

バルブシート面応力分布の解析

Analysis of Stress Distribution on Seat of Valve

大山 康 郎* 菱 川 隆 典*
Yasuo Oyama Takanori Hishikawa

要 旨

バルブにより管内を輸送する流体を閉止するとき、現在のところでは玉形弁におけるようにシート面（弁体と弁座輪の接触面をこのように呼ぶ）を強く押しつけあって流体の流れを止めるのが一般的なやり方である。このとき、流体を完全閉止に至らせる要因として種々のものが考えられるが、まず第一にシート面を接触させたときに発生する応力分布を知る必要がある。そこで今回は、これをモデル化して二次元平面接触問題とし、光弾性実験法^{(1)~(3)}を用いて、平面状のシート面に発生する応力分布を明らかにした。

1. 緒 言

バルブのシート面の形状は種々あるが、最も一般的な平面シートについて考える（図1）。

従来、玉形弁において平面状のシート面を接触させて流体を閉止する場合には、次式で表わされる力 F が必要であるとされている（図2）。

$$F = \frac{\pi}{4} (di + w)^2 P + \pi (di + w) w e P \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 F ：弁棒推力（kg）

di ：弁座口径（mm）

w ：弁座幅（mm）

P ：最高使用圧力（kg/mm²）

e ：漏れ止め係数

（1）式の第1項は流体の圧力 P に抗して弁体を弁座輪に向かって押し下げる力、第2項は、さらに余分にシート面に加えねばならない力である。この式はシート面が均一に接触しており、シート面に発生する応力も一様分布と仮定している。

ここで問題となるのは

（1）シート面は均一に平面接触するのか。

（2）均一に接触したとしても、応力は一様分布であるのか。
の2点である。

シート面が均一に接触すると仮定しても、シート面上の接触の終わる部分（以下接触面端部と呼ぶ）に当然応力集中を生ずるはずであり、ここでは設計の基準となる降伏点をはるかに越えるであろう。さらに（1）式中の e の値は、実際の設計に非常に大きな影響を持つにもかかわらず、正確な意味づけがなされていない。

これらの種々の問題点を明らかにするために、シート面に発生する応力分布の解析を取り上げる。

このほかに、面アラサも閉止には大きな要因となるが、実際にはラッピングによる超仕上げであるので、ここではシート面は理想的に平坦（たん）であり、かつなめらかな状態にあるとする。

2. 光弾性実験^{(1)~(3)}

2.1 実験装置

光弾性実験装置を図3に示す。

図4はモデルを荷重装置に取り付けた状態を示したものである。

2.2 実験模型

モデルとして玉形弁の平面シートを理想化した状態を取り上げ、図2、4に示すように、弁体、弁座輪の共通な中心軸を含む対称断面をとり二次元化し、その一方について、シート面の中央に荷重が

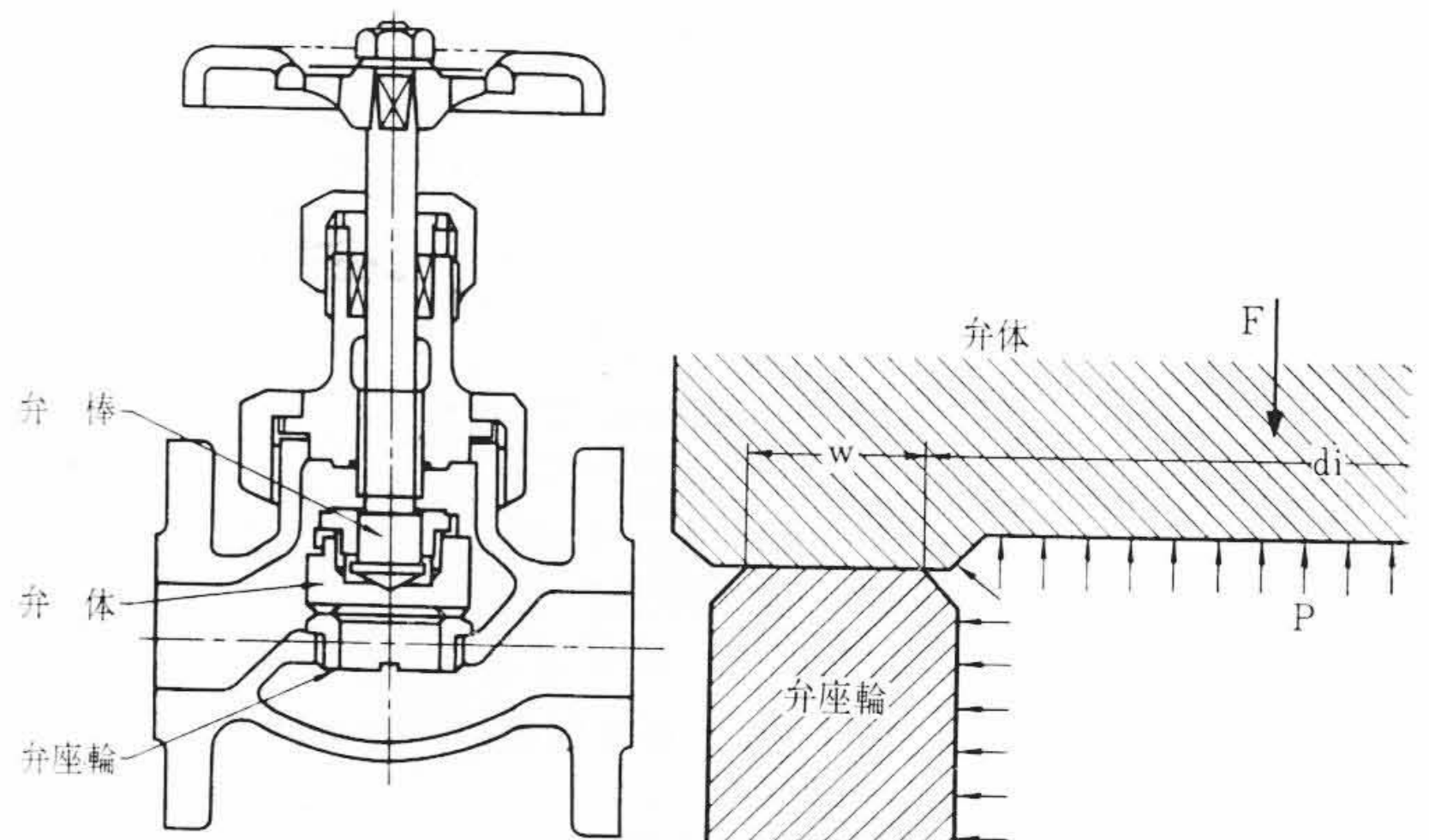


図1 平面シート弁体・弁座

図2 平面シートの詳細

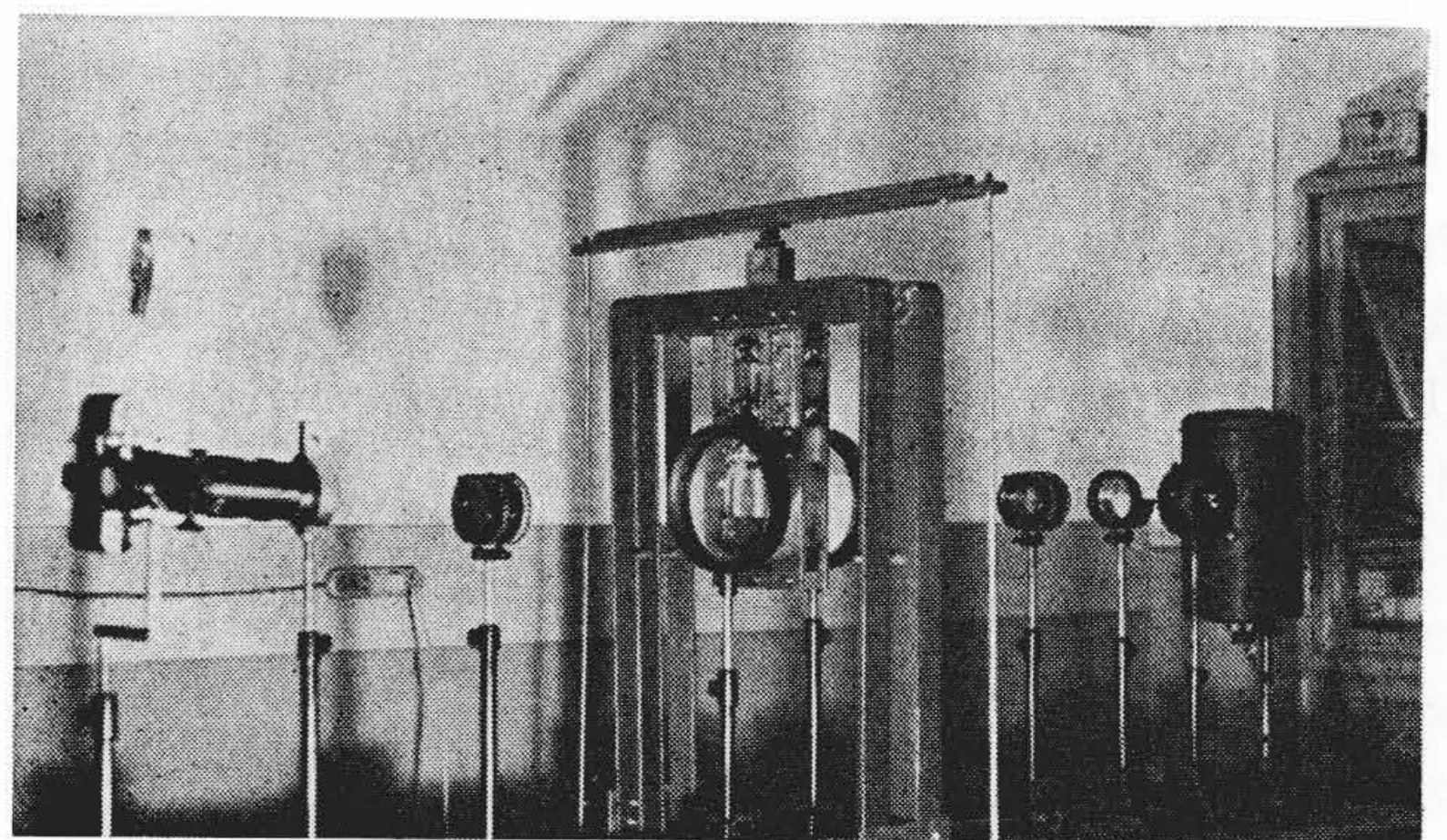


図3 光弾性実験装置

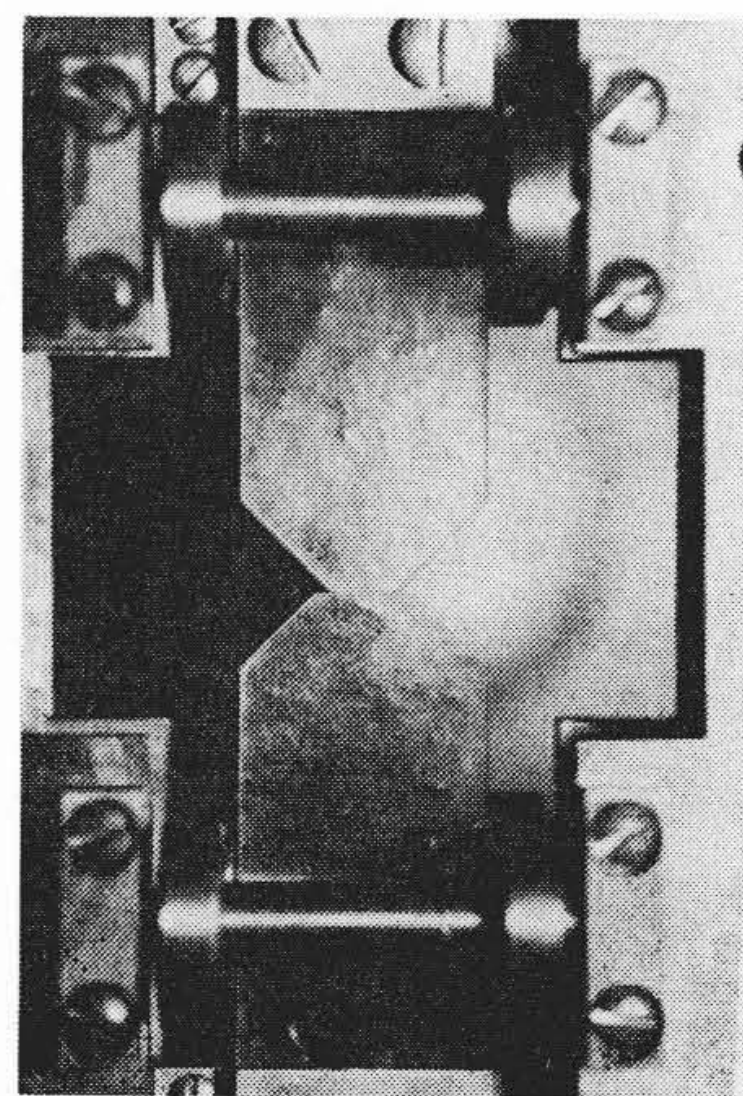


図4 模型装着図

* 日立金属株式会社桑名工場



(縞の密になっているところに応力の集中がある)

図5 等色線

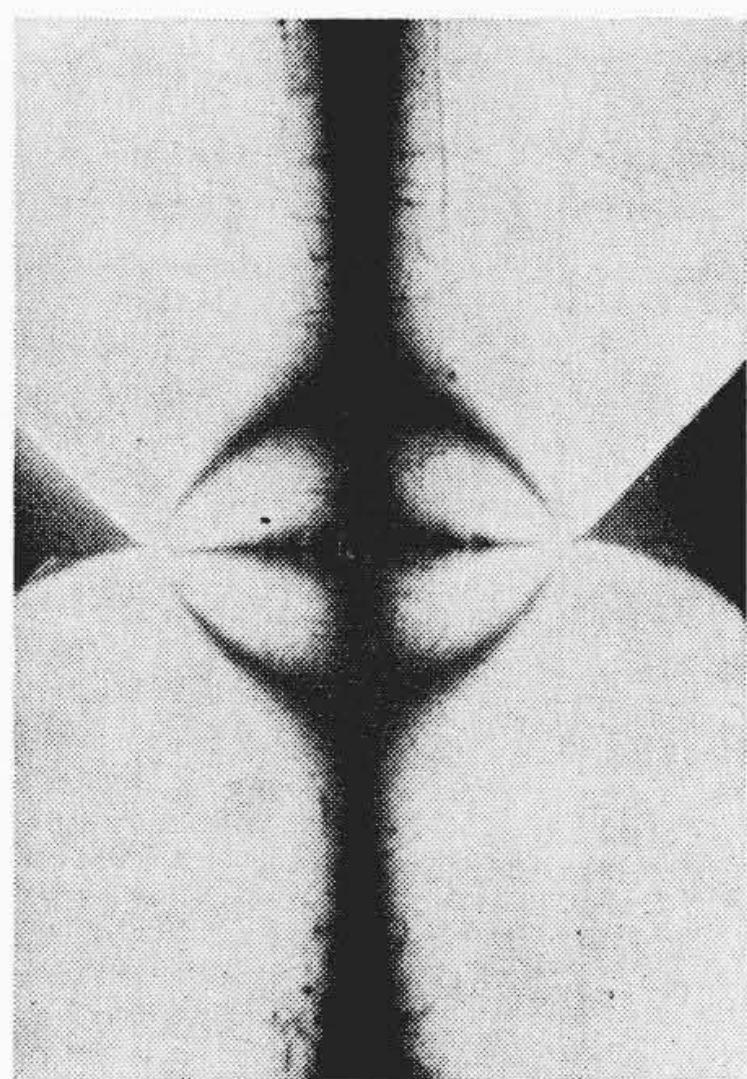


図6(a) 0度の等傾線

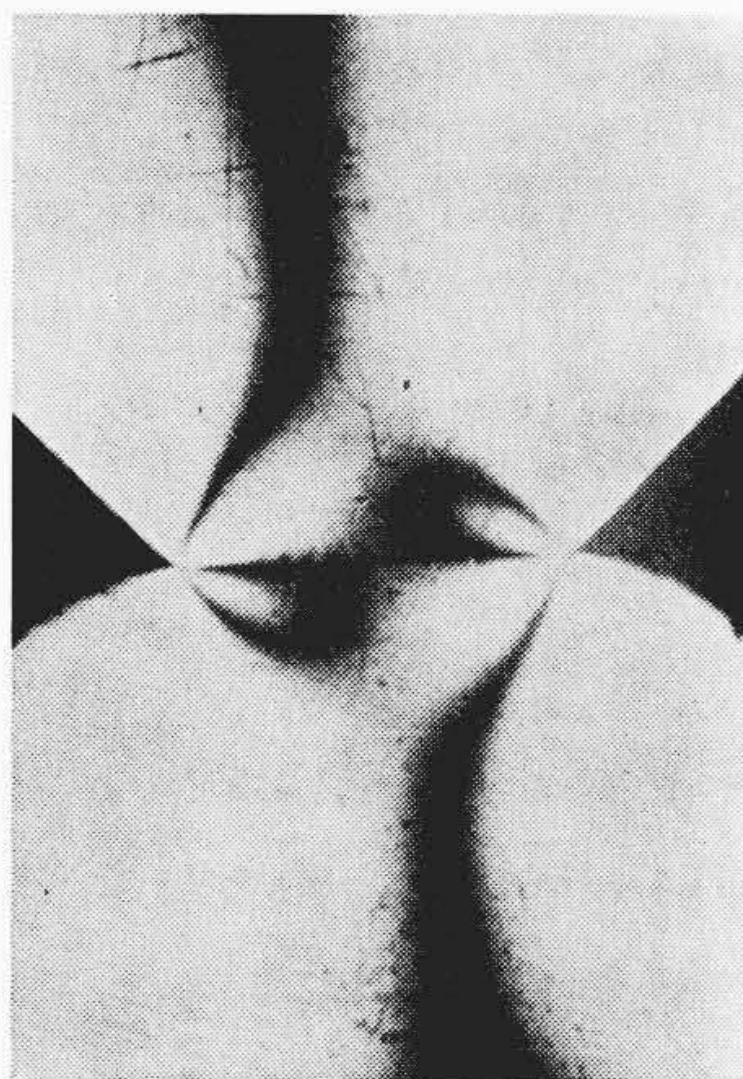


図6(b) 2.5度の等傾線

かかるものとする。

材料としてはエポキシ樹脂およびアクリル樹脂を使用した。このうちエポキシ樹脂は成型用の鋳型に流し込んで薄板を作り、アクリル樹脂は市販の薄板より、それぞれ断面の形状に合わせて模型を切り出した。

模型の面に相当する面はラッピング超仕上げである。さらに本来、物体の接触問題は非常に微妙であるので、その模型製作に際しては精度がよくなるように注意深く加工した。

2.3 実験方法および応力解析法

この実験結果より応力を算出するのに図式積分法の一つであるせん断応力差積分法を用いる⁽¹⁾⁽²⁾。そのため、等色線と等傾線の撮影が必要である。

一般に等傾線を撮影する場合は等色線が妨げとなって前者の像が明確にできないので、ここではカラー・フィルムを使い、露出を少しオーバーにして等色線を消し、等傾線だけが残るようにする。

このカラー・フィルムを使った等傾線の撮影はこれまであまり実用されていないが、かなり有効な方法である。

さらにエポキシ樹脂を用いるかぎり、カラー・フィルムを使用しても不鮮明な個所は残るので、アクリル樹脂の光弾性感度が低く、等色線が非常に出にくいことを利用して等色線に妨げられることなく等傾線を撮影するよう、後者の模型を製作した。

またエポキシ樹脂の模型は切り出し後時間が経つと縁応力がはいり、応力測定にさしつかえるので流し込んだエポキシ樹脂板を焼鈍して鋳造応力を除き、模型を切り出してから縁応力がはいらない間に、なるべく速かに実験に供するのが普通であるが、実験装置の関係上、これが不可能であったため、切り出したのちにふたたび焼鈍

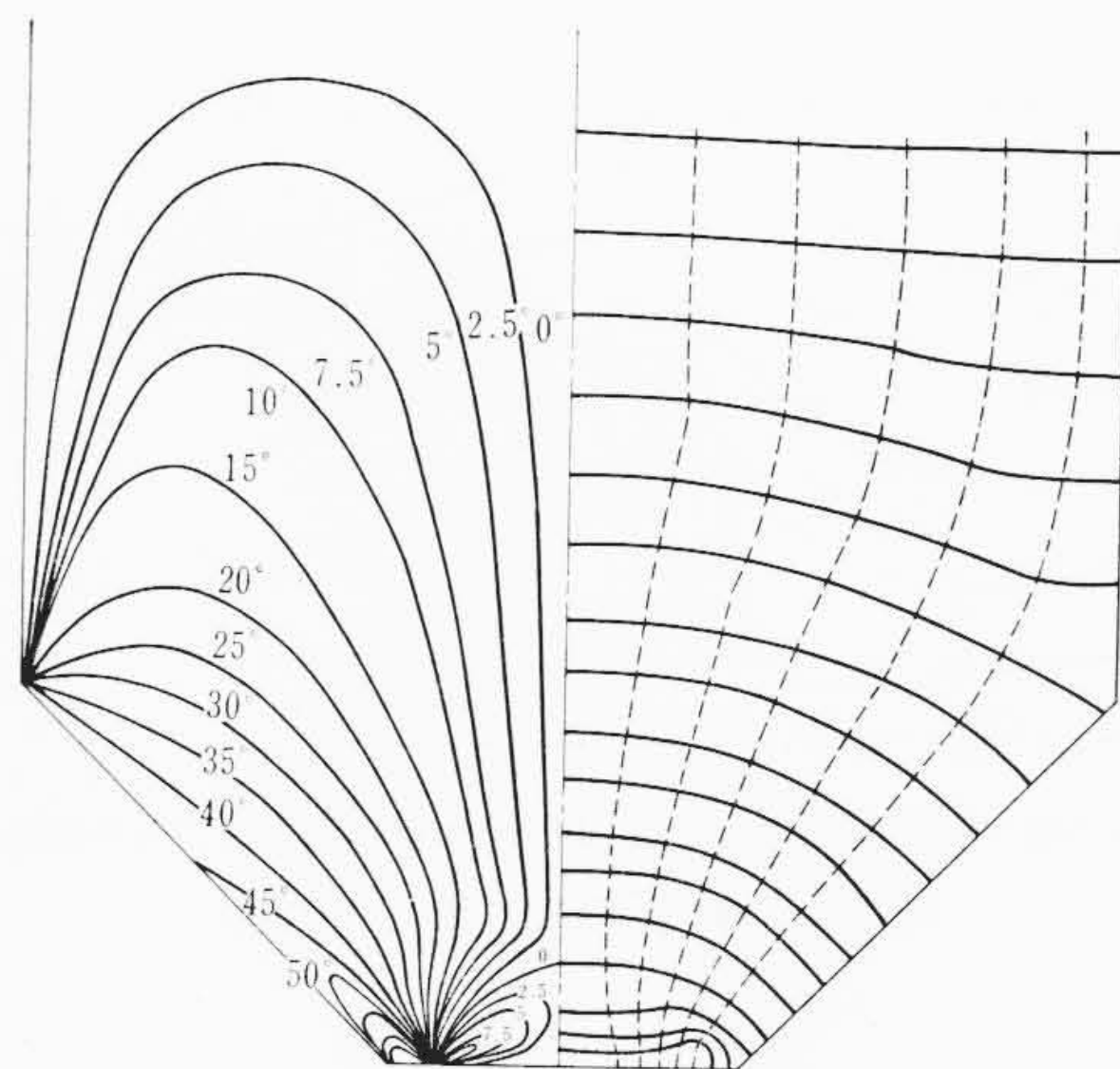


図7 等傾線および主応力線図

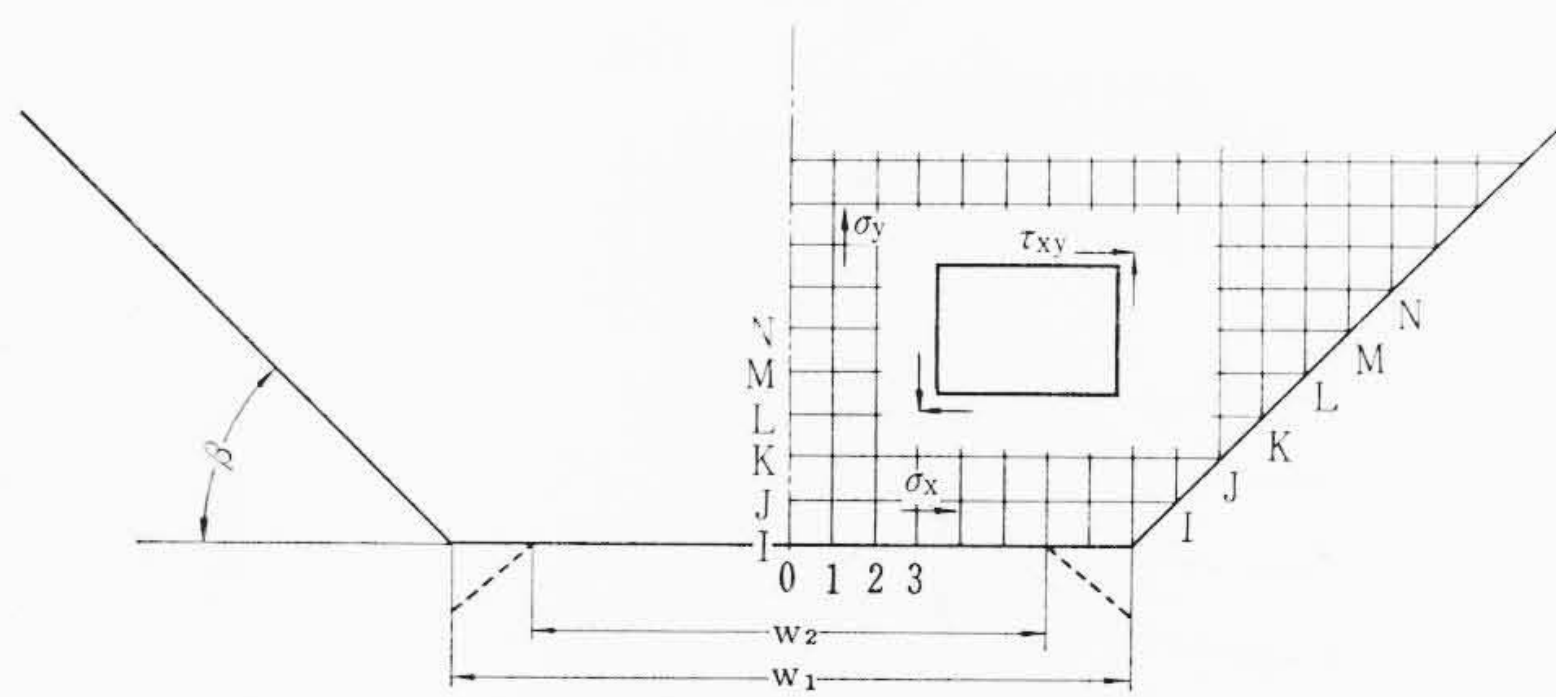

 (シート面幅比とは $w_1:w_2$ を表わす)

図8 各応力の方向および模型上の格子分割

し、その直後に実験をした。

3. 実験結果

3.1 等色線、等傾線写真

図5は等色線の一例である。これは図4に示すように模型のシート面を接触させて荷重をかけ、特にシート面の付近を拡大撮影したものである。この等色線において同一の暗線上にある各位置では主応力差一定ということを意味し、等色線が密になっているところでは応力の集中が起こっていることを示す。この材料はエポキシ樹脂である。

図6に0度および2.5度の等傾線写真を示す。材料はアクリル樹脂である。

図7の左半分はこれらの等傾線を、右半分はこの等傾線図より求めた主応力線を示したものである。

3.2 応力分布

垂直応力、せん断応力については図8に示す矢印の方向を正とする。なおシート面幅比とシート面端部角度(図8の β)応力分布に及ぼす影響を調べるため、シート面は8mmを基準にして10, 12, 14,20mmのものを製作し、それぞれを組み合わせた。また端部角度は45度と30度の二つを組み合わせたものである。

図8に示すように、荷重中心すなわちシート断面の中央に関し左右対称の分布となるので、シート断面の右半面領域内にとった各格子点での応力をとり上げることとし、 β を端部角度とよび、断面N-N、断面K-Kなどはすべてこの図に示すようにとった。特にI-I断面はシート面を表わす。格子の1辺の長さは格子面を投影拡大して解析する関係上0.33mmとする。

図9, 10にはシート面から0.33mmずつ隔った各格子面におけるせん断応力 τ_{xy} と垂直応力 τ_y との分布を示す。シート面I-I上で接触が切れるシート面端部(図9の×印点)では応力は不連続となる。

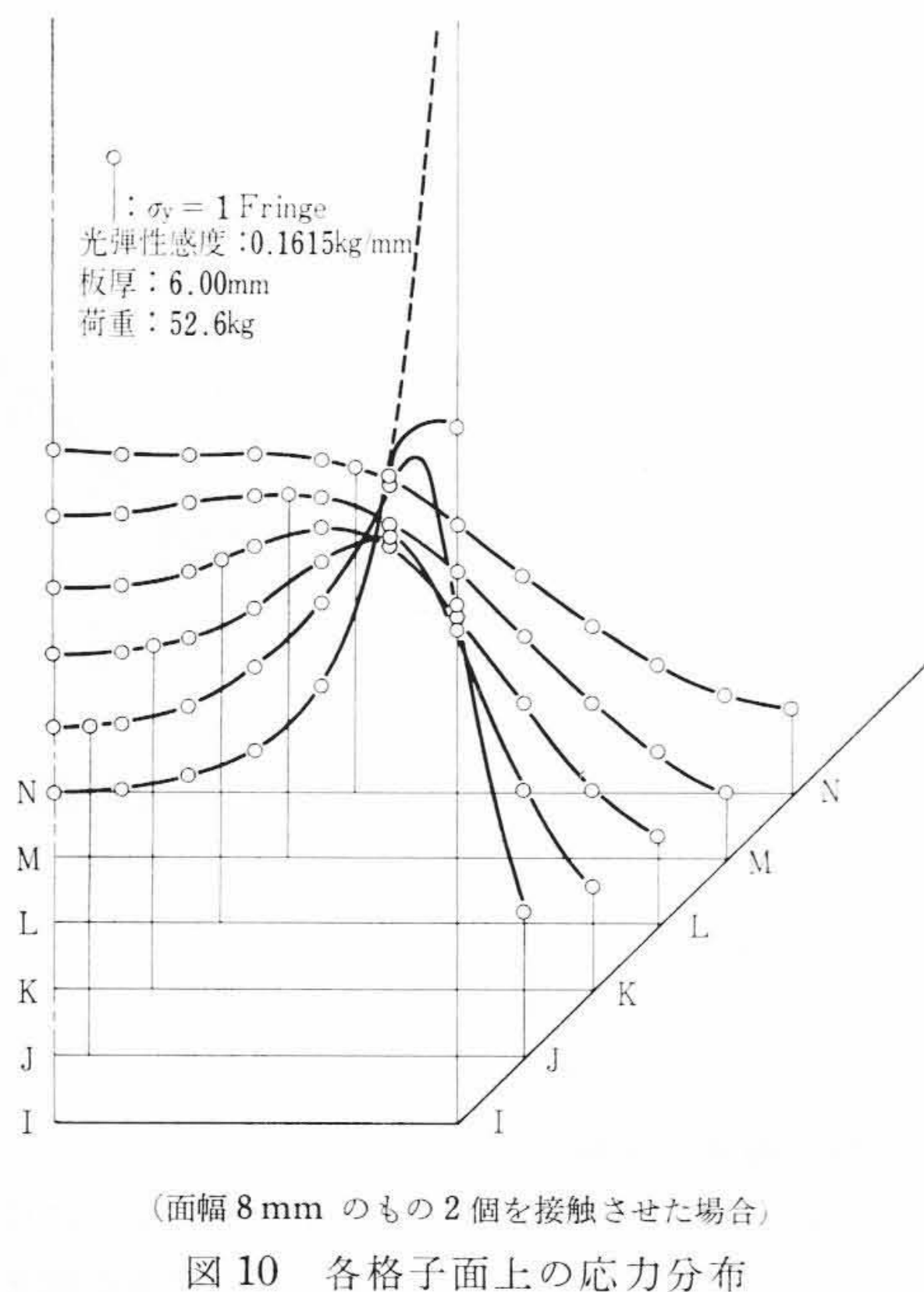
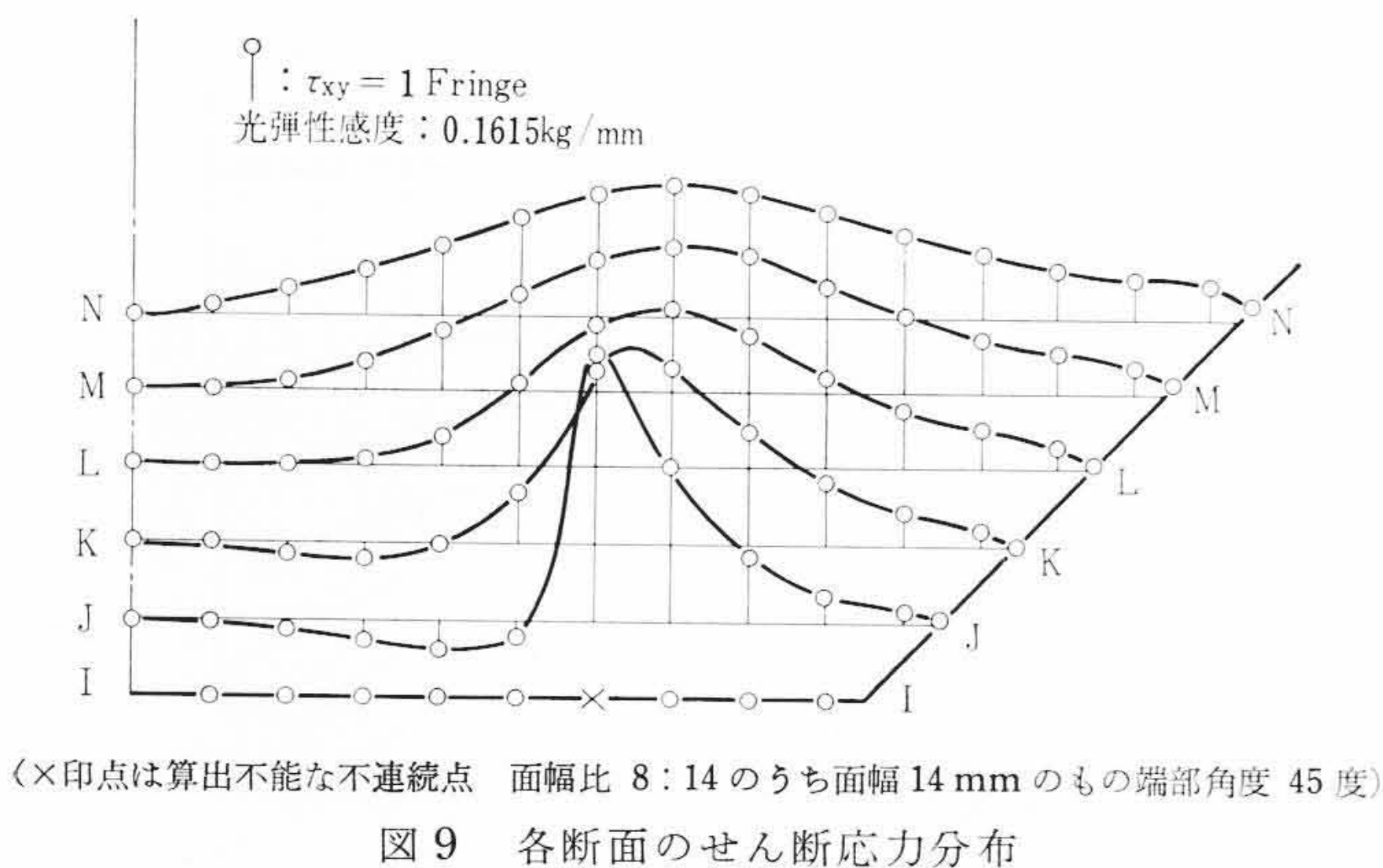


図 11 にはシート面 I-I 上の垂直応力 σ_y の分布を、図 12 には同様にシート面上の垂直応力 σ_x の分布を示してある。なお特にこれらの図では横軸に荷重中心からの距離をとり、縦軸をすべてしま次数 (フリンジ) で示した。

4. 考 察

4.1 等 傾 線

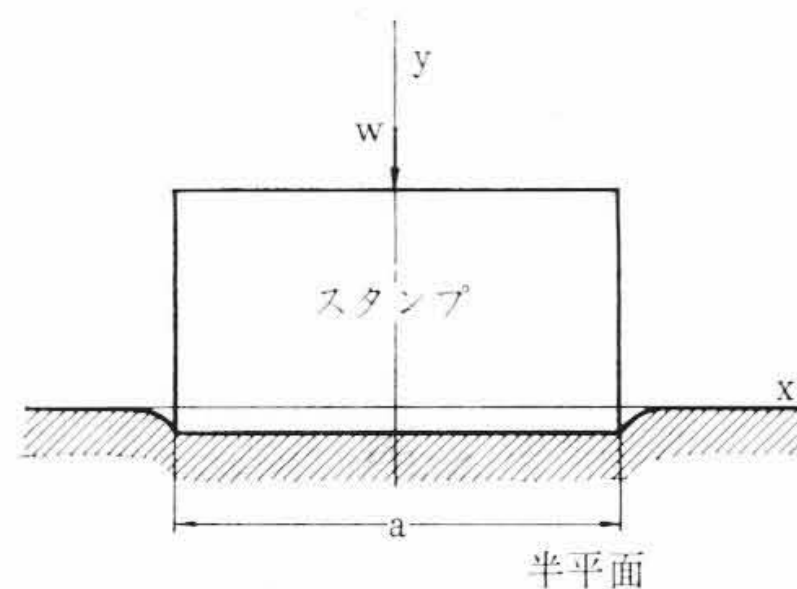
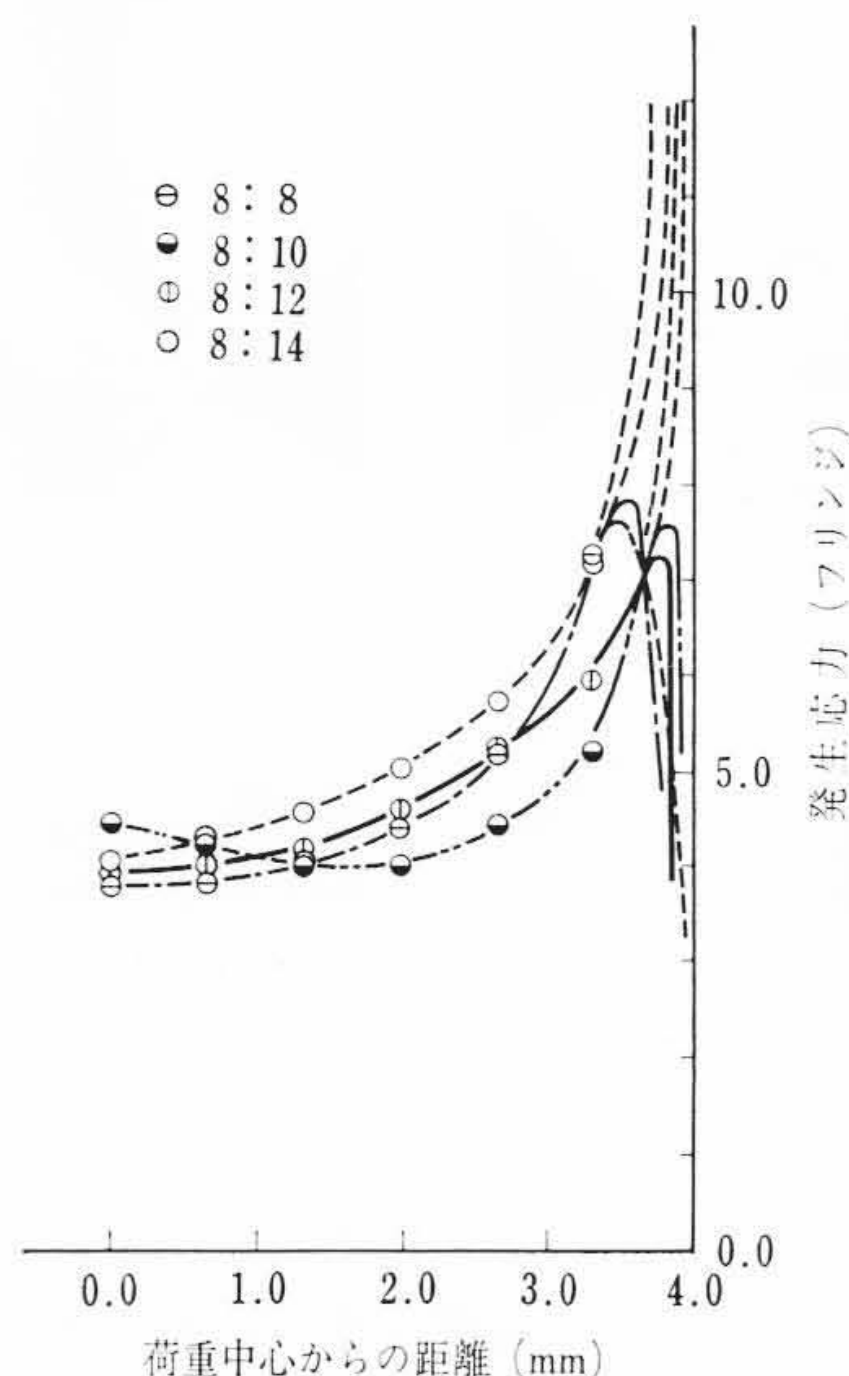
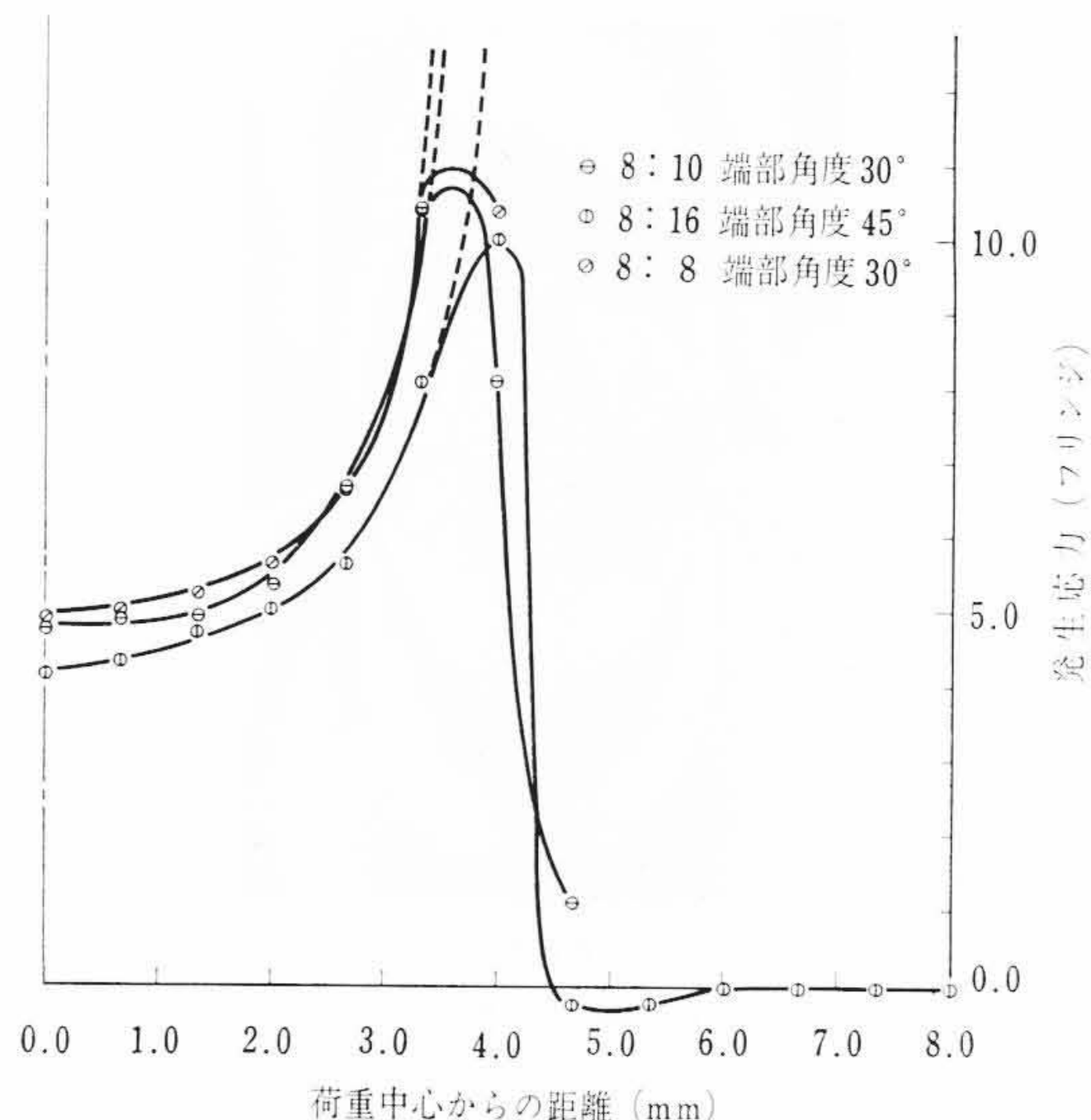
光弾性実験法の最大の欠点は 3. にも記したように等傾線が不鮮明なことである。しかしアクリル樹脂を用いると非常に鮮明な等傾線が得られるので、等色線にエポキシ樹脂を用いれば、両者を総合することが考えられるが、実際には、両者の等傾線の分布は荷重状態の微小な違いにより一致しない。そこで本解析においては、エポキシ樹脂によっては等傾線の判別が困難な部分を明らかにするときのみ、アクリル樹脂による等傾線を参考にするほかない。

4.2 理論値との比較

図 6 (a) よりシート面上の等傾線、すなわち主応力の方向は 0 度または 90 度を示すと判断できる。一方せん断応力 τ_{xy} は次式で求められる⁽¹⁾⁽²⁾。

$$\tau_{xy} = \frac{p-q}{2} \sin 2\theta \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $p-q$: 主 応 力 差
 θ : 主 応 力 方 向

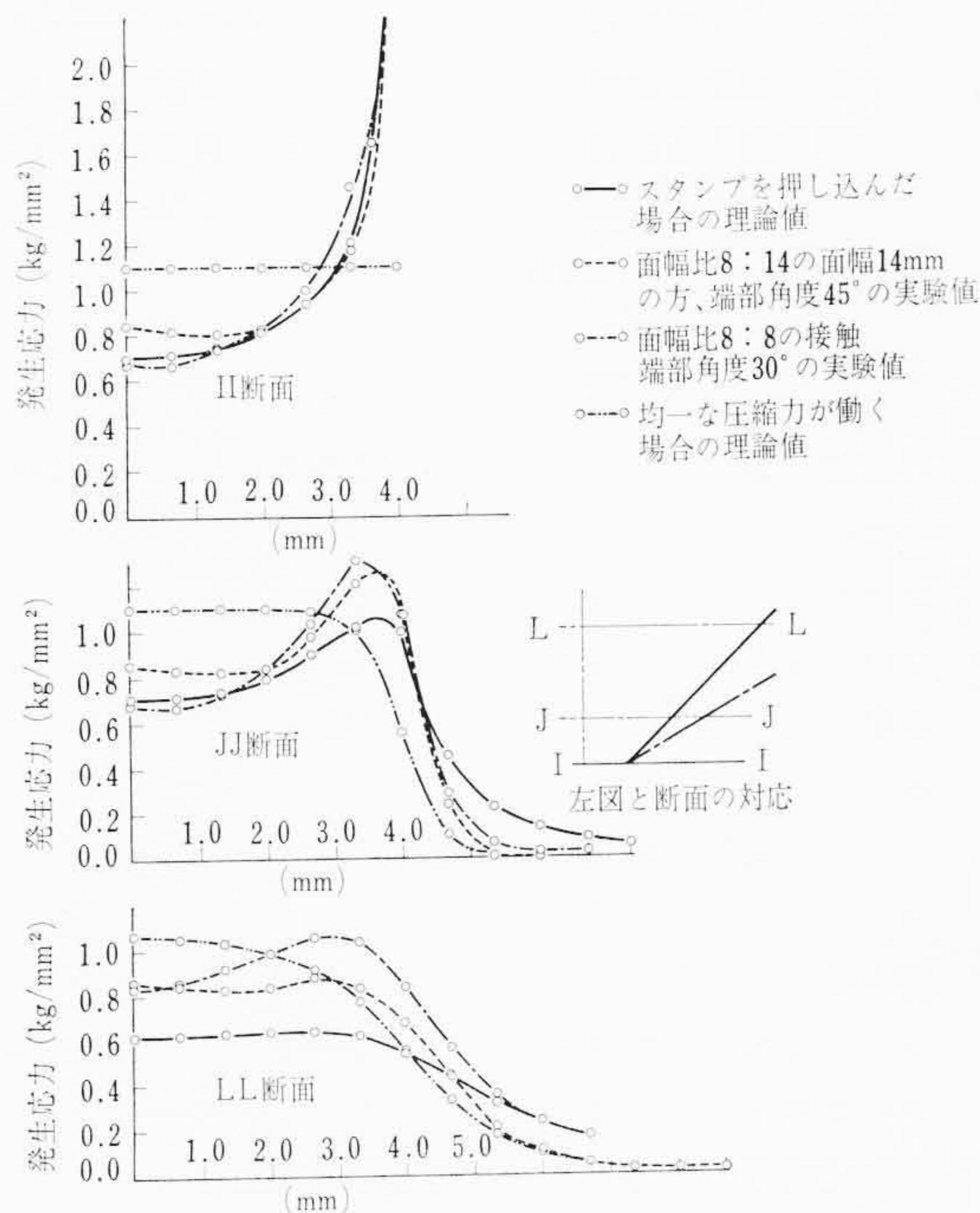


以上のことから、 $(p-q)$ の値がどうであろうとも

$$\tau_{xy} = 0$$

である (図 9 の I-I 上)。

したがって、シート面には摩擦力がないとしてよい。シート面に摩擦力がなくその中心に荷重がかかるとしてスタンプが半平面に押しつけられた場合の理論解は、スタンプの底面を長方形とすると、(3) 式に示すものとなる⁽¹⁾⁽⁴⁾。


 図 14 各格子面上の理論値と実験値の比較 (σ_y のみ)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{W}{\pi} \left\{ \frac{2xyX_2}{X_2^2 + Y_2^2} - \frac{Y_1}{X_1^2 + Y_1^2} \right\} \\ \sigma_y &= \frac{W}{\pi} \left\{ \frac{2xyX_2}{X_2^2 + Y_2^2} + \frac{Y_1}{X_1^2 + Y_1^2} \right\} \\ \tau_{xy} &= \frac{2W}{\pi} \cdot \frac{xyY_2}{X_2^2 + Y_2^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$X_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{D^2 + E^2} + D}$$

$$Y_1 = +\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{D^2 + E^2} - D}$$

$3D^2 - E^2 \geq 0$ ならば

$$\left\{ \begin{aligned} X_2 &= -\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{F^2 + G^2} + F} \\ Y_2 &= +\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{F^2 + G^2} - F} \end{aligned} \right.$$

$3D^2 - E^2 < 0$ ならば

$$X_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{F^2 + G^2} + F}$$

$$Y_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{F^2 + G^2} - F}$$

ここに、 $D = -a^2 + x^2 + y^2$

$E = -2xy$

$F = D^3 - 3DE^2$

$G = E^3 + 3D^2E$

x : 荷重方向に直角 (mm)

y : 荷重方向を負とする (mm)

a : 接 触 面 幅 (mm)

W : 荷 重 (kg/mm)

これを垂直応力 σ_y について図示すれば、図 14 の実線となる。図 14 によると、シート面上においては理論値と実験値がよく一致している。

次にシート面上に均一様な分布圧縮応力が働くと考えると(3)式と同様な記号を用いて(4)式となる⁽⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{W}{2\pi a} \left\{ \frac{(a+x)y}{(a+x)^2 + y^2} - \frac{(a-x)y}{(a-x)^2 + y^2} \right. \\ &\quad \left. - \tan^{-1} \frac{a+x}{y} - \tan^{-1} \frac{a-x}{y} \right\} \\ \sigma_y &= \frac{-W}{2\pi a} \left\{ \frac{(a+x)y}{(a+x)^2 + y^2} + \frac{(a-x)y}{(a-x)^2 + y^2} \right. \\ &\quad \left. + \tan^{-1} \frac{a+x}{y} + \tan^{-1} \frac{a-x}{y} \right\} \\ \tau_{xy} &= \frac{Wy^2}{2\pi a} \left\{ \frac{1}{(a+x)^2 + y^2} - \frac{1}{(a-x)^2 + y^2} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

この中の垂直応力 σ_y の分布は、図 14 の 2 点鎖線で示される。

図 14 にはこれら二つの理論値と実験値とが合わせ示されている。

4.3 誤 差 の 検 討

図 10 の実験値を例にとると、シート面上の垂直応力 σ_y の分布を図上で積分すれば

$$\begin{aligned} \int \sigma_y dx &= 92.408 \text{ (Fringes)} \\ &= 14.924 \text{ kg/mm} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

となる。したがって、平均応力 $\bar{\sigma}_y$ は

$$\bar{\sigma}_y = 1.148 \text{ kg/mm} \dots\dots\dots (6)$$

となり、シート面を押える力 F は

$$F = \bar{\sigma}_y \times (\text{シート面面積}) = 55.10 \text{ kg} \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここにシート面の面積は

シート面幅: 8.00 mm

模型の板厚: 6.00 mm から求められる。

実際には 52.6 kg の荷重をかけたのであるから

誤差 e はパーセントで表わすと、

$$e = \frac{52.6 - 55.1}{52.6} \times 100 = -4.75\% \dots\dots\dots (8)$$

である。同様の考えに基づき、他の場合の誤差も算出したところ、いずれも約 $\pm 5\%$ の範囲であった。

4.4 製品との対比

実際のバルブによる実験においては、弁体と弁座輪とのシート面幅の差が大きいほど流体を閉止する力 F が小さくなるという結果が得られているが、この実験の結果からはシート面幅の差が変化しても発生するシート面の垂直応力の分布には顕著な変化は認められなかった。またシート面の端部角度差の影響も明確にできなかった。その理由としては

この実験では最も理想化した場合を取り上げているためであると考えられる。さらに製品のシート面に近いモデルによる実験にまで進めばこのような点が明らかになるであろう。

またこの種の接触問題の取り扱いにはそれを構成する物体の弾性定数を含んでいないので相似則がなりたつ。

したがって模型と実物の応力関係を示すと⁽¹⁾⁽²⁾

$$\sigma = \sigma_m \cdot \frac{d_m}{d} \cdot \frac{t_m}{t} \cdot \frac{W}{W_m} \dots\dots\dots (9)$$

となる。

ここに、 σ : 実物について求めた応力

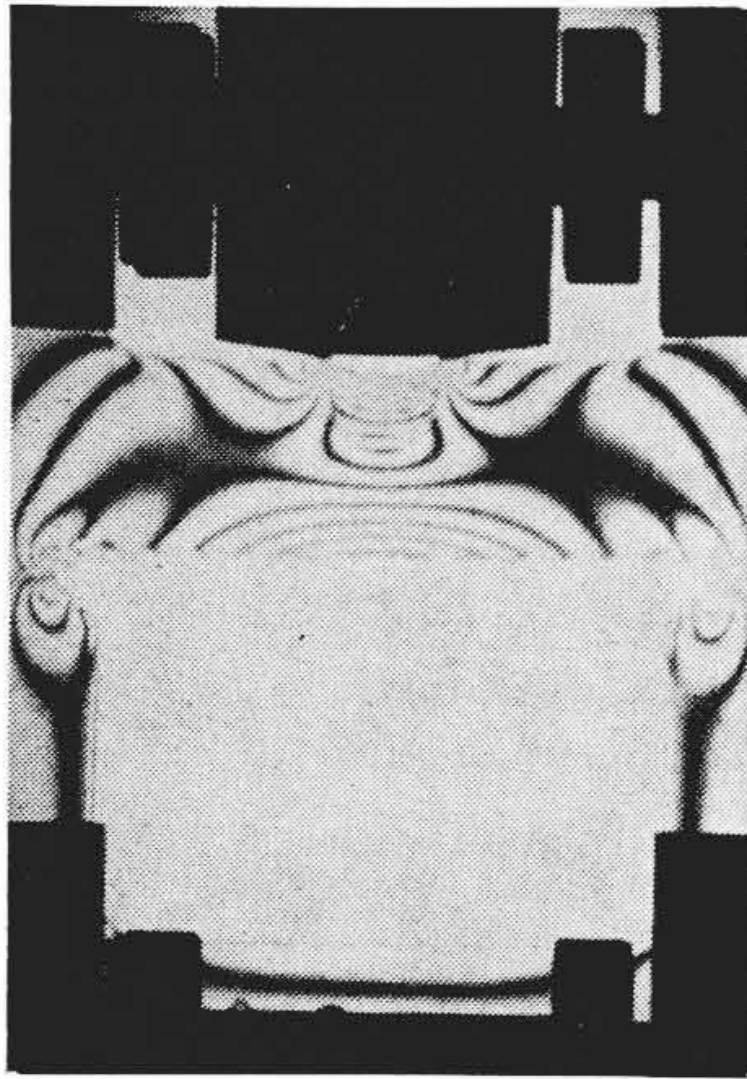
σ_m : 模型により得られた応力

d, d_m : 実物と模型の対応する個所の長さ

t, t_m : 実物と模型の対応する個所の厚さ

W, W_m : 実物と模型に負荷される荷重

ここで注意しなければならないのは(9)式は弾性領域のみで成立する式である。もしこの個所に応力の集中が起こってその部分が塑性域にはいる場合には(9)式は、そのまま実物での応力を表わしていない。このようなときには、模型実験により得られた応力の分布図で代用して実物の応力と思われるものを外そうするしかない。模型に使う材料の塑性域まで考えた実験は、ここで行なった方法より



(内周に応力の集中が見られる)

図15 二次元一体化模型

もはるかに複雑で未解決の問題が多い。

4.5 今後の問題点

面と面との接触に関しては、実際には理想的な均一面接触とみなすことはできない。しかも、実験においては非常に微妙な変化をするため、荷重中心に関して左右対称のしま模様を出すことは困難であった。

図15にはより実際に近い二次元一体化模型による実験を示す。明らかに弁体あるいは弁座輪の内周に応力集中が発生している。図15の模型は断面をとった二次元模型であるので円周方向の拘束を考えに入れることができない。この点をどのように条件にとり入れるか、また模型の板厚の影響をどのように評価するかという点では、この種の二次元模型が、実物をどこまで代表しているかを検討しなければならない。それには今後やはり三次元模型による実験を行なってみる必要がある。幸いなことに三次元接触問題のうちでも軸対称の場合は光弾性実験法により解決することが可能である。

またシート面のアラサの応力分布に及ぼす影響も考慮に入れる必要も生じている。しかしシート面のラッピングが十分でないと、シート面付近の等色線あるいは等傾線のしま模様が乱され、のこぎり状の波形が現われることがわかっているが、これをアラサの影響とみなしてよいかはまだ十分判明していない。

5. 結 言

バルブのシート面について非常に理想化された条件下における実験結果をもとにした検討を要約すると次のとおりである。

- (1) シート面における接触応力が求められた。
- (2) シート面における接触応力分布は、長方形平面底スタンプを半平面へ押し込んだ場合の理論解と非常によく一致する。
- (3) シート面端部に応力集中が認められる。
- (4) シート面の寿命を長くするために、シート面端部に丸味を持たせるのも意味がある。
- (5) シート面幅比と端部角度差は、シート面の応力分布には大きい影響を及ぼさない。
- (6) 三次元模型による実験と実物との対比をいっそう明かにする必要がある。

終わりにのぞみ、終始ご指導を賜った名古屋大学工学部大橋教授、村上助教授、大橋研究室のかたがたに心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) M. M. Frocht: Photoelasticity, 1, 2 (1941, 1948 John Wiley)
- (2) 辻二郎, 西田正孝, 河田幸三: 光弾性実験法 (昭-40, 日刊工業)
- (3) 応力測定技術研究会編: 応力測定法 (昭-36, 朝倉書店)
- (4) L. A. Garlin, 佐藤常三訳: 弾性接触論 (昭-40, 日刊工業)
- (5) 大久保肇: 弾性学, 21 (正-40, 共立出版)

Vol. 50

日立評論

No. 9

目 次

■ 論 文

- ・電子式流量積算計
- ・火力発電所循環水配管系の水撃現象の解析
- ・蒸気タービン電子油圧式ガバナの開発
- ・500 t 積トレーラの構造・性能
- ・東栗子トンネル換気設備
- ・HITAC 8210 システム
- ・日立115形分子量測定装置による二、三の測定例
- ・ソリッドステート速度制御洗濯機
- ・非連続反射板形ビームウェーブガイドを用いる障害物探

知の実験

- ・CPS樹脂成形材料の特性
- 超高層ビル用エレベータ特集
 - ・超高層ビル用高速エレベータ群の計画——霞が関ビルにおけるエレベータリング——
 - ・霞が関ビル納300 m/min ギヤレスエレベータの制御
 - ・高速エレベータ縦振動系の解析
 - ・高速エレベータにおける信頼性
 - ・霞が関ビル納新C-NN形(全透明式)エスカレータ

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
郵便番号 100

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
郵便番号 101
振替口座 東京20018番