



## 脳波の伝搬と他の脳に与える作用（1つの共鳴現象） [2]

Brain Waves Propagation and Action on the Other Brain (A Resonance Phenomenon) [2]

近藤 和夫 (Kazuo Kondo)

前回（第1回）は、脳波の起源と脳神経細胞の電気双極子モデルについて説明した。  
今回（第2回）は、電気双極子モデルに基づいて、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。

### 4. 脳波の伝搬と他の脳に与える作用

#### (1) 電気双極子 $\mathbf{P}_1$ が放射する電磁波（脳波）

脳内の電気双極子から発せられた電磁波（脳波）は光速度で空間を伝搬する。  
また脳波は波長が長いので、進行方向に物質が存在しても反射や散乱などの影響をあまり受けず、距離とともに減衰しつつ伝わっていくと考えられる。

点1と点2に2つの脳の電気双極子  $\mathbf{P}_1$  と  $\mathbf{P}_2$  があると考える。（図6参照）

ある時点における電気双極子  $\mathbf{P}_1$  の始点を原点  $(0, 0, 0)$  とし、原点から点2の電気双極子  $\mathbf{P}_2$  の始点に向かう方向（電磁波の進行方向）を  $z$  軸とする。

$z$  軸に直交する  $x$  軸と  $y$  軸の方向は任意とする。また点1と点2の距離を  $R$  とする。

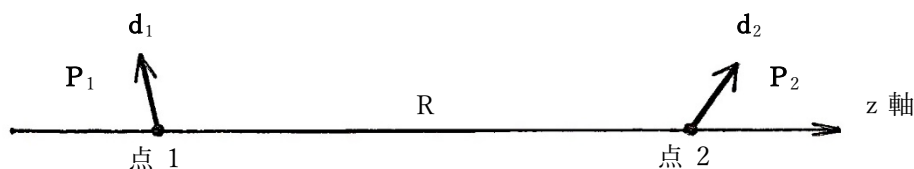


図6：2つの脳の電気双極子

電気双極子  $\mathbf{P}_1$  の終点の位置ベクトルを  $\mathbf{d}_1 = (d_{1x}, d_{1y}, d_{1z})$  とし、電気双極子  $\mathbf{P}_1$  の始点と終点の距離を  $d_1$  とすると、 $d_1 = \sqrt{(d_{1x})^2 + (d_{1y})^2 + (d_{1z})^2}$  である。

電気双極子モーメント  $\mathbf{P}_1$  の時間変動を角周波数  $\omega_1$  の余弦関数で表すと次のようになる。  
 $\delta_1$  は初期位相、 $Q_1$  は電気双極子  $\mathbf{P}_1$  の電荷量である。

$$\mathbf{P}_1(t) = \mathbf{P}_1 \cos(\omega_1 t + \delta_1) \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_1 &= (P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}) \\ P_{1j}(t) &= P_{1j} \cos(\omega_1 t + \delta_1) \quad (j = x, y, z) \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$P_1 = \sqrt{(P_{1x})^2 + (P_{1y})^2 + (P_{1z})^2} = Q_1 d_1 \quad (4-3)$$

電気双極子  $\mathbf{P}_1$  の始点（原点）から距離  $r$  離れた点  $O$  の位置ベクトルを  $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z)$  とすると、 $\mathbf{P}_1$  が放射する電磁波が点  $O$  に作る電場  $\mathbf{E}_1$  は次のように表せる。

$$\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) = - \frac{1}{4\pi \varepsilon_r \varepsilon_0} \left\{ \frac{\mathbf{P}_1(t)}{r^3} - \frac{3\mathbf{r}(\mathbf{r} \cdot \mathbf{P}_1(t))}{r^5} \right\} \quad (4-4)$$

(4-4) 式の第 1 項は、電場  $\mathbf{E}_1$  の各成分に対する電気双極子  $\mathbf{P}_1$  方向からの寄与を表し、第 2 項は、 $\mathbf{r}$  と  $\mathbf{P}_1$  が成す角度によって決まる  $\mathbf{r}$  方向からの寄与を表す。

点 1 から見た点 2 の位置ベクトルは  $\mathbf{r} = (0, 0, R)$  なので、電気双極子  $\mathbf{P}_1$  が放射する電磁波が点 2 に作る電場  $\mathbf{E}_1$  は、(4-1)~(4-4) 式より、次のようになる。

$$\mathbf{E}_1 = (E_{1x}, E_{1y}, E_{1z})$$

$$E_{1j}(t) = - E_{1j} \cos(\omega_1 t + \delta_1) \quad (j = x, y, z) \quad (4-5)$$

$$E_{1x} = (1 / 4\pi \varepsilon_{r2} \varepsilon_0 R^3) P_{1x} \quad (4-6)$$

$$E_{1y} = (1 / 4\pi \varepsilon_{r2} \varepsilon_0 R^3) P_{1y} \quad (4-7)$$

$$E_{1z} = (1 / 4\pi \varepsilon_{r2} \varepsilon_0 R^3) (-2 P_{1z}) \quad (4-8)$$

$$E_1 = \sqrt{(E_{1x}^2 + E_{1y}^2 + E_{1z}^2)} = (1 / 4\pi \varepsilon_{r2} \varepsilon_0 R^3) (P_1 \sqrt{\{1 + 3(P_{1z} / P_1)^2\}}) \quad (4-9)$$

(4-9) 式において、 $0 \leq P_{1z} / P_1 \leq 1$  なので  $1 \leq \sqrt{\{1 + 3(P_{1z} / P_1)^2\}} \leq 2$  である。

ここで、点 1 の頭皮上における脳波の強度を  $100 \mu\text{V}$  と仮定し、点 1 と点 2 の距離  $R$  を  $10 \text{ m}$  とすると、点 2 における電場  $\mathbf{E}_1$  の強度は  $E_1 = (0.5 \sim 1.0) \times 10^{-12} \text{ V/m}$  となる。

この計算には、前回（第 1 回）の 3 (3) 節で求めた  $P_1 = 4.4 \times 10^{-18} \text{ C m}$  を用いた。また、点 2 の電気双極子  $\mathbf{P}_2$  が属する大脳皮質の細胞内液の構成成分は、水 60 %、タンパク質 20 %、脂質 15 %、糖質その他（電解質イオン等）5 % であるが、比誘電率  $\varepsilon_{r2}$  への主たる寄与を水と考えると  $\varepsilon_{r2} = 80$  とした。（ $4\pi \varepsilon_{r2} \varepsilon_0 = 80 \times 1.1 \times 10^{-10} \text{ C}^2 / \text{N m}^2$ ）

## (2) 電気双極子 $\mathbf{P}_1$ の電磁波（脳波）が電気双極子 $\mathbf{P}_2$ に与える作用

原点  $(0, 0, 0)$  を点 1 から点 2 に移し、新たに設定した  $X, Y, Z$  軸の方向は  $x, y, z$  軸と同じとする。この場合、点 1 の位置座標は  $(0, 0, -R)$  となる。

ある時点における電気双極子  $\mathbf{P}_2$  の始点を原点  $(0, 0, 0)$  とする。

$\mathbf{P}_2$  の終点の位置ベクトルを  $\mathbf{d}_2 = (d_{2x}, d_{2y}, d_{2z})$  とし、 $\mathbf{P}_2$  の始点と終点の距離を  $d_2$  とすると、 $d_2 = \sqrt{(d_{2x}^2 + d_{2y}^2 + d_{2z}^2)}$  である。

電気双極子モーメント  $\mathbf{P}_2$  の時間変動を角周波数  $\omega_2$  の余弦関数で表すと次のようになる。 $\delta_2$  は初期位相、 $Q_2$  は電気双極子  $\mathbf{P}_2$  の電荷量である。

$$\mathbf{P}_2(t) = \mathbf{P}_2 \cos(\omega_2 t + \delta_2) \quad (4-10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_2 &= (P_{2X}, P_{2Y}, P_{2Z}) \\ P_{2J}(t) &= P_{2J} \cos(\omega_2 t + \delta_2) \quad (J = X, Y, Z) \end{aligned} \quad (4-11)$$

$$P_2 = \sqrt{(P_{2X}^2 + P_{2Y}^2 + P_{2Z}^2)} = Q_2 d_2 \quad (4-12)$$

点 2 についても頭皮上における脳波の強度を  $100 \mu\text{V}$  と仮定すると、前回（第 1 回）の 3 (3) 節で求めた値を用いて次のようになる。

$$\mathbf{P}_2 \text{ の電気双極子モーメント : } P_2 = 4.4 \times 10^{-18} \text{ C m}$$

$$\mathbf{P}_2 \text{ の電荷量 : } Q_2 = 8.8 \times 10^{-15} \text{ C}$$

$$\mathbf{P}_2 \text{ の電荷数 : } N_2 = Q_2 / e = 5.5 \times 10^4 \text{ 個}$$

電気双極子  $\mathbf{P}_1$  の電場  $\mathbf{E}_1$  は、電気双極子  $\mathbf{P}_2$  の電荷集合体に作用する。

電気双極子  $\mathbf{P}_2$  の始点と終点間の任意の位置において、電荷集合体の電荷量  $Q_2$  の時間変動は次のように表すことができる。

$$Q_2(t) = Q_2 \cos(\omega_2 t + \delta_2) \quad (4-13)$$

従って、電場  $\mathbf{E}_1$  が電荷集合体  $Q_2$  に与える力  $\mathbf{F}_1$  は、(4-5) 式より次のようになる。

$$\mathbf{F}_1(t) = Q_2(t) \mathbf{E}_1(t) \quad (4-14)$$

$$\mathbf{F}_1 = (F_{1X}, F_{1Y}, F_{1Z})$$

$$F_{1J}(t) = -F_{1J} \cos(\omega_1 t + \delta_1) \cos(\omega_2 t + \delta_2) \quad (J = X, Y, Z) \quad (4-15)$$

$$F_{1j} = Q_2 E_{1j} \quad (j = x, y, z) \quad (4-16)$$

$$F_1 = \sqrt{(F_{1X}^2 + F_{1Y}^2 + F_{1Z}^2)} = Q_2 E_1 \quad (4-17)$$

(4-9)、(4-17) 式より、力  $\mathbf{F}_1$  の強度は  $F_1 = (4.4 \sim 8.8) \times 10^{-27} \text{ N}$  となる。

ここで、力  $\mathbf{F}_1$  による電荷集合体  $Q_2$  のイオン（興奮性信号によって細胞内に流入した  $\text{Na}^+$  イオン）の変位について計算しよう。

力  $\mathbf{F}_1 = (F_{1X}, F_{1Y}, F_{1Z})$  によるイオンの変位を  $\mathbf{u}_2 = (u_{2X}, u_{2Y}, u_{2Z})$  とすると、(4-15) 式より、電荷集合体  $Q_2$  を構成するイオンの運動方程式は次のように表すことができる。

$$M_2 (d^2 u_{2J} / dt^2) + M_2 \gamma (du_{2J} / dt) = -F_{1J} \cos(\omega_1 t + \delta_1) \cos(\omega_2 t + \delta_2) \quad (4-18)$$

$$M_2 = N_2 m \quad (4-19)$$

$u_{2J}$  : J 軸方向の変位 [m]

$\gamma$  : 減衰定数 [ $\text{s}^{-1}$ ]

$m$  : イオンの質量 [kg]

$M_2$  : 電荷集合体  $Q_2$  の総イオン質量 [kg]

$N_2$  : 電荷集合体  $Q_2$  の総イオン数 [個]

(4-18) 式の両辺を  $M_2$  で割ると、次のようになる。

$$d^2 u_{2j} / dt^2 + \gamma (du_{2j} / dt) = - (a_{1j}) \cos(\omega_1 t + \delta_1) \cos(\omega_2 t + \delta_2) \quad (4-20)$$

$$a_{1j} = F_{1j} / M_2 = (Q_2 / M_2) E_{1j} = (e / m) E_{1j} \quad (4-21)$$

$$a_1 = \sqrt{(a_{1x}^2 + a_{1y}^2 + a_{1z}^2)} = F_1 / M_2 = (Q_2 / M_2) E_1 = (e / m) E_1 \quad (4-22)$$

ここで、 $\omega_+ = \omega_1 + \omega_2$ 、 $\omega_- = \omega_1 - \omega_2$ 、 $\delta_+ = \delta_1 + \delta_2$ 、 $\delta_- = \delta_1 - \delta_2$  とおいて、三角関数の積和公式を用いると、(4-20) 式の微分方程式の解は次のようになる。なお、一般解  $C$ 、 $C \exp(-\gamma t)$  の記載は省略している。(C は任意定数)

$$u_{2j}(t) = - (a_{1j} / 2) (A_+ + A_-) \quad (4-23)$$

$$A_+ = \{ - (\omega_+) \cos(\omega_+ t + \delta_+) + \gamma \sin(\omega_+ t + \delta_+) \} / (\omega_+) \{ (\omega_+)^2 + \gamma^2 \} \quad (4-24)$$

$$A_- = \{ - (\omega_-) \cos(\omega_- t + \delta_-) + \gamma \sin(\omega_- t + \delta_-) \} / (\omega_-) \{ (\omega_-)^2 + \gamma^2 \} \quad (4-25)$$

(4-25) 式は、 $\omega_- = 0$  のとき、特異点（ゼロ除算）となる。

従って、 $\omega_1 = \omega_2$  のとき、(4-20) 式の解  $A_+$ 、 $A_-$  を新たに求めると次のようになる。

$$A_+ = \{ - (2\omega_2) \cos(2\omega_2 t + \delta_+) + \gamma \sin(2\omega_2 t + \delta_+) \} / (2\omega_2) \{ (2\omega_2)^2 + \gamma^2 \} \quad (4-26)$$

$$A_- = (t / \gamma) \cos(\delta_-) \quad (4-27)$$

また、減衰定数  $\gamma$  を考慮しないとき [脚注5]、(4-20) 式の解は次のようになる。

$$A_+ = - \cos(2\omega_2 t + \delta_+) / (2\omega_2)^2 \quad (4-28)$$

$$A_- = (t^2 / 2) \cos(\delta_-) \quad (4-29)$$

[脚注5：減衰定数  $\gamma$ ]

減衰定数  $\gamma$  は、細胞内液中を運動する  $\text{Na}^+$  イオンが水から受ける抵抗力の速度比例係数である。 $\text{Na}^+$  イオンと水分子の半径は同程度 ( $\text{Na}^+$ : 1.0 Å、 $\text{H}_2\text{O}$ : 1.4 Å) なので、水を連続的な媒体と考える流体力学 (Stokes の抵抗法則<sup>16)</sup>) は適用できない。

微視的には、分子間相互作用<sup>17)</sup> に基づいて水分子の抵抗力を評価する必要があるが、これをイオンの速度に比例する定数として扱うことは適切ではないように思われる。

錐体細胞内に流入した  $\text{Na}^+$  イオンは細胞内液中を移動する際に熱運動している水分子によって散乱されるけれども、イオンと水分子の分子間相互作用 (静電相互作用、軌道間相互作用など) による水和効果<sup>18)</sup> (複数の水分子がイオンに引き付けられる現象) によって、イオン周辺の水分子間の水素結合<sup>19)</sup> が切れたり (これを水の構造破壊という)、イオンの方向に配向した水分子同士がクーロン斥力によって反発し合ったりするので、水分子による抵抗力が低下して  $\text{Na}^+$  イオンは比較的長い距離を移動できると思われる。

電気双極子モーメント  $\mathbf{P}$  の時間変動を表す余弦関数の初期位相  $\delta$  は、脳神経細胞の樹状突起の任意の位置における活動電位パルスの発生タイミングの基準時間からのずれを表している。

(4-28)、(4-29) 式は、 $\text{Na}^+$ イオンの変位  $u_2$  に寄与する項が、初期位相  $\delta_1$  と  $\delta_2$  によって変化することを示している。

とくに、点 1 と点 2 にある 2 つの脳の錐体細胞群の活動リズムが同期しているときには、活動電位パルスの周波数と発生タイミングが一致するので、 $\omega_1 = \omega_2$ 、 $\delta_1 = \delta_2$  となる。

このとき、(4-28)、(4-29) 式は次のようになる。

$$A_+ = -\cos 2(\omega_2 t + \delta_2) / (2\omega_2)^2 \quad (4-30)$$

$$A_- = t^2 / 2 \quad (4-31)$$

(4-30) 式の  $A_+$  項は角周波数  $2\omega_2$  で振動し、(4-31) 式の  $A_-$  項は  $t^2$  で増加する。

ここで例として、静かに開眼・覚醒している人の場合を考えよう。

点 2 の脳波（前頭部優位の  $\beta$  徐波）の角周波数を  $\omega_2 = 2\pi f_2 = 100 \text{ s}^{-1}$  ( $f_2 = 16 \text{ Hz}$ 、 $T_2 = 63 \text{ ms}$ ) とすると、 $\text{Na}^+$ イオンの質量  $m = 3.82 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 、(4-22) 式の  $a_1$  の値  $a_1 = (2.1 \sim 4.2) \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$  なので、(4-22)、(4-23)、(4-30)、(4-31) 式より、変位  $u_2$  の大きさ  $u_2$  の  $-(a_1/2)A_+$  項の係数は、 $a_1/8(\omega_2)^2 = (0.3 \sim 0.5) \text{ \AA}$  となる。

また  $u_2$  の  $-(a_1/2)A_-$  項は、1 周期 ( $T_2 = 63 \text{ ms}$ ) 後に  $-a_1 T_2^2/4 = -(21 \sim 41) \text{ \AA}$ 、100 周期 ( $100 T_2 = 6.3 \text{ s}$ ) 後には  $-(21 \sim 41) \mu\text{m}$  となる。

以上の考察より、点 1 の脳から発せられた脳波が点 2 の脳に伝搬して、2 つの脳の錐体細胞群の活動リズムが同期したとき、点 2 の錐体細胞群において、興奮性信号によって細胞内に流入した  $\text{Na}^+$ イオンは、伝搬してきた点 1 の脳波が作る電場の方向に（微小な振動を繰り返しながら） $t^2$  に比例して移動し続けるという結果が得られた。

この移動は、2 つの脳の錐体細胞群の活動リズムが非同期となるまで継続する。

とくに電気双極子  $\mathbf{P}_1$  と  $\mathbf{P}_2$  の向きが揃ったときには、点 2 の錐体細胞群の樹状突起の任意の位置において細胞内に流入した  $\text{Na}^+$ イオンは細胞体の方向に移動し続けることになる。このような  $\text{Na}^+$ イオンの流れは、点 2 の錐体細胞群の樹状突起における脱分極と電位依存性  $\text{Na}^+$ チャネルの開口を促進し、活動電位の発生閾値<sup>20)</sup> を下げて、投射先の神経細胞群に出力される興奮性信号の強度を強める（増幅する）可能性がある。

脳波を構成する基礎律動（ $\delta$  波、 $\theta$  波、 $\alpha$  波、 $\beta$  波、 $\gamma$  波）<sup>1)</sup> は、大脳皮質全体に持続的に出現するので、脳神経細胞の活動リズムの固有振動数（固有周波数）を表していると考えれば、この現象は一種の「共鳴現象」と見ることができよう。

最後に、伝搬してきた脳波に対する「気づき」と「行動」（振り返りなど）については、大脳皮質第 5 層の錐体細胞群の投射先が皮質内から皮質下（大脳基底核、視床、脳幹、脊髄など）<sup>5)</sup> まで広く分布していることを考えると、Posner の「注意のネットワーク理論」〔脚注 6〕によって説明できるかもしれない。

しかし、そのためにはさらなる神経科学的な検討が必要になるだろう。

## 5. まとめ

脳波の発生に大きく寄与すると考えられている脳神経細胞（錐体細胞群）について、興奮性信号によって樹状突起内に流入した  $\text{Na}^+$  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からなる仮想的な「電気双極子」モデルを用いて、電気双極子放射による脳波の発生と伝搬、および他の脳に与える作用について考察した。

その結果、離れた位置にある2つの脳の錐体細胞群の活動リズムが同期したときに、錐体細胞群の樹状突起の任意の位置において、興奮性信号によって細胞内に流入した  $\text{Na}^+$  イオンは伝搬してきた脳波が作る電場の方向に  $t^2$  に比例して移動し続けることがわかった。

とくに、電気双極子ベクトルの向きが揃ったときには、 $\text{Na}^+$  イオンは樹状突起に沿って細胞体の方向に移動し続けることになるので、樹状突起の任意の位置において脱分極と電位依存性  $\text{Na}^+$  チャネルの開口を促進し、活動電位の発生閾値を下げて、投射先の神経細胞群に出力される興奮性信号の強度を強める（増幅する）可能性がある。

脳波を構成する基礎律動（ $\alpha$  波、 $\beta$  波など）は脳神経細胞の活動リズムの固有振動数を表すと考えると、これは一種の「共鳴現象」と見ることができるだろう。

このような条件が成り立ち得るのは、2つの脳がともに同じような状態（開眼・覚醒、閉眼・覚醒、安静、瞑想など）にあるときであろうか。

本稿の例でいうと、静かに友人を見送っている人とエスカレーターに身を委ねている人の場合などがこれに当たるかもしれない。

しかし、電気双極子モデルは、2つの脳が「共鳴」したとき、どのような脳神経細胞ネットワークによって「気づき」と「行動」がもたらされるかについては説明できない。ここから先は神経科学的なアプローチが必要になるだろう。

ところで、伝搬する脳波の電界強度は距離の3乗で減衰するので、この作用は離れるにつれて弱くなる。遠く離れるほど、その効果は小さくなるだろう。

逆に、距離が近いほど伝搬する脳波の電界強度は大きくなる。

例えば、坐禅やヨガなど数人が集まって瞑想しているときに、互いの脳が共鳴し合うことはあるのだろうか？

また、瞑想時の脳波とシューマン共振波が同期することによって得られると言われているヒーリング効果も、このような現象が関与しているのだろうか？

---

[脚注6：注意のネットワーク理論 (Attention System of Human Brain) ]

Posner は注意に関する現象を説明するために3つの脳内ネットワークを提案した。<sup>21)</sup>

- (1) Alerting network (覚醒・警戒)：脳幹・青斑核、前頭葉、頭頂葉が関与して、適切な覚醒状態を作り維持する機能を持つ。左半球（一時的警戒）、右半球（持続的警戒）
- (2) Orienting network (定位)：視床、前頭葉、頭頂葉が関与して、空間的注意を特定の位置に向ける働きをする。背側（目的志向制御）、腹側（刺激駆動制御）
- (3) Executive network (実行制御)：大脳基底核、前頭葉、辺縁葉が関与して、反応行動時の葛藤制御などを担う。前頭-頭頂（瞬間的実行）、帯状回-弁蓋（計画的実行）

[参考文献] (第1回からの連番)

1. 「脳波」フリー百科辞典『ウィキペディア』2021
5. 牛丸弥香、苅部冬紀、川口康雄「錐体細胞」脳科学辞典, 2021
16. 「ストークスの式」フリー百科事典『ウィキペディア』2021
17. 「分子間力」フリー百科事典『ウィキペディア』2021
18. 「溶媒和」フリー百科事典『ウィキペディア』2021
19. 「水素結合」フリー百科事典『ウィキペディア』2022
20. 長崎信博、平野丈夫「閾値」脳科学辞典, 2014
21. 横澤一彦、河原純一郎「注意のモデル」脳科学辞典, 2021

[補遺 (Supplement)]

本稿においては、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  $\mathbf{P}(t) = \mathbf{P} \cos(\omega t)$  を用いて考察を進めたが、一般的なフーリエ級数を用いた場合には以下のようになる。

点1にある電気双極子モーメント  $\mathbf{P}_1$  の時間変動を角周波数  $\omega_1$  の一般的なフーリエ級数で表すと、(4-1) 式は次のようになる。

$$\mathbf{P}_1(t) = \mathbf{P}_1 \sum_{m=1}^{\infty} [\alpha_{1m} \cos(m\omega_1 t + \delta_{1m}) + \beta_{1m} \sin(m\omega_1 t + \delta_{1m})] \quad (\text{S-1})$$

ただし、(S-1) 式では、定数項  $\alpha_{10}$  は省略し、係数  $\alpha_{1m}$ 、 $\beta_{1m}$  は次の式を満たすように設定するものとする。

$$\sum_{m=1}^{\infty} [\sqrt{\alpha_{1m}^2 + \beta_{1m}^2}] = 1 \quad (\text{S-2})$$

同様に、点2にある電気双極子モーメント  $\mathbf{P}_2$  の時間変動を角周波数  $\omega_2$  の一般的なフーリエ級数で表すと、(4-10) 式は次のようになる。

$$\mathbf{P}_2(t) = \mathbf{P}_2 \sum_{n=1}^{\infty} [\alpha_{2n} \cos(n\omega_2 t + \delta_{2n}) + \beta_{2n} \sin(n\omega_2 t + \delta_{2n})] \quad (\text{S-3})$$

(S-3) 式についても、定数項  $\alpha_{20}$  は省略し、係数  $\alpha_{2n}$ 、 $\beta_{2n}$  は次式を満たすように設定するものとする。

$$\sum_{n=1}^{\infty} [\sqrt{\alpha_{2n}^2 + \beta_{2n}^2}] = 1 \quad (\text{S-4})$$

(S-1)、(S-3) 式を用いると、点2にある電気双極子  $\mathbf{P}_2$  において、興奮性信号によって細胞内に流入した  $\text{Na}^+$  イオンの運動方程式 (4-20) 式は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} d^2 u_{2j} / dt^2 + \gamma (du_{2j} / dt) = \\ - (a_{1j}) \sum_{m=1}^{\infty} [\alpha_{1m} \cos(m\omega_1 t + \delta_{1m}) + \beta_{1m} \sin(m\omega_1 t + \delta_{1m})] \\ \sum_{n=1}^{\infty} [\alpha_{2n} \cos(n\omega_2 t + \delta_{2n}) + \beta_{2n} \sin(n\omega_2 t + \delta_{2n})] \end{aligned} \quad (\text{S-5})$$

ここで、 $\omega_+ = m\omega_1 + n\omega_2$ 、 $\omega_- = m\omega_1 - n\omega_2$ 、 $\delta_+ = \delta_{1m} + \delta_{2n}$ 、 $\delta_- = \delta_{1m} - \delta_{2n}$  として (S-5) 式の解を計算すると、(4-24)、(4-25) 式は次のようになる。

$$A_+ = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [ -\cos(\omega_+ t + \delta_+ + \delta_a + \delta_c) \sqrt{\{(\alpha_{1m}^2 + \beta_{1m}^2)(\alpha_{2n}^2 + \beta_{2n}^2)\}} / (\omega_+) \sqrt{\{(\omega_+)^2 + \gamma^2\}} ] \quad (S-6)$$

$$\tan \delta_a = -(\alpha_{1m}\beta_{2n} + \beta_{1m}\alpha_{2n}) / (\alpha_{1m}\alpha_{2n} - \beta_{1m}\beta_{2n}) \quad (S-7)$$

$$\tan \delta_c = \gamma / (\omega_+) \quad (S-8)$$

$$A_- = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [ -\cos(\omega_- t + \delta_- + \delta_b + \delta_d) \sqrt{\{(\alpha_{1m}^2 + \beta_{1m}^2)(\alpha_{2n}^2 + \beta_{2n}^2)\}} / (\omega_-) \sqrt{\{(\omega_-)^2 + \gamma^2\}} ] \quad (S-9)$$

$$\tan \delta_b = (\alpha_{1m}\beta_{2n} - \beta_{1m}\alpha_{2n}) / (\alpha_{1m}\alpha_{2n} + \beta_{1m}\beta_{2n}) \quad (S-10)$$

$$\tan \delta_d = \gamma / (\omega_-) \quad (S-11)$$

(S-9) 式は、 $\omega_- = 0$  ( $m\omega_1 = n\omega_2$ ) のとき、特異点（ゼロ除算）となるので、(S-5) 式の解を新たに求めると、(4-26)、(4-27) 式は次のようになる。

$$A_+ = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [ -\cos(2n\omega_2 t + \delta_+ + \delta_a + \delta_c) \sqrt{\{(\alpha_{1m}^2 + \beta_{1m}^2)(\alpha_{2n}^2 + \beta_{2n}^2)\}} / (2n\omega_2) \sqrt{\{(2n\omega_2)^2 + \gamma^2\}} ] \quad (S-12)$$

$$\tan \delta_c = \gamma / (2n\omega_2) \quad (S-13)$$

$$A_- = (t/\gamma) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [ \cos(\delta_- + \delta_b) \sqrt{\{(\alpha_{1m}^2 + \beta_{1m}^2)(\alpha_{2n}^2 + \beta_{2n}^2)\}} ] \quad (S-14)$$

また、減衰定数  $\gamma$  を考慮しないとき、(4-28)、(4-29) 式は次のようになる。

$$A_+ = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [ -\cos(2n\omega_2 t + \delta_+ + \delta_a) \sqrt{\{(\alpha_{1m}^2 + \beta_{1m}^2)(\alpha_{2n}^2 + \beta_{2n}^2)\}} / (2n\omega_2)^2 ] \quad (S-15)$$

$$A_- = (t^2/2) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [ \cos(\delta_- + \delta_b) \sqrt{\{(\alpha_{1m}^2 + \beta_{1m}^2)(\alpha_{2n}^2 + \beta_{2n}^2)\}} ] \quad (S-16)$$

点 1 と点 2 にある 2 つの脳の錐体細胞群の活動リズムが同期する条件（共鳴条件）は、  
 $m\omega_1 = n\omega_2$ 、 $\delta_{1m} = \delta_{2n}$  ( $m = 1, 2 \dots$ ) ( $n = 1, 2 \dots$ ) (S-17)  
 となる。

このとき、点 2 にある電気双極子  $\mathbf{P}_2$  において、興奮性信号によって細胞内に流入した  $\text{Na}^+$  イオンの変位  $u_2$  を表す (4-30)、(4-31) 式は次のようになる。

$$A_+ = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [ -\cos\{2(n\omega_2 t + \delta_{2n}) + \delta_a\} \sqrt{\{(\alpha_{1m}^2 + \beta_{1m}^2)(\alpha_{2n}^2 + \beta_{2n}^2)\}} / (2n\omega_2)^2 ] \quad (S-18)$$

$$A_- = (t^2/2) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [ \alpha_{1m}\alpha_{2n} + \beta_{1m}\beta_{2n} ] \quad (S-19)$$



(S-18) 式を見ると、 $A_+$  の展開項は  $1/n^2$  に比例しているの、次数  $n$  が高い項ほど  $A_+$  への寄与は小さいことがわかる。

また (S-19) 式は、次数  $m, n$  は  $(t^2/2)$  の係数のみに寄与することを示している。従って、電気双極子モーメント  $\mathbf{P}$  の時間変動を角周波数  $\omega$  の余弦関数（フーリエ級数の  $m = n = 1$  の項）で表示しても、現象の本質を捉えることができると言えるだろう。

もちろん、(S-1)~(S-19) 式において、 $m = n = 1$ 、 $\alpha_{11} = \alpha_{21} = 1$ 、 $\beta_{11} = \beta_{21} = 0$  とすると、(4-30)、(4-31) 式が得られる。

### [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)