

火花點火現象に就て

後 藤 廉 平*

可燃性氣體と空氣或は酸素との混合氣體中で或程度以上の強さの火花放電を行ふと氣體の或組成及び壓力の範圍内で爆發的燃焼反應が誘起されると云ふ事は周知の事實で内燃機關動作工程の重要部分を成して居るのであるが、この現象が電氣的又は化學的に如何なる機構の下に進行するものであるかと云ふ事に就ては、古來幾多の研究、論争が試みられて來たにも拘らず、未だ不明の點が多く、尙そこに根本的な問題が残されて居る状態である。今之等の問題に關する比較的最近の研究の跡を辿り概括的に述べて見様と思ふ。

I 電氣作用説と熱作用説

電氣火花や熱線を用ひて混合氣に點火が行はれる場合、之を火花や熱線の熱作用に依るものと考へるのが最も普通であつて、この種の考へを基礎とするものを一般に熱作用説 (Thermal theory) と呼んで居る。一方、點火には火花の強さや熱線の溫度等に或限界條件が認められて居るが、熱作用説の立場から之を見ると、點火條件が火花や熱線から混合氣に與へられる熱エネルギーに依て表現される可きであると云ふ事になる。然るに Thornton¹⁾ の研究に依ると、火花點火の限界條件は、火花の熱エネルギーに依ては表はし得ないと云ふ結果になつたので、彼は火花に依る點火作用は單なる熱作用ではなくて、そこに何等かの電氣的過程が含まれて居ると考へる様になつた。之を電氣作用説 (Electric theory) と云ふ。

但し Thornton の用ひたのは、二本の鐵、ニッケル或は鋼線を互に直角に撓めて交叉させ、一方の線をすべらせて、その二本の線が急に離れる時に現れる火花であつて、所謂 切斷火花 (break spark) に相當するものである。そしてその時の火花のエネルギーは $\frac{1}{2}Li^2$ に依て表はされるものとされて居る。但し L はその火花回路のインダクタンスで、 i は火花發生前に流した電流の強さを示すものである。従て、火花の總エネルギーが熱として作用するものならば、火花の點火能は i^2 に對應すべきであるのに、Thornton の實驗結果は組成の廣い範圍に於て、 i に比例する事を示した。Thornton の所謂火花の點火能とは、點火に要する最小電流を指すものである。パラフィン炭化水素—空氣混合氣の場合、混合氣の組成 P と、最小點火電流 I に關して I/P は炭化水素の水素原子の數に大體比例する事を指摘して、結局炭化水素の火花點火は、各分子の水素原子の電離から始まると云ふ假説を提出した。要するに Thornton は火花の點火作用を氣體分子の電離作用に歸せんとしたのである。この意味で之を火花點火の電離作用説 (Ionization theory) とも呼んで居る。

處が、Morgan 一派の人達は、電氣作用説に對して反對するのではないが、火花點火現象を熱作用として充分解釋出來ると云ふ事を主張した。この所謂熱作用説は次の二つの事を根本假定とするものである。

〔1〕 火花に依て混合氣に點火するには、或充分量の氣體を或限界溫度以上に加熱する必要がある。

* 京都帝國大學化學研究所。

〔2〕 而して、その一定温度に氣體を加熱するには、熱の與へ方が早い程少量ですむ。

この假定には、直接の證明はないが、〔2〕の假定に對して、開放系に於て一定量の水を沸騰させるのに必要な熱量は、加熱速度に依て非常に差が出来るものであつて、急速に加熱する程所要熱量は少くてすむと云ふ例を引いて居る²⁾。そして、火花点火の限界熱量の實驗結果が一致しないのは、夫々熱の與へられ方に不同があるからであると考へたのである。

そこで Taylor-Jones, Wheeler 及び Morgan³⁾等は、空氣中の或一點に一定量の熱を瞬間的に與へた場合と或微小時間に亙つて連續的に與へた場合とで、之を中心とする空氣が、或温度以上に加熱される容積を異にする事、そして、瞬間的に與へた場合の方がその容積は大きいと云ふ事を數理的に表現し様とした。その理論の概要は次の様である。

II 空氣中に於ける温度波面の傳播形式

今空氣中の或一點に向つて、Q カロリーの熱が與へられた時、熱傳導理論に従てその點からの距離 r 、その部分の温度 θ 、及び時間 t に關して、次の關係が成立する。

$$\frac{d\theta}{dt} = x \left(\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\theta}{dr} \right) \dots\dots\dots (1)$$

但し、 x は空氣の温度傳導率 ($x = \frac{\lambda}{c}$; λ は熱傳導度、 c は空氣の比熱)で、今假に $x=0.5$, $c=0.00014$, $Q=0.001$ cal. 而して空氣の最初の温度を 0° として、(1) 式を解くと

$$\theta = \frac{Qe^{-r^2/4xt}}{8c(\pi xt)^{3/2}} \dots\dots\dots (2)$$

これに、夫々適當なる數値を入れて計算すると中心から任意の距離並に任意の時間に於ける温度が與へられる事になる。第1表はその計算値を示すものである。

第1表 (A) 瞬間的點熱源

t_{sec}	中心より r cm の温度					
	0	.05	.075	.1	.15	.2
0	∞	0	0	0	0	0
.001	14350	4111	862	97	2	0
.002	5074	2716	1244	416	20	2
.003	2762	1820	1081	521	65	3.5
.004	1794	1313	888	514	108	12
.005	1283	999	730	472	135	23
.006	976	793	611	424	150	35

第2表 (B) 連續點熱源

t_{sec}	中心より r cm の温度				
	.0	.05	.075	.1	.15
.001	∞	518	54	3	0
.002	∞	1197	283	58	1
.003	∞	1041	517	154	9
.004	∞	1952	714	258	26
.005	∞	2181	876	358	51
.006	3396	1811	950	444	80
.007	1830	1303	823	470	109

又(2)式から、或 r の値に對して、 θ が最大になる條件を求めると

$$t = r^2/6x \dots\dots\dots (3)$$

今 $r=0.1$ cm にとると $t=0.00333$ 秒となり、その部分の達し得る最高温度は 526° となるわけである。

今若し問題になつて居る混合氣の發火温度が 700° とし、上の關係式がその儘用ひられるものと假定して、 700° 以上に加熱され得る r の値は 0.091 cm, その容積は 3.16 mm³ となる。

而して、 $r=0.091$ cm の處が 700° になる迄に要する時間は 0.00275 秒となる。

上の場合は、一點に瞬間的に熱が與へられたのであるが、次に總エネルギーは前と同一で或時間 T 秒に亘つて與へる場合に就て考へる。これは(2)から

$$Q=q\int_0^T \frac{e^{-r^2/4\kappa t}}{8c(\pi\kappa t)^{3/2}} dt \dots\dots\dots (4)$$

但し $t < T$, $q = \frac{Q}{T}$ である。Morgan 等はこの式を簡單にして、 $Q=0.001$ cal, $T=0.005$ 秒として θ , r , 及 t びの数値を計算して第2表の如き結果を得て居る。

これから、 700° 以上に加熱され得る容積として 2.62 mm³ ($r=0.0855$ cm; $t=0.006$) なる値が得られた。

Morgan 等はこの容積を以て、上記熱源の点火能の基準となし得るものと考へ、上の結果から、瞬間的熱源に比して、連續的熱源の方が、点火能は17%小さいと云ふ結論を下した。換言すれば、一定の熱量を以て点火するには、なるべく敏速に與へる方が有效であると云ふのである。尙熱源が點狀でなくて球狀である場合に就ても計算して居るがこれは省略する。

扱、次に点火に用ひられる火花の種類に就て考へる場合に誘導火花 (Inductance Spark) と容量火花 (Capacity spark) の二つがよく對立的に引合に出されるのであるが、前者は先に Thomson が用ひた様な分離火花に對應するものでそのエネルギーは $\frac{1}{2} L i^2$ で與へられる。而して容量火花は、蓄電器が火花間隙を横切つて放電する場合の火花に相當し、そのエネルギーは $\frac{1}{2} C V^2$ で與へられるものとされて居る。但しこれは電氣エネルギーが全部火花のエネルギーとなつて放電すると云ふ假定を含むものである。而して誘導火花と容量火花の最も著しい性質の相違は前者が比較的持続性を有するに比し、後者は遙に瞬間的であつて強光を發する點に在る。之を前述の熱作用説から見ると、總エネルギーが一定の場合には、容量火花の方が点火能力は大きいと云ふ事になる。Morgan 等は實際メタン-空氣に就て之を實驗して見た結果、点火に必要な最小エネルギーとして

容量火花..... 0.002 Joule

誘導火花..... 0.006 Joule

と云ふ結果を得たので、彼等の所謂熱作用説の正しい事が證明されたものと考へたのである。

Morgan は更に、火薬を加熱金屬線 (抵抗 1Ω) で点火するに要する最小エネルギーと加熱時間との關係を求めて第3表の様な結果を得て居る。即ちこの時にも、加熱時間が短かい方が点火能率がよくなつて居る事が示されたので、これも熱作用説の歸結に一致するものである事を指摘し、原理的には固體も氣體も根本的に違ふ理由はないと述べて居る。

併し、火花電極の性質、形狀その他の實驗條件に依て、實驗結果は甚しく不一致を示すものであつて、上述諸説が完全に實驗的に證明されたわけではない事は一般に認められて居る處である。尙 Thomson は直流に比して交流の方が点火能が小さいと主張して居るが、これも Morgan Wheeler 等は再現する事が出来なかつた。

第3表 加熱電線に依る火薬の点火
エネルギー

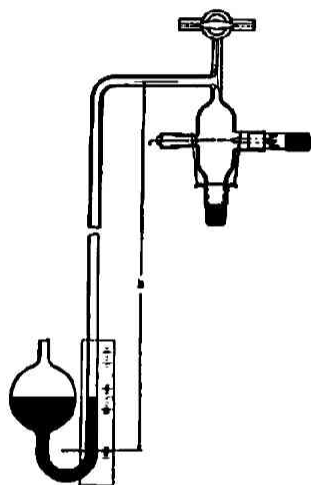
加熱時間 t sec	加熱電流 i amp	点火エネルギー $i^2 R t$
0.1	0.38	0.0144
0.08	0.4	0.0128
0.06	0.415	0.0103
0.04	0.44	0.0077
0.03	0.48	0.0069
0.02	0.53	0.0056
0.01	0.66	0.0044
0.005	0.89	0.004

併し, Coward-Meiner 等に依て行はれたメタン-空気の火花点火に関する実験は熱作用説を支持するものとして注目されて居るから次に之に就て述べる。

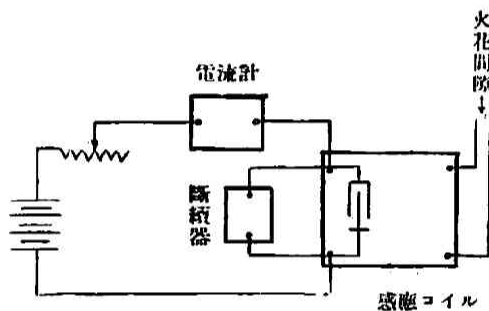
III 単一火花に依る反応量

混合氣に火花を通じて發火しない場合にも, 多少反應が起つて居る事はよく知られて居る所であるが, Coward-Meiner 等はメタン-空気に就て丁度点火が起らない程度の火花を用ひ數千回の放電の結果, その總反應量を測定し, これから平均一回の火花に依て反應する混合氣の容積を計算し, 点火の起る爲に必要な最小反應量を求めんとしたのである。

實驗裝置としては第1圖の如きものを用ひた。



第一圖



第二圖

火花電極は直徑 0.52 mm の白金線を用ひ, 火花間隙はネジで加減出来る様になつて居る。反應容器は 23~38 cc で, 石灰ソーダを底に入れて炭酸ガスや水分を吸収させる様にしてある。

火花は主として第2圖の様な様式で感應コイルの一次電流を断続して發生する二次回路の火花を用ひ, その強さは一次電流の強さで加減するのである。反應には數千回の火花を用ひるのであるが, それらの火花がなるべく一樣に出る様に, 電極の端から少し離れた處に100萬分の4の臭化ラヂウムを含む物質を附着させた。火花が一樣である事は, 5000回の火花に就て平均反應量が一定して居る事や, 寫眞撮影法で直接火花の形を撮影して確めてある。但し電極が汚れて來ると火花が不規則になるから, 時々電極は磨かねばならない。反應後のガスの分析には Bone-Wheeler の裝置を用ひた。

實驗例を一つ述べると次の様である。[8.5% CH_4 + 空氣] は, 火花間隙 0.52 mm で, 一次電流 1.45A の時に点火するが, 1.40A では 5500 回火花を飛ばしても点火しない。(1.45—1.40A の間の一次電流を用ひると火花を飛ばして居る中に途中で点火する。) この 5500 回の火花に就て反應に依る容積減少は 0.20 cc, メタンの割合は 8.49% から 7.38% に減少を示した。平均溫度は 23°C, 氣壓は 752 mm であつた。結局反應したメタンの量は 0.276 cc で, 單一火花に就て 0.050 mm^3 と云ふ事になる。そしてこのメタンは始めの混合氣 0.59 mm^3 中に含まれ

て居たのであるから、始めの混合気は、単一火花毎に 0.59 mm^3 宛燃えたと云ふ事になる。(この場合これが点火に要する最小燃焼容積である) 火花間隙を長くすると、点火に要する最小一次電流は低下するが、最小燃焼容積には大して變りがない。實驗結果を總括すると第4表の様である。

第 4 表

メタンの濃度 $\text{CH}_4, \%$	6.22				8.33	8.49		11.18		
點火一次電流	2.40				6.33	1.45		2.80		
實驗一次電流	2.35	2.35	1.50	1.50	1.50	1.40	1.20	2.75	2.00	1.50
單一火花に依る反應量; mm^3	1.40	1.50	0.72	0.81	0.77	0.59	0.39	1.01	0.53	0.21
反應量 電流	0.60	0.64	48	54	51	42	32.5	0.37	265	14
反應量 電流 ²	25	27	32	36	34	30	27	13	13	09

第 5 表

$\text{CH}_4, \%$ (初濃度).....	6.22	8.33	8.49	11.18
$\text{CH}_4, \%$ (反應).....	2.12	2.26	1.23	2.80
$\text{CO}, \%$ (生成).....	1.25	1.26	0.74	1.99
$\text{CO}_2, \%$ (生成: 計算値).....	0.87	1.00	0.49	0.81
$\text{H}_2, \%$ (生成).....	0.51	0.36	0.49	1.46
$\text{H}_2\text{O}, \%$ (生成: 計算値).....	4.03	4.16	1.97	4.14
$\text{O}_2, \%$ (消費: 計算値).....	3.51	3.71	1.85	3.88
(同上: 實測値).....	3.58	3.90	1.94	3.92
CO_2/CH_4 (反應).....	41	44	40	29
$\frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4$ (反應).....	95	92	80	74

この表からメタンの含量が 8.45% 附近の時最も點火し易い事、(點火一次電流が最小) 及びこの濃度の時單一火花當りの最小反應量が最小である事がわかる。火花放電を終つた後の反應氣體を分析した結果を示すと第5表の様になつた。この中一酸化炭素の割合が比較的多い事は注意すべき事である。

次に、先に述べた Morgan 等の熱作用理論の(1)式に(2)式を代入すると、

$$\theta_m = \frac{\sqrt{\frac{4}{3}} Q e^{-3/2}}{c \pi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)} \quad \text{.....(5)}$$

この θ は、熱源から r なる點の達し得る最高温度である。今この θ 以上になり得る球狀容積を V とすれば $V = \frac{4}{3} \pi r^3$, そして、空氣の比熱を $c = 0.00032$ とすると、

$$V = 964 Q / \theta_m \quad \text{.....(6)}$$

然るに Morgan の實驗に依ると 8.8% のメタン空氣混合気を丁度點火するに要するエネルギー Q は 0.0009 cal (但し火花間隙 = 1.00 mm)。今この値を(6)式に代入し、 θ の任意の値に對して V を計算すると次表の如くなる。

この V は結局、火花に依て點火が起る爲に反應すべき最小燃焼容積に外ならないものである。而して實驗

第 6 表

$\theta_m, ^\circ\text{C}$	V, mm^3	$t, \text{秒} \times 10^3$
700	1.24	3.4
1000	0.87	2.7
1200	.72	2.4
1500	.58	2.0

條件は Morgan の場合と大分異なるが、第1表に示した最小燃焼容積と比較して可成り近い値である事は、上の様な熱作用理論の妥當性を裏書きするものの如く考へられたのである。

IV 電氣的勵起作用説

上述の如く、Morgan 等及び Coward 等は、火花点火現象を熱作用として説明せんとするのであるが、之に對して Finch 一派はその電氣作用なる事を主張したのである。但し、一時は Thomson の云ふ様に電離作用説をとつたが、結局は、反應分子が電氣的に勵起されて、その濃度が或限界に達した時に点火されると云ふ説を唱へた。之を電氣的勵起作用説 (Electric excitation theory) と云ふ。次にその根據とする實驗的事實に就て述べる。

(1) 陰極燃焼反應 (Cathodic combustion)

Finch 及び Cowen⁵⁾ 等は、酸素水素電解ガス (約 90 mm 以下) 中で直流放電 (4~5 mA) を行はしめ、電流と反應量の關係を觀察した。第3圖はその實驗裝置である。S は夫々 No. 12 S.W.G. の銅製導線で、之に接続した e_1 及び e_2 は No. 20 S.W.G. の火花電極で、白金或は銅を用いた。反應容器は約 100 cc でその下部に濃硫酸を入れて水銀壓力計に直接連結してある。

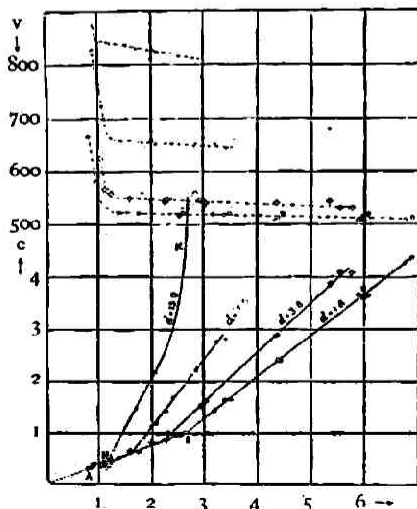
その代表的な實驗結果を圖示すると第4圖の如きものであつた。即ち反應量 c (1分間に反應した氣體の N.T.P. 容積 cc) と放電 $\times$ 流 i との關係は二本の直線で表はされる。そしてその初めの部分 AB 部分は、火花間隙 d を變へても殆ど變らぬが、後の部分は d に依て著しく變る。併し、AB 部分も陰極金屬の種類を變へるとその傾斜が變るのである。(第5圖)。

即ちこの結果を見ると、電流の小さい時には反應は陰極金屬の影響を著しく受け、且つその反應量が電流に比例するか、電流が大きくなると、電極の影響は小さくなる傾向が認められる。

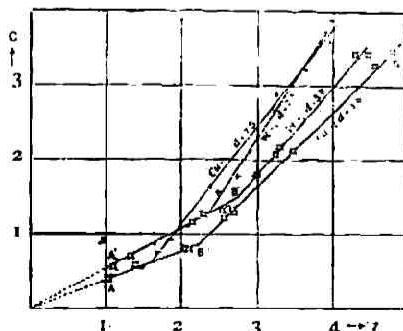
Finch 等はこの事實から、放電 $\times$ 流の小さい時の反應が、主として陰極附近



第三圖



第四圖



第五圖

で行はれて居る事を指摘し、之を陰極燃焼 (Cathodic combustion) と呼んだ。(この場合、陰陽電極附近は共に暈光に包まれて居る。)

次に、全壓力の 200 mm~4 mm の範囲で反応管全體に点火が起る迄電流を増加して、その時の壓力と点火電流の關係を求めると第 6 圖の様になつた。四本の曲線は何れも白金電極を用ひたもので、(IV) 丈は硫酸の無い場合である。大體(I), (II), (III) に就て夫々

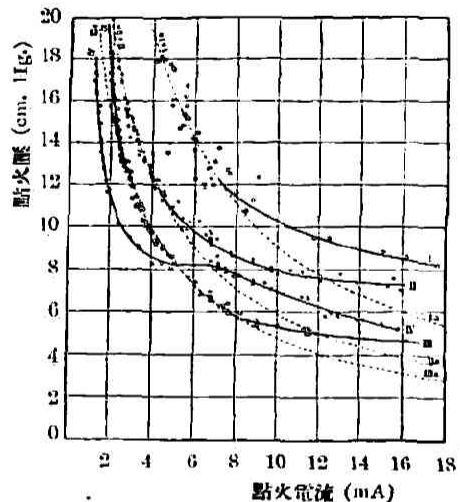
$$p(i+1.5)=105$$

$$p(i+1.5)=68$$

$$p(i+1.5)=55$$

で現される様な双曲線關係の成立する事が認められた。

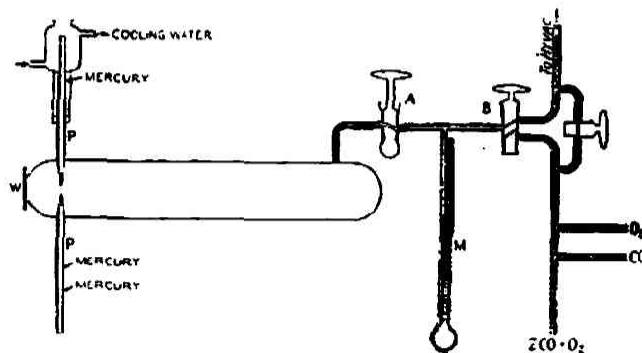
以上の様な反應量と電流の關係から、Finch 等は一時、この種の放電反應は、氣體の電離過程に對應するものであると考へて、Thomson と同様に電離作用説を唱へた。上の事實は又一酸化炭素爆鳴氣に就ても同様に認められる事が確められた。⁽⁴⁾



第六圖

(2) 陰極燃焼反應の分光學的研究

前述の如く若し放電に依る反應が電離過程に對應するものならば、陰極燃焼反應に際して、陰極附近に現れる光茫の中に、夫々反應氣體分子のイオンに相當するスペクトルが認められる筈である。そこで第 7 圖に示す様な装置を用ゐて Finch 及び Thompson⁽⁵⁾ 等は $[2CO+O_2]$ 中で放電を行ひつゝ、その陽極柱及び陰極發光帶の分光寫眞を撮つて見た處が、一酸化炭素分



第七圖

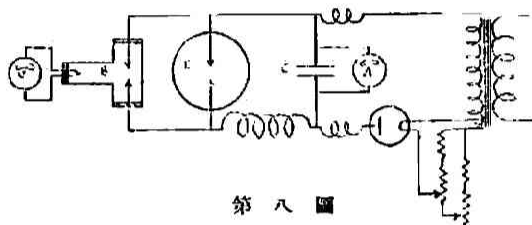
子及び電極金屬原子の勵起状態にあるものゝ存在する事は檢出されたが、CO 分子のイオンは檢出する事が出来なかつた。こんな實驗事實から考へて、放電に依る点火過程に於ては必ずしもイオンの存在を必要としない、唯適當に勵起された分子或は分子の濃度が或程度以上出来ればよいと云ふ事になつた。但し Finch 等はこの分子の勵起作用は電氣的に行はれると考

へるのであつて、單に火花の熱作用に依るとは考へないのである。この意味に於て、上の考へ方を電氣作用説中の“勵起作用説”(Excitation theory)と呼ぶ。

(3) 放電周波數と點火能

Finch 及び Thompson⁹⁾等は、更に火花放電の周波數との關係をしらべて見た。と云ふのは、前記熱作用説に依れば、火花エネルギーになる可く短時間に集中して與へられる方が點火に有效であると云ふ事になるが、それならば火花放電の周波數が大になつた方が果して點火能は大きくなるか如何かと云ふ事を實驗的に確めて見る必要があるわけである。

Finch 等は火花放電回路としては、第8圖の如きものを用ひた。即ち E が反應に用ひる火花放電管でその火花エネルギー及び周波數は、蓄電器 C 及びインダクタンス L に依て調節さ

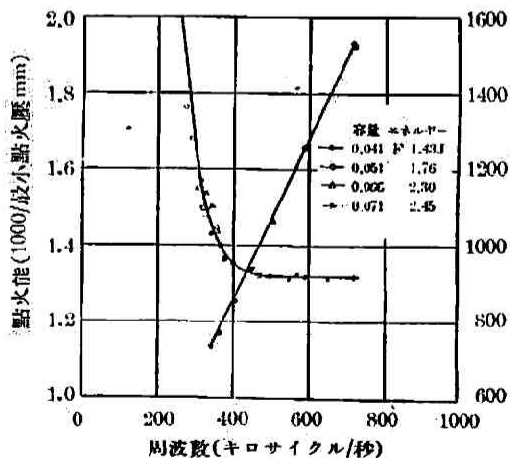


第 八 圖

れ、周波數は、別に周波計に依て測定される。火花エネルギーは B なる補助火花間隙部分の大體の溫度を、熱電對に依て測つて比較する。火花電壓は補助間隙 B に依て 8300 V に保つておいて、次に反應管 E の可動電極間隙を縮めると任意に火花が発生されるわけである。その火花の點火能の基準としては、最小點火壓力の逆數を 1000 倍した數値をとる事にして居る。斯くして得られた實驗的結果を一括して圖示すると第9圖の様になつた。即ち之を見ると一定の蓄電器容量に對して、周波數が減少する程、却て點火能が向上して居る事がわかる。而も、周波數が減少する程、放出エネルギーは減少して居るのである。且つ、總火花エネルギーよりも寧ろ、周波數の方が、點火能に對して大きな影響を示して居る事がこの實驗に依て示された。

要するにこの實驗に依て、誘導回路を通して行はれる蓄電器の放電に依て發生される火花の點火能力は、その周波數に依て著しく影響され、或程度周波數を低下させると全エネルギーとしては減少して居ても點火能は却て増大する事さへあり得ると云ふ事が示された事になる。この結果は、前述熱作用説の歸結即ち、エネルギーの供給が時間的に集中される程點火能は大になると云ふ事と相反する事になつたわけである。従て、この事實から見ると、火花點火反應の機構は、純粹に熱作用のみに依つては説明出来ないと云ふ事になる。

Finch 等は、放電周波數が大きい時には電離作用が強くなるが、周波數が小さくなると中性



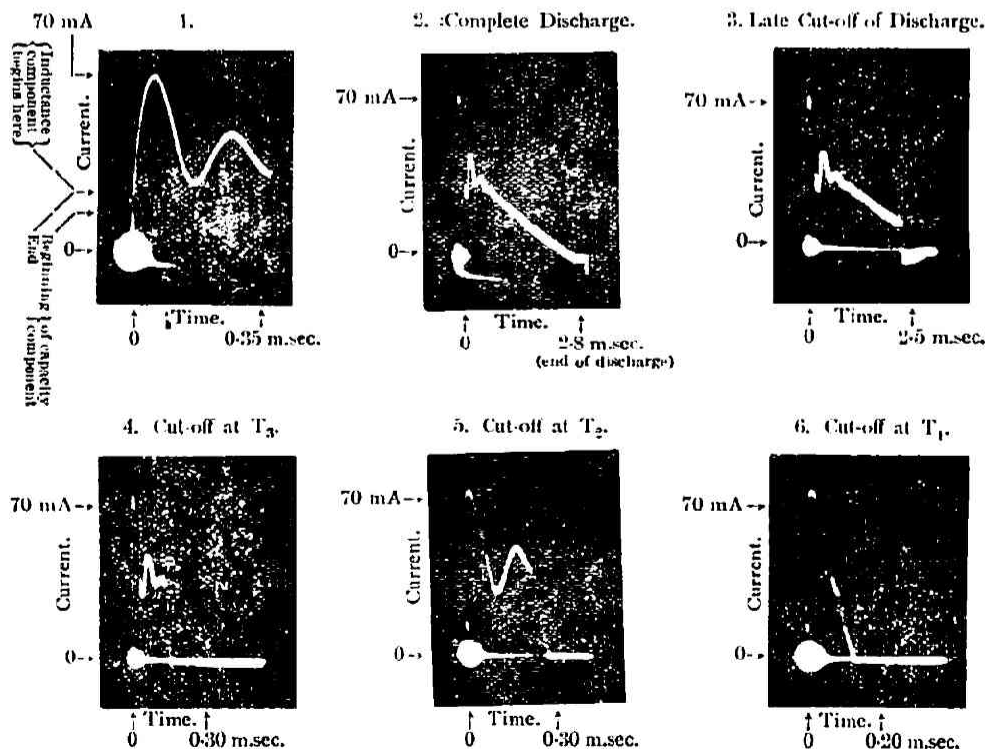
第 九 圖

勵起分子や原子が多くなると云ふ事實と比較して、この場合も、電氣的勵起作用が點火過程の主要なるものであると考へたのである。

(4) 火花成分と點火能

前節の實驗に依て、周波数の大きな火花が必しも大きい點火能を示さないと云ふ事が示されたのであるが、單一の火花も實は一通りのものではなくて、先づその回路の容量に相當した放電が極めて短時間に強光を放つて現れ、之に續いて、回路のインダクタンスに對應した比較的持続性のある放電が微弱な發光を伴つて現れる事が知られて居る。即ち一般に火花は、容量成分と誘導成分とからなつて居るとされて居るのであるが、然らば、單一火花の場合、このどちらの成分が點火過程に際して有効かと云ふ事が問題となる。Morgan 一派の熱作用説に依れば、主として容量成分が點火作用に與るものであつて、誘導成分は二義的のものであると解釋されて居る。然るに、Wheeler⁹⁾ や Maxwell-Wheeler¹⁰⁾ に依れば、パラフィン-空氣系の點火條件を比較する爲には、イグニションコイルの一次電流の切斷を一定にする必要があると述べて居る。

處がこの様な一次電流の切斷法の影響が現れるのは一次回路の誘導成分の方であつて、二次回路の容量成分の方ではないと云ふ事が既に、Finch 及び Sutton¹¹⁾ 等の陰極線オシログラフに依る研究に依て確められて居るので、上記 Wheeler 等の實驗事實は、電氣點火に誘導成分が効いて居る事を意味する事になつて、Morgan 等の熱作用説と矛盾する事になるわけである。そこで Finch、Bradford 及び Prior¹²⁾ 等はエンデン用イグニションコイル (Lucas 型) を



第 十 圖

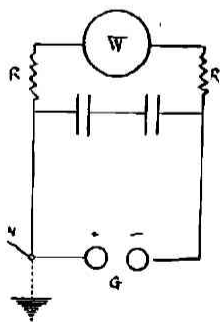
用ひ、 $(2\text{CO} + \text{O}_2 + 5\% \text{H}_2)$ 及び $(\text{CH}_4 + 2\text{O}_2)$ なる混合氣中でその點火能と火花成分との關係をしらべて見た。容量成分を一定にしておいて、誘導成分のみを變へるのには、コイルの一次電流を遮斷する時間を微小に調節する事に依て行はれた。〔英國特許：381, 917(1932)〕。第10圖に示す寫眞は放電の始めの部分が一定で後の部分が順次減少して居る事を示す陰極線オツシログラフ寫眞である。その結果、果して誘導成分を次第に減少させるに作つて、點火能は漸次減ずる事が確認されたのである。但しこれは壓力が $0.1 \sim 0.2$ 氣壓程度で、混合氣の溫度が低く、且つ靜止して居る場合である事を忘れてはならない。こんな條件の下に於ては、誘導成分も點火過程に與つて居ると云ふ事になるわけである。

そこで、Finch 及び Mole¹³⁾ 等は標準四行程エンジンに就て更に同上の實驗を試みた結果、この場合には、誘導成分切斷の影響は殆ど認められなかつたので、實際に用ひられて居る様な内燃機關の火花點火に於ては、熱作用説で主張する様に、點火作用は大體容量成分に依て行はれて居ると考へても差支へがないらしいと云ふ事になつた。この結論は望月氏等¹⁴⁾に依ても認められて居る處である。

V 火花放電現象と火花點火

曾て理研寺田研究室に於ては火花放電現象に關する詳細な研究が行はれて居たが、この研究に關聯して火花點火現象に就ても注目すべき實驗的研究が報告されて居るので、その概略に就て述べる。

寺田、中谷兩氏¹⁵⁾の研究に依れば、空氣中に於て、比較的間隙の長い電極間に、第11圖に示す様な結線に依て、直流電壓を與へ、且つ陽極側を地絡したり、或は之に針をつけておくと、そこに發生する火花は、大略直線に近いばかりでなく、電極に近い部分と中央部分とで明かに性質が異なる事が知られて居る。第12圖はその一例である。之に對して、三部火花 (Three part spark) と名付けられたが、その後、中谷、藤岡兩氏¹⁶⁾が、この火花を分光學的にしらべて見る

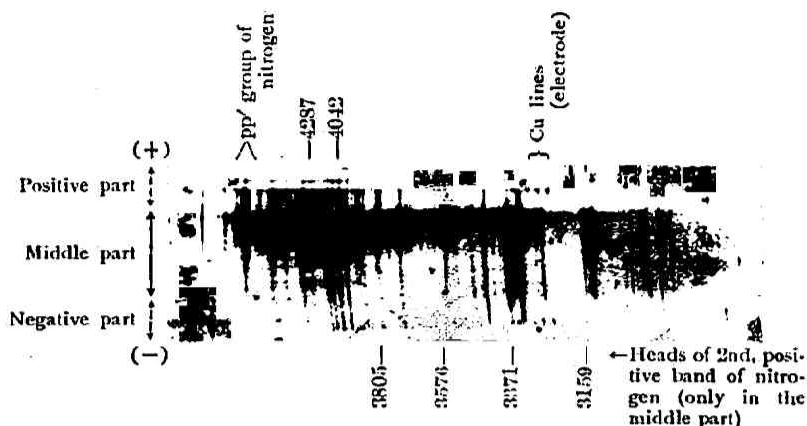


第十一圖



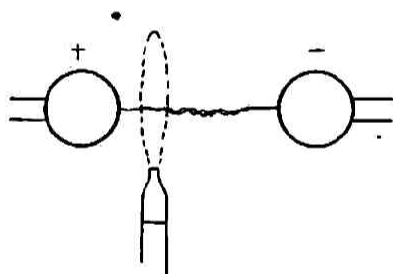
第十二圖

と、第13圖寫眞に示す様に電極に近い部分と、中央部とでは氣體分子 (特に窒素分子) の勵起状態が違ふ事が明瞭になつた。即ち三部火花の中央部分には窒素の Second positive band が現れるに對して、電極附近では、所謂空氣の火花線スペクトルが認められるのである。斯く火花の部分に依て勵起状態が異なる以上、その化學作用も當然異なる事が豫想されるが、寺田、湯本及び山本氏¹⁷⁾等は、三部火花の各部分に第14圖に示す様な方法で、石炭ガスの細流を吹きつけ

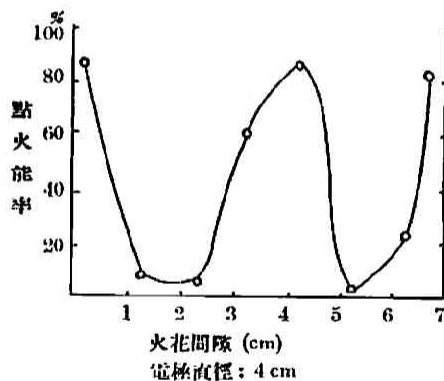


第十三圖

てその點火能を比較して見ると、第15圖に示す様に、電極に極めて近い部分と中央部分とに於て特に點火能が大きく各部の境界部分では最低になる事がわかつた。電極表面に近い部分の點火能が大きい事は姑くおいて、(窒素)分子勵起作用の強い中央部の點火能が大きいと云ふ事は、先に述べた Finch 等の勵起作用説と期せずして一致を示した事になる。

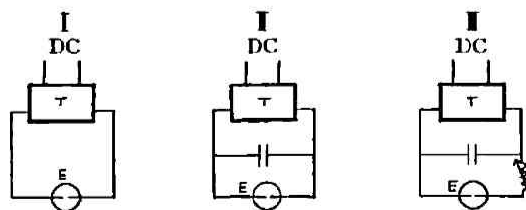


第十四圖

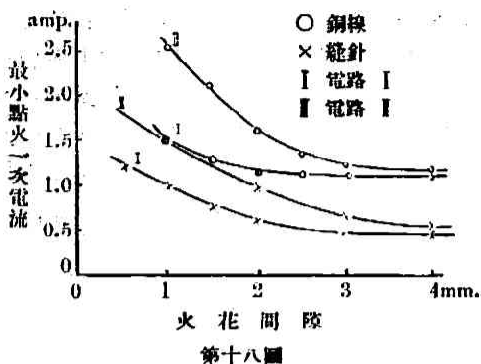
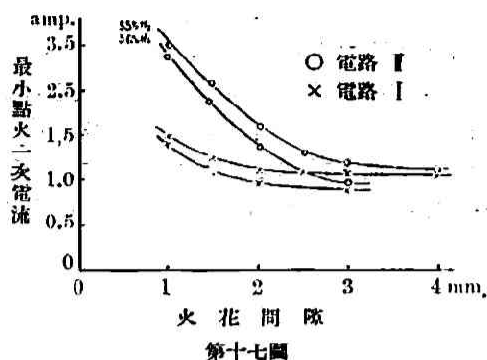


第十 五 圖

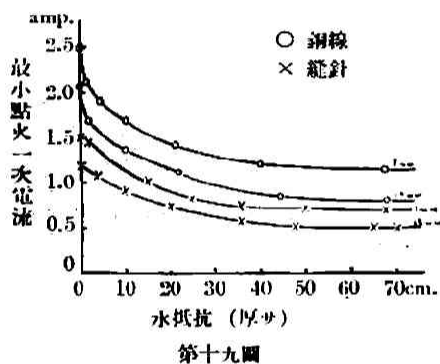
更に寺田及び湯本氏¹⁰⁾等は、第16圖に示す様な變壓器の一次回路を切斷する時に、二次回路に發生する火花の點火能を比較して、第16圖(Ⅱ)の様に火花間隙と並列に蓄電器を挿入すると、その容量を増す程火花の光度は強くなるが、點火能は却て減少する事を認めた。(第17圖及び第18圖参照)。



第十六圖



但し此の時點火能は、點火に必要な最小一次電流に依て比較された。そして氣體は[16%CO + 84%空氣]で、比較的燃え難い種類のものであつた。然るに、第16圖(II)の様に火花間隙と直



列に抵抗を入れると火花の光度は遙に減衰するが、點火能は増す傾向が認められたのである(第19圖)。そこで湯本氏はこれら夫々の場合に現れる火花のスペクトルを撮つて見ると¹⁰⁾、蓄電器を入れた場合には、空氣の火花スペクトルの様に線狀スペクトルが現れるが、(第20圖a)之に抵抗を入れると三部火花の中央部のスペクトルの様に帶狀スペクトルが認められた(第20圖b, c, d)この後の場合は、火花の光度が弱く、電光様のもので、持続時間が比較的長く、誘導

成分の多い火花と考へられるが、この結果は、誘導成分の點火能を認めた Finch 等の研究結果とも一致する處である。但し寺田氏及び Finch 等の實驗は主として、濃度或は壓力の下限界に近い場合に關するものである事に注意す可きである。

尚、熊谷氏の意見に依れば¹⁰⁾、火花回路の容量を増すと、放電々壓が低下するから、總火花エネルギーが減少して點火能が下ると云ふ事も考慮に入れなければならないと云ふ事である。



電極：鐵針；火花間隙：1.5 mm；一次電流：1.5 A.
容量：一定

抵抗：a..... 0 cm
b..... 0.5 cm
c..... 5. cm
d..... 12. cm

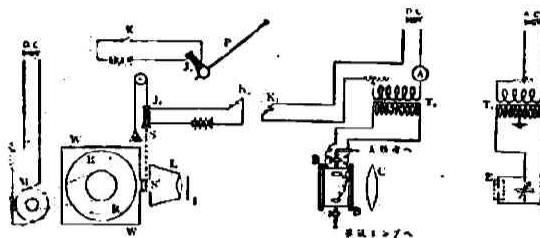
水抵抗
管徑 3cm

第二十圖

VI 火花點火に依る火焰の傳播

次に、火花に依て點火された火焰は果して、如何なる形式をとつて燃え擴つて行くか、之に關する實驗は多くの人々に依て行はれて居るが、その中 代表的な實驗例として湯本氏の

シュリーレン法²⁰⁾を紹介する。第21圖はその實驗裝置の概要である。即ち、Eは照明用の火花間隙で電極は白金線を用ひ1秒間に100回の火花が飛ぶ様に調節してある。そして、火花の位置を一定にする爲に素焼の板で兩側から抑へてある。Bは反應容器で直徑6.9cm長さ5.0cmの眞鍮の筒でその兩端は厚さ約6mmの光學的平面硝子で覆はれて居る。點火用電極には、變壓器T₁の二次回路を用ひ、一次回路の電流がK₁なる電鍵に依て切斷される瞬間に、點火火花が飛ぶ様になつて居る。Iは細い棒で、Eから發する火花の光が、集光レンズCに依つて



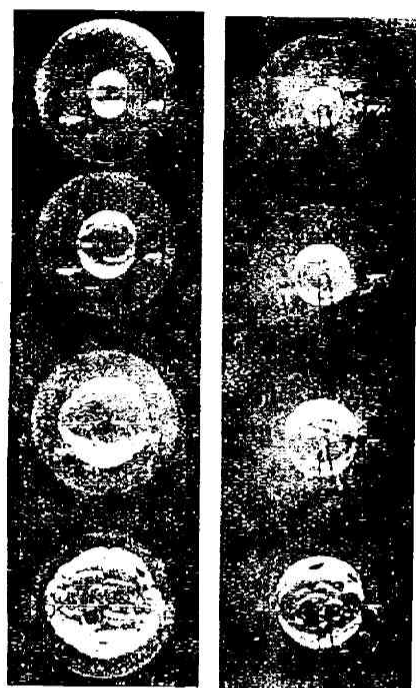
第二十一圖

丁度この上に集まる様になつて居てこの儘では、火花の光は撮影器Rに入らないが反應管内の一部に反應が起き部分的に屈折率が變ると火花の光が、撮影器に入つて、變化を生じた部分の像が、撮影されるのである。實驗操作を述べると、先づBに混合氣を入れ、鍵K₁を閉ちて、振子Pを電磁石J₁に吸着させる。そして、鍵K₂、K₃を閉ちて各回路に電流を流す。シャッターSSは引上げてJ₂に吸着させて置く。感光フィルムを捲き付けたドラムは電動機Mに依て任意の速度で回轉しておく。次に變壓器T₁に交流を通じてEに火花を飛ばしておく。

然る後暗箱の戸を開けて鍵K₁を開くと、振子PはJ₁を離れて、K₂を切つてシャッターを開け、次でK₃を切つて混合氣に點火する。フィルムを捲いたドラムが一回轉しない前にシャッターが落ちて、再び光線を遮斷する。これで一聯の寫眞がとれたわけである。〔CO+空氣〕及び〔H₂+空氣〕及びその混合體等種々の組成の氣體に就て行つた結果、〔第22圖及び第23圖に示す様な記録が得られた。即ち火焰の傳播狀態が100分の1秒おきに撮影された事になる。

第22圖は、火焰傳播に及ぼす電極の影響を示すもので、點火初期には一旦電極に對して直角の方向に延びるが次には電極の方向に向つて延びる。然るに二本の電極を平行させておくと焰は殆ど球狀をなして擴るのである。之を見ると初期には電極の冷却効果が現れ、後には加熱せられた電極の燃焼促進効果が現れて居る様に見える。

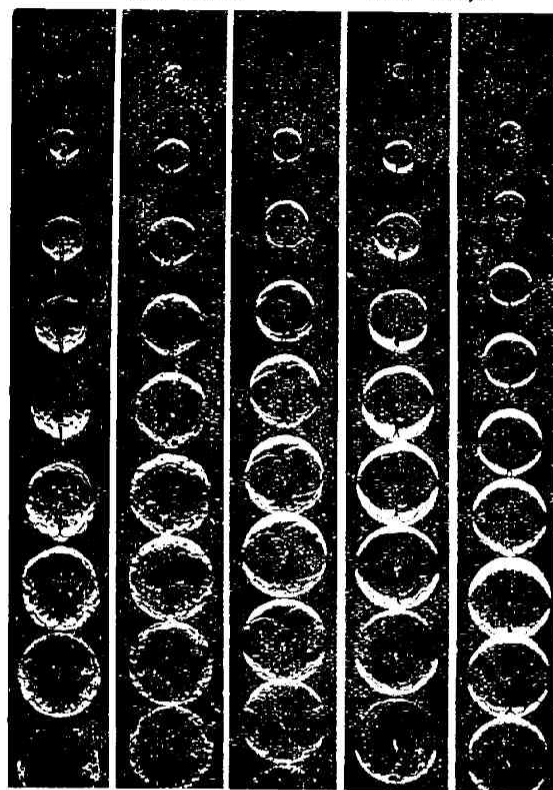
次に第23圖に於て注意すべき事は、〔CO+空氣〕の場合に比し、水素が混入した場合には、火焰の前面に著しい積雲狀の皺が現れる事である。これは特に酸素を用ひた時に著しい。そしてこの皺は、水素の含量を増したり、混合氣を硫酸で乾燥させたり、或は電極の大部分を硝子で包んで先端突出す様にしたりした場合にも減少すると云ふ事である。又一般に電極が大きい程この皺は現れ易い。こんな事から考へるとこの皺は、反應に依て生じた水蒸氣が、冷却されて凝縮する事に起因するのではないかと解釋された。更に注意すべきは、この皺の出來方が、臭化エチルとか、沃化エチルの様な所謂アンチノック劑の混入に依て減少する事である。これは、火焰先端に皺の出來ると云ふ事と、ノッキングとの間に何か關係がある事を暗示するものかも知れない。



第二十二圖

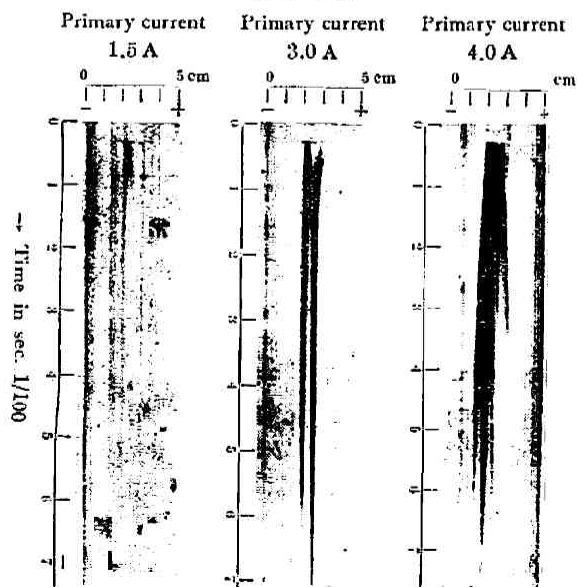
A = $\begin{cases} \text{H}_2 & 10.5\% \\ \text{Air} & 89.5\% \end{cases}$

B = $\begin{cases} \text{CO} & 18.5\% \\ \text{Air} & 81.5\% \end{cases}$

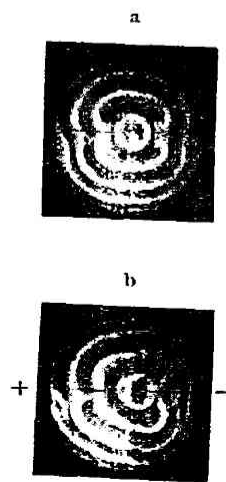


A = 100% B = 0 A = 80% B = 20% A = 50% B = 50% A = 20% B = 80% A = 0 B = 100%

第二十三圖



第二十四圖



第二十五圖

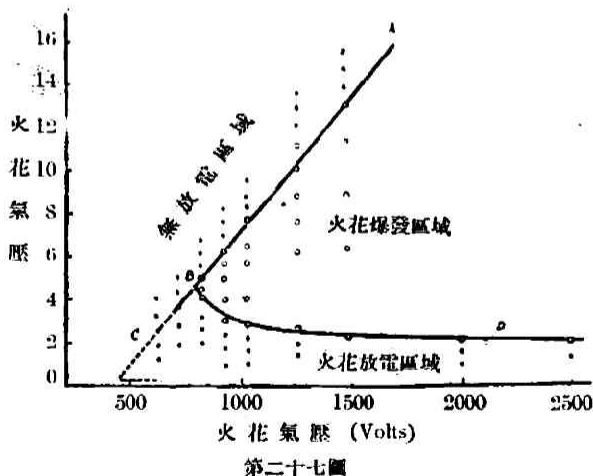
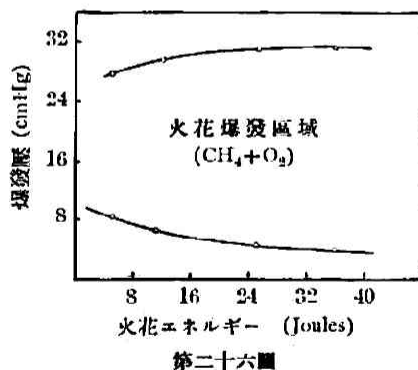
上の實驗は、照明用光源として間歇的な火花を用いた場合であるが、連続光源を用いると第24圖の様な記録が得られる。この記録から火花の何の部分から點火され易いかと云ふ事が示され、前述三部火花の點火能に關聯して興味深い處である。又、弱い火花が電極に吸付けられて消えて了ふ事なども之に依て明瞭に示された。

火花で點火された火花が電極に吸付けられると云ふ現象は、Guennault 及び Wheeler 等の撮つた寫眞²⁴⁾〔第25圖 (a), (b)〕に依ても明瞭に認められる。但しこれは〔メタン⁵空氣〕混合氣の場合で、火花の光に依て直接に撮影したものである。而して感光フィルムは固定しておいて、間歇的に露出して得た一種のスナツプショットである。

(a) の方は電場を與へぬ場合、(b) の方は 3000V/cm の電場を與へた場合で、陰極の方に火花が引付けられて居る事が認められる。

VII 火花點火と上限界壓

高温度に加熱された容器内で起る低壓氣體爆發反應に於ては、或一定温度で氣壓が或限界値以上になると爆發が起らないと云ふ事實が認められて居る。之を上限界壓 (Upper pressure limit) と呼び氣體爆發反應の動力學的研究に於て特に注意されて來たものである。而して、この現象は所謂連鎖反應機構説に依て充分説明し得るものとされて居る。更に Lavrov 及び Bestchastny²⁵⁾ 等は火花爆發の際にも、この上限界壓が認められる事を指摘し、連鎖反應説を支持するものとした。第26圖はその實驗結果を示すものである。



然るに早川後藤等の²⁶⁾實驗に依ると、爆發壓と火花電壓（火花エネルギーに對應する値）とに關して、第27圖に示す様な結果が得られた。之に依ると一見火花爆發の場合にも上限界壓が存在する様に見えるが、實驗事實をよく見ると、この限界線は、爆發反應の限界線であると同時に火花放電の上限界線で、この壓力以上では火花が出ないのである。これは、火花放電現象と爆發反應とがその初期過程を共有する可能性を暗示するものであつて、火花放電に依て爆發反應が誘起されると云ふより寧ろ、火花放電の起る様な作用場が、化學的活性化の作用場にもなり得ると云つた方がよいのではないかとさへ考へられる。

何れにしても火花點火現象は、火花放電現象と爆發反應とが重疊したものであつて、而も、その二つの現象共に、随分古くから知られて居り乍ら今尚充分解決されては居ない種類のものである。今後に残された處が多いものと思はれる。

(昭和17年5月10日)

文 献

- 1) Thornton; *Proc. Roy. Soc., A*, **90**, 272, (1914).
- 2) Morgan; *Fuel*, **11**, 452 (1932); *Phil. Mag*, **49**, 321 (1925).
- 3) Taylor-Jones, Wheeler and Morgan; *Phil. Mag.*, **43**, 359 (1922).
- 4) Coward-Meitner; *J. Am. Chem. Soc.*, **49**, 396 (1927).
- 5) Finch-Cowen; *Proc. Roy. Soc.*, **111**, 257 (1926); **116**, 529 (1927).
- 6) Finch-Hodge; *Proc. Roy. Soc.*, **124**, 303 (1929); **125**, 532 (1929).
- 7) Finch-Thompson; *Proc. Roy. Soc.*, **129**, 314 (1930).
- 8) Finch-Thompson; *Proc. Roy. Soc.*, **134**, 343 (1932).
- 9) Wheeler; *J. Chem. Soc.*, **125**, 1859 (1924).
- 10) Maxwell-Wheeler; *J. Chem. Soc.*, 2078 (1927).
- 11) Finch-Sutton; *Proc. Phys. Soc.*, **45**, 288 (1933).
- 12) Finch-Bradford-Prior; *J. Chem. Soc.*, 227 (1933).
- 13) Finch-Mole; *Trans. Inst. Automobile Engrs.*, **71** (1934); *Chem. Rev.*, **21**, 221 (1937) 参照.
- 14) 望月重雄; 電気之友, **1**, (昭14, 7, 1).
- 15) 寺田一中谷; *Sc. P.*, **8**, 103 (1928).
- 16) 中谷一藤岡; *Proc. Imp. Acad.*, **4**, 464 (1928).
- 17) 寺田, 湯本一山本; *Sc. P.*, **12**, 132 (1929).
- 18) 寺田一湯本; *Proc. Imp. Acad.*, **4**, 467 (1928).
湯本清比古, 理研報, **8**, 131 (昭4).
- 19) 湯本清比古; *Sc. P.*, **21**, 246 (1933).
- 20) 熊谷三郎; 發動機電氣點火論, 62頁 (山海堂, 昭16).
- 21) 寺田一湯本; *Proc. Imp. Acad.*, **4**, 98 (1928).
湯本清比古; 理研報, **7**, 957 (昭3).
- 22) 湯本清比古; *Sc. P.*, **12**, 294 (1930).
- 23) Guennault-Wheeler; *J. Chem. Soc.*, 195 (1931).
- 24) Lavrov-Bestchastny; *Acta Physicochim.*, **1**, 975 (1934).
- 25) 早川一後藤; 本誌, **15**, 118 (昭16); 化研講演集, 第12輯, 63頁 (昭16).