

ナノ物体の物性計測と可視化観察の同時遂行を目指す ナノ・ハンド・アイ・システム

Nano Hand-Eye System for Simultaneous Imaging and
Characterization of Nano Objects

藤田 博之 (Fujita Hiroyuki)
東京大学・生産技術研究所・教授



研究の概要

ナノギャップを持つ対向ナノプローブやそれと一体化したマイクロアクチュエータなどのMEMS デバイス作製技術と、真空中の観測に適した位相差検出透過型電子顕微鏡および生体分子の水中での観測に適した蛍光顕微鏡・微分干渉顕微鏡による「その場」観察技術を融合して、DNA、コラーゲン、微小管、アクチンフィラメント等の生体分子や、ナノ接合、人工合成した超分子（例 HBC ナノチューブ）のようなナノ物体の自由な操作と実時間可視化技術を提供するとともに、その機械的・電氣的な計測技術を確立した。

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、マイクロ・ナノデバイス

キーワード：MEMS、透過電子顕微鏡、ナノ物体操作、生体分子、ナノワイヤ

1. 研究開始当初の背景

ナノ物質を個別の自由に操作し、物性を評価する技術は、ナノテク及びバイオ技術を推進する上で不可欠である。ナノ物体の捕獲や操作は、原子間力顕微鏡プローブを用いて行った例があるが、物体はプローブと基板上の間に固定されており、それを別の手段で観測したり、別空間へ移動させて解析に供したりすることはできなかった。このため、ナノ物体の操作と観測を独立して行えるシステムが必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで培ってきたナノマシン技術で作ったツールをナノ物体の操作や評価に使い、高分解能透過電子顕微鏡技術等の可視化技術を組み合わせることで、ナノハンド・ナノアイ・システムへと発展させて、汎用の技術として確立することである。これにより、ナノ構造の自在なハンドリングと、ナノ機能の計測制御、ナノ物体の実時間可視化観測が可能なシステムへと展開し、ナノ領域における新しい科学技術の領域を切り開く手段を提供する。

3. 研究の方法

<ナノハンドグループ>

本グループでは対向型ナノプローブの高機能化を行い、種々のナノ物体操作ツール及び計測用ツールを提供する。またマイクログリッパによるナノ物体の捕獲・操作技術を研究する。細線ウェッジボンダ、MEMS

製造機器メンテナンス費を使用した。

<ナノアイグループ>

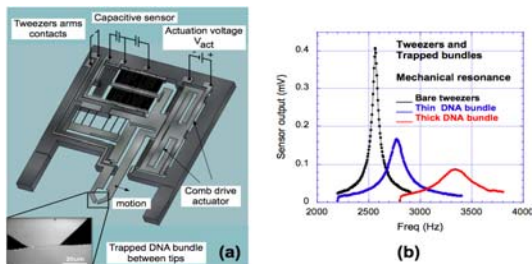
本グループでは極微小領域における構造の変形や動きの可視化計測と、電気機械特性の評価を行った。また生体分子モータによる、分子の直接操作手法も研究した。超高速遠心分離機、可視化機器メンテナンス費を使用した。

4. 研究の主な成果

各種の用途に適合したマイクログリッパを設計し、必要に応じ新たな製作技術も用いて実現した。最小のギャップ間隔は20-50nmが得られた。このツールを用いて、長鎖状の分子を対象に様々な分子を捕獲した。ゼラチン、微小管、アクチン繊維、ポリグルタミン酸、Hexa-peri-hezabenzocoronene (HBC) ナノチューブ、チオール化ルテニウム複合体などの捕獲に成功した。微小管は単一分子の捕獲、ガラス基板上への複数の微小管の再配置、その上でのキネンシン付加ナノ粒子の搬送に成功し、細胞内物質輸送システムが再構成できた。また、チオール化ルテニウム複合体については、分子を捕獲したギャップを徐々に開きながら電気伝導特性を計測し、量子化コンダクタンスに対応するステップ状の変化を計測し、最終的に一分子の特性を知ることができた。

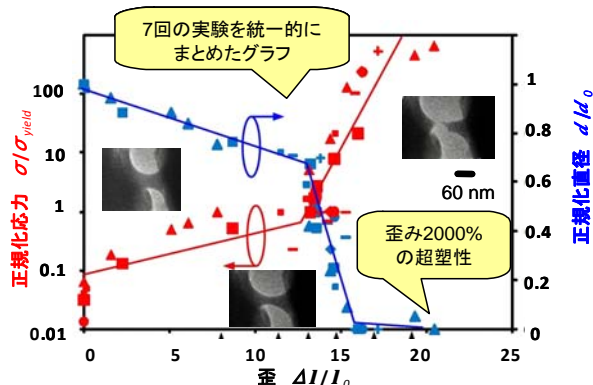
DNA 単分子の捕獲に関しては、マイクロ路内の電気泳動でDNA単分子を分離し、ナノピンセット先端に相当する微細電極の間に、誘電泳動力で伸張し電極表面との電気化学反応により捕獲することに成功した。この成果は世界初であり国際学術誌の表紙を飾った。

さらに、MEMS ピンセット間に捕獲した DNA 分子束の力学特性を連続的に測るシステムを開発し、DNA が制限酵素によって分解される様子を観測した。



対向プローブ間にできるナノワイヤの力学の変形に関して、機械特性と形状変化の実時間同時測定を行った。シリコン製の対向プローブを用いて、TEM 試料室の超高真空 (10^{-8} Pa) 中で両者を接触させ保持した後、徐々に引き離すことでシリコン・ナノワイヤの形成・引張り伸長・破壊の現象を観察した。針先を接触させ 1-3 日間保持すると、最初数 nm であったワイヤ直径が数十 nm まで徐々に成長した。次に 30pm/s 程度の極めて遅い引張り速度で引き離すと、ワイヤは直径 2-4nm 程度まで細くなりながら初期長のおよそ 20 倍まで伸長して破断した。バルク材料では脆性破壊をするシリコンが、ナノワイヤでは超塑性を示すことが分かった (温度は常温のままである)。また、引張り速度を 10 倍に早くすると、初期長のおよそ 4 倍まで伸長して破断した。さらに速度を上げると脆性的に破壊した。

外部の理論家の助けを借り、超塑性現象を説明するモデルを作った。モデルに基づく計算機シミュレーションと、TEM の詳細観測でモデルの妥当性を確認した。これも世界で初の成果である。



TEM観察によるSiナノ接合の特異な塑性変形の発見とモデル化

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

本研究に関する論文[4]は国内学会の論文賞を受賞した。また研究代表者の個人表彰もこの間に 5 件を数え、フランスからの名誉博士号も頂戴した。

中でも、MEMS ピンセットを用いた DNA などの分子の評価、TEM 中での対向プローブ間のナノ物体評価に関しては国内外の研究者との共同研究が始まりつつある。このように、本研究の成果は世界的にも高い評価を得ており、今後のこの分野の発展の方向を示した研究として大きなインパクトを与えた。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

1. Tadashi Ishida, Yuuki Nakajima, Junji Endo, Dominique Collard and **Hiroyuki Fujita**, "Real-time transmission electron microscope observation of gold nanoclusters diffusing into silicon at room temperature", Nanotechnology, Vol.20, No.6, pp.65705.1-6, 2009
2. Murat Gel, Tadashi Ishida, Tetsuo Akasaka, Akinori Umeno, Koji Araki, Kaz Hirakawa, and **Hiroyuki Fujita**, "Mechanically Controlled Quantum Contact With On-Chip MEMS Actuator", IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.16, No.1, February 2007, pp.1-6, 2007
3. Naoyuki Nozawa, Kuniyuki Kakushima, Gen Hashiguchi, **Hiroyuki Fujita**, "In situ Visualization of Degradation of Silicon Field Emitter Tips", IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.2, No.3, pp.284-288, 2007
4. 石田忠, 角嶋邦之, **藤田博之**, "MEMS方向探針による金ナノコンタクト接近・衝突・引張り・破断実験のHRTEM観察と電流測定", 電気学会論文誌 E, センサ・マイクロマシン準部門誌, Vol.126, No.9, pp.504-509, 2006
5. T. Ishida, K. Kakushima, M. Mita, **H. Fujita**, "TEM Observation of Tensile Deformation of Silicon Nanowire between Micromachined Sharp Opposing Tips", Proceedings of the 18th IEEE International Conference on MEMS (MEMS 2005), pp.879-882, Miami, USA, 2005年1月
6. M.C. Tarhan, D. Collard, C. Bottier, R. Yokokawa, M. Hosogi, G. Hashiguchi and **H. Fujita**, "Isolation and Manipulation of Single Microtubule by Silicon Microtweezers", The 12th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences, MicroTAS'08, pp.862-864, San Diego, CA, USA, 2008年10月

ホームページ等

<http://www.fujita3.iis.u-tokyo.ac.jp/?FrontPage>