

高速光学計測装置 — 高速16こま多重 閃光間隙カメラ —

河 田 幸 三 ・ 小 林 昭

A High Speed Optical Analyzer
—High Speed 16 Frames Multiple Spark Gap Camera—

By

Kozo KAWATA and Akira KOBAYASHI

Abstract: Systems, performance and procedures of a high speed 16 frames multiple spark gap camera installed in our laboratory in order to carry out shock technology research in solid mechanics in two-year term project at the present institute are described. In addition, several examples of high speed photoelasticity isochromatics obtained using the above mentioned apparatus are also submitted.

概 要

昭和48年度衝撃工学総合実験設備費により、固体高速衝撃の研究のために設置された高速光学計測装置 — 高速16こま多重閃光間隙カメラ — について、その構成、機能、操作の要点にわたり報告する

最後に本装置による高速光弾性解析の若干例に触れる。

1. ま え が き

固体の高速衝撃に関する研究は、工学の進展に伴い近年特に重要性を認識され、当研究所においても我が国の一つの中心として活潑に進められている。以下述べる高速光学計測装置は、当研究所の衝撃工学総合研究の一環として、昭和48年度衝撃工学総合実験設備費（「固体高速衝撃の研究」）により新しく設置したものである。

固体の高速衝撃現象の計測装置には、大別して光学的手法と電気的手法とがあり、夫々一長一短があるが、光学的手法の場合、主として次の手法に分類されよう〔1〕。

- (1) 流し写真
- (2) 高速度こまとり写真
- (3) 電気火花光源による瞬間写真
- (4) 光強度を電気信号に変換記録

(5) ストロボ

流し写真は一定断面内での現象の測定に限定される。現象全体の変化を捕えるには上述の中で、(2)、(3)、(5)の手法を必要とする。これらの中で、最も尖鋭な大型の図を与える面では(3)が強い。これは放電の火花を或る統制された時間々隔で連続して飛ばせ、これを光源として現象の連続した瞬間写真をとる方式で、Cranz-Schardinにはじまる。弾性波伝播を光弾性的に捕えるには好適の手法である。

以下述べる高速光学計測装置はこの方式に属するもので、著者の基本設計にもとづき、Materials Research Laboratory, Inc. (米国イリノイ州、グレンウッド) が詳細設計を行った高速16コマ多重閃光間隙カメラ (High speed 16 frame multiple spark gap camera) である。その種大型装置は国内ではじめてで若干の興味ある点を含むと思われるので、その詳細を記述することも強ち無益ではあるまいと考え、以下報告する。

最後に掲げる若干の高速光弾性等色線図よりうかがわれるように、本装置は弾性波の構造要素中における伝播の高速光弾性解析に極めて有力な手法を提供し、衝撃工学研究上の大きい役割を果すものである。

2. 高速光学計測装置 — 高速16コマ多重閃光間隙カメラの構成と機能

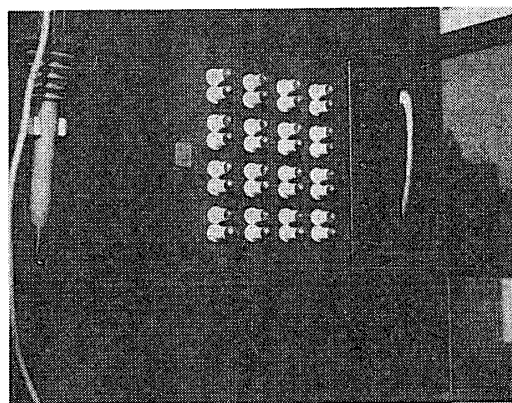
本装置は以下の三つのサブシステムから構成されている。即ち、パルス閃光間隙装置 (pulsing spark gap assembly)、光学系 (optical system)、及び同期回路 (synchronization circuit) である。これらの機能について、以下各部分毎に詳述する。

2.1 パルス閃光間隙装置 (Pulsing spark gap assembly)

第1図に示すように4行4列の正方形状配列の合計16個の閃光間隙

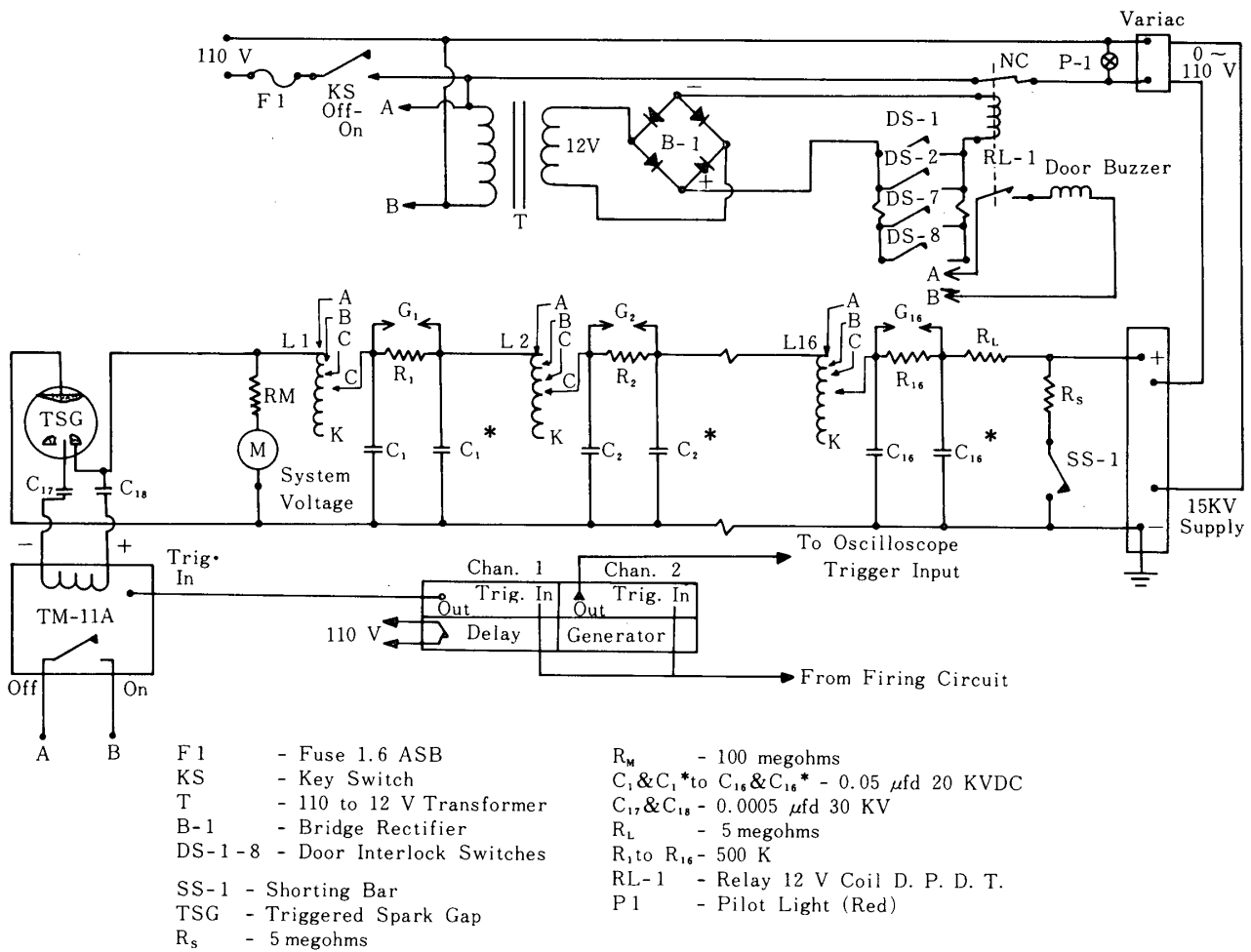
(spark gap) が、試験片を照明し同時にカメラのシャッターを切る為に用いられる。一連の時間関係の設定された短い継続時間と高強度の閃光を発生する。各々の閃光間隙は6.35 mmの固定間隙長をとるように、中心間距離19.05 mmに配列された直径12.7 mmの青銅球2個から成っている。閃光間隙の正方形4×4配列は中心間50.8 mmの間隔で配置されている。

この閃光間隙の配列は第2図に示される直列結合のL-C型パルス回路で作動させられる。C₁ からC₁₆ までとC₁^{*} からC₁₆^{*} までのキャパ



第1図 閃光間隙装置

シタは、夫々、 $0.05\ \mu\text{f}$ の容量と $20,000\ \text{V DC}$ の作動電圧のものであるが、実際は $16,000\sim 17,000\ \text{V DC}$ にまでしか充電しない。これらのキャパシタは、無誘導的にまかれており、大地電圧以下の電圧振動を伴う急速放電をするように、設計されている。閃光間隙と並列に置かれた R_1 から R_{16} までのレジスタは、 $1/2\ \text{megohm}$ の抵抗値をもち、キャパシタ・ラインに最初に充電するに当り、電流を供給するようになっている $3\ \text{mA}$ の充電電流が $5\ \text{megohm}$ 負荷抵抗を通して $15\ \text{KVDC}$ の電源により供給される。この回路のRC定数は元来非常に高い(約 $21\ \text{sec}$)ので、充電時間は約1分である。このライン電圧はフルスケール



第2図 主要回路図

20,000Vの電圧計で監視される。

回路をショートさせるには、絶縁されたバス・バー・スイッチ (buss bar switch) S_1 を使う。回路のショートは、放電々流を抑えるのに用いられるレジスタ R_s (5 megohm) を通してなされる。

L_1 から L_{16} までのインダクタは、この回路用に特別に設計された多重タップ・インダクタで、空心 (air core) に一重巻きをして作られたものである。各々のタップでのインダクタンスは第1表の通りである。このインダクタは第3図のパッチ・ボード (patch board) に接続されている。この回路に用いられるインダクタンスの値は、インダクタの適当なタップに接続されるパッチ・コード (patch cord) を用いて選ばれる。

第1表 インダクタンスの値

	コマ間時間 (μ sec)	こまとり速度 (Frames per sec.)	L (μ H)	タップ間	L (μ H)
0-A	1.13	882,000	0	A-B	5
0-B	1.47	682,000	5	B-C	5
0-C	1.80	556,000	10	C-D	10
0-D	2.47	405,000	20	D-E	30
0-E	3.73	268,000	50	E-F	50
0-F	4.73	211,000	100	F-G	100
0-G	6.57	152,000	200	G-H	300
0-H	8.40	119,000	500	H-I	500
0-I	12.30	81,000	1,000	I-J	1,000
0-J	18.10	55,000	2,000	J-K	3,000
0-K	33.30	30,000	5,000		

インターロック (inter lock) 系はキャビネットに一体に組込まれて居り、キャビネットが開かれ、高電圧線が露出される事になる時、常に主電源を遮断する働きをする。同時に警告ブザーも鳴る。

キャパシタ・バンク (capacitor bank) が充電された後、パルス回路の点火は高電圧パルス (15~30 KV) をトリガ間隙 (trigger gap) にかけることによって開始させられる。トリガ間隙が作動し始めると正弦波電圧振動が誘起され、閃光間隙 G_1 の左の電極が、+16~17 KV から略-10 KV に変化する。この時、閃光間隙 G_1 間に約27 KV の電圧が存在して点火し、短い強い光源を生じる。点火に当り、キャパシタ C_1^* は閃光間隙 G_1 を通して放電し、 C_1^* 、 L_2 、 C_2 を含む回路ループ内に、次々に電圧振動を発生させていく。この第2の電圧振動は閃光間隙 G_2 に点火させ、この過程は16個の全部の閃光間隙を順々に点火させるまでくり返される。各間隙の点火の間の遅延時間は、各回路ループ内のインダクタンス L の値を調整することにより制御される。

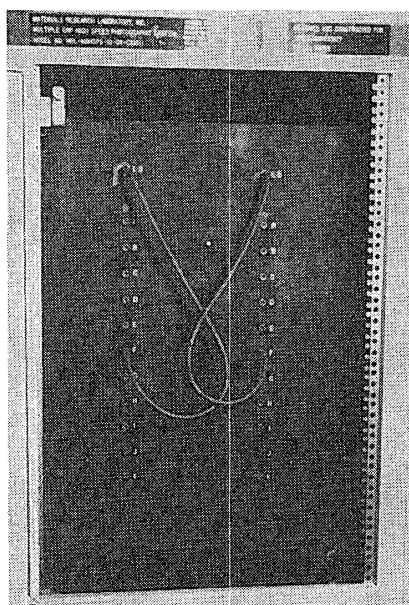
2.2 光学系

このカメラの光学系は、(1)像の分離、(2)像の記録、(3)ほぼ単色光の円偏光の生成、の三つの異った機能をもつ。第4図にその配置を示す。各閃光間隙から出る光は明視野偏光装置 (light field polariscope) の中の試験片を通して大口径の視野レンズで集光される。視野レンズはこの光をカメラ・レンズに収束させ、フィルタを通してフィルム面上に像を結ばせる。

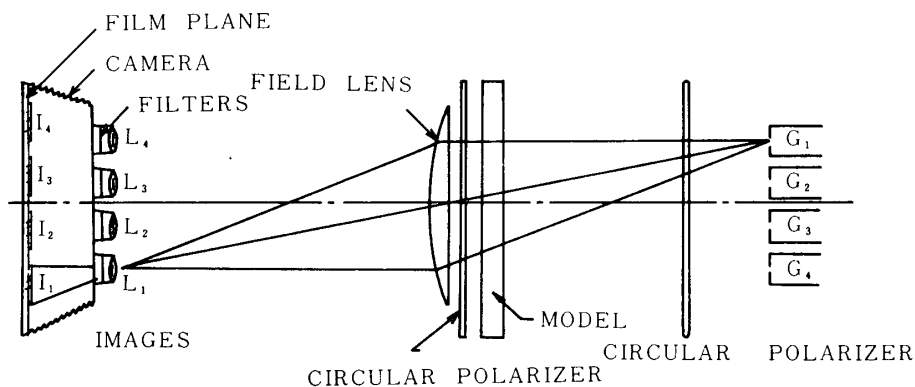
像の分離は、動的現象の16個の別々のネガを独立に記録することで、閃光間隙とカメラ・レンズとの幾何学的配列と視野レンズの位置とで達成される。この光学系では、閃光間隙とカメラ・レンズとは夫々中心間距離 50.8 mm で4行×4列の正方形に配置されている。カメラ・レンズの配置を第5図に示す。直径 45.7 cm (18 inch)、焦点距離 76.2 cm (30 inch) の視野レンズは、閃光間隙から焦点距離の2倍、カメラ・レンズからも焦点距離の2倍の所に設置される。これにより、閃光間隙 G_1 からの光は、他のカメラ・レンズに重なりあうことなくカメラ・レンズ L_1 上に投写され、次いでフィルム面上に像 I_1 を生じる。焦点距離 161 mm、 f 4.5 の16組の Kodak Anastimate camera lens を用いて、制御された時間々隔で16個の明確な分離されている像を記録することが出来る。

光学系の倍率は、視野レンズとカメラ・レンズとの焦点距離と、それらの相対的間隔によって、主として制御される。通常上記の位置に固定されていて、この系で直径 45.7 cm の視野レンズに対応する直径 50.8 mm の像を生じ、ほぼ 0.11 の倍率となる。各々直径 50.8 mm の4×4、合計16個の像が、通常型の暗函カメラ中の1枚の $27.9 \times 35.6 \text{ cm}^2$ ($11 \times 14 \text{ inch}^2$) のフィルムに写される。

使用フィルムは、Kodak Gravure Positive である。これは Kodak の市販品と似て居り、比較的小さい感光乳剤製品である (ASA: 白色アーク光20, タングステン光8)。3500 Å から 5100 Å の間の光に敏感であり、閃光間隙の出力がこの範囲で最高となるので、その見かけの速さは ASA ナンバーより遥かに早い。この時、4800 Å 以下の光の大部分をカットする Kodak Wratten filter No.8 を使用する。このフィルタは、レンズ・ボードの



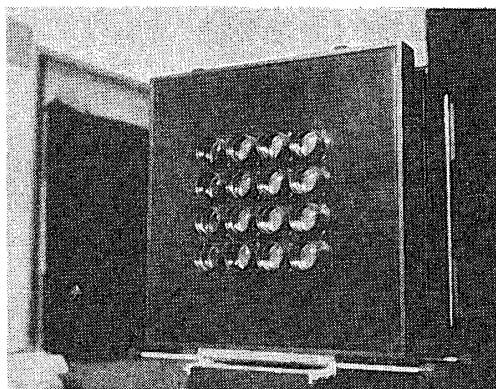
第3図 インダクタ・パッチ・ボード



第4図 光学系配置図

後で暗函カメラ内のプレキシグラス上に装着されている。このフィルムとフィルタの組合せは、動的
光弾性解析に用いる場合、単色光を近似するのに十分な狭い (300 \AA) 4800 \AA から 5100 \AA の波長幅を生じる。Kodak Gravure Positive filmは、D-11現像液、8分間の現像で、最高のコントラストを与える。閃光間隙からの光出力、カメラ・レンズ $f 4.5$ の開き具合、フィルタの透過係数およびフィルムの速さは、動的
光弾性実験で適切な露出を得るのに密接な関係を有する。光学系のパラメータが変って、フィルムの露出を減らさねばならない時には、中間濃度フィルタをカメラ・レンズの前か、真後かに挿入して減らす。整色性フィルム (orthochromatic film) を用いる時には、Wratten 4 filterを、波長域 $4200 \text{ \AA} \sim 4800 \text{ \AA}$ の Wratten 34A filterに変える。

円偏光を得るための偏光装置が光学系に組込まれて居る。それは、視野レンズと閃光間隙



第5図 カメラ・レンズ配置図

の間に挿入された2枚の積層円偏光ポロライド板Polaroid HNCP-38である。前方の1枚は閃光間隙をかこむ防護箱の前面にあり、後方の1枚は視野レンズを保護するガラス板の後ろにある。撮影すべき現象はこの2枚のポロライドの間で生じさせる必要がある。

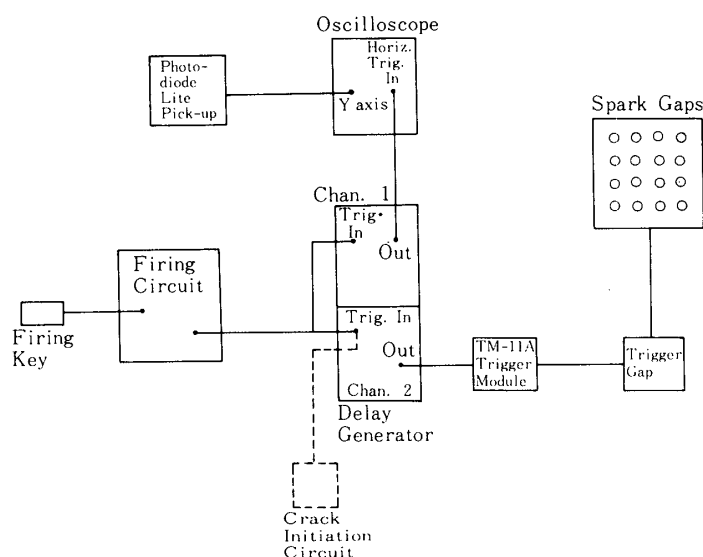
2.3 同期回路 (Synchronization Circuit)

動的光弾性実験では、現象の継続時間は問題の種類にもよるが普通50~500 μsec である。この短い時間内に試片が負荷され、カメラが遅延させられ続いて作動させられ、各こまの時間が記録されねばならない。動的現象を的確に記録したければ、これらの機能のすべてが μsec の時間スケールで正確に連続して働かねばならない。第6図に示す同期回路により、これらの必要な制御が行われる。今、雷管の爆轟で動作をはじめの場合の例を考える。

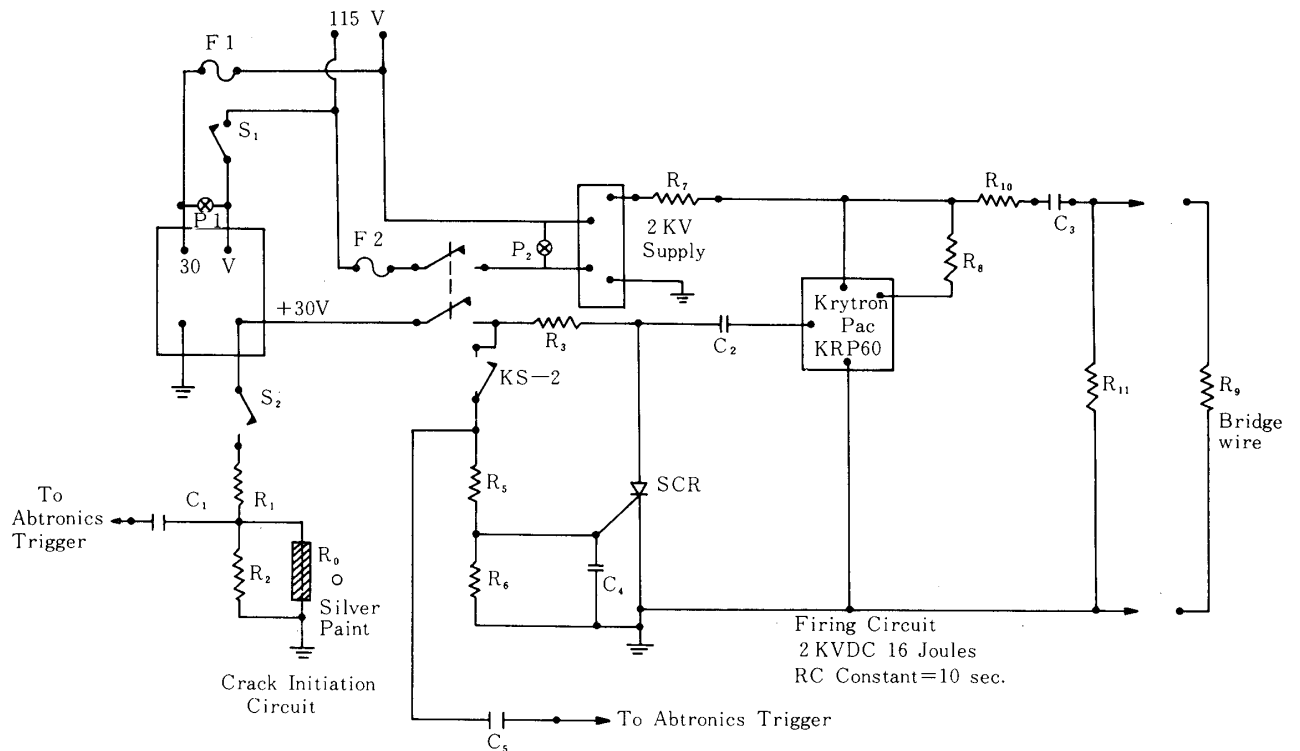
一連の動作は、点火回路 (firing circuit) 内のキー・スイッチKS-2を閉じることによって開始される。第7図の点火回路は、同時に二つのパルス、即ち、雷管内のブリッジ線を点火する2000ボルト (16ジュール) のパルスと、Abtronics time delay generatorのチャンネルAを励起する30ボルトのトリガー・パルスとを発射する。

予め選定した遅延時間の後に遅延発生器が、50ボルトのパルスを、EGG model TM-11A trigger moduleに送る。このトリガー・モジュールは、パルス増巾器として働き、数 μsec の遅延時間の後、高電圧出力パルス (15乃至30KV可変) を出す。出された高電圧パルスは、トリガー・ギャップの3番目の電極に与えられてこれを動作させ、閃光間隙バンク内に点火シーケンス (firing sequence) を開始させる。

点火回路に加えて、第2の動作開始回路 (initiation circuit) が同期パネルに内蔵されている。この第2の動作開始回路も亦、第7図に示されているが、例えばある特定のクラ



第6図 同期回路系統図



- | | |
|---------------------------------|---|
| F 1 | - Fuse 2 ASB |
| F 2 | - Fuse ¼ ASB |
| S ₁ | - Switch S. P. S. T. 30 V Supply |
| S ₂ | - Switch S. P. S. T. Crack Initiation Circuit |
| KS-1 | - Key Switch D. P. D. T. 2 KV Supply and Firing Circuit |
| KS-2 | - Key Switch S. P. S. T. (Firing Key) |
| R ₁ | - 500 ohm, 8 watts |
| R ₂ | - 5000 ohm, 8 watts |
| R ₃ | - 1000 ohm, 8 watts |
| R ₄ | - 400 ohm, 8 watts |
| R ₅ | - 200 ohm, 8 watts |
| R ₆ | - 1.0 megohm |
| R ₇ | - 40 megohms, 2 watts |
| R ₈ | - Bridge wire, 1-2 ohm |
| R ₉ | - 0.6 ohm |
| R ₁₀ | - 190 ohm, 11 watts |
| R ₁₁ | - 0.1 μfd, 200 V |
| C ₁ & C ₅ | - 10 μfd, 200 V |
| C ₂ | - 8 μfd, 2000 VDC |
| C ₃ | - 0.05 μfd, 200 V |
| C ₄ | - Pilot Lights (Red) |
| P 1 & P 2 | - 2 N1772 |
| SCR | |

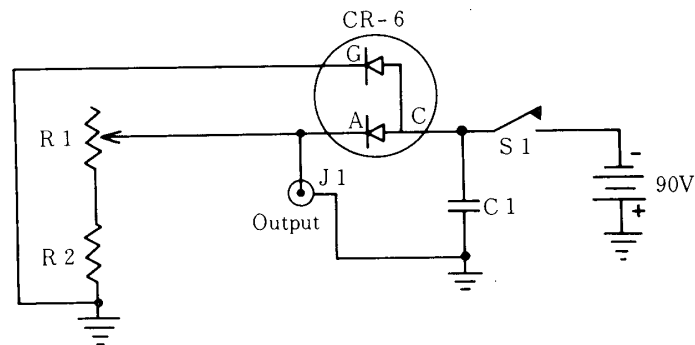
第7図 点火回路及びトリガー（例：クラック開始）回路図

ックが伝播し始めた後にカメラを作動させるものである。(この第2の動作開始回路は勿論、別の現象例えば、飛行体の衝撃などによっても動作させられる)この場合は、通常1又は2 ohm 以下の非常に低い抵抗値を示すレジスタ R_0 を形成するために、光弾性試験片や破壊試験片に導電性塗料を塗布する。クラックが進んで導電性塗料のレジスタを切ると、この抵抗 R_0 は急に無限大にまで増加し、A点の電圧は、略々零から27Vに増加する。このパルスは Abtronics time delay generator のトリガーに用いられ、カメラの動作開始シーケンスが前述のように進行する。

一連の閃光間隙が引続いて発光するにつれ、光の強さは第8図に示す高速フォトダイオード (photodiode) で時間の関数として監視される。フォトダイオードの出力は単掃引オシロスコープ上に記録され、強度～時間関係図を生じる。この関係図は16個の明瞭なピークを持ち、16こまの各々が記録されたその動的現象中の精密な時間を示す。

3. 操作の要点

前述したように、考えている動的現象はたかだか数百 μsec で完了するので、やり直しや計測中の微調整は利かない。実験準備の後、操作者が現象と関り合う機会は点火スイッチをまわして現象を開始することだけである。また閃光電源の高電圧は極めて危険で、電撃死を



- S1 -Off-On Switch S. P. S. T.
- CR 6 -Photodiode SGD-100A
- C1 - 1 μfd 200V
- R1 - 1 K Pot.
- R2 -50 ohm, 1 watt
- J1 -BNC Connector

第8図 フォトダイオード回路図

防止するための手段を明示する必要がある。これらの理由から、実験に当たってのチェック・リストを確立することが必要である。以下に記す操作手順は、操作者によって準備されるべきチェック・リストの概略を示すものである。

1. パルス閃光間隙装置と同期回路のプラグを抜く。
 2. ショート棒 (shorting bar) を押込む。
 3. 閃光間隙配列の32個の電極の各々に、ショート用プローブを接触させて、各キャパシタを放電させる。この放電操作を2～3回くり返す。
 4. 閃光間隙No.1の中央に小さい強い光源を置いて光学系の整合を行い、約1.59 cm (5/8 inch) 直径の円形の光束がカメラ・レンズ1のレンズ・キャップの中心にくるように、(カメラのピント面上では約5.08 cm (2 inch) の円形像となるように) カメラ前面を調節する。他の四隅の閃光間隙にも同じように行い、すべての四隅の閃光間隙とレンズ類の整合を同時に得るようにする。この整合は2個のキャビネットの中心線を一致させ、視野レンズの中心が閃光間隙とカメラ・レンズの丁度中央に来よう配置すれば、容易に出来る。視野レンズのマウントは、光学系の軸に沿って調節出来るように設計されている。
 5. 試験片を光学系の中の適当な位置におく。
 6. 強い光源と焦点調節用のネガ・フィルムを用いて、試験片像が尖鋭にピント面に結ばれるよう、カメラの後面を調節する。(この際、カメラ前面は固定。) 焦点調節は、全四隅について行う。そうすれば、レンズ類は皆マッチしているので、16個の個々の像全部についてピントを合わすことになる。
 7. 試験片から焦点調節用ネガをとりはずす。
 8. 閃光間隙上のカバー箱を閉じる。
 9. 各こまの時間を計算し、最初の遅延時間に対して遅延発生器を調整する。
 10. キャビネットの側面(8パネル)を開いて、インダクタ・パッチ・ボードを露出する。必要とするインダクタンス値を選び、パッチ・コードを用いて、これらの値をパルス回路内に挿入する。(第1表参照)。
 11. ドアを閉じる。
- ここまでで、実際に実験を行う前に、時間記録のチェックが出来る状態になったので、このチェックを以下の手順により行う。
12. 16個の閃光間隙を走査するようにフォトダイオードの整合を行い、その出力をオシロスコープに接続する。
 13. 点火回路よりの50 Vの出力をトリガー・モジュールの入力ジャック及びオシロスコープの外部トリガーに接続する。
- この時点では、2000 Vの出力は、どこへも接続してはいけない。
14. 閃光間隙装置と同期回路のプラグを夫々挿す。
 15. 点火回路の電源を入れる。
 16. TM-11A trigger module のスイッチを入れる。
 17. ショート棒を引出す。
 18. 閃光間隙回路の電源を入れる。

19. 可変調節により電圧を調節して、メータ上で $160\mu\text{A}$ から $170\mu\text{A}$ の間の読みとする。
(註: $200\mu\text{A}$ は $20,000\text{ V}$ である.)
20. オシロスコープの準備をし、点火回路の点火キーをまわして系を作動させる。
(註: 閃光間隙が放電すると、回路は自動的に再び充電され、約1分で再点火が可能となる.)

こま取り速度や個々のこま間隔の再調整が必要ならば、一旦回路を不活性化しなければならない。このような場合には、

21. 前述の1, 2, 3を行う。
22. キャビネットの側面を開け、インダクタ・パッチ・ボードを露出する。
23. インダクタンス値を調整する。
24. 前述の8を行い、次いで12から20までを行う。

カメラの時間シーケンスがきまれば、動の実験を行う用意が出来たことになる。カメラは調整を終って焦点をあわせてある。閃光間隙群は時間シーケンスの設定を終り、充電され、点火の準備が出来ている。

例えば、爆発負荷による光弾性実験での最終段階は、次のようになる。

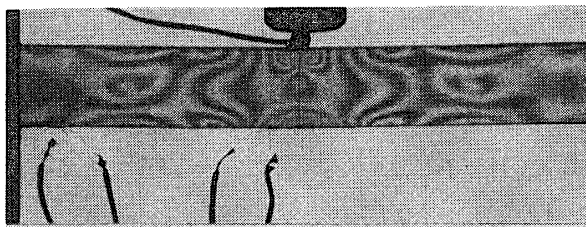
25. 点火回路を不活性化する。
26. 点火キーの断を確認する。
27. 必要ならば飛散物用シールドを光学系にかけ、 2000 V の点火ラインを bridge wire detonator に接続する。(ブリッジ線は $1\sim 2\text{ ohm}$ の抵抗でなければならない。)
ブリッジ線を使用していない時は、 2000 V 点火ラインからのワニ口クリップは互にショートさせなければならない。
28. 点火キーを断にしたまま、再び点火回路を励起する。
29. カメラにフィルム取枠をセットする。
30. オシロスコープを用意する。
31. 閃光間隙回路の電圧をチェックする。
32. 操作者以外に人がいないことを確認する。操作者は耳栓をする。
33. フィルム取枠の前面蓋を引き、直ちに点火キーをまわす。
34. 直ちにフィルム取枠を閉じ、オシロスコープに注意する。
35. 明りをつける。
36. 両方の回路を不活性化する。キーをとり外す。
37. ショート棒を押し込む。

4. 特記事項

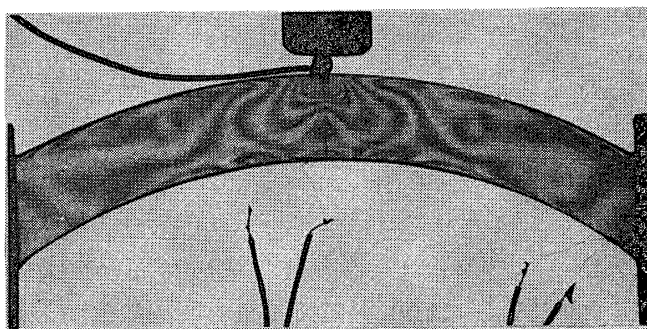
1) 感電死の危険とその防護:

この装置は2種の異った高電圧回路を有しており、いずれも感電死の危険性を有することを銘記しておく必要がある。

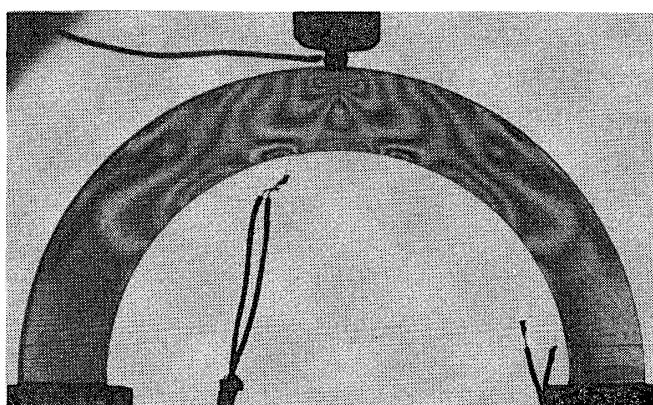
その第1はパルス回路で、 $17,000\text{ VDC}$ で作動し、32の並列 $0.05\mu\text{f}$ キャパシタに合計 231 ジュール のエネルギーを蓄えている。この電圧を閃光間隙の32の球型電極と、インダクタ



(1) 直線梁 (49.5 μ sec)



(2) 浅い曲り梁 (50.7 μ sec)



(3) 半円梁 (48.6 μ sec)

第9図 高速光弾性等色線図の例
(衝撃曲げを受ける両端固定梁内の応力波伝播)

・パッチ・ボードとにかけの必要がある。本カメラで作業にとりかゝるには、装置への電源を切り、ショート・スイッチを少くとも6 RC時定数 ($6 \times 26 \text{ sec} \cong 2 \text{ min}$) の間閉じることが絶対必要である。更に、個々のキャパシタの完全な放電を保証する為に、接地プローブを32球形電極の各々に接触させねばならない。装置はキー・スイッチとインターロックを備えているが、これらの放電予防策のすべてを行わないならば、操作者の安全は保証されない。

その第2は、2,000 VDCで働き、 $8 \mu\text{f}$ キャパシタに16ジュールを蓄える点火回路である。正常状態では、この電圧は点火キーが入れられ、ブリッジ線が点火される時以外は、絶対に出ることはない。

それ故、点火キーは直ちに断位置に戻すことが肝要である。

2) カメラの電源電圧は、115~120 V, 50~60 Hz である。

3) オシロスコープへの要求は

- a. 垂直感度 $0.1 \text{ V/cm} \sim 0.5 \text{ V/cm}$
- b. 立上り時間 $0.006 \mu\text{sec}$

5. 高速光弾性解析の例について

本カメラは応力波伝播の高速光弾性解析に極めて有力な手段を提供する。著者のグループは既に相当数の解析を進めている(領: 文献[2], [3])が、こゝではそれらの内の3例を第9図に示す。対象は落下物体により中央に横衝撃を与えられる両端固定梁における弾性波の伝播で、極めて尖鋭な大型の等色線図が得られる。第9図に見られるように、波頭が極めて明瞭に捕えられている点に本カメラの特色が窺われよう。なお、得られた結果の詳細については、文献[2], [3]を参照されたい。

謝 辞

本装置の調整、試運転、検査、操作に当り参画・協力をいただいた、本所河田・小林研究室の橋本、大谷、黒河(当時大学院学生)各助手および本堂技官に深甚の謝意を表す。

1977年2月8日 材料部

参 考 文 献

- [1] 河田幸三, 橋本彰三: 応力波伝播の高速光弾性解析について, 日本航空宇宙学会誌, 21巻 250号(1973/3), 146.
- [2] 河田幸三, 橋本彰三, 黒河邦彦: 衝撃を受ける両端固定の直線および曲り梁における応力波の伝播, 第2回光弾性シンポジウム論文集(1974/12), 97.
- [3] 河田幸三, 橋本彰三, 黒河邦彦: 飛行体により横衝撃を受ける両端固定梁中の弾性波伝播, 日本航空宇宙学会第6回年会講演会講演集(1975/4), 21.