

1 はじめに

光を用いた分析手法は数多く存在するが、ラマン分光 法はあらゆる状態(固体,液体,ゲル状,等)の試料に 対して,特別な前処理を必要とせずに物質同定を行うこ とができる手法である.また光学顕微鏡とラマン分光装 置を組み合わせたラマン顕微鏡は、ラマン分光法によっ て同定された試料成分の空間分布を,サブミクロンに達 する空間分解能で可視化(イメージング)する装置であ る.ナノフォトン株式会社は、高速かつ高分解能なラマ ンイメージングを可能にするレーザー走査ラマン顕微鏡 をいち早く開発し,幅広い分野に製品を提供してきた. 本稿では、ナノフォトン㈱のレーザー走査ラマン顕微鏡 RAMANtouchの特徴と応用事例を紹介する.

2 ラマン分光法の特徴

ご存知の方も多いと思われるが、まずラマン散乱につ いて簡単に説明する.物質にレーザー光を照射した際に 発生する散乱光の大部分は、入射光と同じ波長をもつレ イリー散乱光である.しかし散乱光の中には、物質を構 成する分子や結晶格子の振動によって非弾性散乱され, 入射光と異なる波長に変化する光も僅かに存在する. こ れがラマン散乱光であり、入射光との波長の差が分子 (格子) 振動のエネルギーに対応する. このラマン散乱 光を,回折格子等を搭載した分光器で分光分析する手法 がラマン分光法であり、横軸に入射光を基準とした波数 (波長の逆数),縦軸に光強度をプロットしたスペクトル をラマンスペクトルと呼ぶ. 横軸はラマンシフト(単位 は cm⁻¹) と表記されることが多く, 高波数側ほどエネ ルギーの高い分子振動であることを表す. 分子振動のエ ネルギーは、分子構造特有のものであるため、ラマンス ペクトルから物質が有する分子構造が分かり、物質同定 が可能となる.

分子振動に対する分光法という点において、ラマン分 光法は赤外分光法と類似した分析手法であり、比較され ることも多い. ラマン分光法の特徴としては、以下の点 が挙げられる.(1)薄片化やすりつぶしといった前処 理が不要で、そのままの状態の試料を測定できる.(2) 水のスペクトルが低強度かつ狭帯域であるため、水分を 含む試料でも目的とする成分を測定できる.(3)結晶 性試料の場合、スペクトルの線幅が細いため、僅かな ピーク位置の差やスペクトル形状の違いから、応力や結 晶多形の分析が可能である.(4)入射光の波長が任意 であり、可視光域(波長400~800 nm)のレーザー光 を使用した場合、光学顕微鏡と組み合わせたラマン顕微 鏡の空間分解能は、試料の面内・深さ方向共にサブミク ロンに達する.この高い空間分解能は、ラマン分光法の 最も魅力的な特徴の一つと言える.

その一方で、ラマン散乱光の散乱断面積は10⁻³⁰ cm² 程度であり¹⁾、赤外吸収の吸収断面積²⁾~10⁻¹⁸ cm² と比 較して圧倒的に小さい.これはラマン散乱の光子が一つ 発生するためには約10³⁰ 個/cm² もの入射光子密度が必 要なことを意味しており、ラマン散乱光は発生効率の低 い極めて微弱な光と言える.そのため*S/N*良くスペク トルを測定するためには長時間の露光が必要であり、試 料ステージを走査しながら多点のスペクトル測定が必要 なラマンイメージングでは測定効率の向上が課題であっ た.

レーザー走査ラマン顕微鏡 RAMANtouch の 誕生

上記の課題は、食品や生体細胞など経時変化しやすい 試料のラマンイメージングを行う場合、ボトルネックと なり得る.2000年代初頭、ナノフォトン㈱が高速なラ マン顕微鏡の開発に乗り出したきっかけは、まさに生体 細胞を生きたままラマンイメージングするためであっ た.1990年以降、細胞に対するラマン分析は徐々に増 加し、ラマンイメージング事例も報告もされていたが、 それらの多くは細胞を薬剤等で固定した報告であっ た³⁾⁴⁾.生きた細胞は動き回るため、測定効率を向上さ せない限り、ラマンイメージングをすることは難しい、 ナノフォトン㈱と創業者の河田聡(当時は大阪大学教 授)の研究グループは、測定効率を劇的に向上させるラ マン顕微鏡を開発し、この課題を克服することに成功し た.

それまでのラマン顕微鏡は、試料表面に点状のレー



図1 ポイント照明とライン照明のラマン顕微鏡 (a) 従来のポイント照明のラマン顕微鏡では、試料ス テージを走査しながら、各点のスペクトルを1本ずつ測 定する.(b) ライン照明のレーザー走査ラマン顕微鏡で は、ライン上の複数箇所のスペクトルを同時に測定しな がら、レーザー光を走査する.

ザー光を集光し(以下,ポイント照明と呼ぶ),試料ス テージをラスター走査しながら1点ずつスペクトルを 取得することで、ラマンイメージングを行っていた(図 1 (a)). それに対し、ナノフォトン㈱と大阪大学が開 発した手法では、試料表面にライン状のレーザー光を集 光し、ライン上の複数箇所(典型的には400点)のス ペクトルを同時に測定しながらレーザー光を走査するこ とで、ラマンイメージングを行う(図1(b)). ライン 照明と名付けたこの方式では、試料表面のライン状の領 域と分光器スリットが共役になり、共焦点光学系の持つ 高い空間分解能(面内・深さ方向)を維持しながら、従 来(ポイント照明)方式の数百倍の速度でイメージング を行うことが可能となる. また溶液中の細胞は、ステー ジ走査の場合、振動などで移動してしまうことがある が、レーザー走査方式の場合、その心配もない. これら の技術により、生きた細胞が分裂する様子をラマンイ メージングで初めて観測することに成功した⁵⁾. この報 告は 2008 年になされたが、それに先立つ 2005 年にナ ノフォトン㈱から世界初のレーザー走査ラマン顕微鏡 RAMAN-11 を発表した. 以降, 改良や機能追加を行い, 現在では RAMANtouch という名称で主力製品となって

いる. 開発のきっかけこそ生きた細胞のラマンイメージ ングであったが、現在では半導体、高分子、電池、食品 など多くの分野で RAMANtouch の高速イメージングは 活躍している. 次節から RAMANtouch を用いた数々の 測定事例を紹介する.

4 RAMANtouch を用いた測定事例

4.1 高速イメージング事例

まず食品を例にとって, RAMANtouch の高速イメー ジングの魅力を紹介する. 多くの食品は水分を含むた め,水のスペクトルに妨害される赤外吸収分光法では成 分分析が難しいが,ラマン分光法は水分を含んでいて も、タンパク質,脂質,糖質など多岐にわたる成分を同 定可能であるため,食品分野において有用な分析手法の 一つである.しかし食品は,時間の経過とともに乾燥や 環境温度により変性してしまうため,短時間での測定が

(a) ホイップクリーム A



(b) ホイップクリーム B



(c) ホイップクリーム C





図2 3種類のホイップクリームのラマンイメージ (a)~(c)は、それぞれクリームA~Cに対応し、脂肪 分(赤)、乳糖結晶(緑)、水分(青)、空気(黒)の分 布を示している.励起波長:532 nm、対物レンズ:20 倍(NA 0.45)を使用した.(d)クリームAの各成分の 代表的なラマンスペクトル、乳糖結晶と水分のラマンス ペクトルは、脂肪分のラマンスペクトルとの差分である. 水分には糖が溶け込んでいることが分かる.(a)~(c) のラマンイメージは、矢印で示すピークを用いて作成し た.

望まれる測定対象でもある.

このような試料をラマンイメージングする際, RA-MANtouch のライン照明による高速イメージングは威 力を発揮する. 図2(a)~(c)は、3種類のホイップク リーム A-C の 416.8 µm×100 µm の領域 (スペクトル 数:38400点)を,各々わずか18分17秒で測定した ラマンイメージである. 画像は, 脂肪分(赤), 乳糖結 晶(緑)、水分(青)の分布を示しており、それぞれ 2854 cm⁻¹, 358 cm⁻¹, 3150~3600 cm⁻¹ 付近のピー クを用いて作成した.黒い部分は、周囲と比較して脂肪 分のピーク強度が低く,明視野像において気泡状の部分 に相当することから、空気と判断した. 三つのラマンイ メージを比較すると、各ホイップクリームの成分の混ざ り具合が鮮明に分かる.クリーム A, Bと比較して, C は脂肪分と水分が細かく均一に混ざり合っており、また 空気を多く含んでいるため、最も滑らかな食感のクリー ムであると言える. またクリームAは、各成分の混ざ り具合の均一性は低いが、唯一、乳糖結晶が水分中に観 測された.クリームAの原料には練乳が使用されてお り、練乳中の乳糖が析出したものと考えられる. このク リームAで観測された各成分の代表的なラマンスペク トルを、図2(d) に示す.水分が観測された箇所のス ペクトルの指紋領域(1500 cm⁻¹以下)には、糖を示 すピークも観測されており,水分箇所は,糖が溶け込ん だ液糖であることが判明した. ピーク形状から, 溶け込 んだ糖はスクロースであると考えられる. クリーム B, Cの水分箇所も液糖であることが判明したが、糖を示す ピーク形状はスクロースとは異なり,麦芽糖を主原料と する水飴に近いものであった.このような僅かなピーク 形状の差を議論するには露光時間を長くした S/Nの良 いスペクトル測定が必要であるため、従来のポイント照 明によるイメージングでは、測定が長時間に及び、測定 中にクリームの形状が変化する可能性がある.本事例 は、ライン照明を用いることで、スペクトルの S/Nを 高く保ったまま広範囲を高速にイメージングできる RAMANtouch ならではの測定例と言える.

4・2 高分解能イメージング事例

続いて、RAMANtouch の高い空間分解能を示すイ メージング事例を二つ紹介する. 図3(a)は、カーボ ンナノチューブを用いた電界効果型トランジスタ (CNT-FET)のラマンイメージであり、炭素六員環の 面内振動に由来するGバンド強度(1590 cm⁻¹付近) をマッピングした画像である. 電極間に合成された CNTバンドルが、約350 nmの空間分解能で観測され ており、励起波長:532 nm、対物レンズ:100倍(NA 0.9)使用時に期待される回折限界の分解能で解像出来 ていることが分かる. 図3(b)は、(a)のラマンイメー ジを動径方向の伸縮振動である Radial Breathing Mode





図3 カーボンナノチューブを用いた電界効果型トランジスタ (CNT-FET)のラマンイメージ(試料提供:東京大学 丸山茂夫先生).
(a) Gバンド強度イメージ.約350 nmの空間分解能で 解像できている.(b) RBMのピーク位置 ω_{RBM} を用い て、4種類に色分けしたラマンイメージ.直径とカイラ リティの異なる CNT が分布している様子が分かる.赤: ω_{RBM}=146 cm⁻¹(半導体)、マゼンタ:ω_{RBM}=179 cm⁻¹ (半導体)、緑:ω_{RBM}=192 cm⁻¹(半導体)、シアン: ω_{RBM}=232 cm⁻¹(金属).(c)中央付近の CNT バンド ルの拡大図と、(d) 八つの矩形領域(1辺400 nm)に おける平均ラマンスペクトル.(c)と(d)における番 号は対応しており、カイラリティの異なる CNT が絡み 合っていることが分かる.

(RBM: 300 cm⁻¹ 以下)のピーク位置 ω_{RBM} で4種類 に色分けした画像であり、直径やカイラリティの異なる CNT が分布している様子を示している. ω_{RBM} (cm⁻¹) と CNT の直径 d (nm)の間には $d=248/\omega_{RBM}$ の関係 があることが知られており⁶⁾、 ω_{RBM} から CNT の直径を 導くことが可能である.また CNT のラマン散乱は、光 吸収を伴う共鳴ラマン散乱であり、励起光エネルギーに 依存して特定の構造(直径、カイラリティ)の CNT か



 図4 窒化ガリウム (GaN) 基板表面の応力イメージ(試料提供:大阪大学 谷川智之先生)
 (a)明視野像.(b) E₂^Hモード(567 cm⁻¹付近)のピーク位置をマッピングした応力イメージ.励起波長: 532 nm,対物レンズ:100倍(NA 0.9)を使用した.明視野像では平坦で滑らかに見えるが,局所応力が分布している様子が分かる.

ら強くラマン散乱が生じる⁷⁾. つまり励起波長と ω_{RBM} から,ある程度カイラリティを絞り込むことが可能であ り,図3(b)では $\omega_{RBM}=232 \text{ cm}^{-1}$ (シアン)の CNT のみが金属で,それ以外は半導体であることも分かる. 図3(c)は、(a)における中央付近の CNT バンドルの 拡大図であり、このバンドルを八つの矩形領域に分け、 各領域の平均スペクトルを示したものが図3(d)であ る.矩形領域の1辺は400 nmであり、回折限界とほ ぼ等価な領域であるが、領域1番から8番にかけて、 RBM ピークが変遷していることが明瞭に分かる.これ は、カイラリティの異なる CNT がバンドルを形成して いる様子を、回折限界に迫る分解能で明らかにした事例 と言える.

ラマン顕微鏡は、成分分布だけでなく、光学顕微像で は見えない応力の分布を描き出すことも可能である.二 つ目の事例として、窒化ガリウム(GaN)基板表面の 応力イメージングを紹介する. 図4 (a), (b) は, それ ぞれ GaN 基板表面の明視野像と、567 cm⁻¹ 付近 E_2^{H} モード⁸⁾のピーク位置から作成したラマンイメージであ る. 結晶性試料の場合, ラマン散乱を引き起こす要因は 主に格子振動であるが、格子振動は結晶歪みによる応力 でエネルギーが変化するため、ラマンピークの位置から 応力を評価することが可能である.一般的にピーク位置 は、引張応力によって低波数側、圧縮応力によっては高 波数側にシフトすることが知られている. 図4(a)の 明視野像では平坦で滑らかに見える GaN 基板も、(b) のラマンイメージではピークシフトした領域が分布して おり、局所応力が発生していることが分かる.引張と圧 縮それぞれの応力領域が隣り合っている箇所には、結晶 転位(主に刃状転位や混合転位)が存在していると考え られる⁹⁾¹⁰⁾. このような結晶転位由来の僅かなピークシ フト分布を描き出すためには、S/Nの良いラマンスペク トルを高空間分解能で得る必要があるため、前節同様ラ イン照明による高速イメージングが有用である.実際、

図4 (b) のラマンイメージは、100 倍 (NA 0.9) の対 物レンズを用いて、80 µm×60 µm の領域(スペクトル 数:120000 点)を僅か 21 分強で測定したデータであ り、RAMANtouch の高速・高分解能性を示す恰好の事 例である.

4・3 深さ方向の測定

ラマン顕微鏡の特徴の一つに, 試料の面内(XY)方向だけでなく, 非破壊で試料内部の深さ(Z)方向の測定ができることも挙げられる. これは図1に示したように, 共焦点光学系を採用しているため, 対物レンズの 焦点が合う位置(焦点面)から生じたラマン散乱光のみが分光器スリットを通過することに由来する.本節では, 深さ(Z)方向の測定事例を紹介する.

図5は、ポリマー多層フィルムを*XZ*面内で測定した ラマンイメージであり、3種類のポリマー材料(ポリエ チレン、ポリプロピレン、ナイロン)の分布を示してい る.各ポリマーが、サブミクロンスケールで積層構造に なっていることが明瞭に分かる.この測定は、共焦点性 の高さが重要であり、100倍の油浸対物レンズ(NA= 1.4)と、スリットではなく直径20 µmのピンホールを 用いて行った.RAMANtouchはライン照明が特徴であ ることを述べたが、ポイント照明とピンホールを用いた 測定も可能であり、その切り替えはソフトウェア上で簡 単に行うことができる.

Z方向の分析対象には、組成だけでなく、応力や結晶 性等も含まれる.図6は、炭化シリコン(SiC)基板の 薄膜化の各過程におけるZ方向の応力分布を示すため に、6H-SiCの789 cm⁻¹(FTO(2/6)E₂)のピーク位 置¹¹⁾¹²⁾をXZ面内で測定したものである.(a)は研削後、 (b)は研削で発生した傷を除去するための研磨を行った 後のXZラマンイメージである.(a)では、研削による 傷の周囲には引張応力、二つの傷の間には圧縮応力がか かっていることが分かる.研磨後の(b)では、全体的 に応力が低減されているが、残された傷周辺には依然と して引張応力が発生していることが分かる.より詳細に





図 6 炭化シリコン (SiC) 基板の XZ 応力イメージ

 (a) 研削後,(b) 研削+研磨後の SiC 基板の明視野像と,
 FTO (2/6) E₂モード (789 cm⁻¹) のピーク位置をマッピングした XZ 応力イメージ.励起波長:532 nm,対物レンズ:100倍 (NA 0.9) を使用した.明視野像に示した線上の深さ方向を測定した.矢印に示す研削傷の周辺では,引張応力が発生していることが分かる.(c)研磨前後の応力の Z 方向ラインプロファイル.研磨により,応力が発生している領域は表面から 2 µm 程度にまで減少している.

解析するために,研磨前後のZ方向の応力プロファイ ル(線分析)を(c)に示す.応力プロファイルは,抜 粋拡大画像の点線の位置で評価した.研削による応力 は,研削後では Z=4 μm 程度まで生じているのに対し, 研削+研磨後では約 Z=2 μm に低減されていることが 分かる.

5 RAMANtouch 特有の測定方法

前章までは,RAMANtouchのラマン顕微鏡としての 基本的な性能を紹介してきた.本章では,RAMANtouchが搭載する発展的な測定機能を二つ紹介する. 5・1 平均ラマンスペクトル測定

ラマン顕微鏡は、その名の通り微視的に測定したラマ ン分光特性の空間分布を描き出す装置であるが、観察領 域全体の平均値といった巨視的な特性を測定したい場合 もある. このような場合, 広範囲のラマンイメージング を行った後、すべてのスペクトルを平均化する方法もあ るが, RAMANtouch は AreaFlash 測定という平均ラマ ンスペクトルを短時間に測定する機能を搭載している. AreaFlash 測定は、スペクトルを取得するための露光時 間中に、ライン照明をラインと垂直方向に高速走査し、 レーザーが照射された XY 領域の平均ラマンスペクトル を測定する方法である. この方法は、レーザー走査方式 である RAMANtouch だからこそ可能な機能であり、高 い S/Nの平均ラマンスペクトルを短時間に取得できる ことが特徴である.図7に、製造ロットの異なる2つ のカーボン粉末 A, B を, AreaFlash 測定した事例を示 す. 測定領域は、それぞれ(a)、(b)の明視野像に示す サブミリメートルに及ぶ広い領域で、各120000点の 平均ラマンスペクトルをわずか5秒で取得した結果が (c) である. 1590 cm⁻¹ 付近のGバンド強度で規格化 すると、1350 cm⁻¹ 付近に現れる欠陥由来の D バンド 強度に僅かな差が観測されており、些細な品質の差を判 別することができた.

AreaFlash 測定は、分析時間の短縮ができるため、加 熱や冷却、延伸等に伴うスペクトルの経時変化のモニタ



図 7 二つのカーボン粉末の平均ラマンスペクトル(AreaFlash) 測定事例 (a) 粉末 A, (b) 粉末 B の平均ラマンスペクトルを測定

したサブミリメートル領域の明視野像. (c) 粉末 A, B それ ぞれの 平均 ラマンスペクトル. Gバンド (1590 cm⁻¹付近)強度で規格化すると,欠陥由来の D バンド (1350 cm⁻¹付近) に僅かな差が見受けられる. リングにも適している.また,レーザーパワーを弱くし ても,通常の測定より短時間でスペクトルが取得できる 上に,レーザーパワーを広範囲に分散させるので,熱の 局所的な蓄積を低減できる.したがって,レーザーによ る熱ダメージを受けやすい試料でも,安心して測定でき るメリットもある.

5・2 凹凸のある試料表面の測定

ラマン顕微鏡は共焦点光学系を採用しているため,深 さ(Z)方向の測定が可能であることを4・3節で述べ た.しかしこのことは、表面に凹凸があり観察領域内で 焦点面が一定にならない試料に対しては、ラマン顕微鏡 によるイメージング測定は不向きであることを意味して いる.すなわち焦点深度(焦点面のZ方向の領域)の 短い高倍率の対物レンズを使用すると、XY面内の測定 箇所を変えるたびに、試料表面に対物レンズのフォーカ スを一致させる必要があり、反対に焦点深度の長い低倍 率の対物レンズを使用すると、高い空間分解能を得るこ とが難しい.

このような凹凸のある試料表面を高分解能でラマンイ メージングするために,RAMANtouch は ZTrack とい う機能を搭載している.ZTrack は,光学顕微鏡像から 試料の表面形状を認識し,表面形状に沿って対物レンズ のフォーカスを自動的に調整しながらラマンイメージン グを行う機能である.図8に,リチウムイオン電池正 極材を,ZTrackを用いてラマンイメージングした事例 を示す.凹凸のある試料表面であっても,100倍の対 物レンズを用いた高分解能なラマンイメージを測定でき ることが分かる.ZTrack は表面形状に沿ってフォーカ スを自動調整するため,ポイント照明を利用する.ライ





ン照明に比べてイメージングの時間は長くなるが、1回 のイメージングで、すべての測定箇所において試料表面 にフォーカスが一致したスペクトルを取得できる点は魅 力である.

6 ラマンスペクトル測定のコツ:蛍光の回避

最後に、ラマンスペクトルを測定する際に遭遇するこ とが多い蛍光を回避する方法を紹介する.蛍光は、発光 (フォトルミネッセンス)の一種であり、光によって電 子励起状態に遷移した分子が、振動緩和などを経た後、 電子基底状態に戻る際に発する光のことである.多くの ラマン顕微鏡で採用されている波長 532 nm のレーザー 光は、この電子遷移を引き起こすのに十分な光子エネル ギーを持っている.蛍光を発する試料のラマンスペクト ルを、波長 532 nm のレーザーで測定しようとすると、 ラマン散乱光と蛍光の波長域が重なり、圧倒的に強度が 高くブロードな蛍光のピークに、ラマンピークが隠され てしまうことが多い.

蛍光を回避する方法は、大きく三つある、一つ目は、 共焦点性を高めることである. 高倍率・高 NA の対物 レンズを使用する、あるいは分光器スリット・ピンホー ルの幅や径を小さくすることで、焦点面以外からの蛍光 の影響を低減させることができる. 4・3 節でも述べた が、RAMANtouch にはピンホールも搭載されており、 スリットよりも高い共焦点性を持つピンホールを利用し て、ラマンピークをより顕在化させることが可能であ る. 微小な測定対象物の周辺に蛍光物質が存在する状況 であっても,空間分解能の高い RAMANtouch は, 蛍光 の影響を抑えて測定することができる.二つ目は、蛍光 の性質を利用することである.まずレーザーを一定時間 照射し続けると、蛍光は次第に輝度が低下していくこと が知られている. これは蛍光退色と呼ばれ, 先に述べた 電子の励起/脱励起が繰り返される中で,分子の蛍光を 発する一部の化学結合が破壊されることによって引き起 こされる. しかし分子構造自体はほとんど変わらないた め、蛍光退色させた後に、ラマンピークを観測できる場 合がある.またレーザー強度を強くすることも効果的で ある.励起光の強度を強くしていくと、通常のラマン散 乱光の輝度は線形に増大するが、蛍光の輝度は飽和する ことが知られている¹³⁾. つまりラマンピークの強度を 相対的に目立たせることが可能になる. この方法は, レーザーによって損傷しにくい試料の場合に有効であ る. 三つ目は、レーザーの波長を変えることである. 近 赤外域に近い波長 785 nm のレーザーを利用すると、光 子エネルギーが低くなり蛍光は抑制される.また波長 405 nm や 457 nm といった紫外域に近いレーザーを利 用すると、ラマン散乱光の波長域が蛍光よりも短波長側 になるため、ラマンピークを蛍光ピークから分離するこ とが可能になる. RAMANtouch には、標準的に波長 532 nm と 785 nm のレーザーが搭載されており, 蛍光 回避のために 785 nm はよく利用される. 最近は 400 nm 台のレーザーを追加搭載するケースも増えてき ている.

7 おわりに

本稿では、ナノフォトン㈱のレーザー走査ラマン顕微 鏡RAMANtouchの特徴と代表的な測定事例を紹介した. 「ラマン顕微鏡は難しそうだし、イメージング測定に時 間が掛かるらしいから敷居が高い…」と思われている方 は、是非RAMANtouchの高速イメージングを体感して いただきたい.高精細なラマンイメージが、素速く、そ して簡単に測定できることに驚かれると思う.他にも ユーザービリティーが高く、解析機能の充実したソフト ウェアを標準的に搭載しており、またオプション製品と して、加熱冷却ステージや電池材料用の不活性セル LIBcell なども用意している.本稿をきっかけに、ラマ ン顕微鏡に少しでも興味を持っていただければ幸いであ る.

文 献

- 1) 藤田克昌: 顕微鏡, 43, 268 (2008).
- 2) HITRAN online. (https://hitran.org).
- N. M. Sijtsema, S. D. Wouters, C. J. De Grauw, C. Otto, J. Greve : *Appl. Spectrosc.*, 52, 348 (1998).
- H.-J. van Manen, Y. M. Kraan, D. Roos, C. Otto : J. Phys. Chem. B, 108, 18762 (2004).
- K. Hamada, K. Fujita, N. I. Smith, M. Kobayashi, Y. Inouye, S. Kawata : *J. Biomed. Opt.*, **13**, 044027 (2008).
- A. Jorio, R. Saito, J. H. Hafner, C. M. Lieber, M. Hunter, T. McClure, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus : *Phys. Rev. Lett.*, 86, 1118 (2001).
- H. Kataura, Y. Kumazawa, Y. Maniwa, I. Umezu, S. Suzuki, Y. Ohtsuka, Y. Achiba : *Synth. Met.*, **103**, 2555 (1999).
- 8) 播磨 弘:材料, 51,983 (2002).
- N. Kokubo, Y. Tsunooka, F. Fujie, J. Ohara, K. Hara, S. Onda, H. Yamada, M. Shimizu, S. Harada, M. Tagawa, T. Ujihara :

Appl. Phys. Express, 11, 111001 (2018).

- 10)谷川智之,足立真理子,寺田陸斗,塚越真悠子,上向井 正裕,片山竜二:第68回応用物理学会春季学術講演会, 17a-Z27-4 (2021).
- S. Nakashima and H. Harima : Phys. Status Solidi (a) 162, 39 (1997).
- N. Sugiyama, M. Yamada, Y. Urakami, M. Kobayashi, T. Masuda, K. Nishikawa, F. Hirose, S. Onda : *MRS OPL*, 1693, 107 (2014).
- 13) K. Fujita, M. Kobayashi, S. Kawano, M. Yamanaka, S. Kawata : *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 228105 (2007).



.

齋藤広大(Kohta SAITOH)

ナノフォトン株式会社 R&D センター (〒562-0036 大阪府箕面市船場西 3-1-7). 慶應義塾大学大学院理工学研究科基 礎理工学専攻後期博士課程修了.博士(理 学).《現在の研究テーマ》ラマン顕微鏡 の機能強化,及び新製品開発.《主な著書》 "Tip Enhanced Raman Microscopy", Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology, 2nd edition, Vol. 4, pp.13-32 (2019), (Elsevier). E-mail: kohta.saitoh@nanophoton.jp

青木克仁(Katsuyoshi Aoki)

ナノフォトン株式会社東京ショールーム (〒105-0003 東京都港区西新橋3-6-10マストライフ西新橋403). 筑波大学 大学院数理物質科学研究科電子・物理工 学専攻博士後期課程修了. 博士 (工学). 《現在の研究テーマ》ラマン顕微鏡のアプ リケーション開発.

E-mail : katsuyoshi.aoki@nanophoton.jp

足立真理子 (Mariko ADACHI)
ナノフォトン株式会社大阪ショールーム
(〒 562-0036 大阪府箕面市船場西 3-17). 金沢大学理学部化学科(現 理工学域)卒業.《現在の研究テーマ》ラマン顕微鏡のアプリケーション開発.《主な著書》
"ウェーハ上の異物分析",「異物の分析, 検出事例集」第4章,第3節(技術情報協会,2020年).

E-mail : mariko.adachi@nanophoton.jp

会社ホー	人ペー	・ジIRL:	

https://www.nanophoton.jp/

関連製品ページ URL:

https://www.nanophoton.jp/products/ramantouch