

Multi-Channel型放電衝撃大電流発生装置と二, 三の 放電実験

栖原, 寿郎

福田, 重久

<https://doi.org/10.15017/4743426>

出版情報：應用力學研究所所報. 26, pp.111-127, 1967. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



Multi-Channel型放電衝撃大電流発生装置 と二、三の放電実験

栖 原 寿 郎
福 田 重 久

1. ま え が き

最近国内・国外ともに液中放電成形、電磁成形など放電衝撃大電流発生装置を用いた高速度加工法の開発が行なわれ、将来の加工技術に大きな改革をもたらすものと期待されている。

これらは衝撃大電流放電をすることによって、電気エネルギーを機械的衝撃エネルギーに変換し、超高压や超高速状態の下で材料を成形加工する方法であり、そのような状態における材料の力学的特異性をうまく利用して材料の加工度を増加し、また複雑な形状の成形加工も容易にするなどの特徴をもつたものである。このような放電の他の応用例としては、金属導線を放電爆発させ、発生した超高温の金属ガスまたは金属 vapor の衝突によつて物体表面に金属の coating を行なう試みがあるが、これは高速衝突エネルギーと高密度な熱エネルギーとを利用したものである。また、この導線爆発は最近のロケット構造において点火装置やその他制御の重要な装置として広く使用されている。

一方衝撃大電流の放電現象は高エネルギー領域における力学的、熱的実験手段としても極めて有効である。例えば、a) 気体、液体あるいは固体中の衝撃波の発生、b) 超高速材料試験用のピストン駆動、c) 超高温プラズマの衝突による材料の熱衝撃試験、d) 瞬間X線の発生、e) プラズマを高輝度の光源として利用するなどであり、何れも放電爆発の制御が容易であることおよびその際のエネルギー密度を他の方法に比べて、はるかに高くできるという特徴を利用するものである。

しかしながら放電爆発の現象およびそれによる衝撃力の発生伝達の機構に関してはあまり解明されておらず、応用面においてもむしろ試行的段階にあり、この高度の利用を期待するためには、現象の物理機構に関して組織的、総合的な研究が必要である。

本研究所における高エネルギー工学研究の一環として、著者等は以上の問題の解明、さらにその応用に関する研究に着手し、種々の予備的実験を行なつてきたが、^{1)~4)9~11)}これを基として新たに5-channel型の放電衝撃大電流発生装置の基本設計を行ない、昭和40年3月に製作を完了した¹²⁾(第1, 2図)。

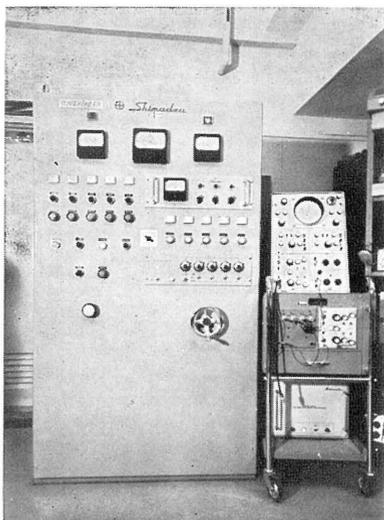
本報告では装置の概要ならびにこれを用いて得られた放電導線爆発に関する二、三の実験結果について述べる。

2. 装置の概要

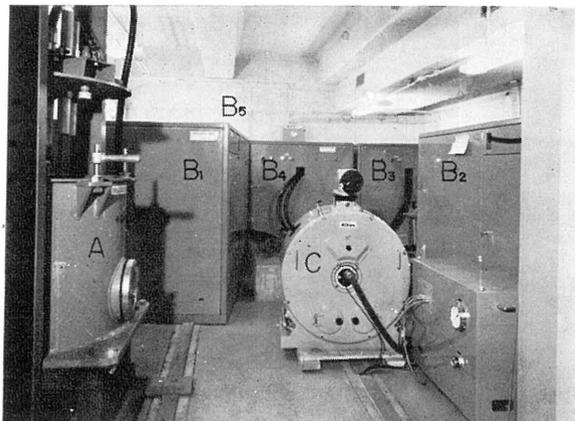
2.1 設計条件

本装置を設計するにあたり、われわれが重点をおいた諸点は次のとおりである。

註 1) 株式会社島津製作所



第 1 図 放電衝撃発生装置制御盤(左)と
放電電圧・電流計測用シンクロ
スコープ(右)



第 2 図 放電衝撃実験室

- A. 5 極型放電槽 600φ×600mm
B. コンデンサバンク (5 channel), 30kV, 5×20μF
C. ニコン・植村式高速度カメラ, 25×10⁴F/sec

- a) 放電回路のインダクタンス (L) と抵抗 (R) とを最少限にすること。

すなわち放電電流の立ち上がり時間を短くするとともに、放電電流の最大値を大きくすることは、充電されたエネルギーを集中して放出させることであつて、放電衝撃力をより効率よく発生させるための最も重要な条件となる。

- b) 充電エネルギー量の制御方法は、充電電圧の制御による方法、コンデンサ容量の選択切換えによる方法、または両方法の組合わによる方法のいずれもが可能であること。このような制御方法は放電実験の上からは勿論のこと、放電衝撃力の定量的な解析にも重要なことである。

ただし、このコンデンサ容量の選択切換えの操作は簡便な方法でなければならない。

- c) 放電源はコンデンサ容量を分割して multi channel 型とし、その各々の channel は予め任意に設定された時間々隔にしたがつて放電の起動が可能であること。さらにまた他の現象と放電の起動とが同期できること。

以上の諸点が可能であることは超高速現象の研究に必要な実験装置としても極めて有効に利用できる。この点は火薬の爆発を利用するものに比べてすぐれた特徴といえよう。

2.2 主要目

装置の主要目は、コンデンサの最高充電電圧が 30 kV、コンデンサの総容量が 100 μF (昭和 41 年度で 200 μF とする) である。

さらにこのコンデンサ群は 5 基のコンデンサバンク (condenser bank) に分けられ、1 基あたりのコンデンサ容量が 20 μF となつている。

したがつて 1 基あたりの最大充電エネルギーは 9 k joule、総計 45 kJ (昭和 41 年度で 90 kJ) である。

またコンデンサ容量の選択・切換は、制御盤操作で $20 \mu\text{F}$ 単位で行なわれる。

各バンクの放電回路のインダクタンスを最少限にするために、放電回路の大部分は放電スイッチを含めて同軸状結線を行なったので、出力ケーブル 4 m を含めた全回路のインダクタンスは $0.73 \mu\text{H}$ と非常に小さくなった。

各バンクには放電スイッチとして、新しく開発されたトリガ装置付きの低圧カイオンスイッチ^{註2)} (low pressure ion switch) を用いた。

したがって他の現象と同期させ得るとともに、指定されたバンクの放電をトリガ操作によつて、予め設定された時間々隔 ($0 \sim 500 \mu\text{sec}$ 範囲) で逐次放電させることができる。

次に本装置の放電特性²⁾は、充電々圧 30 kV 時のバンク 1 基あたりの短絡放電々流最大値が 150 kA であり、また最大電流値までの立ち上がり時間が約 $6 \mu\text{sec}$ である。

これらの結果は同じ充電容量をもつ従来の装置に比べて、最大電流値が $2 \sim 5$ 倍大きく、また放電々流値の立ち上がり時間は $1/2 \sim 1/5$ である。したがって従来の装置に比して、数倍の衝撃力を発生させ得ることができる。

3. 装置の構成と機能

3.1 構成

本装置は第 3 図に示すように大別して (1) 制御装置、(2) 充電装置、(3) コンデンサバンクの三部分から構成されている。

a) 制御装置では、電源操作、コンデンサバンクの充電選択、低圧カイオンスイッチの真空度読み取りおよび真空度の確認、充放電操作とその放電開始時間々隔の設定、トリガ電圧の調整などを行なう。

b) 充電装置は必要な直流高電圧を発生してコンデンサを所定の電圧に充電する。

c) コンデンサバンクは 5 基あつて、それぞれがコンデンサ、トリガ電圧発生装置、放電用低圧カイオンスイッチ、充放電切換器、保護抵抗器類、真空装置および出力用同軸ケーブルなどを持ち、放電回路を形成している。その基本回路を第 4 図に示す。

3.2 各部の機能と定格

a) 制御装置 放電スイッチ用の真空度計は測定範囲が $10^{-2} \sim 10^{-7} \text{ mmHg}$ の電離型であつて、コンデンサを充電する前に、スイッチ内圧が $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ mmHg}$ であることを確認するものである。

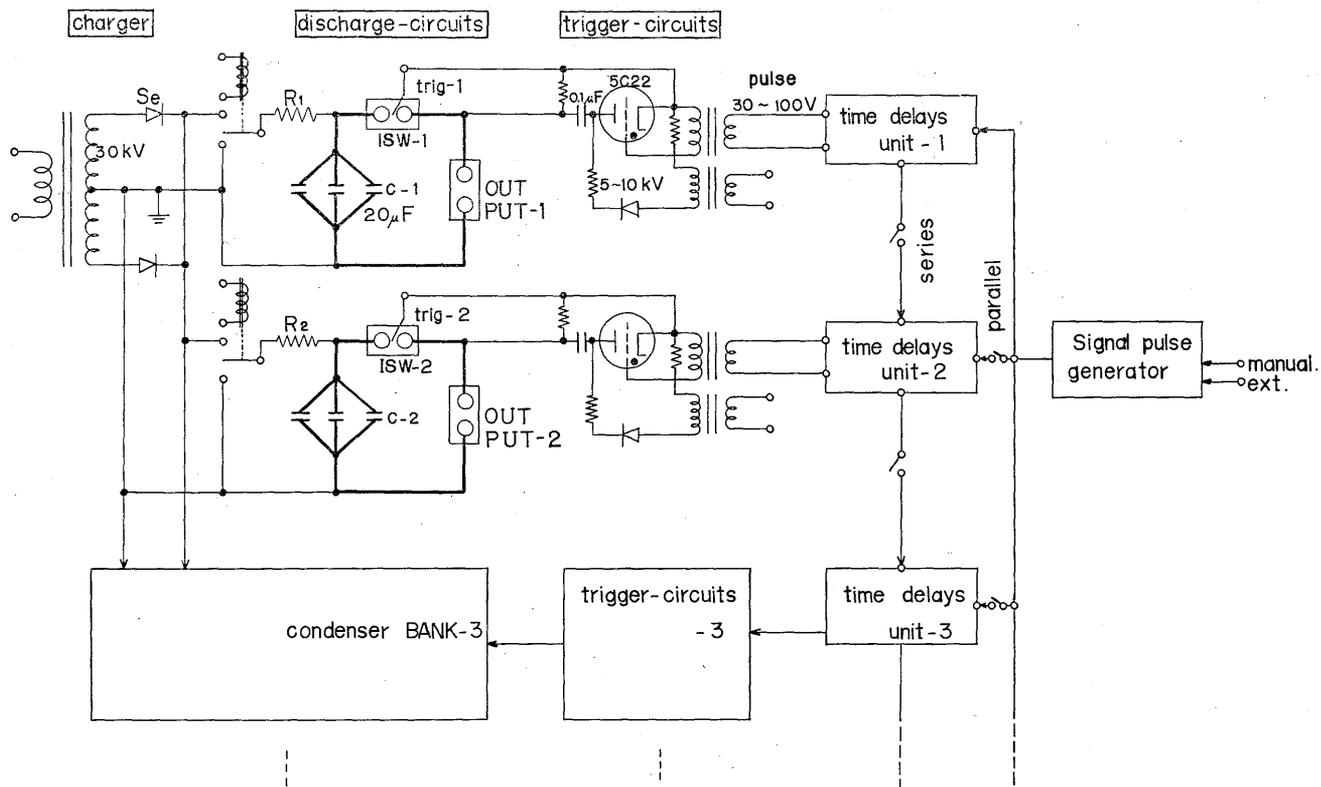
放電スイッチ始動用パルス (信号) 発生器は、パルス発生回路 1 個と、遅延回路ユニット 5 個からなつている。

パルス発生回路は、始動押釦または外部同期入力に直結されていて、いずれかの信号によつて始動し、信号パルスを遅延回路に送り込む。

5 個の遅延回路はそれぞれコンデンサバンク中のトリガ装置と直結されて 5 系統 (five channel) を構成し、各回路内では予め設定された時間だけ信号送り出しの遅延を行なう。

なお遅延回路 (ユニット) の組合わせ配列を変えることによつて、入力信号に対して直列または並列

註 2) 株式会社島津製作所放射線機器工場

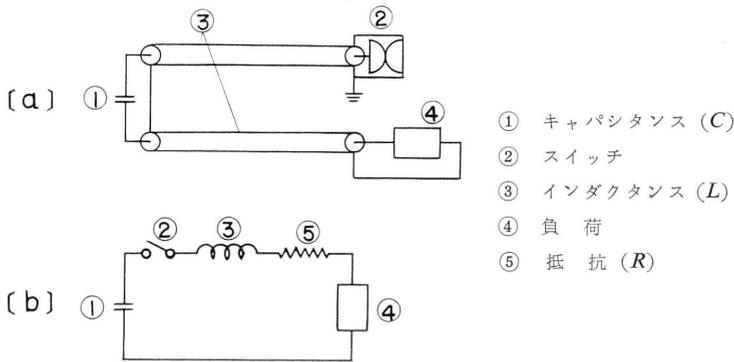


第3図 充放電回路およびトリガ回路の説明図

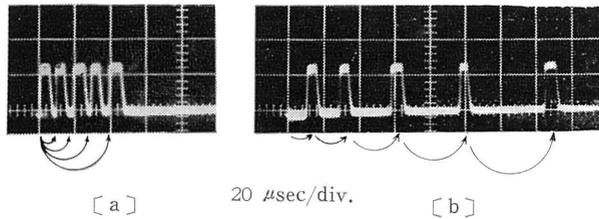
C-1, 2..... 衝撃電流用コンデンサ 20 μ F \times 5

ISW-1, 2..... 低圧カイオンスイッチ 30kV, 300kA 用

time delay: 1 Unti で 0 \sim 100 μ sec 遅延可能



第4図 放電基本回路



第5図 トリガ信号パルス例

- a. 各 channel 並列接続時のパルス例
 pre set : 0, 10, 20, 30, 40 μsec 遅延
 b. 各 channel 直列接続時のパルス例
 pre set : 10, 20, 30, 40, 50 μsec 遅延

に切換えできるようになっている。その各遅延回路を経たパルス波形例を第5図に示す。

遅延時間は各ユニットとも $0 \sim 100 \mu\text{sec}$ の範囲を $0.1 \mu\text{sec}$ の精度で可変できる。なおパルス巾は $10 \mu\text{sec}$ で、立ち上がりは $0.2 \mu\text{sec}$ 以下である。

b) 充電装置 装置は高電圧発生トランスと高電圧整流体からなり、電気容量は 4.6 kVA 、最高出力電圧は 40 kVp (DC) である。また充電容量は 45 k joule の電氣量を30秒間で充電できる。

コンデンサへの給電は各バンクに附属している充電切換器を介して行なわれる。

c) コンデンサバンク バンクは5基(5系統)あつて、各基の性能は全く同一である。

充電は充電回路での選択によつて、任意のものだけが同時に最高 30 kV まで充電されるが、放電は開始時間に差を与えることができる。

バンク中のコンデンサは、容量 $5 \mu\text{F}$ 、耐電圧 50 kV 、使用電圧 30 kV 、残留インダクタンス $0.28 \mu\text{H}$ である。^{註3)} 各バンク中にはこのコンデンサが4個放射状に並列結線され、 $20 \mu\text{F}$ となつている。したがつてバンク1基中に充電されるエネルギー (E) は 9 k joule である。

註 3) 株式会社指月電機製作所製

充放電切換器は充電時のみ充電ケーブルに接続され、通常は保護抵抗器を介してコンデンサの両極を閉じるようになっているので、放電後の残留電荷や不用電荷の除去をなし、危険防止用も兼ねている。

放電用低圧カイオンスイッチは耐電圧が 30 kV, 300 kA の衝撃大電流用として新たに開発されたものである。主な特徴は主電極の間に、自己クリーニング作用性をもつテフロン (teflon)⁵⁾ の絶縁筒と、その中に等間隔に配置された 8 枚の補助極板およびトリガ電極からなり、回路上からは同軸上となっている。

またスイッチの室内は耐電圧度と応答速度との関係で、 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ mm Hg 範囲に減圧されている。⁶⁾ なお応答速度は $0.2 \mu \text{sec}$ 以下である。

トリガ電圧発生装置は、放電スイッチを始動するためのトリガパルスを生ずる装置であつて、 $0.1 \mu\text{F}$ のコンデンサを $5 \sim 15 \text{ kV}$ に充電しておき、放電信号のパルスによつて起動されるサイラトロン (thyatron) の働きで、まずトリガ極間にスパーク放電をさせ、主コンデンサの放電を誘起させるものである。

初信号を発してから放電が開始するまでには約 $4 \mu\text{sec}$ 遅れるが、各系統内でのずれは $\pm 0.2 \mu \text{sec}$ 以下である。

真空装置は放電スイッチの排気用であつて、油回転ポンプおよび油拡散ポンプからなり、スイッチ内気圧を常に $10^{-4} \sim 10^{-5}$ mm Hg に保っている。

同軸ケーブルは、コンデンサと放電スイッチの間と、スイッチから負荷、およびコンデンサまでの帰路に至る間の放電回路に 2 本並列に用いられている。

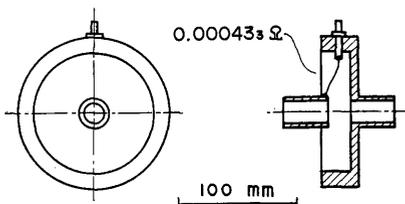
この同軸ケーブルも新たに設計製作されたもので、^{註4)} 内部導体径が 20 mm, 外部導体径が 40 mm, 直流抵抗値は内芯側で $0.00085 \Omega/\text{m}$, 外側では $0.00037 \Omega/\text{m}$ である。またインダクタンスは $96 \text{ m} \mu\text{H}/\text{m}$ (360 kc) と小さいものである。

また放電回路中の同軸ケーブルの総長は 5.5 m であつて、回路のインダクタンス (L) はスイッチ部も含めて $0.73 \mu\text{H}$ である。

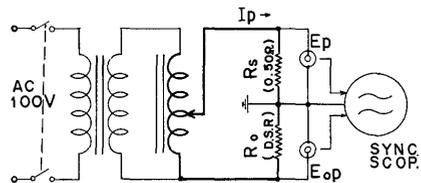
4. 装置の放電特性

4.1 放電電流測定装置と方法

放電電流の測定方法には Rogowski coil⁷⁾ や同軸 Shunt⁸⁾ による方法などがあるが、われわれは第 6



第 6 図 放電電流測定用シャント



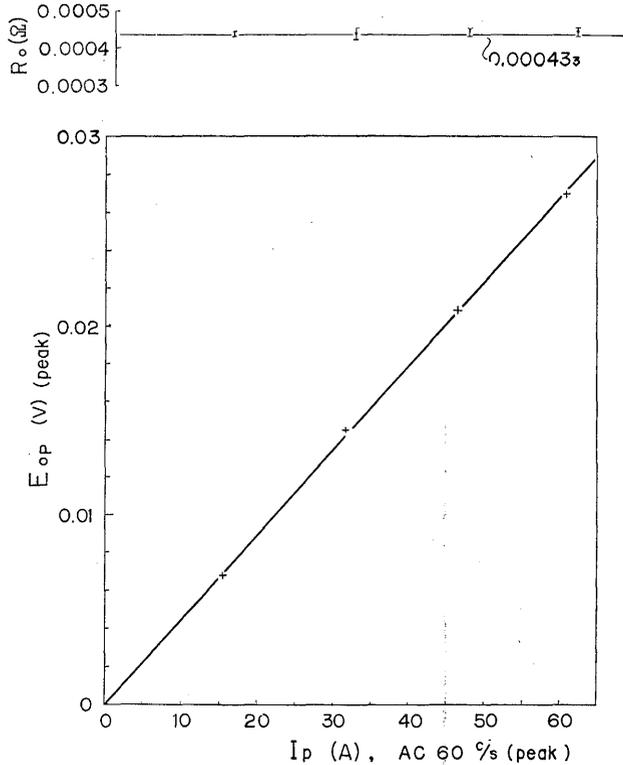
第 7 図 シャントの電流値検定回路

R_s 標準抵抗, R_0 シャント抵抗

註 4) 住友電線工業株式会社製

図に示すような disk shunt (円板状の無誘導型低抵抗体) を製作し、精密な検定を行なつてから放電々流測定に用いた。なお使用した低抵抗素子は 0.3 mm の 18-8 不銹鋼板であつて、接続はすべて鋸付けによつた。

検定方法は、第 7 図に示す検定回路に、熱容量の充分大きな 0.50 Ω の無誘導型標準抵抗 (R_p) と disk shunt (R_0) とを直列に挿入しておき、回路に AC 60 c/s, 最高 60 A (peak) までの瞬間電流を通じて、 R_p , R_0 端のそれぞれの電圧 E_p , E_{0p} を 2 ビーム (dual beam) 型シンクロスコープで同時測定を行ない、 R_0 の抵抗値を測定した。その結果第 8 図に示すように、 R_0 の抵抗値は $0.00043 \pm 5\%$ Ω であつた。また R_0 に用いた材料の固有抵抗値を測定して R_0 の抵抗値を算出した結果は 0.000430Ω であつた。

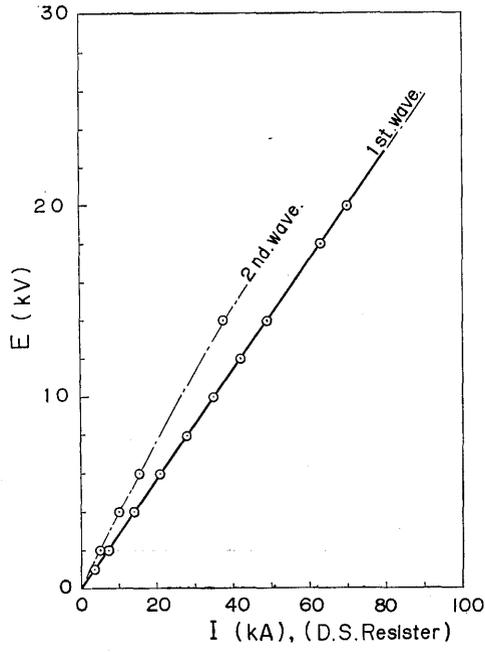


第 8 図 シャント出力電圧 (E_{op}) と電流値 (I_p) およびシャント抵抗値 (R_0)

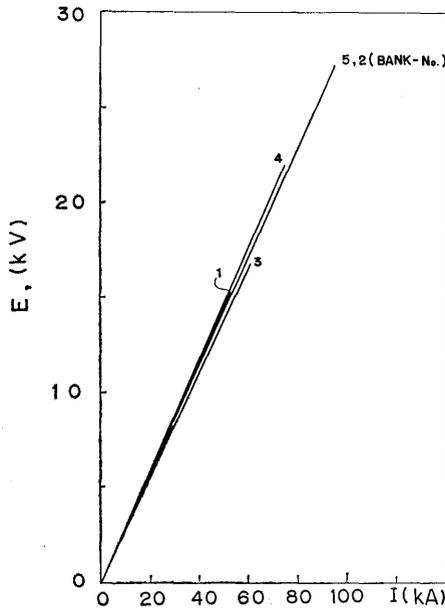
実際に放電々流を測定する際には、disk shunt にさらに完全な電磁シールド (shield) を施して回路に挿入し、出力電圧をシンクロスコープで測定した。

4.2 充電電圧と短絡放電電流との関係

前述の disk shunt を用いて、短絡負荷時の放電々流と充電々圧との関係をバンク 1 基について測定した結果が第 9 図である。このときの出力ケーブルの長さは 10 m であつて、インダクタンスが少し大



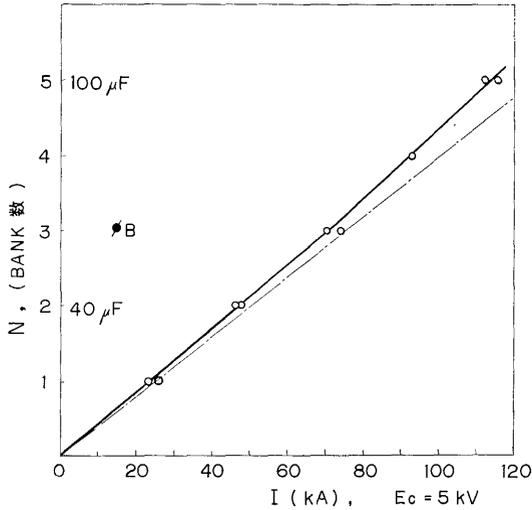
第9図 BANK-5の充電々圧 (E) と放電々流最大値 (I) との関係
ケーブル長さ 10m



第10図 各バンク別の充電々圧 (E) と放電々流最大値 (I)
ケーブル長さ 10m

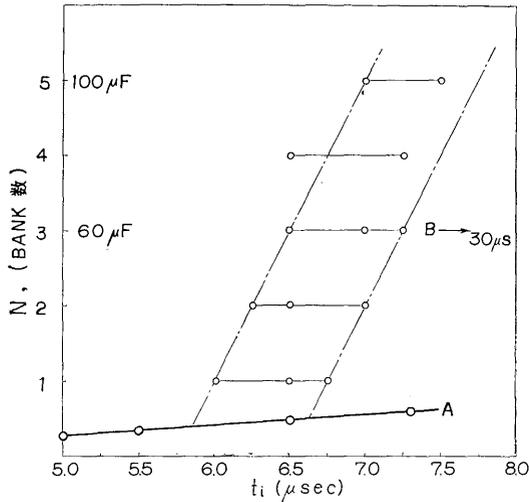
きくなつてはいるが、充電々圧 20kV 時の放電々流値は 70 kA であつた。また放電々流は充電々圧に比例する。

さらに各個バンク別の充電々圧と放電々流との関係を測定した結果が第 10 図であるが、電流値に数%の不揃いがあるのはコンデンサの容量差によるものである。



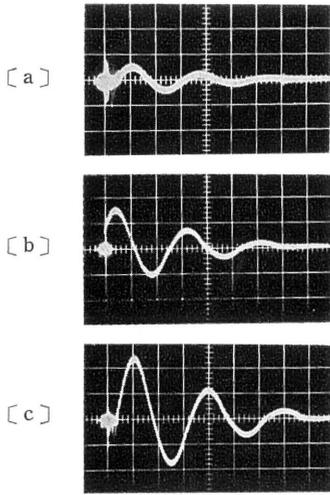
第11図 バンクの並列接続数 (N) と放電々流値 (I)

B は同じコンデンサ容量をもつ他所装置例、ケーブル長さ 10m 鎖線はバンク 1 個時の値を延長したもの



第12図 バンクの並列接続数 (N) と放電々流最大値までの立ち上がり時間 (t_i) との関係

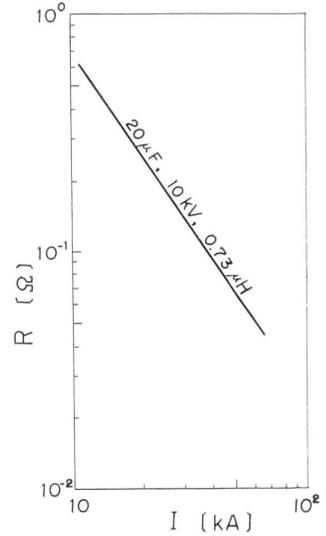
A, B は他所装置例



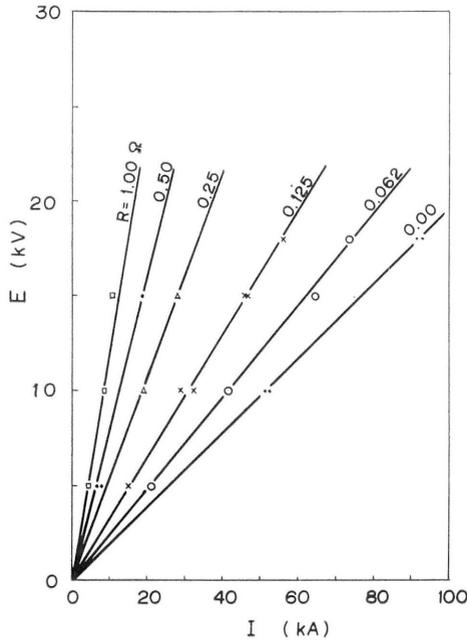
$E_c = 5 \text{ kV}, \quad 10 \mu \text{ sec/div.}$

第13図 バンクの接続数 (N) と放電々流値測定例

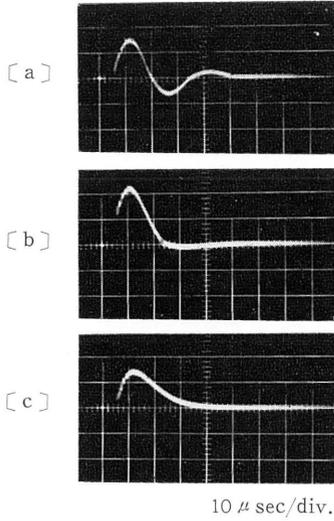
- a. バンク 1 基 ($20 \mu \text{ F}$)
- b. 3 基 ($60 \mu \text{ F}$)
- c. 5 基 ($100 \mu \text{ F}$)



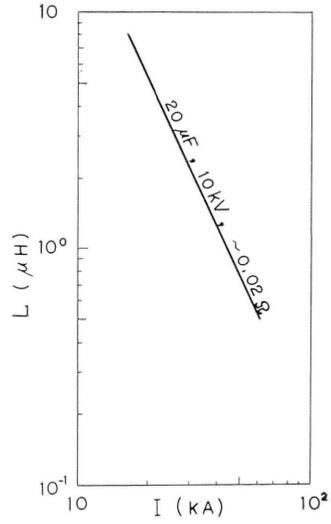
第15図 回路抵抗値 (R) と放電々流最大値 (I) との関係



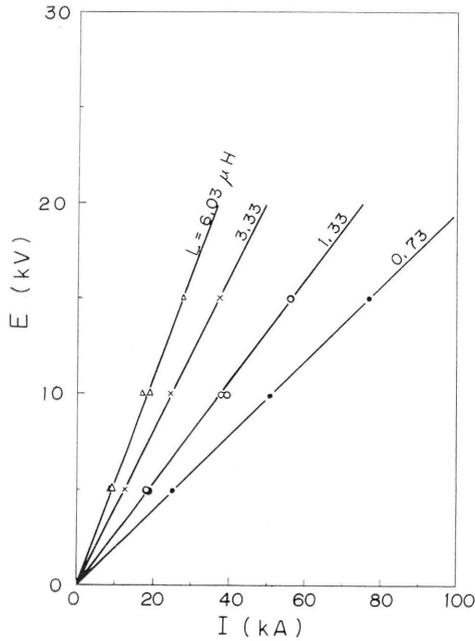
第14図 抵抗 (R) 負荷時の充電々圧 (E) に対する放電々流最大値 (I)



第16図 抵抗負荷時の放電々流波形
 a. 0.062 Ω,
 b. 0.25 Ω,
 c. 0.50 Ω



第18図 回路インダクタンス (L) と放電電流最大値 (I) との関係



第17図 回路インダクタンス (L) を変えた場合の充電々圧 (E) に対する放電々流最大値 (I)

各バンクの出力ケーブル端を disk shunt に集結したときの総合放電々流の測定値を第 11 図に示し、また第 12 図にこのときの放電々流の立ち上がり時間と、第 13 図に測定写真例を示す。

この回路の特徴は、出力ケーブルの終端を負荷（無誘導性）に直付集結すれば、負荷から見たコンデンサの容量は増加するが、一方負荷側から見た見掛けのインダクタンスが低下するので、放電々流の周期には殆んど変化がないことである。

したがって、この場合の放電々流値はコンデンサ容量（バンク数）に略々比例する。

4・3 抵抗負荷特性

放電回路の負荷に抵抗を挿入したときの、放電々流値とその波形を調べ、本装置の抵抗負荷特性を測定した。第 14 図と第 15 図は、負荷抵抗値と最大放電々流値 (I_m) との関係について充電々圧 (V) を変えて測定したものであるが、これから放電回路の見掛けの抵抗値を推定すると約 0.02Ω である。

また本装置の抵抗 (R) 負荷時の放電々流 (I_m) 特性の測定結果によると、 $I_m \div KVR^{-1/1.5}$ (K は定数) で表わされる。

第 16 図は抵抗値を変えたときの放電々流波形であるが、 0.50Ω では完全に非振動型となつている。本装置のインダクタンス (L) が $0.73 \mu\text{H}$ であるので、放電々流が非振動型となる抵抗値 (R) は、条件式 $R^2 \geq 4L/C$ (C はコンデンサ容量) から $R \geq 0.38 \Omega$ と小さな値となる。

このように負荷を含む放電回路の、時定数が小さいと、充電エネルギーの総放出が時間的に集中して行なえることになる。

4・4 インダクタンスの影響

放電回路のインダクタンスと放電々流との関係を、充電々圧 (V) を変えて測定し、第 17 図と第 18 図に示した。

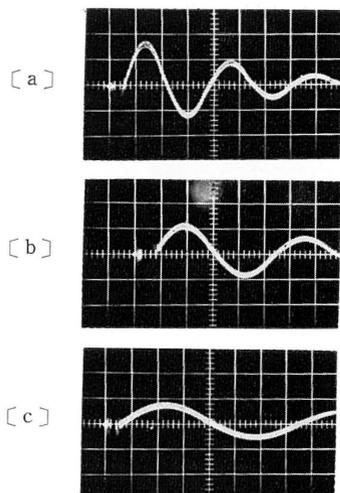
測定結果によると、本装置の最大放電々流 (I_m) 値におよぼすインダクタンス (L) の影響は、 $I_m \div KVL^{-1/2}$ (K は定数、 V は充電々圧) で表わされる。またインダクタンス値を変えたときの放電々流波形を第 19 図に示す。

一般にキャパシタンス (C) とインダクタンス (L) からなる回路で抵抗 (R) が無視できるときは、回路の振動数 (f) は $f=1/(2\pi\sqrt{LC})$ 式で、また放電々流値の最高値 (I_0) は $I_0=V/\sqrt{L/C}$ 式で与えられる。したがっていずれにしても衝撃大電流用放電回路中のインダクタンスは最少限にとどめられなければならない。

なお本装置短絡放電時の最高電流値の測定値は、上述計算式による I_0 よりも約 5% 低い。

5. 本装置を用いた二、三の放電導線爆発実験とその応用

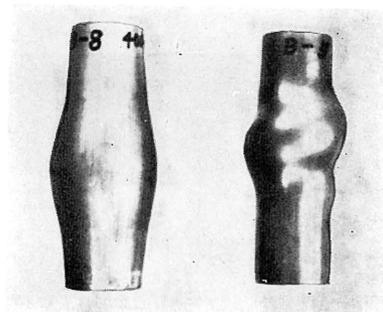
コンデンサに充電されたエネルギーを種々に利用する試みは既に 1905 年頃から始まつているが、主な項目をあげると、(a) 火花放電によつては、その強い光と超高温の利用、プラズマの加速・発射、瞬間 X 線の発生、熱衝撃の研究等に用いられ、(b) 導線放電法で発生する衝撃圧の利用法としては、種々の媒体中の衝撃波の基礎研究、成形加工、難融金属類の爆発溶射法によるコーティング (coating) 等がある。その他にわれわれが新しく開発研究した乾式放電法⁹⁾ の応用による成形加工、金属の圧接着、ピス



$E_c = 5 \text{ kV}$, $10 \mu \text{ sec/div}$, $20 \mu \text{ F}$

第19図 インダクタンス (L) を変えたときの放電々流波形と電流値

a. $1.33 \mu \text{ H}$, b. $3.33 \mu \text{ H}$, c. $6.03 \mu \text{ H}$



[a] [b]

第20図 銅管のバルジ成形
 10 kV , $80 \mu \text{ F}$

a. 水中導線放電成形例
b. 乾式 (ラセン状架線) 放電成形例

トンの高速駆動で行なう材料の高速試験がある。(c) 電磁力の利用としては瞬間強磁力の発生, 電磁成形加工等がある。

5・1 成形加工

本装置で, 液中または固体中放電成形法および電磁成形法によつて, 板金成形, バルジ (bulge), 打ち抜きなどの成形加工の実験を種々行なつてきたが,⁹⁾¹⁰⁾ そのうち, 水中導線放電によつて 1 mm 厚軟鋼板を筒状ダイス (80ϕ dies) 上で自由変形させた例を示すと, 試片上 10 mm のところにアルミ線 ($0.15 \text{ mm}^2 \times 20 \text{ mm}$) を架し, 水深を 20 mm にとつて, 充電々圧 10 kV , コンデンサ容量 $20 \mu \text{ F}$, 充電エネルギー 1000 J でアルミ線を放電爆発させたところ, 軟鋼板は 11 mm くぼんだ。

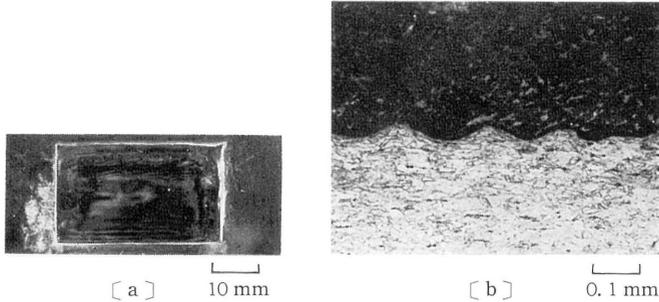
第20図に, 30ϕ , 1.7 mm 厚銅管を 10 kV , $80 \mu \text{ F}$ でバルジ成形したプロフィールを示す。同図左側は水中放電法, 右側は硬質ビニール中放電の乾式放電法⁹⁾で行なつたものであるが, いずれも伸びひずみは40%にも達している。

5・2 圧接着

a) 本装置と乾式放電法を使つて, 放電法による金属と金属の圧接着に始めて成功した。⁹⁾

放電による圧接着の方法は, 接着する金属片の非接着側に $0.2 \sim 1 \text{ mm}$ 厚の絶縁板 (ポリエステル樹脂など) の間に爆発導線または金属箔を挟み, これを最適放電条件で爆発させることによつて金属片を $100 \sim 5000 \text{ m/sec}$ (材質・形状で異なる) で, しかも適当な角度 ($10 \sim 30^\circ$) で相手の金属に衝突させる。

第21・a図は $1 \times 25 \times 40 \text{ mm}$ の銅板を真鍮板に圧接着したものである。このときの放電条件は, 爆発導線に厚さ 0.02 , 巾 20 , 長さ 35 mm のアルミ箔を用い, 30 kV , $20 \mu \text{ F}$, 9000 J 放電で行なつたものである。第21・b図は銅・タングステン複合々金と銅との圧接着断面である。放電法による圧接着は,



第21図 金属と金属の圧接着例

- a. 銅板（1 mm）と真鍮
- b. Cu-W（複合々金）に銅板（下）を圧接着した断面

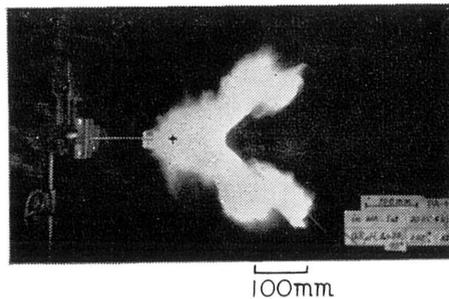
爆薬などによる場合に比べて材料の損傷度が少なく、アルミや鉛などの軟質材や 1 mm 以下の薄板などに適しているといえよう。

b) なお同様な方法でピストンを発射して速度を測り、機械エネルギーへの変換効率を調べた結果、500~1000 J 放電では、充電エネルギーに対する変換率は 10~15% であった。

5・3 熱衝撃および材料試験機（昭和 41 年度に設置される）の駆動

a) 熱衝撃試験 金属導線が放電によつてガス化され、さらにこれがイオン化されて加熱される時、プラズマ状態となつて 10^4 °K 以上にもなる。¹¹⁾¹²⁾ この発生した高温のプラズマを、放電時の衝撃大電流の磁力によつて 10^3 ~ 10^4 m/sec に加速発射して試験体に衝突せしめるものである。

第 22 図に大気中で 2000 J 放電によつてプラズマを発生・発射し、アングル材に衝突させたときの写真を示す。



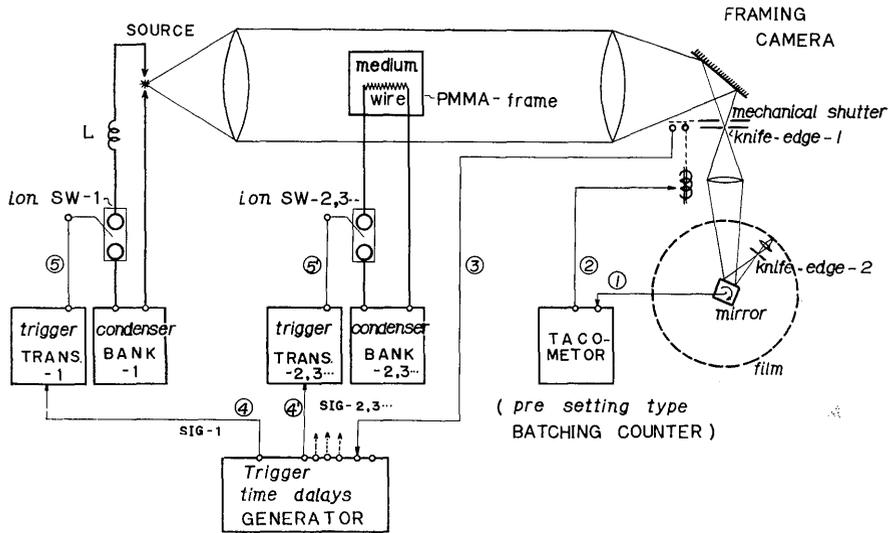
第22図 アングル材（90°）に導線（+印箇所）爆発焰を加速衝突させた例

b) 高速度材料試験 前述のピストン発射の要領で高張力鋼などのブロックを秒速 数 100 m で発射し、これを試片に衝突させて高速圧縮試験を行なう。

また高速引張試験の方は、対になつたブロック間に試片を接続しておき、ブロックの間で放電爆発させることによつて行なう。この方法で最高 300 m/sec までの引張速度で試験を行なうことができる。

5・4 超高速カメラとの同期

本放電装置は、他の現象との同期がとれること、multi channel型であること、および各 channel の放電開始に遅延をかけることができるなどの特徴をもつので、超高速カメラとともに第 23 図に示すような構成をなし、両者の同期をとることによって超高速現象を撮影することができる。



第23図 高速度カメラと放電装置との同期構成例 (Schuliren 法)

①, ②, ③... 順に同期信号が伝達される

第 24 図は、水中で導線を放電爆発させたときに発生伝播する水中衝撃波を、ニコン・植村式 (第 2 図の c) 超高速カメラで撮影したものである。

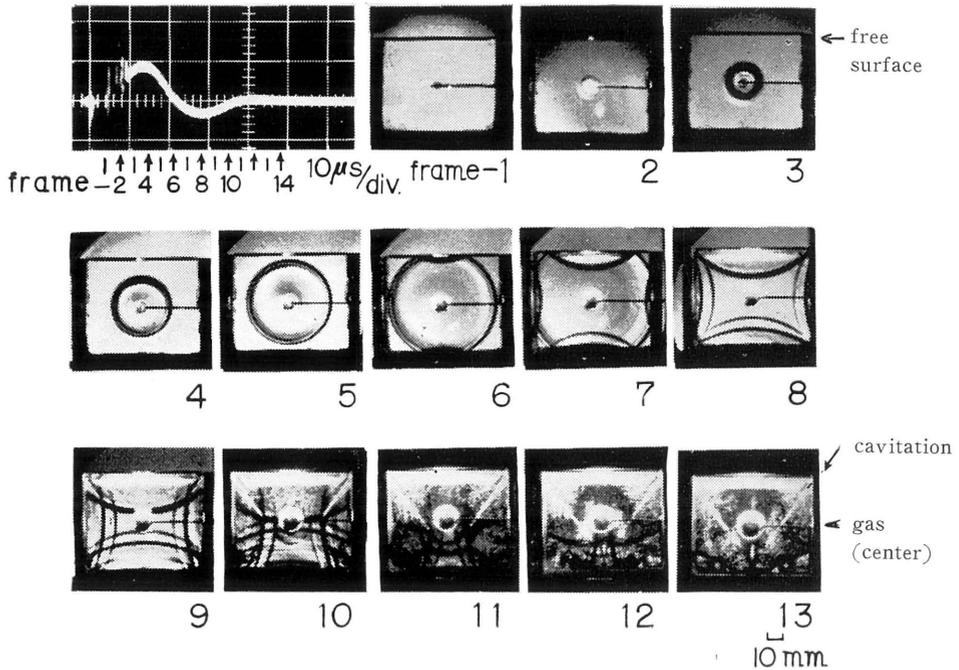
撮影方法は、第 23 図に示すように被写体をシュリーレン装置の光路の中に設けておき、BANK-1 の放電開始時間を BANK-2 よりも $10\mu\text{sec}$ 先行するように遅延回路をセットし、同様にカメラのタコメータ (tachometer) のプレセットダイヤルを所定の撮影速度値に合わせておく。次にバンクの充電を行なうとともにカメラの駆動を始める。その間にバンクの方は既に充電を完了し、待期の状態にある。かくしてカメラが所定の撮影速度に達すると同時に自動的にタコメータから発せられる信号によってカメラのシャッターが開き、さらにシャッターから放電装置のパルス発生器に信号が送り込まれて、BANK-1 が光源となる放電を開始する。続いて BANK-2 はこれから $10\mu\text{sec}$ 遅れて放電を開始し、水槽中の導線を爆発せしめ、水中に衝撃波を発生伝播させる。一方カメラの方は、その間に駒送り速度 $25 \times 10^4 \text{ F/sec}$ 、露光時間 $0.4 \times 10^{-6} \text{ sec}$ の速度で連続 400 駒の撮影を完了する。

同様な方法で透明なプラスチック中の衝撃波なども撮影できた。³⁾⁴⁾

6. あとがき

1) 本装置の放電特性を要約すると次のようである。

a) 放電エネルギー集中が大きい。すなわち放電回路のインダクタンスが小さく ($0.73\mu\text{H}$)、したがつ



第24図 Schuliren 法で撮影した水中衝撃波の伝播

撮影速度 $25 \times 10^4 \text{ F/sec}$

露光時間 $0.4 \mu \text{ sec}$

放電条件 7 kV , $20 \mu \text{ F}$, Al 線 ($0.15 \text{ mm}^2 \times 30 \text{ mm}$)

て放電々流値の最高点までの時間も短く約 $6 \mu \text{ sec}$ であつて、コンデンサバンク 1 基あたりの短絡放電電流値は充電々圧 30 kV のときには 150 kA に達した。

また充電々圧と放電々流値との関係の再現性は極めてよい。

b) 5 基のコンデンサバンクの各々の放電回路が完全に独立しているので、5 基全部を並列にして負荷（無誘導性）に投入しても放電々流の周波数は 1 基のみのときとあまり変わらず、放電々流値は投入したバンクの数に略々比例する。

c) 本装置でピストンの発射を導線爆発法で行なつた結果、充電エネルギーが発射体の運動のエネルギーに変換される変換率が 14% 以上に達することがわかつた。

d) 各コンデンサバンク間の放電開始時間々隔の設定精度は $0.1 \mu \text{ sec}$ であつて、実際のずれは $\pm 0.2 \mu \text{ sec}$ 程度である。

2) 構成上の特徴は

a) コンデンサ容量の選択が充電回路で行なわれるので、各コンデンサバンクは独立しても作動させ得る。

b) 放電スイッチはトリガ装置をもつているので、他の現象との同期がとれるとともに各バンク間の放電開始時間を $0 \sim 500 \mu \text{ sec}$ の範囲で予め設定して遅延できる。したがつて超高速カメラなどとの組

合わせ、同期が容易にできる。

3) 本装置を用いて放電実験を行なった結果、放電成形はもちろん、放電による金属の圧接着が初めて可能となった。またプラズマの加速発射や種々の媒体中の衝撃波に関する基礎実験が比較的容易にできるなど、応用域は広い。

なお充電エネルギー制御の精度が高いため実験結果の再現性がよいなど、本装置は一応初期の目的に叶ったものであるといえよう。

最後に本装置の設計、設置にあたり有益な助言を与えられた栗原道徳名誉教授を始め、本研究所々員各位に厚く感謝する。また製造を担当された株式会社島津製作所と同社向坂光雄氏、ならびに測定を手伝ってくれた福崎康治君の各氏に感謝する。

なお本装置の設備は主として文部省特別設備費および科学研究費によるものである。

文 献

- 1) 栖原寿郎, 福田重久: 高エネルギー工学研究ノート No. 3
- 2) 栖原寿郎, 福田重久: 高エネルギー工学研究ノート No. 7
- 3) 栖原寿郎, 北島一徳, 福田重久: 第17回塑性加工連合講演会前刷
- 4) 栖原寿郎, 福田重久: 第16回応用力学連合講演会前刷
- 5) D. C. Hagerman, A. H. Williams: Review of Scientific Instruments. Vol. 30, No. 3 (1959)
- 6) J. W. Mather, A. H. Williams: Review of Scientific Instruments. Vol. 34, No. 3 (1960)
- 7) 林, 中野: 電気学会誌 81巻, 874号 (1961)
- 8) J. H. Park: U. S. Department of Commerce National Bureau of Standards Research Paper. Vol. 39, Sept. (1947)
- 9) 栖原寿郎, 福田重久: 高エネルギー工学研究ノート No. 8, No. 9
- 10) 栖原寿郎, 北島一徳, 福田重久: 塑性と加工 8巻 77号
- 11) 北島一徳, 栖原寿郎, 福田重久: 塑性と加工 8巻 74号
- 12) 北島一徳: 高エネルギー工学研究ノート No. 5

(昭和42年2月24日 受理)