518 AFM 用ファンデルポール型自励発振マイクロカンチレバーの非線形特性

Nonlinear characteristic of van der Pol type self-excited oscillation micro cantilever for AFM

○ 染谷 貴司(筑波大院)

正 黒田 雅治(産総研)

正 芦田 極(産総研)

正 藪野 浩司(筑波大院)

Takashi SOMEYA, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki

Kiwamu ASHIDA, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)

Masaharu KURODA, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)

Hiroshi YABUNO, University of Tsukuba

Self-exciting technique is known as an effective excitation method for AFM probe to measure the surface of a biological sample in a liquid environment. In this research, the self-excited oscillation in a cantilever probe is generated by linear feedback. In addition, the steady state amplitude is reduced by nonlinear feedback. Then, the cantilever probe has the same dynamics as van der Pol oscillator. We implement the excitation method to a practical cantilever probe of AFM, using the optical lever method and tube PZT scanner. For using our own making AFM, we experimentally confirm that the small steady state amplitude of the cantilever probe is realized.

Key Words: Nonlinear Vibration, Nonlinear Control, Atomic Force Microscopy, Self-excited Oscillation

A1 はじめに

近年、原子間力顕微鏡 (AFM) による液中における生体試料観察への期待が高まっている。AFM とは先端に探針が付いたマイクロカンチレバーを用いて、微小な物体の表面形状を観測する装置である。試料と探針の間に働く原子間力によりカンチレバーの等価的な固有振動数が変化することを利用し、試料-探針間の距離の変化を検知する。AFM で液中観察を行う際の感度の低下を改善する方法として、自励発振型カンチレバーの利用が注目されている。本研究では、線形フィードバックと非線形フィードバックを用いて、実際の AFM カンチレバーにファンデルポール型の自励発振と同様な振動特性を持たせ、AFM 機能を実現するに足る低振幅の定常自励発振が可能なことを実験的に確認する。そのため、AFM 装置を試作し、その機構を用いて提案手法の実現可能性を確認する。

A2 実験用 AFM の試作

本研究では、図 A1 に示すような実験用 AFM 装置を試作し、AFM カンチレバーがファンデルポール型自励発振により、実際の AFM の機能を有するか検証を行った。

カンチレバーはその支持部分を圧電アクチュエータにより加振される。カンチレバーの変位は、カンチレバーの先端にレーザ光をあて、反射されたレーザ光をミラーを介して四分分割フォトディテクタで受光する光てこ法を利用して計測する。カンチレバーがたわむと反射角が変化し、反射光の光点が移動するので、受光位置の変化からカンチレバーのたわみ角を観測できる。

試料を載せるステージにはチューブ型スキャナを用い、 x - y 方向の走査及び走査時の z 方向の制御をサンプルステージ側を動かすことで行う。チューブ型スキャナはセラミックスの円筒の側面にバイモルフ型の圧電素子を形成したもので、ナノメートルスケールの分解能を有する。各方向の圧電素子に適切な電圧を印加することでステージを走査することができる。また、チューブ型スキャナの z 方向の変位を正確に測定するため、マイクロセンサをチューブスキャナ内に搭載する。通常、チューブ型スキャナの伸びは圧電定数に印加電圧を掛けることで求めることができる。しかし、圧電素子で形成されているチューブ型スキャナはヒステリシスが存在するため、一定電圧を加え伸びが生じた際、時間の経過とともにその伸びが変化する。本研究では、自励発振の発振振動数の変化と、それに依存したプローブ-試料間の距離の変化を明確に計測するために、 z 方向変位を印加電圧から求めるのではなく、マイクロセンサを用いて測定する。マイクロセンサは、測定対象との静電容量を計測することで微小な距離を計測することができる。

Fig. A1: Setup of prototype AFM

式 (A1) に示すようなファンデルポール型自励発振と同様の振動系を AFM カンチレバーに発生させるため、線形フィードバックおよび非線形フィードバックを与える回路を作製した。

$$\ddot{x} - \mu(1 - x^2)\dot{x} + x = 0 \quad (\text{A1})$$

光てこ機構により検出したたわみ角信号を微分し、増幅して線形フィードバック信号を作った。また、たわみ角信号と微分により得られたたわみ角速度信号から、非線形フィードバック信号を作った。最後に線形成分と非線形成分を加算し、カンチレバーへの制御入力として圧電素子に印加した。

A3 試作 AFM を用いた実験

試作した AFM を用いて AFM カンチレバーをファンデルポール型自励発振させた。非線形フィードバックを加えなかったとき、発振振幅は線形フィードバックゲインが臨界ゲインを越えるとすぐに測定限界 (250nm) まで増大した。これに対し、非線形フィードバックを加えたとき、非線形フィードバックの効果により振幅が定常状態となり制御することができた。また、非線形フィードバックゲインをより大きくすることで振幅をさらに小さく制御することができた。このとき 8nm の定常振幅を持つ自励発振が実験により確認された。

Fig. 1: Analytical model

1 はじめに

近年、原子間力顕微鏡 (AFM) による液中における生体試料観察への期待が高まっている⁽¹⁾。AFM とは先端に探針が付いたマイクロカンチレバーを用いて、微小な物体の表面形状を観測する装置である。試料と探針の間に働く原子間力によりカンチレバーの等価的な固有振動数が変化することを利用し、試料-探針間の距離の変化を検知する⁽²⁾。生体試料を観察する場合、AFM は液中で利用しなければならない。この場合、粘性減衰によりカンチレバーの Q 値が低下するため従来の強制加振による固有振動数の測定は困難になる。また、弱い衝撃でも変形してしまう生体試料を計測するためには、低振幅で発振させなければならない。このような問題に対して、本研究では、線形フィードバックと非線形フィードバックを用いてマイクロカンチレバーにファンデルポール型の自励発振と同様な振動特性を持たせ、低振幅、定常発振を実現する⁽³⁾。この振幅特性を利用すれば⁽⁴⁾⁽⁵⁾、カンチレバーの共振状態での振幅制御が可能となり、測定試料への接触の問題点を解決することができると考えられる。

そこで、実際の AFM カンチレバーに提案した手法を適用し、AFM 機能を実現するに足る低振幅の定常自励発振が可能なことを実験的に確認する。本手法の物理的特性を的確に調べ、実験によるパラメータスタディの効率化を図るため⁽⁶⁾⁽⁷⁾、また、各機械要素の挙動を観察するための計測機器の追加を容易にするため、AFM 装置を自作した。

2 ファンデルポール型自励発振カンチレバーのダイナミクス

2.1 解析モデルと運動方程式

AFM カンチレバーをオイラーベルヌーイ梁とみなし運動方程式を導出する。カンチレバーの解析モデルを図 1 に示す。カンチレバーの長手方向に x 軸、たわみ方向に z 軸をとり、カンチレバーは $z-x$ 平面内を運動するものとする。カンチレバーは長さが l で、固定端から中立面のある点までの距離を s 、ある点 s における x 軸方向の変位を u 、 z 軸方向の変位を w とする。固定端は圧電素子により z 軸方向の変位入力 ζ を与えることができ、これを制御入力とする。まず、カンチレバーの運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを求め、ラグランジュの未定乗数 λ を用いて、中立面は曲げによる伸びを生じない条件を導入すると、拡張されたハミルトンの原理から運動方程式は以下のようになる⁽⁸⁾。

$$\begin{aligned} & \rho A \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \right) + EI \frac{\partial^4 w}{\partial s^4} + C_{lin} \frac{\partial w}{\partial t} \\ & + EI \left\{ \frac{\partial^4 w}{\partial s^4} \left(\frac{\partial w}{\partial s} \right)^2 + 4 \frac{\partial w}{\partial s} \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \frac{\partial^3 w}{\partial s^3} + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \right)^3 \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial s} \left[\rho A \frac{\partial w}{\partial s} \int_l^s \int_0^s \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial s \partial t} \right)^2 + \frac{\partial w}{\partial s} \frac{\partial^3 w}{\partial s \partial t^2} \right\} ds ds \right] \\ & = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

境界条件は

$$\left. \frac{\partial^3 w}{\partial s^3} \right|_{s=l} = \left. \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \right|_{s=l} = \left. \frac{\partial w}{\partial s} \right|_{s=0} = w \Big|_{s=0} = 0 \quad (2)$$

である。ここで ρ, A, E, I はそれぞれ、密度、断面積、ヤング率、断面二次モーメントを表し、測定環境における線形粘性減衰項 $C_{lin} \partial w / \partial t$ を考慮している。次に、ファンデルポール型自励発振を実現するためにカンチレバーのたわみ角速度をフィードバックし、加振入力 ζ は圧電定数 d_{33} とフィードバックされる入力電圧を用いて以下のように表される⁽⁹⁾。

$$\zeta = d_{33} \left\{ K_{lin} \frac{\partial^2 w}{\partial s \partial t} \Big|_{s=l} - K_{non} \left(\frac{\partial w}{\partial s} \Big|_{s=l} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial s \partial t} \Big|_{s=l} \right\} \quad (3)$$

$K_{lin} (> 0)$ と $K_{non} (> 0)$ はそれぞれ線形フィードバックゲインと非線形フィードバックゲインを表している。

代表長さを l 、代表時間を $T = \sqrt{\rho A l^4 / EI}$ とおくと、運動方程式 (1) は以下のように無次元化される。

$$\begin{aligned} \ddot{w}^* & + w^{*''''} + \mu_{lin} \dot{w}^* \\ & + w^{*''''} w^{*2} + 4 w^{*'} w^{*''} w^{*'''} + w^{*''3} \\ & + \left[w^{*'} \int_1^{s^*} \int_0^{s^*} (\dot{w}^{*2} + w^{*'} \dot{w}^{*'}) ds^* ds^* \right]' \\ & = -k_{lin}^* \dot{w}^{*'} \Big|_{s^*=1} + k_{non}^* (2 \dot{w}^{*3}) \Big|_{s^*=1} \\ & + 6 w^{*'} \Big|_{s^*=1} \dot{w}^{*'} \Big|_{s^*=1} \dot{w}^{*'} \Big|_{s^*=1} + w^{*2} \Big|_{s^*=1} \ddot{w}^{*'} \Big|_{s^*=1} \end{aligned} \quad (4)$$

このとき境界条件は

$$w^{*'''} \Big|_{s^*=1} = w^{*''} \Big|_{s^*=1} = w^{*'} \Big|_{s^*=0} = w^* \Big|_{s^*=0} = 0 \quad (5)$$

となる。ここで、 $(\cdot)$ は無次元座標 s^* による偏微分、 $(\dot{\cdot})$ は無次元時間 t^* による偏微分を表している。無次元の減衰係数とフィードバックゲインは以下のようにおいた。

$$\mu_{lin} = \frac{C_{lin} l^2}{\sqrt{\rho A E I}} \quad (6)$$

$$k_{lin}^* = \frac{d_{33}}{l^3} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} K_{lin} \quad (7)$$

$$k_{non}^* = \frac{d_{33}}{l^3} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} K_{non} \quad (8)$$

これ以降、無次元量を表す $(^*)$ は省略する。

2.2 多重尺度法による解析

無次元運動方程式 (4) を、多重尺度法を用いて解析する。微小パラメータ $\epsilon (0 < \epsilon \ll 1)$ を用いて、 z 軸方向変位 w をべき級数展開し、多重時間尺度を以下のように導入する。

$$w = \epsilon w_1 + \epsilon^3 w_3 \quad (9)$$

$$t_0 = t, \quad t_2 = \epsilon^2 t \quad (10)$$

フィードバックの効果が後で得られる振幅方程式に反映されるように⁽¹⁰⁾、各係数に対し以下のようなオーダーを与える。

$$\mu_{lin} = \epsilon^2 \hat{\mu}_{lin}, \quad k_{lin} = \epsilon^2 \hat{k}_{lin}, \quad k_{non} = \hat{k}_{non}$$

ここで $(\hat{\cdot})$ のついたパラメータは $O(1)$ である。 t に関する時間微分は多重時間尺度で表すと

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t_0} + \epsilon^2 \frac{\partial}{\partial t_2} \\ \frac{d^2}{dt^2} &= \frac{\partial^2}{\partial t_0^2} + 2\epsilon^2 \frac{\partial^2}{\partial t_0 \partial t_2} \end{aligned}$$

となる。以降 $\partial / \partial t_0 \equiv D_0, \partial / \partial t_2 \equiv D_2$ の微分オペレータを導入する。式 (4) に式 (9), (10) を代入し、オーダーごとにまとめ、振幅 a と位相 γ に関する方程式を求めると以下のようになる⁽⁸⁾。

$$\frac{da}{dt} + \frac{\mu_{lin}}{2} a - \beta_2 k_{lin} a + \frac{1}{4} \beta_3 k_{non} a^3 = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} - \frac{1}{4} \beta_1 a^2 = 0 \quad (12)$$

Fig. 2: Bifurcation diagram (Relationship between amplitude and linear velocity feedback gain)

ここで, $\beta_1 \sim \beta_3$ は

$$\beta_1 = \frac{\int_0^1 C(s) \Phi_1 ds}{2\omega \int_0^1 \Phi_1^2 ds} \quad (13)$$

$$\beta_2 = \frac{\omega^2 \Phi_1' \Big|_{s=1} \int_0^1 \Phi_1 ds}{2 \int_0^1 \Phi_1^2 ds} \quad (14)$$

$$\beta_3 = \frac{\omega^2 \Phi_1'^3 \Big|_{s=1} \int_0^1 \Phi_1 ds}{2 \int_0^1 \Phi_1^2 ds} \quad (15)$$

である。式 (11) と式 (12) はファンデルポール型発振子の振幅と位相の時間変化を示す式と等価であり、式 (3) のフィードバックにより、カンチレバーはファンデルポール型発振子と同様の特性をもつことになる。式 (11) の時間微分の項を 0 とおいて定常振幅を求めると、

$$a_{st} = 0, \sqrt{\frac{-2(\mu_{lin} - 2\beta_2 k_{lin})}{\beta_3 k_{non}}} \quad (16)$$

となる。これにより線形フィードバックゲイン k_{lin} と定常振幅の関係が図 2 のように得られる。 $k_{lin-cr} = \mu_{lin}/2\beta_2$ は自励発振限界で、線形フィードバックゲイン k_{lin} がこの臨界ゲイン k_{lin-cr} より大きいときカンチレバーは超臨界 Hopf 分岐により自励発振する。また非線形フィードバックゲイン k_{non} が式 (16) 中の分母にあることから k_{non} を大きくすることによりカンチレバーの自励発振時の定常振幅を低く抑えられることがわかる。さらに式 (12) を解くと、

$$\gamma = \frac{1}{4}\beta_1 a_{st}^2 t + \gamma_0 \quad (17)$$

となり、カンチレバーの振動の位相を求めることができる。ここで、 γ_0 は初期位相で、初期値によって決定される。従って自励発振の定常状態は以下の式で表せる。

$$v = a_{st} \cos \left\{ \left(\omega - \frac{1}{4}\beta_1 a_{st}^2 \right) t - \gamma_0 \right\} \quad (18)$$

ここで ω はカンチレバーの線形の固有振動数である。カンチレバーの自励発振振動数 Ω は

$$\Omega = \omega - \frac{1}{4}\beta_1 a_{st}^2 \quad (19)$$

であり、定常振幅 a_{st} が微小な場合、 Ω は ω とほぼ一致する。

3 実験用 AFM の試作

3.1 AFM 装置の構成

本研究では、図 3 および図 4 に示すような実験用 AFM 装置を試作した。カンチレバーはその支持部分を圧電アクチュエー

Fig. 3: Setup of prototype AFM

Fig. 4: Picture of prototype AFM

タにより加振される。カンチレバーの変位計測はカンチレバー上面にレーザー光を当て、その反射角の変化を読み取る光てこ法⁽¹¹⁾を利用する。試料を載せるステージにはチューブ型スキャナを用い、試料の水平方向の走査および上下方向の位置制御を行なう。また、チューブ型スキャナの上下方向の変位を正確に測定するため、測定対象との微小な距離を測定できるマイクロセンスを内蔵する。

3.2 光てこ型変位検出機構

光てこ法を用いた変位計測機構の概要を図 5 に、写真を図 6 に示す。カンチレバーの先端にレーザーポインタ (キコー技研, MLXG-D12-670-3) のレーザー光をあて、反射されたレーザー光をミラーを介して四分分割フォトディテクタ (浜松ホトニクス, S7479) で受光する。カンチレバーがたわむと反射角が変化し、反射光の光点が移動するので、受光位置の変化からカンチレバーのたわみ角を観測できる。受光位置は図 5 中の四つの分割面のうち上側半分の二面に受ける光量と、下側半分の二面に受ける光量の差、つまり $(A+B)-(C+D)$ を計算することでたわみ角を検出することができる。観察前の準備としてレーザー光をカンチレバーの先端に当てるための調整と、静止状態での反射光を四分分割フォトディテクタの中心で受光するための調整が必要である。そのためレーザーポインタを XZ ステージ (シグマ光機, TBM-254CL) に固定し、照射位置の調整を可能にした。レーザーポインタは水平に固定し、レーザー光をプリズム (シグマ光機, CSCH-10-550) により鉛直下方向へ落とし、カンチレバーに当てた。カンチレバーは水平面に対して 15° の角度をもって支持されており、反射光は垂直方向に対しておよそ 30° の角度で反射されてミラー

Fig. 5: Acceptance surface of a 4-segment photo detector

Fig. 6: Picture of optical lever system

へもどる。反射光をフォトディテクタで受けるための粗い調整は、角度が調節可能なミラー（シグマ光機，TFA-10S03-10）により行ない，さらにフォトディテクタをXYステージ（シグマ光機，TASB-252）に固定して，精密な位置決めを可能にした。

フォトディテクタからは，分割された受光面が各々に受ける光量に比例した電流が出力されるので，図7に示すI-V変換回路によって電圧に変えた後，上下の受光面の受ける光量の差を演算回路で計算する。I-V変換にはバイアス電流が小さいオペアンプ（Linear Technology，LT1058CN）を用い，演算にはオフセットの信頼性が高い精密オペアンプ（Texas Instruments，NE5532，NE5534）を用いた。最後の減算には10倍の固定ゲインを持つオペアンプ（Analog Devices，AD621）を用いて出力を増幅した。演算回路に全受光面の出力の和を求める回路を組み込むことにより，フォトディテクタ全体の受ける光量を計測することができる。これにより，フォトディテクタが反射光を十分受けていることを確認することができる。

3.3 カンチレバーホルダ

カンチレバーホルダの構成を図8に，写真を図9に示す。カンチレバーは水平方向からおよそ 15° の角度をもって支持される。支持台の上部には圧電素子（富士セラミックス製）が接着されており，カンチレバーに加振入力を与えることができる。本研究では，ファンデルポール型自励発振AFMの実用可能性を検討しているため，カンチレバーは図10に示す市販のもの（セイコーインスツル，SI-DF3：長さ $450\mu\text{m}$ ，幅 $50\mu\text{m}$ ，厚さ $4\mu\text{m}$ ，1次モードの固有振動数 27.9kHz ）を用いる。カンチレバーはリン青銅製の板ばねで挟んで固定され，容易に交換できるようになっている。

3.4 粗動機構

試料表面の凹凸を計測する前に，試料とカンチレバーを適切な位置にセッティングしなければならない。そのため装置は，大まかな位置決めを行う粗動機構と，計測のために用いられるナノメータスケールの精密な分解能を有する微動機構から構成されている。

図11の試作AFM側面図から， $x-y$ 方向の粗調整はXYステージ（ミスミ，XYSPG80）で行い， z 方向の粗調整はカンチレバーを含む上部プレートを微調ねじ（シグマ光機，FPSA-62579-SR2.25，ピッチ 0.25mm ）で支持することにより，高さ

Fig. 7: Displacement signal processor circuit

Fig. 8: Setup of cantilever holder

調節が可能となっている。光てこ機構およびカンチレバーを搭載した上部プレートは，チューブ型スキャナを搭載した下部フレーム上のA,B,Cの3点で支持されている（B点は奥行き方向）⁽⁸⁾。カンチレバーはD点に取り付けられ，C点の微調ねじは減速比11:8のプーリーを介してステッピングモータ（オリエンタルモーター，CFK544BP2）で駆動する。カンチレバーが固定されるD点は，この原理によりC点の高さを調整すると，その1/10の変位が発生する。モータのステップ数は 500step/rev. なので，ステッピングモータによる z 方向変位の分解能は理論上 36nm となる。

3.5 微動機構

$x-y$ 方向の走査制御及び走査時の z 方向の制御はチューブ型スキャナ（富士セラミックス，A41.5H11.8X13C-FHAuC(C-82)）を用いてサンプルステージを動かすことで行う。チューブ型スキャナはセラミックスの円筒の側面にバイモルフ型の圧電素子を形成したもので，ナノメータスケールの分解能を有する。

図12に示したチューブ型スキャナの動作原理から，チューブ型スキャナは5つの圧電素子を持っており，上部の円筒を巻くように付いているものが z 方向用，下部の4つが $x-y$ 方向用である。上部の圧電素子の伸縮によりスキャナ上面の高さを制御する。上下方向は $\pm 200\text{V}$ の印加電圧で $0.8\mu\text{m}$ 駆動できる。下部の4つの素子は対面するもの同士の電圧-歪特性が逆になっており，対面する2つの素子に同じ電圧を印加すると，一方が伸び，もう一方が縮むので，スキャナ全体を微小に曲げることができる。これが x 方向， y 方向にそれぞれ1対あるので，電圧を印加することで x 方向， y 方向にチューブの上部を振ることができる。サンプルを載せるステージ部分が実際には円軌道を描き傾いてしまうが，微小な範囲の走査にはほとんど影響しない。

図13は，チューブ型スキャナの z 方向の変位を測定するためのメカニズムであり，図14はその写真である。通常，チューブ型スキャナの伸びは圧電定数に印加電圧を掛けることで求めることができる。しかし，圧電素子で形成されているチューブ型スキャナはヒステリシスが存在するため，一定電圧を加え伸びが生じた際，時間の経過とともにその伸びが変化する。本研究では，自励発振の発振振動数の変化と，それに依存したプローブ試料間の距離の変化を明確に計測するために， z 方向変位を印加電圧から求めるのではなく，マイクロセンス（日本エー・ディー・イー，4810，プローブ2806L，分解能 9nm ）を用いて行う。マイクロセンスは，測定対象との静電容量を計測するこ

Fig. 9: Picture of cantilever holder

Fig. 10: Picture of cantilever

とで微小な距離を測定することができ、 $\pm 10V$ の出力電圧で $\pm 5\mu m$ の変位を計測できる。まず、計測を行う前に試料ステージとマイクロセンスとの距離を、 z ステージを用いて調整しゼロ点 ($0.1\mu m$) をあわせる。基準ゼロ点の位置で、マイクロセンスをフランジに固定する。測定時は、チューブ型スキャナに電圧を印加し伸びが生じ、リアルタイムに変位を計測することができる。

3.6 ファンデルポール型自励発振回路

本研究では線形フィードバックおよび非線形フィードバックにより、カンチレバーをファンデルポール型自励発振子と同様の振動系にする。式 (3) に示すような線形フィードバックおよび非線形フィードバックを実現するために図 15 に示すような回路を製作した。

光でこの機構により検出したたわみ角信号 V_{in} を微分し、増幅して線形フィードバック信号 $K_{lin}V_{in}$ を作った。またたわみ角信号と微分により得られたたわみ角速度信号から、アナログ乗算器 (Analog Devices, AD734) を用いて非線形フィードバック信号 $-K_{non}V_{in}^2$ を作った。最後に線形成分と非線形成分を加算し、カンチレバーへの制御入力として圧電素子に印加した。線形フィードバックゲインおよび非線形フィードバックゲインは、それぞれ可変抵抗により 0~10 倍に調整できるようになっている。

4 試作 AFM を用いた実験

4.1 光でこ法による自励発振の実現法

まず、線形フィードバックのみを加えカンチレバーを自励発振させた。このときカンチレバーは 2 次モードの固有振動数で自励発振した。これはたわみ角を検出する光でこによる出力では 2 次モードの振動の感度の方が高いためであると考えられる。本研究では AFM でより一般的に利用される 1 次モードの固有振動数において自励発振を実現することを考える。そこで、光でこ出力における 2 次モードの振動の出力が小さくなる固定端からの距離がおおよそ $220\mu m$ の位置にレーザの焦点を合わせることににより、2 次モードの振動の感度を落とした。その結果、カンチレバーは 1 次モード固有振動数で自励発振した。

Fig. 11: Side view of the prototype AFM

Fig. 12: Mechanism of tube PZT scanner

4.2 自励発振の非線形特性

図 16 に線形フィードバックゲインに対する自励発振の定常振幅との関係を示す。横軸は線形フィードバックゲイン K_{lin} 、縦軸は自励発振の定常振幅 a_{st} である。線形フィードバックゲイン K_{lin} が臨界ゲイン K_{lin-cr} を越えた範囲で自励振動が発生している。非線形フィードバックを加えなかったとき、発振振幅は線形フィードバックゲインが臨界ゲインを越えるとすぐに測定限界 ($250nm$) まで増大した。これに対し、図 16(a) では非線形フィードバックの効果により振幅が制御されている様子がわかる。また、図 16(b) では非線形フィードバックゲイン K_{non} をより大きくすることで振幅がさらに小さく制御されていることがわかる。このとき $8nm$ の定常振幅を持つ自励発振が実験により確認された。実際の AFM に用いられるカンチレバーの応答振幅は $10nm$ 程度で用いられることから⁽¹²⁾、本実験で得られた結果は AFM 機能を実現するに足る結果であると考えられる。

なお、低振幅の自励発振は線形フィードバックゲイン K_{lin} を臨界ゲイン K_{lin-cr} に極めて近く設定することでも理論上は実現できる。しかし、実際には環境のわずかな変化により K_{lin-cr} (分岐点) が移動し、しばしば発振停止が生じた。本研究で提案した手法を用いれば、線形フィードバックゲインを K_{lin-cr} より十分に大きな値に設定することが可能で、その場合でも振幅を低く抑えられるため、発振停止を起こさずに安定な低振幅かつ定常発振が可能である。

5 おわりに

本研究では、AFM による液中生体試料観察に向け、線形フィードバックおよび非線形フィードバックにより AFM カンチレバーにファンデルポール型自励発振子と同様なダイナミクスを持たせることで、定常発振を実現し、その振幅を低く抑える方法を実現した。また、実験的なパラメータスタディが可能な実験用 AFM 装置を試作し、自励発振型カンチレバーの分岐特性を観察し非線形特性を実験により明らかにした。ハイゲインの非線形フィードバックによって定常振幅 $8nm$ の自励発振を実現した。今後、自励発振型 AFM を用いた試料の検出可能性を調べるため、発振状態のカンチレバーにチューブ型スキャナを近づ

Fig. 13: Displacement detection mechanism of tube PZT

Fig. 14: Picture of tube PZT with sensor device

けることで、AFMの測定原理から発振振動数の変化を観察できるか検証していく。

本研究に協力頂いた筑波大学システム情報工学研究科の林圭一氏にお礼申し上げます。最後に、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（C）19560225）の援助のもとで行われたことを付記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 森田清三, 原子・分子のナノ力学, 丸善株式会社, (2003), pp.9-10, pp.161-169.
- (2) G. Binnig, C. F. Quate, and C. Gerber, Atomic Force Microscope, *Physical Review Letters*. Vol. 56, (1986), pp. 930-933.
- (3) H. Kaneko, H. Yabuno, and M. Kuroda, Nonlinear Analysis of a Self-excited Cantilever Beam, *Proceedings of DETC2005*, 2005, 84843.
- (4) K. Hayashi, T. Kobayashi, M. Kuroda, and H. Yabuno, "Van der Pol" Self-excited Microcantilever with PZT Actuator and Sensor, *Abstracts of The 9th International Conference on Non-contact Atomic Force Microscopy*, (2006-7), p. 51.
- (5) M. Kuroda, and H. Yabuno, "Cantilever Control Device," Japanese Patent Disclosure 2006-208089 (2006).
- (6) 芦田 極, 摩擦顕微鏡機構を用いた極微小除去加工装置の開発研究, 千葉大学大学院自然科学研究科 博士論文, (1998).
- (7) 芦田 極, 森田 昇, 吉田嘉太郎, 摩擦顕微鏡機構を用いた極微小機械加工の研究 (第1報, FFM 一体型加工評価装置の試作), 日本機械学会論文集 (C編), 64巻626号, (1998), pp. 4072-4078.
- (8) 林 圭一, 芦田 極, 藪野 浩司, 黒田 雅治, ファンデルポール型自励発振を用いた AFM カンチレバーの振幅制御, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 73, No. 732, (掲載予定).

Fig. 15: Electrical circuit for "van der Pol" type self-excitation

(a) Low nonlinear feedback gain ($K_{non} = 1.8 \times 10^{16} \text{ V/m}^3/\text{s}$) (b) High nonlinear feedback gain ($K_{non} = 3.6 \times 10^{17} \text{ V/m}^3/\text{s}$)Fig. 16: Relationship between amplitude and linear velocity feedback gain K_{lin}

- (9) C. R. Fuller, S. J. Elliott, and P. A. Nelson, *Active Control of Vibration*, Academic Press, (1996), pp.115-120.
- (10) H. Yabuno, Bifurcation Control of Parametrically Excited Duffing System by a Combined Linear-Plus-Nonlinear Feedback Control, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 12, (1997), pp. 263-274.
- (11) S. Alexander, L. Hellemans, O. Marti, J. Schneir, V. Elings, P. K. Hansma, M. Longmire, and J. Gurley, An Atomic-resolution Atomic-force Microscope Implemented Using an Optical lever, *Journal of Applied Physics* Vol. 65, No. 1 (1989), pp. 164-167.
- (12) 重川 秀美, 吉村 雅満, 坂田 亮, 河津 璋, 走査プローブ顕微鏡と局所分光, 裳華房, (2005), pp. 68-72.