

「3次元ファンクショナルデジタイザの研究開発」

1. 研究概要

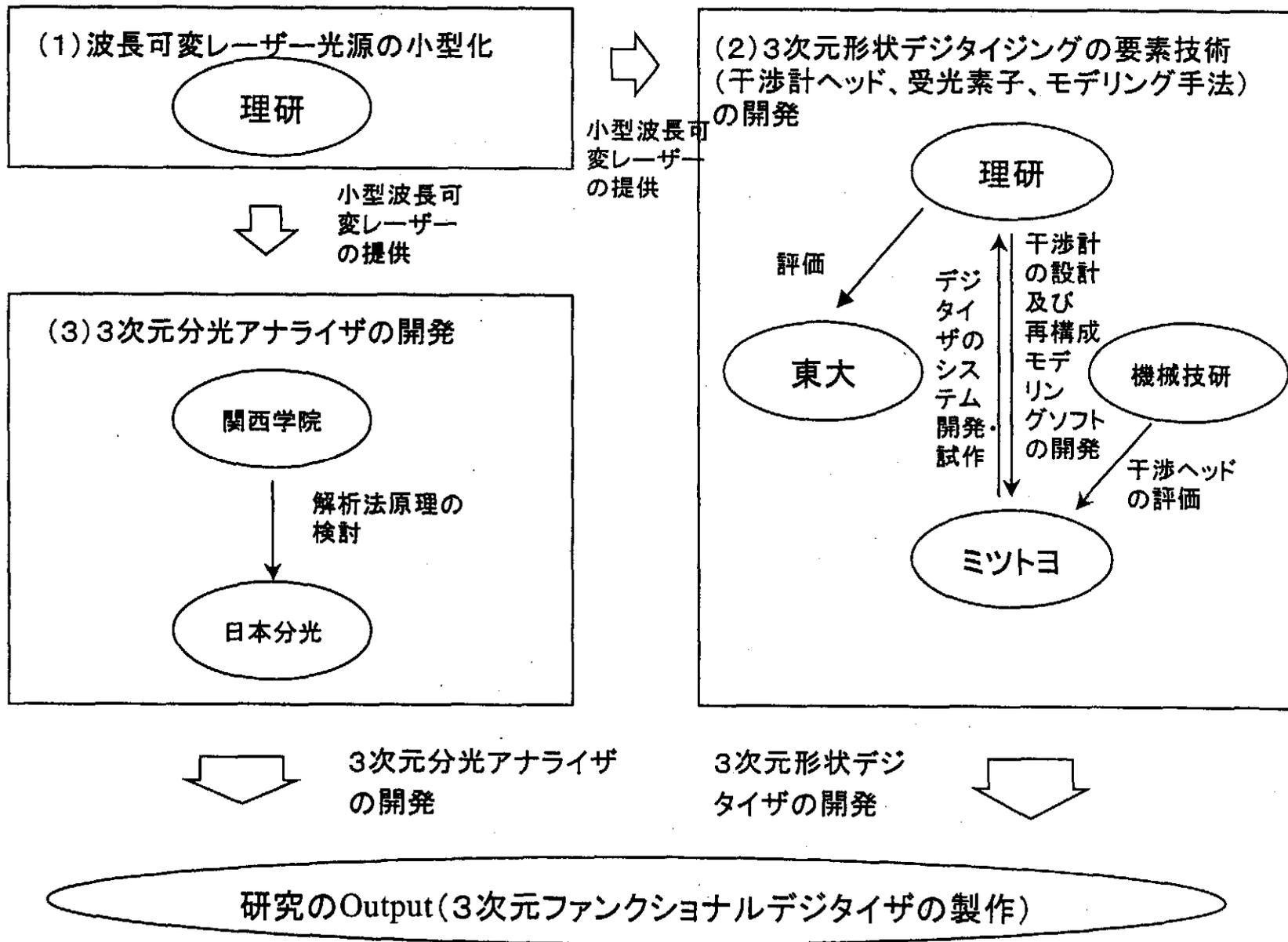
(平成9年度～13年度)

研究代表者：田代 英夫 (理化学研究所)

研究体制：理化学研究所 (中核機関) 他4機関

研究の概要・目標	諸外国等の現状	研究進展・成果がもたらす利点
<p>1 何を目指しているのか 3次元物体の形状や表面状態を計測し、<u>1 μmの精度</u>で複雑な表面情報 (形状・状態) を数値化し、<u>計算空間内にデジタル情報として取り込むツールの開発</u>を目指す。</p> <div data-bbox="119 644 716 821"><p>5年後の目標 ●高精度 (ミクロン) 高速 (数分) 非接触形状デジタイザと高精度、高速、ラマン、蛍光同時分析装置の一体化。</p></div> <p>2 何を研究しているのか ①高出力可変波長レーザーの小型最適化、②3次元形状デジタイジングの要素技術の開発、③3次元分光アナライザの要素技術の開発を実施する。</p> <p>3 何が新しいのか 可変波長レーザーを用いて光学・非接触で<u>複雑な3次元の形状を1 μmの精度の自動計測</u>を数十分で行うこと、さらに同時に<u>物体表面の分光分析</u>も計測することをはじめて可能とする。</p>	<p>1 現状 精密部品、複雑形状工業意匠製品、マイクロマシンや微小生体表面などの複雑な3次元表面形状のものを対象とするには精度的に十分とは言えない。ただし、非接触で計測・解析するデジタイジングシステム技術は、ドイツ、アメリカ、イスラエルで進んでおり、計測・解析速度の面で優れている装置が開発されている。(分解能は25 μm程度) 逆に高精度なものは時間がかかる</p> <p>2 我が国の水準 我が国は接触式のもので進んでおり、精度的に優れている。ただし、この方式のものは計測・解析に数時間かかり、速度面も含めた技術の改良開発が求められている。</p>	<p>1 世界との水準の関係 3次元ファンクショナルデジタイザは世界で初めて高速可変波長レーザーシステムを採用することにより、高速・高精度な計測と解析 (分光分析) が同時に自動的に可能となる非接触計測・解析システムで、我が国独自の技術である。</p> <p>2 波及効果 精密な加工物の計測、生物体の形状機能の分析などに応用され、解析・評価のサイクルを飛躍的に速くするものであり、科学技術の進展に寄与することが確実に期待できる。また、デジタル化された情報を利用して対象物の機能、表面状態の関係の解明によりロスが少ない、優れた形を追求する工学手法の開発への道を拓く。</p>

研究体制



2. 所要経費

科学技術振興調査費課題「3次元ファンクショナルデジタイザの研究開発」の実施体制及び所要経費(第I期)

研究項目	担当機関等	担当者(H11)	(千円)		
			平成9年度 所要経費	平成10年 度所要経	平成11年 度所要経
1. 高出力小型波長可変レーザー光源の開発に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)	田代 秀夫	32,999	30,141	17,623
2. 可変波長レーザーを用いた干渉計ヘッドの開発に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)	山口 一郎	20,422	10,133	5,236
(1)可変波長レーザーを用いた干渉法の原理に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)	天神林 孝二	2,612	2,021	2,043
(2)可変波長レーザーを用いた干渉計ヘッドの開発に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)、NIST(再委託)	松宮 貞行	6,153	22,981	18,050
(3)可変波長レーザーを用いた干渉計ヘッドの開発に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)	松宮 貞行	32,750	25,516	44,900
3. 高感度マルチポート受光素子の開発に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)	夜崎 俊一	17,672	30,261	20,603
4. 高速3次元形状デジタイジングシステムの開発に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)、NIST(再委託)	松宮 貞行	32,750	25,516	44,900
5. 3次元表面形状モデリング手法に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)、東京大学大学院(再委託)	木村 文彦	4,097	4,859	3,526
(1)3次元構造再構築手法の開発に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)	加瀬 究	7,147	7,546	9,504
(2)3次元微細表面形状再構築手法の開発に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)	加瀬 究	7,147	7,546	9,504
(3)3次元測定誤差自己修正手法の開発	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)	牧野内 昭武	4,374	3,146	3,802
6. 表面分光イメージングプローブの開発に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)、関西学院大学(再委託)	尾崎 幸洋	19,129	4,415	4,908
(1)可変波長レーザーを用いた蛍光・ラマン分光解析法の開発に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)、日本分光(株)(再委託)	池田 照樹	20,252	29,807	42,481
(2)可変波長レーザーを用いた3次元イメージングシステムの開発に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)	池田 照樹	20,252	29,807	42,481
7. 3次元ファンクショナルデジタイザの実機製作に関する研究	科学技術庁 研究開発局 理化学研究所(委託)	田代 英夫	1,747	1,304	10,294
8. 研究運営	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)	田代 英夫	4,250	4,476	6,180
所要経費(合計)			173,604	176,606	189,130

科学技術振興調査費課題「3次元ファンクショナルデジタイザの研究開発」の実施体制及び所要経費(第II期)

研究項目	担当機関等	担当者(H13)	(千円)	
			平成12年 度所要経費	平成13年 度所要経
1. 高出力小型波長可変レーザー光源の開発に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)	和田智之	14,068	29,498
2. 可変波長レーザーを用いた干渉計ヘッドの開発に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)	山口 一郎	4,175	3,881
(1)可変波長レーザーを用いた干渉法の原理に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)	松宮 貞行	48,283	22,003
(2)可変波長レーザーを用いた干渉計ヘッドの開発に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)、NIST(再委託)	松宮 貞行	37,899	25,988
3. 高速3次元形状デジタイジングシステムの開発に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)、NIST(再委託)	松宮 貞行	37,899	25,988
4. 3次元表面形状モデリング手法の開発に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)、東京大学大学院工学系研究科	木村 文彦	1,058	911
(1)3次元構造再構築手法の開発に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)	加瀬 究	6,155	8,916
(2)3次元微細表面形状再構築手法の開発に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)	加瀬 究	6,155	8,916
5. 表面分光イメージングプローブシステムの開発に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)、関西学院大学(再委託)	尾崎 幸洋	1,583	2,827
(1)可変波長レーザーを用いた蛍光・ラマン分光解析法の開発に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)、日本分光(株)(再委託)	池田 照樹	46,233	42,504
(2)可変波長レーザーを用いた3次元イメージングシステムの開発に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)	池田 照樹	46,233	42,504
6. 3次元ファンクショナルデジタイザの実機製作に関する研究	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)	田代 英夫	33,515	42,510
7. 研究運営	文部科学省 研究振興局 理化学研究所(委託)	田代 英夫	7,101	8,282
所要経費(合計)			200,048	187,320

3. 研究成果の概要

3次元ファンクショナルデジタイザは、波長走査干渉計測と波長可変分光計測の2大技術構成要素とする。干渉計測技術は形状デジタイザとして、分光計測技術は表面イメージングシステムとして装置化した。以下、知的基盤整備の視点を踏まえて個別的に成果の概要を示す。

A. 干渉計測と形状デジタイザ

a. 波長走査干渉法の原理と限界性能の追求

マイケルソン型の干渉計構成を基本として、光学系の焦点深度や測定対象面の傾斜等の測定精度への影響を理論と実験の面から明らかにした。また、大面積あるいは強い傾斜をもつなど、多様な測定対象の計測に対応した光学系設計の自由度をあげることが必要であり、このため発散照射型の干渉計やフィゾー型の光学系にも波長走査干渉計が適用できることも示した。

一方、本研究で開発した電子制御方式によるレーザーの特長、すなわち広い安定した波長可変域(200nm)を掃引し、理論通りの深さ方向分解能 $3\mu\text{m}$ で計測できることを実証した。さらにプログラマブル波長掃引機能を利用し、一定波数ステップの掃引をすることと、波長掃引によって生ずる干渉周波数スペクトルのFFTピーク検出解析法を改良することにより、最高 $0.1\mu\text{m}$ の深さ方向分解まで得られることを示した。これにより、波長走査干渉法が非接触形状計測技術として発展する知的基盤を築いた。

b. 要素技術とデバイス開発

b-1. レーザー

電子制御による波長可変技術は出力等に高い安定性を要求される干渉計測応用に最適でありかつ実用化できることを示すことができた。すなわち、波長可変走査域最大280nm、スペクトル幅0.2nm、最小走査ステップ0.02nmの一定波長間隔、あるいは一定波数間隔のプログラマブル掃引機能を実現できた。また本開発により出力300mWクラスへの高出力化ができたことで本レーザーは単に波長走査干渉計ばかりでなく様々な応用可能なレーザーとなった。換言すると、このようなユニークな性能をもつレーザーを世界に先駆けて、それも実用レベルで実現できたことで知的基盤整備ができたと言える。

b-2. マルチポートCCD

本研究のニーズに応じて、8ポートパラレル方式によるマルチポート高速デジタル読み出し可能なCCDを実用化することができた。本デバイスでは高速化にあたりCCD感度を下げることではなく、近い将来製品化が可能であり製品化により知的基盤と言える。

b-3. 周波数解析専用計算機

デジタイザ試作機の仕様に特化した干渉縞の周波数解析専用計算機を開発した。マルチポートCCDカメラから出力されるデータを遅滞なく取り込み、約26万組の1024点フーリエ変換を10秒以内に行うという目標性能を達成して本研究に供することができた。小型の演算器を32個並列化して効率的にデータを転送するメモリシステムに特徴のある設計となり、演算性能に比較して総合的なデータ処理能力の高い特徴的な装置が完成した。なお、本開発と平行して進んだ信号処理法の研究成果を内部制御系へ取り込むことについては十分でなかったために、継続課題として今後も取り組む必要があると考える。

b-4. 干渉計プローブ

多様な測定対象に対応するため3種の干渉計プローブヘッド、汎用タイプ(プローブA)、高分解タイプ(プローブB)、広範囲タイプ(プローブC)を設計試作した。波長可変干渉計システム

に組み入れた実験評価及び改良を通して、目標通りの性能が得られることを確認できた。特にプローブAはコンパクトでかつ完成度が高く、種々測定のための知的基盤ツールとなっていると言える。

c. 形状デジタイザー

c-1. 3次元形状デジタイジングシステム

測定範囲・分解能・精度の異なる3種類の干渉計プローブの評価用システムとして、垂直・水平の2方向の測定ヘッドを有する同時4軸・全7軸の走査機構および計測制御システムからなる3次元形状デジタイジングシステム実用化試作機を設計し試作した。振動特性・精度・機能など基本性能の評価を行い、目標仕様を満たしていることを確認した。また、自動高速デジタイジング計測を目標とした計測制御ソフトウェアの2次試作を行い、実用化試作機に各種測定ヘッドを搭載した状態で実際の測定動作の確認を行った。最終的にこれらを統合し、実用化試作機を完成させた。本実用化試作機は、形状デジタイジング用各種センサーの総合評価の知的基盤となるシステムとしても有効に活用される。

c-2. 実機計測システム

プローブAをヘッドとし制御及び信号処理に用いる計算機を簡素化した。パソコンベースの実機計測システムを試作した。本実験装置は測定時間が長い等制約があるものの、光学系を含めて測定条件を細かく調整することが可能であり、種々の実サンプル計測試験を行った。本装置により、波長可変レーザーの限界性能を引き出す操作法、干渉計光学系の最適設計手法、高速な周期信号解析法などの個別の成果は、有用な知的基盤となった。

d. デジタルデータの再構築及びモデリング

形状計測で得られたデジタイズされた部分測定データ（プローブAでは $5 \times 5 \text{mm}^2$ /視野、 512×512 データポイント）を実時間で、高精度に張り合わせる手法を開発することを目的とし、最終的には工業用のCADデータに変換するソフトウェアまでを開発することを目指した。結果として、測定点数（N）に比例、おそくともNの2乗に比例するような（部分）点群からの面データ作成を有する実用化ソフトウェア（張り合わせ手法実用化ソフトウェア）と、4隅の存在範囲が予め与えられた互いに重複する多数の部分測定点群を各近似曲面パッチが接線連続及び曲率連続になるような位置姿勢の最適解を求める、張り合わせ最適化手法及びソフトウェア（張り合わせ手法最適化ソフトウェア）を開発した。

またモデリング手法については、柔軟な測定対象形状を変形させ、逐次測定を行うことにより、柔軟形状の大変形を迅速にモデリングできる手法を構築した。高速で大量データが取得できるデジタイザーと本手法によって、3次元形状測定および形状構築の基盤的な情報処理技術の知的基盤の整備ができた。

B. 分光プローブシステムの開発と計測応用

a. 分光プローブ開発

第I期に可変波長レーザーを用いて蛍光・共鳴ラマン等の分光手段により、高感度で表面成分の分光解析ができる3次元分光解析ヘッドとイメージングシステムを開発した。この表面分光イメージングプローブシステムは試料表面の反射像、蛍光像、ラマン像が得られる分光イメージ機能及び最小 $1 \mu\text{m}$ の微小領域におけるスペクトル測定機能を持つ。さらに、第II期に表面分光イメージングプローブシステムの改造を行い、光の回折限界を越えた空間分解能を有し、光源に可変

波長レーザーを用いた小型軽量のポータブル近接場分光イメージングプローブを開発し、これらを組み入れたユニバーサル分光イメージングプローブシステムを完成させた。上記の装置は独立した微小表面分析装置としても利用できることから、分光計測の知的基盤の整備ができたと言える。

b. 計測応用

分光イメージングプローブシステムについては、ダイヤモンド薄膜、ポリマーブレンドの薄膜、ミドリムシ、金表面上に作製した4-メルカプトピリジンの自己蒸着膜を用いてシステムの評価を行った。ダイヤモンド薄膜については大変よいラマンイメージングが得られた。しかしミドリムシではイメージングではなく、マッピングにとどまっている。

波長可変レーザーの有用性に関する評価では、金表面上に作製した4-メルカプトピリジンの自己蒸着膜表面増強ラマンスペクトルの励起波長依存性を波長可変レーザーを用いて行った。波長可変レーザーを用いることにより、詳細な励起波長依存性を調べることができ、表面増強ラマン散乱のメカニズムの研究に役立った。波長可変レーザーの有用性を示したという点で知的基盤の整備に寄与した。

上記のように、個々の要素技術についての成果は目覚ましいものがあるが、3次元ファンクショナルデジタルシステムとして実用的な装置を完成させると言う目標を完全に達成するには至らなかった。ただし3次元ファンクショナル計測を目指す知的基盤とすることができたという段階には至っており、従ってこれを基に今後ともさらに本研究の成果を発展させシステム全体の完成を目指す必要があると考える。

4. 研究成果公表等の状況

【研究成果発表等】

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	6 (1) 件	5 件	41 件	52 (1) 件
国外	16 (1) 件	3 件	18 件	37 (1) 件
合計	22 (2) 件	8 件	59 件	89 (2) 件

(注：既発表論文について記載し、投稿中の論文については括弧書きで記載のこと)

【特許出願等】 5 件 (国内 5 件、国外 件)

【受賞等】 3 件 (国内 1 件、国外 2 件)

- 尾崎幸洋, 1998年3月
Tomas Hirschfeld賞 (ピッツバーグ会議)
- 尾崎幸洋, 2001年10月
Eastern Analytical Symposium Award (Eastern Analytical Symposium)
- 尾崎幸洋, 2002年5月
日本分光学会賞 (学術賞)

【主要雑誌への研究成果発表】（インパクトファクター評価誌）

Journal	Impact Factor	サブテーマ1	サブテーマ2	サブテーマ3	合計
		高出力小型波長可変レーザー光源の開発に関する	可変波長レーザーを用いた干渉法の原理に関する研究	可変波長レーザーを用いた蛍光・ラマン分光解析法の開発に関する研究	
Applied Optics	1459	1	2		3
Applied Spectroscopy	1752			1	1
Journal of Applied Physics	2128	1			1
Optical Review	0722		1		1
Optical Engineering	0997		1		1
Optics and Laser Technology	0601		1		1
Surface Science	2189			2	2
Molecular Crystals and Liquid Crystals	0457			2	2
Journal of Molecular Structure	0907			1	1
主要雑誌小計	9誌				
発表論文合計		2	5	6	13