

## NC-AFM による磁性体表面観察の現状と可能性

細井浩貴・末岡和久\*・早川和延\*\*

武笠幸一\*

北海道大学先端科学技術共同センター 〒001-0021 北海道札幌市北区北21条西11丁目

\*北海道大学大学院工学研究科 〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目

\*\*北海道科学技術振興センター 〒060-0001 北海道札幌市中央区北1条西7丁目プレスト1・7 5F

(2001年10月3日受理)

### Possibility of NC-AFM Imaging of Surface Magnetic Structure

Hirotaka HOSOI, Kazuhisa SUEOKA\*, Kazunobu HAYAKAWA\*\*

and Kōichi MUKASA\*

Center for Advanced Science and Technology (CAST), Hokkaido University, Kita 21, Nishi 11, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 001-0021

\*Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628

\*\*Northern Advancement Center for Science & Technology, Prest 1・7 Bldg. 5 F, Kita 1, Nishi 7, Chuo-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0001

(Received October 3, 2001)

Many kinds of scanning probe microscopes have been proposed for imaging surface magnetic structures. Theoretical calculations predict that the detection of the short-range magnetic interaction such as exchange interaction reveals the magnetic structures on an atomic scale. The non-contact atomic force microscopy (NC-AFM) detecting the short-range magnetic interaction is called *exchange force microscopy (EFM)*. In order to detect the exchange interaction between a magnetic tip and a sample, we performed NC-AFM imaging of an antiferromagnet NiO(001) surface using a ferromagnetic Fe-coated tip. To discuss the interaction atomically resolved images obtained are analyzed by the superposition method. The results of the analysis demonstrates that the spin configuration revealed from the superimposed images coincides with the expected one of the NiO(001) surface. To evaluate the corrugation amplitude of the atoms, we introduced the topographic asymmetry, which indicates that the short-range magnetic interaction between the Fe-coated tip and sample can be detected by NC-AFM.

### 1. はじめに

近年, ハードディスクに代表される磁気記録技術の高密度化はもとより, トンネル磁気抵抗素子やスピントランジスタをはじめとするナノスケールの構造を持つ磁気デバイスの実用化が具体性を持つようになり, より高い空間分解能を持つ磁気測定手法開発への要求は強くなっている。一方, 走査型プローブ顕微鏡 (SPM) は試料表面の構造や電子状態の原子分解能観察を可能とする測定

ツールであり, この高分解能測定を磁気測定に応用しようとする様々な試みがなされている。

最近, Heinze らは強磁性体探針を用いて W(100) 上の Mn 薄膜の観察を行い, Mn サイトにおける電子スピノの反強磁性的配列の実空間画像化に成功<sup>1)</sup>しており, スピノ偏極 STM (SP-STM) が表面磁気構造観察において原子分解能を持つことが示された。また, 末岡らは光励起 GaAs 探針を用いた場合にも Fe 薄膜のスピノ偏極した表面準位をナノスケールで観察できること<sup>2)</sup>を示している。しかし, SP-STM の観察対象は導電性を持つ表面に限定されるため, 遷移金属酸化物をはじめとする絶

縁性の磁性体表面の観察には適さない。試料の導電性にとらわれない測定を可能とする走査型力顕微鏡 (SFM) を用いた磁気測定法の代表的なものに, Martin らによる磁気力顕微鏡 (MFM)<sup>3</sup>がある。MFM は現在最も広く用いられている磁気測定 SFM であるが, 磁性体探針・試料間に働く磁気双極子相互作用を力として検出するため定量測定が難しい。同様に磁気双極子相互作用を測定する SFM としては, SQUID 顕微鏡<sup>4</sup>, Hall プローブ顕微鏡<sup>5</sup>および走査型磁気抵抗効果顕微鏡<sup>6, 7</sup>があり, より定量的な測定を目指して種々の磁気測定 SFM の開発が行われている。また, SFM と磁気共鳴映像法 (MRI) を組み合わせた技術として磁気共鳴力顕微鏡 (MRFM)<sup>8</sup>がある。これまでに, 核磁気共鳴<sup>9</sup>, 電子スピン共鳴<sup>10</sup>, 強磁性共鳴<sup>11</sup>が MRFM により検出可能であることが知られており, 窒化アンモニウム中の水素原子核スピンの 3 次元画像が 3  $\mu\text{m}$  程度の分解能<sup>12</sup>で得られている。また, 近接場光の偏光角を測定することにより試料表面の磁気光学効果を測定する近接場磁気光学効果顕微鏡<sup>13</sup>の開発も行われている。

近年, 原子分解能が達成可能な SFM として非接触原子間力顕微鏡 (NC-AFM)<sup>14, 15</sup>が注目を集めており, 半導体<sup>16</sup>や金属<sup>17</sup>, 絶縁体表面<sup>18</sup>において欠陥を含む原子像が得られている。NC-AFM で測定される探針・試料間相互作用は, ファンデルワールス力や静電気力の長距離相互作用と結合力 (共有, 金属, イオン等) である短距離相互作用に分類される。探針と試料に磁性体を用いた場合には, 長距離相互作用である磁気双極子相互作用に加え, 短距離相互作用である交換相互作用が働く。したがって, 交換相互作用を抽出できれば, SP-STM と同様に, 原子分解能で表面磁気構造を測定できる。著者は, 交換相互作用を検出する NC-AFM を交換相互作用力顕微鏡 (Exchange Force Microscope: EFM)<sup>19~25</sup>と呼び, 探針・試料間に働く磁気の相互作用について理論的に検討した。また, 交換相互作用力検出の可能性を実験的に検証するために, 強磁性体探針による反強磁性体試料表面の NC-AFM 観察を行った。

本稿では, 探針・試料間に働く交換相互作用力の第一原理計算と強磁性体探針による反強磁性体 NiO(001) 表面の NC-AFM 観察の結果について紹介する。

## 2. 交換相互作用の理論的検討

1994 年に武笠らが強磁性体探針・強磁性体試料に対する 1 次元モデル計算<sup>19</sup>を行い, 交換相互作用力の大きさが AFM の感度内にあることをはじめて示唆した。この結果を踏まえ, 著者らのグループは EFM に関する数値計算を本格的に行い, 実験的に検証するために準備を

始めた。

その後, Ness らはタイトバインディング法を用いた計算により, Fe 探針と C(001) および N(001) 表面間に働く相互作用の計算を行い, AFM により交換相互作用が検出可能であることを示した<sup>26</sup>。さらに, 著者らのグループでは第一原理計算に基づき Fe 探針・Fe 試料間の交換相互作用力の定量的な評価を進め<sup>21</sup>, 交換相互作用を検出することにより, 原子分解能で表面の磁気的構造が観察可能であることを明らかにした<sup>24, 25</sup>。最近では, Foster らがスピン偏極した H および Na 原子を先端に持つ探針と NiO(001) 表面上の Ni サイト間に働く相互作用の *ab initio* 計算<sup>27</sup>を行っている。以下では, 著者らのグループが行った第一原理計算の結果について述べる。

### 2.1 計算方法およびモデル

探針・試料系のモデルとして, 3 原子層からなる 2 組の bcc-Fe 薄膜を使用した<sup>21</sup>。2 組の薄膜は (001) 表面が距離  $d$  で対向している。ただし, 薄膜間距離  $d$  は最表面原子層間の距離である。ここで, 距離  $d$  を 0.14 nm から 0.5 nm の間で変化させた場合の薄膜間に働く相互作用力の距離依存性を計算した。また, 探針に相当する薄膜表面の原子が試料に相当する薄膜表面の 3 つの原子サイト: ホロー (H), サドル (S) およびトップ (T) サイトに位置する場合の計算, すなわち相互作用のサイト依存性についての計算も行った。計算には局所密度近似および Full-potential linear augmented plane wave (FLAPW) 法<sup>28</sup>を用いた。以下では, 格子緩和等の原子の変位を考慮していない場合の結果を示すが, 緩和を考慮しても<sup>23</sup>交換相互作用力が僅かに小さくなる傾向が見られる程度である。

### 2.2 交換相互作用力

Fig. 1 にホローサイトにおける全相互作用力および交

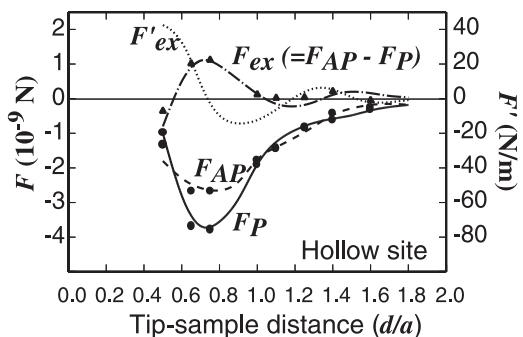


Fig. 1 Forces  $F_P$  and  $F_{AP}$  for the P and AP magnetic configurations, the exchange force  $F_{ex}$  ( $= F_{AP} - F_P$ : triangles) and the corresponding force gradient  $F_{ex}$  (dotted lines).

換相互作用力の距離依存性を示す<sup>21)</sup>。ただし、横軸は薄膜間距離  $d$  を Fe の格子定数  $a$  (= 0.283 nm) で規格化した値であり、 $d/a = 0.5$  がバルクの原子間距離に相当する。また、交換相互作用力 ( $F_{\text{ex}}$ ) は両薄膜間の磁化配列が平行 (P) および反平行 (AP) となる場合の全相互作用力の差 ( $F_{\text{P}} - F_{\text{AP}}$ ) とした。探針・試料間距離が  $0.5 < d/a < 1.7$  の領域において、全相互作用力 ( $F_{\text{P}}, F_{\text{AP}}$ ) が顕著に変化していることがわかる。また、H サイトは他のサイトに比べてエネルギーが低く<sup>19)</sup>、磁化配列が平行となる場合が最も安定である。これは、バルクにおいて磁化配列が強磁性的となることから容易に想像される。ところで、 $0.5 < d/a < 1.7$  の領域で交換相互作用力が生じていることがわかるが、交換相互作用力の大きさは  $d/a = 0.5 \sim 1.0$  の領域で  $10^{-9} \sim 10^{-10}$  [N] であり、サイト依存性も顕著である。 $d/a = 1.0 \sim 1.7$  の領域でも  $10^{-10} \sim 10^{-11}$  [N] の大きさで、AFM の力検出感度よりも大きい。この違いは、電子分布密度と局所状態密度計算結果<sup>22)</sup>から、 $d/a < 1.0$  の領域では両薄膜の  $d$  軌道間の重なりによる直接交換相互作用が働き、交換相互作用力の振動が見られる  $d/a > 1.0$  の領域では、 $s$  および  $p$  電子により RKKY 的な交換相互作用が働く結果と考えられる。

Fig. 2 は、探針・試料間距離が  $d/a = 0.9$  における各サイト (H, S, T) の交換相互作用力 ( $F_{\text{ex}}$ ) を示した交換力像である。交換相互作用力の大きさはサイトに強く依存しており、交換相互作用力をマッピングすることにより磁気構造の原子分解能観察が可能であることを示している。このように、EFM は SP-STM と同様に原子分解能を持つ可能性が示された。SP-STM は表面のスピニ偏極した状態密度の差をトンネル電流を用いて測定しており、その違いがスピニ配列に対応している。したがって、EFM と SP-STM では異なる物理量を測定しており、その像は異なる磁気特性を反映している可能性に留意しなければならない。

### 3. 反強磁性体試料

上述の第一原理計算の結果から、探針・試料間距離が数 nm の範囲で働く交換相互作用は、 $10^{-9} \sim 10^{-11}$  [N] であり、交換相互作用力を検出すれば、試料表面の磁気構造を原子分解能で観察できることが明らかになった。しかし、交換相互作用力を検出する実験を行うにあたり、NC-AFM で検出される全相互作用力から交換相互作用を分離、抽出あるいは識別することが必要となる。この問題の解決法のひとつとして、フォースカーブ測定が挙げられる。すなわち、表面ポテンシャルの差に相当する電圧を探針・試料間に印加し、静電気相互作用を補償し

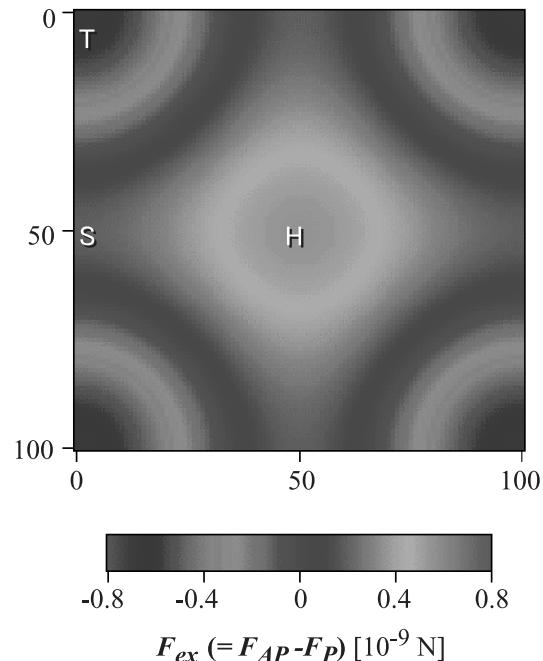


Fig. 2 Exchange force images on the Fe(001) surface at  $d/a = 0.9$ . They are obtained by interpolation of the calculated values of the exchange force for the three high-symmetric surface sites of the hollow site (H), the saddle site (S), and the top site (T). The unit in the contour map is  $10^{-9}$  N.

た条件で測定したフォースカーブをフィッティングパラメータにより解析を行い、ファンデルワールス力を分離する方法である。実際に、Si 探針と Si(111)-7×7 表面のフォースカーブ測定を行い、化学的短距離相互作用が分離可能であることが示されている<sup>29)</sup>。我々は、もうひとつ別の解決方法として反強磁性体を試料とする方法を考えた。

#### 3.1 磁性体探針・試料間に働く相互作用

磁性体探針および磁性体試料を用いた AFM で測定される全相互作用力は、

$$F_{\text{tot}} = F_{\text{vdw}} + F_{\text{el}} + F_{\text{mag}} + F_{\text{chem}}$$

と表すことができる。ここで、 $F_{\text{vdw}}$  はファンデルワールス相互作用、 $F_{\text{el}}$  は静電相互作用、 $F_{\text{mag}}$  は磁気双極子相互作用に起因する力であり、 $F_{\text{chem}}$  は化学結合（共有、イオン、金属）由来の力である。各相互作用は異なる距離依存性を持っており、探針・試料間距離が数 nm 以上で支配的となる長距離相互作用 ( $F_{\text{vdw}}, F_{\text{el}}, F_{\text{mag}}$ ) と 1 nm 以下で強く働く短距離相互作用 ( $F_{\text{chem}}$ ) に分類できる。NC-AFM で観察される原子像コントラストは、この化学的短距離相互作用によるところが大きい<sup>29, 30)</sup>。また、

磁気的短距離相互作用は、クーロン相互作用とパウリの排他律に従うと考えられ、 $F_{\text{chem}}$  に含まれる。この磁気的短距離相互作用のエネルギーは電子スピン配置に依存しており、探針と試料表面のスピン配置の違い（平行あるいは反平行）によるエネルギー差が交換エネルギーとなる。

反強磁性的スピン配列を持つ表面には向きの異なるスピンを持った同種の原子が存在する。このような原子サイト上では、 $F_{\text{vdw}}$  や  $F_{\text{el}}$  といった非磁気的相互作用の大きさが同一であり、 $F_{\text{chem}}$  に含まれる磁気的相互作用のみ異なると考えられる。したがって、 $F_{\text{chem}}$  が支配的となる条件、すなわち、反強磁性体表面の原子像が観察できる場合に、測定される原子高さの違いが交換相互作用力の差を反映すると期待される。また、強磁性体探針と反強磁性体試料という実験配置は、磁気双極子相互作用（ $F_{\text{mag}}$ ）の影響を最小限にできる。そこで、著者らは反強磁性体である NiO 単結晶の表面を測定対象とした。

### 3.2 反強磁性体 NiO

NiO 単結晶は  $\langle 111 \rangle$  方向にわずかに圧縮された NaCl 型構造（面心菱面体構造）<sup>31</sup>を持つ。ネール温度は約 525 [K] であり、室温でも安定な反強磁性体である。Fig. 3 に示すように強磁性綱面は  $\langle 111 \rangle$  面であり、同一の  $\langle 111 \rangle$

面内における Ni サイト上での電子スピンの向きは全て平行となっている。また、スピンの向きは隣接する  $\langle 111 \rangle$  面とは反平行になっており、スピンの向きも考慮した磁気的な単位胞は化学組成の単位胞の 2 倍の大きさである。このような表面スピン配列は、低エネルギー電子回折を用いた交換散乱の実験<sup>32</sup>により確認されている。NC-AFM で原子像観察を行うのは劈開面である  $\langle 001 \rangle$  表面であるが、この表面では電子スピンの向きが反平行となっている Ni 原子が存在し、原子高さの差が磁気的短距離相互作用を反映すると考えられる。

## 4. NiO(001) 表面の NC-AFM 観察

### 4.1 実験方法

測定には自作の劈開装置を備えた NC-AFM (JEOL: JAFM-4500 XT) を使用した。NC-AFM 測定はすべて周波数シフト一定モードで行っている。また、カンチレバーの加振は、一定加振 (constant excitation) モードで行っている。

試料となる NiO 単結晶は、結晶の成長方向が長軸となるよう直方体状に切り出し、劈開用にノッチを入れた後に、試料ホルダーに固定した。ただし、劈開時の帯電を防ぐために NiO 単結晶には Au を蒸着し、超高真空中にて劈開することで  $\langle 001 \rangle$  清浄表面を得た。

強磁性体探針には、Fe 蒸着探針を使用した。Ar<sup>+</sup>スパッタを用いて清浄化した市販の Si カンチレバー上に、約 30 nm の厚さの Fe 薄膜を蒸着した。NiO(001) 表面上で測定した接触電位差は Fe 蒸着の前後で異なる値となり、探針先端付近に Fe が存在していることを示す。NC-AFM 測定後には、作製した Fe 蒸着探針形状の SEM 観察を行い、探針先端が大きく破壊されていないことを確認した。また、大気中 MFM により迷路磁区を持つガーネットを観察し、Fe 探針が強磁性的であることを確認した。

### 4.2 観察結果

Fe 蒸着探針を用いて観察した NiO(001) 表面の原子像を Fig. 4 に示す<sup>34</sup>。Fig. 4 (a) で観察されている輝点の間隔はおよそ 0.42 nm、高さは約 40 pm であり、Si 探針で得られている像<sup>33</sup>および低温 NC-AFM で測定された結果<sup>35</sup>と同様の結果が得られている。また、Fig. 4 (a) で示したラインプロファイルから明らかに背景雑音が大きい。前述の第一原理計算の結果から見積もられる磁気的相互作用の大きさは、全相互作用の大きさの数 % 程度であり、このラインプロファイルから微小な原子高さの評価は困難である。したがって、NC-AFM 像の信号対雑音 (SN) 比を向上する必要があり、重ね焼き法を用いてこの NC-AFM 像の解析を行った。

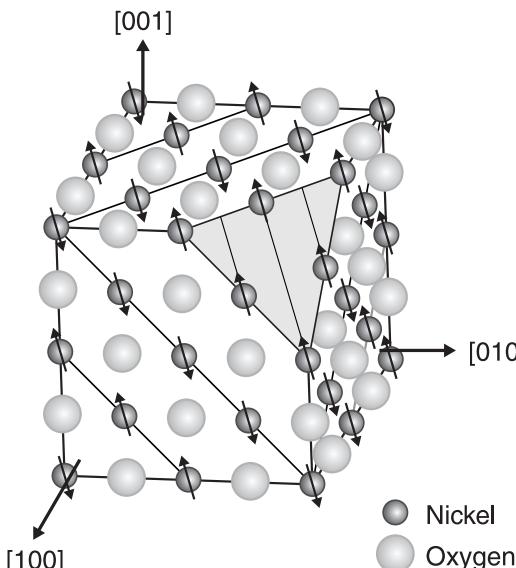


Fig. 3 Schematic diagram of the crystallographic structure of a NiO single crystal also showing the spin alignment. NiO has a face-centered rhombohedral structure with lattice constant  $a = 0.417 \text{ nm}$  and with  $\alpha = 90.3.8$  at room temperature. The direction of the spin at Ni site on the  $\langle 001 \rangle$  faces has an alternating alignment along the  $\langle 011 \rangle$  direction, and the  $\langle 111 \rangle$  faces have a ferromagnetic arrangement.

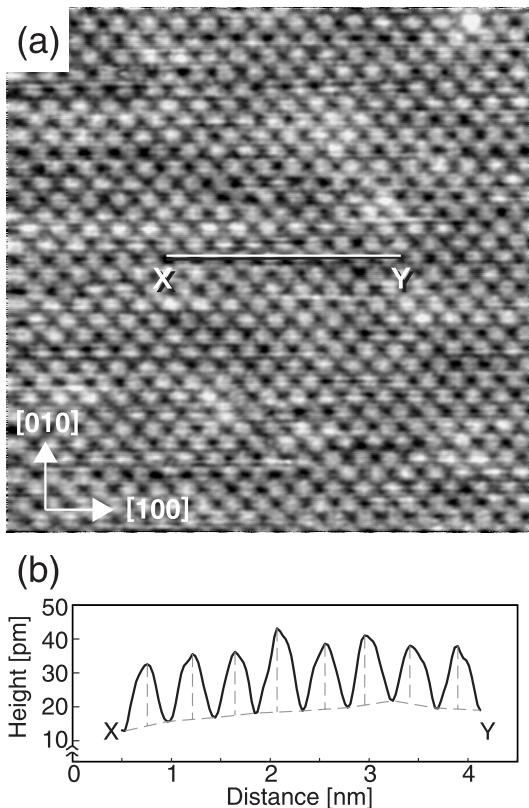


Fig. 4 (a) Atomically resolved image of NiO(001) surface with a Fe-coated tip. The distance between bright protrusions is about 0.4 nm and their height is 40 pm. The image contrast is analogous to image obtained by non-coated Si tip. Image size is 8.1 nm  $\times$  8.1 nm. (b) The line profile between the point X and Y.

## 5. NC-AFM 像の解析

### 5.1 重ね焼き法

重ね焼き (superposition) 法<sup>36)</sup>は透過型電子顕微鏡像のSN比を向上させるために用いられてきた手法である。この方法では、TEM像のネガを格子間隔分ずらして印画紙に数回焼き付ける。その結果、白色雜音が減少し、TEM像のSN比を向上させるのに効果的であることが知られている。今回、我々は重ね焼き法をNC-AFM像に適用し、原子高さの評価を行った。ただし、Fig. 4に示したNiO(001)表面の原子像に重ね焼き法を適用にする場合には、スピン配列を考慮する必要がある。NiO(001)表面には、スピンの向きが全て平行に揃っている[110]方向と反平行に並んでいる[110]方向があることから、Fig. 5に示すように2種類の重ね焼きを行う方法が存在することになる。すなわち、[110]方向にずら

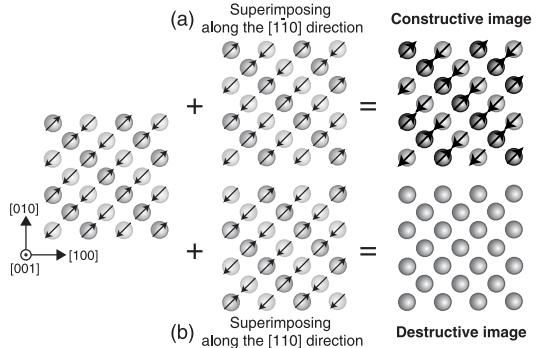


Fig. 5 The conceptual schema of the superposition method. (a) The superimposing along the [110], in which the direction of spin is parallel, enhances the spin-dependent contrast of NC-AFM image. (b) In the case that the image is superimposed along the [110] direction, the spin-dependent contrast diminishes.

して重ね焼きを行った場合には、同じ方向のスピンを持つ原子の高さが足し合わされることになり、スピンに依存したコントラストが強調された重ね焼き像が得られる。一方、[110]方向に一周期ずらして重ね焼きを行うと、スピンに依存したコントラストが消失してしまう。したがって、Fig. 4がスピンに依存したコントラストを含んでいる場合には、重ね焼きを行う方向に依存した2種類の異なる重ね焼き像 (constructive image, destructive image) が得られると期待される。

### 5.2 画像の解析結果

NiO(001)表面の原子像を重ね焼きした結果をFig. 6に示す。ただし、原子高さの差が明瞭となるようにコントラストを強調した。また、単位胞の大きさを白線で示した。

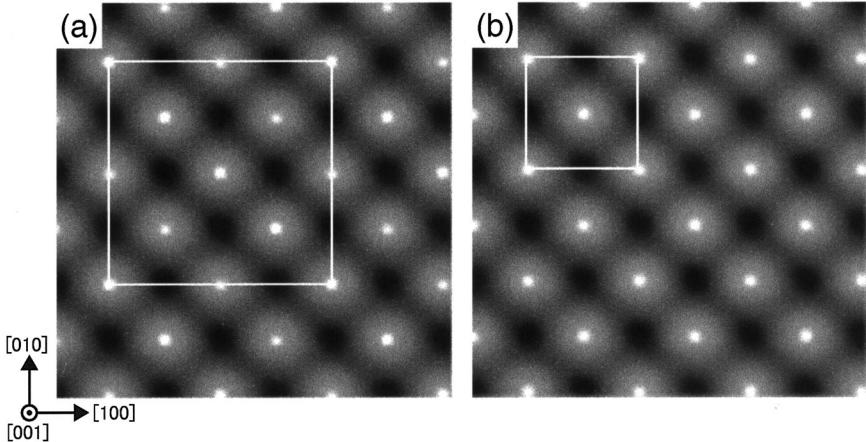
[110]方向にずらして重ね焼きした画像 (Fig. 6(a)) では高さの異なる2種類の原子が存在することがわかる。原子高さは[110]方向では同一であり[100][010]、[110]方向で交互に変化している。一方、[110]方向に重ね焼きした像 (Fig. 6(b)) では、全ての原子サイトがほぼ同じ高さとなっていることがわかる。また、Fig. 6(a)は(b)の2倍の大きさの単位胞を持っている。

以上の結果は、重ね焼きを行う方向により2種類の異なる重ね焼き像が得られることを示しており、Fig. 4のNC-AFM像がスピンに依存したコントラスト成分を含んでいることを意味している。

### 5.3 ラインプロファイルの解析

同様の方法を用いて、ラインプロファイルを重ね焼きした結果をFig. 7に示す。

[110]方向に重ね焼きしたラインプロファイル (Fig.



**Fig. 6** Superposition image calculated from Fig. 5. (a) The image superimposed along the [110] direction have a twice the period of the original one and their periodicity is equal to the magnetic unit cell. The corrugation amplitude alternatively changes in the [110], but atoms in the [110] direction always show the same corrugation amplitude. (b) The image superimposed along the [110] direction is a same periodicity as the original one.

7 (a)) では、原子サイトに対応する位置に 2 つのピークが存在し、その値が異なっている。一方、[110] 方向に重ね焼きしたラインプロファイル (Fig. 7 (b)) では、2 つのピークはほぼ同じ大きさである。この 2 つのラインプロファイルおよび前述の重ね焼き像から、NC-AFM 像のスピン配列は [110] 方向でスピンの向きが反平行であり、[110] 方向では平行であると推定され、この配列は期待される NiO(001) 表面のスピン配列に一致している。また、[100] 方向に重ね焼きを行ったラインプロファイル (Fig. 7 (c)) においても 2 つのピークに差が見られ、上述の結果を支持するものとなっている。

#### 5.4 形状非対称度

重ね焼きしたラインプロファイルに見られる原子高さの差を評価するために、形状非対称度 (topographic asymmetry) を導入する。形状非対称度は、

$$A = (A_1 - A_2) / (A_1 + A_2) \times 100 [\%]$$

と定義し、 $A_1, A_2$  は原子 1, 2 の高さを表すものとする。

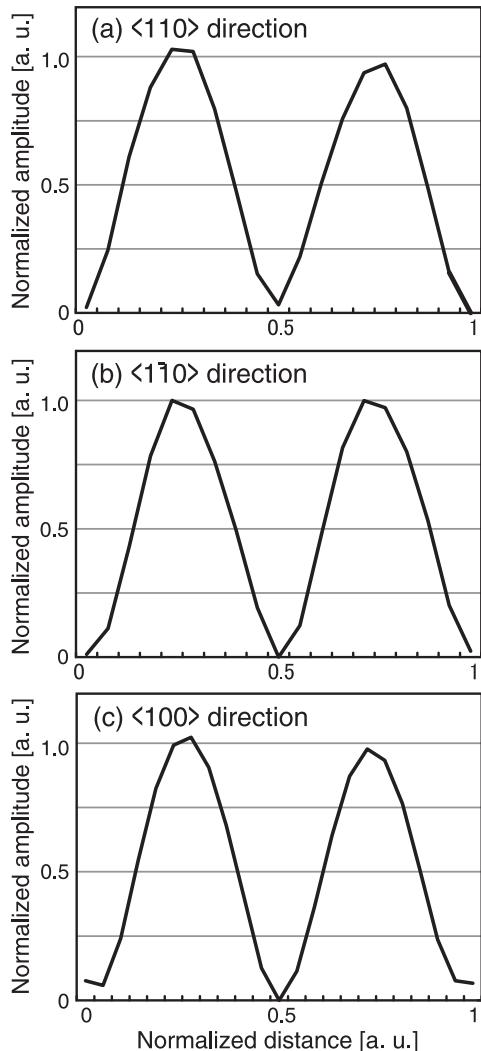
重ね焼きしたラインプロファイル (Fig. 7 (a), (b)) から計算した形状非対称度および Si 探針で観察した NC-AFM 像から得られた形状非対称度を Fig. 8 に示す。Fe 蒸着探針で得られた形状非対称度は、各方位でそれぞれ、 $A_{[110]} = 0.40\%$ 、 $A_{[110]} = 0.08\%$ 、 $A_{[100]} = 0.61\%$  であり、その大きさは重ね焼きを行う方位に依存していることがわかる。一方、Si 探針で得られた形状非対称度は、 $A_{[110]} = 0.12\%$ 、 $A_{[110]} = 0.05\%$ 、 $A_{[100]} = -0.07\%$  であり、その大きさが Fe 蒸着探針の [110] 方向の形状非対称度と同程度に小さく、重ね焼きを行う方位に対する依存性

も明瞭ではない。Si 探針の形状非対称度に若干のばらつきが見られるが、これは測定系の誤差および重ね焼きで生じた誤差に対応すると考えられることから、Fe 蒸着探針で見られた形状非対称度の大きさの違いは有意な差であるといえる。以上の結果より、重ね焼きを行う方位における形状非対称度の違いは探針・試料間の磁気的相互作用によるものであると考えられる。

#### 5.5 形状非対称度の起源

NC-AFM により検出可能な磁気的相互作用には 2 種類あると考えられるが、Ni 原子が明るく見えている場合には、探針先端の Fe 原子と Ni 原子間に交換相互作用が働く可能性がある。また、O 原子が画像化されている場合には、第 2 層にある Ni 原子が第 1 層の O 原子を介して探針先端の Fe 原子と相互作用する超交換相互作用が働いている可能性がある。第 2 層の Ni 原子のスピン配列も第 1 層と同じように反強磁性配列をしていることから、どちらの場合にも NC-AFM 像は反強磁性的なスピン配列を反映したものとなる。Fig. 4 ではどちらか一方の原子しか画像化されていないことがわかるが、NC-AFM 像から Ni あるいは O 原子のどちらであるかを特定することは現時点では困難である。これは、今後、分子あるいは原子の吸着した NiO 表面の観察や第一原理計算を行うことにより明らかにできると考えられる。

しかし、どちらの場合にも、スピンに依存した相互作用が NC-AFM 像に反映され、NiO(001) 表面の磁気的構造の原子分解能観察が可能となる。この形状非対称度の起源の詳細を明らかにするためには、相互作用の距離

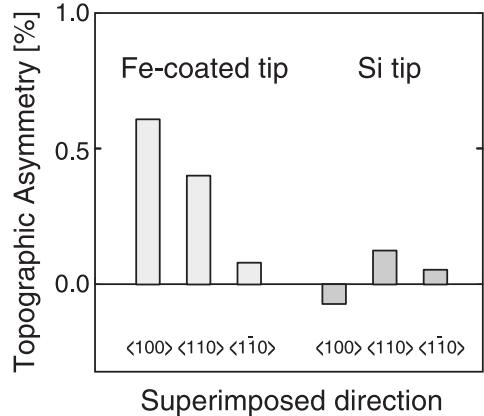


**Fig. 7** The line profiles superimposed along the [110] (a), the [1-10] (b), and the [100] direction (c). The horizontal axis presents the distance normalized by the lattice constant and the vertical axis is the superimposed corrugation amplitude normalized by the average value of the two peaks at the positions corresponding to the atom sites.

依存性の測定（力学的分光測定）や反強磁性体試料と強磁性体探針間の相互作用の理論的計算等が必要であると考えられる。

## 6. おわりに

磁性体探針・試料間に働く交換相互作用の検出を目的として、Fe 蒸着探針による NiO(001) 表面の原子像観察を行い、重ね焼き法を用いて原子像の解析を行った。



**Fig. 8** The comparison with the topographic asymmetry of the images obtained by Fe-coated and non-coated Si tip. The values of topographic asymmetry with the Fe-coated tip depend on the superimposed direction. The topographic asymmetry obtained by Si tip has no dependency on the superimposed direction and their value is small as that of the [110] direction with Fe-coated tip.

その結果、NC-AFM 像がスピンに依存したコントラストを含んでいることが明らかになった。これは、NC-AFM による磁気的な短距離相互作用の原子分解能測定が可能であることが示されたことを意味する。すなわち、試料表面からの漏洩磁場を検出する MFM よりも高分解能で、表面のスピン配列を直接観察する新しいSFM である交換相互作用力顕微鏡の実現への第一歩を踏み出したと言える。しかし、SN 比の向上等、克服しなければならない技術的課題が山積しているのが現状である。また、形状非対称度の起源の詳細についても不明であり、磁気的相互作用検出の物理的描像を明確にするために、第一原理計算等による磁気的相互作用の理論的な研究が必要である。交換相互作用力顕微鏡は力の測定を基本としており、有機・生体分子への応用も可能であることから、これまでにない磁気測定 SPM として大きな期待がもてる。

## 謝 辞

この研究の一部は科学技術振興事業団 (JST)・戦略的基礎推進事業 (CREST) の研究助成により行われた。山梨大学の堀 裕和氏にはデータ解析について有益なアドバイスをいただいた。また、画像解析用プログラムの一部は北海道大学ナノエレクトロニクス分野の事務官である加納美智代氏の作成によるものである。また、AFM 測定に耐えうる試料の劈開面の作製は、池田正幸、稻田明弘両氏の助言がなければ行えなかったものである。ま

た、CREST の研究プロジェクトについて支援してくださった各位に対し、ここに感謝の意を表すものである。

## 文 献

- 1) S. Heinze, M. Bode, A. Kubetzka, O. Pietzsch, X. Nie, S. Brügel and R. Wiesendanger: *Science* **288**, 1805 (2000).
- 2) 末岡和久, 武笠幸一: *日本応用磁気学会誌* **24**, 1385 (2000).
- 3) Y. Martin and H.K. Wickramasinghe: *Appl. Phys. Lett.* **50**, 1455 (1987).
- 4) A. Hang, H. Hallen, L. Harriott, H. Ness, H. Kao, J. Kwo, R. Miller, R. Wolf, J. Ziel and T. Chang: *Appl. Phys. Lett.* **61**, 1974 (1992).
- 5) J. Kirtley, M. Ketchen, K. Stawasz, J. Sun, W. Gallagher, S. Blanton and S. Wind: *Appl. Phys. Lett.* **66**, 1138 (1995).
- 6) R. O'Barr, M. Lederman and S. Schultz: *Appl. Phys. Lett.* **79**, 6067 (1996).
- 7) 木村道哉, 中村基訓, 末岡和久, 武笠幸一: *日本応用磁気学会誌* **25**, 1079 (2001).
- 8) J.A. Sidles, J.L. Garbini, K.J. Bruland, D. Rugar, O. Zügar, S. Hohen and C.S. Yannoni: *Rev. Mod. Phys.* **67**, 249 (1995).
- 9) D. Rugar, O. Zügar, S. Hohen, C.S. Yannoni and R.D. Kendrick: *Science* **264**, 1560 (1994).
- 10) D. Rugar, C.S. Yannoni and J.A. Sidles: *Nature* **360**, 563 (1992).
- 11) Z. Zhang, P.C. Hammel and P.E. Wiegert: *Appl. Phys. Lett.* **68**, 2005 (1996).
- 12) O. Zügar, S.T. Hohen, C.S. Yannoni and D. Rugar: *J. Appl. Phys.* **79**, 1881 (1996).
- 13) 佐藤勝昭: *固体物理* **34**, 681 (1999).
- 14) F.J. Giessbl: *Science* **267**, 68 (1995).
- 15) S. Kitamura and M. Iwatsuki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, L 145 (1995).
- 16) Y. Sugawara, M. Ohta, H. Ueyama and S. Morita: *Science* **270**, 1646 (1995).
- 17) S. Orisaka, T. Minobe, T. Uchihashi, Y. Sugawara and S. Morita: *Appl. Surf. Sci.* **140**, 243 (1999).
- 18) M. Bammerlin, R. Lüthi, E. Meyer, A. Baratoff, J. Lü, M. Guggisberg, Ch. Gerber, L. Howald and H.-J. Güntherodt: *Probe Microsc.* **1**, 3 (1997).
- 19) K. Mukasa, H. Hasegawa, Y. Tazuke, K. Sueoka, M. Sasaki and K. Hayakawa: *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 2692 (1994).
- 20) K. Mukasa, K. Sueoka, H. Hasegawa, Y. Tazuke and K. Hayakawa: *Mater. Sci. Eng. B* **31**, 69 (1995).
- 21) K. Nakamura, H. Hasegawa, T. Ohuchi, K. Sueoka, K. Hayakawa and K. Mukasa: *Phys. Rev. B* **56**, 3218 (1997).
- 22) K. Nakamura, T. Ohuchi, H. Hasegawa, K. Sueoka, K. Hayakawa and K. Mukasa: *J. Mag. Soc. Jpn.* **23**, 724 (1999).
- 23) K. Nakamura, T. Ohuchi, H. Hasegawa, K. Sueoka, K. Hayakawa and K. Mukasa: *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, 6575 (1998).
- 24) K. Nakamura, T. Ohuchi, H. Hasegawa, K. Sueoka, K. Hayakawa and K. Mukasa: *Appl. Surf. Sci.* **140**, 366 (1999).
- 25) K. Nakamura, T. Ohuchi, H. Hasegawa, K. Sueoka, K. Hayakawa and K. Mukasa: *Appl. Surf. Sci.* **142**, 433 (1999).
- 26) H. Ness and F. Gautier: *Phys. Rev. B* **52**, 7352 (1995).
- 27) A.S. Foster and A.L. Shulger: *Surf. Sci.* **490**, 211 (2001).
- 28) O.K. Andersen: *Phys. Rev. B* **12**, 3060 (1975).
- 29) M. Guggisberg, M. Bammerlin, Ch. Loppacher, O. Pfeiffer, A. Abdurixit, V. Barwich, R. Bennewitz, A. Baratoff, E. Meyer and H.-J. Güntherodt: *Phys. Rev. B* **61**, 11151 (2000).
- 30) T. Uchihashi, Y. Sugawara, T. Tsukamoto, M. Ohta, S. Morita and M. Suzuki: *Phys. Rev. B* **56**, 9834 (1997).
- 31) H.P. Rooksby: *Acta Cryst.* **1**, 226 (1948).
- 32) K. Hayakawa, K. Namikawa and S. Miyake: *J. Phys. Soc. Jpn.* **31**, 1408 (1971).
- 33) H. Hosoi, K. Sueoka, K. Hayakawa and K. Mukasa: *Appl. Surf. Sci.* **157**, 218 (2000).
- 34) H. Hosoi, K. Kimura, K. Hayakawa, K. Sueoka and K. Mukasa: *Appl. Phys. A* **72**, S 23 (2001).
- 35) W. Allers, S. Langkat and R. Wiesendanger: *Appl. Phys. A* **72**, S 27 (2001).
- 36) 堀内繁雄: “高分解能電子顕微鏡 原理と利用法” (共立出版, 1988) p. 207.