

# 関節液成分が生体材料のトライボロジー特性に及ぼす影響の実験的研究

新盛, 弘法

<https://hdl.handle.net/2324/6787606>

---

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 新盛 弘法

論 文 名 : 関節液成分が生体材料のトライボロジー特性に及ぼす影響の実験的研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

生体の関節は、体重の数倍を支える荷重支持能力、摩擦係数 0.001 以下の超低摩擦、80 年を越す高寿命を有し、優れた機械要素である。これらの特性は、表面を覆っている関節軟骨組織と関節内を満たしている関節液に由来する。特に、関節液に含まれる各種成分は、生体関節の境界潤滑に寄与していると指摘されている。現在、この生体関節の軸受機能を人工材料で再現する試みが盛んにおこなわれている。既に超高分子量ポリエチレン (Ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE) と耐食性金属合金またはセラミックスの組み合わせを用いた人工関節が、重度の関節疾患の治療法として実用化されている。しかし、現状の人工関節には、UHMWPE の摩耗、および生体組織と人工関節材料の材料物性の違いに起因する可動域の制限といった技術的課題が残されている。そこで、人工関節の更なる高機能化を目指し、生体軟骨組織に近い物理的特徴を持つ人工軟骨の使用が提案されている。しかしながら、人工材料を用いて関節機能を再現するにあたり、生体環境下における材料の振る舞いに関する知見の蓄積が求められている。

そこで本研究では、トライボロジー (摩擦・摩耗・潤滑) の観点から、生体環境における生体材料のトライボロジー特性の解明を目的とした。関節内の環境を再現するために、関節液成分を添加した模擬関節液を用いて各種試験を行った。これにより、トライボロジー特性に影響を及ぼす関節液成分の特定と、各成分間の相互作用について包括的に理解することを目指した。

第 1 章では、まず原点である生体関節の構造とその潤滑機構、その中で関節液成分が果たす役割について整理した。その後、人工関節のトライボロジー特性に対する関節液成分の影響に関する先行研究を紹介した。最後に、現在の人工関節の課題を解決する 1 つの指針として、人工軟骨候補材料の材料特性およびトライボロジー特性に関する先行研究についてまとめた。

第 2 章では、人工関節材料である UHMWPE の摩擦挙動に対し、どの関節液成分が支配的な因子なのか、さらに成分間の相互作用がどのような影響を及ぼすのかを調査した。運動形態による影響を抑えるために、単純な一軸往復動試験にて評価を行った。その結果、関節液に含まれるタンパク質が、UHMWPE と耐食性金属間の摩擦に対し、支配的な影響を及ぼすこと、他成分がタンパク質の効果を増進することが明らかにした。

第 3 章では、人工関節材料である UHMWPE の摩耗特性に対する、タンパク質を含む複数成分の影響を調査した。ここでは、臨床における人工関節の摩耗メカニズムを再現するために、多方向すべり摩耗試験機を評価に用いた。その結果、タンパク質が UHMWPE の摩耗に対しても支配的成分であることが確認された。一方で、特定の成分組成・荷重条件下ではタンパク質の影響が抑制され、UHMWPE の摩耗が抑制されることを明らかにした。

第 4 章では、前章までに得られた UHMWPE のトライボロジー特性に対する関節液成分の影響に関する知見を踏まえ、樹脂材料の機能向上を目指した複合材について、生体模擬環境における摩耗特性を評価した。ここでは、現行の UHMWPE の改善を目的とした炭素系ナノ材料充てん

UHMWPE 複合材と、UHMWPE の代替材料として、より強度の高いエポキシ系樹脂に関節液成分を複合化させた 2 種の材料を評価した。

第 5 章では、高含水ソフトマターであるハイドロゲルを関節軟骨のモデルとし、そのトライボロジー特性に対する関節液成分の影響を調査した。関節軟骨は、柔軟性、含水性、透水性、階層構造など様々な特性を有することが知られている。ここでは、特に柔軟性と含水性に着目し、関節軟骨に類似の特性を有する物理架橋ハイドロゲルを用いて試験を行った。その結果、ハイドロゲルの摩擦に対する関節液成分の影響は、すべり速度に大きく依存することを明らかにした。低速度域では、UHMWPE と同様にタンパク質がゲル表面に吸着・変成し、著しく摩擦を上昇させるが、高速度域ではタンパク質の吸着と変成が抑制され低摩擦が維持されることを示した。また UHMWPE に比べ、他成分の影響がより顕著に摩擦挙動に反映されることが明らかになった。さらに高速度域では、吸着成分よりも潤滑液の粘性が摩擦を支配することを示した。

第 6 章では、第 5 章に引き続き、ハイドロゲルを軟骨組織のモデルとして、関節液成分の摩擦への影響を調査した。ハイドロゲルのような含水性ソフトマターは、内部の水分により荷重の一部を支持し摩擦を低減すると示唆されている（固液二相潤滑）。本章では、ゲル内部の水分による固液二相潤滑効果を抑制するため、**Constant Contact** 状態での摩擦試験システムを構築し、広いすべり速度域における摩擦に対する関節液成分の影響を評価した。その結果、各関節液成分について第 5 章と同様の結果が確認された一方で、第 5 章と第 6 章の結果を比較することにより、生体模擬環境におけるトライボロジー特性に対する固液二相潤滑の重要性を明確に示した。

第 7 章では、本研究の内容を総括した。