

平成 25 年度報告書（概要）

平成 26 年度報告書（概要）

平成 27 年度報告書（概要）

平成 28 年度報告書（概要）

平成 29 年度報告書（概要）

マイクロ領域／マクロ領域における  
複合的プローブ技術の開発に関する研究

研究期間（平成 25 年度～平成 29 年度）

文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業  
平成 25 年度研究費補助金実績報告

平成 28 年 3 月

千葉工業大学・電気電子情報工学科  
戦略的研究基盤形成プロジェクト

## はじめに

本プロジェクトは平成 25 年 6 月に文部科学省の「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」として採択された。研究観点としては「研究拠点を形成する研究」に分類されており、プロジェクト名は「マイクロ領域／マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究」、期間は平成 25 年度から平成 29 年度までの 5 年間である。

本プロジェクト組織は電気電子情報工学科の 10 名の研究者（教員）によって構成されており、各研究者の専門分野を「複合的プローブ技術による計測手法」の確立のために結集し、装置および計測のためのアルゴリズムの開発を通じて、学術的ならびに工学的研究を行うことで、世界的な研究拠点を構築することを目的として立ち上げた。ここでは千葉工業大学の立地条件を活かし、新規装置の利用促進と先端材料およびデバイスの解析評価、それらの結果を幅広く共有していくことで国内外の研究拠点を構築することを目指している。

本プロジェクトは「マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究」と「超音波及びテラヘルツ波による複合的非破壊検査の高精度化にする研究」の 2 つのテーマから構成されており、対象領域を「マクロ領域」と「マイクロ領域」に分けて同時並行的に開発研究を行うことで、装置開発ノウハウを含めた計測技術の確立を行っていく。

## 研究概要と目的

複数のプローブによる「その場」計測により単独プローブでは得られない複合的な情報から、先端光・電子材料およびデバイス診断を行うことは、材料評価をはじめとする計測技術の飛躍的な発展が期待できる。本研究では最終的には複数プローブを用いた「その場」計測による材料の形状や物性などの高精度、高分解能評価の確立を目的とする。

### 1) 「マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究」

様々な走査型プローブ技術を用いた計測法が開発されてきたが、マイクロ領域においては、複数の装置によって行われる個別計測では同一位置の特定ならびに評価は困難である。研究対象としている本計測法はマイクロ領域の同一地点での超微細形状のみならず、光や電子に関連する物性を計測することができ、その有用性は非常に大きい。走査プローブ顕微鏡技術の一つである近接場光学顕微鏡(SNOM)では、近接場光による光誘起相互作用力を検出する「顕微鏡装置」としても、また「計測手法」としても全く新しい高感度・高分解能顕微鏡を実現する。また、マイクロ領域の半導体の局在状態を評価する過渡容量分光(DLTS)顕微鏡の試作を行う。さらに多機能・多探針化の下で、新たなアイデアとなる、探針による試料表面への衝撃を他方の探針によって検出する多探針弾性波検出顕微鏡実現のために指針を得る。本測定法を用いて先端的な有機、無機材料のナノ・ミクロン構造やその物性を評価する。

### 2) 「超音波およびテラヘルツ波による複合的非破壊検査の高精度化に関する研究」

人間サイズから見て実用的な空間分解能(ミリメートル~サブミリメートル)を有する波動である超音波とテラヘルツ波電磁波を複合し、同一の観測対象に対し同じ空間サイズで多角的な情報を取得・分析することで、非破壊検査技術の高精度化を実現する。道路トンネル内壁の剥離検査や原子炉隔壁内の欠陥検査など、安心安全面で懸念が生じている建築構造物内の多角的な検査技術の開発に大いに貢献できる。単一手法では見逃される欠陥も多く(電磁波だけでは金属体の検査に弱く、超音波だけでは音響インピーダンスの近い測定対象の分離が難しい)、音波と電磁波という異なる情報を同時かつ同一空間サイズで計測する事で、お互いの欠点を補う事が可能である。この際、発展途上のテラヘルツ波に対しては、電波~マイクロ波領域における合成開口アレイアンテナ、MIMO(multiple-input and multiple-output)等の信号処理技術を適用し、超音波測定と同程度の高精度な解析を実現する。

## 研究組織

研究代表者 脇田和樹

### 1) マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究

工学部	電気電子情報工学科	教授	室	英夫
工学部	電気電子情報工学科	教授	山本	秀和
工学部	電気電子情報工学科	教授	脇田	和樹
工学部	電気電子情報工学科	准教授	小田	昭紀
工学部	電気電子情報工学科	准教授	佐藤	宣夫
工学部	電気電子情報工学科	助教	清水	邦康

### 2) 超音波およびテラヘルツ波による複合的非破壊検査の高精度化に関する研究

工学部	電気電子情報工学科	教授	長	敬三
工学部	電気電子情報工学科	教授	陶	良
工学部	電気電子情報工学科	准教授	水津	光司
工学部	電気電子情報工学科	助教	中林	寛暁

## 外部評価委員

東北大学名誉教授	伊藤 弘昌
四国大学・学長，京都大学・名誉教授	松重 和美

外部評価委員会による年度末報告会の評価結果			
外部評価シート(伊藤弘昌)			
<b>平成25年度戦略的研究基盤形成支援事業 研究報告会外部評価シート</b>			
研究プロジェクト名			
マイクロ領域／マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究			
開催 場所	本学・津田沼学舎 2号館13階大ゼミ室	開催 日時	平成26年3月6日(木) 13:00 - 16:30
外部評価委員 所属・職・氏名		東北大学名誉教授 伊藤弘昌	
総評	1. 大変良い	<input checked="" type="radio"/> 2. 良い	3. 普通      4. 不十分      5. 非常に不十分
<p>学内の教官群を結び付けて実行する新たなプロジェクトは、これまでは独立に行っていた活動から分野を跨いで新たな研究構想を生み出すきっかけとなり、研究拠点作りに有効であり、本事業はその好例であろう。分野の異なるグループとの研究を考え実行することにより、予期以上の新しい成果が生まれる可能性も強く、期待したい。</p> <p>評価会でも発言したが、研究のマイルストーンがほとんど示されていない。複数のグループが協調して行うプロジェクトでは、特にリーダーの目標管理がやりにくいのではと思う。是非、具体的な成果をどこに何をテーマごとに早目に相談され、掲示しながら進められることをお勧めする。目標を中間の3年目と5年目に設定し、進展に応じてフレキシブルに見直しを行う。3年次までに中間成果として纏められ、後半に繋がるようにされることをお勧めしたい。</p>			
テーマ1	1. 大変良い	<input checked="" type="radio"/> 2. 良い	3. 普通      4. 不十分      5. 非常に不十分
<p>複数の教官がこれまで個々に進めてきた先端光材料の形状や諸物性の高精度、高分解能評価を、従来困難なマイクロ領域で同一箇所の複数同時計測を実現しようとする意欲的テーマ。</p> <p>1プローブで複数情報の取得や、複数プローブでポンプ・プローブ的計測を目指しており、マイクロ領域でのアクティブ計測は、多くの機能性を展開できる可能性が大きい。</p> <p>本プロジェクトで創意工夫され創り出される装置が、新たなマイクロ領域でのプローブ計測装置に発展するような構想と成果を期待したい。</p>			
テーマ2	1. 大変良い	<input checked="" type="radio"/> 2. 良い	3. 普通      4. 不十分      5. 非常に不十分
<p>THz TDS の受信信号処理に合成開口アンテナの考えを組み入れるというアイデアは興味深い。また、新たな周波数領域にMIMOをはじめとする先端無線技術を展開する研究は、今後の発展が楽しみである。</p> <p>一方音波による地中映像化は、得られる信号と媒質情報などのデータ処理により、高精度化が期待されるテーマである。</p> <p>プロジェクトとして、異なったグループ間の研究成果が一緒になって新たな成果が求められる。本プロジェクトは複合的非破壊検査技術であることから、複合性を目指しつつ、どの程度の分解能向上をどの程度の処理時間で実現するかなどのターゲットを明示できるように、グループ間で協力して検討し推進されることを期待したい。</p>			

外部評価シート(松重和美)					
<b>平成25年度戦略的研究基盤形成支援事業 研究報告会外部評価シート</b>					
研究プロジェクト名					
マイクロ領域／マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究					
開催 場所	本学・津田沼学舎 2号館13階大ゼミ室	開催 日時	平成26年3月6日(木) 13:00 - 16:30		
外部評価委員 所属・職・氏名		四国大学・学長, 京都大学・名誉教授, 松重和美			
総評	1. 大変良い	2. 良い	3. 普通	4. 不十分	5. 非常に不十分
<p>マイクロ及びマクロ領域のそれぞれの分野で活躍されている研究者の集まりでプロジェクトは構成されており、大きな成果が期待される。今回はその概要の紹介で、研究者間での有機的な連携、開始直後でもあり具体的な成果は未だとの印象である。それぞれの研究者(分野)の目標、連携による(によって初めて結実が可能となる)成果を明示する事が望まれる。また、プロジェクトの運営・進捗管理の有効的な方法、知的財産の取扱等にも十分配慮が必要であろう。</p>					
テーマ1	1. 大変良い	2. 良い	3. 普通	4. 不十分	5. 非常に不十分
<p>各種SPM(走査型プローブ顕微鏡)の開発およびその共焦点顕微鏡システムとの連携とそれらの種々半導体結晶への評価等、ある程度基盤形成及びその応用とある程度統一感ある取組みとなって居り、またその実現も可能と判断される。</p> <p>ただ、今の所大部分の成果はこれまでの実績に基づくもので、本プロジェクトの遂行に依る、今後より進展した成果を期待したい。</p>					
テーマ2	1. 大変良い	2. 良い	3. 普通	4. 不十分	5. 非常に不十分
<p>THz領域および超音波計測、そして電磁波解析と各分野での取組み内容は理解出来るものの、プロジェクト遂行に依るそれぞれの研究分野での具体的な目標の提示および三者の相関性は余り明確ではない。大変興味ある分野の集合であり、連携に依る新たな研究・応用分野の創出を期待したい。</p>					

# 研究報告書（外部評価に対する次年度計画を含む）

## 総合報告

### 研究実績の概要

本プロジェクトは「複合的プローブ技術による計測手法」を確立するために、対象領域を「マイクロ領域」と「マクロ領域」に分けて同時並行的に研究開発を行うことで、計測技術の構築を行っていくことを目的として平成 25 年 6 月に研究を開始した。プロジェクト開始年度ではそれぞれのテーマについて以下の様な課題に絞り、研究活動を行った。

#### 1. マイクロ領域グループ

多機能ならびに多探針プローブ顕微鏡を用いた刺激-応答計測による材料内部の可視化装置、

AFM, KPFM、SNOM、SCM 機能を具現化するために、現有装置を利用したデータ解析に基づいて、多探針プローブとしての仕様を決定した。加えて、要素技術となるプローブ微小変位検出のためのセンサ技術の開発に着手した。

#### 2. マクロ領域グループ

THz 波検出器の位置精密制御を行った上での測定が可能な装置仕様を決定し、装置導入した。

また、実測評価の前段階として、合成開口アレー・偏波処理を適用するためモデル化などにより、単純な構造のターゲットについて高分解能化やコントラスト強調などの効果を確認した。

超音波計測において、感度補正型送信信号を用いた空中物体の方位測定法を考案し、その有効性を確認した。感度補正型送信信号と線形予測広帯域化処理を併用する手法を提案し、確認した。さらに、従来パルスエコー法より受信信号の明確化と SN 比の向上を確認した。

### 総合外部評価に対する次年度対応計画の概要

#### 平成 26 年度に受けた総合外部評価に対する対応計画

テラヘルツ・超音波による同一サンプル計測を実施し、早期に有効性を示すべきであるとの指摘を受け、今後議論していくこととした。

また、特許申請に関するシステムの確立を提案され、それについて実行する。

## テーマ 1 報告

### グループ研究課題

マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究

### グループ研究担当者

研究者名	所属部・科名	職名
脇田 和樹	工学部 電気電子情報工学科	教授
室 英夫	工学部 電気電子情報工学科	教授
山本 秀和	工学部 電気電子情報工学科	教授
小田 昭紀	工学部 電気電子情報工学科	准教授
佐藤 宣夫	工学部 電気電子情報工学科	准教授
清水 邦康	工学部 電気電子情報工学科	助教

### 研究実績の概要

大気圧環境下での原子間力顕微鏡 (AFM) /ケルビンプローブ力顕微鏡 (KFM) によるワイドバンドギャップ半導体として GaN on Si 試料の欠陥密度とその表面電位観察を行った。格子不整合および GaN 結晶構造 (六方晶) に基づく六角形の欠陥および当該箇所の特異的な低電位の観測に成功している。また、太陽電池材料である CdS 薄膜について KFM を用いて解析し、仕事関数の分布からナノ結晶状態評価することができた。共焦点顕微システムを用いた化合物半導体の物性評価ではミクロン程度の分解能をもつ局所評価が可能であることを示した。またパワー半導体デバイスの断面評価とその結果解析から得られる物理モデルの構築を目指し、まずは簡易モデルによる半導体動作のシミュレーションを開始した。一方、SOI-MEMS 技術によるカンチレバー型マイクロアクチュエータの可能性を探るために熱式と磁歪式のマイクロアクチュエータのプロトタイプ試作・評価を行った。磁歪式についてはピエゾ抵抗式変位検出の確認を行うことができた。

### 外部評価に対する対応

1 プローブで複数情報の取得,あるいは,複数プローブでポンプ・プローブ的計測を目指しているというコンセプトを理解して頂き,マイクロ領域におけるアクティブ計測では,多くの機能性を展開できる可能性を評価して頂いている。ただし,これらはこれまでの実績に基づくものであり,本プロジェクトの遂行に依る,今後より進展した成果が求められている。そのため,装置開発,最先端技術に基づく試料の評価を継続しつつ,数値計算シミュレーションによる実験結果の理論的裏付けを行っていく。

次年度研究計画変更の概要

特に無し。

## テーマ 2 報告

グループ研究課題

超音波及びテラヘルツ波による複合的非破壊検査の高精度化にする研究

グループ研究担当者

研究者名	所属部・科名	職名
長 敬三	工学部 電気電子情報工学科	教授
陶 良	工学部 電気電子情報工学科	教授
水津 光司	工学部 電気電子情報工学科	准教授
中林 寛暁	工学部 電気電子情報工学科	助教

研究実績の概要

THz 波検出器の位置精密制御を行った上での測定が可能な装置仕様に関しスペクトルデザイン社と議論を重ね開発を行った。当該装置は、サンプル点をピボットとしてレシーバの位置を  $10\mu\text{m}$  の精度で円周上に制御し、サンプルからの反射テラヘルツ波を任意の角度で計測し得る。また、高速光遅延機構および専用の電流アンプを備え、多点に渡る計測の高速化を図っている。また、実測評価の前段階として、合成開口アレー・偏波処理を適用するためモデル化、および平板など基本形状に対する評価を行い、単純な構造のターゲットについて高分解能化や強調、消去、コントラスト強調などの効果を確認した。超音波計測では、感度補正型送信信号を用いた空中物体の方位測定法を考案し、その有効性を確認した。また、感度補正型送信信号と線形予測広帯域化処理を併用する手法を提案し、パルス帯域の拡大、圧縮信号の短縮および距離測定精度の向上を確認した。さらに、近年国土強靱化に伴い、長い地中杭（ロックボルトやアンカーボルトなど）の計測の課題に着目し、電磁誘導駆動法を提案し初期的検討を行い、従来パルスエコー法より受信信号の明確化と SN 比の向上を確認した。

外部評価に対する対応

パルス毎の THz 波の位相ずれ、受信器の移動などを加味した上でのモデル化

を行い、新しい計測法としての解決策を検討していくべきである、との指摘を受け、これらを包括した数値計算を実施することとした。また、クリアな境界が無い場合などの解析法を見出せるか、との指摘に対し、誘電率分布の推定を課題として取り組むこととした。3年目などの早い段階での同一サンプル計測を実施し、早期に有効性を示すべきであるとの指摘を受けた。これら指摘に対し、THz波、超音波それぞれの技術課題に注力しつつ、測定対象に関する議論を随時行うこととした。

#### 次年度研究計画変更の概要

同一サンプルからの相補的に情報抽出、超音波での全体的な計測後にテラヘルツ波による細部計測など、計測対象に関する議論を前倒しに行い、早期に測定対象を選定する。

マイクロ領域／マクロ領域における  
複合的プローブ技術の開発に関する研究

研究期間（平成 25 年度～平成 29 年度）

文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業  
平成 26 年度研究費補助金実績報告

平成 28 年 3 月

千葉工業大学・電気電子情報工学科  
戦略的研究基盤形成プロジェクト

## はじめに

本プロジェクトは、平成 25 年度の成果に基づきプロジェクト計画に沿った環境の整備と研究課題の進展に焦点を絞り研究活動を行った。研究遂行に必要なとなる研究設備に関しては、昨年度末に「ファイバー結合型テラヘルツ波時間領域分光システム」を、今年度には「環境制御型プローブ顕微鏡ユニット」を導入し、研究設備の整備を完了した。各テーマの研究は、当初の計画に沿って研究を進め、本報告書記載の通り、2 テーマでいずれも、基礎的、実用的に有効な成果が出つつあり、概ねプロジェクト自体は順調に推移している。

また、本年度から教員 1 名、ポスドク 1 名がプロジェクトに加わり、本年度のみならず今後のプロジェクトの進展のための強力なメンバーとなった。

## 研究概要と目的

複数のプローブによる「その場」計測により単独プローブでは得られない複合的な情報から、先端光・電子材料およびデバイス診断を行うことは、材料評価をはじめとする計測技術の飛躍的な発展が期待できる。本研究では最終的には複数プローブを用いた「その場」計測による材料の形状や物性などの高精度、高分解能評価の確立を目的とする。

### 1) 「マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究」

様々な走査型プローブ技術を用いた計測法が開発されてきたが、マイクロ領域においては、複数の装置によって行われる個別計測では同一位置の特定ならびに評価は困難である。研究対象としている本計測法はマイクロ領域の同一地点での超微細形状のみならず、光や電子に関連する物性を計測することができ、その有用性は非常に大きい。走査プローブ顕微鏡技術の一つである近接場光学顕微鏡(SNOM)では、近接場光による光誘起相互作用力を検出する「顕微鏡装置」としても、また「計測手法」としても全く新しい高感度・高分解能顕微鏡を実現する。また、マイクロ領域の半導体の局在状態を評価する過渡容量分光(DLTS)顕微鏡の試作を行う。さらに多機能・多探針化の下で、新たなアイデアとなる、探針による試料表面への衝撃を他方の探針によって検出する多探針弾性波検出顕微鏡実現のために指針を得る。本測定法を用いて先端的な有機、無機材料のナノ・ミクロン構造やその物性を評価する。

### 2) 「超音波およびテラヘルツ波による複合的非破壊検査の高精度化に関する研究」

人間サイズから見て実用的な空間分解能(ミリメートル～サブミリメートル)を有する波動である超音波とテラヘルツ波電磁波を複合し、同一の観測対象に対し同じ空間サイズで多角的な情報を取得・分析することで、非破壊検査技術の高精度化を実現する。道路トンネル内壁の剥離検査や原子炉隔壁内の欠陥検査など、安心安全面で懸念が生じている建築構造物内の多角的な検査技術の開発に大いに貢献できる。単一手法では見逃される欠陥も多く(電磁波だけでは金属体の検査に弱く、超音波だけでは音響インピーダンスの近い測定対象の分離が難しい)、音波と電磁波という異なる情報を同時かつ同一空間サイズで計測する事で、お互いの欠点を補う事が可能である。この際、発展途上のテラヘルツ波に対しては、電波～マイクロ波領域における合成開口アレイアンテナ、MIMO(multiple-input and multiple-output)等の信号処理技術を適用し、超音波測定と同程度の高精度な解析を実現する。

## 研究組織

研究代表者 脇田和樹

### 1) マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究

工学部	電気電子情報工学科	教授	小田	昭紀
工学部	電気電子情報工学科	教授	室	英夫
工学部	電気電子情報工学科	教授	山本	秀和
工学部	電気電子情報工学科	教授	脇田	和樹
工学部	電気電子情報工学科	准教授	佐藤	宣夫
工学部	電気電子情報工学科	准教授	安川	雪子
工学部	電気電子情報工学科	助教	清水	邦康

### 2) 超音波およびテラヘルツ波による複合的非破壊検査の高精度化に関する研究

工学部	電気電子情報工学科	教授	長	敬三
工学部	電気電子情報工学科	教授	陶	良
工学部	電気電子情報工学科	准教授	水津	光司
工学部	電気電子情報工学科	助教	中林	寛暁

## 外部評価委員

東北大学名誉教授	伊藤	弘昌
四国大学・学長，京都大学・名誉教授	松重	和美

外部評価委員会による年度末報告会の評価結果			
外部評価シート(伊藤弘昌)			
<b>平成26年度戦略的研究基盤形成支援事業 研究報告会外部評価シート</b>			
研究プロジェクト名			
マイクロ領域／マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究			
開催場所	本学・津田沼学舎 2号館13階大ゼミ室	開催日時	平成27年3月2日(月) 13:30 - 17:20
外部評価委員 所属・職・氏名		東北大学名誉教授 伊藤弘昌	
総評	1. 大変良い	② 2. 良い	3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分
<p>戦略的研究基盤形成支援事業に、参加研究者も大学も真摯に取り組んでいる。</p> <p>同一マイクロ領域箇所での複数のSPM計測は、物性計測ではしばしば行いたいのが難しい課題である。実現できればより正確な計測情報の比較検討により、新たな物性情報取得が可能になることも多いことと思われる。一方、THz波や超音波による新しい計測への展開を、電波・マイクロ波領域信号処理技術と融合させて更なる展開を図ろうとするテーマも挑戦的である。</p> <p>これまでは独立に行っていた活動活動から、学内の教官群を結び付けて実行する新たなプロジェクトの展開は、分野を跨いで新たな研究構想を生み出したり研究拠点作りに有効であり、まさに本事業はその好例であろう。分野の異なるサブグループとの研究を考え実行することにより、予期以上の新しい成果が生まれる可能性も強く、期待したい。</p>			
テーマ1	1. 大変良い	② 2. 良い	3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分
<p>この事業により各サブグループでの研究は活発化していることが十分感じられた。中間評価では、当初うたっている目標にどのように近づいたかが問われることになるので、</p> <p>1. マイクロ領域での同一箇所での複数のSPM計測による計測事例 2. グループ内での共同作用による前進</p> <p>などがわかるような成果に繋がるようにし、このプロジェクトとしての特長を出してほしい。新装置の導入も進み、創意工夫で本研究に適した新たなマイクロ領域でのプローブ計測装置に発展させ、優れた成果を得てほしい。</p>			
テーマ2	1. 大変良い	② 2. 良い	3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分
<p>合成開口アンテナの受信信号処理の考えをまずTHz TDSの実験結果と組み合わせ、新たな知見が得られ始めていることは大変興味深かった。実験結果とその解析が有効なことが証明できれば、さらに多様な状況設定のもとシュミレーションにより結果の推定が可能となる。どこまでの分解能が得られるかや信号が受信できるかなどのシュミレーションが実験に反映できるようになれば、その効果は大変大きい。</p> <p>超音波計測についても同様に、シュミレーションの活用を望みたい。また、THzと超音波による同一サンプルの計測による相乗効果を期待したい。サブグループ間の共同作業により、さらなるチャレンジングな展開を期待したい。</p>			

外部評価シート(松重和美)			
<h2>平成26年度戦略的研究基盤形成支援事業 研究報告会外部評価シート</h2>			
研究プロジェクト名			
マイクロ領域／マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究			
開催場所	本学・津田沼学舎 2号館13階大ゼミ室	開催日時	平成27年3月2日(月) 13:30 - 17:00
外部評価委員 所属・職・氏名		四国大学・学長, 京都大学・名誉教授, 松重和美	
総評	1. 大変良い	2. 良い	3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分
<p>本プロジェクトは、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に採択され、千葉工業大学自体の理解・支援により実施されているもので、大型装置も設置され始め、本格的に稼働し始めると判断される。特に、学内の異なる分野の研究者群が統一テーマ(本プロジェクトでは、マイクロ領域／マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究)のもと、方向性を持って協創的に取り組む姿勢は、大学の研究レベルの向上のみならず学生の教育・研究活動にも良い影響を与えらる。プロジェクト推進体制もある程度確立されており、そして参画の先生方の意識の高さも感じられ、まだ顕著な成果は出ていないが、今後の進展を大いに期待している。</p>			
テーマ1	1. 大変良い	2. 良い	3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分
<p>真空環境下での表面電位観測システムも購入・整備された他、ケルビンプローブフォース顕微鏡(KPFM)やチップ増強型近接場分光法などの実験も本格的に稼働し始めている。こうした装置・システムの開発・動作確認とともに、構成員それぞれが特異とする分野: パワーデバイス、CIGS太陽電池、磁性ナノ材料への諸物性評価への適用がなされ始めていることは評価できる。また、プローブ探針の運動モデルや振動現象の解析も含めた数値実験の展開も興味深い。ただ、こうした計測装置・システム、シュミレーション、またそれらの複合化によって初めて解明できた事象の提示迄にはなっていないと思われ、今後本研究の実施結果が、新たな先端電子材料の開発等へと繋がる事を期待したい。</p>			
テーマ2	1. 大変良い	2. 良い	3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分
<p>テラヘルツ波および超音波による非破壊的検査の高精度化に対する取り組みで、装置・システムの基盤的確認実験や電磁波解析はその初期的内容は順調に進んでいると思われる。研究グループ間の協調体制もメールベースを超え、合宿や卒論などにも進展しているのは評価される。一般に非破壊解析は種々の要因も絡み容易でなく、またテラヘルツ分野での新規測定法の確立はチャレンジングであり、今後本格的なデータ取得・解析、種々の対象への適用、そして明確な成果・本手法の優位性の明示等を期待したい。</p>			

# 研究報告書（外部評価に対する次年度計画を含む）

## 総合報告

### 研究実績の概要

「複合的プローブ技術による計測手法」を確立するための本プロジェクトは2年目を迎え、テーマ毎に計画していた「テラヘルツ波時間領域分光システム」および「環境制御型プローブ顕微鏡ユニット」

装置も導入し、各テーマについて以下の様な課題について研究活動を行った。

#### 1. マイクロ領域グループ

評価手法に関しては真空環境下での表面電位の観測の実現やチップ増強分光法の研究に着手した。また、物性評価に関してはワイドギャップ半導体の結晶評価および磁性体薄膜材料の評価に着手すると共に、化合物太陽電池材料の複合プローブにより物性評価を行った。さらに、理論解析については power-MOSFET 内部の電荷分布の数値解析やカンチレバーのファンデルワールス力の影響について検討した。

#### 2. マクロ領域グループ

導入された THz 波測定装置に対しノイズ等の評価を行い、測定時の変調周波数やロックインアンプ時定数を決定した。また、電波解析に関する、合成開口アレー測定では、金属板による反射実験データに対する解析を実施し、レーダポラリメトリ測定では、ロンキールーリングパターンからの反射実験データに対する解析を実施し、偏波シグネチャの推定を行った。さらに、超音波測定からのアプローチとして、超音波領域での高度な計測および解析法をテラヘルツ波に展開し、テラヘルツイメージング分解能の向上等が可能性であるか検討を行った。

### 総合外部評価に対する次年度対応計画の概要

平成 26 年度に受けた総合外部評価に対する対応計画

マイクロ領域グループでは、同時・同一領域での「表面形状／表面電位／静電容量」観察に向けて装置を改良し、Si 半導体試料および GaN 半導体薄膜試料の計測を行う。また合わせて、他の SNOM 装置でのナノスケール評価への検討を開始する。

マクロ領域グループでは、超音波領域の技術である振幅相関合成映像化法などをテラヘルツ波測定に取り込み、グループ間の連携をさらに強めて行く。

## テーマ 1 報告

### グループ研究課題

マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究

### グループ研究担当者

研究者名	所属部・科名	職名
脇田 和樹	工学部 電気電子情報工学科	教授
室 英夫	工学部 電気電子情報工学科	教授
山本 秀和	工学部 電気電子情報工学科	教授
小田 昭紀	工学部 電気電子情報工学科	教授
佐藤 宣夫	工学部 電気電子情報工学科	准教授
安川 雪子	工学部 電気電子情報工学科	准教授
清水 邦康	工学部 電気電子情報工学科	助教

### 研究実績の概要

「評価手法」、「物性評価」、「理論解析」を行うサブ Gr によって、本年度に導入した環境制御型プローブ顕微鏡装置の立ち上げを含め、それぞれ以下に示す研究を遂行した。

・「評価手法」サブ Gr では、主な成果として、(1) 大気環境下に留まらない真空環境下での表面電位観測の実現、(2) 原子間力顕微鏡と近接場光学顕微鏡の複合化であるチップ増強分光法の研究に着手した。

・「物性評価」サブ Gr では、主な成果として、(1) サファイア基板上／シリコン基板上のワイドバンドギャップ半導体の結晶評価、(2) 磁性体薄膜材料の評価への検討に着手し、(3) 太陽電池材料である CdS:O 薄膜のナノ構造解析や (4) CuInS<sub>2</sub> 薄膜の物性評価を行った。

・「理論解析」サブ Gr では、主な成果として、(1) power-MOSFET 内部の電荷分布の数値解析、(2) カンチレバーの運動方程式に基づくファンデルワールス力の影響についての精査を実施した。

外部評価に対する対応

同時・同一領域での「表面形状／表面電位／静電容量」観察に向けて装置を改良し、Si 半導体試料および GaN 半導体薄膜試料の計測を行う。また合わせて、他の SNOM 装置でのナノスケール評価への検討を開始する。

大気中での水分の影響を、真空環境ならびに 120℃加熱による水の蒸散によって可能な限りにおいて理想的な表面観察条件を実現するようにする。このことにより シミュレーション数値結果との整合性により注視し、ナノスケール領域で発現する物理現象の精査に尽力する。

次年度研究計画変更の概要

特に無し。

## テーマ 2 報告

グループ研究課題

超音波及びテラヘルツ波による複合的非破壊検査の高精度化にする研究

グループ研究担当者

研究者名	所属部・科名	職名
長 敬三	工学部 電気電子情報工学科	教授
陶 良	工学部 電気電子情報工学科	教授
水津 光司	工学部 電気電子情報工学科	准教授
中林 寛暁	工学部 電気電子情報工学科	助教

研究実績の概要

導入された THz 波測定装置に対しノイズ等の評価を行い、測定時の変調周波数やロックインアンプ時定数を決定した。今後の様々な金属パターン測定に備え、自作での金属パターン作製法を模索した。コピー用紙に対し、レーザープリンタを利用した金属箔熱転写、インクジェットプリンタによる銀ナノ粒子印刷を行い、所望の特性が得られることを確認した。

電波解析では、合成開口アレー測定およびレーダポーラリメトリ測定を実施した。合成開口アレー測定では、金属板による反射実験データに対する解析を実施した。アレー素子間の受信位相特性を分析することで、反射位置の推定が可能である事を確認した。かつ、テラヘルツ波の伝搬状態を推定することができた。レーダポーラリメトリ測定では、ロンキールーリングパターンからの反射実験

データに対する解析を実施し、偏波シグネチャの推定を行った。反射波のスペクトル解析の結果、金属パターンサイズとテラヘルツ波長の関係に対応した反射特性の変化が確認できた。尚、当該成果は 2015 年電子情報通信学会総合大会にて口頭発表を行った。

超音波測定からのアプローチとして、超音波領域での高度な計測および解析法をテラヘルツ波に展開し、テラヘルツイメージング分解能の向上等が可能性であるか検討を行った。相関合成映像化技術、パルス圧縮技術などを適用することで、イメージング分解能向上が見込まれる。

#### 外部評価に対する対応

電波および超音波の解析技術をテラヘルツ波測定に適用することに対し、一定の評価を頂いた。超音波からの技術活用も強く期待されていることから、超音波領域の技術である振幅相関合成映像化法などを取り込み、グループ間の連携をさらに強めて行く。

#### 次年度研究計画変更の概要

特に無し

マイクロ領域／マクロ領域における  
複合的プローブ技術の開発に関する研究

研究期間（平成 25 年度～平成 29 年度）

文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業  
平成 27 年度研究費補助金実績報告

平成 29 年 3 月

千葉工業大学・電気電子情報工学科  
戦略的研究基盤形成プロジェクト

## はじめに

本プロジェクトは、平成 26 年度の成果に基づきプロジェクト計画に沿った環境の整備と研究課題の進展に焦点を絞り研究活動を行った。研究遂行に必要なとなる研究設備として購入した「ファイバー結合型テラヘルツ波時間領域分光システム」及び「環境制御型プローブ顕微鏡ユニット」を用いて、研究も順調に進行し始めている。それに伴い新たな研究の成果も表れているが、同時に課題も見つかっており、今後の研究の新たな方向性も定まってきている。また本年度は本プロジェクト（5 年間）の中間年であることから、研究進展を図るための招待講演とこれまでの研究成果の発表の場として応用物理学会や電気学会などの協賛によるシンポジウムを開催した。

## 研究概要と目的

複数のプローブによる「その場」計測により単独プローブでは得られない複合的な情報から、先端光・電子材料およびデバイス診断を行うことは、材料評価をはじめとする計測技術の飛躍的な発展が期待できる。本研究では最終的には複数プローブを用いた「その場」計測による材料の形状や物性などの高精度、高分解能評価の確立を目的とする。

### 1) 「マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究」

様々な走査型プローブ技術を用いた計測法が開発されてきたが、マイクロ領域においては、複数の装置によって行われる個別計測では同一位置の特定ならびに評価は困難である。研究対象としている本計測法はマイクロ領域の同一地点での超微細形状のみならず、光や電子に関連する物性を計測することができ、その有用性は非常に大きい。走査プローブ顕微鏡技術の一つである近接場光学顕微鏡(SNOM)では、近接場光による光誘起相互作用力を検出する「顕微鏡装置」としても、また「計測手法」としても全く新しい高感度・高分解能顕微鏡を実現する。また、マイクロ領域の半導体の局在状態を評価する過渡容量分光(DLTS)顕微鏡の試作を行う。さらに多機能・多探針化の下で、新たなアイデアとなる、探針による試料表面への衝撃を他方の探針によって検出する多探針弾性波検出顕微鏡実現のために指針を得る。本測定法を用いて先端的な有機、無機材料のナノ・ミクロン構造やその物性を評価する。

### 2) 「超音波およびテラヘルツ波による複合的非破壊検査の高精度化に関する研究」

人間サイズから見て実用的な空間分解能(ミリメートル~サブミリメートル)を有する波動である超音波とテラヘルツ波電磁波を複合し、同一の観測対象に対し同じ空間サイズで多角的な情報を取得・分析することで、非破壊検査技術の高精度化を実現する。道路トンネル内壁の剥離検査や原子炉隔壁内の欠陥検査など、安心安全面で懸念が生じている建築構造物内の多角的な検査技術の開発に大いに貢献できる。単一手法では見逃される欠陥も多く(電磁波だけでは金属体の検査に弱く、超音波だけでは音響インピーダンスの近い測定対象の分離が難しい)、音波と電磁波という異なる情報を同時かつ同一空間サイズで計測する事で、お互いの欠点を補う事が可能である。この際、発展途上のテラヘルツ波に対しては、電波~マイクロ波領域における合成開口アレイアンテナ、MIMO(multiple-input and multiple-output)等の信号処理技術を適用し、超音波測定と同程度の高精度な解析を実現する。

## 研究組織

研究代表者 脇田和樹

### 1) マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究

工学部	電気電子情報工学科	教授	小田	昭紀
工学部	電気電子情報工学科	教授	室	英夫
工学部	電気電子情報工学科	教授	山本	秀和
工学部	電気電子情報工学科	教授	脇田	和樹
工学部	電気電子情報工学科	教授	佐藤	宣夫
工学部	電気電子情報工学科	准教授	安川	雪子
工学部	電気電子情報工学科	准教授	清水	邦康

### 2) 超音波およびテラヘルツ波による複合的非破壊検査の高精度化に関する研究

工学部	電気電子情報工学科	教授	長	敬三
工学部	電気電子情報工学科	教授	陶	良
工学部	電気電子情報工学科	教授	水津	光司
工学部	電気電子情報工学科	助教	中林	寛暁
ポストク			千村	大

## 外部評価委員

東北大学・名誉教授	伊藤	弘昌
四国大学・学長, 京都大学・名誉教授	松重	和美

外部評価委員による年度末報告会の評価結果			
外部評価シート(伊藤弘昌)			
<b>平成27年度戦略的研究基盤形成支援事業 研究報告会外部評価シート</b>			
研究プロジェクト名			
マイクロ領域／マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究			
開催 場所	本学・津田沼学舎 2号館13階大ゼミ室	開催 日時	平成28年3月1日(火) 13:30 - 17:00
外部評価委員 所属・職・氏名		東北大学名誉教授 伊藤弘昌	
総評	1. 大変良い    ② 2. 良い    3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分		
<p>戦略的研究基盤形成支援事業が意図している参加研究者間の競争的協力関係のシナジー効果が、見える形で形成されてきていることが感じられた報告会であった。テーマ1、テーマ2ともに、特色ある研究を行うという目的に向かい、しっかりとした芽を感じた。これはプロジェクトリーダーのリーダーシップと共に、共同研究者たちが切磋琢磨している成果と思う。</p> <p>届けていただいた8月のシンポジウムの印刷物を見て研究の進展を感じていたが、発表を伺い再確認できた。今後は学会や大学も一目置くような特色ある成果を創出できるように取り組んでほしい。特にこれまでにない新たな成果に結び付けられるような目標を選定し、実現に向けて進まれることをお勧めしたい。見える形での成果(論文発表、報道等)が出てくれば、今後しっかりとした裏付けのある研究提案ができ、研究費の獲得など次への研究展開構築にもつなげることができる。事業終了後では遅すぎるので、是非これから進めていただきたい。</p> <p>学内外からも注目される研究集団になってゆくことを期待する。</p>			
テーマ1	1. 大変良い    ② 2. 良い    3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分		
<p>装置の導入も進み、それらを生かした研究のステージに入っている。複合プローブが活躍するシーンを皆で議論され、それを多数書き出し、その中でこのグループがやれるものを絞りこみ、その体制づくりを検討されては如何か。実際の計測に取り組んでいるグループが中心になり、説得力のある計測対象と計測法についての特色ある成果が出せるように、一段の努力を期待する。</p>			
テーマ2	1. 大変良い    ② 2. 良い    3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分		
<p>超音波計測シミュレーションのTHz TDSへの活用結果は大変興味深い。また合成開口アンテナの受信信号処理をTHz TDSの実験結果とも組み合わせ、偏波依存などから新たな知見が得られ始めていることは大変興味深かった。</p> <p>THz分野はまだ十分確立されていないことから、その解析は多くの示唆を与えることができそうである。さらなるチャレンジングな展開を期待したい。</p>			

外部評価シート(松重和美)			
<b>平成27年度戦略的研究基盤形成支援事業 研究報告会外部評価シート</b>			
研究プロジェクト名			
マイクロ領域／マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究			
開催 場所	本学・津田沼学舎 2号館13階大ゼミ室	開催 日時	平成28年3月1日(火) 13:30 - 17:00
外部評価委員 所属・職・氏名		四国大学・学長, 京都大学・名誉教授, 松重和美	
総評	1. 大変良い	<input checked="" type="radio"/> 2. 良い	3. 普通      4. 不十分      5. 非常に不十分
<p>本プロジェクトは開始後3年目となり、5年計画の中間点を過ぎた事になる。マイクロ領域の研究とマクロ領域の研究で、それぞれの領域での研究が進展しているのに加え、それらの連携・融合によるこれ迄にない新たな展開が見え始めている。新規購入の機器の運用やシミュレーション技法の活用により、今後とも計画通り、更には計画以上の成果の創出が期待される。また、自己そして外部の中間評価も参考にしながらプロジェクト後半での研究目標の絞り込み、改訂的な設定等の再検討も必要であろう。</p>			
テーマ1	1. 大変良い	<input checked="" type="radio"/> 2. 良い	3. 普通      4. 不十分      5. 非常に不十分
<p>本マイクロ領域の研究では、測定での高精度化が進展し、また複合的な計測が順調になされていると判断される。測定対象として、省エネに大きく貢献すると期待されているGaNなどのワイドギャップ半導体およびそれをを用いたデバイスの特性計測に取り組んでおり、欠陥との相関性が明らかになっているが、マイクロ物性が如何にマクロ(実レベルの)デバイス特性に影響を及ぼすか、また後者の機能向上に対する指針は未だ得られていない。共焦点顕微システムとSPM法の併用によるCuInS<sub>2</sub>結晶の観測では、ナドメインや自発分極の観測にある程度成功しており、今後チップ増強型近接場分光法の確立が期待される。また、新たなマイクロカンチレバーの開発やスピントロニクス材料・磁気物性の分野でも着実に研究は進展しているが、今後より一層の成果の創出と展開を期待したい。</p>			
テーマ2	1. 大変良い	<input checked="" type="radio"/> 2. 良い	3. 普通      4. 不十分      5. 非常に不十分
<p>これ迄の超音波やテラヘルツ波の実績をベースに、卓越した信号処理技術やシミュレーション技術の併用により、非破壊分野での新たな展開が開始されたとの印象を持った。テラヘルツ波に適合したセンサーの開発や高精度のシミュレーション・映像化技術の応用により、新たな研究分野が着実に開け始めていると思われる。今後より活発な研究展開を期待したい。また、こうした複合的・先端的な手法がその能力を発揮する最適な適用分野についても、その具体的な対象物システムの検討も必要だと思われる。</p>			

# 研究報告書（外部評価に対する次年度計画を含む）

## 総合報告

### 研究実績の概要

本プロジェクトでは 3 年目を迎え、研究の中核を担う大型装置の導入と立ち上げが終わり、それらを用いた研究の成果が表れると同時に課題も見つかっており、今後の研究の新たな方向性も定まってきた。また、5 年計画のプロジェクトの中間年であることから、これまでの成果を披露するためのシンポジウムを企画した。本プロジェクトの各テーマにおいて以下の様な課題について研究活動を行った。

#### 1. マイクロ領域グループ

平成 26 年度に環境制御型原子間力顕微鏡装置を導入し、光・電子・磁気材料やデバイスの評価解析を行っている。また真空環境下／温度可変状態での表面電位観測、半導体試料の微分容量測定可能な走査型容量原子間力顕微鏡への改良や原子間力顕微鏡と近接場光学顕微鏡の複合化を試みている。さらに、Si ショットキーバリアダイオードの固定電荷を考慮した数値解析やファンデルワールス力によるカンチレバーの運動方程式に基づく挙動解析にも取り組んでいる。

#### 2. マクロ領域グループ

導入した THz 波測定装置のサンプルホルダ改良により位置設定誤差の問題の解決を図った。

また、偏波選択が可能な実験系に改良することで偏波切り替え時の位置設定誤差を抑制した。

電波解析ではアレー素子間の位相分布より位置校正の推定や到来波分布を明確化するためにレイ・トレーシングによる解析などを試みている。また、超音波での解析法である相関合成法を取り入れた THz イメージングの高コントラスト化を目指し、数値計算による初期検討に着手した。

### 総合外部評価に対する次年度対応計画の概要

#### 平成 27 年度に受けた総合外部評価に対する対応計画

マイクロ領域グループでは、複合プローブでの研究テーマを絞り込み、特色ある成果が期待できる研究に取り組む。また、マイクロ物性とマクロデバイス特性との関連についての知見を得るとともに、さらに一層の研究の進展を図る。

マクロ領域グループでは、センサーの開発や高精度のシミュレーション・映像化技術の応用による活発な研究展開を進めるとともに、このような先端的な手法を用いる対象物システムの検討を行う。

## テーマ 1 報告

### グループ研究課題

マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究

### グループ研究担当者

研究者名	所属部・科名	職名
脇田 和樹	工学部 電気電子情報工学科	教授
室 英夫	工学部 電気電子情報工学科	教授
山本 秀和	工学部 電気電子情報工学科	教授
小田 昭紀	工学部 電気電子情報工学科	教授
佐藤 宣夫	工学部 電気電子情報工学科	教授
安川 雪子	工学部 電気電子情報工学科	准教授
清水 邦康	工学部 電気電子情報工学科	准教授

### 研究実績の概要

大気・真空，温度制御下でナノ・ミクロン領域における物性計測装置（環境制御型原子間力顕微鏡装置【平成 26 年 6 月】）の導入により，光・電子・磁気材料の評価解析を行っている．当該装置は，表面吸着水の影響を最小限に抑えることができる高真空状態での電気計測や加熱・冷却状態での試料の物性マッピングを可能としており，最先端材料に留まらず，デバイス評価に関する研究遂行の主要装置として高い使用頻度で利用されている．

当該装置の利用に基づいた研究体制の下で，「物性評価」，「装置改良」，「理論解析」を行うサブ Gr を形成し，有機的な連携により遂行している．

「物性評価」サブ Gr では，主な成果として，(1) Si ショットキーバリアダイオード (Si-SBD) の表面電位／微分容量像による逆バイアス印加時の空乏層の拡がりを可視化することに成功した．(2) カンチレバー作製 (MUMPs by MEMSCAP 社)，(3) 共焦点フォトルミネッセンス分光とマイクロ EPMA の複合プローブによる多元系太陽電池材料の解析に成功した．(4) Au ナノ粒子の自己組織化構造の空間制御について国際学会で発表した．従来の Au ナノ粒子の自己組織化構造の作製だけでなく、極めて高い規則度で Au 粒子を 2 次元に配列させる技術、および各 Au 粒子の結晶配向面を(111)に制御することに成功した．

「装置改良」サブ Gr では，主な成果として，(1) 真空環境下／温度可変状態での表面電位観測，半導体試料の微分容量( $\partial^2 C/\partial z \partial V$ )の分布を測定する走査型容量原子間力顕微鏡への改良 (3) 原子間力顕微鏡と近接場光学顕微鏡の複合化

に着手した.

「理論解析」サブ Gr では、主な成果として、(1) Si-SBD の固定電荷を考慮した数値解析、(2) ファンデルワールス力によるカンチレバーの運動方程式に基づく挙動解析についての精査を実施した.

また「戦略的研究基盤形成支援」としての特別講演会を2回実施 (A. カステラツィ先生@ノッティンガム大【2015/07/10】、岩田太先生@静岡大【2015/10/30】) し、最先端研究事例を学ぶ機会を持った.

#### 外部評価に対する対応

伊藤評価委員：「マイクロ領域での同一箇所での複数の SPM 計測による計測事例が問われる段階になる」というご指摘を頂いており、平成 27 年度は、表面形状像/表面電位像だけではなく、微分容量像の観察ができるように装置改良を施し、その具現化を達成している.

松重評委員：「計測装置・システム、シミュレーション、またそれらの複合化によって初めて解明できた事象の提示までにはなっていない」というご指摘を頂いており、平成 27 年度は、物性評価 Gr と理論解析 Gr との連携を蜜にする、具体的には週 1 回の合同ゼミナール開催を通じて、成果を共有し国際会議 (ICEMS2016)での発表を予定している. また、「マイクロチーム」研究者間の研究協力をアドバイスされた。そこで平成 27 年度は試料の解析などにおいて当該チームの研究者との研究協力を実施した。

#### 次年度研究計画変更の概要

特に無し.

## テーマ 2 報告

### グループ研究課題

超音波及びテラヘルツ派による複合的破壊検査の高精度化にする研究

### グループ研究担当者

研究者名	所属部・科名	職名
長 敬三	工学部 電気電子情報工学科	教授
陶 良	工学部 電気電子情報工学科	教授
水津 光司	工学部 電気電子情報工学科	教授
中林 寛暁	工学部 電気電子情報工学科	助教
千村 大		ポスドク

### 研究実績の概要

サンプルホルダに X-Y-Z 微動ステージおよび  $\theta$ - $\phi$  のあおり機構を追加することで、サンプル設置時における位置設定誤差の問題の解決を図った。また、発振器及び検出器を 45 度傾けて設置する治具を作製し、金属ワイヤグリッドによる偏波選択が可能な実験系に改良することで、偏波切り替え時の位置設定誤差を抑制した。電波解析ではアレー素子間の位相分布より位置校正の推定を行うと共に、到来波分布を明確化するためにレイ・トレーシングによる解析を試みている。かつ、偏波シグネチャの解析を行い、金属の周期的構造の偏波応答の解析を進めている。金属構造のサイズと THz 波長との関係により、特異な応答が得られることが見出されて来た。また、超音波での解析法である相関合成法を取り入れた THz イメージングの高コントラスト化を目指し、数値計算による初期検討に着手した。初期検討段階では有望な結果を得ており、今後実測データへの展開に取り組む。

### 外部評価に対する対応

2014 年度の年度末報告会にて受けた「超音波計測についても同様に、シミュレーションの活用を望みたい」との指摘に対応し、超音波領域で利用されているタイムドメインでの合成開口イメージングの手法を、THz イメージングに適用することでイメージングの高精度化への取り組みに着手した。初期段階として、実測した THz 波の時間波形を用いて、数値計算による相関合成法の適用を実施し、高コントラストに対して有望であるとの知見を得た。

#### 次年度研究計画変更の概要

THz 波に対する合成開口イメージングは多くの課題があることから、電波手法のみならず、超音波の手法を適用して高精度なイメージング手法を提案することに注力する事とした。

マイクロ領域／マクロ領域における  
複合的プローブ技術の開発に関する研究

研究期間（平成 25 年度～平成 29 年度）

文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業  
平成 28 年度研究費補助金実績報告

平成 29 年 8 月

千葉工業大学・電気電子情報工学科  
戦略的研究基盤形成プロジェクト

## はじめに

本プロジェクトは、平成 28 年度までに当初の計画に沿った研究設備「ファイバー結合型テラヘルツ波時間領域分光システム」及び「環境制御型プローブ顕微鏡ユニット」の整備を終了した。また、これらの装置を用いて平成 27 年度までの成果に基づきプロジェクト計画に沿って各テーマにおける研究課題の絞り込みを行い、その遂行に取り組んできた。そして新たな研究の成果も得ている。また本年度は早々にこれまでの成果をまとめた中間報告を作成し、文科省へ提出した。一方、後述するように、プロジェクト後半での研究目標の絞り込みや改訂的な設定等の再検討および特色ある大きな成果の創出など外部評価委員の指摘を受け、最終年度に向けたプロジェクトの新たな課題も明らかとなった。

## 研究概要と目的

複数のプローブによる「その場」計測により単独プローブでは得られない複合的な情報から、先端光・電子材料およびデバイス診断を行うことは、材料評価をはじめとする計測技術の飛躍的な発展が期待できる。本研究では最終的には複数プローブを用いた「その場」計測による材料の形状や物性などの高精度、高分解能評価の確立を目的とする。

### 1) 「マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究」

様々な走査型プローブ技術を用いた計測法が開発されてきたが、マイクロ領域においては、複数の装置によって行われる個別計測では同一位置の特定ならびに評価は困難である。研究対象としている本計測法はマイクロ領域の同一地点での超微細形状のみならず、光や電子に関連する物性を計測することができ、その有用性は非常に大きい。走査プローブ顕微鏡技術の一つである近接場光学顕微鏡(SNOM)では、近接場光による光誘起相互作用力を検出する「顕微鏡装置」としても、また「計測手法」としても全く新しい高感度・高分解能顕微鏡を実現する。また、マイクロ領域の半導体の局在状態を評価する過渡容量分光(DLTS)顕微鏡の試作を行う。さらに多機能・多探針化の下で、新たなアイデアとなる、探針による試料表面への衝撃を他方の探針によって検出する多探針弾性波検出顕微鏡実現のために指針を得る。本測定法を用いて先端的な有機、無機材料のナノ・ミクロン構造やその物性を評価する。

### 2) 「超音波およびテラヘルツ波による複合的非破壊検査の高精度化に関する研究」

人間サイズから見て実用的な空間分解能(ミリメートル～サブミリメートル)を有する波動である超音波とテラヘルツ波電磁波を複合し、同一の観測対象に対し同じ空間サイズで多角的な情報を取得・分析することで、非破壊検査技術の高精度化を実現する。道路トンネル内壁の剥離検査や原子炉隔壁内の欠陥検査など、安心安全面で懸念が生じている建築構造物内の多角的な検査技術の開発に大いに貢献できる。単一手法では見逃される欠陥も多く(電磁波だけでは金属体の検査に弱く、超音波だけでは音響インピーダンスの近い測定対象の分離が難しい)、音波と電磁波という異なる情報を同時かつ同一空間サイズで計測する事で、お互いの欠点を補う事が可能である。この際、発展途上のテラヘルツ波に対しては、電波～マイクロ波領域における合成開口アレイアンテナ、MIMO(multiple-input and multiple-output)等の信号処理技術を適用し、超音波測定と同程度の高精度な解析を実現する。

## 研究組織

研究代表者 脇田和樹

### 1) マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究

工学部	電気電子情報工学科	教授	小田	昭紀
工学部	電気電子情報工学科	教授	室	英夫
工学部	電気電子情報工学科	教授	山本	秀和
工学部	電気電子情報工学科	教授	脇田	和樹
工学部	電気電子情報工学科	教授	佐藤	宣夫
工学部	電気電子情報工学科	准教授	安川	雪子
工学部	電気電子情報工学科	准教授	清水	邦康

### 2) 超音波およびテラヘルツ波による複合的非破壊検査の高精度化に関する研究

工学部	電気電子情報工学科	教授	長	敬三
工学部	電気電子情報工学科	教授	陶	良
工学部	電気電子情報工学科	教授	水津	光司
工学部	電気電子情報工学科	准教授	中林	寛暁
ポストドク			千村	大

## 4. 外部評価委員

東北大学・名誉教授	伊藤	弘昌
四国大学・学長, 京都大学・名誉教授	松重	和美

外部評価委員による年度末報告会の評価結果			
外部評価シート(伊藤弘昌)			
<b>平成28年度戦略的研究基盤形成支援事業 研究報告会外部評価シート</b>			
研究プロジェクト名			
マイクロ領域／マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究			
開催 場所	本学・津田沼学舎 2号館13階大ゼミ室	開催 日時	平成29年3月2日(木) 13:30 - 17:00
外部評価委員 所属・職・氏名		東北大学名誉教授 伊藤弘昌	
総評	1. 大変良い    ②. 良い    3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分		
<p>プロジェクト参加研究者間で協同した具体的研究に至り、その成果が出てきているものが複数見られた。これまでにない異分野共同成果を生み出しつつある状況が確認でき、今後の展開を期待したい。</p> <p>各テーマに於いて、常に研究の目的、オリジナリティ、先行研究との位置づけ、などを研究者自身が明確にしながら遂行する必要がある。説明の冒頭に簡明にこれらを纏めて説明いただくと、自分のためにも、また背景を十分理解していない人たちへ情報を伝える上でも容易になるので、ぜひ検討いただきたい。競合する分野の研究は、見えないところで大きな展開が図られていることが多いので、常に注意を払う必要がある。</p> <p>なお、参考として配布された資料に添付されている研究進捗状況報告書(中間報告)を眺めていて気になったのが、&lt;特に優れた研究成果&gt;の項目に何も記述がないことである。記入漏れだったのではと思うが、この項目を空欄にすることなく、リーダーが成果の中から得られた新たな知見の記をお勧めする。</p>			
テーマ1	1. 大変良い    ②. 良い    3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分		
<p>AFM/KFM/SCFMや共焦点顕微システムなど複数のシステムでの同一領域同時計測は 装置の稼働が図られ、具体的なサンプル準備とその測定ステージに移行し、測定対象としてパワーデバイス、多元化合物やスピントロニクス材料の物性評価、と幅広く展開している。</p> <p>本プロジェクトの主目的である、「複合的プローブ技術を用いた計測法」による成果として、&lt;特に優れた研究成果&gt;に上げるものを明確にしながら、現在進めている研究を一層推進してほしい。</p>			
テーマ2	①. 大変良い    2. 良い    3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分		
<p>テーマ2は研究計画の性質上、「複合的非破壊検査」にむけてグループ内での整合性がはっきりした課題設定になっていることから、テラヘルツ、超音波、電波のそれぞれの特色を生かした研究はこのプロジェクトの成果であり、その展開が楽しみである。</p> <p>今回の報告では電波とともに、超音波の技法をテラヘルツTDS信号に適用する方法で、新たな成果が得られている。最終年に向けて技法の確立とともに、わかりやすいデモとなるように測定ターゲットなどに更なる検討を期待したい。</p>			

外部評価シート(松重和美)			
<h2>平成28年度戦略的研究基盤形成支援事業 研究報告会外部評価シート</h2>			
研究プロジェクト名			
マイクロ領域/マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究			
開催場所	本学・津田沼学舎 2号館13階大ゼミ室	開催日時	平成29年3月2日(木) 13:30 - 17:00
外部評価委員 所属・職・氏名		四国大学・学長, 京都大学・名誉教授, 松重和美	
総評	1. 大変良い	<input checked="" type="radio"/> 2. 良い	3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分
<p>一般的にプロジェクトは順調に進展していると判断します。本プロジェクトは、来年度が最後の年であり、集大成に向かって邁進して頂きたい。特に共通意識としてのターゲットがあったはずであり、全体のスキームとして、取り組んでいる個々の研究内容が、プロジェクトの内容に合致しているのか、再認識して頂きたい。またアプリケーションを考えることも重要である。学術的な進捗だけではなく、産業的な利用を意識してほしい。計測に特化しているが、その中でも、「何が産業界に還元できるか」を改めて意識する必要があるだろう。</p> <p>ナノテクノロジーは2000年頃に、推進された科学技術であったが、今日、どれほどの産業に根付いているのか、本PJは、5年間の予算でここまでの成果を出してきたが、成果の集約が必要であり、それがどう(産業)応用されるのか、それを明確なイメージとして持って(各自が)取り組んで欲しい。それが次なるステップに繋がる。来年度は最終年度として、更なる成果・進展を期待したい。</p>			
テーマ1	1. 大変良い	<input checked="" type="radio"/> 2. 良い	3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分
<p>開発された装置を用いて、種々の電子デバイス(Si-SBD, SiC-SBD, GaNなど)の内部や表面電位分布等の評価、更にこうした計測と数値計算による比較等もなされ、がなされていて興味深い。これらのデータが実際のデバイスの性能向上などの指針を提起できれば一層本研究遂行の価値が出てくると思われ、今後そうした視点での研究も望ましい。また、多元化合物の物性評価二関しても、研究は順調に進展しており、更なる成果を期待している。</p>			
テーマ2	1. 大変良い	<input checked="" type="radio"/> 2. 良い	3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分
<p>研究チームの連携も進み、研究は順調に進展していると判断される。超音波およびTHz波、其々の特性を考慮した複合的非破壊検査への適用が、計測法等の改善も含め、より高精度化していると考えられる。一方、実用化という面で十分な精度が確保され実際に適用できるか、また他の手法等との比較でも格段の優位性があるか、第三者的視点での評価も含め、更なる研究の進展を期待したい。</p>			

## 研究報告書（外部評価に対する次年度計画を含む）

### 総合報告

平成 28 年度 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業研究費補助金実績報告書

#### 研究実績の概要

本プロジェクトは4年目を迎え、各テーマにおける研究課題の絞り込みを行い、その遂行に取り組んできた。また、中間報告書をまとめ文科省に提出した。本プロジェクトの各テーマにおいて以下の様な課題について研究活動を行った。

##### 1. マイクロ領域グループ

Si 製ショットキーバリアダイオードのバイアス電圧印加時のナノスケール観測や界面準位を模擬したシミュレーション解析などを行った。また、AFM の探針形状を考慮した原子間力相互作用に関する数値解析や磁歪膜付きカンチレバービームの共振特性のシミュレーション解析とモデル化に取り組んだ。さらに、先端材料の評価では強磁性合金薄膜と Au ナノ粒子複合材料のプラズモニック効果の検証を行い、Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> 薄膜表面のチップ増強ラマン観測に成功した。

##### 2. マクロ領域グループ

電波領域での信号処理および超音波領域での信号処理を並行して実施し、テラヘルツイメージングへの適用性に関して実験的に取り組んだ。電波領域での技術としては、MUSIC の導入による反射源位置の精密推定、および、POLSER に向けた偏波解析による反射構造体のサイズおよび向き の同定に取り組み、合成開口と比較して位置推定精度の大幅な向上の可能性を見出した。超音波領域での技術としては、相関合成およびパルス圧縮の実施により、通常の合成開口に比してアーティファクトを大きく抑制することが可能であることを示した。

#### 総合外部評価に対する次年度対応計画の概要

平成 28 年度に受けた総合外部評価に対する対応計画

マイクロ領域グループでは、種々の電子デバイスの内部や表面電位分布等のデータが実際のデバイスの性能向上などの指針となる研究を進める。また、マイクロカンチレバーの開発やスピンエレクトロニクス の材料・磁気物性の分野でも一層の成果の創出と展開を行う。さらに、チップ増強型近接場分光法を確立する。マクロ領域グループでは、「複合的非破壊検査」にむけてテラヘルツ、超音波、電波のそれぞれの特色を生かした研究のさらなる展開を図る。また、電波とともに、超音波の技法をテラヘルツ TDS 信号に適用において、明快なデモとなる測定ターゲットなどの検討を行う。

## テーマ 1 報告

### グループ研究課題

マイクロ領域での複合的プローブ技術を用いた計測法に関する研究

### グループ研究担当者

研究者名	所属部・科名	職名
脇田 和樹	工学部 電気電子情報工学科	教授
室 英夫	工学部 電気電子情報工学科	教授
山本 秀和	工学部 電気電子情報工学科	教授
小田 昭紀	工学部 電気電子情報工学科	教授
佐藤 宣夫	工学部 電気電子情報工学科	教授
安川 雪子	工学部 電気電子情報工学科	准教授
清水 邦康	工学部 電気電子情報工学科	准教授

### 研究実績の概要

研究実績を以下のように列記する。

- ・ Si 製ショットキーバリアダイオードのバイアス電圧印加時のナノスケール観測。
- ・ Si 製ショットキーバリアダイオードの界面準位を模擬したシミュレーション解析。
- ・ Si 製ショットキーバリアダイオードの深さ方向への電位分布の数値解析。
- ・ SiC 製ショットキーバリアダイオードのナノスケール観測。
- ・ AFM カンチレバー探針と試料表面との相互作用に関する周波数特性評価
- ・ 探針形状を考慮した原子間力相互作用に関する数値解析。
- ・ 磁歪膜付きカンチレバービームの共振特性のシミュレーション解析とモデル化
- ・ 電磁ノイズ抑制用・強磁性シートの作製とその透磁率評価ならびに理論モデルとの比較
- ・ 強磁性合金薄膜と Au ナノ粒子複合材料のプラズモニック効果の検証
- ・ Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> 薄膜表面のチップ増強ラマン観測
- ・ CuInS<sub>2</sub> 薄膜の共焦点顕微フォトルミとマイクロ EPMA による複合プローブの進展。

外部評価に対する対応

伊藤弘昌先生より、「グループがやれるものを絞りこみ、その体制づくりを検討する段階にあるのではないか」【※以上、抜粋】とのことから、最先端光電子・磁気材料の評価、パワーデバイス評価とシミュレーション、カンチレバー挙動解析の3つに絞って実施する体制を整えるに至った。

松重和美先生より、「マイクロ物性が如何にマクロ（実レベルの）デバイス特性に影響を及ぼすか」【※以上、抜粋】とのことから、特に市販されているディスクリットデバイス（ショットキーバリアダイオード）のナノスケール評価について実施し、それらの結果を国内外の学会にて成果報告するに至った。

## 1. 次年度研究計画変更の概要

産業界へのフィードバックを行うため、デバイスメーカーとの連携体制を構築していく。

## テーマ2 報告

グループ研究課題

超音波及びテラヘルツ派による複合的破壊検査の高精度化にする研究

グループ研究担当者

研究者名	所属部・科名	職名
長 敬三	工学部 電気電子情報工学科	教授
陶 良	工学部 電気電子情報工学科	教授
水津 光司	工学部 電気電子情報工学科	教授
中林 寛暁	工学部 電気電子情報工学科	准教授
千村 大		ポスドク

研究実績の概要

電波領域での信号処理（周波数ドメイン）および超音波領域での信号処理（タイムドメイン）を並行して実施し、テラヘルツイメージングへの適用性に関して実験的に取り組んだ。電波領域での技術としては、MUSIC の導入による反射源位置の精密推定、および、POLSER に向けた偏波解析による反射構造体のサイズおよび向き の同定に取り組んだ。

MUSIC により金属ワイヤー単線からの反射位置解析を行う事で、通常 の合成開口に比して位置推定精度を大きく向上可能である知見を得た。偏波解析では、偏波シグネチャ解析により金属グリッド方向の同定が可能となり、周波数応答解

析よりグリッドサイズの推定が可能となった。

超音波領域での技術としては、2本の金属ワイヤーからの反射波に対し、相関合成およびパルス圧縮を実施し、通常の場合に比してアーティファクトを大きく抑制可能であることが実験的に示された。また、相関合成においても現れる多重反射由来のアーティファクトに対して、偏波を利用することで抑制することに成功した。

#### 外部評価に対する対応

超音波計測シミュレーションの THz-TDS への活用に対する期待を頂いたことを踏まえ、実験結果に対する超音波解析への適用へと展開を行った。また、電波領域における合成開口アンテナの受信信号処理の THz-TDS 処理への適用、偏光解析の適用に対しても評価を頂いたことを踏まえ、具体的な画像化へと向けた検討を行った。

#### 次年度研究計画変更の概要

最終年度では、電波領域の信号処理では、偏波解析と合成開口解析の融合による高精度化について検討する。また、金属ワイヤーあるいは金属グリッドなどの比較的単純な構造体に対するイメージングだけでなく、電波や超音波技術によるイメージング高度化を実証する対象として、スパイラルなどのより複雑な構造体を有するサンプルを導入していく。

外部評価シート(伊藤弘昌)			
<h2>平成29年度戦略的研究基盤形成支援事業 研究報告会外部評価シート</h2>			
研究プロジェクト名			
マイクロ領域／マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究			
開催場所	本学・津田沼学舎 2号館13階大ゼミ室	開催日時	平成30年2月23日(金) 13:30 - 17:00
外部評価委員 所属・職・氏名		東北大学名誉教授 伊藤弘昌	
総評	<input checked="" type="radio"/> 1. 大変良い    2. 良い    3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分		
<p>マイクロとマクロという異なった2つのテーマを複合プローブ技術としてプロジェクトにまとめ、10人を超える学内研究者を集結して進めてきた成果が、論文発表や、次のプロジェクトへ展開していることは大変喜ばしい。戦略的研究基盤形成支援事業が意図している参加研究者間の競争的協力関係による、まさに研究基盤の形成が、この5年間のプロジェクトで形成されてきたことは大きな成果であり、高く評価できる。これはプロジェクトリーダーのリーダーシップと共に、共同研究者たちの協力と切磋琢磨の成果である。 研究テーマは変化すると思うが、このような研究推進の経験を生かし、貴学・貴学科の一層の発展を期待する。</p>			
テーマ1	<input type="radio"/> 1. 大変良い <input checked="" type="radio"/> 2. 良い    3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分		
<p>本プロジェクトで導入したマイクロ領域複合計測装置が本格的に使われ始め、当初から目指していた実デバイスの評価などに成果を上げている。パワーデバイスの通電中のマイクロ情報取得は、デバイス開発者からの期待も大きいと思われる。データ解析をしっかり行い、内外への学会発表を通して、デバイス開発者が求めている情報の収集に対応できるよう努め、更なる次の展開につないでほしい。また、学内の電子デバイス開発においても重要なツールになってきており、今後とも研究を一層推進してほしい。 複合したマイクロ計測システムの特徴を生かし、他所では容易にできない物性評価による研究の推進を期待する。今後幅広く測定例を論文・学会で示すことで、この測定系を他の研究者も試用してみたいとの相談を多く受けるようにしながら、次の研究へと展開していただきたい。</p>			
テーマ2	<input checked="" type="radio"/> 1. 大変良い    2. 良い    3. 普通    4. 不十分    5. 非常に不十分		
<p>マクロ領域のテーマでは、音波、電波の研究者がこのプロジェクトのもとでTHz TDS計測とその解析に注力する方向で、早めに変更して研究を行ったことは大変良かった。その結果、これまでにない分野横断的な新しい成果を出すことに繋がり、全体的にまとまりの良い構成で5年間の研究を締めくくれた。今後とも、密接な協力体制のもと、新たなテーマ設定で研究の提案・遂行を是非とも続けていただきたい。このようなチームは、内外でも他には例が少ないので、面白い研究展開を期待する。 得られた成果を広く発表し、産学連携をも視野に入れたより大きな研究への展開を、今後とも見守りたい。</p>			

外部評価シート(松重和美)					
<h2>平成29年度戦略的研究基盤形成支援事業 研究報告会外部評価シート</h2>					
研究プロジェクト名					
マイクロ領域/マクロ領域における複合的プローブ技術の開発に関する研究					
開催 場所	本学・津田沼学舎 2号館13階大ゼミ室	開催 日時	平成30年2月23日(金) 13:30 - 17:00		
外部評価委員 所属・職・氏名		四国大学・学長, 京都大学・名誉教授, 松重和美			
総評	1. 大変良い	2. 良い	3. 普通	4. 不十分	5. 非常に不十分
<p>本プロジェクト開始時、研究対象・内容に多少バラバラ感があったが、この5年間の研究活動の進展で、それぞれの研究グループがレベルアップし、全体としても統一的な研究分野の進捗、課題が明確になったと評価される。研究は積み重ねであり、対象とした主要な研究分野の一つはイメージングであり、現在の専門分野に限定せず、ほかの分野での進展も取り入れるべく、今後の展開を期待したい。また、予算獲得に繋げて欲しいし、グループの発展系として年に1回程度でもブレインストーミングを続けてはどうか。私学の研究者であるので、ベンチャー精神・事業展開も考慮してはどうかと思う。</p>					
テーマ1	1. 大変良い	2. 良い	3. 普通	4. 不十分	5. 非常に不十分
<p>当初計画された測定機器等の整備、性能向上はされており、また、実デバイスへの実証も予測以上の成果を挙げている。全体として、本グループに対する評価は、十分な実績を残し、そして今後の展開も大いに期待されると判断している。</p>					
テーマ2	1. 大変良い	2. 良い	3. 普通	4. 不十分	5. 非常に不十分
<p>研究対象として、ハード、ソフトの両面で必ずしも容易な内容であるが、この5年間での研究展開により、研究は大きく前進したと思われる。この分野、実社会での各種応用でも注目されており、その発展が期待される。ただ、現時点では実用化等へはまだ課題も多く、各構成員そしてグループ全体として今後の一層の活躍に期待したい。</p>					