

熱雑音を測ることでポリマーに埋もれたナノ構造を検出 —走査型熱振動顕微鏡法によるナノスケール表面下構造イメージング—

概要

近年、集積回路におけるナノ欠陥分析や細胞内診断など、材料・デバイス解析やバイオ・医療分野においては、ナノ空間分解能をもつ非破壊・非侵襲の内部診断法の開発が強く求められています。京都大学大学院工学研究科の小林圭准教授、山田啓文教授、八尾惇研究員（現豊田工業大学）らの研究グループは、原子間力顕微鏡（AFM）を基にした新しい分析手法、走査型熱振動顕微鏡法（Scanning Thermal Noise Microscopy: STNM）を開発し、同手法により厚い高分子膜内部に隠れた、表面下の金ナノ粒子の非破壊検出に成功しました。

AFMは、原子レベルで尖った探針をもつマイクロスケールの板ばね（カンチレバー）を用いて、探針と試料表面との間にはたらく原子・分子間力を検出し、試料表面の微細形状やナノ物性を計測する手法として広く利用されています。このカンチレバーは、ばね振動系（調和振動系）として、特定の周波数（共振周波数）の外力によって共鳴的に振動し、その周波数応答は共振スペクトルを示します。実は、外部からの人為的な力が全くなくても、周囲の熱揺らぎによって、カンチレバーは原理的に常に振動しています（熱雑音振動＝熱振動）。

探針が試料に接触した状態では、カンチレバーの共振周波数は、接触部の試料表面の固さ（＝弾性率）に応じて変化しますが、われわれは、カンチレバーの上記熱振動の振幅の周波数依存性、つまり熱振動スペクトルからも弾性率を求めることができることを見だし、探針直下の領域の弾性率を計測することができるSTNMを新たに開発しました。

今回の研究ではポリイミド基板上に金ナノ粒子（直径40 nm）を散布し、これを膜厚300 nmの高分子（フォトポリマー）の膜で覆いました。接触モードAFMの探針走査中に、走査領域内の各点 (x, y) で、カンチレバーの熱振動スペクトルを計測し、熱振動振幅の3次元データ $R(x, y, f)$ を得ました（図1）。この3次元データから、任意のある特定周波数 (f_p) における熱振動振幅像 $R(x, y)$ を再構成することができます。図2(a)は、高分子膜の表面形状像であり、図2(b)は再構成により得られた104.2 kHzにおける熱振動振幅像です。図2(b)において白矢印で示した輝点は、104.2 kHzにおいてカンチレバーの熱振動振幅が大きくなっていることを示しており、熱振動スペクトル（図1）の分析から共振周波数が高い、つまりこの領域の弾性率が高いことが分かりました。また、モデル計算により、今回検出された弾性率の変化が、金ナノ粒子の有無に対応することが分かりました。つまり、厚い高分子膜に埋もれた金ナノ粒子の検出に成功しました。

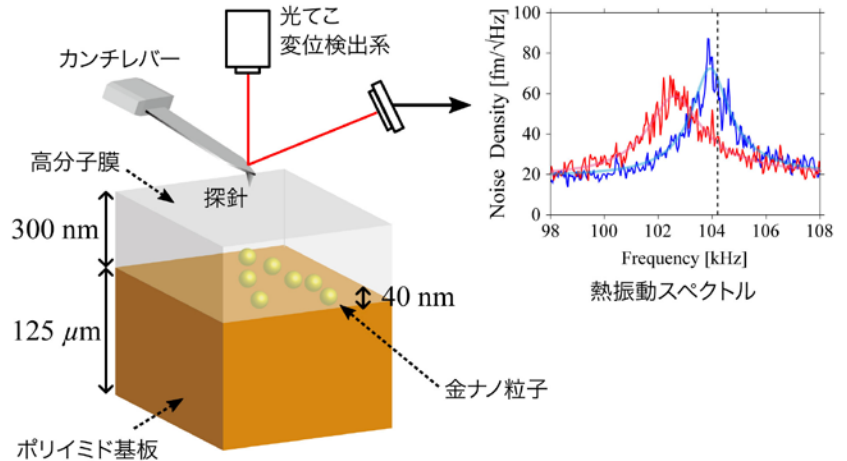


図1. 走査型熱振動顕微鏡（STNM）による高分子膜の内部に隠れた金ナノ粒子の可視化の模式図。

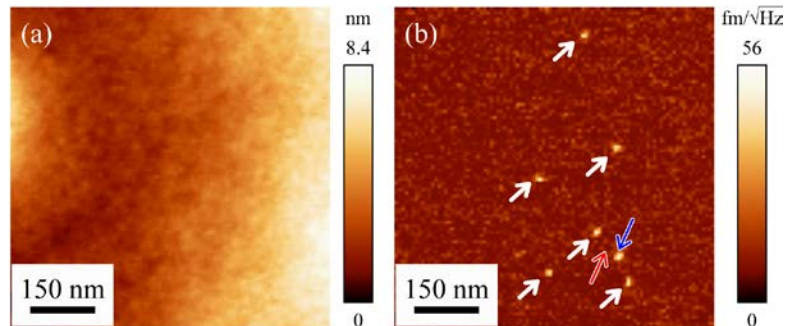


図2. (a) 試料の表面形状像. (b) 熱振動振幅像 ($f_p = 104.2$ kHz). 赤矢印および青矢印は、図1に示す熱振動スペクトルが得られた箇所を示す

本研究成果は、非破壊、ナノスケール分解能での弾性率計測および表面下構造イメージング確立に向けての大きな前進であり、今後、様々な産業、バイオ、医療分野における非破壊ナノ内部診断法実現に直接つながるものと期待されます。

本成果に関する論文は2月17日、英国の学術誌*Scientific Reports*に掲載されました。

研究プロジェクトについて

本研究は日本学術振興会 科学研究費補助金（課題名：走査型熱雑音顕微鏡による表面下構造可視化のメカニズム解明および応用可能性探索、非線形MEMS共振器を用いた演算形メモリの開発、複合機能プローブシステムによるバイオ・ナノ材料の分子スケール機能可視化）の支援を受けました。

<論文タイトルと著者>

タイトル: Visualization of Au Nanoparticles Buried in a Polymer Matrix by Scanning Thermal Noise Microscopy

著者: Atsushi Yao, Kei Kobayashi, Shunta Nosaka, Kuniko Kimura & Hirofumi Yamada

掲載誌: *Scientific Reports*