

これからの液晶の話

ソニーコンピュータサイエンス研究所 諏訪俊一*

大阪大学大学院基礎工学研究科 内田幸明

前回「ここだけの液晶の話」をお伝えしたトランスバウンダリーの諏訪が、今回は、共同研究者の大阪大学の内田と共著で「これからの液晶の話」をお伝えします。

液晶というとディスプレイのイメージが強いですが、そもそもは物質の状態の一つを指します。液体のように流れることができ、結晶のように構造の秩序を持つ状態のことを液晶相と呼びます。また、液晶相を示す物質のことも単に液晶と呼びます。実は、液晶は、工業製品だけでなく、皆さんのもっと身近なところに存在しています。その最たるものは細胞膜です[1]。細胞膜が液晶でできていることで、生体内の物質や情報のやり取りが迅速かつ省エネで行われているのです。

細胞に限らず、自然界に目を向けてみると我々の身体を含めて生物が生きるために作り出す材料は、極めて環境に低負荷な製法で作られています。ロブスターの殻は繊維状のキチンをベースとする組織で構成されています[2]。この生物学的ナノ複合材料の最も特徴的な点は、様々なスケールの構造で構成された厳密な階層組織となっていることです。分子レベルではキチンと呼ばれる物質が18~25個、細長い結晶単位の形で配列したものがタンパク質によって包まれ、直径約2~5 nm、長さ約300 nmのナノフィブリルを形成します。さらに、ナノフィブリルの一部がクラスター化し、直径約50~300 nmの長いキチン-タンパク質繊維が形成されます。キチン-タンパク質繊維は、平面的に編まれ、周期的に分岐したネットワークを形成します。繊維と繊維の間は、ミクロからナノサイズのタンパク質とバイオミネラルで埋め尽くされています。このような複雑な構造を持つ生体材料は極めて強固で軽く耐久性が高い上に、土に帰るため、環境への負荷の低い優れた素材と言えます。ロブスターは進化の過程でとても長い時間をかけてこのような素材を生み出してきました。

人間が用いる素材にも耐久性が求められます。環境による変化の少ない素材と言い換えることもできます。もちろん、前回紹介したディスプレイに使われている液晶も環境変化への耐性を持つものが追求されてきました。生物が生み出してきた素材と同等もしくはそれ以上の性能を持つ素材を作るには、極端に熱をかけたり圧力をかけたりするなど、膨大なエネルギーを必要とする製法がしばしば使われます。私たちの生活は人類が生み出した高機能で耐久性の高い素材のおかげで、とても豊かになりました。一方で、素材の性能を追求するあまり、生み出した素材が環境に対して多くの負荷をかけ、人類自身に悪影響を及ぼすケー

スも出てきました。

環境と人類の負荷の低い素材が必要であることは広く認識されています。著者達は、そのような素材になり得る可能性を持つものとして、「液晶」を捉えています。生物を含め自然のあらゆるところに「液晶」が登場することがヒントになっています。細胞膜以外でも、タンパク質や DNA は、条件によって液晶相になります[3,4]。タバコモザイクウイルスやバクテリオファージなどのウイルスも液晶相になります[5]。コガネムシの背中の色も液晶相の構造に由来するものです[6]。生体は思いのほか液晶で構成されているのです。さらに、身の回りのもの、という観点で視野を広げると、粘土を水に分散させても、石鹸を水に溶かしても、液晶相は発現します[7]。最初に人間が液晶として認識したものは、植物学者のライニッツァーがにんじんジュースから取ったコレステロールから作ったものでした。

ロブスターの殻のように、生体の持つ特徴がどう役に立つか、という説明は疑いようもないですが、生物の進化は、生物そのものが考えて進めているわけではないので、なぜそのように進化したのか、には様々な解釈があり得ます。生き物が液晶を使うように進化した理由についても解釈したくなります。ウイルスは自分では動きませんが、高濃度になると並ぶのはうまく次の宿主に取り付くのに便利だったからではないか。DNA は、細胞というかなり限られた空間で、複製や、ヒストンに巻き付くなどの精密さが要求される操作に、排除体積を減らしたり、絡まないようにしたりする液晶性を、有効利用しているのではないか。考え出すと楽しく、妄想が尽きません。実は、最近、様々な疾患が細胞膜の液晶性と関連しているのではないかという説も提案されてきていますし、今後、進化で液晶が使われるようになった理由も明らかにされるかもしれません[1]。

これほどまでに自然界が利用している液晶ですが、人類はこの素材の機能の一部しか応用できていません。人工的に作られた高分子や界面活性剤とウイルスや生体分子などが、液晶という同じ状態を作り得ることは、生物が持つ性質を人工的に引き出すことが出来ることを暗示していると思います。これから、その試みの一つを紹介したいと思います。

細胞膜で合成される膜貫通タンパク質は、疎水性の部分を膜内に固定するために、膜内で合成されます[8]。液晶相の一種である超膨潤ラメラ相は細胞膜と同様に二分子膜で構成されています。著者の一人（内田）は、これを鋳型に用いることで、ナノサイズの厚みを持つシート状の粒子（ナノシート）を合成できることを見つけました。そして、この方法で環境にやさしい化学反応を起こす触媒となるナノシートの合成にも成功しました。

現在のプラスチックリサイクルの方法は、マテリアルリサイクルとサーマルリサイクルが主流です。マテリアルリサイクルは材料をそのまま溶かして成形し直すのに対して、サーマ

ルリサイクルでは燃焼により得られる熱を利用します。これらは両極端で、前者は物質が劣化しても取り除けないのに対して、後者は CO₂ を排出してしまうため効率が悪いのが問題です。そこで注目されるのが、ケミカルリサイクルです [9]。

プラスチックを原料に戻したり、他のプラスチックの原料に転換したりする化学反応を利用したリサイクル法です。原油と同様に精製の過程は必要になりますが、化石資源を使用せず、CO₂ の排出も抑えられます。置き場に困るプラスチックゴミが、一転、資源となるのが画期的です。都市鉱山の一種と考えてもいいでしょう。しかし、汎用プラスチックの中でも上位 1,2 位の生産量を誇るポリエチレンとポリプロピレン(2021 年は 244.6 万トンと 246.3 万トン) は、どちらもケミカルリサイクルが非常に難しいのが現状です。

ケミカルリサイクルに用いられる触媒として、ゼオライトがよく知られています。前述のナノシート合成法を用いると、ゼオライトナノシートを合成することができました[10]。これを触媒として用いると、ポリエチレンの熱分解の主成分として、ポリプロピレンの原料であるプロピレンが得られることを発見しました。この原因はゼオライトの粒子の形にあり、その形を決めているのは液晶です。これは液晶の使い方としては今までに無いもので、学会で受賞するなど、今、注目を集めています。

私達は、液晶を使えば様々なプロセスの環境負荷を低減できると考えています。バイオミメティクスの分野では、液晶をはじめとする自己組織化を伴う生物学的構造材料が、本質的な不均質性を持つことに注目しています。ほとんどの人工構造材料とは根本的に異なっているのです。木材、脊椎動物の骨や歯、軟体動物の殻、その他の無脊椎動物の骨格要素など、動植物全体のほとんどの構造生物学的材料に見られる階層的組織を生み出します。これらの複雑さは性能を生み出しますが、それ以上に私たち生物が材料を生み出す時の低環境負荷プロセスに着目しています。液晶をはじめとする自己組織化を利用した材料の創成は、分子自らが構造体を形成するため、多くのエネルギーを必要とはしません。現在この社会が抱えるエネルギーをはじめとする諸問題に対して、私たち人類を含む生物が自然に行っていることに目を向けて好循環な社会を目指していきたいと思います。

参考文献

- [1] Binot, C. & Chouard, C.-H. Neurodegenerative diseases, infectious pathologies and liquid crystals: Hypothesis of a common information vector involving a multidisciplinary approach. *Rev. Neurol.* **174**, 540-544 (2018).
- [2] Raabe, D., Sachs, C. & Romano, P. The crustacean exoskeleton as an example of a

structurally and mechanically graded biological nanocomposite material. *Acta Materialia* **53**, 4281-4292 (2005)

[3] Krysmann, M. J., Castelletto, V., McKendrick, J. E., Clifton, L. A., Hamley, I. W., Harris, P. J. F. & King, S. M. Self-Assembly of Peptide Nanotubes in an Organic Solvent. *Langmuir* **24**, 8158-8162 (2008).

[4] Strzelecka, T. E., Davidson, M. W. & Rill R. L. Multiple liquid crystal phases of DNA at high concentrations. *Nature* **331**, 457-460 (1988).

[5] Tomar, S., Green, M. M. & Day, L. A. DNA-Protein Interactions as the Source of Large-Length-Scale Chirality Evident in the Liquid Crystal Behavior of Filamentous Bacteriophages. *J. Am. Chem. Soc.* **129**, 3367-3375 (2007).

[6] Seago, A. E., Brady, P., Vigneron, J.-P. & Schultz, T. D. Gold bugs and beyond: a review of iridescence and structural colour mechanisms in beetles, *J. R. Soc. Interface* **6**, S165-S184 (2009).

[7] Miyamoto, N. & Nakato, T. Liquid Crystalline Nature of $K_4Nb_6O_{17}$ Nanosheet Sols and Their Macroscopic Alignment. *Adv. Mater.* **14**, 1267-1270 (2002).

[8] Manzer, Z. A., Selivanovitch, E., Ostwalt, A. R. & Daniel, S. Membrane protein synthesis: no cells required. *Trends Biochem. Sci.* **48**, 642 (2023).

[9] Garcia, J. M. & Robertson, M. L. The future of plastics recycling. *Science* **358**, 870 (2017).

[10] Sasaki, K., Gaitan, J. A. H., Okue, T., Matoba, S., Tokuda, Y., Miyake, K., Uchida, Y. & Nishiyama, N. "Amorphous Aluminosilicate Nanosheets as Universal Precursors for the Synthesis of Diverse Zeolite Nanosheets for Polymer-Cracking Reactions," *Angew. Chem. Int. Ed.* **61**, e202213773 (2022).