

## マイクロ構造物の界面強度評価

高橋 可昌\*

### Evaluation of Interfacial Strength in Micro-scale Structures

Yoshimasa TAKAHASHI

#### 1. はじめに

界面 (interface) とは、異なる物性を持つ材料どうしを接合した境界部分を指す。特に界面と自由表面が交差する部位は界面端 (interface edge) と呼ばれ、変形能力の不釣り合いが原因となって著しい力の集中 (正確には応力集中という) が生じる場合がある<sup>1) 2)</sup>。このため、界面端は破壊 (界面剥離) の起点になりやすい。我々の身の回りには、界面端を持つ様々なスケールの構造物が存在する。小さな方に目を向けると、近年、携帯端末にセンサーとして組み込まれることが多い微細電気機械デバイス (MEMS) が一つの典型例である。MEMSには、ミクロン ( $10^{-6}\text{m}$ ;  $\mu\text{m}$ ) オーダーの寸法を持つ多数の構造物が基板上に作り込まれており、界面剥離による不良が発生する場合もある。構造的に信頼できる (=壊れない) MEMSを設計するためには、界面端からの破壊に対する「強さ (強度)」を試験によってあらかじめ把握しておく必要がある。しかし、肉眼では見ることもできない小さな構造物の界面強度をどうやって測るのか?

本トピックスでは、界面端を持つ微小な構造物 (試験片) の作製法、電子顕微鏡と小型の負荷装置を組み合わせた新しい試験方法、および強度の考え方について概説する。

#### 2. 試験方法

図1に試験片の作製方法を示す<sup>3) 4)</sup>。まず、シリコン (Si) ウェハ上に複数の薄膜 (銅: Cu、窒化ケイ素: SiN、カーボン: C) をあらかじめ成膜した材

料を用意した。この材料から、一辺が約 $10\mu\text{m}$ のブロックを集束イオンビーム (Focused Ion Beam: FIB) によって切り出した。FIBとは、電界加速した液体金属 (ガリウム) のイオンビームをミクロンオーダー以下の目標領域に照射して材料をスパッタリングする (削り飛ばす) 加工方法である。次に、先端径が約 $5\mu\text{m}$ のガラスプローブを用いてブロックを引き上げ、先端を細くした金ワイヤーの先端まで搬送し、接着固定した。その後、ブロックの一部をFIBによってz方向の厚さ $d$ が $0.5\mu\text{m}$ 程度になるまで薄く加工した。最後に側面からy方向の高さ $h$ が $1\mu\text{m}$ 程度となるように加工した。

図2に作製した試験片の電子顕微鏡像を示す。試験片は、片持ちはり (カンチレバー) 形状であり、先端から順にC、SiN、Cu、Siで構成されている。

図3に考案した界面剥離試験法を示す<sup>4)</sup>。試験片の寸法が極めて小さいため、電子顕微鏡で拡大像を見ながら負荷試験を行う必要がある。そこで、透過型電子顕微鏡 (TEM) の試料ホルダーに小型の力学負荷機構を組み込んだ装置を使用する。試験片を高倍率で観察しながらピエゾアクチュエータにより移動させ、負荷チップの先端に押し付けることで負荷を与える。印加荷重 $P$ は、負荷チップ背後に取り付けた超微小荷重センサーにより測定する。負荷チップによりカンチレバーのSiN層上面に荷重を負荷すると、曲げモーメントが最大となる固定端近傍に位置する界面端 (Si/Cu界面端) には特に大きな引張応力が負荷され、ここから剥離破壊を生じさせることが可能である。

#### 3. 試験結果

図4は、(a) 負荷開始時、(b) 最大荷重点および(c)

原稿受付 平成24年9月5日

\*システム理工学部 機械工学科 助教

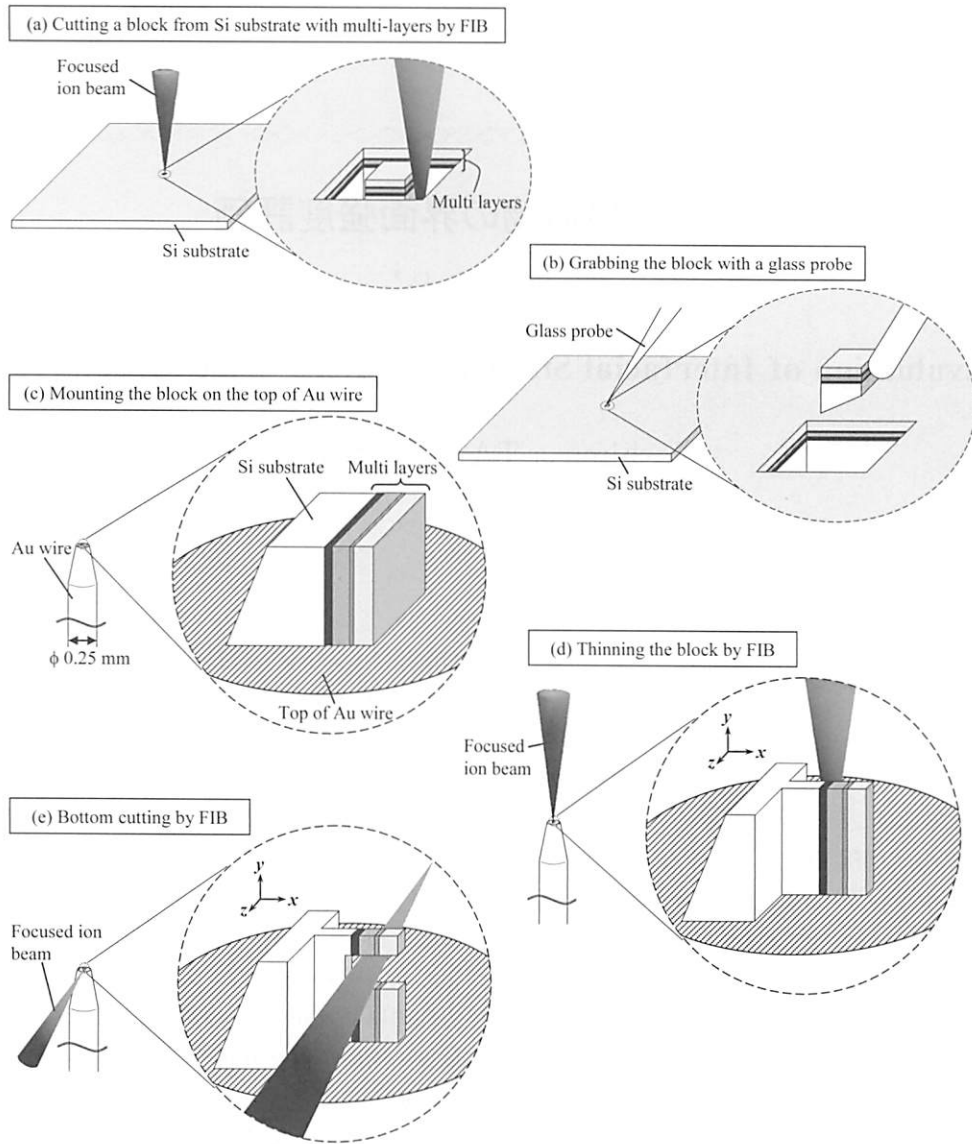


図1 試験片の作製方法<sup>3) 4)</sup>

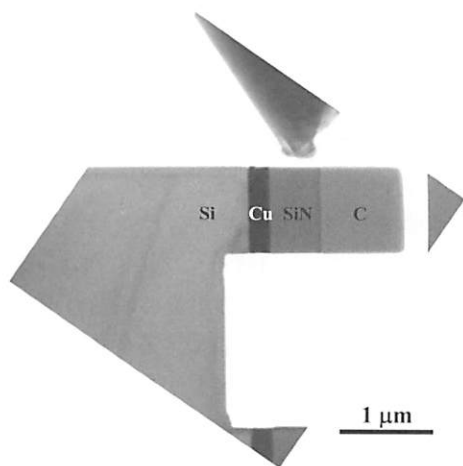


図2 試験片の透過型電子顕微鏡像

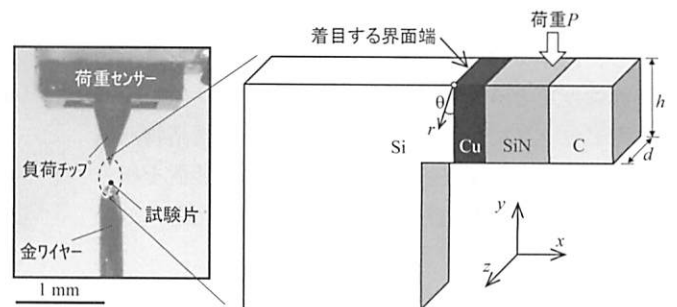


図3 試験片の負荷方法 (模式図)

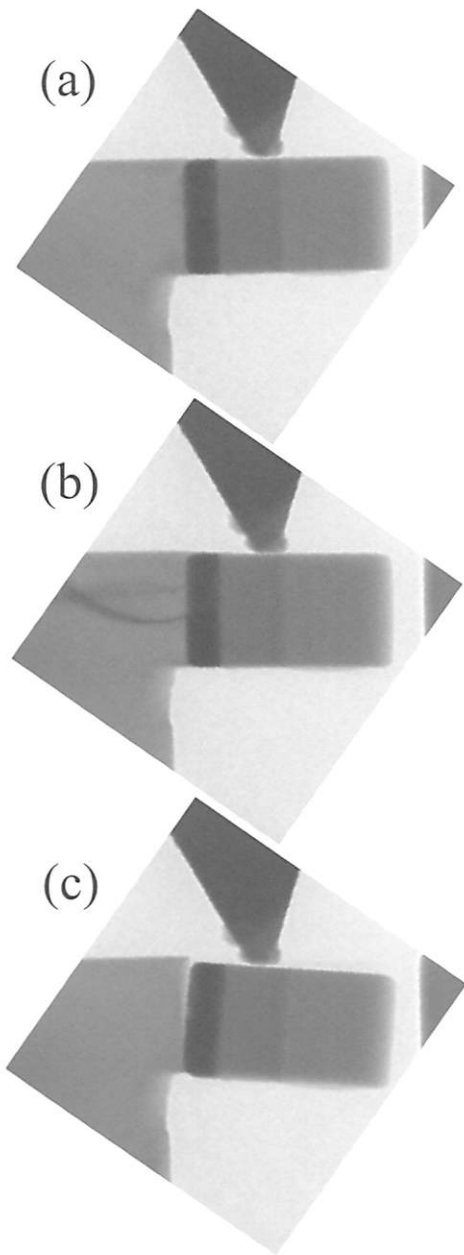
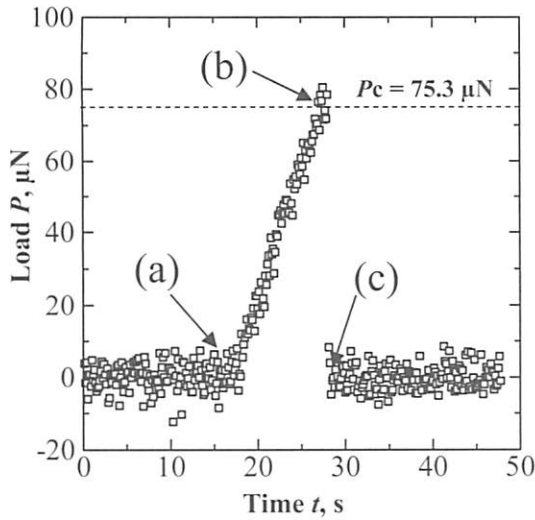


図4 マイクロカンチレバー界面剥離試験

剥離破壊直後における試験片のその場観察 TEM 像と荷重変化を示す。荷重開始後、荷重  $P$  は単調に増加し、(b) において最大値 ( $P_c = 75.3 \mu\text{N}$ ) に到達する。この間、試験片にはたわみが見られるが、Si/Cu 界面端から亀裂は発生しておらず、また荷重が集中するチップ接触部においても損傷は認められない。(b) の直後、荷重  $P$  は急速に 0 まで低下し、(c) に示すように Si/Cu 界面に沿って亀裂が発生し、瞬時に界面を進展した。本試験により、微小な構造物の界面端からの剥離亀裂発生現象を捉えるとともに、亀裂発生荷重 ( $P_c$ ) を測定することができた。

#### 4. 界面上の応力分布 (強度評価)

試験結果を基に、剥離亀裂が発生した時点の応力分布を有限要素法 (FEM) により解析した。FEM モデルの形状や寸法は試験片の電子顕微鏡像を基に決め、SiN 層上の負荷チップの接触位置に亀裂発生荷重  $P_c$  を集中荷重として与えた。各材料は全て線形弾性体であると仮定した。

図5は、Si/Cu 界面上の応力分布の例を示す。なお、ここでは亀裂発生点である Si/Cu 界面端を原点とする  $(r, \theta)$  極座標系を考え (図3参照)、界面に垂直な応力成分  $\sigma_{00}$  の分布を示している。図中に示すように、界面端に向かって  $\sigma_{00}$  の値は大きくなっており、界面端近傍の 10nm 程度の領域では、ほぼ一定値となっている。ここでは詳細を省略するが、寸法 ( $d$  や  $h$ ) が異なる他の試験片の場合と比較した結果、この領域の  $\sigma_{00}$  値は比較的近い値となった。すなわち、Si/Cu 界面端からの亀裂発生に対する抵抗値 (強度値) は、界

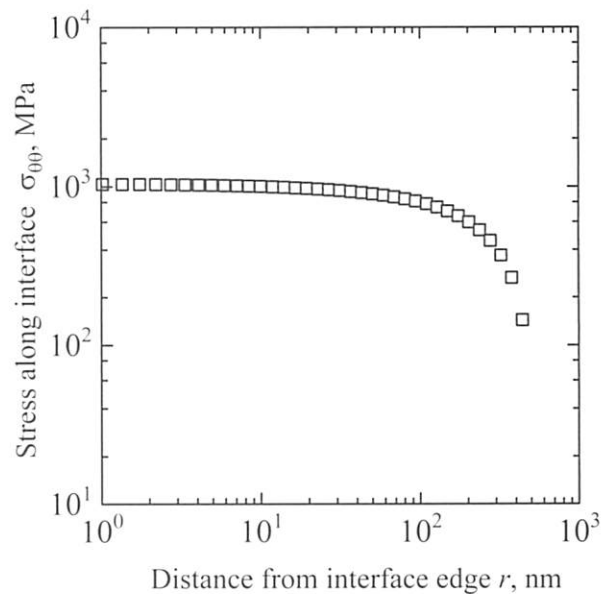


図5 Si/Cu 界面に沿った剥離破壊時の垂直応力分布

面端近傍の  $\sigma_{00}$  によって表すことが可能であり、その値（平均値）は  $\sigma_{00c} = 894\text{MPa}$  と評価された（添え字 c は critical value（限界値）の意味）。

#### 5. おわりに

ミクロンスケールの試験片を用いた界面端からの剥離破壊試験方法および強度解析例を紹介した。本手法は、今後他の材料を組み合わせた界面やより小さな構造物への応用も考えられる。

#### 参考文献

- 1) D.B. Bogy, J. Appl. Mech, **35** (1968), pp460-466
- 2) D.B. Bogy, J. Appl. Mech, **38** (1971), pp377-386
- 3) Y. Takahashi, H. HIRAKATA and T. Kitamura, Thin Solid Films, **516** (2008), pp. 1925-1930
- 4) 平方寛之, 高橋可昌, 新見耕二, Do van Truong, 北村隆行, 材料, **55**, (2006), pp. 1073-1080