

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分

平成28年 5月31日現在

研究課題名（和文） **single digit ナノスケール場の破壊力学**

研究課題名（英文） **Fracture mechanics in single digit
nanometer scale**

課題番号：25000012

研究代表者

北村 隆行 (KITAMURA TAKAYUKI)

京都大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要：

single digit ナノスケール（1 nm～10 nm）の変形集中場に起因した破壊を支配する力学法則の解明を目的として、single digit ナノひずみ集中場観察破壊実験システムを開発した。single digit ナノスケールの変形集中場を有するナノ試験片を作製してその場観察微小負荷試験を実施し、破壊の支配力学量を特定した。実験結果および原子レベル解析結果から、4nm 程度まで従来の力学法則が成立するが、2 nm 以下では従来の破壊支配力学量が破たんする。エネルギー収支を考慮した新しい破壊基準を提案し、その破壊挙動を統一的に記述することに成功した。

研究分野：材料強度学

キーワード：single digit ナノ、ひずみ集中場、破壊力学、負荷実験、その場観察

1. 研究開始当初の背景

高度な機能を産み出すマイクロ・ナノ構造に関する工学発展は著しく、single digit ナノスケール（1 nm～10 nm）の精密な構造体が工業応用の対象となりつつある。ミクロン以上のスケールに関する破壊の力学法則については、詳細に研究が積み重ねられてきており、とくにミリメートル以上ではその学術成果は成熟の域に達している。しかし、ナノスケールの構造体の破壊現象に対しては、我々は依然として十分な知識を有していない。破壊は構造体全体の機能を喪失させる波及効果を有しているが、本質的にはき裂先端等の局所から発生する現象である。したがって、破壊現象は不均一な局所力学場（応力場など）に支配される。一方、single digit ナノスケールの局所領域では原子レベルの離散性などによって従来の破壊の力学における基礎である連続体力学（応力等の概念）の適用性について疑義が生じる。すなわち、ナノ構造体中の不均一な力学場における破壊を支配する力学法則は未解明である。

2. 研究の目的

(1) single digit ナノスケールの変形集中場を制御できる強度実験方法およびその破壊過程をその場観察できる試験システムを開発すること。

(2) 局部ナノ破壊現象を支配する力学法則を解明すること。

3. 研究の方法

(1) ナノ構造体中局所の原子位置の変化を正確に観測する技術を確認する（ナノひずみ集中場観察技術の整備）。

(2) 微小負荷試験のための試験装置（微小負荷装置、ナノスケール加工装置およびハンドリング装置）と(1)の観察技術とを組み合わせた実験システムを開発する（single digit ナノひずみ集中場観察破壊実験システムの構築）。

(3) 制御されたsingle digit ナノひずみ場を有するナノ試験体の創製、その場観察微小負荷試験、および、原子レベル解析を実施する（single digit ナノスケール破壊の支配力学の探求）。

4. これまでの成果

(1) 原子レベルの分解能を有する走査型透過型電子顕微鏡（Scanning Transmission Electron Microscope: STEM）を導入し、single digit ナノひずみ集中場で不安定なイベント（局所破壊の発生）が発生した際の荷重変化を検知できる微小負荷装置を開発し

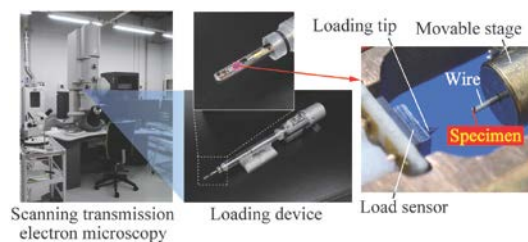


図1 その場観察微小負荷試験システム

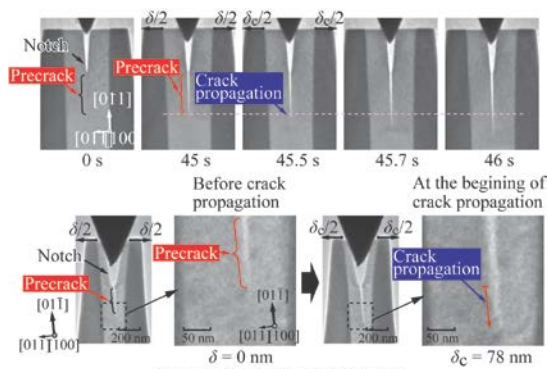


図2 き裂伝ば時のその場観察像

て、その場観察微小負荷試験システム (図1) を構築した。

(2) 試験片に対して超高真空・高温下で熱処理を施すことで、single digit ナノひずみ場を有し、加工層のない試験体 (Si) の実現に成功した。

(3) 試験体形状の力学設計および負荷方式の決定を行い、最小寸法 4 nm の応力特異場を有する試験片および STEM 内その場観察き裂伝ば試験の実現に成功した。

(4) その場観察き裂伝ば試験 (図2) により、応力特異場の大きさ 4 nm~20 nm においては、応力拡大係数 K_I を用いた破壊基準が有効であり、その値は、マクロ材のものと一致することを示した (図3(a))。

(5) single digit ナノひずみ場を有する切り欠きでは、き裂の場合とは大きく異なる破壊特性を有する (ひずみ (応力) 集中場の寸法減少に伴って破壊強度は上昇し、理想強度に漸近する) が、その強度はひずみ集中場の分布が異なるき裂先端から原子数個分の距離の応力とほぼ一致することを明らかにした (図3(b))。従来、特異場からの破壊と有限の応力値を有する応力集中場からの破壊は、統一的な理解に至っていない。本成果は、原子レベルの破壊現象では統一した力学量が適用できる可能性を示すものであり、学術的なインパクトは極めて大きい。

(6) 原子レベル解析により、single digit ナノひずみ場に起因した破壊基準について一般化された力学的支配法則に関する検討を行い、応力特異場の大きさが 2 nm 以下になる場合、従来の破壊力学基準が破綻することを明らかにした (図4(a))。エネルギー収支を考慮した新しい破壊基準を提案し、そ

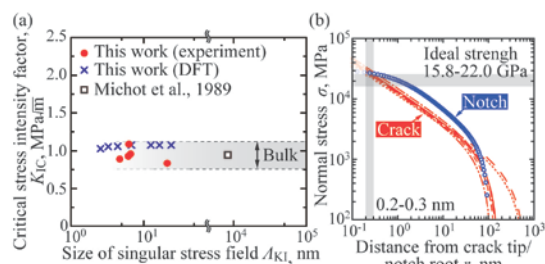


図3 実験による single digit ナノひずみ場からの破壊基準の検討結果

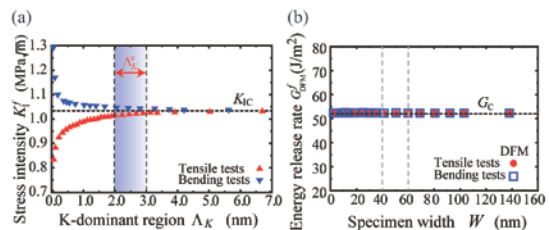


図4 原子シミュレーションを用いた single digit ナノひずみ場からの破壊支配力学量の検討結果

の破壊挙動を統一的に記述することに成功した (図4(b))。

5. 今後の計画

(1) 異材界面を有するナノ構造体中の single digit ナノひずみ場を対象とし、その破壊現象について検討を行う。(平成 28 年度実施)

(2) 形状や内部構造 (結晶粒界等) によって発現する single digit ナノひずみ場に起因したマルチフィジクス現象へ展開を行う。(平成 29 年度実施)

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

・著書 (計 2 件)

1. T. Kitamura, T. Sumigawa, H. Hirakata, and T. Shimada, Fracture Nanomechanics second edition, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. (2016). (他 1 件)

・主な論文 (査読有: 計 84 件)

1. T. Sumigawa, S. Ashida, S. Tanaka, K. Sanada, and T. Kitamura, Fracture Toughness of Silicon in Nanometer-scale Singular Stress Field, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 150, pp.161-167 (2015)

2. T. Shimada, K. Ouchi, Y. Chihara, and T. Kitamura, Breakdown of Continuum Fracture Mechanics at the Nanoscale, Scientific Reports, Vol. 5, article number 8596 (2015)

3. L. Guo, T. Kitamura, Y. Yan, T. Sumigawa, and K. Huang, Fracture Mechanics Investigation on Crack Propagation in the Nano-multilayered Materials, International Journal of Solids and Structures, Vol. 64-65, pp.208-220 (2015). (他 81 件)

※このほか、3 年間に国際会議の基調講演・招待講演 12 件を依頼によって行っている。

・受賞 (計 8 件)

1. 平成 27 年度 日本材料学会賞論文賞 (澄川貴志, 北村隆行, 他)

2. 平成 26 年度 文部科学省 若手科学者賞 (科学技術分野の文部科学大臣表彰)

(嶋田隆広)

(他 6 件)

ホームページ等

<http://kitamura-lab3.p2.weblife.me/>