

原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope)

野澤恵理花¹

共同実験者

KM さん

実験日時

平成 26 年	4 月	21 日	13 時 20 分	~	17 時
平成 26 年	4 月	28 日	13 時 20 分	~	19 時
平成 26 年	5 月	8 日	13 時	~	18 時 30 分
平成 26 年	5 月	12 日	13 時 20 分	~	16 時 30 分 (解析及び議論)

要旨

原子間力を利用して物体表面の形状を測定する装置を原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope) と言う。この報告では、まず、AFM の歴史や背景について触れる。次に、AFM の装置構成、原子間力、測定原理について説明する。次に、試料 CD・DVD の作り方、AFM の初期調整の仕方、試料表面の画像の取得方法、試料表面画像の計測方法について述べる。次に、測定結果を示し、それを解析する。最後に、解析結果を用いて、試料 CD・DVD の記録容量について考察する。

¹g1220217@edu.cc.ocha.ac.jp

1 序論

原子間力^[1]を利用して物体表面の形状を測定する装置を原子間力顕微鏡^{[2][3]} (Atomic Force Microscope、以下 AFM) と言う。

走査型トンネル顕微鏡 (STM) を開発したゲルト・ビーニツヒは、トンネル効果が起こるほど接近した探針と試料の間には、力が働くことを発見した。この力を利用すれば、STM では不可能な絶縁体の測定を行うことができると確信したビーニツヒは、1985 年、世界に先駆けて AFM の開発に成功した。

原子間力は全ての物体間に働くため、AFM は、トンネル電流を利用する STM や、電子線を利用する走査型電子顕微鏡 (SEM) に比べて、高い汎用性を持っている。AFM を用いることで、試料を特殊な環境におくことなく、自然な状態 (大気中、溶液中、高温、低温など) で測定することが可能となる。このため、これまで STM や SEM が不得手とした生体試料の測定において、AFM は目覚ましい成果を上げている^[4]。図 1 に、そのような成果の例として、ナタデココのセルロース繊維とアセトバクターキシリナム菌の様子を示す。

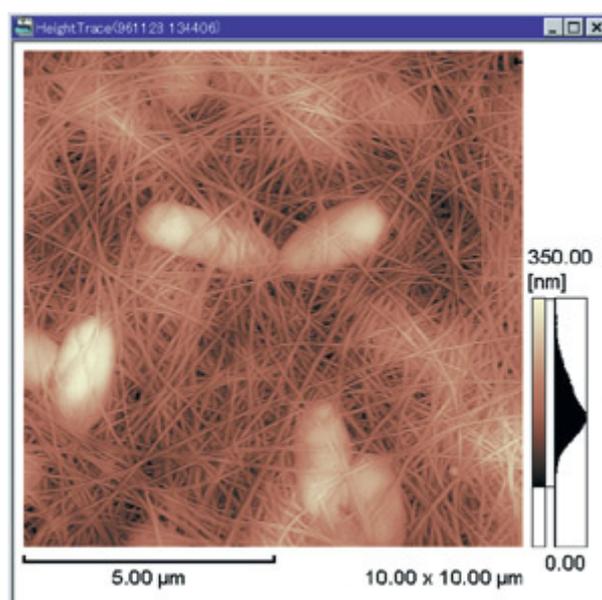


図 1: ナタデココのセルロース繊維とアセトバクターキシリナム菌の様子。京都大学農学部東教授のご提供。

一方、AFM には弱点もある。それは、試料の測定に長い時間を要してしまうことだ。1つの試料画像を得るのに、十数分程度かかってしまう。しかしながら、現在、その高速化に向けた改良がなされており、わずか 0.1 秒で試料画像を得ることができるようになったという報告もある。最近では、カリフォルニア大学バークレー校のチームが、AFM を用いて、化学反応前後の分子構造を測定したとする論文^[5]が発表されるなど、AFM 高速化に向けた取り組みは急速に進みつつあるようだ。

AFM の測定分解能は探針の先端半径によって決まり、原理的には原子 1 個の像まで観測できるが、この報告では、ナノオーダー程度の微細構造を持つ試料である、CD と DVD の反射層を測定し、AFM の測定原理を理解すると共に、CD と DVD の記録様式や記録容量などについて考察する。

2 装置

図 2 に、実験装置の写真を示す。また、図 3 に、装置構成図を示す。



図 2: 装置写真。机の上には、右から、光学顕微鏡、AFM（島津製作所製 SPM-9500）、専用のデータ処理装置 (PC) がある。机の右下には、AFM の制御ユニットがある。

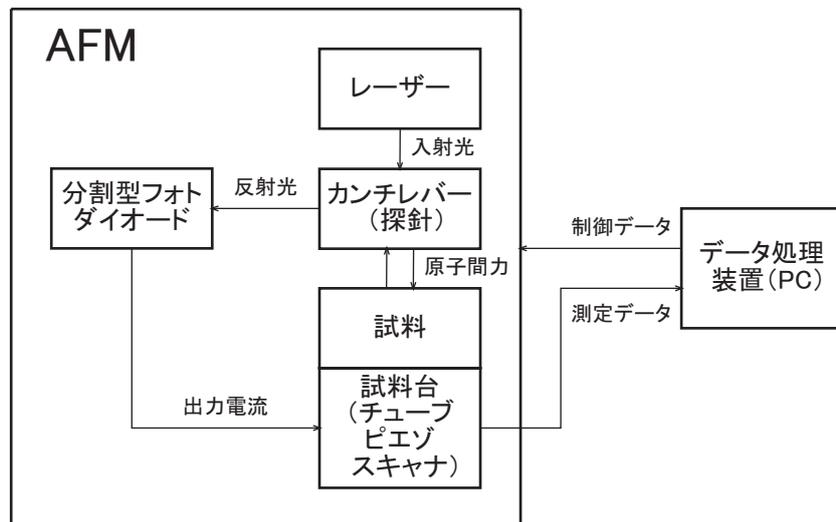


図 3: 装置構成図。実験装置は AFM とデータ処理装置 (PC) から成る。AFM はレーザー、カンチレバー (探針)、試料、試料台 (チューブピエゾスキャナ)、分割型フォトダイオードなどから成る。

図3に示したように、実験装置はAFMとデータ処理装置(PC)から成る。データ処理装置はAFMに制御データを送り、AFMはデータ処理装置に測定データを返す。AFMはレーザー、カンチレバー(探針)、試料、試料台(チューブピエゾスキャナ)、分割型フォトダイオードなどから成る。カンチレバー(探針)と試料の間には原子間力が働き、試料はカンチレバーをたわませる。レーザーからの入射光はカンチレバーにより反射され、分割型フォトダイオードへと送られる。分割型フォトダイオードはその反射光を出力電流に変換し、試料台へと送る。

本実験では、試料にCDとDVDを用いた。図4に、それらの写真を示す。

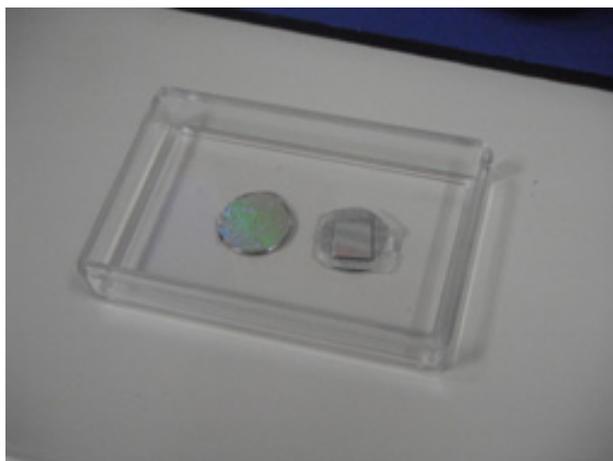


図4: 試料写真。左がCD、右がDVD(片面一層)である。

2.1 原子間力

原子間には様々な力(クーロン力、ファンデルワールス力など)が働く。それらの力を総称して原子間力と言う。その原子間力を導く経験的なモデルの一つに、レナード=ジョーンズ・ポテンシャル^[1]があり、

$$U(r) = 4\epsilon \left\{ \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right\} \quad (1)$$

により定義される。ここで、 r は原子間距離(核間距離)であり、 ϵ はポテンシャルの深さを表すパラメータであり、 σ は衝突直径を表すパラメータである。図5に、ポテンシャルの深さ ϵ を $\epsilon = 0.8$ 、衝突直径 σ を $\sigma = 1.2$ としたときのレナード=ジョーンズ・ポテンシャル $U(r)$ の様子を示す。

式(1)より、原子間力 $F(r)$ は、

$$F(r) = -\frac{d}{dr}U(r) = 4\epsilon \left\{ \frac{12}{r} \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \frac{6}{r} \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right\} = \frac{24\epsilon\sigma^6}{r^7} \left\{ 2 \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 - 1 \right\} \quad (2)$$

と導かれる。ここで、斥力 $\frac{12}{r} \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} > 0$ は、レナード=ジョーンズ・ポテンシャル $U(r)$ の正のポテンシャル $\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} > 0$ から導かれ、電子雲の重なりによるクーロン力などを表す。また、引力 $-\frac{6}{r} \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 < 0$ は、レナード=ジョーンズ・ポテンシャル $U(r)$ の負のポテンシャル $-\left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 < 0$ から導かれ、電気双極子によるファンデルワールス力などを表す。

レナード=ジョーンズ・ポテンシャル $U(r)$ を実際の系に適用するには、ポテンシャルの深さ ϵ と衝突直径 σ を最適に設定(パラメータフィッティング)しなくてはならない。これまでに、そのための様々な工夫がなされてきた^[1]。以下では、重要なパラメータである、ポテンシャルの深さ ϵ と衝突直径 σ の意味について考える。

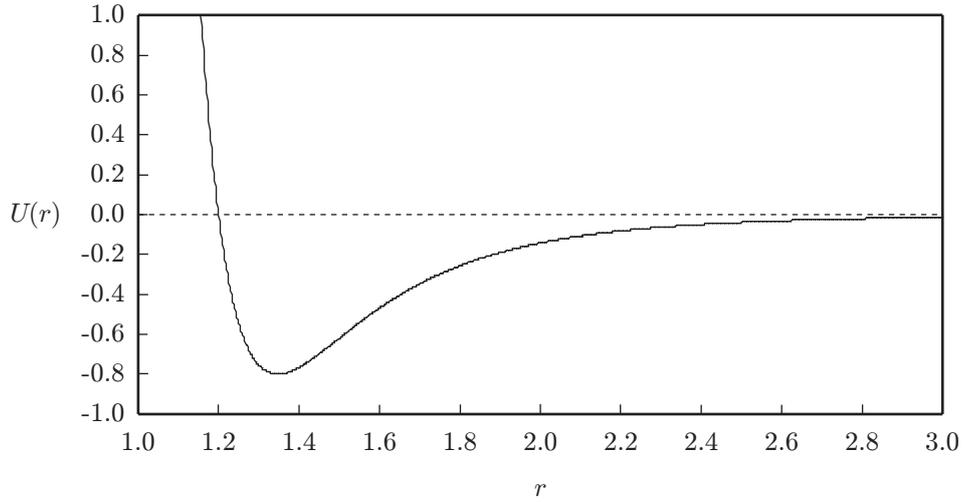


図 5: レナード=ジョーンズ・ポテンシャル $U(r)$ の様子。横軸は原子間距離 (核間距離) r であり、縦軸はレナード=ジョーンズ・ポテンシャル $U(r)$ である。ここで、ポテンシャルの深さ $\epsilon = 0.8$ 、衝突直径 $\sigma = 1.2$ とした。

2.1.1 衝突直径 σ

式 (1)、式 (2)、及び、図 5 から分かるように、原子間距離 r が $0 < r \leq \sigma$ となる範囲では、

$$\frac{\sigma}{r} \geq 1 \quad (3)$$

となり、

$$\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} \geq \left(\frac{\sigma}{r}\right)^6 \Leftrightarrow U(r) \geq 0 \quad (\text{等号は } r = \sigma \text{ の場合に限る}) \quad (4)$$

となるため、正のポテンシャル $\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12}$ が負のポテンシャル $-\left(\frac{\sigma}{r}\right)^6$ よりも優勢となる。従って、どのような原子においても、 σ より内側の世界は、斥力 $\frac{12}{r} \left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12}$ のみが支配する領域となり、原子同士が σ を越えて近づくことはほとんど起こらない。 σ は、原子のそのような直径を与えることから、衝突直径と呼ばれている。

2.1.2 ポテンシャルの深さ ϵ

式 (2) から、原子間力 $F(r)$ を $F(r_0) = 0$ とする、平衡原子間距離 r_0 は、

$$r_0 = \sqrt[6]{2}\sigma \quad (5)$$

となる。この平衡原子間距離 r_0 は、物質の格子定数と良く一致することが知られている^[1]。式 (5) を式 (1) に代入し、

$$U(r_0) = U(\sqrt[6]{2}\sigma) = 4\epsilon \left\{ \left(\frac{\sigma}{\sqrt[6]{2}\sigma}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{\sqrt[6]{2}\sigma}\right)^6 \right\} = 4\epsilon \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2}\right) = -\epsilon \quad (6)$$

を得る。ここで、

$$\frac{dU(r_0)}{dr} = -F(r_0) = 0 \quad (7)$$

であり、

$$\frac{d^2U(r_0)}{dr^2} = -\frac{dF(r_0)}{dr} = \frac{24\epsilon\sigma^6}{r_0^8} \left\{ 26 \left(\frac{\sigma}{r_0} \right)^6 - 7 \right\} = \frac{144\epsilon}{(\sqrt[3]{2})^4 \sigma^2} > 0 \quad (8)$$

であることから、レナード=ジョーンズ・ポテンシャル $U(r)$ は、平衡原子間距離 r_0 において、極小値 $U(r_0) = -\epsilon$ をとる。図 5 から分かるように、 ϵ は、レナード=ジョーンズ・ポテンシャル $U(r)$ の深さ (基準値 $U(r) = 0$ から極小値 $U(r_0) = -\epsilon$ までの長さ) を与え、ポテンシャルの深さと呼ばれている。

2.2 AFM の測定原理

第 2.1 節において述べたように、2 つの原子が接近すると、その原子間距離に応じて引力や斥力が生じる。この力を用いて、物体表面の形状を測定するのが AFM である。図 6 に、光てこ検出法による AFM の測定原理図を示す。

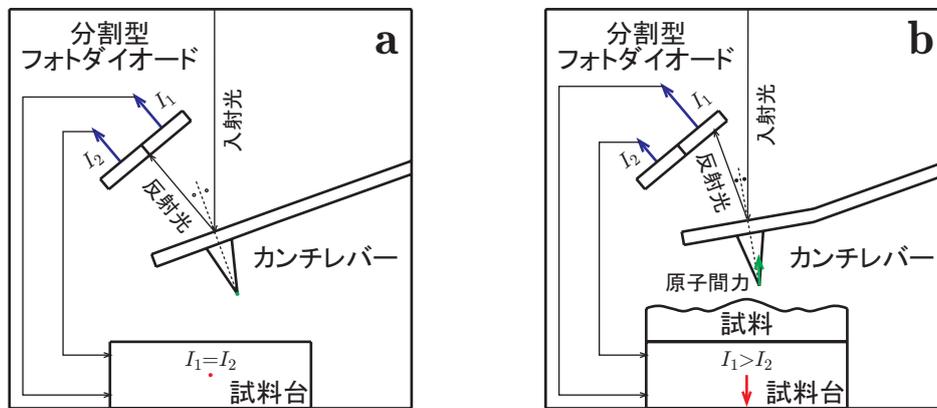


図 6: AFM の測定原理図。(a) 探針と試料との間に原子間力が働いていないとき。(b) 探針と試料との間に原子間力 (斥力) が働くとき。緑の矢印は探針に働く原子間力、赤い矢印は試料台の変位、青い矢印は分割型フォトダイオードの出力電流を表す。

探針と試料との間に原子間力が働いていないとき (図 6(a))、レーザーの反射光は、分割型フォトダイオードの中央に到達し、分割型フォトダイオードの上部で発生する出力電流 I_1 と、下部で発生する出力電流 I_2 は等しくなる ($I_1 = I_2$)。 I_1 と I_2 が一致するため、試料台は移動しない。この試料台の位置を基準面と考える。

探針と試料を接近させ、探針と試料との間に原子間力 (斥力) が働くとき (図 6(b))、探針が原子間力を受けることで、カンチレバーは上方にわずかにたわみ、レーザー光のカンチレバーに対する入射角と反射角もわずかに小さくなる。分割型フォトダイオードをカンチレバーから十分離れた位置に置くことで、このわずかな角度差を検出可能な大きさにまで増大させることができる (光てこ検出法)。これにより、反射光は分割型フォトダイオードの上部に到達し、出力電流 I_1 は出力電流 I_2 より大きくなる ($I_1 > I_2$)。 I_1 が I_2 より大きくなるため、 I_1 と I_2 を一致させるように試料台は下降する。試料台の変位は、カンチレバーの探針に働く原子間力の変化に起因するものである。探針に働く原子間力の変化は、探針と試料間の距離に対応して起こるため、試料台の変位は、基準面から測った試料表面の高さを与える。AFM では、試料全体に渡ってカンチレバーを走査しながら、カンチレバーのたわみを一定 ($I_1 = I_2$) に保つように試料台を変位させることで、試料表面の形状測定を行う。

3 実験手順

3.1 試料の準備

3.1.1 CD

次の手順で、試料 CD を用意した。図 7 に、試料 CD の (a) 作成前の状態と (b) 作成後の状態を示す^[6]。

1. CD を適当なサイズにカットした (図 7(a))。
2. CD の印刷層 (図 7(1)) に両面テープを貼り付けて、これを剥がし、保護層 (ラッカーコート、図 7(2)) を露出させた。
3. 露出させた保護層 (図 7(2)) に両面テープ (図 7(5)) を貼り付け、基板・記録層 (ポリカーボネート、図 7(4)) から、測定対象である反射層 (アルミニウム蒸着膜、図 7(3)) を剥がした。
4. 保護層 (図 7(2)) に貼り付けた両面テープ (図 7(5)) を用いて、反射層 (図 7(3)) を試料ホルダ (図 7(6)) に固定した (図 7(b))。このとき、反射層 (図 7(3)) が試料ホルダ (図 7(6)) に対してなるべく水平になるように注意した。

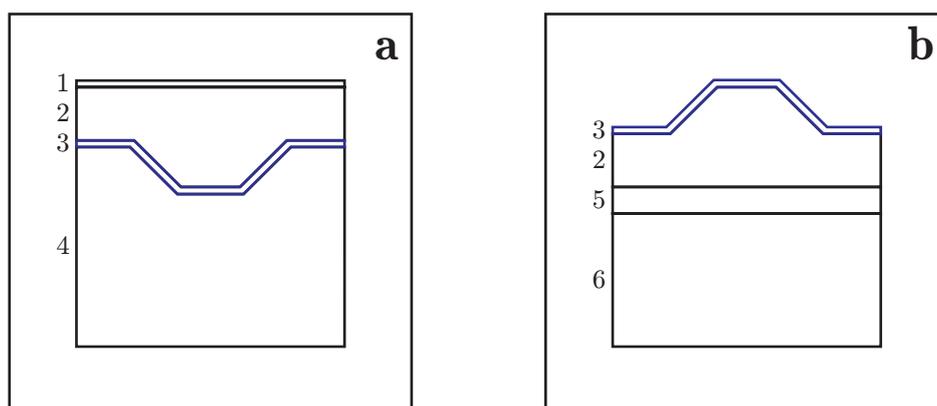


図 7: 試料 CD の (a) 作成前の状態と (b) 作成後の状態。(1) 印刷層。(2) 保護層。(3) 反射層。(4) 基板・記録層。(5) 両面テープ。(6) 試料ホルダ。ここで、測定対象である反射層を青い線により示した。

3.1.2 DVD

次の手順で、試料 DVD (片面一層) を用意した。図 8 に、試料 DVD の (a) 作成前の状態と (b) 作成後の状態を示す^[6]。

1. DVD を適当なサイズにカットした (図 8(a))。
2. 樹脂層 (ポリカーボネート、図 8(2)) と樹脂層 (図 8(5)) に力をかけ、保護層 (UV 硬化樹脂、図 8(3)) から、測定対象である反射層 (アルミ、図 8(4)) を剥がした。
3. 反射層 (図 8(4)) と樹脂層 (図 8(5)) のみとなった DVD を、試料ホルダに納まるサイズにカットした。
4. 樹脂層 (図 8(5)) に両面テープを貼り付け、反射層 (図 8(4)) を試料ホルダに固定した (図 8(b))。

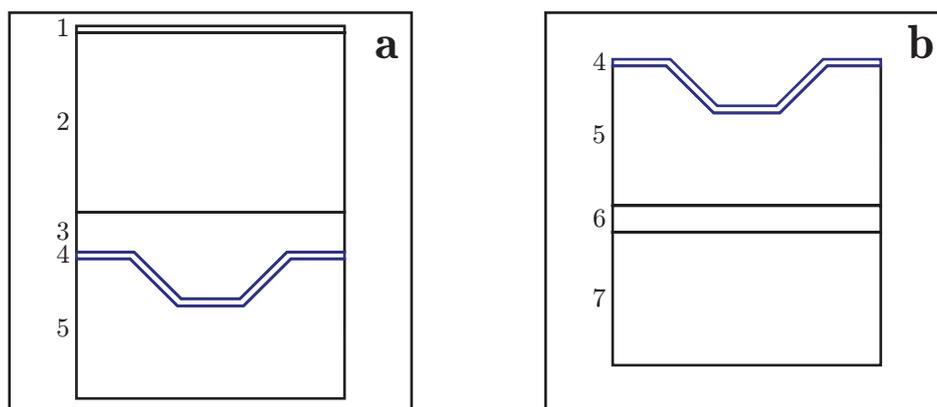


図 8: 試料 DVD の (a) 作成前の状態と (b) 作成後の状態。(1) 印刷層。(2) 樹脂層。(3) 保護層。(4) 反射層。(5) 樹脂層。(6) 両面テープ。(7) 試料ホルダ。ここで、測定対象である反射層を青い線により示した。

3.2 AFM の準備

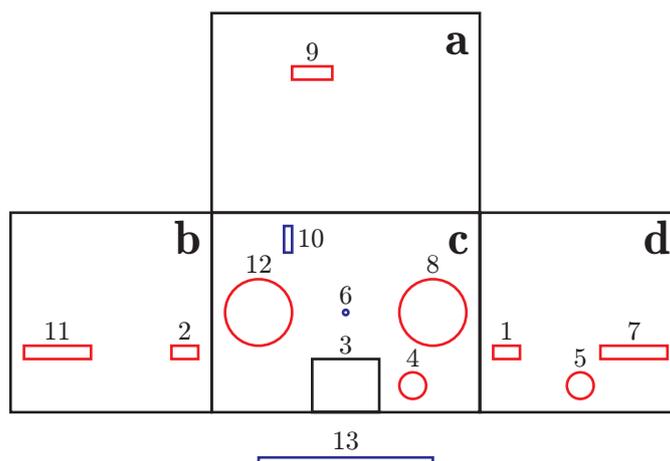


図 9: AFM の調節機構 (クランプや調節つまみなど) の概略図。(a)AFM 上面。(b)AFM 左側面。(c)AFM 正面。(d)AFM 右側面。(1)、(2)AFM ヘッドのクランプ。(3) 試料台。(4)、(5) 試料の観察位置の調節つまみ。(6) カンチレバー。(7)、(8) レーザー光の調節つまみ。(9) ミラー。(10) 分割型フォトダイオード。(11)、(12) 調節つまみ。(13) 本体信号表示パネル。ここで、手動操作する調節機構を赤い線により、その他の装置を青い線により示した。

図 9 に、AFM の調節機構 (クランプや調節つまみなど) の概略図を示す。AFM とデータ処理装置 (PC) の電源を ON にし、PC 上で SPM マネージャーのオンラインアプリケーションを起動した後、次の手順で、試料をセットした。

1. AFM ヘッドのクランプ (図 9(1)、(2)) のロックを解除し、AFM ヘッドを軽く持ち上げながら奥へ移動した。
2. ピンセットを用いて、第 3.1 節で準備した試料を試料台 (図 9(3)) に置いた。

3. AFM ヘッドを軽く持ち上げながら元の位置へ戻し、AFM ヘッドのクランプ (図 9(1)、(2)) をロックした。

調節つまみ (図 9(4)、(5)) を用いて、試料の観察位置を変更できるが、今回は行わなかった。試料をセットした後、次の手順で、AFM を初期調整した。

1. 光学顕微鏡でカンチレバー (図 9(6)) の先端を見ながら、調節つまみ (図 9(7)、(8)) を用いて、レーザー光がカンチレバー (図 9(6)) のほぼ先端に照射されるよう調節した。
2. ミラー (図 9(9)) を調節し、分割型フォトダイオード (図 9(10)) に、レーザーの反射光のスポットを写した。
3. 調節つまみ (図 9(7)、(8)) を用いて、スポットが明るく鮮明に、その形状が左右対称になるようにした。
4. ミラー (図 9(9)) と調節つまみ (図 9(11)、(12)) を用いて、本体信号表示パネル (図 9(13)) の LED パー表示が最大、かつ、その数値が -2.0 ($-5.0 < -2.0 < 5.0$) 程度になるようにした。

3.3 測定

測定は、オンラインアプリケーション上での操作となる。次の手順で、試料表面の形状測定をした。

1. 観察条件設定画面において、各パラメータを次のように設定した。
 - 走査範囲 $\dots 10[\mu\text{m}]$ (CD) λ $5[\mu\text{m}]$ (DVD)
 - 走査速 $\dots 1[\text{Hz}]$
 - 画素数 $\dots 512 \times 512$
 - Z レンジ $\dots \times 2$
 - オペレーティングポイント $\dots 2[\text{V}]$
 - P ゲイン $\dots 5$
 - I ゲイン $\dots 0.01$
 - 走査モード \dots カー定
 - Z オフセット $\dots 0[\mu\text{m}]$
 - X オフセット $\dots 0[\mu\text{m}]$
 - Y オフセット $\dots 0[\mu\text{m}]$
 - 走査角 $\dots 0[\text{度}]$
 - 自動 Z オフセット \dots チェック
 - Y 走査を行う \dots チェック
2. 信号選択や表示形式などの設定画面において、各パラメータを次のように設定した。
 - 信号 \dots 高さ
 - 表示方法 \dots 濃淡
 - 走査方向 \dots トレース

- Z 表示範囲 … 500[nm] (CD), 50[nm] (DVD)
 - 傾斜補正 … XY 方向
 - カラーグループ … 1
 - カラー番号 … 16
3. メニューの「動作」>「高速アプローチ」を選択し、カンチレバー（探針）を試料表面から 10[μm] の距離まで近付けた。
 4. メニューの「動作」>「精密アプローチ」を選択し、カンチレバー（探針）を試料表面にほぼ接するまで最接近させ、試料表面の形状を測定した。
 5. メニューの「ファイル」>「保存」を選択し、得られた試料表面のデータを保存した。

3.4 ピットの計測

ピットの計測は、オフラインアプリケーション上での操作となる。オフラインアプリケーションは、データ処理装置 (PC) の SPM マネージャーから起動される。次の手順で、試料 CD、試料 DVD のピットの幅、長さ、高さ、間隔 (トラックピッチ) を計測した。ここで、画像の端にあるピットは計測対象外とした。

1. メニューの「ファイル」>「一覧表示」を選択し、表示された測定データの一覧表から、計測に使うデータを選択した。
2. メニューの「画像解析」>「断面形状」を選択し、試料 CD、試料 DVD 表面の画像データを表示した。

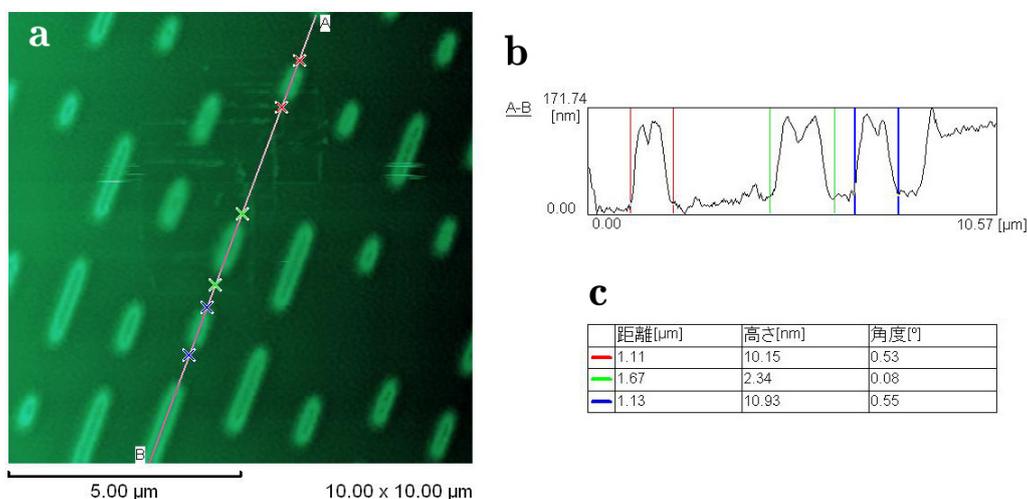


図 10: 試料 CD のピットの長さの計測に用いた画面。(a) 試料表面の画像。(b) 断面形状のグラフ。(c) 線分間の距離の表。

3.4.1 CD

(A) ピットの長さ

次の手順で、ピットの長さを計測した。図 10 に、計測に用いた画面の様子を示す。

1. 試料表面の画像（図 10(a)）において、ピットに平行な線分を引き、断面形状のグラフ（図 10(b)）を得た。
2. 断面形状のグラフ（図 10(b)）において、ピットの両端（ランドとの境界）に線分（赤・緑・青）を引き、線分間の距離の表（図 10(c) の距離）を得た。
3. 線分間の距離の表（図 10(c) の距離）において、各色の線分ごとの数値を読み取り、それぞれ、ピットの長さとして記録した（図 10(c) の場合には、1.11、1.67、1.13[μm] となる）。

(B) ピットの高さ

次の手順で、ピットの高さを計測した。試料 CD のピットは中央が窪んだ形状をしていたため（図 11(b) 参照）ここでは、ピットの最も高い点の高さと最も低い点の高さをそれぞれ計測することにした。

まず、ピットの最も高い点の高さを計測した。図 11 に、計測に用いた画面の様子を示す。

1. 試料表面の画像（図 11(a)）において、ピットに平行な線分を引き、断面形状のグラフ（図 11(b)）を得た。
2. 断面形状のグラフ（図 11(b)）において、ピットの最も高い点と、その点に近い側のピットの端（ランドとの境界）に線分（赤・緑・青）を引き、線分間の高さの表（図 11(c) の高さ）を得た。
3. 線分間の高さの表（図 11(c) の高さ）において、各色の線分ごとの数値を読み取り、それぞれ、ピットの最も高い点の高さとして記録した（図 11(c) の場合には、131.93、133.49、131.93[nm] となる）。

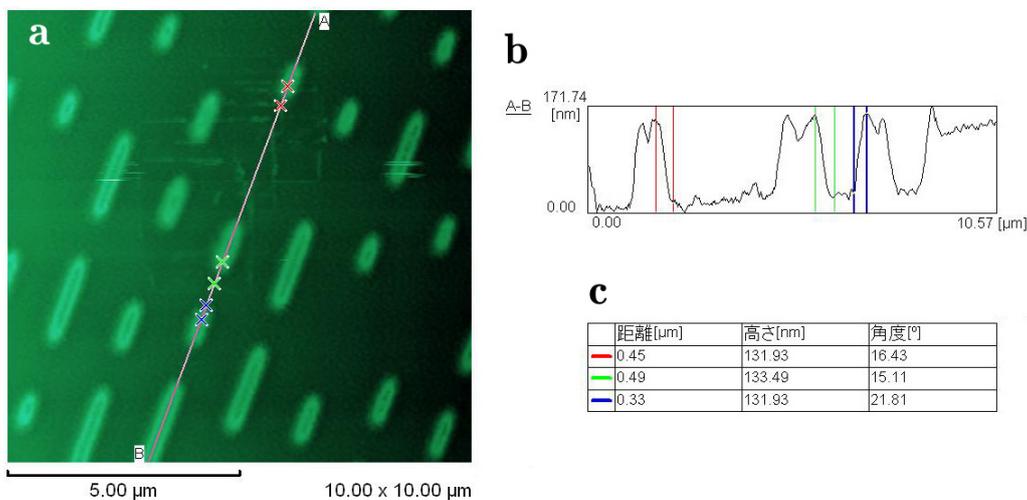


図 11: 試料 CD のピットの最も高い点の高さの計測に用いた画面。(a) 試料表面の画像。(b) 断面形状のグラフ。(c) 線分間の高さの表。

次に、ピットの最も低い点の高さを計測した。図 12 に、計測に用いた画面の様子を示す。

1. 試料表面の画像（図 12(a)）において、ピットに平行な線分を引き、断面形状のグラフ（図 12(b)）を得た。
2. 断面形状のグラフ（図 12(b)）において、ピットの最も低い点と、その点に近い側のピットの端（ランドとの境界）に線分（赤・緑・青）を引き、線分間の高さの表（図 12(c) の高さ）を得た。

3. 線分間の高さの表（図 12(c) の高さ）において、各色の線分ごとの数値を読み取り、それぞれ、ピットの最も低い点の高さとして記録した（図 12(c) の場合には、92.12、90.55、94.46[nm] となる）。

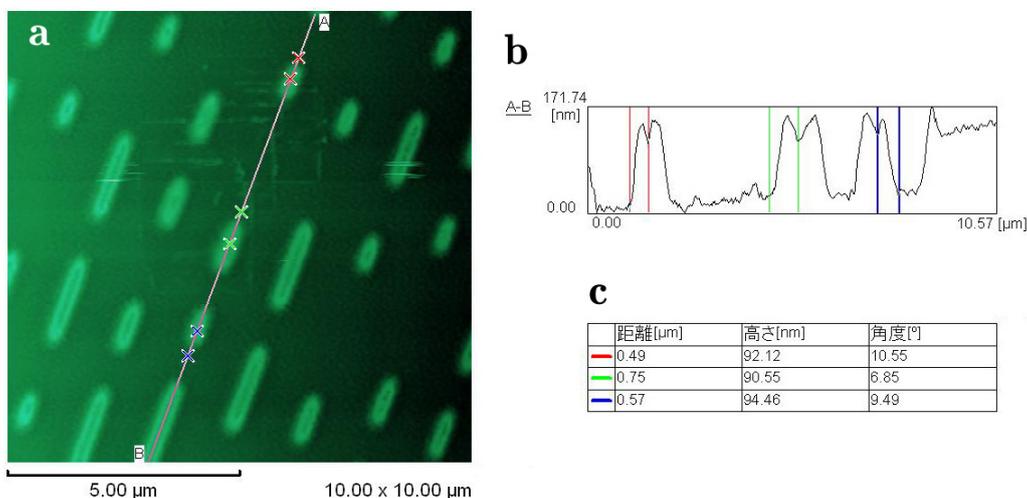


図 12: 試料 CD のピットの最も低い点の高さの計測に用いた画面。(a) 試料表面の画像。(b) 断面形状のグラフ。(c) 線分間の高さの表。

(C) ピットの幅

次の手順で、ピットの幅を計測した。図 13 に、計測に用いた画面の様子を示す。

1. 試料表面の画像（図 13(a)）において、ピットに平行な線分を引いた後、その線分に垂直に交わる線分を引き、断面形状のグラフ（図 13(b)）を得た。
2. 断面形状のグラフ（図 13(b)）において、ピットの両端（ランドとの境界）に線分（赤・緑・青）を引き、線分間の距離の表（図 13(c) の距離）を得た。
3. 線分間の距離の表（図 13(c) の距離）において、各色の線分ごとの数値を読み取り、それぞれ、ピットの幅として記録した（図 13(c) の場合には、0.63、0.63、0.72[μm] となる）。

(D) ピットの間隔

次の手順で、ピットの間隔（トラックピッチ）を計測した。図 14 に、計測に用いた画面の様子を示す。

1. 試料表面の画像（図 14(a)）において、ピットに平行な線分を引いた後、その線分に垂直に交わる線分を引き、断面形状のグラフ（図 14(b)）を得た。
2. 断面形状のグラフ（図 14(b)）において、隣り合うトラックの 2 つのピットを選び、それぞれの中央に線分（緑・青）を引き、線分間の距離の表（図 14(c) の距離）を得た。
3. 線分間の距離の表（図 14(c) の距離）において、各色の線分ごとの数値を読み取り、それぞれ、ピットの間隔として記録した（図 14(c) の場合には、1.42、1.47[μm] となる）。

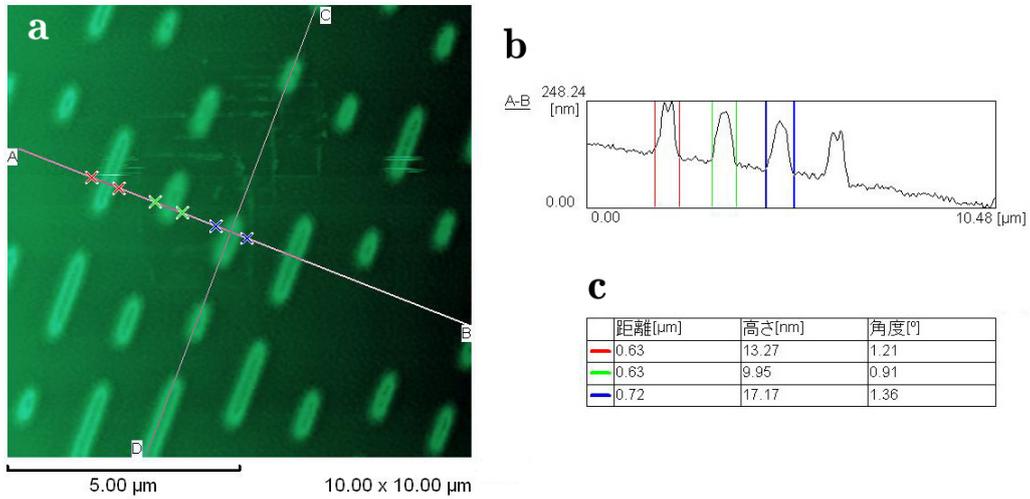


図 13: 試料 CD のピットの幅の計測に用いた画面。(a) 試料表面の画像。(b) 断面形状のグラフ。(c) 線分間の距離の表。

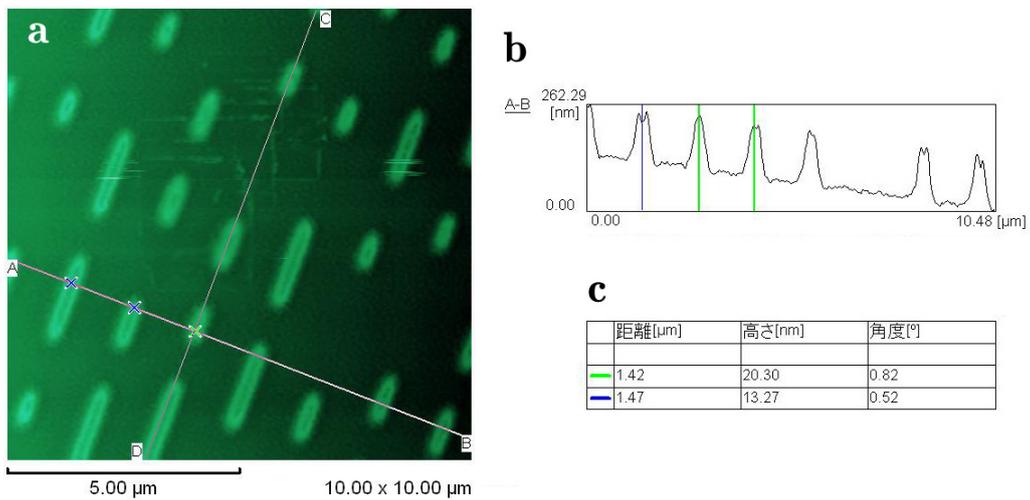


図 14: 試料 CD のピットの間隔の計測に用いた画面。(a) 試料表面の画像。(b) 断面形状のグラフ。(c) 線分間の距離の表。

3.4.2 DVD

試料DVDのピットにおいても、その長さ、幅、間隔については、試料CDのときと同様に計測した。ピットの高さについては、CDの場合と異なり、DVDのピットの中央が窪んだ形状をしていなかったため（図15(b)参照）、ピットの最も高い点の高さのみを計測し、それをピットの高さとすることにした。

(A) ピットの高さ

次の手順で、ピットの高さを計測した。図15に、計測に用いた画面の様子を示す。

1. 試料表面の画像（図15(a)）において、ピットに平行な線分を引き、断面形状のグラフ（図15(b)）を得た。
2. 断面形状のグラフ（図15(b)）において、ピットの最も高い点と、その点に近い側のピットの端（ランドとの境界）に線分（赤・緑・青）を引き、線分間の高さの表（図15(c)の高さ）を得た。
3. 線分間の高さの表（図15(c)の高さ）において、各色の線分ごとの数値を読み取り、それぞれ、ピットの高さとして記録した（図15(c)の場合には、113.19、119.44、121.00[nm]となる）。

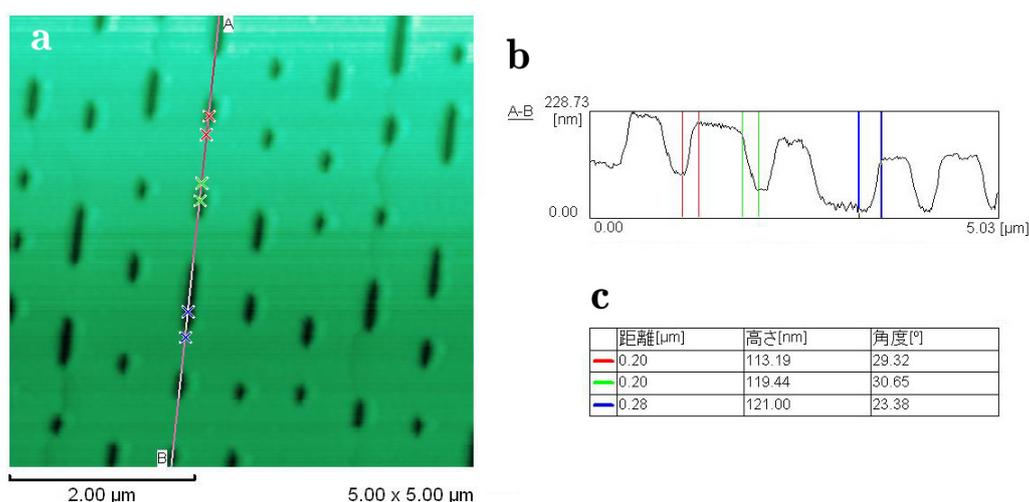


図15: 試料DVDのピットの高さの計測に用いた画面。(a) 試料表面の画像。(b) 断面形状のグラフ。(c) 線分間の高さの表。

4 結果

4.1 測定結果

4.1.1 CD

図16に、測定により得られた試料CDの表面の画像を示す。ここで、左上から i 行目、左下から j 番目の試料CDのピットを p_{ij}^C とする。表1に、試料CDのピット p_{ij}^C の長さ l_{ij}^C [μm]、最も高い点の高さ hh_{ij}^C [nm]、最も低い点の高さ hl_{ij}^C [nm]、幅 w_{ij}^C [μm]、右隣のトラック中のピットとの間隔 tp_{ij}^C [μm] を示す。

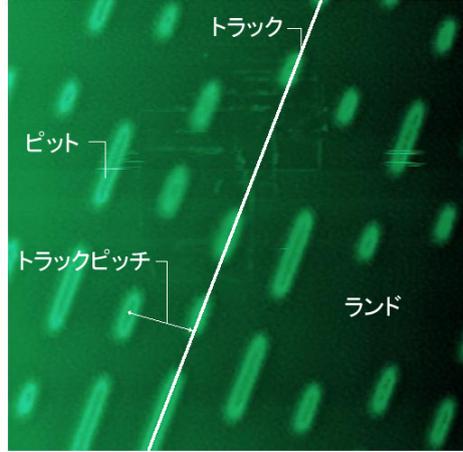


図 16: AFM の表面形状測定により得られた試料 CD 表面の画像。ここで、走査範囲を $10[\mu\text{m}]$ とした。AFM による表面形状測定では、高い所ほど明るい（低い所ほど暗い）画像が得られる。画像の色（緑）は、第 3.3 節の信号選択や表示形式などの設定画面において、カラーグループを 1、カラー番号を 16 としたことによる（AFM では、物体表面の色情報をとることはできない）。この画像では、明るい所がピット、暗い所がランドを表す。

表 1: 試料 CD のピット p_{ij}^C の長さ $l_{ij}^C[\mu\text{m}]$ 、最も高い点の高さ $hh_{ij}^C[\text{nm}]$ 、最も低い点の高さ $hl_{ij}^C[\text{nm}]$ 、幅 $w_{ij}^C[\mu\text{m}]$ 、右隣のピットとの間隔 $tp_{ij}^C[\mu\text{m}]$ の測定値。

ピット p_{ij}^C	p_{22}^C	p_{31}^C	p_{32}^C	p_{33}^C	p_{42}^C	p_{43}^C	p_{44}^C
長さ $l_{ij}^C[\mu\text{m}]$	1.16	1.18	2.35	2.33	1.48	1.44	1.48
高さ（高） $hh_{ij}^C[\text{nm}]$	123.08	127.24	124.90	126.46	127.24	113.19	145.20
高さ（低） $hl_{ij}^C[\text{nm}]$	93.09	82.75	82.75	90.55	98.36	103.04	117.10
幅 $w_{ij}^C[\mu\text{m}]$	—	—	0.72	0.63	0.65	0.63	—
間隔 $tp_{ij}^C[\mu\text{m}]$	—	—	1.47	1.47	1.42	1.42	—

ピット p_{ij}^C	p_{52}^C	p_{53}^C	p_{54}^C	p_{61}^C	p_{62}^C	p_{63}^C
長さ $l_{ij}^C[\mu\text{m}]$	1.13	1.67	1.11	2.33	2.35	1.18
高さ（高） $hh_{ij}^C[\text{nm}]$	131.93	133.49	131.93	121.78	117.10	128.81
高さ（低） $hl_{ij}^C[\text{nm}]$	94.46	90.55	92.12	89.77	96.80	123.34
幅 $w_{ij}^C[\mu\text{m}]$	0.61	0.72	0.65	0.65	0.65	0.54
間隔 $tp_{ij}^C[\mu\text{m}]$	1.49	1.49	1.42	1.48	1.50	1.49

ピット p_{ij}^C	p_{71}^C	p_{72}^C	p_{73}^C	p_{74}^C	p_{81}^C	p_{82}^C
長さ $l_{ij}^C[\mu\text{m}]$	1.41	1.11	2.00	1.11	1.43	1.14
高さ（高） $hh_{ij}^C[\text{nm}]$	124.90	128.81	124.12	142.47	127.76	141.30
高さ（低） $hl_{ij}^C[\text{nm}]$	97.97	98.36	92.90	115.53	85.48	122.56
幅 $w_{ij}^C[\mu\text{m}]$	0.61	0.61	0.54	—	0.61	—
間隔 $tp_{ij}^C[\mu\text{m}]$	—	—	—	—	—	—

4.1.2 DVD

図 17 に、測定により得られた試料 DVD の表面の画像を示す。ここで、左上から i 行目、左下から j 番目の試料 DVD のピットを p_{ij}^D とする。表 2 に、試料 DVD のピット p_{ij}^D の長さ l_{ij}^D [μm]、高さ h_{ij}^D [nm]、幅 w_{ij}^D [μm]、右隣のトラック中のピットとの間隔 tp_{ij}^D [μm] を示す。

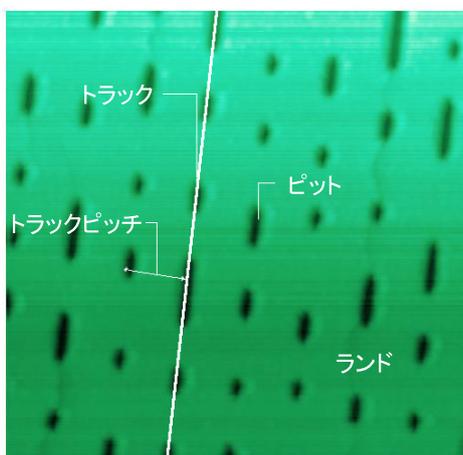


図 17: AFM の表面形状測定により得られた試料 DVD 表面の画像。ここで、走査範囲を $5[\mu\text{m}]$ とした。AFM による表面形状測定では、高い所ほど明るい (低い所ほど暗い) 画像が得られる。画像の色 (緑) は、第 3.3 節の設定による。この画像では、暗い所がピット、明るい所がランドを表す。

表 2: 試料 DVD のピット p_{ij}^D の長さ l_{ij}^D [μm]、高さ h_{ij}^D [nm]、幅 w_{ij}^D [μm]、右隣のピットとの間隔 tp_{ij}^D [μm]。

ピット p_{ij}^D	p_{13}^D	p_{14}^D	p_{21}^D	p_{22}^D	p_{23}^D	p_{24}^D	p_{32}^D	p_{33}^D	p_{34}^D	p_{35}^D	p_{42}^D
長さ l_{ij}^D [μm]	0.35	0.60	0.39	0.74	0.90	0.48	0.41	0.55	0.40	0.73	0.49
高さ h_{ij}^D [nm]	111.11	128.61	121.78	114.75	124.12	117.10	102.26	120.22	113.97	111.63	114.75
幅 w_{ij}^D [μm]	—	0.32	—	0.34	0.31	0.32	0.30	0.30	0.30	0.33	0.33
間隔 tp_{ij}^D [μm]	—	0.63	—	0.66	0.64	—	—	0.66	0.64	0.67	0.65

ピット p_{ij}^D	p_{43}^D	p_{44}^D	p_{45}^D	p_{52}^D	p_{53}^D	p_{54}^D	p_{55}^D	p_{56}^D	p_{61}^D	p_{62}^D	p_{63}^D
長さ l_{ij}^D [μm]	0.97	0.50	0.50	0.39	0.53	0.62	0.37	0.40	0.39	0.51	0.41
高さ h_{ij}^D [nm]	121.00	119.44	113.19	106.95	127.24	127.24	103.04	97.58	106.17	106.95	113.19
幅 w_{ij}^D [μm]	0.33	0.29	0.30	0.32	0.30	0.33	—	0.30	0.32	0.33	0.33
間隔 tp_{ij}^D [μm]	0.66	0.66	—	0.65	0.63	0.65	—	0.65	0.65	—	—

ピット p_{ij}^D	p_{64}^D	p_{65}^D	p_{71}^D	p_{72}^D	p_{73}^D	p_{74}^D	p_{81}^D	p_{82}^D	p_{83}^D	p_{84}^D	p_{85}^D
長さ l_{ij}^D [μm]	0.39	0.58	0.47	0.77	0.38	0.46	0.38	0.50	0.77	0.84	0.39
高さ h_{ij}^D [nm]	117.10	117.10	110.85	113.19	112.41	107.73	107.34	113.97	111.63	110.85	112.41
幅 w_{ij}^D [μm]	—	0.31	0.33	—	—	0.34	0.33	—	—	0.32	—
間隔 tp_{ij}^D [μm]	—	—	0.65	—	—	0.64	—	—	—	—	—

4.2 解析結果

4.2.1 CD

(A) ピットの長さ

試料 CD のピットの長さ l_{ij}^C が、長さ l の k 近傍 $l \pm k\Delta$ ($k = 1, 2, \dots$, Δ は定数) に含まれるとき、そのようなピットの長さ l_{ij}^C の k についての平均個数 $N(l)$ を、

$$N(l) = \frac{1}{2k+1} \sum_{i,j} \sigma(l_{ij}^C - l) \quad (9)$$

により定義する。ここで、

$$\sigma(x) = \begin{cases} 1 \cdots |x| \leq k\Delta \\ 0 \cdots |x| > k\Delta \end{cases} \quad (10)$$

とした。図 18 に、 $l = 1.00, 1.01, \dots, 2.50[\mu\text{m}]$ 、 $k = 2$ 、 $\Delta = 0.01[\mu\text{m}]$ としたときの平均個数 $N(l)$ の様子を示す。

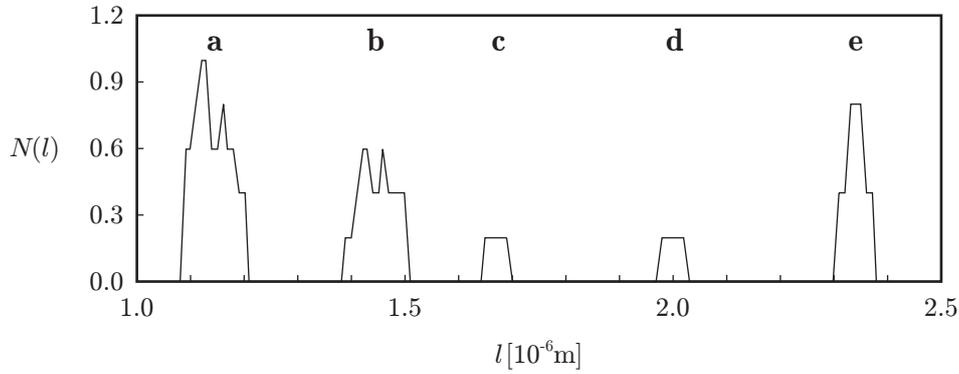


図 18: k 近傍に含まれる試料 CD のピットの長さ l_{ij}^C の平均個数 $N(l)$ の様子。横軸は長さ l ($l = 1.00, 1.01, \dots, 2.50[\mu\text{m}]$)、縦軸は平均個数 $N(l)$ である。ここで、 $k = 2$ 、 $\Delta = 0.01[\mu\text{m}]$ とした。

図 18 から、平均個数 $N(l)$ は、5 つのピーク (図 18(a)、(b)、(c)、(d)、(e)) をもつことが分かる。そこで、それぞれのピークについて、平均値 $\langle l^C \rangle$ 、標準偏差 σ_{l^C} 、標準誤差 $\sigma_{\langle l^C \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの長さ l^C を求める。 $\langle l^C \rangle$ 、 σ_{l^C} 、 $\sigma_{\langle l^C \rangle}$ 、 l^C は、

$$\langle l^C \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i,j} l_{ij}^C \quad (11)$$

$$\sigma_{l^C} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i,j} (l_{ij}^C - \langle l^C \rangle)^2} \quad (12)$$

$$\sigma_{\langle l^C \rangle} = \sqrt{\frac{1}{n}} \sigma_{l^C} \quad (13)$$

$$l^C = \langle l^C \rangle \pm \sigma_{\langle l^C \rangle} \quad (14)$$

により定義される。ここで、 n は i, j についての足し上げの総数である。表 3 に、各ピークについて求めた、足し上げの総数 n 、平均値 $\langle l^C \rangle$ 、標準偏差 σ_{l^C} 、標準誤差 $\sigma_{\langle l^C \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの長さ l^C を示す。

表 3 から、誤差幅付きのピットの長さ l^C は、ピットの長さの規格値 (1.13、1.43、1.73、2.03、2.33 $[\mu\text{m}]$)^[6] とほぼ一致していることが分かる。

表 3: 各ピークにおける、足し上げの総数 n 、 l_{ij}^C の平均値 $\langle l^C \rangle$ 、標準偏差 σ_{l^C} 、標準誤差 $\sigma_{\langle l^C \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの長さ l^C 。

範囲	$1.09 < l_{ij}^C < 1.2$	$1.39 < l_{ij}^C < 1.5$	$1.65 < l_{ij}^C < 1.69$	$1.98 < l_{ij}^C < 2.02$	$2.31 < l_{ij}^C < 2.37$
n	8	5	1	1	4
$\langle l^C \rangle [\mu\text{m}]$	1.14	1.45	1.67	2.00	2.34
$\sigma_{l^C} [\mu\text{m}]$	0.03	0.03	0.00	0.00	0.01
$\sigma_{\langle l^C \rangle} [\mu\text{m}]$	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
$l^C [\mu\text{m}]$	1.14 ± 0.01	1.45 ± 0.01	1.67 ± 0.00	2.00 ± 0.00	2.34 ± 0.01

(B) ピットの高さ

表 1 から、試料 CD のピットの高さの平均値 $\langle h^C \rangle$ 、標準偏差 σ_{h^C} 、標準誤差 $\sigma_{\langle h^C \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの高さ h^C は、

$$\langle h^C \rangle = \frac{1}{19} \sum_{i,j} \frac{hh_{ij}^C - hl_{ij}^C}{2} \sim 113.40[\text{nm}] \quad (15)$$

$$\sigma_{h^C} = \sqrt{\frac{1}{19} \sum_{i,j} \left(\frac{hh_{ij}^C - hl_{ij}^C}{2} - \langle h^C \rangle \right)^2} \sim 8.83[\text{nm}] \quad (16)$$

$$\sigma_{\langle h^C \rangle} = \sqrt{\frac{1}{18}} \sigma_{h^C} \sim 2.08[\text{nm}] \quad (17)$$

$$h^C = \langle h^C \rangle \pm \sigma_{\langle h^C \rangle} = 113.40 \pm 2.08[\text{nm}] \quad (18)$$

となる。式 (18) から、ピットの高さの誤差 $\sigma_{\langle h^C \rangle}$ は、平均値 $\langle h^C \rangle$ の 1.84% 程度の大きさであることが分かる。ピットの高さの規格値は、 $0.11[\mu\text{m}] = 110[\text{nm}]$ である [6] ので、誤差幅付きのピットの高さ h^C は、規格値とほぼ一致していると言える。

(C) ピットの幅

表 1 から、試料 CD のピットの幅の平均値 $\langle w^C \rangle$ 、標準偏差 σ_{w^C} 、標準誤差 $\sigma_{\langle w^C \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの幅 w^C は、

$$\langle w^C \rangle = \frac{1}{14} \sum_{i,j} w_{ij}^C \sim 0.63[\mu\text{m}] \quad (19)$$

$$\sigma_{w^C} = \sqrt{\frac{1}{14} \sum_{i,j} (w_{ij}^C - \langle w^C \rangle)^2} \sim 0.05[\mu\text{m}] \quad (20)$$

$$\sigma_{\langle w^C \rangle} = \sqrt{\frac{1}{13}} \sigma_{w^C} \sim 0.01[\mu\text{m}] \quad (21)$$

$$w^C = \langle w^C \rangle \pm \sigma_{\langle w^C \rangle} = 0.63 \pm 0.01[\mu\text{m}] \quad (22)$$

となる。式 (22) から、ピットの幅の誤差 $\sigma_{\langle w^C \rangle}$ は、平均値 $\langle w^C \rangle$ の 2% 程度の大きさであることが分かる。ピットの幅の規格値は、 $0.5[\mu\text{m}]$ である [6] ので、誤差幅付きのピットの幅 w^C は、規格値より $0.13[\mu\text{m}]$ 程度大きい。

(D) ピットの間隔

表 1 から、試料 CD のピットの間隔の平均値 $\langle tp^C \rangle$ 、標準偏差 σ_{tp^C} 、標準誤差 $\sigma_{\langle tp^C \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの間隔 tp^C は、

$$\langle tp^C \rangle = \frac{1}{10} \sum_{i,j} tp_{ij}^C \sim 1.47[\mu\text{m}] \quad (23)$$

$$\sigma_{tp^C} = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i,j} (tp_{ij}^C - \langle tp^C \rangle)^2} \sim 0.03 \quad (24)$$

$$\sigma_{\langle tp^C \rangle} = \sqrt{\frac{1}{9}} \sigma_{tp^C} \sim 0.01 \quad (25)$$

$$tp^C = \langle tp^C \rangle \pm \sigma_{\langle tp^C \rangle} = 1.47 \pm 0.01 \quad (26)$$

となる。式 (26) から、ピットの間隔の誤差 $\sigma_{\langle tp^C \rangle}$ は、平均値 $\langle tp^C \rangle$ の 0.7% 程度の大きさであることが分かる。ピットの間隔の規格値は、 $1.6[\mu\text{m}]$ である [6] ので、誤差幅付きのピットの間隔 tp^C は、規格値より $0.13[\mu\text{m}]$ 程度小さい。

4.2.2 DVD

(A) ピットの長さ

試料 DVD のピットの長さ l_{ij}^D が、長さ l の k 近傍 $l \pm k\Delta$ ($k = 1, 2, \dots$, Δ は定数) に含まれるとき、そのようなピットの長さ l_{ij}^D の k についての平均個数 $N(l)$ は、式 (9) の l_{ij}^C を l_{ij}^D と置き換えることにより定義される。図 19 に、 $l = 0.30, 0.31, \dots, 1.00[\mu\text{m}]$ 、 $k = 2$ 、 $\Delta = 0.01[\mu\text{m}]$ としたときの平均個数 $N(l)$ の様子を示す。

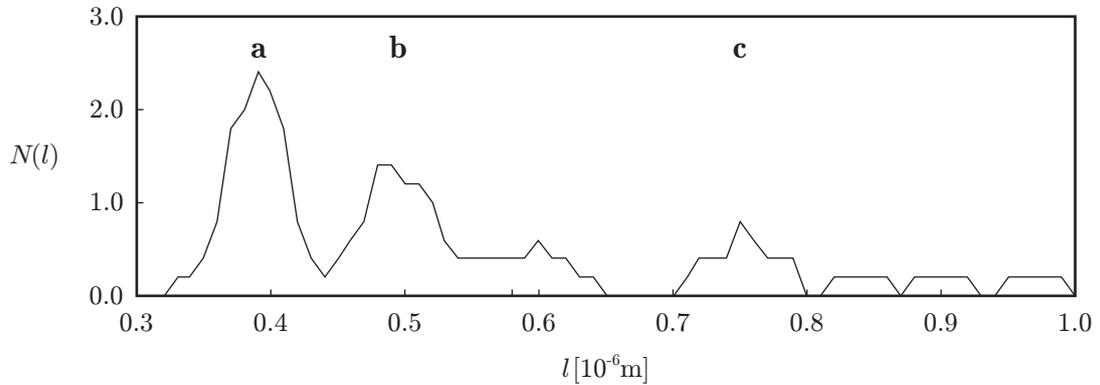


図 19: k 近傍に含まれる試料 DVD のピットの長さ l_{ij}^D の平均個数 $N(l)$ の様子。横軸は長さ l ($l = 0.30, 0.31, \dots, 1.00[\mu\text{m}]$)、縦軸は平均個数 $N(l)$ である。ここで、 $k = 2$ 、 $\Delta = 0.01[\mu\text{m}]$ とした。

図 19 から、平均個数 $N(l)$ は、3 つのピーク (図 19(a)、(b)、(c)) をもつことが分かる。そこで、それぞれのピークについて、平均値 $\langle l^D \rangle$ 、標準偏差 σ_{l^D} 、標準誤差 $\sigma_{\langle l^D \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの長さ l^D を求める。 $\langle l^D \rangle$ 、 σ_{l^D} 、 $\sigma_{\langle l^D \rangle}$ 、 l^D は、式 (11)、式 (12)、式 (13)、式 (14) の l_{ij}^C を l_{ij}^D と置き換えることにより定義される。表 4 に、各ピークについて求めた、足し上げの総数 n 、平均値 $\langle l^D \rangle$ 、標準偏差 σ_{l^D} 、標準誤差 $\sigma_{\langle l^D \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの長さ l^D を示す。

表 4 から、誤差幅付きのピットの長さ l^D は、ピットの長さの規格値 ($0.40, 0.53, 0.79[\mu\text{m}]$) [6][7] とほぼ一致していることが分かる。

表 4: 各ピークにおける、足し上げの総数 n 、 l_{ij}^D の平均値 $\langle l^D \rangle$ 、標準偏差 σ_{l^D} 、標準誤差 $\sigma_{\langle l^D \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの長さ l^D 。

範囲	$0.33 < l_{ij}^D < 0.43$	$0.45 < l_{ij}^D \leq 0.53$	$0.71 < l_{ij}^D < 0.79$
n	13	9	4
$\langle l^D \rangle [\mu\text{m}]$	0.39	0.49	0.75
$\sigma_{l^D} [\mu\text{m}]$	0.02	0.02	0.02
$\sigma_{\langle l^D \rangle} [\mu\text{m}]$	0.00	0.01	0.01
$l^D [\mu\text{m}]$	0.39 ± 0.00	0.49 ± 0.01	0.75 ± 0.01

(B) ピットの高さ

表 2 から、試料 DVD のピットの高さの平均値 $\langle h^D \rangle$ 、標準偏差 σ_{h^D} 、標準誤差 $\sigma_{\langle h^D \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの高さ h^D は、

$$\langle h^D \rangle = \frac{1}{33} \sum_{i,j} h_{ij}^D \sim 113.84[\text{nm}] \quad (27)$$

$$\sigma_{h^D} = \sqrt{\frac{1}{33} \sum_{i,j} (h_{ij}^D - \langle h^D \rangle)^2} \sim 7.16[\text{nm}] \quad (28)$$

$$\sigma_{\langle h^D \rangle} = \sqrt{\frac{1}{32}} \sigma_{h^D} \sim 1.27[\text{nm}] \quad (29)$$

$$h^D = \langle h^D \rangle \pm \sigma_{\langle h^D \rangle} = 113.84 \pm 1.27[\text{nm}] \quad (30)$$

となる。式 (30) から、ピットの高さの誤差 $\sigma_{\langle h^D \rangle}$ は、平均値 $\langle h^D \rangle$ の 1.11% 程度の大きさであることが分かる。ピットの高さの規格値は、 $0.11[\mu\text{m}] = 110[\text{nm}]$ である^[6] ので、誤差幅付きのピットの高さ h^D は、規格値とほぼ一致していると言える。

(C) ピットの幅

表 2 から、試料 DVD のピットの幅の平均値 $\langle w^D \rangle$ 、標準偏差 σ_{w^D} 、標準誤差 $\sigma_{\langle w^D \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの幅 w^D は、

$$\langle w^D \rangle = \frac{1}{24} \sum_{i,j} w_{ij}^D \sim 0.32[\mu\text{m}] \quad (31)$$

$$\sigma_{w^D} = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i,j} (w_{ij}^D - \langle w^D \rangle)^2} \sim 0.01[\mu\text{m}] \quad (32)$$

$$\sigma_{\langle w^D \rangle} = \sqrt{\frac{1}{23}} \sigma_{w^D} \sim 0.00[\mu\text{m}] \quad (33)$$

$$w^D = \langle w^D \rangle \pm \sigma_{\langle w^D \rangle} = 0.32 \pm 0.00[\mu\text{m}] \quad (34)$$

となる。式 (34) から、ピットの幅の誤差 $\sigma_{\langle w^D \rangle}$ は、平均値 $\langle w^D \rangle$ の 0.9% 程度の大きさであることが分かる。ピットの幅の規格値は、 $0.3[\mu\text{m}]$ である^[6] ので、誤差幅付きのピットの幅 w^D は、規格値とほぼ一致していると言える。

(D) ピットの間隔

表 2 から、試料 DVD のピットの間隔の平均値 $\langle tp^D \rangle$ 、標準偏差 σ_{tp^D} 、標準誤差 $\sigma_{\langle tp^D \rangle}$ 、誤差幅付きのピットの間隔 tp^D は、

$$\langle tp^D \rangle = \frac{1}{16} \sum_{i,j} tp_{ij}^D \sim 0.65[\mu\text{m}] \quad (35)$$

$$\sigma_{tp^D} = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_{i,j} (tp_{ij}^D - \langle tp^D \rangle)^2} \sim 0.01[\mu\text{m}] \quad (36)$$

$$\sigma_{\langle tp^D \rangle} = \sqrt{\frac{1}{15}} \sigma_{tp^D} \sim 0.00[\mu\text{m}] \quad (37)$$

$$tp^D = \langle tp^D \rangle \pm \sigma_{\langle tp^D \rangle} = 0.65 \pm 0.00[\mu\text{m}] \quad (38)$$

となる。式 (38) から、ピットの幅の誤差 $\sigma_{\langle tp^D \rangle}$ は、平均値 $\langle tp^D \rangle$ の 0.4% 程度の大きさであることが分かる。ピットの間隔の規格値は、 $0.74[\mu\text{m}]$ である^[6] ので、誤差幅付きのピットの間隔 tp^D は、規格値より $0.09[\mu\text{m}]$ 程度小さい。

5 考察

CD と DVD の記録容量を、次の 2 つの方法により求める。

- ディスクとピットの面積の比による方法
- トラックとピットの長さの比による方法

(A) ディスクとピットの面積の比による方法

記録様式や読み取り方法を考慮しない場合には、ディスクとピットの単純な面積比を用いて、記録容量を算出することができる。CD を単純に埋め尽くすのに必要なピットの個数 n^C は、単純な面積比により、

$$n^C = \frac{\pi(R_1^2 - R_0^2)}{l^C w^C} \quad (39)$$

と与えられる。ここで、 R_0 は CD の内径、 R_1 は CD の外径である。これにより、単位面積当たりのピットの個数 (ピットの面内密度) D^C は、

$$D^C = \frac{n^C}{\pi(R_1^2 - R_0^2)} = \frac{1}{l^C w^C} \quad (40)$$

となる。DVD の場合も同様に、

$$D^D = \frac{1}{l^D w^D} \quad (41)$$

となり、その比は、

$$\frac{D^D}{D^C} = \frac{l^C w^C}{l^D w^D} \quad (42)$$

で与えられる。

第 4.2 節の解析結果より、試料 CD のピットの長さ l^C の最小値は $1.14[\mu\text{m}]$ 、ピットの幅 w^C は $0.63[\mu\text{m}]$ であり、試料 DVD のピットの長さ l^D の最小値は $0.39[\mu\text{m}]$ 、ピットの幅 w^D は $0.32[\mu\text{m}]$ であるので、これらを式 (42) に代入し、

$$\frac{D^D}{D^C} = \frac{1.14 \times 0.63}{0.39 \times 0.32} \sim 5.8 \quad (43)$$

となる。

(B) トラックとピットの長さの比による方法

CD や DVD では、螺旋状のトラックへピットを配置することによって、情報を記録したり、読み取ったりする。この場合の記録容量は次のようになる。CD のトラックの全長 L^C は、

$$L^C = \frac{tp^C}{2\pi} \int_{2m_0^C\pi}^{2m_1^C\pi} \theta d\theta = \pi tp^C \left\{ (m_1^C)^2 - (m_0^C)^2 \right\} = \frac{\pi}{tp^C} (R_1^2 - R_0^2) \quad (44)$$

により与えられる。ここで、 m_i^C は半径 0 から R_i までに tp^C 間隔で描かれた螺旋の巻き数を表し、

$$m_i^C = \frac{R_i}{tp^C} \quad (i = 0, 1) \quad (45)$$

とした。このとき、記録容量 C^C は、

$$C^C = \frac{L^C}{l^C} = \frac{\pi}{l^C tp^C} (R_1^2 - R_0^2) \quad (46)$$

と定義される。DVD の場合も同様に、

$$C^D = \frac{L^D}{l^D} = \frac{\pi}{l^D tp^D} (R_1^2 - R_0^2) \quad (47)$$

と定義される。CD と DVD の記録容量の比を求めると、

$$\frac{C^D}{C^C} = \frac{l^C tp^C}{l^D tp^D} \quad (48)$$

となる。

第 4.2 節の解析結果より、試料 CD のピットの長さ l^C の最小値は $1.14[\mu\text{m}]$ 、ピットの間隔 tp^C は $1.47[\mu\text{m}]$ であり、試料 DVD のピットの長さ l^D の最小値は $0.39[\mu\text{m}]$ 、ピットの間隔 tp^D は $0.65[\mu\text{m}]$ であるので、これらを式 (48) に代入し、

$$\frac{C^D}{C^C} = \frac{1.14 \times 1.47}{0.39 \times 0.65} \sim 6.6 \quad (49)$$

となる。

(A) と (B) の結果から、記録容量の比に多少の違いがあることが分かる。式 (42) と式 (48) を比較すると、

$$\frac{w^C}{w^D} \sim 2.0 \quad (50)$$

であるのに対し、

$$\frac{tp^C}{tp^D} \sim 2.3 \quad (51)$$

であることがその理由である。すなわち、記録様式（螺旋状にピットを配置する）を考えたときには、ピットの幅を小さくするよりも、ピットの間隔（トラックピッチ）を狭くする方が、記録容量をより大きくでき、実際、そのような技術的工夫がなされているのではないかと思われる。

参考文献

- [1] Wikipedia, "レナード-ジョーンズ・ポテンシャル", Wikipedia (2013), accessed 28-April-2014.
- [2] 浜谷望著, "AFM (原子間力顕微鏡) 物理学実験プリント" (2014).
- [3] Wikipedia, "原子間力顕微鏡", Wikipedia (2013), accessed 28-April-2014.

- [4] 島津製作所, "SPM 資料室", <http://www.an.shimadzu.co.jp/surface/spm/sol/data/index.htm> (2014).
- [5] Dimas G. de Oteyza et al., "Direct Imaging of Covalent Bond Structure in Single-Molecule Chemical Reactions", *Science* (2013).
- [6] 石川憲二著, "しくみ図解シリーズ メモリ技術が一番わかる", 技術評論社 (2012).
- [7] 川又利明著, "VRDS-NEO", <http://www.dynamicaudio.jp/audio/5555/7f/oto/oto52-02.html> (2004).