
油 圧 特 集

スプール弁のハイドロリックロック.....	59
リリーフ弁の特性に関する研究.....	64
工作機械の油圧回路.....	72
日立建設機械の油圧の現状.....	77
リクレーマの油圧駆動.....	82

スプール弁のハイドロリックロック

Hydraulic Lock in Spool-type Valves

松 崎 淳* 浜 野 新*

Atsushi Matsuzaki

Shin Hamano

要 旨

油圧用スプール弁に生ずるハイドロリックロック現象は弁の動作を不安定にし、はなはだしい場合にはスプールがまったく動かなくなる。本報は、その発生機構を明らかにし、種々のスプール形状がおよぼす影響を検討するために行なった実験の結果をまとめたものである。まず、スプールとスリーブの間の漏れ流量や接触電気抵抗の変化を調べてロック時にスプールがスリーブと接触していることを明らかにし、さらに、適当なテーパや段を設けたスプールではハイドロリックロックを起こさないことを確認した。

1. 緒 言

油圧装置には種々の弁類を用いるが、その中で最もひん繁に使われるスプール弁でときどきしゅう動部分の摩擦力が非常に大きな値となり、大きな操作力を必要として弁の動作を不安定にすることがある。このような現象はハイドロリックロックと呼ばれており、今後油圧装置の高圧化に伴ってますます重要な問題になってくるものと思われる。ハイドロリックロックはすでに1940年代に航空機などに用いる高圧の油圧機器で問題となっており⁽¹⁾、同じころガスタービンの燃料制御に用いる弁でもこれに似た現象が経験されている⁽²⁾。当時は油の中に混じっているごみや不純物がスプールのしゅう動部につまるため大きな摩擦力が生ずるものと考えられていたが⁽³⁾⁽⁴⁾、その後細かなフィルタでごみを除いた清浄な油でも同様に生ずることが明らかになった。また、Towler 氏⁽¹⁾は実験によってこの現象は供給油圧をある圧力以上にするると起こるが、それ以下の圧力では起こらないこと、弁に圧油を供給してから一定時間経過すると急にロック力が増大すること、さらに高圧でロック現象を起こしたスプールもそのまま圧力を下げるとロックが消えて再び円滑にしゅう動することなどを見いだした。その後 Sweeney 氏⁽⁵⁾⁽⁶⁾、Mannam 氏⁽⁷⁾、Blackburn 氏⁽⁸⁾をはじめ多くの人々によって研究が行なわれ、現在ではハイドロリックロックは油の中に混じっているごみのためばかりでなく、スプールのまわりに不平衡な圧力分布が生じて、スプールの偏心させスリーブに強く押しつけるために起こる現象と考えられている。

本報では、スプールとスリーブの間の漏れ流量や電気抵抗の変化を測定してハイドロリックロックの発生機構を明らかにし、また種々のスプール形状が及ぼす影響を調べた結果などについて述べる。

2. ハイドロリックロックの発生機構

ハイドロリックロック現象の原因は

- (1) 油の中に混じっているごみがスプールとスリーブのしゅう動部分につまる
- (2) スプールのまわりに不平衡な圧力分布が生じ半径方向の力が作用してスプールのスリーブに強く押しつけ大きな摩擦力を生ずる

の二つが考えられる。このうち、(1)の原因は細かなフィルタを用いて弁に供給する油を清浄に保つことにより取り除くことができるが、(2)の原因はスプールとスリーブの間の微小なすきまにおける油の流れに基づくものでその解決は容易でない。次に、スプールのまわりに不平衡な圧力分布が生じてスリーブに押しつけられる過程について述べる。

スプールやスリーブが完全に真円の断面をもちしゅう動部の真直

* 日立製作所機械研究所

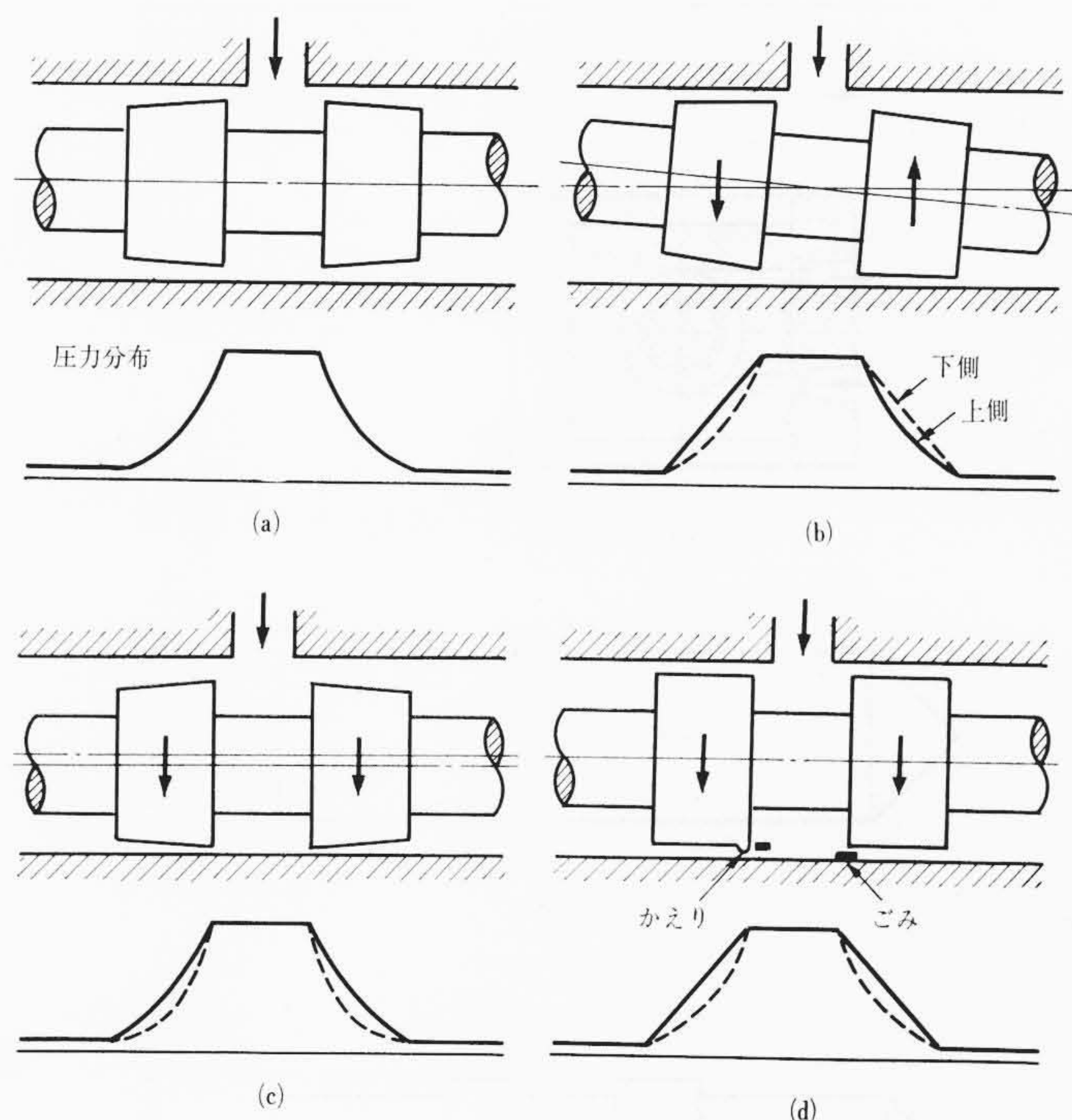
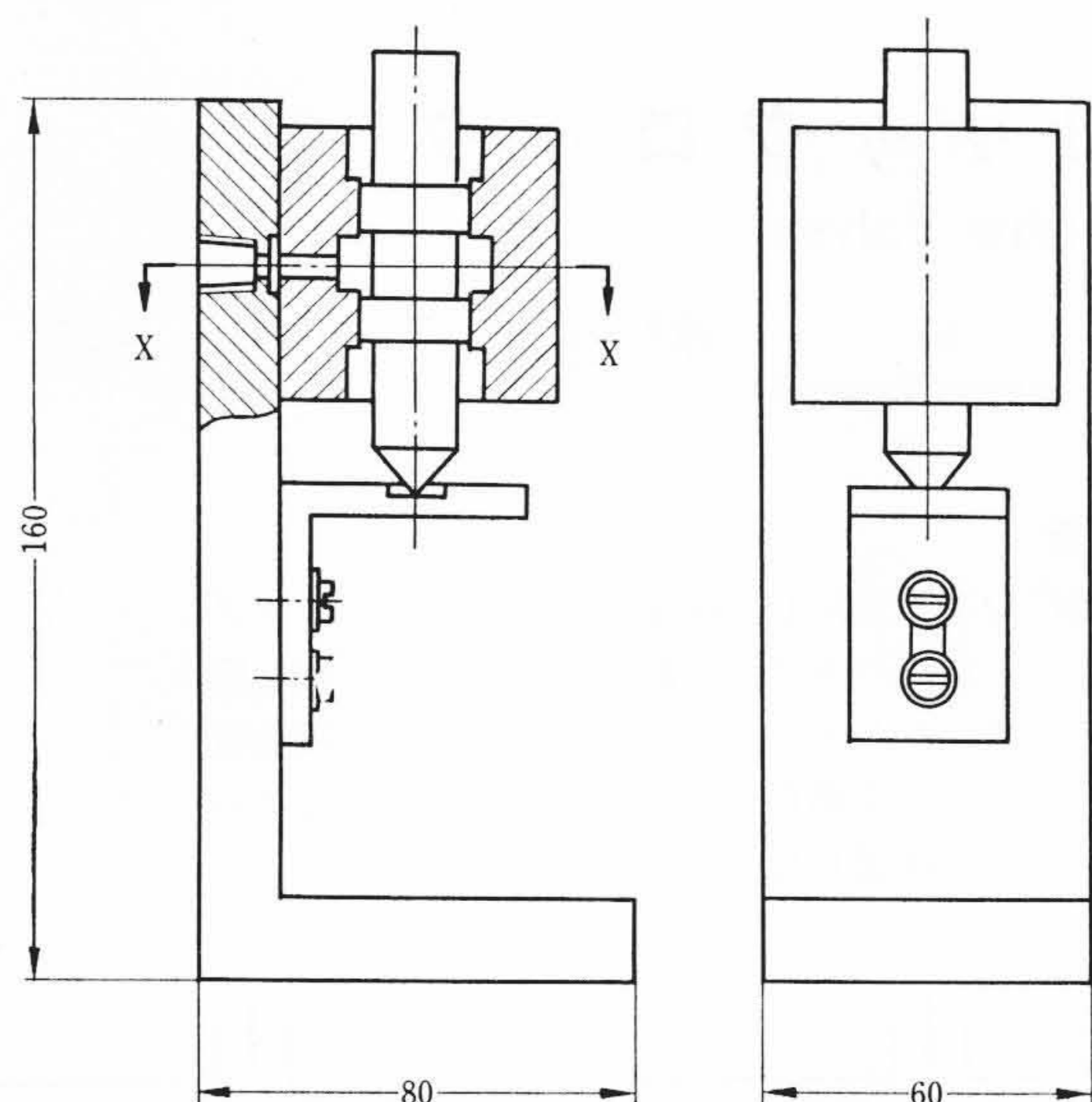


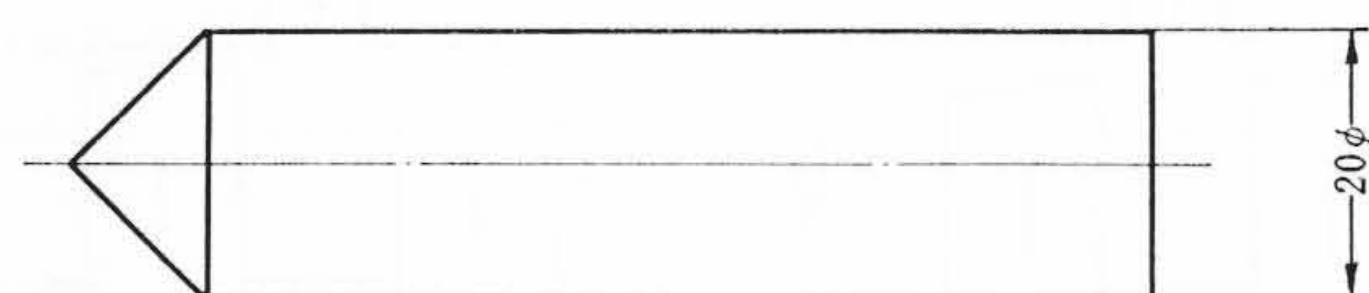
図1 スプールのまわりの圧力分布

度も理想的な場合には、スプールのまわりの圧力分布は一様になり半径方向の力が作用することはない。しかし、実際のスプールやスリーブをこのような理想形状に加工することは不可能であるから、スプールランドに微小な凹凸、うねりあるいはテーパがでたり、エッジの部分がだれることがあって、不平衡な圧力分布を生ずる原因となる。最も簡単な例として図1のようにスプールランドにテーパがある場合を考えてみる。いま(a)のようにスプールの中心がスリーブの中心と一致しているとすれば、スプール・スリーブ間のすきまは油の流れに対して一様な広がりをもち、スプール表面の圧力分布は図に示すように高圧側から低圧側に向かって凹状の変化をする。ところで、弁の動作中にスプールとスリーブが同心にあることはごく稀で、(b)のように傾いていたり(c)のように偏心していることが多い。このような場合にはスプールとスリーブの間のすきまは非対称になるから、スプールのまわりの圧力分布はそれぞれ図に示すように不平衡となり、上下方向の力がスプールに作用する。このため(b)では傾いたスプールがスリーブと平行になって(a)または(c)のような状態となるが、(c)の状態ではスプールはますます偏心しスプール・スリーブ間の油膜が押し出されて両者が金属接触を起こし大きな摩擦力を生ずる。このようにスプールの偏心させるような圧力分布を生ずる原因としては、スプールやスリーブの形状

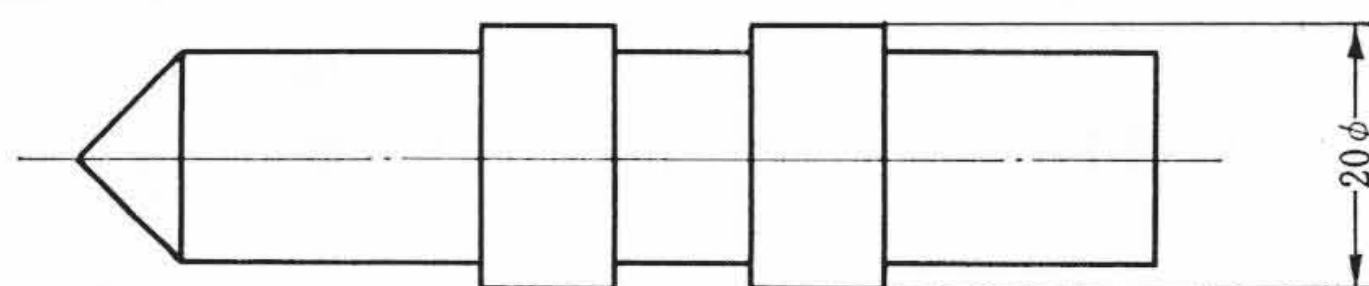


X-X断面

図2 実験装置



(a)



(b)

図3 スプールの形状

や加工精度（表面あらさ、真円度、真直度など）、油の中に混じっているごみ、高圧による各部の弾性変形などが考えられる。たとえば、スプールランドにテーパがない場合にも(d)のように加工時のかえりが残っていたり、すきまにごみがつまっていたりすると不平衡な圧力分布が生じスプールが偏心してハイドロリックロックの原因となる。

3. 実験結果

3.1 実験装置

図2に実験装置の概略を示す。スプールおよびスリーブの中心軸を水平にするとスプールの自重が半径方向に作用するので、図のように垂直にした。スプールの形状は図3に示すように単純化し、(a)のような円柱と(b)のように2個のランドをもったものを用い、それぞれ実験内容によってスプール・スリーブ間のすきまやランドの長さを変えて実験した。しゅう動部はすべて研削加工を行ない、スプールの外径、スリーブの内径とも表面あらさ ($H_{\max}$) およ

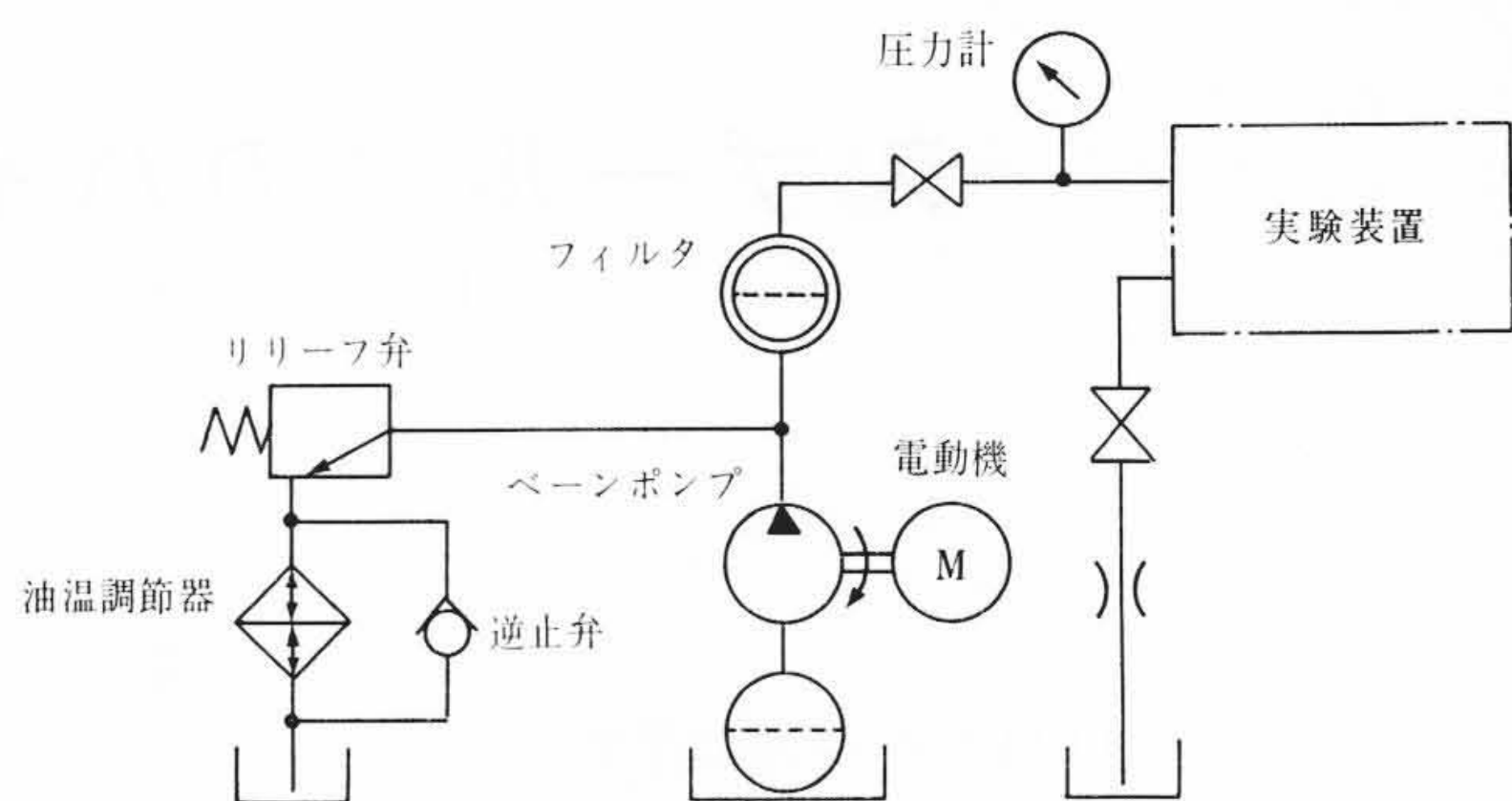


図4 油圧回路

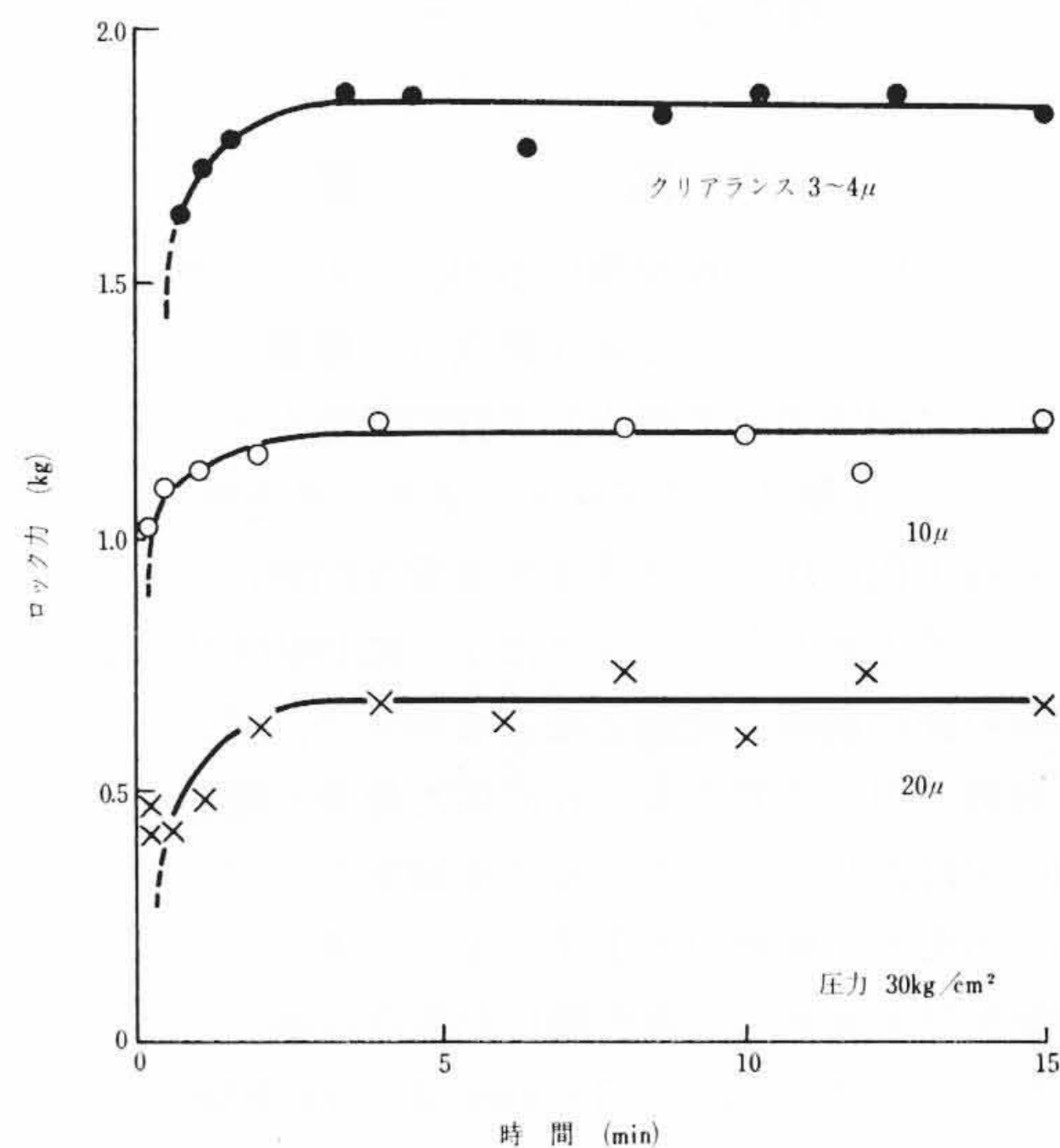


図5 ロック力の変化

び真空度が 1μ 以下に仕上げてある。

図4は油圧回路である。油圧源にはベーンポンプを用い、ここから吐出した油をリリーフ弁で一定圧力に設定し、フィルタでごみを取り除いてから実験装置の弁に供給した。このフィルタは焼結金属製のエレメントでできており、 $2\sim3\mu$ 以上の大きさのごみはここでろ過される。また実験中の油温変化を防ぐためリリーフ弁の戻り回路にオイルクーラを入れ、温度調節器を用いてタンク内の油温が常に 40°C 前後になるようにした。こうして実験装置に圧油を供給してから一定時間経過したときスプールを静かに上方へ引張り、スプールが動きはじめるときの操作力をばね秤で測定してロック力を求めた。なお実験に使用した油は D. T. E. Oil Light で 40°C における粘度は $0.24 \times 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ である。

3.2 ロック力の変化

図5は弁に圧油を供給した後ロック力がどのように変化するかを示したものである。圧油を供給した直後はスプールは円滑に動きその自重に相当する力だけで引き上げることができるが、 $15\sim30\text{ s}$ 後からハイドロリックロックを起こし、ロック力は時間が経過するにしたがって急激に増加する。これは、圧油を供給した直後スプールは一樣な油膜を介してスリーブと接触しているが、前章で述べたような原因でスプールのまわりに不平衡な圧力分布が生じ、スプールが偏心してスリーブに押しつけられ、押しつけ力が大きくなるにしたがってその間の静摩擦力が増加したことを示す。しかし、 $1\sim2\text{ min}$ 後にはほぼ一定値に達して、それ以後は 30 min 経過してもあまり変化しない。

3.3 スプールの偏心

前節で述べたようにロック力の変化はスプールが偏心してスリー

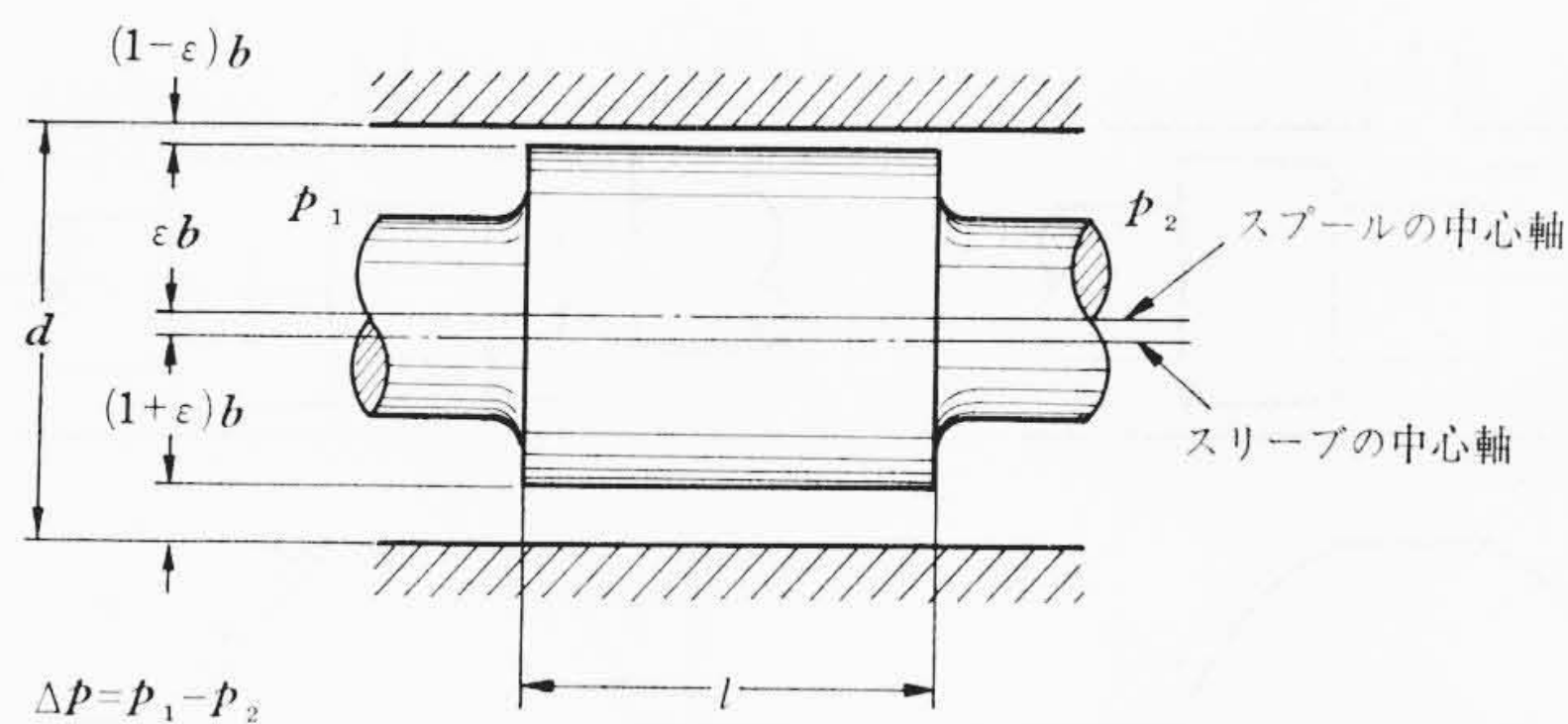


図6 スプール・スリーブ間のすきま

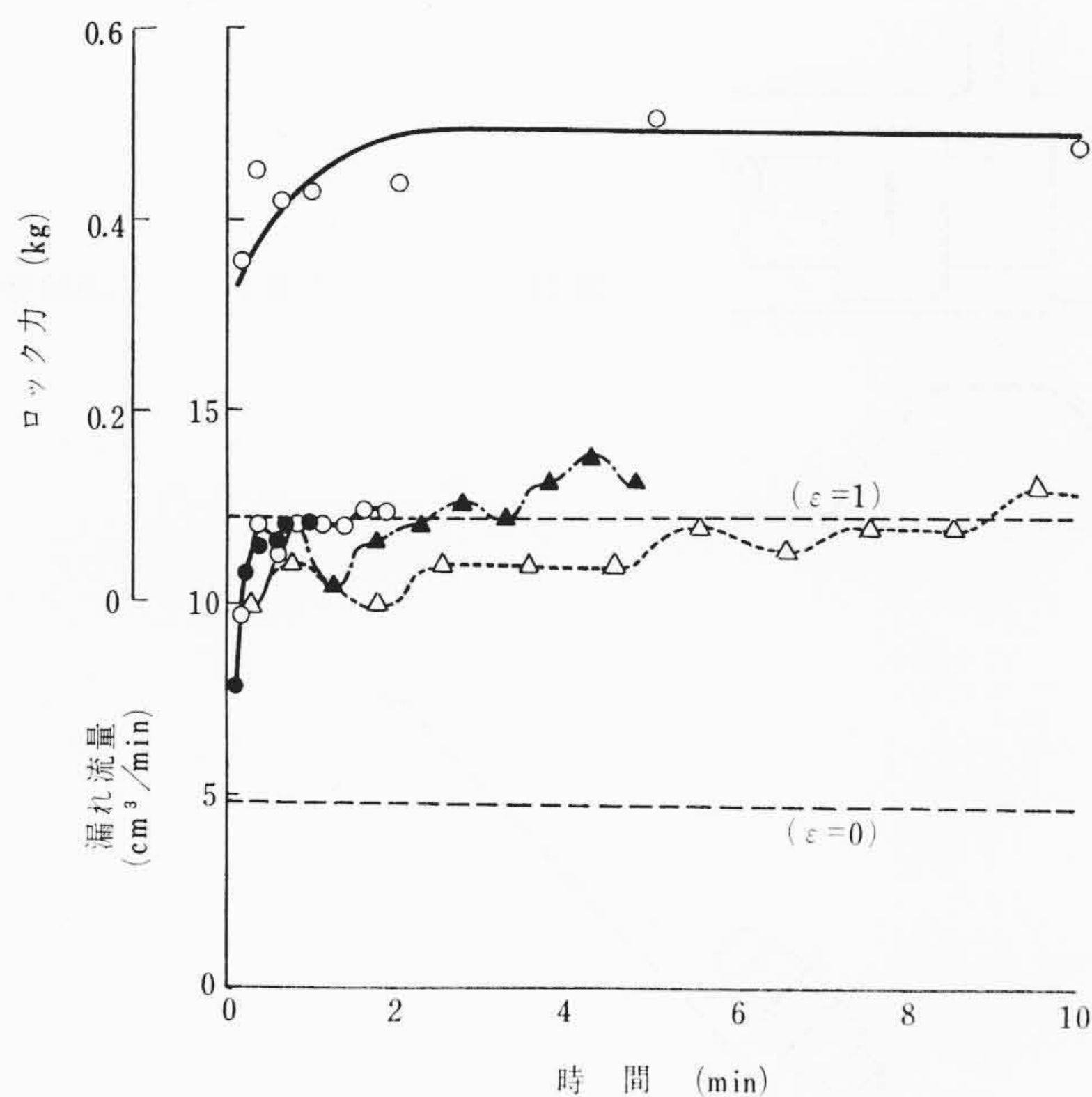


図7 漏れ流量とロック力の変化

ブに押しつけられると考えれば説明できる。そこでこの説明を裏づけるためにスプールが偏心する様子を調べた。ただし、スプールとスリーブの間のすきまは非常に小さくスプールの偏心量を直接測定することができないので、スプール・スリーブ間の油漏れや接触電気抵抗の変化から間接的に測定した。

3.3.1 スプール・スリーブ間の漏れ流量

スプール・スリーブ間の漏れ流量 q (cm^3/s) は、油の流れがすべて軸に対して平行で円周方向の流れ成分は無視できると仮定すれば、次のような Hagen-Poiseuille の式で表わされる。

$$q = \frac{\pi d b^3}{12 \mu l} \Delta p [1 + 1.5 \varepsilon^2]$$

ここに各記号の意味は図6に示すように、

d : スリーブの径 [cm]

b : スプール・スリーブ間のすきま (スプールとスリーブが同心のとき) [cm]

l : スプールランドの長さ [cm]

μ : 油の粘度 [$\text{kg}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$]

Δp : すきまの前後の圧力差 [kg/cm^2]

ε : スプールの偏心率

で、 ε はスプールの偏心量とスプール・スリーブ間のすきま b の比を表わす。したがって、スプールとスリーブの中心が完全に一致しているときは $\varepsilon=0$ 、スプールがスリーブに押しつけられている状態では $\varepsilon=1$ である。上の式によれば漏れ流量 q はスプールの偏心量によって変化するから、漏れ流量を測定すれば逆にスプールの偏心量を知ることができる。とくに $\varepsilon=1$ のときは $\varepsilon=0$ の

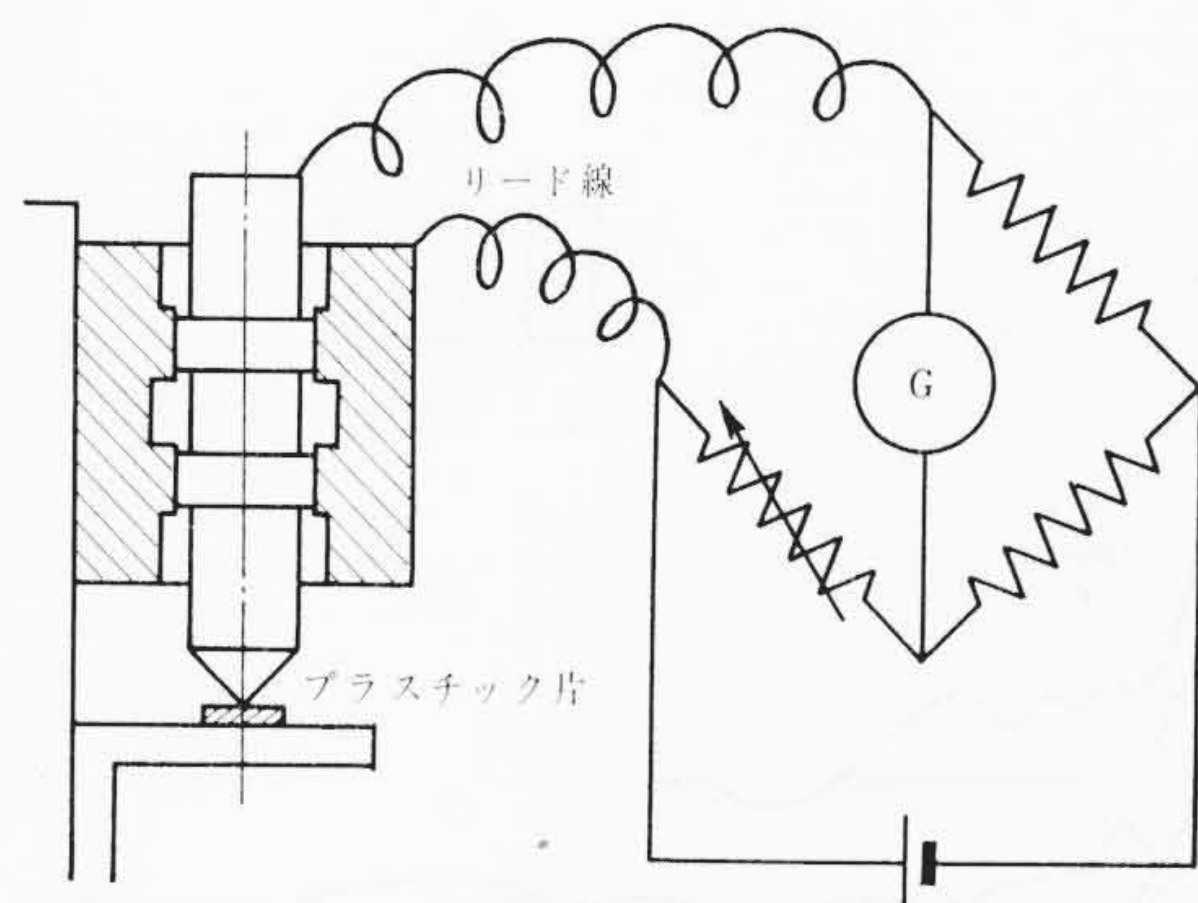


図8 スプール・スリーブ間の接触電気抵抗測定法

ときに比べて2.5倍の漏れ流量があるはずである。

図7はスプール・スリーブ間の漏れ流量の変化を調べたもので、ロック力の変化と比較して示してある。使用したスプールは長さ4 mmのランドを2個もったもので、スリーブ内径との直径差は 10μ 、供給油圧は $60 \text{ kg}/\text{cm}^2$ である。 $\varepsilon=0$ および $\varepsilon=1$ のときの漏れ流量計算値はそれぞれ4.9, $12.3 \text{ cm}^3/\text{min}$ で図中に破線で示してある。測定値は、図2の実験装置全体を水平にしスリーブの両端から落ちる油滴を10 s ~ 1 minの一定間隔ごとに回収してその間の平均流量を求めたものである。各測定値はロック力がほぼ一定値に達した状態ではほとんど $\varepsilon=1$ のときの計算値に近いところにあり、スプールとスリーブが接触していることが推定できる。しかし、圧油供給直後に $\varepsilon=0$ のときの計算値に近い測定値が得られず、各場合ともあまり大きな流量変化が見られない。最も測定間隔が短い●印の場合(油滴回収間隔10 s)にのみ比較的大きな変化が見られるだけである。これは、最初からスプールとスリーブが同心の位置になかったため、あるいは弁に圧油を供給してからスプールが偏心を起こすまでの時間が油漏れの回収間隔に比べて短かったために測定されなかったものと思われる。

3.3.2 スプール・スリーブ間の接触電気抵抗

前節の実験により、ロック時の漏れ流量はスプールが完全に偏心してスリーブに押しつけられているとしたときの計算値に近い値であることがわかった。本節では、スプールの偏心をさらに確認するためスプールとスリーブの間の電気抵抗の変化を調べた。

作動油の固有抵抗はスプールやスリーブの材質として用いられる金属に比べてけた違いに大きい。したがって、スプールとスリーブが様な油膜を介して接触しているとき両者間の電気抵抗は非常に大きい、スプールが偏心を起こしてスリーブとの間に局部的に金属接触すると急激に減少し、接触面積が増加するにつれてますます小さくなると考えられる。

図8にスプール・スリーブ間の接触抵抗の測定法を示す。スプールと実験装置本体の間をプラスチック片で絶縁し、しゅう動部分の接触抵抗をホイートストーンブリッジの一辺に入れてその平衡をとりながら測定する。なおこのような接触抵抗はこの部分を通る電流の大きさによって変化し、一般に接触部に生ずるジュール熱のため電流が大きいときほど抵抗が低く現われることが知られているが⁽⁹⁾、本実験では接触抵抗の値自身よりもむしろこの抵抗が変化する様子を調べることが目的であったので、電源には1.5Vの乾電池を使用した。

実験結果の代表的な例を図9に示す。実験条件は漏れ流量を測定した図7の場合と同じである。ただしスプール軸は垂直にしてある。接触抵抗は、ほとんどの場合弁に圧油を供給した直後に急激な減少をし、その間の変化は非常に速いのでブリッジの平衡を

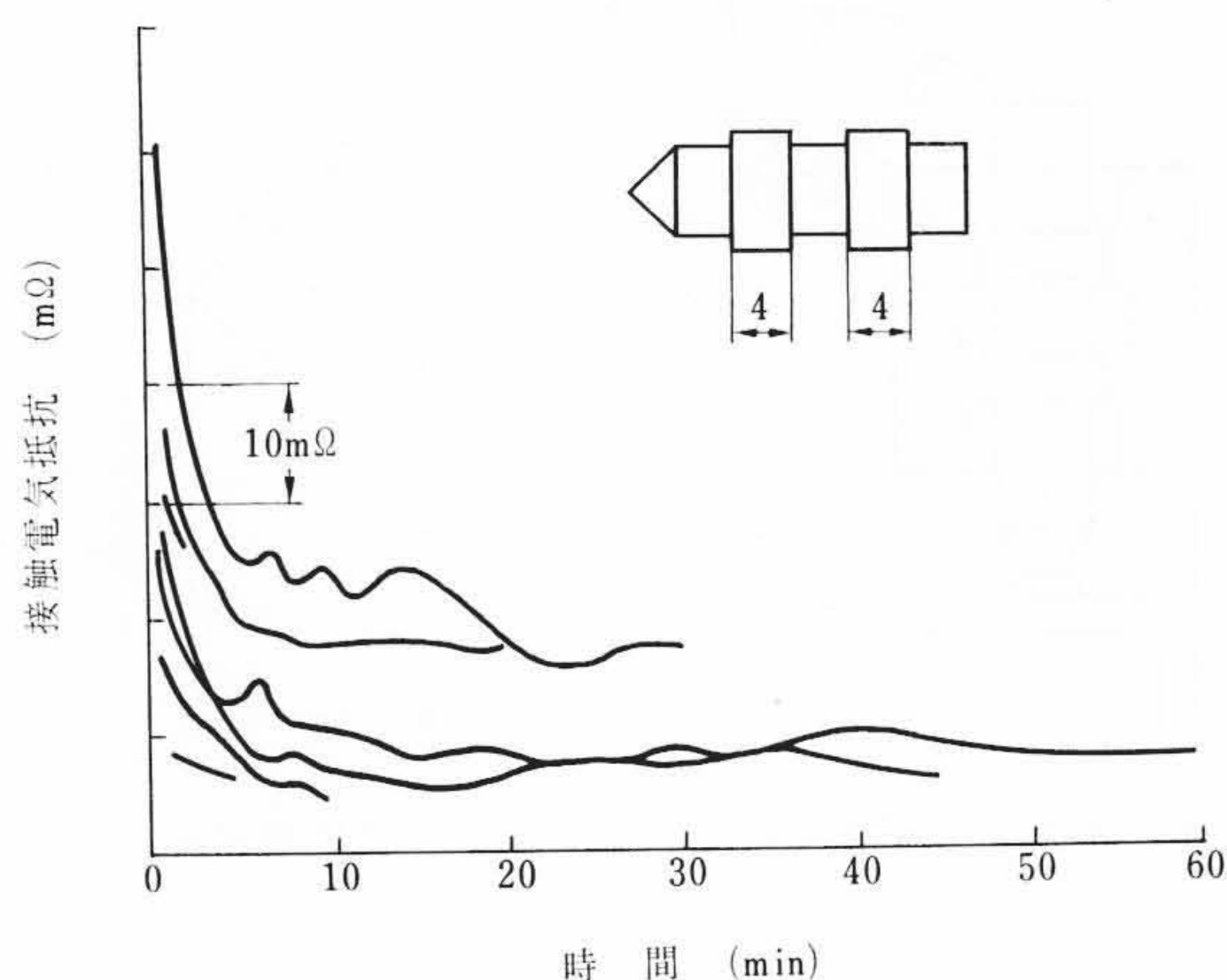


図9 接触電気抵抗の変化

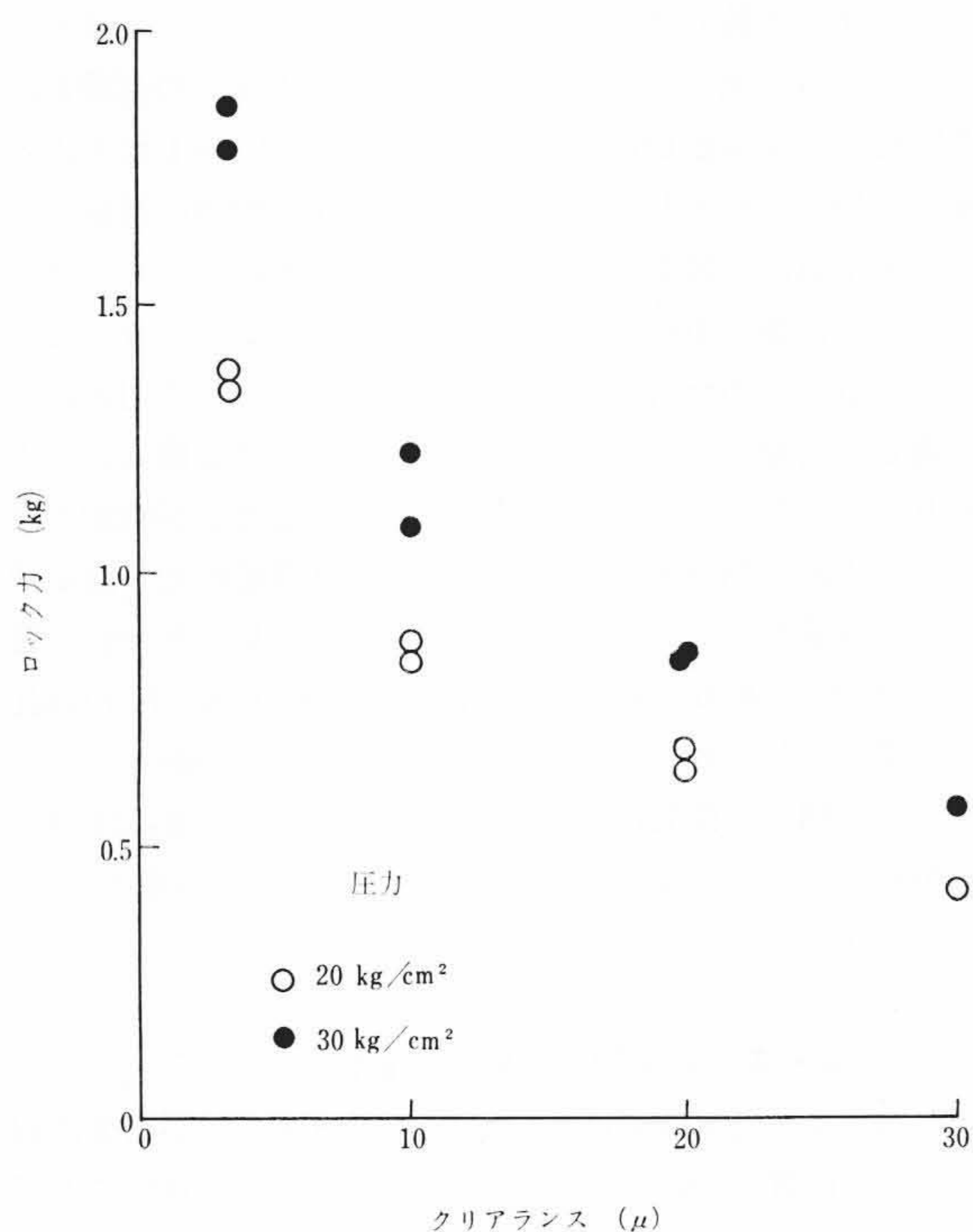


図10 クリアランスの影響

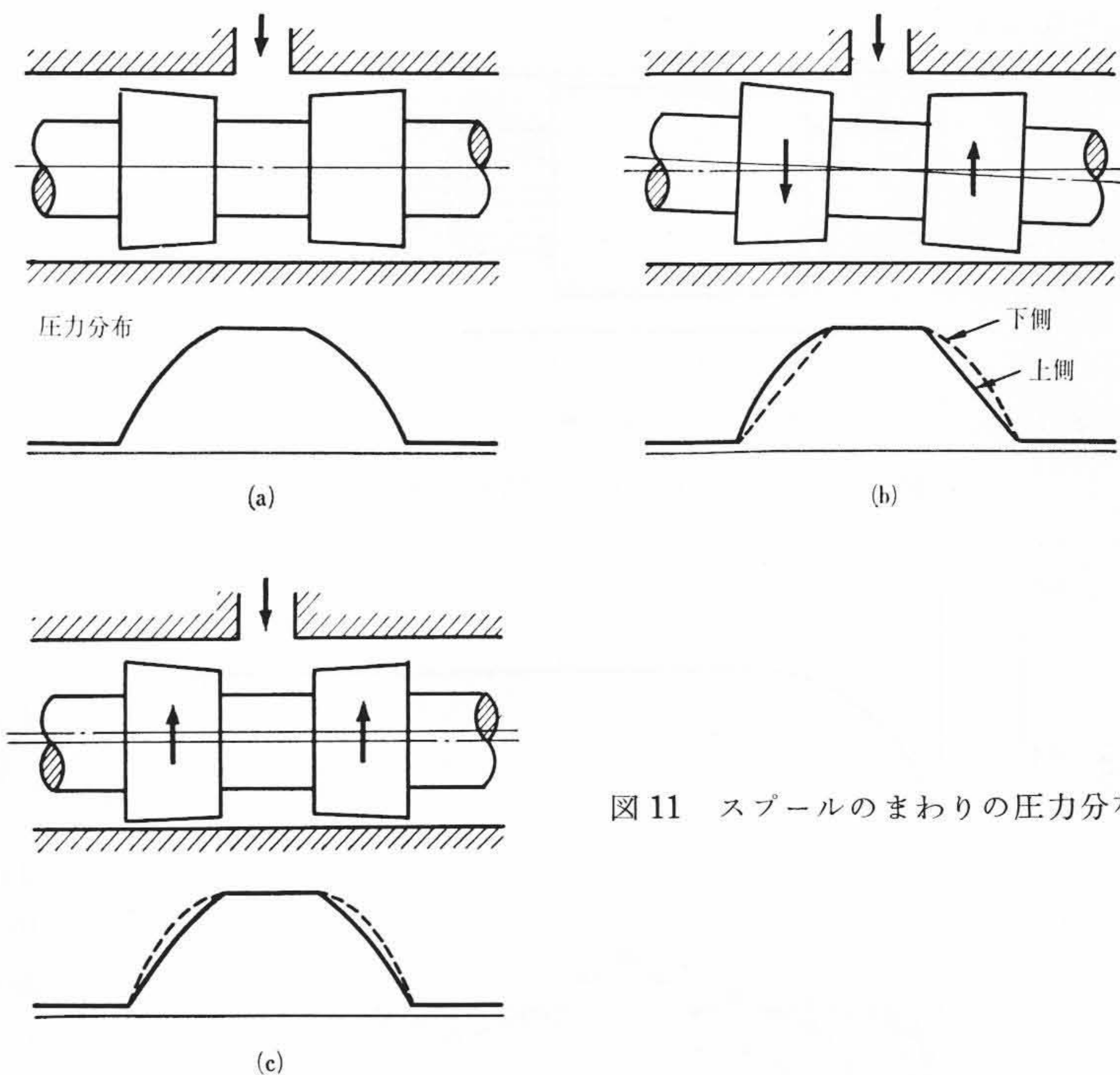


図11 スプールのまわりの圧力分布

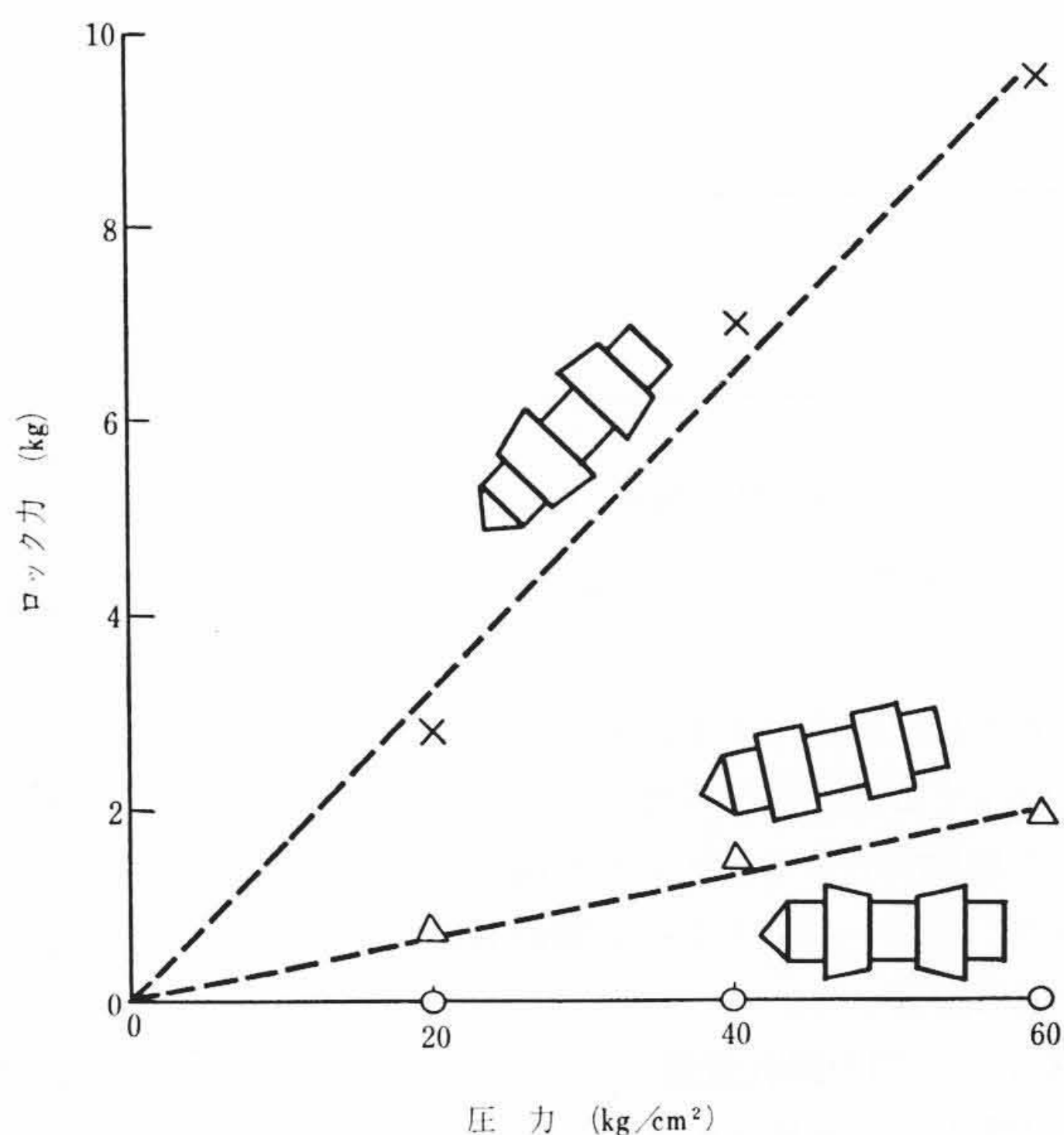


図12 テーパつきスプールのロック力

とすることは不可能であった。図9は10～30 s経過して抵抗変化が比較的ゆるやかになってからの様子を示すものである。抵抗が減少する割合はしだいに小さくなり、長時間経過すると接触抵抗はほとんど一定値になる。一定値に達したときの抵抗値はリード線自身がもっている抵抗値にほぼ等しい値になっている。なおこの図には現われない最初の急激な変化量は図に見られる変化量よりもはるかに大きな量である。

以上、スプール・スリーブ間の漏れ流量と電気抵抗の測定結果からスプールは圧油供給後間もなく偏心を始め、完全にロックした状態ではスリーブと接触していることがほぼあきらかとなった。

3.4 スプール形状の影響

スプール・スリーブ間のすきまの形状がスプールのまわりの圧力分布に大きな影響を与えることを2.で述べた。本節ではスプールランドの寸法や形状を種々に変えて実験しその影響を調べた。

3.4.1 クリアランスの大きさ

図10はスプール・スリーブ間のすきま(クリアランス)の大き

きを変えたときのロック力の変化を示す。ロック力は圧油を供給してから2～10 min経過して一定値に達した後測定した値で、すきまが小さいときほど大きなロック力になることがわかる。

3.4.2 テーパつきスプール

2.で述べたように、スプールランドにテーパがある場合は不平衡な圧力分布が生じハイドロロックを起こしやすい。ただし図1では高圧側から低圧側に向かってスリーブとの間のすきまが広がるようなテーパを考えたが、ここで逆向きにテーパがある場合を考えてみる。図11のようにテーパの向きを逆にするとスプールのまわりの圧力分布は凸状に変化する。したがって、(b)のようにスプールが傾いているときはこの傾きをなおすような力が作用し、(c)のようにスプールが偏心しているときは図1の場合と逆に偏心したスプールの中心に戻そうとする力が作用してスプールはスリーブに接触しない。

図12は逆方向にテーパをもつ2種類のスプールと普通の平行なスプールについてロック力を比較した結果である。テーパの量はスリーブとスプールの直径差とほぼ同程度(10 μ)で、2個のラ

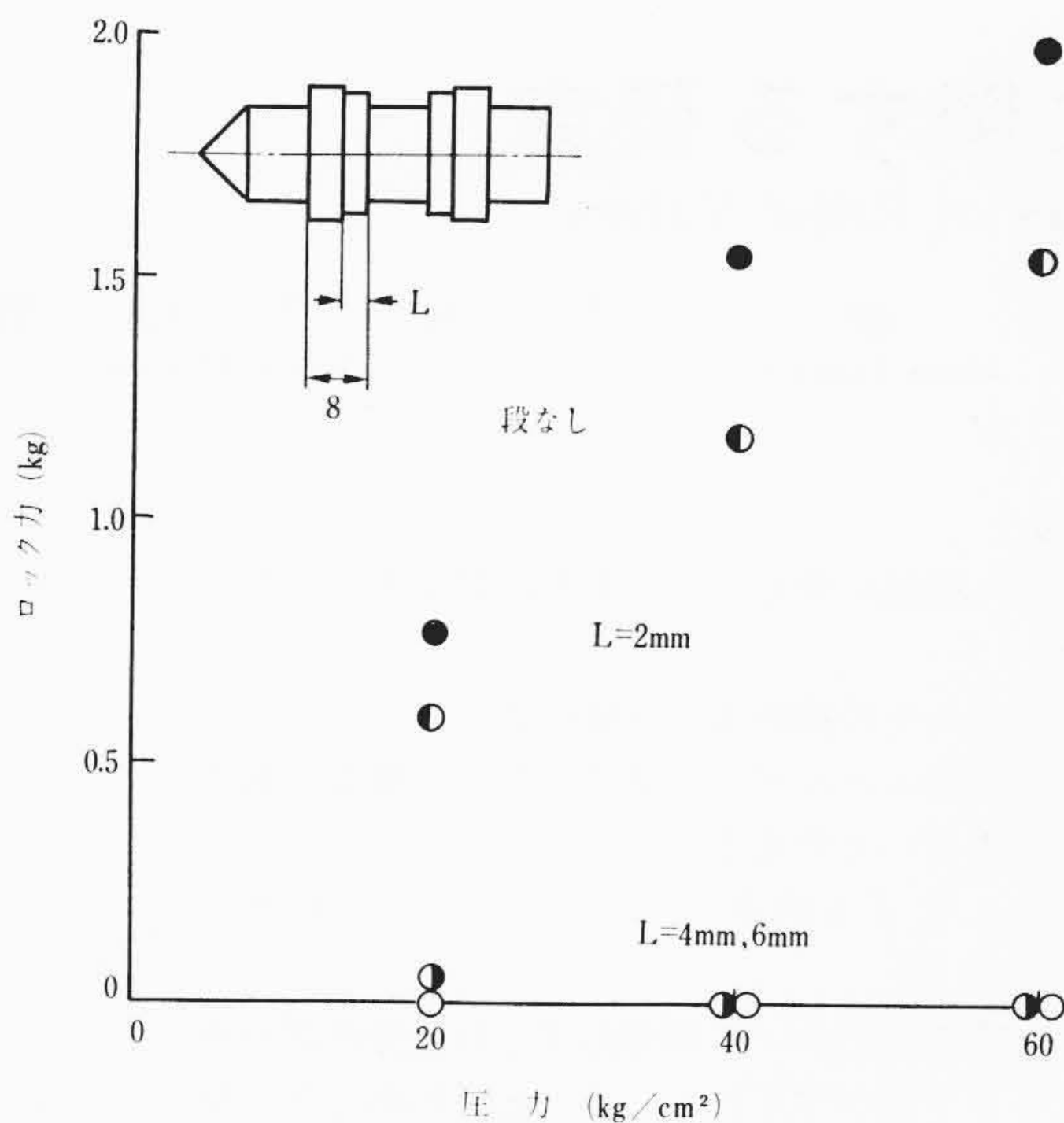


図13 段つきスプールのロック力

ンドに対称に設けてある。高圧側の径を細くしすきまが流れの方向に狭くなるようにしたテーパのスプール(○印)では供給油圧を60kg/cm²まで変えてもロックを起こさずなめらかにしゅう動するが、逆に低圧側の径を細くしたスプール(×印)では非常にかたくロックし平行なスプール(△印)の数倍ものロック力になる。

3.4.3 段つきスプール

前節の実験により、スプールランドに適当なテーパをつけるとロックを起こさないことがわかった。しかしこのように微小なテーパを加工することは容易でない。本節ではこのテーパと同じ大きさの段をもったスプールを用い、段の位置を種々に変えて実験し普通の平行なスプールの場合と比較した。実験結果を図13に示す。段の位置を低圧側に近づけるほどロックが起こりにくくなる。

3.5 供給油圧の影響

図12あるいは図13からわかるように、ロック力は供給油圧が高くなるにしたがって大きくなる。これは供給油圧が高い場合ほどスプールをスリーブに押しつける力が大きくなるためである。しかしさらに圧力が高くなってスプールやスリーブの弾性変形が無視できない量になると、逆に圧力が高くなるにしたがってロック力が小さ

くなり、ある圧力以上では全くロックしなくなることがある。高圧の部分ほどスリーブ径の膨張が大きいため、スプール・スリーブ間のすきまが高圧部で大きくなり、ちょうどスプールにテーパをつけた場合と同様の効果を生ずるためである。

4. 結 言

油圧用スプール弁の動作を不安定にする大きな原因となっているハイドロリックロック現象についてその発生機構を明らかにし、種種のスプール形状が及ぼす影響を調べた。その結果を要約すると次のとおりである。

- (1) ハイドロリックロックは静止中のスプールに圧油を供給してから15~30s後に生じ、1~2min経過するとロック力はほぼ一定値となってそれ以後あまり変化しない。
- (2) ハイドロリックロックを起こした状態では、スプールはスリーブに接触している。
- (3) スプール・スリーブ間のすきまが小さいときほどロック力は大い。
- (4) スプール・スリーブ間のすきまが高圧側から低圧側に向けて狭くなるようにスプールランドにテーパをつけるとハイドロリックロックを起こさないが、テーパの向きを逆にするとロックしやすくなり非常に大きなロック力を生ずる。
- (5) テーパと同じ量の段をもったスプールでも、テーパの場合と同様の効果が得られる。

実験装置の製作にあたり日立製作所中央研究所機械工作課の関係各位に多大の協力をいただいた。ここに深甚の謝意を表わす。

参 考 文 献

- (1) Towler, F. H. : Proc. Inst. Mech. Engrs 156, 295-296 (1947)
- (2) Alcock, J. F. : Proc. Inst. Mech. Engrs 158, 203-205 (1948)
- (3) Parker, S. M. : Proc. Inst. Mech. Engrs 156, 282-285 (1947)
- (4) Beacham, T. E. : Proc. Inst. Mech. Engrs 156, 293-294 (1947)
- (5) Sweeney D. C. : Engineering 172 513-516, 580-582 (1951)
- (6) Manhajm, J. & Sweeney, D. C. : Proc. Inst. Mech. Engrs 169, 865-879 (1955)
- (7) Mannam, J. : Proc. Inst. Mech. Engrs 173, 699-716 (1959)
- (8) Blackburn, J. F. : Trans. A. S. M. E. 75, 1175-1180 (1953)
- (9) 曾田範宗 : 摩擦と潤滑 (昭36. 岩波書店)