

粒子計測・分析技術の最前線と標準化の動向

Frontiers and Standardization Trends of Particle Measurement and Analysis Technology

藤本 俊幸

FUJIMOTO Toshiyuki

産業技術総合研究所
社会実装本部
チーフ標準化オフィサー(CSO)
博士(理学)
Chief Standardization Officer, Councilor
Marketing and Business Development Headquarters
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Doctor of Science



微粒子の物理・化学特性の中で基盤的かつ極めて重要な特性である粒子サイズに関する計測・分析技術の最前線を、先導的な技術基準が導入される欧州の規制への対応を中心に、標準化における最近の話題を含めて纏めた。気中微粒子計測では規制に直結する検出器の校正について、また液中分散微粒子計測ではナノ材料に関するEC定義の基礎となっている個数基準のサイズ分布を、各種測定法を用いて国際的に同等な結果を得るための試みを含めて紹介した。

This report summarizes the frontiers of measurement and analysis technologies related to particle size, which is a fundamental and extremely important Physico-chemical property of fine particles, with a focus on compliance with regulations in Europe, where leading technical standards are being introduced, as well as recent topics in standardization. In the case of particle size measurement in air, the calibration of detectors, which is directly related to the regulations, and in the case of particle size measurement in liquid, the number-based size distribution, which is the basis of the EC definition of nanomaterials, were introduced, including attempts to obtain international equivalence by using various measurement methods.

はじめに

原子・分子の集合体が示す特異的な性質は古くから利用されてきた。その初端を明らかにするのは容易ではないが、中世ヨーロッパの建築に多大な影響を与えたステンドグラスに微粒子による発色を利用した物があるのは広く知られている。

計測・分析技術の高度化により、微粒子がそれを構成する原子(ミクロスコピック)ともバルク(マクロスコピック)とも異なる特性を示すことが、サイズと共に報告されるようになる。その特性の理解と積極的な利用に向けてメソスコピックサイエンスあるいはクラスターサイエンスという領域の研究開発が積極的に進められてきた。

例えば白金微粒子が粒径に依存して触媒反応活性が変化したり、特異な電子物性を示すなど、化学・物理双方においてサイズが性質に及ぼす影響が数多く報告され、組成および構造の他にサイズ(空間的な広がり)というパラメーターの重要性がクローズアップされた。サイズに立脚した新規

物性の発現とその応用に向けて、ナノテクノロジーという概念が提唱されたのは1970年代中頃である。その後米国のナショナルナノテクノロジーイニシアティブを始めとして世界各国でナノテクノロジーに対する研究開発が推進され、現在ナノテクノロジーを利用した製品は身の回りに数多く見いだせるに至っている。他方、サイズに立脚して発言する特異な物性が健康や環境に及ぼす影響評価からの要請もあり、信頼性の高い微粒子サイズ計測・分析技術の確立が必要となっている。

本稿では正確に微粒子のサイズおよびその分布を得るための計測技術を中心に標準化の動向も交えて概説する。

欧州におけるナノ材料の定義

2022年6月10日、欧州委員会(European Commission: EC)からナノ材料の定義に関する最終勧告^[1]が発出された。同勧告は2011年に発出した規制で使用するナノ材料の公式定義(2011/696/EU)を改定するものである。それまでISOでは個別物体の大きさや構造を規定(ISO/TS8004-1)してい

たのに対して、ECの定義はある量の中に含まれる物体のサイズ範囲およびその個数分布を含めて規定しており、現実の材料を取り扱うにあたってより進んだ定義であった。しかしながら凝集体の構成粒子を含めたサイズ分布等、その該否判定の困難さから材料製造者、計測専門家双方ともに混迷を与えた。ナノ材料定義の効果的な利用に向けて、欧州連合(European Union: EU)におけるNanoDefine等の大規模プロジェクトの推進やECの共同研究所(Joint Research Centre:JRC)の精力的な調査等が行われた。それらを通して得られた知見に基づきより実用性を向上させた最終勧告は以下の通りである。今後様々な規制等で利用される可能性を考え新たなナノ材料の定義全文を引用する。

- (1) ナノ材料とは、単体で、または強凝集体や弱凝集体の中に識別可能な構成粒子として存在する固体粒子からなる、天然、偶発的または製造された材料であり、数ベースのサイズ分布において、粒子の50%以上が下記の条件の少なくとも1つを満たしているものである。
- (a) 粒子の1つ以上の外形寸法が1 nm~100 nmのサイズ範囲にある。
 - (b) 粒子が、ロッド、ファイバーまたはチューブなどの細長い形状を有し、2つの外形寸法が1 nmより小さく、他の寸法が100 nmより大きい。
 - (c) 粒子が板状の形状を有し、1箇所の外形寸法が1 nmより小さく、他の寸法が100 nmより大きい。

なお数基準のサイズ分布の決定において、直交する少なくとも2つの外形寸法が100 μmより大きい粒子は考慮する必要がない。

また、比表面積が6 m²/cm³未満のものはナノマテリアルとはみなさない。

- (2) 前項において、以下の定義が適用される。
- (a) 「粒子」とは、定義された物理的境界を有する微小な物質の断片をいう。単一分子は「粒子」とはみなされない。
 - (b) 「強凝集体」(aggregate)とは、強く結合したまたは融合した粒子からなる粒子をいう。
 - (c) 「弱凝集体」(agglomerate)とは、弱く結合した粒子または強凝集体の集合体で、外部表面積が個々の構成要素の表面積の合計と同程度であるものをいう。

測定量と測定手続き

JRCが2012年発表した、「ナノ材料に対するEC定義を実施するために必要とされる計測方法」と題する報告書^[2]では、現在主に用いられている粒径計測法を、ナノ粒子の大きさの計測方法としてある量の試料の全体情報を得るアンサンブル法(DLS, SAXS等)、構成要素を個別に計測するカウンティング法(TEM, SEM, AFM等)、更にサイズ毎に分

別して評価するフラクシヨネーション法(FFF, CLS, SEC等)に分類してそれぞれの特徴を紹介している。同分類の導入は優れた分析である。それぞれの特徴を踏まえ、複数の計測技術を活用することによって必要な情報が的確に取得できるのみならず、新たな分析評価が可能となるであろう。そのために重要になるのが適用可能範囲と測定量(measurand)の正確な把握と理解である。

同じ粒子サイズを計測しているつもりでも、用いる手法によって測定量の詳細がことなることは多々ある(手法依存: Method dependent)。手法依存の主因は利用している物理現象の違いによる。ナノ材料の構成要素を個別に計測(カウンティング法)した結果と、ある空間における集合体として評価(アンサンブル法)した結果を比較するためには、それぞれの計測原理の詳細を検討する必要がある。更に同じカウンティング方でも、例えばTEMでは等価円径であるが、DMASで得られるのは電気移動度等価球径という違いがある。測定量の違いを利用して、中心粒径と粒径分布の関係から、粒子の形状に関する定量的な指標を得る等の応用も期待できる。

更に同じ測定手法であっても測定の手続きによって結果が異なること(手続き依存: protocol dependent)が知られている。手続き依存の主因は測定パラメーターによって実際に検出されている測定量が異なることによる。例えば、手のひらをゆっくり水面に浸す時、この動作によって手が感じるのは主に水温あるいは水の粘度であろう。もし手のひらで素早く水面を叩いたとしたら手が主に感じるのは水の表面張力であろう。これは検出に用いる手を動かすスピード(測定パラメーター)を変化させただけで、検出される測定量(物理量)が変わったことを意味している。正確な粒子サイズの計測分析には利用している物理現象、適用している測定手続きと対象の状態を十分考慮すること、計測分析機器が適切に校正されており、測定手続きの妥当性が確認されていることが重要である。

気中粒子計測と標準化の動向

微小な粒子が気相に浮遊している状態はエアロゾルと呼ばれる。特に大気中に浮遊している微粒子の組成、サイズ、量は環境保全や労働環境安全等の観点から古くから計測モニタリングが行われている。PM2.5のような大きな粒子の計測は、慣性力を利用したインパクターやサイクロンを用いて粗大粒子を除去したのち、フィルターで一定体積の大気から粒子を捕集し、その質量を評価することによって行われる。これらにより評価される微粒子濃度はmg/m³として表現され質量基準濃度と呼ばれる。粒子による有害性は暴露される粒子の総質量とともに増えるとの考え方と合わせ、大きな粒子からなるエアロゾルでは質量による評価が適しており、欧州における自動車の排ガス規制では2009年

のEuro5まで粒状物質の規制は質量基準のみで行われていた。物質捕集技術の高度化により排気ガスに含まれる粒状物質の量が減少すると、より希薄な粒子のモニタリングに向けて個数基準の評価が求められるようになった。2011年に導入されたEuro5⁺ではディーゼル車の排ガスに含まれる粒状物質について、質量基準に加えて個数基準の規制が加えられた。排ガス中に含まれる固体粒状物質数の計測は、加熱希釈により揮発性成分から成る粒子を除去した後、粒子数カウンタで行われる。粒子数カウンタとしては凝縮粒子計数器(Condensation Particle Counter: CPC)が通常用いられる。

CPCは原理的に幅広い粒子径に対して安定した検出効率が得られる優れた特性を有するが、粒子径の減少に伴い急激に検出効率の低下が見られる。これは検出下限においては微小粒子表面への雰囲気分子の吸着による粒子成長が不十分なため、検出器で感知できる大きさまで成長できないことが主因である。このため規制等での利用に際しては検出下限近傍における粒子の検出効率が規定されている。Euro5⁺、Euro6さらにEuro7において導入が予定されている粒子の検出効率をTable 1に示した。

2025年に導入が予定されているEuro7では従来の粒子径23 nm以上の固体粒子数から粒径10 nm以上の固体粒子数へ規制対象の拡張が検討されていることに注意を要する。

Figure 1に各要求値(帯で表示)と典型的なCPCの検出効率曲線を示した。SPN23, SPN10どちらにおいても、要求値を満たすためには高度な校正が必要であることがわかる。CPCの検出効率校正や基準となるFaraday-cup aerosol electrometer測定の不確かさに関しては既に報告されている^[3]。Figure 2にはCPCの一般的な校正スキームを示した。

Table 1 Requirements of particle detection efficiencies under European vehicle emissions controls

	導入年	粒子の検出効率
Euro5 ⁺	2011	50%±12%@23 nm 90%以上@41 nm (SPN23)
Euro6	2014	
Euro6a	2017	
Euro7	2025	65%±15%@10 nm 90%以上@15 nm (SPN10)

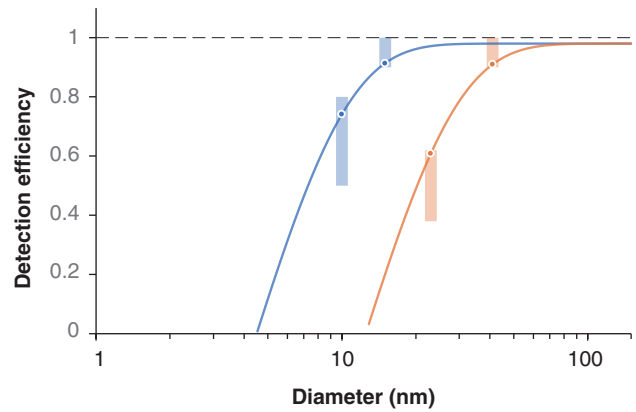


Figure 1 Requirements of particle detection efficiencies under European vehicle emissions control (indicated by bands) and typical detection efficiency curves of a CPC. Orange is for SPN23, blue is for SPN10 (planned).

粒子発生器においては対象となる粒径において安定した粒子数の発生が必要となる。粒子の発生には、小さな、サイズの揃った液滴の吐出が可能でエレクトロスプレー法がしばしば用いられる。内径25 μmのキャピラリーを用いた場合の吐出時における液滴径は約150 nm-200 nmである。自動車の排ガス測定を目的としたCPCの検出効率の校正ではアルコールに溶解したポリアルファオレフィン (Poly- α -Olefin: PAO) が用いられる。CPCの検出効率は、特にその下限近傍では粒子の化学的な性質にも影響を受ける。炭化水素であるPAOは自動車排ガスに含まれる微粒子と同様な検出効率を与えると期待できる。PAOの濃度を調整することによって、アルコール溶媒揮発後のPAO粒子径が制御可能である。

発生させた液滴は電氣的に中和されるとともに溶媒が揮発した粒子として粒径分別器(Particle Size Classifier)において、検出効率確認に用いられるサイズへの単分散化が行われる。粒径分別器に導入される前に溶媒の揮発が完了し粒子径が安定している必要があり、その検証は正確な検出効率を得るのに重要な要素の一つである。粒径分別器にはDMA (Differential Mobility Analyzer)が用いられるが、同装置における粒径値はFigure 1の横軸となることから、その不確かさの十分な把握と極小化が必要である。産業技術総合研究所では、DMAの粒径校正の不確かさの詳細な解析に基づき、DMAの基準装置との比較による校正、標準物質を介した校正双方から十分小さな不確かさでのDMA

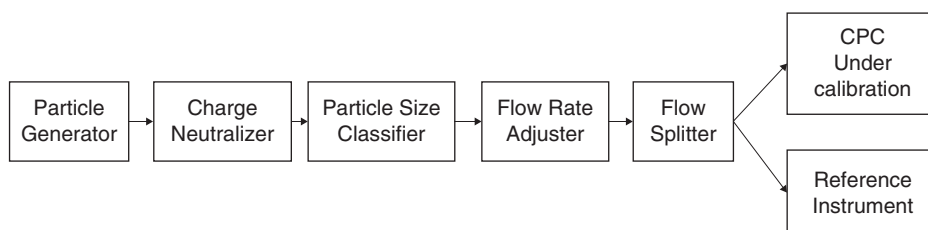


Figure 2 Schematic representation of the CPC calibration setup.

サイズ校正の供給について検討を行っている。

近年、印刷品質向上への要請からインクジェットノズルから吐出される液滴の微小化および均一性が飛躍的に向上している。微小で均一な液滴を生成できるインクジェット技術は医薬品製造等様々な分野での応用が広がっている。計測分析の分野でも、ICP-MSへの試料導入や、試料のイオン化、噴霧乾燥法による試料調製への応用等々広く利用されている。

単分散の粒子数標準の確立に向けてインクジェットエアロゾル発生器(Inkjet Aerosol Generator: IAG)の開発が進められている^[4]。同法の活用の際には、特に微小な粒子を発生させる場合、経路が複雑になることに伴う溶液の汚染機会の増加等に起因した、核生成時における不純物の析出や生成した核の安定性に関する十分な検討が必要である。

IAGでは粒子の発生数がデジタルに制御できることから、生成する粒子のサイズや安定性および再現性が十分評価できた粒径領域では、IAGとCPCを直結して検出効率の校正が可能となる。なお、IAGはすでに光散乱式気中粒子計数器の校正に用いられている。光散乱式気中粒子計数器の国際規格であるISO 21501-4, Determination of particle size distribution - Single particle light interaction methods - Part 4: Light scattering airborne particle counter for clean spacesは補遺の作成作業が現在ISO/TC 24/SC 4において進められており、IAGが校正方法の1つとして追記される見込みである。2022年7月現在、補遺はDAmdの状態であるが、2023年にはAmdとして発行される予定である。

IAGの利用によりFigure 2の校正セットアップが大幅に簡略化されることから、求められる計測条件と精度によっては可搬性を高めた校正システムの開発や、計測装置に校正システムが組み込まれた標準内包計測装置の実現が期待されている。

更にIAGは溶液にバイオ材料や各種マーカーを用いることによって、生成する微粒子の組成や機能性の基準としての活用も期待されている。

液中分散粒子計測と標準化の動向

液中分散粒子を固体表面に展開した計測法も含めると、液中分散粒子の計測・分析方法は極めて多岐に渡る。このため、3章で述べた測定量の違いに起因した測定結果の違いがしばしば問題になる。ECのナノ材料定義への該非判定に向けてJRCが2019年に発行した報告書^[5]では、分散性の異なる欧州標準物質について様々な計測法で粒径を評価した結果が報告されている。ここでは、粒子が球状で単分散に近い試料では計測法間差が小さいのに対して、粒径分布が

広い試料では計測法間で顕著な差が生じる。各計測法の基礎となる物理的な原理が、通常、粒径が単分散で理想的な試料系に対してのみ精度良く成り立つためである。

実際の材料においては粒子サイズ分布に広がりを持つため、正確な粒径計測・分析に際して注意が必要となる。粒径が二峰分布の試料に対する代表的なアンサンブル法であるDLSとLDの結果を紹介する。用いた試料は粒径70 nmと180 nmのPSL(PolyStyrene Latex)の標準粒子を質量比1:1で混合したものである。それぞれのPSL標準粒子のSEM像をFigure 3に示した。

両PSL粒子どちらも球形で極めてシャープな粒径分布であることがわかる。粒子径に依らずPSLの密度が一定であるとする、質量比1:1で調整した混合溶液には個数基準では180 nmのPSLに比べて約17倍の70 nmのPSL粒子が存在している。

Figure 4にDLSおよびLDによって評価された混合溶液に含まれる粒子の粒径分布を示した。両者の測定量は光強度基準、体積基準と異なるが、二峰のサイズ分布は再現できていない。これは粒子からの散乱する光の強度が粒子径の6乗に比例するため、大きな粒子からの強い散乱光によって小さな粒子からの弱い散乱光の効果が遮蔽されてしまうことによる。

DLSとLDはアンサンブル法として優れた特徴を有するが、粒径分布の広い材料の精確な分析には、粒径分布の狭い複数の分画に分けて測定した結果を合成する等の工夫が必要である。流動場を用いた分級システムとDLSを組合せて二峰性試料の粒径分布を精度良く再現した例が報告されている^[6]。

ECのナノ材料の定義が微粒子の個数基準でのサイズ分布を基礎としていることもあり、個数基準濃度の研究所や国を超えた測定再現性に関する検証が様々な枠組みで行われている。最も大規模なものは、VAMAS(Versailles project on Advanced Materials and Standards)が行った金ナノ粒子の試験所間比較であり、世界各国から50の研究機関が参加した結果が報告されている^[7]。試料には粒径30 nmの金ナノ粒子分散液が用いられた。試料のクエン酸で安定化

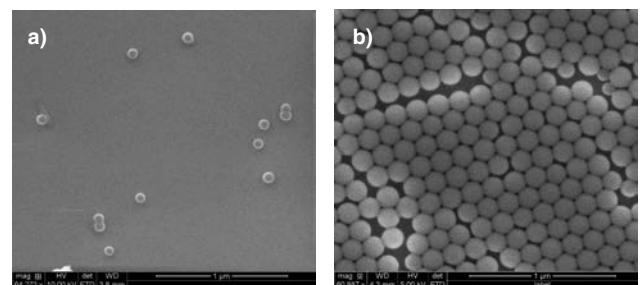


Figure 3 Electron micrographs of PSL reference particles.
a) $d=70$ nm, b) $d=180$ nm

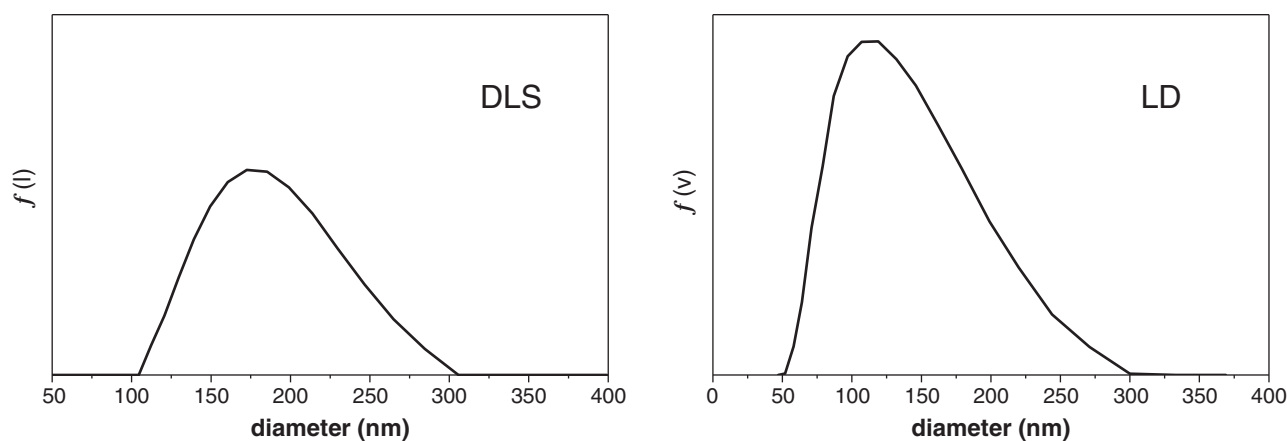


Figure 4 Particle size distributions of bimodal reference sample evaluated by DLS and LD.
DLS (Dynamic Light Scattering), LD (Laser Diffraction)

された金ナノ粒子は、ほぼ球形で極めて粒径分布が狭いことが、CLSやSEMによる事前検討から明らかにされていた。計測分析法としては、SAXS、CLS、UV-Vis、PTA、spICP-MSが用いられた。同報告では、アンサンブル法であるSAXSとUV-Vis、フラクシヨネーション法であるCLSを合わせて集団平均法(Population-Averaging Methods)として、カウンティング法であるPTAとspICP-MSとの比較を通して結果の考察をしている。

結果で興味深いのは、集団平均法が試験所間で高い測定再現性を示すことである。SAXS、CLS、UV-Visによる報告値の相対標準偏差はそれぞれ、2.6%、11%、1.4%であった。この中で特にアンサンブル法は、理想的な試料の個数濃度の評価において試験所を超えて高い再現性を示した。これは同法の測定セットアップおよびプロトコルが比較的簡単で高い堅牢性を有することに起因しているとされている。CLSは技術的に若干複雑になりより高度な校正が必要であるとされている。他方対照的にカウンティング法による報告値は、それぞれの試験所内の再現性が相対標準偏差12%程度であるのに対して、試験所間のそれはspICP-MS法で46%、PTA法で68%と大きく劣っていた。試験所間の再現性が劣る理由について、カウンティング法利用時に必要であった試料の大幅な希釈過程の影響等も含めて検討されたが、明確な解釈には至っておらず、その向上に向けて、試料調製を含む測定手順およびデータ処理手順の標準化の重要性が指摘されている。国際度量衡委員会物質質量諮問委員会(CCQM: Metrology in Chemistry and Biology)において、単分散金ナノ粒子分散液や二峰性金ナノ粒子分散液を用いたパイロット研究や国際比較が進められており、ナノ粒子分散液の個数濃度の精確かつ国際整合性を有する計測分析基盤の確立が期待されている。

微粒子の計測・分析法の国際標準化はISO TC 24/SC 4あるいはISO TC 229/JWG 2において主に行われている(AFMの計測技術についてはISO TC 201/SC 9)。ナノ粒子の個数基準のサイズ分布の計測・分析法として重要で試

験所間比較にも用いられているPTA法およびspICP-MS法は既に国際標準が存在する(それぞれISO 19430:2016, ISO/TS 19590:2017)。両者とも定期見直しを機に最新の知見をベースに、PTA法はISO TC 24/SC 4において、spICP-MS法はISO TC 229/JWG 2において現在改定作業が続けられている。

特にPTA法はカウンティング法でありながら顕微鏡法に比べて自動化等による簡易化できる可能性が高く、汎用的な適用が期待されており、今般の改定では濃度評価に関する記述の追記が予定されている。

粒径70 nmと180 nmのPSLの標準粒子を質量比1:1で混合したもののPTAによる計測結果をFigure 5に示した。サイズ分布は二峰性であることを示しているが、濃度軸は測定回毎に異なり、その分布は調製時の個数濃度が反映されていない。PTAでは他の顕微法と同様計測対象となっている領域が試料全体に比べて極端に少ないため、データの積算についても他の顕微法同様統計的に十分有意であることの確認が重要である。

ECのナノ材料定義への合致判断においては先ず比表面積での選別が行われるが、最後まで該否判断に疑義が生じた場合、凝集体の構成粒子の確認のため電子顕微鏡による計測分析が必要となる。電子顕微鏡の利用に際しては、観察試料作製や結果の集計について統計的に正しい標準化された手続きを用いる必要がある。TEMについてはISO 21363:2020(Nanotechnologies - Measurements of particle size and shape distributions by transmission electron microscopy)が、SEMの利用に際してはISO 19749:2021(Nanotechnologies - Measurements of particle size and shape distributions by scanning electron microscopy)が近年制定されている。

これらの国際標準はOECDのテストガイドライン 125 (Nanomaterial Particle Size and Size Distribution of

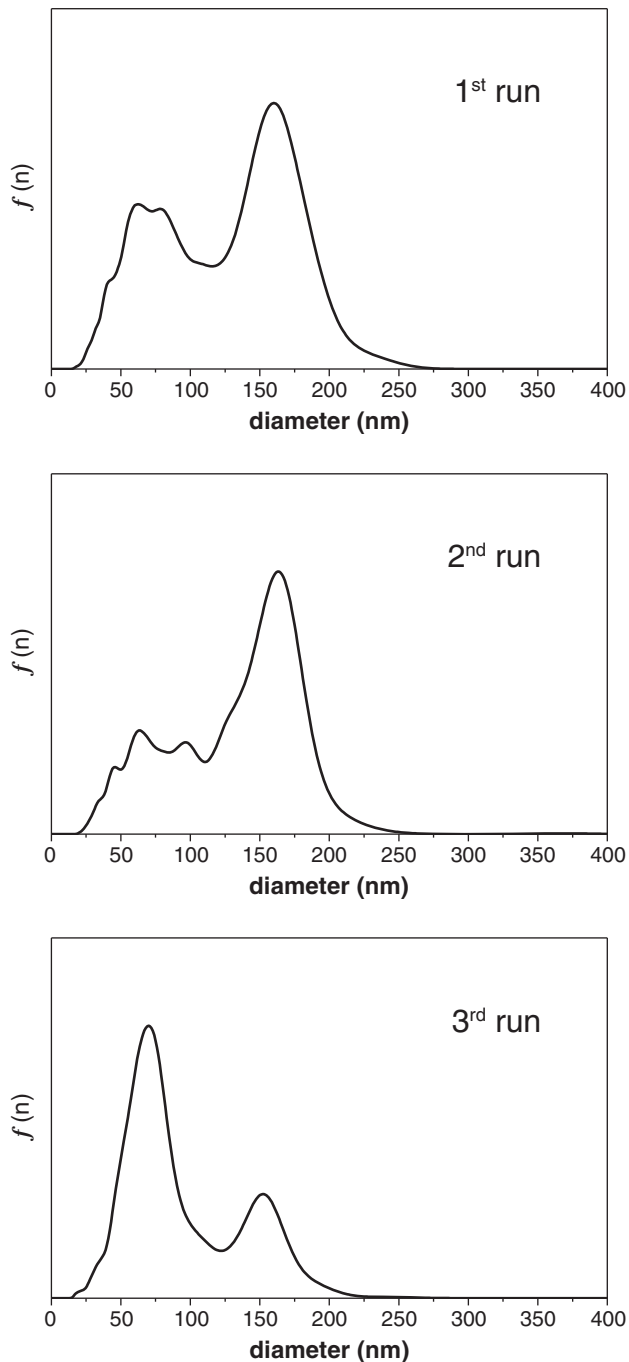


Figure 5 Number based particle size distribution evaluated by PTA method for a bimodal reference sample.

Nanomaterials, 30 June 2022)にも引用されている。

おわりに

先導的な技術基準が導入される欧州の規制への対応を中心に粒子計測・分析技術と標準化における最近の話題を纏めた。ECにおいてナノ材料の定義の初版が提案された2011年以降、微粒子計測・分析の詳細な理解および計測結果の信頼性の向上は目覚ましいものがある。

産業技術総合研究所では微粒子計測・分析の基盤となる計量標準の開発・供給、およびその高度化を行っている計量

標準総合センター内に、堀場製作所をパートナー企業とした「堀場製作所-産総研 粒子計測連携研究ラボ」を2021年に設立した。同ラボでは世界トップレベルの粒子計測を可能とするシステムの開発および実用化を目指しており、環境規制強化に対応する粒子計測システム開発およびナノ材料特性の解析・評価システム開発をテーマとして活動を開始している。環境規制強化に対応する粒子計測システム開発においては、PM2.5や自動車排気粒子など、環境課題の解決に向けて今後さらなる規制強化が想定される分野において、より微小な粒子の正確かつ簡便な計測に向けた新たな知見が得られつつある。また、ナノ材料特性の解析・評価システム開発では遠心式粒子径分布測定装置のアプリケーション確立に向けて、カーボンナノチューブやセルロースナノファイバーを対象として顕微鏡による比較を通じた詳細な検討を行っている。その結果、従来の散乱法では難しかった、遠心沈降法による高分解能な粒子径解析技術に繋がる成果が得られている。それぞれの成果の活用および実用化の推進に際しては、粒子計測技術の分野横断性を活かした適用分野の拡充に向けた成果創出も期待されている。

近年計測・分析データを集積して、新たな知見の創出を目指すDXの推進が世界的に進められている。DXで重要となるデータの共有に際して、FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable)原則が提唱されており、国際的に広まりつつある。FAIR原則の詳細については様々なコミュニティで議論の対象となっているが、データが十分なメタデータとともに記述されており標準的な方法でアクセスおよび理解可能であること、データのトレーサビリティが明確に記述されていることが重要である。

微粒子は幅広い技術分野で用いられることから、その計測・分析に求められる情報も多岐に亘る。計測・分析技術の詳細な理解に基づき十分なメタデータと共に保存・集積された信頼性の高い共有データは、微粒子の画期的な応用機会に繋がるものと考えている。優れた計測分析機器と詳細に検討されたプロトコルを用いることによって分野を超えた測定結果の相互利用が可能になり、微粒子の新規特性の理解および活用に繋がることを期待している。

*測定法の略語

AFM(Atomic Force Microscopy),
 CLS(Centrifugal Liquid Sedimentation),
 CPC(Condensation Particle Counter),
 DMA (Differential Electrical Mobility Analyzer), DLS (Dynamic Light Scattering),
 ICP-MS (Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry),
 LD(Laser Diffraction),
 PTA(Particle Tracking Analysis),
 SAXS(Small-Angle X-ray Scattering),

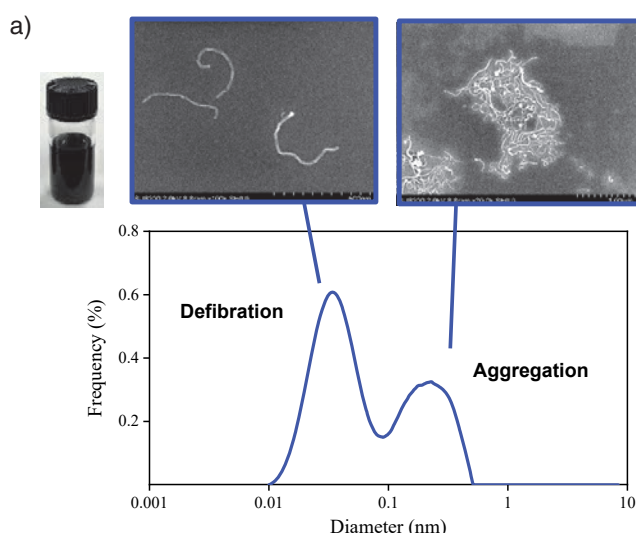
SEM(Scanning Electron Microscopy),
spICP-MS(Single Particle ICP-MS),
TEM(Transmission Electron Microscopy),
UV-Vis(Ultra Violet - Visible)

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年
時点での自社調査に基づいて記載しています。

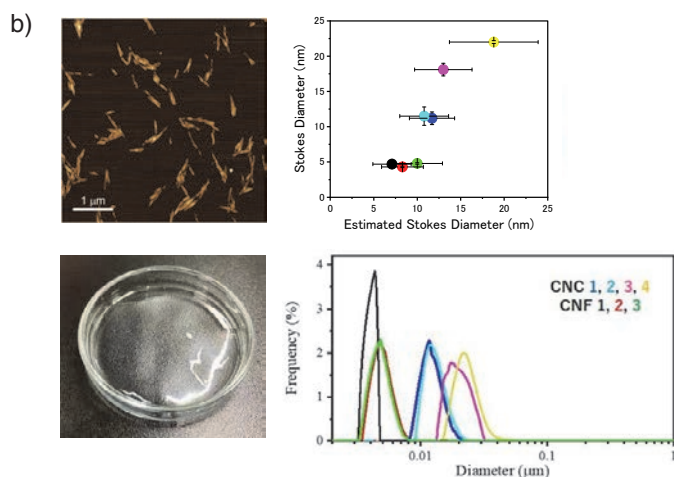
参考文献

- [1] https://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/pdf/C_2022_3689_1_EN_ACT_part1_v6.pdf
- [2] T. Lisinger et al., Requirements on measurements for the implementation of the European Commission definition of the term 'nanomaterial', <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC73260>
- [3] H. Sakurai et Al., Earozoru Kenkyu, 22(4), 310(2007); H. Skurai and K. Ehara, Meas. Sci. Technol. 22(2011) 024009, doi:10.1088/0957-0233/22/2/024009
- [4] K. Iida et Al., Aerosol Science and Technology, 48, 78(2014), DOI: 10.1080/02786826.2014.930948
- [5] Rauscher et al., Identification of nanomaterials through measurements, EUR 29942 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-10371-4, doi: 10.2760/053982, JRC118158
- [6] T. Yamaguchi et Al., Anal. Sci. 36, 761(2020)
- [7] C. Minelli et al., Nanoscale, 14, 4690(2022), DOI: 10.1039/d1nr07775a

堀場製作所 - 産総研 粒子計測連携研究ラボにおける遠心式粒子径分布測定装置のアプリケーション確立



a) Carbon Nano Tube : Particle size distribution and electron microscope images.



b) Nanocellulose: Particle size distribution and correlation with AFM.



Centrifugal Nanoparticle Analyzer