

機能性押圧部材による弾性材製品の接触変形解析

— 成型弾性材製品の形状検査技術の研究 —

大塚裕俊・後藤幸臣・重光和夫・船田 昌
機械電子部

Deformation Analysis of a Hyperelastic Material Pressed against Contact Filters

Study on Inspecting the Shapes
of Formed Hyperelastic Material Products

Hirotooshi OHTSUKA, Yukiomi GOTO, Kazuo SHIGEMITU, Masashi FUNADA
Mechanics & Electronics Division

要旨

ゴム等の成型弾性材製品の形状検査技術において、硬質の押圧部材との接触により形成された接触面パターンを利用して製品形状の検査を行うという新しい検査方法について研究した結果、接触面パターンを効率的に得るための機能性押圧部材（接触フィルター）を見出だし、検討の結果この検査技術の有効性が確認出来た。また弾性材製品の全体形状や局所形状と、得られる接触面パターンの相関については数値計算による予測が有効であると同時に、さまざまなパラメータが関係していることがわかった。

1. はじめに

自動化技術で用いられる形状検査技術は、一般機械部品のような剛性が大きくソリッドな製品を対象としており、変形その他の不確実な要素を持っている素材からなる製品について適用することは、必ずしも有効でない場合が多い。

「変形その他不確実な要素を持っているもの」にはいろいろな対象物が該当するが、なかでもゴム等の弾性材製品は、素材自体が柔らかく剛性が小さいため、機械部品等を対象とした既成の自動化技術の適用を阻む不確実性を有しており、自動化のための新しい形状検査技術の開発が必要となっている。

ここでは対象としてゴム状材質の弾性材製品（例：オイルシール）を取りあげ、この材質特性を利用した新しい接触による形状検査技術の研究を行った。またあわせて数値計算による接触時の弾性体の変形予測を実施し、解析的なアプローチの有効性について検討した。

2. 研究内容

従来、弾性材製品の表面形状の検査・計測は、対象となる弾性材製品がその材料特性のため外力により容易に変形し、一般の触針など接触式による計測方法を適用することが難しいことから、レーザ光を用いた非接触の計測方法などが利用されている。しかし必ずしも合理的な

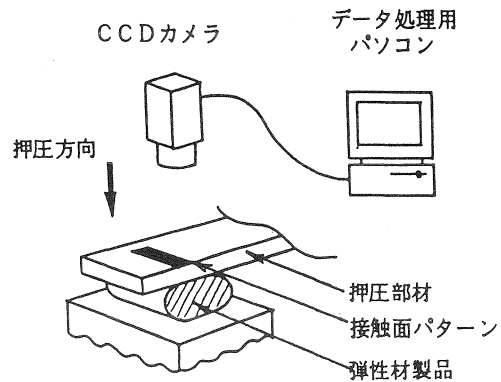


Fig. 1 弾性材製品の形状計測技術の実施例の概略図

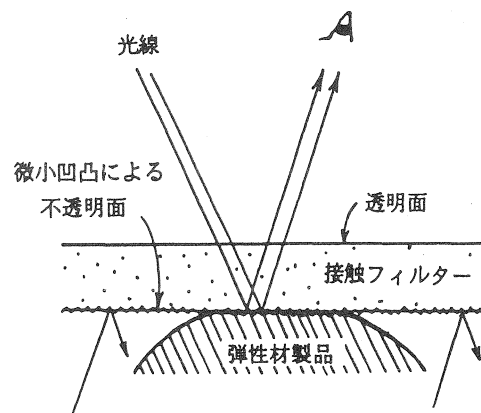


Fig. 2 接触フィルターの原理図

計測方法とは言いがたいので、弾性材製品の材料特性に見合った新しい表面形状の計測方法が求められている。

そこで本研究では、硬質の押圧部材を対象となる弾性材製品に押しつけ、その押圧部材の表面上に形成される弾性材製品との接触部の形状データ（接触面パターン）を利用して変形前の表面形状を評価する、という方法について研究を行った。

この新しい計測技術は、外力付加による大きな変形に対して永久変形を残さず元の形が保持できる材質の材料（例：ゴム材）について適用でき、従来の計測技術に比較して以下の利点を有する。

(1) 3次元データである表面形状データを、単純な原理により接触面上の2次元データとして処理でき、表面形状検査に利用することが出来る。

(2) 押圧部材と被計測対象の相対的接触による方法であり、表面形状を選ぶことなく汎用性が高い。

2.1 「接触フィルター」について

本研究における弾性材製品の形状検査の手法の実施の概略をFig. 1に示す。

ここに示すような形状検査に利用される押圧部材は、例えばガラスのような単純な硬質透明材では接触パターンだけを光学的に取り出しにくいいため、本検査技術の目的に合った機能をもつ新しい押圧部材が必要となる。

「接触フィルター」とは例えば磨りガラスのように、透明材製の押圧部材の片側の面を極微小な凹凸による不透明な面として形成したものであり、Fig. 2に示すような原理により押圧部材として用いたとき弾性材製品と接触した部分のみを鮮明なコントラストの高い像として表示できる機能をもつものである。

接触フィルターの極微小な凹凸による不透明な面を接触面として弾性材製品の表面に押し付けると、その部分に親密に接触が生じ、反対側の透明部分から見ると接触部のみが鮮明な像を呈するようになる。これにより照明光等の環境条件の影響を受けにくい安定した画像データを得ることが出来る。(Fig. 4)

2.2 押圧時の弾性材製品の变形解析

本検査手法によれば、弾性材製品の表面形状（3次元データ）は接触フィルター上に接触面パターンとして2次元データ化されて得られる。このとき弾性材製品の押圧による変形前の表面形状（3次元データ）と材質の物理的特性、押圧部材の押圧変位量、接触面の摩擦係数、そして形成された接触面パターン（2次元データ）等の間には物理的原理に従って特有の相関がある。

つまり弾性材製品の表面形状に設計値（基準の面形状）

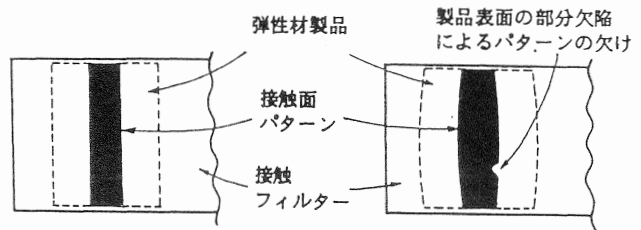


Fig. 3 接触面パターン（円柱形状の場合）

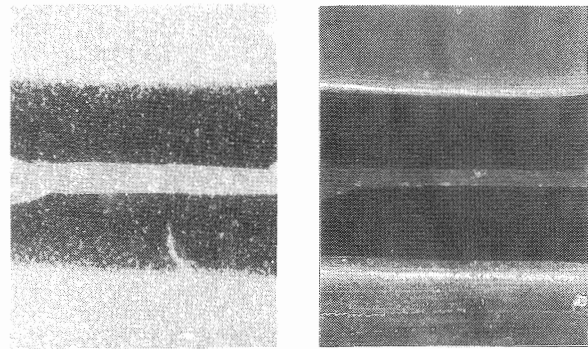


Fig. 4 接触パターン部の例（オイルシール）
（左：接触フィルター 右：板ガラス）

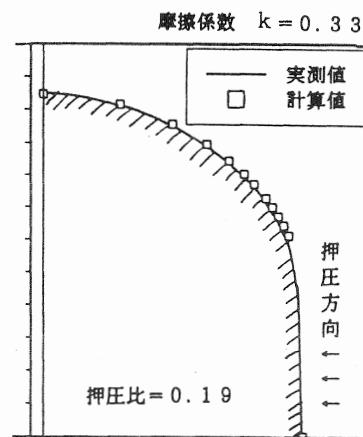


Fig. 5 弾性材製品（円形断面）の押圧時の変形（1/4モデル）

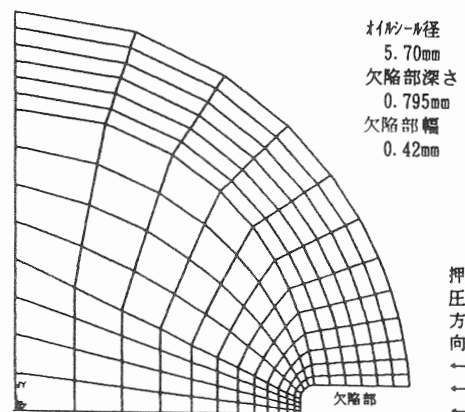


Fig. 6 断面部の有限要素法メッシュ

からのずれや歪みがあれば、それは接触フィルター表面上に形成される接触面パターンのずれや歪みとして反映されるから、接触面パターンの形状を調べれば、もとの弾性材製品の表面形状を評価することができる。これにより全体的な形状欠陥はもちろん、弾性材製品の表面の欠肉や傷などの局所的な欠陥についても同様に評価することが可能となる。

例として円柱形状を有するゴム状の弾性材製品を用いて、接触フィルターによる表面形状の検査を行った場合の例をFig.3に示す。その表面形状が正しい基準の面形状をもつ場合には、接触面パターンの形状は押圧変位が小さい範囲ではFig.3の左側に示すように近似的な長方形となる。これに対し押圧変位が同じで製品の表面形状に不正があり、若干中央部の径が膨らんだ形状であれば、概略的にFig.3の右側に示すような接触面パターンが得られる。また弾性材製品の表面上の欠肉や傷など局所的な欠陥も図のように局所的な接触面パターンの不正な変化として評価することが可能となる。

前記の押圧と接触面パターンの相関関係は実験的に求めることができるが、有限要素法を用いて解析的に数値計算により求めることも可能である。接触面パターンの理論的な解析アプローチを行うことで、接触フィルターを用いた形状検査技術をより一般的な手法とするための端緒とすることができる。また弾性材製品表面の欠陥パターンに対する接触面パターンの理論的なデータベースの構築等が可能となる。

以下に、代表的なゴム状の弾性材製品であるオイルシールに見られるような、単純な円形断面をもつ形状を例として取りあげ、材料を超弾性体としてモデル化し、上記の接触フィルターによる形状検査を行ったケースについて、数値計算によって得られた計算結果や実験値との比較などについて述べる。

なお超弾性体のモデル化にはひずみエネルギー関数モデルを用い、その係数は測定により求めた。¹⁾ その詳細については付録Aに示す。

3. 結果

3.1 数値計算結果(2次元モデル)

弾性材製品の断面を円形と仮定し、2次元モデルによる数値計算結果と実験結果の比較を行った。これは押圧部材(接触フィルター)により、円形断面に対し押圧量 ΔD を与えた場合をモデル化し、その変形時の全体形状等について、数値計算結果と実験結果の比較について示したものである。(Fig.5)

前述したように接触フィルターを用いた検査技術によれば、弾性材製品の表面上の欠肉や傷など局所的な欠陥

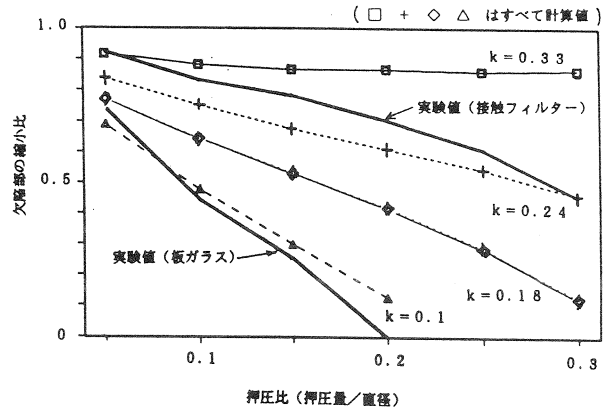


Fig.7 欠陥部の接触パターンの変化

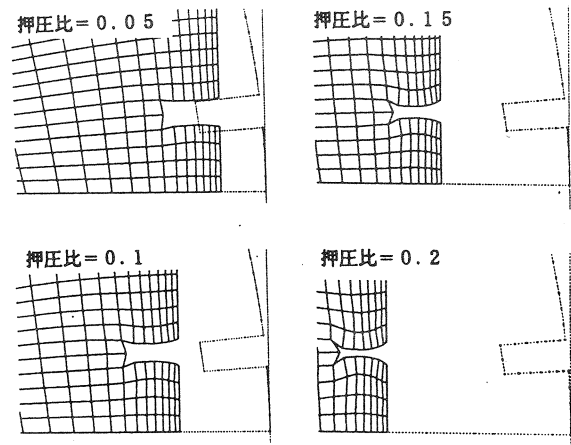


Fig.8 押圧比の変化による欠陥部の形状変化

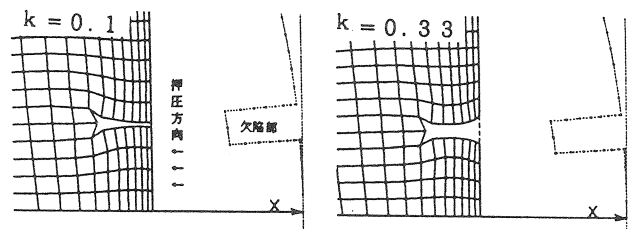


Fig.9 摩擦係数kの変化による欠陥部の押圧時の形状変化

も接触面パターンの不正な局所的変化として評価・検査することができる。

また製品表面上の欠肉や傷など局所的な欠陥が、接触フィルター上にどのような接触面パターンとしてあらわれるのかを2次元の接触フィルターによる押圧問題としてモデル化し、数値計算により評価することを試みた。その結果について以下に示す。(Fig.6~Fig.9)

全体形状の変化については数値計算の結果と実験値は

よく合致している。また局部欠陥については、押圧比（押圧量／直径）の変化による開口部（キズ口）の縮小変化は計算と実験とで傾向的に合致している。接触フィルターは表面にざらつき（凹凸）があるため摩擦係数は普通のガラス板よりも大きくなる。いずれについてもひずみエネルギー関数モデルによる数値計算結果が今回の弾性材料について有効であることがわかる。

またこの結果、欠陥部の接触パターンへの投影には、材質、摩擦係数、欠陥部の形状、欠陥部の位置、押圧比など各種のパラメータが関係していることがわかる。とりわけ摩擦係数については欠陥部の開口部（キズ口）のパターンの変化に大きく関係するため重要である。これら各種パラメータを変化させた計算結果の一部を図に示す。

接触フィルターの性能に関しては、表面の微小凹凸が小さい方が得られるパターンの解像度の点からは有利であるが、摩擦係数が小さくなり表面欠陥のパターンが実際より縮小するなどの可能性が生ずるため、検査の点からは必ずしも有利でないことがわかる。

3.2 数値計算結果（3次元モデル）

次に同様にして、弾性材製品を軸方向に長さをもつ3次元の円柱形状としてモデル化し、単純な形の表面欠陥が存在する場合の接触パターンについての計算結果と実験結果の比較についてFig.10以下に示す。

これによると、計算結果は押圧比が小さいとき変形による欠陥部の変化の計算結果は実測値より大きくなる傾向にある。押圧比が大きくなると計算結果は実測値に接近している。今後他の形状モデルでの検討がさらに必要であろう。今回の数値計算結果の一部については付録Bに示す。

4. まとめ

(1)弾性材製品の材料特性を利用して、硬質の押圧部材をその表面に押し付け、その押圧部材の表面上に形成される接触部の形状データ（接触面パターン）を利用して弾性材製品の表面形状を検査するという新しい検査技術について研究を行った。これにより3次元の表面形状データを単純な原理と簡単な設備により接触面上の2次元データとして取り込み、表面形状の評価・検査を行うことが出来る有効な検査方法を見出した。

(2)上記の接触面パターンを効率的に得るための有効な機能材として、「接触フィルター」の利用を考案した。

「接触フィルター」は単純な原理によって上記の新しい弾性材製品の形状検査方法を効率的に実現でき、また周囲の照明光等の条件によらず、常に安定したコントラスト

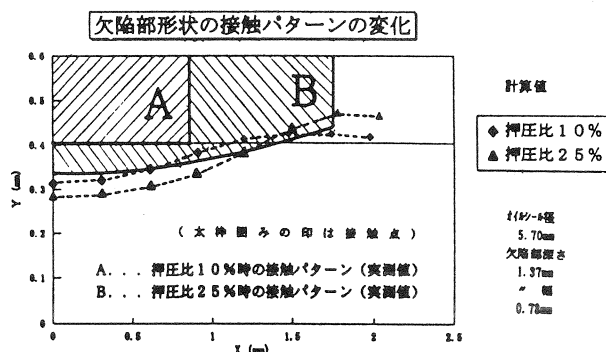


Fig.10 欠陥部の接触パターンの変化 (3次元モデル)

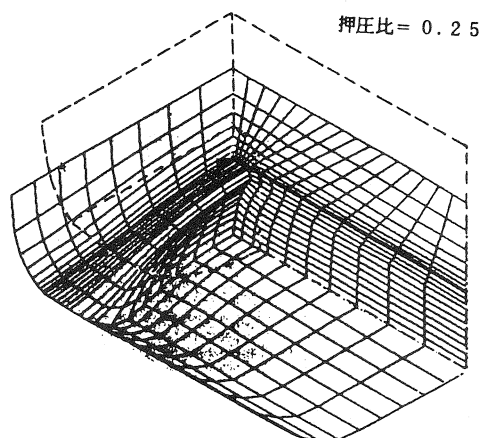


Fig.11 弾性材製品モデルの変形図 (3次元モデル; 欠陥部有)

の高い接触面パターンを得ることができる、などの点で非常に有利である。

(3)弾性材製品の変形シミュレーションを行った結果、数値計算の結果と実験値は2次元モデルではよく合致しており、数値計算の有効性が確かめられた。3次元モデルでも数値計算は変形と接触パターンの予測に有効である。

(4)欠陥部の接触パターンへの投影には、材質、摩擦係数、欠陥部の形状、欠陥部の位置、押圧比など各種のパラメータが関係する。とりわけ摩擦係数については欠陥部の開口部（キズ口）のパターンの変化に大きく関係する。

本研究は地域人材不足対策技術開発事業での要素技術研究の一環として行われた。

また本研究に一部利用したCAD/CAM/CAEシステムは、日本自転車振興会の補助を受けて設置したものである。

文献

- 1) R. S. Rivlin, "The Elasticity of Rubber", Rubber Chemistry and Technology, Vol. 65, 1993

(付録A)

ひずみエネルギー密度関数について

ひずみもしくは変位テンソルによるスカラー量として、弾性ポテンシャル関数(ひずみエネルギー密度関数)Wを定義できる材料を超弾性材(HYPERELASTIC)と呼び、一般的にWのひずみ成分についての勾配がその応力成分となる。

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (1)$$

S_{ij} . . . 応力テンソル
 W . . . ひずみエネルギー密度関数
 E_{ij} . . . ひずみテンソル

なお変位テンソル C_{ij} は変形勾配テンソル f_{ij} の積で表される。

$$C_{ij} = f_{ki} f_{kj} = f^T f$$

ここで

$$f_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \quad (2)$$

X_i . . . 質点の変形前の位置(i方向)
 x_i . . . " 変形後の位置(")

C_{ij} による3つのスカラー量(基礎ひずみ変数)を以下のように仮定する。

$$I_1 = C_{ii} = \text{tr} C \quad \dots \text{対角成分和} \quad (3)$$

$$I_2 = ((\text{tr} C)^2 - \text{tr} C^2) / 2 \quad (4)$$

$$I_3 = \det C_{ij} \quad \dots \text{行列式値} \quad (5)$$

これによって

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (6)$$

なお I_3 は物体の変形前と変形後の体積比の二乗をあらわし、非圧縮性が仮定でき変形前後で体積変化がない場合、 $I_3 = 1$ である。以下 $I_3 = 1$ を仮定する。(このときポアソン比=0.5)

ゴムなどの非圧縮性の超弾性体については、上記 I_1, I_2 によるひずみエネルギー密度関数Wとして下記の3次式が用いられる。

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (7)$$

W . . . ひずみエネルギー密度関数
 $C_{10}, C_{01}, C_{11}, C_{20}, C_{30}$. . . 材料定数
 (実験より求める)

上記(7)式の高次項を省いた簡便な形も以下のように用いられる。

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (8)$$

MOONY-RIVLIN モデル

$$W = C_{10}(I_1 - 3) \quad (9)$$

NEO-HOOKEAN モデル

次に対象とする材料について、単軸引張り試験によって材料定数の測定を行う場合について述べる。

すなわち(7)式が次的に1次元となり、もっとも単純な条件下で各定数を決定する。

この場合、引張比(引張長さ/初期長さ)を λ とすると他の2方向は非圧縮性仮定により $\lambda^{-1/2}$ となり、(3)(4)式より I_1, I_2 は

$$I_1 = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda}, \quad I_2 = \frac{1}{\lambda^2} + 2\lambda \quad (10)$$

(1)式は1次元では応力 σ 、ひずみ ϵ によって

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \epsilon} \quad (11)$$

となる。これを引張力T、初期断面積A、 λ などによってあらわすと $\epsilon = \lambda - 1$ より

$$\sigma = \frac{T}{A} = \frac{\partial W}{\partial \lambda} \quad (12)$$

よって(10)式を(7)(8)(9)などに代入し、 λ で微分すれば $\lambda - \sigma$ 関係式が得られる。

本研究では2定数および3定数モデルを用いて、単軸引張り試験により得られる特性曲線を近似した。

各々の関係式は以下のとおりとなる。

(a) C_{10}, C_{01} (MOONY-RIVLINモデル)

$$\sigma = C_{10}(2\lambda - 2\lambda^{-2}) + C_{01}(2 - 2\lambda^{-3}) \quad (13)$$

(b) C_{10}, C_{01}, C_{20} (3変数モデル)

$$\sigma = C_{10}(2\lambda - 2\lambda^{-2}) + C_{01}(2 - 2\lambda^{-3}) + C_{20}(4\lambda^3 - 12\lambda + 12\lambda^{-2} - 8\lambda^{-3} + 4) \quad (14)$$

以上の各々についての係数を求めた結果、単軸引張り試験による実験結果と近似式とを比較したものをFig. A-1に示す。

(付録B)

3次元モデルの数値計算結果の例

上記についてFig. B-1に示す。

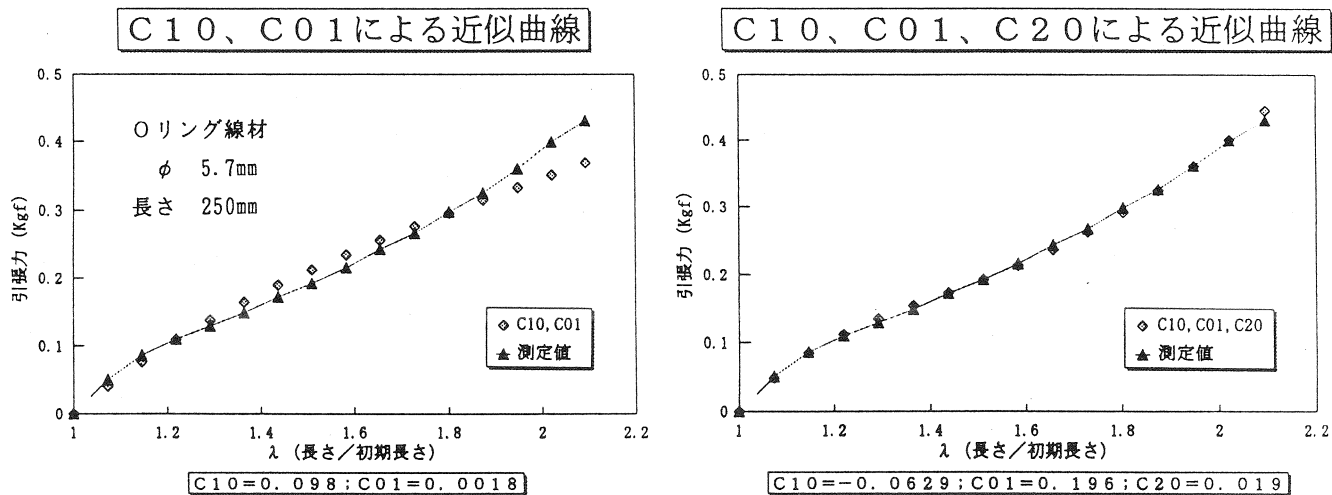


Fig. A-1 ひずみエネルギー関数による近似曲線

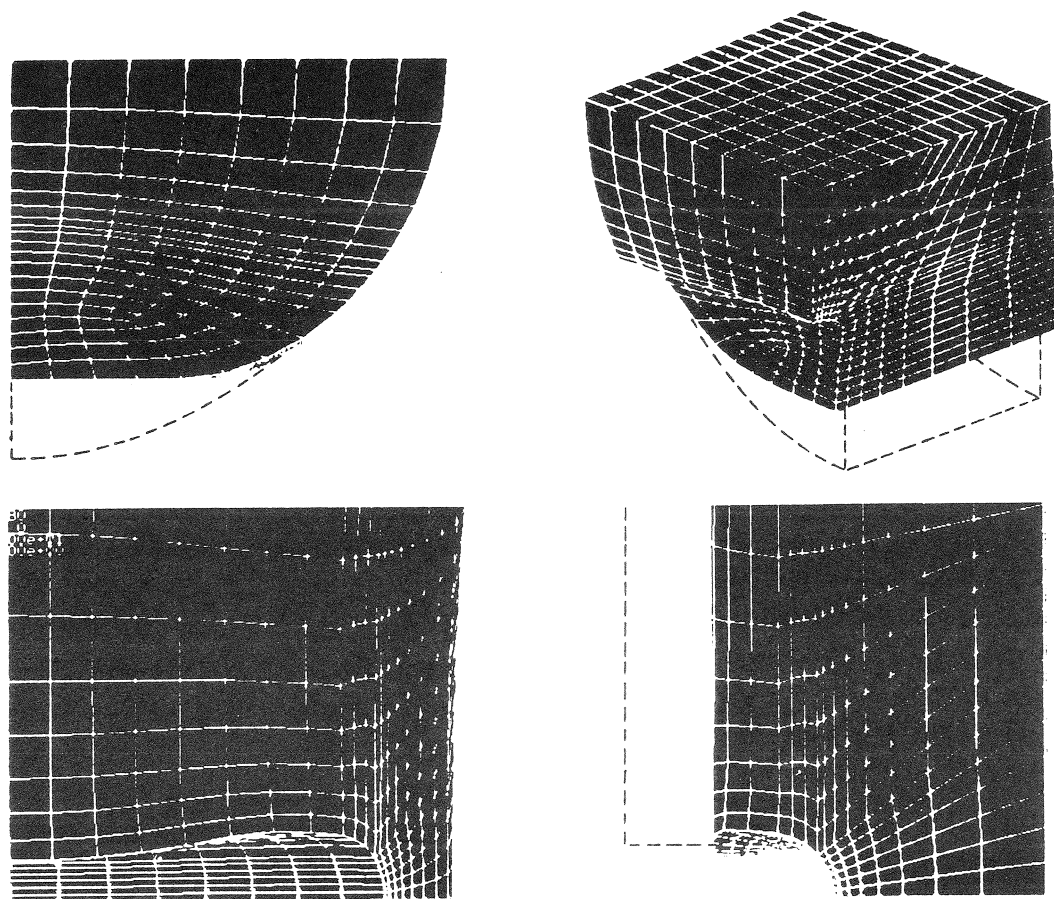


Fig. B-1 弾性体変形の数値計算結果 (3次元) 押圧比 20%