

# モノづくりの高度化を牽引する 「検査・計測」技術基盤

廣瀬 文師  
Hirose Takenori

田中 麻紀  
Tanaka Maki

中野 博之  
Nakano Hiroyuki

谷口 伸一  
Taniguchi Shinichi

三輪 俊晴  
Miwa Toshiharu

モノづくりにおいては、設計どおりに製造できていることを保証するため、モノの検査や計測が必要不可欠である。日立製作所研究開発グループの生産分野の「検査・計測」技術基盤では、外観検査・計測、非破壊検査、化学・プローブ応用計測、光学式3D形状計測の4つの中核技術を設定し、さまざまな対象に対応した検査・計測技術の開発に取り組んでいる。これらの中核技術の強化により、日立グ

ループのモノづくりにおける品質向上や信頼性の確保に貢献するとともに、検査・計測装置事業を牽引していく。本稿では、それぞれの中核技術の開発例として、半導体外観検査技術、超音波およびX線による非破壊検査技術、ナノ分解能顕微鏡および生体分子計測、光学式3D形状計測技術を紹介する。

## 1. はじめに

モノづくりにおいて、設計どおりに製造できていることを保証するため、モノの検査や計測が必要不可欠であることは言うまでもない。検査・計測は品質保証に必要不可欠ではあるが、生産に直接的に寄与しないため、工場での設備投資がされにくいとも言われている。しかし、実際には優れた検査・計測技術は、製品の品質や信頼性を担保するだけでなく、製造工程で発生する不良の低減や、調整や段取り作業をなくした製造工程の自動化など、工場全体の生産性や品質の向上に欠かせない基盤技術である。また、世の中で話題となっているIoT (Internet of Things) を活用した新たなモノづくりにおいても、検査・計測技術はモノの状態をリアルタイムで計測してデジタル化するコア技術である。サイバー空間において実世界の計測データとさまざまなシミュレーション技術を融合させることで、顧客の多種多様なニーズに対応した製品を直ちに生産するマスカスタマイゼーションの実用化が進んでいる。

日立製作所研究開発グループの生産分野の「検査・計測」技術基盤では、日立グループのモノづくりにおける品質向上や信頼性の確保に貢献するとともに、検査・計測装置事業を牽(けん)引していくことを目的に、4つの中核技術〔(1) 外観検査・計測、(2) 非破壊検査、(3) 化学・プローブ応用計測、(4) 光学式3D (Three-dimensional) 形状計測〕

を定め、その技術開発の強化を図っている。これらの中核技術は、機械部品から材料・プロセス製品まで幅広い製品分野をカバーし、高精度な外観および内部欠陥検出技術や、まだ見えていない状態や事象の可視化・見える化を実現する先進的な技術の開発を進めている。

本稿では、これらの中核技術の強みとなる特徴を説明するとともに、日立グループのモノづくりにおける活用や、検査・計測装置への適用状況について述べる。

## 2. 外観検査・計測

製品上の微小な異物や欠陥を検出する光学検出技術と、検出した異物などを顕在化するための画像処理技術、および両者を組み合わせた外観検査・計測技術を開発している。

### 2.1 半導体ウェーハ検査

半導体ウェーハを対象とし、微小欠陥を高速かつ高精度で検出可能な世界トップレベルの検査技術を開発している。開発技術は株式会社日立ハイテクノロジーズの半導体ウェーハ外観検査装置に適用され、ナノメートルオーダーの欠陥管理を可能とすることで、デバイスメーカーの製造歩留まりや製品信頼性の向上に寄与している。

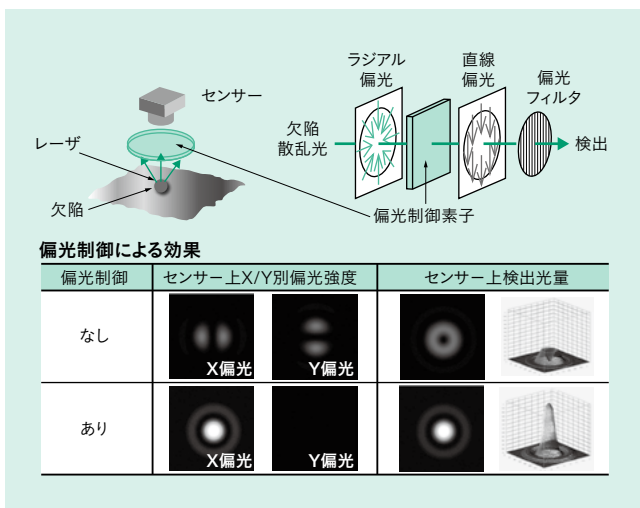


図1 | 欠陥検出光学系

ラジアル偏光である欠陥散乱光を直線偏光に変換して検出することで、ウェーハ表面散乱光との弁別比を上げ、高感度検出を実現している。

## 2.2 光学検出技術

レーザー照射による微小欠陥からの散乱光をモデル化し、偏光を表現可能とする光線ベクトル化シミュレーションに基づき、偏光制御素子を利用した高感度微細欠陥検出光学系を開発している<sup>1)</sup>。欠陥からの散乱光は放射状のラジアル偏光であるが、偏光制御素子によって直線偏光に変換する。これを偏光フィルタで選択的に透過させることにより、欠陥散乱光とウェーハ表面からの散乱光とを高効率に弁別し、 $\phi 18 \text{ nm}$  欠陥の安定検出を実現した(図1参照)。

## 2.3 画像処理技術

半導体デバイスの微細化に伴い、製造プロセスでのばらつきの大きさが欠陥サイズと同程度となっており、これらを弁別するための高度な処理アルゴリズムが求められている。従来の濃淡ベースの画像比較検出に加え、摂動アルゴリズム<sup>2)</sup>の高度化や特徴量による画素弁別技術により、検

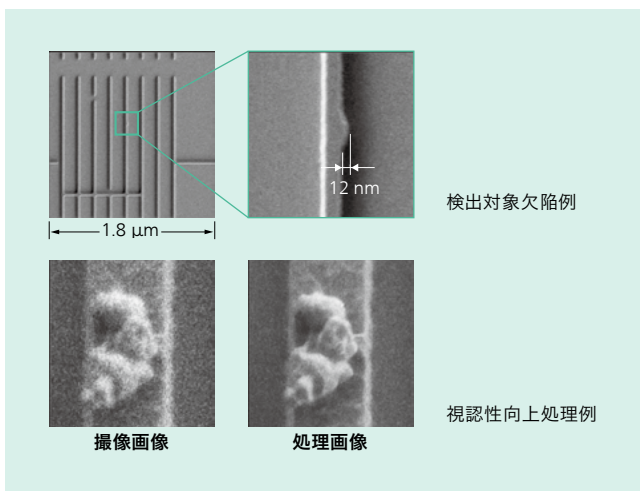


図2 | 欠陥検査のための画像処理

微細欠陥検出、視認性向上のための画像処理アルゴリズムを開発している。

出の高感度化を図っている。

欠陥のSEM (Scanning Electron Microscope) 画像では観察が重要な用途であり、ノイズ抑制アルゴリズム、検出モデルに基づいた画像高分解能化アルゴリズム<sup>3)</sup>など、欠陥視認性向上のための画像処理アルゴリズムを開発している(図2参照)。

## 3. 非破壊検査

X線や超音波を用いて、製品の内部を可視化する非破壊検査技術を開発している。開発した技術は、日立製作所の産業用高出力X線CT (Computed Tomography) 装置HiXCTシリーズ、株式会社日立パワーソリューションズの超音波探傷装置ESシリーズに適用され、製造プロセスの改善・効率化、製品品質の向上に寄与している。

### 3.1 産業用高出力X線CT

従来方式(第2世代)では、1断面の撮像に並進と回転操作が必要であった。検出精度を落とさず短時間で撮像するために、検出素子として薄型の半導体センサーを稠(ちゆう)密に配列することで、回転操作のみで画像を作成できる方式(第3世代)を開発し、1断面当たり最速10秒の高速撮像を実現した<sup>4)</sup>。

X線発生源に対向して1列に500~1,000素子の検出器アレイを配置する。センサー素子と高精度にアライメントされたコリメータを用い、各素子には特定の方向からのX線のみが入射する構成とすることで、素子間での混線(クロストーク)を防止して高速撮像と検出精度を両立させている(図3参照)。

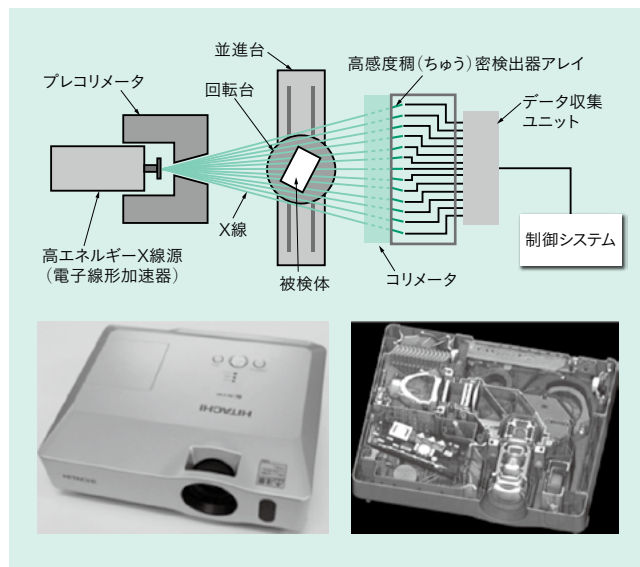


図3 | 産業用高出力X線CT装置の構成と内部可視化結果

産業用高出力X線CT (Computed Tomography) 装置の構成(上)と内部可視化結果(下)を示す。高感度稠密検出器アレイとコリメータで0.2 mmの分解能を実現した。

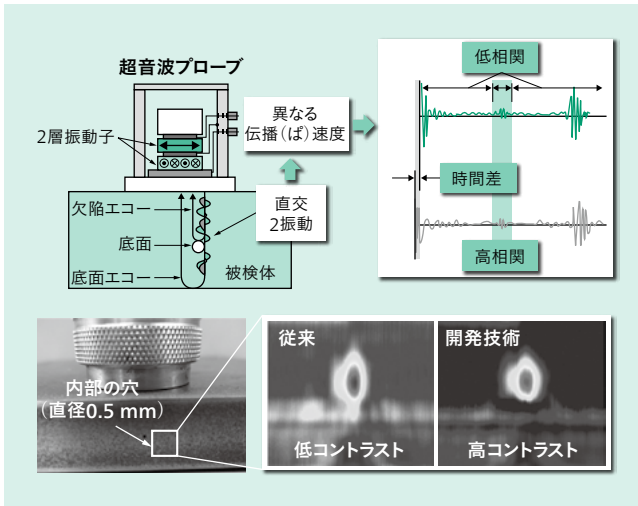


図4 | 2軸超音波プローブの構成・検出波形と内部可視化結果

2軸超音波プローブの構成・検出波形(上)と内部可視化結果(下)を示す。2軸の超音波の相関を利用してサブミリメートルオーダーの欠陥を検出する。

### 3.2 超音波検査技術

振動軸が直交する2つの超音波を用いる検査技術を開発した<sup>5)</sup>。従来は、結晶界面で発生する反射ノイズのため欠陥信号の識別が難しくなり、数ミリメートルオーダーの欠陥しか検出できなかった。そこで、振動軸が直交する超音波を送信・受信する2つの超音波素子を使い、各軸の信号を個別に取得できるようにした。圧延材などの金属では、振動軸が直交する2つの超音波の伝播(ば)速度が異なるため欠陥の検出信号位置が異なる。そこで、伝播速度の違いに基づき、欠陥信号の位置が一致するように補正する方式を開発した。その結果、SN (Signal Noise) 比が向上し、サブミリメートルオーダーの欠陥検出を可能とした(図4参照)。今後、製品化して調達材料の受け入れ検査などに適用していく。

## 4. 化学・プローブ応用計測

最先端デバイスの品質制御や疾患関連生体分子を用いた診断への応用を目的として、従来見えなかった高分解能の光学像の検出や分子機能を計測する技術を、研究所主導で開発中である。

### 4.1 ナノ分解能顕微鏡

最先端デバイスの品質保証や、製造時のインライン検査をターゲットとし、ナノ分解能で物性・組成の状態が計測できるプローブ式の顕微鏡を開発している。プローブ先端にナノサイズの光スポットを発生させ、これを走査することにより、回折限界をはるかに超えるナノオーダー分解能の光学像を取得することができる。

開発した検出用プローブの模式図を図5に示す。Siカンチレバー先端に形成した金薄膜から成るプラズモン導光部

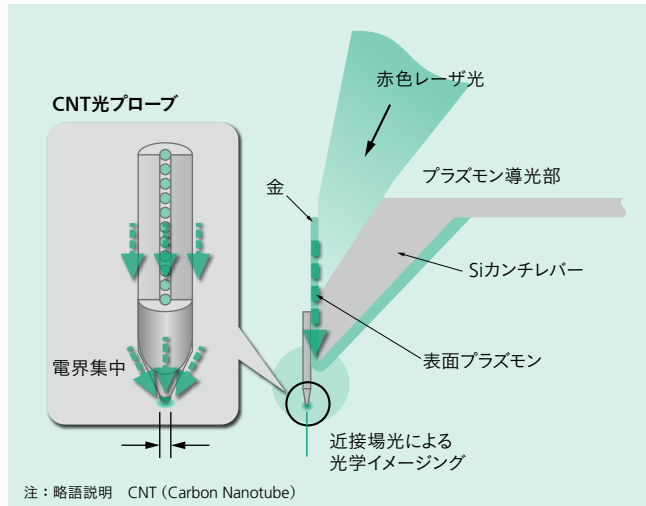


図5 | 開発した光CNTプローブの模式図

プラズモン導光路により、金コートされたSiカンチレバーのチップ先端に近接場光が生成される。これを走査することでナノ分解能の光学像が取得できる。

により、入射光を表面プラズモンに変換し、カーボンナノチューブ (CNT : Carbon Nanotube) 光プローブに効率よく結合する。その結果、CNT光プローブ先端に $\phi 4$  nm程度の近接場光が発生するため、これを利用し、サンプル上のナノ分解能での光学像のイメージングを可能にする。デバイスや材料の特性解析だけでなく、最終的には非破壊での細胞計測装置の開発につなげる。

### 4.2 分子鑄型ポリマによる生体分子の捕捉・高感度計測

生体中に微量 (nmol/L) 存在する疾患に関連する生体分子を計測し、高度な診断を可能にする技術として分子鑄型ポリマ技術を開発している<sup>6), 7)</sup>。分子鑄型ポリマとは、対象とする分子を鑄型としてその周辺にポリマを作製する技術であり、ポリマ表面に対象分子形状の穴を有するものである。コアとなる微粒子(ポリスチレン製)の表面に、分子鑄型ポリマを被覆することで、微量分子を高効率に捕捉して高感度な計測の実現をめざす(図6参照)。

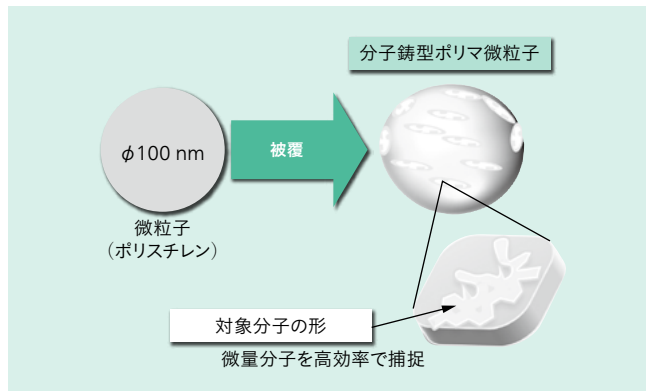
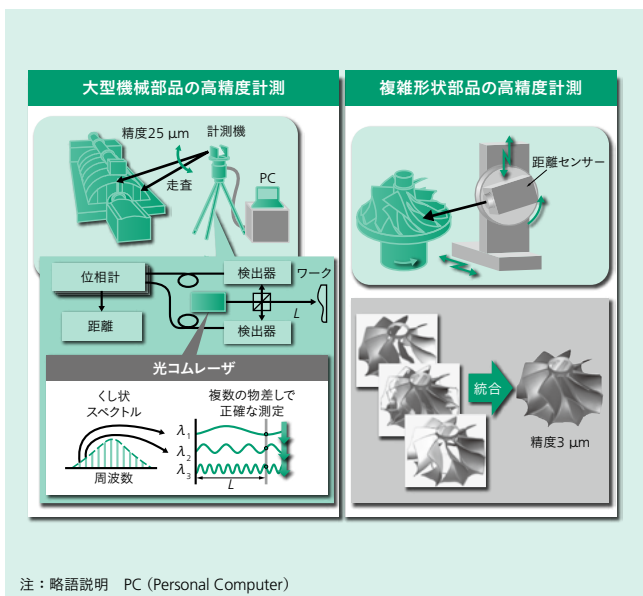


図6 | 分子鑄型ポリマ微粒子の作製模式図

ポリスチレン製微粒子の表面に対象分子に応じた分子鑄型ポリマを被覆することで対象分子を高効率に捕捉する穴が形成され、微量分子が高感度に計測できる。





注：略語説明 PC (Personal Computer)  
**図7 | 高精度3D計測技術**  
 発電機や圧縮機のような大型機械から自動車部品のような複雑形状の小型部品まで、非接触で高精度に形状を測定する技術を開発している。

### 5. 光学式3D形状計測

製品の高效率生産や品質確保には、製造中の形状を計測して、設計・加工・組み立てにフィードバックすることが重要である。そこで、レーザを用いた高精度3D形状計測技術の開発に取り組んでいる。

くし状のスペクトル特性を持つ光コムレーザなど、レーザを応用した非接触で高精度に形状計測可能な技術や、計測した大量の3D点群データを処理・解析する技術を開発している<sup>8), 9)</sup>。発電機、圧縮機、鉄道車両のような大型機械から、自動車部品のような複雑形状の小型部品に対応した技術開発を進めている(図7参照)。

### 6. おわりに

「検査・計測」技術基盤では、今回紹介した技術以外にも、さまざまな対象や方式の検査・計測技術の開発に取り組んでおり、日立グループのモノづくりを検査・計測の視点から支えるとともに、日立グループの検査・計測装置事業を牽引していく。

また、IoTを活用したモノづくりが進展していく中で、先進的な検査・計測技術によってデジタル化を推進し、モノづくりの高度化に寄与していく。

### 参考文献

- 1) Y. Otani, et al.: Enhanced Scattered Light Imaging of Nanoparticles by Controlling the Polarization Distribution with Photonic Crystals, Japanese Journal of Applied Physics (2013)
- 2) Y. Matsuyama, et al.: Precise Visual Inspection of LSI Wafer Patterns by Local Perturbation Pattern Matching Algorithm, Systems and Computers in Japan, Vol. 21, Issue 9, pp. 99-112 (1990)
- 3) K. Nakahira, et al.: A fast iterative technique for restoring scanning electron microscope images, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 768, pp. 89-95 (2014)
- 4) 定岡, 外: 高エネルギーX線CT装置の技術動向とその応用, 精密工学会春季大会シンポジウム (2010)
- 5) M. Kitaoka, et al.: Signal Enhancement by Controlled Orthogonally Polarized Shear Waves, QNDE (2014)
- 6) N. Murase, et al.: Fluorescence Reporting of Binding Interactions of Target Molecules with Core-Shell-Type Cortisol-Imprinted Polymer Particles Using Environmentally Responsible Fluorescent-Labeled Cortisol, Macromolecular Chemistry and Physics, 216, 1396-1404 (2015)
- 7) N. Murase, et al.: A molecularly imprinted nanocavity-based fluorescence polarization assay platform for cortisol sensing, Journal of Materials Chemistry B (2016年掲載予定, DOI: 10.1039/C5TB02069G)
- 8) 針山, 外: 光コムレーザを用いた形状計測技術の開発, 精密工学会学術講演会講演論文集, 122 (2012)
- 9) 栢場, 外: ロバスト単眼回転ステレオの開発とその3次元形状計測への融合の応用, VIEW 2012, IS2-C1 (2012)

### 執筆者紹介



**廣瀬 丈師**  
 日立製作所 研究開発グループ 生産イノベーションセンター  
 検査・計測研究部 所属  
 現在、検査・計測技術の研究開発に従事  
 応用物理学会会員



**田中 麻紀**  
 日立製作所 研究開発グループ 生産イノベーションセンター  
 検査・計測研究部 所属  
 現在、半導体用検査・計測装置の研究開発に従事  
 SPIE会員



**中野 博之**  
 日立製作所 研究開発グループ エネルギーイノベーションセンター  
 応用エネルギーシステム研究部 所属  
 現在、非破壊検査・計測技術の研究開発に従事  
 博士(工学)  
 電子情報通信学会会員, 応用物理学会会員, 日本光学会会員



**谷口 伸一**  
 日立製作所 研究開発グループ 生産イノベーションセンター  
 検査・計測研究部 所属  
 現在、ヘルスケア向け材料・計測技術の研究開発に従事  
 博士(学術)  
 応用物理学会会員, 日本化学会会員



**三輪 俊晴**  
 日立製作所 研究開発グループ 生産イノベーションセンター  
 検査・計測研究部 所属  
 現在、検査・計測技術の研究開発に従事  
 博士(工学)  
 日本機械学会会員, 精密工学会会員