

# 脳波と脳磁図

(著) ざっきい

## 1. 概要

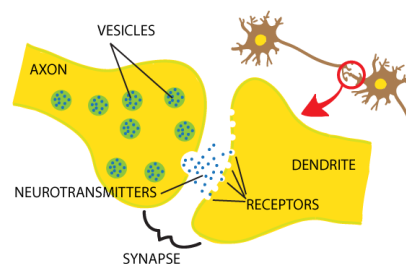
人間の脳活動を可視化することは、医師にとって極めて重要である。認知症やてんかん、精神疾患といった患者の脳機能を計測・解析することにより、これらの本質的な病態解明につながるからだ。しかし、脳活動の可視化は技術的に非常に難しい。研究対象が生体 (in vivo) であるため、脳の中に電極を差し込むなどの侵襲的な方法をとる訳にはいかないのである。このため、MRI や PET など、非侵襲的に脳信号を読み取ろうとする試みが多数行われている。このうち、電磁気学の知識が最もわかりやすく用いられている、脳波と脳磁図について説明したい。

なお本稿の内容は、「脳のイメージング (宮内・星・菅野・栗城/2016年共立出版)」を参考にして

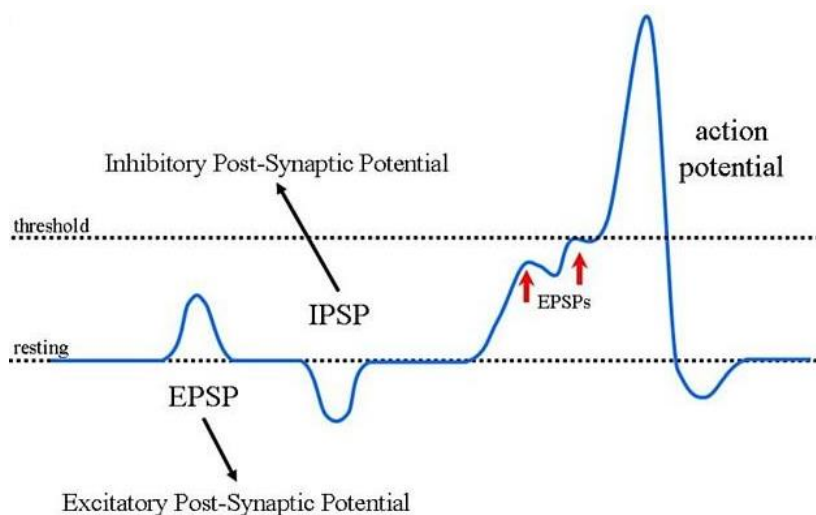
## 2. 脳波 (EEG)

人間の脳波を世界で初めて観測したのは、ドイツの精神科医ハンス・ベルガーである。彼は1924年、頭蓋骨が欠損した患者の脳の左半球の硬膜上に針電極を置くことで、脳の電気活動を可視化した。彼の成果は当初、懐疑的な目で見られていたが、ノーベル賞受賞者でもある英国の生理学者エイドリアンによる追試が成功したことで、広く世に知られるようになった。

そもそも、脳波とは何か。神経細胞の軸索を伝わってきた信号が、末端のシナプスと呼ばれる組織に達すると、ニューロン内のシナプス小胞から神経伝達物質が放出される (右図)。神経伝達物質が、次のニューロンの受容体に結合すると、イオンの透過性が変化することによって電位 (シナプス後電位) が発生する。シナプス後電位には、興奮性 (EPSP、細胞内電位を上げる。神経細胞は定常状態では細胞外より電位が低いため、これを脱分極という) と抑制性



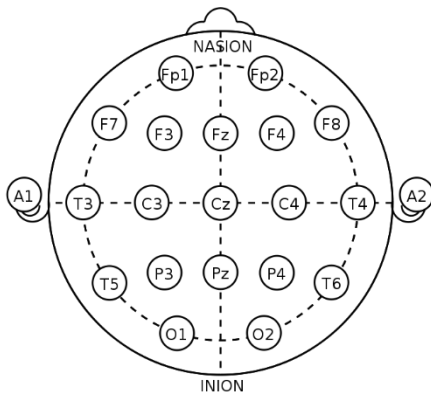
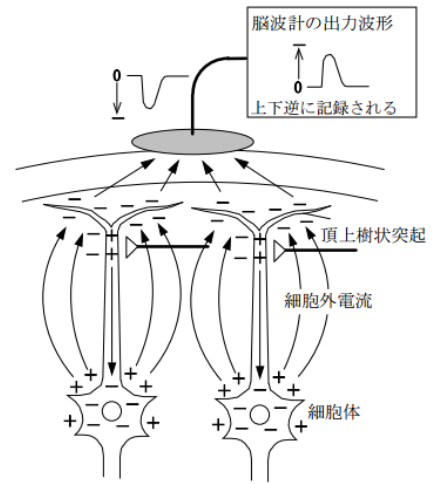
(IPSP、細胞内電位を下げる。過分極という) の二種類がある。一つのニューロンに接続する多くのニューロンの、EPSP と IPSP の加重値が、閾値と呼ばれる限界を超えれば、そのニューロンに信号が伝わり、活動電位 (action potential) として軸索を伝わっていく (左図)。



脳波として測定されるのは、EPSP と IPSP の加重電位である。活動電位については、持続時間が1ms と短いため、脳波としては記録されない (記録されたとしても、解析の過程で除かれる)。

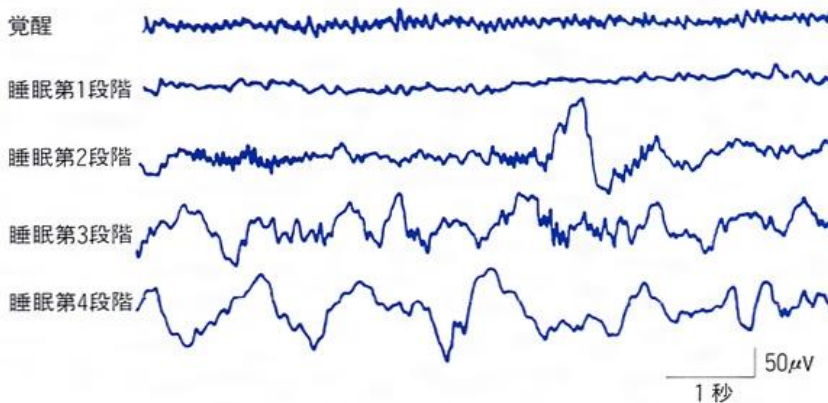
※私は現在脳波の解析をしているが、脳波を主成分分析などで1チャンネルにまとめた後、フーリエ変換によって取り出した、ある振動数以上の波形を取り除いている。

脳波計で正の出力をされる EPSP について、詳しく説明する。神経伝達物質の放出は  $\text{Ca}^{2+}$  の細胞への流入によって引き金をひかれ、受容体に結合した後は細胞内に  $\text{Na}^+$  が入り込む。すなわち、刺激受容直後のシナプス末端は正に帯電しており、ニューロン内に電流が流れている（細胞内電流）。これに伴って、逆の方向に細胞外電流が流れ、疑似的な回路を構成している（右図）。脳波が計測するのはこの細胞外電流で、大脳皮質にある神経細胞の一種である、錐体細胞の帯電を電氣的に読み取っている。一つの電極下には数百万のニューロンが含まれるため、脳波が読み取るデータは巨視的であるといえる。



脳波の計測は、脳に 21 個の電極を置くことで行う。電極の配置は、国際 10-20 法と呼ばれる方法で定められており（右図、nasion は鼻根部、inion は後頭結節）、耳たぶの 2 つを基準電極とした頭皮上の電位を測定する。

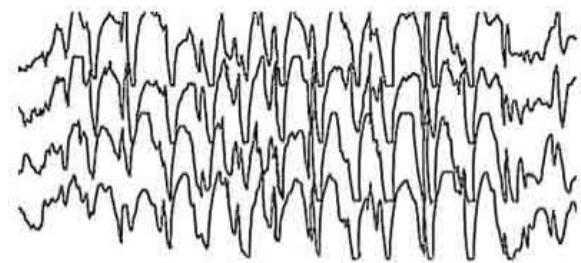
平常時の脳波は自発性脳波と呼ばれ、感覚刺激によって生まれた脳波を誘発性脳波という。自発性脳波に比べて、誘発性脳波は振幅が数十分の一しかなく、刺激と脳波の関係を調べる研究者はこれをそのまま見る事ができないため、自発性脳波を平坦化するプロセスが必要である。自発性脳波はその振動数によって、 $\delta$  波 ( $\sim 4\text{Hz}$ )、



$\theta$  波 ( $4\sim 8\text{Hz}$ )、 $\alpha$  波 ( $8\sim 13\text{Hz}$ )、 $\beta$  波 ( $13\sim 30\text{Hz}$ )、 $\gamma$  波 ( $30\text{Hz}\sim$ ) と分類される。脳波の種類を最もわかりやすく示したのが睡眠移行時の脳波である。覚醒時、あるいは睡眠に落ちる直前の状態で見られるのが  $\alpha$  波であり（覚醒時には  $\beta$  波も出ることがある）、入眠直後、浅いノンレム睡眠時には

周波数の低い  $\theta$  波に移行する。深いノンレム睡眠では、極めて周波数の低い  $\delta$  波が連続的に出現する（左図）。 $\gamma$  波領域に関しては、知覚や意識、学習に関連することが示唆されているが、定まった知見はない。

また、てんかん発作時の脳波は右のようであり、棘波（スパイク）や鋭波といった異常な波形が現れる。てんかんの診断には、脳波検査が必須である。



脳波は、計測装置が安価であり、また被験者に完全な安静を要求しない（ある程度の頭の動きが許される）ため、スポーツや日常生活などあらゆる行動の解析に有効である。一方で、頭皮や髄液など、大脳皮質を覆う部分は部位によって厚さが異なり、全てのチャンネルが同じ基準で脳活動を記録しているとはいえない。また、脳波には筋電や眼球運動などのノイズ（アーチファクト）が含まれており、耳たぶの基準電極にもこれらが入り込みうるため、電位差という計測基準が客観的でない可能性がある。さ

らにより本質的な問題として、複数のチャンネルから得られたデータから、正確な活動源や情報の因果関係を推定することは極めて難しい。このため厳密性を要する研究においては、脳波はほとんど使用されない。

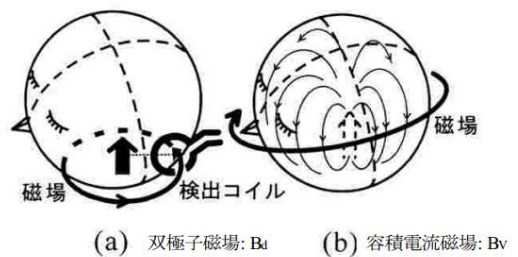
### 3. 脳磁図 (MEG)

脳波は、神経細胞の細胞外電流を測定したものと説明した。脳磁図は、細胞内電流を検知する方法である。信じられないような話だが、多数の細胞群が同時に EPSP を出すと、それらはまとまった線状電流となり、右ねじの法則に従って周囲に磁界が生まれる。磁界の大きさは  $10^{-12} \sim 10^{-15} \text{T}$  程度であり、地磁気 (約  $10^{-5} \text{T}$ ) の数億分の一という、微弱なものである。この磁束を素子によって電圧に変換し、出力することで脳活動を計測するのが脳磁図である。初めて使われたのは 1972 年のことであり、脳波のように多チャンネル化が進んだのはつい数十年前だ。

磁気を検出する装置は超伝導量子干渉素子 (SQUID) と呼ばれるもので、コイルが 4.2K で冷却された液体ヘリウム中で超伝導状態にある。磁束がこのコイルを突き抜けようとする時、その磁束を打ち消すように超伝導電流が流れるという仕組みである。しかし一般的なコイル (マグネトメータ、右図左) では外部からの磁場も同じように通過してしまうため、微弱な生体信号を見逃してしまいかねない。そのため、グラジオメータというコイルが使用される。グラジオメータには二種類あり、軸型 (右図中) では、上下方向に逆向きのコイルが連結されている。脳から出る信号は発信源からの距離が小さいため、上下のコイルで差が出るが、雑音では上下で差が出ない。従って、上下の差分をとることで、脳信号を推定できる。しかし、脳深部からの信号は、上下でそれほど差が生まれなため、相殺されてしまう危険性がある。平面型 (図右) も同じ雑音除去の仕組みを持つが、一般的な都会での磁場オーダーは  $10^{-7} \text{T}$  と非常にオーダーが大きく、MEG 実施時は厳重な磁気シールドが最低条件である。磁気シールド室は、透磁率の高いパーマロイ (Ni と Fe の合金) と、高い電気伝導性を持つアルミニウムによる、三層の入れ子構造になっている。リモコンやデータ収録装置は、シールド室の外に置かれる。

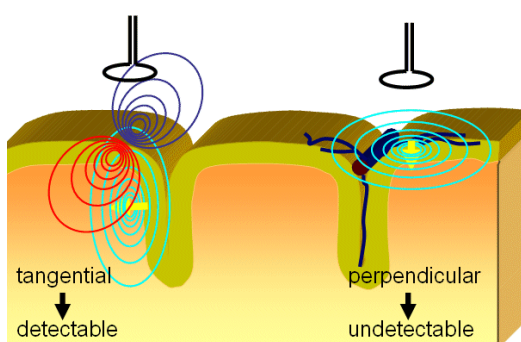
両端が正負に帯電している神経細胞において、流れると近似できる電流は「双極子電流 (ダイポール電流)」と呼ばれる。細胞内のダイポール電流は、頭球面の半径方向の成分と、球面に接する方向の成分に分けられる。半径方向の成分が作るダイポールは、終点から起点へと戻る疑似回路を形成する (容積電流)。

一次的なダイポール電流が作る磁場と、二次的な容積電流が作る磁場は打ち消されるため (上図)、この電流は頭蓋外に磁場を作らない。従って脳磁図では、脳の接線方向ベクトルを含む電流しか検知しない。



一次的なダイポール電流が作る磁場と、二次的な容積電流が作る磁場は打ち消されるため (上図)、この電流は頭蓋外に磁場を作らない。従って脳磁図では、脳の接線方向ベクトルを含む電流しか検知しない。

※半径方向の電流を検出しないのは、そもそも磁場がコイルと閉口なので突き抜けないためではないかと思う (左図) のだが、真相を突き止めることはできなかった。





頭皮上の電場（あるいは磁場）分布から、脳内で活動している神経細胞の概略を知ることは極めて難しい。例えば全てのダイポール電流が左右対称に存在したとすると、合計の電場は互いに打ち消しあってゼロになるが、ここから元の双極子の位置はわからない。このような「結果」から「原因」を推測する問題のことを「逆問題」というが、この場合、素直に解くことは不可能だ。そこで、脳の中に双極子が一つしかないと仮定して、電位分布に最も当てはまる双極子を近似する手法が使われる。近似した双極子の電位と、測定電位の差の二乗の和（残差平方和）の大きさから当てはまりの良さを評価する。神経活動が空間的に広がっている場合は、双極子を複数にして考えるが、三つ以上になると難解になる。

脳波が体組織の遮蔽を不均一に受けるのに対し、脳の透磁率は部位によらず一定であり、脳磁図の方が安定した基準を設けていると言える。

#### 4. 補遺：脳と血流

脳波と脳磁図は、脳神経の働きを直接見るものであるが、電流源の推定など不透明なプロセスが多い・計測する電流や磁場が極めて微弱であるなどの問題を抱えている。これらの問題を解決するために、近年では脳のイメージングは、MRIやPETといった機器に頼っている。これらの機器が、直接的な神経活動ではなく何を見ているのかについて説明する。

神経細胞が電氣的に活動する際に、生体内でエネルギーを管理する物質であるATPを用いる。生体でATPを産生する機構は解糖系と呼ばれ、これを機能させるには酸素とグルコースが必要である。しかしこれらは脳内に貯蔵されていないため、血液を介して神経細胞に提供することとなる。このように、神経活動に伴って血流が増大する過程のことを神経血管カップリング（NVC）という。

神経血管カップリングの分子的な仕組みは、完全には解明されていない。最も一般的な理論は、神経伝達物質の一つであるグルタミン酸がニューロンの受容体（イオンチャネル型）に結合すると、細胞内に $Ca^{2+}$ が流入し、これによって一酸化炭素合成酵素（nNOS）が活性化し、合成されたNOが細胞外に遊離して血管を拡張させるというものである。

しかし現在では、脳内に存在する別種の神経細胞であるアストロサイトが、血流調整に大きな意味を持つと報告されている。アストロサイトは脳機能の恒常性維持のためにのみ存在すると思われてきたが、神経伝達物質の受容体や、ニューロンへのエネルギー供給システムの存在が明らかになっている。解剖学的にも、アストロサイトの突起部分は、血管の外壁とほぼ完全に密着しているということだ。また、活性化された脳領域では、酸素量の増加に対して、血液の絶対量とグルコース・乳酸の増加量のはるかに多い。このことから、単純な好氣的代謝ではなく、TCAサイクルが組み込まれた特別な回路（Astrocyte-neuron lactate shuttle; ANLSH）が、アストロサイトを介して行われていると提案されている。ただし、詳細の多くは解明されていない。

#### 5. 画像出典

<https://socratic.org/questions/how-does-a-message-travel-across-the-gap-at-a-synapse>

<https://www.studyblue.com/notes/hh/psychology/491/epsp-ipsp/027831490471171995>

[http://www.kenn.co.jp/text/eeg\\_text.pdf](http://www.kenn.co.jp/text/eeg_text.pdf)

<http://guides.lib.kyushu-u.ac.jp/content.php?pid=686338&sid=5708879>

<https://kotobank.jp/image/dictionary/nipponica/media/81306024004963.jpg>

<http://smzhepi.sakura.ne.jp/semi/drop-sz.html>

<http://meg.aalip.jp/coil/index.html>

<https://nimg.neuroinf.jp/modules/nimgdocs/tutorials/dai3kaikougishiryou.pdf>