放電加工の加工機構

— 水中衝撃放電による液体金属（水銀）の挙動 —

元木 幹雄* 行村 建* 和田 宏隆*

Metal Removal Mechanism of the EDM Process

— Behaviors of Liquid Metal (Mercury)

Caused by a Pulse Discharge in Water —

by Mikio MOTOKI, Ken YUKIMURA and Hirotaka WADA

Behaviors of liquid metal (mercury) caused by a transient arc discharge in water (The maximum current is about 125 A of which duration is about 68 μ s) are studied in relation to the removal mechanism of the electrical discharge machining (EDM). Photographs are taken with an image converter camera or with a single still camera. It is observed that the small luminous particles scatter away from the vicinity of the arc region at the beginning of a bubble expansion. Small particles of the liquid metal, of which the number increases gradually, are also observed to be emitted from the projections created on the mercury electrode and scatter away during the expansion of a gas bubble. In this manner, they are removed from the mercury electrode. These phenomena vanish suddenly when the gas bubble begins to contract. In the case of a solid electrode, many cavities instead of the projections are observed near its surface in a bubble during the time period mentioned above. They also vanish suddenly after the beginning of the contraction of the bubble. It is apparently suggested that the projections observed in the case of the mercury electrode and cavities on the solid electrode are produced by the

* 同志社大学工学部

same reason; that is, these are created at the regions of partially low pressure on the surface of the electrode. Accordingly, these regions seem to be playing an important role in the removal phenomena of the molten metal on the EDM process; that is, it is concluded that the molten metal in the crater might be removed in the form of small particles from the workpiece showing the same removal mechanism as the case of mercury electrode.

1. ま え が き

放電加工の基礎的研究として、加工機構の究明は極めて重要であり、従来より多方面で活発な研究が行われ、次第にその本質が解明されつつあるが^{1)~10)}、なお且つ今後の研究課題として多くの問題点が残されている現状である。液体中における短時間のアーク放電によって、電力密度の高い電気エネルギーが被加工体表面の放電点に集中して供給され、その結果、被加工体材料の一部は熔融・蒸発する。蒸発によって材料の一部が被加工体より除去される外に、電極点付近の熔融部分が、なんらかの作用によって取除かれて加工は進行する。熔融部分の除去はギャップに発生した気泡の膨張、収縮運動が密接に関連しているようである。

本研究は上記の熔融部分の除去機構を明らかにすることを目的とするもので、熔融部分が液体状であることに着目し、液体金属（水銀）を液中短ギャップ放電における一方の電極とする点に特徴があり、放電に際しての水銀表面の挙動をイメージコンバータカメラ及び開放形カメラによって観測した。すなわち、実際の放電加工においては、1回の放電によって形成される電極点近傍の熔融部分の体積は極めて微小であり、従って熔融部分の挙動の観測は比較的困難であるが、水銀を電極とすると、水銀は常温においても液状であるので、衝撃放電に対応する液状金属の挙動観測が容易である。要するに、本論文は水銀電極の液中短時間放電に対する挙動より、実際の放電加工における被加工体よりの熔融部分の除去機構を推定した研究成果を報告するものである。

2. 研 究 方 法

図1は単発衝撃放電の発生回路（図中太線）及び現象観測のための測定系であり、図中の矢印（→）は信号の流れを示す。単発衝撃放電の発生はコンデンサ放電に依った。すなわち、サイリスタをスイッチング素子として用い、約47 μ Hの電流制御用インダクタンスを介して、コンデンサに蓄積したエネルギーを水中に設けたタングステン電極と水銀電極との間の微小ギャップに投入し、過渡アーク放電を発生させた。なお、コンデンサの容量は10 μ F、充電電圧は300Vである。

図 1 実験概略図

現象の写真撮影はイメージコンバータカメラ及び開放形カメラを用い、1回の放電で1枚の撮影を行う駒撮りであり、イメージコンバータカメラの露出時間は $1\mu\text{s}$ に設定した。衝撃放電の発生に伴う円板形分流器（抵抗値 $2\text{m}\Omega$ ）の出力によりオシロスコープの時間軸を掃引させた。放電開始後任意の時刻での観測を行うため、遅延装置を介して、半値幅が約 $3\mu\text{s}$ の光パルスを発生せしめ、これを背光としてギャップ状態を観測した。背光をフォトダイオードにより検知し、フォトダイオードの出力により、イメージコンバータカメラを動作させた。また開放形カメラの場合、シャッタをパルスとして写真撮影した。

図 2 開放形水そうの場合の電極配置図

図 2 及び図 3 に電極等の構造を示す。実験は水中において行い、主として水銀を陰極とし、陽極にはタングステン線を採用した。図 2 は、開放形水そう中で実験を行う場合の電極形状を示す。直径約 100mm のジュラコン樹脂の中央部に直径 12mm 、深さ 17mm の穴をあけ、ここに水銀を注入し陰極とした。ギャップの長さは約 0.3mm であって、マイクロメータにより調整した。なお、用いた容器はアクリル製で縦×横×高さはそれぞれ、 $130\text{mm}\times 125\text{mm}\times 185\text{mm}$ である。

図 2 の方式では気泡の内部現象の観測は困難であるので、図 3 に示すように 2 枚の平行な透明アクリル板の狭い間隙内部に両電極を設けて衝撃放電を発生せしめ、気泡内部にある水銀面の挙動などに付

図3 細隙形水そうの場合の電極配置図

いて観測した。この方式によれば、開放形水そうの場合と異なり、気ほうはおおむね密閉された容器内での挙動となり、アクリル板によって板に垂直方向の運動が制限され、気ほう内部の観測が容易になる。細隙の間隔は(a), (b), (c)とも1 mmとした。図3 (a) は水銀電極の場合であり、密閉度が気ほうの運動に与える影響を検討するために、アクリル板上端より水銀面までの深さ l を9 mm～90 mmまで変化させた。更に、現象の比較のために l を15 mmとして図(b)に示すような方法で陰極にアルミニウム板を用いた場合、及び水銀電極の極性を反転させた場合についての実験も行った。

ギャップの長さは、(a)の水銀電極の場合約0.3 mmであり、(b)では陰極を軽くアルミ板に接触させた。このようにギャップの長さに差異を設けたのは次の理由による。水銀陰極の場合、コンデンサ電圧をギャップに印加すると、発生するギャップ電界によって水銀面に突起が発生¹¹⁾して放電開始時には、電極間隔がこれ以上に小さくなるものと考えられ、安定且つ再現性のある衝撃放電が発生する。しかるに、アルミ板の場合は明らかにこのような現象は発生しないため、本研究条件のコンデンサ電圧程度ではわずかの放電ギャップでも、主に放電開始の遅れによりアークの発生に大きなばらつきを生ずる。このため、陰極を軽くアルミ板に接触させて実験を行った。

図3 (c)は(a)と同様の電極構成であるが、放電によって発生した気ほうの上方向への膨張を阻止するために、プラスチック板(以後、p1板と称す)を設けた。すなわち、比較的面積の大きな加工電極で放電加工する場合の気ほう運動がこれに類似する。水銀面とp1板下端との距離は約1 mmとした。ギャップの長さの調整を容易に行うために、陽極のガイドとして内径0.4 mm、外径1 mmの絶縁管を設け、管内にタングステン線を通した。

以上の実験より、ギャップ現象、特に気ほうの内部における水銀面の挙動を観測して、実際の放電加工における被加工体より溶融部分の除去機構について考察した。

3. 研究 成 果

3.1 開放形水そうの場合

図4は開放形水そうにおいて、陰極を水銀とした場合のギャップ電圧及び放電電流波形の一例である。放電時間は約 $68\mu\text{s}$ であって第1半波の終了後、サイリスタが導通しなくなる結果放電は終了する。電圧波形は放電の開始時に 40V 程度の値を示し、時間と共に電圧はほぼ直線的に減少しておりアーク放電は過渡状態にあることを示している。また、電流はアーク発生後約 $32\mu\text{s}$ で最大 $125\pm 5\text{A}$ に達する。アークの発生はサイリスタの導通後 $1.4\pm 0.3\text{ms}$ で起こる。すなわち、サイリスタを導通させても直ちにギャップはアーク放電へ移行せず、約 1.4ms の経過後にギャップ破壊をする。放電電流波形などの電気的特性は細隙の場合やアルミニウム板の場合にもほぼ同様の傾向を示した。但し、アルミ板の場合両電極は軽く接触しているため、サイリスタの導通後アークが発生するまでの時間は極めて短く、最大でも約 $40\mu\text{s}$ であった。

図5は開放形水そうの場合におけるギャップ現象の観測例であり、(I)は水平方向、(II)は約 20 度の斜め上方より開放形カメラによって撮影したものである。このため、放電点近傍ではすべての写真にアークによる光が重畳されている。初期に形成されたまゆ形の気ほうは膨張を始め、次第に半球状となり、約 $200\mu\text{s}$ で最大膨張に達し〔図5 I (b)〕、その後、気ほうは収縮過程に入り、約 $350\mu\text{s}$ で崩壊し、再膨張は見られなかった〔図5 I (e)〕。

図6は図5より求めた気ほう半径の時間変化であり、測定は電極に対し軸方向と垂直方向について行った。これより、 $50\mu\text{s}$ から $100\mu\text{s}$ までの垂直方向での平均膨張速度は、約 8.2m/s 、収縮期の $250\mu\text{s}$ より $300\mu\text{s}$ までの平均速度は 8.8m/s であり、後者の速度がわずかに大きい値を示す。

一方水銀面においては気ほうの生成初期より、その膨張運動に追随したと思われる水銀の盛り上がり

20V/div, 20 μs /div
(a) ギャップ電圧波形

50A/div, 20 μs /div
(b) 放電電流波形

図4 電圧，電流特性

図 5 開放形水そうにおける観測例

図6 気泡半径の時間変化

図7 水銀面の挙動の模式図

が見られる。これは気泡が水銀に接する付近に生成される。この水銀面の挙動の模式図を図7に示す。形成された盛り上がりは、気泡の崩壊後次第に成長して高くなり、図5 I (e), (f) より明らかにその輪郭は台形状であって電極軸を中心とするリング状となり、いわゆるミルククラウン状を呈する。このリング形状は、図5 IIの観測よりも明らかであり、垂直方向へのリング状水銀の成長は3 ms程度まで継続する。その後、時間の経過と共に図5 I (g) 及び図7よりわかるように、このリング形状は次第に失われ水銀面に脈動として伝ばんしていく。

200 μ s 程度以降において、気泡の表面近傍に多数の微粒子が外側に飛散する現象や発光粒子の飛散が観測されるが〔図5 I (c), II (b)〕, これらの現象は Hockenberry 氏²⁾らによっても認められている。また、水銀粒子の飛散は気泡の崩壊後においても盛り上がりの縁端部より認められる〔図5 I (d)〕。おおむね1 ms 以降においては放電点を中心とする放射状の飛散も存在し、その飛散方向は電極軸を中心として、36度程度の上方向の範囲内にある〔図5 I (g)〕。

以上要するに、開放形水そう中において単発衝撃放電を発生せしめた結果、生成される気泡は膨張、収縮運動を行うが、崩壊後の再膨張は観察されなかった。また、水銀面は気泡の膨張運動に追隨して盛り上がり、リング形状を呈すると共に、金属粒子の気泡外への飛散、発光粒子や盛り上がり縁端部よりの水銀粒子の飛散等の現象が認められた。

3.2 細隙形水そうの場合

開放形水そうにおける一連の観測では気泡の内部現象を詳細に観測することは困難である。本論文は放電加工の加工機構を明らかにするのが目的であるので、時間的に気泡の崩壊前後までの気泡内部現象に着目する必要がある。この観点より、開放形水そうの場合に比べて気泡内部の観測がより容易な細隙中において単発衝撃放電を発生させて研究を行った。

図8は図3 (a) の細隙形水そうにおいて l が9 mm の条件で放電させた場合のイメージコンバータ

図 8 細隙形水そうにおける観測例 (水銀電極の場合)
 ℓ ; 9 mm, タングステン線電極の直径 : 0.5 mm

カメラによる観測例で、アークによって発生した気ほうは開放形水そうの場合と同様におおむね半円状となって運動しその最大半径もほぼ同じであるが、最大膨張時刻は約 $300 \mu\text{s}$ であり、開放形水そうの時の約 $200 \mu\text{s}$ より $100 \mu\text{s}$ 程度遅くなる。これは、細隙を構成するアクリル板の影響を受けたものと考えられる。また、崩壊時刻は約 $750 \mu\text{s}$ である。図の (a), (b) より明かなように、気ほうの内部には、アークの発生に伴って放電点近傍において生成されたとと思われる多くの金属微粒子が認められる。更に、この時刻以降気ほう内部において、放電点を中心としておおむね 2 mm の範囲の水銀面がわずかに盛り上がるが、気ほうの収縮期においてこの水銀面は下方に押しやられるのがわかる [(e)]。

約 $150 \mu\text{s}$ 以降最大膨張時までの期間、気ほう内の水銀面のわずかな盛り上がりの外に、この付近よりほぼ一様に小さな突起が形成され、その先端より金属微粒子が飛散して突起より離脱する現象が認め

られる〔(c), (d)〕。この突起の形成は気ほうの膨張につれて次第にその数を増加するが、気ほうの収縮期に入ると、その数は急激に減少し、気ほうの崩壊までの間に2～3個程度の突起しか認められなくなることが判明した。

かくして、細隙形水そうの採用により開放形水そうに比べて気ほう内部における水銀表面の状態がより容易に観測できた。いずれの場合も、電極材料として水銀を用いているので、気ほう内部の電極表面は液体状であり、従って気ほう内における液状金属の挙動をは握しやすい。

次に、上記の観測結果の比較のために、電極材料として水銀の代わりに金属板を用いて同様の実験を行った。すなわち、電極としてアルミニウム板を使用し、図3(b)の装置で単発放電を発生させた。図9はその観測例であって、気ほうは図8の水銀の場合と同様にほぼ半円状を呈しながら膨張収縮運動を行い、約 $350\mu\text{s}$ で最大膨張に達する。また気ほうの最大半径や崩壊時刻なども水銀の時とほぼ同じ値を有する。

本方式では気ほうの膨張期において、水銀電極の場合に認められた突起の発生の代わりに、気ほう内のアルミ板上に多数のキャビティが形成される点に特徴を有する〔(b), (c)〕。キャビティは、気ほうの膨張に伴って水銀の場合と同様に、その数を増加するが、気ほうの収縮期に入ると急激に減少し、(d)より明らかな様に、約 $360\mu\text{s}$ ではほとんど認められなくなる。

ℓ ; 15 mm, タングステン線電極の直径 ; 0.1 mm

図9 細隙形水そうにおける観測例(アルミ電極の場合)

以上より水銀陰極の場合の突起の発生、消滅と陰極を固体金属とした場合のキャビティの挙動には気ほうの膨張及び収縮運動が大きく作用しているものと考えられ、これらの現象における時間的流れはほぼ一致する。従って上述の水銀面における突起の発生は、キャビティの生成現象と同様の原因に基づくものと思われる。これらの模式図を図10に示す。(a)は膨張期の気ほうを表するものである。キャビティはアルミ板上に局所的な低圧力部が生成されることにより発生する〔(b)〕。従って、水銀陰極の場合、気ほう膨張に伴う内部圧力の低下に従い、水銀面に局所的な低圧力部が発生して、(c)に示すようにその部分の水銀が引き上げられて突起が生成され、その結果突起の先端より金属微粒子が飛散して電極面より離脱するものと思われる〔(d)〕。一方、気ほうの収縮過程において突起がほとんど見られなくなるのは局所的な低圧部の形成が急激に消滅することを意味し、気ほうの収縮開始に伴う気ほう内の圧力の増加が低圧力部の存在を消失させる結果と推測される。通常の放電加工における固体金属面上のクレータ形成の1つの要因は、アークの加熱によって作られた熔融金属が上述の水銀粒子の離脱現象と同様の局所的な低圧力部の発生に基づいて飛散する結果と思われる。

3.3 深さ l の変化による影響

一般に液体中に発生した気ほうの膨張、収縮運動は周囲媒質の液圧の影響を受け、圧力の増加に従って運動の周期は短くなる。これは周囲圧力としてほぼ一定の圧力が定常的に加わっている場合¹²⁾や気ほうに作用する圧力が逐次変化する時¹³⁾のいずれにおいても認められる。特に、後者の現象は密閉形容器中で生成した気ほうに見られる。

細隙形水そうでは極めて狭いアクリル板の間隙中で気ほうを発生させるため、この間隙はおおむね密閉形容器に近いと考えられ、液圧による気ほう運動の差異が予測される。よって、放電点までの深さ l を変えて実験を行った。

図11は、図3(a)の装置において l を54mmにした場合のイメージコンバータカメラによる観測例であり、気ほうが膨張、収縮運動をすることやほぼ半円状の形状を示すことは前述の l が9mmの時と同様である。しかし、気ほうの最大膨張時刻は約300 μ s、崩壊時刻は約400 μ sであって、 l が9mm

図10 キャビティ及び突起、水銀微粒子の飛散の模式図

l : 54 mm, タングステン線電極の直径 : 0.5 mm

図 11 細隙形水そうにおける観測例 (水銀電極の場合)

の場合と比較して、最大膨張時刻はそれ程変わらないが、気ほうの収縮期では l の影響を大きく受けて収縮が進み、崩壊時刻は $350 \mu s$ 程度速くなる。

初期の気ほう内には図 8 (a), (b) で認められたのと同様のアーク放電に基づく金属微粒子が見られるが、水銀面の挙動には大きな差異が認められる。すなわち、 l が 9 mm の時には水銀表面よりの突起の発生及びその先端よりの金属微粒子の離脱が顕著に現れたが、 l が 54 mm の場合、この特徴の外に水銀面の盛り上がり現象が著しくなる〔(b) ~ (d)〕。この盛り上がりは気ほうの膨張と共に、特に上方向に大きくなり、気ほうの最大膨張時においてその高さは 0.8 mm 程度に達するが、収縮に従って減少し始め、気ほうの崩壊時刻付近においてほとんど認められなくなる〔(e)〕。

水銀面の盛り上がり領域は、気ほう内全面に一樣に発生しているのではなく、気ほうの最大膨張時に放電点を中心として水平方向に 2 mm 程度広がり、この時の気ほうの直径約 4 mm に比べ、ほぼ 50 %

程度である。これは、気ほう内部の水銀面上の圧力が均一でなく、気ほうと水銀面の境界付近に比べて、放電点近傍がより低い圧力に達していることを意味する。

この盛り上がり現象は l が 20 mm 程度より顕著に現われるが、これ以上の深さでは盛り上がり高さにそれ程の違いは見られなかった。このように、 l が 20 mm 程度を境にして気ほう内の水銀面の盛り上がり高さに差異を生ずる。この現象は次の様に考えられる。すなわち、 l が小さい場合気ほうの膨張に基づいて周囲の水は細隙部より上に押し出されるが、 l が大きくなるとこの押し出しが十分でなくアクリル板による間隙部は実質的に、より密閉状態に近づき、気ほう外部において局部的な水の圧縮層が形成され¹³⁾、気ほう外の水銀面に対してより高い圧力として作用する結果、気ほう内の水銀面にこのような盛り上がり現象が発生するものと推測される。また、この盛り上がり現象は気ほう内の圧力の不均一性に基づいて、放電点近傍に形成される。

除去機構の要因になる突起の発生は l が 9 mm の時と同様に、気ほうの膨張時に多数認められ、気ほうの収縮開始と共にその数は急激に減少する。しかるに、(b)～(d) より突起の形成は盛り上がった水銀面より見られる。 l が 9 mm の場合には、ほぼ元の水銀面より発生していたが、これは 54 mm の場合に比べて水銀面の盛り上がり現象が顕著でないためである。しかし、その生成領域は気ほう内の全域に渡っているのではなく、54 mm の場合と同様に放電点を中心として水平方向に 2 mm 程度の領域である。

上述の水銀面の盛り上がりや突起の発生及び消滅過程は、電極の極性を反転させた場合、すなわち、陽極が水銀、陰極がタングステン線の条件で行っても同様であった。この場合の観測の一例を図 12 に示す。但し、 l は 32 mm である。図より明らかなように、図 11 に類似した突起の発生、その先端よりの水銀粒子の離脱現象が観測される。

以上要するに、細隙中の水深を大きくした場合（本実験条件では 20 mm 以上）、気ほう内の水銀面の盛り上がり現象が顕著になり、突起の発生及び微粒子の離脱現象はこの盛り上がり面より見られる。水銀面の盛り上がり著しくなるのは気ほう外部における水の圧縮層の形成に伴うより高い圧力と気ほう内部の水銀面の圧力の差異が大きくなる結果と推測される。

3.4 気ほう膨張の抑制

実際の放電加工において、電極面積が比較的大なる場合は、放電点で生成された気ほうは加工電極と被加工体のために上下方向の膨張が制約され、ギャ

l : 32 mm, タングステン線
電極の直径 : 0.5 mm

図 12 逆極性の場合の観測例

$l : 9 \text{ mm}$, タングステン線電極の直径: 0.2 mm

図 13 気ほう膨張の抑制 (水銀電極の場合)

ツブの長さに対応した厚さを持った円板形状となって、半径方向に膨張する。この現象と類似の現象を発生させるために、細隙形水そう中にプラスチック板 (pl 板) を図 3 (c) に示すように設けて実験した。

図 13 はこの場合のイメージコンバータカメラによる観測例を示すもので、前述のように pl 板下端と水銀面との距離は 1 mm , l は 9 mm である。気ほうは上述と同様に膨張、収縮運動を行うが、上方への膨張が大きく抑制されるため、水平方向への広がりが顕著である。気ほうの最大膨張時刻は約 $400 \mu\text{s}$ であり、この時の水平方向の広がりには $4.5 \sim 5.0 \text{ mm}$ 程度に達し、pl 板を設けない時と比較して、最大膨張時刻は $100 \mu\text{s}$ 程度遅く、気ほうの広がりはずかに大きい値を示す。これは、pl 板の影響を受けたものである。また、図の (b) ~ (d) より明らかなように、pl 板と細隙を構成するアクリル板との間にはわずかな間隙 (約 $50 \mu\text{m}$) があり、この間に気ほうが入り込んでいるのがわかる。

一連の写真より、水銀面の挙動は前述の図 11 の l が 54 mm の場合と次の各点において極めて類似した現象を呈しているのがわかる。第 1 に、水銀面の盛り上がりは気ほうの膨張に伴って上方向に成長しこの盛り上がり高さは気ほうの最大膨張時において $0.6 \sim 0.8 \text{ mm}$ 程度に達する [(c)]。第 2 に、この盛り上がりは気ほう内の全域にわたっているのではなく、放電点を中心として 2 mm 程度の広がりを持つ [(c)]。第 3 に水銀の盛り上がり面より水銀の突起が発生して、その先端より水銀微粒子の

離脱が見られる〔(b)～(c)〕。第4に気ほうの収縮過程において、この盛り上がりも小さくなる〔(d)〕などである。

このように水銀面の挙動に関して pI 板の設置は、pI 板を設けなくて l が大きい場合と同様の現象を示すことがわかる。従って、実際の放電加工において電極面積が比較的大きい場合のギャップ現象は、細隙形水そうの深さが大きい場合に呈される現象と極めてよく似た過程を経るものと考えられ、熔融金属の飛散によって作られるクレータの形成要因の1つには、気ほう内に存在する局所的な低圧力部の発生が大きく作用しているものと考えられる。

4. む す び

放電加工における加工機構の研究として、電極表面の放電点付近に形成された熔融部分の除去機構を明らかにするために、水中において水銀を一方の電極として線電極の先端との間に単発放電を発生し、そのときの水銀面の挙動について研究した。

(1) 水中放電によって生成された気ほうの膨張初期に放電点近傍より水銀微粒子が飛散する現象の外に、気ほうの膨張と共に多数の突起が水銀面上に形成され、突起の先端より水銀微粒子が飛散する現象が観測された。突起の生成は気ほう内における圧力分布の不均一に基づくものと推測され、気ほう内に生成された多数の突起は、気ほうの収縮によりその数を急激に減少する。

(2) 上述の観測結果より、実際の放電加工においても、熔融部分の電極よりの除去機構は、気ほう内に局所的な低圧力部が生成されることに基づくものであると推察される。この推論は、水銀の代わりに金属板を用いた時、気ほう内に局所的な低圧力部の発生に基づくと思われる多数のキャビティが形成され、このキャビティの生成、消滅過程と水銀面上の突起の生成、消滅過程とが時間的にほぼ一致する事実からも妥当性があると思われる。

本実験には、尾関伸二郎君の協力を得た。付記して感謝の意を表す。

(1978. 2. 1 受付)

参 考 文 献

- 1) 藤本, 戸嶋: 電気加工学会誌, 6, p 48 (1972)
- 2) T. O. Hockenberry, E. M. Williams: IEEE Trans., IGA-3, p. 302 (1967)
- 3) A. S. Zingerman, D. A. Kapler: Sov. Phys. Tech. Phys., 4, p. 792 (1960)
- 4) J. M. Feldman, E. M. Williams: Trans. AIEE, 80, Part III, p. 523

(1961)

- 5) F. V. Dijck, J. R. Crookall, C. J. Henvelman, R. Snoyes : Proceedings ISEM 4, p. 68, Bratislava (1974)
- 6) F. V. Dijck, R. Snoyes : Mecanique, No. 301-302, p. 9 (1975)
- 7) L. Chincholle : Proceedings ISEM 5, p. 57, Wolfsberg (1977)
- 8) L. Chincholle : Mecanique, No. 301-302, p. 17 (1975)
- 9) B. N. Zolotych : Electrospark Machining of Metals (in Russian), 1, p. 38 (1957)
- 10) B. N. Zolotych : Fertigung, 2, p. 185 (1971)
- 11) 岡田 : 電学誌, 78, p. 1175 (1958)
- 12) R. H. Cole : "Underwater Explosions", Dover, p. 281 (1948)
- 13) 元木, 行村 : 同志社大理工研報告, 18, p. 84 (1977)