



木塚 徳志

名古屋大学難処理人工物研究センター

プロフィール：1991年、東京大学大学院工学系研究科博士課程終了（工学博士）。同年、名古屋大学工学部応用物理学科助手。1997年より名古屋大学難処理人工物研究センター講師（大学院工学研究科応用物理学科兼任）。1998年～1999年、通産省工業技術院機械技術研究所流動研究員（兼任）1999～2001年、豊田理化学研究所非常勤研究嘱託（兼任）1998～2001年、科学技術振興事業団さきがけ研究21本領域研究員を兼任。

ナノ構造変形における量子化された材料力学の実験

要旨

いかなるナノデバイスであっても、ナノ構造の安定性を高め、それを巨視的な大きさまで集積化する技術を開発するためには、設計時にも作製時にも、ナノ構造体とその界面固有の構造と力学特性の理解が不可欠である。しかし、ナノテクノロジー研究の展開がしきりに叫ばれ、ナノデバイスの作製と電気伝導特性の研究が盛んに進められている一方で、こうした力学特性を研究する手法は、これまで計算機シミュレーションに限られ、実験研究は皆無であり、工学研究としての様相を呈していなかった。この理由は、数ナノメートルしかないナノ構造体やその界面を単独に接触・変形させることができず、当然その構造変化と力学特性を計測することも不可能であったためである。従来、手がつけられていなかったこの特性研究にも注目し、ナノ材料の研究手法開発と応用研究をこの「さきがけ研究」で進めてきた。

本研究では、まず新しい構造をもつナノ構造を、独自の機械的操作、気相堆積技術、原子サイズ電子線加工を用いて創製するとともに、その時の原子配列、強度特性と電気伝導特性のダイナミクスをミリ秒単位で同時に解析できる原子直視的手法を世界に先駆けて開発した。この手法の装置は、透過電子顕微鏡法をもとにして、原子間力顕微鏡と走査トンネル顕微鏡の機能を備えるように設計された。最終的に得られた試料操作分解能は10pm、観察空間分解能は0.1nm、応力検出最小値は10pN、および電流検出最小値は10pAである。各信号は260μs間隔で記録できるようになった。この結果、金属や半導体のポイントコンタクトや原子ワイヤーなどのナノ構造体を個別に変形させ、かつ物性をその場で測定する実験が初めて可能になり、原子スケールの材料力学研究の実験的基盤が構築された。孤立したナノ構造、もしくは単一の界面を変形させ、その歪みと応力を実測して、弾性率、弾性限界、強度をはじめとする各種力学特性を直接解明できる手法は、原子直視法に基づいたこの手法だけである。

現在までに発見されたことは、(1)ナノメートルスケールに微小化した金属や半導体は、弾性限界と強度が、それぞれバルクの50倍、100倍以上に増加し、かつ繰り返し変形しても破壊しないこと、(2)さらにサイズが数原子以下になると、コンダクタンスだけでなく強度も量子化されること、(3)単原子が直列に連結する最も細くなった金属鎖では、金属-絶縁体転移が生じること、(4)表面を清浄化して接合すると、内部強度を上回る半導体異常接合強度が得られること、および、(5)カーボンナノチューブ同士を接合し、その強度がカーボンレイヤーの破断強度まで増加すること等である。いずれも、ナノテクノロジー研究にブレークスルーをもたらす現象と特性である。ナノ構造変形の過程を顕微鏡にしたこと自体がまず独創的な成果であり、的確に評価された構造と対応して解明された個別の局所的物性に関する情報は、従来の平均的な物性評価法では決して得ることができない。

ナノ材料のサイズが微細化された極限で現れる強度量子化の発見は、「量子化された材料力学」の起源となろう。本題名は、「さきがけ研究」で得られた記念すべき最終成果を表している。

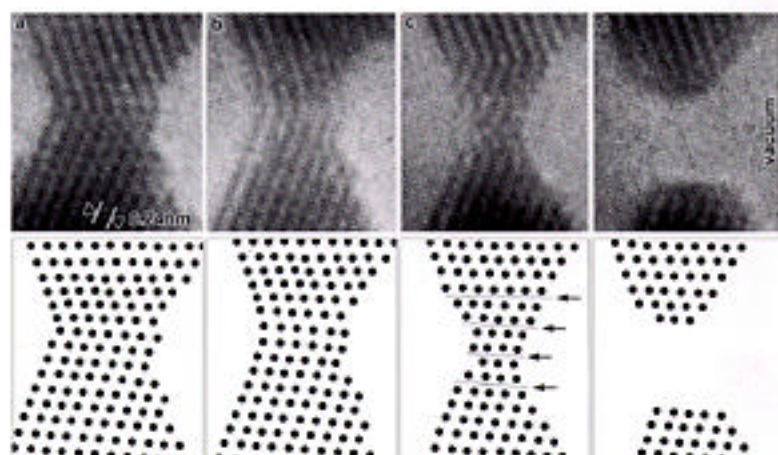


図1 金ポイントコンタクトを引張り変形したときの原子像の時系列。

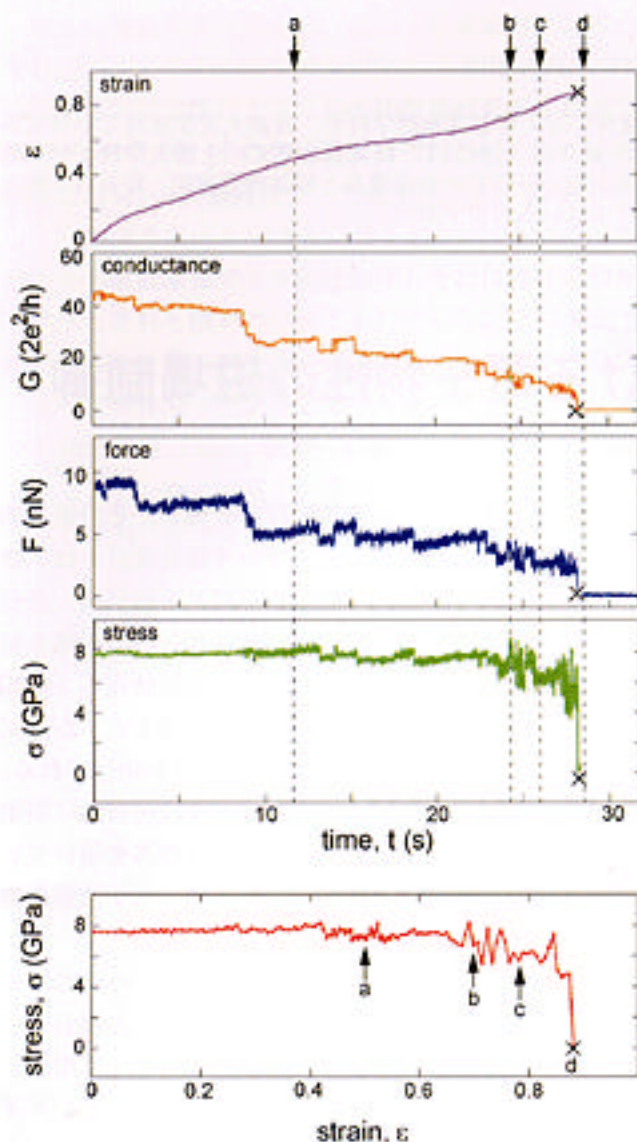


図2 図1の観察と同時計測した歪み、力、応力、コンダクタンスの時間変化、および歪み-応力関係。

成果

主要発表論文

1. T. Kizuka, Phys. Rev. Lett. **81**, 4448 (1998).
2. T. Kizuka, Phys. Rev. **B57**, 11158 (1998).
3. T. Kizuka, Phys. Rev. **B59**, 4646 (1999).
4. T. Kizuka and K. Hosoki, Appl. Phys. Lett. **75**, 2743 (1999).
5. T. Kizuka and T. Yanaka, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 1595 (1999).
6. T. Kizuka, Phys. Rev. **B63**, 033309 (2001).
7. T. Kizuka, H. Ohmi, T. Sumi, K. Kumazawa, S. Deguchi, M. Naruse, S. Fujisawa, S. Sasaki, A. Yabe and Y. Enomoto, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L170 (2001).
8. T. Kizuka, S. Umehara and S. Fujisawa, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L71 (2001).

主要解説

1. 木塚徳志、電子顕微鏡 33巻2号 (1998) p87.
2. 木塚徳志、日本結晶学会誌 41巻 (1999) p188.
3. 木塚徳志、固体物理 6巻 (2000) p383.
4. 木塚徳志、日本溶接学会誌 69巻 (2000) p58.

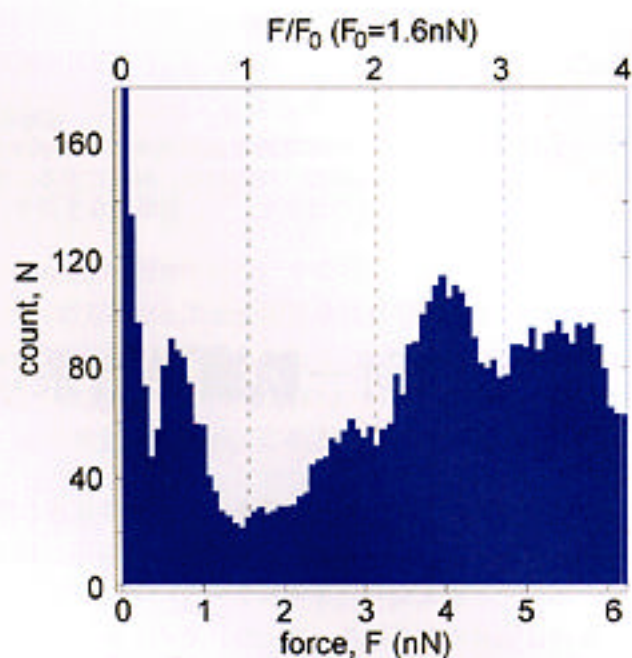


図3 全ポイントコンタクト変形における力測定値の分布。分布の各極小値は各構造の強度に対応し、1.6 nNを単位として量子化している。