

SPM (走査型プローブ顕微鏡) はサブナノメートルの高分解能で試 料の形状測定や局所的な機械的・電磁気的物性測定が可能な装 置である。株式会社日立ハイテクサイエンスでは,産業計測向けに SPM に白色干渉計を複合した走査型プローブ顕微鏡「AFM5400L」 を開発した。AFM5400Lは白色干渉計によって広い領域の試料形 状を高速に測定し,得られた白色干渉計像の所望の位置を指定し てSPM によって局所的な高精度,高分解能計測を行う機能を有す る。さらに,測定パラメータの自動調整機能を搭載するとともに SPM の操作性を向上させることで簡便に測定を行うことができる。

1. はじめに

SPM (Scanning Probe Microscope:走査型プローブ顕微 鏡)は,探針と試料間に働く相互作用を利用して表面形状 の測定や機械物性,電磁気物性などの測定を行う顕微鏡の 総称であり,1982年に発明されたSTM (Scanning Tunneling Microscope:走査型トンネル顕微鏡)¹⁾が原型である。

株式会社日立ハイテクサイエンスは、1985年から旧電 子技術総合研究所の技術協力によりSTMの開発に着手 し、1988年に国産初のSTM、1990年には国産初のAFM (Atomic Force Microscope:原子間力顕微鏡)²⁾の製品化を 行い、その後、各種多機能モードに対応した汎用型SPM、 8インチ対応の大型試料用SPM、真空中での測定や温度可 変機能を備えた環境制御型SPMなどを製品化してきた。

SPMは研究開発分野での評価ツールとして使用される ことが多かったが、近年、各種デバイスの細密化によって 産業分野での検査ツールとしてニーズが広がってきている。

例えば,LED (Light Emitting Diode) やパワーデバイス などで使用される化合物半導体やフォトマスク製作用のガ ラス基板などでは,算術平均粗さ (Ra) で0.1 nmオーダー の粗さ管理が必要となっている。また,太陽電池や有機 EL (Electroluminescence) などで電極パターンに用いられ る ITO (Indium Tin Oxide) 薄膜, LED で光の取り出し効 率向上のために使用されるサファイヤ基板上に凹凸構造を 設けた PSS (Patterned Sapphire Substrate)³⁾, ナノインプ リント⁴⁾ のモールドや成形品などでは数nm~数100 nm の三次元形状の計測や, 微小な欠陥検査などが求められて いる。

日立ハイテクサイエンスでは、これらの検査ニーズに対応するため、2013年に走査型プローブ顕微鏡に白色干渉計を複合化した「AFM5400L」を開発した(図1参照)。

ここでは、AFM5400Lの特徴と応用例について述べる。



図1 | 走査型プローブ顕微鏡「AFM5400L」 AFM5400L (左) とプローブステーションAFM5000 (右) を示す。AFM5400L はオプションで白色干渉計の複合が可能である。

2. SPMの測定原理⁵⁾

SPMの基本構造と測定原理を図2に示す。SPMは微小 な探針を設けたカンチレバーを使用し探針と試料間の距離 をZスキャナによって制御する。また、XYスキャナによ り、二次元平面内で走査を行い、Zスキャナの移動量を高 さ表示することで試料表面の三次元形状が測定される。

SPMでは、探針と試料間に働く原子間力によるカンチ レバーのたわみ量が一定となるように距離制御を行うコン タクトモードAFMと、カンチレバーを共振周波数近傍で 振動させ、原子間力や間欠的な接触力によるカンチレバー の振幅減衰量が一定となるように距離制御を行うDFM (Dynamic Force Mode)と呼ばれる測定手法が使用されて いる。DFM はコンタクトモードAFM に比べ探針摩耗や 試料へのダメージを軽減できるため、現在、最も普及して いる測定手法である。また、凹凸の大きい表面や吸着力の 大きい試料の測定、探針摩耗や試料へのダメージ軽減のた めに、測定点ごとに探針と試料を接近させて高さデータを 測定し次の測定点に移動する場合には試料を退避させる SIS (Sampling Intelligent Scan)モード⁶⁾での測定も行うこ とができる。

さらに,探針と試料間の相互作用による電流,表面電位,



RMS (Root Mean Square), DC (Direct Current), AFM (Atomic Force Microscope:原子間力顕微鏡), PC (Personal Computer), DFM (Dynamic Force Mode), SIS (Sampling Intelligent Scan)

カンチレバーの変位は光てこ方式のレーザ変位計によって検出され、振幅や 変位が一定となるようにスキャナにより距離制御が行われる。 磁気力,粘弾性,摩擦力などの電磁気物性や機械物性も測 定が可能である。物性測定時には形状測定時との測定条件 の違いにより,明瞭な形状像が測定できない場合がある が,ほとんどの物性測定をSISにも対応させ,明瞭な形状 像と物性像の同時観察を可能とした。

3. 白色干渉計複合機能

3.1 複合機の特長

AFM5400LではSPMに白色干渉計を複合させることを 可能とした。AFM5400Lに搭載されるSPMと白色干渉計 の主な仕様の比較を**表1**に示す。

SPMは、局所的な高分解能計測に優位性があり、各種物性測定も可能である。一方、白色干渉計は広領域の形状 を高速で測定することができ、SPMと同等の高さ分解能 を有する。

SPMと白色干渉計の複合により、両者の像をリンケー ジさせることで相互の特長を生かしながら広域から局所ま でのシームレスな計測が可能となる。

3.2 白色干渉計の構造と測定原理

表1 SPMと白色干渉計の特徴比較

AFM5400Lに搭載される白色干渉計の基本構造を図3 に示す。LEDの白色光をバンドパスフィルタによって特 定の波長幅に制限し、対物レンズを介して試料に照射す る。対物レンズ内には参照面(反射ミラー)とハーフミラー が設けられており、対物レンズを試料に対して高さ方向に 走査し、試料からの反射光と参照面からの反射光の位相差 による干渉縞(じま)の明暗情報をCCD(Charge Coupled Device)カメラのピクセルごとに検出して試料の凹凸を計 測する⁷⁾。

AFM5400Lに搭載される白色干渉計の仕様を表2に示 す。白色干渉計は試料の段差に応じて3つのモードが備え られている。高さ分解能は対物レンズに依存せず,隣り合 う段差が→波長以下の平坦な試料に適用される Phase モー

AFM5400LでのSPMと白色干渉計の主な仕様を比較した。白色干渉計の対物 レンズおよび測定モードごとのスペックは 表2 に示す。							
項目	SPM		白色干渉計				
面分解能	O	0.5 nm	×	500 nm			
垂直分解能	O	0.01 nm	O	0.01 nm			

垂直分解能	O	0.01 nm	O	0.01 nm
XY測定領域	×	90 µm	O	950 µm
Z走査レンジ	×	6 μm or 15 μm	O	80 µm
測定時間	×	数分~	O	数秒~
傾斜面測定	O	85°	×	~15°
物性観察	O	機械物性 電磁気物性	×	なし
サンプル 反射率影響	O	なし	×	あり

feature

articles

図2 | SPMの基本構造(a)と測定原理(b)



注:略語説明 CCD (Charge Coupled Device), LED (Light Emitting Diode)

図3 白色干渉計の基本構造

サンプルからの反射光と対物レンズ内に配置された参照面 (反射ミラー)の位 相差による干渉縞(じま)の明暗情報をCCDのピクセルごとに検出する。

表2 白色干渉計のスペック

AFM5400Lに複合される白色干渉計は3種類の測定モードを有する。また対物レンズは3種類の中から選択する。

測定モード	高さ分解能	適用			
Phase	0.01 nm	100 nm未満の段差 段差のない平滑面			
Wave 0.1 nm		100 nmを超える段差 nmオーダーの平滑面			
Focus	5.0 nm	数十µmを超える段差 急峻(しゅん)な傾斜測定			
計物しいブ位変	10位	20位	50位		
対物レンス旧牛	юн	2018	JUID		
開口数 NA	0.3	0.4	0.55		
XY測定領域 (µm)	947×710	473×355	189×142		
面内分解能(nm)	910	690	500		
注:略語説明 NA (Numerical Aperture)					

注:略語説明 NA (Numerical Aperture)

ドでは,最大で0.01 nmの分解能が得られる。また,面内 分解能は回折限界で制限されるため,対物レンズごとに異 なり,倍率50倍,開口数0.55の対物レンズの場合では約 500 nmである。

3.3 測定ヘッド部の構造

白色干渉計を複合したAFM5400Lの測定ヘッド部を 図4に示す。

SPM ヘッド部と白色干渉計ヘッド部はZステージ上に 並列に配置しており、SPM ヘッド部はスキャナの先端に カンチレバーを取り付けたカンチレバースキャン方式を採 用している。また、SPM の探針と白色干渉計の対物レン ズの対向する位置にはXY 自動ステージが設けられている。

AFM5400LではSPMの探針先端の位置と白色干渉計の 焦点の位置をあらかじめソフトウェアに登録しておくこと



図4 AFM5400Lの構造 SPMヘッド部に白色干渉計が複合される。自動ステージによってサンプルを 移動させることで白色干渉計とSPMで同一箇所の測定を行う。

により、白色干渉計の測定を行った後、白色干渉計像上の 所望の位置を指定するだけで、XYZの自動ステージ移動 により、測定箇所にSPMの探針を自動的に位置決めする リンケージ機能を有する。

SPMのカンチレバーを交換した場合には、最大で数百 µmの取り付け誤差が生じるが、カンチレバー取り付け時 に光学顕微鏡像によって探針の位置を指定することで、取 り付け誤差を補正する機能を設け、リンケージ精度を向上 させた。

測定箇所の指定は1つの白色干渉計像に対して複数箇所 指定可能である。また,SPMで測定した箇所を白色干渉 計の焦点位置に移動させて測定することも可能である。

4. 白色干渉計複合機能の測定例

4.1 白色干渉計によるSPM測定箇所の位置決め

SPMはXY:0.5 nm, Z:0.01 nmオーダーの高分解能 測定が可能であるが,最大測定領域は90 µmに制限され, 1回の測定に数分の時間を要する。

広視野での測定対象の探索のため、従来は光学顕微鏡を 使用し、測定箇所にカンチレバーを位置決めして SPM で の測定を行っていた。しかし、光学顕微鏡は焦点深度が深 く小さな凹凸を観察するのが困難であった。

白色干渉計は高さ分解能が高く小さな凹凸でも計測する ことが可能であり,光学顕微鏡では観察が難しいターゲッ トも容易に見つけだすことができる。

溶岩結晶 (方解石) の測定例を図5に示す。光学顕微鏡 像では確認できない凹凸の小さい結晶ステップが白色干渉 計では明確に計測できている。白色干渉計で20倍対物レ ンズを使用して471×352 (μm)の視野で計測を行った後, 白色干渉計像から結晶ステップの特定箇所を指定し, SPMによって20 μm視野で高倍率での測定を行うことが できた。



図5 | 溶岩結晶 (方解石)のステップ段差の計測 二酸化炭素飽和水で浸食された方解石のステップ段差の測定例を示す。

4.2 広領域と狭領域のリンケージ機能

産業計測では広領域と狭領域の計測データをリンケージ させて測定するニーズが多い。

例えば、電極や微小な構造物、薄膜試料などで広領域で の形状やうねりを計測し、局所的に粗さや欠陥などの計測 を行うニーズなどがある。白色干渉計とSPMを複合させ ることで広領域と狭領域の計測データのリンケージが実現 される。

ITO膜の白色干渉計像とSPM像を図6に示す。白色干 渉計で350×450 (μm)の広領域の形状測定を行うととも にSPMで2μmの領域の局所的な粗さ測定を行うことがで きた。

4.3 形状計測と物性計測

白色干渉計で形状測定を行った後,所望の位置を指定してSPMで物性測定を行うことができる。

食品用ラップフィルム表面の測定例を図7に示す。白色 干渉計でフィルムの表面の形状計測を行った後,特定箇所 を指定してSPMの測定を行った。SPM測定時に,DFM モードによるカンチレバー振動の位相の変化も同時に測定



図6 | ITO膜の測定 太陽電池や有機EL(Electroluminescence)の電極などに使用されるITO(Indium Tin Oxide) 膜の白色干渉計像(左)とSPM像(右)を示す。



図7 | 食品用ラップフィルムの測定 白色干渉計像 (上) で表面形状の計測を行った後,SPMで位相像を測定し,表 面物性の測定を行った。

した。位相の変化はフィルム表面の吸着力や粘弾性力を反 映し、白色干渉計では測定することができない物性像を SPMによって測定することができた。

4.4 測定データのクロスチェック機能

白色干渉計は光学式計測装置であるため,原理上,基板 上の厚さ1µm以下の薄膜などでは,基板からの光の反射 の影響などで正確な測定ができない場合がある。また,急 峻(しゅん)な試料では反射光の戻り量が少なくなるため 測定可能な傾斜角度に制約がある⁷⁾。

白色干渉計とSPMを複合させることで、白色干渉計で 測定したデータをSPMで測定し、白色干渉計の測定デー タの正確性を検証するクロスチェックを行うことができ る。これによって白色干渉計の計測データの信頼性を向上 させることが可能となる。

5. SPMの操作性向上

5.1 測定パラメータ自動調整機能

SPMでは探針試料間の距離制御を行うためにフィード バックパラメータの設定が必要である。また,探針先端に かかる力が弱いと正確な測定ができず,力が強すぎると探 針や試料を破損するため,適正な力の設定が必要である。 従来のSPM装置ではこれらのパラメータの設定は測定者 の経験に頼る部分が多く,測定者によって測定データに差 が生じる場合があった。

AFM5400Lでは使用するカンチレバーや試料に応じて

eature



図8 | 従来の測定フローとAFM5400Lでの測定フロー パラメータ自動調整機能により、測定力,走査周波数, IPゲイン(フィードバッ クゲイン)などが自動で設定され,ワンクリックで測定が開始される。

測定力やフィードバックパラメータの設定を自動的に行う 測定パラメータ自動調整機能が使用できる。従来の測定時 とのフローの比較を図8に示す。ソフトウェア上のボタン を押すと、DFMの振動周波数の設定(Qカーブ測定),探 針と試料の近接動作(アプローチ)に続き,測定パラメー タが自動的に設定され,走査が開始される。この機能によ り操作性が向上するとともにオペレーターによらず測定結 果の再現性を向上させることができる。

5.2 カンチレバー自動交換機能

測定前の準備フローを図9に示す。

一般的な SPM の装置では測定前にカンチレバーの根元 に設けられている 3.5×1.5 (mm) 程度のベース部をピン セットでつまんで装置にセットする必要があるが,カンチ



図9 測定準備フローとAFM5400Lの操作機能

AFM5400Lではサンプルをセットした後はほとんどの作業をディスプレイの 前で実施できるような機能を採用している。 レバーが小さいため取り付けには習熟を要していた。 AFM5400Lでは最大5本までのカンチレバーを自動的に 取り付けるカンチレバー自動交換機能を搭載し,多機能測 定を行う場合やカンチレバーが消耗した際にソフトウェア 上での操作によってカンチレバーを交換することを可能と している。

5.3 光軸調整アシスト機能

一般的なSPM装置ではカンチレバーを取り付けた後, カンチレバーの変位を測定する光てこ方式(Optical Lever Method)のレーザ変位計の光軸調整が必要であるが, AFM5400Lではフォトディテクタ上のレーザスポット位 置を検出し,光軸調整の要否を自動判定し,光軸調整が必 要な場合のみ調整を促す「光軸調整アシスト機能」を搭載 した。この機能によって光軸調整が不要な場合には調整を 省略することが可能となった。

5.4 6インチ全面観察ステージ

AFM5400Lは,最大直径8インチ(約200 mm)の試料 が搭載可能である。またステージの稼働範囲を従来機より も拡大し,XY各軸6インチ(±75 mm)を自動ステージで 移動できるようにした。これにより,大きな試料や複数の 試料を途中で置き換えることなく多点の測定が可能と なった。

5.5 光学顕微鏡およびサイドビューカメラ

探針と試料の観察は、直上から100×75 (μm) ~700× 535 (μm)の視野で観察可能な光学顕微鏡に加えて、サイ ドビューカメラを搭載し、広い視野での全景観察を可能と した(図10参照)。

従来は直上の光学顕微鏡で観察する前に、ユニットの前



図10 | サイドビューカメラ画像 サイドビューカメラは防音カバーを閉めた状態でもカンチレバーとサンプル の全景を観察できる。

にオペレーターが移動して目視しながら位置合わせを行っ ていたが、サイドビューカメラの搭載により、ディスプレ イの前での位置合わせが可能となった。また、SPMは振 動や音の影響を抑制するため、除振台上に搭載されたユ ニットが防音カバー内に設置される。防音カバー内の試料 を移動させる場合には防音カバーの開閉が必要であった が、サイドビューカメラによって防音カバーを閉じたまま でもステージの移動やカンチレバーの交換が可能となった。

これらの機能によって試料をセットした後は、ユニット の前に移動することなしにディスプレイ前に座ったままで ほとんどの操作を可能としている。

おわりに

ここでは、AFM5400Lの特徴と応用例について述べた。 AFM5400Lでは、SPMと白色干渉計を複合し、リンケー ジ機能を搭載することで、同一測定箇所の広領域から局所 までの高分解能計測が可能となり、測定にかかる時間の短 縮を図ることができた。

また,測定パラメータ自動調整機能や各種の操作性向上 機能を搭載することで,使用経験によらず, 簡便に SPM の測定を行うことが可能となるなど、ユーザビリティの格 段の向上を図ることができた。

現在のSPMはメーカーごとに測定手法や校正方法が統 一されていないため、標準化により、計測装置としてデー タの信頼性を高める活動も行われている。

すでに、JIS (Japanese Industrial Standards) において算 術平均粗さ(Ra):1 nm~30 nmの表面粗さを対象とした 表面粗さ測定方法(JIS R 1683)⁸⁾が規定されており, AFM5400Lのオペレーションソフトウェアでもこの規定 に沿った測定を可能としている。さらに、ISO(International Organization for Standerdization: 国際標準化機構) では TC201 (表面化学分析)のSPM分科会(SC9)の中で、 SPMに関する各種標準化作業が進められており⁹⁾, さらな る適用拡大に期待が高まっている。

参考文献など

- 1) G.Binnig, et al.: Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy, Physical Review Letters, 49,57-61 (1982)
- 2) G.Binnig, et al.: Atomic Force Microscope, Physical Review Letters, 56,930-933 (1986)
- 3) 曾田,外:LED用サファイヤ単結晶基板の超精密CMP加工技術とそのPSS加工プロ セスへの応用,精密工学会誌, Vol.78 No.11,932-936 (2012)
- 4) 松井,外:ナノインプリント技術および装置の開発,シーエムシー出版(2011)
- 5) 株式会社日立ハイテクサイエンス, http://www.hitachi-hitec-science.com/products/spm/tec_mode/b_top.html 6) M.Yasutake, et al.: Critical Dimension Measurement Using New Scanning
- Mode and Aligned Carbon Nanotube Scanning Probe Microscope Tip. Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, 1970-1973 (2006) 7) 吉澤:最新光三次元計測,朝倉書店(2006)

伊與木 誠人

- 8) 原子間力顕微鏡によるファインセラミックス薄膜の表面粗さ測定方法, JIS R 1683, 日本規格協会(2007)
- 9) 藤田: SPM標準化: ISO TC201 SC9での標準化活動について, 精密工学会誌, Vol.79, No.3, 213-217 (2013)

執筆者紹介



1995年セイコー電子工業株式会社入社,株式会社日立ハイテクサイ エンス 技術本部 分析技術部 所属 現在、走査型プローブ顕微鏡の技術開発に従事

野坂 尚克 1991年セイコー電子工業株式会社入社,株式会社日立ハイテクサイ エンス 営業本部 分析応用技術部 所属

現在、走査型プローブ顕微鏡のアプリケーション開発に従事

渡辺 和俊



1981年株式会社第二精工舎入社,株式会社日立ハイテクサイエンス 技術本部 分析技術部 所属 現在,分析装置の開発マネジメントに従事