圧電素子による点火現象 Ignition Phenomena by Piezoelectric Ceramics

Concerning the gas ignition by piezoelectric ceramics analysis has been made to clarify its mechanism from the viewpoint of discharge energy.

The phenomenon of ignition consists of a spark discharge area and a glow discharge area each with a discharge energy of 0.5 mJ and 1.5 mJ, respectively. And, the relationship between the discharge energy and the piezoelectric material constants is proportionate with the product of g_{33} and d_{33} in the case of the spark discharge and to d_{33} in the case of the glow discharge.

The mechanism of ignition is also studied by way of the measuring of discharge spark and ignition point of a discharge started in the city gas atmosphere by means of a photoelectric amplifier tube. 真中 誠^{*} Makoto Manaka 小林真佐留^{*} Masaru Kobayashi

11 緒 言

圧電磁器に応力を加えて10,000V以上の高電圧を発生させ、 火花放電に導き、燃料に点火する方式が開発され、わが国で は昭和38年ごろより家庭用ガス器具、たばこ用ガスライター などに実用化されている。高電圧の発生方式は、静圧力を加



える方式と衝撃力を加える方式とがあり,加圧力と発生電圧, 電気量ならびに材料定数などの関係については報告も散見さ れるが⁽¹⁾⁽²⁾,エネルギーを主体に検討したものや,圧電による 点火機構の詳細についての報告は,ほとんどない現状である。

東京瓦斯株式会社においては,現在の都市ガスを天然ガス に転換する計画で,昭和45年当初より同社総合研究所におい て圧電点火に関する根本的検討が始められた。これは都市ガ スを天然ガスに転換した場合,圧電点火が現在より困難な方 向に向かう要素があることから,従来の規格の再検討を必要 としたためである。このため圧電点火に必要なエネルギーを 検討し,現在よりもさらに高性能であり,かつ安全性のある 機構を含め圧電スパーカの開発を要望された。

このような気運の中で,日立化成工業株式会社(以下日立 化成工業と略す)では放電エネルギーを実測することを試 み,これをもとに圧電点火現象の究明など前記総合研究所に 協力した結果,材料開発,スパーカ機構などについて種々の 知見も得られ,日立化成工業の既存製品に反映することがで きた。

2 放電エネルギーの測定

従来, 圧電による放電エネルギーに関しては, 測定された データもなく, 一般に素子の静電容量(C)と出力電圧(V_0)か ら蓄積された静電エネルギー½ CV_0^2 が放電時に熱エネルギー として放出されると考えられていた⁽³⁾。 圧電スパーカの評価 に関しては, 推定された数値でなく実測されたもので評価す べきと考え, 放電エネルギーの測定を検討した。圧電素子を 圧縮するとプラスの電圧を発生し, ひずみが開放される過程 では, 逆極性の電圧を発生する。**図1**は放電電圧・電流のエ

図 | 圧電放電波形のモデル 圧電磁器にひずみを起こす圧縮方法によって放電波形のモデルは異なるが、この図は一般に知られている衝撃音を生ずる装置で行なった波形の一例である。

ネルギーの関係を示すものである。便宜上, エネルギーをス パークとグローの二つの放電エネルギーに分けて考えた。放

Fig. I Discharge Wave by Piezoelectric Ceramics

* 日立化成工業株式会社





 図 2 圧電ユニット構成図 圧電ユニットは衝撃機構(スパーカ)の中に収められ、ガス器具用に一般に使用されている。
 Fig. 2 Construction of Piezoelectric Ceramics Unit (Hitachi Chemical Ind. Co., HPSU-I Unit)

図3 放電エネルギー測定回路 放電エネルギーを算出するに必要な電圧と電流を 同時に測定する回路を示す。

Fig. 3 Measuring Circuit of Discharge Volt and Amperer





図 4 HPSU-I形圧電ユニットの放電波形 日立化成工業の圧電ユニットによる放電電圧,電流波形を示す。

Fig. 4 Discharge Wave of HPSU-I Unit

図5 波形の説明図 図4の放電波形のフィルムをトレースした電圧および電流の状態を示す。

Fig. 5 Trace of Discharge Wave of Fig. 4

電エネルギーを測定するためには、スパークの電圧(V_s)と電 流(I_s)はグローの電圧(V_c)、電流(I_c)とが、 $V_s \gg V_c$ 、 $I_s \gg I_c$ であることから同一の尺度で測定することは不可能である。 したがって、これらの両者について掃引時間、電圧・電流レベルを変えて測定した。図2は測定に使用した日立化成工業の圧電ユニットHPSU-1形の構成図を示すものである。

2.1 グロー放電エネルギーの測定

図3および表1は測定回路の条件を,また図4は測定した 波形を示すものである。この波形の構成を明確にするため, 電圧と電流の動きをトレースし図5に示した。エネルギーは (1)式を用いて算出し,1.5mJの値を得た。

ここに, Ec: グロー放電エネルギー

V:電極間の放電電圧(V_G) I:放電電流

t:時間 *τ*:放電終了時間

2.2 スパーク放電エネルギー(E_s)の測定

54

前項では、10µsの掃引で観察されるグロー放電域について 測定したが、このほかに放電開始時に放電電圧の急激な低下 能のよい分圧器と電流測定回路により、また輝度の明るいシンクロスコープを利用した結果、この部分の撮影が可能となった。図6は実際に測定したユニットの放電波形を示すものである。この波形を観察すると、電圧がゼロ付近に達したときに電流のピークが最大となっている。

ここでは、実験結果に基づいて下記の計算を行なった。す なわち、図7に示すスパーク放電域の模型図より次式を求め 近似した。

$$V = V_s \left\{ 1 - \frac{1}{\tau} (t - t_1) \right\}$$

$$\Box \subset U_z, \quad \tau = t_2 - t_1, \quad t_1 < t < t_2$$

$$I = \frac{I_s}{\tau} (t - t_1)$$

表 | 測定条件 放電現象は使用する装置,回路,環境などにより異なるので,放電エネルギー算出にあたって使用する装置を指定したものである。

Table. I Details of Fig. 3 Circuit

とそれに伴う電流の急激な立上りがあることが図4によりわか
ったので、この部分について検討した。この部分は100ns以
下の過渡現象であるため一般に市販の装置では詳細が実測さ
れず,従来より見過されてきた分野である。このため今回,
日立製作所日立研究所の協力により, 6ns 程度の高周波性

シンクロスコープ	テクトロニックス社 TYPE 551							
分, 圧器	岩崎通信機株式会社 40ID							
電流測定用抵抗	100Ω, ½ Wソリッド抵抗4本並列接続							
放電電極間げき	3 針電極(JIS B 8036)							
4 mm 一定	電極材質 ニッケル合金							

圧電素子による点火現象 日立評論 VOL.55 No.3 261



スパーク放電写真(HPSU-I形ユニット) 図 6 日立化成工業の圧 電ユニットによるスパーク放電域(図1)の電圧,電流波形を示した。 Fig. 6 Discharge Wave at Spark Area (HPSU-I Unit)

ここに、

$$E_{s} = \int_{t_{1}}^{t_{2}} VIdt = \int_{0}^{\tau} \frac{V_{s} \cdot I_{s}}{\tau} (1 - \frac{1}{\tau}t) tdt = \frac{1}{6} V_{s} \cdot I_{s} \cdot \tau$$
.....(2)
(2)式に図 6 よりそれぞれの実測値 ($V_{s} = 8.7 \text{kV}, I_{s} = 12 \text{A}, \tau = 30 \text{ms}$) を読み取り代えするよ $E_{s} = 0.5 \text{m} I \text{k} t \text{c} \tau$



スパーク放電域の電圧・電流説明図 図 7 図6の放電波形のフィル ムをトレースした電圧および電流の状態を示す。

Fig. 7 Trace Discharge Wave at Spark Area of Fig. 6

 $\tau = 30ns$) を読み取り11人9 ると、 $E_S = 0.5mJ$ となる。

したがって, 圧電放電の場合には, 大きなエネルギーがス パーク放電域にも存在していることになり、前記のグロー放 電域と合わせると2mJの放電エネルギーとなった。

スパーク放電域は、放電波形に示されるようにコンデンサ 放電であるから、 ½CV²より求めた推定値1.9mJに比べると 小さく1/3程度である。また、無放電時の最高出力電圧15kVよ り算出したエネルギーは5.6mJであり、Es、Ecの実測値の和 2mJは、やはりこの1/3にすぎない。

3 点火に必要なエネルギー

1

メタンの空気中最小点火エネルギーはコンデンサ放電によ



る場合, 0.2mJ(静止ガス)の文献値⁽³⁾があるが, 流動ガス中 で放電する実用の場合は異なる。点火性能の評価はメタン, 空気混合ガスの流れの中で(4) 放電させ、点火域(メタン濃度、 放電電極間げき)を調べたもので、図8はその結果を示すも のである。メタンガスの爆発燃焼範囲は静止ガスで空気中で 5~15%であるが⁽⁴⁾,空気中において電極間げき4mmで0.9~ $1.2mJ(E_G)$ 程度の放電エネルギーをもつ市販3社の実用スパ ーカでは下限が6%,上限が10.5~12.5%の値である。この 場合,性能の良いものは点火するメタン濃度範囲が広く,電 極間げきの小さい領域に対しても点火することを示している。



実用スパーカにおける点火性能 放電間げきとメタン濃度によ 図 8 り市販の3種のスパーカにより点火の領域を調べた。エネルギーの大きなもの は点火性能が優れていることがわかる。

Fig. 8 Spark Ignition Area in Methan-Oxygen Gas by Practical Piezoelectric Sparkers

図9 圧電による最小点火エネルギー 放電点火する限界のスパーカ を用いて点火性能を調べた実験である。この実験からは、1.8mm電極間げきが その限界で数値はその間げきの放電エネルギーを示す。 Fig. 9 Minimum Energy for Spark Ignition by Piezoelectric Ceramics

55

圧電素子による点火現象 日立評論 VOL. 55 No. 3 262



図10 測定方法と電圧波形 点火機構の解明のために正逆2波に分離したことを示す。

Fig. 10 Measuring Circuit of Positive and Negative Voltage Wave by High Voltage Silicondiode and Their Voltage Wave

また、実用スパーカ(A社製)を用いた実験から図9に示すように、出力電圧を小さくしたものは点火域が狭く、点火限界曲線の極小の位置が出力電圧の大きいものより高い。この極小の位置は1.8mmの電極間げきであり、その間げきの放電エネルギーが0.4mJと求められたことから、この値を圧電点火に必要な最小エネルギーのめやすと考えた⁽⁵⁾。

図|| 第|波,第2波による点火性能 点火性能については,第|波 も第2波も差はないが,正常放電に比較し点火性能はやや劣る。

Fig. II Spark Ignition Area in Methan-Oxygen Gas by Positive and Negative Discharge



これに対して日立化成工業のHPSU-1形圧電ユニットは, スパーク域, グロー放電域合わせて2.0mJであるから, 点火 に必要な最小エネルギー0.4mJに対し5倍であり, 現在の都 市ガスより点火が困難とされるメタン⁽⁴⁾に対しても十分余裕 のある数値となっている。

4 点火機構の解明

56

E電特有の放電は,正逆から成ることにあるが,これを図10 のように正逆2波に分離して点火性能を調べたところ,図11 に示すように両者は,点火性能としては同等であることがわ かった。これらは正逆を合わせた放電の場合に比べてやや点 火域は狭いが,いずれの波形も点火に寄与していることがわ かる。また,ガス中で放電点火する現象と空気中で放電だけ させる現象とを光電子増倍管(以下,ホトマルと略す)を用 いて時間的経過の比較を行ない,放電点火プロセスの検討を 行なった。すなわち,図12の装置を用い空気中の放電時のホ トマル出力と同時に,ガス中で放電点火した場合の出力とを ブラウン管上に同時結像できるように調整した。

さらに留意した点は、時間軸を示すために放電電圧波形を 同時に描かせたことである。図13はシンクロスコープの掃引 を10µs~2msの範囲で撮影した写真である。装置の関係で時 定数が0.6msと大きかったので現象の概要を知るにとどまっ た。図14は図13の写真をまとめて示したものである。すなわ ち、横軸は対数目盛で時間を表わし、縦軸はそのときの放電 図12 光電子増倍管による測定装置 光の強さと放電電圧を同時に測 定する装置。

Fig. 12 Detecting Apparatus for the Intensities of Light by a Photomutiplier Tube



図14 ホトマルによる放電点火プロセス 図13の写真から放電点火の 現象をイラストした図を示す。点火の時期は1ms前後を示している。 Fig. 14 Observed Phenomena of Spark Ignition Process

電圧と光の強さをホトマルの出力で示したものである。 この場合,逆極性にかかわる第2波,またスパーカの構造 上ハンマで2回圧電ユニットを打撃することに起因する第3, 第4波の放電スパークでホトマルは明確に応答している。 この実験から点火時期は,およそ1ms前後であることがわ かる。そして10msで噴出ガス全体に炎が広まり,さらに炎が

安定する定常状態へ移行していくものと判断される。また、 10µsの写真から次のようにいえる。すなわち、 (1) スパーク放電域のホトマル出力(光の強さ)は、ガス中 のほうが空気中より極端に大きい。したがって、スパーク

圧電素子による点火現象 日立評論 VOL.55 No.3 263



図13 空気中およびガス中における放電の光電子増倍管装置による点火時期の追跡 点火時期を 追跡することによって,点火に必要なエネルギーを検討するために行なった実験である。放電した場合の空気中と ガス中におけるホトマルの出力を比較した。

Fig. 13 The Study of Igniting Time in the City Gas Atmosphere by Photomultiplier System

によって微視的な燃焼が発生したと考えられる。

(2) 第2波の逆極性の放電以降ホトマル出力は,20~30µs付 近で低下せず,むしろ上昇カーブが見られるのは,すでに 点火の初期的な状態を示すものと考えられる。

以上,点火現象の検討とスパーク放電域のエネルギー値より考察すれば,流出ガスの分解などの化学現象は放電開始時の高圧スパークによってなされ、またスパーク故雪とりはス

5 圧電素子材質と放電エネルギー

前節までの検討結果より, 圧電放電エネルギーの和は,

 $E = E_{S1} + E_{G1} + E_{S2} + E_{G2} + \dots (3)$

(最初のスパーク域)(グロー放電域)(逆極性のスパーク域)(逆極性のグロー放電域) で表わされる。一方, 圧電磁器に力が加えられたときに発生

1

する電荷ならびに電圧は次式で表わされる。

$$Q = d_{33} \cdot F \cdots (4)$$
 $V = g_{33} \cdot \frac{l}{S} \cdot F \cdots (5)$
ここに,
 $Q : 発生電荷量$ $V : 発生電圧$
 $F : 力$ $S : 素子の電極面積$

57

日立化成工業製圧電点火素子用材料特性 材料特性と放電エネルギー値を示す。 表 2

Table 2 Piezoelectric Constant for Igniting Sparker (Hitachi Chemical Ind. Co.)

材質名	結	合 <i>K</i> 3	係 3	数	圧 d ₃₃	電 × 10 ^{−12}	率 C/N	電 圧 出 g ₃₃ ×10	Ⅰ カ 係 数) ⁻³ V-m/N	誘	電 &	率	スパーク域の放電 エネルギー E_s (mJ)	グロー域の放電 エネルギー <i>E_G (mJ</i>)	総 エ ネ ル ギ ー E (mJ)				
HPM-II	0.67		0.67			0.67		0.67					28		1,000		0.5	1.5	2.0
HPM-22	0.71		0.71		425			23	2,000			0.8	1.7	2.5					
HPM-32	0.68		32 0.68		0.68		280		27		1,200			0.65	Ι.55	2.2			
HPM-42		0.7	70			380			25		1,800		0.75	1.65	2.4				

d33:加圧方向の圧電率 1:素子の厚み

g33:加圧方向の電圧出力係数

ここで、(3)式の各項は(4)(5)式からそれぞれ次のようになる。

 $E_{S_1} = \frac{1}{2} C V_S^2 = \frac{1}{2} Q V_S \propto q_{33} \cdot d_{33} \cdot F$

Vcをほぼ一定値とみなして,

$$E_{G1} = V_G \int_{t_1}^{t_2} \frac{dQ_1}{dt} dt = V_G \cdot d_{33} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dF}{dt} dt$$

ここに、 $t_1 \sim t_2$: 第1波のグロー放電時間

 $t_3 \sim t_4$: 第2波のグロー放電時間

- Q₁:放電中に加えられた圧力に比例する電荷
- Q2: 放電中に圧電素子のひずみが開放されるとき

図15 $E_{s_1} \ge g_{33} \cdot d_{33}$ 圧電磁器の材料定数 $g_{33} \cdot d_{33} \ge z_{33} \cdot d_{33}$ とは直線関係にある。

Fig. 15 Relationship E_{s_1} & $g_{33} \cdot d_{33}$

に発生する電荷

すなわち、スパーク放電エネルギーは、一定の加圧条件で は材料定数のg33・d33の積に比例し、グロー放電エネルギーは 放電電圧がほぼ一定値であることから、d33に比例することが わかる。

表2は日立化成工業で開発した点火素子用材料の定数と実 測したエネルギー値を示すもので、また図15はEs1とg33・d33, 図16はEG1とd33の関係を示すものである。いずれも直線関係 にあることから、上記(6)(7)式が成り立つものと考える。すな わち,放電エネルギーを大きくするためにはg定数, d 定数 の大きな材料を用いることが望ましい。なお,表2に示した 日立化成工業の材質はすべて2.0mJ以上のエネルギーを発生 し、点火に必要な最小エネルギー0.4mJに対して十分実用で きるものである。しかしながら, 圧電点火素子の評価は放電 エネルギーの大きなことのみでは一義的に決められず、耐久 性、加圧機構などを考慮のうえ行なうべきであると考える。

結 言 6

58

以上,本実験により得られた結果を下記にまとめる。

- (1) 圧電放電現象について, 圧電効果による放電波形のモデ ルを考え,放電の始まるスパーク放電域とグロー放電域に 分けて放電波形を観測することができた。
- (2) 日立化成工業のガス器具用圧電ユニットについて4mm間 げきの放電エネルギーを測定し、スパーク域0.5mJ、グロ ー域1.5mJの値を得た。この値は点火に必要な最小エネル ギー0.4mJに比べて十分余裕があり、現在の都市ガスのみ ならずメタンガスに対しても点火を保証することができる。
- (3) 点火に寄与する有効な放電成分について, 光電子増倍管 を用いて点火時期の追跡をガス中で行ない、スパーク放電 は点火を開始し、それに続くグロー放電は点火を維持する 条件であると推定される。 (4) 放電エネルギーと圧電素子の材料定数との関係を求め、 スパーク放電エネルギーはq33・d33の積に、グロー放電エネ

ルギーはd33に比例することがわかった。

図16 $E_{G_1} \ge d_{33}$ の関係 圧電磁器の材料定数 $d_{33} \ge 0$ - エネルギー E_{G_1} とは直線関係にある。

Fig. 16 Relationship E_{G1} & d_{33}

最後に今回の検討に対し,ご指導,ご協力いただいた電気 通信大学丸竹教授, 東京瓦斯株式会社総合研究所渡辺副主查 ならびに日立製作所中央研究所,同日立研究所の関係各位に 対し深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 丸竹: 圧電磁器による火花発生(チタバリ研究会資料 XV-83-555)
- (2) 新美: 圧電点火装置 固体物理 p.48 Vol.2, No.4
- (3) Levis, B., Von Elbeg: "Combustion Flames and Explosion by Gas" Academic Press 1961 (4) 東京瓦斯総合研究所: 圧電点火試験報告第1報(昭45-4) (5) 辻,渡辺,菊地,真中: "圧電点火素子の放電エネルギーと点火性 能" 第31回応用物理学会 1970 (6) C. Pearcy : "High Voltage Generation from Piezoelectric Ceramics" Electronic Engineering 1965