ジョージア工科大学

ポリマー・テキスタイル・繊維工学科

内 田 哲 也*

1. ジョージア工科大学

ジョージア工科大学は1885年に創立された大学で、アメリカ東南部にあるジョージア州アトランタ市の中心部に位置する。アトランタは1996年にオリンピックが行われたことで世界的に有名であり、それに合わせて街並みも以前と比べて格段にきれいになったそうである。オリンピック時にはジョージア工科大学でも水泳、バスケットボールの競技が行われ、その記念プレートなどが大学内に多く飾ってある。またアトランタと言えば「風と共に去りぬ」の作者であるマーガレット・ミッチェルや、黒人解放の父と呼ばれたマーティン・ルーサー・キング Jr. 牧師などを輩出した街としても有名である。

ジョージア工科大学は6学部 (College) から成り、学部、大学院とを合わせて約15,000名の学生が在籍している。そのうち工学部は9学科 (School) を有し、筆者は2002年10月から2003年9月までの間、工学部ポリマー・テキスタイル・繊維工学科に所属した。ジョージア工科大学は工学系大学院の総合評価で常に上位にランキングされており、教育、研究の両面で充実した大学である。以下に各学部の構成を示す。

College of Engineering

- ・ Aerospace Engineering
- ・ Chemical and Biomolecular Engineering
- ・ Civil & Environmental Engineering
- ・ Electrical & Computer Engineering
- ・ GT/Emory Department of Biomedical Engineering
- ・ Industrial & Systems Engineering
- ・ Materials Science & Engineering
- ・ Mechanical Engineering
- ・ Polymer, Textile & Fiber Engineering

College of Sciences

- ・ Applied Physiology
- ・ Biology
- ・ Center for Education Integrating Science

図1 Georgia Tech のシンボル Tech Tower

- ・ Mathematics & Computing (CEISMC)
- ・ Chemistry & Biochemistry
- ・ Earth & Atmospheric Sciences
- ・ Mathematics
- ・ Physics
- ・ Psychology

College of Computing

- ・ Computing

College of Architecture

- ・ School of Architecture
- ・ Building Construction
- ・ City & Regional Planning
- ・ Industrial Design
- ・ Music/Arts & Technology

Ivan Allen College of Liberal Arts

- ・ Economics
- ・ History, Technology & Society
- ・ International Affairs
- ・ Literature, Communication & Culture
- ・ Modern Languages
- ・ Public Policy
- ・ Psychology

* Uchida, Tetsuya
岡山大学工学部 物質応用化学科
岡山市津島中 3-1-1 (〒700-8530)
2005.3.1. 受理

2. ポリマー・テキスタイル・繊維工学科

筆者が所属した工学部ポリマー・テキスタイル・繊維工学科は、物質科学科やジョージアテック研究所をはじめとする6つの学科、研究所と連携して高分子教育研究センターと称する教育研究機関を組織していた。この組織内では教育・研究における情報交換、研究設備の共同使用が円滑に行われており、滞在中の研究活動に大いに役立った。企業との連携も盛んに行われており、大学内で多くの企業からの研究者が実験を行っていた。大学内の雰囲気は日本より開放的で(しかしマナーは日本よりきちんとしている)、廊下に設置されたテーブルや建物横の広場にある長椅子で活発に意見交換する学生と教授の姿を何度も見かけた。またほとんどの教官が在室時にはドアを開放し、いつでも学生が質問や相談に入りやすい環境を心がけていることも感じられた。そのほかに注目すべき点としては、(2002年当時としては珍しく)図書館のデータベース検索や電子ジャーナルのシステムが完全に構築されていたことである。実験室に設置されたPCからでも、すばやく文献収集や特許検索が可能なシステムは、最先端の研究を世界中の研究者と競うために非常に有効であると感じられた。

3. 単層カーボンナノチューブ/高分子複合体の構造と力学的性質

筆者は工学部ポリマー・テキスタイル・繊維工学科の Satish Kumar 教授のグループに所属して研究を行った。そのグループは教授1名、博士研究員5名、大学院生10名で構成され、カーボンナノチューブ(CNT)を利用した高性能高分子複合体繊維の開発を目指した研究が行われていた。

単層カーボンナノチューブ(Single Wall Carbon Nanotube, SWNT)は、炭素原子が二次元網目に結合したシートが筒状につながった中空繊維状の物質である¹⁾(図2)。その直径は約1ナノメートル(100万分の1ミリ)であり、長さは数ミクロンから数十ミクロンにもおよぶ。最も強い炭素-炭素結合(sp²結合)が網目状につながった構造のため、その弾性率はダイヤモンドに近い値(1TPa~640GPa)であることが予想されている^{2)~5)}。また熱の伝導効率が金属より高く、さらに構造によっては導電体にも半導体にもなりうるということが知られており、多くの分野での応用が期待されている^{6)~10)}。アメリカにはこのCNTに関連する企業があり、その応用利用に関する共同研究が盛んに行われていた。高機能・高性能複合体作製の観点から見れば、細くて長く、弾性率の高いSWNTを高分子中に均一に分散できれば、その力学的性質が飛躍的に向上することが予測される。SWNTの特性を最大限に活かすには、高分子マトリックス中に個々のナノチューブを分散させることが必要である¹¹⁾。しかしながらSWNTは凝集性が強いいため、通常の溶媒には溶解せず通常の方法で複合体を作製しても、高分子マトリックス中にSWNTを均一に分散させることは困難である。ここではKumar教授の研究グループで、

図2 単層カーボンナノチューブ(Single Wall Carbon Nanotube (SWNT))の模式図

表1 PANおよびSWNT/PAN複合体繊維の力学的性質

SWNT (wt%)	Tensile Modulus [GPa]	Tensile Strength [GPa]
0	7.9	0.23
5	14.2	0.36
10	16.2	0.33

図3 SWNT/PAN複合体中に存在するSWNT bundleの直径分布(もとのSWNT bundleと比較)

高分子マトリックス中へのSWNTの分散性の向上について行った若干の結果を紹介する。

HiPco法(High-Pressure carbon monoxide)¹²⁾で作製したSWNTを高温水蒸気酸化と塩酸洗浄¹³⁾により精製した試料を透過型電子顕微鏡(TEM)で観察すると、bundle状に凝集したSWNTが観察される。TEM写真を詳細に検討した結果、SWNT bundleの直径は均一でなく、数nmから70nmの範囲内で分布をもち、その平均値は30nmであることがわかった。またその高分解能電子顕微鏡写真では格子縞が観察され、bundle状の凝集体中に規則構造が存在することも報告されている¹⁴⁾。

前述したようにSWNTは通常の溶媒には溶解しないが、dimethyl formamide (DMF)中で超音波を照射することにより分散性が向上する。そこでSWNTをあらかじめDMF中に分散させた後、ポリアクリロニトリル(PAN)を加え複合体繊維を作製した¹⁵⁾。得られた複合体繊維の力学的性質を表1に示す。

SWNTの添加により力学的性質が向上し、10wt%の添加でその弾性率はもとのPAN繊維の2倍以上に達している。この結果からPANマトリックス中へのSWNTの分散性の向上が推察されるが、その直接的な解明には更なる構造解析が必要である。しかし走査型電子顕微鏡観察ではSWNTとPANを識別できず、解析が不可能であった。そこでこれら複合体の微細構造解析を目的としてTEM観察を行うと複合体中に存在するSWNTのbundle(格子縞)

が明瞭に確認できた。その一方でPANマトリックスから孤立したSWNTが突出した様子も観察された。得られたTEM写真をもとに複合体中に存在するSWNTのbundleの直径分布を測定した(図3)。その分布は1~30 nmであり, もとのSWNT(数nm~70 nm)に比べて分布幅が減少したことがわかる。以上のことから, 超音波を用いた複合体作製法によりSWNTのbundleが解きほぐされ(exfoliate), PANマトリックスへ分散したことがわかる¹⁶⁾。

SWNT/高分子複合体の応用研究は幅広く行われている。前述したSWNT/PAN複合体だけに着目しても, さらなる分散性の向上による高性能化に加え, 例えばPANを賦活することにより作製した炭素繊維への応用¹⁷⁾やエレクトロスピンニングによる微細繊維化¹⁸⁾など多くの応用が考えられている。SWNTの優れた物性を活かした新規複合材料の今後の実用化が期待される。

4. おわりに

ジョージア工科大学, ポリマー・テキスタイル・繊維工学科, そしてKumar教授グループの研究について簡単に紹介させていただいた。この紹介がこれから留学を目指している研究者, 技術交流を目指している企業の方々に少しでも参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Iijima, S. and Ichihashi, T. : *Nature*, **363**, 603 (1993)
- 2) Lu, J. P. : *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 1297 (1997)
- 3) Gao, G.-H., Cagin, T. and Goddard, W. A. : *Nanotechnology*, **9**, 184 (1998)
- 4) Sinnott, S. B., Shenderova, O. A., White, C. T. and Brenner, D. W. : *Carbon*, **36**, 1 (1998)
- 5) Popov, V. N., Van Doren, V. E. and Balkanski, M. : *Solid State Commun.*, **114**, 395 (2000)
- 6) Yakobson, B. I. and Smalley, R. E. : *Am. Sci.*, **85**, 324 (1997)
- 7) Treacy, M. M. J., Ebbesen, T. W. and Gibson, J. M. : *Nature* (London), **381**, 678 (1996)
- 8) Wong, E. W., Sheehan, P. E. and Lieber, C. M. : *Science*, **277**, 1971 (1997)
- 9) Poncharal, P., Wang, Z. L., Ugarte, D. and De Heer, W. A. : *Science*, **283**, 1513 (1999)
- 10) Baughman, R. H., Zakhidov, A. A. and De Heer, W. A. : *Science*, **297**, 787 (2002)
- 11) Liu, T. and Kumar, S. : *Nano Letters*, **3**(5), 647 (2003)
- 12) Nikolaev, P., Bronikowski, M. J., Bradley, R. K., Rohmund, F., Colbert, D. T., Smith, K. A., and Smalley, R. E. : *Chem. Phys. Lett.*, **313**, 91 (1999)
- 13) Strong, K. L., Anderson, D. P., Lafdi, K. and Kuhm, J. N. : *Carbon*, **41**, 1477 (2003)
- 14) Thess, A., Lee, R., Nikolaev, P., Dai, H., Petit, P., Robert, J., Xu, C., Lee, Y. H., Kim, S. G., Rinzler, A. G., Colbert, D. T., Scuseria, G., Tomanek, D., Fischer, J. E. and Smalley, R. E. : *Science*, **273**, 483 (1996)
- 15) Sreekumar, T. V., Liu, T., Min, B. G., Guo, H., Kumar, S., Hauge, R. H. and Smalley, R. E. : *Adv. Mater.*, **16**(1), 58 (2004)
- 16) Uchida, T. and Kumar, S. : *J. Applied Polymer Science*, will be published
- 17) Min, B. G., Sreekumar, T. V., Uchida, T. and Kumar, S. : *Carbon*, **43**, 599-604 (2005)
- 18) Liu, J., Wang, T., Uchida, T. and Kumar, S. : *Journal of Applied Polymer Science*, in press