

銅線切断法による放電火花のメタン点火限界についての研究

電 気 課 田 中 隆 二

The Ignition of Methane-Air Mixtures by Sparks with Snapping-Wire Apparatus

by R. Tanaka

Measurements have been done of minimum igniting currents for low voltage d.c. inductive and non-inductive circuits, in methane-air mixtures, with a snapping copper wire apparatus.

It is shown that more incendiive sparks are achieved, for inductive circuits, than with the British Break-Flash No.3 apparatus, hinting for the need for a larger safety factor in cases of live wire break incidents. The incendiivity of the apparatus is almost equal to that of the German Schnellunterbrecker. With non-inductive circuits obvious differences of the minimum igniting currents are not indicated throughout the range of voltages investigated.

As for the effect of the wire diameter, the minimum igniting currents are nearly constant over a limited range of diameter of 0.1-0.4 mm, the other conditions being equal.

1. まえがき

通電中の電気回路が正常な動作中または事故時（短絡，地絡など）に発生する放電火花の爆発性ガスへの点火危険性については，これまで基本的な回路について種々の観点から求められている⁽¹⁾。これらの成果の多くは，特殊な電極系，つまり電極の形状，材質，開閉速度などについて実際の接点とはかなり異なった特性のものを使用して得られたものではあるが，接点の構造，動作などの多様性を考えた場合，このような特殊な電極系によって得られた点火限界によって，実際の接点火花のガスへの点火危険性を評価することは安全の立場から妥当であると考えられる。

しかしながら，接点とは異なって，通常は放電火花を発することのない配線が通電中に事故などによって断線したような場合に発生する放電火花のガスへの点火危険性を，上記のような特殊な電極系で発生する火花と同等に取り扱ってよいか否かについては，やや問題が残されてきた。そこでここでは，実際の電気回路で最も普通に使われている銅線を通電中に切断して放電火花を発生させ，その際のガスへの点火限界を求めるとともに，これを従来からの特殊電極系によって得られている結果と比較して報告し，併せて現在本質安全防爆機器の試験装置

として使用されている特殊電極系をこのような配線の断線の際の点火危険の試験に使用することの妥当性に関してのべる。

なお，この実験のために使用した銅線の切断法は，筆者が1963年英国の Safety in Mines Research Establishment (Sheffield) に滞在中，研究の一部に採用した方法⁽²⁾と同じであることをおことわりしておく。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置の概要

実験装置の概要を第1図に示す。同図における火花発生装置の内部には，銅線が水平に張られており，その両端が金属軸 S_1 および S_2 に巻き付けられていて，これらの軸を通じて外部の被試験回路に接続されている。一

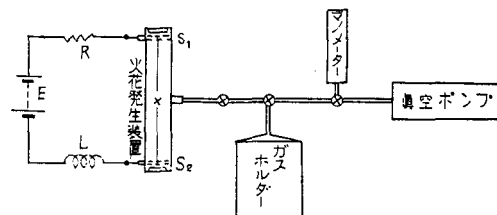


Fig. 1. Schematic layout for experimental equipment.

方、この火花発生装置はポリエチレンチューブによってメタンガスホルダー、マノメーターおよび真空ポンプと接続されている。火花発生装置の内部は一旦真空（水銀中約5mm以下）にしてから所定の濃度のメタンガスを送給するような構造になっている。

2.2 火花発生装置

火花発生装置のやや詳細な構造は第2図に示すようなもので、長さが約45cm、内部の中空部分の断面が3.6×3.6cmの透明なプラスチック製の容器で製作されており、その両端部にはゴムバンドで押さえ付けてある円板状のふたがある。両端部の近くには、銅線を固定し巻き付けることによって張力を与えて切断するための金属軸が取り付けられており、容器の外部からハンドルでこの軸を回転させることができる構造になっている。

銅線は容器両端部の円板状ふたを一時取り外すことにより、ここから所要の長さに切って挿入することができる。そのあと再びふたをして、ゴムバンドで押さえ付けておく。なおこのふたは実験中に放電火花がガスに点火した場合の爆発圧力を外部に放出するための安全弁の役割をも兼ねている。

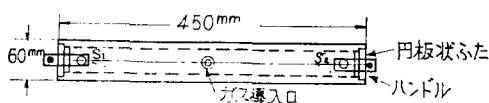


Fig. 2. Construction details of spark producer.

2.3 試験ガス

実験に使用した試験ガスは、市販のボンベ入りのメタンに空気を混合させ、濃度が $8.3 \pm 0.1\%$ （体積比）としたものを、ポリエチレン製のガスホルダーに貯えて使用した。ガス濃度は理研製の干渉式ガス検知器で測定し、実験中はポリエチレン製ガスホルダー内のガス濃度がほとんど変化しないことを確認した。

なお、試験ガスの温度は室温で、特に除湿操作は行なわなかった。

2.4 実験方法

実験の手順としては、先づ銅線を所要の長さに切り、そのほぼ中央部にニッパーで切りキズを一定の深さにつけてから、火花発生装置の容器内部に取り付け、両端を金属軸に巻き付けて固定する。しかる後に装置の両端部のふたをして電気回路の条件を設定する。設定が終わったら銅線への通電を中断し、火花発生装置内を真空にして、所定の真空度に到達してから試験ガスを送入する。試験ガスの圧力は大気圧に等しくなっている。ここで再び銅線に通電し、手動によって金属軸のハンドルを回転させることにより、銅線は予め与えておいたキズの部分で切断され、放電火花を発生する。

放電火花が試験ガスに点火した場合には、他の条件は同一のまま、通電電流のみを5～10%減少させて、同様な方法により放電火花を発生させた。このようなことを繰り返し連続5回の発生火花で1回もガスへの点火が得られない最大の電流値（ I_m ）と、その電流値に減少させる前に点火が得られた最小の電流値（ I_t ）とを測定し、これを不点火および点火の限界とした。（注： I_m の決定における5回の実験回数は十分なものとはいえないが、これ以上実験回数を増加一例えば10回にしても、 I_m の値がそれほど低下する例が少なかったことと、実験に長時間を要することのため、ここではこの程度の回数にとどめた）

被試験回路には電源として直流電源（鉛蓄電池または90V積層乾電池）を使用し、単純な直列誘導回路または無誘導回路を基本的な回路として採用した。誘導回路の実験に使用したインダクタンスは、いずれも空心のもので、0.1mH～10Hの大きさのものである。

また、銅線には一般に最も広く使用されていると思われる太さの範囲の相当品として直径0.1, 0.18, 0.3および0.4mmの4種類の軟銅線を使用した。上述のような方法で銅線を引張り切断させて実験をする場合、予め銅線に切りキズを与えた箇所と異なる部分で切断することがあるが、これは線径が太い場合は切りキズの深さが比較的浅くて他のキズをつけない部分が切れてしまうとき、また線径の細い場合は線の太さが必ずしも一様ではなく、製造上、局部的に他の部分より細くなっているときなどに起りやすい。このような場合は一般に点火感度が低い（この理由は後述するように電極としての開離速度が小さくなるためと考えられる）ので、実験値を棄却し、改めて同じ実験を繰り返して行なった（注：引張りの際の銅線の伸びにより、切断点の銅線の太さがかなり細くなることが予想されたが、直径の減少はいずれも切断前の直径の18%以下であった。一般に直径が小さいと伸びによる直径の減少も小さく、直径が大きいと減少も18%に近くなる。この程度では伸びによる直径の減少の影響はほとんど実験上無視してよいとみなされる）

3. 実験結果

3.1 誘導回路の実験結果

第1表に示したのは誘導回路の場合について、銅線の直径、回路インダクタンスおよび電源電圧の大きさをそれぞれパラメータとして測定した点火電流値（ I_t ）と不点火電流値（ I_m ）である。線径が0.4mmの場合について点火電流の限界（ I_t と I_m との算術平均をとった）を曲線で示すと第3図のとおりである。この曲線の形状は、従来、特殊な電極系によって得られた点火電流の限

Table 1. Minimum igniting current for inductive circuit.

線径 (mm)	インダクタンス (mH)	電源電圧(V) 電流(mA)		6	24	48	96
		I_t	I_m				
0.1	0.1	I_t	—	—	—	900	510
		I_m	—	—	—	800	480
	3	I_t	570	600	450	340	—
		I_m	530	570	425	320	—
	30	I_t	180	180	180	170	—
		I_m	170	170	170	160	—
	95	I_t	108	108	115	100	—
		I_m	103	104	110	95	—
	1,000	I_t	—	34	37.5	33	—
		I_m	—	32	35	31.5	—
	10,000	I_t	—	—	13	14	—
		I_m	—	—	12	13	—
0.18	0.1	I_t	—	2100	1800	550	—
		I_m	—	2000	1700	525	—
	3	I_t	650	645	540	320	—
		I_m	600	610	500	300	—
	30	I_t	200	200	180	170	—
		I_m	190	190	170	162	—
	95	I_t	120	100	105	90	—
		I_m	115	95	100	85	—
	1,000	I_t	—	34	32	29	—
		I_m	—	32	30	28	—
	10,000	I_t	—	—	—	15	—
		I_m	—	—	—	14	—
0.3	0.1	I_t	4750	4000	1500	475	—
		I_m	4500	3600	1400	450	—
	3	I_t	760	600	475	400	—
		I_m	730	570	450	380	—
	30	I_t	225	200	200	180	—
		I_m	220	190	190	170	—
	95	I_t	125	120	120	92	—
		I_m	120	110	110	88	—
	1,000	I_t	—	34	32	28.5	—
		I_m	—	32	30	27	—
	10,000	I_t	—	—	—	16	—
		I_m	—	—	—	14	—
0.4	0.1	I_t	5000	2550	1900	600	—
		I_m	4750	2400	1800	560	—
	3	I_t	760	710	600	470	—
		I_m	720	680	570	450	—
	30	I_t	230	220	230	190	—
		I_m	225	210	220	180	—
	95	I_t	119	130	130	105	—
		I_m	113	120	120	100	—
	1,000	I_t	—	36	36	32	—
		I_m	—	34	34	30	—
	10,000	I_t	—	—	—	16	—
		I_m	—	—	—	15	—

註 I_t = 点火した最小電流値
 I_m = 点火しなかった最大電流値

界を示す曲線⁽¹⁾とはほとんど同じである。すなわち、インダクタンスの大きな範囲では点火電流の大きさは電源電圧の大きさにほとんど無関係で、インダクタンスの大きさのみに依存し、かつ、点火電流 (I) とインダクタンス (L) との間には $LI^n = \text{一定}$ (n は定数) の関係が成立している。そしてインダクタンスが小さくなると始めて電源電圧の大きさの差が現われてくる。

第1表の結果を、縦軸に点火電流、横軸に線径をとって曲線に示すと第4図のようになる。同図から明らかなように、いずれの場合にもこの程度の線径の範囲内では線径の違いが生じていない。これは34.2Hのインダクタンスについて求めた関氏⁽³⁾の実験結果とも一致している。電源電圧の大きさの差が生じてくるのは、インダクタンスが3 mH程度より小さな場合となっている。

3.2 無誘導回路の実験結果

誘導回路の場合と同様に、無誘導回路についての実験結果を第2表に示す。これを曲線として第5図に描いている。

無誘導回路の場合についても、線径に有意な差を生じなかった。

第5図には各国のそれぞれの火花発生装置によって求めた最小点火電流曲線を比較のために記入してあるが、これから明らかなように火花発生装置の種類ごとに異なった特性のものが得られている。なお、この実験の結果では、現在、英国で本質安全防爆機器の試験に採用されている Intermittent break apparatus によって得られた曲線⁽⁴⁾と同様に、最小点火電流曲線の中にクビレ (kink) を生じた。

4. 考察および意見

4.1 銅線の切断現象と電極としての開離速度

通電中の銅線を上述のような方法によって切断させ、その間に発生する放電火花のガスへの点火性を調べたのであるが、力学的に見れば銅線は切断前に蓄積していた弾性エネルギーを運動エネルギーに変換して急速に開離すると考えられる。この場合、銅線の切断は実際には弾性限界をこえた範囲で生ずるので Lord 氏⁽⁵⁾が解析しているような切断直後の銅線の運動は、一般に一端固定、他端自由な棒の縦振動を示す運動方程式の適用が困難であること、したがって、切断直後の銅線の開離速度を理論的に解析して求めた結果を適用することは適当でないと考えられる。そこでこの実験では、実際の開離速度を高速度カメラで撮影して実測した。

その結果は、直径0.5mmの銅線については約20m/s、直径0.3mmの銅線では約25m/sにも達し、その速度は0.5mmの場合は0.2~0.3cm、0.3mmの場合は2~3

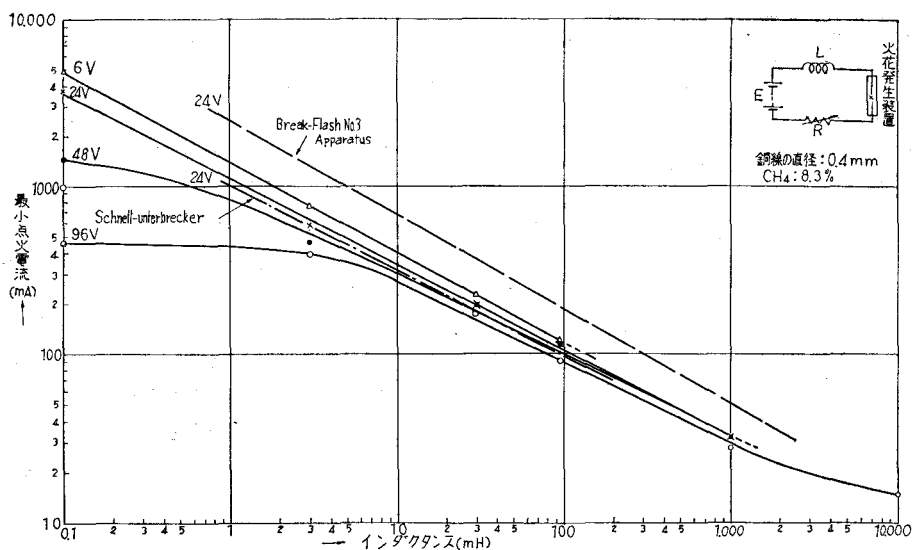


Fig. 3. Minimum igniting current vs. circuit inductance for 0.4 mm-dia. copper wire.

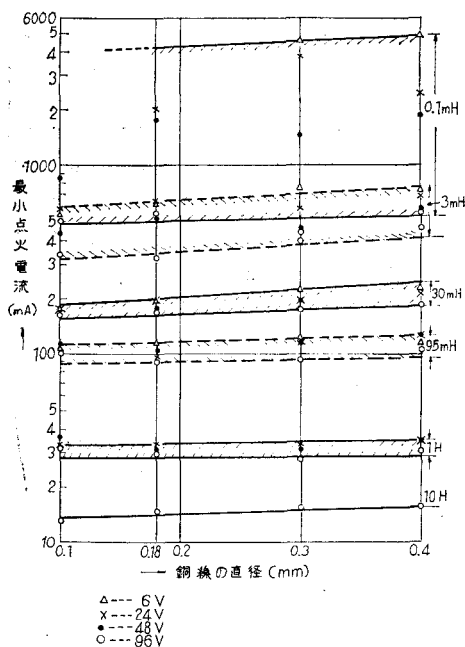


Fig. 4. Variation of igniting current against dia. of copper wire for inductive circuits.

cm 程度の電極間隔となるまで維持されることが確認された。したがって、この場合の電極としての開離速度は実際の接点の開離速度と比較して、きわめて大きくなっている。(注：銅線の切断瞬間を $t=0$ からフィルムのコマに同期して撮影することはできない。したがってフィルム上ではある間隔だけ開離してから切断したことが知られるので、この場合の開離速度は切断瞬間における微分速度ではなく、フィルム面上で切断が認められた最

初のコマから、その次のコマ間の平均速度から算出した。したがって、 $t=0$ における開離速度はこの平均速度よりはやや大きいと考えられる。)

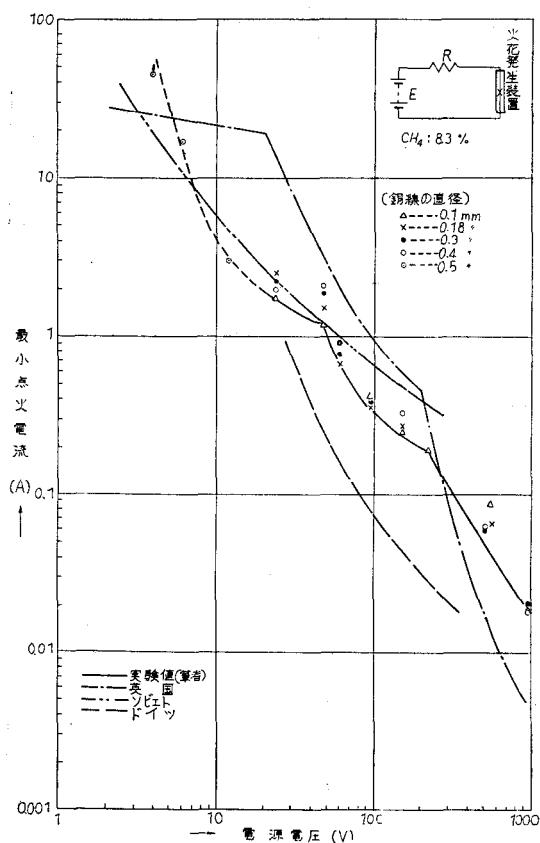


Fig. 5. Minimum igniting current curve for non-inductive circuit.

Table 2. Minimum igniting current for non-inductive circuit

線径 (mm)	電源電圧 (V) 電流 (mA)	4	6	12	24	48	60	96	150	220	500	950
0.1	I_t	—	—	—	1800	1200	950	425	260	200	90 ⁽¹⁾	11
	I_m	—	—	—	1650	1100	900	400	240	190	80 ⁽¹⁾	9
0.18	I_t	—	—	—	2500	1500	680	370	280	200	65 ⁽²⁾	20
	I_m	—	—	—	2400	1400	620	350	260	190	60 ⁽²⁾	18
0.3	I_t	—	—	—	2200	1900	760	400	280	200	59	20
	I_m	—	—	—	2100	1800	720	375	260	190	58	19
0.4	I_t	—	—	—	2000	2100	950	425	340	200	60	18
	I_m	—	—	—	1900	2000	900	400	320	190	58	17
0.5	I_t	—	17A	3A	2000	1400	—	400	—	—	36 ⁽²⁾	19 ⁽³⁾
	I_m	44A	16A	2.9A	1900	1300	—	380	—	—	35 ⁽²⁾	17 ⁽³⁾

注：(1) 524Vにおける値

 I_t = 点火した最小電流値

(2) 540V "

 I_m = 点火しなかった最大電流値

(3) 915V "

4.2 誘導回路のしゃ断の場合

誘導回路のしゃ断による実験結果については、3.1 において述べたように、インダクタンス—最小点火電流の関係を示す曲線の形状が、従来種々の火花発生装置によって得られた曲線とほぼ同様であることから、火花のガス点火の機構も同様であると考えられる。ただし、点火感度が高いのは、大きな開離速度のために電極としての消炎作用が小さいからと思われる。

また銅線の直径の差がほとんど生じなかったのは、銅線切断前に、切断点に与えた切りキズおよび引張ったときの伸びによる実効断面積の減少を考慮に入れるとしても、初期の炎核 (flame kernel) の成長速度がこれに比べてはるかに小さいためではないかと考えられる。

第3図にはこの実験の結果と比較するために、同じ回路条件について別の火花発生装置として英国の Break flash No.3 apparatus およびドイツの Schnellunterbrecker を用いて得られた結果を示してある。同図から明らかなように、この実験結果は Schnellunterbrecker によるものとほぼ同じであることがわかった。Break flash No.3 apparatus はこれらに比べて点火感度が小さく、したがって本質安全回路の配線が通電中に切断されるような場合の試験の目的には、例えば安全率の値の決定に関して、開閉接点における場合に適用されるような値を一率に適用するには問題があると思われる。

4.3 抵抗回路しゃ断の場合

抵抗回路の場合には第5図のように特異な点火限界が得られたが、電源電圧が200V程度まではソビエトの実験結果にやや近い結果となった。ソビエトの実験方法は

直径0.26mmのスズメッキ銅線を0.6m/sの開離速度で切断させる方法である。筆者の方法と比較すると線径については同様と考えてよいが、銅線にスズメッキを施してあることと、開離速度が非常に小さくなっている点異なる。開離速度が小さいので消炎作用は当然筆者の方法に比べて大きい筈であるが、これが結果的に見かけ上の点火電流の大きさに影響を及ぼすことが少なかった理由は、銅線に施こされたスズメッキに求めることができるのではないと思われる。これまで電極材料の種類を変えて行なった誘導回路についての実験結果では、一般に密度の小さな電極材料ほど点火感度が高くなる⁽⁶⁾ことが示されており、スズメッキ処理が行なわれている銅線ではスズの影響が無視できるとはいえないであろう。スズメッキの有無による点火電流の大きさの差は、実用的にも重要であるのみでなく、また必要なことでもあるので、さらに機会を見て確認することに致したい。

点火電流の限界が特異な曲線となったことは、英国の Intermittent break apparatus によって得られた曲線とはほぼ似ているが、その点火電流限界を比較するとかなりの相違が見られる。したがって、この場合にも英国の試験装置の特性は必ずしもすべての回路条件について満足し得ないものであることが明らかである。

5. 結 論

スズメッキを施こさない裸の軟銅線に通電しながら、これをメタン空気混合ガスの中で引張り切断し、その際に発生する放電火花による点火限界を、誘導回路と無誘導回路の場合について求めた。

この結果、実験で使用した太さの範囲では直径の差が

点火限界に及ぼす効果はほとんど認められなかった。また点火感度については英国とドイツの火花発生装置によって得られている結果と比較してみると、誘導回路の場合はドイツのものとはほぼ同じであり、英国のものよりはかなり点火感度が高いことが示された。これに対して無誘導回路の場合には必ずしもそのようなことが明らかとならなかった。特に数V以下の低電圧の場合については、大電流を流さなければならないので、電極が過熱しアークによる点火の問題と判別しにくくなるので、ここではこのような低電圧の場合については実験を行なうことができなかった。しかし、本質安全防爆機器に乾電池を電源として使用する場合には、電源の端子短絡時のアークの危険性を正しく確かめるためにも、将来はガスの種類

を変えてさらに詳しく研究してみたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) 例えば IEC Document, SC31G, RM864 (1964)
- (2) 田中：昭和37年度長期在外研究員報告書 科学技術庁（昭40）
- (3) 関，江村，青柳，池田：採鉱と保安，vol. 10, No. 11 (1964)
- (4) Guenault, E.M.: S. M. R. E. Research Report No. 41 (1952)
- (5) Lord, H., Widginton, D. W. and Gordon, R. L.: IEE Conference Report Series No.3 (1962)
- (6) Scull, W.E.: N.A.C.A. Report 1019 (1951)