

論 文

高電圧パルス放電による雑草等の除去

名倉 章裕*, 天満 孝昌*, 坂口 恒生*

山野 伸明*, 水野 彰*

(1991年8月26日受理)

Destruction of Weeds by Pulsed High Voltage Discharges

Akihiro NAGURA,* Takamasa TENMA,* Yasuo SAKAGUCHI*

Nobuaki YAMANO* and Akira MIZUNO*

(Received August 26, 1991)

In order to replace the use of chemicals for weed control, destruction performance of weeds and its mechanism by pulsed high voltage spark discharges have been investigated. Small weeds, 4-6 cm height and 1-3 mm stem diameter, could be destroyed by one discharge with its electrical energy of 135 mJ. Stem and root of weeds are damaged. Large weeds in field (50 cm height and 8 mm stem diameter) could also be destroyed effectively using a pulsed voltage source designed for field use which generated a voltage with 15 kV crest value, 30 Hz frequency and the discharge energy of 2 J. Since the spark discharges take place from the electrode to a nearest, or highest weed, the discharge can selectively destroy weeds which grow faster. The use of pulsed voltage can restrict the electrical energy of the discharge below the incendiary level. Electrical resistance of damaged small weeds was 1-2 M Ω , and decreased to 100-200 k Ω after the discharge. Microscopic observations indicated that cells of stem and root were damaged by the spark discharge.

1. はじめに

最近、農場やゴルフ場での農薬による水や大気の汚染が問題になっており、また、農業生産物の農薬汚染も深刻な問題となっている。最近の環境問題に対する認識の高まりと共に、薬品使用の環境対策、安全性もコストとして考慮すべき時に行きていると思われ、高電圧放電の農業等への応用の可能性が高まってきた。化学薬品の代わりに、雑草やバクテリア、ウイルス、昆虫のコントロールに適用可能な方法のひとつに高電圧放電の利用がある。高電圧の利用に関しては古くから特許等が出されているが、農業へ利用するために本格的な研究が行われた例としては、1970年代のソビエト連邦におけるもの^{1,2)}、1980年前後に米国 Lasco 社によるもの³⁻⁵⁾等があげられる。なお筆者らの調べた範囲では日本における研究例

は見あたらなかった。ソビエト連邦ならびに米国における研究は主として大規模農場への適用に主眼がおかれて、波高値 30~80 kV、放電エネルギー 100 J/pulse 程度の大容量のパルス電源を用いるもの、あるいは 30~50 kV の大容量直流電源を使用している。

日本において農業への利用、ゴルフ場等の雑草除去に利用する際には、感電に対する安全性の確保、ならびに枯草への放電による着火防止の観点から、小容量のパルス放電の利用が適していると考えられる。パルス放電は電気集じん装置への利用やパルス放電プラズマによる排気ガス処理⁶⁾、オゾン生成⁷⁾、液体中のバクテリア、ウイルスの破壊^{8,9)}等への利用が研究されており、信頼性の高いパルス電源の開発¹⁰⁾も行われている。特に近年製品化された高電圧セラミックコンデンサがパルス電源の信頼性向上に大きく寄与している。

パルス放電の利用は、放電が電極に近い草に発生することを利用して成長の速い雑草を選択的に除去できる可能性を有している。また害虫や菌のコントロールを行える可能性も有している。筆者らは、小容量パルス電源を用いた試作装置の雑草除去特性、ならびにパルス放電による雑草損傷の様子を調べたので以下に報告する。

キーワード：パルス放電、雑草除去、電気的細胞破壊、火花放電

* 豊橋技術科学大学工学部電気電子工学専攻 (441 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1, Hibarigaoka, Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi, 441 Japan

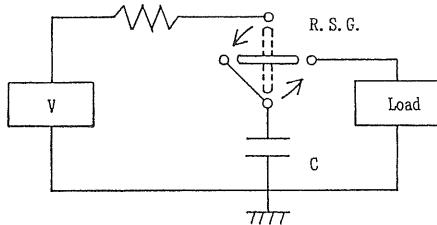


図 1 パルス高電圧電源

Fig. 1 Pulsed high-voltage generator.

V : DC high-voltage source ($V=0\sim20$ kV)
C : Ceramic capacitor ($C=2700\sim18000$ pF)
R.S.G. : Rotary spark gap

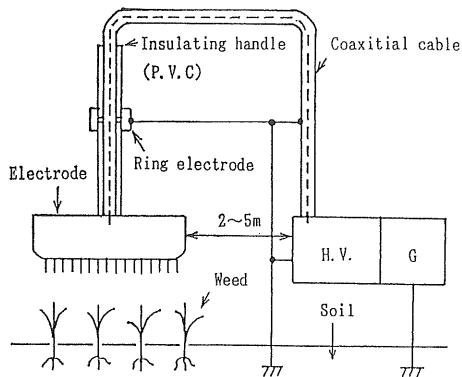


図 2 パルスポート型雑草除去装置

Fig. 2 Pulse portable system.

H.V. : Pulsed high-voltage source ($C=18000$ pF), G : Engine generator (300VA)

2. 実験装置

2.1 高電圧パルス電源

図1に本実験で使用した高電圧パルス電源を示す。直流高電圧電源(定格出力 15 kV, 170 VA のネオントランスを使用)により、 C [pF] の容量を持つセラミック・コンデンサを充電し、ロータリー・スパーク・ギャップ(R.S.G.)を用いて充電されたコンデンサを直流電源から切り離し放電電極に接続する。1パルス当たりの放電エネルギーは、 $W=(1/2)CV^2$ である。屋外における実験はエンジン駆動の交流出力 300 VA および 900 VA の発電機を用いて行った。他にバッテリー (15 Vdc) 駆動のインバータ電源も使用した。

2.2 雜草除去電極装置

2.2.1 屋外実験で使用した電極装置

屋外実験では、パルスポート型、DC ポータブル型、自走式乗用型の3種類の装置を使用し、実験した。

図2に、パルスポート型を示す。この装置は主に大型の雑草を除去することを目的として製作した。ナイフエッジ板電極 (250 mm × 50 mm, 厚さ 2 mm) に針

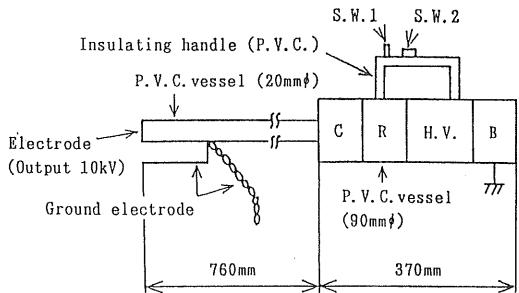


図 3 DC ポータブル型雑草除去装置

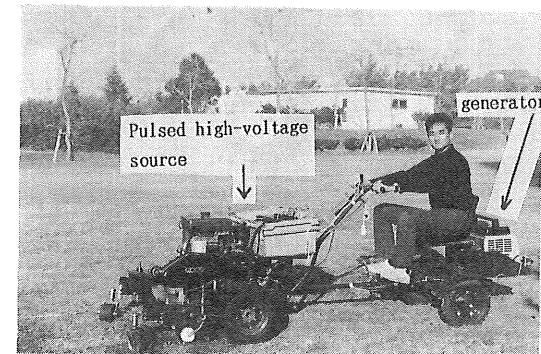
Fig. 3 DC portable system.

C : Ceramic capacitor (6000 pF)
R : Resistance (50 kΩ)
H.V. : High-voltage power supply (Output 10 kVdc)
B : Battery (15 Vdc)

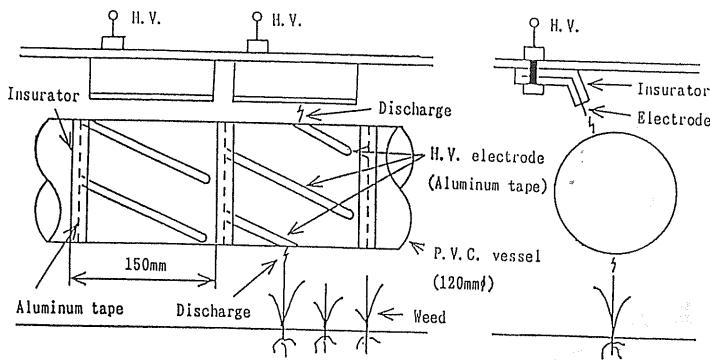
(ナイフエッジ板電極からの距離 3.0 mm, 間隔 4.5 mm)を取り付けたものを放電電極として使用し、放電電極は絶縁性の棒状ハンドルに取り付けた。安全性を考え放電電極を接地電極および絶縁性の板で覆い、そして、表面放電による電気ショックを避けるため、放電電極から200 mm 離れたハンドル上にリング状電極を取り付け接地した。高電圧パルス電源と放電電極は同軸ケーブルで接続し、全体の接地は電源周辺の地面にアルミニウム板(幅 15 mm)を約 20 mm 差し込むことにより行った。電源のコンデンサ容量 C は 18000 pF とした。

図3にDC ポータブル型を示す。この装置は主に小型の草や、芝の中に埋もれよう生えている平らな雑草を除去することを目的として製作した。この装置は、直流 15 V 入力、10 kVdc 出力のインバータ電源 (H.V.) を使用してポータブル化したものである。このポータブル型では、コンデンサ容量 $C=6000$ pF、保護抵抗 $R=50$ kΩ であり、各素子が 90 mm φ、長さ 370 mm の絶縁性の P.V.C. 管に収納されている。安全性を考え、P.V.C. 管全体をアース電極で覆い、放電時には 3か所でアースを取るようにした。この装置ではロータリー・スパーク・ギャップ (R.S.G.) を使用せずに、電極を雑草に近付けることにより放電を加える。

図4に自走式乗用型を示す。この装置は主にゴルフ場などの芝から 5~10 mm とび出て生えている多数の雑草を除去することを目的として製作した。図4(b)のように、円筒の PVC 管の外径に螺旋状にアルミテープ(幅 7.5 mm)を 4枚取り付け電極とした。高電圧の給電は、金属プレートによる固定ギャップにより行った。そして、この円筒の電極をある一定の速度で回転させて、雑草にいちばん近い部分で放電を順次発生させ、放電を走査することができる。放電電極の周りを囲むようにチェーンに



(a)



(b)

図 4 自走式乗用型雑草除去装置

Fig. 4 Car type system.

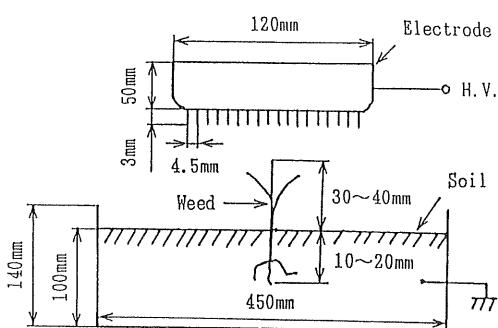
H.V. : Pulsed high-voltage source ($C=12000\text{ pF}$)

図 5 実験室用電極装置

Fig. 5 Electrode system (For laboratory test).

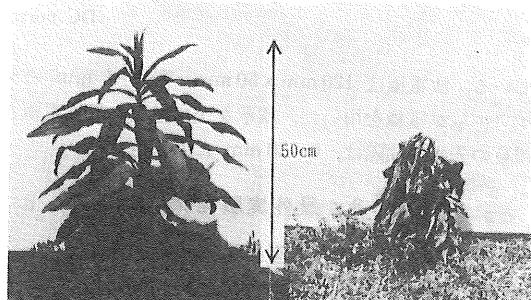
(a) Normal sample
(Sample : Rumex
japonicus)(b) Damaged sample
(1 day after the
discharge)

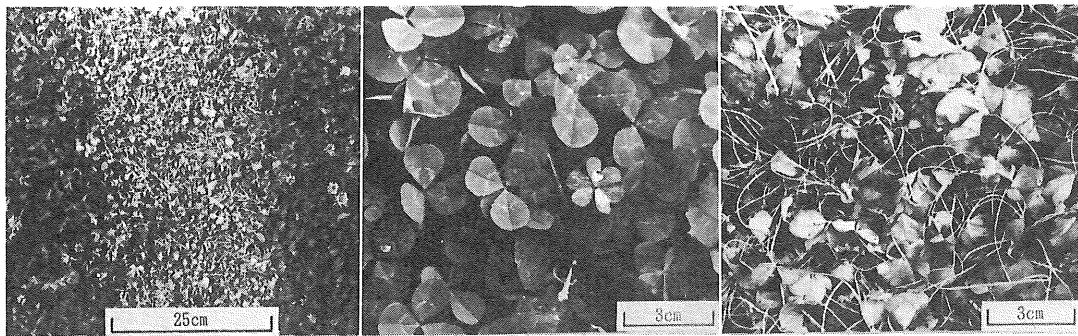
図 6 雜草除去のフィールドテスト—1

Fig. 6 Field tests of weed destruction.
(Pulse portable system, $W=2\text{ J}$, $f=30\text{ Hz}$)

2.2.2 室内実験で使用した電極装置

より接地を行った。本装置では安全性を考え、1パルスあたりの放電エネルギーが2J以下になるように1つの電極の幅を15cmとして、この幅の電極を4個横に接続し、それぞれに放電エネルギー $W=1.35\text{ J}$ 、充電電圧 $V=15\text{ kV}$ 、コンデンサ容量 $C=12000\text{ pF}$ の高電圧電源を接続した。

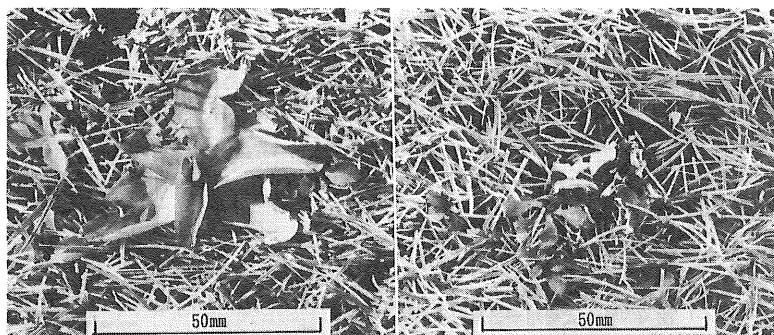
図5に実験室で使用した電極装置を示す。45cm×30cm、深さ14cmの絶縁性の箱に土が入れてある。10cm×30cm、厚さ1mmの接地電極板が箱の底に設置され



(a) Clovers with and without the pulse spark discharged.
(b) Clovers without the discharge.
(c) Clovers with the discharge.

図 7 雜草除去のフィールドテスト—2

Fig. 7 Field tests of weed destruction.
(Pulse portable system, $W=2\text{ J}$, $f=30\text{ Hz}$)



(a) Normal sample
(b) Damaged sample

図 8 雜草除去のフィールドテスト—3

Fig. 8 Field tests of weed destruction.
(DC portable system, $W=300\text{ mJ}$)

ている。放電極は $120\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 厚さ 1 mm のナイフエッジ電極を用いた。雑草を土に植え、放電電極と雑草の先端の間隔は、 $0\sim30\text{ mm}$ に変化させた。

3. 屋外実験結果

3.1 パルスポートブル型装置

図 2 で示した R.S.G. 使用ポータブル型を使用して屋外実験を行った。電源は $W=2\text{ J}$, $V=+15.0\text{ kV}$, $C=18000\text{ pF}$, 周波数 30 Hz の条件で使用した。

図 6(a)に放電をさせていないギシギシ(高さ約 50 cm , 茎の直径 $8\text{ mm}\phi$)を示す。茎の中心部分に 10 秒間 のパルス火花放電を行った結果、サンプルはすぐに萎れ、放電後 12 時間 以内で茎が曲がり、放電させた茎の表面が緑色から茶色へと変化した。図 6(b)は放電後 1 日 経過したサンプルである。この雑草は放電後、約 1 週間 で枯れてしまい、その後 1 か月間 観察したが再生することはなかった。

図 7 に放電を加えたものと、加えていないもののクローバーの様子を示す。電極を軽くクローバーに接触させクローバー群の上を移動させた。電極を動かすと同時に多数の火花放電が発生した。そして、写真にあるように放電させた部分は効果的に枯れた。

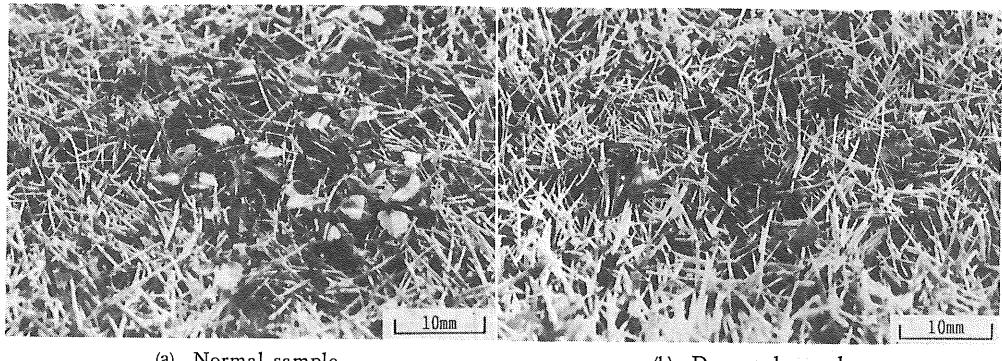
3.2 DC ポータブル型装置

図 3 で示した DC ポータブル型を使用して、屋外実験を行った。放電は $W=300\text{ mJ}$ の条件で行った。

芝と同じくらいの背の高さで芝のなかに埋もれるようになっている草に対してパルス電圧を約 10 秒間 加したところ、図 8 のように放電後、約 1 週間 で枯らすことができた。雑草は立ち枯れの状態になっており、その後、その雑草は再生することはなかった。

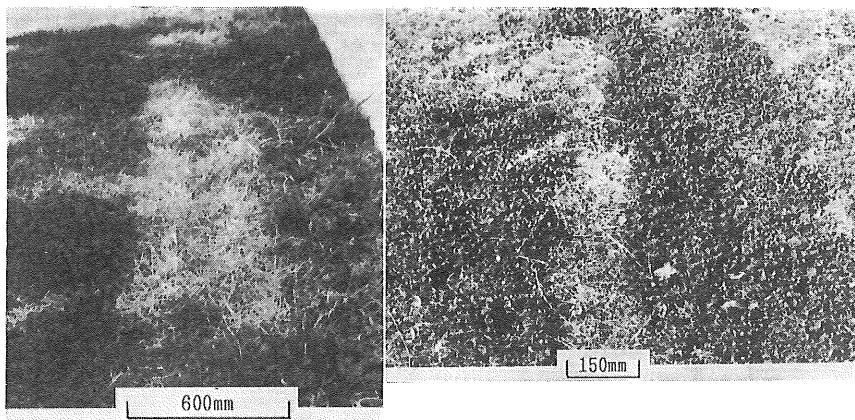
3.3 自走式乗用型装置

ゴルフ場などで芝生を芝刈機で刈ると成長の早い雑草はすぐに伸びて芝生から $5\sim10\text{ mm}$ 高くなる。そこで図 4 に示した自走式乗用型を使用して芝から $5\sim10\text{ mm}$ 成



(a) Normal sample (b) Damaged sample

図 9 雜草除去のフィールドテスト—4

Fig. 9 Field tests of weed destruction.
(Car type system, $W=1.35\text{ J}$)

(a) 電極幅 600mm (b) 電極幅 150mm

図 10 雜草除去のフィールドテスト—5

Fig. 10 Field tests of weed destruction.
(Car type system, $W=1.35\text{ J}$)
(Sample : Clovers)

長した雑草を除去した。図 9 に結果を示す。放電後 1~2 日で萎え約 1 週間後には枯れた。1 パルスあたりの放電エネルギーが $W=2\text{ J}$ 以下の放電では芝は枯れることができなかった。また $W=2\text{ J}$ で温度 10°C 、湿度 30% の晴れた冬の日、乾燥した植物に放電させたとき着火は生じなかつた。

次に、雑草が密集して生えている場所に対してこの装置を適用したところ、図 10 のように電極が移動した部分のみ雑草を除去することができた。雑草は約 1 週間で枯れてしまい、その後 1 か月ほどその部分の観察を行つたが、放電を加えた雑草は再生しなかつた。

放電は、電極の幅 15 cm に対し、コンデンサ容量 $C=12000\text{ pF}$ 、充電電圧 $V=15\text{ kV}$ 、放電エネルギー $W=1.35\text{ J}$ の条件で行った。

4. パルス高電圧放電による雑草除去の基本的特性

4.1 放電の特性

図 5 の室内用電極装置を用いて、パルス放電開始時の電極から雑草までの距離とコンデンサ充電電圧 V の関係を調べた。サンプルとしてミミナ草（高さ $50 \pm 5\text{ mm}$ ）を使用した。図 11 は放電時の写真である。放電電極の極性は正で、 $V=15\text{ kV}$ 、 $C=3600\text{ pF}$ である。電極から葉までの放電経路が形成され、それは葉の表面から茎へと続く。根付近において発光が観察されたが、このことは根と土の間で放電が生じていることを表している。

次に放電開始時の電極と雑草間距離を計測した。容量 C は 3600 pF で、パルス電圧の周波数は 30 Hz である。始めに電圧 V を固定し、そして電極を移動させ火花放電

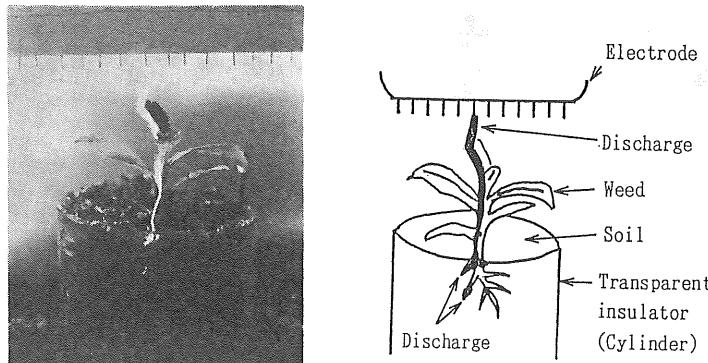


図 11 雑草へのパルス放電の様子

Fig. 11 Pulsed spark discharge to the weed.
(Sample : *Cerastium holosteoides*)
($C=3600 \text{ pF}$, $V=15 \text{ kV}$, $W=405 \text{ mJ}$)

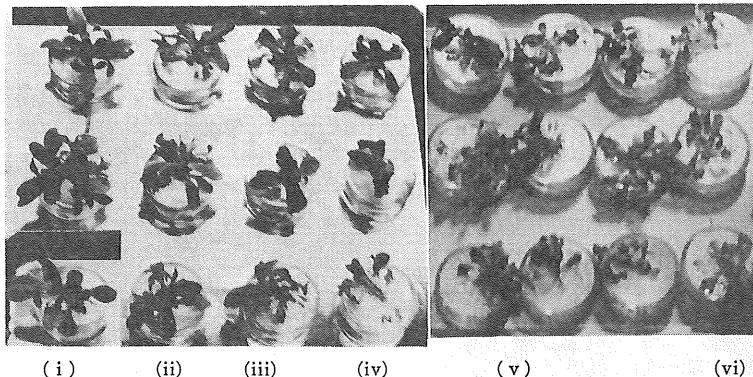


図 12 培養時のサンプル (放電後 3 日)
Fig. 12 The sample planted in the petridish, for 3 days after the spark discharge.
(Sample : *Cerastium holosteoides*)

が生じるまでその間隔を小さくしていった。3~5回放電した後サンプルは萎れ、その後新しいサンプルと取り換えた。正極性と負極性について各々30回計測した。

$\pm 15 \text{ kV}$ および $\pm 20 \text{ kV}$ の電圧では、放電発生時の電極間距離の平均値は $\pm 0.5 \text{ mm}$ の範囲に分布していた。この結果は雑草が他の植物や芝よりも 1.0 mm 高ければ、パルス火花放電を選択的に雑草のみに加えることができるることを示している。

4.2 ミミナ草損傷に必要な放電最小エネルギー

ミミナ草(重量 $0.5 \pm 0.1 \text{ g}$ 、高さ $50 \pm 10 \text{ mm}$ 、茎の直径約 2 mm)をサンプルとして使用した。室内用電極装置を用い、放電エネルギー W はコンデンサ容量 C および電圧 V により調整した。雑草に対し1発のパルス火花放電を加え、その後サンプルを水が入ったシャーレに入れ、室温 $25 \sim 30^\circ\text{C}$ で光の量が一定の部屋にサンプルを置いて培養し数日間それを観察した。図 12 に培養時のサンプルを示す。これらの写真は放電後3日経過したものである。

サンプル(i)は放電していないものである。(v) ($W=304 \text{ mJ}$) と (vi) ($W=405 \text{ mJ}$) は完全に枯らしたものであり、(iv) ($W=135 \text{ mJ}$) は一見したところでは枯れているように見える。(iii) ($W=76 \text{ mJ}$) はわずかに枯れており、(ii) ($W=34 \text{ mJ}$) は明白なダメージが観察されなかった。この結果は、ある特定の雑草が枯れるしきい値エネルギーが $76 \text{ mJ} \sim 135 \text{ mJ}$ の間にあることを示している。

4.3 雑草の電気抵抗の減少

図 13 は雑草(ミミナ草)の茎部分での、電気抵抗 R の変化を示している。 $V=+15.0 \text{ kV}$, $C=18000 \text{ pF}$ で放電させた後、直流電圧 1.5 V をサンプルに印加して R を測定した。茎の両端にマチ針をさして測定用電極とした。その結果放電前 $1 \sim 2 \text{ M}\Omega$ だった抵抗 R が、放電後 $100 \sim 200 \text{ k}\Omega$ に低下した。その雑草は1回の放電の後すぐ萎れ、さらに放電を行うと草の抵抗 R は徐々に減少した。パルス火花放電の印加により、植物体内の細胞壁が

破裂し、イオンの選択透過性がなくなり導電性の経路が形成されたためではないかと考えられる。

5. 顕微鏡による損傷の観察

5.1 雜草（ケアリタ草、ミミナ草）の細胞

図 14 に放電を加えたものと、加えていないもののケアリタ草（茎の直径 $6\text{ mm}\phi$ ）の茎の切断面を示す。放電は周波数 30 Hz で、 $W=2\text{ J}$, $V=+15.0\text{ kV}$, $C=18000\text{ pF}$ の条件で 1 秒間行った。この写真は放電後 1 日経過したものである。茎の直径は約 $6\text{ mm}\phi$ で、放電後茎の中心は空洞となった。

図 15 は屋内用電極装置を用いて放電させたミミナ草の顕微鏡写真である。1 回のパルス放電は $W=405\text{ mJ}$, $V=+15.0\text{ kV}$, $C=3600\text{ pF}$ で行った。図 15 の写真を

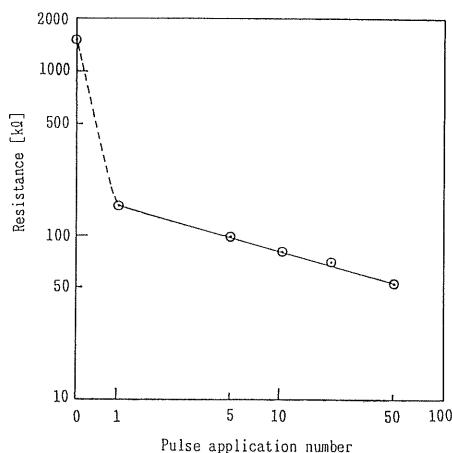


図 13 雜草の電気抵抗の減少

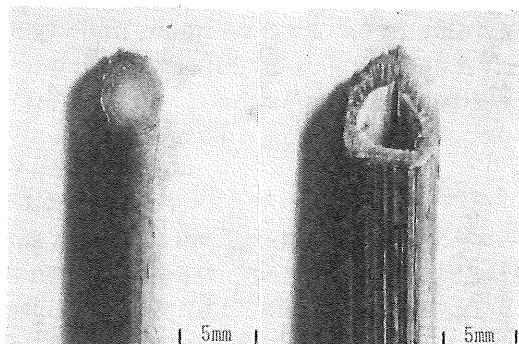
Fig. 13 Effect of the pulse application number on the electrical resistance of a weed.
(Sample : Cerastium holosteoides)
($C=18000\text{ pF}$, $V=15\text{ kV}$, $W=2\text{ J}$)

撮る前に、維管束を着色させるため、放電させたサンプルとさせていないサンプルの根を、12 時間黒インクに浸しておき、それからサンプルを切断し顕微鏡観察の準備をした。図 15(a), (b) はそれぞれ正常な雑草と、損傷を受けた雑草の茎の切断面である。正常なサンプルは着色部分が限られており細胞壁が区別できるが、それと対象的に損傷を受けたサンプルは一様に着色されており細胞壁も不明瞭である。これらの観察結果は、パルス火花放電により、根と茎の細胞が破壊されたことを示している。

6. ま と め

小容量の高電圧パルス電源を用いた雑草除去装置の試作および試験を行い以下の結果を得た。

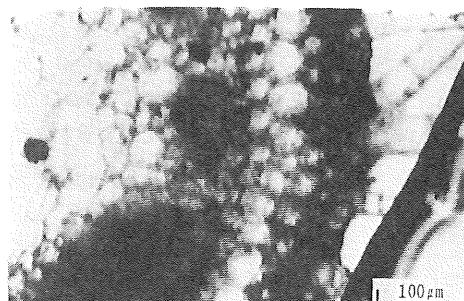
(1) R.S.G. 使用ポータブル型装置を使用して、放電エネルギー $W=2\text{ J}$ の条件で、高さが約 50 cm の大型の草を除去することができた。



(a) Normal sample (Stem) (b) Damaged sample (Stem)

図 14 放電前のケアリタ草の茎の切断面図

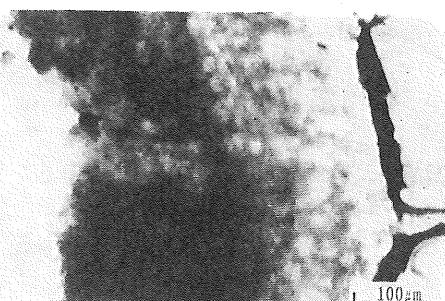
Fig. 14 Cross section of stems with and without the pulsed spark discharged.
(Sample : Cerastium holosteoides)
($C=18000\text{ pF}$, $V=15\text{ kV}$, $W=2\text{ J}$)



(a) Normal sample (Stem)

図 15 ミミナ草の顕微鏡写真

Fig. 15 Microscopic pictures of cross sections of the stem and the root stained with black ink.
(Sample : Cerastium holosteoides)
($C=3600\text{ pF}$, $V=15\text{ kV}$, $W=405\text{ mJ}$)



(b) Damaged sample (Stem)

(2) DC ポータブル型装置を使用して、放電エネルギー $W=300 \text{ mJ}$ の条件で、芝生に埋もれるように生えている幅が約 50 mm の小型の雑草を除去することができた。

(3) 自走式乗用型装置を使用して、放電エネルギー $W=1.35 \text{ J}$ の条件で、電極と芝生の間隔を調整することにより、芝生から 5~10 mm 飛び出して生えている雑草を除去することができた。

(4) パルス電圧 $V=15 \text{ kV}$ において、芝より 1 mm 以上高い雑草に選択的に放電させることができた。

(5) 高さ 50 mm、茎直径 2 mm 程度のミミナ草は放電エネルギー 135 mJ 以上で枯れる。草の種類により必要な最小放電エネルギーは異なっていると思われる。

(6) 顕微鏡による観察で、パルス火花放電により茎と根の細胞、特に維管束系の細胞がダメージを受けていることを確認した。

参考文献

- 1) V. Slesarev : Zemledelie, 9 (1972) 56
- 2) M.F. Diprose and F.A. Benson : J. Agric. Eng. Res., 30 (1984) 197
- 3) R.H. Pluenneke and W.G. Dykes : U.S. Patent No. 4,007,794 (1976)
- 4) R.H. Pluenneke and W.G. Dykes : U.S. Patent No. 3,919,806 (1975)
- 5) R.H. Pluenneke and W.G. Dykes : U.S. Patent No. 3,935,670 (1976)
- 6) 水野 彰 : 電学誌, 107 (1987) 1158
- 7) 増田閃一 : 電学誌, 108 (1988) 1173
- 8) 天満孝昌, 速水光浩, 水野 彰 : 静電気学会誌, 13 (1989) 322
- 9) 水野 彰, 井上 亘, 山口成夫, 松本陽一 : 静電気学会講演論文集 '89, p. 181, 静電気学会 (1989)
- 10) A. Mizuno and Y. Kamase : IEEE Trans. IAS, 25 (1989) 54