

## MEMSスケールでの材料破壊 破壊挙動に及ぼすサイズ効果

熊本大学大学院自然科学研究科マテリアル工学専攻 教授 高島 和希

数年前からMEMSで使用される微小材料の機械的性質評価に関連した研究を行うようになってから、MEMSの世界に足の先を少しだけつけるようになりました。このような、微小スケール材料の機械的性質評価に関連した発表をしますと、「サイズ効果はどうなるのですか」という質問を必ず受けます。サイズ効果は、材料の寸法が小さくなったとき、バルク材料に比べて材料特性が変化することの一般的な総称として使用されていますが、特に、私たちのように機械的性質を主として行ってきた人たちにとっては、機械的な特性がどのように変わるのかという点に興味を湧くようです。

一般に脆性材料（ガラスやセラミックスなどのように脆い材料）の場合、サイズが小さくなると強度が上昇すると言われています。この現象は、材料中に存在する欠陥の存在確率と関連づけて説明がなされてきました。すなわち、材料の寸法が小さくなると、材料に含まれる欠陥の数が減少するために、破壊の起点が減少し、そのために強度が上昇するというものです。しかしながら、MEMS材料のように、寸法が $\mu\text{m}$ のオーダーになると、これ以外にもいろいろサイズ効果が現れてきます。

これらのサイズ効果は、intrinsic（内生的）な効果とextrinsic（外生的）な効果に分けることができます。intrinsicな効果は、寸法が小さくなることによって、材料の変形機構などが変わり、その結果として機械的性質が変わるものを言います。一方、extrinsicな効果は、先に述べた欠陥のように外因的な要素によって機械的な性質が変わることを言います。特に、MEMS材料では、ナノサイズの欠陥が含まれていても、それが応力集中部になり、機械的性質を大きく変えてしまう可能性があります。MEMSに使用される材料の場合、製造プロセスによって機械的性質が変化するのは、欠陥の形状ならびにその存在割合がプロセスに依存するためのextrinsicなサイズ効果と言えます。しかしながら、一般的にはこれら両者の効果が混在するために、機械的性質に及ぼすサイズ効果はきわめて複雑なものになっています。

ところで、機械的性質に限らずサイズ効果が現れ始める寸法のことを「特性長さ（Characteristic Length）」と呼んでいます。電磁気的な性質や量子的な効果が関与する場合には、特性長さがnmのオーダーのものが多いのですが、機械的性質の中には、特性長さがMEMSのサイズである $\mu\text{m}$ となるものがあります。例えば、延性材料（多くの金属材料のように、破壊までに大きな塑性変形を示す材料）の引張試験の場合、 $\mu\text{m}$ のサイズまでは材料強度が寸法にほとんど依存しないことが実験的に示されています。しかしながら、「曲げ」あるいは「ねじり」のように、応力勾配や歪勾配が発生する場合には、材料の寸法が小さくなると強度が増加するサイズ効果を示すことが、実験的・理論的に示されています。特に、金属材料

の場合、材料の種類によって違いはありますが、特性長さが $\mu\text{m}$ のオーダーになりますので、カンチレバーやヒンジなどのように曲げ、ねじり応力が作用する部材に金属を利用したMEMSデバイスの場合、このサイズ効果は重要なものとなります。

ところで、信頼性、耐久性に優れたMEMSデバイスの設計・開発のためには、微小寸法材料の破壊特性を精度良く評価することがきわめて重要です。これに関連したサイズ効果の一つの例を紹介します。材料に均一な力がかかっているときに、キズやき裂が存在すると、その先端部では応力が集中しますが、このとき、き裂先端部分の応力が降伏応力を越えると、塑性変形を起こします。この塑性変形を起こしている領域のサイズ（破壊の場合に特性長さに関連したパラメータ）が、リガメント長さ（き裂先端から、その先の自由表面までの長さ）に比べてきわめて小さいと脆性破壊を起こしますが、そのサイズが大きくなると、材料の破壊形態が脆性破壊から延性破壊に遷移するサイズ効果が現れます。延性材料では、この場合の特性長さはmm以上のオーダーですので、サイズが $\mu\text{m}$ のオーダーになっても同じく延性破壊形態のままです。しかしながら、脆性材料の場合、サイズによって破壊形態が遷移する可能性があります。私たちのグループでは、Fe-3%Si合金の単結晶（マクロサイズでは劈開（脆性）破壊を起こすが、特性長さが数 $10\mu\text{m}$ のオーダーになる材料）を使って、マクロからマイクロサイズまでの破壊挙動を調べてみました。その結果、マクロサイズでは劈開破壊を起こすのに対して、マイクロサイズでは延性破壊へと挙動が変わることを実験的に見出すことができました（図1）。

MEMSの場合、高性能化を目指すためには、シリコン系の材料だけでなく、金属、セラミックス、高分子など多くの材料の適用が必要とされます。また、シリコンやセラミックスはマクロサイズでは脆性破壊を起こすものが多いため、私どもが示した破壊に及ぼす寸法効果の結果は、信頼性、耐久性を確保したMEMSデバイスの設計を行う場合にきわめて重要になると考えられます。

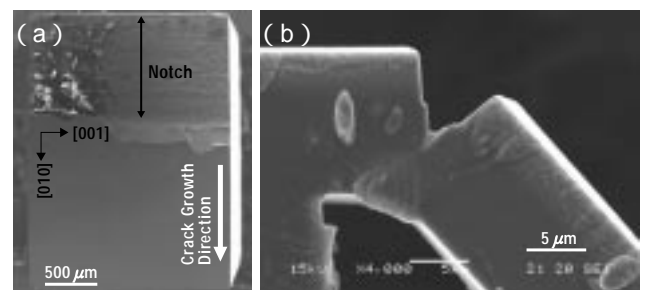


図1 Fe-3%Si合金単結晶の(a)マクロサイズ試験片と(b)マイクロサイズ試験片における破壊挙動の変化。マクロサイズでは劈開（脆性）破壊を起こすが、マイクロサイズでは延性破壊となる。このように同じ材料でも、材料の寸法が微小になると破壊挙動・形態が異なるようになる。