4~13 Hz でランダムに変えて、被験者には中央の固視点を凝視してもらって、どちらの揺れが速いかを回答してもらう。答えが半々になるところが、どちらが速いともいえない両者の「見え」の速さがつり合っているところになります。このようにして、錯視のジッター周波数を定量化することができます。

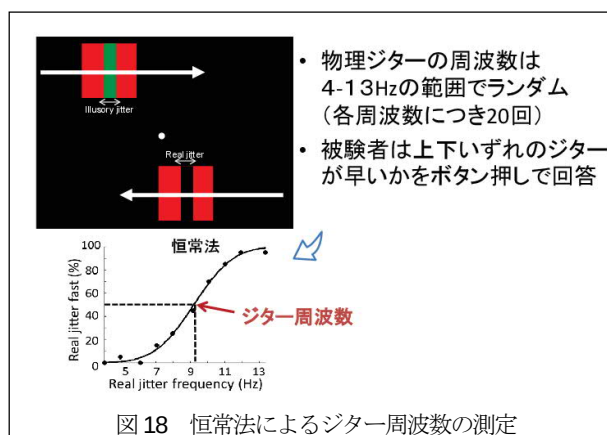
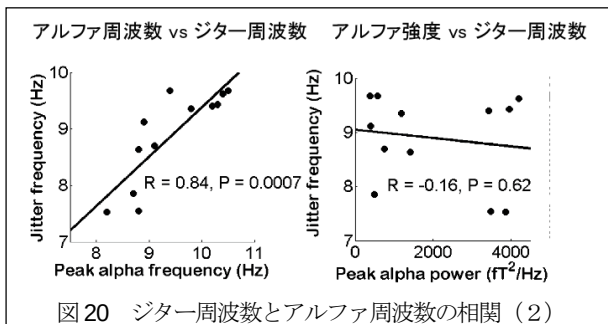
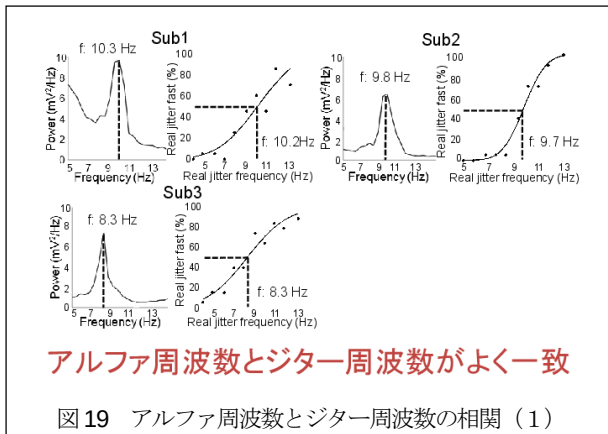
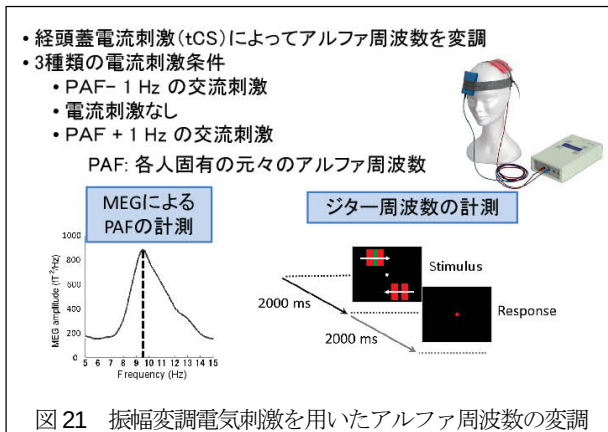


図 19 は各個人のデータです。被験者 1 は、10.3 Hz のごく平均的なアルファ波を持っている人です。心理実験でブルブルが何 Hz で揺れているかを見ると、10.2 Hz ということで、アルファ周波数と非常によく対応している。この被験者に限ったことではなく、他の被験者でも、元々持っているアルファ周波数とジッター周波数がよく一致していることがわかりました。

実際、被験者全員のデータでアルファ波の速さと錯視の「見え」の速さをプロットしてみると、非常に強い相関があります (図 20 左)。つまり、元々アルファ波が遅い人はブルブルも遅く見えて、元々速い人は速く見えるのであって、錯視を見ることで、ある意味脳内のアルファ波が見えていることになります。一方、錯視とアルファ波の強度との関係は見出せませんでした (図 20 右)。



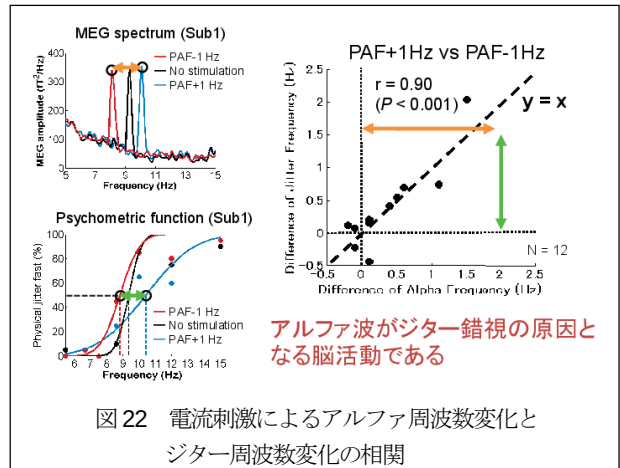
ここまでの説明だけでも、元々持っている固有のアルファ波のリズムを使って錯視が見えているようで、錯視が見えた結果としてアルファ波が生じているのではないと予想されます。そこで、より直接的に因果関係を示すために、経頭蓋電流刺激 (transcranial Current Stimulation) を用いました (図 21)。電流刺激といっても、電極対を頭部に張り付けて 1 mA 程度の非常に微弱な電流を流す方法です。



被験者固有のアルファ波の速さ (Peak Alpha Frequency : PAF) は、8~13 Hz まで個人差があり、その周波数よりも 1 Hz 遅い電流を流したり、1 Hz 速い電流を流したり、比較のために何も流していない、即ちその人固有のリズムそのままの 3 条件で実験しました。実験は、電流を流しながら MEG でアルファ波の変化を調べつつ、心理実験でブルブルの見え方がどのように変わったのかを調べました (図 22 左)。

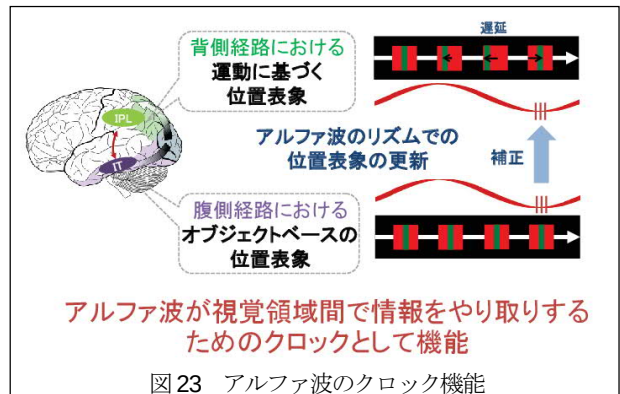
MEG の測定結果によると、被験者 1 のアルファ波は元々 9 Hz あたりでしたが、それを強制的に遅くしたり速くしたりできました。微弱な電流を流すことで、その人固有のアルファ波のリ

ズムを変えることに成功しました。それでは、アルファ波が変わったことで見え方が変わったのかどうかを心理実験で見ると、何も電流刺激をしていない条件に比べて、-1 Hz の電流を流すと遅くなり、+1 Hz の電流を流すと速くなりました。アルファ波の変化に対応して、ブルブルの見え方も変わることがわかりました。



アルファ波とジター錯視の関係を横軸と縦軸にプロットすると、非常に強い相関が見られます。アルファ波を変えれば、変えた分だけ錯視のブルブルの見え方も変わることがわかりました (図 22 右)。つまり、アルファ波を強制的に変えたら見え方も変わったので、アルファ波が原因で錯視が生じていることが実証できました。

ここまですアルファ波が錯視に明瞭に関係していることは示せたと思いますが、アルファ波の機能としてどのようなものを持っているのかを簡単にご紹介します (図 23)。



動いている物体の位置は、動きに基づいて動きのスピードを時々刻々積分していくことで次の時刻の位置を表現することができます。一方、動きとは関係なく、時刻時刻のスナップショットとして動いているものの位置を計算することもできます。脳の視覚の経路には背側と腹側の大きく 2 つの経路があり、背側の方は動きに特化した処理を、腹側の方はスタティックな物の形状である顔とかを処理をしていると考えられます。背側経路において、スピードを積分する方式で物の位置を計算すると、緑のスピードが遅いので緑がどんどん置いてきぼりになってしまいます。一方、腹側経路において、動きとは関係なくスナップショットとして 1 枚 1 枚の画像を切り出してくると、緑は物

理的に常に中央にあるので、緑が正しく中央にあるように表現されます。この特殊な錯視の状況では、両者はうまく乖離できているのです。この乖離を補正するリズムとして、脳内に元々あるアルファ波が使われているのではないかとというのが我々の考え方です。つまり、脳内で分散処理された視覚情報を最終的に統合して1つにまとめる必要がありますが、統合するリズムを決める機能としてアルファ波があるのではないかと考えています。

今日の話で示せたのは錯視に関することだけですが、視覚情報である動き、色、形などはそれぞれ異なる領域で分散処理されていることが知られており、我々の予想としては、アルファ波は分散処理された視覚情報を領域間で統合してやり取りするためのリズム、クロックとして作用しているのではないかと考えています。

脳活動変調技術の応用

サイエンティフィックな内容は以上でして、最後に少しだけ最近の研究の方向性についてお話ししたいと思います。

今までの研究で、アルファ波のリズムを強制的に速くしたり遅くしたりできることがわかりました。その応用として、認知機能を向上させたいときには、例えば、集中してデスクワークをしたい、記憶力を一時的に向上させたいときには、それに適した脳状態が存在するのなら、その状態に導いてあげる。逆に、リラックスしたいときには、それに見合った脳状態に導いてあげる。このようなことができるのではないかと考えています。アルファ波の実験では、この変化に電流刺激を使いましたが、ニューロフィードバックなど、他の手法で変調させることもできます。

やってみたい認知機能の向上としては、例えば、運転時の有効視野拡大です。お年寄りは、運転中の視野が狭まることで注意を向けられる範囲が狭くなり、飛び出しとかに気づかないことが今問題になっていますが、視野を広げるようにしてあげる。他には、学習時や運動時の機能向上とか、アスリートの集中力アップとか、高齢者の認知機能補助などです。少し機能が落ちてきた人を補填することもできるのではないかと考えています。

認知機能の高さと脳の状態の対応について相関関係に関する色々の報告がなされていますが、相関関係と因果関係は別物であって、相関関係があるのでその状態に導けば機能が上がるか、逆にリラックスできるかとなると、そのようなことは全くもって自明ではないので、今このあたりをサイエンティフィックに詰めようとしているところです。

まとめ

最後に、まとめです。まず初めに、相関関係と因果関係は違うことを一般的な例を使って紹介しました。1つ目の研究では、デコーディッドニューロフィードバック法を使って、被験者が自分で自分の脳活動を変えていく方法でモノクロ画像に赤色の「見え」をつくり出すことに成功したという話をしました。2つ目は、技術的にはほぼ同じニューロフィードバック法ですが、恐怖を感じる画像を直接被験者に見せるのではなく、それに対応した脳活動を出すようにトレーニングすることで恐怖反応を軽減できたという話をしました。最後に、アルファ周波数に個人差があること、微弱な電流を流して強制的にアルファ波の速さを変えられることを使って、アルファ波がジター錯視の知覚に因果的に寄与していることを実証しました。

以上です。ありがとうございました。