

東京都市大学
平成21年度 総合研究所 紀要

第6号

平成22年5月
東京都市大学・総合研究所

巻頭言

本研究所は、本学の特色ある研究を推進し、研究を基盤とした教育を実践する全学の研究拠点として平成 16 年 4 月に開設された。当初は、武蔵工業大学総合研究所であったが、大学名称の変更により、平成 21 年 4 月より東京都市大学総合研究所となった。以来概略 6 年を経過した現時点は、その研究活動を軌道にのせ、研究の領域の拡大と研究の一層の深化を図り、成果を活用して教育に繋げる時期を迎えている。本研究所では、プロジェクト研究、提案公募型研究、本学の独自性の高い研究、企業との共同研究等、それぞれ分野・性格が異なる研究が並行して進められている。各研究者は他のグループや研究者の成果発表などを通して情報交換と交流を行い、日々切磋琢磨する中で研究に取り組んでいる。それぞれの専門性と特色を活かし、研究の質的向上を図り社会に大きな影響を与え、結果として高い評価を得る環境を整えるのが、私の主たる任務と考えている。

平成 20 年度においては、文部科学省から平成 20 年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に認定された私が代表を務める「生活密着型次世代燃料電池の技術開発と解析手法の確立によるシステムの最適化」プロジェクトと生体医工学科の田口教授が代表を務める「生体インターフェース用ナノカーボン／量子デバイス複合型バイオチップの開発」プロジェクトを、学内外の研究者を組織したプロジェクト研究として推進した。

「生活密着型次世代燃料電池の技術開発と解析手法の確立によるシステムの最適化」プロジェクトでは、固体高分子形燃料電池 (PEFC) と固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の 2 グループに分かれて、研究に取り組んでいる。前者では、小型自動車駆動、可搬型小型電源、或いは二次電池代替電源としての技術開発と解析手法の確立を目指し、後者では、災害時の緊急用電源や小型分散電源としての性能向上と評価手法の確立を目標としている。

一方、「生体インターフェース用ナノカーボン／量子デバイス複合型バイオチップの開発」プロジェクトにおいては、神経とバイオチップの融合、すなわち「生体インターフェース」を目的としたバイオチップの開発に重点をおいた研究を行っている。カーボンナノチューブと単電子制御が可能な量子デバイスを複合させたデバイス開発を目指して、万能細胞の一種である神経幹細胞をバイオチップ表面に定着させながら培養した後に、目的部位に導入する神経との融合化に関する研究を推進している。

さらに、平成 21 年度においては、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業として、「次世代 LSI 創出に向けた新機能シリコン系ナノ電子・光・スピンドバイスの創出」プロジェクトが新たに認定された。これまでに蓄積したシリコンナノ科学の技術と知識、具体的には、卓越した結晶成長技術と高度なシミュレーション技術を駆使して、次世代を支える電子・光・スピンドバイスの開発を目指している。

加えて、平成 19 年度より「重点先行研究（現在は重点推進研究）」プログラムが発足している。このプログラムは、全学委員会である「研究委員会」が全学的に研究提案を募集し、審査に合格したテーマを総合研究所での進展を推進するもので、その研究代表者は研究期間（中間審査を経て 3 年）内においては総合研究所に属して、通常業務を軽減し研究に集中する制度である。これは中村英夫学長の強い熱意と支援のもとで実現したものである。平成 22 年度は、制度の切り替え時期と重なり、研究代表者と研究テーマは、次に示す 1 テーマである。

都市工学科 吉川弘道教授 「地震リスクの活用とマネージメント」

以上の研究に加えて、水素エネルギー研究センター、機器分析室及びインキュベーションラボラトリー「健康・医科学研究室」において、活発な研究と研究に対する支援が行われている。詳細は、各研究報告を参照して頂きたい。

本紀要は、平成 21 年度の研究活動の成果を集約した内容であると同時に、将来へ向けてどのような展開を目指しているかを示すものでもある。今後とも、本研究所が本学の研究拠点として、一層の発展を遂げることをお約束して巻頭言の結びとする。

2010 年 5 月

東京都市大学 総合研究所

所長 永井 正幸

総合研究所構成員

所長 教授 永井 正幸 (無機材料化学)

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	小林 光一	[工学部] 兼務	(有機材料化学)
	教授	宗像 文男	[工学部] 兼務	(固体化学)
	教授	横川 晴美		(高温電気化学)
	准教授	江場 宏美	[工学部] 兼務	(無機物質科学)
	客員教授	阿竹 徹	[東京工業大学・特命教授]	(物性物理化学)
	研究員	鈴木 智史		(無機材料化学)
	共同研究者	古谷 健司	[AGCセイミケミカル(株)・課長]	(材料プロセッシング)
	共同研究者	国松 昌幸	[神奈川県産技センター・主任研究員]	(電気化学計測工学)
	共同研究者	須田 聖一	[J F C C・主任研究員]	(無機材料工学)
	共同研究者	嘉藤 徹	[産総研・グループリーダー]	(エネルギーシステム)

水素エネルギー研究センター

センター長	教授	高木 靖雄	[工学部]兼務	(エネルギーシステム)
	教授	永井正幸	[工学部]兼務	(無機材料化学)
	教授	武 哲夫	[工学部]兼務	(エネルギーシステム)
	教授	鈴木勝正	[工学部]兼務	(流体制御)
	教授	百目鬼英雄	[工学部]兼務	(パワーエレクトロニクス)
	准教授	和多田雅哉	[工学部]兼務	(パワーエレクトロニクス)
	准教授	鳥居 肅	[工学部]兼務	(パワーエレクトロニクス)
	准教授	山根公高	[工学部]兼務	(水素エネルギーシステム)
	客員研究員	長沼 要		(水素エネルギーシステム)
	技士補	中川 研司		(エネルギーシステム)

ナノカーボンバイオデバイス研究センター

センター長	教授	田口 亮	[工学部]兼務	(画像解析)
	教授	秋谷 昌宏	[工学部]兼務	(バイオセンサ)
	教授	仁木 清美	[工学部]兼務	(超音波計測)
	教授	丸泉 琢也	[工学部]兼務	(半導体工学)
	教授	小林 光一	[工学部]兼務	(有機材料化学)
	准教授	平田 孝道	[工学部]兼務	(バイオセンシング)
	准教授	島谷 祐一	[工学部]兼務	(感性生理学)
	講師	京相 雅樹	[工学部]兼務	(生体信号計測)
	講師	澤野憲太郎	[工学部]兼務	(半導体工学)
	研究員	筒井 千尋		(内分泌学)
共同研究者		坂井 貴文	[埼玉大・教授]	(内分泌学)
共同研究者		畠山 力三	[東北大・教授]	(プラズマ理工学)
共同研究者		山本 雅	[東大・教授]	(分子生物学)

シリコンナノ科学研究センター

センター長	教授	丸泉 琢也	[工学部]兼務	(半導体工学)
副学長		白木 靖寛		(半導体工学)
	教授	小野 茂	[工学部]兼務	(プラズマ科学)
	教授	桐生 昭吾	[工学部]兼務	(量子計測)
	教授	岩松 雅夫	[知識工学部]兼務	(統計物理・計算物理)
	教授	岡野 好伸	[知識工学部]兼務	(マイクロ波応用)
	教授	吉田 真史	[知識工学部]兼務	(計算科学)
	准教授	野平 博司	[工学部]兼務	(電子物性)
	講師	瀬戸 謙修	[工学部]兼務	(半導体CAD)
	講師	澤野憲太郎	[工学部]兼務	(半導体工学)
	講師	堀越 篤史	[知識工学部]兼務	(計算科学)
客員教授		中川 清和	[山梨大・教授]	(半導体工学)
客員教授		松井 敏明	[情報通信研究機構]	(半導体工学)
	助手	夏 金松		(半導体工学)
	技術員	田口 貞憲	[工学部]兼務	

自動車エンジン研究室

准教授	伊東 明美	(エンジントライボロジ)
-----	-------	--------------

重点推進研究室

水素自動車実用化研究室

准教授	山根 公高	[工学部]兼務	(水素エネルギーシステム)
共同研究員	松原 洋一	[元日本大学・教授]	(低温工学)
共同研究員	大久保博司	[(株) 鈴木商館・副事業部長]	(低温工学)

免震システム研究室

教授	西村 功	[工学部]兼務	(構造制御工学、耐震構造)
----	------	---------	---------------

地震リスクマネジメント研究室

教授	吉川 弘道	[工学部]兼務	(コンクリート工学, 地震リスク)
----	-------	---------	----------------------

機器分析室

准教授	吉田 明	(分析科学)
技士	新藤 恵美	(化学研磨)
技術員	浜村 尚樹	(プラズマ科学)

インキュベーション・ラボ

健康医科学研究室

教授	近藤雅雄	[人間科学部]兼務	(生命科学)
共同研究者	田中 徹	[SBIアラプロモ(株)・代表取締役]	(健康科学)
共同研究者	井上克司	[SBIアラプロモ(株)・研究開発部長]	(医科学)
共同研究者	土屋京子	[SBIアラプロモ(株)・ 研究開発マネージャー]	(生化学)
共同研究者	太田 麗	[SBIアラプロモ(株)・ 研究開発マネージャー]	(分析化学)

事務室	事務員	鈴木栄里子	国際産官学連携室
-----	-----	-------	----------

目 次

1. 平成21年度 活動報告	1
--------------------------	---

2. 平成21年度 研究概要

エネルギー環境科学研究センター	5
---------------------------	---

リン酸石膏複合膜 GPTES 系新規固体電解質膜の作製と評価

永井 正幸

凍結セルの起動停止繰り返しにより生じる性能劣化に与える
凍結時の MEA 内残存水分量の影響

高木 靖雄

中温動作膜を用いた燃料電池 MEA の性能劣化診断法の開発
—TLM-ACIS 法の開発—

高木 靖雄、武 哲夫

中温動作膜の MEA 化にむけた MEA の調製法の検討と
ANOVA による評価

高木 靖雄

Mn 系スピネル複合酸化物の熱電特性に関する研究

宗像 文男

固体酸化物形燃料電池の性能劣化に関する熱力学的考察

横川 晴美

SOFC セルのコバルトの状態分析

江場 宏美

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

水素エネルギー研究センター	17
-------------------------	----

NO_x 排出を大幅に低減する新しい燃焼コンセプトの構築

高木 靖雄

高セタン価燃料および火花点火による水素 HCCI 機関の
燃焼最適化の研究

高木 靖雄

中型バストラック用低 NO_x 水素エンジンの研究開発

高木 靖雄、山根 公高

東京都市大学における水素エンジンおよび水素バスの
開発と運行

山根 公高

ナノカーボンバイオデバイス研究センター・・・・・・・・・・ 27

幹細胞含有ヒト臍帯血を用いたCNT複合体上での細胞培養・
再生

平田孝道、筒井千尋、秋谷昌宏、田口 亮

マイクロスポット大気圧プラズマ源を用いた再生治療

— 培養細胞を用いたプラズマ照射実験 —

森 晃、平田孝道、筒井千尋、山本俊昭、田口 亮

マイクロスポット大気圧プラズマ源を用いた再生治療

— 培養細胞を用いたプラズマ照射実験 —

筒井千尋、平田孝道、森 晃、山本俊昭、田口 亮

シリコンナノ科学研究センター・・・・・・・・・・ 35

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

上位レベルからのシステム LSI 設計支援技術

瀬戸 謙修

選択的イオン注入法による一軸性歪み Si/Ge ヘテロ構造の開発

澤野憲太郎

Silicon-based light emitting devices based on Ge quantum
dots in optical microcavities

夏 金松

SiGe Resonant-Cavity-Enhanced (RCE) Waveguide
Photodetector

徐 学俊

自動車エンジン研究室・・・・・・・・・・ 45

ガソリンエンジンのピストンスカートプロファイルが摩擦損失
に及ぼす影響

伊東 明美

シリンダブロックのボア変形がオイル消費に及ぼす影響

伊東 明美

ピストンピンボス軸受の潤滑状態に関する研究	伊東 明美
水素エンジンバスの実用上の問題点に関する研究	伊東 明美
重点推進研究室・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5 3
首都圏鉄道路線の地震時システムリスク解析	吉川 弘道
木造家屋を対象とした免震構造技術の革新と普及	西村 功
パルス管冷凍機による液化水素貯蔵タンクのボイルオフ 低減の研究ーパルス管冷凍機の開発ー	山根 公高
機器分析室・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5 9
平成21年度機器分析の利用状況と成果 吉田 明、新藤 恵美、浜村 尚樹	
インキュベーション・ラボ	
健康・医科学研究室・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6 3
尿中ポルフィリンのスクリーニング法の開発	近藤 雅雄

3. 研究論文

エネルギー環境科学研究センター・・・・・・・・・・	7 1
水素エネルギー研究センター・・・・・・・・・・	1 3 7
ナノカーボンバイオデバイス研究センター・・・・・・・・	1 4 7
シリコンナノ科学研究センター・・・・・・・・・・	1 5 9
自動車エンジン研究室・・・・・・・・・・・・・・・・	1 9 1
重点推進研究室・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2 2 3
機器分析室・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2 8 3
健康・医科学研究室・・・・・・・・・・・・・・・・	2 9 5

総合研究所 平成21年度活動報告

月	日	活 動 内 容
4	1	インキュベーションラボ(SBIアラプロモ株) 賃貸借契約締結(更新)
	15	総合研究所説明会(前期)(学生対象)
	20	第21回運営委員会
	23	第53回所内会議
	23	第26回総研セミナー(エネルギー環境科学研究センター)
5	18	第22回運営委員会
	28	第54回所内会議
	28	第27回総研セミナー(ナノカーボンバイオデバイス研究センター)
	31	総合研究所紀要-第4号-発行
6	1	第23回運営委員会
	25	第55回所内会議
	25	第28回総研セミナー(重点推進研究 地震リスクマネジメント研究室)
	26	第1回機器分析室管理運営委員会
7	23	第56回所内会議
	23	第29回総研セミナー(シリコンナノ科学研究センター)
	27	第24回運営委員会
	30	インキュベーションラボ(SBIアラプロモ株) 賃貸借契約締結(新規)(1室増室分)
9	2	第2回機器分析室管理運営委員会
	24	第57回所内会議
	24	第30回総研セミナー(エネルギー環境科学研究センター)
10	13	文部科学省平成21年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業シンポジウム シリコンナノ科学研究センター(第31回総研セミナー)
	14	総合研究所説明会(後期)(学生対象)
	22	第58回所内会議
11	12	第59回所内会議
	12	第32回総研セミナー(ナノカーボンバイオデバイス研究センター)
	14	セラミックス大学2009 (社)日本セラミックス協会
	16	第25回運営委員会
12	15	第60回所内会議
	22	第33回総研セミナー(エネルギー環境科学研究センター)
1	15	第26回運営委員会
	21	第34回総研セミナー(ナノカーボンバイオデバイス研究センター)
	28	第61回所内会議
2	25	第62回所内会議
	25	第35回総研セミナー(シリコンナノ科学研究センター)
3	1	第27回運営委員会
	6	テクノロジーフロンティア研究会シンポジウム(ISTEC超伝導研究所)
	10	重点推進研究 研究成果中間報告会 (地震リスクマネジメント研究室)
	12	文部科学省平成21年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業シンポジウム エネルギー環境科学研究センター(第36回総研セミナー)
	25	第63回所内会議
	25	エントランスホール硝子パーテンション取付工事完了
	29	既存棟3階研究室(3-1)空調設備設置工事完了

平成 2 1 年度 研究概要

エネルギー環境科学研究センター

エネルギー環境科学研究センター

エネルギー環境科学研究センターでは、平成 20 年度に文部科学省から私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の認定を文部科学省から受け、「生活密着型次世代燃料電池の技術開発と解析手法の確立による燃料電池システムの最適化」の研究に着手した。燃料電池の 4 つのタイプのうち、日常生活に役立ち環境への負荷を生活者が実感できる固体高分子形燃料電池(PEFC)と小型固体酸化物形燃料電池(SOFC)に研究対象を絞り、PEFC プロジェクトと SOFC プロジェクトとの 2 つのサブプロジェクトに分かれて研究を推進した。初年度(平成 20 年度)においては、研究の進展に不可欠な装置・設備の充実に重点をおきながら、既存装置・設備を活用して研究を進めた。PEFC プロジェクトにおいては、各部材の作製と分析評価及び特性評価を行った。特に、電解質膜や電極触媒の構造と組織の精密な制御、さらにその特性への影響を詳細に調べ、作製プロセスに反映させることにより燃料電池特性の向上に繋げる指針の基に検討を進めた。また、SOFC プロジェクトにおいては、通常 1000℃近傍で動作される燃料電池の動作温度を 600℃までの低減を目指して、出力特性を大幅には低下させない燃料電池セルを組み立てるため、各部材の選択と界面相の制御による特性の最適化に重点をおいて検討を進めた。

以下に 2 つのサブプロジェクトの第二年度(平成 21 年度)の進捗状況を簡単に記す。

PEFC プロジェクトについての成果

生活密着型次世代 PEFC システム用中温型電解質膜として、リン酸処理石膏-GPTES 系固体電解質及び酸・イミダゾール系電解質膜の作製と評価を行った。また、白金低減電極触媒として、カーボンナノシェル構造を利用した固体高分子形燃料電池用非白金系カソード触媒の調製と評価を行った。さらに、次世代用電極調製法最適化の一環として、MEA 調製法が電気化学的特性と出力性能に与える影響の基礎的検討、および性能劣化を評価する電気化学的手法の確立、および材料解析の一環として NMR(核磁気共鳴法)など機器分析法の適用研究を行った。

SOFC プロジェクトについての成果

生活密着型次世代 SOFC システム用セルの 500-600℃付近での動作には、電極のこの温度領域での活性の維持と燃料極側では炭素析出の抑制防止が大きな課題である。そこで、鉄系燃料極を用いて、炭素析出の抑制と耐酸化性及び触媒活性の維持を可能にする条件の検討を行った。結果として、鉄系材料において、添加物等により組織と構造を制御することで、触媒活性と耐酸化性を両立して動作する電極触媒が作製できる可能性が示された。

最後に、本プロジェクトの主要研究テーマ以下に示す。

- * 燃料電池用新規電解質膜及び電極触媒の探索と特性評価
- * 電解質・電極及びそれらの界面の電気化学的・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
- * 150℃付近で動作する PEFC の開発と評価
- * 500-600℃付近で動作する SOFC の開発と評価

2010 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

リン酸石膏複合膜 GPTEs 系新規固体電解質膜の作製と評価

ハイブリッド材料化学研究室
永井正幸・寺崎雄亮

私たちはシラン系カップリング剤をマトリックスとして、150℃程度の中温度領域で動作する有機-無機複合系電解質膜の作製法の検討を進めている。これまでに、プロトン伝導性が確認されたリン酸処理石膏と 3-グリシドキシプロピルトリエトキシシラン(GPTEs)、3-グリシドキシプロピルメチルジエトキシシラン(GPMDES)をゾル-ゲル法にて複合化させ、ある程度柔軟性を持つ膜試料は既に報告した。しかし、一層の電気伝導度の増大と膜試料の耐熱性と耐久性の増大が課題として残されている。そこで、プロトン伝導体にリン酸処理石膏を用いて、ゾル-ゲル法による膜基材に GPTEs 及び GPMDES を用いた薄膜の作製と直接混合法による膜基材に GPTEs 及び側鎖エポキシ変性シリコンオイル (KF-101) を用いた薄膜作製法を検討した。また膜作製時にリン酸添加を行うことで膜内に導電性を持つケイリン酸塩の作製を行って性能向上を図った。

試料の作製方法を以下に簡単に記す。まず、リン酸処理石膏を使用した膜試料の作製では、17 wt%リン酸水溶液と焼き石膏粉末を 2:1 の重量で混合した試料を室温で 2 日間、80℃で 1 日間乾燥した後、200℃で 4 時間の熱処理を加えてリン酸処理石膏試料を得た。次に、ゾル-ゲル法による膜試料の作製については、GPTEs、GPMDES、2-プロパノールを攪拌した試料に 60 wt%のリン酸処理石膏を加え、ここに 1mol/l の塩酸を加えて 7 日間攪拌した後、80℃で乾燥させることで膜試料を得た。膜の性能向上では 1mol/l の塩酸をリン酸に変更したリン酸添加法を用いてリン酸添加量の最適値の検討を行い、膜マトリックスの性能向上を試みた。さらに、直接混合法・減圧加熱加圧膜作製法による膜試料の作製については、次のように行った。GPTEs, KF-101, リン酸処理石膏を乳鉢において直接混合して粉末試料にした後、減圧ポンプで排気しつつ加熱、加圧し膜試料を得た。膜試料の性能向上ではリン酸処理石膏量の増加による膜化と、膜基材を乳鉢において直接混合する際にリン酸を添加するリン酸添加法を用いてリン酸添加量の最適値の検討を行った。

表 1 試料の特性比較

表 1 にゾル-ゲル法で得られた試料の膜厚と電気伝導率を示す。

交流インピーダンス測定は 160℃に昇温して膜内水分を蒸発させた後に降温しながら測定を行った。そのため、含有水分量の少ない条件で測定できたと考えている。リン酸添加量を増やすと電気伝導率が向上することが分かった。これはリン酸が膜マトリックス形成において膜基材との結合に寄与し、膜内で電気伝導性のあるケイリン酸塩を形成したと推測した。これを検証するために FT-IR により構造を調べた。結果はリン酸添加量が多い試料についてシロキサン結合のピークの増大が確認された。しかし、FT-IR では目的物質のケイリン酸塩のピークである、P-O-Si や、Si-O-P は SO_4 やシロキサン結合のピークと重なるために観察することはできなかった。また、交流インピーダンス測定前後の FT-IR 測定結果からは、ケイリン酸塩、シロキサン結合のピークが増大していることが確認されたので、予め熱処理を試料に加えることでケイリン酸塩を膜内で形成し性能向上できる可能性があるかと推定する。

試料名	P/Si 比	膜厚 (mm)	電気伝導率 (S/cm) 最大値
従来膜	無し	0.254	$1.451 \times 10^{-6} / 150^\circ\text{C}$
1 膜	2.00	0.240	$5.588 \times 10^{-5} / 150^\circ\text{C}$
2 膜	1.50	0.240	$1.355 \times 10^{-5} / 150^\circ\text{C}$
3 膜	1.00	0.360	$2.827 \times 10^{-7} / 150^\circ\text{C}$
4 膜	0.50	0.286	$4.437 \times 10^{-9} / 150^\circ\text{C}$

表 2 直接法の特性比較

次に、直接混合法・減圧加熱加圧膜成形による膜試料の特性比較を表 2 に示す。試料はリン酸処理石膏量の増加によるリン酸処理石膏バスの形成を期待し、また酸触媒と膜基材の性能向上の役割としてリン酸添加を合わせて行い作製した。結果としてリン酸処理石膏量の増加による性能向上が見られた。しかし、リン酸添加を行いつつリン酸処理石膏量を増加させて膜化する場合、安定した膜試料を得るためには添加量を減少させる必要があることが分かった。電気伝導率は 70 wt%膜が最大となり、80 wt%膜の値は低下した。以上より、ゾル-ゲル法のリン酸添加によって約 1 桁電気伝導率を向上することが確認でき、また、直接混合法によりリン酸添加量の調整とリン酸処理石膏量の増加によって、約 1 桁電気伝導率を向上することが可能となった。

試料名	P/Si 比	膜厚 (mm)	電気伝導率 (S/cm) 最大値
60 wt%膜	1.70	0.076	$1.798 \times 10^{-5} / 150^\circ\text{C}$
70 wt%膜	1.50	0.068	$9.408 \times 10^{-5} / 160^\circ\text{C}$
80 wt%膜	1.30	0.160	$7.215 \times 10^{-7} / 160^\circ\text{C}$

凍結セルの起動停止繰り返しにより生じる性能劣化に与える 凍結時の MEA 内残存水分量の影響

エネルギー環境技術開発センター
高木 靖雄

1. まえがき

PEFC は、運転条件や放置環境によって性能劣化を引き起こす。氷点下環境における凍結起動停止繰り返し運転もその 1 つである。本報告では、 -30°C で凍結したセルの凍結起動停止繰り返しにより生じる性能劣化を停止時 MEA 内に残存する水分量の観点から検討し、性能劣化原因解明の一環とする。

2. 実験方法

-30°C 一定の恒温槽内に単セルを設置して凍結起動停止繰り返し運転を行った。実験手順として、まず 70°C で 30 分運転した。その後、停止時 MEA 内に残存する水分量を調節するために、アノードとカソードを乾燥窒素でパージを行った。LCR メータで抵抗値をモニターし、抵抗値が $10\text{ m}\Omega$ の条件を高水分量保持、 $100\text{ m}\Omega$ の条件を低水分量保持と定義した。その後セルを密閉し、5 時間かけてセル温度を 70°C から -30°C まで冷却し、30 分間 -30°C で放置後、アノードに乾燥水素、カソードに乾燥空気を供給し、負荷電圧 0.5 V で起動した。セル温度はヒーターによって 1 時間で -30°C から 70°C まで昇温させ、 0°C に達すると、アノードとカソードの加湿を開始した。以上の過程を 50 回繰り返した。MEA 劣化特性を調べるために、10 サイクルごとにセル温度 80°C 、アノードとカソードの加湿温度 80°C にて性能評価を行った。さらに窒素ガス吸着法により電極触媒層、水銀圧入法により GDL の細孔分布測定を行った。

3. 結果と考察

Tafel 解析により得られた性能劣化で生じた活性化過電圧と濃度過電圧の変化を図 1 に示す。低水分量保持の場合、性能劣化は全負荷電流域における電気化学的な活性化過電圧の増加に、高電流負荷域における濃度過電圧の増加が重畳された特性である。これに対して高水分量保持では、濃度過電圧の増加が大幅に抑制され、結果として性能劣化が大幅に軽減された（図示なし）。以上のことから、凍結セルの起動により生じる性能劣化は、活性化を低下させる要因と水分不足作動により拡散機能を低下させる要因とが組み合わさっていると推定できる。

性能劣化前後における機能低下の電極触媒層と GDL の細孔分布を図 2 に示す。残存水分量に関わらず、凍結により触媒層と MPL 層内炭素の細孔容積が増加している。このことは、この温度条件では触媒層内残存水分は全て凍結することから触媒層内残存水凍結による体積膨張により細孔径の増大と触媒層内炭素の分散増大がイオノマーの剥離などの構造変化を引き起こし、これが図 1 で示した活性化の低下を引き起こした原因であると考えられる。GDL の細孔容積が高水分量保持で低下しているが、これは水分凍結による圧搾により引き起こされたと考えられる。しかし、拡散機能の低下が高い低水分量保持でその増加が微少であることから、このことが濃度過電圧増加の原因ではなく、上で述べた電極触媒層の構造変化と図 2 には示されていない低水分量保持に関連する他の因子、たとえば低水分作動によるイオノマーの拡散機能の低下などが原因であると考えている。この解明は今後の課題として取り組んで行く。

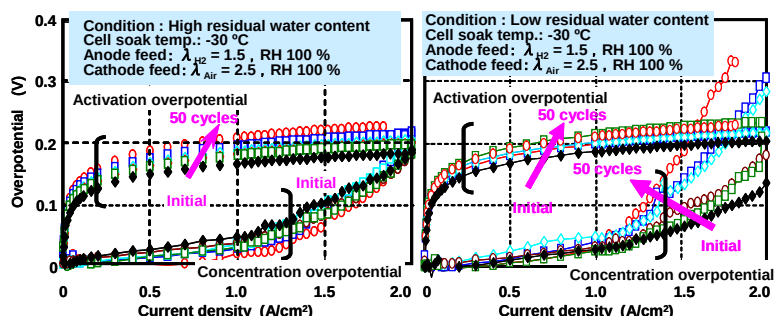


Fig. 1 Changes in overpotentials caused by repeated startup of frozen cell soaked at -30°C and with residual water contents

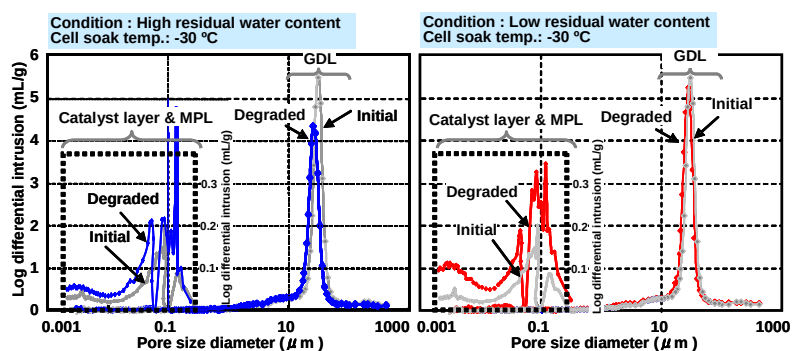


Fig. 2 Changes in pore size and volume in MEA caused by

中温動作膜を用いた燃料電池 MEA の性能劣化診断法の開発－TLM-ACIS 法の開発－

エネルギー環境技術開発センター

高木靖雄

武 哲夫

1. 研究の目的と概要

中温動作膜を用いたセルの性能劣化診断と軽減を，エネルギー環境技術開発センタープロジェクトの研究課題として取り組んでいる．新しい素材を用いた MEA の性能劣化診断に要求されることは，劣化部位を明らかにすることである．個々の部位，例えばアノード，カソード，電解質膜などは従来の交流インピダンス法や CV 法など電気化学的診断法の適用によって診断が可能であるが，複合要素から成り立っている触媒層各要素の劣化診断には新たな手法の開発が必要である．この目的のために TLM-ACIS 法(ACIS 実験で取得した Nyquist 線図を分布定数型等価回路 TLM によりカーブフィティングし各要素のインピダンス変化を診断する手法)の開発に取り組んでいる．図 1 が TLM の等価回路であり，図中に MEA を構成する電解質膜と触媒層イオノマー内のプロトン伝導プロセスと性能 (インピダンス)，炭素内電子の伝導性および二重層コンデンサーと電気化学反応が示されている．

2. ガラス転移させた電解質を用いた劣化部位の感度試験

カソードイオノマーを加熱処理し意図的にガラス転移させ性能を劣化させた MEA を用いて，TLM-ACIS 法の劣化部位の診断能力を判定する下記実験を行った．

2. 1 カソードイオノマーの劣化感度

カソードイオノマーをガラス転移させた MEA は，低電流領域では性能に変化はないが，高電流領域で性能低下した．また TLM-ACIS 法により，カソードイオノマー抵抗(R_i)が増加するが，媒層中の電子伝導抵抗(R_e)は変化がなく，反応抵抗(R_{ct})にわずかに変化が測定されることがわかった．

2. 2 カソードイオノマー層状劣化の感度

同様に，カソードイオノマーの電解質膜側のみを層状にガラス転移させた MEA (図 1 で，電解質膜側半分のみを劣化させた場に相当) により，TLM-ACIS 法は電解質膜側の劣化を判断できることが確認できた．

3. 凍結起動劣化 MEA への診断適用結果

TLM-ACIS 法を，凍結した MEA の起動繰り返しにより生じた性能劣化解明に適用し，次のような特性を解明した (図 2)．

- ・ 繰り返し回数に応じて機能低下が進む．
- ・ 電解質膜の機能低下は生じない．
- ・ 性能劣化は，アノードよりカソードで発生する．
- ・ カソードのイオノマーが機能低下し，炭素は低下しない．
- ・ イオノマーは電解質側膜が重荷機能低下し，GDL 側では低下しない．この症状に対応する電解質膜側の圧搾が SEM 写真で観察されている．

4. 今後の進め方

中温動作型 MEA の性能劣化診断に適用する．

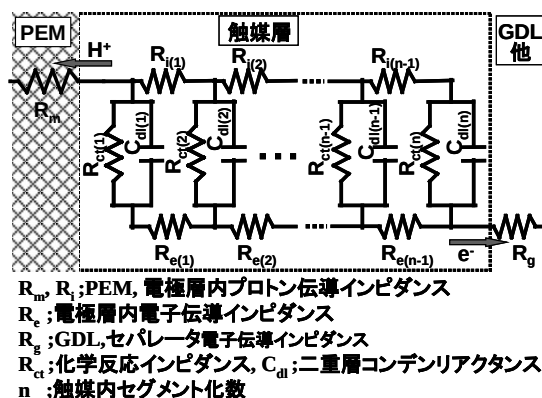


図1 分布定数型等価回路のブロック線図

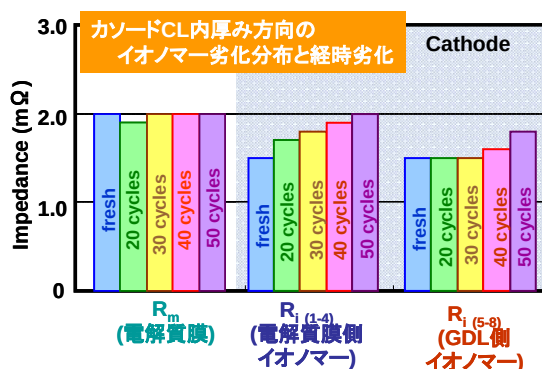


図2 凍結MEAの繰り返しにより生じたイオノマーの劣化分布 (電解質膜側のみ劣化)

中温動作膜の MEA 化にむけた MEA の調製法の検討と ANOVA による評価

エネルギー環境技術開発センター
高木 靖雄

1. まえがき

エネルギー環境技術開発センターのプロジェクトで進めている中温動作膜、低白金触媒の開発後の MEA 化のベースデータとすることを目的として、これまで用いられている電極材料を用いた

表 1 MEA 調製因子と水準

因子	水準			
	第一水準	第二水準	第三水準	第四水準
A:MPL中のPTFE含量	PTFEなし	PTFE/C=1/1	PTFE/C=1/2	PTFE/C=1/4
B:MPLの種類	Valcan-XC72	Acetylene black		
C:触媒ペーストの水分量	6%	40%	64%	77%
D:触媒ペーストのイオノマー量	Nafion/Pt=0.5/1	Nafion/Pt=1/1	Nafion/Pt=1.2/1	Nafion/Pt=1.5/1
E:ボールミルの攪拌時間	5分	20分	60分	
F:バインダーの種類	Nafion DE520	Nafion DE521		
G:保存条件	2°Cで24時間	25°Cで168時間	60°Cで24時間	

MEA の調製法が出力に与える影響を体系的に検討した。調製法の因子と水準を表 1 に示す。

2. 結果と考察

2. 1 出力に対する MEA 調製法主要因子の出力に対する影響

PTFE 含有率を高くし撥水性を高めると高電流域での出力電圧が安定し、出力も上昇した(図 1)。しかし、撥水性が高すぎると、高電流域で出力が低下する。触媒ペースト作製時の水分量は、低電流域と高電流域で分極特性が良くなる。溶媒として用いる水分を多くすることでナフィオン電解質の高分散が可能になっていると考えられる。しかし、触媒インクの水分量が高すぎると乾燥収縮時にインクの表面張力が高いためひび割れが発生し、高電流域で生成水がひび割れ部に浸み込み、触媒層にフラグメンテーションを引き起こした。触媒ペーストのイオノマー量は、高電流域の分極特性により N/Pt は 1 が最適との結果になった。N/Pt は 1 より低い、イオン伝導性高分子電解質が少ない領域では、プロトン伝導性が低下し、N/Pt は 1 より高い、イオン伝導性高分子電解質が過剰な領域では、ガス拡散性が阻害されることが考えられている。

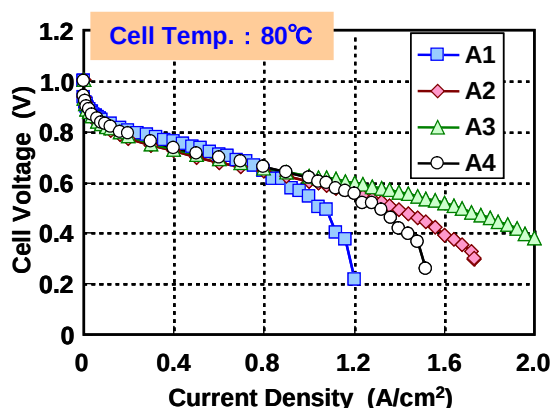


図 1 MPL 撥水性の影響

2. 1 その他の因子の影響

上項で述べた主要調製法因子の効果に加えて、表 1 で示した他の因子の性能向上に対する効果の一覧を合わせて図 2 に示す。MEA 調製時の因子が出力性能に与える影響を明らかにし、また ANOVA による分散も明らかにした。ANOVA の検定結果から、選定した因子は有意水準 5% で有意であることが判明した。

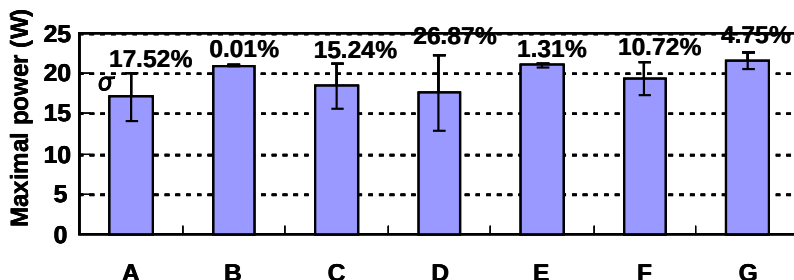


図 2 MEA 調製法が出力に与える効果と ANOVA による分散分析

3. まとめ

このような調製時の因子の感度を確認しながら、新しく開発される中温動作電解質膜と低白金触媒を組み合わせた MEA システムの出力最適化に適用していく。

固体酸化物形燃料電池の性能劣化に関する熱力学的考察

総合研究所エネルギー環境科学研究センター 横川晴美

固体酸化物形燃料電池システムの実証研究が進み、その実用化の時期も当初予定されていたものよりかなり早まってきている。初期導入に際し最も要求されるものは、システムの信頼性であり耐久性である。

耐久性の中でも最後まで材料科学的に検討を行う必要があるのが不純物の効果である。空気極材料では、クロム被毒についての熱力学考察と性能劣化との相間について以前に検討していたが、本年度においては産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池材料グループが 2 酸化硫黄の被毒試験を行い、特徴的な反応生成物分布を示したことから、 $(\text{Sm}, \text{Sr})\text{CoO}_3$ 空気極と SO_2 との反応平衡を 3 次元化学ポテンシャル図を構築することによって観測プロファイルがどのような反応経路で表されるかを明らかにした。その特徴は、全てのプロファイルは化学ポテンシャルが局所的に連続かつ、拡散方向に低下するという条件のもとで合理的に解釈できることが明らかになった。

スタック内外に使用している物質からの汚染で従来あまり注意を払われていないが、実際に 2 次イオン質量分析計 (SIMS) で測定すると、電極活性点近傍に認められるものにリンがある。他方、リンは石炭ガス化ガス中でニッケル燃料極の性能劣化をもたらす元素の一つとして認識されており、現在米国エネルギー省のプロジェクトである SECA (Solid State Energy Conversion Alliance) の中で精力的に実験的検討が進められている。このような背景から、ニッケルと、S, Se, As, P との相互作用を、Ni-M-O-H 系の Ellingham 線図を構築することによって熱力学的に検討した。その結果、SRI の Bao らが指摘するように $\text{HPO}_n (n=1,2,3)$ の気相種の影響が著しいことがわかったので、これらの気相種を考慮に入れて図の構築を行った。その結果、次の 3 領域が重要であることが分かった。(1)還元性が強い雰囲気で、金属間化合物を生成する、(2) $\text{HPO}_2(\text{g})$ が安定で Ni との相互作用がない、(3)SOFC の高燃料利用率下に相当する酸化性雰囲気下ではニッケルはリン酸塩になることがわかった。石炭ガス化ガスの不純物導入試験では主に(1)による効果を観察し、通常の SOFC 稼働下では(2)、更に汚染が酷くなると電気化学的活性点を攻撃することが分かった。

これらの結果を基にして、不純物による性能劣化の一般的なモデルを構築し、燃料極にも空気極にも同じ物理化学的考えを適用し、性能変化と不純物との反応性についての相間を明らかにした。その視点より逆に個別の劣化現象の見直しを行い、従来の議論ではかけていた点を洗い出し、劣化現象の複雑な要因を把握するとともに、それぞれの要因毎に温度、運転条件の及ぼす影響を明らかにし全体像の把握を行う作業に着手した。

[参考文献] Harumi Yokokawa, Haruo Kishimoto, Katsuhiko Yamaji, and Teruhisa Horita, "Generalization of Degradation Mechanisms in Terms of Materials Chemical Nature, Operation Condition and Electrode Reaction Mechanism," *ECS Transactions* **25(2)**, 401-410 (2009).

高効率な駆動源を目指した 500℃程度の中温域で作動する燃料電池、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 21 年度は、自動車や固体酸化物型燃料電池などでは、500℃程度の排ガスが発生するため、この中温域熱源を利用可能な新規複合酸化物熱電材料に関する研究を行った。

近年、3d 遷移金属酸化物における熱電特性に関する研究が数多くなされているが、比較的高い熱電特性を示すことで現在注目されている Ca-Mn 系ペロブスカイト型複合酸化物においてさえも実用化に十分な特性は得られていない¹⁾。そこで、Mn 系複合酸化物熱電材料における性能向上を目指し、スピネル構造を有する Mn 系複合酸化物 (AB_2O_4) に注目し、A、B 各サイトを種々の元素で置換し、熱電特性の挙動の変化を検討した。特にここでは、 $Ni_{1-x}Cu_xMn_2O_4$ 系についての研究結果について報告する。

市販の高純度酸化物原料を用い $Ni_{1-x}Cu_xMn_2O_4$ ($0.00 \leq x \leq 0.50$) となるように秤量後、板状の成形体を作製し、焼成することで測定試料とした。これらについて粉末 X 線回折測定と 373~1173K の温度領域での電気伝導率とゼーベック係数の測定を行った。X 線回折図形から、作製した全ての試料は単一相であることを確認した。格子定数は Cu 置換量の増加に比例し減少を示していた。得られた電気伝導率とゼーベック係数の測定結果を図 1 と図 2 に示す。特徴的な挙動として、 $x=y=0.00$ のゼーベック係数は、温度の上昇に伴い約 1000K を境に負から正へ符号反転を示した。また、Cu 置換により、ゼーベック係数は負から正へ連続的に変化し、 $x \geq 0.10$, $y \geq 0.10$ では全測定温度領域において正の値を示した。このように元素置換により、組成によってキャリアの制御が可能で、温度域を選べば P-N 接合熱電素子の実現可能性が示唆された。

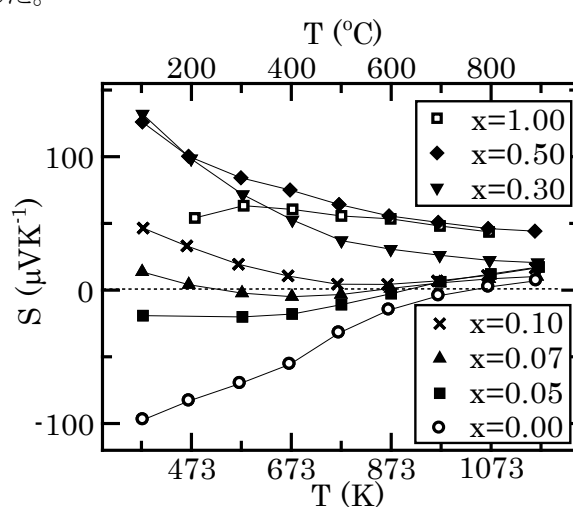
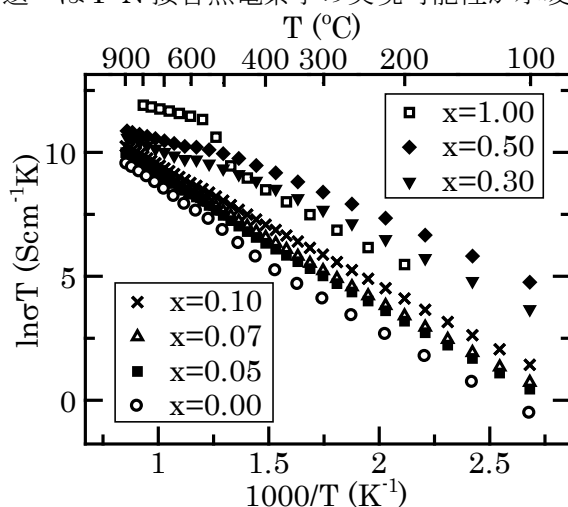


図 1 $Ni_{1-x}Cu_xMn_2O_4$ の電気伝導率の温度依存性 図 2 $Ni_{1-x}Cu_xMn_2O_4$ のゼーベック係数の温度依存性

【参考文献】 1) 1) M. Ohtaki: J. Solid State Chem. 120 (1995), 105

固体酸化物型燃料電池 (SOFC) には、層間における反応や界面の乱れが起こりやすいという現状があり、一定の性能を維持するためには、各層の組成や構造とその乱れを詳しく調べる必要がある。本研究では、マイクロ (μ) ビームを用いた X 線分析により、SOFC セルの各層からの元素の拡散と組成変化や、界面での化学反応や相形成の観察を行うための技術的検討を行った。

ここでは円筒形の燃料極支持型 SOFC セルを用い、エポキシ樹脂に埋め込んで研磨し、積層面に垂直な断面試料を作製した。各層の構成は、Ni-YSZ (Y_2O_3 -stabilized ZrO_2) の基体管に Ni-ScSZ (Sc_2O_3 -stabilized ZrO_2)、ScSZ、GDC (CdO_3 -doped CeO_2)、SSC ($Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_3$) の層を、数 μm ~ 数十 μm 程度の厚さで順に積層させたもので、さらに銀メッシュの集電体を接着してある。蛍光 X 線分析は高エネルギー加速器研究機構、放射光科学研究施設、BL-4A において行った。約 $5\mu m$ 角の単色化した放射光 X 線マイクロビームを、断面試料表面から照射し、Si (Li) 半導体検出器を用いて蛍光 X 線スペクトルを測定した。入射 X 線のエネルギー 8.5 keV のときの蛍光 X 線スペクトルを図 1 に示す。ここで、A の測定は銀メッシュ ~ SSC 付近、B は Ni-YSZ 部分、C は SSC 部分を狙ってマイクロビーム照射したものである。ただし、X 線の入射角度は、Ni-YSZ 側から銀メッシュ側に斜めに抜ける方向であったため、X 線の侵入深さの関係で、特に B のスペクトルでは、Ni, Co のほかに複数の層の構成元素が検出されている。一方、C の測定では積層面に平行に X 線が侵入する配置で測定したため、基体管の成分の Ni はともかく、Co と Sm が選択的に検出され、SSC 部分の観察ができています。このことから、SOFC の各層の分析を行うには、試料の配置に注意するか、薄片試料を作製するなどの必要があることがわかった。

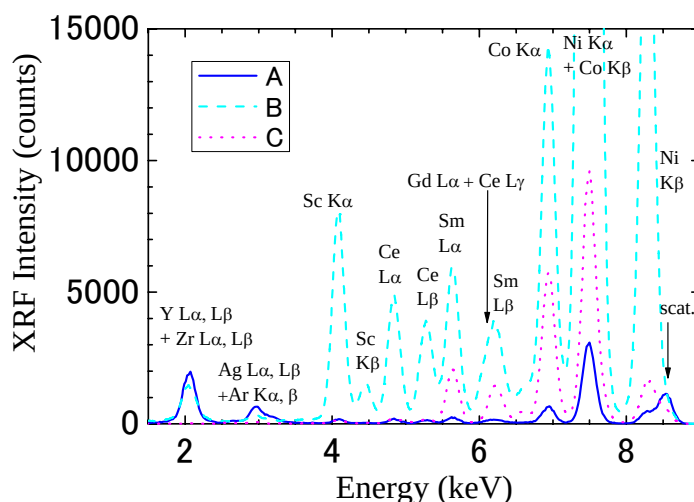


図 1 SOFC 断面からの蛍光 X 線スペクトル
A: 銀メッシュ ~ SSC 付近, B: Ni-YSZ, C: SSC 部分
(入射 X 線エネルギー: 8.5 keV, 積算時間: 300 秒)

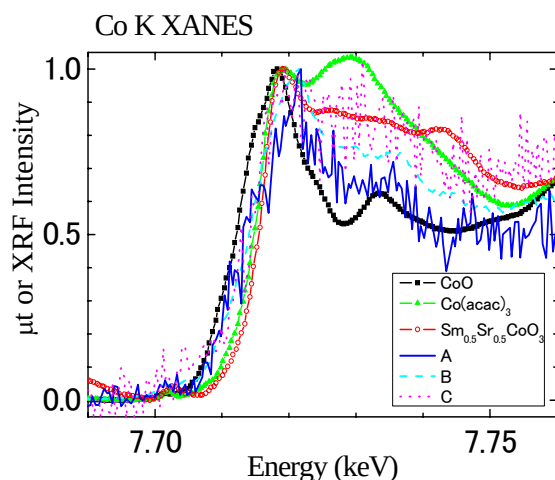


図 2 CoK 吸収端近傍における吸収スペクトル
(A, B は各エネルギー点 10 秒, それ以外は各点 1 秒 $\times$ 168 点の測定。A, B, C は蛍光法, それ以外は透過法。)

次に A, B, C の各測定点において、入射 X 線のエネルギーを Co K 吸収端 (7.71 keV) 前後で走査して XANES スペクトルを測定した。結果を図 2 に示す。図中には参照試料として酸化コバルト (II) : CoO , アセチルアセトナトコバルト (III) : $Co(acac)_3$, および SSC の原料粉末について透過法により測定した XANES を同時に示した。吸収端は Co の酸化数が大きくなるにつれ高エネルギー側にシフトする。各測定点におけるスペクトルは、特に Co の蛍光 X 線強度が相対的に弱い B や、積算時間も短くした C では統計変動が大きいですが、原料の SSC とは明らかに異なっている。吸収端の立ち上がりは、A, B, C いずれも SSC に比べて低エネルギー側にあり、吸収端上部の構造も得に A や B において SSC とは明らかに異なっている。すなわち、このセルの SSC 層は、少なからず乱れており組成や構造の変化、Co の拡散など起きている可能性の高いことがわかった。

1. 背景

自動車や可搬型電子機器用の電源として固体高分子形燃料電池（PEFC）に注目が集まり、一部では商業化も始まりつつある。しかしながら、現状の PEFC ではコスト・部材の環境負荷・性能に問題が残っており、その解決が望まれている。燃料電池の主要部材である電解質膜の改良はそれらの問題の解決方法の一つであり盛んに研究が行われている。本研究では、アルカリ膜形燃料電池用有機ケイ素系電解質膜と中温動作形燃料電池用無機有機ハイブリッド電解質膜の開発を通じ、さらにその成果を基に電極部分の開発を行うことで、それらの問題の解決を目指している。

2. アニオン交換膜形燃料電池用有機ケイ素系電解質膜

電解室内を水酸化物イオンが伝導するアニオン交換膜形燃料電池は近年になり注目が集まり研究例が増えてきている。しかしながら、既存の PEFC を代替しうる発電性能は先行グループを含めでも得られておらず、更なる電解質膜の性能向上が必要である。2009 年度には電荷質膜の性能向上について 2 つのアプローチを試みた。一つは電解質膜の単位重量当たりの水酸化物イオン量であるイオン交換容量の増大であり、もう一つはイオン伝導を担う側鎖末端部の構造の変更（図 1）である。イオン交換容量の増大については側鎖末端部の変更により前年度試作電解質膜に比べて大幅に向上した（図 2）。しかし、膜の厚さ方向に膜成分の偏りが見られ、イオン交換容量の増大に反してイオン伝導度が低下する結果となった。本年度は、従来型の側鎖末端基を持つ膜のイオン交換容量の増大と、2009 年度形の側鎖末端基を持つ膜の内部の改良により性能向上を試みる。

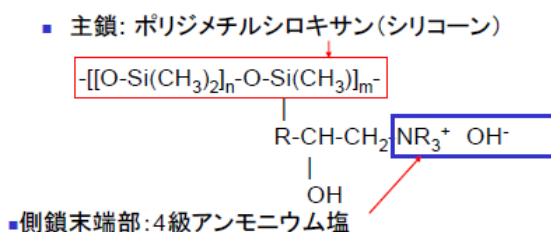


図 1 試作電解質膜分子構造図

図 2 アニオン交換膜外見

3. 中温動作形燃料電池用材料

PEFC を 150℃付近の中温度領域で運転させることで、触媒被毒の緩和・発電効率の上昇・冷却系の簡略化・廃熱利用・生成水の排出が可能になる。そのため、PEFC の動作温度を上昇させる新規電解質膜の開発が広く行われている。我々のグループでは 2009 年度は研究を続けてきた石膏系プロトン伝導材料の電極への展開を行った。燃料電池用電極に必要な要素は、電子伝導経路・イオン伝導経路・物質移動経路・触媒付近の三相界面の確保である。我々の試作した試料（図 3）ではそれぞれを導電性炭素・リン酸処理石膏・炭酸カルシウム・リン酸造孔剤により形成し、ポリビニルアルコールを用いて形態を安定させた。本試料は我々のグループが前年度までに試作した電極とは異なり造孔剤による物質移動経路の積極的な形成を行ったことで最大電流密度 27.3 mA/cm²、最大出力密度 3.6 mW/cm² が得られた。今後も運転条件を変えた評価を行う予定である。



図 3 リン酸石膏系複合電極

水素エネルギー研究センター

水素エネルギー研究センター

水素エネルギー研究センターは、武蔵工大が永年行ってきた水素エンジンの研究を継続して行っている。水素エネルギーは、地球が抱えている3大課題である地球温暖化、大気環境の汚染化、エネルギー資源の枯渇化を解決する手段の一つとして、太陽光、風力などの再生可能エネルギーから製造することができ、かつ排出物がクリーンであることから、エネルギーを大量に消費する運輸用原動機や家庭用分散型発電用に用いる研究開発とその現在実用化に力が入れている。本研究センターにおける研究も、このような世界の水素エネルギー活用技術開発の動きの中で重要な役割を占めており、平成17年度から国土交通省の（独）交通安全環境研究所からの委託により、大型バス／トラック用水素エンジン動力システムの試作開発の研究を行っている。この研究は、武蔵工大が永年培ってきた水素エンジンの技術力を活用し、車両走行を行うことのできるエンジンシステムの開発を目標としており、研究活動の範囲は水素エンジン本体の研究開発、エンジンに用いる高圧水素噴射弁とポンプの開発さらにはエンジンを車両にて走行させるために必要な燃料噴射や窒素酸化物など有害排出物を軽減させるエンジンのトータル制御システムの開発を、一貫してかつ独自技術で行っている。さらに、水素エンジンからの唯一の有害排出物である窒素酸化物を還元させる NO_x 吸着還元触媒の最適化の研究や車載燃料を液体水素にした場合の課題である燃料タンクからのボイルオフ水素を回収するためのパルス管冷凍機の開発など、基礎的な研究も平行して行っている。

一方、これらの研究とは別に、エンジンの燃焼室内で均質に混合した水素を圧縮着火による燃焼を行わせる HCCI 機関（均質予混合圧縮機関）の研究も行っている。この燃焼方式は、これまでの水素エンジンより一層の熱効率の向上が期待でき、かつ窒素酸化物の排出が概ねゼロの近いことから、次世代の内燃機関として世界中各界で研究開発が進められている新しい燃焼方式である。本センターでは、着荷促進燃料として DME（ジ・メチル・エーテル）や灯油を補助燃料に用いるなど、独自の技術を織り込んだユニークなアプローチで研究を行っている。

主要研究テーマを以下に示すが、本研究センターでは、大学院生を中心とする学生が研究の主体であり、この研究を本学の教員、本センターの研究員や技術員が指導する形で、先に述べた（独）交通安全環境研究所や関連する大学、部品メーカーさらには国土交通省と一体となって研究を進めている。

- * 車載用筒内直接噴射式水素エンジンの熱効率向上と排出物軽減に関する研究開発
- * 筒内直接噴射式水素エンジンの燃焼性能向上の研究
- * コモンレール方式高応答高噴射量高圧水素噴射弁の研究開発
- * 車両走行と排出物軽減コントロールシステムの開発
- * 液化水素貯蔵タンクのボイルオフ低減の研究 -パルス管冷凍機の開発-
- * 液体水素高圧ポンプの研究開発
- * 高セタン価燃料を補助燃料とする水素予混合圧縮着火機関の出力と熱効率改善に関する研究

2010年5月

水素エネルギー研究センター
センター長 高木靖雄

水素エンジンの研究開発

総合研究所水素エネルギー研究センター 高木靖雄

CO₂ やPM排出のないクリーンな水素燃料を重量車両用内燃機関に適用するための燃料供給方式、燃焼方式、課題の一つである窒素酸化物 NO_x の軽減方法を含めたシステムの研究開発を、(独) 交通環境安全研究所の受託研究として実施している。

(1) 高圧水素噴射エンジンシステム

開発を進めている水素エンジンは、出力向上と低 NO_x 排出を目標としているため、高圧水素を燃焼室に直接噴射し火花点火により燃焼させる方式であり、昨年度までの研究により、エンジンシステムの試作を行い目標値通りの出力特性を達成した(表1に機関仕様、図1に出力特性を示す)。さらに単気筒機関をベースにした燃焼性能実験により性能を確認するとともに NO_x の後処理に用いる NSR 触媒(NO_x 吸蔵還元触媒)、EGR、NSR と EGR の制御と車両走行を行うエンジンと排気の制御システムの開発を行った。さらに、開発した制御システムを応用してシミュレータとして用い、D13 車両走行モードによる NO_x の排出量と燃料消費量の予測を行なった。

(2) 高圧噴射供給システム

本水素エンジンシステムの基幹技術の一つが、高圧水素を燃焼室に噴射する噴射弁であり、この開発を水素エネルギー研究センター独自で進めている。このシステムは、コモンレール油圧駆動ニードル噴射弁方式を用いており、特徴は液体水素をインタンクポンプで最大 20MPa までの昇圧し高圧で噴射することができること、高速応答を可能としたことであり、噴射期間 30 度 CA で最大必要燃料量を燃焼室に噴射することができる。(図2 試作噴射弁参照)

一方、上記高圧水素噴射エンジンとは燃焼コンセプトが異なる水素 HCCI 機関(均質予混合圧縮着火機関)の研究開発を進めている。このエンジンの特長は、均質に予混合させた混合気を圧縮着火により燃焼させることにより、従来の火花点火水素に比べて大幅に熱効率を高くできると、NO_x 排出がゼロレベル近傍であることである。圧縮着火性の低い水素を圧縮により着火させるため、10 から 20% の DME (ディメチルエーテル) を混合させる必要がある。昨年度は、DME 混入量を減らすため、また安定して燃焼できる運転領域を拡大するために、低 DME 混合域で火花点火を補助的に用いる手法を検討し、その効果を確認した。

図1 試作エンジンシステムの仕様

Items	Specification
Base Engine	Hino J05D
No. of Cylinder	Inline 4 Cylinders
Engine Displacement	4728 mL
No. of Valves	4 valves
Cooling System	Water Cooled
Bore x Stroke	112mm x 120mm
Compression Ratio	13:1
Fuel	Direct Inj. High Press. Hydrogen
Ignition System	Spark Ignition
Aspiration	NA

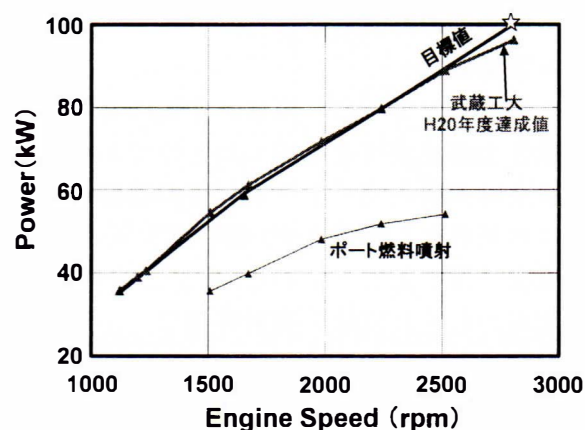


図1 試作機関の出力特性

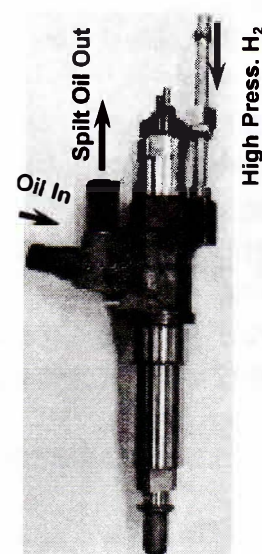


図2 開発中の高圧噴射弁

NO_x 排出を大幅に低減する新しい燃焼コンセプトの構築

水素エネルギー研究センター
高木 靖雄

1. まえがき

CO₂ 排出のない水素燃料エンジンの唯一の有害排気成分は窒素酸化物 NO_x であり、かつこれまでの技術では数千 ppm という高い排出濃度であった。国交省の次世代大型低公害車開発プロジェクトの一環で、排気後処理システムに依存しないエンジンでの燃焼過程において NO_x 生成を抑制する燃焼方式の研究を行っているが、平成 21 年度の研究においてこの NO_x 排出を大幅に低減することのできる新しいコンセプトを見出し、PCC コンセプト(Plume Combustion Concept; 過濃混合気塊燃焼コンセプト)と命名し、学会での発表も行った。

2. 実験結果

このコンセプトは、水素の空気に対する高い拡散性と燃焼速度を活用したものであり、噴射中または直後の高じょう乱状態の過濃水素噴流塊に火花点火し燃焼させ、過濃混合気の低 NO_x 生成を活用したものである。図 1 に示すように、上死点からそれ以降の噴射時期で、かつ概ね同時期の火花点火により、NO_x の生成が他の条件の 70% 以上もの大幅な低減が実現できた。さらに、熱効率 η_i の低下も未燃焼水素の急増も生じていないことが PCC 燃焼の特長である。また、PCC 燃焼に EGR を行うことによって、さらに大幅な NO_x の低減が可能であり、EGR にみにより現行規制値である 2009 年大型バスの規制値レベルである 0.7 g/kWh のレベルまで低減できる可能性も確認できた(図 2)。

3. 今後の課題

低 NO_x 生成のメカニズムを解明するために、噴射した水素噴流の挙動と性能を最適化するための点火位置の詳細、さらには点火後の火炎伝ばなどを可視化エンジンを用いて一層の性能向上をはかり、4 気筒エンジンにおける排気性能評価研究が可能なレベルまで進める。

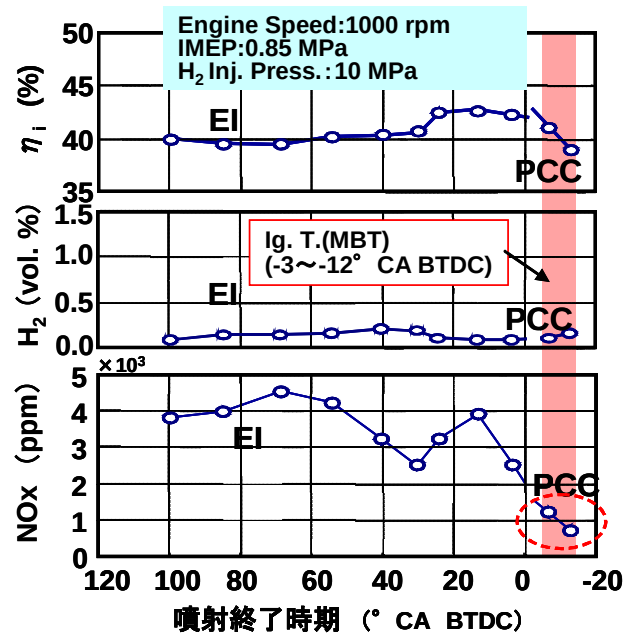


図 1 PCC 燃焼による低 NO_x 排出特性

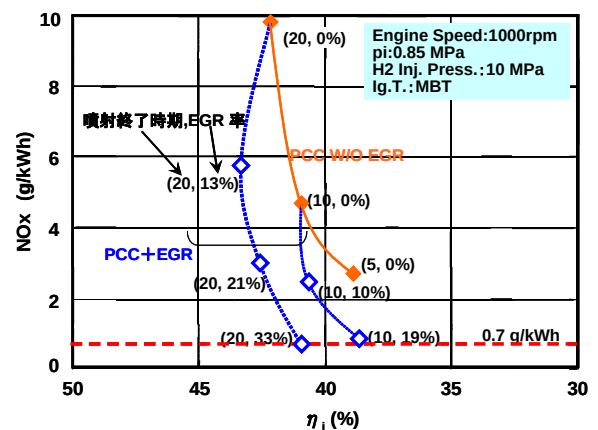


図 2 PCC 燃焼の EGR による NO_x 低減効果

高セタン価燃料および火花点火による水素 HCCI 機関の燃焼最適化の研究

水素エネルギー研究センター
高木 靖雄

1. 緒言

次世代の燃料である水素を、次世代の燃焼方式と期待されている予混合圧縮着火（HCCI）燃焼により燃焼させ、高熱効率と低 NO_x(排出濃度概ねゼロ)および CO₂ 排出ゼロとなる内燃機関の研究に取り組んでいる。ただし、低セタン価燃料である水素に着火させるため、現時点では補助燃料として DME や灯油を混合している。

2. 実験結果および考察

2. 1 水素 HCCI 燃焼の熱発生特性

水素 HCCI 燃焼では、圧縮着火により HCCI 特有の微量の低音熱発生に続いて主熱発生が起こる。 λ が 2.5 という希薄空燃比にもかかわらず HCCI 燃焼の特徴である高い熱発生が実現でき、この結果として高い熱効率が実現できた(図 1)。また、水素燃料機関の特性である高い冷却損失も壁面近傍で熱発生が抑制されるため大幅に低減された。NO_x の排出は図示するまでもなく、数 ppm という低レベルであった。

2. 2 火花点火による水素 HCCI 燃焼の制御

HCCI 燃焼では、熱効率や NO_x 排出を最適化するために重要な燃焼開始時期の制御ができないという欠点があった。本研究では、HCCI に火花点火を組み合わせるコンセプトで燃焼の制御を試みた。火花点火が水素 HCCI 燃焼機関の熱発生特性に与える効果として、図 2 に示すように、点火時期に応じて主熱発生開始の進角、燃焼期間の短縮が起こり、点火時期 -14deg.CA ATDC において出力最良点 MBT、最高熱効率 42%を示した。これは火花点火に主熱発生を誘発する作用があるためと考えられ、通常の HCCI 燃焼では主熱発生が遅角してしまう条件について、性能を向上する有効な手段であると思われる。

2. 2 火花点火による安定燃焼領域の拡大

火花点火による水素 HCCI 燃焼の運転範囲の変化を図 2 に示す。火花点火によって HCCI 燃焼領域が少 DME 添加（低 D.M.R.）側へ拡大し、それに伴って□範囲が希薄、濃混合気両側へ拡大した。これは火炎伝ば燃焼の熱発生によって自着火が誘発されたことなどが原因と思われる。

3. まとめ

- 火花点火は水素 HCCI 燃焼に対し、主熱発生を進角により熱効率の向上に効果を持つことがわかった。
- HCCI に火花天下を組み合わせることによって、安定燃焼 λ 領域が拡大され、また補助燃料である DME の添加量も大幅に軽減することができた。

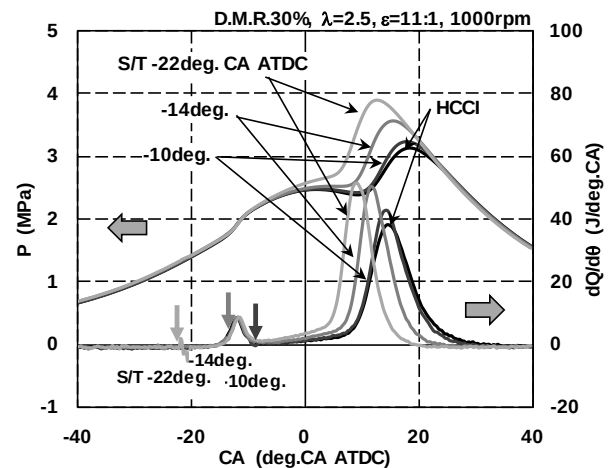


Fig.2 Improvement of Heat Release in H₂-DME Combustion with Spark Ignition Timing

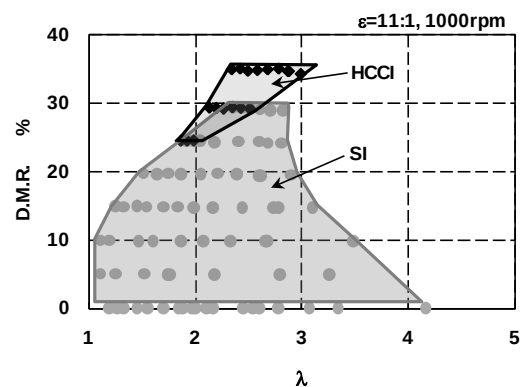


Fig.2 Expanding Operation Range with Spark Assistance

東京都市大学における水素エンジンおよび 水素バスの開発と運行

山根公高

東京都市大学

158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1

Development of Hydrogen Fuelled I.C Engine and Bus and its Operation

Kimitaka YAMANE

Tokyo City University

1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158-8557 Japan

Because of the urgent social need of the reduction of the most important greenhouse gas or carbon dioxide in the Earth's atmosphere, it was decided that the mini-bus should be developed by using verified, not new technologies with great confidence and reliability.

The development ended in great success, having had it run on public roads with a license number plate on. It was also verified by the JE05 emission test that the emission was almost so low as the zero-emission. The total driving distance reached 11000 km with no problem by the end of November, 2009. It was also found that the mini-bus could run about 200 km per one charge of 10 kg hydrogen.

Key words: Hydrogen Fuel, Internal Combustion Engine, Near-Zero Emission Bus

1. まえがき

自動車動力源の具備条件は、軽量、コンパクト、大出力、低燃費、低価格、高安全性、低維持費、低騒音、低振動、高信頼性、高耐久性、低エミッションおよび良運転性である。内燃機関水素自動車は、この具備条件の多くを備えている。

東京都市大学（旧武蔵工業大学）は、1970年から、地球環境問題と化石燃料枯渇問題を同時に解決できる水素を自動車動力源の燃料として用いるための実用化研究を実施してきた。その結果、内燃機関水素自動車は化石燃料で育まれてきた安価で、高信頼性と高耐久性を持つ既存技術に応用することが可能であり、かつ地球の緊急課題である地球温暖化問題解決の手段として極めて有望であることが判った。加えて、更に合理的内燃機関エンジンシステムおよび水素自動車の追及のために研究開発を続けている。

今回は、緊急な社会ニーズを最優先させ早期に水素自動車の普及を実現化するためにどうすればよいかを考えた。そこで、多くの一般の方が一同に水素利用の有効性を体感できる公共交通手段である水素バスを開発し、公道を走れるように白ナンバーを取得してその普及の実現性を一般の方々に実感していただきたいと考えた。

2. 開発の目的と基本方針

本開発の目的は、緊急な社会ニーズすなわち地球温暖化対策に寄与するため、公道を走れる水素バスを早期に開発して白ナンバーを取得、その普及の実現性を一般の方々に実感していただくことであつた。よって、本開発の基本方針を、信頼性、耐久性が確認できている既存技術のみで対応することとした。かつ、水素エンジンに付き物の排気中のNOxは、10ppm以下に抑えることにより、化石燃料エンジンのコスト高となっている排気清浄化装置を用いずに運用できるエンジンシステムにすることにした。

3. 燃料供給システムとエンジンシステム

水素燃料搭載のエネルギー密度から考えると東京都市大学が長い間研究開発してきた液体水素燃料供給システムも当初候補と考えたが、信頼性、耐久性が確認できている既存の技術のみで対応する基本方針に従い、燃料電池自動車走行のために既に運用されている技術基準「道路運送車両の保安基準第17条別添100」に従った燃料供給システム、すなわち、軽量樹脂タンク高圧水素供給システムを採用した。このことは、白ナンバー取得を可能にするばかりか、既設の水素ステーションネットワークを活用でき、本開発の目的に合致したものであった。

燃料供給システム設計に当っては、先に述べた技術基準を満たすことは当然であるが、「漏らさない」、万一漏れたら「自動的に止める、知らせる」に加えて、「溜めない」を基本的考えとして設計をした。

開発対象バスは、日野自動車製小型バスリエッセとした。車両に搭載されている日野自動車製直噴式4気筒過給ディーゼルエンジン(J05D)(ボアφ112mm、ストローク120mm)を使用し、水素エンジンに改造(J05H2)した。主な改造点および変更点は、以下3点である。

- (1) ディーゼル用直接噴射弁の廃止および点火栓の装着
- (2) 吸気マニホールドに天然ガス用インジェクタとスロットルバルブの追加
- (3) ピストンの燃焼室形状、容積の変更により圧縮比を18から11に変更

開発の基本方針より、構造が簡単で、技術的に容易で信頼性、耐久性が確認できている予混合希薄火花点火燃焼エンジンの燃焼方式を採用した。

予混合希薄火花点火燃焼エンジンとしたため、次のような短所を確認する必要があった。

短所1：ノッキング、バックファイア等の異常燃焼が起きやすい。

短所2：水素燃料を空気と同時に吸入することから、空気量が制限を受けその分水素燃料が投入できない。加えて、希薄燃焼により出力が低下する。

短所1に対しては、圧縮比を11に下げ、バックファイア対策をエンジンシステムに追加した。

短所2に対しては、ベースエンジンにもともと設置されていた可変ノズル付ターボ過給機を採用し空気投入量を増加することで出力低下を補った。

4. まとめ

緊急な社会ニーズを最優先させるために、早期に水素自動車の普及を実現化する必要があった。それには、多くの一般の方が一同に水素利用の有効性を体感できる公共交通手段であるバスを開発することがよいと考えた。加えて、公道を走れるように白ナンバーを取得してその普及の実現性を一般の方々に実感していただきたいと考えた。その結果、計画通り開発した東京都市大学予混合希薄燃焼内燃機関水素バス用エンジンは、排気清浄化装置を装着しないで全ての運転領域で排出NOx濃度を10ppm以下に抑えながら、バックファイア等の異常燃焼をまったく起こさずに目標出力を上回る動力性能を得ることができた。

このエンジンを小型バスに搭載し、日本車両検査協会で排気ガス認定試験を実施した結果、排気清浄化装置無しで2009年度ポスト新長期排気ガス規制値を大幅に下回る排気性能を得ることができた。改造申請による白ナンバーを取得でき一般道路を走行可能となった。白ナンバー取得後運行調査のため6月末まで図9に示すように、東京都市大学のキャンパス間を主に走行した。9月末から10月中旬に環境省総合環境政策局「低炭素地域づくり面的対策推進事業」として行われた大丸有・周辺地区環境交通社会実験、北海道室蘭市で10月から11月にかけて実施した室蘭工大－東京都市大大学連携支援事業で運行調査を行った。11月末現在累積走行距離は、11000kmとなった。この間、何にも問題は生じていない。この走行実績から計算された1充填走行距離は、約200kmであることがわかり高い効率で走行できることも示すことができた。

本紀要は、依頼投稿論文：山根公高、特集「水素・燃料電池自動車の開発状況」タイトル：東京都市大学における水素エンジンおよび水素バスの開発と運行、燃料電池 Vol.9, No.3, pp.56-60, Jan. 2010より抜粋

ナノカーボンバイオデバイス研究センター

「ナノカーボンバイオデバイス研究センター」の概要

ナノカーボンバイオデバイス研究センター長 田口 亮

1. センター運営状況

文部科学省「平成 20 年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」の公募に対して、事業名(研究プログラム名)「生体インターフェース用ナノカーボン／量子デバイス複合型バイオチップの開発」とし応募し採択された研究プログラムを遂行するための拠点としてセンターが開設されて 2 年間が経過した。初期のメンバーに加えて、「大気圧プラズマ源を用いた生体細胞・組織の活性化による生体適合性向上の研究」を発展・飛躍させるために、工学部生体医工学科・森晃教授(プラズマ医学)と工学部電気電子工学科・山本俊昭教授(プラズマ応用)が本研究センターの新たなメンバーとして加わった。

2. 研究進捗状況

本研究センターでは、神経とバイオチップの融合、すなわち「生体インターフェース」を目的とした体内完全埋め込み型のバイオチップ開発に主眼を置いた研究を行っている。研究は以下に示すように複数の要素から構成されている。

[チームA] カーボンナノチューブ(CNT)-FET の設計・作製・特性評価

CNT 無成長のシリコンデバイスをを用いた基本特性評価。バイオチップ仕様 CNT-FET デバイスの基本設計。

[チームB] 量子効果発現型シリコンデバイス設計・作製・特性評価

CNT 無成長のシリコンデバイスの作製を行う。[チームA]と共同でデバイスの特性評価を行い、設計仕様との比較を行う。

[チームC] FETチップへの CNT の直接成長と特性評価

CNT 成長に必要な条件を見出し、その条件下で金属触媒配線を形成させたシリコン基板上への CNT 直接成長を行い、その構造を評価する。

[チームD] 各種細胞を用いた生体適合性の評価

バイオチップ使用材料における生体適合性の評価と向上のための検討を、培養細胞を用いて行う。大気圧プラズマ源を用いた生体細胞・組織の活性化による生体適合性向上(組織再生)に関する研究も合わせて行う。

[チームE] 小動物を用いた生体適合性の評価

バイオチップ使用材料における生体適合性の評価と向上のための検討を、小動物(ラット、ミニブタ等)を用いて行う。ここでも、大気圧プラズマ源を用いた生体適合性向上(組織再生)に関する研究を行う。

[チームF] 無線送受信機的设计・製作・特性評価

体内完全埋め込み型チップのための多チャンネル無線送受信機的设计・製作・特性評価を行う。

3. 国際ワークショップの開催

本研究センターの研究プログラムも 3 年目を迎え、今年度中に中間点を超えることになる。これまで、実験環境の整備に追われていた感があるが、今年度からは、成果を着実に積み重ねる必要がある。そのような背景から、著名な研究者の招待講演と研究プログラムの中間報告を含む講演からなる国際ワークショップを 11 月下旬に世田谷キャンパスで開催する予定である。

幹細胞含有ヒト臍帯血を用いたCNT複合体上での細胞培養・再生

平田孝道、筒井千尋、秋谷昌宏、田口 亮

我々は脳－機械インターフェース (Brain-Machine Interface, BMI) を目的とした生体インターフェース用神経融合型カーボンナノチューブ(CNT)バイオデバイス開発を主眼とした CNT 上、神経再生型電極上、シリコンウエハー上での各種細胞 (上皮・心筋細胞) 及び万能細胞(主として神経幹細胞) の培養とそれらの生体適合性評価に関する研究を展開している。本年度は、各種デバイスと神経細胞の密着性・親和性を向上させるため、幹細胞を用いたデバイス上での細胞/神経の再生・融合に関する基礎実験を行った。¹⁾

本実験に用いる幹細胞は、ヒト由来臍帯血 (胎児と母体を繋ぐ胎児側の組織である“へその緒”中に含まれる血液) であり、白血病や再生不良性貧血などの難治性血液疾患治療に不可欠な造血幹細胞 (赤血球、白血球、血小板に分化可能な幹細胞) が多量に含有されているのみならず、再生医療への応用が期待されている前駆細胞 (神経細胞、肝細胞、上皮細胞などの組織への多分化能を有する細胞) も含まれている。

実験は、培養容器もしくは酸化膜を堆積したシリコンウエハー上にポリエチレングリコール (PEG) をグラフト処理した CNT (PEG-CNT) を分散・塗布した後、マグネトロン型プラズマ発生装置 (周波数: 50 Hz、電圧・電力: 1 kV・20 W) 内のサンプルホルダーに固定させてプラズマイオン照射 (プラズマアクティベーション) 処理を施した場合と未処理の場合について行った。プラズマ発生用導入ガス種及び圧力は大気 (主に N_2 :

78.08 %、 O_2 : 20.95 %) 及び 10 Pa であり、照射時間は 30 min である。更に、これらの培養容器 (シリコンウエハー) を CO_2 -インキュベーター (培養条件: 温度: 37°C、 CO_2 ガス濃度: 5 %) に導入し、長期間培養と光学顕微鏡による直接観察を行った。

図 1 は、幹細胞含有臍帯血の顕微鏡写真であり、赤血球や造血幹細胞に相当する細胞が観察されている。プラズマアクティベーション) 処理を施した場合、CNT 上に各種細胞が定着しているのが観されており、生体適合性の向上が確認された (図 2)。

1) 平田、島谷、田口: 第 56 回応用物理学関連連合講演会 講演予稿集 No.0, p. 24 (2009).

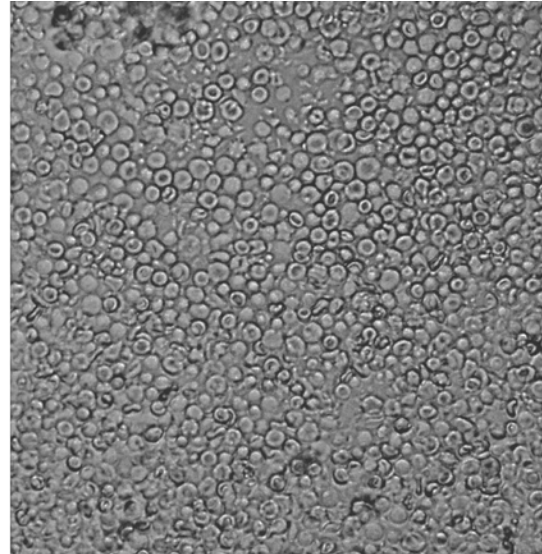


図1 幹細胞含有ヒト由来臍帯血の顕微鏡写真

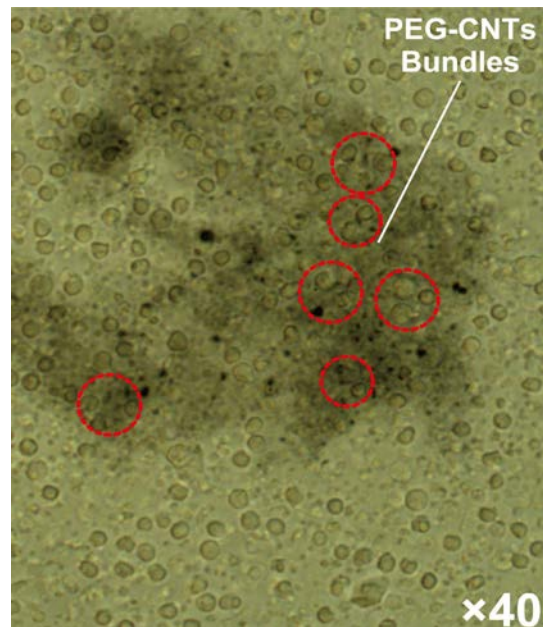


図2 CNT 上に定着した幹細胞の顕微鏡写真

マイクロスポット大気圧プラズマ源を用いた再生治療 — 培養細胞を用いたプラズマ照射実験 —

筒井千尋、平田孝道、坂谷祐一郎、森 晃、堀井敦史、山本俊昭、田口 亮

我々は生体への熱的かつ電磁的ダメージが極めて低いマイクロスポット大気圧プラズマ源を用いた生体組織・細胞への直接照射を行い、再生治療も視野に入れた“プラズマ医療”に関する基礎実験及び評価・分析を行っている。^{1,2)} 今回は、培養細胞へのプラズマ照射を行い、増殖状態の違いについて評価を行った。

実験装置の概要を図1に示す。プラズマ発生装置本体は、ガラスキャピラリー（プラズマ発生部の内径：8 mm、先端部の内径：1 mm）内にタングステン線（直径：1 mm）を導入し、外部に筒状グラウンド電極を設置した同軸状構造である。プラズマ発生条件は、印加電圧：5-9 kV、周波数：1-3 kHz であり、ヘリウム（He）ガス流量：1-1.5 L/min、照射距離：5-10 mm、プラズマ照射時間：1-300 sec である。実験は、培養容器（ポリプロピレン製）上にマウス繊維芽細胞（NIH3T3）を含有した培地を展開し、プラズマイオン照射処理を施した場合と未処理の場合について行った。更に、プラズマ処理を施した培養容器を CO₂-インキュベーター（培養条件：温度：37℃、CO₂ ガス濃度：5%）に導入し、長時間培養と光学顕微鏡による直接観察を行った。

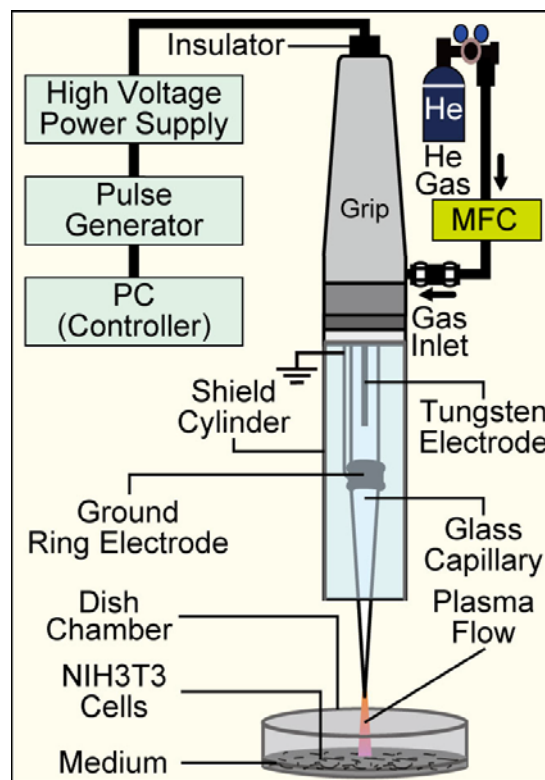


図 1

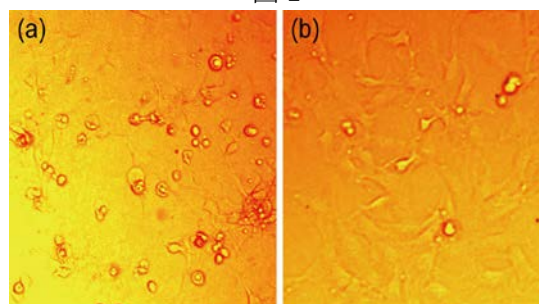


図 2

He ガスのみをフローさせた場合、培地内でのガス攪拌に起因した細胞の浮遊化が促進されたために細胞の成長が阻害されている [図 2 (a)]。一方、プラズマを発生させた場合、細胞の浮遊化が殆んどみられず、順調に増殖することが判明した [図 2 (b)]。したがって、プラズマ電界もしくは培地表面へのイオン／ラジカルの衝突等による相互作用が細胞内の成長因子増殖に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

- 1) T. Hirata *et al.*, 19th MRS-J Academic Symposium, I-10-I (2009).
- 2) T. Hirata *et al.*, The 6th Asia-Pacific Int. Sympo. on the Basic and Appl. of Plasma Technol. (2009).

マイクロスポット大気圧プラズマ源を用いた再生治療 — 培養細胞を用いたプラズマ照射実験 —

森 晃、平田孝道、筒井千尋、横井由貴子、堀井敦史、山本俊昭、田口 亮

我々は生体への熱的かつ電磁的ダメージが極めて低いマイクロスポット大気圧プラズマ源を用いた生体組織・細胞への直接照射を行い、再生治療も視野に入れた“プラズマ医療”に関する基礎実験及び評価・分析を行っている。^{1,2)} 今回は、培養細胞の増殖結果との比較を行うために、人工的に皮膚の火傷を発生させた小動物へのプラズマ照射を行い、照射患部の治癒状態について評価を行った。

マイクロスポット大気圧プラズマ源のプラズマ発生条件は、印加電圧：8 kV、周波数：3-6 kHz であり、ヘリウム (He) ガス流量：1-1.5 L/min、照射距離：5-10 mm、プラズマ照射時間：90 sec である。照射実験に用いた小動物は、ラット（種：ウイスター、飼育状態：無菌、性別：オス）及びミニブタ（性別：メス）であり、ガス麻酔による無意識下状態にて実験を行った。照射対象となる皮膚の火傷は、手術用電気メスを用いて形成した。

ラットを用いた火傷患部へのプラズマ照射実験を図 1 (a)、サーモグラフを用いた体表面温度の測定結果を図 1 (b) に示す。照射部

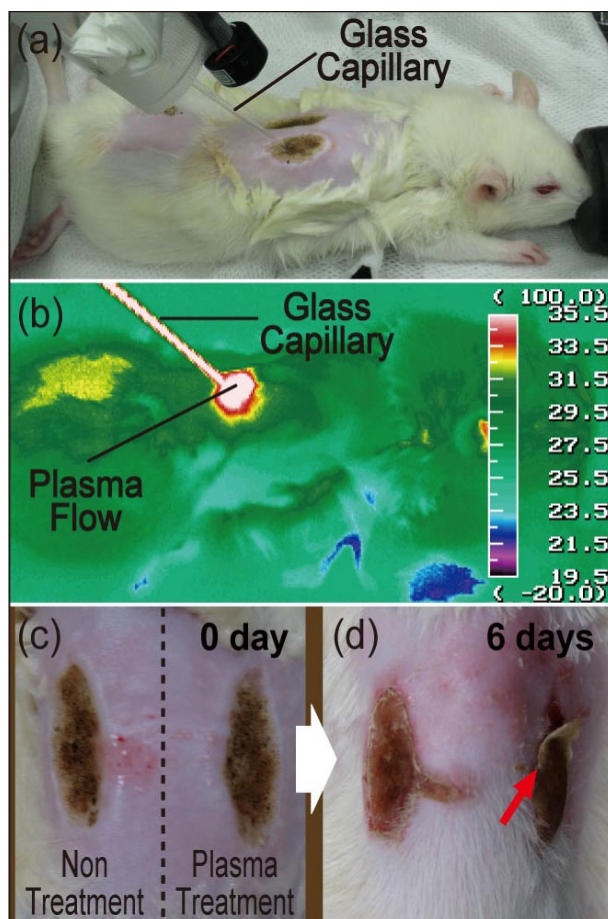


図 1

の温度は、40～45℃程度であり、火傷を起こす温度には到達していないことが判明した。また、火傷形成直後の写真を図 1 (c) に示す。ここで、火傷はラットの背骨を挟んで左右に形成し、右側のみにプラズマ照射を行った。図 1 (d) は 6 日目の患部観察写真であり、照射対象部位には外傷性火傷や感電的負傷に起因した痕跡が見当たらないのみならず、一部の皮膚には治癒に起因した白色の痂皮（かさぶた）が形成されていることも判明した。ミニブタを用いた実験、並びにプラズマ照射と細胞成長因子の関連性については、講演にて報告する。

- 1) T. Hirata *et al.*, 19th MRS-J Academic Symposium, I-10-I (2009).
- 2) T. Hirata *et al.*, The 6th Asia-Pacific Int. Sympo. on the Basic and Appl. of Plasma Technol. (2009).

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では、平成 21 年度に文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「次世代 LSI に向けた新機能シリコン系ナノ電子・光・スピンデバイスの創出」プロジェクトの採択を受けた。本研究プロジェクトは、実験研究を主とする『新機能シリコンフォトリック・スピンデバイスの創製と LSI 化に向けた研究（新機能デバイスプロジェクト）』と、シミュレーション研究により実験研究の加速・支援を目指す『シリコンナノシステムの計算科学（計算科学プロジェクト）』の 2 研究テーマで構成され、学内研究者 14 名、学外研究者 9 名、計 23 名の体制でスタートした。

新機能デバイスプロジェクトでは、歪みエンジニアリングを活用し、現行シリコンデバイスより一桁高い移動度が達成できる超高速電子デバイスとその CMOS プロセスの開発を行う。あわせて通信波長域の室温 EL 発光デバイスとの融合による光インターコネクト開発を目指しており、現行の電子デバイスの高性能化ニーズに直接応えけるとともに、融合型デバイスの実用化を目指すものである。さらに、スピン FET の動作実証は、スピン流の創出とその制御に根ざした極めて基礎的な研究を集約するものであり、材料、界面制御における基礎技術の進展が大いに期待できるものである。

一方、計算科学プロジェクトでは、新機能デバイスプロジェクトで研究開発を進める電子・光・スピンデバイスのシミュレーションプラットフォームを、実験結果との検証を通じて構築する。デバイス微細化による量子効果、チャネル歪み効果、スピン注入拡散効果、量子ドット発光特性など、夫々のデバイスに固有なモデル化とシミュレーション機能の開発を進め、シリコンナノシステム統合設計・開発環境の構築を目指すものである。

さて、平成 21 年度はプロジェクト初年度となるため、10 月 13 日に、中村英夫学長をはじめ、学内外から多数の研究者と関係者を招き、第 1 回シンポジウムを盛大に開催した。本シンポジウムでは、新機能デバイスプロジェクトと計算科学プロジェクトの各テーマについて、研究概要を担当者が説明するとともに、プロジェクトテーマ分野の著名な研究者による招待講演 3 件を行った。因みに、東京大学大学院工学研究科の和田一実先生には、「シリコンフォトリクス」、東北大学金属材料研究所の前川禎道先生には、「ナノサイエンスとスピンエレクトロニクス」、日立製作所中央研究所の鷲尾勝由博士には、「次世代準ミリ波無線通信システムに向けた低電力 SiGe HBT と回路技術」と題して、最先端の研究成果についてご講演いただいた。今年度のシリコンナノ科学研究センターでの具体的な研究成果に関しては、本冊子に纏められた各担当者別の研究報告をご覧いただきたい。

最後に、中国科学院半導体研究所光電子集積化研究室で、平成 21 年 7 月に学位を取得した徐学俊博士を、大学事務局のご支援により、10 月 1 日から本センターのポストドクターとして迎えることができた。本センターで強化すべき分野のひとつである光デバイス研究分野で貴重な戦力補強ができた事を報告する。

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、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、安定性解析など、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。本報告では、昨年度研究成果のあがったシリコン表面におけるドーパント不純物原子のクラスタリングに関する解析について報告する。

2. 不純物ドーパントのクラスタリング

導電性を高めるためにシリコン半導体に導入されるドーパント不純物に関しては、従来のイオン注入法にかわり、より低エネルギーで高濃度な導入が可能となるプラズマドーピング等の新手法が開発され、ソース、ドレイン領域の浅接合形成等への応用が図られている。一方、これらの方法により導入された不純物は、高濃度であるため、シリコン中で凝集し、クラスタ構造をとることが知られているが、キャリア生成への影響、表面近傍での安定位置・安定構造等に関しては、未だ未だ不明な点が多く、ドーパントの表面偏析現象と並んで重要な課題の一つである。本研究では、ボロン(B)原子クラスタについて検討を進めた。さて、B原子は高ドーズ時には B_6 、 B_{12} 等のクラスタ構造として存在する事が知られている。単体原子は最表面から2層目に安定位置を持つ事が実験、計算両面から知られているが、クラスタ構造での安定位置に関する報告は無い。本研究では、Si(001)-c(4×4)表面 Si 9層並びに Si20層スラブモデル(右図1)を用い、icosahedral B_{12} とcubo-octahedral B_{12} の中心位置を、表面2層目から5層目まで変え、クラスタ安定位置を求めた。この結果、cubo-octahedral B_{12} は最適化による形状変形やicosahedral B_{12} への変形が見られたため表面近傍では安定に存在しにくく、 B_{12} はicosahedral B_{12} の形状で中心が4層目にあるとき最安定であるとわかった(図2)。この理由としては、 B_{12} クラスタを収納する V_5 空格子のサイズが、第4層目でクラスタサイズに最適フィットするためであると考えられる。

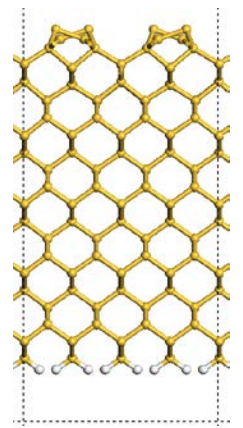


図1 Si(001)-C(4x2)スラブモデル

3. 今後の進めかた

本研究では、Si界面でのドーパント不純物のクラスタリングを検討したが、総研で現在実験が進められているGeに関しては、Siと異なる表面偏析の現象が見つかってきている。今後は、材料をSiからGeに変え、また面方位も(001)面に限定せず、歪電子デバイスやスピンドバイスでの応用が期待される(111)面に関して、表面偏析の現象やクラスタリング現象の解析を進める予定である。

本研究の一部は文部科学省科研費基盤研C(20560025)並びに私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の助成を受けて実施した

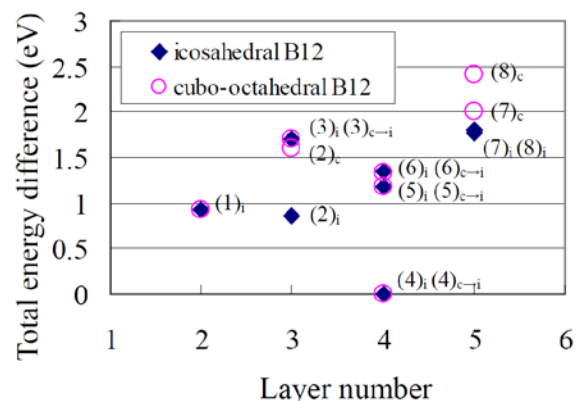


図2 B_{12} クラスタのSi表面深さ方向の安定性

4. 関連研究成果

- 1) S. Ito, T. Maruizumi, and Y. Suwa, 13th International Workshop on Computational Electronics, “Stable position of B_{12} cluster near Si(001) surfaces and its STM images” (IWCE 2009), pp305-308, Beijing, China(2009).
- 2) 第70回応用物理学会学術講演会(富山): 伴井香苗、丸泉琢也、野平博司 “第一原理計算によるSi中のAsドーパントのXPS解析”、伊藤俊祐、丸泉琢也、諏訪雄二 “Si表面近傍におけるボロンクラスタの安定位置とそのSTM像(2)”、第57回応用物理学会関係連合講演会(東海大学)伊藤俊祐、丸泉琢也、諏訪雄二 “Si表面近傍におけるボロンクラスタの安定位置(3)”。
- 3) 佐藤満弘、大橋鉄也、丸泉琢也、北川功、日本機械学会論文集(A編)、“不純物がドーブされたULSIセルに生じる転位の結晶塑性解析”、75、1057(2009)。

高位合成はプログラミング言語等で記述されたアルゴリズムから、ハードウェアを短時間に自動出力する設計技術であり、集積回路の設計期間を短縮する技術として使われつつある。しかし、ソフトウェアで用いられるアルゴリズムをそのまま合成しても、出力されるハードウェアの処理速度が不十分であることが多い。したがって、十分な速度を持つハードウェアを得るには、入力となるアルゴリズムに対して、手動でタスクレベルの並列化など最適化を適用する必要がある。このステップには時間がかかり、誤りが混入しやすいため、結果として、高位合成の利点が損なわれ、設計期間が長期化してしまう問題点が存在する。効果的なタスクレベルの並列化手法の一つに、複数の関数呼び出しをオーバーラップして同時並列的に実行させるタスクレベルパイプライン化がある。本研究では、C ベース言語で記述されたアルゴリズムに対し、タスクレベルパイプライン化を自動で行うことを目指し、タスクレベルパイプライン化の手順を体系的にまとめた。

提案するタスクレベルパイプライン化手法の入力は C 記述、出力は並列化 C 記述である。タスクグラフ生成で、タスク間の依存関係を解析後、タスクグラフを生成する。FU アロケーションでは、FU(Function Unit, 機能ユニット)の種類と数を決定する。スケジューリングでは、FU アロケーション結果を基にタスクグラフのパイプラインスケジューリングを行う。その際、命令レベルのパイプライン化技術である、モジュロスケジューリングをベースとした。FU バインディングでは、FU にタスクを割り当てる。BM(Buffer Memory, バッファメモリ)アロケーションでは、BM の数を決定する。BM バインディングでは、中間配列に BM を割り当てる。最終的に、コード生成ステップで、並列化 C 記述を出力する。

提案するタスクレベルパイプライン化手法の効果を検証するために、JPEG エンコーダの C プログラムに提案手法を適用した。提案手法の適用前、適用後それぞれのハードウェア合成結果について速度・面積を比較することで、本手法によるハードウェアの高速化の効果と面積への影響を検証した。実験に用いた JPEG エンコーダは、Independent JPEG Group (IJG) の提供する JPEG エンコーダの C プログラムを簡単化したものである。行数は約 2300 行である。JPEG エンコーダのメインアルゴリズムを入力記述、パイプライン化されたアルゴリズムを出力記述とする。動作合成には“Sharp Bach System”を用い、動作合成結果は“Mentor Graphics ModelSim”を用いて論理検証し、論理合成には“Synopsys Design Compiler”を用いた。論理合成用ライブラリとして、“Oklahoma State University FreePDK ver.2.7”(TSMC の 0.18 μ m)を用いた。以上のツールを用いて、JPEG エンコーダを 100MHz で動作する ASIC としてハードウェア合成した。

実験対象とした JPEG エンコーダは、4 種 24 個のタスクを持つ。関数 block(), dct(), quantize()の処理サイクル数は一定である。関数 encode()の処理サイクル数は入力データにより変化するため、平均値を用いた。パイプライン化されていない状態でのタスクグラフのスループットは、3076 サイクルである。スケジューリングの単位サイクル数を 65 サイクルとしてスケジューリングを行い、パイプラインカーネルを得た。パイプライン化しない場合 3076 であったタスクグラフのスループットが、パイプライン化により 1560 サイクルとなり、スループットが約 1/2 となる。したがって、約 100%の性能向上が期待できる。JPEG エンコーダのハードウェア合成結果をもとに速度を比較すると、提案手法の適用後には約 81%の性能向上が見られる。100%に届かなかったのは、関数 encode()の処理サイクル数がスループットを上回ることが発生したためだと考えられる。一方、面積を比較すると、提案手法の適用後では面積が約 19%削減された。

選択的イオン注入法による一軸性歪み Si/Ge ヘテロ構造の開発

総合研究所シリコンナノ科学研究センター 澤野憲太郎

【研究背景、目的】

これまで半導体技術は素子の縮小化によって発展を遂げてきたが、近年その縮小化に物理的限界が近づき、新たな技術革新が必須となっている。その中で、歪み Si/Ge ヘテロ構造が注目されており、本研究では、新規な歪み制御技術を開発した。具体的には、イオン注入法による選択的欠陥導入を行い、SiGe 層における歪み場分布の面内任意制御および異方性歪み場の実現を目指した。

【研究手法】

手法の概略を図1に示す。まず、Si基板表面にマスクを用いて選択的イオン注入を行い、局所的に結晶欠陥を導入する。その後にSiGe層を成長させると、SiGeはSi基板に格子整合して2軸圧縮歪みを有することになるが、欠陥が導入された領域においては、Si/SiGe層界面に転位が発生し、SiGe層の歪み緩和が生じる。つまり、同一のSi基板上に、歪みを有するSiGeと緩和したSiGeが同時に形成される。

【研究成果】

Si基板上に数 μm 幅のストライプ・パターン状に選択的イオン注入を行った試料において、顕微ラマン分光法によって、面内歪み分布を詳細に調べた結果、パターンに沿って歪みの異なる領域が明瞭に観察された(図2)。同一な層であるにもかかわらず、横方向に歪み分布を実現した例はこれまでになく、本手法のユニーク性が顕著に示された結果である。

これをさらに詳細に調べるために、X線回折逆格子空間マッピング測定によって評価した(図3)。X線の入射方向がラインに平行な場合と垂直な場合で、SiGe層の回折ピークの位置が大幅に変化することが観測され、方向に依存した歪み状態が確認された。より詳細なピーク値の定量評価により、2つの方向で約40%も歪み緩和率が異なることが示され、一軸性歪みが本手法によって実現できることが実証された。さらにこの歪みの非対称性は、パターンのライン幅に強く依存することを系統的に示した。これらの結果は、本技術が今後のSi/Geヘテロ構造ローカル歪みデバイス実現へ向けて非常に有望であることを示している。

【関連投稿論文】 [1] “Introduction of Uniaxial Strain into Si/Ge Heterostructures by Selective Ion Implantation” K. Sawano et al., Applied Physics Express **1**, 121401 (2008). [2] “Local Control of Strain in SiGe by Ion Implantation Technique”, K. Sawano et al., Journal of Crystal Growth **311**, 806 (2009). [3] “Formation of Uniaxially Strained SiGe by Selective Ion Implantation Technique”, K. Sawano et al., Thin Solid Films **518**, 2454 (2010).

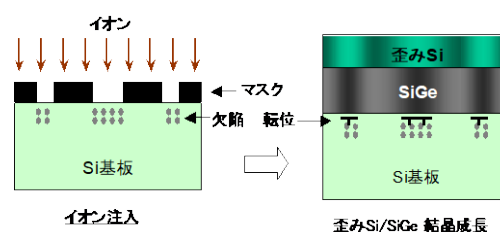


図1 選択イオン注入法の模式図

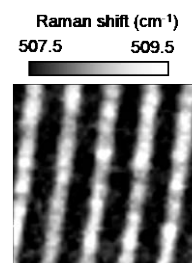


図2 選択的イオン注入法により形成したSiGe層のラマンマッピング像。

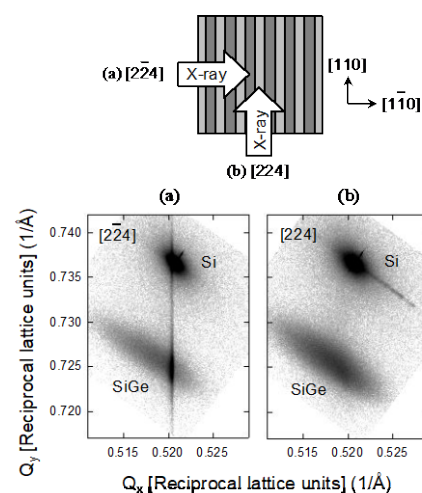


図3 一軸歪みSiGeのXRDマッピング像。(a)パターン垂直入射 (b)パターン並行入射

Silicon-based light emitting devices based on Ge quantum dots in optical microcavities

Ge self-assembled quantum dots, which can be easily grown on Si wafer by epitaxy on Si wafer, have the advantages of full compatibility to current CMOS technology and light emission in the telecommunication wavelengths (1.3 to 1.6 μm). Light emission from Ge self-assembled quantum dots is lack of efficiency and spectrum purity, especially at room temperature. In our research, Ge dots were embedded into various optical microcavities in order to enhance the light-emitting properties. In last year, we have achieved the following results.

- 1) We succeeded in the fabrication of current-injected Si-based light emitting devices based on photonic crystal microcavities with Ge dots. A p-i-n junction was embedded into the device for current-injection. The alignment between multiple steps of electron beam lithography (EBL) was carried out by using novel marks formed lift-off of HfO_2 . The fabricated devices was shown in Fig. 1
- 2) Room temperature electroluminescence (EL) spectrum from the Ge dots in microdisk under DC biases shows obvious resonant light emission. The observed whispering gallery modes (WGMs) are confirmed by FDTD numerical simulations. The quality factors of the resonant peaks are in the range of 60 to 100 which is smaller than that of PL devices. The decrease is due to the optical energy loss induced by free carrier absorption in highly doped region and light scattering at the metal arms. Dependence of the luminescence intensity on the injected current shows a superlinear increase which is similar to the phenomenon observed in photoluminescence measurements. The reason is assumed to be relative to the high carrier density in the disk at large current. The room-temperature EL spectrum was shown in Fig. 2.
- 3) Photonic crystal wire (PhW) microcavity with one Ge dots layer was fabricated and tested. A single major sharp peak was observed at 1.3 μm at room temperature showing a single mode operation is achieved, which is an important progress compared to previous results. The measured spectrum was shown in Fig. 3.

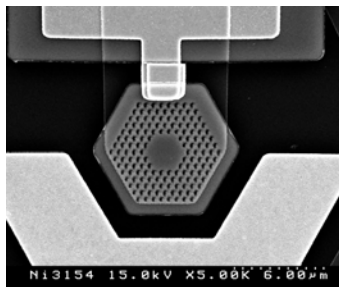


Fig.1 Photonic crystal EL device

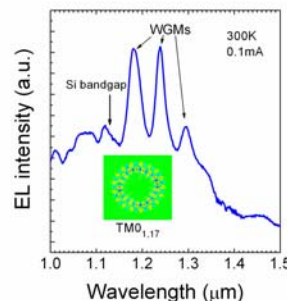


Fig.2 Resonant RT EL

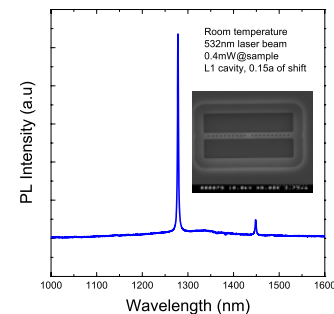


Fig.3 RT PL from PhW L1 cavity

- 1) “Current-injected Si microdisk with Ge self-assembled quantum dots”, **Jinsong Xia**, Seiji Fukamizu, Noritaka Usami, Yasuhiro Shiraki, the 2nd Photonics and OptoElectronics Meetings (POEM 2009), Wuhan China, 2009.08.10 (invited talk)
- 2) “Si-Based Light Emitting Devices Based on Ge Self-Assembled Quantum Dots”, **Jinsong Xia**, Ryuichiro Tominaga, Noritaka Usami, Yasuhiro Shiraki, 2009 International Symposium on Crystal Science and Technologies, Kofu, Japan, 2009.12.04 (invited talk)
- 3) “シリコンフォトリック結晶ナノ共振器導入Si系電流注入型発光デバイス (30 分)”, **J.S. Xia**, R. Tominaga, N. Usami, Y. Shiraki, 2009 年春季 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 31p-ZT-7, 筑波大 2009.03.31

SiGe Resonant-Cavity-Enhanced (RCE) Waveguide Photodetector

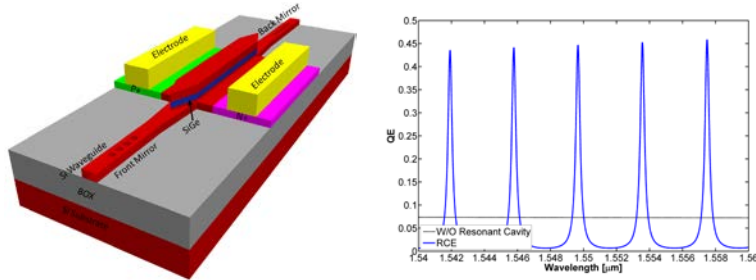
総合研究所 徐 学俊

1. Introduction

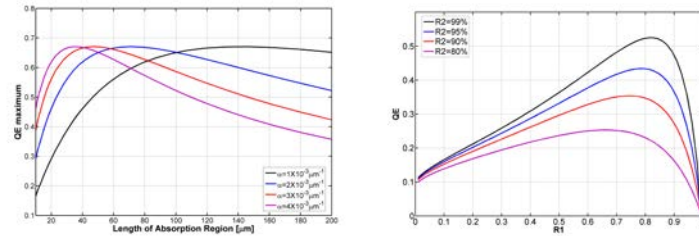
SiGe-based photodetector (PD), which can expand the wavelength to 1.30 to 1.55 μm range, is one of the most important components in silicon photonics. PD with a waveguide configuration can be easily integrated with other silicon photonic devices. Combination of resonant cavity and waveguide structure can reduce the device dimension significantly. The resonant-cavity-enhanced (RCE) PD can completely circumvent the trade-off between device responsivity and speed.

2. Fabry-Perot Cavity RCE Waveguide PD

The SiGe material is located between two mirrors in a Fabry-Perot cavity. In this way the quantum efficiency (QE) can be significantly enhanced even the absorption coefficient of SiGe material is very low or the absorption length is very short.



Schematic diagram of FP cavity RCE waveguide PD and its wavelength response



The peak QE versus the reflectivity of the two mirrors, the absorption coefficient and length of SiGe waveguide

3. Microring Resonator RCE Waveguide PD

The SiGe waveguide PD can also be combined with a single-side-coupled microring resonator. The peak QE is related to the coupling efficiency of the bus and ring waveguides, the absorption coefficient and length of SiGe waveguide.

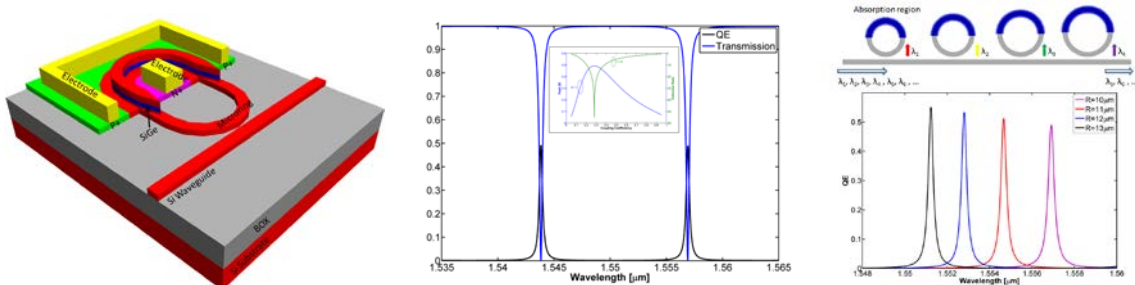


Figure Left: Schematic diagram of microring RCE waveguide PD;

Figure Middle: Compared to FP cavity, the microring resonator can absorb light with desired wavelength, and drop the undesired wavelength through the bus waveguide. The peak QE is proportional to the extinction ratio of the throughput port;

Figure Right: Multiple microrings with different radius can be integrated together to form a WDM receiver. Each ring can detect only one wavelength, and the other wavelengths are transmitted to the next ring.

自動車エンジン研究室

自動車エンジン研究室

自動車エンジン研究室では、自動車用エンジンによる環境負荷低減のための研究を推進している。平成21年度は日産自動車株式会社をはじめとする8件の受託研究、日野自動車株式会社との共同研究および戦略的大学連携支援事業の一部を実施した。これらの概要を以下に述べる。

受託研究は大きく3テーマに大別される。

ひとつはピストンの摩擦損失低減に関する研究である。現在、地球温暖化の主要因と目される二酸化炭素排出量の削減は自動車用エンジンにおいても急務である。エンジンの二酸化炭素排出量削減のために燃費向上が重要であるが、ピストンの摩擦損失低減はこれに貢献できる方策のひとつである。今年度は主に、摩擦損失低減のためのピストン設計指針を得るべく、ピストン設計諸元と摩擦損失の関係の明確化にとりくんだ。これにより、ピストン摩擦損失低減のためのいくつかの方向性を示すことができた。さらに本研究を実施することにより、現在の摩擦力測定装置の改善すべき課題を明確にすることができた。

二つ目のテーマは、エンジンのオイル消費低減に関する研究である。前述のピストンの摩擦損失低減のための方策は、オイル消費の増加を招くことが多い。一方でオイル消費は、排気中の粒子状物質の増加、排気後処理装置の目詰まりおよび使用者の経済的負担増加を引き起こすため、低減の必要がある。今年度は、オイル消費に対して寄与度が高い現象の一つであるエンジン実働時のシリンダボア形状の測定を行った。これにより同一シリンダブロック内でも、エンジン実働時のシリンダボア形状は、気筒毎に大きく異なることが分かった。さらにオイル消費の測定に関しては、その測定精度を大幅に向上させることに成功した。

三つ目のテーマは、ピストンピン周りの潤滑状態の改善に関する研究である。ピストンピン軸受は、エンジン中の全ての軸受中、最も面圧が高く、雰囲気温度は高く、かつ摺動速度が低いため、最も厳しい潤滑状態で使用される。ここで、エンジンの小型軽量化および高出力化は燃費の改善に有効な手段の一つであるが、これによりピストンピンに作用する荷重および熱負荷がさらに厳しくなる傾向にある。そのため当該部の潤滑状態の解明が強く望まれている。然るにピストンピン周りの潤滑状態は、その測定が困難なため、いまだ不明な点が多い。そこで今年度は、潤滑状態の指標としてピストンピン／ピンボスベアリング間の摩擦力測定を行い、その測定精度の向上にとりくんだ。その結果、摩擦力が小さいため従来は測定が困難であったDLC皮膜を有するピストンピンの摩擦力測定が可能となった。

日野自動車との共同研究および戦略的大学連携支援事業の一部では、水素エンジンバス運行のための技術的課題解決を取り上げた。今年度は、総走行距離1万kmを越す実路走行実績を積み重ね、その間にエンジン不具合が発生しないことを確認できたほか、寒冷地での水素エンジン利用時に発生する問題点の検出を行った。環境室での試験により、本車両は-10℃までエンジンは始動することが分かった。また防寒処置が必要な部品を明確にすることができた。

2010年 5月
自動車エンジン研究室
伊東 明美

自動車用エンジンの二酸化炭素排出量削減のために燃費向上が重要であるが、ピストン周りの摩擦損失低減はこれに貢献できる方策のひとつである。特にガソリンエンジンでは、使用運転域に置ける摩擦損失の占める割合が大きく、ピストン周りの摩擦低減は燃費向上に有効である。ピストン周りの摩擦低減は、ピストンリング部とピストンスカート部の摩擦低減に大別される。本研究はピストンスカート部の摩擦低減を取り上げた。

ピストンスカート部摩擦損失低減のため、当該部の摺動面形状最適化が有効である。摺動面形状を最適化する際のパラメータは、ピストンスカート部のプロフィールおよび剛性である。しかし摩擦損失低減のための施策は、基本となるピストンの潤滑状態により方向性が異なってくる。そのため本研究では、基本となるピストンの潤滑状態の確認およびそれに対する摩擦低減策の検討を行った。

摩擦力の測定により、本ピストンでは、図1に示すようにピストンスカートの低剛性化は摩擦低減に有効であることがわかった。ピストンスカート部の油膜可視化により、スカートの低剛性化は当該部油膜厚さを均一にし、局所あたりが回避されること、またエンジン実働中のスカート部変形により、スカート下端から摺動面への潤滑油供給が促進されていることがわかった。

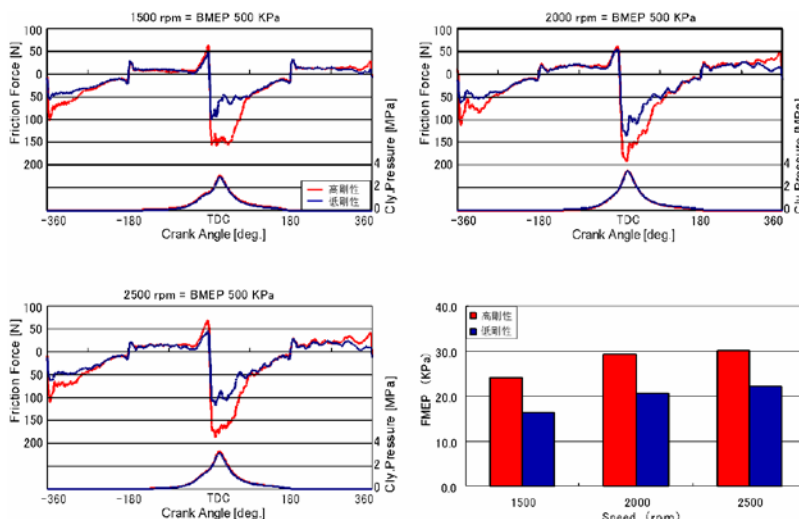


図1 ピストンスカート剛性が摩擦力に及ぼす影響

そこで低剛性スカートの実働中の摺動面形状を模したプロフィールを高剛性ピストンスカートに適用し、摩擦力の測定を行った。その結果を図2に示す。低剛性ピストン実働時のプロフィールを模したピストンの摩擦力を青線で示す。これにより剛性が高くても、スカートプロフィールの最適化により摩擦力を低減できることが分かった。

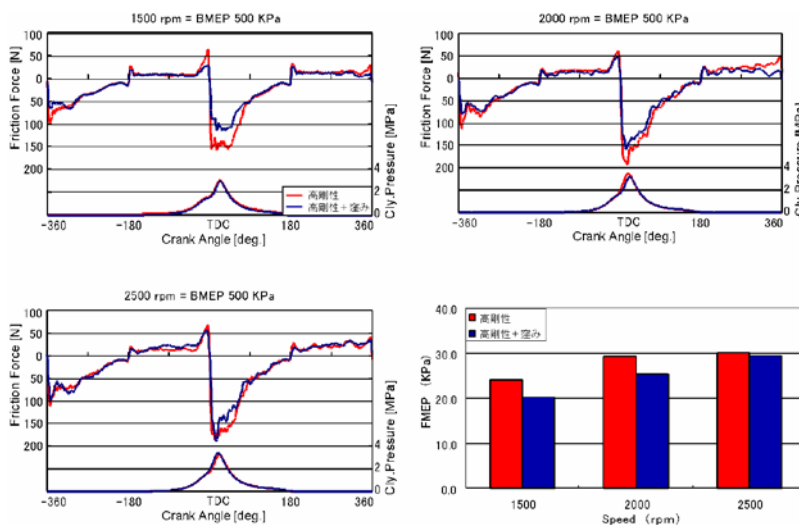


図2 ピストンスカートプロフィールが摩擦力に及ぼす影響

シリンダブロックのボア変形がオイル消費に及ぼす影響

伊東 明美

エンジンの二酸化炭素排出量削減のために燃費向上が重要である。ピストンの摩擦損失低減はこれに貢献できる方策のひとつであるが、一方でオイル消費の増加を招くことが多い。オイル消費は排気を悪化させるため、低減の必要がある。エンジンの開発段階におけるオイル消費の評価は実験のみに頼っているのが現状であり、机上評価手法の確立が期待されている。オイル消費に高い寄与度を持つ現象の一つに、エンジンのシリンダブロックのボア変形が挙げられる。しかし、その測定の困難さから、ボア変形がオイル消費に及ぼす影響の精度よい解析は行われていない。そこで本研究では、ボア変形部からのオイル消費メカニズムの解明を最終目的とし、今年度は、エンジン実働時ボア変形の気筒毎測定および十分な測定精度を有するオイル消費測定手法の検討を行った。

エンジン実働時のボア変形は、古浜らにより開

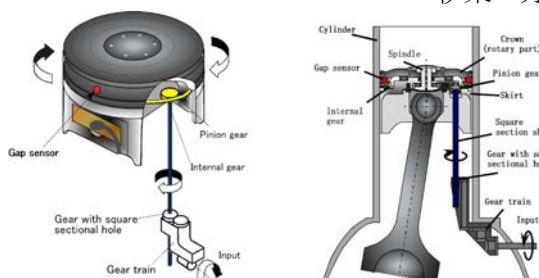


図1 回転ピストン外略図

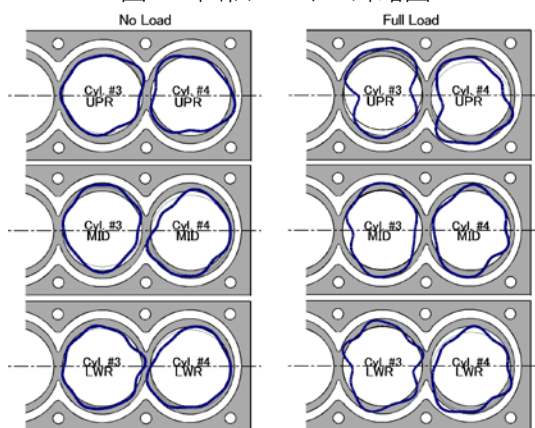


図2 ボア変形測定例(3000rpm)

発された回転ピストン法により測定された。供試機関

には日産自動車製QR 20を使用した。図1に測定に使用した回転ピストンの概略を示す。隙間センサーを埋め込んだクラウン部は、軸受を介してその他の部分に連結されており、実働中に回転させることができる。

図2に代表測定例を示す。#3気筒と#4気筒では、エンジン実働中のシリンダボア形状が大きく異なることが

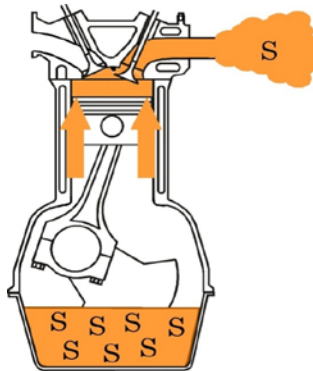
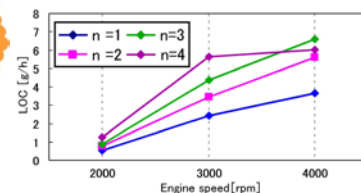


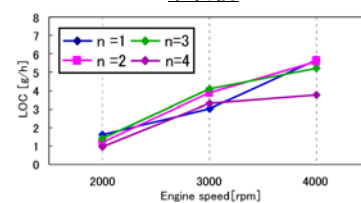
図3 S-トレース法

分かる。

気筒毎のオイル消費は、S-トレース法により測定された。測定原理を図3に示す。硫黄分を含まない燃料を用いてエンジンを運転し、高濃度の硫黄を含むオイルを潤滑に使用すると、エンジンの排気中に含まれる硫黄分は全てオイル由来のものとなる。その濃度を調べることで、オイル消費量を測定することができる。今回、測定精度に影響を及ぼす要因を解析し、これを排除することにより、図4に示すとおり、測定精度を大幅に向上させることに成功した。図5に#3気筒と#4気筒のオイル消費を示す。概ね変形の大きい#3気筒のほうが#4気筒よりオイル消費も多いことが分かる。オイル消費に寄与度の高いボア形状上の特徴について、次年度以降、解析を行いたい。



改善前



改善後

図4 測定精度改善効果

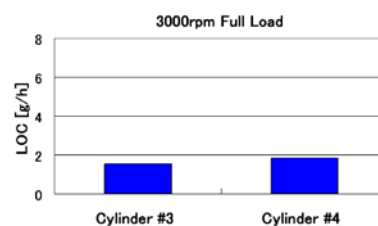


図5 #3、#4気筒オイル消費比較

自動車用エンジンの燃費向上のためにエンジンの軽量化および高出力化は効果的な施策である。エンジンの軽量化のため軸受幅は低減される傾向にあり、このことは軸受の面圧を増加させている。さらに高出力化により軸受の面圧はさらに増加し、当該部の摺動条件は悪化する傾向にある。

ここで取り上げるピストンピンボス軸受は、エンジンの主軸受およびコンロッド大端部軸受と比較して、面圧、雰囲気温度、供給油量、摺動速度の点で摺動条件が過酷である。さらに他の軸受と異なり、最近のエンジンではピストンピンがコンロッドおよびピストンの双方に摺動方向に固定されないため摺動速度を幾何学的に求めることができず、理論解析手法も確立されていない。

そこで本研究では、ピストンピンボス軸受の潤滑状態を向上させることを目的に、潤滑状態の指標として当該部摩擦力測定精度の向上に取り組んだ。

ピストンピンボス軸受の摩擦力は図1に示す装置により測定された。従来の測定結果は、理論的に説明が不可能な出力が観察されていたため、測定精度に影響を及ぼす要因の解析を行った。測定装置に作用する慣性力およびその他

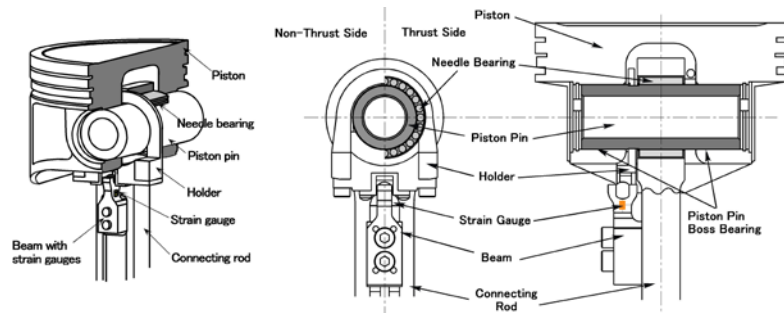


図1 ピストンピンボス軸受摩擦力測定装置

の外乱を理論的に算出し、測定された結果を補正することで、理論的に妥当と思われる出力が得られるようになった。本手法を用い、従来、摩擦力の値が小さいため測定が不可能であった DLC 皮膜つきピストンピンの摩擦力測定を行った。図2に示すとおり、標準ピン (TEST3) と DLC 皮膜つきピン (TEST5) は定性的には同様の傾向を示し、妥当と思われる摩擦力波形を得ることができた。

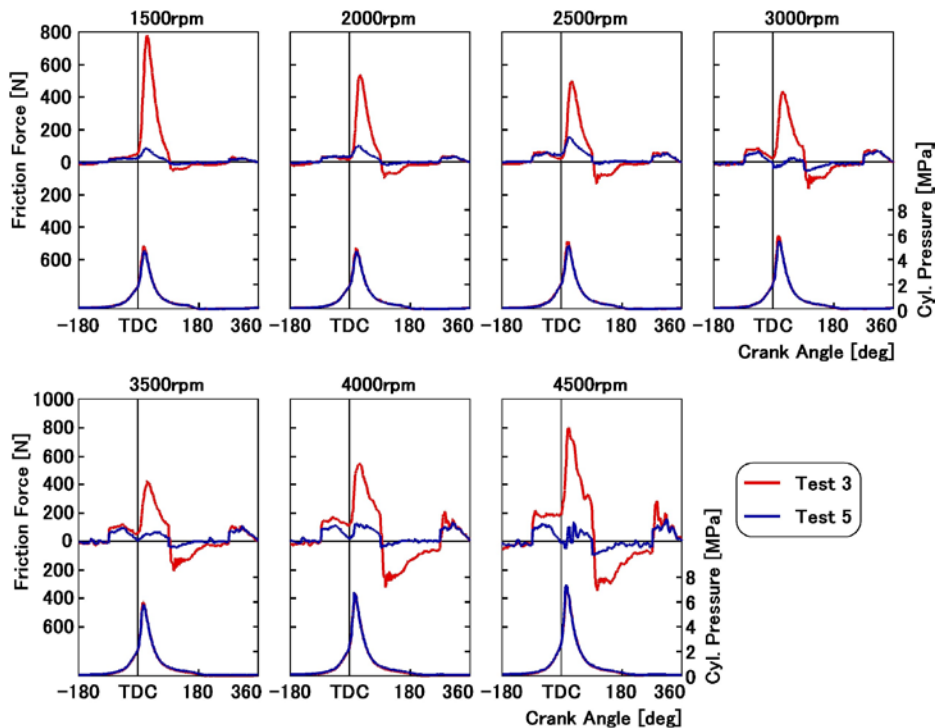


図2 標準ピンと DLC 皮膜つきピンの摩擦力比較

化石燃料の枯渇や二酸化炭素排出量削減の要求に対し、自動車用エンジンの燃料は多様化している。ここでとりあげる水素燃料は、プラント等で得られる副生水素を利用する場合には、製造時に要するエネルギーも小さく、多様化する燃料の一翼を担うことができると考えられる。

水素燃料は、燃焼により水以外の物質を排出しないクリーンな燃料である。これを車両に使用した場合、化石燃料と比較して、画期的な排気浄化が可能である。また電気自動車と比較し、より長い航続距離が期待できる。さらに燃料電池と比較して、水素の純度は低くても問題なく、また既存の技術を転用できるため開発コストおよび製造コストの面で安価に車両の製造が可能である。

そこで本研究は、水素エンジンの実用化を最終目的に、実用上発生する問題点の把握を進めている。今年度は、既に開発済みの水素エンジンバスを用い、寒冷地での運転により発生する問題点の把握およびその対策の検討を行った。

寒冷地試験は、日野自動車株式会社所有の環境試験室にて実施した。試験は、車両を雰囲気温度 -10°C 、 -15°C および -20°C に一晩放置した後、始動性および始動後に発生する問題点の検出を行った。

その結果および対策案を表1に示す。 -10°C まではエンジンは始動可能であるものの、エンジン吹き上がり不良により、約4分間の暖気運転を要することが分かった。またエンジンの燃焼室からのブローバイガスを吸気管に戻す経路に設けられたオイルセパレータ内で水分が結露し、これを閉塞する傾向が見られたため、対策を要することが分かった。また -15°C 以下ではエンジンは始動しないことが分かった。

表1 寒冷地試験結果

No.	重要度	現象	推定原因	対策案
1	◎	燃料供給レギュレータバルブの作動不良(-10°C にて)	バルブメーカー保証温度(-10°C)以下での使用	・バルブ保証温度ワンナップ ・保温強化(断熱材、ヒータ、冷却液循環など)
2	◎	オイルセパレータ内結露水過多および凍結による閉塞	排気中の水分過多	・更なる保温強化(断熱材、ヒータ、冷却液循環など) ・ブローバイガス量低減
3	◎	-15°C 以下で始動せず(初爆あり)	寒冷地運転に対し、空燃費および点火時期アンマッチ DC-DCコンバータ過負荷判断(16V 以下)	寒冷地マップ追加 ・寒冷地向けバッテリーに変更 ・閾値 16V の見直し
4	◎	失火後再始動時にアフターファイヤ発生	失火により排気管に滞留した水素に再始動時着火	失火後再始動時に排気管内掃気モード追加
5	○	冷却液漏れ(改造部ホース/パイプ締結部)	冷却によるホース収縮により緊縛力低下	ホースバンド形状見直し等
6	○	エラー表示: H2リークディテクター異常	バッテリー電圧低下	寒冷地向けバッテリーに変更

重点推進研究

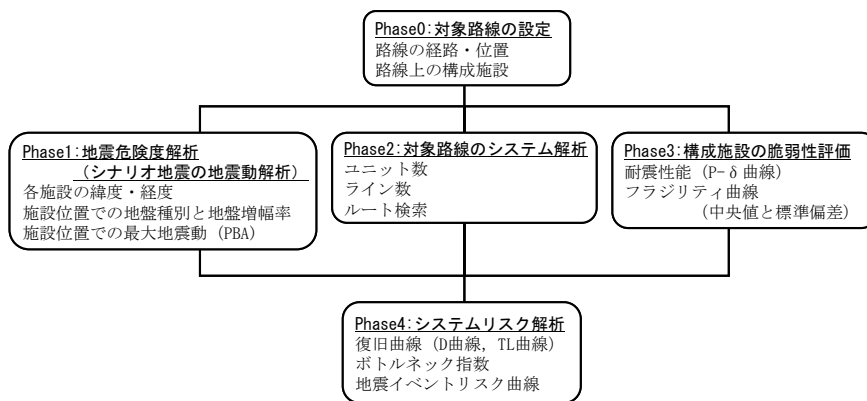
首都圏鉄道路線の地震時システムリスク解析

重点推進研究 地震リスクマネジメント研究室 吉川弘道

地震時システムリスク解析

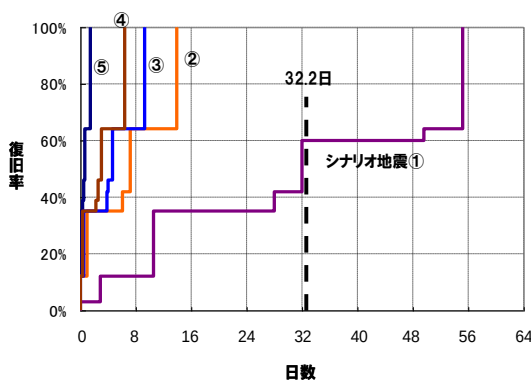
首都圏は、高度に発達した都市内鉄道路線により、多くの通勤通学者が都市中心部に移動する。強震時には多大な地震災害が想定され、首都圏におけるインフラ機能の損失が懸念される。

鉄道路線は線状構造のため構造施設 1 か所の損傷により、路線全体に亘る機能停止を招くが、一方では、首都圏には複数路線が存在し、互いの機能停止を補完し、ある程度の冗長性も有する。平成 21 年度にて、システム信頼性理論と最先端地震危険度解析により、地震時システムリスク(Seismic System Risk)に関する解析手法を構築し、解析プログラムのプロトタイプを完成した。



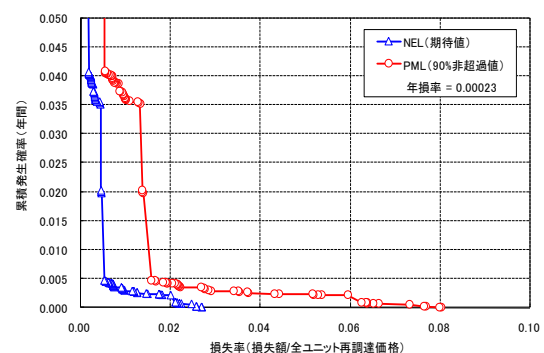
地震時システムリスク解析の出力：復旧曲線とリスク曲線

対象とする都市内鉄道路線の地震時システムリスク解析により、被災後の復旧曲線（左図），地震リスクイベント曲線（右図），ボトルネック指標の算出，シナリオ地震のリスク評価など，が出力される。これは、システムリスクを定量的に示すことであり、地震リスクマネジメント/SRM と事業継続計画/BCP ための説明性の高い情報を付与すると考える。



5つのシナリオ地震に対する復旧曲線

(横軸：被災後の経過日数，縦軸：システムの復旧率)



地震イベントリスク曲線：NEL, PML

(横軸：基準化損失率，縦軸：累積発生確率)

木造家屋を対象とした免震構造技術の革新と普及 Innovative Refinement of Base Isolation Technology for Light Weight Houses

東京都市大学 総合研究所 教授 西村 功

1. 研究開発の目的

本研究課題の対象は、免震構造にとって必須の部材である積層ゴム支承の座屈挙動の解明である。具体的な目標は、積層ゴム支承の座屈挙動を幾何学的非線形と材料非線形を考慮した上で正確に把握し、小型で変形性能の高い積層ゴム支承を開発することにある。

2. 研究概要

幾何学的非線形を考慮した積層ゴム支承の座屈現象に関する理論研究により、座屈支持能力という観点から積層ゴム支承を考察し、座屈能力を著しく高めた免震構造用部材の開発を目指す。既に理論研究の成果を基に木造家屋を対象とした免震構造用積層ゴム支承の開発が行われ、国土交通大臣の認定を受けた免震構造部材が開発されている。平成 21 年度は、性能を高め適応範囲を拡大した改良型の検討を行った。平成 22 年度には、実用化を目指した性能確認実験を行う予定である。



写真1 実用化した積層ゴム支承の施工



写真2 振動台実験による変形状況と安定性

3. 研究成果

一連の研究成果である「高い座屈安定性を有する積層ゴム支承の力学挙動解明と実用化」に対して、平成 21 年 6 月 第 10 回 日本免震構造協会賞（技術賞）が授与された。

4. 本年度の発表論文

著者：鈴木敏志、西村功

論文題目：高減衰積層ゴム支承の安定性に関する実験的研究

日本建築学会構造系論文集 第 650 号 799－806 2010 年 4 月

パルス管冷凍機による液化水素貯蔵タンクの ボイルオフ低減の研究 - パルス管冷凍機の開発 -

A Study in Reduction of Boil-off Gas for an Automotive Liquid Hydrogen Tank by a Pulse Tube Cryo-cooler

山根公高、彦根昂仁、相原裕樹、大久保博司、松原洋一
東京都市大学 総合研究所
E-mail: kyamane@tcu.ac.jp

Abstract

The boil-off gas is only one problem for the practical storage of liquid hydrogen as an automobile fuel. A conceptual study was made to compare the cost of the liquid hydrogen boiled-off and the electric power to liquefying the boil-off gas with a small pulse tube cryo-cooler available on the present market. The paper concluded that the cost of the electricity was cheaper than the cost of the amount of liquid hydrogen refueled by the amount lost by the boiled-off. The other study was carried out and the conclusion was obtained that the pulse tube cryo-cooler was feasible for the application to the liquefier of the boil-off gas of hydrogen in automotive liquid hydrogen storage tanks.

This paper shows the summary of the work having been carried out in the study for the three year Exploratory Research Project funded by Tokyo City University.

Keywords: Liquid Hydrogen, Boil-off gas, Pulse Tube Cryo-cooler, Automobile Fuel, Exploratory Research Project

1. まえがき

東京都市大学は、1970 年より水素エンジン自動車の研究開発を実施してきている。その研究開発から、液体水素を車載して液体水素を小型高压液体水素ポンプで高压に加圧し車上で高压ガス水素（10~30MPa）を製造することによって、水素エンジンで燃焼室内に高压で筒内噴射する水素エンジンシステムがエンジンの三大必須条件（高出力、小型、軽量）からみて、最も有効な水素エンジンの手段であると提案してきている。

しかし、自動車の燃料として液体水素を利用する場合、その蒸発損失は大きな問題の一つである。蒸発損失の起源は、外部からの熱進入である。電気を利用して冷凍機でその進入熱を外部に放出することができれば蒸発損失ゼロ化は可能である。しかし電気代がかかる。蒸発して放出された水素の価格より電気代を小さくしなければわざわざ冷凍機を装置する意味がなくなる。市場で売られている小型冷凍機を使うことにより現時点でも可能性があることが判った。その小型冷凍機のうち、自動車車載用冷凍機としては、パルス管冷凍機がもっとも有力な候補であることも調査研究で判明している。

東京都市大学の中村学長が提唱する「きらりと光る大学」を大学として推進するために、2006年度より「重点推進研究」を学内から公募し、その一つとして採択された。

本報告は、「重点推進研究」で実施した研究成果を最終報告としてまとめた。しかし、その小型パルス管冷凍機による蒸発損失ゼロ化研究開発は、3年でやっと目が出てきたが、まだ実用化には遠い。今後も引き続き、解析ツールの構築をしながら高性能小型パルス管冷凍機およびそれを用いて液体水素蒸発損失ゼロ化研究開発を推進してゆく。

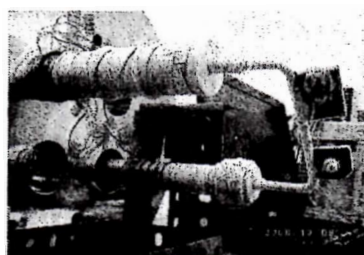
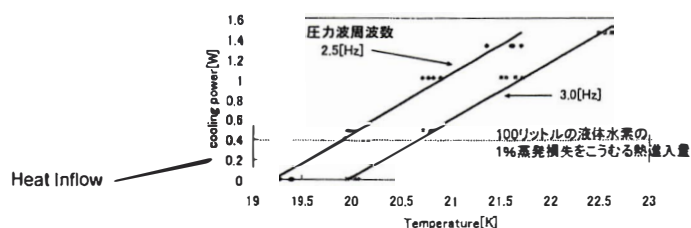
2. 研究成果

蒸発ロスをゼロ化する車載用小型軽量冷凍機システム研究開発を行うことができた。主な研究成果は、以下のとおり。

- (1) 小型軽量冷凍機としてパルス管冷凍機を選んで、パルス管冷凍機の設計から試作、実験装置の準備、実験方法、計測法の検討、実験の実施をおこない、第一目標である蒸発ロスをゼロ化するため大気圧下液体水素蒸発温度 20 K (−253℃) 以下の低温 (19.3 K (無負荷時)) に 1 段パルス管で到達できた。
- (2) パルス管冷凍機の性能向上手段として、パルス波形の最適化がある。それをロータリバルブとステッピングモータとの組み合わせを用いて、ソフトプログラム LabView を利用してモーションコントロールを行うことでパルス波形の最適化がはかれるツールを開発できた。
- (3) 貯蔵システムで蒸発ゼロ化を示すための蒸発ロス評価用液体水素タンクの設計試作を実施した。
- (4) パルス管冷凍機性能向上研究開発に欠かせないシミュレーションができるようになった。
- (5) 発表論文を作成し、発表を行った。彦根昂仁、池田貴、山根公高、松原洋一、「パルス管冷凍機による液化水素貯蔵タンクのボイルオフ低減の研究 - パルス管冷凍機の開発 -」、第 28 回水素エネルギー協会大会、平成 20 年 12 月 11、12 日、タワーホール船堀に於いて発表、主催：水素エネルギー協会
- (6) 実用化を図るために、必要な要素およびシステム研究開発は、進んだがそれを持って企業連合体を組織化することはできなかった。

3. 今後

- (1) パルス管冷凍機の性能向上：確立した、モーションコントロール手法、シミュレーション技法、熱交換器評価技法、(現在、既開発プログラムの利用法研究中) を駆使して、性能向上実験をおこなう。
- (2) 実験用小型液体水素タンクによる現状パルス管冷凍機のシステム性能評価：次ページに、すでに設計・試作実験用液体水素タンクをつかって、蒸発損失ゼロ化システムとしての研究を進める。
- (3) 液体水素タンクボイルオフゼロ化研究の外部共同研究推進：パルス管冷凍機による蒸発損失ゼロ化手法、確立した実験手法に、鉄道総合研究所やエアウオウタ社が大学の研究室に見学にており、大変興味を示している。



実用的、安価液体水素タンクは、
蒸発損失約5%程度である

更なる、性能向上が必要

真空容器中から取り出し空気に当たった
試作パルス管冷凍機

HERC of TCU

図1 試作した1段パルス管冷凍機性能

機器分析室

平成21年度機器分析の利用状況と成果

東京都市大学 総合研究所 吉田 明、新藤 恵美、浜村 尚樹

1. はじめに

機器分析室は全学共通利用施設・設備として武蔵工業大学総合研究所に所属して2年が経過した。平成21年度の機器分析室利用件数は1機種1日(10:00~17:00)使用を1件として971件で、昨年度より101件減となった。この原因は7月後半から10月前半まで、20数年間住み慣れた16号館1階から新2号館(生体医棟)地下1階に移転し、実質約3ヶ月間休室状態となったためである。機器分析室が16号館から2号館地下に施設されるに至った経緯は、近い将来に16号館のすぐ裏に、世田谷区が6メートル道路を整備する計画があり、道路が出来れば振動などにより機器分析室の殆どの分析機器は性能がでず使用不能状態になることが明らかになったためである。しかし、移転により稼働日数が減ったことを考慮すると1日当たり約5台の分析装置が常に稼働していることになり、昨年度より1日あたりの利用率が高いことがわかる。

また、平成21年度は20数年間使用されていたアタッチメント交換複合型の理学電機製強力X線回折装置から単機能型の複数機種で構成されているブルカー社のX線回折装置に更新された。

成果としては、最先端のニーズに応えるためにスタッフ各自が機器分析に関わる研究テーマの1つである透過電顕による電子エネルギー損失スペクトル分析技術が論文として評価された。その他、これまでラマン分光分析法によるCarbonの分析テクニックに関するノウハウを共同研究者であるエネルギー化学科の鍋木教授がトルコ・日本間のカーボンに関するセミナーにおいて「Raman spectroscopy as a tool for characterizing the structure order of carbon materials」と題して招待公演を行った。

2. 新機器分析室(2号館地下)の設計思想

平成21年夏に機器分析室は16号館から新2号館に無事移転したが、機器分析室に設置されている分析機器は温度、湿度、振動、磁場変動などに敏感で影響される為、新2号館の設計の段階から設計士の方々や設備担当者や育英会・大学の担当者の方々と事前に電子顕微鏡メーカーの見学や約1年間毎週のように打ち合わせを重ねつつ設計施工され新機器分析室が完成された。基本的な設計思想は見学や管理しやすくすることや修理や機器の更新が容易であることなどを考慮し、ガラス張りで個々の分析機器を仕切らないこと、且つ最も設置条件の厳しい透過電子顕微鏡が本来の性能を生かせるような条件のもとに設計をお願いした。部屋の主な構成は真空ポンプや循環水を必要とする大型分析機器を設置する第1機器分析室と小型分析機器を設置する第2分析機器室および試料作製室と管理室となっている。また、第1機器分析室は装置を1直線に配置し、床の振動防止のため通常の床の厚さより厚くなっている。更に、付属の真空ポンプや循環装置の振動や音波による振動の防止とガスボンベや電源ボックスなどを設置する為に第1機器分析室の壁裏に機器室を設けているのが特徴である。

3. 透過電子顕微鏡に付属した電子エネルギー損失スペクトル(EELS)による多層カーボンナノチューブ中のホウ素分析

平成18年度の私学助成で更新された透過電子顕微鏡(TEM)は日本電子製JEM2100Fを使用し、TEMによる特にEELS分析の技術的検証を兼ねて、この研究を行った。カーボン特にグラファイトに臭素(ボロン)をドーピングすることによって特異な現象特性が表れる。しかし、ボロン原子がカーボンやグラファイトの構造の何処に結合あるいはどのような状態で存在するかを分析する手段は少ない。そこで我々は透過電子顕微鏡に付属したEELSアナライザーを利用しボロンをドーピングしたカーボンの電子エネルギー損失スペクトル(EELS)を測定することで解析した。試料としては多層カーボンナノチューブをアルゴン気流中、3000度で処理し、その後、窒化ボロンと共に加熱処理して多層カーボンナノチューブにボロンをドーピングした。それらの試料について電子エネルギー損失スペクトル(EELS)およびボロンの分布等を測定した。その結果、カーボンナノチューブの多層部位にボロンがドーピングされているが、均一ではなく疎らに存在し、炭素原子と置換して存在することなどが分かった。

(成果論文; Emi Shindou, Naoki Hamamura, Akira Yoshida, Yutaka Kaburagi, Yoshihiro Hishiyama, An EELS study on individual boron-doped multi-walled carbon nanotube; Tanso (2009) [No.239] 162-168.)

インキュベーション・ラボ
健康・医科学研究室

健康医科学研究室概要

— 学術研究と企業の研究の融合で健康・医科学への貢献を！—

健康医科学研究室は、SBI アラプロモ株式会社 (<http://www.sbi-alapromo.co.jp/>) の研究開発部門と連携し、生命の根源物質ALAの国際的研究拠点として先駆的研究を行っている。現在、7人の研究員が常駐し「ALA(5-アミノレブリン酸)」を有効成分とする医薬品、化粧品及び健康食品の研究開発を行っている。特に化粧品事業、健康食品事業においては、当研究室で開発された製品が既に上市され、TV、雑誌などに掲載され、話題となっている。



製品ラインアップ

上段左より

「ララ・ソロモン」シリーズ
「アルサイエンス」シリーズ
(美容化粧品)



下段左より

「ナチュアラ・バイオ」(健康食品)
「はたらくて」(ハンドクリーム)
「花蜜」(美容化粧品)

また、医薬品事業においては、ALAの代謝物であるポルフィリンが癌細胞に特異的に蓄積し、蛍光を発生する性質を利用した、がんの光線力学的治療や診断方法の先進的な研究を数多くの研究機関と連携し推進している。

このほか、体内のヘム生合成経路の遺伝的異常であるポルフィリン症の発症機序、診断、治療、ケアにおける長年の研究成果とSBI アラプロモ株式会社が保有するALAやポルフィリン類の光学的測定技術を融合させ、ポルフィリン症迅速診断方法の開発にも取り組んでいる。平成21年度、SBI アラプロモ株式会社は、厚生労働科学研究費補助金(難治性疾患克服研究事業)において、「遺伝性ポルフィリン症の全国疫学調査ならびに診断・治療法の開発に関する研究」(研究代表者：近藤雅雄)の分担研究(研究協力)として参加し、当研究室において「ポルフィリン症迅速診断システム」を新規開発し、これを公表した。現在、現場の医師とのディスカッションを基に、実用化を目指している。

研究報告 尿中ポルフィリンのスクリーニング法の開発

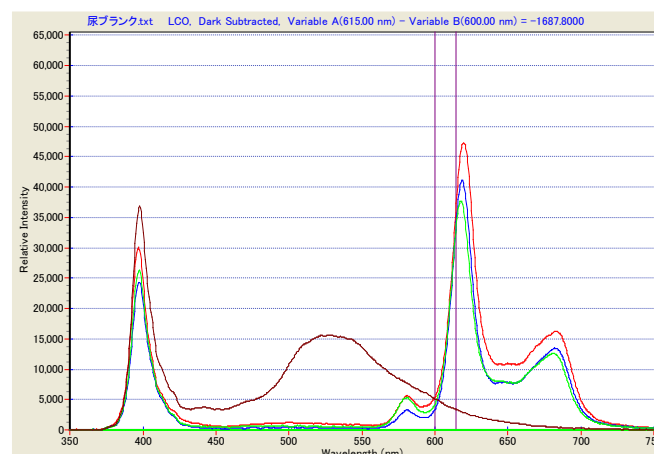
我々は 5-アミノレブリン酸(5-ALA)を投与して血漿および尿中のポルフィリンを測定することによるがんのスクリーニング法の開発を行っている。

がん細胞は 5-ALA を選択的に取り込み、その結果プロトポルフィリンIXを蓄積する一方でウロポルフィリンやコプロポルフィリンを高濃度で排泄することが分かってきた。我々は尿検体の蛍光スペクトル解析によってこの尿中に排泄されるポルフィリン量を定量的、簡易的に測定することによってがん患者のスクリーニングが可能であると考えている。

ポルフィリン症は、ヘム生合成経路に関与する 8 つの酵素のいずれかが遺伝的に障害するために中間代謝産物のポルフィリンやその前駆体が異常蓄積することによって起こる一群の疾患群のことを指し、消化器症状や神経症状を特徴とする急性ポルフィリン症と、皮膚症状を特徴とする皮膚型ポルフィリン症に分類される。このうち急性ポルフィリン症では初期診断による誤診率が約 80%と極めて高い。

ポルフィリン症においても尿中にポルフィリン類が多く排泄されること、その病型によって血漿中や尿中で検出されるポルフィリン種が異なることが知られており、我々は、初期診断時に有用なスクリーニングシステムの構築を目的に、尿検体の蛍光スペクトル計測によるポルフィリン症患者の簡易スクリーニング手法を開発した。

実際に、AIP（急性間欠性ポルフィリン症）、CEP（先天性赤芽球性ポルフィリン症）、HCP（遺伝性コプロポルフィリン症）、PCT（晩発性皮膚ポルフィリン症）の 4 病形のポルフィリン症患者尿検体を用いて蛍光スペクトルを計測した。その結果、いずれの病形においてもポルフィリン特有の蛍光ピークが確認され、健常人尿検体と比較して明確な差が明確な差が確認され、各病型に特徴的なスペクトルが見られた。このことから、本研究で開発したスクリーニング手法は、初期診断時における誤診を防ぎ、適当な初動治療への一助となることが期待される。



図： 尿中ポルフィリンスクリーニングシステムと、CEP 患者尿の蛍光スペクトル