トリガ始動真空パルス放電により発生するフラッシュ X 線 の特性に及ぼす放電回路の影響

正員 高谷 俊平 (都立医療技術短大)

Influence of Discharge Circuits on the Characteristics of the X-ray Flash Produced by Trigger Initiating Discharge in Vacuum

Shumpei Takaya, Member (Tokyo Metropolitan College of Allied Medical Sciences)

A pulsed discharge in vacuum accompanies with a X-ray flash. The author has made a trigger initiating discharge vacuum tube, and is now under experiments with it, to produce a single and high energy X-ray flash. In operating the tube, two circuits are needed. They are a main circuit and a triggering circuit. Energy of a X-ray flash is limited by the circuit condition of the main circuit. In step of experiments, the triggering circuit become important. Because the triggering circuit affects to not only the switching time, but also waveform of the X-ray flash. The experimental results are as follows. (1) Uprising of the anode voltage brings a decreasing the rise time and increasing the crest value of the X-ray flash. (2) A smaller capacitance in the triggering circuit leads out a X-ray flash with a shorter rise time. From these results, some discussion was described on a capability of waveform operation of the X-ray flash by controlling the triggering capacitance.

キーワード：フラッシュ X 線，トリガ始動真空パルス放電，波形操作

1. ま え が き

真空パルス放電にはフラッシュ X 線の発生を伴う。フラッシュ X 線（以下、X 線パルスという）の持続時間が短いことに着目した高速現象の観測や、X 線の波長を用いた結晶構造の解析への応用などが、放電管そのものの研究と並行してこれまで行われてきた⁽¹⁾。X 線パルスの利用を考えるとエネルギーやパルス幅などの特性が問題になる。著者はトリガ始動型の真空パルス放電管を試作し、半値時間幅が 1 μ s 前後、照射線量が数十 mR の X 線パルスを得ている。本実験は、時間的にも空間的にも狭い範囲に単一パルスのエネルギーを集める X 線源を一つの目標に、特性の改善を目指している。

真空パルス放電管は陽極、陰極をガラスなどで作った絶縁真空容器に収めた二極管のほか、本論文のようにトリガ極により放電を開始する三極管がある⁽¹⁾。ギャップが固定された二極管の放電開始はもっぱら陽極電圧の調節によって行われる。これに対し、三極管のトリガ始動では、陽極電圧を任意に制御しつつ、これとは独立に陽極電圧よりずっと低いトリガ電圧で放電を開始できるのが特長である。そのため、陽極電圧を発生する電源と主放電回路のほかにトリガ回路が付加される。発生する X 線パルスのエネル

ギーやパルス幅などは主放電回路側の条件によって制約されるが、高圧コンデンサやダイオードを使って電源回路を組み立てて実験段階に入ると、トリガ回路が重要になる。これは主放電の時刻を決めるだけでなく、X 線パルスの波形にも影響するからである。実験を進行する立場からいえば、大型で高価な電源回路の手直しは実験装置の基本変更につながることもあり困難を伴うので、小型で変更可能なトリガ回路の改良により波形操作ができることが望ましい。

波形操作に関連して、これまでに行われている技術として単安定マルチバイブレータを用いた X 線パルスの遅延が挙げられる⁽²⁾。この場合、X 線パルスの波形を変えることは考えていない。近時、電気信号でなくレーザ光で陰極を照射してトリガを行い、X 線パルスを圧縮しようとする報告がある⁽³⁾。これらの例に対して本論文は、トリガ回路に挿入するコンデンサの静電容量を調節することにより、X 線パルスの立上りの遅れと波形そのものを幾分変形できることを議論する。

X 線パルスの特性からみた最も重要な回路の条件は放電管の陽極電圧である。実験の結果から、陽極電圧が上がると X 線パルスの波高値が急速に上昇し、立上り時間が減少するが、パルスの半値時間幅は大きな変化を示さ

ない。

次に、陽極電圧を一定として、トリガ回路に挿入するトリガコンデンサの静電容量を減らすと X 線パルスの立上り時間が小さくなり、立下り時間が増すなど、やはり波形の変化が生ずる。この結果を利用して、トリガコンデンサの容量を調節することにより、ある範囲内で波形操作が可能だとする認識を得た。これは放電管を要素を含めた回路設計に幾らかの示唆を与える。

2. 実験装置

〈2・1〉 トリガ始動真空パルス放電管 現在使用中の真空パルス放電管の構造を図 1 に示す。放電管の基本要素である陽極、陰極およびトリガ極に外部から電気エネルギーを伝達する部分はステンレス鋼製である。これらを互いに隔て、電気絶縁しているのは内径 10 cm, 5 mm 厚のガラス管(図 1 の粗い斜線部分)である。ガラス管内の気圧を

図 1 真空パルス放電管の構造

Fig. 1. Structure of the vacuum pulsed discharge tube.

下げるため、図 1 右下の排気管に真空ポンプが連結されている。放電実験はロータリーポンプと油拡散ポンプの直列結合により到達する 10^{-6} Torr レベルで行う。この放電管は封じ切りではなく、開口部 C のねじを外して分解し、後に述べる電極交換など実験条件の変更が可能である。

陽極は尖端に加工したタングステンの棒を用いている。陽極尖端から陰極までの垂直距離は 3 cm, 放射口の外面まで 7 cm である。陽極で発生した X 線はトリガ電極と陰極の 8 mm の穴を通り、放射口から下方に放射される。陽極の尖端は図の位置を基準に幾分下方に移動が可能である。

トリガ電極と陰極は、ステンレス鋼の円板の中心に直径 8 mm の穴をあけ、穴の辺縁を鋭いエッジに仕上げた丸窓電極である。精密加工したテフロン製の筒状スペーサを準備し、このスペーサの上下にトリガ電極と陰極をはめ込んで、ギャップを 0.1 mm に保持して対向させ、一体の電極ブロックを形成した。0.1 mm 単位で寸法の異なるスペーサと交換すればギャップの長さの変更が可能である。開口部 C を開き、この電極ブロックを放電管底面の定位置にはめ込み、シリンダにより上から締めて固定する。シリンダはこの働きのほか、X 線の側面への漏れを防ぐ役目を果たす。

〈2・2〉 実験回路 図 2 に放電管を動作する実験回路を示した。回路は放電管を中心に、左側に示したトリガ回路と右側の主放電回路とその電源回路よりなる。主放電の電源回路は倍電圧整流方式を用い、放電管陽極に 40 kV 以上の直流電圧を供給する。二つのコンデンサの容量は C_1 が $0.01 \mu\text{F}$, C_2 が $0.014 \mu\text{F}$ である。主変圧器には 100 V/33,000 V の試験用変圧器を用いている。電源回路の C_1 と陽極を結ぶ導体およびアース側の C_2 と陰極を結ぶ導体はいずれも断面積の大きいケーブルを 1 m 以下の長さで使っている。

トリガ回路は図 2 左側に示すとおり、二つのコンデンサ C_t を並行充電、直列放電する方式をとっている。3 点ギャップによりトリガ回路を作動し、主放電を開始する。図 2 のトリガ回路の極性はトリガ電極が正となっている。真空度が 10^{-6} Torr の桁では、トリガ電極の絶縁破壊電圧

図 2 放電実験回路

Fig. 2. A experimental circuit of discharge in vacuum.

(以下、単にトリガ電圧という)は0.1 mmのギャップの長さで決まり、20 kV前後の値である。陰極を正の極性にする、自爆放電が起きやすく現在は採用していない。トリガ電圧は、直列で放電する二つの C_i の電圧で決まるので、以下の記述では、 C_i の直列合成静電容量 C_{i0} でトリガコンデンサの静電容量を表す。トリガ放電経路の導線は断面積が大きく長さもできる限り短く、抵抗とインダクタンスを小さくした。このトリガ回路では、一つの C_i の充電電圧が常時両極の間に加わり、スペーサの内面で沿面放電が起きやすい。沿面放電が起きるとトリガの機能をしないため、スペーサの内面に溝を付けて沿面距離を増し、絶縁保持に努めた。

〈2・3〉 X線パルス観測装置 電子の制動放射により陽極で発生するX線は、陽極電圧で決まる最短波長を含む連続スペクトルとなる。陽極電圧の値によって陽極材料で決まる固有X線を含む。このX線パルスの観測装置として、光電子増倍管(浜松ホトニクス 1P28)と100 MS/sのオシロスコープを用いた。1P28の分光感度はカタログに記載されている⁽⁴⁾。通常、X線により発光するシンチレータと、その光の波長に高い感度をもつ光電子増倍管(以下、ホトマルと略記)を1組にして使用される。図3に本実験の観測系の概略を示した。電磁シールド金属容器に収めたホトマルの受光窓を、直径2 mmの穴を開けた厚さ2 mmの鉛板の蓋で閉じる。更に、その穴を黒紙で閉じX線のみホトマルに到達するようにした。実験開始当初、2 mmの穴にX線を紫色可視光に変換するX線増感紙(KYOKKO BM-III)を張り付けて観測した。しかし、増感紙の残光が無視できず、ホトマルのみでX線パルスに対して十分感度を示すことから鉛の蓋を黒紙で閉じるだけで観測することとした。ホトマルの受光面と放電管の放射口下面との距離は30 cmとし、ホトマル受光窓

図3 X線フラッシュの観測系
Fig. 3. A observation system of X-ray flash.

に、中間に絞りを付けた鉛の筒を立てX線を取り込んだ。

1P28の最大出力電圧は10 Vである。出力電圧は出力電流と出力段の抵抗の積で与えられる。応答遅れの低減を重視し出力電圧を2 V程度となるよう出力抵抗を1 kΩに選んだ。

図2に示すとおりアースに近い箇所A、Bにログウスキーコイルを取り付け陽極電流、トリガ電流を検出した。X線パルスのエネルギーとして照射線量を熱蛍光線量計(Thermo-luminescence Dosimeterの頭文字TLDと略記)を用いて測定した。検出器として使われる幾つかの熱蛍光物質のうち、本実験で扱う100 keV以下の領域のX線に対する感度が最も高いCaSO₄:Tmの素子を用いた。本文のX線パルスのように持続時間が短く、放電ごとのデータにばらつきがあるX線エネルギーの測定法としては、同じ素子を多数回X線パルスで照射して線量を積算し、照射回数で割って1パルスの線量を求める方法をとる。

3. 実験結果

回路の条件を直接反映する放電電流を、X線パルスと同時に観測した。その一例を図4(a)、(b)に示した。二

(a) X線パルスと主放電電流

(b) X線パルスとトリガ電流

図4 X線パルスと電流波形の照合
Fig. 4. Comparison a X-ray pulse to the waveform of current.

つの画面に分けて表示しているが、3チャンネル同時観測した結果である。この例では主放電の電源回路の C_2 が $0.02 \mu\text{F}$ で、図2に記した値より大きい。トリガ回路の C_{t0} は $2,000 \text{ pF}$ 、陽極電圧は 50 kV である。図4(a)は図2のA点でとった主放電電流とホトマル1P28で観測したX線パルス、(b)図は図2、B点でのトリガ電流とX線パルスの関係をそれぞれ示している。主放電電流、トリガ電流とも振動電流となっている。トリガ電流はおおよそ $1.5 \mu\text{s}$ で終わるが主放電電流はこれより長く続く。同図から、トリガ放電の開始時刻を基準にして陽極電流の開始を見ると、識別が難しい程度の遅れであるが、X線パルスの開始は $0.4 \mu\text{s}$ ぐらい遅れている。

(a) 観測波形の例

(b) 特性値の定義

図5 光電子倍增管1P28によるX線パルスの観測波形

Fig. 5. A pulse example of X-ray flash observed with photomultiplier 1P28.

次に、ホトマル1P28の出力電圧が 2 V 程度になるよう出力抵抗を調整して観測したX線パルス波形の例を図5(a)に示した。陽極電圧 50 kV 、 C_{t0} が $1,000 \text{ pF}$ の例である。信号には雑音が含まれ、パルス上の値を決めにくい場合がある。このため、各波形を振動の平均値と思われる点を結んで1本の曲線に見直し、X線パルスの特性値を(b)図のとおりに定義し、立上り時間ほかの特性値を求めた。

〈3・1〉 陽極電圧の変化とX線パルス波形 X線パルスに影響する主放電回路の因子は陽極電圧、コンデンサの静電容量、放電管の陽極材料、陽極陰極間距離、管内気圧などである。これらのうち、影響が最も大きくかつ変更容易な因子は陽極電圧である。このため、陽極電圧の変化に対するX線パルスの変化を $C_{t0} : 1,000 \text{ pF}$ 一定で観測した。陽極電圧は 40 kV から 70 kV まで 10 kV ごととした。その結果を図6(a)~(d)に示した。各電圧に対し10回程度観測した。データにはばらつきがあり、最大、最小の範囲を示し、平均値を白丸で表した。

まず、図6(a)の立上り時間は陽極電圧の上昇とともに短くなっている。白丸平均値がはっきりこの傾向を示している。この変化に対して、(b)図の立下り時間はほとんど変わらず、(c)図の半値時間幅ははっきりした傾向が見えない。陽極電圧の変化に対するX線パルスの最も顕著な反応は、(d)図のとおり波高値が陽極電圧の上昇とともに急速に上昇することである。

以上述べた図6のX線パルスの観測は、次に図7で述べる C_{t0} 変化に対するX線パルスの観測とは別に行ったため、両図の 50 kV 、 $1,000 \text{ pF}$ に関するデータは異なっている。

〈3・2〉 C_{t0} の変化とX線パルス波形 C_{t0} の最小値を 500 pF とし、これを2倍ごとにとり、最大値を $4,000 \text{ pF}$ まで各場合につき十数回観測し、図7の結果を得た。陽極電圧は 50 kV 一定とした。

まず、 C_{t0} の減少とともに立上り時間は短くなり、(a)図のとおり片対数グラフ上できれいな直線となった。立上り時間と C_{t0} が指数関数の関係をなしている。これは、 C_{t0} が小さくなるとトリガが掛からなくなるので限界があり、大きいほうでも主放電回路の時定数との関係で限度がある。(b)図は立下り時間を示したものである。 C_{t0} の増

図6 陽極電圧がX線パルス波形に及ぼす効果

Fig. 6. Effects of the anode voltage on the waveform of X-ray pulse.

図 7 トリガコンデンサ静電容量が X 線パルス波形に及ぼす効果
Fig. 7. Effects of the trigger capacitance on the waveform of X-ray pulse.

表 1 TLD による X 線パルスの照射線量

Table 1. Exposure dose of the X-ray pulse measured with thermo-luminescence dosimeter.

W からの距離 (cm)	平均照射線量	
	(mR)	(C/kg)
10	94.3	2.43×10^{-5}
20	38.3	0.99×10^{-5}
○ 30	22.1	0.57×10^{-5}
40	10.5	0.27×10^{-5}
50	4.2	0.11×10^{-5}
60	3.2	0.08×10^{-5}

加とともに減少している。これに対して、半値時間幅は (c) 図に示すようにほとんど一定の値を示している。立ち下り時間は図 5(b) からわかるように、半値時間幅から立ち上り時間を差し引いた時間に近い。このことから (b) 図は立ち上り時間とは逆の傾きとなるが、立ち上り時間の指数関数の関係ほど明瞭ではない。次に、 C_{to} が増すと X 線パルスの波高値が図 7(d) に示すように漸増する。

〈3・3〉 X 線パルスの照射線量 X 線パルスの照射線量を TLD (UD-200 S) $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ を用い、陽極電圧 50 kV で測定した。素子の近くに散乱体があると照射線量は変わるため図 3 のホトマルと鉛の筒を除き、この測定を単独に実施した。直径が 8 mm の丸窓状陰極の作る照射野は放射口から 30 cm 下の位置で直径 10 cm、80 cm の床下では 22 cm となる。放射口の中心に鉛直に薄いフィルムリボンをつり下げ 10 cm ごとに 2 素子ずつ入ったケースをフィルムにとどめた。10 回放電し、被爆 X 線エネルギーを累積した。各測定点の 2 素子の測定結果をそれぞれ 10 で割って 1 回の値に直し、2 者平均した値が表 1 の各データである。表中○印の行のデータがホトマルの測定位置に当たる。

4. 検 討

〈4・1〉 ホトマルの X 線パルス出力波形について

図 5(a) に示した X 線パルス波形は、分光感度、光電変換効率、応答遅れなどの特性をもったホトマルの制動放射連続 X 線パルスに対する応答である。X 線のパルス幅を求めるために別に実験を行った。高速回転する金属円板

図 8 主放電の際の火花
Fig. 8. A spark pulse of the main discharge.

の外縁に切ったスリットを、X 線パルスにより撮影した。この像を、同じ X 線パルスで撮影した静止スリット像と比較し、双方のずれから X 線パルスの時間幅として数 μs 以下の結果を得た⁽⁶⁾。これは図 6、および図 7 の半値時間幅とだいたい符合している。

放電の際、陽極近傍に火花が発生する。図 8(a) に、暗中で放射口から撮影した火花の写真を参考に示した。シャッター開放で撮影したため、カソードスポットも一緒に記録されている。X 線パルスと火花はほぼ並行した現象であり、火花を観測し、X 線パルスとの照合をしたいと考えた。ホトマル 1 台で X 線パルスと火花を交互に観測した。ホトマルによる火花観測は、鉛板に直径 5 mm の穴をあけ、この穴を鉛ガラスでおおい可視光のみを通す蓋を用いた。この観測例を (c) 図に挙げた。発光の時間は X 線パルスより長く、波形も全く異なっている。火花と X 線パルスは同時に観測していないため、同時性の検討はでき

ない。

(b)図は鉛板に開けたピンホールにより観測した陽極の X 線像である。(a)図と比較して、陽極火花と X 線の発生場所はほぼ同じであると推察される。

図 5(a)の X 線パルス波形のはじめに $0.1 \mu\text{s}$ 以内の振幅の大きい上下振動がある。これは、ホトマル受光窓を鉛板で完全におおっても消去せず、図 8(a)に見るとおり火花波形にも含まれることから、放電で発生した電磁波、または周囲の電界擾乱が測定器に入り込んだものと考えられる。

〈4・2〉 回路の条件が X 線パルス波形に及ぼす影響

C_{t0} を主たる要因とするトリガ回路の特性が X 線パルスに及ぼす影響を検討する。トリガ放電は主放電を引き起こし、主放電により X 線パルスが発生する。それゆえ X 線パルスはトリガ放電の間接的結果である。主放電と X 線パルスの関係は直接的なので、 C_{t0} の主放電に及ぼす影響が明らかになれば、X 線パルスへの影響の推定は容易になる。

トリガにより発生する陰極火花を契機として、陽極と陰極の両方で発生するプラズマが両極の間を満たし、陽極陰極間のコンダクタンスが急速に増して放電が成立する⁽⁶⁾。トリガ放電電流が急峻に立ち上がるほど陰極からの電子の供給量が速やかに増して主放電の開始遅れが少なくなり、放電電流の立上りも早くなる。放電電流と対応して発生する X 線パルスも早く立ち上がる。図 4 の $C_2: 0.02 \mu\text{F}$ 、 $C_{t0}: 2,000 \text{ pF}$ の例ではトリガの開始から X 線パルスの開始まで約 $0.4 \mu\text{s}$ の遅れがあり、立上り時間約 $0.7 \mu\text{s}$ が観測された。 C_2 の変化が加わっているが、図 5(a)の $C_2: 0.014 \mu\text{F}$ 、 $C_{t0}: 1,000 \text{ pF}$ の場合には開始まで $0.1 \mu\text{s}$ 程度、立上り時間 $0.3 \mu\text{s}$ まで減少している。

また、図 7(a)～(d)までのデータより、X 線パルス半値時間幅と波高値の積でエネルギーを概算すると、 $C_{t0}=500 \text{ pF}$ の場合を除いてほとんど変わらない。しかし、 C_{t0} が小さくなるほど立上りが早くなり、立下りは逆に遅くなっている。これは、エネルギーが変わらず波形が変化していることを示している。

トリガから主放電を経て X 線パルスに至る一連の関係を、一般的に理解するためのモデルを図 9 に示した。トリガ放電電流の増加は C_{t0} が小さいとき曲線 T_1 のように急になり、大きければ T_2 のように緩やかになる。時刻 s_1 で主放電が開始するものとする。主放電電流 i_1 の増加に伴い陽極電圧 v_1 は低下する。トリガ放電により電子供給が頂点に達する τ_1 付近における状況を次のように推定する。 i_1 が増すと v_1 は低下し、 v_1 の低下は逆に i_1 を減らすように働く。 i_1 の増加が止まると、 v_1 の減少は緩やかになり電流 i_1 は緩やかに破線のように減少傾向をたどる。 τ_1 以降放電管内の抵抗が非線型に変化して大きくなるものと考えられる。 C_{t0} が大きい場合には、主放電が始まる s_2 は s_1 より遅れる。電子の供給量は T_1 のときより多く、主放電電流 i_2 は大きくなる。時点 τ_2 は τ_1 より遅い。 i_2 が大きい

図 9 トリガ・主放電・X 線パルスの関係
Fig.9. A following model from triggering to the X-ray flash.

ため、 v_2 の減少が大きい。このときは先ほどの T_1 のときとは異なり、 τ_2 以降も抵抗は小さく v_2 と i_2 の変化速度が増す。このように、トリガ放電は主放電の開始を決めると同時に、主放電の電流および電圧の変化に影響を与える。X 線パルスは主放電電流に依存するが電圧 v も関係する。 v が大きい領域で電流変化に対応した X 線パルスの模式図を描くと、図の上段のパルス波形となる。この波形は図 7(a)～(d)の実験結果に沿っており、以上に述べた推定から無理なく導かれる。

陽極電圧を上げると、図 6(d)に示すとおり顕著に X 線パルスの波高値は大となる。波高値の大きい X 線を望むときは陽極電圧を上げるのが直接的方法である。図 6(d)のような波高値上昇をトリガ特性で行うことはできない。図 7(d)に示したとおり C_{t0} を増したときの波高値の増加は相対的に小さい。

〈4・3〉 X 線パルスのエネルギー測定 照射線量は、照射を受けた物質が X 線エネルギーにより電離したとき、一方の符号の電荷を測るものである。単位 R は C/kg の次元をもち、 $1R=2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ で換算される。TLD は測定量の積算が可能のため、本論文の X 線パルスのように持続時間が短く、且つばらつきがある場合の測定器として最適である。表 1 の値をジュールに換算する必要がある場合は、図 5(a)の X 線パルス波形の面積をジュールに換算することと関連して課題の一つになると考えている。

5. 結 び

電源を含む主放電回路の時定数が X 線パルスの特性を制約する。しかしトリガ回路も、放電の開始時刻を決めるだけでなく X 線パルスの波形に影響する。X 線パルスの立上りの $1 \mu\text{s}$ 以下の時間操作と波形そのものの変形を述

べた。このため C_{i0} の調節範囲をどのようにするか問題が残っている。放電管の再試作のとき、トリガコンデンサを小型化して放電管容器の内に取り込み、外部から静電容量を調節できる構造とし、極力回路を小さくするのが得策である。

(平成5年8月10日受付, 同5年9月30日再受付)

文 献

- (1) R. Germer: "X-ray Flash Techniques", *J. Phys. E*, **12**, 336 (1979)
- (2) 荒井聡明: 「大電流による細い銀線の破壊」, 電学誌, **91**, 123 (昭46-11)
- (3) P. Krehl: "Pulse compression effect in a laser driven flash X-ray tube", *Appl. Phys. Letter*, **52**, No. 5, 354 (1988-2)
- (4) カタログ「光電子増倍管と関連製品」(平2) 浜松ホトニクス

- (5) 高谷, 他: 「真空パルス放電で発生するフラッシュ X 線の時間計測」, 平4 都立医療技術短期大学紀要, p. 209
- (6) G. A. Mesyats & D. I. Proskurovsky: *Pulsed Electrical Discharge in Vacuum*, p. 20 (1989) Springer Verlag

高 谷 俊 平 (正員) 1933 年 11 月 7 日生。1970 年近畿大学理工学部電気工学科卒業。1971 年東京都立放射線技師学校教員。1975 年東京電機大学大学院修士課程修了。1981~88 年高圧限流ヒューズの調査研究に従事。1986 年東京都立医療技術短期大学診療放射線学科助教授。1991 年日本大学理工学部大学院博士後期課程在籍。1993 年都立医療技術短期大学教授。電気設備学会会員。