MAY 1983 RIIS-RR-31-2

UDC 621.315.61 : 621.3.015.3 : 620.169 : 614.896

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-31-2

高圧用ゴム手袋の電気的ストレスによる劣化

市 川 健 二

労働省産業安全研究所
MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

高圧用ゴム手袋の電気的ストレスによる劣化

市　川　健　二

Deterioration due to voltage stresses of rubber gloves for use in high voltage electrical working

by Kenji Ichikawa*

Rubber gloves for use in high voltage electrical working deteriorate both electrically and mechanically on account of various stresses imposed on them. In particular, their electrical deterioration in terms of the withstand voltage is regarded as an important parameter from the viewpoint of electrical safety. This report describes the results of accelerated life tests of rubber gloves, which are carried out with over-voltage stress. Degree of electrical deterioration is estimated as the result of life test curves obtained with the following summaries :

1) The life has a great variation and becomes extremely short if brakdown probability is assumed smaller, or if a certain higher voltage stress is imposed ;

2) The cumulative distribution functions of the life are given as follows, depending upon the mode of stress ;

(a) In case that voltage stress is applied continuously,

$$F(V,t)=1-\exp\left[-C_1\cdot V^{5.45}\cdot t^{0.16}\right]$$

where C_1=constant (8.99×10^{-9})
V=applied voltage in kV
t=duration in hour

(b) In case that voltage stress is applied repeatedly for one min., followed each by one min. rest,

$$F(V,N)=1-\exp\left[-C_2\cdot V^{5.45}\cdot N^{0.3}\right]$$

where C_2=constant (2.46×10^{-9})
V=applied voltage in kV
N=number of cycle

(c) In case that voltage stress is applied repeatedly for three min., followed each by one min. rest,

$$F(V,N)=1-\exp\left[-C_3\cdot V^{5.45}\cdot N^{0.35}\right]$$

where C_3=constant (3.31×10^{-9})
V=applied voltage in kV
N=number of cycle

3) From the life curves of the distribution functions, the deterioration of the rubber gloves

* Electrical division.

for high voltage insulation purposes is much less dependent on voltage stresses ; and

4) The life is shorter in case that voltage stresses are applied repeatedly than that in case of voltage stresses continuously applied, and moreover, it tends to become a little shorter if the duration of repeatedly applied voltage is longer.

1. まえがき

高圧用ゴム手袋（以下，単に手袋と記す）は，高圧活線作業などにおいて，作業者の手，前腕部分を感電から保護するために着用される絶縁用保護具であり，製造時は勿論のこと，使用期間中においても絶縁性能が常に良好な状態に維持されていなくてはならない。しかし，手袋はゴム材料で作られており，材料の経年劣化によって使用と共に絶縁性能が低下してくると考えるのが常識である。

作業者が手袋を着用して高圧に接触中に手袋が絶縁破壊を起こしては人命に係わる災害に直結するため，絶縁性能の中で特に耐電圧値が重要視される。そのため，現在，労働安全衛生法及び労働安全衛生規則で義務付けている製造時の型式検定や定期自主検査では，絶縁性能のチェックに耐電圧試験が行なわれる。この耐電圧試験における試験電圧値は，使用期間中の経年劣化を考慮して対象とする電路の電圧よりかなり高い電圧である。現在，6kV 級の手袋について，製造時の型式検定や新品購入時の際に行なわれる耐電圧試験の試験電圧値は 20 kV，使用期間中に行なわれる耐電圧試験のそれは 10kV 以上である。

一方，高圧活線作業は手作業が主であり，絶縁性能のみを重視して肉厚の厚い手袋を製造すると，作業性が悪くなる。そこで，現状の手袋は耐電圧試験に合格する程度の裕度を持たせた中で，できるだけ肉厚を薄くするようにして製造される。

経年劣化を起こす要因としては，使用期間中に受ける機械的ストレス，大気中の酸素，オゾン，日光，熱などがあるほか，電気的ストレスもある。一般に，絶縁材料は電圧，特に過電圧が印加されると，少なからず劣化すると言われる。安全性の確認のために行われる耐電圧試験が，仮に劣化を促進させているのであれば問題である。そこで，ここでは電圧ストレスによる手袋の寿命（絶縁破壊分布）を統計的手法を用いて推定し，これより，手袋の電圧ストレスによる劣化程度を検討した。その結果，出荷時 20kV×1分間の耐電圧試験に合格した現状の手袋の電圧ストレスによる寿命は，バラツキが非常に大きく一概には言えないが，使用中に受ける電圧は勿論，使用期間中の耐電圧試験で印加される電圧に対しても，寿命が短縮される程度は比較的少ないことが証明された。以下に，その結果を報告する。

2. 寿命式の誘導[1),2),3),4)]

製品や材料などの寿命分布は，製品や材料などの種類及びその使用段階で様々な形をとるほか，同一条件の製品や材料の寿命分布であっても，一般に正規分布のように平均寿命に対して左右対称にならずに，全体的に寿命の長いものより短いものの方が多かったり，また，寿命の長い方に大きく裾を引いた歪んだ分布である場合が非常に多い。このような寿命の分布に対して，従来の正規分布関数や指数分布関数を適用するには無理があり，新たに，関数中のパラメータにより様々の形状を取り得て，寿命分布のように歪んだ分布によくあてはまる分布関数として開発されたものにワイブル分布関数がある。すなわち，ワイブル分布とは，製品や材料に電気的あるいは機械的ストレスを加えた場合，その電気的あるいは機械的強度が製品や材料中に不規則的に散在する欠陥のうち，最大の欠陥つまり最弱箇所の破壊によって決定されるとして誘導されたものであり，最近この手法を用いて電力ケーブルや発電機コイルなどの課電寿命を推定することが試みられている。そこで，以下にワイブル分布関数を用いて，手袋の電圧ストレスによる寿命式を誘導する。

（1） 電圧ストレスによる破壊電圧の分布関数

今，手袋に破壊を起こさせる電圧ストレスを e_x とし，e_x が V を越えない確率 P_r $(0<e_x\leqq V)$ を $F(V)$ とするとき，e_x が V と $V+\Delta V$ の間にある確率 $P_r(V<e_x\leqq V+\Delta V)$ は，次式のように書くことができる。

$$P_r(V<e_x\leqq V+\Delta V)=F(V+\Delta V)-F(V) \qquad (1)$$

この確率は，また，手袋がストレス V 未満では破壊しない確率 $(1-F(V))$ と，V まで健全であった手袋が，次の $(V+\Delta V)$ の間で破壊する確率 $\lambda(V)\cdot\Delta V$ との積としても与えられる。すなわち，

$$P_r(V<e_x\leqq V+\Delta V)=\{1-F(V)\}\cdot\lambda(V)\cdot\Delta V \qquad (2)$$

ここで，$\lambda(V)$ とは，ストレス V まで健全であった手袋が，次の単位ストレスの間に破壊する確率である。そこで，（1）式と（2）式の右辺を等しいと置き，$\Delta V\to 0$ の極限を考え，さらに積分して初期条件［$V=0$ のとき $F(V)=0$］を代入し，整理を行うと（3）式が得られる。

$$F(V)=1-\exp\left[-\int_0^V \lambda(V)\,dV\right] \qquad (3)$$

ここで，手袋の破壊分布をワイブル分布で示すことにす

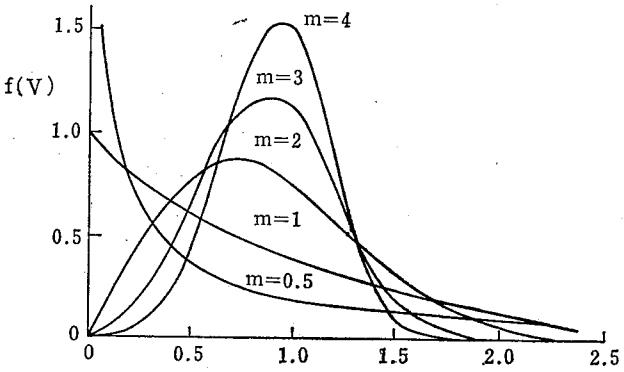

Fig. 1　$f(V)$ when "m" are varied with $\alpha=1$
$\alpha=1$ で m を変化させたときの $f(V)$

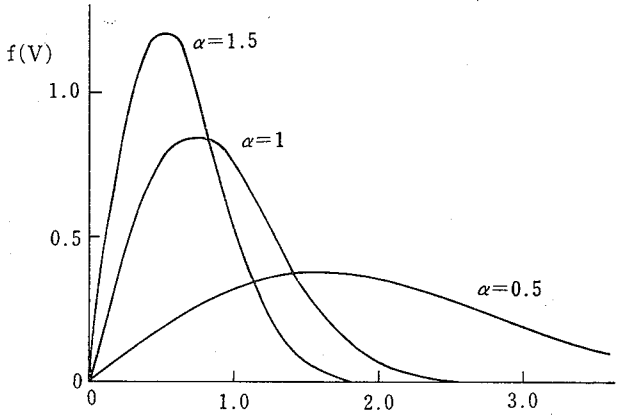

Fig. 2　$f(V)$ when "α" are varied with $m=2$
$m=2$ で α を変化させたときの $f(V)$

ると，$\lambda(V)$ は次式のような形で与えられる。

$$\lambda(V)=\frac{m}{\alpha}V^{m-1}$$

ゆえに，手袋の破壊電圧の累積分布関数 $F(V)$ は（4）式，確率密度関数 $f(V)$ は（5）式のようになる。

$$F(V)=1-\exp\left[-\frac{V^m}{\alpha}\right] \qquad (4)$$

$$f(V)=\frac{dF(V)}{dV}=\frac{m}{\alpha}V^{m-1}\cdot\exp\left[-\frac{V^m}{\alpha}\right] \qquad (5)$$

ここで，mは形のパラメータ，αは尺度のパラメータ，と呼ばれるワイブル分布のパラメータであり，この2つのパラメータの違いにより，ワイブル分布の密度関数は，Fig. 1，Fig. 2 のように様々な形をとることができる。

更に，尺度のパラメータαを $\eta=\alpha^{1/m}$ で表わし，η を新たに尺度のパラメータとして，ワイブル分布の累積分布関数を求めると（6）式のようになる。

$$F_1(V)=1-\exp\left[-\left(\frac{V}{\eta_1}\right)^{m_1}\right] \qquad (6)$$

ここで，パラメータ m_1，η_1（添数字は後出の破壊時間等のワイブル分布のパラメータと区別するためのものである）は，手袋の破壊電圧試験で得られたデータをワイブル確率紙にプロットして得られた直線から求めることができ，これらパラメータの物理的意味は次のとおりである。m_1 は手袋に使用されたゴム材料の性質によって決まる定数で，破壊電圧のバラツキを表わし，分布の形状を決定する。η_1 は手袋の寸法によって決まる定数で，破壊確率が 63.2% となるような破壊電圧に相当する。

（2）電圧ストレスによる破壊時間の分布関数

次に，手袋に一定の電圧ストレスを連続して加えた場合の破壊に要する時間の分布を考える。これについてもワイブル分布に従うとして累積分布関数 $F(t)$ を求めると，（6）式の誘導と同様な方法で（7）式を得る。

$$F_2(t)=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{m_2}\right] \qquad (7)$$

ここで，パラメータ m_2，η_2 は一定ストレスの連続印加で得られた破壊時間のデータをワイブル確率紙上にプロットして得られた直線より求めることができる。

（3）繰返しストレスによる破壊回数の分布関数

手袋に一定電圧を一定時間だけ加えるような電圧ストレスを繰返し加えた場合，手袋が破壊するまでの繰返し回数の分布を考える。これについてもワイブル分布に従うとして累積分布関数 $F_3(N)$ を求めると，（6）式の誘導と同様な方法で（8）式を得る。

$$F_3(N)=1-\exp\left[-\left(\frac{N}{\eta_3}\right)^{m_3}\right] \qquad (8)$$

ここで，パラメータ m_3，η_3 は一定ストレスの繰返し印加で得られた破壊までの繰返し回数のデータをワイブル確率紙上にプロットして得られた直線より求めることができる。

（4）寿命式の誘導

（6）式と（7）式より，または（6）式と（8）式より，$V=0$，$t=0$ または，$V=0$，$N=0$ で $F_1=F_2=0$ または $F_1=F_3=0$ の条件を満足し，F_1 等の単調増加性を考慮すれば，2つの確率変数に対する分布関数（破壊確率）は，次に示す（9）式や（10）式のような拡張されたワイブル分布関数で表わすことができる。

$$F_1(V,t)=1-\exp[-C_1\cdot V^{m_1}\cdot t^{m_2}] \qquad (9)$$

$$F_2(V,N)=1-\exp[-C_2\cdot V^{m_1}\cdot N^{m_3}] \qquad (10)$$

すなわち，この（9）式が電圧ストレスを連続して加えた場合の寿命式であり，（10）式が電圧ストレスを繰返し加えた場合の寿命式である。具体的に，この式をもう

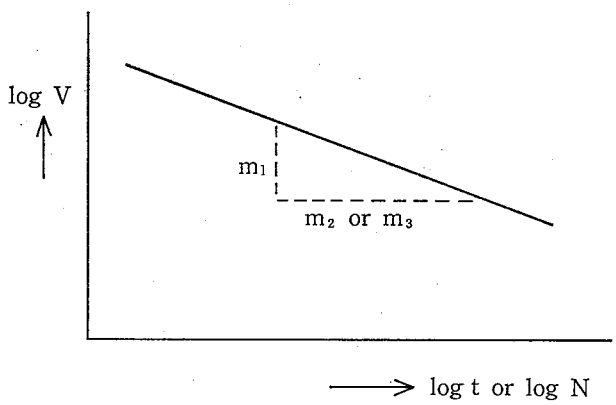

Fig. 3　Life curve
寿命曲線

少しわかり易い形で示すために，破壊確率がある一定値の場合（$F_1(V,t)$=一定，$F_2(V,N)$=一定）を考えて，（9）式と（10）式を変形すると，

$$\log t+\frac{m_1}{m_2}\log V=\text{一定} \qquad (11)$$

$$\left(\text{又は，}\ t=\frac{\text{一定}}{V^{m_1/m_2}}\right)$$

$$\log N+\frac{m_1}{m_3}\log V=\text{一定} \qquad (12)$$

$$\left(\text{又は，}\ N=\frac{\text{一定}}{V^{m_1/m_3}}\right)$$

となり，（11）式または（12）式を両対数紙上に表わせば，Fig. 3 に示すように，傾きが $-(m_1/m_2)$ または $-(m_1/m_3)$ の直線となり，一般に経験則として知られている寿命式（寿命 T=定数/V^n）と同じ形になる。

3. 実　　験

3.1 実験方法

手袋に電圧ストレスを加えた場合の寿命式を求めるために，次の2通りの試験を行なった。

（1） step-stress 試験

この試験は，手袋に加えた電圧を段階的に増加して手袋の破壊電圧の分布を求めるものである。この試験において，各 step での時間間隔は，破壊電圧の中に時間的要素がなるべく入り込まないように，その電圧における手袋の予想される寿命より十分短かくしなければならない。実際の実験は，Fig. 4 に示すように，5，10 kV 及びそれ以後 1 kV 増すごとに手袋に流れる充電電流の値をメータで読みとる間だけ電圧の昇圧を中止した程度の昇圧速度で破壊電圧を求めた。

（2） constant-stress 試験

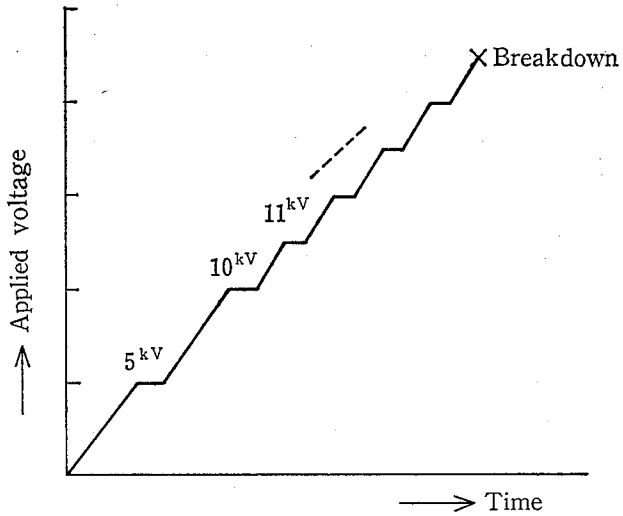

Fig. 4　Step-up process of step-stress test
ステップ-ストレス試験の昇圧方法

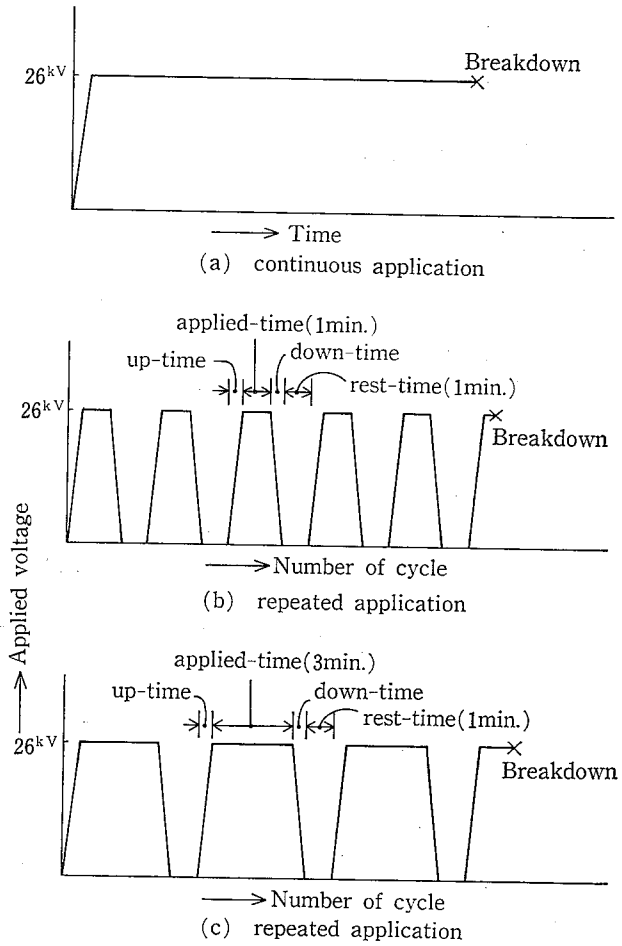

Fig. 5　Application modes of voltage stress
電圧ストレスの種類

この試験は，手袋に一定過電圧を連続して加えて手袋の破壊時間の分布を求めるものと，一定過電圧を一定時間繰返し加えて手袋の破壊までの繰返し回数の分布を求

めるものである。実際の実験は，一定の過電圧として26kV を Fig. 5(a) のように連続的に加えた場合，Fig. 5(b) のように1分印加—1分休止の周期で繰返し加えた場合，及び Fig. 5(c) のように3分印加—1分休止の周期で繰返し加えた場合の3種類について行った。

3.2 実験装置

手袋に電圧ストレスを加える方法は，JIS T 8010「絶縁用保護具・防具類の耐電圧試験法」に規定された水中試験法によった。ただし，手袋の内外面に満された水電極間の沿面距離は，沿面からの閃絡による実験不能をなくすため，JIS T 8010 で規定された沿面距離以上の 10 cm（手袋の縁から水面まで 5 cm）とした。実験装置の概略を Fig. 6 に示す。

3.3 実験試料として用いた手袋

本実験に使用した手袋は，JIS T 8112「電気用ゴム手袋」の種類分けによれば，C種（3,500 V を越え 7,000 V 以下の電気作業に使用するもの）で，その外形寸法が

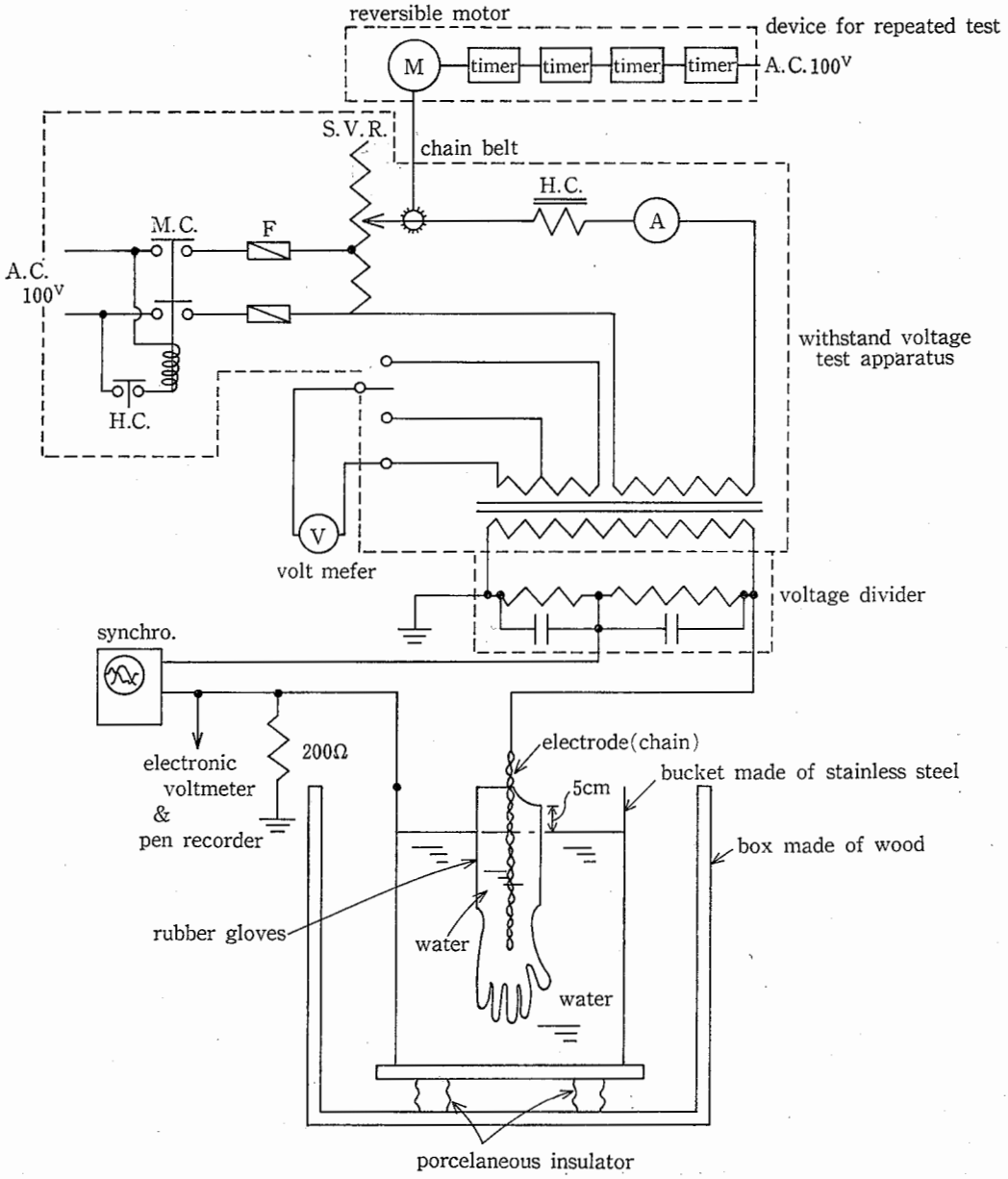

Fig. 6　Schematic diagram of experimental equipment
実験装置の概略

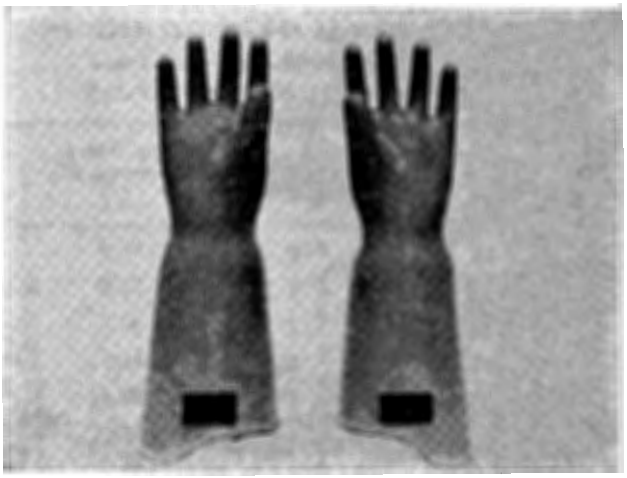

Fig. 7　Rubber gloues for use in high voltage electrical working
手袋の外観

405 mm のものである。この手袋は，現在，大手A電気工事会社が採用しているB社製のもので，A電気工事会社では，胴太，横えぐりタイプのS（寸法の大小を表わす）と呼ばれるものであり，その外観を Fig. 7 に示す。

この手袋の原料は 90% 以上が天然ゴムで，残りが加流剤，加流助剤，老化防止剤，充塡剤，色素などから成っており，その製造方法は，これら原料を揮発油で溶かしてゴム糊を作り，この中に手型を浸漬して造膜したものを乾燥，加流することによって製造される。

なお，C種電気用ゴム手袋の肉厚は JIS T 8112 によれば，手のひら，甲，指の部分で 1.3～2.4 mm，その他胴，指の先端部分で 1.3～2.7 mm と規定されているが，実験に使用された手袋は胴部分の肉厚が約 2.0～2.2mm であった。

また，この手袋は，メーカーの出荷段階で 20 kV×1 分間の耐電圧試験に合格したものである。

4.　実験結果

4.1　破壊電圧の分布

step-stress 試験から得られた破壊電圧の結果を Table 1 に示す。この結果より累積頻度を求め，ワイブル確率紙上にプロットすると Fig. 8 のようになる。その結果は一本の直線で表わすことができ，手袋の破壊電圧の分布が（6）式をよく満足しているとみなせる。この図より尺度のパラメータ η_1（破壊確率が 63.2% となる破壊電圧）を求めると 29.5(kV) であり，形のパラメータ m_1 を求めると 5.45 であった。そこで，これら

Table 1　Results of step-stress test
ステップストレス試験の結果

breakdown voltage V (kV)	number of occurrence, n	cumulative frequency, $F(V)$ (%)
20	1	9.1
25	4	45.5
29	1	54.5
31	2	72.7
32	1	81.8
35	1	90.9

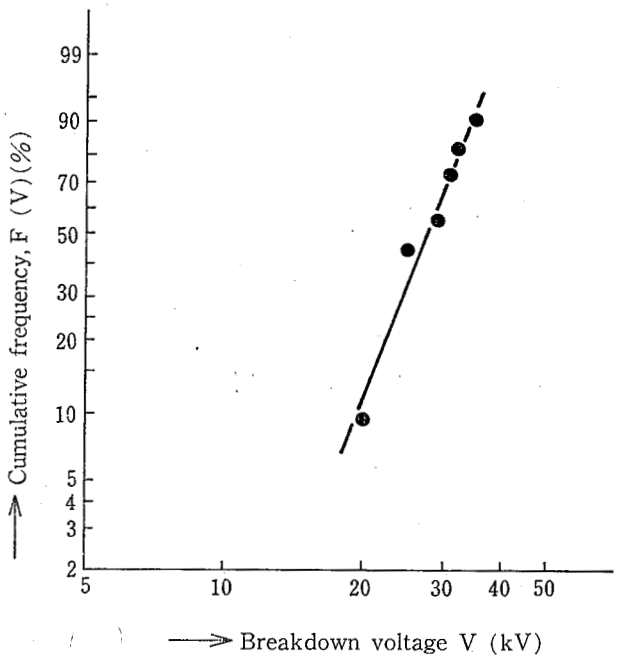

Fig. 8　Cumulative distribution of breakdown voltage
破壊電圧の累積分布

の値を（6）式に代入して，手袋の破壊電圧の累積分布関数 $F_1(V)$ を求めると（13）式のようになる。

$$F_1(V)=1-\exp\left[-\left(\frac{V}{29.5}\right)^{5.45}\right] \qquad (13)$$

ただし，V：(kV)

また，この図より，確率論的にみて，この手袋は，20 kV の印加電圧で破壊する確率が約 11%，10 kV の印加電圧で約 0.32% であり，破壊確率が 50% の破壊電圧は約 27.5 kV である。

4.2　一定ストレスによる破壊時間の分布

26 kV の一定過電圧を連続して加える constant-stress 試験から得られた破壊時間の結果を Table 2 に示す。こ

Table 2 Results of constant-stress test (when 26 kV stress is applied continuously)
26 kV の連続ストレス試験の結果

time to breakdown, t (min)	number of occurrence, n	cumulative frequency, $F(t)$ (%)
less than 0.1	3	27.3
1.4	1	36.4
2.0	1	45.5
11.5	1	54.5
177.0	1	63.6
531.2	1	72.7
∞[1]	2	90.9

1) non-breakdown in 32 hour's time

の結果より累積頻度を求め，ワイブル確率紙上にプロットすると Fig. 9 のようになる。この場合も，その結果は一本の直線で表わすことができ，手袋の一定ストレスによる破壊時間の分布が（7）式をよく満足しているとみなせる。このグラフより尺度のパラメータ η_2（破壊確率が 63.2% となる破壊時間）を求めると 1.67 時間であり，形のパラメータ m_2 を求めると，0.16 であった。そこで，これらの値を（7）式に代入して，手袋に 26 kV の一定過電圧を加えた場合の累積分布関数 $F_2(t)$ を求めると（14）式のようになる。

$$F_2(t)=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{1.67}\right)^{0.16}\right] \qquad (14)$$

ただし，t：(hours)

Table 3 Results of constant-stress test (when 26 kV stress is applied repeatedly for one min., followed each by one min. rest)
26 kV×1 min. の繰返しストレス試験の結果

repeatedly number of cycle, N	number of occurrence, n	cumulative frequency, $F(N)$ (%)
1	2	16.7
4	1	25.0
6	1	33.3
8	1	41.7
37	1	50.0
103	1	58.3
126	1	66.7
174	1	75.0
∞[1]	2	91.7

1) non-breakdown in 2,000 number of cycle

4.3 繰返しストレスによる破壊回数の分布

次に，26 kV の過電圧を 1 分間印加後，1 分間休止する電圧ストレスを繰返し加えた場合の破壊までの繰返し回数の結果を Table 3 に示す。この結果より累積頻度を求め，ワイブル確率紙上にプロットすると Fig. 10 のようになる。また，26 kV の過電圧を 3 分間印加後，1 分間休止する電圧ストレスを繰返し加えた場合の破壊までの繰返し回数の結果を Table 4 に示す。この結果より，同じく累積頻度を求め，ワイブル確率紙上にプロットすると Fig. 11 のようになる。この場合も，これらの結果

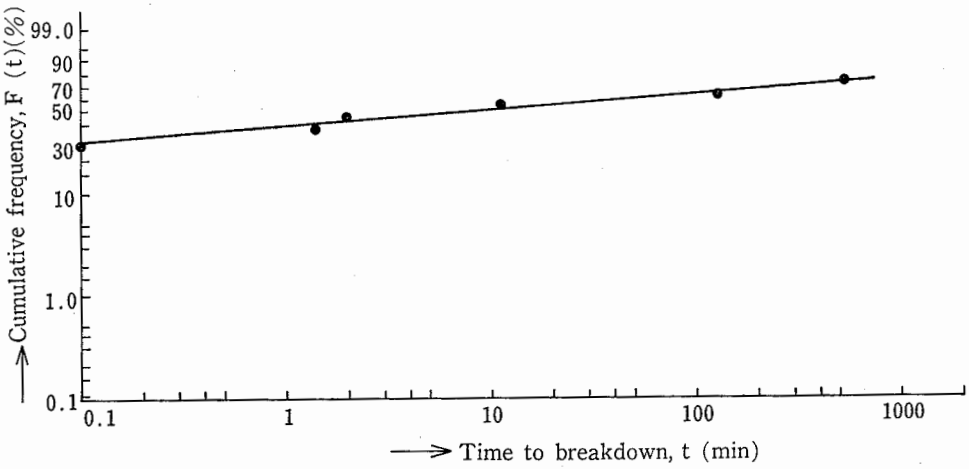

Fig. 9 Cumulative distribution on time to breakdown
破壊時間の累積分布

Table 4 Results of constant-stress test (when 26 kV stress is applied repeatedly for three min., followed each by one min. rest)
26 kV×3 min. の繰返しストレス試験の結果

repeatedly number of cycle, N	number of occurrence, n	cumulative frequency, $F(N)$ (%)
1	3	25.0
2	1	33.3
4	1	41.7
6	1	50.0
14	1	58.3
23	1	66.7
51	1	75.0
165	1	83.3
∞[1)]	1	91.7

1) non-breakdown in 760 number of cycle

は各々一本の直線で表わすことができ，手袋に一定ストレスを繰返し加えて発生する破壊分布は，（8）式をよく満足しているとみなせる。このグラフより尺度のパラメータ η_3 と形のパラメータ m_3 を求め，これらの値を（8）式に代入して，累積分布関数 $F(N)$ を求めると（15）式と（16）式のようになる。

1分印加-1分休止の繰返しストレスの場合，

$$F_3(N)=1-\exp\left[-\left(\frac{N}{99}\right)^{0.3}\right] \qquad (15)$$

3分印加-1分休止の繰返しストレスの場合

$$F_3(N)=1-\exp\left[-\left(\frac{N}{22}\right)^{0.35}\right] \qquad (16)$$

5. 考　　察

5.1 電圧ストレスを連続印加した場合の寿命

（13）式と（14）式より，電圧ストレスを連続して加えた場合の寿命式は，（9）式の拡張されたワイブル分布関数から（17）式のようになる。

$$F_1(V,t)=1-\exp[-C_1\cdot V^{5.45}\cdot t^{0.16}] \qquad (17)$$

ただし，

$$C_1=\left(\frac{1}{29.5}\right)^{5.45}\cdot\left(\frac{1}{1.67}\right)^{0.16}=8.99\times10^{-9}$$

この式より，破壊確率が 50，10，1 及び 0.5% の場合の寿命式を求めると Table 5 のようになり，その関係を両対数紙に描くと Fig. 12 のようになる。

この結果から，手袋に電圧を連続的に加え続けると劣化して，いつかは破壊に至るといえる。この破壊に至る時期は Table 5 の結果からも知られるように，破壊確率を小さくとる程，またストレスとして加える電圧を少し大きくするだけで，寿命が極端に短かくなる傾向がある。Fig. 12 の中の×印は Table 2 の結果（26 kV 連続印加時の寿命）と予備実験で得られた結果（28 kV で 8.5 分で破壊）とをプロットしたものであるが，このことからも寿命のバラツキが非常に大きいことが知られる。また，Table 5 の結果から，この手袋は使用期間中に 10 kV の電圧ストレスを連続的に受けたとしても約 1.51×10^6 年（破壊確率 10%）～約 230 日（破壊確率 1%）の寿命があり，また，6.6 kV の電圧ストレスを連続的に受けたとしても約 8.81×10^5 年（破壊確率 1%）

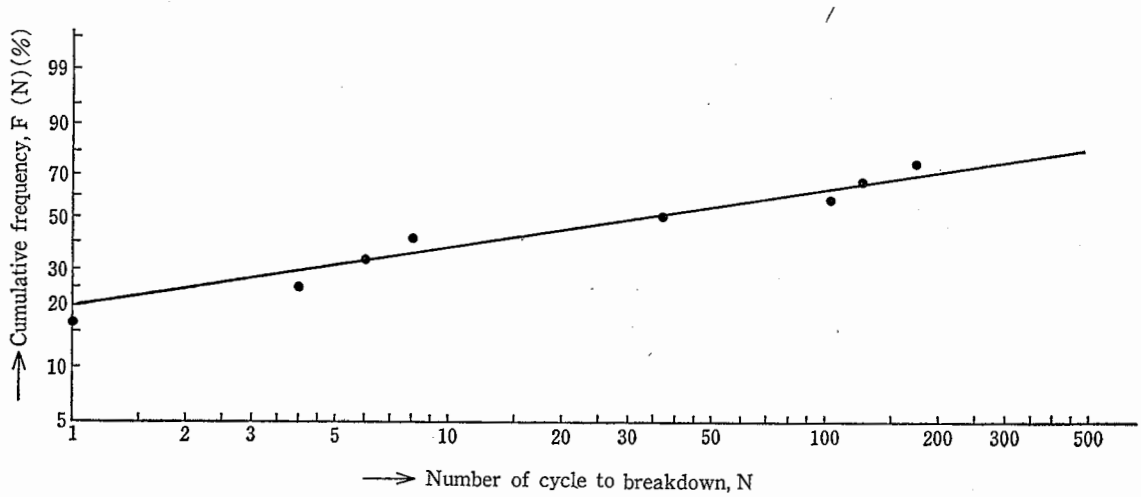

Fig. 10 Cumulative distribution on number of cycle to breakdown
破壊までの繰返し回数の累積分布

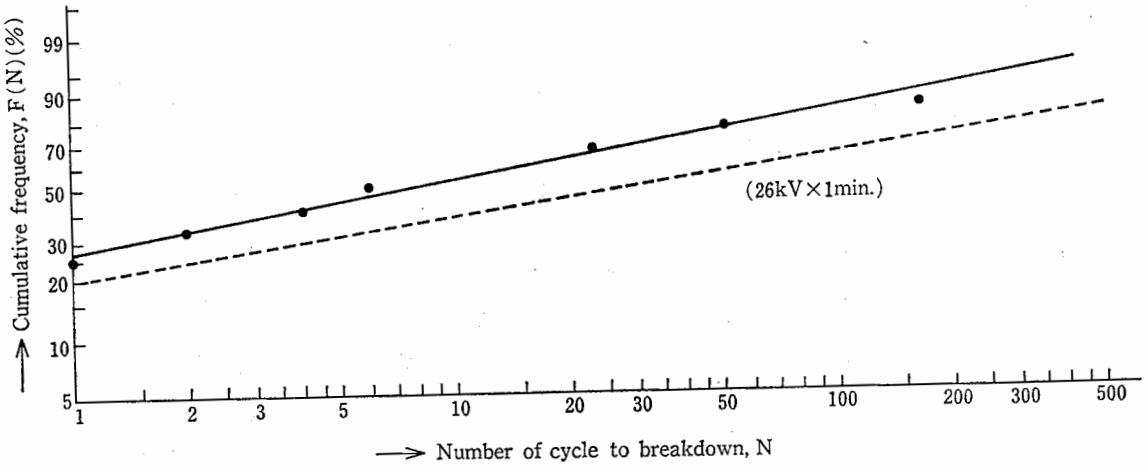

Fig. 11　Cumulative distribution on number of cycle to breakdown
破壊までの繰返し回数の累積分布

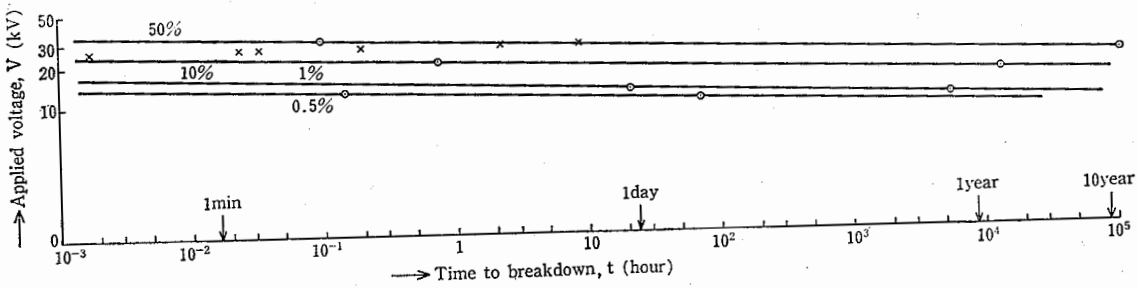

Fig. 12　Life curves of rubber gloves when voltage stress is applied continuously
連続ストレスによる高圧用ゴム手袋の寿命曲線

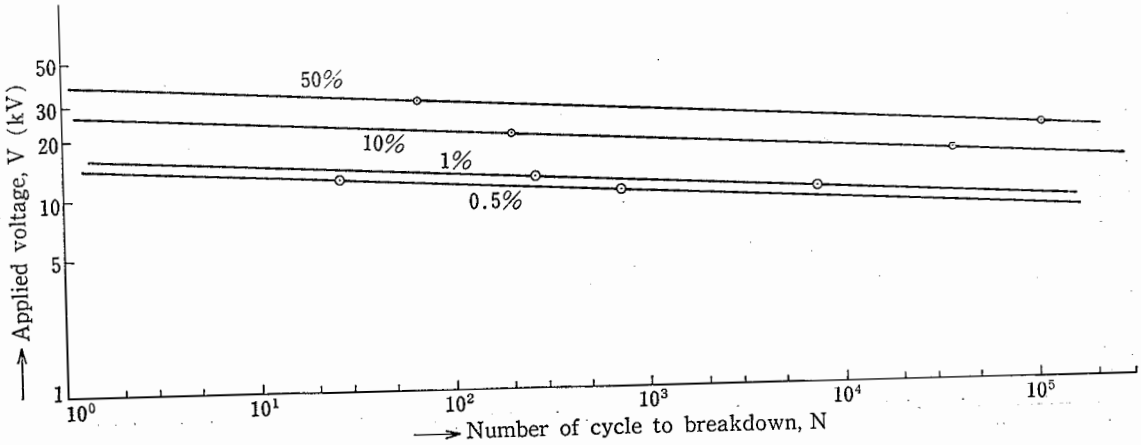

Fig. 13　Life curves of rubber gloves when voltage stress is applied repeatedly for one min., followed each by one min. rest
1分印加の繰返しストレスによる高圧用ゴム手袋の寿命曲線

Table 5 Life distribution formulas
(when voltage stress is applied continuously)
連続印加の寿命式

breakdown probability $F(V, t)$ (%)	life distribution formula t : hour, V : kV	example
50	$t \fallingdotseq \frac{1.969\times10^{49}}{V^{34.06}}$	if $V=20$ kV, then $t \fallingdotseq 10.9$ years if $V=30$ kV, then $t \fallingdotseq 5.78$ minutes
10	$t \fallingdotseq \frac{1.516\times10^{44}}{V^{34.06}}$	if $V=12$ kV, then $t \fallingdotseq 3.0\times10^{3}$ years if $V=20$ kV, then $t \fallingdotseq 44.2$ minutes
1	$t \fallingdotseq \frac{6.348\times10^{37}}{V^{34.06}}$	if $V=10$ kV, then $t \fallingdotseq 230$ days if $V=12$ kV, then $t \fallingdotseq 11.1$ hours
0.5	$t \fallingdotseq \frac{8.210\times10^{35}}{V^{34.06}}$	if $V=10$ kV, then $t \fallingdotseq 71.5$ hours if $V=12$ kV, then $t \fallingdotseq 8.62$ minutes

～約 1.14×10^{4} 年（破壊確率 0.5%）の寿命があると推定できる。実際の使用期間中に受ける電圧ストレスは，手袋を作業者が着用して高圧活線作業を行うときと，約6ケ月ごとに1度ずつ 10kV×1分間の耐電圧試験を行うときであり，数年程度の使用期間に受ける電圧ストレスによる寿命の短縮は比較的少ないと考えられ，これによる劣化を危惧する心配はなさそうである。しかし，電圧ストレスを少し大きくするだけで寿命が極端に短かくなる傾向があるため，手袋の安全性の確認には，出来るだけ低い電圧で手袋の残存破壊電圧などを非破壊で推定することが好ましく，その方法の確立が望まれる。

5.2 電圧ストレスを繰返し印加した場合の寿命

前節の推定は，手袋に常に電圧ストレスが加えられている場合の寿命式から推定したものである。しかし，手袋は，電力ケーブル，コンデンサ等のように常に電圧が印加されているものではなく，作業者が手袋を着用して活線作業を行なうときと，あとは定期自主検査で行われる耐電圧試験のときぐらいである。そこで，電圧ストレスの加える状態を連続的でなく，ある一定時間で繰返し加えた場合の寿命式を求めた方が，より現実的である。そこで，(13) 式と (15) 式より，また，(13) 式と (16) 式より，電圧ストレスを繰返し加えた場合の手袋の寿命式を誘導すると，(10) 式の拡張されたワイブル分布関数から (19) 式及び (20) 式を得る。

1分印加—1分休止の繰返しストレスの場合，

$$F_2(V, N)=1-\exp[-C_2\cdot V^{5.45}\cdot N^{0.3}] \qquad (19)$$

3分印加—1分休止の繰返しストレスの場合，

$$F_3(V, N)=1-\exp[-C_3\cdot V^{5.45}\cdot N^{0.35}] \qquad (20)$$

ただし，

$$C_2=\left(\frac{1}{29.5}\right)^{5.45}\cdot\left(\frac{1}{99}\right)^{0.3}=2.46\times10^{-9}$$

$$C_3=\left(\frac{1}{29.5}\right)^{5.45}\cdot\left(\frac{1}{22}\right)^{0.35}=3.31\times10^{-9}$$

これらの式より，破壊確率が 50, 10, 1 及び 0.5% の場合の寿命式を求めると各々 Table 6, Table 7 のようになり，その関係を両対数紙に描くと Fig. 13 及び Fig. 14 のようになる。

この結果から，手袋に電圧を繰返し加えた場合にも劣化して，いつかは破壊に至るといえる。この破壊に至る繰返し回数も Table 6, Table 7 の結果から知られるように，破壊確率を小さくとる程，またストレスとして加える電圧を少し大きくするだけで，寿命が極端に短かくなる傾向がある。

また，Table 6 の結果から，この手袋は使用中に 10 kV×1分間の電圧ストレスを繰返し受けたとしても約 1.86×10^{7} 回（破壊確率 10%）～約 7,380 回（破壊確率 1%）の寿命があると推定でき，Table 7 の結果から，使用中に 10kV×3分間の電圧ストレスを繰返し受けたとしても約 7.37×10^{5} 回（破壊確率 10%）～約 895 回（破壊確率 1%）の寿命があると推定できる。そこで，実際に使用期間中に 10kV×1分間，又は 10kV×3分間の耐電圧試験を6ケ月ごとに1度ずつ行なっても，数年程度の使用期間で受ける電圧ストレスによる寿命の短縮は比較的少ないと考えられ，これによる劣化を危惧する心配はなさそうである。

しかし，現実の手袋は数年程度の使用期間中に行なう 10kV×1分間の耐電圧試験で不合格のものがでているが，実際の使用環境下では使用中に受けた傷，大気中の

Table 6 Life distribution formulas
(when voltage stress is applied repeatedly for one min., followed each by one min. rest)
繰返し印加の寿命式

breakdown probability $F(V, N)$ (%)	life distribution formula N (number of cycle), V (kV)	example (number of cycle)
50	$N \fallingdotseq \frac{1.469\times10^{28}}{V^{18.17}}$	if $V=20$ kV, then $N\fallingdotseq33,680$ if $V=30$ kV, then $N\fallingdotseq21$
10	$N \fallingdotseq \frac{2.753\times10^{25}}{V^{18.17}}$	if $V=12$ kV, then $N\fallingdotseq678,000$ if $V=20$ kV, then $N\fallingdotseq63$
1	$N \fallingdotseq \frac{1.092\times10^{22}}{V^{18.17}}$	if $V=10$ kV, then $N\fallingdotseq7,380$ if $V=12$ kV, then $N\fallingdotseq269$
0.5	$N \fallingdotseq \frac{1.074\times10^{21}}{V^{18.17}}$	if $V=10$ kV, then $N\fallingdotseq726$ if $V=12$ kV, then $N\fallingdotseq26$

Table 7 Life distribution formulas
(when voltage stress is applied repeatedly for three min., followed each by one min. rest)
繰返し印加の寿命式

breakdown probability $F(V, N)$ (%)	life distribution formula N (number of cycle), V (kV)	example (number of cycle)
50	$N \fallingdotseq \frac{5.957\times10^{23}}{V^{15.57}}$	if $V=20$ kV, then $N\fallingdotseq3,297$ if $V=30$ kV, then $N\fallingdotseq6$
10	$N \fallingdotseq \frac{2.738\times10^{21}}{V^{15.57}}$	if $V=12$ kV, then $N\fallingdotseq43,100$ if $V=20$ kV, then $N\fallingdotseq15$
1	$N \fallingdotseq \frac{3.325\times10^{18}}{V^{15.57}}$	if $V=10$ kV, then $N\fallingdotseq895$ if $V=12$ kV, then $N\fallingdotseq52$
0.5	$N \fallingdotseq \frac{4.556\times10^{17}}{V^{15.57}}$	if $V=10$ kV, then $N\fallingdotseq123$ if $V=12$ kV, then $N\fallingdotseq7$

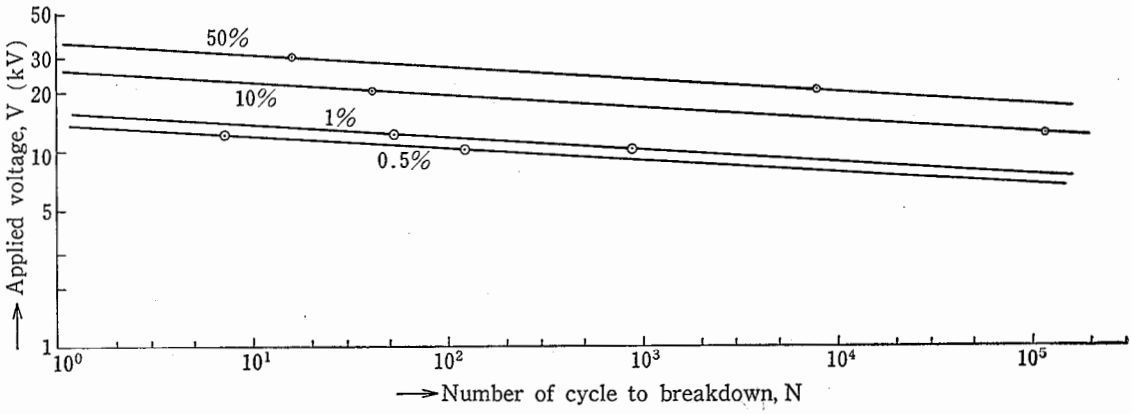

Fig. 14 Life curves of rubber gloves when voltage stress is applied repeatedly for three min., followed each by one min. rest
3分印加の繰返しストレスによる高圧用ゴム手袋の寿命曲線

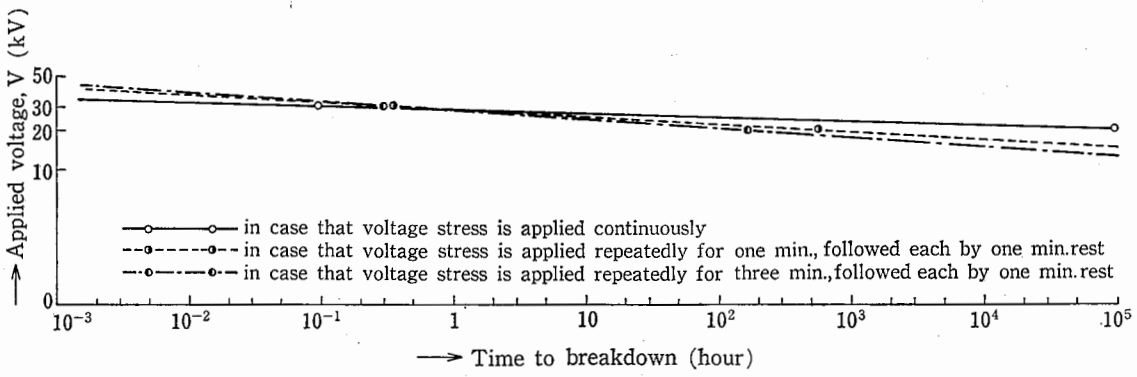

Fig. 15　Life curves dependent upon the mode of stress
ストレスの加え方の違いによる寿命曲線

酸素，太陽光，熱などによって劣化されているため，これらの劣化が電圧ストレスと重畳されて，寿命を短縮することは当然考えられる。

また，1回の印加時間が3分間の場合と1分間の場合の耐電圧試験において，破壊確率が等しくなる試験電圧値を(19)式と(20)式から求めると次式のようになる。

$$V_1=\left(\frac{C_3}{C_2}\right)^{1/5.45}\cdot V_3 \fallingdotseq 1.06\,V_3 \quad (\mathrm{kV})$$

ただし，　V_1：印加時間が1分間の試験電圧値

V_3：印加時間が3分間の試験電圧値

そこで，ゴム手袋の米国規格（ASTM，D 120）で，耐電圧試験の印加時間を3分間にしている（例えば，class 3のゴム手袋では 20 kV×3分間）が，この耐電圧試験と等価な破壊確率をもつ耐電圧試験を印加時間が1分間で得るには，上式より，約 21.1 kV となる。

5.3　ストレスの加え方の違いによる寿命

電圧ストレスを連続的に加えた場合と，1分間周期で繰返し加えた場合，また，3分間周期で繰返し加えた場合の手袋の寿命分布の違いを検討するために，電圧ストレスを連続的に加えた場合の分布図（$V-t$ グラフ）上に，1分間周期及び3分間周期で得られた破壊時の回数から印加された延時間を算出して $V-t$ グラフ上に示すと Fig. 15 のようになる（破壊確率 $F=50\%$ の場合）。これより，電圧ストレスは連続的に加えられるよりも繰返し加えられる方が劣化が早いこと，また，繰返しストレスでも1分周期で加えられるより3分周期（ただし，休止時間1分）で加えられる方が更に劣化が促進されることが予想される。

6.　ま　と　め

手袋は，使用期間中に受ける種々のストレスによって電気的にも機械的にも劣化するが，手袋の使用目的から電気的劣化，特に耐電圧値の低下が重要視される。そこで，本研究は，使用期間中に受ける電圧ストレスによって手袋の耐電圧値がどの程度低下するかを検討するために，過電圧ストレスによる加速寿命試験を行ない，これより手袋の寿命曲線を求め，使用期間中に受ける程度の電圧ストレスによる劣化程度を推定した。その結果を整理すると以下のようになる。

1)　現状の手袋は，電圧ストレスによる寿命のバラツきが大きく，破壊確率を小さく仮定すると寿命は極端に短かくなる。

2)　手袋の寿命は，破壊確率を一定に仮定した場合でも，電圧ストレスを少し大きくすると極端に短縮される。従って，手袋の安全性の確認には，出来るだけ低い電圧でその残存破壊電圧値などを推定することが好ましく，その計測技術の開発が望まれる。

3)　電圧ストレスを連続的に加えた場合の手袋の寿命分布は次式で与えられる。

$$F_1(V,t)=1-\exp\left[-C_1\cdot V^{5.45}\cdot t^{0.16}\right]$$

ただし，C_1＝定数（8.99×10^{-9}）

V＝印加電圧（kV），t＝破壊時間（時間）

4)　一定電圧を1分間又は3分間繰返し加えた場合の手袋の寿命分布は次式で与えられる。

1分印加—1分休止の繰返しストレスの場合

$$F_2(V,N)=1-\exp\left[-C_2\cdot V^{5.45}\cdot N^{0.3}\right]$$

3分印加—1分休止の繰返しストレスの場合

$$F_3(V,N)=1-\exp\left[-C_3\cdot V^{5.45}\cdot N^{0.35}\right]$$

ただし，

C_2＝定数（2.46×10^{-9}），C_3＝定数（3.31×10^{-9}）

V＝印加電圧（kV），N＝破壊までの繰返し回数

5)　3)及び4)の手袋の寿命曲線から推定して，数年の使用期間で受ける電圧ストレスのみによる寿命の短縮は比較的少ないと言える。しかし，実際の使用環境下で

は使用中に受けた傷，大気中の酸素などによって劣化されているため，これらの劣化が電圧ストレスと重畳されて寿命を更に短縮すると考えられる。

6) 印加時間が3分間の場合と1分間の場合の1回の耐電圧試験において，破壊確率が等しくなる試験電圧値は，

$$V_1 \fallingdotseq 1.06 \cdot V_3 \quad (\mathrm{kV})$$

ただし，　V_1：印加時間が1分間のときの試験電圧

V_3：印加時間が3分間のときの試験電圧

となり，20kV×3分間の耐電圧試験は21.1kV×1分間の耐電圧試験と等価とみなせる。

7) 電圧ストレスは連続的に加えられるより，一定周期で繰返し加えられる方が，更に，一定周期の印加時間が長い方が寿命が短かくなり劣化が促進される傾向がある。

謝　辞

本研究を行なうにあたり，東京電力(株)の安全部から多大な御協力を得ました。ここで深く謝意を表します。

(58. 3. 7 受付)

参　考　文　献

1) 日科技連：信頼性データの解析
2) 金子，杉山：電気学会絶縁材料研究会資料，IM-72-2 (1972)
3) 金子，杉山：昭和47年度電気四学会連合大会，94(1972)
4) F.H.Kreuger : The Weibull distribution for evaluation of cable dielectrics, CIGRE Report, 21, April '71

産業安全研究所研究報告　RIIS-RR-31-2

昭和58年6月10日　発行

発行所　労働省産業安全研究所
〒108　東京都港区芝5丁目35番1号
電話（03）453—8441（代）
印刷所　新日本印刷株式会社

UDC 621.315.61：621.3.015.3：620.169：614.896

高圧用ゴム手袋の電気的ストレスによる劣化

市川健二

産業安全研究所研究報告，RIIS-RR-31-2，1～14（1983）

高圧用ゴム手袋は，使用期間中に受ける種々の要因によって劣化する。その劣化要因の1つに電気的ストレスがある。本報は，新品の高圧用ゴム手袋に電圧ストレスのみを加えたときの絶縁破壊分布（寿命）を統計的手法を用いて推定し，これより電圧印加による手袋の劣化特性を検討した結果を示す。電圧ストレスとしては，一定電圧を連続して加えた場合と1分印加－1分休止及び3分印加－1分休止の電圧を繰返し加えた場合の3種類である。

（表 7，図 15）

UDC 621.315.61：621.3.015.3：620.169：614.896

Deterioration due to voltage stresses of rubber gloves for use in high voltage electrical working

by K. Ichikawa

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety,
RIIS-RR-31-2, 1～14 (1983)

Rubber gloves for use in high voltage electrical working deteriorate on account of various stresses received during their use, among which there is an electrical stress. This report describes the results of accelerated life tests of rubber gloves, which are carried out with voltage stress, and estimates a degree of thier electrical deterioration from the result. Application modes of voltage stress are as follows: (i) continuous application, (ii) repeated application with one min. on and each followed by one min. rest, and (iii) repeated application with three min. on and each followed by one min. rest.

(7 tables, 15 figures)