

氏名	森 亜 希 子		
授与した学位	博 士		
専攻分野の名称	工 学		
学位授与番号	博甲第2610号		
学位授与の日付	平成15年 9月30日		
学位授与の要件	自然科学研究科システム科学専攻 (学位規則第4条第1項該当)		
学位論文の題目	人工膝関節材料の構造最適化に関する研究		
論文審査委員	教授 尾坂 明義	教授 三浦 嘉也	教授 三宅 通博

学位論文内容の要旨

本研究では、人工関節の摺動部材として用いられている超高分子量ポリエチレン (UHMWPE) の成形条件や各種添加剤の影響を検討し、酸化劣化および摩耗に対して長期的に高い耐性を有する人工膝関節用 UHMWPE コンポーネントの開発を試みた。得られた UHMWPE は、経年的酸化をシミュレーションする加速酸化試験法を用いた抗酸化試験、引張試験、疲労摩耗試験により評価した。本論文は、序論、結論を含め、以下の7章から構成されている。

1. 序論：上述の本研究の背景、目的、および従来の研究について述べた。
2. 超高分子量ポリエチレンの酸化劣化に対する耐性：Direct Compression Molding 法を用いて UHMWPE の成形圧力、成形雰囲気等の成形条件、および添加剤の影響を検討した。成形条件や添加剤が UHMWPE 粒子間の融着状態および fusion defect の発生状態を左右し、経時的酸化に対する耐性に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。
3. 超高分子量ポリエチレンの引張特性：2 で検討した各種 UHMWPE がどのような機械的特性を有するのか、特に引張特性について検討した。その結果に基づき、粒界の融着状態が UHMWPE の抗酸化力のみならず、引張特性等、機械的特性にも大きく影響することを示した。
4. 超高分子量ポリエチレンの疲労摩耗に対する耐性：人工膝関節のおかれる生体内環境を想定して、膝関節特有の摺動面同士の離間現象 (lift-off) を模倣する凸面接触型の衝撃疲労摩耗試験機を設計、製作した。この試験機を用いてビタミン E 添加 UHMWPE の疲労摩耗特性を評価した結果、無添加の UHMWPE に比べ、その摩耗量は 1/5 まで低減した。したがって、ビタミン E 添加 UHMWPE は人工膝関節用摺動部材としての利用が期待できる。
5. ビタミン E 添加超高分子量ポリエチレンの特性：人工関節用摺動部材の製造工程を考慮し、加熱加圧成形工程におけるビタミン E の添加効果について検討した。ビタミン E は加熱時の UHMWPE の熱劣化を抑制する役割を担ったが、酸素共存下における加熱においては、成形温度と成形時間の選択が不適切である場合、ビタミン E 自身の酸化が劇的に進行することを示した。また、ビタミン E の添加により、本来、斜方晶から成る UHMWPE が、単斜晶も含めた結晶構造をとることを示すと共に、ビタミン E の添加により、 γ 線照射やその後の酸化劣化に対する耐性が向上することを明らかにした。
6. クロスリンクポリエチレン (crosslinked UHMWPE) の長期安定性：参考として、近年人工股関節用に開発された crosslinked UHMWPE の長期安定性を、加速酸化試験法を用いて検討した。その結果、極めて程度は低いものの、酸化の進行を裏付ける形態変化が認められた。これらの結果に基づき、化学反応を用いた酸化防止の制御は極めて困難であることを示した。
7. 結論：本研究の結論と今後の課題について述べた。

論文審査結果の要旨

損傷した膝関節の置換術に用いられる人工膝関節の摺動部材の超高分子量ポリエチレン (UHMWPE) は、従来型の成形条件では、短期間でハニカム構造と呼ばれる劣化構造が生成し、長期にわたる使用には耐えない。本研究では、成形条件や各種添加剤の影響を検討し、酸化劣化および摩耗に対して長期的に高い耐性を有する人工膝関節用 UHMWPE コンポーネントの開発に成功し、さらに経年的酸化をシミュレーションする加速酸化試験法ををも開発している。本研究の成果は次のようにまとめることができる。

1. 成形圧力・雰囲気等の成形条件および添加剤が UHMWPE の酸化劣化耐性に及ぼす影響を検討した。その結果、1) UHMWPE 粒子界面を拡散浸透する外部酸素と、2) 粒子内の内在酸素による 2 種の酸化機構があること、それを防ぐには粒子熔融前段階における高荷重下での冷間圧縮、および減圧下での成形がそれぞれ特に有効であること等を明らかにした。
3. 引張特性等の検討から、fusion defect 型構造欠陥の存在よりも UHMWPE の粒子間融着の強さが、機械的特性に大きく影響することを明らかにした。
4. 歩行時の生体内環境をより再現する、膝関節特有の摺動面同士の離間現象 (lift-off) を模倣する凸面接触型の衝撃疲労摩耗試験機を新規に設計製作した。この試験機は従来機では不可能であったハニカム構造型欠陥を再現できた。
5. ビタミン E の抗酸化性と潤滑性に着目し、ビタミン E を添加した試料を用い 4 のシミュレーターでその疲労摩耗特性を評価した。その結果、無添加の UHMWPE に比べ、摩耗量は 1/5 まで低減した。また、滅菌用 γ 線照射やその後の酸化劣化に対する耐性が向上することを明らかにし、ビタミン E 添加 UHMWPE は人工膝関節用摺動部材として極めて優れていると結論した。
6. その他、近年開発されたクロスリンク (橋掛け) 型 UHMWPE の長期安定性は上記 5 の材料と比較し、クロスリンク法は、酸化防止の制御には極めて困難であること等を示した。

以上のように、森さんの研究成果は人工膝関節摺動部材としての UHMWPE のみならずすべての UHMWPE の劣化防止等に関する重要な知見を与え、医療材料工学上の貢献は多大である。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。