HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ
学校法人北海学園
北海学園大学
北海商科大学

タイトル	人の脳細胞の働き ： 法的判断の本質
著者	小山，昇
引用	北海学園大学法学研究，43(3・4)：563-618
発行日	2008-03-00

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

研究ノート

人の脳細胞の働き

――法的判断の本質――

小山昇

目次

はじめに
第一章　外界の物質の認知とその可視化
第二章　神経細胞の働きの画像化法
第三章　磁気共鳴
おわりに

はじめに

私は、法は人において発生し、人において存在し、人を拘束すると思っている。ところで人は細胞から成る。そこで、法は人の細胞の働きであると推論する。私はまず人の神経細胞の働きがどういうものであるかを調べた（「法と人の細胞の働き――序説」北海学園大学法学研究第四一巻第一号）。ついで、法は社会関係事実に即してこれを律するものであるところから、社会関係にかかわる人の神経細胞の働きを研究した。その結果、法の発生、法の働きは人の神経細胞の働きであると推論した（「法と人の細胞の働き――本論」北海学園大学法学部四〇周年記念論集二〇〇七年）。法が機能するのは人が司法的判断をすることにおいてである。司法的判断は、社会的事実を認知して、そこに見られる問題を処理するという課題を解くために、この事実に法を適用して結論を下すことである。事実を認知することも法判断結論を下すことも神経細胞の働きである。神経細胞は外界の刺激を認知する。社会的事実も、外界の物質と同様に、外界の刺激のひとつ（いわば精神への刺激）である。神経細胞は刺激を受けると反応する。蚊が与える刺激を受けるとその蚊を叩くという反応をする。社会的出来事という刺激に対して法判断をするという反応も神経細胞の反応である。

そこで、外界の刺激を認知する脳の働きと社会的事実を認知する脳の働きは同じものか、外界の刺激を認知することを画像化する方法はあるが、その方法により社会的事実を認知することを画像化できるか、外界の刺激の認知を画像から解読することを社会的事実の認知にも応用することができるか、外界の刺激に対する反応である脳の働きとその画像化は社会的事実に対する反応としての司法的判断である脳の働きとその画像化に応用できるか、これらを調べたい。司法的判断の過程を画像化して、撮像された司法的判断の内容が画像から解読できれば、司法的判断の実相を科学的に解明したことになろう。本稿はこのような空想の現実化の可能性を探る試みである。法学が脳科学の成果を

肥料として成育することができるかの探求でもある。

本稿では、外界から受けるのでない刺激、すなわち体内で生じる刺激（たとえば空腹感）は別にする。

第一章　外界の物質の認知とその可視化

1　人は外界の物質を認知する。

人は外界の物質を認知する。〈感覚を通してとり込まれた情報は、過去にたくわえられた情報と照合されて、それがなんであるかという「認知」が生ずる〉（酒井邦嘉「心にいどむ認知脳科学」一七頁）。この場合感覚とは何か。〈光や音などの刺激を受けとるときの、目や耳などの感覚器官のはたらきが「感覚」である〉（酒井前掲一七頁）。刺激は情報ととらえられているのである。

2　神経細胞が外界の物質を刺激として受けとる。刺激にはいろいろある。光、音、匂い、味、接触などがある。これらを受けるのは、視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚をつかさどる神経細胞である。

イ　光刺激を受けて視覚をつかさどる細胞はどう働くか。〈網膜には数億の視細胞（神経細胞）があって、光の信号を電気信号に変える〉（伊藤正男監修「脳と心」四五頁）。電気信号に変えられた情報は脳内の諸分野において分析され統合されて、形、色、明るさ、動き、模様、位置などの要素が、視覚として成立する（伊藤監修前掲四七頁）。神経細胞は光の信号を電気信号に変えるのである。

ロ　音は空気の振動である。この振動は、中耳の中のツチ骨・キヌタ骨・アブミ骨という三つの骨の連なりに伝わり、その過程で増幅される。増幅された振動は、アブミ骨がつながっている内耳の蝸牛の前庭窓という部分を介して蝸牛に伝わる。蝸牛で、空気の振動は内部のリンパ液の振動に変えられる。リンパ液の振動は、次に蝸牛の中のコル

チ器というところに伝わる。コルチ器は感覚細胞をもつ聴覚器で、その感覚細胞が有毛細胞であり、蝸牛内のリンパ液の振動は有毛細胞の毛を動かし、有毛細胞は電気的に興奮し、隣接する蝸牛神経とのシナプス間隙に神経伝達物質を放出する。こうして蝸牛神経が興奮し、リンパ液の振動が電気信号に変換されることになる（以上前掲「脳と心」四九頁）。〔電気的に興奮するとはどういうことか。液体の振動がどのようにしてどんな電気信号に変換するのか。こういう質問が残る。ともかく、音の刺激により細胞が電気的に興奮する〕。音である空気の振動が蝸牛内のリンパ液の振動に変えられ、この振動が有毛細胞を動かし、有毛細胞が電気的に興奮する、つまり振動が電気信号に変換される。

ハ　食物の化学成分が味蕾を刺激し、この刺激物質が味蕾のなかの一つである味細胞に吸着すると、その刺激を受けて、細胞と味覚神経の間隙のシナプスに味細胞の末端では伝達物質の放出という形で、信号が味覚神経に伝わる（前掲「脳と心」五五、五六頁）。〔味覚神経が興奮する。つまり、刺激が電気信号に変換される、と筆者は解する〕。

ニ　匂いの化学的な刺激（物質の化学作用がもたらす刺激）は、嗅細胞で電気的な信号に変えられ、嗅神経に送られる。嗅神経は嗅上皮の上の篩骨の穴を通って嗅球へ入り、神経線維のかたまりである嗅糸状体に連絡する。このときに、同種類の受容体からの情報が同じ嗅糸状体に入るようにまとめられる（前掲「脳と心」六二頁）。情報は脳の各部に送られる（各部については同上六二頁）。嗅覚情報と脳各部との分析機能などは、まだ未知の部分が多い（同上六二頁）。

ホ　皮膚には何かが触れたとき触れた感じのするところがある。これを触点という。触点の下には、マイスナー小体、メルケル盤、ルフィニ終末、パチニ小体、毛盤、毛包受容器、自由神経終末などの受容器があり、それぞれが皮膚への異なる刺激に対して反応する（伊藤監修前掲「脳と心」六七頁）。反応は、いわゆる「興奮」である。神経細胞の興奮は、要するに、細胞膜の内から外へ外から内へとイオンが流れて、細胞膜に脱分極（興奮）が起こり、それが一定以上になって活動電位が発生することで、つまり電気信号が発生することである（前掲「法と人の細胞の働き――序説」

第二章4参照。前掲「脳と心」七五頁)。

3　外界の刺激は神経細胞において電気信号に変わる。――活動電位

イ　外界の刺激に細胞が反応する。その反応が電気現象として見られることがわかった。これが刺激を電気信号に変えるということであろう。そこで、この電気現象がどんなものかを知らなければならない。

感覚器官の神経細胞が感覚するとは、刺激を電気信号に変換することである。前稿(「法と人の細胞の働き――序説」北海学園大学法学研究第四二巻第一号)に述べたように、細胞に活動電位が生ずるのである。情報は活動電位の変化として軸索膜の上をシナプス前部に流れる(同上第二章3、4)。シナプス前部で化学反応が生じ、シナプス間隙に神経伝達物質が放出され、神経伝達物質のあるものがシナプス後部の受容体に至り、そこで化学反応が起こり、活動電位が生ずる。以上の過程をくわしく検討しよう。〔社会的事実の認知は、感覚器官によるものではない。感覚細胞とは別の細胞の働きではなかろうか〕。

ロ　活動電位はどのようにして起こるか。

a　細胞膜の内外にはもともと電気が存在する。ナトリウムイオンやカリウムイオンが存在するからである。これらのイオンに細胞膜の内外で濃度差があり、細胞内ではカリウムイオンが多く、ナトリウムイオン濃度は低い。細胞膜がカリウムイオンはよく通すが他のイオンはほとんど通さない結果として、カリウムイオンが細胞膜の内から外へ流出する。それは正の電荷の細胞外への移動ということになり、細胞内に(通常七〇ミリボルト)負の電位が生ずる(平野丈夫「脳と心の正体」二二頁、九八、九九頁)。ところでイオンを選択的に通すのはタンパク質分子の働きである。つまり化学作用である(同上一〇一頁)。

b　神経細胞が刺激されると〔もともと電気が存在したところに刺激が加わって〕ナトリウムイオンの膜透過性が

一過性に上昇する。これも化学作用である。細胞内より細胞外に多いナトリウムイオンが細胞内に流入する。そもそもイオン流は、逆向きのイオン流を生み、両イオン流の大きさが等しくなるようになる。この平衡状態の電位を平衡電位という。カリウムイオンとナトリウムイオンがそれぞれの平衡電位に近づくと、ナトリウムイオンの流入がカリウムイオンの流出を上回る電位が生ずる。すなわちナトリウムイオンについての平衡電位は細胞内が細胞外より六〇ミリボルトくらい高くなる(同上一〇〇～一〇二頁)。こうして、細胞内電位が負になっていたのが、一時的に[1]正の方向に動いて(負を減少させて)逆転する(平野同上九九～一〇二頁)。この正の電位(三〇ミリボルトくらい)が活動電位である。[2]つまり、神経細胞が刺激されると活動電位(電位の変化は、一ミリ秒に一〇〇ボルトの変化)が発生する(同上二二頁、一〇二頁)。これが電気信号への変換である。そして、この変換は化学作用である。

(1) 約一ミリ秒間だけ、内部電位がゼロあるいはプラスに変化する(桜井芳雄「ニューロンから心をさぐる」一一頁)。

(2) 活動電位は、スパイク、インパルス、神経興奮、脱分極、とよばれるものと同一である。それが発生することを、ニューロンの発火とよぶ(桜井前掲一一頁)。〈ニューロンの活動とは、スパイクの発生、すなわち発火を指す。スパイクの大きさはニューロンごとに一定である。つまりニューロンの活動とは、一定の大きさと形を持つスパイクを出すか出さないか、発火するかしないか、であり(全か無かの法則)、一かゼロの信号をオン・オフする、デジタル信号の発生に近い〉(桜井前掲一二頁)。

ハ　活動電位の伝導と伝達　この電位変化は一ミリ秒程度しか持続しない(平野前掲一〇三頁)。しかし、一ミリ秒の間に、神経細胞を軸索に沿って伝わっていく(仙波純一「脳と生体統御」二五頁、平野前掲一一二頁)。〔この伝わりかたの説明をした文献を筆者はまだ知らない。平野前掲二〇頁も、同一の神経細胞内での情報は電気信号として伝えられるというのみ。なお同上二一頁。〕。

電位変化（活動電位）が神経の末端までくると、すなわち、〈神経インパルスなどによってカルシウムがカルシウムチャンネルから流入すると、細胞内の濃度は一〇〜一〇〇倍に増加し、神経伝達物質が小胞からシナプスに放出される引き金を引く〉（仙波前掲二一頁、平野前掲二二頁）。（神経インパルスは電気的な情報である――仙波前掲一七頁。神経伝達物質は数も種類も多い化学物質である――仙波前掲二六―三五頁。小胞については仙波前掲三三頁、平野前掲二三頁）。

細胞と隣の細胞の間には約二〇ｎｍの隙間があり、これをシナプスという（仙波前掲一九頁）。神経細胞の終末部から神経伝達物質とよばれる化学物質が放出されると、これが隣のつまりシナプス後神経細胞の受容体（樹状突起や細胞体にある）を刺激してその細胞の細胞膜のイオン透過性が変わり、シナプス電位がつくられる（仙波前掲二五、二六頁）（受容体の詳細は仙波前掲三六〜四三頁、四四〜五八頁）。（化学物質がイオン透過性を変える化学作用をするのである）。細胞あたりのシナプスの数は一万個と推定されており、シナプス電位は後シナプス（刺激を伝えられる側）を興奮させるものと抑制するものとがある[1]（仙波前掲二六頁、平野前掲四一頁）。このシナプス電位の総和がある一定の値（閾値）以上になったとき神経細胞は脱分極して活動電位を生ずる（仙波前掲二六頁）。以上から考えると、シナプス前神経細胞終末部における活動電位と隣のシナプス後神経細胞に生じた活動電位とは、ボルトその他同じものではないようであるが、専門家は、一方に活動電位が生じ、他方に活動電位が生じたことをもって、神経細胞は神経伝達物質を介して、次の神経細胞に情報を伝えているという（仙波前掲二六頁、平野前掲二四頁）。

（1）〈シナプスには、次のニューロンの発火を促すもの（興奮性）だけではなく、逆に発火しにくくさせるものもある〉（桜井前掲一三頁、平野前掲四一頁）。〈興奮性か抑制性かは、シナプスで放出される神経伝達物質の種類やそれを受け取る受容部のタンパク質の違いにより決まる。このような興奮性シナプスと抑制性シナプスの組み合わせにより、バランスが制御された複雑な信号伝達が可能に

なる〉（桜井前掲一三頁）。つまり、情報の伝達すなわち電気信号の伝達は、最初の信号そのままの伝達ではない。

4　活動電位と認知

人は外界の事物を認知する。その過程は、前述のように、感覚器官が刺激（情報）を受け、これが神経細胞内の電位を負から正へと瞬間的に（一ミリ秒間に）逆転させる（電位の変化）、つまり活動電位が発生することである。活動電位は電気信号（電位変化）である（平野「脳と心の正体」二一頁）。かくて、細胞において刺激は電気信号に変換されるといわれる。電気信号は、前述のように、細胞体から軸索に伝導し、軸索の末端であるシナプス前終末に伝導し、化学反応を解してシナプス後細胞に活動電位が発生するという過程で他の神経細胞に伝達される。

この情報伝達は、その過程において変化する。[1] そのような、情報伝達がその終点に達して、すなわち、終点における活動電位の状態において、情報処理が完成するということになるのであろうと推測する。そして、情報処理の完成が事物の認知ということであろう。

認知は電気信号に変換された刺激を情報として受けとりこれを表現することであるといえる。そこで私は、この電気信号すなわち電位の変化と処理されて表現された情報の対応関係（たとえば、どんな活動電位の変化が赤い色という情報に対応するか）を知りたい。ところで電気信号の伝達は、多くの化学反応の段階を経る。そこで次のような嘆きが生ずる。〈そのひとつひとつの化学反応を解明しなければ、私たちの「脳と心」の解明につながることはけつしてないのだとしたら、科学の力はいつの日に、どのような答えを出してくれるのだろうか〉（伊藤監修「脳と心」七四頁）。

（1）〈よく発達した神経系をもつ生物では、外界からの刺激に対しての反応も一定ではない。これは、高等動物の脳・神経系が多くの感

覚入力を統合し、また脳内に蓄積された過去の経験に基づく情報やそのときの体内部の状態によって、神経系内での情報伝達を変化させるためである。〉（平野前掲六頁）。この変化は、活動電位を伝えたり活動電位の発生を抑えたりすること（平野前掲四一頁）によって起こるのであろう。〈この抑制性シナプスの存在により、情報の交通整理が可能となり、複雑で高度な情報処理ができるようになっている。〉（平野前掲四一頁）

5　活動電位の測定

イ　〈細胞内で情報を伝えるのは活動電位とよばれる神経細胞内電位の瞬間的な変化であり、この電位変化（電気信号）が軸索を伝導していく。〉（平野前掲二二頁）。この電位変化は〈神経細胞の細胞膜の両側間の電位差が約一ミリ秒間百ミリボルトほど変化する現象である。〉（同上二二頁）。細胞外に対する細胞内電位は、静止電位も活動電位も、ガラス管微小電極（平野前掲九八頁）先端を細胞内に刺し入れることによって電気信号として測ることができる[1]（平野前掲二〇、二二頁。桜井前掲二一、二二頁）。

（1）　電位差は数量的にボルトで表現する。また、活動電位の頻度も測定できる（平野前掲三四頁図一九参照）。

ロ　ニューロンの種類によるスパイクの特徴、スパイク発生のメカニズム、あるいはシナプスに興奮性と抑制性があることなど、ニューロン活動の基本のほぼすべてが一九六〇年前後に明らかになった（桜井前掲二三頁）。一九八〇年頃から、認識、判断、記憶、運動など、特定の情報処理をしているときのニューロン活動が測定された（桜井前掲二八、二九頁）。例をいくつかあげよう。

a　ネコの一次視覚野（視覚情報がまず到達する脳部位）に電極を刺し、ネコの眼の前にスクリーンを置き、スライドガラスに張り付けたさまざまな刺激をプロジェクターで投射して見せた。はじめはどのような刺激を見せても、ニューロンはあまり活動（発火）しなかった。しかし、偶然スライドガラスのふちがスクリーン上を動いたとき、ニューロンは強く活動し、多くのスパイクを出した（活動電位が高いボルトで瀕度多く測定されたということであろう）。そして、そのような視覚野のニューロンは、スライドガラスのふちが表わす線分に対して活動していることがわかった。しかも、強く活動させる線分の角度や位置はニューロンごとに異っていた（以上桜井「ニューロンから心をさぐる」二四、二五頁）。つまり傾きのある線分に対して傾きごとにこれに応答するニューロンがあるわけである（平野「脳と心の正体」三四頁、図一九）。

b　サルの二次視覚野で、主観的輪郭（物理的には輪郭線がないのにかかわらず、輪郭があるかのように知覚できる図形）に対して強く活動する、つまり選択性（特定の何かに対して強く活動すること）を示すニューロンが見つかった（桜井前掲二七頁）。

c　点刺激が下の方向に動いて見えたら眼を下に動かすように仕こんだサルは、点刺激が実際に下へ動いたと判断したときにのみ、ニューロン活動もその刺激に応じて選択性を示した（一九八九年。桜井前掲二八頁）。サルのＩＴ野などから、顔を見たときだけ活動するニューロンが見つかっている（同上）。

d　サルの大脳皮質運動野の一つである運動前野のニューロン活動を測定すると、小さな物をつまむ、物を指先で拾う、物を握る、ボタンを押すという動作のうちどれか一つに対してのみ選択性を示すニューロンが見つかった（一九八八年。桜井前掲二九頁）。どの指かに関係なく、つまむという動作自体に関連して活動した（同上）。

e　物を握るについて、角のあるものを握ったときのみ、または球面を握ったときのみ活動するニューロンが見つ

かった（桜井前掲二九頁）。サルが自分から意識的に握ったときにのみ活動した（同上）。

f　過去に経験した刺激を、その後に経験した刺激の中から、選ぶことができるためには、先に経験した刺激を保持するという記憶が必要であるが、保持するニューロンがサルの大脳皮質の側頭葉や前頭葉で数多く見つかっている（桜井前掲三一頁）。

g　広い空間にラットを置いて自由に歩き回らせると、特定の場所に行ったときだけ活動するニューロンが海馬という部位にたくさん存在することがわかった（一九七八年。桜井前掲三一頁）。選択性を示す場所が変化することがある（同上）。それは置かれた状況の変化やそこでの経験による（同上）。

ハ　刺激と神経細胞の活動の関係について、ネコやサルでの実験結果は、ヒトに類推することができよう。ネコやサルとヒトとの視覚機能にほとんど違いがないといわれている（桜井前掲二六頁）からである。他の感覚機能についても類似しているであろう。

ニ　活動電位の測定からわかること

活動電位の測定は電位の大きさと瀕度をグラフに示すことであろう。

画像化されたのは電気信号である。それは電位変化であろう。電位変化はどのようなものか。すでに述べた（3ロ）がここでくりかえす。

細胞内外のイオン組成は異なる。細胞内外のイオンは濃度において差がある。この濃度差により、細胞内は通常六〇―九〇ミリボルト程度負の電位（静止電位）を有している。興奮性細胞（神経はこれに属する）は刺激を受けると一過性の電位変化を生じる。これを活動電位と呼ぶ（くわしくは仙波「脳と生体統御」一九頁、二五―二六頁）。興奮時には膜内外の極性が逆転し、細胞内が三〇―四〇ミリボルト程度正の電位となる。この電位変化は数ミリ秒程度の時間内に

回復するのでスパイク電位と呼ばれる。この電位変化に伴って局所電流が誘起され、これにより興奮が減衰することなく伝導される。伝導速度は細胞によって異なり、一―一〇〇ミリ秒（m／s）である（以上、世界大百科「活動電位」）。

電位変化はニューロンが反応したことを示す。

画像化の過程から、ニューロンは、ある特定の刺激のみを選択して、ある特定の部位のニューロンのみが、その刺激に対して、ある活動電位を生ずる、ということがわかる（桜井前掲三八頁）。

ところで、人はたとえば自分のおばあさんを認知する。そこで、おばあさん全体を選択して活動する神経細胞があるという仮説が生ずる（おばあさん細胞仮説、桜井前掲三八頁、平野前掲四四～四六頁）。しかし、自分のおばあさんにしか反応しないようなニューロンはどうしても見つからなかった（平野前掲四四頁）。また、人が認知するものは極めて多数で、そのいちいちにのみ反応するニューロンがあるとするにはニューロンの数が足りない（平野前掲四四、四五頁）。そこで、ニューロンの活動パターンの組合せがありそれにより認知が成立するという仮説が立てられる（「単一ニューロン主義」ないし、「集団コーデイング説」、桜井前掲三八頁、平野前掲四四～四六頁）。しかしたとえば、どのような神経細胞集団の活動パターンがおばあさんに反応するかといったことはまったくわかっていない（平野前掲四五頁。なお桜井前掲三九―四四頁）。そこで、一つの事物を認知するとき、その事物のもつ属性のそれぞれに対応する神経細胞が同期して活動するという説がある（平野前掲四六頁）。しかし、これには問題がある。①はたして同じタイミングで活動電位を発火するものなのか。②同期するとして、同期することがどのようにしていくつかの属性をもつ一つの事物の認知へつながるのか（いくつかの属性の認知を一つの事物の認知にどのようにして構成するのかということであろう）。③タイミングにずれがあるとして、同期した神経情報を処理する神経回路は、どの程度の同期のズレを違いとして処理することができるのか。これらの問題はまだ解明されていない（以上平野前掲四六頁）。〈これらの解明は今後の課題である。〉と

されている（平野前掲四六頁）。

しかし、他方で、桜井は、関係する神経細胞が集団を形成し（機能的結合）、協調（活動相関）して情報を表現すると唱え、集団がどのようにして形成され、どのようにして協調して働くのかを説明している（桜井前掲三七～七〇頁）。

6　第一章のまとめ

以上のことから以下のように推論することができよう。多くの属性の集合体である一つの物体を認知したことときニューロンの発火との間の関係はまだ明らかにされていない。別言すれば、ニューロンの発火を測定してその測定結果を画像にしても、その画像から認知された物体を――発火の原因である刺激をあらかじめ認識しているのでないときは――認識することはできないであろう。物体の属性の一つ一つについては、その部位のニューロンの発火だから、それはその属性（たとえば縦の線分）を示すということはできるかもしれないが。そうすると、いわんや、ヒトがある社会関係（物体ではない）を認知したときにニューロンの発火が測定されたとしても、その社会関係と発火との間の関係は明らかにされていないと、推論できるであろう。

要するに、人がある事物を認知したということは、その人の神経細胞にある活動電位（電位変化）が発生したということによって知られる。しかし、ある形を認知したことある色を認知したことの違いが、活動電位のちがいとして表示されるものかについては、まだ私には知られていない[1]。

法は社会関係に則してこれを処理する（解決を与える）判断において自己を実現する。そこでの人の神経細胞の働きは、社会関係を認知すること、認知した社会関係について反応を起こすことである。この認知と反応を、科学的に客観的に観察することができれば、法的判断の発生を客観視することができよう。物質を認知してこれに反応することについてはある程度までその過程を客観視することができている（たとえば、ある神経細胞が食事をとる行動をひき起こ

すことについて平野前掲五五、五六頁ほか)。その方法を応用して、社会的事実(物質ではない)を認知して法的判断の発生をひき起こす過程を客観視することができないものであろうか。まだできてはいない。多くの研究者にこのことを期待したい。

(1) 麻酔したネコの一次視覚野内の神経細胞が発生する活動電位を記録しながら、ネコの前に置いたスクリーン上にさまざまな角度の線分を呈示し、各傾きの線分に対して神経細胞が発生する活動電位の頻度を調べた実験がある(平野前掲三四頁)。線分が縦方向であるときに活動電位の頻度が最大である。傾きの角度が大きくなるにつれて頻度が小さくなる。〈一次視覚野の神経細胞は、傾きのある線分に応答する。ある神経細胞は縦線に、ほかは横線や斜めの線に応答する。〉(平野同上三五頁)。しかし、傾きの角度と活動電位発生の頻度の応答は、数の対応で表わされてはいない(角度〇〇度の場合に頻度〇〇回というふうに)。

また〈光情報は、網膜内の光受容細胞で受容されて、電気信号に変換され、光受容細胞→双極細胞→神経節細胞の順に伝わり、神経節細胞は視床の外側膝状体へ情報を送っている。〉(平野前掲三〇頁)。〈神経節細胞の情報は、視床にある外側膝状体を介して大脳皮質へ送られる。〉(平野前掲三五頁)。〈外側膝状体からの入力を受ける後頭部の大脳皮質領域を、一次視覚野とよぶ。〉(平野前掲三五頁)。ところで、〈外側膝状体の受容野は、神経節細胞と同様に同心円状である〉(平野前掲三五頁)。つまり、同心円状図形に応答する。(同上三五頁図二〇)。この同心円状の図形への応答から、一次視覚野神経細胞の傾きをもった線分への応答性が、どのようにしてつくられるかはわかっていない(平野前掲三五頁)。神経細胞間の結合があるという仮説がある(平野前掲三五、三六頁)が、実際にそのような神経細胞間結合になっているか否かは、まだわかっていない(平野前掲三六頁)。

要するに、活動電位の発生、その大きさ、その頻度と認知がある特定の対象物の認知であることとの関係は明らかでないと思われる。

第二章　神経細胞の働きの画像化法

1　序

第一章において、感覚細胞が外界の物質からの刺激を感覚器官において受ける仕組みと刺激に対する反応として起きた活動電位を測定して画像化する過程を分析した。外界の物質から受ける刺激に対し、たとえば、美しいという情の反応を起こした場合、あるいは、ある数学の問題を解くことを課せられて、解答を出すという理の反応を起こした場合、神経細胞がどんな働きをしているのかを画像化することができれば幸いであると思う。活動電位を測定してこれを画像にすることはできるのであった。しかし、それから知ることができるものはごく限られていた。そこでこのほかに、神経細胞の働きを画像化する方法としてどんなものがあるかを調べてみる。神経細胞の働きをではなく、人体の内部の状態や構造を画像化する方法もついでにとりあげる。

脳の部位を画像化することについては、以下のようにいわれている。〈なにかをしているときの私たちの脳は、必ず、どこかの部位が活性化している。しかもそれは、ひとつの部位に限らない。強弱はあるものの、さまざまな部位が関係して、その行動に対応した反應を示している。それらの反應、活性化している場所を明示する方法として、サブトラクション方法がある。この方法は、何かをしているときに測定したデータから、何もしていないときのデータを差し引いて、その差分をとることによって、何かをしているときの活性化部位を明示しようとするもので、ＰＥＴ、ＭＲＩ単独でも可能であり、さらに両者を組み合わせることも一般的に行われている。〉（伊藤正男監修「脳と心」三五頁。ＰＥＴ、ＭＲＩについては後述）。

脳の部位の画像化のいろいろの方法を以下に列挙しよう。

2　X線CT（X-ray Computed Tomography＝X線コンピューター断層撮影法）

この方法は一九七〇年代に誕生した。〈体は組織によってその成分が違うので、X線の透過率も組織によって異なる。このことを利用して、人体を横断する一平面に対しX線をさまざまな方向から照射して、透過度をコンピューターで計算、断層化する方法だ〉（伊藤正男監修「脳と心」一九九六年三五頁）。XCTの誕生により、従来の検査ではわかりにくかった脳出血と脳梗塞の区別などの診断が容易にできるようになった（同上三五頁）。XCTは体の中の様子や構造を画像にする（同上三六頁）。

注　〈コンピューター断層法は、X線を身体のある断面について三六〇度の方向から当てて、その透過率を測定し、コンピューターを用いてもとの断面のX線の吸収度を計算し、画像化するものをいう。〉（仙波純一「脳と生体統御」一九九八年九六頁）。〈X線の吸収度の高い造影剤を投与して組織に移行させれば、血流量の変化を高いコントラストをつけて表すことができる〉（同上九七頁）。

3　MRI（Magnetic Resonance Imaging＝磁気共鳴画像法）

MRIは一九八〇年代から実用化された（仙波純一「脳と生体統御」）。MRIは、水の分子の中にあるプロトン^{1}Hの核磁気共鳴（NMR）によって生ずる信号をコンピューター断層法（CTスキャン）の方法で画像化したものである（仙波前掲九八頁）。核磁気共鳴については第三章に述べる。

ＭＲＩは生体に害を与えないという利点があり、いろいろな方向の画像をつくることができ、骨の中などもはっきりと描出する（伊藤監修「脳と心」三五頁。仙波前掲九八頁）。ＭＲＩは体の中の様子や構造を画像にするのである（「脳と心」三六頁）。ＭＲＩを使って画像をとるとその画像から、脳のどこにどのようなタイプの病変（梗塞、出血、腫瘍、委縮、変性など）があるかを確認できるといわれている（Functional MRIについて）。

4　ＦＭＲＩ（Functional Magnetic Resonance Imaging＝機能的磁気共鳴画像法）

イ　ＦＭＲＩとはどういうものかについての記述

①〈一般のＭＲＩ検査では、脳の構造を知るだけであったが、血液中のヘモグロビンの酸化還元状態を利用すると、血流量の変化を画像化することができる。これを機能的ＭＲＩという〉（仙波純一「脳と生体統御」九八頁）。

ヘモグロビンの酸化還元状態を利用するとはどういうことか。〈赤血球中のヘモグロビンは肺で酸化され酸化ヘモグロビンとなり、組織で酸素を渡して、自身は還元ヘモグロビンとなる。還元ヘモグロビンは酸化ヘモグロビンよりも磁化しやすいので、ごく短時間でスキャンすると、信号強度に差ができる。これを原理として脳の血流量の変化を画像化するのである。脳の血流量は神経細胞にある程度相関しているので、最終的には特定の脳領域の活動を知ることができる〉（仙波前掲九八頁）

②　神経細胞の働きは生理現象として観察される。この生理現象を撮像するわけである。その方法としてBold法が最も有名であるBold（Blood Oxygen Level Dependent）法とは以下のようなものである。株式会社国際電気通信基礎技術研究所脳活動イメージングセンター（BAIC）「FMRIについて」から引用する。

〈脳活動に伴い賦活領域において血流が二〇～四〇%増加します。神経細胞において酸素と結合したヘモグロビン（酸化

ヘモグロビン）が還元され還元ヘモグロビンとなるのですが[a]、血流の増加に対し酸素消費量は五%しか増えないことから、静脈中の酸化ヘモグロビンの量が相対的に増加する[b]ことになります。また、酸化ヘモグロビンは還元ヘモグロビンに比べ磁化されにくいため、賦活領域では磁化率が減少し、磁気共鳴信号の強度が変化します[c]。タスク実行時と安静時の画像を比較し、磁気共鳴信号の変化を統計的に分析することにより、脳の活動部位を推定することが出来ます。〉

（a）還元ヘモグロビンは酸素と結合していないヘモグロビンであろう。

（b）酸化ヘモグロビンの量が相対的に増加することは、酸素と結合していないヘモグロビンが相対的に減少することである。

（c）酸素と結合していないヘモグロビンは、その構造上の特性から周囲組織との間に磁場不均一性を生ずる。その結果ＭＲＩの信号を低下させる。通常、安静時の脳では静脈血内の酸素と結合していないヘモグロビンにより、もともと信号が低下した状態にある。血流の増加により相対的に酸素と結合していないヘモグロビンが減少することは、ＭＲＩの信号の強度を増すことになる。これで、脳血流変化をＭＲＩ信号の変化としてとらえることができる。仙波前掲九八頁に〈還元ヘモグロビンは酸化ヘモグロビンよりも磁化しやすいので、ごく短時間でスキャンすると信号強度に差ができる。これを原理として、脳の血流量の変化を画像化するのである〉とある。

③〈神経細胞が活動すると酸素消費量が増加する。すると、酸素を含む赤血球であるオキシヘモグロビンが酸素を含まない赤血球のデオキシンヘモグロビンに変化する。つまり神経細胞周囲が一時的に酸素濃度の低下を起こすのだが、その直後に脳血流量が急激に増大する。この血液量の増加は神経細胞が酸素を消費しきれないほどであり、その結果、神経細胞周囲のオキシヘモグロビン濃度を急激に増大させることになる。オキシヘモグロビンは反磁性体、デオキシヘモグロビンは常磁性体と磁性が異なり、オキシヘモグロビン濃度の増大はＭＲ（磁気共鳴）信号の増強を引き

起こす。結果的に神経細胞の活動が増加するとMR信号が増強するのである〉（「脳機能画像解析入門」四頁。オキシヘモグロビン＝酸化ヘモグロビン、デオキシヘモグロビン＝還元ヘモグロビンである）。

④〈MRIではあくまで微小循環血液量の変化を観察しているのであり、脳の賦活そのものを直接観察しているわけではない。そこでFMRIの解析では脳の賦活以外の情報を除外するために脳に刺激を加えた状態と何も加えていない状態の画像をそれぞれ撮像し、信号変化を統計的に有意差解析することで賦活以外の原因による信号変化を除外している。つまり、FMRIは刺激の変化によってMR信号に有意に差がある場所を同定しているのである。MR信号が刺激の変化により有意に差があるということは、その部位が刺激により賦活した万能性が高いということである〉（「脳機能画像解析入門」四頁）。

ロ　イの記述からどういうことがわかるか。

血流量の変化は磁気共鳴信号の変化としてとらえられて画像化される。神経細胞が活動すると酸素消費量が増加し（③）、酸化ヘモグロビンを含む赤血球を有する血流（①）の量が増加する（③）。酸素消費により赤血球のヘモグロビンは酸素を含まないもの（＝還元ヘモグロビン（①））に変化する（③）。酸化ヘモグロビンは還元ヘモグロビンに比べ磁化しにくく（②）、後者のほうが磁化しやすい（①）。磁化のときに磁気共鳴があり磁気共鳴信号が発せられるのであるらしい。安静時の脳では、静脈血内の赤血球中のヘモグロビンは還元ヘモグロビンであり（①）、それは常磁性体であるから磁化して（①参照）、磁気共鳴信号は低い（②）。活動時には、酸素消費は増えるが、酸素を消費しきれない（②）ほど血液量が増えるので、相対的に酸化ヘモグロビンの量が増える（②、③）。磁化ヘモグロビンは反磁性体であるから、磁気共鳴信号は強い（③）。結果的に神経細胞の活動が増加すると磁気共鳴信号が増強する（③）。こうして血流量の変化を通して神経細胞の活動を知ることができる（①）のであろう。

ハ　ＦＭＲＩによっては以下のこともわかる。

①　行動経済学には最終提案ゲームとよばれる実験がある。どういう提案をするか、どういう提案を拒むかの実験である。その〈結果は人間の経済行動は単純な損得勘定のみで決まるのではなく、公平、不公平、快、不快といった実に人間らしい情動に左右されることを物語る〉（日本経済新聞二〇〇七年五月四日）。この最終提案ゲーム実験中の脳の血流を磁気共鳴画像法（ＭＲＩ）で調べると、不公平な条件を提示されると受けとる側の脳で島皮質という場所の活動が増加したことが認められ、この活動レベルを見れば条件を提示された側の拒否率も分るといわれている（同上）。

②　〈男子学生一〇人に、注射針が刺さった腕の写真を五秒間見せ、「痛み」を想像してもらった。この時機能的ＭＲＩ（ＦＭＲＩ）と呼ばれる装置で脳の活動を調べると、一〇人全員で、本当に痛みがあったときに興奮する側頭葉の一部などが興奮していた。この部分は情動をつかさどっているとされる〉（朝日新聞二〇〇七年五月一日朝刊）。〈肉体的な痛みを連想させる写真を見ると、実際には痛くなくても脳は「痛い」と感じる〉（同上）。〈味覚など他の感覚と比べて、痛みには感情の動きが大きく関与しているためらしい〉（同上）。

③　ＦＭＲＩは、〈脳の全ての場所での血流を同時に測定するための機械〉（生理学研究所・柿木隆介・定藤規弘）で、〈この方法は、色々な課題をしたとき、それをしないときに比べて、脳のどの部分がどれだけ使われているか、を調べるので、脳賦活検査とよばれています。この方法を使うことにより、記憶や学習、計算や運動といった、さまざまな高次脳機能が脳のどの部分をつかって行われているかがわかりつつあります〉（同上）。〈物を見るという働きは後頭葉……で受け持ち、……手の運動や感覚を制御する部分は頭頂葉というところが分担します。〉〈その一方……脳の各所の協力があるはずです〉〈一例として、触覚による形状弁別が挙げられます。麻雀の牌にはさまざまな模様が彩色されていると同時に彫られているので、熟練者ならばそのパターンを目でも指でも認知できるのです（麻雀におけるいわゆ

る盲牌)。このような異種感覚の統合がどこで起こっているかをFMRIで調べてみると、ちょうど後頭葉と頭頂葉の間の部分が共通して用いられていることが判明しました〉(生理学研究所同上)。つまり、〈タスク実行時と安静時の画像を比較し、磁気共鳴信号の変化を統計的に分析することにより、脳の活動部位を推定することが出来ます〉(「FMRIについて」株式会社国際電気通信基礎技術研究所、脳活動イメージングセンター(BAIC))。

④〈例えば、身体的にはどこにも異常がないとされてきた内因性精神病の脳の破壊像が発見されています。〉(「現代の倫理道徳Q&A」二〇〇四―六八、立木教夫)。〈また、反社会的人格障害者の脳をイメージングした結果として、前頭葉の異常が報告されています。イメージングデータは、人間の行動に対する統御能力や責任能力と関連して、裁判に大きな影響をもたらすことになると考えられています。〉(同上)。

⑤ FMRIを使って〈思考過程で小脳が活動することが実証されはじめている。例えば、英国のA. Ploghaus(プログハウス)らによると、赤と青のランプがあったとき、赤いランプがついたときにだけ熱刺激がくる実験を続ける。やがてあるとき、赤いランプをつけておくと、熱刺激を与えないでも小脳は熱刺激がきたときと同じような活動を見せる。「赤いランプを見たときに、〝次に熱刺激がくるぞ〟と小脳が予測していると考えられます」〉(「小脳から記憶や思考の謎に迫る」脳科学総合研究センター、神経回路メカニズム研究グループ記憶学習機構研究チーム、チームリーダー伊藤正男、理研ニュース二六〇号二〇〇三年二月)。

⑥ Wired News掲載のRowan Hooper「FMRIで解き明かす、脳と心の関係」(日本語版、藤原聰美、髙森郁哉)から引用する。

〈FMRIを使うことによって血中の酸素レベルの測定が可能となり、脳のどの部分がとくに活発に働いているかがわかるようになる。たとえば、恋に落ちた時に機能している部分や食べ物が欲しいと思っている時に機能している部分などがわ

かる。最近では、米民主党員と米共和党員の脳の違い（日本語版記事）さえ明らかにされている。〉

プリンストン大学心理学部のジョシュア〈グリーン博士らの調査では、ボランティアの脳をスキャンするにあたり、彼らにひどく難しいジレンマを想像させる。たとえば、あなたは今、略奪にやってきた敵の兵士から逃れて、隣人たちと一緒に地下室に身を隠している。その時、あなたの赤ん坊が泣きはじめた。このまま赤ん坊が泣き続ければ、兵士たちに隠れ場所を知られ全員殺されてしまう。自分と仲間を救う唯一の方法は、赤ん坊を静かにさせること赤ん坊の口をふさいで窒息死させることだ。さあ、あなたならどうするか？〉。〔課題を与えるわけである〕

〈このような状況では明らかに、われわれは感情のたかぶりを自覚し、脳のスキャン映像もそのことを示している。だが、われわれはこのとき、状況を論理的に判断するようにも迫られており、このことも脳のスキャン映像に表れる。この場合、抽象的かつ論理的思考を司る領域と感情を司る領域が、ともに明るく示されるのだ〉。〔領域が確認されるにとどまるのか〕

〈つまり、困難かつ個人的な道徳ジレンマを処理しようとする時、文字通り「二つの心」〔of two minds：「決心がつかない」という意味の慣用表現〕になっているのだ。グリーン博士は、ジレンマがそれほど個人的なものでなければ、脳の論理的思考を司る領域が優勢になることを発見した〉。

〈二者間で対立が生まれた場合、法廷でも領土を巡る主張でも、往々にして仲裁者が登場する。それと同様に、脳にも仲裁者の役割を果たす領域があるようだ。研究者らは、対立の仲裁に関係していると考えられる前部帯状回という脳の部分が、泣き叫ぶ赤ん坊の仮定と格闘しているとき、高度に活性化していたことを発見した〉。〔有罪か無罪か、民事原告の請求を認容するか棄却するかの格闘にもあてはまるであろう〕。

〈グリーン博士らはこうして、「二つの心」という表現の神経学的根拠を示し、それぞれの心が優位に立とうと競っていることを明らかにした。では、心が頭を支配しているのだろうか？「そういう時もある」というのが答えだ。だが、頭は戦

いもせずに降参するわけではない〉。

〈ＦＭＲＩの応用をさらに進めて、人類がどのようにして今の状態になったのかを調べることもできる。ベルギーのルーベン・カトリック大学医学部で神経生理学科の責任者を務めるガイ・オーバン教授は、ＦＭＲＩを使って脳の進化の謎に取り組んでいる。オーバン教授の研究では、被験者に回転する立体の画像を見せ、その間に彼らの脳をスキャンしている。ただグリーン博士の実験と違い、オーバン教授は人間の他にサルも観察対象にしている〉。

〈この研究から、人間の脳とサルの脳では立体画像の処理方法が著しく異なることがわかった。人間の場合、脳の特定の領域（視覚野と頭頂間溝皮質）で活動が観察されるが、サルの脳の同じ部分では活性化が見られなかった〉。

〈「この結果が示唆しているのは、人間が進化するに従い、脳の一部が適応し、特定の能力たとえば精密な運動技能の制御などを作り出したということだ」と、オーバン教授は説明する〉。

〈それでは、人間の脳がサルの脳から空間処理能力を進化させたという証拠があれば実際そうなったように思われるのだが、われわれの道徳観念も霊長類の祖先から進化してきたということになるのだろうか？〉。

〈エモリー大学（ジョージア州アトランタ）のサラ・ブロスナン博士は、そう考えるのが妥当だという証拠を示している。ブロスナン博士は、訓練されたサルは公正の感覚を持つようになることを発見した。このようなサルは、同じ仕事をした仲間が報酬として自分より美味しいエサをもらっているのを見ると、働くのを拒むという〉。

〈「進化によって生じるものはどれも、それまでに進化した別の何かに手を加えたものだ」とグリーン博士は語る。「特定の思考に関わる構造が進化した歴史をたどることができれば、当該の思考が種の進化の歴史によって形作られているという事実がはっきりするかもしれない」〉。

〈このような特定の思考については、マックス・プランク研究所生物サイバネティックス部門（ドイツ、チュービンゲン）

に所属するアンドレアス・パーテルズ博士も注目している。パーテルズ博士は、（ＦＭＲＩを使った実験を基に）母性愛が進化して恋愛になったという説を提唱した〉。

〈同じように、ロンドン大学公衆衛生・熱帯医学大学院（LSHTM）のバル・カーティス博士は今年、われわれが持つ嫌悪感は病気から身を守るために発達した感覚であるとする論文を発表した。こうした衛生の感覚が土台となり、より高度な感覚たとえば道徳感情などが発達したのかもしれない、とグリーン博士は述べる〉。

〈グリーン博士は現在、こうした説の研究に取り組んでいる。「たとえば、われわれは、賄賂を受け取るという行為を不快なこととみなすだろう。そこには、学習によって得た〔衛生上よくないという〕単純な比喩以上のものがあるように、私には思える」とグリーン博士〉。

〈道徳は文化に強い影響を受けるが、重要な遺伝的要素も道徳に関係しているとグリーン博士は考えている。「われわれの道徳判断の中で、文化から学んだ、あるいは個人が論理的に導いたと思っているものの多くが、主として進化の力によって形作られたものである可能性がある」〉。

〈校庭で遊ぶ子どもたちが、幼稚な発言や振る舞いをした相手を動物にたとえることがある。ＦＭＲＩを使った研究は、われわれ全員が動物であることを思い出させる。人間らしいと思っている感覚や道徳でさえも、動物から進化したのかもしれない〉。〔つまり、人間や動物を成している細胞の働きのことなのではないか〕。

⑦　サイエンス・グラフィックス（有）が管理しているサイトにある「FMRIごしに見える「考え中」の脳の場所」から引用する。

〈血流による酸素の供給と神経細胞の活動の間の具体的な関係が、ドイツの研究グループによって明らかにされました〉。

〈神経細胞では情報の伝達を電気的または化学物質などを利用して行っています。例えば細胞の内外でナトリウムイオン（Na^+）とカリウムイオン（K^+）のやりとりをして、内外の電位差を調整して電気信号としています。外からの刺激を受けると、細胞の外にあったナトリウムイオンが内部に流れ込み、内部の電位が変化します（local field potential）。この電位が一定の値になったら神経細胞が電気信号を発するといった具合です（action potential, nerve impulse）〉。

〈問題となるのは、この神経細胞の電気的な信号、ＦＭＲＩによる酸素の供給量の変化との間で、具体的にどのような関係があるのかということです。この二つの現象の間には、ずいぶん隔たりがあり、今までこの関係が明らかにされていなかったのです〉。

〈しかし、この問題も今回の報告によって解決しました。今回の報告をした研究チームは、サルに模様の替わるチェッカーボードを見せ、脳の活動について二つの方法で観察しました〉。

〈一つ目は、ＦＭＲＩをつかって脳の血管中の酸素の量についての脳の活動領域を測定するものでした。そして二つ目は、麻酔をかけたサルの脳の神経細胞に細い針を刺し、細胞内外の電位差を測定するものでした。この二つの測定方法で、それぞれのデータを同時に記録し比較するというものでした〉。

〈神経細胞が電気信号を受けたり送ったりする一連の過程にはいくつかの段階があるのですが、この方法のおかげで、どの段階に酸素量の増加が関係しているかということを突き止めることができました〉。

〈その結果、脳の活動領域の酸素量が増えるのは、刺激によるインプットで電位が変化するlocal potentialの方に関係しているということがわかりました。この結果になったのは、電気信号を受けるときに必要なエネルギーを、血液によって供給された酸素とグルコースの反応によって補うためだろうと考えられています〉。

〈こうしていままでＦＭＲＩによる脳の測定の際に、血流の変化と神経細胞の活動の関係の謎が明らかになりまし

た〉。

5　MRS（Magnetic Resonance Spectroscopy＝MRスペクトロスコピー）

〈これは、MRIと同様に、磁気性を利用した方法だ。MRIからは、鮮明な断層画像は得られるが、脳の中の化学的な情報はわからない。そこで、原子核が共鳴する周波数をさらにくわしく、一〇〇万分の一のレベルまで測定し、その原子核がどのような化学物質のものなのかを見てみる。すると、原子核は置かれた状態によって、共鳴する周波数がわずかずつ違うことがわかる。これを化学シフトという。たとえば、体のいろいろな物質に含まれるリンの化学シフトを測定してグラフ化[1]すると、リンを含む物質がどれだけあるのかがわかる。そのパターンは、ある病気のときはリンを含む特定の化合物が少なかったり、別の病気では、また違うリン化合物が少ないなど、いろいろな病気によって異なる。このような化学的な情報によって、病気をくわしく判別する検査方法だ〉（伊藤前掲「脳と心」三九頁）。

（1）　MRSは、生体をまったく侵襲することなく、その成分を測定できる方法である（仙波前掲九九頁）。人体中のプロトン（^{1}H）やリン（^{32}P）や炭素（^{13}C）のスペクトルをグラフに画くことができる。プロトンが水分子中にあるか、あるいはグルタミン酸などのアミノ酸分子中にあるか、などによって生じるわずかな共鳴周波数のずれを横軸とし、縦軸に信号の強度をとると、生体中にあるこれらの分子の濃度を推測できる（同上）。プロトンの場合はおもにアミノ酸、リンの場合はエネルギー代謝に関連するATP（アデノシン三リン酸）などの測定が試みられている。現時点では、MRIよりもさらに強力な磁場が必要なことや、脳の特定領域からの信号を得ることがむずかしいことから、研究段階にとどまっているが、今後の発展が期待されている（同上）。

6　PET（Positron Emission Tomography＝陽電子放射断層撮影法）

〈PETの仕組みは、放射性同位元素[1]を使って化合物をつくり、体内に送り込んで、そこから放出される陽電子[2]を検出して、コンピューターが画像処理するというもの。放射性同位元素は、酸素、炭素、窒素などでつくる。限られた部分の血流量や血液量、酸素消費量、ブドウ糖やアミノ酸の代謝などのほか、神経伝達物質を受け取るレセプターの分布[3]も調べることができる[4]〉（伊藤前掲「脳と心」三六頁）。PETは体の中がどのように機能しているかを画像化する（同上、仙波前掲一〇〇頁）。

（1）　陽電子（ポジトロン）を放出する放射性同位元素（仙波前掲一〇〇頁）。

（2）　化合物（仙波前掲一〇〇頁は、トレーサーと称える）は生体内に取り込まれると、崩壊して陽電子を放出する（仙波前掲一〇〇頁）。この陽電子はただちに周囲の電子と衝突して消滅し、一八〇度の向きに二本の放射線を放出する。この放射線は組織を容易に通過するので、体外に検出器を置くことによってその信号を検出できる（同上）。この信号をX線CTのような断層撮影の原理を援用すると、トレーサーの体内分布を断層像として得ることができる（同上）。分解度はCTやMRIほど高くなく、画像の鮮明度はそれらに劣る（同上）。

（3）　仙波前掲一〇二頁。

（4）　〈われわれが色を正常に知覚するためには、大脳皮質に局在した色覚中枢のはたらきが必要である〉（酒井「心にいどむ認知脳科学」二四頁）。後頭葉の下側に紡錘状回という領域があり、それは視覚前野の一部であり、四次視覚野をふくんでいる（酒井前掲二三、二四頁）、ここがヒトの色覚中枢である。PETにより、紡錘状回の付近で、色を知覚するときに、脳の血流量がふえることがわかった（一九八九年、酒井前掲二四頁）。〔これは活動電位の画像化ではないであろう。〕活動電位と血流量の増加が相関するのかどんな相関があるのかが調べられなければならないと思われる。日立製作所中央研究所と酒井たちの共同グループはFMRIのエコープレナ法という技術を使って、ヒトの色の知覚を調べ（一九九五年）、六色のカラー・パターンを被験者に見せたときに、紡錘状回の一部で活

動が観察された（酒井前掲二五頁）。

7　SPECT（Single Photon Emission Computed Tomography＝単光子放射型コンピューター断層撮影法）

〈PETと同じように、SPECTも、微量の放射性同位元素を体に注入して検査する方法だ。こちらは、放射性同位元素が放出するガンマ線[1]を検知して断層写真をつくる。目的の臓器や組織に結合しやすい物質を体に注入すると、めざす組織や臓器に取り込まれて、そこで放射線を放出する。その様子を、体のまわりで回転する検出器でとらえて、断層画像として再生する。PETのような精密な画像は得られないが、装置が比較的簡単だという利点がある[2]〉（伊藤前掲三六頁）。SPECTは体の中がどのように機能しているかを画像化する（同上）。

（1）ガンマ線を放出する放射性同位元素として、原子番号の大きいテクネシウム（^{99m}TC）やヨウ素（^{123}I）などが多い。

（2）その他の利点・欠点については仙波前掲一〇三頁。

8　MEG（脳磁図magnetoencephalography）

脳の神経細胞が興奮したときには細胞内に電流が生じ、電流が流れた場合にはその周囲に磁場が生じる。MEGは、この脳から出てくる磁気を測定するものである。脳の活動の脳内の位置をかなり空間的な精度で特定できる。

神経細胞の活動は電気的な情報によって神経細胞内を伝わっていく。この電気的な活動は集団的である。集団的な

神経細胞の電気的活動があれば、脳内に一定方向の電流が流れる。このとき、電気物理学の原理によれば、微弱ではあるが磁場が発生するはずである。実際、このときの磁場の強さは10^{-13}テスラと見積もられる。地磁気の10^{-5}テスラに比べると、一億分の一の強さにすぎない。しかしこの微弱な磁場も超伝導現象を利用した超伝導量子干渉計Squid(Superconducting quantum interferne device)を用いれば観測できるようになってきた。これがＭＥＧである。たとえば、ヒトは一定の視覚などの知覚の刺激を受けると、集中的な神経活動が生じる。このときのＭＥＧの信号を検出すると、刺激後どれくらいの時間で脳のどのようなところで集中的な神経活動が生じたかわかる。そこで、ＭＥＧを用いた知覚と脳の機能を調べる研究が始められている。しかし、一度期に多数の脳部位が活性化し、磁場の生ずる部位が多数あるような場合は、誤差が生じやすいので、複雑な脳の高次機能に対しては慎重な検討が必要である。このように、ＭＥＧは脳の活動をきわめて短い時間で、しかもかなり空間的な精度で脳内の位置を特定することができる(以上仙波純一「脳と生体統御」一〇四頁(注))。

〈このようにＭＥＧは脳の活動をきわめて短い時間で、しかもかなり空間的な精度で脳内の位置を特定することができる。実際にはＭＥＧで得られた情報をＭＲＩなどの画像の上に重ねて示すことが多い〉(仙波前掲一〇四頁)。

(注)〈脳の神経細胞が興奮した時には細胞内に電流が流れます。電流が流れた場合にはその周囲に磁場が生じます。電流を計測するのが脳波(脳電場)であり、磁場を計測するのがＭＥＧです。例えば、私達が何かを見た時(視覚)、聞いた時(聴覚)、あるいは触れた時(触覚)には、一秒以内のほんの一瞬の間に脳の中で情報が処理されます。ＭＥＧはミリ秒(一〇〇〇分の一秒)単位で脳内の情報処理過程を解明できるので、その情報がどのくらいの時間帯で脳内のどの部分で処理されているか、それらの情報がどのように伝達されるのか、が正確にわかります〉(生理学研究所・柳木隆介・定藤規弘)。

9　以上のほかに、化学シフトのデータを基に画像化するＣＳＩ(Chemical Shift Imaging＝化学シフトイメージング)が開発され、ＰＥＴ画像とＭＲＩ画像を組み合わせたり、三次元ＣＧで脳内の様子を再現する研究が進められている。その現在の成果を筆者はまだ知るに至っていない（以上は一九九六年版・一九九八年版の文献に依存するに止まるからである）。

たしかに2～7に紹介したいろいろの画像の方法により、なにかを神経細胞がしているときの、その神経細胞の部位を特定することができる。しかし、その画像から、なにをしているかを特定することはできるだろうか。なにかを認知していること、なにかに反応していることを特定の部位において知ることはできるが、たとえば、ある特定のリンゴを認知していること、リンゴを食していることを、その特定部位において、知ることはできるのだろうか。色についていうならば、ＰＥＴにより、紡錘状回の付近で、色を知覚するとき、脳の血流量がふえることが知られている(前掲6)。一方で光の信号は電気信号に変えられ、電気信号に変えられた情報は脳内の諸分野において分析され統合されて色の要素も視覚として成立するといわれている(第一章2イ)。だが、その電気信号の測定や頻度は知られていない。色を認知するのは脳のどの部位かはわかっても、どんな色を認知した場合にどんな活動電位が測定されるのかはまだ私に知られていない。

筆者は、神経細胞がたとえばあるリンゴを認知しこれを食するという反応をするという働きをしていることが画像化されることを希望するのである。それができるならば、ある社会関係を認知し、これに即してある法的判断を行うという働きを画像化する手掛りが得られるのではないかと想像するのである。そのような画像化の研究が進展することを希望するものである。

第三章　磁気共鳴

序

ＦＭＲＩは、前述（第二章3）のように、ＭＲＩ装置を使って、血液中のヘモグロビンの酸化還元状態を利用して、血流量の変化を画像化するものである。ＭＲＩ装置は、水素原子が強い磁場の中で、決まった方向を軸に回転する状態に、一定の周波数の電磁波を与えることにより共鳴現象が起きたときに放出されるエネルギーを信号にして、コンピューターで断層像を画き出すものである（伊藤正男監修「脳と心」三五頁。仙波純一「脳と生体統御」九八頁）。血流量の変化は磁気共鳴信号の変化としてとらえられて画像化される（第二章4ロ。なお同イ③）。そこで磁気共鳴について調べよう。

磁気共鳴については、日本大百科全書「磁気共鳴」に定義されている。

〈磁性をもった原子や分子およびこれらを含む物質に磁界が加えられると、単一のエネルギーをもっていたレベルが磁気量子数によって複数のレベルに分岐する。この系にさらに電磁波を加えると、その電磁波の光子のエネルギーが分岐したレベルの適当なものの間のエネルギー差に等しいとき、共鳴的にこの電磁波の磁界成分によってこのレベル間に転移がおこる。この現象を磁気共鳴という〉。（人体は磁性をもった原子や分子を含む物質である）。そこで「分岐」と「転移」を調べよう。

第一節　原子核と磁気

磁気共鳴は水素原子に関して起こるが、それは水素原子の原子核が磁気モーメントをもち、磁気モーメントはエネルギーをもつことにもとづく。その詳細をまず調べる。

1　原子と電子　原子は、物質を構成する最小単位である（広辞林）。原子は、原子核と電子から構成されており[1]、原子核は陽子と中性子とから構成されている[2]（世界大百科事典「原子」）。電子は電気（＝絹布で摩擦したガラスの棒が軽い物体を引きつける現象を起させる素因（広辞林）の量（＝電荷）をもつ（広辞林）。電気には陽電気（＋）と陰電気（－）の二種がある（広辞林「電気」）。電子には陽電荷をもつもの（陽電子）と陰電荷をもつもの（陰電子）とある（広辞林「電子」）（最初は陰電子だけが知られていた（同上））。

電子は素粒子の一つである（広辞林「電子」）が、実際は質点ではなく波の性質をもつといわれ、原子内では電子雲の状態で存在し、一つ一つの電子がそれぞれ雲のように広がっているといわれている（世界大百科事典「原子」）。しかし、一個、二個と個数で数えられ、原子内の電子が一個あるいは二個以上放出されると正イオンになり、逆に中性原子に電子がとりこまれると負イオンになる（同上）。電子は放出されたりとりこまれたり動くものであるようである。それにより化学結合が起こるのだろう。〈化学結合は一般に電子雲の重なり、あるいは電子のやりとりによって生じている〉（日本大百科全書「共鳴」）といわれている。

（1）　原子は原子核と電子とから構成されている（世界大百科事典「原子」）。原子核に電子が結合して原子をつくる（日本大百科全書「エネルギー」）。構成とか結合といわれる実態は、何個かの電子が原子核の周りに存在している状態である（世界大百科事典「原子」）。

どんな存在の状態か。水素原子について、一九一三年に、N・H・Dボーアは、一個の電子と一個の陽子（すなわち水素原子核）とからなる、と考え、電子が陽子のまわりに等速円運動をしていると仮定した（同上）。だが、量子力学では、前述のように、電子は固い粒ではなく、変形しうるものであり、一般にある程度の広がりをもっていて、その広がり（電子雲）の中には波があると考えることが必要になった（同上）。原子は原子核と電子とから構成されている。質量は、電子の質量は原子核の質量よりはるかに小さく、原子核においては陽子の質量と中性子の質量はほぼ等しい。電荷は、陽子の電荷をeとすれば電子の電荷はマイナスeであり、中性子は電荷をもたない。個数は、陽子の個数は、中性子の個数と同じではないが、電子の個数と同じである。だから原子は電気的に中性である（以上、世界大百科事典「原子」）。

（2）　原子核を構成する陽子と中性子の間には力が働いており、この力は核力と呼ばれる（核は固有の磁性をもつといってよい）。核力は陽子と中性子が離れていると引き合い、近づきすぎると非常に強く反発するように働くことが、実験で確かめられている〔現在の物理理論によると、陽子や中性子は三個づつのクオークからできている（二〇〇七年六月二一日朝日新聞朝刊）〕。

2　電子と磁気

磁気は鉄片などを吸いつける作用を起こす力である（広辞林「磁気」）。この力の能率を磁気モーメントという（広辞林「モーメント」）。電子自身が固有の磁気モーメントをもっている（日本大百科全書「磁気モーメント」）。電流の周りには磁場ができる（同上。〈電流が流れているうちは導線の周囲は磁場ができる〉――広辞林「電流」）。電流は円形に流れるものがある（水素原子は陽子の周囲を一個の電子が回転している構造をしている（「脳機能画像解析入門」一三二頁）。この電子の回転は電荷の円運動すなわち円電流と考えられる（日本大百科全書「磁石」）。円形に流れる電流は磁気モーメントを発生し[1]（磁気モーメントはエネルギーをもち[2]）、したがって円電流と磁石とは同じ性質をもつ（日本大百科全書「磁石」「磁気モーメント」）。

こうして、〈水素原子そのものが小さな磁石と同じ性質をもっているので、一個の水素原子は電子が原子核を周回す

る面に垂直な方向の磁化ベクトルと考えることができる〉[2]（「脳機能画像解析入門」一三三頁）。

（1）電流の周りには磁場ができる。その磁気モーメントの〈大きさは電流の強さIと環の面積Sとの積すなわちISに等しい〉（日本大百科全書「磁気モーメント」）。磁石の周りには磁場ができる。〈長さがLでその両端の磁極の強さがmとマイナスmであるような棒磁石が遠くの点につくる磁場の方向と強さは、棒の軸方向およびmとLとの積とだけによって定まる〉それでこの積を磁気モーメントという（以上、同上「磁気モーメント」。なお同上「磁石」）。電磁場が時間的に変化する場合には電磁波が発生し、電磁波は電波と磁波とから構成されており、電波と磁波とはそれぞれ互いに直交する平面内で振動する（以上、同上「電磁波」）。

（2）磁気モーメントはエネルギーをもつことが以下の記述から推測される。〈磁石の上に紙をのせ、上から砂鉄をまくと、磁石の一つの極から他の極に向って多くの磁力線を画く。これは砂鉄の粒に生じた磁極が隣の粒の異なる符号の磁極と引き合って線状に並ぶからである〉（日本大百科全書「磁場」）。〈磁力線は空間の各所で磁場の方向に平行であり、その向きは磁石のN（正）極から発してS（負）極に終わる向きである〉（「磁力線」）。〈磁力線の密度は、各場所での磁場の強さに比例している〉（「磁場」）。〈磁力線は磁極に対しては線の方向に、電流に対しては電流と線との両方に垂直な方向に力を及ぼす〉（「磁力線」）。〈磁力線はまた単位体積当り、マクスウエルの応力と同じ式によって表される量のエネルギーを蓄えている〉（「磁力線」）。つまるところ、磁力線発生の原因である磁気モーメントにエネルギーがあるからだろう。

付言　二つの磁気モーメント間の力を計算すると、距離の四乗に反比例している。これは二個の磁石間の吸引力がごく接近しているときは強く、離れれば急速に弱まることの理由である。また、異極は引き合って互に磁極を打ち消し、全体の合成モーメントを小さくするように位置したがる（同上「磁石」）。

3　人体と磁気

〈水素原子は血液や細胞液、脂肪などを構成している元素の一つであり、人体を構成する元素のうち最も多く存在している。〉（「脳機能画像解析入門」一三二頁）。〈ヒトの体は約七〇%が水分で、脂肪を含めると約九〇%になります〉

（「Functional MRIについて」）。〈水素原子は、陽子の周囲を一個の電子が回転している構造をしておりスピンともよばれる。〉（同上「入門」同頁）。電子が回転すると、そこに円形電流（環状電流）が見られる。環状電流は前述（2）のように磁気モーメントを持つ（地球の地磁気によるのか）。（そのほかに、電子自身が固有の磁気モーメントをもっている（日本大百科全書「磁気モーメント」））。すなわち、磁石と同じ性質をもつ（この意味で個々の原子は原子磁石である――日本大百科全書「磁石」）。これは核に基づく磁性である（同上「核磁性」）。人体は磁性をもつものである。（電子自身、陽子自身磁気をもつ）。

第二節　物質におけるエネルギーの分岐

1　原子核の分岐

原子核の分岐については以下のような記述がある。

①〈磁性をもった原子や分子およびこれらを含む物質に磁界が加えられたとき、単一のエネルギーをもっていたレベルが磁気量子数[1]によって複数のレベルに分岐する。〉（日本大百科全書「磁気共鳴」）。

②　固体や液体に含まれる〈原子核は磁界が加えられたときには、それぞれ磁気量子数によって[1]複数のレベルに分岐する。〉（同上「核磁気共鳴」）。

③〈ここでは分子線磁気共鳴の簡単な場合について解説する。いまスピン[2]（素粒子の固有の角運動量）がSで磁気モーメントμをもつ原子あるいは分子があるとする。これが磁界H中に置かれたとき、スピンの磁界方向の成分[3]m（磁気量子数とよばれ、mはS，S-1，……，-Sの（2S＋1）のいずれかの値をとる）によって（μ/s）mHのエネルギーをとり、単一のレベルにあったものが、（2S＋1）個のレベルに分岐する（図A）。〉（同上「磁気共鳴」）。

（1）磁気量子数

③から、角運動量が分岐する、分岐した角運動量の分岐部分（成分）がそれぞれレベルを成す。それぞれの成分は物理量で、この物理量が磁気量子数で表わされる、と理解することができる。

a　磁気量子数

磁気量子数については日本大百科全書「量子数」に説明されている。この説明を引用する。〈水素原子内電子の運動は、その動径方向の運動と回転運動とに分けることができる。電子を非相対論的に扱うと、そのエネルギーは、動径方向の運動を表す状態関数の波打つ数と角運動量ℓとで決まる数nの二乗に反比例した値（$-e^2/2a_0$）$(1/n^2)$（a_0はボーア半径）をもつ（図参照）。nを主量子数という。また、回転運動に伴う角運動量の大きさは$\sqrt{\ell(\ell+1)}\hbar$（$\hbar$はプランク定数hを2πで割ったもの）で与えられ、その一成分は$m\hbar$で与えられる。ℓは$\ell=n-1, n-2, \cdots\cdots 0$で与えられる正整数で方位量子数、mは$-\ell, -\ell+1, \cdots\cdots \ell$で与えられる正負の整数で磁気量子数という。電子の軌道運動状態は、n.ℓ.mの三つの量子数を同時に与えることによって定まる。〉

電子の軌道運動状態を決めるのに量子数を与えるというのは、それを数で表現するということであろう。それでは、量子すなわち、物理量の最小単位である基礎量そのものは、どういうものであろうか。量子は、〈ある量を分割することができる一定の極微量〉と説明されているが（広辞林「量子」）、それはどういう量なのか。

b　量子数とはなんであろうか。電子の本質は波動である（世界大百科事典「電子」）。電子のエネルギーの値は電子の波動性によりとびとびになる（日本大百科全書「エネルギー」）。物理量が連続的な値をとらずとびとびの値をとる場合、物理量の値を整数または半整数（整数に$\frac{1}{2}$を加えた数）を用いて表すことができる（同上「量子数」）。物理量の値が基礎量の整数倍で与えられる場合その基礎量を量子という（同上「量子」）、つまり、量子は、不連続な値しか持たない物理量の最小の単位である（広辞林「量子」）。量子の整数倍ということで物理量の値を区別することができる。この場合の整数を量子数という（同上「量子数」）。

c　電子エネルギーは前述（第一節1注（1））のように、波動性をもち、この波動性によりとびとびの値をもつ。このとびとびの値は量子数を用いて表わされる。この値を表わす量子数nの要素の一つである角運動量（それは電子の回転運動に伴うのであるが）の大きさの一成分の要素を表わすのに磁気量子数が用いられるということであろうか。よくわからない。

（2）スピン

スピンとは、電子や陽子、中性子あるいは光子などの素粒子が有する自分自身の固有の角運動量※をいう。この場合の角運動量は……これらの粒子を表現する波動関数の成分の数で決まる。（以上、日本大百科全書「角運動量」）。スピンの成分は角運動量の成分である。

角運動量は三つの成分をもつ。

※角運動量は〈三成分をもつベクトル量であって、粒子の位置をX、Y、Z、運動量をP_X、P_Y、P_Zとすれば、角運動量はそのX、Y、Z方向の成分がYP_x-ZP_y, ZP_x-XP_z, XP_y-YP_xで与えられる物理量である。〉（日本大百科全書「角運動量」）。

ところで角運動量の成分とはどういうことか。

運動には直線運動のほかに回転運動がある。いずれも運動量をもつ。運動は、変位・速度をもち、ある方向に向う。すなわち、大きさだけでなく方向と向きをもつベクトル量である。〈空間では、互に直交する三平面を基礎図形として直交座標系が導入される〉（日本大百科全書「座標系」）。〈大きさが一のベクトルを単位ベクトルという〉（同上「ベクトル」）。空間では〈直交座標軸に平行な三つの単位ベクトルがあり〉（同上「ベクトル」）。これは基本ベクトルである（同上）。三つの単位ベクトルをe_1、e_2、e_3と表示するならば、〈e_1、e_2、e_3が同一の平面に含まれる三本の有向線分によって表わされないとき、これらを基本ベクトルという〉（「ベクトル」）、e_1、e_2、e_3が基本ベクトルのとき、任意のベクトルをaとすれば、aはどう表わすか。$a=a_1e_1+a_2e_2+a_3e_3$と表わす（同上）。この場合a_1 a_2 a_3をe_1 e_2 e_3に関する成分という（同上）。e_1 e_2 e_3を定めておけば、aをa_1 a_2 a_3で表示できる。

角運動量の成分とは、方向の成分で、互に直交する三平面にそれぞれ平行する方向のことであろうか。

（3）磁界方向の成分

磁界は強さと方向をもつベクトル量である（同上「磁場」）ところ、磁界の方向とは、磁石のN（正）極から発してS（負）極に終る向きである（第一節2注（3））。その強さと向きは、単位の強さの正磁極に対して及ぼす力で表わす（同上「磁場」）。この方向のスピン（角運動量）の成分が磁気量子数で表わされるのであろう。

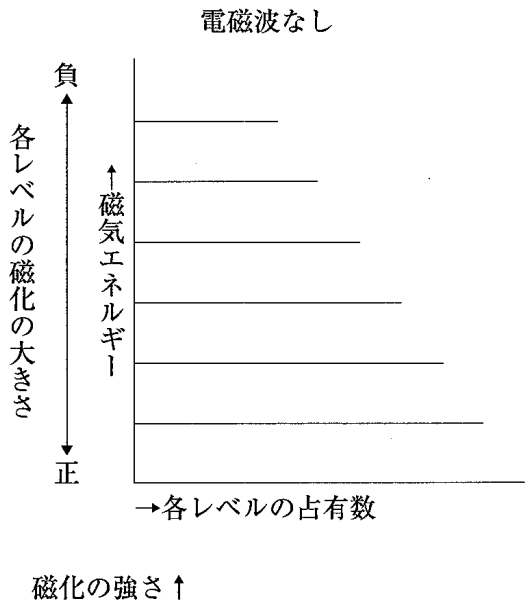
2　1の記述をどう理解するか、まず分岐するということがよく解らない。分岐する主体は原子または分子の角運動量であるらしい（1の③より）。角運動量が分岐するのは観念なのか可視的なのかは私には知られていない。分岐した分岐部分すなわち角運動量の成分はそれぞれレベルを成す。単一のエネルギーをもっていたレベルが複数のレベルにというのはどういうことかよく解らない。（3の注にいうところの、磁石全体が単一のレベルで、複数の磁区が複数のレベル

なのか?)。語義からは、レベルが単一から複数にということであろう。エネルギーをもっていたレベルが単一であったのが、複数に分岐するということであろう。単一と複数によって区別されるレベルはなんのレベルであるか。見当がつかない。解らないままに、レベルの実相を調べることにする。

3　分岐により複数化したレベルの実相

前述1の②に続いて以下の記述がある。〈熱平衡にある物質にあっては、これらのレベルのそれぞれを占める核の数は、ボルツマン統計に従って図のAのようにエネルギーの低いレベルほど多くなっており、磁化Mをもつ。[1]〉(「核磁気共鳴」)。

図のAは次のとおり。



磁気エネルギーは下が低く上が高い。各レベルの占める核の数は下のレベルが多く上のレベルがより少ない。（図Aは可視的なものか、観念的な推測なのか）。

図Aにおいて、各レベルが占有する核の数は、レベルが上になるほど小さくなっている。レベル間の核の数の差はレベルに電磁波を加えると減少する。この核の数の差の減少は、さらに強い電磁波を加えると激しい転移がおこり、差がゼロに至る。すなわち全てのレベルにおいて、占有する核の数が同じになる。（磁化はゼロになる）。磁化がゼロになれば、電磁波の吸収はおこらない（飽和という）〈以上日本大百科全書「核磁気共鳴」〉。

（1）図Aに磁化という言葉がある。

磁化されていない物質を強さがHの磁場の中に入れると、物質は磁気モーメントを与えられて磁石となる。これを磁化という（日本大百科全書「磁化」）。磁気モーメントはひとつの物理量で、その向きも考えてSからNへ向うベクトルで表わす（同上「磁石」）。このベクトル量は磁場の強さに比例する。物質の単位体積当りの磁気モーメントも磁化（ベクトル）といい、そのベクトル量をMとする。普通の物質ではMはきわめて小さく精密な計器でないと測れないが、MはHに比例する（この比を磁化率とか帯磁率とよぶ）。ただし、強磁性体では、MはHに比例しない。Hが大きくなるとMは飽和する（物質はそれ以上電磁数を吸収しないということか）。MとHが比例するときは、この比は一定である。だが、比は物質によって異なり、また温度によっても変化する。室温で強磁性体である鉄などでは、比は数十ないし数十万の値をとるが、多くの物質では一〇〇万分の一程度の小さなものであり、正のもののほか負のものもある（以上「磁化」）。比が負であるということはどういうことか、よく解らない。

鉄などのように強く磁化される〈強磁性体の内部は、自発磁化の方向の異なる微小な区域に分かれている。この区域を磁区という。磁区内では、原子磁気モーメント（原子磁化）は同じ方向を向いている。（原子磁石が互に作用しあって規則的に整列しているということである（日本大百科全書「自発磁化」）もし磁区に分かれず、磁石全体が同じ方向に磁化すれば、磁性体表面に磁極が現れ、内外に磁界を生ずる。磁性体は、この自らつくりだした磁界中に置かれるため、磁気エネルギー（静磁エネルギー）が発生する。そこで、強磁性体は、静磁エネルギーを下げるため、自ら内部でいくつかの磁区に分かれ、各磁区は互いに自発磁化を打ち消しあって、表面

に磁極が現れないような配置をとる〉（「磁区」）。このため〈全体としては磁気モーメントがない〉（「磁石」）。だから〈純鉄などは普通は磁石に見えない〉（同上）。だが、鉄が〈磁界中に入ると、磁界に反対向きの磁区は磁界方向に形や向きを変え、全体としての磁気モーメントが生ずる。これを磁化するという。磁界が強くて全磁区が磁界方向を向き、したがって全体が一個の磁石となった状態が飽和磁化である。〉（「磁石」）。

強磁性体でMが飽和するとはこのことであろうか。全体としては磁気モーメントがないのが全体としての磁気モーメントになるというのは、磁気モーメントのベクトル量が、それ以上大きくならなくなるということであろうか。

4　以上から次の理解が生ずる。分岐は電磁波が加えられないときにすでに存する。分岐は単一の原子核が数個に分れることではない。物質は多くの原子核を含んでいる。これらの核の数個を占有するレベルが数個存在するに至るのが分岐である。それぞれのレベルにおいて、占有する核の数は同じではなく、そのエネルギーの大きさも同じではない。これらのレベルのそれぞれを占める核の数は、エネルギーの低いレベルほど多くなっているのはなぜか。私には解らない。核の数が多いと核の磁化（第一節参照）がそれだけ大きい。磁化は磁気モーメントを与えられることである。核が磁界に置かれることにより磁界から磁気モーメントを与えられるのであろう。磁化が大きいというのは、磁界の磁気エネルギーが、磁気モーメントを核に与えるので、それだけ磁気エネルギーが低くなるという関係にあるのであろう。ともあれ、分岐は磁気共鳴の先行状態である。しかし、分岐を起こさせる原因はなにか。磁性ある分子や原子が磁界におかれるとどういう作用により分岐が起こるのか。

分岐は、磁性をもつ原子や分子に磁界が加えられたことにある。磁気と磁気が接触することによってどういうことがおこるのか。

それは磁石に磁場を加えたのに似るのではないか、次のような記述がある。〈孤立した磁石に磁場を加えると、その

N（正）極に働く力とS（負）極に働く力とは、大きさが等しくて方向が反対であるため、偶力を形成し、磁石のS→Nの方向が磁場Hの方向に平行になるまで磁石を回転させる〉（日本大百科全書「磁場」）。磁性をもつ原子や分子の磁極S→Nの方向が磁場Hの方向に平行になるまで回転すると類推することができようか？　しかし、このことと、レベルに分岐することとの関係がわからない。

第三節　分岐したレベルの間の共鳴的転移

1　磁気共鳴の意義

①　日本大百科全書「磁気共鳴」に第二節1の①の文に続いて次のような記述がある。〈この系にさらに電磁波を加えると、その電磁波の光子のエネルギーが分岐したレベルの適当なものの間のエネルギー差に等しいとき、共鳴的にこの電磁波の磁界成分によってもこのレベル間に転移がおこる。この現象を磁気共鳴という。〉

②　同上「磁気共鳴」に第二節1の③の文につづいて次のような記述がある。〈一般にmで分れた系に、周波数Vの電磁波が加えられ、その光子エネルギーhv（hはプランク定数[1]）が分岐した相隣るものの間隔に等しいとき、そのレベル間に共鳴的に転移がおこる〉。分子線磁気共鳴の例では〈mによって等間隔に分岐しているから（2S＋1）個に分かれたレベルのすべての相隣るものの間に一斉に転移がおこる。この磁気共鳴の条件はv＝(μ/sh)Hである〉。

（1）　プランク定数

プランク定数とはドイツの物理学者プランクが熱放射の研究のなかで一九〇〇年に発見したところの、量子力学的な現象を特徴づける普遍定数である。Nで表わす。（以上日本大百科全書「プランク定数」）。プランクは、空洞内の放射の分布を正しく与えるために

は光を放射し吸収する際の原子の振動子のエネルギーが連続的でなくhv（vは光の振動数）の整数倍の値に限る必要のあることを示した（同上「量子」）。つまり、振動数vの光のエネルギーという物理量の値がhvという基礎量の整数倍で与えられる。このように物理量の値が基礎量の整数倍で与えられる場合その基礎量を量子という（同上「量子」）。そしてその整数（または半整数）を量子数という（同上「量子数」）。第二節1の註（1）のb）。

③　NHKサイエンススペシャル驚異の小宇宙・人体II「脳と心」三五頁に〈強い磁場の中では、体内の水素原子は決まった方向を軸に回転する。その状態で一定周波数の電磁波エネルギーを与えると、共鳴現象を起こす〉とある。この回転は歳差運動であろう。歳差運動に一定周波数の電磁波エネルギーを加えると、さらなる歳差運動がおこり（2の注（1））、これを共鳴というのであろう。

④　仙波純一「脳と生体統御」九七頁に次の文がある。〈一定周波数の電磁波のもとでは、ある種の原子核は電磁波の軸のまわりに、独楽のようなスピン現象をひきおこす。これを核磁気共鳴とよぶ〉。これは③と同じことをいうのであろう。すでに決まった方向を軸に回転している。つまり歳差運動している原子核がこれに電磁波を加えると、その電磁波の軸のまわりに、独楽のようなスピン現象、すなわち歳差運動をおこすというのではなかろうか。その電磁波の軸というのがよく解らない。電磁波の波動の方向であるところの直線的なものをいうのか。

⑤　「脳機能画像解析入門」一三三頁に次のような記述がある。

〈水素原子（正確にはそれ以外の元素も可能だが）に対し、スピンの歳差運動と同じ周波数で磁場を小刻みに振動させるRF（radio frequency）波（高周波）を印加することでスピンにエネルギーを与えることができる。〉（RFは無線周波数と訳されている）。〈RF波の印加によりエネルギーが与えられた状態を励起状態とよぶ〉。励起されたスピンは、共鳴し

て磁化ベクトルの方向が変化する。そのときの振動数を共鳴周波数とよび、その大きさは磁場の大きさと比例して大きく、1T（一〇、〇〇〇ガウス）あたり約四二MHzとなる〉。〈図のように、Z軸方向にある磁化ベクトルに対し、X軸方向にRF波を印加してスピンを励起すると、共鳴を起こし磁化ベクトルはY軸方向に回転する。この現象を磁気共鳴現象とよび、印加するRF波の時間と強さとの積分により回転角度が決まる〉。この記述における「スピン」とは〈水素原子は、陽子の周囲を一個の電子が回転している構造をしておりスピンともよばれる〉（同上「入門」一三二頁）ものである。磁化ベクトルが回転するというのは、それは、すでに歳差運動をしている水素原子が、その周波数と同じ周波数の振動によりエネルギーを与えられてこれに触発されてさらに歳差運動を重ねることではなかろうか。

歳差運動は磁場で行われている。これに電磁波を加える（電磁波の光子のエネルギーを加えたことになる）ことは磁場を小刻みに振動させることである（「脳機能画像解析入門」一三三頁参照）。そのための、電磁波の周波数は水素原子の歳差運動の周波数と同じである（同上）。この周波数（共鳴周波数）と同じ速度でさらなる歳差運動が起こる。磁場の振動によりエネルギーを与えられて水素原子がさらなる歳差運動を起こすことになる（同上）。水素原子を含む物質内のエネルギーは増すことになる。

⑥　日本大百科全書「共鳴」に以下の記述がある。〈(1)振動体がその固有振動数に近い周期性をもつため外力を受けたとき、振動を始める現象〉。〈(2)光と物質の間におこる共鳴　物質内のエネルギー準位の差が、入射する光の波長と一致したときに生ずる〉。エネルギー準位の差が波長と一致するとはどういうことか？　波長はエネルギーを表すものなのか？

2　核磁気共鳴の構造

核磁気共鳴は、水素原子核と電磁波エネルギーの間におこる（1の⑥）。共鳴の前提に、核が歳差運動[1]をしているこ

とがある。また複数の核を占有するレベルが複数に分岐している（第二節）ことがある。共鳴の起因は、水素原子の歳差運動と同じ周波数[2]で、磁場を小刻みに振動させる電磁波[3]を核に加えることである（1の①～⑤）。核は電磁波を吸収し[4]、電磁波のエネルギーを核のエネルギーに変換する[4]。共鳴の条件は、電磁波のエネルギーが、分岐したレベルの間のエネルギー差に等しいことである（1の①②⑥）[5]。共鳴状態は、1の④では、核がスピン現象をひきおこすことといわれているが、スピン現象は歳差運動である。そうすると、共鳴現象は歳差運動Aの主体がさらに別の歳差運動Bを重ねるものであることになる。また、1の⑤では、磁化ベクトルと考えられる（第一節2）水素原子の磁化ベクトルが共鳴してその方向が変化（＝回転）するとあるが、歳差運動の回転軸（一定の方向をもつ）自体がいわゆるみそすり運動をすることをいっているのではなかろうか。共鳴の結果はいわゆる転位である。

（1）　水素原子は、陽子の周囲を一個の電子が回転している構造をしている（「脳機能画像解析入門」一三二頁）。磁場中にある一個の水素原子は歳差運動することが知られている（同上一三二頁）。つまり、内部で電子が回転している水素原子核自体が、磁場の中に置かれると、ある軸の周りを回転する。電子は原子核の周りを回転しながらその回転自体がある軸の周りを回転する原子核自体の回転の主体になっているということであろう。〈歳差運動とは、〈剛体が回転運動をしているとき、外力のモーメントがつけ加えられると、その回転軸が周期運動をする現象をいう〉（日本大百科全書「歳差運動」からである）。この歳差運動は周波数をもつ。それは電子の回転運動の周波数とこの回転がさらにある軸の周りを回転する運動の周波数の差であるのではなかろうか。

（2）　周波数について次の二つの記述を見た。第一。〈原子が歳差運動をする角速度を核周波数とよぶ〉（「脳機能画像解析入門」一三三頁）〈角速度とは〈質点または剛体の瞬間的な角回転の割合として定義される速度〉（日本大百科全書「角速度」）。第二。〈物体は多数の分子・原子の集まりであり、それらの分子・原子は、目には見えないが、ある種の運動をしている。一定温度の一つの容器に気体が閉じ込められている場合、気体の分子は……あらゆる方向に運動しており、……固体結晶の場合には、分子・原子あるいはイオンが……微小振動をしており〉、結晶が融解して液体となった〈液体の運動もそれを構成する個々の分子の運動からなる〉（日本大百科全書「運

動」)。以上の記述から、固体・液体における分子運動は振動であって、周波数をもつと考えられる。分子運動はすなわち歳差運動であるといえるのかはまだ私には解らない。

(3) 電磁波

電磁波は、電磁場が波動として空間を伝播する場合、伝播する物理的実体を指す(日本大百科全書「電磁波」)。荷電粒子(たとえば電子や原子核)が運動することにより電磁波が発生する(同上)。電磁場は、電流や磁石が動いている場合、その周囲に電気力と磁気力が相伴って同時に存在するものである(広辞林「電磁場」)。電極の間に振動数の高い振動電流が通じると、電気の性質を持った電界の波(電波)と、磁気を持った磁界の波(磁気波)が発生する。これはいつも同時に起こるのでまとめて電磁波という(同上「電磁波」)。〈電波と磁波とはそれぞれ互に直交する平面内で振動しており、電磁波はこれらの平面の交線方向に伝播する〉(日本大百科全書「電磁波」)。電磁波は、電磁場の振動的変化(=波動が真空または物質(=空間)を伝播する現象(広辞林「電磁波」)である。〈発生した電磁波はエネルギーや運動量を伝播することができる。この現象を電磁波の放射という〉(日本大百科全書「電磁波」)。(電磁波は、真空中を伝播する物理的実体であって、エネルギー、運動量、角運動量などをもつ。それと同時に波動としての性格をもっているので、波長または周波数によって特徴づけることができる――日本大百科全書「電磁波」)。

(4) 電磁波はエネルギーや運動量を伝播する。すなわち放射する(日本大百科全書「電磁波」)。〈電磁波は物質と出会うと、物質中の電子や原子核のような荷電粒子と相互作用する。相互作用の結果として、二種類の現象がおこりうる。その一つは物質による電磁波の吸収で、その際、電磁波のエネルギーは物質の内部エネルギーに変換される。他の一つは物質による電磁波の散乱である。相互作用によって物質中の荷電粒子は加速度運動をするようになるから、電磁波と相互作用した荷電粒子は電磁波を放射する。電磁波の散乱はこのようにしておこり、放射された電磁波が散乱波を形成する。〉(日本大百科全書「電磁波」)。

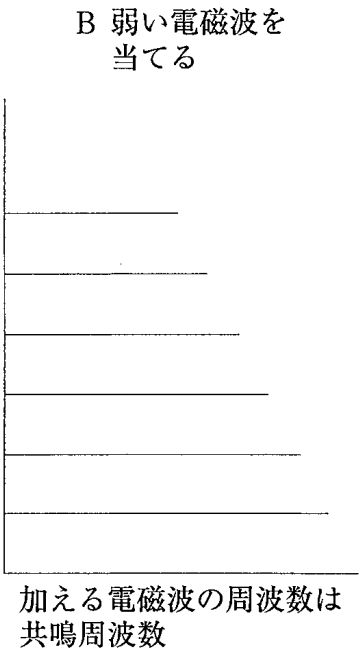
(5) 共鳴がおこるのは、加えた電磁波のエネルギーが分岐したレベル間の磁気エネルギーの差に等しいときである(同上「磁気共鳴」)。共鳴とは、一方に振動体があり、他方に外力があり、振動体の固有振動数と外力のもつ周期性とが同じか近い場合に、振動体が外力を受けると振動を始めることである(日本大百科全書「共鳴」)。磁気エネルギーは磁気波のエネルギーである。電磁波は波動する(2注(2))。だから電磁波も磁気波も周波数をもつ。外力である電磁波の周期性が、振動体である原子の磁気エネルギーの磁気波の周波数の差に等しいときに、原子核が振動をするというのであろうか。

3　転移――磁気共鳴の結果

いわゆる分岐の状態は第二節において見たように、電磁波が加えられていない状態での磁性をもった原子や分子が置かれた状態である（第二節3の図のA）。この状態が、電磁波が加えられることによって変化する。

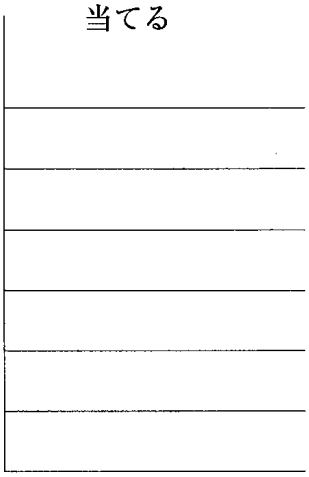
分岐により生じたレベル（第二節3の熱平衡状態の図のA）の状態は以下のように変化する。

図のAの系に〈磁気共鳴を行わせると相隣るレベルの間に転移がおこるが、下方のレベルほど占有数が多いので転移のおこる数が多く、高周波の強度に従って、Bのように上下のレベルの数の差を少くするような状態で平衡に達する〉。（日本大百科全書「核磁気共鳴」）。



〈さらに強い高周波によって激しい転移をおこさせると、Cのように、上下のレベルを占める核の数が同じになってしまう（磁化はゼロになる）。この状態では転移はおこっても占有数の変化は生じない〉（同上。この状態で転移がおこるということが理解できない）。

C 強い電磁波を当てる



磁気共鳴は電磁波エネルギーを加えることによっておこる（同上「磁気共鳴」）。〈磁気共鳴時には、相隣るレベル間の占有数の差（つまり磁化の大きさ）に比例した電磁波の吸収がおこる〉（同上）。〈図Cのようになってしまえば、もはや吸収はおこらない（飽和という）〉。〈なお吸収と同時に磁化の分散現象も生ずる〉（同上）。（磁化の分散現象は、2の注(5)の電磁波の散乱のことか）。〈吸収強度は電磁波の強さにも比例する〉（同上）。〈磁気共鳴下において平衡に達しているときには、転移による占有数の均等化とAの熱平衡状態に戻ろうとする緩和現象とがつり合っている〉（同上）。転移による占有数の均等化という句から、転移とは占有する核が他のレベルに移ることを指すと理解することができる。

核占有数に差があるレベルが多数隣り合っているところに電磁波エネルギーを加えたとき、レベル間に一のレベルから他のレベルに核が移るのはなぜか。その答えを教える文献にまだ当らない。

転移の起因はそれぞれのレベルに電磁波が加えられることである。この転移の条件は電磁波の光子のエネルギーが分岐したレベルの適当なものの間のエネルギー差に等しいことである（同上「磁気共鳴」）。転移の原因と転移という結果の因果関係が私にはまだ不明である。

4　転移の表現

〈磁界H中に置かれた磁気双極子[1]は、双極子の方向を磁界の方向に向けようとする回転力を[2]受けるが、この原子は角運動量をもっているので、双極子の磁界に対する傾きの角を一定にしたままで傾いたこまの運動のように磁界の周りに首振り運動をする（歳差運動）。その周波数（2の注（1）、（2））はVに等しい。さらに小さな高周波磁界H_1をHに垂直に加えると、その周波数がVに等しいときのみ、この小さい磁界H_1の周りの首振り運動が重なり合って、双極子の磁界Hに対する傾きの角が大きく変わる（異なるm（mは、第二節——③のmか）へ転移することに対応。これが磁気共鳴の古典的説明である。〉（日本大百科全書「磁気共鳴」）。これが転移を観測する方法である（同上）。

首振り運動が行われている磁界Hにさらに小さな高周波磁界を前者の磁界H_1に垂直に加えると、もうひとつ首振り運動が起こる。前者の首振り運動の周波数と加えられた磁界の周波数が等しいときにのみ二つの首振り運動が重なる。すると、以前の磁界に対する傾きの角が大きく変わる。周波数が等しいことにより二つの首振り運動が重なるときは、前二者の首振り運動がもつ分岐したレベルのエネルギーの差と加えられた電磁波の光子のエネルギーとが等しいときに等しい前二者の間でエネルギーの転移がおこっているのであろう。この転移が首振り運動の重なりによって観察されるのであろう。エネルギーの転移が双極子の磁界に対する傾きの角の大変化として現われるというのであろうか。

（1）　磁気と磁気双極子

多くの素粒子は、その内部のようすが未知であるけれども、周囲に磁気的な双極子場をつくっているので、これを磁気双極子と考※えることができる（日本大百科全書「双極子」）。磁気双極子の原因には、荷電粒子の運動（＝電流）と素粒子の磁気双極子とがある。荷電粒子の運動が原因であるというのは、こういうことである。荷電粒子の運動は、すなわち電流であるところ、〈静止している荷電粒子は周囲の空間に電場をつくるが、動いている荷電粒子は電場と同時に磁場もつくることが知られている〉（「磁気双極子」）。素粒

子の磁気双極子が磁気双極子の原因であるというのは、素粒子が磁気双極子の性質をもっているということである（同上「磁気双極子」）。核に基づく磁性（第一節3）が原因であることになろう。

〈いずれの原因による磁気双極子でも、周囲の空間に、位置rで定まるポテンシャル$\varphi = m \cdot r/r^3$から導かれる磁場（双極子場）をつくる〉（同上「磁気双極子」）。（ポテンシャルとは、広辞林には、「力や流体の速度などの空間分布を導き出すためのスカラーの量。力が場所の関数として与えられるとき、その関数で表わされるもの。」とある。スカラーとは、広辞林には「方向をもたず、一つの数値だけで完全に表わせる量。長さ・時間、物体の重さなど。」とある）。

※　双極子という発想がある。それは大きさが等しく符合が反対の二つの単極^{+}q、^{-}qの――ある条件を満たす――組みである（日本大百科全書「双極子」）。双極子は周囲の空間に双極子場をつくる（同上）。プラスとマイナスの極をもつのは電極と磁極である。

一般に、電荷の分布が空間的にまたは時間的に一定の向きをもつ場合、その電荷分布は双極子場をつくる。空間的な向きの場合、双極子は電場であって、電荷分布を電気的双極子と考えることができる。時間的な向きの場合、すなわち電流のように電荷分布が動いている場合には双極子場は磁場であって、このような系を磁気双極子と考えることができる（同上「双極子」）。

素粒子の磁気双極子のモーメントは$h/2\pi$（hはプランク定数（第三節1の注（1））を単位とする不連続な大きさしかとることができない（同上「磁気双極子」）。磁気モーメントの大きさは、磁気モーメントがもつエネルギーの大きさのことではなかろうか。電子が原子くらいの大きさの領域に閉じ込められると特定のエネルギーの値しかとれなくなる（同上「エネルギー」）。この特定の価（＝エネルギー準位）は、電子などのミクロ粒子がもつ波動性により、その系に固有のとびとびの値（エネルギー固有値という）であることが多い（同上「エネルギー準位」）。このとびとびの値をどのように表すか。

（2）　回転力を受けることについて

素粒子の一つの属性として磁気双極子というものがあり、スピンとよばれる（日本大百科全書「磁気双極子」）。素粒子は、前述のように磁気をもつ。磁気がある磁場はN極とS極の二つの極をもつ。双極に相対するものは単極である。だが今日までのところ磁気単極の実在は認められていない（同上「磁気双極子」）。現実の磁気素粒子の原因には二つの場合がある。その原因の一つは、荷電粒子の運動、すなわち電流である。動いている荷電粒子は電場と同時に磁場もつくることが知られている（同上）。もう一つの原因は素粒子の磁気双極子である。つまり、素粒子はそれ自身磁気双極子であり、磁場をつくる（同上）。また、磁気双極子は外界から加えられた磁場と相互作用する（同上）。

つまり、磁気双極子が磁界中におかれると相互作用が起こる。磁気双極子はそれ自身磁界（A）をもつ。その磁界が他の磁界（B）

におかれると二つの磁界が競合する。この二つの磁界が相互に作用するのであろう。磁界（B）中に置かれた磁気双極子は、双極子の方向を磁界の方向に向けようとする回転力を受けるといわれる（同上「磁気共鳴」）。双極子の方向が磁界の方向に平行になるまで回転する（同上「磁場」）。

この回転は以下の回転であろう。孤立した磁石に磁場を加えると、そのN（正）極に働く力とS（負）極に働く力とは、大きさが等しくて方向が反対であるため、偶力を形成し、磁石S→Nの方向が磁場Hの方向に平行になるまで磁石を回転させる（「磁場」）。（水素原子内電子の運動は、その動径方向の運動と回転運動とに分けることができる（日本大百科全書「量子数」））。

これを双極子についていえば、双極子の方向とは双極子における磁界（A）の方向であろう。それはN極のさす向きと定められている（同上「磁石」）。この方向を他の磁界（B）の方向に向けようとする回転力により、磁気双極子は、磁界（B）の周りに首振り運動をする（同上「磁気共鳴」）。その運動は、傾いたこまの運動のような首振りで、双極子の磁界に対する傾きの角を一定にしたまま傾いたこまの運動のようなものである（同上）。この首振り運動は歳差運動とよばれている（「脳機能画像解析入門」一三二頁、日本大百科全書「回転運動」「歳差運動」）。

5　1の①にいう「共鳴的に」転移がおこることについて

1の①から⑤までの記述から「共鳴的に」の意味を以下のように推論することができよう。

磁気共鳴の共鳴の起因は電磁波を（分岐したレベルに）与えることである。前述（2）のように、電磁波はエネルギーや運動量を伝播し、電磁波が物質と出会うと、物質（原子から成る）は電磁波を吸収し、電磁波のエネルギーは物質の内部エネルギーに変換される。この吸収変換は、物質内部で分岐したレベルのエネルギー準位の差に電磁波エネルギーが等しいときに起こる（1の②⑤参照）。これが共鳴的といわれるのは、〈振動体が、固有振動数の等しい他の振動体に誘導されて、振動を起こす現象〉（日本大百科全書「共鳴」）と定義される共鳴に類するからであろう。

そうすると、この転移が「共鳴的に」といわれるのは、加えられた電磁波（周波数をもつ）エネルギーを媒介として、

一方のレベルの核（磁気をもち、磁気波は周波数をもつ）エネルギーと他方のレベルの核のエネルギーとが呼応して、核の数の移動をおこすことが共鳴現象になぞらえるということであろうか。この理解には自信がない。

第四節　磁気共鳴信号

1　以下のような記述がある。

①〈原子核を構成する核子（陽子および中性子）はスピンをもっている。水素原子核としてのスピン状態は、ばらばらの場合と、そろっている場合とがあるが、通常は同じエネルギー準位をもっている。これに外部磁場を存在させると、スピン状態のそろい方によってエネルギー準位の値が違うようになる。その結果、原子核はラヂオ波（電磁波の一種）を吸収して高いエネルギー状態になる。あるいは低いエネルギー状態になるときラヂオ波を放出することができるようになる。

静磁場中でラヂオ波をあて、全ての原子核のエネルギー状態をそろえるとスピンの状態もそろえられる。その後放置すると、原子核はラヂオ波を出しながら低いエネルギー準位（とスピン状態）に戻ってくる。この現象を緩和と呼ぶ。これらの信号を記録し、コンピューターによって処理する。医療用ＭＲＩでは特に、水素原子^{1}Hの信号を見る。これらの信号を距離に比例した勾配をかけた磁場中で取ることにより、^{1}Hの共鳴周波数が距離に比例するようにして、得られた信号の強度を白黒に変換してやる事で生体組織の画像を作り出す〉（フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia）』核磁気共鳴画像法）。

注a　エネルギー準位の値について

微視的（ミクロ）な粒子や粒子系がもつことができるエネルギーの値をエネルギー準位という。その粒子系に固有なとびとびの値（エネルギー固有値という）をとることが多い。とびとびとなるのは、ミクロ粒子のもつ波動性による（以上、日本大百科全書「エネルギー準位」）。原子は原子核とそれを取り巻く電子とから成り立っている。この場合の電子は決まったエネルギー（エネルギー準位）しかとることができない。原子が集って固体（あるいは液体）をつくると、原子のときのエネルギー準位は他の原子の影響を受けて分裂し、少しづつエネルギー値の異なる多数の準位の集合となる。固体（液体）が極端に小さな寸法でない限り、分裂した準位はきわめて小さなエネルギー差で分布し、連続的なエネルギー分布をもつとして取り扱うことが許される。これをエネルギー帯という（以上、同上「エネルギー帯」）。

注b　水素原子^{1}Hの信号について

プロトン^{1}H。――プロトン^{1}Hは、水を構成する元素である。^{1}Hは水以外の人体を構成する物質の中に含まれていることが多い。人間の体の三分の二は水である。だから、プロトン^{1}Hを画像化することは人体（の中身）を画像化することに外ならない（以上、フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia）』核磁気共鳴画像法より）。

② 「脳機能画像解析入門」一三三頁より抜粋する。〈地球上には地磁気が存在しているが、磁場中にある一個の水素原子は歳差運動することが知られている〉。〈水素原子は、陽子の周囲を一個の電子が回転している構造をしておりスピンともよばれる〉。〈水素原子そのものが小さな磁石と同じ性質をもっているので、一個の水素原子は電子が原子核を周回する面に垂直な方向の磁化ベクトルと考えることができる〉。〈水素原子に対し、スピンの歳差運動と同じ周波数で磁場を小刻みに振動させるRF（radio frequency）波を印加することでスピンにエネルギーを与えることができる。RF波の印加によりエネルギーが与えられた状態を励起状態とよぶ。励起されたスピンは共鳴して磁化ベクトルの方向が変化する。そのときの振動数を共鳴周波数とよび、その大きさは磁場の大きさと比例して大きい〉。〈RF波を印加された水素原子は、共鳴周波数と同じ速度で歳差運動しながら元の磁化ベクトルの状態に戻ろうとする。このとき

受信コイルを置くと電磁誘導により起電力が生じる。受信コイルで検出した微弱電流波形を保存したデータがMR信号である〉。

注　磁化ベクトルの方向が変化することについて。

この共通の等しい周波数が共鳴周波数とよばれ、この共鳴周波数の波動が共鳴現象をおこすのであろう。すなわち、電磁波エネルギーの振動が水素原子の（したがって人体に）振動をおこすのであろう。振動は水素原子にエネルギーを与えるものであろう。そうすると磁化ベクトルと考えられる水素原子の磁化ベクトルの方向が変化する。この変化は〈回転〉である（「入門」一三三頁）。そしてその回転はさらなる歳差運動であろう（「入門」一三三頁）。

元の磁化ベクトルの状態に戻るとは元の歳差運動だけになることであろう。

③　〈強い磁場の中では、体内の水素原子は決まった方向を軸に回転する。その状態で一定周波数の電磁波エネルギーを与えると、共鳴現象を起こす〉。そのときエネルギーが放出される（以上「脳と心」三五頁）。このエネルギーを信号にする（「脳と心」三五頁）。それはどういうことか。水の分子のなかにあるプロトン^{1}H（①の注b）信号が核磁気共鳴（NMR＝nuclear magnetic resonance）によって生じるといわれる（仙波純一「脳と生体統御」九八頁）。この信号を、X線コンピューター断層法（CTスキャン）の方法で画像化する（同上）。信号は、分子により共鳴周波数と強度を異にする（同上九九頁）。核磁気共鳴強度の異なるものが人体に分布しているのであろう。核磁気共鳴を〈人体に応用して、核磁気共鳴強度の空間分布を画像化したものを磁気共鳴画像（MRI）という〉。（仙波前掲九七頁）。

④　〈一定周波数の電磁場のもとでは、ある種の原子核は電磁波の軸のまわりに、独楽のようなスピン現象をひきおこす。これを核磁気共鳴（nuclear magnetic resonance, NMR）とよぶ。〉（仙波純一「脳と生体統御」九七頁）つまり、原

子核による磁気共鳴である。（日本大百科全書「核磁気共鳴」）。〔ＭＲＩはこれを人体に應用して、核磁気共鳴強度の空間分布を画像化したものである（仙波同上九七頁）。〕。ここでいうスピン現象は先行のスピン現象（後述）に後行のスピン現象が重なったことをいうらしい。

2　磁気共鳴装置は磁気共鳴信号を画像化する、磁気共鳴信号は微弱電流波形を保存したデータである（「脳機能画像解析入門」一三三―一三四頁）。微弱電流波形は受信コイルで検出する。受信コイルに電磁気誘導により起電力が生ずるからであろう（同上）。電磁気誘導は以下のような現象であろう。磁化ベクトルと考えられる水素原子が、それが置かれた磁場が電磁波（電磁波はエネルギーをもつ――第三節2の注（3））により小刻みに振動させられて（1の②）、電磁波を吸収して（1の①）エネルギーを与えられて（1の②①）、その磁化ベクトルの方向を変化し（1の②）、その後、振動の振動数（共鳴周波数とよぶ――1の②）と同じ歳差運動しながら（②）、電磁波を出しながら（1の①）、元の低いエネルギーの（1の①）、磁化ベクトルの状態に戻る（1の②）。この電磁波の吸収・放出が電磁気誘導であろう。このとき受信コイルに起電力が生じるのであろう。この起電力により生じた微弱電流波形を記録しコンピュータによって処理するのであろう。

ＭＲＩ装置により撮像される磁気共鳴信号は、吸収され放出される電磁波エネルギーを電磁波について信号としたものであると理解される。エネルギーは電磁波の吸収放出により高くなり低くなるものである。だからエネルギーを信号にするという場合の信号は電磁波の信号であろう。

医療用ＭＲＩでは特に水素原子^{1}Ｈの信号を見るといわれている。水の分子の中にあるプロトン^{1}Ｈの信号である。（信号は、分子により共鳴周波数と強度を異にする（仙波前掲九九頁））。

本章のまとめ

人体においては水分がその約七〇%で、脂肪がその約二〇%であり、水および脂肪の構成分子は水素原子核である（第一節3）。水素原子核は磁性をもつ（第一節3）。水素原子核は磁界が加えられると、磁場の中で、歳差運動をし（第三節1の③、④、⑤）、いくつかのレベルに分岐する（第二節1）。この状態にさらに歳差運動の周波数と同じ周波数の（第三節1の⑤、⑥）電磁波を加えて磁場を小刻みに振動させると、電磁波のエネルギーが、分岐したレベルの間のエネルギー差に等しいときに（第三節1の①）、電磁波エネルギーと水素原子（分岐したレベルの双方）が共鳴する（第三節1の⑥、第三節2の注5参照）。共鳴により、水素原子核はエネルギーを与えられて、さらなる歳差運動をおこし（第三節1の⑤）、分岐したレベルの間の核の数の差がゼロに向う（第三節5）。その後放置すると、水素原子核は電磁波を出しながら、低いエネルギー状態に戻ろうとする。ＦＭＲＩは、この電磁波の信号を記録し、コンピューター断層法によって処理して、分子により核磁気共鳴強度を異にするものが人体に分布しているその分布を画像化して生体組織の画像を作り出す（第四節1の①、③）。また、血流量の変化を画像化することができる（第二章3）。実際には、ＭＲＩなどの画像の上に、ＭＥＧ（第二章7）で得られた情報を重ねて示すことが多い（同上）。

おわりに

ヒトは五感の神経細胞が外界から刺激を受けてその刺激情報を脳神経細胞が処理して外界の物体や物質を認知する（第一章）。ヒトは社会的事実を経験や伝聞を通して認知する。物質を認知する神経細胞の働きと社会的事実を認知する神経細胞の働きは、本質的には同じであると推測される。

ヒトの身体の内部の状態や構造、その変化を、また、神経細胞の働きを画像化することはある程度できている(第二章)。社会的事実を刺激として受けてこれに社会的に反応する働きもある程度画像化することができる。画像にされるのは反応の起因である情動である。たとえば、経済行動の提案に拒否という反応をする起因が、不公平とか不快とかの情動であることが、脳の血流の変化の画像から知られる(第二章4のハの①)。またたとえば、あれかこれかの選択を迫る課題を与える社会的事実を認知し、これに対していずれかを選択するという反応する起因である論理的思考の優勢が脳の前部帯状回の活性化の画像から知られる(第一章4のハの⑥)。しかし、脳のどの部位が活性化したという事実から、その活性化の起因がなんであるかを特定することはできない。同じように、ある司法的判断をしていることをつまり、神経細胞が活動していることとどの部位で活動しているかを、画像化することはできようが、ある画像から、それがどんな司法的判断であるかを特定することはできないであろう。将来においてこれができるようになるのか、その手掛りをつかみたいものである。