超高分子量ポリエチレンの機械的性質と構成式*

桜 本 逸 男^{*1}, 土 田 豊 実^{*2}
蔵 本 孝 一^{*3}, 河 野 俊 一^{*4}Mechanical Property and Constitutive Equation
of Ultra High Molecular Weight PolyethyleneItsuo SAKURAMOTO, Toyomitsu TSUCHIDA,
Kouichi KURAMOTO and Syunichi KAWANO

UHMW-PE has been used as a bearing material in the artificial knee joint. Stress analysis, using FEM, is generally performed to clarify the cause of *in vivo* wear and delamination. A test machine, of the displacement control type, was designed and built and equipped with a measuring system to obtain accurate test results and the constitutive equation of UHMW-PE. The maximum crosshead speed of the machine is 10^4 mm/min. Furthermore, it has the capability of determining stress relaxation and strain recovery behavior immediately after performing a tensile test. Interesting properties of UHMW-PE have been obtained using this machine. Also, the constitutive equations for plasticity and viscoelasticity were derived from the experimental results. The equations have strongly nonlinear properties in the mechanical model described in this work. Stress relaxation simulations based on the equation for viscoelasticity have been performed. From this, it was confirmed that the equation is valid.

Key Words: High Polymer Materials, Tensile Property, Visco Elasticity, Plasticity, Constitutive Equation, Biomechanics, Ultra High Molecular Weight Polyethylene

1. 緒 言

人工膝関節置換手術は、変形性膝関節症や女性に多く見られる慢性関節リウマチなど高度の膝関節機能障害を有する患者に対し、除痛、可動性および支持性が同時に得られる手術法として近年多用されている。しかし、この人工膝関節部材の一つである超高分子量ポリエチレン(UHMW-PE)インサートの摩耗や層状はく離などの損傷のために、一度膝関節置換を行っても十数年、ひどい場合には3、4年で再手術をする場合があり、その損傷メカニズムおよび機械的性質を解明するために多くの研究が報告されている^{(1)~(5)}。このUHMW-PEインサートの損傷の原因を解明するために、有限要素法を用いたインサートの応力解析^{(6)~(9)}が行われているが、UHMW-PEは応力等がひずみ速度に強く依存する粘弾性、粘塑性的性質を有している⁽¹⁰⁾ので、いまだUHMW-PEインサートの応力解析を行

うのに十分な機械的性質は得られていないようである。この理由の一つとして、通常のボールネジ形の引張試験機では最大クロスヘッド速度はおおよそ500 mm/min程度であり、しかも荷重開始点では試験機可動部の慣性力によりその速度は変化すること、また低速度(500 mm/min以下)と圧縮空気を用いた高速(5 m/s以上)の中間の引張速度をもつ市販の試験機が少ないことが原因であるように思われる。

そこで著者らは、UHMW-PEの構成式を得るための基礎的研究として、最大10 000 mm/minのクロスヘッド速度をもち、引張開始点での速度変化を最小限に抑え、さらに引張試験後に連続的に応力緩和とひずみ回復試験をする機能を付加した高速高精度引張試験装置を製作した。その試験装置を用いて、応力緩和特性、ひずみ回復特性、応力-ひずみ特性および残留ひずみ(塑性ひずみ)などを実験的に調べた⁽¹⁰⁾。さらに、各実験結果から塑性および粘弾性の構成式を構築する方法について検討した。

2. 実験方法および装置

2・1 試験装置の概略 市販の引張圧縮試験機は、元来準静的機械的性質を調べることを目的としており、ひずみ速度依存性が強いプラスチック材料では、

* 原稿受付 1997年11月21日。

^{*1} 正員、徳山工業高等専門学校(☎745-8585 徳山市久米高城3538)。^{*2} 千葉大学医学部(☎260-8670 千葉市中央区亥鼻1-8-1)。^{*3} ナカシマプロペラ(株)(☎700-8691 岡山市上道北方688-11)。^{*4} 正員、山口大学工学部(☎755-8611 宇部市常盤台2557)。

E-mail: sakuramo@tokuyama.ac.jp

標点間距離を短縮するなどの工夫をしても、高ひずみ速度下の実験データを得るには限界がある。そこで、下記の仕様を満足する引張試験機を製作した。

- (1) 高速広範囲のクロスヘッド速度($\sim 10^4$ mm/min)
- (2) 主に JIS 2号形引張試験片を対象とし、負荷荷重は最大 2 000 N 程度
- (3) 引張開始時から一定の負荷速度が得られること
- (4) 引張終了後の応力緩和および負荷荷重解放後のひずみ回復の測定が可能

今回製作した試験装置のシステム構成図を図 1 に示す。高精度の直動型アクチュエータ⁽¹¹⁾ に取付けられた AC サーボモータ⁽¹²⁾ を AC サーボコントローラ⁽¹³⁾ で駆動することにより、クロスヘッドの速度と変位を制御している。また、上部の試験片つかみ治具とアクチュエータ可動部を分離し、一定速度になった後にそれらが一体となる構造を採用することによって、引張開始点における速度変化を最小限に抑えることができる。

2・2 試験片 図 2 に、使用した引張試験片(JIS K 7113 No. 2)の形状・寸法を示す。UHMW-PE 粉末は、Hoechst 製 Hostalen GUR 1120 を用いており、ASTM D 4020 による測定では、平均分子量は 3.35×10^6 であった。この粉末をナカシマプロペラ(株)で圧縮成形した。成形条件は、プレス圧力 5.725 MPa において、熱プレス 20 分(プレス盤温度 220°C)の後、冷却プレス 20 分(プレス盤温度 20°C)である。

2・3 実験方法 まず、試験片の標点間(25 mm)

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental system

Fig. 2 Specimen design

にスライド抵抗器を使用した自作の高速用変位計を取付け、以下の三つの試験を連続的に行う。

引張試験 試験片は定速のクロスヘッド速度下で荷重が作用する。本研究のクロスヘッド速度範囲は $10 \sim 10^4$ mm/min であり、対応するひずみ速度は $3.36 \times 10^{-3} \sim 3.37$ /s、最大変位は $0 \sim 20$ mm である。

応力緩和試験 引張試験の後、クロスヘッドは最大変位位置で固定される。

ひずみ回復試験 荷重開始から 240 秒後にクロスヘッドを戻し、荷重を解放する。試験片保持具の重量は、図 1 に示すようにローラーの先の重りと釣合いがとれているので、試験片を取り外すことなしにひずみ回復の測定が可能である。

このときの AD 変換のサンプリング周波数は、クロスヘッド速度により $200 \sim 2\,000$ Hz とした。さらに、試験片を約 24 時間放置した後に残留ひずみの測定を行った。なお、試験中の雰囲気温度は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ である。

3. 実験結果

図 3 にクロスヘッド速度 10^3 mm/min、3 種類の最大引張変位 10, 15, 20 mm における荷重-時間特性を示す。図 3 にみられるように、異なった試験片であるにもかかわらず、荷重の立上り部が一致し、また滑ら

Fig. 3 Stress relaxation

Fig. 4 Strain recovery

かな応力緩和特性が得られていることがわかる。

図4にひずみ回復に注目した標点間変位-時間特性を示す。これは、応力緩和試験と同じサンプルによって得られたものである。荷重解放後に、図中のABに示すような弾性的回復(ひずみの急激な減少)がみられ、その後徐々に粘弾性的回復がみられるが、除荷時における粘弾性回復の変位速度は最大引張変位の増加とともに減少してゆく現象がみられる。

図5は、最大クロスヘッド変位20 mmでひずみ速度 3.36×10^{-3} , 3.50×10^{-2} , 3.58×10^{-1} , 3.73 s(対応するクロスヘッド速度: 10^1 , 10^2 , 10^3 , 10^4 mm/min)の応力-ひずみ特性を示している。なお、ひずみは真ひずみであり、ひずみ速度は変位-時間特性から得られたものである。図5にみられるように、応力-ひずみ曲線の立上り部の傾斜は、クロスヘッド速度に依存せずほぼ一定であるので、本研究におけるひずみ速度の範囲では、ひずみ速度の縦弾性係数への影響はかなり少ないことがわかる。

図3から図5の実験結果より、著者らが製作した試験機は、実験の再現性および精度の両面でほぼ満足すべき性能を有していることがわかった。

4. 構成式

4.1 モデル中の各ひずみ成分の分離 本研究で

Fig. 5 Stress vs. strain

Fig. 6 Mechanical model of UHMW-PE

用いた UHMW-PE の力学的モデルを図6に示す。このモデルに基づいて、ひずみ ϵ (標点間のひずみ) を次式で仮定する。

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p + \epsilon_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ϵ_e は弾性ひずみ、 ϵ_p は剛粘塑性ひずみ、 ϵ_c は粘弾性ひずみである。実験で得られるのは全体のひずみのみであるので、以下のように応力に対応する塑性ひずみおよび粘弾性ひずみを求め、この結果から構成式を検討する方法を述べる。

(1) あるひずみに対するひずみ回復後(ここでは除荷後24時間)の残留ひずみを測定する。この残留ひずみを塑性ひずみとみなし、各ひずみ速度ごとにひずみと塑性ひずみの関係を求める。

(2) 図5より近似的に縦弾性係数 E を定め、ひずみから(1)で近似式で表した塑性ひずみと弾性ひずみを引くことによって、粘弾性ひずみを求める。

(3) (1), (2)で得られたデータに基づき構成式を構築する。

図7に、各ひずみ速度条件における合計48本の試験片のひずみと塑性ひずみの関係を示す。図7に示すように、24時間後の残留ひずみ(塑性ひずみ)は引張ひずみ速度が大であるほど大きくなっており、一般の金属材料と逆の傾向がみられる。この実験結果から、ひずみ速度ごとに二次多項式による最小二乗近似を行うと、次式および図7の実線に示すような結果が得られた。

$$\epsilon_p^{(k)} = a^{(k)} \epsilon^{(k)2} + b^{(k)} \epsilon^{(k)} + c^{(k)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、添字の $k=1, \dots, n$ は n 種類のひずみ速度に対応しており、式(2)の係数はひずみ速度によって異なることを意味する。

また、 $\epsilon_p^{(k)}=0$ となる $\epsilon^{(k)}$ (初期降伏点)は、

$$\epsilon^{(k)} = \frac{-b^{(k)} \pm \sqrt{b^{(k)2} - 4a^{(k)}c^{(k)}}}{2a^{(k)}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となるが、物理的な意味から符号は正の場合を採用し

Fig. 7 Plastic strain vs. strain

た。

式(2)と式(3)より、応力-ひずみの離散的測定データから塑性ひずみを分離することができるが、初期降伏点と近似係数 $a^{(k)}$, $b^{(k)}$, $c^{(k)}$ がひずみ速度により異なるので、それらを考慮した処理が必要である。

図8に分離された応力-塑性ひずみ線図を示す。

次に、図5に示す応力-ひずみ線図より、弾性部分の縦弾性係数を $E=1\,000\text{ MPa}$ と近似する。粘弾性ひずみは、式(1)より

$$\epsilon_c^{(k)} = \epsilon^{(k)} - \epsilon_p^{(k)} - \epsilon_e^{(k)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となるので、ひずみから弾性ひずみと式(2)に示す塑性ひずみを差し引くことにより求められる。

図9に分離された応力-粘弾性ひずみ線図を示す。

4・2 塑性部の応力-ひずみ関係式 塑性構成式として、応力が静的な応力(塑性ひずみの関数)と粘性部の動的な応力(塑性ひずみおよび塑性ひずみ速度の関数の積)の和で表されると仮定し、次式で示す関係式を用いた。

$$\sigma(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p) = \sigma_0(\epsilon_p) + f_1(\epsilon_p)f_2(\dot{\epsilon}_p) \quad \dots\dots\dots (5)$$

なお、引張試験では全体のひずみ速度を一定としているので、塑性ひずみ速度を次式のようにひずみ速度から求めることにする。

$$\dot{\epsilon}_p = f(\epsilon_p, \dot{\epsilon}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$\dot{\epsilon}_p$ を式(6)で表すために、以下のように式を変形する。

式(2)の両辺を時間微分する。

$$\dot{\epsilon}^{(k)} = (2a^{(k)}\dot{\epsilon}^{(k)} + b^{(k)})\dot{\epsilon}^{(k)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

さらに、式(2)は次のように変形される。

$$\epsilon^{(k)} = \frac{-b^{(k)} + \sqrt{b^{(k)2} - 4a^{(k)}(c^{(k)} - \epsilon_p^{(k)})}}{2a^{(k)}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

これを式(7)に代入すると、

$$\dot{\epsilon}^{(k)} = \dot{\epsilon}^{(k)} (\sqrt{b^{(k)2} - 4a^{(k)}(c^{(k)} - \epsilon_p^{(k)})}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

となり、塑性ひずみ速度は $\dot{\epsilon}_p = f(\epsilon_p, \dot{\epsilon})$ の形式で表すことができる。

本研究では、応力を次式で示す塑性ひずみと塑性ひずみ速度の関数で表し、各係数 $\sigma_0(\epsilon_p)$, $A(\epsilon_p)$, $B(\epsilon_p)$ を以下の手順で求めることにする。

$$\sigma(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p) = \sigma_0(\epsilon_p) + A(\epsilon_p)\ln(1 + \alpha\dot{\epsilon}_p) + B(\epsilon_p)\{\ln(1 + \alpha\dot{\epsilon}_p)\}^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 α は定数であり、ここでは2000とした。

まず、応力-塑性ひずみの各ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{(k)}$ ($k=1, \dots, n$) ごとの離散データ列において、一定の塑性ひずみ $\epsilon_{p(j)}$ (正確にはいちばん近いデータ点であり、各ひずみ速度により異なるのでプログラムで追跡) を指定し、その塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{p(j)}^{(k)}$ を式(9)を用いて求める。次に、 $\epsilon_{p(j)}$ に対応する $\sigma_{(j)}^{(k)}$ の組を求める。このひずみ速度の異なるデータに対し、 $\ln(1 + \alpha\dot{\epsilon}_{p(j)})$ についての二次多項式

$$\sigma_{(j)} = \sigma_{0(j)} + A_{(j)}\ln(1 + \alpha\dot{\epsilon}_{p(j)}) + B_{(j)}\{\ln(1 + \alpha\dot{\epsilon}_{p(j)})\}^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

による最小二乗近似を行い、 $\sigma_{0(j)}$, $A_{(j)}$, $B_{(j)}$ を求める。以上の手順を各 $\epsilon_{p(j)}$ について繰返す。

最後に、任意の塑性ひずみ ϵ_p についての関数としての応力 σ を得るために、 $\sigma_{0(j)}$, $A_{(j)}$, $B_{(j)}$ の各データ列に対しそれぞれ近似を行うことにより式(10)の各係数が求められる。

図10から図12に各係数と塑性ひずみの関係を示す。なお、図中の実線はそれぞれ多項式による最小二乗近似である。図11と図12の比較から明らかなように、係数 $B(\epsilon_p)$ は係数 $A(\epsilon_p)$ に比べて極めて小さな値となる。

図13に得られた構成式を用いた応力-塑性ひずみ曲線を実線で示す。図中のプロット点は近似に使用した実験データからのサンプル点である。

4・3 粘弾性部の応力-ひずみ関係式 粘弾性部の構成式についても、塑性部の構成式の考え方に準じて行う。すなわち応力、粘弾性ひずみ速度を次式で仮定する。

Fig. 8 Stress vs. plastic strain

Fig. 9 Stress vs. viscoelastic strain

$$\sigma(\epsilon_c, \dot{\epsilon}_c) = \sigma_0(\epsilon_c) + f_1(\epsilon_c)f_2(\dot{\epsilon}_c) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\dot{\epsilon}_c = f(\epsilon_c, \dot{\epsilon}) \quad \dots\dots\dots (13)$$

式(1)の両辺を時間微分し、変形すると、

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_p - \dot{\epsilon}_e \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。 $\sigma'(\epsilon)$ を応力-ひずみ線図の傾きとすると、

$$\dot{\epsilon}_e = \frac{\dot{\sigma}}{E} = \frac{\sigma'(\epsilon)\dot{\epsilon}}{E} \quad \dots\dots\dots (15)$$

であるから、式(7)および式(15)を式(14)に代入整理すると、

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon} \left\{ 1 - b - 2a\epsilon - \frac{1}{E}\sigma'(\epsilon) \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

となる。なお、簡単のために式(2)の係数 $a^{(k)}$, $b^{(k)}$ は a , b と記述する。

ところで、図9に示す応力-粘弾性ひずみ曲線を用いてデータ処理を行うためには、式(16)を式(13)の形式で表すほうが便利である。式(1)と式(2)より物理的意味を考慮すると、以下の式が求まる。

$$\epsilon = \frac{-(b-1) - \sqrt{(b-1)^2 - 4a(c + \epsilon_c + \epsilon_e)}}{2a} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式(17)を式(16)に代入すると、

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon} \left\{ \sqrt{(b-1)^2 - 4a\left(c + \epsilon_c + \frac{\sigma}{E}\right)} - \frac{1}{E}\sigma'(\epsilon) \right\} \quad \dots\dots\dots (18)$$

となり、また $\epsilon_e = \sigma/E$, $\sigma' = d\sigma/d\epsilon$ であるので、最終的には $\dot{\epsilon}_c = f(\epsilon_c, \dot{\epsilon})$ の形式で表すことができる。

Fig. 10 $\sigma_0(\epsilon_p)$ vs. plastic strain

Fig. 11 $A(\epsilon_p)$ vs. plastic strain

Fig. 12 $B(\epsilon_p)$ vs. plastic strain

塑性構成式に準じて、応力を次式で示す粘弾性ひずみと粘弾性ひずみ速度の関数で表し、各係数 $\sigma_0(\epsilon_c)$, $A(\epsilon_c)$, $B(\epsilon_c)$ を以下の手順で求めることにする。

$$\sigma(\epsilon_c, \dot{\epsilon}_c) = \sigma_0(\epsilon_c) + A(\epsilon_c)\ln(1 + \beta\dot{\epsilon}_c) + B(\epsilon_c)\{\ln(1 + \beta\dot{\epsilon}_c)\}^2 \quad \dots\dots\dots (19)$$

ただし、 β は定数であり、ここでは 10^5 とした。

まず、応力-粘弾性ひずみの各ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{(k)}$ ($k=1, \dots, n$)ごとの離散データ列において、一定の粘弾性ひずみ $\epsilon_{c(j)}$ を指定する。式(17)および式(18)を用いて、 $\dot{\epsilon}_c^{(k)}$ を計算する。このとき、 $d\sigma/d\epsilon$ は、対応する ϵ の点の周囲の複数点により最小二乗近似で求めたものである。ただし、ひずみ速度によりサンプリング周波数が異なるので、良好な近似を得るために周囲の点の個数はひずみ速度により異なる。今回は表1のものを使用した。

次に、 $\epsilon_{c(j)}$ に対応する $\sigma^{(k)}$ の組を求める。このひずみ速度の異なるデータに対し、 $\ln(1 + \beta\dot{\epsilon}_{c(j)})$ についての二次多項式

$$\sigma_{(j)} = \sigma_{0(j)} + A_{(j)}\ln(1 + \beta\dot{\epsilon}_{c(j)}) + B_{(j)}\{\ln(1 + \beta\dot{\epsilon}_{c(j)})\}^2 \quad \dots\dots\dots (20)$$

による最小二乗近似を行い、 $\sigma_{0(j)}$, $A_{(j)}$, $B_{(j)}$ を求める。以上の手順を $\epsilon_{c(j)}$ について繰返す。

最後に、任意の ϵ_c についての関数としての σ を得るために、 $\sigma_{0(j)}$, $A_{(j)}$, $B_{(j)}$ のデータ列に対しそれぞれ近似を行うことにより、式(19)の各係数が求められる。

図14から図16に各係数と粘弾性ひずみの関係を示す。図17に得られた構成式を用いた応力-粘弾性ひず

Table 1 Number of points

Speed(mm/min)	Frequency(Hz)	Points
10	2×10^2	10^3
10^2	2×10^2	10^2
10^3	2×10^2	10
10^4	2×10^3	10

Fig. 13 Calculated stress vs. plastic strain

み線図を実線で示す。図中のプロット点は近似に使用した実験データからのサンプル点である。

5. 応力緩和シミュレーション

4章では、引張試験結果から構成式を求めたが、5章では、その構成式を用いて応力緩和のシミュレーションを行い、構成式の妥当性を検証するために実験結果との比較検討を行う。

粘弾性の構成式は式(19)で与えられるから、 $\dot{\epsilon}_{in} = \ln(1 + \beta \dot{\epsilon}_c)$ とおくと、

$$\sigma = \sigma_0 + A \dot{\epsilon}_{in} + B \dot{\epsilon}_{in}^2 \quad \text{..... (21)}$$

となる。変位固定状態であるから、 $\dot{\epsilon} = 0$ であり、また、応力緩和中(除荷中)に再降伏しないと仮定すると、ひずみと塑性ひずみは定数になる。これを $\epsilon = \epsilon_{\max}$, $\epsilon_p = \epsilon_{p\max}$ とおくと、式(1)より、

$$\epsilon_{\max} = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_{p\max} + \epsilon_c \quad \text{..... (22)}$$

式(21)を式(22)に代入整理すると、

$$B \dot{\epsilon}_{in}^2 + A \dot{\epsilon}_{in} - \{ -\sigma_0 + E(\epsilon_{\max} - \epsilon_{p\max} - \epsilon_c) \} = 0 \quad \text{..... (23)}$$

となる。式(23)を $\dot{\epsilon}_{in}$ に関して解くと、 σ_0, A, B が ϵ_c についての関数であるので、 $\dot{\epsilon}_{in}$ は以下に示すように、 ϵ_c についての関数[これを $f(\epsilon_c)$ とする]となる。

Fig. 14 $\sigma_0(\epsilon_c)$ vs. viscoelastic strain

Fig. 15 $A(\epsilon_c)$ vs. viscoelastic strain

Fig. 16 $B(\epsilon_c)$ vs. viscoelastic strain

$$\dot{\epsilon}_{in} = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4B\{-\sigma_0 + E(\epsilon_{\max} - \epsilon_{p\max} - \epsilon_c)\}}}{2B} \quad \text{..... (24)}$$

ただし、符号は正をとる。したがって、

$$\ln(1 + \beta \dot{\epsilon}_c) = f(\epsilon_c)$$

$$\dot{\epsilon}_c = \frac{e^{f(\epsilon_c)} - 1}{\beta} \quad \text{..... (25)}$$

となり、 ϵ_c の非線形常微分方程式となる。

また、応力緩和は、式(22)より、

$$\sigma = E(\epsilon_{\max} - \epsilon_{p\max} - \epsilon_c) \quad \text{..... (26)}$$

で求められる。

式(25)の微分方程式を、 $t = t_1$ (引張終了、変位固定開始)のとき、 $\epsilon_c = \epsilon_{\max} - \epsilon_{p\max} - \sigma(t_1)/E$ の初期条件のもとで、簡単な直接積分法(オイラー法、刻み時間 0.01 s)で数値的に解いた。

図 18, 19 に式(25), (26)より求めた応力緩和曲線と実験結果の比較を示す。なお、○印等は実験結果のサンプル点である。図 18 は、クロスヘッド速度 10^3 mm/min において最大引張変位を 10, 15 および 20 mm、図 19 は、最大引張変位 20 mm においてクロスヘッド速度を $10, 10^2$ および 10^3 mm/min と 3 種類変えたものである。図 19 の 10 mm/min では、実験結果が計算結果に比較して若干高くなっているが、全般的に良い一致がみられており、引張試験結果から得られた構成式が妥当であることがわかる。ところで、本シミュレーション結果は、 $\beta = 10^5$ と仮定して得られたものであるが、 β に他の値を用いても図 17 に示す応力-粘弾性ひずみの関係を得ることができる。さらに詳しく述べると式(19)の σ_0 は β に依存しており、 β が大きくなると低下する傾向をもつが、 σ_0, A, B を 4・3 節で述べた方法によって決定することによって、図 17 に示す結果を得ることができる。そこで、 $\beta = 2 \times 10^3$ と極端に小さくした場合の構成式について検討する。図 20 にシミュレーション結果と実験結果の比

Fig. 17 Calculated stress vs. viscoelastic strain

Fig. 18 Stress relaxation (10³ mm/min, $\beta=10^5$) Fig. 20 Stress relaxation (20 mm, $\beta=2 \times 10^3$) Fig. 19 Stress relaxation (20 mm, $\beta=10^5$)

較を示す。図 20 にみられるように、実験結果と計算結果にかなりの差異がみられ、このことより精度の高い構成式を得るには、応力緩和実験結果も必要であることがわかる。

6. 結 言

UHMW-PE の構成式を得るための基礎的研究として、最大 10⁴ mm/min のクロスヘッド速度をもち、引張開始点での速度変化を最小限に抑え、さらに引張試験後に連続的に応力緩和とひずみ回復試験をする機能を付加した高速高精度引張試験装置を製作した。その試験装置を用いて、応力緩和特性、ひずみ回復特性、応力-ひずみ特性および残留ひずみ(塑性ひずみ)-ひずみ特性などを実験的に調べた。さらに、その実験結果を用いて超高分子量ポリエチレンの構成式の検討を行った。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 応力緩和特性、ひずみ回復特性および応力-ひずみ線図の実験結果から、著者らが製作した試験装置は、実験の再現性および精度の両面でほぼ満足すべき性能を有していることが示された。

(2) 塑性ひずみはひずみ速度が上昇すると大きくなる。また、塑性ひずみは耐力以前で生ずることが明らかとなった。

(3) 本研究で用いた超高分子量ポリエチレンは、著者らが用いた力学的モデルおよび実験範囲内においては粘弾性部で強い非線形性が得られた。

(4) 精度の高い構成式を得るためには、荷重負荷時のみならず、応力緩和時の実験データも必要であることが明らかになった。

終わりに、本研究の一部は、通産省の新規産業創造技術開発費補助金「材質、形状を最適化した高耐久性人工関節の開発」の補助によることを記して深謝する。

文 献

- (1) Willert, H. G., ほか 2 名, *Hogrefe & Huber Publishers*, (1991).
- (2) Wang, A., ほか 3 名, *Wear*, 181-183 (1995), 241-249.
- (3) Ohashi, M., ほか 3 名, *Bio-Med, Materials and Eng.*, 9 (1996), 1-11.
- (4) 大橋美奈子・ほか 3 名, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 17(1996), 45-49.
- (5) Scott, A., ほか 2 名, *IEEE Trans. Bio-Med. Eng.*, 43 (1996), 638-649.
- (6) 藤木裕行・ほか 2 名, 機論, 59-567, A(1993), 2800-2807.
- (7) 藤木裕行・ほか 2 名, 機論, 60-571, A(1994), 833-840.
- (8) 藤木裕行・ほか 2 名, 機論, 61-582, A(1995), 262-269.
- (9) 岩壺卓三・ほか 5 名, バイオエンジニアリング講演論文集, No. 96 29(1996-7), 60-61.
- (10) 桜本逸男・ほか 2 名, 機講論, No. 97 1(1997-3), 328-329.
- (11) THK 株式会社 LM ガイドアクチュエータ KR 6525 B 技術資料.
- (12) 安川電機株式会社 AC サーボモータ SGM-03 B 3 G 24 B 技術資料.
- (13) 安川電機株式会社 AC サーボバック CACR HR 05 BAB 技術資料.