

# コンタクトモード AFM を用いた試料表面形状と 弾性特性の同時推定法

渡辺早紀矢\*, 藤本博志 (東京大学)

Simultaneous Estimation of Sample Surface Topography and Elasticity  
using contact-mode AFM

Sakiya Watanabe\*, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

## Abstract

Atomic Force Microscope (AFM) is the device which can be applied to measure the surface topography of samples in nano-scale. Because the cantilever holds its physical contact with the sample, it is also possible to measure elasticity of samples in principle. However, compared with the improvement of scanning performance, the technologies for viscosity and elasticity measurements are still underdeveloped. The proposal method measures the surface topography in forward scan (FWS) and the elasticity in backward scan (BWS). Furthermore, we introduce Surface Topography Observer (STO) and Perfect Tracking Control (PTC) in order to improve accuracy of the measurement.

**キーワード** : 原子間力顕微鏡, 弾性推定, 表面形状オブザーバ, 完全追従制御法, 逐次最小二乗法  
(Atomic Force Microscope, elasticity estimation, Surface Topography Observer, Perfect Tracking Control, Recursive Least Squares)

## 1. はじめに

近年, 半導体デバイスの超高密度化, 高性能化のように, 原子・分子レベルのエレクトロニクスが急速に発達している。これらは, 情報分野のインターネット, バイオ分野の遺伝子解析など広い分野に貢献している。エレクトロニクス分野にかぎらず, ナノバイオニクスのように様々な分野でナノスケールオーダーでの研究がなされている。従って, 原子・分子レベルの技術は今後の科学技術の発展にとって不可欠かつ, 急務の課題であるといえる。

原子レベルの分解能を持つ顕微鏡として, 原子間力顕微鏡 (AFM : Atomic Force Microscope) がある。AFM は図 1 のように, テコに備え付けられたプローブ (カンチレバ) の先端と試料との間に働く原子間力により生じるカンチレバの歪みを測定することで, 原子レベルの分解能を実現する顕微鏡である。

AFM の課題の 1 つとして, 1 枚の画像を得るのに時間がかかることがあげられる。そこで AFM を高速化, 高精度化するため, 制御理論の視点やハードウェアの視点から様々な手法が提案されている<sup>(1)~(3)</sup>。また, 本研究グループでも学習制御やオブザーバを用い, 大幅な高速化に成功している<sup>(4)~(5)</sup>。

AFM の特徴の 1 つに, カンチレバが試料に物理的に接触する点がある。この特徴を生かし, 試料表面の凹凸情報に加えてソフトマテリアルの弾性, 凝着効果の測定を目的としたナノ力学特性マッピングが研究されている<sup>(6)~(8)</sup>。しかし, AFM の高速化, 高精度化に比べて粘弾性測定技術は進んでいない<sup>(9)</sup>。ソフトマテリアル系では, 表面形状の他に粘弾性, 凝着効果の影響が大きいため, これら力学的情報をナノスケールで調べることができれば, 新しい材料科学の可能性が開けると考えられる。

そこで著者らは, RLS 法を用いて, 試料の表面形状と弾性

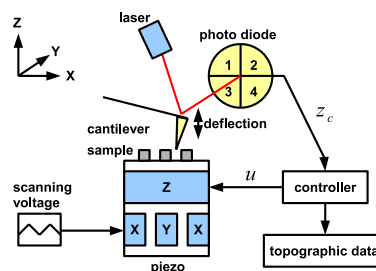


図 1 光てこ方式 (AFM)

Fig. 1. Optical lever method (AFM).

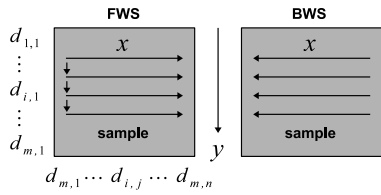
特性を交互に測定する手法を提案した<sup>(10)</sup>。本手法は, 試料走査の 1 列前の表面形状情報を用いて, 試料の弾性特性を推定する。しかし, 表面形状を弾性特性を 1 列置きに交互に推定するため通常の測定に比べ分解能が半減する。また, 弾性推定する走査列での表面形状と 1 列前の記憶した表面形状との誤差が弾性推定に悪影響を与えるといった問題がある。

本稿ではこれらの課題に対し, 試料走査の往路で表面形状を, 復路で弾性推定を行う手法を提案する。これにより, 分解能と弾性推定の誤差の問題が改善される。また, より高精度な推定を行うために, 表面形状オブザーバ (STO : Surface Topography Observer)<sup>(11)</sup> と完全追従制御法 (PTC 法 : Perfect Tracking Control)<sup>(12)</sup> を導入する。

本稿は以下の構成である。まず第 1, 2 章で研究背景とコンタクトモード AFM に関して述べる。続く第 3, 4 章で提案する試料の弾性推定法について述べる。その後, 第 5 章でシミュレーションと実験結果を示し, 第 6 章でまとめを述べる。

## 2. 原子間力顕微鏡

本章では AFM の概要を述べた上で, 実験装置について説



(a) Surface scan route of the cantilever.

	FWS				BWS			
$N$	1	2	...	$n$	$n$	...	2	1
Previous Line	$d_{i-1,1}$	$d_{i-1,2}$	...	$d_{i-1,n}$	$d_{i-1,n}$	...	$d_{i-1,2}$	$d_{i-1,1}$
Scanning Line	$d_{i,1}$	$d_{i,2}$	...	$d_{i,n}$	$d_{i,n}$	...	$d_{i,2}$	$d_{i,1}$

(b) Reverse disturbance of AFM.

図2 カンチレバの走査経路と表面形状  
Fig.2. Scan route and surface topography.

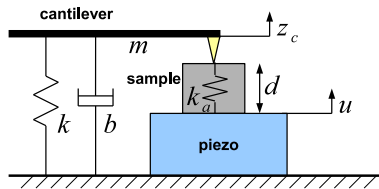


図3 AFMの力学モデル  
Fig.3. Model of contact-mode AFM.

明する。AFMの測定手法は、コンタクトモードとダイナミックモードに大きく二分される。本稿では、コンタクトモードAFMのみを扱う。コンタクトモードAFMは、高精度な測定が可能であり、かつ、簡易な力学モデルであることが知られている。

**〈2・1〉コンタクトモードAFMの概要** コンタクトモードAFMによる表面形状の測定は、カンチレバのたわみ量を一定に保つようにピエゾステージの $z$ 軸を制御し、その操作量 $u$ を表面形状として記録する方法が一般的である。また、図1のようにレーザー光の反射角の変位を測定する光てこ方式を用いて、表面形状によるカンチレバの変位を測定する。

図1において、試料の表面形状は $x$ 方向走査に関して開始位置から走査幅だけ右方向へ走査するフォワードスキャン(FWS)、同じ経路を左方向へ走査するバックワードスキャン(BWS)により測定される。これを $y$ 方向に繰り返し走査することで、図2(a)のように面走査を行う。ここで、表面形状 $d_{i,j}$ は、カンチレバの走査の $i$ 列目、 $j$ サンプル目の表面形状である。

**〈2・2〉コンタクトモードの力学モデル** 文献(13)で提案されているAFMの力学モデルを図3に記す。図3において、 $m$ 、 $b$ 、 $k$ はそれぞれシステムの質量、粘性係数、弾性係数を表す。また、 $z_c$ 、 $u$ 、 $d$ 、 $k_a$ はそれぞれカンチレバの変位、ピエゾへの位置指令、試料の表面形状、試料の弾性係数を表す。

図3の力学モデルについて、 $u$ から $z$ までの入出力関係は、

$$z_c = \frac{k_a}{ms^2 + bs + (k + k_a)}(u + d) \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。ここで、プラントの弾性係数は試料の弾性係数よりも十分に大きいと仮定し、 $k_a \ll k$ とすれば、式(1)は

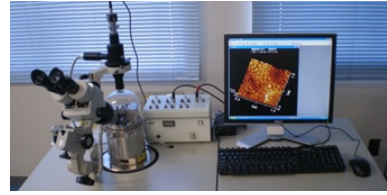


図4 実験装置  
Fig.4. Experimental device.

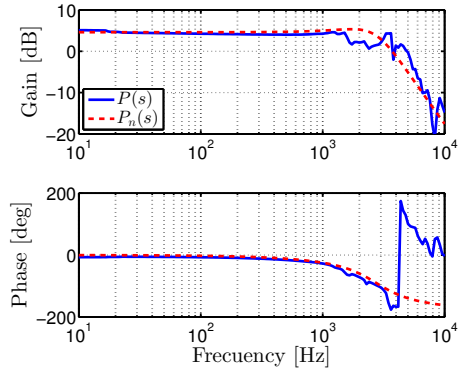


図5 プラントの周波数特性 (Si 試料)  
Fig.5. Frequency response of the Si sample.

$$z_c \simeq \frac{k_a}{ms^2 + bs + k}(u + d) \dots \dots \dots (2)$$

と近似される。実際のコンタクトモードAFMのプラントは、フォトダイオードでカンチレバの変位を検出する際のゲイン $g$ を考慮し、

$$P(s) = \frac{z_c}{u} = g \frac{k_a}{ms^2 + bs + k} = \frac{k'_a}{s^2 + b's + k'} \dots \dots \dots (3)$$

で表される。ただし、 $k' = \frac{k}{m}$ 、 $b' = \frac{b}{m}$ 、 $k'_a = g \frac{k_a}{m}$ である。

**〈2・3〉実験装置** 実験機の概観を図4に記す。本稿で使用したAFMは、日本電子製JSPM-5200の特別仕様である。本実験装置では、必要な入力信号のインターフェースを用意し、dSPACE-1104により制御系を構成する。

試料としてSi試料を用いた際の、サーボアナライザにより得られた位置指令 $u$ からカンチレバの変位 $z$ までの周波数特性を図5に記す。この周波数特性からフィッティングにより求めるノミナルプラントを、

$$P_n(s) = \frac{5.07 \times 10^8}{s^2 + 1.90 \times 10^4 s + 2.98 \times 10^8} \dots \dots \dots (4)$$

とした。ただし、式(4)は試料のある一点における周波数特性である。実際の試料は、場所ごとに $k'_a$ が異なる。従って、弾性係数を正しく推定する必要がある。

また、本稿で用いるフィードバック制御機は製品に用いられている位相遅れ補償器とし、

$$C_{fb}(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} k_p \dots \dots \dots (5)$$

を用いる。ただし、装置のマニュアルに従って調整し、 $k_p = 100$ 、 $\omega_c = 2\pi f_c$  ( $f_c = 0.5$ ) とする。

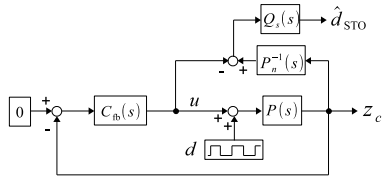


図 6 STO のブロック線図  
Fig. 6. Block diagram of STO.

### 3. 制御手法

**(3・1) 表面形状オブザーバ** 表面形状オブザーバ (STO : Surface Topography Observer) は、表面形状  $d$  を外乱とみなしたときの、外乱オブザーバとして構成される。STO のブロック線図を図 6 に示す。ここで、 $Q_s(s) = (\frac{\omega_s}{s+\omega_s})^2$  は、 $P_n^{-1}$  をプロパーにする 2 次のローパスフィルタであり、オブザーバの応答は、

$$\hat{d}_{STO} = P(s) \times P_n^{-1} \times Q_s(s)d \simeq Q_s(s)d \dots \dots \dots (6)$$

である。ただし、 $\omega_s = 1000 \text{ rad/s}$  とした。

STO は開ループで構成されるため、閉ループの帯域の制限を受けることなくオブザーバの帯域を上げることが可能である。従って、制御入力  $u$  が表面形状  $d$  に追従していなくても  $d$  を推定することができるため、より高速かつ正確な表面形状の測定が可能である。

**(3・2) 完全追従制御法** PTC 法は、FB 制御器とマルチレート FF 制御器からなる 2 自由度制御系である<sup>(12)</sup>。FF 制御器はプラントの安定な逆システムであり、 $n$  次の制御対象に対して 1 周期に  $n$  回制御入力を切り替えることで、ノミナルプラントに対してサンプル点上で指令値に完全追従する。外乱やプラント変動が生じた場合には、FB 制御器により追従誤差を抑圧する。

式 (3) を状態変数  $\mathbf{x}$  を用いて、サンプリング時間  $T_u (= \frac{1}{2}T_y)$  の 0 次ホールドを考えると、

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}_s \mathbf{x}[k] + \mathbf{B}_s u[k] \dots \dots \dots (7)$$

$$z_c[k] = \mathbf{C}_s \mathbf{x}[k] \dots \dots \dots (8)$$

を得る。式 (3) のプラントの次数  $n = 2$  に注意すると、マルチレート化された状態方程式は、

$$\mathbf{x}[i+1] = \mathbf{A} \mathbf{x}[i] + \mathbf{B} u[i] \dots \dots \dots (9)$$

$$z_c[i] = \mathbf{C} \mathbf{x}[i] \dots \dots \dots (10)$$

となる。ただし、 $\mathbf{A} = \mathbf{A}_s^2$ 、 $\mathbf{B} = [\mathbf{A}_s \mathbf{B}_s, \mathbf{B}_s]$ 、 $\mathbf{C} = 1$ 、 $\mathbf{u}[i] = [u_1[i], u_2[i]]^T$  である。

式 (10) について安定な逆システムから、FF 制御入力は、

$$\mathbf{u}_{ff} = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{I} - z^{-1}\mathbf{A})\mathbf{x}[i+1] \dots \dots \dots (11)$$

で表される。

**(3・3) 逐次最小二乗法** RLS 法は、制御工学のシステム同定分野で多く使われている手法である<sup>(14)</sup>。本節では、RLS 法のアルゴリズムについて述べる。

システムの入出力関係が、

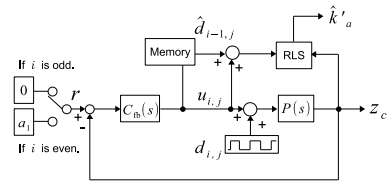


図 7 弾性推定法のブロック線図 (従来法)  
Fig. 7. Block diagram of the conventional method.

$$y[k] + a_1 y[k-1] + \dots + a_{n_a} y[k-n_a] = b_1 u[k-1] + \dots + b_{n_b} u[k-n_b] \dots \dots \dots (12)$$

で表せるとする。このとき、未知のパラメータベクトル  $\theta[k]$ 、測定可能なデータベクトル  $\varphi[k]$  を用いて

$$y[k] = \theta^T[k] \varphi[k] \dots \dots \dots (13)$$

の関係式が得られる。ただし、

$$\theta[k] = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}]^T \dots \dots \dots (14)$$

$$\varphi[k] = [-y[k-1], \dots, -y[k-n_a], u[k-1], \dots, u[k-n_b]]^T \dots \dots \dots (15)$$

とする。

式 (13) に関して、未知のパラメータベクトル  $\theta$  は重み付き逐次最小二乗法から以下の更新式が得られる。

$$\hat{\theta}[k] = \hat{\theta}[k-1] + \frac{\mathbf{P}[k-1]\varphi[k]}{\lambda + \varphi[k]^T \mathbf{P}[k-1]\varphi[k]} \epsilon[k] \dots \dots (16)$$

$$\epsilon[k] = y[k] - \varphi^T[k] \hat{\theta}[k-1] \dots \dots \dots (17)$$

$$\mathbf{P}[k] = \frac{1}{\lambda} \left( \mathbf{P}[k-1] - \frac{\mathbf{P}[k-1]\varphi[k]\varphi^T[k]\mathbf{P}[k-1]}{\lambda + \varphi^T[k]\mathbf{P}[k-1]\varphi[k]} \right) \dots \dots \dots (18)$$

ただし、 $\lambda$  は忘却係数であり 1 以下の正定数、 $\hat{\theta}[0] = 0$ 、 $\mathbf{P}[0] = \gamma \mathbf{I}$  ( $\gamma$  は正定数) である。

式 (16)~(18) の更新式により、未知パラメータの推定値  $\hat{\theta}[k]$  を得る。

### 4. 弾性推定法

**(4・1) 従来法** 本節では従来法として、前列表面形状を用いた試料弾性推定法を述べる<sup>(10)</sup>。従来法のブロック線図を図 7 に示す。

一般的な AFM は、制御入力  $u = -\hat{d} \simeq -d$  を試料の表面形状として測定される。従って、1 列前の表面形状と現在の表面形状がほぼ一致するとすれば、

$$d_{i,j} \simeq \hat{d}_{i-1,j} = -u_{i-1,j} \dots \dots \dots (19)$$

となる。また、式 (3) より、

$$Q_r(s)(s^2 + b's + k')z = Q_r(s)k'_a(u_{i,j} + d_{i,j}) \simeq Q_r(s)k'_a(u_{i,j} - u_{i-1,j}) \dots (20)$$

が得られる。ただし、 $Q_r(s) = \frac{\omega_r^2}{(s+\omega_r)^2}$  はプロパーとするための 2 次のローパスフィルタであり、 $\omega_r = 500 \text{ rad/s}$  とした。こ

こで、

$$\theta = k'_a \dots \dots \dots (21)$$

$$\varphi = Q_r(s)_r(u_{i,j} - u_{i-1,j}) \dots \dots \dots (22)$$

$$y = Q_r(s)(s^2 + b's + k')z \dots \dots \dots (23)$$

とすれば、RLS 法の更新式である式 (16)~(18) により試料の弾性特性  $k'_a$  を逐次的に推定することができる。ただし、式 (3) よりプラントの弾性係数が試料の弾性係数よりも十分に大きければ、伝達関数の分母係数は弾性特性に依存しないため、

$$b' = 1.90 \times 10^4 \dots \dots \dots (24)$$

$$k' = 2.98 \times 10^8 \dots \dots \dots (25)$$

を用いる。

式 (22) の左辺について式 (20) より、

$$\varphi = u_{i,j} - u_{i-1,j} \simeq 0 \dots \dots \dots (26)$$

となり、これがプラントへの入力となる。実際の測定では出力の測定値には雑音が混入するため、入力信号が小さければ出力端における S/N 比が劣化する。これはシステム同定の精度を劣化させるため、雑音対策の観点からはプラント入力のレベルは大きい方が望ましい。

AFM においてプラント入力の増加は、カンチレバが試料に与える力の増加を意味する。弾性推定が必要となるソフトマテリアル系では、カンチレバから受ける力により表面が歪み、正確な表面形状が得られず、試料を破壊する場合もある。従って、プラント入力の値を常に大きな値にするのは好ましくない。そこで、図 7 のように、指令値  $r$  の切り替えを考える。このとき、制御入力

$$u_{i,j} = \frac{C_{fb}}{1 + PC_{fb}} r - \frac{PC_{fb}}{1 + PC_{fb}} d_{i,j} \dots \dots \dots (27)$$

$$r = \begin{cases} 0 & \text{If } i \text{ is odd,} \\ a_1 > 0 & \text{If } i \text{ is even,} \end{cases} \dots \dots \dots (28)$$

である。ただし、 $a_1$  は表面形状へ極端な歪みを与えない程度の値を用いる。これにより、試料に与える負荷を抑えながら S/N 比を改善することができ、奇数列目の走査で表面形状を、偶数列目の走査で弾性特性を交互に推定することができる。

**〈4・2〉 提案法** 従来法の問題点として、試料走査の 1 列置きの交互に表面形状と弾性推定を行うため、AFM の分解能が半減することがある。また、1 列前にメモリへ記憶した表面形状情報を用いて弾性推定を行うため、現在走査している表面形状と記憶した表面形状との誤差が弾性推定の誤差として現れる。

そこで本節では、FWS で試料表面形状を測定し、BWS で弾性推定を行う手法を提案する。また、より高精度な推定のため、BWS で PTC 法を用いる。提案法のブロック線図を図 8 に示す。

**〈4・2・1〉 シグナルジェネレータ** 本節では、AFM の BWS において PTC 法により、表面形状に対して完全追従を達成するためのシグナルジェネレータについて説明する。状態変数を  $\mathbf{x} = [z, \dot{z}]$ 、速度指令値を

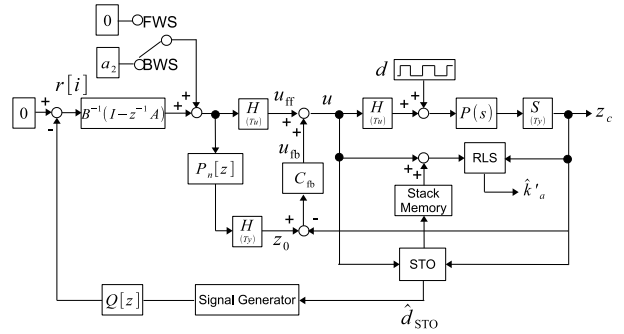


図 8 弾性推定法のブロック線図  
Fig. 8. Block diagram of the proposed method.

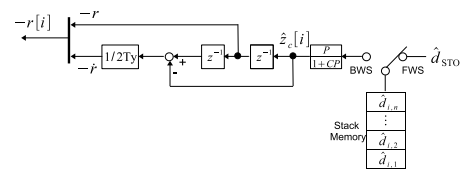


図 9 シグナルジェネレータ  
Fig. 9. Signal generator.

$$\dot{r}[i] = \frac{r[i+1] - r[i-1]}{2T_y} \dots \dots \dots (29)$$

として 1 サンプル先の指令値を与えれば、目標値に対して完全追従が達成される。

AFM において表面形状を外乱とすれば、FWS と BWS で周期的な外乱とみなせる。つまり、FWS で得られた情報を元に BWS で指令値を生成することで、BWS にて表面形状に完全追従する。ただし、AFM では FWS と BWS での走査経路が反転するため、外乱は図 2(b) のように折り返し外乱となる。従って、コントローラとプラントのダイナミクスの影響のため、同じ表面形状を走査しているにもかかわらず、FWS と BWS でシステムの外乱応答が異なる。

そこで本稿では、FWS にて STO で表面形状  $\hat{d}$  を推定しスタック型メモリーに記憶した上で、BWS にて、

$$r = -\frac{P_n}{1 + C_{fb}P_n} \hat{d}_{STO} \dots \dots \dots (30)$$

のように外乱応答を指令値とする。これにより、コントローラとプラントのダイナミクスを考慮した上での正しい指令値を得る。

本稿で用いるシグナルジェネレータを図 9 に示す。また、ノイズカットのため位相遅れのないローパスフィルタとして、

$$Q[z] = \left( \frac{z + 2 + z^{-1}}{4} \right)^2 \dots \dots \dots (31)$$

を用いる。

**〈4・2・2〉 往復型の弾性推定法** 提案法では、図 8 のように FWS でフィードバックコントローラのみで制御し、STO により推定された表面形状をスタックメモリーに記憶する。BWS では、PTC により表面形状に対して完全追従する。ここで、

$$\theta = k'_a \dots \dots \dots (32)$$

$$\varphi = Q_r(s) \left( u + \hat{d}_{STO} \right) \dots\dots\dots (33)$$

$$y = Q_r(s) \left( s^2 + b's + k' \right) z \dots\dots\dots (34)$$

とし、RLS 法により弾性推定を行う。

BWS の弾性推定時では表面形状に完全追従するため、

$$\varphi = Q_r(s) \left( u + \hat{d}_{STO} \right) \simeq 0 \dots\dots\dots (35)$$

となり、従来法と同様に S/N 比が劣化する。そこで、BWS では制御入力を  $a_2$  だけ増加させることで、試料を少し押さえつけた状態で走査をする。従って、 $a_2$  から出力までの応答は、

$$z_c = \frac{P(1 + C_{fb}P_n)}{1 + PC_{fb}} a_2 \simeq Pa_2 \dots\dots\dots (36)$$

となり、S/N 比が改善され正確な弾性推定が可能となる。

本手法では FWS で表面形状を推定し、BWS で弾性推定を行うため、従来法に比べて分解能が 2 倍に改善する。また、FWS と BWS では試料の同じ経路を互いに逆に走査する。従って、弾性推定時の表面形状はスタックメモリに記憶された表面形状と一致するため、従来法で問題であった記憶した 1 列前の表面形状と現在の走査列での表面形状の誤差による弾性推定の誤差がなくなる。

### 5. シミュレーション及び実験

本章ではシミュレーションと実験により、従来法と提案法を比較しその有効性を示す。

**〈5・1〉 シミュレーション** 本節では、シミュレーションにより提案法の有効性を示す。シミュレーションに用いるプラントモデルは、式 (4) を用いた。シミュレーションの結果を図 10 に示す。図 10(a) はプローブの走査経路であり、三角波の増減がそれぞれ FWS, BWS を表す。図 10(b) は表面形状  $d$  である。また、図 10(c), 10(d) はそれぞれプラントの出力  $z_c$ , プラントへの入力の推定値  $u + \hat{d}$  である。BWS では、カンチレバを歪ませた状態で表面形状に完全追従していることがわかる。

図 10(e) は、推定した弾性特性  $\hat{k}'_a$  である。従来法は、1 列おきの FWS で弾性推定を行なっているのに対して、提案法は各走査の BWS で弾性推定を行う。従って、従来法は図 10(e) 中の 0.2 ~ 0.3 s で、提案法は 0.1 ~ 0.2 s, 0.3 ~ 0.4 s で弾性推定が行われている。これにより、提案法では従来法に比べて分解能が 2 倍に改善している。また、本シミュレーションでは式 (4) より、 $\hat{k}'_a = 5.07 \times 10^8$  である。従来法は、 $\hat{d} \simeq -u$  を用いて推定を行うため、コントローラの遅れの影響により推定結果に誤差が生じているのに対し、提案法ではより正確な推定がなされている。

**〈5・2〉 実験** 本節では、実験により提案法の有効性を示す。実験結果を図 11 に示す。図 11(a) について、三角波の増減はそれぞれ FWS, BWS を表す。また、図 11(b) は STO で推定した試料表面形状である。図 11(c), 11(d) はそれぞれ、プラントの出力  $z_c$ , プラントへの入力の推定値  $u + \hat{d}$  である。図 11(e) は弾性推定値  $\hat{k}'_a$  である。従来法については 1.8 ~ 2.6 s で、提案法では 1.1 ~ 1.8 s, 2.6 ~ 3.4 s で弾性推定が行われている。提案法では従来法に比べ、より正確に推定が行われて

おり、分解能も 2 倍に改善している。

しかし、提案法で推定された弾性特性について、1.1 ~ 1.2 s, 1.7 ~ 1.8 s 付近で推定の精度が劣化している。これは、FWS でメモリに記憶した表面形状  $\hat{d}_{STO}$  と BWS での実際に走査している表面形状  $d$  の誤差が原因である。今後の課題としたい。

### 6. まとめ

本稿では、コンタクトモード AFM を用いて FWS で試料の表面形状を、BWS で弾性特性を取得する手法を提案した。これにより、従来は表面形状と弾性特性を別個に測定していたのに対し、測定試料を 1 度走査するだけで表面形状と弾性特性を測定することが可能となった。今後の展開としては、試料の粘性特性を含めたより正確な力学モデルへの拡張がある。また、測定試料へ与える負荷が小さいという点で優位であるタッピングモード AFM への拡張、および弾性特定の影響が大きい高分子を測定し、検討を行う必要がある。

### 参考文献

- (1) T. Ando, "Control Techniques in High-speed Atomic Force Microscopy", American Control Conference, pp. 3194-3200(2008)
- (2) A. Flemming, "A Method for Reduction Piezoelectric Non-Linearity in Scanning Probe Microscope Images", American Control Conference, pp. 2861-2866(2011)
- (3) G. Schitter, P. Thurner, P. Hansma, "Design and input-shaping control of a novel scanner for high-speed atomic force microscopy", Mechatronics, Vol. 18, pp. 282-288(2008)
- (4) T. Shiraiishi, H. Fujimoto, "High-Speed Atomic Force Microscope by Surface Topography Observer", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, pp. 026602-026602-7(2012)
- (5) H. Fujimoto, T. Ohshima, "Contact-mode AFM Control with Modified Surface Topography Learning Observer and PTC", 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2515-2520(2008)
- (6) K. Nakajima, S. Fujinami, D. Wang, T. Nishi, "Evaluation of Viscoelastic Properties of Polymeric Materials by Atomic Force Microscopy", Journal of the Japan Society of Colour Material, Vol. 83, pp. 108-144(2010)(in Japanese)
- (7) H. Sekiguchi, A. Hidaka, Y. Shiga, A. Ikai, T. Osada, "High-sensitivity detection of proteins using gel electrophoresis and atomic force microscopy", Ultramicroscopy, Vol. 30, pp. 351-356(2009)(in Japanese)
- (8) D. Kim, J. Park, M. Kim, K. Hong, "AFM-based identification of the dynamic properties of globular protein : simulation study", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, pp. 2203-2212(2012)
- (9) "AFM による弾性計測ロードマップ", 日本学術振興会 ナノプローブテクノロジー第 167 委員会 (2012)
- (10) S. Watanabe, H. Fujimoto, "Estimation of Sample Elasticity Utilizing Previous Line Surface Topography by AFM", IIC/MEC-13-089-090, pp. 61-66(2013)(in Japanese)
- (11) K. Aoki, H. Fujimoto, "Nano Scale Servo Control of Atomic Force Microscope Based on Surface Topography Observer", IIC-06-132, pp. 1-6(2006)(in Japanese)
- (12) H. Fujimoto, Y. Hori, A. Kawamura, "Perfect Track-

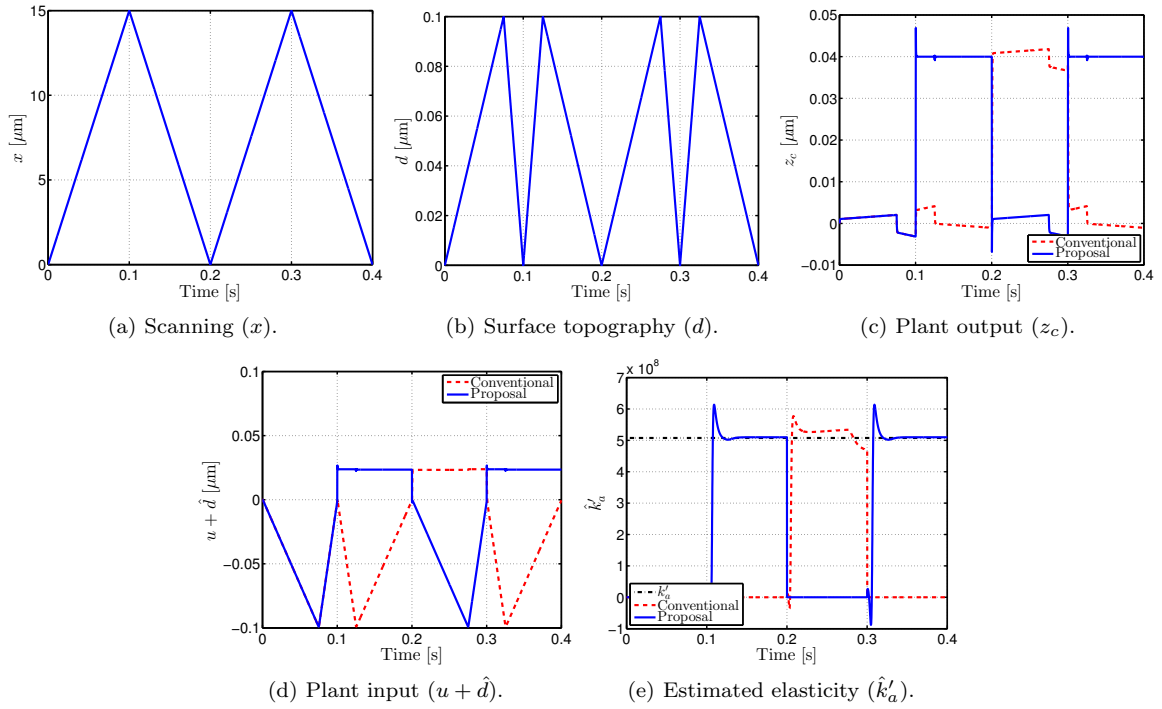


図 10 シミュレーション結果

Fig. 10. Simulation results.

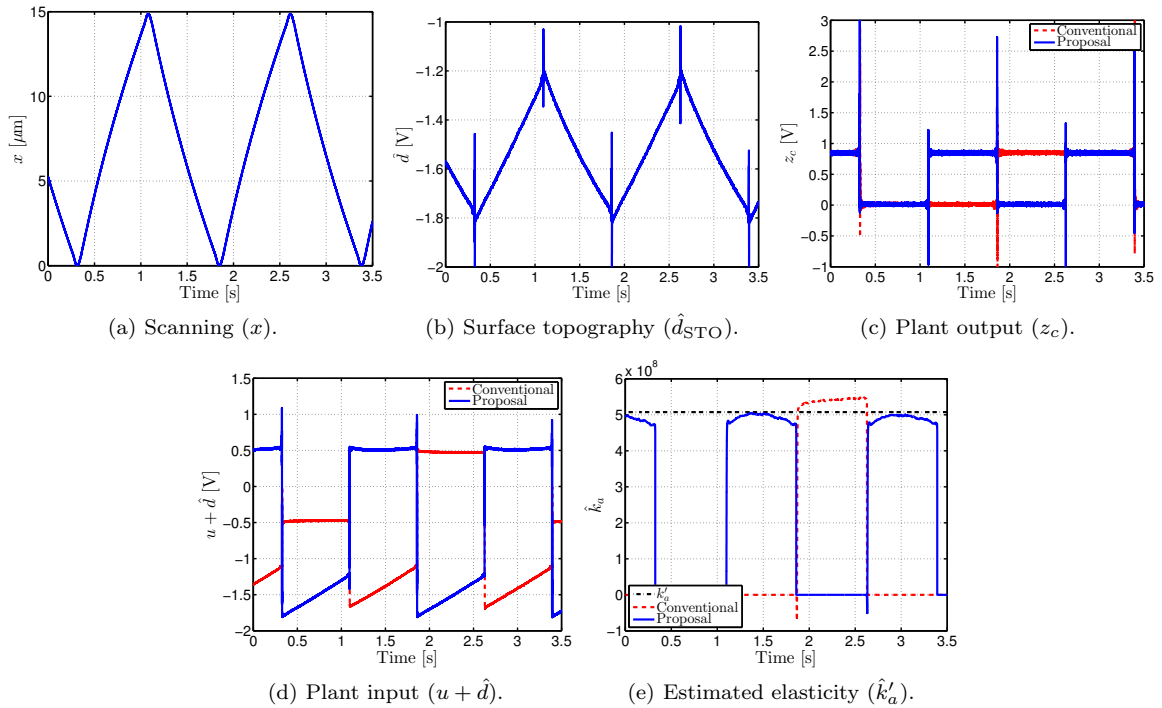


図 11 実験結果

Fig. 11. Experimental results.

ing Control Method Based on Multirate Feedforward Control”, Journal of SICE, Vol. 36, No. 9, pp. 766–772(2000)(in Japanese)

- (13) A. Sebastian, M. Salapaka, D. Chen, J. Cleveland, “Harmonic analysis based modeling of tapping-mode AFM”,

American Control Conference, Vol. 1, pp.232–236(1999)

- (14) H. Fujimoto, B. Yao, “Multirate adaptive robust control for discrete-time non-minimum phase systems and application to linear motors”, IEEE/ASNE Journal of Mechatronics, Vol. 10, pp. 371–377(2005)