

# モデルによる空気遮断器操作特性の推定

Predetermination of the Air-blast Circuit Breaker Operating Characteristics by Models

高 砂 常 義\*  
Tsuneyoshi Takasuna

## 内 容 梗 概

空気遮断器の操作特性を相似なモデルにより求め、その結果から実物（原形）の特性を推定する方法について述べたものである。すなわち、まずモデルの具備すべき力学的相似条件について検討し、次元解析を応用してモデルの相似係数を求めた。この結果に基づき、相似なモデルを製作してストローク特性および圧力特性を求め、これより実物特性を推定したところ、ストローク特性は実測値とかなりよく一致し、また圧力特性もほぼ一致した。このようなモデル試験法は従来実施されておらなかったが、モデルの製作が簡単であるばかりでなく、電気的諸性能をもモデルにより推定できる見通しであるので、新製品開発のうえにはなはだ有効な方法であることが確かめられた。

## 1. 緒 言

送電システムの拡大に伴い、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。それとともに最近新しい形の ABB が次々と開発されつつある。しかしながら遮断器の開発には十分な操作試験および遮断試験を実施することが必要であり、そのために大容量短絡試験設備が多数建設され稼動している。日立製作所においても早くから常に他社にさきがけて大容量短絡実験所を建設し、これを活用して多数の新形遮断器を開発したばかりでなく、最近では、日立新等価試験法の開発<sup>(1)</sup>により、さらに大容量の遮断性能をも検証できるようになった。

しかしながら、新製品の開発の過程においては、驚くほど多数の操作試験や遮断試験が必要であり、このために製品同様な大容量 ABB を多数製作し、しかも大容量短絡試験を行なうことは、製品開発上好ましい方法ではなかった。そこで、実物と相似なモデルを使用して十分な試験を行ない、その結果から原形（実物）の性能が推定できれば、モデルの製作が簡単であるばかりでなく、試験設備も小容量ですみ、きわめて有効であると考えられた。筆者は以前から、モデル ABB を使用して気流の状態をシュリーレン法で観測したり<sup>(2)</sup>、気流中のアークを観測したり<sup>(3)</sup>したがこの経験からモデルで得られた結果は実物と常に一定の関係にあることを知り、この関係を次元解析により検討した。その結果、モデルと実物との間の形状および種々の物理量の相似係数（similarity parameter または scale factor）が明らかとなった<sup>(4)</sup>。さらに、実物の遮断性能を推定するために必要十分な試験条件も理論的に明白となった<sup>(4)</sup>。ABB の諸現象の研究に、モデルを使用することは従来から行なわれてはいたものの、そのモデルは実物と相似関係になく、むしろ、対象とした研究が実施しやすいように変形されていた。したがって、それらの結果から実物の諸性能を推定することは不可能であった。一方、遮断器以外の流体機械、たとえば水車、船舶、航空機などの研究では、モデルを使用して実物の特性を推定することはある程度常識となっており、今までに多数の実績が残されている。これに反して、ABB ではモデルによる結果は信頼性が少なく、実物の性能の推定がなされなかった原因は、ABB のモデルと実物との相似性について十分な検討がなされなかったためであろう。

ここでは ABB の操作特性について、モデルの特性から実物の特性をうる方法の理論的根拠ならびに実験的結果を述べ、モデルによる推定が可能であることを述べる。

## 2. モデル空気遮断器の力学的相似条件

### 2.1 力学的相似条件

ABB の動力学的問題をモデルにより研究する場合、モデルと実物との間には一般的な力学的相似条件が満足されなければならない。力学的な相似条件とは、モデルと実物の対応する点における力学的現象が相似関係にあるための条件である。すなわち、

- (a) 物体は幾何学的に相似である（幾何学的相似条件という）。
- (b) 対応点の密度比が一定である（密度分布相似条件）。
- (c) 最初の質点の配置は相似である。
- (d) 対応点における速度（ベクトル量）は定比である。
- (e) 対応点の実体力（ベクトル量）は定比である。
- (f) フラウド数  $\phi = V^2/lf$  が等しい（ここに、 $V$ ：速度、 $l$ ：長さ、 $f$ ：実体力すなわち単位質量当り作用する力）

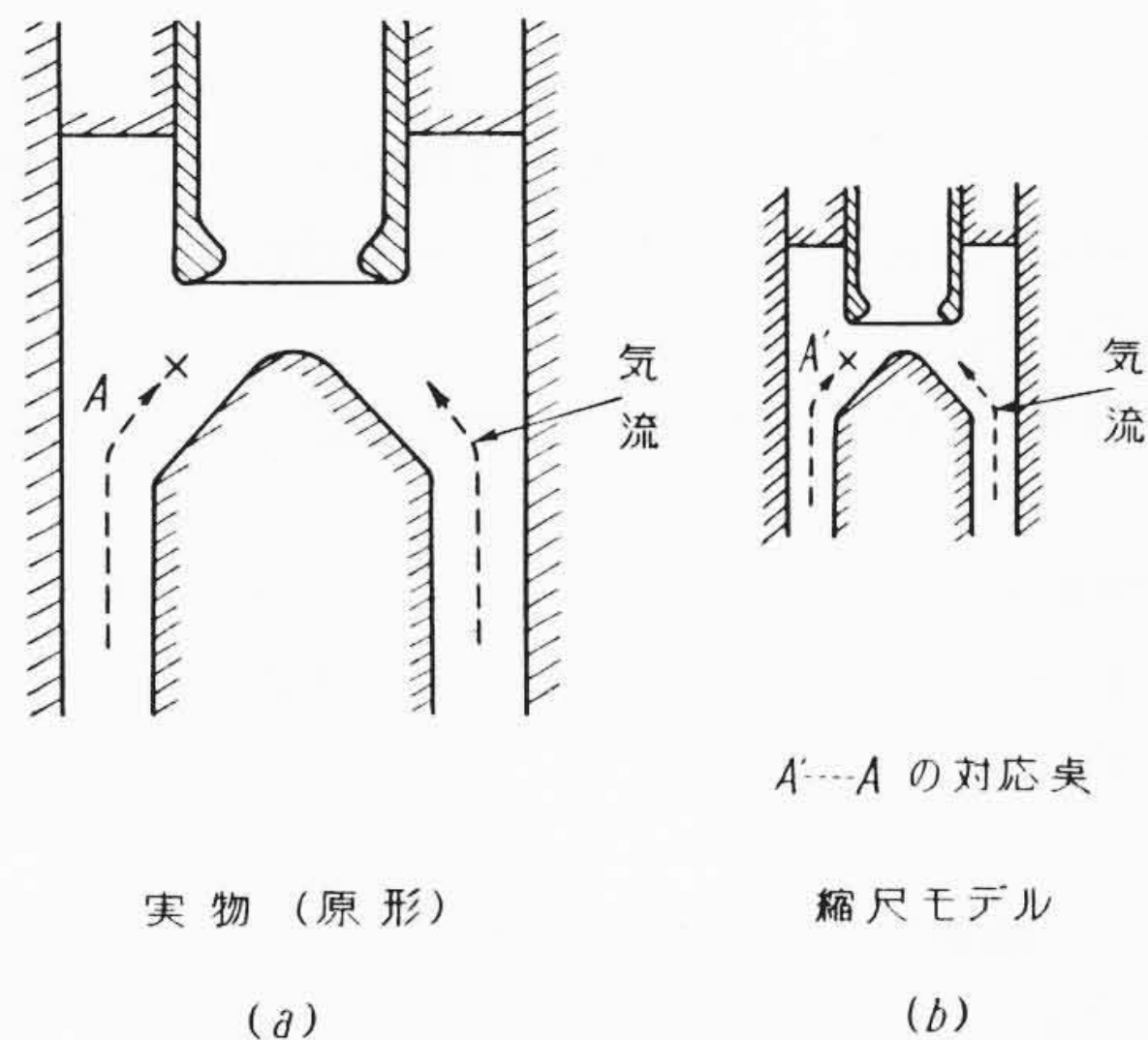
これら六つの条件を満足するように、モデルは製作されなければならない。その場合、この六つの条件は必ずしも独立でなく、互に関連しているので、定比を適切に選択すれば、モデル化が容易になる。

第 1 図に ABB の遮断部内を模型的に示した。実物の A 点に対応するのはモデルの A' 点であり、A 点と A' 点で前記の六つの条件が満足されていれば、その点の現象は相似であることになる。次にこれらの条件を詳細に検討してみよう。

### 2.2 ABB の力学的相似条件

#### 2.2.1 幾何学的相似条件

モデルの縮尺を  $\alpha$  とし、 $l_m$ ,  $l_p$  をそれぞれモデルと実物の対応



第 1 図 幾何学的に相似の形状

\* 日立製作所日立研究所



する長さとするれば、

$$l_m = \alpha l_p \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。

2.2.2 密度分布相似条件

対応点の密度比を  $\beta$  とすると、密度  $\rho$  は

$$\rho_m = \beta \rho_p \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\rho_m, \rho_p$ ：モデルおよび実物の対応点の密度で表わされる。 $\beta$  が一定であるためには、操作気圧と構造材の密度とが比例関係になければならないことになる。たとえば、モデル ABB の操作気圧を  $1/2$  に減ずるときは、遮断部空間の気体密度も  $1/2$  になるので、構造材の密度も  $1/2$  にしなければならない。少なくとも可動部分の密度は  $1/2$  にしなければならない。

2.2.3 (c) の条件

モデルと実物とは同一状態(たとえば遮断あるいは投入状態)から動作しなければならないことを意味する。幾何学的相似条件が満足されていれば、この条件は容易に満たすことができる。

2.2.4 (f) の条件

この条件を書き替えると

$$\phi = \frac{mV^2}{lF} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $m$ ：物体の質量

$F$ ：物体に作用する力 ( $=mf$ )

が等しいことである。すなわち、

$$\frac{m_m V_m^2}{l_m F_m} = \frac{m_p V_p^2}{l_p F_p} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、末尾記号  $m$  はモデルに対する値、 $p$  は実物に対する値を表わす。  
で表わされる。

空気を圧縮性非粘性気体と仮定して気流についてまず検討すると、空気に作用する実体力  $f$  は体積弾性率を  $k$ 、密度を  $\rho$  として

$$f = \frac{\text{弾性力}}{\text{質量}} = \frac{kl^2}{\rho l^3} = \frac{k}{\rho l} \dots\dots\dots (5)$$

よって、フラウド数は、

$$\phi = \frac{\rho k^2}{k} \dots\dots\dots (6)$$

となる。一方、音波の伝はん速度  $a$  は

$$a = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \dots\dots\dots (7)$$

によって与えられるから、フラウド数は、

$$\frac{\rho V^2}{k} = \left(\frac{V}{a}\right)^2 = M^2 \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $M$ ：マッハ数

となる。すなわち、(f) の条件はモデルと実物とにおいて、対応する点の気流のマッハ数が等しくなければならないことを意味している。このような圧縮性非粘性気体のマッハ数は形状によって決まるので、幾何学的に相似なモデルの対応点では等しいことが知られている。

したがってこの条件は(a)の条件で満足されていることになる。

通常対応点の気流の温度は等しいので、マッハ数のみならず流速も等しいことになる。すなわち、対応する点の気流の速度は、

$$V_m = V_p \dots\dots\dots (9)$$

となる。

次に、可動物体について同様な検討を行なうと、質量  $m$  は、 $m = \rho l^3$  で表わされるから、実体力は  $F/\rho l^3$  となる。

ゆえに、フラウド数は、

$$\phi = \frac{\rho l^2 V^2}{F} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、前述の対応点の気流速度が等しいことを考慮すれば、可動物体の対応点の速度も等しくすることの必要性が理解される。よって、

$$\frac{\rho_m l_m^2}{F_m} = \frac{\rho_p l_p^2}{F_p}$$

または、

$$F_m = \beta \alpha^2 F_p \dots\dots\dots (11)$$

この式から物体に作用する力(たとえばバネ力)は  $\beta \alpha^2$  に比例させなければ相似とならないことがわかる。

2.2.5 (d) の条件

対応点の速度は前項で明らかなように等しくする必要がある。

2.2.6 (e) の条件

対応点の実体力  $f = F/m$  は式(1)、(2)、(11)より

$$f_m = \frac{\beta \alpha^2}{\beta \alpha^3} \frac{F_p}{\rho_p l_p^3} = \frac{1}{\alpha} f_p \dots\dots\dots (12)$$

となり、縮尺の逆数で表わされた定比となる。

2.3 相似係数

前述の相似条件を満足するモデル ABB の種々の物理量について、次元解析により相似係数を求めてみる。この場合、一般に使用されている基本次元  $L, M, T$  とは異なった実用的(特に ABB の解析に適した)基本次元として  $L$  (長さ)、 $P$  (圧力)、 $V$  (速度)を用いると便利である。

これら 2 組の基本次元の間の関係式は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} L &= L \\ T &= LV^{-1} \\ M &= L^3 PV^{-2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

このうち第 3 の式は圧力  $P$  の次元が  $L^{-1}MT^{-2}$  で表わされることから、ただちに理解される。基本次元 ( $L, P, V$ ) を用いて ABB に関連した物理量の次元式を求め、さらに、

$$l_m = \alpha l_p \dots\dots\dots (1)$$

$$P_m = \beta P_p \dots\dots\dots (2')$$

$$V_m = V_p \dots\dots\dots (9)$$

を考慮すれば、相似係数は  $\alpha, \beta$  の関数として示される。第 1 表はこのようにして求めた相似係数を示す。

この表から明らかなように、時間は  $\alpha$  倍に縮尺され、加速度は

第 1 表 相 似 係 数

| 物 理 量     | 次 元 式                      |                            | 相似係数<br>$\alpha$ : 縮 尺<br>$\beta$ : 密度比 | 相似係数計算例                   |                             |
|-----------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
|           | $L, M, T$ を基本とするとき         | $L, P, V$ を基本とするとき         |                                         | $\alpha=2/3$<br>$\beta=1$ | $\alpha=1/3$<br>$\beta=1/2$ |
| 長  さ      | $L$                        | $L$                        | $\alpha$                                | 2/3                       | 1/3                         |
| 面  積      | $L^2$                      | $L^2$                      | $\alpha^2$                              | 4/9                       | 1/9                         |
| 体  積      | $L^3$                      | $L^3$                      | $\alpha^3$                              | 8/27                      | 1/27                        |
| 時  間      | $T$                        | $L \quad V^{-1}$           | $\alpha$                                | 2/3                       | 1/3                         |
| 流  速      | $L \quad T^{-1}$           | $V$                        | 1                                       | 1                         | 1                           |
| 圧  力      | $L^{-1} M \quad T^{-2}$    | $P$                        | $\beta$                                 | 1                         | 1/2                         |
| 力         | $L \quad M \quad T^{-2}$   | $L^2 \quad P$              | $\alpha^2 \beta$                        | 4/9                       | 1/18                        |
| 加 速 度     | $L \quad T^{-2}$           | $L^{-1} \quad V^2$         | $\alpha^{-1}$                           | 3/2                       | 3                           |
| 運 動 量     | $L \quad M \quad T^{-1}$   | $L^3 \quad P \quad V^{-1}$ | $\alpha^3 \beta$                        | 8/27                      | 1/54                        |
| エ ネ ル ギ ー | $L^2 \quad M \quad T^{-2}$ | $L^3 \quad P$              | $\alpha^3 \beta$                        | 8/27                      | 1/54                        |
| 質  量      | $M$                        | $L^3 \quad P \quad V^{-2}$ | $\alpha^3 \beta$                        | 8/27                      | 1/54                        |
| 流  量      | $M \quad T^{-1}$           | $L^3 \quad P \quad V^{-1}$ | $\alpha^3 \beta$                        | 4/9                       | 1/18                        |
| 密  度      | $L^{-3} \quad M$           | $P \quad V^{-2}$           | $\beta$                                 | 1                         | 1/2                         |
| 弾 性 力     | $L \quad M \quad T^{-2}$   | $L^2 \quad P$              | $\alpha^2 \beta$                        | 4/9                       | 1/18                        |
| 空気消費量     | $M$                        | $L^3 \quad P \quad V^{-2}$ | $\alpha^3 \beta$                        | 8/27                      | 1/54                        |

注 (1) 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。 $q$  は無次元常数である。



$1/\alpha$  倍に拡大される。バネ力は  $\beta\alpha^2$  倍になり、バネ常数は  $\beta\alpha$  倍になる。空気消費量が  $\beta\alpha^3$  倍になるのは吹付時間が  $\alpha$  倍になるため、単位時間当りの流量は  $\beta\alpha^2$  倍になっている。

#### 2.4 モデルバネの相似条件

ABB は通常、接触子の圧接を行なうために圧縮バネを使用する。このバネの強さは可動子のストローク特性に大きい影響を及ぼすので、モデルバネの製作にあたっては十分な注意が必要となる。そこで、バネの場合単に幾何学的相似に縮尺しただけで、強さが  $\beta\alpha^2$  倍に減少するかいなかを検討しよう。すなわち、モデルバネの大体の形状はバネを収納する空間によって制限されるので、任意に変更することはできない。その結果、バネの材質を変更しなければならないかもしれないので重要な問題である。

バネの特性式

$$F = \frac{8DW}{\pi d^3} \dots\dots\dots (14)$$

$$\delta = \frac{8WD^3N}{Gd^4} \dots\dots\dots (15)$$

ここに、  $F$ : ねじり内力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$W$ : 荷重 ( $\text{kg}$ )

$D$ : 平均直径 ( $\text{mm}$ )

$d$ : 線の直径 ( $\text{mm}$ )

$\delta$ : たわみ ( $\text{mm}$ )

$N$ : 有効巻数

$G$ : ねじり弾性係数 ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

を用いて、バネの力 (すなわち荷重  $W$ ) とそのときのたわみ  $\delta$  の相似係数を求めてみよう。式(14)より、

$$W = \frac{\pi d^3}{8D} \cdot F \dots\dots\dots (16)$$

で表わされ、 $F$  の限界値は材料によりほぼ同一の値を取るの、相似係数は  $\alpha^2$  となる。

次に、たわみは式(15)と式(16)より、

$$\delta = \frac{8D^3N}{Gd^4} \cdot \frac{\pi d^3}{8D} F = \frac{ND^2}{Gd} F \dots\dots\dots (17)$$

となり、相似係数は  $\alpha$  となる。

結局、圧縮バネでは幾何学的相似条件を満足させれば  $\beta=1$  の場合の相似係数と一致し、相似なモデルバネが製作される。

もし、 $\beta$  が 1 より小さいときは、バネの力を  $\beta$  倍に弱めねばならない。そこで線の太さ  $\alpha$  を  $\alpha\beta^{1/3}$  に比例して縮少し、巻数を  $\beta^{1/3}$  倍、 $D$  を  $\alpha$  倍に縮少しとすると、式(16)および式(17)より、モデルバネでは、

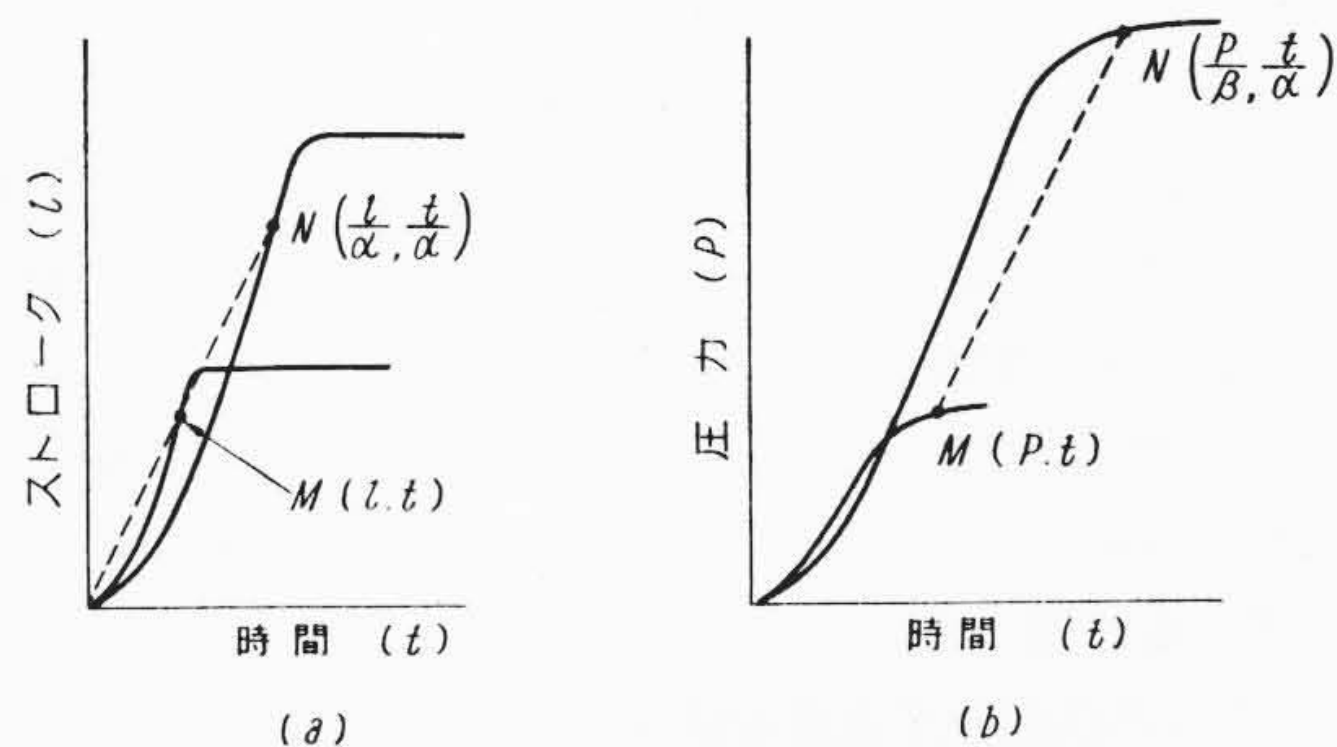
$$W_m = \frac{\pi d^3}{8D} F \cdot \frac{\alpha^3\beta}{\alpha} = W_p \cdot \alpha^2\beta \dots\dots\dots (18)$$

$$\delta_m = \frac{ND^2}{Gd} F \cdot \frac{\beta^{1/3}\alpha^2}{\alpha\beta^{1/3}} = \delta_p \cdot \alpha \dots\dots\dots (19)$$

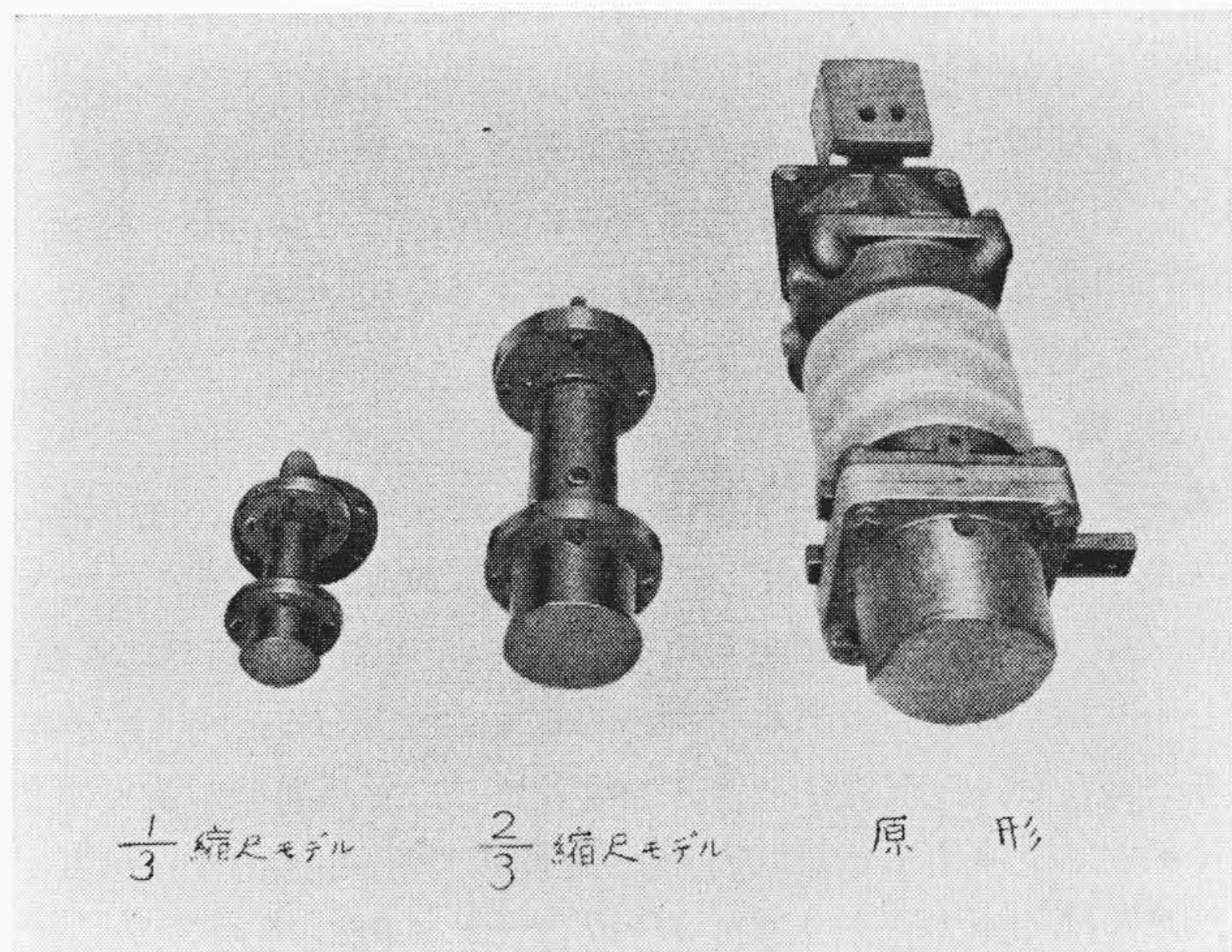
となり、相似係数はそれぞれ、 $\alpha^2\beta$  および  $\alpha$  となる。よって、圧縮バネをモデル化するとき、第2表のような相似係数を使用すればよいことが明らかとなった。

第2表 バネの相似係数

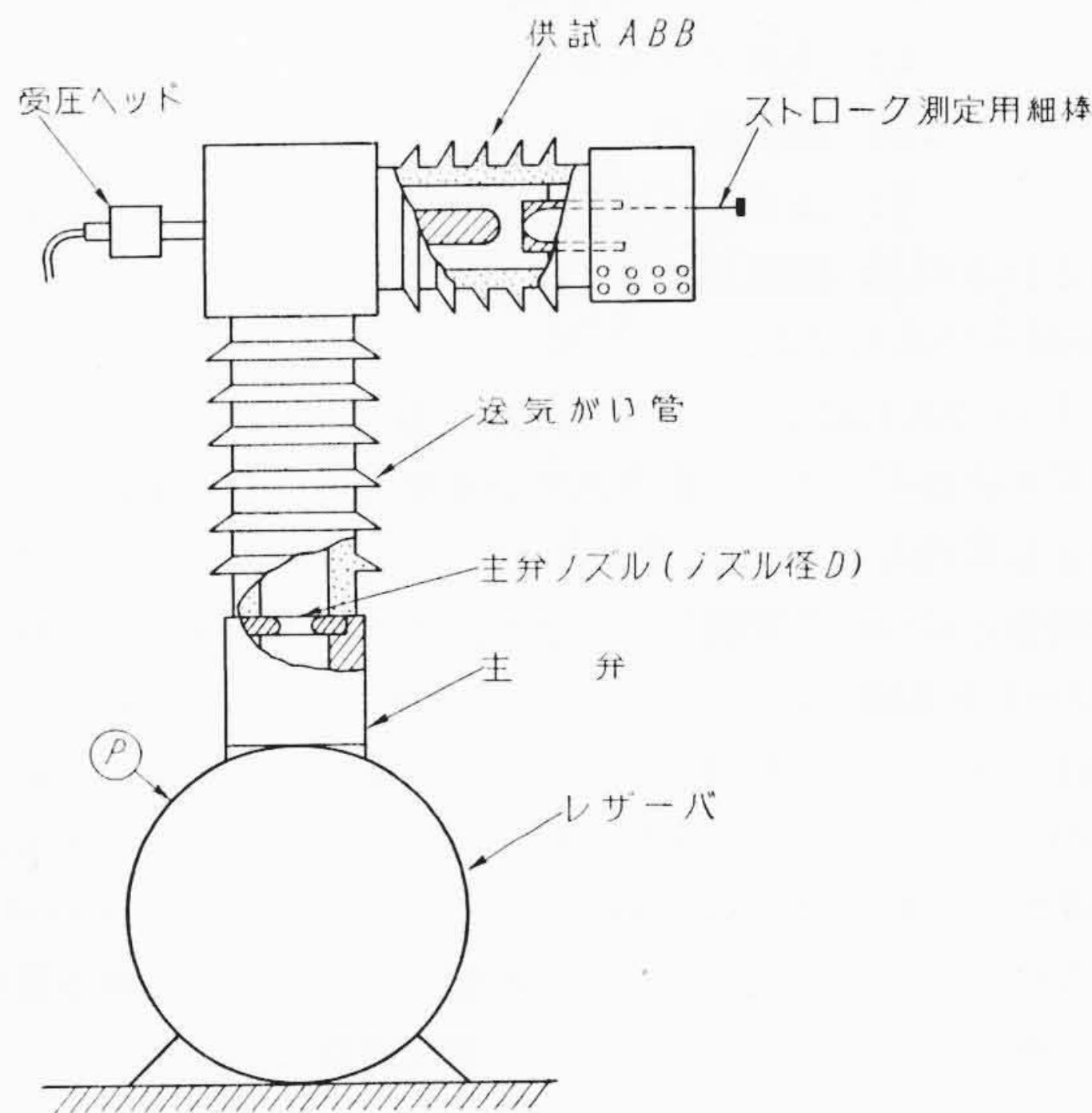
| 物理量     | 実物の値     | 相似係数                | モデルの値                |
|---------|----------|---------------------|----------------------|
| ねじり内力   | $F$      | 1                   | $F$                  |
| 平均直径    | $D$      | $\alpha$            | $\alpha D$           |
| 線の直径    | $d$      | $\alpha\beta^{1/3}$ | $\alpha\beta^{1/3}d$ |
| 有効巻数    | $N$      | $\beta^{1/3}$       | $\beta^{1/3}N$       |
| ねじり弾性係数 | $G$      | 1                   | $G$                  |
| 荷重 (強さ) | $W$      | $\alpha^2\beta$     | $\alpha^2\beta W$    |
| たわみ     | $\delta$ | $\alpha$            | $\alpha\delta$       |



第2図 モデル特性より実物特性を推定する方法



第3図 供試 ABB 遮断部の外観



第4図 実験装置略図

#### 2.5 モデル特性による実物特性の推定法

前述の結果より明らかなように、モデルで得た結果に相似係数の逆数を掛けた値が、実物の推定値となる。たとえば、第2図(a)に示すように、図示されたモデル特性  $M(l, t)$  より、実物の特性  $N(l/\alpha, t/\alpha)$  が求められる。(b)の場合も同様に  $M(P, t)$  より  $N(P/\beta, t/\alpha)$  が求められる。

### 3. 実験方法

#### 3.1 供試 ABB

前章で述べた理論的結果が実際に妥当かいなかを検討するため



に、簡単な小形 ABB と、やや複雑な大形 ABB とについて実験を行なった。いずれの場合もほぼ同様な結果を得たので、ここでは主として簡単な小形 ABB の場合について述べることにする。第 3 図に実物および  $\frac{2}{3}$ 、 $\frac{1}{3}$  縮尺モデルの遮断部の外観を示す。外形はあまり相似でないが、内部はほとんど正確に相似となっている。また、遮断部がい管はモデルでは絶縁筒を使用している。実験は主として、実物と  $\frac{2}{3}$  縮尺モデルとについて行ない、その比較をした。

### 3.2 測定方法

圧力特性は抵抗線ひずみ計を使用して測定した。測定箇所は遮断部の代りに遮断部入口の屈折部分とした。第 4 図にその位置を図示してある。また、真空タンクの圧力はベローズを使用した簡易真空計を製作して測定した。可動子のストローク特性は可動子に細棒を付け、それを遮断部の外部に突き出して、高速度カメラまたはホール効果を利用したストローク測定装置によりその運動を撮影して求めた。ストロークの測定誤差は  $\pm 0.2 \text{ mm}$  以下であった。なお、接触子の開離点は接触子に流れる微小電流 (約  $0.1 \text{ mA}$ ) の遮断されたときとした。

### 3.3 実験方法

第 4 図に示すように主弁およびレザーバなどの操作部は実物とモデルとで同一のものを共用し、送気がい管および遮断部のみをモデル化した。これは操作部を共用したほうが、実用上有利であるので、むしろ共用した場合の誤差を求めておく必要があると考えたからである。ただし、主弁直後にノズルを設置し、その面積が縮尺の 2 乗に比例するよう変更した。簡単な流体力学的知識からわかるように、遮断部の圧力立上り速度  $dP/dt$  は、 $P < 0.53 P_0$  のとき

$$\frac{dP}{dt} = k \frac{D^2}{C} \cdot P_0 \dots\dots\dots (20)$$

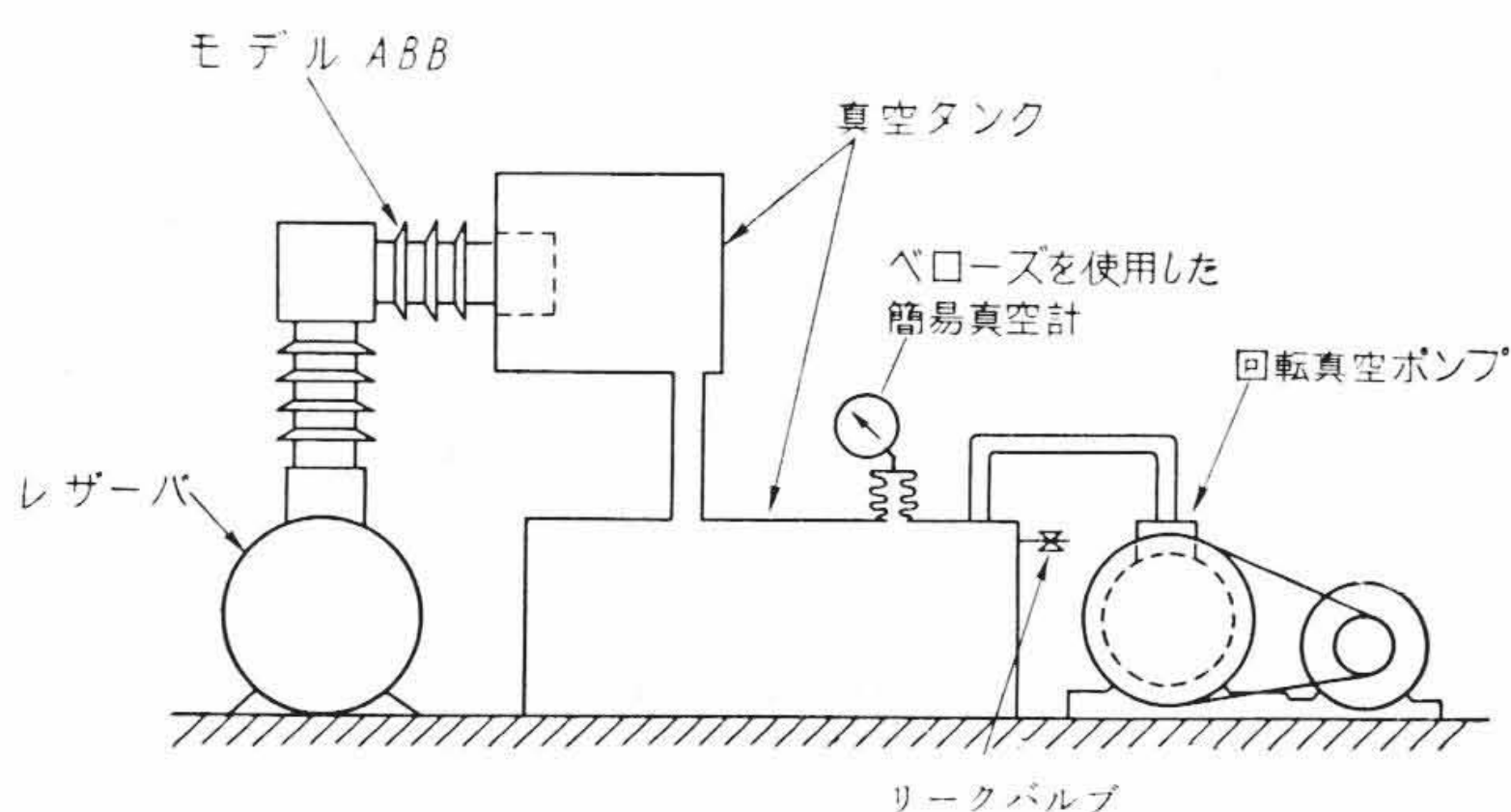
ここに、 $D$ : 主弁ノズル径 (略して主弁径という)

$C$ : 主弁ノズル背後の容積

$P_0$ : 操作圧力

$k$ : 主弁ノズルの形状や温度により定まる定数

で表わされるので、遮断部を除く部分は必ずしも相似でなくても  $D^2/C$  が同一であればよい。したがって、モデルと実物とでは  $D^2/C$  の値が  $1:\alpha$  であればよいことになる。実験では、主弁ノズル径  $D$  および  $C$  がそれぞれモデル化されている場合と、 $D$  を実物とモデルで同一とし  $C$  のみを  $1:\alpha$  に変化させて、 $D^2/C$  を前記条件を満足せしめた場合とについて実験した。また、操作圧力を変えた実験も行ない、 $\beta=1$  と  $0.56$  とについて主として実施した。 $\beta=0.56$  のときの可動子はアルミニウムを母体としてこれに銅メッキを施し一部に銅材を使用して、平均比重を実物可動子の  $\beta$  倍とした。このときの外気も理論的には絶対気圧  $0.56 \text{ kg/cm}^2$  (すなわち  $-0.44 \text{ kg/cm}^2$ ) に減圧しなければならぬので、その影響を知るために、第 5 図に示すような減圧用真空タンクを設置し、減圧調整を行なった。



第 5 図 外気を減圧する真空装置

## 4. 実験結果

### 4.1 圧力特性の推定

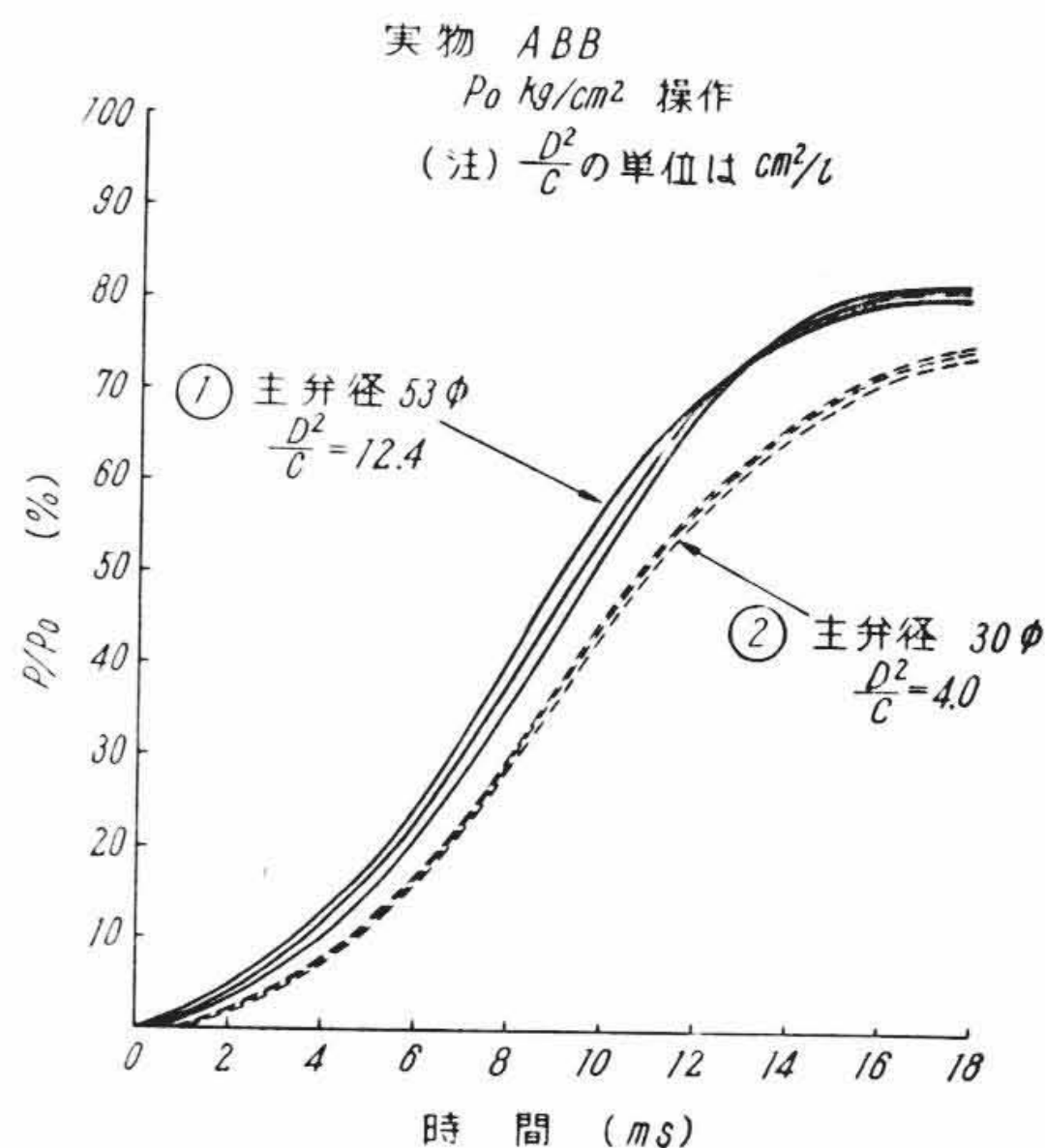
実物 ABB の定格操作圧力を  $P_0$  とすると、第 6 図は実物 ABB の圧力特性を操作圧力  $P_0$  で測定した場合である。主弁ノズル径の小さいほど圧力の立上り速度が小さい。

モデルでは主弁ノズル径を変えて、 $D^2/C$  を実物の約  $1/\alpha$  倍 (すなわち  $\frac{2}{3}$  モデルでは  $1.5$  倍) にすると、実物と相似になるはずである。第 7 図はモデルの主弁ノズル径を実物の  $\frac{2}{3}$  ( $20 \phi$ ) とし、容積を  $8/27$  倍に縮少し  $D^2/C$  を  $6.0$  とした場合の特性から、実物の特性を推定した場合である。圧力特性の大部分は実物実測値とほぼ一致している。圧力の比較的高いところではモデルの推定値のほうが実測値より高くなる。

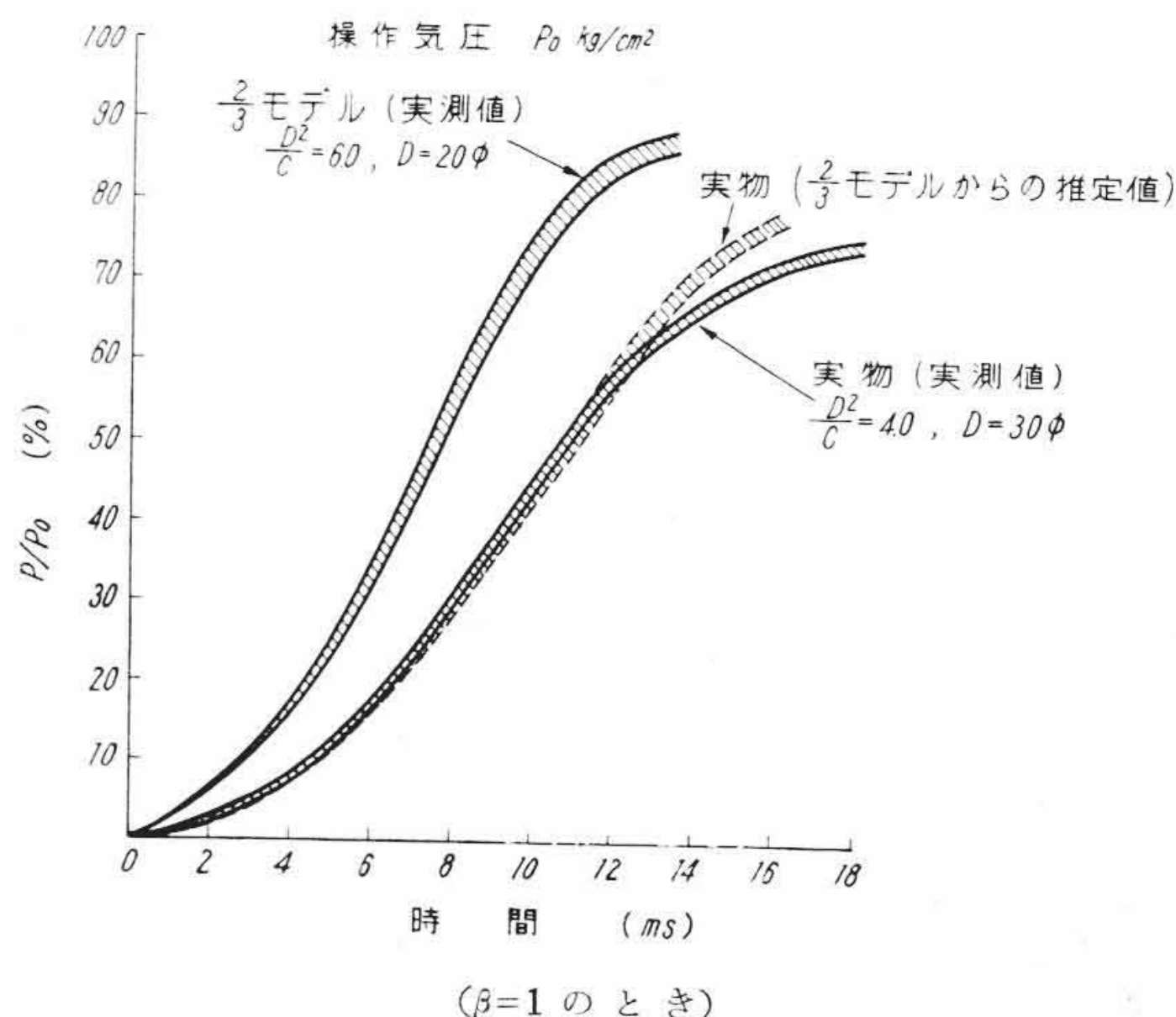
第 8 図は圧力を減少せしめたときの結果から、実物の圧力特性を推定した場合で、第 7 図と比較すると若干誤差が大きいが、測定精度からすればほぼ一致しているとみてよい。以上の結果から、圧力特性は  $10$  数 % の誤差の範囲内で、推定可能であることが明らかとなった。

### 4.2 ストローク特性

実物について実測したストローク特性を第 9 図に示す。主弁ノズル径を小さくすると、ストローク特性は明らかに悪くなる。これは第 6 図に示した圧力特性からわかるように、圧力上昇率の差異がおもな原因と考えられる。 $\frac{2}{3}$  モデル ABB で操作圧力を実物と同じ  $P_0$

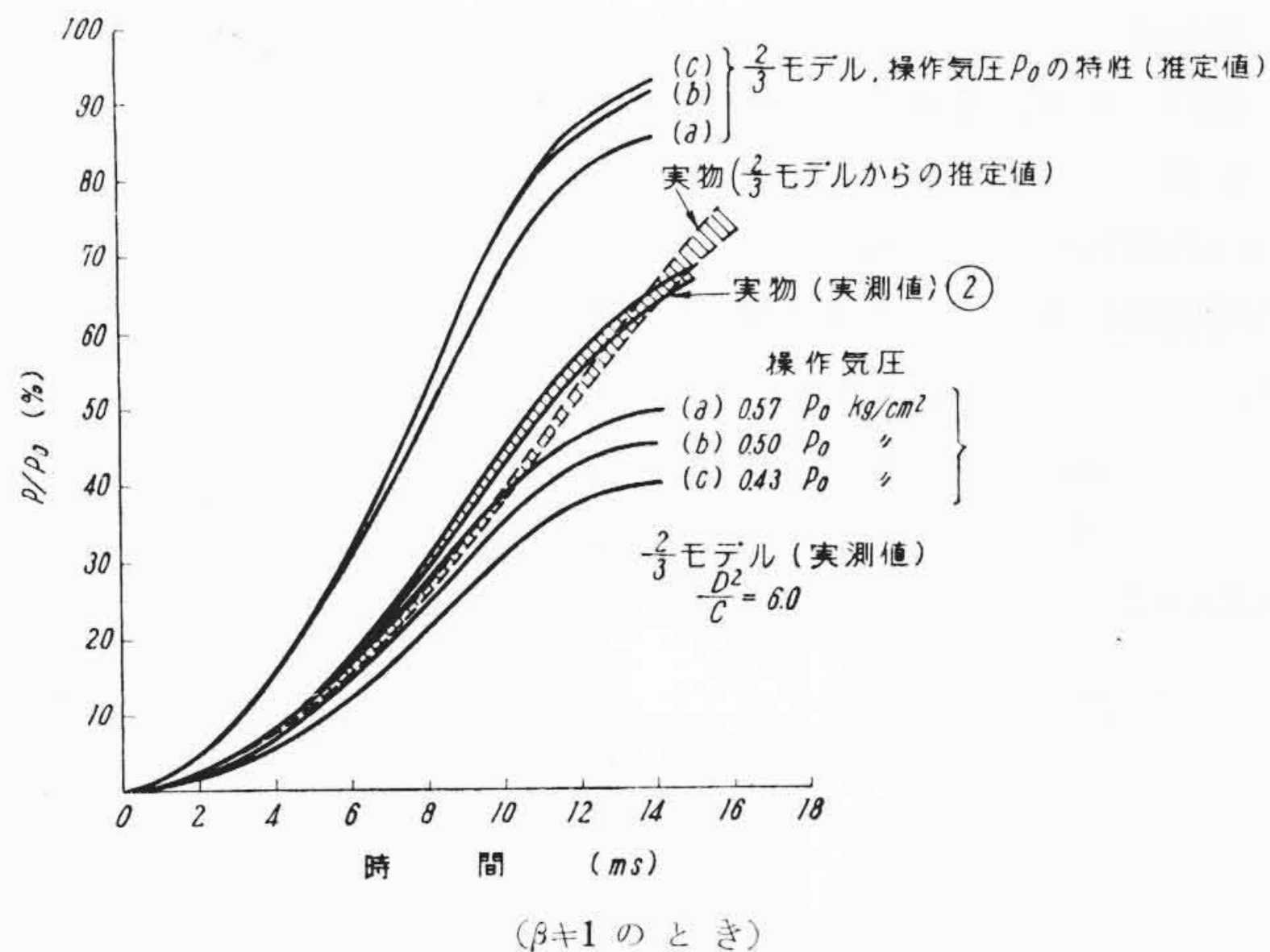


第 6 図 実物 ABB の圧力特性

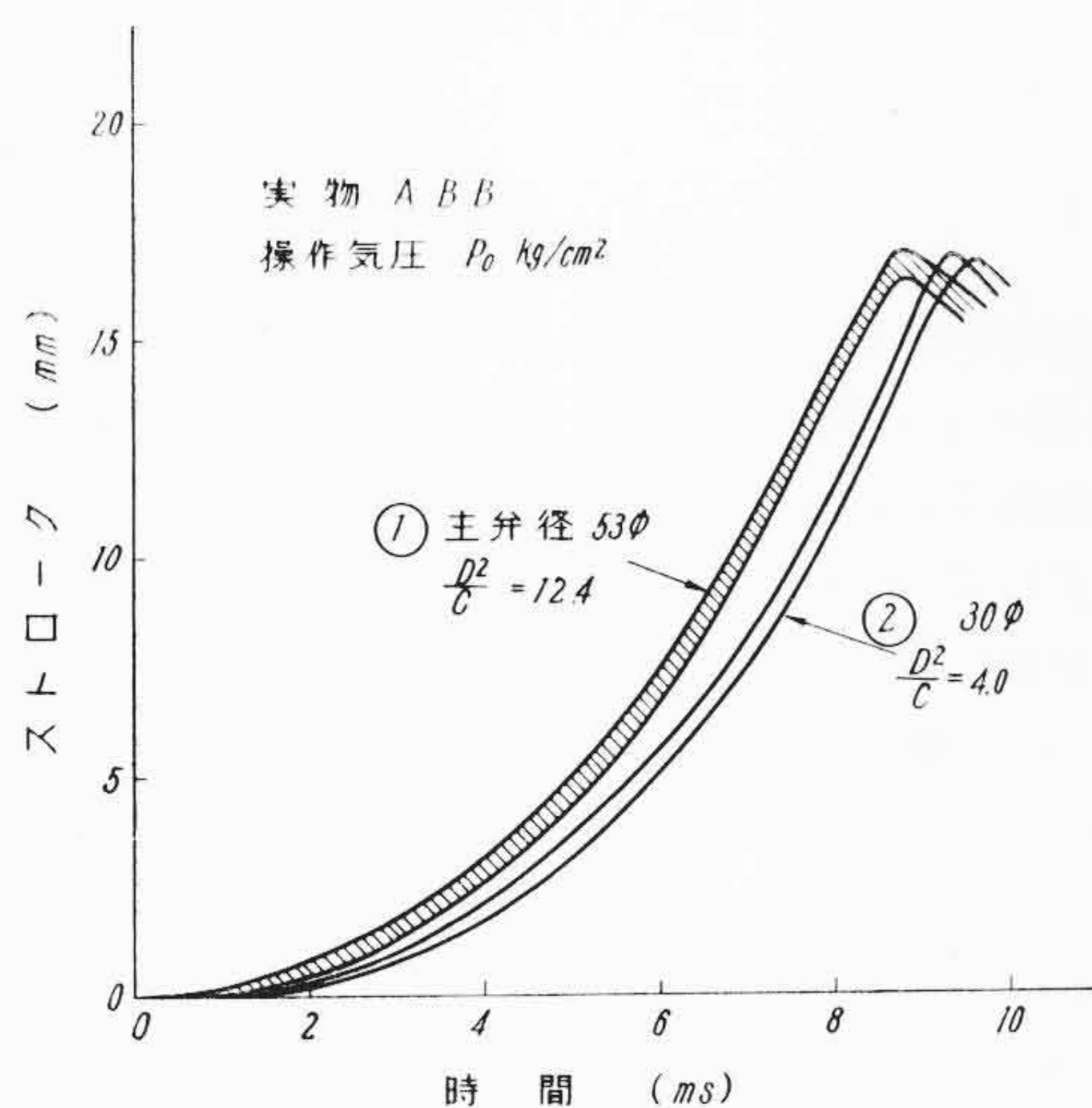


第 7 図 モデル ABB による圧力特性の推定

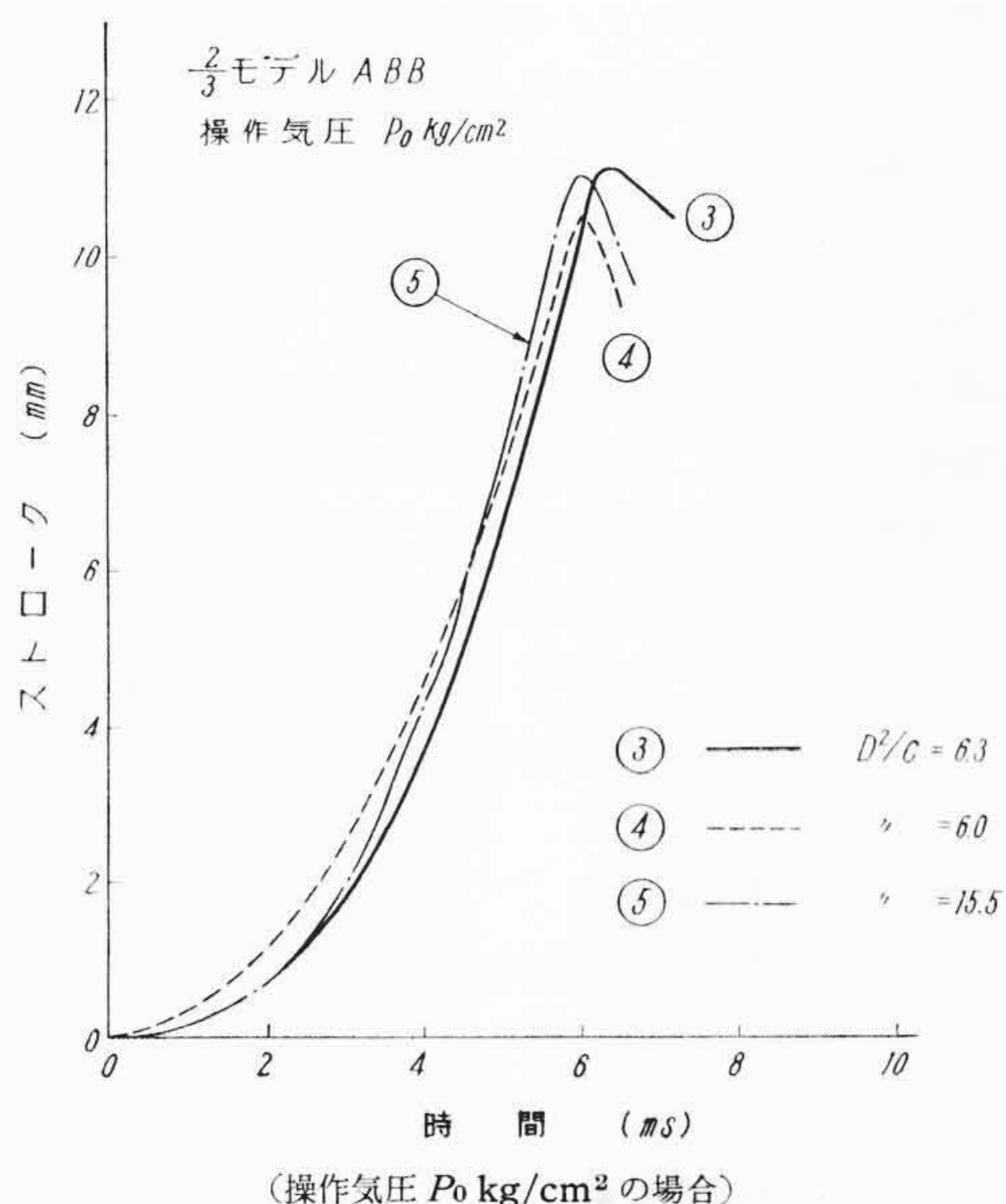




第8図 モデル ABB による圧力特性の推定



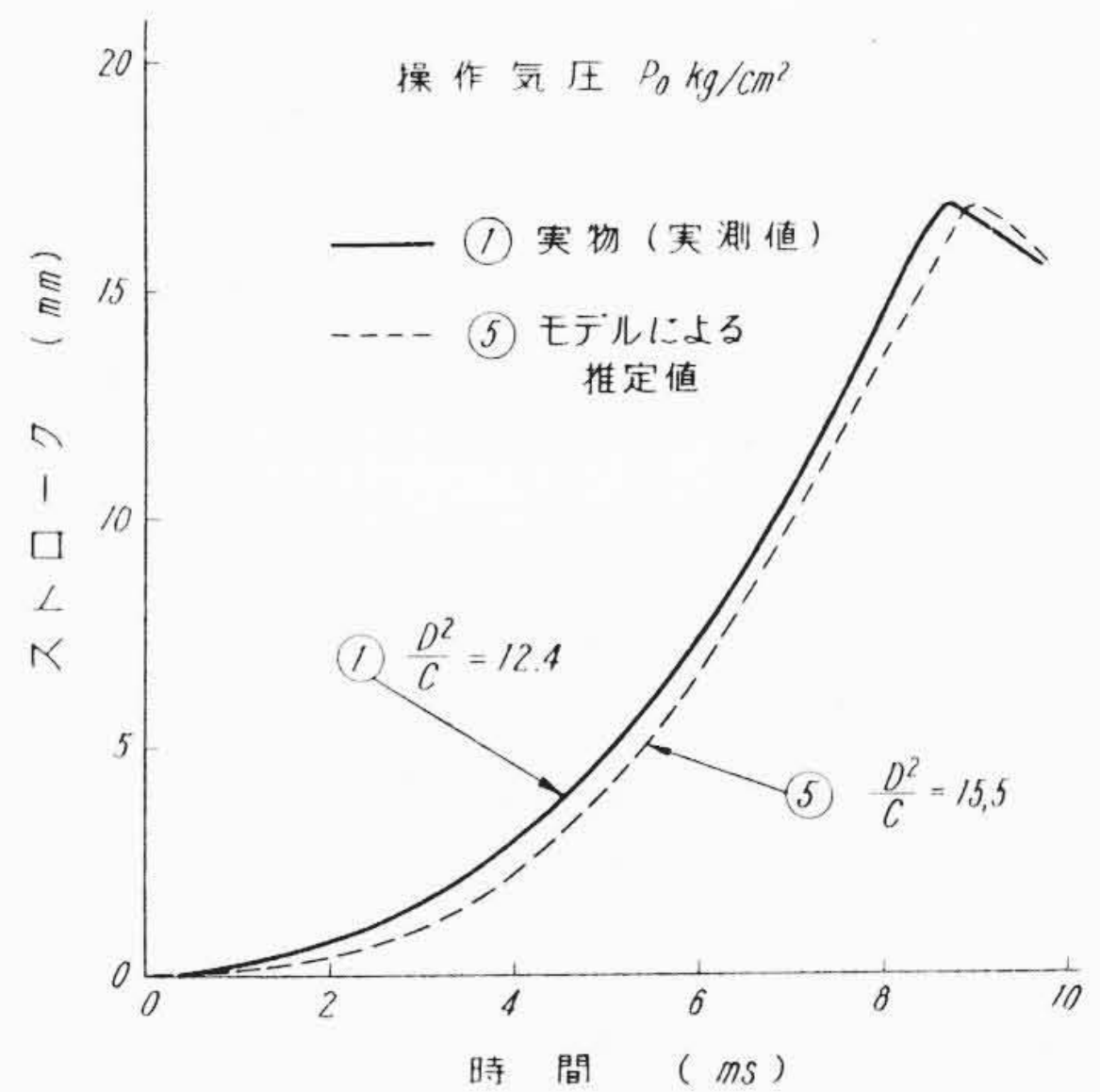
第9図 実物 ABB のストローク特性



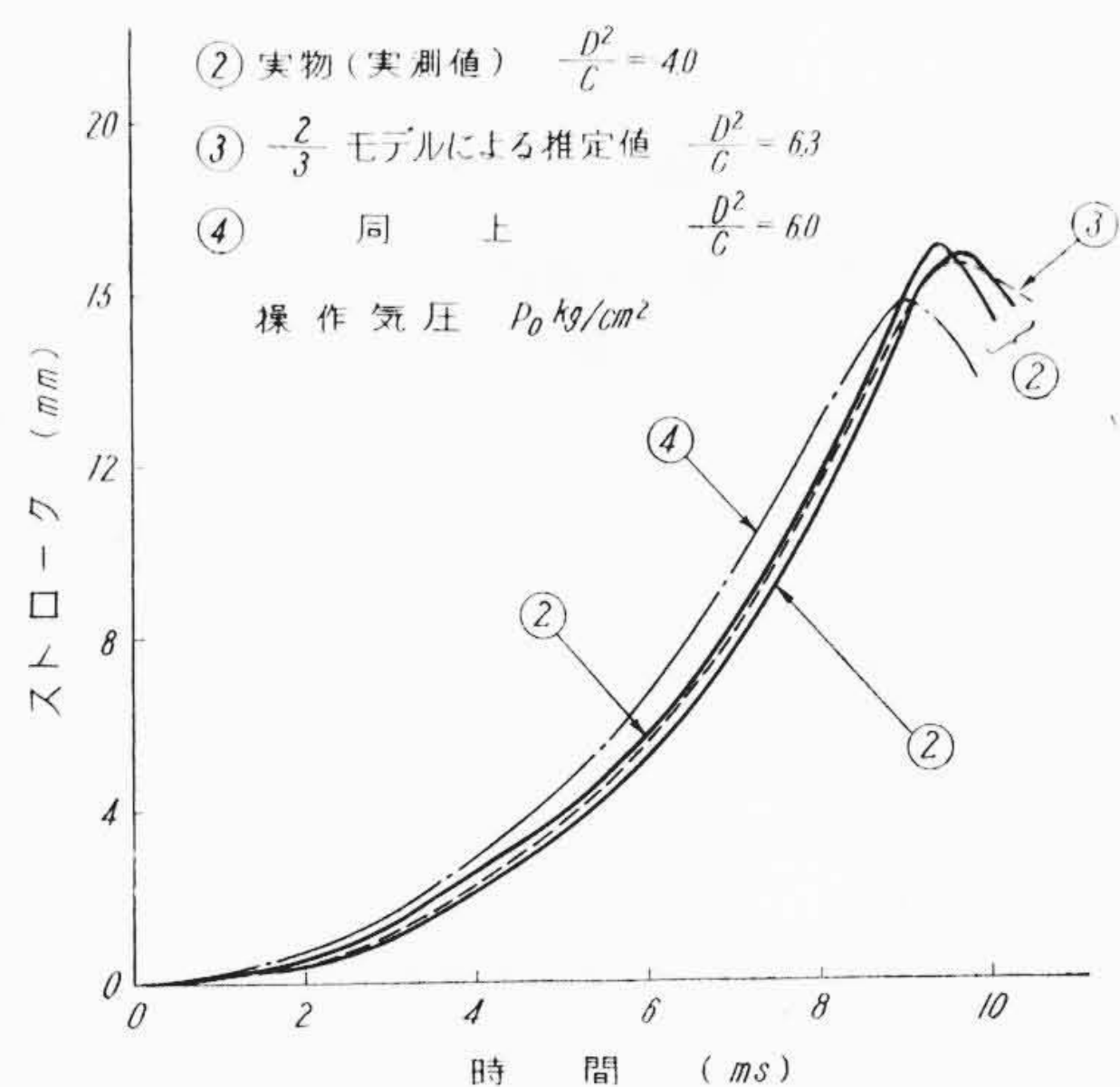
第10図 2/3モデル ABB のストローク特性

kg/cm<sup>2</sup> としたときのストローク特性を第10図に示す。 $D^2/C$  が大きいほど、やはりストローク特性の速度が大きい。しかし、圧力特性の差異に比べるとストローク特性の差は少ない。なお開離点の測定誤差が約  $\pm 0.5$  ms あることを考慮すれば、特性③と④とでは③のほうが良好であるとみられる。

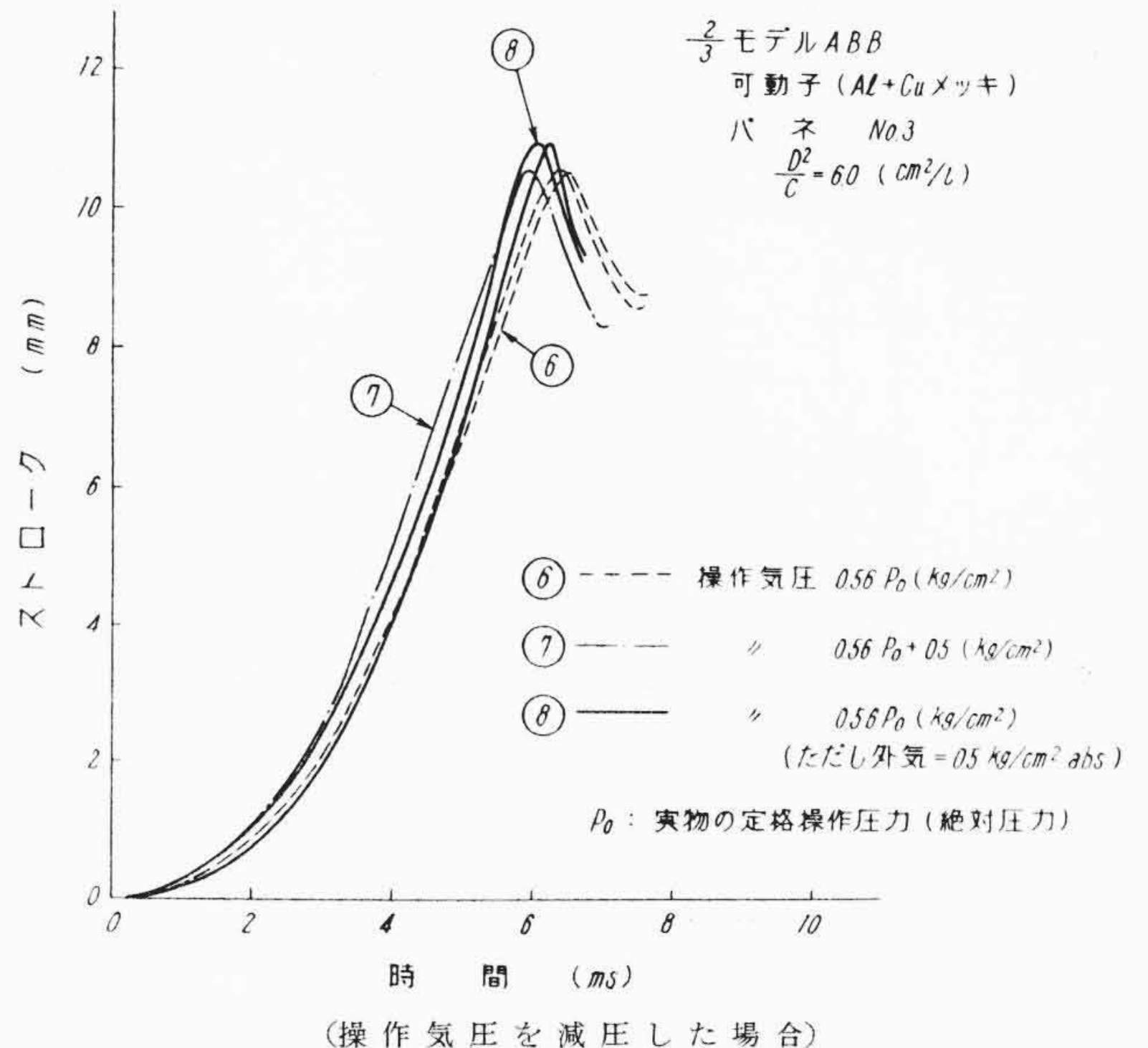
第11図および第12図に、 $2/3$ モデルから推定された特性と実物実



第11図 モデル ABB によるストローク特性の推定 (その1)



第12図 モデル ABB によるストローク特性の推定 (その2)



第13図 モデル ABB のストローク特性

測値とを比較して示した。モデルと実物の  $D^2/C$  はほぼ  $1:\alpha$  になっている。多少の差はあるが、推定値は実測値とかなりよく一致している。

次に  $2/3$ モデルの可動子の平均比重を約0.56とした場合についてストローク特性を測定し、その結果を第13図に示した。厳密には操作気圧が  $0.56 P_0$  ( $P_0$ : 実物の定格操作絶対圧力) のときは外気も絶対気圧  $0.56 \text{ kg/cm}^2$  (すなわちゲージ圧力で  $-0.44 \text{ kg/cm}^2$ ) に減圧



しなければならないので、その影響を知るために、外気を 0.5 kg/cm<sup>2</sup> 減圧した場合としない場合および外気を減圧する代りに 0.56 P<sub>0</sub> + 0.5 kg/cm<sup>2</sup> を操作気圧とした場合とについて測定したものである。いずれもほぼ同じ特性であるが、特性⑦は特性⑧により似た曲線を示した。したがって、外気を減圧する代りに等価な操作圧力 P<sub>eq</sub> を

$$P_{eq} = \beta P_0 + (1 - \beta) = \beta (P_0 - 1) + 1 \dots\dots\dots (21)$$

に選べばよい。β が 1 に近いまたは P<sub>0</sub> が著しく大きいときは、

$$P_{eq} \doteq \beta P_0 \dots\dots\dots (22)$$

となる。特性⑧により推定した特性と実物実測値とを比較して第 14 図に示した。β = 1 のときより推定誤差は若干大きい、ほぼ推定可能である。

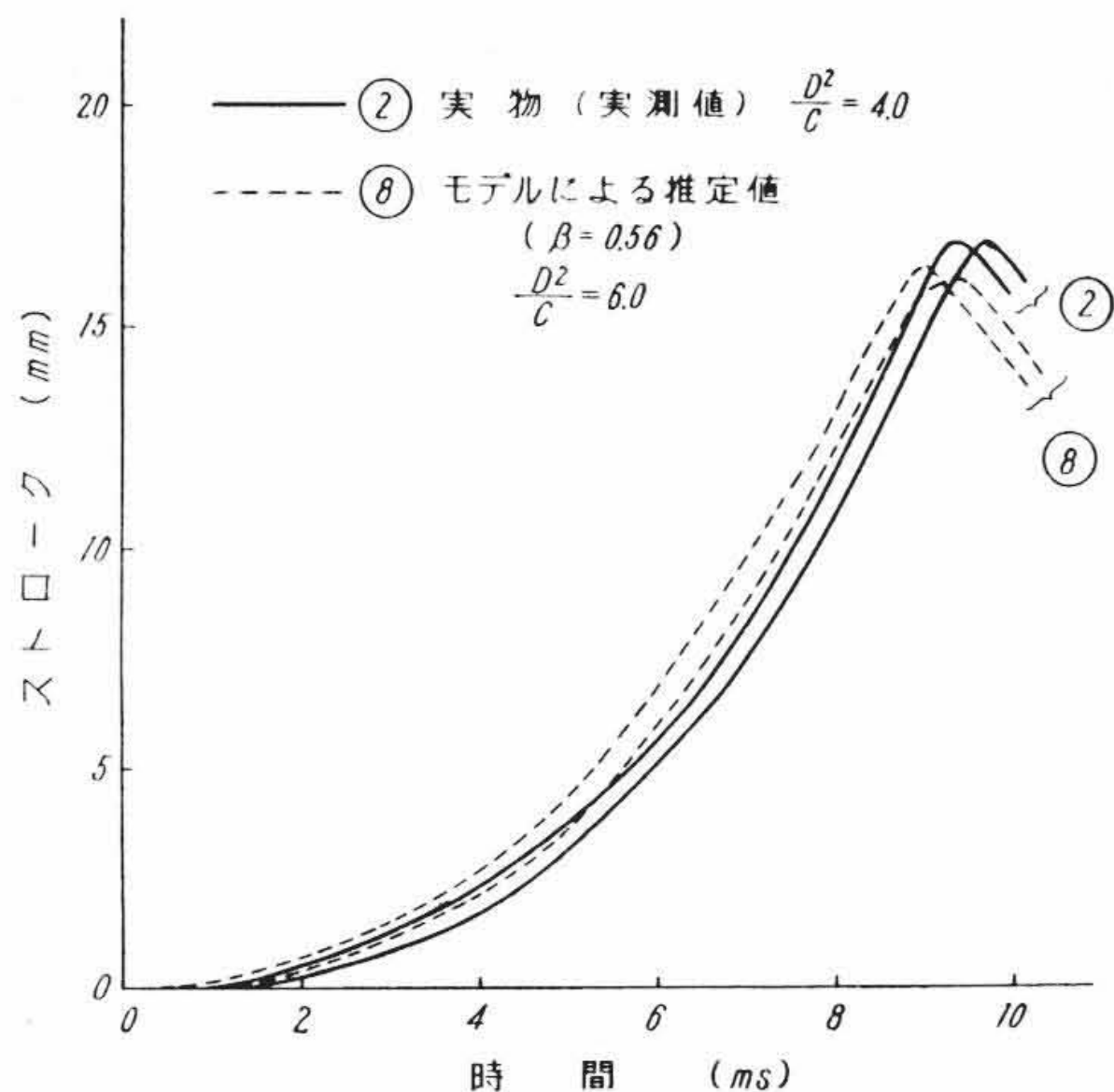
以上の結果から、ストローク特性のモデルによる推定は可能であり、その誤差は約 10% 以下である。もし、ワイピング作用のある場合には、推定誤差はさらに小さくなり数 % 以下に減少すると思われる。

## 5. 検 討

### 5.1 圧力特性に及ぼす種々の原因

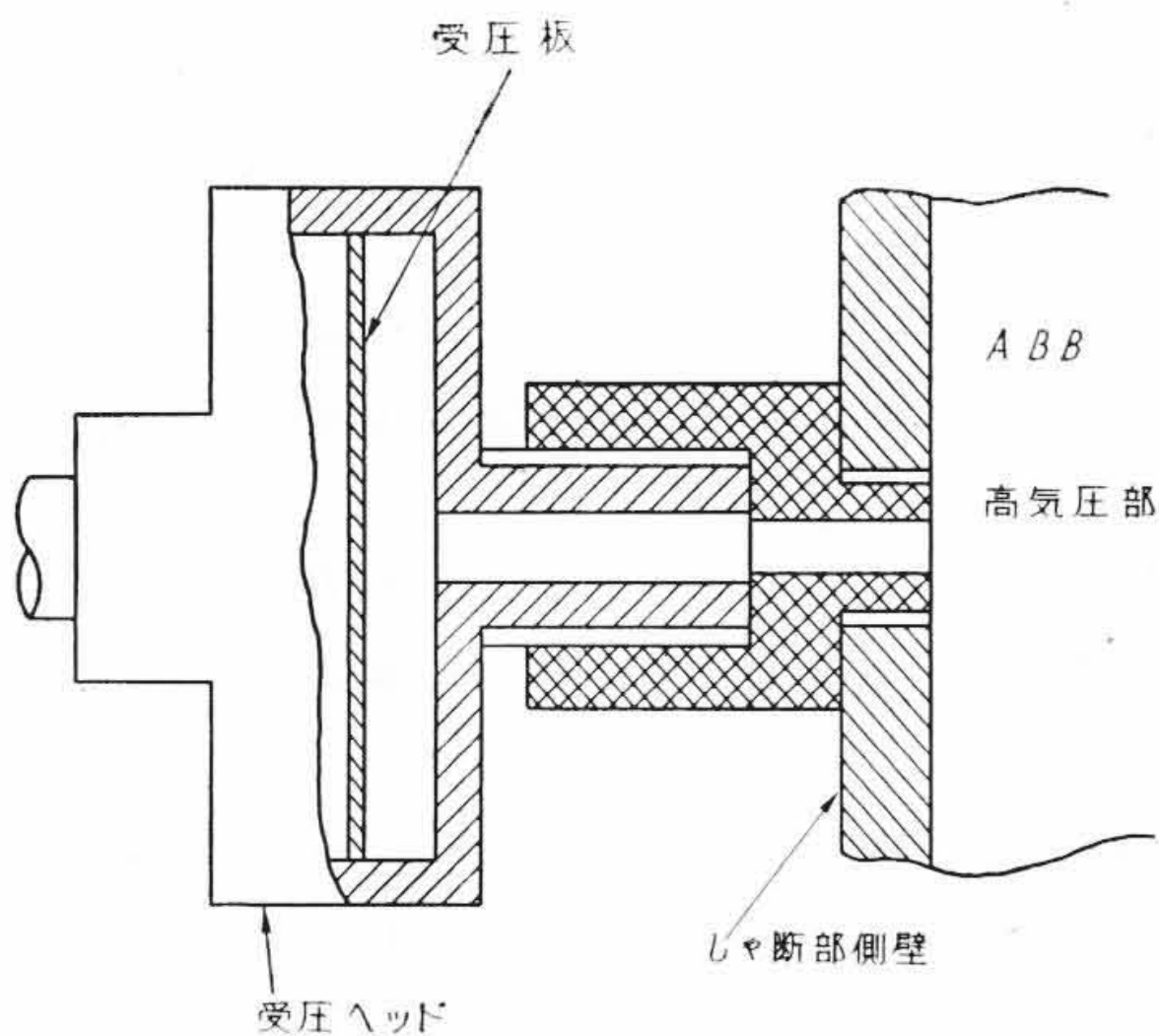
圧力特性はモデルによる推定値と実物実測値とがほぼ一致したが、当初はあまり良い一致を示さなかった。その原因を調査したところ、次のことが明らかとなった。すなわち、

(a) 圧力上昇はモデルが小さいほど急速であるが、当初使用した受圧ヘッドは第 15 図に示すように取付けたため、圧力の急峻波を測定してもゆるやかな波となり、過渡的な圧力特性が変わい



(操作気圧を減圧した場合)

第 14 図 モデル ABB によるストローク特性の推定 (その 3)



第 15 図 受圧ヘッドの取付方法

された。しかしアタッチメントを除去すれば、かなり改善された。(b) 主弁、電磁弁、レザーバなどが共用であったために相似性が悪くなった。

(a)の原因をさらに検討してみると、第 15 図の場合ノズルの背後の受圧板に加わる圧力 P の特性は(20)式と同様に、P < 0.53 P<sub>0</sub> のとき、

$$\frac{dP}{dt} = k' \frac{D^2}{C} P_0 \dots\dots\dots (23)$$

あるいは、

$$P = k' \frac{D^2}{C} P_0 t \dots\dots\dots (24)$$

ここに、 D: ヘッド入口ノズル径

C: ヘッド内容積

P<sub>0</sub>: ABB 高気圧部圧力

k': 比例定数

で表わすことができる。よって、P<sub>0</sub> の圧力が矩形波的に印加されても、測定された圧力は、

$$T = \frac{C}{k' D^2} \dots\dots\dots (25)$$

なる等価な時定数をもった波形として、測定されることになる。事実、第 15 図に示す構造で時定数 2 ms の圧力波形を測定したところ、時定数約 7 ms の波形として測定された。そこで、アタッチメントを除去し D<sup>2</sup>/C を約 3 倍に増加せしめたところ、ほぼ予想どおりの結果が得られた。そのときのヘッドの時定数は計算の結果約 2 ms であった。第 6 図ないし第 8 図はこのように改良後の結果である。さらに急しゅんな波に対して D<sup>2</sup>/C の大きい受圧ヘッドを使用しなければならない。受圧板が外部に露出している受圧ヘッドを使用すればいっそう理想的である。

次に、(b)の原因は最初から予想されていたが、同一の操作部を共用するほうが便利であるので、あえてモデル化しなかった。主弁のみはその背後にモデル化したノズルを置いた。結果的には、レザーバの容積が相似でないための影響は現れたが、他の影響は比較的少なかった。すなわち、電磁弁および主弁の非相似性による影響は圧力特性の比較的初期であるので、圧力値も低く実際にはあまり問題とならない。また、レザーバによる影響は圧力特性の後期で、圧力の最後値に対する影響は明白である。このように同一レザーバを使用する場合はモデルのほうを若干低い操作気圧で実施すればよいが、圧力特性の初期および後期はストローク特性に及ぼす影響が少ないので、実際にはあまり問題としなくてもよいであろう。

### 5.2 ストローク特性に及ぼす種々の原因

ストローク特性ではモデルによる推定値と実測値とがよい一致を示した。しかし、一致を悪くする種々の原因が伏在しているので、これについて検討してみよう。

#### 5.2.1 摩擦の影響

可動子の運動は摩擦力の大小により、かなりの影響を受けると考えられる。摩擦力 F (kg) は

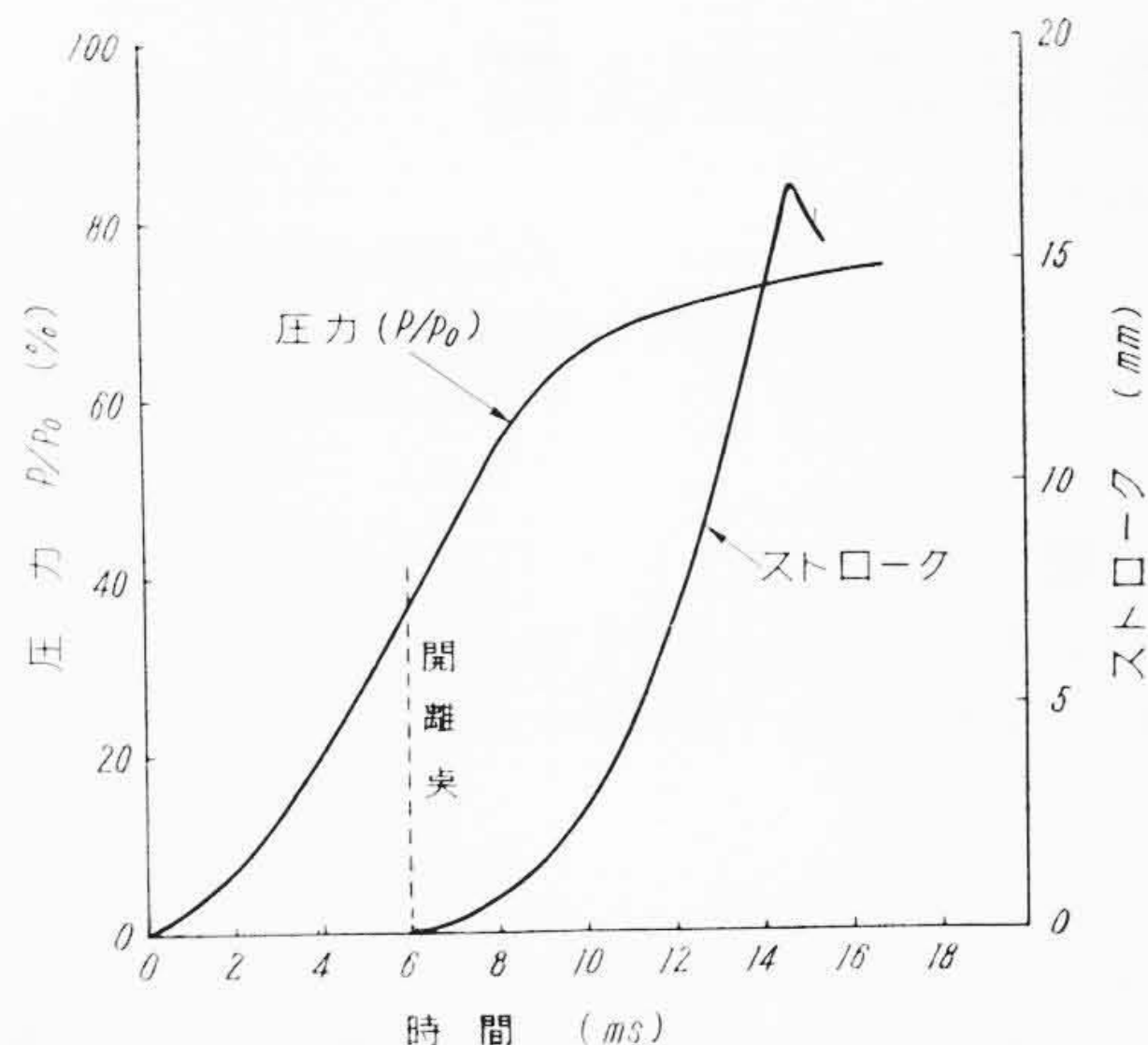
$$F = \mu F_c \dots\dots\dots (26)$$

ここに、 μ: 摩擦係数

F<sub>c</sub>: 可動子と固定部分との接触圧力 (kg)

で表わされる。F<sub>c</sub> は通常 10～数 10 kg であるので、接触面が清浄なときは μ ≒ 1 として摩擦力は 10～数 10 kg に達する。この値は駆動力の数 10% に達し、しかもわずかのよごれにより大きく変動することを考えれば、このような条件でのモデル試験は信頼性が少なくなる。潤滑剤を施せば、μ は 0.1～0.3 に減少するので、摩擦力は駆動力の数ないし 10 数 % に減少し、したがって、駆動力の変動は数%以下になると考えられる。それによるストローク





第16図 圧力特性とストローク特性の時間的關係

特性の誤差も数%以下であろう。

摩擦の極端な場合として、加工不良によるカジリの現象が生ずると、ストローク特性の推定は不可能となることが経験された。

### 5.2.2 圧力特性の影響

圧力特性が相似でないとき、ストローク特性に及ぼす影響について考えてみよう。ストローク特性と圧力特性の時間的關係は、第16図に示すとおりである。図から明らかなように圧力が立上りはじめてから約7 ms後に接触子は開離しているの、圧力特性の初期の影響は少ない。また、圧力の最終値がフルストローク後に到達する場合は、その影響も少ないが、第16図の例では、最終圧力の影響もストローク特性の後半に対して若干影響を与えている。このことから、モデル ABB のストローク特性に対しては、操作器がモデル化されていないための影響を無視することができる。ただし、レザーバ容積が同一の場合はモデルの操作気圧を若干低下させることが必要であろう。

### 5.2.3 大気圧の影響

操作圧力を減圧する場合は、大気圧も  $\beta$  倍に減圧しなければ力学的相似条件が満足されないが、実用的でない。そこで、大気圧を減圧する代りに、式(21)で示される等価圧力  $P_{eq}$  を使用するとよいことを述べた。しかしながら、電氣的相似条件を考えると、 $P_{eq}$  より  $\beta P_0$  を操作気圧とするほうが誤差が少ないことが明らか

である<sup>(4)</sup>ので、結局  $\beta$  および  $P_0$  ができるだけ大きい条件が望ましく、その場合は式(22)を用いることができる。もし  $\beta=1$  の場合は  $P_{eq}$  は  $P_0$  に等しくなるので、最も望ましい条件である。

## 6. 結 言

ABB の操作特性を判定する一つの方法として、縮尺された相似なモデルを使用する方法を考え、理論的考察ならびに実験的検討を行った。その結果を要約すると次のとおりである。

(1) モデルは幾何学的に相似であるばかりでなく、力学的にも相似でなければならない。そのモデルに対する相似係数は理論的に求められ、第1表に示されている。

(2) 第1表の条件が気流および可動部分について成り立つときは、モデルの操作特性から実物の操作特性が求められることが実験的にも明らかとなった。

(3) 実験の結果では、モデルによる圧力特性の推定値は、 $D^2/C$  を相似にすれば実物実測値とほぼ一致することが確かめられた。また、ストローク特性の推定値は実測値とかなりよく合致した。

(4)  $\beta \neq 1$  のときのストローク特性は大気圧を減圧する代りに、式(20)の等価圧力  $P_{eq}$  を用いて測定すればよい。

(5) 操作器は完全にモデル化しなくても、主弁ノズル径のみを相似に変化せしめるだけで、圧力特性およびストローク特性の推定は可能である。

(6) ストローク特性測定の際は、摩擦力をなるべく小さくするよう考慮しないと、推定誤差を大きくすることがある。

(7) 圧力測定の際は受圧ヘッドの  $D^2/C$  をできるだけ大きい構造としないと、誤差が生じやすい。特にモデルでは圧力特性が急しゅんであるので注意されねばならない。

以上のほかに、ABB の電氣的特性に対するモデル試験についても理論的には検討した<sup>(4)</sup>が、これについては実験結果も含め稿を改めて記述する予定である。

## 参 考 文 献

- (1) 山崎：日立評論 40, No. 9, 1047 (昭 33-9)  
山崎：電学誌 79, 896 (昭 34)
- (2) 高砂：日立評論 41, No. 12, 1583 (昭 34-12)
- (3) 高砂：同上 41, No. 8, 895 (昭 34-8)
- (4) 高砂：昭 34 電気学会東京支部大会予稿 No. 156 (昭 34-11)

Vol. 44

日 立

評 論

No. 5

・内蔵形復水器逆洗弁の操作について  
・急速起動におけるタービン車室の熱応力  
・電源開発株式会社御母衣発電所納相分離密閉母線  
・154 kV 系統キャリヤリレー  
・天井つりさげ形セシウム 137 治療装置  
・210 t 積トレーラ  
・空気分離器用 5,500 kW 原料空気圧縮機  
・リタソガイドベンの研究  
・CK-1 形二次元ならいフライス盤  
・気化器エアブリードの導入空気流量と燃料の脈打噴出  
・PX-1 形クロスバ交換機  
・メサ形トランジスタの高周波特性

・ニュービスタ 2BH5, 6CW4  
・AVM-1 形硫酸濃度分析計  
・赤外分光光度計の波長駆動機構  
架空送電線特集

・長径間送電用電線“AS-170”の諸特性  
・長径間送電線用電線の“AS-170”の付属品の検討  
・長径間送電用アルミ被鋼より線の金車通過実験  
・ジャンパ補強装置に関するもの  
・超高圧送電線路下の静電誘導  
・4 導体送電線断線実験  
・2 回線送電線における不平衡絶縁の効果  
・短波電波に対する棒間げきの内絡特性

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地

取次店 株式会社 オーム社書店

振替口座東京 71824 番

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地

振替口座東京 20018 番