

ナノインデントを用いた材料評価事例 ～軟質材料編～

株式会社東陽テクニカ
ライフサイエンス&マテリアルズ
岩田 敏一
2020年12月10日(木)

- ／ 背景とナノインデントの概要
- ／ スマートフォン用材料の様々な測定例
 - 》 押し込み硬度・ヤング率・回復性測定
 - 》 破壊靱性
 - 》 スクラッチ
 - 》 粘着力測定
 - 》 動的粘弾性試験

背景とナノインデンターの概要

- ◆ 機械的性質・・・ 材料が持つ力学的特性の総称であり、
材料の種類の違いにより外力に対してどの程度の耐久性を持つかの諸性質です。

材料開発や設計の観点から材料加工のしやすさや工業製品の耐久性の尺度として非常に重要な指標となります。

代表的な機械的性質とその評価試験機

機械的性質	測定試験機例
強度	引張試験機
硬さ	ビッカース硬度計、ショア硬さ、デュロメータ
脆さ	シャルピー衝撃試験
クリープ特性	引張クリープ試験機
耐摩耗性	トライボメータ、スクラッチ試験器

- 硬度（硬さ）は、材料の強度・機械特性と相関があることから、工業分野では新規材料の開発や性能・コストを考慮した構成部品の信頼性を推定する材料として認識されています。

➡ 材料の強度・機械特性の**指標**として、硬度測定は幅広く利用されています

硬度 = 材料が支える平均圧力（荷重／面積）

- 材料の変形のしにくさや、物体の傷つきにくさ
- 硬さは定義に従って試験して得られる工業量

縦弾性係数（ヤング率）測定のご役割

ヤング率は物質に固有の機械的性質を示す**物性値**であり、応力の計算時に用いられるパラメータの一つ

ヤング率 = ひずみと応力関係の係数

- 弾性変形のしにくさを表す
- ヤング率は物性値

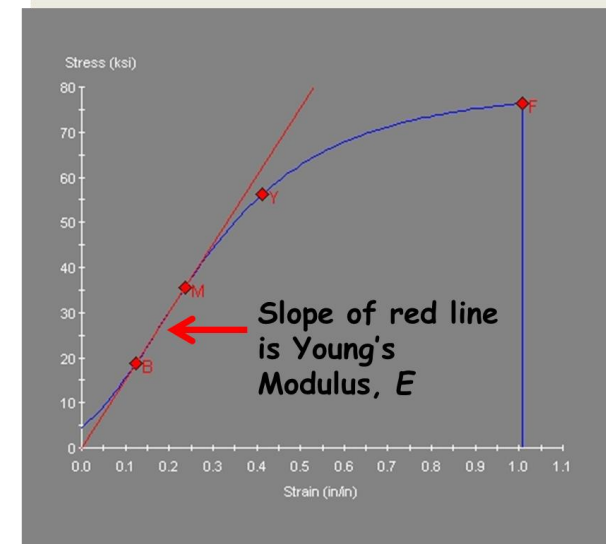
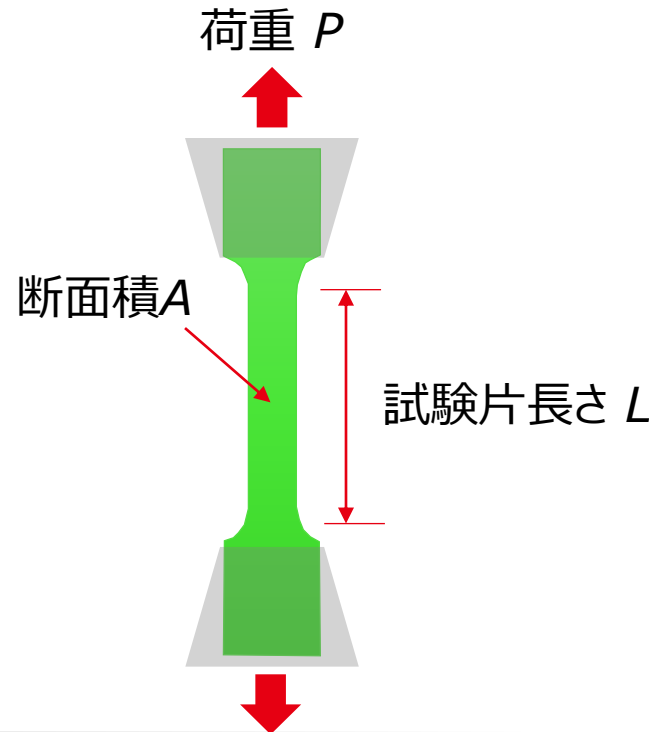
$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\text{応力 } \sigma = \frac{P}{A}$$

$$\text{ひずみ } \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

典型的な材料のヤング率	ヤング率(GPa)
ゴム	0.01~0.1
ポリカーボネート	2.3
アルミニウム	70.3
銅	129.8
アルミナ	~400

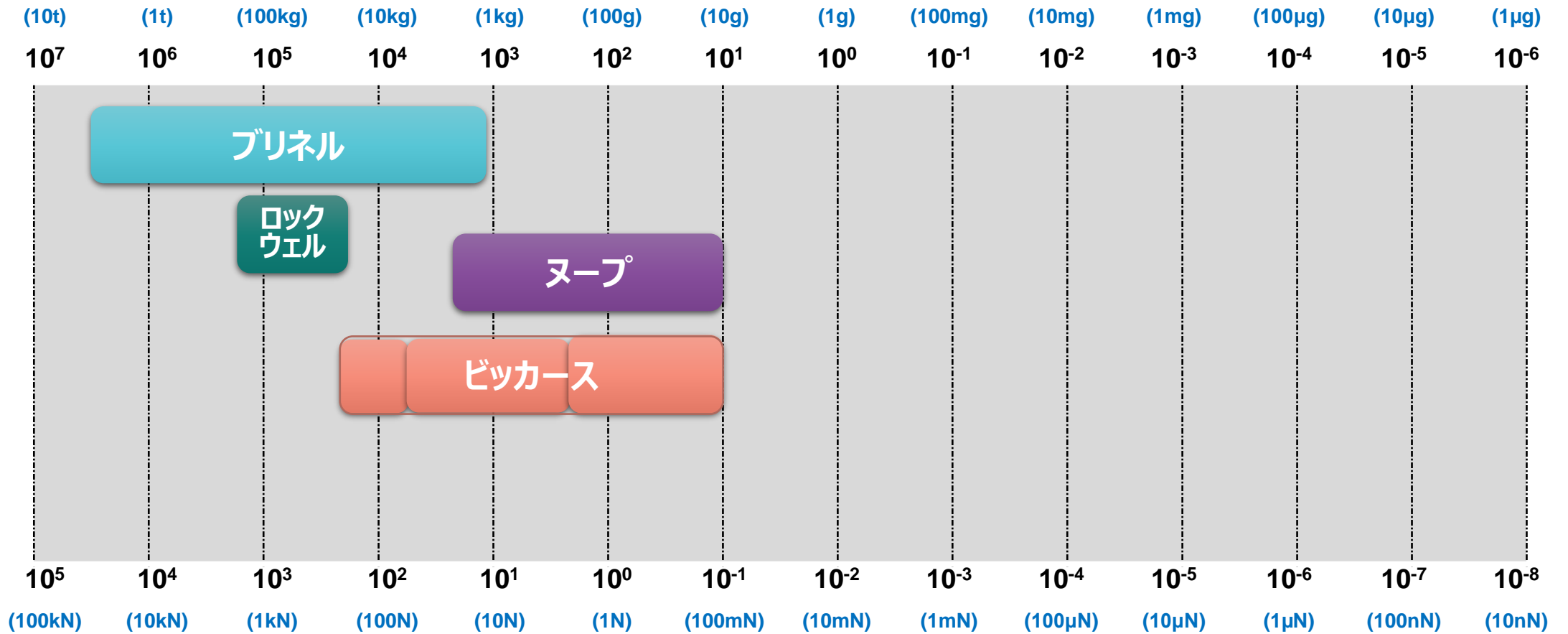
(出典)<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A4%E3%83%B3%E3%82%B0%E7%8E%87>



硬度の種類	規格	試験内容	利点
ブリネル (1900年)	JIS Z 2243 ISO 6506	球圧子を試験片に押し込み、圧痕の寸法を計測	圧痕は大きく、広範囲の平均的硬さが求められる
ショア (1907年)	JIS Z 2246	ハンマーを試験面に対して鉛直に落下させた際の跳ね返り高さを計測	安価、小型軽量で可搬型
ロックウェル (1919年)	JIS Z 2245 ISO 6508	円錐または球圧子を試験片に押し込み、変位を計測	自動計測に対応
ビッカース (1925年)	JIS Z 2244 ISO 6507	正四角錐圧子を試験片に押し込み、圧痕の寸法を計測	均一な材料では荷重とは無関係に一定の硬さで求められる
ヌープ (1939年)	JIS Z 2251 ISO 4545	断面が菱形の圧子を試験片に押し込み、圧痕計測の寸法を計測	ビッカースよりも薄膜の硬さに敏感

主な押し込み硬度測定荷重レンジ

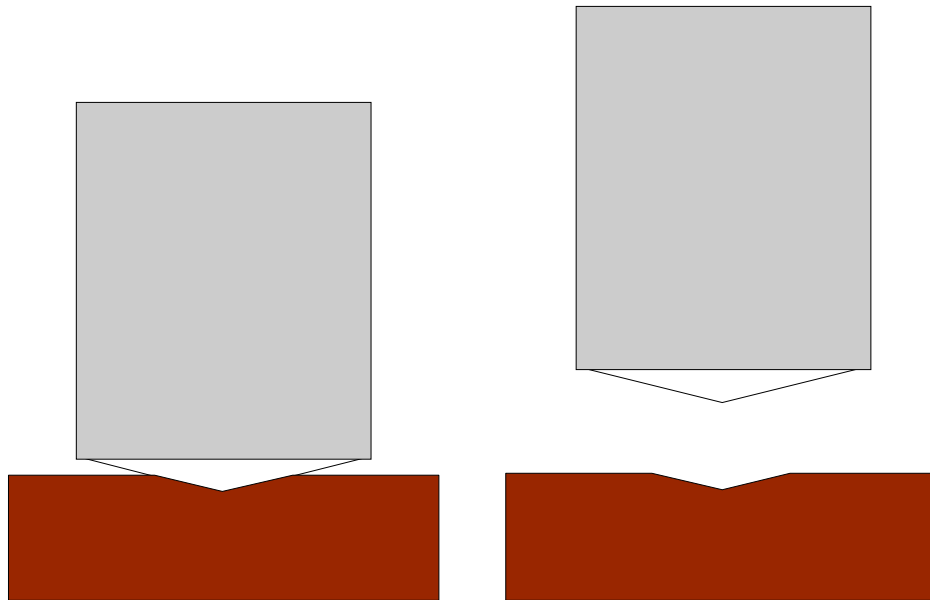
“はかる”技術で未来を創る



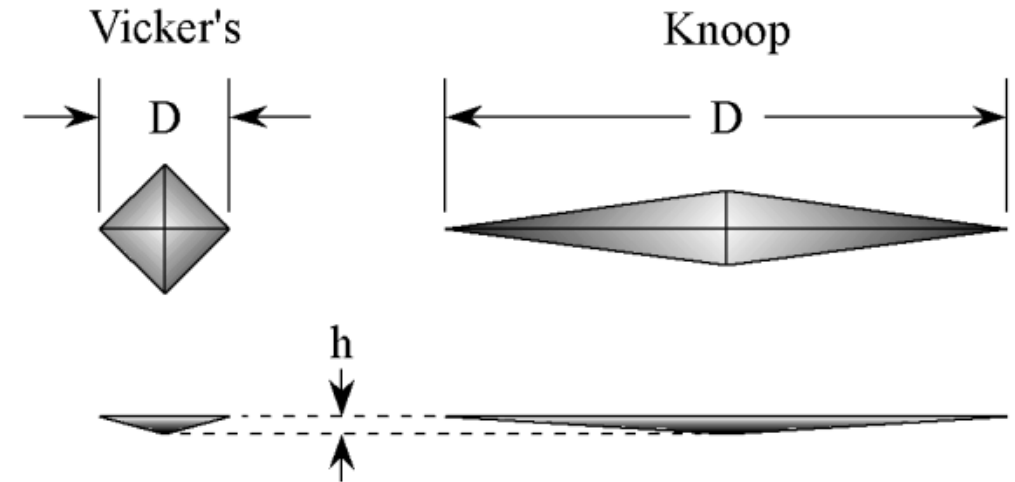
代表的な硬度測定法 (ビッカース・ヌープ)

一定荷重で圧子を
試料に押し込む

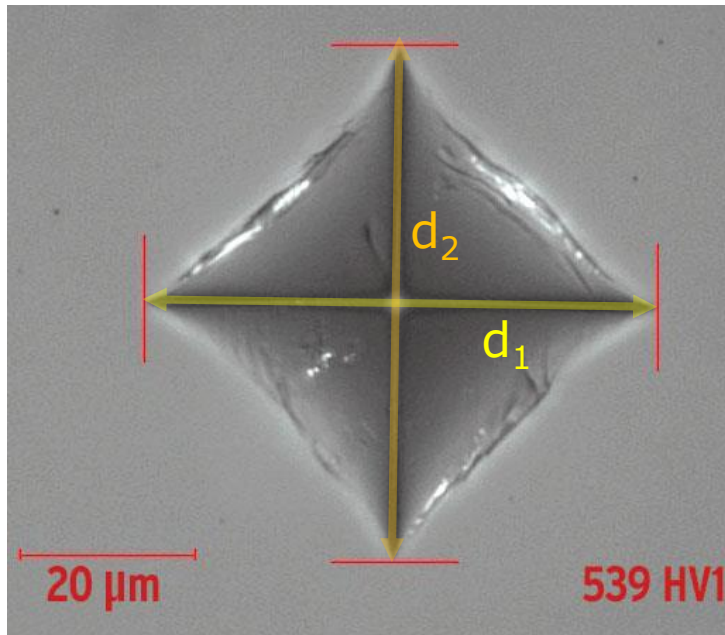
押し込み後の
圧痕を観察



光学顕微鏡で圧痕の大きさを計測する



- 規格: JIS Z 2244、ISO6507で規格化
- 圧痕の対角線を測定 (対角線の長さは20μm以上が望ましい。)

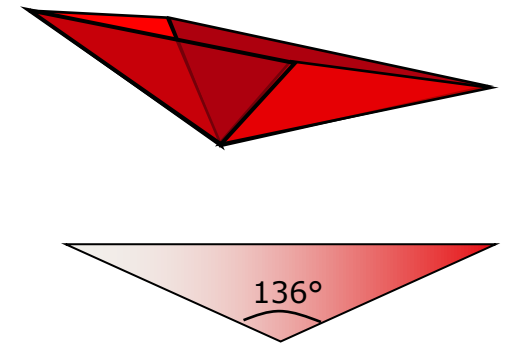


Vickers impression in a ceramic, ASTM
http://www.astm.org/SNEWS/MJ_2010/e0405_mj10.html

$$H_v = \frac{P}{A_s} = 1.8544 \times \frac{P}{d^2}$$

P : 荷重 [kgf]
 A_s : 接触面積(表面積) [mm²]
 d : 対角線の長さの平均値 [mm]

$$A_s = \frac{\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2}{2 \times \sin \frac{136^\circ}{2}} \sim \frac{\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2}{1.8544}$$



薄膜硬度測定における5倍則・10倍則

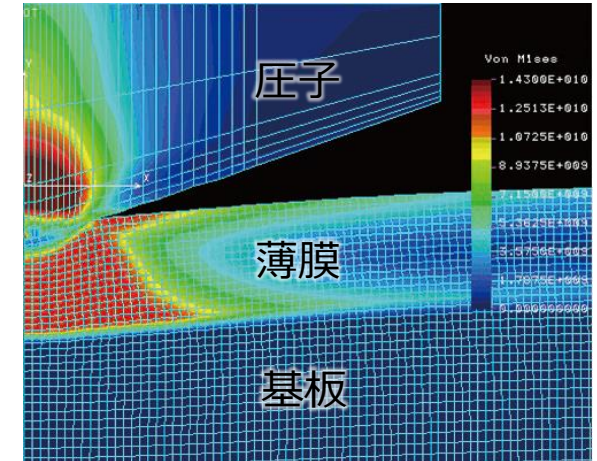
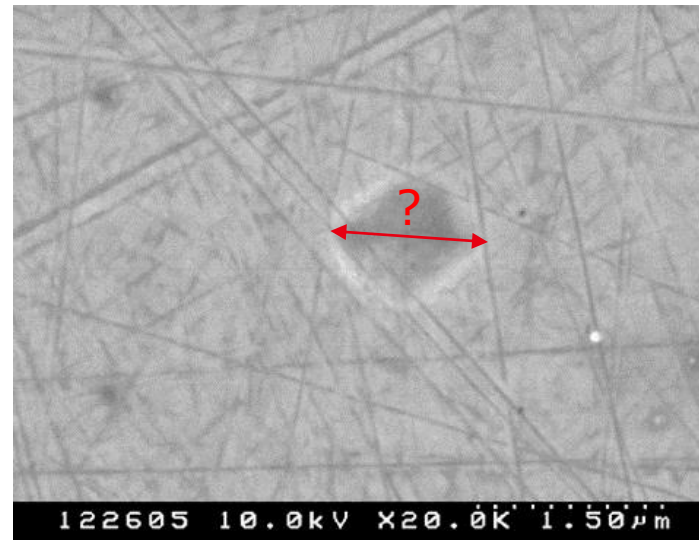
★ 5～10倍則 : 押し込み深さの5～10倍深いエリアまでの影響を受ける

⇒ 膜の硬度を測定するには膜厚の1/10程度の押し込み深さで評価すべき

※5～10倍則はあくまでも経験則。材料次第ではより下地の影響を受けやすい場合もある。

例) 膜厚1 μm の薄膜の場合、押し込み深さは100nm程度まででない、下地の影響を受けてしまう可能性が高い。

⇒ 圧痕はサブ μm のサイズになり
対角線の長さの計測は現実的ではない



軟らかい基板上的硬質薄膜に対し
押し込み試験を行った場合の有限要素解析例

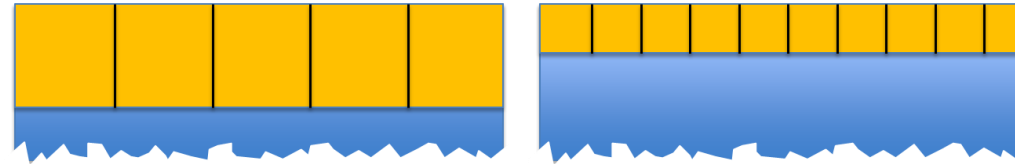
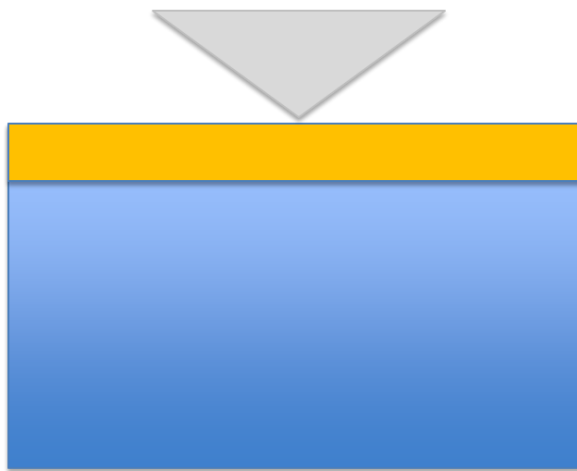
低荷重ビッカース試験時
圧痕の電子顕微鏡像

1. 試験荷重が大きい ⇒ 基材の影響を受けており、薄膜本来の機械特性を正確に測定できない。
2. 人による計測誤差が生じる ⇒ 顕微鏡の精度にも限界があり、測定誤差が生じやすい。
3. 弾性変形・塑性変形の切り分けがない ⇒ サンプルの弾性回復が考慮されていないため、
ゴムや高分子への対応が困難。

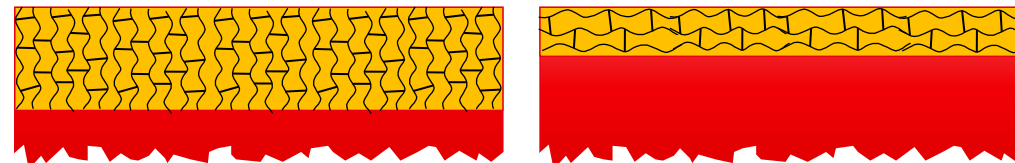
硬度測定をしたいサンプルはそのサイズにより手法に制限が生じる

たとえば・・・

金属の場合、厚みがかわるとグレインが小さくなる



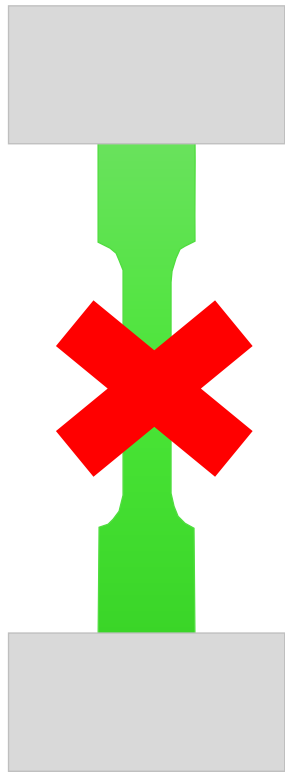
高分子の場合、鎖の状態が変わる



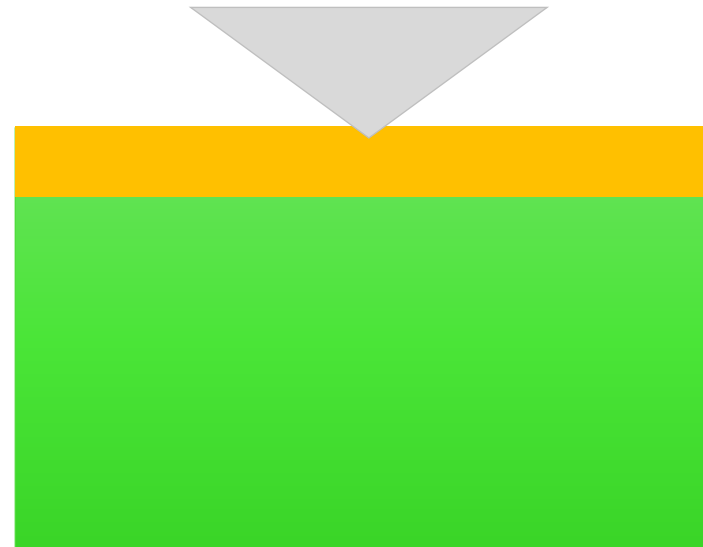
実際に使用するサイズで材料特性を評価することが非常に重要

なぜナノインデントで試験するのか？

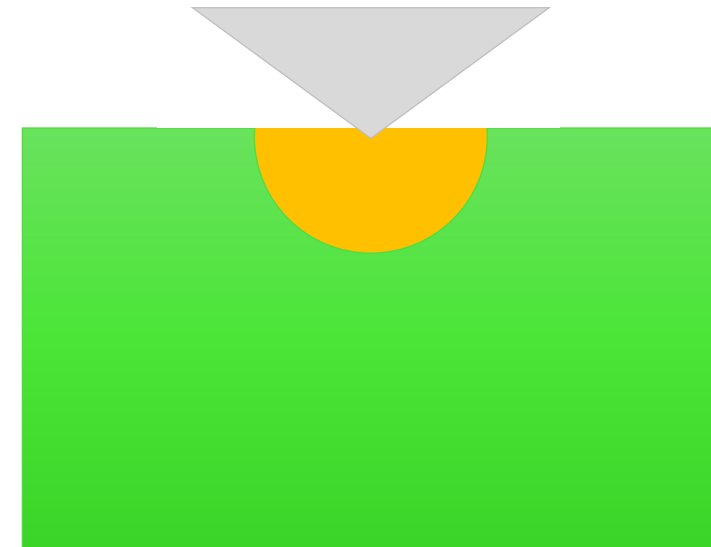
- 引張試験などでは困難な薄膜材料の評価や微小領域の硬度・ヤング率評価が可能
- 測定が容易かつ試験片を複数作製しなくてもN数をかせぐことができる



サンプル作製困難



薄膜・表面処理



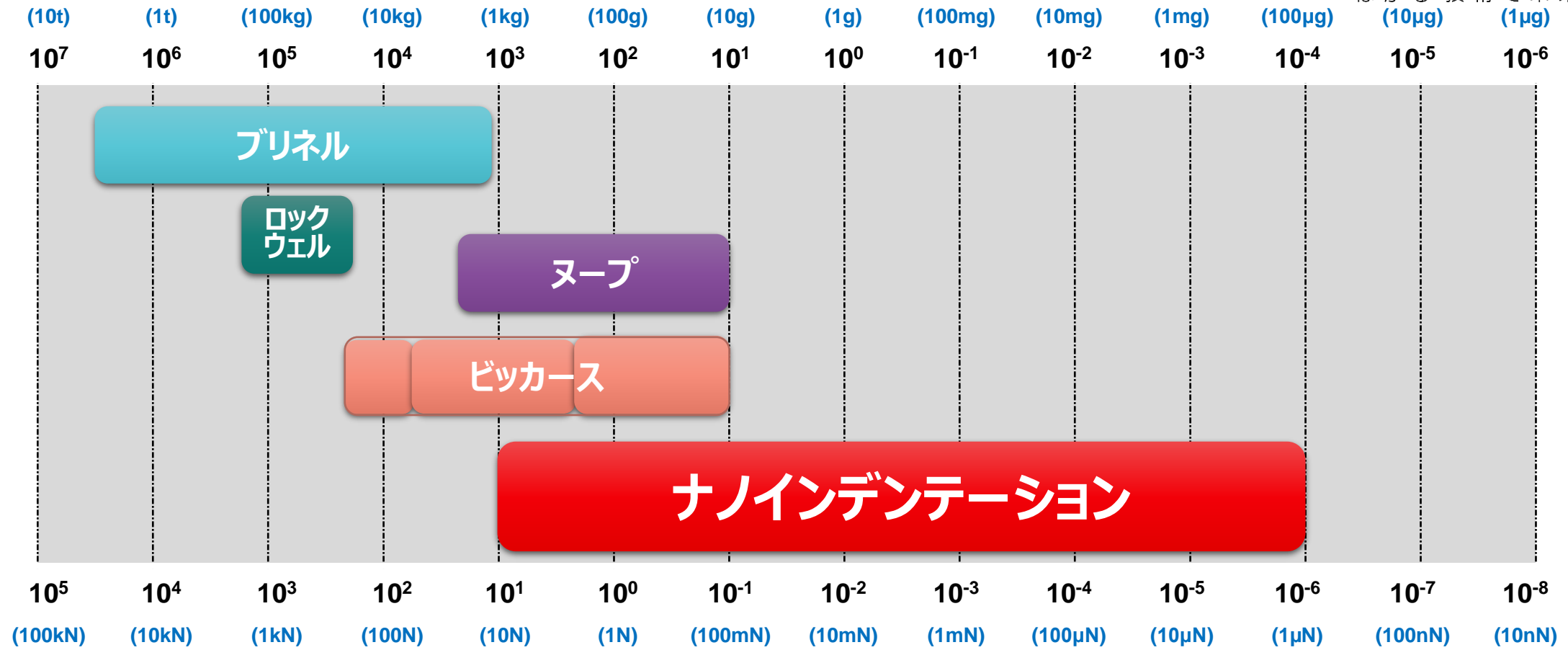
局所領域

伝統的な硬さ試験法とナノインデンテーション法

硬度の種類	規格	試験内容	利点
ブリネル (1900年)	JIS Z 2243 ISO 6506	球圧子を試験片に押し込み、圧痕の寸法を計測	圧痕は大きく、広範囲の平均的硬さが求められる
ショア (1907年)	JIS Z 2246	ハンマーを試験面に対して鉛直に落下させた際の跳ね返り高さを計測	安価、小型軽量で可搬型
ロックウェル (1919年)	JIS Z 2245 ISO 6508	円錐または球圧子を試験片に押し込み、変位を計測	自動計測に対応
ビッカース (1925年)	JIS Z 2244 ISO 6507	正四角錐圧子を試験片に押し込み、圧痕の寸法を計測	均一な材料では荷重とは無関係に一定の硬さで求められる
ヌープ (1939年)	JIS Z 2251 ISO 4545	断面が菱形の圧子を試験片に押し込み、圧痕計測の寸法を計測	ビッカースよりも薄膜の硬さに敏感

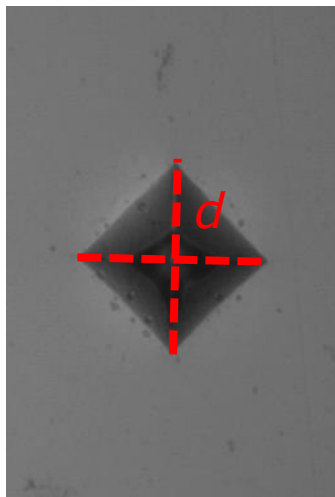
主な押し込み硬度測定 の 荷重レンジ

“はかる”技術で未来を創る

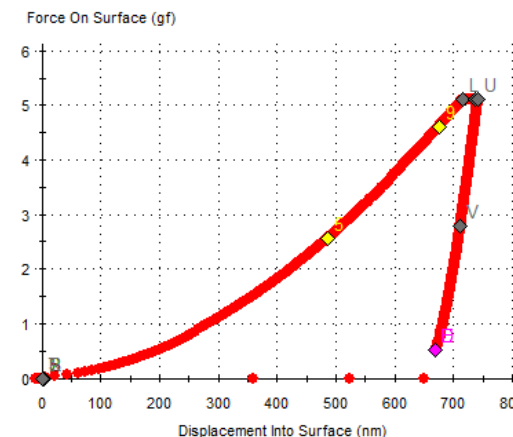


ビッカース硬度とナノインデンテーション硬度

	ビッカース	ナノインデンテーション
規格	JIS Z 2244、ISO 6507	JIS Z 2255、ISO 14577
圧子	ビッカース形四角圧子を常時使用	ビッカース形またはバーコビッチ形三角錐圧子を使用
定義	荷重と 表面 の接触面積の商として定義 $H_V = P / A_f$	荷重と 投影 接触面積の商として定義 $H_{IT} = P / A_p$
方法	面積は光学的に対角線を測定して計算	荷重-変位データから面積を計算
単位	kgf/mm ²	GPa (=10 ⁹ N/m ²)

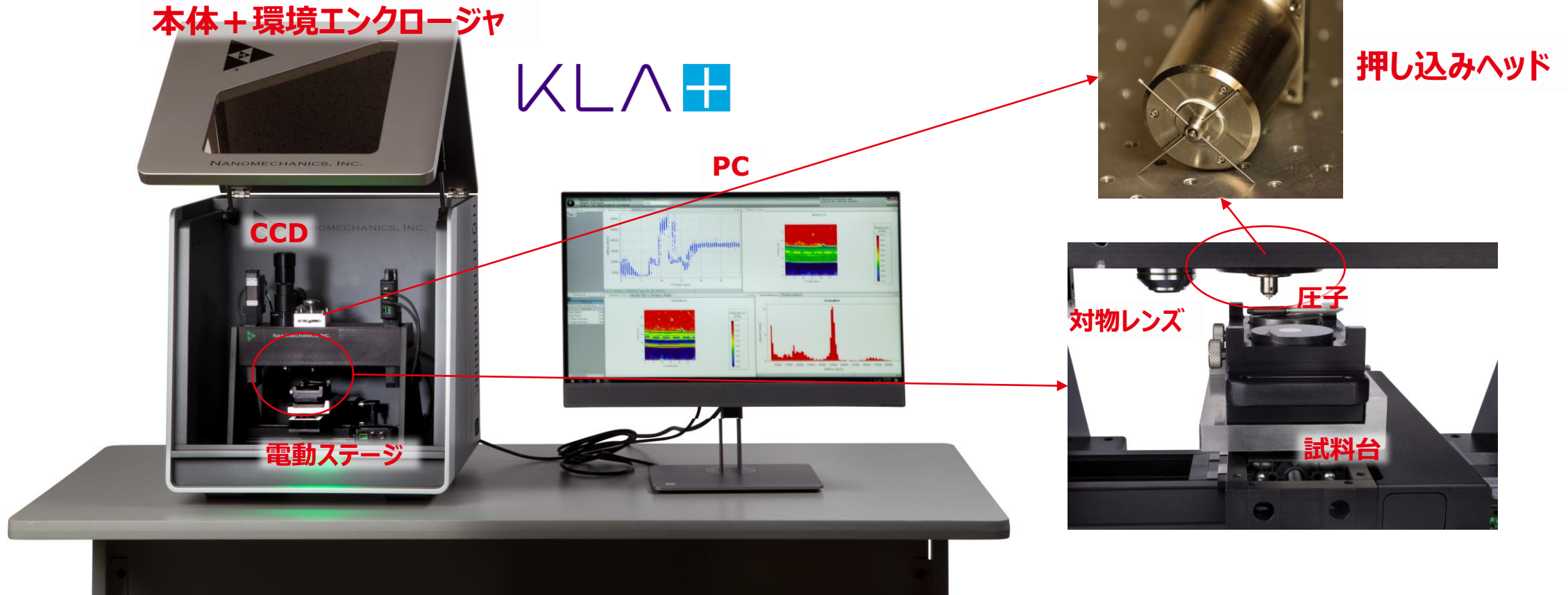


- ヒューマンエラーあり
- 自動測定不可
- $d \geq 20\mu\text{m}$ が望ましい

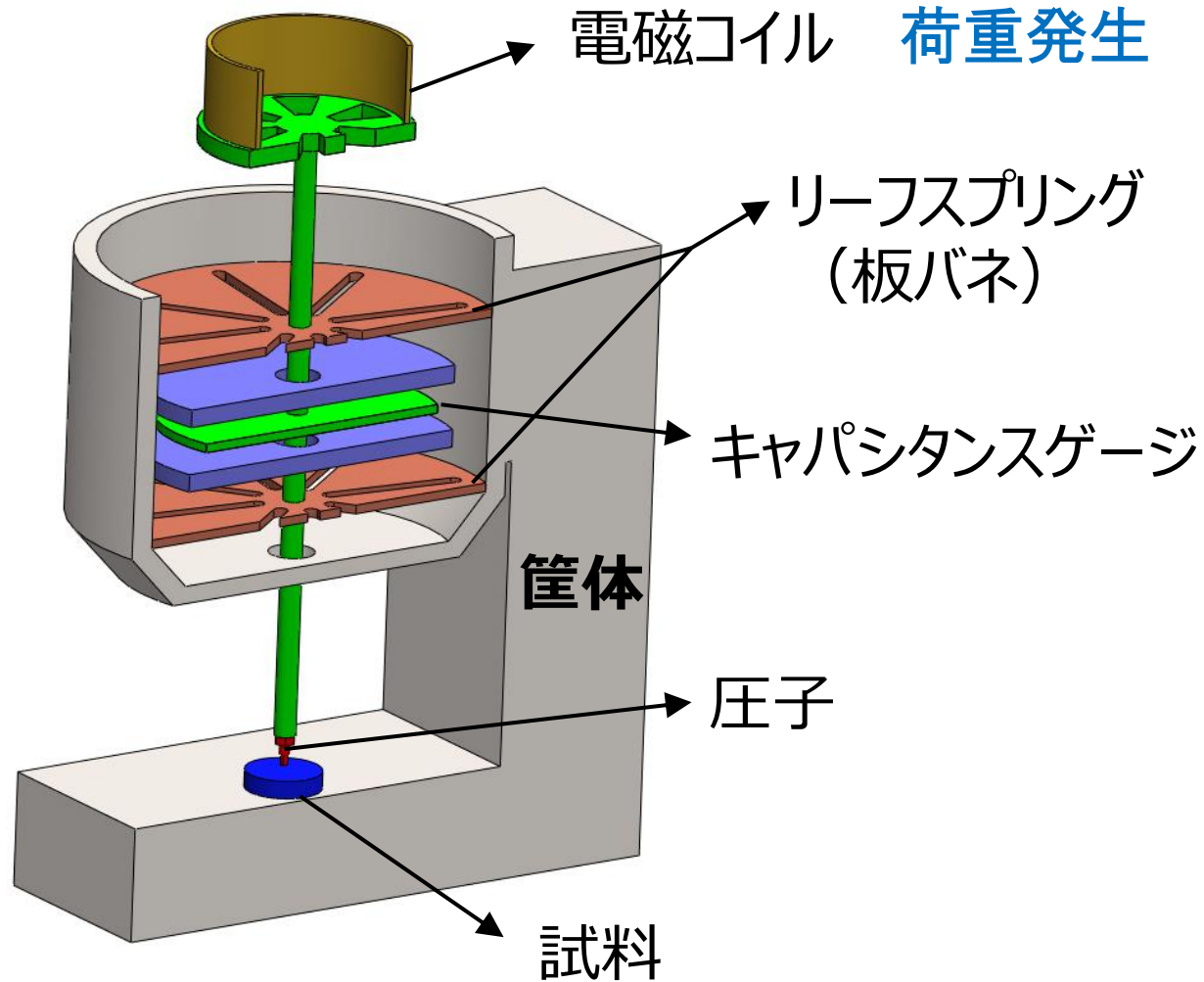


- ヒューマンエラーなし
- 自動測定可能
- 微小押し込み

ナノインデント装置の外観



KLA社製iMicroナノインデント装置



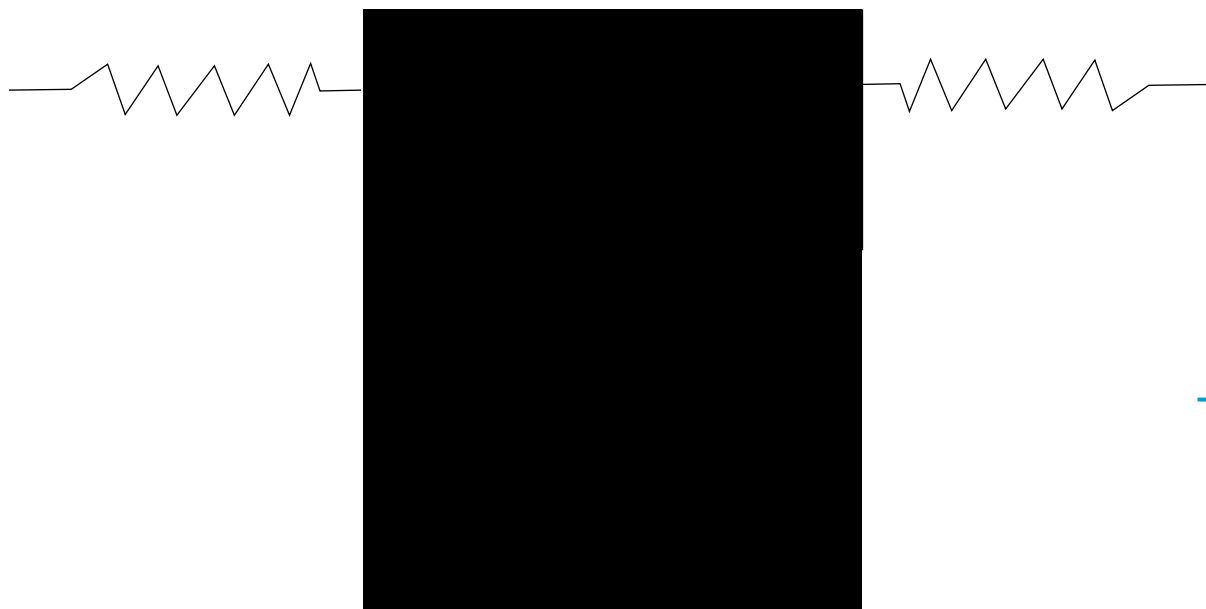
一軸動作

原則 1次元 (Z方向) にしか
動かない構造が重要

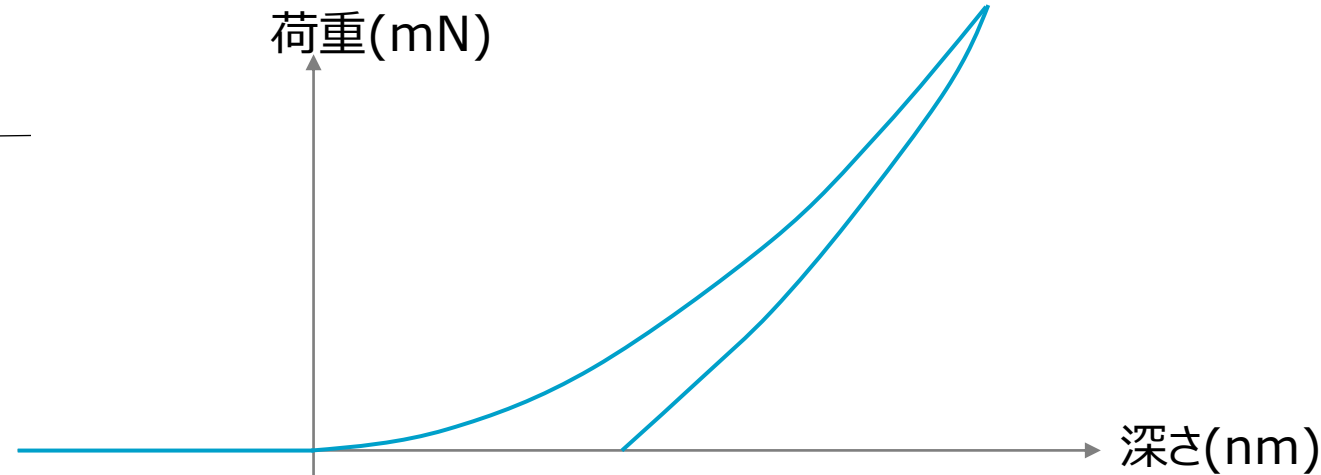
変位計測

準静的荷重除荷インデンテーション試験

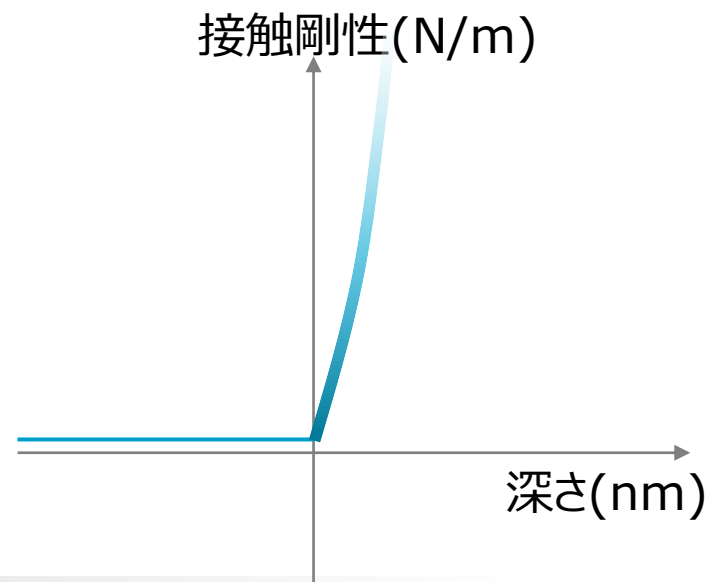
“はかる”技術で未来を創る



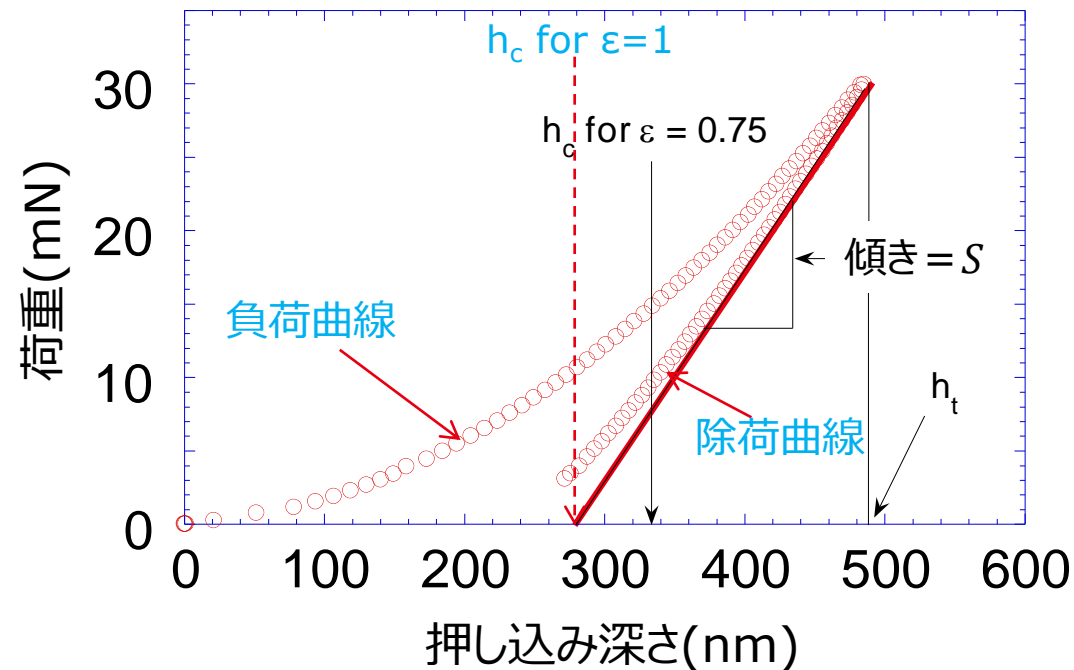
荷重(mN)



接触剛性(N/m)



- 装置によって計測される物理量(荷重と押し込み深さ)から、**計算のみ**で硬度を評価する手法。
- 荷重－変位曲線から接触剛性(スチフネス： S)と接触深さ(h_c)を求める。
- Dr. Warren Oliverらの提唱手法 (JMR Vol.7, No.6, June 1992参照)。
- 国際規格**ISO14577 計装化押し込み試験として標準化。



$$S = \left. \frac{dP}{dh} \right|_{P_{max}}$$

弾性/塑性変形物質の
典型的な荷重-変位曲線
(試料：熱溶融石英)

接触深さ(h_c)とは： 圧痕の弾性回復

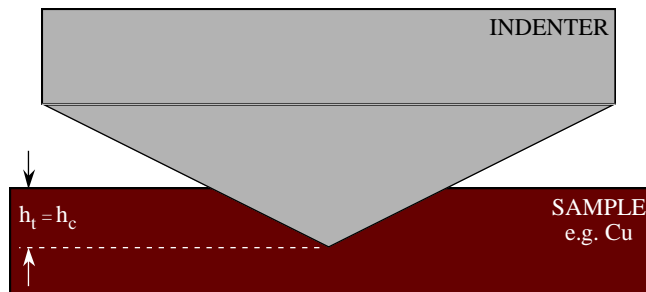
h_t : 計測される押し込み深さ

h_c : 接触深さ(荷重を支える領域)

塑性変形分が圧子と接触し、弾性変形分は接触しないと考える。

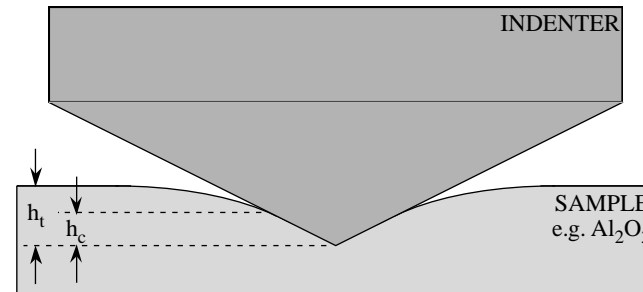
弾性変形がほとんど無い場合

$$h_t \cong h_c$$



弾性変形がある場合

$$h_t > h_c$$



荷重 - 除荷曲線から求められたスチフネス S より、接触深さ(h_c)は

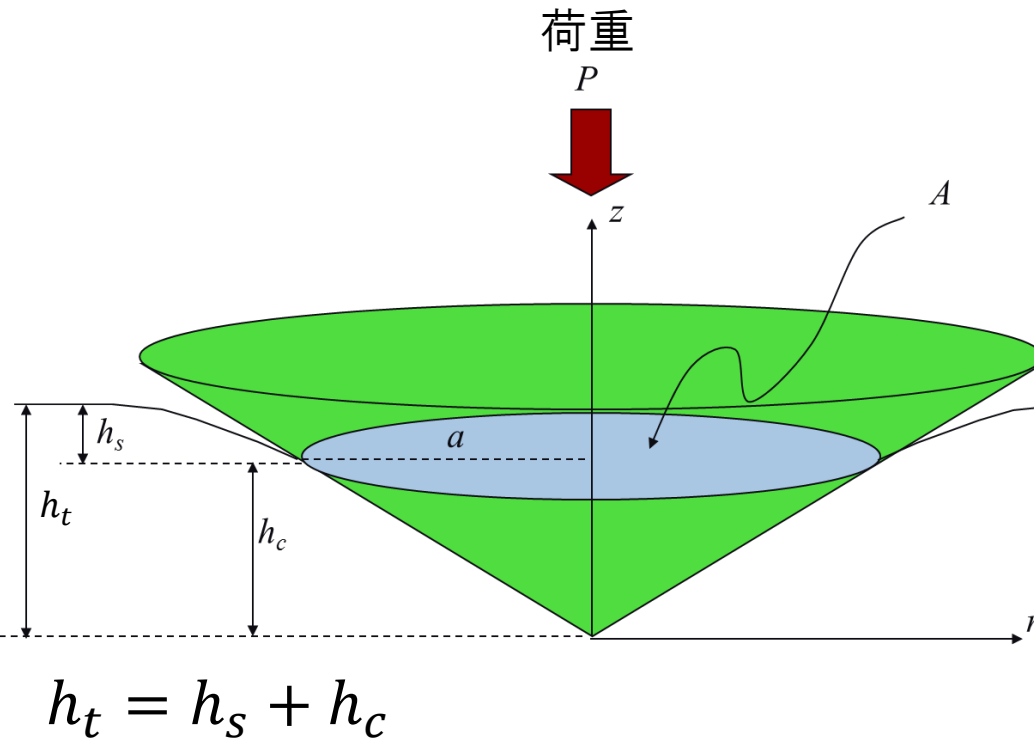
$$h_c = h_t - \varepsilon \frac{P}{S}$$

ε : 圧子形状に関する定数
弾性変形によって圧子周りの
試料が沈み込む割合
(バーコビッチ圧子は0.75)

接触投影面積 A は接触深さ h_c から算出

$$A = 24.56h_c^2$$

左記の計算式は幾何学的理想状態（先端が無限に鋭い）のバーコビッチ圧子の場合の面積関数。

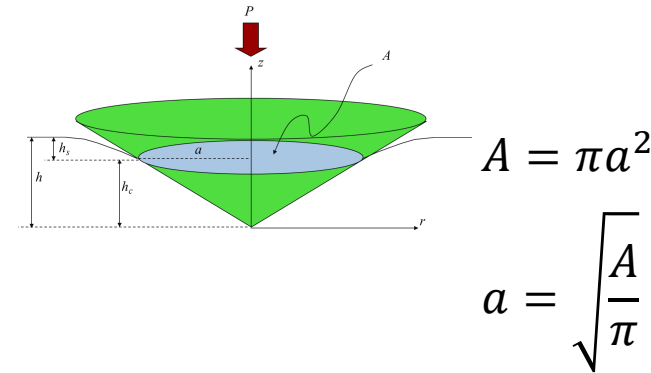


硬さと弾性率 (ヤング率)

インデンテーション硬さ H_{IT} は材料が耐える平均圧力

$$H_{IT} = \frac{P}{A}$$

(荷重)
(接触投影面積)



$$A = \pi a^2$$

$$a = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

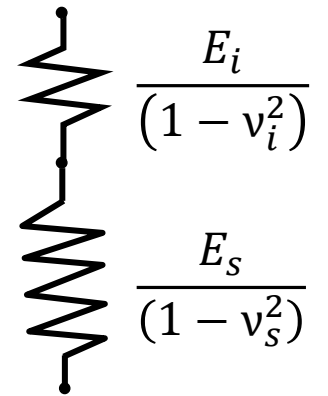
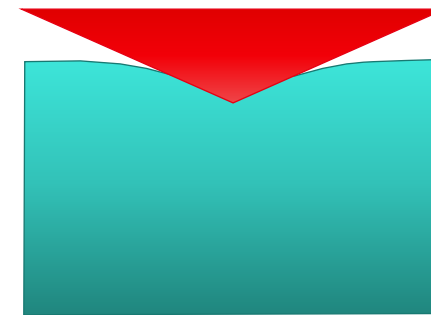
$$S = E_r \times 2a$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A}}$$

試料の弾性率 E_s は複合弾性率 E_r から算出

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A}$$

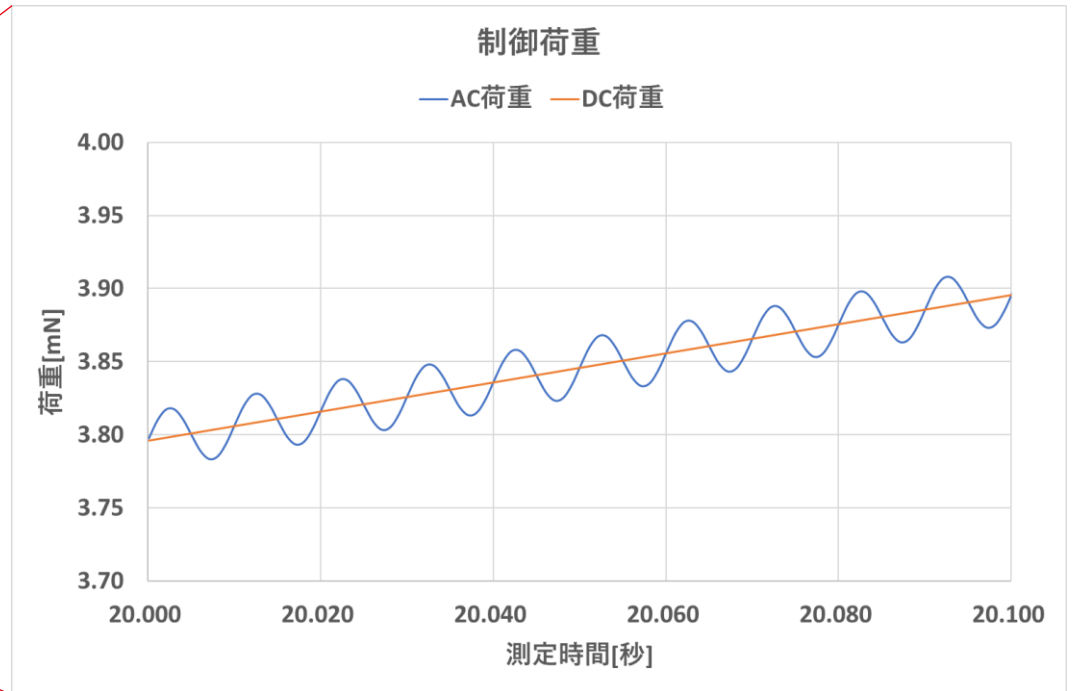
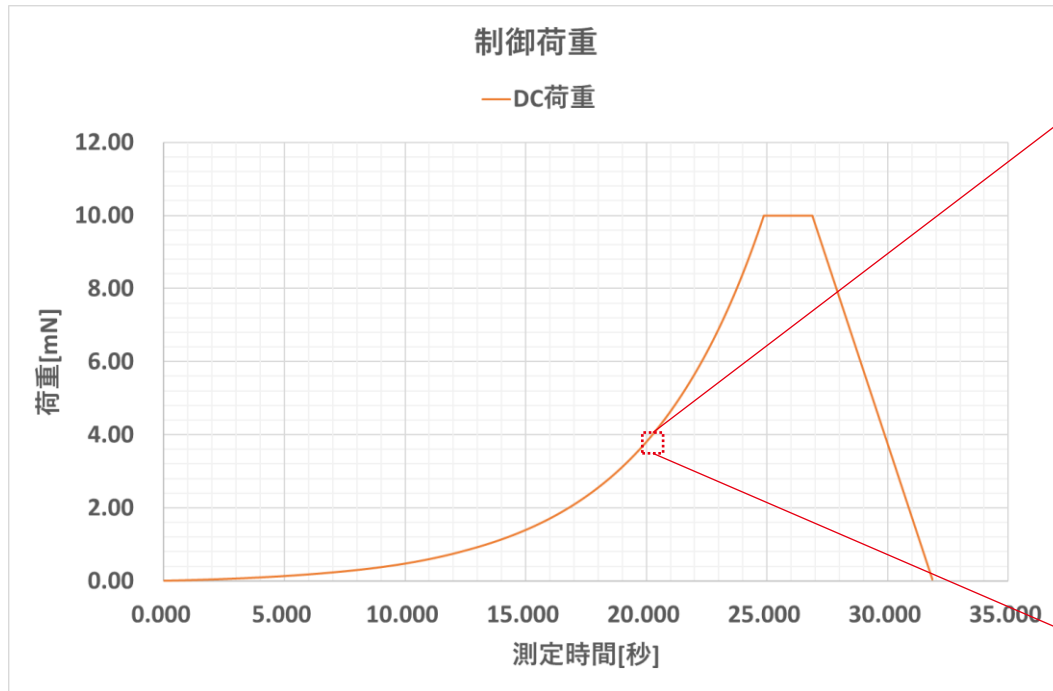
$$E_r = \left[\frac{(1 - \nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} \right]^{-1}$$



E_i : 圧子の弾性率, ν_i : 圧子のポアソン比, E_s : 試料の弾性率, ν_s : 試料のポアソン比
(ダイヤモンド: $\nu_i = 0.07$, $E_i = 1141\text{GPa}$)

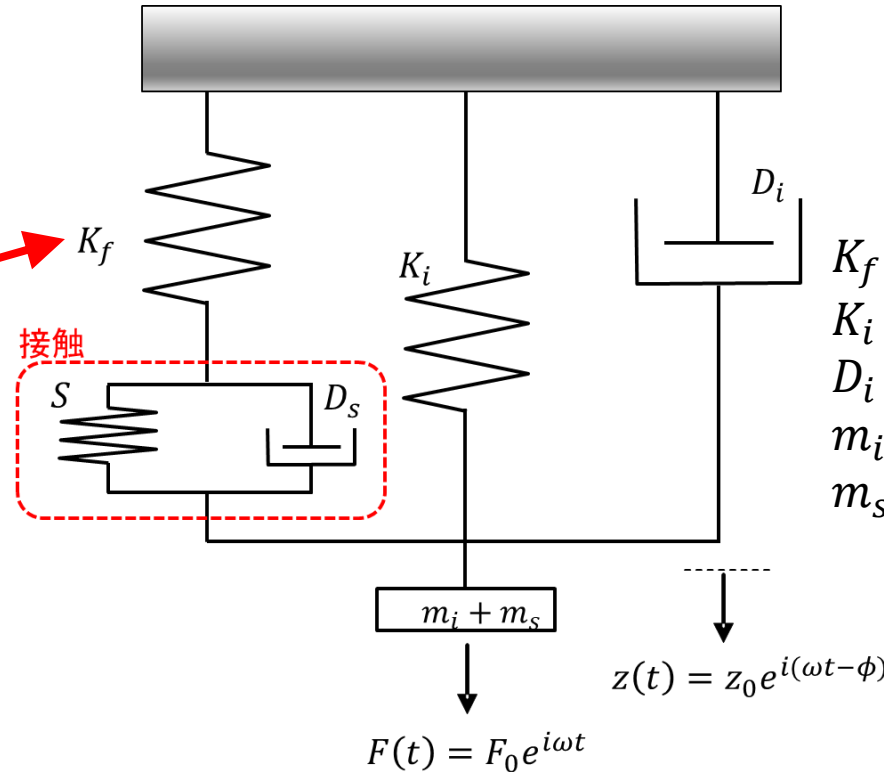
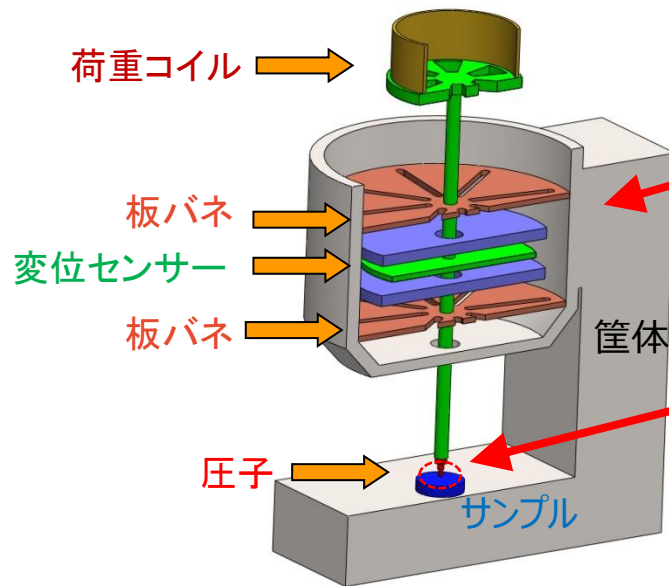
連続剛性測定法での荷重印加

準静的な試験荷重に微小AC荷重を重畳。AC荷重の応答から押し込み深さに対する接触剛性を連続的に算出。



連続剛性測定法(CSM)でのスチフネス算出

ナノインデンターの構造と力学モデル



- K_f : 筐体の剛性
- K_i : 板バネの剛性
- D_i : 変位センサーの減衰
- m_i : インデーター軸の質量
- m_s : サンプルの質量

サンプルの微小振動に対する応答（振幅と位相）を測定することで、常に接触剛性(S)を求めることが可能

$$S = \left[\frac{1}{\frac{F_0}{z_0} \cos \phi - (K_i - m\omega^2)} - \frac{1}{K_f} \right]^{-1}$$

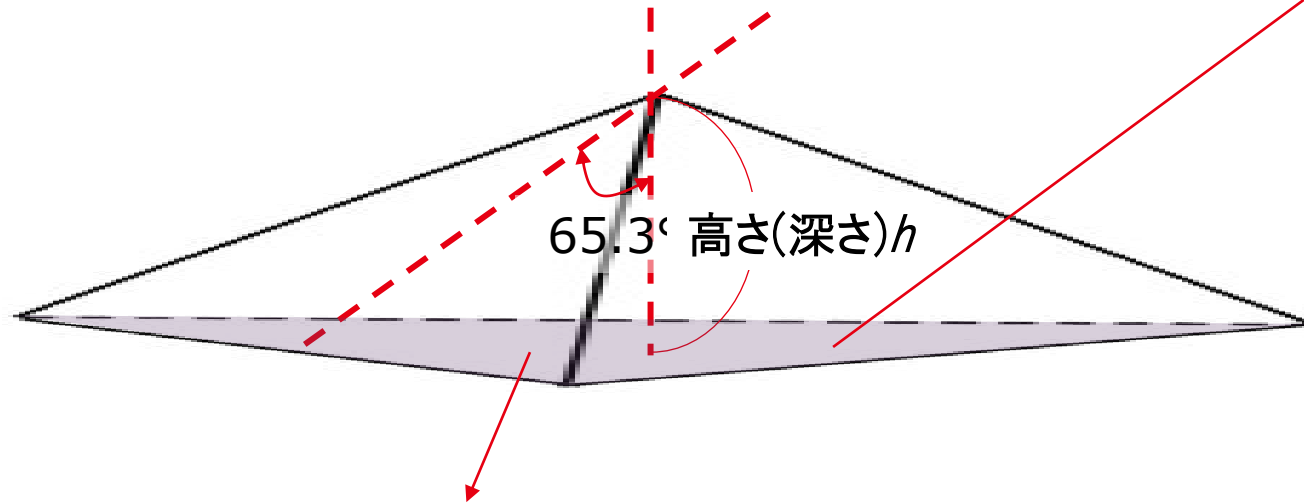
$$D_s \omega = \frac{F_0}{z_0} \sin \phi - D_i \omega$$

ナノインデントーで用いる標準圧子

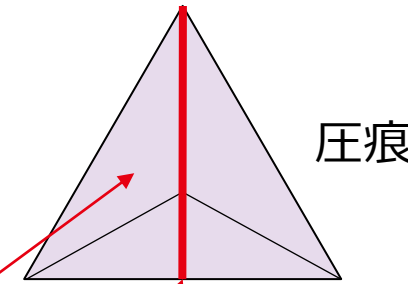
一般的にはダイヤモンドや超硬材料の圧子が使用されます。

バーコビッチ圧子(三角錐)

先端曲率半径：<20nm(ダイヤモンド新品時)



$$\begin{aligned} \text{面積} A &= 3\sqrt{3} (\tan 65.3^\circ)^2 \times h^2 \\ &\doteq 24.56 \times h^2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{一辺の長さ} &= 2\sqrt{3} (\tan 65.3^\circ) \times h \\ &\approx 7.53 \times h \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{三角形の高さ} &= \frac{2\sqrt{3} (\tan 65.3^\circ) \times h}{2} \times \frac{1.5}{\cos 30^\circ} \\ &= (\tan 65.3^\circ) \times 3h \approx 6.52 \times h \end{aligned}$$

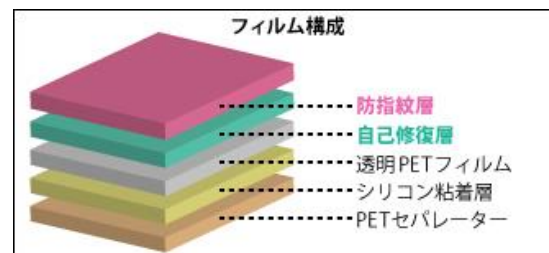
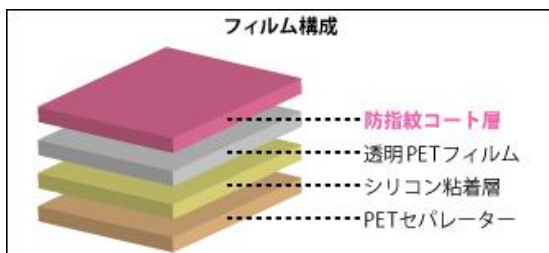
保護フィルムの測定例



- ／ 押し込み硬度・ヤング率・回復性測定
- ／ 破壊靱性
- ／ スクラッチ
- ／ 粘着力測定
- ／ 動的粘弾性試験

メーカー	表面機能	素材	裏面機能
A社	キズ防止(3H)	PET系	気泡消失
A社	キズ修復	?	気泡消失
R社	キズ防止(5H)	アクリル系	—
R社	キズ防止(5H)・耐衝撃	アクリル系	—
R社	キズ修復・高弾性	ウレタン系	高密着

※各サンプルは多層構造で複雑であるため、比較のためポリカーボネート板(500um厚)を追加で測定。



「アクリルコート」で傷や衝撃に強い。

アクリルコート
通常のフィルムの約2倍近い鉛筆硬度5Hを誇る、優れたコーティングです。

229g
180cm

「割れない」という安心感。
弊社鋼球落下テストでは229gの鉄球を180cmの高さから落としても割れませんでした。

硬度・ヤング率・回復性評価

- 破壊靱性
- スクラッチ
- 粘着力測定
- 動的粘弾性試験

使用装置

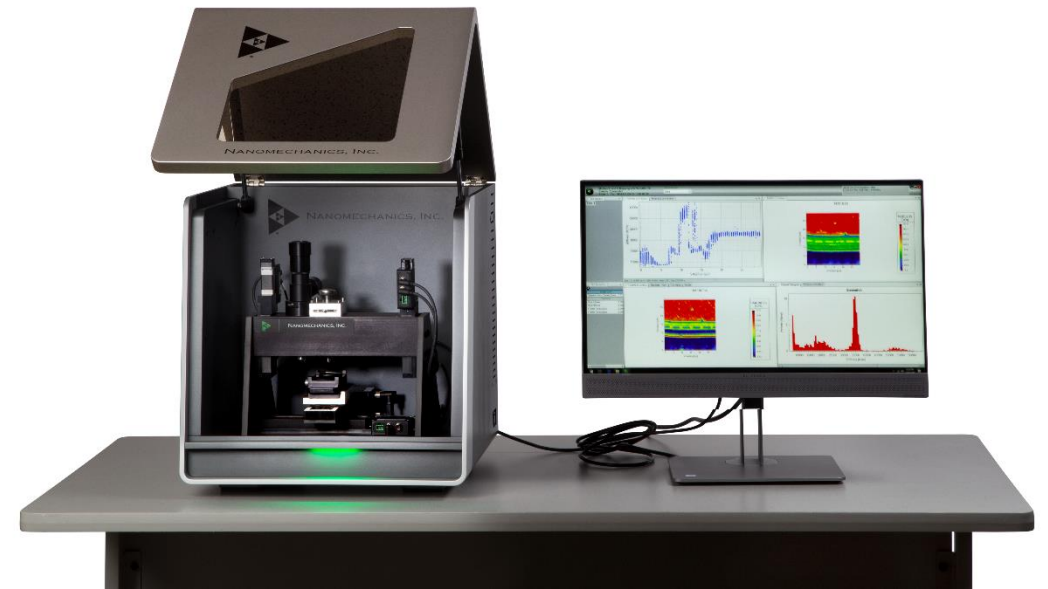
- › KLA社製iMicro型ナノインデントー
- › 高分解能 InForce50ヘッド
- › バーコビッチ圧子

測定モード

- › 連続剛性測定法(CSM/CSR)

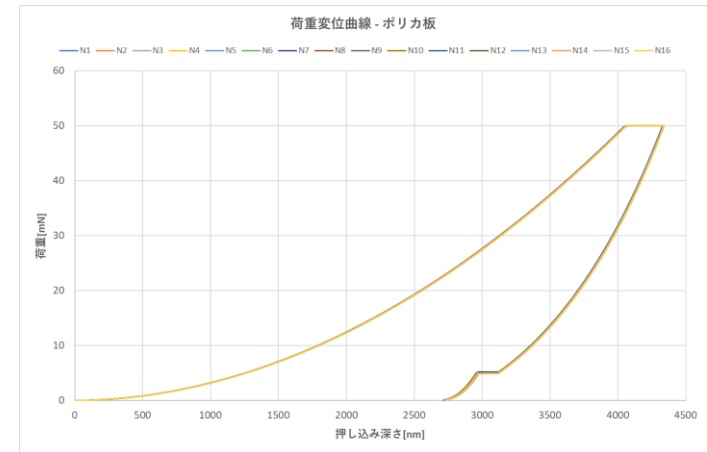
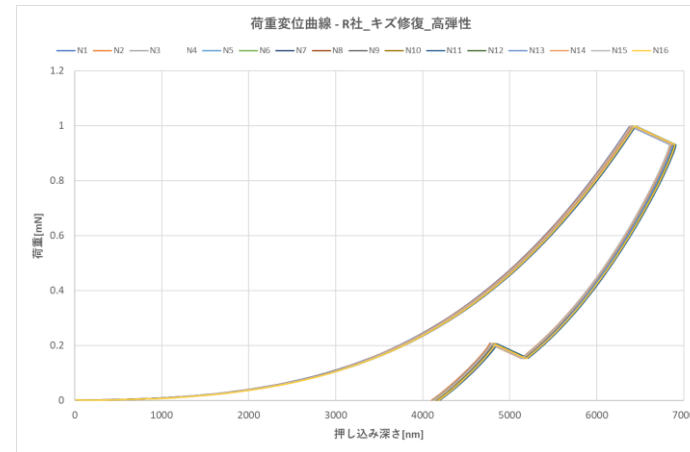
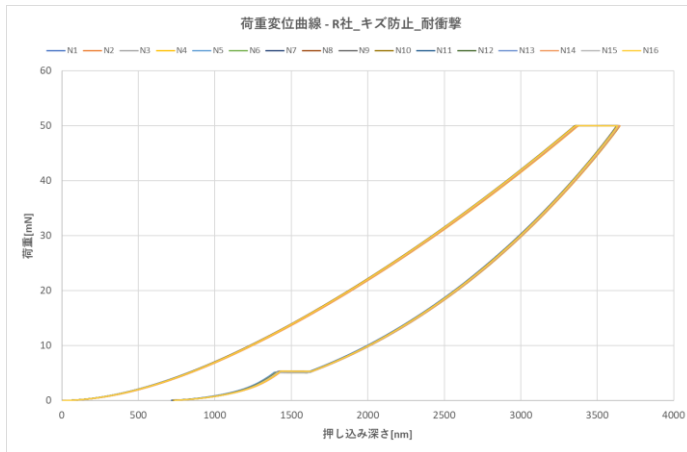
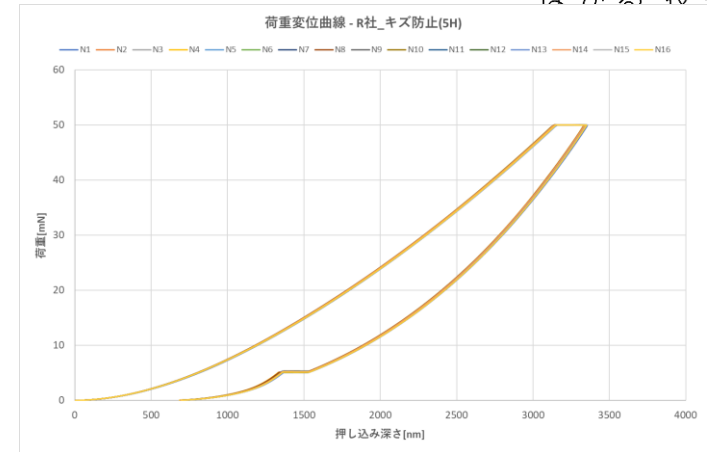
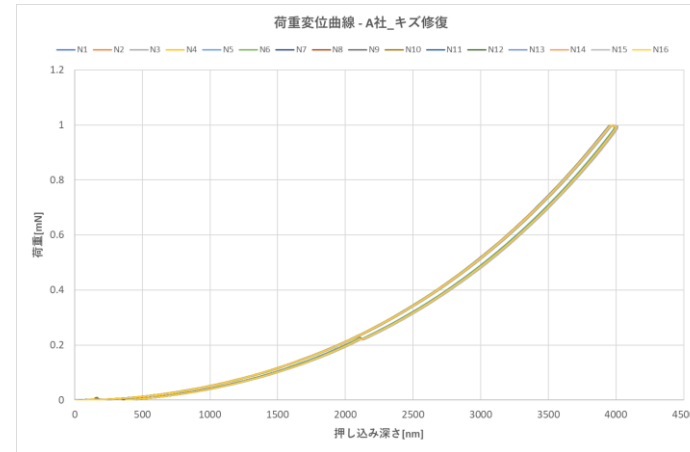
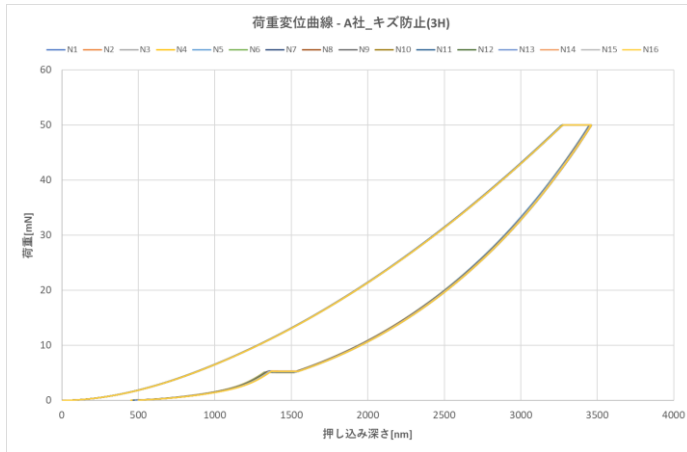
測定条件

- › 最大荷重：50mN(キズ防止系)、1mN(キズ修復系)
- › ひずみ速度：0.2
- › 最大荷重保持時間：30秒
- › サンプルのポアソン比：0.40を使用
- › 測定点数：各16点



荷重変位曲線

“はかる”技術で未来を創る

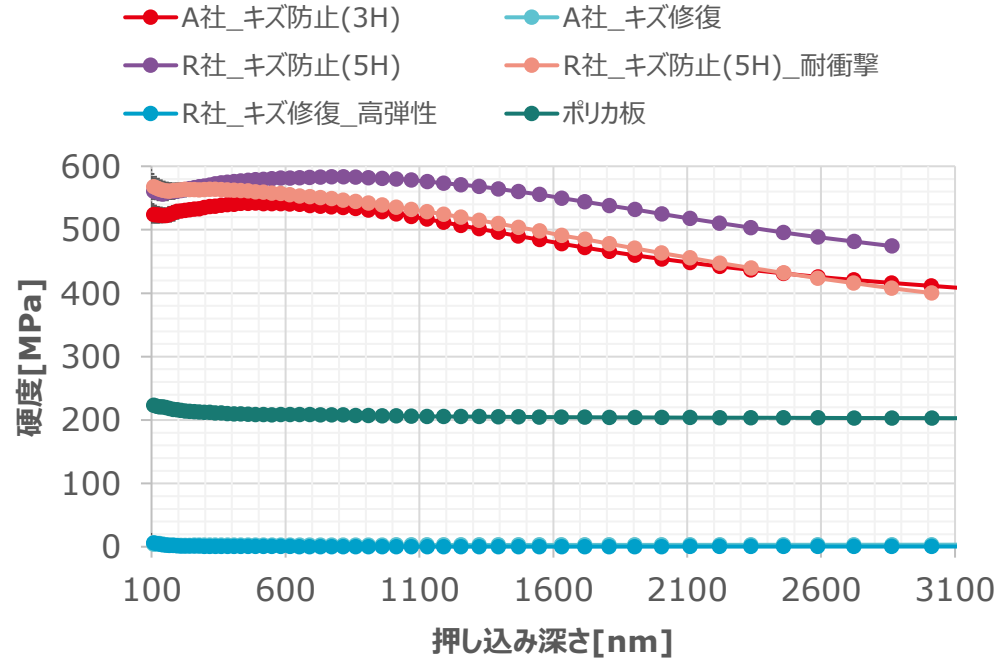


硬度・ヤング率測定 — 硬度・ヤング率の深さプロファイル

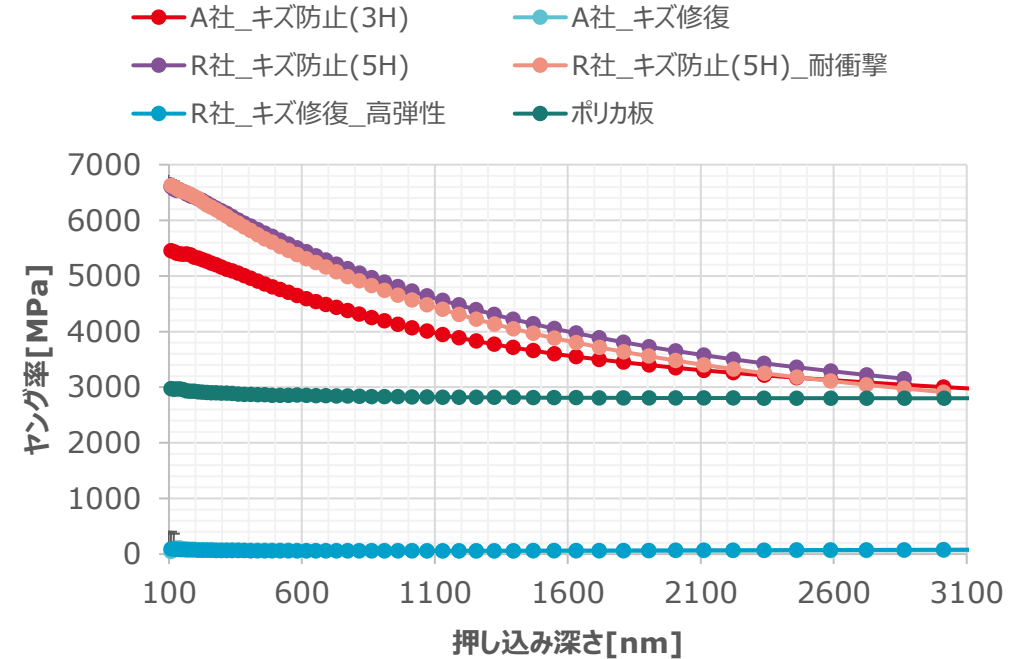
“はかる”技術で未来を創る

各試料に対し、硬度・ヤング率の深さ方向のプロファイルを取得しました。
なお、下記のプロファイルは各測定点を平均化しております。

硬度の押し込み深さプロファイル

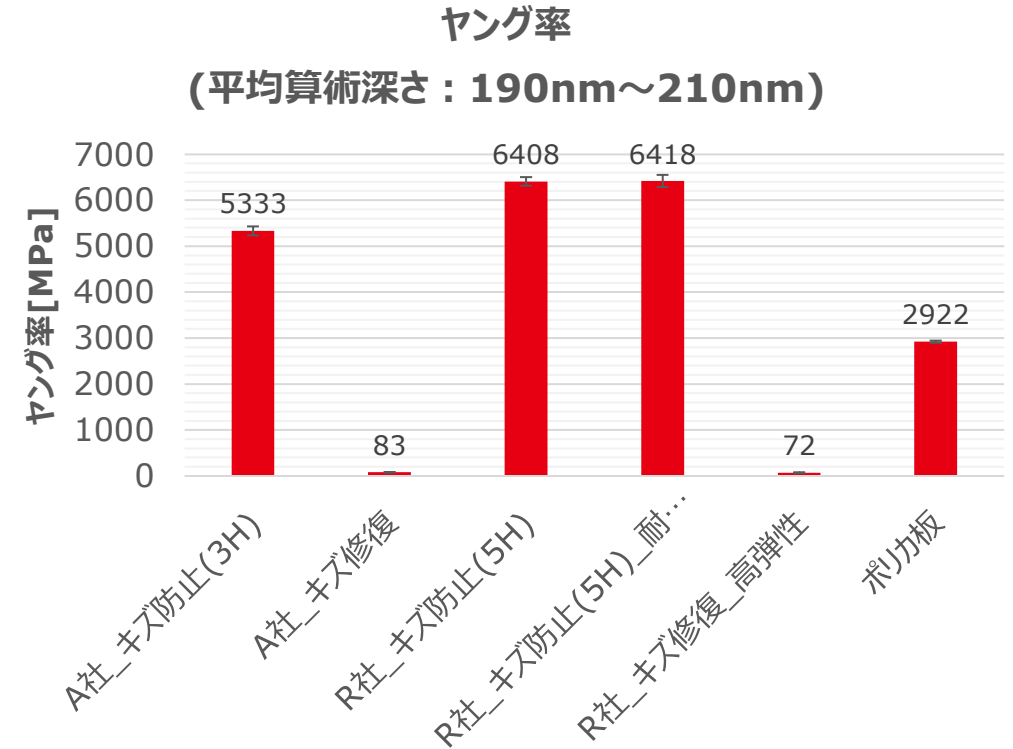
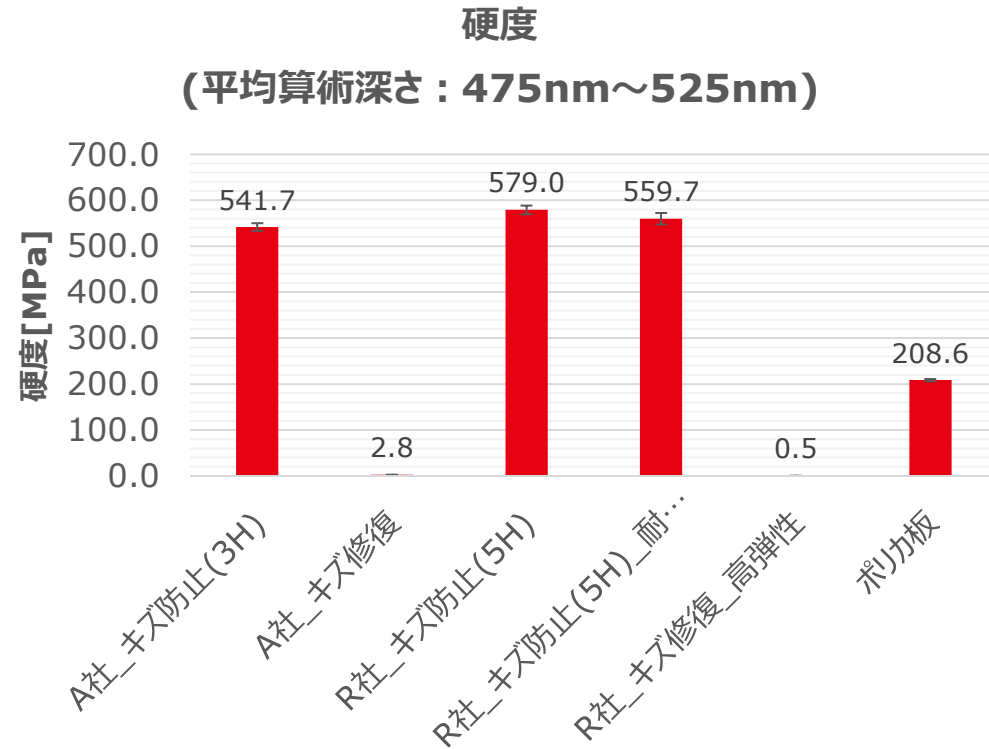


ヤング率の押し込み深さプロファイル



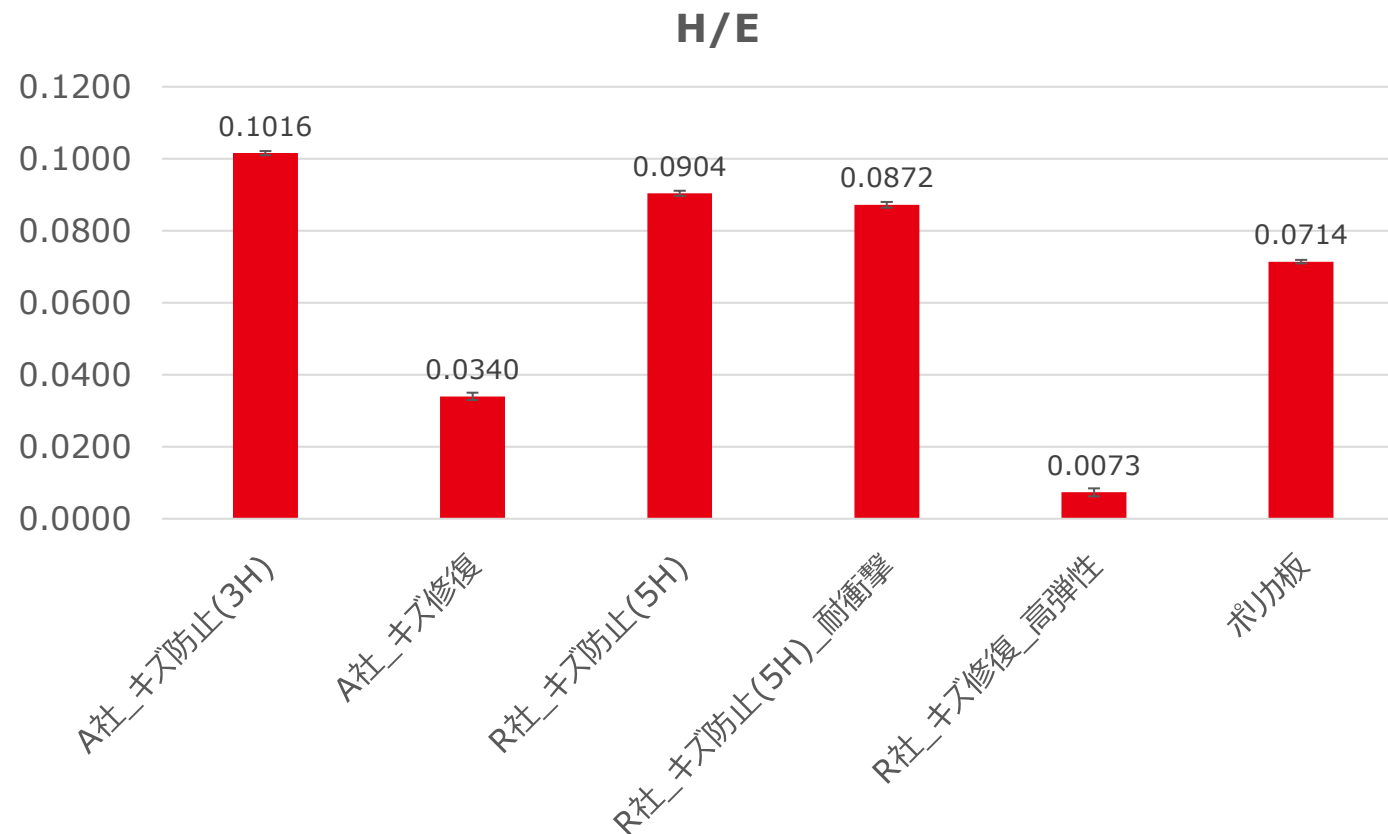
硬度・ヤング率測定 — 硬度・ヤング率比較

各サンプルの最表層における硬度とヤング率の平均値を下図にまとめました。
硬度は500nm±25nm、ヤング率は200nm±10nmの範囲で計算しています。



硬度・ヤング率測定 — H/E(硬度とヤング率の比率)

降伏歪みに比例する量で材料の機械特性を評価する上で、一つの指標になると思われます。一般に金属では低く、ガラスで0.13程度です。



硬度：材料が耐える圧力。塑性変形のしやすさ(しにくさ)。

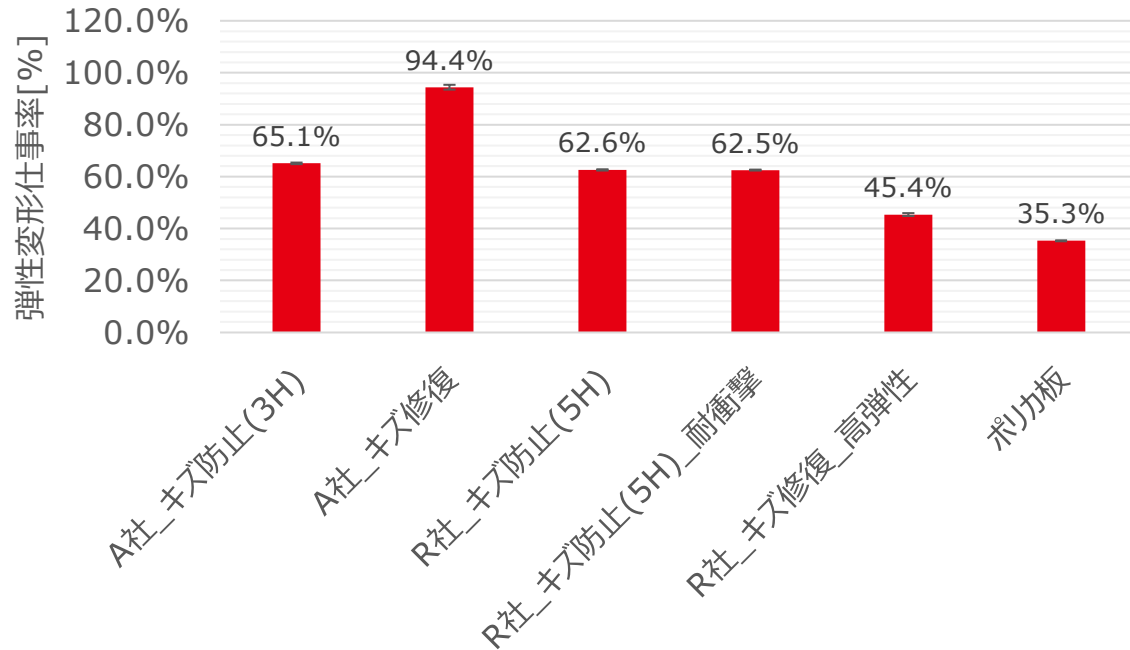
ヤング率：材料が変形を加えられた際に復元する力。弾性定数。

同等のヤング率で硬度が低い
⇒H/E(降伏歪みに比例する量小さい)
⇒弾性域をより早く超えるため傷が残りやすい材料であると推測できる。

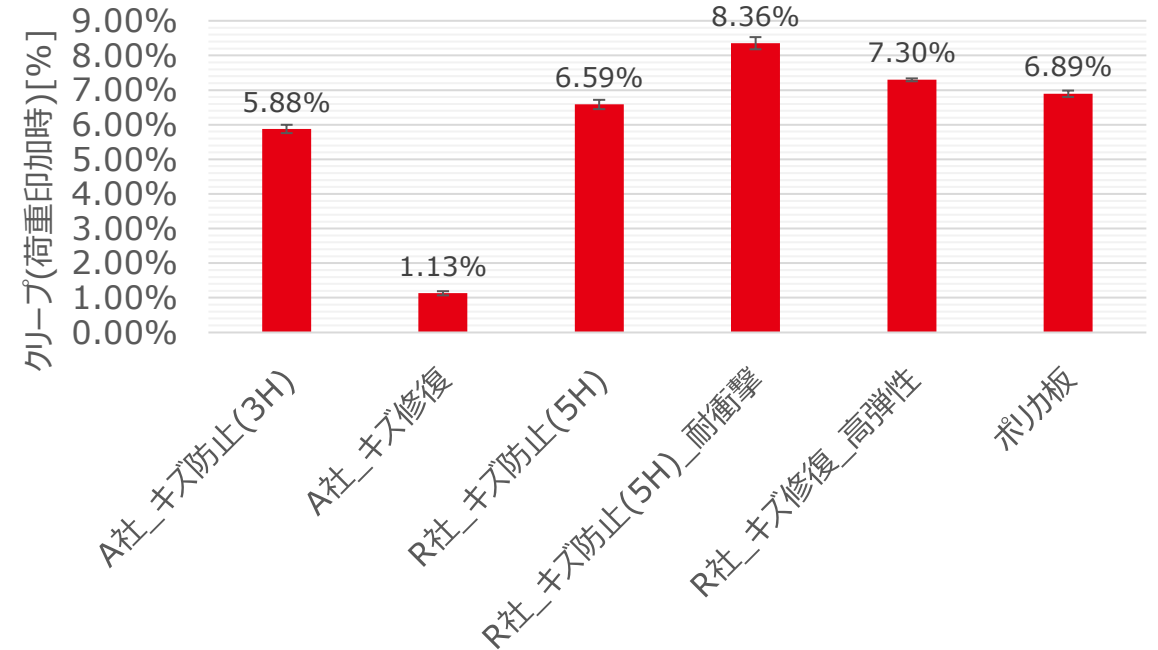
弾性変形仕事率とクリープ

サンプルの回復性の指標となる弾性変形仕事率は下記の通りです。また、時間応答性の指標となるクリープは下記の通りです。

弾性変形仕事率

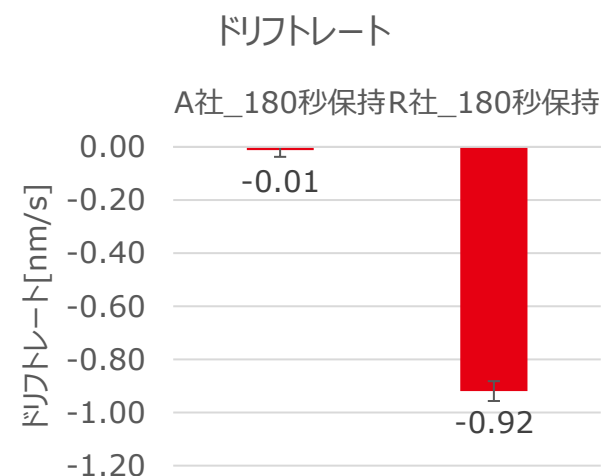
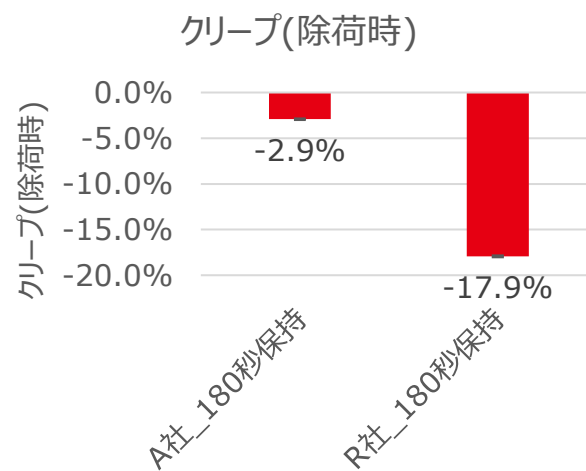
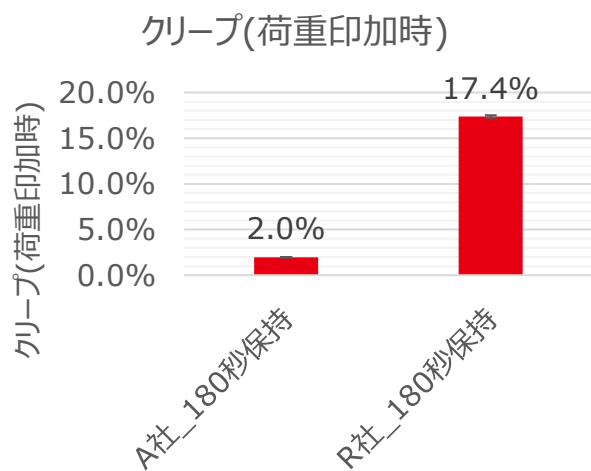
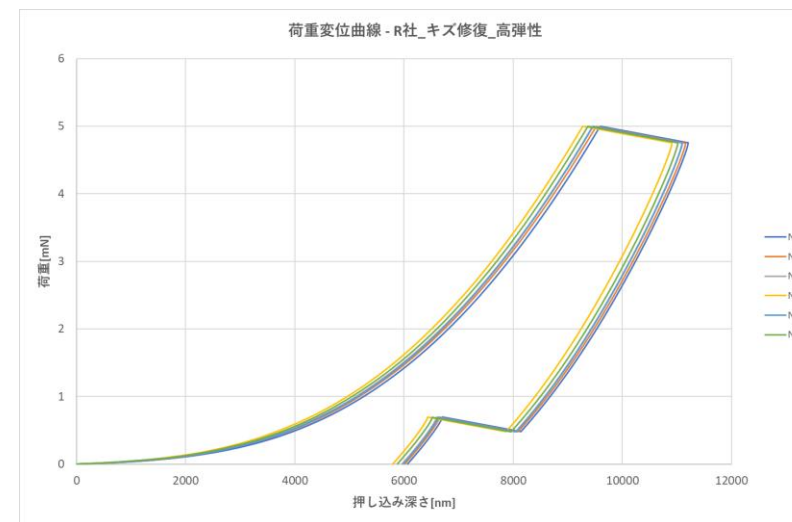
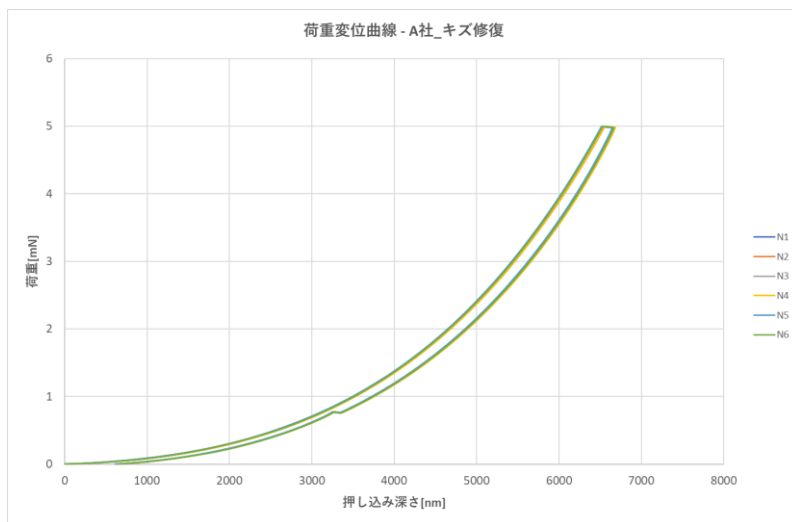


クリープ(荷重印加時)



キズ修復フィルムの時間応答性の比較

“はかる”技術で未来を創る



使用装置

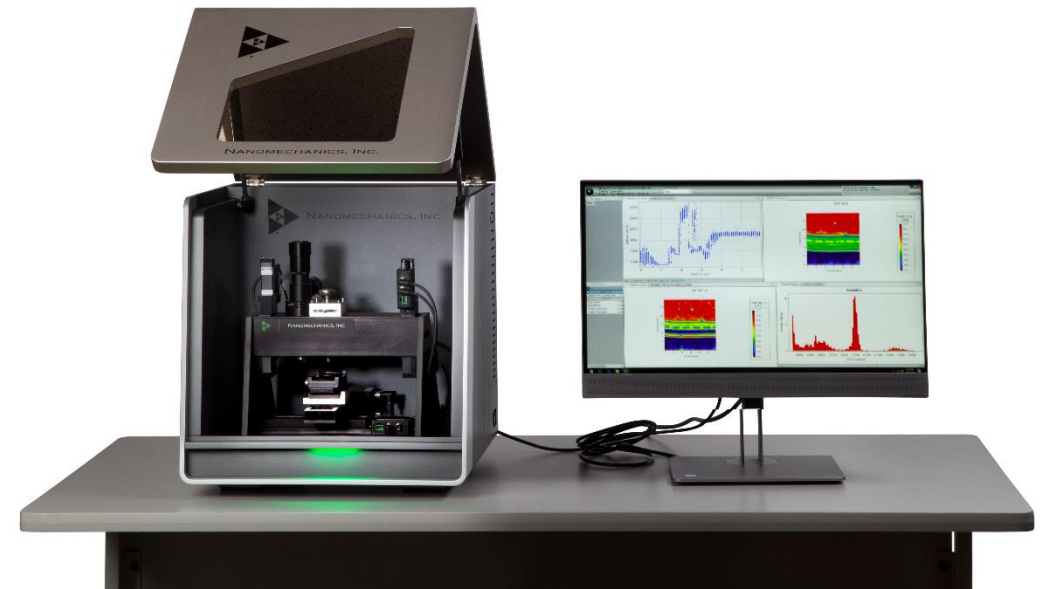
- 》 KLA社製iMicro型ナノインデントー
- 》 標準InForce1000ヘッド
- 》 バーコビッチ圧子

測定モード

- 》 ISO14577準拠押し込み試験

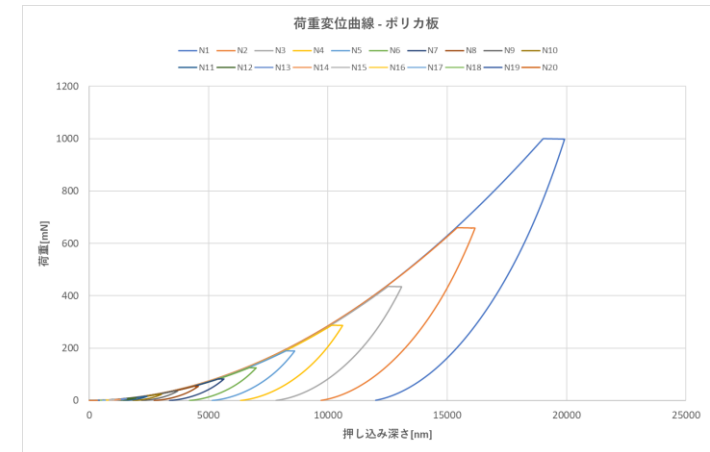
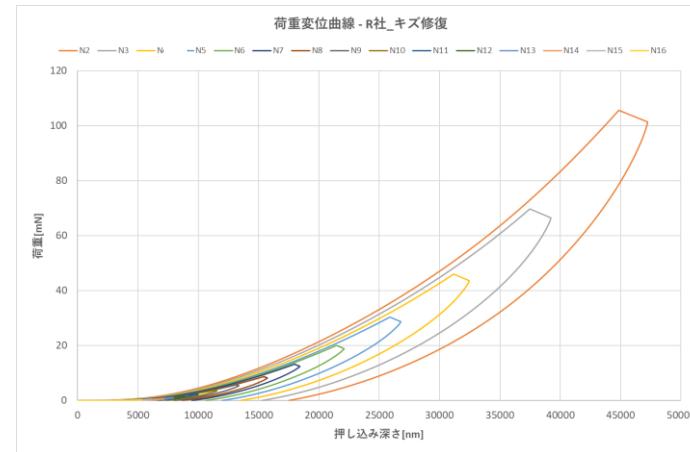
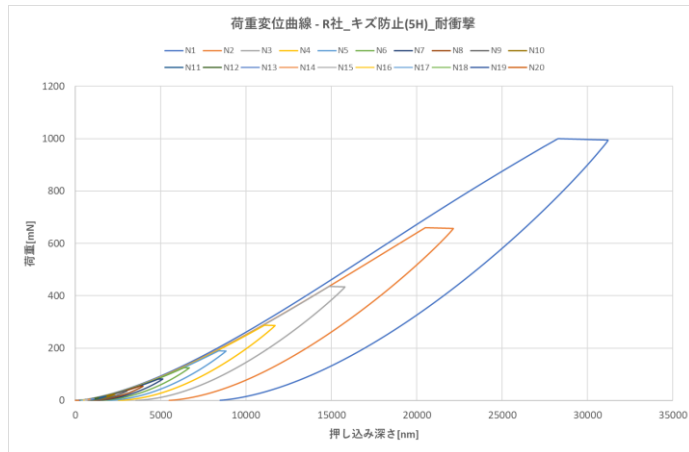
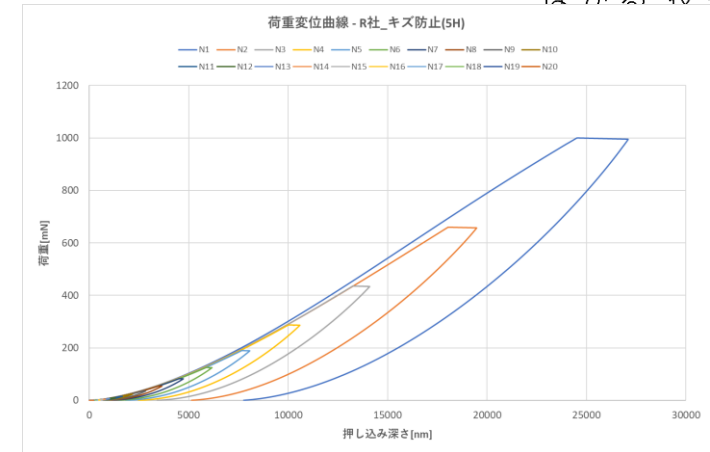
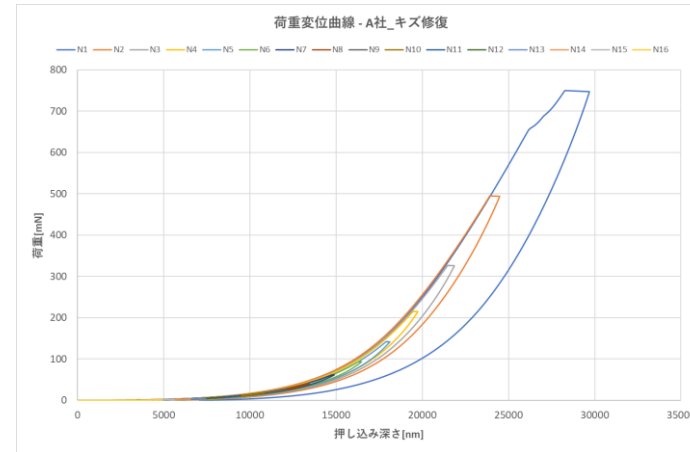
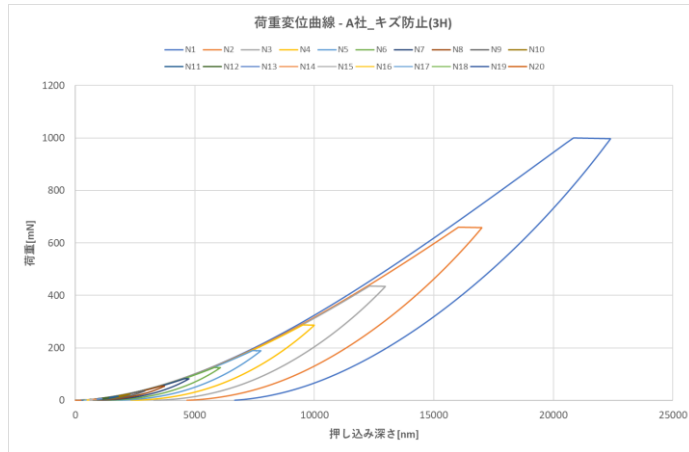
測定条件

- 》 最大荷重：50mN(キズ防止系)、1mN(キズ修復系)
- 》 荷重減弱係数：
- 》 最大荷重到達までの時間：10秒
- 》 最大荷重保持時間：10秒



荷重変位曲線

“はかる”技術で未来を創る

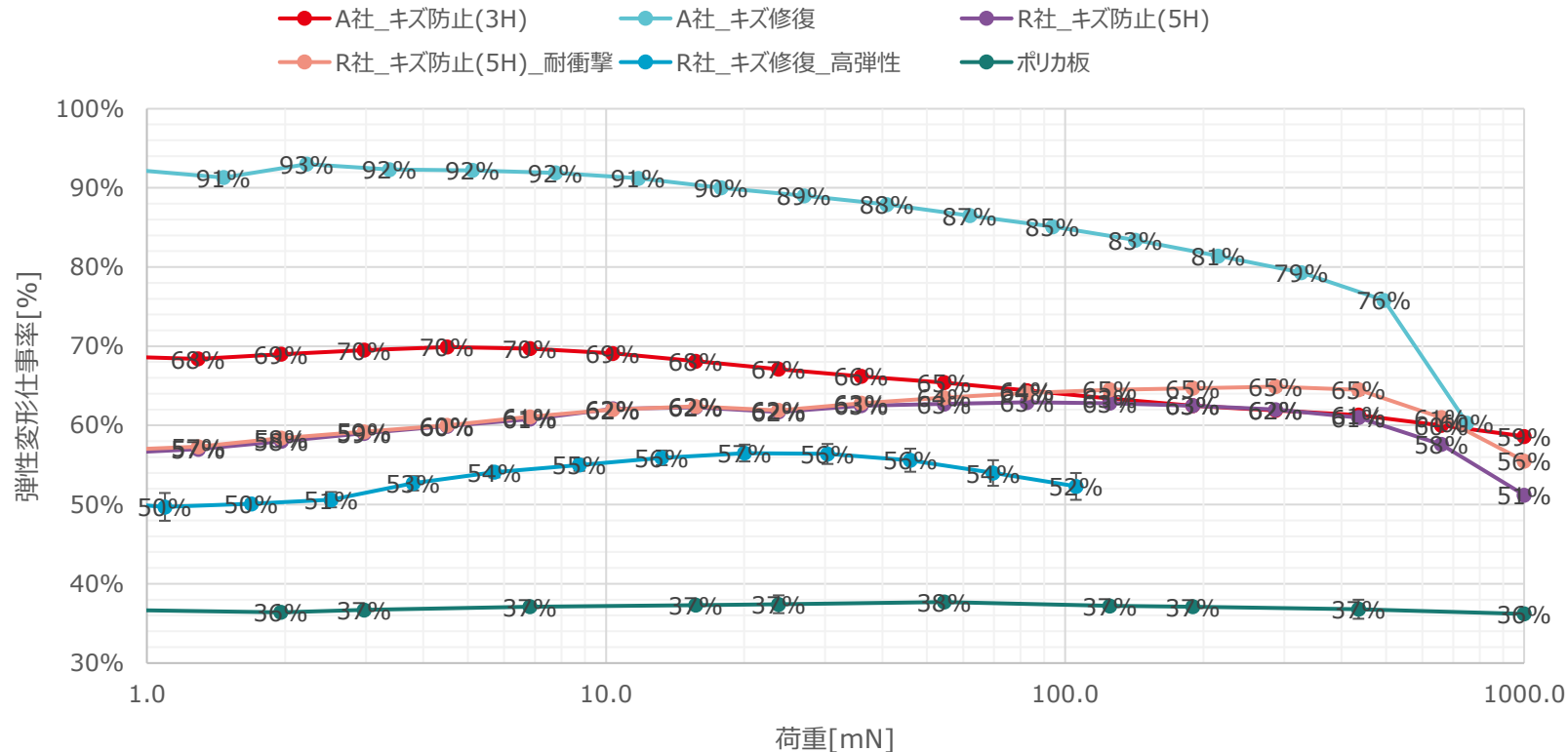


弾性変形仕事率

“はかる”技術で未来を創る

各サンプルに対し、荷重を変えて弾性変形仕事率の測定を行いました。
深さによって弾性変形仕事率に差があるサンプルがあります。

弾性変形仕事率(バーコビッチ圧子)



◆押し込み硬度・ヤング率測定

破壊靱性

◆スクラッチ

◆粘着力測定

◆動的粘弾性試験

使用装置

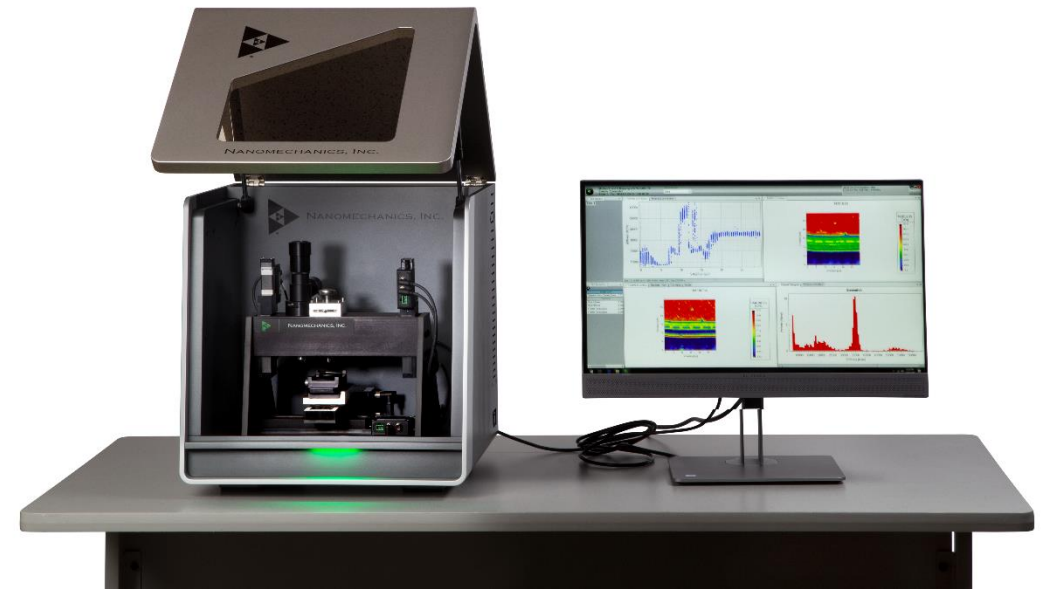
- 》 KLA社製iMicro型ナノインデントー
- 》 標準 InForce1000ヘッド
- 》 キューブコーナー圧子

測定モード

- 》 ISO14577準拠

測定条件

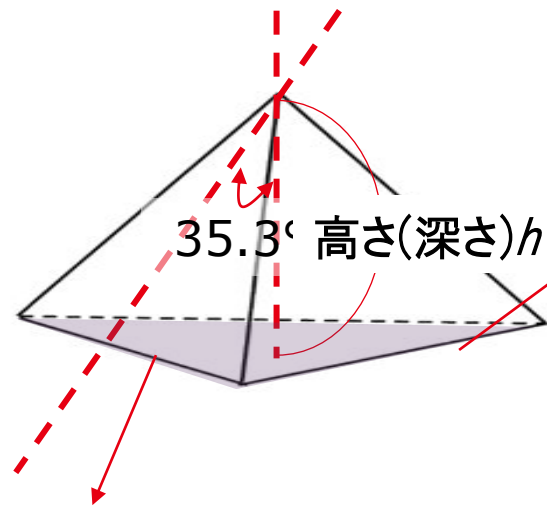
- 》 最大荷重到達までの時間：10秒
- 》 最大荷重保持時間：10秒



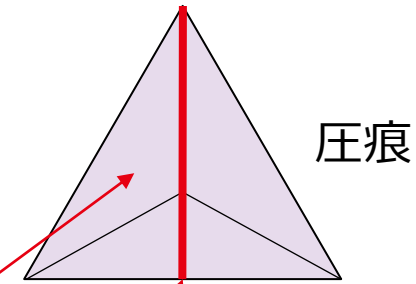
キューブコーナー圧子

一般的にはダイヤモンドやサファイアの圧子が使用されます。

先端曲率半径：<20nm(ダイヤモンド新品時)



$$\begin{aligned} \text{面積} A &= 3\sqrt{3} (\tan 35.3^\circ)^2 \times h^2 \\ &\approx 2.605 \times h^2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{一辺の長さ} &= 2\sqrt{3} (\tan 35.3^\circ) \times h \\ &\approx 2.45 \times h \end{aligned}$$

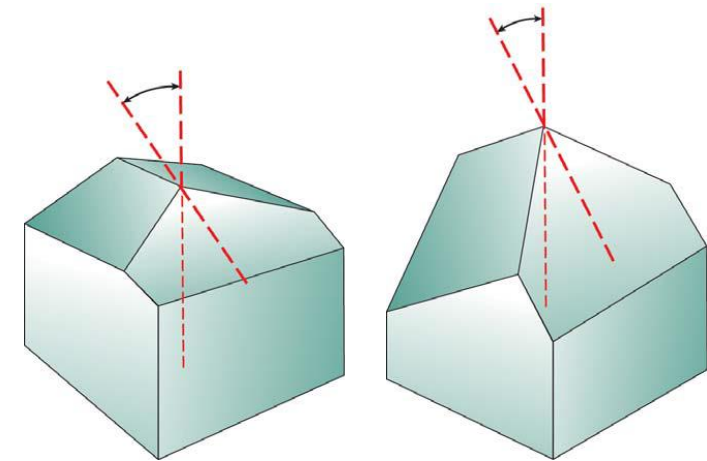
$$\begin{aligned} \text{三角形の高さ} &= \frac{2\sqrt{3} (\tan 35.3^\circ) \times h}{2} \times \frac{1.5}{\cos 30^\circ} \\ &= (\tan 35.3^\circ) \times 3h \approx 2.12 \times h \end{aligned}$$

- /// サンプル表面にクラックが発生するようある荷重を設定して圧子を押し込む
- /// 圧子の接触点周辺の応力を大きくするようキューブコーナー圧子を使用
- /// 圧痕のコーナーに発生したクラックの長さ(C)を測定する
- /// バーコビッチ圧子を用いてヤング率 E と硬度 H を測定する

破壊靱性 K_{IC} は下記の通り

$$K_{IC} = \alpha \left[\frac{E}{H} \right]^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{P_{max}}{C^{\frac{3}{2}}} \right]$$

α は幾何学的な接触に関する定数: キューブコーナー圧子では $\alpha=0.032$

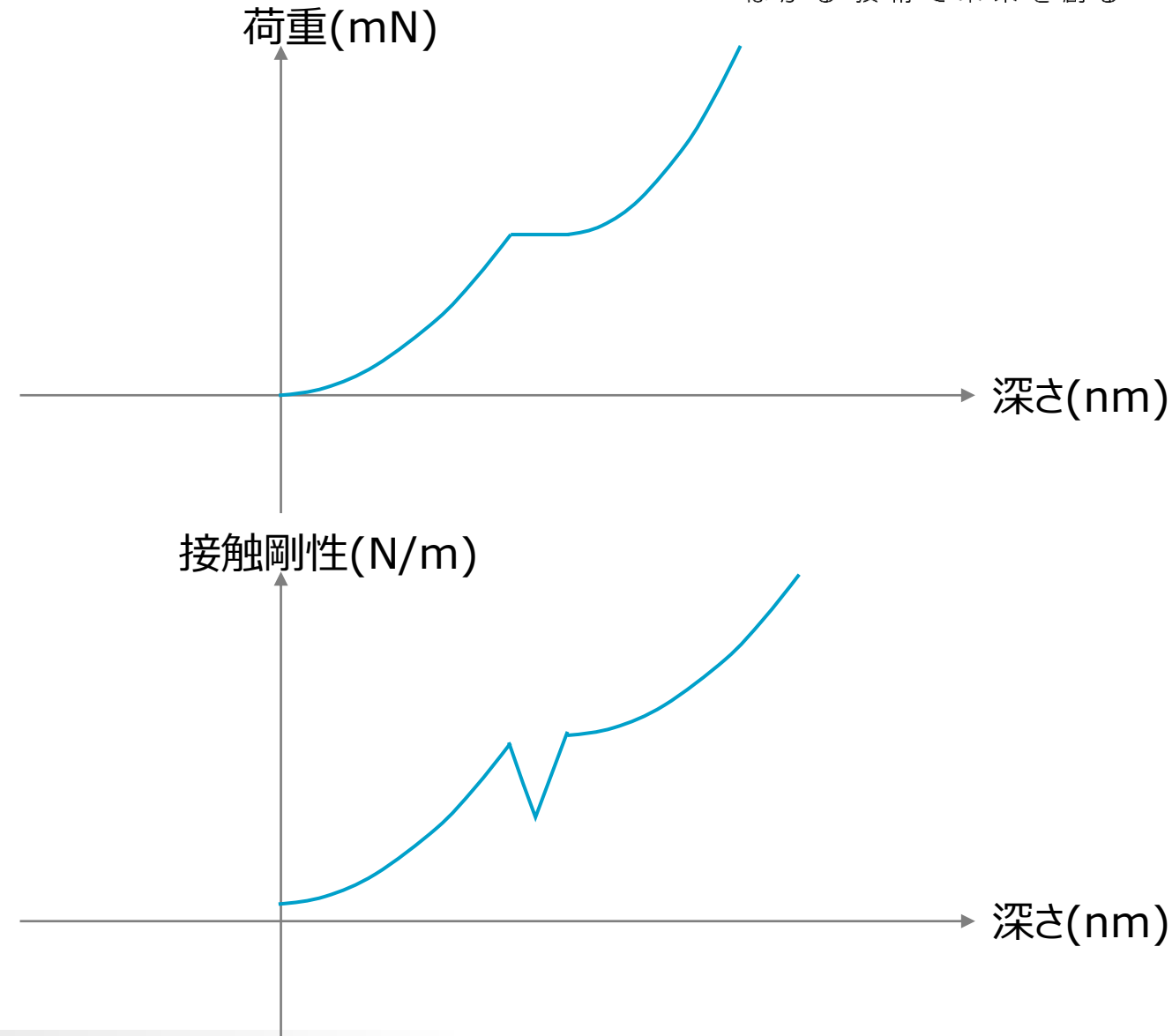
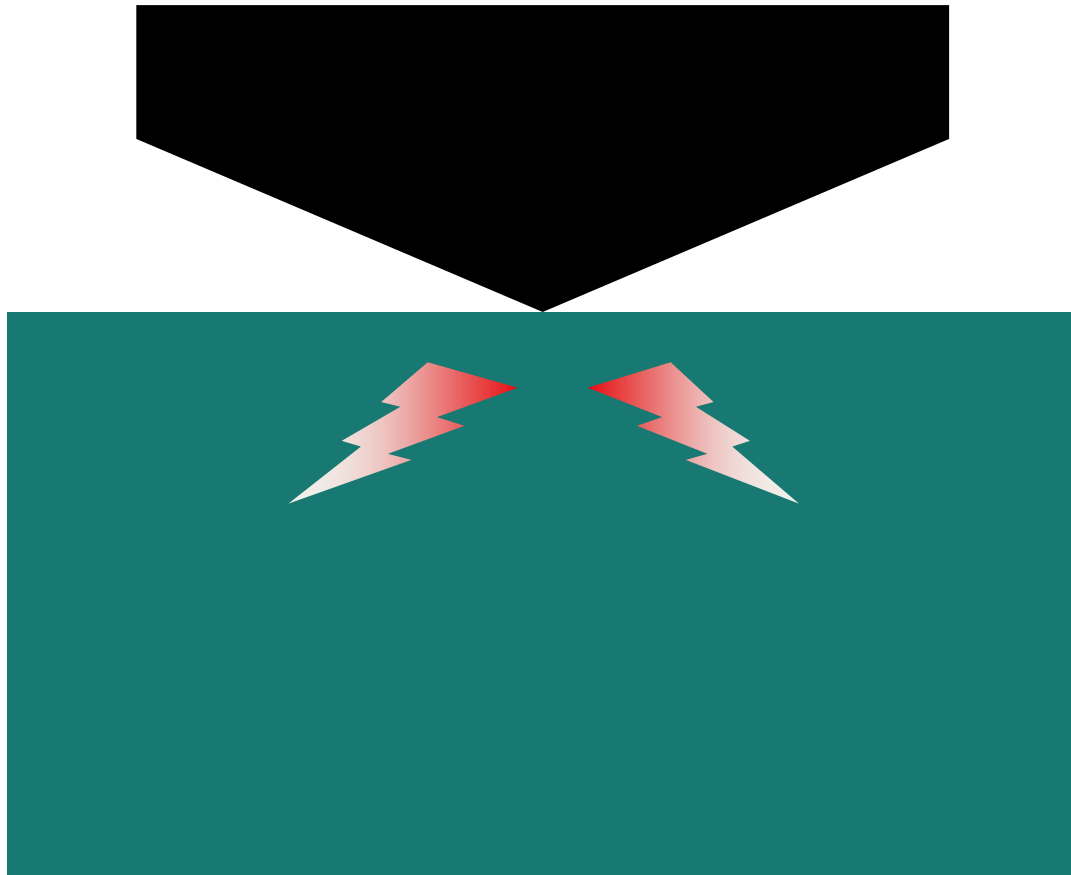


バーコビッチ圧子

キューブコーナー圧子

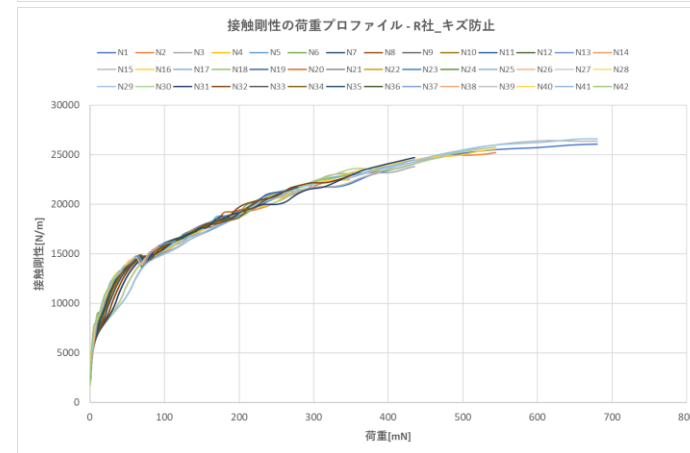
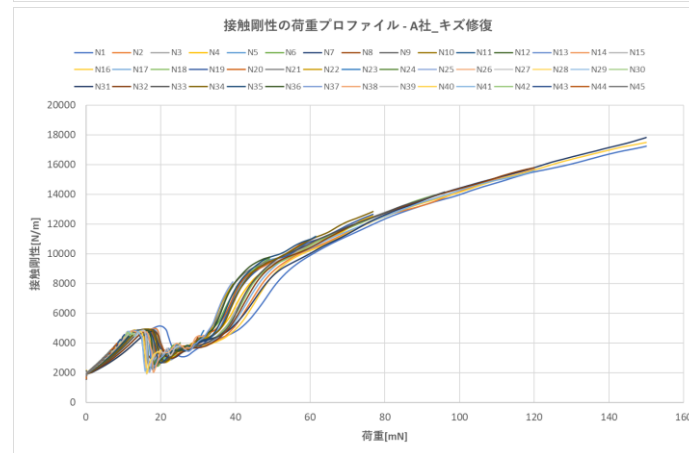
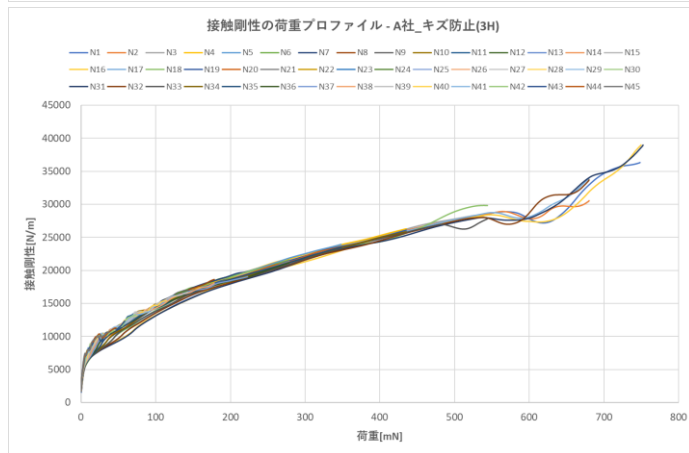
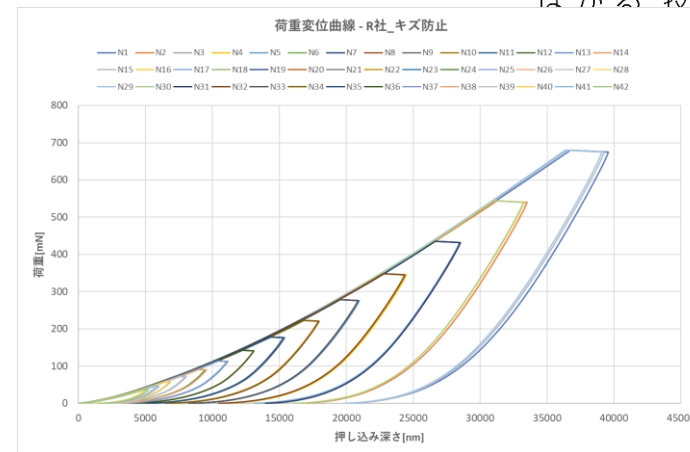
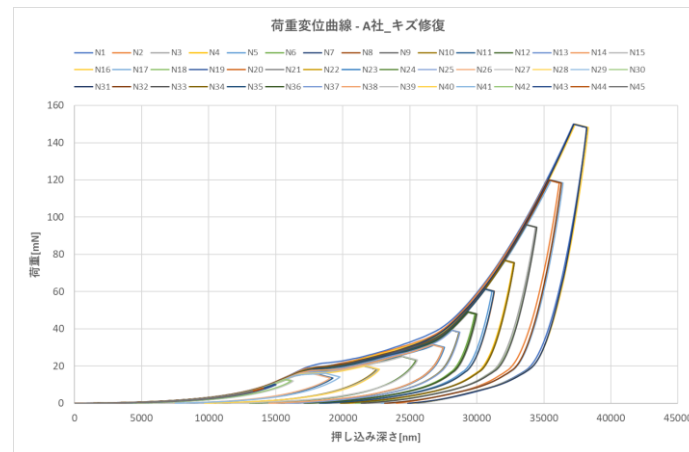
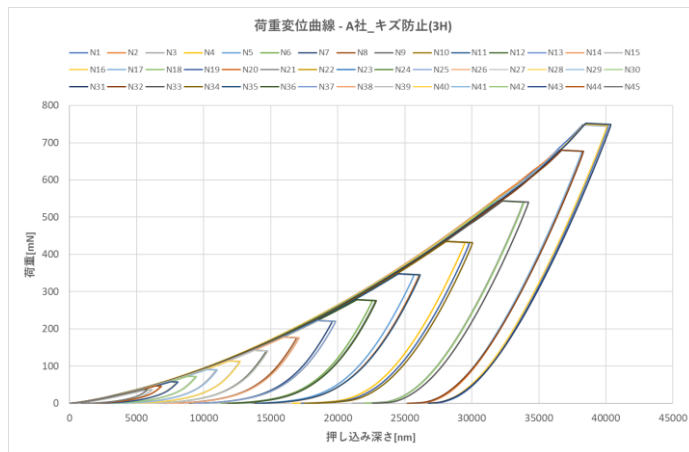
破壊の検出方法

“はかる”技術で未来を創る



荷重変位曲線と接触剛性

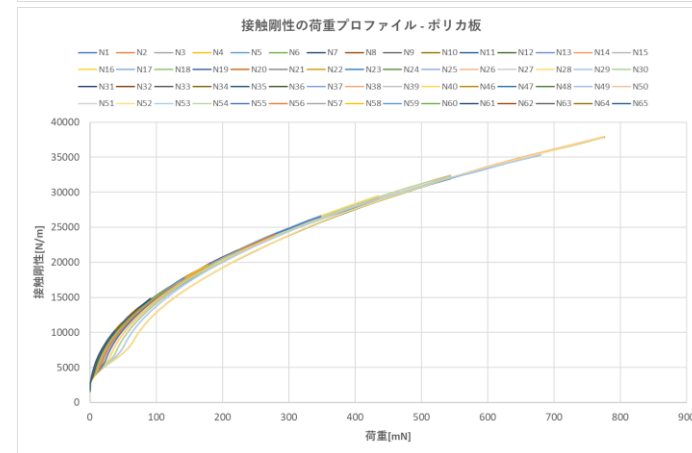
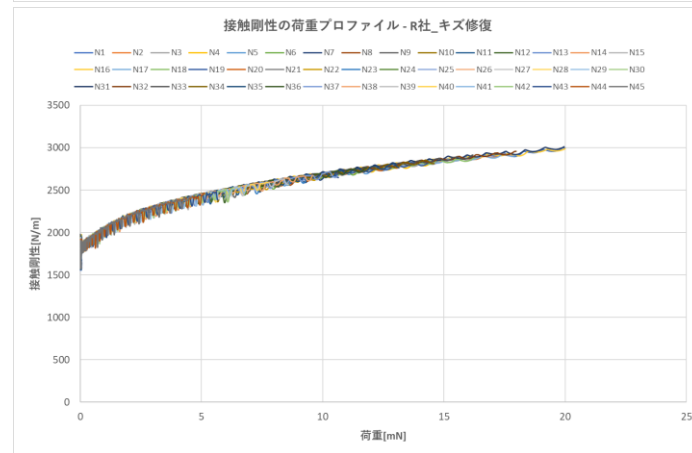
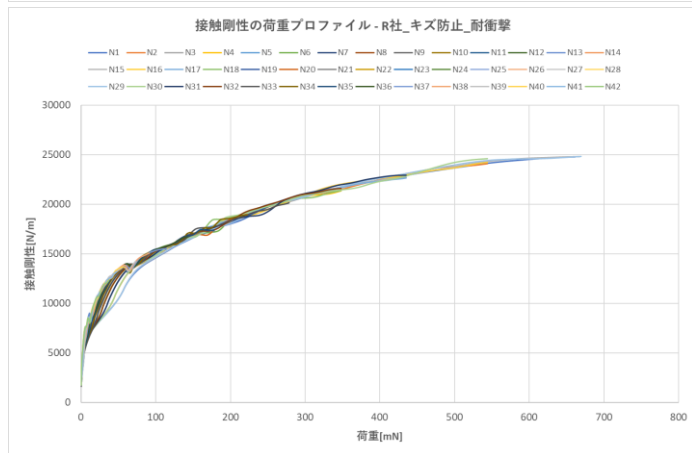
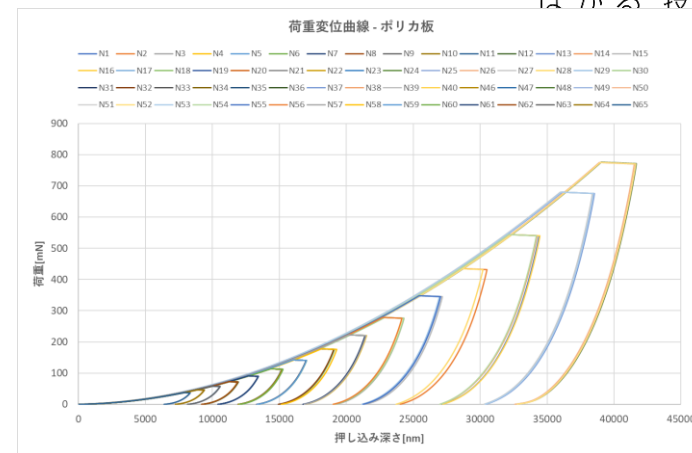
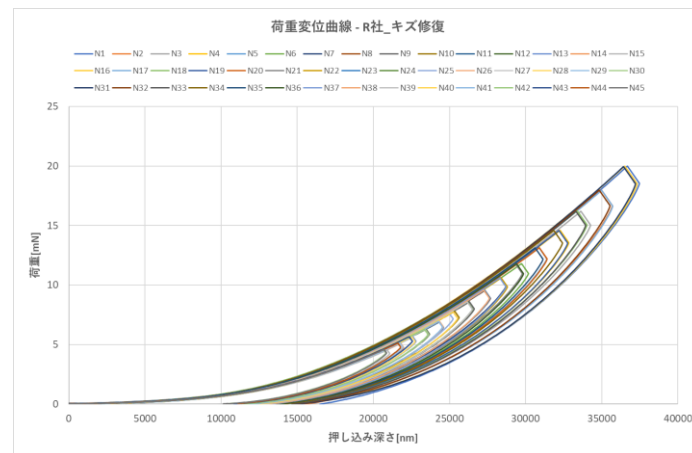
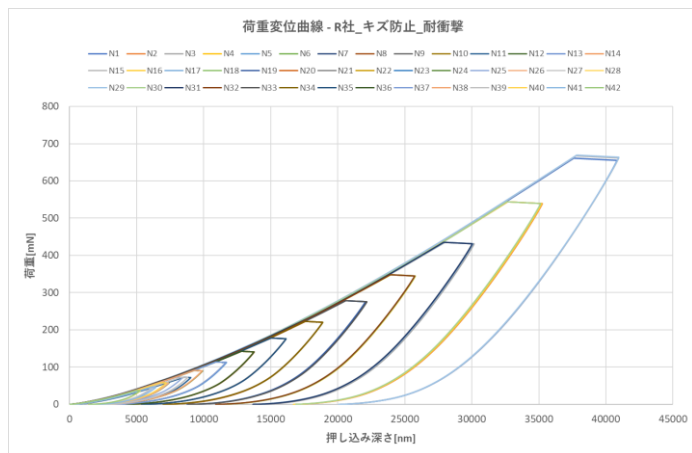
“はかる”技術で未来を創る



キューブコーナー圧子を用いて押し込み試験を行いました。
キズ防止系は1000mNから徐々に荷重を下げています。
キズ修復系は深さが40um以下になるように荷重をかけています。

荷重変位曲線と接触剛性

“はかる”技術で未来を創る

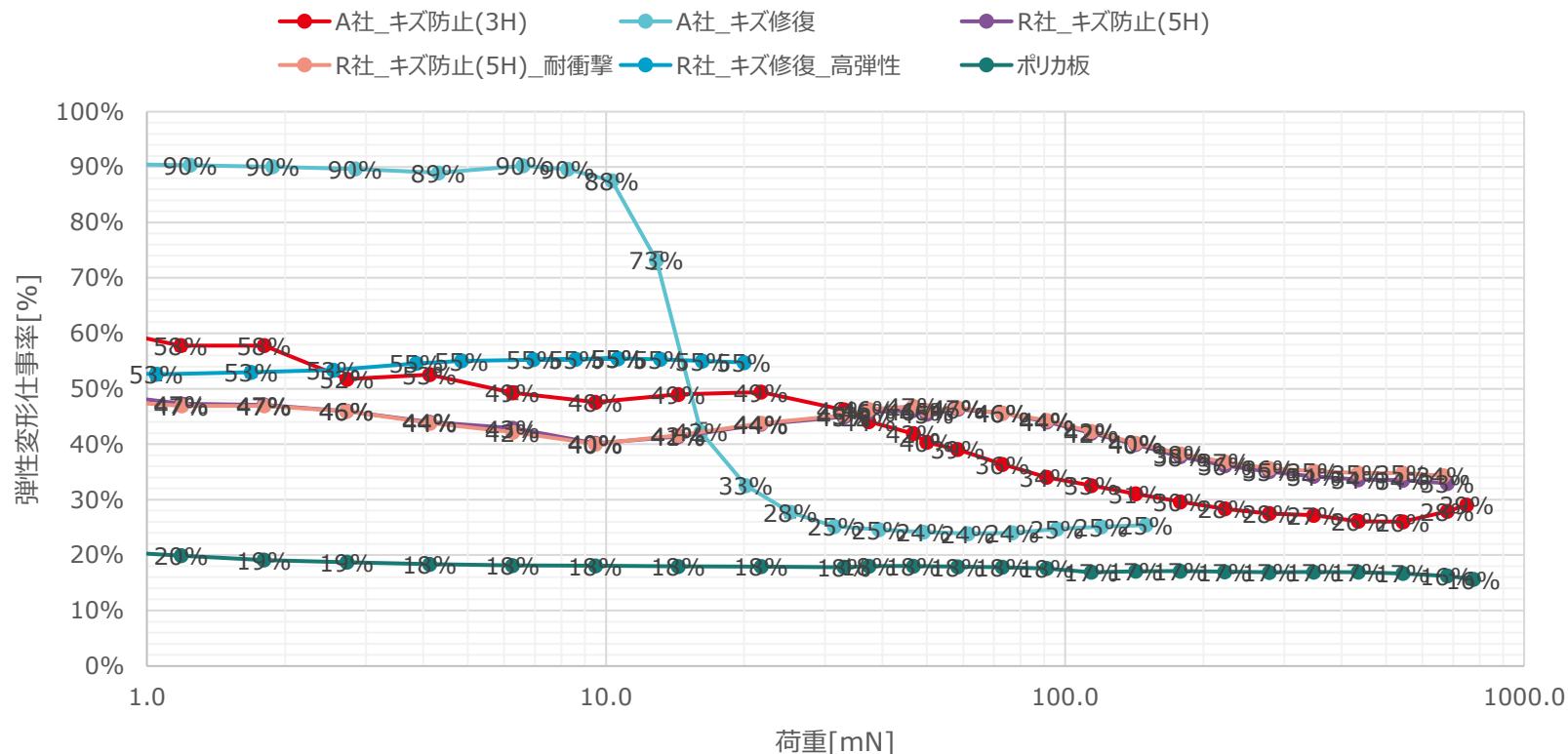


キューブコーナー圧子を用いて押し込み試験を行いました。
キズ防止系は1000mNから徐々に荷重を下げています。
キズ修復系は深さが40um以下になるように荷重をかけています。

荷重に対する弾性変形仕事率の変化

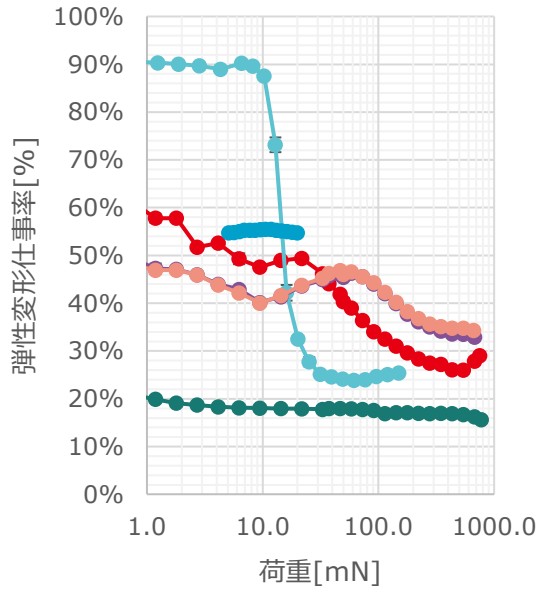
キューブコーナー圧子を用いて、荷重に対する弾性変形仕事率の変化をプロットしました。高荷重時に回復性が低下する傾向が見られます。

弾性変形仕事率(キューブコーナー圧子)

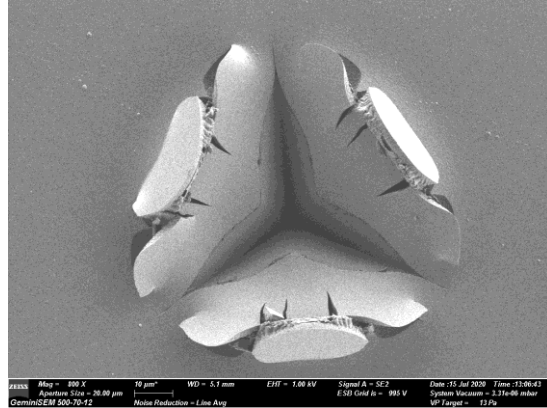


弾性変形仕事率(キューブコーナ-圧子)

- A社_キズ防止(3H)
- A社_キズ修復
- R社_キズ防止(5H)
- R社_キズ防止(5H)_耐衝撃
- R社_キズ修復_高弾性
- ポリカ板

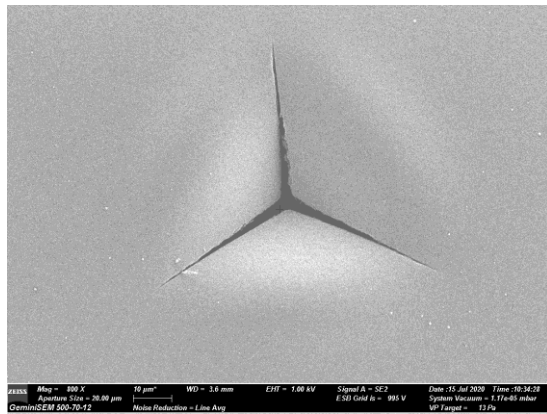


A社_キズ防止(3H)



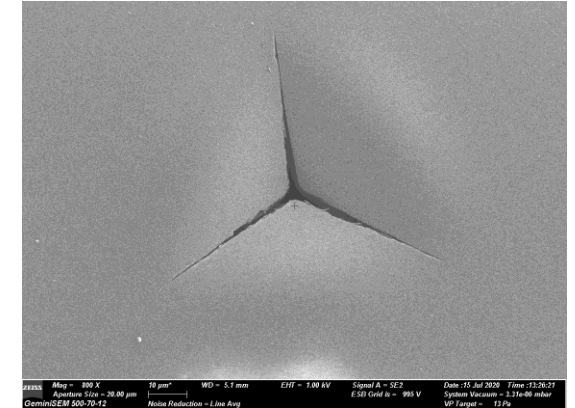
A社_キズ修復

R社_キズ防止(5H)_耐衝撃

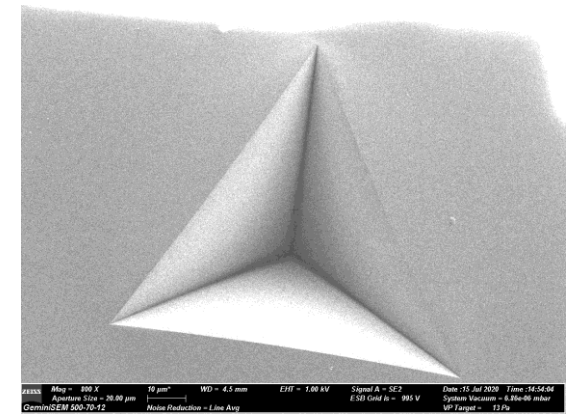


R社_キズ修復_高弾性

“はかる”技術で未来を創る
R社_キズ防止(5H)



ポリカ板

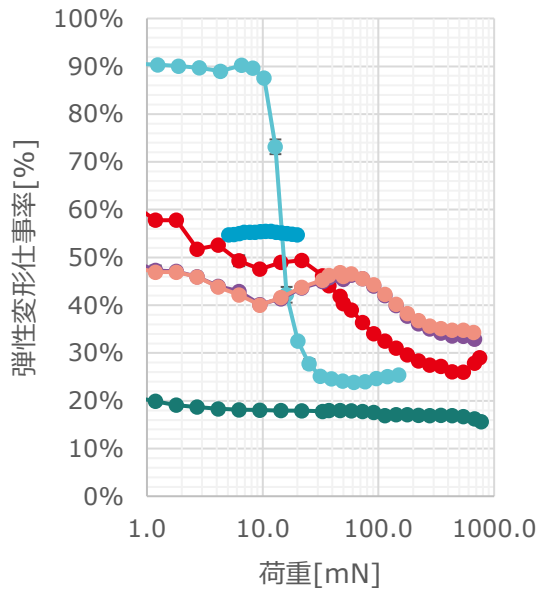


73mN(A社_キズ修復のみ77mN)

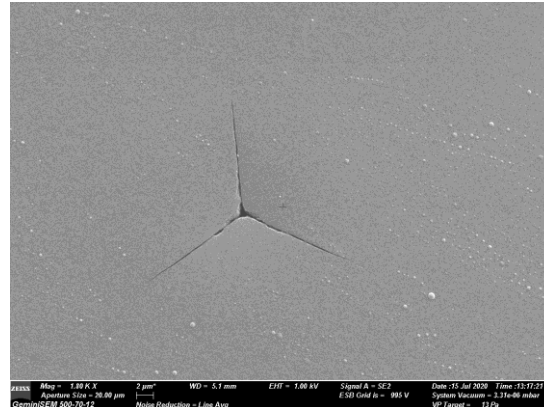
“はかる”技術で未来を創る
R社_キズ防止(5H)

弾性変形仕事率(キューブコー
ナー圧子)

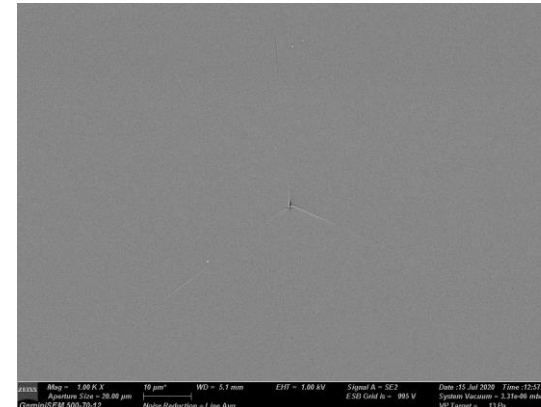
- A社_キズ防止(3H)
- A社_キズ修復
- R社_キズ防止(5H)
- R社_キズ防止(5H)_耐衝撃
- R社_キズ修復_高弾性
- ポリカ板



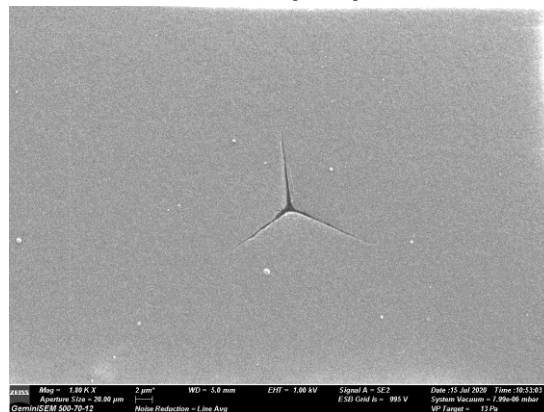
A社_キズ防止(3H)



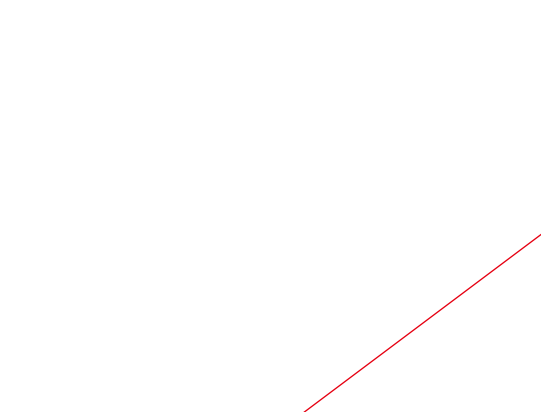
A社_キズ修復



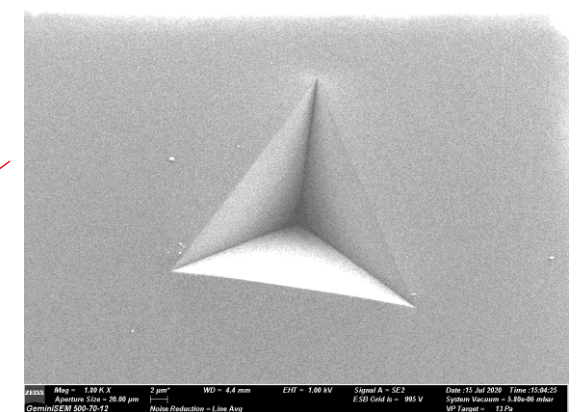
R社_キズ防止(5H)_耐衝撃



R社_キズ修復_高弾性

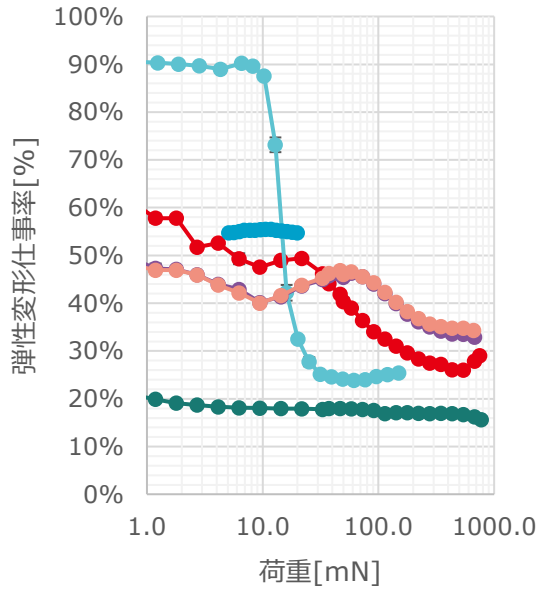


ポリカ板

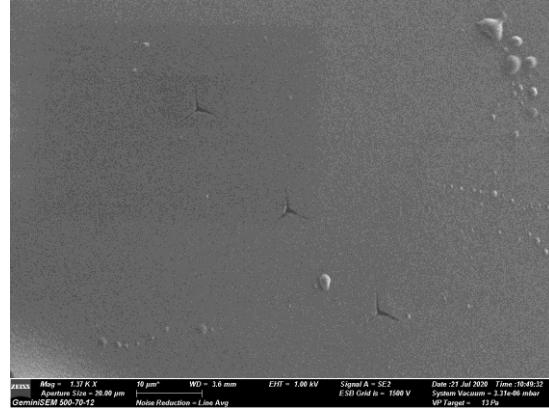


弾性変形仕事率(キューブコーナ-圧子)

- A社_キズ防止(3H)
- A社_キズ修復
- R社_キズ防止(5H)
- R社_キズ防止(5H)_耐衝撃
- R社_キズ修復_高弾性
- ポリカ板



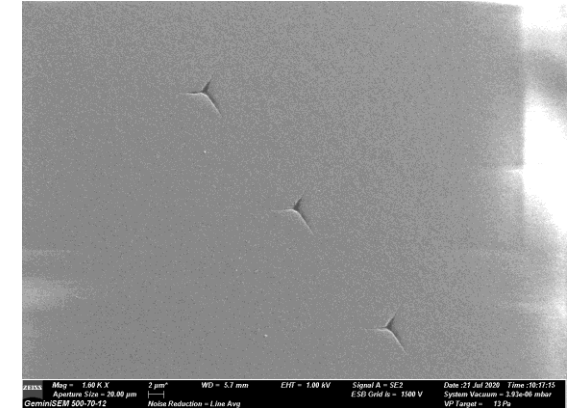
A社_キズ防止(3H)



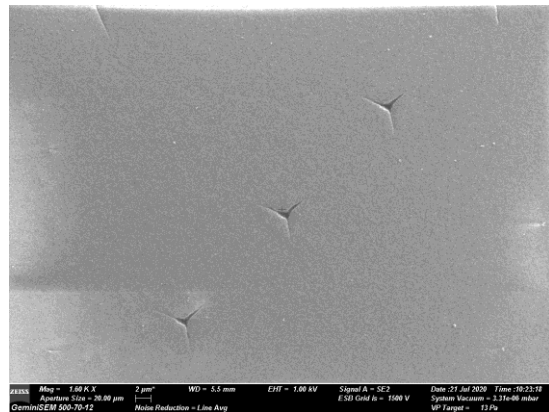
A社_キズ修復



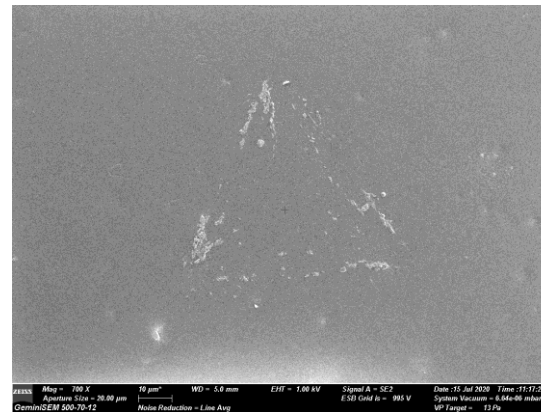
“はかる”技術で未来を創る
R社_キズ防止(5H)



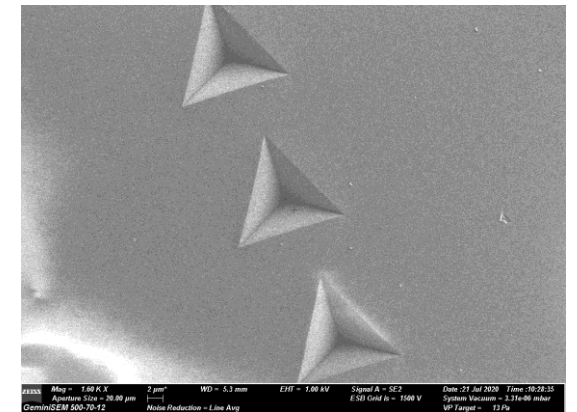
R社_キズ防止(5H)_耐衝撃



R社_キズ修復_高弾性



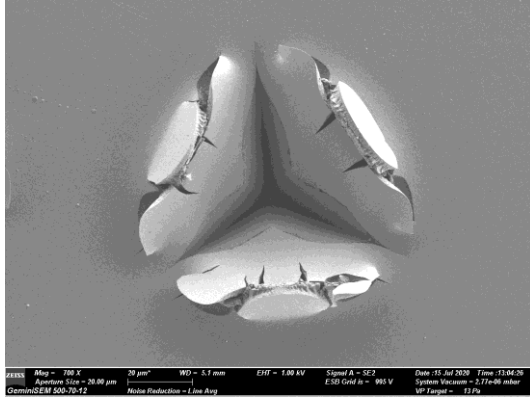
ポリカ板



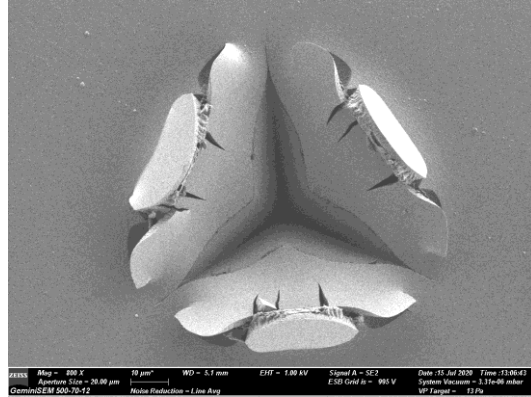
A社_キズ防止(3H)

“はかる”技術で未来を創る
435mN

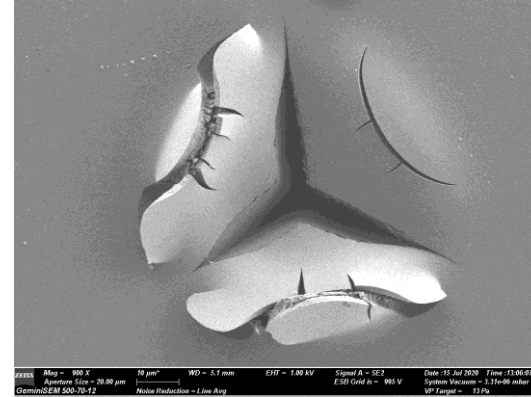
750mN



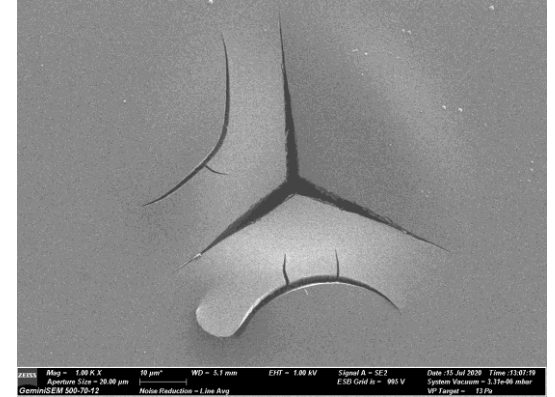
680mN



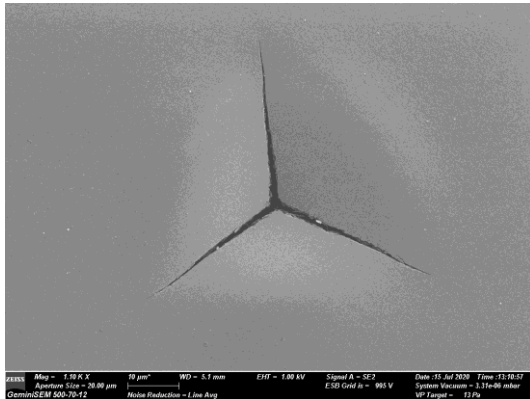
544mN



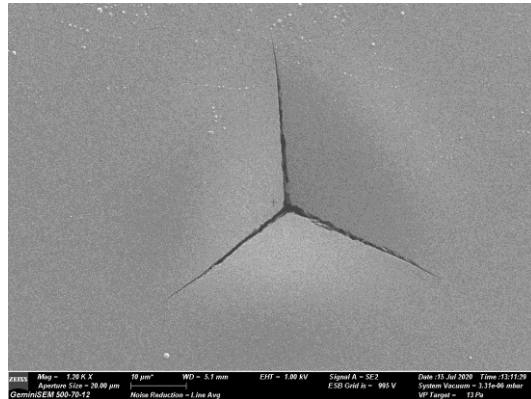
435mN



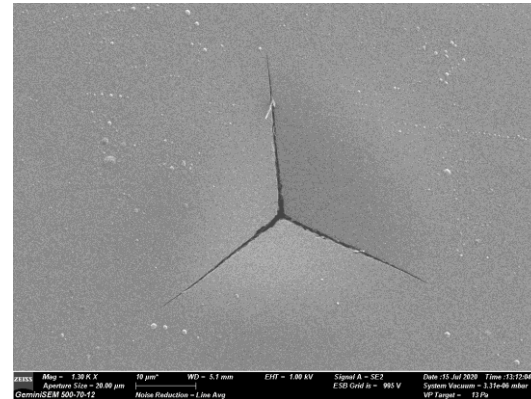
348mN



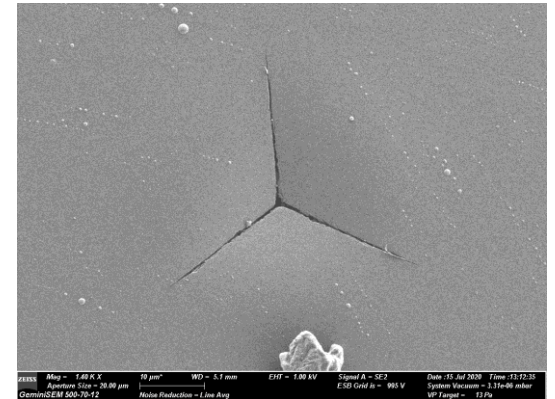
279mN



223mN



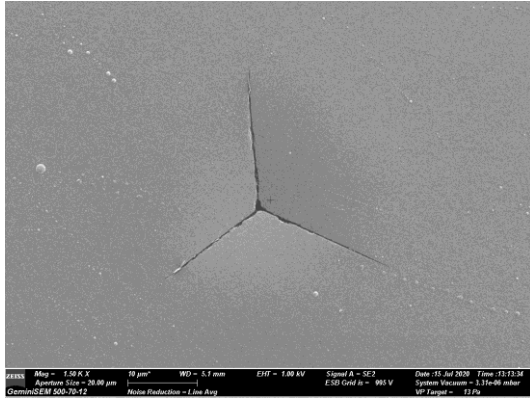
178mN



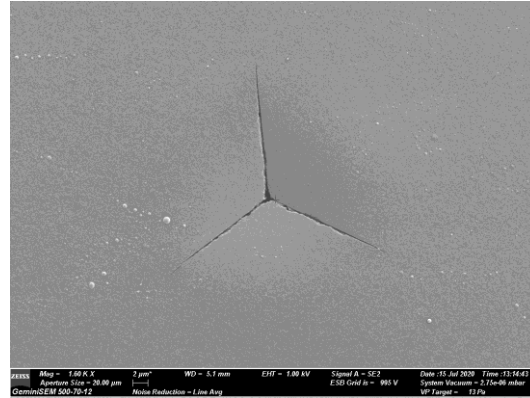
A社_キズ防止(3H)

“はかる”技術で未来を創る
73mN

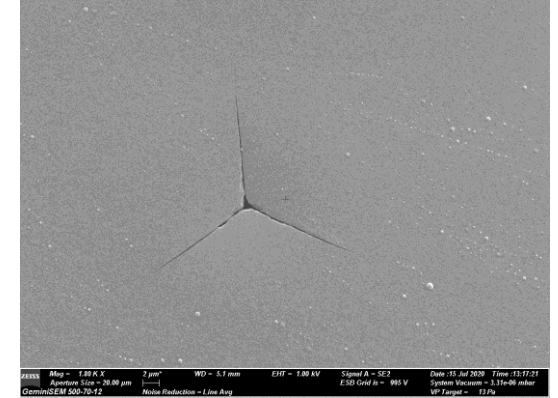
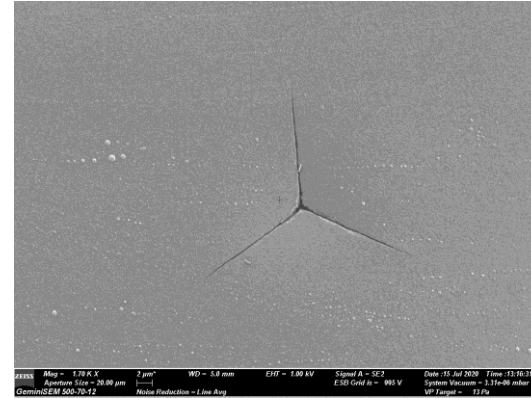
143mN



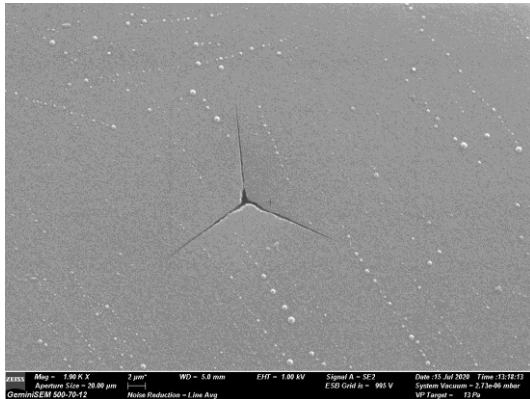
114mN



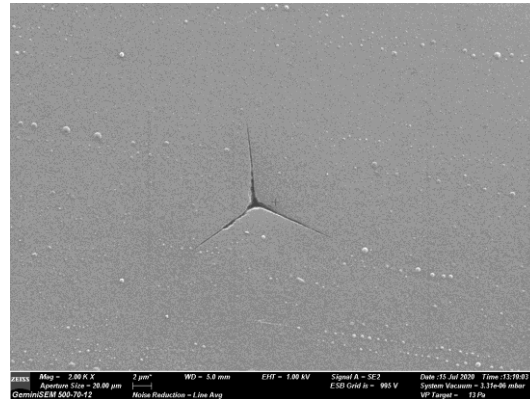
91mN



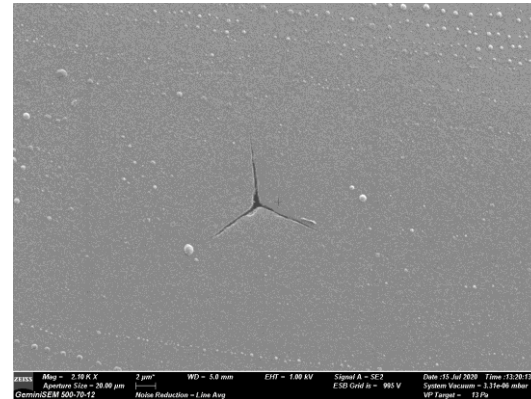
58mN



47mN



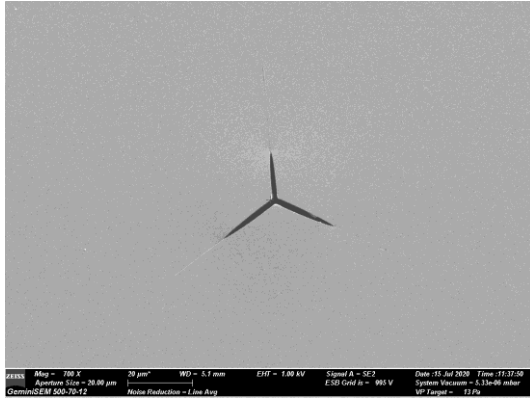
37mN



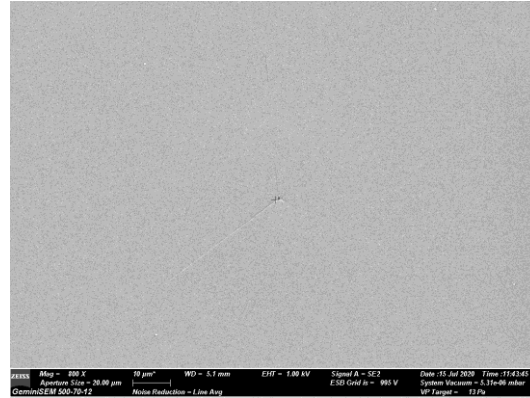
A社_キズ修復

“はかる”技術で未来を創る
77mN

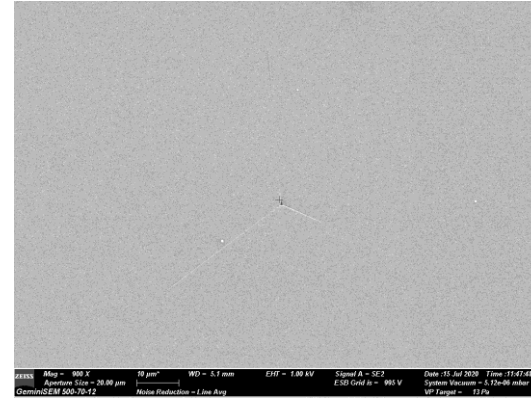
150mN



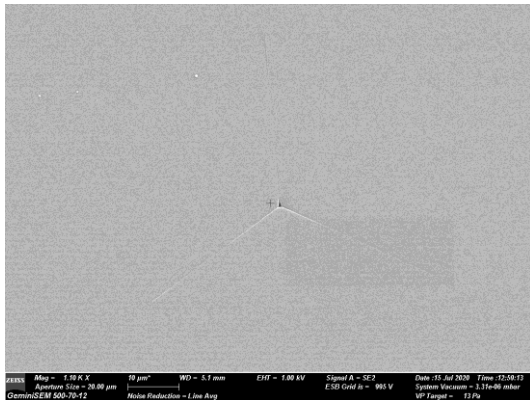
120mN



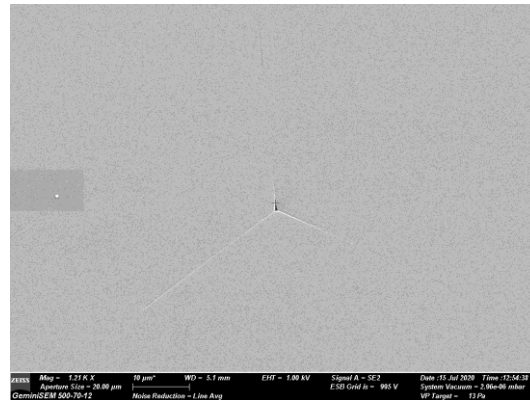
96mN



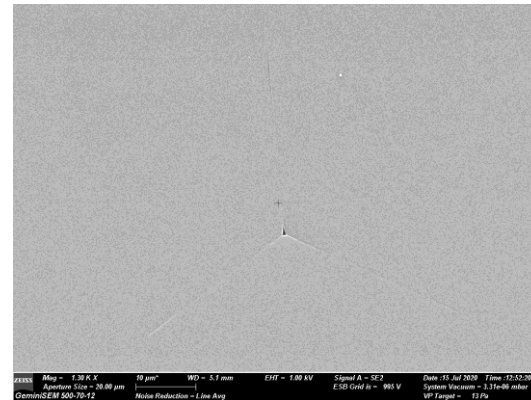
61mN



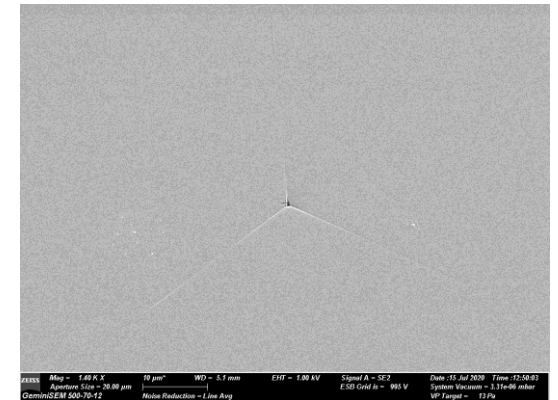
49mN



39mN



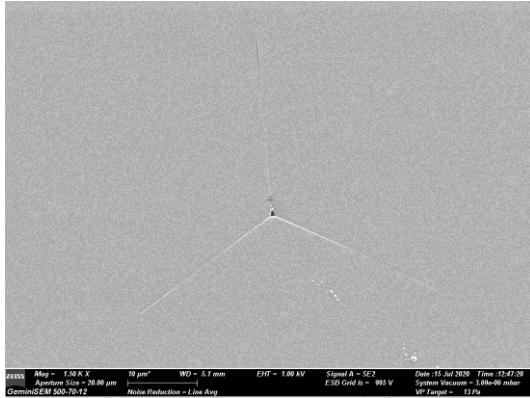
31mN



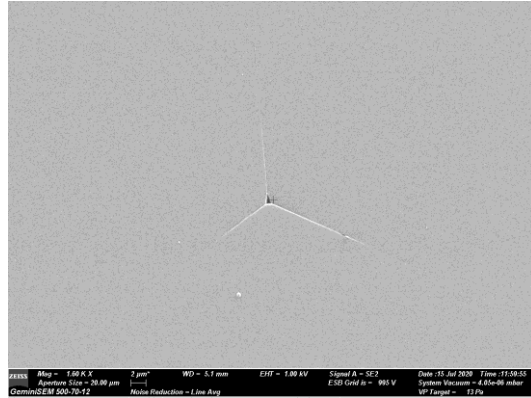
A社_キズ修復

“はかる”技術で未来を創る
13mN

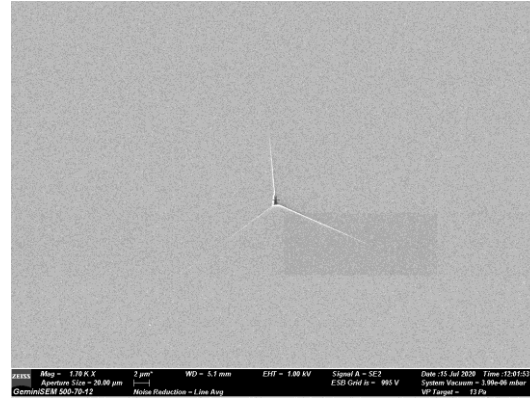
25mN



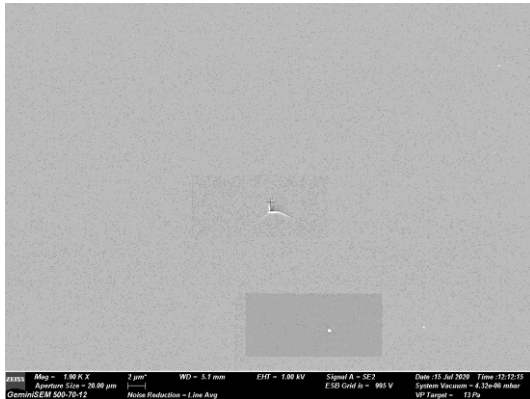
20mN



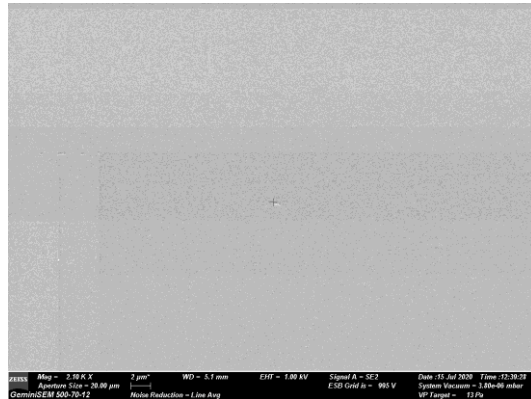
16mN



10mN



8mN



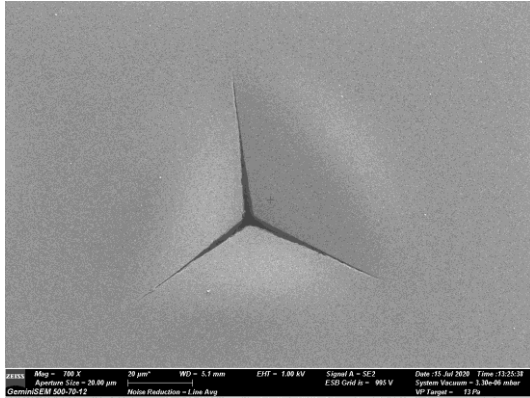
7mN



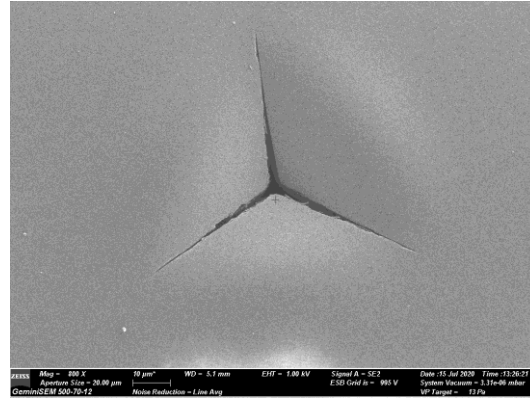
R社_キズ防止(5H)

“はかる”技術で未来を創る
435mN

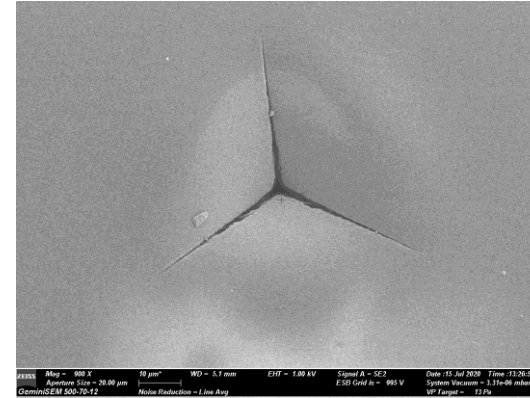
750mN



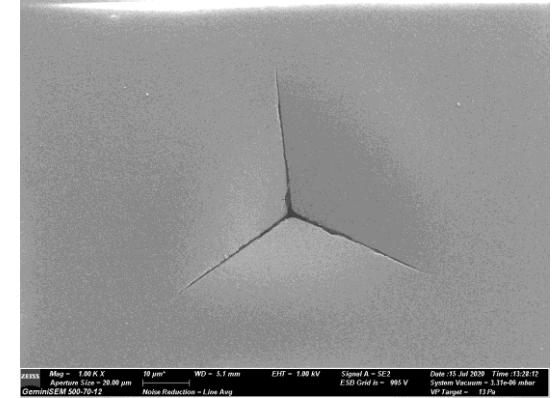
680mN



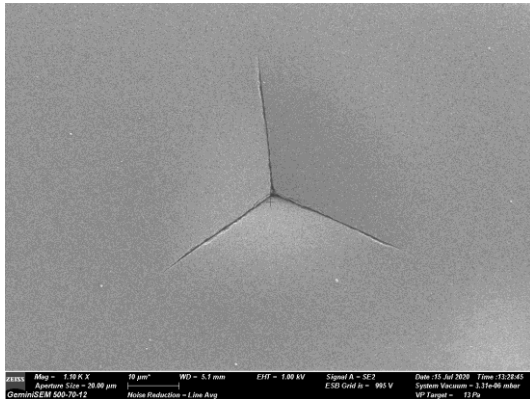
544mN



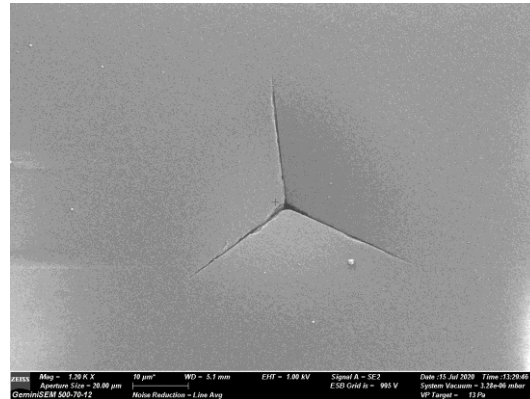
435mN



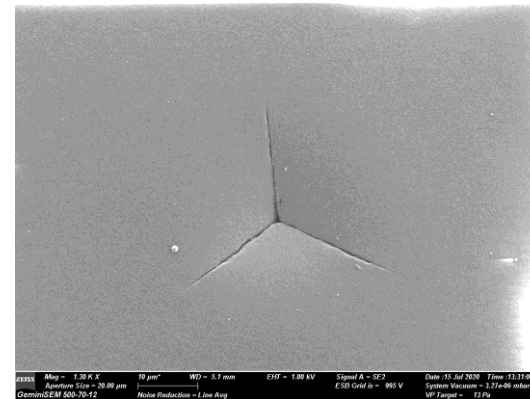
348mN



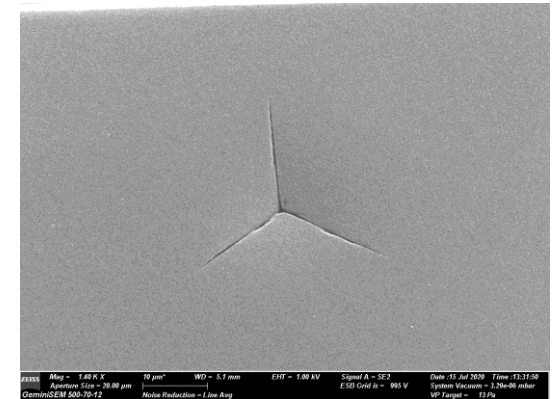
279mN



223mN



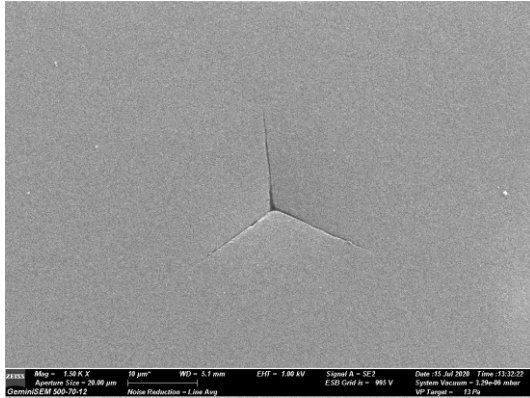
178mN



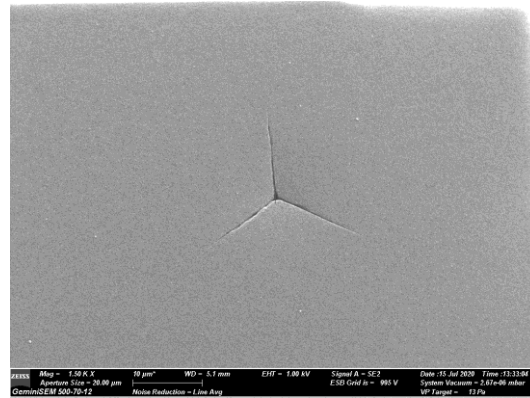
R社_キズ防止(5H)

“はかる”技術で未来を創る
73mN

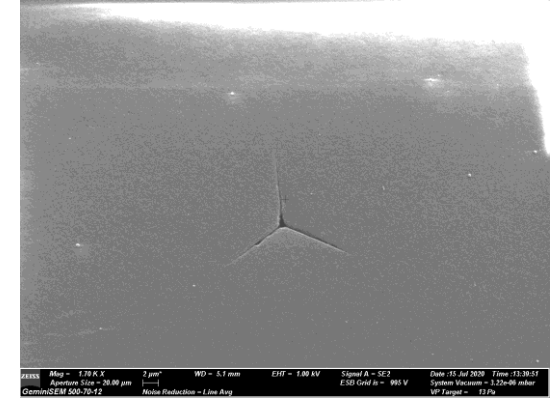
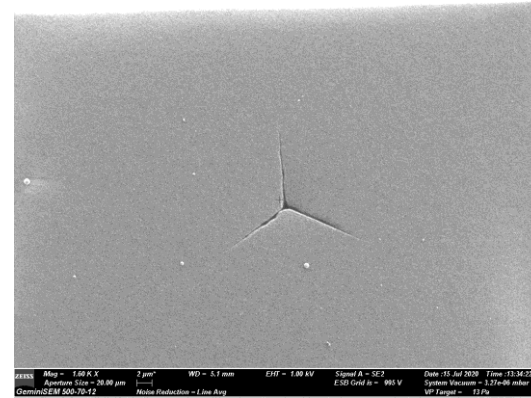
143mN



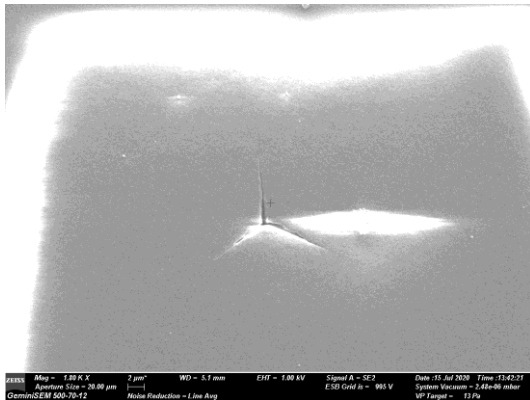
114mN



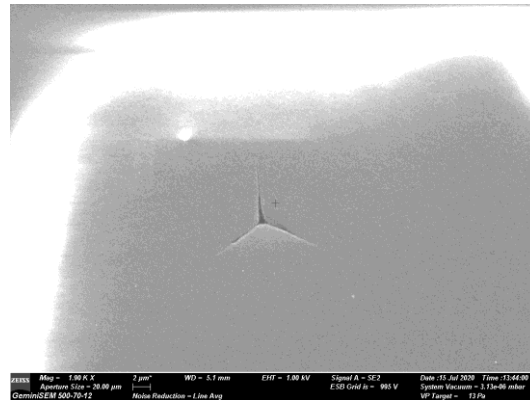
91mN



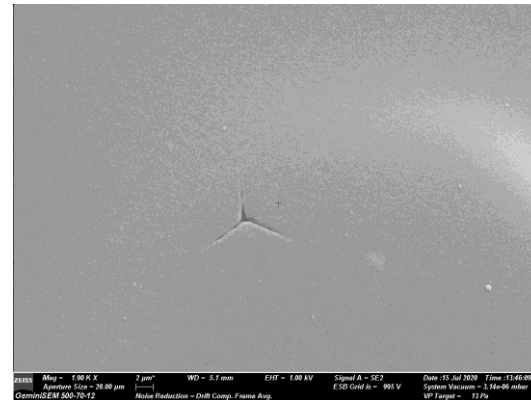
58mN



47mN



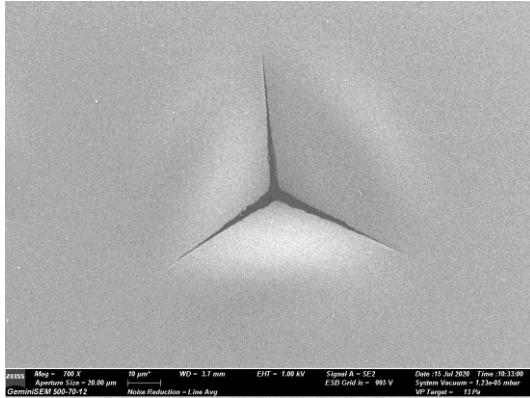
37mN



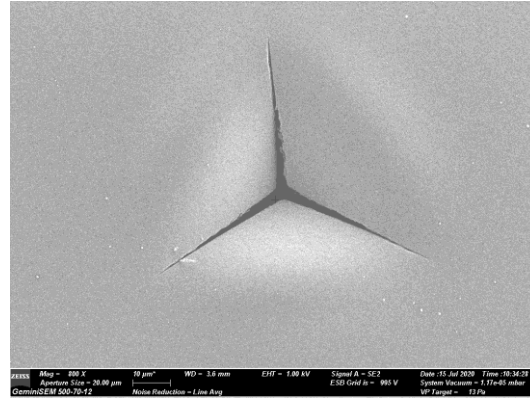
R社_キズ防止(5H)_耐衝撃

“はかる”技術で未来を創る
435mN

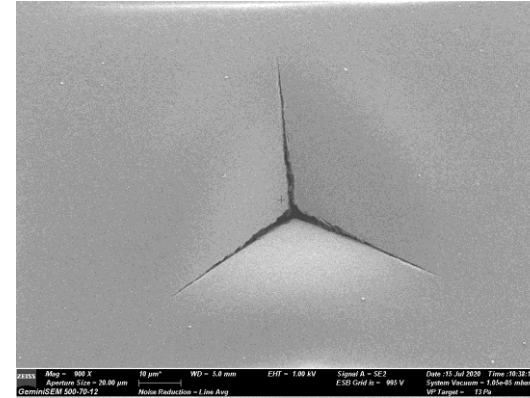
750mN



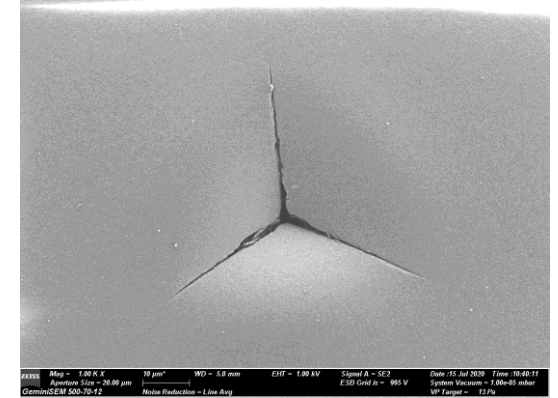
680mN



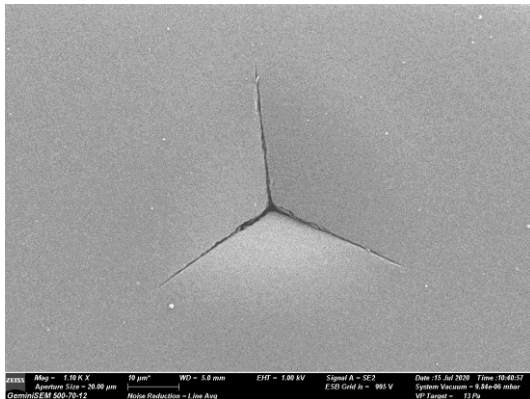
544mN



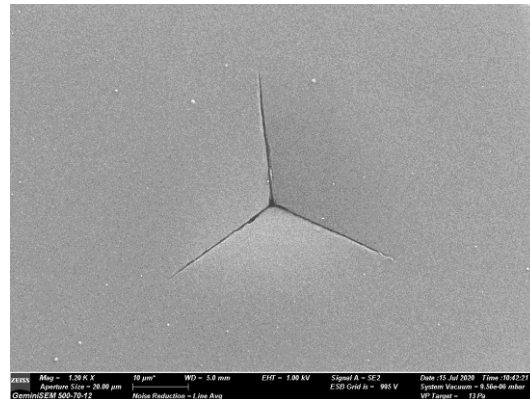
435mN



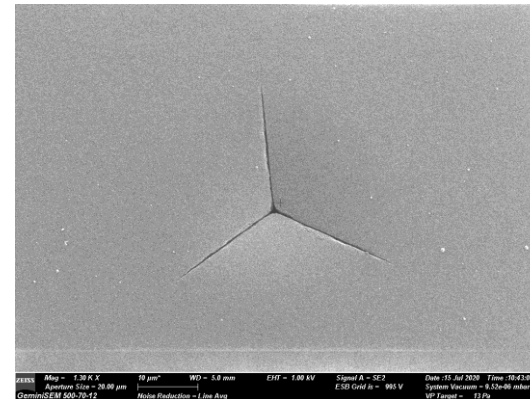
348mN



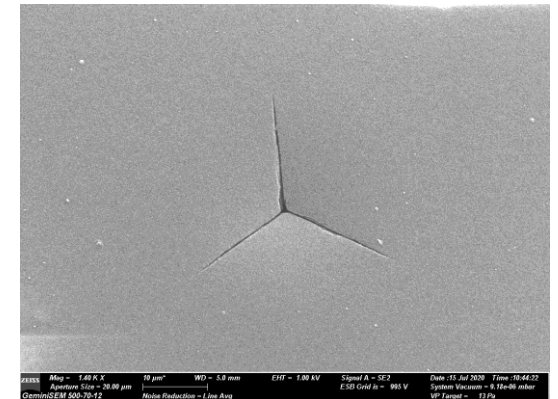
279mN



223mN



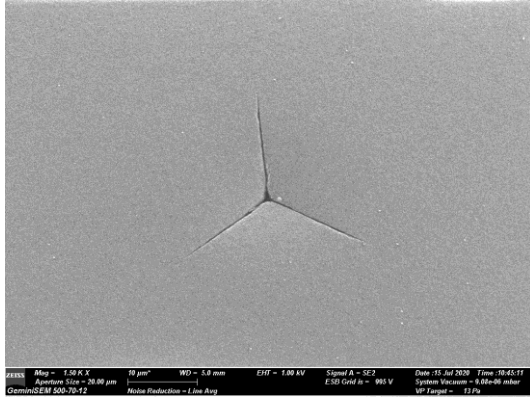
178mN



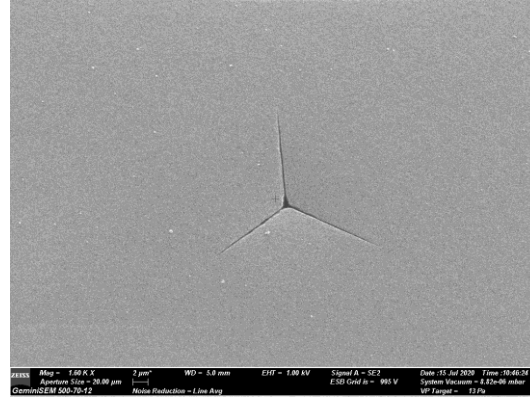
R社_キズ防止(5H)_耐衝撃

“はかる”技術で未来を創る
73mN

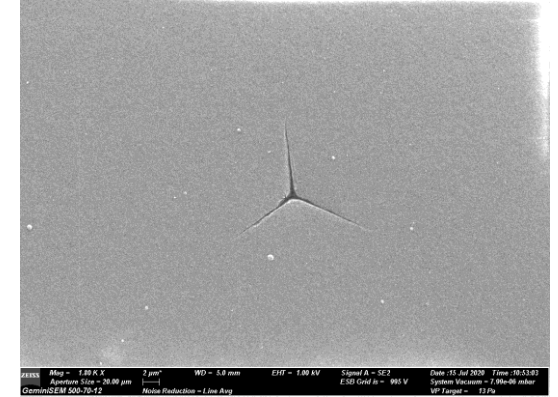
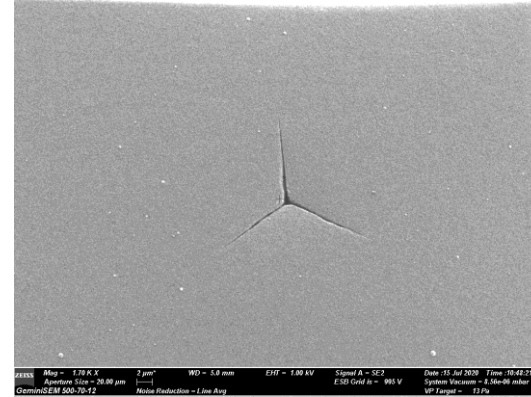
143mN



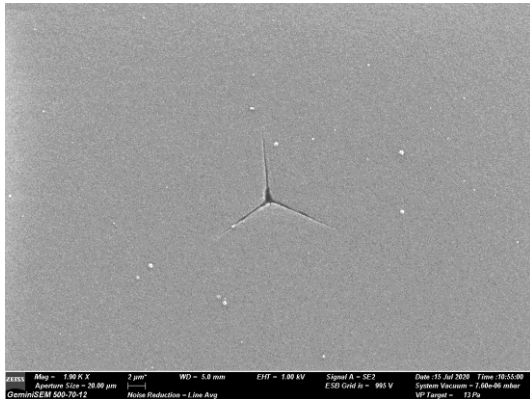
114mN



91mN



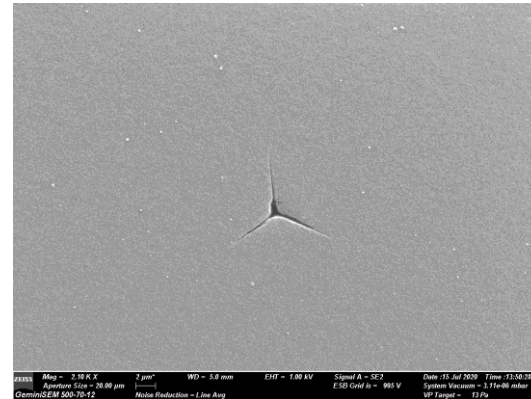
58mN



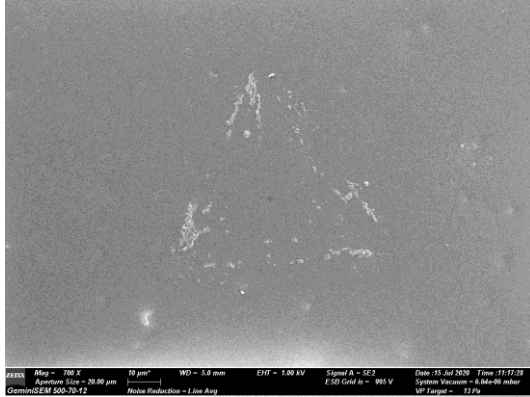
47mN



37mN

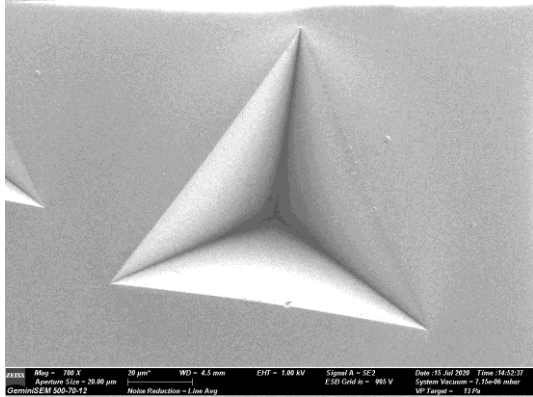


20mN

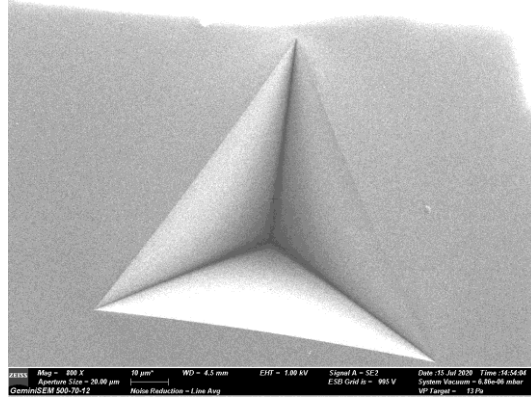


“はかる”技術で未来を創る
435mN

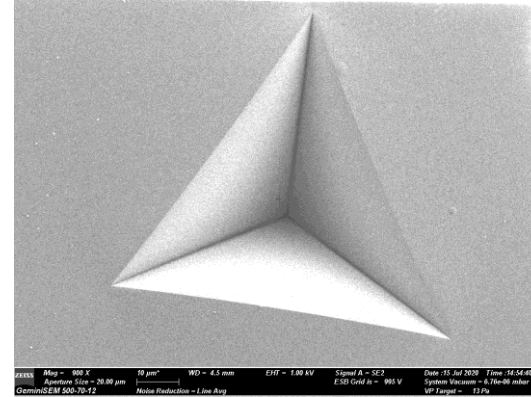
750mN



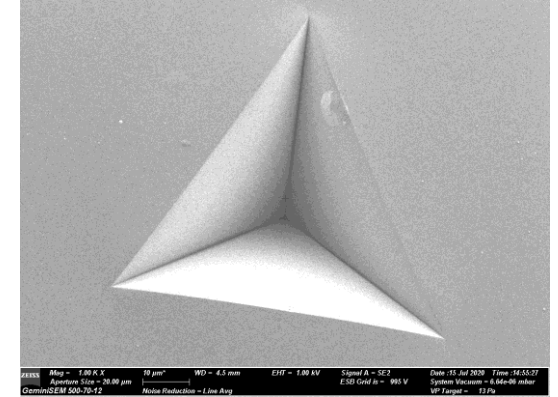
680mN



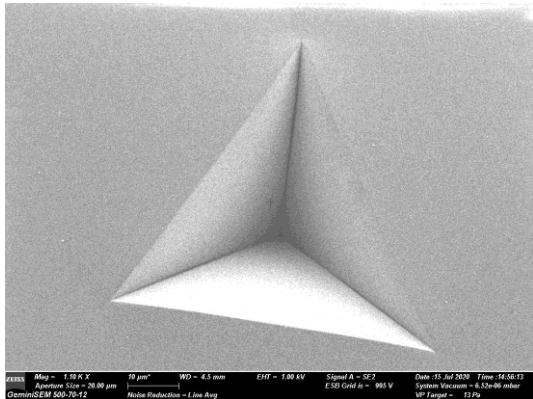
544mN



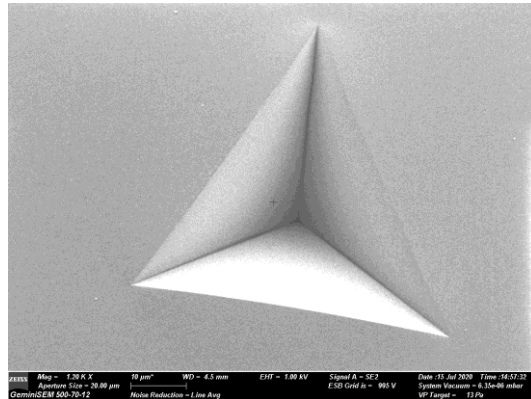
435mN



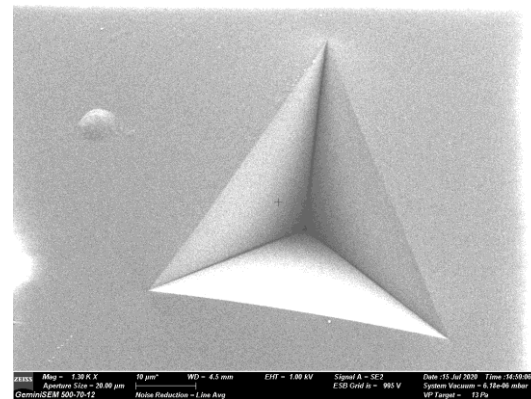
348mN



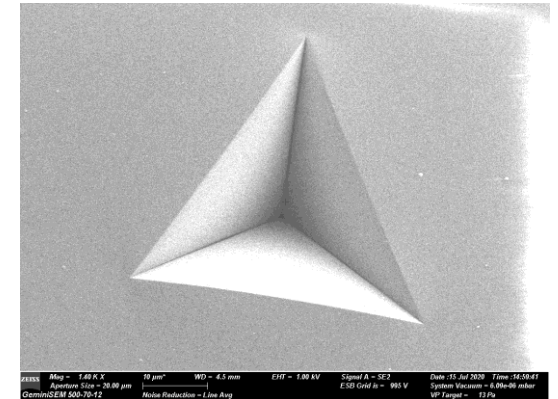
279mN



223mN

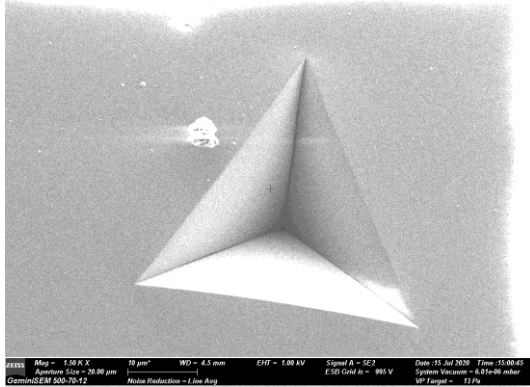


178mN

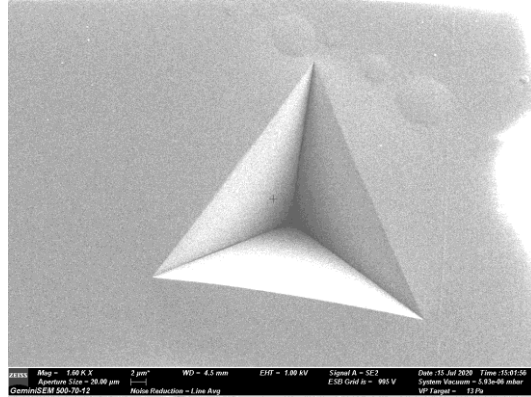


“はかる”技術で未来を創る
73mN

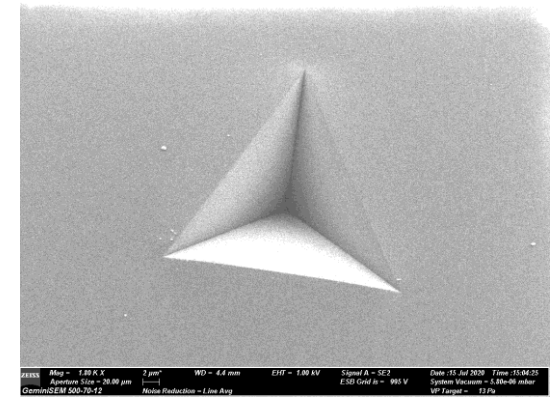
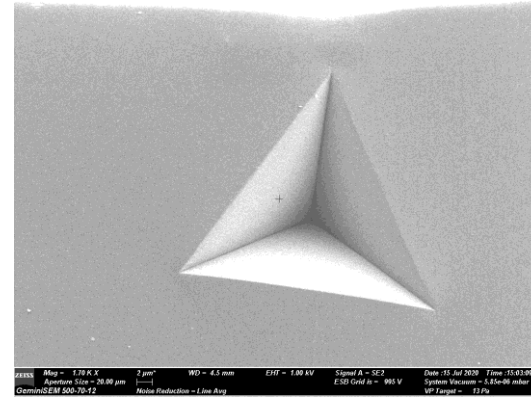
143mN



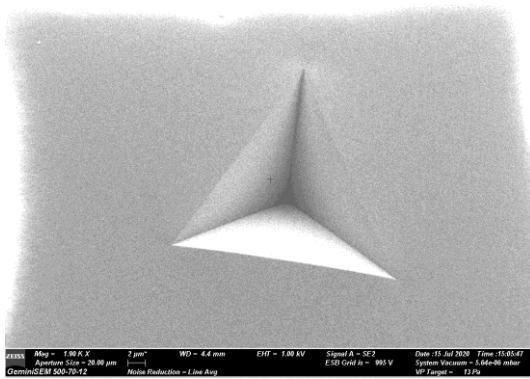
114mN



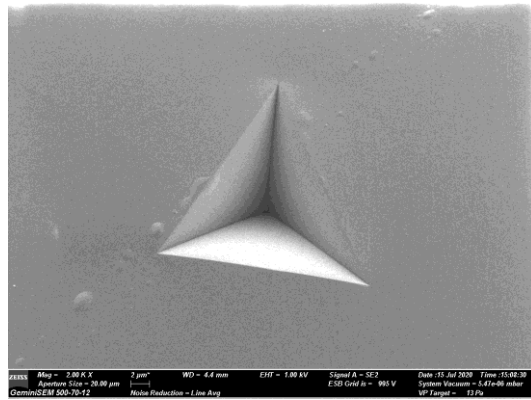
91mN



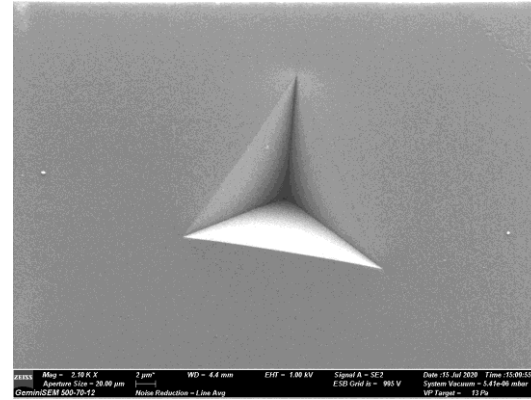
58mN



47mN



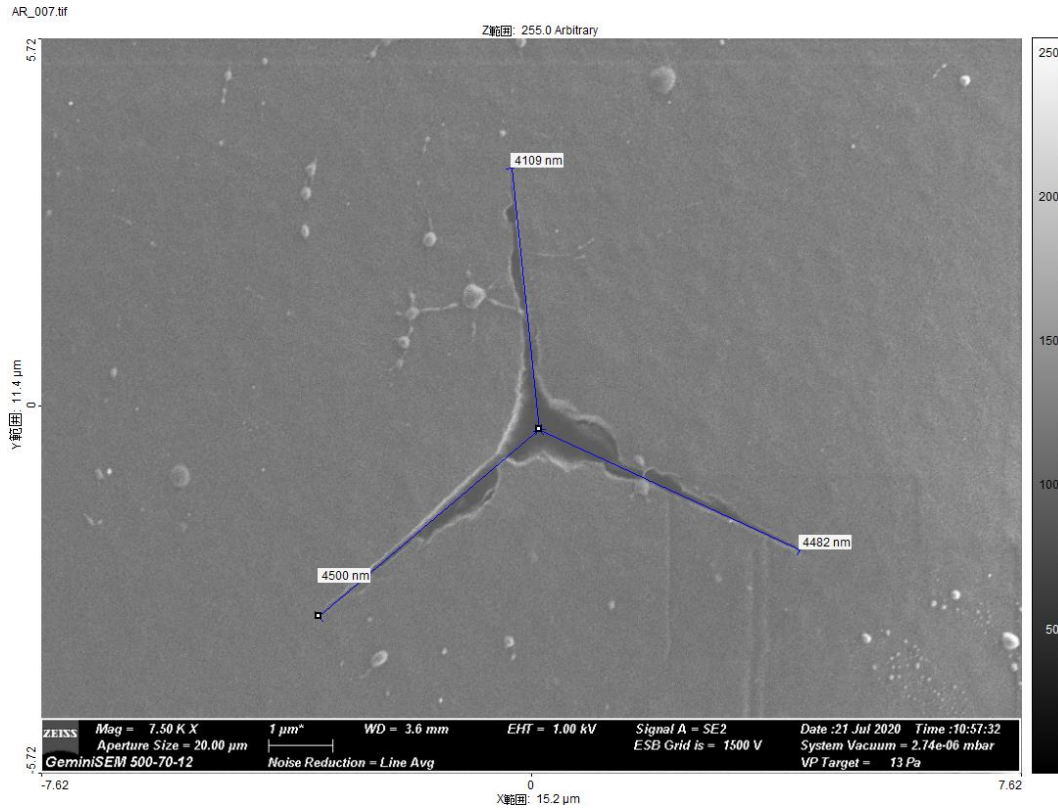
37mN



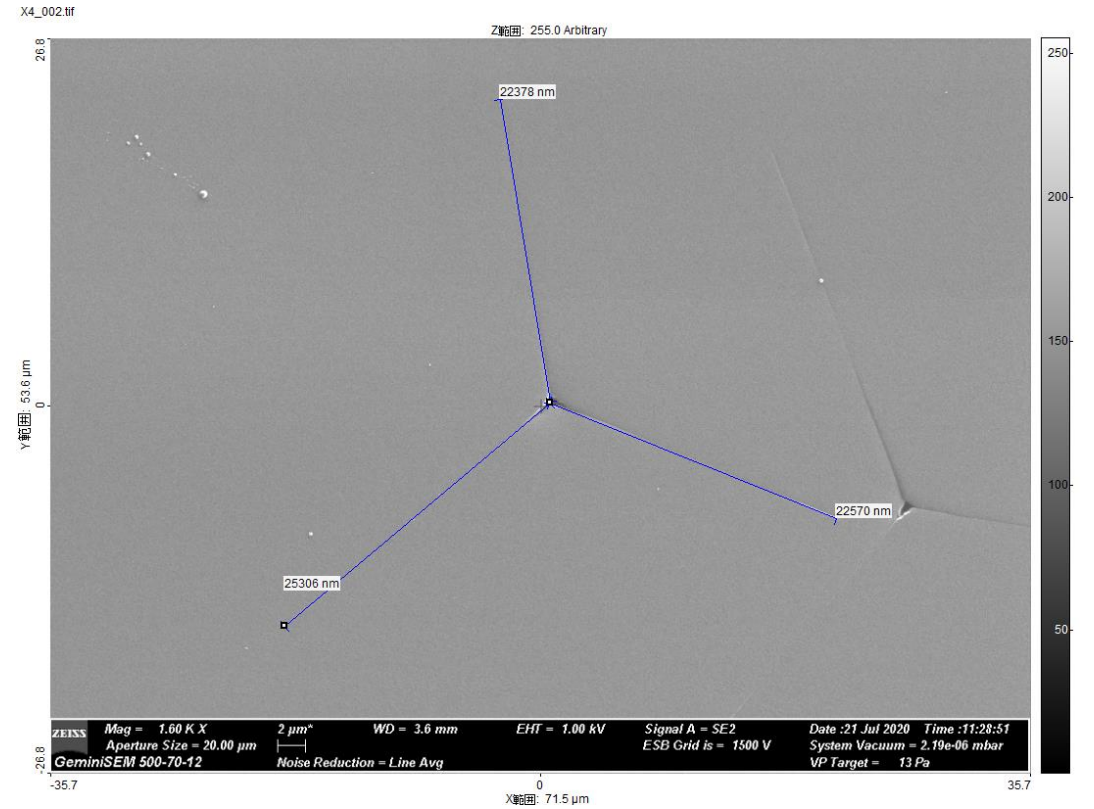
20mN押し込みによる破壊靱性値

“はかる”技術で未来を創る

A社_キズ防止(3H)



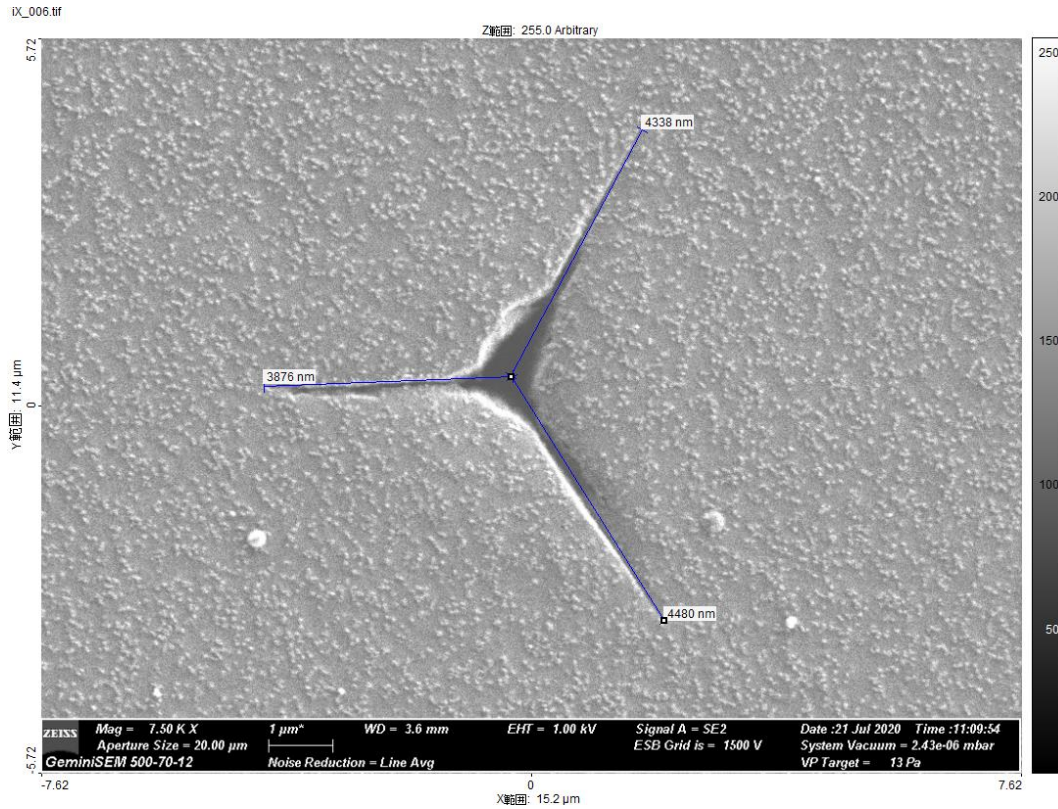
A社_キズ修復



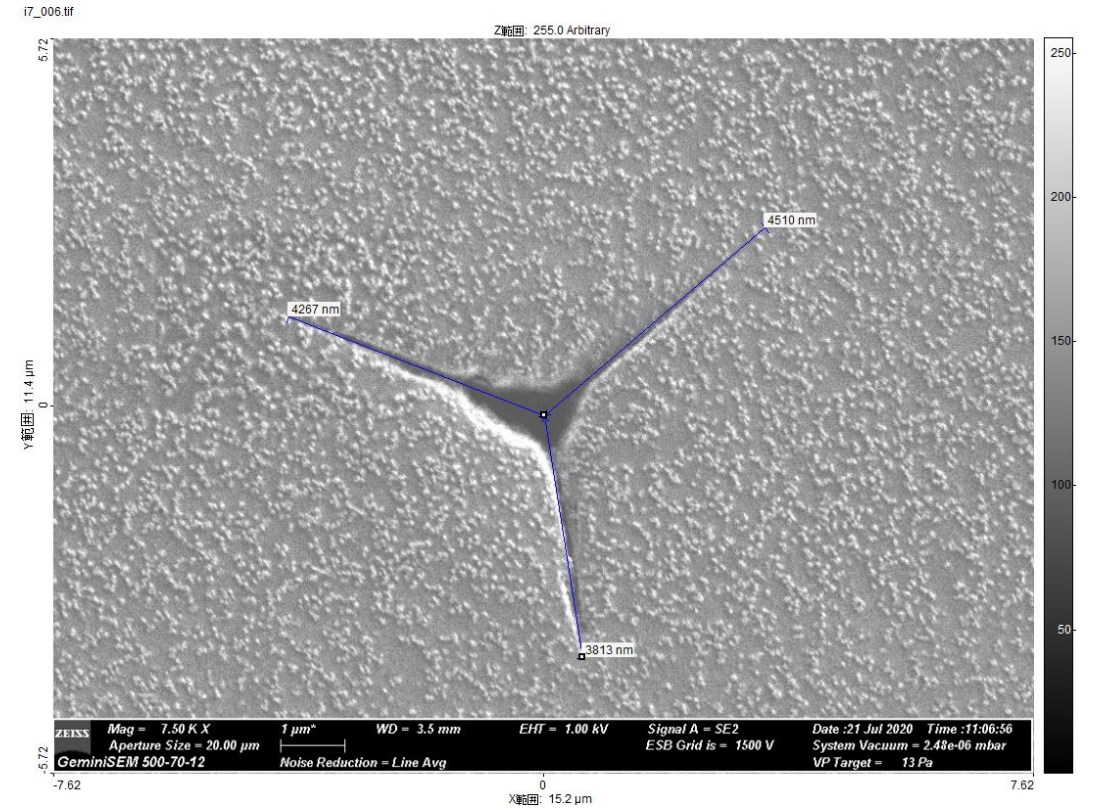
20mN押し込みによる破壊靱性値

“はかる”技術で未来を創る

R社_キズ防止(5H)



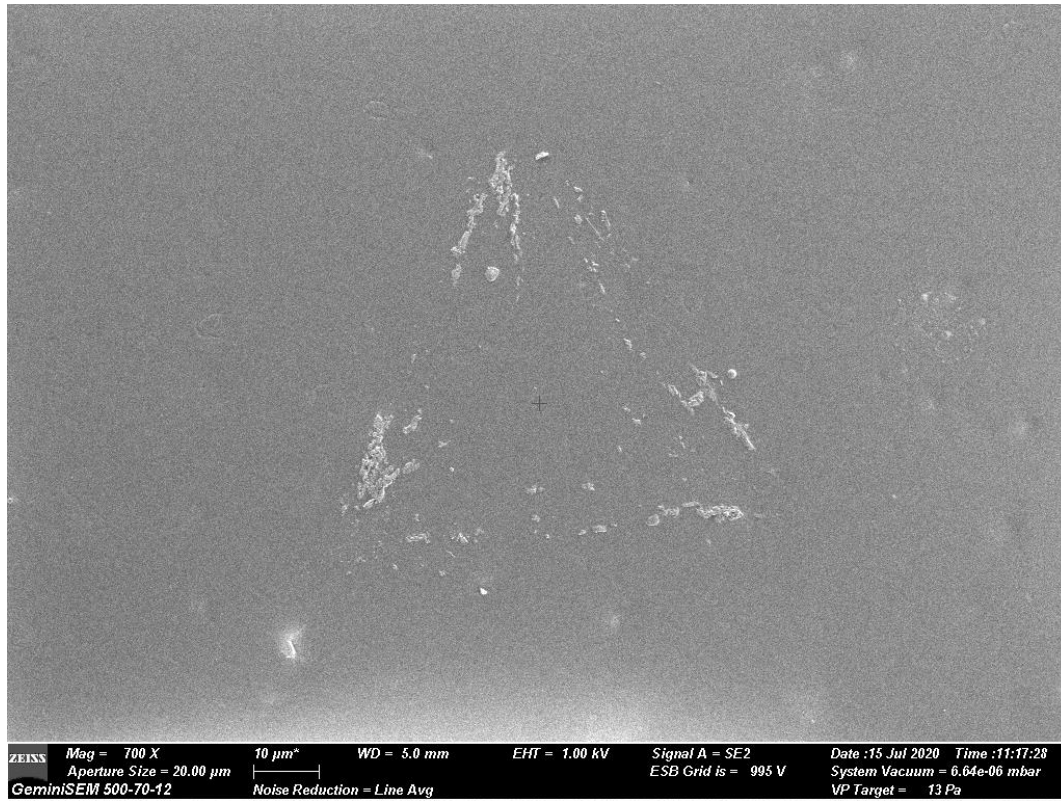
R社_キズ防止(5H)_耐衝撃



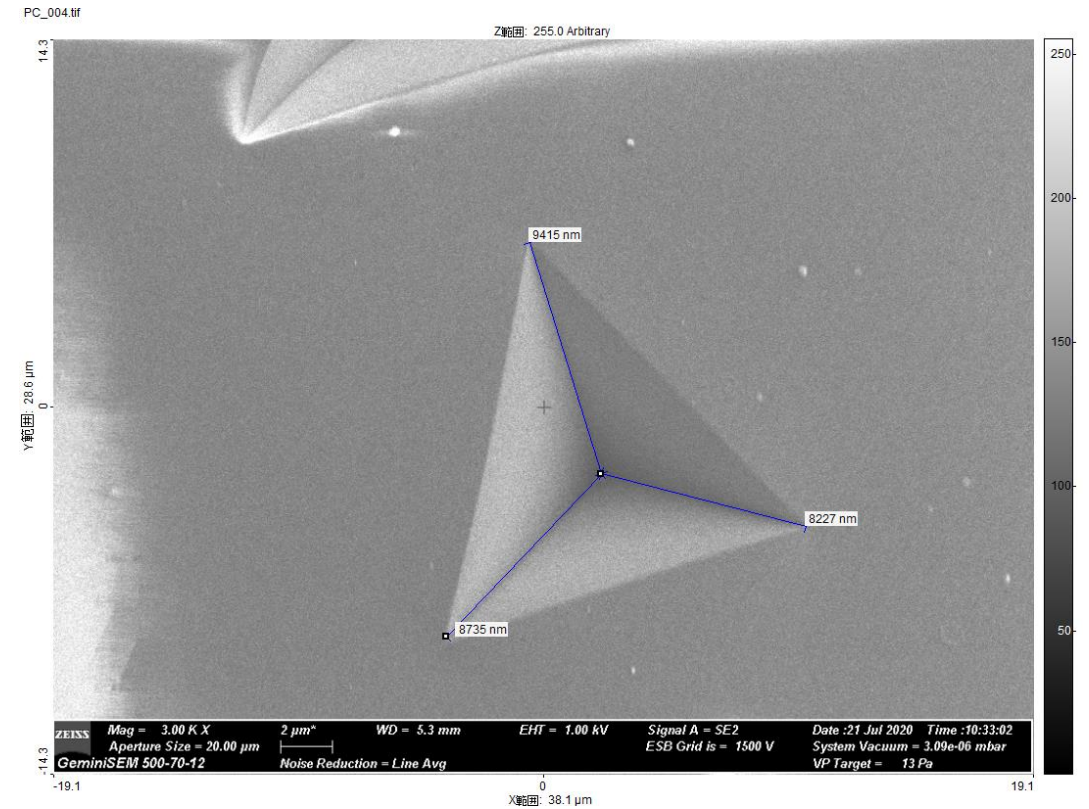
20mN押し込みによる破壊靱性値

“はかる”技術で未来を創る

R社_キズ防止(5H)

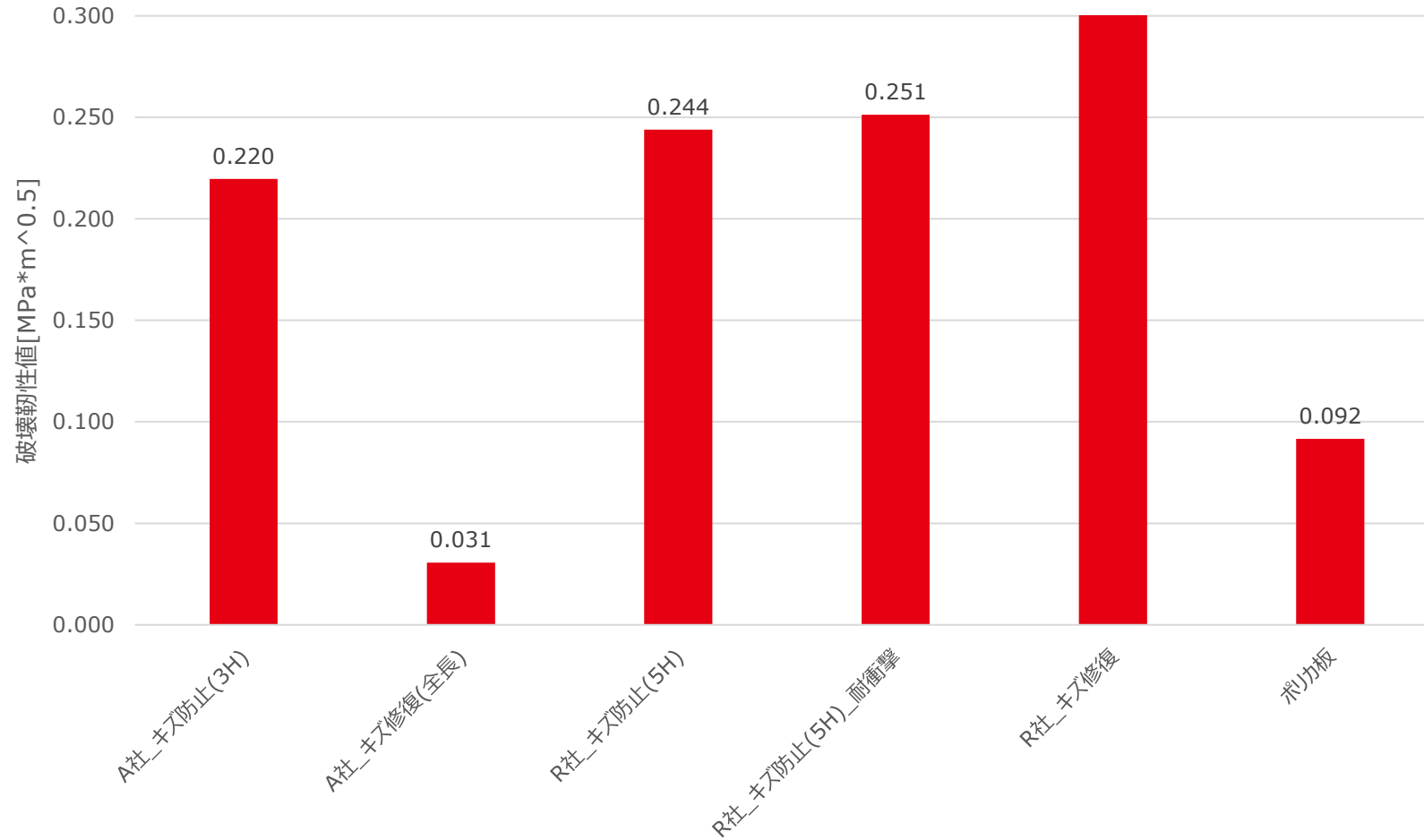


R社_キズ防止(5H)_耐衝撃



20mN押し込みによる破壊靱性値

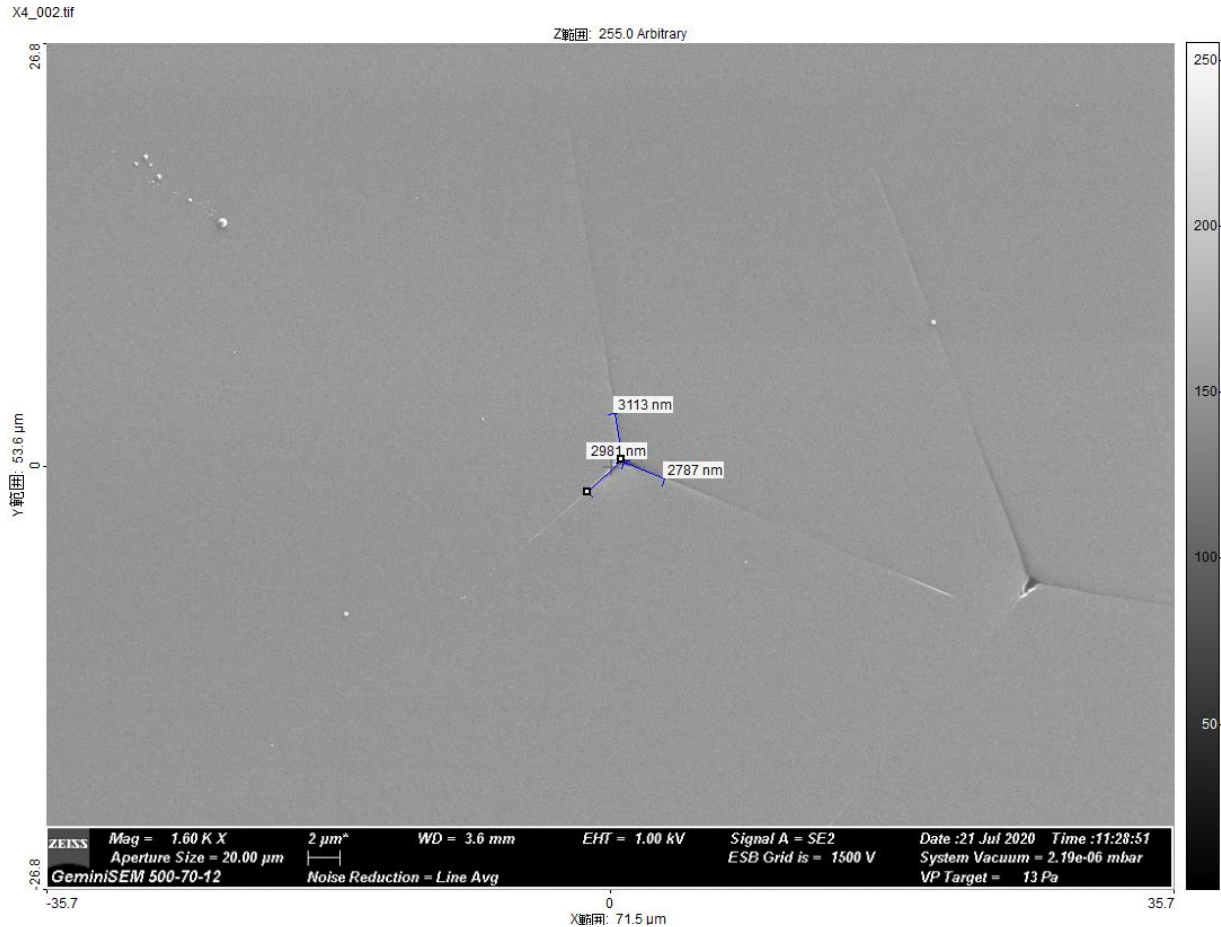
破壊靱性値



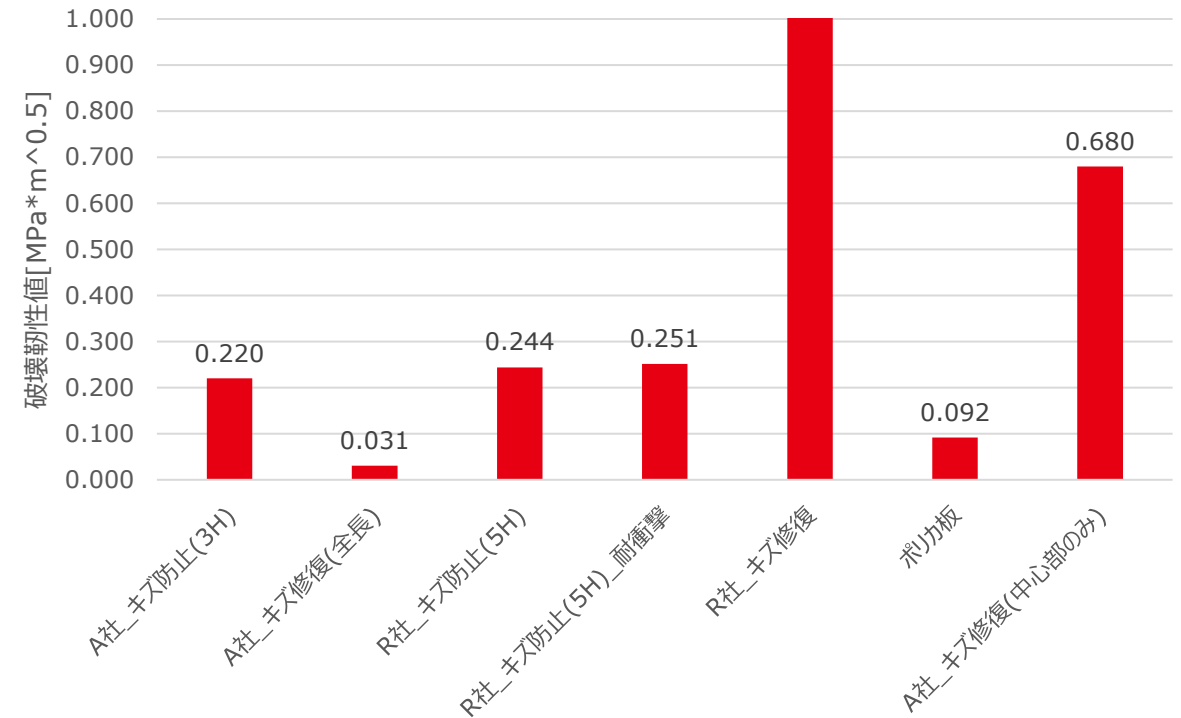
20mN押し込みによる破壊靱性値

“はかる”技術で未来を創る

A社_キズ修復



破壊靱性値



◆押し込み硬度・ヤング率測定

◆破壊靱性

スクラッチ

◆粘着力測定

◆動的粘弾性試験

使用装置

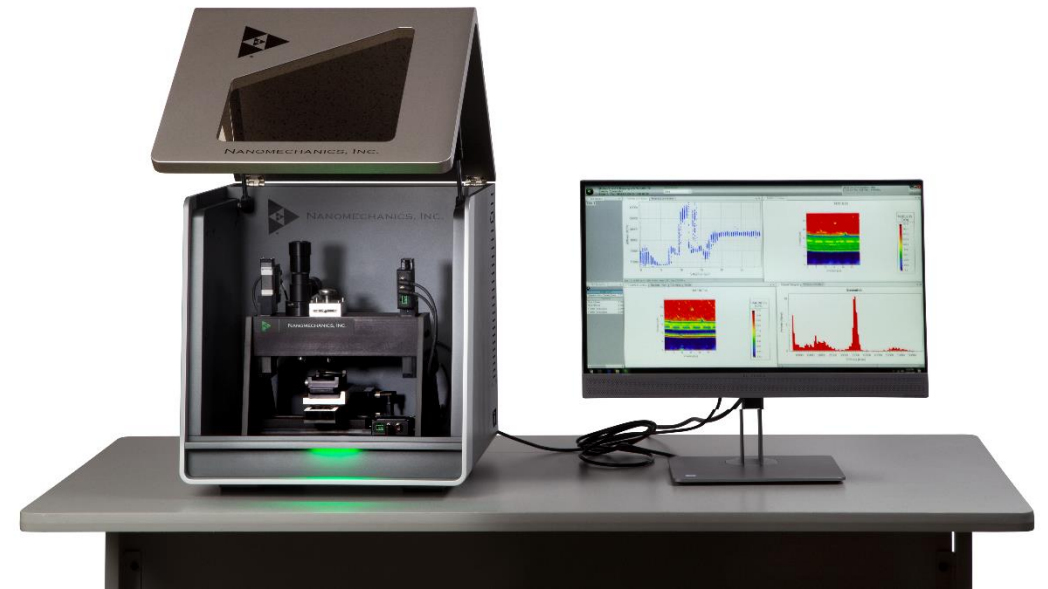
- › KLA社製iMicro型ナノインデントー
- › 高分解能InForce50ヘッド
- › 円錐圧子(先端曲率半径：1 μ m)

測定モード

- › 荷重増加スクラッチ

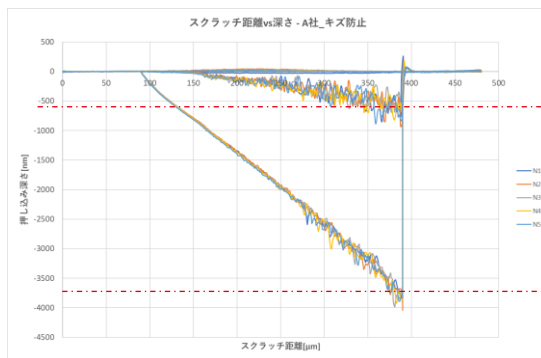
測定条件

- › 荷重範囲：0～3mN
- › スクラッチ距離：300 μ m
- › スクラッチ速度：30 μ m/s
- › 測定点数：各5点

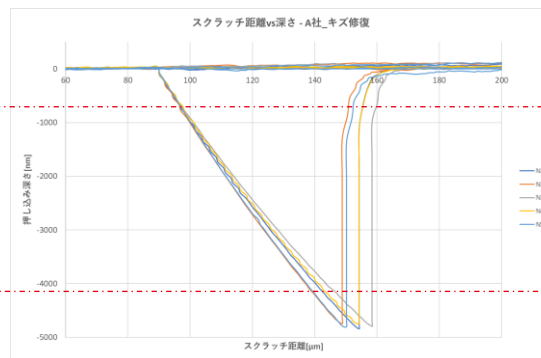


プロフィール

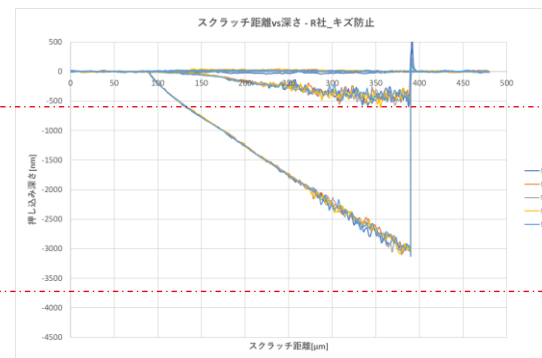
A社 キズ防止(3H)



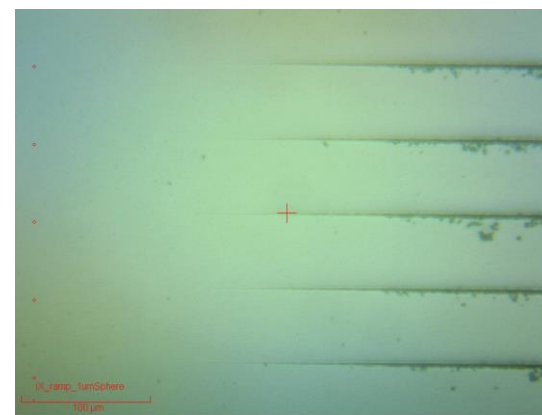
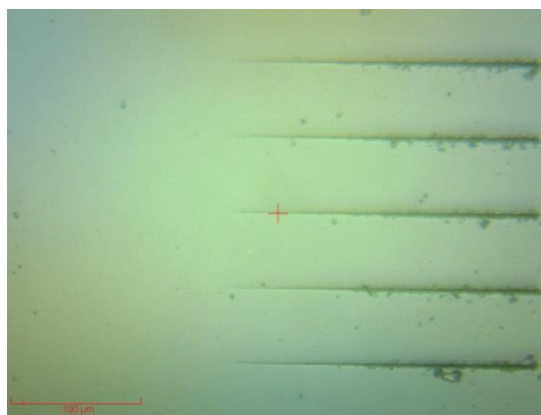
A社 キズ修復



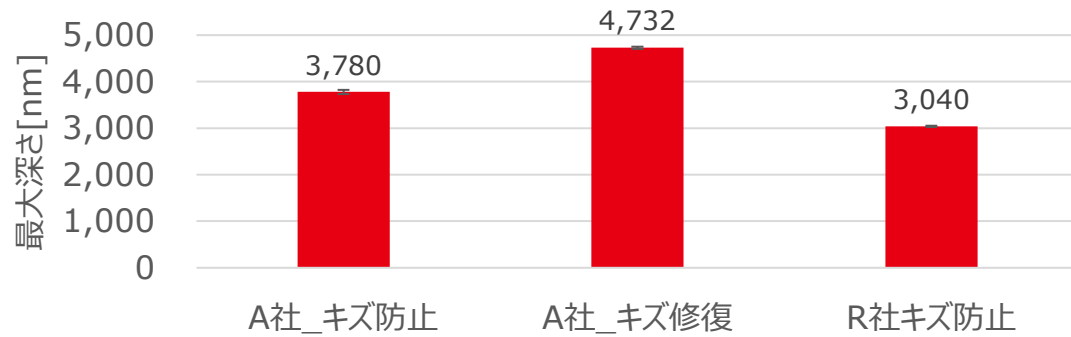
R社 キズ防止(5H)



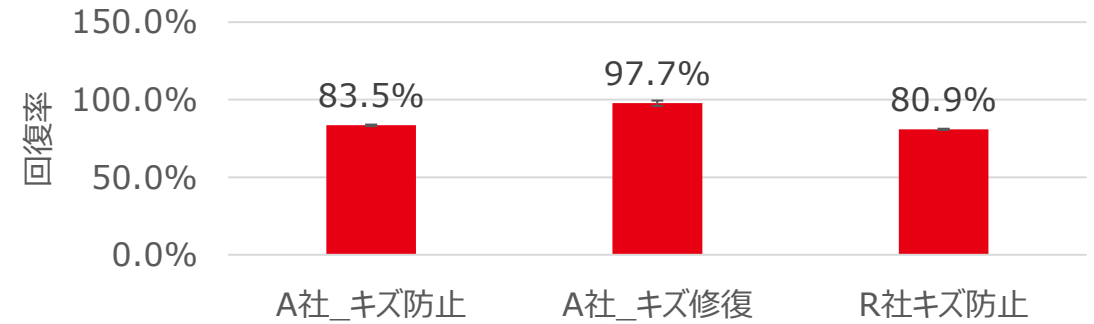
CCD像



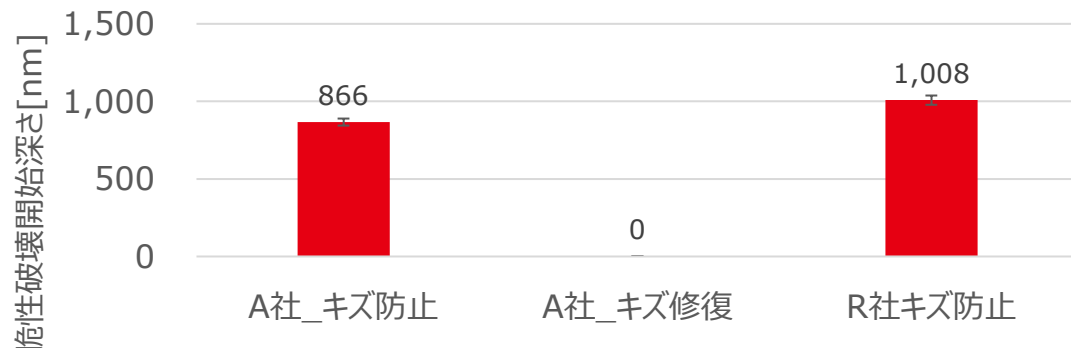
最大深さ



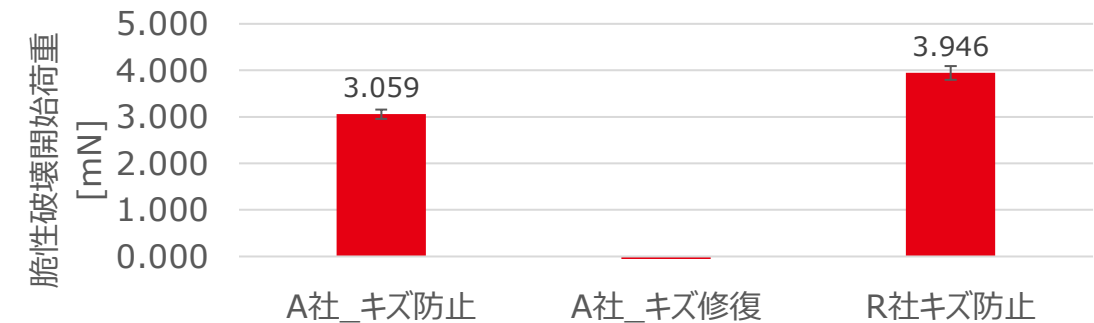
回復率



脆性破壊開始深さ



脆性破壊開始荷重



使用装置

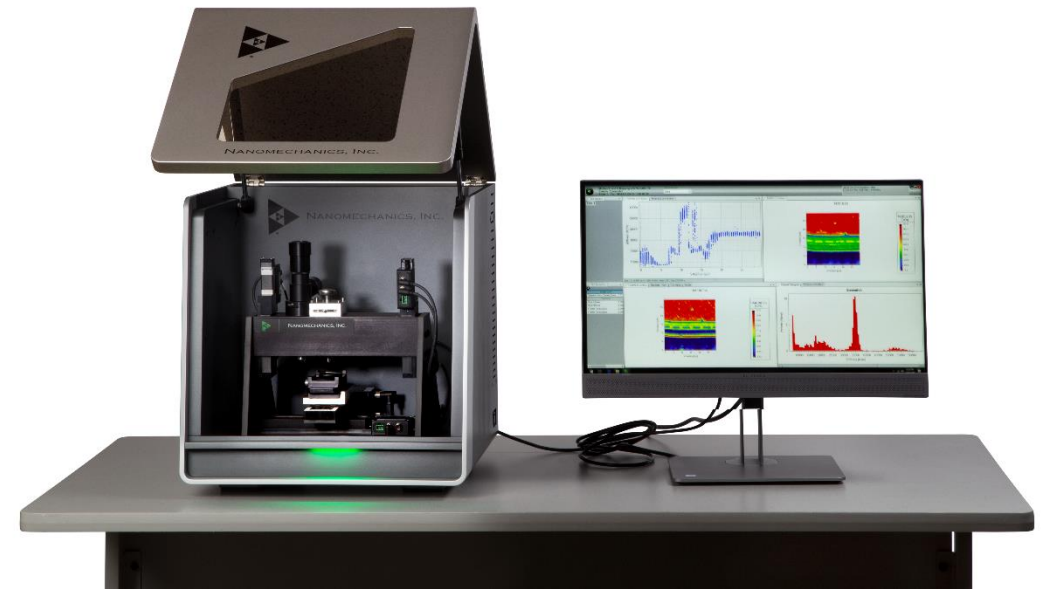
- › KLA社製iMicro型ナノインデントー
- › 高分解能InForce50ヘッド
- › 円錐圧子(先端曲率半径：1 μ m)

測定モード

- › 一定荷重スクラッチ

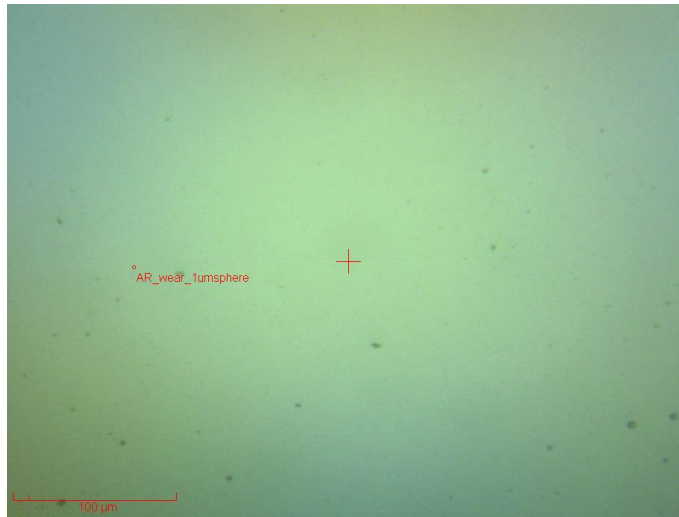
測定条件

- › 荷重範囲：0.5mN
- › スクラッチ距離：200 μ m
- › スクラッチ速度：20 μ m/s
- › 摩耗点数：各100回

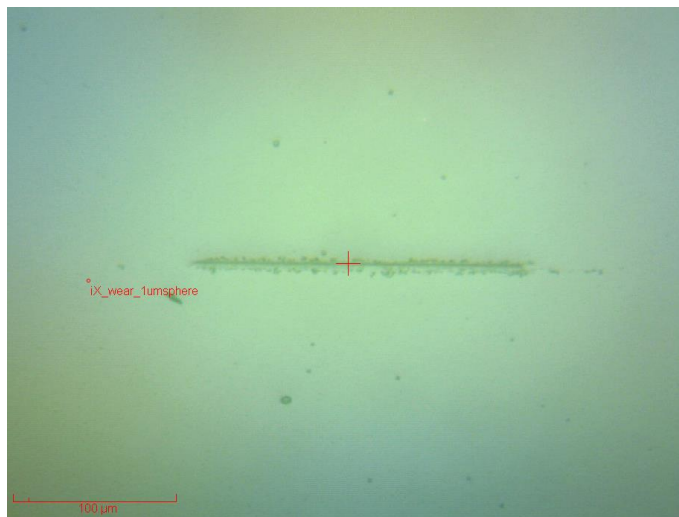


“はかる”技術で未来を創る

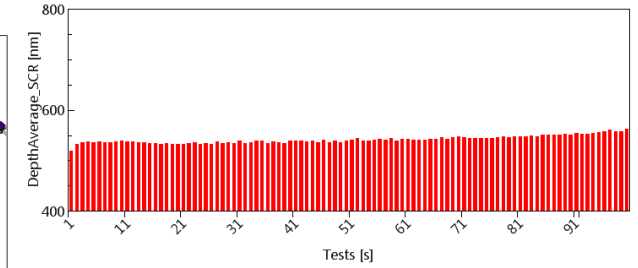
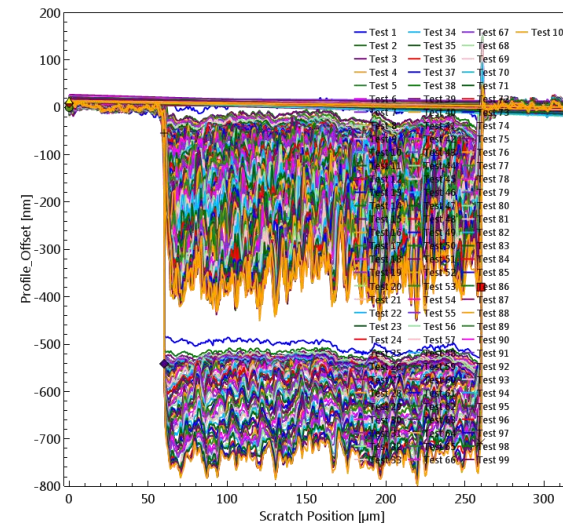
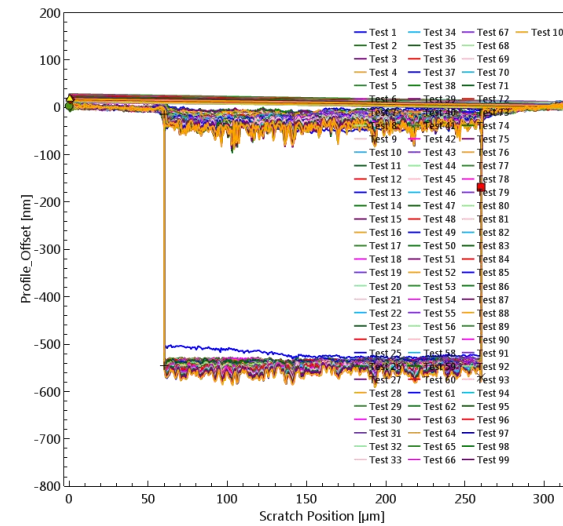
A社 キズ防止



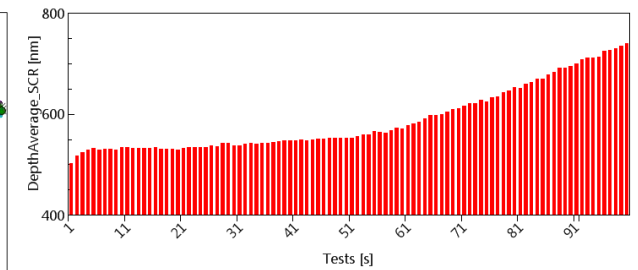
R社 キズ防止



プロフィール



摩耗回数と粗さ



◆押し込み硬度・ヤング率測定

◆破壊靱性

◆スクラッチ

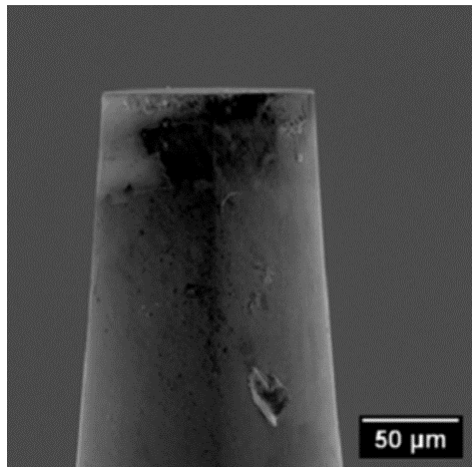
◆粘着力測定

動的粘弾性測定

CSMを利用し、加振周波数を変更した場合の貯蔵弾性率(E')、損失弾性率(E'')、損失正接(LF)を評価。
接触面積を一定に保つため、フラットパンチ圧子を使用。

$$E' = \frac{(1 - \nu^2) F_0}{d z_0} \cos \delta \qquad E'' = \frac{(1 - \nu^2) F_0}{d z_0} \sin \delta \qquad LF = \tan \delta = \frac{E''}{E'}$$

F_0 :振動荷重, z_0 :振動振幅, δ :位相シフト, d :接触面積, ν :ポアソン比



平坦円筒型のフラットパンチの場合、接触剛性はおおよそ $E'D$ となる。ここで、 E' は予測される貯蔵弾性率で、圧子直径(D)は以下のように選択。

$$50 \text{ N/m} < E'D < 20,000 \text{ N/m}$$

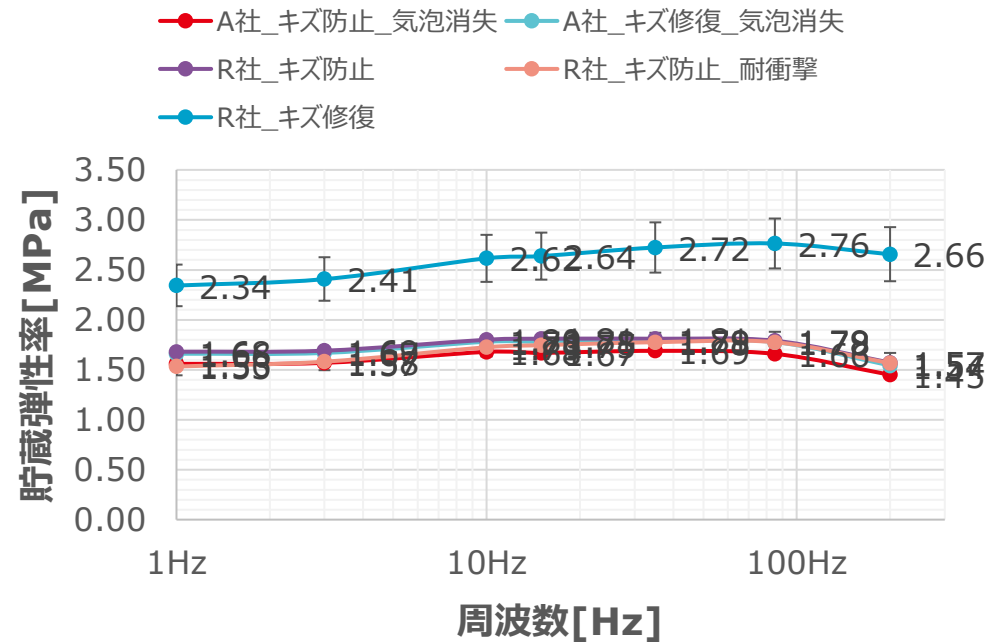
$$\frac{50 \text{ N/m}}{20 \mu\text{m}} < E' < \frac{20,000 \text{ N/m}}{20 \mu\text{m}}$$

$$2.5 \text{ MPa} \leq E' \leq 1 \text{ GPa}$$

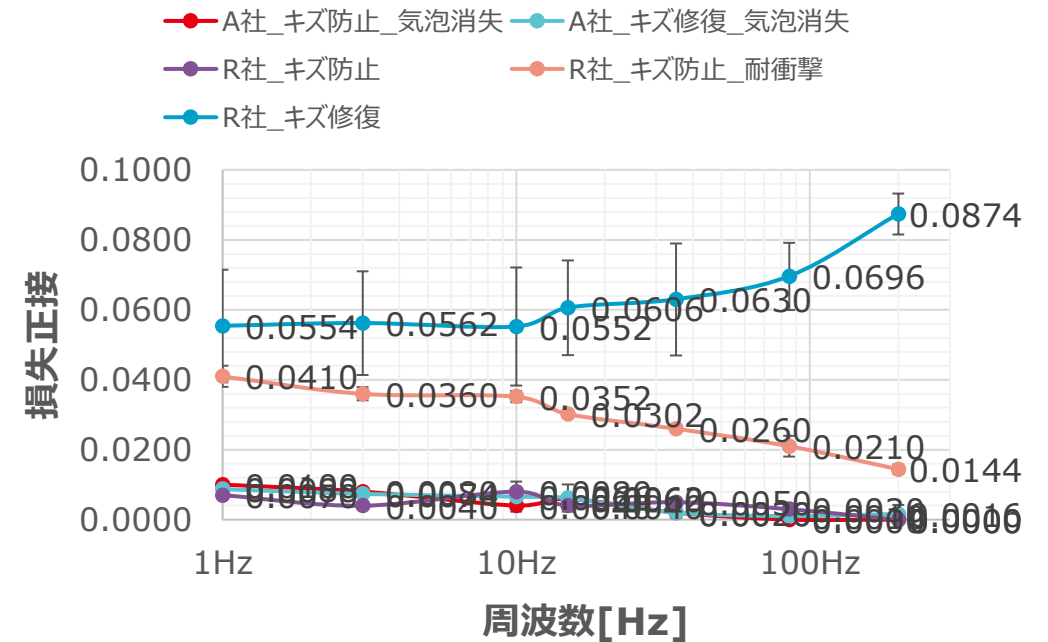
動的粘弾性(吸着面側)

直径50umのフラットパンチを用いて測定しました。目標押し込み深さは500nmです。
周波数は1~200Hzの範囲を掃引しています。

貯蔵弾性率



損失正接

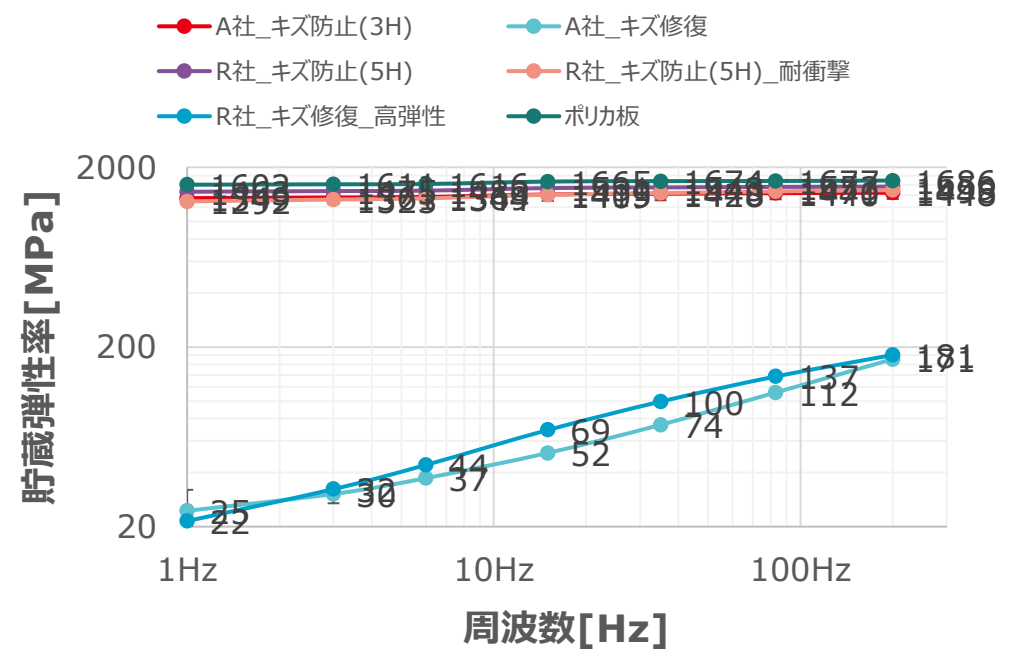


動的粘弾性(表側)

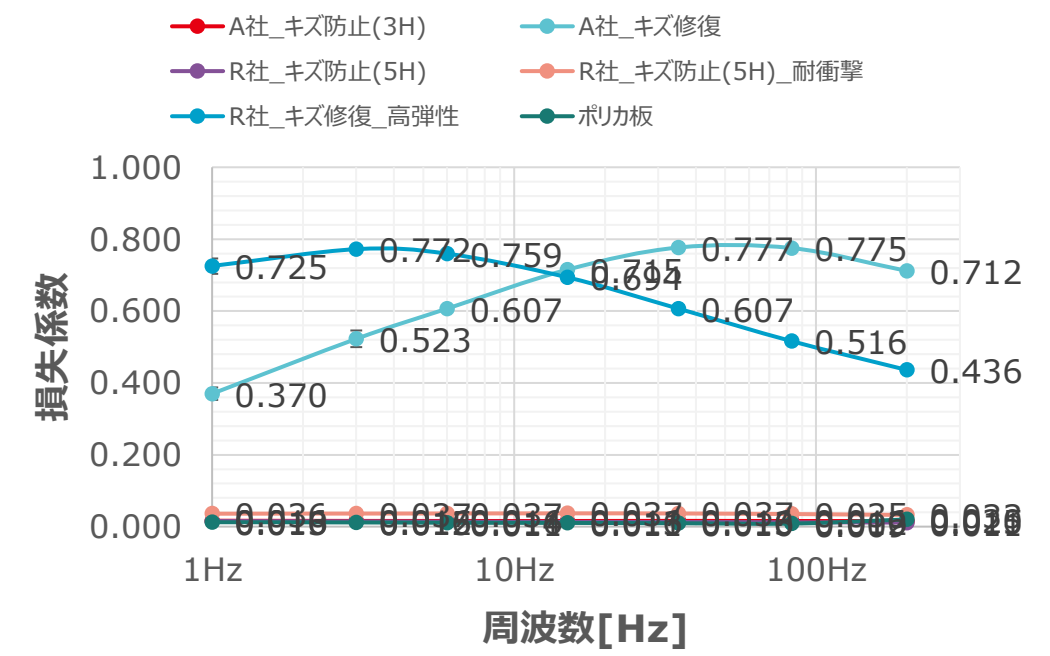
“はかる”技術で未来を創る

直径20umのフラットパンチを用いて測定しました。目標押し込み深さは500nmです。周波数は1~200Hzの範囲を掃引しています。

貯蔵弾性率



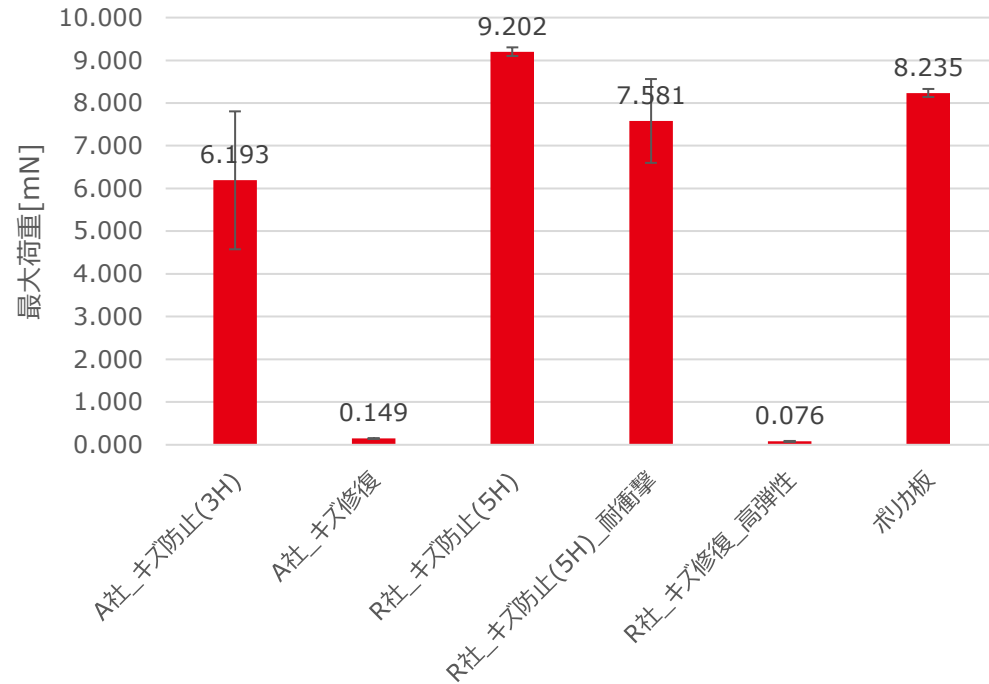
損失正接



硬さの指標(表側)

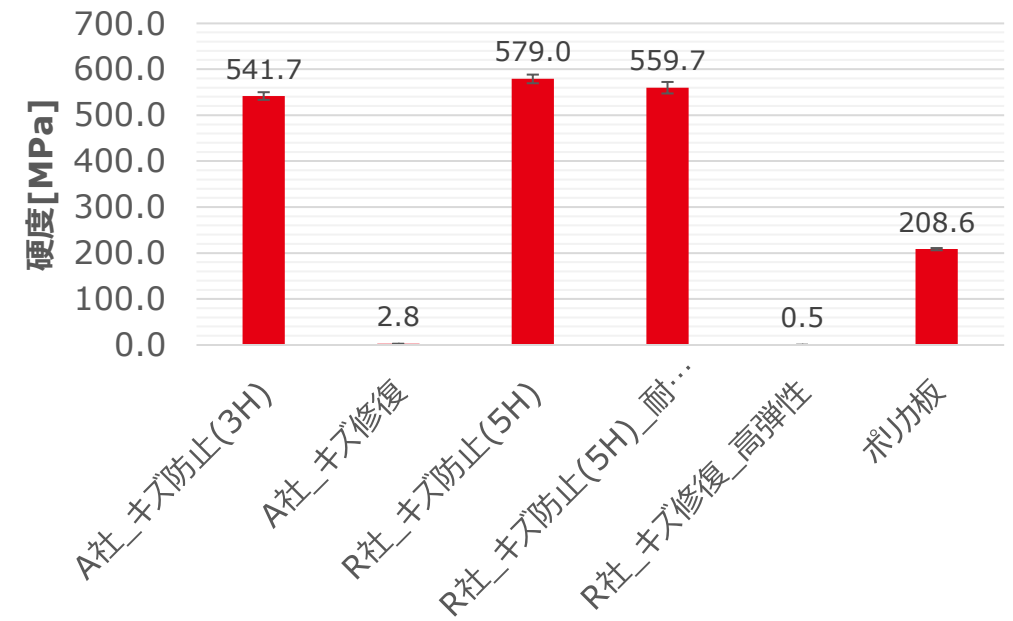
押し込み深さ500nmに到達するまでに要した荷重は下記の通りです。

最大荷重



硬度

(平均算術深さ : 475nm~525nm)



◆押し込み硬度・ヤング率測定

◆破壊靱性

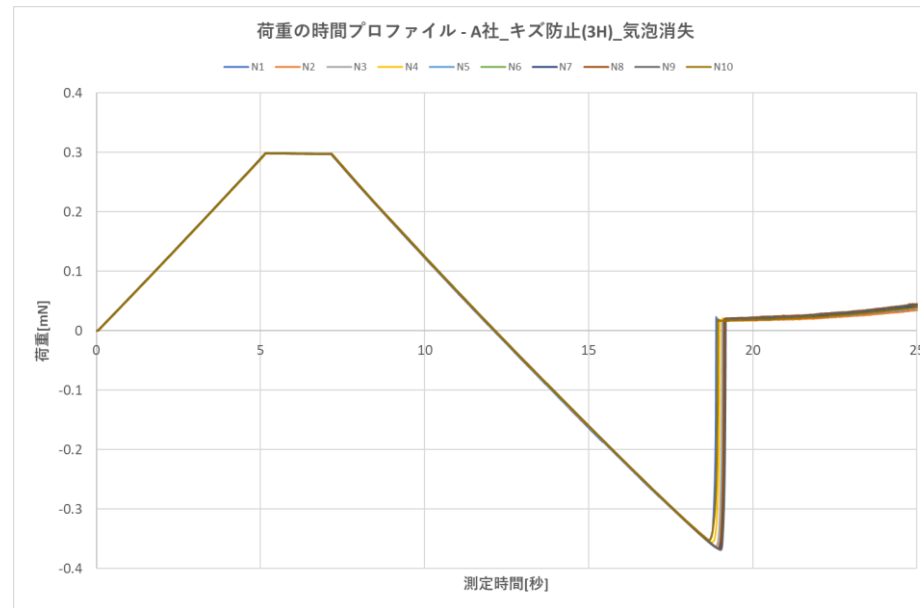
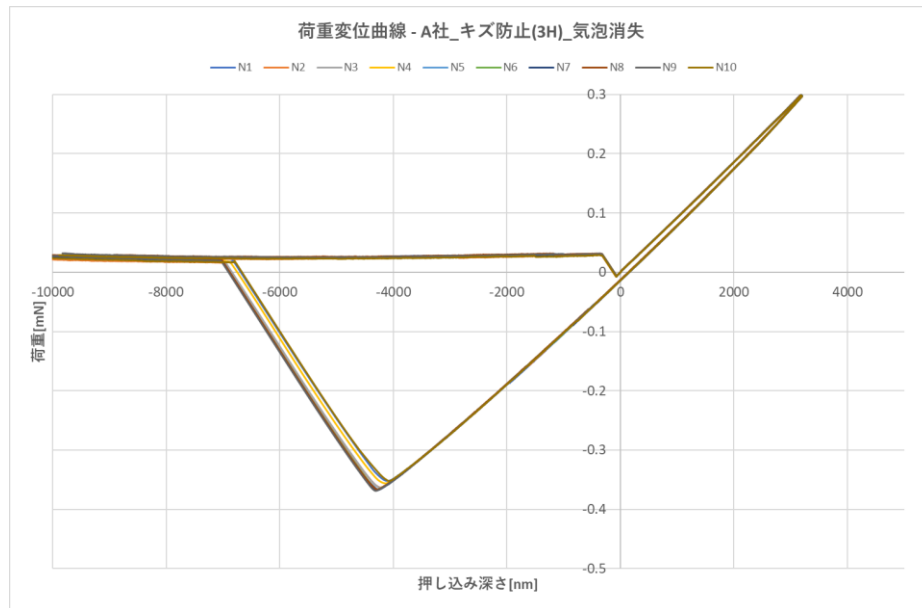
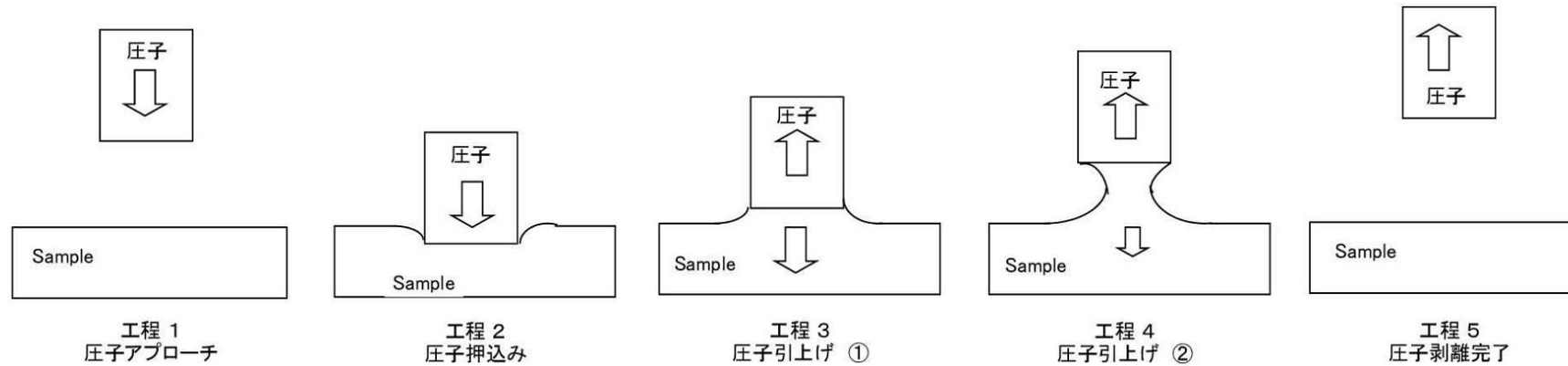
◆スクラッチ

粘着力測定

◆動的粘弾性試験

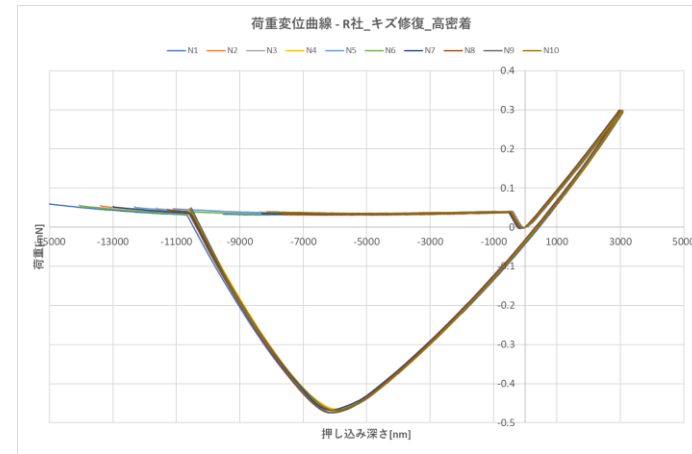
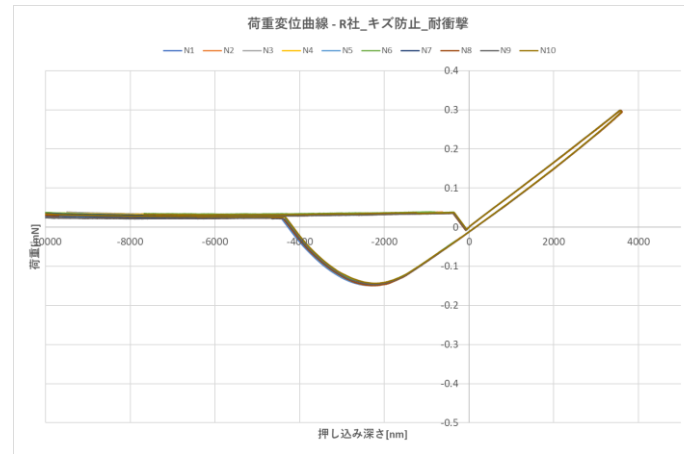
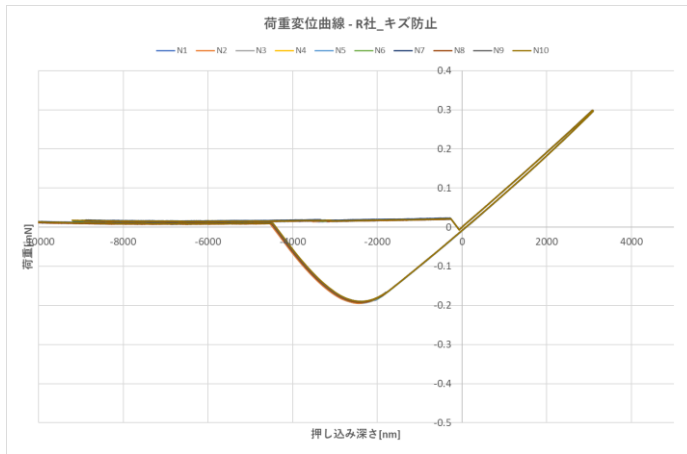
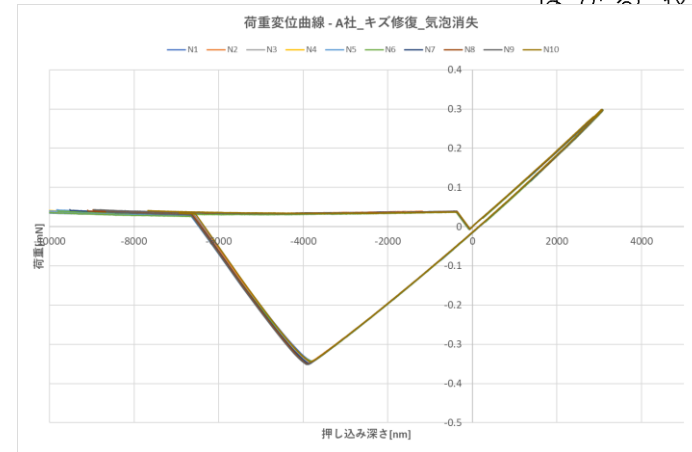
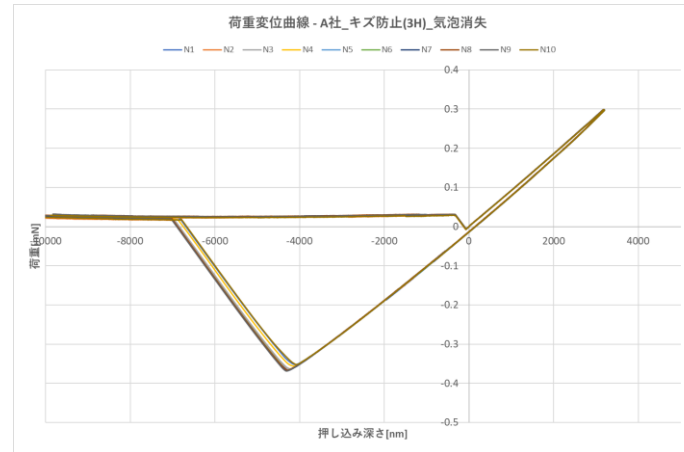
粘着力試験の概要

“はかる”技術で未来を創る



吸着面の測定

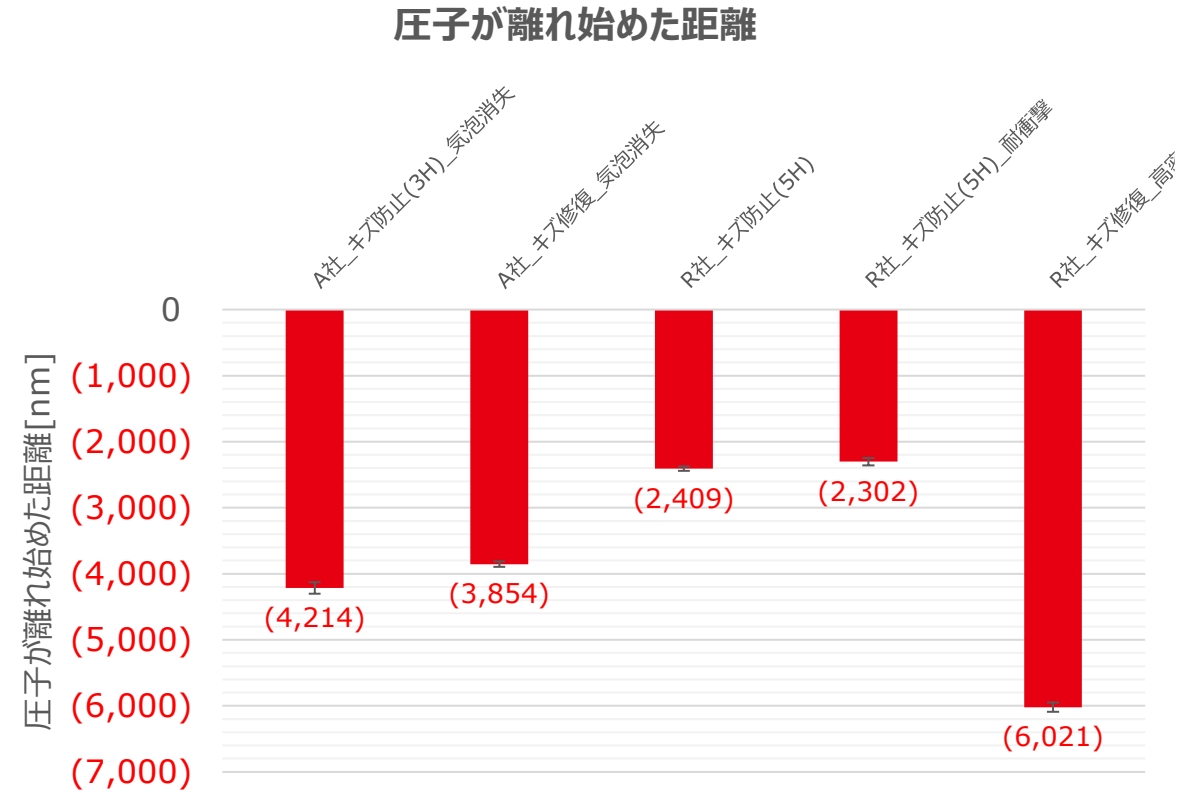
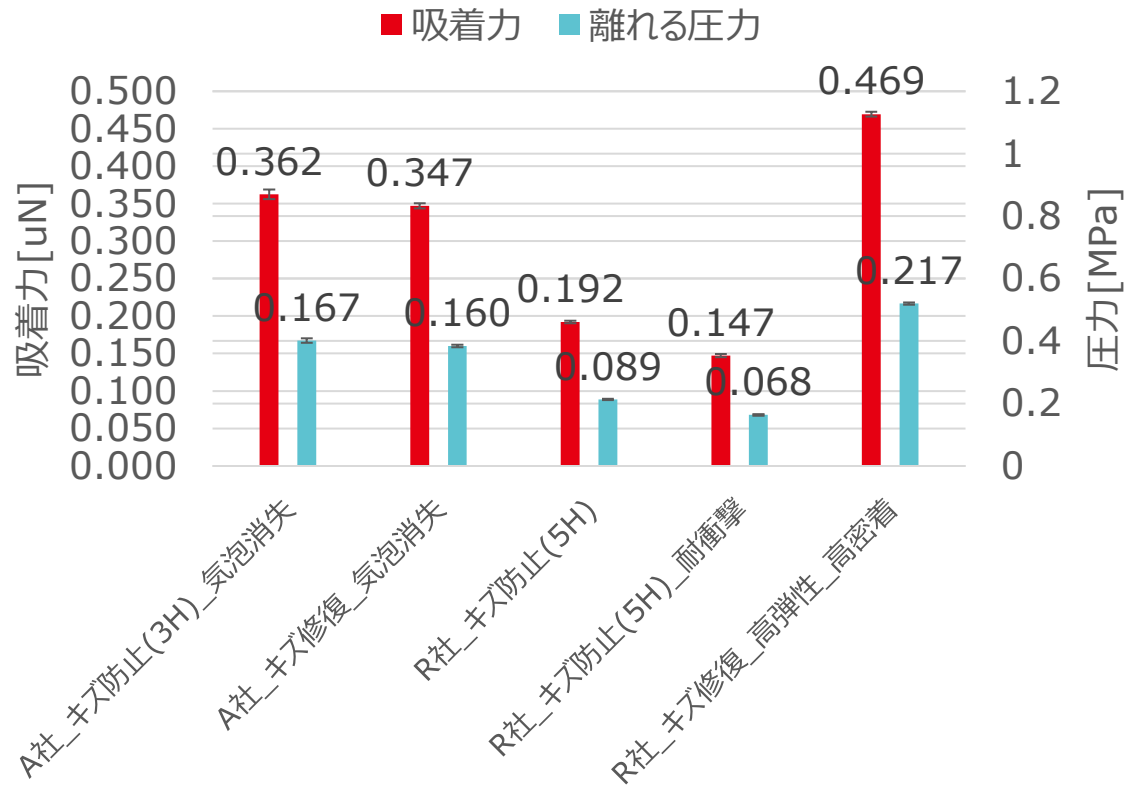
“はかる”技術で未来を創る



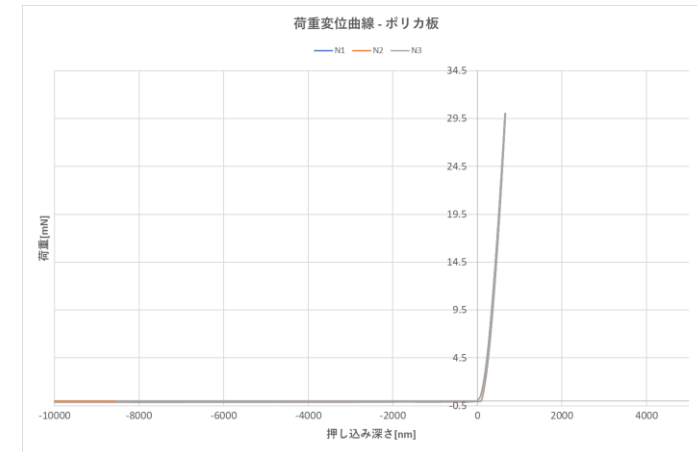
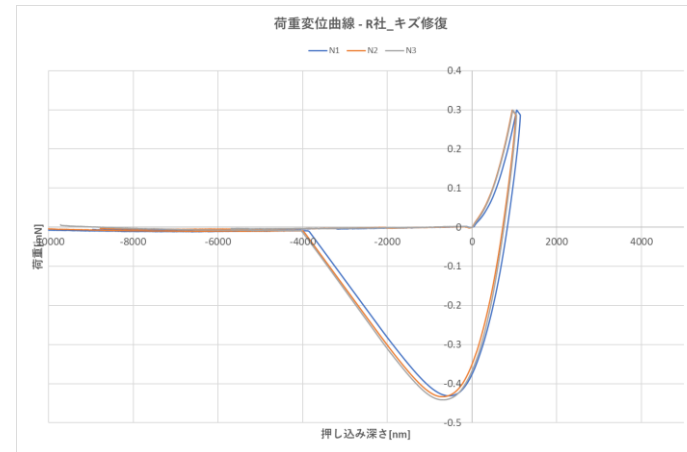
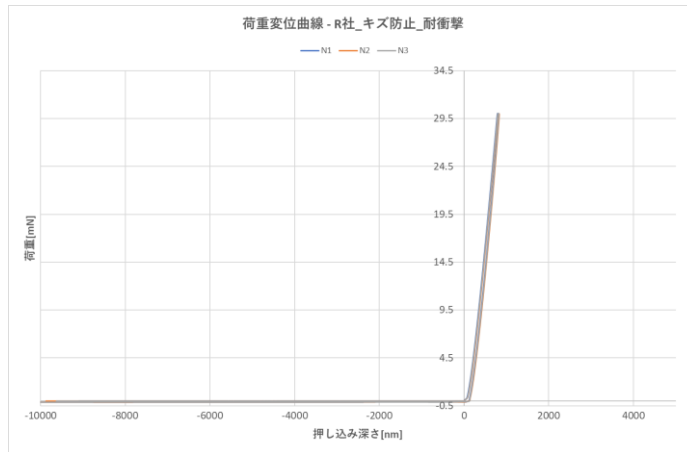
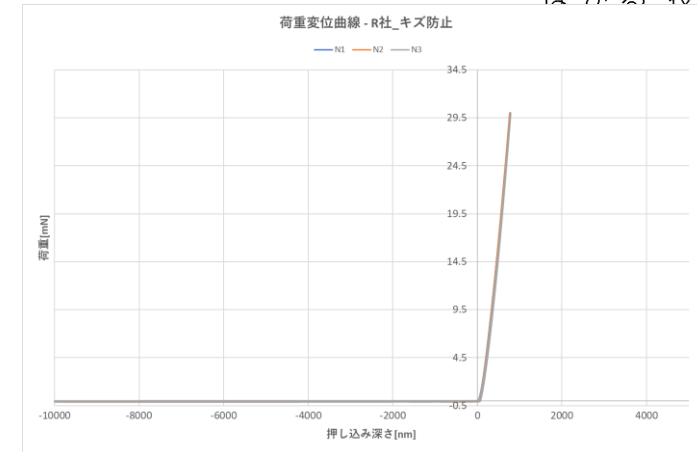
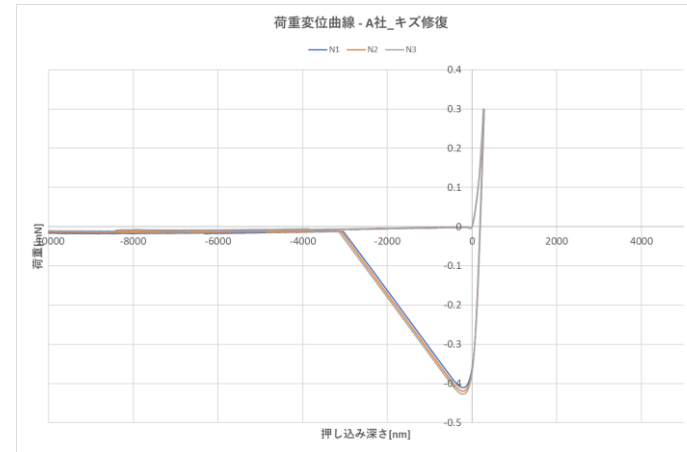
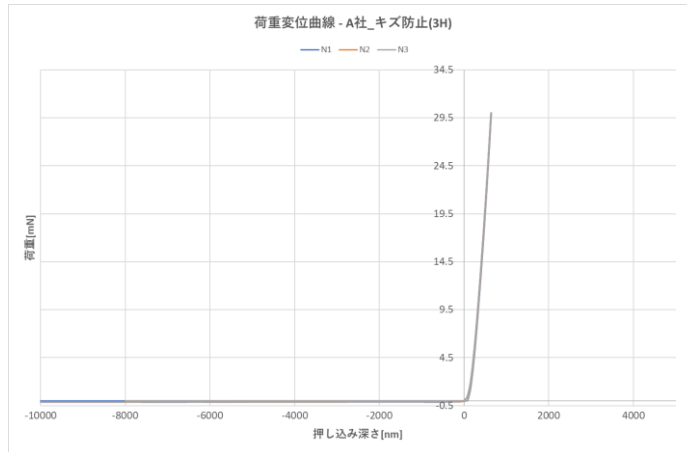
- 印加荷重 : 0.3mN
- 圧子 : 直径50umフラットパンチ



吸着面の測定



“はかる”技術で未来を創る



- 印加荷重 : 0.5mN、30mN
- 圧子 : 直径50umフラットパンチ

ご清聴ありがとうございました。

問い合わせ先：
株式会社東陽テクニカ
ライフサイエンス&マテリアルズ
tel : 03-3245-1351
mailto: bunseki@toyo.co.jp

※本資料でご紹介した製品の
デモ測定・受託分析も受け付けております。