

## 最近の技術から

# バイオフォトンのイメージングと量子特性測定

稻 場 文 男

東北工業大学工学部電子工学科 〒982 仙台市太白区八木山香澄町 35-1

### まえがき

生物界においてはさまざまな生命活動や生体機能の発現に伴って、肉眼の検出限界以下の極微弱発光が生じている。可視域を含み紫外外部から近赤外部にかけて主として観測されるこの現象は生物フォトン(biophoton)と総称され<sup>1,2)</sup>、生体を構成するミクロな細胞内小器官や細胞、組織、臓器・器官、さらにはマクロな個体全体という生命システムがもつ構造的・機能的な多重階層構造のすべてのレベルで検出されている<sup>1-5)</sup>。空間的・位置的なメッセージと考えられる生物フォトン発光パターンの特性やその時間的变化の計測・解析は、バイオフォトニクスシステムとしての生体の仕組みをよりよく理解する上で、分光的測定・分析と並ぶ極めて重要な無侵襲、非破壊的情報収集手段といえる。本文では生物フォトン現象のイメージングの最近の測定例と量子光学的特性解明へのアプローチの一端について紹介する。

### 2. イメージング方法および計測結果

極微弱な生物フォトンのイメージングには、2次元光電子増倍計数管の光電面上に結像した光子像を、その位置情報を保持したまま2次元的な光電子分布に変換した後増倍し、各光電子パルスの到来位置を検出、計数・演算処理を行ってプラウン管上に表示するという方法を用いている<sup>6)</sup>。位置検出は、光電子パルスを螢光面に入射させ、その各点での再発光像を撮像管でとらえるか、半導体位置検出素子と位置演算コンピュータを組み合わせる方法により行われる。生体試料や個体をそのまま測定対象とすることが多いため、特に装置内には温度や雰囲気などの環境制御系も整備しており、有効波長域は約280~850 nmである。なお、最近冷却型CCDカメラを用いて、1 μm近くまで拡張することを試みているが、まだ多くの検討・改善の余地が残されている。

図1に完全暗所で発芽させた無傷、無感染の小豆種子に外傷を与えた時の発光像の時間的变化を示す。aは外傷を付加する前の正常な発光パターン、bとcはこの状態で子葉にナイフで十字形の傷をつけてから15分後および2時間後にそれぞれ1時間計測した結果で、dは外

傷の位置を示すために実験後に弱い照射光の下で撮った写真像である。組織に異常がない場合は、通常aの左側に見られるように幼根の一部に比較的強い発光が観測されるのみであるが、外傷を受けるとその傷部位そのものが相対的に顕著な発光を呈するようになり、だいに減衰するとはいへ長く継続することが発見された<sup>6)</sup>。このような生物フォトンにおける特徴的な現象は、発芽大豆の外傷やマウス背面に作成した創傷の治癒過程においても発現することが確認されている<sup>5)</sup>。

次に、図2に採取した竹の子から直接検出された極微弱発光パターンを示す<sup>7)</sup>。a, cはそれぞれb, dの写真像に対応する上下および横方向に切断した試料のイメージである。この発光は生物フォトン用の超高感度分光分析装置<sup>2)</sup>を用いて測定した結果、竹の子の成分中のチロシンとバイチロシンのペルオキシダーゼを触媒とする空気中の酸化過程に起因することが見出された。

### 3. 量子光学的特性の検討

以上の実験結果からも明らかのように、生物フォトン

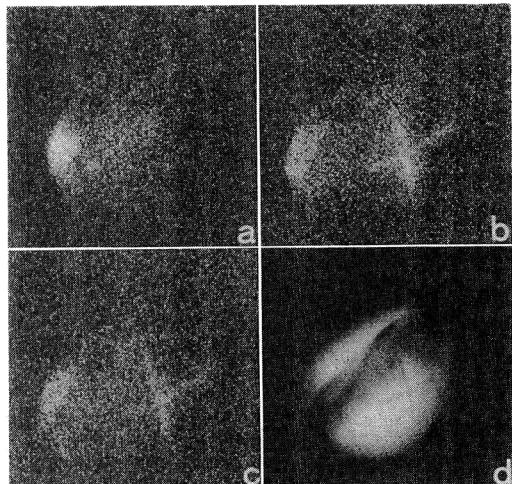


図1 発芽小豆種子に十字形の外傷を加えた後の極微弱生物フォトン発光のイメージングの経時変化（計測時間：60分）

a：無傷（全カウント数30,136個、平均カウント数8.4個/秒）、b：15分後（9.3個/秒）、c：2時間後（7.8個/秒）、d：外傷を加えた小豆種子の写真像。

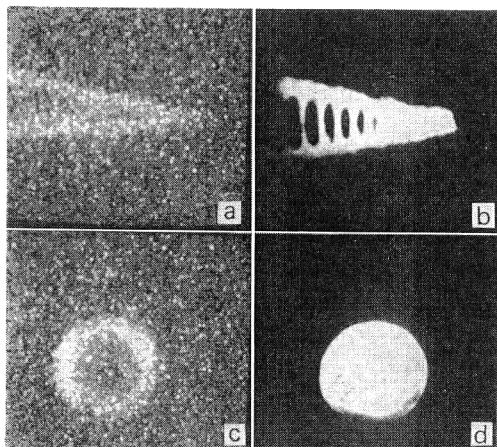


図 2 竹の子の切断面の極微弱生物フォトン発光のイメージング（計測時間：60 分）

a, b : 上下方向に切断したやじり形の試料, c, d : 横方向に切断した円形の試料によるイメージングと写真像.

発光は生体の時間的・空間的な状態や変化を伝える光の情報であり、極微弱でありながらユニークな応答（反応）を発する事実は、その極微弱な性質に重要な意味があるのではないかと考えられる。そこで研究の一環として、生物フォトンの量子光学的特性の測定・解析を計画し、2次の強度相関関数などの精密実験を試みている。試料の選択、調整や安定性、計測時間とデータの膨大量、雑音対策など極めて多難な実験のため、まだ確定的な結果は得られていないが、非古典的なサブポアソン分布の可能性が、例えばホウレン草の葉より抽出した葉緑体の秒オーダーの遅延蛍光の中のごく狭いピーク波長成分などでみられる徵候があり検討中である。

ところで、コヒーレントな古典的光を内部雑音がない理想的な検出器で直接検波する場合、 $10^{-9}$ の符号誤り率を保つに必要な光子数は平均 21 と見積もられる。このショット雑音限界を開拓するためにスクイズド状態が注目され<sup>8)</sup>、その一種であるサブポアソン分布をとる光子数スクイズド光は理想的には光子数のゆらぎがゼロであるから、直接検波における誤り率をゼロに近付けることが可能で、SN 比の上限はないものと考えられる。

このような観点から生物フォトン現象の検討、考察を試みる一例として、図 1 a の正常な場合をみよう。平均カウント数は毎秒 8.4 であるが、その半分は雑音カウント数とすると、面積的にみて幼根の部分からは光子が毎秒 10~数個程度放出されているものと概算される。室温において光子 1 個は究極的に最大約 46 ビット（波長 1.5  $\mu\text{m}$ ）の情報を担うと見積もられており、毎秒 10 個程度の光子は成長・分裂の活発な正常細胞に対して、何らかの必須な情報をやりとりしているといえそうである。そ

して外傷のような異常ないし危険な状態が生じるとそこからさらに毎秒数個の光子が放出されることになる。

そこで、さらに想像をたくましくすれば、傷のような異常な状態は別にしても、生命システムにとって正常な機能や活動のための情報を運ぶ生物フォトンは、直接検波で符号誤り率の最も低くできるサブポアソン分布の光子数スクイズド状態が最も有利ではないかと思われる。すべての生物はホメオスタシス（恒常性）の維持・制御によって秩序ある生命を保つとされており、それゆえ生体のミクロな構成要素である分子や原子の励起も自発的に十分よく制御されているはずである。光子数スクイズド光は、今までに原子や電子の励起状態を外部からフィードバックなどによりよく制御して秩序性を保たせる方法で人工的に実現されたが<sup>8)</sup>、そこには生物フォトンや外因の緩和された極微弱な遅延蛍光の発光過程との類似が示唆されるものと筆者は考えている。

#### 4. む　す　び

従来ほとんど知られていなかった生物フォトンの 2 次元発光パターンの計測を行い、それが空間的、時間的な生体系の生理状態や機能を伝える新しい光情報であり、その中には外部からの作用（入力）に対して生じる固有の応答（出力）の的確な発現が含まれていていることが初めて明らかになった。さらに、生物フォトンの量子光学的特性について検討、考察を行ったが、このような光子情報論的ならびに量子光学的な観点からの本格的追究は今後の興味深い課題と考えられる。

#### 文　献

- 1) 稲場文男：“生物フォトン”，月刊 BME（日本 ME 学会誌），1 (1987) 628-635.
- 2) H. Inaba: “Super-high sensitivity systems for detection and spectral analysis of ultraweak photon emission from biological cells and tissues,” *Experientia*, 44 (1988) 550-559.
- 3) 稲場文男, 達 保宏: “極微弱光情報検出技術に期待される新しい応用”, 画像処理, 7 (1976) 33-51.
- 4) 稲場文男: “極微弱光計測技術の医学および生命科学への応用”, 光学, 12 (1983) 166-179.
- 5) 稲場文男: “生物フォトンの超微弱発光計測”, 病態生理, 9 (1990) 101-110.
- 6) S. Suzuki, M. Usa, T. Nagoshi, M. Kobayashi, H. Watanabe and H. Inaba: “Two-dimensional imaging and counting of ultraweak emission patterns from injured plant seedlings,” *J. Photochem. Photobiol. B*, 9 (1991) 211-217.
- 7) H. Totsune, M. Nakano and H. Inaba: “Chemiluminescence from bamboo shoot cut,” *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 194 (1993) 1025-1029.
- 8) 例えば、花村栄一: 量子光学, 現代の物理学 8 (岩波書店, 1992) pp. 17-32.

(1994 年 3 月 4 日受理)