

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870213

研究課題名(和文) 股関節カップ設置公差と生体活性皮膜の摩耗・はく離を考慮したゆるみ寿命予測法の開発

研究課題名(英文) Development of a prediction method for loosening lives of acetabular cups by considering delamination/wear of surface coating and clearances

研究代表者

大塚 雄市(Otsuka, Yuichi)

長岡技術科学大学・その他の研究科・准教授

研究者番号：80467084

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：人工股関節臼蓋カップの設置公差による荷重変動が、生体活性皮膜(HAp溶射皮膜)の局部摩耗・はく離挙動に与える影響を実験的に解明し、股関節カップのゆるみ寿命予測法を開発することを目指した研究を実施した。その場観察によりHAp溶射皮膜のはく離が皮膜の摩耗を促進させることや、臼蓋カップの緩み挙動再現試験装置を用いた検討により臼蓋カップの角変位が臼蓋カップ上のHAp溶射皮膜の損傷により促進されることを示した。そして、有限要素解析により皮膜のはく離長さが大きく、模擬骨の縦弾性係数が高い場合に摩耗が促進されることを示した。

研究成果の概要(英文)：This study aims at developing a prediction method for loosening lives of acetabular cups by considering localized wear/ delamination by clearances in placing of the cups. In-situ observation revealed that delamination at interfaces between HAp coating with substrate accelerated wear of HAp coating. Cyclic loading system for acetabular cups /stem components has been assembled. Rotational displacements of the acetabular cups were promoted by delamination / wear of HAp coating in cases of larger clearance. FEA also demonstrated that longer delamination length or higher Young's modulus of simulated fixing bones led to higher wear rates of HAp coating, which may result in shorter loosening lives of the acetabular cups.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：水酸アパタイト溶射皮膜 臼蓋カップ 設置公差 ゆるみ フレッシング摩耗 はく離 界面 破壊力学

### 1. 研究開始当初の背景

生体活性皮膜（水酸アパタイト（HA）溶射皮膜など、生体骨と直接結合する性質を持つ）は金属製人工股関節システム、カップ表面に施工され、生体骨との初期固定性の向上に有益とされる。一方、人工股関節の長期固定性に、生体活性皮膜の存在はむしろ有害であるとの臨床報告となお有益とする報告が相反している。カップの設置公差は目標値から±20°もずれるケースが有り、カップの抜去例ではHA溶射皮膜が固定ネジ穴周辺部から選択的に脱落している等、カップ設置公差による荷重状態（垂直/せん断荷重）の変動がHA溶射皮膜の摩耗・はく離を促進させる可能性が予測される。しかし、荷重変動による摩耗・はく離が最終的なゆるみへと至る力学的機構は未解明である。従来、カップの表面粗さ・固定ネジの有無・カップ表面形状により摩耗量が増加するとの報告はあるが、設置公差との対応は未検討である。HA溶射皮膜の単一荷重によるはく離強度についての報告は多いが、繰返し荷重による摩耗挙動やはく離寿命との対応は不明である。またHA溶射皮膜のフレットング摩耗挙動も検討されているが、皮膜が均一に摩耗する全域すべり条件であり、カップ表面の生体活性皮膜と生体骨の接触状態である固着-部分すべり条件は考慮されていない。これまでに股関節カップの長期固定性の悪化機構を再現するため、繰返し荷重によるHA溶射皮膜の摩耗・はく離挙動の相互作用に着目した取組みを進めている。予備成果を踏まえて、カップ設置公差による荷重変動がもたらす摩耗・はく離挙動の実験的検討へと展開することで、HA溶射皮膜の損傷がカップゆるみに至る力学的機構を解明できると考えた。

### 2. 研究の目的

人工股関節カップの設置公差による荷重変動が、生体活性皮膜（HA溶射皮膜）の局部摩耗・はく離挙動に与える影響を実験的に解明し、股関節カップのゆるみ寿命予測法を開発することを目指す。

### 3. 研究の方法

上記の目的を達成するための研究項目を以下に示す。

- (1) HA溶射皮膜のフレットング摩耗その場観察により、荷重変動を模擬した接触面圧・荷重振幅の変化がはく離と摩耗の発生・摩耗粉の排出挙動を促進する機構を明らかにする。
- (2) 股関節臼蓋カップ表面HA溶射皮膜のフレットング摩耗試験による臼蓋カップのゆるみ挙動再現により、カップの設置公差と固定ネジの存在が、摩耗・はく離を促進させる機構を明らかにする。
- (3) 有限要素解析に実験で得た摩耗特性（摩耗速度、摩擦係数等）を組み込み、繰返し荷重下での摩耗・はく離に伴うカップのゆるみ量を予測する手法を開発する。

### 4. 研究成果

#### (1) HA溶射皮膜のフレットング摩耗その場観察

図1に示すレーザ顕微鏡下その場観察フレットング疲労試験機を活用して、海綿骨ブロック（株式会社アヴィス、発砲ポリウレタン：pcf50）を接触片として用いたフレットング疲労試験法を開発した。フレットング接触片の固定方法については定期的な補正が必要ではあるが、生体骨の機械的性質と近似した模擬骨を用いてフレットング疲労試験を実施した例は存在しない。

図2、図3にフレットング疲労試験におけるHAp溶射皮膜の損傷例を示す。HAp溶射皮膜の接触部端部において早期に貫通き裂が形成され、その部分からHAp溶射皮膜/チタン基材界面ではく離が進展していくことを明らかにした。また、摩耗粉は2種類の界面でそれぞれ発生するが、HAp溶射皮膜の界面ではく離の進展に伴い、基材/接触片の相対すべり変位が増加することにより摩耗が促進されることを実験的に明らかにした。また、荷重振幅・面圧の影響とも調査したが、進展速度の変化には大きな影響は見られず、はく離長さが最もHAp溶射皮膜の摩耗を促進する因子であることを明らかにした。

図4にフレットング疲労試験におけるHAp溶射皮膜のはく離進展速度を示すが、これは軸荷重における繰返し負荷試験の蛍光と同様に端部の界面特異応力場により進展が初期に加速され、その影響が小さくなるに連れ進展速度も低下すること、すなわち破壊力学的モデルにより進展挙動を説明できることを初めて明らかにした。



図1 フレットング疲労試験装置の概要

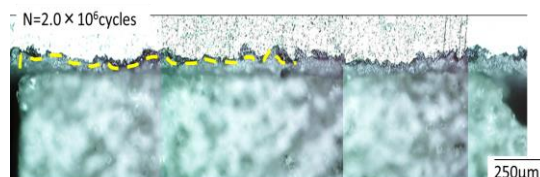
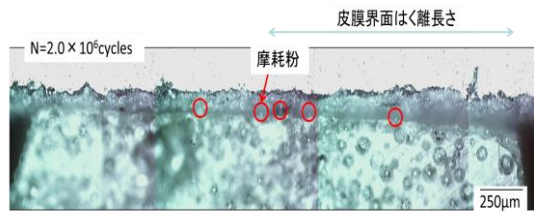


図2 フレットング疲労試験におけるHAp溶射皮膜のはく離のその場観察例。



はく離進展後に摩耗粉が排出

図3 HA p 溶射皮膜—模擬骨界面からの摩耗粉の排出挙動.

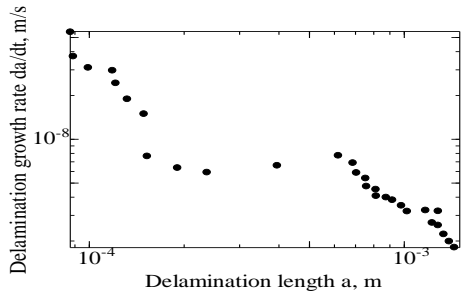


図4 フレッシング疲労試験におけるHA p 溶射皮膜のはく離速度とはく離長さの関係

(2) 股関節臼蓋カップ表面 HA 溶射皮膜のフレッシング摩耗試験による臼蓋カップのゆるみ挙動再現

図5に示す IS07206 を元に独自に作成した股関節臼蓋カップおよび股関節ステム部にプラズマ溶射により HA p を製膜した. 図6に本研究により構築した股関節臼蓋カップのゆるみ挙動再現試験装置を示す. 股関節臼蓋カップおよび股関節ステム部は, 角度を固定して埋入できる治具により, 設置公差を再現した任意の固定角度で埋入することができる. また, 埋入するためのセメント部材は, 海綿骨と同等の縦弾性係数を有する高分子発泡体およびアルミナビーズの混合体を作成する技術を独自に開発した. また, 繰り返し負荷試験中に HAp 溶射皮膜の損傷挙動を間接的に計測するため AE センサーを設置した. AE センサーのノイズを除去するためにフィルターを導入し, これにより繰り返し負荷試験中に摩擦などのノイズ信号を除去して HA p 皮膜の損傷挙動を観察することが可能な試験装置を構築することに初めて成功した.

図7, 図8に AE の計測例および試験中に中断して臼蓋カップの変異を測定した例を示す. 臼蓋カップの AE 信号の発生位置は端部付近が主であり, HA p 溶射皮膜のはく離は股関節臼蓋カップの端部の特異応力場に影響を受けていることを実験的に明らかにした. また, 設置公差の影響を検討するため股関節臼蓋カップの z 軸方向に回転させた場合の AE 計測を実施した. その結果, z 軸方向に回転させた場合 AE 信号がより早期に観察されるようになることから, 皮膜の損傷が促進されていることを明らかにした. そして, 試験を中断して得た変位挙動を分析した結果, z 軸方向に回転を生じさせた場合, 法線変位が

小さくなるにもかかわらず図8に示す角変位が同等に発生すること, そしてその角変位量は HA p の損傷が発達する早期に顕著に見られることを明らかにした. すなわち, HA p 溶射皮膜のはく離などの損傷は股関節臼蓋カップの設置公差による応力状態の変化により促進されうること, その結果として股関節臼蓋カップの角変位挙動がより早期に発生しうることを初めて実験的に明らかにした. そして, 試験後取り出した股関節臼蓋カップの SEM 観察結果から, 端部やネジ穴近傍の応力特異場では HA p 溶射皮膜のはく離が確かにより顕著に生じていることを得た.

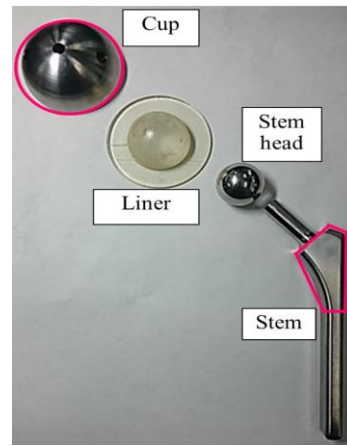


図5 独自に作成した股関節臼蓋カップおよび股関節ステム部品

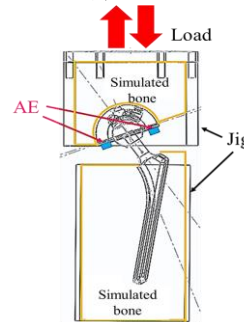


図6 股関節臼蓋カップの繰り返し負荷によるゆるみ挙動再現試験装置

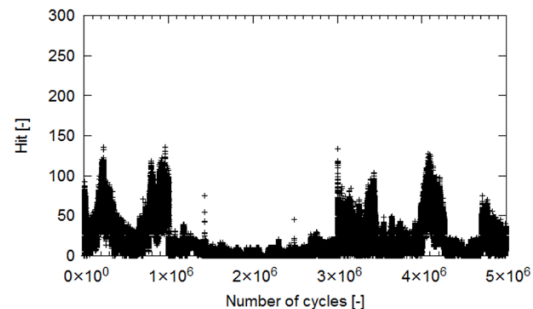


図7 繰り返し負荷試験中における AE 信号の計測例. 10<sup>6</sup>に至るまでの初期段階で AE が顕著

に見られることがわかる。

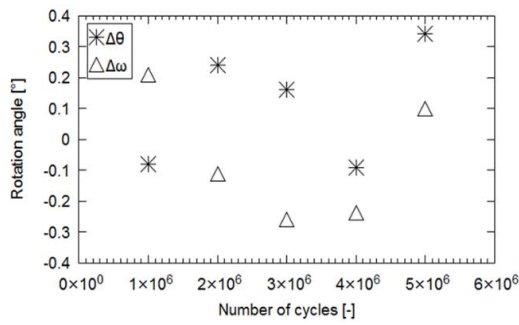


図 8 白蓋カップの角変位の発生挙動.  $10^6$ に至るまでの初期段階で顕著に見られることがわかる。

(3) 有限要素解析による繰返し荷重下での摩耗・はく離に伴うカップのゆるみ量を予測する手法開発

図 9 にフレットング疲労試験片を模擬した有限要素解析モデルを示す. 影響因子として, 模擬骨の縦弾性係数 (1-30 Gpa) 模擬骨-皮膜の密着強度 (0-10 MPa: 健全な生体骨に近づくほど大きくなると想定), 摩擦係数 (体液の影響想定), 皮膜はく離長さ (皮膜の損傷が摩耗に与える効果) を変化させて検討を実施した. その結果として, 最も摩耗挙動に影響をあたえるのは皮膜のはく離長さであることを明らかにした (図 10). さらに, 図 11 に示すように弾性係数が高まるほどむしろ皮膜/チタン基材界面での摩耗量は増加することを得た. 一方で, 界面での摩擦係数や皮膜と模擬骨の結合強度は大きな影響は見られなかった. この結果は, 皮膜の界面強度とはく離・摩耗挙動が摩耗粉の発生や変位挙動を抑制するためには最も重要な因子であることを端的に示している.

股関節白蓋カップのゆるみ挙動については, 本研究で得られた  $200\mu\text{m}$  程度の変位は, 臨床報告で得られた健全な生体骨を有する人工股関節白蓋カップ使用患者のケースとほぼ一致することから, 妥当性を有すると考えられる. しかしながら, 変位の発生が想定よりも早く  $10^6$  であるのは模擬骨の強度特性に依存するためと考えられる. 今後, 模擬骨と溶射皮膜の密着強度を高めることでより変位量を低減させ, その特性値を用いるお事で, より有効な寿命予測法の開発に繋がることを期待される.

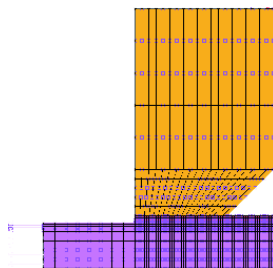


図 9 1/4 対称の有限要素解析モデル

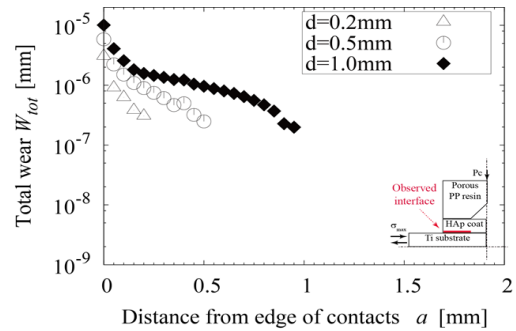


図 10 HAp 溶射皮膜界面のフレットング摩耗挙動に影響を及ぼす皮膜はく離長さ

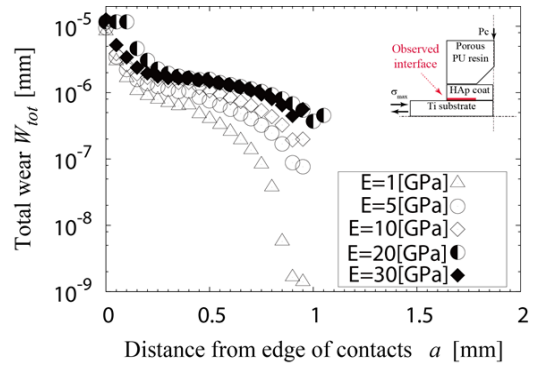


図 11 HAp 溶射皮膜のフレットング摩耗挙動に影響を及ぼす模擬骨の縦弾性係数

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件. すべて査読有)

- (1) 大塚雄市, 水谷正義. 初学者のためのバイオマテリアル 2. 金属系バイオマテリアル. 材料, Vol. 63, No. 6, pp. 480-486, 2014.
- (2) 久森紀之, 大塚雄市. 初学者のためのバイオマテリアル 3. セラミック系バイオマテリアル. 材料, Vol. 63, No. 7, pp. 563-568, 2014.
- (3) Achariya Rakngarm Nimkerdphol, Yuichi Otsuka, and Yoshiharu Mutoh. Effect of dissolution/precipitation on the residual stress redistribution of plasma-sprayed hydroxyapatite coating on titanium substrate in simulated body fluid (sbf). Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 36:98-108, 2014. DOI: 10.1016/j.jmbm.2014.04.007
- (4) Yuichi OTSUKA, Yukio MIYASHITA, Yoshiharu MUTOH, Effects of delamination on fretting wear behaviors of plasma-sprayed hydroxyapatite coating, Mechanical Engineering Journal 15-00573, 2016 DOI: 10.1299/mej.15-00573
- (5) Yuichi Otsuka, Hayato Kawaguchi, Yoshiharu Mutoh, Cyclic delamination

behavior of plasma-sprayed hydroxyapatite coating on Ti-6Al-4V substrates in simulated body fluid, Materials Science and Engineering: C, 67, 533-541, 2016, doi:10.1016/j.msec.2016.05.058

[学会発表] (計 16 件)

- (1) 大塚雄市, 織田達也, 宮下幸雄, 武藤睦治. Hap 溶射皮膜のフレッティング疲労試験中の損傷挙動観察. 日本材料学会第 63 期総会・学術講演会, 福岡大学, 2014 年 5 月 23 日
- (2) 大塚雄市, 水酸アパタイト溶射皮膜に対する 4 点曲げ密着強度評価の適用日本溶射学会 第 99 回 (2014 年度春季) 全国講演大会 (招待講演), 機械振興会館, 2014 年 6 月 3 日
- (3) Yuichi Otsuka, Yukio Miyashita, Yoshiharu Mutoh, Effect of simulated body uid (sbf) immersion on delamination behavior of plasma-sprayed hap coating on ti substrate. JSME ASME 2014 International Conference on Materials and Processing ICMP2014. 2014 年 06 月 12 日, Detroit, USA.
- (4) 永田晃則, 大塚雄市, フレッティング疲労強度に及ぼす摩耗形状と摩耗片の影響. 日本機械学会年次大会 2014, 2014 年 09 月 08 日 東京電機大学
- (5) 高野翔伍, 大塚雄市, 宮下幸雄, 武藤睦治: 電気泳動法によるチタン多孔質体への水酸アパタイト皮膜の形成とその密着強度評価, 日本機械学会 北陸信越部第 5 2 期総会・講演会, 2015 年 03 月 07 日, 新潟工科大学.
- (6) 大塚雄市, 宮下幸雄, 武藤睦治: フレッティング疲労による水酸アパタイト溶射皮膜のはく離形成挙動のその場観察, 日本機械学会 北陸信越部第 5 2 期総会・講演会, 2015 年 03 月 07 日, 新潟工科大学
- (7) 大塚雄市, 水酸アパタイト溶射皮膜の擬似体液中での耐久性評価, 日本材料学会 疲労部門委員会, 生体・医療材料部門委員会合同委員会, 2015 年 05 月 22 日, 山形大学.
- (8) 加賀谷謙伍, 大塚雄市, 宮下幸雄, 武藤睦治: 人工股関節カップのゆるみにおよぼす水酸アパタイト溶射皮膜の摩耗・はく離の影響, 日本材料学会 第 6 4 期通常総会・学術講演会, 2015 年 05 月 24 日, 山形大学.
- (9) Kengo Kagaya, Yuichi Otsuka, Yukio Miyashita, Yoshiharu Mutoh: Effect of wear/delamination of plasma-sprayed hydroxyapatite coating on loosening behavior of artificial acetabular cup, The 4th international GIGAKU conference in Nagaoka(IGCN), June 20, 2015, 長岡技術科学大学.
- (10) Yuichi Otsuka, Yukio Miyashita, Yoshiharu Mutoh: Effect of delamination on fretting wear behavior of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings. The 4th international GIGAKU conference in Nagaoka(IGCN), June 20, 2015, 長岡技術科学大学.
- (11) 大塚雄市, 加賀谷謙伍, 宮下幸雄, 武藤睦治: 人工股関節カップの前捻角の変化に伴う水酸アパタイト溶射皮膜の摩耗・はく離の影響, 日本セラミック協会 ナノバイオセラミックスによる細胞機能制御テクノロジー研究会 第 1 回, 2015 年 08 月 21 日, 長岡市
- (12) Yuichi Otsuka, Yukio Miyashita, and Yoshiharu Mutoh., In situ observations on fretting wear behavior of plasma-sprayed hydroxyapatite coating, The 4th Asian Symposium on Materials and Processing ASMP2015, 2015 年 08 月 11 日, Lombok, Indonesia.
- (13) 加賀谷謙伍, 大塚雄市, 宮下幸雄, 武藤睦治: AE 法による股関節カップ上の水酸アパタイト溶射皮膜のはく離・摩耗挙動評価, 第 4 回日本バイオマテリアル学会北陸地区若手研究発表会: 2015 年 11 月 30 日, 北陸先端科学技術大学院大学
- (14) 大塚雄市, 加賀谷謙伍, 宮下幸雄, 武藤睦治: 擬似体液中の水酸アパタイト溶射皮膜の摩耗・はく離による股関節カップ取り付け角度の変化, 日本機械学会 第 28 回バイオエンジニアリング講演会 2016 年 01 月 09 日, 東京工業大学
- (15) 大塚雄市, 加賀谷謙伍, 宮下幸雄, 武藤睦治: “股関節カップのゆるみ挙動におよぼす水酸アパタイト溶射皮膜の摩耗・はく離の影響”, 日本機械学会北陸信越支部第 53 期総会・講演会, 2016 年 3 月 5 日, 信州大学
- (16) 大塚雄市: 人工関節表面のコーティングの破損挙動, 日本セラミック協会 ナノバイオセラミックスによる細胞機能制御テクノロジー研究会 第 2 回 (招待講演), 2016 年 03 月 28 日, 長岡市

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://sdfrs.nagaokaut.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚雄市 (OTSUKA YUICHI)

長岡技術科学大学・技術経営研究科・准教授  
研究者番号: 80467084