

# Photothermally induced vibration of an optically driven atomic force microscope cantilever

(光駆動AFM カンチレバーの光熱誘起振動に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

The advanced fabrication technology for cantilever has made the cantilever to offer wide potential utilization in various experimental conditions. The advantage of being small in size and physically sensitive to the environment changes has attracted many applications, for example, in photo-thermal spectroscopy, pressure gauge, and mass sensor. The frequency dependant vibration of the cantilever is the most attractive property, which can be tailored by its geometrical dimension and material properties. The use of atomic force microscopy (AFM) cantilever with supersharp probe tip in near-field scanning optical microscopy (NSOM) enables us to measure nanostructures at nanometer scale and thus breaking the diffraction limit. However, the leaked illumination and the scattered light might influence the dynamic operation of the NSOM by photothermally modifying the mechanical properties of the probe.

Therefore, it becomes important to investigate the mechanical response of an optically driven cantilever. The topic is also of the interest in the microelectromechanical sensor systems (MEMS), where the cantilever acts as an active element. Structural bending in the cantilever is expected to occur due to the bimaterial property in the common cantilever. The mechanical vibration of the cantilever can be photothermally induced by optical modulation.

In this study, the photothermally induced vibration is compared between non-coated and metal-coated AFM cantilevers. It is found that the metal-coating reduces the vibration amplitude. Since the photothermal effect is based on the optical absorption process, the metal-coating apparently limits the induced vibration. Interestingly, the spectra of the vibration amplitude also exhibit asymmetry at resonance. The resonance asymmetry is found to be dependent on the excitation spot-position. In addition, very high gradient of the resonance phase can be achieved by adjusting the excitation spot-position along the central axis of the cantilever. This asymmetry is similar to the spectral profile of Fano resonance. The Fano resonance is attributed to the asymmetry at the resonance of absorption spectra of atomic structures due to the interference between resonant and continuous components. Based on the analysis of the Fano resonance, the constituent components in the vibration spectrum are able to be extracted and their origin was discussed.

The observed Fano-like resonance might find useful applications in high-sensitivity AFM systems, for example, in constructing phase sensitive mode AFMs, where a high phase gradient is required at resonance. Furthermore, the variation in cantilever response for different excitation spot-positions provides more options in designing cantilever-based devices because it is possible to maximize or minimize the resonance amplitude by selecting the correct excitation spot-position.

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	笹木敬司
副査	教授	末宗幾夫
副査	教授	竹内繁樹
副査	准教授	藤原英樹

## 学位論文題名

### Photothermally induced vibration of an optically driven atomic force microscope cantilever

(光駆動AFM カンチレバーの光熱誘起振動に関する研究)

最先端微細加工技術により様々な実験条件で利用できる原子間力顕微鏡 (AFM) カンチレバーの作製が可能になり、特に、微小形状や環境変化に感度の高いカンチレバーは、光熱分光法、圧力ゲージ、質量計測等への応用が進展している。強度変調したレーザー照射によりカンチレバーの光熱誘起振動を励振する微小電気機械システム (MEMS) も高感度センサーとして実用化されつつある。また、AFM カンチレバーを用いた散乱型ニアフィールド光学顕微鏡 (NSOM) は、回折限界を大幅に超えて 10 nm 以下の空間分解能を実現することが可能であり、ナノ構造体における光局在場を観測する実験に成功している。しかしながら、光を用いてカンチレバーの振動を誘起したときの機械的な特性については明らかにされていない点が数多く、MEMS センサーや NSOM への応用において課題となっている。

本論文は、二層構造の AFM カンチレバーの振動を光熱誘起したときの周波数特性について詳細に解析し、新奇な現象の解明を行ったものである。まず、V 形状カンチレバーの片面および両面を金属コートしたときの周波数応答を観測し、振動振幅の変化、およびカンチレバーにおける吸収・反射過程を解析した結果から、光熱効果の機構について明らかにしている。また、周波数応答の位相情報に着目した観測を行った結果、振動共鳴スペクトルの非対称性を新たに観測することに成功している。また、非対称スペクトル形状は、レーザースポットの照射位置に依存して大きく変化することを実験的に示している。通常、カンチレバーの機械的振動は、共鳴周波数の前後で位相が  $\pi$  変化するが、観測した周波数スペクトルでは、レーザースポット位置によって位相が  $2\pi$  変化する位置と変化がない ( $0\pi$ ) の場合が現れることを実証している。この非対称スペクトル特性は、振動現象におけるファノ共鳴効果として説明することができることを見出している。

ファノ効果は、スペクトル線幅の狭い共鳴振動成分と非共鳴なブロードスペクトル成分の干渉に依って現れる現象であり、光熱誘起カンチレバー振動における共鳴成分と非共鳴成分の起源について解析を行っている。その結果、共鳴成分はカンチレバー固有の最低次の振動モードであることが分かり、また、振動振幅の光照射スポット位置依存性から、非共鳴成分は高次の振動モードの低周波数成分には帰属されることが示されている。非共鳴成分の起源の可能性としては、光照射に

伴うカンチレバーの形状変化により共鳴モード以外の変形・変位成分が誘起されていると考察している。ファノ効果の解析から、特定の光照射スポットにおいては共鳴成分と非共鳴成分が打ち消し合って干渉し、振動が消失することが明らかになっている。実験的に検証を行ったところ、ある照射スポットにおいて、周波数応答スペクトルに線幅が極めて狭い共鳴ディップが現れることを実証している。また、この共鳴ディップの前後で位相は  $2\pi$  変化し、周波数当りの位相変化量 (位相変化の勾配) は、通常の共鳴ピークの場合に比べて 3 桁以上増大することを見出している。

本論文の研究により、光熱誘起 AFM カンチレバー振動の特性が明らかになり、光照射スポットの位置を調整することによって様々な振動状態を形成できることが示されている。また、ファノ共鳴現象を発見し、特異な照射スポット位置において位相変化量が急激に増大することを明らかにするとともに、共鳴成分・非共鳴成分が現れる機構を解析している。この特異な現象は、超高感度な MEMS センサーや NSOM への応用が期待できると考えられる。

これを要するに、著者は、カンチレバーを用いた高感度センサーやナノ計測法の実現に向けて、光熱誘起共鳴振動の周波数応答における位相情報に着目した解析を行い、ファノ共鳴スペクトルを新たに観測すると共に、その機構の解明において有益な知見を示し、光計測制御の分野の進展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。