

IN-SITU SEM/FIB

ナノインデントー

FT-NMT04

ナノメカニカル
テストシステム



FT-NMT04 ナノメカニカル テスト システムは、マイクロ スケールおよびナノ スケールで材料の機械的挙動を正確に定量化できる汎用性の高い in-situ SEM/FIB ナノインデンターです。

世界初の MEMS ベースの in-situ SEM/FIB ナノインデンターである FT-NMT04 は、FemtoTools により特許取得されたマイクロエレクトロメカニカルシステム (MEMS) 技術に基づいています。20年以上にわたる技術革新を活用したこの in-situ ナノインデンターは、比類のない解像度、再現性、動的安定性を備えています。

FT-NMT04 in-situ SEM/FIBナノインデンターは、金属、セラミックス、薄膜の機械的試験、およびメタマテリアルやMEMSなどのマイクロスケール構造物の試験に最適化されています。さらに、FT-NMT04はモジュール化されており、様々な研究分野の要求に対応できるよう機能を拡張することができます。

代表的なアプリケーションには、マイクロピラーの圧縮試験やダンベル形状の試験片、薄膜、ナノワイヤーの引張試験による塑性変形メカニズムの定量化があります。

さらに、曲げ試験中の連続剛性測定 (CSM) により、マイクロカンチレバーの破壊試験中の破壊靱性と亀裂成長現象のJ積分定量化が可能になります。

FT-NMT04は、力がわずかに500pN (実測値保証)、変位が50pm (実測値保証) という比類なきノイズフロアと、200mNと25 μ mという比較的大きな測定範囲により、これまでにない精度と再現性で材料の機械的挙動を包括的に研究することができます。



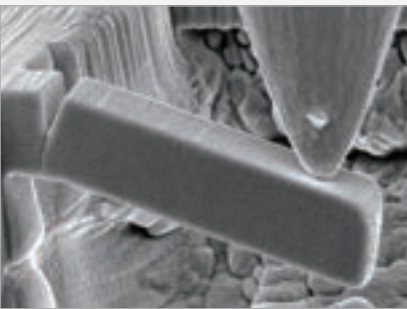
特徴

- ナノインデンテーション、圧縮試験、引張試験、破壊試験、疲労試験
- EM、EBSD、STEMによる同時イメージングによる定量的機械試験
- 特許取得済みのMEMSベースのセンシング技術により、0.5nN～200mNの力と0.05nm～21mmの変位の両方で最高の分解能と再現性を実現
- 複雑な動的校正を行うことなく、最大500 Hzの連続剛性測定 (CSM) または疲労測定が可能
- 真の変位制御試験により、急速な応力低下を定量化できます (オプションで力制御測定も可能)
- すべての軸に位置決めエンコーダを使用したサンプルアライメント用3軸クローズドループセンサー
- 800°Cまでの高温等温試験
- 圧子面積関数とフレームコンプライアンスを簡単に測定
- フィッティング関数を用いて測定結果を評価、材料特性の決定が可能なデータ解析ツール
- SEM画像およびビデオとナノメカニカルデータの同時取得を可能にするSEM同期機能
- コンパクトなモジュール設計により、小型チャンバーのSEM/FIBにも統合可能
- カスタマイズ可能な測定手順と原理



マイクロピラー圧縮

- すべり系の臨界分解せん断応力 (CRSS) の決定
- 一軸応力下における変形メカニズムの特性評価
- 塑性損傷とひずみの局在の定量化



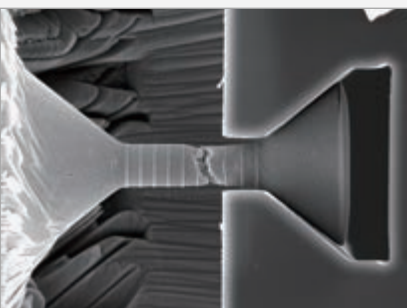
マイクロカンチレバー破壊試験

- 連続J積分法によるサブミクロン破壊靱性の測定
- 単調破壊および繰返し破壊挙動の評価
- 個々の亀裂の発生と伝播の定量化



ナノインデンテーション

- 微小体積における硬度とヤング率の測定
- 接触力学と動的応答の定量化
- 多軸応力下における変形メカニズムの特性評価



マイクロ引張試験

- 特定の相と構造の降伏応力、極限引張応力、破断までの伸びの測定
- 単調荷重および繰返し荷重下での破壊モードの特性評価
- ひずみの局所化効果、亀裂の発生と進展現象の定量化



機械試験とSTEM/EBSDの相関関係

- ひずみ局在化の定量的研究
- 相変態の定量的研究
- 組織変化の定量的研究
- 転位ダイナミクスの定量的研究
- 粒界移動の定量的研究

システム構築

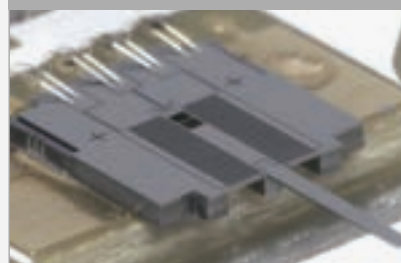


システムコンポーネント

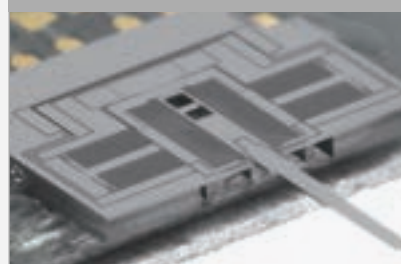
- ① 高精度位置決めエンコーダを搭載した1軸ナノポジショニングステージ、誤差1nmで21mmの範囲の移動が可能
- ② 高精度位置決めエンコーダ搭載の2軸ナノポジショニングプラットフォーム、誤差1nmで12 x 12mmの範囲の移動が可能
- ③ 静電容量式高精度位置決めエンコーダを搭載し、0.05nmの誤差で25 μ mの範囲を連続的かつ高速に移動できるフレクチャーベースのリニアピエゾスキャナー
- ④ FT-Sマイクロフォース・センシング・プローブ：0.5nN～200mNの力検知範囲

MEMSベースのナノインデンテーション

1軸マイクロフォースセンシングプローブ



2軸マイクロフォースセンシングプローブ



チップヒーターを内蔵した1軸マイクロフォースセンシングプローブ



T-NMT04ナノメカニカルテストシステムは、MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術に基づいた高分解能ナノインデンターです。

一般的なナノインデンテーションシステムは、精密機械加工され組み立てられたコンポーネントに基づく力センサー技術を特徴としていますが、Femto-Tools社は、半導体製造技術を使用して、単結晶シリコンウェハーから力センサー全体を機械加工しています。

このアプローチにより、はるかに小さな構造の製造が可能になり、高感度、高分解能、高繰り返し精度のロードセルを作ることができるため、従来技術の限界を克服することができます。

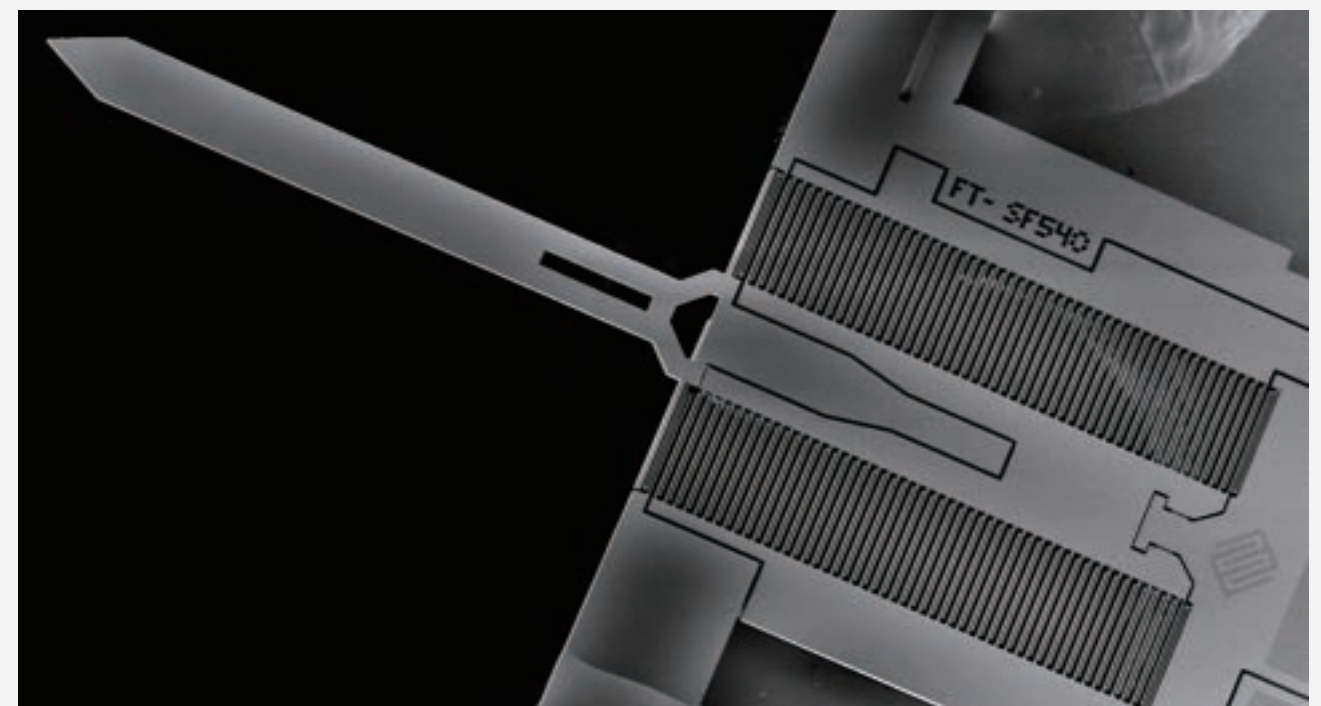
さらに、MEMSセンシングエレメントのサイズが小さいため、従来のロードセルよりも質量が桁違いに小さくなります。

シリコンたわみの高い剛性と組み合わせることで、FemtoTools FT-Sマイクロフォース・センシング・プローブは高い固有振動数(最大50 kHz)を実現し、高速イベントの測定や、高周波での疲労試験や繰返し試験の実施に関連する能力を提供します。

コンパクトなMEMSベースのフォース・センシング技術のもう一つの利点は、FT-NMT04のフォーム・ファクターの小ささです(120 mm x 72 mm x 44 mm)。

これにより、ほとんどのSEM/FIBシステムにFTNMT04を組み込むことができます。

MEMSベースのマイクロフォースセンシングプローブ



アクセサリ

FT-S マイクロフォースセンシングプローブ

FemtoTools FT-Sマイクロフォース・センシング・プローブは、センサーのプローブ軸に沿ってサブナニュートンから200ミリニュートンの力を測定できるセンサーです。

圧縮力と引張力の両方を測定できます。各プローブにはSITレーサブルな事前校正が施され、卓越した長期安定性と組み合わせることで、この力範囲における他のフォースセンシングシステムよりも大幅に高い測定精度を保証します。

2軸マイクロフォースセンシングプローブや最高800℃の高温プローブ (HT) など、特殊バージョンもご用意しています。FT-Sマイクロフォース・センシング・プローブには、ダイヤモンド・ベルコビッチ、キューブコーナー、フラットパンチ、ウェッジ、円錐形など、さまざまな先端の材質と形状をご用意しています。



モデル	範囲	ノイズフロア (10Hz)
FT-S200	+/- 200 μ N	0.5 nN
FT-S2'000	+/- 2'000 μ N	5 nN
FT-S20'000	+/- 20'000 μ N	50 nN
FT-S200'000	+/- 200'000 μ N	500 nN
FT-S20'000-2軸	+/- 20'000 μ N (通常)	100 nN
	+/- 20'000 μ N (接線方向)	100 nN
FT-S200'000-HT (800℃)	+/- 200'000 μ N	1000 nN

高温試験モジュール

FT-NMT04は、FT-SEM-HT04 in-situ SEM 高温モジュールでアップグレードできます。

このモジュールにより、最高800℃までサンプルを加熱することができます。先端ヒーターを内蔵したマイクロフォースセンシングプローブと組み合わせて使用し、サンプルの温度に合わせて先端を局所的に加熱します。

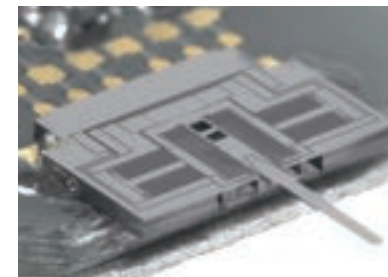
このモジュールにより、800℃までの温度でFT-NMT04のすべての機能 (高分解能・高繰り返し性ナノインデンテーション、マイクロピラー圧縮、マイクロ引張試験、マイクロカンチレバー破壊試験など) を使用することができます。

in-situ SEM高温モジュールは、局所的な材料特性の変化だけでなく、高温での塑性変形、軟化、破壊メカニズムの定量的な研究を可能にします。

代表的な研究は、温度による硬度、弾性率、破壊靱性の変化です。



スクラッチテストモジュール



FT-NMT04は、FT-SEM-ST04 in-situ SEM スクラッチ試験モジュールにアップグレードすることで、ナノスクラッチ、ナノ摩耗、ナノ摩擦試験、および走査型プローブ顕微鏡 (SPM) が可能になります。

2軸マイクロフォース・センシング・プローブのダイヤモンド探針は、所定の速度で傾斜荷重または定常荷重をかけながらサンプル表面を移動します。

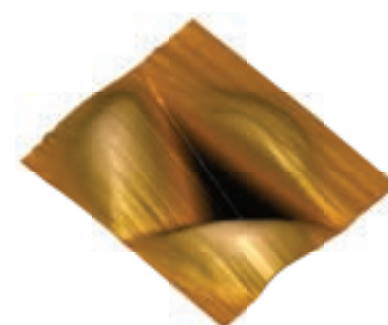
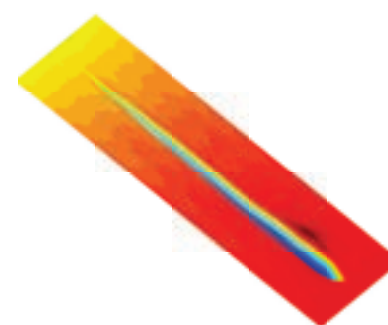
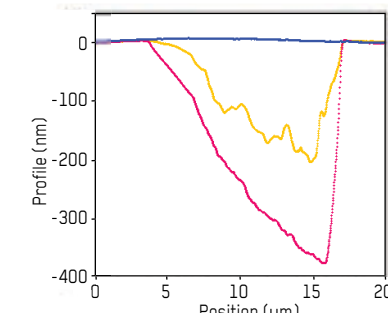
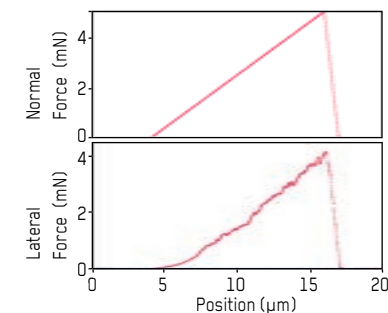
スクラッチ試験では、ナノスケールでの破損メカニズム、薄膜の接着性、摩擦係数、材料の耐摩耗性など、さまざまな特性に関する定量的な知見が得られます。さらに、高分解能SPM画像は、スクラッチ試験、摩耗試験、ナノインデンテーション試験の前後のトポグラフィ画像にも使用できます。

これにより、試験前の表面粗さや試験後の表面の変形や損傷を直接可視化することができます。

20 x 20 x 25 μ mのイメージング範囲と50pmのスキニングノイズフロアを備えたこのモジュールは、20mNの力範囲に対して100nNのノイズフロアを特徴とする2軸マイクロフォースセンシングプローブと組み合わせて使用します。さらに、このモジュールは、1nmの長距離プローブ位置決めノイズフロアにより、特定のテストまたはスキニング位置をターゲットとすることができます。

高分解能、高再現性ナノインデンテーションのためのFT-NMT04の技術的優位性に加えて、スクラッチ試験モジュールは、ナノスケールでの弾塑性変形と破壊メカニズムの定量的特性評価と同様に、表面と界面における材料特性の包括的研究を可能にします。

代表的な例としては、凝集破壊や接着破壊の臨界荷重の特性評価、浅い圧痕に対する表面粗さの影響、摩擦に対する表面近傍の塑性の影響などがあります。



マイクロピラー圧縮

研究実施者: D. Gianola 他、Gianola Lab、材料部門、
カリフォルニア大学サンタバーバラ校、米国

in-situ SEMマイクロピラー圧縮試験は、ミクロな材料の単軸機械的応答を測定し、応力ひずみデータを個々の変形事象に直接関連付ける方法を提供します。

これにより、変形挙動や強化メカニズムの観点から、特定の相や粒子を定量化したり、サイズ効果を研究したりすることができます。

個々の変形現象を解明するために、測定システムに求められる主な要件は、高い荷重・変位分解能と高速データ収集です。SEMとEBSDを用いて微細構造や結晶方位の観点から適切な位置を特定した後、集束イオンビーム(FIB)を用いたトップダウンミリングによってマイクロピラーを作製します。

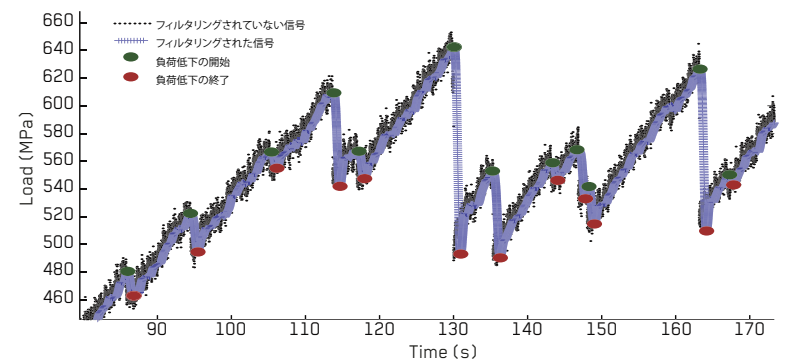
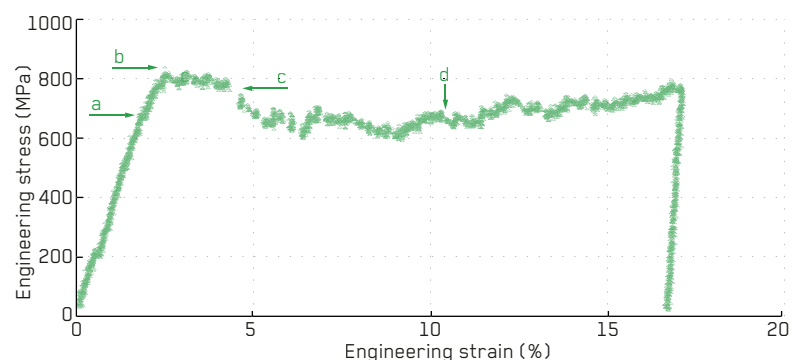
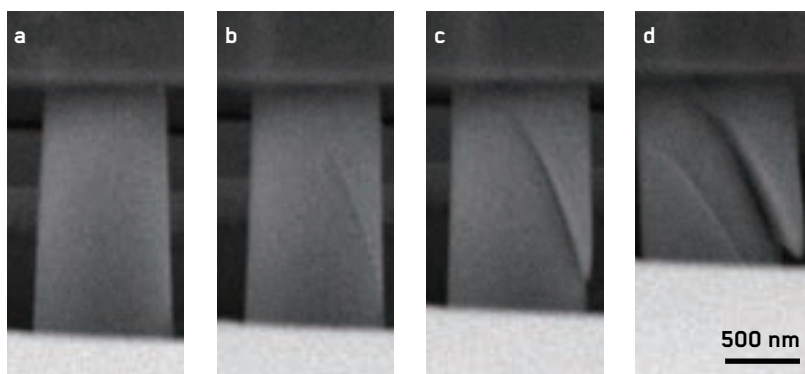
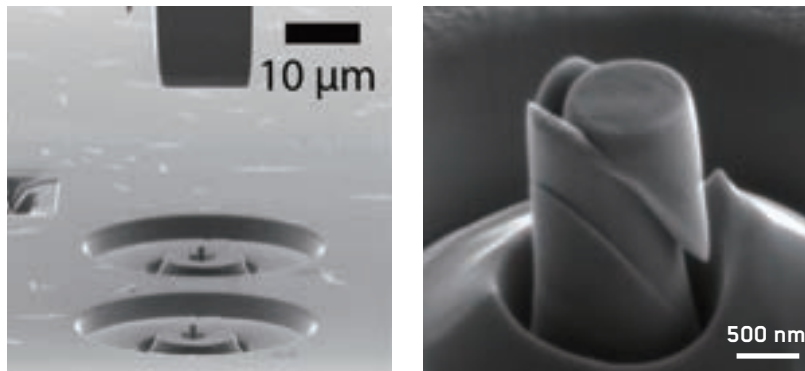
FIBによる損傷を低減するため、構造体の加工から最終的な表面研磨まで、イオン電流を減少させながら行います。

圧縮時には、降伏と塑性の前に、初期負荷段階で線形弾性が観察されます。

塑性領域では、急激な応力低下とそれに続く再载荷期間を伴う鋸歯状の塑性流動挙動が、転位すべり現象の特徴であることが多いです。例えば、応力-ひずみデータの応力降下と、SEMで見られる剪断帯の形成との間には、a)弾性負荷、b)最初のすべり事象の核生成、c)上面との交差、d)すべり事象の増殖、という相関関係が示されています。

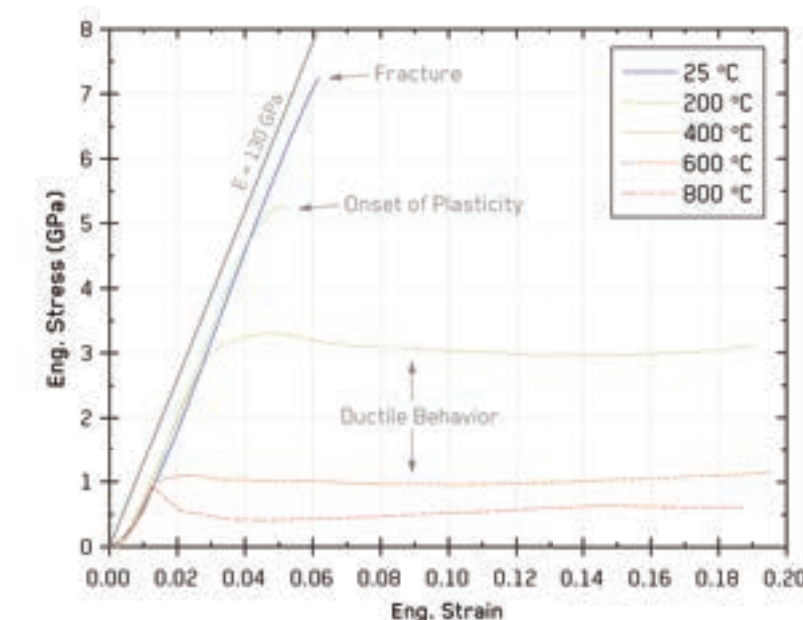
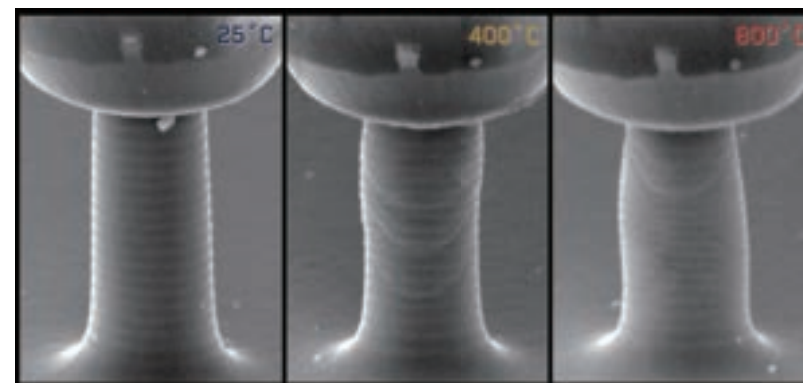
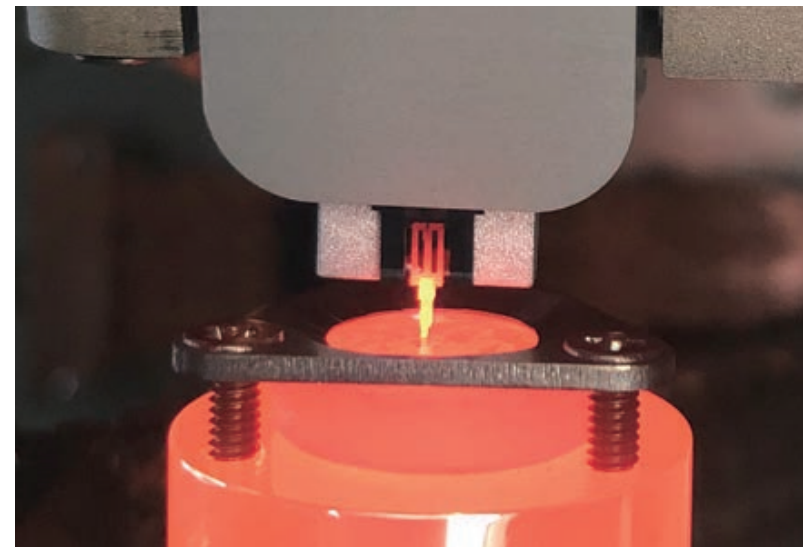
荷重制御試験システムでは、応力-ひずみ曲線に(応力低下ではなく)ひずみバーストが見られるため、これらのメカニズムを定量的に研究することができないことは注目に値します。したがって、このシステムの重要な要件は、真の変位制御です。超低荷重ノイズフロアと組み合わせることで、さらに小さな応力降下の統計解析が可能になります。

これにより、転位と様々な格子欠陥との相互作用の性質について新たな知見を得ることができます。



X. Zhao, D.J. Strickland, P.M. Derlet, M.R. He, Y.J. Cheng, J. Pu, K. Hattar, and D.S. Gianola. "In situ measurements of a homogeneous to heterogeneous transition in the plastic response of ion-irradiated <111> Ni microspecimens." Acta Materialia, 2015

高温試験



高温マイクロ圧縮試験は、通常脆いシリコンのような半導体でさえも、材料の塑性変形を研究するための優れたツールです。

小さな長さスケールと高温の組み合わせは、多くの材料、特にシングル・スリップ配向でのクラック形成を抑制し、塑性変形メカニズムを詳細に調べることが可能にします。

左の静止画は、in-situのビデオから撮影したもので、室温での破壊から高温での塑性への脆性から延性への遷移を見ることができます。

室温の画像は破壊直前の弾性変形した柱を示しているが、高温では塑性すべりや変形の明確な証拠が見られます。

これは、Zeiss EVO走査型電子顕微鏡(SEM)でその場ではっきりと可視化されています。

ラビッドアプローチで接触を検出した後、すべてのピラーを一定のひずみ速度(0.004/s)で変形させました。

転移温度200°C以上では、転位運動は400°Cで見られたように、最初はいくつかのすべり面に局在しているが、高温では転位運動は非局在化し、変形はより均質になります。

これは応力-ひずみ挙動でも観察され、200°Cを超えるとかなりの塑性が観察されます。このデータの品質を示す強力な指標は、応力-ひずみ曲線の初期弾性負荷領域です。

これは、示したように、[100]配向シリコンに期待される弾性率と密接に一致しています。

これは、柱頂部のテーパーや丸みを最小限に抑え、高い幾何学的精度を可能にするリソグラフィ加工によるものです。弾性率は温度に対してほぼ一定であり、測定値が熱ドリフトに依存しないことを示しています。

実際には、弾性率は温度とともにわずかに減少し、500°Cでは125GPaになるが、これを解決するには、連続剛性測定(CSM)のような高精度の測定が必要です。

破壊試験

研究実施者: S. Gabel, B. Merle, M. Göken, ドイツ、エアランゲン・ニュルンベルク大学、研究所 I、材料科学および工学部門

破壊靱性は、ほとんどの工学用途において重要な特性です。

微小片持ち梁曲げ試験を用いた小規模な破壊実験は、低体積材料の破壊靱性を決定する上で極めて重要です。さらに、これらの試験は、材料の全体的な耐亀裂性に対する特定の微細構造の特徴の寄与を定量化するための重要な情報を提供します。

さらに、in-situ SEMマイクロカンチレバー曲げ試験は、力-変位データと亀裂経路の直接観察を組み合わせることによって、破壊のミクロメカニズムに関する新しい洞察を提供します。

典型的なマイクロカンチレバー曲げ試験では、リソグラフィまたは集束イオンビーム (FIB) を用いて作製した、独立したノッチ付きカンチレバービームに圧縮荷重をかけます。

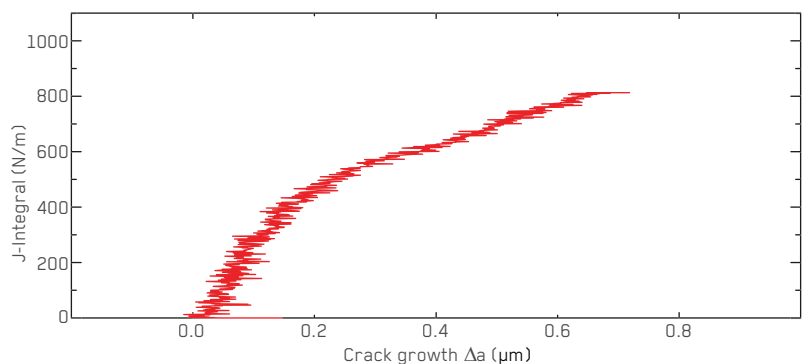
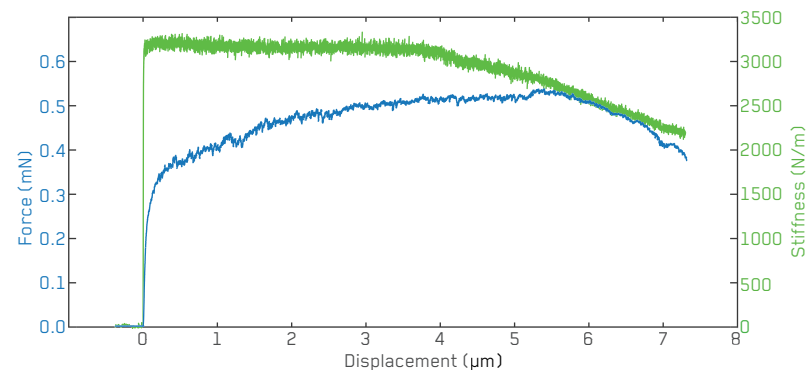
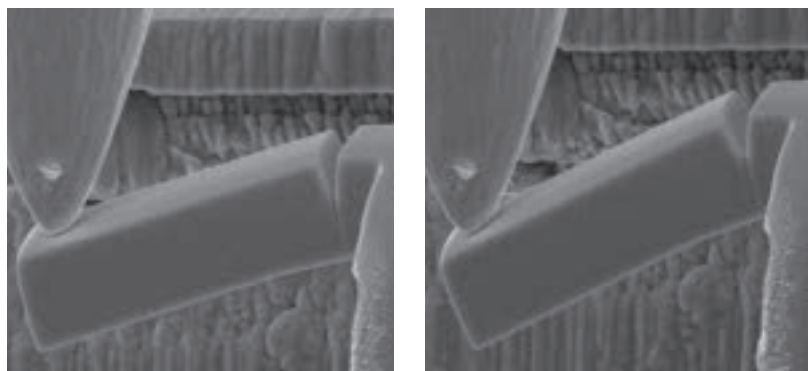
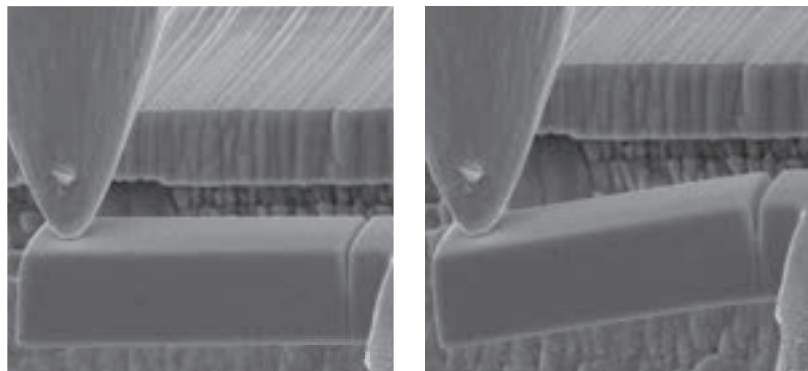
脆性破壊の場合、破壊靱性KICは最大荷重時の応力拡大係数KIから決定されます。

測定システムの重要な要件は、力制御システムにありがちな、亀裂が不安定になった後のサンプルの破局的破壊を避けるための真の変位制御です。

弾塑性破壊の場合、亀裂進展抵抗曲線 (J-R曲線) と弾塑性破壊靱性 (JIC) の解析には、一般的にJ積分法が用いられます。一般に、KICやJICが高いほど、あるいはJ-R曲線が急であるほど、材料の破壊に対する抵抗性が高いことを示します。

連続剛性測定 (CSM) を用いたマイクロカンチレバー曲げ試験では、亀裂の長さの変化をモニターし、周期的な無負荷セグメントから連続的なJ積分を計算することができるため、連続的なJ-R曲線を作成することができます。

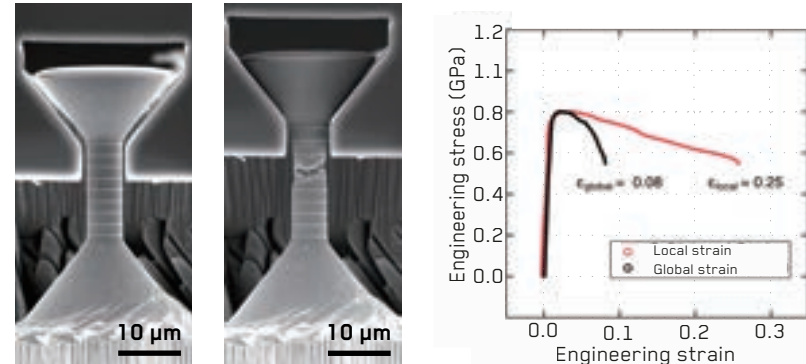
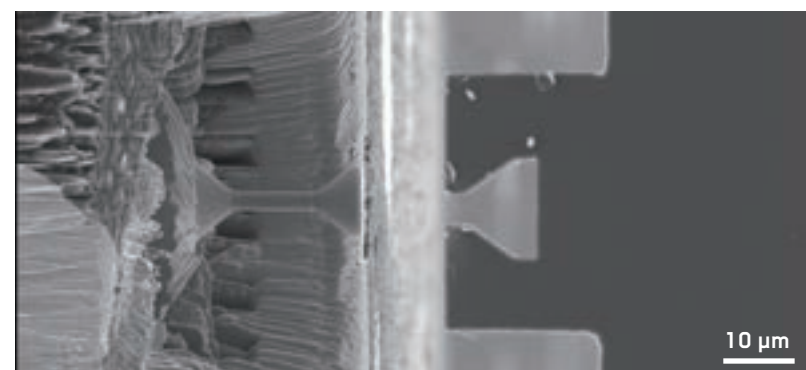
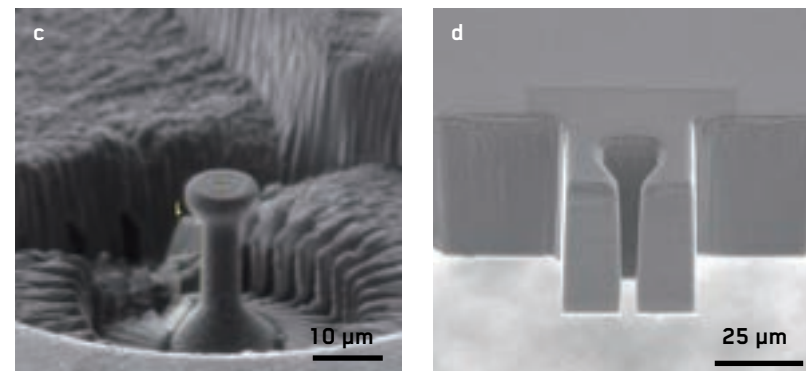
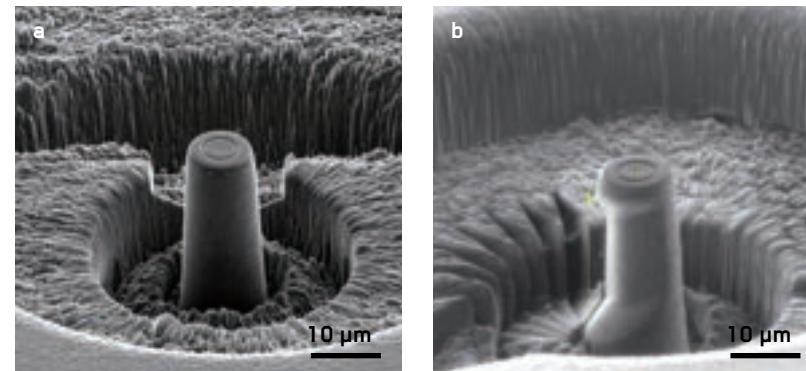
FT-NMT04は、真の変位制御、高い荷重・変位分解能、広い調和周波数範囲、高速データ収集速度を組み合わせることで、破壊プロセスの正確な制御と、材料の破壊靱性に及ぼす個々の微細構造の特徴の影響の定量化を可能にします。



Technique based on: Ast J., Merle B., Durst K., Göken M. "Fracture toughness evaluation of NiAl single crystals by microcantilevers - A new continuous J-integral method" (2016) Journal of Materials Research, 31 (23), pp. 3786-3794.

マイクロ引張試験

研究実施者: J.L Wardini, T. Rupert, Ru-pert 研究室、カリフォルニア大学アーバイン校、米国



Z. Fu, L. Jiang, J. L. Wardini, B. E. MacDonald, H. Wen, W. Xiong, D. Zhang, Y. Zhou, T. J. Rupert, W. Chen, E. J. Lavernia, "A high-entropy alloy with hierarchical nanoprecipitates and ultrahigh strength." Science Advances, 2018

ラージスケールの引張試験は、材料の弾性率、降伏強度、極限強度、破壊強度を定量化するためによく用いられる試験です。

しかし、これらの試験は、材料特性全体に関する貴重な洞察を提供する一方で、個々の相や界面などの構成要素の影響を平均化してしまいます。

単一の相や界面の特性を定量化するには、左の一連の画像に示すように、マイクロ引張試験が必要です。さらに、これらの実験をさらにスケールダウンすることで、単一の塑性変形メカニズムを検出し、調査することができます。

サンプル作製には、集束イオンビーム (FIB) を用いて、元の基板に付着したままの均一な断面を持つドッグボーン形状のサンプルを作製することができます。

FIBはまた、力検知プローブの先端にグリッパー形状を加工するのにも使用できます。

このグリッパー形状により、微小引張試験を行うためのドッグボーンサンプルとの連動が可能になります。

引張負荷をかけると、初期段階では線形弾性が観察され、その後、降伏、塑性、最終的には破壊に至ります。

完全な応力-ひずみ曲線を測定するための重要な試験要件は、真の変位制御試験であり、不安定な亀裂伝播中の試験片の破断を防止します。その結果、(応力-ひずみ曲線の勾配が減少する) 極限強度以降の材料の挙動を特徴付けることができます。

この微小引張試験法を、サンプルに沿って斑点またはラインマーカー (左図) を蒸着する方法と組み合わせることで、デジタル画像相関法 (DIC) を使用して荷重軸に沿った局所ひずみを求めることもできます。

ナノインデンテーションは、最小限のサンプル調製で材料の機械的特性をスモールスケールで研究するための標準的かつ効率的な手法です。

この技術は、薄膜や体積の小さい材料の研究に最適です。

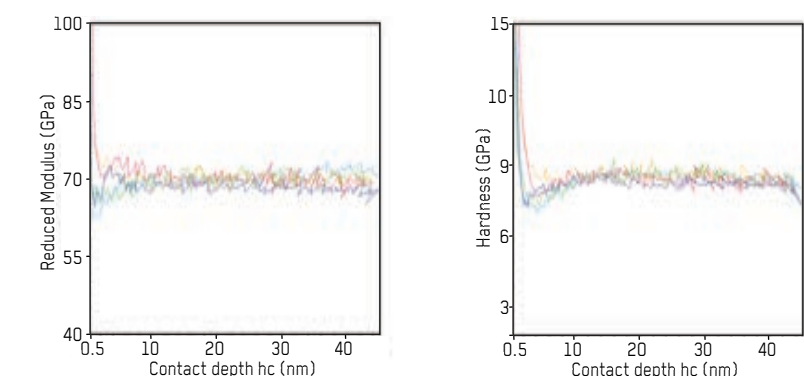
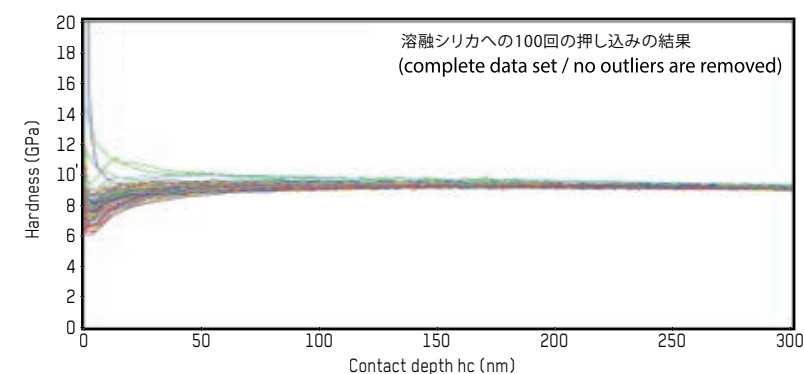
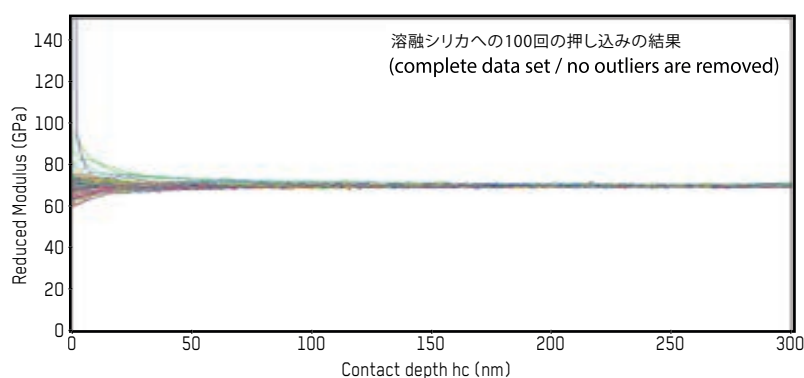
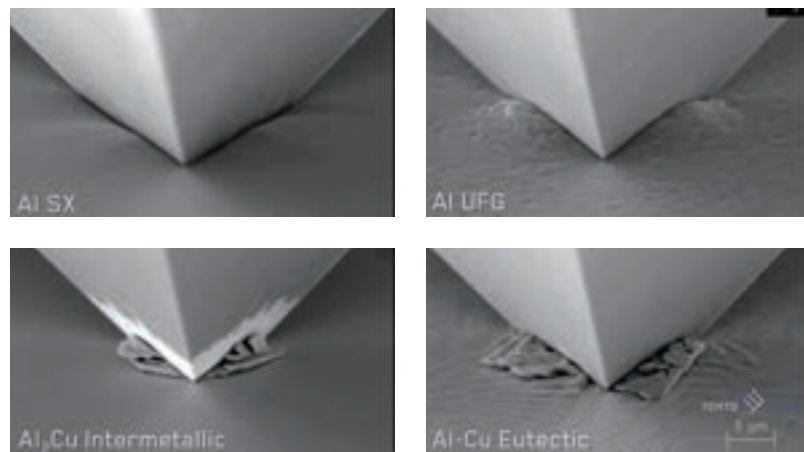
硬度や弾性率に加えて、材料のクリープ特性、破壊特性、疲労特性についても有用な知見を与えます。圧子下の多軸応力場は、異なる平面におけるすべり系の活性化を可能にするため、複雑な塑性メカニズムを包括的に調査することができます。

また、小型化されたサンプルのサイズ効果を利用することで、準脆性材料の塑性挙動を研究することも可能です。

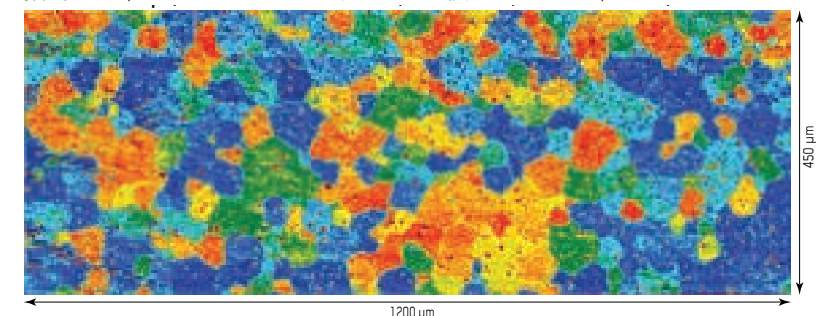
FT-NMT04は、超高分解能の荷重・変位とその場SEM観察を組み合わせることで、特定のサブミクロンスケールの微細構造の機械的特性を測定し、パイルアップ、スリップバンド、クラックの形成を直接可視化することができます。

標準的なナノインデンテーションでは、無負荷時の測定データが得られますが、連続剛性測定 (CSM) を使用することで、硬さと弾性率の両方を圧子侵入深さの関数として記録することができます。

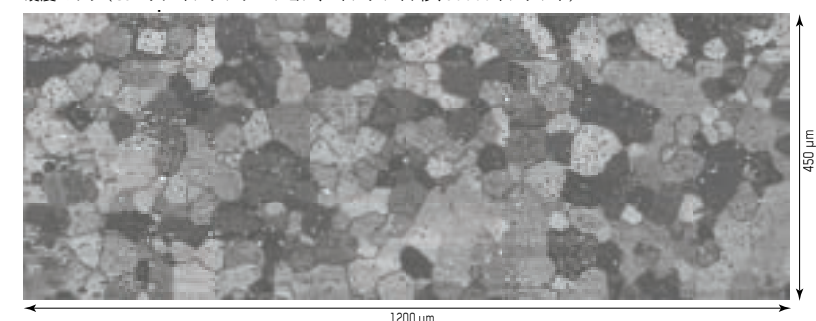
FT-NMT04を用いたCSMナノインデンテーションでは、高い荷重分解能と変位分解能により、浅い押し込み深さと塑性の始まりからバルク材料までの機械的応答の変化を定量化することができます。さらに、FT-NMT04システムの拡張高調波周波数範囲 (測定システムからの寄与がほとんどない状態で最大500Hz) と高速データ収集速度の組み合わせにより、材料の粘弾性および粘塑性挙動のこれまでにない定量的な動的力学解析が可能になります。



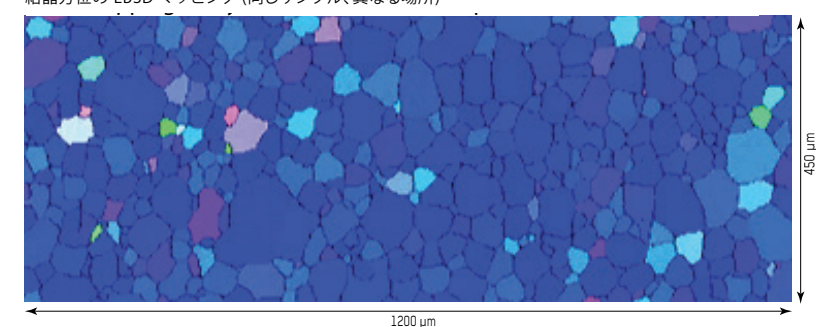
弾性率マップ (CSM ナノインデンテーション、1 インデント/秒、60000 インデント)



硬度マップ (CSM ナノインデンテーション、1 インデント/秒、60000 インデント)



結晶方位の EBSD マッピング (同じサンプル、異なる場所)



FT-NMT04の能力を実証するために、Ni-Ti合金のCSMナノインデンテーション測定の結果を紹介します。

Ni-Ti合金は、ニッケルとチタンの原子百分率がほぼ等しく設計されており、形状記憶効果と超弾性という、温度に依存する独自の特性を示します。

形状記憶とは、塑性変形を起こし、負荷がかかっていない状態で臨界温度まで加熱されても変形を維持する能力に関係します。

この臨界温度に達すると、合金は相転移を起こし、塑性変形から元の状態に戻ります。

この臨界温度よりも高い温度では、Ni-Ti合金は超弾性を示し、可逆的な相転移によって大きな変形を起こし、負荷がかかっていない状態ですぐに回復します。

Ni-Ti合金は、高い生体適合性、耐腐食性、耐摩耗性を兼ね備えているため、最もよく知られている形状記憶合金の1つです。

医療用インプラントからインテリジェントな鉄筋コンクリートや減衰部品まで、幅広い商用アプリケーションで使用されています。

形状記憶効果とその限界を完全にメカニズム的に理解するために多くの研究努力が払われており、特に結晶方位と弾性率の関係は、不可逆的な変形と形状記憶効果の漸進的喪失につながる局所的なひずみの適応と局在化を説明する上で重要であると思われます。

ここで、FT-NMT04は、結晶方位による硬度と弾性率の変化を定量化できます。注目すべきことに、粒界付近の狭く柔らかい特性勾配 (≤3%) の定量化も可能になります。広い領域で高い空間分解能を特徴とし、高速マッピングでも高い精度を維持するFT-NMT04の結果をEBSDマップやEDXマップと直接比較して、微細構造と材料特性の関係を完全に理解できます。

疲労試験

研究実施者: S. Singh, AS Singaravelu, N. Chawla, 米国アリゾナ州立大学 4D 材料科学センター

in-situ微小疲労試験では、亀裂経路の直接観察および動的機械応答の連続モニタリングにより、疲労亀裂の発生および伝播事象の定量的研究が可能です。この試験により、疲労のマイクロメカニズムや、ナノ複合材や積層材などの材料や複雑な構造の疲労寿命に及ぼす影響について、これまでにない洞察が得られます。

FT-NMT04は、広いダイナミックレンジ（システム共振なし）、高速データ収集速度、および真の変位制御を備えているため、低サイクルおよび高サイクルのin-situ疲労試験を最大500Hz、500万回以上の荷重サイクルで3時間以内に実施できます。

典型的な実験セットアップは、マイクロカンチレバーの曲げです。

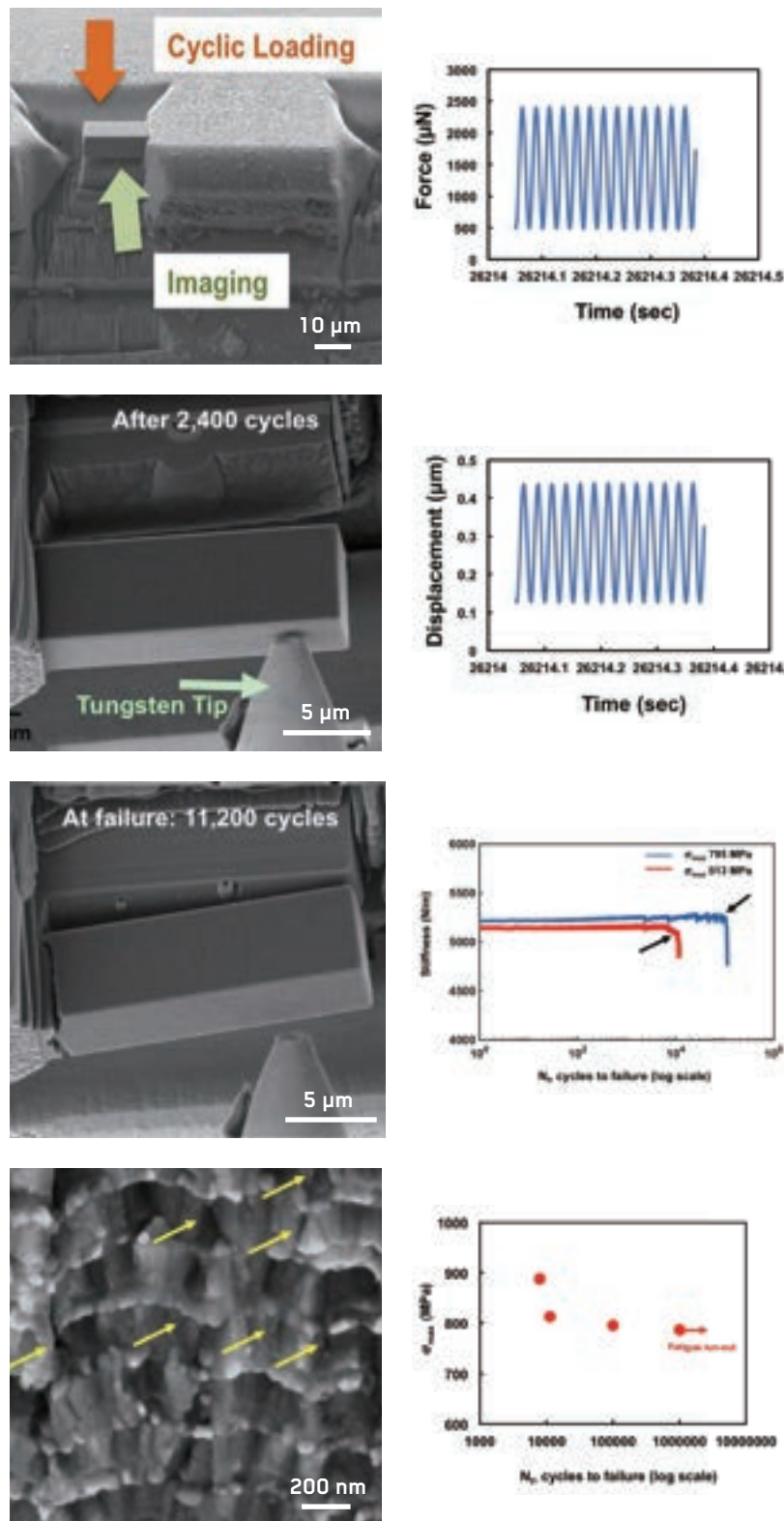
このほか、マイクロピラーの繰返し圧縮や、薄板などの引張サンプルの繰返し引張圧縮試験も可能です。

次に、試験片に繰返し荷重をかけます。試験は、亀裂の発生、進展、界面でのたわみ、または表面損傷の兆候を観察するために、高解像度のSEM画像化のために一定間隔で中断されます。試験片の動的な剛性応答をモニターすることで、例えば、短いまたは長い亀裂の発生と進展、あるいは周期的な硬化と軟化のメカニズムなどに関する重要な知見が得られます。

さらに、相関EBSDマッピングにより、亀裂先端の前方でのひずみの蓄積と、その後の臨界面に沿った亀裂伝播との関連を追跡することができます。

疲労寿命は、試験片の剛性を変化させて評価することができます。

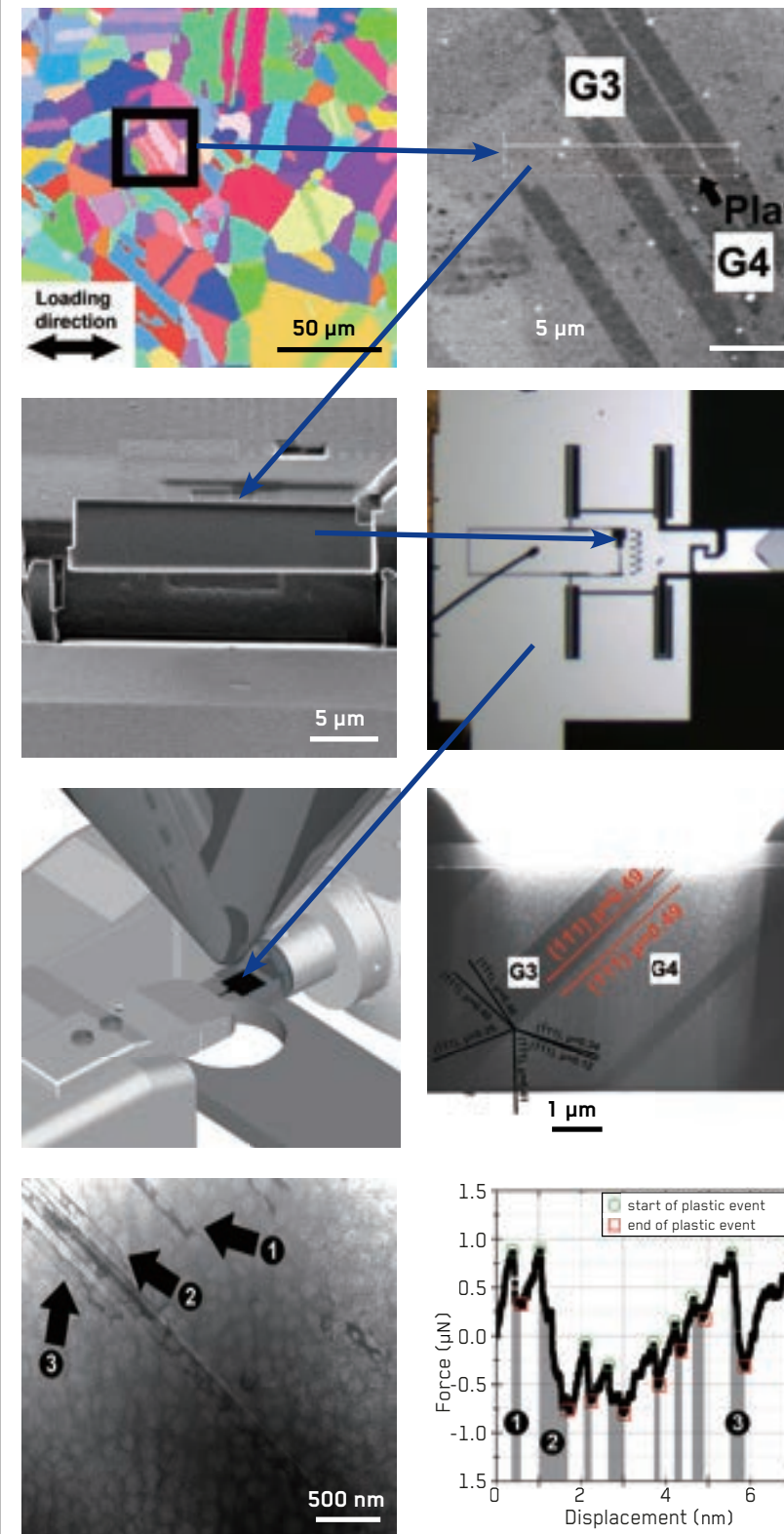
このデータは、最終破断後の破面観察と比較することができます。



S. Singh, A.S. Singaravelu, and N. Chawla, "Deformation Behavior of Co-Sputtered and Nanolaminated Metal/Ceramic Composites" Dissertation for the Doctor of Philosophy Degree, Center for 4D Materials Science, Arizona State University, 2018

SEMにおける相関STEM/EBSD

研究実施者: D. Gianola 他, Gianola Lab、材料部門、カリフォルニア大学サンタバーバラ校、米国



J. C. Stinville, E. R.Yao, P. G. Callahan, J. Shin, F. Wang, M. P. Echlin, T. M. Pollock, D. S.Gianola, "Dislocation Dynamics in a Nickel-Based Superalloy via In-Situ Transmission Scanning Electron Microscopy," Acta Materialia, 2019

FT-NMT04は、材料の応力-ひずみ応答研究を表面事象の観察だけでなく、EBSD、TKD、STEM特性評価と組み合わせることで、相変態と転位ダイナミクスに関するこれまでにない定量的な洞察を得るために特別に設計されています。マイクロ引張試験、ピラー圧縮、カンチレバー曲げをEBSDと相関させることで、動的な相変態とひずみの局在化をモニターし、定量化することができます。転位スケールでの塑性をさらに探求するために、TKD検出器やSTEM検出器と相関させながら、電子透過性のサンプルや薄膜の微小引張試験を行うことができます。

SEMとEBSDを用いて微細構造と結晶方位の観点から適切な位置を選択した後、集束イオンビーム（FIB）加工によってサンプルを切り出します。

その後、FemtoTools Nano Tensile Testing Chipのような試験用支持台に載せ、イオン（または電子）ビーム誘起堆積法で固定します。

その後、FIB損傷を最小限に抑え、STEMイメージングを可能にするため、低電圧でFIBカービングを行い、マイクロ引張試験片を電子透過性まで薄くします。

荷重をかけると、まず線形弾性が観察され、その後、複数回の荷重降下と最終的な破壊を特徴とする塑性領域が観察されます。

真の変位制御、高速データ収集速度、超高荷重・変位分解能により、個々の荷重降下の振幅と時間の解析が可能です。

STEM画像との相関により、特定の塑性事象に起因する特徴的な荷重（0.5 μN 未満まで）が得られます。オロワン・ボーイングや、部分的または完全な転位ペアによる析出物のせん断など、格子欠陥との明確な転位相互作用を研究するまたとない機会が得られます。

これにより、転位スケールまでの塑性局所化メカニズムを統計的に理解することができます。

微細構造試験

個々の金属ガラスナノワイヤの熱機械的クリープ試験

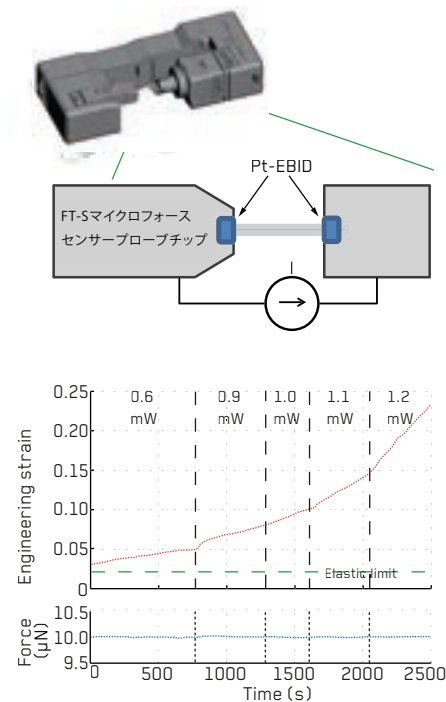
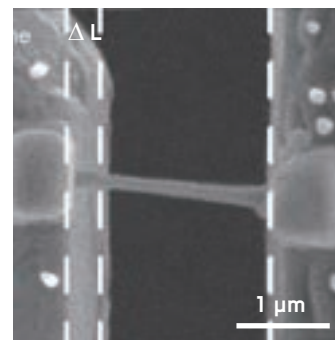
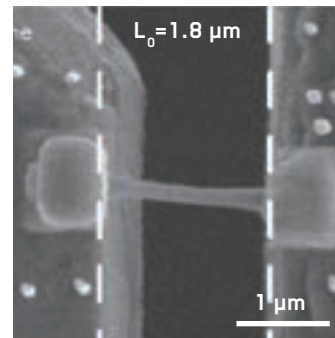
金属ガラスは、その大きな弾性限界や高い破壊靱性といったユニークな機械的特性により、注目を集めています。さらに、大きな過冷却液体領域は過塑性成形を可能にし、新しい材料加工戦略を切り開きます。

従って、熱機械的挙動の定量的理解は極めて重要である。カリフォルニア大学サンタバーバラ校のダニエル・ジアノラ教授は、金属ガラスの超塑性流動について研究しています。

この目的のために、金属ガラスナノワイヤは、FT-Sマイクロフォース・センシング・プローブと第二の基板の間にPt-EBIDによって取り付けられています。

クリープ試験（変形を測定しながら一定の引張荷重を加える）を行いながら、ナノワイヤーに電流を流して温度を段階的に上昇させます。

この方法により、異なるナノワイヤー温度におけるクリープ挙動が解析されます。

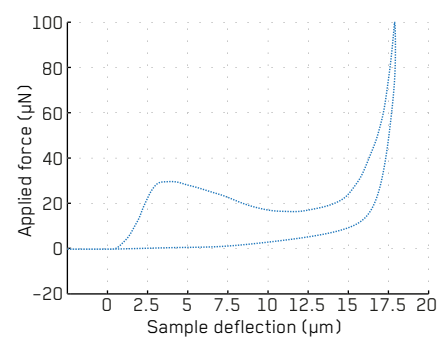
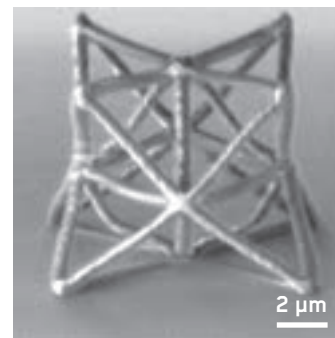


マイクロスキャフォールドの安定した圧縮試験

微細足場は、超軽量材料の創製のための材料科学や、人工組織の増殖に使用される、あらかじめ定義された機械的剛性を持つ細胞環境としての生物学など、様々な分野で使用されています。

スキャフォールドの圧縮試験により、崩壊点を超えてもその弾性および塑性挙動を決定することができます。

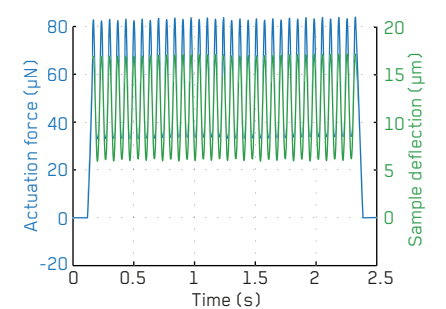
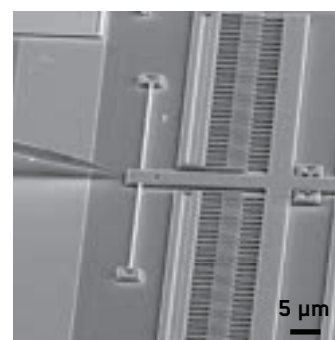
画像提供: ETH Zurich, Switzerland



MEMS / NEMSの面内および面外機械試験

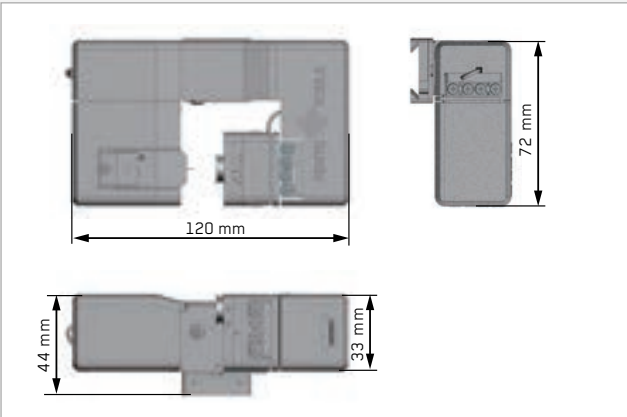
継続的な小型化の傾向により、MEMSの典型的なフィーチャーサイズはナノスケールへと向かっています。

その結果、光学顕微鏡に基づく従来の機械的試験原理は限界に達しています。SEMの高分解能イメージング能力により、in-situ SEM機械的試験は、MEMS / NEMSの機械的および電気機械的特性を直接定量化することができます。

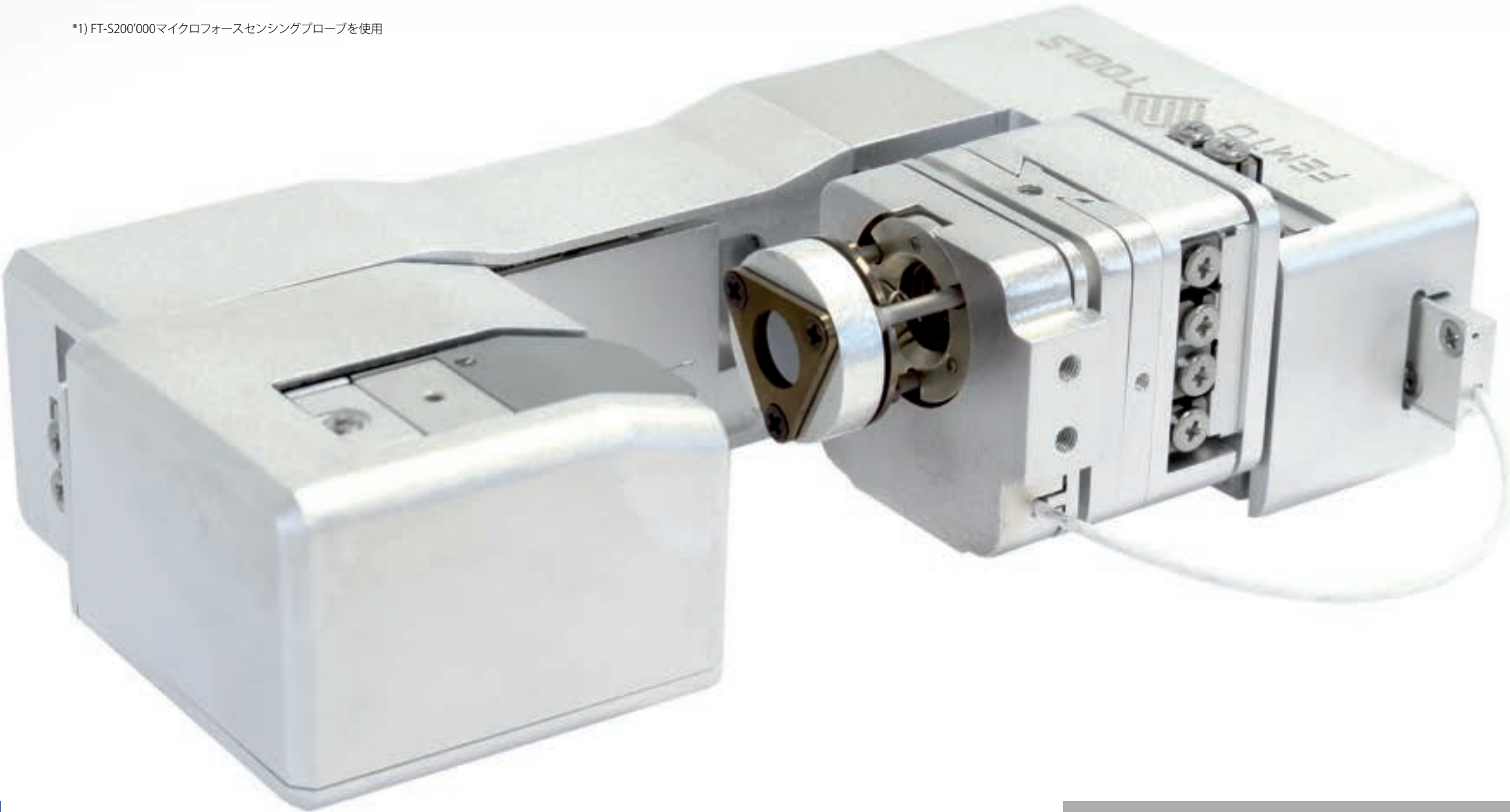


FT-NMT04 ナノメカニカル試験システム

可動軸(coarse)	3軸
駆動原理 (coarse)	ピエゾ stick slip
XYZ 駆動範囲 (coarse)	21mm x 12mm x 12mm
最小駆動単位 (coarse)	1nm
駆動原理 (fine)	ピエゾ scanning
駆動範囲 (fine)	25 μ m
最小駆動単位 (fine)	0.05nm
位置測定範囲	0.05nm - 21mm
最大荷重範囲※1)	± 200mN



*1) FT-S200'000マイクロフォースセンシングプローブを使用





オックスフォード・インストゥルメンツ株式会社

〒141-0001 東京都品川区北品川5丁目1番18号 住友不動産大崎ツインビル東館

TEL: 03-6744-4701 info.jp@oxinst.com

【大阪営業所】 〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島5-8-3 新大阪サンアールビル北館10F

202504-NA016-C038-300