

ナノ構造メタ界面の力学・マルチフィジックス特性設計

Design on Mechanical and Multi-Physics Properties of Nano-Structured Meta-Interface

課題番号：18H05241

北村隆行（TAKAYUKI, KITAMURA）

京都大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

本研究では、多数の微小構造体を配列した界面（離散ナノ構造メタ界面）に発現する特異な力学特性およびマルチフィジックス特性の機構を明らかにすることを目的とする。界面の構成要素であるナノ構造体の幾何形状が生み出す力学特性（非線形弾性）を実験的に評価し、さらにその集合体であるメタ界面全体が持つ力学機能（優れた疲労特性）を明らかにした。

研究分野：材料力学、生産工学、設計工学およびその関連分野

材料力学および機械材料関連 材料物性

キーワード：ナノ構造、メタ界面、力学、マルチフィジックス、設計

1. 研究開始当初の背景

電子デバイスやバイオMEMS、次世代電池システムなど現代の科学技術の根幹を成す機器は、いずれも多機能化・高性能化のために異なる材質の多くのナノメートルスケール構造体から構成され、異材界面が随所に存在する。一般的に、異材界面は機能的に劣る部分として知られている。一方、近年の微小要素の作製技術の発展にともない、ナノメートルスケールの微小構造体（直径数 nm から数十 nm）が開発されている。微小ナノ構造体を異材間の界面に配置すれば（ナノ構造メタ界面）、その“幾何形状”と“配列（配置・密度）”を制御することで、特異かつ多様な力学特性を有する界面を創り出し、特別な力学的機能を任意に設計できる。また、ナノ構造メタ界面は、力学的負荷と機能の運動効果であるマルチフィジックス特性の効果も大きいと期待できる。したがって、力学特性に留まらず、マルチフィジックス特性へと発展する大きな潜在性を有している。

2. 研究の目的

本研究では、ナノ構造メタ界面に発現する特異な力学・マルチフィジックス特性の支配因子とその機構を解明することを主目的とし、(1)メタ界面の構成要素である微小ナノ構造体の幾何形状が生み出す力学特性を実験的に評価し、(2)その集合体であるナノ構造メタ界面が持つ力学能力を引き出して設計・実証する。さらに、(3)微小ナノ構造体が生み出す非線形相互作用を積極利用することでメタ界面が持つ機能を拡張設計するほか、(4)強誘電性などの物理特性は構造体

同士の接近・接触によって強く相互作用する性質を利用してナノ構造メタ界面における微小構造体の集団変形がもたらすマルチフィジックス特性の解明とその設計へと発展を図る。

3. 研究の方法

動的斜め蒸着法（Dynamic oblique deposition: DOD）によって精緻に形状・寸法を制御したナノメートルスケールの微小構造体が密集した離散ナノ要素集合構造を対象とする。この層は、ナノレベルの離散的な構造を有する集積構造材料であることに特徴がある。本研究では、ナノ微小構造体単体に対する力学実験装置を開発し、実験・解析によってその力学特性を明らかにする。また、ナノ構造体メタ界面の巨視的力学特性を特定するための実験および解析を実施する。その後、マルチフィジックス特性に関する第一原理解析および装置の拡張およびそれによる実験により、要素の特性とメタ界面の特性を解明する。

4. これまでの成果

DOD法を用いてメタ界面を作製する際、一

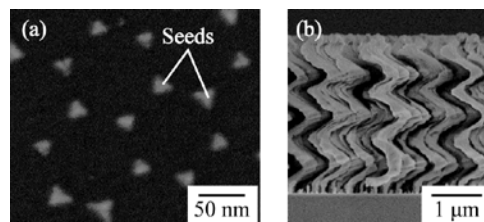


図1 (a)幾何学的な位置に配置した初期形成核、(b)作製した微小ナノ構造体。

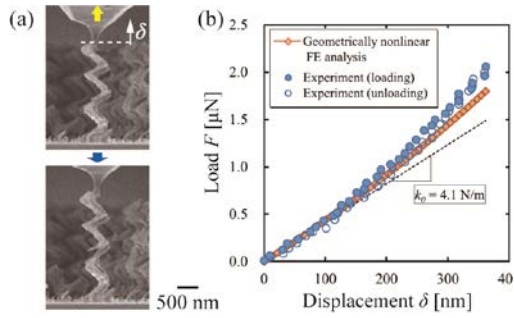


図2 (a) 引っ張り負荷試験の様子、(b) 荷重-変位関係。

一般的に初期形成核はランダムな位置に配置されるが、この配置位置を制御することを目的として、直径 100 nm のナノポリスチレン球を予め基板上に最中密状態で設置した。その上から蒸着（シリコン (Si)）を行った後、ポリスチレン球を除去することで、核を配置した（図 1(a)）。この核上に斜め蒸着を行うことで、幾何学的に設計・制御した位置にナノ要素を作製することに成功した（図 1(b)）。

さらに、透過型電子顕微鏡（Transmission electron microscope: TEM）内においてナノ構造体単体に対して負荷実験が可能な微小負荷装置を開発した。本装置は、TEM 用のロッド状ホルダの先端に負荷機構を設け、メタ界面から取り出したナノ構造体を専用のカートリッジに搭載して設置し、負荷を与えることができる。

図 2(a) は、非線形弾性挙動を示すよう設計した作製したメタ界面から抽出した微小ナノ構造体に対して、引張負荷試験を実施した様子を示す。図 2(b) は、この試験から得られた荷重-変位関係を示す。ナノ構造体は、非線形弾性挙動を示しており、要素に対して適切な設計を行うことで、目的とする力学特性（この場合は非線形挙動）を示すナノ要素を実現できることを明らかにした。

また、ナノ要素が集合したメタ界面の変形特性を取得するための試験手法を開発し、一般的に疲労特性が延性と相関があること、および、らせん形状要素は延性が高いことに着

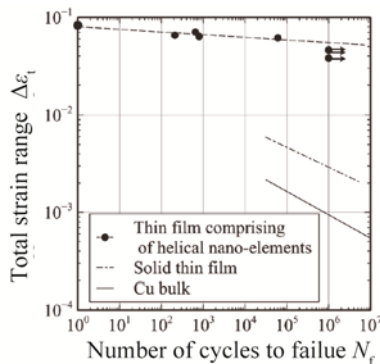


図3 均質薄膜との疲労特性の比較。

目し、ナノ要素が集合したメタ界面に繰り返し負荷を与え、均質薄膜よりも極めて優れた強度特性を有することを明らかにした（図 3）。

5. 今後の計画

令和 2 年度は、実験とマルチスケール力学解析から得られた結果を対比し、その力学に着目して現象を解明する。さらに、ナノ構造メタ界面の力学挙動を直接的にその場観察するための実験を FE-SEM 内で行う予定である。

令和 3 年度は、機能（例：強誘電性、磁性、金属-絶縁体転移特性など）を有する材料を用いてナノ構造メタ界面を作製し、それらの特性を測定する。とくに、ナノ構造メタ界面の巨視的なマルチフィジクス特性を取得する負荷試験装置を開発する。

令和 4 年度は、開発した試験装置を用いて、微小ナノ構造体のマルチフィジクス特性を実験的に取得する。さらに、得られた結果を基に所望の特性を発現できるメタ界面の設計を行う。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

- ・主な論文（査読有：計 34 件）
 - 1. R. Kaneko, T. Yukishita, T. Sumigawa, T. Kitamura, Nonlinear Elasticity in Meta-Film Comprising of Nano-Helices, Thin Solid Films, Vol. 695, 137749 (2020).
 - 2. 金子遼太, 山本幹也, 澄川貴志, 北村隆行, 斜め蒸着法で作製した銅ナノらせん要素集合薄膜の優れた疲労強度特性, 材料, 68 巻 11 号 pp. 845-851 (2019).
 - 3. T. Sumigawa, S. Uegaki, T. Yukishita, S. Arai, Y. Takahashi, T. Kitamura, FE-SEM in situ Observation of Damage Evolution in Tension-compression Fatigue of Micro-sized Single-crystal Copper, Materials Science and Engineering A, Vol. A 764, 138218 (2019)
 - 4. L.V. Lich, M.-T. Le, T.Q. Bui, T.-T. Nguyen, T. Shimada, T. Kitamura, T.-G. Nguyen, V.-H. Dinh, Asymmetric Flux-closure Domains in Compositionally Graded Nanoscale Ferroelectrics and Unusual Switching of Toroidal Ordering by an Irrotational Electric Field, Acta Materialia, Vol. 179, pp. 215-223 (2019).
- (他 30 件)

・このほか、2 年間に国際会議の特別講演 7 件、海外大学・研究所における特別講義 5 件を依頼によって行っている。

・受賞（計 1 件）

- 1. Best Paper Award, 5th International Conference on Materials and Reliability (2019)

(T. Sumigawa, S. Uegaki, T. Kitamura)

7. ホームページ等

<http://cyber.me.kyoto-u.ac.jp/>