

Research Reports of the Research Institute  
of Industrial Safety, RIIS-RR-92, 1993  
UDC 614.83:537-96:537.521:546.11

高周波電気回路の開閉火花による水素・空気  
混合気体の点火危険性

本山建雄\*

Ignition Hazards of Hydrogen-Air Mixture Caused by Spark Discharge  
with Switching in Radio Frequency Resistive Circuit

by Tatsuo MOTOYAMA\*

*Abstract*; With a progress of electrical technologies, radio frequency circuits including high frequency components are applied to electrical installations. Some of them are used in hazardous locations where explosive or inflammable gases exist: as a result, ignitions of the gases may be induced by a spark discharge when the radio frequency circuits are switched on or off. However, experiments on their ignition hazards are scarcely carried out and problems of the ignition are often discussed to design the high frequency electrical installations used in hazardous area.

The purpose of this study is to clarify experimentally the ignition hazards of inflammable gases caused by spark discharges occurring from the radio frequency circuits. Based on the experimental method of IEC 79-3 already recommended, experiments are performed to investigate the ignition hazards of a hydrogen-air mixture due to the spark discharge. A high frequency circuit used in this experiment is a  $50\Omega$  resistive one consisting of a co-axial cable, resistor of  $50\Omega$  and power source of 1 to 1000 kHz in frequency. The circuit voltages supplied for inducing the ignition of a hydrogen-air mixture were examined to determine a correlation the minimum ignition voltage versus the frequency.

Results obtained from experiments indicate that the ignitions of the hydrogen-air mixture caused by spark discharges depend primarily on the frequency of the power source in the resistive circuit. It has been clarified from experiments that the minimum ignition voltage increases gradually with the increase of the frequency, since the duration of the individual spark discharge decreases contrary to the increase of the frequency and that its value at 1000 kHz is 80V in peak voltage. Furthermore, the experimental results suggest that the ignition is induced by a few sparks repeated under the condition of the frequency over 50 kHz.

As described above, higher voltage and several sparks are required to induce the ignition of the hydrogen-air mixture in the high frequency resistive circuit over 50 kHz. In this paper, experimental data and fundamental factors are presented to evaluate the ignition hazards in the high frequency resistive circuit.

*Keywords*; Radio frequency, Breakflasch, Minimum ignition voltage, Ignition hazards, Hydrogen

### 1. まえがき

近年、電子技術の発展とともに高周波電気回路を有する電気機器が増え、これらが可燃性混合気体の存在する場所でも使用されつつある。このような場所で使用する高周波電気回路は点火危険性のないことが原則であるが、現在、その設計のための基礎的な資料が不足している。

高周波による点火危険性については、Bittner, Burstow 等が抵抗回路において、さらに Burstow 等はアンテナとして作用する構造物からの点火危険性を評価する目的で点火限界を報告<sup>1)</sup>している。また、我国では田中が“導線引っ張り断線形”による開離時の点火限界を報告<sup>2)</sup>している。しかし、前者の論文では、点火限界を求めるに至った条件が明確でなく、また、後者は開離を中心に検討していることから高周波電気回路の開閉火花による危険性を評価する上で十分ではない。

ここでは、本研究で得られた点火限界から高周波電気回路の開閉火花による危険性を明らかにし、防爆電気機器の設計資料の提供を目的としている。

実験は工場電気防爆指針<sup>3)</sup>に基づいて、50Ω抵抗回路で水素・空気混合気体の最小点火電圧を求めた。周波数範囲は1～1000 kHz、火花点火試験装置はIEC形である。

その結果、周波数が高くなると水素・空気混合気体の最小点火電圧は高くなり、特に、10～50 kHzの間で大きく変化することが明らかとなった。以下、実験結果を報告する。

### 2. 点火限界を求める回路

開閉火花による点火限界を求める基本的な電気回路として抵抗回路、容量回路及び誘導回路がある。

誘導回路は周波数の増加とともにインピーダンスが大きくなるため、周波数と点火限界の関係を求めるためには広帯域、大容量の電源が必要となり、基礎データを得る方法として現実的ではない。容量回路は、高周波数の領域においてコンデンサを流れる電流が多く、開離時に発生する電圧は一般に、抵抗回路よりも小さくなる。

この他に、アンテナの役目をするような構造物からの放電を模擬する回路としてLCRの直列回路が考えられているが、共振時に最も放電エネルギーが大きいという理由で、抵抗回路が多く使用されている。

Burstow 等も 50Ωの抵抗回路を使って基礎的な限界を求めている<sup>1)</sup>。

一方、高周波電源には 50Ωの出力インピーダンスを有する回路が多く、また、50Ωの特性インピーダンスをもつ同軸ケーブルは配線として多く利用されている。

以上のことから、点火限界を求める実験は 50Ωの抵抗回路で行なった。

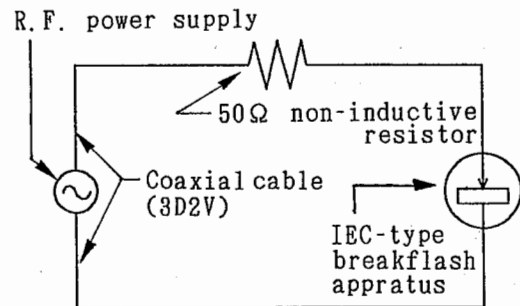


Fig. 1 50Ω resistive R.F. circuit for ignition experiment  
点火試験回路 (50Ω抵抗回路)

## 3. 実験

### 3.1 実験回路

試験回路は Fig. 1 に示すように、高周波電源、50Ωの抵抗及び火花点火試験装置からなり、同軸ケーブル(3D2V)で配線されている。

高周波電源は発信器と高周波増幅器から構成され、発信器の出力(正弦波)を実験に必要とされる電圧まで増幅し、火花試験装置に電力を供給する。

増幅器の仕様は表 1 に示すもので、出力インピーダンスは小さく、抵抗回路の試験用電源として適当

Table 1 Main specification of high frequency amplifier  
高周波増幅器の主な主要

Output voltage (peak)	± 70 V (DC ~ 500 kHz) ± 55 V (DC ~ 1000 kHz)
Output current (rms)	3 A
Output impedance	0.125Ω and less than 0.4 μH

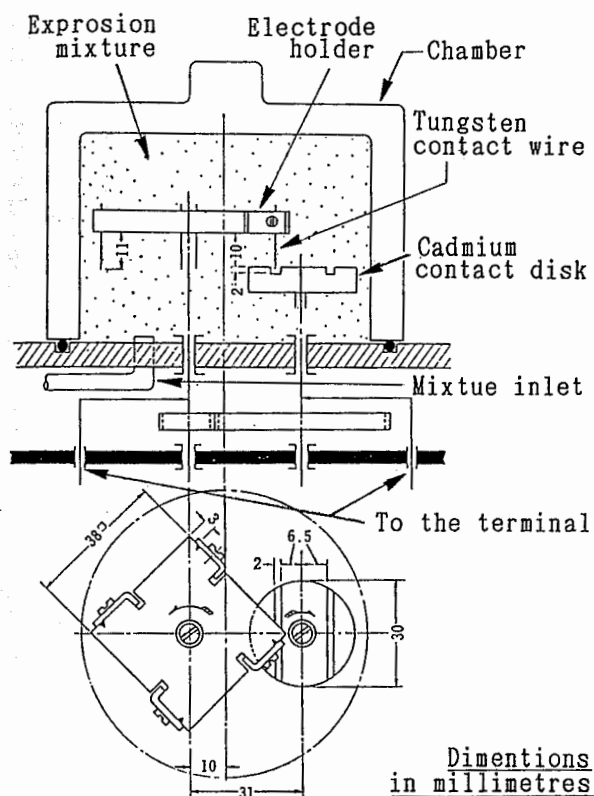


Fig. 2 Scheme of the IEC-type breakflash apparatus  
IEC 型火花点火試験装置の構造

と考えられる。1000 kHz での点火電圧 (80V) は本装置の仕様を越えているが、開放時の電源の出力電圧波形及び短絡時の電流波形には歪が小さいことから 1000 kHz の測定値はそのままデータとして採用した。

なお、高周波増幅器の保護のため、その出力端にサージプロテクター (動作電圧約 280V) を取り付けてある。これによって、約 280V を越える開閉時のサージはここで吸収されることになるが、開閉サージは電源電圧の数倍と考えられることから、これによる影響は小さいと考えられる。

50Ω の抵抗はリアクタンス分の影響をできる限り少なくするために、ここでは、ストリップラインタイプの抵抗を 4 個組み合わせ使用した。なお、個々の抵抗の仕様は周波数帯域が DC ~ 1000 MHz, インピーダンスは 50Ω ± 2%, 定格電力は 50W である。

IEC 形の点火試験装置 (IEC-type breakflash apparatus) は IEC で推奨されている開閉火花の点火試験装置であり、その構造を Fig. 2 に示す。

電極は、2 本の平行な溝のついたカドミウム円盤電

極 (直径 30 mm) と、直径 0.2 mm, 長さ 11 mm の 4 本のタングステン線から構成され、内容積が約 250 cm<sup>3</sup> のプラスチック容器のなかに取付けられている。タングステン線電極はそれを保持する金属板 (以下、電極保持板と記す) とともに 80 rpm の速さで回転し、カドミウム円盤はそれと相反する向きに約 20 rpm の速さで回転する。両電極間に試験回路を接続し、電極を回転させ、開閉火花を発生させる。電極が開離して 0.2 mm 離れるのに要する時間は約 11.3 μs であり、閉成する速さは約 0.23 m/s である。

なお、本装置はあらかじめ校正することが必要とされており、水素・空気混合気体 (21 ± 2 vol%) において、直流 24V, 0.3A でタングステン線電極保持板の回転が 400 回以内に水素・空気混合気体に点火することを確認して使用した。

### 3.2 実験方法

点火実験は工場電気防爆指針<sup>3)</sup>とほぼ同様の方法で行った。まず、周波数、試験電圧を設定し、Fig. 2 に示すようにタングステン線を取り付ける。その後、水素・空気混合気体をプラスチックの容器に送入し、試験電極を回転させ、所定の回転数の間に混合気体に点火するか否かを観測し、点火した最小の電圧を求めた。

試験電圧は原則として、点火した場合には 2.5V 下げ、点火しない場合は 2.5V 上げることにし (一部に 5V の場合もある)、点火から不点火、または不点火から点火に変わるまで繰り返した。

タングステン線電極は試験中に線の割れを生じないように、電流により所定の長さに溶断して作ることが、IEC において推奨されているが、ここでは点火試験の前後においてタングステン線の先端を十分確認することにして、ニッパーで所定の長さに切断し、電極とした。なお、タングステン線電極に異常が確認された場合の測定値は除外した。

試験混合気体は水素、空気の混合気体であり、水でシールされた混合容器の中で 21 ± 2vol% になるように混合したものである。この場合、水分の点火電圧に与える影響が懸念されるが、混合気体を作った当日中に使用するのであれば水から隔離して混合した場合とほぼ同じ点火電圧が得られている。

一試験の電極の開閉回数の最大は、電極保持板が 3000 回回転するのに対応する数とした。これは直流の場合の約 15 倍に、低周波交流の場合の約 3 倍に当た

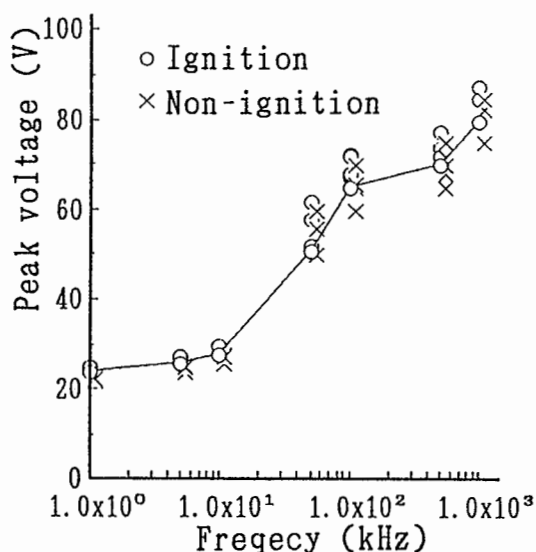


Fig. 3 Minimum ignition voltage in 50Ω resistive R.F. circuit to induce ignition of 21 ± 2 vol% hydrogen/air  
水素・空気混合気体 (21 ± 2 vol%) の最小点火電圧

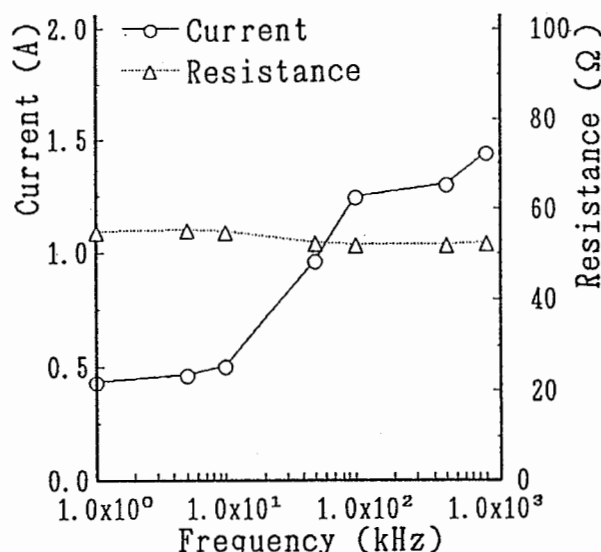


Fig. 4 Short-circuit current and circuit resistance of R.F. circuit at minimum ignition voltage  
最小点火電圧における短絡時の電流と回路抵抗

り、電圧が周期的に変化することによる放電の機会  
の減少を十分補うことが出来る。なお、この場合、電  
極の開閉の回数は少なくとも 12000 回を越えること  
になる。

タングステン線電極の使用回数は、電極の保持板  
の回転数が 4000 回を限度とし、これを越えるもの、  
また、先端が割れたものは交換した。また、カドミ  
ウム電極の表面はタングステン線によって傷が生じ  
る。これは複雑な放電を発生するというこの点火試  
験装置の考え方に対して問題がないと考えられるが、  
サンドペーパーで磨き、凹凸を少なくするようにした。

### 3.3 実験結果

Fig. 3 に各実験毎の点火した最小のピーク電圧を  
○印で、点火しなかった最大のピーク電圧を×印で  
示す。これら最小、最大の電圧は試験毎に変化する  
ことから各周波数 1, 5, 10, 50, 100, 500, 1000 kHz  
に対してそれぞれ 2, 3, 3, 4, 7, 6, 7 回 (順不同) 測  
定を行い、得られた全てのデータを Fig. 3 に記入し  
た。また、図中の折れ線は点火した電圧のうち最も  
小さい電圧を結んだものであり、以後、これを最小  
点火電圧とする。

各試験毎の点火電圧の差は使用した試験装置の特  
性に起因すると考えられる。なお、直流での点火電  
圧は 22V であった。

Fig. 4 に、最小点火電圧においてタングステン線  
電極とカドミウム円盤電極間 (以下、電極間と記す)  
を短絡したときの電流及びその時の電源電圧と電流  
の比を示す。この比はインピーダンスに相当するが  
リアクタンス分が十分に小さいことから抵抗と見な  
した。なお、電流、抵抗は測定毎に微妙に変化する  
ことから代表的な値で示してある。この変化は主に、  
使用した点火試験装置の軸と軸受け間の接触抵抗の  
変化に起因すると考えられる。また、電圧と電流の  
比は、同様の原因により設定した抵抗値 50Ω よりも  
大きい値を示している。

## 4. 検 討

### 4.1 開閉時に発生する放電

Fig. 5 は電極間で観測された放電電圧波形の一例  
である。放電電圧波形は、点火試験装置から発生する  
ノイズを避けるため、点火試験の開閉速度とほぼ同  
じ速度で、手動により電極の開離、閉成を行い、測定  
した。電極間に印加した電圧は Fig. 3 の最小点火電  
圧であり、異なる周波数においてもほぼ同様の波形  
が観測されている。観測された電圧波形から、開閉火  
花の特徴をまとめると次のようになる。なお、開離  
の場合の電極の移動速度は、主にタングステン線電  
極のばねの作用によって決まり、また、閉成の場合

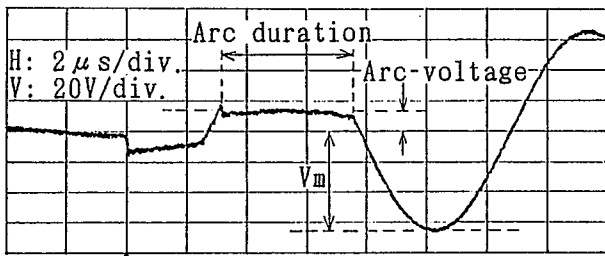


Fig. 5 Typical example of discharge voltage waveform  
放電電圧波形の一例

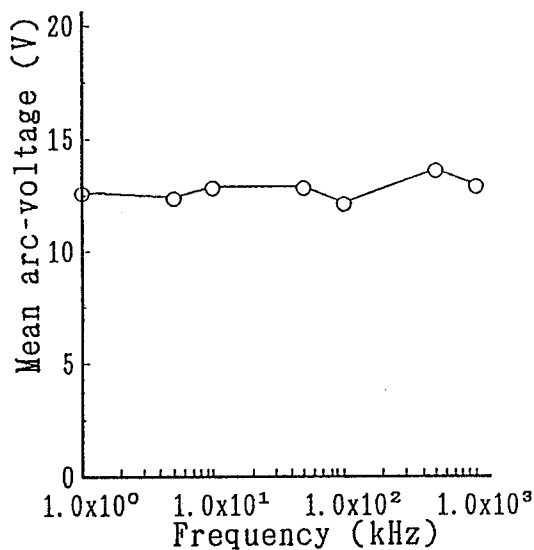


Fig. 6 Mean arc voltage in 50Ω resistive R.F. circuit at a minimum ignition voltage  
最小点火電圧におけるアーク電圧の平均

タングステン線電極の移動速度が遅いため、放電の開始、終了は主に、電極間の電圧の変化によって放電の状態が決まることから、いずれの場合も電極を手動で開閉したことの影響は小さいと考えられる。

- 1 ~ 1000 kHz の開閉火花はアークを伴う放電である。
- 開離、閉成のいずれにおいてもアーク電圧はほぼ同じ値を示す。
- 周波数が低い場合、アークの持続時間は開離時よりも閉成時のほうが長い。周波数が高くなると両者の差はほとんどなくなる。
- 周波数が低い場合、一度の開離または閉成において連続する放電の回数は開離時よりも閉成時に多いが、周波数が高くなると両者の差はほとんどなくなる。

開閉火花がアークを伴うこと、アーク電圧が電極材料に依存することは知られており<sup>4),5)</sup>、上記 a., b. の特徴はそのことを示している。

c., d. は次のように考えることができる。まず、周波数が低い場合、半周期の時間内の電極の移動距離は閉成時に小さく、放電の発生、消滅が主に電圧の変化の影響を受けるのに対し、開離時には電極の移動距離が大きく放電が主に電極間距離の変化の影響を受けるため、開離と閉成の差が現れる。一方、周波数が高くなると、半周期の時間内の電極の移動距離が開離時、閉成時のいずれにおいても小さく、放電の発生、消滅が主に電圧の変化の影響を受けるため、両者の差がほとんど現れない。

## 4.2 放電エネルギー

### 4.2.1 放電エネルギーの算出式

開閉火花はアークを伴う放電であることから、放電のエネルギー  $Ea$  は放電電流  $Ia$  とアーク電圧  $Va$  の積の時間積分から求まる。ここで、放電を半波長の間にかかる一回の放電に限定し、 $t_1$  をアークの開始時間、 $t_2$  をアークの終了時間とすると、放電のエネルギーは (1) 式で表される。

$$Ea = \int_{t_2}^{t_1} Va \cdot Ia \, dt \quad (1)$$

(1) 式の  $Va$  として、Fig. 5 に示すような放電電圧波形から測定した値を用いることにする。

Fig. 6 は測定された  $Va$  の平均を示したもので、測定回数は開離、閉成それぞれ 5 回とした。なお、1 回の開離、又は閉成において放電が数回連続する場合、それらの値も個々のデータとして扱っている。

Fig. 6 によると、アーク電圧の平均は周波数によらず 12 ~ 13V 付近の値を示しており、それらの平均は 12.8V であった。

$Ia$  はアーク電圧のように安定しておらず、滑らかに近似することは難しい。ここでは、アーク電圧をもとに (2) 式により算出することにした。ただし、 $Vm \cdot \sin 2\pi ft$  は電源の電圧、 $R$  は電極を短絡したときの回路の抵抗とする。

$$Ia = (Vm \cdot \sin 2\pi ft - Va) / R \quad (2)$$

放電の持続時間  $Td$  を電極間の電圧がアーク電圧以上となる半波長以内の時間と仮定すると (3) 式の

ようになる。なお、Fig. 5の放電電圧波形が示すように実験では放電の開始時点でのアーク電圧は終了でのアーク電圧と異なることから(3)式は持続時間の最大ではなく、それに近い値となる。

$$T_d = t_2 - t_1$$

$$= (1/2\pi f)(\pi - 2\sin^{-1}(V_a/V_m))$$

ここで、 $t_1 = (1/2\pi f)\sin^{-1}(V_a/V_m)$  (3)

$$t_2 = (1/2f) - t_1$$

(3)式にアーク電圧の平均(12.8V)を代入するとFig. 7に示すような持続時間(計算値)が得られる。また、Fig. 7には、アーク電圧と同様の波形から測定された持続時間の最大(測定値)を併記してある。持続時間は開閉のタイミングによって大きく異なるため測定値は目安にすぎないが、計算値に近い値を示している。

(1), (2), (3)式から、半波長の間に起こる一回の放電で発生する放電エネルギー  $E_a$  と周波数の関係を求めると、(4)式で表される。

$$E_a = \int_{t_2}^{t_1} V_a \cdot I_a dt$$

$$= (V_a/R)((V_m/2\pi f)(\cos 2\pi ft_1 - \cos 2\pi ft_2) - V_a \cdot T_d)$$

(4)

#### 4.2.2 放電エネルギーの推定と水素・空気混合気体への点火

4.2.1の検討から、 $V_a$ をアーク電圧の平均12.8V、 $R$ を回路の抵抗の平均53.44Ωそして $V_m$ をFig. 3の最小点火電圧として、(4)式から1回の放電で発生するエネルギーを求めるとFig. 8のようになる。

水素・空気混合気体では、点火に要する時間(ignition induction time)は20 μs程度<sup>1)</sup>であることが知られている。一放電当りの持続時間がこの時間より長い場合にはその放電で発生したエネルギーが、短い場合にはこの時間内に生じたいくつかの放電によるエネルギーの和が点火を評価するための基本となる。

1, 5, 10 kHzでの半波長は20 μs以上であることから、混合気体への点火は1回の放電エネルギーで発生したことになる。したがって、Fig. 8の1, 5, 10 kHzの値は本実験装置における、点火に必要な最小の放電エネルギーの目安を示していることになり、

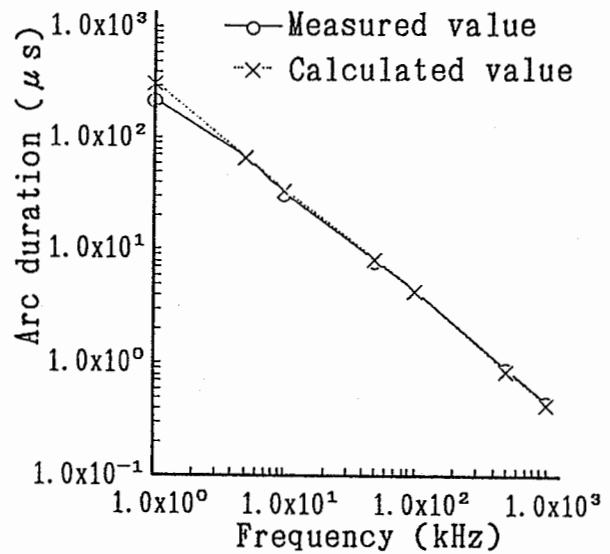


Fig. 7 Arc duration vs frequency in 50Ω resistive R.F. circuit at a minimum ignition voltage  
最小点火電圧におけるアーク持続時間

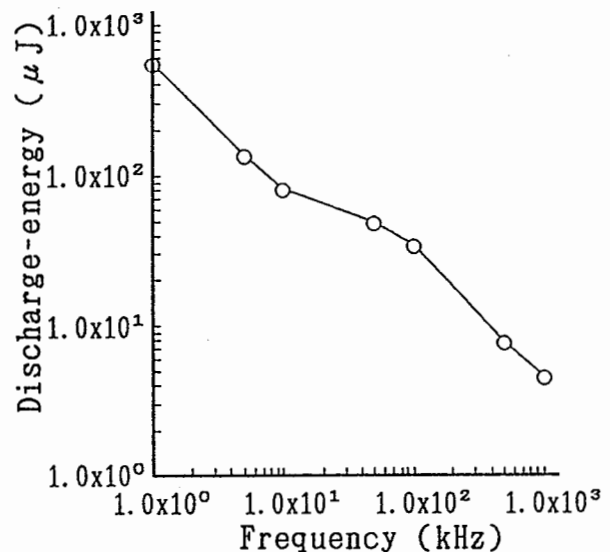


Fig. 8 Estimated discharge-energy vs frequency in 50Ω resistive R.F. circuit at a minimum ignition voltage  
最小点火電圧における放電エネルギーの推定値

この範囲では周波数が高くなるほど点火に要する放電エネルギーは小さくなると推定される。

50 kHz以上では半波長が20 μs以下となることから点火には2回以上の放電が関係していると予想される。また、50 kHzでの最小点火電圧が10 kHzの約2倍になる(Fig. 3参照)のは放電と放電の間の

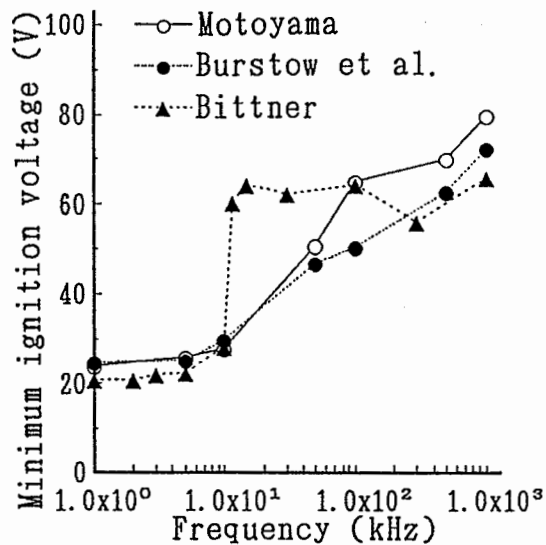


Fig. 9 Comparison of a minimum ignition voltage with previous works  
最小点火電圧の比較

休止期間におけるエネルギーの損失が原因と推定される。

一方、500, 1000 kHz では1放電当たりのエネルギーが水素・空気混合気体の最小点火エネルギー(約20  $\mu$ J)以下となっており、明らかに2回以上の放電エネルギーが加算されたと推測される。

なお、(4)式はアークを伴わない放電を考慮していないが、アーク放電によるエネルギーと比較して十分に小さいと考えられる。

#### 4.3 実験結果の比較

高周波電気回路の開閉火花による最小点火電圧はBittner及びBurstow等によっても調べられている<sup>1)</sup>。これらはカドミウム円盤を利用したもので、実験条件は本論文とほぼ同じであると推定される。したがって、参考までにこれらの実験結果と今回得られた結果について比較検討する。

Fig. 9は周波数に対する最小点火電圧の実験結果を記したもので、これらによると周波数の増加とともに最小点火電圧が上昇するという傾向を示している。

また、10 kHzを越えた周波数での大きな変化はいずれにも共通しており、この付近の周波数において点火に係わる放電の数が1回から2回に変化するという推定と一致している。

なお、500, 1000 kHz のにおいて他の実験結果より

大きくなったのは試験回路の抵抗に起因すると考えられる。

#### 4.4 その他の観測結果

最小点火電圧は混合気体の圧力によって減少することが知られていることから<sup>6)</sup>、大気圧の変化(0.5 hPa程度)と最小点火電圧の関係を検討した。その結果、気圧が高いほど点火する電圧が1ステップ(2.5V)下がる場合が多かったが逆に上がる場合もあり、はっきりとした結論が得られなかった。

一方、タングステン線電極が試験中に割れて細くなった場合、点火電圧は明らかに減少した。タングステン線を細くしてカドミウム円盤に接触させると燃焼、爆発などの現象が観測されることから、タングステン線が細い場合、点火機構が大きく変化すると考えられる。

#### 4.5 点火危険性とその防止の考え方

以上のことから点火危険性について次のことが推測される。

- 50 $\Omega$ の抵抗回路の開閉火花では周波数が高くなると最小点火電圧は大きくなり(Fig. 3参照)、電源電圧からみた点火危険性は小さくなる。
- 少なくとも1から10 kHzの範囲では一回当たりの放電エネルギーは減少しており(Fig. 8参照)、放電エネルギーからみた危険性は大きくなる。
- 50 kHz付近を越える周波数では、2回以上の放電が点火に関係すると考えられ、連続した放電の発生しやすい条件において、点火危険性が高くなる。

一方、高周波電気回路の開閉火花による点火危険性を減少させる方法は、基本的には、直流や低周波の交流の場合と同じであるが、次のような点を考慮する必要がある。

- 放電電圧及び放電エネルギーからの検討
- 連続した放電による点火危険性
- 細線の爆発や燃焼による点火危険性
- 共振周波数における点火危険性

### 5. あとがき

高周波(1 ~ 1000 kHz), 50 $\Omega$ 抵抗回路の開閉火花による水素・空気混合気体の最小点火電圧を実験か

ら求め、点火危険性について検討した。その結果をまとめると次のようになる。

1. 水素・空気混合気体では、点火に要する時間 (ignition induction time) は  $20 \mu\text{s}$  程度であることから、 $10 \text{ kHz}$  までは一回の放電により点火が発生する。また、 $50 \text{ kHz}$  以上では  $20 \mu\text{s}$  以内に発生した 2 回以上の放電が点火に関係する。
2.  $50 \text{ kHz}$  での最小点火電圧が  $10 \text{ kHz}$  の約 2 倍になる (Fig. 3 参照) のは、放電と放電の間の休止期間におけるエネルギーの損失が原因と考えられる。
3. 水素・空気混合気体では、周波数が高くなるほど点火電圧は大きくなるが、少なくとも  $1 \sim 10 \text{ kHz}$  の範囲において、点火に必要な放電エネルギーは逆に、小さくなると推測される。
4. 得られた最小点火電圧は文献値と同様の傾向を示しているものの、高周波において差が大きくなっている。これは、試験回路全体の抵抗が  $50 \Omega$  より大きかったことによると推定される。
5. 高周波電気回路では、表皮効果による損失の防止するため細い線が利用されているが、開閉

火花によって細線の燃焼、爆発を伴うため、それに対する点火危険性を考慮する必要がある。

(平成 5 年 5 月 7 日受理)

#### 参考文献

- 1) D.J. Burstow et al., Radio Frequency Ignition Hazards, The Radio and Electronic Engineers, Vol. 51, No. 4, pp. 151-169, (1981).
- 2) 田中, 本質安全防爆電気回路に関する基礎的研究, 博士論文, pp. 92-100, 産業安全研究所, (1970).
- 3) '工場電気設備防爆指針', 産業安全研究所技術指針, RIIS-TR-74-1, 産業安全研究所, (1974).
- 4) M.M. Atalla, Arcing of Electrical Contacts in Telephone Switching Circuits, Bell System Technical Journal, pp. 1493-1506, (1953).
- 5) 沢, 須原他, 接点开離時の間欠アーク発生に及ぼす気圧の影響, 電気学会論文誌 A, vol. 97, No. 5, pp. 9-16, (1977), 他.
- 6) 田中, 加圧下のメタン-空気混合気中における本質安全防爆電気回路の基礎的研究, 産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-17-7, (1969).