

脳波計測・解析の実用ハンドブック

～計測の留意点、解析データの取り扱い、最新応用事例～

SAMPLE

目 次

第1章 脳波の理解へ向けた脳と神経細胞の基礎 15 (青山 敦)

はじめに	15
1 脳と神経細胞の基本構造	15
1.1 脳の基本構造	15
1.2 神経細胞の基本構造	17
2 神経細胞における情報伝達	18
2.1 神経細胞内の情報伝達	18
2.1.1 静止膜電位	18
2.1.2 活動電位	19
2.2 神経細胞間の情報伝達	21
2.2.1 エクソサイトーシス	21
2.2.2 シナプス後電位	21
3 脳波と脳・神経細胞	22
3.1 脳波と脳波計	22
3.2 脳波の特徴	23
3.2.1 脳と神経細胞に起因する脳波の特徴	23
3.2.2 その他の脳波の特徴	25
3.3 脳波実験へ向けた感覚系の基礎	25
おわりに	26

第2章 脳波計測の原理と準備・実際の計測 28 (上田一貴)

はじめに	28
1 脳波計測の原理	28
1.1 脳波とは何か	29
1.1.1 背景脳波	29
1.1.2 事象関連電位	30
1.2 脳波計測の強み～他の計測ツールとの比較から～	30
2 脳波計測の準備	31
2.1 知りたい心理・行動プロセスに適した脳波計測手法	31

2.2 脳波計測に必要なもの	33
2.2.1 脳波計	33
2.2.2 電極	33
2.2.3 ソフトウェア	34
2.2.4 計測環境	35
3 実際の脳波計測の手順と留意点	36
3.1 脳波計測の手順	36
3.2 脳波計測の留意点	37
3.2.1 実験者が計測前、計測中、計測後にすべきこと	38
3.2.2 実験参加者に計測前、計測中、計測後にしてもらうこと	39
おわりに	40

第3章 脳波計測データの解析/取り扱い方と応用

第1節 脳波の解析方法	42
-------------------	----

(川崎真弘)

1 脳波解析の前処理	42
1.1 アーチファクトとは	42
1.2 ノイズの除去方法	42
1.2.1 電源ノイズ	42
1.2.2 眼球運動・まばたき	43
1.2.3 手足の動きや頭の動き	45
1.3 体積伝導の除去	45
2 時間窓の作成	45
2.1 脳波実験の種類	45
2.1.1 Block design	46
2.1.2 Event-related design	46
2.2 時間窓の作成	46
3 事象関連電位の解析	47
3.1 加算平均による事象関連電位の算出	47
3.2 事象関連電位の例	47
3.3 統計検定	49
4 時間-周波数解析：脳波リズム振幅解析	49
4.1 フーリエ変換	49
4.2 ウェーブレット変換	50
4.3 脳波リズム振幅の例	50

5	時間-周波数解析：脳波リズム同期解析	52
5.1	コヒーレント解析：2脳波電極間の脳波リズム振幅	52
5.2	位相同期解析：2脳波電極間の脳波リズム位相	52
5.3	脳波リズム位相の例	53

第2節 実環境における脳波データ計測とその応用

(渡部宏樹)

	はじめに	55
1	脳波データ計測の概要	55
1.1	脳波について	55
1.2	脳機能計測手法の比較	55
1.3	ウェアラブル脳波計の概要	56
2	事象関連電位の概要	57
2.1	事象関連電位	57
2.2	事象関連電位の測定方法	58
3	実環境における事象関連電位の計測の応用例	59
3.1	学習中の意欲の度合いの測定	59
3.2	日常環境下における抑うつ気分の予測	61
	おわりに	63

第3節 脳波に混入するノイズの種類と除去手法

(辰岡鉄郎)

	はじめに	65
1	脳波に混入するノイズの種類	65
1.1	環境由来のノイズ	65
1.2	生体由来のノイズ	67
1.3	ノイズの波形例	68
2	脳波データに用いられるノイズ検出、除去手法	69
2.1	ノイズ検出、除去手法の種類	69
2.1.1	独立成分分析 (Independent component analysis、ICA)	69
2.1.2	主成分分析 (Principal component analysis、PCA)	69
2.1.3	正準相関分析 (Canonical correlation analysis、CCA)	71
2.1.4	連続ウェーブレット変換 (Continuous wavelet transform、CWT)	71

2.1.5	離散ウェーブレット変換 (Discrete wavelet transform、DWT)	72
2.1.6	経験的モード分解 (Empirical mode decomposition、EMD)	72
2.1.7	Hampel フィルタ (Hampel filter)	72
2.1.8	適応フィルタ (Adaptive filter)	73
2.1.9	心電図除去アルゴリズム	73
2.2	その他の手法	73
2.2.1	ハイパス/ローパス/ノッチ/コムフィルタ (High pass/Low pass/Notch/Comb filter)	73
2.2.2	形態学的成分分析 (Morphological component analysis、MCA)	74
2.2.3	簡易的な指標	74
2.2.4	複数の手法の組み合わせ	74
2.2.5	機械学習のクラス分類アルゴリズムによるノイズ検出	74
3	デジタルフィルタ使用時の注意点	74
3.1	位相の遅れと進み	74
3.2	高次またはQ値が高いフィルタの波形歪み	75
3.3	ゼロフェーズフィルタ	77
3.4	過大なスパイクノイズに対する応答	77
3.5	FIR フィルタかIIR フィルタか	77
3.6	高次のIIR フィルタでのバイクアップ構成	78
3.7	FFT 後、周波数領域で不要な成分を除去してから 逆FFTすることの問題点	78

第4節 ウェアラブル脳波計で記録された脳波の特徴と可視化 81

(杉 剛直)

1	ウェアラブル脳波計に関する研究動向	81
2	ウェアラブル脳波計の医療分野への応用	82
3	ウェアラブル脳波計によるICU/ER脳波の特徴解析	83
	まとめ	87

第4章 AI・機械学習によるデータ活用

第1節 機械学習による脳波データ活用 90

(船井正太郎、笹井俊太郎)

はじめに	90
1 NeuroAIの勃興	90
2 エンジニアリングの目標達成のための機械学習	92
3 人間らしい行動を目指す機械学習	94
4 神経的な妥当性	95
おわりに	96

第2節 メタ学習による個人に適応した脳波からの感情予測 99

(中村 哲、田中宏季、宮本佳奈)

1 脳波データを用いた機械学習の課題：個人特性・少量データ	99
2 メタ学習の脳波への応用	100
3 メタ学習を利用した脳波からの感情予測	102
まとめ	103

第5章 脳波計測事例

第1節 製品の視覚的デザインに対する印象評価 105

(上田一貴)

はじめに	105
1 製品形態に対する好悪評価時の脳波計測	106
1.1 実験方法	106
1.1.1 実験参加者	106
1.1.2 刺激	106
1.1.3 装置	107
1.1.4 手続き	107
1.1.5 脳波測定	108
1.1.6 脳波分析	109
1.2 結果と考察	110
おわりに	111

第2節 感情状態の心理生理学的評価 113

(岩城達也)

はじめに	113
1 感情の考え方	113
2 感情を喚起する方法	115
3 感情と脳波	115
4 脳波マイクロステート	116
5 研究事例	117
5.1 主観評価	117
5.1.1 Affect grid	117
5.1.2 印象（感性）評価	118
5.1.3 主観的強度の時間変化	120
5.2 匂い刺激提示に伴う脳波活動	121
まとめ	123

第3節 飽きの発生に関する脳波を利用した 食の飽きやすさの認知科学的検討 126

(宮内英里)

1 研究1：飽きの発生に関する脳波の特定	126
1.1 方法	127
1.1.1 対象	127
1.1.2 課題	127
1.1.3 計測と解析	127
1.2 結果	128
1.3 飽きの発生に関する脳波の特徴とは	129
2 研究2：食の飽きに関する脳波の評価	129
2.1 方法	130
2.1.1 対象	130
2.1.2 課題	130
2.1.3 脳波計測と解析	131
2.2 結果	131
2.3 認知科学的飽きやすさの特徴とは	133

第4節「匂い」や「触知覚」の神経生理学的評価 135

(兒玉隆之)

はじめに	135
1 「嗅覚」研究の考え方	135
2 「匂い」の神経生理学的評価	136
2.1 匂いに対する脳内情報処理	136
2.2 匂いの脳波研究	138
2.3 匂いの脳波測定（自験例）	140
2.3.1 方法	141
2.3.2 結果および考察	141
2.4 2項のまとめ	144
3 「手の触知覚」研究の考え方	144
3.1 手の感覚運動障害がもたらす影響と問題	144
3.2 PSIに対するリハビリテーション	147
4 「触知覚」の神経生理学的評価	148
4.1 触知覚障害への介入における脳波測定（自験例）	148
4.1.1 方法（代償感覚刺激フィードバックトレーニング）	148
4.1.2 結果および考察	149
4.2 4項のまとめ	151

第6章 脳波を応用したブレインマシンインターフェース

第1節 ブレインコンピュータインターフェースの原理 157

(加納慎一郎)

はじめに	157
1 脳波を用いたBCIの特徴	158
1.1 脳活動の計測手法の比較とBCIへの適用性	158
1.2 脳波を用いたBCIの特徴	159
2 BCIの分類と実現方法	159
2.1 BCIの分類	159
2.2 運動想起に伴う脳活動を検出するBCI	160
2.3 誘発応答を検出するBCI	160
2.4 事象関連電位を検出するBCI	161
3 BCIの今後の課題	162
まとめ	163

第2節 脳波を応用した車の自動運転化への活用事例 166 (夏目季代久)

あらし	166
1 ブレインマシンインターフェース (BMI) の実施シナリオ	166
2 これまでの脳波を用いた自動運転への応用事例	166
2.1 海外での取り組み	166
2.2 自動車メーカーの取り組み事例	167
3 脳波を用いた車酔い研究	168
3.1 Virtual Reality (VR) を用いた車酔い誘発実験	168
3.2 VRを用いた車酔い脳波実験	170
3.3 実験で得られた ErrP 脳波の時間/周波数領域特徴	172
3.4 気分スコアと脳波パワーの相関	172
3.5 実験で誘導した気分悪化・車酔い・脳波	173
3.6 車酔いの前兆となる脳波について	174
4 自動運転における BMI 技術の今後	175
謝辞	175

第3節 脳波を利用したブレインマシンインターフェースの医療 応用：体内植込み型ブレインマシンインターフェース 177 (平田雅之)

1 体内植込み型ブレインマシンインターフェースと対象となる疾患	177
2 ALS	177
2.1 ALSとは	177
2.2 ALS患者が抱えるジレンマ	178
2.3 ALS患者の多くが埋め込みBMIの利用を希望している	178
3 体内植込みBMIのコア技術1：脳信号解読	179
3.1 神経細胞活動の解読	179
3.2 頭蓋内脳波の解読	180
3.3 AIを用いた脳信号の解読	181
3.4 ロボットの自律制御とBMIの随意制御の調和	182
3.5 発話内容の解読	183
3.6 書字内容の解読	183
4 体内植込みBMIのコア技術2：体内植込み装置	183
4.1 脳内針電極	184

4.2	Neuralink	184
4.3	血管内電極	184
4.4	頭蓋内脳表電極	185
5	実用化への過程	186
5.1	医療機器実用化までの過程	186
5.2	大阪大学におけるBMI開発の過程	186
5.3	革新的医療技術実用化のための特例制度の活用	186
5.4	企業への導出	187
6	将来展望	187
6.1	体内植込み装置のインパクト	187
6.2	対象疾患の拡大	187
6.3	BMIに接続される機器の多様性	188

第7章 ビジネス活用に向けたブレインテックの概要と活用事例 … 190

(西下 慧、間瀬英之)

1	ブレインテック概要	190
1.1	ブレインテックとは	190
1.2	ブレインテックの全体像	193
1.3	ビジネス活用に向けた課題・留意点	194
2	活用・研究事例	196
2.1	ブレインテックの活用が期待される領域	196
2.2	ブレイン・マシン・インターフェース	197
2.3	ニューロフィードバック	199
2.4	ニューロモジュレーション	199
2.5	デコーディング	200
3	今後の展望	201

【本書注】

本書では、「ブレインマシンインターフェース (BMI)」と「ブレインコンピュータインターフェース (BCI)」という用語を取り上げている。意味はほぼ同じと考えてよいが研究者の間で細かな解釈の違いがあり、本書で統一しての定義は難しい。便宜上、第6章の見出しには「ブレインマシンインターフェース」を使用しているが、各章節にて定義に若干の違いがあることに留意いただきたい。

(それぞれの解釈については「BMI」「BCI」を取り上げる章節を参照)

脳波計測・解析の実用ハンドブック

SAMPLE

第1章 脳波の理解へ向けた脳と神経細胞の基礎

慶應義塾大学
青山 敦

はじめに

脳波を理解するにあたって、その計測対象である脳と神経細胞（nerve cell）の基礎を知ることは重要である。神経細胞とは、脳を構成する細胞のうち、脳の情報処理を直接支える細胞であり、ニューロン（neuron）とも呼ばれる。人間の脳の場合、神経細胞の数は約860億個にも上り、このうち、最も発達した部位である大脳（cerebrum）には、左半球と右半球に約80億個ずつ、合わせて約160億個の神経細胞が存在する¹⁾。2023年の世界人口が約80億人であるから²⁾、2023年の世界人口とほぼ同数の神経細胞が小さな大脳半球に存在することになる。これらの神経細胞は、相互に連結し合って大規模なネットワークを形成し、人間らしい高度な精神機能を実現している。本章では、高度な精神機能の中核かつ脳波の主たる計測対象である大脳に焦点を当てながら、脳と神経細胞の基礎について解説する。

1 脳と神経細胞の基本構造

1.1 脳の基本構造

人間の脳は大脳、小脳（cerebellum）、脳幹（brainstem）に大別され、脳幹は間脳（interbrain）、中脳（midbrain）、橋（pons）、延髄（medulla oblongata）からなる（図1左）。中でも大脳は最も発達した部位であり、感覚・知覚・認知・行動といった人間に固有の機能を担っている。大脳の表層は、主に神経細胞の細胞体（soma）が集まった灰白質（gray matter）で構成され、大脳皮質（cerebral cortex）と呼ばれている（図1右）。大脳皮質は皺構造を形成しており、表出している部分を脳回（gyrus）、奥まっている部分を脳溝（sulcus）という。このような皺構造が存在するのは、頭部の限られた容積の中で表面積を可能な限り大きくしようとして発達してきたためだと考えられる。一方で大脳の深層の大部分は、主に神経線維である軸索（axon）が集まった白質（white matter）で構成され、大脳髄質（cerebral medulla）と呼ばれている。大脳の深層には、大脳基底核（basal ganglia）のような神経核（nucleus）と呼ばれる灰白質も部分的に存在する。おのおのの大脳半球には、前頭葉（frontal lobe）、頭頂葉（parietal lobe）、側頭葉（temporal lobe）、後頭葉（occipital lobe）の4つの領域が存在する（図2）。また、外側溝の奥には、島葉（insular lobe）あるいは単に島（insula）と呼ばれ

第1章 脳波の理解へ向けた脳と神経細胞の基礎

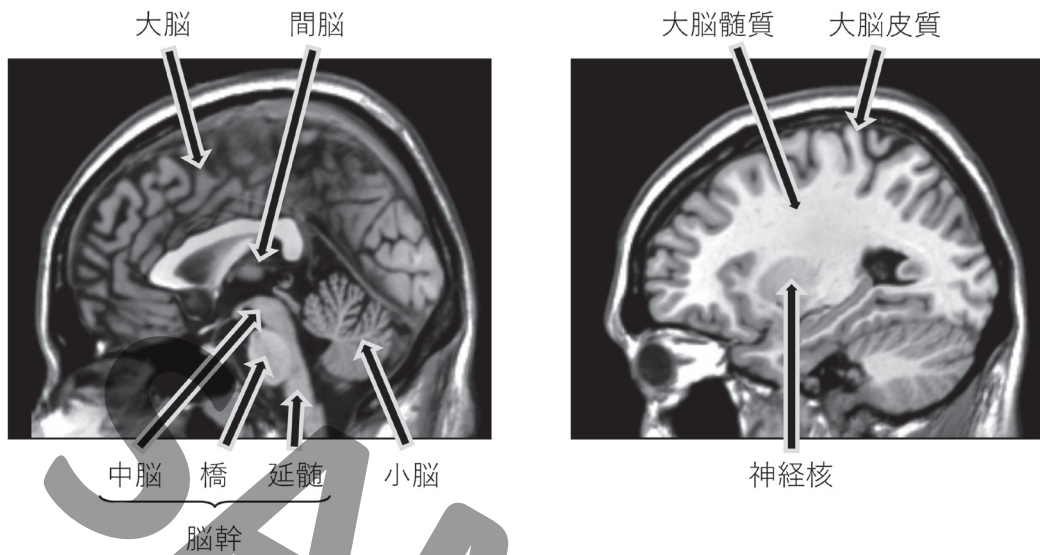


図1 脳の基本構成

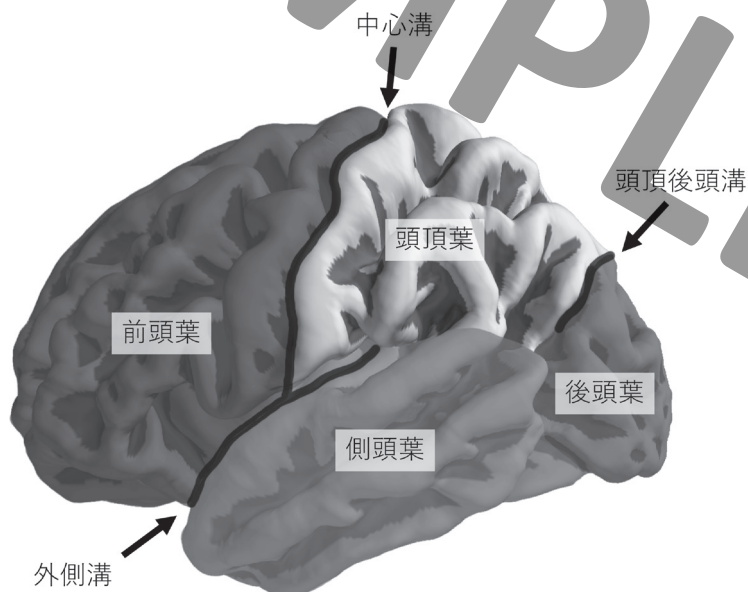


図2 大腦の外表構造

る領域も存在する。前頭葉と側頭葉は外側溝（lateral sulcus）、前頭葉と頭頂葉は中心溝（central sulcus）、頭頂葉と後頭葉は頭頂後頭溝（parieto-occipital sulcus）で隔てられている。

1.2 神経細胞の基本構造

神経細胞は、細胞体、樹状突起（dendrite）、軸索から構成されている（図3）。樹状突起は細胞体から木の枝のように伸びた部分、軸索は細胞体から長く伸びた部分であり、軸索には鞘状のミエリン鞘（myelin sheath）が数珠のように断続的に巻き付いている。軸索の先端である軸索終末（axon terminal）は、別の神経細胞の樹状突起や細胞体に連結し、シナプス（synapse）を形成している。ただし、両者は物理的に接触しておらず、約20 nmのわずかな隙間であるシナプス間隙（synaptic cleft）を介して結合している。シナプスにおいて、軸索終末側の細胞をシナプス前細胞（presynaptic cell）、樹状突起・細胞体側の細胞をシナプス後細胞（postsynaptic cell）と呼ぶ。

神経細胞内には、細胞のエネルギーであるATP（adenosine triphosphate、アデノ

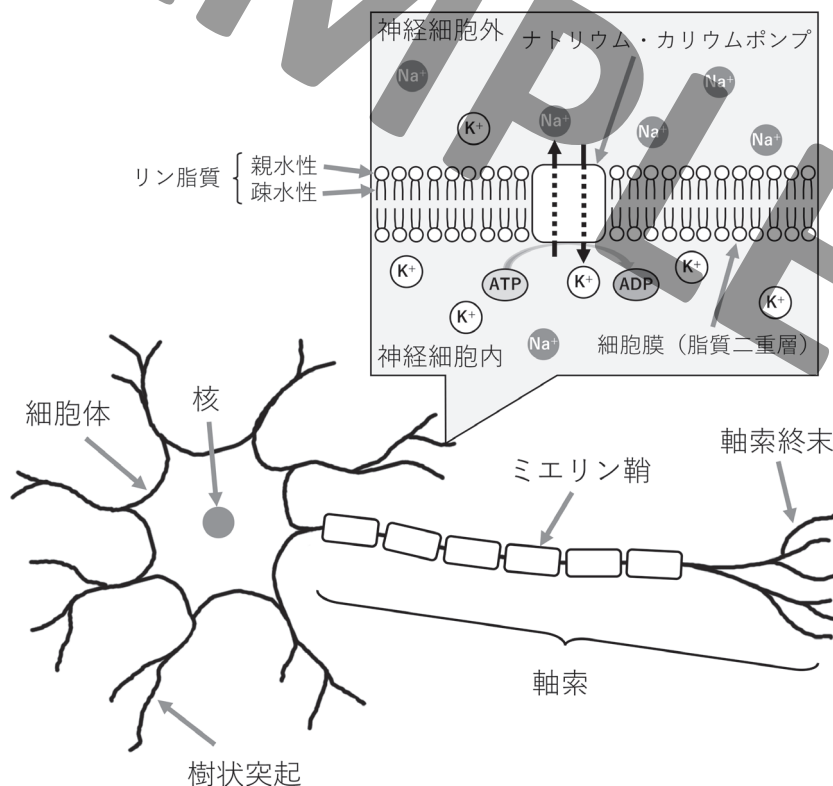


図3 神経細胞と細胞膜の基本構造

第1章 脳波の理解へ向けた脳と神経細胞の基礎

シン三リン酸)を生成するミトコンドリア (mitochondrion)、タンパク質を合成するリボソーム (ribosome)、そして核 (nucleus) などの細胞小器官 (organelle) が存在し、神経細胞は細胞膜 (cell membrane) で覆われている。細胞膜は、親水性と疎水性の部分をもつリン脂質 (phospholipid) によって構成され、リン脂質同士の疎水性部分が向き合い、親水性部分が神経細胞内外へ向いた脂質二重層 (lipid bilayer) を形成している (図3吹き出し)。リン脂質同士は化学的に結合していないため、細胞膜の可動性は高く、イオンチャネル (ion channel) やイオンポンプ (ion pump) といったタンパク質が脂質二重層を貫通して細胞膜に入り込んでいる。イオンチャネルとは、特定のイオンのみを選択的に透過させる筒状の構造をもったタンパク質であり、カリウムイオン (K^+) を透過させるカリウムチャネル (potassium channel)、ナトリウムイオン (Na^+) を透過させるナトリウムチャネル (sodium channel) などがある。イオンポンプもイオンチャネルと同様にイオンを選択的に通すが、イオンチャネルとは異なり、ATPを使用した能動輸送 (active transport) を行っている。例えば、ナトリウム・カリウムポンプ (sodium-potassium pump) では、神経細胞内にカリウムイオンを汲み入れ、神経細胞外へナトリウムイオンを汲み出す。能動輸送でATPを使用すると、ATPはADP (adenosine diphosphate、アデノシン二リン酸) に変化するが、ミトコンドリアにおいてADPはATPに戻る。

2 神経細胞における情報伝達

2.1 神経細胞内の情報伝達

2.1.1 静止膜電位

入力がない状態の神経細胞において、神経細胞の外側を基準として内側の電位を計測すると、約 -70 mV の値を得る。これを静止膜電位 (resting membrane potential) と呼ぶ。静止膜電位は次のようなメカニズムで生じる。まず、図4のようにカリウムイオンのみに注目すると、神経細胞の細胞膜近傍では、ナトリウム・カリウムポンプのはたらきによって、内側のカリウムイオン濃度が外側のカリウムイオン濃度に比べて約20倍高い状態になっており、内側から外側へ向けて濃度勾配 (concentration gradient) が存在する。一方で、細胞膜にはカリウムチャネルが多数存在するため、カリウムチャネルを通して正の電荷をもったカリウムイオンが流出し、外側から内側へ向けて電位勾配 (potential gradient) が生じる。やがて、電位勾配は濃度勾配と釣り合い、カリウムイオンの流出は止まる。このとき、神経細胞の外側に対する内側の電位は約 -80 mV となっており、この値をカリウムイオンの平衡電位 (equilibrium potential) という。次に、ナトリウムイオンのみに注目すると、神経細胞の細胞膜近傍では、ナトリウム・カリウムポンプのはたらきによって、外側のナトリウムイオン濃度が内側のナ