カーボンナノチューブゲル

福島孝典

1. はじめに

カーボンナノチューブを高分子に複合化させると、高分子の機械的強度が向上し、導電性を付与できると予想されている。しかし、この期待は「分散性の乏しさ」によって裏切られることが多い。単層カーボンナノチューブは、細いチューブ状のファイバーが複雑にからみ合い、巨大な束になって固まった不溶不融の黒色粉体である。ナノチューブの可溶化に関する研究も数多くなされているが¹⁾、ナノチューブ表面への化学的修飾は、「芳香族性」という魅力的な性質を奪うことになる。また、界面活性剤を用いてナノチューブが高度に分散した希薄溶液を得ることもできるが²⁾、それらを材料設計に結びつけることは容易ではない。筆者らは、偶然にも単層カーボンナノチューブがイオン性液体をゲル化することを見だし³⁾、「カーボンナノチューブからなるソフトマテリアル」の新しい可能性を提案した。

2. バックキーゲル

イオン性液体は、イオンのみからなるにもかかわらず、室温で液体としてふるまい、不燃性、不揮発性、耐熱性、高イオン伝導性などの特徴を有する特異な物質である。筆者らは、ナノチューブの粉体をイミダゾリウムイオン系のイオン性液体とともに、乳鉢中でこすると、この液体がゲル化(バックキーゲル)することを見出した³⁾。ゲル化はわずか0.5%のナノチューブによって引き起こされる。イオン性液体は揮発しないので、バックキーゲルは空气中に長時間放置しても干からびない。電子顕微鏡で観察すると、複雑にからみ合っていたナノチューブの束が細くなり、からみ合いも大幅に解消していることがわかった。熱分析、X線回折、動的粘弾性などの測定から、ナノチューブ表面にイミダゾリウムイオンが吸着し、これが引き金となって近傍のイミダゾリウムイオンも構造化し、その結果としてナノチューブどうしが物理的に架橋し、ゲルとしてふるまうという図式が示唆された(図1)。すなわち、イオン性液体はナノチューブを「分散」させ、かつ、分散したナノチューブの「接着剤」としても機能する。重合部位を有するイオン性液体を用いると、バックキーゲルからポリマー複合体(バックキープラスチック)を作製できる。ナノチューブがポリマーマトリックス中に高度に分散しているため、数%の

図1 バックキーゲルとその生成機構

ナノチューブにより、ポリマーの引張強度が20倍、動的硬度が40倍にも増大し、室温で 1 S cm^{-1} という高い導電性を示すようになる。

3. バックキーゲルアクチュエーター

バックキーゲルは優れた電子電導体(ナノチューブ)と不揮発性電解質(イオン性液体)からなる複合体である。筆者らは、バックキーゲルを用い、空气中で長時間作動する初めてのソフトアクチュエーターを開発した⁴⁾。プロトタイプのアクチュエーターは、ある種のフッ素系ポリマーを支持体として、バックキーゲル層でゲル状のイオン性液体層をラミネートした単純な3層構造からなり、2種類のゲルを交互に塗布するだけで作製できる。バックキーゲル層自体が電極になるので、金属層を外付けする必要はない。さらに、内部にイオン性液体を保有するため、従来版とは異なり、電解質溶液中に浸す必要もない。三層塗布膜から切り出した短冊状のシートに電圧を印加すると陽極側に屈曲する。このアクチュエーターは30 Hzの交流電圧にも俊敏に応答し、8000回駆動させても性能低下はきわめて小さい。支持体となるポリマーやイオン性液体の種類を吟味することにより、性能のさらなる向上が期待される。

文 献

- 1) D. Tasis, N. Tagmatarchis, V. Georgakilas, M. Prato: *Chem. Eur. J.*, **9**, 4000 (2003)
- 2) M. J. O'Connell, *et al.*: *Science*, **297**, 593 (2002)
- 3) T. Fukushima, T. Aida, *et al.*: *Science*, **300**, 2072 (2003)
- 4) T. Fukushima, K. Asaka, A. Kosaka, T. Aida: *Angew. Chem. Int. Ed.*, **44**, 2410 (2005)

FUKUSHIMA, Takanori (独)科学技術振興機構 ERATO 相田ナノ空間プロジェクト・グループリーダー, 博士(理学). 専門は有機化学, 超分子化学, 高分子化学.
Carbon Nanotube Gel