



視覚研究に用いる時間的光強度変調器：パルス変調と高速電子シャッター

重松 征史

電子技術総合研究所量子技術部 〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

1. ま え が き

視覚の研究のうち電気生理学の分野で用いられる時間的光強度変調器とその問題点を述べる。

生理学で用いられる光刺激としては、単純なフラッシュ光やシャッターの on-off によるステップ状の光刺激が普通に用いられる。しかし、視覚系の周波数特性や時間的な動特性を求めるためには、sin 波形やランダム波形を用いた解析法が必要になる。sin 波形は回転デスクと特殊開口の組合せによる機械的な方法で実現できるが、それでも周波数を短時間に掃引するには難がある。そこで光強度を自由に入力電気信号に合うように制御できる発光装置があれば、神経生理学の研究にも情報理論の解析法が使える大変便利になる。そのための光強度変調器をどのように実現するか、またそれには視覚系の特性をどのように利用できるかを述べる。

2. パルス変調方式

白色雑音状に強度変調された光刺激は、Naka らにより網膜の神経細胞の動特性や非線形解析の研究のために用いられた¹⁾。彼らの光強度変調の方法は、電流で発光強度が制御できるグロー変調放電管を振幅変調することにより行なった。

グロー変調放電管は写真電送用の光源として開発されたもので、放電電流にほぼ比例した光出力を出し、その応答は 10 μ s と早い応答をする。また放電開始電圧は、200 数十ボルトと比較的低くトランジスタ回路でも制御できる²⁾。発光スペクトルは線スペクトルが主体で、赤・青色成分が強く、白色に発光するように作られた管もある。ただし、電流によって発光強度を制御しようとすると、白色発光の管であっても電流の増加にともないピンクから白色へと目に見えて発光色が変化する。したがって、そのまま色覚の実験に用いるには問題が生じる。

一方、視覚系は光強度の時間的変化に対してせいぜい 100 Hz 程度までしか追従できなく、それ以上の点滅では点滅のない連続した光のように感覚される。この視覚のローパスフィルターの特性を逆に利用して光刺激とする方法が考えられた。すなわち、パルス状の早い周期の発光をしてそのパルス発光の時間幅 (パルス幅変調) またはパルス密度 (パルス周波数変調) を変化させることによって、光強度の変調をするという考えである。

パルス変調の方法では、放電電流は一定となるため分光スペクトル特性は改善される。とくにパルス周波数変調では個々のパルスは同一波形であるため分光スペクトル特性も改善されて、75% 強度変調された色光でも線形性から 2~3% 以内の誤差になった³⁾。パルス周波数変調の周波数分析をすると、ある平均レベル (DC 成分) から入力信号に比例した強度の成分とその高調波成分が加わったものとして光出力される⁴⁾。これを視覚系に刺激として与えると、ローパスフィルターの特性より DC 成分と入力信号成分のみが感覚されることになる。パルス周波数変調をするための装置は、図 1 のように信号発信器からの電圧を電圧-周波数変換モジュールを用いてパルス列に変換して、パルス成形回路と駆動回路で昇圧してグロー放電管を発光させる。この方式により白色雑音波形の光刺激を作って網膜神経細胞の水平細胞における色覚機構の動特性を各色光成分ごとに測定して色覚情報処理のメカニズムを研究するのに役立った⁵⁾。

グロー変調放電管は放電のクレータ口径が 1.5 mm と小さく発光輝度もあまり高くない光源である。そのため強い光を必要とする実験には不向きである。パルス周波数変調方式は、高速に制御できるパルス発光光源がシャッターがあれば実現できる方式であるため、他の光源を用いても作ることができる。たとえば、光源としてパルス発光が可能な LED や半導体レーザー等を使うことも考えられる。最近の LED には高輝度発光のものも出ているのでそれを光源として使える。さらに高輝度発光の

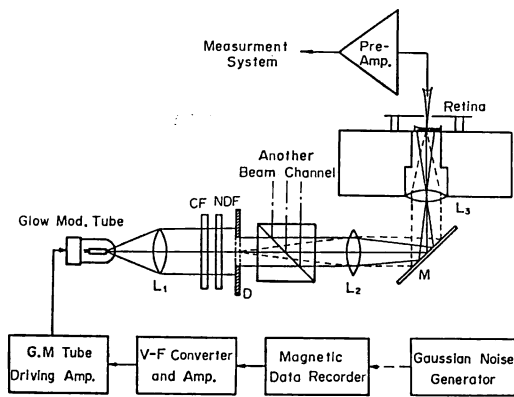


図1 パルス周波数変調方式の光刺激装置

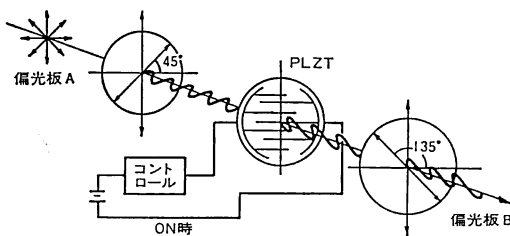


図2 PLZT 高速電子シャッターの原理図

キセノンランプが手軽に使えたと大変有意義である。

もう一つの、強力で安定な光源の光を高速シャッターを用いて変調する方法については、高速のシャッターとして透過率を電子的に制御する素子すなわち、液晶フィルター、PLZT フィルターや音響光学素子を用いることが考えられる。そのなかでも最も安価に使用できる PLZT 電子シャッターについて次に述べる。

3. 高速電子シャッター

PLZT を用いた高速電子シャッターは、光の透過性の良い圧電材料 PLZT (lead lanthanum zirconate titanate) 素子を2枚の偏光板でサンドイッチ状にはさんだ構造をしている^{6,7)}。図2のように偏光板はそれぞれ90°ずらしてあり、PLZT 素子に電圧が印加されないうちは光は透過せず、電圧が加わると光の偏光角が素子中で回転して透過するようになる。

応答時間は50 μs と高速で、on/off の光透過率の比は1,000 : 1 以上の性能をもっている。直流電流を印加すると透過率が350 V で15% になる。電圧と透過率との関係は直線的ではなく、また少しのヒステリシスをもつ。印加電圧が高いと分光透過率は変化して色ガラスフィルターようになる。200 V 以下で用いる限り白黒フィルターとして使用できた。また中に細い電極線が配置されているために、この面に結像するような使い方な

く平行光の中に挿入した使い方がよい。

PLZT 電子シャッターは口径も大きく、応答も10 kHz と早いので、強力安定な光源を用いてパルス周波数変調方式の光強度変調器のシャッターとして好ましい特性をもつ。また PLZT 電子シャッターは on/off のみでなく電圧により中間の透過率も取りうるので、振幅変調方式の光強度変調素子として用いる方法もある。ただし印加電圧と透過率の関係は直線的でないで入力電圧に合った正しい光出力が得られない。そこで光出力を検出して入力電圧との誤差がなくなるようにフィードバック回路を設けて光強度変調器とする必要がある。この振幅変調方式では光源はいつも定常状態で点灯されているため、変調による分光スペクトルの変化は PLZT の透過率に関係する部分のみとなる。入力の印加電圧を200 V 以下にして使えば分光スペクトル的な問題は少なくなる。

4. 光強度変調器による視覚の研究

電気生理学的な実験では光刺激入力による神経細胞の応答出力を測定し解析ができる。したがってランダム光強度変調器を用いた光刺激の方法は情報理論を用いた解析が有効に利用できる以下の利点をもつ。

- 1) 神経系の周波数特性・動特性を効率よく定量的に測定でき、非線形特性についても計算で求められる。
- 2) 短時間で全体の特性が測定できるために、長時間安定に測定することがむずかしい神経細胞内応答からも必要な情報が取り出せる。
- 3) 測定中に混入する電極抵抗などの雑音を相互相関の計算により除去することができる。

今後、自由に時間的・空間的に光刺激が制御できる装置が実現され、視覚研究が進展することを期待したい。

文 献

- 1) P. Z. Marmarelis and K.-I. Naka: "White-noise analysis of a neuron chain; an application of Winer theory," *Science*, **175** (1972) 1276.
- 2) P. F. Pauter: *Modulation, Noise and Spectral Analysis* (McGraw-Hill, New York, 1965) p. 534.
- 3) Y. Shigematsu, et al.: "A white-noise photo-stimulator by using a pulse frequency modulation method," *J. Light Vis. Environ.*, **1** (1977) 51.
- 4) B. Buchman-Olsen: "Spectral energy calibration of a light flash source used in physiological experiments," *J. Opt. Soc. Am.*, **47** (1957) 30.
- 5) Y. Shigematsu, et al.: "Color component analysis of horizontal cells in the carp retina," *J. Light Vis. Environ.*, **6** (1982) 22.
- 6) Motorola Inc.: "PLZT electrooptic devices and materials," data sheet.
- 7) 一ノ瀬昇: 照明学会誌, **70** (1986) 155.

(1986年6月3日受理)