

JAERI - M
83-154

J T-60 N B I 原型ユニット高速シャッタ
の動特性

1983年9月

向田 秀敏*・栗山 正明・荒木 政則

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費領有をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 原子力資料サービス

JT-60 NBI 原型ユニット高速シャッタの動特性

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

向田 秀敏^{*}・栗山 正明⁺・荒木 政則⁺

(1983年8月30日受理)

JT-60NBI 原型ユニットの圧縮空気作動型高速シャッタの動作特性を解明するため、高速シャッタ動作解析コードを作成した。この解析コードの使用により、高速シャッタの動作が、作動ガスのリザーバタンクの大きさ、圧空配管のコンダクタンスおよびガス導入用バルブの開閉タイミングによって大きく影響されることを確認し、更にシャッタが安定に動作する条件を見出した。また高速シャッタ特性試験中に起きたシャッタ動作不良の原因およびそれらの改造方法について検討した。

+ 大型トカマク開発部

* 東京芝浦電気株式会社

The dynamic property of fast shutter for JT-60 NBI

Hidetoshi MUKAIDA^{*}, Masaaki KURIYAMA⁺ and Masanori ARAKI⁺

Department of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 30, 1983)

To evaluate the dynamic property of a pneumatic drive type fast shutter of the prototype injector unit for JT-60, a computer code which simulated the fast shutter motion was developed. By using the code, it became clear that the shutter motion was affected considerably by the volume of a reservoir tank of compressed gas, the conductance of gas feeder pipes, and the open and close timing of gas introduce valve. Furthermore condition for stable movements of the shutter was clarified.

The cause of malfunction which occurred in the performance test of the shutter, and the method of improvements were investigated.

Keywords: Fast Shutter, JT-60, Injector, Prototype Unit, Neutral Beam
Dynamic Property, Simulation Code

+ Department of Large Tokamak Development, Tokai, JAERI

* Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 高速シャッタの概要	1
2.1 機能	1
2.2 動作原理	2
3. 特性解析プログラム	3
3.1 プログラムの特徴	3
3.2 計算式	3
4. 解析結果	6
5. ミスロックと特性	7
6. 改造とその特性	7
7. まとめ	8
謝 辞	9
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Description of fast shutter	1
2.1 Specification	1
2.2 Motion mechanism	2
3. Simulation program	3
3.1 Feature of program	3
3.2 Equation	3
4. Simulation results	6
5. Fast shutter malfunction	7
6. Improvements of malfunction	7
7. Conclusions	8
Acknowledgements	9
References	9

1. はじめに

JT-60用中性粒子入射装置(NBI)⁽¹⁾は、高速の中性水素ビームをトーラスのプラズマに打ち込むことにより、プラズマを加熱するための装置である。JT-60では14ユニットのNBIにより20MWの加熱を行なう予定である。NBIとトーラスの間のガス流量を制限するために、高速シャッタが各NBIユニットにそれぞれ設置される。高速シャッタは中性ビーム入射の前後に高速で開閉の動作を行なう。実機NBIに先立って性能を確認するために製作された原型ユニットにおいては、その動作時間は0.2秒程度の速さが要求されている。また開口部の直径は $\phi 600$ mmと従来の高速シャッタより大口径となっており、技術的にも難しい装置となっている。この高速シャッタの動作特性を把握し、問題点を検討するために、高速シャッタ特性解析プログラムを作成した。

本報告では作成したプログラムの特徴や計算方法の内容と、本プログラムを用いて解析した動特性と実験結果の比較、さらに原型ユニット高速シャッタの特性試験で起きたミスロック現象の原因と対策について述べる。

2. 高速シャッタの概要

2.1 機能

高速シャッタはNBIのトーラスへのビーム入射前後に、トーラス内に充満している中性水素ガスをNBIへ引き込まないためのバルブである。ガスの流入を少なくするために、ビーム入射の直前に開き、直後に閉じる高速の動作が必要とされる。またシャッタの閉状態ではガスのコンダクタンスを十分小さくし、ガスの流入を低くおさえなければいけない。このためにシャッタ弁板とハウジングの間隔は最小の寸法となっている。さらに高速動作に加えて確実な動作が要求される。これはシャッタが閉った状態あるいは十分に開かない状態でビームを入射すると、シャッタ弁板にビームがあたり、装置を破損してしまうことになりかねないからである。このような状態に到らないために、制御上でのインタロックが組まれているが、機械としての動作の確実性が第一に要求されるものである。その他の条件としては、トーラスとNBI間の限られた空間に設置されるために、本体および周辺装置も含めて、コンパクトな形状が要求される。

原型ユニット高速シャッタの主要仕様は次の通りである。

- | | |
|------------------|---------------|
| a. 口径 | $\phi 600$ mm |
| b. 動作速度 | 0.2秒以内 |
| c. シャッタ閉時コンダクタンス | 270 l/sec |
| d. 耐用開閉回数 | 30,000回 |

1. はじめに

JT-60用中性粒子入射装置(NBI)⁽¹⁾は、高速の中性水素ビームをトーラスのプラズマに打ち込むことにより、プラズマを加熱するための装置である。JT-60では14ユニットのNBIにより20MWの加熱を行なう予定である。NBIとトーラスの間のガス流量を制限するために、高速シャッタが各NBIユニットにそれぞれ設置される。高速シャッタは中性ビーム入射の前後に高速で開閉の動作を行なう。実機NBIに先立って性能を確認するために製作された原型ユニットにおいては、その動作時間は0.2秒程度の速さが要求されている。また開口部の直径は $\phi 600$ mmと従来の高速シャッタより大口径となっており、技術的にも難しい装置となっている。この高速シャッタの動作特性を把握し、問題点を検討するために、高速シャッタ特性解析プログラムを作成した。

本報告では作成したプログラムの特徴や計算方法の内容と、本プログラムを用いて解析した動特性と実験結果の比較、さらに原型ユニット高速シャッタの特性試験で起きたミスロック現象の原因と対策について述べる。

2. 高速シャッタの概要

2.1 機能

高速シャッタはNBIのトーラスへのビーム入射前後に、トーラス内に充満している中性水素ガスをNBIへ引き込まないためのバルブである。ガスの流入を少なくするために、ビーム入射の直前に開き、直後に閉じる高速の動作が必要とされる。またシャッタの閉状態ではガスのコンダクタンスを十分小さくし、ガスの流入を低くおさえなければいけない。このためにシャッタ弁板とハウジングの間隔は最小の寸法となっている。さらに高速動作に加えて確実な動作が要求される。これはシャッタが閉った状態あるいは十分に開かない状態でビームを入射すると、シャッタ弁板にビームがあたり、装置を破損してしまうことになりかねないからである。このような状態に到らないために、制御上でのインタロックが組まれているが、機械としての動作の確実性が第一に要求されるものである。その他の条件としては、トーラスとNBI間の限られた空間に設置されるために、本体および周辺装置も含めて、コンパクトな形状が要求される。

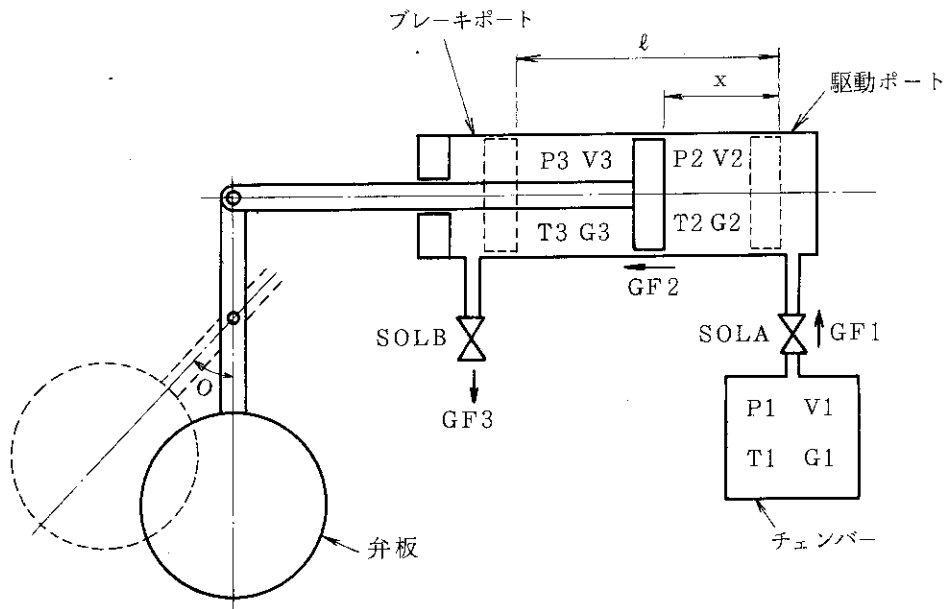
原型ユニット高速シャッタの主要仕様は次の通りである。

- | | |
|------------------|---------------|
| a. 口径 | $\phi 600$ mm |
| b. 動作速度 | 0.2秒以内 |
| c. シャッタ閉時コンダクタンス | 270 l/sec |
| d. 耐用開閉回数 | 30,000回 |

e. 運転サイクル 10分に1回開閉, 開の状態にある時間は約10秒
 原型ユニット高速シャッタの構造を第1図に示す。また圧空制御回路と計装配置図を第2図に示す。

2.2 動作原理

原型ユニット高速シャッタの動作原理を模式的に表わしたのが第3図である。この図によりシャッタの動作原理を説明する。



第3図 動作原理図

圧空シリンダの直線運動をリンク機構で回転運動に変換し, シャッタ弁板の開閉動作を行なうのが基本的な機構である。駆動チェンバーにピストン駆動用の圧縮空気を蓄え, チェンバーと駆動ポート間の電磁弁SOLAを開くことにより, 圧縮空気は駆動ポートに入る。駆動ポートの空気圧の上昇によって, ピストンは押し上げられ, シャッタの動作が開始する。この時, 電磁弁SOLBは閉じられているので, ピストンの運動に伴ないブレーキポート側の空気は圧縮され, 圧力が上昇する。この圧力が制動力として働き, ピストンを減速させる。所定のストロークに達した所で, ピストンはロック装置によりロックされ動作は停止し, シャッタは開状態を保持する。閉動作の場合は圧力の方向を逆にすることにより, 同様の動作を行なう。

以上のようにシャッタの動作は, 駆動側とブレーキ側の圧力が特性を支配する要因となっている。したがって駆動圧力, チェンバボリウム, 駆動ポートボリウム, ブレーキポートボリウム, 配管や電磁弁などの流路抵抗などの値が特性を左右する重要なパラメータとなる。

原型ユニット高速シャッタの特性試験結果の一例を第4図, 第5図に示す。第4図は閉→開, 第5図は開→閉動作時の圧力変化および電磁弁等の開閉状態を示したものである。開, 閉動作ともに電磁弁動作による圧力負荷開始より, 動作完了まで約0.2秒である。

3. 特性解析プログラム

3.1 プログラムの特徴

本プログラムはシャッタ動作時のチェンバー、ポートなどの圧力、流量変化を求め、シャッタの運動方程式を解く事により、シャッタ動特性を求めるものである。プログラムの特徴は次の通りである。

- a. 駆動およびブレーキ圧の変動を考慮した気体の状態方程式（エネルギーの式、運動量の式、連続の式）とピストンやシャッタ弁板の運動方程式を連立微分方程式として解く。
- b. 電磁弁部をオリフィスとして、音速、亜音速流れの両者を取り扱う。
- c. 管摩擦による流れの圧力損失を考慮。
- d. 状態変化を断熱変化、等温変化のどちらかを選択して計算することができる。

本プログラムではチェンバー、ポートを3つのボリウムで模擬し、その間はオリフィスなどの流路で接続し、流量を求める。流量の変化から各ボリウムの圧力を求める。この圧力をピストンに対する駆動力（ブレーキ力）として計算するものである。

3.2 計算式

弁板の運動方程式、ボリウムのエネルギーの式、質量保存則、流量の式を連立させて解く。⁽²⁾⁽³⁾

a. 運動方程式

シャッタの開閉動作については、ピストン、弁板および連結部について運動方程式を適用する。外力としてはピストンに負荷される圧力と摩擦力、重力、バネ反力、粘性減衰力である。

ピストンの直線運動の運動方程式は

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = A_2 P_2 - (A_3 P_3 + A_R P_A) - F - W - kx - c \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

ここで、 x ：ピストンストローク、 m ：ピストン質量、 A_2 ：ピストン駆動側面積、 A_3 ：ピストンブレーキ側面積、 A_R ：ピストンロッド面積、 P_2 ：駆動ポート圧力、 P_3 ：ブレーキポート圧力、 P_A ：大気圧、 F ：リンク部反力、 W ：重量、 k ：バネ定数、 c ：粘性係数である。

また弁板の回転運動の運動方程式は次式となる。

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = Fr \sin \left(\frac{\pi}{3} + \theta \right) \quad (2)$$

θ ：回転角、 I ：弁板の慣性モーメント、 r ：回転半径

直線運動と回転運動の関係は a を比例定数として、近似的に

$$\theta = ax \quad (3)$$

b. エネルギーの式

内部エネルギーの増加を dU 、外部仕事を dL 、加えた熱量を dQ とすると熱力学の第一法則あ

るいはエネルギー保存則から次式が成り立つ。

$$dQ = dU + AdL \quad (4)$$

ここでAは仕事の熱当量である。

断熱変化の場合は $dQ = 0$ である。

ここで次の熱力学一般関係式および気体の状態方程式を用いて(4)式を書き換える。

$$U = G_i u_i \quad (5)$$

$$AdL = AP_i dv_i + \sum G_{fji} \cdot h_j \quad (6)$$

$$h_i = u_i + P_i v_i = C_p T_i \quad (7)$$

$$u_i = C_v T_i \quad (8)$$

$$PV = GRT \quad (9)$$

G : ガス重量, P : 圧力, v : 体積, G_{fij} : ボリューム j から i への流量, h : エンタルピー, C_p : 定圧比熱, C_v : 定容比熱, T : 温度, R : ガス定数, i : ボリューム i について, j : ボリューム j について

(5)~(9)式を(4)式に代入し, 時間 t で微分すると, 断熱変化の場合は次式が成立する。

$$\frac{C_v V}{R} \frac{dP}{dt} + \left(\frac{C_v P}{R} + AP \right) \frac{dV}{dt} + \sum G_f C_p T_j = 0 \quad (10)$$

また等温変化の場合は

$$V \frac{dP}{dt} + P \frac{dV}{dt} + RT \sum G_f = 0 \quad (11)$$

c. 質量保存則

ボリューム内の重量の増分はボリュームへ出入した流量の総和であるから

$$\frac{dG}{dt} = - \sum G_{fij} \quad (12)$$

d. 流量の式

ボリューム間の流量に関しては, 電磁弁部をオリフィス流れ, ピストンリング部からの漏れは摩擦流れと仮定する。ボリューム i から j へ流れる時の流量 G_f は

1) オリフィス流れ (等エントロピー流れとする)

$$\circ P_i / P_j \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{音速の時})$$

$$G_f = \varphi_1 F \sqrt{gk \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{P_j}{v_j}} \quad (13)$$

$$\circ P_i / P_j > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{亜音速の時})$$

$$G_f = \varphi_1 F \sqrt{\frac{2 g k}{k-1} \frac{P_j}{v_j} \left\{ \left(\frac{P_i}{P_j} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_i}{P_j} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right\}} \quad (14)$$

ここで, k : 比熱比 $\left(\frac{C_p}{C_v} \right)$, φ_1 : 補正係数, F : 流路断面積, g : 重力加速度, である。

ロ) 摩擦流れ

$$G_f = \sqrt{\frac{2 g \gamma}{\left(\frac{f L}{D} + \Sigma \zeta\right)}} (P_j - P_i) \quad (15)$$

γ : 比重量, f : 管摩擦係数, L : 流路長さ, D : 流路直径, ζ : 損失係数, φ_2 : 補正係数
e. その他関係式

駆動ポート体積 V_2 およびブレーキポート体積 V_3 はストロークにより変化しその関係は次式となる。

$$V_2 = A_2 x + V_2' \quad (16)$$

$$V_3 = A_3 (1 - x) + V_3' \quad (17)$$

l : 全ストローク

以上(1)~(17)までの関係式から各ボリウムと駆動部に関して次の方程式が成立する。

i) 断熱変化の場合

運動方程式

$$\frac{d^2 x}{d t^2} = \left(A_2 P_2 - A_3 P_3 - A_R P_A - W - k x - \frac{d x}{d t} \right) \frac{r \sin\left(\frac{\pi}{3} + a x\right)}{m + I a} \quad (18)$$

チェンバー

$$\frac{d P_1}{d t} = \frac{R C_p}{C_v V_1} (-G_{f1} \cdot T_1) \quad (19)$$

$$\frac{d G_1}{d t} = -G_{f1} \quad (20)$$

$$T_1 = \frac{P_1 V_1}{G_1 R} \quad (21)$$

駆動ポート

$$\frac{d P_2}{d t} = -\frac{P_2 A_2}{C_v V_2} (C_v + A R) \frac{d x}{d t} + \frac{R C_p}{C_v V_2} (G_{f1} \cdot T_1 - G_{f2} \cdot T_2) \quad (22)$$

$$\frac{d G_2}{d t} = G_{f1} - G_{f2} \quad (23)$$

$$\frac{d V_2}{d t} = A_2 \frac{d x}{d t} \quad (24)$$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{G_2 R} \quad (25)$$

ブレーキポート

$$\frac{d^2 P_3}{d t^2} = -\frac{P_3 A_3}{C_v V_3} (C_v + A R) \left(-\frac{d x}{d t}\right) + \frac{R C_p}{C_v V_3} (G_{f2} \cdot T_2 - G_{f3} \cdot T_3) \quad (26)$$

$$\frac{d G_3}{d t} = G_{f2} - G_{f3} \quad (27)$$

$$\frac{dV_3}{dt} = A_3 \left(-\frac{dx}{dt} \right) \quad (28)$$

$$T_3 = \frac{P_3 V_3}{G_3 R} \quad (29)$$

ii) 等温変化の場合

運動方程式

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \left(A_2 P_2 - A_3 P_3 - A_R P_A - W - kx - c \frac{dx}{dt} \right) \frac{r \sin\left(\frac{\pi}{3} + ax\right)}{m + Ia} \quad (30)$$

チェンバー

$$\frac{dP_1}{dt} = -\frac{RT_1}{V_1} G_{f1} \quad (31)$$

$$\frac{dG_1}{dt} = -G_{f1} \quad (32)$$

駆動ポート

$$\frac{dP_2}{dt} = -\frac{P_2 A_2}{V_2} \frac{dx}{dt} + \frac{RT_2}{V_2} (G_{f1} - G_{f2}) \quad (33)$$

$$\frac{dG_2}{dt} = G_{f1} - G_{f2} \quad (34)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = A_2 \frac{dx}{dt} \quad (35)$$

ブレーキポート

$$\frac{dP_3}{dt} = -\frac{P_3 A_3}{V_3} \left(-\frac{dx}{dt} \right) + \frac{RT_3}{V_3} (G_{f2} - G_{f3}) \quad (36)$$

$$\frac{dG_3}{dt} = G_{f2} - G_{f3} \quad (37)$$

$$\frac{dV_3}{dt} = A_3 \left(-\frac{dx}{dt} \right) \quad (38)$$

以上の連立微分方程式を Runge-Kutta-Gill 法で解き、シャッタの動特性を求める。

4. 解析結果

解析プログラムにより計算した、高速シャッタの動特性を第6図、第8図に示す。第6図は閉から開、第8図は開から閉への特性である。第7図と第9図は実験結果で閉から開あるいは開から閉の過程における圧力をプロットしたものである。計算に使用した諸数値は第1表に示した。この中で流量に関する数値は、流量係数を求めるために実施した予備実験より求めた。その他の数値は計算で求めたものである。第6図と第7図あるいは第8図と第9図の計算値と実験結果を

$$\frac{dV_3}{dt} = A_3 \left(-\frac{dx}{dt} \right) \quad (28)$$

$$T_3 = \frac{P_3 V_3}{G_3 R} \quad (29)$$

ii) 等温変化の場合

運動方程式

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \left(A_2 P_2 - A_3 P_3 - A_R P_A - W - kx - c \frac{dx}{dt} \right) \frac{r \sin\left(\frac{\pi}{3} + ax\right)}{m + Ia} \quad (30)$$

チェンバー

$$\frac{dP_1}{dt} = -\frac{RT_1}{V_1} G_{f1} \quad (31)$$

$$\frac{dG_1}{dt} = -G_{f1} \quad (32)$$

駆動ポート

$$\frac{dP_2}{dt} = -\frac{P_2 A_2}{V_2} \frac{dx}{dt} + \frac{RT_2}{V_2} (G_{f1} - G_{f2}) \quad (33)$$

$$\frac{dG_2}{dt} = G_{f1} - G_{f2} \quad (34)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = A_2 \frac{dx}{dt} \quad (35)$$

ブレーキポート

$$\frac{dP_3}{dt} = -\frac{P_3 A_3}{V_3} \left(-\frac{dx}{dt} \right) + \frac{RT_3}{V_3} (G_{f2} - G_{f3}) \quad (36)$$

$$\frac{dG_3}{dt} = G_{f2} - G_{f3} \quad (37)$$

$$\frac{dV_3}{dt} = A_3 \left(-\frac{dx}{dt} \right) \quad (38)$$

以上の連立微分方程式を Runge-Kutta-Gill 法で解き、シャッタの動特性を求める。

4. 解析結果

解析プログラムにより計算した、高速シャッタの動特性を第6図、第8図に示す。第6図は閉から開、第8図は開から閉への特性である。第7図と第9図は実験結果で閉から開あるいは開から閉の過程における圧力をプロットしたものである。計算に使用した諸数値は第1表に示した。この中で流量に関する数値は、流量係数を求めるために実施した予備実験より求めた。その他の数値は計算で求めたものである。第6図と第7図あるいは第8図と第9図の計算値と実験結果を

比較すると、駆動圧力、ブレーキ圧力、閉から開までの時間とも良く一致している。第7図および第9図に示した計算では空気の状態変化を等温変化として取り扱った。一方、空気の状態変化を断熱的として計算すると、ストロークに対する駆動圧力の低下、ブレーキ圧力の増加の速度が、等温変化による場合より大きくなり、総じて駆動力の不足となり、実験結果と合わなくなる。以上からこの解析プログラムで高速シャッタの動特性解析をする際、空気の状態変化を等温的に扱うことにより、実験値と良く一致することが明らかとなった。以下の計算においては空気は等温変化するものとして扱う。

5. ミスロックと特性

原型ユニット高速シャッタは所定のストロークに対してわずかにオーバーして止まるように調整されている。これはシャッタ自体に最終ストローク時の機械的ショックアブソーバを持っていないため、最終段の停止もブレーキ圧力により行なうようになっているためである。このために、駆動力とブレーキ力のバランスが乱れると、ストロークが所定の値に達せず、途中で逆もどりしてしまうミスロックや、行きすぎてしまうオーバーランが起きることにもなる。ミスロックが起きると、入射ビームがシャッタ弁板にあたり損傷したり、本来のシャッタとしての機能を果たせないことになる。ミスロックの原因として、どのパラメータが主要な因子となっているかを調べるため、各ポリウムの容積と初期圧力を変数として、特性解析プログラムにより、弁板の最大ストロークを計算した。その結果を第10～13図に示す。この結果によると許容ストローク範囲を2 cmとした場合、それぞれの初期値の許容差は、チェンバ圧力が 0.5 kg/cm^2 、チェンバ容積が 200 cm^3 、ブレーキ容積が 200 cm^3 、ブレーキ圧力が 0.1 kg/cm^2 となる。この中で条件として最も厳しいのはブレーキ圧力である。ブレーキ圧力の変動する原因としては、繰り返し運転時の残圧の影響、あるいは電磁弁の漏れによる圧力の上昇である。シャッタ動作終了後、駆動ポート、ブレーキポートの圧力は大気に放出され、ポート内は大気圧にもどされる。この大気放出が十分でないと残圧が残ることになる。この状態で次の動作を開始するとミスロックを起す可能性がある。動作終了後の大気放出特性を計算した結果を第14図に示す。ポート内の圧力が大気圧まで戻るには約2秒必要としている。

以上から原型ユニット高速シャッタでは次の動作を開始するまで2秒以上の大気放出時間を必要とするということが明らかとなった。

6. 改造とその特性

原型ユニット高速シャッタの圧空システムでは、ブレーキ側ポリウム内の空気は開閉動作中には大気放出されない。このためロック装置が完全に動作しなかった場合や、ストロークが、足りない

比較すると、駆動圧力、ブレーキ圧力、閉から開までの時間とも良く一致している。第7図および第9図に示した計算では空気の状態変化を等温変化として取り扱った。一方、空気の状態変化を断熱的として計算すると、ストロークに対する駆動圧力の低下、ブレーキ圧力の増加の速度が、等温変化による場合より大きくなり、総じて駆動力の不足となり、実験結果と合わなくなる。以上からこの解析プログラムで高速シャッタの動特性解析をする際、空気の状態変化を等温的に扱うことにより、実験値と良く一致することが明らかとなった。以下の計算においては空気は等温変化するものとして扱う。

5. ミスロックと特性

原型ユニット高速シャッタは所定のストロークに対してわずかにオーバーして止まるように調整されている。これはシャッタ自体に最終ストローク時の機械的ショックアブソーバを持っていないため、最終段の停止もブレーキ圧力により行なうようになっているためである。このために、駆動力とブレーキ力のバランスが乱れると、ストロークが所定の値に達せず、途中で逆もどりしてしまうミスロックや、行きすぎてしまうオーバーランが起きることにもなる。ミスロックが起きると、入射ビームがシャッタ弁板にあたり損傷したり、本来のシャッタとしての機能を果たせないことになる。ミスロックの原因として、どのパラメータが主要な因子となっているかを調べるため、各ポリウムの容積と初期圧力を変数として、特性解析プログラムにより、弁板の最大ストロークを計算した。その結果を第10～13図に示す。この結果によると許容ストローク範囲を2 cmとした場合、それぞれの初期値の許容差は、チェンバ圧力が 0.5 kg/cm^2 、チェンバ容積が 200 cm^3 、ブレーキ容積が 200 cm^3 、ブレーキ圧力が 0.1 kg/cm^2 となる。この中で条件として最も厳しいのはブレーキ圧力である。ブレーキ圧力の変動する原因としては、繰り返し運転時の残圧の影響、あるいは電磁弁の漏れによる圧力の上昇である。シャッタ動作終了後、駆動ポート、ブレーキポートの圧力は大気に放出され、ポート内は大気圧にもどされる。この大気放出が十分でないと残圧が残ることになる。この状態で次の動作を開始するとミスロックを起す可能性がある。動作終了後の大気放出特性を計算した結果を第14図に示す。ポート内の圧力が大気圧まで戻るには約2秒必要としている。

以上から原型ユニット高速シャッタでは次の動作を開始するまで2秒以上の大気放出時間を必要とするということが明らかとなった。

6. 改造とその特性

原型ユニット高速シャッタの圧空システムでは、ブレーキ側ポリウム内の空気は開閉動作中には大気放出されない。このためロック装置が完全に動作しなかった場合や、ストロークが、足りない

比較すると、駆動圧力、ブレーキ圧力、閉から開までの時間とも良く一致している。第7図および第9図に示した計算では空気の状態変化を等温変化として取り扱った。一方、空気の状態変化を断熱的として計算すると、ストロークに対する駆動圧力の低下、ブレーキ圧力の増加の速度が、等温変化による場合より大きくなり、総じて駆動力の不足となり、実験結果と合わなくなる。以上からこの解析プログラムで高速シャッタの動特性解析をする際、空気の状態変化を等温的に扱うことにより、実験値と良く一致することが明らかとなった。以下の計算においては空気は等温変化するものとして扱う。

5. ミスロックと特性

原型ユニット高速シャッタは所定のストロークに対してわずかにオーバーして止まるように調整されている。これはシャッタ自体に最終ストローク時の機械的ショックアブソーバーを持っていないため、最終段の停止もブレーキ圧力により行なうようになっているためである。このために、駆動力とブレーキ力のバランスが乱れると、ストロークが所定の値に達せず、途中で逆もどりしてしまうミスロックや、行きすぎてしまうオーバーランが起きることにもなる。ミスロックが起きると、入射ビームがシャッタ弁板にあたり損傷したり、本来のシャッタとしての機能を果たせないことになる。ミスロックの原因として、どのパラメータが主要な因子となっているかを調べるため、各ポリウムの容積と初期圧力を変数として、特性解析プログラムにより、弁板の最大ストロークを計算した。その結果を第10～13図に示す。この結果によると許容ストローク範囲を2 cmとした場合、それぞれの初期値の許容差は、チェンバ圧力が 0.5 kg/cm^2 、チェンバ容積が 200 cm^3 、ブレーキ容積が 200 cm^3 、ブレーキ圧力が 0.1 kg/cm^2 となる。この中で条件として最も厳しいのはブレーキ圧力である。ブレーキ圧力の変動する原因としては、繰り返し運転時の残圧の影響、あるいは電磁弁の漏れによる圧力の上昇である。シャッタ動作終了後、駆動ポート、ブレーキポートの圧力は大気に放出され、ポート内は大気圧にもどされる。この大気放出が十分でないと残圧が残ることになる。この状態で次の動作を開始するとミスロックを起す可能性がある。動作終了後の大気放出特性を計算した結果を第14図に示す。ポート内の圧力が大気圧まで戻るには約2秒必要としている。

以上から原型ユニット高速シャッタでは次の動作を開始するまで2秒以上の大気放出時間を必要とするということが明らかとなった。

6. 改造とその特性

原型ユニット高速シャッタの圧空システムでは、ブレーキ側ポリウム内の空気は開閉動作中には大気放出されない。このためロック装置が完全に動作しなかった場合や、ストロークが、足りない

場合など、シャッタがはね返されてしまいミスロックが生じる。また残圧の影響が大きいなどの問題がある。

このような不安定な特性を安定なものとするためには、ブレーキ側の空気を大気へ放出しながら開閉動作をさせれば良い。第3図の電磁弁SOLBを動作中に常に開放しておくことにより、かりにストロークが不足した場合でも、ブレーキ圧は時間の経過につれて低下し、駆動圧力がブレーキ圧に勝るようになり、最終的に所定のストロークで安定し停止するようになる。

このような状態を特性プログラムによりシュミレートしたのが第15図である。ミスロックを起こしても、再びロックすることが分る。

このような考えのもとに、原型ユニット高速シャッタの改造が実施された。改造後の特性試験結果を第16図に示す。同じく計算結果を第17, 18図に示す。

ブレーキ側の圧力のピークが低くなり、動作終了後圧力の低下が見られるが、改造前との大きな違いである。圧力、ポリウム体積などの設定値は第1表に示されている。この改造システムではミスロックを起さずに順調に動作している。

JT-60実機の高速シャッタにおいては、開から閉への動作間隔は2秒以下が要求されている。原型ユニットの場合は、2秒以上の動作間隔であるため上記の対策で十分であったが、上述の実機の仕様を満足するためには、更に次の対策が必要と考えられる。

- a. 圧力放出のライン、電磁弁を太くし、排気速度を上げる。
- b. ポートのポリウムを小さくし、排気量を少なくする。(小さなシリンダとする。)
- c. 駆動圧力を低くし、排気量を少なくする。

上記の2, 3は低出力化を意味するが、実機高速シャッタでは、開閉の動作時間が1秒と遅くなっていることから、十分実現できるものと思われる。

7. ま と め

原型ユニット高速シャッタの動作特性解析プログラムを作成し、実験結果と比較した。この結果は駆動時間やポリウムの圧力変化等について、空気の状態を等温変化として扱うことにより良い一致を見た。この特性解析プログラムにより、原型ユニット高速シャッタの圧空駆動システムが、本質的に不安定性を持っていることが明確になった。つまり、圧力やポリウムのわずかな変化に対して敏感であり、ミスロックを起しやすいことが分かった。

改造シャッタにおいては、開閉動作中に背圧を逃がすということにより、圧空システムとして安定にすることができ、多少の圧力やポリウムの変動があっても、確実な動作を実現できるようになった。

場合など、シャッタがはね返されてしまいミスロックが生じる。また残圧の影響が大きいなどの問題がある。

このような不安定な特性を安定なものとするためには、ブレーキ側の空気を大気へ放出しながら開閉動作をさせれば良い。第3図の電磁弁SOLBを動作中に常に開放しておくことにより、かりにストロークが不足した場合でも、ブレーキ圧は時間の経過につれて低下し、駆動圧力がブレーキ圧力に勝るようになり、最終的に所定のストロークで安定し停止するようになる。

このような状態を特性プログラムによりシュミレートしたのが第15図である。ミスロックを起こしても、再びロックすることが分る。

このような考えのもとに、原型ユニット高速シャッタの改造が実施された。改造後の特性試験結果を第16図に示す。同じく計算結果を第17, 18図に示す。

ブレーキ側の圧力のピークが低くなり、動作終了後圧力の低下が見られるが、改造前との大きな違いである。圧力、ポリウム体積などの設定値は第1表に示されている。この改造システムではミスロックを起さずに順調に動作している。

JT-60実機の高速シャッタにおいては、開から閉への動作間隔は2秒以下が要求されている。原型ユニットの場合は、2秒以上の動作間隔であるため上記の対策で十分であったが、上述の実機の仕様を満足するためには、更に次の対策が必要と考えられる。

- a. 圧力放出のライン、電磁弁を太くし、排気速度を上げる。
- b. ポートのポリウムを小さくし、排気量を少なくする。(小さなシリンダとする。)
- c. 駆動圧力を低くし、排気量を少なくする。

上記の2, 3は低出力化を意味するが、実機高速シャッタでは、開閉の動作時間が1秒と遅くなっていることから、十分実現できるものと思われる。

7. ま と め

原型ユニット高速シャッタの動作特性解析プログラムを作成し、実験結果と比較した。この結果は駆動時間やポリウムの圧力変化等について、空気の状態を等温変化として扱うことにより良い一致を見た。この特性解析プログラムにより、原型ユニット高速シャッタの圧空駆動システムが、本質的に不安定性を持っていることが明確になった。つまり、圧力やポリウムのわずかな変化に対して敏感であり、ミスロックを起しやすいことが分かった。

改造シャッタにおいては、開閉動作中に背圧を逃がすということにより、圧空システムとして安定にすることができ、多少の圧力やポリウムの変動があっても、確実な動作を実現できるようになった。

謝 辞

本研究を行なっていく上で、実験および改造の面で御協力をいただいた、三菱重工KKの関係各位に感謝します。また有益な議論をして戴いた松田慎三郎副主任研究員をはじめとする加熱工学第一研究室およびJT-60第4開発室の諸氏に感謝します。最後に不断の激励を戴いた磯康彦核融合研究センター長、小幡行雄核融合研究部長、田中正俊加熱工学第1研究室長、白形弘文JT-60第4開発室長に感謝します。

参 考 文 献

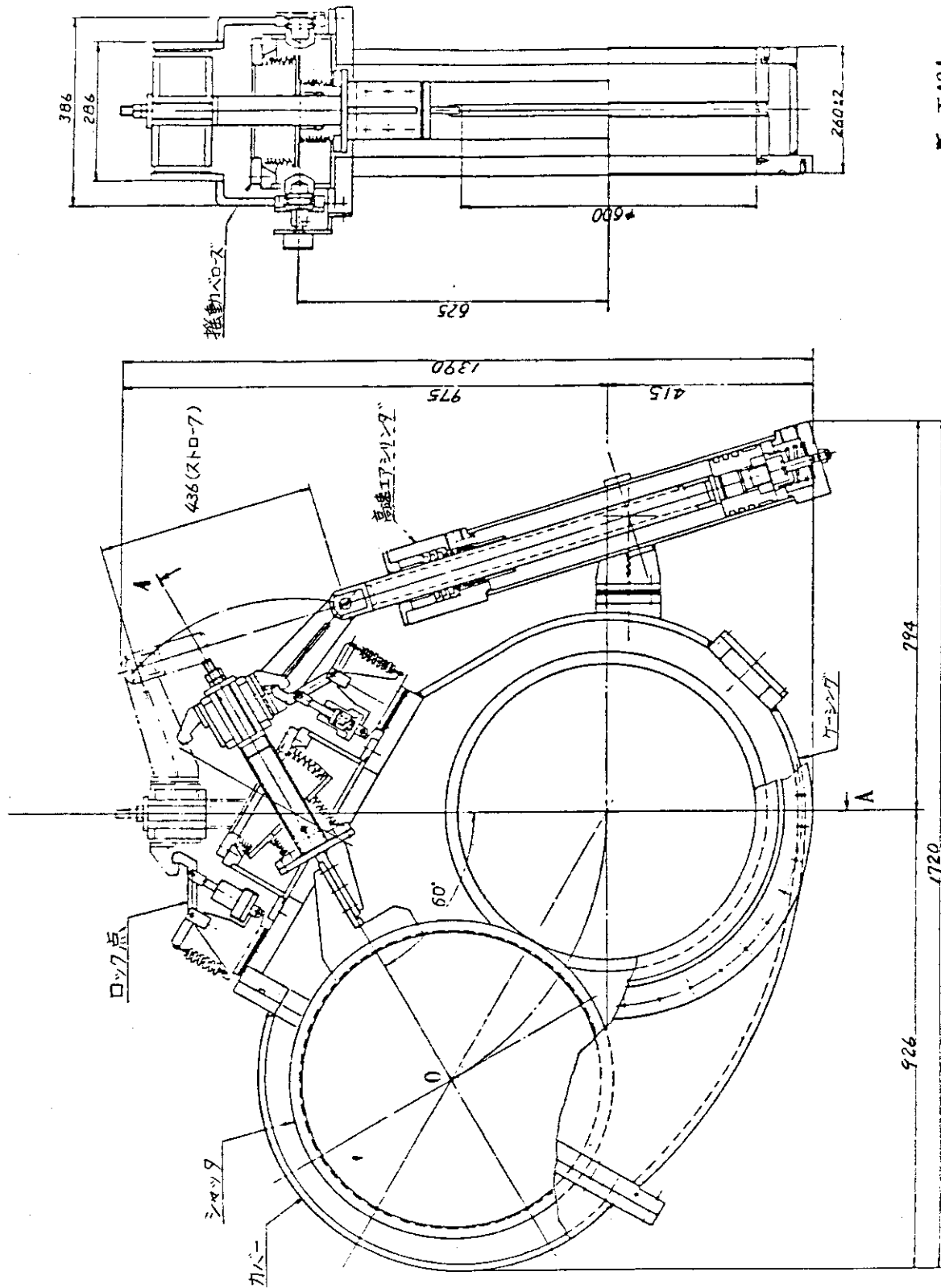
- 1) M. Kuriyama, et al. "Construction of prototype Injector Unit for JT-60," Proc. 9th Symp. Eng. Problems of Fusion Research, Chicago (1981)
- 2) 松下市松 ; 「工業熱力学 基礎編」 (裳華房)
- 3) 斉藤秀雄 ; 「機械力学」 (朝倉書店)

謝 辞

本研究を行なっていく上で、実験および改造の面で御協力をいただいた、三菱重工KKの関係各位に感謝します。また有益な議論をして戴いた松田慎三郎副主任研究員をはじめとする加熱工学第一研究室およびJT-60第4開発室の諸氏に感謝します。最後に不断の激励を戴いた磯康彦核融合研究センター長、小幡行雄核融合研究部長、田中正俊加熱工学第1研究室長、白形弘文JT-60第4開発室長に感謝します。

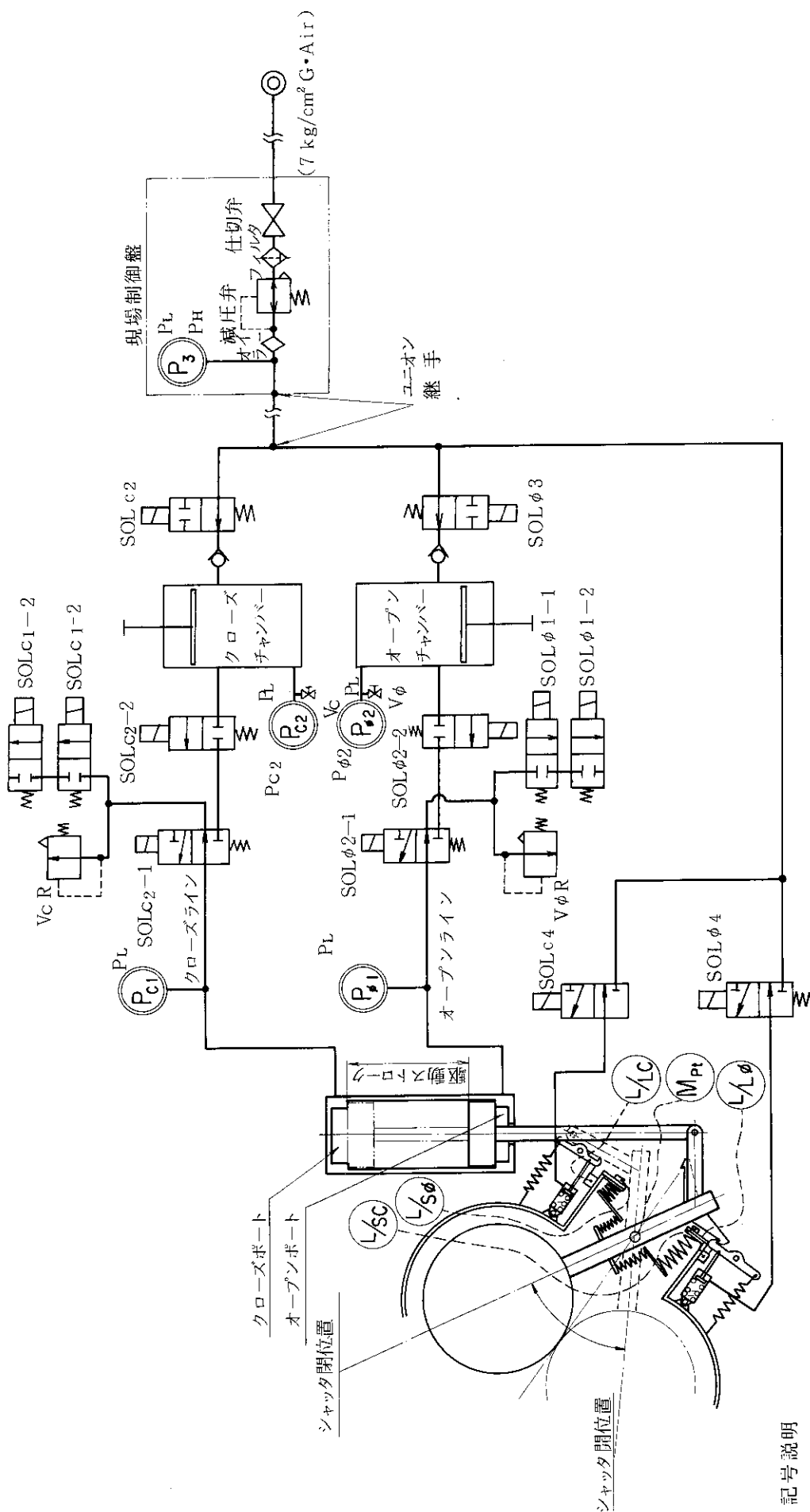
参 考 文 献

- 1) M. Kuriyama, et al. "Construction of prototype Injector Unit for JT-60," Proc. 9th Symp. Eng. Problems of Fusion Research, Chicago (1981)
- 2) 松下市松 ; 「工業熱力学 基礎編」 (裳華房)
- 3) 齊藤秀雄 ; 「機械力学」 (朝倉書店)



断面AOA

第1図 原型ユニット高速シャフトの構造

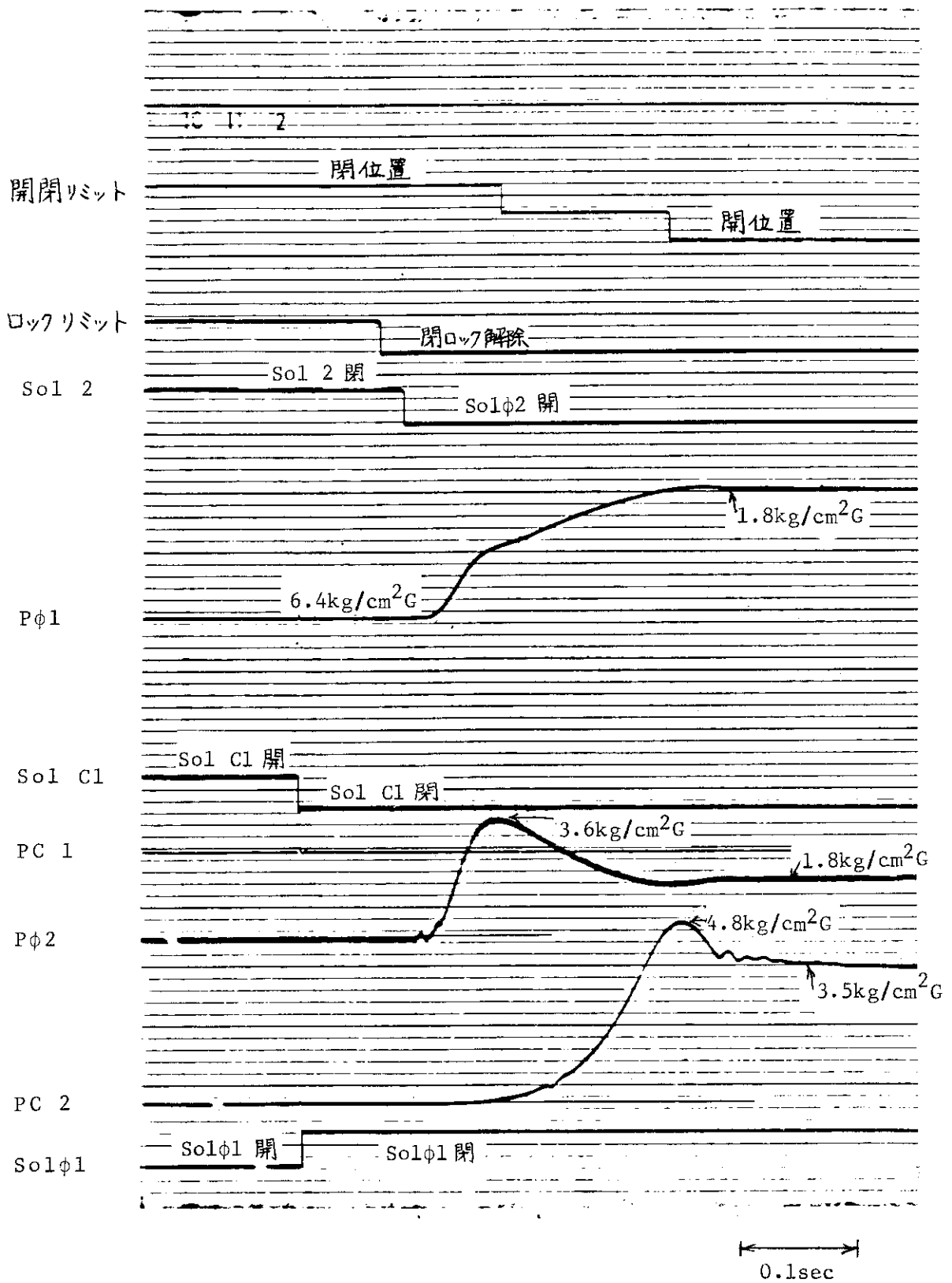


記号説明

- (L/Sφ) シャッター開位置リミットスイッチ
- (L/SC) シャッター閉位置リミットスイッチ
- (L/Lφ) 閉ロックラッチリミットスイッチ(ロック解除動作のとき ON)
- (L/LC) 開ロックラッチリミットスイッチ()
- (M/Pt) ポテンシヨメータ
- (P) Pc1, Pc2, Pφ1, Pφ2, Pφ3は現場圧力計を示す。
 (P) の記号の右肩又は右下に記号を記入したものは
 圧カススイッチが別途に設けてあることを示す。
- SOL 電磁弁
- VcR, VφR リリーフ弁

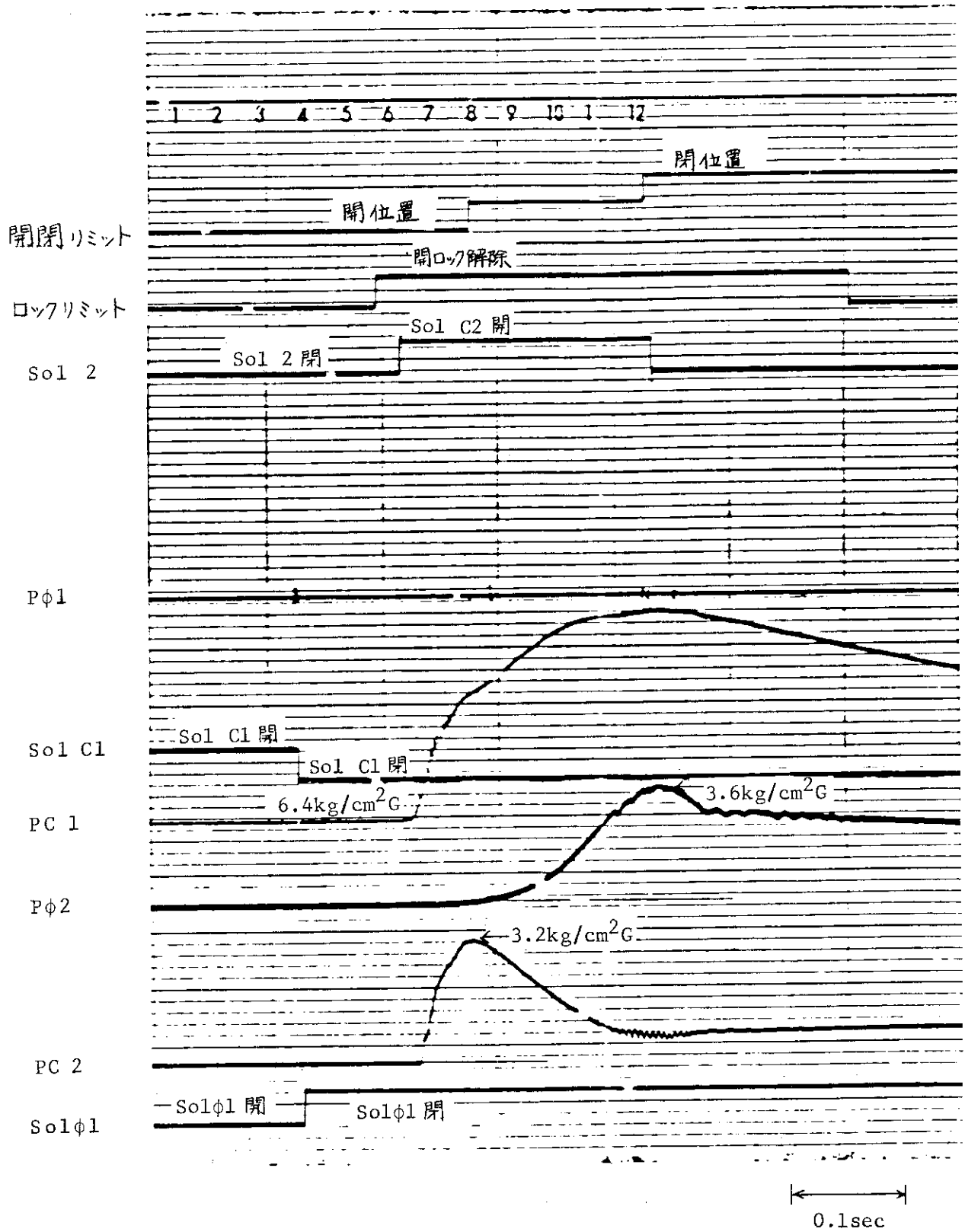
第2図 圧空制御回路と計装配置図

CLOSE TO OPEN

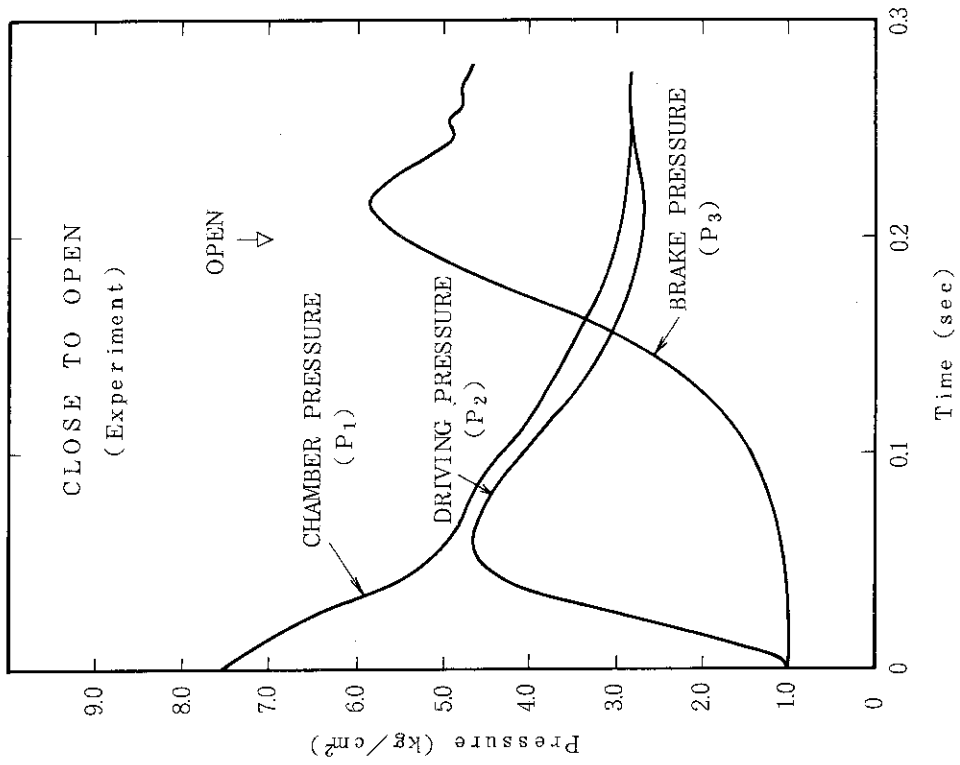


第4図 特性試験結果 (閉→開)

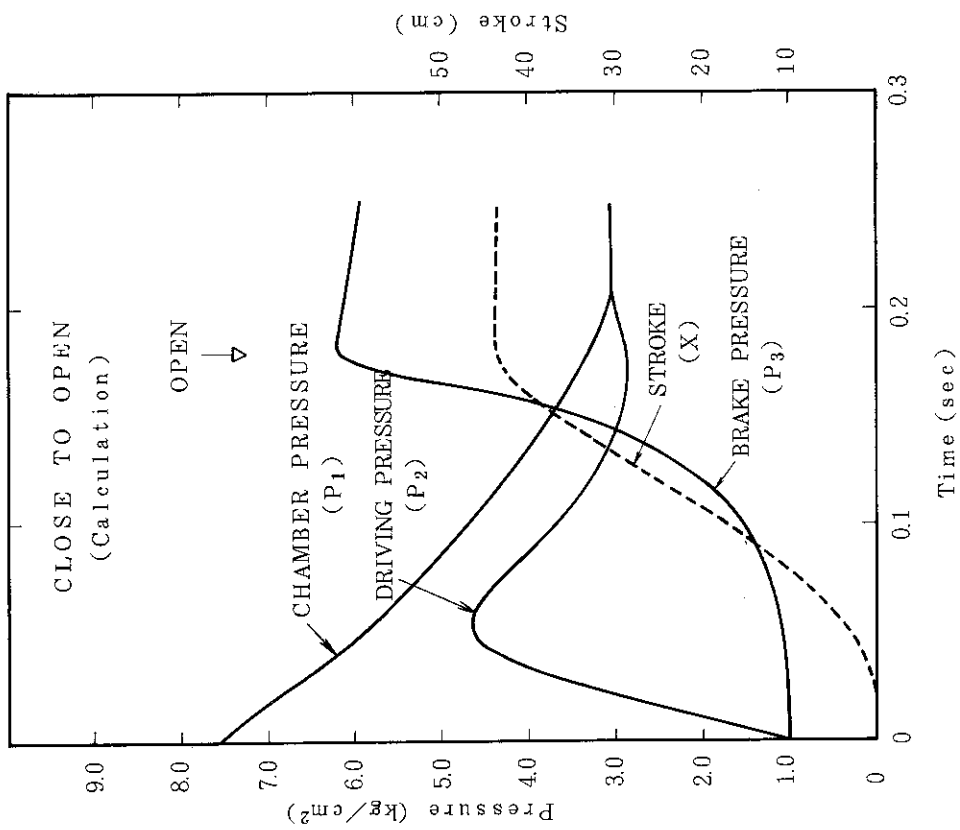
OPEN TO CLOSE



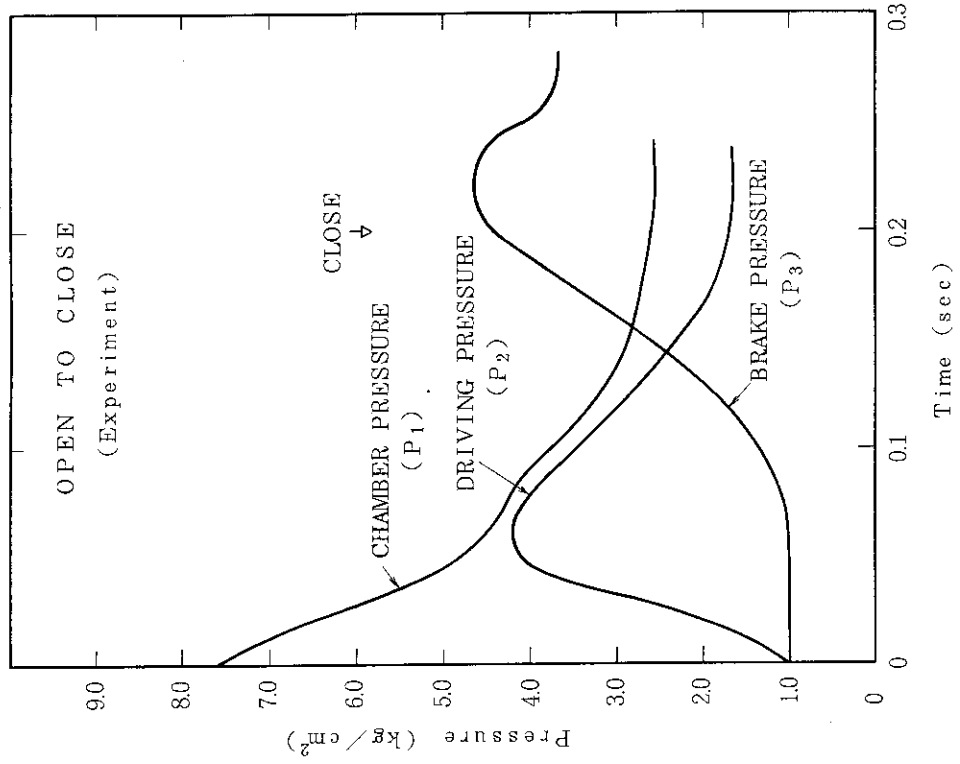
第5図 特性試験結果 (開→閉)



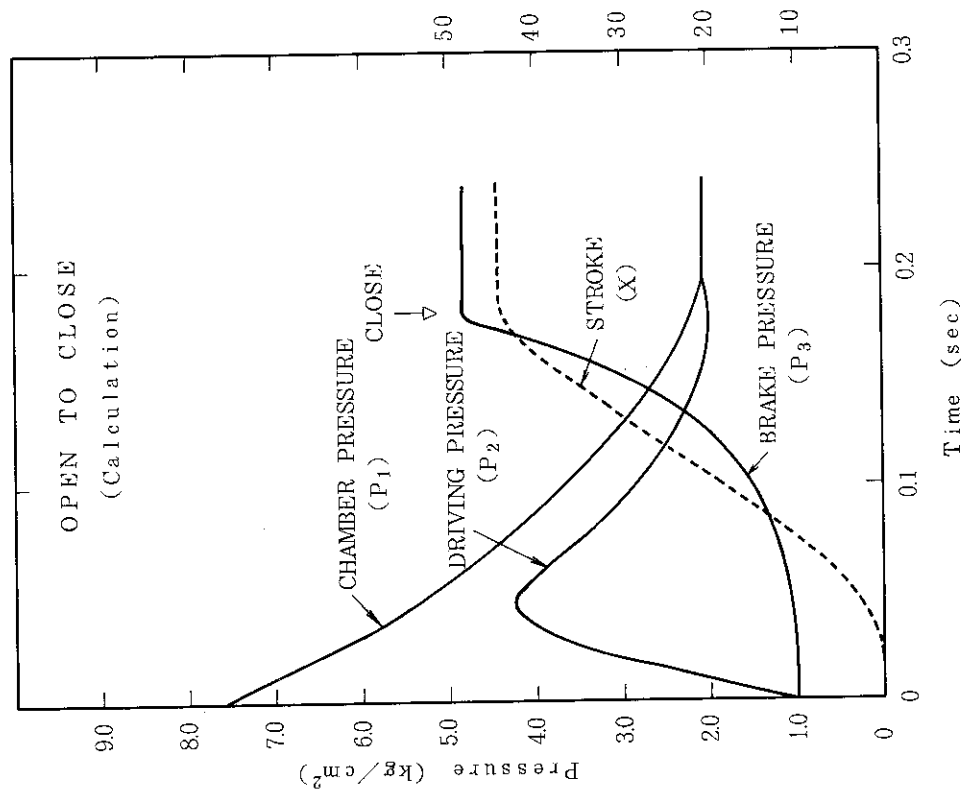
第7図 特性試験結果 (閉→開)



第6図 特性試験結果 (閉→開)



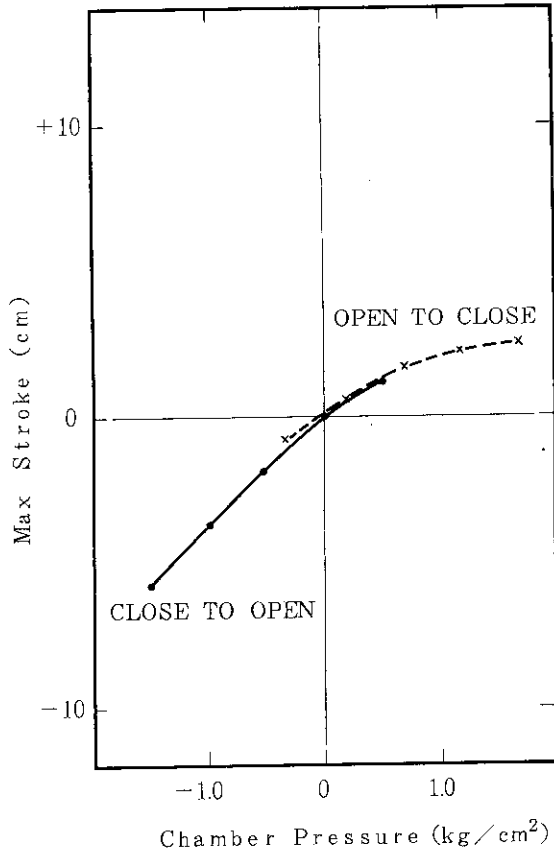
第9図 特性試験結果 (開→閉)



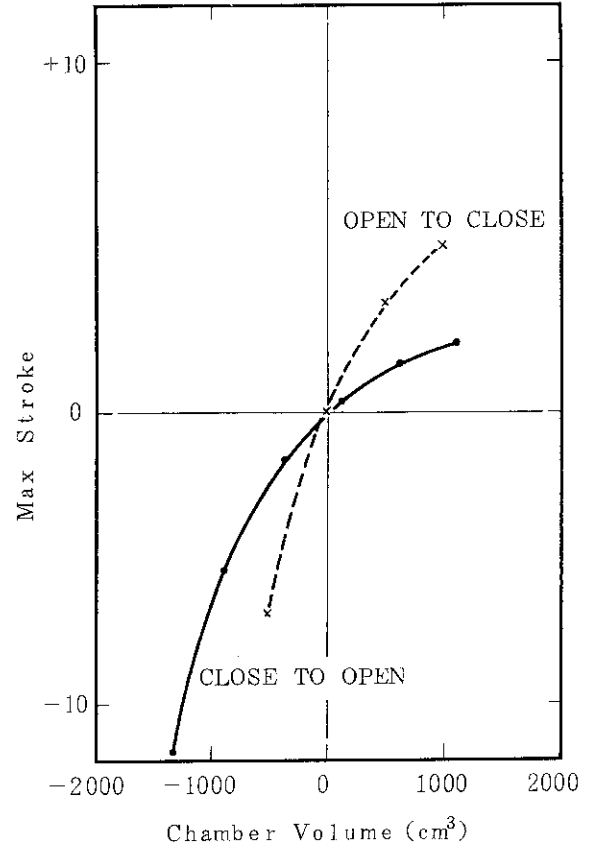
第8図 特性試験結果 (開→閉)

第1表 計算に使用した諸数値

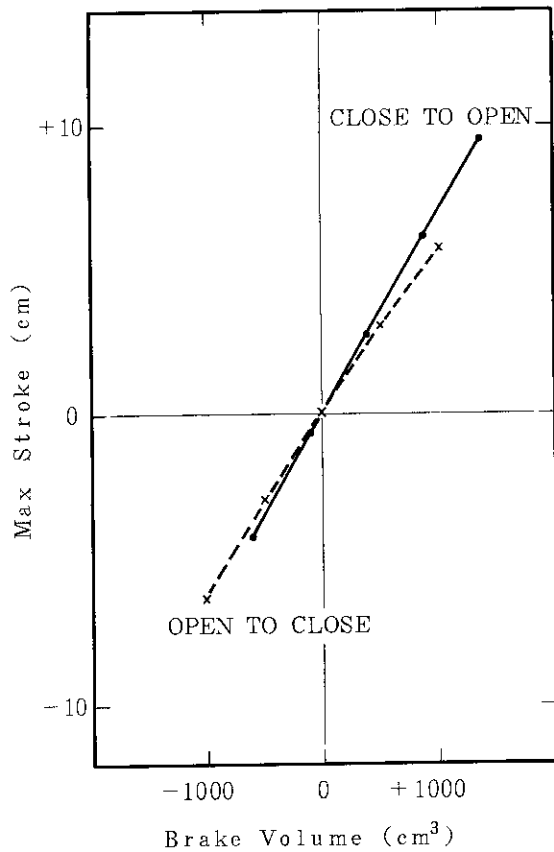
記号	記号の意味	改造前		改造後	
		閉→開	開→閉	閉→開	開→閉
m	ピストン質量 $\text{kg s}^2/\text{cm}$	0.02067	←	←	←
I	ベーン慣性モーメント $\text{kg s}^2/\text{cm}$	61.18	←	←	←
a	回転角とストロークの比例定数	0.024	←	←	←
r	リンク回転半径 cm	43.6	←	←	←
l	全ストローク	43.6	←	←	←
W	重量(運動方向分力) kg	15.3	←	←	←
k	バネ定数(最終ストロークで動作) kg/cm	100.0	←	←	←
C	減衰定数	0.26	←	←	←
P ₁	チェンバー圧力(初期値) kg/cm^2	7.6	←		←
P ₂	駆動ポート圧力(") kg/cm^2	1.0	←	←	←
P ₃	ブレーキポート圧力(") kg/cm^2	1.0	←	←	←
P _A	大気圧 kg/cm^2	1.0	←	←	←
T ₁	チェンバー温度(初期値) °K	293	←	←	←
T ₂	駆動ポート温度(") °K	293	←	←	←
T ₃	ブレーキポート温度(") °K	293	←	←	←
V ₁	チェンバー容積 cm^3	3182.4	2122.2	5701	3050.5
V ₂ '	駆動ポート容積(初期値) cm^3	1092.52	1002.7	1214.2	1171.6
V ₃ '	ブレーキポート容積(") cm^3	1002.7	1092.52	1171.6	1214.2
A ₂	駆動側ピストン面積 cm^2	94.4	122.7	94.4	122.7
A ₃	ブレーキ側ピストン面積 cm^2	122.7	94.4	122.7	94.4
A ₄	ピストンロッド面積 cm^2	28.3	←	←	←
φ ₁	補正係数 1	SOLA 0.15	←	SOLA 0.15 SOLB 0.15	←
F	オリフィス断面積	SOLA 6.0	←	SOLA 6.0 SOLB 2.6	←
C _p	定圧比熱 $\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$	0.240	←	←	←
C _v	定容比熱 $\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$	0.171	←	←	←
K	比熱比	1.4	←	←	←
φ ₂	補正係数 2	0.08	←	←	←
f	摩擦係数	0.02	←	←	←
L	流路長さ cm	11.0	←	←	←
D	流路相当直径 cm	0.01	←	←	←
Σζ	損失係数	2.0	←	←	←
R	ガス定数 $\text{kgcm/kg}^\circ\text{K}$	2927.0	←	←	←
A	仕事の熱当量 kcal/kg cm	2.34×10^{-5}	←	←	←
g	重力加速度 cm/S^2	980	←	←	←



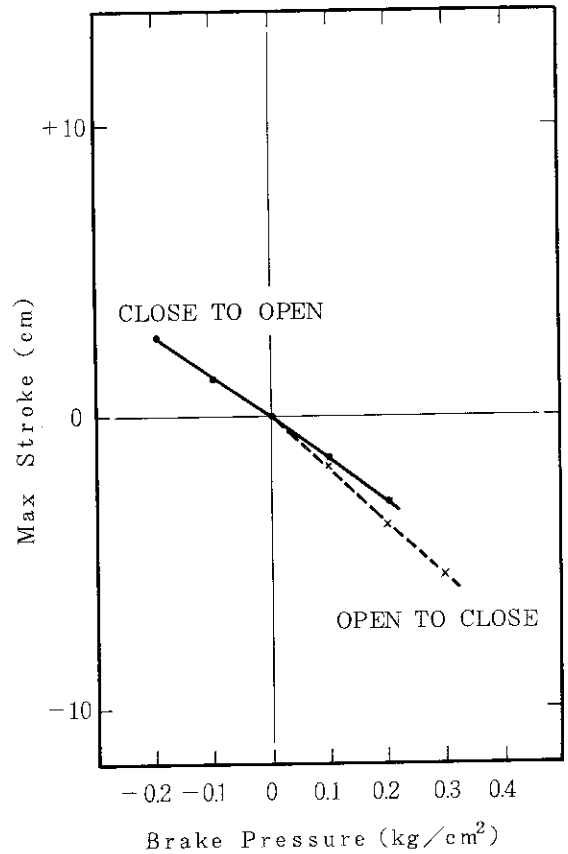
第10図 チェンバ初期圧力と最大ストロークの関係



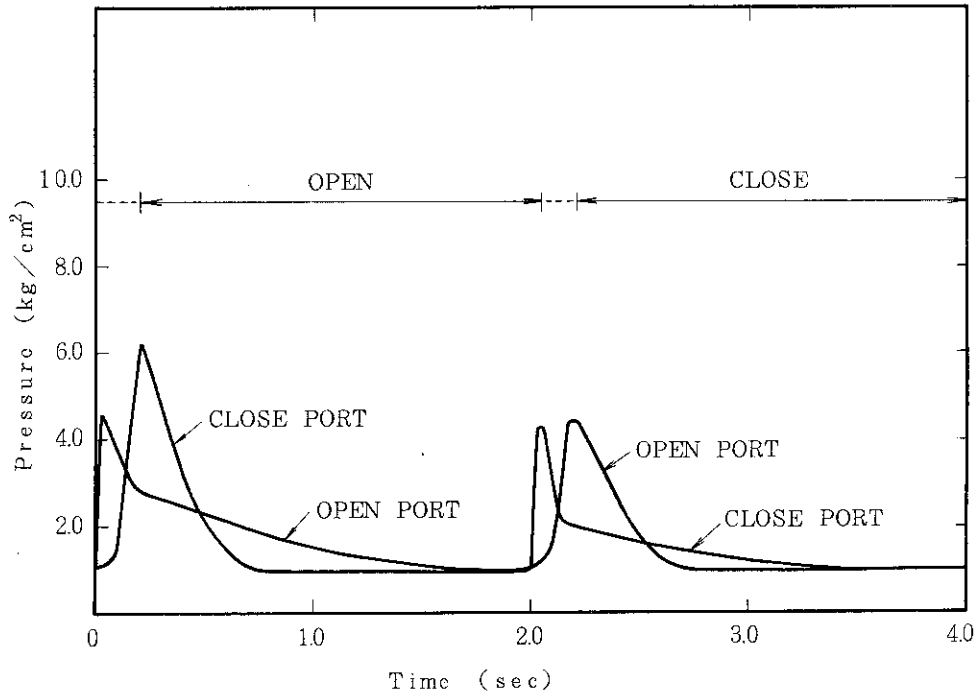
第11図 チェンバボリウムと最大ストロークの関係



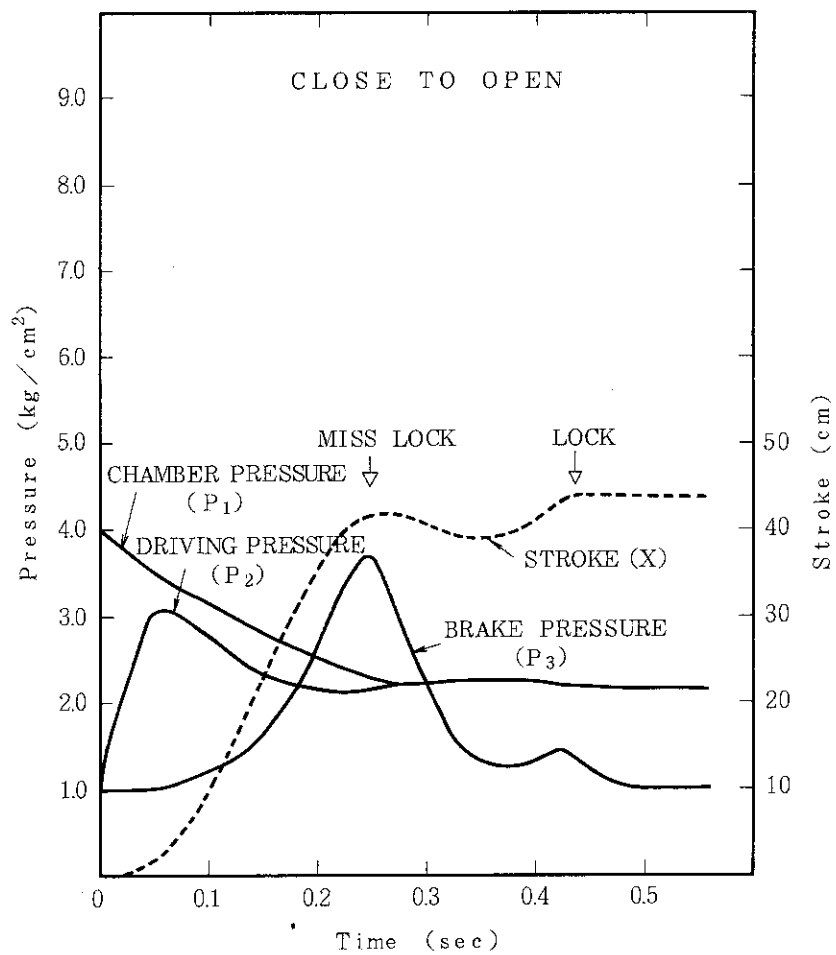
第12図 ブレーキ初期ボリウムと最大ストロークの関係



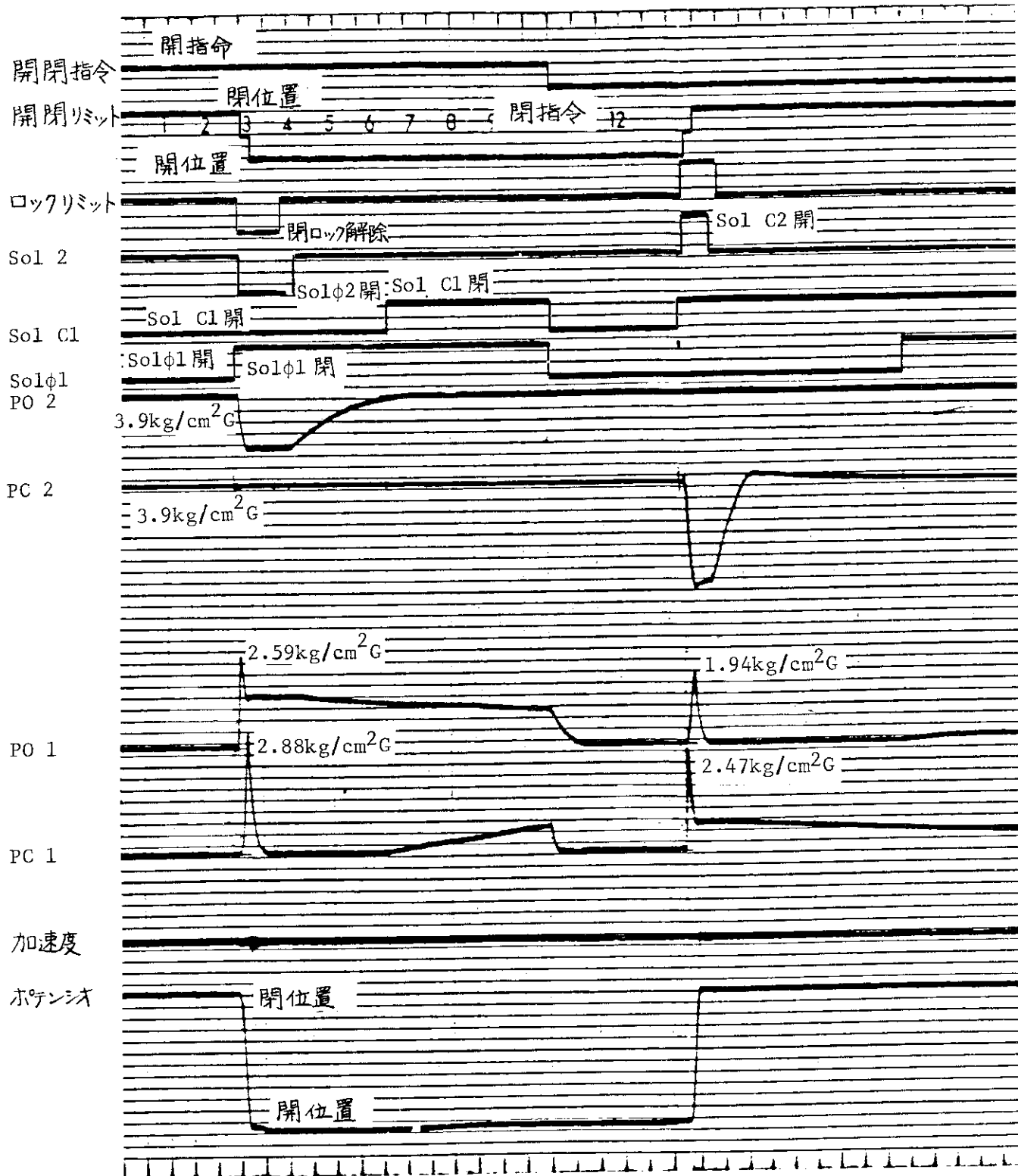
第13図 ブレーキ初期圧力と最大ストロークの関係



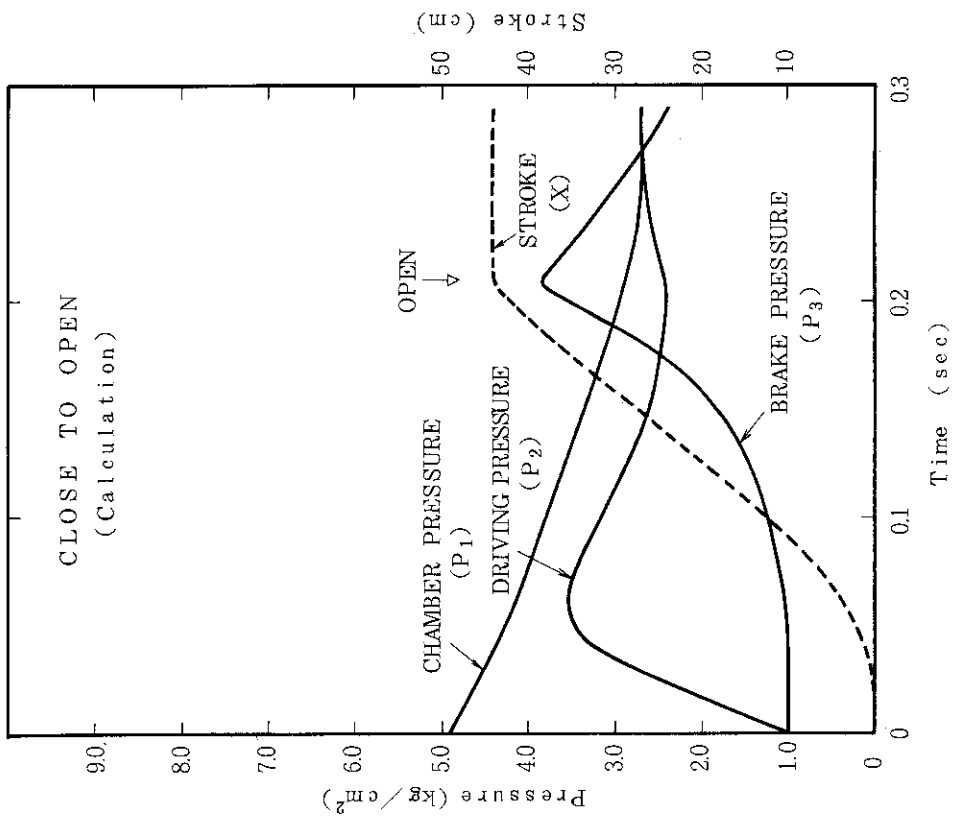
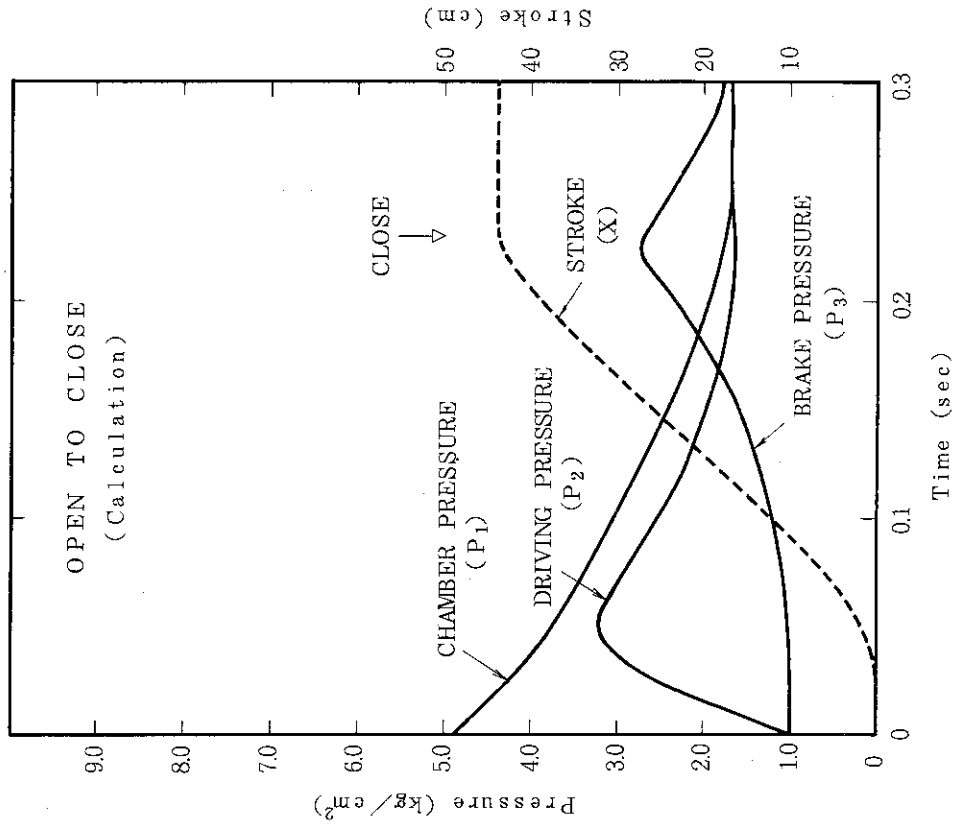
第14図 大気放出特性



第15図 ミスロックのシュミレーション



第16図 改造後の特性試験結果



第18図 改造後の特性解析結果 (開→閉)

第17図 改造後の特性解析結果 (閉→開)