



脳波の伝搬と他の脳に与える作用（1つの共鳴現象） [1]

Brain Waves Propagation and Action on the Other Brain (A Resonance Phenomenon) [1]

近藤 和夫 (Kazuo Kondo)

Abstract: A possibility of propagated brain waves to act on the other brain and cause a resonance phenomenon is shown by an electric dipole model in this essay.

Keywords: 脳波 (brain waves)、電気双極子モデル (electric dipole model)、共鳴現象 (resonance phenomenon)

1. はじめに

ある日、不思議な体験をした。

久しぶりに同窓会で会った友人を駅まで送って行った時のことである。

大きな駅の広いコンコースで、友人はエスカレーターに乗ってプラットフォームのある階へ上がっていき、私は別れを惜しみながら静かに彼女を見送っていた。

時刻は夜9時を過ぎており、周りにはまだ多くの人がいたけれども、昼間のような喧騒はほとんどなかった。

もう少しで上の階に着くというときに友人の前にいた若い女性が不意に何かに気づいて振り返った。

そこでようやく友人も振り返って私に気づき、再び別れの挨拶をすることができた。

そのとき友人と私との距離は10~15mくらいあっただろうか。

その後、友人の前にいた若い女性がどうして気づいたのかということが気になった。

もしかして、私が発した脳波が彼女の脳に届いて何かの作用を及ぼしたのだろうか？

しかし、これはいわゆる「虫の知らせ」とは違うものだ。

虫の知らせは、遠く離れた人の災難や凶事を事前に察知するというもので、人間の危険予知や思いやりという想像力によるものだろう。

本稿は、脳神経細胞の「電気双極子モデル」に基づいて、電磁波である脳波の伝搬と他の脳に与える作用について科学的に考察することを目的にしている。

紙面の都合上2回に分けて、第1回は、脳波の起源と電気双極子モデルについて説明し、第2回は、脳波の伝搬と他の脳に与える作用（1つの共鳴現象）について述べる。

2. 脳波の起源

脳波は、脳神経細胞（ニューロン）の生化学的・電気的活動（電気信号の発生と伝達）によって生じる電位変動を反映したものであり、脳の活動状態（睡眠、瞑想、安静、思考、計算などの意識レベル）を表すと言われている。¹⁾

脳波の起源は、次のように考えられている。

外界からの物理化学的刺激（光、音、熱など）や身体内部（内臓など）からの刺激により感覚受容器で発生した電氣的インパルスは、感覚神経を上行し、脊髄、脳幹（延髄、橋、中脳）、間脳（視床、視床下部）を經由して、大脳皮質（前頭葉、頭頂葉、側頭葉、後頭葉、辺縁葉）に達する。²⁾³⁾

神経細胞は、脳幹から大脳皮質に至る過程で、多くの側枝を出して興奮性・抑制性のシナプス結合を行い、その結果発生した周期 1～10 ms の律動性振動（電氣的パルス）によって大脳皮質の覚醒レベルを調節する。

これを上行性覚醒系といい、脳幹（脚橋被蓋核）から視床を經由する経路や脳幹（青班核、縫線核）から視床下部を經由する経路、さらに脳幹（青班核、結合腕傍核）から前脳基底部を經由する経路などが報告されている。³⁾

大脳皮質には、興奮性の錐体細胞とそれを抑制的に制御する非錐体細胞などの神経細胞が数多く存在して、人間が生きていく上で必要な高次の脳機能を実現している。

とくに大脳皮質第5層（神経節細胞層）にある錐体細胞は、円錐形の細胞体から先端樹状突起を表層近くまで伸ばして、他の神経細胞から興奮性・抑制性の信号を受けるとともに、軸索を長く伸ばして、皮質内（同側領野間、左右半球間）および皮質下（大脳基底核、視床、脳幹、脊髄など）に興奮性信号を投射するので、脳波の発生に大きく寄与していると考えられている。⁴⁾⁵⁾⁶⁾（図1参照）

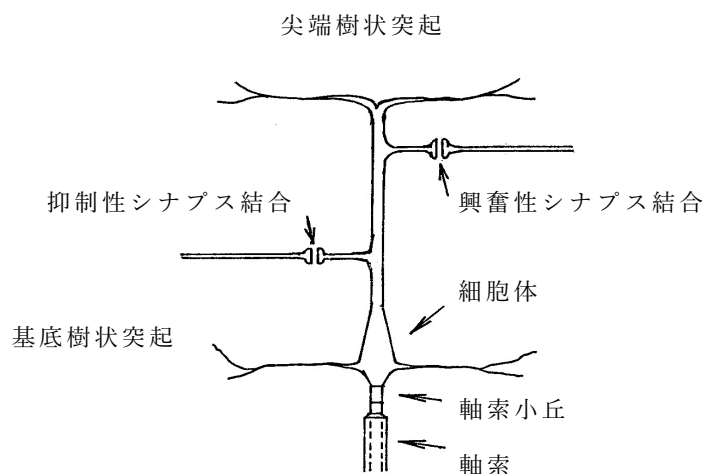


図1：脳神経細胞（錐体細胞）の模式図

読者からの投稿

錐体細胞の生化学的・電氣的活動によって、樹状突起のシナプス結合が興奮性信号を受けると、興奮性シナプス後電位（EPSP: Excitatory Post-Synaptic Potential）を発生し、抑制性信号を受けると、抑制性シナプス後電位（IPSP: Inhibitory Post-Synaptic Potential）を発生する。

シナプス後電位（PSP = EPSP - IPSP）は細胞体の方向に伝導し、軸索小丘で統合されて、それが閾値に達すると興奮性信号が投射先の神経細胞に出力される。

このような多数の脳神経細胞（錐体細胞）が同期して生じるシナプス後電位（PSP）の総和の時間変動が、頭外で観測される脳波の起源であると説明されている。^{7) 8) 9)}

3. 脳神経細胞の電気双極子モデル

(1) 電気双極子モデル

脳神経細胞が平衡状態にあるとき、細胞膜上に数多く存在している $\text{Na}^+\text{-K}^+$ ATPase（Adenosine Tri-Phosphatase）ポンプ（これは3個の Na^+ イオンを細胞外に排出して、2個の K^+ イオンを細胞内に取り込む働きをする）によって、 K^+ イオンは細胞内に多く細胞外に少ない、 Na^+ イオンは細胞外に多く細胞内に少ない状態に保たれている。

細胞外の電位に対する細胞内の電位を膜電位といい、平衡状態の膜電位（平衡電位）は、細胞内外のイオン濃度勾配からネルンストの式 [脚注1] によって計算されて、 K^+ イオンが約-90 mV、 Na^+ イオンが約+45 mVであることが示されている。¹¹⁾

$\text{Na}^+\text{-K}^+$ ATPase ポンプが細胞内外のイオン濃度勾配を維持するのに対して、膜電位の急速な変化を支配しているのは K^+ 漏洩チャネルと電位依存性 Na^+ チャネルである。

脳神経細胞が静止している状態では、細胞膜上にある K^+ 漏洩チャネルは開いているが、電位依存性 Na^+ チャネルは閉じている。

そのため細胞膜間を移動するのは主に K^+ イオンとなり、静止膜電位は K^+ イオンの平衡電位に近い値（約-70 mV）に保たれている。これを細胞が分極しているという。¹¹⁾

脳神経細胞の樹状突起シナプスがグルタミン酸などによる興奮性信号を受けると、電位依存性 Na^+ チャネルが開いて、 Na^+ イオンの細胞内外の濃度勾配（細胞外が高濃度）と電氣的勾配（細胞内がマイナス）により、細胞内に Na^+ イオンが流入し、シナプス後細胞の膜電位は瞬時にプラスに変化して、活動電位インパルスが発生する。

これをシナプス後細胞が脱分極する（または発火する）といい、このとき発生する活動電位が興奮性シナプス後電位（EPSP）である。

[脚注1：電気生理学におけるネルンストの式（Nernst equation）]

細胞内外のイオン X の濃度を $[X]_i$ 、 $[X]_o$ とすると、体温（37°C）における Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- イオンの平衡電位は $E = 61.5 \log_{10} ([X]_o / [X]_i)$ [mV] によって与えられる。¹⁰⁾

膜電位が+30 mV 程度になると、電位依存性 Na^+ チャネルは閉じて Na^+ イオンの流入が止まり、その前後に電位依存性 K^+ チャネルが開いて K^+ イオンが流出することによって、静止状態に戻ると説明されている。¹¹⁾

脳神経細胞の樹状突起シナプスが GABA (Gamma Amino Butyric Acid) などによる抑制性信号を受けると、電位依存性 Cl^- チャネルが開いて細胞外から細胞内に Cl^- イオンが流入し、シナプス後細胞の膜電位は静止膜電位よりさらにマイナスとなる。これを過分極といい、このとき発生する活動電位が抑制性シナプス後電位 (IPSP) である。¹¹⁾

さて、興奮性信号によって細胞内に流入した Na^+ イオンは、クーロン力によって細胞内のマイナスイオン (タンパク質高分子など) を引きつけるので、その周囲は膜電位がプラスとなって脱分極し、多くの電位依存性 Na^+ チャネルが開く。

プラス電位 (活動電位) の波は、このような周囲の脱分極と電位依存性 Na^+ チャネルの開きによる局所的な電位変化 (活動電位の再生) を繰り返しながら、樹状突起シナプス後細胞から細胞体の方向に伝搬する (一度開いた Na^+ チャネルはしばらく不活性状態となるため、活動電位の波は一方向に伝搬する) と説明されている。¹¹⁾

細胞内を細胞体の方向に流れるローカルなイオン電流 (主に EPSP による電流) と細胞外を逆方向に流れるイオン電流に着目して「電流双極子」と名付け、多数の脳神経細胞 (錐体細胞) の活動を1つの「等価電流双極子 (Equivalent Current Dipole)」としてモデル化して、細胞外電流が脳波信号を伝達すると説明されている。^{8) 9) 12) 13)} (図2参照)

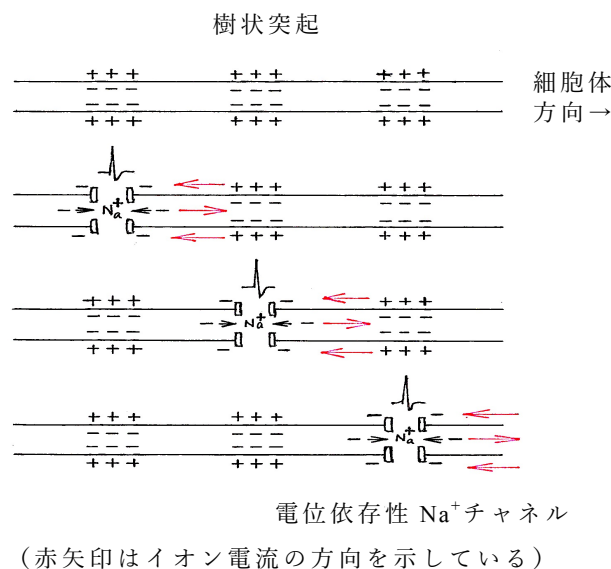


図2：電流双極子モデル

読者からの投稿

ここで少し見方を変えて、錐体細胞内の電荷分布に着目すると、樹状突起の任意の位置において、静止状態ではマイナス電荷の状態にあるものが、 Na^+ イオンの流入によって部分的にプラス電荷に置き替わり、その後、再びマイナス電荷の状態に戻る。

この局所的な電荷分布の変動は、興奮性信号に同期して樹状突起シナプス後細胞から細胞体への伝搬を繰り返す。（流入した Na^+ イオンが細胞内を長く移動する必要はない）

調和がとれた多数の錐体細胞内の電荷分布の動きを全体として見れば、興奮性信号によって細胞内に流入した Na^+ イオンのプラス電荷集合体と静止状態のマイナス電荷集合体があって、興奮性信号に同期して、プラス電荷集合体の位置が樹状突起シナプス後細胞から細胞体の方向へ移動し、プラス電荷集合体とマイナス電荷集合体の位置が周期的に反転する1つの仮想的な「電気双極子」と考えることができる。（図3参照）

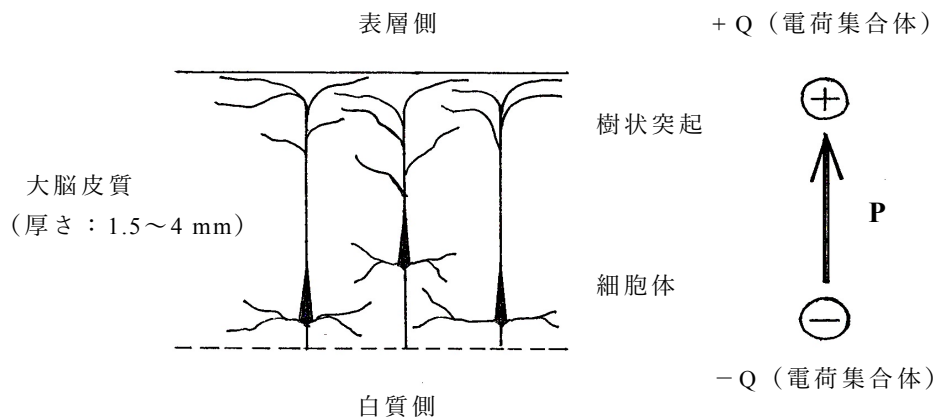


図3：電気双極子モデル

電磁場理論によれば、狭い領域の中で電荷分布が時間的に変動すると電磁波が放射されるので、電気双極子を形成する電荷集合体の時間変動が脳波を発生させると考えられる。

（電気双極子放射）

また、電磁波は「重ね合わせの原理」が成り立つので、パルス波を含む任意の脳波は種々の周波数の三角関数の和（フーリエ級数）によって近似できる。〔脚注2〕

本稿では、上記の電荷集合体によって形成される電気双極子モーメント \mathbf{P} の時間変動をフーリエ級数の基底関数 $\mathbf{P}(t) = \mathbf{P} \cos(\omega t)$ を用いて表すことにして考察を進める。

〔脚注2：フーリエ級数（Fourier series）〕

Fourier は、任意の関数は三角関数の無限級数で表すことができることを発見した。¹⁴⁾

関数 $h(t)$ の周期 T 、基本角周波数 $\omega (= 2\pi / T)$ とすると、関数 $h(t)$ のフーリエ級数は、余弦関数と正弦関数の和によって、次のように表すことができる。

$$h(t) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (n = 1, 2, 3 \cdot \cdot \cdot)$$

(2) 電気双極子の脳内分布

脳波は、周波数 $f = 1 \sim 70$ Hz、周期 $T = 15 \text{ ms} \sim 1 \text{ s}$ 、波長 $\lambda = 4 \times 10^6 \sim 3 \times 10^8 \text{ m}$ の電磁波である。 $(fT = 1, c = f\lambda, c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s})$

脳波の周波数（基礎律動）は、脳の意識レベルに応じて変化し、 δ 波（1～3 Hz）、 θ 波（4～7 Hz）、 α 波（8～13 Hz）、 β 波（14～30 Hz）、 γ 波（30～70 Hz）などに分類されている。¹⁾⁹⁾（図4参照）[脚注3]

脳の活動は、その意識レベルに応じて、特定の部位にある神経細胞群が担当していると考えられている。¹⁾⁹⁾

例えば、 δ 波（睡眠）や θ 波（瞑想）は頭頂部と側頭部優位、 α 波（閉眼・覚醒、安静）は後頭部優位、 β 波（開眼・覚醒、思考・計算）は前頭部優位に出現する。

大脳皮質の活動が高まると、後頭部優位の α 波（基準波）が抑制されて、前頭部に β 波（速波）が出現する。

従って、脳の活動状態によって、「電気双極子」の位置とベクトルの向き、電氣的振動の周波数と振幅は変化すると考えられる。（図5参照）

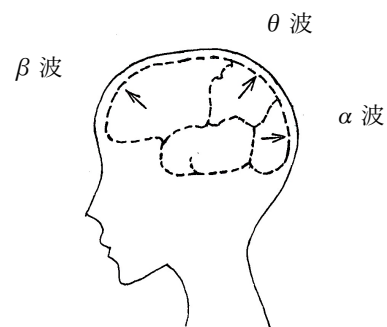
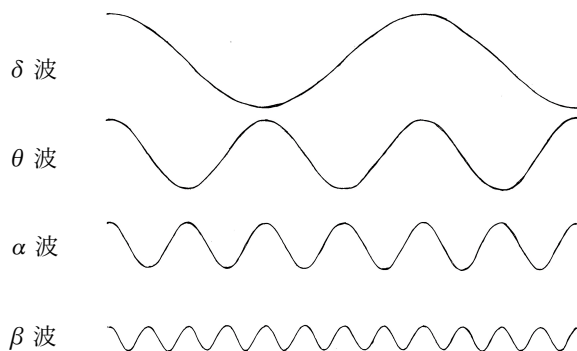


図4：電気双極子モデルによる脳波の模式図

図5：電気双極子ベクトルの脳内分布

[脚注3：シューマン共振波 (Schumann resonance)]

地球の電離層（バン・アレン帯）のプラズマ振動によって発生する電磁波（定在波）をシューマン共振波という。

その共振周波数は、7.83 Hz（一次）、14.1 Hz（二次）、20.3 Hz（三次）である。¹⁵⁾

瞑想時の脳波（ θ 波～7.5 Hz）とシューマン共振波（7.83 Hz）が同期すると、ヒーリング効果が得られると言われている。

読者からの投稿

(3) 電気双極子の電磁スカラー・ポテンシャル（電位）

ある時点における錐体細胞群の電気双極子 \mathbf{P} の始点（細胞体群と樹状突起の興奮性シナプス後細胞群との仮想的な中点におけるマイナス電荷集合体）を原点 $(0, 0, 0)$ とし、終点（樹状突起の興奮性シナプス後細胞群におけるプラス電荷集合体）の位置ベクトルを $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$ とする。電気双極子 \mathbf{P} の始点と終点の距離を d とする。

（ここでは任意の直交座標系を採用している）

電気双極子モーメント \mathbf{P} の時間変動を角周波数 ω の余弦関数（フーリエ級数の $n = 1$ の項）で表すと次のようになる。 δ は初期位相、 Q は電気双極子 \mathbf{P} の電荷量である。

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P} \cos(\omega t + \delta) \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= (P_x, P_y, P_z) \\ P_j(t) &= P_j \cos(\omega t + \delta) \quad (j = x, y, z) \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2} = Q \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} = Q d \quad (3-3)$$

$$d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad (3-4)$$

頭蓋内の電気双極子 \mathbf{P} の始点（原点）から距離 r 離れた頭皮上の脳波測定点の位置ベクトルを $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z)$ とすると、測定点における電磁スカラー・ポテンシャル（電位） ϕ は次のように表すことができる。（双極子近似）

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi \epsilon_r \epsilon_0} \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{P}(t)}{r^3} \quad (3-5)$$

$$r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \quad (3-6)$$

(3-5) 式で、 $\mathbf{r} \cdot \mathbf{P}$ はベクトルの内積（ \mathbf{r} と \mathbf{P} の \mathbf{r} 方向への射影との積）を表し、 \mathbf{r} と \mathbf{P} が成す角度を θ とすると、三角関数の余弦定理により、次のようになる。

$$\phi(\mathbf{r}, t) = (1 / 4\pi \epsilon_r \epsilon_0 r^3) (r P \cos \theta) \cos(\omega t + \delta) \quad (3-7)$$

$$= (1 / 4\pi \epsilon_r \epsilon_0 r^3) (r_x P_x + r_y P_y + r_z P_z) \cos(\omega t + \delta) \quad (3-8)$$

脳波の電氣的強度（原点と測定点間の電位差あるいは電圧）は、頭蓋内では数 10 mV～100 mV とされているが、頭皮上の測定点では数 10 μ V～100 μ V の微小電位となる。¹⁾⁹⁾

本稿では、頭皮上の脳波の強度 ϕ を 100 μ V と仮定して計算を進める。

$$(\phi = 1 \times 10^{-4} \text{ V})$$

錐体細胞の樹状突起の長さは約 $500 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$ であることが示されている⁴⁾⁵⁾ ので、ここでは電気双極子 \mathbf{P} の始点と終点の距離 d を $500 \mu\text{m}$ とする。

$$(d = 5 \times 10^{-4} \text{ m})$$

電気双極子 \mathbf{P} の始点（原点）から頭皮上の測定点までの距離 r を 2cm とする。

$$(r = 2 \times 10^{-2} \text{ m})$$

比誘電率 ϵ_r は、界面における電束密度の連続性により、脳波測定点が属する媒質によって決まる [脚注 4]

電気双極子 \mathbf{P} が属する大脳皮質と脳波測定点がある頭皮の間には、脳軟膜、脳クモ膜、脳硬膜、頭蓋骨などがあるが、頭皮は空気中にあるので $\epsilon_r = 1$ とした。

$$(4\pi \epsilon_r \epsilon_0 = 1.1 \times 10^{-10} \text{ C}^2 / \text{N m}^2)$$

(3-7) 式から、電気双極子モーメント \mathbf{P} の大きさ P は $4.4 \times 10^{-18} \text{ C m}$ と見積もることができる。

$$(P = 4.4 \times 10^{-18} \text{ C m})$$

(3-3) 式から、電気双極子 \mathbf{P} の電荷量 Q は $8.8 \times 10^{-15} \text{ C}$ となる。

$$(Q = 8.8 \times 10^{-15} \text{ C})$$

電気双極子 \mathbf{P} の電荷数 N （興奮性信号によって細胞内に流入した Na^+ イオン数）は、電荷量 Q を電気素量 ($e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$) で割り算して 5.5×10^4 個となる。

$$(N = Q / e = 5.5 \times 10^4 \text{ 個})$$

[脚注 4：電束密度の連続性と誘電率]

電気双極子 \mathbf{P} によって生じる電磁場において、電磁スカラー・ポテンシャルを ϕ 、電磁ベクトル・ポテンシャルを \mathbf{A} 、電場を \mathbf{E} とすると、次の関係式が成り立つ。

$$\phi = - \int_C (\mathbf{E} + \partial \mathbf{A} / \partial t) \cdot d\mathbf{r} \text{ (原点から測定点までの任意の経路 } C \text{ に沿う線積分)} + \text{定数}$$

$$\mathbf{E} = - \text{grad } \phi - \partial \mathbf{A} / \partial t$$

次に、空間 A と空間 B の界面を考えると、電束密度の連続性により、

$$\mathbf{D} = \epsilon_{rA} \epsilon_0 \mathbf{E}_A = \epsilon_{rB} \epsilon_0 \mathbf{E}_B = - (1 / 4\pi) \{ \mathbf{P} / r^3 - 3 \mathbf{r} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{P}) / r^5 \}$$

$$\therefore \mathbf{E}_A = (1 / \epsilon_{rA} \epsilon_0) \mathbf{D} = - (1 / 4\pi \epsilon_{rA} \epsilon_0) \{ \mathbf{P} / r^3 - 3 \mathbf{r} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{P}) / r^5 \}$$

$$\mathbf{E}_B = (1 / \epsilon_{rB} \epsilon_0) \mathbf{D} = - (1 / 4\pi \epsilon_{rB} \epsilon_0) \{ \mathbf{P} / r^3 - 3 \mathbf{r} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{P}) / r^5 \}$$

[参考文献]

1. 「脳波」フリー百科事典『ウィキペディア』2021
2. 蔵田潔、渡辺雅彦「大脳皮質」脳科学辞典, 2021
3. 木村啓介「脳幹網様体賦活系」脳科学辞典, 2016
4. 窪田芳之「大脳皮質の神経細胞と局所神経回路」日本神経回路学会誌, Vol.21, No.3, p.122-131, 2014
5. 牛丸弥香、苅部冬紀、川口康雄「錐体細胞」脳科学辞典, 2021
6. 植田禎史、畠中由美子、川口康雄「投射ニューロン」脳科学辞典, 2021
7. 田宗秀隆、岩崎広英、岡部繁男「シナプス」脳科学辞典, 2013
8. 飛松省三「脳波リズムの発現機序」臨床神経生理学, 42 巻, 6 号, p.358-364, 2014
9. 良峯徳和「脳波の謎：リズムとその存在理由」多摩大学研究紀要, 経営情報研究, No.21, p.93-100, 2017
10. 「ネルンストの式」フリー百科事典『ウィキペディア』2021
11. 「活動電位」フリー百科事典『ウィキペディア』2021
12. 武者利光「双極子追跡法による脳活動の推定」光学, 第 24 巻, 第 1 号, p.9-13, 1995
13. 神保泰彦「生体電気計測の基礎」精密工学会誌, Vol. 73, No.11, p.1204-1207, 2007
14. 「フーリエ級数」フリー百科事典『ウィキペディア』2022
15. 「シューマン共振」フリー百科事典『ウィキペディア』2021

[筆者紹介]

近藤 和夫 (Kazuo Kondo)

1977 年 大阪大学 工学博士 (工学研究科 電子工学専攻)

「低電界エレクトロレフレクタンスによるシリコンの光学的臨界点構造に関する研究」(大阪大学リポジトリ OUKA DOI: 10.18910/31652)

1977 年 富士通研究所に入社し、事業部門に異動するまで下記の研究・開発に従事

「GaAlAs/GaAs 発光素子の通電による結晶欠陥生成メカニズムの研究 (論文 4~6)
「MBE 結晶成長技術の開発」(論文 7)

主要論文

1. K. Kondo and A. Moritani, "Symmetry Analysis and Uniaxial-Stress Effect on the Low-Field Electroreflectance of Si from 3.0 to 4.0 eV", Physical Review B, Vol. 14, No. 4, p. 1577-1592, 1976.
2. K. Kondo and A. Moritani, "Symmetry Analysis of the E_2 Structures in Si by Low-Field Electroreflectance", Physical Review B, Vol. 15, No. 2, p. 812-815, 1977.
3. K. Kondo and A. Moritani, "Optical Critical-Point Structures of Si: Symmetry Analysis by Low-Field Electroreflectance", IL NUOVO CIMENTO, Vol. 39 B, No. 2, p. 387-391, 1977.
4. K. Kondo, S. Yamakoshi, S. Isozumi and T. Yamaoka, "Slow Degradation Mechanism of GaAlAs Light-Emitting Diodes", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 19, Supplement 19-1, p. 437-440, 1979.
5. K. Kondo, S. Isozumi, S. Yamakoshi and T. Kotani, "Recombination-Induced Deep-Level Formations in GaAlAs DH LEDs", Institute of Physics Conference Series, Vol. 63, Chapter 5, p. 227-232, 1981.
6. K. Kondo, O. Ueda, S. Isozumi, S. Yamakoshi, K. Akita and T. Kotani, "Positive Feedback Model of Defect Formation in Gradually Degraded GaAlAs Light Emitting Devices", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-30, No. 4, p. 321-326, 1983.
7. K. Kondo, J. Saito, T. Igarashi, K. Nanbu and T. Ishikawa, "MBE as a Production Technology for HEMT LSIs", Journal of Crystal Growth, Vol. 95, p.309-316, 1989.

(大阪大学 工学部 電子工学科 1972 年卒 1974 年修士 1977 年博士)