



## 早澤紀彦氏の論文紹介

大阪大学・理化学研究所 河田 聡

光の波動性による回折限界を超えて、ナノ分解能を有する顕微鏡の開発の歴史は長い。STM 走査トンネル顕微鏡の発明とノーベル賞受賞に触発されて、光の走査プローブ顕微鏡の研究発表がスイスとアメリカで始まったのは、80年代半ばのことである。微小な開口を先端に開けたプローブが一般的であった中、私達のグループは金属探針の先端に存在する局在プラズモンをナノ光源として、これを走査する顕微鏡を提案していた。

受賞者早澤紀彦氏は、開口のない金属探針を用いた近接場顕微鏡をラマン散乱分光ナノイメージングに初めて応用した。実験結果は1999年にSPIEで口頭発表され<sup>2)</sup>、2000年には論文発表された<sup>3)</sup>。この顕微鏡は後に先端増強ラマン散乱 (TERS: tip-enhanced Raman scattering) 顕微鏡と名付けられ、近接場顕微鏡の最も重要なテーマとして、かつまたプラズモニクス・ブームのきっかけとして大きな注目を浴び、多くのグループがその後に参加することになった。また、コヒーレント・アンチストークス・ラマン散乱による先端増強ラマン顕微鏡によって、15 nm の空間分解能を実現し<sup>4)</sup>、ラジアル偏光を用いることによって高い先端増強効果を得ている<sup>5)</sup>。

当時のこの顕微鏡の実験の再現性は低く、増強度を主張することはあっても、信頼性あるラマン画像を示すことはなかなかできなかった。

今回の受賞論文は、先端増強近接場ラマン顕微鏡の再現性に関して、ブレイクスルーを与える研究成果の発表である<sup>1)</sup>。シリコンカンチレバーの先端を最適に酸化および金属化する技術を確認させ局在モードの表面プラズモンのスペクトルピークを制御することによって、1000 倍以上の増強効果を 100% 近い再現性でもって実現した。この技術を用いることにより、無機・有機のナノ材料が 10~20 nm の分解能でラマン画像観察できるようになった。

早澤氏は大阪大学応用物理の研究室で 2001 年に学位を

取得した。博士後期課程中にフィリピン大学に留学していたが、この新しい近接場ラマン顕微鏡開発を開始するために帰国し、研究を先導した。幸い非常に優れた成果を収め、プラズモンポラリトンを用いた近接場光学に先端増強ラマン散乱という新しい科学を創出し、ナノ分光学の分野に大きな貢献を果たした。学位取得後は理化学研究所の河田ナノフォトニクス研究室の専任研究員に採用され、精力的に研究を推進しきわめて高い業績を挙げている。関連論文<sup>3)</sup>の引用件数は 200 を超えており、それ以外の多くの論文もそれぞれ 100 以上の引用件数を有している。h-index は 20 を超えており、光学分野において彼の世代では突出していると思われる。

光学顕微鏡の最大のメリットである、試料をそのまま観察し分析することのできる先端増強ナノ・ラマン散乱顕微鏡の先駆者として、ますますの活躍を期待したい。

### 文 献

#### 受賞論文

- 1) N. Hayazawa, T. Yano and S. Kawata: "Highly reproducible tip-enhanced Raman scattering using an oxidized and metallized silicon cantilever tip as a tool for everyone," *J. Raman Spectrosc.*, **43** (2012) 1177-1182.

#### 関連論文

- 2) Y. Inouye, N. Hayazawa, K. Hayashi, Z. Sekkat and S. Kawata: "Near-field scanning optical microscope using a metallized cantilever tip for nanospectroscopy," *Proc. SPIE*, **3791** (1999) 40-48.
- 3) N. Hayazawa, Y. Inouye, Z. Sekkat and S. Kawata: "Metallized tip amplification of near-field Raman scattering," *Opt. Commun.*, **183** (2000) 333-336.
- 4) T. Ichimura, N. Hayazawa, M. Hashimoto, Y. Inouye and S. Kawata: "Tip-enhanced coherent anti-Stokes Raman scattering for vibrational nano-imaging," *Phys. Rev. Lett.*, **92** (2004) 220801.
- 5) N. Hayazawa, Y. Saito and S. Kawata: "Detection and characterization of longitudinal field for tip-enhanced Raman spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2004) 6239-6241.



## Dinesh N. Naik 氏の論文紹介

宇都宮大学オプティクス教育研究センター 武田 光夫

Dinesh N. Naik 氏は、2007年にインドの Hyderabad 大学大学院物理学専攻修士課程を修了後、文部科学省国費留学生として電気通信大学大学院情報通信工学専攻の博士後期課程に進学し、2011年に同専攻を修了して博士(工学)の学位を取得した。その後、電気通信大学博士研究員を経て、現在は Humboldt 財団博士研究員としてドイツの Stuttgart 大学光工学研究所で新しいイメージングやセンシング技術について研究している。

Naik 氏の論文は、これまで分離されていた「統計光学」と「ホログラフィー」の両分野に橋を架け、その知見を統合することにより、「コヒーレンスホログラフィー」と「光子相関ホログラフィー」という新技術を提案し、その有効性を実験により実証したものである。コヒーレンスホログラフィーと光子相関ホログラフィーは、空間的にインコヒーレント照明されたホログラムからの回折場の2次の相関関数(コヒーレンス関数)や4次の相関関数(強度相関関数)の三次元空間分布が再生像を与えるという風変わりなホログラフィー技術である。受賞対象論文<sup>1)</sup>は、コヒーレンスホログラムを熱光源からの自然光で照明し、三次元物体をアโครマティックな空間コヒーレンス関数の空間分布として再生することに初めて成功したものである。

コヒーレンスホログラフィーの原理そのものはすでに筆者のグループで提案されているが、これまでの実験は回転擦りガラスによりレーザー光の空間コヒーレンスを落とし、時間的にコヒーレントで空間的にインコヒーレントな不自然な人工光源を利用してきた。この論文は、共通光路サニャック干渉計の中に望遠鏡結像光学系を挿入しその横倍率と縦倍率の関係を利用して奥行き方向に伝搬する光波の時間遅延を自動補正することにより、自然光による三次元像再生を実現したものである。本来あるべき真のコヒー

レンスホログラムをはじめて実現した意義は大きい。また、アโครマティックな三次元シアリング干渉計の原理の提案と実証という観点でも、その技術的価値は大きい。

関連論文の2)は光子相関ホログラフィーという新原理の提案と実験的実証に関するものである。コヒーレンスホログラフィーは光波動場の相関関数(コヒーレンス関数)により像再生するのに対して、光散乱場の強度分布の相関関数から三次元像再生を初めて実現したものである。例えていえば、コヒーレンスホログラフィーがマイケルソン恒星干渉計、光子相関ホログラフィーがハンブリーブラウン・トゥイスの強度干渉計に相当する。

関連論文の3)はコヒーレンスホログラフィーを実時間で記録再生する原理と実証実験に関するものである。

光波の本質である揺らぎを制御し「混沌」の中に所望の「秩序」を創り出すことを目指す本研究は、照明光のコヒーレンスや強度相関関数を自由に制御することにより、リソグラフィー光学系や高分解能光学顕微鏡の性能向上や、無分散光トモグラフィなど将来の新技術への発展の可能性が期待される。受賞者の今後の活躍に期待したい。

### 文 献

#### 受賞論文

- 1) D. N. Naik, T. Ezawa, R. K. Singh, Y. Miyamoto and M. Takeda: "Coherence holography by achromatic 3-D field correlation of generic thermal light with an imaging Sagnac shearing interferometer," *Opt. Express*, **20** (2012) 19658-19669.

#### 関連論文

- 2) D. N. Naik, R. K. Singh, T. Ezawa, Y. Miyamoto and M. Takeda: "Photon correlation holography," *Opt. Express*, **19** (2011) 1408-1421.
- 3) D. N. Naik, T. Ezawa, Y. Miyamoto and M. Takeda: "Real-time coherence holography," *Opt. Express*, **18** (2010) 13782-13787.