

武蔵工業大学
総合研究所 紀要

第2号

平成18年5月
武蔵工業大学・総合研究所

はじめに

武蔵工業大学・総合研究所は、本学における重要研究拠点として2004年4月に発足し、2年を経過した。

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年度には共同研究の活動拠点として貸研究室の整備を行い、現在2つの研究室が活動を開始している。

「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、文部科学省の特別推進研究や特定領域研究で実施してきた、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している。エレクトロニクスを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。

また、昨年度には総合研究所のグランドデザインを作成したが、現在この計画を実現し、総合研究所を発展させ、名実ともに、本学における研究拠点となることを目指し、鋭意努力中である。

本総合研究所は、産業界との協働を積極的に推進することもモットーの一つとしており、研究成果のいち早い社会還元を目指し、産学共同研究を積極的に推進する予定である。

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、研究および教育活動が本格化し、本学における研究拠点として立ち上がってきたその軌跡と、主要成果を示すものである。

2006年5月

武蔵工業大学・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、研究が推進されている。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、すでにナノメートル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 50 nm 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 500 m² 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、さらには中国科学院半導体研究所や台湾の国立成功大学などから、研究者や学生を受け入れ、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計画中である。

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

2006 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

許容可能な水準で環境を維持しながら、生活の質の向上と社会の持続的発展を可能とするためには、クリーンなエネルギー源の確保と産業活動或いは日々の生活で生じる環境負荷物質の低減が喫緊の課題である。エネルギー環境科学研究センターは、このような人類共通の克服に長期間を要する困難な課題に対して、研究者の得意分野を生かし連携を強化して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に取り組むとともに、他大学或いは公的研究機関との共同研究にも鋭意取り組んでおり、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、大阪大学、大分大学等と共同研究を進めている。

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。私達はこれまでに文部科学省のハイテクリサーチセンター、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、光触媒や放電処理を中心とした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、電池特性の解析及び電池システムの最適化を重点課題として研究を進めており、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、次世代の燃料電池として期待される固体酸化物形燃料電池に関しても、電解質と電極の両面から研究を進めている。さらに、燃料確保の観点から、水素製造及び利用に関する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、クリーンエネルギーの代表例である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。

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

2006 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（貸研究室）

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の研究

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。

2006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	白木靖寛	特任教授
副所長	兼務 渡辺 健	システム情報工学科講師・ 国際産官学連携室室長

シリコンナノ科学研究センター

センター長 兼務	白木 靖寛		(半導体工学)
兼務	丸泉 琢也	工学部・教授	(半導体工学)
兼務	田口 亮	工学部・教授	(信号処理)
兼務	秋谷 昌宏	工学部・教授	(集積回路)
兼務	宮内 新	工学部・教授	(集積回路)
兼務	野平 博司	工学部・助教授	(電子物性)
兼務	鳥居 肅	工学部・助教授	(マイクロマシン)
	服部 健雄	客員教授[武蔵工大・名誉教授]	(電子物性)
	中川 清和	客員教授[山梨大・教授]	(半導体工学)
	吉見 信	客員教授[ソITECKアジア・チーフサイエンティスト]	(半導体工学)
	マクシム ミロノフ	助手	(半導体工学)
	澤野憲太郎	助手	(半導体工学)
	奥井登志子	研究員	(半導体工学)
	夏 金松	研究員	(半導体工学)
兼務	田口 貞憲	技術員	
	大竹 省自	技術員	

エネルギー環境科学研究センター

センター長 兼務	永井 正幸	工学部・教授	(無機材料化学)
兼務	高木 靖雄	工学部・教授	(エネルギーシステム)
兼務	山根 公高	工学部・助教授	(エネルギーシステム)
兼務	鳥山 保	工学部・教授	(材料分析・計測)
兼務	若林 英彦	工学部・助教授	(材料分析・計測)
兼務	小林 光一	工学部・教授	(有機材料化学)

兼務	高橋 政志	工学部・講師	(有機材料化学)
兼務	鍋木 裕	工学部・教授	(有機材料化学)
兼務	宗像 文男	工学部・教授	(固体化学)
兼務	江原 由泰	工学部・助教授	(電子化学)
兼務	吉崎 真司	環境情報学部・助教授	(環境緑化工学)
兼務	梅村 和夫	工学部・講師	(生物物理学)
	高 彦峰	助手	(無機合成化学)
	岡田 達弘	共同研究者 [産業技術総合研究所・主任研究員]	(電気化学)
	河本 邦仁	共同研究者[名古屋大・教授]	(固体材料学・無機反応化学)
	小栗 慶之	共同研究者[東工大・助教授]	(イオンビーム応用工学)
	和田 雄二	共同研究者[大阪大・助教授]	(光化学・ナノ機能材料化学)
	宮下 徳治	共同研究者[東北大・教授]	(高分子ナノ材料学)
	大谷 朝男	共同研究者[群馬大・教授]	(材料設計化学)
	豊田 昌宏	共同研究者[大分大・教授]	(無機材料化学)
	宮坂 力	共同研究者[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

星谷 勝	特任教授 [武蔵工大・名誉教授]
山本 欣弥	共同研究者 [攻玉社短期大学・教授]

事務員	鈴木栄里子	国際産官学連携室
	徳植久子	国際産官学連携室

目 次

1. 平成17年度 活動報告	1
2. 平成17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
MPEG標準符号化方式映像の画質改善処理チップ の実現	田口 亮
バイオセンサシステムの研究	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 肅
Results of research activity for period April 2005 - March 2006	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
Light Emission from Ge Quantum Dots Embedded in Photonic Crystals Cavities	夏 金松
エネルギー環境科学研究センター	15
チタンニオブ酸塩を用いた光触媒材料の作製と評価	永井 正幸
固体高分子形燃料電池の燃料切れ運転に起因する性能 劣化特性解明と軽減	高木 靖雄
波長分散型粒子線誘起X線分析法 (WD-P I X E) による固体高分子型燃料電池の硫黄の分析	鳥山 保
対極に金属酸化物/導電性高分子複合材料を用いた 色素増感太陽電池の作製と評価	小林 光一

放熱フィルムおよびキャパシター用電極材としての炭素材料	鎗木 裕
エネルギー変換材料用セラミックス材料の研究	宗像 文男
砂浜の緑地修復技術	吉崎 真司
環境負荷低減システムの研究	江原 由泰
Nanostructured ZnO photoelectrodes	高 彦峰
共同研究支援 インフラテック研究室・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27
企業の防災投資促進技術の開発	星谷 勝
SDCF 法を用いた上水道システムの地震リスクマネジメント	山本 欣弥

3. 研究論文

シリコンナノ科学研究センター	35
エネルギー環境科学研究センター	45
インフラテック研究室	101

総合研究所 平成17年度活動報告

月	日	活 動 内 容
4	1	夜回り警備の導入
	14	第12回所内会議
	14	総合研究所説明会(学生対象)
	22	電気電子情報工学科、米国インテル(株)本社見学及びディスカッション開催
5	12	第13回所内会議
	16	第3回運営委員会
	31	総合研究所紀要－第1号－発行
6	1	カードキー取替工事
	2	第14回所内会議
7	1	既存棟2階教室及び女子トイレ改修工事完了
	7	第15回所内会議
9	1	ボンベ庫設置
	6	玉川消防署立入検査
	20	第4回運営委員会
	29	第16回所内会議
	30	総合研究所パンフレット(改訂版)発行
10	1	貸研究室入居開始
	11	日本学術振興会 薄膜第131委員会開催
	20	第17回所内会議
11	17	第18回所内会議
	18	「シリコンナノ科学」研究プロジェクト成果報告会
	21	第5回運営委員会
	30	防災訓練
12	15	第19回所内会議
1	12	第20回所内会議
2	9	第21回所内会議
3	13	学術フロンティアシンポジウム開催
	14	第22回所内会議
	20	第6回運営委員会

平成 1 7 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センターでは、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、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研究を進めている。具体的テーマとしては、第一原理計算による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、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、昨年度進めたシミュレーション研究のうち、ナノスケール MOS デバイスの応力・転位分布解析についてその概要を報告する。

2. ナノスケール MOS の応力・転位分布解析

微細化が進むナノスケール MOS デバイスでは、その性能向上に向け、高誘電率ゲート絶縁膜材料の開発や、新規デバイス構造の提案が積極的に進められている。新規デバイスでは、3 次元的構造により、短チャネル効果低減を狙うものや、Si と SiGe とのヘテロ構造を利用し、発生する歪を電気特性向上に利用するものなどの報告が多く、これらデバイスでの応力・転位分布の解析技術は、重要となる。本研究では、応力・転位分布解析技術立ち上げの一環として、デバイスソース、ドレインに SiGe を用い、チャネル方向に圧縮歪をかける歪チャネル MOS 構造、3 次元デバイス構造として Fin 型 MOS-FET について解析を進めた。また、Si/SiGe ヘテロ構造に発生する転位の挙動を検討するため、基板構造での転位発生を結晶塑性解析により評価した。本稿では歪チャネル MOS についてその解析結果を示す。

図 1 には参考とした歪チャネル MOS 構造を、図 2 にはその解析モデル（全体構造を上部に、チャネル領域拡大図を下部）を示す。チャネル長を 40nm、20nm と変えたときの分布変化を評価した。デバイス材料については Si、SiGe、poly-Si、SiO₂ の 4 種とした。図 3、図 4 に歪分布と応力分布図を示す。チャネル領域での圧縮歪が再現できている。材料定数設定、メッシュ最適化などに課題を残しているが、本研究によりデバイス構造での応力、転位分布解析技術を立ち上げる事ができたと考える。

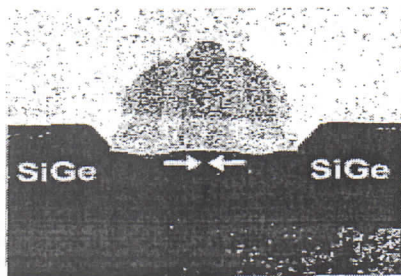


図 1 SiGe-SD 構造を持つ歪 Si チャネル MOS

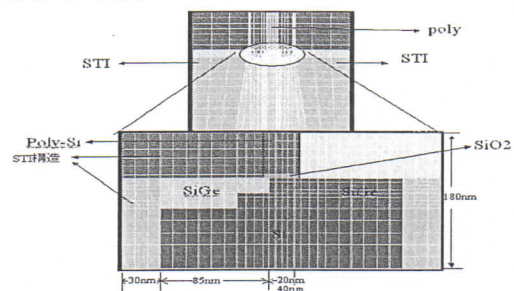


図 2 歪チャネル MOS 構造のモデル

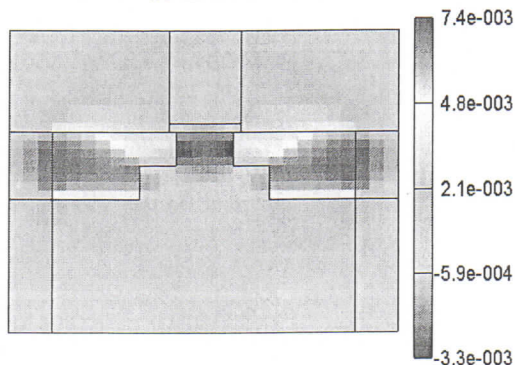


図 3 歪 ϵ_{xx} 分布 (L=40nm)

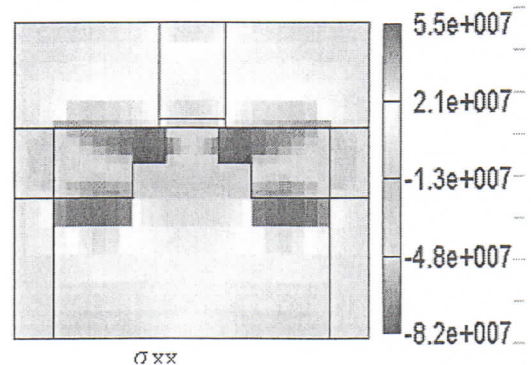


図 4 応力 σ_{xx} 分布図 (L=40nm)

3. 今後の研究計画

平成 18 年度は、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、結晶塑性解析によるナノスケール MOS の応力・転位分布解析などを引き続き進めるとともに、STM/STS の第一原理計算、微細デバイスのモンテカルロデバイスシミュレーションほかを進めてゆく。

MPEG 標準符号化方式映像の画質改善処理チップの実現

工学部電気電子情報工学科 田口 亮

地上デジタルTVの全世帯導入がいよいよ現実性を帯び、また、映画・ドラマ・コンサート等が録画されたDVDの市販状況は活気を呈している。地上デジタルTV放送映像、DVD録画映像ともに、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。

MPEG符号化方式は映像信号圧縮を目的とした不可逆符号化であり、映像信号には符号化による劣化が生じている。映像信号はカラー信号であるが、カラー信号は輝度成分と色差成分に分解して符号化・伝送/蓄積される。ここで注意すべきは輝度成分と色差成分に対する処理の要求が異なる点である。輝度成分に対しては、ブロック歪み、モスキート雑音と言った符号化に起因する劣化を低減させる処理が重要である。一方、色差成分に対しては符号化の際に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ことが必要であり、このことは、画像の詳細部分の色再現性の向上処理や色の鮮やかさに関する復元処理によって成し遂げられる。

平成17年度はMPEG映像に対する質向上のためのアルゴリズムとそのFPGA実装を行ってきた。輝度成分に対するブロック歪みやモスキート雑音の低減のために荷重メジアンフィルタと ε -フィルタを組み合わせた拡張 ε -フィルタ方式を明らかにしFPGA(Xilinx社製Virtex II)に実装した。色差信号に対してはフォーマット変換に対する画像エッジ部に生じる弊害は既に回避済みであったので、昨年度は色の鮮やかさ(彩度)を復元・強調する処理を提案した。色差信号に対する前者の処理はFPGA実装を終えたが、後者の処理に関しては平成18年度に実装を行うことになる。

平成18年度はMPEG符号/復号器に接続することを念頭に、上記3つの方式を一括した簡易な映像処理エンジンをFPGAに実装する段階となった。本年度の上半期にはFPGAへの実装を完了することになろう。また、FPGA実装で動作確認終了後、LSIチップ化を図る方向で検討を進める。

さらに、平成18年度はMPEG映像にこだわらず、さらに有益な映像信号処理方式の提案とFPGA実装を図っていきたい。研究・開発を行っていく方式として「ビット長伸長処理」、「フレームレート向上処理」、「符号化雑音等の低減のための時空間フィルタ処理方式」等があげられる。

最後に、平成17年度の主な関連研究発表実績を示させて頂く。

文献

- [1] 渡辺, 田口: "ラプラシアンピラミッド階層表現に基づくデジタル画像拡大法の高性能化," 電子情報通信学会論文誌(A), Vol. J88-A, NO. 11, pp. 1392-1397.
- [2] 杉田, 田口: "YUV4:2:0 フォーマットカラー画像の色差成分補間法," 電子情報通信学会論文誌(A), Vol. J88-A, NO. 6, pp. 751-760.
- [3] 重村, 田口: "YCbCr 色空間における画像の彩度強調," 電子情報通信学会技術研究報告(スマートインフォメディアシステム) 平成18年3月.
- [4] 滝本, 田口: "MPEG用ポストフィルタのDSP実装," 電子情報通信学会技術研究報告(スマートインフォメディアシステム) 平成17年6月.

バイオセンサシステムの研究

工学部電子通信工学科

秋谷昌宏

1. はじめに

バイオセンサとしてこれまでに、有機超薄膜の一種であるLB膜を用いた味覚センサ並びににおいセンサの開発と同時にこれらのセンサからの出力をデータ処理するLSIの研究を進めてきた。今回新たにカーボンナノチューブを用いた抗原抗体センサを試作し、その特性評価を目的としたビタミンタンパク質結合反応を利用した測定を行った。

2. 味覚センサ

塩味、酸味、苦味、甘味、うま味の基本5味を検出金属電極上にLB膜を堆積したセンサを用いて最大膜電位変化、応答時間等をパラメータとして味覚物質の識別をおこなっている。今回、新たな膜物質としてステアリン酸を採り上げ実験を行った結果、従来識別が困難であった苦味、旨味において良好な識別が行えることを確認した (Fig. 1)。

3. データ処理 LSI、

におい、味覚センサからのデータを取り込み、応答パタンの特徴抽出により、におい並びに味覚物質の認識を行う回路のLSI化に取り組んでいる。識別回路にSVM(Support Vector Machine)を採用することにより93%以上の識別率を得られる見通しを得た。

4. 抗原抗体センサ

特性ビタミン(ビオチン)と結合する糖タンパク質(アビジン)をカーボンナノチューブに修飾させて作製した抗原抗体センサの特性評価を行った。各種ビタミン注入時の電極間インピーダンスの時間変化を測定した結果、ビオチンを注入した場合にはインピーダンスが増加し、他のビタミン類(B₁, B₆, C)では減少する結果が得られた。さらに、ビタミン注入直後から反応が現れ、2、3分以内に数値が安定することも判明した (Fig. 2)。

参考文献

- 1) M. Akiya and H. Yamada, Abstract of Electrochem. 2005, P32, 2005
- 2) 平田、愛甲、秋谷、武居、坂井、畠山、応用物理学会春季大会予稿 p.1636, 2006
- 3) 荒田、平田、秋谷、応用物理学会春季大会予稿 p.1331, 2006
- 4) 福岡、平田、秋谷、電子情報通信学会春季総合大会予稿 p.36, 2006

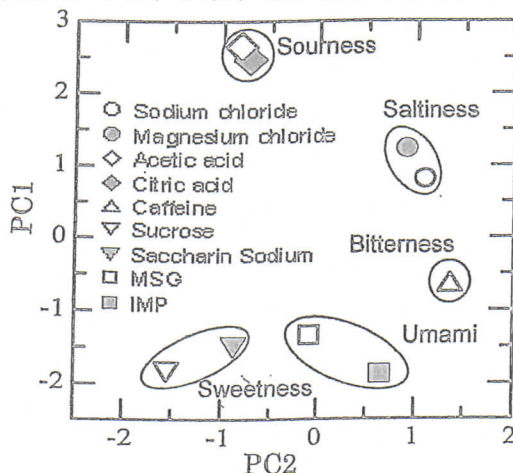


Fig.1 基本5味の識別マップ

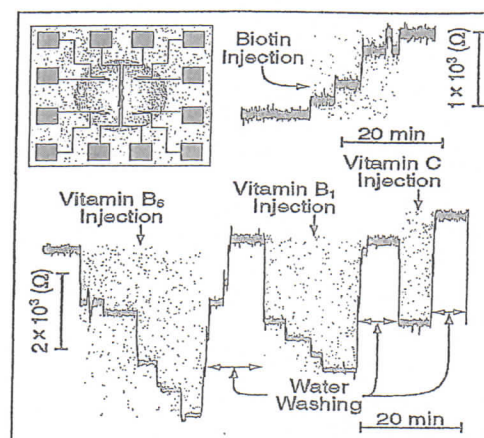


Fig.2 電極間インピーダンスの時間変化

1. はじめに

シリコンナノ科学研究センターでは、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（ANELBA㈱、L-250S-FH（特型）、図1）、エッチング装置（ANELBA㈱、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。

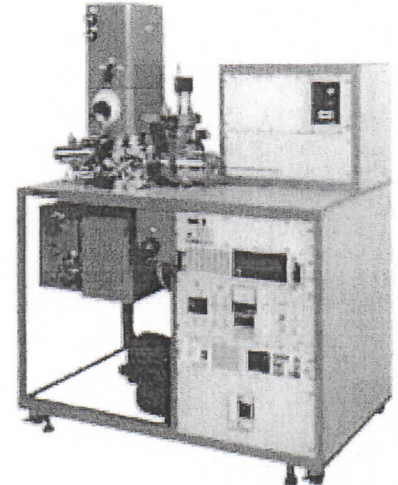


図1 平行平板型スパッタリング装置

3. 研究成果の紹介

本年度は、平行平板型スパッタリング装置を用いて作製したLaとSiの組成を制御して作製した膜厚約10 nmのランタンシリケート層のX線光電子分光測定を行い、(1) La組成の増加とともにランタンシリケートに起因するSi 2p光電子の結合エネルギーは低結合エネルギー側に、一方La 3d_{5/2}光電子の結合エネルギーは高結合エネルギー側にシフトする、(2) 一方、ランタンシリケートからのO 1s光電子の結合エネルギーは、La/Siの組成比が変化してもほとんど変化しないことを明らかにした。この知見をもとに、室温で水素終端されたSi面上にLaO_xを堆積することで作製したLaO_x/Siおよびこの試料を1 Torrの窒素中で300℃、400℃、500℃、600℃の熱処理を行った試料を角度分解X線光電子分光法により評価した。測定光電子は、Si 2s、La 3d、O 1sである。その結果、LaO_x/Si界面は、300℃までは安定であるが、400℃以上では、LaO_x層とSi層との間で界面反応が生じLaシリケートが形成されること、500℃以上では、さらに界面反応が進行することを見いだした。

4. 今後の研究計画

平成18年度は、引き続き希土類酸化物/Siの界面構造、深さ方向組成分布をX線光電子分光法を用いて評価し、熱的に安定な希土類酸化物/Si界面構造を探る。これらに加え、希土類酸化膜/Geの界面構造の検討を行う。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., ECS Transactions, **Vol. 1**, (2005) pp. 87-95.
- 2) M. Higuchi et al., ECS Transactions, **Vol. 1**, (2005) pp. 267-276.
- 3) Y. Hijikata, et al., Materials Science Forum Vols. **483-485** (2005) pp. 585-588.
- 4) T. Hattori, et al., Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena **144-147** (2005) pp. 457-460.
- 5) Y. Takata, et al., Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena **144-147** (2005) pp. 1063-1065.
- 6) S. Shinagawa et al., Microelectronic Engineering **80** (2005) pp. 98-101.
- 7) Y. Takata, et al., Detectors and Associated Equipment **547**, (2005), pp. 50-55.

我々の研究グループでは、ナノ・マイクロマシンの研究を目的として、総合研究所の設備を用いて、微細加工(Micro Fabrication)技術の確立を主眼として活動している。これまでに得られた成果として、現在実施可能な加工技術は以下の通りである。

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 SiO_2 薄膜の生成を組み合わせ、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、等方性及び異方性エッチを組み合わせ、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等を行っており、図1に示すような、幅 $5\mu\text{m}$ 、厚さ 800nm 、長さ約 $100\mu\text{m}$ のマイクロブリッジの製作に成功している。

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 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°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) 真空蒸着による電極の生成

一般的な真空蒸着装置により、Al 薄膜を形成し、フォトリソによるリフトオフ、または 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) 集束イオンビーム(FIB)装置による加工

図2に示す集束イオンビーム(FIB)装置の稼働に成功し、 50nm オーダの切削加工とスパッタ堆積が可能となった。これにより、超微細な穴空け・くり抜き加工が可能となる。

これらの技術を用いて、図3に示すようなカンチレバー型静電アクチュエータを数種、流体ポンプ用流量制御構造などの製作を行った。当グループは本来電磁力応用を得意分野としているため、図4のような多層マイクロコイルの製作等も予定している。

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) ポリシリコン犠牲層の成膜とそのエッチ技術

3) ボ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。

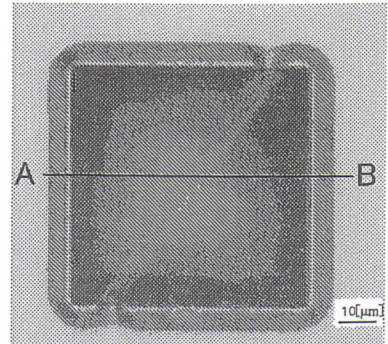


図1 幅 $5\mu\text{m}$ 厚さ 800nm のマイクロブリッジ

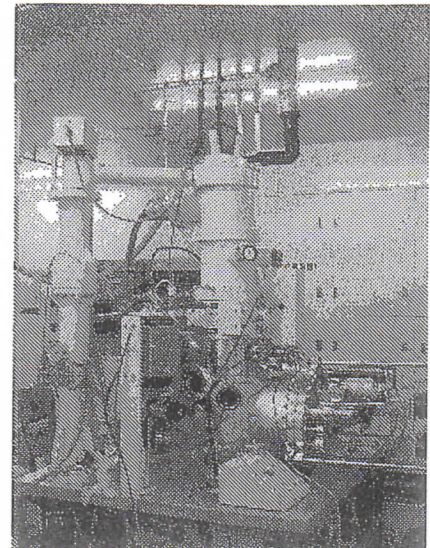


図2 集束イオンビーム装置(FIB)

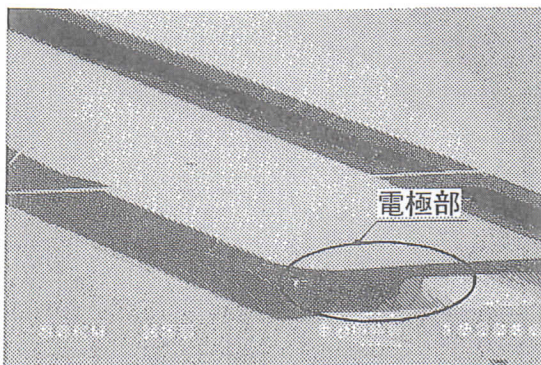


図3 カンチレバー型静電アクチュエータ

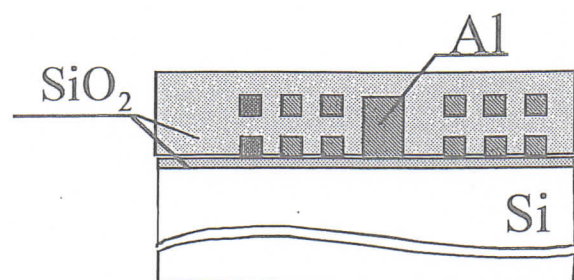


図4 多層マイクロコイル

Results of research activity for period April 2005 - March 2006

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

14 June 2006

Enhancement of hole mobility and carrier density in Ge quantum well of SiGe heterostructure via implementation of double-sides modulation doping

A significant improvement of transport properties of 2DHG (two-dimensional hole gas) in the strained Ge quantum well (QW) of SiGe heterostructure was obtained via implementation of double-sides modulation doping from bottom and top sides of Ge QW. Around two times enhancement of 2DHG Hall mobility up to $30,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ and sheet carrier density up to $1.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ were obtained at 3 K. By employing this way of modulation doping hole's wave function was moved away from the interface towards the center of Ge QW that allowed enhancement of hole mobility due to reduction of interface roughness scattering.

1. M. Myronov, K. Sawano and Y. Shiraki "Enhancement of hole mobility and carrier density in Ge quantum well SiGe heterostructure via implementation of double-sides modulation doping" Accepted to *Applied Physics Letters*.
2. M. Myronov, K. Sawano and Y. Shiraki "Enhancement of holes conductance in Ge quantum well of SiGe heterostructure via realization of double-sides modulation doping". Submitted to *Semiconductor Science and Technology*.
3. M. Myronov, K. Sawano and Y. Shiraki "Enhancement of Hole Mobility and Carrier Density in Ge Quantum Well SiGe Heterostructure via Implementation of Double-Sides Doping" The third International SiGe Technology and Device Meeting (ISTDM 2006) May 15-17, 2006, Princeton, New Jersey, USA, pp 100-101. (Poster)
4. A. Ulyanenko, M. Myronov, Y. Shiraki, K. Saito "Investigation of strain, relaxation degree, interface roughness and porosity of SiGe/Si MODFET heterostructures" E-MRS 2006, May 29 - June 2 2006, Nice, France(Poster).

Strain relaxation and surface morphology of ultra thin high Ge content SiGe epilayers grown on Si(001) substrate

A new approach to grow relaxed, ultra thin 50 nm thick, high Ge content $\text{Si}_{0.34}\text{Ge}_{0.66}$ epilayers on Si(001) substrate is 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 amorphous seeding layer grown at low-temperature followed by the growth at gradually changing substrate temperature. Variation of growth temperature of 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. These epilayers grown under optimum conditions can be used as a buffer layer for the growth of semiconductor heterostructures with high mobility compressive strained.

1. M. Myronov and Y. Shiraki "Strain relaxation and surface morphology of ultra thin high Ge content SiGe epilayers grown on Si(001) substrate". Submitted to *Applied Physics Letters*.
2. M. Myronov and Y. Shiraki "Strain relaxation and surface morphology of 50 nm thick $\text{SiGe}_{0.66}$ epilayers grown on Si(001) substrate" European Materials Research Society 2006 conference (E-MRS 2006), May 29 - June 2 2006, Nice, France (Oral).

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センター 澤野憲太郎

<はじめに>

Si-MOSFET の微細化限界が近づく中、キャリア移動度を向上させるべく、チャンネルに歪みを導入したいいわゆる「歪み Si チャンネル」の研究が進み、ついにデバイス化が実現している。今後のさらなる移動度向上に向け、現在「Ge チャンネル」が注目されており、本研究では高品質な歪み Ge 変調ドープ構造を作製し、電気伝導特性の評価を行った。さらに、構造作製に不可欠となる歪み緩和 SiGe 擬似基板の詳細な結晶評価を行った。

<成果>

歪み緩和 SiGe 層は、その歪み緩和に起因する大きな表面ラフネスを有しており、その上に作製される歪み Ge チャンネル構造の電気伝導特性に悪影響を与えることが危惧されてきた。本研究では、化学的機械研磨 (CMP) を用いて SiGe 緩和層を平坦化し、その上に Ge チャンネル構造を作製することで移動度の向上を図った。図 1 に移動度のチャンネル膜厚依存性を、CMP を施した試料と施していない試料について示す。チャンネル膜厚の減少と共に顕著な相違が見られ、CMP による大幅な移動度増大が確認された。これは、ラフネス散乱がチャンネル膜厚減少とともに増大し、それが CMP によって大幅に低減できることを示している。

また、SiGe 緩和層の Ge 組成を変化させ、その上の Ge チャンネルの歪み量を変えることで、移動度の歪み依存性を系統的に調べた。その結果を図 2 に示す。歪み量増加とともに移動度が増大していくことが明瞭に示された。さらに 2% に及ぶ大きな歪み量であるにも関わらず、非常に高い移動度が得られ、Ge チャンネル構造のデバイス応用化へ向けた大きな成果を得ることができた。

SiGe 緩和層が CMP によって平坦化されることが示されたが、結晶内部に存在する転位に起因する歪み場の影響は依然残り、デバイス構造に悪影響を与える可能性がある。そこで、空間分解ラマン分光法により、面内歪み分布を評価した。その結果、周期的な歪みのゆらぎが明瞭に観測され、その周期は SiGe 膜厚に大きく依存することが分かった (図 3)。この結果は SiGe 層内部に生じているミスフィット転位が不均一に分布していることを示唆している。さらにその歪みゆらぎは、結晶成長速度の不均一を生じさせ、ラフネス形成にもつながることが示された。

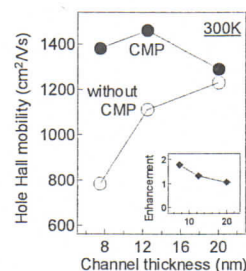


図 1 移動度の膜厚依存性

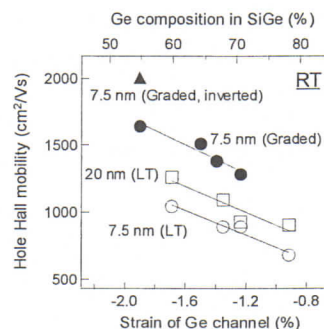


図 2 移動度の歪み依存性

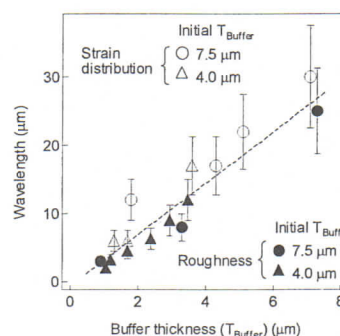


図 3 歪み分布周期の膜厚依存性

<発表論文>

[1] K. Sawano et al., Materials Science in Semiconductor Processing **8**, 177 (2005). [2] K. Sawano et al., Jpn. J. Appl. Phys. **44**, L1316 (2005). [3] K. Sawano et al., Jpn. J. Appl. Phys. **44**, L1320 (2005). [4] K. Sawano et al., Appl. Phys. Lett. **87**, 192102 (2005). [5] K. Sawano et al., Jpn. J. Appl. Phys. **44**, 8445 (2005).

[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性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差す。

[研究成果の紹介]

SiGe pn 接合の STM による評価

Si_{0.7}Ge_{0.3} (001)上に作製した pn 接合(キャリア密度は、 $p = 10^{17}/\text{cm}^3$ 、 $n = 10^{20}/\text{cm}^3$)について、STM 評価を行った。測定前の表面処理は熱硫酸による酸化膜作製後 HF+HCl 溶液中で表面を水素終端し、超高真空中にて測定した。

得られた STM 像を Fig. 1 に示す。STM 像において左上から下端にかけて黒い帯状の領域が観察された。これは、トンネル電流が流れにくいいため探針が試料表面に近づいた結果であり、キャリアが少ないという性質から pn 接合の空乏層領域であると考えられる。この両側にほぼ一般的なコントラストで n^+ 型、 p 型領域が観察されている。また、空乏層領域の黒いコントラストは STM 測定時の試料バイアス電圧に依存することから、pn 接合の電気的性質を示していると言える。

次に、pn 接合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)。各領域における I_t - V_s 曲線は、STM 測定系を MIS 構造[Metal=tip, Insulator=vacuum gap, Semiconductor= Si]に仮定して考えることができる。 p 型領域では、トンネル電流が負バイアス電圧側ではほとんど流れず、正バイアス電圧側で急激に増加する p -MIS ダイオードの特性が得られた。 n^+ 型領域では正・負バイアス電圧において対称的な縮退半導体の I_t - V_s 特性が見られている。空乏層領域においては、負バイアス電圧側でトンネル電流が大きい I_t - V_s 曲線が得られている。これらの領域では STM 像から探針－試料間距離が小さくキャリアも少ないために、半導体表面のバンドが大きく曲げられている。その結果、キャリアが少ないにも拘らず比較的大きなトンネル電流が得られている。得られた I_t - V_s 曲線は pn 接合近傍において半導体表面近傍における局所的なバンドベンディングを捉えている。このように、SiGe においてもポテンシャル分布を反映した結果が得られた。

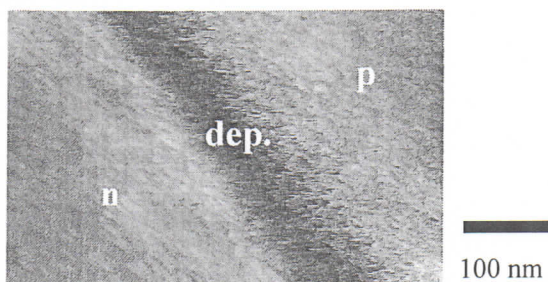
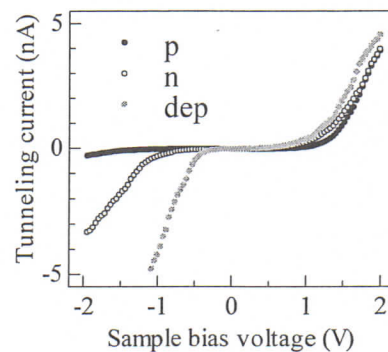


Fig. 1: STM image of the SiGe pn junction.

Fig. 2: I_t - V_s characteristics of the n -type, p -type, and depletion regions.

[今後の研究計画]

Si/SiGe ヘテロ構造を断面から STM 測定することにより、ヘテロ構造の各微小領域における 2 次元キャリア密度分布・ポテンシャル分布を明らかにする。

[成果発表]

田中他, 第 53 回応用物理学関係連合講演会 23a-V-5, 2006.3

Light Emission from Ge Quantum Dots Embedded in Photonic Crystals Cavities

Advanced Research Laboratories

Jinsong Xia

1. Introduction

Quantum structures based on Si/Ge material are attracting more and more attention due to their high potential for making cost-effective devices on Si substrates, which realize Si-based optoelectronics circuits. The low possibility of radiative recombination due to the indirect bandgap is enhanced greatly by the quantum confining. Microcavity based on 2-dimensional photonic crystals (PhCs) will be used to get better spectral purity, directionality, and luminescence yield. This page gives a basic guideline for the research work in past year, results obtained.

2. Research Topics

- Grow germanium self-assembled quantum dots on Silicon-on-Insulator (SOI) using Gas-source molecular beam epitaxy (GS-MBE) and solid-source molecular beam epitaxy (SS-MBE).
- Numerical simulations of photonic crystal structures.
- Design and fabricating of high quality 2-dimensional photonic crystals using E-beam lithography and inductively coupled plasma (ICP) etching.
- Photoluminescence (PL), AFM, X-ray diffraction, SEM, and TEM etc are used to get optical, morphological, and lattice information of the fabricated structures.

3. Results

- The PL system was rebuilt. A new control system was set up. We coded new software for the system.
- High quality Ge self-assembled quantum dots were grown on SOI wafer using GS-MBE.
- High quality 2D photonic crystal slab was fabricated by optimised fabrication procedure (Fig.1).
- Based on numerical simulations, different kinds of PhC microcavities have been designed and fabricated.
- A 100-fold increasing of the luminescence at $1.32\mu\text{m}$ from the QDs embedded in PhC cavity was obtained. Strong resonance peaks were also observed (Fig.2). The quality factor of 470 was measured at $1.46\mu\text{m}$, which was highest ever reported.

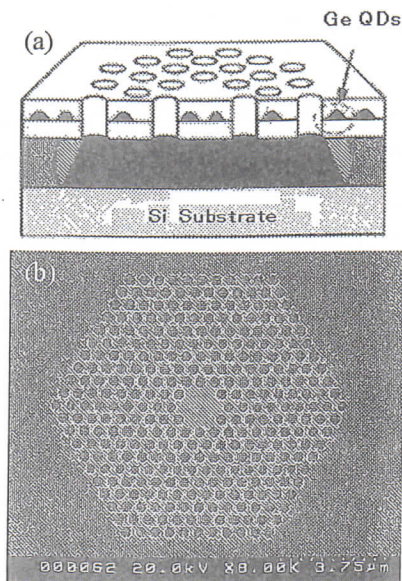


Fig.1 (a) schematic structure of the devices, and (b) SEM image of H2 cavity

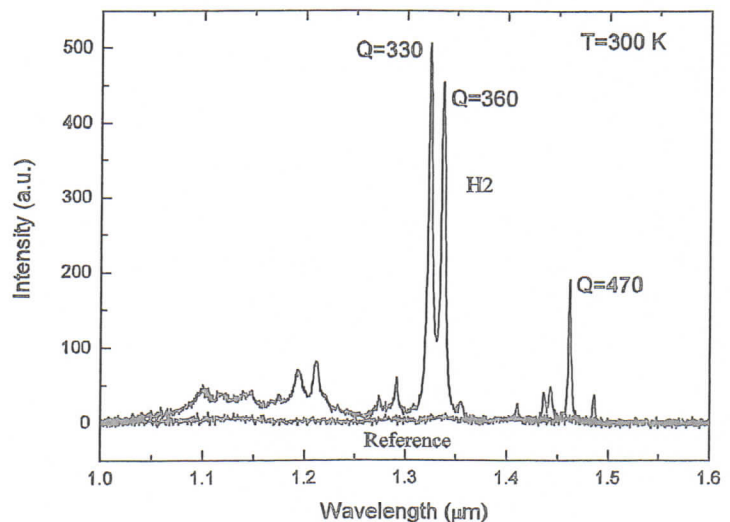


Fig.2 PL from H2 cavity and reference from pattern free region.

エネルギー環境科学研究センター

環境負荷低減技術の一つとして、光触媒による有害物質の除去削減或いは、水の直接分解による水素の製造などが注目を集めている。その代表例が二酸化チタンであるが、紫外光領域の光しか利用できないことや量子効率の向上が解決すべき課題として残されている。一方、層状構造を有する複合酸化物は、穏和な条件下でイオン交換やインターカレーションなどが可能で、化学的・物理的な修飾が容易であるために、特性制御の観点から注目を集めている。そこで、二酸化チタンに代わる新しい光触媒を開発するために、3d と 4d 軌道の両者が伝導帯を形成すると考えられる、図1で示すような層状構造を有するチタンニオブ酸カリウム (KTiNbO_5) を出発物質として、新しい光触媒の作製と評価を行った。

出発物質であるニオブチタン酸カリウムは、固相反応法により作製した。試料を塩酸溶液中で処理することにより、カリウムイオンとプロトンとをイオン交換した。その確認は元素分析と熱重量分析により行った。さらに、イオン交換後の試料を種々の温度で熱処理することにより、種々の生成相を含む試料を得た。これらの試料は生成相の確認後、UV-Vis 測定を行い可視紫外領域での吸収特性を評価した。また、光触媒特性を評価するために、試料粉体をメチレンブルーを含む溶液中に投入後、攪拌しながらで光照射を行いその分解割合を求めた。

熱分析の測定結果より、イオン交換後の試料の反応は、まず $\text{HTiNbO}_5 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Ti}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ であると推定された。中間生成物である $\text{Ti}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ は熱力学的に不安定で、最終的には分解反応により、 $\text{Ti}_2\text{Nb}_2\text{O}_9 \rightarrow \text{TiO}_2 + \text{TiNb}_2\text{O}_7$ となる。粉末 X 線回折結果によると、500-700°C の中間温度領域では、中間生成物が生成しており、900°C 以上では $\text{TiO}_2 + \text{TiNb}_2\text{O}_7$ が生成していることが確認された。図2に種々の温度で処理した試料の処理温度と吸収端波長の関係を示す。600°C 以上では温度の上昇とともに、吸収端は可視光領域側にシフトしたが、1100°C 以上では、逆に吸収端波長が短波長側へシフトした。この原因は現在のところ不明であるが、非化学量論組成に基づく欠陥の導入や酸素の欠損などが関係していると推定される。1000°C で処理した試料では、メチレンブルーの分解が可視光領域の光の照射により促進されることが確認され、光触媒特性に可視光が有効利用できることが実証された。

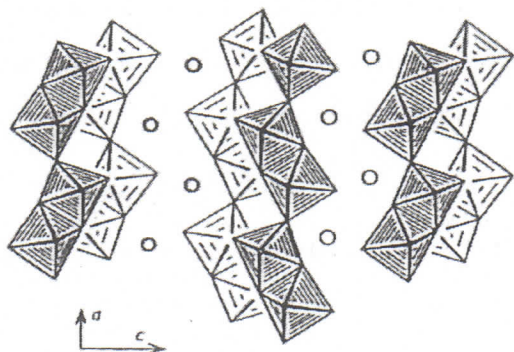


図1 チタンニオブ酸カリウムの結晶構造

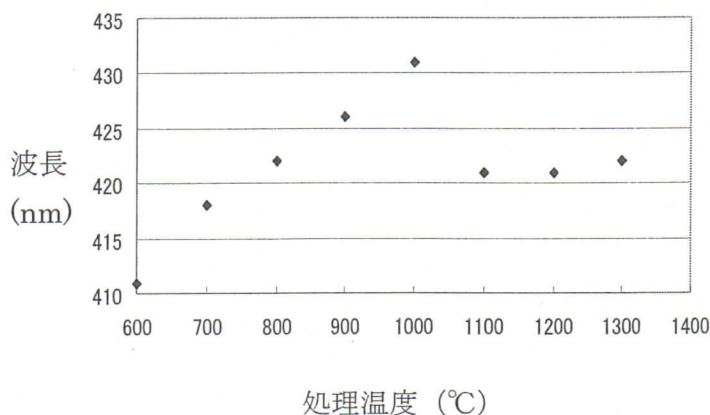


図2 UV-Vis スペクトルから求めた吸収端波長と熱処理温度の関係

1) K.Inoue and M.Nagai, J. of Ceramic Society of Jpn., Vol.112, pp.S1393-1397 (2004).

固体高分子形燃料電池の燃料切れ運転に起因する性能劣化特性解明と軽減

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

現在実用化が進められている燃料電池の課題の一つが耐久性の確保であり、自動車用で5000時間、家庭用定置用で40000時間が目標とされている。耐久性の確保には、現在各界で進められている電解質膜や電極触媒など構成要素素材の信頼性向上に加えて、各種運転条件や放置環境による劣化軽減も重要な課題である。しかしながらこれらの研究は端緒についたばかりであり、劣化発生条件の全貌すら明らかになっていない。エネルギー環境科学研究センターでは、このような燃料電池の運転条件と環境条件により生じる性能劣化の研究に永年取り組んでいる。その一つが燃料電池スタックを燃料不足の条件で運転した場合に生じる性能劣化であり、以下のようにその劣化特性を解明し軽減効果も確認した。

2. 燃料電池の燃料切れ運転に起因する性能劣化の特性と軽減

2.1 性能劣化の特性

燃料切れ運転により生じる性能劣化の特性を、交流インピーダンス法やサイクリックボルタンメトリーなどの電気化学的な診断法と電極で発生するガス成分分析などから、次のように明らかにした。

- (1)スタック中のあるセルへ供給する水素の量が発電に必要な電流以下になると、電極間電位が転位（逆電位）しこれが劣化発生のトリガーとなる。
- (2)アノード排出ガス中で大量の二酸化炭素が発生することから、アノードで水電解が発生し電極触媒担体である炭素を電食させ性能劣化を引き起こすことを明らかにした。
- (3)このような性能劣化は、わずか数分間の燃料不足運転により30%以上の性能低下が生じるなど燃料電池にとっては致命的な劣化である。
- (4)劣化はアノード電極触媒の反応性低下（図1）と電解質バインダーのプロトン伝導抵抗増加として診断され、電極内界面が損傷を受けていることを明らかにした。カソードの機能低下は全く現われない。

2.2 性能劣化軽減法の提案

上で述べた性能劣化特性診断結果から、以下のようにアノードに用いる触媒担体炭素の素材を変更し劣化軽減法を提案しその効果を確認した（図2）。

- (1)触媒担体炭素を現在主に用いられているケッチェンブラック（Pt/C）から諸物理特性が強化されたグラファイト化カーボン（Pt/GC）に変更することにより、性能劣化は大幅に軽減できた。
- (2)炭素を全く用いない白金ブラック（Pt/black）の使用により、性能劣化は全く生じない。
- (3)アノードの白金とルテニウム（Pt-Ru/C）を用いることでも、性能劣化が軽減できた。
- (4)劣化軽減効果の大きい担体ほど初期出力性能は低下するが、これらをアノードにのみ用いることで低下を抑えることができた。

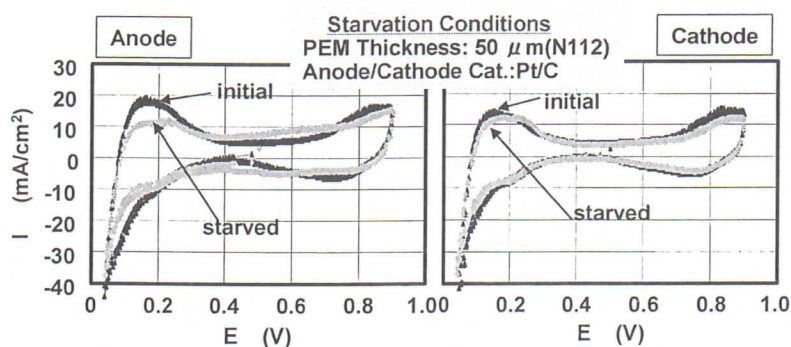


Fig.1 CV data to show degradation in anode catalyst

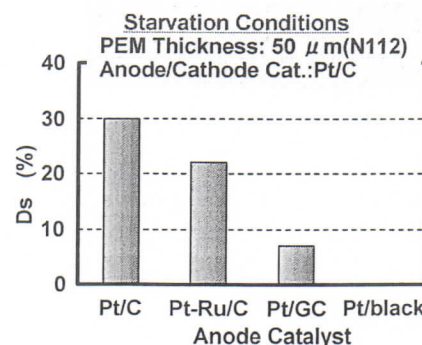


Fig.2 Effect of anode catalyst on degradation rate D_s caused by starvation operation

波長分散型粒子線誘起 X 線分析法 (WD-PIXE) による固体高分子型燃料電池の硫黄の分析

工学部環境エネルギー工学科・総合研究所 川畑俊明・若林英彦・鳥山保・高木靖雄
東京工業大学・理工学研究科 小栗慶之・川崎克則；理化学研究所 前田邦子；
M. I. S. 長谷川賢一

固体高分子型燃料電池 (PEFC : Polymer Electrolyte Fuel Cell) は環境負荷の少ないエネルギー供給システムとして期待され、その性能向上と長期安定化のための研究が盛んに行われている。PEFC は、電極での酸化還元反応を起こさせるためにアノードでは Pt-Ru 合金の微粒子を、カソードでは Pt の微粒子を触媒として使用している。これらは、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硫黄によって、燃料電池の電極触媒が被毒 (S 被毒) し、性能が低下してしまう。そこで、PEFC の性能向上と安定な運転を実現するためには、触媒の S 被毒による劣化のプロセスを解明する必要がある。S 被毒した触媒では、触媒原子の分布が、正常な触媒と比べてどのように変化しているかを知ることが重要である。

元素の分布を知る方法としては、一般に電子線プローブマイクロアナリシス (EPMA : Electron Probe Micro Analyzer) が用いられるが、電子ビームの電流量が多いために S の観測には適していないことが知られている。それに対して、非破壊的に深い位置まで測定が可能な方法としては、波長分散型粒子線誘起 X 線分析 (WD-PIXE : Wavelength Dispersive type-PIXE) が考えられる。WD-PIXE は加速された陽子を試料に照射し、試料中の S 原子より発生する特性 X 線を入射角 θ で結晶格子に入射し、その反射特性からエネルギースペクトルを測定する分光法である。WD-PIXE は、一般的に分解能が 15eV 以下と分解能が高く、環境問題等の研究で、S の測定に使用されてきた実績がある。本研究では、劣化した MEA における S の分布の変化を測定するために、S の K X-ray 及び触媒元素である Ru の L X-ray と Pt の M X-ray の三つの X 線を同時に測定可能な WD-PIXE システムを東工大ヴァンデグラフに構築することを第一の目的としている。このシステムの構築に際しては、理化学研究所に設置されている WD-PIXE システム[1,2]を参考にした。

最初に、S の K X-ray が測定できるかを確認するために、Mo の板を試料に設置し、Mo の L X-ray の測定を試みた。Mo の L X-ray (2.292keV) は、エネルギーが S の K X-ray (2.307keV) に非常に近く、システム確認用試料として適している。1.7MeV 陽子ビームで生成された試料からの X 線は平板 Ge(111) 結晶で反射した後、位置敏感型比例計数管 (PSPC : Position Sensitive

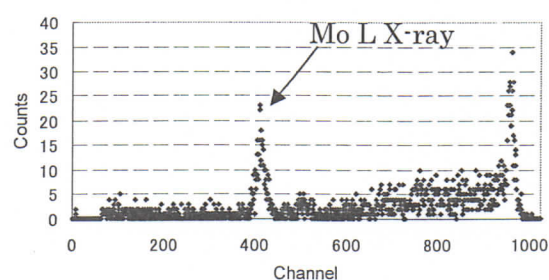


図1 WD-PIXE による
Mo の LX-ray スペクトル

Proportional Counter) により計測され、割り算回路により位置情報に変換された後、PC に蓄積された。試料から PSPC の窓までの X-ray の通る領域は X-ray の減衰を避けるために空気を He ガスで置換し、PSPC は 1 気圧の Ar + 10% CH₄ ガスで動作させ、測定を行なった。図 1 に Mo の LX-ray について測定したスペクトルを示す。これが Mo の L X-ray であることは、結晶に対する PSPC の角度を変え、予想通りの位置にピークが現れることから確かめられた。ところで、500~1000 Channel 付近には直接入射する陽子ビームなどのノイズとみられるバックグラウンドが残っているので、今後、改善する必要がある。しかし、WD-PIXE システムの基礎は構築できた。

[1] K.Maeda, H.Hamanaka, K.Ogiwara, Int.J.PIXE 6(1996)97.

[2] K.Maeda, K.Hasegawa, H.Hamanaka, K.Ogiwara, Nucl.Instr.and Meth.B134 (1998)418.

対極に金属酸化物/導電性高分子複合材料を用いた色素増感太陽電池の作製と評価

Preparation and evaluation of dye-sensitized solar cells using metal oxide/PEDOT-PSS composites as counter electrode materials

武蔵工業大学 大学院 工学研究科 小林光一, 武藤拓馬

桐蔭横浜大学 大学院 工学研究科 宮坂 力

1. 目的

色素増感太陽電池の対極には、通常白金材料が用いられる。この白金対極は、耐腐食性と触媒活性に優れるが、成膜工程を含めて高価であるため、新しい対極材料が求められている。本研究では、フルプラシック色素増感太陽電池の非白金系プラスチック対極として、金属酸化物と導電性高分子を用い、セルの光電変換特性の改善を図ることを試みた。

2. 実験方法

対極材料として、導電性高分子には Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) doped poly(styrenesulfonate) (PEDOT-PSS)水分散液を、金属酸化物微粒子には、酸化チタン(TiO_2)粒子、酸化アルミニウム(Al_2O_3)粒子、酸化亜鉛(ZnO)粒子を用いた。また、対極基板としては酸化インジウムスズ蒸着ポリエチレンナフタレート (ITO-PEN) (シート抵抗: 15~16 $\Omega/\square$)を使用した。対極基板表面へのキャスト溶液は PEDOT-PSS 水分散液(2 mL)をエタノール(5 mL)で希釈し、金属酸化物微粒子を添加して作製した。その溶液を ITO-PEN 基板上にスピコート (1000 rpm, 30 sec)し、140 $^{\circ}\text{C}$ で加熱処理して対極を作製した。対極の性能は、 I_3^- 還元の手動を有機溶媒系電解質中のサイクリックボルタメトリー (CV) によって評価した。太陽電池の評価は、ソーラーシミュレータの下で光電流-電圧特性を測定して行なった。受光面積は 0.24 cm^2 とした。作用極は、ITO-PEN 上に低温成膜用酸化チタンペーストを塗布し、加熱乾燥後、 3×10^{-4} M ルテニウム色素 (N719) 溶液に浸漬させて作製した。電解液には、アセトニトリル/3-メトキシプロピオニトリル混合溶媒に、LiI (0.4 M), I_2 (0.04 M), Tetrabutylammonium iodide (0.4 M), 1-Methylbenzimidazole (0.3 M) を加えた溶液を用いた。

3. 結果および考察

3.1 金属酸化物微粒子添加量の違いによる対極性能評価

各種金属酸化物微粒子を添加した PEDOT-PSS 複合膜のサイクリックボルタモグラムの図 1 に示す。 TiO_2 添加量が増加するにつれて、還元ピークの電流密度が増加し、さらに過電圧が小さくなり、還元ピーク電位が高電位側にシフトした。 TiO_2 微粒子の添加により、電極表面積が増大し、対極性能が向上したと考えられる。 Al_2O_3 微粒子においても TiO_2 微粒子同様、添加によって対極性能の向上が見られた。 Al_2O_3 微粒子を 2.0 wt%添加した場合、6.5 wt%添加した TiO_2 微粒子とほぼ同等の対極性能を示した。溶液の分散状態が Al_2O_3 微粒子と TiO_2 微粒子とでは異なることから、微粒子の添加による影響が電極表面積の増大だけでなく、微粒子表面と PEDOT-PSS との界面の状態が対極性能に影響を与えているのではないかと考えられる。 ZnO 微粒子においては溶液中で激しい凝集が起こり、良好な膜を成膜することができなかったために、 ZnO 微粒子の添加による電極性能の向上は見られなかった。

3.2 各種対極材料の光電流-電圧 (I-V) 特性

TiO_2 /PEDOT-PSS、および Al_2O_3 /PEDOT-PSS を対極に用いたフルプラスチック色素増感太陽電池の I-V 特性を図 2 に示す。ここで、 TiO_2 と Al_2O_3 の添加量はそれぞれ 6.5 wt%および 2.0 wt%とした。比較として Pt 蒸着 FTO ガラス、PEDOT-PSS 単独を対極に用いた結果も併せて示した。図より、 TiO_2 /PEDOT-PSS (変換効率 $\eta = 5.10\%$) と Al_2O_3 /PEDOT-PSS ($\eta = 4.83\%$) は PEDOT-PSS 単独 ($\eta = 4.30\%$) と比べてセル性能が向上した。 TiO_2 /PEDOT-PSS は Pt 蒸着 FTO ガラス ($\eta = 5.84\%$) に迫るセル性能を得ることができ、非白金系フィルム対極を用いたフルプラスチック色素増感太陽電池として良好な結果が得られた。

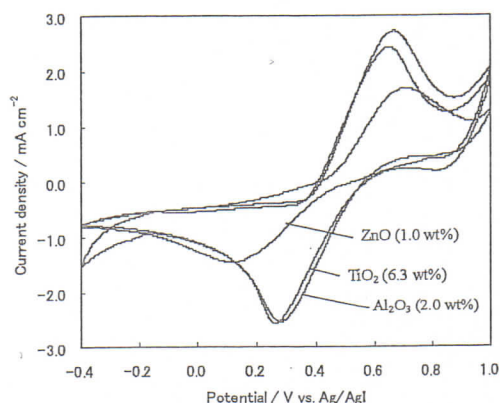


図 1 3種類の金属酸化物/PEDOT-PSS 複合膜のサイクリックボルタモグラム

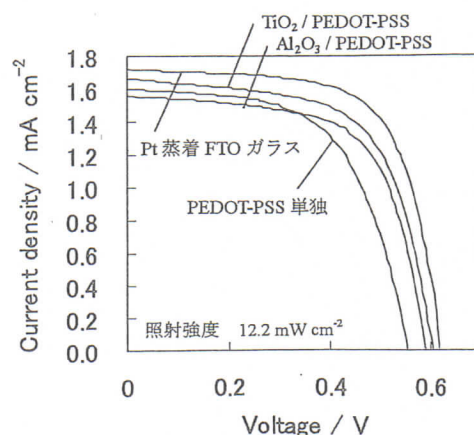


図 2 各種対極材料の I-V 特性

放熱フィルムおよびキャパシター用電極材としての炭素材料

工学部環境エネルギー 工学科 鍋木裕

1. はじめに

近年、高弾性高強度炭素繊維、高比表面性活性炭、ナノチューブ、フラーレンなどの種々の炭素材料が開発され、それらの優れた物理的・化学的特性を活かして、環境浄化、クリーンエネルギー（燃料電池やリチウム二次電池など）や航空機分野など、多方面の産業分野において使われるようになった。炭素材料には結晶性の異なる種々のものがあるが、結晶完全性の高い黒鉛構造炭素材料は、金属に準ずる電気伝導性、高い熱伝導性、大きな反磁性、優れた機械（力学）特性を示す。また黒鉛構造を持たない、欠陥の多い炭素材料の表面を酸化して活性化し、多孔質にすることで活性炭となる。微細孔を持ち比表面積の大きな活性炭は大きな電気二重層容量を示すことから、電気二重層キャパシターの負極材としても有用である。今回、黒鉛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としての新たな炭素負極材の調製・評価を行った。

2. 放熱フィルムとしての炭素材料

黒鉛のキャリアー密度は非常に小さく、熱のほとんど全てが格子振動（フォノン）によって運ばれる。熱伝導は炭素六方網面に沿って生じ、 c 軸方向の熱伝導率は非常に小さい。六方網面方向の熱伝導率は銅や銀の4倍程度（高配向性熱分解黒鉛：HOPG では 300K において 2000W/m/K）にもなり、ダイヤモンドの 1000~2000W/m/K に匹敵する。しかし、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ので、黒鉛繊維を含めてこれまでの人造黒鉛材料では 100~500W/m/K 程度であった。近年はパソコンや携帯電話などの放熱シートとして 600~800W/m/K の高熱伝導性黒鉛シートが芳香族ポリイミド薄片集合体の高温熱処理により調製・使用されるようになった。さらに2006年から世界最高の高熱伝導性黒鉛シートとして 800~1600W/m/K ものカタログ値を示す黒鉛シートも市販されている。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も大きく、黒鉛放熱シートは電磁遮蔽効果も兼ね備えている。また熱伝導率や電気伝導率と同じく磁気抵抗も結晶完全性に依存する。本研究では熱伝導率は電気伝導率および磁気抵抗と相関性が良く、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が分かった。また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。

3. キャパシター用電極材としての炭素材料

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。本研究で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た。900℃炭素化-500℃賦活試料では 1200~1410m²/g となり、賦活条件としての最適性は未検討であるが活性炭として妥当な範囲の値が得られた。これらの賦活試料に対して質量あたりの電気二重層容量は 200~220F/g と大きな値を示した。しかし、表面積当たりの二重層容量はそれぞれ 0.15F/m² 程度であり、一般の活性炭の域を出ない。今後、炭素化・賦活条件の検討や、分子構造の異なるポリイミド微粒子についての実験を行い、窒素含有活性炭としての機能発現の可能性を検討する。

エネルギー変換材料用セラミックス材料の研究

工学部 環境エネルギー工学科 エネルギー変換材料科学研究室 宗像 文男

高効率な駆動源を目指した固体酸化物形燃料電池、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の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。特に、平成 17 年度は、高出力な固体酸化物形燃料電池(SOFC)を目指した固体電解質及び電極材料の研究とこれにかかわる燃料改質触媒の開発を進めるとともに、人工光合成用光触媒新材料の設計・合成、新規熱電材料の研究を行ってきた。

1) 固体酸化物形燃料電池(SOFC)用材料に関する研究

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。そこで、本年度は、より高出力であり低温度域（500℃から700℃程度）で発電可能な SOFC 用材料技術の開発を進め、以下の結果が得られた。

- a) ジルコニア系固体電解質材料に比べ酸素のイオン伝導率が一桁程度高い LaGaO_3 系固体電解質の実用化を図るために、電気泳動法による LaGaO_3 系固体電解質膜の形成を試み、緻密で高電気伝導率を示す固体電解質厚膜の作製に成功した。（日本セラミックス協会 2005 年度秋季シンポジウムにて発表。）
- a) 電極材料についても小型高出力 SOFC を目指し、スプレイドライ法による空気極材料の作製及び発泡金属技術の燃料極への適用を試み、微細で均質な Co 系空気極材料の合成が可能になると共に、発泡金属燃料極支持体の作製が可能になった。

2) 燃料改質触媒に関する研究

固体高分子型燃料電池のみならず固体酸化物型燃料電池においても燃料となる炭化水素の水蒸気改質は重要な課題となっている。従来は、Ru や Ni などの金属触媒が用いられてきたが、コスト面や長期安定性という観点で十分ではない。そこで、これらの触媒系より高活性で耐久性に優れた新規酸化物触媒の設計・合成を進めてきた。その結果、3d 遷移金属を含むペロブスカイト触媒によるメタンの水蒸気改質の可能を見出した。

3) 光触媒半導体に関する基礎的研究

可視光を用いた人工光合成については十分な光触媒特性を示す材料系は見出されていない。現在、光触媒半導体として Ge 系複合化合物に注目し、研究を進めている。特にスピネル構造を持つ Ge 含有複合酸化物で、結晶構造及び置換元素によって紫外光励起による発光現象が制御されることを見出した。

4) 3d 遷移金属酸化物熱電半導体に関する基礎研究

現在、500℃から700℃の温度域で発電可能な熱電半導体として $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 系複合酸化物が知られているが、実際の使用温度域での酸素分圧による伝導率、ゼーベック係数の挙動の変化については十分知られていない。本年度は、この酸素分圧効果に注目し研究を行い、この温度域での酸素の放出が電子物性に大きな影響を及ぼしにくいことを確認した。

砂浜の緑地修復技術

A study on the restoration technic of coastal vegetation at sandy beach

武蔵工業大学環境情報学部 吉崎真司・岡浩平・広瀬梓

1. はじめに

我が国の海岸は国民の余暇活動の場として広く利用されているが、自転車道やジョギングコースなどの施設が海岸林の前面に設置されているために、利用者は飛砂害に悩まされている。

本来、海浜部に成立する植生による地表面の被覆は砂移動や砂の飛散を防ぐ効果があると言われるが、その程度は十分に明らかにされているわけではない。本稿では、神奈川県湘南海岸の海浜部を対象として行っている緑地（海浜植生）の修復技術に関する研究の一部を報告する。

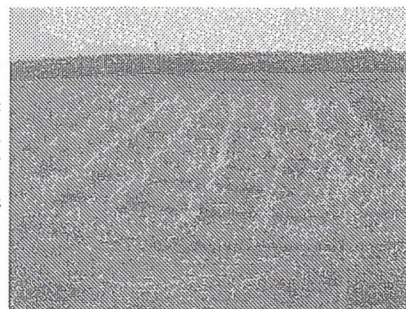
2. 研究内容と方法

現地調査は 2002 年から 2005 年にかけて行った。調査は①海浜植物の繁殖特性②粒径分布特性③植生による減風調査④草方格による植生回復試験 から成る。

粒径は大磯海岸から江ノ島までの区間において、汀線から 15m 内陸側の表層砂、成立している植物群落の内外の表層砂、自転車道に堆積した表層砂を採取し、風乾後円孔篩によって篩い分けを行った。また、植生による減風効果を明らかにする目的で、大磯海岸のコウボウムギ群落内に調査測線を設置し、測線に沿ってレベル測量を行い、更に地表面からの高さ別風速分布を実測した。一方、現地では飛砂防止工法である草方格の有無による飛砂の堆積と植生の回復状況に関する試験を実施した。

3. 結果と考察

- 3.1 海浜植物の特性：主要種は、カヤツリグサ科コウボウムギである。本種は毎年の堆砂によって上長成長を繰り返す特性を持ち、堆砂が浅い場合や周囲にギャップがある場合には横向き地下茎を積極的に伸長させ群落を拡大することがわかった。
- 3.2 粒径分布特性：表層砂の粒径は、西側から東側に向かって（河口から遠ざかるに連れて）指数関数的に細くなり、それにつれて飛砂害も激しくなることがわかった。また、植物群落内の表層砂の粒径は群落外のそれよりも常に小さく、植生が飛砂を捕捉しているのではないかと考えられた。
- 3.3 植生による減風効果：地表面からの風速の鉛直分布から、植物群落内と群落外では粗度に大きな違いがあり、植物群落上の減風効果は大きいこと、更に夏と冬では緑葉の豊富な夏場のほうが減風効果が大きいことがわかった。根系による堆砂深の推定から、コウボウムギ群落上には年間約 9cm にわたって飛砂が堆積していることがわかった。
- 3.4 草方格による植生回復試験：草方格施工区は、無処理区に比べて 2 倍の堆砂能力を発揮した。また、草方格内では生育基盤が安定し、栄養塩である硝酸態窒素も多く、捕捉された植物種からの実生個体も多く観察された。以上の結果、無処理区に比べて被覆面積が大きくなったことから、草方格内では植生による回復が早いことを明らかにできた。



環境負荷低減システムの研究

武蔵工業大学 総合研究所・工学部 電気電子情報工学科 江原由泰

21 世紀型都市再生を目的として、首都圏の環状線道路が重点プロジェクトとして整備され始めている。特に首都高速道路の中央環状線は、東京都内の主要拠点を結び、首都機能の維持・増進を図ることが期待されている。既に、中央環状王子線は開通し、新宿線は平成 18 年度の完成を目指しており、品川線の着手も予定されている。この中央環状線は、ほぼ全線が地下トンネルである。したがって、トンネル内の換気を行う換気所が設置されている。都市部では特に大気環境に対する配慮が必要であり、これらの換気所では電気集じん装置と低濃度脱硝装置が設置されている。

本研究の成果である新型交流電気集塵装置は再飛散現象を抑制させ、集じん性能の向上が計られた。これまでの直流電気集塵装置では、集塵電極上でディーゼルエンジンなどから排出される微粒子が凝集肥大化し再飛散現象を発生させた。開発された交流電気集塵装置は、集じん部に交流電圧を印加することで、極板凝集粒子の形状を球状化し粒子と集塵電極の接触面積を増加させることで、再飛散を防止させることが可能となった。新型交流電気集塵装置は既に、前述した中央環状線のトンネル換気所に適用されている。

上記背景のもと、本研究は主としてトンネル用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 17 年度に行ったものである。現状の問題点に対する改善策の提案や都市部のトンネルを対象とした研究、そして今後注目しなければならない領域についても検討を行った。本研究の成果は以下の 3 つにまとめられる。

① 電気集じん装置におけるナノ粒子の集じん率向上に関する研究

電気集じん装置の帯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。粒子の帯電メカニズムは衝突帯電と拡散帯電がある。ナノ粒子の帯電では拡散帯電が支配的になるため、拡散帯電量を増加させる方法によりナノ粒子の集じん率向上を検討した。ナノ粒子の集じん率は、イオン濃度の高い負帯電の方が正帯電より高く、イオンが拡散しやすい鋸歯状の方がワイヤ電極より高いということが分かった。

② 電気集じん装置における放電電極形状改善による発生オゾンの低減

電気集じん装置は放電を用いて粒子の帯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る。そこで本編では、電気集じん装置より排出されるオゾン濃度の低減を計ることとした。放電電極の形状を変化させ、オゾン生成濃度の低減を計った。実験の結果、オゾン濃度は正負両極性ともに板厚が薄いほど低くなった。集じん率は正極性・負極性ともに板厚を薄くしても低下しなかった。

③ 放電によるCOの酸化に関する研究

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に設置してあるファンにより、換気を行っている。そこで本編では、排ガスに含まれる一酸化炭素濃度の低減を計ることとした。研究の第一段階として、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。処理ガスを直接放電処理する方法と処理ガスを放電にさらすことなく、高濃度のオゾンガスによる処理の 2 種類を検討した。CO 転化率の放電電力特性では、各初期濃度において放電電力を増加させるほど CO 転化率が高くなり、CO 転化率に差が無くなった。CO 転化率の酸素濃度特性では、酸素濃度が低くなると CO 転化率は向上した。

Nanostructured ZnO photoelectrodes

Yanfeng Gao^{*} and Masayuki Nagai

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

Email: yfgao@sc.musashi-tech.ac.jp, Fax: +81-3-5706-3259

ZnO is a candidate for the photoelectrode materials in dye-sensitized solar cells (DSSCs). Different from classical thin-film cells where light is absorbed by a semiconductor layer, light irradiated onto DSSCs is absorbed by dye molecules which are pre-adsorbed on the surfaces of transparent semiconductors with high porosity, such as TiO₂, ZnO and SnO₂. Oxide photoelectrodes in these cells act as a support for dye adsorption and also a route for electron transportation. The essential requirements for the semiconductor layer are as follows: (1) high crystallinity permitting high efficiency of electron mobility; (2) large surface areas enabling to increase dye adsorption; (3) good adherence to the substrate; (4) appropriate thicknesses; and (5) flat surfaces.

We tried to purposely arrange the ZnO crystals of optimized morphologies with specific orientations on the substrate through a solution-based bio-inspired route, which is one of attractive research field for preparation of better ceramics through chemistry (*Cryst. Growth Design* 5, 1983 (2005)). We have obtained various ZnO nanostructures from nanorods, nanoplates to complex architectures on both polymer and glass substrates pre-coated with transparent conductive oxide layers. We have assembled DSSCs using these films, and an overall conversion efficiency about 0.7% has been obtained. Present study is focused on improving the cell performance by detailed control of morphology and improving the adherence of the film to substrate along with the conductivity. We hope that the effort we are making in this study may contribute to develop a low-cost, simple process for the fabrication of dye-sensitized solar cells.

共同研究支援
インフラテック研究室

武蔵工業大学総合研究所 正会員 〇星谷 勝
日本政策投資銀行 非会員 野田健太郎
(株) 篠塚研究所 正会員 中村孝明

1. はじめに

本報は、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、2005年9月よりスタートした、『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』の成果の一部を報告する。組織はNPOシビルポートネットワーク（代表辻田満）をプロモーターとして大学（武蔵工業大学総合研究所）、建設コンサルタント（日本技術開発、長大、篠塚研究所）、日本政策投資銀行から構成される産官学の共同研究組織である。本報告はその１で研究の要旨、その２で地震による企業財務への影響、その３は企業価値を指標にした防災投資判断について、それぞれ発表する。

2. 研究の背景と目標

企業は短期的な投資効率を重視し、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。しかしながら、企業が被る地震被害は施設の損壊のみならず、操業中断による顧客あるいは取引先への信頼の喪失、火災や危険物の漏洩による２次的災害など多様である。このため、事前に地震被害に伴う損失、事業停止期間、２次災害等を予測し、企業としての地震リスクを把握するとともに企業にとって最も効果的と判断できる対策を選定、実施することが地域社会の防災性向上に資する意味でも重要である。一方、企業の資金調達手段は多様化し、市場を通じた社債や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資（SRI ; Socially Responsible Investment）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っていない一因となっている。このような中、内閣府¹⁾は、企業の防災性向上を目的として、事業継続計画（BCP ; Business Continuity Plan）に関するガイドラインをまとめ発表している。日本政策投資銀行²⁾は、防災への自発的な取組みを支援する立場から、企業財務における防災会計の必要性について論じた上で、防災投資効果を記述する適切な方法や指標については今後の課題としている。また、同行は防災への取り組みを評価し、積極的な企業に対しては低利で防災への取り組みに対する資金を融資する仕組みを2006年4月よりスタートさせた。企業の防災投資促進を目的とした具体的な方策が国レベルで進められている。

以上を踏まえ、本研究は①企業を取り巻くステークホルダーの視点で企業価値とは何かを検討した上で、②防災への取り組みを企業財務に則した情報として開示できる方法を検討する。③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、④既存の財務指標との整合性を図りつつ、物理的、金融的対策を取り込み、防災投資による企業価値を合理的に記述できる方法ならびに指標の提案を行うものである。

3. 企業のステークホルダーと企業価値

企業の利害関係者は、主に顧客や取引先、従業員、債権者、株主、さらに地域住民などであるが、視点によって企業価値や活動の目標が異なる。だれの視点を重視し、尊重すべきかについては業種や社会的役割、活動方針や経営理念に応じた個性を持つものと考え、様々なステークホルダーが存在する中で、近年の傾向としては株主を重要と考える企業が多い。事実、経営者が重視する業績指標の調査³⁾では、利益の伸び率と並び投下資本利益率（ROE ; Return on Equity）が最上位に位置している。一方、事業を長期的に繁栄させるには、国際社会や地域社会の安定が重要であり、そのメリットを享受する企業は社会に対して一定の責任を果たす義務がある。これがCSR

キーワード 地震防災、企業価値、BCP、企業財務、防災投資指標

連絡先 〒158-0082 東京都世田谷区等々力 8-15-1 武蔵工業大学総合研究所 TEL 03-5706-3879

(Corporate Social Responsibility)であり、その金融面からの具体的な活動として前記した社会的責任投資（SRI）がある。しかしながら、CSRは企業経営が健全に推移することが重要なポイントである。SRIは企業価値を示す一つの尺度になりうるが、必ずしも十分なものではない。つまり、企業価値を示すには収益力、経営の健全性や資金面での余力、安定性といった尺度が重要であり、このような問題に直接利害を有する資金提供者の視点を優先するのが自然であると考える。

4. 企業価値と財務

近年、企業の会計制度はキャッシュフロー（CF）計算書、連結決算、時価評価（含む減損会計）の導入により大きく変化している。従来は、経営者が選ぶ会計ルールによって損益計算書で計算される利益が異なる実態があった。つまり、利益に経営者の裁量や恣意性が入り込む余地があった。そこで、恣意性を排除し財務状況を公平かつ客観的に示すことを目標に、キャッシュの出入りに着目するCF計算書が導入された。CF計算書から資金提供者への還元原資に相当するFCF（Free Cash Flow）を求めることができ、ROEを含めた各種業績指標を求めることも容易となる。またFCFの予測を行うことでその割引現在価値として企業価値、株主価値が求められ、さらには投資家に配当できるリターンを予測することができる。これは資金提供者にとって貴重な意思決定情報となる。このような観点から本研究ではFCFに着目し、地震災害によるFCFの低下を考慮した企業価値や各種の業績指標を推計するモデルを開発する。

5. 企業の確率論的割引現在価値

資金提供者の投資行動は、ハイリスク・ハイリターン、ロウリスク・ロウリターンなど配当とリスクの関係に基づいた投資メカニズムに則っている。このメカニズムを健全に働かせるにはリスクに応じた配当や企業価値を客観的な情報として明示する必要がある。一方、社会情勢や企業活動の不確実性などからFCFは一定の幅、つまりばらつきを持つ。これまで、最も起きやすいシナリオを前提にFCFを確定的に設定するケースが大半であった。しかしながら、リスクは確定的な値からのマイナス側への乖離であり、乖離の幅が大きい程リスク大と判断できる。地震災害はマイナス側への乖離を拡大させる厄介な事象であり、場合によっては企業価値を著しく低下させ、倒産に至ることもある。そこで、ばらつきを伴うFCFに地震リスクを取り込み、その現在価値として企業価値を推計する。これによりリスクの大きさと企業価値を一体で評価でき、投資メカニズムを反映した投資判断が可能となる。本研究では確率論的DCF（Discounted Cash Flow）法を使い企業価値を確率分布として評価する。式で表すと以下のようになる。

$$Y = \sum_{i=1 \sim n} (X_i - S_i) d_i + v_n d_n + v_0 \quad (1)$$

Y は企業価値、 X はFCF、 S は地震損失の確率変数、 d_i は割引因子、 v_n は残存価値、 v_0 は現在の剰余資産である。

6. 防災投資判断

防災対策の実施判断では、防災対策の効果を企業価値という視点で定量的に示す必要がある。例えば、補強対策は設備投資としての費用支出となり、地震保険は毎期の営業活動としての支出となる。これらはFCFを低下させ企業価値は低下するものの、同時に地震損失も低下するため企業価値は相対的に上昇する。この低下と上昇のバランスにより、対策の実質的な効果を評価する。また、本研究は企業の財務収支に着目していることから補強費用を借入で賄うケースや保険と補強対策の組み合わせなど、多様な対策の効果を一元的に比較することも利点の一つである。また、防災投資による企業価値向上を定量的に示すことは、資金提供者の理解を得るのに大いに役立つ。具体的なモデルや事例はその2、その3で述べる。

参考文献

- 1) 民間と市場の力を活かした防災力向上に関する調査会 企業評価・業務継続マネジメント・グループ：事業継続ガイドライン第1版、内閣府 中央防災会議、PDF file
- 2) 日本政策投資銀行：防災マネジメントによる企業価値向上に向けて、調査No80., P. 78., 2005. 3
- 3) (社)生命保険協会：H13, H17 株式価値向上に向けた取り組み状況について、企業向けアンケート集計結果、PDF File

SDCF 法を用いた上水道システムの地震リスクマネジメント

攻玉社工科短期大学 正会員 ○山本欣弥
武蔵工業大学総合研究所 正会員 星谷 勝

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、SDCF 法 (Stochastic Discounted Cash Flow 法)¹⁾ を適用する。

2. SDCF 法の上水道システムへの適用

評価期間 n 年間の正味現在価値 (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) である。

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

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。

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

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、SDCF 法による地震対策の検討を行う。

上水道システムは、浄水場を起点として考えると、大口径送・配水管から中口径・小口径配水管を経て給水管から給水栓へ至る、階層型ネットワーク構造を構成している。延長は、小口径管になるほど長くなり、複雑なネットワークとなっている。ここでは、浄水場から配水池・配水塔までの主要送・配水管網をネットワークモデルとし、リンクの被害とネットワークの連結性を考慮する。ノード (配水施設) より下層の管路網は構造的被害のみを考え、該当するノードと浄水場との連結性が回復した後に復旧作業が開始され、全ての被害箇所が修復された後に、配水地域の需要家へ給水が行われるものとしている。

地震による構造被害は、管路のみに発生し、その延長方向にポアソン過程に従って分布するものと仮定する。管路の被害推定には、次式²⁾を用いる。

$$Rm(v) = C_p \times C_d \times C_g \times C_e \times R(v) \quad (3)$$

$$R(v) = 3.11 \times 10^{-3} \times (v - 15)^{1.30} \quad (4)$$

ここで、 $Rm(v)$: 平均被害率 (箇所/km)、 $R(v)$: 標準被害率評価式、 C_p : 管種補正係数、 C_d : 管径補正係数、 C_g : 地盤補正係数、 C_e : 液状化補正係数、 v : 地表面最大速度 (kine) である。

地震損失 S_i は、被害管路の再調達価格とする。地震被害の発生によって断水が発生すると年間の水道料金収入が減少し、さらに、住民が享受する便益が減少する。そのため、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。

当該システムに影響を与える 5 つのシナリオ地震をハザードとして用いる。簡単のために、再現期間 (T) はすべて 60 年とする。これにより、1 つの地震の年間発生確率 P_i は 0.01667 となる。これらの地震による管路被害額は再調達価格以下であり、その発生は、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 5% で正規分布に従うものとする。支出 Q_i は確定量で、その内訳は毎年定常的にかかる管理運営費 428 億円と、地震対策実施時の費用 93.3 億円である。また、資産価値 v は 1,290 億円、便益 B_i は、市民生活の基本に与える影響、病院医療、火災時の消防用水について検討して 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 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により解析し、それぞれの結果を比較する。

図-1 に示す $r - P_B$ 曲線より、地震の発生を考慮しない場合の曲線③が、地震発生を考慮した場合には、曲

キーワード SDCF 法、地震リスクマネジメント、上水道システム、防災投資、便益、正味現在価値

連絡先 〒141-0031 東京都品川区西五反田 5-14-2 攻玉社工科短期大学 環境建設学科 TEL.03-3493-5671

線①となり、全体的に左方向に移動しており、予測される地震被害がシステムに負の影響を与えていることが分かる。対策を1年目に実施する場合には、 r が約3.3%以下の範囲で、曲線②が上回り（図-2）、対策の効果が出ていることが分かる。

図-3、4に、対策を実施しない場合（A）と、1年目に実施する場合（B）と、6年目に対策を実施する以前に地震が発生したときに、当初の計画に従って実施する場合（C）と、計画を変更して中止する場合（D）の結果を比較している。曲線Cは、 r が約3.8%以下の範囲で、他の3本の曲線より大きく下回っており、対策の実施によって負の影響が出ている。しかし、計画の中止を含んだ曲線Dは、 r が約3.8%以下の範囲で、他の3本の曲線を上回っており対策の効果が大きい。

この傾向は、16年目に対策を実施する場合にも現れている（図-5）。

本研究のSDCF法では、地震対策実施以前に地震被害が発生した場合には、対策実施を中止するといった選択肢などを当初計画に盛り込むこと（リアルオプション）が可能であることが示された。

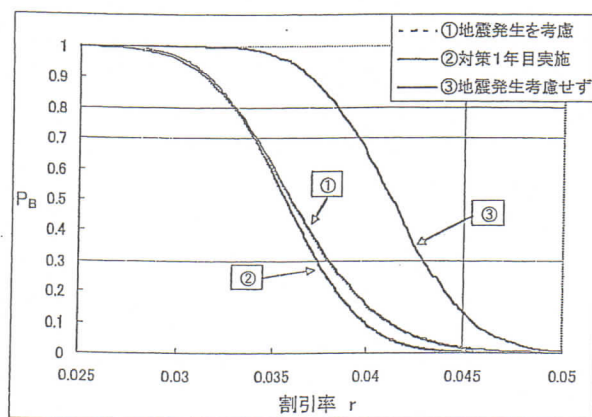


図-1 割引率 r - P_B 曲線

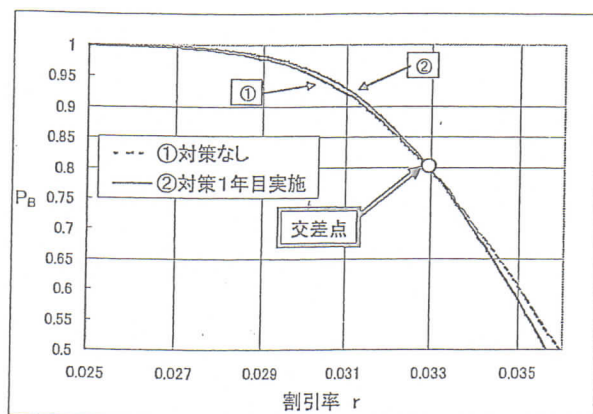


図-2 対策実施の効果（拡大図）（ $P_B \geq 0.5$ ）

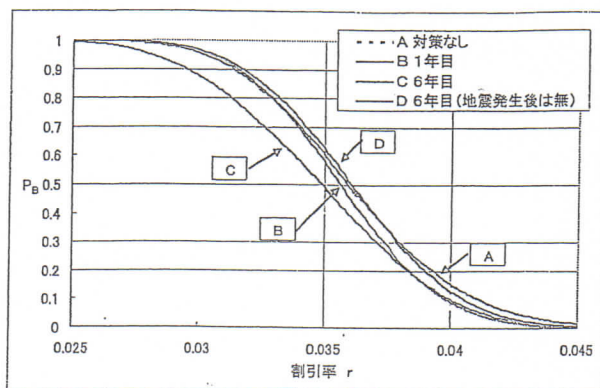


図-3 現状と対策実施後との比較

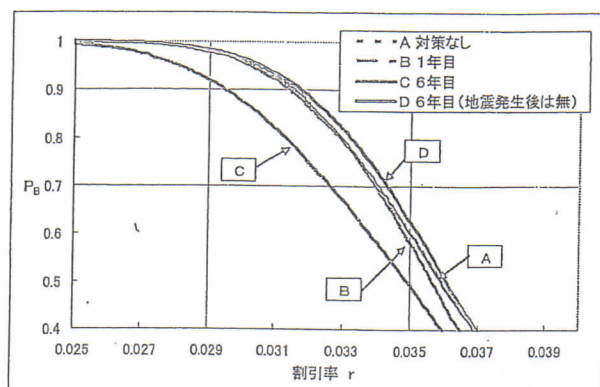


図-4 現状と対策実施後との比較（拡大図）（ $P_B \geq 0.4$ ）

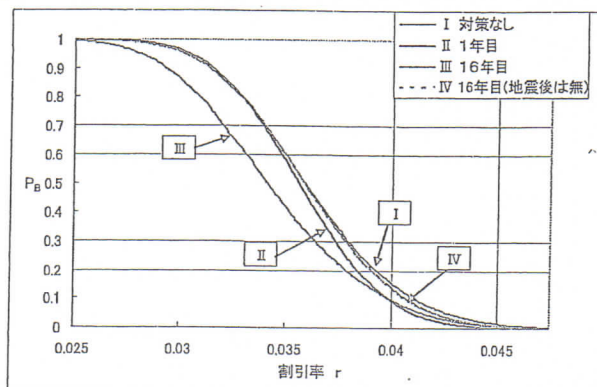


図-5 現状と対策実施後との比較（ $P_B \geq 0.4$ ）

4. おわりに

SDCF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。

参考文献

- 1) 中村孝明，星谷勝，望月智也：地震リスクを考慮した確率論的 DCF 法による資産価格とマネジメント，土木学会論文集 No.752/I-66，169-178，2004 年 1 月。
- 2) 社団法人日本水道協会：地震による水道管路の被害予測、1998 年。
- 3) 星谷勝，中村孝明：構造物のリスクマネジメント，山海堂，2002 年 4 月。