知的ナノ計測専門委員会

ものづくり基盤の進化からイノベーションの創出を担う知的ナノ計測*

Intelligent Nano-measurement as a Driving Force of Metrology and Innovation

高谷裕浩**
Yasuhiro TAKAYA

Key words

intelligent nano-measurement, metrology, traceability, optical comb, areal topography, optical measurement

1. はじめに

メゾスコピックからサブナノメートル領域の幾何学量を扱う最先端のものづくりにおいて、新たな技術や機能を創出するためには、「プロセスの見える化」が不可欠であり、ものづくり基盤としての計測技術は、グローバルな規模で急速に変化するものづくりに対応するための戦略技術として、ますます重要となってきた。本委員会（委員長：高谷裕浩（大阪大学）* 2014 年高増潔（東京大学）委員長から交代）は、「知的ナノ計測研究分科会」（2004 年発足：委員長 三好隆志（大阪大学））における活動を発展的に継承することにより、2006 年に設立された。設立以来一貫して、計測の基盤である標準や規格のたゆまない進化を追求する基礎研究から、新たな加工原理や製造技術への適用が可能な新計測技術の開拓に至る広範囲なものづくり計測の探求を目的とした活発な活動を展開している。

2. 活動理念：3つの基盤

本委員会の活動理念を図1に示す。計測は、科学、技術および社会的秩序におけるそれぞれの基盤として、その役割を果たしている。すなわち、学問基盤、技術基盤および社会基盤の構築、維持、発展を担う委員会活動は、

- 1) 基礎現象の深い理解に基づいた新たな計測原理の探求と、それによって獲得された知識の体系化によって普遍性の高いメトロロジや計測科学を構築する、
- 2) 新たな加工原理や製造技術への適用が可能な加工計測、知的計測および計測システムなど、技術革新の原動力となる計測技術を開拓する、
- 3) ものづくりにおける社会的（経済的）秩序を維持するための、標準と規格、校正、トレーサビリティを整備する、

の3つの目的に基づいている。このような委員会活動を、産官学連携のコアの役目を果たしながら強力に推進し、革

新的ものづくりの創出と計測科学の学術体系そのものの変革を世界的な規模で広げていくことを狙っている。

3. 知的ナノ計測の最新動向

3.1 計測基盤の進化

この5年くらいのあいだに、ものづくり計測全体の変革に関わる、新たな動きが起きており、本委員会の研究開発の方向性にも影響を与えている。

3.1.1 新たな長さの国家標準

ナノスケールものづくりにおける絶対精度を保証するためには、絶対基準に対する繰り返し測定の実測値がもつ分布の期待値（母平均）の偏りが高精度に校正された、高い正確度をもつ計測技術が必要不可欠である。すなわち加工の絶対精度は、トレーサビリティに基づいて保証される。トレーサビリティ体系の最も頂点にあるのが、国際単位 SI (Système International d'Unités) における基本単位である、長さ（メートル）標準を具現化した国家標準（特定標準器）であり、その精度は計測機を通して加工精度にも波及する。1993 年 11 月に特定標準器に指定されて以来 15

図1 知的ナノ計測専門委員会の活動理念

*原稿受付 平成 27 年 8 月 5 日

**正 会 員 大阪大学大学院工学研究科（大阪府吹田市山田丘 2-1）

図2 新たな長さの国家標準：光周波数コム

年間、波長の値 632 991 212.579 fm に対し、12 桁の精度が保証されている、「長さ用 633 ナノメートルよう素分子吸収線波長安定化ヘリウムネオンレーザー装置」が国家標準として用いられてきた。2009 年 7 月、新たな長さの特定標準器として、エルビウム添加光ファイバーを増幅媒体とするモード同期ファイバレーザとフォトニック結晶ファイバーから構成される、「協定世界時に同期した光周波数コム装置」が指定された。光周波数コムは、図 2 に示すように、その出力電場 $E(t)$ の時間変化はモード同期パルスレーザであり、周波数軸のスペクトル $\bar{E}(v)$ は発振モードが等しい周波数間隔（モード間隔周波数）で並んでいる。そのため多くの波長に対して光ビートを利用した高精度な光周波数計測が可能となり、光応用測定機の校正の利便性が飛躍的に向上し、光周波数の測定精度が 300 倍向上した（不確かさ 1/300）。

3.1.2 光学式 3 次元形状計測の規格

複雑な 3 次元自由曲面形状加工の急速な広がりに対応するため、光学式 3 次元形状計測の高精度化と実用化が進んでいる。そこで、測定機の校正方法やトレーサビリティの必要性に対する要求に応えるため、2009 年 9 月に JIS B 7441「非接触座標測定機の受入検査及び定期検査」¹⁾が制定・公示された。対象物の形状を多点群の三次元座標値として取得できる非接触座標測定機として、「イメージセンサ（CCD カメラなど）の他に、測定のために物体表面にパターン・テクスチャを投影するプロジェクタ、レーザ光を投影するシステムなどをもつ光学式センサ、その他の手法による非接触プロービングシステムを保有する」測定機が規格の対象とされている。光学式センサの具体例として、レーザスリットスキャン、縞投影、スポット光投影、モアレ方式などが挙げられている。精度評価の方法は、従来の CMM（Coordinate Measuring Machine）の校正などでも規定されている。トレーサビリティを確保するためのアーティファクトを用いた方法に準拠している。特徴的なのは、表面の光学特性を規定する項目が挙げられている点

図3 検査用標準器を用いた表面の光学特性評価法

である。図 3 に示すように、光を検査用標準器に投影し、角度 θ_c と θ_s を変化させながら反射光を観測することによって、測定表面の特性を評価する方法が示されている。

3.1.3 3 次元表面粗さの規格

最近では、サブマイクロメートルからナノメートル単位で加工制御を行い、複雑で高度な機能を有する表面微細形状加工の需要も増している。しかし、従来の 2 次元輪郭曲線に基づいた表面粗さパラメータ²⁾では、複雑な 3 次元表面微細形状や加工精度の評価に十分対応できなくなっている。2012 年には ISO 25178-2 の新たな 3 次元表面粗さ規格が定められた³⁾。新たな規格では、コヒーレンス走査型干渉法や共焦点顕微鏡など、主に 3 次元プロファイル計測に適した光学式測定法を分類して提示している。さらに、3 次元パラメータの規格を生産現場に普及させようとする動きも急速に進んでおり、最新動向として、生産現場における加工表面の検証や測定機の校正に利便性の高い校正用標準試料や、生産現場の環境でも利用可能な測定機が開発されている。3 次元表面性状パラメータの多くは輪郭曲線 $Z(x)$ から 3 次元プロファイル $Z(x, y)$ への拡張となっているが、自己相関距離やモチーフ解析のような 3 次元トポグラフィ特徴解析など、3 次元表面性状パラメータ独自の評価方法も提示されている。

3.2 学術としての深化と展開

本委員会の活動理念を示した図 1 に対応する研究について、それぞれ一例を挙げて紹介する。

3.2.1 学問基盤

基礎現象の深い探求に基づいた新たな計測原理の確立に挑戦する研究の一例として、新たな長さの国家標準に基づいた次世代の距離計測技術に関わる研究が展開されている。光コムのビートを利用する計測手法を提案し、遠方から、粗面に対して非接触かつ高速で、高分解能（10 μm ）で測距を行う計測手法の有効性を示している⁴⁾。また、蛍光偏光の物理現象に基づいた新たなナノ粒子粒径計測原理である周波数領域蛍光法が提案されている。蛍光プローブ標識金ナノ粒子の回転拡散係数測定によって、提案手法に

図4 見学会の様子 ((株)クリスタル光学)

より粒径計測の妥当性を示している⁵⁾。

3.2.2 技術基盤

精密加工装置や半導体露光装置向け超精密リニアステージにおいては、高精度リニアエンコーダを用いたフィードバック制御による nm・サブ nm オーダの位置決め精度が要求される。新たな知的精密計測技術の開拓に関する研究の一例として、測定レーザー光の反射体に回折格子を用いることで、シングルレーザー光で測定対象の3軸微小回転運動を一括検出できる光学式3軸角度センサの提案と、実用的なセンサを用いた実験実証が行われている⁶⁾。

3.2.3 社会基盤

薄膜作製や材料表面処理の品質管理のため、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いてナノメートルオーダの表面粗さ測定が広く行われるようになってきており、より高品質な薄膜や材料表面を評価するために、より高精度で信頼性の高い表面粗さ測定が求められている。そこで、標準と規格、校正、トレーサビリティなどに密接に関連した基礎研究の一例として、測長原子間力顕微鏡を用いた表面粗さ測定に関する研究が挙げられる。測長 AFM を用いて各種材料の表面粗さ測定およびその不確かさ評価が行われている。その結果、測長 AFM はナノメートルオーダの表面粗さ測定にも適用可能であり、表面粗さの規格である JIS B 1683:2007 も有効であることが示されている⁷⁾。

4. 活動概要と実績

前回のレビュー (精密工学会誌, Vol.76, No.10, 2010) 以降の活動についてその概要をまとめる。

4.1 研究会と見学会

春季および秋季大会の定例委員会および年一回の総会と研究会 (見学会を含む) を開催した。総会では、毎回2件以上の計測および関連分野の最先端動向に関する特別講演会を実施している。また、研究会では、大阪大学吹田キャンパス (2011年6月)、(株)小坂研究所 (2013年12月)、(株)クリスタル光学 (2015年1月) を訪問し、講演会と見学会を実施して研究交流を図っている (図4)。

表1 オーガナイズドセッション：知的精密計測の講演件数

年度	春季大会学術講演会	秋季大会学術講演会
2011年	3月14～16日：東洋大学 大震災により中止	9月20～22日：金沢大学 34件
2012年	3月14～16日：首都大学東京 35件	9月14～16日：九州工業大学 21件
2013年	3月13～15日：東京工業大学 29件	9月12～14日：関西大学 23件
2014年	3月18～20日：東京大学 43件	9月16～18日：鳥取大学 20件
2015年	3月17～19日：東洋大学 35件	9月4～6日：東北大学 33件 (予定)

4.2 オーガナイズドセッション：知的精密計測

本委員会が主催したオーガナイズドセッション「知的精密計測」を表1にまとめた。毎回20件以上の講演発表があり、最新計測技術に関する発表と活発な議論が行われている。

4.3 国際会議とシンポジウムの主催

本委員会では、表2に示すような国際会議とシンポジウムを積極的に主催し、国内外における研究者および企業技術者などによる学術交流を行っている。まず、国際交流として、2010年に計測と品質管理に関する国際会議である、ISMQC2010 (10th International Symposium on Measurement and Quality Control, 大阪大学, 実行委員長：高谷裕浩 (大阪大学)) を主催し、197名 (外国参加者108名)、発表件数147件の盛会となった。さらに、2014年に LMPMI2014 (11th Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry, つくば国際会議場, 実行委員長：高辻利之 (産総研)) を実施し、119名 (外国参加者48名)、発表件数81件の実績を挙げた。

次に、2012年の秋季大会学術講演会・国際シンポジウムでは、将来を担う若手研究者と海外の招待講演者より、ナノスケールものづくり基盤としての新たな計測技術の最新研究開発動向が紹介された。2015年春季大会では、国連 (A/RES/68/221) で採択された世界イニシアチブである、国際光年 (International Year of Light, IYL2015) を記念して、「ユネスコ国際光年記念 精密工学会・国際シンポジウム」を開催した。さらに、2015年秋季大会でも、「ユネスコ国際光年記念シンポジウム 知的ナノ光計測の新展開」を主催して、ものづくりの基盤を支える光計測の最新動向を紹介する。

4.4 知的精密計測への理解を深める啓蒙活動

基礎講習会や学会誌特集記事などは、社会に広く開かれた学問としての重要な使命である。その活動の一つとして、第367回講習会「研究室見学付き基礎講座「はかる」を知る、精密測定の理論と最新動向—基礎原理から最新の微細欠陥精密計測、X線CT、計測機器まで—」(2014年6月)を、精密工学会と精密測定技術振興財団の共催によって開催した。計測のトレーサビリティや歴史等、精密測

表2 国際会議とシンポジウムの主催

年 度	国際会議/シンポジウム
2010 年	9 月 5～9 日（大阪大学）：国際会議 IMEKO Symposium ISMQC2010（10th International Symposium on Measurement and Quality Control） 主 催：知的ナノ計測専門委員会，大阪大学大学院工学研究科
	9 月 20 日（金沢大学）：秋季大会学術講演会・シンポジウム 「光形状計測技術の最新動向」 主 催：知的ナノ計測専門委員会，メカノフォニクス専門委員会
2012 年	3 月 16 日（首都大学東京）：春季大会学術講演会・シンポジウム 「高精度の形状・大きさ・寸法を実現するための GPS 規格」 主 催：知的ナノ計測専門委員会，日本規格協会
	9 月 16 日（九州工業大学）：秋季大会学術講演会・国際シンポジウム International Symposium on Technology for Intelligent Measurement with Nanoscale 主 催：知的ナノ計測専門委員会
2013 年	3 月 13 日（東京工業大学）：春季大会学術講演会・シンポジウム 「輪郭曲線・輪郭曲面の測定と定量化法及び三次元の表面性状パラメータ」 主 催：知的ナノ計測専門委員会，日本規格協会
	3 月 18 日（東京大学）：春季大会学術講演会・シンポジウム 「歯車形状測定技術の新展開」 主 催：知的ナノ計測専門委員会，メカノフォニクス専門委員会，成形プラスチック歯車研究専門委員会
2014 年	9 月 2～5 日（つくば国際会議場）：国際会議 IMEKO Symposium LPMI2014（11th Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry） 主 催：知的ナノ計測専門委員会，産業技術総合研究所
	3 月 16 日（東洋大学）：春季大会学術講演会・国際シンポジウム 「ユネスコ国際光年記念 精密工学会・国際シンポジウム」 主 催：知的ナノ計測専門委員会，メカノフォニクス専門委員会
2015 年	3 月 16 日（東洋大学）：春季大会学術講演会・シンポジウム 「量子光工学の現状」 主 催：知的ナノ計測専門委員会，メカノフォニクス専門委員会
	9 月 6 日（東北大学）：秋季大会学術講演会・シンポジウム（予定） 「ユネスコ国際光年記念シンポジウム 知的ナノ光計測の新展開」 主 催：知的ナノ計測専門委員会，メカノフォニクス専門委員会

定の基礎についての講義にくわえ，近接場光や X 線を利用した応用的な精密測定技術の解説および非接触 3D 測定機を利用した生産性向上・改善の事例について紹介された。

5. お わ り に

知的ナノ計測専門委員会は，設立から 10 年を迎えようとしている。その間，世界のものづくりはめまぐるしく変化し，計測が担うべき役割も，ますます複雑で高度になってきている。精密工学において，計測がものづくりの“横糸”であることは，これからも変わらないであろう。しかし，設立 10 年という節目を迎えるにあたり，改めて“横糸”として果たすべき役割を見なおし，さらなる新しい計測技術の構築と学術としての体系化に務めたい。

参 考 文 献

1) JIS B 7441「非接触座標測定機の受入検査及び定期検査」，2009。
2) JIS B 0601-2001，製品の幾何特性仕様（GPS）表面性状：輪郭曲線方式，2001。
3) ISO 25178-2, Geometrical Product Specifications (GPS) —Surface Texture: Areal—, 2012。

4) 尾上太郎，楊宋珞，高橋哲，高増潔，松本弘一：非接触精密光コム距離測定技術の開発（第 6 報）—光軸と計測対象面の角度と計測精度—，2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，（2014）101。
5) 石崎祐樹，林照剛，道畑正岐，高谷裕浩：周波数領域蛍光法を用いたナノ粒子粒径評価に関する研究（第 3 報）—DNA を用いたナノ粒子計測プローブの開発—，2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，（2014）93。
6) 丸山泰司，清水裕樹，伊藤聡，高俣：光学式 3 軸角度センサの小型化に関する研究，2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，（2015）151。
7) 三隅伊知子，直井一也，菅原健太郎，権太聡：測長原子間力顕微鏡を用いた表面粗さ測定（第 1 報）—JIS R 1683:2007 に整合した手法の検討—，2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，（2014）73。

高谷裕浩
1992 年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了，同年大阪大学工学部助手，同講師を経て，1997 年大阪大学大学院工学研究科助教授，2006 年同教授，博士（工学）。光応用ナノ加工・計測，カーボンナノ粒子応用加工などの研究に従事。