脳と心の動きを見る
――科学技術の最前線

根本　正史

はじめに

この連続講演会の統一テーマは「現代科学の焦点――生命・脳・心」です。「生命」「脳」「心」はいずれも難しい問題を含んでいますが、現代の生命科学や脳科学の発展は、少しずつその謎に迫っています。

なかでも、「心と脳（身体、物質）の関係性」や「心や精神が、どのようにして物質である脳から現れるのか」という問題は、最大の関心事だと思います。しかし、この「心脳問題」に直接迫ることは大変に難しいのです。これに関して、米カリフォルニア工科大学のクリストフ・コッホ博士は、「実際に進歩が見られ、実践的で期待のもてる研究」というのは「心の動き」に応じて変化する「脳神経活動のプロセス」に的をしぼった研究だと述べています。

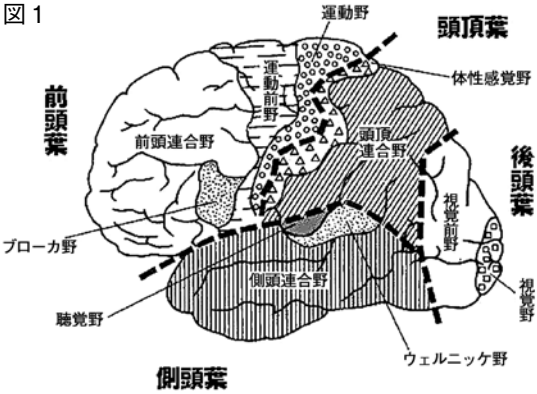
そこで今回は、最初に脳科学の基礎から始め、この20年間に明らかにされてきた「脳神経活動のプロセス」に関する最新の知識までを、できるかぎりわかりやすく紹介したいと思います。

タイトルには「科学技術の最前線」とありますが、技術的な部分は難解になりますので、エッセンスだけを取り出します。

1 「脳は使うほどよくなる」
――その仕組み

まず、皆さん、脳の地図というのをあまり見たことがないかもしれませんので、脳外科医である私がこちらに示してみます（図1）。

図1



大脳は4つの「葉」に分かれています。前頭葉、頭頂葉、後頭葉、側頭葉ですね。さまざまな機能をもつ場所がありまして、運動を司る「運動野」、感覚――触った感じや痛みとかを感じとる「体性感覚野」、そして頭の真後ろのほう、目と反対側の場所に、見るための「視覚野」があります。聴くための「聴覚野」はちょうど耳の上あたりにあります。

こめかみあたりには言葉を話すための場所（運動性言語中枢）があって、「ブローカ野」と呼ばれています。これは、ポール・ブローカというフランス人医師の名前です。彼の患者さんに、「タン、タン」としか言葉をしゃべれない人がいて、その患者さんが亡くなった後、「脳のどこが損傷していたのか」解剖して調べたわけです。左前頭葉の下方に損傷部位がみつかったのですが、その後、同じ症状をもつ8人の患者にも、同じ場所に損傷があったことから、そこに言葉をしゃべるための場所があるのではないかと発表しました。1865年のことです。

ブローカの示した重要なことは、大脳の左側、左脳に「しゃべるための脳」がある、右脳と左脳は形は同じでも働きは違うということを示した点です。

そして、「聴覚野」の周りで後方よりに「言葉を理解する」ための場所があります。「ウェルニッケ野」と呼

ばれています。発見したのはドイツ人の医師カール・ウェルニッケで、１８７４年のことです。「言葉を聞いて、理解する」機能に障害を受けた人がいて、その人の死後、脳を解剖して、言葉を理解する場所がここにあるだろうとしたわけです。

20世紀に入り、大脳の詳しい機能地図がつくられました。この地図を、世界で初めて人間の脳で明らかにしたのがワイルダー・ペンフィールドです。カナダのマギル大学の教授で、モントリオール神経学研究所の所長でした。１６３人の重症のてんかん患者に対して、てんかんを起こす脳の病巣を取り除く手術をしたのですが、開頭手術中に大脳皮質を電気刺激し、機能部位の脳地図を作成したのです。脳の重要な働きをもつ場所がどこにあるのか、そこを傷つけないために必要でした。患者は、局所麻酔で手術し、意識のある状態にしてあります。ある場所に電気刺激を与えると、急に手が動いたり、足が痛いと言い出したり、言葉がしゃべれなくなったり、過去の記憶が鮮明によみがえったりしました。こうやって、その脳の場所がどういう働きをもっているかがわかってきたわけです。

さて、ペンフィールドの脳地図を見てみましょう（図2）。まんなかに中心溝という溝があります。その前方に運動に関係する場所があります。中心溝の後ろ側には、体に触った感じを感じとる場所があります。そして、親指とか唇に関する部分が大きく示されています。つまり、よく使うところ、あるいは触った感じが敏感なところが、脳の中で広い領域を占めているのです。

ここで質問ですが、ピアニストや、ギタリストの脳はどうなっているとお思いですか。若いころから長期間、訓練を続けると、手や指の運動や感覚を司る脳の場所が大きくなる――そんな可能性が最先端の科学技術によって示されています。

これに関連して、皆さん、「頭は、使えば使うほどよくなる」と聞いたことがあると思います。最近、それを裏づける科学的根拠が数多くみつかっています。これが今日の話の前半のポイントになります。

「サビつかせてダメになる人が多い」

「脳は使うほどよくなる」と言いましたが、「よくなる」

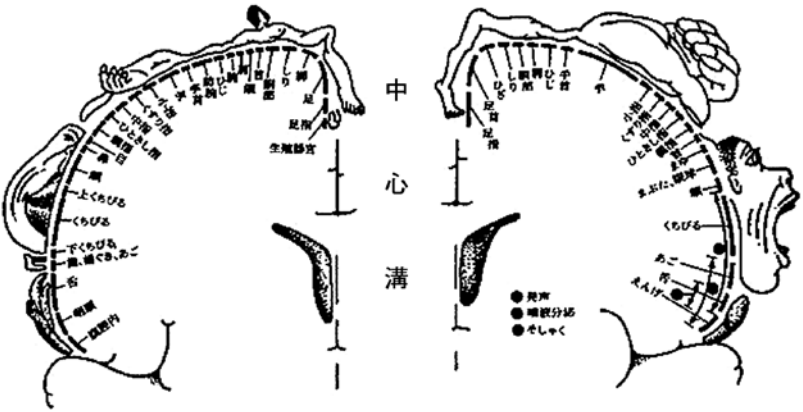


図2
ペンフィールドの脳地図。体の各部位への刺激が、脳のどの部分に投射されるかの対応関係を示す。唇や顔、手などに対応する部分は大きく、背中や尻などは小さい。

というのは、具体的にはどういうことでしょうか。この脳科学的な意味を探る前に、一人の波乱万丈の人生を紹介しましょう。

その人とは、カーネル・サンダースさん（1890～1980年）のことです。ケンタッキーフライドチキンの店の前に、寒くてもいつも立っていますね。彼は、6歳で父親を亡くしています。お母さんは缶詰工場に勤め、泊まり込みで働いていました。サンダース少年には弟と妹がいて、ある時、母親の代わりになって、ライ麦パンを焼きました。とてもうまく焼けたので、できあがったパンを持ち、弟と妹を連れて、母親のいる工場に見せに行きました。そうしたら、お母さんがとても喜んで「これはおいしいわ！　すごいわね！」とほめてくれたのです。これは、サンダースさんの忘れられない体験となり、一生に大きく影響したといいます。7歳のころでした。その後も苦労の連続で転職を繰り返し、40もの職種に就いた後、30代後半でガソリンスタンドを始めました。そのスタンドのお客さんに、物置を改造した6席ほどのレストランで、手作り

のフライドチキンを食べさせたのです。それは大好評だったのですが、またまた苦難がやってきます。片腕だった自慢の息子を亡くしたり、火事に見舞われたり、最後には、ハイウエーができたため車の流れが変わり、店はつぶれてしまったのです。彼はもう65歳になっていました。

ところが、ここから彼の本格的な活躍が始まります。奥さんが、こうアドバイスしたそうです。「人が来なくなったのなら、人のいる所に売りに行けば?」。そこでフライドチキンをワゴン車に積んで回り、調理法を教えるかわりに歩合をもらうという契約を結んで、フランチャイズを広げていったわけです。

まさに不撓不屈の人生ですが、そのサンダースさんがこう言っているんですね。「人間は働き過ぎてだめになるよりも、休みすぎてサビつきだめになるほうが、ずっと多い」と。

「サビつかない」ためには「よく使う」ことですが、この言葉はまさしく脳のことを言っているようです。それでは、よく使うとどうしてサビつかないのでしょうか? それを知るためには、脳の神経回路を顕微鏡で観察しなければなりません。

ミクロの世界の脳活動を探る

どうやって観察するのかといいますと、「ゴルジ染色」という染色法があります。イタリアのカミッロ・ゴルジという医師が1873年に開発した方法です。これを使うと、神経細胞だけに銀（クロム酸銀）がくっついて銀メッキされたようになり、黒く見えます。これで、神経回路が観察しやすくなるわけです。

ちなみに、脳の神経はものすごくたくさん手を伸ばして網の目のようになっていますから、ゴルジは「脳神経細胞は、すべてがつながっていて一体のものである」という説（網状説）を発表しました。

それに対して、スペインのサンティアゴ・ラモン・イ・カハールという学者は「いや、1個1個の神経細胞は独立している。そしてシナプスと呼ばれる接合部によって互いに連絡しているのだ」という説（ニューロン説）を唱えました。今はこちらが正しいことが証明されています。

神経細胞ニューロンは、大脳の1立方ミリメートル当たり数万個から10万個もあります。大脳全体では数百億個から1千億個もあるようです。この神経細胞には手がたくさんあり、「樹状突起」と呼ばれています（図3）。樹の枝のように多数突き出ているからです。そして1本の幹のような「軸索」というものを出しています。軸索は枝分かれして、他の神経細胞の樹状突起や細胞本体と、「シナプス」という構造で間接的につながっています。「シナプス」とは、ギリシャ語で「つなぐ」という意味です。1つの神経細胞には、数千から数万個のシナプス結合があるとされています。つまり数百億の細胞同士が、それぞれ数千から数万のシナプス結合でつながっているわけで、とてつもない組み合わせのつながり、神経のネットワークになります。

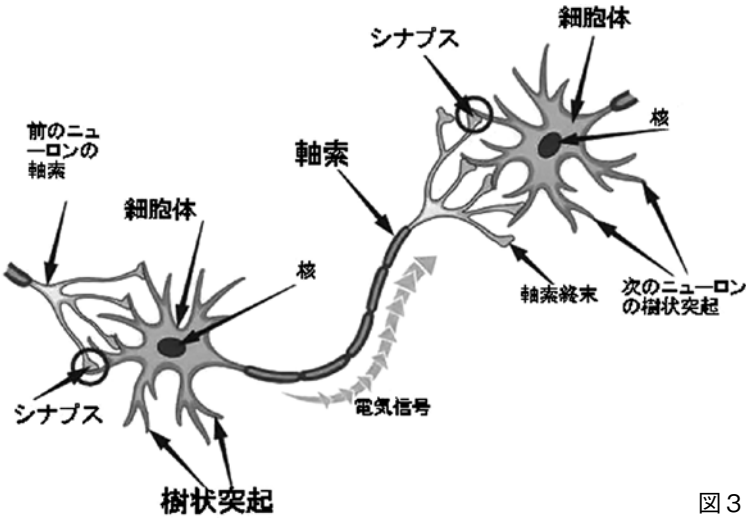


図3

さて、ヒトがものを触ったり（触覚）、見たり（視覚）、聞いたり（聴覚）、匂いをかいだり（嗅覚）、味わったり（味覚）すると、その情報は、末梢の感覚受容器を経て、0・1ボルトの電気的信号に変換され、次々と神経細胞に伝わっていきます。この神経細胞の電気的活動が軸策を経て、次の神経細胞へとリレーされていく「つなぎ目」がシナプスです。シナプスには、電気的活動（興

奮）をそのまま次の細胞に伝えようとするものと、反対に次の細胞の興奮を抑えようとするものがあります。神経細胞は、シナプスを介して受け取ったすべての情報を加算統合して、また、0・1ボルトの電気的な活動として「発火」し、次の細胞にその信号を送るわけです。このシナプスの隙間の部分では、次の神経細胞に「神経伝達物質」というものを放出して電気的活動を伝えます。

後で、「脳の活動を画像化する方法」についてお話ししますが、これらの活動は、神経細胞内のカルシウム濃度の変化としても見ることができます。画像化すると、活動している様子が、ピカピカ光って見えます。皆さんの脳の中でも、数百億個の神経細胞がピカピカ光っているわけです。今、ちょっと眠くなってきた方もおられると思いますが、眠くなるとピカピカも少なくなってきます（笑）。

このようにして、5つの感覚情報は次々と神経回路のネットワークを伝わりながら分析・統合され、主観的な体験として意識に現れます。最終的には、たとえば、おいしそうなケーキが見えた、カレーのいい匂いがしたという時に、他人より早く行動する、つまり食べに行く。そういう出力に結びつくわけです。

多く通れば「道」は通りやすくなる

さて、この神経回路に関して、「ヘッブの学習則」という法則が、かなり昔から知られています。ドナルド・ヘッブというカナダの学者が、今から60年以上前に提唱した学説です。

細胞Aと細胞Bがシナプスでつながっていて、繰り返し、あるいは絶え間なくAがBの発火に参加していると、Aの発火がBの発火へとつながりやすくなるというものです。つまり、伝達の効率が増加するわけです。東大の合原一幸先生の譬えで言えば、山の獣道のようなものです。「山道をたくさんの獣たちが活発に歩き回ると、その道は次の獣たちにとって、もっと通りやすい獣道になる」ということです。この場合、山道というのは脳の神経回路です。獣たちは電気信号、情報です。それがたくさん駆けめぐると、その山道は次の獣たちにとってもっと通りやすい獣道になる。これがいろい

ろな「学習」です。「このキノコはマツタケで美味しい」とか「これは毒キノコだ」とか、そういったものを学習していきますが、そのさいに神経細胞レベルで何が起こっているか。それを示す法則といわれてきました。

ところで、獣道を使わなければどうなりますか。雑草が生えてきます。使わないとどんどん道が通りにくくなるということです。つまり、脳がサビつくわけです。ただ、この法則は実際に証明されたものではなくて、仮説だったわけです。

それが西暦２０００年を過ぎて、さまざまなかたちで証明されるようになりました。それを示した日本の研究を紹介しましょう（松崎政紀ら２００４年、岡本賢一ら２００４年）。

シナプスに活動履歴が記録される

シナプスを見るのに、さらに拡大率を上げて、二光子顕微鏡という顕微鏡で見てみましょう（図４）。

すると、興奮を受け取る樹状突起側のシナプスは、頭部がふくらんだキノコのような突起構造物（スパイン）であることが観察できます。このシナプスを、人工的に高頻度で電気刺激したり、グルタミン酸という神経伝達物質を光で活性化させたりすると、スパインの頭部は、プクッとふくれて大きくなることがわかりました。つまり、一個のシナプスに電気的な活動が起きて、

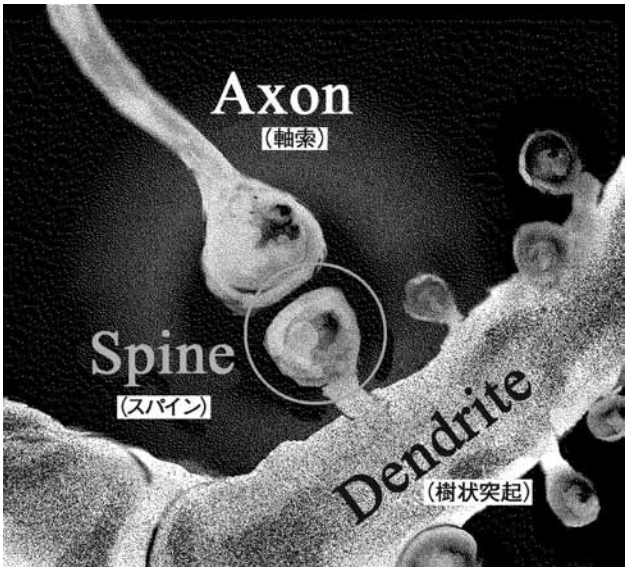


図４

信号が通り抜けると、シナプス構造そのものに変化が起きるのです。しかも、このスパイン頭部の増大は、電気的活動の増大も伴っていました。難しくいうと「活動依存的な構造的かつ機能的変化」が生じます。

また、この構造的変化は、アクチンという細胞の骨格となるタンパク質がかたちを変えて（重合して）起きることもわかりました。アクチンというのは、ミオシンとともに筋肉の収縮弛緩を行うタンパク質です。

面白いのは、高頻度に刺激するとふくらむのですが、長期の低頻度刺激ではアクチンに脱重合がおこり、スパインはしぼんでしまう。つまり、使用頻度が低いとしぼんでしまうのです。

さらに、小型のスパインと大型のスパインを比較すると、小型のスパインは、そこを信号が通った後、長期間にわたってふくらんで通りやすくなっていることがわかりました（長期増強）。ところが、大型のスパインは一時的に大きくなりますが、すぐもとに戻ってしまう。松崎先生らは、これらの現象について「小型のスパインが（学習に関わる）長期増強の好発部位であるのに対し、大型のスパインは長期記憶痕跡の物理的実態である可能性が示唆された」、そして「スパインが一個ごとに個別にヘッブの学習則に従う」と述べています。

身体で行い、口で言い、意（こころ）で思ったこと、さらに本人も意識できないような心の活動までもが、過去の活動履歴として、脳の中のシナプスという構造に焼きこまれているのかもしれません。

使う部分から栄養が入り、脳を強化

〝頭を使えば使うほど神経回路のネットワークが強化される〟ということが見えてきました。

しかし、このような脳活動には当然、「栄養素」が必要です。これを、脳循環・物質輸送のシステムがとても効率よく支えていることもわかってきました。

ネズミ――ラットの脳には、頬ヒゲ一本一本に対応する、感覚野の中で最も広い領域があります。頬ヒゲのバレル野といいます。ラットの頬ヒゲを刺激すると、この部分の神経活動が活発になり、その場所の脳血流が増えます。そのとき、血中から「ＩＧＦ－１（インス

リン様成長因子・1)」という強力な神経の栄養素が脳内に移動することが確認されました。つい最近出た日本とスペインの共同研究です。(西島壮ら2010年)。

実は、脳の血管には関所(血液脳関門)があり、脳細胞の栄養分が血液中にいくらあっても、その関所のために通れないものも多いのです。「IGF・1」は神経細胞にブドウ糖を取り込ませたり、細胞の成長を調節したり、神経の興奮性や学習にも関わる重要な栄養素ですが、血液中では他のタンパク質と結びついていて巨大分子になっています。そのため、そのままでは関所を通れません。ところが、この研究によりますと、ヒゲが刺激されて神経活動が高まり、その場所の血流が増えることが引き金となり、特殊な酵素が、その巨大分子を分解して「IGF・1」を切り離し、脳の関所を通れるようにするというのです。

共同研究者の征矢英昭先生は「脳の神経活動そのものが強力な栄養素を取り込み、さらに脳機能が強化される好循環を生む」と述べられています。すなわち、頭を使うと脳機能を強化する栄養素が取り込まれ、その結果、脳は強化され、脳活動はさらに活発化する。こういう「好循環」が生まれることが明らかになったわけです。

大人の脳でも神経細胞は新生する

先ほど、「ニューロン説」をいち早く唱えたカハール先生を紹介しました。カハール先生は、1928年の論文の中で、「いったん発達が終われば、軸索や樹状突起の成長と再生の泉は枯れてしまって元に戻らない。成熟した脳では神経の経路は固定されていて変更不能である。あらゆるものは死ぬことはあっても再生することはない」と述べています。成長した哺乳類においては、脳や脊髄を構成する中枢神経はひとたび損傷を受けると、もはや再生しない、脳の神経細胞は減るだけであると、こう私たちも学生時代に教わってきました。

ところが、1990年代、このカハール先生のドグマは決定的に破られます。成体哺乳類の脳ではもちろんのこと、老人の脳でも神経細胞が新たに生まれていることが証明されたのです。

どうやって新生細胞を見分けるのかといいますと、ＢｒｄＵ（ブロモデオキシウリジン）という物質を体の中に注射します。この物質は、遺伝子ＤＮＡの構成成分とそっくりなため、ＤＮＡの複製が必要な、これから分裂し生まれようとする細胞だけに取り込まれます。結果として、新生細胞に印をつけることができ、これを免疫蛍光染色すると、他の細胞と区別できるようになるわけです。体中どこでもこういうものは見つかるのですが、脳だけには新生細胞はないだろうと考えられていました。ところが、そうではなかったのです。

はじめに、トリ、ネズミ、サルの脳で新生が確認され、１９９８年、とうとう「人間の大人の脳でも神経細胞は新生している」ことが証明されました。スウェーデンのピーター・エリクソンと米国のフレッド・ゲージらのチームが証明したのですが、どうやったかというと、がんの研究がヒントとなりました。

がん患者にＢｒｄＵが投与されていたのです。これは新生したがん細胞の量や、がん細胞がどれくらいのスピードで増殖しているかを知るためのもので、もともとは、がんの治療と研究が目的でした。これをエリクソン博士は脳の研究に応用しました。ＢｒｄＵを投与された患者さんが亡くなった後、脳を調べさせてもらったわけです。５人のがん患者で、平均年齢は64歳でした。そういう高齢者の脳の「海馬」の切片をいただいたところ、なんと神経細胞が新生していたのです。

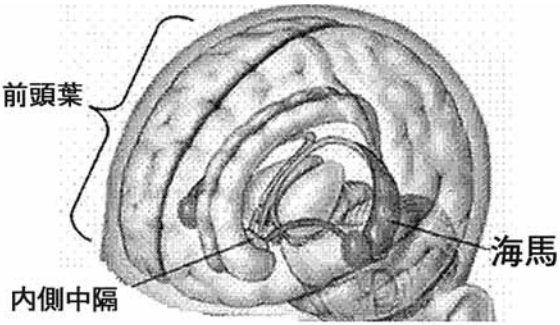


図５

１立方ミリメートル当たり百個とか２百個の細胞が生まれていました。

「海馬」というのは側頭葉の内側部にあるタツノオトシゴみたいな格好をした部分で、学習や記憶に関わる重要な器官です（図５）。当時、回し車で運動させたネズミの海馬歯状回

というところで、神経細胞の旺盛な新生が見られることがわかっておりましたので、人の脳でも、まず海馬の脳組織が選ばれたわけです。

海馬以外の部分ではどうかというと、サルの大脳を使って明らかにされています。米プリンストン大学のエリザベス・グールド先生が、サル12匹にＢｒｄＵを注射して、新生細胞を調査しました。そうすると、脳の中心部分に「脳室」といって脳脊髄液が溜まる空間がありますが、そのすぐ近くの脳室下帯にたくさんの細胞が生まれていました。そして1～2週間のあいだに、神経組織の白質と呼ばれるところを経て、成熟しながら大脳皮質に到達していました。「遊走」という言葉を使いますが、そういう移動が行われていました。とくに「連合野」というところに、たくさん遊走していたのですが、これは知能、記憶、思考、判断など高次のはたらきを司る場所です。つまり、新生ニューロンは、白質を通って連合新皮質へと移動していたことが証明されたわけです。

ネズミの脳でお話しすると、ラットの海馬では毎日5千から1万個のニューロンが新生しているといわれています。具体的にどのように新生するのか。まず細胞分化の源は「神経幹細胞」で、ここから分裂して「娘細胞」ができます。そして、はじめ未熟な細胞（神経前駆細胞）だったのが、細胞誕生から第2週目に、樹状突起と軸索を伸ばし始め、成熟した神経細胞になっていきます。つまり、他の神経から電気信号を受け取り、統合して他の神経に渡すという活動、神経回路のネットワーク上で、ある機能に参加して働くようになる。これが機能する新生ニューロンです。

新生細胞は「学習」すれば生き残る

しかも、実に興味深いことに、この新生細胞は、何もしないとどんどん死んでいくことがわかっています。第2週目のこの時期に学習し、脳を使えば、細胞の生存率が高まり、生まれた神経は生き残るのですが、学習の機会がないと、大半が死滅してしまうのです（学習の臨界期）。

やはりエリザベス・グールド先生の実験ですが、ネズミに、目のまばたき反射を利用した条件づけ学習や、

水迷路試験などの学習をさせ、その際、「困難な課題」と「簡単な課題」を与えました。簡単な課題だけをやっていた場合は、新生細胞の多くは死滅した。難しい課題に挑戦したら、新生ニューロンは生き残っていた。「苦労なくして得るものなし」といいますか、脳細胞も使わなければ失われるわけです。

学習・運動によって、神経細胞のニューロンが多く新生し生き残ります。今日の講演会にいらっしゃった皆さんの脳のなかでは、ニューロンがどんどん生まれて生き残っているだろうと思います（笑）。

ただ、適度な刺激が大事でして、不要なストレスといいますか、ストレスが過剰な負担になっている場合には、神経細胞の新生も抑制されてしまうこともわかっています。

わかりやすくまとめますと、脳を使えば使うほど①神経回路がつながりやすくなり②使った部分に栄養が回り③新しく生まれた脳細胞が生き残る。そう言ってよさそうです。

日本早期認知症学会という学会がありまして、その理事長をされていた金子満雄先生が認知症について、「ぐうたらな生活」は大きな原因になると厳しいことを言われています。もちろん、いろいろな体の病気とかを抱えている場合もありますが、できるかぎり脳を使った生活をしていくことが大事だというのです。

また、長谷川和夫先生は、認知症を診断する評価基準（長谷川式認知症スケール）をつくった方で、聖マリアンナ医科大学の教授や学長をされましたが、こう言われています。

――脳の老化と精神の老化は脳から精神という一方通行のものではなく、脳と精神が相互的・循環的作用を及ぼし合う。脳が老化するために精神が老化するというのは不十分で、精神の老化が脳の老化を促す、と。

要するに、運動が身体を丈夫にするように、精神・身体の運動が脳を鍛え上げるということを、ぜひ知っていただきたいと思います。脳は筋肉と同じように、鍛えられるのです。

2 「心脳問題」をさぐるヒント
――錯覚とは？ 共感とは？

錯覚も心の真実――脳の中の「リアル」

後半は、心と脳の関係性を考える上で、重要なヒントになるような脳科学のトピックスを2つお話ししたいと思います。

ひとつは「錯覚（実在する本当の対象とは違ったものとして知覚すること）」について、もうひとつは「ミラー・ニューロン」についてです。

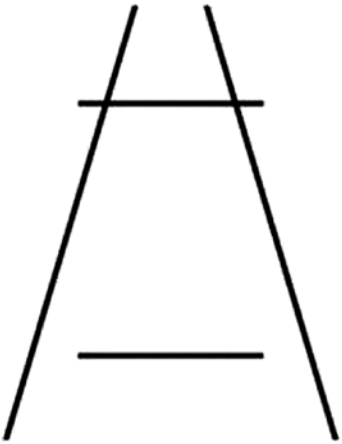


図6

この絵をごらんください（図6）。

2本の横線があります。上下どちらの線が長いでしょうか？ これはポンゾ・イリュージョンといって、イタリアの心理学者マリオ・ポンゾという人が最初に報告しました。上のほうが長く見えますが、同じ長さです。

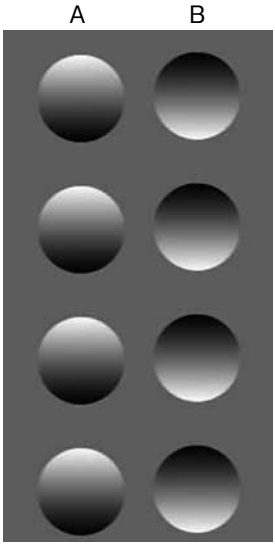


図7

次の絵はどうでしょうか（図7）。左のA列と右のB列とどちらが凸でどちらが凹か。――皆さん左のA列の方が凸に見えますよね。でも、これは同じ図形を、上下さかさまにしただけです。米カリフォルニア大学の神経科医のヴィラヤヌル・ラマチャンドラン氏が取

り上げた絵です。

このような「目の錯覚（錯視）」がどうして起こるかという理由は十分にはわかっていませんが、絵を描くための表現技法の研究や、視覚心理学などの研究から、「脳の働き」が深く関わっていることが推測されています。

たとえば、私たちは三次元の空間で暮らしていますが、その空間をどう認識しているかというと、一つには目から入る視覚情報を使っています。ところが、目の網膜というスクリーンは、写真のフィルムのように、平面的に広がっています。ですから、三次元の世界の情報は、網膜では二次元の画像として映ります。私たちがこの三次元空間で、うまく行動するためには、その二次元画像をもとの三次元の世界として再現しなければなりません。

それをやっているのが脳です。つまり、二次元の画像を、脳が三次元の立体構造として解釈し復元しているのです。

この絵（図8）を見てください。下の方のボールは浮き上がっているように見えませんか。ボールの位置は上と下で変わらないのですが、影の位置から、ボールが空間のどこにあるのか、脳は無意識に、しかも瞬時に計算してしまうのです。このように、脳は、網膜に映された画像のさまざまな「特徴や手がかり」をとらえ、過去の記憶とすり合わせて、復元しています。

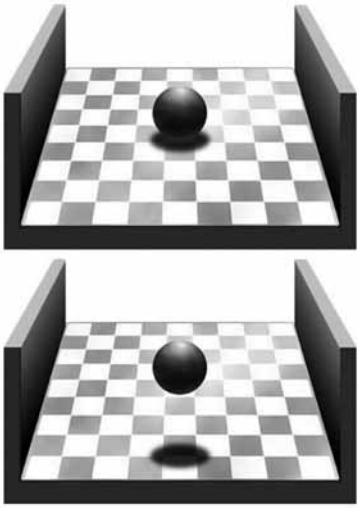


図8

はじめのポンゾ・イリュージョンも「遠くのものは小さく見えるはずだ」という、過去の経験から得られた「世界のきまり」についての記憶情報を加味して、

三次元の立体空間の中で画像を解釈してしまうことから起こると推測されます。このような相対的大きさ（線遠近法的手がかり）のほか、重なり具合や陰影、明瞭さ、遠くがかすむ感じ（空気遠近法的手がかり）、色の強さやコントラストなどを手がかりにしています。また左右の目は離れていますので、それぞれの目がとらえる像は少しずれています。この「両眼視差」も重要な手がかりです。さて、ラマチャンドランが取り上げた凹凸の絵（図7）は、何を手がかりにして左のA列が凸に見えてしまうのか、皆さん考えてください（答えはこのあと※に）。

要約しますと、私たちの五感で感じとる世界は絶対的な客観世界をそのまま映し出しているのではなく、外界の対象と脳の働き、もしくは心との相互作用で生まれてくるということです。

タゴールという詩人は、アミ（わたし）という詩の中で「私自身の意識の色を通して、エメラルドは緑になり、ルビーは赤になった」と述べています。

※　頭の上から（視野上方から）光が降り注げば凸に出ばったものは上が明るく下に影ができ、凹にへこんだものは上に影ができるという「世界のきまり」に関する過去の記憶に照らし合わせて、同じ図形であっても、上が明るい左のA列が凸に見える。

「心の動きを脳活動から読み取る」方法

さて、後半の本題に入る前に、「心が動く時、脳の中で何が起こっているのか。いったいどうやってわかるのか」について説明しましょう。

脳の中で行われている活動は、当然、ふつうは目に見えませんね。これを目に見えるかたちで表す技術を「脳機能画像法（脳機能イメージング）」といいます。これを使いますと、さまざまな心の活動が、脳の中のどのような生理的活動と関連して起きているのかがわかり、脳の研究や病気の診断に役立つわけです。

この方法はいろいろとあって、大きく分けて「脳の神経細胞の電気的活動」を見る方法と「脳血流の変化」を観察する方法とがあります。

前者は、神経細胞の電気的活動による〝脳の電場の変化〟を見る「脳電図（脳波）」、同じく〝脳の磁場の変

化〟を見る「脳磁図」などがあります。

一方、脳血流を示す方法ですが、大脳皮質には太い静脈のほかに、やや細めの動脈が大脳皮質を垂直に貫いています。神経細胞が活発化すると、こうした動脈やさらに細い血管を広げるような信号や物質が出て、「活動した脳の場所で血流が増える」ようになっています。

先ほどちょっと触れましたが、ネズミの脳で、私も実験してみました。麻酔をかけ、右足、左足を交互にくすぐります（振動刺激）。左足をくすぐると、足に関係する右側の脳の場所で血流が増え、右足をくすぐると左側で増えます。ネズミの場合、ヒゲが一番繊細な感覚をもっているのですが、そのヒゲを0・5ミリほど1回振らせただけでも、はっきり血流反応が起きます。

では、脳の血流変化をどうやって見るのでしょうか。

その方法のひとつが、磁気を使う「機能的磁気共鳴画像法（ファンクショナルＭＲＩ）」です。脳卒中になったときに、こういうＭＲＩ装置に入る場合がありますね。最近では脳が老化していないかチェックするために使う場合もあります。簡単な原理をいうと、赤血球の中には酸素を運ぶヘモグロビンという物質があります。脳の血流が増えると、酸素と結びついた酸素化ヘモグロビンが多くなりますが、これは鮮やかな赤色をしていて、磁気を帯びていません。それに対して、脳の細胞に酸素をわたし終えたあとの脱酸素化ヘモグロビンは磁場があると磁気を帯びやすく、また、暗い赤色を呈しています。結局、脳の活動した場所は鮮やかな赤色となり、磁性も変化します。この磁性の違いを利用して脳活動が強く起きた場所を画像化するのがファンクショナルＭＲＩです。

たとえば、この方法を用いた面白い研究が日本から報告されました（宮脇陽一ら２００８年）。被験者に、さまざまな意味のない模様をかわるがわる1時間ぐらい見せながら、一次視覚野――頭の真後ろにありますが（図1）――の血流変化、脳活動の様子をＭＲＩで細部にわたり観測します。次に、字や図形などを見せると、ＭＲＩの脳活動の信号パターンから、今どんなものを

見ているのか、コンピュータで計算し、画像化できます。

一方、光を使った「近赤外分光法」があります。これは、先ほどお話しした〝脳活動が起きた場所は色や明るさが変化する〟ことを利用して、脳活動を検出します。手を光にかざすと、うっすらと透けて見えますね。650～950ナノメートルの光は生体を透過しますが、この近赤外光を用いて、脳活動の場所の〝光の吸収変化〟を検出するのです。多チャンネルにすると、脳の血流が増えたところを画像化できます。この方法だと、頭に検出器をつけて、歩いている最中とか動いている時でも、脳の活動を見ることができます。

こういった技術を利用して、最近では、手足や体が動かなくなり意思表示もできなくなった方たちが今、何をしたいのか、イエスかノーかなどを、脳活動で検出できるまでになっています。

これとは別に、放射性同位元素を使った「ポジトロン断層撮影法（PET）」という方法もあります。血液中にγ（ガンマ）線という放射線を出す薬剤を注射します。それから、放射線を検出するPETの装置に入って、脳の血流等を画像化するわけです。

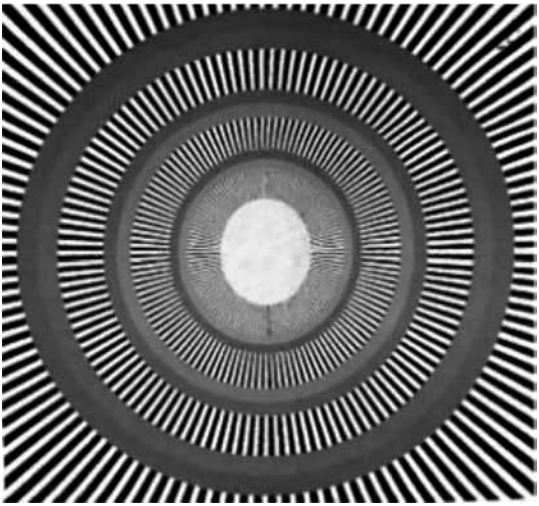


図9

錯覚を脳活動で読み解く

それでは本題にはいりましょう。

これはイシア・レビアンというフランス人が1981年に描いたエニグマ（謎）という絵をもとにして描い

た図形です（図９）。中心部分をじっと見ていると、リングの部分で何かが回っているように見えないでしょうか。白いものがサーッと走っているように見えませんか―見える人と見えない人がいるようです。脳の構造にあまり違いはないと思いますが（笑）。実際に、これを見ているときにどのような脳活動が起きているのか研究した学者がいます。

ロンドン大学のセミール・ゼキたちが、ＰＥＴを使って調べました。被験者に、まずチェッカーボードの模様を見せ、それが実際に動いている時と静止している時の脳活動を比べました。すると、動いているものを見ているときは、脳の高次視覚野「Ｖ５（ＭＴ野）」という領域で血流が増えていました。そして「エニグマ」の絵を見ているときも、やはり、この「Ｖ５（ＭＴ野）」の領域、そして側頭葉や前頭葉の一部も活発化していることがわかりました。つまり、実際に動いていなくても、主観的に「動いていると感じる」時、きちんと脳の活動として現れているわけです。

このＶ５の領域というのは運動方向、スピードなどの物体の動きに感受性をもつニューロンが存在しています。ここを損傷すると運動知覚を失い、世界が静的なフレームの連続のように感じられます。一つひとつの絵が断続的にしか見えないため、車が速く走る道路を横断したりすることが難しくなってしまいます。

最近、エニグマなどの運動錯視が生じる理由として、視覚野のみならず、眼球レベルから錯覚に関わる過程が始まるのではないかという仮説も提唱されています（Xoana G. Troncoso ら２００８年）。私たちの眼は、いくら一点をみつめるように固定しても、非常に小さな眼球運動が生じています。これをマイクロ・サッカード（固視微動）といいますが、神経系が慣れの現象おこさぬよう重要な役割を担っています。もし、これらの目の動きを完全に止めて景色も動かないと網膜にはいつも同じ光刺激があたる為、神経系は慣れて像が消えてしまうのです。エニグマの運動の錯視感覚が、マイクロ・サッカードの強さと密接に関係しているので、この微動に伴って眼球レベルで錯視過程が始まり、Ｖ５野の脳活動の活発化は、その下流としての反映を見ている

のではないか、というわけです。

「両義図形」と「両眼視野闘争」

さて、これは何に見えますか（図10）。アヒル？ウサギ？　この絵は、米国初の心理学博士となったジョセフ・ジャストロウがとりあげた絵「ダック―ラビット」です。どちらにも見える曖昧な図形ですね。

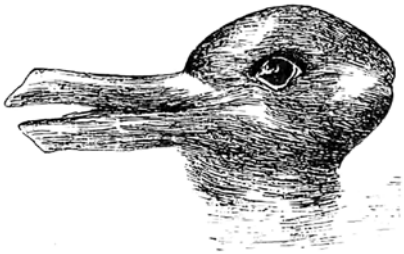


図10

図11

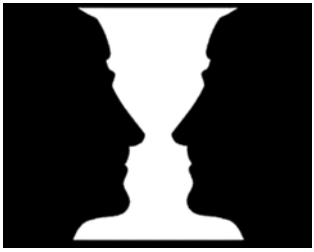


図12

これはどうでしょう（図11）。「嫁と義母（婦人と老婆）」という有名な絵です。若い女性が向こうを向いている姿にも、おばあさんの横顔にも見えます。次は「ルビンの壺」（図12）。これは、デンマークのエドガー・ルビンが描いた「盃と顔図形」をもとにしています。このように、ある図形が2通りに見えるとき、「両義図形」といいます。では、その両方を同時に見ることができるでしょうか。婦人が意識にのぼっているとき老婆は意識下にあり、老婆が意識にのぼると婦人が意識下に隠れます。このように、一つの画像を見ているのに意識にのぼる主観が交互に切り替わる時、脳の活動はどのようになっているのでしょうか。これを明らかにするために、「両眼視野闘争」の脳活動が研究されました。

「両眼視野闘争」というのは、左右の眼それぞれに異なるパターンのイメージを同時に見せた時、二つのイメージが交互に意識にのぼる現象で、両義図形を見た時の意識体験と良く似ています。米ハーバード大学のフランク・トングたちは、全体の色調を緑色にした「顔」の写真と、赤色にした「家」の写真を重ねて合成画像

を作成し、被験者に、赤と緑のフィルターを左右にもつ赤緑メガネつけて見てもらいました。すると被験者のそれぞれの眼には、「顔」と「家」が別々に映り、頭の中では「両眼視野闘争」がおきました。この時、どちらが見えているのかボタンで報告してもらいながら、ファンクショナルＭＲＩを行ったのです。

実は、「顔」を見たときに強く活動する領域は、側頭葉底面の紡錘状回（図13）というところで、「家」や「場所」を見た時はその内側の海馬傍回（図13）というところなので、活発化する脳の領域が異なるのです。結果は、予想通り、意識にのぼった表象が「顔」の時は紡錘状回で、「家」の時は海馬傍回で脳活動が活発化していることが確かめられました。すなわち、心に浮かんだ表象は、高次視覚野の脳活動と一致していたわけです。

このような実験から、両義図形を見た時に交互に現れる意識内容の変動や、視覚的気付きも、局所的、あるいは広範囲な脳活動の変動と対応していることが推測されます。

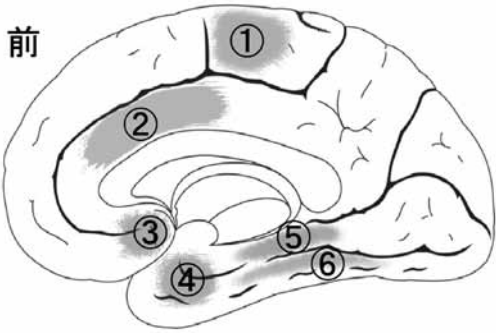


図13

大脳の正中内側面

① 補足運動野
② 前帯状回
③ 側坐核
④ 扁桃核
⑤ 海馬傍回
⑥ 紡錘状回

幻覚や夢も、脳と心にとっては「現実」

このように、現実に即さないことまで起こりうる心の中のリアリティが脳の活動である程度説明できるわけですが、これは錯視や両眼視野闘争などの視覚体験ばかりではありません。病者などの幻覚体験（実在しないものを実在するかのように知覚体験する）や正常者の夢の体験にも当てはまります。

たとえば統合失調症の人は、自分の存在を脅かすような恐ろしい幻聴を聞くといいます。他人の声で罵倒されたり命令されたりして、それがあまりにも現実感をもって迫る。そのため幻聴を相手にぶつぶつ言ったり、時に自分や相手を傷つけるような行為にまで及びます。このような患者11人に、フィンランドのチームがファンクショナルＭＲＩを行いました（Tuukka T. Raij ら２００９）。幻聴が聞こえる時と聞こえない時とを比べて、聞こえる時はどのくらい現実感をもって聞こえるのかを報告してもらいながら、ＭＲＩで脳活動をモニターしたのです。

すると、聴覚言語性の幻覚は、「ブローカ野」を含む両側の下前頭回の脳活動に特に強く相関しました。さらに、その幻聴体験の主観的な現実感は、下前頭回と聴覚野・右線条体・右側頭葉後部・側坐核および前帯状回（図13）（分離・喪失・苦痛の情動の座）との同期的な活動に相関していたといいます。

すなわち、ブローカ野で発動した〝自己生成の言語〟が〝他人から発せられて聞いている音声〟として情動的に体験されてしまうわけです。ここには自己監視システムの障害という病態が示唆されています。

それでは、夢を見ている時の脳活動はどうなっているでしょうか。夢は、つじつまがあわないのに、妙にリアリティに富んでいると思いませんか。この睡眠中にも、ファンクショナルＭＲＩやＰＥＴが施行されています。その結果、特に記憶に残るような生々しい夢との関連が示唆される「レム睡眠期（眼球がせわしく動く、およそ90分周期で繰り返される睡眠相）」の脳活動は、覚醒時に比べてかなり違うことが明らかになりました。具体的には、〝情動の座〟である大脳辺縁系（図13）（前帯状回・扁桃核・海馬）、および高次視覚野、橋（脳幹の一部）が活発化し、逆に〝理性の座〟である前頭連合野、および一次視覚野、後帯状回の脳活動が低下することがわかってきたのです。夢は、時間的にも空間的にもばらばらで、秩序がなく、しばしば視覚体験を伴い、時に個人の願望が反映されたり、社会的に不適切な内容も含んでいますが、実際の脳の活動領域と矛盾しない結果となっています。

以上をまとめると、現実にそぐわない知覚体験、錯覚、幻覚、夢も、その脳活動を通してみると、まさしく「心の現実であり、真実である」と言えます。そして、心に映った知覚体験は、意識下の働きの最終的な結果であると考えられると思います。

ヒトの「ミラーニューロン」も発見?!

さて、お話もだいぶ長くなり、そろそろ過剰なストレスが、皆さんを襲っているかもしれません。そこで、最後のテーマにいく前に、ネコのあくびでも見てもらいましょう。動物もあくびすることはペットを飼っていらっしゃる方ならよくおわかりになると思います。動物どうしもうつりますが、このあくびを見てあくびをしたくなった人はいませんか。とても気持ちよさそうなあくびですね。まず、これでリフレッシュしましょう。

しかし、人から人へとうつるものは、あくびだけではありません。スポーツやオリンピックを観戦しても、皆の心は熱くなる。映画を見ると、主人公になったつもりで、爽快に乗り物を操縦したり、ヒロインに恋をしたり、観客皆で泣いたり笑ったりしています。日ごろの生活では、喜びも悲しみも、怒りまでも容易にうつってしまいます。

さて、このような、人間の社会的行動に関わる脳内の神経機構はどのようになっているのでしょうか。他者とうまく交流していく能力は、人間のみならず、高等動物が個としての生存を維持していくために必須のものといえます。それは、生後まもない頃からの模倣に始まり、学習を繰り返しながら他者と共通する神経基盤を作り上げる過程で成熟していくものと考えられます。他者の行動を観察し、その行動の意図を理解し、自らをそれに適合させて行動を選択する。さらに、相手の心の内的状態を理解し、情動的に共感していく脳内のシステムはいかなるものなのでしょうか。

１９９０年代の初め「ミラー・ニューロン」という神経細胞が発見されました。この細胞は、イタリアのパルマ大学、ジャコモ・リゾラッティたちのグループが偶然発見したものです。サルの前頭葉運動前野の下方部（F５野、ヒトの「ブローカ野」に相当する位置にある）

で、運動のプログラミングに関わる神経細胞の電気的活動を記録していた時のことです。休憩時間に、研究者がアイスクリームを食べようと口に持っていくと、それを見ていたサルも、神経細胞を活動させたのです。その細胞は、本来、サル自身が餌などを口に持っていく時に反応する細胞でしたが、他のサルや人が行っても、繰り返し反応することがわかったのです。ちょうど鏡に映るように、サル自身がある行為をしても、他者がその行為をするのを見ていても、同じように活動する神経細胞なので、「ミラー（鏡）・ニューロン」と名づけられました。

それまでの脳科学では、脳のこの部分は運動をつかさどる所、この部分は視覚をつかさどる所、といったように、それぞれの役割を担う神経細胞群が脳内にかたまって分布しているという〝機能局在〟を前提とした研究が主流でした。ところが、この発見は、「行為の遂行（運動）」と「行為の観察（感覚）」という異なる脳のシステムにまたがり、しかも、「自己」と「他者」の行動を共通なものとして結びつける高次元の心の活動を担う細胞の発見だったわけです。

さらに、その後の実験から、視覚情報だけでなく、他者の行為の聴覚情報や手がかりだけが与えられても、自分の行為と同様に活動する細胞も見つかりました。たとえば、サル自身がピーナッツを割る行為で強く活動する細胞の中には、誰かがピーナッツを割るシーンだけを見ても、割る音だけを聞いても反応する細胞があったわけです。それは、ピーナッツを割るという抽象的な概念・情報をエンコード（符号化）している細胞です。

また、頭頂葉の下方には、サル自身と他の誰かが、食べようとしてものをつかむ時には強く活動し、移そうとしてつかむ時には反応しない、自他の行為の意図や目的を識別して反応する細胞もみつかりました。これらの細胞は、他者の行為と、その背後にある意図を、自分の内なる行為として理解し、リハーサルする細胞といえるのかもしれません。人間にも、同様な「ミラー・ニューロン」、あるいは、その神経ネットワークがあると推測されたわけです。

これには多くの反論もありましたが、２０１０年、ようやくその直接的証拠を人間でつかんだという発表がありました。米カリフォルニア大学のイツァク・フリードとロイ・ムカメルたちのグループです。実験は、手術治療を目的に前頭葉と側頭葉の内側部に微小電極が埋め込まれた難治性てんかん患者21人に行われました。

笑う・しかめるの顔の表情をつくる行為とマグカップをつかむという行為について、患者自身が遂行している時と他者の行為の映像を見ている時に神経細胞の電気的活動を記録したのです。すると、それぞれの行為に対応し、しかも、自分が遂行しても他者の行為を観察しても活動する「ミラー・ニューロン」が多くみつかりました。補足運動野（図13）や海馬周辺（図5）では、このような特性をもつ細胞が、記録した細胞の一割にも達し、自他の行為、認知と遂行とを結びつけるこれらの神経ネットワークのシステムは、これまで考えられていた以上に脳内に広く分布していることが証明されたわけです。さらに、自分の行為の遂行時に強く活動し、他者の行為の観察時には活動を抑止する細胞もあり、自他の行為を区別して働く細胞も見つかりました。

以上は、主に、理知的なコミュニケーションの基礎となる神経機構についてお話をしましたが、最後に、他者の気持ちを共感して理解する、情動的なコミュニケーションに関わる研究をご紹介します。

２００４年、英ロンドン大学のタニア・シンガーたちは、16組の夫婦に実験に参加してもらい、そのうちの女性を被験者としてファンクショナルＭＲＩを行いました。まず、被験者の手に電気ショックを与え、脳のどこが強く活動するのか測定します。次に、被験者のパートナーである男性にも同様の電気ショックを与え、それを観察している時の被験者の脳活動を調べたのです。

すると、自分が痛みを受けた場合に活発化した脳の領域のうち、痛みの認知に関係するところ（感覚野など）は、パートナーが痛みの刺激を受けても活発化しませんでした。しかし、両側の前帯状回（図13）、島前部（大

脳の横にある大きなしわの奥の前方部分）などの情動に関わる領域は、自分が痛みを受けても、パートナーが受けても、同じように強く活動していることがわかりました。痛みには、感覚としての認知的な側面のみならず情動的な側面があり、人間はその情動的な側面で他者の痛みを再体験していることが推測されたわけです。この場合は、あくまでも脳の血流変化に関係した信号の話なので、「同苦するニューロン」というわけではありません。しかしながら、脳の中には、そうした他者の苦悩に共感する領域や神経のネットワークによってその役割を演じる神経細胞があることが推測されます。

私たちはこのように、他者の心の動きを、自然に、しかも瞬時に理解し共感することができる共通の神経基盤をもちあわせています。だからこそ、あたたかく心を通わせながら社会生活を営むことができるわけです。つまり、他者は決して冷たい傍観者でもなければ、感情に翻弄される自己でもない。自分がとても乗り越えられないような壁にぶつかった時、同じような壁を乗り越えてきた友の力強い体験を聞けば、きっと心の琴線は揺さぶられ、自分自身の壁を破る勇気へとつながっていくと思います。

さて、本日は、「心や精神が、どのようにして物質である脳から現れるのか」という難題をさておいて、「心の動き」を「脳の活動」と関連させて理解することで、何か生きていく上で役立ちそうな知恵が引き出せないか、脳科学のトピックスの研究をご紹介しました。何かきれいな知恵の花でも見つけてくだされば幸いです。

（ねもと　まさひと／創価大学保健センター管理医師）

（２０１０年11月４日、東京・新宿区の日本青年館で行われた講演に加筆していただいたものです）