

調査研究報告書要約

書名	平成17年度新製造技術に関する調査研究報告書 － 製造技樹の情報化促進 －				
発行機関名	社団法人 日本機械工業連合会 ・ 財団法人 製造科学技術センター				
発行年月	平成18年3月	頁数	48頁	判型	A4

〔目次〕

〔本編〕

第I章 調査研究の概要

- 1.1 背景と目的
- 1.2 調査研究体制
- 1.3 調査研究項目・スケジュール

第II章 現物融合型デジタルエンジニアリング

- 2.1 背景と目的
- 2.2 3次元スキャン技術の現状
- 2.3 技術分野
 - 2.3.1 現物検証
 - 2.3.2 現物設計
 - 2.3.3 現物CAE
 - 2.3.4 現物計画
- 2.4 おわりに

第III章 Functional Inspection

- 3.1 産業応用可能な最近の計測技術
 - 3.1.1 スライシング利用技術
 - 3.1.2 テラヘルツ波利用計測
 - 3.1.3 中性子応用計測
- 3.2 半導体微細加工分野における Functional Inspection
 - 3.2.1 はじめに
 - 3.2.2 レジスト表面の広域ナノスケール計測技術
 - 3.2.3 半導体ウエハ加工表面の機能属性・高分解能計測技術

3.2.4 おわりに

第IV章 まとめ

4.1 製造技術の高度化の方向付け

4.2 情物一致・現物融合

4.3 現物融合と技術開発目標

〔要 約〕

序

はじめに

第I章 調査研究の概要（省略）

第II章 現物融合デジタルエンジニアリング

半導体技術とデジタル技術を製造技術そのものへ活用することで、加工技術の一層の高度化、製品の高品質化、高性能化、製造の高効率化、低コスト化を実現して、競争力の維持・強化を図って行くことが重要不可欠となっており、日本独自の強みを生かした付加価値の高い製造技術を確立し、生産システム全体の比較優位を構築して行くことが大きな課題となっている。

製造技術における情報技術として注目されているのが、三次元ソリッドCADを中心としたデジタルエンジニアリングである。これは、製品情報を徹底して三次元デジタル化し、可視化やシミュレーションによって不具合を洗い出して、最適化する取り組みであり、開発の期間短縮に大きな効果をもたらしている。日本のものづくりの強みは現場における摺り合わせによって品質の作り込みにあるとされている。この摺り合わせの部分で獲得すべき品質レベルが高度化するに従って、現物とモデルとの乖離は致命的なものとなる。また、新規材料や新しいプロセスの出現によって、製造工程における製造条件の作り込みがますます難しくなっている。

三次元スキャン技術には、光学式の非接触3次元スキャナーやX線CT装置がある。前者は、数10 μ m程度の計測精度を実現しているが、一桁小さい計測精度の要求も少なくない。後者は、マイクロフォーカスCTと通常のX線CTがある。前者は、画素の大きさが数 μ m程度まで可能であり、後者は、画素のサイズで0.1mm台が一般的である。

現物融合型デジタルエンジニアリングの技術分野としては、つぎの4つに分類される。

1) 現物設計：実体の形状を作って設計し、それをデジタル化する。代表的な例としては、クレイモデルからCADモデルを生成するリバースエンジニアリングがある。人間の感性による評価が重要な製品意匠の場合は、モックアップの作成が不可欠であり、モックアップを手修正して製品意匠を評価して修正後のモックアップからCADモデルを生成する。

2) 現物検証：製造工程内で現物形状を計測し、形状や寸法を比較検証するもので、各工程で型や製品を計測し、CADと比較して問題点を洗い出したり、異なる製造条件による製品の形状比較を行うことで製造条件を最適化するものである。

3) 現物CAE：実験とシミュレーションを同じ形で実施するため、試験対象の現物形状を計測し、作成された現物モデルを用いてシミュレーションを行う。現物の誤差要因としては、スプリングバック、ヒケ・反り、手直し等がある。また、CADデータがなく、現物しかないもののシミュレーションにも有効である。

4) 現物計画：現物のデータに基づいて生産や設備の計画を行うものである。例えば、機上で素形材を計測して、その形状データに基づいてNC加工を行ったり、組み立て中の車体を計測してロボットの溶接経路を変更したりする。また、最近では建造物などもスキャンできる装置が開発され工場の設備や建屋を計測し、それに合った設備設計を行う As Built モデリングと呼ばれるものもある。

このような技術が実現してきた背景には、非接触3次元スキャナやX線CTスキャナ等の三次元スキャン技術の高度化にある。紹介した例の多くは開発の端緒についたばかりである。一方、この考え方は形状情報に特化したものではなく、他の計測技術を利用して製品や部品、或いは製造プロセス中の様々な製造特性に適用できる。近年、様々な先端的な計測原理に基づいた計測法が開発されており、それらの計測情報をデジタルエンジニアリングで活用することは極めて有効であるが、計測原理の確立から実際の産業現場で装置或いはシステムへと測定技術を高度化して行くことが前提となる。

現物融合型デジタルエンジニアリングの特徴は、最新の計測技術をベースにして現物とデジタルエンジニアリングを結び付け、現場のレベルが高い日本固有のモノづくりの強みをデジタルエンジニアリングに織り込むことである。従来のデジタルエンジニアリングは、現物からのアプローチが欠けていたために日本固有の技術にならなかった。今日、広くデファクト化している欧米ベンダー製のデジタルエンジニアリングソフトウェアにも、このようなコンセプトはなく、独自にこの分野の技術開発を進めることが重要不可欠である。

第Ⅲ章 Functional Inspection

3.1 産業応用可能な最近の計測技術

産業への応用が可能と考えられる最近の計測手法について、その典型的な例を調査し、エンジニアリングを考案することが重要である。ここでは、それぞれサイエンスティックな着想・視点により研究が開始され、近年、研究分野から産業分野に至るまで広範に応用・実用化が求められている、1) スライシング利用計測（破壊検査）、2) テラヘルツ波利用計測（非破壊検査）、3) 中性子ビーム利用計測（非破壊検査）の3つの計測手法を紹介している。Functional Inspection の切り口としては、これらの手法を複合利用し多重の情報を計測・処理できれば、現物融合化の基礎ツールとして組み込み、将来の製造技術高度化戦略として大きな効果をもたらすことが期待できる。

1) スライシング利用計測 : この手法は、観察対象となる試料を精密にスライシングすることで、その断面の画像や物性を取得・三次元構造の解析から、鋳造品などの工業部品の内部構造解析までが可能である。破壊検査手法であるが、試料内部の多面的な情報が得られ、原理的な分解能には制限がないのが特徴である。この手法により、取得された複数種のデータを統一的に利用する情報処理技術も重要となる。

2) テラヘルツ波利用計測 : 本手法は、非破壊検査であり、見えないものを見えるようにする手段を提供できることで産業への応用・実用化が期待される。テラヘルツ波は赤外線と電波の中間に位置していて電波的な物質透過性を有する最短波長域であり、実用に適した空間分解能を生かして物質透視イメージングに利用可能である。応用例として、・封筒内の禁止薬物の検査、・フレキシブルパッケージの欠陥の検査、・集積回路の欠陥検査、・その他における各種の事例の現状に基づいて明らかにしている。テラヘルツ波物質透過性と指紋スペクトルによる分子の識別能力によってソフトマターの新たな測定プローブとなる技術であり、コンパクトな光源や大規模なアレイ検出素子の実現により、広範な産業利用が期待できる。一方でテラヘルツ波技術は、既存の技術に取って変わるものというよりは、既存技術と相補的な役割を果たすものであろう。実際、テラヘルツ波は水や金属は通さないため、物質透視手段としてのX線検査は依然として重要である。また、テラヘルツ波のような新技術が実用現場で生かされるには、計測時間やコストの制限の克服が必要となる。その意味で、前述の薬物検査やIC検査の例のように、複数の測定手段の組み合わせにより、相補的情報の取得や情報の重ね合わせのための高度情報処理技術も必要となる。

3) 中性子応用計測 : 低エネルギー中性子ビームを用いた解析手法で軽元素に敏感な解析手段として物質研究に利用されている。とくに生体物質の研究においてはX線でも見ることでできない水素の情報を直接引き出す手段として注目されている。しかし、中性子は、発生に費用がかかり実験場所が限られていること、X線に比べて中性子ビームは格段に強度が低いために、一般的な解析手段としては応用範囲が制限されている。このような貴重な中性子ビームの利用効率を上げて最大限の科学的成果を生み出すために、近年、これまで系統的な研究がなされて来なかった中性子の光学系の研究が進み、中性子利用技術は著しい進展を見せている。手法の利点として、・中性子利用イメージングの効果、・有効ポテンシャル、・磁気相互作用、・磁気ミラーについて紹介している。

また、解析の応用例については、・リチウム電池などの新型電池材料の解析、・透視や非破壊検査として、核燃料棒内部の透視、・ロケット内の燃料、・溶接部の内部歪み、・エンジン内部の燃料の動き・金属管内の空気・水二相流の透視観察等、広範にわたる応

用可能性について事例に基づいて明らかにしている。中性子応用計測については、中性子の性質、イメージング、解析応用などの一連のアクティビティは、物理面での研究応用と産業分野へ向けた研究開発が一層進展を見せており、現在、原研東海で建設が進んでいる J-PARC での大強度中性子ビームを利用することで、中性子応用計測のさらなる発展が期待できる。

3.2 半導体微細加工分野における Functional Inspection

半導体加工の微細加工への進化は、2004年に100nmテクノロジノードを達成した後、今日では、液浸ArFリソグラフィに超解像技術を駆使することにより、65nmノードも実現しており、さらに2010年には、50nm以下の超解像を目指した新たな微細加工技術が求められている。半導体微細加工分野は、最も高精度な生産工程を有する製造技術分野といえる。ここでは、Functional Inspection 例として、とくに次世代半導体製造現場への適用が期待されているレジスト表面形状の広域ナノスケール計測技術および半導体ウエハ加工表面の機能属性・高分解能計測技術について紹介している。

1) レジスト表面形状の広域ナノスケール計測技術：半導体製造前工程に位置付けられるフォトリソグラフィ工程において、形成パターン微細化は、至上命題となっている。より微細パターンの露光を実現するため、ステップ、スキヤナの解像度を向上させるためのレンズ開口数を増大させるアプローチが続いている。開口数を増大させると解像度は向上するが、焦点深度が浅くなる。そのため、フォトリソグラフィの露光プロセスにおいては、プロセス中に次期露光領域の凹凸プロファイルを高速計測することによってデジタル化し、その形状データに基づいてリアルタイムで焦点調節することにより、所望の解像度を実現している。これまでのレジスト面計測技術は、主に光計測によって実現されてきた。しかし、次世代においては、計測するレジスト膜の厚みが数100nm程度になるため、透明性を有しているレジストの多重干渉を除去できず、従来法の適用は困難となっている。そこで、次世代において期待されている50nmスケールの微細パターンを形成するには、フォトリソグラフィ・露光工程に適用可能な新しいレジスト面デジタル化技術が必要になってきている。

2) 半導体ウエハ加工表面の機能属性・高分解能計測技術：半導体ウエハの起点となるベアSiウエハ加工表面が満足すべき機能属性としては、大きく二つが挙げられる。

- ・ 表面形状がナノスケールで平坦となっていること（数nmといった微小スクラッチがないこと）。
- ・ トランジスタデバイスとして機能する表面層内部において無欠陥であること（空孔欠陥がないこと）。

すなわち、ベアSiウエハとして、前述の複数の属性をデジタルデータ化することができシュミレーションなどにより、製品デバイスにおける不良度合いを追跡することが可能になり、製造現場において歩留まりの向上に大きく寄与することになる。

→ 赤外エバネッセント光を利用したSiウエハ表面欠陥計測手法：シリコンに対して吸収の少ない赤外レーザービームを、ウエハ内部より伝搬させ、ウエハ上面にエバネッセン

ト光を生成させる。エバネッセント光はnmオーダーといった微少領域における光学特性の影響を受けるため、表面に微少欠陥が存在すると、その微少欠陥の光学属性に応じてその分布に変化が生じる。この手法は、そのままでは観測不可能なエバネッセント光をプローブを用いて伝播光に変換することで間接的に観測し、その分布の変化から表面層微少欠陥の検出・評価を行うものである。検出分解能は光源波長に依存せずプローブ先端径により決定されるため、従来法では、検出が困難であった数10nmスケールの微少欠陥検出の可能性はある。さらにエバネッセント光の生成方法としてウエハ内部からの臨界角条件を利用して、表面層下の内部欠陥も検出できる可能性もある。

これらの計測技術に求められている要求精度・仕様および現状達成度ならびに今後開発を必要とする機器としては、

* レジスト表面形状の広域ナノスケール計測技術

・ 要求精度および仕様

要求高さ分解能 : 5 nm以下	現状高さ分解能 : 達成 (5 nm)
要求横分解能 : 1 mm程度	現状横分解能 : 達成 (250 μm)
100 nm透明膜への適用性	現状 : 達成 (多重干渉等の問題なし)
一括広域計測性 : 30 mm × 30 mm	現状 : 要開発

* 半導体ウエハ表面加工の機能属性・高分解能計測技術 (とくに欠陥について)

・ 要求仕様

表面欠陥検知性 : 5 nm以下	現状 : 達成 (5 nm)
表面欠陥定量性	現状 : 達成 (走査分解能に依存)
内部欠陥検知性 : 300 ~ 500 nm深さ	現状 : ほぼ達成
内部欠陥定量性	現状 : 要開発

以上のように、次世代半導体製造現場において、代表されるデジタル化技術は、信頼性・高付加価値な半導体デバイスを製造するために不可欠な技術となっており、半導体業界においても、これからも情物一致に基づく現物融合型デジタルエンジニアリングがますます重要となる。

第IV章 まとめ

本調査研究事業は、平成15年度から17年度までの3カ年に亘って実施された。1年目の15年度では、今後の製造業にとって重要不可欠とされ課題を論議し、つぎの13テーマが選定された。

- 1) 計測技術とデジタルエンジニアリングによる現物融合化技術
- 2) 設計品質高度化技術の研究
- 3) 設計生産知識の動態保存に関する研究
- 4) マイクロ加工におけるインプロセス・モニタリング技術とプロセス制御技術
- 5) バーチャル加工作業習熟システム技術
- 6) 半導体製造現場における高度情報化生産システム
- 7) 高度デジタル・マニュファクチャリング推進のための機器オブジェクトとシミュレーションサービスモジュールのライブラリー構築
- 8) 動的自動計測システムと高速物理情報伝送システム化技術
- 9) カスタマイズ型加工機械における加工機能の継続的拡張操作技術
- 10) ハイパーシステムインテグレーションDNA戦略による新たな製造戦略展開
- 11) 製造物トレーサビリティシステム
- 12) 高齢者社会における消費者指向生産システム
- 13) 先端研究機器開発のための製造技術・情報技術のインフラ整備

2年目の16年度には、製造現場へのアンケートからの重要度の評価も含め、製造業が現在求めている技術は何を解決するための技術なのか、という視点で、「情物一致」、「動的システムへの対応」、「持続社会の構築」の3つに分類を行った。この3種の対応のなかで、「情物一致」についてさらに調査を行った。情物一致とは、「情報システム内部のデータと現実世界のデータを一致させること」である。

「情物一致」とは、シミュレーションと現実のギャップを埋める必要性である。3年目の17年度では、情物一致についてより焦点を絞り、「現物融合」を調査した。その結果、つぎの事例について分類した。

現物検証：工場内で現物形状を測定し、形状・寸法を検証。

現物設計：実体の形状を変形して設計し、デジタル化。

現物CAE：実験とシミュレーションを同じ形で実施。

現物計画：現物のデータに基づく生産や設備の計画。

このなかから、「現物検証」について調査を進めた。そもそも測定は測定できるものしか対象になっていない。仮に測定できたとしても、* 測定精度が不十分、* 測定データを意味ある情報として認識しなければ情報システムでは使えない、ということになる。

すなわち、対象物があったとして、表面粗さから全体寸法まで、外部形状から内部構造まで、存在するであろうものの検証から何が不明物の検索までの全てを扱うことは不可能、たとえ扱えるようになったとしても異なる測定結果を重ね合わせる(センサー融合と呼ぶ)

方法論が必要になる。

- a) 見えないものが見えるようにするといった科学的なアプローチで測定可能対象の範囲を拡大する。
- b) Multi model な測定で、同一対象に対する多重測定を行う。
- c) 情報的なモデルを用いて、測定結果を可視化し、情報の意味付けを行う。
- d) その意味にしたがって再測定を行う。

これを「機能指向測定 (Functional Inspection)」と銘々した。

最終的な技術開発の目標として、つぎを掲げることにした。

【目標 1】 情報技術を用いた製造技術の高度化

【目標 2】 現物融合を可能とする表現モデル (シュミレーションモデル) の開発

【目標 3】 現物融合を実現する測定系の開発

【目標 4】 現物と情報システムとの間の頻繁なフィードバックによる製品高度化の追求

以 上



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。