

「脳はいかにして数学(物理学)を生み出すのか」 武田 暁 2019年6月2日 学士会館
講演の際に用いた power point の説明

1 図 2016年12月に大学生・高校生を対象に話した講演。その際に使用した power point の幾つかを今回使用した。

2 図 物質世界、数学の世界、心の世界は密接に関連している。物理法則、数学の論理体系は人が自然を眺めて見出したものか、あるいは人が作り出したものかとの論争があるが、この論争は不毛の論争で、いずれにしても心の中で物質世界の世界像、数学の世界の論理構造を再現しなければならないので、心の働きを知ることが重要である。

3 図 機能的 MRI という方法で画像化した私の脳の活性化部位。働いている脳部位には通常より多くの血流が流れることを利用した方法。数に関する色々な課題を行っているときの活性化部位は色づけして表示。1 から 10 までの数を繰り返し暗誦する単純な課題のときでも多くの脳部位が活性化。素数を暗誦する際の活性化部位も示した。この画像の空間分解能は 1cm 程度、時間分解能は悪く 1 秒程度。

4 図 数学・物理学では抽象的な概念の形成とその定量化が重要。抽象概念の一例として数を取上げる。神経細胞(ニューロン)レベルでの表現を調べるためにサルの脳に微小電極を挿入し、刺激に対するニューロンの応答を調べる。最近では多数の電極を束にして挿入できるので、100 個程度のニューロンの働きを同時測定できる。図の VIP 領域には数をコードする数ニューロンが多数存在。上中央の図に数 1~5 個の物体の集まりの視覚提示に選択的に強く応答する数ニューロンの刺激—応答曲線を示した。横軸は提示する物体の数、縦軸はニューロンの応答の強さを表し、応答の強さはニューロンがどのような頻度でパルス信号を出すか(発火頻度と呼ぶ)で計測する。個々のパルス信号の時間幅は 1~2 ミリ秒、振幅は 0.1 ボルト程度。数ニューロンは提示物体数が最適の数より少しずれてもある程度応答する。しかし多くの数ニューロンの応答の強さを統合すれば、サルは相当に良い精度で数を認知していることになる。

VIP 領域には数十万個の数ニューロンが存在するが、数 1 に選択的に強く応答するニューロンが最も多く、数 n が増加すると対応する数ニューロンの数は急激に減少する。それでも数 30 程度の大きな数に選択的に強く応答するニューロンの存在が確かめられている。上左の図には隣接する LIP 領域でのニューロンの応答特性を示した。この部位のニューロンには提示物体の数を増やすと発火頻度が単調に増加するものと、図示していないが単調に減少するものが混在している。このような応答特性の LIP ニューロンからの入力を総合して、VIP ニューロンの応答特性が生じると考えられている。

5 図 数 0 をコードするニューロンの発見(虫明, et. al)。VIP 領域の数ニューロンに 0 をコードするニューロンを発見。上図に示したようにサルの行う課題としてスクリーン上に 3 個の丸、次に 1 個の丸を提示し、1 個の丸からスタートして丸の数を変え 3 個にする

のが課題である。2 個のボタンがあり、一方を押すと丸が 1 つ増え、他方を押すと 1 つ減る。サルは学習すると課題を正しく行える。課題遂行中にサルは最初に提示された数 3 を記憶している必要があり、3 をコードする数ニューロンが継続的に活性化している。

別の課題として最初に丸がない画面を提示し、次に 2 個の丸のある画面を提示し、ボタンを操作して丸の数を 0 にする課題が図示してある。その間に継続的に発火するニューロンが見出されており、0 をコードする数ニューロンと考えられる。0 ニューロン数は数 1 をコードするニューロンよりも多数存在。0 ニューロンには 2 種類あり、図示したように 1~4 個の物体の提示に対してもある程度応答するニューロンのほかに、全く応答しない（ノイズレベルの応答は除く）ニューロンもあり、これらは数 0 をコードしているというよりは、何もないことを表現しているように見える。排他的 0 ニューロンと呼んでいる。

数 0 が最初に現れたのは 6 世紀のインドの文献で、それ以前は大きな数を表示するのが大変でした。0 ニューロンは 6 世紀の遥か以前からサルや人の脳内に存在していたと思われるので、心の中を覗くと新しい発見が行われることを示唆しているように思われる。図には人の脳の VIP 領域も示した。この領域の下に位置する隣接脳部位は角回と呼ばれる脳部位で人の脳で特に発達した部位であり、視覚・聴覚・触覚等の感覚情報の集まる部位で、数等の抽象的概念の形成・記憶中枢と考えられている。数に関する思考をするときにはこの部位が必ず活性化し、またこの部位が活性化すれば数の操作に関与する多くの脳部位が活性化する。

6 図 人が用いる多くの単語は抽象化された事物を表す。単語イヌやネコも特定のイヌ、ネコを指すのではなく抽象化・範疇化された動物を指している。色々な抽象的概念を区別して範疇化するのには数学・物理学の研究には欠かせない機能です。

サルの前頭前野のある領域に微小電極を挿入し、ニューロンレベルでの範疇化機能を調べたのが 6 図です。イヌとネコの混合画像を作成し、イヌ 100%, 90%, . . . , 10%, 0%, すなわちネコ 0%, 10%, . . . , 90%, 100% の 11 枚の画像を用意しサルに提示する。混合画像を見せられるとサルはイヌかネコかを判断し範疇化する。イヌ何パーセント、ネコ何パーセントというような中途半端な判定をしないのが範疇化の機能で、アナログ的情報をデジタル化するのが特徴である。

最初に混合画像を提示、1 秒の遅延時間をおいてサルにイヌかネコかを判定させる。画像提示に伴うニューロンの活性化の時間変化を図示してあるが、遅延時間中に発火頻度が増大するのは情報を検討して判断材料を集めているためである。遅延時間中の発火頻度はイヌ 100% から 60% の混合画像に対しては似たような時間変化を示し高頻度で発火していますが、イヌ 40% から 0% の画像に対しては活性化の程度が低い。発火頻度の差は相当シャープで、ニューロンレベルで範疇化が鋭く行われていることを示している。図にはイヌに範疇化する機能に主として関与するニューロンの活性化を示したが、このほかにネコへの範疇化に寄与するニューロンが存在し、ネコ 100% から 60% の画像に強く応答する。

判定の際にはイヌ 100%,あるいはネコ 100%の画像を提示し、サルは混合画像をイヌと判断したときにはイヌ 100%の画像提示に対してそれまで押し続けていたキーを離す、ネコと判断したときにはネコ 100%の画像提示に対してキーを離す行動を取る。多くのニューロンを調べたが、当該局所部位のニューロンの1/3程度の多数のニューロンがこのような範疇化に寄与している。

少し脱線しますが、森永さんは本当に多数の友人を持っていました。そうすると脳の適応性の結果として友人の範疇化が起こり、社会性の脳部位と呼ばれる脳の前頭前野の前部に友人の範疇化機能を持つニューロン群が形成されても可笑しくはありません。友人の範疇化の一つの単純な方法は、友人を善人と悪人に区別することです。友人の信頼度の絶対値には脳は敏感ではなく、相対的な信頼度の相違には非常に敏感で友人の範疇化が行われるものと思います。森永さんに突然善人から悪人に色分けされた友人が相当数居られることを承知していますが、彼が多数の友人を持ったことと、彼の脳の範疇化機能の鋭さによる当然の結果のような気がします。細胞レベルの活性化の相違で瞬時に善悪の色分けがなされるので、森永さん自身も友人を善人から悪人に転化した本当の理由は分かっていないような気もします。

7 図 脳には海馬と呼ばれる記憶を司る部位がある。この部位には場所細胞と呼ばれる場所をコードするニューロンが多数存在する。場所細胞の発見者は2014年にノーベル生理学賞を受賞しています。図にはネズミが左から右に走り移動する際の4つの場所細胞の発火の様子を示した。縦棒はニューロンの発火を示しており、個々のニューロンはネズミがある範囲の位置にあるときのみ活性化し自分の居場所をコードしている。人の脳の海馬にも勿論場所細胞が存在する。

8 図 上図にはネズミが2.5mの通路を5秒間で左から右に移動するとき、10つの場所細胞が順次発火する様子を示した。色のついた縦棒はニューロンの発火頻度が多くなる位置を示している。下図はこのネズミを別室に連れてゆき寝かせたとき、深睡眠中に上図と同一の10つの場所ニューロンの発火を調べた図である。このような図は数千枚撮れているが、何れも覚醒中の運動の記憶を想起している。深睡眠中には脳波に2~3 Hzの振幅の大きい低周波振動が見られるが、ときどき鋭波と呼ばれる100~200Hzの高周波振動が現れる。継続時間は0.1~0.3秒程度、2~3秒に1回の割りで間歇的に鋭波が現れる。この時間帯に脳が何かをしていると考え、鋭波中の場所細胞の活性化を調べたのが下図である。上図と同じような順序で場所細胞は活性化しており昼間の行動を想起しているように見えるが、時間スケールが非常に異なり、250ms程度の短時間に5秒間の行動の記憶を想起している。また昼間の行動中にネズミは右端に到着すると数分程度休憩するが、その間にも鋭波が間歇的に起こり、鋭波中では下図と同様に早回しで行動の記憶を想起している。鋭波中の記憶想起は意識には登らないが、記憶の固定化に大きく寄与しているものと思わ

れる。

9 図 脳活動には自分で何を考えているかを気がついている意識的活動と、自分で気がついていない無意識の活動がある。脳活動の際には神経伝達物質の生成、輸送、回収等の機能でエネルギーを主として消費するが、神経伝達物質の使われる量の測定から脳の消費エネルギーの 95%は無意識の脳の働きに使われ、僅か 5%が意識を伴う脳の働きに使われている。宇宙論の言葉を借りて無意識の脳機能に使われるエネルギーを脳の暗黒エネルギーと呼ぶ人もいる。いずれにしても自分で気がつかない脳の働きが人の思考に大きな影響を与えていることになる。

無意識な脳の働きには学習機能もある。人は寝ているとき、休息してぼんやりしているときにも無意識に絶えず記憶を想起しているが、これは記憶の固定化に役立つだけでなく、記憶内容の変化にも寄与している。記憶想起している脳部位には他の情報も入力するので、記憶内容はそれらの入力情報のある程度加味した内容に変化する。多くの場合に記憶内容は世間の常識に合うように、あるいはその人の思考のパターンに合うように変化する。言い換えれば記憶を想起する際に人は無意識に学習して記憶を変更し、自分なりに記憶内容の意味づけをしていることになる。

10 図 個々のニューロンの働きではなく、局所的な脳部位の働きを知るには脳波測定が重要である。脳内に微小電極を挿入し脳内の電位を測定したのが局所場電位である。この電位は近傍の数千から数万個のニューロンの活性化に伴う電位変化の総和である。色々な周波数帯の脳波が混在しており、脳の活性化状態は音域の異なる多数の楽器の奏でる管弦楽に類似している。調和の取れた美しい音楽と同様に、位相一振幅、位相一位相相関を保った異なる周波数帯の局所場振動電位の共存が理性的な思考には重要と思われる。

11 図 局所場電位の一例を図示した。フーリエ分解すると 1.5, 7, 40 Hz の振動電位が共存している。1.5Hz の波の谷の領域では 7Hz の波の振幅は大きく、また 7Hz の波の谷の領域では 40Hz の波の振幅が大きい。このような位相一振幅相関、あるいは図示していないが異なる周波数帯の振動の位相一位相相関等が理性的な思考の鍵を握っている。局所場電位はその部位のニューロン群の活性化し易さの変化を表しており、谷の領域では活性化し易く、山の領域では活性化し難い。

12 図 特に追加説明なし。

13 図。数理的思考、内省的思考の流れは複雑であるが、大体の流れの様子を示した。一方、外部入力処理の際の思考の流れはガンマー振動状態から始まり図示した思考の流れとは逆の道筋を通る。Default mode とは人がぼんやりと休息しているときに現れる脳の状態、機能的 MRI を用いて血流量の変化を測定すると広範囲の脳部位への血流量が時間的

に同期して増加し、10秒から1~2分の長期にわりその状態が維持される。血流量が増加する脳部位は過去の記憶の想起、未来に起こることを予想する等の際に活性化する脳部位と一致するので、記憶の断片を想起して思考の準備をしている状態と言われている。勿論、この状態での脳機能の多くは意識には登らない。

default 状態では個々のニューロンの発火頻度は小さいので、signal-noise 比は小さくノイズ入力の影響を受け易い。したがってノイズにより普通では起こりにくい神経回路が偶然に形成され新たな思考が生まれる可能性が大きい状態かもしれないので、この状態は創造性の原点と考える人も多い。このような機能はストカスチック resonance (確率共鳴) と呼ばれ、物質の相転移、流れのパターンの変化等の際に広く見られる現象で、脳の思考パターンの思わぬ変化にも寄与する可能性がある。一方で意識的に思考している状態ではノイズの影響は抑制されるので、異質の思考が生まれ難いと思われる。

14 図 default mode 状態での非常にゆっくりと時間変化する血流量変化の起因として、グリア細胞の1種であるアストロサイトの関与が論じられている。グリア細胞はニューロンの機能を支える細胞である。図示したようにアストロサイトの足の一端はニューロン間をつなぐシナプス部位に伸びており、そこで放出される神経伝達物質グルタミン酸の一部を取り込んで局所脳部位のニューロン群の活動を計測している。図には1つのシナプス部位しか示していないが、数十個のシナプス部位に足を伸ばしており、局所脳部位の活性化の程度を監視している。グルタミン酸を取り込むとCaイオンがアストロサイト内に流入し、diffusionにより別の末端のCaイオン濃度も増加する。その末端は微小血管を包んでおり、末端のCaイオン濃度がある程度大きくなると特殊な化学作用により血管を膨らませるので、当該局所脳部位への血流量が増加し default mode を維持する役を果たす。イオン濃度のdiffusionによる拡散は秒速20ナノメートル程度で非常に遅いので、イオン濃度の変化時間は default mode の時間スケールと一致している。Caイオン濃度は細胞内では細胞外の1万分の1程度の低さなので、Caイオンのアストロサイト内への流入は重要な結果を生むことになる。働いている脳部位への血流量の増加の主たる原因はアストロサイトの働きによると考えられており、脳の機能部位の画像化に貢献していることになる。

アインシュタインの脳は密かに保存されている。顕微鏡で調べた結果では彼の脳は一般人の脳と変りないが、アストロサイトの密度が大きいのが唯一の特徴であった。このことが彼の創造的思考に良い影響を与えたのかも知れない。

15 図 参考文献として私の著書4編をあげた。丸善から出版した本には今回の講演の詳しい内容が記載されている。南部さんのコメントは面白いので掲載した。20年ほど前に南部さんと当時の理研理事長の小田稔さんを誘って3人で理研でのサルの実験を見学したことがある。2時間ほどの長時間の実験をお二人とも興味深そうに見ておられたのを思い出す。物理学者には脳科学に興味を持つ人が多いように思われる。 終り。