

レーザーと生命現象

阪大・理 榎田孝司

§1. はじめに

生きた生体は明らかに秩序性を示し、しかもその秩序は空間的なものにとどまらず、時間的秩序や機能的な秩序を含む高度な秩序である。そして生命の本質は、この秩序性を自ら作り出して行くという所にあると考えられる。このようなことが可能であるためには、系は非平衡系であることが必要である。さらに秩序形成には非線形性が大きな役割を果たしていると考えられるから、生体の特徴は物理的には非線形非平衡開放系として捉えることができる。一方、レーザーは典型的な非平衡開放系であり、非線形作用によって秩序性が自発的に形成される点で生体と大変似かよっている。しかもレーザーの場合には、比較的容易に種々の実験を行なうことができ、またその結果を量子力学に基づいた厳密な理論と比較することができるので、非線形非平衡開放系の物理的モデルとして大変に優れている。そこでレーザーに於ける秩序形成について考え、それを拡張する観点から生命現象を眺めてみることにする。¹⁻⁴⁾

§2. レーザーにおける秩序性と熱力学的考察

レーザーから放出される光は、ポンピングがしきい値を越えると、スペクトル幅が狭く指向性の優れたものとなる。この性質は通常コヒーレンスが優れていると表現されるが、ここでは秩序性の観点からエントロピーと関連づけて考えてみる。

いま、光子ガスにボース統計を適用すると、光によって運ばれるパワーとエントロピーは、それぞれ

$$P = \int n \hbar \nu d\tau, \quad \frac{dS}{dt} = k \int \{ (n+1) \ln(n+1) - n \ln n \} d\tau$$

と表わすことができる。ここで n は自由度あたりの光子数であり、積分は異なる自由度にわたって行なう。つまり、偏った一つのビームを考えの場合、その断面積を A 、立体角を $d\Omega$ 、振動数幅を $d\nu$ として $d\tau = A \nu^2 d\nu d\Omega / c^2$ である。ここで、数少ない自由度のみについて考えることにし、簡単のため、その自由度間で平均をとって $\int d\tau \rightarrow \Delta\tau$ 、 $n \rightarrow \bar{n}$ と置きかえると

$$\frac{dS}{dt} \sim \frac{kP}{\hbar\nu} F, \quad F = \{ (\bar{n}+1) \ln(\bar{n}+1) - \bar{n} \ln \bar{n} \} / \bar{n}$$

と書くことができる。レーザーの発振光はスペクトル幅および立体角が小さいから、 $\bar{n}$ は非常に大きく、その場合 F は $(\ln \bar{n} + 1) / \bar{n}$ と近似できて、 F は十分に小さくなることわかる。つまり、有限のパワーを数少ないモードに集中した場合、その光は殆どエントロピーを運ばない。その極限として、完全にコヒーレントな光ではエントロピーは零になる。これは機械的な仕事などの最も高級なエネルギーに相当する。

任意の $\bar{n}$ をもつビームについて、 $\bar{n} = [\exp(\hbar\nu/kT_B) - 1]^{-1}$ として輝度温度

TB を定義すると、これはその光をあてることにより物質の温度をどこまで上げることができるかという到達温度の限界を与えることになる。⁵⁾ レーザーの発振光では輝度温度も高く、そのために物質を極めて高い温度にすることが出来る。このようにレーザーは非常に高温の光源に匹敵するが、これを実現するには負温度状態を作る必要があり、この状態は、無限大の温度よりも高温の状態とみなされる。光励起を考えると、前述のように二準位系では光源の輝度温度までしか温度は上昇しないから、負温度状態を作ることは出来ない。それに対して、三準位系ないしはそれ以上の多準位系を考えれば、ポンピングにより負温度状態を作ることが可能になり、これが実際にレーザーに使われている。ところで、そのようなことが定常的に行われるためには、光源からシステムを経て熱浴へとエネルギーが散逸される必要がある。したがって、機械的仕事に匹敵する高級なエネルギーを作り出すレーザーは、熱力学的には、高温の熱源からエネルギーをもらい、その一部を低温の熱源に捨てながら仕事をする熱機関とみなすことができる。この場合、もうエントロピーと捨てるエントロピーとでは後者の方が大きく、差し引きすると負のエントロピーをもらっていることになり、これが秩序形成ないしは仕事の源になっている。このように、一般に外部と結合し、エネルギーやエントロピーの流れの中に置かれた非平衡開放系では、秩序の形成が自発的に行われても熱力学とは矛盾せず、その場合には熱平衡状態の近傍では期待されないような新しい秩序状態の実現が可能である。生命現象もそのような散逸構造の一つの例であると考えられる。

§3. レーザーにおける秩序形成のメカニズム

レーザーをまず半古典論で考える。さらに放射場については共振器の一つのモードのみを考えて、そのエネルギー密度を P とする。いま、レーザー遷移の上準位と下準位の分布を N_2, N_1 とすると、 $dN_2/dt, dN_1/dt$ は P に依存し、また dP/dt は $(N_2 - N_1)$ に依存する。したがって、これらの振舞いは非線形となるが、しきい値から余り離れていない領域では物質系は放射場の変化に瞬間的に追従するとする断熱近似を使うことができ、 $dN_2/dt = 0, dN_1/dt = 0$ と置くことにより、 $\gamma = \gamma_0(1 + P/P_s)^{-1}$ を得る。ここで P_s は物質定数で決まる飽和パラメータであり、 $\gamma \equiv (1/P) dP/dz$ は増幅利得係数で、 $(N_2 - N_1)$ に比例する。これを使うと、光速を c 、共振器の損失係数を L として、次の式を得る。⁵⁾

$$\frac{dP}{dt} = (\gamma c - L) P \quad (1)$$

いま、ポンピングが弱く $\gamma_0 < L/c$ の場合には $P \approx 0$ であるが、ポンピングを強くして $\gamma_0 > L/c$ となったとすると、自然放出で生じた光は上式に従って増大する。しかし P が大きくなると飽和効果のために γ は小さくなり、 $\gamma = L/c$ の所で光の増幅率と損失率がバランスして振幅が一定の光波の持続的振動が実現する。これがレーザーの連続波 (CW) 発振である。

量子論では、熱浴も含めた全系のハミルトニアンから出発し、緩和定数とゆらぎの項を導入することにより、まず熱浴の変数を消去する。さらに、上と同様に断熱近似を使って物質の変数を消去すると、光の電場の運動方程式として

$$\frac{dE}{dt} = (G - K)E - \beta E E^* E + F \quad (2)$$

を得る。⁶⁾ ただし、放射場としては一つのモードのみを考え、その電場の演算子を $E(r, t) = E(t)u(r) = (Ee^{i\omega t} + E^*e^{-i\omega t})u(r)$ とした。ここで、 G と K は ωC と L に対応し、また β は飽和パラメータ、 F はゆらぎの演算子である。この場合も、 $G > K$ となると F によって生じた電場に対して正味の増幅が起こるが、電場が強くなると第二項の飽和効果が利いて安定化されるということ、発振に至る過程は古典論の場合と変わりはない。結局、レーザーに於ける秩序形成には、種を与えるゆらぎの他に、第一項で与えられる不安定化をもたらす効果と第二項で与えられる安定化をもたらす非線形効果が重要な役割をしていることがわかる。

ところで、上式はポテンシャル

$$V(|E|) = -\left(\frac{G-K}{2}\right)|E|^2 + \frac{\beta}{4}|E|^4 \quad (3)$$

の中での粒子の運動とみはして理解することもでき、レーザー発振に於いては、 G が K を越えることにより $E=0$ がポテンシャル曲線の底から不安定点に変わるために相転移が起こると考えてもよい。⁶⁾ すなわち、非平衡系を扱っているが、これを平衡系の相転移と全く同じように扱うことが可能である。

§4. 生体系に於ける秩序形成

熱力学的考察から、非平衡系における秩序形成には負のエントロピーの供給、つまり、低エントロピーの熱源であるポンピングとエントロピーの捨て場となる熱浴とが必要であることがわかったが、ポンピングは式(1)、(2)の右辺第一項を正にするためのものである。これは生体の場合、太陽の光ないしはそれを貯えた物質が元になり、実際の生命現象の場では通常 ATP の形で化学エネルギーとして供給される。またエントロピーは熱あるいは排せつ物としてまわりに捨てられる。一方、前節で秩序形成に重要な役割を果たすことが知られた非線形性は、全ての系に備わっているが、生体の場合には特に強い非線形性がみられるように思われる。例えば、生命の単位である細胞に於いて各種の生命現象に非常に重要な役割を果たしている細胞膜には 10^5 V/cm といった極めて高い電場が掛かっている。したがって、膜を構成する物質やそこに入り込んだ蛋白質分子などは強く分極しており、さらにこれらは柔らかいため変形を受けて系は安定化されていると考えられる。この系をさらに変形させたり振動させたりすると、それは分極に影響を与え、そしてそれがまた変形や振動に影響することになろう。フレリッヒは、このような分極と低周波の弾性振動の結合を考えることにより、分極 P の運動方程式が(3)式と同じ形のポテンシャルの中での粒子の運動として理解することができ、 P^2 の時間平均がしきい値を越えると、 $P \approx 0$ の状態から振幅の決まった振動状態へと転移が行はわれることを示した。^{7,8)} 彼はまた、機械的振動と電氣的振動が結合した振動の多くのモードについて、モード間の結合とポンピングを考えることにより、ポンピングがしきい値を越せば一般にボース凝縮と同様のことが起こり、コヒーレントな振動状態が実現されることも示した。^{7,8)} したがって、細胞を構

成する物質の非線形性と代謝によるポンピングを考えれば、レーザーと類似の現象が起こっても不思議はないことになるが、実際に、イカの神経興奮に関する実験結果は、まさにこのようなものとして理解することができる。⁹⁾ また、フレーリッヒのボース凝縮的モデルを支持するような実験結果もいくつか報告されている。^{1,2,7,8)} その他、相転移や時間的振動、周波数の引き込みなどといったレーザーと類似の諸現象は、細胞のレベルに限らず、例えば解糖サイクルのような生化学的反応から、形態形成とか個体数変化とか、さらに大きくは社会や進化といった問題に至るまで、生命現象の各所に見られるものである。^{10,11)} したがって、生命現象を非線形非平衡開放系の問題として捉え、レーザーをモデルにして考えることは大いに意味のあることであると思われる。

§ 5. おわりに

以上述べたように、生命現象における秩序形成の本質は、生体が非平衡開放系であり、熱平衡状態から遠く離れた状態に安定に存在し、負のエントロピーの供給を受けている所にあると考えられる。その点でも、またゆらぎや非線形性が重要な働きをしている点でも生体はレーザーと極めて似かよっている。そのような観点からすれば、地球上に生命が存在しうる理由が、地球が太陽という高温の熱源と低温の宇宙空間の間にある、エネルギーとエントロピーの流れの中に置かれた開放系であるという点に求められることは明らかであろう。そしてまたその大もとでは、宇宙の膨張にあるということが出来る。すなわち、これにより宇宙は冷え、空間の単位体積あたりのエントロピーは減ってきて来た。しかし、物質系の温度の低下は放射場のそれに追従できず、高温の星と3Kの放射場とが共存するのが現在の宇宙の姿である。これが天文学的時間スケールにわたる非平衡開放系の存在をもたらし、生命の存在を可能にした訳である。

文献

- 1) 梶田孝司 : レーザー研究 7 (1979) 241.
- 2) 梶田孝司 : 応用物理 49 (1980) 610.
- 3) 梶田孝司 : フィジクス 4 (1983) 364.
- 4) 岩沢宏 : 応用物理 52 (1983) 931.
- 5) 梶田孝司 : 量子光学 (朝倉書店 1981).
- 6) H. Haken (牧島, 小森訳) : 協同現象の数理 (東海大学出版会, 1980).
- 7) H. Fröhlich: Riv. Nuovo Cimento 7 (1977) 399.
- 8) H. Fröhlich: Advances in Electronics and Electron Physics 53 (1980) 85.
- 9) 松本元 : 神経興奮の現象と実体 (丸善, 1981).
- 10) G. Nicolis and I. Prigogine (小島, 相沢訳) : 散逸構造 (岩波書店, 1980).
- 11) 清水博 : 生命を捉えなおす (中央公論社, 1978).