

参 考 文 献

- 1) Zaitsev & Shliomis, Sov. Phys. JETP 32 (1971) 866
Graham, Phys. Rev. A10 (1974) 1762
Smith, Phys. Rev. Letters 32 (1974) 1164
- 2) Bergè, Fluctuations, Instabilities and Phase Transitions; NATO, Geilo, Norway, April 1975
- 3) Lekkerkerker, Physica 80A (1975) 415
槌屋他, 77年春 物理学会予稿集

ヤリイカ神経膜にみられる散逸構造

電子技術総合研究所 松 本 元

ヤリイカ神経膜系が、非平衡開放系であることに注目し、この系に特徴的な応答として、神経インパルス of 自励発振現象がこれにあたるとして、自励発振状態ならびに静止状態（外部刺激によって活動電位が一過性の応答を示す状態）から自励発振状態への転移の様相を詳しく調べた。

まず、自励発振状態がどのようにして実現できるかを調べた。この結果、下記のいずれかによってこの状態が実現できることが判った：

- 1) 神経のまわりの外液の Ca^{2+} イオン濃度を、ある臨界値以下にする¹⁾
- 2) 神経軸索を細胞内灌流したとき、灌流溶液の pH をアルカリにする。²⁾
- 3) 神経軸索中の蛋白を化学的に修飾する、あるいは蛋白質分解酵素で蛋白のペプチド結合を切断する。³⁾

自励発振状態が、分子レベルでどのようなメカニズムで実現するかは今後解明さるべき問題としてここでは触れない。静止状態からこの状態への転移でマクロな物理量として観測されるのは、静止状態で一過性の活動電位を生じさせる為に超えるべき閾値が減少し、この状態で0になると思われることである。しかしこの閾値は、周波数依存性

を有し、 18°C で約 160Hz のとき最小である。すなわち、自励発振状態に近づくにつれ、いわば神経軸索系の Q 値がどんどん増大するのである。⁴⁾

次に、自励発振状態の性質を調べ、次のようなことが解った：

1) 安定である。⁴⁾ 外部から単一刺激を与えて、それに対応する活動電位の応答があっても、自励発振の周波数はすぐ元に戻る。自励発振の周波数は、細胞内液灌流しない神経においては温度のみの関数であって、 18°C で 160Hz 程度である。

2) 非線型性を反映している。⁴⁾ 図1にみるように、外部より正弦波刺激電流を加えると、電流の大きさおよびその周波数に従って、自励発振状態は影響をうけるが、自励発振周波数の近くで引き込まれ現象がみられ、これより離れた所で変調をうける。これらは、非線型振動現象でよく見られるものである。⁵⁾

3) 空間的な秩序状態である。⁶⁾ 自励発振している活動電位インパルスを生み出す場所は、神経軸索膜のきわめて空間的に狭く且つ特定の場所であることが判った。すなわちペースメーカー点が存在し、ここから生み出された活動電位インパルスは、軸索膜上を通常の伝播速度よりやや遅い速度で伝わってゆく。別の見方をすると、自励発振状態では空間的に一様な状態は安定ではない。

静止状態の性質は神経生理学的によく調べられており、^{7,8)} 自励発振状態についてもほぼ明らかになったので、^{4,6)} 次にこの2つの状態間の転移の性格を詳しく調べた。その結果を要約すると次の通りである：

1) きわめて小さい(閾値に比べ)電流インパルスに対する膜電位の応答は、振動的であって、図2にみるように、① その振動周波数は転移点の前後で不変である、⁹⁾ ② 振動は、静止状態で転移点より遠く離れた所で指数関数的減衰を示し、転移点近くなると指数関数的減衰より離れ、ゆっくりと減衰する。¹⁰⁾ いわゆる Critical Slowing-Down の現象が表われる。③ 転移点を超えると不連続的に自励発振状態が実現する

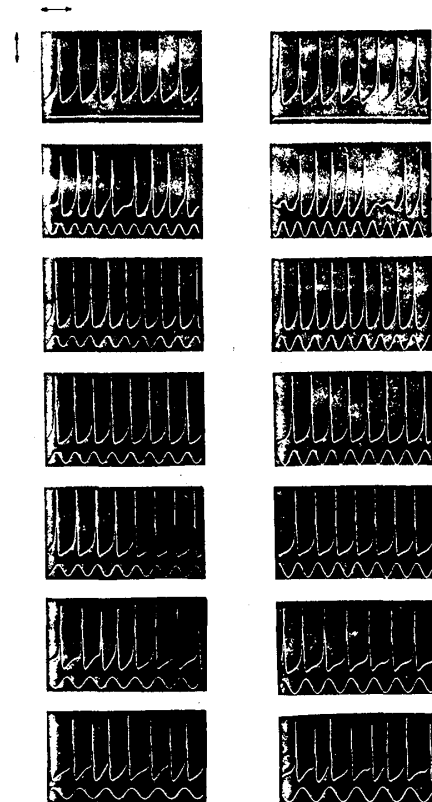


図1-(i)

図1-(ii)

(図2の記録9に注目)。

2) きわめて小さい電流インパルスに対する膜電位応答(図2参照)に対し、やはりきわめて小さい正弦波電流に対する定常的な膜電位応答を実験的に求めたところ転移点から遠く離れた静止状態でこの両者は Kubo¹¹⁾ の線型応答理論で良く結びつくことが判った。⁹⁾ 従ってこの理論は、平衡から遠く離れた系でも成り立つことが実験的に証明された。

3) 膜の出す電圧ゆらぎの周波数解析を、静止状態で転移点からの離れ具合をパラメータとして行ったところ、18℃で160Hz近傍にピークを有する単一のスペク

トルが転移点近傍に近づくにつれ鋭く生長してゆくことが判った^{9,12)} (図3参照)。

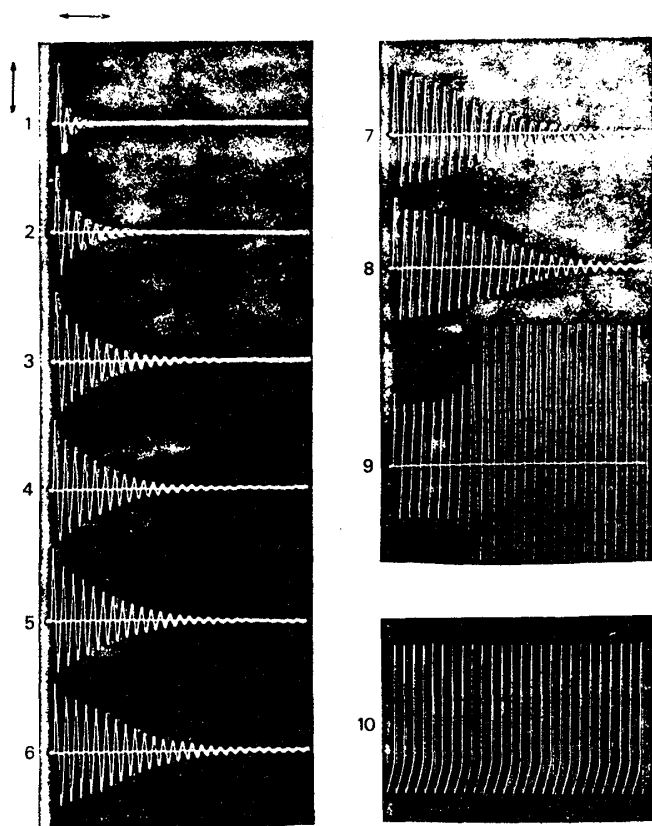


図2-(i)

図2-(ii)

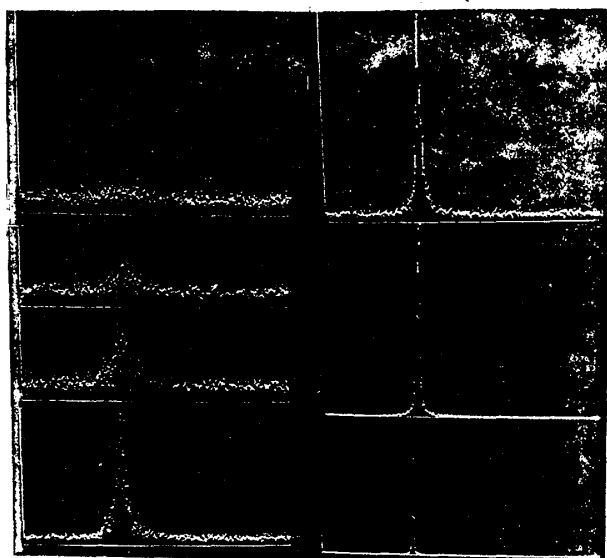


図3-(i)

図3-(ii)

4) 神経軸索膜中の異なる場所での電圧ゆらぎの相互相関を、場所間の距離の関数として求めた。この結果、きわめて長距離の空間相関があることが判った。¹²⁾

これらの転移に関する特徴はTomita等¹³⁾ によって展開されているirreversible circulation of fluctuationの概念、およびPrigogine学派の散逸構造に関する理論¹⁴⁾ が予測するものと定性的に良く一

致するものである。非平衡開放系として、従来実験的にジャボチンスキー反応などの化学系¹⁵⁾や流体系^{15,16)}などが対象であったが、ヤリイカ神経系は現象が電氣的である為にこれらの系にくらべ定量的で且つ精密なデータを提供しうるものと確信している。ヤリイカの神経が精密科学の仲間入りできたのは、従来飼育不可能とされていたヤリイカの水槽内飼育を可能¹⁷⁾とし、試料としてのヤリイカを実験室に持ち込めたこと、さらに各地のヤリイカの水揚げ港よりこれを運搬し飼育することにより、従来、年に3ヶ月程度しか実験できないという季節的制約を一挙になくしたという点を最後に強調したい。さらに、非平衡開放系が示す特徴的な現象が、ヤリイカ神経系という生体系の機能ときわめて密接に結びついていることが実験的に明らかになりつつあることは、印象深いことである。

参 考 文 献

- 1) A. Huxley: Ann. N. Y. Acad. Sciences **81** (1959) 221.
- 2) I. Tasaki, I. Singer and T. Takenaka: J. Gen. Physiol. **48** (1965) 1095.
- 3) J. Baumgold, G. Matsumoto and I. Tasaki: J. Neurochem. (in press).
- 4) G. Matsumoto: in preparation.
- 5) J. J. Stoker: Nonlinear Vibrations in Mechanical and Electrical Systems ed. by H. Bohr, R. Courant and J. J. Stoker in Pure and Applied Mathematics Vol. II (Interscience Pub., N. Y., 1950).
- 6) G. Matsumoto and H. Shimizu: to be published in J. Phys. Soc. Japan.
- 7) A. L. Hodgkin: The Conduction of the Nervous Impulse (Liverpool University Press, 1971).
- 8) I. Tasaki: Nerve Excitation—A Macromolecular Approach—(Charles C Thomas Pub., Springfield, 1968).
- 9) G. Matsumoto, I. Tasaki and I. Inoue: J. Phys. Soc. Japan **44** (1978) 351.
- 10) G. Matsumoto and T. Kunisawa: to be published in J. Phys. Soc. Japan.
- 11) R. Kubo: J. Phys. Soc. Japan **12** (1957) 570.
- 12) G. Matsumoto and W. Stühmer: to be submitted to J. Phys. Soc. Japan.
- 13) K. Tomita and H. Tomita: Progr. theor. Phys. **51** (1974) 1731.
- 14) H. Lemarchand and G. Nicolis: Physica **82A** (1976) 521.

- 15) P. Glansdorff and I. Prigogine: Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations (Wiley-Intersciences, London and N. Y., 1971).
- 16) D. D. Joseph: Stability of Fluid Motions, I and II (Springer, 1976).
- 17) G. Matsumoto: Biol. Bulletin **150** (1976) 279.

Fluctuation and Relaxation of Transient Laser

東大・理 有 光 敏 彦

急に発振状態におかれたレーザーが、自然放出により光を出しはじめ、定常的発振状態におちつくまでの極く短い時間の間に、光子数分布にひじょうに大きなゆらぎが観測されている¹⁾。この現象は、非平衡系の不安定点近傍では、一般的にみられるものである。このような現象を扱う一つの方法として、スケーリング理論²⁾が提出された。このスケーリング理論を、H. Risken³⁾によって導びかれた半古典的レーザーモデルに応用し、F. T. Arecchi et al.¹⁾による自分たちの実験の解析と比較し、スケーリング理論がひじょうに有効であることを示す。また、レーザーの過渡的現象を扱った種々の理論があるが^{4)~7)}、今興味ある実験の解析としては、スケーリング理論が物理的直観にもうったえやすく、すぐれていることがわかる。ちなみに、スケーリング理論では分布関数が解析的に求まるが、他の理論では固有関数展開による無限級数でしか求められない。

初期状態の不安定点からのずれを示すパラメータ δ と、系の大きさ（レーザー系ではポンピング強度の2乗、つまり定常発振時の光子数）の逆数 ϵ において、(i) 不安定点上からの緩和 ($\epsilon^\mu/\delta \rightarrow \infty$)、(ii) 不安定点近傍での緩和 ($\epsilon^\mu/\delta \equiv \tau^\mu = \text{finite}$)、(iii) Ω 展開⁸⁾の使える緩和 ($\epsilon^\mu/\delta \rightarrow 0$) と分類できるが、紙面の都合上 (i) の場合の結果だけをここに記すことにする。

Risken³⁾の式を変数変換すると、

$$\frac{\partial R}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ 2x(1-x)R \} - 2\epsilon \frac{\partial}{\partial x} x \frac{\partial}{\partial x} R = 0 \quad (1)$$