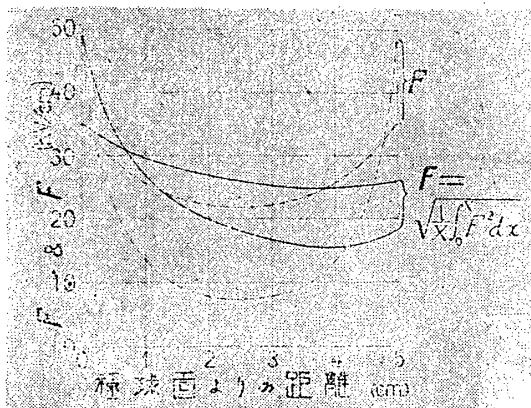


(1946 年 11 月 20 日受理)

1. 火花放電電圧の計算

著者は數學物理學會記事* 及び航空研究所彙報(邦文)に火花放電に関する研究報告を三回に亘つて発表した。その第三の部分に火花放電電圧が何によつて定まるかに就いて述べた。この報告の初めの部分は同じ問題を更に進めて考察したものである。後の部分は 300 mm までの低壓空氣中に於ける火花電圧を測定し、その結果に同じ法則を適用して計算を行つたものである。

二つの球狀電極に、地に對して對稱に(正負等値に)電壓をかけたときの極間の電場の強さは前報告第三に述べた方法で計算出来る。左方の極球面から間隙の軸に沿うて x を取り、兩極間にかけた電圧が 1 なる場合(兩極 ± 5) の、極間の任意の點 X に於ける電場の強さを ϕ で表はす。此の ϕ に放電電壓を乗すれば、放電直前の X 點の電場の強さ F が出る。第 1 圖の點線曲線は球の直径が各 2 cm 及び 10 cm なるとき間隙を兩方共 5 cm にした場合の極間の電場 F の變化を示す。

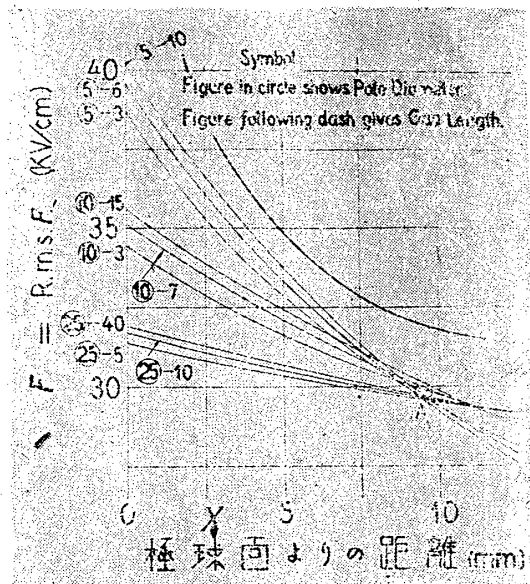


第 1 圖

電場のエネルギーは電場の二乗に比例するから、電場の二乗平均値 $r.m.s. F$ を計算する。即ち ϕ^2 を球面から X まで積分し、 X で割つて平方に開く。積分は數値積分によるか又は適當な近似數式を假定して積分する。この値を \sqrt{x} で表はす。放電電圧に \sqrt{x} を乗すれば、放電直前の極球面から X までの $r.m.s. F$ が得られる。この値を F_x で表はす。第 1 圖の實線

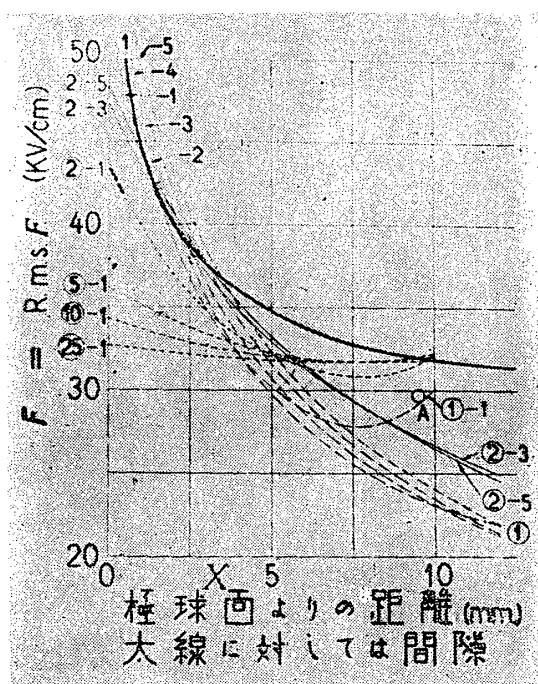
曲線は F の變化を示す。(F は左方から計算してあるから左右非對稱である。)

極球の直径と間隙距離とを色々にした場合の、極球の附近の F_x の變化を圖に引いて見ると、球が比較的大きい場合には、第 2 圖に示す様に總べての曲線が A 點の附近に收斂する。A 點の位置は、 X が約 1 cm, F が約 30 kV/cm である。これは電極の面から約 1 cm の邊までの F が 30 kV/cm に達すれば火花放電が起り、それより先の電場の強さは無關係であることを示す。



第 2 圖

然るに、極球の直径が小さい場合の曲線は、第 3 圖に示す様に A 點の附近を通らない。この場合は別に考へなくてはならない。第 3 圖の太い曲線は、平板を兩極とした場合の火花電圧を間隙距離で割つた値、即ち平均電場(この場合は $r.m.s. F$ に等しい)の値が間隙距離の縮小と共に増大する有様を示す。(この曲線に對しては X は間隙の幅を與へる。)圖で見ると F 曲線は皆 A 點よりも遙に左方で太い曲線に接觸して居る。これは極から 1 cm までの F が 30 に達しない前に、もつと短い部分(1~2 mm)の F が火花を發生する値に達して居ることを示すものである。(球直径 1 cm の各曲線は太い曲線を少し切つて居る。これは



第 3 圖

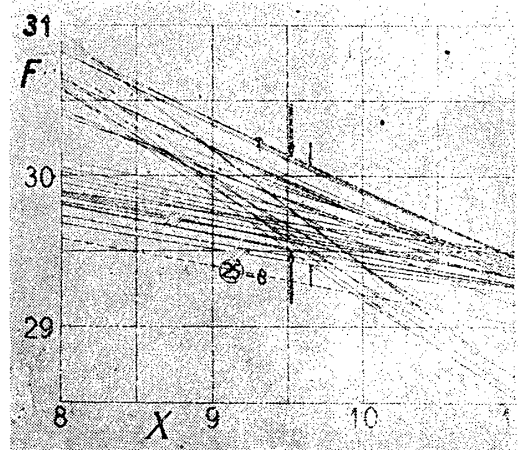
球直前の部分の電場が非常に大きい爲に、局部的放電が起つて、電場が計算通りになつて居ないのに因ると考へられる。球が小さくて間隙が長いときには、球表面に屢々微光が現れる事實と相應する。故に球が小さい場合の放電々壓は、* 曲線が太い曲線に接するまで持上げる爲に、* の値に乗すべき數値で與へられる。

次は間隙が小さい場合である。極球が大きい場合でも、間隙が 2 cm 以下では第 2 圖の條件に適用出来ないこと勿論である。間隙が 2 cm よりも小さい場合には間隙全體の r. m. s. F が平板間の放電の際の電場(太い曲線)の値に達すれば放電する。第 3 圖に間隙 1 cm の場合の F 曲線が 5 本引いてある。その中、1 cm の球の場合には太い曲線に接する。他の 4 本は上記の法則に良く合つてゐる。(右端が殆んど太い曲線上にある。)

かく間隙 2 cm 以上と以下とで放電の起る條件が異なる。故に火花電壓を間隙に對して圖示すると、曲線の曲り方が 2 cm の附近で不連続になるわけである。電壓曲線では餘り分明でないが、平均電場(電壓/間隙)の曲線を間隙に對して引いて見れば、この不連続が明瞭に見られる。

第 3 圖の型から第 2 圖の型に移るのは、球直径が 3 cm の邊である。實測の経験によれば、第 3 圖の場合が第 2 圖の場合よりも放電々壓の毎回の觀測値の變動が大きい様である。故に高電壓の測定に火花間隙を用ゐる場合には、3 cm よりも大きい球を使用する方が良いと云へる。

球が 3 cm よりも大きい場合の火花放電々壓を精密に算定する爲には第 3 圖の A 點の位置を正確に決定する必要がある。Lando t の Physikalischchemische Tabellen には、5 cm の球で間隙 10 cm まで、10 cm の球で 17 cm まで、25 cm の球で 40 cm までの火花電壓の値(Töpler, Estorf, Weiker, Peak 等の實測値)が載せてあるから、間隙 3 cm 以上の總べての値を用ゐて F の曲線を A 點の附近だけ廓大して書いて見ると第 4 圖の様になる。その中、25 cm の球の 8 cm の値(破線で示す)は他の値に比べて明に小さ過ぎるから、これを除けば X が 9.65 mm の所で最も狭くなつてゐる。更に最下方の二本を除けば 9.5 mm の邊に收斂してゐる。故に A 點を 9.5 mm に取る。(この値は少しづらゐる變つても放電々壓計算の結果には餘り影響しない。)



第 4 圖

この 9.5 mm の意義は明瞭でないが、前報告第三に掲げた火花寫眞が示す様に、火花の一端又は兩端に約 1 cm の直線部分があることはこれに關聯するものと考へられる。

そこで 5 cm, 10 cm 及び 25 cm の球につき、種々の間隙に對する 0~9.5 mm 間の r. m. s. F 即ち $F_{9.5}$ を計算すると第 1 表の様になる。この値に放電々壓を乗ずれば $F_{9.5}$ が得られる。球直径 5 cm の場合の結果を表示すれば次の通りである。

間隙	$F_{9.5}$	間隙	$F_{9.5}$	間隙	$F_{9.5}$
3 cm	29.66	6	29.55	9	29.80
4	29.58	7	29.61	10	29.79
5	29.50	8	29.79	平均	29.66 ± 0.03

(各の値の probable error は ±.09 である。)

猶ほ三種の極球に就ての全部の平均を求めると 29.75 ± 0.03 kV/cm となる。即ち probable error は極めて小さく、球面から 9.5 mm までの r. m. s. F 即ち $F_{9.5}$ が 29.75 kV/cm になれば火花が飛ぶことゝ

なる。

球直径 5 cm, 10 cm, 25 cm の外, 50 cm, 100 cm

の $\gamma_{9.5}$ の値を第1表及び第2表に掲げる。

第1表 $\gamma_{9.5}$ の表 I

Gap in cm	Diameter of Pole Spheres		
	5 cm	10 cm	25 cm
3	0.3675	0.3502	0.3400
4	3028	2763	2606
5	2658	2330	2133
6	2422	2048	1819
7	2260	1849	1596
8	2143	1703	1429
9	2055	1592	1300
10	1986	1505	11975
11	1930	1435	11138
12	1885	1377	10444
13	1848	1328	9859
14	1816	1287	9361
15	1789	1251	8934
20	1700	11327	07455
25	1649	10658	06594
30	1616	10232	06036
40		09726	05366
50		09439	04933
60		09255	04739

第2表 $\gamma_{9.5}$ の表 II

Gap in cm	Diameter of Pole Spheres		
	25 cm	50 cm	100 cm
3	0.3400	0.3367	0.3350
5	3133	2067	2033
10	11975	10980	10489
15	08934	07775	07216
20	07455	06186	05583
30	06036	04620	03956
40	05366	03857	03148
50	04983	03413	02668
60	04739	03125	02352
100	04283	02581	01738
150	04077	02333	01449
200		02219	01314
300		02112	011881
400			011297
500			010966
600			010753

第3表 火花放電電圧
(計算値と實測値との比較) I

Gap (cm)	Diameter of Poles in cm			
	5		10	
	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.
3	81.0	80.9	85.0	85.4
4	98.3	97.7	107.7	108
5	112.0	111	127.7	128
6	122.9	122	145.3	146
7	131.7	131	161.0	162
8	138.9	139	174.8	176
9	144.8	145	186.9	187
10	149.8	150	197.7	199.5
11	154.2		207.4	209
12	157.9		216.1	218.5
13	161.0		224.1	227
14	163.9		231.2	234
15	166.3		237.9	241
20	175.1		262.7	
30	184.2		290.9	
40			306.0	
50			315.3	
60			321.6	

Landoit の表にあるよりも大きい球径, 大きい間隙に對する火花電圧の測定結果の十分正確と思はれるものは見當らない様である。 $\gamma_{9.5}$ を用ゐて計算した

(29.75 を $\gamma_{9.5}$ で割る) 火花電圧を第3及4表に示す。29.75 は Landolt の表にあるだけの値から求めたものであるから, 大きいところは外挿法に依つたことになる。しかし唯曲線を引延ばした外挿法と違つて相當に信頼出来ること明である。猶ほ表には計算で求めた火花電圧: 元々算出直とが比較してある。

第4表 火花放電電圧
(計算値と實測値) II

Gap (cm)	Diameter of Poles in cm			
	25		50	
	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.
3	87.5	87.3	88.4	88.8
5	139.5	138	144.0	146.4
10	248.5	247	271	284
15	333	331	383	412
20	399	398	481	533
30	493	492	644	752
40	555	555	771	945
50	597		872	1115
60	628		952	1265
100	695		1153	1712
150	730		1276	2050
200			1341	2260
300			1409	2500
400				2630
500				2710
600				2770

2. ブラシ放電

間隙が球直径の約7倍以上になると火花が出ないでブラシ放電が起ると云はれる。大きな球でブラシ放電を出すには非常に高い電圧を必要とするから, 著者は2 cm の球で観測して, 間隙が13 cm の邊で火花からブラシに移る(この邊では火花とブラシと兩方出る)こと, 又このときの放電電圧は96.8 kV であることを認めた。この電圧は第3圖の型の火花電圧に合つてゐる。故に一般にブラシ放電も火花放電と同じ條件で放電電圧が定まるもので, ブラシの場合には間隙中央部の電場が弱い爲に, 火花がこの部分を貫いて相手極に達し得ないものと考えるのが妥當である。

上記の2 cm 球 13 cm 間隙の場合の中央の電場を計算して見ると1845 V/cm と出る。故にこの値より弱い電場は火花の芽が貫通しないと考える。5 cm 球の場合に, 放電電圧と中央部の電場とを計算して, 中央部の電場が1845 となるとところを求めると, 間隙27.7 cm, 放電電圧182.5 kV となる。又10 cm の球では51.2 cm, 316 kV となる。これ等の電圧は高過ぎて著者の有する装置では實測によつて確めることが出来ない。

唯一つの球が廣い空間にある場合にも $F_{9.5}$ が29.75 となればブラシが出るものと考えれば次の結果が得られる。

球直径	$\gamma_{9.5}$	ブラシ發生電壓
2 cm (第3圖の接觸)		50 kV
5	.2949	101
10	.1689	176

3. 低壓空氣中の火花電壓の測定

長さ及び直径各約 1m の圓錐形タンク(鐵製で兩端はエポナイトで蓋がしてある)の中の氣壓を下げて、低壓空氣(鹽化カルシウムで乾燥させた)中の火花電壓を測定した。極球間の間隙を變へることも、間隙距離を讀取ることも外部から出来る様にした。間隙の測定は 1/100 mm まで可能である。

電壓を測定するボルト計は本所工場で造つたもので、二枚の大きな平圓板を對立せしめ、その一方の中央にあけた孔からアルミニウム製の中空半球をのぞかせ、半球は反對側圓板との間の靜電力で動く様にしたものである。その運動は光の反射で物尺上に讀取る。可測範圍を變へるには圓板の距離を變へる。これを大きなブリキの箱で覆ひ、外部から来る電場の影響を無くした。又、地から絶縁する必要があるので、全體を大きな碍子の上に載せた。

火花電壓を測定する場合には、常に一圓板と覆箱とを接地し、二つの電極にかかる正負の電壓を別々に測り正負の値が殆んど等しくなる様に努力した。火花を出すときの電壓は極めて徐々に増加して、火花の出るところを讀取つた。

このボルト計の較正は次の方法で行つた。二つの同型ボルト計を並列につなぎ(一極接地)兩圓板を近づけて可測範圍を略 5000 V にし、これに高壓の發電機又は電池で 5000 V までの電壓をかけて較正する。この電壓を測定するには、高抵抗を並列に入れ、その一部にかかる電壓を良く較正した multi-cell 計で測り、抵抗の比を乗じて全電壓を出す。

次に、二つのボルト計の一方を地から絶縁し、二つを直列につなぎ、變壓器とケノトロンとで電壓をかけ第三のボルト計を並列に入れればこれを 10000 V まで較正出来る。かくして可測範圍を 10 kV にした二つのボルト計を直列につなぎ、これに第三のボルト計を並列に入れて 20 kV まで較正する。この方法を反覆して 100 kV 以上に及んだ。この方法による電壓測定の精密度は 1/1000 以上に達せしめることが出来る。しかし電壓が 70~80 kV (火花電壓測定では正負で 150 kV) になると、著者の設備ではブラシ等の爲め示度が動揺して精密度が落ちる。

氣壓と溫度(20°C)とを一定にして火花電壓を測るのに、溫度を正しく保つことは中々むづかしいから、

溫度は 20° の附近にして置いて、壓力の方で加減して空氣の密度が求むる状態に等しくなる様にして測定を行つた。

第5表は直径 3 cm, 5 cm 及び 10 cm の球を用ゐて測定を行つた結果である。

第5表 低壓に於ける火花放電電壓
(實測値) (kV)

Gap (cm)	Pressure 600 mm			Pressure 500 mm		
	Pole Diameter (cm) 3	5	10	Pole Diameter (cm) 3	5	10
1	26.3	26.5	26.6	22.7	22.8	22.9
2	47.4	47.9	48.2	39.3	41.0	41.1
3	60.9	65.7	69.0	50.8	56.3	58.6
4	70.6	79.4	87.4	58.8	68.0	74.6
5	77.6	89.6	103.8	64.2	76.8	88.3
6	82.7	98.4	118.1	67.9	83.8	100.7
7	86.5	105.4	130.7	70.9	89.8	111.0
8	89.6	111.3	142.0	73.9	94.7	120.1
Gap (cm)	Pressure 400 mm			Pressure 300 mm		
	Pole Diameter (cm) 3	5	10	Pole Diameter (cm) 3	5	10
1	19.2	19.2	19.1	15.6	15.6	15.5
2	33.4	33.9	34.1	26.5	26.8	27.0
3	42.9	46.5	48.4	33.7	36.5	38.2
4	49.7	56.2	61.3	39.1	44.3	48.4
5	54.3	63.8	72.7	42.8	50.5	57.4
6	57.5	69.8	82.6	45.4	55.2	65.2
7	60.1	74.6	91.1	47.5	59.1	71.7
8	62.9	78.9	98.3	49.7	62.8	77.5

4. 低壓に於ける火花電壓の計算

以上に示した測定結果を用ゐる、各一定の氣壓の場合に就き第2圖と同じ様な圖を引いて見ると、何れの場合にも全曲線は一點の附近に收斂する。而してこの點の球面からの距離は皆前と同様に 1 cm の附近である。故に 1 氣壓の場合と同様に 9.5 mm と取れば第1表及び第2表の $\gamma_{9.5}$ の値を使用出来る。これによつて、前と同様に、9.5 mm までの r.m.s. F 即ち $F_{9.5}$ を計算して見ると次の結果が得られる。

氣壓	$F_{9.5}$ の平均値
600 mmHg	24.05 ± .04 kV/cm
500	20.49 ± .03
400	16.92 ± .02
300	13.36 ± .01

これ等の値から $F_{9.5}$ の實驗式を求めると

$$F_{9.5} = 29.75 - 0.3565(760 - p)$$

で十分精密に之を表すことが出来る。故にこの式と第1表及び第2表の $\gamma_{9.5}$ の値とを用ゐて、種々の氣壓に就て種々の大さの極球を用ゐる間隙を色々にしたときの火花放電電壓を計算することが出来る。

- * 1) Proc. Phys.-Math. Soc. Japan, 12 (1930), 8, 240.
 2) do. 13 (1931), 11, 310.
 3) do. 14 (1932), 14, 418.
 4) do. (Short notes) 15 (1933), 5, 222.