

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01744

研究課題名（和文）二軸応力試験による熱可塑性ポリエーテルエステルエラストマの変形特性の測定と定式

研究課題名（英文）Measurement and formulation of the deformation behavior of thermoplastic polyetherester elastomer using biaxial stress tests

研究代表者

桑原 利彦（Kuwabara, Toshihiko）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・卓越教授

研究者番号：60195609

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：樹脂円管の二軸バルジ試験機を製作し、ポリエチレン円管材に対して、二軸応力試験を実施した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。(1) ポリエチレン円管試験片に対し、任意の線形応力経路における  $\sigma_1$  -  $\sigma_2$  曲線の測定に成功した。(2) 本供試材は、 $\sigma_1$  および  $\sigma_2$  方向の単軸引張ss曲線はほぼ一致したが、二軸引張応力状態では強い異方性を示した。例えば  $\sigma_1/\sigma_2 = 1:1$  では、同一の応力値に対して、 $\sigma_1$  は  $\sigma_2$  の2～3倍大きくなった。(3) 樹脂材料の二軸応力下における変形挙動を定量的に評価する方法として、等仕事面の作成が有効である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震国である日本では、樹脂円管の耐震性や可撓性に関する研究は多くあるが、単軸引張/圧縮応力試験のように単純応力状態における試験に限定されている。一方、土中に埋設されたPE管が地震時に受ける応力状態は軸力と同時に内圧も受け、多軸応力状態であるが、そのような多軸応力状態における変形挙動を数値シミュレーションする場合に必要な材料モデル構築に関する研究は極めて少ない。樹脂円管の安全性評価指標の高度化のためには、二軸応力試験方法の確立と高精度な材料モデルの構築が急務であり、本研究成果はそれらの基礎研究として役に立つ。

研究成果の概要（英文）：A material testing apparatus for measuring the biaxial deformation behavior of a polymer tube is developed to quantitatively evaluate a deformation behavior of polymeric materials. The testing apparatus can apply an axial force and internal pressure to a tubular specimen. Polyethylene tubes with an outer diameter of 17 mm and a thickness of 2 mm are used as a test specimen, and are subjected to linear stress paths with stress ratios of  $\sigma_1/\sigma_2$ ;  $\sigma_1/\sigma_2 = 1:0, 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4, \text{ and } 0:1$ , where  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  are the axial and circumferential stress components applied to the center of the bulging specimen, respectively. Biaxial stress-strain curves are successfully measured for every linear stress path at a nearly constant logarithmic strain rate of  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . The maximum equivalent strain is achieved up to 0.71 for a specimen with a stress path of  $\sigma_1/\sigma_2 = 2:1$ . The contours of equal work plotted in the principal stress space show significant anisotropy of the test material.

研究分野：塑性力学

キーワード：ポリエチレン 二軸応力 材料試験 異方性 等仕事面 破断限界

## 1. 研究開始当初の背景

近年、自動車・情報家電・医療機器などの高付加価値製品において樹脂材料の役割が増加し、強度を保障するような重要部品にまで適用が試みられるようになってきた。中でも自動車分野においては燃費向上のため車体の軽量化が喫緊の課題であり、金属製品の樹脂化が進められている。自動車部品においては、多軸応力状態での耐衝撃性・高寿命が設計段階で求められ、破壊して機能を完全に喪失するまでの特性を予測し保障する技術の確立が渴望されている。すなわち、衝突安全等に係る重要保安部品に関して安全設計を可能にするためには、材料特性の高精度な二軸応力試験技術と変形シミュレーション技術の開発が急務である。

### 【国内・国外の研究動向及び位置づけ】

樹脂円管の多様な力学特性を計測・取得するためには、1軸引張試験 (JIS K 7162:1994) では不十分である。二軸応力試験法を用いて、実際使用時の様々な応力状態下での応力-ひずみ曲線の測定と破断限界の定式化が必須である (Kawabata and Kawai, 1977; 河村ほか, 2000)。金属板材については、十字形試験片を用いた二軸引張試験方法が1970年代から各国で研究され50) (上付の文献番号は研究業績欄の文献番号に対応)、2014年に国際規格化 (ISO 16842) された。また二軸引張試験機も市販されるに至っている。しかし寸法や荷重容量が過大であり樹脂円管の試験には適していない。

一方、一般樹脂材料の二軸応力試験法に関する研究としては、液圧バルジ試験 (Hamdi, 2006)、発泡体を対象にした二軸圧縮試験 (Kossa, 2015)、十字形試験片の形状最適化 (神馬・高橋, 2013; Lamkanfi ら, 2015)、中実丸棒材の引張-ねじり試験 (Guillon ら, 2014) に関する研究報告がある。しかし二軸応力状態における応力-ひずみ曲線を実測した研究報告はない。牧野内ら (1970) は、ポリカーボネート製の円管試験片に軸力と内圧を負荷する二軸応力試験を行っているが、測定範囲は降伏曲面に限定されており、大ひずみ範囲における応力-ひずみ曲線を実測した研究はない。

以上要するに、二軸応力状態における樹脂材料の変形特性や破断限界を解明した研究はない。樹脂材料の使用を自動車分野に拡大させるためには、樹脂円管用二軸材料試験機の開発と成形シミュレーションの高精度化に不可欠な材料モデルの定式が必須である。

## 2. 研究の目的

樹脂材料の多軸応力下での変形特性を解明し、自動車衝突安全部品のような設計難易度の高い製品にまで樹脂材料を適用可能にするための基盤技術を確立する。具体的には以下の3項目を研究目的とする：

- (1) 二軸応力下における樹脂材料の応力-ひずみ曲線を測定可能なサーボ制御二軸応力試験機の開発
- (2) (1)の試験機による測定結果より、高精度な材料モデルを定式化する。かつ破断限界を解明する。
- (3) (2)で作成された材料モデルを有限要素解析ソフトウェアへ組み込み、実部品の成形シミュレーションを行い、材料モデルの妥当性を実験的に立証する。

## 3. 研究の方法

本研究で設計・製作した二軸バルジ試験機の原理図を Fig. 1 に示す。以下、管軸方向を $\phi$ 、円周方向を $\theta$ と記す。両端を把持した円管試験片に軸力と内圧を負荷することにより、試験片中央部に $\phi$ 方向真応力 $\sigma_\phi$ および $\theta$ 方向真応力 $\sigma_\theta$ を負荷することができる。本章では、円管試験片に発生するひずみおよび応力の測定方法を説明する。

**アクチュエーター** 対向する電動シリンダによって軸力 $T$ を、プランジャポンプにより内圧 $P$ を負荷する。軸力はロードセルにより、内圧は水圧計により測定する。作動流体として水を利用した。ポンプはプランジャを二個搭載した、ダブルプランジャ方式であり、 $P \leq 20$  MPa の圧力範囲であれば、吐出圧力に関係なく指定した量の無脈流を吐出可能である。

**ひずみと $\phi$ 方向曲率半径の計測方法** 円管試験片の変形の測定原理図を Fig. 2 に示す。試験機中央に図に示すフレームを固定し、それにエリアカメラ (KEYENCE 製 CV-HV035M) 1個、 $\theta$ 方向に $120^\circ$ ごとに配置した反射型レーザ変位計3個 (KEYENCE 製 IL-065)、対向する位置に透過型レーザ変位計 (KEYENCE 製 IG-028) 1組を取り付けた。透過型レーザ変位計は帯状にレーザを照射し、影部の長さを測定する。透過型レーザ変位計は試験機に取り付けられた試験片の初期外径を直接測定するために用いる。試験片外径が増大すると、やがて透過型レーザ変位計の測定領域を超える。このため、反射型レーザ変位計を併用して、試験中の試験片外径 $D$ を測定する。

試験片外表面の $\theta$ 方向対数ひずみ $\varepsilon_\theta^0$ の測定方法は以下の通りである。まず試験開始前に、透過型レーザ変位計により円管試験片の初期外径 $D_0$ を測定する。さらに3つの反射型レーザ変位計

により、試験片外表面の半径方向における変位量を測定し、その平均値から試験片中央の外径変化量 $\Delta D$ を決定する。このとき $\varepsilon_{\theta}^s$ は式(1)より測定できる。

$$\varepsilon_{\theta}^s = \ln\left(1 + \frac{\Delta D}{D_0}\right) \quad (1)$$

本試験機では $D \leq 30$  mmの範囲で計測可能である。

試験中の試験片中央の肉厚を $t$ 、初期肉厚を $t_0$ とすると( $t$ の測定方法については2.3節参照)、肉厚中心における $\theta$ 方向対数ひずみ $\varepsilon_{\theta}^c$ は、次式より得られる。

$$\varepsilon_{\theta}^c = \ln \frac{D_0 + \Delta D - t}{D_0 - t_0} \quad (2)$$

試験片外表面の $\phi$ 方向曲率半径 $R_{\phi}$ の測定方法は以下の通りである。Fig. 3に示すように、試験片表面に初期間隔 $S_0 = 5$  mmで白黒の帯を描き、それらの帯の境界線と試験片の外径輪郭線との交点a, b, cの座標をエリアカメラにより追跡・計測した(点bは試験片中心と一致する)。このとき $R_{\phi}$ は式(3)から決定される。

$$R_{\phi} = \frac{h^2 + s^2}{2h} \quad (3)$$

ここで、 $S = (S_1 + S_2)/2$ (変形中の左右の帯幅の平均値)、 $h = (h_1 + h_2)/2$ (中央点bと端点aおよびcとの高低差の平均値)である。

$\phi$ 方向対数ひずみ $\varepsilon_{\phi}^c$ は肉厚中心の値として、試験片中央における円環要素(Fig. 3)の幅の変化から測定した。円環要素の初期幅は $\bar{ac} = 2S_0 = 10$  mmである。一方、試験中の点a, c間の標点距離は $2R_{\phi} \sin^{-1}(S/R_{\phi})$ である。よって円管試験片の外表面における $\phi$ 方向ひずみ $\varepsilon_{\phi}^s$ は次式より算出できる。

$$\varepsilon_{\phi}^s = \ln \left\{ \frac{R_{\phi}}{S_0} \sin^{-1} \left( \frac{S}{R_{\phi}} \right) \right\} \quad (4)$$

同様に、肉厚中心における $\phi$ 方向対数ひずみ $\varepsilon_{\phi}^c$ は次式より算出される。

$$\varepsilon_{\phi}^c = \ln \left\{ \frac{2R_{\phi} - t}{2S_0} \sin^{-1} \left( \frac{S}{R_{\phi}} \right) \right\} \quad (5)$$

**試験中の試験片中央の肉厚の算出方法** 試験片中央の肉厚 $t$ の算出方法は以下の通りである。試験片中央において、初期外径 $D_0$ 、 $\phi$ 方向の初期微小幅 $l_0$ を有する円環要素が、試験中の任意の時刻においてそれぞれ $D$ 、 $t$ 、 $L$ に変形したと仮定する。ここで体積一定条件を仮定すると、式(6)を得る。

$$(D_0 - t_0)\pi t_0 l_0 = (D - t)\pi t l_0 \exp(\varepsilon_{\phi}^c) \quad (6)$$

よって次式を得る。

$$t^2 - Dt + \frac{(D_0 - t_0)t_0}{\exp(\varepsilon_{\phi}^c)} = 0 \quad (7)$$

したがって、 $t$ は次式より求まる。

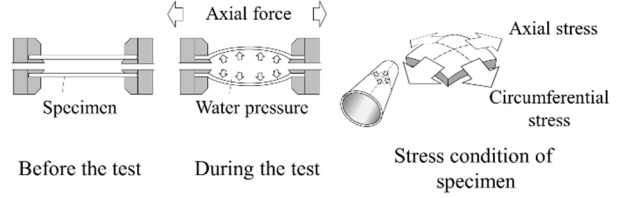


Fig. 1 Schematic of multiaxial tube expansion testing method

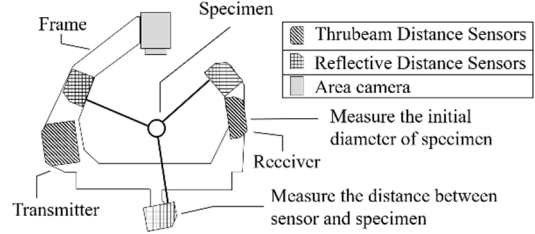


Fig. 2 Noncontact diameter measurement apparatus

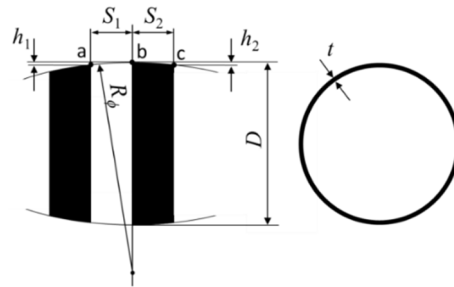


Fig. 3 Noncontact strain and curvature measurement apparatus

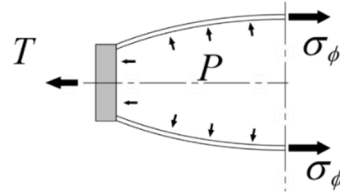


Fig. 4 Force equilibrium in the axial direction of a specimen subjected to internal pressure  $P$  and axial stress  $\sigma_{\phi}$

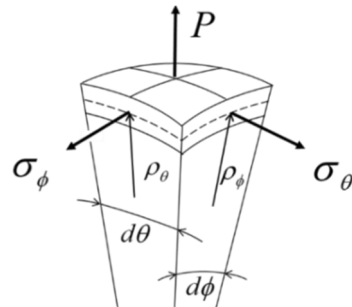


Fig. 5 Force equilibrium in the thickness direction of a material element embedded at the center of a tubular specimen

$$t = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_0 - t_0}{\exp(\varepsilon_\phi^s)}\right)} \quad (8)$$

**応力の算出方法** 二軸バルジ試験中の試験片について、試験片の回転対称軸を通る断面図を Fig. 4に示す。φ方向の力のつり合いより次式が得られる。

$$T + P\pi(D/2 - t)^2 - \pi(D - t)t\sigma_\phi = 0 \quad (9)$$

これより  $\sigma_\phi$  は次式より算出される。

$$\sigma_\phi = \frac{T + P\pi(D/2 - t)^2}{\pi(D - t)t} \quad (10)$$

次に、φ方向微小角dφおよびθ方向微小角dθで区切られた微小要素 (Fig. 5) について、半径方向の力のつり合い式を立てる。肉厚中心のθ方向曲率半径を $\rho_\theta (= D/2 - t/2)$ 、肉厚中心のφ方向曲率半径を $\rho_\phi (= R_\phi - t/2)$ とすると、式 (11) が成り立つ。

$$2\sigma_\theta t \rho_\phi d\phi \sin(d\theta/2) + 2\sigma_\phi t \rho_\theta d\theta \sin(d\phi/2) = P(\rho_\phi - t/2)(\rho_\theta - t/2)d\theta d\phi \quad (11)$$

$\sin(d\theta/2) \cong d\theta/2$ ,  $\sin(d\phi/2) \cong d\phi/2$ より次式を得る。

$$\frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} + \frac{\sigma_\phi}{\rho_\phi} = \frac{P(\rho_\theta - t/2)(\rho_\phi - t/2)}{t\rho_\phi\rho_\theta} \quad (12)$$

よって、 $\sigma_\theta$  は次式より算出される。

$$\sigma_\theta = \frac{P(\rho_\theta - t/2)(\rho_\phi - t/2)}{t\rho_\phi} - \frac{\sigma_\phi\rho_\theta}{\rho_\phi} \quad (13)$$

**応力の制御回路** 制御系は National Instrument 社製の LabVIEW で構築されている。センサから  $T, P, D, R_\phi, \varepsilon_\phi^s$  の5つの測定値が50 Hz で制御用パソコンに取り込まれる。それらの値から、管中央部に作用する  $\sigma_\phi$  と  $\sigma_\theta$  が算出される。それらの値は、P コントローラに入力され、応力の指令値との差分から  $T$  と  $P$  の指令値が出力され、 $\sigma_\phi$  と  $\sigma_\theta$  が制御される。 $T$  と  $P$  の指令値はそれぞれの測定値と比較され、その差分から電動シリンダとプランジヤポンプの出力が決定される。シリンダは、対向した二つが左右対称に動作することにより、試験片の応力測定部を試験機の中央、すなわちひずみ測定可能範囲に保持できる。

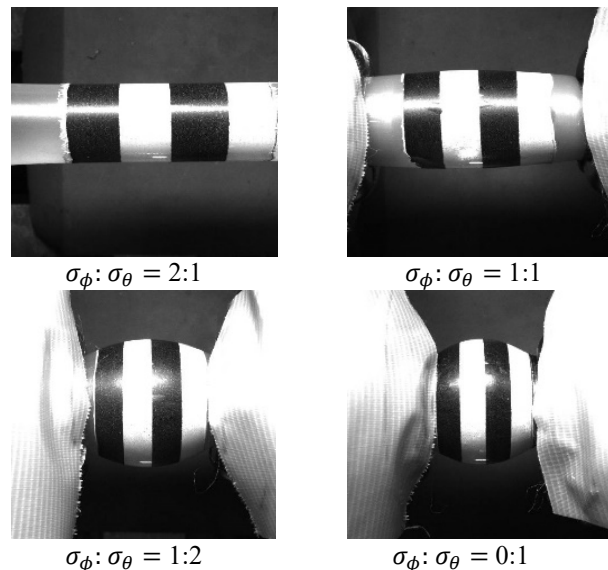
**実験方法** 供試材として低密度ポリエチレンの押し出し円管材を用いた。公称肉厚  $t_0$  は 2.0 mm, 試験片外径  $D_0$  は17 mm, 試験片長さは110 mm である。

9通りの線形応力経路  $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 1:0, 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4, 0:1$  を円管試験片に付与し、 $\sigma_\phi - \varepsilon_\phi$  および  $\sigma_\theta - \varepsilon_\theta$  曲線を測定した。ひずみ速度はおよそ  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  で一定に維持されるように制御した。

樹脂材料はひずみ速度依存性が大きいので、試験中および応力経路ごとのひずみ速度を極力一定に維持することが望ましい。そこで以下の手順で、ひずみ速度を一定に維持するための応力指令値 (CSV ファイル) を作製した。まず予備試験として、応力速度一定の応力-時間線図を CSV ファイルで作製し、それを指令値とした二軸バルジ試験を行った。次に、この予備試験より得られた  $\sigma$  曲線から、ひずみ速度が一定となる応力-時間線図を逆算し、作製した CSV ファイルを指令値とすることで、ひずみ速度一定試験を実施した。

#### 4. 研究成果

線形応力経路の代表例として  $\sigma_\phi : \sigma_\theta = 2:1, 1:1, 1:2, 0:1$  における試験片中央部の写真を Fig. 6 に示す。(a)は試験前、(b)~(f)は各応力経路における試験終了時 (除荷直前) である。いずれの応力経路においても試験片中央がエアアカメラの測定範囲内に位置しており、応力およびひずみの測定が正常に行われたことが確認できる。



**Fig. 6** Images of the specimens before experiment (a) and immediately after completing the experiment with linear stress paths (b)–(f)

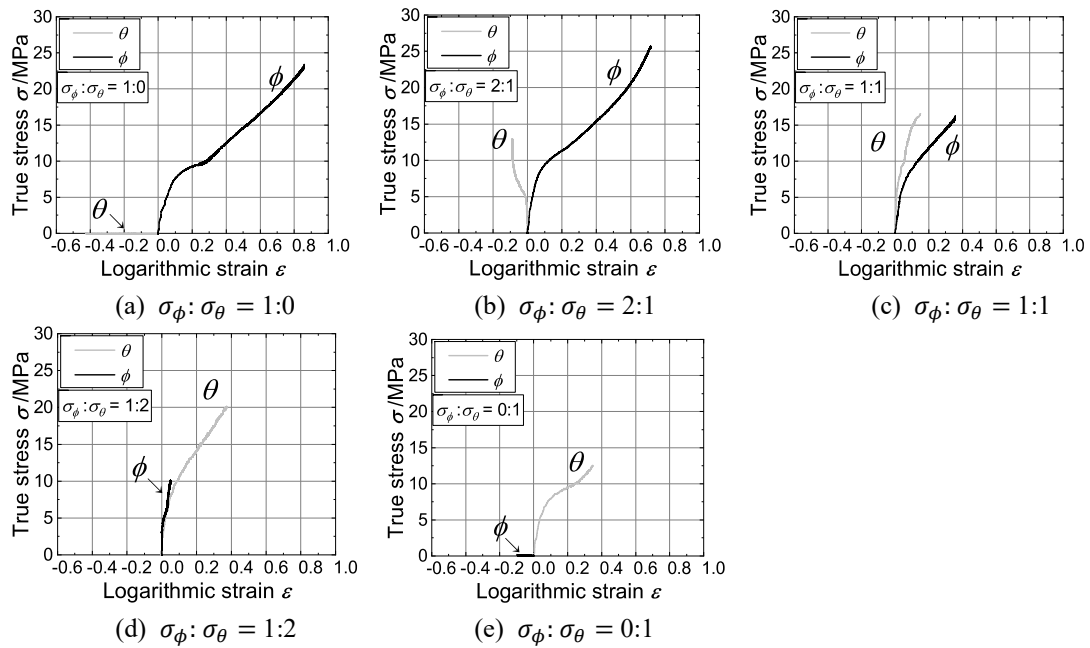


Fig. 7 True stress–logarithmic strain curves measured along every linear stress path

線形応力経路  $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1$  の試験終了時における全ひずみ成分はそれぞれ  $(\varepsilon_\phi, \varepsilon_\theta) = (1.09, -0.59), (0.72, 0.09), (0.35, 0.15), (0.05, 0.37), (-0.96, 0.36)$  であった。

$\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1$  において測定された真応力–対数ひずみ曲線 (ss 曲線) を Fig. 7 に示す。黒い実線が  $\phi$  方向 ss 曲線、赤い実線が  $\theta$  方向 ss 曲線である。本供試材の ss 曲線は、等方性の von Mises 降伏条件に従うと仮定した材料 (von Mises 材料) のそれとは以下の点で大きく異なり、強い異方性を示している点が特徴的である。

- $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$  では、von Mises 材料の  $\phi$  方向と  $\theta$  方向の ss 曲線は一致する。一方、本供試材では、同じ応力に対して  $\varepsilon_\phi$  は  $\varepsilon_\theta$  の 2~3 倍大きく、 $\theta$  方向の方が強度が高い。
- $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 2:1$  および  $1:2$  では、von Mises 材料の ss 曲線は両応力経路で一致する。一方、本供試材では、両者の最大主応力方向の ss 曲線は大きく異なる。例えば、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 2:1$  では  $\sigma_\phi = 15$  MPa において  $\varepsilon_\phi \approx 0.4$  であるが、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:2$  では  $\sigma_\theta = 15$  MPa において  $\varepsilon_\theta \approx 0.2$  である。すなわち  $\theta$  方向の方が強度が高い。これは、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:1$  において  $\theta$  方向の方が強度が高くなる測定結果と整合する。
- $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 2:1$  および  $1:2$  においては、von Mises 材料ではそれぞれ  $\theta$  方向と  $\phi$  方向 (中間主応力の方向) の塑性ひずみ増分は 0 となる。一方本供試材では、変形の進行と共に、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 2:1$  では  $\varepsilon_\theta$  が圧縮側に増大し、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:2$  では、 $\varepsilon_\phi$  が引張側に増加している。

Fig. 7 で測定された本供試材の異方性硬化挙動を可視化するために、以下の方法で等仕事面を製作した。まず  $\phi$  方向単軸試験において、基準となる  $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:0$  における  $\phi$  方向の対数ひずみ  $\varepsilon_0$  に達した瞬間における真応力  $\sigma_0$  とそれまでになされた単位体積あたりの仕事  $W_0$  を測定する。他の応力経路においては、 $W_0$  と等量の仕事が消費された時点の真応力  $(\sigma_\phi, \sigma_\theta)$  を測定して主応力空間にプロットし、その集合をもって等仕事面を決定した。等仕事面の測定結果を Fig. 8 に示す。9 つすべての応力経路に対して応力点が測定されたのは  $\varepsilon_0 = 0.3$  までであった。 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 0:1$  以外の応力比ではさらに大きな仕事領域まで測定できたため、 $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:2, 1:1, 2:1, 4:1, 1:0$  においては  $\varepsilon_0 = 0.5$  まで測定値を記載する。等仕事面は  $\sigma_\phi:\sigma_\theta = 1:4$  から  $3:4$  の方向にかけて相対的に大きく張り出す形状となり、強い異方性が観測された。

以上のことから、本供試材の異方性硬化挙動を単軸引張試験のみで評価することはできず、多軸応力試験を実施することにより、定量的に測定・評価することが可能である。

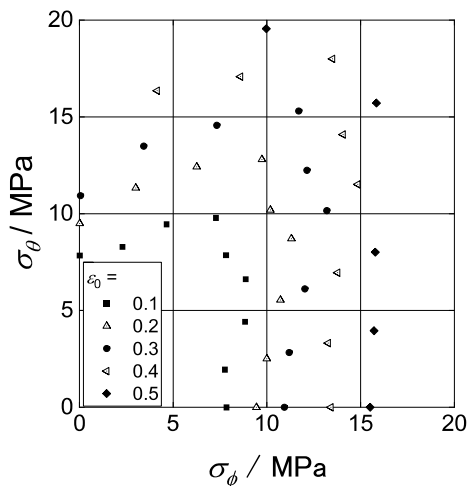


Fig. 8 Stress points forming contours of equal work

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 久保漱汰・桑原利彦・住山琢哉・小林卓哉・古市謙次・野々村千里	4. 巻 62
2. 論文標題 大ひずみ二軸応力下におけるポリエチレン円管の 変形挙動測定と解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 塑性と加工	6. 最初と最後の頁 73-78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久保漱汰・桑原利彦・住山琢哉・小林卓哉・古市謙次・野々村千里
2. 発表標題 二軸応力下における樹脂円管の変形挙動に関する研究
3. 学会等名 2019年年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保漱汰・桑原利彦・住山琢哉・小林卓哉・古市謙次・野々村千里
2. 発表標題 二軸応力下における樹脂円管の変形挙動に関する研究
3. 学会等名 第69回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保漱汰・桑原利彦・住山琢哉・小林卓哉・古市謙次・野々村千里
2. 発表標題 ：二軸応力下における樹脂円管の変形挙動に関する研究，第一報 二軸バルジ試験機の開発
3. 学会等名 第26回 プラスチック成型加工学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	久保 漱太  (Kubo Sohta)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------