

日本学士院賞 受賞者 相田卓三



専攻学科学目 高分子化学・超分子化学

略歴	生年	月	略歴
	昭和三十一年	五月	横浜国立大学工学部応用化学科卒業
	昭和五四年	三月	東京大学大学院工学系研究科博士課程修了
	同	五九年	工学博士
	同	五九年	東京大学工学部助手
	同	五九年	東京大学工学部助手
	同	六三年	東京大学工学部講師
	平成	二年	東京大学工学部助教授
	同	七年	東京大学大学院工学系研究科助教授
	同	八年一〇月	東京大学大学院工学系研究科教授（現在に至る）
	同	一二年一〇月	科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（ERATO）研究総括
	同	一七年一〇月	科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業発展研究（ERATO-SORST）研究総括
	同	一九年一〇月	理化学研究所フロンティア研究システム物質情報変換化学研究グループ
	同	二五年	理化学研究所創発物性科学研究センター副センター長（現在に至る）

## 工学博士相田卓三氏の「革新的ソフトマテリアルの精密階層設計に関する研究」に対する授賞審査要旨

相田卓三氏は革新的ソフトマテリアルの開拓において世界を牽引している化学者である。物理や生命科学など異分野との境界領域に大きく踏み込み、他に類のない独創的な物質科学を深く広く展開している。世界の研究者の視線が「希薄平衡系」から「凝縮非平衡系の複雑科学」に移行しつつある今現在、相田氏は一九九九年にシリカの細孔を反応場としたエチレンの押し出し重合（細孔内で生成したポリエチレン鎖が伸びきったまま集合し強靱な結晶性繊維として蜘蛛の糸のように細孔外に押し出される…論文32）を発見した。「分子↓ナノ↓巨視スケールに至る精緻な異方的階層構造」は材料に破格の可能性を提供するが、ナノ↓巨視スケール間に存在する非平衡状態特有の速度論的トラップが一義的な階層構造の生成を阻む。相田氏は押し出し重合の発見を通じて、多価相互作用／物理的摂動がこの Missing Link を繋ぐために有効であることをいち早く認識し、世界を驚嘆させる多くの新物質／新材料を生み出すことで未成

熟だった当該分野を世界に先駆けて牽引してきた。

全重量の九八%が水であるが自立し、任意の形状に成形加工が可能なハイドロゲル「アクアマテリアル」は代表的な成功例であり（論文6）、分子糊と命名した極微量の高分子物質を水中に分散させた粘土ナノシート（無機物・全重量のおよそ二%）と混合するだけで迅速・簡単に合成できる。相田氏は二〇一〇年にこの新材料で *Nature* 誌に発表し世界を驚かせた（論文23）。この材料の内部では分子糊が強力な多価相互作用を形成して粘土ナノシートを三次元に架橋し、その編み目に水分子を捕捉する。化学反応で作る通常のハイドロゲルとは異なり、アクアマテリアルは化学の素人が現場の水を使いその場で簡単に作ることができ、そのような素材は弱く使い物にならないというそれまでの考えを払拭した。ナノシート含量を増やすと車で押しつぶしても壊れない強靱な材料になる。このような魅力的な素材が化石資源にほぼ依存することなく「地表の七〇%を覆う水」から製造できるといふ。持続社会を実現する革新技術としてアクアマテリアルの用途開発が企業と進められている中、相田氏は最近左記に記載の第二世代のアクアマテリアルを発表した（論文13）。

精緻な階層構造の実現に物理的摂動を用いる独自研究の一貫として磁場と物質の相互作用を検討中、相田氏はコロイド分散した酸化

チタンナノシートに磁場を印加するとシートが磁束線に垂直（シート同士は平行）に配向する異常現象を発見した。平行配向したシート同士は大きな表面負電荷のため強く反発し、系は自発的に疑似結晶構造を形成する（論文5）。相田氏はエントロピー的に不利なこの配向をゲル化で空間固定し、異方的な反発力を内包した世界初のソフトマテリアルを開発した（論文6、13、16）。この素材はシートに垂直方向の荷重には強い（シート間隔が縮まると静電反発が強まるため）が平行な剪断力には大きく変形する（静電反発がその方向の内部摩擦を下げていく）という膝軟骨組織特有の異方的力学特性を初めて人工系で実現した。インプラント化ができれば、関節疾患の患者に光明がさす。静電反発を材料の力学物性の設計に使う奇想天外な戦略はいかにも相田氏の発想である。

分岐密度が中央から表面に向かって増大する樹木状巨大球形高分子デンドリマーの特異な光捕集アンテナ機能の発見と人工光合成（論文33）は、相田氏を世界の舞台上に押し上げた学術研究であるが、上述の材料科学研究の例においても同氏は深い基礎に根ざしつつ、時代時代の本質的な問題に目を向け、応用への大きな広がりも重要視している。世界初の導電性・酸化還元活性分子ナノチューブ（論文14、19、26、29）は分子の自己組織化の大きな可能性を世界に示した。立体構造と長さの同時制御を可能にした世界初の連鎖成長型

精密超分子重合（論文2、11）は、高分子科学一〇〇年の歴史を塗り替える大きな成果である。一方、相田氏はイオン液体を用いて炭素ナノチューブの高濃度分散技術として世界で広く利用されているバッキーゲル（論文30）を二〇〇三年に開拓し、その後、携帯点字デバイスの開発に直結した乾電池駆動アクチュエータの開拓に展開した。また共同研究を通じて、ソフトロボティクスや次世代ヘルスケアに欠かせない伸縮性導体の開拓（論文24、25）にも展開し、最近ではイオン液体オリゴマーを用い、グラファイトの電磁波剥離による高純度単層グラフェンの高効率製造（論文7）に成功している。最近の大きな話題として、ガラス状態にあり強靱にもかかわらず破断面を圧着させておくと修復する世界初のポリマーガラスを開拓（論文1）し、高分子材料は柔らかくなければ自己修復しないというそれまでの先入観を払拭した。

相田氏の革新的な研究成果は幾度となくトップジャーナルを飾り、日本の物質科学の底力を世界に示し、そして世界のファンを魅了している。相田氏の一貫した挑戦的姿勢は世界から高く評価され、研究分野を超えて広く大きな波及効果を生み出している。

### 主な論文目録

(1) Y. Yanagisawa, Y. Nan, K. Okuro and T. Aida, "Mechanically Robust, Readily

- Repairable Polymers via Tailored Noncovalent Cross-linking", *Science* **2018**, *359*, 72–76.
- (2) K. V. Rao, D. Miyajima, A. Nihonyanagi and T. Aida, "Thermally Bisignate Supramolecular Polymerization", *Nature Chem.* **2017**, *9*, 1133–1139.
  - (3) M. Ueda, K. Jorner, Y. M. Sung, T. Mori, Q. Xiao, D. Kim, H. Ohtson, T. Aida and Y. Itoh, "Energetics of Baird Aromaticity Supported by Inversion of Photoexcited Chiral [4+1]annulene Derivatives", *Nature Commun.* **2017**, *8*, Article No. 346.
  - (4) H. Arazoe, D. Miyajima, K. Akaike, F. Araoka, E. Sato, T. Hikima, M. Kawamoto and T. Aida, "An Autonomous Actuator Driven by Fluctuations in Ambient Humidity", *Nature Mat.* **2016**, *15*, 1084–1089.
  - (5) K. Sano, Y. S. Kim, Y. Ishida, Y. Ebina, T. Sasaki, T. Hikima and T. Aida, "Photonic Water Dynamically Responsive to External Stimuli", *Nature Commun.* **2016**, *7*, Article No. 12559.
  - (6) Y. S. Kim, M. Liu, Y. Ishida, Y. Ebina, M. Osada, T. Sasaki, T. Hikima, M. Takata and T. Aida, "Thermoresponsive Actuation Enabled by Permittivity Switching in an Electrostatically Anisotropic Hydrogel", *Nature Mat.* **2015**, *14*, 1002–1007.
  - (7) M. Matsumoto, Y. Saito, C. Park, T. Fukushima and T. Aida, "Ultra-high-Throughput Exfoliation of Graphite into Pristine Single-Layer Graphene using Microwaves and Molecularly Engineered Ionic Liquids", *Nature Chem.* **2015**, *7*, 730–736.
  - (8) C. Li, J. Cho, K. Yamada, D. Hashizume, F. Araoka, H. Takezoe, T. Aida and Y. Ishida, "Macroscopic Ordering of Helical Pores for Arraying Guest Molecules Noncentrosymmetrically", *Nature Commun.* **2015**, *6*, Article No. 8418.
  - (9) S. Chen, Y. Itoh, T. Masuda, S. Shimizu, J. Zhao, J. Ma, S. Nakamura, K. Okuro, H. Noguchi, K. Uosaki and T. Aida, "Subnanoscale Hydrophobic Modulation of Salt Bridges in Aqueous Media", *Science* **2015**, *348*, 555–559.
  - (10) M. Huang, C.-H. Hsu, J. Wang, S. Mei, X. Dong, Y. Li, M. Li, H. Liu, W. Zhang, T. Aida, W.-B. Zhang, K. Yue and S. Z. D. Cheng, "Selective Assemblies of Giant Tetrahedra via Precisely Controlled Positional Interactions", *Science* **2015**, *348*, 424–428.
  - (11) J. Kang, D. Miyajima, T. Mori, Y. Inoue, Y. Itoh and T. Aida, "A Rational Strategy for the Realization of Chain-Growth Supramolecular Polymerization", *Science* **2015**, *347*, 646–651.
  - (12) A. S. Tayi, A. Kaeser, M. Matsumoto, T. Aida and S. I. Stupp, "Supramolecular Ferroelectrics", *Nature Chem.* **2015**, *7*, 281–294.
  - (13) M. Liu, Y. Ishida, Y. Ebina, T. Sasaki, T. Hikima, M. Takata and T. Aida, "An Anisotropic Hydrogel with Electrostatic Repulsion between Cofacially Aligned Nanosheets", *Nature* **2015**, *517*, 68–72.
  - (14) T. Fukino, H. Joo, Y. Hisada, M. Ohana, H. Yamagishi, T. Hikima, M. Takata, N. Fujita and T. Aida, "Manipulation of Discrete Nanostructures by Selective Modulation of Noncovalent Forces", *Science* **2014**, *344*, 499–504.
  - (15) S. Biswas, K. Kimbara, T. Niwa, H. Taguchi, N. Ishii, S. Watanabe, K. Miyata, K. Kataoka and T. Aida, "Biomolecular Robotics for Chemomechanically Driven Guest Delivery Fuelled by Intracellular ATP", *Nature Chem.* **2013**, *5*, 613–620.
  - (16) M. Liu, Y. Ishida, Y. Ebina, T. Sasaki and T. Aida, "Photolatently Modulable Hydrogels using Unilamellar Titania Nanosheets as Photocatalytic Cross-linker", *Nature Commun.* **2013**, *4*, Article No. 2029.
  - (17) D. Miyajima, F. Araoka, H. Takezoe, J. Kim, K. Kato, M. Takata and T. Aida, "Terroelectric Columnar Liquid Crystal Featuring Confined Polar Groups within Core-Shell Architecture", *Science* **2012**, *336*, 209–213.
  - (18) T. Aida, E. W. Meijer and S. I. Stupp, "Functional Supramolecular Polymers", *Science* **2012**, *335*, 813–817.
  - (19) W. Zhang, W. Jin, T. Fukushima, A. Saeki, S. Seki and T. Aida, "Supramolecular Linear Heterojunction Composed of Graphite-Like Semiconducting Nanotubu-

- lar Segments”, *Science* **2011**, *334*, 340–343.
- (20) E. Ohta, H. Sato, S. Ando, A. Kosaka, T. Fukushima, D. Hashizume, M. Yamasaki, K. Hasegawa, A. Muraoka, H. Ushiyama, K. Yamashita and T. Aida, “Redox-Responsive Molecular Helices with Highly Condensed  $\pi$ -Clouds”, *Nature Chem.* **2011**, *3*, 68–73.
- (21) N. Hosono, T. Kajitani, T. Fukushima, K. Ito, S. Sasaki, M. Takata and T. Aida, “Large-Area Three-Dimensional Molecular Ordering of a Polymer Brush by One-Step Processing”, *Science* **2010**, *330*, 808–811.
- (22) A. Tsuda, Y. Nagamine, R. Watanabe, Y. Nagatani, N. Ishii and T. Aida, “Spectroscopic Visualization of Sound-Induced Liquid Vibrations using a Supramolecular Nanofibre”, *Nature Chem.* **2010**, *2*, 977–983.
- (23) Q. Wang, J. L. Mynar, M. Yoshida, E. Lee, M. Lee, K. Okuro, K. Kimbara and T. Aida, “High-Water-Content Mouldable Hydrogels by Mixing Clay and a Dendritic Molecular Binder”, *Nature* **2010**, *463*, 339–343.
- (24) T. Sekitani, H. Nakajima, H. Maeda, T. Fukushima, T. Aida, K. Hata and T. Someya, “Stretchable Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode Display using Printable Elastic Conductors”, *Nature Mat.* **2009**, *8*, 494–499.
- (25) T. Sekitani, Y. Noguchi, K. Hata, T. Fukushima, T. Aida and T. Someya, “A Rubberlike Stretchable Active Matrix using Elastic Conductors”, *Science* **2008**, *321*, 1468–1472.
- (26) Y. Yamamoto, T. Fukushima, Y. Suna, N. Ishii, A. Saeki, S. Seki, S. Tagawa, M. Taniguchi, T. Kawai and T. Aida, “Photoconductive Coaxial Nanotubes of Molecularly Connected Electron Donor and Acceptor Layers”, *Science* **2006**, *314*, 1761–1764.
- (27) T. Muraoka, K. Kimbara and T. Aida, “Mechanical Twisting of a Guest by a Photoresponsive Host”, *Nature* **2006**, *440*, 512–515.
- (28) A. Kishimura, T. Yamashita, K. Yamaguchi and T. Aida, “Rewritable Phosphorescent Paper by the Control of Competing Kinetic and Thermodynamic Self-Assembling Events”, *Nature Mat.* **2005**, *4*, 546–549.
- (29) J. P. Hill, W. Jin, A. Kosaka, T. Fukushima, H. Ichihara, T. Shimomura, K. Ito, T. Hashizume, N. Ishii and T. Aida, “Self-Assembled Hexa-*peri*-hexabenzocoronene Graphitic Nanotube”, *Science* **2004**, *304*, 1481–1483.
- (30) T. Fukushima, A. Kosaka, Y. Ishimura, T. Yamamoto, T. Takigawa, N. Ishii and T. Aida, “Molecular Ordering of Organic Molten Salts Triggered by Single-Walled Carbon Nanotubes”, *Science* **2003**, *300*, 2072–2074.
- (31) D. Ishii, K. Kimbara, Y. Ishida, N. Ishii, M. Okochi, M. Yohda and T. Aida, “Chaperonin-Mediated Stabilization and ATP-Triggered Release of Semiconductor Nanoparticles”, *Nature* **2003**, *423*, 628–632.
- (32) K. Kageyama, J. Tamazawa and T. Aida, “Extrusion Polymerization: Catalyzed Synthesis of Crystalline Linear Polyethylene Nanofibers within a Mesoporous Silica”, *Science* **1999**, *285*, 2113–2115.
- (33) D.-L. Jiang and T. Aida, “Photoisomerization in Dendrimers by Harvesting of Low-Energy Photons”, *Nature* **1997**, *388*, 454–456.