

生体からの極微量フォトン放射

—バイオフィオトンのイメージングと生体光情報検出—

Ultraweak Photon Emission from Living States

—Biophoton Imaging and Biophotonic Information Detection—

稲場 文男^{*1,2} 宇佐 史^{*2}
Humio INABA Masashi USA

要 旨

生体組織や器官、細胞、生体関連物質などの多重階層構造をもつ生体系のさまざまなレベルで広く全般的に検知・観測される、普通肉眼では認知できないくらい極微弱な、すなわち極微量のフォトン放射現象であるバイオフィトン(生物フォトン)発光は、生命現象や生理・代謝機能に密接なかわりをもつことが近年明らかになってきた。換言すれば、このような生物界に普遍的な極微弱発光現象は巨視的な秩序を保って組織的に統合されているシステムとしての生物・生体が生きているというありのままの状態のもとに発信し、伝えようとしているフォトンのメッセージ——生体光情報と考えられる。本稿では、可視域を中心として紫外部から近赤外部にわたって発現するこのような生物フォトン放射の主要な特徴や発生機序および各種の発光特性の高感度計測技術の概要をまとめて述べるとともに、空間的・位置的な新しい生体情報である発光パターンの2次元イメージングの基本的事例について報告する。

Biophoton is a new concept representing ultraweak photon emission phenomena closely related to a variety of life processes and biological activities, observable quite generally in nature. Hence these phenomena are considered as a novel source of biological and vital information originating from microscopic and macroscopic systems, such as biomolecular species, cellular organelles, cells, tissues, organs and living systems regardless of differences in biological hierarchy. In an effort to study the essential role of biophoton emission and to clarify its basic mechanisms and information in actual living systems and materials noninvasively, nondestructively and without use of any photosensitizers, we have pursued research and development of highly sensitive technology for detecting, imaging, analyzing and processing the ultraweak biophoton emission, not detectable by the human eye and conventional detection techniques. They include extremely low-noise photon counting systems, computer-based spectral analyzers, two-dimensional photon-counting imaging systems and systems to measure and analyze the optical and quantum statistical properties. This paper reports and discusses recent progress and results of our biophoton emission research with emphasis on their two-dimensional imaging along with summarizing fundamental characteristics and emission mechanisms of the ultr-

*1 東北工業大学工学部(〒982 仙台市太白区八木山香澄町 35-1) : Tohoku Institute of Technology.

*2 生体光情報研究所

論文受付 : 1994 年 10 月 6 日

最終稿受付 : 1994 年 11 月 24 日

aweak biophoton radiation.

Key words : Ultraweak biophoton emission, 2D image, Photon counting imaging, Biophotonic information, Living states and functions

はじめに

近年急速に進展しつつあるフォトニクス (Photonics) ないし光エレクトロニクス (Optical electronics) の支柱の一つである極限光計測技術の研究開発に伴って、ほとんどすべての生物は通常、肉眼の検出限界 (個体差はあるが、およそ数千~数万 photons/cm²·sec) 以下のきわめて微量な光子を常に自発的に放射しながら生きているという事実が明らかになってきた。生物界におけるさまざまな生命活動や生体機能の発現に伴って発生するこのような普遍的な極微弱生体発光、ないし放射現象は、一般に“バイオフィトン” (Biophoton) と総称され [1~3], 生体を構成するミクロな物質系から細胞内小器官, 細胞, 組織, 臓器・器官, さらにはマクロな個体全体という生体系の多重階層構造のすべてのレベルで観測されている [1~15]. 本報では、生体からの極微弱な光情報として

のバイオフィトン(以下通称の生物フォトンを用いる)現象について、とくに空間的・位置的な新しい生体情報をもたらす発光パターンのイメージングを中心として、この放射の主要な特徴や発光機序, さらに諸種の特性の高感度計測法などを概説する。

1. 生物フォトン現象の特徴と発光機序

生体内の日常的なさまざまな生理代謝作用に伴う生化学反応において必然的に生じる励起分子種に起因する生物フォトンの発光強度は、肉眼で識別可能なホタルやクラゲ, 発光バクテリアなどの例でよく知られている。“生物発光” (Bioluminescence) のレベルよりも3~6桁, またはそれ以上も弱く, 通常およそ 10⁻¹⁵W/cm² (可視域において約 10³photons/cm²·sec のオーダーのレベル) 以下である。Fig. 1 に参考のために生物フォトン発光と生物発光の強度範囲の概略の比較を示す [3, 6]. なお, 生体表面温度

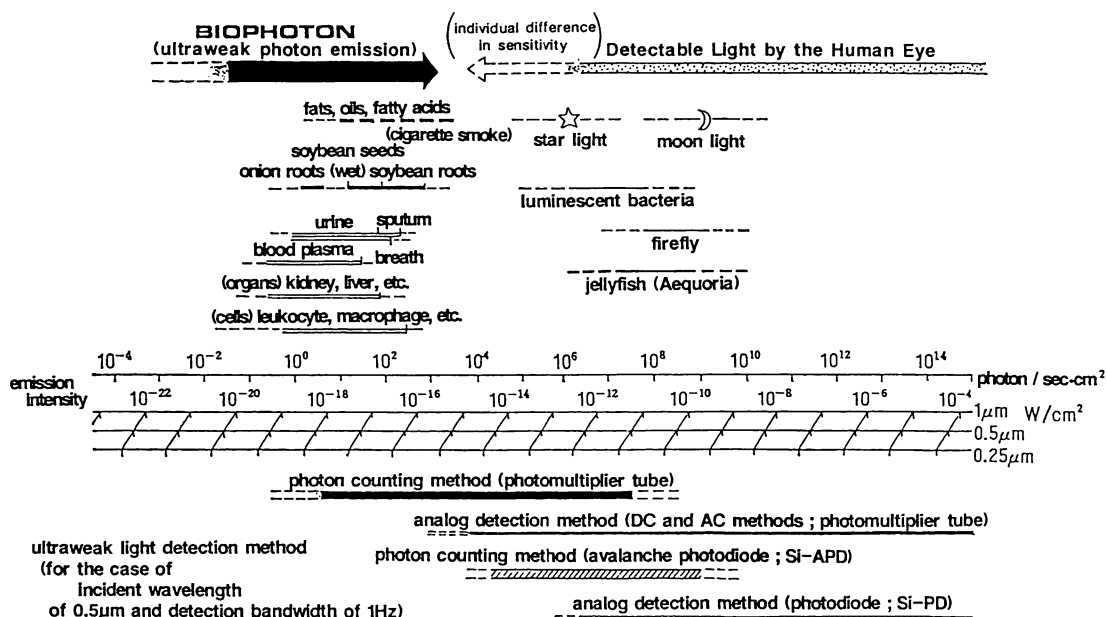


Fig. 1 Comparison of typical intensity distributions of various light emission phenomena closely associated with life functions and biological activities; ultraweak biophoton emission and bioluminescence. Detection range and sensitivity of some typical low intensity light detection techniques are also illustrated for comparison.

や環境温度における可視域近辺の黒体放射強度（およそ $1 \text{ photon/cm}^2 \cdot \text{sec}$ のレベル）は、一般に生物フォトン発光強度よりも弱く、その点では熱平衡系の温度放射とは基本的に異なる非熱平衡的放射のカテゴリーに入るものである。

生物フォトン発光はミクロにみれば、生体構成物質が生体内部の代謝過程、または外界との交流による代謝応答を通して生化学的に励起され、その中で発光を伴って自発的に低エネルギー状態に遷移する分子種によって生じるものであり[1, 4, 5], 代謝的にこのような応答が繰り返されれば連続して観測されることになる。したがって、原理的には化学発光の一種(Ultraweak dark biochemiluminescence; 極微弱暗生化学発光)[1, 4, 5]であるが、とくに重要なことは外部から人為的に光や熱をはじめ物理的、ないし化学的な何らかの刺激や操作を一切加えなくても、生きているありのままの状態で自発的に発現している点である。

換言すれば生物フォトン現象は、視認可能な光を放つ生物発光のようなある特別の種類生物のみに偏在化されて系統進化的に非類縁性を有する、分子進化の過程で特異化したと思われる特殊な酵素やタンパク質(たとえば、ルシフェリンールシフェラーゼ, エコーリンなど)が関与する発光とは基本的に異なるものといえる。すなわち、この発光・放射は生命維持の根幹ともいえる酸化代謝の過程・機能状態などと密接に関連して発生するもので、複雑な発光機序と多くの種類の発光分子種が存在すると考えられている[12]。

そのため通常この現象の多くは生体内に存在する酸素分子種に依存し、常温で緩やかに進行する代謝反応過程での活性酸素種やフリーラジカルの産生と関連し、その際の生体中の過酸化過程や酵素反応、エネルギー移動などに付随して観測される[12]。これは酸素分子種による酸化は酸化還元電位の差から生じるエネルギーが比較的大きく、発光分子種の励起に有利であることに基づくものとみられる[16]。たとえば脂質過酸化の場合には、生体内で内的あるいは外的要因で発生した活性酸素 ($\text{HO}\cdot$; ヒドロキシラジカルなど) が開始剤となって脂質ペルオキ

シラジカル ($\text{LOO}\cdot$) やヒドロペルオキシド (LOOH) が連鎖反応的に生成され、それからさらに発光を生じる励起カルボニル分子や励起一重項酸素分子 ($^1\text{O}_2$) が形成される (Russell 機構) [17]。

また、励起一重項酸素分子がさらに不飽和化合物と反応することによってジオキセタンを生成し、その開裂によっても励起カルボニルを生じる[17]。これらの励起分子種からの発光の他に、蛍光分子種へのエネルギー移行により生じた励起状態からの発光も寄与すると考えられる。さらにタンパク質中のチロシンやトリプトファンなどのアミノ酸残基や核酸などの発光も認められている。

その他、生物フォトン発光のメカニズムに関しては、励起分子種と電子供与性蛍光物質との間での電子の授受による電荷移動錯体の形成(電荷分離)と電荷消滅を経た蛍光物質の励起(CIEEL 機構)など、エネルギー移行を含む複雑な反応過程に基づいて複数の発光種が関与することがスペクトル分析などの結果から示唆されている[12]。また、異分子間でなく同一分子内での電子移動、電荷分極による蛍光性基の発光なども生じるものと考えられる。なお、これらの中には酸素非依存性の発光分子種も含まれているとみられ、チトクローム系のような電子移動による嫌気性条件下における生物フォトン発光現象の検討も今後の課題の一つといえる。

Table 1 に生物フォトン発光に関与するとみられる、現在までに明らかにされた主要な発光分子種の分類とその生成励起過程を参考のためにまとめて示しておく[12, 16]。

生物フォトン現象の医学的応用の観点から興味深いことは、近年種々の疾患において、脂質、核酸、酵素、タンパク質などへの酸化修飾による代謝機能障害や発ガンのプロモーターとしての活性酸素種やフリーラジカルの関与が注目されており、これらの作用や過程が生物フォトン発光に多かれ少なかれ反映していると考えられる点である。たとえばマウスやラットの臓器や細胞、血液からの生物フォトン発光強度の増加が、紫外線や放射線照射、あるいは過酸化脂質、発ガン物質の投与などの酸素雰囲気下における

Table 1 Classification and typical examples of emitting molecular species and their generation/excitation processes associated with ultraweak biophoton emission phenomena (known up to the present time).

Emitting Molecule/Reaction	Generation/Excitation Process
Active oxygen	${}^1\text{O}_2; \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{R}-\text{C}-\text{C}-\text{R} \\ \quad \\ \text{O}-\text{O} \end{array} \longrightarrow \begin{array}{c} \text{R}-\text{C}^*=\text{O} + \text{O}=\text{C}-\text{R} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$
Energy transfer (Förster process)	$\begin{array}{c} \text{R}-\text{C}^*=\text{O} + \text{F} \\ \\ \text{H} \end{array} \longrightarrow \text{RCHO} + \text{F}^*; \text{F}(h\nu) \longrightarrow \text{F}^*$
Dioxetane in molecular species	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{F}-\text{C}-\text{C}=\text{O} \\ \quad \\ \text{O}-\text{O} \end{array} \longrightarrow \left[\begin{array}{c} \text{F}=\text{C}-\text{O} + \text{CO}_2^* \\ \\ \text{H} \end{array} \right] \longrightarrow \begin{array}{c} \text{F}-\text{C}^*=\text{O} + \text{CO}_2 \\ \\ \text{H} \end{array}$
Hydroxide and hydroperoxide in molecular species	$\text{FH}-\text{OOH} + (\text{RCHO}) \longrightarrow \cdot\text{FHOH}\cdot + (\text{RCOOH}) \longrightarrow \cdot\text{FHOH}$
Diradical reaction	$\text{F} + \text{A}(\text{O}_2) \longrightarrow \cdot\text{F}^+ + \cdot\text{A}^- \longrightarrow [\cdot\text{F}^+ \cdot\text{A}^-] \longrightarrow \cdot\text{F} + \text{A}$

ストレス状態を招来するような条件において認められることや、加齢に伴うラットの各種臓器の極微弱発光の増大、老化ラットでの老化色素リポフスチンの増加との相関などが報告されている[1~5, 7, 17].

また、ラット心筋を用いた虚血再灌流障害の実験では虚血再灌流時に発光が増強する様子が *in vivo* で実時間計測される[7]など、老化と活性酸素、フリーラジカル、過酸化脂質の関連性について種々の興味深い知見が得られている。生物フォトン発光はこのような生体内の酸化的ストレス状態、すなわち活性酸素種やフリーラジカルの産生と生体の抗酸化機能の間のバランス状態が不均衡になるような諸種の過程で検出されることが全般的に多いものといえる。それゆえ、生物フォトン情報はヒトを対象とする非侵襲、非接触的な生体計測・検査のための新しい手法を提供するものと期待される。

2. 極微弱生物フォトン放射の高感度計測技術

肉眼の検出限界を下回るような極微弱な光を計測し、その中に含まれている情報を分析する技術は、近年のフォトニクスのめざましい進展とともに実用開発されてきた、可視域を中心として紫外部から近赤外部にかけてもっとも高感度な光子計数法 (photon counting method) (正確には単一光電子計数法; Single photoelectron

counting method) に原理的に基づいている[1~5, 9, 14]. これは光は強度が微弱になるに従って、エネルギーや運動量の最小単位である photon(光子)としての粒子的な振舞いが顕著になり、その個数を計数することによって統計的に強度の測定が可能になるという事象に従うものである。動作法と計測時間を最適化することにより、現在ではとくに選別された優れた性能の光電子増倍管を用いると、数秒~分当たり平均1個の光子までも検出できるようになっており、また光電子増倍管の光電面の感度がきわめて低下する約900 nm以上の近赤外領域では、Si や Ge の pin フォトダイオードやアバランシェフォトダイオードなどの半導体光検出素子を用いた光子計数方式、あるいは電荷蓄積方式などの有効性が確認されている。Fig. 1 の下部には各種の極微弱光検出法のおよその動作範囲も図示してある[6].

生物フォトン発光の特徴の一つは、紫外部から近赤外部の波長範囲全般にわたり広く分布し、通常は分~時間、あるいは日単位の経時的変化を示すことが多いという点である。それゆえ、生物フォトンの物理的特性および生物学的な現象としての意義などをより具体的に把握し、さらに生体計測・検査への適用法などを実際に探索するためには、極微弱な発光強度の測定のみならず、発光スペクトル分布や偏光特性およびそれらの空間的・位置的分布や時間的変化、さ

らにそれらの相関特性などをも含めた系統的な計測・分析が是非とも必要である。その中でも、発光分光特性とその時間的变化は、生物フォトンの発光機序や発光分子種、さらには生理状態・病態などに関する重要な情報を提供するものである。

しかし、発光強度が通常 10^{-15}W/cm^2 以下という極微弱光領域において適用し得る分光法としては、現時点では光子計数法に基づくフィルター差分分析方式および分散型多波長同時測光方式の2種類に限られるであろう[2, 9, 18~21]。一般的には、検出感度と汎用性という点では前者が、波長分解能と時間分解能の点では後者が優れていると考えられる。

フィルター差分分析方式分光法は、試料と光電子増倍管の間隙に、透過率の優れた複数枚の異なる短波長シャープカットオフ特性を持つ色ガラスフィルターをコンピュータで制御して、一定時間ごとに順次挿入してその透過光強度を計数し、各フィルター間の差分光子計数値から発光波長分布を算定するという原理に従うものである[2, 18~20]。とくに生きている個体やその局所、臓器、組織、あるいは種々の液体試料のような、比較的広い表面積を持つ測定対象からの生物フォトン放射を、光学的損失を極力低くして効率よく分光分析するには、この方式が実用上最適である。

しかし本方式には、時間分解能(最短約1分)と波長分解能(最小約20 nm程度)についての動作上の制約があるため、時間的に速い変化を伴う現象(たとえば1分以内に発光スペクトルのパターンが変化するような場合)の精密な分析には適用が難しい。このような状態には、最適設計された光学系と平面型回折格子および2次元光電子増倍計数管からなる分散型の多波長同時測光(Polychromator)方式[21]が有用である。とくに発光種の同定および反応動力学的解析といった基礎生化学や、極微弱発光計測を主体とする検体検査[6~10, 14, 17]の分野では、この方式が今後ますます有用な分光手段を提供するものと判断される。

生物フォトン現象は、空間的に広がりのある一種の極微弱な面発光として捉えることが可能

である。空間的・位置的な生体情報としての生物フォトン発光画像やその時間的变化の計測・分析は、精緻な生体系の仕組みやそのダイナミクスを理解する上で、発光分光計測と並ぶきわめて重要な無侵襲生体計測手段である[1, 7, 15, 22, 23]。生物フォトンの2次元画像計測法は、基本的には1次元的な光子計数法を2次元に拡張したものである。すなわち、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に対応して検出、計数・演算処理を行ってブラウン管上に表示する方式が用いられる。位置検出には、光電子パルスを蛍光面に入射させその部位での再発光像を撮像管で捕らえる方法や、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があるが、いずれも2値化された光電子パルスを位置に対応した画像メモリー上で計数、蓄積して最終的な2次元光子計数画像を構成している[7, 22~26]。

3. 生物フォトン放射パターンのイメージング

極微弱生物フォトン発光画像の超高感度計測用として数種類の2次元極微弱発光パターン計測・解析システムをわれわれの研究グループは設計・開発した[7, 22~25]。Fig. 2にそのブロッ

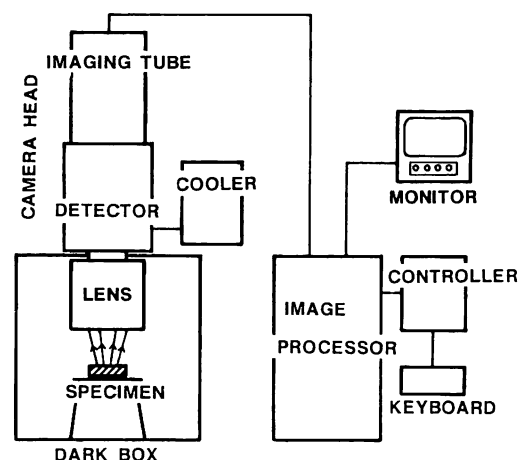


Fig. 2 A block diagram of the two-dimensional photon counting system for ultraweak biophoton emission imaging.

ク図の一例を示す[25]。生きてい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、システム内には温度や雰囲気などの環境制御系も装備してあり、有効波長範囲はおよそ280~580 nmである。なお最近、冷却型 CCD カメラを用いて1 μm 近くまで波長域を拡大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。上述の2次元光電子増倍計数管を用いる方法と比較して、原理的に CCD の方が量子効率が高く、しかも近赤外領域にも感度を有するという利点があり、極微弱生物フォトン発光特性の2次元計測にとって今後有効な手法となる可能性がある。しかし、そのためには現在市販品として入手可能な比較的大口径の内外の CCD 素子の超低ノイズ化、超高感度化を含む一層の性能向上が強く望まれる。

以下にこのような計測システムにより初めて見出された、生物フォトン発光・放射のイメージングのいくつかの具体的結果を示す。

1) 大豆種子の発芽時の生物フォトン放射イメージング

試料は蛍光を発する可能性のあるクロロフィル系物質の形成を生じないように、光を完全に遮断して暗所で発芽させた5日目のもので、Fig. 3の右側(b)に示すように、2枚の子葉のうち的一方を注意深く取り除いた後の幼根、幼葉および他方の子葉を含む1個の大豆である。Fig. 3(a)はブラウン管に表示されたそのまま

の画像で、露光時間93分にわたる光電子パルスの全カウント数は、67,788個(平均カウント数12.1個/秒)である[24,27]。

この発光パターンは外部から光などの刺激をまったく加えずに、完全な暗室中に試料を長く放置しておいて得られたものであり、とくに幼根と幼葉の接合部を含む胚軸部分から毎秒当たりの平均フォトン数は少ないが、およそ500 nmを中心とする幅広いスペクトル分布の生物フォトンが顕著に放出されていることが発見された。胚軸の幼根側には細胞が活発に分裂し、増加している分裂的成長帯があり、さらにその先にはおのおの細胞が大きくなりつつある伸長的成長帯へと接続する部位がある。なお、このほかにも幼根、そして子葉のふちの順に極微弱発光が観測された。

2) 発芽小豆種子に外傷を加えた場合の生物フォトン放射イメージング

次に何らかの既知の環境変化や刺激・外乱を付与した場合に誘起される生体系の状態変化を、生物フォトン放射の空間的応答情報として探るために行った実験の代表例を紹介する。

その一つは、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パターンの時間的変化である。Fig. 4(a)は外傷を付加する前に1時間計測した像(正常な発光パターン;全カウント数30,136個,平均カウント数8.4個/秒)、(b)と(c)はこの状態で子葉にナイ

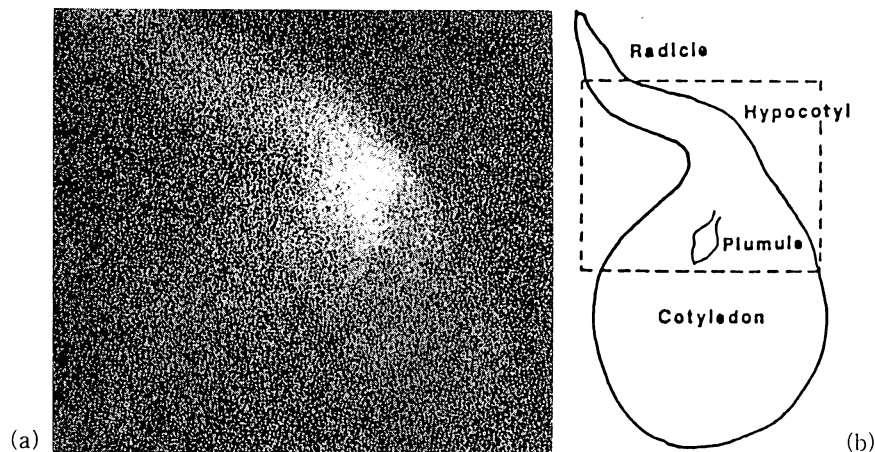


Fig. 3 (a) Ultraweak biophoton emission image of mitosing soybean after 5 days of germination, and (b) schematic drawing of the sample soybean; the area included in the image is indicated by the dashed line.

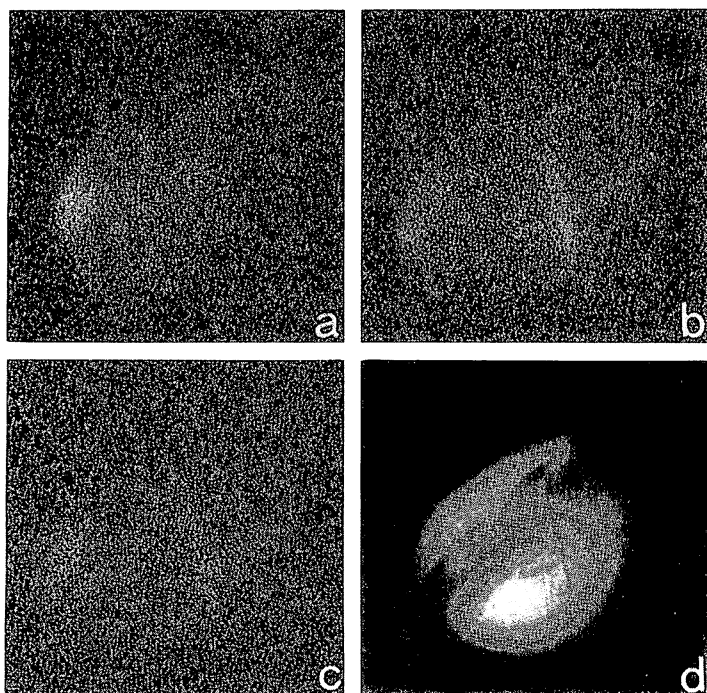


Fig. 4 Ultraweak biophoton emission images of germinating adzuki bean. (a) its image before injury, (b) and (c) 15 min. and 2 hours after injury, respectively, and (d) photograph of the same specimen used in this experiment. The cut can be clearly seen as the cross on the cotyledon.

フで十字印の傷をつけてから 15 分後(全カウント数 33,445 個, 平均カウント数 9.3 個/秒)および 2 時間後(全カウント数 27,987 個, 平均カウント数 7.8 個/秒)にそれぞれ 1 時間測定した結果を示している。(d)は外傷の位置を確認するために実験終了後に外部から弱い光を照射して撮影した写真像である[15, 25, 27]。

組織に異常がない場合は, 通常(a)の中央左側にみられるような幼根の一部に比較的強い発光が観測されるのみである。ところが一度外傷を受けると傷の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, その後時間の経過とともに徐々に全体的な減衰傾向を示すことが発見された。

またさらに(a)と(b)の発光パターンを比較すると, 創傷付加直後の時点において, 幼根の部位に生じている特徴的な生物フォトン発光の領域にある程度の広がり観測される。これとまったく同じような現象は, 発芽大豆を用いた実験でも発現することをすでに確認している[25]。このような実験事実は, 創傷に代表されるような外部からの生体系へのある種の入力(刺激)が, 出力応答としての極微弱生物フォトン放射し, 組織的にはつながっているが距離的に隔たった部位に光情報として伝達されるこ

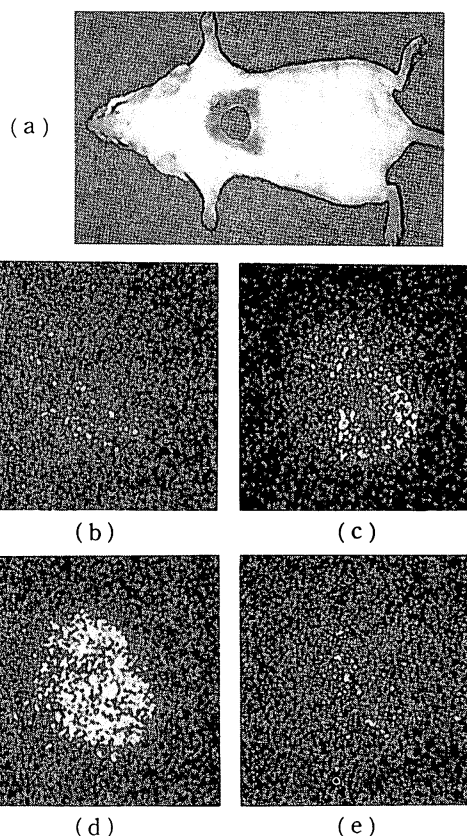


Fig. 5 Ultraweak biophoton emission images showing time course of wound healing on an injured mouse back.(a)photograph of the mouse with a wound of roughly 1 cm in diameter,(b)its biophoton image taken 15 min. after the operation,(c)2 days,(d)4 days and(e)8 days after injury, respectively.

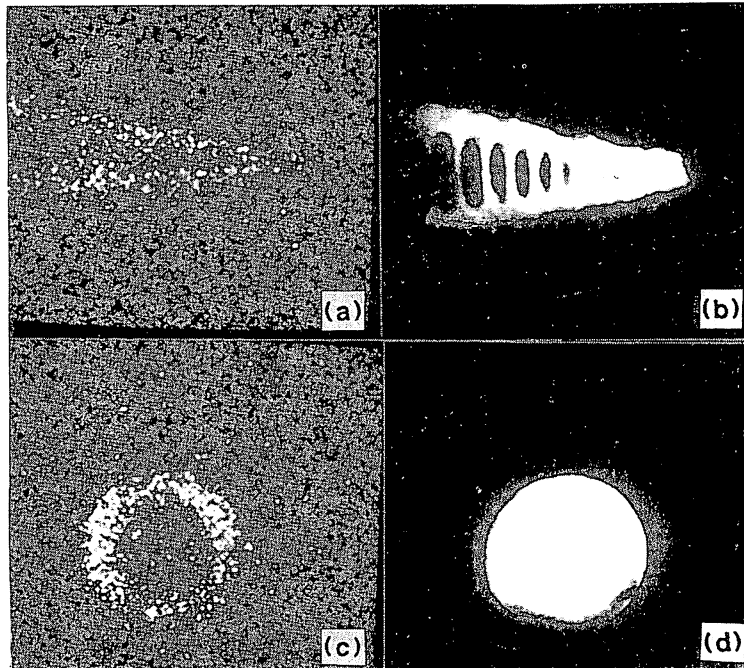


Fig. 6 Ultraweak biophoton emission images of bamboo shoot cut and their photographs. (a) a sagittally sectioned bamboo shoot, (c) an axially sectioned bamboo shoot, (b) and (d) photographs of the same specimens as in (a) and (c), respectively.

とを客観的に示すものといえる。

3) マウス背面に作成した創傷からの生物 フォトン放射イメージング

植物の場合と比較して、ヒトや動物が外傷を受けたときに発現する初期の生体(防御)反応は、免疫学的にある程度明らかになっている。しかし、たとえば創傷が縮小、回復していく過程において、傷そのものおよびその周辺の組織がどのような相互作用・効果を生じながら最終的な治癒の状態に至るのかは、医学的にも生理学的にも未知の課題である。

そこで、このような状況で極微弱生物フォトンが生体の反応ないし応答情報として発現する可能性を確かめるために、マウスを用いて実験を行った結果、体表面上の創傷が自然に治癒する過程で特有な生物フォトン放射が観測されることを見出した〔7, 22, 23〕。Fig. 5はその代表例を示すもので、(a)のようにマウス(Balb/c, 雄, 7週齢)の背側の皮膚を真皮を含めて直径約1 cmのほぼ円形状に切除し、人工的な外傷のモデルとした。(b)~(e)はそれぞれ、創傷形成直後、自然治癒過程の3日目(48時間後)、5日目、9日目の時点で得た創傷部位の発光パターンである。測定はいずれもエーテル麻酔下で90分間行った。その結果一般的な傾向として、創傷を形成した直後の生物フォトン発光はそれ

ほど顕著ではないが、2日目以降徐々に創傷部位からの発光強度が増加し、4~6日目の時点でピークに達した後、時間の経過とともに減衰しながら8日目~9日目以降痂皮(かさぶた)が脱落して治癒に至る、というタイムコースを辿ることが明らかとなった。

今後、病理学的な所見も含めて詳細に検討する必要があるが、このような生物フォトン発光パターンの経時的変化は、その生体情報的意義とともに、創傷の周辺組織が関与した痂皮形成のメカニズムと痂皮そのものの役割の重要性を強く示唆しているものと考えられる。

4) 竹の子の切断面における生物フォトン 放射イメージング

次に、Fig. 6に地中から採取した竹の子の切断面から直接検出された極微弱発光パターンを示す。(a)は(b)の写真像に対応する上下方向に切断したやじり形の試料、一方(c)は(d)のような横方向に切断した円形状の試料からの生物フォトン発光像である〔15, 23, 28〕。

この竹の子をすりおろして、遠心し、採取した上澄み細胞液は2 mlで約10,000カウント/秒という比較的強い発光強度を有しており、 H_2O_2 の添加により顕著に増大することが認められた。そこで、生物フォトン用の超高感度フィルター差分分析方式分光装置を用いて発光スペ

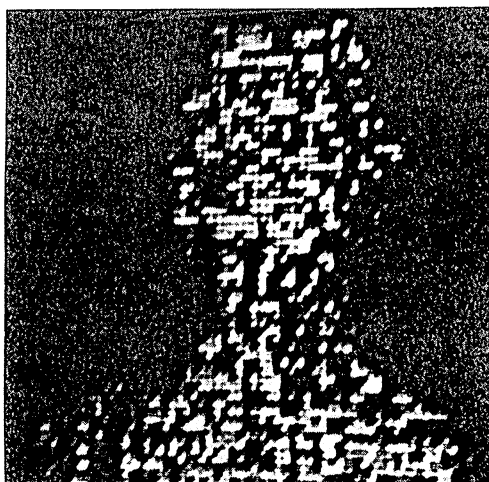


Fig. 7 Ultraweak biophoton emission image detected from face and neck including shoulders of a young woman.

クトルの分析を行った結果、この発光は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での酸化過程により発生することが見出された[28].

5) ヒト顔面付近からの生物フォトン放射イメージング

われわれは人体表面から自発的に放射される極微弱生物フォトン発光についても数年来研究を進めており、手および指先各部の発光パターンの計測、分析については以前にも報告した[8, 10, 22, 29]. **Fig. 7** は近年試みた測定結果の一例で、若い女性の顔面および首・肩部からの生物フォトン発光パターンを示す[23, 29]. 計測に際しては、顔などの化粧品をすべて取り去った後に丁寧に数回洗顔してもらい、暗室中にリラックスして静座して約2時間の測定で得られた画像である。このパターンでは表示された元の生のデータから背景雑音レベルをある程度差し引く画像処理を行っている。

肩から上の人体の形状が描出されており、左側の肩の部分に縦に洋服の紐の跡が黒く残っていることから、これらの発光は人体皮膚表面に由来していることが確認される。なお、このような人体からの生物フォトン放射については、本特集号の筆者らの別の報文[30]を参照していただければ幸いである。

おわりに

生体からの生物フォトン放射の研究はようやく本格的な幕明けを迎えたといえるもので、本報ではこのような生体システムの生理状態や機能の時・空間的な新しい光情報をもたらす生体フォトン放射現象の中でも、極微弱でありながらユニークな応答、反応を空間的パターンとしての確に発現することをとくにこれまでの実験結果を織りまぜて明らかにした。これらの事実はさらに、その極微弱な放射特性に何か本質的な意義、ないし役割があることを示唆しているものではないかと思われる点が少なくない[15, 23, 27]. この問題については、生物フォトン放射の量子力学/量子光学的な観点からの根元的追究[15, 27], さらに細胞間や細胞・組織内の光子通信の可能性などにかかわる未踏革新的なテーマの掘下げを含めて今後の新たな取り組みが望まれる。その中にはフォトンによる生体イメージングの究極技術の探求も含まれるものと考えられ、光と生体の相互作用の本質的特性を基盤として、新しいバイオフィotonクスの分野が総合的に開拓され、計測、診断、治療などへの応用に大いに貢献することを心から期待して結びとする。

文 献

- [1] 稲場文男：生物フォトン. BME(日本 ME 学会雑誌) 1 : 628-635, 1987
- [2] Inaba H : Super-high sensitivity systems for detection and spectral analysis of ultraweak photon emission from biological cells and tissues. *Experientia* 44 : 550-559, 1988
- [3] Inaba H : New bio-information from ultraweak photon emission in life and biological activities : biophoton emission. In : Andersen JB ed. *Modern Radio Science 1990*, Oxford Univ Press, Oxford, 1990, pp. 163-184
- [4] 稲場文男, 遠保宏 : 極微弱光情報検出技術に期待される新しい応用—ライフサイエンスにおける極微弱化学および生体発光を中心として. *画像処理* 7(3) : 33-51, 1976
- [5] 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 : 166-179, 1983
- [6] 稲場文男 : 超微量光計測による生物フォトン情

- 報の検出. 化学と工業 **42** : 865-868, 1989
- [7] 稲場文男: 生物フォトン超微弱発光計測. 病態生理 **9** : 101-110, 1990
- [8] 宇佐 史, 稲場文男: 人体表面からの極微弱生物フォトン発光と脳波の同時計測. 生物物理 **30** : 259-262, 1990
- [9] 小林正樹, 稲場文男: 極微弱生物フォトン検出・分析による生体計測. 光技術コンタクト **28** : 690-700, 1990
- [10] 小林正樹, 稲場文男: 極微弱生物フォトン発光による生体計測. 臨床検査 **35** : 610-615, 1991
- [11] 稲場文男: 生体からの極微弱生物フォトン計測. 医学のあゆみ **162** : 882, 1992
- [12] 渡辺治夫, 稲場文男: 生物フォトンの生化学代謝, 発光機構, 進化一. O plus E No. 142 : 112-123 および No. 143 : 139-153, 1991
- [13] 稲場文男: BIOPHOTON, 第 13 回日本レーザー医学会大会論文集 : 13-16, 1992
- [14] 小林正樹, 宇佐 史, 稲場文男: 生体情報計測のためのヒト由来生体試料の高感度極微弱発光検出およびスペクトル分析. 計測自動制御学会論文集 **30** : 385-391, 1994
- [15] 稲場文男: バイオフィオンのイメージングと量子特性測定. 光学 **23** : 306-307, 1994
- [16] 稲場文男: バイオフィトニクスと高分子. 高分子 **42** : 52, 1993
- [17] 宮沢陽夫, 稲場文男: 極微弱発光. 今井一洋編: 生物発光と化学発光—基礎と実験. 広川書店, 東京, 1989, pp.126-143
- [18] 清水慶昭, 遠保宏, 稲場文男: 極微弱な光情報の計測—その基礎と極微弱発光スペクトル分析への応用—. 光学 **4** : 105-123, 1975
- [19] Inaba H, Shimizu Y, Tsuji Y : Measurement of very weak light signals and spectra. Japan J Appl Phys **14**, Suppl **14-1** : 23-32, 1975
- [20] Inaba H, Shimizu Y, Tsuji Y et al : Photon counting spectral analyzing system of extraweak chemi- and bioluminescence for biochemical applications. Photochem Photobiol **30** : 169-175, 1979
- [21] Nagoshi T, Watanabe N, Inaba H et al : Spectral analyses of low level chemiluminescence of a short lifetime using a highly sensitive polychromatic spectrometer incorporating a two dimensional photon-counting type detector. Photochem Photobiol **56** : 89-94, 1992
- [22] 宇佐 史, 小林正樹, 稲場文男, 他: 極微弱生物フォトンによる生体情報計測. テレビジョン学会技術報告 **15**(22) : 1-6, 1991
- [23] 稲場文男: 生物フォトンによる生体光情報と生体計測応用. 電気学会光応用・視覚研究会資料 LAV-94-13 : 53-64, 1994
- [24] Scott RQ, Usa M, Inaba H : Ultraweak emission imagery of mitosing soybeans. Appl Phys **B48** : 183-185, 1989
- [25] Suzuki S, Usa M, Inaba H et al : Two-dimensional imaging and counting of ultraweak emission patterns from injured plant seedlings. J Photochem Photobiol B : Biol **9** : 211-217, 1991
- [26] 藤正 巖: 医用オプトエレクトロニクスの未来技術. BME (日本 ME 学会雑誌) **8**(5) : 1-9, 1994
- [27] 稲場文男: 光センシングにおける未踏極限技術の探究と期待. 計測と制御 **32** : 915-920, 1993
- [28] Totsune H, Nakano M, Inaba H : Chemiluminescence from bamboo shoot cut. Biochem Biophys Res Commun **194** : 1025-1029, 1993
- [29] 神 正照, 稲場文男, 宇佐 史, 他: ヒト手指先からの無侵襲極微弱生物フォトン発光計測. 第 14 回日本レーザー医学会大会論文集 : 489-492, 1993
- [30] 宇佐 史, 稲場文男: 人体からのフォトン放射. Med Imag Tech **13** : 本特集号, 47-54, 1995