

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360096

研究課題名(和文) マイロカンチレバープローブの非線形振幅制御と完全非接触ナノバイオセンシング

研究課題名(英文) Nonlinear amplitude control of micro-cantilever probe and non-contact bio-sensing

研究代表者

藪野 浩司 (YABUNO HIROSHI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：60241791

研究成果の概要(和文)：

探針(カンチレバー)先端と測定対象に働く原子間力の変化から、物質の表面形状をナノメートルスケールで測定できることが知られている。生体試料の測定においては、カンチレバーの振動振幅を微小な値にコントロールし、生体試料への接触を避ける必要がある。その実現に向けて新しい視点にたった(システムの非線形性を積極的に利用する)制御法を理論的に提案し、実験によってその性能検証を行い、非接触ナノバイオセンシングの基礎的な方法を確立した。

研究成果の概要(英文)：

Variation of the atomic force between the tip of a cantilever and the measurement object corresponds to the roughness of the surface shape. The fact is utilized for the measurement with the accuracy of nano meter. In the case of the bio-sensing, the amplitude of the cantilever in liquid needs to be controlled with small value not to contact to the sample. To this end, a nonlinear amplitude control method is theoretically proposed which is different from the conventional linear control methods. Furthermore, we confirmed the validity of the control method to establish the fundamental technique to the bio-sensing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2011年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械力学・制御

 キーワード：ホップ分岐 マイロカンチレバー 分岐現象 原子間力顕微鏡 振幅制御  
 生体試料観察 自励振動 非線形制御

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 液中環境での生体試料観察に向けて、内外を通じてさまざまな研究が行われていた。この時点で不可能であった完全非接触な測定を実現するにはマイクロカンチレバーの制御性能の向上により、低振幅かつ高周波で自励発振するマイクロカンチレバープローブを開発する以外に道はなかった。

(2) しかしながら線形理論に基づく従来法の改良（フィードバックゲインの調整；Automatic gain control (AGC) 法など）のみで制御性能の向上が模索されているのが内外の現状であり、生体試料観察に向けて格段の向上は望めず、ブレークスルーとなる斬新な発想に基づく制御法の構築が急務であった。

## 2. 研究の目的

(1) 生体試料を生きたまま生理機能を乱さずに、ナノスケールの解像度で、リアルタイムに動画観察可能な、計測システムを開発することにある。

(2) 具体的には、以下の二つの点を可能にする制御法の開発を目的とした。

① AFM のマイクロカンチレバープローブを液中において、その固有周波数で粘性の影響を受けずに安定に振動させること

② カンチレバープローブの振幅を 1nm 以下になるようにし、カンチレバーと試料との接触を防ぐこと

③ さらに応答周波数を高速にした状態で上記①、②を実現し、生体試料のリアルタイム観察を実現すること

## 3. 研究の方法

(1) カンチレバー自身の非線形復元力や原子間力のカンチレバーの振動変位に関する非線形性などを実験的に明らかにするため、パラメータスタディーが可能な試作カン

チレバー制御装置を製作する。

(2) 原子間力を受けるマイクロカンチレバープローブの非線形ダイナミクス of 理論解析をおこなうために、まず原子間力の非線形性とカンチレバーの復元力に関する非線形性を考慮に入れた運動方程式（非線形偏微分方程式）を導出する。

(3) 得られた運動方程式に対し、多重尺度法などの解析的近似解法を適用して、振幅特性を明らかにするとともに線形フィードバックによる自励発振の発生と非線形フィードバックによる振幅低減化の可能性を理論的に検討する。

(4) 試作 AFM を用いて、自励振動実験をおこなう。理論的に提案された制御法をシステムに実装するに当たり、制御回路の性能、カンチレバーの変位測定のための光てこ（レーザーおよびフォトディテクター）の性能などを検証し、向上する必要がある。

(5) 実際のマイクロカンチレバープローブを提案されたフィードバック制御により加振する。このとき、非線形フィードバックの変化にともなう、定常振幅の変化および励振周波数に注目し、理論的に提案された制御法の有効性を検討する。

## 4. 研究成果

(1) van der Pol 方程式のダイナミクスをマイクロカンチレバーに発現されることにより、マイクロカンチレバーは固有振動数で発振するとともに、リミットサイクルが発生して、定常振動状態が実現できることを世界に先駆けて提案した。

(2) 具体的なフィードバック制御力の与え方は、アクチュエータとして積層型の圧電セラミクスを用いる場合、入力電圧と変位の関係から、積分制御で線形および非線形制御力が与えられることを初めて示した。

(3) カンチレバーの運動方程式を、以下の点を考慮して求めた。すなわち世界に先駆けて、非線形制御下での弾性力の非線形性を考慮したマイクロカンチレバーの運動方程式を提示した。

①カンチレバー自身の非線形復元力特性は、曲率の非線形性を考慮し、中立面が伸びない条件下で、ハミルトンの原理を適用して、変分により求めた。原子間力はレナードジョーンズポテンシャルの微分により表し、平衡点周りでテイラー展開することにより、3次の弾性力の非線形性まで考慮に入れた。

②圧電セラミクスによる加振変位を加速度項に考慮し、入力電圧と出力変位は比例するものと仮定して、その効果を運動方程式に導入した。

③カンチレバーに働くダンピングの効果を線形粘性として運動方程式に導入した。

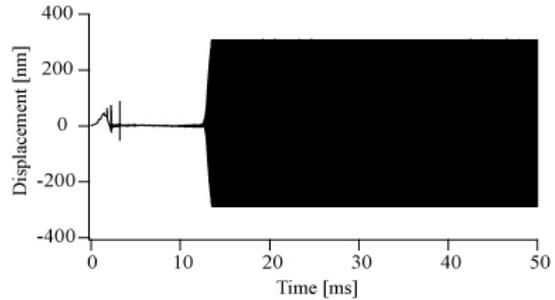
④線形フィードバックと非線形フィードバックにより具体的に加振変位を表し、運動方程式中に線形フィードバックゲインと非線形フィードバックゲインが陽に現れるようにした。

(4) 得られた運動方程式を多重尺度法により非線形解析した。発振振動の分岐解析を行い、分岐点から発生する安定な定常振幅の大きさが、非線形フィードバックゲインの増加により理論上無限小にできることを明らかにした。

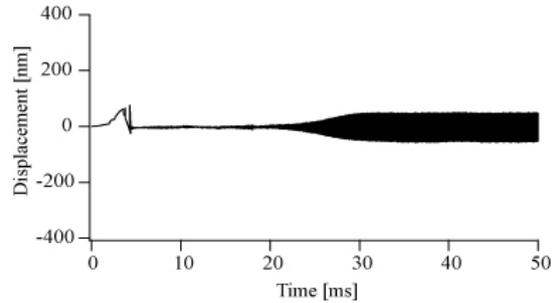
(5) 試作装置を用いて、マイクロカンチレバーの発振実験を行い、以下のような実験結果を得た。実験例を示しながら結論を述べる。

① 過渡状態を含めた自励発振後の定常振動の時刻歴波形は、図1のようになる。

(a)は非線形フィードバックを行わず、線形フィードバックのみでカンチレバーを発振させた場合、(b)は非線形フィードバックを加えて自励発振させた場合である。

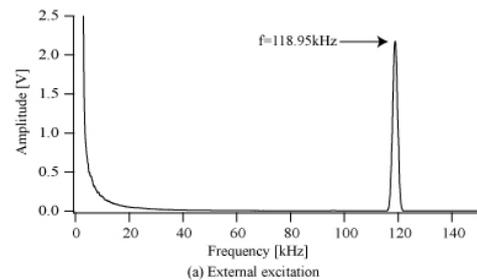


(a) With only linear feedback

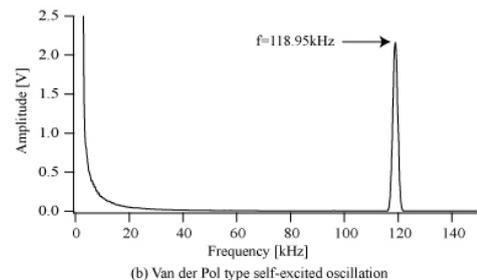


(b) With linear and nonlinear feedback

図1 時刻歴波形(非線形フィードバックによる振幅の低減化)



(a) External excitation



(b) Van der Pol type self-excited oscillation

図2 周波数分析結果

非線形フィードバックの効果により、リミットサイクルの半径が小さくなり、定常振幅の低減化が達成されていることがわかる。さらに、これらの結果の周波数分析結果が図2である。

(a) (b)ともに線形フィードバックによる負減衰系に変換されているため、固有振動数で発振していることがわかる。すなわち提案手

法は、強制加振下での周波数応答曲線を測定せずに、波形の周波数分析のみで固有周波数が特定できる点でもすぐれている。特に液中環境などの、Q 値が下がる場合でも、本手法によれば、正確に固有周波数が求められることになる。

②線形フィードバックゲインをコントロールパラメータに取り、非線形フィードバックゲインを変えた時の実験で得られた分岐図を図3に示す。

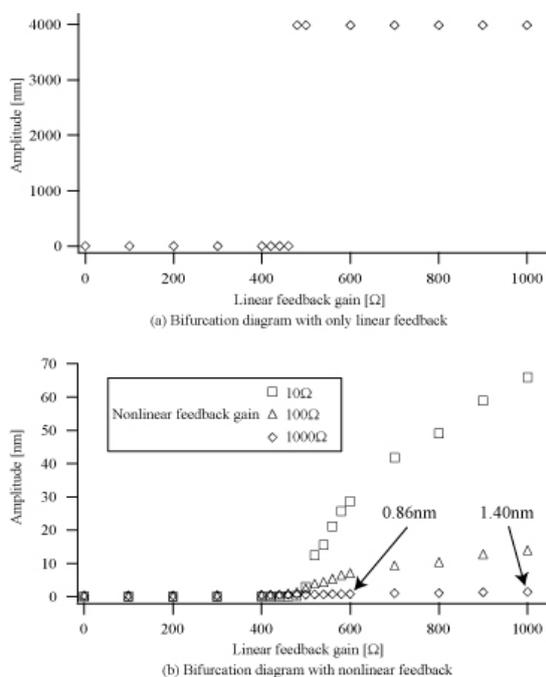


図3分岐図

同図からわかるように、非線形フィードバックゲインを大きくとると定常振幅を表す分岐曲線が右に大きく傾く。すなわち、線形フィードバックゲインを大きくとっても低振幅定常自励発振が実現できる。これによって、従振幅低減化のために線形フィードバックゲインを分岐点近傍に設定しなければならず、粘性の変化によって発振停止が生じてしまう従来法の欠点を解決できることになる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

①Kuroda, M., Yabuno, H., and Someya, T., Noncontact Observation with van der Pol-type Self-excited FM-AFM in Liquid, *Nonlinear Theory and Its Applications*, **査読あり, 掲載決定**

②Yabuno, H., Kuroda, M., Someya, T., Nishimura, K., Hayashi, K., and Ashida, K., Van der Pol-type Self-Excited Microcantilever Probe for Atomic Force Microscopy, *Japanese Journal of Applied Physics*, **査読あり**, 50-7, 2012, 076601.

[学会発表] (計6件)

① Yabuno, H., Experimental Investigation of Analysis and Control of Nonlinear Systems, Symposium on Nonlinear Dynamics; Multidisciplinary and Interdisciplinary Applications, 2012年10月1日, Belgrade Serbia

②Kasakawa, M., Kuroda, M., Yabuno, H., M. Response Amplitude of Nonlinear Self-excited Microcantilever Probe, *ICTAM2102*, 2012年8月21日, Beijing.

③黒田雅治, AFMプローブカンチレバーの運動と制御, 「走査プローブ顕微鏡」セミナー(オーラル), 2012年01月17日, 産総研.

④高原義裕, 笠川政孝, 黒田雅治, 藪野浩司, 芦田 極, Amplitude Control of van der Pol-type Self-excited Microcantilever Probe in AFM using Nonlinear Feedback, 非線形理論とその応用に関する京都ワークショップ(ポスター), 2011年11月30日, 京都大学.

⑤笠川政孝, 藪野浩司, 黒田雅治, 芦田 極, 高原義裕, 非線形自励発振するマイクロカンチレバープローブの応答振幅, 第3回マイクロ・ナノ工学シンポジウム(ポスター), 2011年09月27日, タワーホール船堀(東京).

⑥黒田雅治, 高原義裕, 藪野浩司, 非線形フィードバックによるFM-AFM用マイクロカンチレバープローブの振幅制御, 日本機械学会2011年度年次大会(オーラル), 2011年9月14日, 東京工業大学.

[図書] (計1件)

①Yabuno, H., Kuroda, M., and Someya, T., Contact to Sample Surface by Self-excited Micro-cantilever Probe in AFM, *Proc. IUTAM Symposium on Dynamics Modeling and Interaction Control in Virtual and Real Environment*, pp. 27-33, 2011, Springer.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藪野 浩司 (YABUNO HIROSHI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：60241791

(2) 研究分担者

黒田 雅治 (KURODA MASAHARU)

独立行政法人産業技術総合研究所・ナノシ

ステム研究部門・主任研究員

研究者番号：60344222

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：