

武藏工業大学  
総合研究所 紀要

第3号

平成19年5月  
武藏工業大学・総合研究所

## はじめに

武藏工業大学における重要研究拠点として2004年4月に発足した総合研究所は3年を経過し、研究教育活動が本格化し、多くの研究成果が出始めている。

本総合研究所は、主としてプロジェクト研究を強力かつ効率的に推進し、社会のニーズに迅速に対応するために組織されたものであり、その趣旨に則った運営を心がけている。現在、平成16年度に文部科学省から選定された2つのプロジェクト研究機構、すなわち、学術フロンティアである「エネルギー環境科学研究センター」と、ハイテクリサーチセンターの一つである「シリコンナノ科学研究センター」の2部門が中心となって研究活動を推進している。また、17年度に整備した共同研究の活動拠点としての貸研究室では、現在2つの研究室が活動している。

「エネルギー環境科学研究センター」は、地球環境調和型エネルギーの技術開発、特に地球環境に対する負荷を低減できる燃料電池を主な研究対象として研究活動を行っている。小規模発電装置および自動車用電源を開発することを目標に、世界的な研究実績がある、小型で低温動作可能な高分子電解質膜に関する技術を一段と高め、実用に供せられる高性能燃料電池の作製を目指している。

「シリコンナノ科学研究センター」は、半導体の基幹材料であるシリコンのナノ科学に関する研究を実施している。エレクトロニクスの中心をなす半導体デバイスの一層の性能向上と、新しい機能を有するデバイスを実現するには、シリコンを中心とする半導体材料およびデバイスのナノ科学の研究開発が必須であるとの認識のもと、ナノ領域のシリコン系材料作製と評価、ナノデバイスの開発、デバイス集積回路設計技術の開発などを行っている。

なお、これら2つの研究センターには5年の時限があり、2007年度に終了する。そのため、今後どう発展させるかの議論を開始しており、2007年度中に明確な方向付けを行う予定である。そのため、まず外部評価を実施することとし、シリコンナノ科学研究センターについては、現在その審査結果を取りまとめ中である。評価結果は予想以上に高く、本センターの一層の発展を勧告するものであった。この勧告を踏まえた将来計画の策定が現在進行中である。一方、エネルギー環境科学研究センターの外部評価の準備も進んでおり、まもなく実施される予定である。

また、総合研究所を名実ともに本学の研究拠点とするために、期限付きで研究者を学内から受け入れる制度が、学長の強いイニシアティブで新たに発足し、「重点先行研究」の名のもとに、テーマを募集することが決まり、2007年度中にスタートすることになった。

このように、一昨年に策定した総合研究所のグランドデザインの実現が順調に進んでおり、ほかの研究組織、具体的には「水素エネルギー研究センター」や「機器分析室」との統合も前進しており、2007年度には実現できる予定である。

本書は、この1年間の総合研究所の活動状況をまとめたものであり、本学における研究拠点としての研究および教育活動状況を、主要成果を中心に示すものである。

2007年5月

武藏工業大学・総合研究所

所長 白木 靖寛

## シリコンナノ科学研究センター

シリコンナノ科学研究センターは、文部科学省の特別推進研究や特定領域研究としてこれまで実施してきた、半導体界面の研究および新IV族半導体の研究や、企業との共同研究の実績を踏まえ、半導体の基幹材料であるシリコンのナノ科学に関する研究を実施すべく計画され、ハイテクリサーチセンターとして研究が推進されている。このハイテクリサーチセンター事業は総合研究所創設の1年前にスタートしており、来年2008年3月末にその期限を迎える。

さて、エレクトロニクスの中心をなす半導体デバイス、特にシリコン高集積化回路(VLSI)の加工は、すでにナノメーターの領域に入っているが、今後一層の性能向上を実現し、さらに新しい機能を有するデバイスを開発するには、シリコンを中心とする半導体材料およびデバイスのナノ科学の研究開発が必須である。現在、デバイスの最小加工寸法が50nm以下となるデバイスの研究開発が進められているが、その開発過程は決して平坦ではなく、多くの物理的限界が立ちふさがってきている。これを解決するためには、ナノ科学に立脚した研究開発が鍵となっている。本研究センターは、このシリコンナノ科学に関する実験的理論的研究と教育を行うために整備され、学内はもとより学外にも広く供用される施設である。具体的には、クリーンルームを主体とする約500m<sup>2</sup>の研究室が整備され、電子線描画装置やイオン打込み装置などの加工プロセス装置、分子線エピタキシー装置などの結晶成長装置、高分解X線回折装置や原子間力顕微鏡などの評価装置を備えている。

本研究センターでは、本学の教員はもとより、大学院生を主体とする学生が研究に従事している。また学外との共同研究も活発に行っており、山梨大学、慶應義塾大学、東京大学、東北大学と研究交流を積極的に実施している。また、企業との共同研究も実施中である。

主要な研究テーマは以下に示すとおりであるが、いずれもシリコンナノ科学を基盤にした研究である。

- \* シリコン系ナノ構造の作製と物性評価に関する研究
- \* シリコン系ナノデバイスの開発
- \* シリコン系デバイスの低消費電力化の研究
- \* SiGe系デバイスの超高速化と光配線に関する研究
- \* マルチメディア用LSIの設計技術の開発
- \* 信号処理、センサー応用LSIの設計と開発
- \* ナノ・マイクロマシンの開発

先にも述べたように、来年度末にはハイテクリサーチセンターとしての期限を迎えるため、これまでの研究成果を点検し、本研究センターを今後どのようにするかを考える重要な資料として、著名な研究者に評価委員をお願いし、外部評価を実施することとした。そして、外部評価のための資料の作成、評価委員に対する説明会を実施し、採点をしていただいた。現在その評価結果を取りまとめ中で、近々公表する予定である。

2007年5月

シリコンナノ科学研究センター

センター長 白木 靖寛

## エネルギー環境科学研究センター

生活の質的向上と社会の持続的発展を両立するためには、クリーンなエネルギー源の確保と社会的な活動に伴い生成する環境負荷物質の低減が必須である。エネルギー環境科学研究センターは、このような克服に長期間を要する人類共通の困難な課題に対して、研究者の専門知識と技術を生かし連携を強化して研究を円滑に推進するために設立された。本センターでは、エネルギーと環境に関わる研究課題を取り組むとともに、他大学或いは公的研究機関との共同研究にも取り組んでおり、その密接な連携と協力のもとに研究を進めている。現在は、東北大学、群馬大学、産業技術総合研究所、東京工業大学、桐蔭横浜大学、名古屋大学、岡山大学、大分大学等と共同して研究を進めている。

エネルギーと環境に関わる分野は広範囲にわたるために、取り組むべき課題を絞り込む必要がある。私達はこれまで文部科学省のハイテククリサーチセンター整備事業、科学研究費或いは新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)等より助成を頂き、燃料電池の中でも主として直接メタノール形燃料電池の研究と、環境負荷物質の低減技術に関して多くの成果を挙げてきた。これらの成果と蓄積された技術を生かし一層の研究の深化と応用を図るために、小型燃料電池を中心としたクリーンエネルギー技術に関する研究と、光触媒や放電処理等の環境負荷低減技術に関する研究を重点的に推進している。

クリーンエネルギー技術に関しては、直接メタノール形燃料電池の高性能化に必要な新規電解質膜の開発、電極触媒の特性向上、電池特性の解析、電池システムの最適化及び劣化機構の解明とその抑制法を重点課題として研究を進めており、最終的には独自の材料とシステムにより燃料電池を動作させることを目標として研究を進めている。また、シリコン系太陽電池に比較して安価な色素増感太陽電池の作製と評価についての研究にも取り組んでいる。

環境負荷低減技術に関しては、光触媒による環境負荷物質の分解除去、ミクロ多孔体による吸着特性の解析及び放電分解法による大気汚染物質の分解等を重点課題として研究を進めている。エネルギーと環境に関わる研究分野は密接に関連しており、それぞれの成果を分野の異なる領域で有効に活用することが研究の進展には必須である。そのような観点から、環境負荷低減技術に関わる光触媒の研究成果を、色素増感太陽電池の特性向上に繋げる研究にも取り組んでおり、その成果は着実に挙がりつつある。

平成19年度に5カ年のプロジェクトの最終年度を迎えるにあたり、独自技術により作製した小型燃料電池の提案と実証、さらに独自に開発した光触媒や放電処理による環境負荷低減システムの提案と実証を行うべく、より質の高い成果を出すことができるように鋭意研究を進める。

主要な研究テーマを以下に示す。

- \* 燃料電池用新規電解質及び電極触媒の作製と評価
- \* 電解質・電極及び界面の電気化学的及び物理的な挙動解析
- \* 燃料電池の特性解析・劣化機構の解明及び信頼性・安全性・性能の向上
- \* 色素増感太陽電池の電極及び電解質の作製法の開発と性能評価
- \* 環境負荷物質の低減に有効な高性能光触媒の開発
- \* 大気汚染物質の放電分解法技術の開発
- \* 炭素系材料の特性評価及びエネルギーと環境分野への応用

2007年5月

エネルギー環境科学研究センター

センター長 永井正幸

## 共同研究支援

### インフラテック研究室

#### 近未来社会のインフラテクノロジー

わが国は、物質的に豊かな経済成長を推進してきた中で、歴史、伝統、文化といった精神面は軽視され都市や地域の個性や魅力は失われてきた。これからは、少子高齢化が進む中で、精神的な豊かさ、生活の質的向上、個人の自立やコミュニティの再生を重視する個性的な成熟社会を目指していくべきである。また、当然ながら経済性、利便性、快適性を追求するあまり生態系の破壊や生活環境の悪化を招いた。これからは、環境負荷の少ない循環型社会の実現を目指し、物質面のみでなく精神面でも豊かで人間らしい生活を取り戻し、将来にわたる安全で快適な社会環境の創生が必要である。

このような循環型成熟社会を支えるインフラストラクチャーは、道路、水道といった有形のインフラストラクチャーに、理念、感性、法律、制度、教育といった無形のインフラストラクチャーを伴った、地球規模の自然環境と共生するものでなければならない。それには、インフラストラクチャーを多面的に検討し、戦略的、計画的に整備しなければならない。そのため、それを可能とするインフラテクノロジーの研究・開発が必要である。

#### インフラテクノロジー研究

インフラストラクチャーの整備計画には、社会的必要性、長期的展望、事業継続性、安全性、維持管理計画などに説得力があり、説明責任を果たし、合意形成がなされなければならない。そのためには、各側面で多くの技術を必要とするが、その中で、（1）減災技術および防災投資促進技術と（2）環境負荷低減技術の開発は重要である。前者の技術は、自然災害リスクに対峙して、インセンティブが得られ防災投資を促す技術である。後者の技術は、環境負荷の少ない施設を計画、設計、建設、維持管理および解体する技術と建材リサイクルを可能とする循環技術の開発である。

これは、まさしく本研究室開設の原点であり、大学の戦略的展望に立ってインフラテック研究室を建設部門の研究センターへと発展させることを目指すものである。そのために、環境・防災・金融・人間などの分野を総合したインフラテクノロジーの開発を推進する。

本研究室は、防災投資促進技術と環境負荷低減技術の2つの技術に特化した研究を開始するが、時代の要請に柔軟に対応していく予定である。

2007年5月

インフラテック研究室  
教授 星谷 勝

## 総合研究所構成員

所長 特任教授 白木 靖寛

特任教授 星谷 勝

### シリコンナノ科学研究センター

センター長	白木 靖寛	兼務	(半導体工学)
教授	丸泉 琢也	[工学部]兼務	(半導体工学)
教授	田口 亮	[工学部]兼務	(信号処理)
教授	秋谷 昌宏	[工学部]兼務	(集積回路)
教授	堀田 正生	[工学部]兼務	(集積回路)
教授	宮内 新	[工学部]兼務	(集積回路)
助教授	野平 博司	[工学部]兼務	(電子物性)
助教授	鳥居 肇	[工学部]兼務	(マイクロマシン)
客員教授	服部 健雄	[武藏工大・名誉教授]	(電子物性)
客員教授	中川 清和	[山梨大・教授]	(半導体工学)
助手	マクシム ミロワフ		(半導体工学)
助手	澤野憲太郎		(半導体工学)
研究員	奥井登志子		(半導体工学)
研究員	夏 金松		(半導体工学)
技術員	田口 貞憲	[工学部]兼務	
技術員	大竹 省自		

### エネルギー環境科学研究センター

センター長	教授 永井 正幸	[工学部]兼務	(無機材料化学)
教授	高木 靖雄	[工学部]兼務	(エネルギーシステム)
教授	鳥山 保	[工学部]兼務	(材料分析・計測)
教授	小林 光一	[工学部]兼務	(有機材料化学)
教授	鎌木 裕	[工学部]兼務	(炭素材料化学)
教授	宗像 文男	[工学部]兼務	(固体化学)
教授	吉崎 真司	[環境情報学部]兼務	(環境緑化工学)

助教授	山根 公高	[工学部]兼務	(エネルギー・システム)
助教授	江原 由泰	[工学部]兼務	(電子化学)
助教授	高橋 政志	[工学部]兼務	(有機材料化学)
講師	梅村 和夫	[工学部]兼務	(生物物理学)
助手	高 彦峰		(無機合成化学)
研究員	鈴木 智史		(無機材料化学)
研究員	姜 海青		(無機材料学)
客員研究員	古谷 健司	[セイミケミカル(株)・課長]	(材料プロセッシング)
共同研究者	岡田 達弘	[産業技術総合研究所・主任研究員]	(電気化学)
共同研究者	河本 邦仁	[名古屋大・教授]	(固体材料学・無機反応化学)
共同研究者	小栗 慶之	[東工大・助教授]	(イオンビーム応用工学)
共同研究者	和田 雄二	[岡山大・教授]	(光化学・ナノ機能材料化学)
共同研究者	宮下 徳治	[東北大・教授]	(高分子ナノ材料学)
共同研究者	大谷 朝男	[群馬大・教授]	(材料設計化学)
共同研究者	豊田 昌宏	[大分大・教授]	(無機材料化学)
共同研究者	宮坂 力	[桐蔭横浜大・教授]	(光化学)

### 共同研究支援（貸研究室）

#### インフラテック研究室

特任教授	星谷 勝	(地震防災工学)
共同研究者	山本 欣弥	[攻玉社短期大学・教授] (地震防災工学)

#### 先端映像処理研究室

教授	田口 亮	[工学部]兼務	(信号処理)
----	------	---------	--------

### 事務室

事務員 鈴木栄里子 国際産官学連携室

事務員 徳植 久子 国際産官学連携室

## 目 次

1. 平成18年度 活動報告	1
2. 平成18年度 研究概要	
シリコンナノ科学研究センター	3
シミュレーションによる量子・ナノデバイスの研究	
丸泉 琢也	
画像・映像信号の質改善処理の開発とFPGA実装	
田口 亮	
超薄膜味覚センサの研究	
秋谷 昌宏	
X線光電子分光法による量子・ナノデバイスの研究	
野平 博司	
ナノ・マイクロマシンの製作	
鳥居 肇	
Enhancement of 2DHG conductivity and mobility in Ge QW SiGe heterostructures	
マクシム ミロノフ	
歪みSi/Ge系半導体ヘテロ構造の電気伝導特性と 結晶評価	
澤野憲太郎	
走査型トンネル顕微鏡によるSiGe系ヘテロ構造評価	
奥井登志子	
Toward a silicon-based light source	
夏 金松	
エネルギー環境科学研究センター	15
有機・無機コンポジット電解質膜の作製と キャラクタリゼーション	
永井 正幸	
固体高分子形燃料電池の凍結起動時の発電と 性能劣化特性解明研究	
高木 靖雄	
固体高分子型燃料電池中の硫黄の分析用波長分散型 粒子線誘起X線分析システムの構築	
鳥山 保	
二酸化チタンをベースにした光触媒の開発研究	
小林 光一	
放熱用グラファイトフィルム、キャパシター用 活性炭等に関する検討の進展	
鏑木 裕	

新規エネルギー変換材料の設計に関する研究	宗像 文男
沙漠化修復のための環境監視システムの構築と運用	吉崎 真司
海浜植生による飛砂抑制効果と微地形の変化	吉崎 真司
レシプロ方式水素内燃機関の技術現状と今後	山根 公高
A Development of a High Pressure H <sub>2</sub> Gas Injector With High Response by Using Common-Rail Injection System for Direct Injection H <sub>2</sub> Fuelled Engines	山根 公高
環境負荷低減システムの研究	江原 由泰
Engineering of TiO <sub>2</sub> and ZnO crystallization in solution	高 彦峰
燃料電池用有機無機ハイブリッド電解質膜の開発と 評価	鈴木 智史
The preparation and characterization of different photocatalysts through solution combustion	姜 海青
共同研究支援 インフラテック研究室	31
企業価値向上のための防災投資促進技術に関する共同 研究	星谷 勝
投資効率に着目した上水道システムの地震リスクマネ ジメント	星谷 勝
上水道システムの地震災害に対する広域復旧戦略シミュ レータの開発	山本 欣弥

### 3. 研究論文

シリコンナノ科学研究中心	39
エネルギー環境科学研究中心	117
インフラテック研究室	185

## 総合研究所 平成18年度活動報告

月	日	活動内容
4	13	第23回所内会議
	19	総合研究所説明会(学生対象)
5	11	第24回所内会議
	25	第1回総研セミナー
	31	総合研究所紀要－第2号－発行
6	12	第7回運営委員会
	15	第25回所内会議
	15	高耐力マイクロパイアル研究会総会開催
	22	第2回総研セミナー
7	7	第26回所内会議
8	22	既存棟空調設備改修工事完了
	25	記者説明会 「高効率の発光デバイスの開発に成功」開催
	25	NPO法人シビルサポートネットワーク共催セミナー 「地震災害の財務影響分析」開催
9	7	第27回所内会議
	10	入室管理システム(北側自動ドア)増設工事完了
	21	第3回総研セミナー
10	2, 3	日本学術振興会 薄膜第131委員会開催
	12	第28回所内会議
	26	第4回総研セミナー
11	9	第29回所内会議
	22	防災訓練
	30	「シリコンナノ科学」研究プロジェクト成果報告会 (第5回総研セミナー)
12	7	第30回所内会議
	20	学長裁量費研究成果発表会(第6回総研セミナー)
1	12	第31回所内会議
	25	第7回総研セミナー
2	15	第8回総研セミナー
3	13	学術フロンティアシンポジウム開催
	15	第32回所内会議
	26	第8回運営委員会

# 平成 18 年度 研究概要

シリコンナノ科学研究センター

## 1. はじめに

シリコンナノ科学研究中心では、IV族半導体ヘテロ構造を利用する量子・ナノデバイスの研究開発を進めている。本研究では、材料、プロセス、デバイスの各階層にわたるシミュレーション技術を活用し、これら量子・ナノデバイスの開発を支援、加速する事を目的としている。具体的テーマとしては、第一原理計算によるSTM/STS(Scanning Tunneling Microscopy/Scanning Tunneling Spectroscopy)シミュレーション、高誘電率ゲート絶縁膜の熱安定性解析、シリコン・絶縁膜界面の構造解析など、また、結晶塑性解析によるナノスケールMOSの応力・転位分布解析など多岐にわたる。本報告書では、STM/STSによるSiGe系ヘテロデバイスのポテンシャル評価支援を目指した第一原理STM/STSシミュレーションについて報告する。

## 2. Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>表面のSTM/STSシミュレーション

STM/STS計測は、ナノスケールデバイスのポテンシャル分布や不純物分布の評価が原子分解能で行える手法として、近年、大変注目を集めているが、表面状態やポテンシャル分布の違いによるSTM/STS変化などの解釈、評価においては、第一原理計算を用いたモデル化が重要である。本研究では、第一原理計算プログラムパッケージTAPP(Tokyo Ab-initio Program Package)を用いSTM/STSシミュレーションを行なった。解析に必要となるGe原子のUltrasoft型擬ポテンシャルに関しては、Ge結晶の格子定数(0.5%以内)と体積弾性率(±20%以内)を再現するように本研究で新たに作製、Vegard則との対応を確認し、問題のない事を確認した(図1)。Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>(x=0.3)-c(4x2)表面再構成構造(図2)では、そのバンド構造(図3)から分かる通り、ギャップ中にある表面準位の縮退が解けている事が分かった。

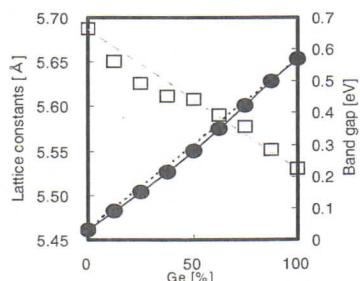


図1 予測格子定数、バンド幅の  
Vegard則(点線)との対応

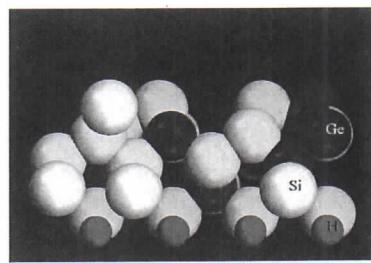


図2 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>(x=0.3)-c(4x2)  
再構成表面モデル

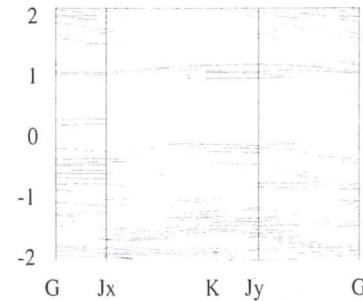


図3 Si<sub>0.7</sub>Ge<sub>0.3</sub>-c(4x2)  
表面のバンド構造

次に、サンプルバイアス電圧+1.0V～-1.0Vの範囲におけるSTM像シミュレーション結果を図4に一括して示す。負バイアス時(b,c,d)には価電子帯トンネルによる表面トポロジーを反映したanti-parallel zigzagパターンが明瞭に見えている。また、正サンプルバイアス時(f,g,h)でも表面局在π\*状態によるanti-parallel zigzagパターンが見えている。Si(100)-c(4x2)でも同様な振る舞いが観測されているが、詳細に調べてみると、-0.3Vと0.2Vのサンプルバイアス範囲で、Ge原子とSi原子との像の見え方に大きな違いがあり、SiとGeを弁別可能であると期待できる結果を得た。この違いについては、Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>で表面準位の縮退が解けた事とトンネルに寄与する状態数が減った事によると考えている。

## 3. 今後の研究計画

実デバイス解析を可能とするデバイス・STM/STS連成シミュレーション技術の研究を進める。

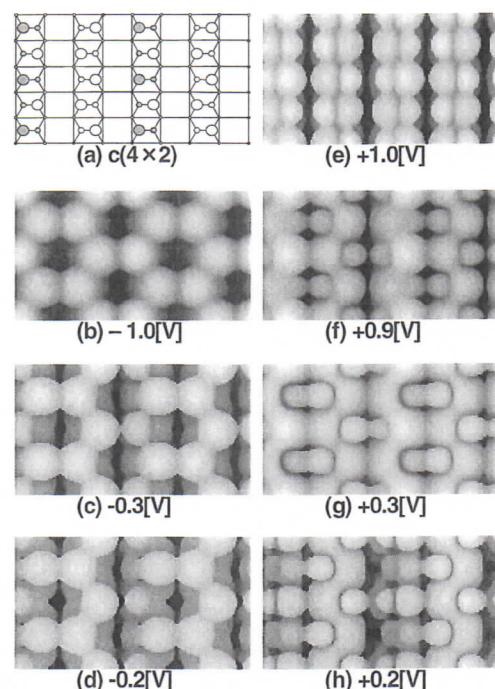


図4 Si<sub>0.7</sub>Ge<sub>0.3</sub>-c(4x2)表面の  
STMシミュレーション像

# 画像・映像信号の質改善処理の開発と FPGA 実装

工学部・電気電子情報工学科 田口 亮

従来のアナログ TV から地上ディジタル TV への切り替えが迫り、また、映画・ドラマ・コンサート等が録画された DVD の市販状況は相変わらずの活気を呈している。地上ディジタル TV 放送映像、DVD 録画映像とともに、MPEG 標準符号化方式によって符号化されている。すなわち、MPEG 映像に対する処理の社会的要求は高い。

昨年度までは MPEG 映像に対する映像処理エンジン用アルゴリズムを揃え、かつ、FPGA 実装を行ってきた。映像処理エンジンに含まれるアルゴリズムは、①輝度信号に対するブロック歪み、モスキート雑音の除去、②画像サイズを変化させるフォーマット変換による劣化を低減させる処理、③画像の鮮明さを保存した拡大法、の 3 つである。②、③は私どもの研究室が提案した独自性の高いアルゴリズムであり、国内外で高い評価を得ている。そして、映像処理エンジンを FPGA (Xilinx 社製 Virtex II) に実装した。

平成 18 年度は LSI チップ化への研究を進めることができたが、上記の③に関しては非常に限定された機能のみしか FPGA には実装できておらず、一般化されたアルゴリズムを、まずは、FPGA 実装する必要がある。そのためには、フレームメモリーを使用する必要があるが、その使用を図るには比較的高度な技術が要求され、時間を費やしてしまっている。

平成 18 年度は、並行して、画像・映像信号の質改善処理アルゴリズムの開発を行った。

まずは、「ビット長伸長処理」である。現在普及しているフラットパネルディスプレイ等では RGB に対して、全て 10 ビット以上の表示能力があるものの、画像・映像信号は 8 ビットで取り扱われる。そこで、8 ビット信号を 10 ビット以上に引き伸ばす処理が必要となる。提案したアルゴリズムは階調数をほぼ 3 倍にする処理を与えるもので、その処理を複数回繰り返すことで、8 ビット信号を 10 ビット以上にすることが可能である。

次に「フレームレート向上処理」があげられる。これも、現在普及しているフラットパネルディスプレイ等では 90 フレーム/秒以上のフレームレートによる表示能力を持っている。開発してアルゴリズムはフレームレートを 2 倍にするものであり、動き補償に基づく方法で高精度である。今後、これらの処理アルゴリズムも FPGA 実装することを考えている。

最後に、平成 18 年度の主な関連研究発表実績を示させてい頂く。

## 文献

- [1] "Enlargement for Images with Gaussian Noise by Embedded Filtering in the LP Algorithm" IEICE Trans. on Fundamentals, Vol. E89-A, No.8, pp.2129-2139.
- [2] "データ依存型 Biasing を伴う補間法によるディジタル画像の高解像度化" 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol.J89-A, No.7, pp.619-628.
- [3] "ブロックマッチング動き補償に基づくフレーム間補間法," 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J90-A, No.5, pp.477-483.
- [4] "階調数伸長処理による画質向上法" 電気学会論文誌(C) 投稿中.

# 超薄膜味覚センサの研究

工学部電子通信工学科

秋谷昌宏・平田孝道

## 1. はじめに

有機超薄膜の一種である LB 膜を用いた味覚センサの研究においては測定系を見直し実用化に向けて小形携帯化に重点を置き研究を進めた。さらに一昨年度より新たに構造は異なるが、LB 膜と同様の超薄膜カーボンナノチューブを用いた味覚センサを試作し、特性評価の結果、LB 膜では検出が困難であった苦味、甘味の識別が容易であることが分かった。

## 2. LB 膜味覚センサの小形携帯化

従来の味覚センサの測定系は 2 個以上のガラスビーカーを用いた大掛かりな装置であったが、今回新たに LB 膜を堆積したセンサガラス板を固定し塩化ビニール樹脂で外壁を覆った長手方向の寸法が 50 mm と小形で一体型構造 [Fig. 1] を提案し、塩味、酸味、苦味、甘味、うま味の基本 5 味について実験を行った。センサ感応膜は DOABr-PVSK の従来の LB 薄膜を用いて電位変化と応答時間を測定した結果、基本 5 味の識別は十分に行えしかも応答時間の短縮化が図られた。

## 3. カーボンナノチューブを用いた味覚センサ

ポリエチレンゴルコール(PEG)をグラフト処理した CNT (PEG グラフト化 CNT) を用いて、味覚センサを作製し、その特性評価を行なった。味覚センサは、Fig. 2 (a) に示すようなマルチチャンネル型バイオナノセンサチップ (外寸 : 17.5 × 17.5 mm、電極間距離 : 1, 5, 10, 50 μm) 上に PEG グラフト化 CNT を定着・架橋させたものであり、セル内には予め蒸留水を注入しておく。また、評価方法は、マイクロシリンジを用いて呈味物質を滴下した直後から安定するまでの時間及びそのインピーダンス変化 (基準値から安定状態までの変位) を測定した [Fig. 2 (b)]。各種呈味物質における応答時間—インピーダンス変化量を測定した結果、LB 膜の場合には苦味と甘味の判別が困難であったのに対して、本センサの場合には明確な違いがみられ識別が容易に行えることを確認した。

## 参考文献

- 1) M.Akiya, Y.Akimoto, E.Hirayama and T.Hirata, Abstract of 5 th Spring Meeting of ISE., P-3 , 2007
- 2) T.Hirata, K.Takagi and M.Akiya. Jpn.J.Appl.Phys.46, L314,2007

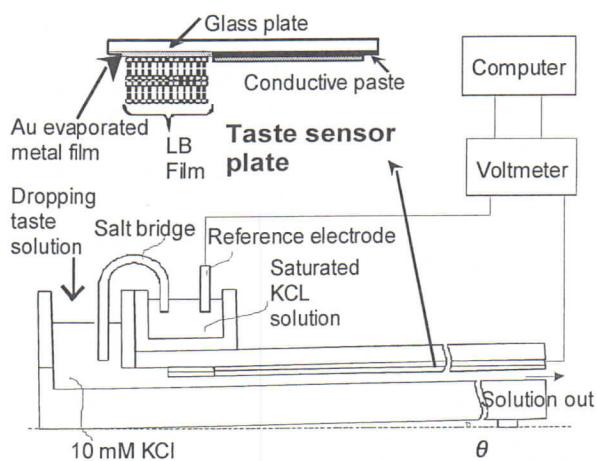


Fig.1 小形携帯型 LB 膜味覚センサ

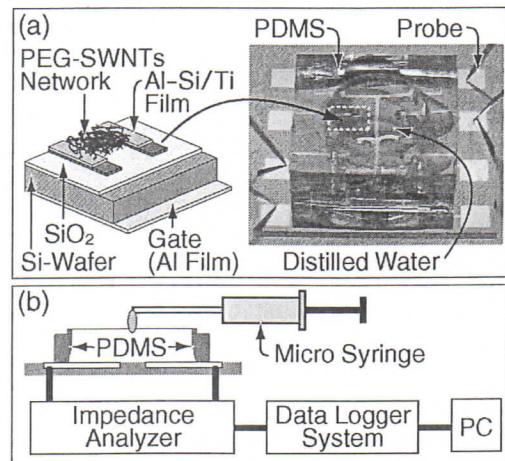


Fig.2 CNT を用いた味覚センサ

# X線光電子分光法による量子・ナノデバイスの研究

工学部電気電子工学科

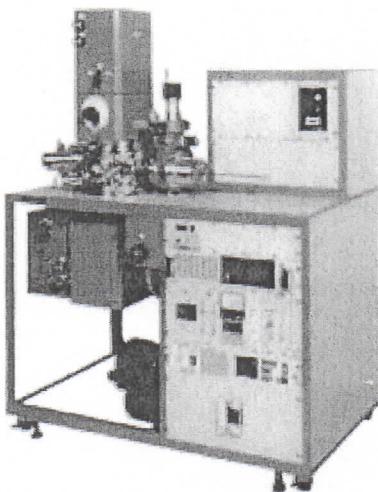
量子・ナノデバイス研究室 野平博司

## 1. はじめに

シリコンナノ科学研究所では、IV族半導体ヘテロ構造を利用する量子・ナノデバイスの研究開発を進めている。本研究では、量子・ナノデバイスの開発を支援、加速する事を目的としてX線光電子分光測定をはじめとする材料評価技術を活用し、ゲート電極／高誘電率膜／Si界面構造や高誘電率膜／Ge界面構造の評価を行っている。本報告書では、昨年度行ったランタン系絶縁膜についての研究成果の一部を述べる。

## 2. 研究設備

総合研究所には、高誘電率材料の成膜、加工のための平行平板型スパッタリング装置（アネルバ（株）、L-250S-FH（特型）、図1）、エッチング装置（アネルバ（株）、L-201D-SLA（特型））がある。また、世田谷キャンパス・半導体特別研究棟には、プラズマ酸化・窒化装置、光酸化装置、超高分解・高感度X線光電子分光装置ESCA-300、分光エリプソ装置を所有している。



## 3. 研究成果の紹介

本年度は、高誘電率膜とGe界面の熱安定性の基礎的な評価を行った。試料は、平行平板型スパッタリング装置を用いて、ランタンシリケート膜およびランタン酸化膜をGe(100)基板上に室温で堆積した。組成制御は、前年度の成果に基づいて行った。これらの試料を窒素中で200°C、300°C、400°Cの熱処理を行い、X線光電子分光測定により高誘電率膜/Ge界面を評価した。その結果、熱処理による界面遷移層の増加は、ランタンシリケート/Ge界面よりもランタン酸化膜/Ge界面の方が少ないことを明らかにした。なお、熱処理前で比較したとき、界面酸化層の厚さは、ランタンシリケート/Ge界面の方がシリコンを含まないランタン酸化物/Ge界面より若干厚かった。これは、ランタンシリケートを作製するときに行うSiO<sub>2</sub>のスパッタリング時にSiO<sub>2</sub>が分解して生じた原子状酸素によってGe表面が酸化された可能を示唆しており、現在プロセスの再検討を行っている。これと平行して、ランタン酸化物/Si界面反応の抑制のためのバリア層の検討を東工大・岩井研究室グループと共同で行った。その結果、Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si構造は700°Cまで安定であり、Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>がバリア層として有望であることを見出した。

図1 平行平板型スパッタリング装置

## 4. 今後の研究計画

平成19年度は、引き続き希土類酸化物/Siおよび希土類酸化膜/Geの界面構造と深さ方向組成分布をX線光電子分光法により評価し、熱的に安定な希土類酸化物/半導体界面構造を探る。具体的には、他元素の添加、バリア層の挿入などである。これらの結果と丸泉グループのシミュレーション（ケミカルシフト計算・構造安定性解析など）による研究と連携しながら進めて行くことで、量子・ナノデバイス実現のために不可欠な高品質な高誘電率絶縁膜/Si界面、高誘電率絶縁膜/Ge界面の実現をめざす。

## 5. 成果発表

- 1) H. Nohira et al., Journal of Physics IV, vol. 132, pp. 273-277 (2006).
- 2) Y. Hijikata, et al., Journal of Applied Physics, vol. 100, pp. 053710-1 - 053710-7 (2006).
- 3) K. Hirose, et al., Applied Physics Letter, vol. 89, 154103-1-3 (2006).
- 4) H. Nohira, et al., Electrochemical Society Inc., ECS Transactions, Vol. 3, No. 2, 2006, pp.169-173.
- 5) T. Hattori, et al., Microelectronics and Reliability, Volume 47, Issue 1, January 2007, Pages 20-26.
- 6) H. Hirose, et al., Progress in Surface Science 82 (2007) 3–54
- 7) M. Higuchi, et al., Applied Physics Letter, vol. 90, 123114-1 123114-3 (2007)

## ナノ・マイクロマシンの製作

鳥居 肇

我々の研究グループでは、総合研究所の設備を用いて、微細加工(Micro Fabrication)技術を確立するとともに、新たなナノ・マイクロマシンの設計・製作を行っている。一般にこの分野では、静電駆動型のシステムが多く提案されているが、当グループは電気機器・磁性応用を主としているため、電磁駆動アクチュエータを主眼とした研究を進めている。現在実施可能な加工技術と、これまでに得られた代表的な成果を以下に述べる。

### 1) 基本的なパターニング技術

フォトリソグラフィと湿式酸化による  $\text{SiO}_2$  薄膜の生成を組み合わせて、様々な形状のパターニングが可能である。

### 2) ウェットエッチ（等方性、異方性）による切削加工

上述のパターニングと、等方性及び KOH による異方性エッチを組み合わせて、立体構造の製作が可能である。コーナー部のアンダーカットを考慮した形状作成を行っている。図 1 に、典型的な異方性エッチによるエッチストップ形状を示す。

### 3) 基板の直接接合技術

極めて清浄かつ平坦な Si 基板または  $\text{SiO}_2$  薄膜付き Si 基板を直接接合することができる。Chemical Mechanical Polishing(CMP)による表面研磨を施した基板を純水中で圧着後、電気炉にて  $1100^{\circ}\text{C}$  前後の熱処理を行うことにより、非常に強力な接合が得られることを確認している。

### 4) 真空蒸着による導体・電極の生成

真空蒸着装置により、Al 薄膜を形成し、Al 直接エッチにて、各種形状の電極を作成可能である。現在は、段差がある場合の電極形成が課題である。

### 5) スパッタによる多層構造の作成

Si スパッタ装置により、 $1\mu\text{m}$  程度の Si 層を作成し、表面マイクロマシニングに用いる。ラマン分光等による分析により、アモルファス Si の積層が行えることを確認している。

これらの技術を用いて様々な製作に取り組んでおり、図 2 に示す幅  $5\mu\text{m}$ 、厚さ  $800\text{nm}$  のマイクロブリッジ、図 3 に示すカンチレバー型アクチュエータ、図 4 に示す多層マイクロコイルなどの成果が得られている。

また、今後トライしていく微細加工技術としては、

#### 1) 磁性薄膜の成膜

2) ポロンドープ層の作成と、高アスペクト比エッチ及びエッチストップの実現などが挙げられる。

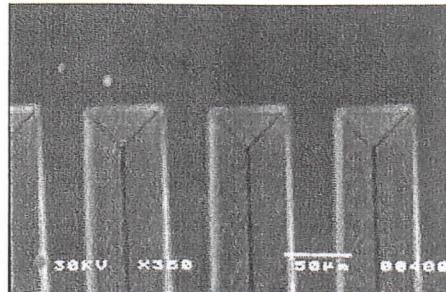


図 1 (100)Si 基板異方性エッチのエッチストップ形状

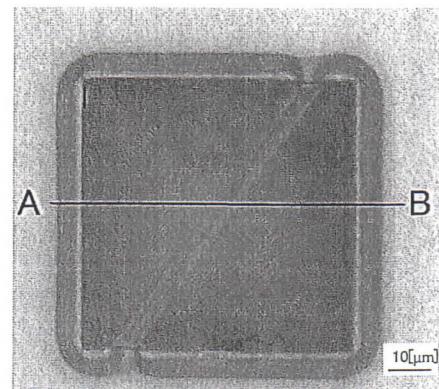


図 2 幅  $5\mu\text{m}$  厚さ  $800\text{nm}$  のマイクロブリッジ



図 3 カンチレバー型静電アクチュエータ

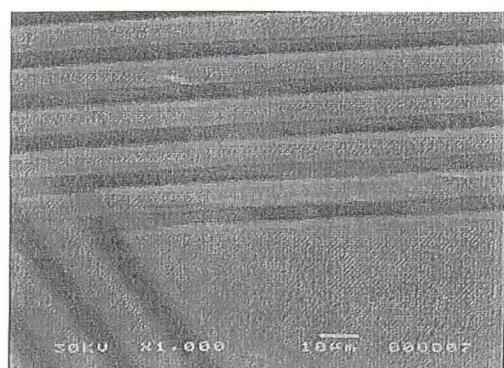


図 4 多層マイクロコイル

# Enhancement of 2DHG conductivity and mobility in Ge QW SiGe heterostructures

Dr M. Myronov

Research Center for Silicon Nano-Science, Advanced Research Laboratories,  
Musashi Institute of Technology, 8-15-1 Todoroki, Setagaya-ku, Tokyo 158-0082, Japan

The room-temperature two-dimensional hole gas (2DHG) conductivity as high as 649.3  $\mu\text{S}$  was obtained by implementation of double-side modulation doping (DS-MOD) of an 8 nm thick strained-Ge quantum well in a SiGe heterostructure. This conductivity is about three times higher than that of the conventional SiGe heterostructure with single-side modulation doping (SS-MOD) (Fig. 1). While the low-temperature ( $T = 3 \text{ K}$ ) mobility with DS-MOD is two times higher than that with SS-MOD, the room-temperature mobility of the two is practically the same, suggesting that phonon scattering is the dominant limiting mechanism at the device operating temperatures.

1. M. Myronov, Y. Shiraki, T. Mouri and K.M. Itoh *Applied Physics Letters* 90 (19), 192108, 2007.
2. M. Myronov, K. Sawano and Y. Shiraki *Semiconductor Science and Technology* 22 pp.S63-S67, 2007.
3. M. Myronov, K. Sawano and Y. Shiraki *Applied Physics Letters* Vol. 88, 252115, 2006.

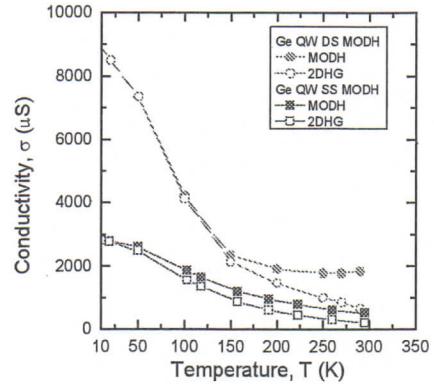


Fig. 1. The temperature dependence of conductivities of 2DHG in DS-MOD (open circles) and in SS-MOD (open squares) samples obtained by the mobility spectrum analysis and the temperature dependence of the averaged conductivity of the whole heterostructures for DS-MOD (filled circles) and in SS-MOD (filled squares) samples obtained from the standard resistivity measurements.

## Ultra thin high Ge content, relaxed SiGe buffers grown by molecular beam epitaxy on Si(001) and SOI(001) substrates

Epitaxial growth by variable-temperature approach and structural characterization of relaxed, ultra thin 50 nm thick, high Ge content  $\text{Si}_{0.34}\text{Ge}_{0.66}$  epilayers on Si(001) substrate was demonstrated. All epilayers are grown in a single process by solid-source molecular beam epitaxy. Smooth surface and full relaxation of  $\text{Si}_{0.34}\text{Ge}_{0.66}$  epilayers are achieved by introducing initial seeding layer, with high density of point defects, grown at low-temperature followed by the growth at rapidly elevating substrate temperature. Variation of growth temperature of  $\text{Si}_{0.34}\text{Ge}_{0.66}$  seeding layer from 50 up to 450 °C exhibits strong effect on changes of surface morphology and appearance of strain in the  $\text{Si}_{0.34}\text{Ge}_{0.66}$  epilayers (Fig. 2). These epilayers grown under optimum conditions can be used as a buffer layer for the growth of semiconductor heterostructures with high hole mobility compressive strained SiGe or Ge quantum wells.

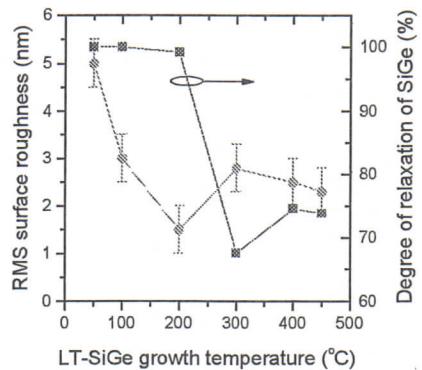


Fig. 2. Degree of relaxation (squares) and RMS surface roughness (circles) of  $\text{Si}_{0.34}\text{Ge}_{0.66}/\text{LT}-\text{Si}_{0.34}\text{Ge}_{0.66}/\text{LT}-\text{Si}/\text{Si}(001)$  samples as a function of growth temperature of LT- $\text{Si}_{0.34}\text{Ge}_{0.66}$  layer.

1. M. Myronov and Y. Shiraki *Japanese Journal of Applied Physics* 46 (2) pp.721-725, 2007.
2. M. Myronov and Y. Shiraki *Journal of Crystal Growth* 301-302 pp315-318, 2007.

## 歪み Si/Ge 系半導体ヘテロ構造の電気伝導特性と結晶評価

総合研究所シリコンナノ科学研究中心 澤野憲太郎

### 〈目的〉

Si-MOSFET の微細化限界が近づく中、「Ge」が新規高移動度チャネル材料として大きく期待されている。特に SiGe 模擬基板上に Ge チャネル層を形成して「歪み」を導入することで、バルクを大きく上回る超高正孔移動度が実現可能である。本研究は、高品質歪み Ge チャネル構造を作製し、その磁気輸送特性評価により、正孔有効質量、キャリア散乱メカニズムを詳細に調べることを目的として行った。

### 〈成果〉

Ge 組成 33 ~ 65% の SiGe 傾斜組成バッファー層をガスソース MBE で成長し、CMP により表面平坦化を施した後、固体ソース MBE により変調ドープ構造を作製した。Ge チャネル層は 6 および 7.5 nm とし、B ドーピング層 (10 nm) は、チャネルの上側 (Normal 構造) または下側 (Inverted 構造) にスペーサー SiGe 層 10 nm を挟んで導入した。

図 1 に Ge 組成 41% の SiGe 上歪み Ge チャネル構造の磁気輸送特性を示す。明瞭なシュブニコフ・ドハース (SdH) 振動が観測され、歪みが非常に大きいにもかかわらず、高品質なチャネル内に 2 次元正孔ガスが形成されていることを示している。この SdH 振動の温度変化を調べることで、各歪みを有する試料について正孔有効質量導出を行った。図 2 に得られた有効質量を正孔密度に対してプロットする。正孔バンドの強い非放物線性によって有効質量は正孔密度と共に大きく増大することが知られているが、ここでは、歪みの効果によってその増大が大きく抑制されていることが分かる。これは歪みによる有効質量減少効果を顕著に示すものであり、今回初めて系統的データが得られた。

さらにキャリアの散乱要因を解明すべく、磁気輸送特性の解析により、量子緩和時間と輸送緩和時間の比であるディングル比  $\alpha$  の導出を行った。その結果、特に Inverted 構造において 10 を越える大きな  $\alpha$  が得られた (図 3)。これは、支配的散乱要因がリモート不純物散乱であり、界面ラフネス散乱の寄与が無視できることを意味する。つまり、超高品质な Ge チャネル層が形成されていることを示している。Normal 構造などにおける  $\alpha$  の低下は界面ラフネスの発生を示し、特に歪みの大きな構造においては、この界面制御が移動度向上に非常に重要であると言える。

以上のように、高品質 Ge チャネル構造の作製により、移動度を決定する最重要要素である、有効質量、散乱要因を、その歪み依存性の観点から解明し、高速デバイス応用へ向けた非常に大きな知見を得ることができた。

〈投稿論文〉 [1] K. Sawano et al., Thin Solid Films **508**, 117 (2006). [2] K. Sawano et al., Physica E **32**, 520 (2006). [3] K. Sawano et al., Appl. Phys. Lett. **89**, 162103 (2006).

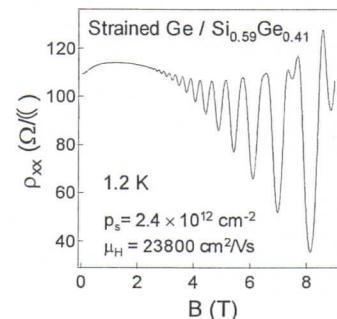


図 1 歪み Ge 構造の SdH 振動

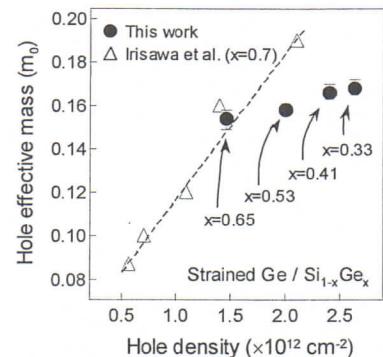


図 2 正孔有効質量の正孔濃度依存性

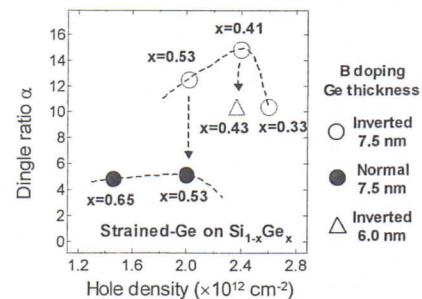


図 3 各歪み Ge 構造のディングル比

## 走査型トンネル顕微鏡による SiGe 系ヘテロ構造評価

シリコンナノ科学研究中心 奥井登志子

### [はじめに]

SiGe 系ヘテロ構造やデバイスにおいては、いわゆる電気特性やデバイス特性など比較的マクロな物理評価を中心として行われている。これらの手法では全体像の評価ができるが、個々の領域を分離し解析することが困難である。そこで、走査型トンネル顕微鏡を用いて SiGe 系微細ヘテロ構造中のナノ領域でのポテンシャルプロファイリングの実現を目指す。

### [研究成果の紹介]

#### Si/SiGe ヘテロ構造の STM による評価

Si (001)基板上に固体ソース MBE により作製した歪み Si/Si<sub>0.66</sub>Ge<sub>0.34</sub> ヘテロ接合多層構造 (Boron doped:  $3 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ ) について、断面 STM 評価を行った。試料は、 $\{110\}$  断面を切り出し鏡面研磨した後、測定前の表面処理として熱硫酸による酸化膜作製および HF+HCl 溶液による表面水素終端を行い、超高真空中にて測定した。

歪み Si/Si<sub>0.66</sub>Ge<sub>0.34</sub> ヘテロ接合多層構造の断面 STM 像を Fig. 1 に示す。試料バイアス電圧  $V_s = -1.5 \text{ V}$  における STM 像 (Fig. 1(a)) では左側に白い帯状の領域が見られ、これは形状などから歪み Si 層であると考えられる。その両側に位置するのは SiGe 層である。一方、 $V_s = -0.5 \text{ V}$  における STM 像 (Fig. 1(b)) では Si 領域が黒い帯状に観察されている。STM 測定時の試料バイアス電圧依存性を解析した結果、これらの STM 像はヘテロ構造におけるバンドアライメントを反映していることが分かった。

次に、ヘテロ構造の各領域においてトンネル電流 – 試料バイアス電圧 ( $I_t$ - $V_s$ ) 特性を評価した (Fig. 2)。Fig. 1(a) に示す □ 中の  $3.6 \times 3.6 \text{ nm}^2$  の各領域から得られた  $I_t$ - $V_s$  曲線は、Si、SiGe、ヘテロ接合部 (interface) においてそれぞれ特徴的な特性を示している。これらの違いはヘテロ構造のバンドアライメント、つまりはポテンシャル分布に起因していると言える。

以上より、Si/SiGe ヘテロ構造におけるポテンシャル分布を 5 nm より高空間分解能で捉えることができた。よって今後、ヘテロ接合を用いた微細デバイス評価への応用が期待される。

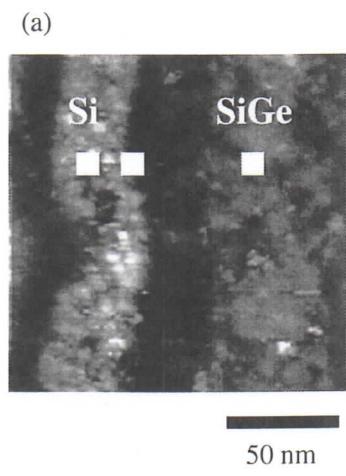


Fig. 1: STM image of the SiGe hetero structures taken at (a)  $V_s = -1.5 \text{ V}$  and (b)  $V_s = -0.5 \text{ V}$ .

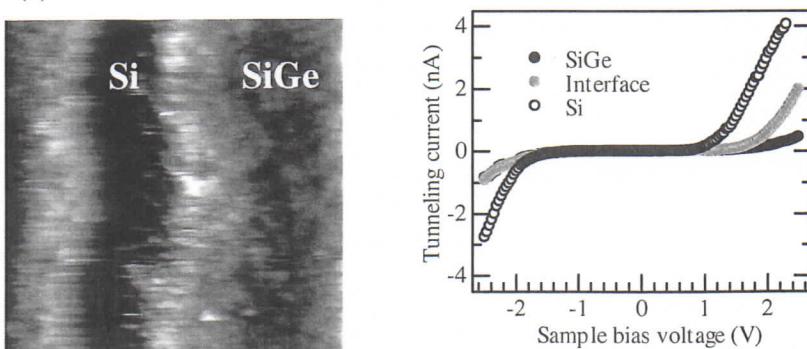


Fig. 2:  $I_t$ - $V_s$  characteristics of the hetero structure.

### [成果発表]

T. Okui et al., J. Vac. Sci. Technol. B 25, 29 (2007).

奥井他, 第 54 回応用物理学関係連合講演会 28a-K-2, 2007.3

## Toward a silicon-based light source

夏 金松 (Jinsong Xia)

Silicon, the dominating materials in microelectronic field, in recent years, has attracting more and more attention as an optical material in the photonics field due to the mature, low-cost and large-scale process technology. The attractive vision of silicon-based optical device is the hybrid-integrated ‘electro-optical superchips’, which include light emitters, modulators, optical waveguide circuits, amplifiers, optical detectors and, latterly, intelligent electronic control circuits.

However, despite of its success as an electronic material, silicon is prevented from dominating the photonics field by its indirect bandgap. Currently, as the initial step to a silicon-based light source, we are working to enhance the light emission from Ge quantum dots by optical microcavities. In our research, Ge self-assembled quantum dots are used as the light emitters. The light emission efficiency from unprocessed Ge self-assembled quantum dots is lack of efficiency and spectrum purity. In order to enhance the light emission from Ge dots further, we combine the dots with photonic crystal (PhC) microcavities, and demonstrate the room-temperature resonant light emission from Ge quantum dots in PhC microcavity for the first time. Figure 1 shows the schematic structure of the PhC microcavity devices we have already fabricated. The PhC microcavity, which provides in-plane optical confinement, is formed by removing several air holes from the hexagonal lattice. Figure 2 shows the micro-photoluminescence ( $\mu$ -PL) of the T6 microcavity. As shown in the figure, multiple strong resonant peaks are observed at room-temperature, which is the first time for Ge quantum dots. Compared with unprocessed quantum dots, the luminescence intensity is enhanced significantly due to the Purcell effect. We also try to enhance the light emission from Ge quantum dots and silicon itself by microdisk resonators. Enhanced room-temperature light emission from crystalline silicon and Ge self quantum dots in microdisk is demonstrate.

- J. S. Xia, et al, “Strong resonant luminescence from Ge quantum dots in photonic crystal microcavity at room temperature,” *Appl. Phys. Lett.* vol. 89, no. 20, Nov. 13, p.201102, 2006
- J. S. Xia, et al, “Observation of whispering-gallery modes in Si microdisks at room temperature,” *Appl. Phys. Lett.* vol. 90, no. 14, p.141102, 2007
- Participating in 4 international and 2 domestic conferences.

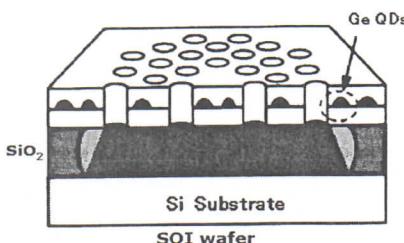


Fig. 1 The schematic structure of the fabricated PhC microcavity with Ge quantum dots.

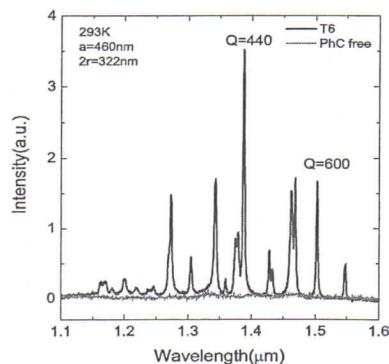


Fig. 2 Room-temperature photoluminescence spectrum from PhC T6 microcavity with Ge dots.

エネルギー環境科学研究センター

## 有機・無機コンポジット電解質膜の作製とキャラクタリゼーション

工学部環境エネルギー工学科・総合研究所

永井正幸・門馬幸広

直接メタノール形燃料電池はマイクロ燃料電池として注目を集めているが、その電解質膜には改善すべき点が幾つか残されている。その主要な課題が、出力の向上とメタノール透過性の低減である。そこで、有機物の加工性と無機物の耐熱性を併せ持つ有機・無機コンポジットに注目して、耐熱性の向上及びメタノール透過抑制の検討を行った。マトリックスとして GPTS (3-グリシドキシプロピルトリメトキシシラン [ $\text{Si}(\text{CH}_3\text{O})_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}_2\text{CHOCH}_3$ ]) 及び GPMDES (3-グリシドキシプロピルメチルジエトキシシラン [ $\text{CH}_3(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{SiC}_3\text{H}_6\text{OCH}_2\text{CHOCH}_3$ ]) を選択し、層状リン酸ジルコニウムを予め層剥離させて得たリン酸ジルコニウム薄片状粒子と一体化させることで、高プロトン伝導性のコンポジットを作製し、電解質膜の特性向上を図った。

リン酸ジルコニウムを層剥離させて溶液中に分散させたゾルは、単に静置し乾燥させるだけで図 1 に示すような薄膜状になった。ただし、このままの状態では、電気伝導度が低く、また機械的な強度も不足していた。そこで、機械的強度を上げるために、GPTS 及び GPMDES と複合化した。これらはリン酸ジルコニウムの薄片状粒子を化学結合で繋ぐ役割を果たし、機械的強度の向上に寄与する。同時に、膜中にはリン酸ジルコニウム薄片状粒子が分散されるため、メタノールの透過が抑制できる。さらに、薄片状の粒子が積層しながらマトリックスと複合化するため、作製した膜の曲げ強度の向上にも繋がる。



図 1 リン酸ジルコニウム単独膜

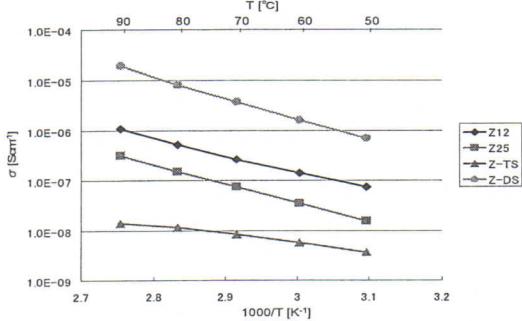


図 2 種々のコンポジット膜の電気伝導度

GPTS で複合化した試料 (Z-TS) は厚さが 0.32 mm で 120° 程度湾曲するが、折れやすい。また、GPMDES で複合化した試料 (Z-DS) は厚さが 0.44 mm で 180° 湾曲させることができる。試料の柔軟性の違いは加水分解、重縮合により得られた試料中のシロキサン結合の構造的相違によると推定される。また、複合化した試料の電気伝導度を測定すると、図 2 に示すように電解質膜の実用に必要とされる  $10^{-3}\text{S}/\text{cm}$  と比較して、 $1/10^5 \sim 1/10^3$  程度であることが分かる。従って、伝導度を増大させる固体酸の添加或いは酸性基の導入による伝導度の増大が必須である。一方、作製した試料を温水または 5 wt% メタノール水溶液に浸漬させると、Z-TS はクラックや収縮を生じたのに対して、Z-DS は変化がなかった。GPTS は三方向に親水性のシロキサン結合ができるが、GPMDES は一端に疎水性のメチル基があるため、水に対する耐久性が向上すると考えられる。以上のように、リン酸ジルコニウムとシランカップリング剤の組み合わせにより得られる有機・無機コンポジットは、伝導度を向上させることにより、高強度で高耐久性を備えた電解質膜として実用の可能性があることが分かった。

# 固体高分子形燃料電池の凍結起動時の発電と性能劣化特性解明研究

総合研究所エネルギー環境科学研究センタークリーンエネルギー技術開発班

工学部環境エネルギー工学科

高木 靖雄

## 1. まえがき

現在実用化に向けて開発が進められている固体高分子形燃料電池の課題の一つが、耐久性の確保と実作動環境における性能と機能の確保である。耐久性に関しては自動車用で 5,000 時間、家庭定置用で 40,000 時間が目標とされており、各界で電解質膜や電極触媒などの構成要素素材の改良に加えて、各種運転条件や放置環境により生じる性能劣化の原因解明と軽減に取り組まれている。本研究で、燃料電池の作動環境の一つである寒冷地において凍結したセルを起動させた場合の性能の特性と、このような起動の繰り返しにより性能劣化が生じることを明らかにした。

## 2. 凍結起動時の発電特性と性能劣化

### 2. 1 凍結起動時の発電特性

単セルを凍結した状態で作動させた場合の発電特性を図 1 に示す。アノード・カソード共に無加湿、セル温度を起動中は一定とした。起動時凍結状態のセルを起動させる場合、起動温度がマイナスの場合発電電流が起動直後一度上昇した後急減する現象が発生することが明らかになった。この急減現象はセル温度が 0 °C の場合には生じないことから、MEA 内で発生する水分の凍結による水素または空気の閉塞によるものである可能性が高いことが推測できる。

### 2. 2 凍結起動繰り返しにより生じる性能劣化

凍結したセルを起動した後暖機を続け 70 °C まで昇温させた後作動を停止し冷却凍結させる起動・運転・放置・凍結を 50 サイクル繰り返した場合の性能劣化特性を図 2 に示す。この場合起動直後のセル温度は 1 時間あたり 90 °C で昇温させ、かつセル作動温度が 0 °C に上昇した時点でのアノードへの加湿を開始した。また、70 °C の作動時間は 30 分、セル冷却は -20 °C までを (90 °C を) 4.5 時間で行った。この結果、50 サイクルの繰り返しで約 17% の性能劣化が生じることが明らかになった。交流インピダンス法や CV 法などの電気化学的な診断結果から、アノードとカソードの両電極触媒、電解質膜のいずれもの機能低下が計測されていることから、複合された原因による性能劣化が考えられる。

## 3. 今後の進め方

平行して開発を進めている凍結起動時の発電部位、発電急減部、性能劣化部が解析できる分割セル、起動時の CO<sub>2</sub> などの排気分析、性能劣化部位を判定する二重参照電極セルなどの適用により、劣化部位・性能劣化原因を解明し、性能劣化軽減につなげる。また、MEA 構成部材の見直しなども含めて、凍結起動特性の向上にも取り組む。

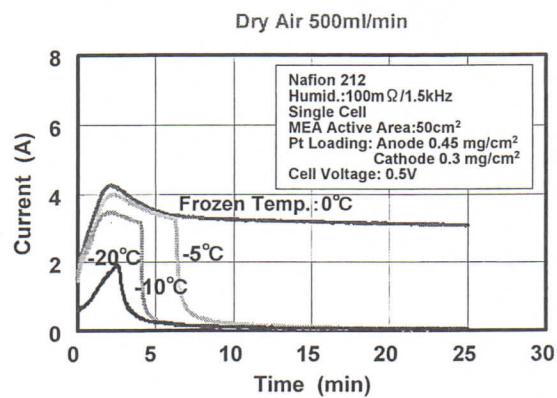


Fig.1 Characteristics of current generated under cold start operation of frozen cell of PEFC

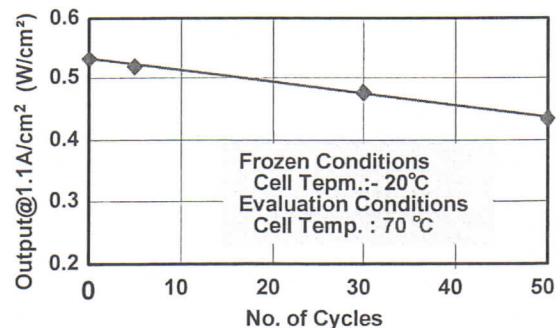


Fig. 2 Performance degradation caused by cold start of frozen cell of PEFC

## 固体高分子型燃料電池中の硫黄の分析用波長分散型粒子線誘起X線分析システムの構築

武藏工業大学エネルギー量子工学専攻・総合研究所 鳥山保, 川畠俊明;

東京工業大学基礎物理学専攻 川崎克則; M. I. S. 長谷川賢一;

理化学研究所 前田邦子; 東京工業大学原子核工学専攻 小栗慶之

化石燃料を利用した内燃機関は、排気ガスによる地球環境問題と化石燃料の枯渇問題を生み出した。近年、それら問題を解決する方法として燃料電池が期待されている。中でも固体高分子型燃料電池(PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell)は、作動温度が低く小型化が可能なため、盛んに研究されている。PEFCは、Pt触媒を使用していることから硫黄(S)成分に弱く、燃料として天然ガスやガソリンの改質ガスを用いる場合には、その改質ガス中に微量に含まれるSが、燃料電池の電極触媒を被毒し、その性能を劣化させるという問題点がある。通常のエネルギー分散型粒子線誘起X線分析法(ED-PIXE)では、SのK X-rayのエネルギーはアノード触媒中のRuのL X-rayとPtのM X-rayのエネルギーに非常に近いためにピークが重なってしまう。また、通常の分析センターに設置されている電子線マイクロアナライザー(EPMA)を用いてMEA中のSの分析を行なうと電子ビームの注入熱量が大きく、Sが飛散してしまうため、定量的な測定が困難である。そこで、劣化を引き起こすSが膜電極接合体(MEA: Membrane Electrode Assembly)中のアノード電極及びカソード電極にどの程度残留しているかを定量的に測定できる分解能の高い波長分散型粒子線誘起X線分析法(WD-PIXE)システムを構築することを本研究の目的とした。

東工大ヴァンデグラフ実験室に理化学研究所設置のWD-PIXE[1]と同方式のシステムを構築した。有効長100mmのPSPCを使い、アノード電極中から放出されるSのK X-ray及びRuのL X-rayとPtのM X-rayを同時に測定できる。加速器からのProtonは、内径5mmのカーボン筒を通過し7.5μmのカプトン膜を通り抜け、大気中にある出口から25mm離れた位置に45°傾けた試料に照射される。試料から発生したX線は、幅30mmのGe(111)平板結晶により回折され、Kr+10%CO<sub>2</sub>のPSPC(窓面積: 24mm×120mm)に入射する。測定するX線は2.3keV前後であり、空気中での減衰を避けるため、試料付近からPSPCまでのX線経路をHeで満たした。さらに、試料をX-Yステージ上に試料を設置し、MEA(50mm×50mm)試料に対して、5点×5点のマッピング測定が出来るようにした。また、試料に入射するProtonの電流量を正確に測定するために試料の前にTi薄膜を設置し、Si(Li)X線検出器でTi K X-rayを測定した。システムの定量性を確認するために、あらかじめGe(111)平板結晶のRocking曲線を測定した上で、Mo板を標準試料としてSのK X-rayのエネルギーに近い、Mo L X-rayを用いて測定した。その結果、30%以内で強度の計算値と実験値が一致することを確認した。

構築したシステムを用いてH<sub>2</sub>S 10ppm/minで100min運転し、Cell電位30%低下したS被毒劣化MEAのアノード側スペクトルをFig. 1に示す。SのK X-ray、RuのL X-ray、PtのM X-rayがはっきりと分離され、同時に測定されている。これにより、アノードに残留したH<sub>2</sub>Sに由来するSはナフタリオン液中あるスルフォン酸基のSに比べて最大で2.5倍、燃料入り口付近にあることが明らかになった。

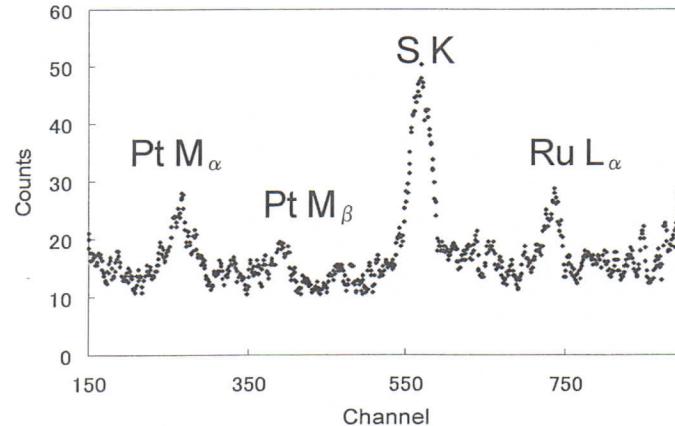


Fig. 1 S被毒MEA(Anode側)PIXEスペクトル  
H<sub>2</sub>S 10ppm/minで100min運転  
Cell電位30%低下

[1] 前田邦子, 長谷川賢一, 浜中廣見, 前田勝, X線分析の進歩, 第34集(2003) pp.89-113.

# 二酸化チタンをベースにした光触媒の開発研究

## 工学部環境エネルギー工学科・総合研究所

小林光一・原 弘明・千葉耕平・名取宏孝・高橋政志

環境に負荷を与えない環境調和型エネルギー技術の確立は、21世紀において最も重要な課題の一つである。この課題解決の期待の一翼を担っているのが  $TiO_2$  などの光触媒である。光触媒は有害な有機物質を光の作用により分解し無害化することが可能なため、環境浄化材料として注目されている。中でも  $TiO_2$  は最も有望な光触媒として現在活発に開発が進められており、 $Al_2O_3$  や  $ZrO_2$ 、 $ZnO$ 、 $SnO_2$ 、 $WO_3$  などの金属酸化物および  $CdS$  や  $SiO_2$  などとの複合化による触媒活性向上についても研究されている。そこで、本稿では  $TiO_2$  をベースにした光触媒の活性向上に関する研究の一部を紹介する。

### 1) 逆ミセル法で調製した $SiO_2/TiO_2$ 複合微粒子の構造とその光機能性に関する研究

$TiO_2$  は有機物などの環境汚染物質を分解する光触媒として注目されている。その触媒活性は表面や結晶構造によって大きく影響を受けることが知られており、 $TiO_2$  の修飾によって可視光応答化や活性の向上を目指した取り組みが行われている。この研究では、逆ミセル法を用いて  $TiO_2$  を  $SiO_2$  と複合化することで、 $SiO_2$  が高温での  $TiO_2$  の粒子成長および相転移を抑制して、粒子サイズが小さく結晶性の高い光触媒を調製し、その触媒活性を検討した。

$TiO_2$  に  $SiO_2$  を少量添加することにより高温焼成時にアナターゼ→ルチルの相転移を抑制すること、および焼成時に結晶子の成長が抑制され、比表面積が増加することが明らかになった。さらに高温焼成において、 $SiO_2$  が表面に偏析することが確認された。調製した  $SiO_2/TiO_2$  複合微粒子の光触媒活性を調べるため、800 °C 焼成試料を使って水溶液中のメチレンブルー (MB) を光分解し、その速度を UV-vis スペクトルの吸光度変化から評価した。 $SiO_2$  のモル分率が 0.05 の試料の活性が最も高く、これよりも  $SiO_2$  の添加量が増えると  $TiO_2$  単身触媒よりも逆に活性が低下した。また、ゾルゲル法で調製した  $SiO_2$  のモル分率 0.05 の試料と比較すると、逆ミセル法で作製した試料はゾルゲル法のものよりも高活性を示すことがわかった。

### 2) ラングミュア・プロジェット法による $TiO_2/WO_3$ ナノ微粒子薄膜の作製と光機能性の評価に関する研究

ナノ微粒子が二次元に配列した微粒子薄膜は、バルク物質に対して特異な性質を示すため、広い分野にわたり研究がなされてきた。とりわけ二酸化チタン ( $TiO_2$ ) ナノ微粒子は、紫外光の照射により活性となる環境浄化型光触媒として注目されており、その薄膜は防汚、抗菌、曇止めなどに応用されている。これまで我々は、ラングミュア・プロジェット (LB) 法を用いて均一な  $TiO_2$  微粒子薄膜を作製し、それと  $SnO_2$  や  $Nb_2O_5$  微粒子などの無機物質と複合化することで、 $TiO_2$  微粒子の光機能性の向上を試みてきた。そこで今回は、三酸化タンゲステン ( $WO_3$ ) 微粒子を複合化させることにより機能性の検討を行った。

まず、 $WO_3$  作製条件について検討した。下層液に用いる微粒子分散液の pH および膜物質の電荷密度の最適化によって均一な  $WO_3$  微粒子 LB 膜が作製することが分かった。また、多層累積した  $WO_3$  微粒子薄膜や  $WO_3$  微粒子と  $TiO_2$  微粒子との複合化膜も作製できることが分かった。作製した複合微粒子膜の光触媒活性はステアリン酸の分解から分光学的に調べた。 $TiO_2/WO_3$  複合微粒子系では焼成温度が高いほど光触媒活性は低下したが、 $WO_3$  との複合化による効果は大きく現れた。さらに、 $TiO_2/WO_3$  複合微粒子系の光電流は 400 °C と 500 °C 焼成の時に  $TiO_2$  単独系よりも増加した。現在、 $TiO_2/SnO_2$  複合系の光触媒性能について調べている。

# 放熱用グラファイトフィルム、キャパシター用活性炭等に関する検討の進展

工学部 環境エネルギー工学科 鎌木 裕

高配向性グラファイトの示す高い熱伝導性と、活性炭の示す大きな電気二重層容量に着目し、新たなグラファイト放熱フィルムの調製・評価、そして大容量キャパシター用電極材としての窒素含有活性炭の検討を行った。また廃棄されるCarbohydrate系食品の内で、不純物の少ない1次加工品である餅を対象として、賞味期限切れのものを炭素化、空気賦活することで活性炭素を調製し市販の活性炭との比較を行った。

## 高配向性グラファイトフィルムの調製と評価

黒鉛の熱伝導はほぼ格子振動（フォノン）によって運ばれ、炭素六方網面に沿って非常に大きな値を示し、高配向性熱分解黒鉛（HOPG）では銅や銀の4倍程度にもなり、ダイヤモンドの熱伝導率に匹敵する。熱伝導率はフォノンの平均自由行程に比例するため構造（結晶）完全性に大きく依存するが、近年はパソコンや携帯電話などの放熱シートとして800～1600W/m/Kのカタログ値を示すグラファイトシートが市販されるようになった。昨年度は芳香族ポリイミドフィルムの高温熱処理を行い、高熱伝導性黒鉛シートに匹敵する高熱伝導性黒鉛フィルムが実験室調製により得られることが分かった。また黒鉛の炭素六員環二重結合に起因するπ電子も六角網面に沿って伝導するため網面方向の電気伝導率や磁気抵抗も大きいが、結晶完全性に依存する。昨年度は熱伝導率と電気伝導率および磁気抵抗の相関が非常に良い事を実証し、これらの物性を測定することにより熱伝導率を評価することが可能であることを示した。本年度はグラファイトフィルムの構造を検討し、多結晶体であるグラファイトフィルムの平均結晶子寸法と熱伝導率の相関およびグラファイト層面の面配向度を表すパラメータであるモザイクスプレッドと熱伝導率の相関を検討し、どちらも非常に良い相関を示す事を見出した。すなわち平均結晶子寸法やモザイクスプレッドを測定することにより熱伝導率を評価することが可能となった。

## キャパシター用電極材としての窒素含有活性炭の調製と評価

電気容量は電極の比表面積に比例し電極間距離に反比例するために、ナノオーダーの大きさの細孔を持ち比表面積の大きい活性炭を電極材に用いると、非常に大きな電気容量が得られる。しかし極小の細孔内には電解液が浸透できず、またイオンが電気二重層を形成できないことから、細孔径分布を制御したり、カーボンナノチューブなど新規の炭素材料を用いる検討が行われている。また黒鉛構造を示す炭素材料は同じ比表面積を示す活性炭より大きな電気二重層容量を示すことが報告され、さらに窒素含有炭素材料はその表面積から予測されるよりも大きなキャパシタンスを発現することも報告されている。昨年度はイミド環に窒素原子を有する芳香族ポリイミド微粒子を炭素化、賦活して活性炭を調製し、細孔特性と電気二重層容量の対応を検討し200～220F/gと大きな電気二重層容量が得られる事を示した。本年度は芳香族ポリイミド微粒子から得た活性炭に低エネルギー窒素プラズマ処理および高エネルギー窒素イオン照射打ち込みを行い、物理的に外部から窒素原子をさらに付加する実験を行った。また熱拡散法によりホウ素原子を芳香族ポリイミド微粒子から得た活性炭にドープする実験を行ったが、これらの物理的窒素・ホウ素処理を行った活性炭について、明らかな静電容量の改善は見られなかった。そこでPBO繊維、ユリア樹脂、ポリアミド繊維など、未検討の新たな窒素含有高分子からの活性炭を調製し、含有窒素の電気二重層容量への影響を検討している。

## Carbohydrate系食品からの活性炭素

Carbohydrate系食品廃棄物を念頭に、賞味期限切れの餅を炭素化・空気賦活して得た活性炭は、市販の活性炭に比較しうる比表面積・細孔径分布・細孔容量を示すことが分かった。

## 新規エネルギー変換材料の設計に関する研究

工学部 環境エネルギー工学科

宗像 文男

高効率な駆動源を目指した燃料電池、太陽光を有効利用した人工光合成技術、廃熱を有効利用する熱電発電技術など種々のエネルギー変換技術に関連した新しいエネルギー変換材料の基礎及び応用研究を行っている。平成 18 年度は、高出力な固体酸化物型燃料電池(SOFC)を目指した新規固体電解質と水素生成光触媒材料の研究において以下の結果を得た。

### 1) SOFC 用新規固体電解質材料に関する研究

燃料電池は移動体や小型電源への応用が注目されており、SOFC も小型高出力なシステムの構築が検討されている。本年度は、高出力で低温度域(500°Cから700°C程度)で発電可能な新規固体電解質材料の開発を進め、新規酸素イオン伝導体  $\text{La}_{1.67}\text{Ca}_{0.2}\text{Ge}_{0.67}\text{Si}_{0.33}\text{O}_{5-\delta}$  ( $\delta = 0.93$ )を見出した。この結晶構造のリーとベルト解析結果(図 1)と得られたイオン伝導率を従来の Ge 系酸素イオン伝導体  $\text{La}_2\text{GeO}_{5-\delta}$  と比較して図 2 に示した。

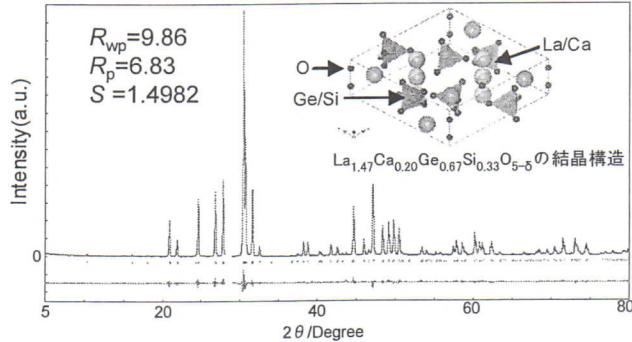


図1  $\text{La}_{1.47}\text{Ca}_{0.20}\text{Ge}_{0.67}\text{Si}_{0.33}\text{O}_{5-\delta}$  の粉末X線回折リートベルト解析結果

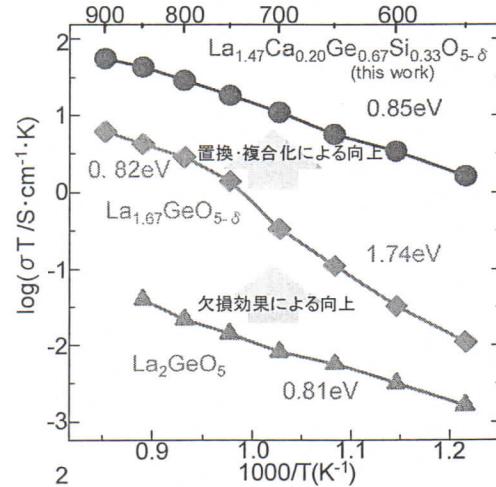


図2 Ge系複合酸化物における伝導率の温度依存性

### 3) Ge 系複合酸化物における光触媒特性に関する研究

これまで、光触媒として Ge 系複合化合物に注目し研究を進めてきたが、本年度は NiO を担持した  $\text{Zn}_2\text{GeO}_4$  で、Xe ランプによる紫外線照射により、右図(図 3)示すような水素気泡の発生を確認できた。従来は水素発生助触媒として  $\text{RuO}_2$  が用いられてきたが、高価であると共に安定性にかけるところがあった。本研究では、助触媒の NiO を有機酸塩から母材の  $\text{Zn}_2\text{GeO}_4$  に分解担持させることにより、高活性化を実現した。

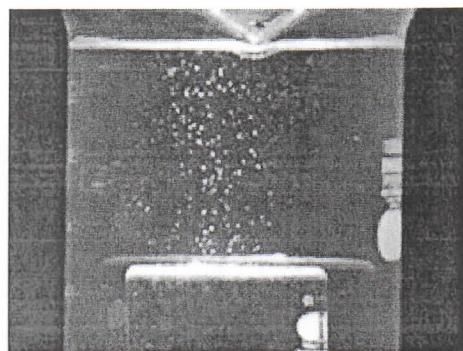


図3 上方からXeランプ照射による水素気泡の発生

## 沙漠化修復のための環境監視システムの構築と運用

武藏工業大学環境情報学部 吉崎真司・諏訪啓祐

### 1. はじめに

近年、黄砂や光化学スモッグ注意報、酸性雨に関するニュースや報道が多くなり、それらが大陸からの「越境環境汚染」ではないかと指摘されることから国民の関心が高くなっている。特に、春先の偏西風に乗って移動してくる黄砂が大陸東岸で発生する大気汚染物質を捉えることで、わが国の環境への負荷の増大が懸念されている。筆者らは2000年8月以来、中国内陸部の黄砂の発生源と推定される劣化した土地の修復を目指す沙漠緑化研究や環境教育に取り組んできたが、最近では緑化の成果を確認するための環境監視が必要になってきた。しかし、電源確保、データの蓄積と伝送方法、維持管理や盗難など多くの問題があり実現は容易ではない。

筆者らは2004年から気象装置とWEBカメラを設置して、無線LANとインターネットを利用した環境データの伝送システムの構築と運用を目指し研究を行ってきた。将来黄砂の発生状況や劣化土地の回復状況をリアルタイムで監視できれば、わが国における環境負荷低減に寄与できると考える。本稿では、今までに実現できたシステムの一部を報告する。

### 2. 研究方法

武藏工業大学横浜キャンパスには無線LANシステムが整備されており、建物外でも受信アンテナを設置することによりデータの送受信が可能である。そこで、部室棟屋上の緑化試験地にWEBカメラと気象装置(小笠原計器)、テニスコート脇に同型の気象装置を設置(2005年8月)して無線LAN経由で研究室のサーバにデータを蓄積し、更に複数の研究室で監視できるシステムの構築を試みた。また、アメリカDavis社製の気象装置とWEBカメラを北京林業大学の建物屋上に設置(2006年8月)して、無線によって学内のサーバにデータを蓄積した後、インターネット経由で本学横浜キャンパスへデータを伝送するシステムを構築し運用を試みた。

### 3. 結果と考察

(1) 本システムでは、沙漠化土地における環境改善効果の監視、作物の生育状況の監視、砂塵嵐の発生状況の監視、土地利用の季節変化の監視が可能である。

(2) 図-1に示すように、本学横浜キャンパス内に環境監視システムを構築した結果、気温、湿度、風向・風速、日射量、CO<sub>2</sub>濃度について1-5分毎のデータと画像を取得でき、24時間の変化をグラフ化できるようになった。

(3) 課題として、車専用バッテリーと太陽電池パネルのみでは日射が不足した場合にデータ伝送が途切ることや、CO<sub>2</sub>センサーの精度、画像の解像度については改善の余地があることが確認できた。

(4) 北京林業大学に設置した気象装置は、精度はやや低下するが、約1年間は内蔵電池で稼動できるためバッテリー問題はない。また、システムも現状では問題なく稼動することも確認できた。しかし、情報セキュリティの問題で常時接続状態が確保できず、更には担当学生の在不在によりデータ伝送が断続的になる。

(5) 中国では、有線のインターネット環境は十分ではないが、内陸の沙漠でも携帯電話による通話は可能である。そこで、携帯電話を利用して常時接続モニタリングシステムへの改善を行う必要があることがわかつてきた。

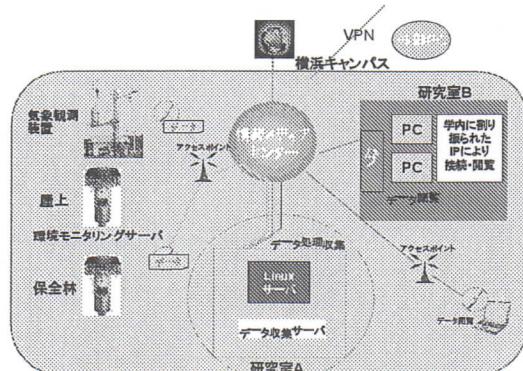


図-1 横浜キャンパスにおける環境監視システム

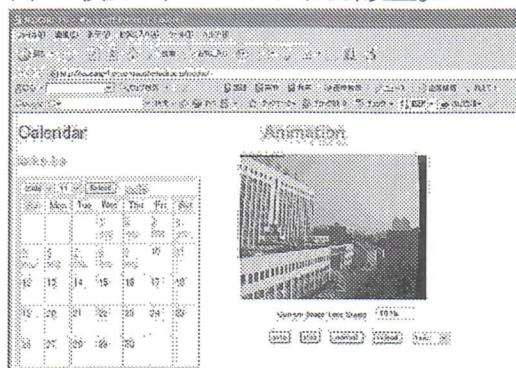


図-2 北京林業大学から転送された環境監視画面

## 海浜植生による飛砂抑制効果と微地形の変化

武藏工業大学環境情報学部 吉崎真司・廣瀬 梓・岡 浩平

### 1. はじめに

神奈川県湘南海岸では、海岸防災林の前面に自転車道が設置されているために飛砂が絶えず押し寄せ、市民の余暇活動にも支障が出ている。行政では堆砂対策を行っているが決め手が無いのが現状である。一方、海浜には本来特有の植生の成帯構造が見られ、景観形成や飛砂発生抑制に寄与していたが、海岸や砂浜の縮小などにより衰退している。

そこで、海浜植生の有無によって砂地表面の風速の鉛直分布や水平分布特性を把握したうえで、植生により微地形はどう変化するのか、また植生の内外で表層砂の粒径にどのような特徴があるのかを明らかにする目的で調査を行った。

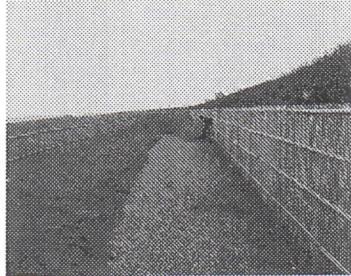


図-1 自転車道への堆砂(2005年2月)

### 2. 研究方法

汀線から内陸へ向かって、主風向(N18° W)に沿って海浜植生の成立する範囲の中心に沿って測線を設置し、5m間隔で水準測量を行った。また、汀線近くの凸地の地表1m高さを基準点として風向・風速計を設置するとともに、基準点から10mごとに地表からの高さ10, 25, 50, 100cmの位置に風速計を設置して風速の鉛直分布を計測した。更に各地点の表面をデジタルカメラで撮影し50cm×50cm方形区内の植被率を算出した。更に、前述の風速の調査地点と植生のない地点において100cc採土円筒を使って表層砂を採取し、標準網篩8階級により粒径分析を行った。

一方、海浜植生であるコウボウムギでは、上向き地下茎の節間長を計ることによって過去の堆砂量の推定が可能と考えられたことから、風速測定地点の個体を1地点につき3個体、過去3年分を目安に根茎を掘り起こし節間長を計測することで、植生による堆砂深を推定した。

### 3. 結果と考察

(1) 神奈川県大磯海岸の海浜部において、植生による飛砂抑制効果検証のための調査を行った。

(2) その結果、海浜植生上の風速は減速され、これは夏季の植被率の増加と群落高の発達に伴う地表面疎

度長が高くなつた結果であると推定された。

(3) 植生内に捕捉された砂の中央粒径は0.19～0.21mmで、他の無植生帶の表層砂に比べて歪度が小さく尖度が非常に大きい粒度特性を示した。

(4) コウボウムギの節間長から堆砂深を推定したところ、対象群落では過去3年間に、平均9.1cmの速度で砂が植生上に堆積していることがわかつた。

(5) 以上から、対象地においてコウボウムギ群落が成立している部分はドーム上に盛り上がつてゐるが、これが植生による飛砂捕捉の結果であり、植生は毎年埋没と上長生長を繰り返しながら維持・発達していると推察された。鈴木(1979)は湘南海岸での調査から、「砂地の植生被覆によって砂防林に飛来する飛砂が1/2近くに抑制されることが認められる。」としており、海浜部における植生被覆は良好な緑地景観の構成要素のみならず、飛砂の固定や移動抑制、更には飛砂発生抑制にも大いに寄与する海岸保全上、非常に重要であると考えられた。

表-1 表層砂の粒径分布特性

	採取場所	D50	Uc	U'c	Sk	K
夏季	無植生	0.25	2.17	0.08	0.49	1.67
	植生	0.21	1.87	0.05	0.40	1.71
	自転車道	0.18	1.69	0.04	0.20	2.40
冬季	無植生	0.24	2.22	0.08	0.53	1.62
	裸地ライ	0.23	1.97	0.06	0.54	1.73
	植生	0.21	1.86	0.05	0.42	1.75
	植生内	0.19	1.64	0.04	0.16	2.84
	自転車道	0.18	1.69	0.04	0.30	3.09

D50: 中央粒径 Uc: 均等係数 U'c: 曲率係数 Sk: 歪度 K: 尖度

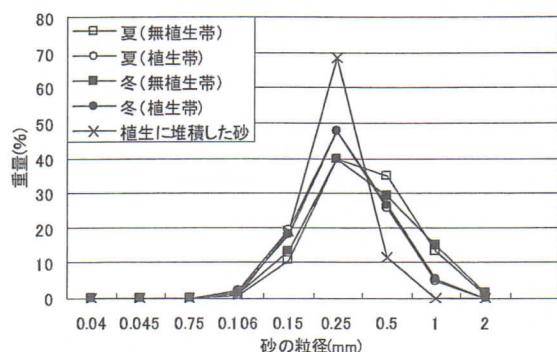


図-2 表層砂の粒径比較

# レシプロ方式水素内燃機関の技術現状と今後

Recent Technology and Prospect of Reciprocating Hydrogen Fuelled Engines

山根公高  
武藏工業大学工学部

水素エンジンの技術背景を読者に知つていただくため、水素エンジンの必要性を解説、その後自動車のエンジンの燃料として利用する立場から水素の性質について解説した論文。

水素エンジンは、混合気形成によってエンジン性能、排気性能が大きく異なるころから2大混合気形成法について解説を加え、レシプロ方式水素内燃機関の概説を行った。その一つは、外部混合方式で、ガソリン車のように燃料である水素と空気をエンジンに導入する前に混合

させ点火時には、均一混合な混合気が成立している。もう一つの方法は、内部混合方式とよばれその中でも、吸気弁が閉じた直前すなわち圧縮の初めにエンジン内に高圧水素を噴射する方式を圧縮前期噴射、圧縮後期にエンジン内に噴射する方法を圧縮後期噴射と区別する。その特徴を表1に示す。外部混合方式の特徴は、軽負荷運転（空気過剩率 $\lambda > 2 \sim 2.5$ ）のみであるが排気性能すなわち水素エンジンのNO<sub>x</sub>がゼロと見なせる性能を示す。また、混合気にしてエンジンに空気を投入するため、空気がエンジンに多く投入できないため発熱量が少なくなり理論混合気（空気過剩率 $\lambda = 1$ ）であっても、ガソリンエンジン出力の75%となってしまう。しかし、内部混合方式では、燃料である水素を吸気弁が閉じた後高圧でエンジンに投入することから、多量に吸入された空気に対する水素を投入できるので理論混合気（空気過剩率 $\lambda = 1$ ）では、ガソリンのそれの1.17倍の出力が出る。しかし圧縮前期噴射では、着火するまでに噴射した水素が空気と混合する時間が長く得られるので、均一混合気で燃焼させることが可能である。しかし、点火する前に着火可能混合気の形成が完了しており、よって燃焼室内に点火以外の着火源があると着火を起こし異常燃焼が起こる場合がある。また、理論混合気では、NO<sub>x</sub>は、5000~6000ppmの大きな濃度を示す。圧縮後期噴射では、燃料水素を噴射したと同時に火花点火して燃焼させる成層燃焼をさせることから、圧縮前期噴射のような異常燃焼は起こらない。かつ、圧縮比を高く設置できるため高熱効率のエンジンが実現する。しかし、成層燃焼させることにより、軽負荷運転（空気過剩率 $\lambda > 2 \sim 2.5$ ）であっても、NO<sub>x</sub>は発生する。ゼロNO<sub>x</sub>排出量にするためには、NO<sub>x</sub>低減装置（EGR装置、触媒後処理装置）に加え、高熱効率とゼロNO<sub>x</sub>を実現させるためには、精密な電子制御が必要となる。最も先進的水素エンジン技術は、現ディーゼルエンジンで実施されているコモンレール方式燃料噴射エンジン制御技術の構築が試されており、この2年ぐらいでその技術の産声が聞こえることが期待されると解説した。

引用論文：水素エネルギー協会会誌、「水素エネルギーシステム」，Vol. 31, NO. 1,

p. 12-19, 2006 CODEN: SESHE3, ISSN 1341-6995, 「特集」依頼投稿原稿

表1 外部混合方式と内部混合方式の特性比較

比較項目	外部混合方式	内部混合方式	
		圧縮前期噴射	圧縮後期噴射
圧縮比	燃料性状で決定	エンジン要求で決定	←
冷却損失(同平均混合比)	大	中	小
熱効率(同出力時)	小	中	大
同行程容積での出力	小	大	大
リーンバーン運転時のNO <sub>x</sub>	小	小	大
NO <sub>x</sub> 低減装置	不要	不要	必要
バックファイバー対策	必要	不要	←
車載液体水素ポンプ要否	不要	必要	←
大型エンジンへの適用	不向	不向	良好
システムの煩雑さ	単純	複雑	←

# A Development of a High Pressure H<sub>2</sub> Gas Injector with High Response by Using Common-Rail Injection System for Direct Injection H<sub>2</sub> Fuelled Engines

Kimitaka Yamane<sup>a</sup>, Masakuni Oikawa<sup>a</sup>, Tomonori Kitaura<sup>a</sup>, Kouta Mawatari<sup>a</sup>, Takashi Kondo<sup>a</sup>, Yasuo Takagi<sup>a</sup>, Yoshio Sato<sup>b</sup>, Yuichi Goto<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Hydrogen Energy Research Center, Musashi Institute of Technology  
1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557, Japan  
[yamane@herc.musashi-tech.ac.jp](mailto:yamane@herc.musashi-tech.ac.jp)*

<sup>b</sup>*National Traffic Safety and Environment Laboratory (NTSEL)  
7-42-27 Jindaijihigashimachi, Fuchu-city, Tokyo 182-0012, Japan  
[goto@ntsel.go.jp](mailto:goto@ntsel.go.jp)*

## ABSTRACT:

The authors have developed a new generation hydrogen gas injector which may overcome the problems brought about by the previous injectors activated hydraulically. The hydrogen gas injector is activated electro-hydraulically by working fluid at 100 MPa fed by the common rail system developed for diesel engines to open the needle valve of the injector. And the hydrogen gas at high pressure of 20 MPa in the injector is directly injected into the combustion chamber. An experiment was carried out concerning the injection flow rates affected by the injection crankangle at two engine speeds such as 1000 and 3000 rpm, the temperature and pressure of the working fluid to obtain the characteristics of the injector.

**KEYWORDS :** Hydrogen Gas Injector, Electro-hydraulic System, Common-Rail

In order to obtain altogether high thermal efficiency, high output power, near-zero NO<sub>x</sub> emission, a precise engine control device is required. In diesel engine development, the common-rail type fuel injector is widely used to obtain both good engine performance and good emission one successfully.

In hydrogen fueled engine development, the common-rail type high pressure hydrogen injector may be useful to obtain good engine and emission performances altogether.

At Hydrogen Energy Research Center (HERC), Musashi Institute of Technology in Tokyo, the common-rail type high pressure hydrogen injector was experimentally made and the characteristics of the injector was obtained experimentally.

It was found from the results that the common-rail system developed for diesel engines is functionally applicable to hydrogen gas injectors.

This is the briefing of the following paper: The CD-ROM Proceedings of WHEC 16, 13-16 June, 2006 at Lyon in France

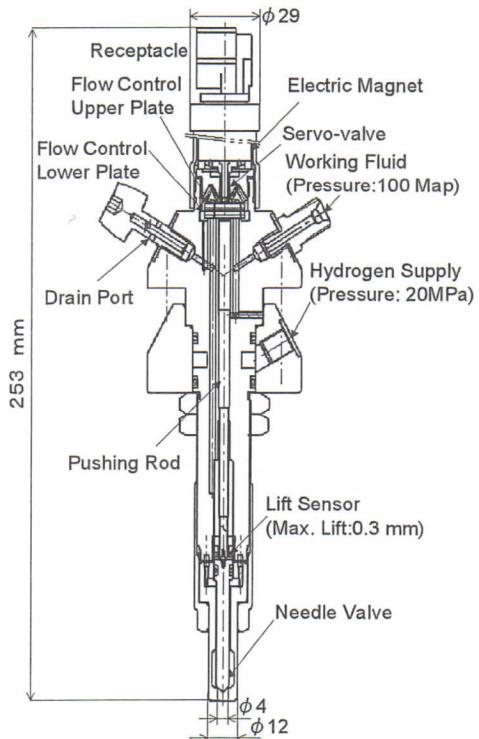


Fig. 1 Cross-Section View of Common-Rail Type High Pressure Injector

# 環境負荷低減システムの研究

武藏工業大学 総合研究所・工学部 電気電子情報工学科 江原由泰

ディーゼルエンジン排気ガス中の微粒子 (DEP : Diesel Exhaust Particle) は帶電しづらく、集じんが困難な粒径 100 nm 以下のナノ粒子が大多数である。ナノ粒子は現行の重量評価法では重視されていない。近年では大粒径粒子よりナノ粒子は健康への危険性が高いと報告され、この粒径の集じん性能が見直されつつある。また、電気集じん装置は放電を用いて粒子の帶電を行っているため、低濃度ではあるがオゾンを発生させてしまう。高効率の電気集じん装置 (ESP) に関する研究は様々あるが、ナノ粒子の集じん性能や排出オゾンに関しての報告はほとんどない。ナノ粒子から大粒径粒子まで、広範囲の粒子を除去できる ESP やオゾンレス ESP の開発が今後の課題となるであろう。

また、高速道路用の地下トンネルなどでは、一酸化炭素濃度が基準値以下になるように換気塔を設置し、ファンによりトンネル内の空気を換気している。換気する空気中の一酸化炭素濃度により、換気塔の高さが決定されている。首都圏などに設置される換気塔は外観にも配慮が必要であり、より低い換気塔が望ましい。

一方、2005 年 5 月、国際海事機関(IMO)によって「MARPOL 条約」が発効され、船舶からの大気汚染物質の排出規制が本格化している。日本、欧州、米国等のいくつかの港湾地域においては既に、船舶に対する独自の排煙の濃度規制が検討あるいは実施されている。いま実際に規制されているのは NOx, SOx であり、今後 CO や DEP が順に規制されるであろう。

上記の背景のもと、本研究は電気集じん装置を対象とし、「次世代電気集じん装置の開発」について、平成 18 年度に行ったものである。都市部のトンネルを対象とした研究や、今後注目しなければならない領域について検討を行った。本研究の成果は以下の 4 つにまとめられる。

## ① ナノ粒子集じんによる次世代電気集じん装置の開発

電気集じん装置の帶電部および集じん部の構造を変化させることにより、ナノ粒子の集じん性能の向上を期待して研究を行った。帶電部では鋸歯状電極、集じん部では穴あき平板電極の評価をそれぞれ行った。

## ② 放電によるCOの酸化に関する研究

大気中の一酸化炭素を放電により酸化し、二酸化炭素に変換することを試みた。処理ガスが乾燥状態では二酸化炭素への変換率が低いため、処理ガスを加湿し OH ラジカルの効果により、変換率の向上を計った。

## ③ 電気集じん装置における電極構造と発生オゾンの関係

電気集じん装置より排出される、オゾン濃度の低減を目的として実験を行った。帶電部の電極を鋸歯状として、溝の深さやピッチを変化させ、オゾン生成濃度の低減を計った。

## ④ ディーゼルエンジンから排出する粒子の直接捕集に関する研究

船舶用ディーゼルエンジンからの排出粒子の除去を目的とした。研究の第一段階として、現在地下トンネル内で実際に使用されている二段式 ESP が、適用可能か判断するための基礎研究を行った。

## **Engineering of TiO<sub>2</sub> and ZnO crystallization in solution**

*Yanfeng Gao*

Musashi Institute of Technology, Advanced Research Laboratories, Tokyo 158-0082, Japan

Synthesis of ceramics from an aqueous solution by partially mimicking the biomimetic process is a promising approach for the growth at low temperatures through an environmentally friendly manner, while it usually produces slightly crystallized or amorphous precipitates. Crystalline ceramic powders and films with precise control of polymorphs, crystalline orientations, sizes and morphologies are of technical importance to achieve a wide range of functions. Investigations into the biomimetic mechanisms provide valuable considerations on the direct synthesis and crystalline control of ceramic oxides in solutions.

In the absence of polymers, we have fabricated a rutile TiO<sub>2</sub> film from a peroxotitanate aqueous solution by kinetically controlling the nucleation and growth. A highly transparent, crack-free film about 2  $\mu\text{m}$  in thickness with specific crystalline orientations along (101) and (002) diffraction planes was successfully deposited on a SnO<sub>2</sub>: F (FTO)-covered glass substrate that was soaked for a long period of time in a peroxotitanate aqueous solution with a low concentration with respect to Ti(IV), and a low pH, but without any other additives. In the presence of a small amount of soluble polymers, the deposition rate was significantly lowered compared to that in the absence of polymers. Interestingly, XRD results showed that the deposits are anatase TiO<sub>2</sub> nanocrystals without obvious crystallographic orientations. The existence of about 30% residue of carbon was also confirmed, suggesting the formation of anatase/polymer hybrid composites. It seems that the polymer stabilized the metastable anatase phase probably by controlling the surface energies. The similar treatment was also effective on the crystallization of ZnO in solution. In this case, ZnO crystals with different morphologies have been grown on substrates or in solution.

### **References:**

1. Y.-F. Gao, M. Nagai, W.S. Seo, and K. Koumoto, "Template-free self-assembly of nanoporous TiO<sub>2</sub> films", *J. Am. Ceram. Soc.*, 90(3), 831-837 (2007).
2. Y.-F. Gao, M. Nagai, W.S. Seo, and K. Koumoto, "Thick transparent rutile TiO<sub>2</sub> films crystallized in solution", *Langmuir* 23(9), 4712 - 4714 (2007).

## 燃料電池用有機無機ハイブリッド電解質膜の開発と評価

総合研究所エネルギー環境科学研究センター 研究員 鈴木智史

### 1. 背景

近年、自動車用動力と電子機器用電源として100°C付近の温度領域で動作する燃料電池が着目されている。その内部で電解質として用いられるパーカルオロスルホン酸系高分子膜は100°C以上での使用に適さないこととメタノール燃料の透過などの問題があることが知られている。そのため、100°C以上200°Cまでの温度領域で動作する燃料電池用電解質膜の開発が広く行われている。本研究ではプロトン供与能を持つ無機物を用いた有機無機ハイブリッド電解質膜の開発と評価を行い、合成プロセスの構築と評価を行う。

### 2. 研究の方針

#### 2.1 スルホン化有機ケイ素複合膜

メルカプト基(-SH)を有する有機ケイ素化合物であるメルカプトプロピルトリメトキシランを参加することでスルホン酸(-SO<sub>3</sub>H)に変化させ、プロトン供与能とプロトン伝導性を付与する。更に、グリシドキシプロピルトリメトキシランを用いて膜化し、気密性や柔軟性を付与する。

#### 2.2 リン酸処理石膏

2006年に硫酸カルシウムを主成分とする石膏をリン酸で処理することで高いプロトン伝導性を発現させることが報告された。本グループでもリン酸処理石膏を追試し、試料の調製条件および広い温度領域におけるプロトン伝導性変化の傾向を調査した。今後はリン酸処理石膏を複合化した伝導膜の作成を行う。

#### 2.3 スルホン化有機ケイ素・高分子複合膜

現在広く用いられているフッ化炭素系高分子プロトン伝導膜以上の特性を得るために、耐熱性高分子にプロトン伝導性を付与する研究が広く行われている。本グループでは優れた耐熱耐薬品性を持つポリイミド樹脂にスルホン化した有機ケイ素化合物を複合化することでプロトン伝導性を付与する。

#### 2.4 リン酸ジルコニウム系複合膜

層状構造を持つリン酸ジルコニウムはプロトン伝導性を有することが報告されている。この物質の層を剥離させることでプロトン伝導経路を増大させることが可能である。本グループでは層剥離させた層状リン酸ジルコニウムを用いてプロトン伝導性複合膜を作成し、評価する。

### 3. 核磁気共鳴分光装置（NMR）の整備

2006年度は固体炭素・ケイ素の測定に使用された。2007年度は多種多様な試料の測定が可能なように運用環境を整備し、学内の広い分野の研究において利用できるようにする。

**The preparation and characterization of different photocatalysts through solution combustion  
synthesis technique**

*Hai-qing Jiang, Koichi Kobayashi*

Musashi Institute of Technology, Advanced Research Laboratories, Tokyo 158-0082, Japan

Combustion synthesis (CS) has emerged as an important technique for the synthesis and processing of advanced ceramics, catalysts, composites, alloys, intermetallics and nanomaterials. Especially, the solution combustion synthesis (SCS) method of preparing oxide materials is a fairly recent development technique. In recent years, this technique has been used to produce homogeneous, very fine, crystalline powders. The combustion synthesis method takes advantage of exothermic, fast and self-sustaining chemical reactions between metal salts and a suitable organic fuel, such as citric acid, urea, hydrazides, malonic acid dihydrazide, tetra formal tris azine et al. Since most of the heat required for the synthesis is supplied by the reaction itself, the mixture of the reactants only needs heating up to a temperature that is significantly lower than the actual phase formation temperature.

In our research work, we synthesized different photocatalysts, such as  $\text{AgNbO}_3$ ,  $\text{BiNbO}_4$ , et al, through solution combustion technique. Citric acid was not only employed as chelating agent, but also was applied as fuel. At the same time, ammonia solution, as well as a reagent to adjust pH, will react with  $\text{NO}_3^-$  radical to form ammonium nitrate, which can be used as an oxidizer. The phase structure of as-burnt powders was investigated through X-ray diffraction. The diffusion reflection spectra of as-burnt powders were recorded through UV-VIS-IR spectrophotometer. The morphology were observed by scanning electron microscopy. And the photocatalysts properties were investigated through photodegradation of methyl blue.

共同研究支援  
インフラテック研究室

## 企業価値向上のための防災投資促進技術に関する共同研究

武蔵工業大学総合研究所 星谷勝

### 1. はじめに

本報告書は、特定非営利活動法人シビルサポートネットワークをプラットホームとして、武蔵工業大学総合研究所、(株)長大、日本技術開発(株)、(株)篠塚研究所による社産学協同研究「企業価値向上のための防災投資促進技術に関する共同研究」(Phase I : 平成 17 年 9 月—平成 18 年 3 月末および Phase II : 平成 18 年 4 月—平成 18 年 12 月末) の成果をまとめたものである。

研究の目的および要旨は以下の通りである。

### 2. 研究目的

#### 1. 背景

地震防災への取り組みは企業価値を高め、また地域社会の防災性向上に資する意味でも、重要な検討課題である。しかしながら、投資効率を物差として企業選別を行う外資の急増や国際間の競争の激化などから、企業は短期的な投資効率を重視する傾向にあり、長期的な視点が必要な防災投資に積極的に取り組む企業は少ない。

間接金融から直接金融の時代を向かえ、企業の資金調達手段は多様化し、市場を通じた社債株式による調達が比重を占めるようになった。これを受け、企業は安定した資金調達を実現するため借り入れとしての調達を含め、投資家の意向を重視する傾向にある。ところが、地震リスクを取り入れた投資判断指標は必ずしも整備されておらず、投資家は地震対策に熱心な企業とそうでない企業の選別ができるない。一方の企業は、企業価値に与える防災投資の貢献度を示す手立てがなく、防災投資を IR (Investors Relations) 活動や社会的責任投融資 (SRI) の一環として位置付けることができない。これは、企業が防災投資にインセンティブを持てない状況の一因となっている。

一方、防災対策はリスクの転嫁、分散、低減、保有など、物理的な対策から金融的な対策まで多様であるが、これら対策の組み合わせを含め、一つの尺度で効果を記述する方法は未整備である。企業が持つ選択肢の多様性を考慮すると、防災投資の妥当性を統一的に評価することは不可欠である。

#### 2. 研究提案

日本政策投資銀行のレポート「防災マネジメントによる企業価値向上に向けて」は、企業の防災投資が企業価値の向上、さらには地域経済や社会に対しても有益であることを述べたうえで、企業の防災マネジメントに関する考え方や方法論、要素技術、さらには事例を踏まえ幅広くリサーチしている。特に、災害時の事業継続プラン (BCP) については、中心的な役割を担う考え方として位置づける一方、先行している環境会計と対比しつつ、企業財務における防災会計の必要性やあり方について論じている。また、要素技術として、防災投資は長期的な視点が必要であるとの考え方の下、その効果を記述する既存モデルとして、費用便益分析ならびに LCC を取り上げ紹介している。しかしながら、防災投資効果を記述する適切な方法や指標については課題とし、また企業の自主的な取り組みを促進する立場から、基準化による企業活動への弊害について指摘している。

本研究は、上記レポートを受け、企業の防災投資を促進するための具体的な方法や指標の開発を目標に、参加各社による共同研究組織の下で実施した。研究は Phase 1 ならびに Phase 2 に分けて行なった。

Phase 1 では、①企業を取り巻くステークホルダーが共通の理念で理解できる情報とは何かを検討した上で、②防災への取り組みを企業会計に則した情報として開示できる指標を検討し、③その具体的な評価方法を検討した。④地震の発生や被害の不確実性等、将来推計におけるリスクを反映できる評価モデルを開発し、⑤既存の財務指標との整合性を図りつつ、物理的、金融的対策の区別なく、防災投資による企業価値を合理的に記述できる指標の提案を行った。

Phase 2 は、Phase 1 の研究成果を受け、⑥具体的な事例解析を通じモデルの適用性について検討を行い、セミナーの開催および学会での論文発表を行なった。一方、公益事業についても市場原理に則した効率化や質的向上が求められている実情を考慮し、⑦社会資本の防災投資を促進する指標あるいはモデルとして、その適用可能性について検討した。

## 1. はじめに

本研究では、上水道システムの防災投資効果の評価に、確率論的現在価値変換法（Stochastic Discounted Cash Flow：確率論的 DCF 法）を適用する。

## 2. 確率論的 DCF 法の上水道システムへの適用

評価期間  $n$  年間の上水道システムの正味現在価値（NPV）を  $Y^{(n)}$  とし、式(1)に基本式を示す。ここで、 $C_i$  は収益、 $Q_i$  は維持管理費、 $S_i$  は地震損失、そして、 $B_i$  は、市民に与える効用を金額に換算した便益である。また、 $v$ 、 $v_n$  は、それぞれ、現状と  $n$  年後の資産価値である。 $s$  は便益に対する現在価値割引率（社会的割引率）、 $r$  は現在価値割引率であり有利子負債コスト  $r_B$  と同じ値をとる。

$$Y^{(n)} = -v + \sum_{i=1}^n B_i (1+s)^{-i} + \sum_{i=1}^n (C_i - Q_i - S_i) (1+r)^{-i} + v_n (1+r)^{-n} \quad (1)$$

また、投資効率指標  $P_B$  は、 $s$  および  $r$  による条件付確率として、式(2)によって定義される。

$$P_B = P(Y^{(n)} \geq 0 | s, r = r_B) \quad (2)$$

## 3. 数値計算例

(1) 解析対象モデル 首都圏近郊の上水道システムを想定したモデルを例題として、式(2)によって定義された投資効率指標  $P_B$  を用いて地震対策の検討を行う。

地震損失  $S_i$  は、被害管路の再調達価格とする。また、収益  $C_i$  および便益  $B_i$  は、地震損失  $S_i$  の関数となるため確率変数である。

当該システムに被害を及ぼす 4 つのシナリオ地震を地震ハザードとして被害の計算を行う。これらの地震による管路被害総額は再調達価格の総額以下であり、被害の発生は、評価期間  $n$  年間に多くても 1 回とする。

収益  $C_i$  は、平均値 445 億円、変動係数 0.4% で正規分布に従うランダムウォークで変動するものとする。支出  $Q_i$  は確定量で、その内訳は毎年定期的にかかる管理運営費 428 億円と、地震対策実施時の費用 157 億円である。また、資産価値  $v$  は 1,290 億円、便益  $B_i$  は検討して 36 億円としたが、これは収益  $C_i$  の約 8% に相当する。簡単のため、社会的割引率  $s$  と割引率  $r (= r_B)$  は区別せず、等しい値と仮定する。

## (2) 解析結果

地震対策は単年度で完了するものとし、その実施時期を、1 年目、6 年目、16 年目と 3 ケースを検討する。地震対策の実施により、管路の耐震性が向上し、地震発生時の損失が減少する。評価期間  $n=30$  年間として、モンテカルロシミュレーション法により解析し、結果を比較する。

図-1 に縦軸に投資効率指標  $P_B$ 、横軸に割引率  $r = r_B (= s)$  をとったリスク・リターン曲線を示す。ここでは、地震損失を考慮しない場合 (Case A')、地震発生を考慮するが地震対策を実施しない場合 (Case A)，対策を 1 年目に実施 (Case B) の 3 ケースを比較している。投資効率指標  $P_B$  が 1.0 に

近いほど安全であるため、 $x$  軸の割引率の値が同じときに  $y$  軸の  $P_B$  の値が上方に位置しているものが、より安全であることになる。図-2 では、地震対策を 6 年目に実施する場合 (Case C) と、対策実施以前に地震が発生した場合にはそれ以降の対策は中止する場合 (Case C') を比較している。Case C' はリアルオプションが設定されている場合である。図-3 では、地震対策を 16 年目に実施する場合 (Case D) と、対策実施以前に地震が発生した場合にはそれ以降の対策は中止する場合 (Case D') を比較している。Case D' は、Case C' と同様にリアルオプションが設定されている場合である。最後に、Case A, B, C' および D' の、 $P_B \geq 0.5$  の範囲での比較結果を図-4 に示す。安全重視の方針が選択された場合には、明らかに、Case B > Case C' > Case D' > Case A となっていることが分かる。

## 4. おわりに

確率論的 DCF 法は、社会基盤である上水道の防災投資効果の評価に有効であることが示された。さらに、当初計画の中止・変更に関する意思決定にも対応できる指標を提示できたと考えている。

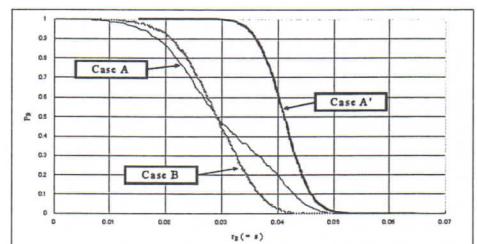


図-1 割引率  $r$ - $P_B$  曲線

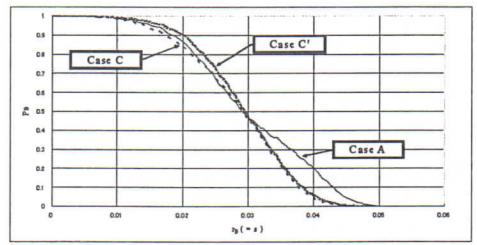


図-2 対策実施の効果（拡大図）  
( $P_B \geq 0.5$ )

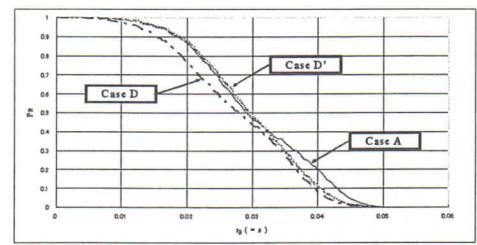


図-3 現状と対策実施後との比較

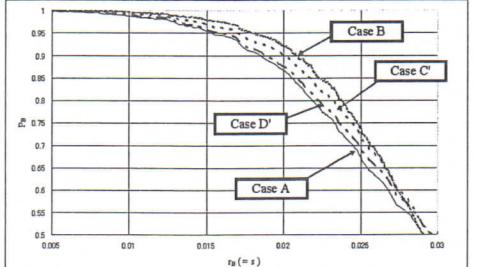


図-4 現状と対策実施後との比較  
(拡大図)

# 上水道システムの地震災害に対する広域復旧戦略シミュレータの開発

武藏工業大学総合研究所

山本欣弥

株式会社イー・アール・エス 永田 茂, 景山耕平

## 1. はじめに

本研究では、公開されている地震動を用いて解析対象とする地区の配水管路網の被害と応急復旧過程を簡略的に推定可能な「上水道システムの広域復旧戦略シミュレータ簡易版」を開発した。以下に、その内容について報告する。

## 2. 上水道システムの広域復旧戦略シミュレータ簡易版の概要

本研究で開発した広域復旧戦略シミュレータ簡易版（簡易版シミュレータ）は解析用ネットワークモデルを利用せずに、地域基準メッシュ（3次メッシュ）単位で公開されている地震ハザードを入力として用い、3次メッシュごとに配水管路の被害を簡便に推定し、その結果に基づいて解析対象地区全体の被害を求めて、応急復旧日数の平均値や標準偏差などの統計量および応急復旧曲線の推定を行うことが可能である。

## 3. システムの特徴

簡易版シミュレータは、3次メッシュ単位に整備された給水人口、地盤種、地震動などのデータベースと、（社）日本水道協会の水道統計の管路データを利用して水道事業者単位で作成した配水管路データベースにより、3次メッシュ単位での配水管路の平均被害率（箇所/km）と平均被害箇所数を算出する。そして、被害発生がポアソン分布に従うものと仮定してモンテカルロシミュレーション法を用いて被害箇所数をシミュレートし、復旧歩掛り、投入復旧作業班数などの情報を入力として、応急復旧日数の平均値、標準偏差等の統計量を算出する。

また、3次メッシュで公開されている、主要 98 断層帯に発生する固有地震 115 地震、海溝型地震 24 地震、そして 50 年発生確率地震 4 地震の合計 183 の想定地震の地震動分布を用いて解析対象地区の水道管路の被害推定を行っている。そのため、選択した解析対象地区にとって、どの地震による影響が最も大きいかについての検討が可能である。さらに、任意の 1 つのメッシュの復旧完了時期等の推定結果を示すことが出来る。

## 4. 解析結果の出力例

神戸市水道局の配水管路網を用いた解析結果の出力例を以下に示す。図-1 は、東南海-南海連動地震動による被害箇所数の平均値の分布、図-2 は、応急復旧開始地点とした配水池などの配水拠点と復旧過程、図-3 は、1 日あたりの最大投入復旧班数を 100 班とした場合の復旧曲線をそれぞれ示している。図-4 は、1 日あたりの平均投入復旧班数を 70 班とした場合の、50 年発生確率地震に関する応急復旧日数のリスクカーブである。

## 5. おわりに

簡易版シミュレータは、水道管路網のデジタルデータを保有しなくても、概略的ではあるが配水管路網の全体的な応急復旧日数および復旧戦略の検討を可能にしたことなど、上水道の防災力の向上に寄与するものと考える。

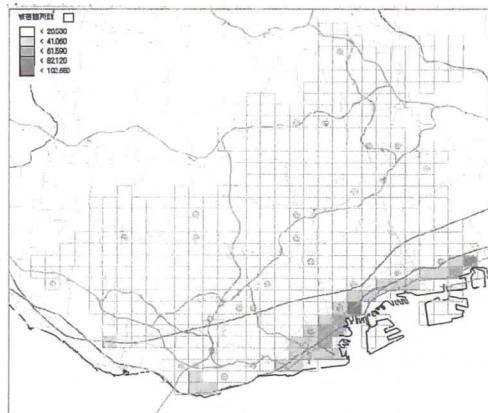


図-1 被害箇所数の分布

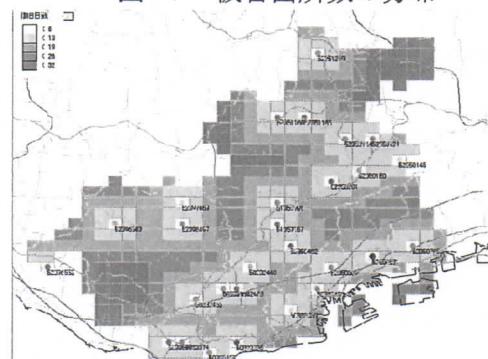


図-2 応急復旧開始地点と復旧過程

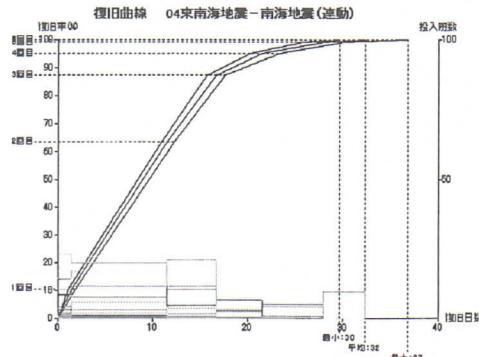


図-3 応急復旧曲線

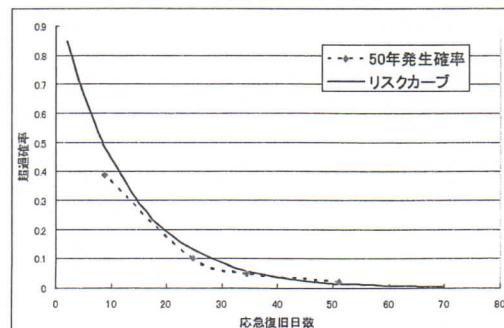


図-4 地震リスクカーブ