

[012]九州大学産学連携センター年報 : 12

<https://doi.org/10.15017/15512>

出版情報 : 九州大学産学連携センター年報. 12, 2006-09-25. 九州大学産学連携センター
バージョン :
権利関係 :



5. プロジェクト部門事業

5.1 プロジェクト部門の目標

本センターには平成11年度からプロジェクト部門が新設された。この部門は、九州大学の中に大きな研究シーズがあり、また九州地域あるいは西日本地域の企業に多くのニーズがある先端科学技術領域として、1) 先端機能デバイス、2) 先端機能材料、3) 環境・新エネルギー、4) 電離気体・レーザー、の4つを重点領域として定めた点に特長がある。

九州地域からの新産業技術のシーズ創出を大学主導で行う場合、九州地域で充実ニーズの高い産業分野において、プロジェクト研究を推進することが不可欠となる。そのために、プロジェクト部門客員教授にプロジェクトの企画・推進に対して企業側からの適切なニーズに関する助言を行う役割を果たして頂き、学内の部局間・企業間を横断的に連携した大学主導の先端プロジェクト研究を強力に推進することが必要となる。また、プロジェクト推進には大学院の学生はもとより国内外の優秀な博士研究員を積極的に招いてプロジェクト研究に投入する。従って、本プロジェクト部門は

●先端的プロジェクト研究による高度な産業技術シーズの創出

を目標に掲げて、以下の3つの項目を実施する。

- 1) 産学官の研究者等からなる研究チームの結成
- 2) 先端研究領域における国内外博士研究員の招聘
- 3) 横断型プロジェクトの企画と推進

更に、リエゾン部門及びデザイン総合部門との協力により、

●産学官交流による地域社会等への貢献

を達成できるように活動を展開している。具体的には以下の3つの項目を実施する。

- 1) 民間企業等との共同研究・受託研究等の推進
- 2) 産学官交流の場の提供と技術シーズの発掘
- 3) 産業ニーズの発掘と産学官連携共同研究プロジェクトのコーディネートと推進

5.2 プロジェクト部門の活動状況

5.2.1 先端機能デバイス領域（中島 寛教授）

① 目的

本領域においては、産学連携プロジェクトチームを組織することにより、次世代半導体産業の要求に応える基板材料、薄膜材料、新規プロセス技術、新機能デバイスに関する研究を行うとともに、高度情報社会の実現に貢献できる先端的、独創的な半導体関連のプロジェクト研究を企画・推進することを目的としている。センターにはクリーンルームが設置されており、半導体研究を実施する環境は整っている。

② プロジェクト研究(概要については後述)

- (a) 高速・省電力LSI用高機能Siウェーハの研究開発
- (b) 省電力LSI用高誘電率ゲート絶縁膜のプロセス開発
- (c) 重金属ゲッターリングによる単結晶太陽電池の高効率化

③ 外部資金導入実績(平成17年度)

<プロジェクト>

- ・文部科学省 科学技術振興調整費

プログラム名：産学官共同研究の効果的な推進

研究課題名：「次世代LSI用高機能Siウェーハの研究開発」

研究代表者：宮尾 正信

研究組織：(株) SUMCO、九州大学大学院システム情報科学研究院、九州大学産学連携センター、九州大学大学院総合理工学研究院、九州工業大学マイクロ化総合技術センター

研究期間：平成16～17年度

- ・経済産業省・地域新生コンソーシアム研究開発事業

研究課題名：「省電力LSI用高機能Siウェーハの研究開発」

研究代表者：中島 寛

研究組織：(株) SUMCO、三菱セミコンエンジニアリング(株)、九州大学産学連携センター、九州大学大学院総合理工学研究院、九州大学大学院システム情報科学研究院、九州工業大学マイクロ化総合技術センター、
(財)福岡県産業・科学技術振興財団

研究期間：平成16～17年度

<科学研究費>

- ・基盤研究(B)(2)(課題番号:16360156)

研究代表者：中島 寛

課題名：「省電力LSI用高誘電率ゲート絶縁膜の自己整合プロセス開発」

研究期間：平成16～17年度

<民間との共同研究>

- 研究題目：「シリコン中の格子欠陥評価と制御」
民間機関：イーエヌジー（株）電子材料研究所
- 研究題目：「マイクロ波用MOS移動度向上」
民間機関：（株）東芝セミコンダクター社との組織対応型

<奨学寄付金>

- 受 入 数：1件（平成17年度）

④ 研究業績（平成17年度）

(a) 論文発表等：計9件

- 原 著 論 文：5件
- 著書、総説：0件
- 国際会議プロシーディング等：4件
- そ の 他：0件

(b) 学 会 発 表：10件

- 国内学会：6件
- 国際学会：4件

(c) 特 許 等：

- 国内特許出願数：0件
- 公開特許公報：0件

(d) 論文リスト（平成17年度発表の10件以内）

- Evaluation of Interface States Density and Minority Carrier Generation Lifetime for Strained Si/SiGe Wafers Using Transient Capacitance Method
D. Wang, M. Ninomiya, M. Nakamae, and H. Nakashima
Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 44, No. 4B, pp. 2390-2394 (2005)
- Structural and electrical properties of Zr oxide film for high-k gate dielectrics by using electron cyclotron resonance plasma sputtering
J. Wang, L. Zhao, N. H. Luu, D. Wang, and H. Nakashima
Appl. Phys. A (Materials Science & Processing) Vol. 80, No. 8, pp. 1781-1787 (2005)
- Structural and Electrical Evaluation for Strained Si/SiGe on Insulator
D. Wang, S. Ii, K. Ikeda, H. Nakashima, M. Ninomiya, M. Nakamae and H. Nakashima
4th Int. Conf. Silicon Epitaxy and Heterostructures, Extended Abstract, pp. 78-79 (2005)
- Fe Gettering for High-Efficiency Solar Cell Fabrication
T. Terakawa, D. Wang, and H. Nakashima
Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 6A, pp. 4060-4061 (2005)
- Low-Temperature Fabrication of Polycrystalline Si Thin Film Using Al-Induced Crystallization without Native Al Oxide at Amorphous Si/Al Interface
Y. Sugimoto, N. Takata, T. Hirota, K. Ikeda, F. Yoshida, H. Nakashima,

and H. Nakashima

Jpn.J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 7A, pp. 4770-4775 (2005)

- Electrical characterization of thin SOI wafers using lateral-MOS transient capacitance measurements

D. Wang, A. Ueda, H. Takada and H. Nakashima

The 23rd International Conference on Defects in Semiconductors, Abstract p. 281 (2005)

- Fe gettering by p⁺ layer in bifacial Si solar cell fabrication

T. Terakawa, D. Wang and H. Nakashima

The 23rd International Conference on Defects in Semiconductors, Abstract p. 368 (2005)

- Photoluminescence Characterization of Strained Si-SiGe-on-Insulator wafers

D. Wang, K. Matsumoto, M. Nakanae and H. Nakashima

Extended Abstracts of the 2005 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 576-577 (2005)

- Photoluminescence characterization of strained Si-SiGe-on-insulator wafers with different Ge fractions

D. Wang, K. Matsumoto, M. Nakanae and H. Nakashima

Appl. Phys. Lett. Vol. 87, No. 25, pp. 251928-3 (2005)

⑤ 学会活動等実績（平成17年度）

- 応用物理学会九州支部理事
- 応用物理編集委員
- 科学技術振興事業団研究成果活用プラザ・技術評価委員会 委員長
- 九州地域産学半導体イノベーション研究会 委員
- 独立法人物質・材料研究機構：研究開発課題「電子・光極微応答の解明と半導体機能の発現に関する研究」評価委員

⑥ 研究員等受け入れ実績（平成17年度）

- 氏名（国籍）：王 冬（中国）
受入れ身分：学術研究員
研究テーマ：「歪Si-SG0Iウェーハの欠陥評価と制御」
受入れ期間：平成17年4月～平成18年3月
- 氏名（国籍）：井 誠一郎（日本）
受入れ身分：客員研究員
研究テーマ：「歪Si-SG0Iウェーハの構造解析」
受入れ期間：平成17年4月～平成18年3月

⑦ 代表的プロジェクト研究内容

(a) 「次世代LSI用高機能Siウェーハの研究開発」

研究体制：（株）SUMCO、九州大学システム情報科学研究院、KASTEC先端機能デバイス領域、九州大学総合理工学研究院、九州工業大学マイクロ化総合技術センター

研究経過：このプロジェクト（研究代表者：宮尾 正信）では、平成15年度に終了した歪SiOIウェーハプロジェクト（研究代表者：中島 寛）で構築した技術基盤をさらに発展させ、超高速回路向けに特化した超薄型の高機能ウェーハ開発を行うことを目的としている。

この中で、当該グループでは、超高速LSI用の高機能ウェーハの電氣的欠陥を検出する手法として、高感度電氣的検出法、高感度光学的検出法、高分解能電子顕微鏡観測法を確立し、SUMCO社が試作したウェーハの欠陥評価を行うと共に、本プロジェクト参画グループと共同して欠陥低減プロセスの確立を行った。得られた成果は以下のとおりである。

- (1) SUMCO社が初期に試作した歪Si-SiGeOIウェーハに対して、PL評価とTEM観察を実施した。PL評価から、Ge濃度15%ウェーハには欠陥起因の信号は観測されないが、27%ウェーハには欠陥起因のブロードな信号が観測された。この信号はSiGe形成時に発生した転位と同定した。TEM観察から、歪Si/SiGe界面近傍に原子配列に乱れはなく、歪SiはSiGe層に対して良好な整合性を保ってエピタキシャル成長しているが、歪Si層には特徴的なU字型の欠陥（貫通転位）が存在すること、を明らかにした。
- (2) 酸化濃縮法における昇温過程で生成する欠陥をPL法、光顕観察、TEM観察により詳細に調査した。欠陥発生にはGe濃度とSiGe層の厚さが強く関与していること、欠陥発生は、SiGe/SOI界面に界面転位がまず発生し、その後の熱処理で界面転位が部分転位に分解し、積層欠陥が形成されること、を示した。これらの知見から酸化濃縮過程で生成する貫通転位の発生機構を示し、その知見をSUMCO社に提示した。
- (3) SUMCO社が最適化して試作した酸化濃縮ウェーハを本研究で確立した手法を駆使して評価した。PL評価から、Ge濃度20%の場合、1200℃酸化濃縮ウェーハには欠陥が存在するが、1250℃ウェーハでは欠陥が存在しないこと、DLTS評価から、1250℃濃縮ウェーハには電氣的欠陥信号はまったく観測されず欠陥密度は 10^6cm^{-2} 以下であること、を示した。また、PLマッピングから、ウェーハの品質は周辺部を除いて均一であることを示した。以上より、試作された歪Si-SiGeOIウェーハがLSI基板ウェーハとして十分に使用可能な水準にあると結論した。

(b) 省電力LSI用高機能Siウェーハの開発

研究体制：（株）SUMCO、三菱セミコンエンジニアリング（株）、KASTEC先端機能デバイス領域、九州大学システム情報科学研究所、九州大学大学院総合理工学研究所、九州工業大学マイクロ化総合技術センター、（財）福岡県産業・科学技術振興財団

研究経過：本プロジェクトでは、65nmノード（2007年）以降の省電力LSI用の高機能Siウェーハ開発を目的とし、超平坦なヘテロ界面を有するSiGe/SiO₂（SGOI）構造を形成する技術を開発した。これにより、歪Si-SGOI基板の界面欠陥を低減化する基本技術を確認すると共にウェーハの量産試作に適用し、省電力LSIに適した漏れ電流の少ない歪Si/SiGe/SiO₂/Si構造からなる高機能Siウェーハを実現した。

この中で、当該グループでは、電子線観察手法と過渡容量分光法を基本技術として、歪Si-SG0Iウェーハの省電力性を阻害する構造欠陥と界面欠陥を評価する技術の確立を目的とした。得られた成果は以下の通りである。

- (1) Cross-section HREM観察でヘテロ界面構造を観察した結果、SiGe層のGe濃度に
関係なく、いずれの界面も原子レベルで平坦であることを示した。一方、
Plan-view観察で薄膜面内を広範囲に観察して転位の存在を明確に示し、その密
度を系統的に評価した。また、転位の形態を考慮し、光学顕微鏡観察の結果と比
較検討することで、低転位密度のウェーハ中に存在する転位の定量的評価が可能
となることを明らかにした。
- (2) SiGe/BOXの界面欠陥を電氣的に評価する手法を確立した。SiGe/BOX界面は
Ge濃度の増加で界面準位密度が増加し、これはSiGe/SiO₂の物性に起因すること
を示した。また、界面準位のウェーハマッピングを行い、1200、1250℃で酸化濃
縮した歪Si-SG0Iウェーハ（Ge濃度15、20%）のいずれも良い均一性を示した。更
に、SiGe層中の電氣的欠陥検出を行い、いずれのウェーハにおいても、欠陥密度
は10⁶ cm⁻²以下の高品質性を有することを示した。

(c) 「省電力LSI用高誘電率ゲート絶縁膜のプロセス開発」

研究体制：KASTEC先端機能デバイス領域、九州大学総合理工学研究院

研究経過：平成16年度に採択された日本学術振興会（JSPS） 科学研究費補助金 基盤
研究（B） 基盤研究「省電力LSI用高誘電率ゲート絶縁膜の自己整合プロセス開発」（
研究代表者：九州大学 中島 寛、研究期間：2年間）を最終年度として実施した。
本研究では、電子サイクロトロン共鳴（ECR）プラズマを活用したSiの低温酸化・窒
化、Hf 金属膜のスパッタ堆積、金属膜の表面酸化、およびその後の酸素制御熱処理
により、SiO₂膜換算で1.0nm以下のゲート絶縁膜形成に関する技術基盤を確立するこ
とを目的とした。目標は、同一膜厚のSiO₂膜と比較して4桁以上のリーク電流低減、
Si酸化膜と同程度の界面特性の実現である。また、デバイス試作により電流駆動力で
3倍以上の向上を目指した。本年度得られた成果は以下の通りである。

- (1) Ar/O₂混合プラズマ[最適条件：O₂/Ar=0.1/30 sccm]による1.2 nmのSiO₂膜形成、
スパッタリングによる3nmのHf金属の堆積、酸素プラズマ照射によるHf表面酸化
、を同一真空中で行い、急速熱処理により組成変調条件を広範囲に調べた。その
結果、Hf表面酸化時間8.5分、熱処理条件650℃で30秒間の時、最も低いEOTが得
られた。この時のEOTは1.1nmで、リーク電流は同一膜厚のSiO₂膜と比較して4桁
の低減ができた。また、XPSによる測定から、熱処理によりHfO_xの組成がHfO₂に
変化したこと、SiO₂とHfが反応してSiO₂の膜厚が減少すると共にHfシリケートが
形成される事を示した。
- (2) TaNをMOSFET用ゲート電極に用いることを目的とし、TaN膜をマグネトロン
スパッタリングにより成膜して熱処理によりその最適化を行なった。その結果、
TaNは750℃以下のMOSFET作成プロセスに用いることができるとの知見を得た。ま
た、デバイス作成において不可欠となるTaNの加工として、Hfをマスク材とした
化学処理により5μmサイズの加工プロセスを確立した。

- (3) High- k ゲートMOSFETの試作プロセスを完成させた。メタルゲートにTa₂N₅、ゲート絶縁膜にHf系High- k 膜を用い、Ta₂N₅/ High- k /Si-MOSFETを作成して性能検証を行なった。

(d) 「重金属ゲッターリングによる単結晶太陽電池の高効率化」

研究体制：KASTEC 先端機能デバイス領域、日立製作所

研究経過：両面受光太陽電池は両面からの受光で発電する太陽電池で、高い総合変換効率が期待できることから高効率太陽電池として注目され、その研究・開発が行われてきた。日立製作所では、この両面受光太陽電池セル製造およびその産業応用を目的として、セル製造法ならびに太陽光集光方式を検討して発電効率を大幅に向上できる量産プロセスでの製造技術、および両面受光太陽電池の利点が生かせる垂直設置方式に関して開発を行っている。しかしながら、製造には素子活性領域（p領域）がFe汚染され、少数キャリアライフタイムが1桁以上低下する問題を抱えていた。本領域では、Feを活性領域から除去することを目的として、鉄のゲッターリングに関する研究を平成15年度より開始し、本年度で完了した。本年度得られた成果は以下の通りである。

- (1) バルクSi中のFeを効率良く表面近傍にゲッターリングさせるための最適な熱処理温度は600℃であり、この処理により、Feが極めて薄い表面層に析出してFe-Si化合物を形成し、ゲッターリングサイトとして働くことを示した。
- (2) 上記のFeの挙動は、Fe汚染水準によってその挙動が大きく異なることを示した。Fe濃度が $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 以下の場合（低水準）、その濃度が低いために、両表面層にFeの析出層が形成されないが、Fe濃度が $1 \sim 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ の場合（中水準）、表面析出が生じてゲッターリングが起こる。表面層でゲッターリングが起こるためのFe濃度に臨界値 $N_{\text{Fe}}^{\text{crit}}$ があることを示し、これらを基に、Si中のFeゲッターリングモデルを構築した。
- (3) 高濃度B拡散層によるSi中のFeゲッターリング挙動の調査を行った結果、低水準から中水準のFe汚染に対して、高濃度B拡散層はFeゲッターリングサイトとして有効に機能すること、ゲッターリングされたFeはB拡散層の薄い外表面層に析出されていること、を明らかにした。これらの結果を基に、高濃度B拡散層によるゲッターリングモデルを構築した。

⑧今後の研究計画

- ① 日本学術振興会（JSPS）外国人特別研究員「精密欠陥制御による高品質SiGe仮想基板の形成」（研究代表者：九州大学 中島 寛、受入れ研究者 王 冬、H18～19年度）および科学研究補助金 特別研究員奨励費に採択され、これらの制度により引き続き歪Si-SiGeウェーハの欠陥評価の研究を継続して実施する。
- ② 歪Siに関する新たな展開として、デバイスへの局所歪印加技術に関する調査研究を実施する。
- ③ 日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金 基盤研究（B）「省電力LSI用高誘電率ゲート絶縁膜の薄膜スケーリング手法の構築」（研究代表者：九州大学 中島

寛、H18～19年度）において、極薄高誘電率絶縁膜形成プロセスの確立に向けた研究を実施する。

- ④ 平成16年度より推進している東芝セミコン社との共同研究「マイクロ波用MOS移動度向上」は、次年度も引き続き実施する。
- ⑤ 平成18年度より（株）東芝研究開発センターとの共同研究「高誘電率ゲート絶縁膜/Siチャネル層の欠陥評価」を開始予定である。
- ⑥ 平成18年度より（株）半導体理工学研究センターとの共同研究「高品質Ge結晶薄膜技術に関するテーマ検討」を開始予定である。

5.2.2 先端機能材料領域（桑野範之教授）

① 目的

合金、セラミックス、半導体材料などの機能特性の発現と効率向上には微構造制御が共通のキーテクノロジーである。本領域においては、主に光・電子・磁性に関わる次世代機能材料を対象として研究を行う。具体的には、透過型電子顕微鏡（TEM）、走査型電子顕微鏡（SEM）、およびそれらに付随した解析技法（EDS, CBED, EELS, EBSDなど）を駆使して、結晶の成長過程、微細組織形成機構、欠陥発生原因を明らかにする。それらの結果を材料設計や製造プロセスにフィードバックさせることにより、新規機能材料の開発を図る。また、TEMおよびSEM解析技術の改善にも力を入れるとともに、デバイス開発・研究の現場における解析技術の浸透およびステップアップを図る活動を推進する。

② プロジェクト研究（概要については後述）

- (a) III-V族半導体薄膜結晶の成長機構と欠陥構造の制御
- (b) 相変化を利用した機能性材料の組織制御
- (c) 異相界面を有する機能材料
- (d) 電子材料・エネルギー機能材料
- (e) 微構造の定量的解析法の確立とナノテクへの応用

③ 外部資金導入実績（平成17年度）

<科学研究費>

- ・基盤研究(B)(2)（課題番号：17360012）

研究代表者：桑野範之

課 題 名：「第3元素の占有個所を特定する結晶ナノ構造解析と機能特性発現の解明」

研 究 期 間：平成17～19年度

<民間との共同研究>

- ・研究題目：「化合物半導体結晶の転位挙動」
民間機関：住友電気工業（株）
- ・研究題目：「異種材料接合界面の研究」
民間機関：三菱マテリアル（株）

<奨学寄付金>

- ・受 入 数：2件（平成17年度）

④ 研究業績（平成17年度）

- (a) 論文発表等：計16件
 - ・原著論文：7件
 - ・著書、総説：6件
 - ・国際会議プロシーディング等：2件
 - ・その他：1件

(b) 学 会 発 表 : 計46件

- 国 内 学 会 : 35件
- 国 際 学 会 : 11件

(c) 特 許 等 :

- 国内特許出願数 : 0件

(d) 論文リスト (平成17年度発表の10件以内)

- Effects of heat treatments on microstructure formation in MgB₂/YSZ/Hastelloy film
S. Hata, H. Sosiati, N. Kuwano, Y. Tomokiyo, A. Matsumoto, M. Fukutomi, H. Kitaguchi, K. Komori and H. Kumakura
IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, p.3238-3241 (2005).
- Long-period ordering in a TiAl single crystal with a gradient composition
S. Hata, K. Shiraishi, M. Itakura, N. Kuwano, T. Nakano and Y. Umakoshi
Philosophical Magazine Letters, Vol. 85, 175-185 (2005).
- Room-temperature epitaxial growth of ferromagnetic Fe₃Si films on Si(111) by facing target direct-current sputtering,
T. Yoshitake, D. Nakagauchi, T. Ogawa, M. Itakura, N. Kuwano, Y. Tomokiyo, T. Kajiwarra and K. Nagayama,
Appl. Phys. Lett., Vol. 86, 262505 (2005).
- Relationship between microstructure and J_c property in MgB₂/a-Al₂O₃ film fabricated by in situ electron beam evaporation
H. Sosiati, S. Hata, N. Kuwano, Y. Tomokiyo, H. Kitaguchi, T. Doi, H. Yamamoto, A. Matsumoto, K. Saitoh and H. Kumakura
Superconductor Science and Technology, Vol. 18, p1275-1279 (2005).
- Ordering Process and Formation of Anti-Phase Boundary in Long-Period Superstructures of Al-Rich TiAl Single Crystals
T. Nakano, Y. Nagasawa, Y. Umakoshi, S. Hata, N. Kuwano, M. Itakura, Y. Tomokiyo
Solid→Solid Phase Transformations in Inorganic Materials 2005, Eds. James, M. Howe, David E. Laughlin, Jong K. Lee, Ulrich Dahmen, William Soffa, TMS, Warrendale, PA (2005), p231-236.
- Dependence of ordering process in Ni-based 1 1/2 0 alloy on alloying elements
S. Hata, M. Inoue, N. Kuwano and Y. Tomokiyo
Complex Inorganic Solids –Structural, Stability, and Magnetic Properties of Alloys–
Edited by Patrice E. A. Turchi, Antonios Gonis, Krishna Rajan, and Annemarie Meike
Springer Science+Business Media, Inc., New York (2005), p159-174.

- InN polarity determination by convergent-beam electron diffraction
T. Mitate, S. Mizuno, H. Takahata, R. Kakegawa, T. Matsuoka and N. Kuwano
Appl. Phys. Lett., Vol. 86, 134103-1-3 (2005).
- アンチサーファクタント処理を施したGa_N薄膜の貫通転位
肱黒恵美, 桑野範之, 武内道一, 青柳克信
まてりあ, Vol 44, p983 (2005).
- Microstructures of MgB₂/Fe tapes fabricated by an in situ powder-in-tube method using MgH₂ as a precursor powder
S. Hata, T. Yoshidome, H. Sosiati, Y. Tomokiyo, N. Kuwano, A. Matsumoto, H. Kitaguchi and H. Kumakura
Superconductor Science and Technology, Vol. 19, p161-168 (2006).
- 化合物半導体の欠陥組織観察
桑野範之
材料開発のための顕微鏡法と応用写真集, 日本金属学会, (2006), p. 82-87.

⑤ 学会活動等実績（平成17年度）

- 日本金属学会評議員
- 日本金属学会九州支部理事
- 日本金属学会九州支部材料科学談話会世話人
- 日本顕微鏡学会理事
- 日本顕微鏡学会研究分科会（デバイス解析）代表世話人
- 第50回日本顕微鏡学会シンポジウム実行委員長
- 応用物理学会欧文誌“JJAP”編集委員
- 2006年窒化物半導体に関する国際ワークショップ“IWNS-2006”実行委員・論文委員
- 第13回有機金属気相成長法に関する国際会議論文委員
- 第16回国際顕微鏡学会（2006）組織委員
- 日本学術振興会第172委員会（合金状態図）委員

⑥ 研究員等受け入れ実績（平成17年度）

- 氏名（国籍）：Harini Sosiati（インドネシア）
受入れ身分：外国人特別研究員（文部科学省ナノテク総合支援プロジェクト）
研究テーマ：「ナノマテリアル開発のための超顕微解析支援」
受入れ期間：平成16年4月～平成17年3月
- 氏名（国籍）：Ram Kishore（インド）
受入れ身分：招聘教授（ベンチャービジネスラボラトリー）
研究テーマ：「ナノ蛍光体結晶の量子化とナノ組織制御」
受入れ期間：平成17年4月～平成18年3月

⑦ 代表的プロジェクト研究内容

(a) 「III-V族半導体薄膜結晶の成長機構と欠陥構造の制御」

- AlNテンプレートを用いて成長させたAlGaIn薄膜の低転位密度化

研究体制：先端機能材料領域、三重大学工学部、名城大学、日本碍子（株）

研究経過：GaNを中心とした青色発光ダイオードに関しては既に実用段階に入っている。それに入れ替わるようにして、研究テーマの中心は短波長域のAlGaInあるいは $1.5\mu\text{m}$ 帯を目指したInN系に移行しつつある。また、新たな問題として、発光ダイオード（LED）やレーザダイオード（LD）などのデバイスを作製するにはn-p接合を形成する必要があるため、AlGaIn混晶のp-型化の技術が不可欠である。ところが、AlGaInではGaNやInGaIn混晶でのMgドーピングによるp-型化技術をそのままでは応用できない。さらに、Mgドーピングに伴う微細構造変化も明らかになっていないなどの解決すべき問題が多く残されている。そこで、まず、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \sim 0.5$)/AlN薄膜試料について、TEMによる詳細な解析を開始した。その結果、AlN内の貫通転位がAlGaIn内に進展する際に、Non-dope試料では転位はそのまま進展するが、Mg-dope試料では界面で一旦傾斜することがわかった。これは、界面上での内部応力とAlGaIn層の成長モード変調、および結晶の軟化などに起因するものと思われる。これらの成果は、AlGaIn結晶薄膜の成長条件を最適化するためにフィードバックされる重要な情報となる。

- 正方ドットマスクによる低転位密度化

研究体制：先端機能材料領域、九州大学大学院総合理工学研究院、古河機械金属（株）

研究経過：低転位密度GaN薄膜を成長させる方法として、多くはストライプ状マスクを用いた横方向エピ成長法が広く用いられている。ところが、ストライプ・マスクに替えて正形状のドット状マスクを用いると、転位密度を2桁以上減少させることができることがわかった。これまでの我々の研究により、ドットマスクは転位自体を留めるのではなく、むしろ新たな島状GaN結晶を高密度に発生する働きをすることが判明した。すなわち、ドットマスクは新たなGaN結晶の核発生箇所を与え、GaN結晶成長モードに変調を与える働きをするのである。これは、GaN成長中にSiによるアンチサーファクタント処理による転位消滅機構と共通するものである。さらに、正方マスクの形状が貫通転位の形状・挙動に与える影響についても解析した。この結果はドットマスク法における工法の最適化にフィードバックした。

- 第3元素の占有個所を特定する結晶ナノ構造解析と機能特性発現の解明

研究体制：先端機能材料領域、九州大学応用力学研究所

研究経過：AlN-GaN-InN窒化物系はウルツ鉱構造をなし、エネルギーギャップの値がそれぞれ約6.2-3.4-0.72eVである直接遷移型の半導体である。これらは前組成域で固溶体をなすので、光通信の赤外領域から紫外線領域の広い波長範囲をすべてカバーしており、発光デバイス、受光デバイス、光センサーの応用に観点をおくと、この窒化物系ですべての応用をまかなうことも夢ではない。しかしながら、現在ではGaNを中心とする組成以外では実用の域には達していない。それには多くの原因が

あるが、第一にはやはり、良質の薄膜結晶が未だに得られないこと、p-型化による組織の悪化である。とくにInNでは、この結晶の基本的な物性値であるエネルギーギャップの値すら詳細に解明されていない。一時は1.9eVという値がしめされたが、最近では0.6~0.7eVと信じられている。この数値の不一致は、薄膜成長時に混入した酸素が原因であるという説が有力ではあるが、反論も多く出されており、解決を見ていない。そこで、本研究では、まず、酸素を数%含有するInN結晶について、その酸素原子が結晶のどこの位置にあるかをALCHEMI法により解析することを目的とする。その結果は、結晶成長プロセスの解明、エネルギーギャップ値の変化の解明に繋げていく。初年度ではまず、ALCHEMI解析に耐えうる良質のTEM試料作製法の確立を目指した。その結果、FIB-microsampling _ Ar-milling _ plasma-cleaningを併用する技法を確立することができた。

(b) 「相変化を利用した機能性材料の組織制御」

- Si-Ge薄膜層のNiによる横方向結晶化 (MILC) 機構

研究体制：先端機能材料領域、九州大学大学院総合理工学研究院、九州大学大学院システム情報工学研究院

研究経過：SiO₂/Si上に堆積させたa-SiGeは約600℃以上に加熱すると結晶化するが、安価なガラス基板を使用するためには、この結晶化温度をさらに下げることが求められている。これに対して、a-SiGe上に金属AlやNiを堆積させると、そこから低温でも急速に結晶化することが知られている。しかしながら、その結晶化機構については、結晶化組織・プロセスが堆積させる金属種、a-SiGeの膜厚、結晶化温度、SiGe組成によって大きく変化し、統一的に説明されていない。そこでまず、NiによるSiGeの結晶化機構について断面TEM解析をおこなった。その結果、Niの直下では、NiGe金属間化合物がSiGe膜の下辺に生成し、上辺近傍にはa-Siが残留していることが判明した。Ni片の端にはNiSiなどの化合物の形成がみられ、そこからはSiGeの多結晶粒が連続して形成し、結晶化が進行している。a-SiGeの結晶化は非晶質状態から結晶状態への遷移のためのエネルギーバリアが大きいことが結晶化温度が高くなっている原因であり、このバリアをどのように回避させるかが結晶化の目標である。Niによるa-Siの結晶化はNiSi₂が媒介とする結晶化学的な効果によるとされているが、SiGeではかなりその様相をこととしている。これまでの解析結果は、結晶化前線での歪場が大きな寄与を果していることを示唆している。a-SiGe、結晶化したSiGe(c-SiGe)およびNi金属間化合物相中のNiの拡散、各相の熱力学的安定性（自由エネルギー）、などを考慮に入れ、結晶化機構の解明を図る。

(c) 「異相界面を有する機能材料」

- 「化合物半導体結晶の転位挙動」、「異種材料接合界面の研究」

研究体制：先端機能材料領域、住友電気工業（株）、三菱マテリアル（株）

研究経過：本研究はそれぞれ、住友電気工業（株）、三菱マテリアル（株）との共同研究として行われたもので、窒化物結晶材料を取り扱ったものである。いずれの機能性材料も単独の結晶材として用いられることはほとんどなく、いずれも異種結晶

材との組み合わせにより始めて機能性を発現する。その異種材料同士の接合界面は単独の結晶材には無い新たな環境であり、そこには特異な電子状態や欠陥の発生なども見られ、組織制御の観点からきわめて重要である。本年度はおもに、転位周り歪場の測定手法の改善および異種材料接合における亀裂発生機構、および転位集中部分の微細構造について詳細な研究を行った。

(d) 「電子材料・エネルギー機能材料」

- ・「すずメッキ上に発生するウィスカー」

研究体制：先端機能材料領域、九州大学 熊本大学工学部、(社)電子情報技術産業協会

研究経過：ヨーロッパが世界に先駆けて民生品からの鉛使用廃絶をめざしており、これに対応するために電子機器では鉛フリーのハンダおよびメッキへの置き換えが急ピッチで進められている。ハンダに関しては大方、Sn-Agをベースにしたものが大勢を占める様相であるが、メッキについてはまだ混沌としており、すずメッキではウィスカー発生などの問題を解決できずにいる。本研究では、すずメッキでのウィスカー発生機構の解明を目指した研究を進めている。すずメッキのウィスカーには、その発生状況により、①内部圧力型、②外部圧力型、③外部環境型、などに分けられ、その形状についても①ノジュール型、②ニードル型、③ヘア型などに分類される。これらはウィスカーの発生原因が単一でないことのあらわれである。しかしながら、その発生原因・発生機構と上記分類がかならずしも対応していない。これまで企業を中心に多くの研究がなされてきたが未だに解決をみない。それは、複雑な発生原因を正しく区別しての発生機構の解明がなされていなかったことに起因する。また、すず材料は、(1) きわめて柔らかい、(2) 再結晶温度が極めて低い、(3) 特定の元素の拡散がきわめて速い、などの特徴のため、試料調整および計測がきわめて難しく、解析には高度な技術が必要であること、企業内での研究に終始し、多くの研究結果について相互の検証が十分でなかったことに起因する。そこで、(社)電子情報技術産業協会内に『錫ウィスカ抑制技術研究委員会』(座長：菅沼大阪大学教授)を組織し、100社以上の企業といくつかの大学(大阪大学、東北大学、熊本大学、九州大学、東海大学、横浜国立大学)とが協力しながら解決にあたる事とした。

(e) 「微構造の定量的解析法の確立とナノテクへの応用」

- ・ナノマテリアル開発のための超顕微解析支援

研究体制：先端機能材料領域、九州大学超高压電子顕微鏡室、九州大学大学院総合理工学研究院

研究経過：本研究は、文部科学省ナノテクノロジー支援プロジェクト「ナノマテリアル開発のための超顕微解析支援」超高压透過型電子顕微鏡を活用した解析支援(平成14～18年度)の一環として行っている。本プロジェクトは、九州大学超高压電子顕微鏡室および関連する施設とが、企業および他大学の研究者・技術者に対して透過型電子顕微鏡を主とする実験設備の利用、実験実施の協力、実験技術および解析技術の援助を行うことにより、研究開発の発展を促進するとともにデバイス解析技術の向上に資するものである。本領域では、産学連携センターに設置されている「集束イオンビーム装置(FIB)

（日立製作所（株）：FB-2000K）」にマイクロサンプリング機器を装着し、これまでは透過型電子顕微鏡用サンプルの作製が極めて困難であった試料についても詳細な微構造解析を可能とした結果、多くの材料・テーマについて問題解決に寄与した。また、平成18年度より本格的に開始する「超電顕フォーラム」による技術研修会に対しても、九州大学超高压電子顕微鏡室とともに貢献した。

⑧今後の研究計画

（a）III-V族半導体薄膜結晶の成長機構と欠陥構造の制御

AlGaIn薄膜の良質化については、AlNテンプレートの改善により貫通転位密度の低減を試みる。これまでの研究成果により、テンプレート表面の清浄化がキーポイントになることが示唆されるので、成長前にエッチング状態を保持する条件を検討する。

また、GaIn-InN材料ではとくに酸素の影響が大きいと予測されるので、酸素原子位置と酸素拡散機構の解明を図る。さらに、酸素位置の安定性を探るために、第一原理計算による解析を開始する。

（b）相変化を利用した機能性材料の組織制御

Ti-Alの規則化に伴う微細構造形成、a-SiGe系の金属誘起横方向結晶化機構、希土類磁石材料の組織最適化などの研究を推し進める。

（c）異相界面を有する機能材料

引き続いて、共同研究を進める。異相界面構造では、亀裂発生と伝播のメカニズムをあきらかにする。これは、亀裂伝播を抑制できる組織形成を目指す。

（d）電子材料・エネルギー機能材料

引き続き、すずメッキでのウィスカーに関する研究を行う。とくに、（社）電子情報技術産業協会内に組織された『錫ウィスカ抑制技術研究委員会』（座長：菅沼大阪大学教授）の大学側メンバーとして活動し、各メンバーと協力して、新規プロジェクトの形成を図る。

（e）微構造の定量的解析法の確立とナノテクへの応用

文部科学省ナノテクノロジー総合支援プロジェクト「超高压透過型電子顕微鏡を活用した解析支援」を引き続き進行させる。とくに、FIBによる試料作製において、Gaビームによる影響、メッシュ材料の影響の回避手法が重要なテーマとなる。

九州大学超高压電子顕微鏡室にはオメガ型の電子分光器が装着された1.3MV超高压電子顕微鏡が設置された。これに伴い、実使用に資するための基礎データの収集、観察条件の最適化を図る。また、超高压電顕用イメージングプレートおよびCCDカメラの調整、テレプレゼンスへの対応、広い試料室を活用した試料ホルダーの開発、など、次世代超高压電子顕微鏡技術の構築を図る。これらのテーマについては、超高压電子顕微鏡室専門委員会に特別WGを設置する。また、全国の超高压電子顕微鏡を設置した施設・部署が協力しあうための組織の『超高压電顕ステーション』の活動にコミットするとともに、次期ナノテク総合支援プロジェクトを目指した組織づくりに参画する。

5.2.3 環境・新エネルギー領域（三浦則雄教授）

① 目的

本領域においては、産学連携プロジェクトチームを組織することにより、「環境・エネルギー産業」に関する技術シーズの創出、およびそれに基づく新産業創生を行うことを目的としている。具体的には、環境保全、環境計測、環境浄化、さらに新エネルギー開発、省エネルギー技術などに関連した高性能で実用性の高い最先端デバイス、装置、プロセスの設計・開発、および従来になかった新規な機能性材料の探索・創製といった「エナコロジー社会」の実現に貢献できる先端的、創造的プロジェクト研究を企画、推進している。

② プロジェクト研究(概要については後述)

- (a) 自動車触媒の性能監視用排ガスセンサの開発
- (b) 異種接合ナノ界面の特異ガス認識機能を用いた高性能センシングデバイスの構築
- (c) ナノ構造物質を電極材料として用いた高性能電気化学キャパシタの開発
- (d) 爆薬類の超高感度検出用 SPR 免疫センサの開発

③ 外部資金導入実績(平成 17 年度)

<プロジェクト>

- 文部科学省 科学技術振興調整費
プログラム名：産学官共同研究の効果的な推進
研究課題名：「自動車触媒の性能監視用排ガスセンサの開発」
研究代表者：三浦則雄
研究組織：九州大学、(株)リケン
研究期間：平成 15 ～ 17 年度
- 科学技術振興機構
研究領域：エネルギーの高度利用に向けたナノ構造材料・システムの創製
研究課題名：「ナノ構造単位材料から構成される電力貯蔵デバイスの構築」
研究代表者：山木準一(九州大学)
研究組織：九州大学(先導研、産学連携センター)、山口大
研究期間：平成 14 ～ 19 年度
- 科学技術振興機構
研究領域：先進的統合センシング技術
研究課題名：「セキュリティ用途向け超高感度匂いセンサシステムの開発」
研究代表者：都甲 潔(九州大学)
研究組織：九州大学(システム情報科学研究院、産学連携センター、農学研究院)、北九州市立大、企業 3 社
研究期間：平成 17 ～ 21 年度

<科学研究費>

- 特定領域研究(2)(課題番号：16079208)

研究代表者：三浦則雄

課 題 名：「異種接合ナノ界面の特異ガス認識機能を用いた高性能センシングデバイスの構築」

研 究 期 間：平成16～20年度

- ・特別研究員奨励費（課題番号：17・05403）

研究代表者：三浦則雄

課 題 名：「低分子化合物の高感度検出用コンパクト表面プラズモン共鳴免疫センサの開発」

研 究 期 間：平成17～19年度

<受託研究>

- ・委 託 者：独立行政法人国立環境研究所

研 究 題 目：「固体素子型ガスセンサの研究」

<民間との共同研究>

- ・研 究 題 目：「省電力型ガスセンサ素子の研究」

民 間 機 関：北陸電気工業（株）

- ・研 究 題 目：「自動車触媒の性能監視用排ガスセンサの開発」

民 間 機 関：（株）リケン

<奨学寄付金>

- ・受 入 数：6件（平成17年度）

④ 研究業績（平成17年度）

(a) 論文発表等：計31件

- ・原 著 論 文：20件
- ・著書、総説：1件
- ・国際会議プロシーディング等：7件
- ・そ の 他：3件

(b) 学 会 発 表：計48件

- ・国内学会：26件
- ・国際学会：22件

(c) 特 許 等：

- ・国内特許出願数：3件
- ・公開特許公報：4件
- ・特 許 登 録：2件
- ・米国特許登録：1件

(d) 論文リスト（平成17年度発表の10件以内）

- ・NO_x Sensing Characteristics of Mixed-Potential-Type Zirconia Sensor Using NiO Sensing Electrode at High Temperatures
N. Miura, J. Wang, M. Nakatou, P. Elumalai, M. Hasei
Electrochemical and Solid-State Letters, 8, pp.H9-H11 (2005).
- ・Surface Plasmon Resonance Immunosensor for Highly Sensitive Detection of 2,4,6-Trinitrotoluene

- D. R. Shankaran, K. V. Gobi, T. Sakai, K. Matsumoto, K. Toko, N. Miura
Biosensors and Bioelectronics, 20, pp.1750-1756 (2005).
- A Novel Surface Plasmon Resonance Immunosensor for 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) Based on Indirect Competitive Immunoreaction: A Promising Approach for On-Site Landmine Detection
D. R. Shankaran, K. V. Gobi, T. Sakai, K. Matsumoto, T. Imato, K. Toko, N. Miura
IEEE Sensors Journal, 5, pp.616-621 (2005).
 - Sensing Characteristics of YSZ-Based Mixed-Potential-Type Planar NO_x Sensors Using NiO Sensing Electrodes Sintered at Different Temperatures
P. Elumalai, J. Wang, S. Zhuiykov, D. Terada, M. Hasei, N. Miura
J. Electrochem. Soc., 152, pp.H95-H101 (2005).
 - Large-area Network of Polyaniline Nanowires Prepared by Potentiostatic Deposition Process
V. Gupta, N. Miura
Electrochemistry Communications, 7, pp.995-999 (2005).
 - Detection of Combustible Hydrogen-Containing Gases by Using Impedancemetric Zirconia-Based Water-Vapor Sensor
M. Nakatou, N. Miura
Solid State Ionics, 176, pp.2511-2515 (2005).
 - Highly Sensitive Regenerable Immunosensor for Label-Free Detection of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid at ppb Levels by Using Surface Plasmon Resonance Imaging
K. V. Gobi, H. Tanaka, Y. Shoyama, N. Miura
Sensors and Actuators B, 111-112, pp.562-571 (2005).
 - Performances of Planar NO₂ Sensor Using Stabilized Zirconia And NiO Sensing Electrode at High Temperature
P. Elumalai, N. Miura
Solid State Ionics, 176, pp.2517-2522 (2005).
 - Electrochemically Deposited Polyaniline Nanowire's Network a High-Performance Electrode Material for Redox Supercapacitor
V. Gupta, N. Miura
Electrochemical and Solid-State Letters, 8, pp.A630-A632, (2005).
 - Solid-State Electrochemical Gas Sensors for Emission Control
S. Zhuiykov, N. Miura
Materials for Energy Conversion Devices, Woodhead Publishing, Cambridge, Chapter 12, pp.303-335, (2005).

⑤ 学会活動等実績（平成17年度）

- 電気化学会化学センサ研究会役員（庶務幹事、事務局）
- 化学センサ国際会議（IMCS）国際運営委員会委員
- 東アジア化学センサ会議（EACCS）国際運営委員会委員

- 電気化学会九州支部幹事常議員
- 固体イオニクス学会役員
- 第32回固体イオニクス討論会代表世話人
- 電気化学会化学センサ研究会「Chemical Sensors」誌発行人
- 国際学術専門誌“IONICS”，Coeditor
- 電気化学会第72回大会実行委員会委員

⑥ 研究員等受入れ実績（平成17年度）

- 氏名（国籍）：Kauveri GOBI（インド）
受入れ身分：学術研究員（ポスドク）
研究テーマ：「超高感度光学式バイオセンサに関する研究」
受入れ期間：平成17年5月～平成18年3月
- 氏名（国籍）：Dhesingh RAVI Shankaran（インド）
受入れ身分：VBL非常勤研究員（ポスドク）
研究テーマ：「爆薬類検出用高感度バイオセンサの研究」
受入れ期間：平成17年4月～平成17年11月
- 氏名（国籍）：Dhesingh RAVI Shankaran（インド）
受入れ身分：日本学術振興会外国人特別研究員
研究テーマ：「低分子化合物の高感度検出用コンパクト表面プラズモン共鳴免疫センサの開発」
受入れ期間：平成17年11月～平成18年3月
- 氏名（国籍）：ELUMALAI Perumal（インド）
受入れ身分：学術研究員（ポスドク）
研究テーマ：「自動車触媒の性能監視用排ガスセンサの開発」
受入れ期間：平成17年4月～平成18年3月
- 氏名（国籍）：寺田 大将（日本）
受入れ身分：学術研究員（ポスドク）
研究テーマ：「自動車触媒の性能監視用排ガスセンサの開発」
受入れ期間：平成17年4月～平成18年2月
- 氏名（国籍）：Jian WANG（中国）
受入れ身分：学術研究員
研究テーマ：「自動車触媒の性能監視用排ガスセンサの開発」
受入れ期間：平成17年4月～平成18年3月
- 氏名（国籍）：竹林 優（日本）
受入れ身分：共同研究員
研究テーマ：「省電力型ガスセンサ素子の研究」
受入れ期間：平成17年4月～平成18年3月
- 氏名（国籍）：Lizhen FAN（中国）
受入れ身分：訪問研究員（JST博士研究員）
研究テーマ：「高性能電気化学キャパシタ用電極材料の研究」

受入れ期間：平成17年4月～平成17年6月

- 氏名（国籍）：Vinay GUPTA（インド）

受入れ身分：訪問研究員（JST博士研究員）

研究テーマ：「ナノ構造電極材料を用いた高性能電気化学キャパシタの開発」

受入れ期間：平成17年4月～平成18年3月

- 氏名（国籍）：Plachnitsa VLADIMIR（ロシア）

受入れ身分：学術研究員（ポスドク）

研究テーマ：「異種接合ナノ界面の特異ガス認識機能を用いた高性能センシングデバイスの構築」

受入れ期間：平成17年4月～平成18年3月

- 氏名（国籍）：Serge ZHUIYKOV（オーストラリア）

受入れ身分：訪問教授

研究テーマ：「排ガス監視用ガスセンサの研究」

受入れ期間：平成17年10月～平成17年11月

- 氏名（国籍）：Sunita KUMBHAT（インド）

受入れ身分：日本学術振興会来日研究者

研究テーマ：「病気進行初期マーカー検出用バイオセンサの開発」

受入れ期間：平成17年10月～平成17年12月

- 氏名（国籍）：川口 俊一（日本）

受入れ身分：学術研究員（ポスドク）

研究テーマ：「セキュリティ用途向け超高感度匂いセンサシステムの開発」

受入れ期間：平成18年2月～平成18年3月

⑦ 代表的プロジェクト研究内容

(a) 「自動車触媒の性能監視用排ガスセンサの開発」

研究体制：KASTEC環境・新エネルギー領域、（株）リケン

研究経過：平成15年度に採択された文部科学省科学技術振興調整費、プログラム名（産学官共同研究の効果的な推進）の「自動車触媒の性能監視用排ガスセンサの開発」プロジェクト（研究代表者：九州大学 三浦則雄、開発期間：3年間）を最終年度として実施した。

自動車用排ガス除去触媒を適正に作動させて、排ガス浄化率と燃費を改善するためには、触媒の前後に10ppm程度のNO_x濃度の検知ができる高性能排ガスセンサが必要である。本プロジェクトでは、大学におけるセンサ工学の専門的研究者と先端的センサ開発技術を有する企業とが、これまでの共同研究をベースにして、より緊密な共同研究体制を構築することにより、実用化にかなり近い段階にある独創的な自動車触媒性能監視用排ガスセンサについての基礎的事項の検討と開発研究を連携して行うことにより、この排ガスセンサの早期実用化を目指している。

最終年度は以下に示すような成果を得た。

(1) センサ電極材料の検討・評価：センサ応答特性のさらなる改善のために、高温での検知特性に優れていることを見出した酸化ニッケルに、ロジウムや酸化タンゲス

テンなどの第二成分を添加して検知極を作製したところ、センサのガス感度が大幅に向上することがわかった。また、第二成分添加によってこのような感度改善効果が現れる理由を明確にした。(2) センサ特性発現、劣化機構の解明：新規電極材料の設計や長期安定性確立のために、特性発現・劣化機構の解明を、検知極の微細構造の観察、ガス脱着状態の測定、電極反応及び気相触媒活性の評価といった基礎的な面から検討した。特に、検知極層の厚さを変化させて気相触媒活性を制御することにより、ガス感度が大きく改善できることがわかった。(3) 新規検知法による特性改善法の検討：新規な複素インピーダンス検出法について、電極材料の最適化やガス応答特性の評価を行った結果、酸化亜鉛に微量白金を添加した検知極を用いることにより、自動車排ガス中に存在する水蒸気や二酸化炭素が共存しても、炭化水素のひとつであるプロペンを高感度、高選択的でしかも迅速に検出できることを見出した。

(b)「異種接合ナノ界面の特異ガス認識機能を用いた高性能センシングデバイスの構築」

研究体制：KASTEC 環境・新エネルギー領域

研究経過：平成 16 年度に採択された文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 (2) (計画研究) (研究代表者：九州大学 三浦則雄、研究期間：5 年間) を、第 2 年度として実施した。本特定領域研究の全体のプロジェクト名は「高温ナノイオニクスを基盤とするヘテロ界面制御フロンティア」(総括研究代表者：東京大学 山口周教授) である。

酸化物系イオン導電体 / 酸化物半導体などの異種接合界面を形成すれば、種々のガス種に対して複素インピーダンスや混成電位などを検出することにより、特異的な応答が達成でき、センサ特性の飛躍的な改善や作動条件の大幅な拡大ができる可能性がある。本研究では、検知極材料の特性評価・制御を行うことにより、特異ガス検知機能の発現メカニズムを明確にし、これまでにない優れた特異検知機能を発揮する高度ガスセンシングデバイスを設計・構築することを目的として研究を進め、本年度は以下のような成果を得た。

(1) ヘテロ接合界面形成のための構成材料の選択・探索：検知極のベース材料としては、NiO を用いてナノ粒子を合成し、さらに特性を向上する目的で、BaO, La₂O₃, CuO を微量添加して検討した。その結果、CuO を 10wt.% 添加することにより、大幅にセンサ特性が向上することを見出した。(2) ヘテロ界面の観察・分析・評価：共沈法で調製した NiO 粉末は、一次粒子径が 120nm のナノ粒子が得られた。最も特性の良かった CuO を添加した NiO 粒子の平均粒子径も約 100nm で、やや多孔質であった。添加した CuO は均一に分散されていることがわかった。(3) ヘテロ界面を有するセンシングデバイスの特性評価：NiO 単独では市販品や本合成品も感度は小さいが、CuO を添加した場合には、湿潤雰囲気下でも 35mV の感度を 800℃ で示すことがわかった。また、測定した 50 ～ 400ppm の範囲で、起電力は NO₂ 濃度の対数と良好な直線関係を示した。さらに、本素子は高い NO₂ 選択性を示すこともわかった。(4) ヘテロ接合界面の特異機能発現機構の解明：CuO 添加によりなぜ感度が改善したのかを説明するために、素子の複素インピーダンスプロットと分極曲線を測定した。その結果、特に酸素の関与する電気化学反応に対する触媒活性が、CuO の

添加により大幅に低下することにより、感度が向上していることが明確になった。

(c) 「ナノ構造物質を電極材料として用いた高性能電気化学キャパシタの開発」

研究体制：KASTEC環境・新エネルギー領域、先導物質化学研究所先端素子材料部門、先導物質化学研究所融合材料部門、山口大学工学部応用化学科

研究経過：平成14年度から開始している科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業（CREST）、研究領域「エネルギーの高度利用に向けたナノ構造材料・システムの創製」の「ナノ構造単位材料から構成される電力貯蔵デバイスの構築」（研究代表者：九州大学先導物質化学研究所 山木準一教授、研究期間：5年間）なるプロジェクトのグループリーダとして推進している。

電気化学キャパシタは、電力、自動車業界などを筆頭にさまざまな分野において、環境に優しい有望なエネルギー変換・貯蔵デバイスとして注目されている。最近、レドックスキャパシタ用電極材料として、酸化物や導電性高分子などが検討されている。ただし、その重量あたりの比容量はまだ十分ではなく、実用化にはさらなる高容量化が望まれる。本研究では、電極材料として、遷移金属酸化物、カーボンナノチューブ、導電性高分子などを取り上げた。これらのナノ構造物よりなる電極薄膜を主に電析法により作製し、それらのキャパシタ特性について検討を加え、本年度は以下のような成果を得た。

(1) 安価な遷移金属酸化物のうち酸化マンガンについて、従来報告のある定電位電析法と定電流電析法、および独自の高速電位走査電析法により得られた各薄膜電極の比容量を測定した。その結果、400mV/sというかなり高い電位走査速度で電析した場合において、約400 F/gもの高比容量が得られた（従来のこの系の最高値は約250F/g）。電析時における走査速度が400mV/sより低くても高くても比容量は低下した。また、定電流電析法および定電位電析法においては、最適条件下で電極を作製した場合でも、高速電位走査電析法の場合に得られた容量よりもかなり低かった。

(2) 導電性高分子の一種であるポリアニリンをカーボンナノチューブ上に電析させた複合材料を作製し、キャパシタ特性について検討を加えた。カーボンナノチューブについては、マルチウォールタイプ（MWCNT）とシングルウォールタイプ（SWCNT）を用いた。カーボンナノチューブ単独やポリアニリン単独を電極材料として用いた場合の比容量はあまり大きくなかったが、導電性のより高いSWCNT上にポリアニリンを73wt%の割合で電析した場合には、440F/g（従来のこの系の最高値は310F/g）という高い比容量を得ることができた。

(d) 「爆薬類の超高感度検出用SPR免疫センサの開発」

研究体制：KASTEC環境・新エネルギー領域、システム情報科学研究院、大学院農学研究院、北九州市立大学、インテリジェントセンサーテクノロジー（株）ほか

研究経過：平成17年度から開始した科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業（CREST）、研究領域「先進的統合センシング技術」の「セキュリティ用途向け超高感度匂いセンサシステムの開発」（研究代表者：九州大学大学院システム情報科学研究院 都甲潔教授、研究期間：5年間）なるプロジェクトのグループリーダと

して推進し、初年度は以下のような成果を得た。

本研究では、抗原抗体反応を応用した間接競合法を用いて分子認識の感度を増幅させ、SPR センサで目的分子を選択的に検出することを目指した。そのために、タンパク質複合体抗原（コンジュゲート）の選定、固定化時の充填率の向上、および配向性の最適設計を行い、検出感度の向上を行った。また、送液時の流速やトータルの抗体流通時間などのパラメータを変化させることにより、検出下限 ppt レベルの感度を保ちつつ、短時間での検出が可能な方法を検討した。まず、TNP-OVA コンジュゲートと種々の抗体を組み合わせた時の TNT の検出範囲を検討したところ、検出限界はそれぞれの抗体によって異なることが分かった。特に TNT モノクローナル抗体（市販）と抗 TNP-KLH ポリクローナル抗体との組み合わせにより、ppt レベルの検出が可能であった。また、TNP モノクローナル抗体（市販）を使うことによって、ppb から ppm レベルの比較的高濃度な TNT も検出することができた。したがって、同一の固定化素子を用いて混合する抗体を変えるだけで、広い濃度範囲で TNT を検出できることが分かった。さらに、TNT 測定後にペプシン - 塩酸溶液を用いることで、TNT 抗体を脱離させ、素子を再活性化させることができた。このため同一のセンサ素子を 20 回以上、感度を落とすことなく使用することが可能であった。さらに、TNT の検出を ppt レベルの感度を保ちつつ、2 分以内で行うことができた。

⑧今後の研究計画

- ① 「自動車触媒の性能監視用排ガスセンサの開発」については科学技術振興調整費のプロジェクトとしては終了したが、平成 18 年度も（株）リケンとの共同研究として継続することにより、高性能排ガスセンサの早期実用化を目指す。
- ② 科学研究費（特定領域研究）「異種接合ナノ界面の特異ガス認識機能を用いた高性能センシングデバイスの構築」については、平成 18 年度以降も、特異的ガス認識機能を効果的に発現させるために、種々の検知方式のセンサ素子の検知極材料のさらなる探索や修飾を検討する。さらに、特異機能発現の因子の一つになっていると考えられる検知極材料の触媒特性の評価を行うことにより、特異ガス検知機能の発現機構を明確にし、これまでにない優れた特異性能を発揮する高性能ガスセンシングデバイスの設計・構築を目指す。
- ③ 科学技術振興機構の「ナノ構造単位材料から構成される電力貯蔵デバイスの構築」に関するプロジェクト（CREST）については、平成 18 年度以降も引き続いて電気化学スーパーキャパシタ用の高性能電極材料について、特に新規酸化物系や導電性ポリマー系のナノ構造材料の開発やキャパシタ特性の評価を進める予定である。
- ④ 科学技術振興機構の「セキュリティ用途向け超高感度匂いセンサシステムの開発」に関する産学連携プロジェクト（CREST）については、平成 18 年度以降も引き続いて爆薬類の ppt レベルの超高感度、高選択的検出が可能な光学式（SPR）免疫センサについて、さらなる高感度化、応答の高速化、素子の安定化を目指して、抗原や抗体との組み合わせや抗原の素子表面への固定化法などについて検討を進める予定である。
- ⑤ 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の平成 18 年度大学発事業創出実用

化研究開発事業として「食品の異臭検知バイオセンサの開発」プロジェクト(研究開発代表者:九州大学大学院農学研究院 松本清教授)が採択された。当領域は、食品の異臭物質を間接競合法により10pptレベルの超高感度で検出することを目指して、研究を進める予定である。

- ⑥ 平成15年度より開始している国立環境研究所からの受託研究である「固体素子型ガスセンサの研究」については、安定化ジルコニア固体電解質を用いた起電力検出方式のセンサ素子により、ppbレベルの低濃度のNO_xの検知が可能な環境計測用高感度ガスセンサの開発を進めてきた。平成18年度は、新規な複素インピーダンス応答方式のセンサにより低濃度の炭化水素ガスの検出を目指して、検知極材料の探索、応答メカニズムの検討などを行う予定である。
- ⑦ 平成13年度より推進している北陸電気工業(株)との共同研究である「省電力型ガスセンサ素子の研究」では、省電力型高性能マイクロガスセンサの実用化を目指している。平成18年度も引き続き実用素子開発のための基礎研究を行う予定である。

5.2.4 電離気体・レーザー領域（間瀬 淳教授）

① 目的

プラズマの物理と工学的応用、ミリ波デバイスおよびシステムの研究とその応用に関連した研究・教育を行う。特に、民間企業や他大学、および国立研究所などの公的研究機関との共同研究を含めたプロジェクト研究を推進していくことを目的としている。

② プロジェクト研究（内容については後述）

- (a) マイクロ波・ミリ波デバイスおよびシステムの開発と産業応用
- (b) 磁場核融合プラズマ、特に核燃焼プラズマのための先進的計測法の開発

③ 外部資金導入実績

<プロジェクト>

- 核融合科学研究所

プログラム名：一般共同研究

課 題 名：「LHDへの超短パルス反射計の適用」

研究代表者：間瀬 淳

組 織：九州大学、東京大学、筑波大学、核融合科学研究所

研 究 期 間：平成16年度～

プログラム名：双方向計画共同研究

課 題 名：「プラズマの可視化技術の開発と電位閉じ込め機構の研究」

研究代表者：間瀬 淳

組 織：九州大学、筑波大学、東北大学、核融合科学研究所

研 究 期 間：平成16年度～

- 日本学術振興会

プログラム名：日米科学技術協力事業（核融合分野）

課 題 名：「先端的ミリ波プラズマ診断法の開発」

研究代表者：間瀬 淳

組 織：九州大学、東北大学、東京大学、筑波大学、核融合科学研究所、カリフォルニア大学デービス校、プリンストン大学

研 究 期 間：平成11年度～

プログラム名：テキサトル共同研究

課 題 名：「マイクロ波画像計測」

研究代表者：間瀬 淳

組 織：九州大学、FOM プラズマ物理研究所（オランダ）、ユーリッヒ総合研究機構（ドイツ）

研 究 期 間：平成13年度～

<科学研究費>

- 特定領域研究（2）（課題番号16082205）

研究代表者：間瀬 淳

課 題 名：「核燃焼プラズマのための先進的ミリ波診断法の開発」

研 究 期 間：平成16～19年度

- 萌芽研究 (A) (課題番号17656134)

研究代表者：間瀬 淳

課 題 名：「超短パルスレーダの開発研究」

研 究 期 間：平成17～18年度

<受託研究>

- 委 託 者：財団法人九州産業技術センター

研 究 題 目：「マイクロ波アクティブセンサを用いた非侵襲生体計測装置の開発」

- そ の 他：1件

<民間との共同研究>

- 研 究 題 目：「高性能非破壊検査装置の開発」

民 間 機 関：三重津田電器産業 (株)

- 研 究 題 目：「マイクロ波を用いた効率的な乾燥技術に関する研究」

民 間 機 関：九州電力 (株) 総合研究所

<奨学寄付金>

- 受 入 数：1件 (平成17年度)

④ 研究業績 (平成17年度)

(a) 論文発表等：計16件

- 原 著 論 文：7件
- 著書、総説：3件
- 国際会議プロシーディング等：6件

(b) 学 会 発 表：計33件

- 国 内 学 会：19件
- 国 際 学 会：14件

(c) 論文リスト (平成17年度発表の10件以内)

- Microwave Reflectometry of Turbulence Spectrum in Tokamak Plasmas

L. Bruskin and A. Mase

Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 44, No. 5A, pp. 3260–3267 (2005).

- マイクロ波イメージング

長山好夫、間瀬 淳

J. Plasma Fusion Res. Vol. 81, No. 5, pp. 337–348 (2005).

- Numerical Study of the Location of the Microwave Imaging Reflectometry Object Plane

M. Ignatenko, A. Mase, L. Bruskin, Y. Kogi, and H. Hojo

J. Plasma Fusion Res. Vol. 81, No. 6, pp. 419–420 (2005).

- Application of a Stratified Plasma Model to Microwave Reflectometry of Density Fluctuations

L. G. Bruskin, A. Mase, G. D. Conway, A. Silva, M. E. Manso, L.

Fattorini, J. Santos, F. Serra, and ASDEX Upgrade Team

Plasma Phys. Control. Fusion Vol. 47, pp. 1379-1400 (2005).

- Method of Electron Density Measurement by Fabry-Perot Interferometry

H. Hojo and A. Mase

Proc. Joint 30th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 13th Int. Conf. on Terahertz

Electronics, Williamsburg (2005) pp. 26-27.

北條仁士、間瀬 淳

- Development of New Detector for Millimeter-Wave Imaging

Proc. Joint 30th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 13th Int. Conf. on Terahertz

Y. Kogi, A. Mase, K. Kudo, M. Ignatenko, N. Ito, T. Tokuzawa, Y. Nagayama, K. Kawahata, M. Aoi, E. Sakata

Electronics, Williamsburg (2005) pp. 604-605.

- Progress in Potential Formation and Findings in the Associated Radially Sheared Electric-Field Effects on Suppressing Intermittent Turbulent Vortex-Like Fluctuations and Reducing Transverse Losses

T. Cho et al.,

Nucl. Fusion Vol. 45, No. 11, pp. 1650-1657 (2005).

- 揺動計測によるゾーナルフロー研究

間瀬 淳

J. Plasma Fusion Res. Vol. 81, No. 12, pp. 978-982 (2005).

- Development of Broadband Ultrashort-Pulse Reflectometer for Inductively Coupled Plasma

Y. Kogi, A. Mase, T. Yasuda, K. Kudo, L. Bruskin, and M. Ignatenko

Thin Solid Films Vol. 506-507, pp. 464-468 (2006).

- プラズマ計測の基礎と応用

間瀬 淳 他

コロナ社 (2006).

⑤ 学会活動等実績（平成17年度）

- 地域新生コンソーシアム研究開発事業研究推進委員会アドバイザー
- 教科書「プラズマ診断の基礎と応用」責任編集

⑥ 研究員等受け入れ実績（平成17年度）

- 氏名（国籍）：Neville C. Luhmann, Jr.（アメリカ合衆国）

受入れ身分：訪問教授

研究テーマ：「先端的ミリ波計測システムに関する国際研究拠点形成」大学間協力協定

受入れ期間：平成17年12月

-
- 氏名（国籍）：Tony J. H. Donne（オランダ）
受入れ身分：訪問教授
研究テーマ：「先端的ミリ波計測システムに関する国際研究拠点形成」
受入れ期間：平成17年12月
 - 氏名（国籍）：Kang Wook Kim（韓国）
受入れ身分：訪問研究員
研究テーマ：「マイクロ波・ミリ波技術と応用に関するワークショップ」
受入れ期間：平成17年12月
 - 氏名（国籍）：Tsung-Heng Tsai（台湾）
受入れ身分：訪問研究員
研究テーマ：「マイクロ波・ミリ波技術と応用に関するワークショップ」
受入れ期間：平成17年12月
 - 氏名（国籍）：Chia-Chan Chang（台湾）
受入れ身分：訪問研究員
研究テーマ：「マイクロ波・ミリ波技術と応用に関するワークショップ」
受入れ期間：平成17年12月
 - 氏名（国籍）：Hyeon K. Park（アメリカ合衆国）
受入れ身分：訪問研究員
研究テーマ：「マイクロ波/ミリ波イメージングに関する萌芽的国際共同プロジェクト研究拠点形成」
受入れ期間：平成18年3月
 - 氏名（国籍）：Hong-Young Chang（韓国）
受入れ身分：訪問研究員
研究テーマ：「プラズマ科学と応用に関するワークショップ」
受入れ期間：平成18年3月
 - 氏名（国籍）：Yong-Soek Hwang（韓国）
受入れ身分：訪問研究員
研究テーマ：「プラズマ科学と応用に関するワークショップ」
受入れ期間：平成18年3月
 - 氏名（国籍）：Leonid G. Bruskin（ロシア）
受入れ身分：学術研究員（科学研究費）
研究テーマ：「核燃焼プラズマのための先進的ミリ波診断法の開発」
受入れ期間：平成17年4月～平成17年5月
 - 氏名（国籍）：近木祐一郎（日本）
受入れ身分：学術研究員（科学研究費）
研究テーマ：「核燃焼プラズマのための先進的ミリ波診断法の開発」
受入れ期間：平成17年4月～平成18年3月
-

⑦ 代表的プロジェクト研究内容

(a) マイクロ波・ミリ波計測システムの開発と産業応用

研究体制：九州大学、核融合科学研究所、筑波大学、九州日立マクセル（株）、（株）松島機械研究所、三重津田電器産業（株）、九州電力（株）総合研究所、カリフォルニア大学デービス校

研究経過：当研究室では、マイクロ波が誘電体を透過し誘電率が不連続な面で反射するという特徴を利用し、被測定物体の内部構造を可視化する装置の開発を進めている。これに関連し、平成14-16年度文部科学省科学技術振興調整費「産官学共同研究の効果的な推進」、平成17年度産学連携戦略・次世代産業創出事業等が推進されてきた。本プロジェクト研究の応用分野としては、生体情報計測、車載レーダ、非破壊検査などが考えられる。

(1) マイクロ波アクティブセンサを用いた生体計測装置の開発

本研究は、マイクロ波集積回路技術により設計・製作した能動的な計測システムを用い、生体情報（呼吸、心拍、音声、脳機能など）を非接触かつ遠隔で評価することにより、健康維持、医療診断、および介護の分野で、また、生体反応およびその変化を遠方かつ障害物越しに計測可能とすることにより、テロ防止などのセキュリティ対策や災害救助などの分野で実用化して行くことを目的としている。また、パルス幅ピコ秒のインパルスを入射波として用いたレーダ装置に、準光学結像系を組み合わせたイメージング（撮像）装置を適用することにより、赤外～可視光では観測不可能なものを対象とした画像計測システムとして実用化を図って行くことを目標としている。

本研究の計測システムは、マイクロ波位相レーダおよび超短パルスレーダであり、前者では干渉測定により反射波の位相変化すなわち反射面の空間変化を感度よく測定する。後者では、反射波の飛行時間差は反射面の絶対位置に対応するため、生体反応の時間・空間的な情報をもたらし、計算機を用いた再構成手法により、二・三次元像に変換することができる。平成17年度は主として以下の成果が得られている。

位相レーダシステムは、マイクロ波信号発生器、送受信アンテナ、受信回路、信号処理装置で構成される。媒質の不連続面で反射された信号を干渉法により反射面の変動に起因する位相変化 $\Delta\Phi$ として検出する。通常干渉信号として振幅成分を含んだ $E\cos\Delta\Phi$ が得られるため、直接位相量に比例しないが、クオドラチャー検出を利用することにより $E\cos\Delta\Phi$ および $E\sin\Delta\Phi$ の両者が得られ、計算機処理により、 $\Delta\Phi$ に直接比例する成分と振幅成分を分離検出することができる。微小位相変化を感度良く測定することにより、表皮あるいは筋肉の微細変化を評価することが可能となる。研究では、入力周波数設定やアンテナ形状、時間・周波数解析などシステムおよび信号処理の最適化を進めた。反射波信号の時間変化にフィルタを施し、周波数解析の結果、心拍によるピーク（1.3 Hz）および呼吸によるピーク（0.3 Hz）を得ることができた。

本研究で用いた装置は、空間分解約 $50\mu\text{m}$ をもつ極めて高感度なシステムである。また $1\mu\text{mW}$ 以下の微弱な電力で測定が可能であった（総務省電波防護指針では、照射点での電力密度が $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下であれば健康被害は無いと報告されている）。心臓動態や呼吸による変位を骨格の上から、かつ障害物を隔てて計測することが可能で

あるとともに、長時間のモニタリングにも適用することができる。

超短パルスレーダは、位相レーダのマイクロ波信号発生器として、パルス幅ピコ秒の超短パルスを出力するインパルス発生器を用いるものである。超短パルス出力は導波管によりチャープ化され、送信アンテナから被測定対象に照射される。反射波信号は、マイクロ波増幅されたのち高速検波器で自乗検波され再度パルス化される。その後コンスタント・フラクシオン・ディスクリミネータと時間電圧変換器を組み合わせたシステムで飛行時間に比例した電圧に変換される。超短パルスレーダで得られた信号と、同時に測定した心電計マイクロ波測定システムは、被測定対象にプローブ光を入射するためのマイクロ波発振器、伝送回路、及び送信アンテナと、反射波信号を受信するための受信アンテナ、検出器、及び信号処理装置信号の周波数スペクトルを比較し、両者に良い一致が得られた。

アレイセンサと準光学結像系を用いたイメージング方式のためには、効率の良い平面アンテナの開発が不可欠で、アレイアンテナのマスクパターンを形成し、九州日立マクセル株式会社が保有する微細加工技術（Electro Fine Forming: EF2）により製作する。試作された回路およびアンテナは、高周波プローブシステム、アンテナ測定システム、電波暗室、ベクトル・ネットワークアナライザなどを用いて性能評価することにより、改良を進めて行く。本計測装置からは、微小かつ時間的に揺らぎのある信号、さらにアレイセンサからの多チャンネル信号が得られるが、データ解析法の最適化が計測システムとしての有用性を左右することになる。

(2) ミリ波非破壊検査システムへの適用

異物検査システムとしてはX線、超音波、金属探知機、さらにはSQUIDセンサを用いた装置が良く知られているが、主として金属異物を対象とする点やコストなどの点で課題がある。このような問題点を解決するために、周波数50 - 140GHzのミリ波帯電磁波を用いた検査システムを開発することが有用と考えられる。ミリ波は周波数領域の選択により媒質による伝搬速度の影響を受けず、金属から誘電体まで幅広い媒質を対象として適用することができる。本研究では、ミリ波帯電磁波を用いて物体からの透過波および散乱波を検出し解析する非接触・非破壊検査システムを構築し、特に食品中の異物検出を想定し、金属異物だけでなくガラスなどの誘電体異物も検出するシステムを構築することを目指した。

被測定物としてグラニュー糖内に挿入した1-10mmの金属および誘電体異物を用いて、その検出を試みた。異物判定として、透過波および散乱波信号の対数表示、およびそのスペクトル解析と自己相関関数、標準偏差などの表示を行い、金属および誘電物体（ガラスなど）にたいし 1-3mmでの異物の判別が可能であることを実証した。現在、球体異物以外に針状の異物、虫などの異物の判定とともに、ニューラルネットワーク解析を検討中である。

(b) 磁場核融合プラズマのための先進的計測法の開発

研究体制：九州大学、核融合科学研究所、筑波大学、東京大学、東北大学、日本原子力研究所、カリフォルニア大学デービス校、プリンストン大学、オランダ基礎物理研究所

研究経過：核融合科学研究所一般共同研究、および双方向共同研究を基盤として、ま

た、日本学術振興会日米科学技術協力事業（核融合分野）、およびテキサトル共同研究による研究者相互派遣により、磁場核融合実験における先進的ミリ波診断法の開発研究を国際協力で進めてきた、平成17年度は、科学研究費特定領域研究「プラズマ燃焼のための先進プラズマ計測」の中の計画研究「核燃焼プラズマのための先進的ミリ波診断法の開発」の一環としても本研究課題が進められている。

本年度は以下の成果が得られた。

(1) ミリ波計測システム要素技術の開発と評価

周波数70～76GHzのイメージングアレイの設計・製作を行った。デバイスは、パッチアンテナとアンテナ中心に接着したミキサ、信号増幅のためのHBTアンプから構成され、一枚の基板に組み込まれている。パッチアンテナは、構造が簡単で基板加工装置を用いて製作することができるため、迅速な性能評価と最適化を図ることができる。アンテナ特性を評価した結果、高利得かつ軸対称な受信パターンが実現していることを確認した。今年度は、このパッチアンテナアレイを実機（核融合科学研究所大型ヘリカル装置LHD）の電子サイクロトロン放射（ECE）イメージング実験に適用し、ECE測定に成功している。

ヘテロダイン受信システムの集積化設計・製作とその評価を行った。周波数2-6GHzの中間周波数回路は広帯域アンプ、帯域通過フィルタ、検波器より構成され、マイクロストリップ線路を用いて製作した。電磁界シミュレータによる設計、基板加工装置による加工作業、実測による試験を行い、改良設計および評価を重ねた結果、シミュレーションと良く一致する性能の回路を製作することができた。

九州日立マクセル株式会社が保有する超精密加工（EF2）設備を利用した準光学ノッチフィルタの製作を進めた。種々のパターンおよび金属膜厚さのフィルタを製作し、周波数特性などの評価を行った。周波数140GHzに対しては、金属膜厚さ25mmのフィルタがリジェクション度、角度依存性とも良好な特性を示し、実機実験に適していることを確認した。

(2) ミリ波イメージング装置の開発と実機適用

上記要素技術を組み合わせた電子サイクロトロン放射（ECE）イメージングシステムをJT-60U装置に適用し、予備実験を開始した。システムの強磁場および放射化の影響についての知見が得られることが期待される。

さらに、ECEイメージングシステムをLHD装置に適用し測定を行った結果、電子温度に比例した信号成分を多チャンネルシステムで得ることに成功した。本ECEイメージングはマイクロ波イメージング反射計に併設しており、同時測定が可能という特長を有している。

(3) 超高速ネットワーク（スーパーSINET）を用いたLHD遠隔実験参加システムの確立を進めた。平成16年度は、LHD装置に設置している超短パルス反射計に対して、送受信アンテナ角度遠隔制御システムを新たに設置したが、平成17年度にそのシステムの遠隔装置を確立し、SN比の改良を進めた。ハードウェアを含めた全システム、および信号収集をスーパーSINETにより九州大学から遠隔制御可能として、LHDでのルーチン的な測定を実施した。

(4) マイクロ波イメージング反射計の計算機シミュレーション

測定ポートの制約が少なくアクセスが良いこと、測定の空間分解が良いことから、磁場核融合実験における主要計測法として期待されているマイクロ波反射計を画像計測法として発展させた、イメージング反射計による揺動計測を実現するため、電磁波のプラズマ中の伝搬についての計算機シミュレーションを展開した。

電磁波伝搬の計算はマクスウェル方程式を解くことで行われるが、プラズマ中伝搬の場合、プラズマの形状および特性などを仮定し解析的に解く方法と、計算機シミュレーションによる方法が主体となっている。有限差分時間領域 (Finite Difference Time Domain: FDTD) 法は、実際に近いシステムおよびプラズマ条件に対して適用することが可能であるが、シミュレーションの精度を上げるため、計算のステップを使用波長の10分の1程度にすることが不可欠であり、入射波としてミリ波領域を用い、計算空間が磁場閉じ込め装置のように1-2mに達する場合、三次元シミュレーションでは多大な計算時間が必要となる。本研究では、真空中の解析解および反射点であるカットオフ領域近傍でのFDTD法による数値解析を組み合わせた新しい計算コードにより全体の計算時間を二桁以上短縮することに成功した。

新しく構築したシミュレーションコードを用い、磁場閉じ込め装置の例として、直線型磁場閉じ込め装置を対象としたイメージング反射計の二つの実現条件について検討した。第一は、入射ホーンの光軸からのシフト、検出器アレイ面のシフト、および結像光学系の焦点面のずれなどで表される光軸のアラインメントの問題であり、第二は、レンズなど集光光学系の開口径の問題である。その結果、結像光学系配置の必要条件、プラズマ揺動を再構成するために必要な開口面の大きさなどを明らかにした。プラズマ中の乱流波動に対してイメージング反射計を適用した結果、波動の波数広がり $\Delta \kappa / \kappa < _0.3$ では光軸からずれた検出器もスペクトルを良く反映するのでイメージング反射計として機能するが、 $\Delta \kappa / \kappa < _0.6$ になると中心の検出器だけが揺らぎの情報を反映することが判った。

⑧ 今後の研究計画

①文部科学省科学研究費・特定領域研究「核燃焼プラズマのための先進的ミリ波診断法の開発」(課題番号:16082205、研究代表者:間瀬)が平成19年度まで実施されることになっている。本研究では、マイクロ波・ミリ波計測システムを核燃焼プラズマ計測システムとして改良していくとともに、それぞれにイメージングアレイを組み合わせた画像計測システムを構築し、電子密度、温度、磁場などの多次元分布、およびそれら揺動成分のスペクトル分布の時間発展測定を可能とする。また、計測システムの効率の良いインテグレーションのための研究を進める。例えば、イメージング反射計と電子サイクロトロン放射イメージングの併用による、電子密度・温度揺動の同時測定から、各揺動成分間のクロススペクトルおよびバイスペクトルの導出を実現する。具体的には、

○既存の磁場閉じ込め装置(LHD、JT-60U)を対象とした、反射計およびイメージング装置の稼動を図り、特に核燃焼プラズマを対象としたときの課題を見出していく。

○ミリ波集積回路技術を駆使したシステムの最適化設計・製作を行う。

-
- 揺動信号の可視化のための信号解析ソフトの構築を図る。
 - ミリ波伝搬の計算機シミュレーションを実行し、実験結果との対応を調べる。
 - 日米欧および日韓協力を通じて計測システムの要素技術の改良を進める。
- ② 産学共同研究を通じて「マイクロ波アクティブセンサによる生体計測装置の開発」を継続する。本研究では、生体情報(心拍、呼吸、音声、脳機能等)を非接触かつ遠隔で測定し、本研究開発においてマイクロ波センシングデバイス、および伝送回路の集積化を進めていくことにより、遠隔かつ障害物越しでの生理量や行動量のモニタリングが可能で、コンパクトな生体検知システムとしての製品化を目標としている。
- ③ ミリ波を利用した異物検査システムの研究開発は、三重津田電器産業㈱との共同研究として継続し、応用分野の拡大と製品化を目指した研究を進めていく。
- ④ 九州電力㈱総合研究所との共同研究「マイクロ波を用いた乾燥・殺菌技術とその応用に関する研究」では、水分を多量に含んだ媒質について、その加熱蒸発による乾燥効果、内部加熱による殺菌効果の二点に着目し、これが有効とされている廃棄物処理、汚泥処理等の分野に適用するべく実証実験を行っていく。