

総 論

1 はじめに

21世紀は光の時代と言われるようになって久しいが、実際に、身近な所で「フォトンクス」や「光通信」といった言葉がしばしば聴かれる。このほかにも、光・電磁波を利用した研究を様々な研究分野において推進する提言も行われている¹⁾。光を利用するには、光源のほかにも、必然的に「光」を計測する検出器が必要となる。光（電磁波）は図1に示したように、波長（振動数）により 10^{-12} m（ $\sim 10^{20}$ Hz）よりも短い γ 線から 10^4 m（ $\sim 10^4$ Hz）よりも長い超長波に分類される。光のエネルギーは波長、振動数によって決まるため、光を検出するには、そのエネルギーに対応した方法やデバイスが必要となることは言うまでもない。さらに、光を化学計測に用いる場合には、光の波長によって試料と光の物理的な相互作用は異なるため、計測に用いる光の波長（エネルギー）により得られる情報も異なる。たとえば、紫外・可視領域の光は分子の電子的な情報を、より波長の長い赤外からマイクロ波の波長領域においては、分子の振動・回転・並進運動の情報が得られる。これに対し、波長の短いX線などは分子を構成する原子による散乱を通して、結晶構造解析に利用されている。

このような分光化学計測においては、実験的に得られる情報の質や精度は検出器、光源、データ処理システムなどに大きく依存する。中でも、図1のような広い波長領域を対象とする分光計測においては、各波長領域の

光を高感度・高精度に検出することが不可欠となる。実際に、我々は実験目的に応じて様々な光源と光検出器を選択・利用している。しかし、機器分析がコンピュータ化された現代では、キーボードを叩くだけで容易に計測を行うことができるため、光検出器あるいは光検出法の原理や特徴を必ずしも熟知せずに利用していることも多いのではなかろうか。正しい計測を行い、かつ計測データの信頼性を評価するためには、個々の光検出器・検出法の原理や特徴を理解することは極めて重要である。そのような観点から、 γ 線から電波にわたる光検出器や関連する最先端技術の原理や特徴などを、各分野における専門家が解説する本特集は大きな価値がある。また、原理や最先端技術を知った上で、実際の分光計測にフィードバックすることにより、新たな研究の進展も期待される。

本稿は光検出器の「総論」であるが、筆者は γ 線から電波にわたる広い波長・エネルギー領域の光検出器全般について詳しいわけではない。ここでは、筆者が比較的に身近とする紫外・可視領域の分光計測に関連する光検出器や関連技術について、利用者としての経験や私見を簡単に紹介し、総論とさせて頂きたい。

2 紫外・可視領域の光検出器

光検出器である限り、波長・エネルギー領域によらず、微弱光を高精度に計測可能な高い感度と低い雑音レベルを持つことが期待される。光検出器としてのこの性能は、近年、飛躍的に高性能化が成し遂げられた。化学

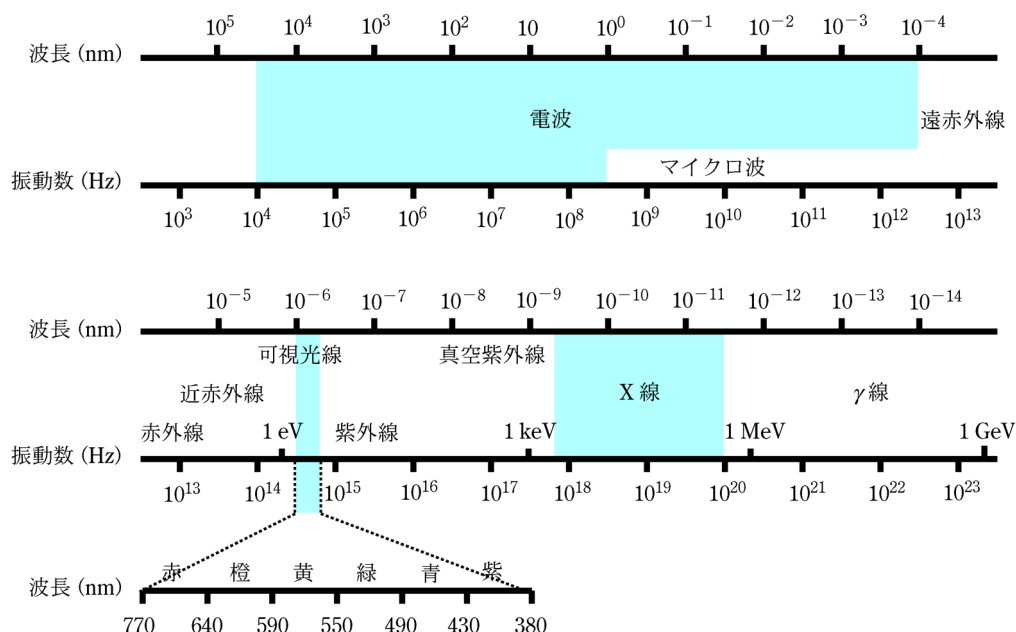


図1 光の波長・振動数による分類

の領域における微弱光検出の極限は「単一分子検出・分光」であると思われるが、これは1994年にTrautmanらによってアバランシュフォトダイオード (avalanche photodiode: APD) と呼ばれる高感度光検出器を用いることにより、世界で初めて達成された²⁾。その後、単一分子分光に関する研究は日本を含め、世界中で広く行われているが、多くの場合、Trautmanらと同様にAPDが利用されている。さらに、高感度なCCD (charge coupled device) 検出器の利用や附属する画像・データ処理システムの発展により、単一分子の動きや蛍光の明滅を画像としてとらえることも広く行われるようになっていく。このような研究の発展は、従来の光電子増倍管しか利用できなかった時代と比べると隔世の感があり、この間の光検出器の多様化と高性能・高感度化は目覚ましいものがある。

紫外・可視領域における光検出器の波長感度特性はフラットであり、近赤外領域まで高い感度を持つことが望まれる。特に、筆者のグループでは有機化合物や金属錯体の蛍光・発光スペクトル測定 (300~1000 nm) を通じて、試料の蛍光・発光量子収率を決定する実験を行うことが多い。そのためには、実測スペクトルに対し、光検出器あるいは検出システム全体の波長感度特性を補正する必要がある。波長感度特性の補正法は既に確立されているものの、可視領域の検出器感度に比べ、800 nmより長波長側における感度は大きく低下する。したがって、可視域に比べ長波長側における検出器の感度補正係数は非常に大きくなり、スペクトル補正に誤差を招くことになる。実際に、長波長側に感度を有する市販の光検出器 (光電子増倍管、フォトダイオードアレイ型検出器など) を用いても、長波長に発光スペクトルを示す金属錯体の発光量子収率を厳密に決めることは難しいのが現状である。光検出器の波長感度特性は年々改善されつつあるものの、筆者の研究にとっては、更なる改善を期待したい性能である。

紫外・可視領域の分光計測においては、しばしば光源としてレーザーが用いられる。特に、パルスレーザーを光源として時間分解分光計測を行うには、光検出器自身に時間分解機能を持つことが望ましい。紫外・可視領域の時間分解分光 (吸収・発光) 計測はNorrish-Porterによる閃光光分解法 (flash photolysis) の発明以来、約50年の間にナノ秒、ピコ秒、フェムト秒レーザーフォトリソへと、最も急速に発展した計測法の一つであるが、その発展を考える上で、光検出器の役割を忘れることはできない。よく知られているように、1954年のメーザーの発明に続き、1960年にルビーレーザーが開発された。その後すぐに、連続発振He-NeレーザーやQスイッチ法によるナノ秒パルスレーザーが発明されている。筆者が大学院に進学した1970年後半には既にナノ秒Nd:YAGパルスレーザーが市販されており、化学の研究室においても利用されるようになった。さらに、1980年頃にはピコ秒レーザーが、1990年頃にはフェムト秒レーザーが利用されるようになった。各種のパルス

レーザーは時間分解分光研究の基盤となったことは間違いないが、紫外・可視領域における様々な光検出器と光検出法の開発がこれらの研究を支えた歴史がある。

筆者は分光計測を専門とする研究室に属していたわけではないが、1979年にナノ秒Nd:YAGレーザーを用いた実験を始めた経験を持つ。その当時、蛍光寿命測定などの時間分解計測には、光電子増倍管とサンプリングオシロスコープやボックスカー積分器を用いたアナログサンプリング方式による測定が主流であった。スペクトル測定には、既にフォトダイオードアレイ型検出器が利用可能であったが、時間分解計測用のゲート動作機能を備えた検出器はいまだ限定的にしか利用されていなかったと記憶する。しかし、1985年には、筆者の研究室においてもデジタルサンプリング方式として、窒素放電管を光源とした単一光子計数法による蛍光寿命測定法を利用していたし、ナノ秒ゲート動作型フォトダイオードアレイ検出器による時間分解スペクトル測定も行えるようになっていた。したがって、この間の光検出器の発展は驚異的と言っても過言ではないとともに、時間分解分光は飛躍的に容易かつ安易になった。その後もMCP (multi-channel plate) 型光電子増倍管、APD、CCD検出器、ゲート動作型ICCD (intensified CCD) などの様々な特徴を持った光検出器が利用可能になり、時間分解分光計測の研究の幅は非常に広がっている。高速分光においてはパルスレーザーの役割が強調されることが多いが、光検出器の開発・発展が関連研究を支えたことは間違いなく、その貢献は極めて大である。

3 おわりに

光検出器に附属する計測ソフトウェアやデータ・画像処理技術の開発も分光計測の発展に大きな役割を担ってきたことは言うまでもない。特に、1990年代から化学・バイオの研究領域において顕微蛍光イメージングが盛んになったが、その発展にとっては、これらの関連技術が基盤となっている。この間にコンピュータの低価格化と高性能化が実現したこともあるにせよ、光検出器に関連する技術は飛躍的に発展し、関連研究分野の進展を促してきた。ここでは紫外・可視領域の分光計測の話題に限ったが、単一分子レベルのラマン分光や時間分解X線構造解析などの研究も着実に進展している。また、医療分野においては光トモグラフィーを初めとした光・電磁波計測がますます重要となっており、光検出器の活躍する場は広い。紫外・可視領域に限らず、日本における光検出器に関連する技術の質は高い。今後とも光検出器の開発・発展を日本がリードすることを期待するとともに、種々の分光計測の更なる高度化を望みたい。

文 献

- 1) “光科学研究の最前線”, 「光科学研究の最前線」編集委員会編: (2005) (強光子場科学研究懇談会).
- 2) J. K. Trautman, J. J. Macklin, L. E. Brus, E. Betzig: *Nature*, **369**, 40 (1994).

〔北海道大学大学院理学研究院 喜多村 昇〕