

視知覚と脳

蘆田 宏

一 はじめに

我が国において二一世紀が「脳の世紀」と呼ばれるように、脳は心の座としての地位を確立し、それは広く一般に知られるようになった。脳科学という言葉が流布し、「脳科学者」が文化人のように活躍する。常識的なことでも脳に原因があるといわれるとなんとなく科学的な気がするが、実際、私が何かしたいというのと脳が要求の信号を出すというのでは論理的にはさほど違いがないが、後者は客観的なように感じてしまう。もちろん、感情や欲求などにも生化学的・生理学的背景があることは重要で、薬物治療などへの道を開くなどの意義があるだろう。しかし、だから日常において特定の食物が大人気になるというレベルになるともはや妄信に近く、それは脳というよりむしろ心理学的な問題に帰着するのは諧謔的ですらある。しかし、学者、それも心の専門家である心理学者ですらそのように幻惑されてしまいがちである。実際、目に見える画像やデータを示されると心理学的測定より説得力があるように錯覚してしまうのは問題であろう。とはいえ、心を支える器官として脳が最も重要であることは今や疑いないとすれば、我々基礎実験心理学者にとって脳を全く避けて通るのもまた得策とはいえない。脳科学的研究を正しく見極め、得るところは得ながらも過度に惑わされないようにしないといけない。そのためには、実際に研究に携わらなくても常に正しい知識を得る努力が

必要となるが、いっそ積極的に参画し、逆にできることなら心理学が研究を主導するくらいの意識で臨むのも一つの道であるように思われる。

実験心理学者は脳について長い間屈折した思いを持ってきた。二元論的な問題はさておき、脳がさまざまな心的現象の基盤となっていることは確かであろう。しかし、動物はともかくヒトの脳は心理学者が手を出すのは難しく、医学・生理学者の協力を得るか、報告を待つしかない状況が長く続いた。脳波は心理学者にとって比較的古くから利用可能な道具であったが、頭蓋の外から観察する電位変化を測定するだけでは、心的現象に対応した脳活動を広範囲に捉えることができません、脳機能そのものの理解には難しい面があった。

しかし、近年の測定技術の発展は心理学者にとって直接利用可能な技術の幅を大きく拡げてくれた。脳波は多点測定と高度な数理的解析によって脳内の電流源の空間的推定を可能にする脳電図⁽¹⁾として拡張され、また、電位変化と直交するごく微弱的な磁場変化を捉える脳磁図⁽²⁾によってその精度がさらに向上した。しかしながら、とりわけ心理学者にとってインパクトが大きかったのは磁気共鳴画像法⁽³⁾(MRI)による機能画像研究であったかもしれない。機能的MRI⁽⁴⁾(fMRI)は、人がさまざまな知覚・認知活動を行っている際の脳活動の様子を比較的詳細に描き出すことができる。撮像は基本的に非侵襲的⁽⁴⁾で、医師免許がなくても使うことができるため、心理学者の注目を集めてきた。現在でも、fMRIを用いて脳活動を調べた研究が数多く報告され、ニュースサイトなどで一般に周知されることも多々ある。

著者自身、過去八年にわたってfMRIを用いた研究に注力してきた。必ずしもよい成果を得たとは言えず、技術の限界と困難を身をもって体験しつつ、他の研究結果を安易に受け入れることの危うさも感じている。インターネットを通して最新の研究成果が平易に、しかし簡略化されて伝えられることが多い今、心理学者ならずとも、人間の活動に関心を持つ人は皆、fMRI研究の本来の意義と限界を知っておいてもよいのではないだろうか。そこで、本論文では、fMRI測定の意味と本質的な限界を論じたあと、視知覚研究においてそれがいかに役に立ってきたか、あるいは、役に

立つためにはどのような基本をおさえておくべきなのかについて論じる。その後、実例として錯視に関する脳機能研究の成果を紹介し、最後に簡単な展望とともに小論を閉じることとしたい。

二 FMRIによる脳機能測定

二・一 MRIとfMRI

機能的脳画像法の代表的存在であるfMRIを用いると、比較的容易に脳の働きを知ることができる。しかし、実際に使う場合はもちろん、公表されている結果を評価するにもある程度の知識が必要になるように思われる。たとえば、fMRIは脳神経活動を記録するものではないということは一一般にあまり理解されていないのではないだろうか。では、実際に測ることができて、どの程度のことができるのか。ここではその概略について述べる。詳しくは別の解説(藤田、2010など)を参照いただきたい。

MRIは核磁気共鳴を用いて物質の内部構造を知る方法であり、さまざまな物性の研究に用いられる。核が放射線を得る連想させるためか、人に対して使う場合は核を外して磁気共鳴画像法と呼ばれる。実際には、よく似た機能画像を得ることができるポジトロン断層法(PET)が放射性物質を用いるの⁽⁶⁾に比べ、MRIは放射線被曝をしない非侵襲的な方法と考えられている。核磁気共鳴とは、外部から与える磁気刺激を特定の原子核と共鳴させ、エネルギー状態の変化から原子の分布などの情報を得る手法である。MRIスキャナ装置(図1(a))には、人体を外側から囲む大きな静磁場コイルがある⁽⁷⁾。これによって発生する大きな静磁場の中に入ると、方位磁針が磁石に引きつけられるように原子核のスピン⁽⁸⁾の方向が揃ってくる⁽⁹⁾。そこにラジオ波パルス(RFパルス)と呼ばれる磁気刺激を印加すると、共鳴周波数が合う原子のみが向きを変え、その後、再び静磁場に従う状態に戻っていく緩和過程で放出されるエネルギーを観測する。断層撮影にはさらに傾斜磁場が必要で、たとえば頭のほうから足の方にかけて、静磁場に加える形で磁場強度が少しずつ変化

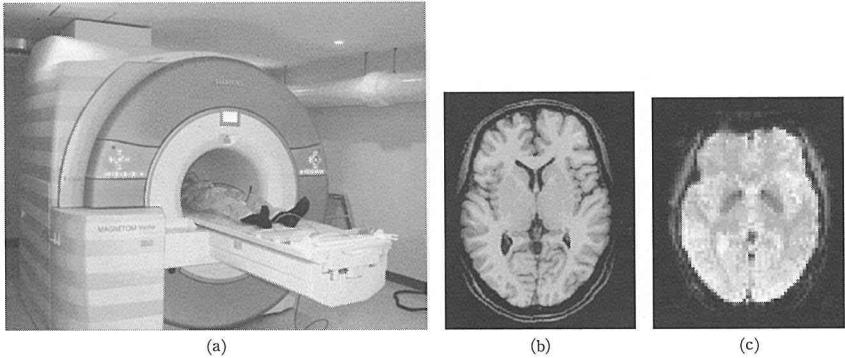


図1 (a) MRI スキャナ装置 (京都大学心の未来研究センター所蔵)。(b) MRI 構造画像の例。(c) 機能画像の例。

するようになる。原子核の共鳴周波数は静磁場強度によって少し変化するので、RFパルスの周波数に従って特定の面上の原子だけが影響を受けるという状況を作り出すことができる。さらに、微小な周波数の変化と位相情報をもとに、面内の二次元構造を復元できる。人の体は大部分水でできているため、水素原子を対象にそのような断層撮影をすると、組織による水素密度の違いにより構造が見えてくる。脳では神経細胞が存在する灰白質と神経繊維が多い白質との対比が浮かび上がる。このような画像を構造画像と呼ぶ(図1(b))。

MRI 構造画像は基本的に静的な構造を示すものである。MR 信号にはさまざまなアーチファクトが介在する。それらは画像の質を下げるので本来避けるべきものであるが、血流中のヘモグロビン濃度に関するアーチファクトが脳の活動状態の推定に有用であることが示され、それをもとにfMRIが開発された(Ogawa et al., 1990)。ヘモグロビンは酸素を体内各部に運ぶもので、酸素と結合した酸化ヘモグロビンが酸素を運び終えて還元ヘモグロビンになる。ヘモグロビンは鉄を含んでおり、酸化していない後者は磁化率が高く信号を減衰させる。脳のある部位で神経活動が活発になるとエネルギーとなる糖質を補給するために血流量が局所的に増加する一方、酸素の消費はそれほど増えないので、結果として活動が盛んな部位には酸化ヘモグロビンが⁽¹⁾潤沢になり、信号強度が相対的に強くなる。これはBOLD 効果と呼ばれ、

測定条件の調節によって BOLD 効果を強調した画像を fMRI 機能画像として用いる。図 1(c)を見ると、図 1(b)とは明暗が逆転し、神経細胞が多数存在する灰白質部分が白くなっている。⁽¹¹⁾これは、神経細胞のための代謝活動を反映して灰白質部分で BOLD 効果が高まっていることを示す。機能的活動推定のためには他の方法もあるが、近年発表されているほとんどの認知神経科学的研究で BOLD fMRI が用いられている。

fMRI の解像度は最小の測定単位としての立方体あるいは直立方体（ボクセル）⁽¹²⁾によって決まる。機能画像のボクセルの大きさは通常三ミリメートル角程度であるが、研究目的や装置によっても変わる。数ミリメートル角の範囲には数百万の神経細胞が含まれるので、生理学的測定として空間解像度が高いとはとてもいえない。あくまでも脳波など他の非侵襲的方法に比べれば高めであるという程度である。また、血流変化は神経活動に比べてたいへん遅い。神経活動を生じる事象が生じてから、信号が極大化するまでに五秒以上かかり、元に戻るには三〇秒程度を要する。これは、ミリ秒単位で働く神経細胞の活動とは大きく異なっている。fMRI の時間分解能が低いことは知られているが、それは、測定技術に起因するのではなく、測定原理の本質的な問題である。

以上のように、fMRI は脳内の代謝活動を測定するもので神経活動を測定するものではない。PET や近赤外分光法⁽¹³⁾も同様である。しかしながら、少なくとも大脳皮質において神経細胞の活動は脳活動の大きな部分を占めるので、両者には強い相関がある。そのため、fMRI は脳神経活動の推定に使うことができ、実際のところほとんどの研究でそのようにしている。ただし、研究論文において神経（ニューロン）活動の測定というような表現を直接使っているとしたり、信頼性に注意が必要である。通常、論文の査読過程においてそのような表現は厳しくチェックされ、事実と推定を明確に分ける書き方が要求される。

もう一つ重要なのは、脳の賦活部位が何を意味するかということである。脳は常にはほぼ全体が働いており、認知活動に依じて一部だけが働くわけではない。しかし、多くの研究では機能を脳の特定の部位に局在させようとする。その

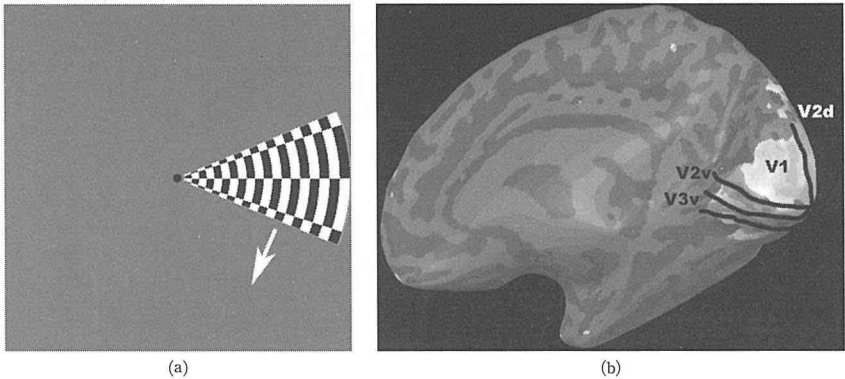


図2 位相エンコーディングによるレチノトピー測定。(a) 刺激図の例。楔形領域(円の一部)がゆっくり回転する。(b) 位相応答を、皮質表面を計算機上で膨らませた脳表面図上に表示したもの。白黒で分かりにくい、後頭葉内側部に位相マップが表れ、それをもとにV1, V2などの領域分けができる。

ために、問題としたい機能以外ではできるだけ変化しないように工夫したベースライン条件の BOLD 応答と、その機能を使っているときの BOLD 応答の両方を測定し、対比(コントラスト)をとる。たとえば、暗い画面を見ていると、画面上に明るい図形が見えていたときの応答を比べて、後者で有意に活動が高まったところを賦活部位と考える。この場合、視覚野が存在する後頭葉が全体的に賦活されるであろう。一方、視覚の中でも特定の機能に焦点をあてたいときは、たとえば人の顔を見ているときと、その画像をランダムに並べかえ、もはや顔に見えなくなった画像を見ている時を比べる。そうすると紡錘状回の顔領域といわれる部位が特に賦活するように見えるだろう。説明上、その部分だけが赤く光っているように見える図を用いるので、それは顔を見るのに必要十分な部位を示すように見えてしまうが、実はそうではなく、上記のように、あくまでもベースラインと比較したときに統計的に有意に活動が高まる部位、ということであり、視覚野が広範に働く中でも特に顔に特化した処理部位という意味になる。

賦活画像の意味を正しく理解しないと、fMRI による脳内の機能地図の作成は新たな骨相学にすぎないという批判(例えば Utta, 2001)に正しく答えられないであろう。実際、脳にはある程度の局

在性があり、たとえば視覚野は後頭葉に、聴覚野は側頭葉にあり、それらは各感覚モードをほぼ独立に処理している。しかし、極端な局在論は妥当ではなく、特にさまざまな高次認知機能をすべて脳の特定部位に局在化させるのは無理がある。もちろん、それが直ちにfMRI研究の限界を示しているというわけではない。近年ではデータ解析の手法が洗練され、デフォルト・モード・ネットワーク理論⁽¹⁷⁾のように脳内の広範なつながりに基づく機能の解明が進められる中でfMRIの果たしてきた役割は大きい。ここでは詳細を述べることはできないが、さまざまな解析手法の開発によって単純な応答コントラストの限界を超える知見が得られてきた。振り返って考えると、視覚野における精緻で生理学的に強い基盤を持つ研究がfMRIそのものの意義を証明し続けてきたようにも感じられる。以下では、その基盤の一つとなったレチノトピーについて概観したい。

二・二 視覚野とレチノトピー

視覚野に関する脳機能の研究では、サル、特にマカクザル（アカゲザル、ニホンザルなど）を用いた神経生理学的研究が先行し、多大な知見が蓄積されてきた。眼に入った光景は網膜に映って神経信号となり、ここから視覚情報の処理が始まる。網膜から出た神経繊維は間脳にある視床の外側膝状体を介して後頭葉の視覚皮質にある第一次視覚野（V1）に投射される。その際、網膜上の位置とV1上の位置はトポジカルに対応している。つまり、外界の様子が、形は大きく歪められつつ皮質上に絵のように投影される。このように網膜位置の情報が保存される形で情報が投射されることをレチノトピー（retinotopy）という。その後V1に隣接するV2には鏡映像の形をとりながら再度の投影がなされ、さらに鏡映反転してV3へ、というようにレチノトピーが保持されたまま少しずつ情報が洗練化されていくと考えられる。

fMRIによって、ヒトにおいても同様のレチノトピー構造が存在することが明らかになった。このことが視覚研究に

おける生理学的測定法としてfMRIが有用であることを証明し、その利用が促進される原動力になったといっても過言ではないため、少し説明しておきたい。fMRIの応答は遅いので、その時々々に眼に映る画像が大脳皮質から得られるわけではない。そのため、少し太めの時計の針のような図形⁽¹⁸⁾を、まさに約一分かけて回転させ、その間実験参加者はじつと中央を見ている。何度か回転するうちに、皮質上の各部位において針が通った時点から信号が上がり始め、通った後で下がるという変化が繰り返される。そのため、応答の時系列から対応する網膜部位を逆算することができる(図2(a))⁽¹⁹⁾。同様に、中央からゆっくり順次拡大していく円環を何周期か見ることによって、中心からの距離がわかる。これら二種類の結果は皮質状の各点における外界位置の極座標を与える(Liu et al., 2006 参照)。特に、偏角の情報からは網膜からの投射が正立像か鏡映像か見極めること(フィールドサイン分析)によって、先述のV1、V2などの視覚野の区分けができる。そのようにして、多くの研究者によって視覚野全体の地図の作成が進んできた(Wandell et al., 2007)。視覚研究においてfMRIが特に進んだのは、皮質上の地図が確立されてきたためともいえる。その地図は、必ずしも解剖学的構造と対応せず、多少人によって違うこともわかってきた。そのため、実験にあたって各人の地図を同定することが重要である。一方、前頭葉など高次の認知機能を担う部位ではレチノトピー⁽²⁰⁾そのものは使えないが、たとえば側頭の聴覚野における周波数依存マップ(トノトピー)は概念的にもよく似ており、他の領域でも別の原理による厳格な地図ができれば詳細な脳内地図の作成に大きく貢献するだろう。

次章で扱う動き情報の中枢と考えられるのが、後側頭部に存在するMTJ野である⁽²⁰⁾。MTJ野ではレチノトピーが保持されているが、V1などに比べて明瞭に測定することが難しいので、別に動く刺激と動かない刺激を見たときの応答の対比から定義することが多い。ヒトの場合、サルのような詳細な区分けが困難なため、周辺領域と合わせてMTJ複合体(MT+)とすることが多い。

三 研究紹介

三・一 「蛇の回転」錯視

ここで、著者自身が「MID」を用いて行った錯視研究の例を紹介したい。錯視とは文字通り視覚における錯誤のことを指し、事物が「本来の」姿とは異なって見える現象のことである。「本来の」に括弧を付したのは、何が正しいのかは物理的屬性によるとも言い切れず、認識論、存在論にも関わる深遠な問題だからである。ここでは深い議論には立ち入らず、同じはずのものが違って見える、止まったものが動いて見える、など常識的な範囲でとらえれば十分であろう。錯視が実験心理学において古くから研究対象となってきた理由の一つは、それが「正しい」見え方も含めて視覚の本質や神経メカニズムに大きな示唆を与えてくれるからである。視覚情報処理が完璧であれば錯視は生じないはずである。しかし、視覚情報からの外界情報を再構成することは実はきわめて難しく、不可能性を含んでいる。そこで、大部分でうまく働く算法による近似、推定を行わざるを得ない。それがうまくいっている間はどのような演算が行われているのか判じがたいが、うまくいかないときには算法あるいはメカニズム特有の錯誤が生じうる。そのため、錯視によって普段は見えない処理メカニズムの一端を垣間見ることができ、研究には格好の題材となる。

ここでとりあげる錯視は、広く一般にも人気を得た「蛇の回転」錯視である(図3参照)。この錯視は共同研究者の北岡明佳が作成したもので、紙に印刷され静止しているはずの図形がゆらゆらと回転して見える。ここに示すのは無彩色であるが、もとの作品は黄、青色がついており、他の色のバリエーションも作られている(<http://www.risumei.ac.jp/~akiraoka>)。色によって動きが強まるようであるが、その効果はまだ未解明で、基本的な効果は無彩色でも得られる(Murakami et al., 2006)。無彩色の場合、白・明灰・黒・暗灰、という四段階の明るさを繰り返し配置すると、白から明るい灰へ、黒から暗い灰へ、という方向への動きが感じられるようになる。この原則に従えば、形はそれほど重要で

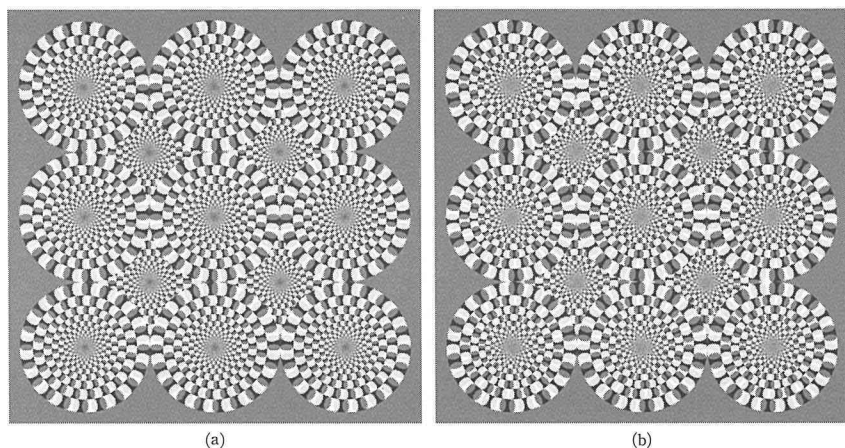


図3 (a) 「蛇の回転」錯視図の一つ、(b) 比較のため錯視が起こりにくくした図、ともに Kuriki et al. (2008) で用いられた図形をグレースケール化したもの。

はない。実際、先述のウェブサイトでは回転のみならず拡大縮小や並進運動などさまざまな形での錯視図形を見ることができ、要素図形の形も様々である。なお、図3では印刷品質の問題で錯視が弱い可能性があるが、実際この錯視が生じない、あるいは弱い人が少なからず存在し、その原因は未だ説明されていない。この錯視が生じないのはむしろ「正しい」知覚であり、動きの知覚そのものに問題があるわけではないが、さらに研究を進める必要がある。

動いていないものが動いて見えるので、なぜこの図形が動いて見えるのかを理解するには動きを検出・分析する機構の理解が必要で、理解が相補的に進展することが期待される。これまでに提案されてきた蛇の回転錯視生起要因は大きく二種類に分けられる。第一に、最初に図形が眼に入ったとき、コントラスト⁽²⁾が高い白や黒の部分は網膜からの情報伝達が速く、コントラストが低い灰色部分は伝達速度が遅いため、視覚野に情報が到達する際に時間差が生じる。この図形は色の順番が巧妙に配置されているため、この時間差によって白から明るい灰黒から暗い灰へという動きの信号として取り出されると考えられる (Backus & Oruc, 2005; Conway et al., 2005)。間の明るい灰から黒

暗い灰から白という部分では速度が逆になることにお気づきかもしれないが、ここではコントラスト極性が反転しているので、いわゆるリ

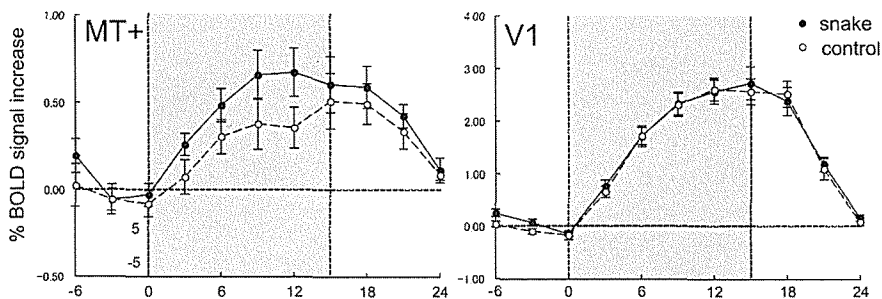


図4 MT+およびV1における平均BOLD信号変化。GEM条件の結果のみを示す。(Kuriki et al., 2008 より改変)

パス・ファイの状況になって運動信号が逆転する (Conway et al., 2005) とも考えられる。第二に、眼は常に細かく揺れており、静止した図形を見ている網膜像は常に揺れ動いていることが錯視の原因となり得る。この揺れは固視微動と呼ばれ、網膜像が完全に固定されて何も見えなくなってしまうことを防いでいる。⁽²²⁾ 通常、そのような揺れは知覚されないが、それは小さな揺れの知覚を意識しないように抑制する働きがあるからだと考えられている (Murakami & Cavanagh, 1998)。蛇の回転図形では、パタンの非対称性によって運動信号にも非対称的な歪みが生じうる。そのため、特定方向の動きだけは抑制しきれずに知覚されると考えられる (Murakami et al., 2006; Ferrüller et al., 2010)。

蛇の回転錯視生起に関する上記の二つの仮説は互いに矛盾するものではなく、複数の要因の総合によってこのような強い錯視が生じている可能性が高い。いずれの仮説からも、錯視は動きの分析におけるきわめて初期の段階で生じていることが示唆される。ハエなどの昆虫、サラマンダーなどの爬虫類、ほ乳類の中でもウサギなどは網膜上で動きの分析を行っているが、ヒトを含む霊長類では、大脳皮質の(V1)以降で動き情報が抽出されると考えられている。そのため、(V1)野ではすでに錯視に対応した動きの信号が生成されていると考えられ、実際にサルではそのような結果が得られている (Conway et al., 2005) もの、ヒトでは証明されなかった。そのため、我々はまず錯視生起時と非生起時の脳活動の違いを測定する基本的な実験を行った (Kuriki et al., 2008)。

三・二 「蛇の回転」錯視に関する脳機能測定(1)

先に述べたように、fMRI実験の基本的な形は特定の機能の有無による脳活動の違いのコントラストを画像化することである。我々はまずそのような基本的な方法を用いて、動く錯視が実際に運動視関連領域の賦活を伴うのかを検証した。ここで重要になるのはどのような統制刺激を用いるかである。動いて見えないだけであまりに違う図を用いれば、仮にBOLD応答に差が生じてもその原因が錯視によるとは限らないことになってしまう。そのため、図形の要素はなるべく変更せず、色の配置順を一単位(白+黄+黒+青)ごとに反転させて全体としての動きが相殺されるような図形を作成し、統制条件とした(図3)。要素ごとの形は同じで、色の総量も変わらないが、動いては見えない点が違っている。これらを十五秒間ずつ見せる基本的なブロックデザインを採用した。また、(一)中央を固視する条件、(二)三秒ごとに定められた点の間で固視点が移動する条件、そして、(三)二と同様に自発的に視線を移動するように求めた条件の三条件を設けた。条件(一)(二)では固視点の色が変わり、特定の色の出現数を数える注意課題を課した。本研究では、最初に動きの情報処理されるV1野と動きの処理中枢であるMT+野を関心領域としてBOLD信号の時間変化を解析した。結果として、全般にV1野では錯視の有無による差が見られなかったが、MT+野では錯視図形に対して大きな応答が得られた(図4)。また、条件(三)で差が最も大きく、条件(一)では最も小さかったため、眼球運動が錯視を促進すると考えられた。

三・三 「蛇の回転」錯視に関する脳機能測定(2)

上記の研究は、錯視生起時にMT+野の応答が高まることを示し、本当の動きのように知覚される錯視の神経基盤の一端が明らかになったことに意義がある。しかし、V1野において差がなかったことは、そこで動きの信号が生成さ

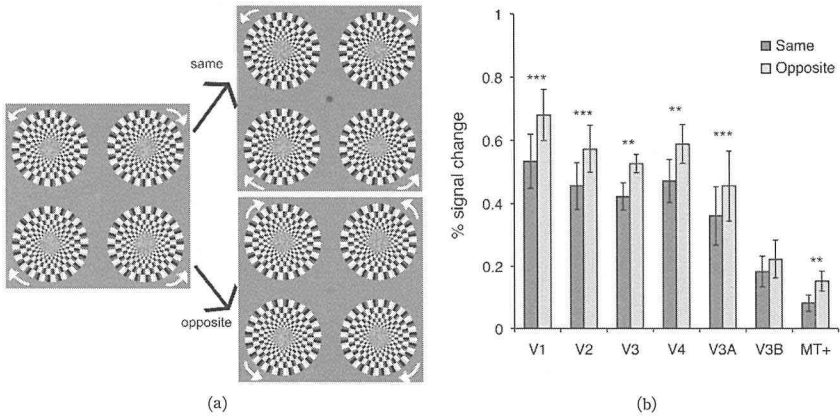


図5 (a) 刺激呈示の様子、(b) 実験結果。刺激ペアの錯視運動が同方向であった場合、反対方向であった場合のBOLD信号変化量を示す。1つめの刺激のみからなるベースライン試行の応答を引くことで2つめの刺激への応答の違いを際立たせている。*印はsameとoppositeが有意に違うことを示す(*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$)。Ashida et al. (2012) より改変。

れていないことを示しているというよりは、むしろこの実験の方法的な特性を示している可能性がある。つまり、「V1野は動きだけではなく色や形などさまざまな属性に強く応答する細胞を含んでおり、fMRIではそれらを分離しきれないので、動きだけが違う状況では信号の違いとして拾えなかったかもしれない。そのことを検証するには、低い空間解像度でもわずかな差異を拾うことができる方法上の工夫が必要になる。その要請に応えてくれると考えたのが、続く研究で用いた順応法である。順応とは心理学において幅広く利用される現象で、同じものに対する応答が下がっていくことを指す。たとえば、言葉で質問できない赤ちゃん（あるいは動物）に同じものを見せていると飽きてあまり見なくなる。そこで新しいものを見せるととたんに興味を持って見始める。ここで、「同じ」ものは必ずしも物理的に同じである必要はなく、赤ちゃんが区別していなければ同じように順応が起こる。そういう意味で、どんな属性が区別され、あるいはされないかを知る手がかりが得られる。脳神経も言葉で答えてくれず、順応で応答が下がる点で同様である。ある神経が形だけを分析していて色には興味があれば、同じ形で違う色のものを見せても順応したままであるが、逆に同じ色でも違う形を見せれば応答が回復するのだら

う。同様に、動きの方向が変わると順応状態が変わる場合、運動方向選択的順応という。これを利用して、各部位が錯視の動きに対して運動方向選択的順応を生じるかどうかを調べる実験を行った (Ashida et al., 2012)。図 5 (a) に示すように、最初に回転して見える四つの円を約三秒間見た後、少し要素の位置が異なっており、動く方向が同じもの、あるいは逆なものを約一秒見せる。その間、実験参加者は中央の固視点の色の变化に注目しており、錯視に注意を払わないようにする。動きの反転によって BOLD 信号の順応が解除されるかどうか⁽²⁶⁾がわかる。つまり、錯視運動方向が反対のペアの時に同じペアより応答が増えるかどうか⁽²⁶⁾が問題となる。

ここでは詳細は省き、BOLD 信号変化を総合した結果を示す (図 5 (b))。先述のような位相符号化を用いて V1 から V3B と呼ばれる部位までを定義し、別途動く刺激への応答から MT+ を定義した。V3B 以外のすべての領域で、運動方向選択的順応が生じたことがわかる。これは意外であり、かつ警鐘ともなる結果であった。V4 など、動きの処理にはあまり関与しないとされる部位でも V1 とあまり変わらないという結果は、何らかのアーチファクトによって全体で一様な差が出ている可能性を示唆する。そのため、構造方程式モデリングを用いたパス解析を行ったところ、V1 から MT+ へ至る経路の順応効果は、V3 あるいは V3A へ至る効果とは分離可能であることがわかった。動きに敏感な V3A はともかく V4 における効果は解釈しにくい⁽²⁶⁾が、先の研究で明らかにできなかった V1 の関与が明らかになった上、MT+ に至る運動視の主要経路で動く錯視に対応した応答が得られたことは重要な成果といえる。

このように順応効果は基本的な応答コントラストではわからない領域内の機能分化を知る手がかりになり得る。しかし、順応効果は解釈が難しい場合もあり、批判も多い。最初の V1 の段階で順応によって応答が下がれば、その影響はずっと下流まで及ぶからである。そのため、本当はどこで順応が起こるのか、すなわち、どこが当該処理の中核部位なのかを断定するのは簡単ではない。ただし、動きの情報に関しては、神経結合そのものは双方向的で情報の流れも双方向的であるにしても、順応の効果は V1 から高次視覚野へというボトムアップの流れに沿うことがわかっている

(Kohn & Movshon, 2003) ため、本研究の結果は比較的素直に解釈可能である。

そのように、fMRIの結果を解釈する上で、孤立した部位それぞれの働きを考慮するだけでは不十分で、部位間の関係を調べたいことがよくある。ここでは比較的古くからある静的なパス解析を試みた。構造方程式モデリングは、因子分析の方法と関連して発展し、心理学やその他の社会科学でも広範に用いられているように、ある意味で確立された方法である。それはさらに進んだ結合性解析につながる第一歩ともいえる。

四 おわりに

このように、視覚研究においてfMRIが実際に役立ってきたことは疑いなく、単に骨相学の再来とは言いがたい意義があることがわかる。最近では視覚のような比較的低次の感覚情報処理にとどまらず、幅広い活用がなされてきている。そして、脳のどの部位が活動するか、という機能局在論的な問題意識にとどまらず、広範な脳領域がどのようにに関連し合うかというネットワーク的な見方が重要になってきている。そのような議論を支える一つの方向性として、いくつかの関連部位における情報の流れを明らかにする結合性解析手法の発展があげられるだろう。先に少し触れた静的なパス解析の技法を発展させ、信号の時系列から因果性を推定するグレンジャー因果性モデルや、さらに発展して動的な情報の流れを示すことができる動的因果性モデルの開発が進んできた (Friston, 2011; Stephan & Roebroeck, 2012) などを参照)。それらの手法は、観察された相関に基づき、単なる機能的結合性 (functional connectivity) をこえて、実際の神経結合の推定を含む有効結合性 (effective connectivity) の推定を目指しているが、fMRIの本質的な時間解像度の低さから、その妥当性については議論が続いている。

BOLD fMRI以外のMRI活用の検討も絶えず行われている。拡散テンソル強調画像法 (DTI) により、神経繊維の結合性を調べる手法はある程度一般的に行われるようになってきた。空間解像度が低いため遠距離の神経結合の推定は

必ずしも簡単ではないが、局所的な神経繊維分布の異常は臨床的な研究で広く用いられる。また、BOLDに変わる機能的画像化の研究も行われており、まだここで紹介できるほど確立してはいないが、近い将来どうなるかはわからない。今後とも最新技術の動向に目を配りつつ、熟成された技術と工夫によって広範な脳機能の研究を行うことも、特に心理学者にとっては重要な仕事といえるのかもしれない。

文献

- 藤田宏 (2010)。「fMRI実験の基礎知識」宇阪直行編『脳イメージング入門——心理学からのアプローチ』第二章「113—143頁」培風館
- Ashida, H., Kuriki, I., Murakami, I., Hisakata, R., & Kitaoka, A. (2012). Direction-specific fMRI adaptation reveals the visual cortical network underlying the “Rotating Snakes” illusion. *NeuroImage*, *61* (4), 1143-1152. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.03.033
- Backus, B. T., & Oruc, I. (2005). Illusory motion from change over time in the response to contrast and luminance. *Journal of Vision*, *5* (11), 1055-1069. doi: 10.1167/5.11.10
- Conway, B. R., Kitaoka, A., Yazdanbakhsh, A., Pack, C. C., & Livingstone, M. S. (2005). Neural basis for a powerful static motion illusion. *Journal of Neuroscience*, *25* (23), 5651-5656. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1084-05.2005
- Fernüller, C., Ji, H., & Kitaoka, A. (2010). Illusory motion due to causal time filtering. *Vision Research*, *50* (3), 315-329. doi: 10.1016/j.visres.2009.11.021
- Friston, K. J. (2011). Functional and effective connectivity: a review. *Brain Connectivity*, *1* (1), 13-36. doi: 10.1089/brain.2011.0008
- Huk, A. C., Dougherty, R. F., & Heeger, D. J. (2002). Retinotopy and functional subdivision of human areas MT and MST. *Journal of Neuroscience*, *22* (16), 7195-7205. doi: 20026661
- Kitaoka, A., & Ashida, H. (2003). Phenomenal characteristics of the peripheral drift illusion. *Vision*, *15*, 261-262.

- Kohn, A., & Movshon, J. A. (2003). Neuronal adaptation to visual motion in area MT of the macaque. *Neuron*, 39 (4) , 681-691.
- Kuriki, I., Ashida, H., Murakami, I., & Kitaoka, A. (2008). Functional brain imaging of the Rotating Snakes illusion by fMRI. *Journal of Vision*, 8 (10) , 16 11-10. doi: 10.1167/8.10.16
- Liu, J. V., Ashida, H., Smith, A. T., & Wandell, B. A. (2006). Assessment of stimulus-induced changes in human V1 visual field maps. *Journal of Neurophysiology*, 96 (6), 3398-3408. doi: 10.1152/jn.00556.2006
- Murakami, I., & Cavanagh, P. (1998). A jitter after-effect reveals motion-based stabilization of vision. *Nature*, 395 (6704) , 798-801. doi: 10.1038/27435
- Murakami, I., Kitaoka, A., & Ashida, H. (2006). A positive correlation between fixation instability and the strength of illusory motion in a static display. *Vision Research*, 46 (15) , 2421-2431. doi: 10.1016/j.visres.2006.01.030
- Ogawa, S., Lee T. M. Kay A. R. & Tank D. W. (1990). Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 87 (24) , 9868-9872. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.01.034
- Uttal, W. R. (2001). *The New Phenology: The Limits of Localizing Cognitive Processes in the Brain*, Cambridge, MA: MIT Press.
- Wandell, B. A., Dumoulin, S. O., & Brewer, A. A. (2007). Visual field maps in human cortex. *Neuron*, 56 (2) , 366-383. doi: 10.1016/j.neuron.2007.10.012

㊦

- (一) Electro-Encephalography: EEG
- (二) Magneto-Encephalography: MEG
- (三) Magnetic Resonance Imaging

- (4) 電磁波の生体への影響には不明な点もあるが、現時点で危険はないとされる。
- (5) 操作には一定の訓練と認定を要するのが普通である。
- (6) 半減期が短い放射性同位元素を体内に注入し、放射線を測定することで血流量を調べる。
- (7) 極低温による超伝導コイルを用いる。
- (8) 現在では3T (Tesla) の静磁場が一般的であるが、7Tの機器が広まりつつある。
- (9) 原子スピンの概念はよく絵で描かれるような単純なものではないともいわれるが、心理学者としての私には理解が及ばず、相
当単純化している点にご注意いただきたい。
- (10) Blood Oxygen Level Dependent の略。
- (11) 図1(b)と(c)は断面の角度が違い、同一面を示しているわけではない。
- (12) 構造画像のボクセルは多くの場合一ミリ角程度である。
- (13) Near Infrared Spectroscopy (NIRS)、あるいは光トポグラフィと呼ばれる。
- (14) 有意性の検定には種々の方法がある。また、多数のボクセルを別々に統計検定するため偶然有意になってしまう可能性が無視
できず、有意水準制御のために各種の補正が行われる。それらの方法や基準値の違いによって賦活範囲は大きく変わるので、研究
者の恣意性が入り込む余地が生じる。
- (15) Fusiform Face Area (FFA) と呼ばれる。
- (16) ガル (F. J. Gall) を創始者として一九世紀に盛んになった。頭蓋の形から人格などを推定するとともに、頭蓋の核位置にさ
まざまな機能をあてはめた地図ができていった。科学的根拠がないだけでなく、優生学的な議論につながった点も批判される。
- (17) 特に何もしていないときにむしろ活動が高まる領域が存在し、それらのネットワークがさまざまな形で意識的な行動を支えて
いると考えられており、それが意識の本質の解明につながる可能性もある。
- (18) 高コントラストで反転を繰り返すチェッカー模様が多用される。また、解析方法や注目したい領域によって最適な角度が変わ
る。しかし、V1など基本的な部分だけ見るには多少の刺激の違いは大きく影響しない。
- (19) fMRI信号の立ち上がり遅れに対する補正が必要となる。
- (20) MTはサルにおいて定義され middle temporal. の略であったが、ヒトでは解剖学的な意味を持たず、サルとの相同部位とし

てMTという略語のみを用いるべきである。ヒト (human) を強調してhMTのように書くこともある。V5野と称する場合もある。

- (21) ここでは平均輝度からの差と考えればよい。
- (22) トロクスラー効果 (Troxler effect) と呼ばれる。
- (23) 測定はより広範囲に行うが、解析において必要な部分だけ切り出す。
- (24) このような行動レベルでの順応は馴化あるいは慣化と呼ばれることが多い。
- (25) 空間的ボタンはほぼ同一であり、それらの素の応答には違いがないことは確認してある。
- (26) V3Bは最初に提案したスミス (A. T. Smith) の定義と後のワンデル (B. Wandell) の定義が異なるが、ここでは前者に従った。
- (27) まだ定訳とはいえず、英語表記をそのまま使う方が一般的であろう。

(著者 あしだ・ひろし 京都大学大学院文学研究科准教授／心理学)

represents the idealization of the biblical language as the Holy tongue (lāšōn qodeš), as distinguished from human languages such as Greek and the vulgate dialect of the sages (lāšōn mišnāh).

Drawing on this distinction between “Jewish” and Hebrew, the paper intends to demonstrate the potential of the term Hebrew as a new and more inclusive way of categorizing “Jewish Thought”, transcending the differences of the pre-modern and the modern as well as the secular and the religious.

Visual perception and the brain

by

Hiroshi ASHIDA

Associate Professor
Graduate School of Letters
Kyoto University

It has become well known that the brain is the centre of our mind (even if one may not accept it as the entire site of mind) and it is now essential for psychologists to take advantage of recent advances in brain imaging techniques. We often see images acquired by using magnetic resonance imaging (MRI) and functional MRI (fMRI) even in common media. It is, however, not always well-understood how fMRI works and what it can really tell us. In this article, I will review the basics of MRI and fMRI and discuss how they can actually help understanding the organisation and functions of our brain. In the domain of visual perception, retinotopy has been playing a major role in proving that fMRI is a useful neurophysiological tool. It has served to map out the structure of the cortical areas in humans, and provided the basis for further investigation of detailed visual functions. Retinotopy is only available in the visual cortex by definition, but a similar idea of tonotopy is used in the auditory domain and we might find other simple principles for other parts of the brain. I will then review our own studies on the ‘Rotating Snakes’ illusion, which induces an impressing sense of illusory motion in a stationary drawing. We have first demonstrated that MT+, the distinct area for visual motion processing, is activated by the illusory motion. Then we revealed the whole network from V1 to MT+ underlying the illusion by using fMRI adaptation. fMRI no longer represents simple localisation theories, as it was once criticised, but it is expected to help understanding how the brain works as a network.

Technical improvement in both measurement and analysis is still on-going, and anyone who is interested in human brain and mind should keep an eye on its advancement even if they are not involved in conducting experiments by themselves.

The Biblical Language as Thou
Transliteration of the Bible and the Idea of Universal Prophecy
in the thought of Martin Buber

by

Toshihiro HORIKAWA
JSPS Research Fellow

In a previous paper entitled *Biblical Language as Thou - False Prophecy and Misunderstanding of the Prophets*, I discussed how Buber prescribed the I-Thou relationship as a mean of attenuate the danger of succumbing to false prophecy. In this paper it is my purpose to expound the importance of interaction between the reader (I) and the spoken word (Thou) by the transliteration of the Bible and the idea of universal prophecy.

Buber's intention of translating the Bible was to enable the reader to engage in the divine voice (spoken word) through the text (written word). It was done as a transliteration. Because Buber believed that the integrity of the original language must take precedence over fluency, the result was an unwieldy text. Buber's goal is possible only when the original language is preserved in its structure and style. This was the purpose of Buber's translation—to recreate the experience of a divine conversation between the reader and God.

Therefore, every person should be a prophet to directly hear God's message. The message announced by the prophet Isaiah 'the whole earth is full of his (God's) glory' (Is. 6:3) was stated by Second Isaiah as 'the glory of the LORD shall be revealed, and all flesh shall see it together' (Is. 40:5). It means that all flesh could be prophets who are able to respond to God's spoken word. In this connection, Second Isaiah (Is. 44:3) echoes the sentiment of Moses as expressed in Numbers 11:29.

Prophets are sent to warn the people, but their warnings are frequently not accepted. Though the message falls onto deaf ears, their prophecy, nevertheless, endures as a hope for future generations. Utilizing this concept of the 'reader as a