

氏 名	しば た のぶ ゆき 柴 田 延 幸
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3682 号
学位授与の日付	平 成 14 年 7 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Fatigue Damage of Ultra- high Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) and its Control in Joint Prostheses (関節置換術における超高分子量ポリエチレン (UHMWPE) の疲労破壊と その制御)
論文調査委員	(主 査) 教 授 池 内 健 教 授 北 條 正 樹 教 授 富 田 直 秀

論 文 内 容 の 要 旨

人工関節の使用可能年数を決めるのは関節自体の耐久性ではなく、ポリエチレンの摩耗粉に対する生体反応に起因する骨との界面のゆるみである。そこで、ポリエチレンの摩耗を減少させるために、ガンマー線照射を行うことがある。その場合、デラミネーションとよばれる一種の疲労摩耗が生じる可能性が高くなるので、高耐久性人工関節を実現するためには摩耗と疲労の両方を防止しなければならない。本研究の目的は耐久性の高い人工関節を実現するために、人工関節用ポリエチレンにおけるデラミネーションの機構を解明し、それを防止する技術を開発することである。また本論文の内容を要約すると次の通りである。

第1章では人工関節におけるポリエチレンの損傷、特にデラミネーションの発生機構を概説するとともに、本研究の意義、目的、方法について記述している。

第2章では人工関節全置換術について概説し、特に人工膝関節に用いられる超高分子量ポリエチレンの特性とそれに関する研究を紹介している。そして人工関節においては摩耗とデラミネーションの両方を防止することが必要であり、膝関節においては特に後者が重要であると主張している。

第3章ではポリエチレンの変形をシミュレートするために離散要素法 (DEM) に基づく数学モデルを提示している。この方法は内部における転位や滑りおよびクラックの発生と進展を含む固体の不連続な変形問題を解析することが可能であるので、ポリエチレンにおけるデラミネーションの解析において有力な武器となりうる。

第4章では離散要素法に基づく数学モデルを用いた一軸引張り試験のシミュレーションを扱い、ポリエチレンの破壊様式、材料の不均一性の局所応力ひずみ特性への影響及び破壊モードに及ぼす荷重の影響を調べている。その結果、ガンマー線照射したポリエチレンでは粒界における応力とひずみが数倍に増加することを明らかにしている。

第5章では離散要素モデルを用いて、周期圧縮荷重下での局所応力ひずみ場に及ぼすポリエチレンの粒内と粒界における力学特性の不均一性の影響を数値的に解析している。計算結果によれば、荷重が単に周期変化する場合と比べて、荷重の方向が90度切り替わる場合には、ポリエチレンの粒界において疲労によるクラックの発生と進展がはるかに顕著である。また後者の場合にはモード (I) の開口現象によって疲労が加速されることとなる。一方、単純な周期圧縮荷重と周期的に切り替わる荷重を問わず、粒内と粒界におけるポリエチレンの力学特性の違いは、局所応力ひずみ場に顕著な影響を及ぼさないことも明らかにしている。

実際の膝関節ではポリエチレンの部品は滑りと転がりを含む複雑な周期荷重にさらされる。そこで第6章では周期滑り運動下における微小なクラックの発生と進展に次いで剝離に到るデラミネーションに及ぼすポリエチレンの粒内と粒界の力学特性の違いについて数値解析を行っている。計算結果によれば、ガンマー線を照射したポリエチレンでは粒内と粒界における力学特性の構造的不均一性のために粒界に沿って応力集中が生じ、特に粒内と粒界における特性の不連続な変化は微小応力場を大幅に変化させる。しかし、ガンマー線照射をしないかまたはビタミン E を添加後にガンマー線照射したポリエチレンにおいては、表面下の粒界における応力集中の度合いが減少する。このように内部の微小なレベルでの力学特性の不均

一性がデラミネーションの原因となるクラックの発生と進展に顕著に影響を及ぼすことが明らかになっている。

第7章では膝関節のポリエチレン部品を試料とする両方向滑り疲労摩耗試験の結果を示している。実験結果によれば、ガンマー線照射を行った試料では表面下の粒界においてクラックの発生と進展が加速され、次いで、滑り面の粗さが増加してデラミネーションに到る。したがって、デラミネーションを防止するためには、表面化の粒界におけるクラックの発生と進展を減少させることが必要であり、そのためには、ガンマー線照射に先立ってポリエチレンにビタミンEを添加するのがひとつの有効な手段であることが実証された。

論文審査の結果の要旨

本論文は耐久性の高い人工関節を実現するために、人工関節用超高分子量ポリエチレンにおけるデラミネーション発生と進展の機構を解明するとともに、それを防止する技術を開発することを目的として研究を行った成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 人工関節におけるポリエチレンの変形問題を数値解析するため、離散要素法に基づく新しい数学モデルを提示した。このモデルは不連続な変形問題の解析が可能であるので、ポリエチレンの粒内と粒界における変位と滑り、クラックの発生と進展及びデラミネーションの発生の予測に適用できるものである。
2. 一軸引張り試験において、粒内と粒界におけるポリエチレンの力学特性の不均一性のために応力一ひずみ場は様ではない。特にガンマー線照射した場合には、粒界における応力とひずみが粒内の数倍になる。この粒界に沿う応力集中がクラック発生の原因になりうる。
3. 一方向の周期的な圧縮が加わる場合に比べて、方向が90度異なる圧縮荷重が周期的に切り替わる場合には、ポリエチレンの粒界において高い応力集中が生じてクラックが発生し、その後、クラックはモード（Ⅰ）の開口現象によって急速に進展してデラミネーションに至る。しかし、いずれの荷重下でも、粒内と粒界の力学特性の差は局所応力ひずみ場にはほとんど影響しない。
4. ガンマー線照射したポリエチレンでは、周期的な往復滑りにおいて表面下の粒界に沿って応力が集中する結果、クラックが発生して急速に進展し、デラミネーションに至る。しかし、ビタミンEを添加後にガンマー線照射したポリエチレンでは応力集中が大幅に緩和され、デラミネーションの発生が抑制される。

以上、要するに本論文は、人工関節用ポリエチレンの変形特性を正確に解析することの可能な新しい計算モデルを提示し、数値シミュレーションと実験によりクラックの発生と進展の機構を調べ、その結果をもとにデラミネーションを生じ難い人工関節用ポリエチレン材料を設計する指針を明らかにしたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また平成14年6月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。