

ビニルコードの絶縁破壊に関する諸実験

中山勝之助*・斉藤巧三*

1. ま え が き

近年、高分子化学の急速な進歩により、種々の高分子材料が製造されるようになった。これら高分子材料は、従来の天然材料に比べて、種々の点で勝れているため、電気絶縁材料として使用されている。そのうち、ポリ塩化ビニルを主成分とするものは、従来のゴム絶縁電線に比べて、耐熱性で劣る以外は、難燃性、耐油性、耐水性、耐オゾン性、耐老化性、耐磨耗性、耐薬品性、耐柔性、着色性、耐微性、占積率等の点で勝れているので、大量生産されるようになった。我が国の標準規格としては、既に器具用ビニルコード (JISC3306) 600V ビニル電線 (JISC3307) 及び制御用ビニルケーブル (JISC3401) 等が制定され、高圧、高周波を除き、従来のゴム絶縁電線の大部分が、これにおき換えられつつある。最近では、ポリエチレン絶縁ビニルシース電力ケーブル等、高圧用のものも製造されるようになり、ポリエチレンのコロナ劣化についての研究も盛んにされているが、未だ問題となっている点が多い。

本報告は器具用ビニルコード (平形2心) について、線間に高電圧を印加して、電圧-時間特性、電圧-電流特性、コロナ開始電圧、商用周波短時間破壊電圧に及ぼす電圧上昇率、電極面積、電圧印加回数の影響、経年劣化の程度等を調べ、電球の強制寿命試験のように、比較的短時間に、その製品の均一性、絶縁強度等の優劣を判断する資料を得ると共に、この種材料を更に高電圧に使用した場合の特性を類推する参考資料として行った実験結果である。試料は2社のものを使用し比較に便した。

2. 実験方法および結果

試料として Sh 社製品 (以後Aと称す) と Su 社製品 (以下Bと称す) の平形ビニルコードを使用し、これを木製ドラム (周囲1 m) に4 cm 間隔に巻き、両端は導体露出部間の閃絡を防ぐため、約13cm を裂き離して、図のように1線を接地して線間に60サイクル交流電圧を印加した。(第1図) 試験用変圧器は手動回転式電圧調整器付100KV, 10KVA のものを使用した。

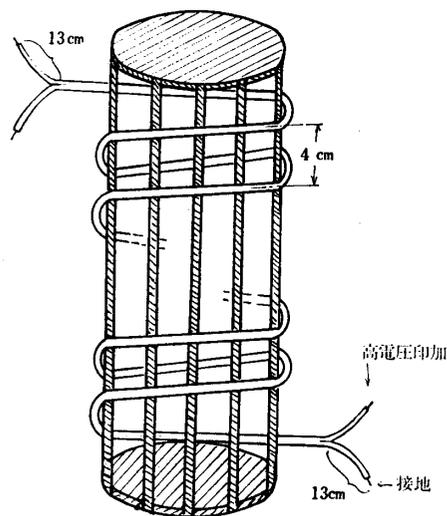


図 1

参考のため試料の JIS 規格を第1表に示す。この表の他に高電圧の試験としては、「空气中室温でスパークテスターを用い、導体と大地間に周波数50c/sまたは60c/sの正弦波に近い波形を持つ7,500Vの電圧を0.15秒加えたとき、これに耐えなければならない」等がある。

器具用ビニルコード JISC-3306

種類	導 体			ビニール絶縁体		仕 上 径 約 mm	概 算 重 量 kg/km	試験電圧 V/分		絶縁抵抗 MΩ/km		標準 条長 m	荷造 方法
	公称 断面積 mm ²	構 成 mm	外形 mm	厚さ mm	外径 mm			導 体 大地間	導 体 相互間	20°C	55°C		
平 形 ビニルコード	0.75	30/0.18	1.2	0.8	2.8	2.8×5.6	28	1,000	3,000	5	0.01	100	タバ

表 1. 試 料 規 格

* 電気工学教室

2. 1 電圧時間特性 毎回1mの試料を取り電圧時間特性を調べた(第2図)耐圧時間は長さを考慮に入れてもA, B共 JIS 規格をはるかに上まわるが, AはBより更に耐圧性が勝れていると共に時間のばらつきも少ないことが認められる。

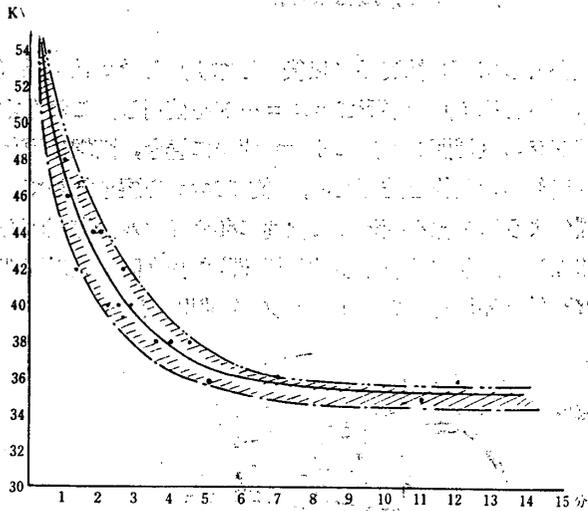


図 2 電圧—時間特性 (a) A

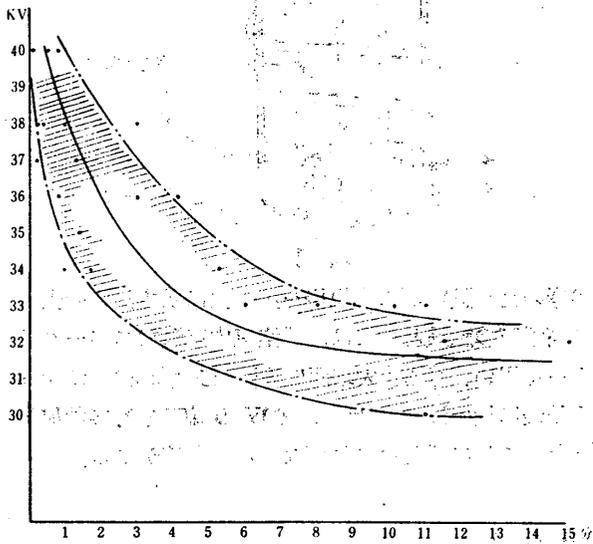


図 2 (b) B

2. 2 電圧電流特性 それぞれ16mの試料に電圧を印加し, 低圧より逐次高圧に上げて電圧電流特性を調べた。(第3図a) 10KV 附近までは極めて接近したカーブであるがAの方が電流値は僅かに低い。10KVを過ぎるとその差は次第に増し, Bは約30KVで破壊しているがAは40KVまで耐えている。

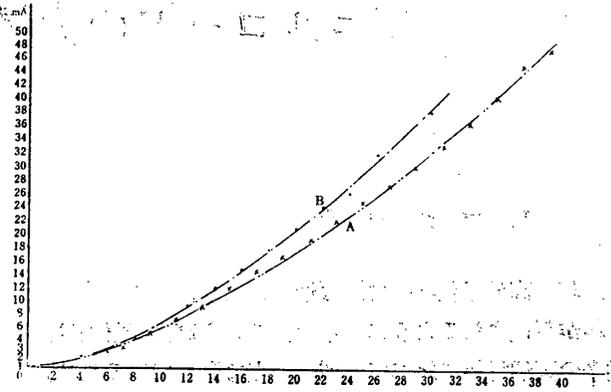


図 3 電圧—電流特性 (a)

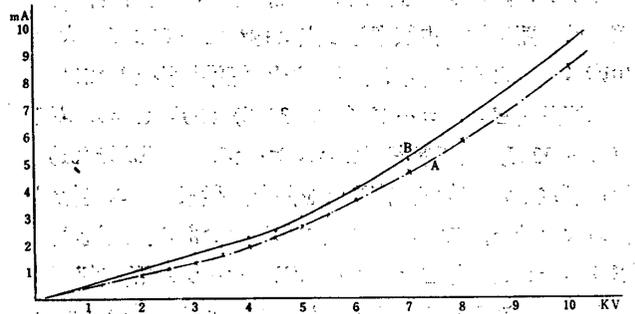


図 3 (b)

2. 3 コロナ開始電圧 コロナ開始電圧を調べるため, A, B各20mをとり, 開始電圧前後の精しい電圧—電流特性を測ると共に, シンクロスコープで電流波形を看察した(第3図b, 第4図) Aは3KVでコロナの発生が見られるがBは4KVでも殆どコロナ波形は見られず, 4.5KVでコロナ波形が現われている。これは電圧—電流曲線が, Aは3KVまでBは4KVまで直線であることと一致している。今回の各種実験において, AはBより絶縁性が勝れているので, コロナ開始電圧もAの方が高いものと予想していたが結果は逆であった。この理由について種々考えた結果, 誘電率によることが判明した。

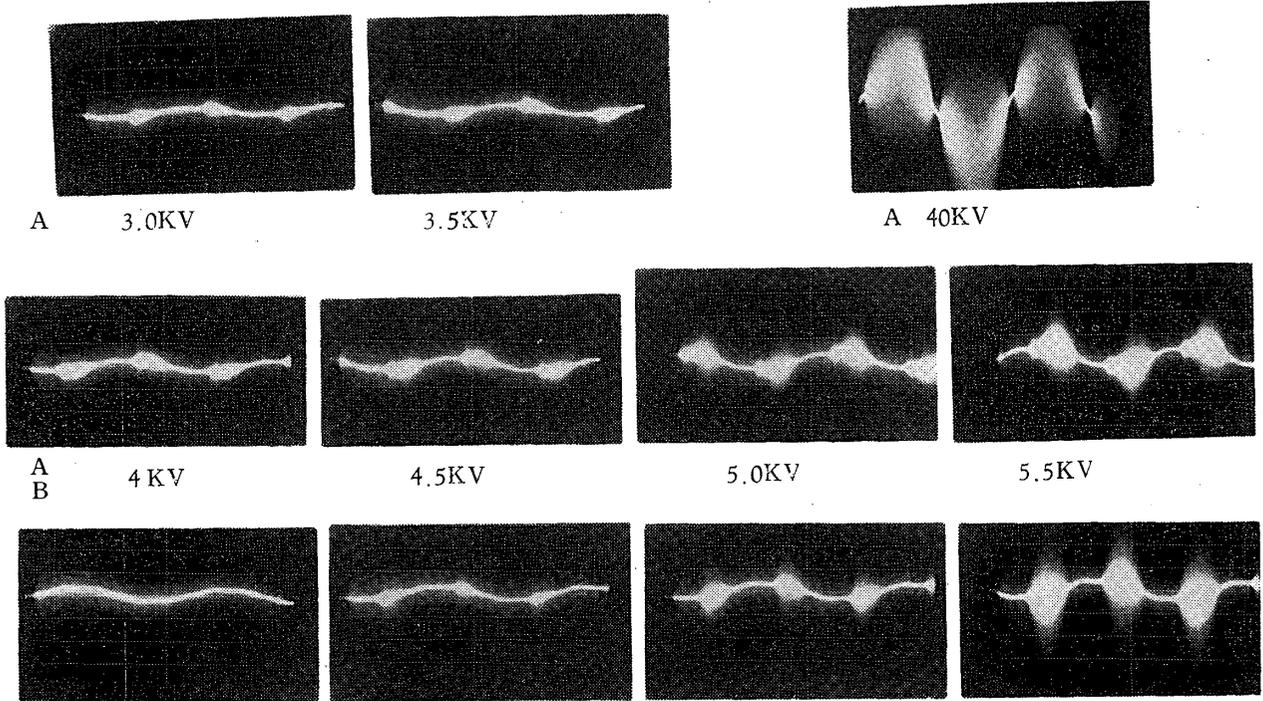


図 4

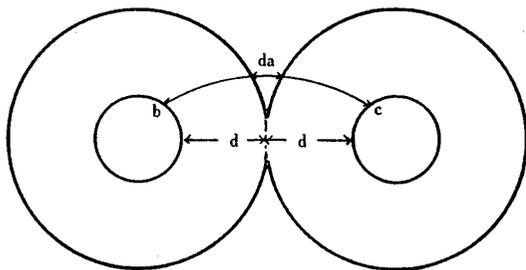


図 5

第5図で電界bcにそって空気中の部分の長さを d_a 、絶縁体中の長さを d_b とし、印加電圧を V とすれば

$$V = V_a + V_b \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$V_a = \text{空気層}d_a \text{ にかかる電圧} = X_a d_a \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$V_b = \text{絶縁層}d_b \text{ にかかる電圧} = X_b d_b = \frac{X_a}{\epsilon} d_b \quad \dots\dots\dots(3)$$

X_a : d_a 部の電位傾度

ϵ : 絶縁層の比誘電率

(1)に(2)(3)を入れて

$$V = X_a \left(d_a + \frac{d_b}{\epsilon} \right) \therefore X_a = \frac{V}{d_a + d_b / \epsilon}$$

$d_a \rightarrow 0$ の極限付近では $d_b = 2d$ (d は絶縁厚さ) となるから

$$X_a = \frac{\epsilon V}{2d}$$

コロナ開始電位傾度は A, B 共等しい筈であるから, A, B の絶縁層の比誘電率をそれぞれ ϵ_1, ϵ_2 とし, コロ

ナ開始電圧を V_1, V_2 とすれば

$$\frac{\epsilon_1 V_1}{2d} = \frac{\epsilon_2 V_2}{2d}$$

$$\therefore \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{4.5}{3} = 1.5$$

すなわち比誘電率が Aが Bの 1.5 倍であればコロナ開始電圧は 1.5分の 1 にもなる筈であり, 逆にコロナ開始電圧から比誘電率の算出もできる. 文献²⁾によれば, 塩化ビニルの比誘電率は 5.5~9.1となっているから 1.5 倍は十分あり得ることである. また比誘電率が既知のときは, コロナ開始電圧を測定して, この場合のコロナ開始電位傾度を算出できる, Aの ϵ を8と仮定すれば開始電位傾度は

$$X_a = \frac{8 \times 3}{2 \times 0.8} = 15 \text{ KV/mm}$$

となる.

なお 3 KVを長時間印加すれば Aはコロナ劣化をするが, Bはしないので, 高電圧に強い Aの方が早く絶縁破壊を生ずる可能性も考えられる.

2. 4 商用周波短時間破壊電圧に及ぼす電極面積と電圧印加回数の影響 これが本実験で主力を注いだ事柄である. 電極面積の増大(この場合は長さに比例)は弱点が電極下にくる確率を増大し従って破壊電圧を低下するものと考えられる (Week spot theory)

また隣接部が破壊するような電圧を印加すれば, その印

加時間（回数）によって劣化を生ずることも当然考えられる。この両者の影響程度をなるべく少ない材料で実験するため次の方法をとった。

まず1タバ100mより20mを切りとり、これを更に16mと1m×2と2mとに分轄する。これを前記ドラムに4cm間隔に巻く。

まず16mに加圧して破壊さす（破壊点をPとする）これを2等分してPを含まない側はそのままとし、Pを含む側は更に2等分する。この方法をくり返しPを含む部分が1mになった時これを取除く、従って2回の加圧を行う部分の長さは8m、4m、2m、1mの4本で計15mとなる。2回の加圧によって破壊した各線にも上記方法をくり返して3回加圧部分を作る。以下同様にして最後の1mは5回の加圧ができる。次に別線の1mと2mにも同一方法で加圧する。この方法により可能な長さ別電圧印加回数は第2表のようになる。この実験によ

長さ m 印加 回数	長さ m					計	計 m
	1	2	4	8	16		
1	2	1			1	4	20
2	2	1	1	1		5	16
3	3	2	1			6	11
4	3	1				4	5
5	1					1	1
計	11	5	2	1	1	20	

表2 長さ別印加回数別試料数

り同一長さに対する電圧印加回数のえいきようおよび同一印加回数で長さのちがいでよるえいきようを比較することができる。ただし同一長さでも回数が多い部分は前に隣接部で弱い部分が取除かれているという条件が入るとはやむを得ない。

この実験での電圧印加方法は前記電圧時間特性を参考にして、Aは40KVまで、Bは30KVまで速に上昇し、以後はそれぞれ1KV/sおよび4KV/sの2種類の上昇率について各種類共7～8回の実験を行った。電圧上昇率はメトロノームと電圧計を用いて耳と目で調整した。

この実験の記録例を第6図(a～d)に示す。

またこの結果をとりまとめたものが第3表(a～d)である。

この表にもとづき各種別毎の7～8回の実験の平均値、最高値、最低値をグラフにしたものが第7図(a～d)

である。この表やグラフを統計的に扱うには実験回数不足の感もあるが一応検討して見る。

2. 3. 1 電圧印加回数による影響 長さ1mのものにつき印加回数の影響程度を見るに、Aの $\frac{1}{4}$ KV/sの場合は平均破壊電圧の順位が印加回数の順位と一致しているが、その他の3つの場合は4回までは一致していない。これは電圧印加回数の影響よりも製品の不均質の影響の方が上まわっているためと考えられる。しかし5回目の印加電圧に対する平均破壊電圧は、4種類共最下位である。これは隣接部が破壊する程度の電圧を4回以上印加すれば、そのための劣化の影響が製品の不均質による影響を上まわってくることを示している。

2. 3. 2 電極面積による影響 同一印加回数に対して長さの影響は概ね右下りの当然の傾向となっているが、右上りのところもあるのは実験回数の不足もあるが、製品の不均質の影響と考えられる。

2. 3. 3 電圧上昇率の影響 各実験種別毎の総合平均値について電圧上昇率の影響を比べる。

(第3表)

1KV/sと $\frac{1}{4}$ KV/sに対しAでは

$$62.5 - 55 = 7 \text{ (KV)}$$

Bでは

$$43.4 - 40.3 = 3.1 \text{ (KV)}$$

の差が出ている、Aの方が電圧の絶対値も差も共に大である。

2. 3. 4 製品によるちがい 上と同様総合平均値について比べる。各同一電圧上昇率についてA、Bの破壊電圧の差はそれぞれ

$$62.5 - 43.4 = 19.1 \text{ (KV)}$$

$$55.0 - 40.3 = 14.7 \text{ (KV)}$$

で何れもAの方が相当に高い。

3. 2. 5 その他 グラフには最高値と最低値も示した、一般の電圧値はこれを上限下限とするバンドの中に入る筈である。また最低値は実験回数を増せば、短いものでも弱点に当たる確率が増すので長いものとの差が縮ってくる筈であるがこの実験でもその傾向があらわれている。最高、最低の差は総平均に対して40～60%位でAの方が少い。

A. 1 KV/s 4月1日 760mmHg 12.5°C 74%

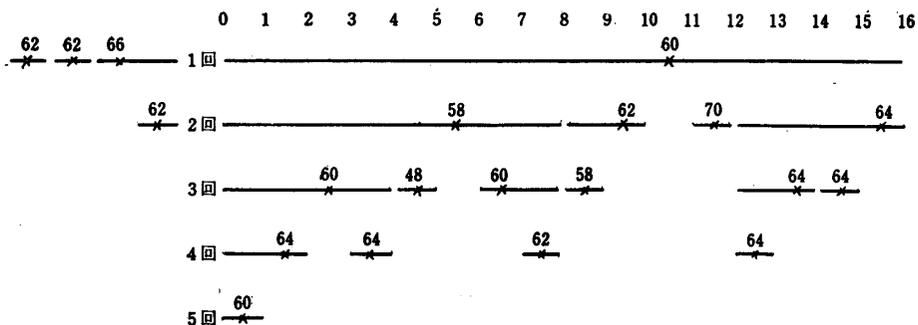


図 6-a

A. 1/4KV/s 4月2日 766mmHg 10.8°C 76%

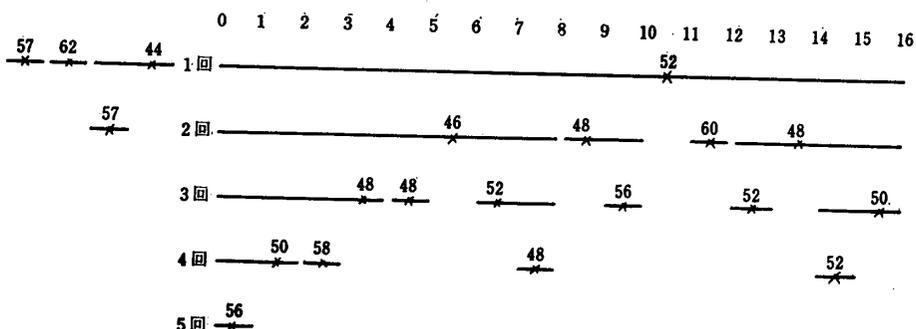


図 6-b

B. 1 KV/s 4月1日 760mmHg 12.5°C 74%

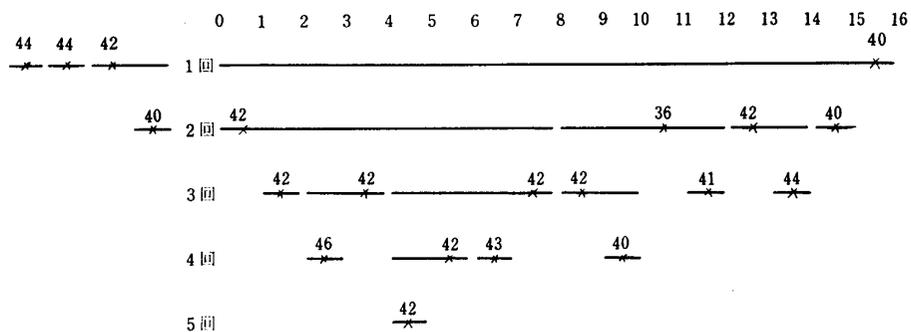


図 6-c

B. 1/4KV/s 3月29日 763mmHg 11°C 75%

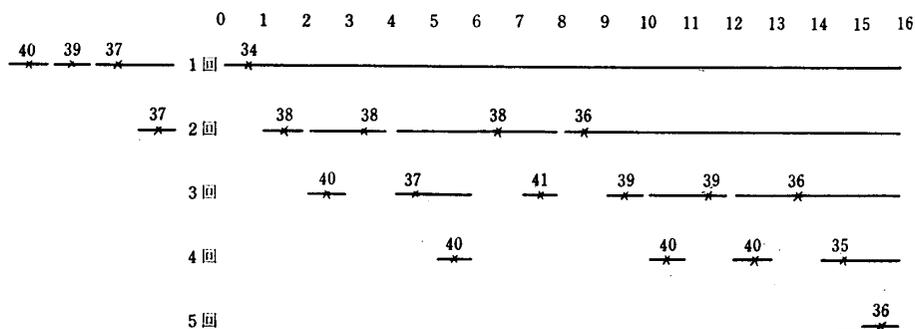


図 6-d

図 6 破壊経過記録例

		(a) A品 1KV/s													
印加回数 長さ 番号	1			2				3			4		5	計	平均
	1	2	16	8	4	2	1	4	2	1	2	1	1		
1	55 53	59	52	60	55	60	62 60	66	60 62	52 58 62	70	56 68 72	68	1,220	61.0
2	74 60	68	60	48	64	60	68 64	62	58	67 68 68	64	62 68 64	48	1,195	62.9
3	62 62	66	60	58	64	62	70 62	60	60 64	48 58 64	64	64 62 64	60	1,234	61.7
4	70 72	64	52	66	74	66	72 68	64	72 64	72 62 68	63	40 75 62	68	1,314	65.7
5	52 70	66	58	64	66	62	66 58	66	68 68	64 60 74	62	66 62 72	70	1,294	64.7
6	66 60	66	50	54	56	64	68 64	58	52 64	60 64 70	62	60 62 64	66	1,230	61.5
7	64 60	70	60	52	60	62	60 70	54	58 56	56 62 64	60	58 56 56	66	1,204	60.2
8															
計	880	459	392	402	439	436	912	430	806	1,331	445	1,313	446		4,377
平均	63.0	65.1	56.0	57.4	62.7	62.3	65.1	61.4	62.0	63.3	63.5	62.5	63.7		62.5
最高	74	70	60	64	74	66	72	66	77	74	70	75	70		
最低	52	59	50	48	55	60	58	54	52	48	60	56	48		

		(b) A品 ¼KV/s													
加加回数 長さ 番号	1			2				3			4		5	計	平均
	1	2	16	8	4	2	1	4	2	1	2	1	1		
1	57 54	58	50	52	49	56		55	54 55	55 50 57	59	44 58 52	54	1,025	54.0
2	55 57	55	44	53	44	44	46 56	53	56 54	46 46 56	55	56 53 52	56	1,037	51.85
3	57 62	44	52	46	48	48	60 57	48	52 50	56 52 48	50	58 48 52	56	1,044	52.2
4	58 60	62	56	60	46	60	54 60	54	56 59	58 63 60	64	62 64 50	60	1,166	58.3
5	60 64	59	60	55	51	48	64 56	56	63 62	65 61 51	60	62 54 63	52	1,167	58.4
6	54 62	62	42	53	53	60	64	56	50 56	57 62 61	58	54 60 58	54	1,138	56.9
7	59 54	54	52	56	58	55	57 55	52	60 57	60 60 58	54	50 54 52	50	1,053	52.6
8															
計	813	394	356	375	349	371	747	374	784	1,182	400	1,157	382		3,842
平均	58.1	56.2	50.9	53.6	49.7	53.0	57.4	53.4	56.0	56.8	57.0	55.1	54.5		55.0
最高	64	62	60	60	58	60	64	56	62	65	64	64	60		
最低	54	44	42	46	44	44	46	48	50	46	50	44	50		

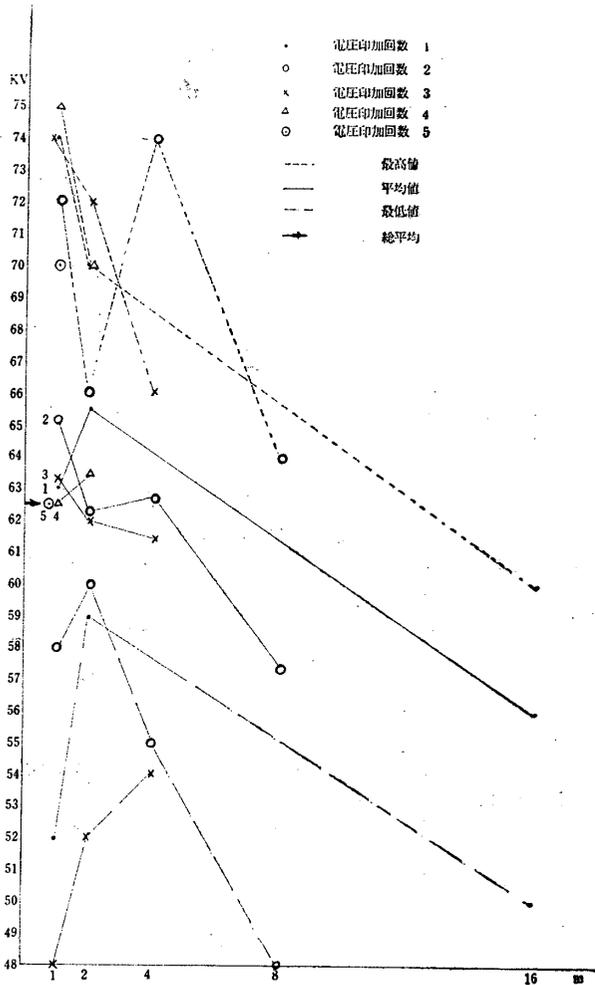
(c) B品 1KV/s

印加回数 長さ 番号	1			2				3			4		5	計	平均
	1	2	16	8	4	2	1	4	2	1	2	1	1		
1	(20) 40	38	34	40	40	40	42 42	36	42 40	44 44 42	38	46 40 40	40	774	40.7
2	42	40	40	38	36	42	38 44	36	38 2ヶ所 40	40 42 40	36	44 38	44	720	40.0
3	44 44	42	40	42	36	42	40 40	42	42 42	42 41 44	42	46 40	42	793	41.7
4	52 48	45	(30)	40	46	52	50 38	38	42 2ヶ所	44 50 56	42	56 42	38	859	45.2
5	44 44	46	40	42	38	44	48 50	44	46 32	50 52 50	42	46 48 42	48	896	44.8
6	42 52	38	38	46	42	48	48 48	44	45 45	50 48 48	50	42 50 48	48	920	46.0
7	48 49	46	40	36	50	42	32 44	40	50 48	48 52 44	46	54 52 50	32	903	45.1
8															
計	591	295	262	284	288	310	604	280	562	971	296	830	292	3 035	
平均	45.4	42.2	37.4	40.6	41.1	44.3	43.1	40.0	43.2	46.2	42.3	43.9	41.7		43.4
最高	52	46	40	46	50	52	50	44	50	56	50	56	48		
最低	40	83	34	36	30	40	32	36	38	40	36	38	32		

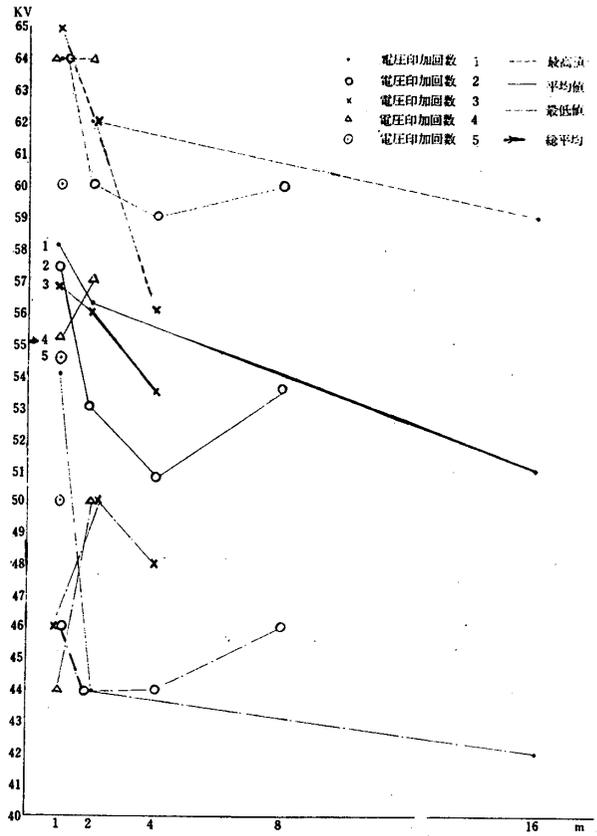
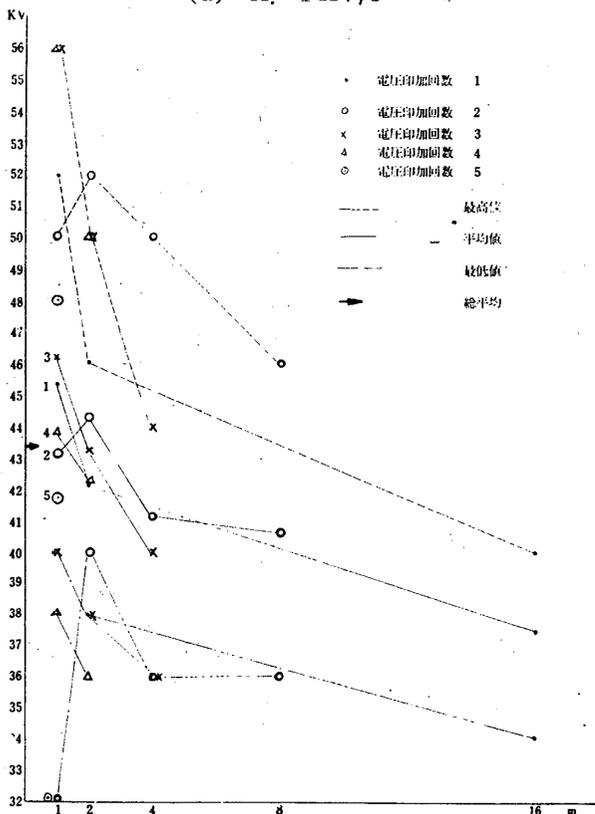
(d) B品 1/4KV/s

印加回数 長さ 番号	1			2				3			4		5	計	平均
	1	2	16	8	4	2	1	4	2	1	2	1	1		
1	35 39	39	32	38	38	38	39	32	36 38	35 37 39	35	37 39 38	35	738	36.9
2	40 39	37	34	36	38	38	38 34	36	37 39	40 41 39	35	40 40 40	36	757	37.9
3			38	42	40	40	44	40	46	42 50 42	50	50 50 42	42	658	43.8
4	54 41	42	36	39	42	39	40 41	40	41	35 41 38	43	48 48 55	51	857	42.9
5	44 44	40	36	38	34	37	41 47	41	42 44	41 49 42	42	46 44 41	49	842	42.1
6	44 42	40	38	36	40	42	42 42	37	45 41	45 44 40	40	40 48 45	43	834	41.7
7	45 45	43	30	32	38	36	45		34 34 49	40 44 49		41 48 34		734	40.8
8	40 47	39	35	41	34	37	43 44	40	38 34	37 40 40	36	35 40 44	47	801	40.1
計	599	280	279	302	304	307	579	266	651	1,037	281	1,033	303	2,852	
平均	42.8	40.0	35.0	37.7	38.0	38.4	41.4	38.0	40.7	40.5	40.1	42.4	43.2		40.3
最高	54	43	38	42	42	42	47	41	46	42	50	55	51		
最低	35	39	30	32	36	35	34	32	34	35	35	34	35		

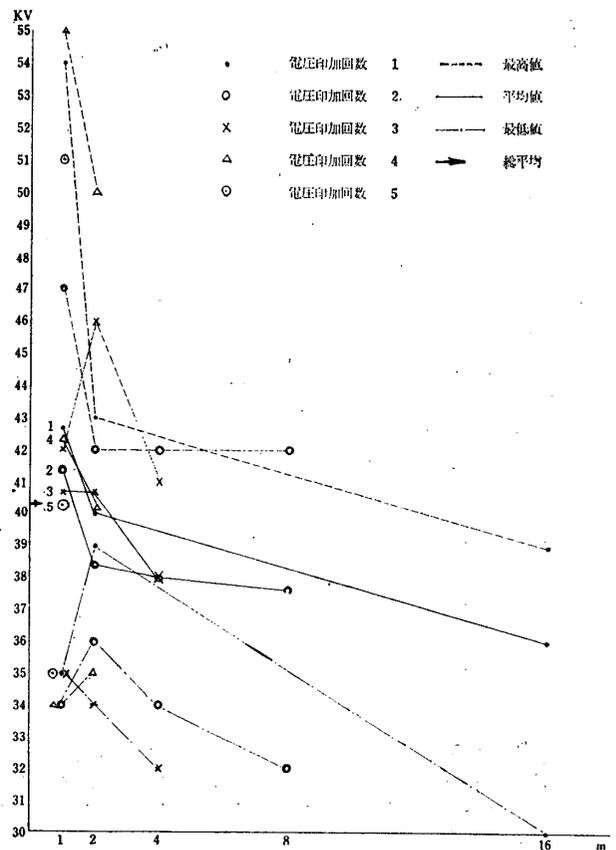
表 3. 長さ別回数別総括表 (a)



(a) A. 1 KV/s



(b) A. 1/4 KV/s



(d) B. 1/4 KV/s

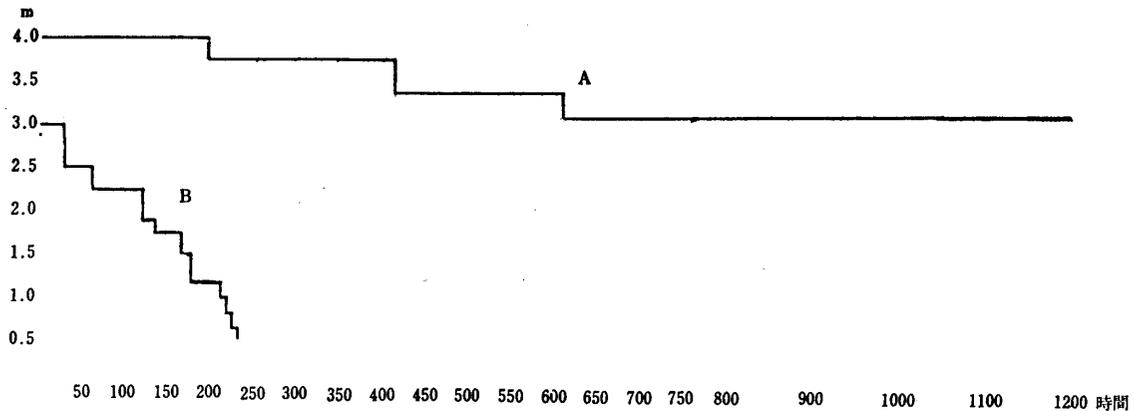


図 6 20KV 反復印加の破壊時間間隔

3. 3 一定電圧下での反復破壊試験 ある長さの試料をとり、これに一定電圧 20KV を印加し、破壊すればその近くで切断して残りの長い方に再加圧することを反覆して時間の記録を取る。A は初長 4 m, B は 3 m をとって実験した。B は 225 時間の間に 10 回破壊し、後の数回は僅か数時間の耐力に低下したが A は 3 回破壊で 1,200 時間以上耐え、4 回目の印加でも 600 時間を越え、線全体の耐電圧性の低下を示さない。(第 7 図) 加圧中、電流は必ずしも漸増せず途中 10% 位減少することもある。長時間加圧により電線の表面はコロナに侵されて白粉を析出した状態になり幾分硬化する傾向があるが、著しい耐電圧性の低下は見られない。コロナが全面にわたって一様に絶縁を著しく劣下させるには甚だしく長時間を要する。絶縁破壊はコロナが極部に集中することによって起るものと考えられる。

3. 4 絶縁破壊のしかた 試料が絶縁破壊する場合平行 2 線がほぼこれに直角な同一断面内で破壊する回数は全体の約 50% である。他は互に離れた 2 点間で沿面放電を通じて破壊する。沿面放電破壊の場合 10cm 以上離れた点間のものも稀でない。切口の一線の端から他線の平行部に最長 30cm の沿面放電をした例もある。

破壊は一般的に火花貫通の際に見られるように、極めて小さいせん孔にはじまり、時間と共に拡大する。孔の 2 線間の相対方向は極めて雑多であることから、穿孔性放電は、製品中の小さいボイドから発起するものと推測される。コロナ放電による劣化の原因としてあげられている事項¹⁾は、放電損失または温度上昇による劣化、放電によって形成される活性酸素、またはオゾンによる酸化、荷電粒子衝突による物理的変質 ないしは 機械的劣化、等とされている。

3. 5 長期使用に対する劣化の程度 6 年間連続使用した蛍光スタンドのコード (M 社製品) 1.5 m につ

いて $\frac{1}{4}$ KV/s の上昇率で 3 回破壊試験を行った結果はそれぞれ 46, 43, 47KV で B 製品の新品を上まわる値を保つ。これより物理的損傷を与えない限り普通の使用状態では経年劣化は極めて少いことが推測できる。

3. む す び

(1) 市販品のビニルコードの絶縁強度は JIS 規格をはかるに上まわっている。経年劣化も極めて少い。

(2) 両試料共 1 KV/s 以下の電圧上昇率で 4 回以上破壊させると、残部の破壊電圧の低下は製品の不均一による影響を上まわってきた。

(3) 同一印加回数に対し、長いものほど破壊電圧は低下するのは当然の傾向であるが、製品の不均一による影響で逆になる場合も相当あった。

(4) コロナが発生しても、これが局部的に集中しなければ、甚だ長時間耐える。穿孔性放電は製品中のボイドが起点と推測された。

(5) 絶縁性の勝れた A がコロナ開始電圧は B より低いことは、誘電率の比から説明できる。

(6) 一般に商用周波短時間破壊電圧の高いものは、絶縁性が勝れていると認めてよいようである。

備 考

この実験は 3 月から 6 月の間に実施し温度は 10°C から 22°C 位まで変化したが、その影響は特に認められなかった。

参 考 文 献

- 1) イオン照射によるポリエチレンの劣化
電学誌 昭 41. 4 堺孝夫外 3 名
- 2) 電気材料便覧 電学界編

(昭和 41 年 6 月 30 日受理)