

わたしたちの研究 (1) 固体力学研究室

平方寛之 (H9/1997卒)

1. はじめに

このたび、吉田先生から「わたしたちの研究」と題して教員が研究を紹介する連載を開始するとのお話をうかがい、その栄えある第一回目にご指名いただきました。いささかプレッシャーを感じつつも、大変光栄に感じて筆をとっています。研究を皆様に知っていただく貴重な機会ですので、どんなことを考えながら研究しているか、何を面白いと思って研究しているかなど、少しでも知っていただけたら幸いです。わたしの所属する研究室は、機械理工学専攻機械材料力学講座の固体力学研究室で、2017年から担任しています。2021年4月現在のスタッフは、教授：平方寛之と准教授：嶋田隆広の2名（[図1](#)）で、所属学生は、博士課程：4名、修士課程：10名、学部4年生：8名です。



図1 筆者（平方：左）と嶋田准教授（右）

2. 現代の錬金術？

その昔、錬金術師といわれる職業がありました。錬金術とは、狭義の意味では卑金属を貴金属に変えることを意味しますが、広義の意味では物質を自在に変えてしまうことを指すようです。これが実在したらとても面白いですが、現代の科学では材料の物性は物質に固有のものと考えられています。機械的特性や強度についても、材料や組織によって決まる材料定数であり、本質的には変えることができないものと信じられています。材料力学は、固有の機械的特性を持った材料を選択して、その「かたち」によって所望の剛性や強度を得ようとする分野です。では、より材料強度の根源的な部分に介入して、機械的特性を自在に操ることはできないのでしょうか。

図2は、わたしどもが過去に行ったアモルファスシリコンのナノ片持ちはり試験片に対する強度実験の結果です。シリコンは典型的なぜい性材料であり、室温下では塑性変形を示さずにぜい性的に破壊します。ところが、電子顕微鏡観察下で実施したナノ試験片は、ぐにゃっと曲がるように変形して、あたかも金属のように大きな延性を示すことがわかったのです。これは、シリコンはぜい性材料であるという常識をくつがえすものです。いったいなぜ、このようなことが起こるのでしょうか？

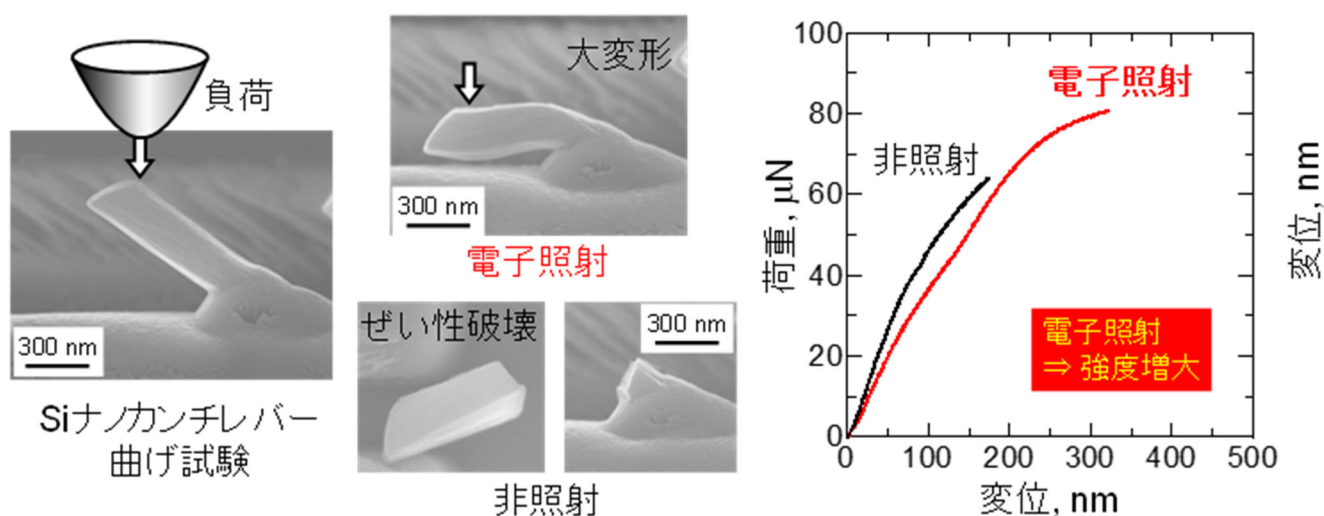


図2 アモルファスSiナノ片持ちはりの強度実験（文献1）

3. これまでの研究：第一期京大時代

これが今面白いと思って取り組んでいる研究トピックの一つですが、その詳細を述べる前に、これまで実施してきたわたしの研究について少し紹介いたします。わたしはこれまで一貫して、ナノ・マイクロスケールの材料力学に関する研究に取り組んできました。わたしは、同志社大学の修士課程を修了したのち、短期間メーカーに勤めましたが、どうしても研究がやりたくて2000年に本学の博士課程に編入学しました。北村先生のご指導のもと、2000年～2003年まで博士課程の学生として、2003年～2007年は助手として、薄膜などの微小材料の破壊に関する研究に取り組みました。北村先生には、研究の楽しさと厳しさの両面を教えてくださいましたが、とくに、一見複雑に見える材料の破壊現象にも普遍的な法則が潜んでおり、一般性のある力学法則を見出すことが研究の醍醐味であることを教えてくださいました。

当時、電子デバイスなどに用いられるサブミクロンからナノスケールの電極や配線などの要素が用いられ始めていましたが、それらの製造プロセスで生じる異なる要素間の界面はく離が問題となっていました。そこで、界面破壊を支配する力学法則を解明するため、当時はあまり行われていなかった透過型電子顕微鏡によるその場観察下（リアルタイムに観察すること）での強度試験方法を開発しました。ナノ・マイクロスケールの破壊の法則を探っていくには、小さな試験片に対してmN～nNオーダーの微小な荷重を制御して負荷するとともに、変形や破壊を観察する必要があります。しかし、確立された方法はありませんので、独自の実験方法を開発する必要がありました（例えば、[図3](#)）。独自の方法を用いて、nmオーダーの極めて局所的な応力場が支配する界面破壊の法則を明らかにして、その成果は日本機械学会や日本材料学会の論文賞を受けるなど高い評価をいただきました。このような経験は、独自の技術を持つことの重要性を認識することができ、その後の研究活動において大きな武器となりました。

そのころは微小なスケールでの実験技術の進歩が目覚ましく、とくに電子顕微鏡観察下での微小な荷重や変位を制御した力学実験が可能になりました。破壊は突き詰めていくと局所的な現象なのですが、それまでは実際に破壊するところは見えないのが普通でしたので、自ら開発した方法により顕微鏡の中で微視的な変形や破壊を始めてこの目で見られるようになり、実験を共にする研究室メンバーと歓声を上げたことを覚えています。

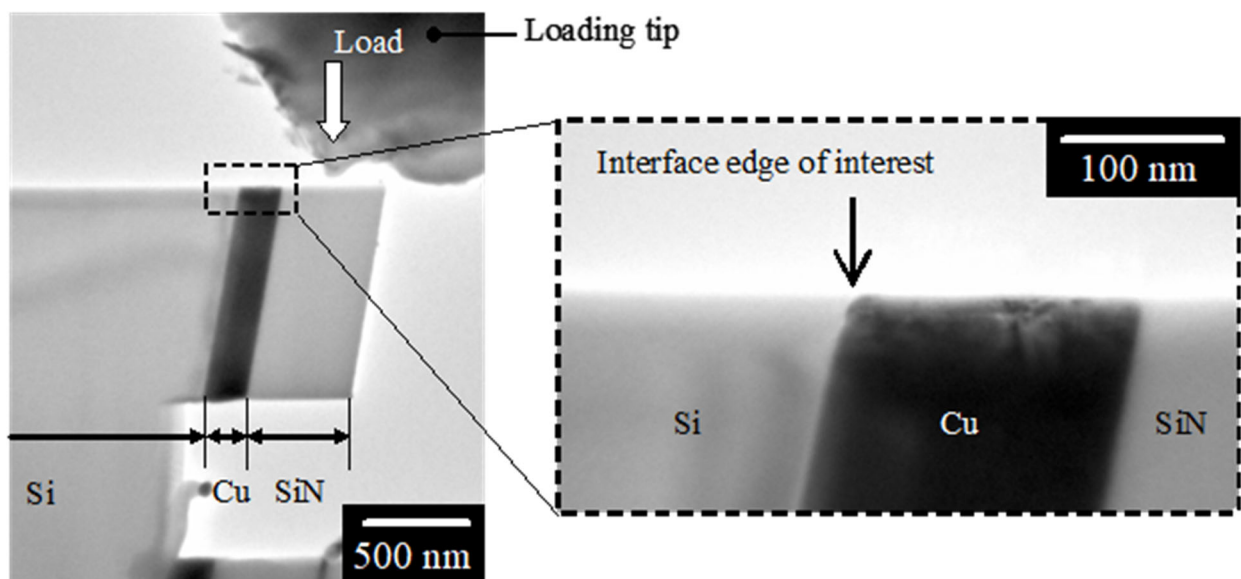


図3 透過型電子顕微鏡観察ナノ薄膜界面破壊実験（文献2）

4. これまでの研究 阪大時代 ～ナノ・マイクロ材料力学～

2007年に大阪大学の箕島先生の研究室に異動しました。本学に戻ってくる2017年まで、講師、准教授として、薄膜や微小材料の強度に関する研究を進めました。材料強度学は、強度が寸法に依存しないことを前提としています。これはマクロな材料ではおおよそ正しいと考えてよく、このため試験片により評価した強度値を実構造物の強度設計に用いることができます。ところが、ナノ・マイクロスケールでは機械的特性や強度が寸法に依存するようになります。ナノ・マイクロスケールの材料力学を確立するには、この寸法効果の法則を解明することが不可欠です。とくに、材料の破壊には、単調に増大する荷重による破壊、繰り返し負荷による疲労破壊、一定荷重下において時間の経過とともに破壊が進行するクリープ破壊など多様な現象があり、現象ごとに強度が異なります。これらを体系的に明らかにしていくためには、対象に特化した実験方法を考えていく必要があります。

良い研究をするには時間をかけて試行錯誤することが欠かせないとの思いから、ナノ・マイクロ材料の作製から実験方法の開発、実験の実施と解析までを同一の研究グループで一貫して行うことにこだわりました。そこで、各種蒸着法による薄膜の製膜技術、確かな強度試験を実施するための基板から分離した薄膜試験片の作製技術、作製した薄膜試験片に繰り返し負荷や長時間の一定荷重を負荷する実験方法などの独自の技術開発に取り組みました。さらに、京大在籍時に鈴木基史先生に教えていただいた斜め蒸着法という自己組織化を利用したナノ構造作製技術によって、形状を制御したナノ構造体を作製できるようになり、これをナノスケールでの強度試験に応用することで、多様な試験ができるようになりました。図2に示したシリコンのナノ片持ちはり、この技術を利用して作製したものです。図4は、独自に開発した装置や実験の例を示しています。このような技術開発は困難を極めますが、できた実験方法は世界で唯一のものであることから、簡単には追いつかれない独自の実験結果を出すことができます。また、学生のアイデアによるところも大きく、思いもよらない方法を提案してくれて、それが成果に結びついたときは研究をしていて最もうれしい瞬間のひとつです。このような独自の実験技術により、ナノ薄膜やナノ・マイクロ構造体の破壊じん性、疲労き裂進展特性、およびクリープ特性に関する寸法効果や破壊機構において、いくつかの成果を上げることができました（例えば、文献3、4、5）。

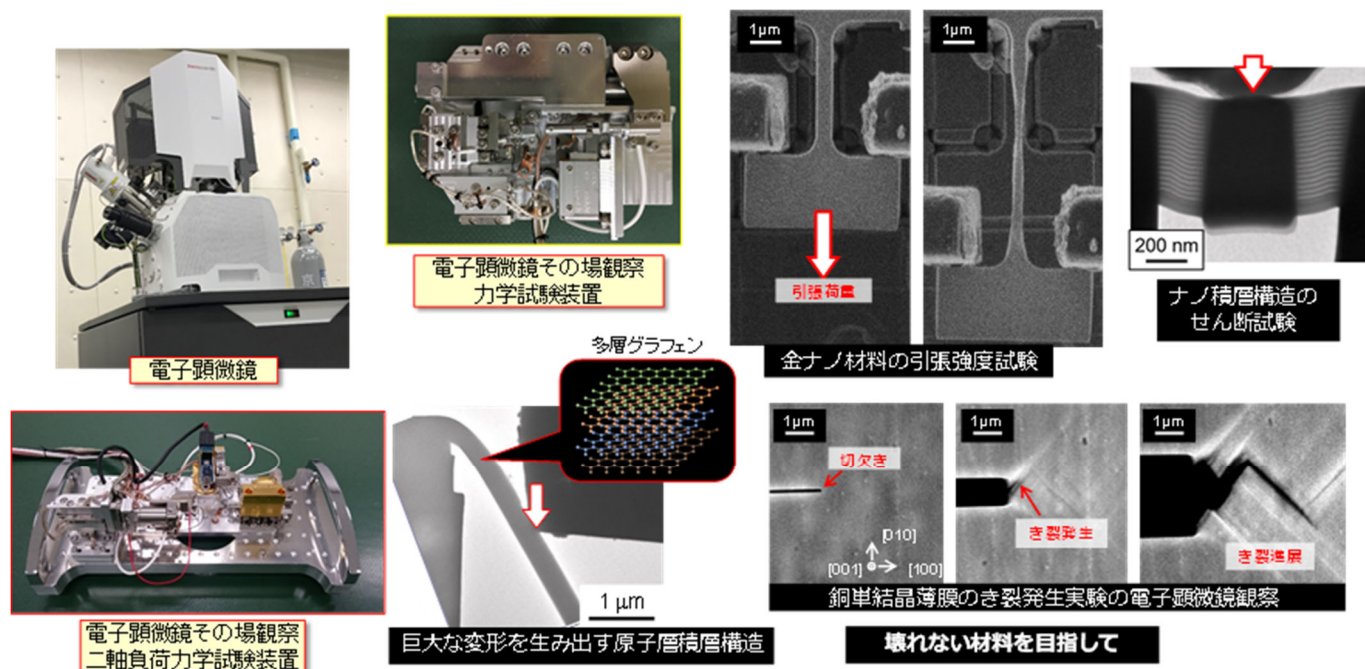


図4 ナノ・マイクロ材料力学実験，独自の実験装置による電子顕微鏡その場観察実験

さて、これらの研究過程で、ある種の研究対象においては電子顕微鏡その場観察試験と大気中の試験では、機械的特性や強度が大きく異なることに気づきました。微視的な機構を見たいから電子顕微鏡その場観察試験をやるわけですが、そもそも挙動が大きく変わってしまうため、大気中の試験と同じ現象を見ているかどうかも疑わしくなってくるわけです。電子顕微鏡内では何かが起きているのです。

いくつかの仮説を考えました。なかでも、ナノ構造体は表面の割合が大きいことを特徴とするため、周囲環境による効果が顕著になることが考えられました。電子顕微鏡は真空下で観察します。大気環境に比べて不活性であるため、周囲環境による酸化などの化学反応が生じにくく、大気中とは異なる破壊が起こりえます。実際に銅薄膜の疲労き裂進展などでは、酸化が大きな影響を及ぼすことも明らかになりました。しかし、それでは説明がつかない現象もありました。その後、電子顕微鏡内の同一実験装置において、電子ビームのONとOFFで強度が異なることに気づきました（図2：シリコンナノ片持ちはり）。電子線を照射することによりナノ材料の機械的特性や強度が大きく変化するのです。ところが照射をやめると元の強度に戻ります。まるで電子によるスイッチON/OFFで自在に機械的特性を変えられるような現象です。

この現象にとっても興味を持ちましたが、そのメカニズムがまったく分かりませんでした。従来の常識では説明がつかない現象のようで、わたしの知識ではアプローチする方法がなく追及するには時期尚早と考えていました。

5. いまの研究とこれから 第二期京大時代

そんな折、2017年に10年ぶりに京都大学に異動して、教授として再びお世話になることになりました。2018年に、できたばかりの研究室に、嶋田先生が准教授として着任してくれました。スタッフが二人になり、ようやく研究室も形になってきました。嶋田先生は、第一原理計算、理論解析を専門とする研究者です。学部から博士まで、さらにはその後も助教として、北村先生の研究室で研究されていました。ナノスケールの構造、力学特性、材料物性・電子物性の相関に着目して、ナノ材料の強度とマルチフィジックスに関する理論研究を進めています（[図5](#)、例えば、文献6、7）。

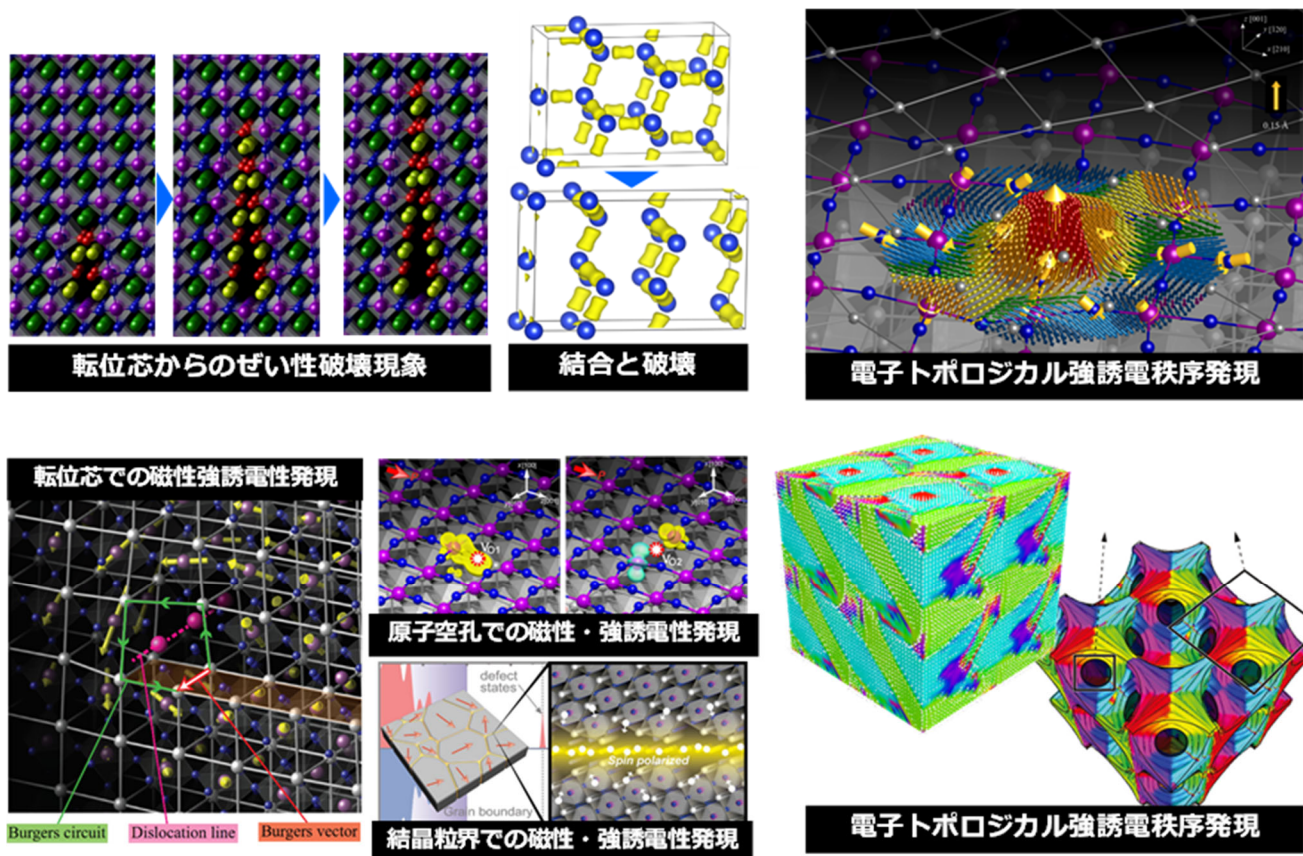


図5 ナノスケールの材料強度・マルチフィジックス解析

わたしは前述のように実験が得意（理論は苦手）なので、理論を専門とする嶋田先生と研究に関する議論は、大きな刺激を与えてくれました。嶋田先生は、材

料力学を原子・電子のレベルから量子力学に基づいて構築する壮大な研究を進めていました。その中で、材料中に本来持ちうる電子とは異なる電子を強制的に注入または排出することにより、材料強度が大きく変化することを量子力学に基づく理論解析により予測していました。材料強度をつかさどるのは究極的には原子間結合ですから、原子間の結合状態・電子構造に介入することにより強度を変化させることができるというものです。研究について議論をするなかで、実験で再三見られた電子顕微鏡観察下での強度特性の変化は、この電子的効果によるものではないかと考えるようになりました。このような視点からの研究は世界的に見ても行われておらず、そこに新たな研究分野があるではないかと考えるようになり、これは面白い研究になりそうだという予感がありました。

そこで、結合強度自体を実測する実験と、それに対応する理論解析に取り組みました。電子顕微鏡の電子銃による電子の制御と局所的なせん断変形による結合強度の実験的評価ができる方法を考案しました。電子線を制御することにより意図的に電子を取り除く状態を作り出したところ、電子が少ない状態では結合強度が低下する結果を得ました。これは、第一原理解析による理論予測と一致したのです（図6）。これらの研究結果から、余剰な電子を強制的に注入したり、取り除いたりすることで、材料の強度を自在に書き換えることができるのではないかと考えています。精密な実験と、原子・電子のレベルから理論解析により、その法則に迫ることができる可能性が拓けたのです。

これは、電子を操ることによって物質を自在に変えてしまうことを目指すもので、機械的特性のみならず他の物性をも変える波及効果を秘めています。大げさに言うと、本研究が進めば、現代の錬金術というべきものになるのではないかと、これからの材料力学は錬金術を可能にする学問へと昇華する可能性を秘めているのではないかと考えています。

この研究は、科学研究費補助金で個人や少人数の研究グループを対象とした基盤研究では最も規模が大きい基盤研究(S)に2020年度に採択されました（「Anomalous電子によるリライタブル材料強度のナノ力学」平方、嶋田）。研究は端緒であり、うまくいくかどうかはわかりません。もしかしたら、今考えている仮説は間違っているかもしれません。しかし、失敗を恐れず、これからも面白いと思うことに挑戦していきたいと考えています。

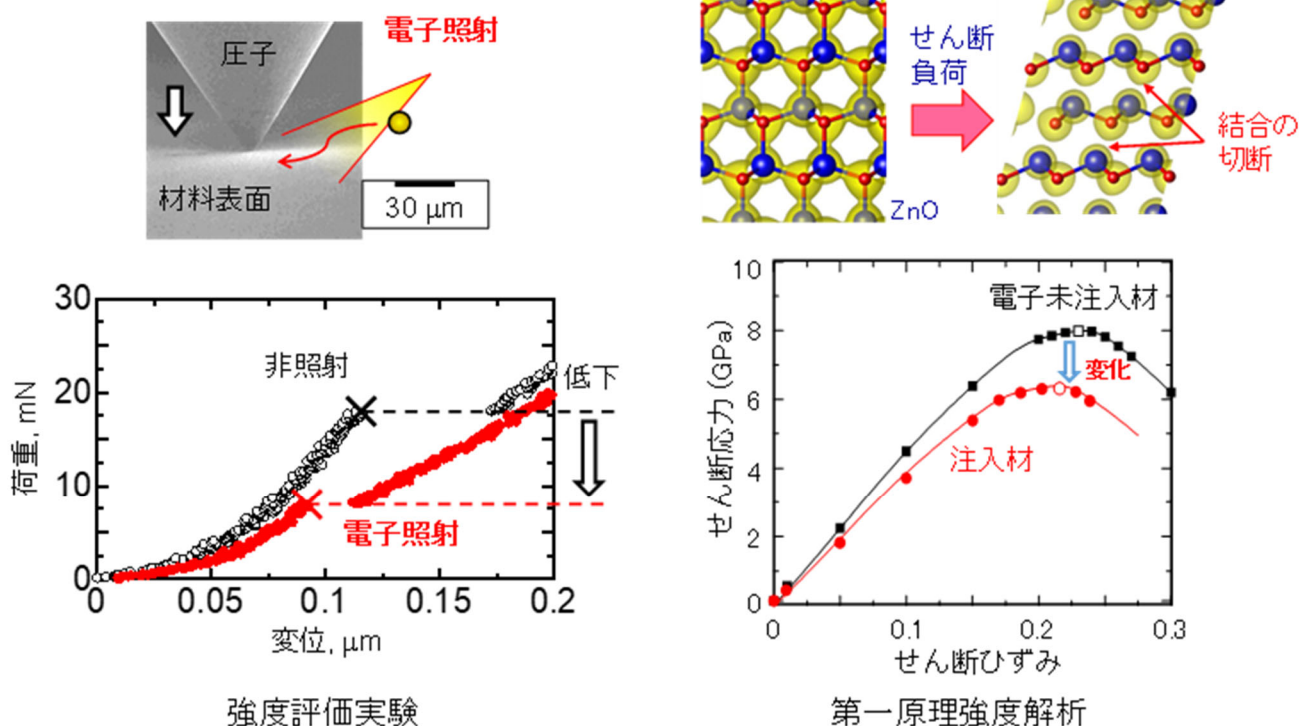


図6 材料の結合強度に及ぼす電子の影響に関する実験と解析（文献8）

6. おわりに

マクロな材料を対象とした従来の材料力学研究から、変形と破壊の現象を実験的にも理論的にも原子・電子のスケールから考えることができるようになり、新しい材料力学へと飛躍する土壌が整いつつあると感じています。これにより、例えば、高い強度といくら変形しても壊れない柔軟性を併せ持つ材料を実現することができるかもしれません。図4の中央の図は多層グラフェンの曲げ試験の結果です。同じグラファイトでも鉛筆の芯はもろく、すぐに破壊してしましますが、緻密に積層したマイクロスケールのグラフェンは破壊せずに巨大な変形を許容するのです。せっかく好きで始めた研究人生なので面白いと思うことを追及し、志を同じくする研究室のスタッフ・学生（図7）とともに一丸となって京大機械発の新しい材料力学を創っていきたいと考えています。さいごになりますが、拙い文章にお付き合いいただきありがとうございました。



図7 研究室のメンバーと

参考文献

1. Electron-beam enhanced creep deformation of amorphous silicon nano-cantilever, H. Hirakata, K. Konishi, T. Kondo, K. Minoshima, *Journal of Applied Physics*, Vol. 126 (2019), 105102, <https://doi.org/10.1063/1.5116663>
2. Role of plasticity on interface crack initiation at free edge and its propagation in nanostructures, H. Hirakata, Y. Takahashi, D. V. Truong, T. Kitamura, *International Journal of Fracture*, Vol. 145 (2007), 261, <https://doi.org/10.1007/s10704-007-9079-0>
3. Effects of film thickness on critical crack tip opening displacement in single-crystalline and polycrystalline submicron Cu films, H. Hirakata, T. Yoshida, T. Kondo, K. Minoshima, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.159 (2016), 98, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.03.031>
4. The effect of thickness on the steady-state creep properties of freestanding aluminum nano-films, H. Hirakata, N. Fukuhara, S. Ajioka, A. Yonezu, M. Sakihara, K. Minoshima, *Acta Materialia*, Vol. 60 (2012), 4438, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.04.036>
5. Vacuum effects on fatigue crack growth in submicrometre-thick freestanding copper films, T. Kondo, A. Shin, M. Sakihara, H. Hirakata, K. Minoshima, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol.42 (2019), 1118, <https://doi.org/10.1111/ffe.12976>
6. Electron engineering of metallic multiferroic polarons in epitaxial BaTiO₃, T. Xu, T. Shimada, Y. Araki, M. Mori, G. Fujimoto, J. Wang, T.-Y. Zhang, T. Kitamura, *npj Computational Materials*, Vol. 5 (2019), 23, <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0163-6>
7. Ferrotoroidic polarons in antiferrodistortive SrTiO₃, T. Shimada, Y. Ichiki, G. Fujimoto, T. Xu, J. Wang, H. Hirakata, *Physical Review B*, Vol. 101 (2020), 214101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.214101>
8. Electron-beam irradiation alters bond strength in zinc oxide single crystal, H. Hirakata, K. Sano, T. Shimada, *Applied Physics Letters*, Vol. 116 (2020), 111902, <https://doi.org/10.1063/5.0002103>