粘弾性材料に関する3要素固体モデルの 押込試験によるパラメータ算出法†

谷 充 博* 佐久間 淳**
小笠原 誠* 斉 藤 俊***

Parameters Evaluation of Three-Element Solid Model for Viscoelastic Materials by Indentation Test

by

Mitsuhiro TANI*, Atsushi SAKUMA**, Makoto OGASAWARA* and Takashi SAITO***

Mechanical tests are necessary to evaluate the deformation behavior of various materials. In particular, it is require that low- or non-destructive evaluation methods such as in-line inspection, which are employed in industries where less time and effort method is required. In this study, a spherical indentation method is developed to evaluate the mechanical properties of viscoelastic materials. The indentation method which can measure the Young's modulus of soft elastomer with finite thickness is applied to evaluate soft viscoelastic materials. The three-element solid model which can express strain rate dependency and stress relaxation is adopted as the constitutive model of the materials. The viscoelastic parameters of the three-element solid model are evaluated by defining the deformation resistance modulus, which depends on the indentation method. The applicability of the method is verified by comparing the parameters evaluated by both tensile and indentation tests. The results show that viscoelasticity can be evaluated as well as elasticity by the proposed low-destructive spherical indentation method.

Key words : Testing, Spherical indentation, Viscoelasticity, Three-element solid model, Equivalent indentation strain

1 緒 言

身の回りに存在する様々な物質の力学的変形挙動の評価のために、対象となる特性や材質に応じた種々の試験法が発明・規定されてきた。特に、製品の全数検査への適応ができることから、試料の加工無しで実施可能な試験法の開発が期待されている。この中でも、試験に用いる試料形状の自由度が高く、しかも簡便かつ迅速に試料の変形特性を計測できる球圧子押込試験^{1)~6)}において、筆者らは厚さが小さい試料のYoung率を計測する相当押込みひずみの概念を導入した評価方法を提案した^{7), 8)}さらに粘弾性材料の変形特性を評価する場合には、特に負荷速度依存性と応力緩和現象を表現可能なモデル^{9), 12)}が有効であるが、このパラメータの算出には労力を要する。

そこで本研究では、粘弾性材料の変形特性を加工無しで評価できる方法の開発を目的として、球圧子の押込試験法による方法を検討する。特に、3要素固体モデルに対して提案¹³⁾された引張りによる方法を基礎としながら、これを球圧子押込試験法^{7), 8)}へ応用する方法を提案する。これについては、市販のシリコンゴムに対して押込みおよび引張試験からパラメータの算出を行い、この比較から球圧子押込試験による3要素固体モデルのパラメータ算出法の有効性を確認する。

2 押込試験による変形特性の評価

2・1 球圧子押込試験によるYoung率計測

厚さが小さい試料のYoung率計測法⁷⁾では、Fig. 1に示すように、剛体上に固定された有限体試料への球圧子押込試験による押込変形を、接触変形と圧縮変形の重ね合わせと考える。このとき、接触部中央での等価的な単軸ひずみを表す相当押込みひずみ (equivalent indentation-strain) $\bar{\epsilon}$ を次式で定義する。

$$\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}_H + \bar{\epsilon}_V \quad (1)$$

この第1項は球圧子による接触変形を表現し、次式の関係である。

Fig. 1 Indentation deformation is considered by the sum of contact and compression deformations.

† 原稿受理 平成 21 年 12 月 16 日 Received Dec. 16, 2009 ©2011 The Society of Materials Science, Japan

* 東京農工大学工学府機械システム工学専攻 〒184-8588 小金井市中町, Graduate School of Eng., Tokyo Univ. of A&T, Naka-cho, Koganei, 184-8588

** 正 会 員 東京農工大学大学院共生科学技術研究院 〒184-8588 小金井市中町, Inst. of Symbiotic Sci. & Tech., Tokyo Univ. of A&T, Naka-cho, Koganei, 184-8588

*** 山口大学大学院医学系研究科 〒755-8611 宇部市常盤台, Graduate School of Medicine, Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

$$\bar{\varepsilon}_H = -\frac{2}{\pi(1-\nu^2)} \left(\frac{2\delta}{\phi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここで、 ϕ と δ はそれぞれ球圧子の直径と押込量、 ν は試料のPoisson比である。また第2項は、球圧子と剛体の間で生じる圧縮変形の領域体積の変化率を表すものとして、試料厚さ h を用いて次式で表現する。

$$\bar{\varepsilon}_V = -\frac{\delta}{h} - \frac{2}{3} \ln \left\{ \frac{2h+3\left(\frac{\phi}{2}-\delta\right)}{2h+3\frac{\phi}{2}} \right\} \quad (3)$$

このとき、試料のYoung率 E は次式で算出する。⁷⁾

$$E = -\frac{6}{\pi^3(1-\nu^2)^2} \left(\frac{2}{\phi} \right)^2 \frac{\hat{F}}{\bar{\varepsilon}^3} \quad (4)$$

ここで、剛体上に置かれた有限体試料への押込荷重 $\hat{F}$ は半無限体試料への場合より大きくなるが、この影響は相当押込ひずみ $\bar{\varepsilon}$ によって考慮されている。

2・2 3要素固体モデルのパラメーター算出法

2・2・1 3要素固体モデル ひずみ速度依存性と応力緩和現象を特徴とする粘弾性材料の力学的挙動は、Fig. 2に示す3要素固体モデルを用いて表現することができる。この図で E はYoung率、 C は粘性パラメーターであり、また添え字 e , v , ve はそれぞれ弾性部、粘弾性部、粘弾性部中の弾性部を表す。この3要素固体モデルの全ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ を、弾性部ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}^e$ および粘弾性部ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}^v$ の和として、ここでは以下のように表す。

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^v \quad (5)$$

また各構成要素については、以下の関係を考える。

$$\dot{\sigma} = E^e \dot{\varepsilon}^e \quad (6)$$

$$\dot{\sigma}^{ve} = E^{ve} \dot{\varepsilon}^v \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon}^v = C \dot{\sigma}^v = C(\dot{\sigma} - \dot{\sigma}^{ve}) \quad (8)$$

ただし、 σ , $\dot{\sigma}$, σ^{ve} と $\dot{\sigma}^{ve}$ はそれぞれ応力、応力速度、粘弾性部の応力とその速度を表している。

2・2・2 粘弾性パラメーターの算出 このモデルの粘弾性パラメーターの算出では、 $\dot{\varepsilon}_\alpha > \dot{\varepsilon}_\beta \gg \dot{\varepsilon}_\gamma$ の関係を持つ3つのひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_I$ ($I = \alpha, \beta, \gamma$)での材料試験を考える。¹³⁾この関係は、比較的高速な2つのひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_\alpha$, $\dot{\varepsilon}_\beta$ と、これらに比べ極めて低いひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_\gamma$ からなっており、特にひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_\gamma$ は粘性が無視できる極低速条件 $\dot{\varepsilon}_\gamma \sim 0$ を理想とする。この条件での試験によって得られるFig. 3

Fig. 2 Three-element solid model.

Fig. 3 Schematic of stress-time curves.

のような負荷過程の応力曲線について、破線のように応力レベルを σ_k から σ_{k+1} とする応力増分 $\Delta\sigma_{k+1}$ および、各ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{Ik}$ ごとに時間増分 Δt_{Ik+1} を考える。このとき、弾性部ひずみ ε_k^e あるいは粘弾性部ひずみ ε_k^v の関数として、応力速度 $\dot{\sigma}_{Ik}$ およびひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{Ik}$ から3つのパラメーターが以下から算出できる。

$$C(\varepsilon_k^v) = \frac{\dot{\sigma}_{\beta k} \dot{\varepsilon}_{\alpha k} - \dot{\sigma}_{\alpha k} \dot{\varepsilon}_{\beta k} + (1 - R_k) \dot{\sigma}_{\alpha k} (\bar{\sigma}_{k+1} - \sigma_{\beta k}^{ve}) C(\varepsilon_{k-1}^v)}{\dot{\sigma}_{\beta k} (\bar{\sigma}_{k+1} - \sigma_{\alpha k}^{ve}) - R_k \dot{\sigma}_{\alpha k} (\bar{\sigma}_{k+1} - \sigma_{\beta k}^{ve})} \quad (9)$$

$$E^e(\varepsilon_k^e) = \frac{\dot{\sigma}_{\alpha k}}{\dot{\varepsilon}_{\alpha k} - C(\varepsilon_k^v) \cdot (\bar{\sigma}_{k+1} - \sigma_{\alpha k}^{ve})} \quad (10)$$

$$E^{ve}(\varepsilon_k^v) = E^{ve}(\varepsilon_{k-1}^v) + \frac{\varepsilon_{\alpha k}^v - \varepsilon_{k-1}^v}{\varepsilon_{\gamma k}^v - \varepsilon_{k-1}^v} \left(\frac{E^e(\varepsilon_k^e) E_{\gamma k}}{E^e(\varepsilon_k^e) - E_{\gamma k}} - E^{ve}(\varepsilon_{k-1}^v) \right) \quad (11)$$

ここで、係数 R_k は $R_k = (\varepsilon_{\beta k}^v - \varepsilon_{k-1}^v) / (\varepsilon_{\alpha k}^v - \varepsilon_{k-1}^v)$ の関係である。 k 番目の増分区間の基準応力とする応力 $\bar{\sigma}_{k+1}$ は、応力増分 $\Delta\sigma_{k+1}$ の過程での平均応力である。また $E_{\gamma k}$ は、極低速なひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_\gamma$ での応力-ひずみ曲線の傾きである。

この応力増分 $\Delta\sigma_{k+1}$ の増分区間におけるパラメーター $E^e(\varepsilon_k^e)$, $E^{ve}(\varepsilon_k^v)$, $C(\varepsilon_k^v)$ を負荷開始から終了まで順に求めることで、弾性部ひずみ ε_k^e と粘弾性部ひずみ ε_k^v の関数として算出する。さらに、離散的な変数である弾性部ひずみ ε_k^e と粘弾性部ひずみ ε_k^v の分割を十分細かくすることで、これらのパラメーターを連続的な値 ε^e , ε^v の関数として取り扱う。

2・3 球圧子押込試験による粘弾性パラメーターの算出法

ここでは、引張試験に対して提案された2・2節の算出法について、これを2・1節の押込試験に適用する方法を提案する。

粘弾性材料への球圧子押込試験では、粘性による変形抵抗が生じるため、押込荷重 $\hat{F}$ は押込速度 $\dot{\delta}_I$ に応じて大きくなる。本報では、この粘性による変形抵抗を考慮し、加えて押込ひずみ依存性も評価できるようにすることを考え、負荷過程の押込速度 $\dot{\delta}_I$ に応じて大きくなる押込荷重 $\hat{F}_I$ 毎に相当押込ひずみ $\bar{\varepsilon}$ の関数とした次式の変形抵抗率 D_I を考える。

$$D_I(\bar{\varepsilon}) = -\frac{6}{\pi^3 (1-\nu^2)^2} \left(\frac{2}{\phi}\right)^2 \frac{\hat{F}_I}{\bar{\varepsilon}^3} \quad (12)$$

この変形抵抗率 $D_I(\bar{\varepsilon})$ を用いると、実験データを複数の応力レベル σ_k で区切って考える場合には、応力レベル σ_k から σ_{k+1} での応力増分 $\Delta\sigma_{k+1}$ に対して、応力増分 $\Delta\sigma_{k+1}$ と相当押込ひずみ増分 $\Delta\bar{\varepsilon}_{Ik+1}$ の関係を用いた次の関係が想定される。

$$\Delta\bar{\varepsilon}_{Ik+1} = \frac{\Delta\sigma_{k+1}}{D_I(\bar{\varepsilon}_{Ik})} \quad (13)$$

つまり、1つの応力増分 $\Delta\sigma_{k+1}$ に関して、各応力速度 $\dot{\sigma}_{Ik}$ ごとくの変形抵抗率 $D_I(\bar{\varepsilon}_{Ik})$ に対応する、3つの相当押込ひずみ増分 $\Delta\bar{\varepsilon}_{Ik+1}$ が得られることとなる。この相当押込ひずみ増分 $\Delta\bar{\varepsilon}_{Ik+1}$ とこの増分に要する時間増分 Δt_{Ik+1} から、相当押込ひずみ速度 $\dot{\bar{\varepsilon}}_{Ik}$ を

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_{Ik} = \frac{\Delta\bar{\varepsilon}_{Ik+1}}{\Delta t_{Ik+1}} = \frac{\Delta\sigma_{k+1}}{D_I(\bar{\varepsilon}_{Ik}) \Delta t_{Ik+1}} \quad (14)$$

で定義する。これに応じて3つの応力速度 $\dot{\sigma}_{Ik}$ も増分に要する時間増分 Δt_{Ik+1} から次式で求める。

$$\dot{\sigma}_{Ik} = D_I(\bar{\varepsilon}_{Ik}) \dot{\bar{\varepsilon}}_{Ik} = \frac{\Delta\sigma_{k+1}}{\Delta t_{Ik+1}} \quad (15)$$

次章では、ここで提案したこれら球圧子押込試験での相当押込ひずみ速度 $\dot{\bar{\varepsilon}}_{Ik}$ および応力速度 $\dot{\sigma}_{Ik}$ を用いた2・2節の3要素固体モデルのパラメーターの算出法について、その有効性を評価する。

3 押込試験によるパラメーター算出法の評価

3・1 試験法と試験条件

3・1・1 球圧子押込試験 ここでは、球圧子押込試験により3要素固体モデルのパラメーターを算出し、その結果を引張試験による算出結果と比較することで、2・3節での提案の有効性を評価する。

まず球圧子押込試験システム¹⁴⁾の概略をFig. 4に示す。このシステムは、アルミニウム製テーブルの上に設置した試料に対して、最大押込速度 $\dot{\delta}_{\max} = 1200\text{mm/s}$ のNSK社製メカトロアクチュエーターXY-HRS400-RH202に取り付けられた荷重軸上の直径 $\phi = 20\text{mm}$ のアクリル球圧子を押込むものである。押込荷重 $\hat{F}$ については荷重軸に取り付けた共和電業社製ロードセルLURA100NSA1から取得し、押込量 δ は荷重軸を取り付けたアクチュエーターのステージの移動量としてアルプス電気社製スライドボリュームRSA0N11S9002によって計測する。それぞれの分解能は荷重 $6.15 \times 10^{-3}\text{N}$ 、変位 $1.53 \times 10^{-6}\text{m}$ である。

Fig. 4 Schematic of material test system.

また算出法への適用に際して、押込速度 $\dot{\delta}_I$ は比較的高速な2つの速度 $\dot{\delta}_\alpha$ 、 $\dot{\delta}_\beta$ と極めて低い速度 $\dot{\delta}_\gamma$ を考えるが、特に極低速 $\dot{\delta}_\gamma$ は試験機の最低速度仕様である 0.01mm/s とする。便宜上これらの押込速度 $\dot{\delta}_I$ を負荷過程で一定にすると相当押込ひずみ速度 $\dot{\bar{\varepsilon}}_I$ が変化するものの、ここでも算出法におけるひずみ速度 $\dot{\bar{\varepsilon}}_I$ の高低関係は保たれる。なお、この負荷過程における各相当押込ひずみ速度の初期値 $\dot{\bar{\varepsilon}}_{I0}$ をTable 1に示す。また極低速 $\dot{\delta}_\gamma$ において理想的に排除できない粘性挙動は、押込停止後60sの圧子保持で計測される応力緩和量を基準とした補正法¹³⁾を適用することにより、その影響を排除する。

なお試料への押込みに関しては、押込量 δ を荷重 10N までの大きさとし、押込回数 N を試験法の誤差評価の目的で条件毎に各1回とする。また押込試験時の環境条件は気温 $26.5 \sim 27.0^\circ\text{C}$ 、湿度 $62 \sim 63\%$ であった。

3・1・2 引張試験 引張試験システムは、Fig. 4のシステムとほぼ同じ構成の生体軟組織など軟材料用の試験機¹³⁾を利用する。この駆動部は、試料の荷重軸をアクチュエーターのステージ部が所定の速度 $\dot{\varepsilon}_I$ に達してから稼働させ始める機構を有し、さらに設定した最大ひずみ $\varepsilon_{\max}$ に至ると荷重軸を停止する機構も有しており、これにより広いひずみ速度域でのひずみ速度依存性と応力緩和現象が観察可能である。なお、アクチュエーターは速度 $0.1 \sim 1200\text{mm/s}$ のNSK社製メカトロアクチュエーターXY-HRS063-RS204を用いており、変位量は荷重軸の移動量をKEYENCE社製レーザー変位計LB-62で計測して求めている。ロードセルとしては共和電業社製微小荷重ロードセルLST-1KAにより計測するシステムとなっており、分解能は変位 $6.25 \times 10^{-6}\text{m}$ 、荷重 $3.28 \times 10^{-3}\text{N}$ である。

なおパラメーターの算出に関しては、3つの異なる引張ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_I$ を考えることになるが、相当押込ひずみ速度 $\dot{\bar{\varepsilon}}_I$ が負荷過程で変化する押込試験とは一致させられないため、本報ではTable 2の値としている。なお、極低速条件は押込試験同様に試験機の最低速度仕様であるが、パラメーターの算出精度向上のため引張停止後60sの応力緩和量を計測して粘性挙動の補正¹³⁾に利用する。引張試験の試験回数については、各条件毎に $N = 5$ 回実施し、算出法評価の基準のため平均値を算出して用いる。また引張試験時の環境条件は気温 $23.2 \sim 27.0^\circ\text{C}$ 、湿度 $62 \sim 68\%$ であった。

Table 1 Condition of spherical indentation.

Indentation rate $\dot{\delta}_I$, mm/s	$\dot{\delta}_\alpha$	$\dot{\delta}_\beta$	$\dot{\delta}_\gamma$
	10	1.0	0.01
Indentation strain rate $\dot{\bar{\varepsilon}}_{I0}$, 1/s	$\dot{\bar{\varepsilon}}_{\alpha 0}$	$\dot{\bar{\varepsilon}}_{\beta 0}$	$\dot{\bar{\varepsilon}}_{\gamma 0}$
	63	7.2	0.074

Table 2 Condition of tensile test.

Tensile strain rate $\dot{\varepsilon}_I$, 1/s	$\dot{\varepsilon}_\alpha$	$\dot{\varepsilon}_\beta$	$\dot{\varepsilon}_\gamma$
	5	0.5	0.01

3・1・3 供試材と試料形状 本報の供試材としては特性が安定した市販の共和工業社製シリコンゴムシートを用い、この中でも高い粘性を持つ硬度 A20 のものから試料を切り出して利用する。

押込試験では、シート厚さ 5.1mm の供試材から縦および横の寸法は共に 100mm の試料を作成し、この試料の圧子との接触面へ摩擦軽減のためのタルク粉を塗布して試験を行う。一方の引張試験では、押込用の試料と同一の供試材から切り出した 1 辺 2.5mm 程度の四角柱状の試料を作成し、特にチャック間距離 10mm とした試験片両端を駆動部へつながる荷重軸とロードセルへつながる感知軸とへそれぞれ瞬間接着剤によって接続して試験する。なお本報の計測結果の評価に際して、Poisson 比は文献値¹⁵⁾を参考に $\nu = 0.48$ とした。

3・2 パラメータ算出結果と考察

3・2・1 3要素固体モデルのパラメータ Fig. 5 (a) の球圧子押込試験、および Fig. 6 の引張試験により算出した 3 要素固体モデルのパラメータを Fig. 5 (b) に示す。

Fig. 5 (a) の押込量－荷重曲線では、負荷過程の押込速度 $\dot{\delta}_I$ に応じて押込荷重 $\hat{F}$ が大きくなる粘性による変形抵抗が確認できている。また Fig. 5 (b) の算出したパラメータである弾性部 Young 率 E^e 、粘弾性部 Young 率 E^{ve} および粘性パラメータ C では、球圧子押込試験および引張試験のどちらもひずみ ε^e 、 ε^{ve} の増加に対して粘

Fig. 5 Experimental results and evaluated parameters.

性パラメータ C および弾性部 Young 率 E^e は減少傾向、粘弾性部 Young 率 E^{ve} はほぼ一定な値となっている。

球圧子押込試験結果と引張試験結果から算出したパラメータを比較すると、粘性パラメータ C は引張試験より球圧子押込試験が高めの結果となっている。これは、粘弾性体では、押込過程における応力とひずみの分布が弾性体とは粘性の効果により異なるが、この影響が弾性体の理論を基礎として評価した 2・1 節の結果では考慮されていないためと考えられる。一方で、弾性部 Young 率 E^e および粘弾性部 Young 率 E^{ve} は比較的一致した結果となっており、Fig. 5 (a) のような粘性による変形抵抗が影響した押込量－荷重曲線であっても、押込試験^{7), 8)}は Young 率を比較的高い精度で評価できることを示している。

3・2・2 粘弾性挙動 ここでは、Fig. 5 (b) のパラメータの算出結果の有効性を観ることを目的として、これを粘弾性挙動のシミュレーションに応用した結果を示す。この結果である Fig. 6 は、3 つの異なるひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_I$ でひずみ $\varepsilon_{mx} = 0.2$ まで変形を負荷した後に応力緩和も観察したもので、粘性効果によりひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_I$ に応じて応力ピークが高くなる曲線となっている。この負荷開始から応力ピークに至るまでの各ひずみ速度の過程を観ると、球圧子押込試験によるパラメータを用いたシミュレーションの最高速で応力ピークが高くなるものの、これ以降の緩和過程や他の速度ではほぼ一致した結果が観られている。このことから、粘性により負荷過程の速度依存性および応力緩和現象を示す材料に関して、粘弾性挙動のシミュレーションにも利用可能なパラメータの算出が押込試験からでも提案法により可能であることが分かる。

今後は、より算出精度の向上を図ると共に、積層構造や異方性を有する粘弾性材料への適用および複雑な形状を有する試料への適用に向けた発展を目指す。

4 結 言

粘弾性材料の力学的挙動を評価する目的で、特に 3 要素固体モデルのパラメータの算出へ球圧子押込試験法を用いる方法について検討した。この結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 3 つの異なるひずみ速度による試験から 3 要素固

体モデルのパラメーターを算出する方法を, 厚さが小さい試料でも計測できる相当押しむすみの概念を導入した球圧子押し込み試験へ応用する方法を提案した。

(2) 提案法により粘弾性材料の3要素固体モデルにおけるパラメーターを算出した。

(3) 算出したパラメーターを用いた粘弾性挙動の数値シミュレーション結果から, 提案法によってシミュレーションに利用可能な構成モデルのパラメーターを算出できること示した。

なお本研究に関しては, 山口大学教授・河野俊一先生に貴重なご指導を頂くとともに, 産業技術高等専門学校准教授 坂本 誠先生, 日立製作所 山内知奈津さんのご助力を得たことをここに記し, 謝意を表します。また本研究の一部は, 文部科学省の科研費(若手研究B)15760052の成果を利用しております。

参 考 文 献

- 1) The Society of Rubber Industry, Japan, "Rubber testing method 3rd Edn", pp.194-206 (2006) MARUZN CO., LTD.
- 2) N. E. Waters, "The indentation of thin rubber sheets by spherical indentors", British Journal of Applied Physics, Vol.16, No.4, pp.557-563 (1965).
- 3) L. L. Chapoy and J. J. Aklonis, "The design and calibration of a stress relaxation ball indentation penetrometer", Transaction of the Society of Rheology, Vol.12, No.3, pp.445-455 (1968).
- 4) O. Takatani and T. Akatsuka, "The clinical measurement method of hardness of organism", Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.14, No.3, pp.281-291 (1975).
- 5) T. Sugimoto, S. Ueha and K. Itoh, "A evaluation method of tissue hardness using relaxation elastic moduli -study of measurement theory and in vitro experiment-", Japanese Journal of Medical Electronics and Biological Engineering, Vol.29, No.4, pp.27-33 (1991).
- 6) Y. Arima and T. Yano, "Basic study on objectification of palpation", Japanese Journal of Medical Electronics and Biological Engineering, Vol.36, No.4, pp.321-336 (1998).
- 7) M. Tani, A. Sakuma and M. Shinomiya, "Evaluation of thickness and Young's modulus of soft materials by using spherical indentation testing", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.75, No.755, pp.901-908 (2009).
- 8) M. Tani and A. Sakuma, "Applicability evaluation of Young's modulus measurement using equivalent indentation strain in spherical indentation testing for soft materials", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.76, No.761 (2009).
- 9) Y. Yamada, "Plasticity·Viscoelasticity", pp.11-18 (1980) Baifukan Ltd.
- 10) V. C. Mow, S. C. Kuei, W. M. Lai and C. G. Armstrong, "Biphasic creep and stress relaxation of articular cartilage in compression : theory and experiments", Transactions of the ASME, Journal of Biomechanical Engineering, Vol.102, No.1, pp.73-84 (1980).
- 11) M. Endo and T. Yoshida, "Determination of constants of a visco-elastic model of a binding agent", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.54, No.502, pp.1246-1251 (1988).
- 12) S. Ammi, M. Masuko, T. Obikawa, T. Shirakashi and E. Usui, "Flow stress characteristics of polymer (1st Report) visco-elastic model and its characteristics under three axial stress state", Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.51, No.4, pp.790-795 (1985).
- 13) M. Ogasawara, A. Sakuma, T. Tadomi, E. Yanagisawa and M. Tani, "Valuation technique of nonlinear parameters in three-element solid model and its application to biological soft tissue", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.75, No.750, pp.251-258 (2009).
- 14) M. Tani, A. Sakuma and T. Tadomi, "System development of compression testing for valuation of in vivo soft tissue", Proceedings of the 18th Bioengineering Conference, No.05-66, pp.273-274 (2006).
- 15) G. P. O' Hara, "Mechanical properties of silicone rubber in a closed volume", Technical Report ARLCB-TR-83045, Large Caliber Eeapon Systems Laboratory, Army Armament Research and Development Center, available from NTIS, Order No.AD-A138129 (1983).