

モデルによる空気遮断器遮断性能の推定

Predetermination of the Interrupting Performance of Air-blast Circuit Breaker by Models

高 砂 常 義*
Tsuneyoshi Takasuna

内 容 梗 概

空気遮断器の遮断性能を相似に作られたモデルの性能から推定する方法について述べている。すなわち、あらかじめ相似な試験条件を求めておき、この結果に基づいて 3/8 モデルと 1/2 モデルの性能を測定し、これより実物の性能を推定した結果、実測値と推定値はほぼ一致し、遮断性能についても推定が一応可能であることがわかった。このようなモデル試験法は従来実施されていなかったが、この方法によれば大容量試験設備を設けなくても簡単な設備により遮断性能の推定ができる。したがって新製品の開発、大容量製品の性能判定にも役だつことが期待される。

1. 緒 言

近年電力系統の拡大に伴って、空気遮断器（以下 ABB と略称する）はしだいに大容量化される傾向にある。このため、大容量 ABB の性能検証試験のみならず、その開発研究途上において必要な試験設備はますます増大の一途をたどっており、このままで進むと試験のために膨大な経費を要することになる。これをある程度解決するために、いわゆる等価試験法（特に合成試験法）の開発が進められ、一部では実用するまでに至ったものもある^{(1)~(4)}。

しかしながら、従来の等価試験法の考え方は、供試遮断器をそのままし、試験電源を等価的に大容量化せしめることに主眼をおいていた。このため、新製品開発の過程では多数の実物大遮断器を製作し、試験しなければならなかったのも、非能率的、非経済的な面があった。また、供試遮断器の単位容量が増大するにつれて、試験設備もある程度比例的に増加しなければならなかった。

これに対し、従来の等価試験法と考え方の逆なモデル試験法が空気遮断器の場合に適用できそうであると考えられた⁽⁵⁾。このモデル試験法は試験設備を増強する代わりに供試品を縮小し、このモデル遮断器について十分な実負荷試験をした結果から実物大のものの性能を推定する方法である。空気遮断器の諸性能をそのモデルから推定せんとする考え方は従来でもまったくなかった訳ではないが、相似性を十分考慮したモデルを使用しなかったのも、その結果から実物の特性を定量的に推定することは信頼性が低かった。しかし、モデルと実物との間に、力学的相似関係が成り立つようにモデルを製作すると、力学的現象、たとえば気流状況、可動接触子のストローク特性などが相似となり、モデルの特性から実物の特性を推定できることが次第にわかってきた⁽⁶⁾。さらに適切な電氣的相似関係をも満足させれば、遮断性能の推定も可能となるのであらうと考えられる。

著者は数年前からこの問題について研究を始め、理論的には推定が可能であることを見だし、必要な試験条件を明らかにした⁽⁵⁾。その後、実験的研究によって ABB の操作特性の推定が可能であることを明らかにし⁽⁷⁾、さらに無負荷絶縁耐力回復性の推定も相似になることを明らかにした⁽⁸⁾。

このような情勢にかんがみ、他に先がけてこのモデル試験法の研究を遂行することは経済性、独創性の点からいってきわめて有意義であると考え、超高压電力研究所、日立製作所などが中心となり、通産省、大学、電力会社、研究所、電機メーカーなどの参加を得て委員会を組織した。この委員会の研究については別に詳細な報告書

が公表されることになっているので、本報告では主として日立製作所において実施したモデル試験研究について述べる。

2. 遮断現象の相似条件の理論的考察

ABB の性能をモデルにより研究する場合、実物とモデルとの間には、

- (a) 幾何学的相似条件
- (b) 力学的相似条件

を満足する必要があることはすでに詳述⁽⁷⁾されており、ここで再びそれらの相似係数を第 1 表に示す。 α および β はそれぞれモデルの縮尺率および圧力比を表わす。相似係数の計算例では $\beta=1$ の場合を示した。以後の考察においても特別な場合を除き $\beta=1$ として論議を進める。

2.1 モデルの電氣的相似条件

まず、遮断性能に関連した電氣的量の相似条件を検討する。

2.1.1 絶 縁 耐 力

一般に高压気体中の放電電圧 V_s は

$$V_s = B \frac{Pl}{\text{const} + \log(Pl)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに P : 圧 力
 l : ギャップ長
 B : 比例定数

で示される。上式の分母は Pl の変化に対してあまり変化しないので、近似的には

第 1 表 力 学 的 量 の 相 似 係 数

物 理 量	次 元 式		相似係数 α : 縮 尺 β : 密度比	相似係数計算例	
	L, M, T を基本次元とするとき	L, P, V を基本次元とするとき		$\alpha=2/3$ $\beta=1$	$\alpha=1/2$ $\beta=1$
長 さ	L	L	α	2/3	1/2
面 積	L^2	L^2	α^2	4/9	1/4
体 積	L^3	L^3	α^3	8/27	1/8
時 間	T	$L V^{-1}$	α	2/3	1/2
流 速	$L T^{-1}$	V	1	1	1
圧 力	$L^{-1} M T^{-2}$	P	β	1	1
力	$L M T^{-2}$	$L^2 P$	$\alpha^2 \beta$	4/9	1/4
加 速 度	$L T^{-2}$	$L^{-1} V^2$	α^{-1}	3/2	2
運 動 量	$L M T^{-1}$	$L^3 P V^{-1}$	$\alpha^3 \beta$	8/27	1/8
エ ネ ル ギ ー	$L^2 M T^{-2}$	$L^3 P$	$\alpha^3 \beta$	8/27	1/8
質 量	M	$L^3 P V^{-2}$	$\alpha^3 \beta$	8/27	1/8
流 量	$M T^{-1}$	$L^2 P V^{-1}$	$\alpha^2 \beta$	4/9	1/4
密 度	$L^{-3} M$	$P V^{-2}$	β	1	1
弾 性 力	$L M T^{-2}$	$L^2 P$	$\alpha^2 \beta$	4/9	1/4
空気消費量	M	$L^3 P V^{-2}$	$\alpha^3 \beta$	8/27	1/8

注：一般にある物理量 Q が実物とモデルとにおいて常に $Q_m = q Q_p$ で表わされるとき、 q を相似係数 (Similarity Parameter) とよぶ。 q は無次元定数である。

* 日立製作所日立研究所

第2表 電気的量の相似係数

電 気 的 量	次 元 式		相似係数 α : 縮 尺 β : 密度比	相似係数計算例	
	L, M, T を基本次元とするとき	L, P, V を基本次元とするとき		$\alpha=2/3, \beta=1$	$\alpha=1/2, \beta=1$
試 験 電 圧	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}$	$B' P L$	$\alpha\beta$	2/3	1/2
絶 縁 耐 力	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}$	$B' P L$	$\alpha\beta$	2/3	1/2
電 源 周 波 数	T^{-1}	$L^{-1} V$	α^{-1}	1.5	2
再起電圧固有周波数	T^{-1}	$L^{-1} V$	α^{-1}	1.5	2
再起電圧上昇率	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-3}$	$B' P V$	β	1	1
アーク電圧	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}$	$L P^{1/2} V$	$\alpha\beta^{1/2}$	2/3	1/2
遮断電流	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L P^{1/2}$	$\alpha\beta^{1/2}$	2/3	1/2
アーク電力	$L^2 M T^{-3}$	$L^2 P V$	$\alpha^2\beta$	4/9	1/4
アークエネルギー	$L^2 M T^{-2}$	$L^3 P$	$\alpha^3\beta$	8/27	1/8
遮断容量	$L^2 M T^{-3}$	$B' L^2 P^{3/2}$	$\alpha^2\beta^{3/2}$	4/9	1/4
アーク時間	T	$L V^{-1}$	α	2/3	1/2

注：次元式の B' は(2)式に示す比例常数で、次元式 $[X/P]=[P^{-1/2}V]$ で表わされる。

$$V_s = B' P I \dots\dots\dots (2)$$

で表わすことができる。 B' は X/P の次元（ここに X ：電位傾度）を持ち、気体の種類によって決まるほぼ一定の常数である。したがって、気体の種類が同じで、かつ PI の変化がわずかであれば、実物とモデルとの間で同一とみなすことができる。たとえば PI の値が $1/2 \sim 2$ 倍の間に変化しても、大気中球ギャップの場合の B' の変化はわずか 10% 以下である。ゆえに、絶縁耐力の相似係数は $\alpha\beta$ となる。

もし、 PI が著しく変化した場合は相似係数を若干修正する必要がある。

2.1.2 電気的量の次元変換と相似係数

遮断試験に関連した電気的量に次元解析を応用して次元変換を行ない、相似条件を求めてみる。力学的相似条件の場合と同様に実用的基本次元として、

L (長さ), P (圧力), V (流速)

を使用する。元来、電気的量の次元式は電磁単位系または静電単位系で表わされていて、基本次元は L, M, T のほかに μ_0 (透磁率) または ϵ_0 (誘電率) が使用されている。しかし μ_0 は無次元量であること、 ϵ_0 は $[L^{-2} T^2]$ の次元を持つことが知られている⁽⁹⁾ ので、結局すべての電気的量を (L, M, T) の三つの基本次元で表わすことができる。したがって、これらを (L, P, V) の次元式に変換することができる。このようにして次元変換により求めた相似係数を第2表に示す。

しかしながら、遮断現象に関連した量の相似係数を現象の考察により検討することが必要と考えられたので、以下に述べるように、電流遮断後の絶縁回復特性、遮断試験条件、アーク特性などについて検討を加える。

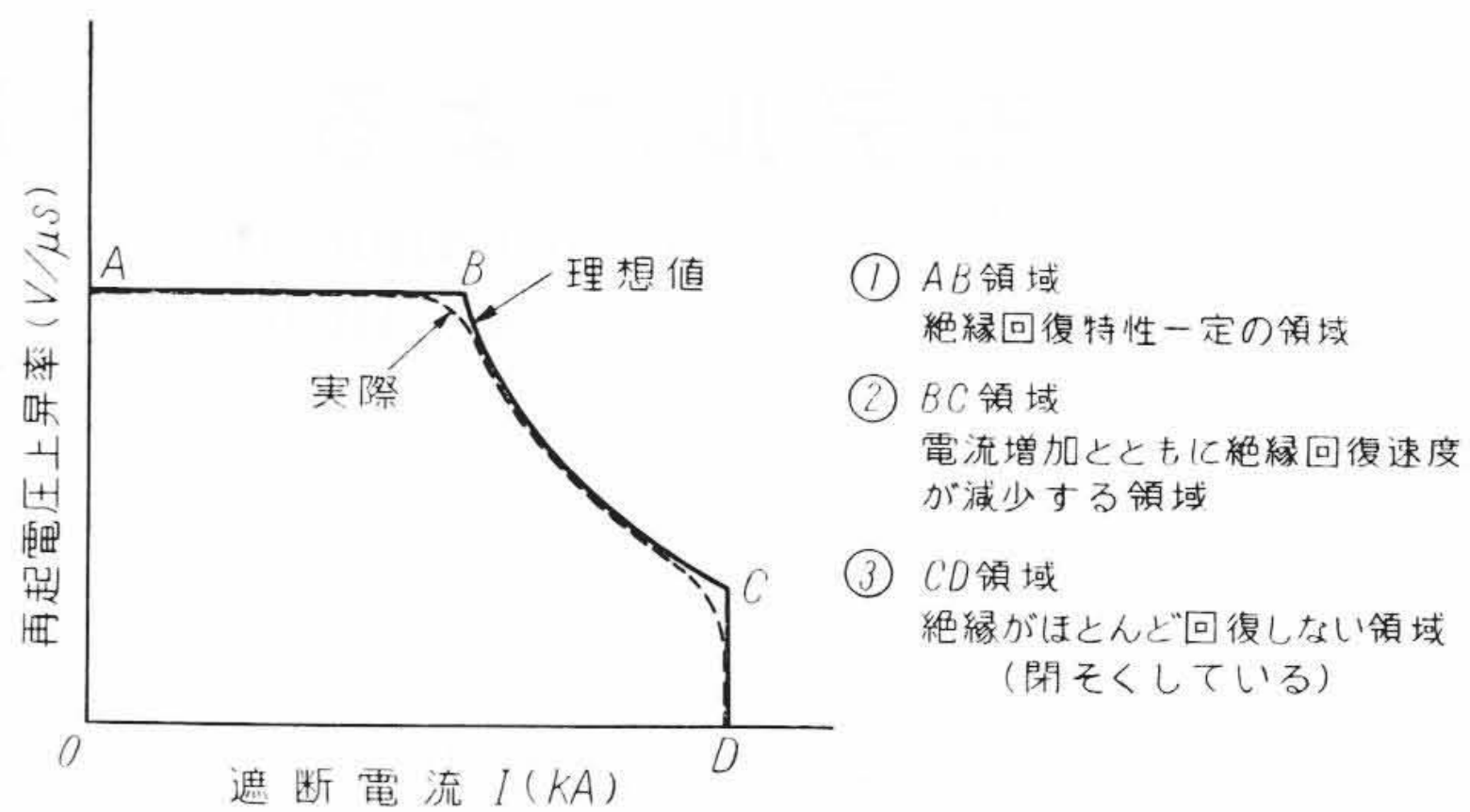
2.2 絶縁回復特性の相似性

2.2.1 絶縁回復に対する考え方

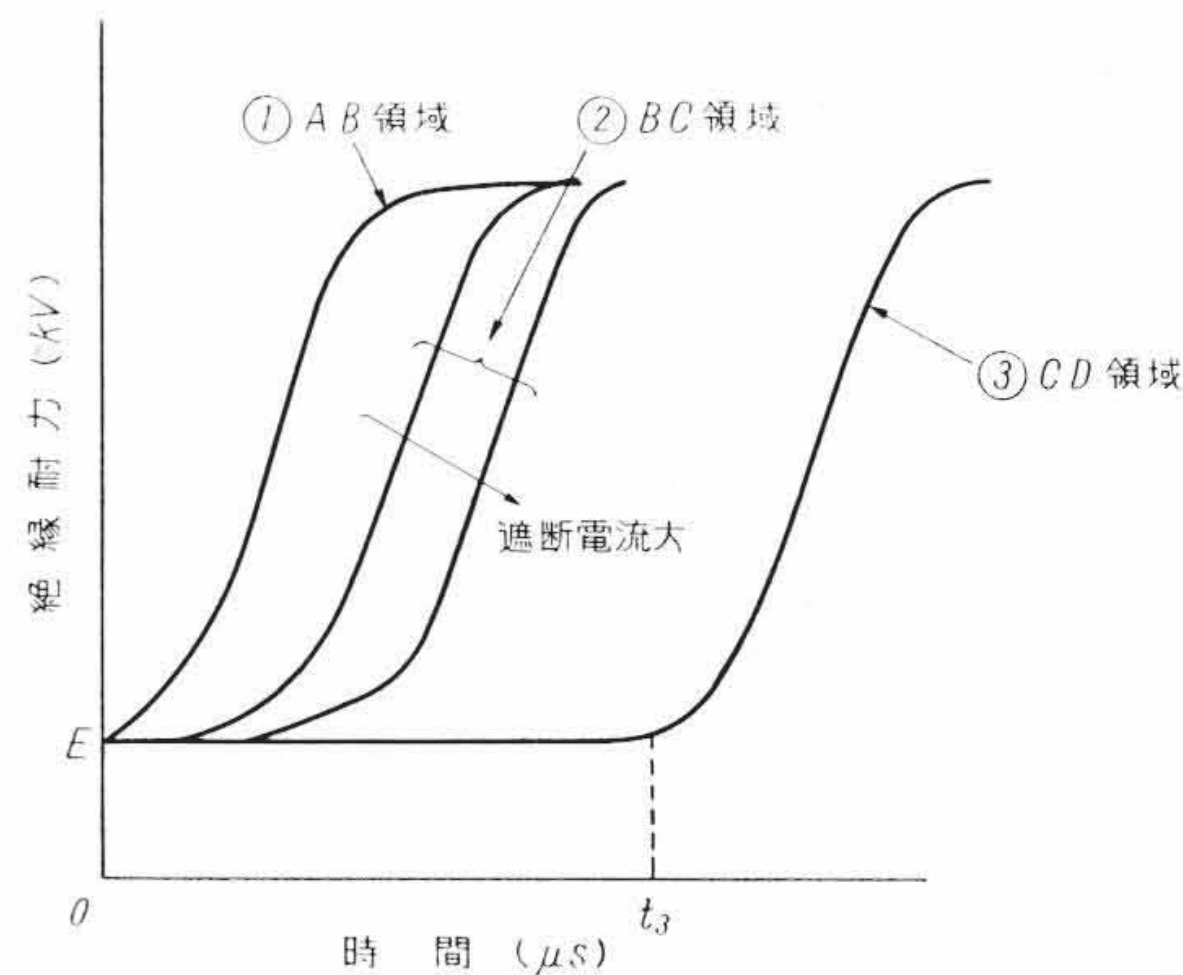
ABB が比較的小電流を遮断したあとの絶縁回復速度は非常に速く、約 1.4 kg/cm^2 の操作気圧で 1.2 kA を遮断したときの例⁽¹⁰⁾ でも平均 $600 \text{ V}/\mu\text{s}$ に達する。しかし、静止気体中のギャップの絶縁回復速度は数 $\text{V}/\mu\text{s}$ で非常におそい。このことは、ABB の絶縁回復はイオンの再結合や拡散の作用によるよりも、気流の Displacement (新鮮な気体がイオン化したガスを移動させて置換すること) によるものであることが理解される。

2.2.2 絶縁回復の三つの領域

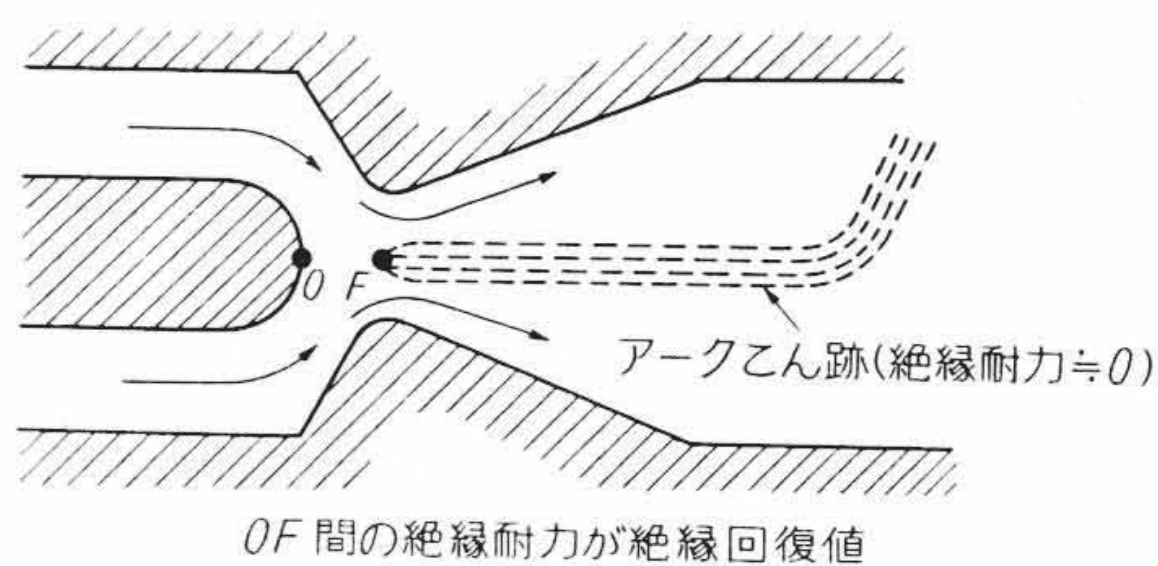
ABB の絶縁回復特性を吟味してみると、およそ三つに分類できる。これはちょうど第1図に示す遮断限界特性の三つの領域に対応するので、かりに AB, BC, CD 領域と呼ぶことにする。まず AB 領域は比較的小電流の場合で、絶縁回復特性が電流値に無関係にほぼ同じ特性を示す領域である。次に BC 領域は遮断電流



第1図 遮断限界特性



第2図 絶縁回復特性



第3図 AB領域の電流零値直後の絶縁回復説明図

の増加に伴って、絶縁回復速度が低下する領域である。この領域の現象は複雑であるので、相似性を考える場合、最も問題となる。最後に、CD 領域は再起電圧上昇率の値にほとんど無関係に電流値のみで遮断限界がほぼ決まる領域である。この電流値は閉そく電流と呼ばれ、この電流以上の大電流に対しては電流零値のあとしばらくの間、絶縁がほとんど回復しない。

これら三つの領域の絶縁回復特性をまとめて第2図に図示した(これらの特性は若干誇張して書かれている)。

(1) AB 領域

この領域では電流遮断直後の気流はアークの影響をほとんど受けていないので、単にアークこん跡を下流に押し流していると考えられる。第3図はこのときのアークこん跡の位置を想像して示したもので、絶縁耐力はOF間の放電電圧に等しいと考えられる。他方、モデルと実物の対応点の流速は等しいので、対応する時間 dt の間の絶縁回復速度は(2)式より

$$dV_s \div B' P u dt \text{ (実物)} \dots\dots\dots (3)$$

$$dV_{sm} \div B' P u (\alpha dt) = \alpha \cdot dV_s \text{ (モデル)} \dots\dots\dots (4)$$

ここに V_s, V_{sm} : 実物およびモデルの絶縁耐力

u : 対応点の流速(モデルと実物では同一値)

で表わされる。したがって、モデルと実物との間の絶縁耐力は

$$V_{sm} = \alpha V_s \dots\dots\dots (5)$$

となり、相似係数は α となる。

(2) BC領域

この領域は遮断電流を増すと次第に絶縁回復特性が低下する領域で、AB領域よりアーク電流が大きいために電流零値直前でもアーク周囲の空気はわずかに熱せられており、またノズルののど部を通る気流の平均温度が高くなるため流量は温度の平方根に逆比例して減少している。これらの原因により、電流零値直後の極間の気流状態はAB領域の場合に比べてやや高温であり、さらに上流側の冷たい気体の流速がやや低い。そのため絶縁回復特性は最初のわずかのあいだ絶縁耐力が低く、その後になって上昇する傾向にあると考えられる。このときも気流の対応点の温度が等しいことを是認するならば、(3)、(4)式と同様に

$$dV_{sm} \doteq B' P \left(\frac{T_0}{T} \right) u(\alpha dt) = \alpha \cdot dV_s \dots\dots\dots (6)$$

ここに T_0 : アークのないときの気流温度

T : アークによって熱せられた気流の温度

で表わされ、相似係数はやはり α となる。なお、対応点の気流温度が等しいためには、空気消費量の相似係数が α^3 であるから、アークエネルギーの相似係数も α^3 であればよいことになる。

(3) CD領域

この領域は閉そく限界電流以上の電流に対するもので、電流零値以後しばらくのあいだ絶縁耐力が著しく低い。この絶縁耐力が上昇し始めるまでの時間（閉そくが解ける時間）はアークエネルギーと流量の相似係数が同一であることから、相似係数は α になると考えられる。その後の絶縁回復はBC領域と同様であると考えればやはり相似係数は α になる。

2.2.3 ま と め

絶縁回復性の三つの領域について検討した結果では遮断電流、アーク時間およびノズル上流のアーク電圧の相似係数をそれぞれ α とし、したがってアークエネルギーの相似係数を α^3 とすることにより、どの領域でも絶縁回復電圧の相似係数は α となることが予想される。

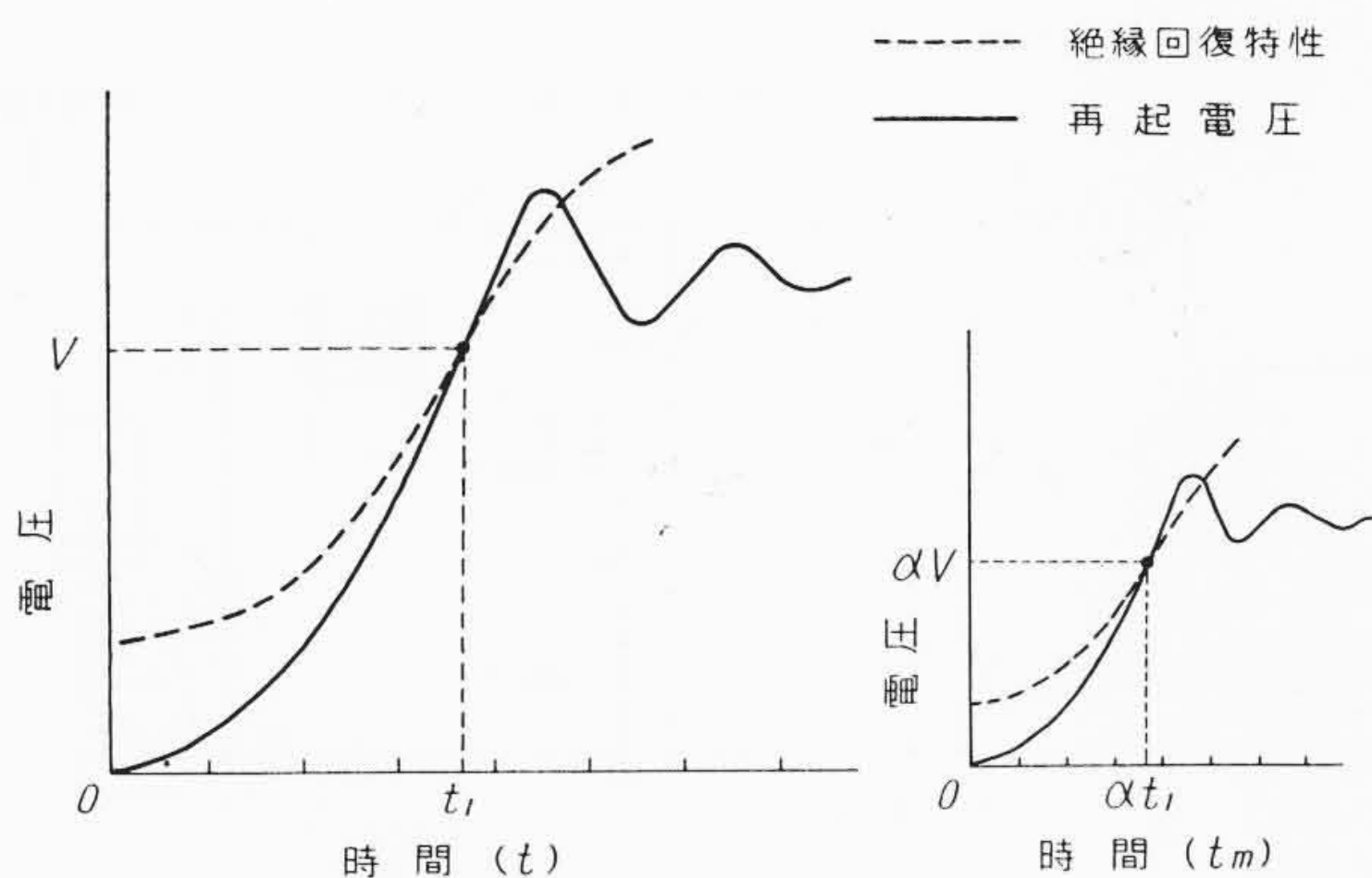
2.3 試験条件の相似性

2.3.1 試験電圧

遮断後極間に現われる回復電圧はモデルに対しては小さくする必要があるが、その値は極間絶縁耐力に比例させればよいと考えられる。 $\beta=1$ のとき、無負荷絶縁耐力および絶縁回復特性の相似係数は α であるから、試験電圧も α 倍にすればよいであろう。これはすでに示した第2表の結果と同じである。

2.3.2 再起電圧

絶縁回復特性の相似係数は前述のように α であり、時間の相似係数も α であるから、再起電圧とその時間に対しても相似係数がそれぞれ α であれば、現象は相似であると考えられる。第4図はこの関係を図示したものである。絶縁回復特性および再起電圧波



第4図 絶縁回復特性と再起電圧

形がどんなに複雑に変化しても、遮断の成否が絶縁回復と再起電圧との競争によってきまるとすれば、相似係数は不変である。

この相似係数より次の結果が得られる。

- (a) 再起電圧固有周波数 f_n の相似係数は α^{-1} （時間の逆数であるから）
- (b) 振幅率の相似係数は1
- (c) 再起電圧上昇率の相似係数は1
- (d) 再起電圧の複周波数に対しても相似係数は α^{-1}

2.3.3 遮断電流

対応点における流速は等しいので、モデルの気流現象は実物のそれに比べて α 倍の時間に短縮される。したがって、アーク現象も気流現象と対応するためにはモデルの遮断電流はその周期が α 倍、すなわち電源周波数は α^{-1} 倍にならなければならない。この結果は時間の相似係数が α であることから容易に推察される。

一方、閉そく限界電流 I_b は、

$$I_b = K \sqrt{P} \frac{S}{L} \dots\dots\dots (7)$$

ここに K : 比例定数（無次元）

S : ノズル面積

L : ノズル上流側有効アーク長

で表わされる⁽¹¹⁾ので、相似係数は $\alpha^{\beta/2}$ または α （ $\beta=1$ のとき）となる。

また、アークエネルギーと空気消費量の対応から考えても、アーク時間とアーク電圧の相似係数がそれぞれ α となることから、電流の相似係数も α となる。

よってモデルと実物が相似となる試験条件の一つは遮断電流とその周波数の積が等しいことである。

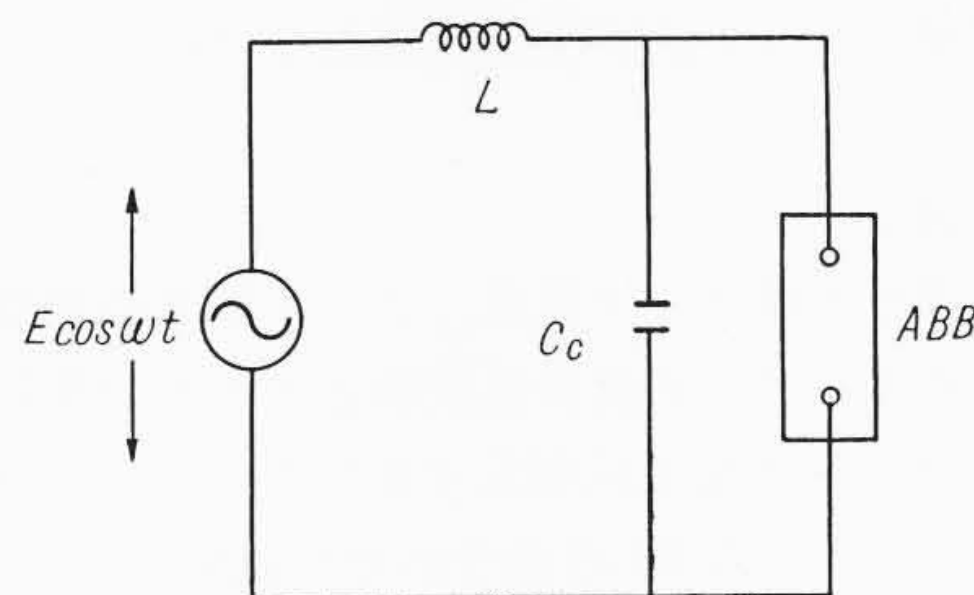
2.3.4 試験回路の相似性

試験電圧、遮断電流の相似係数がともに α であることから、モデルに対する回路インピーダンスは実物の場合と同一値でなければならない。すなわち第5図(a)、(b)において、

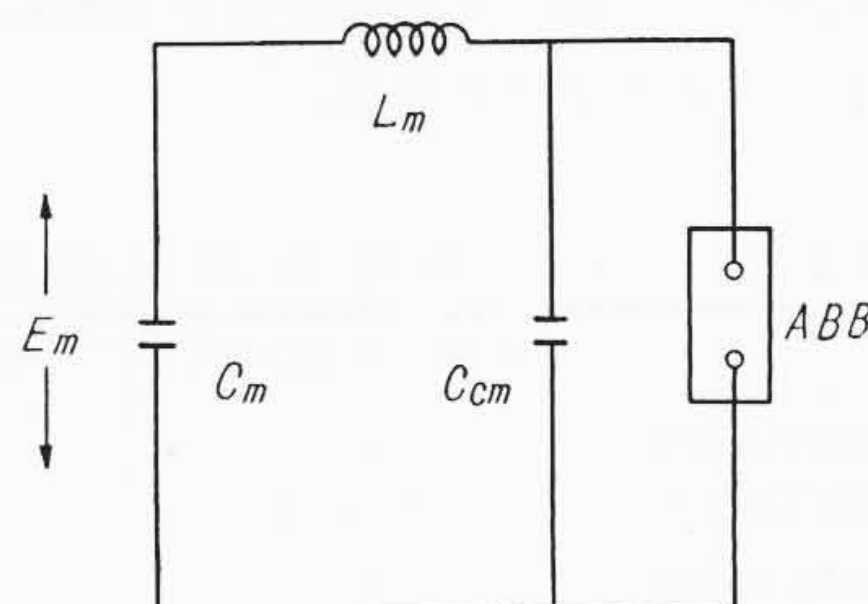
$$\omega L = \omega_m L_m \text{ または } L_m = \alpha L \dots\dots\dots (8)$$

$$\omega C_c = \omega_m C_{cm} \text{ または } C_{cm} = \alpha C_c \dots\dots\dots (9)$$

ここに ω, ω_m : 実物およびモデルの試験回路の電源周波数
本研究に使用した回路はこの条件を十分満足しているが、厳密にはさらに回路抵抗、アーク抵抗、残留抵抗などもモデルと実物

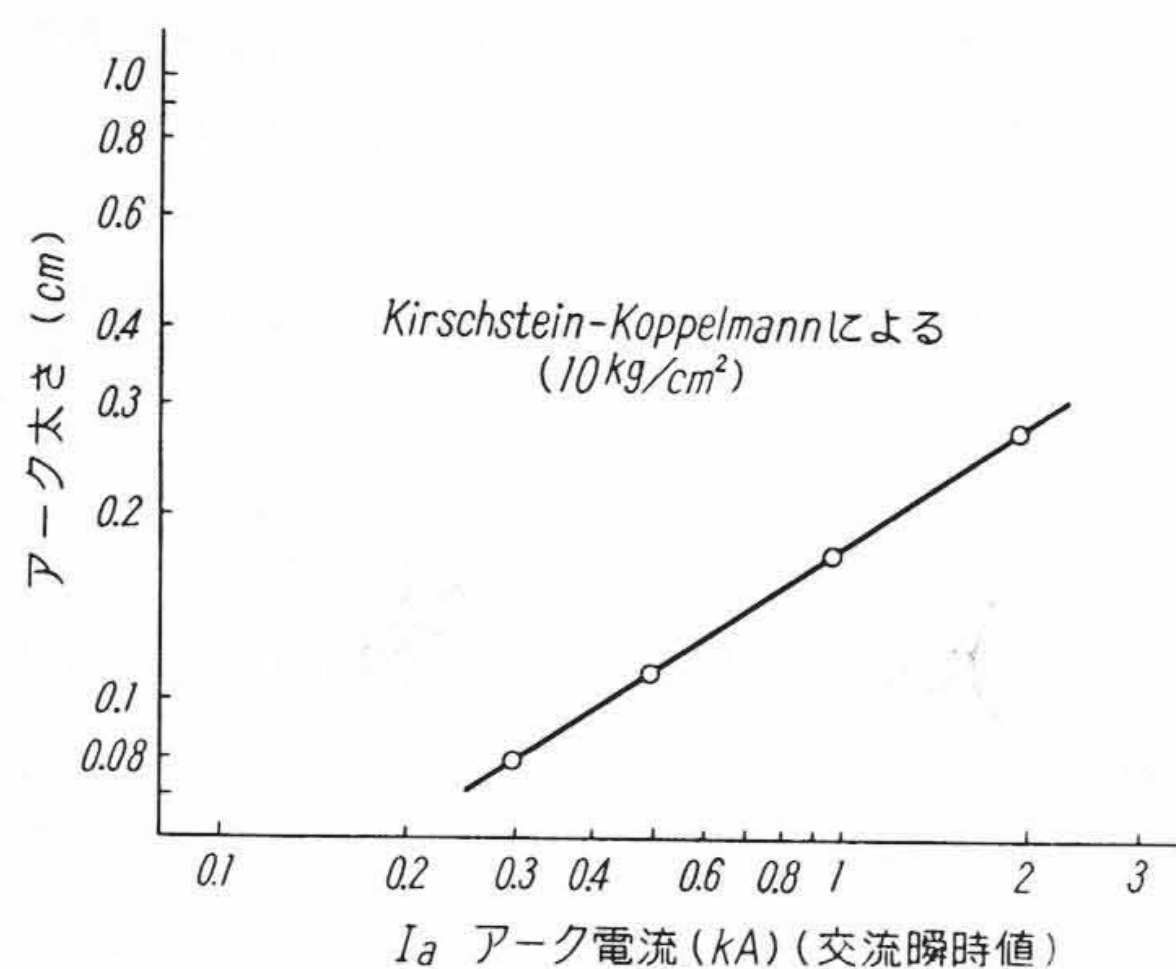


(a) 実物の試験回路



(b) モデルの試験回路

第5図 試験回路の相似性



第 6 図 アーク太さとアーク電流

では同一となる必要がある。このうち、特に残留抵抗は再起電圧波形に影響を与えるので重要であるが、相似性については十分明らかでない。

2.4 アーク特性の相似性

モデル ABB のアーク特性が実物と相似であるかどうかは、遮断現象の相似性に与える影響が大きいので、簡単に検討を加えておく。

(1) アーク電位傾度

一般にアーク電位傾度は電流半波の大部分では近似的に電流値に無関係であるが、電流が零に近づくとき電位傾度は急速に大きくなるのが予想される。また電極降下はアーク柱部分の電位降下に比べて無視しうるほど小さい。したがって、アーク柱の電位傾度が一定の領域でのアーク電圧は単に長さ l に比例し、モデルのアーク電圧の相似係数は α となる。電流零値近傍では相似係数は α より 1 に近くなる。

(2) アークの太さ

アークの太さ d は電流値により変化するが、Kirschstein と Kopplemann によれば⁽¹²⁾、高速気流中では第 6 図にみられるように、

$$d \propto I_a^m \dots\dots\dots (10)$$

ここに m : ほぼ定数で 0.6~0.7 (平均 0.65) で表わされる。 m の値は気流の状態によっても異なり、一般に流速が低いほど小さくなる傾向がある。(10)式は電流の相似係数を α とすると、アークの太さは比例以上に大きくなることを示している。この結果モデルの方が若干過酷な条件にあることが予想される。

(3) アーク抵抗

アークの大部分ではアーク電圧、アーク電流の相似係数がそれぞれ α であるので、アーク抵抗は実物とモデルで等しい。しかし電流零値前ではアーク電圧が増大するため、モデルのアーク抵抗は高めになり、モデル ABB のほうがやや過酷になると思われる。以上の結果をまとめて第 3 表に示す。

2.5 モデルの試験条件

以上考察した結果から、縮尺 α なるモデル ABB (ただし $\beta=1$) の試験条件は理論的には次のようになる。

第 3 表 アーク特性の相似係数

	実 測 (計 算) 値	理 論 値
アーク電圧	大部分の範囲 電流零値直前	α α
アーク抵抗	大部分の範囲 電流零値直前	1 1
アークの太さ	$\alpha^{0.6} \sim \alpha^{0.7}$ (平均 $\alpha^{0.65}$)	α

注：アーク電流の相似係数を α とした場合

$$\text{試 験 電 圧} \quad E_m = \alpha E \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{電 源 周 波 数} \quad f_m = \alpha^{-1} f \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{遮 断 電 流} \quad I_m = \alpha I \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{再起電圧固有周波数} \quad f_{nm} = \alpha^{-1} f_n \dots\dots\dots (14)$$

すなわち電圧、電流は α 倍、周波数は α^{-1} 倍で試験すればよい。また、モデルの試験結果から実物の性能を推定するには電圧、電流をそれぞれ α^{-1} 倍、周波数を α 倍すればよい。

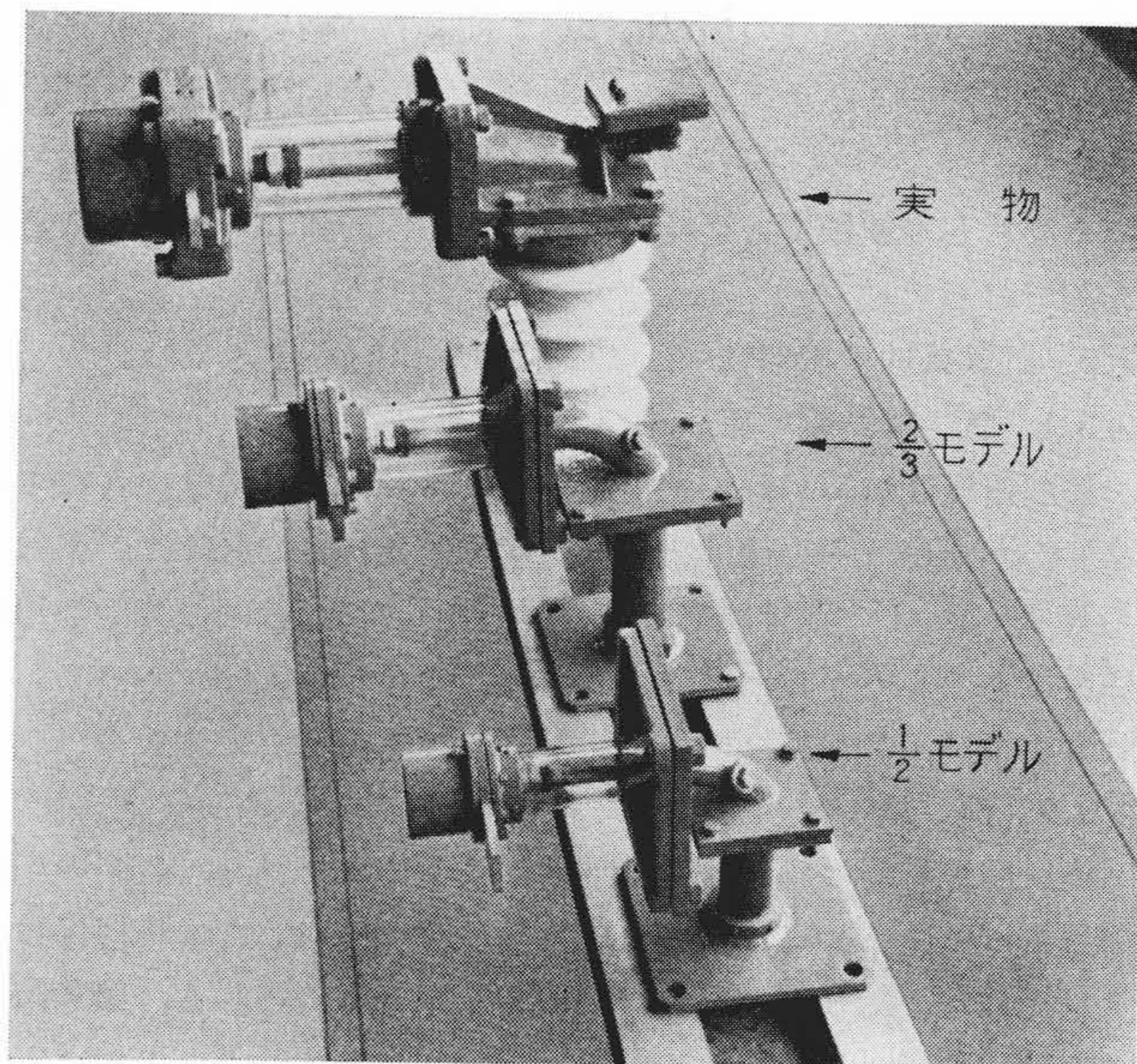
3. 供試遮断器の構造ならびに試験方法

3.1 供試遮断器の構造

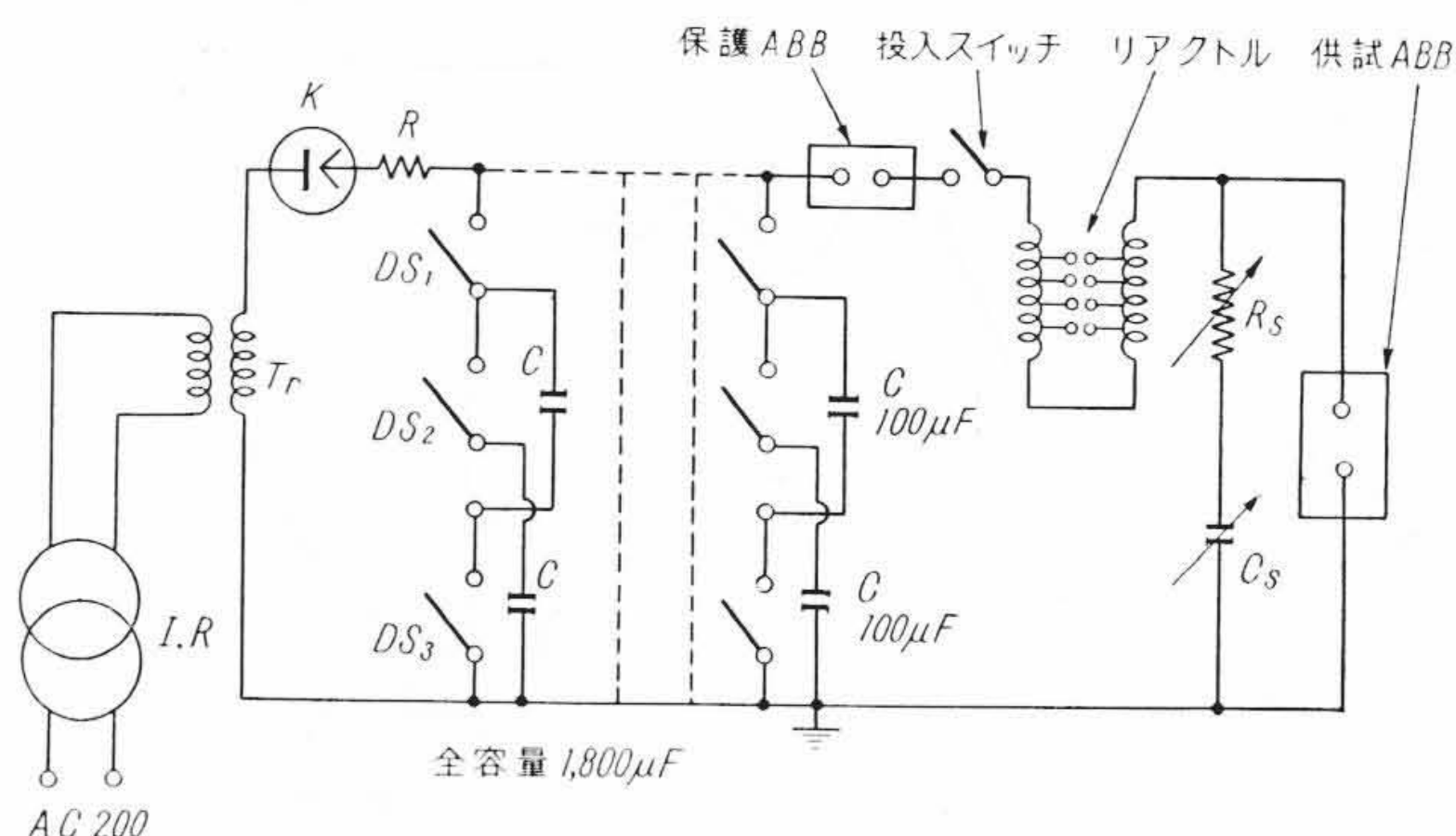
試験設備、取扱上の便宜、研究期間などを考慮し、実物 ABB として遮断限界が 30 kV 200 MVA 程度のものを選んだ。ただし遮断部内部を観察できるよう碍管(がいかん)の代わりに透明なアクリル樹脂筒を使用したほか若干部を変更した。またその $\frac{2}{3}$ 、 $\frac{1}{2}$ 縮尺のモデル ABB を製作し、操作部を除いて実物とは厳密に相似となるよう考慮した。第 7 図に遮断部外観を示す。操作部のみは実物 ABB 用に製作されたものを 2 種のモデルに対しても共用し、簡単な絞り機構で圧力特性の相似性が得られるようにした。

3.2 モデル試験設備の概要

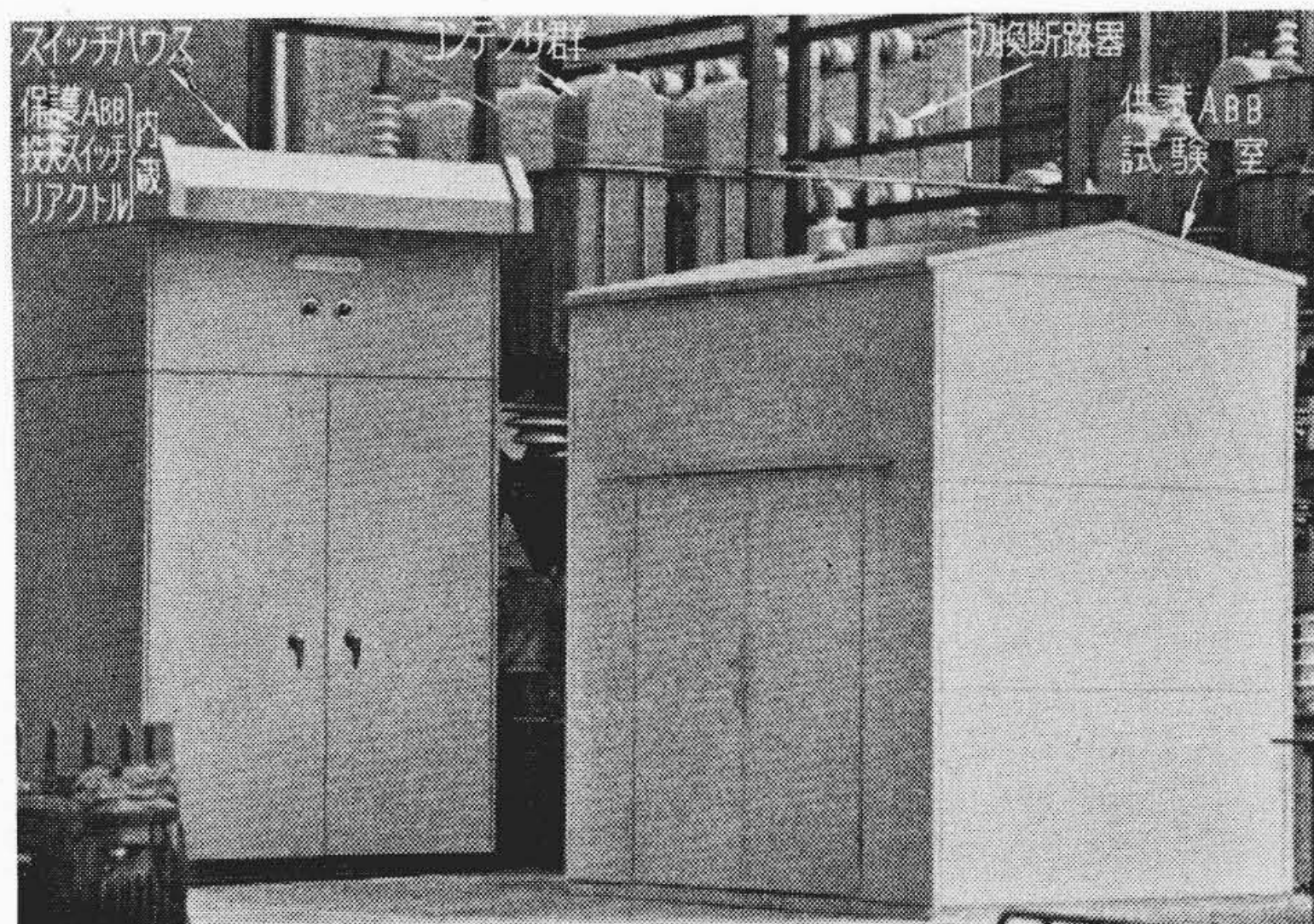
実物 ABB の試験には 150 MVA 発電機による短絡試験設備を使用した。モデル ABB に対しては L-C 共振を利用した等価電源設備(モデル試験設備と略称)を使用して試験を行なった。第 8 図に本設備の回路図を示す。コンデンサは計 1,800 μ F で最大充電エネルギーは 202 kJoule である。コンデンサ容量およびリアクトル値を適当に選べば、任意の電源周波数および電圧、電流値を発生できる



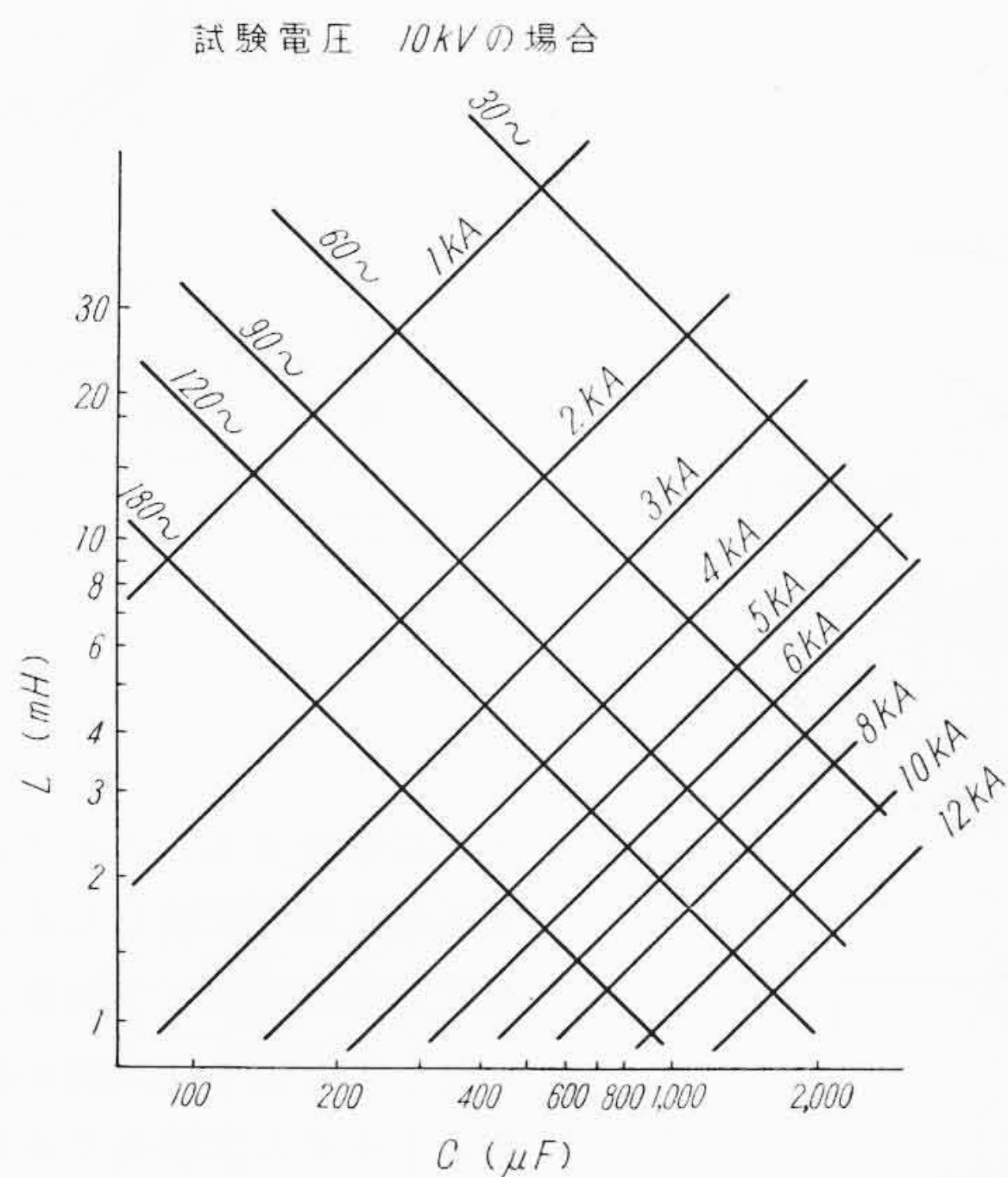
第 7 図 ABB 遮断部外観



第 8 図 モデル試験回路



第9図 モデル試験設備外観



第10図 モデル試験設備の短絡特性

ようになっている。再起電圧固有周波数とその振幅率はモデル ABB の極間に入れた Cs と Rs によって調整される。第9図に本設備の外観を示す。コンデンサは屋外に2段積みされ、断路器によって切り替えられる。リアクトルは 15 mH (タップ4段付) 2台を直並列に切り替えて 0.35 mH から 30 mH まで変更することができる。リアクトル、投入スイッチ、保護 ABB は屋外スイッチハウスの中に格納され、リアクトルによる磁界が測定に悪影響を与えぬよう遮へいされた。この設備により電源電圧 10 kV (実効値) で試験したときの短絡電流 (実効値) と電源周波数との関係を第10図に示す。回路の抵抗分が大きいと短絡電流の減衰が速いので、特にリアクトル、コンデンサおよび配線の抵抗分を小さくするよう考慮した。

3.3 試験方法

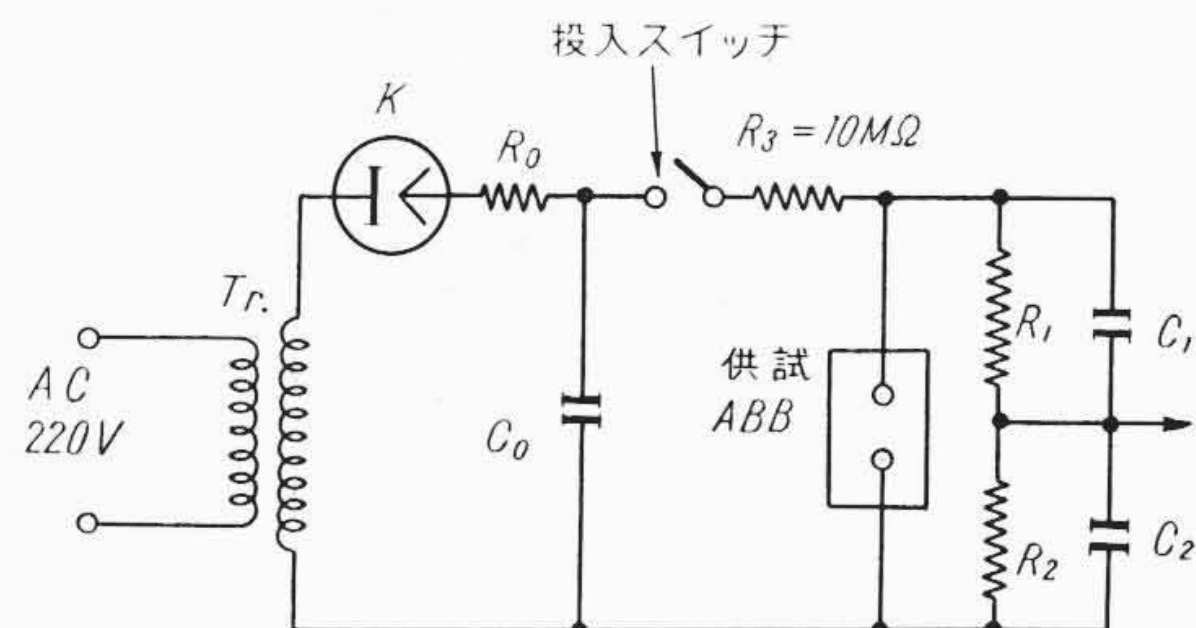
短絡電流遮断に先だって、実物およびモデル ABB の圧力特性、ストローク特性を測定し、相似となっていることを確認してから、無負荷絶縁耐力回復特性および遮断性能を測定した。遮断試験条件を第4表に示す。

実物は 150 MVA 短絡発電機電源により試験されたが、 $\frac{2}{3}$ 、 $\frac{1}{2}$ モ

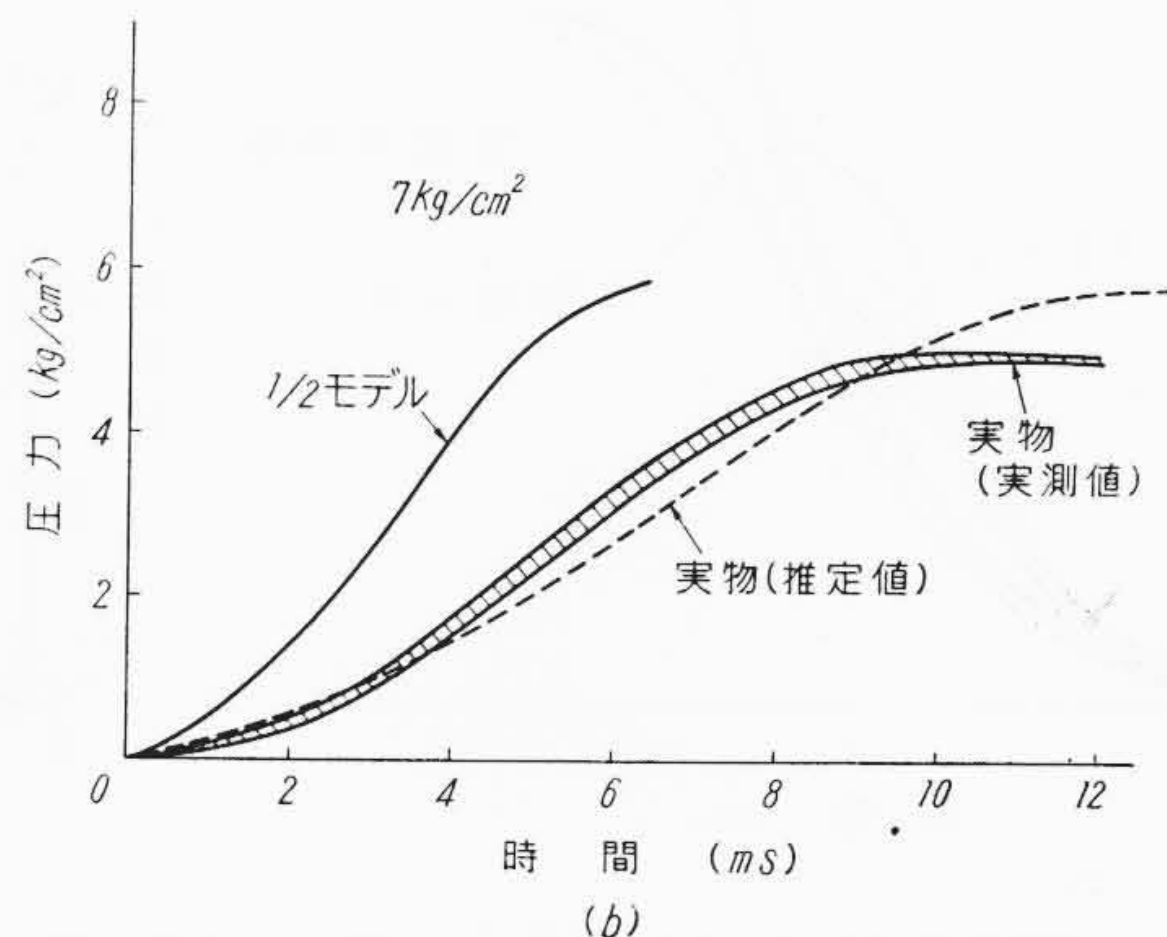
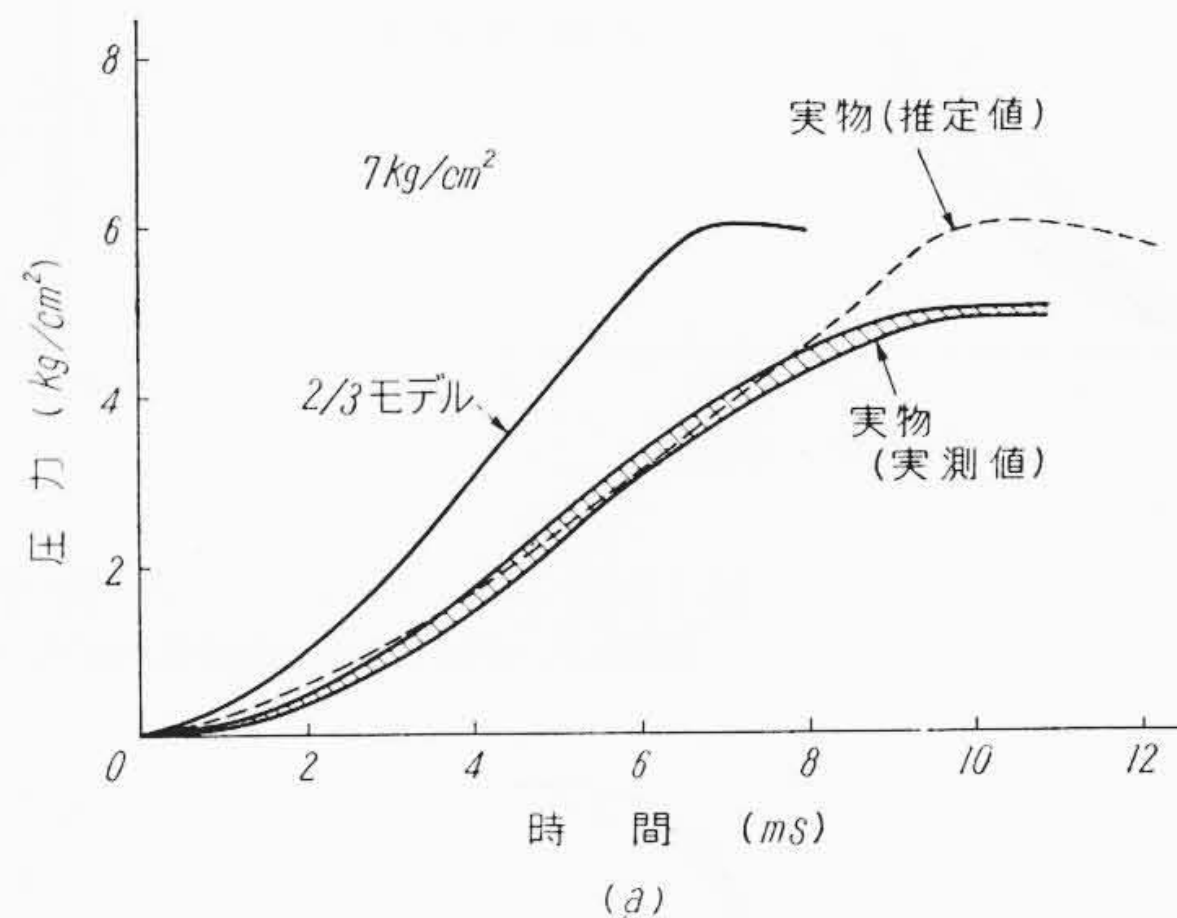
第4表 遮断試験条件

供試 ABB	操作気圧 (kg/cm ²)	ストローク (mm)	試験電圧 (kV) (注)	遮断電流 (kA)	電源周波数 (c/s)
実物	5. 7. 10	20	30 (20)	2~5	62.5
$\frac{2}{3}$ モデル	5. 7. 10	13.3	20 (13.3)	1~2.5	89~98
$\frac{1}{2}$ モデル	5. 7. 10	10	15 (10)	1~2.7	120~133

注：試験電圧()内の数値は 5kg/cm² における値を示す。



第11図 無負荷絶縁耐力測定回路



第12図 圧力特性 (7 kg/cm² 操作)

デルはモデル試験設備により試験された。また両者の電源の等価性を比較するために、 $\frac{2}{3}$ モデルについては 150 MVA 発電機電源とモデル試験電源との両方で同一条件による遮断試験を実施した。なお無負荷絶縁耐力回復特性は高圧直流電源に高抵抗を直列接続して印加する方法によった。このときの試験回路を第11図に示す。

4. 試験結果

4.1 圧力およびストローク特性

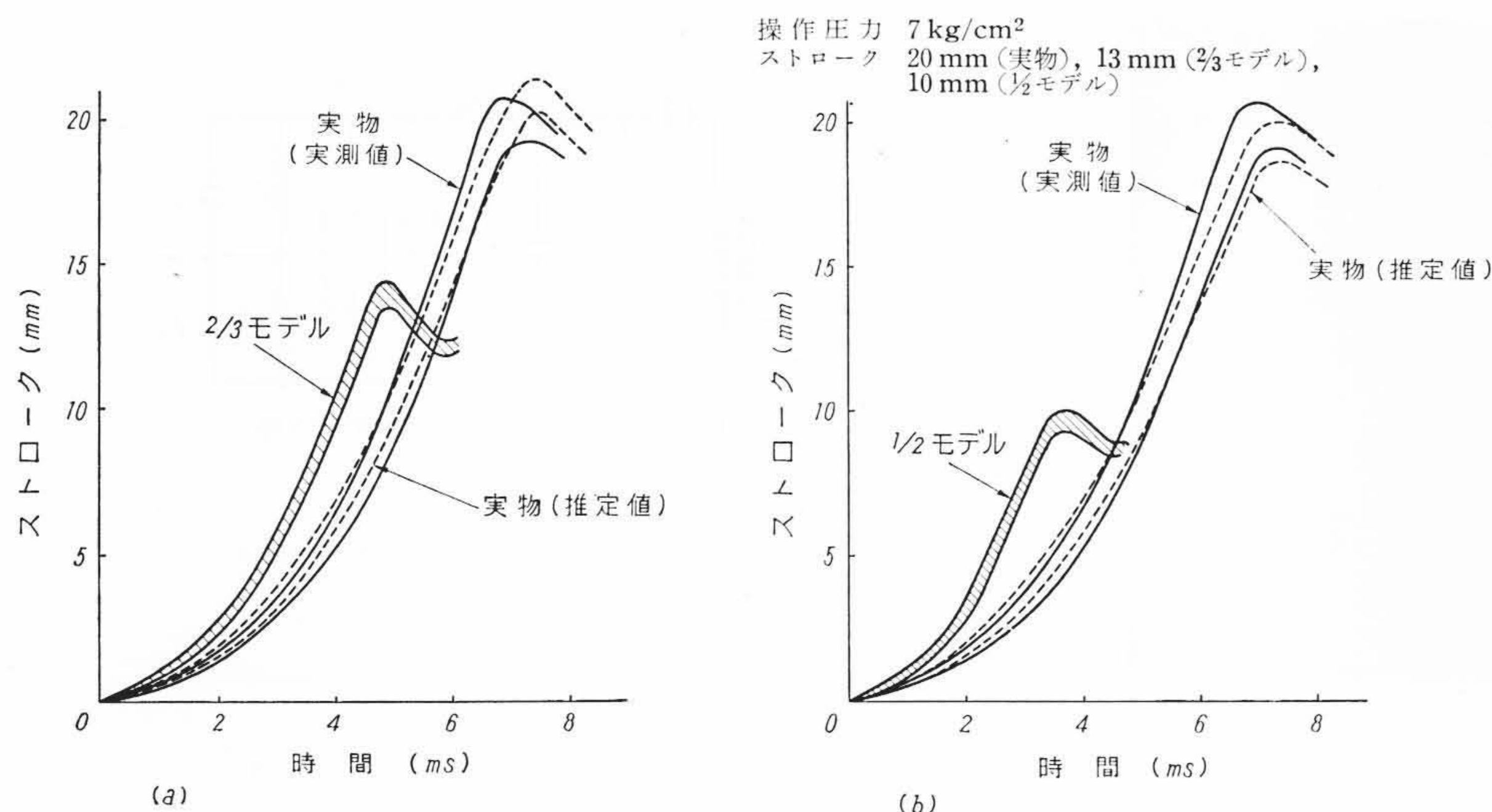
遮断試験に先だって実測した圧力およびストローク特性の例を第12図および第13図に示す。圧力特性の推定誤差が若干大きいのは操作部が完全にモデル化されていないためと考えられる。ストローク特性の推定値は比較的よく一致しているが一般に $\frac{2}{3}$ モデルより $\frac{1}{2}$ モデルのほうが推定誤差の大きい傾向が見られた。

4.2 無負荷絶縁耐力回復特性

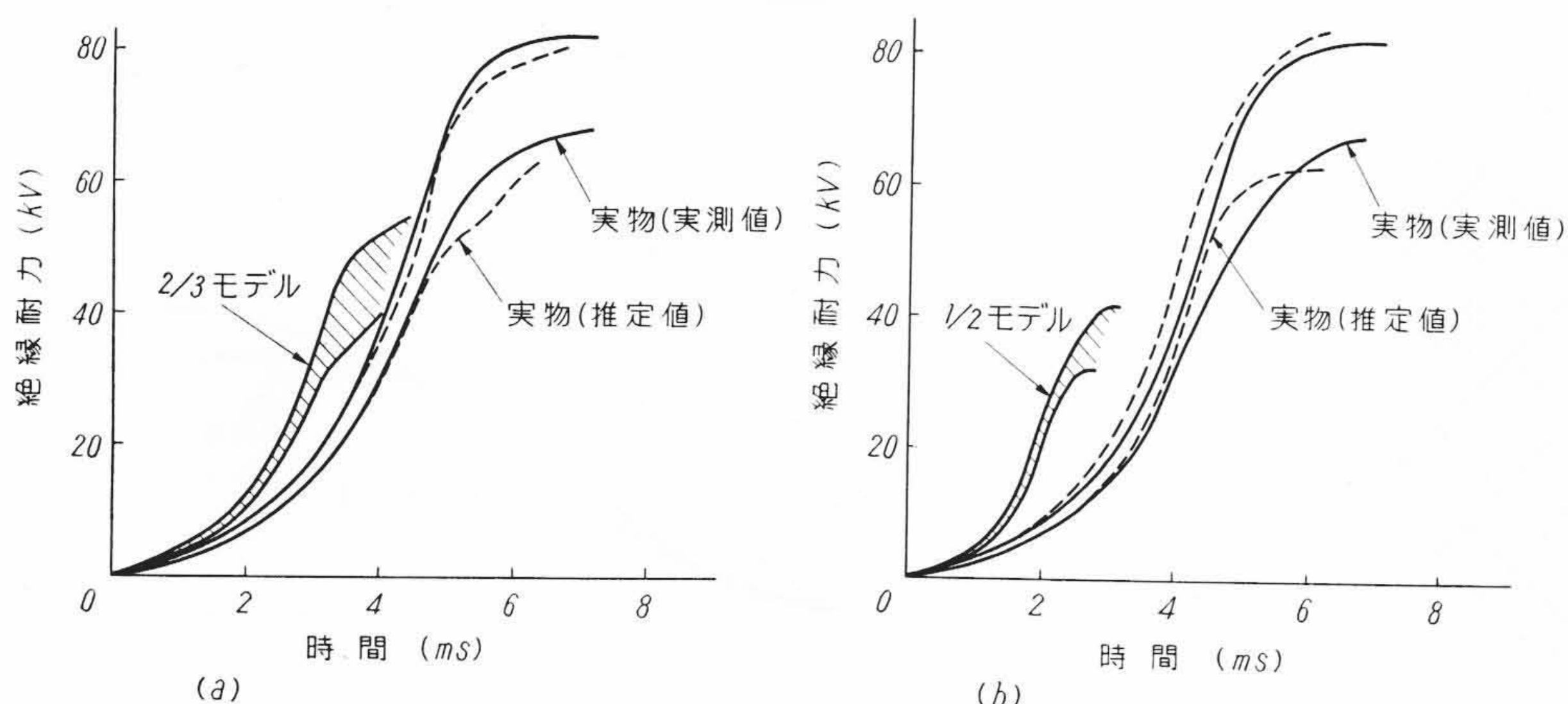
操作気圧を 5, 7, 10 kg/cm² に変化させて測定したが、その一例を第14図に示す。モデルによる推定結果は実測値とほぼ一致した。しかし、一般的に $\frac{1}{2}$ モデルによる推定値のほうが高くなっている。この原因はギャップが小さくても放電電圧は比例した値まで低下せず、それより若干高くなるため、絶縁耐力の相似係数は α より $\alpha^{0.9}$ に近いことを示している。いずれにしてもモデルによる推定が可能であることが明らかとなった。

4.3 試験電源の等価性の検討

第5図において発電機電源とモデル試験電源の回路の比較を行ない、回路インピーダンスが等しくなければならないことを述べたが、

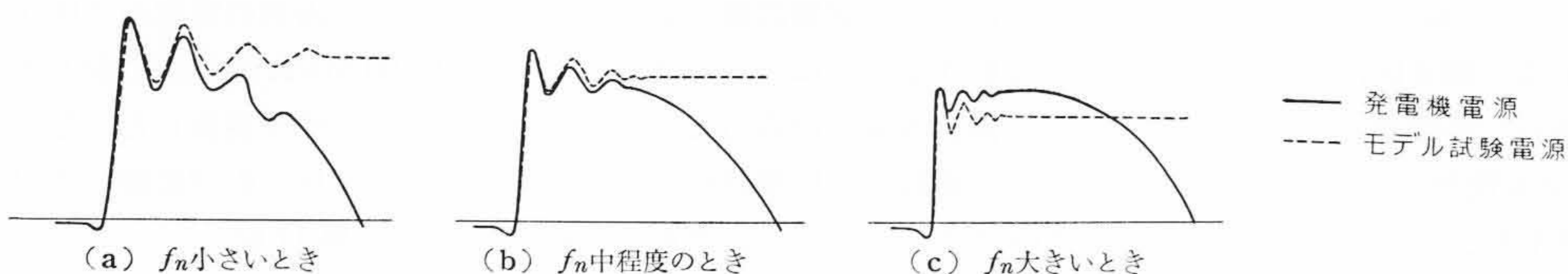


第 13 図 ストローク特性 (7 kg/cm^2)
(特性はいずれも 5 回の測定値のばらつきの幅で示す)

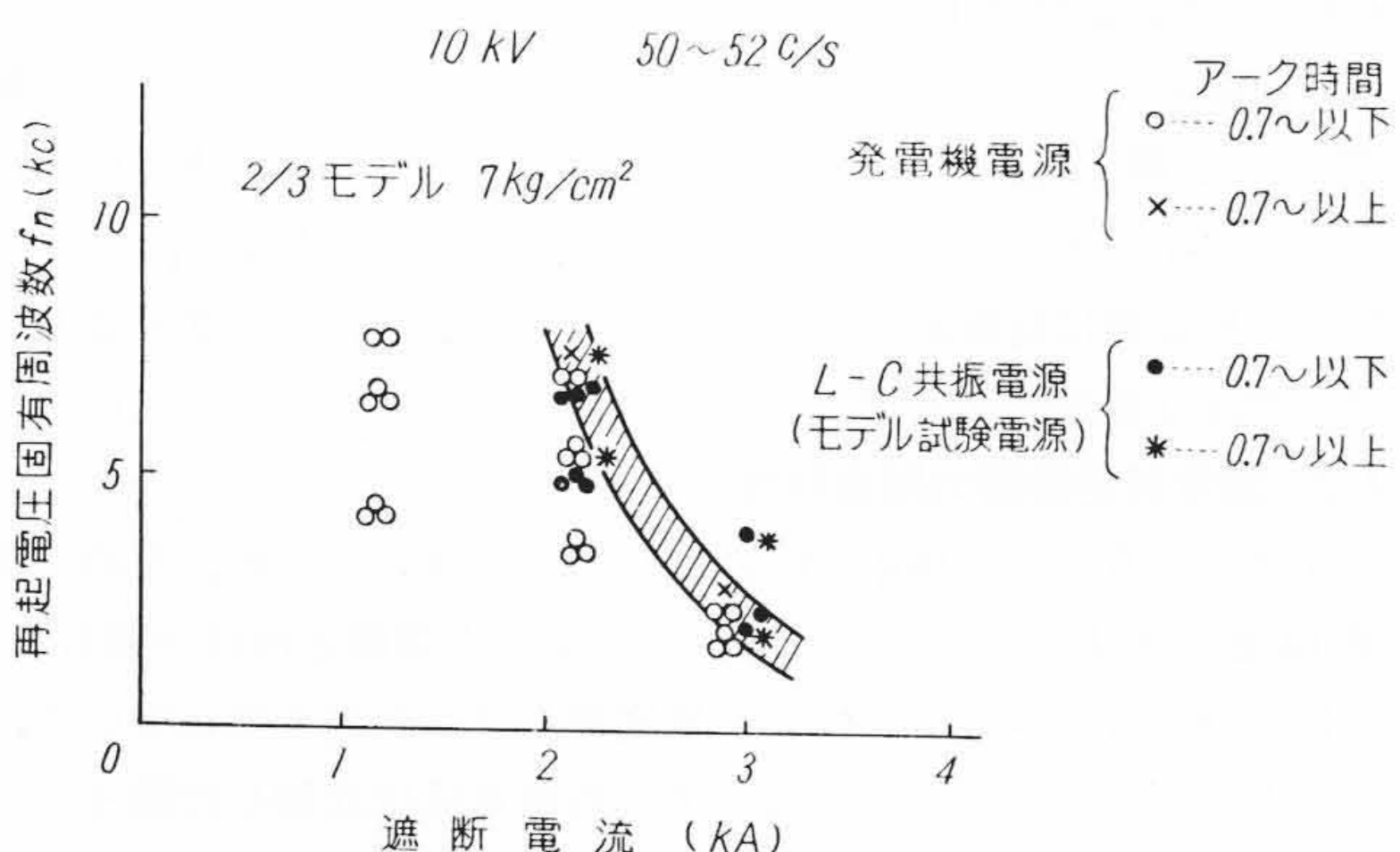


操作圧力 7 kg/cm^2 , ストローク 20 mm (実物), 13 mm ($2/3$ モデル), 10 mm ($1/2$ モデル)

第 14 図 無負荷絶縁回復特性 (7 kg/cm^2 操作)
(特性はいずれも 5 回の測定値のばらつきの幅で示す)

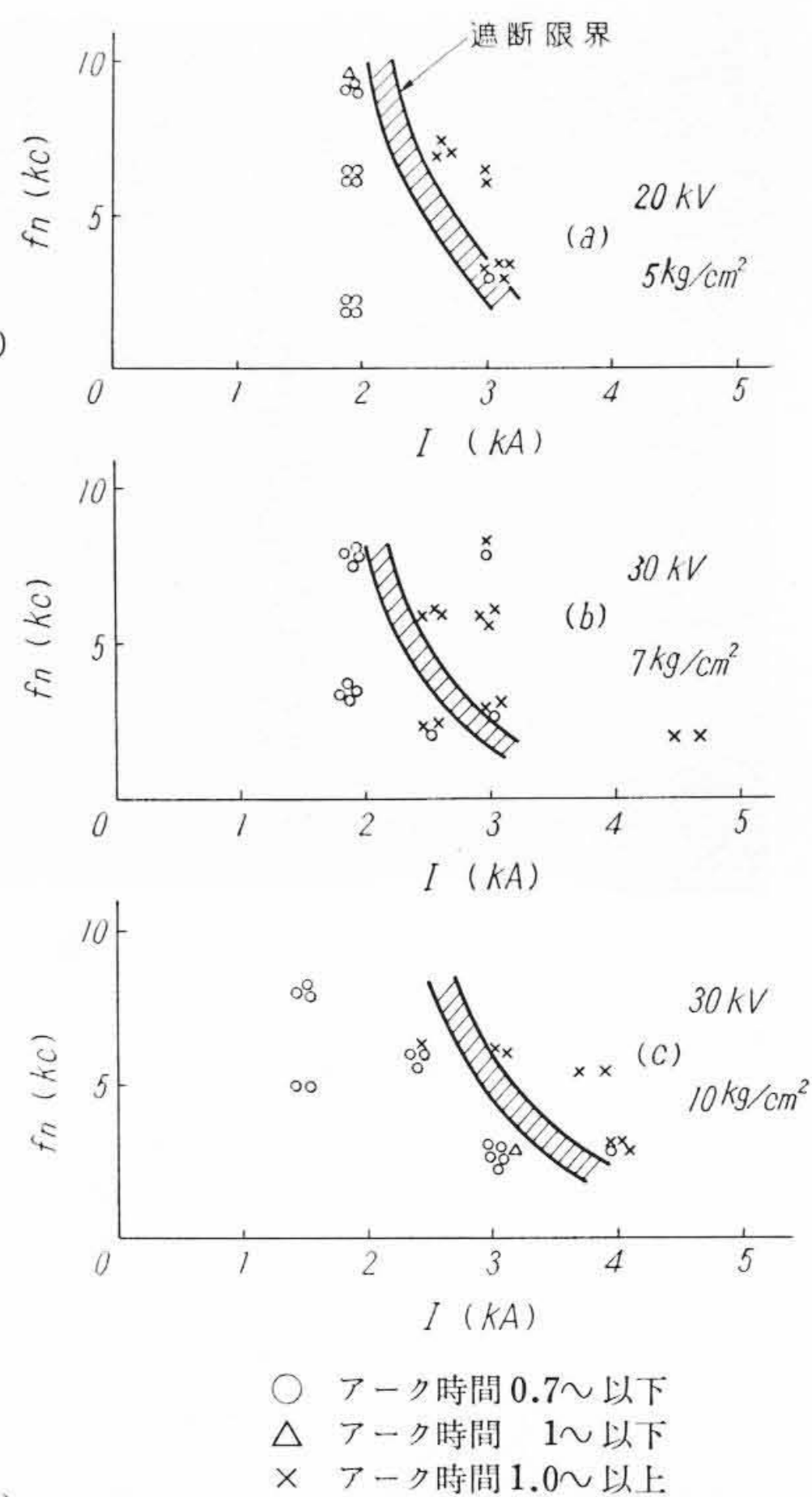


第 15 図 遮断時再起電圧波形



第 16 図 発電機電源と LC 共振電源の等価性

発電機電源を使用した場合の再起電圧波形は回路の鉄損が再起電圧固有周波数 f_n によって変化するために、第 15 図に示すように f_n とともに振幅率まで変化する。一方モデル試験電源では f_n と振幅率を



第 17 図 実物の遮断性能

任意に調整することができるので発電機電源で試験したときの再起電圧波形を測定しておき、これと少なくとも第 1 波高値が相似になるようモデル試験条件を調整して実施した。第 16 図はその結果を示す。遮断不能を $0.7 \sim$ 以上としてその限界を示すとほぼ同じ帯域内に含まれ、一致していることを示している。このことから同一試験条件を構成すれば、遮断限界はいずれの電源においても一致し、両電源は等価であることが確認された。

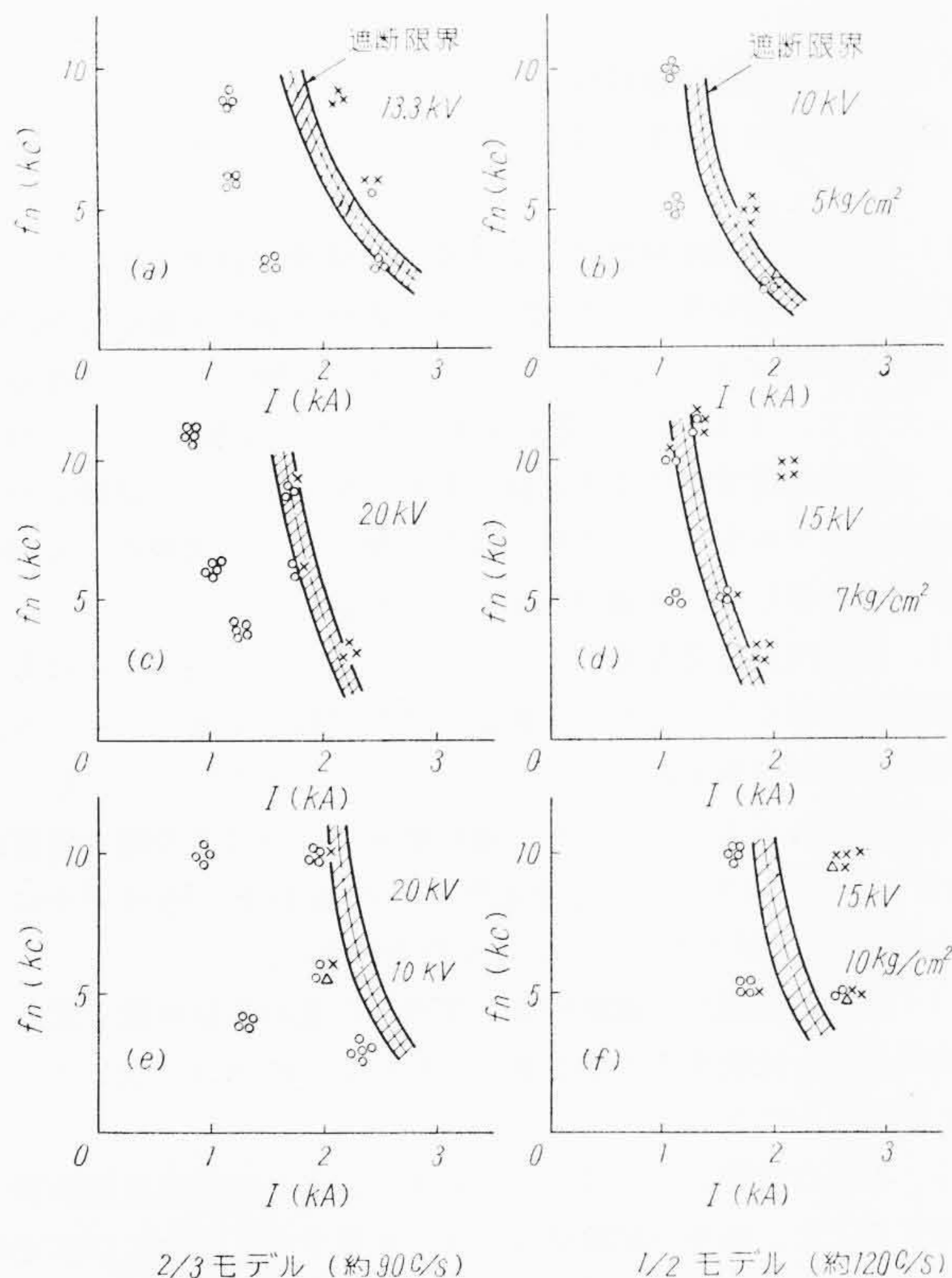
4.4 短絡電流遮断性能

4.4.1 実物

第 17 図に遮断試験結果を示す。遮断性能のばらつきを考えれば遮断限界は幅のある帯で表わすのが妥当である。また $7, 10 \text{ kg/cm}^2$ は試験電圧 30 kV であるが、 5 kg/cm^2 は 20 kV で実施した。図で再起電圧固有周波数 f_n は発電機電源回路におけるそのまゝの値で、 f_n の大きいほど振幅率が小さくなる。したがって再起電圧上昇率とかならずしも比例していない。また、遮断容量が従来のように 200 MVA に達していないのは、遮断部碍管を透明なアクリル樹脂筒に変更したためである。

4.4.2 $2/3$ モデルと $1/2$ モデル

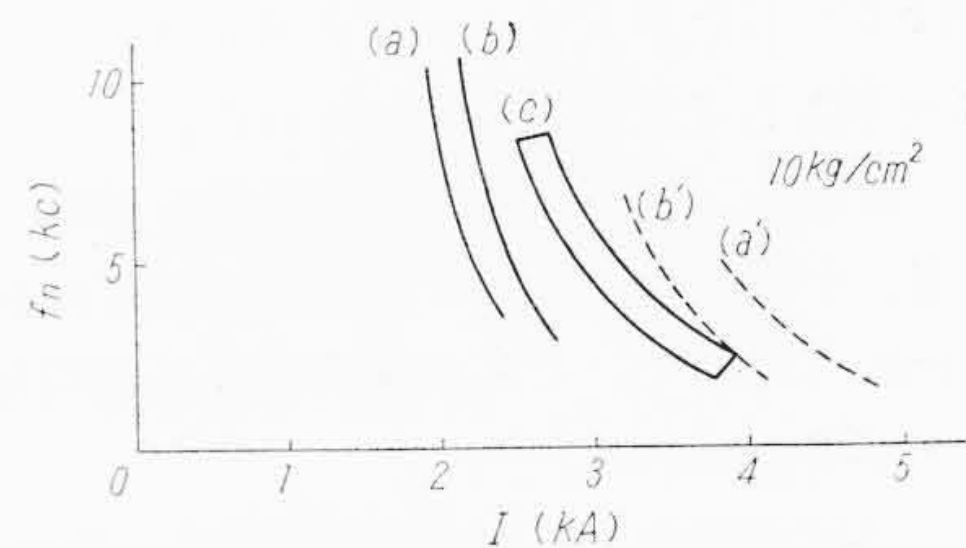
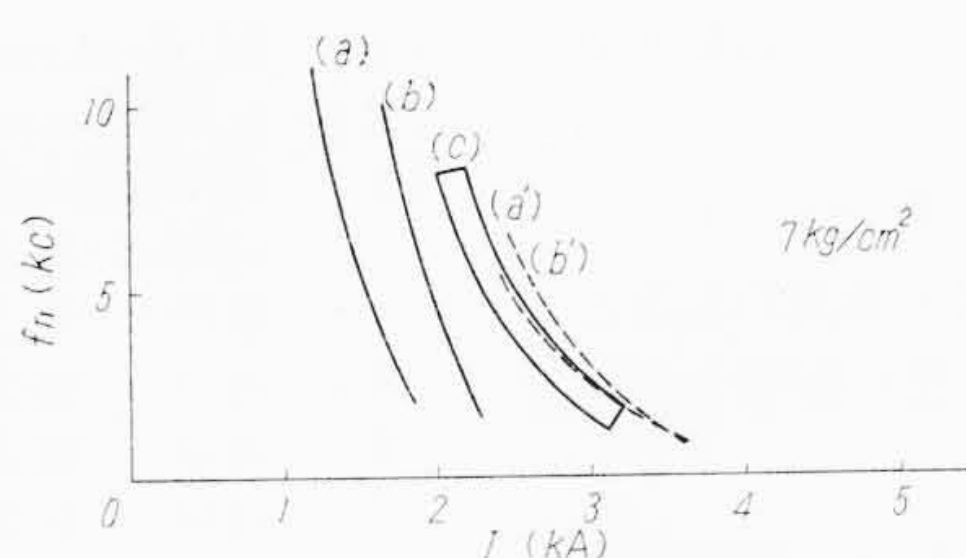
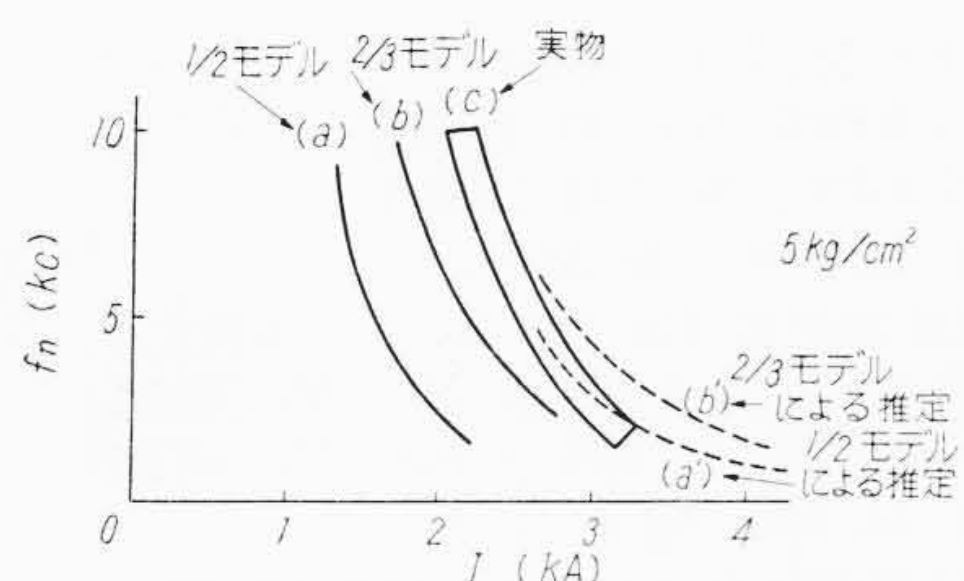
実物の試験結果から、 f_n と振幅率の関係が明らかになったので、モデルでは実物に対応した $f_{nm} (= \alpha^{-1} f_n)$ で振幅率を実物に一致させて試験を行なった。モデルの試験電圧、電源周波数は実物に対してそれぞれ α および α^{-1} 倍に調整された。試験結果を第 18 図に示す。やはり遮断限界は帯で表示されている。第 19 図のオシログラムはその一例を示す。



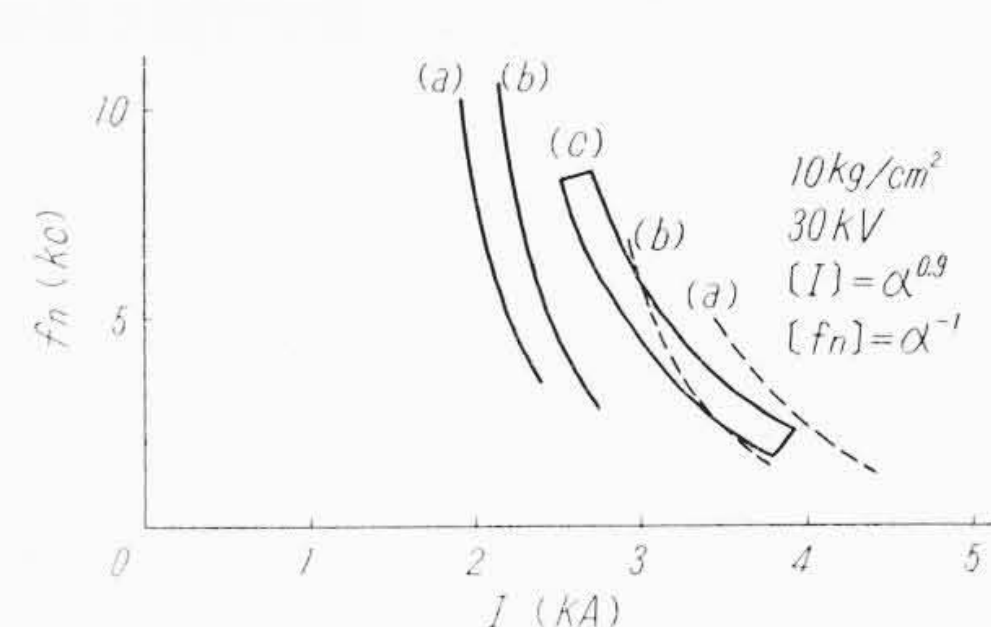
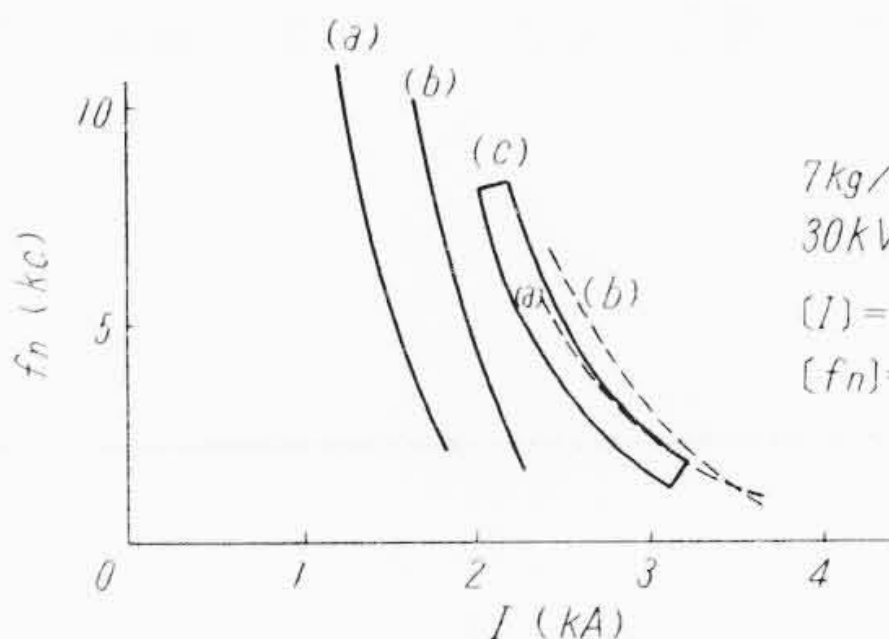
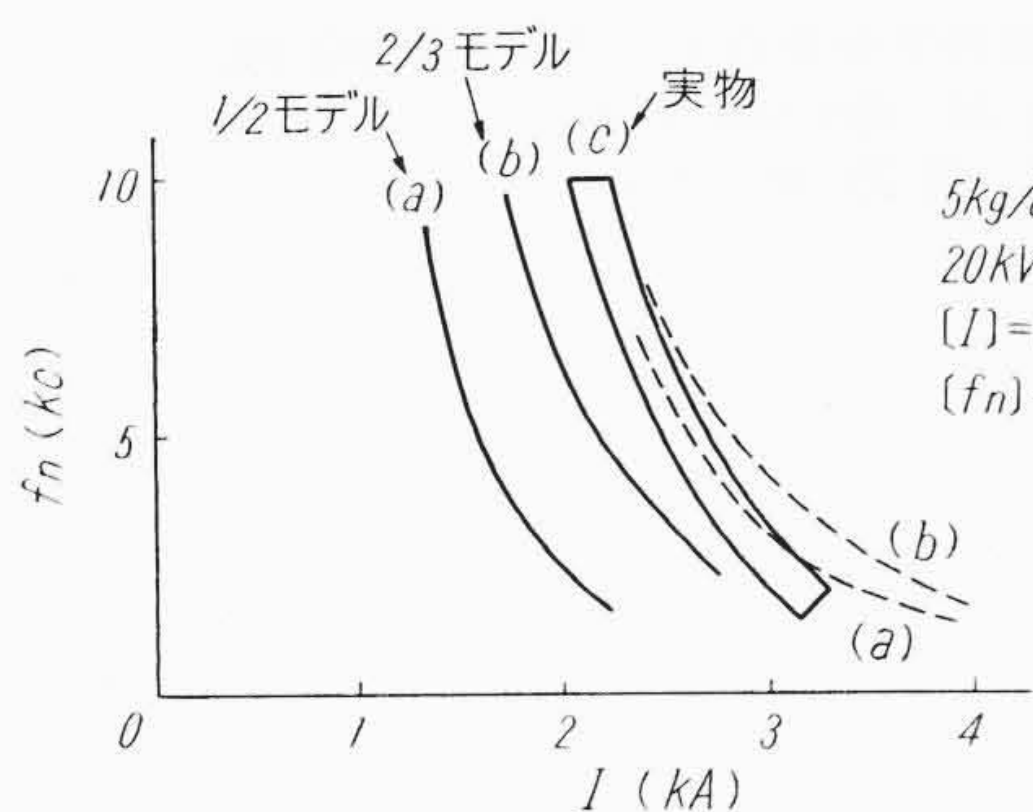
第18図 モデルの遮断性能

4.4.3 モデルによる推定

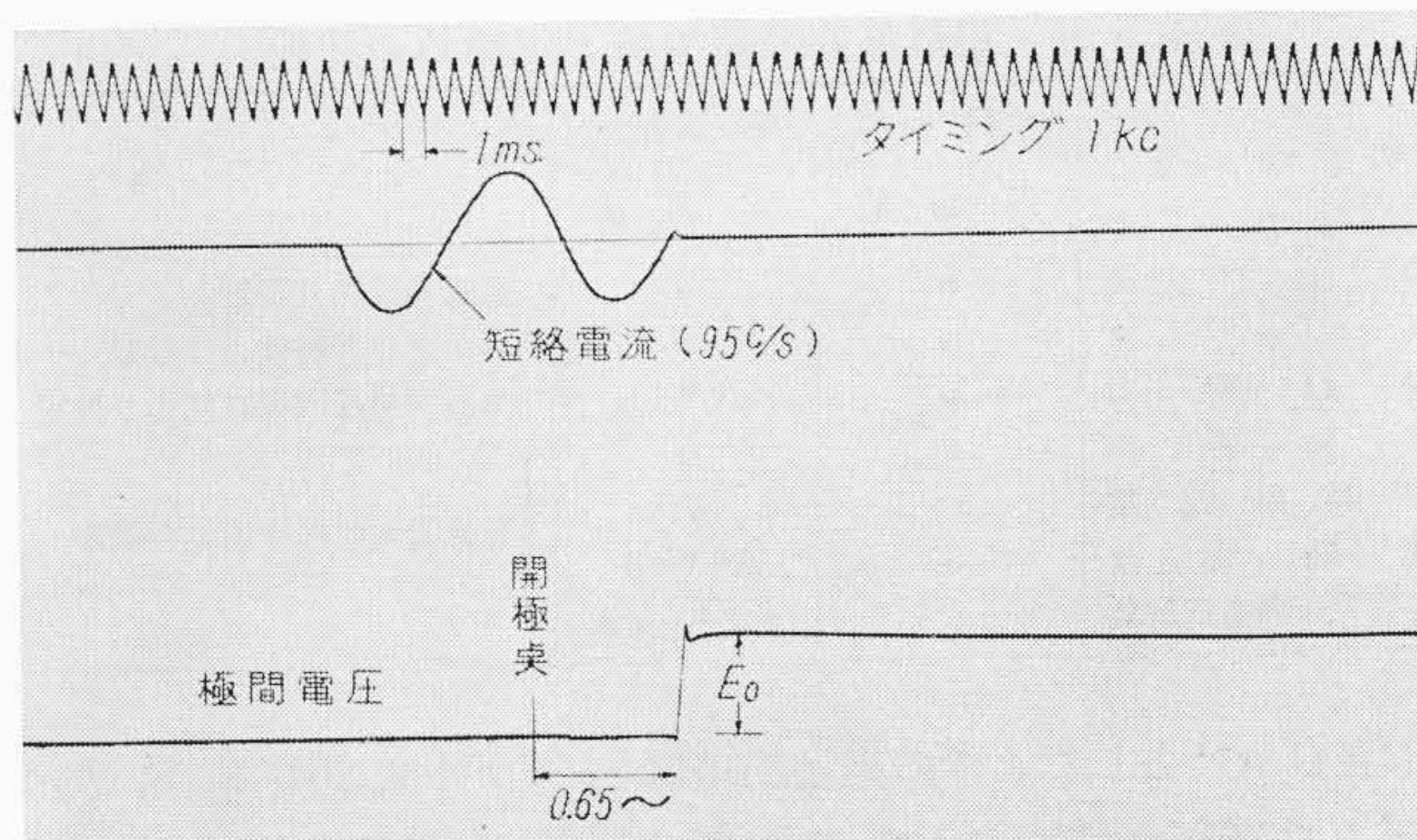
第20図はモデルにより得られた遮断限界から、実物の遮断限界を推定したもので、ここでは実物の遮断限界を帯で、モデルのそれを中心を通る線で表わしている。推定の結果ほぼ一致したが、 $\frac{1}{2}$ モデルで 10 kg/cm^2 の場合は推定誤差が大きく 30% 程度に達している。しかしそれ以外では推定誤差 10 数 % 程度で一致しており、推定の可能性を証明したものといえる。第21図は最も推定誤差が小さくなるような相似係数を検討した結果で、遮断電流の相似係数は $\alpha^{0.9}$ ないし α 、 f_n のそれは $\alpha^{-0.5}$ ないし α^{-1} が適切であることが明白となった。



第20図 遮断性能の推定 (その1) (遮断電流 I の相似係数を α 、 f_n の相似係数を α^{-1} としたとき)



第21図 遮断性能の推定 (その2) 注: [] は相似係数を表わす。



第19図 モデル試験回路による短絡電流遮断時のオシログラム (試験電圧 20 kV 遮断電流 2,300 A)

5. 検 討

5.1 相似係数の理論値と実測値の比較

前章の実験結果と第2章で考察した相似係数の理論値とを比較すると第5表に示す結果が得られる。

表に示した実測値はかならずしも測定したものばかりでなく、実測結果から推定したものが多い。たとえば、時間の相似係数は最初 α としていろいろの特性を求めた結果がよく一致することから推定したものである。

しかしながら時間、試験電圧、電源周波数などに理論値と同じ相似係数を適用することより、他の相似係数がほぼ理論値と合致していることはその適用の妥当性を示すものと考えられる。

なお、アーク特性の相似係数については今回は十分な研究がなされなかったため厳密な比較は困難である。

5.2 縮尺率 (α) と推定誤差

(1) ストローク特性

推定誤差は $\frac{2}{3}$ モデルで約 5%、 $\frac{1}{2}$ モデルで約 10% となり、操作気圧による差異はほとんどない。

(2) 無負荷絶縁耐力特性

絶縁耐力の相似係数を α とすると推定誤差は $\frac{2}{3}$ モデルで約 10%、 $\frac{1}{2}$ モデルで約 15% であるが、 $\alpha^{0.9}$ とすると $\frac{2}{3}$ モデルで約 5%、 $\frac{1}{2}$ モデルで約 10% となる。

(3) 短絡電流遮断性能

遮断電流および再起電圧固有周波数 f_n の相似係数をそれぞれ α

第 5 表 相似係数の理論値と実験値の比較

物 理 量	相 似 係 数		備 考
	理 論 値	実 測 値	
時 間	α	α	各種特性より推定
ス ト ロ ー ク	α	α	
絶 縁 耐 力	α	$\alpha^{0.9 \sim \alpha}$	ストローク特性より推定
試 験 電 圧	α	α	無負荷絶縁回復特性より推定
電 源 周 波 数	α^{-1}	α^{-1}	短絡電流遮断性能より推定
遮 断 電 流	α	$\alpha^{0.9 \sim \alpha}$	
再起電圧固有周波数	α^{-1}	$\alpha^{-0.5 \sim \alpha^{-1}}$	

および α^{-1} としたときの推定誤差は $\frac{2}{3}$ モデルで 20% 以下、 $\frac{1}{2}$ モデルで 30% 以下であるが、各気圧の最適相似係数を使用すると $\frac{2}{3}$ モデルで 10% 程度、 $\frac{1}{2}$ モデルでも 20% 以下に減少する。この最適相似係数の平均値を求めると、遮断電流に対してほぼ $\alpha^{0.93}$ 、 f_n に対して $\alpha^{-0.81}$ が得られる。

5.3 モデル試験法の適用限界

モデル ABB を製作する際に工作精度が問題となることがある。このためモデルを必要以上に縮小することは好ましくない。また空気の粘性の影響も受けやすい。一方、モデル ABB を試験する際に問題となることは推定精度が悪くなることである。この意味からは α の限界は $\frac{1}{4}$ ないし $\frac{1}{5}$ と考えられる。

ABB 以外の遮断器への適用は本方法のままでは困難であるが、これを参考にしてモデル研究を実施すれば可能となるかも知れない。

モデル試験電源では現在のところ直流分を含有した短絡電流に対する試験は困難である。しかし、設備および試験法の改良により解決できると期待される。

6. 結 言

以上、空気遮断器の諸性能をモデルによって推定する、いわゆるモデル試験法の研究について述べたが、その結果を要約すれば次のとおりである。

- (1) モデルを製作し、試験を行なう場合問題となる相似条件を次元解析により検討した結果、力学的ならびに電気的相似条件が明確になり、両者を一つのモデルで満足させることが明らかとなった。
- (2) さらに遮断現象の相似条件について考察し、絶縁回復特性、試験電圧、遮断電流の相似係数は α 、電源周波数、再起電圧固有周波数の相似係数は α^{-1} 、試験回路の各種インピーダンスの相似係数は 1、したがってインダクタンス、キャパシタンスの相似係数は α であることが明らかとなった。
- (3) しかし、アーク特性の相似性を検討した結果では、アークの太さ、小電流時のアーク電位傾度などに非相似的要素のあることがわかったので、これが遮断性能の相似条件に悪い影響を及ぼすことが考えられた。
- (4) 供試遮断器としては試験設備、取扱上の便宜、研究の意義、研究期間などを考慮し、実物空気遮断器 (30 kV, 200 MVA 相当品) とその $\frac{2}{3}$ 縮尺、 $\frac{1}{2}$ 縮尺の二つの相似なモデル遮断器を製作した。ただし、操作部は実物遮断器用に製作されたものを 2 種のモデルに対しても共用し、簡単な絞り機構で相似性が得られるよ

- う考慮した。
 - (5) 無負荷絶縁回復特性について測定を行ない、 $\frac{1}{2}$ モデルでも推定誤差 15% 以下で実物特性の推定ができることが明らかとなった。
 - (6) 短絡電流遮断試験は最も重要で興味深い研究であった。実物は短絡発電機を使用して 62.5 c/s で遮断試験を実施したが、 $\frac{2}{3}$ 、 $\frac{1}{2}$ 縮尺モデルに対して 94 c/s、125 c/s で試験しなければならなかったため、LC 共振の等価電源設備により試験した。このため、まず短絡発電機による試験と LC 共振電源による試験との等価性を $\frac{2}{3}$ モデルを使用して同一条件で検討し、両電源による遮断限界はほぼ等しく、等価であることを確認した。
 - (7) 実物は短絡発電機により、 $\frac{2}{3}$ モデルおよび $\frac{1}{2}$ モデルは LC 共振等価電源によりそれぞれ相似な遮断試験を実施し、モデルから実物の遮断性能を推定することができることを明らかにした。推定誤差は若干大きかったが、遮断限界のばらつきの幅を考慮に入れば、 $\frac{2}{3}$ モデルによる推定誤差が 10% 以下、 $\frac{1}{2}$ モデルによるそれが 20% 以下であることはやむを得ない。
 - (8) 実験の結果から遮断現象に関連した量の相似係数を求め、理論的結果と比較すると第 5 表に示したようにほぼ一致していることが明らかになった。
 - (9) 今後の問題としては、本試験法を、さらに大容量遮断器に適用すること、他種の試験項目にまで拡張することおよび推定精度の向上、アーク特性の基礎的研究とその相似性の検討などがあげられる。
 - (10) 本試験研究は小規模の空気遮断器について実施したものであるが、モデル遮断器により実物大の遮断器の操作特性、遮断特性の推定が一応可能であることを明確にしたことはこの研究の最大の成果である。これは他にその例を見ない独創的研究であって、その結果は今後の空気遮断器の新しい開発、大容量製品の性能の判定などに役だつものと期待される。
- 終わりにのぞみ、本研究に対しご指導いただいた超高压電力研究所大山専務理事、富山理事はじめ東京大学藤高教授、東京工業大学中野教授、名古屋大学宮地教授、電気試験所森部長ならびに電力用遮断器モデル研究委員会の方々および日立製作所関係各位に対し深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) W. F. Skeats: EE 55, 710 (1936)
- (2) J. Biermanns: CIGRE, No. 102 (1954)
- (3) S. Yamazaki: CIGRE, No. 103 (1960)
山崎: 日立評論 40, 1047 (昭 33-9)
- (4) 福田: 電力用遮断器便覧 157 (昭 30, オーム社)
- (5) 高砂: 昭 34 電気学会東京支部大会 No. 156 (昭 34)
- (6) 高砂: 昭 36 電気学会東京支部大会 No. 173 (昭 36)
- (7) 高砂: 日立評論 44, 589 (昭 37-4)
- (8) 高砂: 昭 37 電気四学会連合大会 No. 506 (昭 37)
- (9) 抜山: 次元解法の理論と応用 133 (昭 31 共立出版)
- (10) T. E. Browne: TAIEE, 65, 169 (1946)
- (11) 高砂: 昭 34 電気四学会連合大会 No. 414 (昭 34)
高砂: 日立評論 41, 895 (昭 34-8)
- (12) 福田: 電弧 173 (昭 23 河出書房)