

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05629

研究課題名(和文) 折りたたみ構造を有しない低分子量ポリヒドロキシ酪酸による結晶構造と水素結合の研究

研究課題名(英文) A study on hydrogen bonding and crystal structure of low molecular weight poly(3-hydroxybutyrate)

研究代表者

佐藤 春実 (Sato, Harumi)

神戸大学・人間発達環境学研究科・准教授

研究者番号：10288558

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：微生物由来の生分解性高分子であるポリヒドロキシブタン酸(PHB)は、結晶構造中に弱い水素結合が存在し、それが結晶構造の安定化に寄与していることが分かっている。本研究では、分子量の小さいPHBを用いて結晶構造を形成していく様子を、赤外、ラマン、THzおよび時間分解小角広角X線散乱同時測定により調べた。その結果、分子鎖が短く折りたたみ構造を形成しない場合は、水素結合が分子鎖を配向させる駆動力となり結晶構造を形成しており、PHBの分子量が2000-3000より大きいと水素結合が結晶構造を安定化させる働きをすることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) is biodegradable polyesters synthesized by numerous bacteria as intracellular carbon and energy storage compounds. Infrared, Raman, and THz spectroscopy, wide-angle X-ray diffraction (WAXD) studies were carried out to explore crystallization behavior and hydrogen bonding of low molecular weight PHB. Low Molecular weight PHB (Mn= 1000 and 2000) are crystallized without molecular chain folding. It was shown that the crystallization behavior is affected by the presence of a chain folding structure. In the case where the molecular chain is short and does not form a folded structure, the hydrogen bonding becomes a driving force for orienting the molecular chain to form a crystal structure, and when the molecular weight of PHB is larger than 2000-3000, the hydrogen bonding stabilizes the crystal structure.

研究分野：高分子化学

キーワード：水素結合 生分解性ポリマー 分子量依存性 ラメラ構造

1. 研究開始当初の背景

申請者はこれまでの研究で、微生物由来の生分解性高分子であるポリヒドロキシブタン酸 (PHB, 分子量 6.5×10^5) の結晶構造中に弱い水素結合が存在し、それが結晶構造の安定化に寄与していることを見出した (図 1)。この弱い水素結合は、PHB の結晶構造中の隣り合うらせん分子間を結び付けており、これが数多く存在することで、全体として結晶構造を保持する大きな力となっている。また、この水素結合は結晶の a 軸方向に存在しており、PHB の分子鎖の折りたたみ方向も、同じ a 軸方向であることが分かっている。

一般に、高分子を結晶化させると、厚さ数 nm ~ 数十 nm の板状の結晶を形成する。板状結晶の厚み方向に並ぶように高分子鎖は配列しているが、その厚みは分子鎖の全長に比べて遥かに薄いことから、結晶中では分子鎖が折りたたまれた状態で存在することがわかっている。この高分子鎖の折りたたみによる板状結晶が、どのような機構で生成するか、という高分子の結晶化の問題は、非常に興味深く、50 年以上にわたる研究によって、これまで多くの知見が得られてきた。しかしながら、なぜ折りたたむのか、どのように折りたたむのか、といった高分子の結晶化の本質については未だ解決されているとは言い難い。

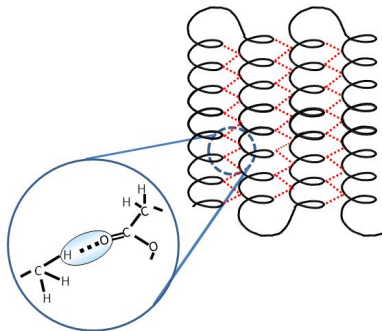
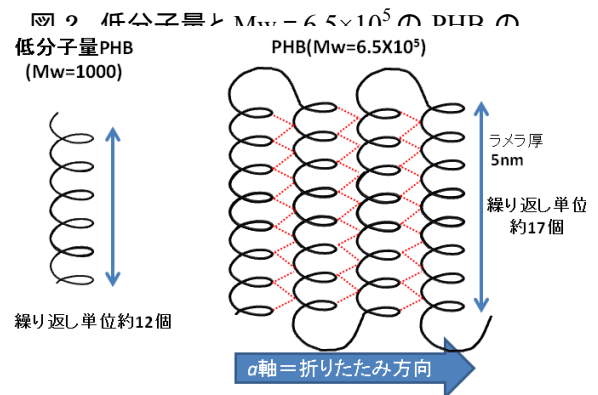


図 1. PHB の結晶構造中に存在する CH...O=C 水素結合。

そこで本研究では、分子量が 1000 程度の極めて分子量の小さい PHB 分子鎖が、折りたたむことなく分子鎖の配向のみで結晶構造

を形成していく様子を、赤外、ラマンスペクトル測定により官能基レベルで観察する。さらに、高分子の高次構造を反映するテラヘルツ分光法を用いて、結晶化に伴うラメラ構造 (高次構造) 形成の様子を直接観察する。以上の結果と、SPring-8 における時間分解小角広角 X 線散乱 (SAXS/WAXD) 同時測定の結果と併せて解析し、高分子の結晶化の本質に迫る。また、本申請により購入予定の温度制御装置の導入により、赤外、ラマン、テラヘルツスペクトル測定が同じ条件下で可能となる。これにより PHB の結晶化挙動を、官能



基レベルおよびラメラ全体の挙動の両方から捉えることができる。

小角 X 線散乱測定より、分子量 $M_w=6.5 \times 10^5$ の PHB は 5nm 程度の厚さのラメラ構造を形成することが報告されており、結晶の格子定数 c (繊維軸) の値を用いて計算すると、ラメラ厚方向には PHB の繰り返し単位が 17 個程度存在していることになる。本研究で用いる分子量 1000 の低分子量 PHB は、分子鎖の長さが繰り返し単位 12 個程度であることから、この低分子量 PHB の分子鎖は $M_w=6.5 \times 10^5$ の PHB のラメラ厚程度の長さであると考えられる。予備実験である低分子量 PHB の広角 X 線回折測定から、この低分子量 PHB においても分子量の大きな PHB と同様の斜方晶を有することが確認できた。しかしながら、低分子量 PHB の分子鎖の長さを考えると、分子鎖は折りたたむことなく、配向することで結晶

構造を形成するものと考えられる。

小角 X 線散乱測定より見積もられた PHB (分子量 6.5×10^5) のラメラ厚は 5nm 程度であることが分かっている。結晶の格子定数 c (繊維軸)の値を用いて計算すると、このラメラ厚方向には PHB の繰り返し単位が 17 個程度存在していることになる。本研究で用いる分子量 1000 程度の低分子量 PHB は、分子鎖の長さが繰り返し単位約 12 個程度と、非常に短い。つまり、この低分子量 PHB の分子鎖長は上述の PHB (分子量 6.5×10^5) のラメラ厚程度の長さしかない、と
いうことになる。予備実験として低分子量 PHB の広角 X 線回折測定を行ったところ、この低分子量 PHB においても、分子量の大きな PHB と同様の斜方晶を有していることが確認できた。しかしながら、低分子量 PHB の分子鎖の長さを考えると、分子鎖は折りたたむことなく結晶構造を形成していると考えられ、折りたたみの有無による結晶構造形成過程の違いを観察することが可能である。また、分子量 1000 だけでなく 5000, 6.5×10^5 等の分子量が異なる PHB の結晶構造形成過程を解析することで、高分子の折りたたみ構造の必然性と結晶構造中の分子間水素結合の効果と同時に明らかにすることができると考えられる。さらに、分子量 1000 程度の極めて短い分子の場合、量子化学計算によって赤外・ラマンスペクトルを分子丸ごと計算することが可能であるため、測定した赤外・ラマンスペクトルの詳細な帰属も可能である。

2 . 研究の目的

本研究では、極めて分子量の小さい(分子量 1000)ポリヒドロキシブタン酸(PHB)を用いて、テラヘルツ分光測定、ラマン分光測定、赤外分光測定、および時間分解小角広角 X 線散乱(SAXS/WAXD)同時測定を行うことで、折りたたみ構造の有無による高分子の結晶構造形成過程の違いを明らかにする。これまでの我々の研究で PHB の結晶構造中に

は分子間に弱い水素結合($\text{CH}\cdots\text{O}=\text{C}$ 水素結合)が存在し、それが結晶構造の安定化に寄与していることが分かっている。そこで、本応募研究課題では、分子鎖長がラメラ厚程度しかない低分子量 PHB の結晶構造形成過程を上記手法により詳細に調べ、分子間水素結合と分子鎖の折りたたみ構造との関わりについての知見を得、高分子の折りたたみ構造の必然性に迫る。

3 . 研究の方法

赤外・ラマンスペクトルの温度変化測定により、PHB の結晶構造形成過程において、折りたたみ構造を形成する場合(分子量 6.5×10^5 の PHB)と、折りたたみ構造を形成しない場合(分子量 1000 の PHB)の分子間水素結合の強さの違いを調べた。

放射光を利用した結晶化過程の時間分解 SAXS/WAXD 同時測定により、折りたたみ構造の有無で結晶構造形成過程にどのような影響を与えるかについて調べ、それらを赤外・ラマンスペクトル測定の結果と併せて解析した。

4 . 研究成果

折りたたみ構造を有しない低分子量ポリヒドロキシ酪酸による結晶構造と水素結合の研究についてテラヘルツ分光測定、ラマン分光測定、赤外分光測定、および時間分解小角広角 X 線散乱(SAXS/WAXD)同時測定を行い、総合的に調べた。特に、分子量依存性についても結晶構造形成過程の違いや、分子鎖間に働く $\text{C-H}\cdots\text{O}=\text{C}$ 水素結合の強さの違いについて検討した。その結果、水素結合の強さに関しては、どの分子量の PHB においてもほぼ同じであり、結晶構造にも違いは確認できなかった。しかしながら、結晶構造形成過程においては、この弱い水素結合の形成が PHB の分子量が 2000-3000 を境に、結晶構造を安定化させる働きをする場合と、分子鎖の整列させる駆動力になる場合に分類することができた。

この分子量2000-3000の値は、ちょうどPHBの分子鎖の長さが、PHBがラメラ構造を形成したときのラメラ厚に相当するものである。つまり、PHBが結晶構造を形成する際に、分子鎖の折りたたみの有無によって弱い水素結合の役割が異なるのである。このことは、分子鎖が短く、結晶構造において折りたたみ構造を形成しない場合は、分子鎖が配向することで結晶構造を形成しており、分子鎖間の水素結合がこの分子鎖を結びつけて安定化させていると考えられる。そして、折りたたみ構造を有しない場合はラメラ構造が合体成長をすることが示された。また、折りたたみ構造を形成する場合には、まず水素結合が形成され、それが結晶ラメラの構造形成へと繋がっていくことが示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

1. Krzysztof B. Bec, Yusuke Morisawa, Kenta Kobashi, Justyna Grabska, Ichiro Tanabe, Erika Tanimura, Harumi Sato, Marek J. Wójcik and Yukihiro Ozaki, Rydberg transitions as a probe for structural changes and phase transition at polymer surfaces: an ATR-FUV-DUV and quantum chemical study of poly(3-hydroxybutyrate) and its nanocomposite with graphene, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **20**, 8859-8873 (2018). (査読有)
2. Mateusz. Z. Brela, Marek J. Wójcik, Marek Boczar, Erika Onishi, Harumi Sato, Takahito Nakajima, Yukihiro Ozaki, "Study of Hydrogen Bond Dynamics in Nylon 6 Crystals Using IR Spectroscopy and Molecular Dynamics Focusing on the Differences Between α and γ Crystal Forms", *Int. J. Quantum Chem.* e25595 (2018). (査読有)
3. Seika Tatsuoka, Harumi Sato, "Stress-induced crystal transition of poly(butylene succinate) studied by terahertz and low-frequency Raman spectroscopy and quantum chemical calculation" *Spectrochimica Acta Part A*, in press (2018). (査読有)
4. Chihiro Funaki, Shigeki Yamamoto, Hiromichi Hoshina, Yukihiro Ozaki, Harumi Sato, "Three different kinds of weak C-H...O=C inter- and intramolecular interactions in poly(ϵ -caprolactone) studied by using terahertz spectroscopy, infrared spectroscopy and quantum chemical calculations", *Polymer*, **137**, 245-254 (2018). (査読有)
5. Dian Marlina, Harumi Sato, Hiromichi Hoshina, Yukihiro Ozaki, "Intermolecular Interactions of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (P(HB-co-HV)) with PHB-Type Crystal Structure and PHV-Type Crystal Structure Studied by Low-Frequency Raman and Terahertz Spectroscopies", *Polymer*, **135**, 331-337 (2018). (査読有)
6. Morihisa Terasaki, Khasanah, Yukihiro Ozaki, Isao Takahashi, Harumi Sato, "Study on phase separation in an ultra-thin poly(methyl methacrylate)/ poly(4-vinyl phenol) film by infrared reflection absorption spectroscopy", *Polymer*, **135**, 69-75 (2018) (査読有)
7. Hotsumi Iwasaki, Madoka Nakamura, Nozomu Komatsubara, Makoto Okano, Masayoshi Nakasako, Harumi Sato, Shinichi Watanabe, "Controlled Terahertz Birefringence in Stretched Poly(lactic acid) Films Investigated by Terahertz Time-Domain Spectroscopy and Wide-Angle X-ray Scattering", *J. Phys. Chem. B*, **121** (28), 6951-6957(2017). (査読有)
8. Mengfan Wang, Sanpon Vantasin, Jinping Wang, Harumi Sato, Jianming Zhang, and Yukihiro Ozaki, "Distribution of polymorphic crystals in the ring-banded spherulites of poly(butylene adipate) studied using high-resolution raman imaging", *Macromolecules*, **50** (8), 3377-3387 (2017). (査読有)
9. Mateusz. Z. Brela, Marek Boczar, Marek J. Wójcik, Harumi Sato, Takahito Nakajima, Yukihiro Ozaki, "The Born - Oppenheimer Molecular Simulations of Infrared Spectra of Crystalline Poly-(R)-3-hydroxybutyrate with Analysis of Weak C-H...O=C Hydrogen Bonds", *Chem. Phys. Lett.* **678**, 112-118(2017). (査読有)
10. Shigeki Yamamoto, Mai Miyada, Harumi Sato, Hiromichi Hoshina, and Yukihiro Ozaki, "Low-Frequency Vibrational Modes of Poly(glycolic acid) and Thermal Expansion of Crystal Lattice Assigned On the Basis of DFT-Spectral Simulation Aided with a Fragment Method", *J. Phys. Chem. B*, **121**, 1128-1138(2017) (査読有)
11. Chihiro Funaki, Takuya Toyouchi, Hiromichi Hoshina, Yukihiro Ozaki, Harumi Sato, "Terahertz imaging of the distribution of crystallinity and crystalline orientation in a poly (ϵ -caprolactone) film", *Applied Spectroscopy*, **71**, 1537-1542 (2017). (査読有)
12. Mengfan Wang, Khasanah, Harumi Sato, Isao Takahashi, Jianming Zhang, Yukihiro Ozaki, "Higher- Order Structure Formation of a Poly(3-hydroxybutyrate) Film during Solvent Evaporation" *RSC Adv.*, **6**, 95021-95031(2016). (査読有)
13. Khasanah, Kummetha Raghunatha Reddy, Shigesaburo Ogawa, Harumi Sato, Isao Takahashi, Yukihiro Ozaki, "Evolution of Intermediate and Highly Ordered Crystalline States under Spatial Confinement in Poly(3-hydroxybutyrate) Ultrathin Films", *Macromolecules*, **49**, 4202-4210(2016). (査読有)
14. Harumi Sato, Mai Miyada Shigeki Yamamoto, Kummetha Raghunatha Reddy, Yukihiro Ozaki "The C-H...O (Ether) Hydrogen Bonding along the (110) Direction in Polyglycolic Acid Studied by Infrared Spectroscopy, Wide-angle X-ray Diffraction, Quantum Chemical Calculations and Natural Bond Orbital Calculations", *RSC Adv.*, **6**, 16817-16823(2016). (査読有)

15. Khasanah, Kummetha Raghunatha Reddy, Harumi Sato, Isao Takahashi, Yukihiko Ozaki "Intermolecular Hydrogen Bondings in the Poly(3-hydroxybutyrate) and Chitin Blends: Their Effects on the Crystallization Behavior and Crystal Structure of Poly(3-hydroxybutyrate)", *Polymer*, **75**, 141-150(2015).
- [学会発表](計 89 件)
1. 振動分光法を用いたポリヒドロキシブタン酸共重合体の結晶化挙動に及ぼす添加剤の影響, 鈴木修平, 佐藤春実, 指輪仁之, 2017年9月20-22日, 愛媛 第66回高分子討論会
 2. Terahertz spectroscopy and its applications in polymers, Harumi Sato, 2017.9.18, Kobe-Kiel bilateral workshop, Kiel University
 3. Thermal Denaturation and structural changes of collagen model peptide studied by low frequency Raman and THz spectroscopy, Tomoki Nagahama, Harumi Sato, ICAVS2017, June 11 – 16, 2017, Victoria Conference Centre, Victoria, BC, Canada
 4. Intermolecular Interaction and Higher-Order Structure of Biodegradable Polyester Studied by Terahertz Spectroscopy, Harumi Sato, Chihiro Funaki, ICAVS2017, June 11 – 16, 2017, Victoria Conference Centre, Victoria, BC, Canada
 5. Higher-Order Structure of Biodegradable Polyesters Studied by Terahertz Spectroscopy, Harumi Sato, 2017年3月10日, Molecular Photoscience Research Center International Symposium "Recent Advances in Terahertz Molecular Science", 瀧川記念会館 神戸大学
 6. Effect of Additives on the Crystallization Behavior of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) Studied by Infrared Spectroscopy, Shuhei Suzuki, Hitoshi Sashiwa, Harumi Sato, 2016年12月4-7日, Japan-Taiwan Medical Spectroscopy International Symposium, Awaji Yumebutai International Conference Center
 7. Depth direction analysis of polymer materials by low-frequency Raman, Yuki Morio, Yasutaka Kitahama, Harumi Sato, Yukihiko Ozaki, 2016年12月4-7日, Japan-Taiwan Medical Spectroscopy International Symposium, Awaji Yumebutai International Conference Center
 8. Phase separation of poly(methyl methacrylate)/poly(4-vinyl phenol) ultra-thin film studied by infrared reflection adsorption spectroscopy, Morihisa Terasaki, Khasanah, Isao Takahashi, Yukihiko Ozaki, Harumi Sato, 2016年12月4-7日, Japan-Taiwan Medical Spectroscopy International Symposium, Awaji Yumebutai International Conference Center
 9. Thermal and Ultraviolet Degradation of Poly(ethylene-co-vinyl acetate) Studied by Vibrational Spectroscopy, Kazutaka Sekiya, Hiromichi Hoshina, Harumi Sato, 2016年12月4-7日, Japan-Taiwan Medical Spectroscopy International Symposium, Awaji Yumebutai International Conference Center
 10. Evaluation of physical properties of poly(ϵ -caprolactone) studied by terahertz spectroscopy, Chihiro Funaki, Takuya Toyouchi, Hiromichi Hoshina, Yukihiko Ozaki, Shigeki Yamamoto, Harumi Sato, 2016年12月4-7日, Japan-Taiwan Medical Spectroscopy International Symposium, Awaji Yumebutai International Conference Center
 11. Molecular Weight Dependence of the Formation of Weak Hydrogen Bonding in Poly(3-hydroxybutyrate), Harumi Sato, 2016年12月4-7日, Japan-Taiwan Medical Spectroscopy International Symposium, Awaji Yumebutai International Conference Center
 12. Higher-Order Structure of the Biodegradable Polymer Studied by Terahertz Spectroscopy, Harumi Sato, 2016年12月4-7日, Japan-Taiwan Medical Spectroscopy International Symposium, Awaji Yumebutai International Conference Center
 13. THz and low-frequency Raman Spectroscopy of polymers, Harumi Sato, 2016年9月11-14日, 20th European Symposium on Polymer Spectroscopy, ドレスデン
 14. Characterization of poly(ϵ -caprolactone) by using terahertz imaging, Chihiro Funaki, Takuya Toyouchi, Hiromichi Hoshina, Yukihiko Ozaki, Harumi Sato, 2016年9月11-14日, 20th European Symposium on Polymer Spectroscopy, ドレスデン
 15. Stretch-induced crystalline phase transition of poly(butylene succinate) by Terahertz spectroscopy, Seika Tatsuoka, Yukihiko Ozaki, Hiromichi Hoshina, Harumi Sato, 2016年9月11-14日, 20th European Symposium on Polymer Spectroscopy, ドレスデン
 16. Effect of additives on the crystallization behavior of poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyhexanoate), Syuhei Suzuki, Hitoshi Sashiwa, Harumi Sato, 2016年9月11-14日, 20th European Symposium on Polymer Spectroscopy, ドレスデン
 17. ポリヒドロキシブタン酸共重合体の核剤添加による結晶化挙動, 鈴木修平, 佐藤春実, 指輪仁之, 2016年7月15日, 第62回高分子研究発表会, 兵庫県民会館
 18. The evolution of intermediate and highly-ordered crystalline states under spatial confinement in poly(3-hydroxybutyrate) ultrathin films, Khasanah, Kummetha Raghunatha Reddy, Shigesaburo Ogawa, Isao Takahashi, Harumi Sato, Yukihiko Ozaki, 2016年5月25日-27日, 第65回高分子学会年次大会, 神戸国際会議場
 19. 振動分光法および小角/広角X線散乱法による低分子量ポリヒドロキシブタン酸の結晶構造形成過程の研究, 門屋直人, 宮井智也, 佐藤春実, 2016年5月25日, 第65回高分子学会年次大会, 神戸国際会議場
 20. Crystal structure and thermal behavior of low molecular weight poly(3-hydroxybutyrate) studied by terahertz and Raman spectroscopy, Tomoya Miyai, Naoto Kadoya, Hiromichi Hoshina, Yukihiko Ozaki, Harumi Sato, Dec15-Dec20, Pacificchem2015, Hawaii Convention Center
 21. Crystallization and chain orientation in the ultrathin films of poly(3-hydroxybutyrate) studied by IR-RAS and GIXD, Khasanah, Raghunatha Reddy Kummetha, Isao Takahashi, Harumi Sato, Yukihiko Ozaki,

- Dec15-Dec20, Pacificchem2015, Hawaii Convention Center
22. Intermolecular Interaction of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) Studied by Low-Frequency Raman and Terahertz Spectroscopy, Dian Marlina, Hiromichi Hoshina, Harumi Sato, Yukihiro Ozaki, 2015年11月19日 - 20日, シンポジウム テラヘルツ科学の最先端, 作並温泉
 23. Thermal Behavior and Lamella Structures of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) Studied by Low-Frequency Raman, Terahertz Spectroscopy, and Small Angle X-ray Scattering, Dian Marlina, Mengfan Wan, Koh Yoshida, Hiromichi Hoshina, Harumi Sato, Yukihiro Ozaki, SCIX2015, Sep. 27-Oct02, Rhode Island Convention Center Providence RI
 24. Temperature Dependent of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) Studied by Low Frequency Raman and Terahertz Spectroscopy, Dian Marlina, Koh Yoshida, Hiromichi Hoshina, Harumi Sato, Yukihiro Ozaki 2015年9月15日, 第64回高分子討論会, 東北大学
 25. The crystallization behavior of poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) during solvent casting process, Mengfan Wang, Shigeaki Morita, Harumi Sato, Yukihiro Ozaki, 2015年9月15日, 第64回高分子討論会, 東北大学
 26. 振動分光法を用いた低分子量ポリ(3-ヒドロキシブタン酸)の結晶構造及び熱的挙動に関する研究, 宮井 智也, 門屋 直人, 保科 宏道, 尾崎 幸洋, 佐藤 春実, 2015年9月15日, 第64回高分子討論会, 東北大学
 27. Analysis of Intermolecular Vibration Mode of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (P(HB-co-HV)) using Low Frequency Raman and Terahertz Spectroscopy, Daian Marlina, Sato Harumi, Ozaki Yukihiro, 2015年7月17日, 第61回高分子研究発表会, 兵庫県民会館
 28. Crystallization Behavior and Conformation Rearrangement of Poly(3-hydroxybutyrate) Ultrathin Film Investigated by Infrared Reflection Absorption Spectroscopy, Khasanah, Kummetha Raghunatha Reddy, Isao Takahashi, Harumi Sato, Yukihiro Ozaki, 2015年7月17日, 第61回高分子研究発表会, 兵庫県民会館
 29. Structure and crystallization behavior of Poly(3-hydroxybutyrate) and Poly(D, L-lactide) blends studied by DSC, FTIR and X-ray analysis, Mengfan Wang, 佐藤 春実, 尾崎 幸洋, 2015年7月17日, 第61回高分子研究発表会, 兵庫県民会館
 30. 低分子量ポリ(3-ヒドロキシブタン酸)における結晶構造及び熱的挙動のラマン分光法及びテラヘルツ分光法を用いた研究, 宮井 智也, 門屋 直人, 保科 宏道, 尾崎 幸洋, 佐藤 春実, 2015年7月17日, 第61回高分子研究発表会, 兵庫県民会館
 31. Multistep Crystallization Process of Poly(3-hydroxybutyrate) Studied by Time-Resolved Synchrotron SAXS and WAXD and MCR, Harumi Sato, XV Chemometrics in Analytical Chemistry conference (CAC2015), June 22-26, 2015, Changsha, China.
 32. Analysis of Poly(3-hydroxybutyrate) during solvent induced crystallization process and its images, 曾 采薇・石川 大太郎・佐藤 春実・Wograveen Kanet・Young Mee Jung・尾崎 幸洋, 第75回分析化学討論会, 2015年5月23-24日, 山梨大学
 33. Confinement Effect of Chitin on the Crystallization Behavior of Poly(3-hydroxybutyrate) Thin Film Studied by Infrared-Reflection Absorption Spectroscopy and Grazing Incidence X-Ray Diffraction, Khasanah, Isao Takahashi, Harumi Sato, Kummetha Raghunatha Reddy, Yukihiro Ozaki, 2015年5月27日, 第64回高分子年次大会, 札幌
 34. 赤外分光法, 広角小角 X 線回折を用いた低分子量ポリ(3-ヒドロキシブタン酸(PHB))の等温結晶化プロセスの研究, 門屋 直人, 佐藤 春実, 尾崎 幸洋, 2015年5月27日, 第64回高分子年次大会, 札幌コンベンションセンター
 35. ラマン分光法及びテラヘルツ分光法を用いた低分子量ポリ(3-ヒドロキシブタン酸)の結晶構造及び熱的挙動の研究, 宮井 智也, 門屋 直人, 保科 宏道, 尾崎 幸洋, 佐藤 春実, 2015年5月27日, 第64回高分子年次大会, 札幌コンベンションセンター
- 他 54 件
- 〔図書〕(計 2 件)
1. 佐藤春実 他、(株)技術情報協会、高分子の残留応力対策、2017、480 (82-88)
 2. Harumi Sato 他、Elsevier、Spectroscopy of Polymer Nanocomposites、2016、498 (88-111)
- 〔その他〕
神戸大学佐藤研究室ホームページ
URL: <http://www2.kobe-u.ac.jp/~hsato/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
佐藤 春実 (Harumi Sato)
神戸大学・人間発達環境学研究所・准教授
研究者番号：10288558
 - (2) 研究協力者
尾崎 幸洋 (Yukihiro Ozaki)
関西学院大学・理工学研究所・教授
研究者番号：00147290

山本 茂樹 (Shigeki Yamamoto)
大阪大学・理学研究科・助教
研究者番号：60552784