

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23245045

研究課題名(和文)超高速固体NMRプローブと超高磁場NMRによる繊維・高分子の分子間構造解析

研究課題名(英文)Determination of Inter-molecular Structures of Fibers and Polymers using Ultra-High Field Solid State NMR with Ultra-High Speed NMR Probe

研究代表者

朝倉 哲郎 (ASAKURA, TETSUO)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30139208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,800,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者らが開発してきた超高速固体NMRマイクロプローブと超高磁場NMR装置を組み合わせ、繊維・高分子材料の分子間構造解明のための¹H固体NMR構造解析法を開発した。¹Hピークの帰属や化学シフト値の取得、分子間距離情報の取得が可能となった。それを用いて、家蚕絹の繊維化前構造を精密に決定でき、構造安定化に関わる水素結合の詳細が明らかになった。さらに、家蚕絹の不均一な繊維化後構造について、原子座標レベルでの詳細な構造を世界ではじめて決定することができ、繊維化前構造と合わせて家蚕絹の繊維化機構の解明を行った。同様に、クモ絹糸についても本構造解析法を用いて、結晶部分の詳細な構造決定を進めた。

研究成果の概要(英文)：The analytical method for the structure determination of several fibers and polymer materials was proposed on the basis of newly developed ¹H solid state NMR method. The method consists of the combination of microprobe with ultra-high speed and ultra-high field NMR magnet together with the theoretical chemical shift calculation. The ¹H NMR peak assignment and ¹H chemical shift data were obtained together with the inter-molecular atomic distance information using this analytical method. The structure of Bombyx mori silk fibroin before spinning was determined precisely and details of the hydrogen bonding formation which contributes to the structural stabilization were clarified. The structure of the silk fibroin after spinning was also determined precisely. Then the fiber formation mechanism was discussed on the basis of these two structures. Similarly, this ¹H solid state NMR method was also applied to determination of the structure of the crystalline fraction in spider silk.

研究分野：化学

キーワード：¹H固体NMR構造解析 超高速固体NMRマイクロプローブ 超高磁場NMR 家蚕絹の繊維化前後の構造 クモ絹の構造 水素結合 ¹H NMR 化学シフト 絹の繊維化機構

1. 研究開始当初の背景

(1) ^1H 固体 NMR は、スペクトルが広幅化し、ピーク分離が十分でないため、溶液の構造決定に威力を発揮してきた ^1H 溶液 NMR と比較して、構造解析の分野では十分に活用されてこなかった。

(2) ^1H 固体 NMR の分解能を上げて、構造解析に広く用いる事ができるように開発を進め、NMR 構造解析が不得意とする分子間構造の解明等に ^1H 固体 NMR を適用する必要があった。

(3) 最近、絹は、優れた再生医療材料として脚光をあびており、その構造の詳細な解明は、材料開発の指針を与えることから、繊維や不均一構造を詳細に解明できる新たな構造解析手法の開発が望まれていた。

2. 研究の目的

(1) 研究代表者らが、これまで開発してきた超高速固体 NMR マイクロプローブを超高磁場 NMR 装置に取り付け、NMR スペクトルの分解能の向上を図る。

(2) 繊維および高分子材料について、その分子間構造解明のキーとなる ^1H 固体 NMR 構造解析法を開発する。

(3) それを用いて、家蚕絹の繊維化前後の構造を原子座標レベルで精密に決定するとともに、最終的に、その繊維化機構を解明する。

3. 研究の方法

(1) 超高速固体 NMR マイクロプローブを分子研の 930MHz 超高磁場 NMR 装置に取り付け、ピークの先鋭化を成し遂げ、繊維・高分子材料の高分解能 ^1H 固体 NMR スペクトルを得るための測定法を開発する。

(2) 特に ^1H DQMASNMR の測定によって、スペクトルの詳細な帰属と化学シフト値の取得を行うとともに、 ^1H 核間の分子間距離情報の取得を行い、実験面から、 ^1H 固体 NMR 構造解析法を開発する。

(3) さらに、モデル構造を仮定し、 ^1H , ^{13}C , ^{15}N NMR 化学シフトの精密計算を行い、実測データと比較して構造決定を行う。そして、その解析手法を用いて、家蚕絹の繊維化前後の構造決定ならびに繊維化機構の解明を行う。

4. 研究成果

(1) 構造既知の平行および逆平行シート構造のアラニン 3 量体を用いた ^1H 核の原子座標決定法の開発

平行および逆平行シート構造を有するアラニン 3 量体の ^1H DQMAS NMR スペクトルを 70KHz の超高速プローブを分子研の 920MHz 超高磁場 NMR 装置に取り付けて測定した。それによって、二構造間の違いが、スペクトルに反映されることを確認するとともに、分解能が著しく向上した 2 次元スペクトルを得、アラニンメチルピークから各ピークをたどることによって、最終的に、各残基毎のピークの帰属を正確に行うことができることを示した。

(2) ペプチドの ^1H N 化学シフトと ^1H N が関わる水素結合原子間距離の相関に関する関係式の提案と水素結合原子間距離の決定

アラニン 3 量体の平行および逆平行シート構造は、各々、さらに、A, B の 2 種類の構造から成る。図 1 (a) アラニン 3 量体について、X 線解析データと本構造解析の ^1H 間原子間距離から得られたデータを化学シフト相関によって比較したところ、後者の方が優れていることを示した。

そこで、図 1 (b) ^1H N 化学シフト (δ_{NH}) とその HN 結合が関わる分子間水素結合距離 (d) のデータベースを作成し、 $\delta_{\text{NH}} = 19.3d^{-3} + 5.9$ の関係式で整理されることを示した。今後、少なくともシート構造を有するペプチドの場合、この関係式を用いることによって ^1H N 化学シフトからそれが関わる分子間水素結合距離を精密に決定することができることを明らかにした。

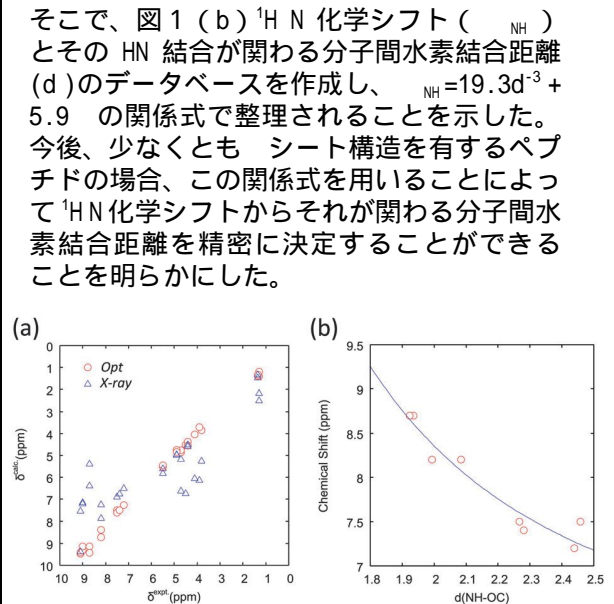


図 1 (a) アラニン 3 量体について、X 線解析データと本構造解析データの ^1H 間原子間距離 (Opt) から得られた化学シフトの相関図の比較 (b) $\delta_{\text{NH}} = 19.3d^{-3} + 5.9$ で整理される本構造解析データ、記号は本文参照。

(3) 逆平行シート構造のアラニン 4 量体の ^1H 核の原子座標決定と逆平行シート構造のアラニン 3 量体との比較

クモの糸 (絹) は、主に、逆平行シート構造を有するアラニン 6 量体から成るアラニン連鎖の結晶領域とグリシンリッチな非結晶領域が繰り返される。

クモの糸の結晶領域のモデル構造の構築にあたって、その分子間シート構造に“ひずみ”の多いアラニン 3 量体ではなく、“ひずみ”の少ないアラニン 4 量体が適することを示した。逆平行シート構造のアラニン 4 量体について、 ^1H DQMAS NMR スペクトルを測定し、残基毎のピークの帰属を行い、化学シフト計算を行うことによって、骨格の原子座標に加え、 ^1H 核の原子座標を決定することができた。

(4)家蚕絹の固体繊維化前構造 Silk I の原子座標レベルでの構造決定

家蚕絹の繊維化前の構造の決定は、環境にやさしい条件下で、水溶液から強くてタフな繊維を作製するための分子設計指針を与える。高い強度の源として重要な結晶部分の構造を決定するにあたり、家蚕絹結晶部分の Silk I 構造のモデルに、(AG)₁₅ の Silk I 構造がなりうることを、¹H DQMAS NMR スペクトルの高い類似性から明らかにした(図 2(A), (B))。

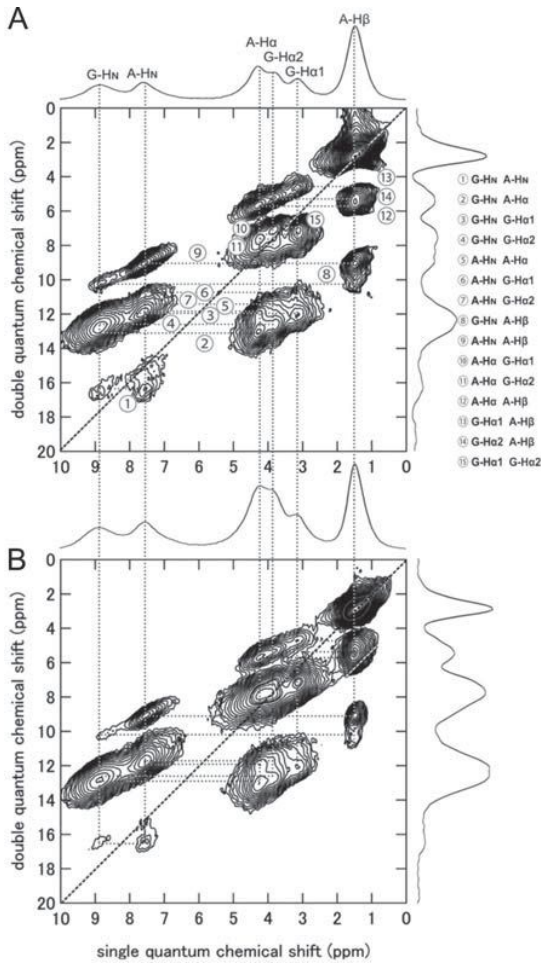


図 2 (A) (AG)₁₅ の Silk 構造および(B) 家蚕絹結晶部分の Silk 構造の各 ¹H DQMAS NMR スペクトル

さらに、(AG)₁₅ について、各 ¹H ピークの帰属を進め(図 2(A))、従来の ¹³C, ¹⁵N 化学シフトデータに ¹H 化学シフトデータを加えて、化学シフト計算を行った。それによって、Silk I 構造の ¹H 核の原子座標を決定することができた。これによって、分子内、分子間の水素結合形成の様子が詳細に明らかとなった。さらに、分子間の Silk I 構造について、分子間距離情報を取得し、分子間構造を最終的に決定した。

(5)家蚕絹の繊維化後構造 Silk の不均一構造とセリン残基の局所構造とダイナミクス

家蚕絹の結晶部分の繊維化後構造 Silk が、

アラニン残基と同様に、セリン残基においても不均一構造であることを明らかにした。そして、セリン C ピークについて、詳細な帰属を進めるとともに、緩和時間を測定して、セリン残基のダイナミクスの様子を明らかにした。

さらに、¹³C 核間の距離情報を与える ¹³C DARR 測定をアラニン C ピークについて行い、結晶構造が、小さい規模の領域から構成される二つの近接した逆平行シート構造から成ることを明らかにした。

(6)家蚕絹の繊維化後構造 Silk に関する従来モデルの否定

家蚕絹の Silk 構造のモデルに関しては、1955 年、Marsh, Pauling らが逆平行シート構造を提案、これまで約半世紀にわたって生化学の教科書には必ずと言ってよい程、掲載されてきた。

そこで、Silk の構造決定に威力を発揮してきた ¹H 固体 NMR 構造解析法を、この構造の再決定のために用いた。図 3 は、Silk I 構造の場合と同様に、家蚕絹結晶部分の Silk 構造のモデルとして(AG)₁₅ の Silk 構造を選び、その ¹H DQMAS NMR スペクトルを測定した結果である。

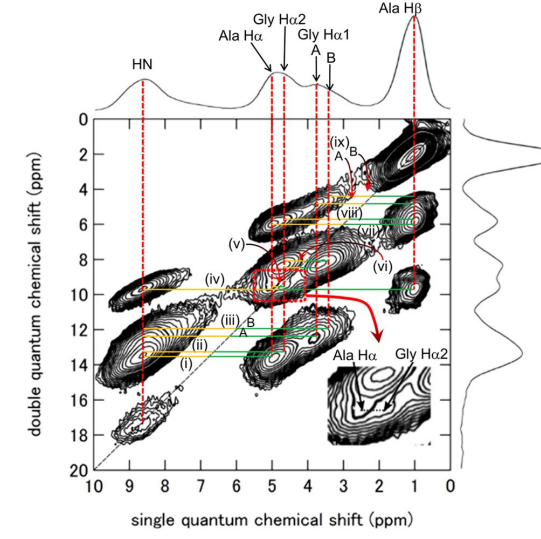


図 3 (AG)₁₅ の Silk 構造の ¹H DQMAS NMR スペクトル

その結果、逆平行のシート構造を有する 2 本の絹分子鎖間の構造を検討すると、Marsh らの提案するモデル構造で予想されるグリシン残基間の近接が観測されず、むしろ、一個、分子間水素結合がずれたアラニンとグリシン残基間が近接することがわかった(図 3 の挿入図)。もともと、アラニン C ピークが非対称であり、Silk 構造は不均一であり、均一な Marsh モデルでは、Silk 構造を説明できなかったが、さらに、提案された分子間構造自身が間違っていることを明らかにした。

(7)家蚕絹の新らたな Silk 構造モデルの提案

(AG)₁₅ の Silk 構造の ¹H DQMAS NMR スペクトルから得られた ¹H 化学シフトデータに、従来の ¹³C, ¹⁵N 化学シフトデータを加えて、化学シフト計算を行った。その結果をもとに、最終的に、図 4 にまとめた二つの構造モデルを、結晶部の二つの逆平行シート構造モデルとして提案することができた。

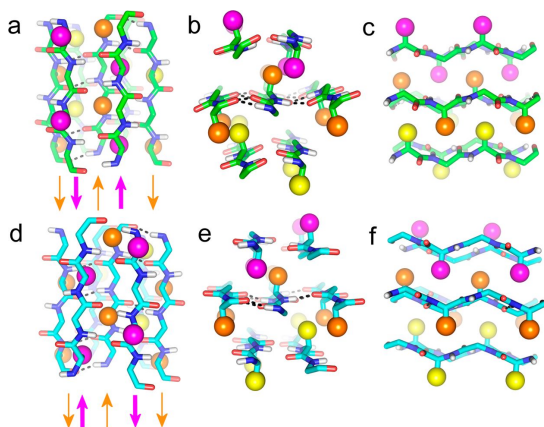


図 4 固体 NMR で決定した家蚕絹繊維の Silk の不均一なシート構造。上下の構造が 2:1 の割合で存在している。それ以外に結晶部には、30% の非晶構造が内在されている。

上と下の構造の割合は、約 2:1 であり、これらの構造が近接して分散した状態が家蚕絹繊維の結晶部分の逆平行のシート構造と言える。それ以外に結晶部には、30% の非晶構造が内在されており、併せて、不均一構造が形成されることが明らかとなった。これらの割合は、全体の絹繊維の 56% であり、残りは非晶領域となる。固体 ¹³C NMR の結果から、我々は、すでに、非晶部分はランダム構造とゆがんだシート構造が、約 1:1 から成ることを示している。

以上のようにして、これまで約半世紀にわたって生化学の教科書に掲載されてきた Marsh, Pauling らの構造モデルを否定し、新たに、不均一な構造モデルを原子座標レベルで提案することができた。これらの不均一構造は、固体 NMR によってはじめて明らかとなったものであり、アメリカ化学会の高分子部門の雑誌である *Macromolecules* の本年 4 月 28 日号の表紙を飾ることとなった。

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 39 件)

Suzuki Yu, Asakura Tetsuo, Silk Fibroin, *Encyclopedia of Polymer Nanomaterials*, Springer, 査読有, in press, 2015,

DOI: 10.1007/978-3-642-36199-9

Asakura Tetsuo, Ohata Takuya, Kametani Shunsuke, Okushita Keiko, Yazawa, Koji, Nishiyama, Yusuke, Nishimura, Katsuyuki, Aoki Akihiro, Suzuki Furitsu, Kaji Hironori, Anne S. Ulrich, and Mike P. Williamson, Intermolecular Packing in B.mori Silk Fibroin: Multinuclear NMR Study of the Model Peptide (Ala-Gly)₁₅ Defines a Heterogeneous Antiparallel Antipolar Mode of Assembly in the Silk Form, *Macromolecules*, 査読有, 48(1), 28-36, 2015, DOI: 10.1021/ma502191g

朝倉哲郎, 総論 シルクで創る再生医療材料の最新動向工業材料, 工業材料, 査読無, 63, 10-13, 2015

朝倉哲郎, 解説 構造と特性, 工業材料, 査読無, 63, 14-18, 2015

朝倉哲郎, 絹の構造・物性と再生医療材料への応用(上)家蚕絹の構造, 加工技術, 査読無, 50, 147-153, 2015

朝倉哲郎, 絹の構造・物性と再生医療材料への応用(下)絹の再生医療への応用, 加工技術, 査読無, 50, 215-222, 2015

Asakura Tetsuo, Yazawa Koji, Horiguchi Kumiko, Suzuki Furitsu, Nishiyama Yusuke, Nishimura Katsuyuki, Kaji Hironori, Difference in the Structures of Alanine Tri- and Tetra-Peptides with Antiparallel -Sheet Assessed by X-Ray Diffraction, Solid-State NMR and Chemical Shift Calculations by GIPAW, *Biopolymers*, 査読有, 101(1), 13-20, 2014, DOI: 10.1002/bip.22241

Suzuki Yu, Yamazaki Toshimasa, Aoki Akihiro, Shindo Heisaburo, Asakura Tetsuo, NMR Study of the Structures of Repeated Sequences, GAGXGA(X=S,Y,V), in Bombyx mori Liquid Silk, *Biomacromolecules*, 査読有, 15(1), 104-112, 2014, DOI: 10.1021/bm401346h

Okushita Keiko, Asano Atsushi, Michael P. Williamson, Asakura Tetsuo, Local Structure and Dynamics of Serine in the Heterogeneous Structure of the Crystalline Domain of Bombyx mori Silk Fibroin in Silk Form Studied by 2D ¹³C-¹³C Homonuclear Correlation NMR and Relaxation Time Observation, *Macromolecules*, 査読有, 47(13), 4308-4316, 2014, DOI: 10.1021/ma500908m

Asakura Tetsuo, Isozaki Makoto, Saotome Toshiki, Tatematsu Ken-ichiro, Sezutsu Hideki, Kuwabara Nobuo, Nakazawa Yasumoto, Recombinant silk fibroin incorporated cell adhesive sequences produced by transgenic silkworm as a possible candidate for use in vascular graft, *Journal of Materials Chemistry B*, 査読有, 2(42), 7375-7383, 2014,

DOI: 10.1039/C4TB01301H

朝倉哲郎, 絹の構造と再生医療材料への応用, 月刊せんい, 繊維機械学会誌, 査読無, 67(12), 33-38, 2014

Asakura Tetsuo, Suzuki Yu, Yazawa Koji, Aoki Akihiro, Nishiyama Yusuke, Nishimura Katsuyuki, Suzuki Furitsu, Kaji Hironori, Determination of Accurate ^1H Positions of (Ala-Gly) $_n$ as a Sequential Peptide Model of Bombyx mori Silk Fibroin before Spinning (Silk), *Macromolecules*, 査読有, 46(19), 8046-8050, 2013.

DOI: 10.1021/ma401531m

Asakura Tetsuo, Suzuki Yu, Nakazawa Yasumoto, Yazawa Koji, Gregory P. Holland, Jeffery L. Yarger, Silk structure studied with nuclear magnetic resonance, *progress in nuclear magnetic resonance spectroscopy*, 査読有, 69, 23-68, 2013, DOI: 10.1016/j.pnmrs.2012.08.001

Asakura Tetsuo, Suzuki Yu, Nagano Aya, Knight, D.P., Kamiya Masakatsu, Demura Makoto, Synthesis and Characterization of Water-Soluble Silk Peptides and Recombinant Silk Protein Containing Polyalanine, the Integrin Binding Site, and Two Glutamic Acids at Each Terminal Site as a Possible Candidate for Use in Bone Repair Materials, *Biomacromolecules*, 査読有, 14(10), 3731-3741, 2013,

DOI: 10.1021/bm401118m

Asakura Tetsuo, Suzuki Yu, Nakazawa Yasumoto, Holland G.P., Yargar J.L., Elucidating silk structure using solid-state NMR, *Soft Matter*, 査読有, 9, 11440-11450, 2013,

DOI: 10.1039/C3SM52187G

Asakura Tetsuo, Okonogi Michi, Horiguchi Kumiko, Aoki Akihiro, Saito Hazime, Knight David P and Williamson, Michael P, Two different packing arrangements of anti-parallel polyalanine, *Angew Chem Int Ed Engl*, 査読有, 51(5), 1212-1215, 2012, DOI: 10.1002/anie.201105356

Yazawa Koji, Suzuki Furitsu, Nishiyama Yusuke, Ohata Takuya, Aoki Akihiro, Nishimura Katsuyuki, Shimizu Tadashi, Kaji Hironori and Asakura Tetsuo, Determination of accurate ^1H positions of an alanine tripeptide with anti-parallel and parallel β -sheet structures by high resolution ^1H solid state NMR and GIPAW chemical shift calculation, *Chem. Commun*, 査読有, 48(91), 11199-11201, 2012.

DOI: 10.1039/c2cc36300c

Yazawa Koji, Yamaguchi Erika, Aoki Akihiro, Nakazawa Yasumoto, Suzuki Yu, Asakura Tetsuo, A two-dimensional spin-diffusion NMR study on the local

structure of a water-soluble model peptide for *Nephila clavipes* dragline silk (MaSp1) before and after spinning, *Polym. J*, 査読有, 44(8), 913-917, 2012, DOI: 10.1038/pj.2012.98

Nakazawa Yasumoto, Asano Atsushi, Nakazawa Chikako, Tsukatani Toshihide, Asakura Tetsuo, Structural characterization of the silk-polyurethane composite material for the biomaterials using solid-state NMR, *Polymer Journal*, 査読有, 44(8), 802-807, 2012, DOI: 10.1038/pj.2012.119

Nishiyama Yusuke, Endo Yuki, Nemoto Takahiro, Utsumi Hiroaki, Yamauchi Kazuo, Hioka Katsuya, Asakura Tetsuo, Very fast magic angle spinning H-1-N-14 2D solid-state NMR: Sub-micro-liter sample data collection in a few minutes, *JOURNAL OF MAGNETIC RESONANCE*, 査読有, 208(1), 44-48, 2011,

DOI: 10.1016/j.jmr.2010.10.001

② Nagano Aya, Tanioka Yumi, Sakurai Nobuko, Sezutsu Hideki, Kuboyama, N.; Kiba, H.; Tanimoto, Y.; Nishiyama Noboru, Asakura Tetsuo, Regeneration of the femoral epicondyle on calcium-binding silk scaffolds developed using transgenic silk fibroin produced by transgenic silkworm, *ACTA BIOMATERIALIA*, 査読有, 7(3), 1192-1201, 2011,

DOI: 10.1016/j.actbio.2010.10.032

② Asakura Tetsuo, Nishi Hirohito, Nagano Aya, Yoshida Ai, Nakazawa Yasumoto, Kamiya Masakatsu, Demura Makoto, NMR analysis of the fibronectin cell-adhesive sequence, Arg-Gly-Asp, in a recombinant silk-like protein and a model peptide, *Biomacromolecules*, 査読有, 12(11), 3910-3916, 2011,

DOI: 10.1021/bm2011196

③ Suganuma Koto, Horiuchi Ken, Matsuda Hironori, H.N.Cheng, Aoki Akihiro, Asakura Tetsuo, Stereoregularity of Poly(lactic acid) and their Model Compounds as studied by NMR and Quantum Chemical Calculations, *Macromolecules*, 査読有, 44(23), 9247-9253, 2011,

DOI: 10.1021/ma2018777

[学会発表](計159件)

Okushita Keiko, Asakura Tetsuo, Silk structure studied with solid state NMR, International Silk Conference 2014, 2014/10/10, Shanghai(Fuxuan Hotel) and Suzhou(Howard Johnson All Suites Suzhou)(China)

朝倉哲郎, 家蚕絹の固体 NMR による精密構造解析、平成 25 年度繊維学会年次大会、2013 年 6 月 12 日、タワーホール船堀(東京都)

矢澤宏次、大畑卓也、朝倉哲郎、西山祐介、西村勝之、梶弘典、超高磁場・超高速 MAS 高分解能 1H 固体 NMR による家蚕絹の構造解析、第 62 回高分子学会年次大会、2013 年 5 月 31 日、京都国際会館（京都府）

大畑卓也、矢澤宏次、青木昭宏、西山裕介、西村勝之、朝倉哲郎、高分解能 1H 固体 NMR を用いた絹結晶部モデルペプチドの分子間構造解析 高分解能 1H 固体 NMR を用いた絹結晶部モデルペプチドの分子間構造解析、第 61 回高分子討論大会、2012 年 9 月 19 日、名古屋工業大学（愛知県）

矢澤宏次、大畑卓也、朝倉哲郎、西山裕介、樋岡克哉、超高速回転固体 NMR マイクロプロープと Double Quantum MAS を組み合わせたアラニンオリゴペプチドの分子間構造解析、第 61 回高分子学会年次大会、2012 年 5 月 31 日、パシフィコ横浜（神奈川県）

〔図書〕（計 5 件）

Biotechnology of Silk, Biologically -Inspired Systems Volume 5, 272, 2014, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, Ed. Asakura, T. & Miller, T.; Asakura Tetsuo, Suzuki Yu, Nakazawa Yasumoto, The Silk and Lamella Structures of (Ala-Gly)₁₅ as the Model of Bombyx mori Silk Fibroin Studied with Solid State NMR, (49-68), Derya Aytemiz, Asakura Tetsuo, Application of *Bombyx mori* Silk Fibroin as a Biomaterial for Vascular Grafts, (69-85)

NMR Spectroscopy of Polymers: Innovative Strategies for Complex Macromolecules Volume 1077, 541, 2011, American Chemical Society, Ed. Cheng, H.N. Asakura, T. English, A.; Nagano Aya, Suzuki Yu, Nakazawa Yasumoto, J.T.Gerig, Asakura Tetsuo, NMR Characterization and Product Design of Novel Silk-Based Biomaterials, (281-297), Nakazawa Yasumoto, Suzuki Yu, Saito Hajime, Asakura Tetsuo, The interaction of A (1-40) peptide with lipid bilayers and ganglioside as studied by multinuclear solid-state NMR, (299-316)

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：絹の物性制御方法

発明者：朝倉哲郎

権利者：国立大学法人東京農工大学

種類：特許

番号：特願 2014-204774

出願年月日：平成 26 年 10 月 3 日

国内外の別：国内

〔その他〕

・報道関連情報

BS 朝日、菅原明子の地球大好き未来便、「工学と医療が融合 絹の人工血管」で、司会

者・菅原明子と対談、2014 年 2 月 23 日

毎日放送、ちちんぷいぷい（関西方面での放映）、「シルクの構造についてを中心に、絹人工血管についても解説」、2013 年 12 月 13 日

福井新聞、「絹糸を編み人工血管～繊維技術、再生医療に」、2013 年 8 月 22 日

福井新聞 ON LINE、「繊維産業、再起へ再生医療に光明～福井の業者が織物技術で人工血管」、2013 年 12 月 13 日

朝日新聞 北陸版、「絹で人工血管作り～夢の【再生医療】に挑戦」、2013 年 6 月 27 日

中日新聞・東京新聞、「極細 1 ミリ絹で人工血管」、2012 年 11 月 10 日

テレビ朝日、モーニングバード!、「日本の再生医療最前線」絹製人工血管開発の研究を紹介、2012 年 10 月 22 日

日本経済新聞 北陸版(電子版)、「絹 100% の人工血管、量産技術を開発。福井経編興業」、2012 年 1 月 21 日

バイオジャパン 2011、「シルク素材の最前線」、2011 年 10 月 5 日

TBS テレビ、夢の扉+、「カイコから人工血管作製～東京農工大 朝倉哲郎教授」編、2011 年 8 月 21 日

Highlighting JAPAN Vol.5, No2, 「The New Silk Road」、2011 年 6 月 1 日

・展示

東京農工大学科学博物館企画展、「衣料から医療へ-シルクが拓く再生医療-」、2014 年 2 月 11 日～4 月 26 日

文部科学省ミュージアム「情報ひろば」企画展示、「命をつなぐ農工テクノロジー」展、2013 年 8 月 1 日～11 月 20 日、文部科学省 情報ひろば 科学技術・学術展示室

・ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~asakura/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

朝倉 哲郎 (ASAKURA, Tetsuo)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：3 0 1 3 9 2 0 8

(2) 研究分担者

清水 禎 (SHIMIZU, Tadashi)

独立行政法人物質・中核機能部門 強磁場ステーション・ステーション長

研究者番号：0 0 3 5 4 3 6 6

（H24 年度より連携研究者）

(3) 連携研究者

中澤 靖元 (NAKAZAWA, Yasumoto)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：2 0 4 5 6 2 5 5

鈴木 悠 (SUZUKI, Yu)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：9 0 6 0 0 2 6 3