

平成 17 年度
新製造技術に関する調査研究報告書
－製造技術の情報化促進－

平成 18 年 3 月

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

序

我が国機械工業における技術開発は、戦後、既存の技術の改良改善に注力することから始まり、やがて独自の技術・製品開発へと進化し、近年では、科学分野にも多大な実績をあげるまでになってきております。

しかしながら世界的なメガコンペティションの進展に伴い、中国を始めとするアジア近隣諸国の工業化の進展と技術レベルの向上、さらにはロシア、インドなどのBRICs諸国の追い上げが目覚ましい中で、我が国機械工業は生産拠点の海外移転による空洞化問題が進み、技術・ものづくり立国を標榜する我が国の産業技術力の弱体化など将来に対する懸念が台頭してきております。

これらの国内外の動向に起因する諸問題に加え、環境問題、少子高齢化社会対策等、今後解決を迫られる課題も山積しており、この問題の解決に向けて、従来にも増してますます技術開発に対する期待は高まっており、機械業界をあげて取り組む必要に迫られております。

これからのグローバルな技術開発競争の中で、我が国が勝ち残ってゆくためにはこの力をさらに発展させて、新しいコンセプトの提唱やブレイクスルーにつながる独創的な成果を挙げ、世界をリードする技術大国を目指してゆく必要があります。幸い機械工業の各企業における研究開発、技術開発にかかる意気込みにかげりはなく、報告を見極め、ねらいを定めた開発により、今後大きな成果につながるものと確信いたしております。

こうした背景に鑑み、当会では機械工業に係わる技術開発動向等の補助事業のテーマの一つとして財団法人製造科学技術センターに「新製造技術に関する調査研究」を調査委託いたしました。本報告書は、この研究成果であり、関係各位のご参考に寄与すれば幸甚であります。

平成18年3月

社団法人 日本機械工業連合会
会 長 金 井 務

はじめに

わが国製造業は、低廉で良質な労働力と大量の消費需要が期待される中国を中心とする東アジアへの事業展開が進んでいますが、事業環境の急激な変化のなかで、製造業の主導的な役割を果たしてきた機械製造業においてもリスクを背負いながらもグローバルな事業展開を余儀なくされています。その一方で、他に真似のできない製品の品質化、高付加価値化のための製造技術を開発することで国内での生産を維持し、また、国内回帰を図る傾向も見られてきています。

日進月歩の情報技術の効果的な活用に関しては、デジタル技術に代表されるように通信はじめ流通の分野などで大きな前進が見られますが、製造技術の分野においては、技能・ノウハウ・経験をデジタル技術を駆使してデータベース化する研究が進められています。これは、熟練技術者が長年に亘って蓄積した独創的な加工技術を情報技術によって伝承することを目的として取り組まれています。実用化には多くの課題が残されています。

本事業は、進展するデジタル技術を製造技術そのものへ融合化することによって、加工技術をさらに高度化、製品の品質化、製造の高効率化、低コスト化を実現し、生産システム全体の比較優位を構築していくことを目的としています。

このような基本認識の下に、加工技術、情報技術、融合化技術それぞれの現状を分析するとともに製造現場における評価を踏まえて「情物一致」を重要開発課題に集約しました。

情物一致とは、データと現物が一致していることを意味しますが、その実現には現物の正確なチェック・評価が重要となります。この現物のより正確なチェックには産業分野にはない高度なセンシング技術が不可欠であることが判明しました。すなわち、「設計情報」→「現物」→「計測技術」の関係を高精度かつ高速に展開させることが前提で、加工された現物の特性を再度センシングし、結果をデジタル信号への変換が必要となります。

このような経緯をふまえて、平成17年度は計測技術に着目して、サイエンス分野において開発が進展している「見えていない物を見えるようにする」センシング技術として、「Functional Inspection」（機能指向測定）をこれからの製造技術の高度化において中核となる重要な開発テーマとして位置付けを行いました。

機能指向測定の実現は、あらゆる加工技術の基礎となるものであり、製品品質の飛躍的な高度化に結実させることにより、21世紀に世界を凌駕する競争力の高い製造技術の創造において大きな役割を果たすものであります。

本報告書は、これらについてまとめたものであり、わが国の製造業が持続的な発展と競争力の一層の進展に寄与することを願っています。

本事業の実施にあたり、ご支援いただきました経済産業省ならびに社団法人日本機械工業連合会にお礼を申し上げますとともに協力いただきました委員の皆様方に対し深く感謝を申し上げます。

平成18年3月

財団法人 製造科学技術センター
理事長 庄山悦彦

目 次

	頁
序	
はじめに	
目 次	
第 I 章 調査研究の概要	1
1. 1 背景と目的	1
1. 2 調査研究体制	3
1. 3 調査研究項目・スケジュール	4
第 II 章 現物融合型デジタルエンジニアリング	5
2. 1 背景と目的	5
2. 2 3次元スキャン技術の現状	7
2. 3 技術分野	8
2. 3. 1 現物検証	8
2. 3. 2 現物設計	9
2. 3. 3 現物 CAE	9
2. 3. 4 現物計画	9
2. 4 おわりに	11
第 III 章 Functional Inspection	13
3. 1 産業応用可能な最近の計測手法	13
3. 1. 1 スライシング利用計測	13
3. 1. 2 テラヘルツ波利用計測	17
3. 1. 3 中性子応用計測	22
3. 2 半導体微細加工分野における Functional Inspection	32
3. 2. 1 はじめに	32
3. 2. 2 レジスト表面形状の広域ナノスケール計測技術	32
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	37
3. 2. 4 おわりに	41
第 IV 章 まとめ	43
4. 1 製造技術の高度情報化の方向付け	43
4. 2 情物一致・現物融合	44
4. 3 現物融合と技術開発目標	46

第 I 章 調査研究の概要

1. 1 背景と目的

グローバル化が進展するなかで、中国をはじめとするアジア諸国は目覚ましい発展を遂げており、この過程で工業技術も急速に競争力を高めている。今、わが国の機械製造業は、海外展開によってトータルコストを抑え、研究開発や設計を含めて多様化する市場ニーズに如何に迅速に対応していけるかどうかの渦中にある。

製造技術が海外に移転することは、二度と日本に戻ることはあり得なく、研究開発拠点すらも海外へ移す行動が当たり前の時代になってきている。これまでわが国の製造業は、固有の器用さと勤勉さによって独自の製造技術を築き上げて競争力を培ってきたが、これから先、その製造技術として何が残せ、何を残しておくべきかを真剣に考え、早急に対処しなければならない事態に直面している。

機械は、あらゆる製造業にとって製品の高付加価値化や効率向上において重要な役割を果たしており、そのベースとなる製造技術が競争力の源になっている。

機械は、多数の部品や素材から構成され、その部品一つ一つの品質は、優れた加工技術によって作り出されるが、それは、製造現場において経験の積み重ねによって生み出された技術・技能やノウハウである。しかし、それを如何にして継承し、進化させていくかが大きな課題となっている。

本調査研究では、広く産官学における加工技術の現状、情報技術の現状ならびに加工技術への情報技術の適用事例の現状を明らかにし、製造技術のさらなる高付加価値化によってわが国のモノづくり技術の維持・強化を推進すること目的に調査研究を行ってきた。

その過程で製造現場における聞き取り調査結果で「情物一致」に最も高い関心が寄せられた。情物一致とは、情報と物が一致していることを意味する。その必要性は、1) 現物チェックによる製品品質の向上、2) 情報システム投資の有効活用である。しかし、その実現にはセンシング技術を高めることが課題となっていた。先ず、「製造される現物」から高速かつ的確な情報を取得し、製造システムに整備された情報インフラに伝送可能なデジタル情報として変換できる計測・評価技術を確立することが不可欠となっている。

これは、「設計情報」→「現物」→「計測技術」の関係が高精度かつ高速に展開することが前提で、製造された「現物」を再度、デジタル世界で扱うことが可能なデジタル情報に変換する必要があるが、このデジタル情報に変換する行為が「計測」に相当する。「計測」により取得された「現物」のデジタル情報（「計測情報」）は、「設計情報」と比較可能な形態に変換されて評価される。そこで得られた知見（デジタル情報）を上流工程へフィードバックして高精度な「情物一致」を実現させることが可能になる。高度な「情物一致」を安定して維持し、高付加価値製品を持続的に製造して行くためには、計測対象として現物のみならず、加工機械や計測装置そのものへのモニタリングも重要不可欠となってくる。また、当然のことながら計測装置は定期的に標準器によりモニタリング・校正さ

れていなければならない。

このような調査研究経過を経て、平成17年度は、「情物一致」の実現に向けて計測技術の重要性の認識と、サイエンス分野において研究または、開発が進展している計測技術は、宇宙から自然環境、生命・医学、DNA等科学（Science）の分野は基より、古墳の分析にいたるまで広範な分野に広がりをもって新たな手法の技術が開発されている。そこで、電磁波利用計測において波長を変化させること（非破壊で）で見えないものを見えるようにするマルチモードセンシングもある。しかし、これを工学（Engineering）の分野に転用という形で応用する考えもある。しかし、ほんの微細な切片しか測定ができない、スループットを考慮していない、といった被測定物のスケール上の問題や得た情報の処理時間の問題は、独自に解決を進めることが必要である。

科学等分野の Scientific な計測では、「見えた」だけで事が足りるという場合も少なくないが、Engineering な計測では、製造プロセス内で扱える（可視化データと現物、モデルとの差異をプロセス内で扱うことが可能なデジタル化が必要になる）ようにする必要がある。そこに焦点を当てて‘今、見えていないものを見えるようにする計測技術’として「Functional Inspection」と名付けて、これを今後残すべき製造技術の中核要素技術として位置付け現状の把握と産業応用に必要な開発課題、産業応用が実現した場合のメリットを明確にし、提言を行うことになった。

「Functional Inspection」へ導くには、先ず、現物融合における4つの事象を取り上げた。

1) 現物検証：工程内で現物形状を計測し、形状・寸法を検証〔・各工程だ型や製品を計測しCADと比較して問題点の洗い出し異なる製造条件による製品の形状比較による条件の最適化、・形状を丸ごと計測し、寸法・幾何公差を検証〕、2) 現物設計：実体の形状を変形して設計し、これをデジタル化〔・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、・型の手直し後にCADモデル生成、・現物しかないもののCADデータ作成〕、3) 現物CAE：実験とシミュレーションを同じ形で実施〔・現物の誤差要因＝スプリングバック、ヒケ・反り、手直し等現物による実験と現物を計測したモデルによるシミュレーション、・現物しかない（CACデータの無い）もののシミュレーション〕、4) 現物計画：現物のデータに基づく生産や設備の計画〔・素形材を計測してNC加工、・組立中の車体を計測してロボットの溶接経路を変更、・工場を計測して設備設計（As Builtモデル）〕。

続いて、それをベースとした「Functional Inspection」について、産業に応用可能な最近の計測技術の現状、事例として、産業への応用に向けた研究開発課題と展望についてまとめを行った。

主に Scientific な計測として発展してきている。マルチモードセンシングの Engineering 展開は遅れている。例えば中性子ビームやテラヘルツ光の利用、また、破壊計測ではある鋳物をスライス状に切断して、スライス面の物質解析も含めて三次元構造が求められる。

（1）産業応用可能な最近の計測手法のなかで代表的な事例として、① スライシング利用

計測、② テラヘルツ波利用計測、③ 中性子応用計測における計測の現状、(2) 半導体微細加工分野における **Functional Inspection** の代表事例として、① レジスト表面形状の広域ナノスケール計測技術、② 半導体ウエハ加工表面の機能属性・高分解能計測技術、に焦点を当て現状と産業応用に向けた開発課題を明らかにした。

当該計測技術の実現は、あらゆる加工技術の基礎になるものであるとともに、製品品質を飛躍的な高度化に寄与することから、今後、世界を凌駕する競争力の高い製造技術の想像に大きな役割をものである。また、それがわが国の機械製造業が発展を続けていく唯一の手段であると云える。

3年間のまとめとしての日本独自の強みを活かした製造技術の高度化にとって重要不可欠な研究開発目標として、以下の4項目を掲げることとした。

【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（シミュレーションモデル）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。

本調査研究によって、これまで独自のモノづくり技術によって世界を凌駕してきたが、その強力な支えとなってきた人材が減少しており、培ったモノづくり技術を伝承し、さらなる新たな製造技術を確立して行くために必要不可欠な研究開発目標が明らかになったことが最大の成果である。

1. 2 調査研究体制

財団法人 製造科学技術センター内に技術高度化調査研究委員会を設置した。

構成メンバーは、製造技術に係わる加工技術、情報技術、システム技術及び計測・分析技術の専門学識者によって構成した。

技術高度化調査研究委員会名簿

[委員長]

新井 民夫 東京大学 大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻 教授

[委員]

大高 哲彦 日本ユニシス株式会社 参事

大森 整 独立行政法人 理化学研究所 中央研究所 大森素形材工学研究室
主任研究員

鈴木 宏正 東京大学 先端科学技術研究センター 教授

高橋 哲 東京大学 大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻 助教授

福田 好朗 法政大学 工学部 経営工学科 教授

[事務局]

瀬戸屋 英雄 財団法人 製造科学技術センター 専務理事

黒田 武夫 財団法人 製造科学技術センター 総務部長兼調査研究部長
橋本 安弘 財団法人 製造科学技術センター ロボット技術推進室 主席研究員

1. 3 調査研究項目・スケジュール

(1) 調査研究項目

1. 現物融合型デジタルエンジニアリング

- イ. 現物検証
- ロ. 現物設計
- ハ. 現物C A E
- ニ. 現物計画

2. Functional Inspection

イ. 産業に応用可能な最近の計測技術

- 1) スライシング利用計測
- 2) テラヘルツ波利用計測
- 3) 中性子応用計測

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

- 1) レジスト表面形状の広域ナノスケール計測技術
- 2) 半導体ウエハ加工表面の機能属性・高分解能計測技術

3. まとめ

(2) スケジュール

(本調査研究事業は、以下のとおりの委員会を開催して実施した。)

- 第1回委員会開催 平成17年 9月22日(木) (財)製造科学技術センター
- 第2回委員会開催 平成17年11月10日(木) 虎ノ門パストラル
- 第3回委員会開催 平成17年12月22日(木) 東京大学 本郷キャンパス
- 第4回委員会開催 平成18年 2月15日(水) (財)製造科学技術センター

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

目まぐるしく進展する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によって、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、低コスト化を実現することが求められている。ここでは、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することにより生産システム全体の比較優位を構築して行くことが重要な課題となっている。

このような製造技術における情報技術として現在最もその効果が顕著に現れているのが、3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ろう。これは、フロントローディング、すなわち製品開発の早期から、製品情報を徹底して3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叩き出し最適化を図ろうとする取り組みと一体となった活動となり、多くの企業で実践がなされ、特に開発期間短縮に大きな効果があるとされている。

このようなアプローチでは徹底したデータ化が行われる。言い換えると、コンピュータの中に仮想の製品を作り上げ、その代わりに実製品・部品による試作などの作業を徹底して減らすという仮想化の考え方に基づくものと言えよう。このいわゆる「データ正のモノづくり」は合理的な考え方であり、今後も徹底したデータ化は進められるものと思われる。

しかし、その一方で現実には複雑であり、コンピュータに実際の製品や部品などの現物に関する情報のすべてを記述しつくし、また、現物の振る舞いや変化のすべてをコンピュータでシミュレーションすることは不可能である。これはコンピュータの中の仮想のモデルと、現物とは常に乖離していることを示す。ここでの問題意識は、この乖離が製品設計や製造工程の高品質化や期間短縮に影響を及ぼしているのではないか、ということであり、この乖離をできるだけ小さくすることが新しい製造情報システムの一つの要件になるということである。

例えば、日本のものづくりの強みは、現場におけるすり合わせによる高度な品質の作りこみにあるといわれている。しかし、現状のデジタルエンジニアリングは、特に部品が組み合わされたときの品質の予測にはあまり有効ではない。この強みを強化するようなデジタルエンジニアリングを実現することは我が国のモノづくりにとっては非常に重要な課題であるといえる。それを考えると、このす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い、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こみが困難になってきている。2007年問題のような技能者不足の問題もあり、従来の勘やノウハウに頼った手法の限界がきている。これをやはりデジタルエンジニアリングで支援することを考えると、実際の材料やプロセスの特性をいかにして効率よくコンピュータに取り込み、シミュレーションなどに反映していくか、ということが重要となる。これも、逆に言えば、

現物とモデルの乖離という問題に帰着される。

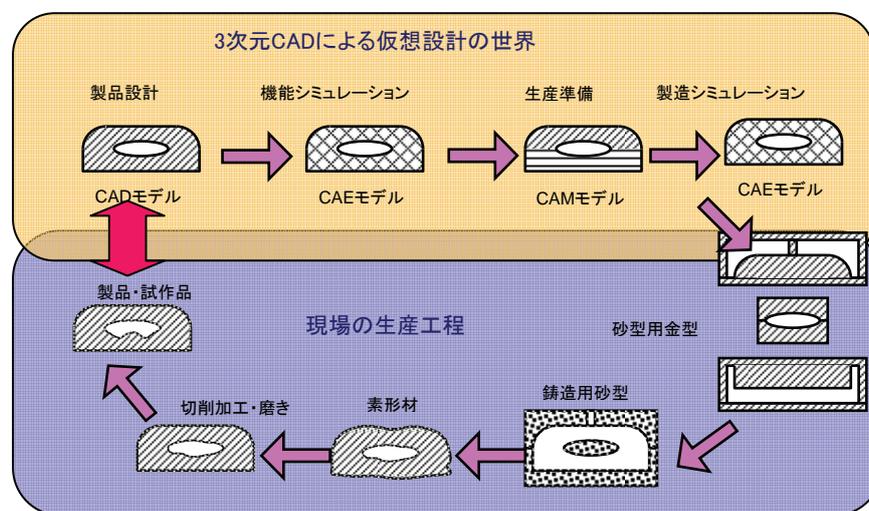


図 2. - 1 仮想生産と生産工程（鋳造を例として）

図 2. - 1 に示した単純な鋳造部品的设计・製造プロセスの様子を使って説明を加える。図の上半分が、上記の仮想化された部分（仮想世界）である。この仮想世界で作られた製品情報や製造情報が製造工程へ流れ、図の下半分に示されるように、工場で実体としての部品や製品が作り出される。この製造工程では、砂型を作る木型、鋳造用の砂型が作られ、さらに素形材が鋳造され、機械加工を経て試作品となる。そして、これを使って実験が行われ、性能を評価しつつ物理的な形状修正が行われる。

部品の形という観点で見ると、最初の CAD で設計された部品の形から出発して、製造要件を織り込んだ金型形状へ修正され、さらにそれが各製造工程において型や鋳物といった実物の形へ転写され、様々な歪み・変形を受け、手直しなども行われたものが最終的な部品形状になっていることが分かる。

このような複雑な工程を経て製品や試作品が作成されるわけであるが、素朴な疑問として“CAD モデルの形状と製品形状は合っているのか”、“合っていないとすれば、どこでどのように狂ったのか”といったものがある。すなわち、工程中の金型や部品などの現物の形やその変化は正確には把握されておらず、例えば次に挙げるようなことが実現できれば、品質・コスト・リードタイムの上で大きな効果があると期待されている。

形状比較： 現物と CAD モデル、部品同士、耐久試験前後の部品などの形状を比較する。

形状追跡： 1 個の特定の部品の形状の変化履歴を工程を通して追跡する。

CAD へのフィードバック： 実験などを経て最適化された試作品形状を CAD モデルに反映する。

これらを解決する有効な手段は、3次元計測技術、すなわち非接触 3次元スキャナや X線

CT スキャナによって各工程段階において現物を” そっくりそのまま” 計測し、3次元形状の現物モデルを生成し、さらにそれをCAD、CAM、CAEなどのデジタルエンジニアリングに取り込むことである。現物のデジタルモデルを徹底利用する新しいエンジニアリング手法を目指すのが、現物融合型デジタルエンジニアリングである。

まとめると、高度に進化した計測技術と、そのデータを活用するモデリングやシミュレーションなどの技術を開発し、それらを統合することによって、日本のモノづくりに適合したデジタルエンジニアリング手法によって業務を革新し、製品開発力の飛躍的向上を図ろうとするのが、現物融合型デジタルエンジニアリングである（図2. - 2）。

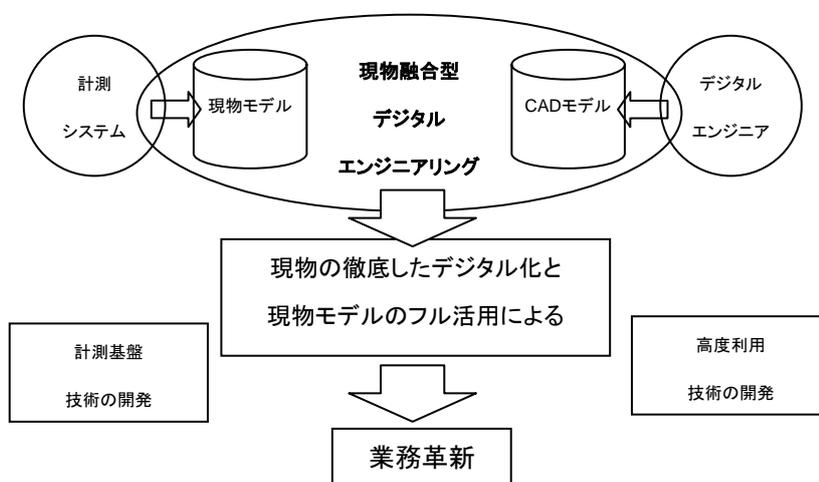


図2. - 2 現物融合型デジタルエンジニアリング

2. 2 3次元スキャン技術の現状

機械部品等の全体形状をスキャンする技術には、光学式の非接触3次元スキャナやX線CT装置がある。前者については、昨年度の本報告書に詳述されているが、概ね数 $10\mu\text{m}$ 程度の計測精度を実現している。しかし、例えばプレス金型の計測等には、もう一桁小さい計測精度が要求されており、そのためにはCCDカメラの高解像度化や、画像処理技術の高度化などが必要である。また、誤差を低減するためのスキャン位置姿勢の設定や、視野を狭くして多数のスキャンから得られる膨大な計測データを処理するポストプロセスでの精度確保技術も重要である。また、スキャナヘッドを多軸のマニピュレータに搭載し、自動計測を行うシステムも導入が進んでいる。前述のような処理機能に、対象物との干渉チェックを行い、計測精度を保証するようなスキャン計画の自動生成機能の実現が待たれている。

一方、X線CT装置については、大きくマイクロフォーカスCTと呼ばれるものと、通常のX線CTに大別される。前者は、微小なX線元を用いて、X線ビームを円錐状に照射し、

高い拡大率を得る装置であり、画素の大きさは数 μ m程度まで小さくすることができる。一方後者は、ビームを平面状に照射するもので、大型のものが多く、画素のサイズは0.1mm台となるのが一般的である。これらの値を改善することはもちろん重要であるが、X線CTについての大きな問題は、いわゆる計測精度が、計測対象物の材質や形状、計測時の様々なパラメタの設定によって大きく異なることにある。そのため、メーカーにおいても、3次元計測の精度については明示的に規定しておらず、ユーザーの導入目的や対象に応じて対応しているのが現状である。

今後は、このような計測条件と精度の関係を解明し、安定した精度を保証することが3次元計測としては必須の条件となる。また、アーチファクトなどの画質の問題を解決し鮮明な画像を得るための技術や、大規模な3次元画像を再構成するための高速計算技術も課題となる。

2. 3 技術分野

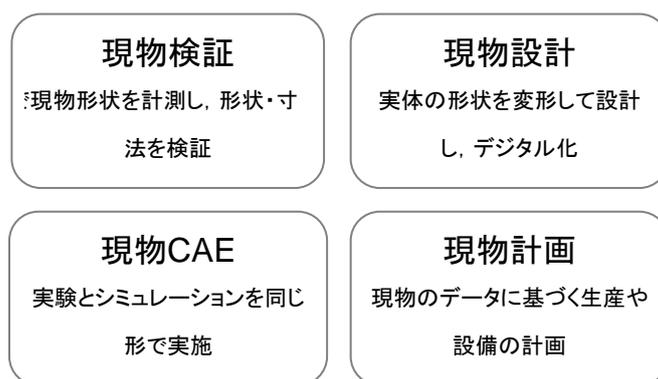


図 2. - 3 現物融合型デジタルエンジニアリングの分類

現物融合型デジタルエンジニアリングの技術分野は、図 2. - 3 のように、次の四つに分類して考えられる。以下、それぞれについて、例を用いて説明する。

2. 3. 1 現物検証

工程内で現物形状を計測し、形状や寸法を比較検証する。例えば、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によって製造条件を最適化したりする。図 2. - 4 上に示したのは、自動車のエンジンのある部分を X 線 CT によって計測したボリュームモデル (3 次元画像) である。鋳物は、その法案の策定が非常に難しく、ヒケ、反りなどの形状不良に加え、内部にできる鑄造巣の問題が重要である。それで X 線や X 線 CT は鑄造巣の検査に利用されてきた歴史があり、このようなエンジンは X 線 CT の最大の適用分野である。デジタルエンジニアリングでこ

のような計測データを活用するには、3次元画像のままでは CAD/CAM/CAE との相性が悪いので、通常まずメッシュに変換しモデリングを行う必要があるが、図はそれを示している。

2. 3. 2 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。代表例は、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であろう (図 2. - 5)。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修正後のモックアップから CAD モデルを生成する。あるいは、金型の手直しが行われた時に、その CAD モデルを生成する。さらに現物しかないもの(旧製品、他社製品)の CAD モデルの生成もこれに含まれる。最近では、世界各地に分散した生産工場において生産を同時に立ち上げるために、調整済みの型から 2 番型を効率よく生成することが求められているが、調整済みの型を計測し、それから加工情報を生成して型製作を行う取り組みがなされている (図 2. - 6)。

2. 3. 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に、試験対象の現物形状を計測して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ものである。現物の主な誤差要因としては、例えばスプリングバック、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。例えば、古い製品や他社製品(ベンチマーキング)などである。

図 2. - 7 上は、電子回路の実装分野における現物 CAE の例である。ここでは、ハンダ等による接合の不良の評価が目的で、マイクロ X 線 CT 装置と呼ばれる装置が利用されている。この図の左はリレー装置のハンダボールのボリュームモデルである。このようなハンダボールは内部にボイドが含まれ、それが接続不良などの原因となる。この右図は、ボリュームモデルから 4 面体メッシュを作り、それを用いて FEM による応力解析をし、ボイド周辺の応力分布を解析した例である。

2. 3. 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、組立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をスキャンできる装置が開発され、それを用いて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 (図 2. - 8)。

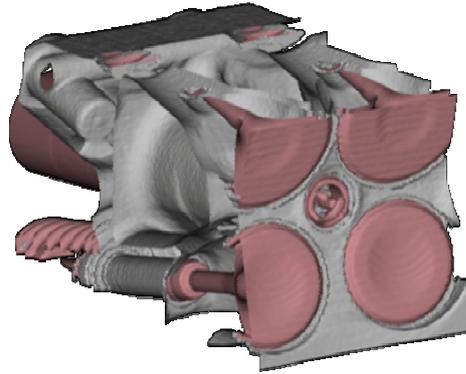
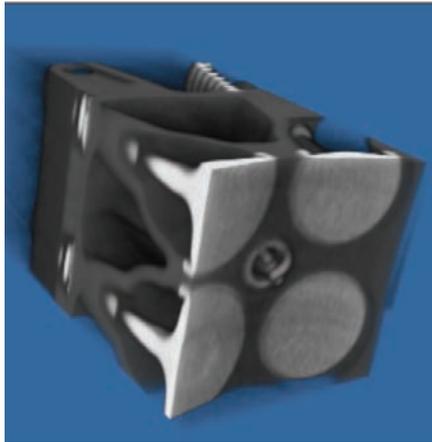


図2. - 4 エンジンの一部の CT 画像からの媒質毎のメッシュ生成
 (上：ボリュームモデル、下：非多様体三角形メッシュ)

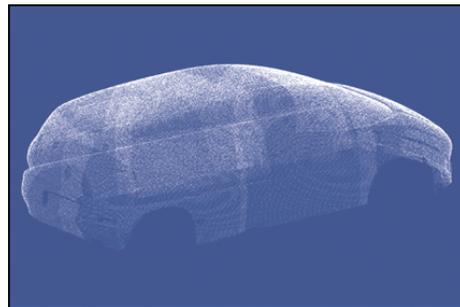


図2. - 5 3次元非接触スキャナーによるクレイモデルの計測。右は計測された点群。
 この点群から多面体モデルや曲面モデルを作成する。(C) ATOS, GOM International AG

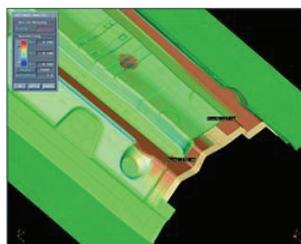


図2. - 6 3次元非接触スキャナーによるクレイモデルの計測。右は計測された点群。
 この点群から多面体モデルや曲面モデルを作成する。(C) ATOS, GOM International AG

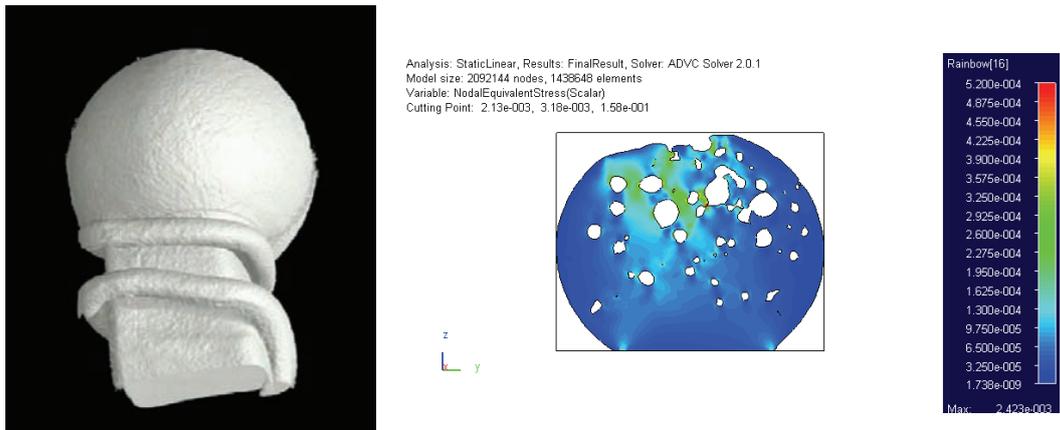


図2. - 7 ハンドボールの CT 画像から有限要素法のメッシュを生成し応力解析
 (上：ボリュームモデル、下：応力解析結果) (提供：日本ビジュアルサイエンス(株))



図2. - 8 As Built モデリング。工場などの建物や生産設備を 3 次元計測し、
 そのデジタルモデルによって設備計画などに応用する。(C) Z+F 社。

2. 4 まとめ

以上示したような技術が現実化してきた背景には、非接触 3 次元スキャナや X 線 CT スキャナなどの 3 次元スキャニング技術の高度化があることは言うまでもない。上で示した例の一部は実用化が進んだものもあるが、そ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、あるいは製造プロセス中の様々な製造特性に適用することができる。特に近年様々な先端的な計測原理に基づく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非常に有効である。しかし、計測原理の確立から、実際に産業の場で利用できる装置あるいはシステムへと、測定技術を高度化することが大前提と

なる。また、様々な特性の計測が可能になれば、それらの測定を多重的に行い、計測情報を重ね合わせたり、補完したり、推定をしたりする高度な情報処理技術を開発する必要がある。これをファンクショナルインスペクションという概念で捉えよう。これについては次章で詳しく述べる。

現物融合型デジタルエンジニアリングの最大の特徴は、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った。従来のデジタルエンジニアリングは、このような現物からのアプローチが欠けていたために、日本固有の技術とはならなかったのかもしれない。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い。本分野の技術開発を進めることが重要であると考えられる。

第三章 Functional Inspection

3. 1 産業応用可能な最近の計測手法

Functional Inspection として、産業応用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、そのエンジニアリングを考案することが必要と考えられる。ここでは、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）について具体的に紹介する。これらは、それぞれ独自のサイエンティフィックな着想・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広範囲での応用・実用化が求められている手法である。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、現物融合化の基盤ツールとして組み込み、将来の技術高度化戦略として利用できる可能性が高い。

3. 1. 1 スライシング利用計測

本手法は、観察対象となる試料を精密にスライシングして行き、その断面の画像や物性を取得・三次元データとして再構築することで、内部構造を取得する新しい手法である¹⁻⁴⁾。近年、生物試料・組織を対象とした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の解析に至るまで、本計測手法のニーズは高まっていると言える。本手法は破壊検査であるが、試料内部の多面的な情報を得ることができ、原理的な分解能には制限がない点は特筆に値する。

①原理

図3. - 1に本計測手法の原理の模式図を示す。まず、何らかの方法で包埋した試料を装置内に固定し、回転するカッターによりスライスして、そのスライス面の情報を取得する。その後、スライスしたい量（厚み方向分）だけ試料を上昇させることを繰り返して、試料の実連続断面情報を得る方法である。本手法では、スライスの単位はシステムの制御分解能や切削条件により設定されるが、ミクロン単位が可能であり、また画像や蛍光や切削力を使用して、構造、機能や物性などの情報を取得し、その情報と切断量を基に三次元情報（ボクセル情報）を構築することが可能である。実際の観察例では、マウス1匹を30 μm の分解能で3,000枚の断面画像として観察した場合、1時間以内でデータ取得が完全自動で実現できる。

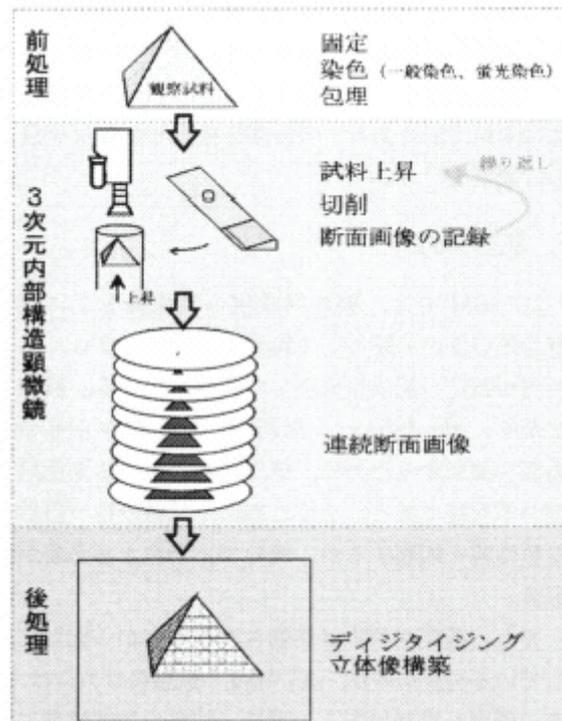


図 3. - 1 スライシング計測手法の模式図

②スライシング部・計測部

試料のスライシング部の構成を図 3. - 2 に示すように、主にカッター回転機構、試料送り保持機構からなる。包埋された試料は試料送り保持機構により任意量分、上方に移動させ、突出し部分を回転する平刃カッターで切断する。また、凍結包埋した試料に対応するために、試料スライス部は低温環境に維持することが可能である。試料のスライス面は、ハロゲン光源から光ファイバー等により照明され、カメラレンズと CCD カメラにより撮影される。撮影時以外は光を照射しないように、光源にシャッター機構を組み込み、制御部から観察光の照射をコントロールできる。また、蛍光観察および共焦点レーザー観察装置を組み込んだシステムでは、スライス面観察部に顕微鏡用の投光管、フィルターセット、超長作動距離の対物レンズ、水銀キセノン光源、レーザー光源、共焦点ユニットなどを用いる。

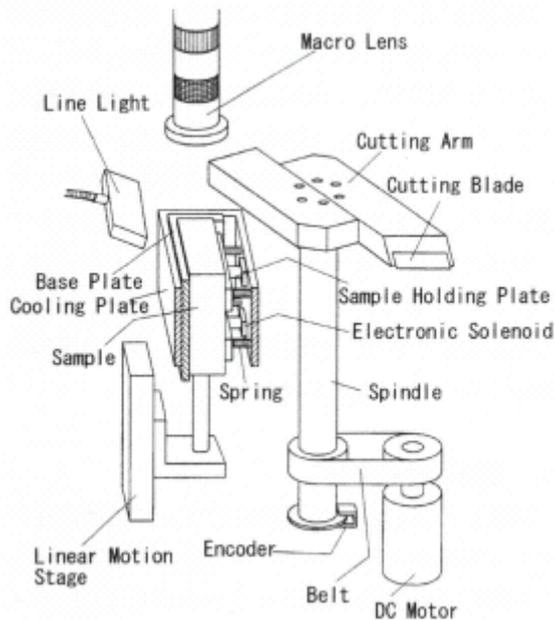


図 3. - 2 試料スライス部の模式図

③観察・計測例

本システムにより、マウス 1 匹を観察した例を図 3. - 3 に示す。(a)は観察した実断面画像であるが、腰の部位の断面であり、腹部の小腸、腎臓、大腿骨などが確認できる。撮影した画像からマウス全体を再構築した画像を(b)に示す。また、実際にはスライスしていない任意の断面での立体画像を(c)に示す。画像処理により、手前の部分を透明にして、脊椎に沿ってマウスを縦に切った画像となっている。

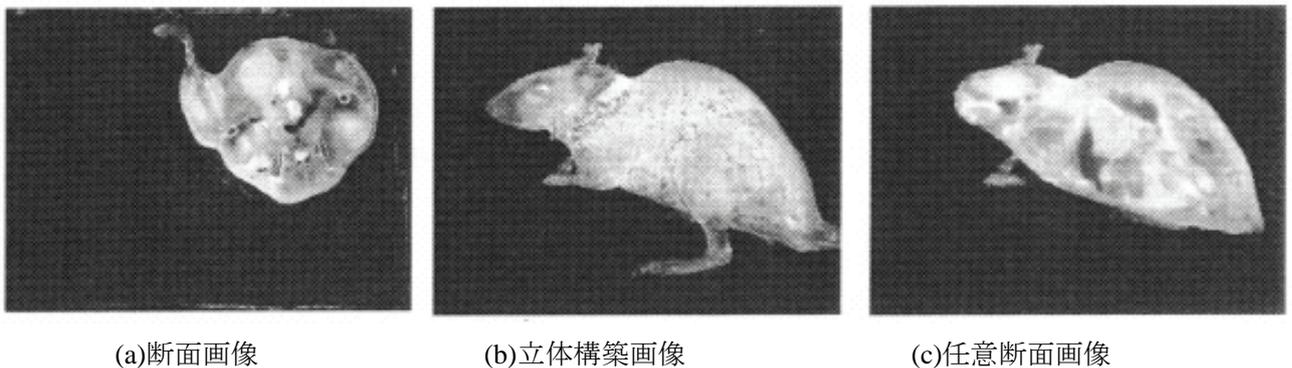


図 3. - 3 マウスの観察結果

生物の機能解析においては、解析対象とする部位に特異的な色がない時は、試料のマーキング手法として、蛍光標識と蛍光観察法による観察が選択できる。具体的には、生物体内で発現している遺伝子の局在を解析した例を紹介する。対象物をマウスの胎児とその体内での癌原遺伝子(c-kit)の発現に設定し、Whole Mount in situ Hybridization により、塊のまま

胎児体内での c-kit の三次元発現パターンを観察した⁵⁾。観察には、本システムに蛍光顕微鏡を組み込んで行った。観察結果である画像群を図3. - 4に示す。明るい部分が c-kit が発現している部分である。内臓および脊椎に強い発現が見られる。この観察法では、発現遺伝子の局在を観察することに成功したが、試料の外側から cDNA プローブや色素を浸透させる必要があり、観察対象物の大きさに制限がある。

そこで次に、特定のプロモータと共に蛍光タンパクを組み込んだ遺伝子組み換え動物に対し、共焦点レーザー顕微鏡を組み込んだシステムにより解析を行った。Green Mouse⁶⁾の心臓の左心室壁を観察した結果を図3. - 5に示す。心臓の心筋細胞が蛍光を発しており、心筋の層状のパターンを見ることができる。

④まとめ

本手法により、内部構造に関わる複数の情報が取得できるシステムを構築できることを紹介した⁷⁾。また、ここでは詳述しなかったが、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。

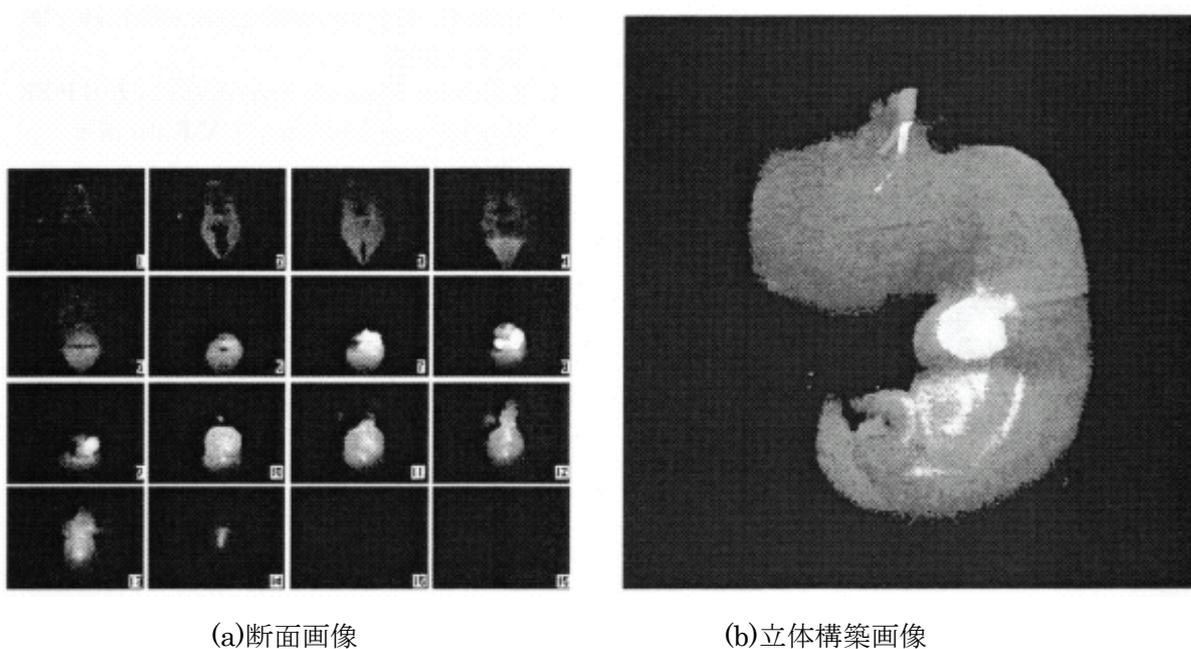
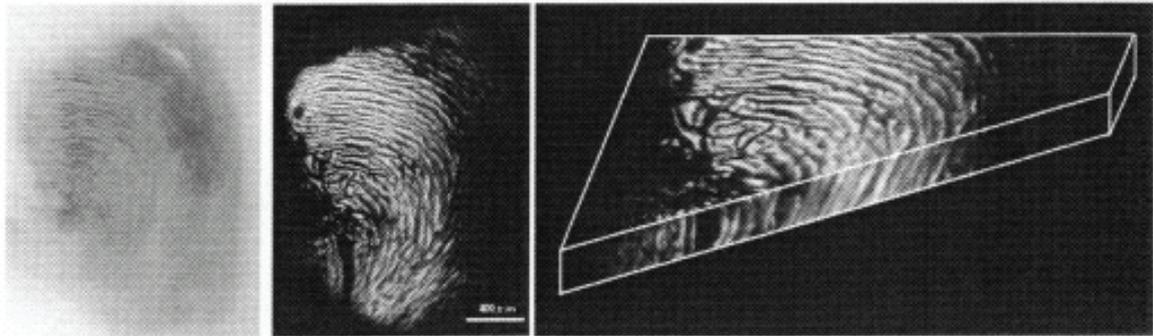


図3. - 4 c-kit の発現



(a)落射蛍光 (b)断面蛍光画像 (c)立体構築画像

図3. - 5 心壁の観察画像

(参考文献)

- 1) 小林賢知ほか, 精密工学会誌, 61, 1, 100 (1995).
- 2) 横田秀夫ほか, 低温物理工学会誌, 44, 1, 1 (1998).
- 3) 川口龍平ほか, あたらしい眼科, 16, 10, 1437 (1999).
- 4) 横田秀夫ほか, Medical Imaging Technology, 20, 6, 660 (2002).
- 5) 横田秀夫, 医用電子と生体工学, 36, 3, 244 (1998).
- 6) Ikawa et al., FEBS Lett., 430, 83 (1998).
- 7) 横田秀夫:新しい観察技術:3次元内部構造顕微鏡, BIO INDUSTRY, Vol.22, No.2, 86-92 (2005).

3. 1. 2 テラヘルツ波利用計測

次に、テラヘルツ波を利用した非破壊検査手法の例を紹介する。本手法についても、見えないものを見えるようにする手段を提供するものとして、その産業への応用・実用化が期待される。

①テラヘルツ波

赤外線と電波の中間に位置するテラヘルツ波は、周波数が 0.3-10 テラヘルツ（波長 1mm-30 μ m）の電磁波である。テラヘルツ波は、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いかして物質透視イメージングに利用可能である^{1) 2) 3)}。例として、JR 東日本の SUICA カードのテラヘルツ透視イメージを図3. - 6に示す⁴⁾。このように、テラヘルツ波は様々な工業製品の実用的な透視イメージング検査に適している。また、生体高分子を中心とした分子の特徴的な吸収スペクトル（指紋スペクトル）が多数の結晶で発見されており、それを利用した物質弁別などの魅力的応用が提案されている^{5) 6)}。特に、テラヘルツ波は物質に対する透過性が赤外線などより高く、物質内部の微細構造による散乱の影響も相対的に小さい。このため、隠蔽されたものを透視しながら物質弁別を行うような応用が期待できる。また、同様の物質透過性を有する X 線では、元素弁別はで

きても分子の弁別は容易ではなく、この利点はテラヘルツ波特有のものである。

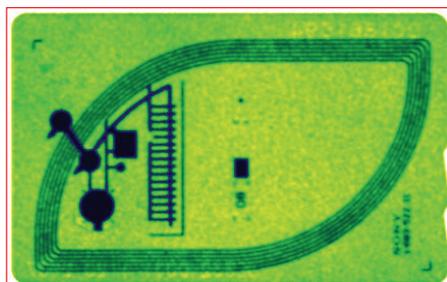


図3.－6 SUICA カードのテラヘルツ像⁴⁾

②応用例

○テラヘルツ波による封筒内の禁止薬物の非破壊検出

我が国では検閲は法的に禁じられており、捜査令状なしでは封書のような郵便物（信書）を開封できない。しかし、封書に麻薬・覚せい剤などの違法薬物や爆薬・生物剤などの危険物質を非破壊で探知することは従来技術では困難であり、郵送による流通の恐れがある。しかし、これらの使用は犯罪・テロ行為に直結しており、封書の非開披探知は水際の現場である税関・国際郵便局や警察活動において切望されている。テラヘルツ波の透過性と指紋スペクトルを利用すると、このような非破壊探知が可能である（図3.－7）⁶⁾。しかし、実際の封書の全数検査では、1日数10万通もの封書の処理（毎秒5-10通）が必要であり、全数の分光測定は困難である。そこで、このプロトタイプでは、X線・可視光を利用した予備検査、および、テラヘルツ波の散乱を利用したスクリーニング検査の導入により、全数検査に耐えうるプロトタイプ開発が行われている⁷⁾⁸⁾。封書の大多数には紙だけが含まれるため、X線透過測定で内容物の影（薬物の袋詰めなど）が見られる封筒のみを次の検査に送り、内容物の位置情報や可視光による封書の外観情報（宛名など）も受け渡す。次に、粉体の粒径がテラヘルツ波と同程度（約100ミクロン程度）で強い散乱が生じるのを利用して粉体の有無を判定し、散乱光が強い封書を「疑わしい封書」と判定して、最終段の分光装置でテラヘルツ分光測定を実行して薬物の有無を判定する。

○フレキシブルパッケージの欠陥の非破壊検査

食品・薬品などの包装に使用するフレキシブルパッケージは、自動充填機を用いて数10 μ mの薄いラミネートフィルムをヒートシールして製作される。このパッケージは、ボトル容器などのリジッドパッケージに比べて材料の使用量が少なく減肉化でき、使用後も折りたたんで捨てることのできる利点をもつため、省資源・減容化の観点から需要が増加しており、製造高速化による高生産性が求められる。しかし、高速化が進むにつれてヒートシール部の不良が多数発生し、耐久性を低下、液漏れ、細菌などの混入を引き起こすことが問題となっている。特に、信頼性、不透明パッケージへの適用の問題、高速生産化の問題などから、現在のシール不良検査で用いられている目視試験やCCDカメラに代わる最適な検査法が望まれている。テラヘルツ波は種々のプラスチックフィルムを透過するうえ、水を

高感度で検出できたため、パッケージの液漏れの検出に有効である。森田らは、この性質を利用して、実際の生産ラインの送り速度と同様の 0.8 m/sec において、最小で 40 μ m の液漏れの検出に成功した (図 3. - 8) ^{9,10)}。

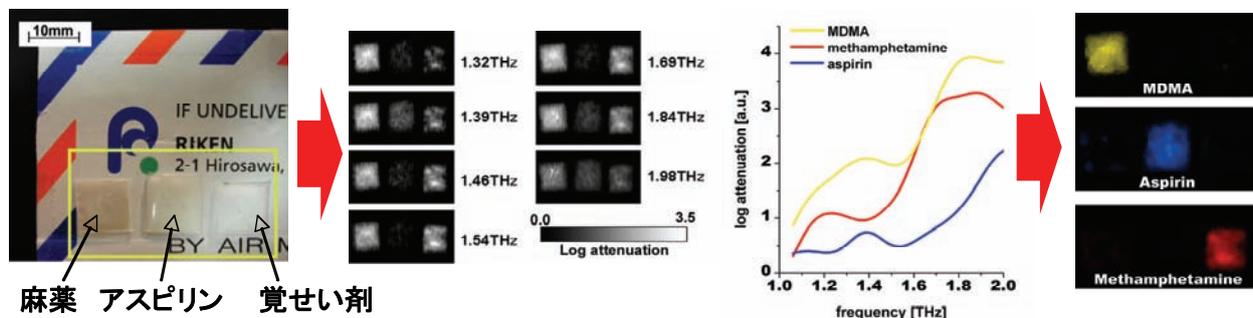


図 3. - 7 テラヘルツ波による封筒内の禁止薬物の検査 ⁶⁾

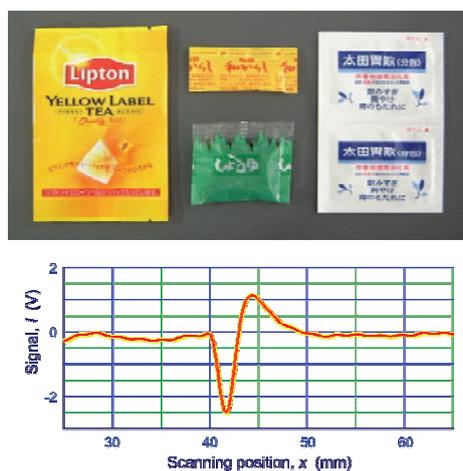


図 3. - 8 フレキシブルパッケージの検査 ^{9,10)}

○集積回路の欠陥検査

最先端の半導体 LSI は、パターンの微細化・複雑化により開発期間及び量産立ち上げ期間が長期化しており、安定した品質の高歩留まりの生産維持のために、開発段階におけるデバイスやプロセスの課題の解析と生産へのフィードバックを行う「故障解析」が重要となっている。そのためには、大規模な LSI 回路内の故障箇所の同定が不可欠である。特に、製造途中の LSI への適用のために、外部測定機器との電気的コンタクトが不要な非接触の故障箇所絞り込み技術の開発が望まれている。山下らは、LSI にフェムト秒レーザーを照射した際に、電圧印可箇所からテラヘルツ波が放射される現象を利用し、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM) の開発を進めている ^{11,12)}。LTEM では、レーザー光を LSI 上でスキャンし、発生したテラヘルツ波の分布を高空間分解能で測定し、分布画像の異常から回路異常箇所を同定する (図 3. - 9)。また、外部電圧を印加しない状態でも LSI チップには *p-n* 接合部等には built-in 電界が存在するため、製造工程において利用可能な故障箇所絞り込み

技術として期待できる。なお、この技術は、JSTの「先端計測分析技術・機器開発事業」に採択された研究課題「超 LSI 故障箇所解析装置」において、レーザー-SQUID 顕微鏡技術との融合による半導体チップの先端的故障解析技術の開発が計画されている。

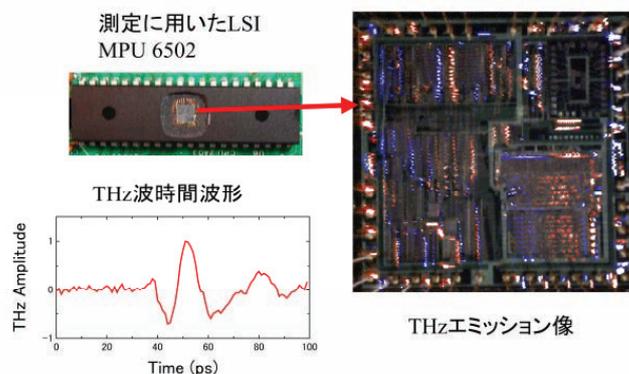


図3. - 9 LTEMによるLSI像とテラヘルツパルス¹²⁾

○その他の応用

他の応用には、テラヘルツ波の物質透過性と実用的な空間分解能を利用した様々な工業製品（プラスチック、ゴム、セラミックスなど）の欠陥検査、食品・農産物・インク・薬品等の品質検査が挙げられる。また、これらの性質の中には、コンポーネントが安価なミリ波やマイクロ波でも利用可能なものがあり、テラヘルツ波で研究された技術が応用されて製品化に結びついているものも生まれている。その例が空港でのペットボトル検査器であり、池田らによるテラヘルツ帯での原理実証実験から生まれたものである¹³⁾。また、医学・生物学応用として、皮膚がんなどの広がり的事前検査（図3. - 10）^{14, 15)}やDNAのhybridizationのラベルフリー診断¹⁶⁾などの可能性も研究されている。

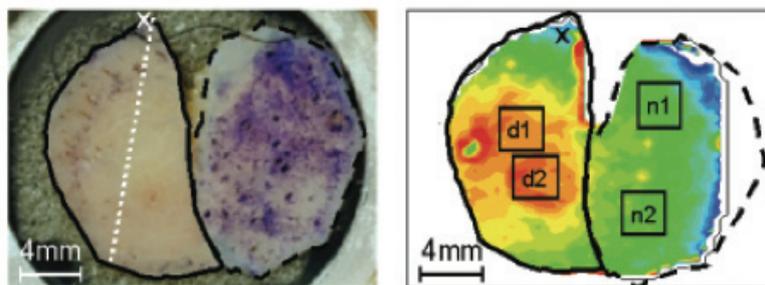


図3. - 10 皮膚がんの計測（サンプルの左半分ががん組織）¹⁴⁾

③テラヘルツ技術の課題

このように、テラヘルツ波は数多くの応用可能性を有するがゆえに、産業界における利用には、共通基盤となる技術開発が極めて重要である。その鍵を握るのは、光源技術、検出技術、そして、イメージング技術の3つである。光源技術においては、広帯域の分光が

可能なテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) とその多素子化、高強度かつ小型の広帯域波長可変光源の開発、そして、半導体レーザー技術を利用した量子カスケードレーザー (Quantum Cascade Laser; QCL) の開発が挙げられる。検出技術では、従来の単素子測定に代わって短時間でイメージングできる多素子検出器が強く求められている。特に、産業応用では、製造ラインなどでの連続測定が求められるため、1次元アレイの実現が極めて重要である。また、イメージング技術の開発も重要である。特に、イメージングでは、X線や可視光などの他の測定手段の情報と組み合わせにより、従来では実現し得なかった相補的情報の同時取得が実現可能となる。その意味で、それぞれの特長が利用可能な新たな測定・検査法の開拓や、複数の測定情報の重ね合わせのための高度情報処理技術も必要である。

④まとめ

テラヘルツ波は、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。ソフトマターの多様さから、応用可能性は多種多様に渡り、今後のニーズの掘り起こしにより、さらに多数の応用が生まれて行くことが期待できる。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と考えるべきである。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いかされるには、計測時間やコストの制限の克服が必要である。その意味で、上記の薬物検査や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充実・肉付けは非常に重要である。また、複数の測定情報を最大限に有効活用するためには、多面的情報の重ね合わせのための高度情報処理技術も必要になると考えられる。

(参考文献)

- 1) B. B. Hu, M. C. Nuss, *Optics Letters*, vol. 20, pp. 1716-1718 (1995).
- 2) D. M. Mittleman et al., *Optics Letters*, vol. 22, 904 (1997).
- 3) Z. Jiang, X. G. Xu, X.-C. Zhang, *Applied Optics*, vol. 39, 2982 (2000).
- 4) A. Dobroiu et al., *Applied Optics*, vol. 43, no. 30, pp. 5637-5646 (2004).
- 5) Y. Watanabe et al., *Applied Physics Letters*, vol. 83, pp. 800-802 (2003).
- 6) K. Kawase et al., *Optics Express*, vol. 11, pp. 2549-2554 (2003).
- 7) 渋谷孝幸ほか, 電気学会論文誌 C, Vol. 125, pp. 545-550 (2005).
- 8) 大谷知行ほか, 応用物理学会誌 (受理済) (2005).
- 9) 森田康之ほか, 日本機械学会論文集 C 編, 71 巻, 706 号, pp. 1999-2005 (2005).
- 10) Y. Morita et al., *Journal of Food Protection*, vol. 68, no. 4, pp. 833-837 (2005).
- 11) T. Kiwa et al., *Optics Letters*, vol. 28, 2058 (2003).
- 12) M. Yamashita et al., *Optics Express*, vol. 13, no. 1, pp. 115-120 (2005).

- 13) T. Ikeda et al., *Applied Physics Letters*, vol. 87, no. 034105, pp. 1-3 (2005).
- 14) R. M. Woodward et al., *The Journal of Investigative Dermatology*, vol. 120, pp. 72-78 (2003).
- 15) R. M. Woodward et al., *Physics in Medicine and Biology*, vol. 47, pp. 3853-3863 (2004).
- 16) M. Brucherseifer et al., *Applied Physics Letters*, vol. 77, pp. 4049-4051 (2000).

3. 1. 3 中性子応用計測

新しい非破壊検査の1つとして、低エネルギー中性子ビームを用いた解析手法は、軽元素に敏感な解析手段として物質研究に使用されている。特に生体物質の研究においてはX線では見ることの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の応用範囲が強く制限されている。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められ、中性子利用技術を著しく進展させるとともに、これからの先端科学および産業分野の両面における利用技術の展開と実用化が期待されている。

①中性子の性質と中性子ビーム

中性子(neutron)はスピン $1/2$ の中性粒子であり、スピンと反平行な磁気双極子能率を持っている。自由空間にある中性子は約 15 分の平均寿命で、陽子、電子、ニュートリノへ崩壊する。約 15 分という寿命は他の不安定素粒子に比べて桁違いに長く、室温以下の温度に対応するような極めて低いエネルギーまで減速しても十分に長い距離を飛ぶことができる。また電氣的に中性であるため物質を透過する能力が高く空気中でも運動を妨げられることが少ない。中性子の質量は陽子の質量とほぼ同じである。図 3. - 1 1 に、中性子の性質をまとめ示す。また、中性子 (ビーム) の運動エネルギー(E)と対応する温度(T)及び波長(λ)の関係は図 3. - 1 2 の通りである。物質解析研究においては、熱中性子(thermal neutron)、冷中性子(cold neutron)及び極冷中性子(very cold neutron)と分けられているエネルギー領域にある中性子が主に使用される。

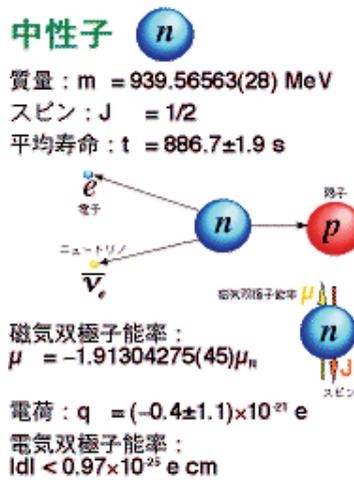


図 3. - 1 1 中性子の性質

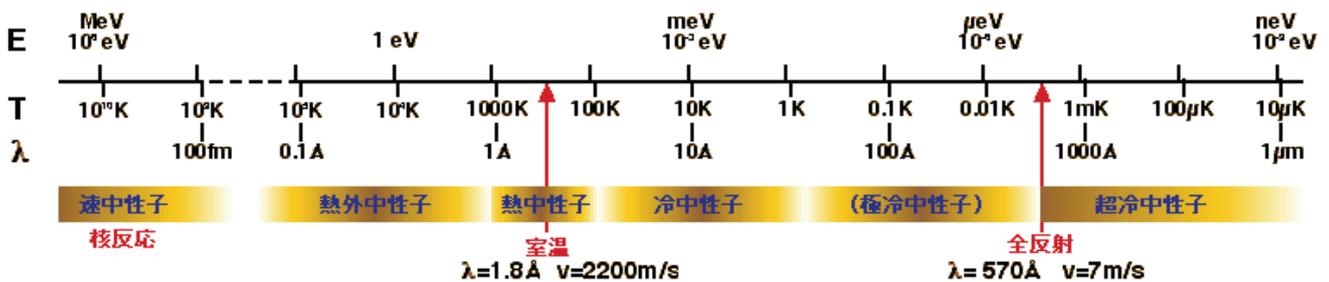


図 3. - 1 2 中性子 (ビーム) の運動エネルギー、温度、波長の関係

②中性子利用イメージングの効果

物質解析研究で使用される放射線は、X線が主流である。X線と比較した場合の中性子が持つ大きな特徴の一つは、中性子の軽元素に対する高い識別性である。X線は物質中の電子と主に相互作用し、電子軌道の構造を反映する構造を除けば、より原子番号の大きな元素からの影響を強く受ける。一方、中性子は物質中の原子核と主に相互作用するため、相互作用の強さは原子核構造に依存する。このため、原子番号に対する系統的な依存性は認められない。結果的に中性子は比較的軽元素に対して高い感度を示す。特に注目される点は、水素や酸素等が高い感度を持っている点である。こうした中性子とX線によるイメージング効果の違いを図示すると図 3. - 1 3 のようになる。また、図 3. - 1 4 の例は重土十字沸石という含水鉱物である。これを X 線を見た場合には、原子番号の大きな Ba が主な寄与を与え、水素や酸素は極僅かな寄与しか与えない(図では球体の幾何学的断面積が、散乱断面積に比例するように描かれている)。しかし、中性子で見た場合には状況が全く異なり、酸素や水素がとても大きな寄与を与えていることが分かる。さらに、中性子は原子核構造に依存した相互作用の強さを持つことを利用して、水素を重水素で置き換えると、さらに

水素位置からの寄与を大きくできる。したがって重水素化された像からもとの像を差し引くことによって、水素原子の情報だけを取り出すことができる。このような手法は水素に限らず、その他の元素でも同位体を利用して実現することが可能で、同位体コントラストと呼ばれる(またさらに、中性子と水素原子核のスピンをそれぞれ制御することによって、両者が平行な場合と反平行な場合の比較によって、極めて大きなコントラストを実現することも可能である)。このような特質から、中性子は特に生体分子内の水素原子や水分子、また金属内水素や軽元素の研究に関する研究では、全く新しい情報を提供できるものと期待されており、また優れた物質透過力を利用した物体の透視等にも活用が期待される。図 3. - 1 5 は、ニワトリ卵白リゾチームタンパク質の構造解析における中性子利用イメージングの効果を示す。

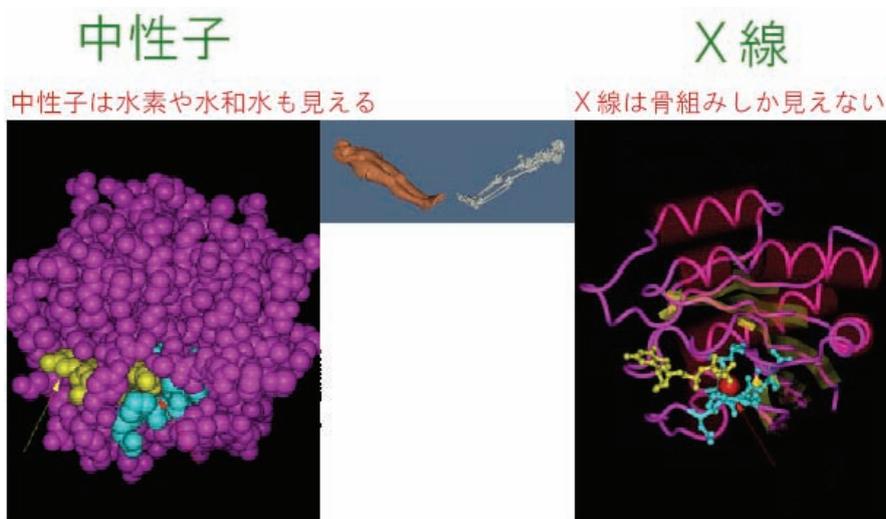


図 3. - 1 3 中性子と X 線によるイメージング効果の相違

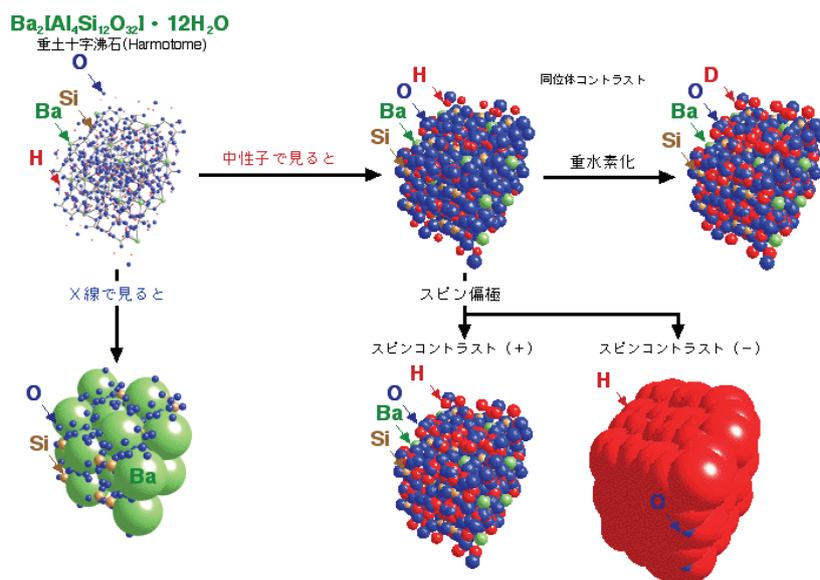


図 3. - 1 4 中性子の軽元素識別能力

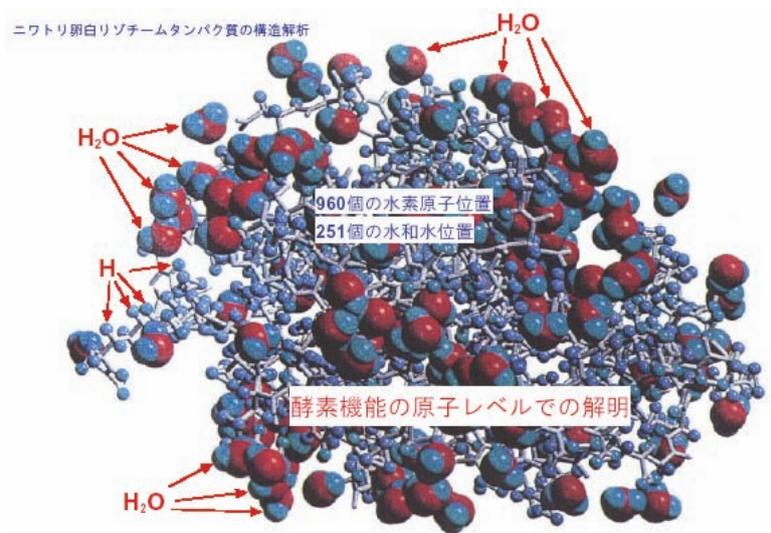


図3. - 1 5 ニワトリ卵白リゾチームタンパク質の構造

中性子を用いた解析は試料を透過した中性子の散乱パターンの検出により行われる（図3. - 1 6）。図3. - 1 7は、中性子によるニワトリ卵白リゾチームタンパク質の回折像を示す。

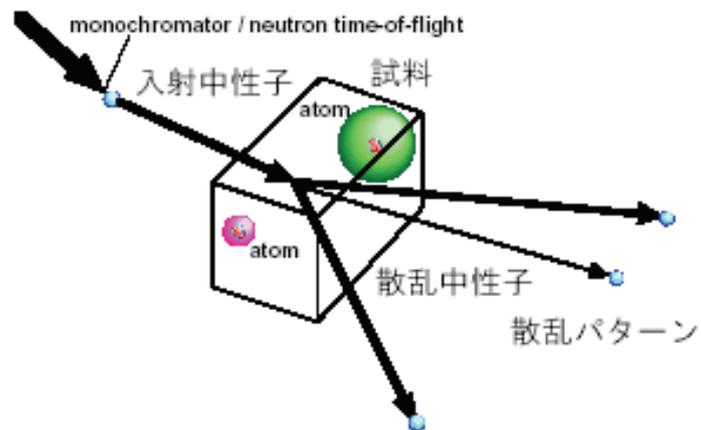


図3. - 1 6 中性子利用解析の模式図

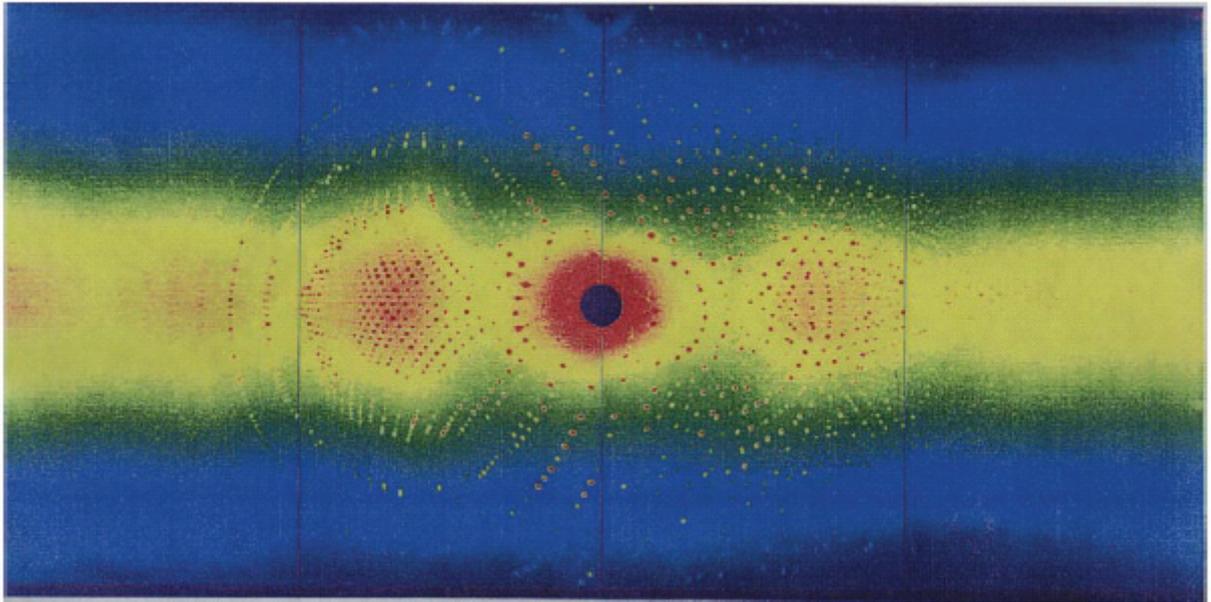


図3. -17 ニワトリ卵白リゾチームタンパク質の中性子回折像

このような優れた特質を持つにもかかわらず、現在のところ中性子は物質研究の中心的な手法として活用されているとは言えない。中性子を発生するには原子核反応を用いる必要があり、十分な強度の中性子ビームを得るためには原子炉や大強度加速器などが使用される。そのため中性子ビームは大変高価なものとなる。これが中性子を一般的な手法として普及する上での障害になっていると言ってよいだろう。また、中性子ビームの強度は X 線に比べて極めて弱く、測定精度を制限する大きな要因となっている。しかし、より強力な新たな中性子源を建設するには巨額の費用と多大な労力を要する。したがって、このような貴重な中性子を最大限に活用するために、中性子ビームを高い効率で試料まで導く方法や物理量を効率的に引き出す測定的手法を開発することが重要な課題となる。このために中性子の運動を制御する手法として、中性子ビームの光学は大変重要な位置を占める。こうした中、近年、中性子光学についての技術開発が系統的に進められてきた。中性子ビームを曲げたりして運動を制御するために利用する相互作用は、ア) 有効ポテンシャル(原子核相互作用)、イ) 磁気相互作用、ウ) 重力相互作用、である。これらの相互作用を利用して中性子光学素子を構成することができる。ただし、当面、重力相互作用の利用は考えていない。これは、重力相互作用は常に地球による重力が支配的なため力の向きや強さを人為的にかえることがほぼ不可能で、設計の自由度が極めて低いからである。ア) およびイ) の相互作用を利用して実現できる中性子光学素子の原理と形態について、以下にそれぞれまとめる。

○有効ポテンシャル

物質の界面では中性子は有効ポテンシャルを感じる。中性子の界面法線方向の速度が極めて小さい場合には、中性子は界面において全反射を起こす。これを利用する光学素子が、

中性子ミラーである。また、全反射を起こさない場合には中性子は物質内に入り込むが、有効ポテンシャルの影響で中性子の速度は変化し、進行方向は曲がる。これを利用すれば通常の光と類似の光学系を構成できる。この原理で作った光学素子を物質光学素子(物質界面屈折光学素子)と呼ぶことにし、レンズ系は物質レンズ、プリズム系は物質プリズム等と呼びならわすことにする。

○磁気相互作用

磁場が変化すると、中性子が感じるポテンシャルエネルギーはそれに応じて変化する。磁場が空間的に変化している場合には、中性子は磁場勾配方向に力を受ける。これを利用することによって光学系を構成できる。この原理を使った光学素子を磁気光学素子(磁気屈折光学素子)と呼ぶことにし、レンズ系は磁気レンズ、プリズム系は磁気プリズム等と呼びならわすことにする。磁気光学系は中性子のスピン方向に依存して中性子を曲げる方向が変化する。

○磁気ミラー

物質が内部に磁場を保持している磁性体等の場合には、その内部磁場に応じて中性子と物質との相互作用の大きさが変化する。物質内の磁場が強力であれば、これを利用した光学系を構成することができる。これは、これまで中性子スピンを偏極させたり、中性子のスピン偏極度を測定するために用いられてきており、普通は磁気ミラーと呼ばれている。これは通常の有効ポテンシャルを用いた中性子ミラーに磁気相互作用による効果を付加したものと考えられる。

これらの光学素子の原理の模式図を図3. - 18に示す。また、これらの中性子光学素子の開発により構築できる中性子解析システムの模式図を図3. - 19に示す。中性子光学素子を用いたビーム収束、ビーム発散低減、スピン偏極などによる「高品位ビーム」、中性子エネルギーの直接測定や中性子偏極度測定、時間分解能を持った中性子画像検出器などを組み合わせることにより、中性子利用効率を最大限に向上させ、より精度の高い測定、より少量の試料や微小領域での中性子解析が実現できる。実際、既に開発した中性子光学素子の一部は、日本原子力研究開発機構(原研)3号炉の中性子ビームラインにおいて実用化され、優れたビーム集光や高位置分解能を実現している。

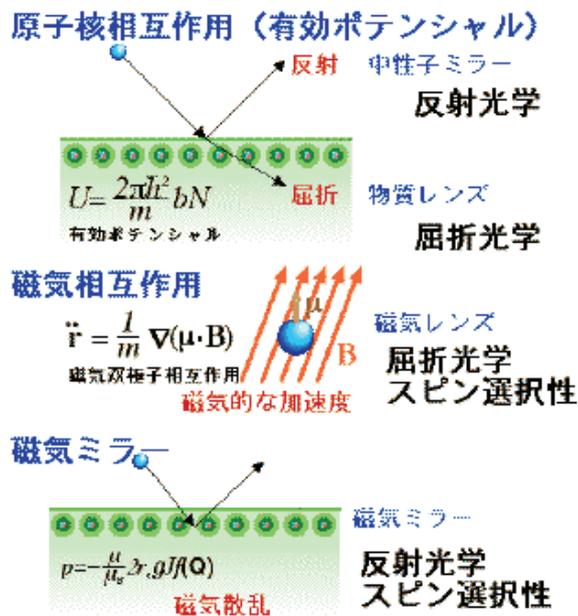


図3. - 1 8 中性子光学素子の原理

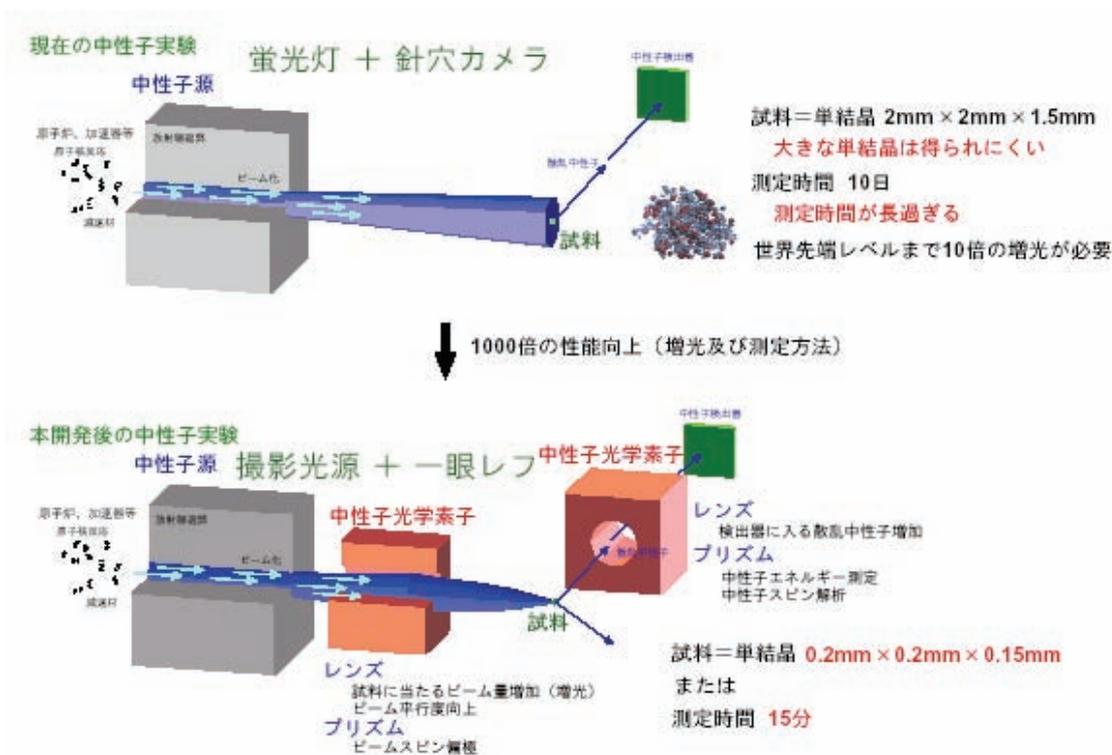


図3. - 1 9 中性子光学素子による実現できる解析システム

これを称して、「中性子実験のダウンサイジング」と呼ぶことにする (図3. - 2 0)。ダウンサイジングの効用の一つは、より小さな試料を用いることを可能にすることによって、中性子の利用範囲を劇的に広げられることにある。同時に使用する試料が小さくなれ

ば、散乱中性子の角度決定精度を同程度にするために必要な検出器と試料の位置を短くすることができる。これによって中性子散乱実験装置自体の寸法を小さくできる。これは実験装置開発のコストと手間を劇的に小さくする可能性を秘めており、中性子の応用分野の開拓に大きく寄与するものである。また、実験装置の寸法が小さくなると検出器に求められる位置分解能などもより優れたものが要求される。このような高機能の検出器を用いて大型の実験装置を構成すれば、より高性能の中性子散乱実験が可能となる。このようにそれぞれの技術が他の技術開発を促進し、中性子散乱実験全体の技術革新を連鎖的に達成することを最終的に目指している。

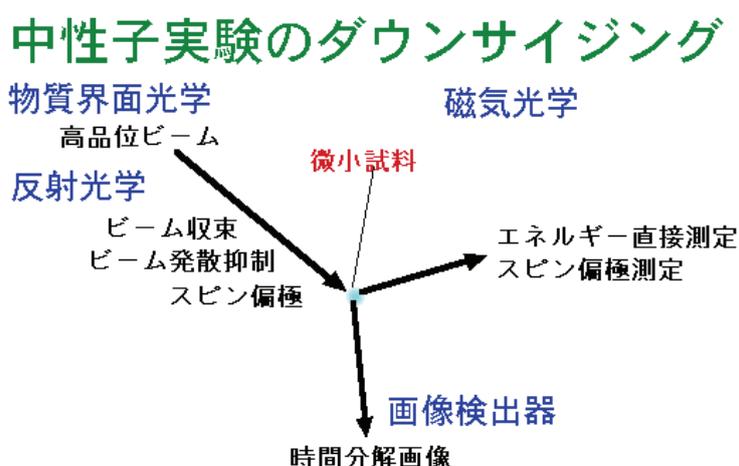


図3. - 2 0 中性子実験のダウンサイジング

③中性子利用解析の応用

中性子を利用したイメージングとそれによる解析の応用としては、図3. - 2 1に、リチウム電池などの新型電池材料の解析において、X線に比べ中性子が効果を発揮する例を示す。明らかに、X線では得られなかったリチウム原子像が、中性子により得られている。また、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の観察等、工業応用が可能である。図3. - 2 2は、中性子による金属管内の空気・水二相流の透視像であり、この画像より、金属管内の水がはっきりと視認できていることが分かる。また図3. - 2 3には、中性子解析による生物科学・バイオテクノロジーへの応用体系について示す。科学技術や実用への大きな貢献が期待できる。このように、中性子利用イメージング・解析手法により、物質研究における解析、生物科学・バイオテクノロジー、そして工業応用へと広範な展開・発展が期待できる（図3. - 2 4）。

④まとめ

以上、中性子応用計測について、中性子の性質、イメージング、解析応用などについて紹介した。現在、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、さらなる中性子応用計測の発展が期待できるであろう。

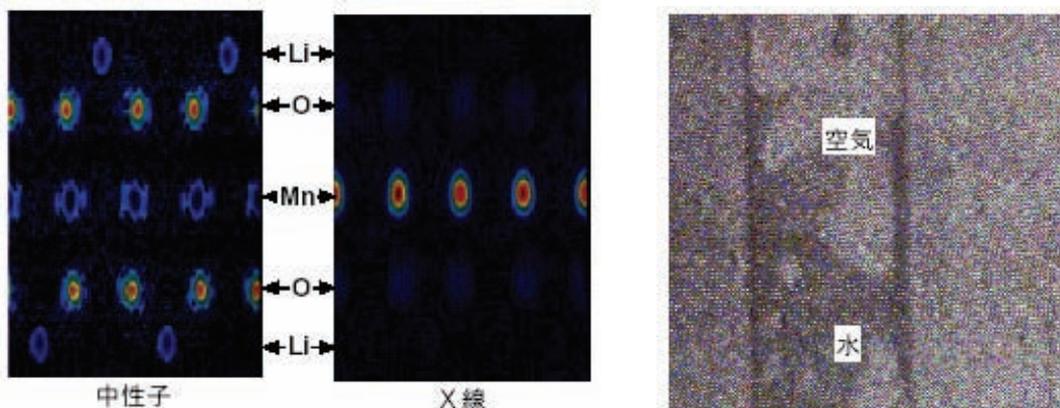


図3. - 2.1 中性子とX線によるLiMnO₄のリチウム原子像 図3. - 2.2 金属管内の空気・水の透視像

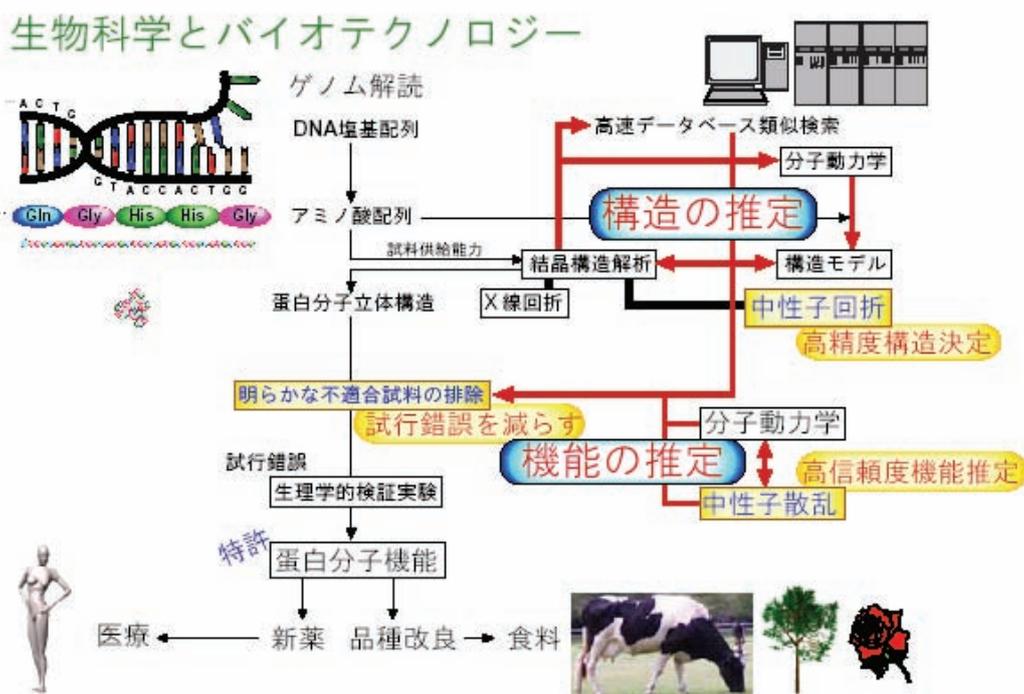


図3. - 2.3 中性子解析による生物科学・バイオテクノロジーへの応用体系

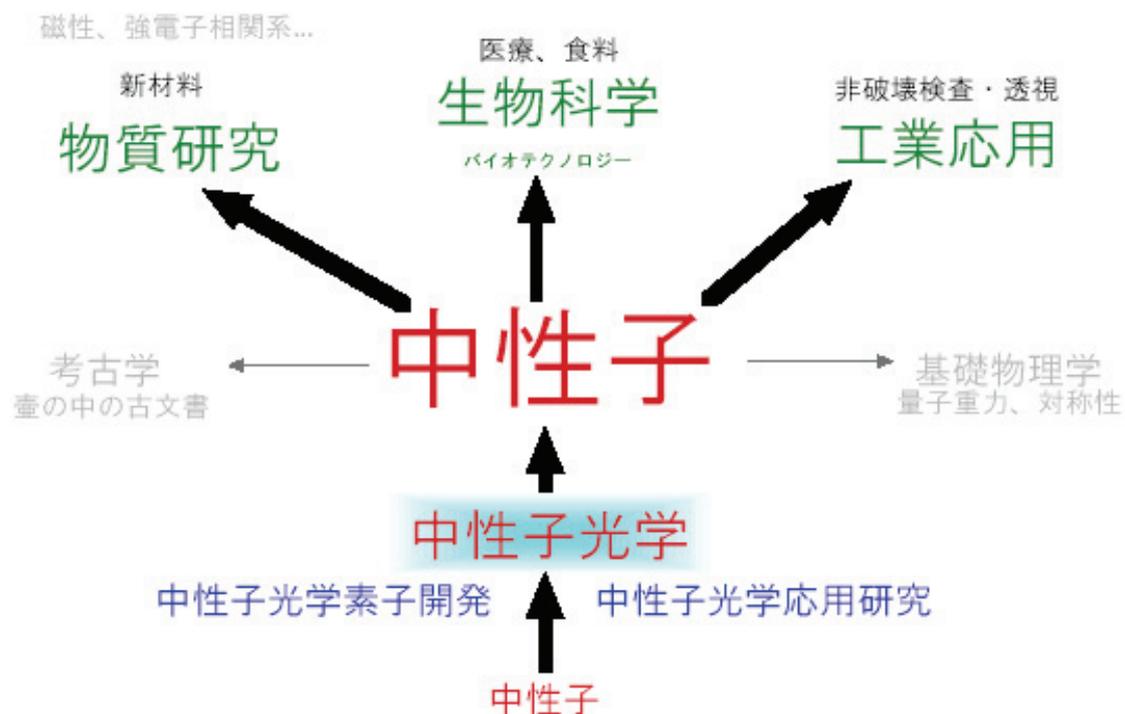


図 3. - 2 4 中性子応用の展開

(参考文献)

- 1) ホームページ : <http://nop.riken.go.jp/research/plan/indexJ.html>
- 2) H.M.Shimizu et al., Appl. Phys. A 74[Suppl.] S326-S328 (2002).
- 3) 日本中性子科学会学会誌「波紋」, 「特集: J-PARC への夢」, Vol.14, No.1 (2004).
- 4) 日本中性子科学会学会誌「波紋」, 「特集: 中性子科学を支える基盤技術」, Vol.15, No.1 (2005).

謝辞

本節で紹介した内容をまとめるに際し、必要な資料を提供頂いた独立行政法人理化学研究所 横田秀夫博士、大谷知行博士、佐藤広海博士、国立大学法人名古屋大学 川瀬晃道教授、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 清水裕彦教授ならびに各研究の関係各位に心から感謝致します。

3. 2 半導体微細加工分野におけるFunctional Inspection

3. 2. 1 はじめに

図3. - 2 5に半導体微細加工分野のロードマップを示す。2004年に100nmテクノロジーノードを達成した後も、その微細化への要求は衰えず、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ノードも実現されてきている。そして、今後も更なる微細化が指向されており、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の確立が求められている。このように可視光波長以下の微小加工単位が求められ、時代時代の最新技術の粋を集中する、半導体微細加工分野は、最も高精度な生産工程を有している製造技術分野といえることができる。本節では、このような微細化の最先端を進んでいる半導体微細加工分野におけるFunctional Inspection例として、特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・高分解能計測技術を紹介する。

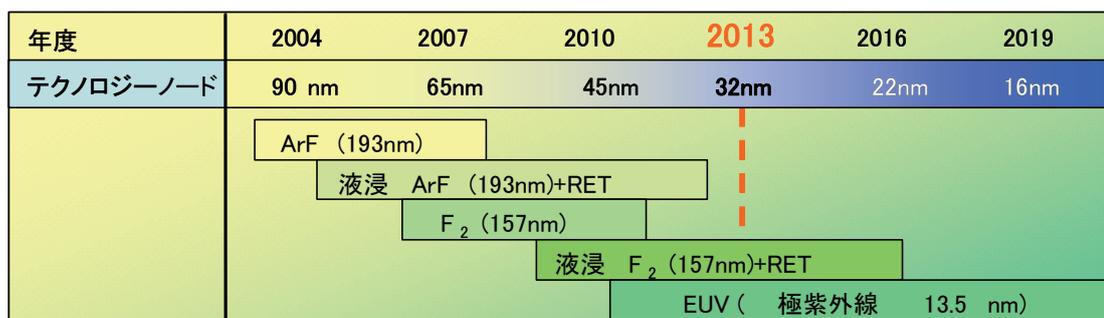


図3. - 2 5 半導体微細加工分野のロードマップ

3. 2. 2 レジスト表面形状の広域ナノスケール計測技術^{1)~4)}

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、形成パターンの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、ステッパ、スキャナの解像度を向上させるために、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 (NA) 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。これはレジスト露光面に100nmスケールの凹凸が存在すると、焦点深度をはずすことになり、チップ内を一括露光することが不可能となることを意味する (図3. - 2 6)。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。すなわち、この計測技術は、インプロセスにおいてレジスト面をデジタルデータ化し、その形状データに基づいて加工を行うという、現物融合型デジタルエンジニアリングにおける現物計画 (2. 2項参照)に相当するととらえることが可能である。

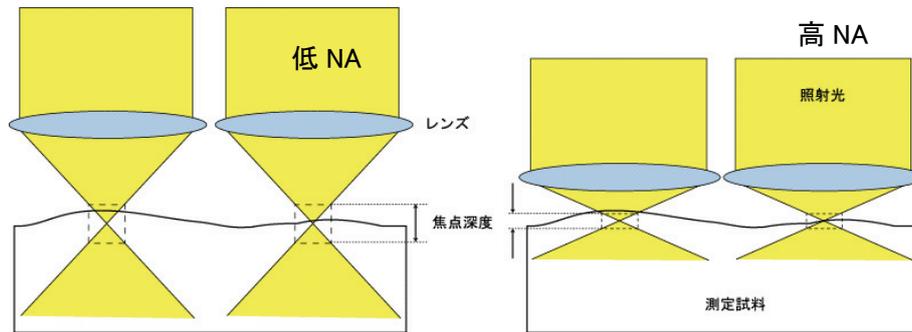


図 3. - 2 6 開口数 (NA) と焦点深度の関係

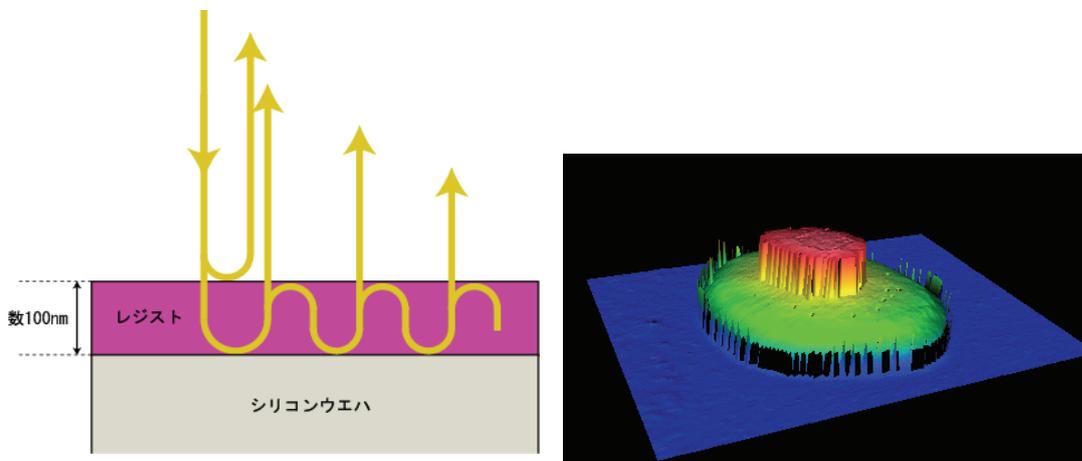


図 3. - 2 7 薄膜レジストによる多重干渉の影響

これまでこ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の影響（図 3. - 2 7）を除去することができず、従来手法の適用は困難となっている。そのため、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求められている。その仕様としては、以下の通りである。

1. 5nm 以下の高さ分解能
2. 100nm 透明薄膜の多重干渉の影響を受けないこと
3. 一括して広域を計れること
4. 横分解能 1mm 程度

以上の仕様を満足する新しいレジスト表面の広域ナノスケール計測技術について、その開発例を以下に紹介する。図 3. - 2 8 はその概念図である。これは、サイズが既知な球を試料面に接触させ、そのプローブ球の上面を、本質的に高さ分解能が優れている白色干渉計

で計測し、プローブ球サイズから、間接的に試料表面の高さ分布を計測するものである。特に広域を一括して計測するために、複数の球をプローブ(マルチボールプローブ)とし、本質的に面内一括計測性を有している白色干渉計で一括して面内プロファイルを計測可能な構成となっている。すなわち、粗さ計等に代表される安定した接触式機械型測定法と優れた縦分解能を有し、面内一括計測が可能な高速性を有した非接触式光応用測定法の両者を融合することで、多重干渉の影響をうけることなく、上述の仕様を満足する計測能を実現することが可能である。

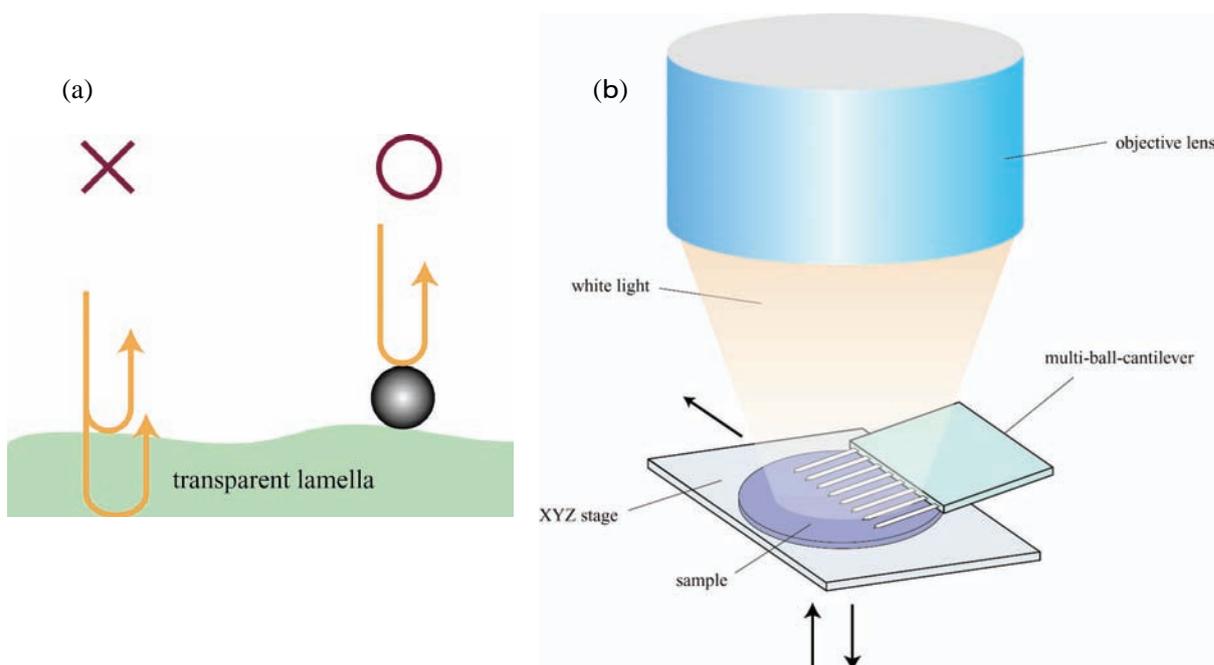


図 3. - 2 8 接触式機械型測定法と非接触式光応用測定法の融合

(a) 概念図

(b) マルチボールプローブと一括面計測白色干渉計を用いたレジスト表面の広域なスケール計測技術

提案手法の可能性を実験的に検討するために、構築した実験装置が図 3. - 2 9 である。ここでは手法の妥当性の検討に焦点をあてるため、8本のマルチボールカンチレバーを用いた基礎的な構成となっている。ボールプローブの材質はSiBであり、直径は $10.9\mu\text{m}$ 、また、各ボールプローブの間隔は $250\mu\text{m}$ となっている。これらのボールプローブの変位は、上方に設置された白色干渉計により、一括して計測可能である。

図 3. - 3 0 は、開発装置による計測例である。(a) は、従来の光計測法により、測定したもので、(b) が提案手法により測定したものとなっている。従来法では、多重干渉の影響で計測できなかった薄膜形状を、多重干渉の影響なく計測できていることが分かる。この計測値の検証のため、サンプルに金蒸着を施し(これにより透明体でなくなるため、多重干渉の影響はなくなる。ただし、破壊的計測であるため、基礎実験の検証としてのみ実

行可能な手段である)、白色干渉計で測定した結果を(c) に示す。これより、(b) のデジタルデータが妥当であることが分かる。

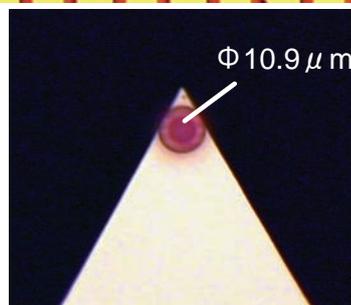
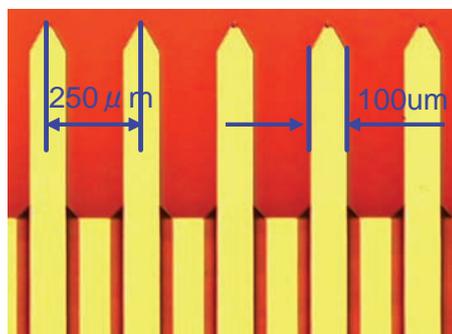
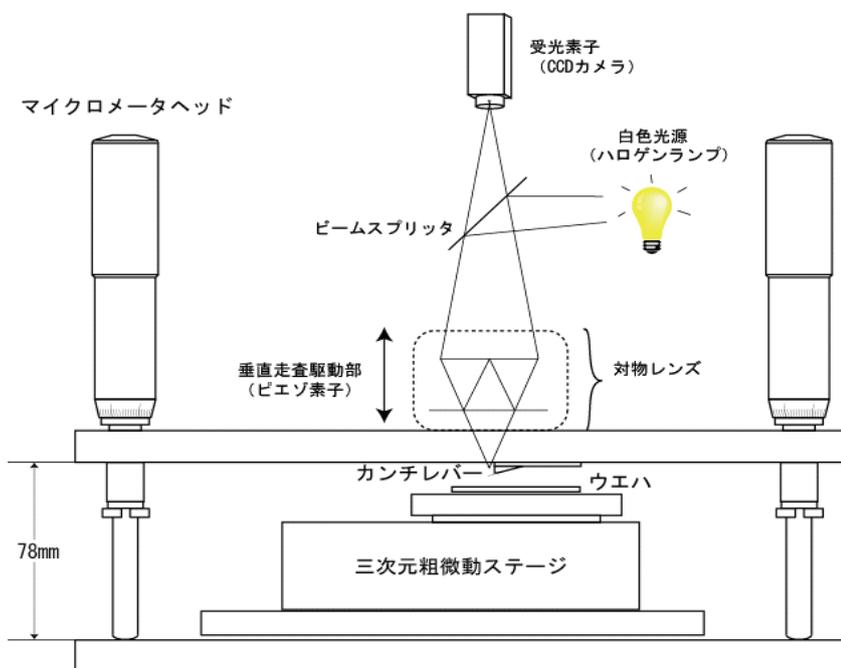


図 3. - 2 9 マルチボールプローブと一括面計測白色干渉計を用いたレジスト表面のナノスケール計測実験装置

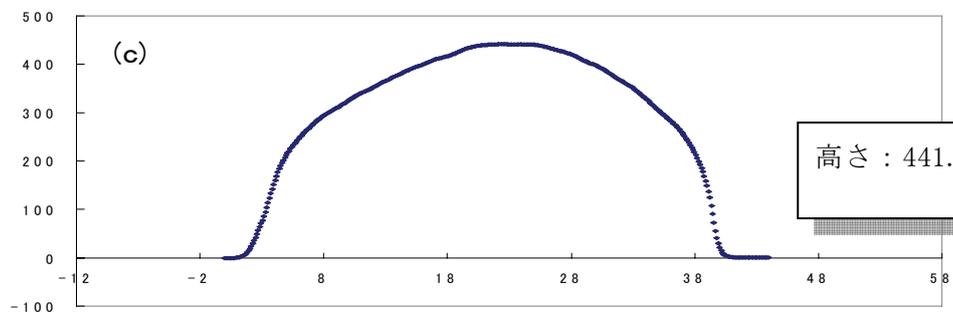
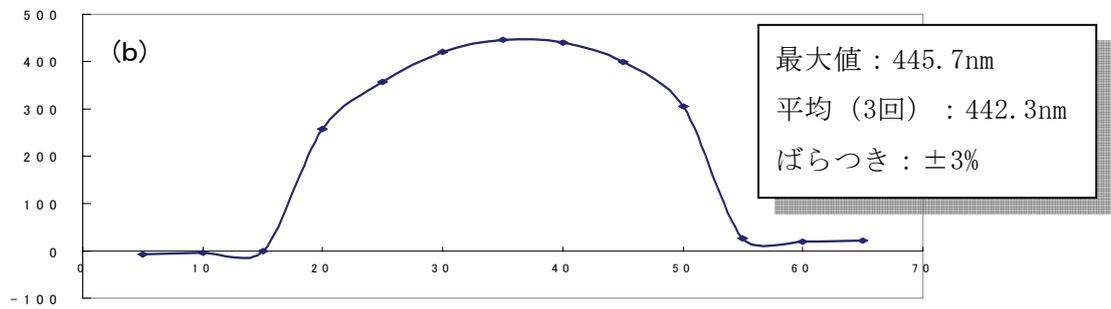
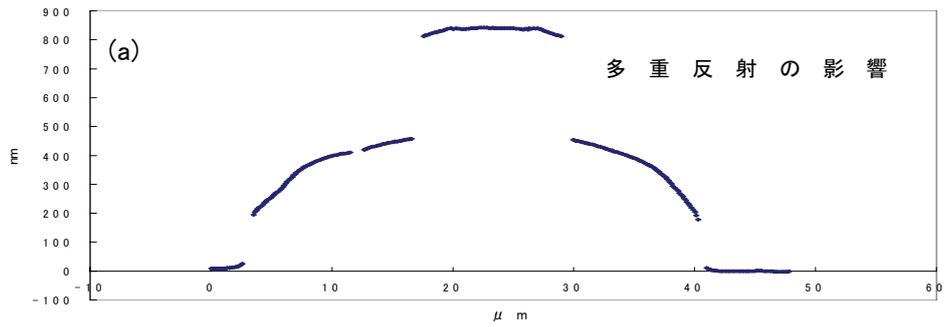


図 3. - 30 極薄透明薄膜のマルチプローブ計測例

- (a) 従来の光計測法による計測結果 (多重干渉の影響で測定不可)
- (b) 開発装置による計測結果
- (c) 金蒸着後, 従来光計測法により計測したもの

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^{5),6)}

半導体プロセスの起点となるベア Si ウエハ加工表面が満足すべき機能属性としては、大きく以下の二つが挙げられる。

1. 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）。
2. 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、上述の複数の属性をデジタルデータ化することができれば、シミュ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向上に大きく寄与することになる。

これは、現物融合型デジタルエンジニアリングにおける現物 CAE（2. 2 項参照）に相当するととらえることが可能である。以下、上述の複数の属性値の同時計測が可能なエバネッセント光を利用した Si ウエハ表面層欠陥計測手法について詳細を述べる。

● エバネッセント光について

図 3. - 3 1 に全反射を利用したエバネッセント光¹²⁾の生成の様子を示す。一般に、二つの媒質が存在するとき、伝播光波は、その界面で反射・透過（屈折）し、それぞれ、両媒質内を伝播する（図 3. - 3 1 (a)）。しかし、光学的に密な媒質（媒質 1）から疎な媒質（媒質 2）に光波が伝搬していく場合は、透過光が存在せず、すべてのエネルギーが反射光となる入射条件が存在する。これは以下のように理解できる、入射角度 θ を大きくしていくと、スネルの法則で記述されるように、屈折角度 ϕ も大きくなっていく、そして、入射角度 θ が臨界角度 θ_{critical} を超えたときに、 $\phi > 90$ 度に達する。つまり、媒質 2 の自由空間中へ伝搬していく光波は存在できず、すべての入射光波は、界面で反射することになる（図 3. - 3 1 (b)）。

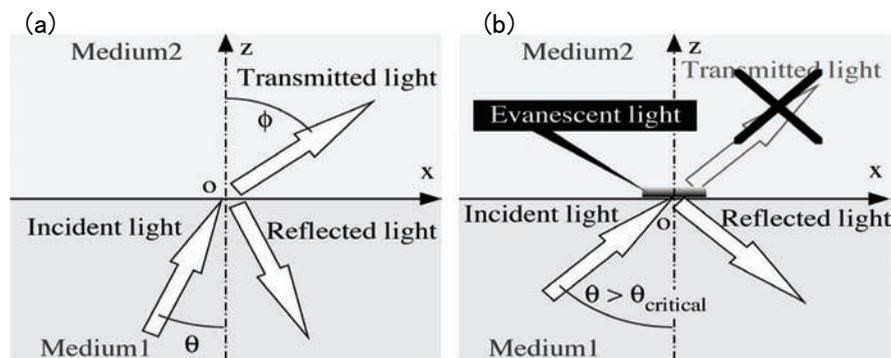


図 3. - 3 1 全反射によって生成されるエバネッセント光

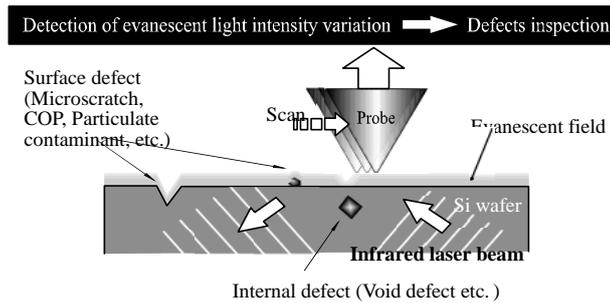


図 3. - 3 2 赤外エバネッセント光によるベアウエハ表面層欠陥検出法

しかし、このとき、界面近傍に関しては、媒質 2 側にも光エネルギーが局在することが知られており、これをエバネッセント光という。その特徴としては、①エネルギーが界面から離れるにつれて指数関数的に急激に減衰し、波長程度の領域のみに局在すること、②自由空間伝搬しないことから回折限界に支配されないため、その面内エネルギー分布は界面におけるナノメートルスケールの微小物性分布を反映したものとなることが挙げられる。

●エバネッセント光を利用した Si ウエハ表面層欠陥計測手法

図 3. - 3 2 は、提案手法の概念図である。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。前述のように、エバネッセント光はナノメートルオーダーといった微小領域における光学特性の影響をうける（特性②）ため、表面に微小欠陥が存在すると、その微小欠陥の光学属性に応じてその分布は変化する。本手法は、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小欠陥の検出・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だった数 10nm スケールの微小欠陥検出の可能性を有する。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いることから、表面層下の内部欠陥も検出できる可能性を有する。図 3. - 3 3 は、この計測原理に基づいて構築したエバネッセント光検出装置である。本装置は、Si を透過可能な波長 1064nm の Nd:YAG レーザ光源、Si ウエハ裏面カップリング用台形プリズム、エバネッセント光検出用ファイバースコープ、高感度赤外検出素子からなる光学システムと、プローブ高精度走査制御・データ処理 PC システム等から構成される。本装置による計測例として、5nm 程度の凹凸を有する微細スクラッチ状表面欠陥（図 3. - 3 4 (a)）と表面層内部（深さ約 300nm）に存在するトンネル状欠陥（図 3. - 3 5 (a)）の計測結果（図 3. - 3 4 (b)、図 3. - 3 5 (b)）を示す。ナノメートルスケールの表面微細凹凸や、また、原子間力顕微鏡等では測定が困難な内部空洞欠陥も検出可能なことが確認できる。本手法は、レーザー入射方法や光源波長を変化させることで、さらなる属性のデジタル化も可能であり、また、ベアウエハ表面層欠陥に限らず、次世代デバイスにおいて強く評価が求められている、SOI ウエハや Low-k 材中の微小欠陥計測法としても適用が期待される。

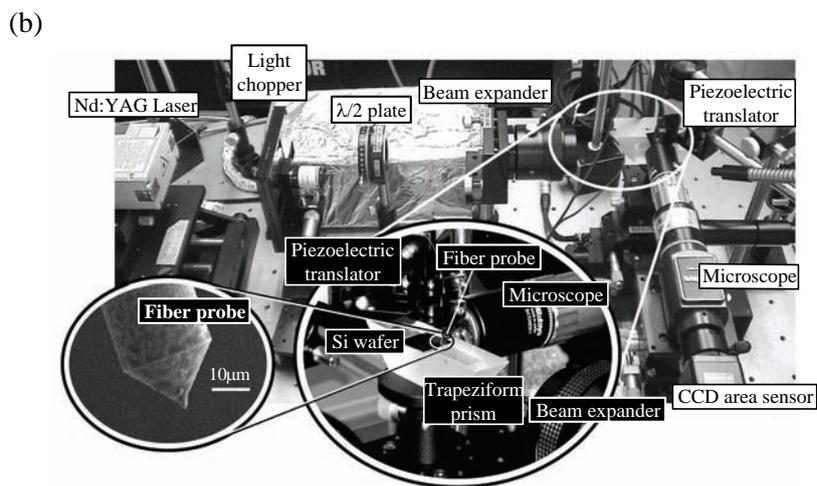
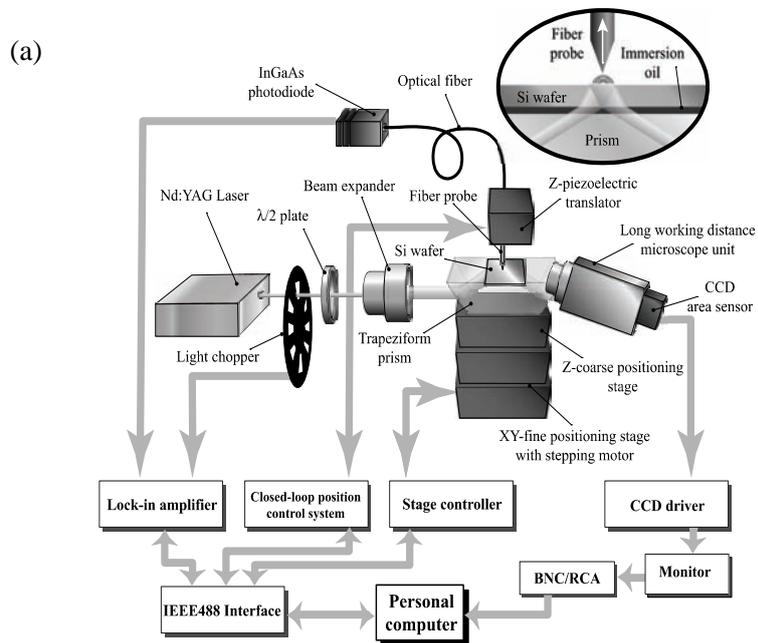


図 3. - 3 3 エバネッセント光によるベアウエハ表面属性計測実験装置
(a) 模式図、 (b) 写真

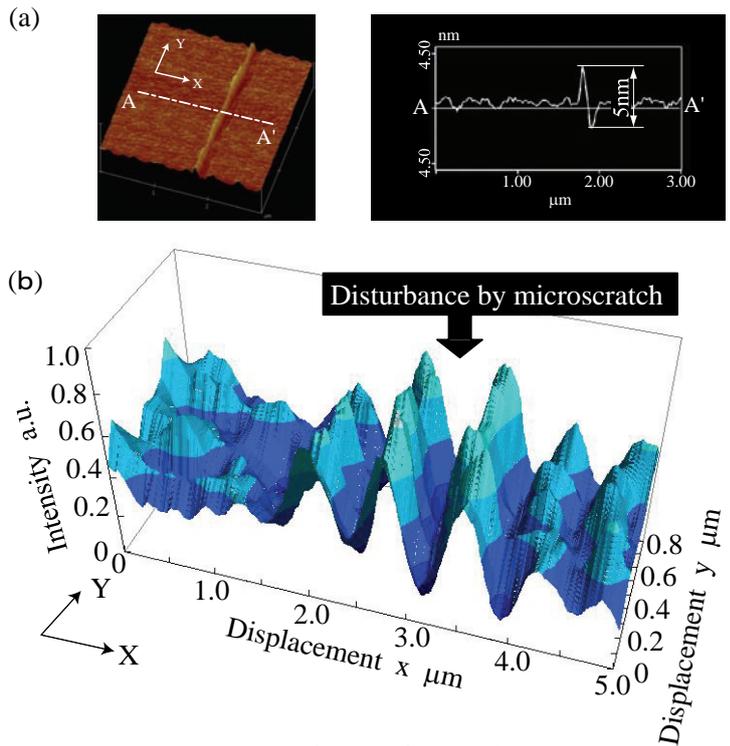


図 3. - 3 4 表面微細形状変化の計測例

(a) 5nm マイクロクラッチ (b)計測例

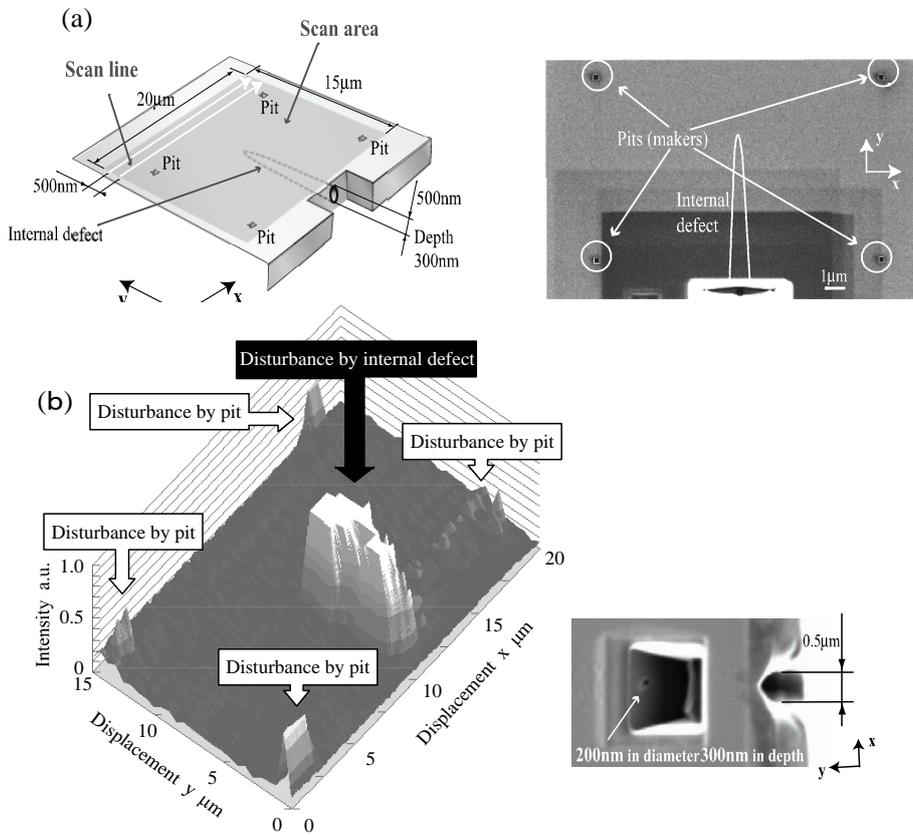


図 3. - 3 5 表面疎内部の計測例

(a) トンネル状空孔欠陥 (b)計測例

3. 2. 4 おわりに

本項では、微細化の最先端を進んでいる半導体微細加工分野における **Functional Inspection** 例として、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・高分解能計測技術を紹介した。最後に、情物一致、現物融合の観点から、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についてまとめる。

●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：5nm 以下	現状高さ分解能：達成（5nm）
要求横分解能：1mm 程度	現状横分解能：達成（250 μ m）
100nm 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：30mm×30mm	現状：要開発

- 今後開発を必要とする機器

今後、マルチボールカンチレバーの本数増加ならびにカンチレバー変位高速検出システムの開発が求められる。具体的には、約 30mm×30mm 領域をカバーする 120×120 個の面内マルチカンチレバープローブの開発およびカンチレバー高さ同期制御機構の開発が必要である。これにより、次世代半導体製造現場・高解像露光工程において不可欠な高 NA 露光条件のリアルタイム制御（現物計画）が可能となり、ラインアンドスペース 50nm 以下のデバイスの量産も期待される。

●半導体ウエハ加工表面の機能属性・高分解能計測技術（特に欠陥について）

- 要求仕様

表面欠陥検知性	： 5nm 以下	現状：達成（5nm）
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	： 300～500nm 深さ	現状：ほぼ達成（300nm）
内部欠陥定量性		現状：要開発

- 今後開発を必要とする機器

半導体ウエハ加工表面の機能属性として、特に重要な存在欠陥の評価に注目した場合、上述のように、近接場光応答による欠陥の検知性はほぼ確立されてきているが、特に内部欠陥サイズの定良性に関しては、未だ開発の余地を残している。今後、これらの未達成点を開発するためには、近接場挙動を解析可能な計算機シミュレータの構築および構築シミュレータに基づくサイズ定量法の確立が求められる。本計測法は、本質的に高分解能である反面、計測速度の向上は難しく、次世代半導体製造現場において、インプロセス計測法と

しての適用は困難である。しかし、内部も含めたウエハ表面層欠陥の非破壊計測性を有していることから、本計測デジタルデータに基づいた現物 CAE の計算機モデル構築が期待される。これにより、特に新プロセスを導入する際の歩留まり予測が実現できれば、ますます複雑多岐な製造工程が必要となる次世代半導体製造現場において、不可欠な計測技術となるポテンシャルを有している。

以上のように、次世代半導体製造現場において、上述に代表されるデジタル化技術は、信頼性・付加価値の高い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、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になるといえるだろう。

(参考文献)

- 1) 長澤秀一, 劉淑杰, 高橋哲, 高増潔: レジスト表面の形状測定(第一報)—ナノインデンテーションと AFM による計測条件の検討, 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (慶応大, 3 月), 2005, 1051-1052
- 2) 劉淑杰, 長澤秀一, 高橋哲, 高増潔: レジスト表面に対する AFM 先端スタイラス形状の影響, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集 (電通大, 9 月), 2005, 79-80
- 3) 長澤秀一, 劉淑杰, 高橋哲, 高増潔: レジスト表面の形状計測(第二報)—マルチボールカンチレバー基礎実験装置の開発—, 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (京都大, 9 月), 2005, 345-346
- 4) S.Liu, S. Nagasawa, S. Takahashi, K. Takamasu : Profile Measurement of Resist Surface Using Multi-Ball-Cantilever AFM, Proc. of SPIE International Symposium on Optomechatronic Technologies 2005, Vol.6049, 2005, 604903_1-604903_9
- 5) 中島隆介, 高橋哲, 三好隆志, 高谷裕浩, 赤外エバネッセント光によるシリコンウエハ加工表面層欠陥検出に関する研究(第 1 報)—理論的・実験的検討—, 精密工学会誌, Vol.69, No.9, 1291-1295, 2003.
- 6) S. Takahashi, R. Nakajima, T. Miyoshi, Y. Takaya, T. Yoshioka, T. Hariyama, K. Kimura, T. Nakao, K. Takamasu: Nano-Defects Inspection of Semiconductor Wafer using Evanescent Wave, VDI Berichte, 1844, 2004, 307-316

第IV章 まとめ

4. 1 製造技術の高度情報化の方向付け

日本に製造業が戻ってきた。中国へとなだれをうって進出した製造業が、日本に製造拠点を再構築し始めた。そして、経済界も政府も製造技術の重要性を再認識し始めたのである。総合科学技術会議では、過去の 8 大分野の中に位置づけた製造技術分野を「ものづくり分野」といって広く捉えるようになった。このような背景のなか、本委員会は 3 ヶ年に亘って、生産システムの高度化について議論を重ね、製造業を活性化するために何をすべきかを検討した。

表 4. - 1 提案された 13 のテーマ

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">(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 |
|--|

第 1 年度(平成 15 年度)には表 4. - 1 に示す 13 のテーマが選ばれた。これらは委員会内で提案された個別テーマを議論して選択したものであり、相互の関連性はない。共通の話題としては、情報技術の活用によって、形式知化することがあげられる。第 2 年度(平成 16 年度)には、これら 13 テーマを分類すると共に、企業へのアンケートでその重要性を評価した。また、表 4. - 2 に示すように分類した。ここに列は技術の適用対象の分類を、行は技術の分類を示す。ここでは、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」「持続性社会の構築」の 3 つに分類した。

これら 3 種の対象の中で、「情物一致」をより一層の調査を加えた。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とを一致させること」である。計算機技術の進歩によって、シミュレーションモデルの方はどんどん精緻になっていくが、実は現物のデータとの一致が取れていない。この典型は「生産計画」を立てておきながら、一方で「棚

卸し」は避けて通れないという現場の数量管理と計算機モデル内での数量管理の不一致は良く知られている。つまり、殆どどの情報システムは入力から結果への **Open Loop** システムなのである。そこで、現物データをシミュレーションモデルに戻す方法が必要になる。現物のデータが測定可能であれば、オープンループシステムをクロズドループに変更できるが、実際には、測定系、シミュレータ共に問題があることが分かった。

表 4. - 2 製造技術のテーマ分類

技術 \ 対象	情物一致	動的システムへの対応	持続性社会の構築
情報処理	現物モデル (1)	カスタマイズ (9)	統合ライフサイクル (12)
加工	知識の動的保存 (3)	加工習熟 (5) 超高速物理伝送システム (8)	インフラ整備 (13)
情報—製造融合	品質 (2)	インプロセス技術 (4) シミュレーション (7)	トレーサビリティ— チング (11)
製造システム	製造物 DNA (10)	On Demand (6)	(製造物 DNA (10))

4. 2 情物一致・現物融合

「情物一致」とは広い概念である。いわば、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。本年度は、情物一致についてより焦点を絞り、「現物融合」を調査した。まず「現物融合」に関する事例について、

現物検証：工場内で現物形状を計測し、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。

に分類した。

この中で、入り口部分である「現物検証」について調査を進めた。事例にも明らかなように、元々、測定できるものしか測定対象になっていない、つまり、見えないものが多数あることが改めて認識された。たとえ測定できても

(1) 測定精度が不十分

(2) 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問題が残されている。

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すべてを扱うことはできない。たとえ扱えるようになったとして、異なる測定結果を重ね合わせる（センサー融合と呼ぶ）方法論を必要とするのである。

そこで本報告ではこれを機能指向測定 (Functional Inspection) と呼ぶ。機能指向測定とは、(A) 見えないものを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 modal 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、情報の意味づけを行う。

(D) その意味にしたがって再測定をする。

結果として、指定した機能の実現度合いを総合的に評価できると定義した。ここで(A)(B)は測定機器を、(C)は情報システムならびにシミュレーションシステムを意味する。本当は(D)が先にくる、測定対象を規定するのだが、ここでは最後に書いた点に注意されたい。すなわち、(D)→(A) →(B) →(C) →(D) →(A)の循環となる。図4. -1はその関係を表したもので、図の横軸は測定の粒度、縦軸はモデルの総合性を示す。モデル自体がマルチモーダルであり、本報告では主として寸法測定・形状測定に限定したが、材質、流量、温度といった物理量測定から、鋳物のす、昆虫の構造、あるいは癌の検出までを含む。これらの特徴はすべて「検出対象がなんであるか分かっており、そのモデルが予めできている」、すなわち、モデル化ができていていることにある。

これに対して、「何がでてくるか分からない対象を測定する」という場合があるだろうが、ここでは「物が存在する。しかし、それに対応するモデルがまだできていない」場合であり、今回の製造技術高度化の対象にはしなかった。

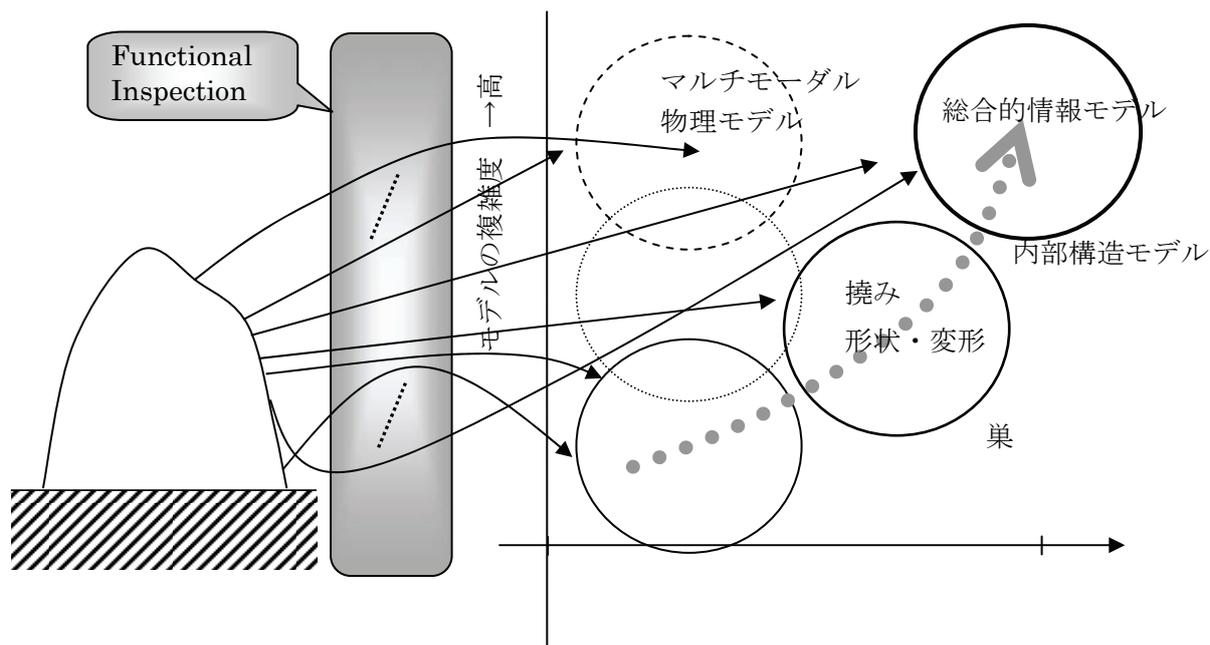


図4. -1 機能指向測定(Functional Inspection) とモデルとの関係

4. 3 現物融合と技術開発目標

本報告の主張は以下のように取りまとめられる。

【目標 1】 情報技術を用いた製造技術の高度化の追求

【目標 2】 現物融合を可能とする表現モデル(シミュレーションモデル)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

製造業の基本ソフトである CAD システムが海外のソフトウェアで占められるようになって久しい。いまや、日本では CAD 用のソフトを開発する能力のある学生を育てる教育の場すらなくなっているのではないかと危惧される。あるいはまた鋳物や射出成型の流れ解析やプレス変形の解析ソフトウェアもまた海外のソフトウェアが中心である。日本の強みは、ソフトウェアよりもハードウェアに置かれている。しかし、それでは総合力としての製造技術の高度化には心もとない。

日本の製造業の競争力が現場の力にあるというなら、現場での力を上手に引き出し、世代を超えて伝承し、継続的な競争力として保持する方法論を準備しておかなければならない。そこで、現場で起こっている製造物の現実をしっかりとモデルに一致させるという部分で日本は競争力を保持できるはずであるというのが本報告の中心的主張である。【目標 2】における「表現モデルの開発」は CAD を一から作り直すのではなくてもよいから、シミュレーションし易く、現場での測定データで修正し易い情報システムの構築を要求する。かつ、現場作業員、特に、測定担当者が扱い易い情報収集システムが必要となる。一方、【目標 3】は測定系を現物融合に適するように開発し、データ処理をつけることを意味する。【目標 2】【目標 3】の両者、つまり、利用方法が進歩した測定系、測定技術に裏打ちされた CAD が必要なのである。しかし、それが研究開発者だけの技術に留まっては意味がなく、過去日本の製造業が頑張ってきた品質保証 (Quality Control) 運動を発展させた高度な「情物一致運動」を【目標 4】でめざしている。

幸いにもこのような認識がここ数年、部分的ながら理解され始めている。

文部科学省は科学技術振興機構 (JST) の事業¹⁾として、「先端計測分析機器開発事業」(機器開発プログラム)と「先端計測分析技術・手法開発事業」(要素技術プログラム)とを 2004 年より推進している。前者は「独創的な研究活動に不可欠な最先端の計測分析・機器及びその周辺システムを開発する」ことを目的とし、まさに「見えないものを見えるようにする」こととその応用技術を追求している。後者はより基礎技術を追求している。我々が上述【目標 3】で追及するのは「競争力のある生産活動に不可欠な最先端の計測分析・機器及びその周辺システムを開発する」ことである。

総合科学技術会議では、ものづくり技術の目標として「共通基盤的なものづくり技術の推進」として、「ITを駆使したものづくり基盤技術の強化」と「ものづくりのニーズに応える新しい計測分析技術・機器開発、精密加工技術」とを掲げている。本報告はこの推進の方向付けに賛成すると共に、この両者が「情物一致」「現物融合」技術として製造業の競争力になることを強く願うものである。

1) <http://www.jst.go.jp/sentan.html>

参 考 文 献

1. 2005年版 ものづくりい白書
経済産業省
厚生労働省
文部科学省
2. 2007年問題がわが国産業の
ものづくりに与える影響
(財) 機械振興協会
経済研究所
3. わが国製造業の現状と新たな発展に関する調査研究
(財) 機械振興協会
経済研究所



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

非 売 品
禁無断転載

平成17年度
新製造技術に関する調査研究報告書
－ 製造技術の情報化促進 －

発 行 平成18年3月

発行者 社団法人 日本機械工業連合会
〒105-0011
東京都港区芝公園三丁目5番8号
電 話 03-3434-5384

財団法人 製造科学技術センター
〒105-0001
東京都港区虎ノ門三丁目11番15号
電 話 03-5472-2561