

ニアフィールド光学顕微鏡の歴史と将来

河田 聡・井上 康志

「光学」誌には1992年に一度、「ニアフィールド顕微鏡の光学」と題してレビューを書いた¹⁾。その頃はまだ大した注目も集めなかったことと思うが、その後5年を経て、現在では「ニアフィールド光学」は広く先端の科学者・技術者の知るところとなったと思われる。1997年には、文部省の科学研究費の重点領域研究のテーマのひとつとしても採択され、通産省でも次世代の光メモリー基盤技術のひとつとしてニアフィールド・メモリーの研究が開始されている。残念ながら、この新しい光学の研究に日本光学会のメンバーはあまり多くは参画していない。しかし、今日のニアフィールド光学の隆盛の基礎を作ったのは、Dieter PohlとDaniel Courjonという2人の光学研究者であり、現在においても、その研究はおおむね古典的な電磁論すなわち光学の範囲に収まっている。

今回は、より多くの光学研究者がこの分野に興味を持たれることを期待して、この解説を書くことにした。現在、先端の自然科学研究や産業界においてニアフィールド光学への期待はとても大きく、これを応用したナノ～メゾ・スケールのサイエンスとエンジニアリングの研究が始まりつつある。しかし、その基礎となるinstrumentationの研究開発はまだまだその初期的段階であり、これからの参画の余地が大きい。

図1に、ニアフィールド光学の研究論文の件数の推移を示した。1984年以前にも論文数があるのは、全反射や表面プラズモンポラリトンなどの表面光学がその中に含まれているからである。

1. プロープの歴史

ニアフィールド光学顕微鏡のinstrumentationという、そのほとんどがプロープの話になる。ニアフィールド光学顕微鏡は、プロープ、走査機構、光源・検出器および制御・表示装置から構成されるが、そのうち、走査および制御・表示部については、走査トンネル顕微鏡 (STM) や原子間力顕微鏡 (AFM) 等の走査プロープ顕微鏡が、また、光源・検出部については従来の光学顕微鏡技術がそのまま利用でき、それらは実際に実用化されている技術だからである。すなわち、ニアフィールド光学顕微鏡の能力はまさにプロープにより決定づけられ、ニアフィールド光学顕微鏡の歴史は、そのままプロープの歴史でもある。

これまでに、何種類ものプロープが提案されているが、その役割は基本的には同じである²⁾。図2(a)に示すように、光の波長より微細な構造に光が照射されると、試料構造により入射光は散乱され、その散乱場内には、伝搬光成分だけでなく、試料表面のニアフィールドに局在する非放射なエバネセント場が含まれている³⁾。従来の光学顕微鏡 (ファーフィールド光学顕微鏡) では、このうち空間中を伝搬する成分のみを対物レンズにより集光して結像させるため、半波長以下の構造を分解することは不可能であった。回折限界といわれるものである。図2(b)に示すように、微小な散乱体をエバネセント場内に挿入すると、エバネセント場は再散乱され、伝搬光に変換される。この微小散乱体を試料表面近傍で走査しながら散乱光を検出することによって、試料構造に局在するエバネセント場が可視化される。これがニアフィールド光学顕微鏡の原理である。局在場であるエバネセント場を画像化するため、回折限界を超える分解能が

大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻 (〒565 吹田市市田丘 2-1)

E-mail: kawata@ap.eng.osaka-u.ac.jp

実現される。これまでの説明を整理すると、プローブは、試料近傍に局在したエバネセント場を散乱により伝搬光に変換する「コンバーター」といえる。あるいは、逆にプローブに伝搬光を入射すると、プローブがエバネセント場を生成し、微細な試料構造はそのエバネセント場を伝搬光にカップル・アウトすると考えることもできる。このとき、プローブは、エバネセント場「ジェネレーター」といえる。

プローブをエバネセント場ジェネレーターであると考えると、いろいろなプローブが思いつく。波長より短い間隔の回折格子は、エバネセント場化した回折場をフィールドに発生する。これを試料表面のニアフィールドに近づけると、試料の微細構造が作るエバネセント場が散乱されて、ファーフィールドへ伝搬する。この原理は、1963年に Lukosz によって提案実験されている⁴⁾。試料構造と回折格子のモアレによる空間周波数のシフトダウンと考えることもできる⁵⁾。われわれは、同心円上の回折格子プローブを提案試作し、マイクロ波を使って走査型 NSOM の実験を行った⁵⁾。

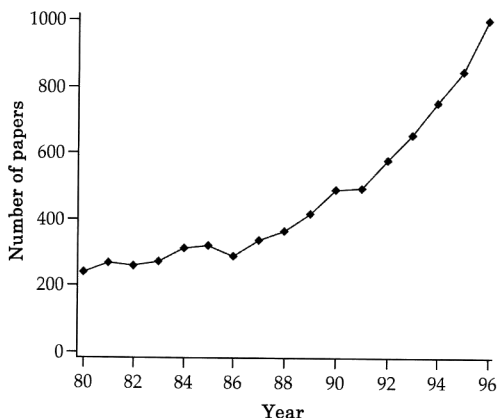


図1 ニアフィールド光学の論文数の推移 (INSPEC A および B の調べによる)。

1928年, Syngé は不透明な板あるいはフィルムに設けた微小開口 (図3(a)) を用いることによって, 回折限界を超える光学顕微鏡を実現できることを提案した⁶⁾。微小開口は Babinet の原理から, 先に述べた微小散乱体と同じ散乱場を与えると考えられるので⁷⁾, エバネセント場の伝搬光へのコンバーターとして同様の役割を果たす (あるいはジェネレーター: 微小開口型プローブではこの使い方が一般的である)。Syngé は 10 nm 径の微小開口を走査しながら試料を照明し, 透過光あるいは蛍光をレンズにより集光することで 10 nm の分解能が達成できると報告している。その原理は現在のニアフィールド光学顕微鏡そのものである。

ニアフィールド光学顕微鏡の最初の実験は, Ash らによって, この原理を基にして実現した⁸⁾。マイクロ波共振器の一端に微小開口を設け, 共振器の Q 値の変化を画像化し, $\lambda/60$ の分解能を達成した。可視光域での実験は, 1982年に Pohl らにより初めて行われた⁹⁾。このとき用いられたプローブは図3(b)に示すように, 先端を研磨した石英柱に, クロム, アルミニウム, 金を蒸着した上で, 先端に微小開口を施したものである。平板上の微小開口と比べると, 走査性で優れており, 現在の光ファイバー型プローブの原型といえよう。このとき分解能は $\lambda/20$ が達成されている。

ところで, 現在広く用いられているプローブは, 先鋭化した光ファイバーに金属薄膜 (多くはアルミニウム) をコーティングしその先端に微小な開口を開けたものである。その構成は導波管と同じである。電磁気学の教科書にあるように, 導波管には遮断周波数があり, 導波管の半径 a に対して導波管内を伝搬できる電磁波の最も短い波長は $3.413a$ (TE_{11} モード) であることから¹⁰⁾, 光ファイバープローブでは $2.26a$ より短い波長は伝搬しない。したがって, コーティング材料が完全導体なら, 波長より細いファイバー中を光は伝搬することはできない。完全導体でなければ, プローブの形状が波長程度以

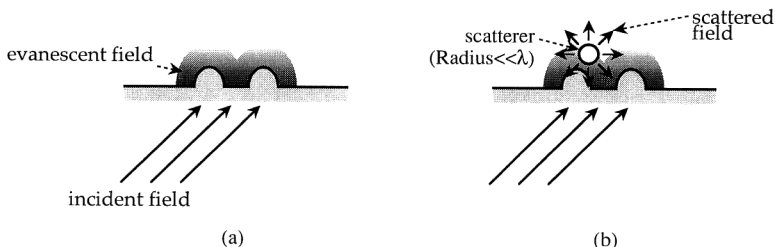


図2 微細構造に局在するエバネセント場(a)とプローブとのカップリング(b)。

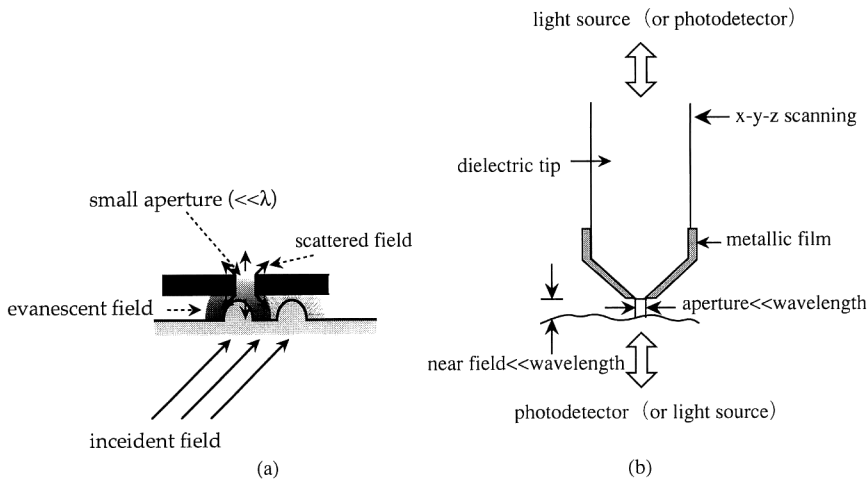


図3 Synggeにより提案された微小開口プローブ(a)とPohlにより提案された微小開口付き誘電体プローブ(b).

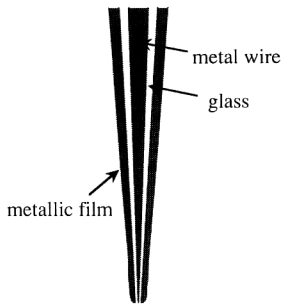


図4 同軸導波管タイプのプローブ。

下では、導波光の一部が微小開口へと向かうが、コーティング金属によって吸収を受けることになる。金属の skin depth を考慮すると、理論的には微小開口の開口径は～数十 nm 程度が限界である¹¹⁾。

Courjon や Reddick らは金属薄膜をコーティングしない誘電体プローブを独立に提案した。全反射光学系により試料を照明し、試料上でのエバネセント場を金属コートしていない誘電体プローブでカップリングして像を得た^{12,13)}。金属がコートされていないため、信号光を効率よく導波できる反面、プローブ側方からの光をもカップリングするため、真の超解像性が得られない。

それでは微小開口型プローブでは、光を効率よく伝搬でき、かつ高分解能を実現することはできないのであろうか？ 図4に示す同軸導波管を用いれば可能である。同軸導波管を伝搬する電磁場のうち、動径方向に振動する電場成分は、自由空間中を伝搬する電磁場と同じ伝搬定数を有している。したがって、同軸導波管において

は、管内を伝搬する電磁場の伝搬定数はあらゆる振動数に対して実数であり、それはこの構造の導波管が遮断周波数を持たないことを意味している。すなわち、導波管径が無限小であっても、波長による制限なく電磁場は伝搬できる。Fischer らは、コアを銀で、クラッドをガラスで構成したファイバーを先鋭化したこの同軸プローブの作製に成功した¹⁴⁾。彼らはチップとは逆の端面から白色光をこのプローブに導入し、チップ先端からエアリーディスク形状を有する回折限界スポット状に光が放射されていることを確認している。その機構は、プローブ先端付近でガラスと金属コアとの界面で非放射場である表面プラズモンが励起され、金属先端に向かって伝搬し、先端で放射場に再変換されることによる。さらに、形成されているスポットは先端に向かって緑色から赤色へと変化しているが、これは表面プラズモンのダンピングの分散によるものである。また、理論面からは、金属細線を用いたプローブの解析が小林らにより行われている¹⁵⁾。

また、エネルギーを微小開口まで効率的に伝送する方法として、Lewis, Kopelman らのグループにより、励起子を利用するプローブが考案されている¹⁶⁾。先鋭化したマイクロピペットの先端にアントラセンを結晶成長させ、この結晶に紫外光を照射することで励起子を生成し、この励起子によりエネルギーを伝搬し、微小開口部において励起子が再結合することで、蛍光を発生させる。この蛍光を微小光源として用いるものである。励起子は分子に強く束縛されて分子内を伝搬するため、波長よりも狭い領域でも効率よくエネルギーが伝搬する。

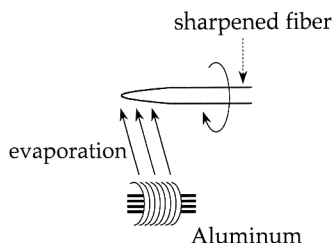


図5 微小開口の作成法。

Lewisらはまた、エレクトロルミネセンス¹⁷⁾や外部励起によるフォトルミネセンス¹⁸⁾を用いた微小光源の開発も行っている。

さて、微小開口プローブで最も一般的なものは、先にも述べたとおり、光ファイバーを用いたプローブである。その作製方法は、Bell研にいたBetzigが考案した方式¹⁹⁾が広く普及している。光ファイバーの一部をCO₂レーザー（あるいはニクロム線）により加熱しながら、張力を加えてファイバーを裁断し、プローブの先鋭化を行う。加える張力およびCO₂レーザーの加熱時間をパラメーターとすることによって、先端の形状を制御することができる。その後、真空チャンバー内で、プローブを回転させながら金属蒸着する（図5）。金属膜の膜厚は、表皮深さを考慮し、アルミニウムでは200 nm程度にするのが一般的である¹⁹⁾。開口は、プローブの先端が蒸着源から蔭になる方向から蒸着を行うことによって、自動的に設けられる。一方、蔣、大津らは、フッ化水素を用いたエッチング法も提案し、先端がきわめて鋭く尖ったプローブの写真を発表した²⁰⁾。この方式では、コア内のGeドープ量を変化させることでチップ形状の制御が可能である。

2. アパーチャーレス・プローブ

さて、チップ先端に微小開口をもたないアパーチャーレス・プローブが、ここ数年、注目を集めている^{21-23, 30, 35)}。試料構造に局在したエバネセント場をプローブの先端が散乱させて伝搬光に変換し、それを外部光学系により検出する。その原理から散乱型プローブとも呼ばれる²¹⁾。電磁論的にみると、微小な散乱体を試料構造近傍においてナノメートルの精度で動かしたときにナノメートルオーダーで境界条件が変わることから、ファフィールドにおける散乱場強度も変化すると説明できる。この方式は、

- (1) 分解能が先端径で決まるため、プローブ先端を先鋭化するだけで、高分解能化が図れる。

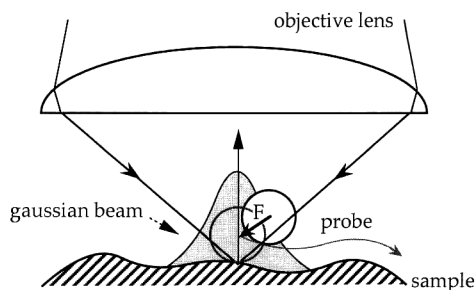


図6 レーザー・トラッピングによるプローブ走査を用いたニアフィールド光学顕微鏡。

- (2) 導波路系を用いず、照明および検出光学系は開口数の高い外部光学系を利用することができるので、高い光利用効率を得られる。
- (3) 金属コーティングを施す必要がないため、プローブの細線化が容易で、深い凹凸に追従できる。
- (4) プローブ内を導波させないため、紫外域～可視域～赤外域にわたって広いスペクトル範囲で、計測することができる。

さらに、プローブの材質として金属を用いると、

- (5) 金属は、誘電体に比べ1桁以上散乱効率が高いため、明るい散乱光が得られ、SN比の向上が図れる。

ただし、

- (6) プローブ先端以外の試料からの迷光成分を除去する必要がある。

迷光成分を除去するためには、(1) プローブを微小振動させ、プローブ先端での散乱光のみを調整しロックイン検出するか^{21, 22)}、(2) 暗視野照明光学系を用いる。

ところで、図2(b)に示したニアフィールド光学顕微鏡は、プローブをレーザー・トラッピング法により捕捉することで実現できる。筆者のグループは、近赤外レーザーによりトラップした微小誘電体球を試料表面に接触させながら走査するニアフィールド光学顕微鏡（図6）を考案・試作した²³⁾。プローブからの散乱光はトラッピングに用いた対物レンズを通して検出する。プローブの捕捉力がピコニュートンオーダーで非常に微弱であるため、柔らかい試料の観察、とくに生体試料に適している。最近では、直径40 nmの金粒子をプローブに用いたニアフィールド光学顕微鏡を試作し、粒子径程度の分解能を達成した²⁴⁾。より微小な微粒子を用いることによって分解能が向上する。プローブ径が小さくなったことによる散乱光の減少は、光の散乱効率の高い金微粒子を用いることによって解決した。Malqvistらは

LiNbO₃の微小球を近赤外レーザーにより3次元トラップし、またトラッピングレーザーによりLiNbO₃結晶から第二高調波を発生させ、微小光源とした光学顕微鏡を考案、試作している²⁵⁾。

レーザー・トラッピングは水中では可能ではあるが、空気中や真空中では容易ではない。その場合には、金属探針がより適している。金属プローブは、金属ワイヤーに電解研磨や機械研磨を施すだけで作製することができ、非常にシンプルである。図7に自作したプローブの写真を示す²⁶⁾。また、金属プローブを用いたニアフィールド光学顕微鏡の構成を図8に示す²⁷⁾。照明光は、誘電体等の透明な試料に対しては全反射条件で²⁷⁾、また半導体等の不透明試料に対しては鏡面反射光が直接検出されない角度から²⁸⁾、試料に入射する。プローブ先端での散乱光は、対物レンズや対物鏡によって検出器に集光される。

金属プローブが試料表面上に作る電磁場分布を有限差

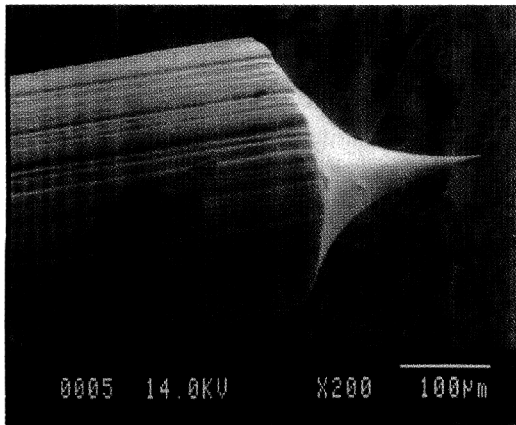


図7 電解研磨により作製したプローブ。先鋭化したタングステンワイヤーの先端に金がコーティングされている。

分時間領域法により求めた結果を図9に示す(電場の振動方向は図と同一面内にある:P偏光)²⁹⁾。円錐状の金属プローブ(PtIr)が誘電体の界面近傍(8nm)にあると、プローブ先端近傍に入射スポットより十分小さなスポットが形成される。スポット径はプローブの先端径にほぼ等しく、プローブが存在しないときに比べ、スポット中心部の電場強度は数十倍増強される。この局所的電場増強効果はローカルな表面プラズモン励起(LSP: localized surface plasmon)によるものと考えられる。

Fischerらは、表面プラズモンを用いたアパーチャーレス・プローブを提案している³⁰⁾。図10に示すようなカバーガラスの角を切り出した4面体に金を蒸着したプローブにおいて、S₁₂およびS₁₃面に照明光を導入し、表面プラズモンを励起する。励起された表面プラズモンは稜線K₁まで伝搬し、稜線K₁において、1次元方向に伝搬する表面プラズモンに変換された後、稜線K₁に沿って、プローブ先端へと伝搬する(金属細線上を表面プラズモンが伝搬するとみなすことができる¹⁵⁾)。プローブ先端まで伝搬した表面プラズモンは、局所的表面プラズモンをプローブ先端に励起する。このプローブにおいては、表面プラズモンが2次元から1次元、0次元へとそのディメンジョンが順に閉じ込められていく。このプローブの大きな特徴としては、S₁₂面およびS₁₃面が入射波に対し、ストリップ線路として働くことで、先の同軸型プローブと同様、稜線K₁近傍(≪波長)にまで入射波が伝搬でき、表面プラズモンを効率よく励起することができる点が挙げられよう。彼らは、このプローブを用いて、1nmの分解能を達成している³¹⁾。

これまで述べてきたプローブでは、微小開口形であれ、アパーチャーレス形であれ、信号光をプローブから離れた位置で検出することから、プローブはパッシブな

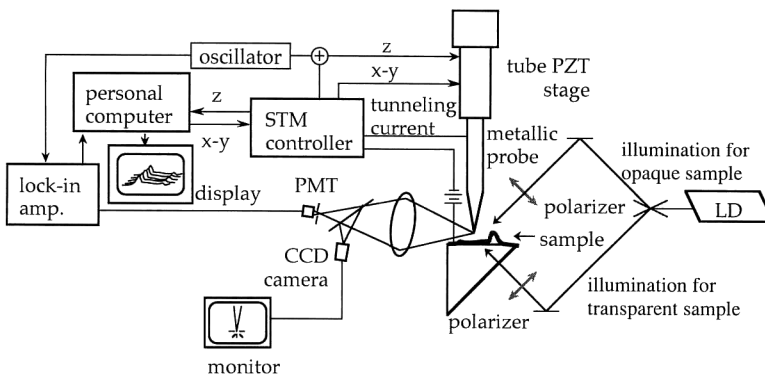


図8 金属プローブを用いたニアフィールド光学顕微鏡の構成。

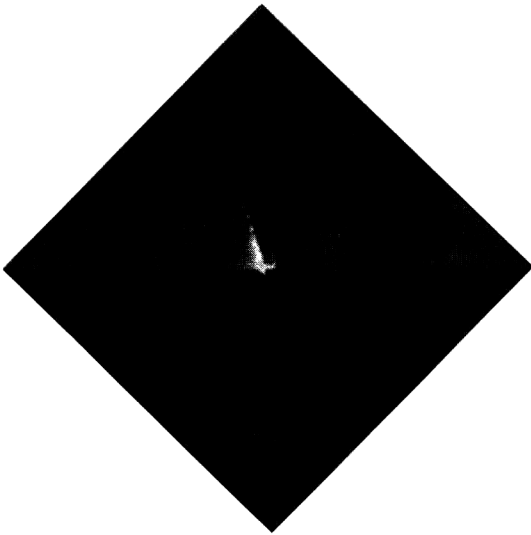


図9 PtIrプローブにより生成される電場強度分布.

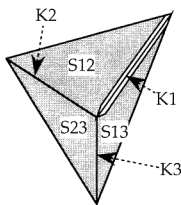


図10 4面体プローブ.

トランスミッター (コンバーター) といえる。これに対し、Danzebrink, Fischerらはn型半導体 (シリコン) 製のカンチレバーに2方向から金属を蒸着し、それぞれを電極とし、プローブ先端での散乱光により励起されたフォトカレントを直接検出するプローブの提案・試作を行った³²⁾。このプローブは、チップ先端の散乱光をプローブにより直接検出するアクティブ・プローブと見なせ、散乱光を効率的に検出することができ、また、装置をシンプルに構成できるという長所を有している。同様のフォトディテクターを内蔵したカンチレバーは、NTTのグループにおいても研究が進められている³³⁾。

3. マルチファンクショナル・プローブ

ニアフィールド光学顕微鏡は、プローブを試料のニアフィールド ($d < a \ll \lambda$: プローブ試料間距離 d ; 開口径あるいは先端径 a ; 波長 λ) に近づけて走査することが大原則である。プローブの位置を制御するためには、微小開口型のプローブでは制御プローブと試料間に働くシ

ェアフォース³⁴⁾を検出して、それを一定になるようにする方法が一般的である。アパーチャーレス・プローブでは、STMの探針やAFMのカンチレバーをそのまま使うことができる。位置制御はSTMあるいはAFMによって自動的に行われる。このとき、STM像やAFM像あるいは他のフォース像が、ニアフィールド光学像と同時に計測できる。このような、マルチファンクショナルなプローブ機能は、ニアフィールド顕微鏡に必ず求められる機能である。第1には、ニアフィールド光学像は、プローブの距離に依存しており、本質的に光学像とトポグラフィー情報を共に含んだ画像になっているので、STM像やAFM像による補正が必要であり、第2に、光学像 (スペクトロスコピー) だけではなく、トンネル電流像や原子間力像も同時に知ることは、測定試料の表面を分析・理解する際に非常に有用であるからである。

van Hulstらは、SiN製のAFMのカンチレバーをNSOMのプローブとして使い、AFMとNSOMの同時観察に最初に成功した³⁵⁾。プローブには暗視野照明光学系により試料表面に生成したエバネセント場をカンチレバーのチップ先端により散乱させる。チップからの散乱光は対物レンズを用いて集光し、ピンホールを通して、光電子増倍管により検出する。カンチレバーの走査および制御はAFMモードをそのまま使用する。この装置を用いて、有機薄膜の吸収分布の画像化を行い、ステップレスで30 nmの分解能を達成している。また、チャンネル型導波路中を伝搬するモードを導波路表面に生じるエバネセント場をチップにより散乱させることから観察している³⁶⁾。

Wickramasingheらは、AFMに干渉計を組み合わせたニアフィールド顕微鏡を試作した³⁷⁾。この光学系ではシリコンのAFMプローブの先端からの散乱光を、干渉計を用いることによって位相検出する。干渉計測法を用いることにより、プローブ先端および試料間に働く双極子-双極子相互作用を高感度検出することが可能となり、ニアフィールド光学顕微鏡ではじめてナノメートル分解能を達成したと報告している³⁸⁾。

筆者らは、金属探針を用いることによってニアフィールド光学像とSTM像の同時観察に成功した²⁷⁾。金属プローブ-試料間を流れるトンネル電流によるプローブの位置制御を行い、プローブを試料に対して1 nm以内に近づけて走査することができる。誘電体回折格子表面上に形成された高次回折光間の干渉縞や微細構造によるエバネセント場の局在の可視化²⁷⁾、および生体試料の観察

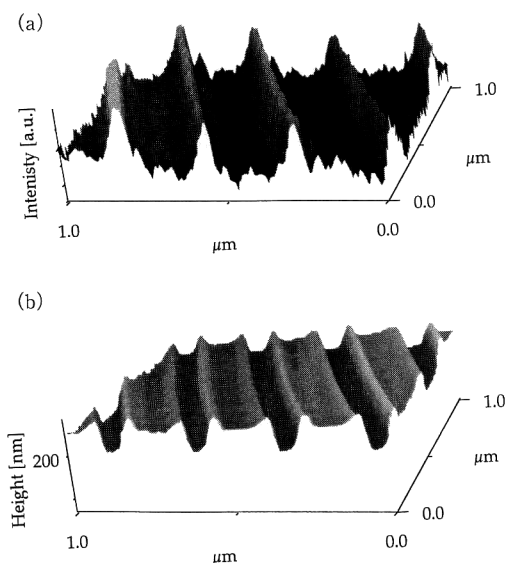


図 11 試作装置で得られた回折格子像（シリコン製）。(a) ニアフィールド光学像，(b) STM 像。

を行っている³⁹⁾。図 11 に、240 nm 周期のシリコン製の回折格子を STM-NSOM 同時観察した結果を示す²⁸⁾。波長 670 nm の半導体レーザーからの光を、レンズを用いてスポット径 20 μm 程度に絞って、試料の照明を行っている。(a)がニアフィールド光学像，(b)が STM 像で、走査範囲は 1 μm \times 1 μm ，走査ピッチは 8 nm \times 8 nm である。この画像から、ニアフィールド光学像は STM 像（トポグラフィック像）とは異なるコントラストを与えること、および回折格子のエッジ部において電場の局在が強くなっていることが観察される。この局在の原因は、エッジ部の構造が波長に比べて微細であるため、すなわち、この部分が高い空間周波数成分を有していることで、散乱場中に含まれるエバネセント場成分が他の領域よりも支配的になるからと考えられる。

Knoll らは、STM-NSOM において、金属探針先端の光吸収による熱的な探針の膨張で起因するトンネル電流の変化を画像化することに成功している⁴⁰⁾。得られる画像は、試料の分布を STM より高いコントラストで分布を示している。これは、入射光によって金属探針先端では局所的な表面プラズモンが励起されることにより散乱場が増強され、さらに試料表面が金属コートされているため試料表面の表面プラズモンが励起された強い相互作用系が構成されているためであると考えられる。入射光は、チョッパーにより強度変調を与え、信号はロックイン検出される。

菅原らは原子分解能を有する原子間力顕微鏡を用いることで、エバネセント場を力勾配として検出できることを明らかにした⁴¹⁾。プリズム表面上に全反射照明系によりエバネセント場を生じし、Sb ドープの導電性 Si によるカンチレバーをエバネセント場中に挿入すると、プローブ先端で散乱された光子が探針先端で吸収され、表面光起電力が生じる⁴²⁾。これにより、探針表面のエネルギー状態が変化し、探針に働く力勾配として検出される。この検出原理は、探針先端が微小なフォトダイオードとして働くこととみなすことができる。ニアフィールド光学顕微鏡としては新しい形態で、プローブ先端での光の場の変化をその先端部で直接観察していることから伝搬等による光の損失がなく、特に高分解能化には優れた方式であると考えられる。

さて、ニアフィールド光学顕微鏡は、光のニアフィールド内にプローブと試料が近接して存在することから、プローブがある場合とない場合で電磁場分布は大きく異なる⁴³⁾。したがって、測定条件が変われば得られるニアフィールド光学像も大きく変化する。そこで、筆者らはプローブと試料間の距離を可変に制御できる NSOM を試作した⁴⁴⁾。実験結果より、先端径 50 nm のアパーチャーレス金属プローブを用いて、その位置が試料表面から 10 nm までの距離においてはニアフィールド光学像はあまり変化せず、10 nm 以上試料から離れたと微細な構造のコントラストが失われていくことが観察された。今後は、複数の距離で得られた画像のデータセットから物質の表面の分布を解く逆問題的手法の開発が求められる⁴⁵⁾。

4. ニアフィールド光学の将来

ニアフィールド光学顕微鏡の核であるプローブを中心にして、ニアフィールド光学顕微鏡のこれまでの研究について話を進めてきた。特に、従来の微小開口を有する光ファイバプローブだけではなく、最近注目を集めているアパーチャーレスタイプのプロープについても詳述した。また、他の走査プローブ顕微鏡とのコンビネーションにより多機能化を図ったものや、検出信号として光以外を利用することで高感度化を達成した方式について述べた。さらに、プローブ-試料間距離を任意に走査し、複数の画像を得、その画像から、幾何学的構造と光学的特性分布を分離する可能性について述べた。これについては、現在ニアフィールド光学で問題となっている、光学像に幾何学的構造が重畳するアーティファクトの問題⁴⁶⁾を解決する有効な方法と考えられる。

世界的な流れから見ると、90年代前半にニアフィールド光学の研究のイニシアティブをとっていた Betzig が Bell 研を去ってから、アメリカでは光学（装置、理論）の立場からの研究アプローチはすこし滞っているように思われる。しかし、応用面からは、凝縮系の物理や光化学の分野などにおけるサブミクロン領域の観察手法として、期待はむしろ広まりつつある。比較的早い段階でトポメトリックス社がニアフィールド光学顕微鏡を発売したことや、Betzig が単分子蛍光計測、量子井戸構造の分光計測等の応用面で優れた業績を挙げたことが要因であろう。一方、ヨーロッパでは、どちらかというところ、光学あるいは物理的側面からの基礎研究としてのアプローチが主で、学問の体系化が現在進められている、という印象を受ける。スイス、ドイツ、フランス、オランダ、ベルギー、デンマーク、スペイン等の多くの国の研究機関で、ニアフィールド光学の研究が遂行されている点も特筆されよう。日本では、80年代後半から東工大や阪大を中心として基礎的研究が進められているが、現在は応用研究の人口のほうが多い。実際、トポメトリックス社の NSOM 装置の売れ行きは日本において特に好調である。

さて、これからのニアフィールド光学は、計測された画像から真の光学像のみを取り出すための逆問題、さらにその基礎となるニアフィールド光学顕微鏡の結像理論の解明等の理論の体系化が望まれる。ニアフィールド光学では、試料およびプローブのディメンションがナノメートル、サブナノメートル（オングストローム）というメソスコピックな領域であるため、Maxwell 方程式および量子力学の間を橋渡しをする新しい光科学の確立に寄与することも考えることができよう。

一方、装置開発の観点からは、現在なお、ユーザーが満足できるだけの分解能を達成しているとはいえない。分子分解能でさえ達成し得ておらず、特にプローブと光学系の開発が重要である。今後、超短パルスレーザーとニアフィールド光学を組み合わせることで、時間および空間的に閉じ込められた領域での物理的・化学的現象を計測することも興味深い。局所的な場の増強効果を利用すると多光子過程との相性もよく、それに見合った装置開発がさらに望まれるであろう。産業面からは、特に高密度光メモリーへの期待が大きい。Guerra のフォトンネリング顕微鏡⁴⁷⁾を原理とする SIL (solid immersion lens) を用いた光磁気ディスク⁴⁸⁾は、来年はじめには TeraStor 社から製品化される予定である。この方法は微小開口を持たないニアフィールド光学メモ

リーの一種であり、将来のより高密度光メモリーの開発への第一歩と位置づけることができるかもしれない。

文 献

- 1) 河田 聡：“ニアフィールド顕微鏡の光学”，光学，**21** (1992) 766-779.
- 2) 河田 聡：“プローブで観察するニアフィールド・レーザー顕微鏡”，レーザー研究，**24** (1996) 1038-1044.
- 3) E. Wolf and M. Nieto-Vesperinas: “Analyticity of the angular spectrum amplitude of scattered fields and some of its consequences,” J. Opt. Soc. Am. A, **2** (1985) 886-889.
- 4) W. Lukosz and M. Marchand: “Optischen Abbildung unter erschreitung der beugungsbedingten Auflösgrenze,” Opt. Acta, **10** (1963) 241.
- 5) 河田 聡：“超解像を実現する回折格子”，O plus E, No. 154 (1992) 73-80.
- 6) E. H. Syngé: “A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region,” Philos. Mag., **6** (1928) 356-362.
- 7) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 6th ed. (Pergamon Press, Oxford, 1980).
- 8) E. A. Ash and G. Nicholls: “Super-resolution aperture scanning microscope,” Nature, **237** (1972) 510-512.
- 9) D. W. Pohl, W. Denk and M. Lanz: “Optical stethoscopy: image recording with resolution 1/20,” Appl. Phys. Lett., **44** (1984) 651-653.
- 10) 例えば、内藤喜之：マイクロ波・ミリ波工学（コロナ社，1986）。
- 11) M. A. Paesler and P. J. Moyer: *Near-field Optics* (John Wiley and Sons, New York, 1996).
- 12) D. Courjon, K. Sarayeddine and M. Spajer: “Scanning tunneling optical microscopy,” Opt. Commun., **71** (1989) 23-28.
- 13) R. C. Reddick, R. J. Warmack and T. L. Ferrell: “New form of scanning optical microscopy,” Phys. Rev. B, **39** (1989) 767-770.
- 14) U. Ch. Fischer and M. Zapletal: “The concept of a coaxial tip as a probe for scanning near field optical microscopy and steps towards a realisation,” Ultramicroscopy, **42-44** (1992) 393-398.
- 15) 高原淳一，山岸 傑，合中直樹，森本朗裕，小林哲郎：“次元光波伝送路としての近接場光学顕微鏡プローブの解析”，第44回応用物理学関係連合講演会 (1997) p. 863.
- 16) K. Lieberman, S. Harush, A. Lewis and R. Kopelman: “A light source smaller than the optical wavelength,” Science, **247** (1990) 59-61.
- 17) N. Kuck, K. Lieberman, A. Lewis and A. Vecht: “Visible electroluminescent subwavelength point source of light,” Appl. Phys. Lett., **61** (1992) 139-141.
- 18) A. Lewis and K. Lieberman: “Near-field optical imaging with a non-evanescently excited high-brightness light source of sub-wavelength dimensions,” Nature, **354** (1991) 214-216.
- 19) E. Betzig, J. K. Trautman, T. D. Harris, J. S. Weiner and R. L. Kostelak: “Breaking the diffraction barrier: optical microscopy on a nanometric scale,” Science, **251** (1991) 1468-1470.
- 20) S. Jiang, N. Tomita, H. Osawa and M. Ohtsu: “A photon scanning tunneling microscope using an AlGaAs laser,” Jpn. J. Appl. Phys., **30** (1991) 2107-2111.
- 21) Y. Inouye and S. Kawata: “Near-field scanning optical microscope using a metallic probe tip,” Opt. Lett., **19**

- (1994) 159-161.
- 22) P. Gleyzes, A. C. Boccara and R. Bachelot: "Near field optical microscopy using a metallic vibrating tip," *Ultramicroscopy*, **57** (1995) 318-322.
 - 23) S. Kawata, Y. Inouye and T. Sugiura: "Near-field scanning optical microscope with a laser-trapped probe," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) L1725-L1727.
 - 24) T. Sugiura, T. Okada, Y. Inouye, O. Nakamura and S. Kawata: "Gold-bead scanning near-field optical microscope with laser-force position control," *Opt. Lett.* (in press).
 - 25) L. Malmqvist and H. M. Hertz: "Two-color trapped-particle optical microscopy," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 853-855.
 - 26) 河田 聡: "近接場ナノ光学: 波長の壁を超えた新しい光技術", *パリティ*, **12** (1997) 23-29.
 - 27) Y. Inouye and S. Kawata: "A scanning near-field optical microscope having scanning electron tunnelling microscope capability using a single metallic probe tip," *J. Microsc.*, **178** (1995) 14-19.
 - 28) Y. Inouye and S. Kawata: "Reflection-mode near-field optical microscope with a metallic probe tip for observing fine structures in semiconductor materials," *Opt. Commun.*, **134** (1997) 31-35.
 - 29) H. Furukawa and S. Kawata: "Field enhancement with a metallic probe tip for near-field optical microscopy," *Abstracts of the First Asia-pacific Workshop on Near-field Optics* (1996) pp. 27-28.
 - 30) U. C. Fischer: "The tetrahedral tip as a probe for scanning near-field optical microscopy," *Near Field Optics*, eds. D. W. Pohl and D. Courjon (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993) pp. 255-262.
 - 31) J. Koglin, U. C. Fischer and H. Fuchs: "Material contrast in scanning near-field optical microscopy at 1-10 nm resolution," *Phys. Rev. B*, **55** (1997) 7977-7984.
 - 32) H. -U. Danzebrink and U. C. Fischer: "The concept of an optoelectronic probe for near field microscopy," *Near Field Optics*, eds. D. W. Pohl and D. Courjon (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993) pp. 303-308.
 - 33) S. Akamine, H. Kuwano and H. Yamada: "Scanning near-field optical microscope using an atomic force microscope cantilever with integrated photodiode," *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 579-581.
 - 34) E. Betzig, P. L. Finn and J. S. Weiner: "Combined shear force and near-field scanning optical microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992) 2484-2486.
 - 35) N. F. van Hulst, M. H. P. Moers, O. F. J. Noordman, R. G. Tack, F. B. Segerink and B. Bölger: "Near-field optical microscope using a silicon-nitride probe," *Appl. Phys. Lett.*, **62** (1993) 461-463.
 - 36) N. F. van Hulst, M. H. P. Moers and E. Borgonjen: "Applications of near field optical microscopy," *Photons and Local Probes*, eds. O. Marti and R. Möller (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995) pp. 165-180.
 - 37) F. Zenhausern, M. P. O'Boyle and H. K. Wickramasinghe: "Apertureless near-field optical microscope," *Appl. Phys. Lett.*, **65** (1994) 1623-1625.
 - 38) F. Zenhausern, Y. Martin and H. K. Wickramasinghe: "Scanning interferometric apertureless microscopy: Optical imaging at 10 angstrom resolution," *Science*, **269** (1995) 1083-1085.
 - 39) Y. Inouye and S. Kawata: "Scanning near-field optical microscope using a single metallic probe tip and its application," *Near Field Optics-3, European Optical Society Topical Meetings Digest Series, 8* (1995) pp. 57-58.
 - 40) M. Rütcker, W. Knoll and J. P. Rabe: "Surface-plasmon-induced contrast in scanning tunneling microscopy," *J. Appl. Phys.*, **72** (1992) 5027-5031.
 - 41) M. Abe, T. Uchihashi, M. Ohta, H. Ueyama, Y. Sugawara and S. Morita: "Measurement of the evanescent field using noncontact mode atomic force microscope," *Opt. Rev.*, **4** (1997) 232-235.
 - 42) M. Hipp, J. Mertz, J. Mlynek and O. Marti: "Optical near-field imaging by force detection," *Photons and Local Probes*, eds. O. Marti and R. Möller (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995) pp. 109-122.
 - 43) H. Furukawa and S. Kawata: "Analysis of image formation in a near-field scanning optical microscope: Effects of multiple scattering," *Opt. Commun.*, **132** (1996) 170-178.
 - 44) H. Hatano, Y. Inouye and S. Kawata: "Near-field optical microscope of multi-height scanning/imaging mode," *Opt. Lett.* (in press).
 - 45) 河田 聡: "ニアフィールド光学における逆問題", *数理科学*, No. 403 (1997) 64-69.
 - 46) B. Hecht, H. Bielefeldt, Y. Inouye, D. W. Pohl and L. Novotny: "Facts and artifacts in near-field optical microscopy," *J. Appl. Phys.*, **81** (1997) 2492-2498.
 - 47) J. M. Guerra: "Photon tunneling microscopy," *Opt. Lett.*, **29** (1990) 3741-3752.
 - 48) B. D. Terris, H. J. Mamin and D. Rugar: "Near-field optical data storage," *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 141-143.

(1997年8月8日受理)