



超高分子量ポリエチレンの衝撃圧縮特性

—ガンマ線照射による特性変化と人工股関節における動的応力・ひずみ解析—

小林 公一*, 柿木 俊彦**, 田邊 裕治**, 坂本 信*

Mechanical Properties of Ultra High Molecular Weight Polyethylene under Impact Compression

— Property Change with Gamma Irradiation and Dynamic Stress-Strain Analysis of Artificial Hip Joint —

Koichi KOBAYASHI, Toshihiko KAKINOKI, Yuji TANABE, and Makoto SAKAMOTO

Mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) used as a bearing material in total joint replacement system have been investigated under impact compressive load. Ten cylindrical specimens, 8 mm in both diameter and length, were machined from compression molded UHMWPE rods. Half of these specimens were gamma-irradiated in air at a dose of 2.9 Mrad without post irradiation treatment. Impact compression tests were performed using the split-Hopkinson pressure-bar technique to evaluate dynamic stress-strain relation up to 8 % strain at a strain rate of about 400 s⁻¹. For both gamma-irradiated and unirradiated specimens, stress-strain relations exhibited relatively linear portions up to 2 % strains and the gradients eventually decreased with increasing strain. Young's modulus determined from the linear portion and 0.5 % yield stress were significantly higher for gamma-irradiated specimens than for unirradiated specimens. Two-dimensional elasto-plastic stress and strain analysis of hip prosthesis was performed under impact loading using a finite element method. Results indicated that the increase in mechanical properties induced by gamma irradiation reduced plastic strain within the UHMWPE cup.

Key words: Biomechanics, Ultra-High Molecular-Weight Polyethylene, Split-Hopkinson Pressure-Bar Test, Gamma Irradiation Sterilization, Total Hip Joint Arthroplasty, FEM

1. 緒 論

人工関節の長寿命化を図る上でその応力伝達機構を明らかにすることは非常に重要である。Fig.1 に全人工股関節置換システムとその設置例を示す。同システムは金属製のステムおよび骨頭と超高分子量ポリエチレン (Ultra High Molecular Weight Polyethylene : 以下 UHMWPE) 製カップにより構成される。カップについては補強のため背面を薄い金属シェルで覆うメタルバックタイプが主流である。人工関節と骨の固定にはアクリル製骨セメントを用いる方法と用いない方法とがあり、骨セメントを用いないシステムでは表面に特殊な処理を施して骨形成を誘発することにより固定する。従って、人工股関節置換術後の関節近傍は骨、

UHMWPE 製カップ、金属製のステム、骨頭およびシェルと場合によって骨セメントで構成され、それらは機械的特性および形状が異なるので応力伝達機構は複雑である。

従来人工股関節や人工膝関節の応力・ひずみ解析に関しては有限要素法等による数値解析の手法^{(1),(2)}が多く用いられてきた。そこでは各要素の物性は実験データが限られていることもあって静的実験から求められた値が用いられる場合がほとんどであった。UHMWPE については塑性および破壊特性⁽³⁾、繰返し荷重下における挙動⁽⁴⁾、応力緩和およびクリープ特性⁽⁵⁾などが報告されているが、衝撃特性に関する研究は非常に少ない。しかしながら、皮質骨をはじめ海綿骨、UHMWPE および骨セメントは粘弾性的性質を有するので、有限要素法による人工関節の応力・ひずみ解析の精度向上を図る上で動的および衝撃荷重下を含めた幅広いひずみ速度におけるこれら材料の力学挙動を明らかにすることは極めて重要であると考えられる。

著者らは皮質骨、海綿骨および UHMWPE の衝撃特性を

原稿受付 2003 年 8 月 27 日

* 正会員 新潟大学医学部 (〒951-8518 新潟県新潟市旭町通 2-746)

** 正会員 新潟大学工学部 (〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐 2-8050)

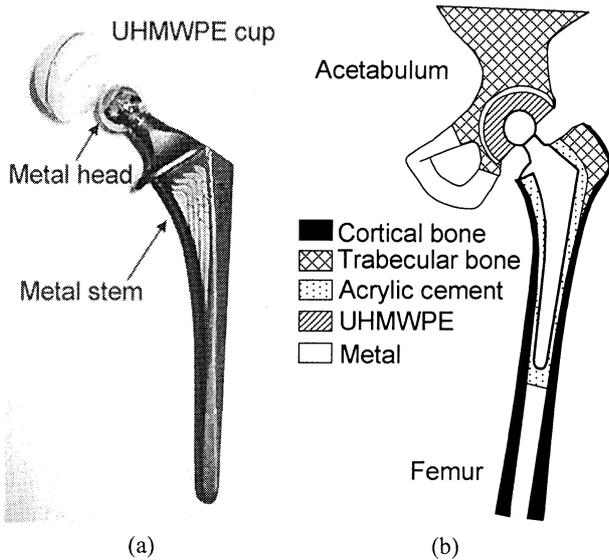


Fig.1 Total hip joint replacement system (a) and schematic of implanted prosthesis (b).

評価するためホプキンソン棒衝撃試験法を適用してその動的構成方程式について検討し⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾, UHMWPE については1%ひずみ以下では骨組織と同様に3要素標準線形固体が適用可能であることを示した。

本研究ではホプキンソン棒衝撃圧縮試験によりUHMWPEの8%ひずみまでの応力-ひずみ特性を測定した。また、現在ガンマ線照射により滅菌処理されたUHMWPEが多く用いられているが、ガンマ線照射を行うとUHMWPEの分子構造に変化が生じ、これによって力学的特性も変化することが指摘されている⁽¹⁰⁾。しかしながら、衝撃特性を考慮した報告はほとんどなく詳細は明らかにされていない。そこで一般的に行われるガンマ線照射を用いた滅菌処理によるUHMWPEの衝撃圧縮特性の変化について調べた。さらに有限要素解析によりこの特性変化が人工股関節カップ内の動的応力・ひずみ状態に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片

UHMWPE (GUR 1020) の成形丸棒材から直径 8mm, 長さ 8mm の円柱状試験片を機械加工により 10 個作製した。このうちの 5 個に対し大気中にて 2.9Mrad のガンマ線を照射した。照射後に焼き鈍し等の熱処理は行わず, 大気中で約 3 ヶ月保存した。非照射の試験片も同様に大気中で約 3 ヶ月保存した。

2.2 衝撃圧縮試験

Fig.2 に示すホプキンソン棒法衝撃圧縮試験装置により衝撃圧縮試験を行った。この試験機は弾性圧力棒(入力棒と出力棒)と打撃棒から構成されている。それぞれの材質は入, 出力棒が高炭素クロム軸受鋼 (SUJ3), 打撃棒が S45C であり, 打撃棒の衝撃端は焼入れ処理した。試験片を入力棒と出力棒の間にはさみ, 圧縮空気を利用して打撃

棒を入力棒の他端に衝突させ, 衝撃圧縮応力波を発生させた。入力棒と出力棒にはひずみゲージを貼付し, 入射波と透過波を測定した。ひずみ信号はブリッジ回路, 増幅器を経由しデジタルオシロスコープ, パーソナルコンピュータへ転送した。また, 打撃棒の衝突速度を測定するためレーザカウンタを設置した。本実験では打撃棒の衝突速度は約 2.8m/s とした。試験片のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$, ひずみ ϵ および σ は次式によりそれぞれ算出した。

$$\dot{\epsilon} = \frac{2}{\rho_0 c_0 \ell} (\sigma_I - \sigma_T) \tag{1}$$

$$\epsilon = \int_0^t \dot{\epsilon} dt = \frac{2}{\rho_0 c_0 \ell} \int_0^t (\sigma_I - \sigma_T) dt \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{A_0}{A} \sigma_T \tag{3}$$

ここで, t は時間, ρ_0 と c_0 は入, 出力棒の密度と弾性波縦波伝播速度, ℓ は試験片の長さ, σ_I と σ_T は入射波および透過波, A_0 と A は入, 出力棒および試験片の断面積である。すべての実験は室温中で(約 20°C) 行った。

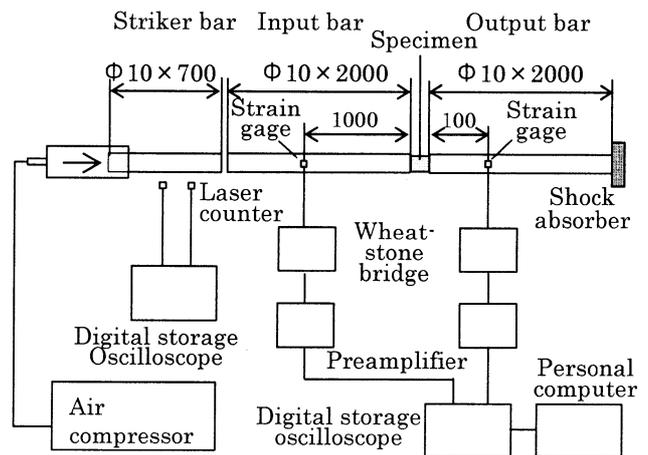


Fig.2 Schematic of split-Hopkinson pressure-bar apparatus.

2.3 有限要素解析

汎用コード ANSYS version 5.4 を用いて有限要素解析を行った。Fig.3 に示すように外径 46mm, 内径 21.82mm の半球型カップの背面を幅 3mm の金属シェルで覆った場合

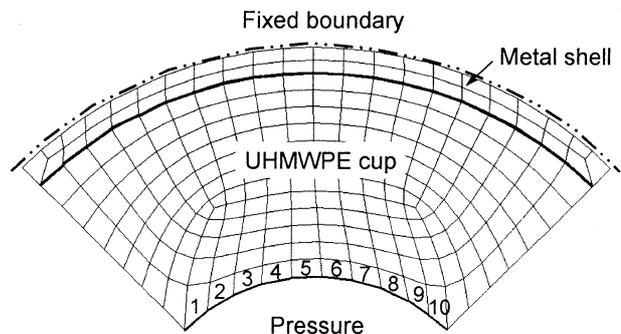


Fig.3 Two-dimensional finite element model of UHMWPE cup with metal-backing.

を想定し、その断面の半分を対象に平面応力モデル（要素数 232，節点数 745）を作成した。境界条件として金属シェル上縁の自由度を拘束し、シェルとカップ間は密着し滑り無しとした。カップ内縁の 10 要素（図中 1~10）に面圧を与えた。金属シェルの材料特性は Co-Cr 鋼を想定し弾性率 210GPa，ポアソン比 0.3 とした。カップについてはポアソン比を 0.4 とした⁽¹¹⁾ほかは次章に述べる実験結果を基に決定した。

3. 結果

3.1 応力-ひずみ特性

Fig.4 にガンマ線照射および非照射の試験片の応力-ひずみ線図を示す。ひずみ速度は約 400s^{-1} であった。両者ともひずみが 0.02 付近まではほぼ直線的であったが、それ以降はひずみの増加に伴い応力-ひずみ曲線の傾きは減少した。本研究では 0.02 ひずみまでの応力-ひずみ関係を直線で近似しヤング率を求め、次に応力-ひずみ曲線を 3 次多項式で近似し、ヤング率と同じ傾きで 0.005 ひずみを通る直線との交点における応力を便宜的に 0.5% 耐力と定義した。ヤング率、0.5% 耐力ともにガンマ線照射された試験片において有意に大きな値を示した (Fig.5)。また、ひずみ速度 $4 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ で準静的圧縮試験を行った結果、ガンマ線非照射の場合弾性率が約 5GPa，0.5% 耐力が約 12MPa であった。

3.2 人工股関節モデルの動的応力・ひずみ解析

前節の結果から UHMWPE を弾塑性体と想定し動的応力・ひずみ解析を行った。Fig.6 に示すように応力-ひずみ曲線を 0 から 0.02 ひずみ、0.02 から 0.04 ひずみおよび 0.04 から 0.08 ひずみの 3 区間に分割してそれぞれを直線で近似し最初の区間を弾性域とした。なお、バウシニング効果は考慮しなかった。各要素に与えた面圧値とその作用時間変化を Fig.7 に示す。面圧値に関しては、著者らの過去の研究⁽¹¹⁾からヤング率 1GPa で本研究と同寸法のカップに剛体人工骨頭を介して体重の 7 倍の荷重が作用した場合にカップに生じる接触圧力が最大で約 23MPa であることを参考に決定した。すなわち、ガンマ線照射した UHMWPE

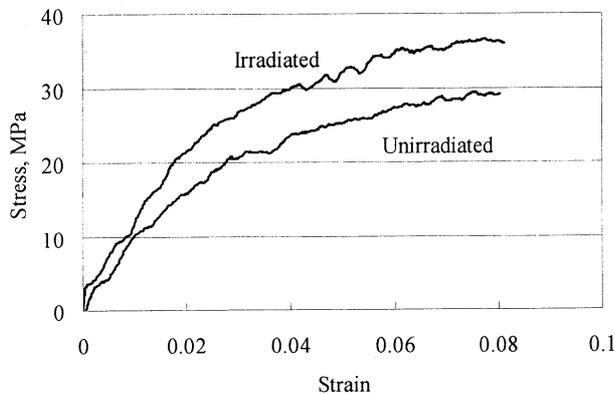
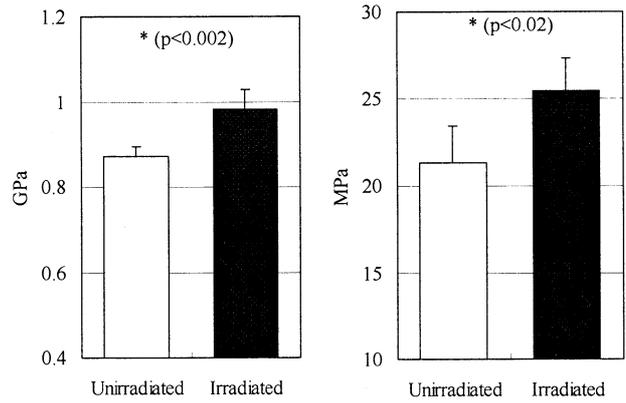


Fig.4 Stress-strain curves for gamma-irradiated and unirradiated UHMWPE specimens.



(a) Young's modulus

(b) 0.5% yield stress

Fig.5 Averages and standard deviations for the mechanical properties. Significance level was given by the value of p .

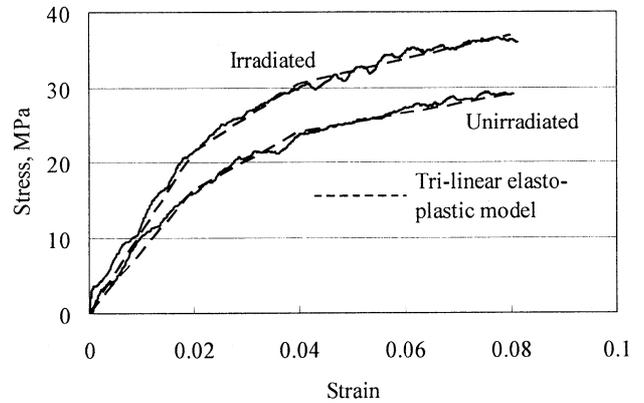


Fig.6 Elasto-plastic model for UHMWPE.

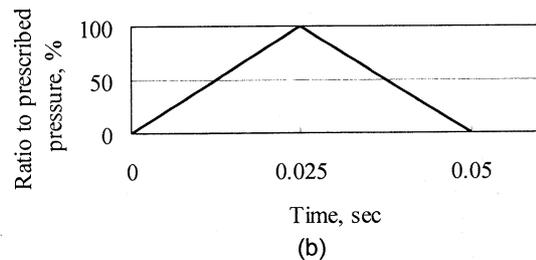
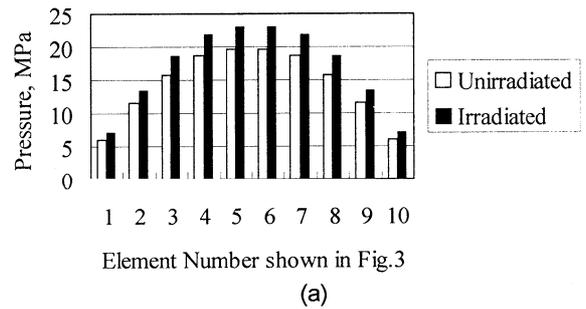


Fig.7 Applied pressure value for each element (a) and variation of pressure with time (b).

についてはヤング率がほぼ 1GPa に近いので面圧を最大で 23MPa 与え、非照射の場合はヤング率が 15%ほど小さいので面圧も 15%小さくした。作用時間変化は 5cm の高さから片足着地した際に下肢に生じる加速度の時間変化を参考にし、作用開始後 0.025 秒に各要素が所定の圧力に達し、0.05 秒後に再びゼロとなるように設定した。Fig.8 は 0.025 秒後におけるミーゼス相当応力分布である。ガンマ線非照射および照射とも応力分布形状はほぼ同じであるが、応力値はガンマ線照射の方が大きい。Fig.9 はミーゼス相当塑性ひずみ分布である。ガンマ線照射した場合、非照射に比べ最大値が 14%程度に減少し、塑性ひずみが発生した領域も大幅に小さくなった

4. 考察

UHMWPE にガンマ線照射すると分子鎖の切断と架橋に引き続いて酸化が進行し、これによって機械的劣化が生じると一般的に認識されている⁽¹⁰⁾。本研究と同程度のガンマ線照射が UHMWPE の力学的特性にどの程度影響を及ぼすのか従来の研究と比較すると、Lewis ら⁽⁵⁾は 5.0Mrad のガンマ線照射が引張りおよび圧縮クリープ特性の有意な低下を引き起こすことを示した。McKellop ら⁽¹²⁾は静的引張り荷重下において、4.5Mrad でガンマ線照射することで耐力はわずかに増加するものの、最大応力と破断伸びは減少することを示した。彼らはまた Izod 型試験機を用いて衝撃強度が減少することを示した。Gillis ら⁽¹³⁾は大気中の 2.5Mrad もしくは 5.0Mrad のガンマ線照射による引張り弾性率と耐力の変化は小さいと報告したが、非照射の結果を示さなかった。一方、北倉ら⁽¹⁴⁾は 2.5Mrad ガンマ線照射しても準静的な引張ヤング率と強度は非照射の場合と同程度であると報告した。本結果は静的引張荷重下ではあるが耐力が上昇することを示した McKellop らの報告を支持している。

有限要素法による人工股関節の応力・ひずみ解析に関しては従来静的弾性解を求めた報告が大半であり、動的弾塑性解析を行った例は少ない。Teoh ら⁽²⁾はカップを降伏応力 8MPa の弾完全塑性体とし、歩行荷重を想定して 3次元有限要素解析を行った。その結果、カップに生じる応力は最大でも 8MPa 以下であることを示した。本解析では体重の 7 倍の負荷が衝撃的に作用した場合を想定したので彼らの結果より大きい応力が発生した。日常においてこのような負荷が発生する頻度は低いと思われる、さらに UHMWPE カップにおけるひずみ速度はおよそ $0.9s^{-1}$ とホプキンソン棒法でのひずみ速度と大きな差異があったが、人工股関節の破壊機構を解明する上で転倒などさらに衝撃的な負荷が作用する状況も考慮する必要があるので、ホプキンソン棒法で求めた物性値を用いる意義はあると考える。

本研究で示されたヤング率および 0.5%耐力の上昇自体は有限要素解析で示されたように好ましい特性変化であり、これが機械的劣化かどうかは靱性特性やガンマ照射後の保存期間等についてさらに検討した上で判断すべきと考える。

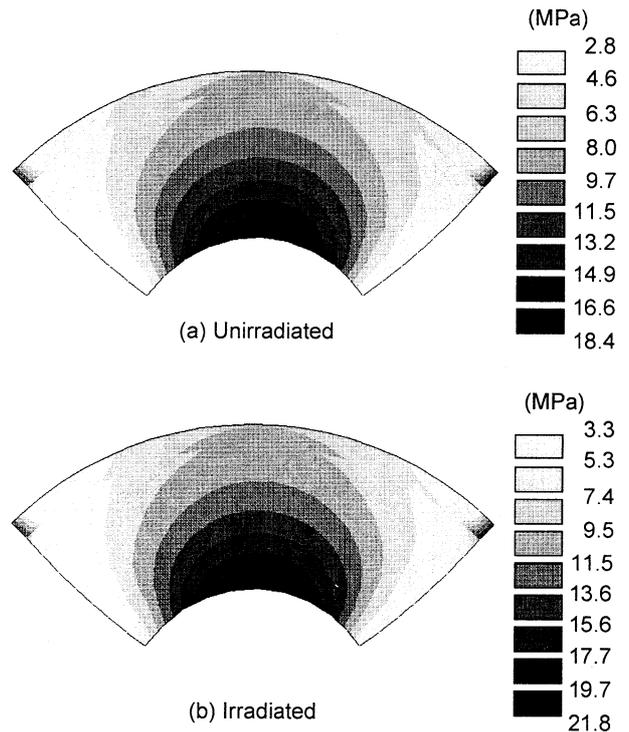


Fig.8 Mises equivalent stress distributions at 0.025 sec.

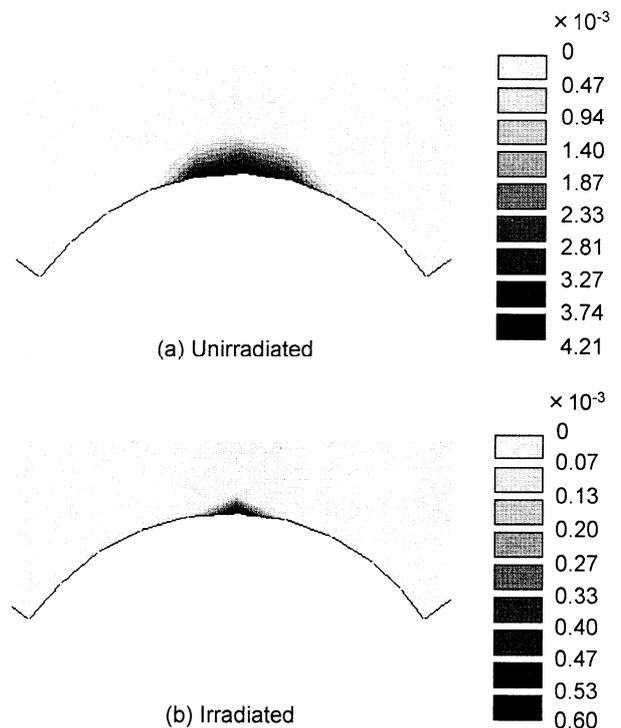


Fig.9 Mises equivalent plastic strain distributions at 0.025 sec.

最後に、生体内では人工骨頭とカップは動的すべり接触しているが、本研究では簡略化のため骨頭とカップの接触解析は省いた。今後、解析の 3次元化と併せ検討する予定である。

5. 結論

UHMWPE の衝撃圧縮特性について調べるため、ホプキンソン棒衝撃試験法を用いて 8%ひずみまでの応力-ひずみ関係を測定した。また通常行われるガンマ線照射による滅菌処理が UHMWPE の衝撃特性に与える影響について検討した。さらに 2 次元有限要素解析によりガンマ線照射による特性変化が人工股関節内の動的応力・ひずみ状態に及ぼす影響について調べた。その結果を要約すると以下のようになる。

1. ガンマ線照射された試験片と非照射の試験片ともにひずみが 2%付近まではほぼ線形の応力-ひずみ関係を示したが、その後はひずみの増加に伴い応力-ひずみ曲線の傾きは減少した。
2. ガンマ線照射された試験片においてヤング率, 0.5%耐力ともに 15%程度有意に大きい値を示した。
3. UHMWPE を弾塑性体と想定した場合, ガンマ線照射するとカップに発生するミーゼス相当塑性ひずみは, 非照射の 14%程度に減少した。

謝辞

試料を提供頂いた瑞穂医科工業 (株) 遠藤ミゲル雅崇氏に謝意を表す。

参考文献

- (1) Huijskes, R. : Biomechanics of artificial-joint fixation, *Basic Orthopaedic Biomechanics* (Mow, V.C. and Hayes, W.C. eds.), Raven Press (1991), 375-442.
- (2) Teoh, S.H., Chan, W.H., and Thampuran, R. : An elastoplastic finite element model for polyethylene wear in total hip arthroplasty, *J. Biomech.*, **35**(2002), 323-330.
- (3) Kurtz, S.M., Pruitt, L., Jewett, C.W., Crawford, R.P., Crane, D.J., and Edidin, A.A. : The yielding, plastic flow, and fracture behavior of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements, *Biomaterials*, **19-21**(1998), 1989-2003.
- (4) Krzyzpow, D. J. and Rimnac, C. M. : Cyclic steady state stress-strain behavior of UHMW polyethylene, *Biomaterials*, **21-20**(2000), 2081-2087.

- (5) Lewis, G. and Carroll, M. : Effect of crosslinking UHMWPE on its tensile and compressive creep performance, *Bio-Medical Mat. Eng.*, **11**(2001), 167-183.
- (6) Tanabe, Y., Kobayashi, K., Sakamoto, M., Hara, T., and Takahashi, H. : Identification of the dynamic properties of bone using the split-Hopkinson pressure-bar technique, *Biomaterials' Mechanical Properties*, ASTM STP 1173(1994), 127-141.
- (7) 小林公一, 田辺裕治, 原利昭 : 衝撃圧縮荷重下におけるウシ海綿骨の力学的挙動, 日本機械学会論文集 A 編, **63-616**(1997), 2624-2630.
- (8) Kobayashi, K., Kayama, T., Nanao, T., Sakamoto, M., and Tanabe, Y. : Mechanical properties of UHMWPE subjected to impact compressive load, *Theo. Applied Mech.*, **51**(2002), 3-8.
- (9) Kobayashi, K., Sakamoto, M., and Tanabe, Y. : Characterization of the mechanical behavior of UHMWPE subjected to impact compressive load, *Acta Bioeng. Biomech.*, **4-1**(2002), 662-663.
- (10) Lewis, G. : Properties of crosslinked ultra-high-molecular-weight polyethylene, *Biomaterials*, **22**(2001), 371-401.
- (11) 早福優, 坂本信, 坂井淳, 寺島和浩, 古賀良生, 大森豪, 遠藤直人 : 人工股関節接触面圧力の RBSM による数値解析, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, **20**(1999), 77-82.
- (12) McKellop, H., Shen, F.W., Lu, B., Campbell, P., and Salovey, R. : Development of an extremely wear-resistant ultra high molecular weight polyethylene for total hip replacements, *J. Orthop. Res.*, **17** (1999), 157-167.
- (13) Gillis, A.M., Schmieg, J.J., Bhattacharyya, S., and Li, S. : An independent evaluation of the mechanical, chemical and fracture properties of UHMWPE cross linked by 34 different conditions, *Trans., 45th ORS*, (1999), 908.
- (14) 北倉隆寛, 富田直秀, 青山栄一, 御守直樹 : UHMWPE の機械特性に及ぼす γ 線滅菌および vitamin E 添加の影響, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, **20**(1999), 303-305.