

## 結晶の臨界サイズで現れた新しい変形機構

ピコメートル精度の試料操作を実現したデュアルゴニオメーターステージを導入した“その場”高分解能透過型電子顕微鏡が開発され、これが 30 年に及ぶナノメートルサイズ接点研究において未着手であった体心立方構造金属の実空間観察に適用された。高融点金属であるモリブデンのナノメートル接点が電子顕微鏡内部で作製され、接点を機械的に変形させたときの微細化挙動が原子レベルの空間分解能で“その場”観察され、同時に電気伝導が調べられた。接点が結晶構造の臨界サイズである単位格子数個分まで微細化すると、これまでよく知られた変形機構とは異なる、原子が液体状に運動して結晶構造が崩れ固体が変形する機構である塑性流動的変形機構が現れることが見出された。

科学技術を支える材料や機器は、機能・構造の利用目的の種を問わず、組成・結晶構造の異なる素材が組み合わされた複合構造になっている。このため材料や機器の中には、素材同士をつなぐ界面や接点が必要に含まれている。その中で電子回路中の素子や配線をつなぐ接点は、回路の集積化の進展とともに微細化し、マイクロメートルからサブミクロンサイズの接点が、物理学や電子工学における長年の研究・開発の対象にされてきた。これより 100 倍小さな接点、つまり、数ナノメートル以下の接点は、この流れには沿わず、トランジスタ、ダイオードや配線などの接合する素子自体がこのサイズに到達する前、1980 年代後半にすでに注目され始めていた。その契機は、半導体界面に形成された自由電子ガスのポイントコンタクトで発見されたコンダクタンスの量子化が、固体接点においても、そのサイズが電子の平均自由行程よりも小さくなれば実現するであろうという期待にあった。折しも走査トンネル顕微鏡の探針操作や機械的破壊接点技術などの機械的変形技術がそうした微細接点の作製を可能にしたときであり、種々の金属のナノメートル接点が調べられていった。その中で、金がコンダクタンスの量子化の特徴を示すことがわかり、ナノ接点の研究はこの材料に集中して進められた。温度も下げず、強磁場もかけず、超高真空にもしないで機械的な接触と破断だけで現れる新しい量子現象に、世界中の物理学関係者の関心が寄せられた。この啓蒙期には、京大の酒井 明教授らの先駆的な結果が発表され、我が国においてもナノメートル接点の研究が広まり、日本物理学会を初め、多くの関連学協会でも盛んにシンポジウムが開催された。こうした金属ナノメートル接点研究では、特に、量子化値に該当するコンダクタンスの起源となる構造がどのような機械的変形過程からもたらされるのか、ということに焦点が当てられた。変形の原子的挙動の解析は、対象となる構造が小さいために、当初、分子動力学や第一原理法などの計算研究に頼らざるを得なかった。その後、ナノメートル接点を実際に変形させて、そのときの原子挙動を“その場”で直接観察できる高分解能透過型電子顕微鏡法が開発され、実験面を担うようになった。その結果、研究が集中した金を初めとして、銀、プラチナ、パラジウムなどの面心立方金属では、接点が比較的大きいときには、変形はある格子面両側の領域が転位運動を媒介として相対的に移動して生じる、よく知られたすべりによって進行することが映し出された。さらに、接点が数ナノメートルに微細化すると、変形機構は転位を媒介としないすべり“同時すべり”に遷移し、そのときの強度は通常の  $10^5$  倍以上大きくなることを見出された。このようにナノメートル接点研究は、面心立方金属

については、2010年頃までに十分な成果を収めてきた。これに対して、他の結晶構造、例えば、体心立方構造や六方稠密構造の多くの金属ナノメートル接点に関しては、コンダクタンスの量子化は現れず、その変形過程は未解明のままであった。

最近、筑波大学数理物質系物質工学域の研究グループは、上記のナノメートル接点研究の問題に対して、研究対象とする体心立方金属の候補を検討した。その結果、彼らは融点、強度、ヤング率が高く、ナノメートルサイズに微細化したときに構造が貴金属よりも安定で、電子デバイスへの応用上も有望であるモリブデンを選定した。彼らは、“その場”高分解能透過型電子顕微鏡法を用いて、モリブデンのナノメートル接点の作製と微細化過程を原子直視的に動的観察した。その結果、接点が結晶構造の臨界サイズである単位格子数個分まで微細化すると、常温でも原子が液体のように運動して結晶構造が崩れ固体が変形する機構である塑性流動的変形機構が現れることを見出した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の2016年10月号に掲載された。

粗大粒結晶金属材料の変形は、よく知られているように、格子面すべり、双晶形成や格子変態によって生じ、これが金属材料の機械的加工と組織制御に利用されている。こうした変形では、材料に外力が印加されると、その中の弱い格子面や狭い帯状領域だけの面状局所領域の原子配置が変化し、その周辺の結晶構造は保たれる。これに対して、今回モリブデン接点で観察された塑性流動状変形は、こうした既知の固体金属の変形機構のいずれとも異なり、結晶構造が破壊されて生じる。この臨界サイズ金属に固有な塑性流動状変形によって、組成制御も加熱冷却もせずに機械的な方法だけで初めて純金属の非晶質状原子配置が得られるようになった。この新しい乱れた微細構造は、固有の機械的・電気的特性を発現させる。このことは物理学のメゾスコピック系基礎研究に新たな展開をもたらすだけでなく、新たな機能をもつ単原子デバイスや単一分子接合などの最先端ナノデバイスに応用されると期待される。

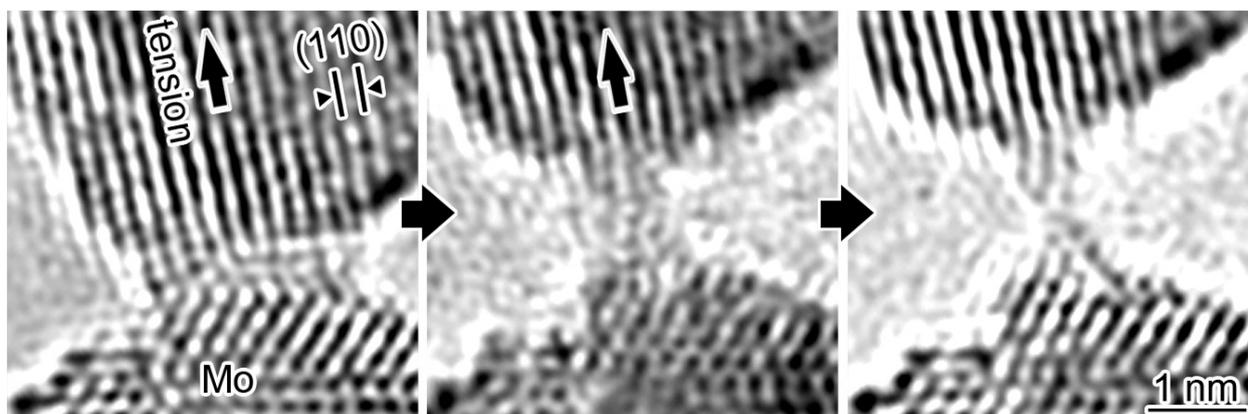


図1. モリブデンナノメートル接点の塑性流動的変形の原子的挙動を直接観察した高分解能電子顕微鏡像

## 原論文

[Plastic Flowlike Deformation and Its Relation to Aperiodic Peaks in Conductance Histograms of Molybdenum Nanocontacts](#)

Kohei Yamada and Tokushi Kizuka: *J. Phys. Soc. Jpn.* **85** (2016) 104601.

問合せ先：木塚 徳志（筑波大学数理物質系物質工学域）