

15° と、極めて高い濡れ性を示した。

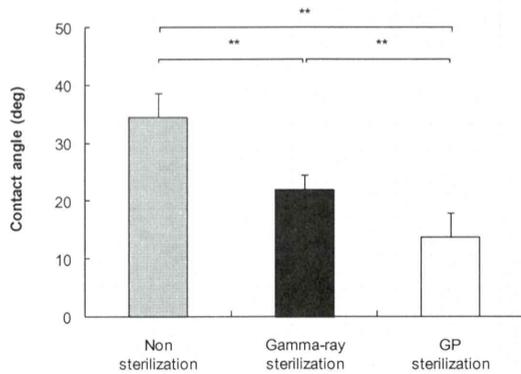


図 26. 種々の滅菌を施した MPC 処理 CLPE (VE) 表面の水による静的接触角 (\*\* :  $p < 0.01$ )

#### 4) TEM 観察

図 27 に、種々の滅菌を施した MPC 処理 CLPE (VE) の断面 TEM 像を示す。いずれの滅菌を施したサンプルにおいても、CLPE (VE) の表面に約 100~150 nm の均一な MPC 層の形成が観察された。MPC 層、CLPE (VE) 基材および MPC 層と CLPE (VE) の界面に、滅菌による変化は認められなかった。

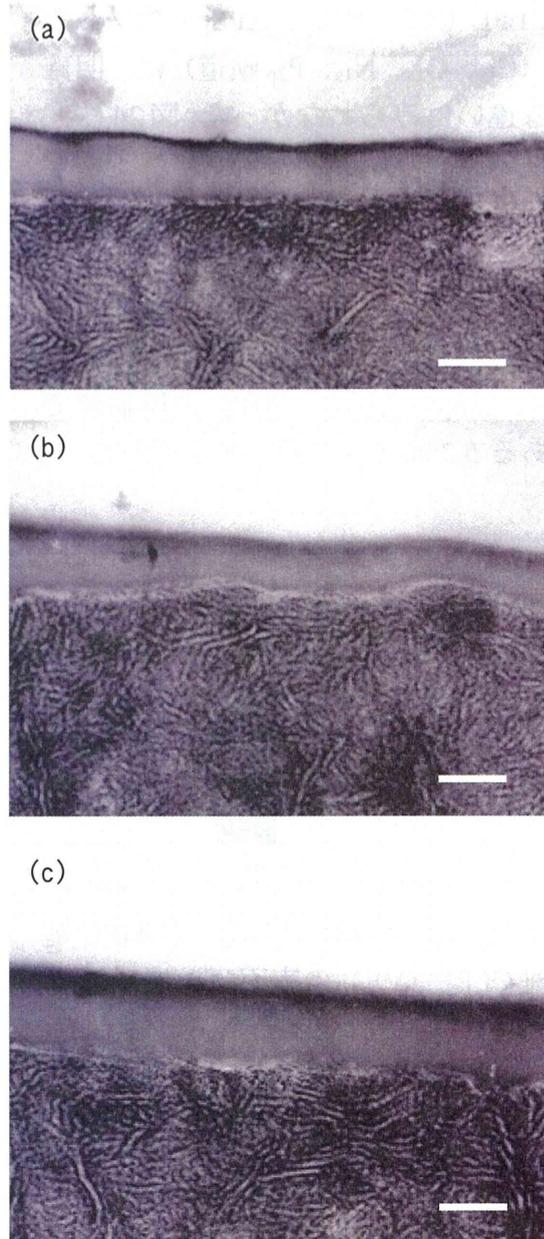


図 27. (a) 未滅菌、(b) ガンマ線滅菌および (c) GP 滅菌を施した MPC 処理 CLPE (VE) の断面 TEM 写真 (Bar: 100 nm)

#### ② 物理的特性評価

##### 1) 残留フリーラジカル濃度測定

図 28 に、種々の滅菌を施した MPC 処理 CLPE (VE) の (a) ESR スペクトルおよび (b) 残留するフ

リーラジカル濃度を示す。未滅菌群および GP 滅菌群には、アルコキシラジカル、ペロキシラジカル、ポリエニルラジカルが残留することがわかった。一方、ガンマ線滅菌群には、アリルラジカル、アルキルラジカルが主に残留することがわかった。また、ガンマ線滅菌群の残留フリーラジカル濃度は、未滅菌群や GP 滅菌群のそれらと比較して約 100 倍の高い値を示した。未滅菌群と GP 滅菌群との間に、有意な差は認められなかった。

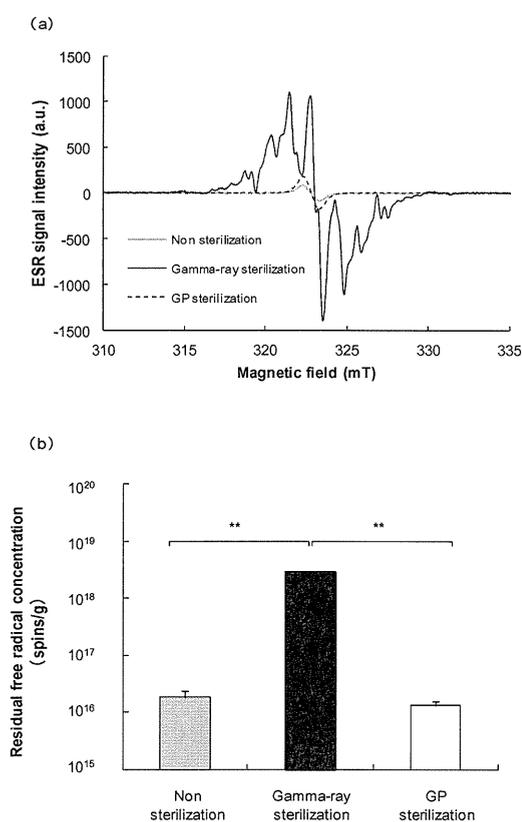


図 28. 種々の滅菌を施した MPC 処理 CLPE (VE) の (a) ESR スペクトルおよび (b) 残留フリーラジカル濃度 (\*\* :  $p < 0.01$ )

#### D. 考察

ラジカル補足剤である VE は、PE の架橋に必要なラジカルも消費する。したがって、PE (VE) に対して PE と同じ線量のガンマ線を照射した場合、PE 基材の架橋の効率が低下し、人工股関節用摺動材料としての十分な耐摩耗性を確保できない問題があった。これに対し、従来の PE を架橋するのに必要な線量 (50~100 kGy) より高い線量 (100~150 kGy) ガンマ線を照射することで十分な架橋密度を得ることができた。得られた架橋密度などの値は、人工関節用材料に求められる機械的強度や耐摩耗性を確保するのに十分なものであった。また、150 kGy 以下のガンマ線照射量の範囲においては、いずれの特性も、ISO や ASTM などの国際規格が要求する値を満たしており、人工関節用材料として有用な特性を有していると考えられた。

MPC 処理時における UV 照射強度は、ラジカル重合の反応開始点の数に対応し、MPC 層の密度に影響を与えると考えた。1.5~20.0 mW/cm<sup>2</sup> において、100~150 nm の MPC 層が CLPE (VE) 表面に形成されている TEM 像が得られた一方、1.5 mW/cm<sup>2</sup> の UV 照射強度で処理したサンプル表面の N、P 原子濃度は、5.0 mW/cm<sup>2</sup> 以上のそれらと比べて低い値を示した。つまり、1.5 mW/cm<sup>2</sup> の UV 照射強度では、反応開始点が少なく、処理したサンプルに、部分的に MPC 層が形成していない箇

所がある可能性が示唆された。また、MPC 処理時における UV 照射時間は、ラジカル重合において UV 照射強度と同様に、反応開始点の数に対応し、MPC 層の密度に影響を与えると考えられた。UV 照射時間が長くなるにつれて、リン酸指数及び MPC 層の厚さは徐々に増加し、45 分を超えるとその増加率はなだらかになる傾向を示した。また、TEM 写真において、MPC 層によって被覆されている箇所のみ膜厚を測定したところ、今回評価した 11~180 分の全範囲において、形成された MPC 層の厚さは 100~150 nm であることがわかった。これらの結果より、UV 照射時間は CLPE (VE) 表面に形成される MPC 層の被覆率（密度）に影響を与えており、CLPE (VE) 表面全体を MPC で被覆するには少なくとも 45 分の照射時間が必要と考えられた。さらに、重合に用いられるモノマー濃度は、ポリマーの分子量に対応するため、グラフト重合においては、基材表面に形成するグラフト層の厚さに対応すると考えられた。リン酸指数測定結果および TEM 写真より、MPC モノマー濃度が増加するにつれて、MPC 層の厚さが厚くなることがわかった。一方、MPC モノマー濃度が 1.00 mol/L にまで至ると、MPC 層と CLPE (VE) 基材との間に空隙が観察された。これは、MPC モノマー濃度が濃いと、グラフト重合速度よりも、水溶液中での単一重合速度のほうが速くなるためと考えられた。これらの結果より、モノマー濃度は MPC 層の

暑さに影響を与えており、MPC 処理のモノマー濃度として 0.33~0.50 mol/L が適当であると考えられた。

至適条件で作製された MPC 処理 CLPE (VE) は CLPE 群と比較して耐酸化性効果を発揮することが期待される。DSC を用いた酸化誘導時間測定による耐酸化性評価から、CLPE (VE) 群が CLPE 群に比べ長い酸化誘導時間を示しており、結果として約 26 倍も高い耐酸化性を有していた。また、MPC 処理 CLPE (VE) の酸化誘導時間は、CLPE (VE) と同等の酸化誘導時間を示した。これにより、MPC 処理を施すことで基材に含まれる VE の持つ抗酸化能を損なわないことが明らかとなった。また、FT-IR による酸化加速試験後の酸化度による評価においても同様に、CLPE (VE) 群では、MPC 処理にかかわらず、酸化が認められなかった。酸素環境下において、抗酸化剤である VE を CLPE 基材に添加することできわめて高い耐酸化効果を得られることが示された。これらの二つの試験において、MPC 処理は VE 添加による抗酸化能を阻害しておらず、MPC 処理 CLPE (VE) は耐摩耗性と耐酸化性の両立を期待することができると考えられた。

MPC 処理 CLPE (VE) の MPC 層および CLPE (VE) 基材へ各種滅菌が与える影響を評価したところ、MPC 処理 CLPE (VE) 表面に存在する MPC 層は、ガンマ線滅菌およ

び GP 滅菌の滅菌処理中に、ガンマ線、プラズマ、UV といったエネルギー負荷に暴露されたが、今回実施した XPS 分析および FT-IR 分析により検出される化学的な構造の変化はなかった。いずれの MPC 処理 CLPE (VE) 表面のリン原子濃度も MPC の理論値である 5.3 atom% に近い値であり、また、TEM 観察でも均一な MPC 層が観察されていることから、いずれの滅菌後も MPC 層の被覆性は維持されたままと考えられた。また、PE に残留するフリーラジカル濃度測定では、ガンマ線滅菌群は、未滅菌群や GP 滅菌群と比較して高い残留フリーラジカル濃度を示すことが明らかとなった。ガンマ線滅菌では、透過性の高いガンマ線の照射によって基材内部の PE 分子に励起や電離が起こりラジカルを生じる一方で、GP 滅菌で発生するヒドロキシラジカル、ヒドロペルオキシラジカルは滅菌後すぐに消失し、また、活性化した過酸化水素、UV は PE 表面にのみ作用するという機序の違いによるものと考えられた。しかし、これまでの研究でガンマ線滅菌を施した MPC 処理 CLPE (VE) は、抗酸化剤である VE の効果により長期抗酸化性を示すことが明らかとなっている。したがって、検出された残留フリーラジカル濃度では長期的な抗酸化特性に影響を与えないと考えられた。

#### E. 結論

VE を添加する PE レジンとして GUR1020E (分子量は  $3.5 \times 10^6$  g/mol)、ガンマ線の照射線量として 100~150 kGy が望ましいと考えられた。

また、CLPE (VE) への MPC 処理至適条件は UV 照射強度 5.0 mW/cm<sup>2</sup> 以上、UV 照射時間 45 分以上、MPC モノマー濃度 0.33~0.50 mol/L が適当であると考えられた。

上記の条件で作製される MPC 処理 CLPE (VE) は酸化誘導時間測定および酸化加速試験後の酸化度測定より極めて高い耐酸化性を示すことが示された。

さらに、MPC 処理 CLPE (VE) へはガンマ線滅菌および GP 滅菌のいずれも採用可能であると結論づけることができた。

#### F. 健康危険情報

特になし。

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

- 1) Taketomi S, Inui H, Nakamura K, Hirota J, Takei S, Takeda H, Tanaka S, Nakagawa T: Three-Dimensional Fluoroscopic Navigation Guidance for Femoral Tunnel Creation in Revision Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Arthroscopy Techniques* 1(1): e95-9, 2012.
- 2) Masuda K, Chikuda H, Yasunaga H, Hara N, Horiguchi H, Matsuda

- S, Takeshita K, Kawaguchi H, Nakamura K: Factors affecting the occurrence of pulmonary embolism after spinal surgery: data from the national administrative database in Japan. *Spine J* 12(11): 1029-34, 2012.
- 3) Nagata K, Yoshimura N, Muraki S, Hashizume H, Ishimoto Y, Yamada H, Takiguchi N, Nakagawa Y, Oka H, Kawaguchi H, Nakamura K, Akune T, Yoshida M: Prevalence of cervical cord compression and its association with physical performance in a population-based cohort in Japan: the wakayama spine study. *Spine* 37(22): 1892-8, 2012.
  - 4) Muraki S, Akune T, Oka H, Ishimoto Y, Nagata K, Yoshida M, Tokimura F, Nakamura K, Kawaguchi H, Yoshimura N: Incidence and risk factors for radiographic lumbar spondylosis and lower back pain in Japanese men and women: the ROAD study. *Osteoarthritis Cartilage* 20(7): 712-8, 2012.
  - 5) Chikuda H, Yasunaga H, Horiguchi H, Takeshita K, Kawaguchi H, Matsuda S, Nakamura K: Mortality and morbidity in dialysis-dependent patients undergoing spinal surgery: analysis of a national administrative database in Japan. *J Bone Joint Surg Am* 94(5): 433-8, 2012.
  - 6) Muraki S, Akune T, Oka H, Ishimoto Y, Nagata K, Yoshida M, Tokimura F, Nakamura K, Kawaguchi H, Yoshimura N: Incidence and risk factors for radiographic knee osteoarthritis and knee pain in Japanese men and women: a longitudinal population-based cohort study. *Arthritis Rheum* 64(5): 1447-56, 2012.
  - 7) Murakami T: Importance of adaptive multimode lubrication mechanism in natural and artificial joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J. J Engineering Tribology* 226(10): 827-37, 2012.
  - 8) Yoshimura N, Muraki S, Oka H, Tanaka S, Kawaguchi H, Nakamura K, Akune T: Accumulation of metabolic risk factors such as overweight, hypertension, dyslipidaemia, and impaired glucose tolerance raises the risk of occurrence and progression of knee osteoarthritis: a 3-year follow-up of the ROAD study. *Osteoarthritis Cartilage* 20(11): 1217-26, 2012.
  - 9) Oshima Y, Seichi A, Takeshita K, Chikuda H, Ono T, Baba S, Morii J, Oka H, Kawaguchi H,

- Nakamura K, Tanaka S: Natural course and prognostic factors in patients with mild cervical spondylotic myelopathy with increased signal intensity on t2-weighted magnetic resonance imaging. *Spine* 37(22): 1909-13, 2012.
- 10) Inoue Y, Ye L, Ishihara K, Yui N: Preparation and Surface Properties of Polyrotaxane-containing Tri-block Copolymers as a Design for Dynamic Biomaterials Surfaces. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 89(1): 223-227, 2012.
- 11) Choi J, Konno T, Takai M, Ishihara K: Regulation of cell proliferation by multilayered phospholipid polymer hydrogel through controlled release of bioactive agent. *Biomaterials* 33(3): 954-61, 2012.
- 12) Mieda S, Amemiya Y, Kihara T, Okada T, Sato T, Fukazawa K, Ishihara K, Nakamura N, Miyake J, Nakamura C: Mechanical Force-Based Probing of Intracellular Proteins from Living Cells Using Antibody-Immobilized Nanoneedles. *Biosens Bioelectron* 31(1): 323-9, 2012.
- 13) Takahara A, Kikuchi M, Terayama Y, Ishikawa T, Hoshino T, Kobayashi M, Ogawa H, Masunaga H, Koike J, Horigome M, Ishihara K: Chain Dimension of Polyampholytes in Solution and Immobilized Brush States. *Polym J* 44(1): 121-30, 2012.
- 14) Bhuchar N, Thundat T, Sunasee R, Ishihara K, Narain R: Degradable Thermo-Responsive Nanogels for Proteins Encapsulation and Controlled Release. *Bioconjugate Chem* 23(1): 75-83, 2012.
- 15) Aikawa T, Konno T, Takai M, Ishihara K: Continuous preparation of a spherical phospholipid polymer hydrogel for cell encapsulation using a flow-focusing microfluidic channel device. *Langmuir* 28(4): 2145-50, 2012.
- 16) Li Z, Konno T, Takai M, Ishihara K: Fabrication of polymeric electron-transfer mediator/enzyme hydrogel multilayer on an Au electrode in a layer-by-layer process. *Biosensor Bioelectron* 34(1): 191-6, 2012.
- 17) Yao Y, Fukazawa K, Ma W, Ishihara K, Huang N: Platelet adhesion-resistance of titanium substrate with mussel-inspired adhesive polymer bearing phosphorylcholine group. *Appl Surf Sci* 258(14): 5418-23, 2012.
- 18) Kotanen C, Nolan A, Ann W,

- Wilson M, Ishihara K: Anthony Guiseppi-Elie: Biomimetic hydrogels gate transport of calcium ions across cell culture inserts. *Biomed Microdevice* 14(3): 549-58, 2012.
- 19) Kyomoto M, Moro T, Saiga K, Hashimoto M, Takatori Y, Ishihara K: Biomimetic hydration lubrication with various polyelectrolyte layers on cross-linked polyethylene orthopedic bearing materials. *Biomaterials* 33(18): 4451-9, 2012.
- 20) Seo J, Kakinoki S, Inoue Y, Yamaoka T, Ishihara K, Yui N: Designing dynamic surfaces for regulation of biological responses. *Soft Matter* 8: 5477-85, 2012.
- 21) Kobayashi M, Terayama Y, Yamaguchi H, Terada M, Murakami D, Ishihara K, Takahara A: Wettability and antifouling behavior on the super hydrophilic polymer brush immobilized surfaces. *Langmuir* 28(18): 7212-22, 2012.
- 22) Fukazawa K, Ishihara K: Simple surface treatment using amphiphilic phospholipid polymers to obtain wetting and lubricity on polydimethylsiloxane-based substrates. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 97(1): 70-5, 2012.
- 23) Byambaa B, Konno T, Ishihara K: Cell adhesion control on photoreactive phospholipid polymer surfaces. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 99(1): 1-6, 2012.
- 24) Sibarani J, Konno T, Takai M, Ishihara K: Nonbiofouling surfaces covered by bio-inspired 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine polymer brush by use of polymeric photoiniferter. *Nano LIFE* 2(4): 1242003-11, 2012.
- 25) Watarai E, Matsuno R, Konno T, Ishihara K, Takai M: QCM-D analysis of material-cell interactions targeting a single cell during initial cell attachment. *Sensors Actuators B: Chemical* 171-2, 1297-302, 2012.
- 26) Yoshimura N, Muraki S, Oka H, Kawaguchi H, Nakamura K, Tanaka S, Akune T: Does mild cognitive impairment affect the occurrence of radiographic knee osteoarthritis? A 3-year follow-up in the ROAD study. *BMJ Open* DOI:10.1136/bmjopen-2012-001520, 2012.
- 27) Kyomoto M, Moro T, Ishihara K: *Polymeric Biomaterials. Structure and Function. Third Edition.* Chapter 25 Polymers for artificial joints. P. 851-883, 2013.

- CRS press.
- 28) Muraki S, Akune T, Oka H, Ishimoto Y, Nagata K, Yoshida M, Tokimura F, Nakamura K, Kawaguchi H, Yoshimura N: Physical performance, bone and joint diseases, and incidence of falls in Japanese men and women: a longitudinal cohort study. *Osteoporos Int* 24(2): 459-66, 2013.
- 29) Fukazawa K, Li Q, Seeger S, Ishihara K: Direct observation of selective protein capturing on molecular imprinting substrates. *Biosens Bioelectron* 40(1): 96-101, 2013.
- 30) Lee S, Matsuno R, Ishihara K, Takai M: Electron transfer with enzymes on nanofiliform titanium oxide films with electron-transport ability. *Biosens Bioelectron* 41: 289-93, 2013.
- 31) Silberberg Y, Mieda S, Amemiya Y, Sato T, Kihara T, Nakamura N, Fukazawa K, Ishihara K, Miyake J, Nakamura C: Evaluation of the actin cytoskeleton state using an antibody-functionalized nanoneedle and an AFM Original Research Article. *Biosens Bioelectron* 40(1): 3-9, 2013.
- 32) Lin X, Konno T, Takai M, Ishihara K: Redox phospholipid polymer microparticles as doubly functional polymer support for immobilization of enzyme oxidase. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 102: 857-63, 2013.
- 33) Muraki S, Akune T, Ishimoto Y, Nagata K, Yoshida M, Tanaka S, Oka H, Kawaguchi H, Nakamura K, Yoshimura N: Risk factors for falls in a longitudinal population-based cohort study of Japanese men and women: The ROAD Study. *Bone* 52(1): 516-23, 2013.
- 34) Oka H, Akune T, Muraki S, Tanaka S, Kawaguchi H, Nakamura K, Yoshimura N: The mid-term efficacy of intra-articular hyaluronic acid injections on joint structure: a nested case control study. *Mod Rheumatol* 23: 722-728, 2013.
- 35) Takatori Y, Moro T, Kamogawa M, Oda H, Morimoto S, Umeyama T, Minami M, Sugimoto H, Nakamura S, Karita T, Kim J, Koyama Y, Ito H, Kawaguchi H, Nakamura K: Poly(2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine)-grafted highly cross-linked polyethylene liner in primary total hip replacement: One-year results of a prospective cohort study. *J Artif Organs* 16: 170-175, 2013.
- 36) Kyomoto M, Moro T, Yamane S, Hashimoto M, Takatori Y, Ishihara

- K: Poly(ether-ether-ketone) orthopedic bearing surface modified by self-initiated surface grafting of poly(2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine). *Biomaterials* 34: 7829-7839, 2013.
- 37) Moro T, Kyomoto M, Ishihara K, Saiga K, Hashimoto M, Tanaka S, Ito H, Tanaka T, Oshima H, Kawaguchi H, Takatori Y: Grafting of poly (2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine) on polyethylene liner in artificial hip joints reduces production of wear particles. *J Mechan Behav Biomed Mater* 31: 100-106, 2014.
- 38) Moro T, Takatori Y, Kyomoto M, Ishihara K, Hashimoto M, Ito H, Tanaka T, Oshima H, Tanaka S, Kawaguchi H: Long-term hip simulator testing of the artificial hip joint bearing surface grafted with biocompatible phospholipid polymer. *J Orthop Res* 32(3): 369-376, 2014.
- 39) Kyomoto M, Moro T, Yamane S, Watanabe K, Hashimoto M, Takatori Y, Tanaka S, Ishihara K: Poly(2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine) grafting and vitamin E blending for high wear resistance and oxidative stability of orthopedic bearings. *Biomaterials* 35(25): 6677-6686, 2014.
- 40) Kyomoto M, Moro T, Yamane S, Hashimoto M, Takatori Y, Ishihara K: Effect of UV-irradiation intensity on graft polymerization of 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine on orthopedic bearing substrate. *J Biomed Mater Res A* 102(9): 3012-3023, 2014.
- 41) Takatori Y, Moro T, Ishihara K, Kamogawa M, Oda H, Umeyama T, Kim YT, Ito H, Kyomoto M, Tanaka T, Kawaguchi H, Tanaka S: Clinical and radiographic outcomes of total hip replacement with poly(2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine)-grafted highly cross-linked polyethylene liners: Three-year results of a prospective consecutive series. *Mod Rheumatol* 25(2): 286-291, 2015.
- 42) Kyomoto M, Moro T, Takatori Y, Tanaka S, Ishihara K: Wear and fatigue of phospholipid-polymer-grafted and vitamin-E-blended crosslinked polyethylene: A pilot study. *Clin Orthopaed Rel Res* 473: 942-951, 2015.
- 43) Ishihara K, Kitagawa T, Inoue Y: Initial cell adhesion on well-defined surface by polymer brush layers with varying chemical structures. *ACS Biomater Sci Engineer* 1(2): 103-109, 2015.
- 44) Moro T, Takatori Y, Kyomoto M, Ishihara K, Kawaguchi H, Hashimoto M, Tanka T, Oshima H, Tanaka S: Wear resistance of the

- biocompatible phospholipid polymer-grafted highly cross-linked polyethylene liner against larger femoral head. *J Orthopaedic Res*: DOI: 10.1002/jor.22868, 2015.
- 45) Sakata S, Inoue Y, Ishihara K: Molecular interaction forces generated during the protein adsorption to well-defined polymer brush surfaces. *Langmuir* 31(10): DOI: 10.1021/acs.langmuir.5b00351, 2015.
- 46) Goda T, Ishihara K, Miyahara Y: A critical update on 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine (MPC) polymer science. *J Appl Polym Sci* 132(16): DOI: 10.1002/app. 41766, 2015.
- 47) Byambaa B, Konno T, Ishihara K: Photoresponsive and cytocompatible polymer substrate for maintaining higher functionality of photoinduced detached cells. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* (in press).
- 48) Kyomoto M, Shobuike T, Moro T, Yamane S, Takatori Y, Tanaka S, Miyamoto H, Ishihara K: Prevention of bacterial adherence and biofilm formation on a vitamin E-blended, cross-linked polyethylene surface with a poly(2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine) layer. *Acta Biomaterialia* (in press).
- 49) Watanabe K, Kyomoto M, Saiga K, Taketomi S, Kadono Y, Takatori Y, Tanaka S, Ishihara K, Moro T: Effects of surface modification and bulk geometry on the biotribological behavior of cross-linked polyethylene: Wear testing and finite element analysis. *Biomed Res Int* (in press).
- 50) Yarimitsu S, Moro T, Kyomoto M, Watanabe K, Tanaka S, Ishihara K, Murakami T: Influences of dehydration and rehydration on the lubrication properties of phospholipid polymer grafted cross-linked polyethylene. *Proc Inst Mech Eng H* (in press).
- 51) Yamane S, Kyomoto M, Moro T, Watanabe K, Hashimoto M, Takatori Y, Tanaka S, Ishihara K: Effects of extra-irradiation on surface and bulk properties of MPC-grafted cross-linked polyethylene. *J Biomed Mater Res A* (in contribution).
- 52) 茂呂徹, 京本政之, 高取吉雄: 人工股関節ポリエチレンライナーのMPC処理. *Bone Joint Nerve* 10(3): 417-424, 2013.
- 2.学会発表
- ① 国内学会
- 1) 吉村典子, 村木重之, 岡敬之, 川口浩, 中村耕三, 阿久根徹: シンポジウム6 OA 治療学の疫学から治療まで: 住民疫学研究

- ROAD からみえてきた日本の  
OA. 第 56 回日本リウマチ学会  
総会. 東京, 4.26-28, 2012.
- 2) 吉村典子, 村木重之, 岡敬之, 川  
口浩, 中村耕三, 阿久根徹: 要  
介護移行の予測におけるロコチ  
エックの有用性の検討:The  
ROAD Study. 第 85 回日本整形  
外科学会. 京都, 5.17-20, 2012.
  - 3) 岡敬之, 村木重之, 阿久根徹, 中  
村耕三, 川口浩, 吉村典子: コ  
ンピュータ自動計測を用いた定  
量評価に基づく 3 年間の膝 X  
線画像縦断変化に関する検  
討:The ROAD Study. 第 85 回日  
本整形外科学会. 京都, 5.17-20,  
2012.
  - 4) 村木重之, 阿久根徹, 岡敬之, 中  
村耕三, 川口浩, 吉村典子: 変  
形性膝関節症の発生率及びその  
危険因子 —The ROAD Study—. 第  
85 回日本整形外科学会. 京都,  
5.17-20, 2012.
  - 5) 井上祐貴, 井上和臣, 石原一彦:  
タンパク質との相互作用を回避  
するマテリアル表面近傍の水の  
ネットワーク構造. 第 61 回高分  
子学会年次大会. 横浜, 5.29,  
2012.
  - 6) 村木重之, 岡敬之, 田中栄, 川口  
浩, 中村耕三, 阿久根徹, 吉村典  
子: 膝関節裂隙狭小化および骨  
棘形成における痛みおよび身体  
機能への影響の違い —The  
ROAD Study—. 第 32 回日本骨  
形態計測学会. 大阪, 6.7-9, 2012.
  - 7) 村木重之, 岡敬之, 田中栄, 川口  
浩, 中村耕三, 阿久根徹, 吉村典  
子: 経口摂取栄養素が膝関節裂  
隙狭小化および骨棘形成に与え  
る影響 —The ROAD Study—. 第  
32 回日本骨形態計測学会. 大  
阪, 6.7-9, 2012.
  - 8) 石原一彦: 生体親和型ポリマー  
による医療デバイスの表面修飾.  
プラスチック成形加工学会. 東  
京, 6.13, 2012.
  - 9) 京本政之, 石原一彦: 水和潤滑  
ポリマー表面の創製と人工関節  
への応用. 第 41 回医用高分子シ  
ンポジウム. 東京, 6.25-26, 2012.
  - 10) 井上祐貴, 井上和臣, 石原一彦:  
ポリマーブラシ表面近傍の水和  
状態によるタンパク質吸着挙動  
の規定. 第 41 回医用高分子シ  
ンポジウム. 東京, 6.25-26, 2012.
  - 11) 村木重之, 岡敬之, 田中栄, 川口  
浩, 中村耕三, 阿久根徹, 吉村典  
子: 膝関節裂隙狭小化および骨  
棘形成が ADL/QOL に与える影  
響 —The ROAD Study—. 第 24  
回日本運動器科学会. 東京, 7.7,  
2012.
  - 12) 吉村典子, 村木重之, 岡敬之, 田  
中栄, 川口浩, 中村耕三, 阿久根  
徹: 高骨密度者の特徴とその経  
過: ROAD 追跡調査より. 第 30  
回日本骨代謝学会. 東京,  
7.19-21, 2012.
  - 13) 村木重之, 阿久根徹, 岡敬之, 田  
中栄, 川口浩, 中村耕三, 吉村典  
子. 複数回転倒の危険因子:

- ROAD 追跡調査より Risk Factors for Multiple Falls: A follow-up of the ROAD cohorts. 第 30 回日本骨代謝学会. 東京, 7.19-21, 2012.
- 14) 雑賀健一, 茂呂徹, 京本政之, 伊藤英也, 中川匠, 岡敬之, 川口浩, 中村耕三, 石原一彦, 高取吉雄: 人工膝関節環境における MPC 処理架橋ポリエチレンの耐摩耗特性の検討. 第 4 回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会. 沖縄, 7.19-21, 2012.
- 15) 石原一彦: 金属/ポリマー界面における高度潤滑機能と長寿命型人工股関節の創出. 日本バイオマテリアル学会東北地域講演会. 仙台, 9.3, 2012.
- 16) 鎗光清道, 茂呂徹, 京本政之, 雑賀健一, 村上輝夫, 石原一彦, 高取吉雄: リン脂質ポリマー処理架橋ポリエチレンの潤滑性に対する除荷と再水和の影響. トライボロジー会議 2012 秋. 室蘭, 9.17, 2012.
- 17) 井上祐貴, 石原一彦: タンパク質との直接的な相互作用を抑制するポリマーブラシ表面の動的な特性. 第 61 回高分子討論会. 名古屋, 9.19-21, 2012.
- 18) 坂田翔, 井上祐貴, 石原一彦: ポリマーブラシ表面へのタンパク質吸着過程を支配する相互作用力の解析. 第 61 回高分子討論会. 名古屋, 9.19-21, 2012.
- 19) 吉村典子, 村木重之, 岡敬之, 田中栄, 川口浩, 中村耕三, 阿久根徹: 高骨密度を有する者の特徴とその予後. 第 14 回日本骨粗鬆症学会/骨ドック・健診分科会. 新潟, 9.27-29, 2012.
- 20) 村木重之, 阿久根徹, 岡敬之, 田中栄, 川口浩, 中村耕三, 吉村典子: 大規模住民追跡調査による複数回転倒の危険因子: ROAD スタディ. 第 14 回日本骨粗鬆症学会/骨ドック・健診分科会. 新潟, 9.27-29, 2012.
- 21) 高取吉雄, 茂呂徹, 京本政之, 石原一彦, 川口浩, 中村耕三: シンポジウム「人工関節成績改善に繋がる近未来の医療用素材」ポリエチレン摺動面の MPC ポリマー処理. 第 27 回日本整形外科学会基礎学術集会. 名古屋, 10.26, 2012.
- 22) 井上祐貴, 石原一彦: ナノ構造制御された生体親和性ポリマーブラシ表面近傍の水和特性. 第 34 回日本バイオマテリアル学会. 仙台, 11.26, 2012.
- 23) 茂呂徹, 高取吉雄, 京本政之, 岩崎泰彦, 宮路史明, 田中栄, 伊藤英也, 川口浩, 中村耕三, 石原一彦: シンポジウム「メタルベースハイブリッドバイオマテリアル」生体機能分子固定化による摩擦低減. 第 34 回日本バイオマテリアル学会シンポジウム. 仙台, 11.27, 2012.
- 24) 石原一彦: ナノメディシン分子科学とバイオマテリアルサイエンス. 第 34 回日本バイオマテリ

- アル学会シンポジウム. 仙台, 11.27, 2012.
- 25) 大熊雄祐, 飛松好子, 赤居正美, 藤野圭司, 川島真人, 畑野栄治, 稲波弘彦, 本田雅人, 土肥徳秀, 中村耕三, 岩谷力: ロコモティブシンドロームにおける活動性に対する痛みの影響. 第 86 回日本整形外科学会学術集会. 広島, 5.23-26, 2013.
- 26) 岩谷力, 土肥徳秀, 中村耕三, 赤居正美, 星野雄一, 飛松好子, 星地亜都司: ロコモティブシンドロームの操作的定義 ロコモティブシンドロームにおける活動性に対する痛みの影響. 第 86 回日本整形外科学会学術集会. 広島, 5.23-26, 2013.
- 27) 緒方徹, 土肥徳秀, 赤居正美, 岩谷力, 中村耕三: ロコモティブシンドロームに対するポピュレーションアプローチ ロコモティブシンドロームにおける活動性に対する痛みの影響. 第 86 回日本整形外科学会学術集会. 広島, 5.23-26, 2013.
- 28) 山根史帆里, 京本政之, 茂呂徹, 雑賀健一, 石原一彦, 高取吉雄: 人工関節環境下における MPC 処理 CLPE の耐摩耗性検討. 第 13 回東京大学生命科学シンポジウム. 東京, 6.8, 2013.
- 29) 迫田秀行, 京本政之, 井上祐貴, 石原一彦, 新見伸吾: 人工関節摺動面材料の形状変化に基づく新規摩耗量評価法の開発. 第 40 回日本臨床バイオメカニクス学会. 神戸, 11.22-23, 2013.
- 30) 京本政之: バイオミメティック技術を基盤とした新しい人工関節の開発と実用化. 第 3 回国際産学連携低侵襲医療シンポジウム. 東京, 1.15, 2014.
- 31) 京本政之: リン脂質ポリマー処理架橋ポリエチレンとセラミック骨頭による摺動面の摩耗特性. 第 44 回日本人工関節学会. 宜野湾, 2.21-22, 2014.
- 32) 石原一彦: 細胞工学を拓くポリマーソフトマテリアル. 高分子同友会講演会. 東京, 9.9, 2014.
- 33) 石原一彦: 生体親和性ポリマーマテリアルの創出と医療デバイスへの実装. バイオインダストリー協会「未来へのバイオ技術」講演会. 東京, 9.10, 2014.
- ② 国際学会
- 1) Yoshimura N, Muraki S, Oka H, Kawaguchi H, Nakamura K, Akune T: Accumulation of Metabolic Risk Factors Raises The Risk of Occurrence and Progression of Knee Osteoarthritis: The ROAD Study. Annual European Congress of Rheumatology 2012. Berlin, Germany, 6.6-9, 2012.
- 2) Kyomoto M, Moro T, Saiga K, Takatori Y, Ishihara K: Cartilage-inspired surface and antioxidative substrate give high

- durability to orthopaedic polyethylene bearings. 9th World Biomaterials Congress. Chengdu, China, 6.1-5, 2012.
- 3) Sakata S, Inoue Y, Ishihara K: Interaction force of protein at biocompatible polymer brush surface. 9th World Biomaterials Congress. Chengdu, China, 6.1-5, 2012.
  - 4) Inoue Y, Ishihara K: Nano-scaled analysis of protein adsorption behavior based on molecular mobility around biocompatible polymer brush surface. 9th World Biomaterials Congress. Chengdu, China, 6.1-5, 2012.
  - 5) Tateishi T, Kyomoto K, Yamaoka T, Ishihara K: Smart surface modification on PEEK by self-initiating graft polymerization for cardiovascular application. 9th World Biomaterials Congress. Chengdu, China, 6.1-5, 2012.
  - 6) Yao Y, Ishihara K, Fukazawa K, Ma W, Huang N: Hemocompatibility improvement of titanium substrate with mussel-inspired adhesive phosphorylcholine polymer. 9th World Biomaterials Congress. Chengdu, China, 6.1-5, 2012.
  - 7) Inoue Y, Ishihara K: Nano-force analysis for protein adsorption on biocompatible phospholipid polymer brush surface. International Conference of Young Researchers on Advanced Materials. Singapore, 6.1-6, 2012.
  - 8) Ishihara K: Bioinspired polymers for developing the bio/medical devices. Japan-Finland International Symposium of Biomedical Materials. Oulu, Finland, 8.8, 2012.
  - 9) Ishihara K: Bioinspired phospholipid polymers for nanobiodevices. Biomaterials Day in Clemson, Society for Biomaterials. 9.30, 2012.
  - 10) Ishimoto Y, Yamada H, Hashizume H, Nagata K, Takiguchi N, Yoshida M, Kawaguchi H, Nakamura K, Muraki S, Oka H, Akune T, Yoshimura N: The relation between radiographic lumbar spinal stenosis and symptomatic persons in the general population -The Wakayama. Golden Jubilee Congress of The Asia Pacific Orthopaedic Association(APOA) and 7th Congress of the Asia Pacific Knee Society(APKS). New Delhi, India, 10.3-6, 2012.
  - 11) Ishihara K: Self-forming polymeric biomaterials for cell-based engineering. Korean Society for Biomaterials Symposium 2012. 11.16, 2012.
  - 12) Oho M, Nagasawa Z, Kusaba K,

- Higashitani T, Ohta S, Sueoka E, Miyamoto H: Application of MALDI-TOF MS-based strain typing for characterization of epidemiological relationships among bacterial strains. 12th Meeting of Asian Society of Clinical Pathology and Laboratory Medicine. Kyoto, Japan, 11.29-12.1, 2012.
- 13) Ishihara K: Successful development of phospholipid polymer biomaterials designed with bioinspiration. *New Innovations in Polymers and Materials*. Hawaii, 12.16, 2012.
- 14) Yoshimura N, Muraki S, Oka H, Tanaka S, Kawaguchi H, Nakamura K, Akune T: Mild Cognitive Impairment Increases The Risk of Knee Osteoarthritis: A 3-Year Follow-Up in The ROAD Study. *IOF Regionals - 3rd Asia-Pacific Osteoporosis Meeting*. Kuala Lumpur, Malaysia, 12.13-16, 2012.
- 15) Muraki S, Akune T, Tanaka S, Kawaguchi H, Nakamura K, Oka H, Yoshimura N: Physical Performance, Bone and Joint Diseases, and Incidence of Falls in Japanese Men and women: The ROAD Study. *IOF Regionals - 3rd Asia-Pacific Osteoporosis Meeting*. Kuala Lumpur, Malaysia, 12.13-16, 2012.
- 16) Moro T, Takatori Y, Kyomoto M, Kamogawa M, Oda H, Morimoto S, Umeyama T, Kawaguchi H, Nakamura K: Clinical results of MPC-grafted polyethylene acetabular liners. *Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society*. San Antonio, USA, 1.26-29, 2013.
- 17) Moro T, Kyomoto M, Ishihara K, Tanaka S, Oshima H, Tanaka T, Ito H, Nakamura K, Kawaguchi H, Takatori Y: Effect of larger femoral head on the wear resistance of the biocompatible polymer-grafted cross-linked polyethylene liner. *Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society*. San Antonio, USA, 1.26-29, 2013.
- 18) Kyomoto M, Moro T, Saiga K, Yamane S, Takatori Y, Ishihara K: Antioxidation and high wear resistance of life-long liners by vitamin E blending and poly(MPC) grafting. *Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society*. San Antonio, USA, 1.26-29, 2013.
- 19) Kyomoto M, Moro T, Saiga K, Yamane S, Takatori Y, Ishihara K: Biomimetic hydration lubrication with various polyelectrolyte layers on orthopedic polymeric bearing materials. *Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society*. San Antonio, USA, 1.26-29, 2013.

- 20) Moro T, Takatori Y, Oda H, Morimoto S, Umeyama T, Kamogawa M, Kyomoto M, Kawaguchi H, Nakamura K: Clinical results of MPC-grafted cross-linked polyethylene liner in primary total hip arthroplasty. American Academy of Orthopaedic Surgeons (AAOS) 2013 Annual Meeting. Chicago, USA, 3.19-23, 2013.
- 21) Kyomoto M, Moro T, Yamane S, Takatori Y, Ishihara K: Smart modification of PEEK by self-initiated surface graft polymerization for orthopedic bearings. 1st PEEK International Meeting. Philadelphia, USA, 4.25-26, 2013.
- 22) Akai M, Doi T, Uehara K, Okuma Y, Ogata T, Seichi A, Nakamura K, Iwaya T: "Locomotive Organ Dysfunction" in Elderly People; An Important Aspect of Geriatric Frailty in a "Super-aged" Society. 7th ISPRM Congress. Beijing, China, 6.19, 2013.
- 23) Ishihara K, Kyomoto M: Photoinduced and self-initiated fabrication of biocompatible phospholipid polymer layer on poly(ether-ether-ketone) (PEEK). 4th Asian Biomaterials Congress. Hong Kong, China, 6.26-29, 2013.
- 24) Kyomoto M, Moro T, Yamane S, Saiga K, Takatori Y, Ishihara K: Effects of antioxidative substrate and cartilage-inspired surface on the durability of acetabular liner. 6th International UHMWPE Meeting. Torino, Italy, 10.10-11, 2013.
- 25) Siskey RL, Kurtz SM, Kyomoto M, Ueno M, Weisenburger J, Haider H: Wear Performance of MPC-grafted UHMWPE for Total Hip Replacement. 6th International UHMWPE Meeting. Torino, Italy, 10.10-11, 2013.
- 26) Ishihara K, Inoue Y: Bioinspired fabrication of artificial cell membrane with phospholipid polymer and biomolecules for nanomedicine molecular science. The 2<sup>nd</sup> Japan-China Symposium on Nanomedicine. Hiroshima, Japan, 5.16-17, 2014.
- 27) Ishihara K: Design of biocompatible polymeric materials inspired from cell membrane surface and their application for medical devices. National Cheng Kung University Seminar. Tainan, Taiwan, 5.18-20, 2014.
- 28) Ishihara K, Oda H: Functionalization of extremely biocompatible phospholipid polymers. 2014 Gordon Research Conference on Bioinspired Materials. Newry, USA, 6.22-28, 2014.
- 29) Moro T, Takatori Y, Kawaguchi H,

- Ishihara K, Kamogawa M, Oda H, Umeyama T, Kim J, Ito H, Kyomoto M, Tanaka T, Oshima H, Tanaka S: Clinical results of MPC-grafted highly cross-linked polyethylene liners. 2014 International Congress for Joint Reconstruction (ICJR) Pan Pacific Congress. Kona, USA, 7.16-19, 2014.
- 30) Moro T, Takatori Y, Kawaguchi H, Ishihara K, Kamogawa M, Kyomoto M, Hashimoto M, Oshima H, Tanaka S: Effect of larger femoral head on the wear-resistance of the biocompatible MPC-grafted highly cross-linked polyethylene liner. 2014 International Congress for Joint Reconstruction (ICJR) Pan Pacific Congress. Kona, USA, 7.16-19, 2014.
- 31) Kyomoto M, Moro T, Yamane S, Watanabe K, Takatori Y, Tanaka S, Ishihara K: Bio-inspired technologies with MPC-grafting and vitamin E-blending make life-long durability of orthopedic bearings. 2014 International Congress for Joint Reconstruction (ICJR) Pan Pacific Congress. Kona, USA, 7.16-19, 2014.
- 32) Yarimitsu S, Moro T, Kyomoto M, Oshima H, Tanaka S, Ishihara K, Murakami T: Influence of rehydration on lubrication property of phospholipid polymer grafted cross-linked polyethylene. The 15th International Union of Materials Research Societies (IUMRS)-International Conference in Asia (IUMRS-ICA) 2014. Fukuoka, Japan, 8.24-30, 2014.
- 33) Ishihara K: Bioinspired polymer for biomedical application. Massachusetts General Hospital and The University of Tokyo Joint Symposium 2014. Boston, USA, 9.22-24, 2014.
- 34) Ishihara K: Nanomedicine molecular science using phospholipid polymer biomaterials. JSPA A3 Foresight International Symposium on Nano-Biomaterials and Regenerative Medicine. Tokyo, Japan, 10.8-9, 2014.
- 35) Ishihara K: Nanomedicine Molecular Science based on the Phospholipid Polymer Biomaterials. International Polymer Conference (IPC) 2014. Tokyo, Japan, 12.2-5, 2014.
- H. 知的財産権の出願・登録状況  
特になし。

厚生労働科学研究費補助金 難治性疾患等克服研究事業  
(難治性疾患等実用化研究事業 (免疫アレルギー疾患等実用化研究事業  
免疫アレルギー疾患実用化研究分野) )

分担研究報告書

多方向摩耗・衝撃耐久性の基礎検討

研究分担者 田中 栄 (東京大学医学部附属病院 教授)  
研究分担者 村上 輝夫 (九州大学バイオメカニクス研究センター 特命教授)  
研究分担者 山根 史帆里 (京セラメディカル株式会社 研究員)

研究要旨:人工股関節ポリエチレン(PE)ライナーの酸化劣化を抑制するため、近年、抗酸化剤の一つであるビタミンE(VE)を添加したPEが広く用いられている。我々はこれまでに、親水性と生体親和性に優れた合成リン脂質ポリマーである、poly(2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine(MPC))を、架橋PE(CLPE)の表面にグラフト重合させる技術(MPC処理)を開発した。このMPC処理をVE添加CLPE(CLPE(VE))に応用することで、抗酸化性と耐摩耗性を合わせ持つ優れた材料を創出できると考えた。今回、我々はピンオンディスク型摩耗試験装置を用いて、厚さ3mmおよび6mmのMPC処理CLPE(VE)ディスクに対して、多方向摺動または衝撃-摺動による摩耗試験を実施し、その耐摩耗性と耐疲労破壊特性を評価した。それらの結果、多方向摺動試験と衝撃-摩耗試験の両方において、MPC処理によるPE摩耗の抑制効果が確認された。また、衝撃-摩耗試験後の全てのディスクに内部クラックの発生は認められなかった。以上より、適切な厚さを有するMPC処理CLPE(VE)は、抗酸化性、耐摩耗性、耐衝撃性を併せ持つ優れた摺動部材であり、人工股関節の製品寿命をさらに延長させると期待される。

A. 研究目的

人工股関節の摺動部を構成するポリエチレン(PE)ライナーの酸化劣化および摩耗は、人工股関節置換術の破損や弛みをもたらし、その長期臨床使用を制限する重要な課題である。ビタミンE(VE)は、生体内に存在する抗酸化剤の一つであり、近

年、VEを添加した架橋PE(CLPE; CLPE(VE))が広く用いられている。我々はこれまでに、親水性と生体親和性に優れた合成リン脂質ポリマーである、poly(2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine(MPC))をCLPE表面にグラフト重合させる技術(MPC処理)を開発した。MPC処理が施さ

れた人工股関節ライナーは、2011年に実用化され、今日まで良好な臨床成績を残している。また、7000万サイクルという長期間の股関節シミュレーター試験において、摩耗量を劇的に抑制することも確認している。この優れた MPC 処理を CLPE (VE) に応用することで、抗酸化性と耐摩耗性を合わせ持つ優れた人工関節用摺動材料を創出できると考えた。

今回、我々はピンオンディスク型摩耗試験装置を用いて、厚さ 3 mm および 6 mm の MPC 処理 CLPE (VE) ディスクに対して、通常歩行時の股関節摺動面の動作を想定した多方向摺動による摩耗試験を行い、その摩耗特性を評価した。また、衝撃-摺動という過酷な試験環境での摩耗試験も実施し、MPC 処理 CLPE (VE) の耐疲労破壊特性を評価した。

## B. 研究方法

### 1. ディスク型試験片の作製

#### ① 試験片の切り出し

0.1 wt%の VE を添加した GUR1020E レジンを成型した PE 棒材に対して、不活性雰囲気にて 100 kGy のガンマ線を照射した後、120℃でアニーリング処理を行った。得られた CLPE (VE) から機械加工にて厚さ 3 mm および 6 mm のディスク型試験片を切り出し、未処理 CLPE (VE) 試験片とした。

#### ② 試験片の MPC 処理

①で得た試験片をベンゾフェノン

(BP) 含有アセトン溶液に浸漬することで、CLPE (VE) 表面に BP をコーティングした。得られた試験片を 0.5 mol/L の MPC 溶液に浸漬し、5 mW/cm<sup>2</sup> の紫外線を 90 分間照射し、MPC 処理 CLPE (VE) 試験片とした。

#### ③ 試験片の滅菌

①、②項で準備された試験片はいずれも、不活性雰囲気にて 25 kGy のガンマ線にて滅菌された。

### 1. 多方向摺動試験

ASTM F732-00 の規格を参考に、ピンオンディスク型試験機 (AMTI 製 Ortho-POD) を用いて、ディスクに対してピンを摺動させる多方向摺動試験を行った。試験条件は、10 mm × 5 mm の長方形を描く軌跡にて、荷重 213 N、摺動速度 30 mm/sec とし、27%ウシ血清溶液中で 100 万サイクルまで繰り返し試験した。対向するピンには、人工股関節の骨頭に用いられるコバルトクロム (Co-Cr) 合金を用いた。PE ディスクの厚さが背面の変形に与える影響を評価するため、ディスク背面と接するチタン合金治具には、スクリーホールを模擬した穴を設けた (図 1)。

### 2. 衝撃-摩耗試験

ASTM F732-00 の規格を参考に、ピンオンディスク型試験機を用いて、ディスクに対してピンを衝突させてから摺動させる衝撃-摩耗試験を行った。試験条件は、最大荷重 150 N、

摺動距離 10 mm、摺動速度 10 mm/sec とし、27%ウシ血清溶液中で 200 万サイクルまで繰り返し試験した(図 2)。

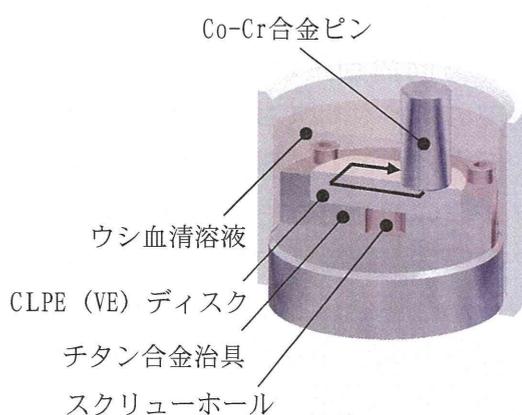


図 1 多方向摺動試験

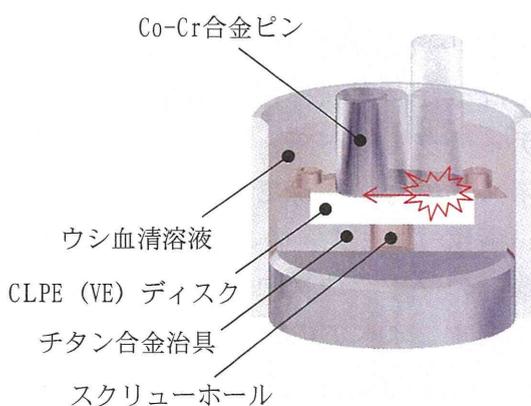


図 2 衝撃-摩耗試験

### 3. ディスクの評価

#### ① 重量摩耗

多方向摺動試験では、25 万サイクル終了毎に、衝撃-摩耗試験では 5 万、20 万、50 万、100 万および 200 万サイクル終了時に、それぞれ試験片の洗浄および重量測定を行った。摩耗試験と並行して、同じ材料のディスクの浸漬試験を行い、摩耗試験のディスク試験片の重量変化から

浸漬試験中の吸水量を差し引くことで、摩耗量を算出した。

#### ② マイクロスコープ観察

デジタルマイクロスコープ(キーエンス製 VHX-200)を用いて、①と同じ間隔で、摺動面および背面のスクリューホール辺縁部の観察を行った。

#### ③ 表面性状測定

摩耗試験終了後、非接触式超精密表面性状測定機(Taylor hobson 製 Talysurf CCI Lite)を用いて、ディスクの摺動面および背面の形状測定を行い、摺動面の体積摩耗量と背面の変形量を測定した。

#### ④ レーザ顕微鏡観察

走査型共焦点レーザー顕微鏡(オリンパス製 OLS1200)を用いて、ディスクの摺動面および背面の孔部の観察を行った。

#### ⑤ マイクロ CT 撮影

衝撃-摩耗試験後のディスクに対して、マイクロコンピュータ断層撮影(CT)装置(島津製作所製 InspeXio)を用いて、ディスクの断面の観察を行った。

### C. 研究結果

#### ① 重量摩耗

多方向摺動試験における PE ディスクの重量摩耗量の推移を図 3 に示す。