

# 最新評価分析講座 (第5講)

J. Jpn. Soc. Colour Mater., 93 [10], 321-328 (2020)

## 原子間力顕微鏡～ソフトマテリアルのナノ力学物性解析～

中嶋 健\*†・関根 慧\*・茂木 楓\*・伊藤万喜子\*・梁 曉斌\*

\*東京工業大学物質理工学院応用化学系 東京都目黒区大岡山2-12-1 (〒152-8552)

† Corresponding Author, E-mail: knakaji@mac.titech.ac.jp

(2020年3月24日受付, 2020年4月12日受理)

### 要 旨

原子間力顕微鏡 (AFM) を用いたナノ力学物性解析について、そのベースとなる接触理論、とくにJKR2点法を概観し、PP/EPDM系動的架橋熱可塑性エラストマー (TPV) を対象に解析の事例を紹介した。動的架橋のプロセスでPP相にはEPDMが混ざり込み、純粋なPPの弾性率よりもずっと低い弾性率が得られた。後半ではGreenwood理論をナノ力学物性解析の新たなツールとして利用する試みについて解説した。とくに3要素モデルをベースにした解析法の詳細を解説し、AFMのフォースカーブから粘弾性情報を抽出する方法を提案している。

キーワード：原子間力顕微鏡, ナノ力学物性解析, 接触力学, 動的架橋熱可塑性エラストマー, グリーンウッド理論

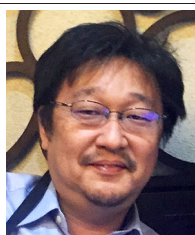
### 1. 緒 言

本誌に論文を寄稿するのはこれが三度目になる。今回は「最新評価分析講座」ということで「講座」の一つに取り上げられたことを大変嬉しく感じている。最初に頂戴したタイトルは「走査プローブ顕微鏡法」というものであったが、その中でもソフトマテリアルを対象とする研究開発の現場ではおもに原子間力顕微鏡 (AFM) が使われているため、タイトルも改め、さらにわれわれが手がけているナノ力学物性解析に的を絞って解説を行う。それ以外の走査プローブ顕微鏡 (SPM) 関連の手法については本稿の最後で少し紹介する。

一度目の寄稿は「(総説) 原子間力顕微鏡による高分子材料表面の物性評価」と題して2008年9月号に掲載された<sup>1)</sup>。まだAFMによるナノ力学物性解析の可能性を探っている段階の内容であり、ナノ触診技法としてのAFMの可能性をナノインデントと比較し議論している。さらに解析に用いる接触力学として凝着などの相互作用を考慮しないHertz理論、凝着相互作用を取り入れたDerjaguin-Muller-Toporov (DMT) 理論やJohnson-Kendall-Roberts (JKR) 理論などを紹介し、その利用方法についても概説を行った。画像としてはHertz理論に基づく弾性率像と凝着力の画像が掲載されているが、今回掲載するデータと比較すると、この分野のこの10年間の発展を再認

識することができる。実際その発展には目覚ましいものがあり、今ではAFMを利用した弾性率評価法はベンダー各社の市販AFMに標準装備またはオプションとして追加装備できるものとなっている。それには著者の1人が精力的に貢献したISO国際標準化の活動がかなり関与していると自負しているところであるが、この活動を通じて世界中のベンダー各社ともやりとりを行い、業界全体として技術の底上げがなされた結果だと思う<sup>2)</sup>。2020年、つまり今年の1月にはISO-21222 “Surface chemical analysis - Scanning probe microscopy - Procedure for the determination of elastic moduli for compliant materials using atomic force microscope and the two-point JKR method” が発行された<sup>3)</sup>。タイトルからもわかるように標準化項目としては後述するJKR2点法を採用したものであるが、本質的な内容は2008年の総説に記載した内容と同じである。

二報目の「(総合論文) 原子間力顕微鏡による高分子材料の粘弾性評価」は2010年3月号に掲載されている<sup>4)</sup>。この論文では弾性計測を乗り越え、いかにしてソフトマテリアルの粘弾性と向き合うかについてのアイデアをいくつか提出している。中でも試料と接触状態にあるAFM探針にnmオーダーの微小な振動を加え、巨視的な動的粘弾性計測 (DMA) と類似の解析を行うことで貯蔵弾性率や損失正接などを画像化する、現在ナノレオロジー AFMと呼んでいる手法<sup>5,6)</sup>の初期のアイデアが掲載されており、著者らとしても感慨深い。この手法はわれわれのアイデアをベースとして一昨年Bruker社からAFM-nDMA™として売り出されてもいる。この手法の最近の進展に興味のある方は既報を参照されたい<sup>7)</sup>。より高周波帯域の損失正接マッピングにはOxford Instruments社のAM-FMモードも活用できる。2010年のこの総合論文から一文抜粋する (一部改変)。「粘弾性体、粘塑性体に見られるフォースカーブの押し込み過程と引き離し過程をより正確に再現するためにはMaugisやGreenwoodによって提案された粘弾性モデルを基にした理論を



【氏名】 なかじま けん  
【現職】 東京工業大学物質理工学院応用化学系 教授  
【趣味】 科学おもちゃ収集、パズル  
【経歴】 1997年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了、博士 (工学)。同年より理化学研究所勤務。2003年より東京工業大学大学院理工学研究科助教。2008年より東北大学原子分子材料科学高等研究機構准教授を経て、2015年より現職。

【図表について】 電子ジャーナルサイト「J-STAGE」ではカラーでご覧いただけます。https://www.jstage.jst.go.jp/browse/shikizai-char/ja/