

学位論文題名

機能性表面構造を有する人工股関節摺動面に
関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

1960年代初頭にイギリスのCharnleyが股関節全置換術(Total Hip Replacement, THR)に成功して以来、人工関節は本格的に発展し、現在では世界中で年間30万例以上のTHRがおこなわれている。THR症例数の増加に伴って経年的なmechanical failure例も増加しており再置換術がおこなわれるようになってきた。再置換術をおこなわなくてはならない理由は、主に人工関節摺動面の摩耗とカップやステム部分のゆるみ(loosening)である。最近の研究によって、この摺動面の摩耗とlooseningとの間に密接な関係があること、すなわち摺動面における超高密度ポリエチレン(ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE)の摩耗粉の発生がlooseningの大きな原因であることが明らかになってきた。したがってlooseningの防止には人工関節摺動面におけるUHMWPEの摩耗を防止することが不可欠であり、それによって患者にたいへんな負担のかかる再置換術の症例を減らすことができる。

本研究は、人工関節摺動面の表面改質をおこない、その潤滑性能の向上を図ろうとしたものである。従来より摩擦摺動面の潤滑性能の向上を目的として、摺動部表面に凹凸パターンを形成する表面改質法を開発してきた。これは主に機械部品用のドライベアリングの摩擦・摩耗特性を改善するためのもので、特に潤滑油を含まない状態での金属対金属の摺動における摩擦特性を向上させる技術である。本研究は、この技術を人工関節摺動面に応用することにより、UHMWPE摩耗粉の発生を抑え人工関節の寿命を延長させることを目的とし、そのための基礎的な検討をおこなった。

本論文は全体で5章からなる。

第1章は「序論」であり、人工関節の歴史・材料・問題点などについて述べた後、本論文で取り扱う内容の工学的な基礎となるトライボロジについて概説している。さらに本論文で提案している摩擦摺動面への機能性表面構造(凹凸パターン)付加について紹介して、本研究の位置づけと目的を明らかにしている。

第2章は「pin on diskによる摩擦・摩耗実験」と題し、pin on disk摩擦・摩耗試験機を用いて、パターン付加による潤滑性能向上について検討している。上に述べたように、凹凸パターン技術は元来ベアリングをターゲットとして開発されたものであり、金属対金属の摺動においては非常に大きな効果をあげているが、人工関節のように金属対高分子材料の摺動においても、その効果を発揮するかどうかは不明であった。そこでpin on disk摩擦試験機を用いて金属対高分子材料の摩擦実験をおこなったところ、金属対高分子材料の摺動においても、摺動面のパターン付加によって摩耗量を大幅に抑えることが可能であり、潤滑性能を向上させることが可能であることがわかった。また、潤滑性能の向上の程度は付加したパターンの径とピッチに依存しており、潤滑性能を最も向上させる最適な径・ピッチが存在していることもわかった。これら径、ピッチによる最適値存在の理由についても考察を加えた。

第3章は「ボールとカップによる摩擦実験」と題し、市販の人工股関節に凹凸パターンを付加した試料を用いて摩擦実験をおこない、その潤滑性能について検討している。第2章によって、金属対高分子材料の摺動においてもパターン付加技術が摩擦・摩耗特性向上に有効であることがわかったが、これは pin on disk による実験(平面对平面 または 平面对球面)の結果である。そこで市販されている人工股関節のカップと骨頭を試料とした摩擦実験(球面对球面)をおこなった。ウェットエッチング法により市販の人工股関節骨頭に凹凸パターンを付加した試料は、パターンを付加していない(すなわち市販のままの状態)の試料と比べて、摩擦係数が低く摩擦状態も安定していた。これによって pin on disk 試験機のような球面对平面の場合だけでなく、球面对球面の場合においても摺動面への凹凸パターン付加が効果を示すことがわかった。

第4章は「関節シミュレータ実験」と題し、関節シミュレータを試作し、それを用いて、市販の人工股関節に凹凸パターンを付加した試料の潤滑性能について検討している。凹凸パターン付加技術を人工股関節に応用するにあたっては、実際の歩行を模した関節シミュレータによる摩擦実験が必要である。そこで関節シミュレータを試作し、これを用いた摩擦実験をおこなった。第3章で用いたものと同様の試料(骨頭にパターン付加)を用いて実験をおこなったところ、カップの摩耗量に大きな違いが見られた。すなわちパターンを付加した試料はパターンなしのものと比較して、カップの摩耗量が約1/2に減少した。また、実験終了後の摺動面の観察でも大きな違いが見られ、パターンを付加していない試料に比べて付加した試料では摺動表面の摺動痕が少なくスムーズで、表面あらさも小さかった。また、市販の人工関節摺動面の形状精度がベアリング等と比較して非常に劣っていることを指摘し、形状精度を改良した人工関節を試作し、摺動実験をおこなった。その結果、形状精度を改良しただけでも潤滑性能が向上したが、それにパターンを付加した試料はさらに潤滑性能が良好であることがわかった。さらに摺動面に変動荷重を与えられるよう関節シミュレータを改良し、より実際の歩行に近い状態での摺動実験をおこなった。その結果、市販の人工関節では UHMWPE の摩耗、摺動面の傷(摩耗痕)が観察されたが、形状精度を改良したものにパターンを付加した試料では UHMWPE の摩耗や摺動痕がほとんどない、良好な潤滑状態が得られた。第4章の最後では、摺動面にパターンを付加した場合の潤滑状態改善に関しての考察をおこなっている。

第5章は「結論」であり、前章までの実験・研究で得られた知見、結論および今後の研究課題として残された問題をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 田 村 好 矩
副 査 教 授 五 十 嵐 悟
副 査 教 授 石 川 博 將
副 査 教 授 山 本 克 之

学 位 論 文 題 名

機能性表面構造を有する人工股関節摺動面に 関する基礎的研究

1960年代初頭にイギリスの Charnley が股関節全置換術 (Total Hip Replacement, THR) に成功して以来、人工関節は本格的に発展し、現在では世界中で年間 30 万例以上の THR がおこなわれている。THR 症例数の増加に伴って再置換術例も多くなっている。再置換術をおこなわなくてはならない理由は、主に人工関節摺動面の摩耗とカップやステム部分のゆるみ (loosening) である。最近の研究によって、この摺動面の摩耗と loosening との間に密接な関係があること、すなわち摺動面における超高密度ポリエチレン (Ultra High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) の摩耗粉の発生が loosening の大きな原因であることが明らかになってきた。したがって loosening の防止には人工関節摺動面における UHMWPE の摩耗を防止することが不可欠であり、それによって患者にたいへんな負担のかかる再置換術の症例を減らすことができる。

以上のような背景のもと、本論文は人工関節摺動面に対して表面改質をおこない、その潤滑性能の向上を図ろうとしたものである。著者は従来より摩擦摺動面の潤滑性能の向上を目的として、摺動部表面に凹凸パターンを形成する表面改質法を開発してきた。これは主に機械部品用のドライベアリングの摩擦・摩耗特性を改善するためのもので、特に潤滑油を含まない状態での金属対金属の摺動における摩擦特性を向上させる技術である。本論文はこの技術を人工関節摺動面に応用することにより、UHMWPE 摩耗粉の発生を抑え人工関節の寿命を延長させることを目的としており、そのための基礎的な検討をおこなっている。

まず pin on disk 摩擦・摩耗試験機を用いて、パターン付加による潤滑性能向上について検討されている。凹凸パターン技術は元来ベアリングをターゲットとして開発されたものであり、金属対金属の摺動においては非常に大きな効果をあげているが、人工関節のように金属対高分子材料の摺動においてもその効果を発揮するかどうかは不明であった。そこで pin on disk 摩擦試験機を用いて金属対高分子材料の摩擦実験をおこなった。その結果、金属対高分子材料の摺動においても、摺動面のパターン付加によって摩耗量を大幅に抑えることが可能であり、潤滑性能を向上させることが可能であることを明らかにした。また潤滑性能の向上の程度は付加したパターンの径とピッチに依存しており、潤滑性能を最も

向上させる最適な径・ピッチが存在していることも確認された。これら径、ピッチによる最適値存在の理由についても考察が加えられている。

次に市販の人工股関節に凹凸パターンを付加した試料を用いて摩擦実験をおこない、その潤滑性能について検討されている。金属対高分子材料の摺動においてもパターン付加技術が摩擦・摩耗特性向上に有効であることがわかったが、これは pin on disk による実験(平面对平面 または 平面对球面)の結果である。そこで市販されている人工股関節のカップと骨頭を試料とした摩擦実験(球面对球面)をおこなっている。ウエットエッチング法により市販の人工股関節骨頭に凹凸パターンを付加した試料は、パターンを付加していない(すなわち市販のままの状態)の試料と比べて、摩擦係数が低く摩擦状態も安定していた。これによって pin on disk 試験機のような球面对平面の場合だけでなく、球面对球面の場合においても摺動面への凹凸パターン付加が効果を示すことが確認された。

さらに関節シミュレータを試作し、それを用いて、市販の人工股関節に凹凸パターンを付加した試料の潤滑性能について検討されている。凹凸パターン付加技術を人工股関節に応用するにあたっては、実際の歩行を模擬した関節シミュレータによる摩擦実験が必要である。そこで関節シミュレータを試作し、これを用いた摩擦実験をおこなっている。パターンを付加した試料と付加していない試料(市販のままの状態)を用いて実験をおこなったところ、カップの摩耗量に大きな違いが見られた。すなわちパターンを付加した試料はパターンなしのものと比較して、カップの摩耗量が約 $1/2$ に減少した。また、実験終了後の摺動面の観察でも大きな違いが見られ、パターンを付加していない試料に比べて付加した試料では摺動表面の摺動痕が少なくスムーズで、表面あらかさも小さかった。また、市販の人工関節摺動面の形状精度がベアリング等と比較して非常に劣っていることを指摘し、形状精度を改良した人工関節を試作し、摺動実験をおこなった。その結果、形状精度を改良しただけでも潤滑性能が向上したが、それにパターンを付加した試料はさらに潤滑性能が良好であることが確認された。さらに摺動面に変動荷重を与えられるように関節シミュレータを改良し、より実際の歩行に近い状態での摺動実験をおこなった。その結果、市販の人工関節では UHMWPE の摩耗、摺動面の傷(摩耗痕)が観察されたが、形状精度を改良したものにパターンを付加した試料では UHMWPE の摩耗や摺動痕がほとんどない、良好な潤滑状態が得られた。また摺動面にパターンを付加した場合の潤滑状態改善に関しての考察がおこなわれている。

これらの結果を総合することにより、人工股関節摺動面形状精度を向上させ摺動面に凹凸パターンを付加する技術が、人工股関節の摩耗防止、すなわち loosening の防止・再置換手術の減少に大きな効果をもたらすことを明らかにした。

近年、人工股関節摺動面の材料は金属やセラミックスなども用いられるようになってきている。本論文で扱われている人工股関節の材料は金属(Co-Cr 合金)と高分子(UHMWPE)であるが、本論文の成果は摺動面の材料が変わっても適用できる可能性が高く、また人工股関節のみならず人工膝関節などにも応用が可能である。

以上を要するに、著者は人工股関節の摩耗を抑え、loosening を防止・再置換手術を減少させる摺動面の表面改質に関して新知見を得たものであり、生体工学、バイオトライボロジー、整形外科領域に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。