

# 文部科学大臣表彰 若手科学者賞を受賞して

中性子科学研究施設 眞弓 皓一

この度、文部科学大臣表彰 若手科学者賞を 2022 年 4 月に受賞致しました。授与式は 2022 年 4 月 20 日にオンラインで行われました。本受賞は文献[1]-[6]をはじめとした研究成果が評価されたものです。一連の研究は、東京大学 伊藤 耕三先生、劉 暢博士、保田 侑亮博士(現産総研)、CROSS 柴山 充弘先生、KEK 遠藤 仁先生、NIST 長尾 道弘先生、CROSS 山田 武先生、東京大学 岡崎 進先生、名古屋大学 藤本 和士先生、ESPCI ParisTech Costantino Creton 先生、成田 哲治先生、Cornell 大学 Chung-Yuen Hui 先生、Colorado 大学 Rong Long 先生らとの共同研究です。この場をお借りしまして深く感謝申し上げます。

受賞対象の研究は「動的結合を有する高分子材料の強靱化メカニズムの解明」です。高分子ゲルは、高い生体適合性を有していることから、人体に埋め込む生体材料への応用が期待されながらも、脆弱な力学強度が問題となっていました。その問題を解決するために、2000 年頃から様々な高強度ゲルが開発され、特に可逆結合や環状分子による架橋などの動的架橋が強靱化に有効であることが明らかになりつつあります。私はこれまで動的架橋高分子材料の力学・破壊物性の分子メカニズムの解明を行ってきました。

(1) 可逆架橋を含む自己修復性高分子ゲルの力学・破壊物性 [1,2]

2012 年 4 月から 2014 年 3 月の間、フランス ESPCI ParisTech にて博士研究員として、可逆架橋を有する自己修復性高分子ゲルの力学・破壊物性に関する研究に従事し、可逆架橋点の解離・再形成ダイナミクスとマクロな力学・破壊挙動との相関を明らかにしました。可逆架橋を有する自己修復性高強度ゲルのモデル系として、ポリビニルアルコール(PVA)を共有結合と可逆結合で同時に架橋した高分子ゲルを用い、様々な変形速度における力学・破壊挙動を系統的に調べました [1]。自己修復性高分子ゲルの示す複雑な粘弾性挙動を、可逆架橋点の解離時間と再結合時間を取り入れた力学モデルによって記述することに成功しました [2]。また、自己修復性高分子ゲルの亀裂進展試験を行い、変形速度に応じて、亀裂の進展速度が転移的に変化す

る現象を発見し、この転移が可逆架橋点の解離・再結合ダイナミクスと相関していることを明らかにしました。これら一連の研究は、可逆架橋を有する高分子材料の力学・破壊メカニズムを理解するための基盤となるものであり、様々な自己修復性高分子材料に適用されています。

(2) 環動架橋高分子材料の力学・破壊物性の分子論的メカニズム [3-5]

高分子鎖を環状分子によって連結した環動ゲルは、優れた伸張性を示します。私達は、環動ゲルの応力歪み関係を実験・粗視化分子動力学(MD)シミュレーションによって調べ、環動架橋点のスライドと巨視的な応力の関係を示す理論モデルの構築に成功しました [3]。また、環動ゲルの破壊靱性を亀裂進展試験によって調べ、亀裂先端における環動架橋点のスライド距離・速度が、環動ゲルの動的破壊挙動を支配されていることを見出し、物理モデルを構築しました [4, 5]。

(3) 強靱性と即時復元性を兼ね備えた自己補強ゲルの開発 [6]

構造を最適化した環動ゲルを延伸すると、高分子鎖が結晶化し、さらに力を取り除くと結晶が融解する現象を発見しました [6]。高分子ゲルにおける可逆な伸長誘起結晶化は、本研究で初めて発見された現象です。本ゲルは伸長誘起結晶化による自己補強効果によって最高水準の強靱性を示すと同時に、伸長誘起結晶化の可逆性から繰り返し変形下において高い復元性を示します。自己補強ゲルは、繰り返し大きな負荷がかかっても一定の力学応答を示すという特性から、人工靱帯・関節などの人工運動器への応用が期待されています。

これらの成果は、動的架橋高分子材料の分子設計指針を示すもので、生体・医療材料、ソフトアクチュエーターなどへの応用展開における基盤となります。今後も高分子・ソフトマター材料の物性メカニズム解明を目指した研究に邁進し、社会に資する新規材料開発に貢献できればと思います。

## 参考文献

- [1] K. Mayumi, A. Marcellan, G. Ducouret, C. Creton, T. Narita, “Stress–Strain Relationship of Highly Stretchable Dual Cross-Link Gels: Separability of Strain and Time Effect”, *ACS Macro Letters*, 2, 1065–1068 (2013).
- [2] R.. Long, K. Mayumi, C. Creton, T. Narita, C. Y. Hu\*, “Time Dependent Behavior of a Dual Cross-Link Self-Healing Gel: Theory and Experiments” *Macromolecules*, 47, 7243-7250 (2014).
- [3] Y. Yasuda, T. Masumoto, K. Mayumi\*, M. Toda, H. Yokoyama, H. Morita\*, K. Ito\*, “Molecular Dynamics Simulation and Theoretical Model of Elasticity in Slide-Ring Gels”, *ACS Macro Letters*, 9, 1280-1285 (2020).
- [4] C. Liu, H. Kadono, K. Mayumi, K. Kato, H. Yokoyama, K. Ito, “Unusual fracture behavior of slide-ring gels with movable cross-links”, *ACS Macro Letters*, 6, 1409 (2017).
- [5] Yasuda, Y., Hidaka, Y., Mayumi, K.\*, Yamada, T., Fujimoto, K., Okazaki, S. Yokoyama, H., Ito, K.\*, “Molecular Dynamics of Polyrotaxane in Solution Investigated by Quasi-Elastic Neutron Scattering and Molecular Dynamics Simulation: Sliding Motion of Rings on Polymer”, *Journal of the American Chemical Society*, 141, 9655–9663 (2019).
- [6] C. Liu, N. Morimoto, L. Jiang, S. Kawahara, T. Noritomi, H. Yokoyama, K. Mayumi, K. Ito, *Science* 372, 1078 (2021).

