

平成 28 年度
共同利用・共同研究報告書

名古屋大学未来材料・システム研究所
共同利用・共同研究委員会

報告書目次

No.	研究代表者	所属機関	研究課題名	頁
1	呉 松竹	岩手大学	電解エッチング／アノード酸化／水熱法による Al 箔上へのナノ材料の創製およびバインダーフリーLIB 正極材料としての特性評価	1
2	小島 隆	千葉大学	構造規整粒子を用いた多孔質酸化チタン電極の作製	3
3	齋藤 美紀子	早稲田大学	CNT/SiC 上金属めっき電極膜形成及びコンタクト抵抗の評価	5
4	由井 樹人	新潟大学	無機層状化合物／金属ナノ粒子複合体の構造解析	7
5	遠藤 彰	東京大学	エピタキシャルグラフェンの低温電子伝導物性研究	9
6	羽田 政明	名古屋工業大学	省資源省エネルギー型環境浄化触媒材料の開発	11
7	網本 正哉	多治見市	安全安心な新規セラミックス系色材の研究開発	13
8	大津 直史	北見工業大学	表面吸着タンパク分別定量による省エネ生体適合評価法の開発	15
9	小林 千悟	愛媛大学大学院	光触媒反応表面を有する Ti ナノチューブ上での高効率骨芽細胞接着	17
10	梅田 隼史	あいち産業科学技術総合センター	ソルボサーマル法による 2 次電池正極材料の合成と電気化学特性評価	—
11	中田 真秀	理化学研究所	化学情報学の手法による色素増感太陽電池の設計	19
12	吉田 寿雄	京都大学	基礎的多重分析による光触媒の革新的高効率化の検討	21
13	菓子野 元郎	大分大学	放射線で誘導される分泌因子の正常及び腫瘍細胞種への影響研究	23
14	倉内 文孝	岐阜大学	交通 IC カードを用いた公共交通ネットワークにおける乗客行動分析	25
15	劉 鋈	大連理工大学	車両燃費向上と環境負荷削減のための交差点における協調的速度調整誘導システムデザイン	27
16	宇野 史睦	産業技術総合研究所	数値気象予報モデルと衛星画像を用いた数時間先の日射予測手法の開発	29
17	青木 睦	名古屋工業大学	インターネットを介した分散電源群の相互協調制御に関する実験的検討	31
18	小迫 雅裕	九州工業大学	機能性ナノコンポジット絶縁材料に関する基礎的研究	33
19	伊東 英幸	日本大学理工学部	革新的なバイオマスエネルギー導入に伴う環境・健康影響評価およびシステム最適化の手法開発	35

No.	研究代表者	所属機関	研究課題名	頁
20	町村 尚	大阪大学	先進的森林バイオマスエネルギー資源量推計手法の開発	41
21	小林 信介	岐阜大学	高効率水素製造のための CLP 酸素キャリアーの開発	43
22	小林 潤	工学院大学	内燃機関の排熱回収を目的としたケミカルターボシステムの開発	45
23	池田 敏彦	信州大学	雪氷に強いエコ水車の開発	47
24	岡山 朋子	大正大学	ピコ水力発電に対する官学民の意識調査研究	49
25	大平 孝	豊橋技術科学大学	電力線通信路インピーダンスの時間周波数依存性の実測	51
26	吉田 奈央子	名古屋工業大学	難培養性脱ハロゲン化呼吸細菌のプロテオミクス解析による脱ハロゲン化酵素の機能特定	53
27	宮田 康史	名古屋市工業研究所	微生物を応用する環境浄化デバイス用電極の解析と合成による実用電極の開発指針	55
28	小井土 賢二	福島大学	タイ・ナコーンナーヨック県におけるバイオメタン導入に向けてのライフサイクル・コスト分析	57
29	花崎 逸雄	東京農工大学	液中に分散した微粒子群から形成される塗布膜の実測に基づく解析	59
30	岡本 英二	名古屋工業大学	協調型高度道路交通システムによる交通流および無線通信の過集中緩和に関する研究開発	61
31	和田 忠浩	静岡大学	可視光イメージセンサ通信システムの研究開発	63
32	三古 展弘	神戸大学大学院	電気自動車の普及可能性に関する研究	65
33	長谷川 豊	名古屋工業大学	マイクロガスタービン用遠心圧縮機の水噴霧冷却に関する研究	67
34	Mikael Nilsson	カリフォルニア大学	界面活性剤 Pluronic と硫酸アンモニウムからなる水相二相系によるレニウムの抽出	69
35	内藤 克浩	愛知工業大学	ICT 活用農業のためのセンサネットワークの研究開発	71
36	荒井 伸太郎	岡山理科大学	低撮影速度のカメラを用いた省エネルギー可視光通信の実現のためのデータ復調手法の開発	73
37	西村 顕	三重大学大学院	二酸化炭素を水素キャリアに変換する太陽光駆動型光触媒の開発	75
38	布目 陽子	広島大学	グロー放電プラズマを利用した揮発性有機化合物の分解メカニズムの解明	77
39	松井 龍之介	三重大学	ハイパボリック・メタマテリアルによる高効率有機発光デバイスの開発	79

No.	研究代表者	所属機関	研究課題名	頁
40	石橋 隆幸	長岡技術科学大学大学院	磁気光学イメージングプレートの開発	81
41	松田 巖	東京大学物性研究所	自由電子レーザーを用いた極端紫外域での非線形光学効果測定に向けた磁性超薄膜の成膜、評価	83
42	高橋 可昌	関西大学	省エネルギー・低炭素化を推進する材料強度評価の新学術・技術基盤創生	85
43	内田 正哉	埼玉工業大学	電子ボルテックスビームが拓く新たな量子イメージングと材料創成	87
44	森川 大輔	理化学研究所	軌道角運動量電子ビームによる単一磁気スキルミオンの生成	89
45	蔡 安邦	東北大学	ポーラス Cu におけるナノ双晶と触媒活性	91
46	歳藤 利行	名古屋陽子線治療センター	原子核乾板技術の陽子線治療への応用	93
47	伊代野 淳	岡山理科大学	原子核乾板超高速読み取り装置 HTS によるミュオン粒子トモグラフィのバックグラウンドとなる低エネルギー粒子解析と重原子核同定への応用	95
48	西藤 清秀	奈良県立橿原考古学研究所	ミュオンラジオグラフィーを利用した古墳の埋葬施設調査	97
49	渋谷 寛	東邦大学	精密 μ ラジオグラフィーのための宇宙線の運動量分布測定	99
50	宮本 成悟	東京大学	宇宙線ミュオンを用いた火山内部密度構造の撮像	101
51	青木 茂樹	神戸大学	超高速原子核乾板読み出し装置 HTS を用いた高精度原子核フィルムの解析手法の確立	103
52	中村 琢	岐阜大学	原子核乾板による生体中の放射性核種オートラジオグラフィー	108
53	吉田 朋子	大阪市立大学	TiO ₂ 光触媒上への Pt ナノ粒子光析出	110
54	塚田 千恵	日本原子力研究開発機構	高密度・高効率な Cs 吸着剤の開発を目指した Au ナノ粒子含有材料に対する Cs と L-システインの共吸着反応の解明	112
55	藤井 健太郎	量子科学技術研究開発機構	放射光を用いた生体分子デバイスの省エネルギーリサイクルシステムの開発	114
56	岡本 征晃	石川工業高等専門学校	外部共鳴摂動磁場によるトカマクプラズマ応答に関する研究	116
57	荒巻 光利	日本大学	非接触ダイバータプラズマ中の中性原子温度計測	118
58	若林 整	東京工業大学	超低消費電力トランジスタ用二硫化モリブデン半導体の TEM 解析	120

No.	研究代表者	所属機関	研究課題名	頁
59	酒井 朗	大阪大学	超低消費電力脳型コンピュータの基幹となるメモリスタシナプス素子の材料物性評価と機能制御	122
60	野田 優	早稲田大学	ナノカーボン材料による面状透明ヒーターの開発	124
61	松田 一成	京都大学	ナノカーボン・原子層物質を用いた光エネルギー変換デバイスの研究	126
62	川口 昂彦	静岡大学	自己形成超格子構造を有する熱電セラミックス薄膜の局所構造と電子状態の観測	128
63	肖 英紀	秋田大学	超省エネ・高密度磁気メモリ開発に向けたスキルミオン物質の設計と評価	130
64	木本 浩司	物質・材料研究機構	超低消費電力磁気メモリデバイス開発のための磁気スキルミオンの新規物性開拓と制御	132
65	新家 寛正	千葉大学	強く捻れた光場中でのカイラル核形成による結晶カイラリティ制御	134
66	田中 文昭	産業技術総合研究所	省エネルギー・高効率・プログラマブルな分子集積化を目的としたエントロピー駆動型 DNA セルフアセンブリ法の開発	136
67	佐藤 威友	北海道大学	窒化物半導体を用いた MOS デバイスにおける半導体/絶縁膜界面の評価	138
68	片山 竜二	大阪大学	N 極性 InGa _N 発光ダイオードの高効率化にむけた局在発光の微視的評価	140
69	谷川 智之	東北大学	GaN 厚膜の HVPE 成長における成長面方位と欠陥形成機構	142
70	加藤 正史	名古屋工業大学	溶液法成長 SiC 結晶を基板として用いたパワー半導体素子の評価	144
71	太子 敏則	信州大学	溶液法 SiC 結晶成長と評価に関する研究	146
72	塚本 勝男	大阪大学	光学観察による SiC 結晶内部欠陥の評価	148
73	千住 智信	琉球大学	オフグリッド型直流スマートハウスの電力供給方式	150
74	北條 昌秀	徳島大学	小規模電力系統における仮想同期発電機の制御効果	152
75	宮澤知孝	東京工業大学	エネルギー伝送 Cu 材料の疲労特性向上に向けた転位組織形成機構の解明	154

電解エッチング／アノード酸化／水熱法による Al 箔上へのナノ材料の創製およびバインダーフリー LIB 正極材料としての特性評価

Controllable Fabrication and Characterization of Versatile Nanomaterials on Al Foils by Electro-etching, Anodization, and Hydrothermal Synthesis as Binder-free Cathode Materials for LIBs

呉 松竹・岩手大学・理工学部化学生命理工学科・准教授
川原 卓人・岩手大学・理工学部化学生命理工学科・修士 2 年
興戸 正純・名古屋大学・未来材料システム研究所・所長

1. 研究目的

新規な高性能・低コスト LIB 正極材料の創製を目指し、ポーラス化を施した Al 箔孔内に、溶液プロセスにより直接 LiFePO_4 などのナノ結晶を析出させ、バインダーフリー LIB の正極材料として電気化学特性を評価することを目的とする。

2. 研究内容と成果

2.1 アノード酸化による Al 板へのナノポーラスアルミナ担体の作製 (担当：岩手大学)

Fig.1 に示すように、リン酸とクエン酸の混合電解液を用い、160 V, 2 h でのアノード酸化法により、Al 板上に約 13 μm の多孔質型アノード酸化皮膜を形成し、さらにリン酸溶液中で化学溶解により細孔直径約 350 nm まで調整し、ナノポーラスアルミナ担体を作製した。

2.2 水熱法によるポーラスアルミナ担体上への LiFePO_4 薄膜の合成 (担当：名古屋大学)

Fig.2 に示すように、強酸性溶液を用い、24 時間の水熱法により、様々な基板(すなわち、(a) Al 板、(b)多孔質アノード酸化皮膜および(c)アノード酸化+プラズマ処理後)の上に数 μm の粒子膜を合成した。また、EDS 分析によりその膜は LiFePO_4 であることが確認された。

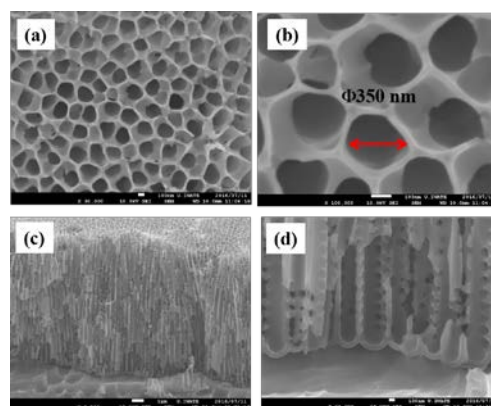


Fig.1 Al 板上のナノポーラスアルミナ皮膜の表面と断面 FE-SEM 写真

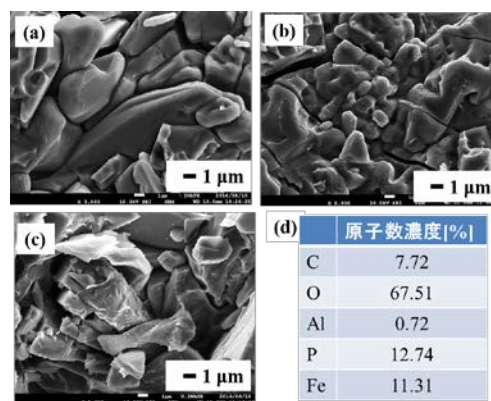


Fig.2 水熱法で各種基板上に形成された LiFePO_4 膜の表面 FE-SEM 写真

2.3 電解エッチングとアノード酸化を組合せた多孔質アルミナ担体の作製 (担当：岩手大学)

Fig.3 に示すように、NaCl 溶液中での電解エッチング法により Al 板上に穴のサイズが 1~40 μm 、深さが 20-50 μm のマイクロピット構造を作製し、さらにアノード酸化を加えて、ピットの表面に細孔約 300 nm のナノポーラスアルミナ皮膜を形成し、耐表面積を有する多孔質アルミナ担体を作製した。

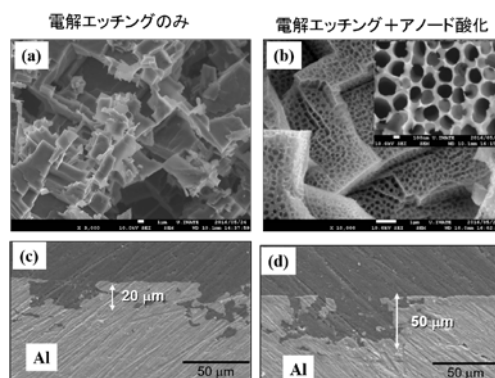


Fig.3 各種処理後の表面 FE-SEM 写真と断面 SEM 写真

2.4 水熱法による各種アルミナ担体上への LiFePO_4 薄膜の合成および構造特性評価 (担当：名古屋大学)

電解エッチングとアノード酸化に形成された試料の耐食性を考慮して、中性域且つ短時間で水熱処理を行うことで、微細な結晶を持つ LiFePO_4 層を形成することができた。また、EDS 分析により、LFP 層と Al 基材の界面にリン酸アルミ層の生成が検出された。

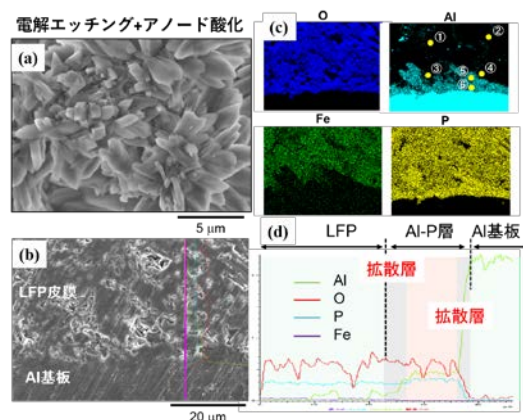


Fig.4 水熱処理試料の表面と断面 SEM 写真および EDS 分析結果

2.5 各種担体上への LiFePO_4 薄膜の電気化学特性評価および LIB 正極としての充放電試験 (担当：名古屋大学)

電解エッチング、アノード酸化と水熱法を組合せることで Al 板上に作製 LiFePO_4 試料を作用極、Li 箔を対電極として定電流充放電試験を評価した結果、バインダー且つ導電助剤フリーの Li イオン電池正極材料として作動することが確認された。

(実験結果を省略)

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- Ei SUMI, Song-Zhu KURE-CHU,* Takuto KAWAHARA, Masasumi OKIDO, Controllable Fabrication and Characterization of Mesoporous LiFePO_4 Films on Al Foils by Electro-etching, Anodization, and Hydrothermal Synthesis toward Binder-free Cathode Materials for Li Ion Batteries(案), Journal of Electrochemical Society へ投稿論文を準備中.

<国際・国内会議> と <産業財産権> : 該当なし

構造規整粒子を用いた多孔質酸化チタン電極の作製

Fabrication of Porous Titania Electrode Using Well-Defined Titania Particles

研究代表者 小島 隆・千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究分担者 上川直文・千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究所担当教員 余語利信・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

本研究は、色素増感太陽電池、水の光分解による水素製造用や、近年、千葉大学において開発が進められている光燃料電池等の電極材料として不可欠な、多孔質酸化チタン電極を高機能かつ安価に作製する手法の確立を目的とした。高精度な酸化チタンの多孔質電極合成手法は数多く提案されているが、コスト面や大面積化に問題を抱えており、酸化チタンの結晶性向上が困難である手法も多い。本研究では、既に合成技術を確認している、特定の結晶面が表面に広がるように針状に構造規整した粒子、粒子表面に細孔を形成した球状粒子を、酸化チタン電極の作製に応用することとした。特定の結晶面が広がるように構造規整された酸化チタンナノ結晶を用いることで、有機色素の吸着や電極としての応用に適する電極の作製が期待できる。また、あらかじめ表面部に細孔を有する酸化チタン粒子を用いることで、多孔質電極の性能向上も期待できる。電極の作製は、粒子の透明導電性基板上への積層または塗布により行った。この際、粒子の積層・塗布工程の最適化により、金属ナノ粒子や有機色素分子の担持に好ましい、均一な膜厚と細孔を有する多孔質酸化チタン電極の安価な作製法確立を目指した。

2. 研究内容と成果

本研究では、粒子の形状・結晶面を規整した粒子および粒子表面に細孔を形成した酸化チタン粒子の合成をまず行い、それぞれの粒子を用いた透明導電性基板上への多孔質薄層（電極）構築方法を検討した。

粒子の形状・結晶面を規整した粒子に関しては、まずチタン錯体の水溶液を調製し、特定の結晶面に吸着しやすい物質（吸着剤）を添加、100°Cで加熱することによりゲル化した。このゲルを140°Cで水熱処理することにより、アナターゼ型の酸化チタンに結晶化し、さらに500°Cでの熱処理により残留有機分を除去した。吸着剤としてエチレンジアミンを用いた場合、アスペクト比が8程度の針状の酸化チタン粒子が得られた (Fig. 1)。この粒子は、結晶のc軸方向が優先的に成長するように構造規整されていた。また、吸着剤としてオレイン酸を用いた場合は、立方体状の粒子が得られたが、粒径の均一性に劣っていた。この粒子に関しては反応系の濃度等、今後さらなる検討を行い、多孔質薄層作製に耐えうる精度での粒子合成を試みる。針状粒子を用いた成膜条件を検討するため、pHを調製した水溶液中に粒子を分散し、ろ過により粒子を積層したところ、pH 9の条件で針状粒子が均一に分散し、粒子がほぼ横向きに並んで配向した多孔質層を構築でき

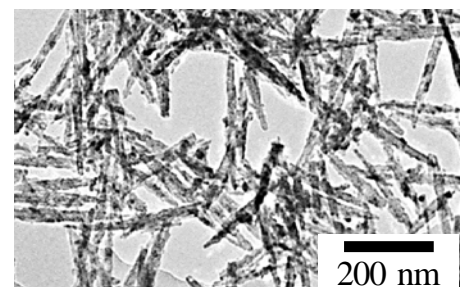


Fig. 1 針状酸化チタン粒子のTEM像

た (Fig. 2)。この結果を踏まえ、ITO (Indium Tin Oxide) 透明導電性基板上にシリコンゴム製の型枠を設置し、その中に pH9 の水溶液に分散した針状チタニア粒子を滴下・乾燥して粒子を積層し、さらに 400°C で 30 分焼成することによって多孔質薄層の構築を試みた。その結果、均質なチタニア多孔質薄層を透明導電性基板上に形成できた (Fig. 3)。今後、色素を吸着させ、色素増感太陽電池の電極としての応用を目指す。また、ろ過により作製した多孔質層では、銀アンミン錯体のブドウ糖還元による銀ナノ粒子の担持にも成功している。今後、透明導電性基板上での銀ナノ粒子の担持も検討し、光燃料電池の電極への応用も検討する。

多孔質の酸化チタン粒子に関しては、まず金属アルコキシドの加水分解により調製した粒子をアルコールで洗浄することにより、粒子表面に細孔が形成された水和 (含水) 酸化チタン粒子を調製した (Fig. 4(a))。この粒子を 100°C で 24 h 水熱処理したところ、原料粒子の外観を維持したままアナターゼ型に結晶化した多孔質粒子を得ることができた。この粒子を針状粒子と同様の手法で透明導電性基板上に積層した。しかし、得られた酸化チタン多孔質層は不均一であり、容易に基板から剥離してしまった。今後、多孔質酸化チタン電極としてのさらなる機能向上を目指し、膜厚の最適化等を検討する予定である。

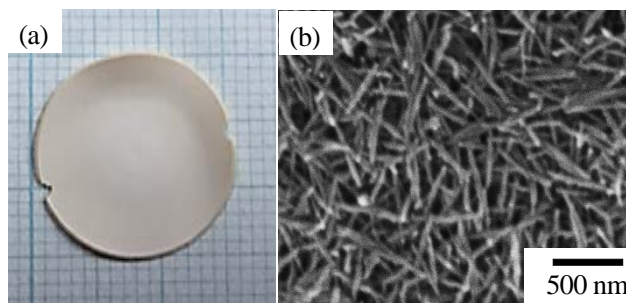


Fig. 2 針状チタニア粒子を用いて作製したチタニア多孔質層の (a) 外観と (b) 微構造

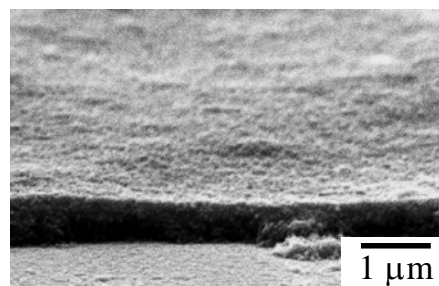


Fig. 3 針状粒子を用いて作製した多孔質酸化チタン薄層の断面 SEM 像

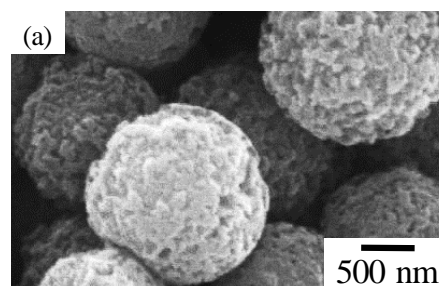


Fig. 4 (a) 多孔質酸化チタン粒子

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- ・丹波雅之, 小島 隆, 石井健太, 鈴木里英, 上川直文, 余語利信, 針状チタニア粒子を用いた多孔体の作製と銀ナノ粒子の担持, 第 6 回 CSJ 化学フェスタ 2016, タワーホール船堀, 2016 年 12 月 10 日～15 日.
- ・Takashi Kojima, Fabrication of Porous Titania and Metal Titanate Particles by Partial Dissolution and Hot Water Conversion of Hydrous Titania, 18 th International Symposium on Eco-materials Processing and Design (ISEPD2017), Okinawa Jichikaikan, 2017 年 2 月 17 日～20 日 (Invited).

CNTs/SiC 上金属めっき電極膜の形成

Preparation of metal electrodeposited electrode films on CNTs/SiC

齋藤美紀子・早稲田大学・ナノ・ライフ創新研究機構・上級研究員（研究院教授）

楠 美智子・名古屋大学・未来システム研究所・教授

1. 研究目的

パワートランジスタには放熱のための実装技術の開発が強く求められている。放熱性の良好な材料の選択や電極表面の均一性や密着性が良好であることが重要となる。SiC 半導体は高温でも物性が悪化しない良好な半導体であり、Si には無い優れた特性を有している。特に低オン抵抗で高電圧動作が可能であることから Si に比較し低消費電力に大きく寄与できる。SiC FET の熱抵抗（放熱性）を良くすれば動作温度が下げられるので更に大電力を扱うことが可能になる。一方カーボンナノチューブ（CNTs）は、鋼の 10 倍の強度、銅の 10 倍の熱伝導度、Si の 1.5 倍の電子移動度を持つなど情報、エネルギー、バイオ産業への応用へと期待の大きい材料である。この為電源用パワーモジュールや Through-Silicon-Via (TSV) を使った 3 次元 LSI の配線材料として優れた性質を有するが、実用的には CNTs と放熱及び電気回路との接触抵抗が高いことが課題である。本研究においては SiC 基板の真空高温表面分解により形成された高密度・高配向 CNTs 層の表面に Au-Ag 電析膜の形成やデアロイにより Au のナノポーラス構造形成を試み、より良好な接合の電極形成を目的とする。本検討ではナノポーラス電極膜形成、形態観察、CNTs のキャップ処理（開口処理）の検討も進めた。

2. 研究内容と成果

実験方法 表 1 に Au-Ag 溶液構成を示す。表 2 に電析及びデアロイ条件を示す。Au-Ag の膜形成は電気化学測定装置 (HZ7000、北斗電工株) を用いた 3 電極方式により行った。SiC 基板上の CNTs へ電線を銀ペーストにより固定、周辺部をエポキシ樹脂で封止し、試料極とし、電析を行った。形態観察は電解放出形走査型電子顕微鏡 (FE-SEM、S-4800、日立ハイテク)、膜組成分析は ICP-MS (ICAP-Q, Thermo Scientific) を用いて行った。キャップ処理は電気炉中 600 °C、10 分で行った。

CNTs 上の電析ナノポーラス構造

表 3 に作製した試料の Au と Ag の組成分析結果を示す。分析結果から CNTs 上の Au-Ag 合金膜では若干 Ag の割合が少なくなっていることが観測された。組成に差が生じた要因については今後検討を進めていく予定である。図 1 (a) に試料の外観像を示す。均一に Au-Ag 膜が CNTs 上に形成されることを確認した。図 1 (b) と (c) にキャップ処理有

無における試料のSEM像を示す。キャップ処理により Au-Ag 膜の粒径が少し小さくなっているように観測された。今後もう少し解析を進めていく予定である。同電析条件で Pt スパッタ付き Si 基板上に形成された Au-Ag 膜を図 1 (d)に示す。CNTs 上では 1 μm 程度と比較的大きかった粒子サイズが Pt 上では数 10 nm であった。CNTs の横方向の抵抗が高いことから核生成より成長の方がより進んでいるものと考えられた。今後さらなる解析を進めていく予定である。

表 1 電析浴組成

試薬	濃度
H ₂ AuCl ₄ ·4H ₂ O	1 mM
AgNO ₃	2 mM
Thiourea	0.2 M
H ₂ SO ₄	0.01M

表 2 電析・デアロイ条件

電位 / mV vs. Ag /AgCl	時間/分	デアロイ時間
-700	30	10 s HNO ₃ (60 wt%) : H ₂ O = 2:1

表 3 電析膜の組成分析結果

	Au at. %	Ag at. %
CNTs	37.0	63.0
Pt	15.3	84.7

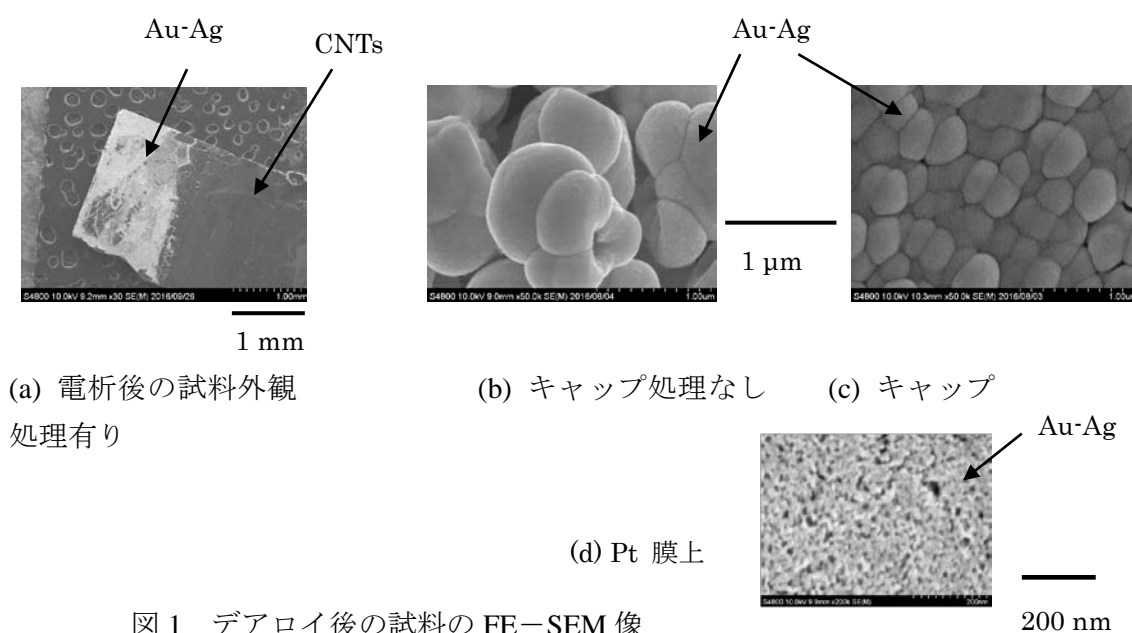


図 1 デアロイ後の試料の FE-SEM 像

【研究成果の公表状況】 <国際・国内会議>

・ M. Saito, J. Mizuno, M. Kusunoki, H. Nishikawa, Formation of Nanoporous Electrode on Aligned CNT Films using Dealloying, 230th Meeting of the Electrochem. Soc., Z02, 4142 (2016) 10/5.

無機層状化合物／金属ナノ粒子複合体の構造解析

Structural analysis of the inorganic layered compound and metal-nanoparticle hybrids

研究代表者：由井樹人 新潟大学工学部機能材料工学科 准教授

研究分担者：乗松航 名古屋大学大学院工学研究科

化学生物工学専攻 助教

研究所担当教：楠美智子 名古屋大学未来材料・システム研究所 教授

1. 研究目的

層状半導体(LMOSs)は、半導体特性を有しかつ2次元的な空間を有するユニークな材料群であり、LMOSs と光機能材料を複合化させた材料群は新たな光機能性材料として盛んに研究されている。一方、金属をナノメートルのサイズまで微細化した金属ナノ粒子(MNPs)は、バルクの金属とは異なる物性を示す材料群であり、特に表面プラズモン共鳴(SRP)により、特異的な着色を示す。近年、半導体材料と MNPs とを複合化したプラズモン光触媒が新たな光触媒として注目を集めている。しかし一般的なバルク半導体は、極めて限られた表面積しか有さないため、MNPs の担持量や活性表面量などには限界があった。この点を克服するため、バルク半導体と MNPs の複合化が行われているが、その例は極めて少なく、少数の報告例も予め MNPs を合成したのち、LMOSs と複合化する手法を取っている。一方、我々は LMOSs の層間で MNPs の成長をさせることに着目した。LMOSs の極めて限定された空間で MNPs を成長させることで、液相合成の MNPs とは異なった形態のナノ粒子が成長し、形態に応じて光学物性を大きく変化させることが可能と予想される。本研究では、LMOSs の透明薄膜を合成すると共に、イオン交換法により陽イオン性金属種の層間導入、さらに金属種の化学的還元により LMOSs 層間で MNPs の *in situ* 合成と成長を試みた。さらに進んで、層間で生成した MNPs の分布や形状を透過電子顕微鏡にて観察を行うことで、層内での MNPs の形態を直接観察し光学特性との相関、さらにはこれらの情報を基盤としてさらなる高性能な MNPs/LMOS 複合体合成の基礎的知見を得ることを目的に研究を行った。

2. 研究内容と成果

LMOSs と MNPs の複合化にあたり、前駆体膜の合成を行った。LMOSs の一種である酸化チタンナノシート(TNS)のコロイド溶液をガラス基板にキャストし 500℃程度の低温で焼成することで、透明性と基板への固着性を有する TNS 前駆体膜の合成に成功した。この膜をビオローゲン処理を行ったのち、硝酸銅水溶液に浸漬すると層間に銅イオンが導入されることを見出した。この結果は、低温焼成膜でもイオン交換能が維持されていることを示し、後述の MNPs 以外への応用展開も期待される。銅イオンを含む膜を

NaBH₄水溶液に浸漬すると、透明だった膜が金属光沢を帯びた褐色へと変化したことから、CuNP の生成が示唆された。XRD、XPS などの分光分

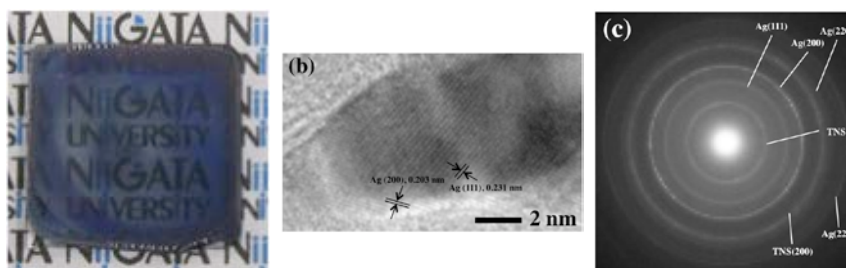


Fig. 1. TNS/AgNP の写真(左)、HR-TEM (中) 、ED パターン(右)。

析から、CuNP の生成が示唆されたが、直接的な証拠や CuNP の形態などの極めて重要な知見を得ることを困難であった。そこで、本共同研究の主眼である TEM にて試料を観察したところ、長さ数十ナノメートルの粒子が観測され、電子線回折から酸化銅のナノ粒子が形成されていることを確認した。この CuNPs は他の CuNP 系よりは高い空気下安定性を示したが、24 時間程度で酸化されることも分かり、さらなる耐久性の向上が望まれた。そのため、同様の手法にて層間に銀イオンを導入したところ、イオン交換容量に対して約 70%の銀イオンが TNS に担持できることを見出した。化学還元法にて層間の銀イオンの還元を行うと、膜の色が極めて濃い青色に変化した (Fig.1)。通常の銀ナノ粒子は黄色を呈するため、青色を示す銀系物質の生成は極めて興味深い。TEM で複合体を観察したところ、数十ナノメートルの AgNP が層間で成長していることがわかった。高分解能 TEM および電子線回折(ED)により、AgNP は結晶性の Ag(0)から構成されていることがわかった(Fig.1)。合成手法などの最適化を行うと、本 AgNP は極めて長波長側の近赤外(NIR)領域まで吸収を示すことを見出した。さらに、本手法で得られた AgNP は、大気中でも極めて安定に NIR 吸収を示した。NIR 吸収色材は、医療・太陽光エネルギー変換・セキュリティーインクなどの応用が期待されているが、その原理上耐酸化性に劣る場合が多い。安価な銀系材料で安定的かつ長波長な NIR 吸収を示す材料群は、ほとんど報告例がなく新たな応用展開が期待される材料となっている。現在、銀の導入手法や LMOs を変化させることで NIR 吸収のコントロールを試みるとともに TME による観測から特異な粒子形態と吸収特性との相関、さらには光触媒特性について検討を行っている。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- ・ K. Sasaki, K. Matsubara, S. Kawamura, K. Saito, M. Yagi, W. Norimatsu, R. Sasaic and T. Yui, *J. Mater. Chem. C*, **2017**, 4, 1476-1481.

<国際・国内会議>

- ・ 由井樹人, 配位化合物と無機層状化合物からなる複合系の特異的な光化学挙動, 第 28 回配位化合物の光化学討論会, 京都繊維工大, H28 年 8 月 8-9 日.

エピタキシャルグラフェンの低温電子伝導物性研究

Low-temperature electronic transport properties of epitaxial graphene

遠藤 彰・東京大学・物性研究所・助教

乗松 航・名古屋大学・大学院工学研究科・助教

楠 美智子・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

厚さ 1 原子層の炭素物質であるグラフェンは、高いキャリア移動度を持ち、線形分散関係に起因する特異な量子ホール効果が観測されるなど、科学的にも応用上も非常に注目される材料である。SiC の熱分解により得られるエピタキシャルグラフェンは、絶縁性基板上にウェハースケールの単結晶グラフェンを直接形成できる唯一の手法である。本研究では、SiC 上グラフェンの電子伝導の機構を明らかにするため、グラフェン層数の異なる複数の試料を用いて低温での磁気輸送測定を行う。また、グラフェンのデバイス応用のためには、グラフェン中へのドーピングを制御する必要がある。そこで、炭化ホウ素の熱分解という独自の手法によって高濃度ホウ素ドーピンググラフェンを作製し、超伝導現象発現も視野に入れ 10 mK の極低温までの抵抗測定を行う。

2. 研究内容と成果

名古屋大学において SiC ウェハをアルゴン雰囲気中、1600°C程度で加熱することで、SiC 基板上に単層や 2 層のグラフェンを作製した。また、あらかじめ SiC 基板上に形成した炭化ホウ素薄膜のグラフェン化により、高濃度ホウ素ドーピンググラフェンを作製した。その後、東京大学において希釈冷凍機・超伝導マグネットを用い、これらのグラフェン試料の低温・磁場中での抵抗測定を行った。

単層領域と 2 層領域が共存するエピタキシャルグラフェンの 10 mK での磁気抵抗を測定したところ、対角成分 R_{xx} は高磁場側で飽和する正磁気抵抗を示し、ホール抵抗 R_{xy} は高磁場側で傾きが小さくなる sublinear な線形を示した (図 1 実線)。これらは、2 種のキャリアが並行に伝導する 2 キャリアモデルで非常に良く記述できることがわかった (図 1 破線)。詳細な解析から、単層、2 層領域それぞれの電子濃度及び移動度、さらには両領域の面積比を導出した。この面積比は原子間力顕微鏡を用いて直接観察することにより得られた面積比と非常に良く一致した。磁気抵抗の測定から実空間での面積比を求めることが可能であることを意味する。

炭化ホウ素薄膜の加熱で得たグラフェンは、室温でのキャリアタイプは正孔であった。グラフェン中にホウ素がドーピングされたことを示唆している。正孔濃度はグラフェン形成時の雰囲気依存し、真空中で作製した場合は約 $1.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ であり、Ar 雰囲気中で作製した場合は約 $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ であった。これは、加熱雰囲気によって正孔濃

度を制御できることを意味している。また、ホウ素原子 1 個が正孔 1 個を供給すると仮定すると、上記の正孔濃度は、それぞれホウ素濃度 2.8 および 25.8 at.% に対応している。これらの試料の抵抗を 1 K から温度を下げ 10 mK までの温度範囲で測定した。1 K では 1.5 k Ω 程度の抵抗が、温度低下に伴って上昇する絶縁体的振る舞いをするのがわかった。超伝導発現を捉えるには至らなかったが、キャリア濃度の高いアルゴン中アニール試料のほうが抵抗上昇は抑制されており、今後は更なる高濃度ドーブ試料の作製を目指す。

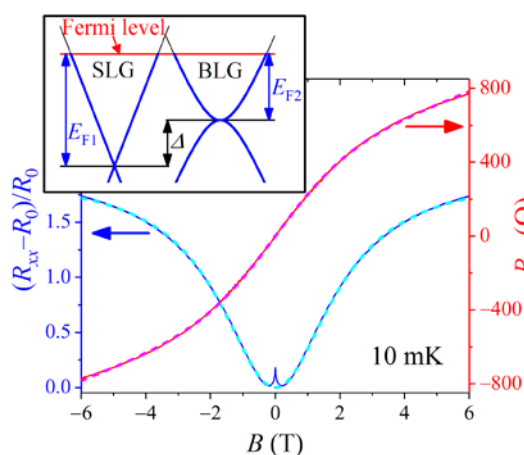


図1. 単層(SLG)・2層(BLG)領域が共存するエピタキシャルグラフェンの対角(左軸)およびホール(右軸)抵抗の磁場依存性。実線が実験データ。破線は2キャリアモデルによるフィッティングの結果。挿入図はこの系のバンド図

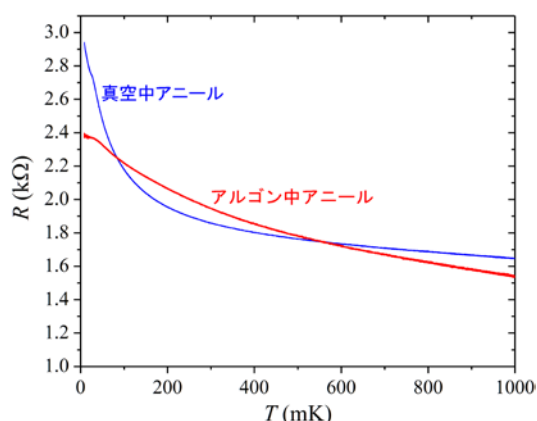


図2. 真空中アニールおよびアルゴン中アニールで得られた高濃度ホウ素ドーブグラフェンの抵抗の温度依存性

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- Akira Endo, Jianfeng Bao, Wataru Norimatsu, Michiko Kusunoki, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye, Two-carrier model on the magnetotransport of epitaxial graphene containing coexisting single-layer and bilayer areas, Philosophical Magazine, (2017), in press, DOI: 10.1080/14786435.2017.1311429

<国際・国内会議>

- 乗松航, 増森淳史, 舟橋良次, 遠藤彰, 楠美智子, SiC 上高濃度ホウ素ドーブグラフェンの物性, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 2016年9月13日~16日.

<産業財産権>

- 出願状況、取得状況
ありません。

省資源省エネルギー型環境浄化触媒材料の開発

Development of environmental catalysts with saving resource and energy

研究代表者 羽田政明・名古屋工業大学・先進セラミックス研究センター・准教授

研究分担者 名古屋工業大学・先進セラミックス研究センター・大学院生・土井泰幸

研究分担者 名古屋大学 未来材料・システム研究所・特任助教・服部将朋

研究所担当教員 小澤正邦・未来材料・システム研究所・材料創製部門・教授

1. 研究目的 (12pt ゴシック体)

大気中および排気の微量の有害ガスの除去に対しては、従来、高価な貴金属を用いた触媒の開発がなされ、広く実用化されている。一方、これらの使用は資源またコスト面で課題があるとされており、コモンメタルを用いた同等の性能を有する研究が期待されている。コモンメタル触媒ではその性能の不足を燃焼温度の高温化によって補う必要があり、熱エネルギーの観点からいわゆる省エネ型試志向に反するという欠点がある。本研究では、将来のコモンメタル型触媒の開発とその利用を考えて、その触媒の設計と基礎物性解明、また分光学的手法を活用した触媒反応解析などの研究を行い、省資源・省エネルギー型環境浄化触媒材料の高性能化・高機能化研究を行う。名古屋大学未来材料・システム研究所内の先進設備ならびに名古屋工業大学内の触媒反応評価技術を統合して、新奇なナノ材料がもつ基礎物性から浄化触媒の応用的な性能を高度化できるような研究の展開を行う。

2. 研究内容と成果 (12pt ゴシック体)

従来使用されてきた白金等の貴金属類を多量に用いなくても、新たなナノ材料の機能化によって新規触媒創製に関する先進的研究を目指し、新たなコモンメタルを用いた触媒材料を研究した。まず、これまでの触媒の構造解析や分光学的な解析により、その優れた性能の起源を解明する研究を行い、貴金属を用いないナノ触媒材料の開発を行った。さらに遷移金属類を中心に、新規な組成系を検討した。その結果、酸化スズをアルミナに担持し、高分散化をはかった触媒材料を見いだした。触媒化のため複合化触媒の浄化活性への影響要因、ガス

吸着脱離の基礎特性を把握し、浄化性能の基礎物性を解明した。本系の酸化スズ／アルミナ触媒において、リーン燃焼条件での窒素酸化物（NO_x）浄化に高活性を発現する触媒を見出した。リーン燃焼は燃費の削減と高効率エネルギー利用に適したエンジン開発に重要であり、このような低廉なメタルとの複合化された触媒組成が省資源・省エネルギーの観点から有用であることと考えられる。

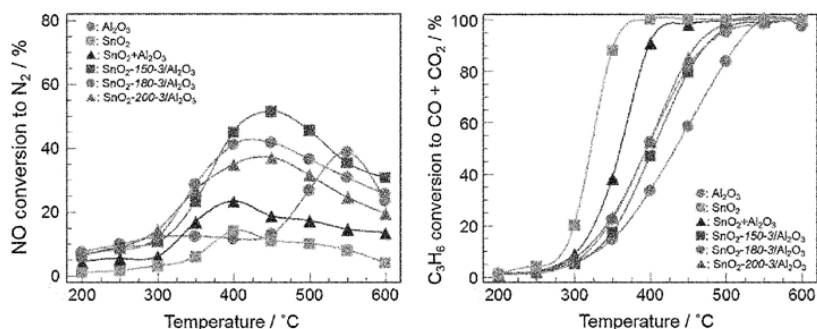


Figure 7 Activity of Al₂O₃ (Grey circle), SnO₂ (orange square), physical mixture of SnO₂ + Al₂O₃ (Blue triangle), SnO₂-150-3/Al₂O₃ (Red square), SnO₂-180-3/Al₂O₃ (Green circle), and SnO₂-

200-3/Al₂O₃ (Pink triangle) catalysts for the selective catalytic reduction of NO with propene. Conditions: NO = 0.1 %, C₃H₆ = 0.1 %, O₂ = 10 %, W/F = 0.12 gscm⁻³.

【研究成果の公表状況】 (12pt ゴシック体)

< 論文発表 >

M.Haneda, Y.Ota, Y.Doi, M.Hattori, “Preparation, characterization, and activity of SnO₂ nanoparticles supported on Al₂O₃ as a catalyst for the selective reduction of NO with C₃H₆”, Journal of Materials Science, Vol.51, pp10949-10959, (2016)

安全安心な新規セラミックス系色材の研究開発

Study of ceramic color materials with safety

研究代表者 網本正哉・多治見市・陶磁器意匠研
究所・主査

研究所担当教員 小澤正邦・材料創製部門・教授

1. 研究目的

セラミックス材料の中には、蛍光、蓄光、光触媒などの自発的に特色を示し、省エネ・環境に資する光学機能を有する組成系がある。それらの材料では、特に外部から電気エネルギーを供給することなく光学的性質を発現するため、エネルギーを費やさない点で有用と考えられる。このような色材の光学機能を活かし、タイル材等を用いることにより耐候性と光学機能を併せ持つ景観材等とすることもできる。本共同研究では、申請者が地場産業地域で養ってきたセラミックス技術を基盤にして、未来材料・システム研究所の種々の設備を活用することにより、省エネルギーで環境に配慮した色材の開発を行うことをめざした。

2. 研究内容と成果

本研究では、陶磁器産業で顔料の原料は必ずしも環境、健康面で安全な材料だけが使用されていない現状に鑑み、安全・安心な色材としての新たな陶磁器用顔料の研究を行う。従来、量産品において安定した発色を得るのに用いられている黄～橙～赤色系顔料に関しては、本来は有毒なカドミウムがしばしば用いられている。カドミウムを含む化合物は耐熱性が十分でないため、焼成して製造する際に細心の注意を要しており、その改善が求められるが十分には達成できていない。これらの有害原料と置き換わるものとして希土類元素、特にセリウムを利用した顔料材で、黄色から橙の色材となる可能性を考え、ホスト結晶構造への微量のドーパが有効な発色源となる可能性を検討した。

得られた結果として、例えば Ce-Zr-Y 系では、Ce-Y が薄い黄色であるのに対して、Zr 含有量を添加すると黄色の発色が濃くなり、また顔料として十分な明るい発色 (L^* 80 以上) を示すことを明らかにした。さらに、希土類の発光中心となる希土類元素 (Eu 等) を導入し、色材としての新奇的な色合いと蛍光発光性を発現することを試みた。その結果、Ce-Pr-Eu 系で特異な発色 (光誘起変光) 現象を見出した。

また、これまでの多治見市意匠研究所での教育研究成果等の活用を視野に入れた新規色材に関する教育研究普及活動を行った。

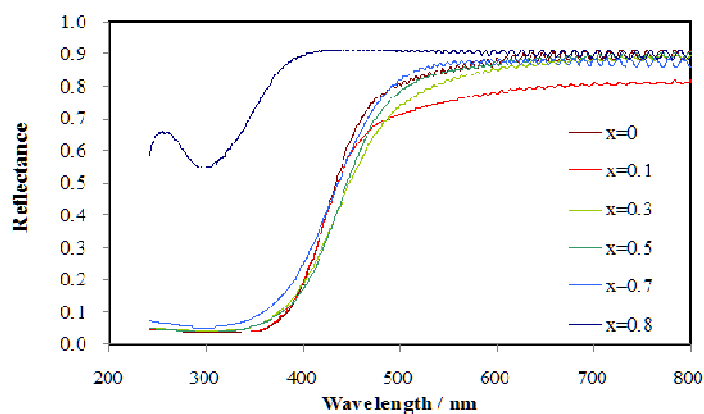


Fig. UV-Vis diffuse reflectance spectra of the $Zr_xCe_{0.8-x}Y_{0.2}O_{1.9}$ ($x=0$, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 and 0.8).

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- 1) 網本正哉、「陶磁器用上絵具の耐アルカリ性・耐酸性の評価」、平成 28 年度上絵付加工衛生対策協議会セミナー（美濃焼陶磁器協議会）、平成 29 年 2 月 17 日、岐阜
- 2) 網本正哉、小澤正邦、「希土類添加 CeO_2 粉末の作製と光学的性質」、日本材料学会東海支部第 11 回学術講演会、平成 29 年 3 月 6 日、名古屋

<産業財産権>

- ・学内知材届検討中

表面吸着タンパク分別定量による省エネ生体適合評価法の開発 Energy-saving biocompatibility evaluation method using fractional determination of surface adsorptive proteins

大津直史・北見工業大学・工学部・准教授
沢口 肇・北見工業大学・工学部・修士 1 年
横岩佑城・北見工業大学・工学部・学部 4 年
黒田健介・名古屋大学・未来研・准教授

1. 研究目的

無機及び有機生体材料から成る医療用デバイスにおいて、生体適合性は不可欠な特性である。生体適合性の評価は、動物細胞試験 (*in-vitro* 試験) や動物実験 (*in-vivo* 試験) によって行われているが、これら評価における“細胞培養”や“動物飼育”には多くの使い捨てプラスチック製品用いられ、さらに、温度環境管理のため大量の電力を浪費する。ところで医療用デバイスが血液などの体液に触れたとき最初に起こる界面反応は、タンパク質の表面吸着であり、そのタンパク吸着表面の特性が細胞接着及び増殖を支配することが知られている。したがって、表面吸着タンパクを分別定量し、その吸着特性と細胞適合性の関係性を明らかにすることができれば、医療用デバイスの生体適合性を細胞培養や動物飼育に依ることなく、タンパク質の分析のみによって迅速かつ簡易的に評価することが可能となる。

SDS-PAGE (Sodium Dodecyl Sulfate - Poly-Acrylamide Gel Electrophoresis) は、電気泳動を利用したタンパク質の分離分析技術の一つである。まず SDS の作用により目的タンパク質に電荷を付与すると同時に高次構造から直鎖状に近い構造へと変える。その後、タンパク質を泳動させながらポリアクリルアミドゲルの持つ「分子ふるい効果」で分離する。この分析手法を利用するとタンパク質の分別定量が可能であるが、材料表面タンパク質にこの手法を適用するためには、① 材料吸着タンパク質を溶液中に可能な限り完全に抽出すること、② 吸着量は僅かであるので、抽出したタンパクを濃縮すること、以上の手順が必要となる。そこで本研究ではこれらの課題を克服し、SDS-PAGE を利用した医療用デバイス表面のタンパク質を簡便・迅速に分別定量するプロセスを確立することを目指した。

2. 研究内容と成果

当該年度では、研究目的を達成するために、上記課題のうち「① 材料表面吸着タンパクの溶液抽出法」について詳細な検討をおこなった。チタン板を研磨及び洗浄した後、 50 mg L^{-1} の牛血清アルブミン (BSA) を含むリン酸緩衝塩類溶液 (PBS) 中に浸漬させ

37℃で30分間保持することで、材料表面にタンパク質を吸着させた。表面吸着タンパク量を全反射フーリエ赤外分光法（ATR-FTIR）で分析した後（図1）、チタン板を濃度0.1～5%のSDS溶液中に浸漬して超音波印加しながら2～30分間保持することで表面吸着タンパク質を溶液中に抽出した。溶液中からチタン板を取出してPBSですすいだ後、ATR-FTIRでチタン板表面に残存するタンパク質を再測定した。抽出前後におけるATR-FTIRのスペクトル面積を比較することで、各条件下におけるタンパク質抽出率を算出した。

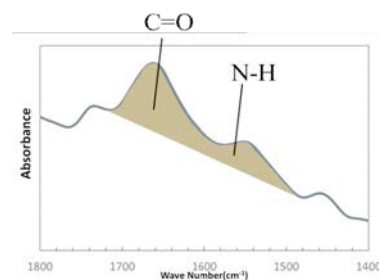


図1．表面吸着タンパクのATR-FTIRスペクトル

まずSDS溶液濃度と抽出率の関係性調べたところ（図2）、抽出時間10分の条件では、SDS濃度の上昇に伴い表面吸着タンパク抽出率が增大し、0.5%溶液を用いることで全吸着タンパク質のうちおよそ80%を溶液中に抽出できることがわかった。しかし0.5%以上濃度のSDS溶液を用いても抽出率に変化はなく、高濃度溶液を用いても完全抽出はできなかった。

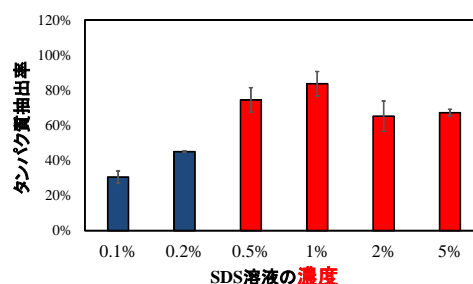


図2．抽出率に及ぼすSDS濃度の影響

次に抽出時間に関する検討をおこなった（図3）。SDS濃度を1%に固定し抽出時間を変えてみたところ、抽出時間2分でおおよそ80%の吸着タンパク質を抽出できることがわかった。しかし抽出時間を増やしても抽出率は増大せず、およそ80%の抽出率を超えることはできなかった。

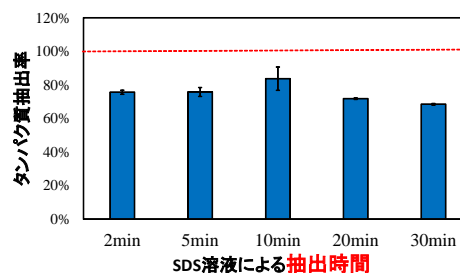


図3．抽出率に及ぼす抽出時間の影響

以上の結果より、濃度0.5%以上のSDS溶液を抽出液として用いることで、チタン表面吸着タンパク質うちおよそ80%抽出できることがわかったが、濃度や抽出時間などのパラメーターを工夫しても、完全抽出できなかった。抽出できないタンパク質は材料表面と直接相互作用しているものに相当すると推察されるが、詳細については次年度以降の検討課題となる。

【研究成果の公表状況】

＜国際・国内会議＞

- ・ 大津直史，沢口肇，黒田健介，材料表面吸着タンパク質の抽出及び分離定量法の検討，日本バイオマテリアル学会シンポジウム，福岡市，平成28年11月21～22日。

光触媒反応表面を有する Ti ナノチューブ上での 高効率骨芽細胞接着

High adhesion rate of osteoblast cells on photocatalytic titania nanotube

研究代表者 小林千悟・愛媛大学大学院・理工学研究科・教授

研究分担者 黒田健介・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

岡野 聡・愛媛大学・工学部等技術部・技術職員

中甕慶太・愛媛大学大学院・理工学研究科・修士 2 年

森 雅之・愛媛大学・工学部・学部 4 年

研究所担当教員 黒田健介・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

超高齢社会となった日本において高齢者の健康維持を図ることは重要課題といえる。高齢者が骨粗しょう症等で骨折した場合、自然治癒が望めないケースが多く、Ti 合金などの金属人工骨を用いた治療が行われている。本研究グループではチタン（ならびにチタン合金）を陽極酸化することによりチタン表面に生成される酸化チタンの光触媒効果に着目し、紫外線照射による光触媒作用によってチタン表面を滅菌・清浄化・超親水性化し、チタン上に細胞接着たんぱく質を吸着しやすくすることによって、骨芽細胞のチタン上への接着を向上させる。さらに、陽極酸化処理時に酸化チタンナノチューブを形成させることにより酸化チタンの表面積を増大させ、光触媒作用による効果を大幅に向上させる。その結果として、チタン上での飛躍的な骨形成能の改善を目指す。まず、今年度はその基礎的研究として、各種生体用チタン合金に対し、酸化チタンナノチューブ形成に及ぼす陽極酸化条件の影響、ならびに骨芽細胞の接着性に及ぼすナノチューブ形態の影響に対する基礎的知見を得ることを目的とした。

2. 研究内容と成果

純チタン、Ti-15Zr-4Nb-4Ta 合金、Ti-6Al-4V ELI 合金に陽極酸化処理を施し、試料表面上に酸化チタンナノチューブを形成させた。そして、陽極酸化条件（印加電圧、時間等）を変化させた際のナノチューブの形態について調査した。さらに、ナノチューブを形成させた Ti-6Al-4V 合金に対し、細胞培養試験を行った。以下に、実験方法と主な結果を記す。各試料を $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ の小片板状に切り出した。これらの板状試料表面を鏡面研磨し、アセトンで 10 分間の超音波洗浄後、エタノール及び純水ですすいで自然乾燥させた。陽極酸化処理の電解液として、 $0.3\text{wt}\% \text{NH}_4\text{F} + 2\text{wt}\% \text{H}_2\text{O} + \text{エチレングリコール}$ の混合溶液を用意し、一定電圧 15~60 V で各試料に 3~10 h の陽極酸化処理を施した。陽極酸化処理後はエタノール中で 10 分間洗浄し、自然乾燥させた。試料表面上に形成された酸化被膜の形状を走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察した。細胞培養試験は、オートクレーブ滅菌を施した試料を、96 ウェルプレートに 1 枚ずつセットし、骨芽細胞様細胞 MC3T3-E1 を $0.2 \times 10^5 \text{ cells/mL}$ の濃度で $100 \mu\text{L}$ 播種し、 37°C 、 $5\% \text{CO}_2$ 湿潤下で 10min~24h インキュベートした。また、各金属板上の細胞数を規格化するために、ウェルプレート上で直接、細胞を培養し同様に観察した。

Fig. 1 に純 Ti 上に形成された酸化被膜を SEM にて観察した結果を示す。径約 100 nm のナノチューブが形成されていることが分かる。また、Fig. 2 に示すように、Ti-15Zr-4Nb-4Ta 合金上においても

同様に、直径約 100 nm のナノチューブが形成されていた。ナノチューブの断面方向からの観察結果から、その厚みは 10 h の陽極酸化処理によって約 30 μm となっていた。純 Ti と Ti-15Zr-4Nb-4Ta 合金上のナノチューブの違いは下の写真から明らかなように、Ti-15Zr-4Nb-4Ta 合金では表面に大きな凹凸が明確にある。このマイクロスケールの凹凸は、合金の内部組織 (α 相と β 相の 2 相組織) と相関があり、 α 相の部分が凹んだ部分に対応し、 β 相の部分が山になった部分に対応していた。Ti-15Zr-4Nb-4Ta 合金のナノチューブ皮膜にマイクロオーダーの凹凸が形成された理由は、合金中の α 相と β 相では組成・結晶構造が異なり、陽極酸化処理においてそれぞれの相の溶解速度に差が生じたためといえる。

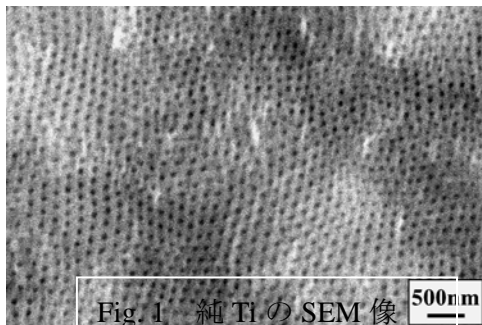


Fig. 1 純 Ti の SEM 像

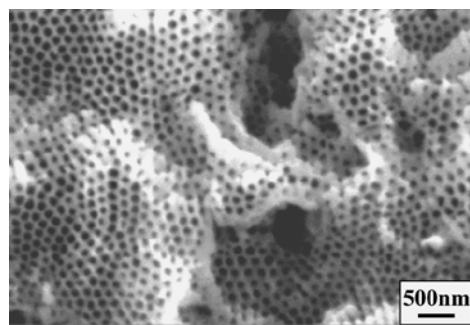


Fig. 2 Ti-15Zr-4Nb-4Ta 合金の SEM 像

Ti-6Al-4V を 15, 30, 45 V でそれぞれ 3 h 陽極酸化し、ナノチューブを形成させた結果、ナノチューブ径は 26, 51, 75 nm と印加電圧の上昇とともに大きくなった。Ti-6Al-4V をバフ研磨まで鏡面研磨した試料ならびにそれらナノチューブを印加電圧 15, 30, 45 V で形成させた試料上で、骨芽細胞を培養した結果を Fig. 3(a)-(d)に示す。これらの結果より、印加電圧が高いほどつまりナノチューブ径が大きいほど細胞数が少なくなった。この傾向は他の Ti 合金においても確認されたが、Ti-6Al-4V 合金ほど悪くはなかった。Ti-6Al-4V 合金の場合、細胞毒性のある V (V 酸化物) が含まれている影響が出ていると考えられる。

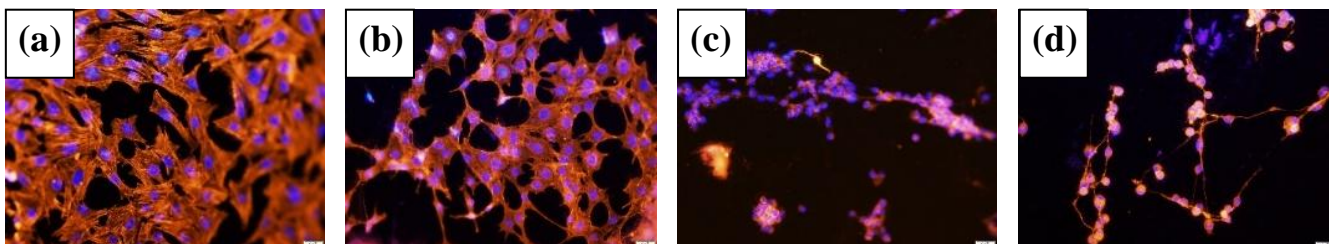


Fig. 3 Ti-6Al-4V 合金上の細胞培養試験結果 (6h 培養) : (a) 鏡面研磨, (b) 15 V 陽極酸化処理, (c) 30 V 陽極酸化処理, (d) 45 V 陽極酸化処理

現在、紫外光を照射して濡れ性を向上させた試料上における細胞培養試験を行っており、それらの研究成果も含めて 9 月に開催予定の国際会議 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS)において、成果報告する予定である。

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- ・ 小林千悟, 細胞接着・伸展性向上のための金属材料表面処理, MES2016 (第 26 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム), 中京大学, 9 月 8 日~9 日.
- ・ 岡野 聡, 中甕慶太, 小林千悟, 黒田健介, 岡本威明, Ti 板上における骨芽細胞及び線維芽細胞の共培養試験, 日本金属学会 第 160 回 春期講演大会, 首都大学東京, 3 月 15 日~17 日.

化学情報学の手法による色素増感太陽電池の設計 Design of dye-sensitized solar cells with chemoinformatics

中田真秀・理化学研究所・情報基盤センター・技師
安田耕二・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

酸化チタンを有機金属色素で増感した太陽電池（色素増感太陽電池、DSSC）は、安価な太陽電池として研究されたが、エネルギー変換効率は 15%程度から進歩していない。発電効率は、色素吸着法や電解質組成など、多数の因子に左右されるため、実験値の比較は簡単でない。溶液中の励起状態から半導体への界面電子移動過程は、近年やっと信頼できる理論解析が可能になった。この研究では、DSSCに関する多数の実験を、化学情報学と理論計算を用い探索し、より効率の良い色素を設計する指針を得る事を目指した。

2. 研究内容と成果

(1) 代表的 Ru 色素、black dye 誘導体の探索

既知の全化合物を網羅した Chemical Abstract Service (CAS)データベースには、1400 個の black dye 誘導体が登録されていた。これら色素分子の CA index name をダウンロードし、それを分子構造の SMILES 線型表現に変換した。次に色素分子のアルキル基をメチル基に変換し、重複分子を除き、電子状態計算をする候補を 650 個決めた。3D 構造を生成し、密度汎関数法(PBE)で、アセトニトリル溶媒[誘電体(PCM)溶媒モデル]中での最安定構造を決めた。次に時間依存密度汎関数法と B3LYP 汎関数を用いて、HOMO エネルギー、一重項励起エネルギー、太陽光エネルギー吸収強度を計算した。Ru 金属錯体は三重項増感剤であり、DSSC では最低三重項状態からも電子注入が起きると言われている。そこで最低三重項状態の安定構造とエネルギーを計算した。先行研究によると、色素の酸化電位と、還元時の再配向エネルギーが、DSSC の効率と相関すると言われている。そこで酸化状態の安定構造も計算し、これらの量も求めた。

今回計算した Ru 錯体は、 $[\text{Ru}(\text{dctpy})]^{2+}$ (dctpy= 4,4'-dicarboxyl-2,2':6',2''-terpyridine)骨格に、種々の配位子や置換基がつく。主な配位子は(a)3NCS⁻, (b)acetylacetone 誘導体+ NCS⁻, (c)4',4''-dicarboxyl- 2,2':6',2''':6'',2''''-quaterpyridine 誘導体+ 2NCS⁻, (d)2-pyrazol-3-yl-pyridine 誘導体 + NCS⁻, (e)2,6-bis [pyrazol- 3-yl] pyridine 誘導体, (f)2,6-bis(pyridin-6-yl)-benzene 誘導体, (g)bipyridine 誘導体 + NCS⁻だった。

配位子は HOMO エネルギーを大きく変えた。配位子の修飾置換基には、thiophene や電子供与基である trimethylamine や carbazole が見られた。thiophene 環の数を増すと太陽光吸収強度は増加するので、吸光係数が小さいという 8 面体型金属錯体の欠点を克服できる。trimethylamine や carbazole は HOMO エネルギーを上昇させるので、これを置換基により最適位置に調整できると分かった。色素還元時の再配向エネルギーは、コンフォメーションで大きく変わる事があり、信頼できる値を得る事が今後の課題である。

(2) 有機色素分子の探索

PubchemQC プロジェクトで計算を進めた。またデータベース構築を行っている。昨年度と比較して、100 万分子の計算が行えた(B3LYP/6-31G*)。計算終了した 1 万分子程度でのデータベース構築を行った。全体で 400 万分子あり、実用に耐えうるデータベースを構築中である。なお、全体で 400 万分子あり、圧縮時 2.5TB、展開すると 10TB を超えるためデータのハンドリング方法が今後の大きな課題となる。

植物に広く含まれる anthocyanin 色素の、DSSC への応用について検討した。CAS データベースから、容易に手に入る anthocyanin, quercetion 誘導体を約 100 個選び、糖鎖などの非共役な置換基を取り除き、Ru 色素と同様に太陽光吸収強度等を計算した。無置換 anthocyanin は HOMO が深すぎ、無置換 quercetion は光吸収が弱すぎた。8 位に共役系を拡張する置換基や電子供与基を導入すると、HOMO エネルギーと光吸収強度が適切な値になる事が分かった。

(3) 色素吸着構造の検討

Black dye は CO₂H 基で表面の Ti 原子に吸着するが、その安定構造は諸説ある。我々は 7 個の black dye 類縁体を選び、安定吸着構造を計算した。溶媒(CH₃CN)の有無が安定度を変えるため、溶媒を PCM モデルなどで表わした。従来報告より安定な構造を系統探索で見つけた。また安定構造は、色素の荷電状態で変化する事、同じ電荷の類縁体は、同じ安定構造をとる事が分かった (論文投稿準備中)。

(4) バンド構造の検討

電子注入には TiO₂ の伝導帯の底の位置(CBM)が、増感色素の LUMO より深い事が必要だと言われてきたが、我々は LUMO ではなく HOMO エネルギー+励起エネルギーと比べるべきと理論的に示した。色素分子や溶媒分子、表面付近のイオン雰囲気は電気二重層を形成し、そのためバンド構造は真空から変化する。我々は 7 種類の black dye 類縁体と、4 種類の安定吸着構造で、電解質中での表面吸着色素のバンド構造を計算した。色素により HOMO エネルギーの値は変化した。各色素で構造による変化は小さかった。また CBM の位置はどの場合でもほぼ同じだった。他方、純溶媒や真空中の計算では、バンド構造は色素の種類や構造でかなり変化した。(1)の black dye 誘導体の結果と組み合わせ、総合的に良い色素を判定する事が、今後の課題である。

(5)ニューラルネットワークによる分子の性質の機械学習

目的物性値を、より簡単な物理量(疎水性、双極子など)で表わす構造型質相関は、昔から使われていた。それに対し、我々は分子構造と目的物性値を直接機械学習させる事を目指した。分子の構造式をグラフと見なし、それを畳みこみニューラルネットで学習させた。分子の発癌性に関する 2 つのデータセットで実験すると、従来法より良い分類能を得た。

【研究成果の公表状況】(12pt ゴシック体)

<原著論文> (11pt 明朝体, Times)

- ・ 著者名 1, 著者名 2, 論文題目, 雑誌名, 巻・号, 頁番号(年-月). (11pt 明朝体, Times)
- ・ David Sulzer, Satoru Iuchi, Koji Yasuda, A New Method To Evaluate Excited States Lifetimes Based on Green's Function: Application to Dye-Sensitized Solar Cells, J. Chem. Theory Comput., 3074–3086 (2016).

<国際・国内会議> (11pt 明朝体, Times)

- ・ 著者名 1, 著者名 2, 論文題目, 会議名, 開催場所, 開催期間. (11pt 明朝体, Times)
- ・ Sulzer David, 井内哲, 安田耕二, Green 関数を用いた表面励起状態の計算法, 分子科学討論会 2016, 神戸ファッションマート, 2016 年 9 月 13 日~15 日.

基礎的多重分析による光触媒の革新的高効率化の検討

Fundamental multi-analysis for the innovative development of highly-efficient photo-catalysts

吉田寿雄・京都大学・人間・環境学研究科・教授
 吉田朋子・大阪市立大学・複合先端研究機構・教授
 熊谷 純・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

酸化チタンの光触媒反応の代表例は水の分解であるが、その素反応を実験的に解析している研究は我々が知る限りあまり例がない。光触媒表面での水の分解において、酸化サイトと還元サイトにおける素反応の理解は、光触媒反応効率を検討する上でとても重要である。本研究では、水を吸着させた酸化チタンを 5.5~20 K にて光照射し、生成ラジカルを ESR 分光法で観測し、生成物を同定して酸化サイトあるいは還元サイトでの素反応について考察したので報告する。

2. 研究内容と成果

大気下 400°C で焼成した本会参照触媒の酸化チタン (JRC TIO-8 アナターゼ型 比表面積 338 m²/g) 550 μmol をヒートガンで加熱しながら 10⁻³ Pa 以下になるまで真空脱気後、H₂O を導入し ESR 測定用スープラジル石英チューブに封緘した。このサンプルを 5.5~20 K で光照射(365 nm)し、ESR スペクトルの測定を行った。

図 1 に生成ラジカルごとのシミュレーションスペクトル及びそれらの和と 100 mol% の実測スペクトルとの比較を示した。正孔がある 3 配位の格子酸素に O₂ が吸着した O_{3c}•⁻-O₂ や、Ti-O•、Ti⁴⁺•••O₂•⁻ の和から構成されるシミュレーションスペクトルは、実測スペクトルを非常によく満足している。O_{3c}•⁻-O₂ と Ti⁴⁺•••O₂•⁻ が含まれていることから、20 K という極低温で光照射をしても、水より酸素が生成していることが示された。一方、既報の氷中の OH ラジカルの ESR スペクトル¹⁾ は実測スペクトルのピーク位置をどれも満足しておらず、OH ラジカルの生成は認められ

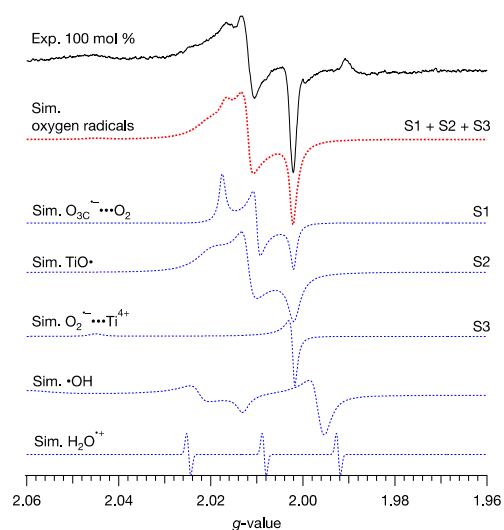


図 1 各酸素ラジカルの和と実測スペクトルとの比較

なかった。また H_2O^+ の信号も観られなかった。従って、酸化チタンの酸化サイトでは水の直接酸化は起こらず、酸化サイトの水の光分解は、今西らによって提案された OH ラジカル生成を伴わない機構を支持するものとなった²⁾。

5.5 K で光照射した吸着濃度 1000 mol% の水 or 重水の入った酸化チタン及び Pt 添加酸化チタンにおいて、水素原子が観測された (表 1)。Pt 添加酸化チタンの場合には生成量は 1.5 倍に増えた。最大傾斜幅を比較すると、 D_2O が吸着している場合には H_2O が吸着している場合の約半分程度になっており、水素原子周りの H と D の核スピンの磁気モーメントの違いによる磁気双極子-双極子相互作用の差が反映されている。従って、水素原子は氷中に捕捉されていると解釈される。また A の実測値がどれも 50.7 mT で周りとの相互作用が極めて小さい水素原子のそれ

表 1 酸化チタン試料中に生じた水素原子の ESR パラメーター

試料	ΔH mT	相対 量	A/ mT
$\text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	0.49	1.0	50.7
$\text{TiO}_2 + \text{D}_2\text{O}$	0.26	1.0	50.7
Pt/ TiO_2 + H_2O	0.47	1.5	50.7

は 50.8 mT であることから、生成した水素原子は酸化チタン表面ではなく氷の中に捕捉されていることを強く示唆している。還元サイトでの H_2 の生成は当たり前であるが、水分解でその起源となる H 原子が観測されたことは我々が知る限り初めてである

一方、Pt 添加酸化チタンにおいては $g = 2.0025$ にシャープなシングレットの信号が観測され、水中に捕捉された水和電子と帰属された。一般に Pt 添加で酸化チタンの還元効率が上昇することは知られているが、還元電子が捕捉電子として観測されたのは我々が知る限りこれが初めてである。

1) G. H. Dibdin, *Trans. Faraday Soc.*, **63** 2098 (1967).

2) A. Imanishi, T. Okamura, N. Ohashi, R. Nakamura, Y. Nakato, *J. Am. Chem. Soc.* **129**, 11569 (2007).

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- T. Yoshida, Y. Minoura, Y. Nakano, M. Yamamoto, S. Yagi and H. Yoshida, XAFS study on a photodeposition process of Pt nanoparticles on TiO_2 photocatalyst, *J. Phys: Conference Series*, vol. 712 (2016) 012076 (4 pages).

<国際・国内会議>

- T. Yoshida, S. Niimi, M. Yamamoto, S. Muto and S. Yagi, Chemical and electronic state analysis of nitrogen implanted TiO_2 photocatalysts (Invited), International Symposium on Nanostructured Photocatalysts and Catalysts, 10 April, 2016, Osaka University, Japan
- 熊谷 純・澤井 健・吉田朋子・吉田寿雄, 第 118 触媒討論会, 岩手大学, 2016 年 9 月 21 日~23 日

放射線で誘導される分泌因子の正常及び腫瘍細胞種への影響研究 Effects of secreted factors for several normal and carcinoma cell species induced by ionizing radiation

菓子野元郎・大分大学・医学部・准教授

熊谷 純・未来研・准教授

熊谷 純・名古屋大学・未来研・准教授

1. 研究目的

照射細胞からの分泌因子が非照射細胞へどのような影響を与えるのか、細胞種の組み合わせを種々検討し、非照射細胞の放射線抵抗性又は放射線感受性獲得のメカニズムの解明し、放射線治療の質の向上並びに長期有人宇宙飛行に向けた正常細胞の放射線抵抗性獲得への道を探ることを目的とする

2. 研究内容と成果

幹細胞として hiMSC (ヒト不死化間葉系幹細胞), 正常細胞として BJ/hTERT (ヒト TERT 遺伝子発現ヒト繊維芽細胞), がん細胞として H1299 (ヒト非小肺がん細胞) と野生型 p53 遺伝子を発現させた H1299wt/p53, 分泌因子を放出する被曝ドナー細胞の培地を未被曝のレシピエント細胞に移し, レシピエント側の細胞内酸化度を長寿命ラジカルで評価した. また, C6 (ラットグリオーマ細胞), RNB (ラットアストロサイト (非腫瘍) 細胞) を用い, 分泌因子の網羅解析と生存率との関係を調べた.

ドナーが幹細胞でレシピエントが正常およびがん細胞の場合, ドナーへの線量が 0.2 Gy の場合において 20%長寿命ラジカルレベルが下がった. ドナーががん細胞の場合も, レシピエントのがん細胞内で 20%長寿命ラジカルレベルが下がったが, 4 Gy では 10%程の有意

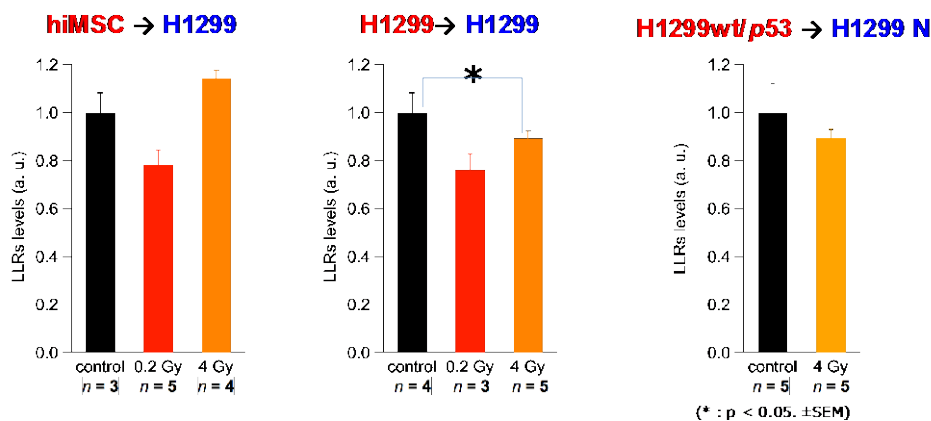


図1 照射ドナー細胞(赤)の培地を未照射のレシピエント細胞に移動して24時間経過後のレシピエント細胞中の長寿命ラジカル(LLRs: Long-Lived Radicals)レベル.

な減少となった。一方、p53 が発現しているがん細胞がドナーの場合には、長寿命ラジカルレベルの有意な減少は見られなかった(図 1)。γ線照射された幹細胞・正常細胞・がん細胞・p53 発現がん細胞が分泌するエクソソームのサイズ分布を測定した結果、どの細胞においても 0.2 Gy で Control とは異なる分布を示し、正常細胞とがん細胞においては未照射時より少し小さい 90 nm 程度のエクソソームの分布が増える傾向が見られた。また、がん細胞においては線量が 4, 6 Gy とあがるにつれて、全体の分泌量が 2 倍以上に増えたが、p53 の発現しているがん細胞においては、分布の変動は見られるものの、分泌量はコントロールと同程度であった。エクソソームの分布と長寿命ラジカルレベルとの間の直接の因果関係はまだわからないが、低線量放射線によって未照射時とは異なる成分(miRNA, mRNA, cytokines, 等々)を含むエクソソームが、レシピエント細胞に取り込まれて細胞の抗酸化性を上昇させる遺伝子を発現させ、長寿命ラジカルレベルが下がったと推察される。細胞内の抗酸化性の上昇は放射線抵抗性獲得の一面と言え、分泌因子による放射線適応応答が起こったものと思われる。

C6 と RNB を γ線照射し、培養上清中の 24 種のサイトカイン量を調べると、放射線により顕著に誘導されるのは IL-6 のみで、C6 細胞では照射後 48, 72 時間により顕著な IL-6 の誘導が見られた。放射線照射時に IL-6 を添加している場合、C6 細胞においては有意な生存率の向上が見られ細胞内酸化度もミトコンドリア内活性酸素量も有意に低下した。一方、RNB 細胞においてはそのような低下は見られなかった、この結果は、C6 細胞においては IL-6 を受け取ることにより細胞内の抗酸化力を高める機能亢進がおり、放射線抵抗性を獲得している。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- Yuri Tamari, Genro Kashino, Hirom Mori, Acquisition of radioresistance by IL-6 treatment is caused by suppression of oxidative stress derived from mitochondria after γ-irradiation, *J. Radiat. Res.* **84** pp.1-9 (2017)

<国際・国内会議>

- Jun Kumagai, Akane Oohashi, Genro Kashino, Radiation-Induced Bystander Effect of Normal, Cancer, and Stem Cells as Studied by Long-Lived Radicals, Hiroshima International Workshop on Circular Dichroism Spectroscopy 2017 -Application to Imaging Microscopy and Radiation Biology-, Hiroshima Univ., 2017.2.28, Invited Lecture.
- 大橋茜音, 菓子野元郎, 熊谷 純, 長寿命ラジカル発現レベルを下げる H1299 細胞の培地移動放射線バイスタンダー効果, 日本放射線影響学会第 59 回大会, 広島市 JMS アステールプラザ, 2016 年 10 月 26 日~28 日.
- 菓子野元郎, がん細胞の放射線感受性に影響する環境因子の解明, 日本放射線影響学会第 59 回大会, 広島市 JMS アステールプラザ, 2016 年 10 月 26 日~28 日.

交通 IC カードを用いた公共交通ネットワークにおける乗客行動分析 Behavioural Analysis on Transit Network Using Smartcard Data

倉内文孝・岐阜大学・工学部・教授

Amr Mohamed Whaballa・名古屋大学

・未来材料・システム研究所・外国人研究者

山本俊行・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

近年は Toica など交通系 IC カードの普及が進み、それらを通じて少なくとも改札を通過した駅及びその時間を自動的に収集することが可能である。本研究では、交通系 IC カードデータを活用し、乗客の公共交通ネットワーク上における経路選択行動の分析とモデル化をめざし、特にプラットフォーム上での待ち時間の分布を推定する方法論を開発する。提案した手法は経路選択行動規範の妥当性検証などに活用可能である。

2. 研究内容と成果

ロンドン Oystercard のデータを活用し、地下鉄トリップに関する徒歩時間およびプラットフォームでの待ち時間の分布の推定を試みた。観測されているのは乗車駅/降車駅の改札口間の所要時間のみである。基本的なケースとして乗り換えを含まない行動について検討する。この場合、観測された時間は、「乗車駅での改札からプラットフォームまでの徒歩時間」、「プラットフォームでの待ち時間」、「乗車時間」、「降車駅でのプラットフォームから改札までの徒歩時間」の合計となる（図 1 参照）。ここで、TfL（ロンドン交通局）が公表している Performance Report に基づき、改札からのプラットフォームまでの徒歩時間、および乗車時間について平均および分散を設定し、さらにそれらについて正規分布を仮定することとして、プラットフォームでの待ち時間分布の推定を試みた。まずは、待ち時間分布についてアーラン分布を仮定しパラメータ推定を試みたところ、3つの駅間ペア（Cockfoster, Oakwood および Southgate から Acton Town へ）について、アーラン次数が 0.677, 1.069, 0.933 と 1 に近い値をとった。そのため、改めて待ち時間分布を指数分布（=アーラン次数 1 の分布）と仮定し、Stochastic Frontier Model の考え方を援用してパラメータ推定を行った。この際には、改札からプラットフォームまでの所要時間分布の位置パラメータについても同時に推定可能である。ここでは、表 1 に示すように、独立変数を「徒歩時間+乗車時間」の一つとした場合、および「乗車時間」と「徒歩時間」の2つとした場合、そして誤差項の分散をあらかじめ与えた場合と推定する場合の4つのモデルを推定した。表 1 にモデルタイプと推定結果からえた BIC 値を、さらに最も BIC 値が小さい Model 3 について Oakwood における改札間所要時間（gate-to-gate travel time, gtgt）の観測値と推定値の差を図 2 に示す。図からも確認でき

るように, $gtgt$ は精度よく推定されており, 決定係数は 0.972 であった.

3. 結論と展望

本研究ではパフォーマンスレポートとスマートカードデータを用いて所要時間の要素分布を推定する方法を提案した.

Oyster card データを用いてモデルを推定し, その推定結果からモデルの妥当性を検証した.

提案手法では, 乗車時間と徒歩時間に分散があることを考慮し, プラットフォーム上での待ち時間分布を推定した. 乗車時間と徒歩時間は正規分布に従うとし, 待ち時間はアーラン分布あるいは指数分布とした. 推定の結果, 待ち時間の平均値は列車の車頭時間分布より小さいが 1/2 よりは大かった. このことは, 伝統的な乗客配分モデルで仮定されている指数分布よりは等間隔での到着を仮定する方が現実的なことを示唆している. 今後えられたモデルを乗り継ぎが生じる場合に拡張し, これらの推定結果を表現できる経路選択モデルを構築するとともに, 新たな乗客配分モデルの開発を行う予定である.

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- Wahaballa, Amr M., Kurauchi, F., Yamamoto, T. and Schmöcker, J-D., “Estimation of Platform Waiting Time Distribution Considering Service Reliability Using Smart Card Data and Performance Reports”, Journal of Transportation Research Board, 2017 (登載決定)

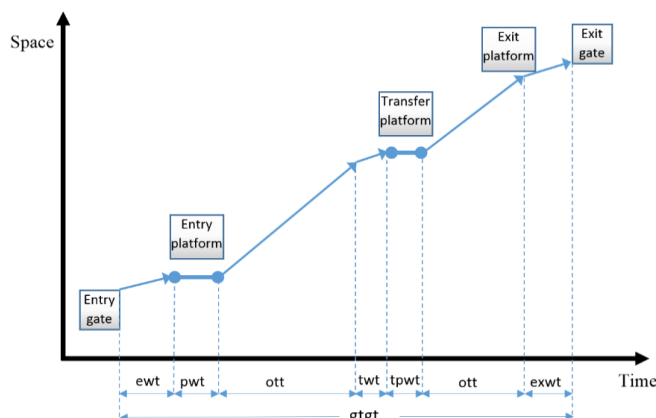


図1 鉄道移動における時間要素 (乗り換え1回)

表1 モデルタイプと BIC (Oakwood)

パラメータ	Input noise error (v_i) as $\sigma_{v_i}^2 = \sigma_{ewti}^2 + \sigma_{ott}^2 + \sigma_{exwti}^2$	Estimating noise error (v_i)
One independent variable $X_i = ewt_i + ott_i + exwt_i$	Model 1 (3439.37)	Model 2 (3449.78)
Separate independent variables $X1_i = ott_i$ $X2_i = ewt_i + exwt_i$	Model 3 (3350.10)	Model 4 (3379.68)

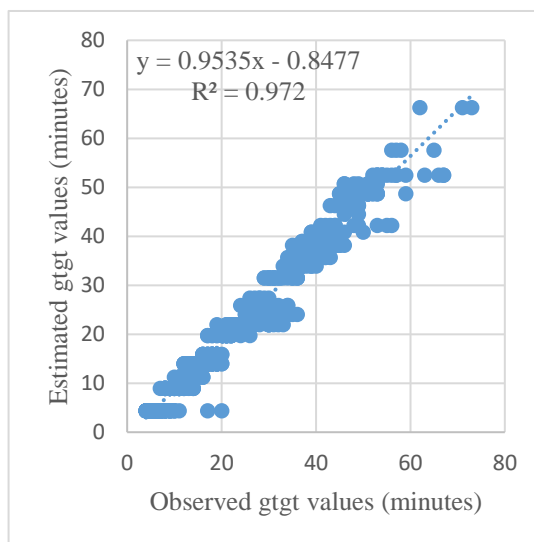


図2 観測値と推定値の関係

車両燃費向上と環境負荷削減のための交差点における協調的速度調整誘導システムデザイン

Intersection Cooperative Adaptive Speed Guidance System Design for Vehicle Energy Saving and Traffic Emission Reduction

劉鋈・大連理工大学・交通運輸学院・准教授
王東磊・大連理工大学・交通運輸学院・大学院生
張健・大連理工大学・交通運輸学院・大学院生
山本俊行・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

Variations in vehicle energy consumption and traffic emissions are usually related to changes in cruise speeds and driver acceleration aggressiveness. Based on vehicle-to-infrastructure communication, speed guidance becomes a kind of novel control technologies for reducing energy consumptions and emissions. This research quantifies the effectiveness of various speed guidance strategies and analyzes the influence of driver's bounded rationality.

2. 研究内容と成果

- In order to explore the strategy reducing emissions and energy consumptions, microscopic traffic simulation software VISSIM and an additionally developed component were used to realize simulation environment under the speed guidance strategy and through the collected driving characteristic data and microscopic emission model MOVES, energy consumption and emission could be estimated. For the experimental results, the comprehensive index of generalized cost was applied to evaluate the effect.
- Taking advantage of vehicle's spatial and temporal trajectories and corresponding signal timing parameters, speed guidance strategy could be provided to drivers for going through the intersection smartly. As a case study, the intersection at Lianhe Road crossing Changjiang Road in Dalian, China, was selected for evaluation. Four driving behaviors under green wave speed guidance strategy were compared. It is found that acceleration behaviors cause much more emissions and energy consumptions. In order to avoid this situation, a low emission oriented speed guidance strategy was proposed through introducing fuzzy speed control into the acceleration speed guidance. Results show that compared with green wave one, traffic emissions and energy consumptions decrease by 3%~5% with the proposed speed guidance strategy in the middle traffic volume. It is proved that the low emission oriented speed guidance strategy plays a positive role on reducing emissions.

- Furthermore, a speed guidance model was proposed in order to explore the influences of the driver's bounded rationality on the vehicle's fuel consumption and emissions during the whole process of the vehicle passing through the signalized intersection. In the proposed speed guidance model, we apply three parameters (i.e., the response time, acceptance threshold value and execution level) to quantify the driver's bounded rationality. In the numerical tests, we use the signalized intersection (consisting of the Xinan Road and the Wuyi Road in Dalian, China) as the simulation scenario, VISSIM to describe the vehicle's movement and the MOVES (motor vehicle emission simulator) to explore the vehicle's fuel consumption and emissions. The numerical results show that the driver's bounded rationality has prominent effects on the vehicle's fuel consumption and emissions, but the impacts are directly dependent on each parameter of the driver's bounded rationality.

【研究成果の公表状況】

- Wang D., Liu K.* and Ando R. Low Emission Oriented Speed Guidance Strategy at Intersection, Transport Research, 2016, 2(1):31-37. (in Chinese)
- Tang T.Q., Zhang J. and Liu K.* A speed guidance model accounting for the driver's bounded rationality at a signalized intersection, Physica A, 2017, 473:45-52.

<国際・国内会議>

- None

<産業財産権>

- None

(注) 別紙様式 2-1 は A 4 サイズ 1 頁に、別紙様式 2-2 は図表等を含めて A 4 サイズ 2 頁になるようにしてください。

数値気象予報モデルと衛星画像を用いた数時間先の日射予測手法の開発

Development of Several Hours-Ahead Forecasting of Irradiance using Numerical Weather Prediction Model and Satellite Images

宇野史睦・産業技術総合研究所・太陽光発電研究センター・特別研究員
舟橋俊久・名古屋大学・未来材料・システム研究所・客員教授
加藤丈佳・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

革新的省エネに資する太陽光発電の有効活用のためには、高精度の予測手法の利用が不可欠である。数時間先の予測は気象衛星画像の利用が有効であり、観測時刻の異なる2つの衛星画像から算定した雲の移動ベクトルに基づく予測手法が提案されている。しかし、予測の高精度化のためには、大気場等に影響される移動ベクトルの分布や、雲の発達/消滅や大きな雲の縁辺部の複雑な動きを把握し、予測への反映が不可欠である。

本研究は、気象学的なアプローチによる衛星画像利用手法の高度化により、数値気象予報 (NWP) モデルと衛星画像を用いた数時間先の日射予測手法の高精度化を目指す。

2. 研究内容と成果

2. 1 NWP モデルと衛星画像を用いた日射予測手法の構築

名古屋大学で開発された、気象庁によるメソスケールの数値気象予報モデル (MSM-GPV) の上・中・低層の雲量と大気外日射強度を説明変数とする重回帰式によって空間平均日射強度を予測する手法がある (手法1)。本研究は、上記の GPV の予報値に加え、MTSAT-2 の可視画像から得られる太陽光反射強度を用いる手法2, 中心波長 $11\mu\text{m}$ (バンド14) と中心波長 $12\mu\text{m}$ (バンド15) の赤外画像の輝度温度差を用いる手法3を新たに構築した。予測の初期時刻は8時, 対象時間帯は9時~14時とし, 初期値6:00のMSM-GPVを用いた。

衛星画像を利用した予測値は, 図1に示すように, まず, 7:30の画像において選択した小領域 ($125\text{px} \times 125\text{px}$) について予測初期時刻におけるMSM-GPVの風速の初期値の空間平均値を算定し, これに基づき小領域の1時間後の移動先を算定し, 移動先における1時間後の風速の予測値に基づき2時間後の移動先を算定する。これを繰り返して小領域が予測対象エリアに到

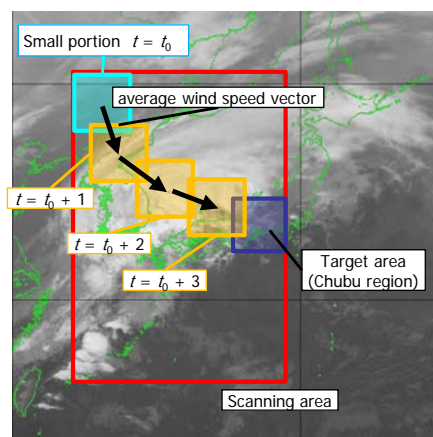


図1 衛星画像情報予測の概念図

達するか否かを判別する。その際、バンド 14 の小領域内の輝度温度の空間平均値と同程度の温度が予測された MSM-GPV の気圧面における風速を用いた。そして、予測対象エリアに到達した小領域の予測初期時刻の画像を上述の予測手法に用いた。なお、小領域の一部でも予測対象エリアに重なれば到達と判定し、到達面積に応じた加重平均によって予測実施時刻の画像を用いた。

予測対象は 2013 年に中部地域内 58 地点で観測された水平面全天日射強度(1 時間値)の戸建住宅数による加重平均値とした。

2. 2 予測結果

4 月 24 日～30 日の予測結果を図 2 に示す。快晴日の 4 月 25 日の場合、MSM-GPV は雲量を過大に予測しており、手法 1 の予測値は実測値よりも小さいが、手法 2 および 3 では雲が存在しないという衛星画像情報を加えることで予測誤差が低減した。晴天日について、手法 1～3 の日平均絶対誤差が最小となった日数を算定した結果、それぞれ 55 日、109 日、101 日であり、晴天日では衛星画像情報を加えることで予測誤差を削減できる日が多いことが確認できた。その結果、月別の平均絶対誤差についても、衛星画像情報を加えることで数%改善された。一方、曇天日は各手法において誤差が最小となった日数はそれぞれ 17 日、26 日、31 日であり、衛星画像情報が有効な日の割合は晴天日より少ない。また、日射強度が数時間で数十%も変動するランプ変動日においては、衛星画像情報の効果は小さかった。これは、上述のような小領域の移動に基づく画像情報の予測手法の場合、大きな雲の移動を適切に予測できないためと考えられる。

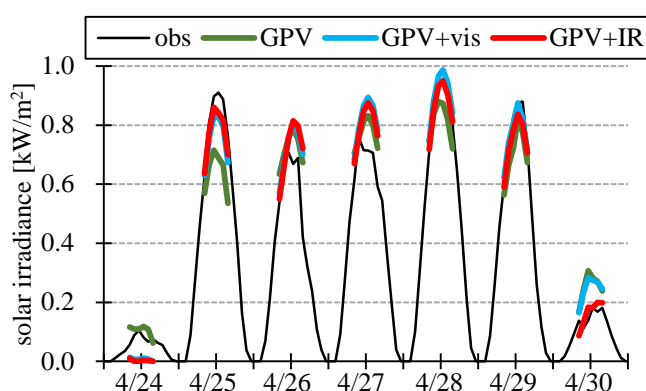


図 2 予測結果の一例(2013 年 4 月 24 日～31 日)

今後は、ランプ変動日の予測精度向上に着目し、i) 広域の雲分布や気圧配置に基づくランプ変動が発生する可能性が高い日の抽出方法を構築し、ii) 予測対象エリア周辺の気圧配置や前線の位置を考慮してランプ変動日が発生する可能性が高い日に特化した雲移動速度の推定手法を構築する。これらの手法を今年度の予測手法に適用し、ランプ変動日における予測精度の向上を図る。

【研究成果の公表状況】

- ・ 榎本隼也, 栗本宗明, 真鍋勇介, 舟橋俊久, 加藤丈佳: 「数値気象予報モデルに基づく数時間先の空間平均日射予測への衛星画像情報の追加の効果」, 平成 29 年電気学会全国大会, 富山大学, 2017 年 3 月 15 日～17 日

インターネットを介した分散電源群の相互協調制御に関する実験的検討

Experimental Study on Remote Control of Distributed Generators using Internet Network

青木 睦・名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
 舟橋俊久・名古屋大学・未来材料・システム研究所・客員教授
 加藤丈佳・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

革新的省エネの実現には、大量導入される太陽光発電の有効活用が不可欠であり、配電システムの電圧上昇等に伴う太陽光発電の出力抑制の回避が重要である。急激な負荷の増減に伴い電圧が大きく変動する際にも、機器間で電圧制御が干渉することなく適切に電圧を維持するため、通信ネットワークを利用した複数機器間の相互協調制御が提案されている。計算機シミュレーションによる検討が主体の中、本研究では、実際のインターネット回線と分散電源等を利用し、実験的に相互協調制御を検討する。その第一段階として、本年度はインターネットを介した PHIL (Power hardware in-the-loop) 実験環境を構築し、相互協調制御の実験的検討における実用上の課題整理を目的として実施した。

2. 研究内容と成果

2. 1 インターネットを利用した PHIL 実験環境の構築

電力機器の新しい制御手法等を実機にて試験するため、電力システムを実時間で演算できるリアルタイムシミュレータ(以下 RTS)にアンプを介して実機を接続する PHIL テストが用いられる。本研究では、図 1 に示すように、名古屋工業大学(名工大)の RTS と名古屋大学(名大)の負荷設備とをインターネットを介して接続した PHIL の実験環境を構築した。名工大側の RTS 内には、電圧源、配電線、負荷 A、名大側の負荷 B に対応する電流源から構成される 6600V の電力システムを模擬した。電流源の指令値は名大側の実機の負荷 B に流れる電流値によって制御される。この電流源の端子電圧(B 点)はインターネットを介して名大側に送信され、パワーアンプの電圧指令値となる。

インターネットを介さない通常の PHIL では、RTS とパワーアンプ間はアナログの電圧・電

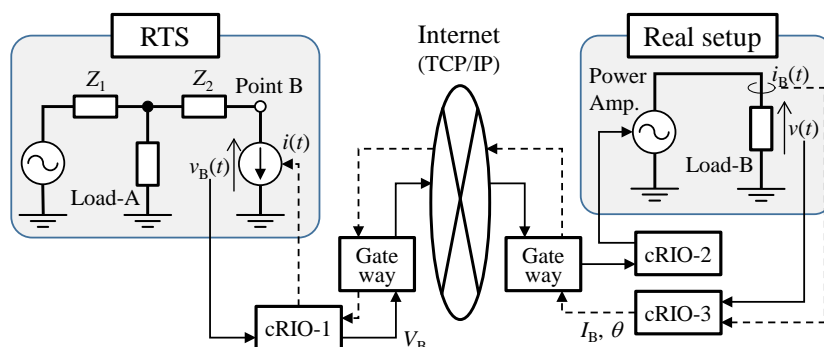


図 1 インターネットを利用した PHIL 実験環境

流波形信号（瞬時値）が送受信される。今回は、通信負荷低減のため、National Instruments(NI)社製 Compact RIO (cRIO)を用いて、1ms 毎に最新の 16ms のデータを用いて実効値を算出し、10 ms 毎に送信することとした。また、受信側も 10ms 毎に指令値を更新することとした。通信プロトコルには、データ通信の信頼性を重視し、エラーチェックやフロー制御を行う TCP/IP を用いた。なお、名工大側の cRIO-1 から RTS に出力するアナログ電流波形と RTS 内電流源の電圧波形との位相差は名大側から送信された位相差情報に基づき設定した。その際、離散的に送信される位相差情報による位相跳躍を避けるため、更新された位相差を徐々に反映させる PI 制御を適用した。

2. 2 実行結果及びデータ通信時間の分析

名工大側の RTS 内に模擬する電力系統の定格電圧は 6600V, 負荷 B として 660kVA (力率 0.7)のインピーダンス負荷を想定した。一方、名大側では、定格電圧 200V のパワーアンプと、1kVA(力率 0.7)の負荷 B を用いた。実機の試験環境は利用可能な電源、負荷の容量に限られるため、名大側の実機の負荷は、RTS 内に模擬した負荷に対して 660 分の 1 にスケールダウンした負荷を扱っている。

RTS 内の電圧源において残存電圧 20%の瞬時電圧低下を模擬した際に RTS から出力される B 点における U 相の相電圧、RTS にフィードバックされる負荷 B の U 相電流の時間変化を図 2 に示す。電圧低下の発生直後において電流源の電流値は初期値のままであるが、RTS 内の電圧源の電圧低下との整合するため、電圧位相が変化している。その後、上述のデータ送信(10ms 毎)、受信側の確認応答(50ms 毎)を経て、名大側アンプの電圧が低下し、これに伴う電流値の減少が名工大側にフィードバックされ、電圧低下から約 100ms 後に電流値が低下した。その 50ms 後にも再度電流値が低下した後、PI 制御による位相調整を経て、電圧低下から約 180ms 後に RTS 内の電流源における電流・電圧値が概ね適正な値となった。このように、インターネットを介した PHIL 実験環境の動作を確認できた。

今後、通信プロトコルを UDP に変更するとともに、位相差情報を反映する PI 制御等を見直し、インターネットを介した PHIL の実験環境としての実用性を高める予定である。

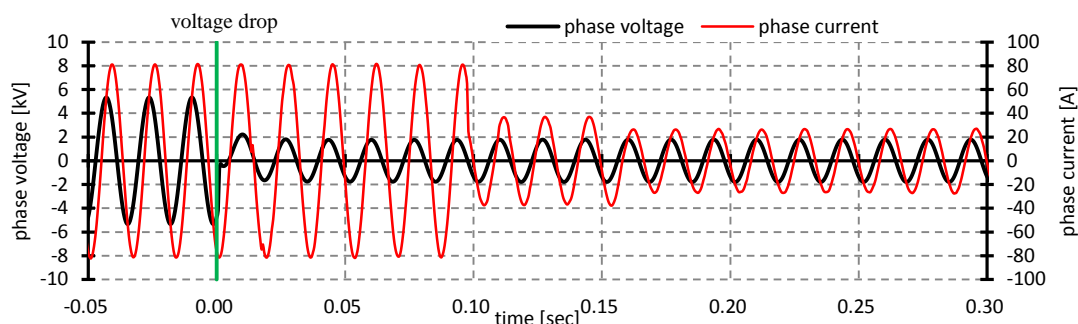


図 2 負荷 B を模擬した RTS 内電流源における電流・電圧波形

【研究成果の公表状況】

- ・ 玉越祐作, 栗本宗明, 真鍋勇介, 舟橋俊久, 加藤丈佳, 光成真, 青木睦:「インターネットを利用した PHIL におけるデータ処理時間に関する一検討」, 平成 29 年電気学会全国大会(6-096), 富山大学, 2017 年 3 月 15 日~17 日

和文共同利用・共同研究課題名 (14pt ゴシック体)

Project Title in English: (12pt Times)

小迫雅裕・九州工業大学 ・工学研究院 ・准教授
村上義信・豊橋技術科学大学・工学研究科 ・准教授
栗本宗明・名古屋大学 ・工学研究科 ・助 教
舟橋俊久・名古屋大学・未来材料システム研究所・教 授
加藤丈佳・名古屋大学・未来材料システム研究所・教 授

1. 研究目的 (12pt ゴシック体)

大電力の発生・流通・制御・使用の要となる、電力用発電機やガス絶縁開閉機器 (GIS) などの電力機器において、機器の信頼性、小型化、省エネルギー性、効率等を実質的に大きく左右するのは、機器の電気絶縁性能である。従来は、エポキシ樹脂に、たとえば大きさが数～数 100 μm といった大きな粒径のシリカ (SiO_2) やアルミナ (Al_2O_3) などの無機フィラーを充填した複合体 (コンポジット) を絶縁材料として用いていた。本研究では、充填する無機フィラーを、その径又は内部構造が 0.1 μm 以下と非常に小さいナノ構造フィラーとした機能性ナノコンポジットの基礎研究を行い、従来レベルを超える電気絶縁性を有する絶縁材料創出に目途を付ける。

2. 研究内容と成果 (12pt ゴシック体)

ナノ構造フィラーとして、平均粒径 100 nm、粒子空孔率 50~70 vol% の中空シリカナノ粒子を用いた。これをエポキシ樹脂に対して 16 vol% 充填したエポキシ/中空シリカナノコンポジットを名古屋大学内設備で作製し、その誘電率と交流絶縁破壊強度を評価した。主な成果は以下の通りである。

- ・エポキシ/中空シリカナノコンポジットは、従来材料であるエポキシ/シリカマイクロコンポジットや無充填エポキシ樹脂の比誘電率よりも低いことがわかった (図 1)。これは粒子内部の空孔として気体 ($\epsilon_r=1.0$) が残存した効果と考えられる。
- ・エポキシ/中空シリカナノコンポジットとエポキシ/シリカマイクロコンポジットの交流絶縁破壊強度は、無充填エポキシ樹脂よりも低いことがわかった。これは、充填粒子と樹脂の間の界面が絶縁上の欠陥となるためと考えられる。また、エポキシ/中空シリカナノコンポジットとエポキシ/シリカマイクロコンポジットの交流絶縁破壊強度を比較すると同程度であることがわかった。

以上より、ナノ構造フィラーとして中空シリカナノ粒子を用いたナノコンポジットは、従来材料より低誘電率な絶縁材料であり、従来材料と同等の交流絶縁破壊強度を有する可能性が示された。今後は、誘電率と絶縁破壊強度のフィラー充填率依存性を取得するとともにさらに多くの電気絶縁特性を評価していく予定である。

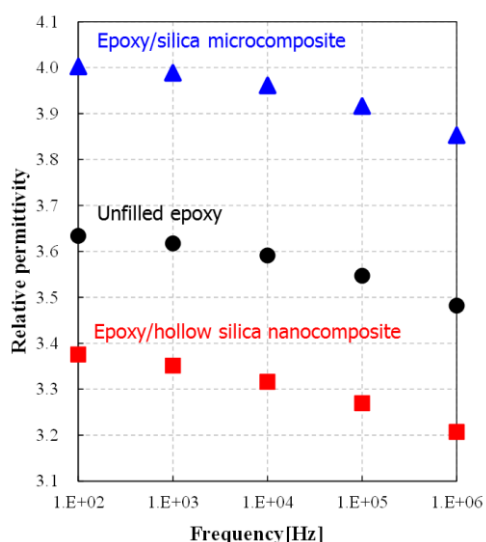


図 1. 誘電率の周波数依存性

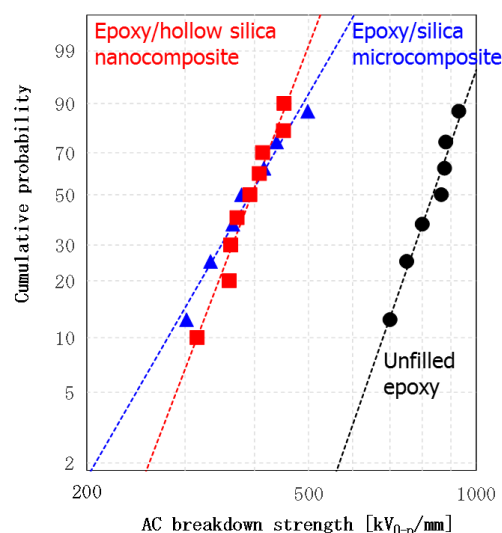


図 2. 交流絶縁破壊強度

【研究成果の公表状況】 (12pt ゴシック体)

<原著論文> (11pt 明朝体, Times)

- ・ 吉田, 栗本, 舟橋, 加藤, 村上, 川島, 鈴置, エポキシ/中空シリカナノコンポジットの交流絶縁破壊特性, H29 電気学会全国大会講演論文集, No.2-064, 頁番号未定 (2017)

<国際・国内会議> (11pt 明朝体, Times)

- ・ 吉田, 栗本, 真鍋, 舟橋, 加藤, 鈴置, ナノ中空シリカ/エポキシコンポジットの低誘電率特性, 電気学会研究会 誘電・絶縁材料研究会, 名古屋駅ウィングあいち, 2016年12月19日

(注) 別紙様式 2-1 は A4 サイズ 1 頁に、別紙様式 2-2 は図表等を含めて A4 サイズ 2 頁になるようにしてください。

**革新的なバイオマスエネルギー導入に伴う
環境・健康影響評価およびシステム最適化の手法開発**
Development of Method for Environmental & Health Impact Assessment and
Optimizing System by Introducing Innovative Biomass Energy

伊東英幸・日本大学理工学部・交通システム工学科・准教授
大場真・国立環境研究所・社会環境システム研究センター・主任研究員
(名古屋大学未来材料・システム研究所・客員准教授)
藤井実・国立環境研究所・社会環境システム研究センター・主任研究員
林希一郎・名古屋大学未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

東日本大震災以降、エネルギー供給安定化や地球温暖化対策としての再生可能エネルギーのさらなる利用に関心が高まっているが、被災地におけるバイオマス利用促進は一方で土地利用と除染の問題、エネルギーシステムの最適化問題、環境汚染物質の排出と気候変動、生態系・健康影響が懸念される。従って現在バイオマス利用に伴う様々な種類の影響を俯瞰的に評価し、異なる領域間のトレードオフを考慮し、適切な利用シナリオ、システム、対策が選択可能である評価手法が必要とされている。

そこで本研究では、革新的なバイオマスエネルギー導入に伴う、環境や健康への影響評価を含めた、システム最適化・効果評価・影響評価の手法開発に向けて以下の3つの観点から研究を実施した。

- 1) バイオマスの生産から加工・エネルギー利用や建築利用などのモデル、再生可能エネルギーの最適利用を含む産業共生システムの開発。今年度はポテンシャル評価とシミュレーションの試行。
- 2) バイオマス利用、土地利用変化などに伴う健康影響評価。今年度は地理的データの収集と分析。
- 3) 将来の土地利用シナリオの開発に向けて、現在の土地利用に関するデータベースを構築するとともに、土地利用や交通網の変化を考慮した生物多様性・生態系への影響評価。今年度は予備的データを収集およびモデルによる現状分析。

2. 研究内容と成果

2. 1 バイオマスの高効率利用に関する検討（藤井）

バイオマスとして木材を採り上げ、その効率的なエネルギー利用について検討する。木材は固体の燃料であるため、自動車などの移動媒体で利用することは、基本的に難しい。固定的な施設での利用が主となるが、発電するケースと熱供給するケースが存在す

るため、効率性の比較を行い辛い。ここでは幾つかの異なる技術システムを利用して、発電する場合はヒートポンプを利用して熱に変換することを想定し、熱供給（給湯）するケースに基準を揃えて、効率性の比較を行う。

熱供給方法としてシンプルなのは、木材を燃焼させてボイラーで温水を製造するケースである。直接温水を製造する場合、温水を遠距離輸送することは、配管の敷設費用や放熱、ポンプ動力の観点で不利なため、需要に近接した場所に設置することになる。ボイラーで蒸気を製造し、タービンを回して発電するケースでは、この電力を利用してヒートポンプを駆動し、遠隔地でも温水を製造することができる。一般にバイオマスのみを燃焼させる発電所は小規模で、発電効率が低いのが難点である。ただし、小規模であるため熱需要先に近接した形で立地させやすいため、発電の排熱を利用して温水供給を行うこともできる。大規模に利用するケースとしては、石炭火力発電所で混焼するケースが想定される。微粉炭ボイラーで混焼するケースや、次世代石炭火力発電である、石炭ガス化複合発電（IGCC）で石炭と併用するケースが挙げられる。それぞれのケースにおける熱効率の概算値を表 1 に示す。小規模分散的な利用（No. 1～3）と大規模利用（No. 5, 6）では効率が最大で 2 倍強異なることになるが、小規模でもコージェネレーションができれば、それほど差は生じない可能性がある（No. 3）。ただし、本試算では給湯を想定して成績係数（COP）を 3.5 に設定しているが、暖房程度の温度であれば COP はより大きな数値になり、小規模分散と大規模利用との性能差は拡大する。

表 1 バイオマス利用システムの効率（温水供給のケース）

No.	技術システム	概算熱効率*1
1	バイオマスボイラー	80%
2	バイオマス専焼発電（20%）＋ヒートポンプ（COP=3.5）	70%
3	バイオマス専焼発電（18%）＋コージェネ（地域熱供給）	120% *2
4	石炭火力混焼発電＋ヒートポンプ（COP=3.5）	140%
5	IGCC での利用＋ヒートポンプ（COP=3.5）	160%

*1 文献 1, 2 等を参考に筆者算定。

*2 発電分をヒートポンプ（COP=3.5）で熱に変換したと仮定して、熱効率に換算した。

今後の課題として、バイオマスを小規模に利用するケースとして、ガス化してエンジンを駆動し、発電やコージェネレーションを行うケースなど、技術の選択肢を広げて評価を行う。また、大規模施設で利用するほど、木材を広域から集約する必要があり、国産バイオマスの輸送コストが増加することになる（輸入木材の場合は大規模施設ほど有利となり得る）一方、木材利用量当たりの設備費の面では有利になる可能性があり、このトレードオフに関する調査が必要である。

参考文献

- 1) 久保山裕史, 木質バイオマス利用の現状と課題, グリーン・エージ 35(2), 9-13, 2008
- 2) 森竜一ほか, バイオマス燃料を活用したハイブリッド型石炭 IGCC システムの性能とコスト分析, エネルギー・資源, 34 (4), 27-33, 2013

2. 2 バイオマス利用、土地利用変化などに伴う健康影響評価

対象地域として仙台市と名古屋市を選択し、都市内緑地を推定した。2 時期の衛星画像 (ALOS, AVNIR2 センサー, 解像度約 10m) における正規化植生指数を利用した。通年で植生がある場所、夏期のみ季節的に植生がある場所、それ以外の場所に区分した。また 2 対象地域における保育所 (後述) からの最近接緑地、周辺の緑地の連続性、公園の数・面積などを環境指標として整備した。健康指標のデータは厚生労働科学研究「東日本大震災の小児保健への影響に関する調査研究 (研究代表者: 呉繁夫)」の「被災地の子どもの発育状況等に関する調査 (分担研究者: 栗山進一)」で得られた全国幼児約 6 万人の成長や既往症などのデータを利用した。前述の環境指標と健康指標について相関等の統計分析を行った。

土地利用図からは把握しにくい緑地 (住宅における庭や道路沿いの緑地) の相対量を正規化植生指数より推定した。またこの判別結果や他の GIS データ源より各種環境指標を計算した。健康指標は前述データ源より、平成 16 年生まれの子供に関しアンケートによって得られた医師に診断された疾患について、あり、なし (不明も含む) とありの場合には喘息があるかどうかに着目し保育所ごとに集計した。保育所ごとに環境指標と環境指標を比較した。今後は環境・健康指標ともより詳細な分析を行う予定である。

2. 3 土地利用や交通網の変化を考慮した生物多様性・生態系への影響評価

福島県は福島県磐梯山と猪苗代湖, 美しい湖沼群を抱く磐梯高原を中心とする国立公園が広がり, 日本を代表する大自然を誇る。しかしながら, 1970 年代頃から東北新幹線や幹線道路などの交通インフラの整備や都市開発により自然環境が減少し, それに伴う動植物の生息適地の減少, 絶滅危惧種の増加が問題となっている。

そこで本研究では福島県の高度成長期以降の交通インフラ整備に伴う土地利用変化に着目し, 絶滅危惧種の生息適地について Maxent (Maximum Entropy Modeling) を用いて定量的に経年分析することを目的とした。Maxent は, 生物の生息が確認された場所のプロットデータと対象地域の各種環境データを用いて, 生物の生息確率と各種環境要因をモデル化し, 対象地域の生息確率を推定するモデリングツールである。

(1) 土地利用および Maxent の評価に向けたデータベースの構築

Maxent の評価に必要な生息データは, レッドデータブック福島 I, II に記載されているデータを用いた。メッシュデータは 10km×10km で作成されているため, GIS データとしてプロットする際には, メッシュ内で最も多い土地利用を占める区分にプロット

した。Maxent で用いる環境変数としては、国土数値情報より福島県の 1976 年、1987 年、1991 年、1997 年、2006 年、2009 年、および 2014 年の土地利用細分、2009 年の平均標高および平均傾斜角度、過去 30 年間の平均から算出した年平均気温、年平均降水量、年最深積雪量のデータ、国土地理院より 2015 年から 2016 年の間に作成された道路縁データの 7 項目を用い、GIS により整理した。道路縁データは道路からの距離を GIS で算出して、数値化し分析に用いた。Maxent で評価する生物種の選定にあたり、福島県レッドデータブックを基に選定した。選定基準は、今回用いた環境変数と関係性があると考えられる生息条件であること、10km×10 km のメッシュデータを使用しているため、行動範囲が広い生物であること、レッドデータブックのリストに十分な生息確認データが記載されていることなどを選定条件とした。その結果、鳥類（猛禽類）から絶滅危惧 I 種のイヌワシとオオタカ、哺乳類から絶滅危惧注意のニホンザルとツキノワグマを評価対象生物として選定した。ニホンザルとツキノワグマは絶滅危惧注意であり、現在の保全優先度はあまり高くないが、将来の保全・獣害対策の必要性が高くなる可能性があるため選定した。

(2) 分析結果と考察

1976 年から 2014 年までの土地利用区分別面積を比較した結果、田は一様に減少し、その他農用地や森林は増減を繰り返しながらも最終的には微増となり、建物用地や幹線交通用地、その他用地は増加していることが示された。

次に Maxent による生息適地の分析結果を示す。図 1 は 2014 年の各生物種の各環境変数への寄与率を示している。オオタカは土地利用が大きく影響しているが、その他の生物は土地利用の影響はそれほど高くない結果となった。また猛禽類は標高の寄与率が高い結果となった。道路距離による影響はそれほど高くないが、オオタカ以外の生物種は多少の影響があることが示された。全体的な特徴として、各生物種の生息条件により、各環境変数の寄与率の違いがみられた。

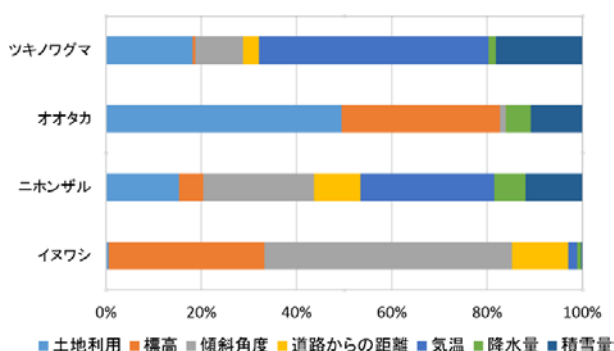


図 1 各生物種に対する各変数の寄与率の推計結果

図 2 は図 1 の寄与率を土地利用区分ごとに示したものである。その結果、全体的に田、農用地、荒地、森林などの寄与率が他の土地利用と比較して若干高い結果となった。表 2 は各生物種の生息適性を示した結果であり、色が青から黄色、赤になるほど生息適地

としての評価が高いことを示している。全体的な傾向として、各生物種とも都市部には生息適地はほぼなく、国立公園などの自然を有する地域には生息適地が多く存在している。図3は、各メッシュの生息確率に面積を乗じた生息可能性面積を時系列に比較した結果であり、イヌワシは微増しているが、他の生物種の生息可能性面積は減少していることが示された。特にオオタカの生息可能面積は顕著に減少傾向にあり、何らかの保全対策を講じる必要あると考えられる。また、今後の課題として、より精度の高い生息データや過去の土地利用データを用いた分析を行う必要がある。

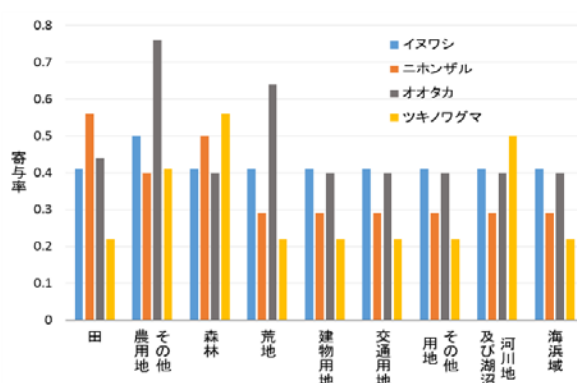


図2 土地利用区分別の寄与率

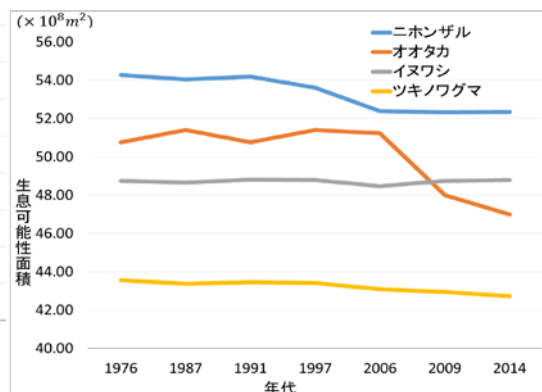


図3 生息可能性面積の経年評価

表2 各生物種の生息地適性の比較結果 (2014年)

凡例	生物種	イヌワシ	ニホンザル	オオタカ	ツキノワグマ
生息地適性					
赤	大 (1.0)				
橙					
黄					
緑					
青	小 (0.0)				
AUC		0.775	0.766	0.765	0.809

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- ・ M. Ooba, K. Hayashi, M. Fujii, "Geospatial distribution of ecosystem services and biomass energy potential in eastern Japan", J. Clean. Prod, 130, 35-44(2016-9).

<著書・解説等>

- ・ M. Ooba, K. Hayashi, "Connection to ecosystem services studies", H. Shimizu, C. Takatori, N. Kawaguchi, "Labor Forces and Landscape Management", Springer, 441-448(2017-11).

<国際・国内会議>

- ・ M. Ooba, K. Hayashi, H. Ito, " Assessment of ecosystem services with land use maps:

- Conservation priority under several greening scenario in Nagoya City ", Proceeding of International Association for Impact Assessment 2016 (Online Proceedings), 11-14 May, 2016, Nagoya, Japan.
- H. Ito, S. Ko, K. Watanabe, T. Fujii, K. Hayashi, " Assessment by Land Use Change using SI models in Khon Kaen, Thailand", Proceeding of International Association for Impact Assessment 2016 (Online Proceedings), 11-14 May, 2016, Nagoya, Japan.
 - M. Ooba, K. Hayashi, T. Togawa, M. Fujii, "Ecosystem services assessment of forest conversion in Japan". 2016 United Nations/Kenya Conference on Space Technology Applications for Wildlife Management and Protecting Biodiversity, web, June, 2016, Nairobi, Kenya.
 - M. Ooba, M. Fujii, J. Khew, K. Hayashi, H. Ito, "Spatial and socio-economic evaluation of ecosystem services at regional-scale in Japan: Considering effects of biomass energy production". 5th International EcoSummit, web, August, 2016, Montpellier, France.
 - M. Ooba, M. Fujii, T. Togawa, "Regional-scale assessment about reduction of carbon emission considering harvested wood products". 11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, usb, September, 2016, Lisbon, Portugal.
 - M. Ooba, K. Hayashi, "Application of an integrated modeling system to evaluating forest ecosystem services", The 8th International Conference on Environmental and Rural Development, Abstracts, February, 2017, Nonthaburi, Thailand.
 - 大場真, 佐藤 ゆき, Chris Fook Sheng Ng, 林 希一郎, 栗山 進一, 「空間情報を用いた都市部緑地配置と幼児の既往症に関する研究. 第 52 回 宮城県公衆衛生学会学術総会」, 同予稿集, 2016 年 7 月, 仙台.
 - 伊東英幸, 早川晃司, 大場真, 藤井敬宏, 「千葉県土地利用変化に伴う絶滅危惧種の生息適地の分析」, 土木学会平成 28 年度全国大会第 71 回年次学術講演会, 2016 年 7 月, 仙台.
 - 大場真, 林希一郎, 「セマンティックモデリングツールを用いた広域生態系サービス評価の試み」, 日本生態学会第 64 回全国大会, web, 2017 年 3 月, 東京.

先進的森林バイオマスエネルギー資源量推計手法の開発

Development of advanced method for forest biomass energy resource assessment

町村 尚・大阪大学・大学院工学研究科・准教授

松井孝典・大阪大学・大学院工学研究科・助教

大場 真・国立環境研究所・社会環境システム研究センター・主任研究員

野呂達也・金城学院大学・非常勤講師

林 希一郎・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

森林バイオマスは我が国の気候に適した再生可能エネルギー資源であり、森林の持つ多様な生態系サービスに配慮した持続可能な資源利用が求められる。森林バイオマス資源量は、樹種・林種による生理・生態的特徴、気候・土壌・地形など生育環境、造林・間伐・主伐など施業管理に依存するため、その利用戦略の策定には、広域適用性と汎用性を有する資源量推計手法の開発が求められる。本研究は森林バイオマスエネルギー資源量推計の高度化のため、地理情報、植生情報、リモートセンシング、生態系モデルの統合的利用による手法を開発することを目的とした。

2. 研究内容と成果

目的達成のため、今年度はリモートセンシングと地理情報を活用したバイオマス推定手法の確立を目標とし、UAV (unmanned aerial vehicle) による 3D 点群データからの樹冠情報解析をおこなった。岐阜県高山市のヒノキ人工林を対象林分とし、2016 年 9 月、11 月、12 月に UAV によってデジタル空中写真を撮影した。また同 11 月に対象林分の毎木調査をおこない、立木の位置と胸高直径を測定した。

樹冠情報解析手法の概要を示す。空中写真を SfM (structure from motion) 処理し、3D 点群データを作成し、さらに 0.1 m メッシュの DSM (digital surface model) に変換した。基盤地図情報 10m メッシュ標高から、DTM (digital terrain model) を作成し、DSM との差分により DCM (digital canopy model) を作成した。LidAR による樹冠解析手法を応用し、DCM から立木個体を識別し、また樹高・樹冠投影面積を計測した。また個体表面高さ分布から、樹冠の形状パラメータである樹冠長、枝張り、樹冠直径、樹冠曲率を抽出するプログラムを作成した。

本手法によって識別した立木個体の分布図を、図 1 に示す。現地毎木調査の結果と比較すると、本手法によって、高木の約 90% を識別した。森林簿による立木密度 1100 ha^{-1} に対し、本手法による立木密度は 1109 ha^{-1} であった。現地測定による胸高直径と 2 変数材積式による林分材積推定値は、森林簿の記載値より 17% 小さかった。以上のように、

開発中の森林バイオマス推計手法は一定の精度が期待される。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

なし

<国際・国内会議> (11pt 明朝体, Times)

- Yuya Katada, Kiichiro Hayashi, Satoru Sugita, Takashi Machimura, Ayana Fujimoto, Assessment of Forest Ecosystem Services Using Unmanned Aerial Vehicles. —Case study of a *Chamaecyparis obtusa* forest, Takayama, Japan—, IAIA17, Montréal, Canada, 4-7 April 2017.
- Ayana Fujimoto, Takashi Machimura, Takanori Matsui, Kiichiro Hayashi, Satoru Sugita, Yuya Katada, Application of UAV-SfM technique to estimate forest stand structure and biomass in Takayama, Japan, ISRS2017, Nagoya, 17-19 May, 2017.

<産業財産権>

なし

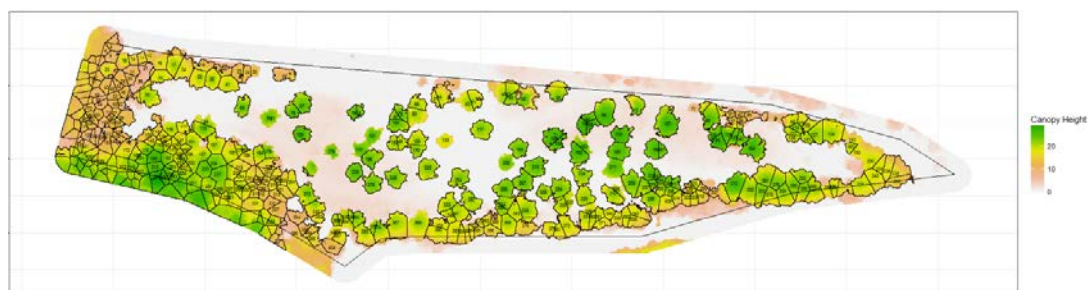


図1 本手法によって識別した立木個体の分布

高効率水素製造のための CLP 酸素キャリアの開発 Development of CLP Oxygen Carrier for an Effective Hydrogen Production

小林 信介・岐阜大学・大学院工学研究科・准教授
名古屋大学・未来材料・システム研究所 システム創生部門 成瀬一郎 教授

1. 研究目的

水素は多種多様な資源から生産可能なクリーンなエネルギー資源であることから、我が国をはじめ、世界各国において水素社会の構築に向けた研究開発が進められている。特に高効率で水素を製造可能な装置の早期開発が望まれており、その一つとしてケミカルルーピングプロセス (CLP) が注目されている。CLP は、酸素担体の酸化・還元反応を利用した水素製造技術であり、従来の水蒸気改質法に比べて高い理論効率で水素製造が可能であることが知られている。そのため、当該研究開発においてはバイオマスを直接反応させる Direct CLP プロセスについて検討を行った。

2. 研究内容と成果

Fig. 1 illustrates the schematics of the biomass pyrolysis experiment. The reactor was a down-flow fixed bed type reactor and it was externally heated during experiments. The maximum operation temperature is 850 °C, which is the estimated temperature at the biomass injection point of the reducer. As the oxygen carrier particles, iron oxide composites (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 and FeO) were prepared for the experiments. The feedstock is woody biomass pellets. In the experiment, 5 g of iron oxide pellets was fed in the reactor preliminarily and then 1 g of the biomass pellets was dropped into the heated reactor. The temperature of the reactor was controlled at 700, 750, 800 and 850 °C. Whole produced gas was collected with a sampling bag until the pyrolysis reaction was complete. The collected gas was analyzed by a gas chromatograph (GC) and the produced gas volume was calculated from the gas composition. Biomass char remained in the reactor and was collected after the experiment weighed. The carbon content of the char was analyzed by the carbon meter (CM). The iron oxide pellets were removed from the reactor after the experiment and the whole reacted pellets were milled. The carbon content of the milled powder was also measured to calculate the carbon deposition on the pellets.

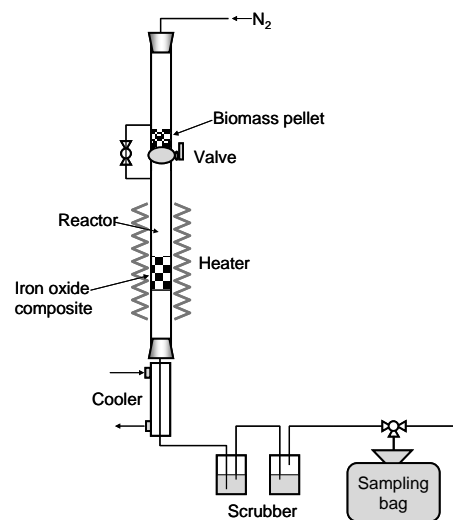


Fig.1 Schematic of experimental system

Fig. 2 shows the carbon balance of the biomass pyrolysis products. The products are gas, char, tar and deposit on the iron oxide pellets. The carbon content of each product was measured by GC and CM. Fig. 2 (a) shows the result of biomass pyrolysis without employing iron oxide pellets, (b), (c) and (d) show the pyrolysis result with Fe_2O_3 , Fe_3O_4 and FeO , respectively. In biomass pyrolysis, the carbon content of the char decreases slightly with increasing reaction

temperature. Char occupied 20-25 % of biomass carbon depending on the reaction temperature. The carbon content in tar decreased significantly above 850 °C. Over 50 % of the carbon in the biomass was converted into gaseous components. When Fe₂O₃ pellets were used, carbon content of condensable tar decreased significantly but the carbon ratio in the gas components was not changed. 15-20 % of the carbon was found on the Fe₂O₃ pellets as carbon deposition instead of condensable tar. The total carbon fraction of the condensable tar and deposition on the iron oxide pellets was almost the same amount of the carbon in the tar during the non-pellets pyrolysis condition. With Fe₃O₄, the carbon fraction in the gas component increased gradually above 750 °C, while the carbon fraction in the in condensable tar decreased. Tar starts decomposing or oxidizing by iron oxides at lower temperature than Fe₂O₃. The carbon deposition fraction decreased slightly with increasing reaction temperature, when Fe₃O₄ was employed. The condensable tar production was almost avoidable by using FeO at 850 °C. Tar was decomposed and oxidized to gaseous components, but carbon deposition was still remained on the pellets. The carbon deposition fraction on the FeO pellets was slightly higher compared with the other pellets at the same reaction temperature. With iron oxides, the condensable tar production was reduced significantly but carbon deposition emerged on the pellets instead of the condensable tar.

Biomass pyrolysis experiments were carried out in the fixed bed reactor with iron oxide composites. Iron oxide was able to enhance the gas production from biomass by the oxidization of hydrocarbons and condensable biomass tar partially. Since the oxidizing power of iron oxides were very strong, carbon dioxide production increased significantly. But, the reaction behavior on iron oxides and the biomass pyrolysis gas varied for the different iron oxide phases. Fe₂O₃ showed the strongest oxidizing power and FeO has decomposition power of biomass tar components.

【研究成果の公表状況】

Nobusuke KOBAYASHI, Yoshinori ITAYA, Performance of Biomass Direct Chemical Looping with Iron Oxide Based Oxygen Carrier, J. Chem. Eng. Japan (Submitted)

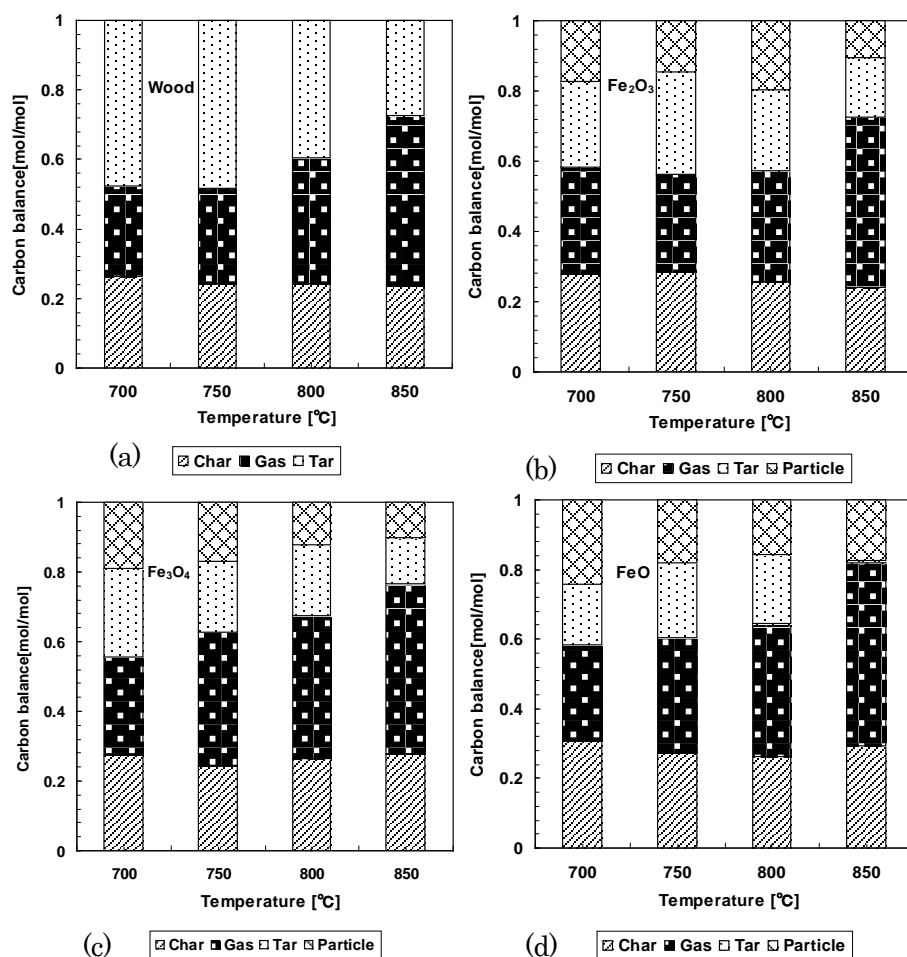


Fig.2 Carbon balance of biomass pyrolysis without/with iron oxides at different reaction temperature. (a) without iron oxides, (b) Fe₂O₃, (c) Fe₃O₄, and (d) FeO. The pyrolysis products were Char, Gas, Tar and carbon deposition on the particle.

内燃機関の排熱回収を目的としたケミカルターボシステムの開発

Development of fast reforming for exhaust heat recovering of SI engine

小林 潤・工学院大学・工学部機械工学科・准教授

成瀬 一郎・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

内燃機関の変換効率向上を図る上で、排気ガスが有するエネルギーを可能な限り回収することが極めて重要と考える。現状では排気ガスが有する運動エネルギーをタービンにより回収し、コンプレッサーや発電機に接続しそのエネルギーを回収する方法が実用化されているが、熱エネルギーの回収という点においては十分な検討がなされているとは言えない。そこで、排気ガスが有している熱エネルギーを利用して燃料の改質を行い、この熱エネルギーを化学的に回収し再度エンジンに投入するケミカルターボシステムを提案する。本研究では、迅速なエネルギー回収が可能となるフルメタル改質反応器を設計・試作し、その特性について評価・検討を行う。

2. 研究内容と成果

本年度は、改質反応器の設計・試作および改質ガス予混合気の燃焼速度評価等基礎的な検討を主に行った。

2. 1 改質反応器の設計・試作

本研究では最終的に2 kWのガソリン-エタノール混合燃料対応型小型発電機に接続することを想定している。最大負荷時の燃料消費量は概ね18 mL(ガソリン)/minであるので、エンジンへの投入エネルギーは概ね10 kWとなる。つまり、発電効率は概ね20%程度であるが、入力エネルギーの5% (未利用エネルギーの6.25% ; 500 W) を回収することを目標として改質器を設計する。改質器に投入される燃料が全て水蒸気改質反応により水素と二酸化炭素に変換されると仮定すると、改質に必要な熱量はエタノール100%で約7.55 kJ/gであり、ガソリン (オクタンと仮定) の場合は約14.7 kJ/gとなるので、500 Wの熱を回収するためには、エタノールで約3.97 g/min、オクタンで約2.04 g/min改質する必要がある。これらの燃料を改質するために必要な水蒸気を燃焼ガスから賄うとすると、エタノールの場合31 L/min、オクタンの場合42 L/minの燃焼ガスが必要となる。気化燃料も含めた総流量を考慮し、空間時間を10000 1/hと想定して触媒反応器の容積を考慮すると、概ね0.2~0.25 L程度の容積となる。これを32Aのステンレスパイプ (内径36.7 mm) で作成すると、触媒区間は0.2~0.24 m程度必要となる。実際の反応管は余熱区間も考慮し0.8 mで作成し、内部に触媒を充填する構造とする。また、使用する触媒は伝熱性を考慮しステンレスメタルハニカムを担体とする触媒とし、銅、亜鉛およびニッケルを担持したものを使用する。

以上の設計理念に基づいて作成された改質反応器およびメタルハニカム触媒の外観を図1および2に示す。改質反応器単独での改質挙動評価を行う場合は、反応器外部よりマントルヒーターを用いて加熱し熱供給を行う。また、エンジンに直結する場合は保温のための断熱材を設置する予定であるが、熱量不足の場合は排気ガスの顕熱交換が可能な構造についても改めて検討する予定である。触媒については、調製条件をいくつか考慮

して製造し、それらが改質反応特性に及ぼす影響について検討を行う予定である。

2. 2 改質ガス予混合気の燃焼速度評価

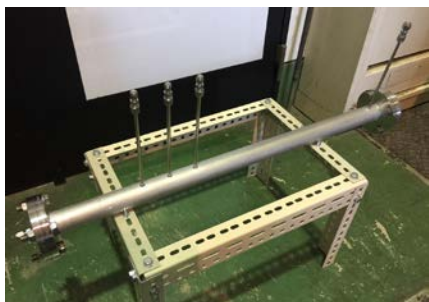


図1 改質反応器外観



亜鉛 銅 ニッケル

図2 焼成後のメタルハニカム 外観

ケミカルターボによって生成される改質ガスは水素や一酸化炭素を多く含む反面、窒素、二酸化炭素、水蒸気などの不燃成分も含まれるため、これらを火花点火機関の予混合気に混合することで筒内の燃焼挙動がどのように変化するのかについて詳細に理解することは、改質ガス混合による EGR 効果を評価するために必要であると考えられる。本研究では改質ガスに含まれる上述のガス成分を含む EGR 模擬ガスを用いて層流予混合燃焼実験を行い、各成分組成が燃焼挙動に及ぼす影響について検討を行っている。

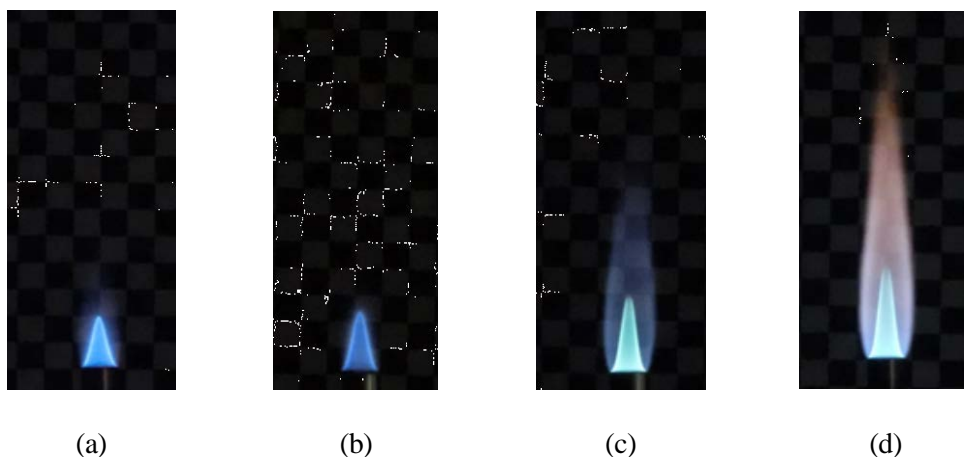


図3 EGR 率 10%における改質ガス予混合気の層流燃焼挙動

(a) 窒素のみ, (b) 二酸化炭素のみ, (c) 水素のみ, (d) 一酸化炭素のみ

プロパン-空気予混合気に EGR ガスとして各成分を混合した場合の当量比 1 における層流燃焼火炎の外観写真を図 3 に示す。当初の予想に反し、燃焼速度の高い水素および一酸化炭素を混入した火炎の方が火炎面積が大きくなる傾向を示した。火炎面積に基づいて燃焼速度を算出したところ、EGR 率 0% (プロパン-空気のみ) で 0.081 m/s であったのに対し、EGR 率 10% で水素のみを加えた場合 0.023 m/s、一酸化炭素のみを加えた場合 0.016 m/s という結果となった。今後はバーナーノズルの形状等実験条件を精査し、より詳細な検討を行う。

【研究成果の公表状況】

<原著論文> 特になし

<国際・国内会議> 特になし

<産業財産権> 特になし

雪氷に強いエコ水車の開発

Development of Eco-Hydraulic Turbine Resistant to Snow and Ice

研究代表者：池田敏彦・信州大学・工学部・特任教授

研究分担者：飯尾昭一郎・信州大学・工学部・准教授

研究所担当教員：内山知実・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

エネルギーの安定した確保は最重要課題である。特に 3.11 以来、水力など再生可能なエネルギーの利用を拡大することが望まれている。このような背景のもと、本研究は農業用水路など各地のいたるところで分散して存在する極小規模である水力エネルギーを有効利用することである。

日本における農業用水路の長さは 40 万 km (地球 10 周相当) であり、申請者らはこれまで河川工事をほとんど必要とせず、流れに置くだけで発電する小型水車 (エコ水車) を開発して、実用化してきている。しかしながら、北陸、東北、北海道など冬期間の農業用水路は堆積した雪や氷によりしばしば閉塞されなどの障害が生じる。このような環境下でも、安定して稼働する水車が望まれる。

雪氷に強いエコ水車の開発、すなわち、雪氷まじりの水流に対して発電可能な水車発電システムの開発を行うことを目的にする。そのために、本研究では、雪氷に強いエコ水車の開発に適した水路の特定とその水路に実装する水車の設計に関して基礎資料を得ることを目指す。

2. 研究内容と成果

1) 開発に適した水路の特定

研究代表者の居住地である長野県北部の信濃町柏原地区の水路に注目し、冬期間 (平成 29 年 1 月 7 日から現在も継続)、インターバルカメラにより 30 分間隔で水路上および水路付近の積雪量の変化を観測した。信濃町における気象庁の最深積雪データによると、1 月 12 日に 20cm 程度であった積雪量が 1 月 17 日には 135cm に極めて短期間に増加している。その後、90cm から 130cm の間で推移している。

1 月 14 日と 15 日は大雪であった。この間、カメラにより撮影した水路の積雪状況を示す。1 月 7 日のカメラ設置時の写真を図 1 に示す。図 2～5 にそれぞれ 1 月 14 日、1 月 15 日、1 月 17 日、1 月 18 日の写真を示す。時刻は 9 時 42 分である。水路脇の積雪量を実測すると 1 月 17 日は 125cm、1 月 18 日は 110cm であった。図 6 に示した 1 月 21 日の写真では水路上部にアーチ形に堆積した雪が崩壊しており、水路内の流れが観測される。この日の水路脇の積雪量は 110cm であった。一連の写真から、雪の堆積

する過程と堆積した雪の崩壊が良くわかる。以上の結果から、積雪量は十分あり、雪氷に強いエコ水車の開発に適した水路であることがわかる。また、グリーンシーズンにおいて、梅雨時期や水田耕作期に注目して水深、流量の計測を行った。多少の変動が観測されたが、平均すると水深は10cm程度、流量は0.07m³/s程度であった。

2) 実装する水車の設計に関する基礎資料

水路上の雪の状況変化（アーチ形堆積と崩壊の繰り返し）や積雪量などを考慮して、水路の幅や深さに関連して、水車の大きさ（直径と幅）、羽根枚数と形状など、水車の設計指針を検討するうえで有益な資料を得ることができた。また、極めて短期間に積雪量の増加が観測された。水路からの水の「溢れ」を避けるための実験手順や方法の検討が必要である。



図1 1月7日9時42分 図2 1月14日9時42分 図3 1月15日9時42分



図4 1月17日9時42分 図5 1月18日9時42分 図6 1月21日9時42分

【研究成果の公表状況】

<原著論文>なし

<国際・国内会議>

平成29年4月21日（金）、駒ヶ根市で開催の第48回水車・風車に関する研究会において発表予定、

<産業財産権>なし

ピコ水力発電に対する官学民の意識調査研究

Questionnaire survey of multi-stakeholder on Pico-hydraulic power generation

研究代表者：岡山朋子・大正大学・人間学部・准教授

研究分担者：谷田林士・大正大学・心理社会学部・准教授

研究所担当教員：内山知実・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

2011年の福島第一原発事故以降、日本においては再生可能エネルギー利活用の重要性が高まっている。しかし水力発電については、2013年度の全発電量に占める割合は8.5%（資源エネルギー庁、2014）であるものの、100kW未満のマイクロ水力発電については導入が必ずしも進んでいない。特に、ピコ水力発電（数10～数百W）については、実証実験としての導入事例が大半で、普及しているとは言えない。その理由としては、売電に適さず費用対効果が極めて悪いこと、発電した電気の使い道が極めて限定されること、連続的な発電を行うためには、水車の除塵といった人の手間が不可欠であるが、発電量の少なさから費用対効果の観点で設置コミュニティから受け入れられないといったこと等があげられる。

このような背景を踏まえて、ピコ水力発電の普及を目指そうとした場合、微少電力を活かせるIoT技術開発や、時間をかけて蓄電して使用するピコ発電・充電・出力システムの開発等が、技術的な課題である。また、ピコ水力発電の価値が理解された上で、設置コミュニティに受容されることが、社会的な課題である。本研究においては、後者の課題に着目し、行政・有識者・一般市民のピコ水力発電に対する意識を明らかにし、その結果をもってピコ水力発電の普及に資する啓発手段を検討することを目的とする。

2. 研究内容と成果

1) 自治体におけるピコ水力発電に対する意識調査の概要

本年度は、特に全国の自治体（都道府県および基礎自治体）において、行政がどのようにピコ水力発電について考えているかを明らかにすることを目的に、アンケート調査を実施した。アンケート調査は、特定非営利活動法人中部リサイクル運動市民の会に質問票の印刷と発送、回収と入力・集計を委託し、平成28年11月25日から1ヶ月間の調査期間に1,175自治体から回答を得た（有効回答率65.7%）。

設問は12問で、再生可能エネルギー全般についての質問（補助金の有無、補助金対象と補助額・補助率、自区域内の有望な再生可能エネルギー）と、小水力発電事業に関する実態（問合せ・相談の有無、導入実績、現状、今後の導入意思、導入を妨げる原因、導入のために必要な条件やことがら等）について質問した。

以下に集計結果を抜粋する。

2) 集計結果の概要

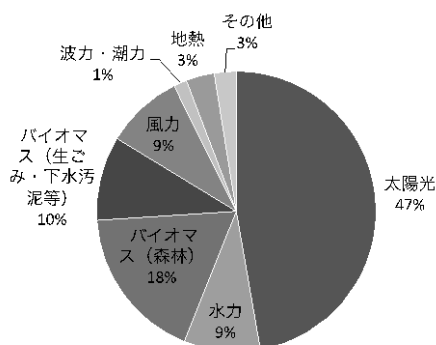


図1 有望な再生可能エネルギーは？

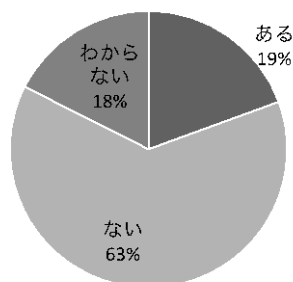


図2 小水力発電事業の有無

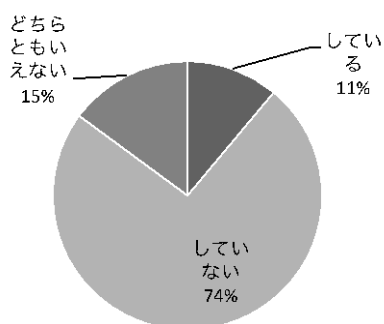


図3 小水力発電事業導入の検討

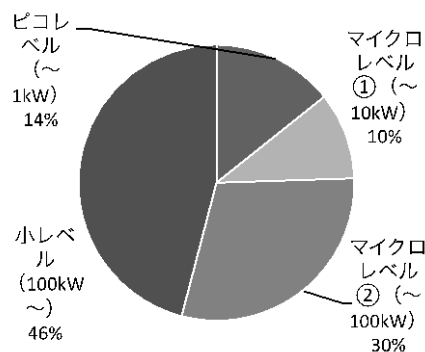


図4 導入を検討している水力発電出力

3) 考察と今後の課題

ピコ水力発電の導入を検討している自治体は、14 団体あった。これらのうち、すでにピコ水力発電を導入している自治体では、その目的は啓発や環境教育、観光であった。また、小水力発電を導入するにあたって必要なもの（複数回答可）は、補助金・助成金（68.1%）、専門家の知見や助言（60.3%）、関係者の協力（54.7%）、住民の理解（49.8%）、水利権の緩和（42.7%）であった。また、小水力発電の導入できない・導入を検討しない理由は（複数回答可）、知見不足（37.3%）、流量不足（34.5%）、資金不足（33.3%）であり、小水力発電施設の導入には資金と専門家の知見が最も重要であることがわかった。上記の14 団体を中心に個別のヒアリングを行い、事業の詳細や導入の背景について把握することが、今後の課題である。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>なし，平成29年度中に論文投稿予定

<国際・国内会議>

平成29年4月21日（金），駒ヶ根市で開催の第48回水車・風車に関する研究会において発表予定

<産業財産権>なし

電力線通信路インピーダンスの時間周波数依存性の実測

Measurement of Time & Frequency Dependence of Power Line Communication Channel Impedance

研究代表者

大平 孝

豊橋技術科学大学 未来ビークルシティリサーチセンター センター長／教授

研究所担当教員

片山 正昭

名古屋大学 未来材料・システム研究所システム創成部門 教授

1. 研究目的

電力線通信 (PLC: Power Line Communication) は, 電力線に接続された機器間の通信が不可欠なスマートグリッドの有望な通信手段である. PLC の性能向上のためには, 通信路としての電力線の特性を明確にすることが必要であり, 伝送特性や雑音特性については多くの研究がある. しかし, 高周波信号伝送に影響を及ぼす線路インピーダンス特性の周波数, 時間依存性の測定研究がほとんど存在しない. そこで, 研究代表者が有する線路インピーダンス測定技術を, 研究所担当教員が有する PLC 技術や信号処理技術と融合した新しいインピーダンス測定系を実現する. さらにこの測定系で, 電力線通信路インピーダンスの周波数, 時間依存性を実測から明らかにする.

2. 研究内容と成果

線路インピーダンス測定系を図 1 に示す. 構成した測定系は, ファンクションジェネレータ (高周波設備許可済) からの正弦波について, インピーダンス測定回路の入出力における振幅電圧比と位相差を 2 チャンネルオシロスコープで測定することで, 測定対象のインピーダンス測定が可能である [1]. ここで, インピーダンス測定回路の入出力の複素電圧比 $\rho = V_2(\cos\theta + \sin\theta)/V_1$ とする. 但し, 入力電圧振幅 V_1 , 出力電圧振幅 V_2 , 入出力電圧の位相差 θ である. このとき, 複素電圧比と測定対象のインピーダンス Z は $Z = 50 \times (\rho - \rho_2) \times (\rho_3 - \rho_1) / (\rho - \rho_1) / (\rho_3 - \rho_2)$ というメビウス変換と呼ばれる関係にある. 複素定数 ρ_1, ρ_2, ρ_3 はそれぞれ異なる既知のインピーダンス Z (本研究では開放, 短絡, 50Ω) を接続した際の複素電圧比である.

測定回路は図 1 に示したように純抵抗からなる. その値の決定には $M_Z = Z \cdot d\rho/dZ$ で定義する可測性 M_Z を用いた. M_Z が小さいと, 測定対象インピーダンス Z の変化に対する複素電圧 ρ の変化量が小さくなり, 測定回路でのインピーダンス測定が困難となる. そこで, 図 2 のように M_Z と R の関係を求めた. その結果, 先行研究から予想される Z の範囲 $10\sim 30\Omega$ 内で, 平均的に高い M_Z を示す 15Ω を R の値とした.

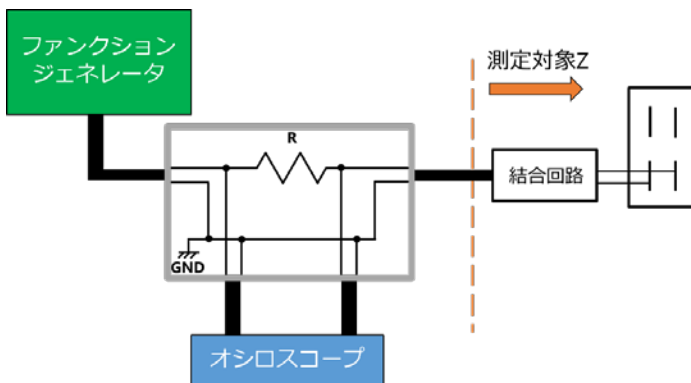


図 1 線路インピーダンス測定系

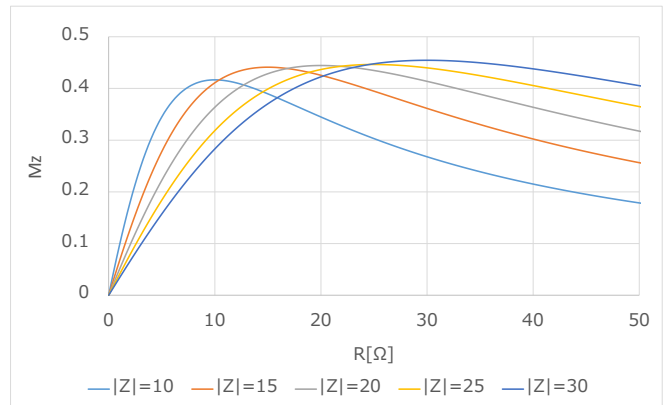


図 2 抵抗値 R 対可測性 M_Z グラフ

作成したインピーダンス測定系で名古屋大学片山研究室内のコンセントを用いて線路インピーダンス測定を行った。コンセントには番号がそれぞれ割り振られており、今回の測定は4, 5, 8, 9, 13, 18, 19, 49, 58の9箇所で行った。測定は狭帯域 PLC の使用帯域を考慮し 150~400kHz の周波数範囲で行った。インピーダンス測定結果の一例を図3に、また各コンセントでの 300kHz 正弦波印加時の線路インピーダンス測定結果を表1に示す。測定結果から、すべてのコンセントで線路インピーダンスは約 30Ω 前後の値であり、入出力インピーダンスの値として測定機器等で多く設定されている 50Ω よりも低い値であることがわかった。また、各コンセントでの各測定周波数における観測波形で、入力電圧に対して出力電圧の位相が遅れていたことから、線路インピーダンスが容量性の負荷であることがわかった。

線路インピーダンスは、商用交流電圧 (AC 電圧) に依存した時変性をもつことが先行研究で指摘されている。そこで、本研究では2チャンネルオシロスコプの1チャンネルに AC 電圧を入力し、その波形をトリガとしてもう1チャンネルで測定回路の出力電圧波形を観測することで、線路インピーダンスの時変性を確認した。観測した波形を図4に示す。上の AC 電圧は周波数が 60Hz で、周期約 16.7ms である。下に示す波形は測定回路に 150kHz の正弦波を印加した際の出力電圧であるが、波形の振幅に周期約 4.8ms の周期性が見られる。このことから、AC 電圧に同期した線路インピーダンス変動が存在していることを本研究においても確認できた。

謝辞 研究の遂行において多大な助力を頂いた、名古屋大学電気電子・情報工学科4年の池田健矢氏に感謝する。

参考文献

[1] 大平 孝, “メビウス変換によるアナログ回路解析,” 電子情報通信学会誌, vol.99, no.10, pp.1012-1014, 2016年10月.

表1 インピーダンス測定結果 (300kHz 正弦波印加時)

	4	5	8	9	13	18	19	49	58
Z	36.76	31.76	27.80	28.67	30.82	25.82	25.81	37.39	36.75
arg(Z)	59.44	47.95	28.52	25.67	27.27	51.34	55.04	55.31	59.46

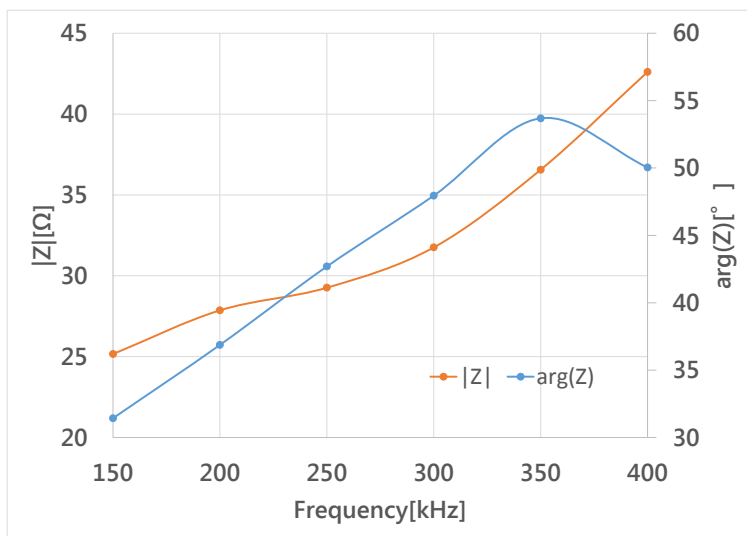


図3 インピーダンス周波数特性 (コンセント5)

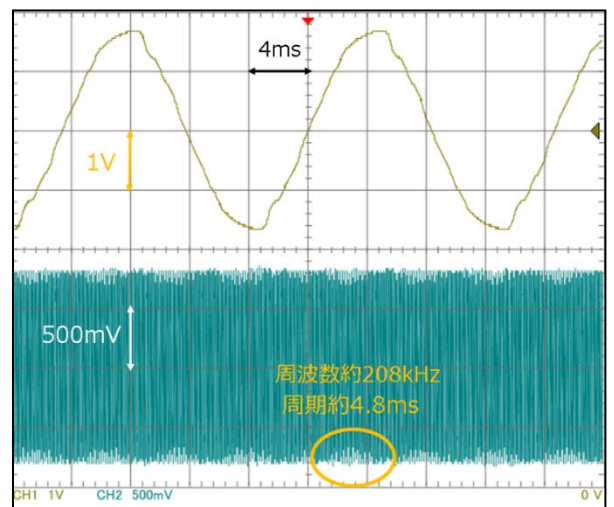


図4 コンセント5での電圧の時間波形

難培養性脱ハロゲン化呼吸細菌のプロテオミクス解析による 脱ハロゲン化酵素の機能特定

Functional characterization of reductive dehalogenase from uncultured dehalorespiring bacteria by proteomics analysis

吉田奈央子・名古屋工業大学・社会工学専攻・准教授

粟田貴宣・名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

片山新太・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

我々は、多種多様な有機ハロゲン還元反応により無毒化する脱ハロゲン化呼吸細菌に着目して研究を行ってきた。脱ハロゲン化呼吸細菌は塩素化エチレン汚染環境を浄化する生物触媒として広く利用されている一方、600以上の登録脱ハロゲン化酵素遺伝子のうち数種の脱ハロゲン化機能しか特定されていない。本研究は、これまでに得られた多様な脱ハロゲン化呼吸細菌の培養物の機能未知の脱ハロゲン化酵素タンパクについて、その脱塩素化機能を特定し、脱ハロゲン化呼吸細菌の生物触媒としての用途拡大を目指す。

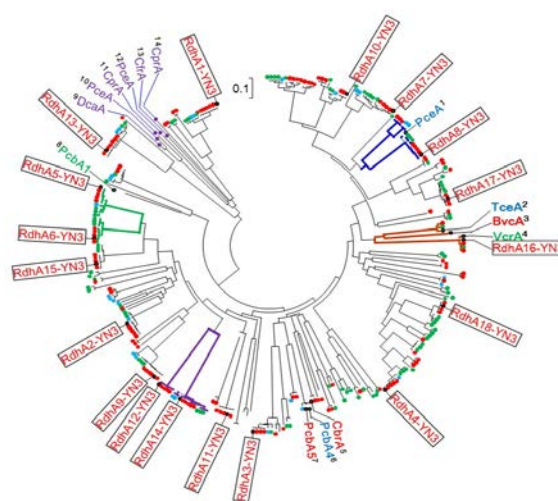


図 1 YN3 の脱ハロゲン化酵素遺伝子の系統樹 □で示したものが YN3 から検出された rdhA を示す。赤、青、緑は、Dehalococcoides の Pinellas, Cornell, Victoria サブグループ、¹⁻¹⁴ はこれまでに同定された脱ハロゲン化酵素遺伝子を示す。

2. 研究内容と成果

2.1 脱ハロゲン化微生物コンソーシア

実験には、テトラクロロエチレン (PCE) をエチレンにまで脱ハロゲン化するデハロコッコイデスが優占する微生物コンソーシア YN3 を用いた。YN3 は、無機塩培地に水素 (電子供与体)、酢酸 (炭素源) ならびに 500mM *cis*-ジクロロエチレン (*cis*DCE) (電子受容体) を補填した最小培地で培養を行い、1 ヶ月に一度植え継ぎ 5 年以上培養を行っている。図 1 に YN3 培養物のメタゲノム解析の結果明らかになった脱ハロゲン化酵素遺伝子の系統樹を示す。

2.2 トランスクリプトーム解析による有機ハロゲン脱ハロゲン化酵素遺伝子の特定

、図 1 に示した脱ハロゲン化酵素遺伝子について、塩素化エチレン添加による転写誘導が生じるか試みた。この結果、18 遺伝子のうち 4 遺伝子 (*rdhA6*-YN3, *rdhA8*-YN3, *rdhA12*-YN3, *rdhA16*-YN3) が顕著な塩素化エチレン添加による転写量の増加を示した。

このうち、特に転写量の増加が著しい *rdhA6-YN3* および *rdhA12-YN3* は脱ハロゲン化する有機ハロゲンが特定されておらず、新規な塩素化エチレン脱ハロゲン化酵素遺伝子であると推定された。

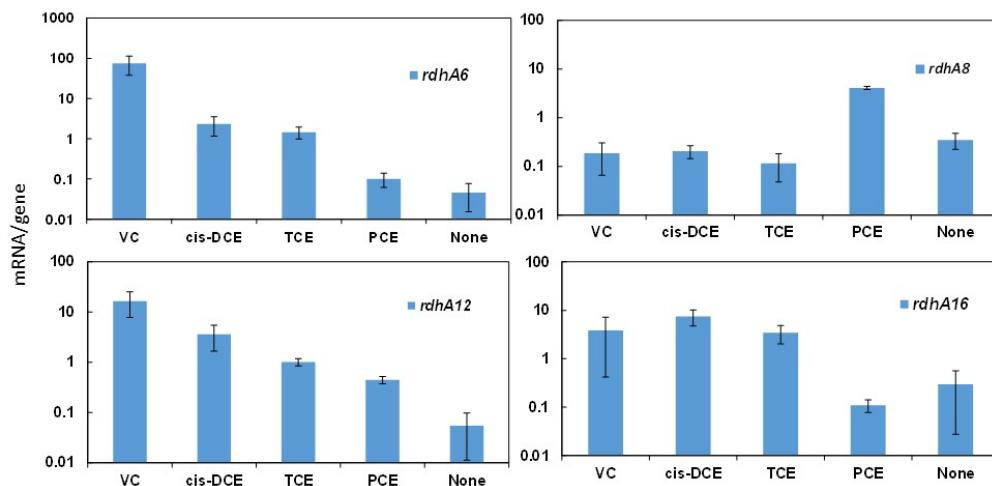


図2 塩素化エチレン添加による脱ハロゲン化酵素遺伝子の転写

2.3 抽出タンパク質による脱ハロゲン化

続いて、3つの異なる培養条件（DF条件：*cisDCE*を電子受容体として添加して培養、DVB：*cisDCE*添加培養後に塩化ビニルを添加、VB：塩化ビニル添加培養）で培養したYN3からビーズビーター破砕により抽出した粗酵素液の脱ハロゲン化活性試験を行った結果、特にDVB条件で培養したYN3でた条件に比べ高い塩化ビニルの脱ハロゲン化が観察された（図3）。得られた粗酵素液についてNative PAGEゲル電気泳動によりサイズ分画したタンパク質について脱ハロゲン化を試みたものの、ゲル断片における脱ハロゲン化活性は観察できなかった。今後、バンド断片の脱ハロゲン化活性を観察できる条件検討を行い、活性が得られたゲルについてMS解析により先の*rdhA*と一致することを確認する。

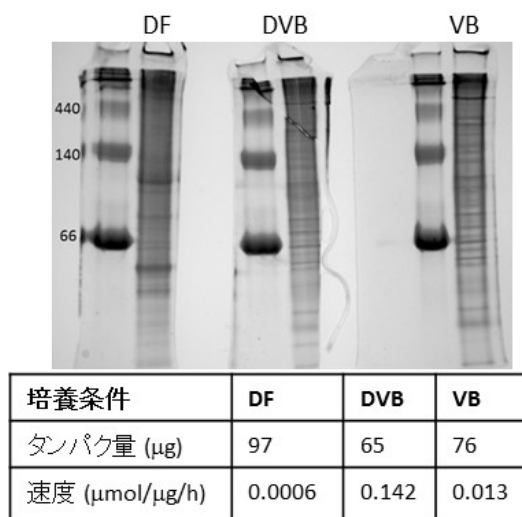


図3 YN3粗酵素液の脱ハロゲン化活性とnative PAGE泳動パターン

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議> **M. Ismael, N. Yoshida, A. Katayama** (28th August 2016) Screening of *Dehalococcoides*-promoting bacteria in PCE-to-ethene dechlorinating Culture. Water and Environment Technology Conference 2016, Tokyo.

N. Yoshida, M Oshiki, L Nonaka, Y Hirose, K Asahi, A. Katayama (26th, August, 2016) Unprecedented high dechlorination activity by reductive dehalogenase extensively expressed from a large plasmid of *Geobacter* sp. AY, 16th International Symposium on Microbial Ecology, selected oral presentation, Montreal.

微生物を応用する環境浄化デバイス用電極の解析と合成による 実用電極の開発指針

Analytical study of the electrode used for the electrochemical device purifying environment and investigation a guideline of the development of the commercial use electrodes

研究代表者 宮田 康史

名古屋市工業研究所 プロジェクト推進室 主任研究員

研究所担当教員 片山 新太

名古屋大学未来材料システム研究所システム創成部門 教授

栗田 貴宣

名古屋大学未来材料システム研究所システム創成部門 助教

1. 研究目的

一部の微生物は、細胞外の導電体と直接電子の授受が可能であり、電気化学デバイスに組み込むことで有機物の分解や脱塩素化などの反応を連続して進めることができ環境浄化デバイスへの応用が期待されている。ここで重要となるのが微生物と電子を授受する電極表面状態である。これまで片山研究室での先駆的研究により、微生物が生息する土壌から採取した腐植材などを化学処理して電極化することで高効率に電子授受ができることがわかっている。一方、作製した電極は土壌由来であり、無機化合物や有機物など多くの成分を含み電子授受に関与する元素や化合物に関しては特定ができていない。そこで本研究では微生物を固定化した電極に対し、X線分光手法と電気化学手法を用いて作製した腐植酸電極（鉄-腐植酸）中の電子授受物質の特定を目的とした。

2. 研究内容と成果

電子伝達は電極上で行われるため、電極電位に依存する。そこで鉄-腐植酸の酸化還元挙動を調べるためにサイクリックボルタモグラム（CV）を測定した。粉末試料を多孔質炭素の空隙に充填して作用電極とし、Ag-AgCl 電極を参照電極に用い、対極に白金メッシュを用いた三極セルにて、掃引速度 10mV/sec、電位範囲は -400 mV から+800 mV で測定を行った。電圧-電流特性が安定するまで 50 回程度の繰り返し測定を行った。測定結果を図 1 に示す。

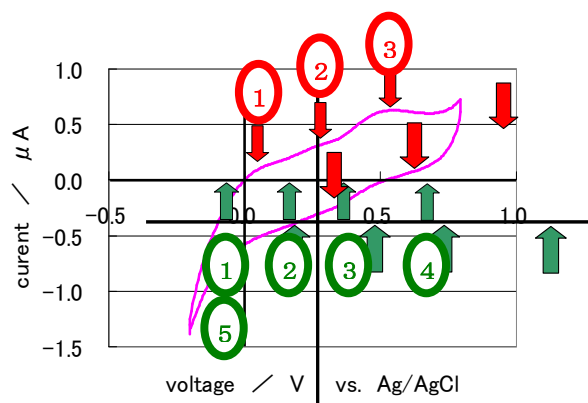


図 1 鉄-腐植酸電極のサイクリックボルタモグラム測定結果

測定試料の鉄-腐植酸は様々な有機化合物や無機化合物からなる多成分電極であり、溶液中でそれぞれ固有の電位で酸化還元される。それは電流として観測されるので CV のピークとして現れる。酸化電流ピークを図 1 中の赤丸で示した。少なくとも 3 種類の物質が酸化反応に寄与していることがわかった。

微生物の代謝において鉄原子は電子授受の細胞外電子伝達物質として作用することが多い。これまで片山研究室では、鉄-腐植酸電極上で高い微生物活性を確認しており、鉄化合物の電気化学的な関与が推察されている。そこで CV 上の酸化還元ピークのうち、鉄化合物が関与するピークを XAFS 測定（あいちシンクロトロン光センターの BL5S1 ライン）にて同定した。電極電位を保持しながら XAFS 測定が可能な電気化学セルを作製し、鉄-腐植酸試料を多孔質炭素の空隙に充填して作用電極とした。参照電極は Ag-AgCl 電極とし、対極には白金微粒子電極を用いた。電解液は培地（MOPS 緩衝液）を用いた。図 1 の CV 測定結果から赤矢印の①から③の酸化ピーク前後の緑の矢印（①（-60mV）～④（700mV））で示す電位で XAFS 測定を行った。再現性の確認のため⑤（-60mV）の電位で再度測定を行った。測定結果を図 2 に示す。

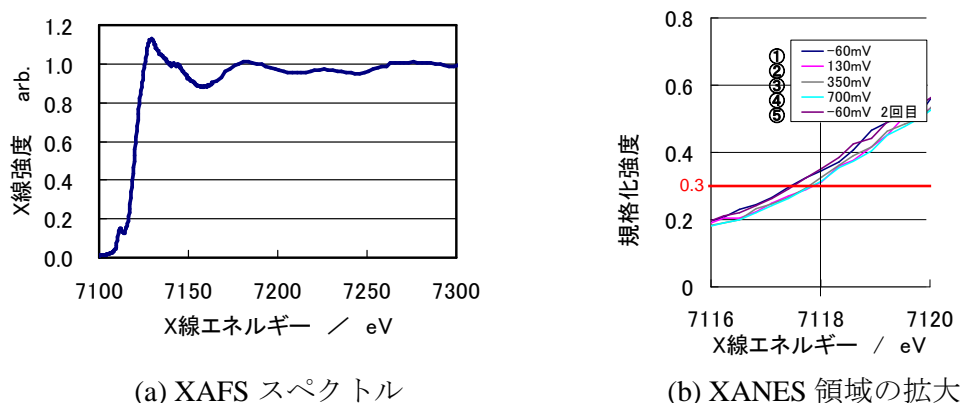


図 2 鉄-腐植酸電極の電気化学 XAFS 測定結果

(a)には鉄-K 殻スペクトルを、(b)にはそれぞれの電位条件での XANES 領域を拡大して示した。(b)の XANES スペクトルは、①⑤-60mV から②130 mV で規格化強度 0.3 にてスペクトルが 0.3eV 高エネルギー側にシフトしており、鉄原子が酸化されたことがわかる。③130 mV から④700 mV のスペクトルは一致し、鉄原子の電子状態が同一であることを示している。同様の XAFS 測定を測定日を変えて 2 回実施し、再現性を確認しており、鉄原子が酸化していることは明らかである。図 1 の CV 測定結果を合わせて考察すると、鉄-腐植酸中の鉄化合物は 70mV (vs Ag/AgCl) 付近 (図 1 の赤矢印①) で酸化還元反応に寄与していることがわかった。多成分からなる電極において微量成分が関わる酸化電位を特定できたことは XAFS 測定の優れた分析能力であるといえる。

今後は残された酸化反応に寄与している電子伝達物質の同定を進める。炭素や酸素の電子状態を検討することで有機物の関与を調査し、電極上の微生物活性の支配因子と繋げて検討したい。

以上

タイ・ナコーンナーヨーク県におけるバイオメタン導入に向けての ライフサイクル・コスト分析

Life cycle cost analysis of biomethane plant in Nakhonnayok province, Thailand for
biomethane promotion

小井土賢二・福島大学・理工学群共生システム理工学類・特任准教授
竹内一佐枝・名古屋大学・未来材料システム研究所・研究員
長谷川達也・名古屋大学・未来材料システム研究所・教授

1. 研究概要

タイでは国内のエネルギー供給が慢性的に不足しているため、2021 年までに国内エネルギー最終需要の 25%を再生可能エネルギーで賄うという、代替エネルギー開発プラン（AEDP2012-2021）が政府主導で遂行されている。このプランの一環として同国ナコーンナーヨーク県において、食品残渣を原料とする 600 kg/day のバイオガス・プラントが設置された。2014 年度にはエネルギー収支比および CO₂ 排出量を LCA ベースで求め、プラントが、エネルギー的に自立していることを明らかにした。そこで、本研究では、このプラントによるバイオメタン製造のライフサイクル・コストを明らかにし、事業収支を明らかにしたのち、感度分析を行った。これによって事業性の高い条件が明らかになった。

2. 計算方法

図 1 に示すシステム境界のもと、本計算では、原料である食品残渣の生産段階はシステムの範囲外とした（図 1）。また、実施時間は 15 年とした。表 1 の計算式に従って、表 2 の計算条件でコスト計算を行った。

**学術論文に投稿中
のため非公表**

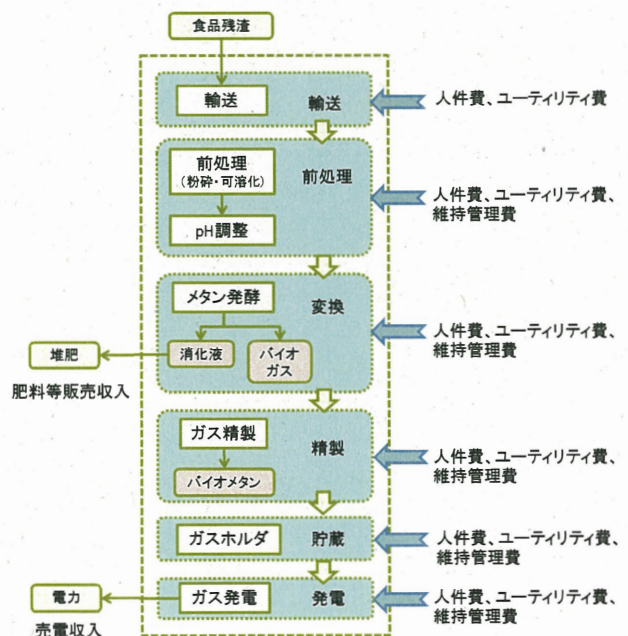


図 1 バイオガス・コスト分析のシステム境界。

学術論文に投稿中のため非公表

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- ・ K. Koido, H. Takeuchi, T. Hasegawa, K. Dowaki. Life cycle assessment of biomethane production from food wastes and driving in Thailand, Bioresource Technology (投稿準備中).

<国際・国内会議>

- ・ K. Koido, H. Takeuchi, T. Hasegawa, K. Dowaki. Life cycle analysis of sustainable biomethane production from marine biomass, 1st International Conference on Bioresource Technology for Bioenergy, Bioproducts & Environmental Sustainability, Sitges, 23-26 Oct 2016.
- ・ 小井土賢二, 竹内一佐枝, 長谷川達也, タイにおける食品残渣を原料としたバイオガスのライフサイクルコスト分析, 日本 LCA 学会第 12 回研究発表会, 産業技術総合研究所, 2017 年 3 月 1 日～3 日.

液中に分散した微粒子群から形成される塗布膜の実測に基づく解析

Direct Measurement of Painted Film from Particle Dispersion

花崎逸雄 東京農工大学・先端機械システム部門・特任准教授
松田佑・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

簡便で省エネルギーなプロセス技術であるプリンティングによって電子デバイスの回路配線などを形成する技術の開発は、いわゆるプリンティッド・エレクトロニクスの可能性が拓けるにつれて本格化してきている。産業界でも既に多くの企業が、導電性インクの開発・販売に進出している。個々の企業は独自の物質組成・配合比率に基づいて定まるプロセス条件を経験的に持っているが、多数の因子が複雑に関係するインクの塗布膜形成現象の法則性について、普遍的な観点に基づく知見は乏しい。本研究では、典型的な物質構成に基づいて塗布膜形成現象の支配因子を力学的な観点から整理する。これにより、これまで化学組成の工夫に依存してきた塗布膜形成技術に力学的な設計指針を与えることができ、関係する産業界全体の経済的損失や環境負荷を軽減できる革新的省エネルギーとなる。本年度は特に、プリンティッド・エレクトロニクスの導電性インクのような顔料型インクの塗布時に、一般的な添加物の代わりに環境負荷の低い物質であるセルロースナノファイバー（CNF）を用いることで現れる塗布乾燥膜の特性の変化を明らかにするための実験と計測データ解析を実施した。

2. 研究内容と成果

原料が豊富で環境負荷の低い物質であるセルロースナノファイバー（CNF）を援用した微粒子分散液の塗布乾燥膜形成現象に対する検討を進めた。CNF は化学的な組成は通常の紙と共通点が多いが、その繊維が数 10nm オーダーであることから工学的に有用な種々の特性が指摘されている材料である。微粒子分散液の塗布技術との関連性からは、微粒子の分散性を調整することや、塗布乾燥膜の品質向上など、幾つかの効果が期待できる一方で、狙った効果とは別の副次的な特性の発現も考えられる。そこで、水に 1.4 μm のポリスチレン系微粒子群を分散させた分散液に CNF を分散させた場合の、CNF が塗布乾燥による薄膜形成に与える影響を検証した。ポリスチレン粒子の濃度と CNF の濃度の 2 系統をパラメータとして、直径 7mm 程度で深さが 10.8mm のポリスチレン製マイクロウェルプレート内に 1 μL の分散液を滴下して室温条件で乾燥した。各条件につき 5 サンプルの合計 225 サンプルを作製する実験を実施して再現性を確保

した。その結果、CNFの濃度が塗布乾燥膜の形態へ及ぼす明確な影響が確認できた。すなわち、CNFの濃度に依存して乾燥後の塗布膜は吸着状態・部分剥離・完全剥離の3種類の状態になる。完全剥離とは、乾燥後のウェルを逆さに向ければ脱離する状態である。そして、それと吸着状態との間とみなされる部分剥離とは、Fig.1に例を示すような剥がれ方のことを意味する。CNFの濃度が十分に低ければ、乾燥後の塗布膜は吸着状態を維持する。これに対して、濃度がある程度高くなると、乾燥の過程でFig.1のような形態での自発的な剥離現象が生じる。これは、CNFが乾燥の過程で水素結合を介して巨視的には収縮する性質があることに起因している。すなわち、基板側に対して試料の気液界面側が先に乾燥するため、気液界面側を内側とする有限な曲率半径が生じるような変形となる。これは、剥離していない材料においてもCNFの収縮を引き起こす残留応力が存在することを示唆する結果でもある。金属材料や半導体材料では、残留応力や歪みが既に産業上の場面で日常的に活用されている。ポリマー系の複合材料でもある本研究の対象系でも、CNFによる残留応力を活用する余地があると考えられる。

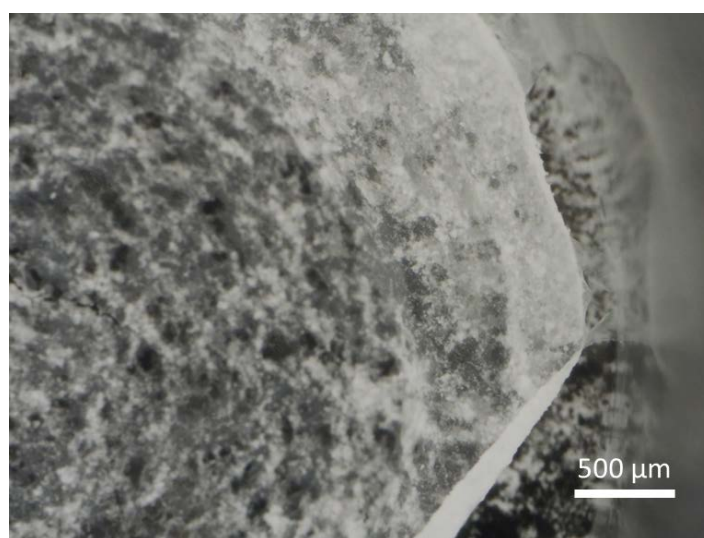


Fig.1 Optical image of a part of dried-up colloidal film mixed with CNFs. The film was formed in the well plate with a diameter of ca. 7mm from a droplet of aqueous dispersion consisting of polystyrene particles and CNFs. This case exhibited the partial self-peeling off during the drying process. It was found that the occurrence of self-peeling off behavior depends on the concentration condition.

【研究成果の公表状況】

<国際会議>

Yuto Ooi, Itsuo Hanasaki, Daiki Mizumura, and Yu Matsuda, “Inhibition of self-peeling off in the drying of particulate films by cellulose nanofibers”, International Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016 (MNST2016), Tokyo, Japan, 18th December, 2016.

協調型高度道路交通システムによる 交通流および無線通信の過集中緩和に関する研究開発

Research and development of cooperative intelligent transport systems for
mitigation of excessive concentration of transport and wireless communication traffic

岡本英二・名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
國友啓佑・名古屋工業大学・大学院工学研究科・修士 2 年
秋吉朋紘・名古屋工業大学・大学院工学研究科・修士 1 年
北川博規・名古屋工業大学・大学院工学研究科・修士 1 年
佐伯尚哉・名古屋工業大学・大学院工学研究科・修士 1 年
堀池直登・名古屋工業大学・大学院工学研究科・修士 1 年
岡田啓・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

高度運転支援システムでは、無線通信を活用する協調型高度道路交通システムを導入することで、より高度な制御や交通集中の回避を実現することができる。この実現のために、ローカルダイナミックマップ (LDM) と呼ばれる動的交通データが活用されることが期待される。しかし、フィールド上に多数の車両が存在する場合、無線トラフィックに爆発的な増加が起こり、LDM 情報処理ができなくなることが問題となる。そこで、本研究では物理層 2 timeslot を用いた非直交協調通信を行い伝送品質を上げることで、長遅延の上位層再送処理を避け低遅延伝送を実現する。

2. 研究内容と成果

物理層で 2 timeslot を用いた非直交協調通信を行い伝送品質を上げることにより、長遅延が生じる上位層再送処理を避け低遅延伝送を実現する手法の検討を行った。図 1 に低遅延化伝送の提案システムモデルを示す。目的は上りリンク車路間伝送において、近傍ユーザ T2 の品質を保ったまま再送が起こりやすい遠方ユーザ T1 の伝送品質を向上させることである。なお基地局 (BS) は T_i ($i=1,2$) の距離 x_i を LDM 情報から既知であると、 T_1, T_2 のペアリングを行ったと仮定する。timeslot 1 で T1 が LTE 上りリンクと D2D (device to device) リンクを用いて BS と T2 にデータを送信する。T2 は T1-T2 間チャンネルを用いて T1 の受信信号を等化し、自データと T1 のデータを 9:1 の電力比で非直交多元接続手法と同様の概念により重畳させて timeslot 2 で伝送する。BS は timeslot 2 の T2 信号受信後、まず T2 のデータを復号し、逐次干渉キャンセルにより T2 の受信信号から T2 データを除去し、その信号と timeslot 1 の T1 受信信号を最大比合成により合成し復号する。これにより T2 の品質を下げずに T1 の品質を上げることができる。

$x_1 = 1.45$ km, $x_2 = 0.45$ km, T1-T2 間を 1 km としたとき, 回線計算から T1-BS, T2-BS, T1-T2 リンクの受信 SNR はそれぞれおよそ 0.84 dB, 20 dB, 7 dB となった. そこでこれらの数値を用いて, 提案手法のリンクレベルシミュレーションを行った. シミュレーション結果を図 2 に示す. 横軸は T1-BS リンクの平均受信 SNR であり, 縦軸はターボ復号後の CRC 符号で検出した正規化スループット特性である. 図より, T1 の直接伝送のみを復号したスループットは横軸の増加によって低減されるが, T1-BS 間距離が 1 km の場合の SNR \approx 1 dB では, およそ 0.2 とかなり小さい. これに対し提案協調通信により両者を最大比合成した場合は, SNR = 1 dB でおよそ 0.75 程度と約 3.8 倍改善されていることが分かる. また T2 のスループットはほぼ 1 であり, 信号重畳による干渉の影響は無視できることが明らかになった. 以上より T1-BS 間が大きい場合に BS により近い T2 の協調リレー伝送を用いることで, T1 の上りリンク伝送特性が改善されることが明らかになった.

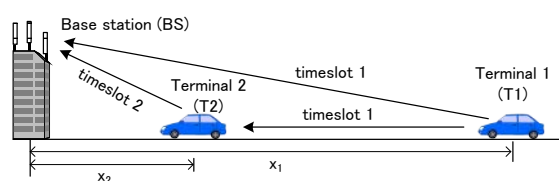


図 1 車車間協調通信を用いた上りリンク低遅延化伝送システム

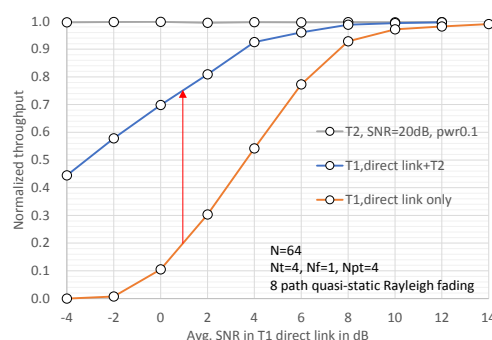


図 2 T1 直接リンク平均受信 SNR に対するスループット特性

【研究成果の公表状況】

< 国際・国内会議 >

- E. Okamoto, “5G access technologies in terrestrial and satellite communications,” Keynote speech, The 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2016), Yogyakarta Indonesia, 2016 年 8 月 25 日～27 日.
- 岡本英二, 岡田啓, 石井良尚, 牧戸知史, “LDM データ伝送のための車車間協調通信による上りリンク伝送品質改善の検討,” 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 東京工業大学, 2017 年 3 月 1 日～3 日.
- 岡本英二, 岡田啓, 石井良尚, 牧戸知史, “LDM データ伝送における車車間通信による上りリンク伝送品質改善の検討,” 電子情報通信学会 2017 年総合大会, 名城大学, 2017 年 3 月 22 日～25 日.
- 岡本頌平, 岡田啓, 石井良尚, 牧戸知史, 岡本英二, 片山正昭, “交通過集中時の LDM データ伝送における MEC による伝送遅延軽減の評価,” 電子情報通信学会 2017 年総合大会, 名城大学, 2017 年 3 月 22 日～25 日.

可視光イメージセンサ通信システムの研究開発

Research and development of visible light image-sensor communication systems

和田忠浩・静岡大学・工学部・准教授

秋場諒・静岡大学・総合科学技術研究科・修士2年

池谷直起・静岡大学・総合科学技術研究科・修士2年

坪田章宏・静岡大学・総合科学技術研究科・修士1年

林毓鋒・静岡大学・総合科学技術研究科・修士1年

岡田啓・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

佐藤翔・名古屋大学・工学研究科・修士2年

1. 研究目的

デジタルサイネージを用いた応用技術として、画面に表示される視覚情報の提供に加え、ユーザが携帯する携帯端末に搭載されたカメラを使ったイメージセンサ可視光通信 (IS-VLC) 技術によるデータ情報の提供が検討されている。IS-VLC 技術は既存の機器のみで通信を実現可能な一方、視覚情報へデータ情報を埋込む際の視覚情報の劣化を覚させないデータ情報の埋込み技術が求められる。本研究はデジタルサイネージ・IS-VLC システムの提案、評価と実装を目的とする。

2. 研究内容と成果

本システムは人間の知覚が可視光の輝度成分に敏感である一方で、色成分に鈍感であるという特徴に注目し、視覚情報の輝度成分を一定に保ちつつ視覚情報の色成分へとデータ情報を埋込む事で視覚情報の劣化を回避する。システムモデルを図1に示す。送信機では、データ情報に対応する信号画像を生成し、信号画像を視覚情報に加算する事で送信を行う。信号画像は複数の矩形領域(セル)を有し、各セルに含まれる画素をデータ情報に基づき $\{0, \alpha\}$ の値にすることで 1bit の情報を表現する。この時の値 α を信号強度と呼ぶ。データ情報加算は視覚情報を構成する R, G, B, Y (輝度), Cr (赤色差), Cb (青色差) のいずれかの成分へ行う。受信機ではカメラより取得した画像列に同期処理を施し、連続する2フレームの差分画像における各セルの状態判定に基づきデータ情報の取得を行う。

本システムでは、視覚情報の品質を保ちつつ通信品質を高くすることが求められる。以下において双方の品質を考慮した評価実験について述べる。まず始めにデータ伝送実験を実施し、各信号強度 α における BER (Bit Error Rate) を測定する。通信距離 3.30m において、画像の特徴が異なる Autumn, Gerbera, Lake を視覚情報に対して信号強度 $\alpha = \{1, \dots, 5\}$ でデータ情報の埋込みを行う。そして主観品質評価実験を実施し、各信号強

度 α における MOS (Mean Opinion Score) を測定する。データ伝送実験と同様のシステムにて 36 名が評価を行う。また評価手法として品質の 5 段階絶対評価を行う ACR (Absolute Category Rating) 法を用いる。データ伝送実験・主観品質評価実験に基づき、MOS 対 BER 特性を算出する。代表として Lake の結果を図 2 に示す。視覚情報の Cb, Cr 成分へのデータ情報の埋込みが高い MOS 評価値を獲得しつつ、より高い通信の信頼性を達成する事を確認できる。

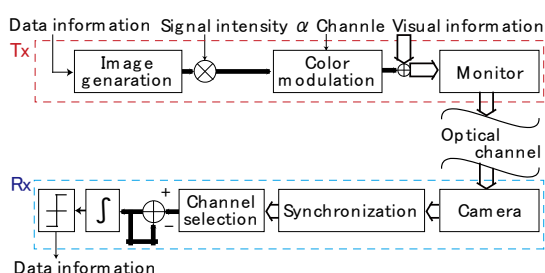


図 1 : システムモデル

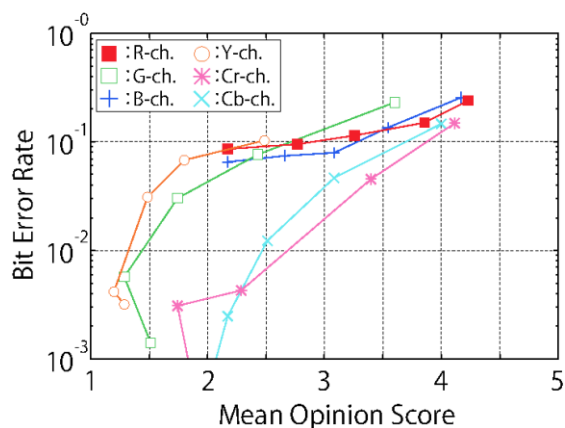


図 2 : MOS 対 BER 特性 (Lake)

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- S. Sato, H. Okada, K. Kobayashi, T. Yamazato, M. Katayama, "Visible Light Communication Systems Using Blue Color Difference Modulation for Digital Signage," IEEE PIMRC, 2016 年 9 月 4~7 日.
- H. Ichikawa, S. Sato, H. Okada, T. Wada, K. Kobayashi, M. Katayama, "Evaluation of Time Asynchronous of Display-Camera Links for Visible Light Communications," RISP NCSP, 2017 年 2 月 28~3 月 3 日.
- A. Tsubota, T. Wada, K. Mukumoto, H. Okada, "A Study on a Position Detection Method using the Hough Transform for Parallel Transmission Visible Light Communication Systems," RISP NCSP, 2017 年 2 月 28~3 月 3 日.
- 佐藤翔, 岡田啓, 和田忠浩, 小林健太郎, 片山正昭, "デジタルサイネージにおけるコンテンツ映像への情報埋め込みがもたらす視覚情報品質の劣化と通信品質の評価," IEICE CQ 研究会, 2016 年 7 月 26~27 日.
- 林毓鋒, 和田忠浩, 椋本介士, 岡田啓, "並列伝送型可視光通信におけるウェーブレット変換に基づく情報埋め込み法の一提案," IEICE WBS 研究会, 2016 年 10 月 6 日.
- 坪田章宏, 和田忠浩, 椋本介士, 岡田啓, "並列伝送型可視光通信システムのためのハフ変換を用いた位置検出手法の性能評価," IEICE WBS 研究会, 2016 年 10 月 6 日.

電気自動車の普及可能性に関する研究 Analysis on Spread Possibility of Electric Vehicles

三古展弘・神戸大学大学院・経営学研究科・准教授
三輪富生・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

環境問題に対する意識は高まりつつあり、環境負荷の小さな電気自動車（EV）の普及に向けた取り組みが進められている。日本政府は、2020年までに新車販売にEV・PHVが占める割合を15~20%とすることを目標としているが、平成25年度のEVの新車販売台数における割合は約0.4%しかなく、PHVを含めても0.6%でしかない。EVの普及が進まない理由の一つに、短い航続距離と長い充電時間がある。近年の技術性能の向上により、EVの航続距離は伸びつつあり、日産リーフは228kmとされているが、例えば走行中のエアコン使用による電力消費、乗車人数、充電タイミングなどの要因を考慮するとこの距離はずいぶんと短くなるため、ガソリン自動車の航続距離に比べてずいぶん小さく、普及を進めるためには走行中に発生する充電切れに対する不安を解消する必要がある。

そこで本研究では、名古屋大学にて過去に実施した電気自動車購入意向に関するアンケート調査データを用い、EVの航続距離性能がEV購入意向にどのように影響しているかを詳細に分析し、EV普及に向けた新たな知見を得ることを目的とする。

2. 研究内容と成果

本研究で使用するデータは、2011年11月に、名古屋市および春日井市にて計4200部の調査票をポストイング配布し、郵送回収したデータである。アンケートへの回答は世帯主に依頼し、返信数は880部（返信率21%）であった。このうち、本研究の分析に使用する情報が正しく記入された394サンプルを使用する。

基礎集計分析の結果より、EV充電施設整備状況や希望航続距離について知見を得た。まず、充電施設の整備場所としては、ガソリンスタンドと高速道路のサービスエリアが強く期待されている。ガソリンスタンドは現在の燃料補給場所であり、日常生活でアクセスしやすい場所に立地していると考えられる。また、高速道路のSA・PAは長距離走行入に充電不足が生じやすい場所と考えられる。その他では、スーパーなどの小型商業施設が他よりかなり多く、普段利用する施設ほど充電施設の設置希望が強いことが分かった。さらに、被験者が必要と考える充電器整備施設への整備前後での希望航続距離変化より、充電施設の整備前では200~250kmが最も回答が多いが、整備後では100~150kmが最も多くなる。これらの分布の差は統計的にも有意であった。したがって、充電施設

の適切な整備によって、希望航続距離が有意に減少することが分かった（下図）。

次いで、被験者の日々の走行距離分布や希望航続距離が、ある航続距離を有するEVの購入意向に与える影響を分析する方法を検討した。

まず、様々な性能のEVに対する意向を評価するため、被験者の希望航続距離のモデル化を検討した。希望航

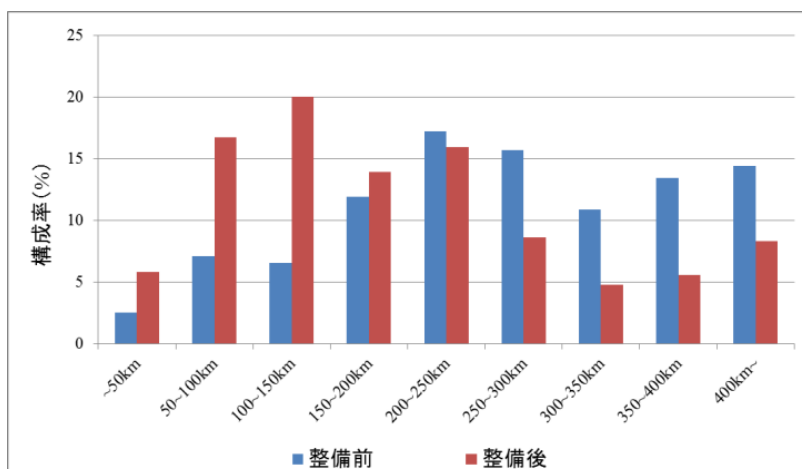


図 充電機整備前後の希望航続距離

続距離は負値をとらないので対数正規分布を仮定し、アンケート回答値（上図）を用いて、2変量オーダードプロビットモデルによってモデル化した。

さらに、被験者の日々の自動車利用距離分布をモデル化した。これは、EV航続距離の評価においては、普段の自動車利用距離との比較を通じて、EV購入意向が形成されると考えたためである。ここでも、自動車利用距離に対数正規分布を仮定し、アンケート回答値から解析的に導出する方法を検討した。

最後に、被験者のEV購入意向をモデル化した。購入するかしらないかを選択肢とし、2変量2項プロビットモデルを適用した。分析の結果から、充電時間の長さはアンケート調査では適切に評価されない可能性、ガソリンスタンドへの充電器整備はEV購入意向を高めないこと、希望航続距離とEV航続距離の比はEV購入意向を有意に説明できるが、充電切れ確率は有意に説明できないことなどが示された。

以上の分析からは、EVに対して希望する航続距離については一定の知見が得られた。しかしながら、希望航続距離や日々の自動車利用距離がEV購入意向に与える影響は明らかとはできなかった。これは、EV購入にあたっては、すでに保有している自動車に対してEVを追加的に購入したり（買い足し）、保有している自動車と買い替えたりする意思決定が伴っているが、本研究でのこれまでの分析では、それらを考慮できていないためであると考えられる。そこで、より多くの知見を得るためには、購入後の利用状況も考慮した分析を行う必要があると考えられる。

【研究成果の公表状況】

現在のところ無し

マイクロガスタービン用遠心圧縮機の水噴霧冷却に関する研究

Study on Evaporative Cooling System of Centrifugal Compressor for Micro-Gas Turbine System

長谷川 豊・名古屋工業大学・工学研究科・教授
 牛島 達夫・名古屋工業大学・工学研究科・准教授
 渥美 光流・名古屋工業大学・工学研究科・博士前期課程 2 年
 加藤 義貴・名古屋工業大学・工学研究科・博士前期課程 1 年
 小島 義弘・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

マイクロガスタービンシステムの高効率化を図る 1 つの手段として、構成要素である小型圧縮機の吸込み流れに微細水噴霧質を導入し、空気流れを冷却することにより、圧縮機仕事を低減する方法がある。

本研究は、超音波振動子を用いた水噴霧質導入方法の改善と、これに伴う圧縮仕事低減効果の改善を実験的に行くと共に、得られた実験結果に基づき水噴霧冷却に関する数値解析モデルを構築し、水噴霧冷却システムを様々な空気機械に対して適用する可能性を明らかにすることを旨とする。

2. 研究内容と成果

平成 28 年度には以下に挙げる研究内容を実施し、要素技術の確立を目指した。

- ① 水噴霧質導入流路における空気流れの特性（平均流速）が水噴霧冷却に及ぼす影響を実験的に解明した。
 実験においては、導入流路内の水噴霧質を伴う空気流における湿度分布・温度分布を計測し、導入流路内の湿度・温度の不均一性を水噴霧質導入断面からの距離に関して調査した。
- ② 水噴霧質冷却システムにおいて、空気流中の水噴霧質の拡散・移流・蒸発とこれに伴う空気冷却に関する数値解析モデルを構築し、実験結果との比較によりモデルの妥当性を検証した。

以下には、内容②で構築した数値解析モデルと、内容①で得られた実験結果との比較検証結果を報告する。

2.1 解析方法 解析対象とした導入流路は鉛直方向高さ $H=118\text{mm}$ 、スパン方向幅 $W=110\text{mm}$ 、流れ方向長さ $L=750\text{mm}$ である。流路下部には水が貯められ、底部に設置された超音波振動子を作動させることで液柱が発生し、その表面から水噴霧質が導入される。水噴霧質は、蒸発をしながら下流へと運ばれ、吸込み空気温度を低下させる。

解析の流れを Fig.1 のフローチャートに示す。水噴霧質の粒子径は、抜山・棚沢の式を使用して不均一性を考慮した。導入した水噴霧質、熱、蒸気の抜山・棚沢の式を使用して不均一性を考慮した。導入した水噴霧質、熱、蒸気の拡散計算は、二次元拡散方程式を使用し、流れ方向の拡散、断面内の移流による影響は無視できるものと仮定した。拡散係数は乱流拡散係数として与え流路内の乱流の影響を考慮したが、水噴霧

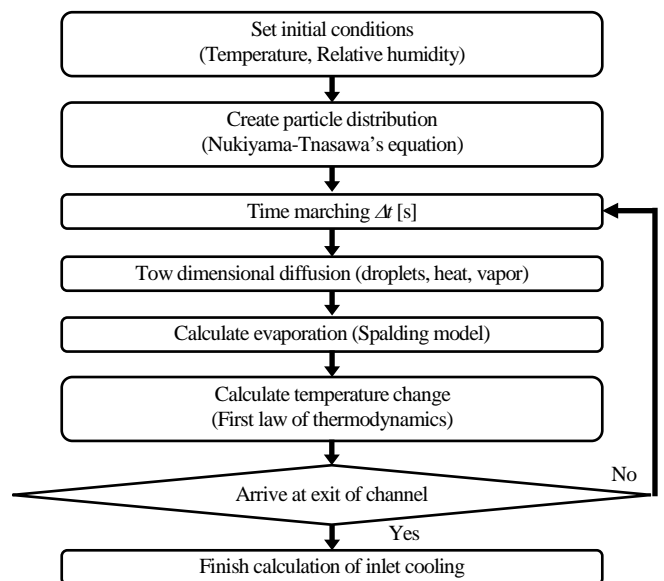


Fig.1 Flow chart of analysis

質・熱・蒸気の拡散に対して同一の値と仮定した。導入した水噴霧質の蒸発計算には Spalding モデルを使用した。水噴霧質の蒸発により変化する周囲空気温度は、熱力学第一法則に水噴霧質の蒸発、液滴温度上昇などの影響を加えることにより予測できる。

2.2 解析結果と妥当性評価 解析における水噴霧質の導入領域は Fig. 2 に示す 3 通りを設定した。実際に発生する液柱に対して、領域 1 は根部位置を一致させて鉛直方向に（流路高さ中央まで）設定し、領域 2 は液柱頂部位置を一致させて鉛直方向に設定し、領域 3 は頂部と根部両方を一致させた。

流れ方向の断面 $z/H=3.92$ 、流路幅方向の中央 $x/H=0$ において、 y 方向に空気流の温度低下量、相対湿度を測定した実験結果と解析結果を比較して Fig. 3 に示す。また、図中には空気流温度・湿度ならびに水噴霧質の粒子密度・粒子径分布を流路断面内で均一と仮定して（一次元モデルとして）得られる解析結果も併せて示す。

実験結果と解析結果はいずれも流路下部に向かうに連れて温度低下量・相対湿度の増加を示し、一次元モデルの解析結果は過剰な温度低下・相対湿度を見積もっている。解析において導入領域の違いは大きな影響を生じており、導入領域 3 で得られる解析結果が実験結果に最も近い値を再現している。ただし、解析結果は、流路全体に亘り相対湿度を過大に推定すると共に、流路上端と下端近傍における温度不均一性を過剰に見積もっている。実験と解析のズレを生じる推定誤差の原因として、導入する水噴霧質の平均粒子径ならびに導入量の測定誤差を想定してそれらの影響を解析により調査した結果、いずれもズレの大きさを大幅に改善するものではないことが判明した。したがって、本解析において水噴霧質・熱・蒸気の拡散係数を同一とした仮定、断面内の移流を無視できるものとした仮定に問題が在るものと考えられる。今後、NS 方程式に基づく CFD 解析を活用してダクト内流れの移流・拡散を調査すると共に、粒子径分布・密度分布の計測を行うことにより、解析モデルの改善を図る予定である。

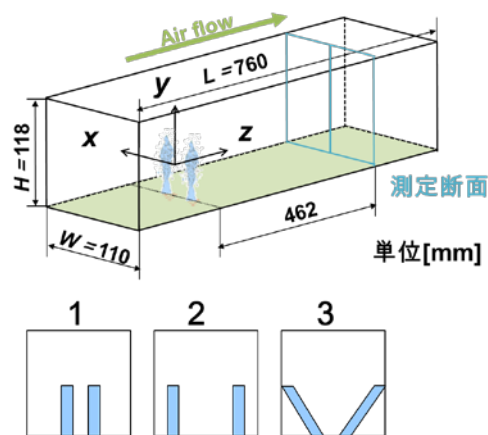


Fig.2 Introduced area of mist in duct

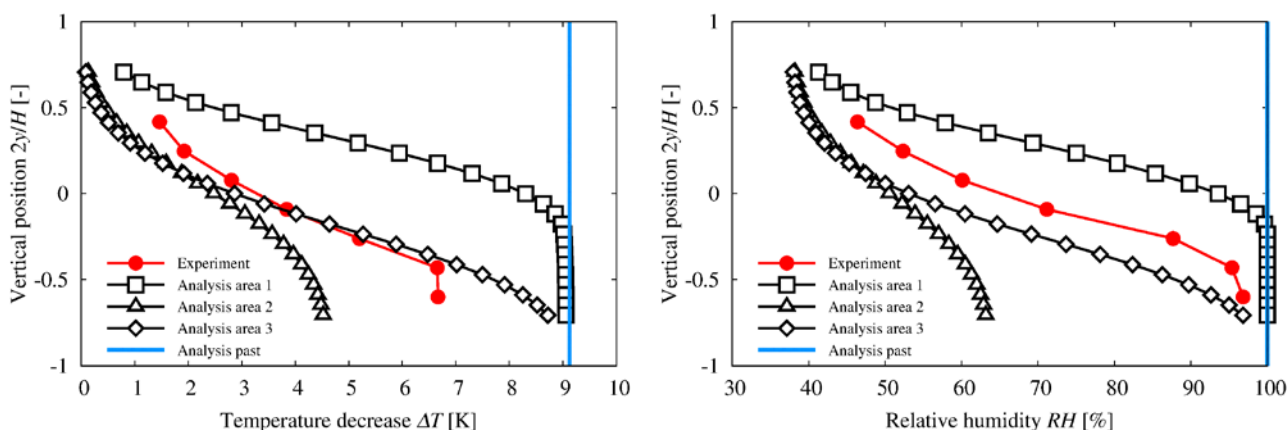


Fig. 3 Comparison of analysis and experiment for temperature decrease and relative humidity in mist introducing duct

【研究成果の公表状況】

<原著論文> 該当なし

<国際・国内会議>

- ・ 渥美, 長谷川, 小島, 牛島, 水噴霧冷却システムを用いた小型遠心圧縮機の入口冷却に関する研究, 日本機械学会東海支部第 66 期総会講演会(2017.3.14~15, 静岡大学), 講演論文集 No.173-1, pp.1-2 (on USB).

<産業財産権> 該当なし

界面活性剤 Pluronic と硫酸アンモニウムからなる水相二相系による

レニウムの抽出

Rhenium extraction by aqueous biphasic systems formed from
surfactant Pluronics and ammonium sulfate

Mikael Nilsson・カリフォルニア大学アーバイン・工学部・准教授
 平山和樹・名古屋大学大学院・工学研究科・博士前期課程 2 年生
 澤田佳代・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

希少金属であるレニウムは触媒や耐熱合金に用いられる重要な元素の一つである。本研究では、レニウムの分離回収を目的として、界面活性剤 Pluronic (Fig. 1) と硫酸アンモニウムからなる水相二相系によるレニウムの抽出について研究を行う。90 年代に米国ロジャークは、ポリエチレングリコール (PEG) と高濃度の硫酸アンモニウムにより形成させた水相二相系抽出を用いて、レニウムと化学的性質が類似しているテクネチウムの抽出分離が可能であることを示した¹⁾。この論文の中で PEG 以外にも界面活性剤である Pluronic-L64 の適用の検討を行っているが、Pluronic-L64 ではテクネチウムの分配比は高いものの、二相系形成の濃度条件が厳しいことから、抽出剤候補から排除された。本研究では Pluronic-L64 と高分子鎖の異なる Pluronics を用いて、レニウムを抽出するのに適した条件を調べることを目的とする。

参考 1) R. D. Rogers, Jinhua Zhang, *Journal of Chromatography B*, **680**, 231 (1996).

2. 研究内容と成果

Pluronic-L64 を用いて作製した水相二相系の外観を Fig. 2 に示す。加える硫酸アンモニウムの濃度を増やすことで二相を形成することが可能となる。しかしながら、ある濃度を超えると上層が白濁したゲル状に変化し、抽出には適さ

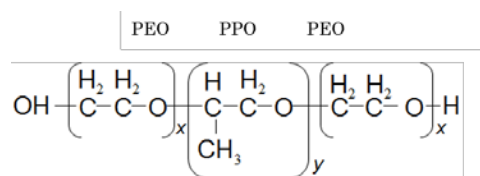


Fig. 1 Structural molecular formula of Pluronics

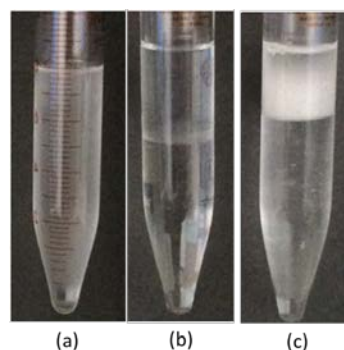


Fig. 2 Appearance of 30 wt% Pluronic-L64 solutions and (a) 0.5, (b) 1.5 and (c) 2.5 mol dm⁻³ ammonium sulfate solution as initial concentrations

なくなる。Pluronic-L31, 61, 64 に対して抽出操作の可能な範囲を調べた結果を Fig. 3 にまとめる。エチレンオキシド鎖の短い L31 と 61 については、硫酸アンモニウム濃度の溶解度限界付近の溶液を用いた場合でも L64 のようなゲル状の相の生成はみられなかった。また、より低い硫酸アンモニウム濃度でも二相系を生成することが確認された。

実際に工業的に抽出を行う場合、この系の相図が必要となる。3 種の Pluronic に対して、二相系を形成し、それぞれの相の組成分析を行うことで Fig. 4 に示すような相図を作成することができた。

水相二相系でのレニウムの分配比の硫酸アンモニウム濃度依存性を Fig. 5 に示す。Pluronic-L61, 64 については、硫酸アンモニウム濃度の増加に伴って分配比も増加した。一方、Pluronic-L31 については、硫酸アンモニウム濃度の増加に伴い、分配比は一旦増加した後、減少に転じた。水相二相系において一般に分配比は相図のタイライン長さに関連があることが知られている。作成した相図と分配比データを比較したところ、Pluronic-L61, 64 については、この相関関係が成立していたが、L31 については Fig. 4 に示すように硫酸アンモニウム濃度が増加するに伴い、タイライン長さも長くなっており、分配比が減少に転じる原因は未解明である。

合金等からレニウムを回収するにあたっては前処理として酸溶解が考えられる。このため、酸性溶液を出発溶液とした場合のレニウムの分配比を、3 種の Pluronic のうち、最も操作可能範囲が広く、高い分配比を有した Pluronic-L31 について検討した。初期溶液濃度で 30wt% Pluronic-L31、 1.5 mol dm^{-3} 硫酸アンモニウムについて、 $\text{pH} < 1$ の硫酸酸性下においても、分配比は 50 以上と非常に高い値を示した。

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

K. Hirayama, K. Sawada, Y. Enokida, "Rhenium extraction by aqueous biphasic systems formed with PEG/PPG block copolymers," Proceeding of CHISA 2016, abst. No. C2.3 (2016).

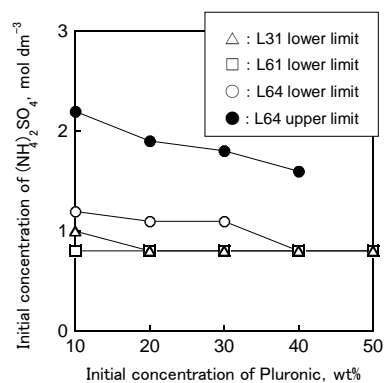


Fig. 3 Workable range of Pluronic for the extraction

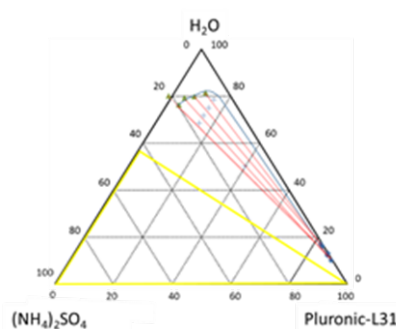


Fig. 4 Phase diagram of the mixture of Pluronic-ammonium sulfate-water Pluronic-L31

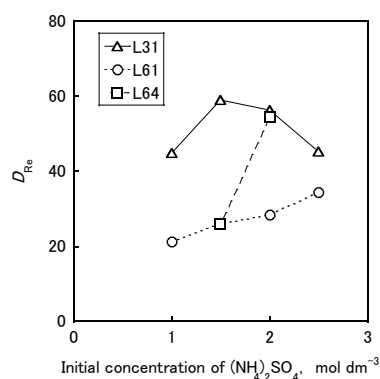


Fig. 5 Re distribution ratio in ABS formed with Pluronic and ammonium sulfate aqueous solution

ICT 活用農業のためのセンサネットワークの研究開発

Research and development of sensor networks for ICT agriculture

内藤 克浩・愛知工業大学・情報科学部・准教授

小林 健太郎・名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

1. 研究目的

本研究では、ICT 活用農業の実現を目指し、圃場環境で使用するセンサネットワークの研究開発を行う。圃場環境は無線機器周辺に電波を吸収する植物が多数ある環境であるにも関わらず、農作業の妨げとならないように、無線機器を植物近くに設置して運用する必要がある特殊な環境となる。また、既存マイコン機器を用いてセンサネットワークを構築した場合、長距離通信用モジュールや一部のセンサを稼働させるだけの突入電流を担保できないため、マイコンの動作不良が発生する場合も確認されている。そして、接続するセンサによっては、インピーダンスマッチングがマイコンボードととれていないため、アナログデジタル変換が正常に行えない状況も確認されている。そのため、農業用途を想定した場合には、接続する機器を見据えたマイコン回路の設計が必須である。本研究では、放射温度測定のためのセンサネットワークを作成する。このセンサーデバイス専用のマイコンボードを新規に開発するとともに、既存の標準化プロトコルを拡張することにより、圃場環境での信頼性ある無線通信を実現可能な放射温度測定のためのセンサネットワークを構築する。

2. 研究内容と成果

2.1 マイコンボードの設計と開発

本研究では、ニッケル水素電池 2 本により稼働が可能なマイコンボードの設計と開発を行った。開発したマイコンボードは、3.3V で動作する Arduino ベースのマイコンを採用しており、スーパーキャパシタを搭載することにより、一時的な電力消費による電圧低下を防ぐ設計としている。また、放射温度センサである Melexis 社の MLX90620 を採用することにより、4×16 の領域毎の温度測定を実現した。また、温湿度・大気圧・水温を測定可能なセンサも接続することにより、圃場環境の様々な環境情報の定期測定を実現した。図 1 はマイコンボードの概形を示し、図 2 は接続したセンサ類を示す。



図 1 マイコンボード



図 2 接続センサ類

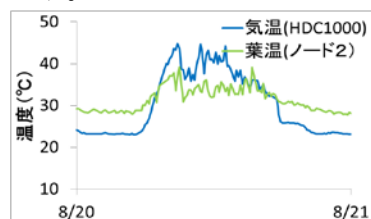


図 3 葉温と気温の測定例

2.2 通信機能とプロトコルの設計と実装

開発マイコンボードには、920MHz帯を利用する無線モジュールを、シリアル通信機能を利用して接続した。無線モジュールはマイコンボードからのコマンドに応じた処理を行うため、通信機能及びマルチホップ通信に必要となる通信プロトコルは、マイコンボード上のソフトウェアとして実装した。開発した通信機能を用いることにより、情報収集を行うシンクノードから木構造のマルチホップ通信経路を確立可能であることを確認した。また、隣接ノードが起動している時間帯のみ動作することにより、省電力動作が可能であることも確認した。

2.3 圃場実験

本研究では、開発したセンシングシステムを名古屋大学東郷フィールドの圃場に設置することにより、夏季(7月~10月)の運用検証を実施した。図3は稲の葉温を放射温度センサにより測定した値と気温の関係を示しており、出穂前の葉温は光合成により気温よりも低くなることが確認された。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- Katsuhiro Naito: A Survey on the Internet-of-Things: Standards, Challenges and Future Prospects, Journal of Information Processing, Vol. 25, pp. 23-31, January, 2017

<国際・国内会議>

- Takamasa Mizukami, Katsuhiro Naito, Chiaki Doi, Ken Ohta, Hiroshi Inamura, Takaaki Hishida, and Tadanori Mizuno: Evaluation About the Feasibility of an Unconscious Participatory Sensing System with iOS Devices, International Journal of Informatics Society, vol.8, 2016.
- Tomoya Ogawa and Katsuhiro Naito: Development of multi-hop field sensor networks with Arduino board, KES IIMSS, June 2016.
- Takuya Wada and Katsuhiro Naito: Prototype implementation of actuator sensor network for agricultural usages. KES IIMSS, June 2016.
- Katsuhiro Naito, Shunsuke Tani and Daichi Takai: Implementation of mobile sensing platform with a tree based sensor network, KES IIMSS, June 2016.
- 森部智也, 岡田啓, 内藤克浩, 小林健太郎, 片山正昭, "放射温度計を用いた営農支援センサネットワークのための通信プロトコルの一検討," 電子情報通信学会 総合大会, 2017年3月.
- 森部智也, 岡田啓, 内藤克浩, 小林健太郎, 片山正昭, "[ポスター講演]ドローンを用いた農業用無線センサネットワークのための通信プロトコルの検討," 電子情報通信学会技術研究報告, ASN2016-61, pp.109-110, 2016年11月.

低撮影速度のカメラを用いた省エネルギー可視光通信の 実現のためのデータ復調手法の開発

Development of Data Demodulation Method for Energy Saving
Visible Light Communication Using Low-Frame Rate Camera

研究代表者：

荒井 伸太郎，岡山理科大学 工学部 電気電子システム学科，講師

研究分担者：

小林 健太郎・名古屋大学 未来材料システム研究所 システム創成部門，助教

秋山 宗一郎，岡山理科大学 工学部 電気電子システム学科，学部 4 年

法 天羽，岡山理科大学 工学部 電気電子システム学科，学部 4 年

研究所担当教員：

小林 健太郎・名古屋大学 未来材料・システム研究所 システム創成部門，助教

1. 研究目的

本研究では，LED 光の点滅を利用したデジタル情報通信技術である「LED 可視光通信」に注目する。LED は白熱灯に比べ低価格であり，高輝度で省電力・長寿命といった利点を持つため，LED 可視光通信は省エネルギーでエコな次世代通信技術であると言える。また，LED 光は人間の目にも識別可能であることから，カメラのようなイメージセンサを受信機として利用できることも大きな特徴である。本技術が実現すれば，スマートフォン等が搭載する低撮影速度カメラを用いて，街中にある LED 照明からデータを受信できるようになると期待している。しかしながら，低撮影速度カメラを用いた場合，レンズのピントずれ等により，LED の認識が困難になり，データの復調に影響を及ぼしてしまう。そこで，本研究課題では，低撮影速度カメラの状態に依存しない新たなデータ復調手法として，実際の撮影画像を模した擬似撮影画像を用いた信号復調手法を提案する。

2. 研究内容と成果

今，図 1 のような 2×2 の格子状に配置された LED アレー送信機とカメラ型受信機を想定した通信システムを考える。ここで，受信機側でのピントずれにより画像がぼけ，送信機上の複数の LED が発する光が互いに影響を及ぼしあう劣化画像が写ったとする。通常，画像にぼけが生じることは劣化でしかないが，通信を考えた場合，一つの信号源を多くの受信機で受信していることになるため，逆に雑音耐性を向上させる事が可能と考えられる。この点に着目し，提案手法では互いに影響を及ぼしあう光の干渉を劣化画像から推定し，その干渉を用いて受信機側で送信機の点滅パターンを模擬した「擬似撮影画像」を作製する。擬似撮影画像は LED アレー送信機がなり得る全ての点灯パターンに対して作製され，それらの画像と受信した撮影画像との各画素値の距離を比較し，距離が最も小さな点灯パターンを持つ擬似撮影画像を決定する。そして，その擬似撮影画像に用いられている送信機 LED の点灯パターンが，実際の LED アレー送信機の点灯

パターンであると推定することで信号復調を行なう。本提案手法は送信機の LED 数が増加することに伴い、擬似撮影画像を作製する枚数も指数関数的に増加、つまり計算コストが増加してしまう。その解決策として、郡知能の 1 つであるバイナリー差分進化 (BDE) を組み合わせた手法を提案し、計算コストの削減も実現する。

図 2 に本提案手法及び提案手法と BDE を組み合わせた手法のシミュレーション結果を示す。本シミュレーションでは画像を劣化させるためにガウシアンフィルタを用いており、本図の横軸はその分散値を表している。分散値が大きいほど画像の劣化が著しいことを示しており、画像が劣化してもデータ復調可能なことから、本提案手法が画像劣化に対する強い耐性を有し、なおかつ優れた信号復調性能を持つことを確認できる。また BDE と組み合わせた場合、提案手法よりも性能は僅かに劣ることが確認できるが、計算コストは 87.8%削減できたことをここに報告する。しかしながら、本提案手法の性能評価はコンピュータシミュレーションによるものに留まっており、今年度中に実機による実験での有効性確認までは至らなかった。そこで平成 29 年度も本共同研究を継続申請して引き続き取り組み、今年度中に達成できなかった、実機による実験により提案手法の有効性を明らかにしたい。

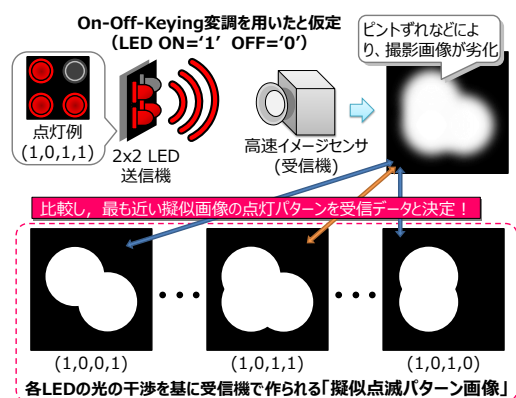


図 1：提案手法のコンセプト。

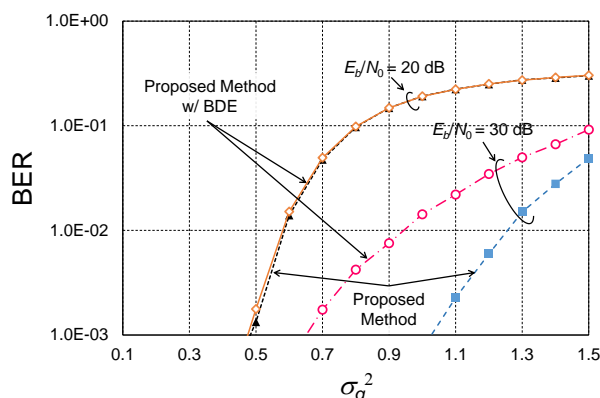


図 2：シミュレーション結果。

【研究成果の公表状況】

【国際会議】

- [1] **S. Arai**, Y. Ohira, T. Yendo, D. He, "Introduction of Image-Sensor-Based Visible Light Communication and its Data Demodulation Technique from Blurred Captured Image," The 2nd Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS'17), National Cheng Kung University (Taiwan), Jul. 31 - Aug. 2, 2017.
- [2] Y. Ohira, T. Ohira, **S. Arai**, "Development of Low-Complexity MLE Method for Image-Sensor-Based Visible Light Communication," 2016 IEEE Vehicular Networking Conference, Hyatt Regency Columbus (USA). Dec. 8-10, 2017.

【国内研究会など】

- [3] **荒井伸太郎**, 松下春奈, 大平祐生, 圓道知博, "イメージセンサ型可視光通信における擬似撮影画像に基づく信号復調のための差分進化を用いた演算量削減の一検討," 電子情報通信学会 CCS 研究会, 京都産大むすびわ館, 2016年11月4日~5日.
- [4] **荒井伸太郎**, 松下春奈, 大平祐生, 圓道知博, "イメージセンサ型可視光通信における差分進化を用いた擬似撮影画像に基づく信号復調法のパラメータ依存性に関する一検討," 2017年電子情報通信学会総合大会, 名城大学, 2017年3月22日~25日. (発表決定済)

(他 1 件)

二酸化炭素を水素キャリアに変換する太陽光駆動型光触媒の開発

Development of solar-driven photocatalyst converting CO₂ into hydrogen carrier

西村 顕・三重大学大学院・工学研究科・准教授
石田 教晃・三重大学大学院・工学研究科・大学院生
立松 大智・三重大学大学院・工学研究科・大学院生
植木 保昭・名古屋大学・未来材料システム研究所・助教

1. 研究目的

CO₂の削減・有効利用を図るべく、次世代エネルギーとして期待される H₂ と反応させて炭化水素化し、H₂ キャリアとして活用する新型光触媒の開発を研究目的とする。

2. 研究内容と成果

ゾルゲル・ディップコーティング法で網目状ガラス繊維に TiO₂ 薄膜をコーティングし、その後パルスアークプラズマガン法で Fe を担持させることで Fe/TiO₂ を作製した。本研究グループの調査した限りにおいて、Fe/TiO₂ をゾルゲル・ディップコーティング法およびパルスアークプラズマガン法にて網目状ガラス繊維に薄膜コーティングした報告例はなく、そこでまずは貴所が所有する JXA-8530F を用いて Fe/TiO₂ の構造分析を TEM, EDX にて行った。パルス回数は 1000, 500, 100 とした。

まずはパルス回数 1000 回の Fe/TiO₂ について、図 1 に TEM データ、図 2～図 4 に EDX データ（図 2：Ti、図 3：Fe、図 4：O）をそれぞれ示す。これらの図から Fe 層が TiO₂ 薄膜を覆っていることが分かる。また図 1 から、TiO₂ 薄膜と Fe 層の厚みに注目すると、今回計測した厚みの平均は TiO₂ が約 1.43 μm、Fe が約 230 nm であった。さらに、図 3 と図 4 から、Fe 層と O の分布が若干重なっており、Fe は酸化鉄の状態でコーティングされていると考えられる。

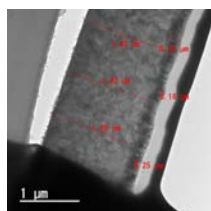


図 1 TEM データ
(倍率 25k)

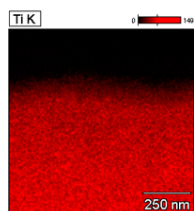


図 2 EDX データ
(倍率 160k, Ti)

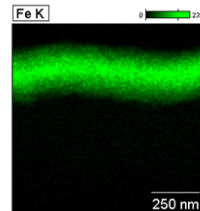


図 3 EDX データ
(倍率 160k, Fe)

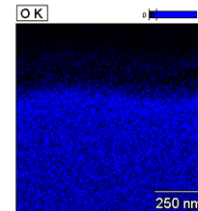


図 4 EDX データ
(倍率 160k, O)

次にパルス回数 500 回の Fe/TiO₂ について、図 5 に TEM データ、図 6～図 8 に EDX データ（図 6：Ti、図 7：Fe、図 8：O）をそれぞれ示す。図 5 に着目するとパルス回数

1000回と同様に Fe 層が TiO₂ 薄膜を覆っている. TiO₂ 薄膜と Fe 層の厚みに注目すると, 今回計測した厚みの平均は TiO₂ が約 2.04 μm, Fe が約 36 nm であった. Fe 層の厚みがパルス回数 1000 回の半分以下となった要因は, パルス回数 1000 回では, ①連続パルス回数が多いため Fe を飛ばすターゲットの先端形状が熱で変形して, 蒸着量が増加する, ②ターゲットが高温になり通常よりも多くの Fe 粒子が蒸着する, ことが考えられる.

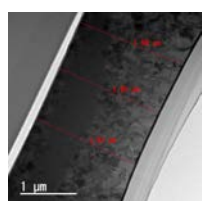


図 5 TEM データ
(倍率 60k)

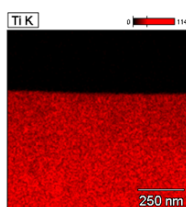


図 6 EDX データ
(倍率 160k, Ti)

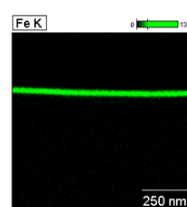


図 7 EDX データ
(倍率 160k, Fe)

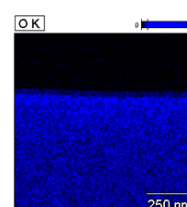


図 8 EDX データ
(倍率 160k, O)

次にパルス回数 100 回の Fe/TiO₂ について, 図 9 に TEM データ, 図 10~図 12 に EDX データ (図 10 : Ti, 図 11 : Fe, 図 12 : O) をそれぞれ示す. 図 9 より, パルス回数 1000 回, 500 回とは異なり, Fe が層にならず粒子としてコーティングされている. TiO₂ 薄膜と Fe 層の厚みに注目すると, 今回計測した厚みの平均は TiO₂ が約 1.81 μm, 粒子の長辺を代表長さとする Fe が 28 nm であった.

別途行った CO₂ 還元実験より, 触媒量あたりの生成物濃度が最も多くなったのは, Fe が粒子状のパルス回数 100 回となった. これは, Fe 層が TiO₂ 薄膜を覆うと TiO₂ が十分な光照射と被反応物との接触が得られず, CO₂ 還元性能が低下するためと考えられる.

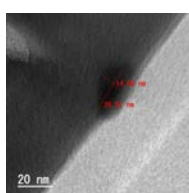


図 9 TEM データ
(倍率 100k)

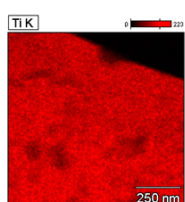


図 10 EDX データ
(倍率 160k, Ti)

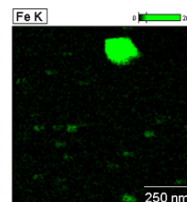


図 11 EDX データ
(倍率 160k, Fe)

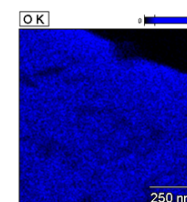


図 12 EDX データ
(倍率 160k, O)

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- ・石田教晃, 西村頭, 立松大智, 廣田真史, 小塩明, 小海文夫, 還元剤が Fe/TiO₂ 光触媒の CO₂ 還元特性に及ぼす影響評価, 化学工学会第 48 回秋季大会, 徳島大学, 2016 年 9 月 6 日~8 日.
- ・西村頭, 石田教晃, 立松大智, 廣田真史, 小塩明, 小海文夫, Fe/TiO₂ 光触媒の CO₂ 還元性能向上のための Fe 担持条件および還元剤の検討, 化学工学会第 82 年会, 芝浦工業大学, 2017 年 3 月 6 日~8 日.

グロー放電プラズマを利用した揮発性有機化合物の 分解メカニズムの解明

Degradation mechanisms of volatile organic compounds by glow discharge plasma

布目 陽子・広島大学・大学院総合科学研究科・助教
植木 保昭・名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

1. 研究目的

浮遊粒子状物質 (SPM) や光化学オキシダントのような大気汚染物質は様々な要因によって引き起こされるが、その主な要因として揮発性有機化合物 (VOCs) があげられている。グロー放電プラズマ (GDP) は、プラズマ化学気相蒸着 (CVD) プロセスにおいてシランガスなど原料ガスの分解に用いられていることから、VOCs の分解に期待されるだけでなく、質量分析計 (MS) と接続することで VOCs の分解物も観察できると期待される。

そこで、本研究では、GDP を利用したソフトプラズマイオン (SPI) 源を用い、GDP における VOCs の分解メカニズムを観察する。具体的には、SPI 源を MS と接続し、GDP における VOCs の分解挙動をその場測定 (in situ) する。

2. 研究内容と成果

本研究では、試料ガスを SPI 源へ直接導入法にて導入し、GDP における試料の分解挙動を MS で観測した。図 1 に SPI-MS 分析装置の概略図を示す。グロー放電プラズマは直流電源を用いて生成させた。試料は有機溶媒 (オキシレン) を用い、その蒸気を試料ガスとして SPI 源に導入した。イオン源内の圧力はマノメーターでモニターした (400~1500 Pa)。質量分析計の質量範囲は 2~200 m/z にし、スキャン時間は 0.3 秒とした。

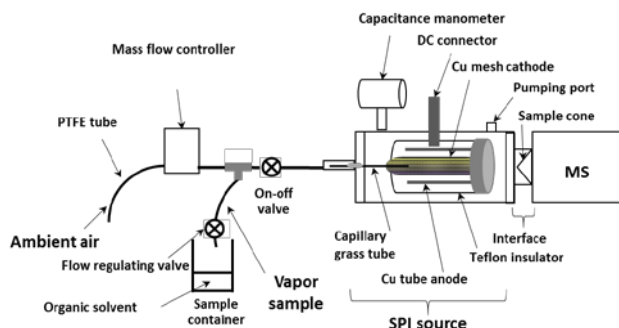


図 1 グロー放電プラズマイオン源を用いた SPI-MS 装置

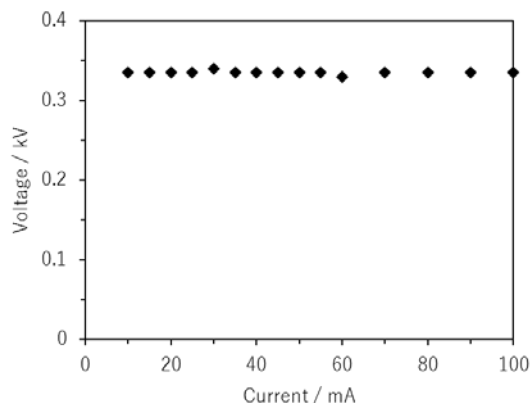


図 2 電流-電圧特性：放電ガス；大気、放電管内圧力；1000 Pa

放電ガス圧 1000 Pa における電流-電圧特性を調査したところ、電流値に関係なく、電圧が一定であり、正常グローを示したため、SPI 源を電流制御にて操作した (図 2)。放電電流 40 mA、放電管内圧力 1000 Pa における α -キシレンのマススペクトルを図 3 に示す。 $m/z = 106$ は α -キシレンの分子イオンピーク、 $m/z = 91$ は α -キシレンのフラグメントピークと帰属した。放電電流を変化させたときの α -キシレンの分子イオンピークの強度をプロットした (図 4)。 α -キシレンの分子イオンピーク ($m/z = 106$) は電流が上昇するにしたがって強度が増加したが、50 mA 以上では分子イオンピーク強度の減少が見られた。これは、電流値が増加すると、励起窒素分子によるイオン化が促進されるが、ある一定以上の電流が流れると、電子衝突による α -キシレンの分解がイオン化よりも促進されるためと考えられる。

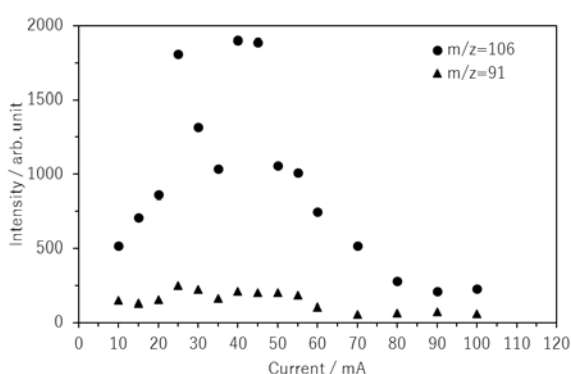


図 4 放電電流を変化させたときの分子イオンピークの強度変化：放電ガス；大気、試料ガス； α -キシレン、放電管内圧力；1000 Pa

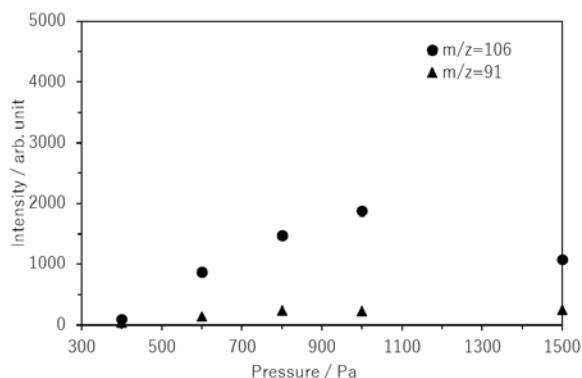


図 5 放電管内圧力を変化させたときの分子イオンピークの強度変化：放電ガス；大気、試料ガス； α -キシレン、放電電流；30 mA

こったと考えられる。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>なし

<国際・国内会議>なし

<産業財産権>・出願状況、取得状況なし

ハイパボリック・メタマテリアルによる高効率有機発光デバイスの開発

Development of efficient organic luminescent devices based on hyperbolic metamaterials

松井 龍之介・三重大学・大学院工学研究科 電気電子工学専攻・准教授
須賀 俊輝・三重大学・大学院工学研究科電気電子工学専攻・博士前期課程 1 年
岩田 聡・名古屋大学未来材料・システム研究所・高度計測技術実践センター・教授

1. 研究目的

誘電体と金属のナノ薄膜の交互積層により得られるハイパボリック・メタマテリアル (hyperbolic metamaterial: HMM) は、見る方向に応じて金属あるいは誘電体的に振る舞う極端な光学異方性を示し、量子ドットや蛍光色素の発光増強なども報告されている。一方で、有機半導体を用いた有機エレクトロニクスは、軽量、フレキシブル、低消費電力といった、従来には無いエレクトロニクスデバイスの創製を可能とするものとして期待されている。申請者等はこれまでに、銀と二酸化チタンの交互積層によるハイパボリック・メタマテリアルを基板として用い、有機半導体 Alq3 薄膜において約 2.6 倍の蛍光増強を得ている (松井他、電学論、(2015))。本研究では、ハイパボリック・メタマテリアルを有機発光トランジスタへ組み込み、発光効率の向上および駆動電流の低減を図り、高効率な発光デバイスの開発によって、省エネルギーに貢献する。

2. 研究内容と成果

本研究では、ハイパボリック・メタマテリアルを組み込むことによる有機発光トランジスタの高効率化を検討する。図 1 に素子構造の概略図を示す。基板としては熱酸化膜付きのドーパシリコンを用い、ゲート電極を兼ねる。ハイパボリック・メタマテリアル構造としては従前の検討を踏まえ銀と二酸化チタンのナノ薄膜の交互積層によるものとし、その作製には先端研の 3 元マグネトロンスパッタ装置を利用した。電荷注入のためのソースおよびドレイン電極は楕形の形状を採用することとしたが、チャンネル長は 5 ミクロンであり、フォトリソグラフィおよびリフトオフ

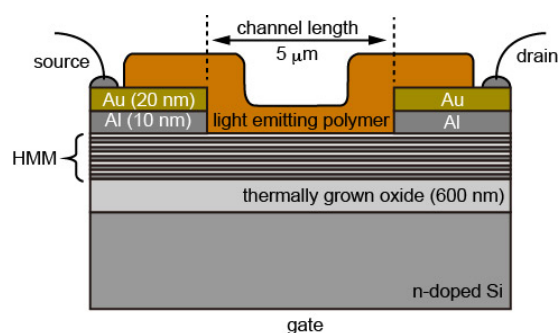


図 1 : ハイパボリック・メタマテリアルを組み込んだ有機発光トランジスタ素子の概略図

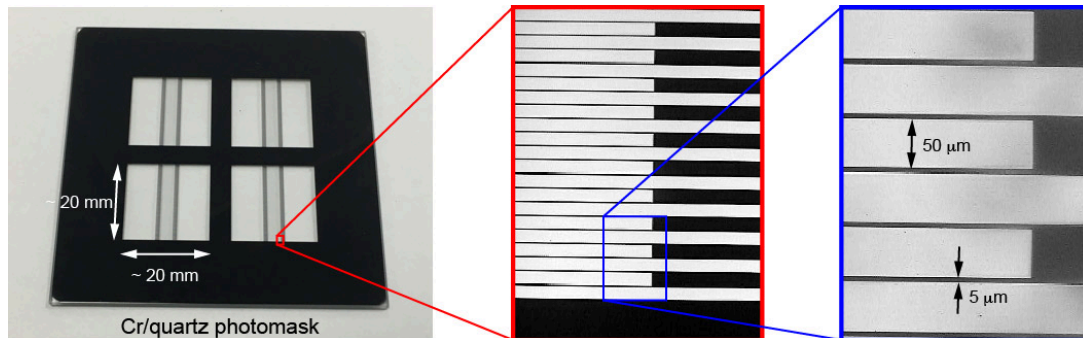


図 2 : 作製したフォトリソグラフィーによる楕形電極作製のフォトマスク

プロセスにて形成することとした。まずは VBL の露光装置等を利用し、楕形電極作製のフォトマスクを作製した。図 2 に作製したフォトマスクの外観および光学顕微鏡像を示す。設計通りのフォトマスクが得られている。作製したフォトマスクを用いた楕形電極の作製にも取り組んだ。レジストパターンの形成には VBL のマスクアライナ等を利用した。電極材料としては有機発光層への電荷注入の効率を考慮してアルミと金を採用することとし、金属電極形成には同じく VBL の電子ビーム蒸着装置を用いた。レジストのスピコートや露光条件などの最適化に取組み、現状までにはほぼ設計通りの楕形電極が再現性良く形成できるまでに至っている。図 3 にリフトオフ後の楕形電極の光学顕微鏡像を示す。

今後は有機半導体層をスピコート法により形成し有機発光トランジスタ素子を完成させ、電流-電圧、発光強度-電流特性、発光スペクトルなどの素子特性を評価していく。また、十ナノメートル程度の厚さの銀と二酸化チタンの交互積層により形成したハイパボリック・メタマテリアルの上に楕形電極を形成した場合には、ソース・ドレイン電極間の短絡も見られた。ハイパボリック・メタマテリアルの最外層の二酸化チタン層の厚さも素子を安定に動作させるための重要なパラメーターであると考えられ、今後詳細に検討していく。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

なし

<国際・国内会議>

なし

<産業財産権>

なし



図 3 : 作製した楕形電極の光学顕微鏡像

磁気光学イメージングプレートの開発

Development of magneto-optical imaging plates

石橋隆幸・長岡技術科学大学大学院・工学研究科・教授
 婁 庚健・長岡技術科学大学大学院・工学研究科・博士学生
 箸中 貴大・長岡技術科学大学大学院・工学研究科・修士学生
 長久保 洋介・長岡技術科学大学大学院・工学研究科・修士学生
 岩田聡・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

電流または磁場分布を可視化する技術は、電気機器の検査技術として重要な技術であり、電力利用の高効率化のためには必要不可欠な計測技術である。しかし、10センチを超える領域をリアルタイムで測定可能なイメージング技術は存在していない。磁場分布および電流分布をリアルタイムで可視化可能な技術として、直流からマイクロ波应用到る広範囲な周波数領域における計測が可能な磁気光学イメージング技術が存在するが、これまで単結晶基板上にしか作製することができなかつたため作製できる大きさに限界があった。そこで本研究では、大面積（直径 20 センチ）かつ直流からマイクロ波領域までの周波数を計測可能な磁気光学イメージングプレートを開発することを目的とする。

2. 研究内容と成果

磁気イメージングプレートの材料として有望な $\text{Nd}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ 薄膜を有機金属分解法により作製し、磁化曲線と磁気異方性の評価を行った。基板には、単結晶の $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG) およびガラス基板を用いた。磁場勾配型磁力計 (AGM) により測定した $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (Bi2.5:NIG) 薄膜の垂直及び面内方向の磁化曲線を図 1 に示す。Nd 鉄ガーネットの磁化容易軸は [111] であるため、GGG(111) 基板の場合は垂直磁気異方性を示すが、反磁界による形状磁気異方性によって、面直方向のヒステリシスは傾いている。一方、GGG(100) 基板の場合は面内に磁化容易軸を有し、面直方向は直線上の磁化曲線となった。どちらの場合も、

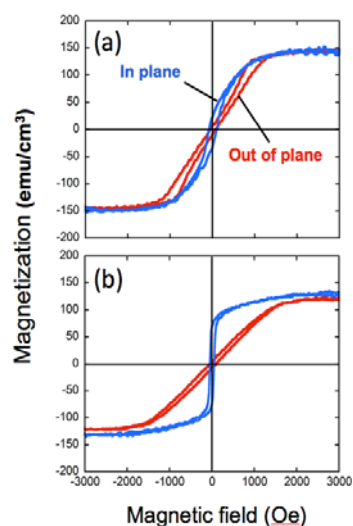


図 1 (a)GGG(111), (b)GGG(100)基板上に作製した Bi2.5:NIG 薄膜の磁化曲線

面直方向の磁化曲線は、保磁力が小さく、磁気イメージングに適した特性を有することがわかった。特に、GGG(111)上に作製したガーネットは、飽和磁場が小さく、磁場感度が高くとれることがわかった。

次に、 $\text{Nd}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ の磁歪定数を求めるための予備実験として、フレキシブルガラス基板上に成膜した $\text{Nd}_2\text{BiFe}_4\text{GaO}_{12}$ (Bi1-NIGG)についてトルク測定を行った。図2に、4 kOeの

磁場を印加した状態で、圧縮歪みを印加したときと引張歪みを印加したときの測定値から得られたトルク曲線を示す。この測定結果から、磁歪定数は、 $\lambda = 5.67 \times 10^{-7}$ と求めることができた。今後は、Bi置換量の大きな試料についての定量的な評価を行う必要があるが、磁歪定数が比較的小さいことから、歪みが多少加わった状態においても磁気イメージングプレートとして機能することが期待できることがわかった。

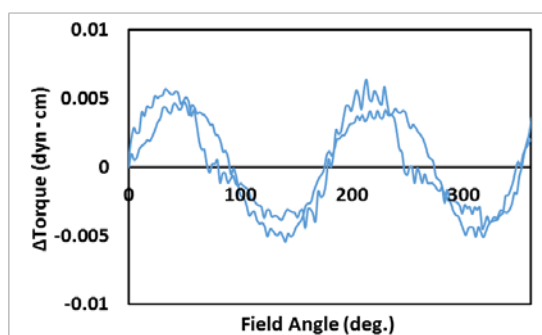


図2 Bi1-NIGG 薄膜のトルク曲線
(印加磁場:4 kOe)

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- ・ 婁 庚健, 石橋 隆幸, 松本 悠人, 栢 修一郎, 石山 和志, 加藤 剛志, 岩田 聡, 安達 信泰, 谷山 智康, 高濃度ビスマス置換ネオジム鉄ガーネット薄膜の高周波数特性の評価, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-17-038, 2017. (2017/3/10 予定)

<国際・国内会議>

- ・ 婁 庚健, 安達 信泰, 加藤 剛志, 岩田 聡, 松本 悠人, 栢 修一郎, 石山 和志, 石橋 隆幸, 高濃度 Bi 置換 Nd 鉄ガーネット薄膜のFMR測定, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 平成28年9月13日~9月16日
- ・ 箸中 貴大, 佐々木 教真, 石橋 隆幸, 加藤 剛志, 岩田 聡, 谷山 智康, $\text{Nd}_{3-x}\text{Bi}_x\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ 薄膜に生じた応力誘導磁気異方性の評価, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 平成28年9月13日~9月16日
- ・ 婁 庚健, 石橋 隆幸, 松本 悠人, 栢 修一郎, 石山 和志, 加藤 剛志, 岩田 聡, 安達 信泰, 谷山 智康, 高濃度ビスマス置換ネオジム鉄ガーネット薄膜の高周波数特性の評価, 電気学会マグネティックス研究会, 名古屋大学, 平成29年3月10日 (予定)

自由電子レーザーを用いた極端紫外域での非線形光学効果測定に向けた磁性超薄膜の成膜、評価

Growth and Evaluation of ultrathin magnetic thin films for measurement of nonlinear optical effect in extreme ultraviolet region using free electron laser

研究代表者：松田巖・物性研究所・准教授

研究分担者：山本真吾・東京大学大学院理学系研究科・博士課程 3 年

研究所担当教員：岩田聡・名古屋大学未来材料・システム研究所高度計測技術実践センター・教授

1. 研究目的

我が国が兵庫県播磨に建設した X 線自由電子レーザー (XFEL) SACLA を用いた新しい分光法の開発に向けて、その測定試料となる磁性超薄膜試料の成膜及び評価をする。そして実際に軟 X 線磁気光学のダイナミクス実験を放射光施設及び XFEL 施設にて行う。

2. 研究内容と成果 (12pt ゴシック体)

成膜・評価

本研究では MgO を基板として Au/Fe/Au のヘテロ構造を作成することで磁性膜試料を用意した。

Fe 層の膜厚は < 1nm として 1~6.6 層相当のものを各種用意作成し、それぞれの電子回折 (RHEED) パターンでその結晶性を確認した (図 1)。こ

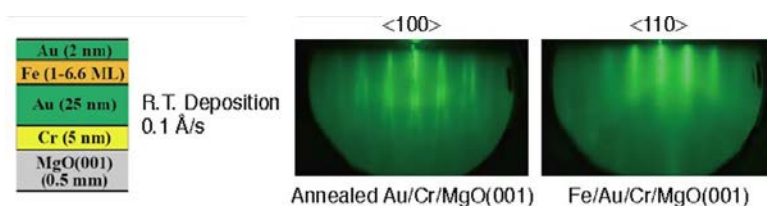


図 1 磁性超薄膜試料とその電子回折(RHEED)パターン

の試料に対して磁気トルク及び X 線磁気円色性 (XMCD) 測定を実施し、Fe 超薄膜の磁気異方性を評価した。膜厚が薄くなるほど面直磁化になりやすくなり、また軌道磁気モーメントの変化が顕著変化することが分かった。

ダイナミクス測定

本研究では次に Au/Fe/Au/MgO 磁性薄膜試料について、軟 X 線を用いた時間分解磁気光学測定を放射光施設 (BESSY, 独) 及び XFEL 施設 (SACLA, 日本) で実施した。

図2は放射光時間分解 XMCDの結果を Au/Fe(0.35 nm 厚)/Au 試料に対して行ったものである。時間分解測定はレーザーをポンプ光とした pump-probe 法で行った。ポンプ光の強度に対して XMCD 信号の時間変化(ピコ~ナノ秒)が著しく変わっていくことが分かった。特にポンプ光の強度が大きくなると、消磁過程が高速化し、 $5\text{mJ}/\text{cm}^2$ 以上では放射光パルスに相当する時間分解能(約 50 ps)以下の変化であることが示唆された。

そこで同一の Au/Fe(0.35 nm 厚)/Au 試料に対して、より高い時間分解能を持つ XFEL 施設 SACLA にて、軟 X 線磁気光学測定を行うことにした。図3に示す実験装置は本グループが開発したもので、ビームラインに持ちこんだ。時間分解軟 X 線磁気光学及び非線形分光測定が可能である。図4は XFEL を用いた時間分解実験の結果であり、300 フェムト以下の超高速消磁過程が存在することが確認された。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

2 報の論文を執筆中。

<国際・国内会議>

・ 松田巖、Ultrafast spin dynamics

of magnetic metal alloys traced by resonant magneto-optical Kerr effect using free electron laser, FTAP2017, ドバイ(UAE) 2017年2月22日

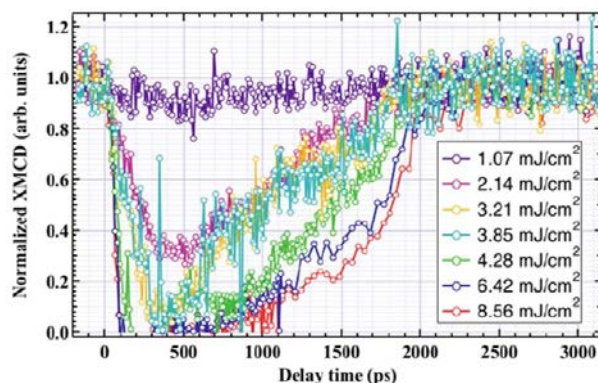


図2 Au/Fe(0.35 nm 厚)/Au 磁性薄膜試料の放射光時間分解 XMCD の結果。(時間分解能：約 50ps)

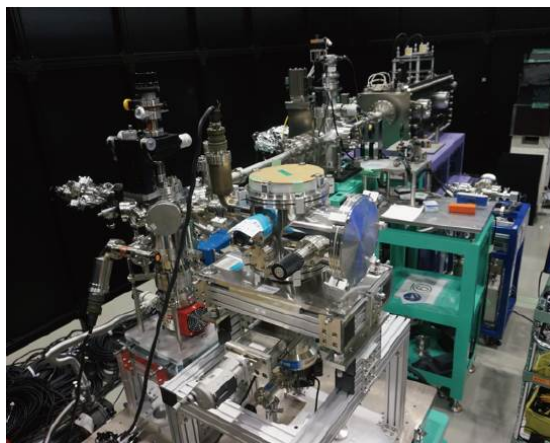


図3 XFEL 施設 SACLA での実験の様子。

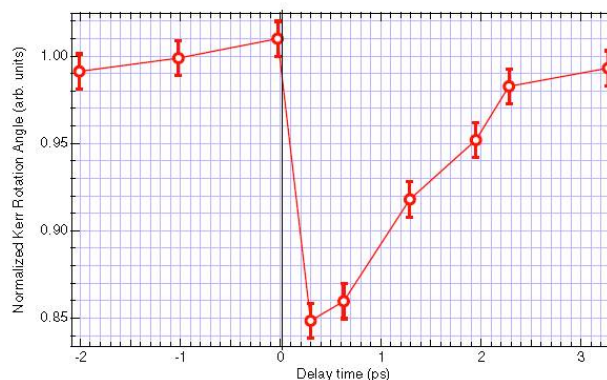


図4 XFEL を用いて行った時間分解軟 X 線磁気光学カー効果測定の結果。ポンプ光のパワー

省エネルギー・低炭素化を推進する材料強度評価の 新学術・技術基盤創生

Formation of Novel Academic/Technical Bases on Materials Strength Evaluation toward
Energy Saving and Low Carbon Emission

高橋可昌 関西大学 システム理工学部 准教授
武藤俊介 名古屋大学未来材料・システム研究所 教授

1. 研究目的

内燃エンジン式に比べて劇的な省エネルギー化・低炭素化を達成する燃料電池自動車は、高圧水素ガス方式を採用したものが普及しつつあるが、水素ガスに曝される車載タンク・蓄圧インフラ等では水素脆性に対する強度の確保が極めて重要な課題である。しかし、水素脆性は複雑極まりない材料劣化現象であり、その発現機構の解明は現在もおお不十分である。本研究では、諸説ある水素脆性の素過程のうち「格子脆化 (Hydrogen-Enhanced Decohesion; HEDE)理論」を特に取り上げ、固体中における応力・水素の分布状態と脆性破壊現象の関係性をおかつて無い極めて精密な力学 - 化学複合実験解析(mechano-chemical in situ TEM experiment)により検証することを目的としている。

2. 研究内容と成果

上記目的を達するために、報告者らは、マイクロスケールの試験片の定量的な破壊実験を水素ガス中において行いつつ電子エネルギー損失分光法(Electron Energy-Loss Spectroscopy; EELS)分析を同時に行い水素分布を解析する、という手法に挑戦している。このような極めて難易度の高い実験を一度で達成することは不可能である。そこで、図1に示す予備実験を試みた。ここでは、異なる材料の界面(SiN/Cu)を有するマイクロ試験片をナノインデント式力学ホルダーへ取り付け、反応科学超高压電子顕微鏡(RSHVEM)中においてその場観察負荷試験を実施し、破壊荷重の検出

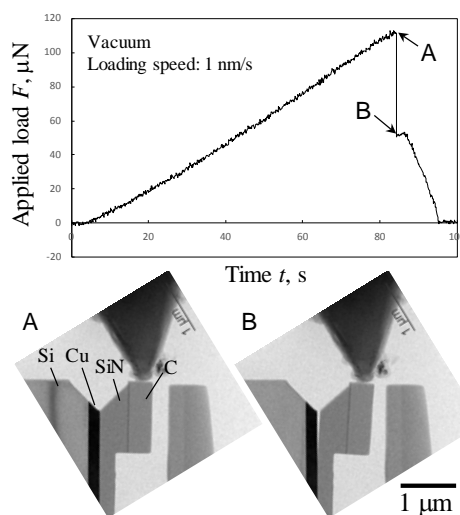


図1 マイクロ試験片のその場観察破壊実験

を行っている。本実験結果を基に、破壊発生時(図中 A 点)において試験片に生じる応力分布を有限要素法により解析し、切欠き底部近傍の応力特異場強さ(K_c)を評価した。同じ実験を真空中および水素含有ガス(N_2 - H_2 混合ガス)中에서도行い K_c 値を比較したところ、図2に示す結果を得た。すなわち、水素含有ガス中における破壊抵抗値は、真空中に比べて約 30%低下した。以上の予備実験により、SiN/Cu 界面を用いた HEDE 理論の検証実験に道筋が付いたと判断し、STEM-EELS 分析を加えた複合実験を行った。

本実験に先立ち、酸素ガスによるコンタミ低減処理 (20Pa, 10min.) を実施した。また、本実験は水素(H)の EELS スペクトルを捉えやすくするために

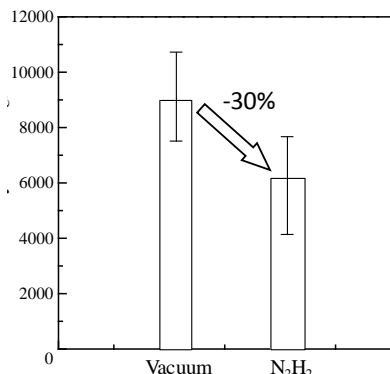


図2 破壊抵抗に及ぼす水素ガスの影響

Ne-H₂混合ガス中で実施した。破壊後の試験片の様子(STEM 像)および切欠き底近傍の STEM-EELS マッピング結果をそれぞれ図3および図4に示す。試験片表面には薄い付着層が形成されているが、これは SiO₂であることが判明した(図3(b))。更に、SiO₂は評価対象である SiN/Cu 界面に沿ってもわずかに形成されることがわかった(図4)。これらの結果は、検出を目指している微量な H に代わり、Si-O 結合によって界面が終端されていることを示している。

上記の結果は、(i)事前の酸素処理、(ii)Ne ガスによるスパッタリング効果、によりもたらされた可能性が高い。一方、精度の高い STEM-EELS 分析のためには、酸素処理および Ne-H₂ガスの使用は必須である。今後、別の材料系を用いる等により、評価を継続する予定である。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- Y. Takahashi, K. Aihara, I. Ashida, K. Higuchi, Y. Yamamoto, S. Arai, S. Muto, N. Tanaka, Evaluation of interfacial fracture strength in micro-components with different free-edge shape, Mechanical Engineering Journal, Vol. 3, No. 6, 2016, ID: 16-00108

<国際・国内会議>

- 相原寿哉, 高橋可昌, 宅間正則, 齋藤賢一, 佐藤知広, Si/Cu マイクロ要素界面端からの剥離き裂発生強度 (界面端形状の影響評価), 日本機械学会関西支部第 92 期定時総会講演会, 大阪大学, 2017 年 3 月 13 日~14 日.
- 浅野瞭, 高橋可昌, 宅間正則, 齋藤賢一, 佐藤知広, 個別粒界試験片を用いた粒界水素脆性の評価, 日本機械学会関西支部第 92 期定時総会講演会, 大阪大学, 2017 年 3 月 13 日~14 日.

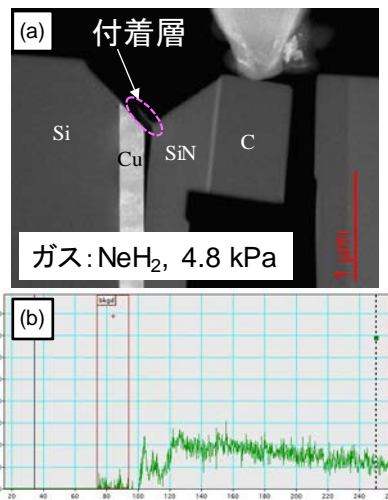


図3 (a)水素含有ガス中における破壊実験, (b)実験中に付着した層の EELSスペクトル

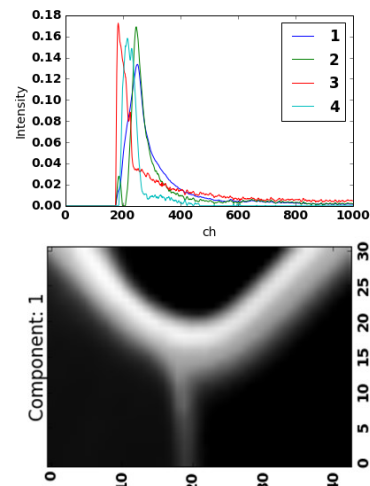


図4 切欠き底のSTEM-EELS エリア分析結果(下図は第1成分; SiO₂の分布に対応)

電子ボルテックスビームが拓く新たな量子イメージングと材料創成

Quantum Imaging and Creative Materials Explored by Electron Vortex Beams

内田正哉・埼玉工業大学・先端科学研究所・教授
齋藤晃・高度計測技術実践センター・教授
桑原真人・高度計測技術実践センター・准教授
石田高史・高度計測技術実践センター・助教

1. 研究目的

研究代表者（内田）らにより世界で初めて電子ボルテックスビームが生成された (Nature, 2010)。電子ボルテックスビームはボルテックス (渦、位相特異点)、量子化した軌道角運動量をもつユニークな特性を有する電子ビームである。これまで代表者と名古屋大学のグループを含め、基礎研究のみならず様々な応用を見据えた研究が世界的に行われてきた。本研究の目的は、名古屋大学未来材料・システム研究所の研究者と共同で収差補正電子顕微鏡、スピン偏極電子顕微鏡、超高压電子顕微鏡を駆使し、電子ボルテックスビームの特性を用いた新しい量子イメージングの手法を開拓することである。電子ボルテックスビームは軌道角運動量および軌道角運動量に伴う磁気モーメントをもつことから、磁気・電子スピン状態を高感度に検出するプローブともなる。新たな量子イメージング法の開発により、高性能モーターのための磁性材料や熱電材料などの先端的材料の創成を行い、革新的省エネルギーの実現に寄与することを目指す。

2. 研究内容と成果

電子ボルテックスビームの特性を用いた新しい量子イメージングの手法を開拓するため、軌道角運動量の検出器の開発を行った。具体的には、1) 低次と高次の回折強度が等しくなる「ダンマン格子」をベースに、ボルテックスビームを生成する「ダンマン渦回折格子」のパターン設計、2) 名古屋大学未来材料・システム研究所超高压電子顕微鏡施設の集束イオンビーム装置 (FIB) を用いて、窒化シリコンメンブレン上に、「ダンマン渦回折格子」の作製を行った。図 1 は作製した回折格子の透過型電子顕微鏡 (TEM) 像である。今後、FIB による加工精度をさらに上げての回折格子の作製を行い、実際に軌道角運動量の検出を目指す予定である。この開発により、磁性材料などの磁気を高感度で検出できる新しい量子イメージングができるようになる。

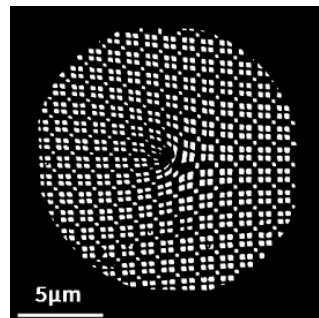


図 1 ダンマン渦格子の TEM 像

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- ・ 南部裕紀, 野口雄紀, 齋藤晃, 内田正哉, Nearly nondiffracting electron lattice beams carrying vortices, *Microscopy*, (投稿中) .

<国際・国内会議>

- ・ 野口雄紀, 齋藤晃, 内田正哉, ダンマン渦回折格子をもちいた軌道角運動量の測定, 日本顕微鏡学会第73回学術講演会, 札幌コンベンションセンター, 2017年5月13日~6月1日(予定) .

<産業財産権>

- ・ 特になし

軌道角運動量電子ビームによる単一磁気スキルミオンの生成

Creation of a single magnetic skyrmion using electron vortex beam

森川大輔・理化学研究所・創発物性科学研究センター・特別研究員
柴田基洋・理化学研究所・創発物性科学研究センター・基礎科学特別研究員
齋藤晃・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授
桑原真人・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授
石田高史・名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

1. 研究目的

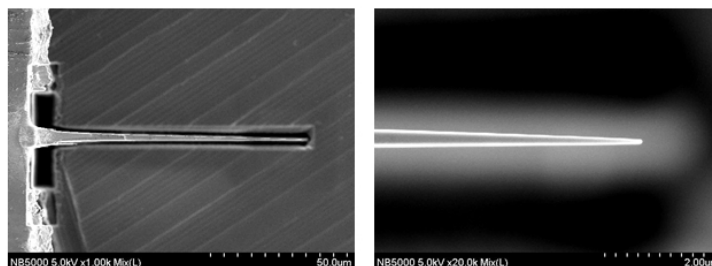
磁気スキルミオンは、従来の強磁性ドメイン壁と比べ数桁低い電流密度により駆動できることから、次世代の低消費電力メモリおよびストレージデバイスへの応用が期待され、精力的な研究がなされている。磁気スキルミオンの生成には、磁場や電流、応力などの利用が報告されているが、まだ単一孤立状態の磁気スキルミオンのコントロールは実現していない。理論計算から、磁気スキルミオンサイズ相当の局所領域に磁場を印加することにより単一磁気スキルミオンの生成が予想されるが、ナノメートルサイズの局所磁場を作り出すことは困難であった。

近年、透過型電子顕微鏡内において、軌道角運動量をもった電子ビームの生成が報告された。この電子ビームは光軸上に磁場を発生させることができるため、この局所磁場によるスキルミオン生成が可能ではないかと考えた。本研究の目的は、軌道角運動量電子ビームによる局所磁場を用いて、単一の磁気スキルミオンの生成を試みることである。

2. 研究内容と成果

- 軌道角運動量電子ビーム生成のための磁性針の作製を行った。材料は Ni を用いた。バルク試料から集束イオンビーム(FIB)加工装置を用いて棒状の試料をピックアップし、透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察用切り欠けメッシュに固定した後、針状へと加工した。試料ステージの傾斜は 58 度までの制限があるが、集束イオンビームの回り込みの効果を利用し、先端でおおむね 100 nm 程度の太さの針の生成に成功した。図 1 に作成した磁性針の SEM 像を示す。観察方向を変えても形状が変化しないことから、

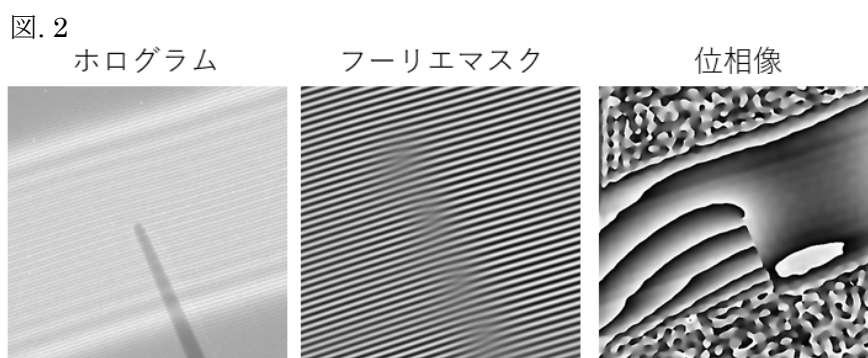
図. 1 磁性針のSEM像



均一であることが確認できた。

- 作製した磁性針を電子線ホログラフィー実験が可能な TEM に挿入し、ホログラムを撮影した。図 2 に撮影したホログラムおよび、フーリエマスクの処理後の画像を示す。ここで見られている縞の変化は位相特異点に対応する。ホログラムから再生された位相像も示してある。今回作製した磁性針では、針に沿っていくつかの位相特異点が並んでいることが明らかになった。この結果は先行研究とよく一致しており、良好な磁性針が作製できたものと思われる。
- 作製した磁性針を用いて軌道角運動量電子ビームを生成するためには、TEM の集束絞り位置に挿入する必要がある。一方で、TEM では電子ビームへのレンズ作用のために随所に磁場レンズが使用されている。挿入される位置やレンズの条件によっては、テスラオーダーの磁場がかかる状況もある。また上述の磁性針は、何回かの TEM 観察後には曲がってしまっていた。原因は TEM 観察以外の可能性も十分に考えられるが、均一でかつ非常に細い形状の場合は簡単に变形してしまう危険性が高い。そこで針の太さをマイクロメートルオーダーとし、かつ針状ではなく板状に成型することで、この変形を防止することとした。すでに作製した磁性針の TEM 集束絞り位置への導入に成功しており、現在、電子線の調整および軌道角運動量電子ビームの

生成の確認
を行っている。今後、本研究の最終目標とする磁気スキルミオン生成実験へと展開する予定である。



【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- なし

<国際・国内会議>

- なし

<産業財産権>

- なし

ポーラス Cu におけるナノ双晶と触媒活性

Nano twins and catalytic activity in porous Cu

研究代表者氏名・東北大学・多元物質科学研究所・教授 蔡安邦
研究分担者氏名・東北大学・多元物質科学研究所・助教 西本一恵
研究分担者氏名・東北大学・多元物質科学研究所・准教授 亀岡聡
研究所担当教員氏名・名古屋大学・未来材料・システム研究所 齋藤晃
名古屋大学・未来材料・システム研究所 荒井重勇

1. 研究目的

触媒は革新的省エネルギー実現のためのキーマテリアルの一つであり、その中でもナノポーラス金属が貴金属代替用の新規触媒材料として注目されている。例えば、Al 基金属間化合物をアルカリや酸等の水溶液でリーチングして得られるポーラス金属は、サブミクロンオーダーのポーラスを有するリガメント構造を有し、ナノ金属粒子が存在しないバルク状態（低表面積）にも関わらず、貴金属に匹敵する高い触媒活性を示すバルク触媒である。特に、ポーラス Au や Cu は高い CO 酸化特性を示す有望な触媒材料であるが、その高い触媒活性の起源はまだ十分に解明されていない。我々はそのポーラス金属組織内に存在する格子欠陥の存在に着目している。その金属組織の特徴はラメラ双晶が数 nm から数十 nm の間隔で高密度に導入されている点である。双晶境界の表面原子の配位数は通常表面原子に比べて低く、表面エネルギーが高いとされるため特異な活性サイトになり得ると考えられる。本研究ではポーラス金属の高い触媒活性の起源を解明することを目的とし、まずそのポーラス金属の組織評価と双晶境界周辺的环境電顕観察を行い、環境雰囲気下でのポーラス金属組織の変化過程をその場観察により評価した。

2. 研究内容と成果

Al₂Cu の単相組成で原料を秤量し、アーク溶解炉で溶解反応させ母合金を得た。その後 550°C 24h の均一化処理を施した試料を乳鉢で粉碎し、25 μm 以下の粒子をふるい分けした粉末を、HCl および NaOH 水溶液を用いてリーチング処理を施し、ポーラス Cu を作製した。

反応科学超高压走査透過電子顕微鏡 (JEM-1000K RS、加速電圧 1000kV) を使用しマイクログリッド上に散布したポーラス Cu の組織観察を行った。ポーラス Cu は 100nm 程度

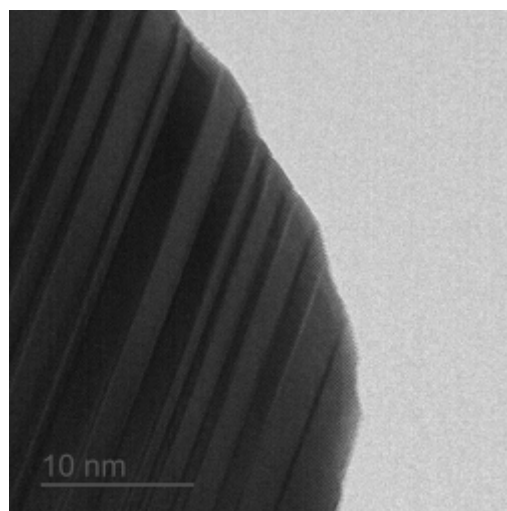


図1. ポーラスCuの高分解能TEM像

の結晶粒がつながりあったリガメント構造を有しており、リガメント中に数 nm 間隔で双晶欠陥が高密度に導入されている金属組織だった。また図 1 の[110]方位入射の高分解能 TEM 像では、双晶欠陥が 111 面に平行に導入されており、その表面は双晶境界に対応して凹凸のファセットを形成していることが分かった。また、室温での酸素雰囲気下での環境電顕観察においては、図 2 のようにナノポーラス Cu の表面が酸化物に覆われた後、内側のポーラス Cu を侵食するように酸化物が成長していく様子をその場観察した。以上より、Al₂Cu をリーチング処理して作製したポーラス Cu は、高密度にナノ双晶が導入されたりガメント構造を有し、さらに酸素と高い反応性を示すことが分かった。

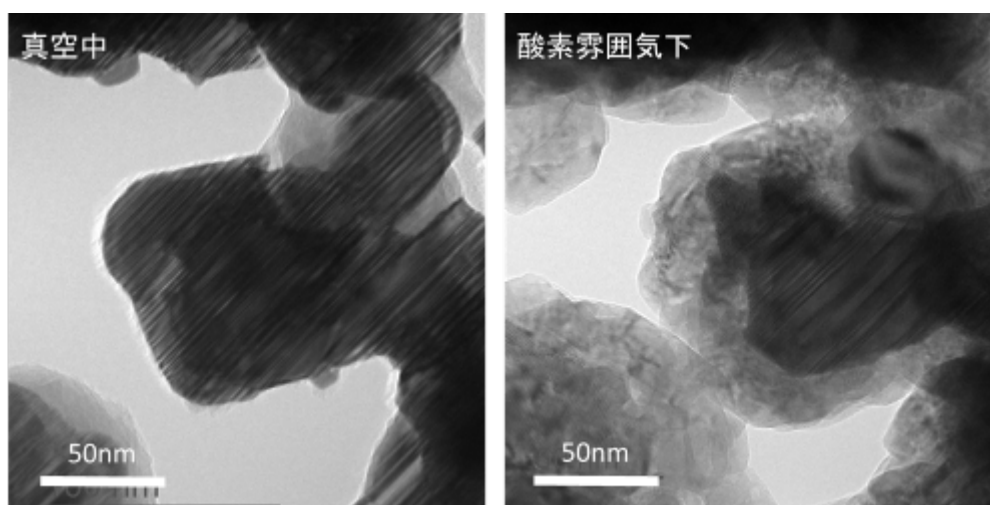


図 2. ポーラス Cu の酸素雰囲気下の HVEM 像

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- ・ 西本一恵, 亀岡聡, 蔡安邦, 荒井重勇, 齋藤晃, ナノポーラス Cu と Al₂Cu のリーチング界面の TEM 観察, 日本金属学会 2017 年春季大会, 首都大学東京南大沢キャンパス, 2017 年 3 月 15~17 日

原子核乾板技術の陽子線治療への応用 Application of nuclear emulsion technology for proton therapy

研究代表者 歳藤利行・名古屋市立西部医療センター名古屋陽子線治療センター・陽子線治療物理科・技師(医学物理)

研究分担者 木村充宏・名古屋市立西部医療センター名古屋陽子線治療センター・陽子線治療物理科・技師(医学物理)

研究所担当教員 中村光廣・名古屋大学・未来材料・システム研究所・高度計測技術実践センター 素粒子計測部・教授

研究所担当教員 佐藤修・名古屋大学・未来材料・システム研究所・高度計測技術実践センター 素粒子計測部・助教

1. 研究目的

陽子線を用いた放射線治療は陽子線治療と呼ばれ、ブラッグピークの特性による高い線量集中性を活かした治療が先進医療として実施され、2016年4月からは小児がんの治療が保険適用になることで、さらなる発展が期待されている。本研究では究極の省エネ放射線検出器である原子核乾板技術、中でもガンマ線と中性子の計測技術を陽子線治療に応用し、照射精度の向上や二次発がんのリスクを効率的に評価するための開発研究を行う。

2. 研究内容と成果

1. 照射中の線量分布の可視化

陽子線が体内の原子核と反応すると、励起した原子核から即発ガンマ線が発生する。このガンマ線を検出し、3次元的に再構成することにより、体内の線量分布を3次元的に可視化する技術が提案されている。本研究ではガンマ線の検出に原子核乾板を用いるための技術開発をすすめている。今年度は原子核乾板による即発ガンマ線検出の原理の検証を目的として、名古屋大学において70gの原子核乳剤の作成と5cm x 6.25cmフィルム60枚の作成、およびフィルム10枚からなるチェンバーを6個組み立て、名古屋陽子線治療センターにおいて人体を模擬した水槽に陽子線ビームを照射、水槽の近くに

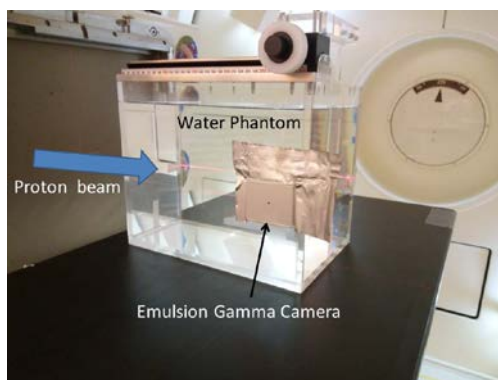


図 1. 即発ガンマ線検出実験セットアップ

はガンマ線検出用の原子核乾板モジュールを設置した(図 1)。その後、名古屋大学にて現像、飛跡読み取りを実施した。現在、読み取りデータの解析をすすめ、原子核乾板中でガンマ線が電子・陽電子対生成を起こす事象を探索している。

・ 2.二次中性子の精密測定

テーマ 1 と同時進行で、陽子線照射に伴う二次中性子の検出を目的にビーム照射実験を行った。名古屋大学において 100 g の原子核乳剤を作成し、5 cm x 6.25 cm フィルム 80 枚からなるチェンバーを作成、名古屋陽子線治療センターにおいて人体を模擬した水槽に陽子線ビームを照射、水槽の後ろ、下流側に中性子検出用の原子核乾板モジュールを設置した。その後、名古屋大学にて現像、飛跡読み取りを実施した。現在、読み取りデータの解析をすすめ、原子核乾板中で中性子による被ばく線量の評価をすすめている。

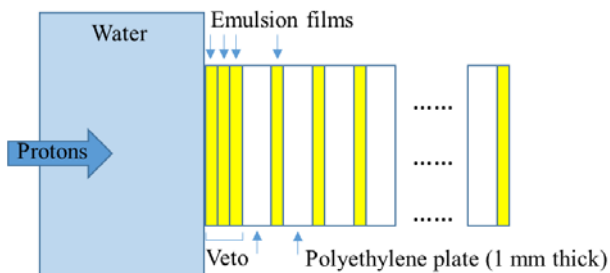


図 2. 中性子検出実験セットアップ

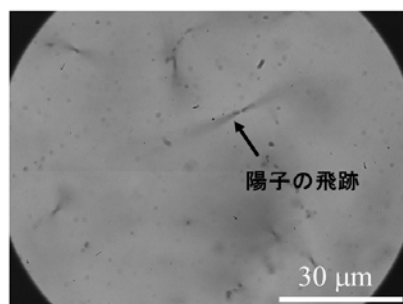


図 3. 中性子反応により生成されたと推定される陽子の飛跡

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

該当なし

<国際・国内会議>

- ・ 木村充宏, 歳藤利行, 原子核乾板技術で切り拓く陽子線がん治療の未来, 2016 年度日本写真学会原子核乾板技術研究発表会, 名古屋大学東山キャンパス, 2017 年 2 月 15 日.
- ・ 木村充宏, 歳藤利行, 原子核乾板技術を用いた陽子線がん治療の高精度化に向けた研究, 第 31 回固体飛跡検出器研究会, 量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所, 2017 年 3 月 9 日~10 日. 発表予定

<産業財産権>

該当なし

原子核乾板超高速読み取り装置 HTS による ミュオン粒子トモグラフィーのバックグラウンドとなる 低エネルギー粒子解析と重原子核同定への応用

Analyses of low energy charged particles as background components against muon radiography
and their application for heavy nuclei identification

伊代野淳・岡山理科大学・理学部・教授

山本紗矢・岡山理科大学・大学院理学研究科・修士 2 年

大畑智滉・岡山理科大学・理学部・4 年生

中村光廣・未来材料・システム研究所附属高度計測技術実践センター・教授

佐藤 修・未来材料・システム研究所附属高度計測技術実践センター・助教

森島邦博・未来材料・システム研究所附属高度計測技術実践センター・特任助教

六條宏紀・未来材料・システム研究所附属高度計測技術実践センター・研究員

1. 研究目的

名古屋大学で開発された原子核乳剤を使用した乾板による素粒子・原子核の観測は、素粒子・高エネルギー物理、高エネルギー天体物理の研究ばかりでなく、ミュオン粒子トモグラフィーへの応用が行われてきた。また、原子核乾板超高速読み取り装置 HTS によって、原子核乾板に記録された飛跡情報は完全にデジタル化され、解析の短期間終了が可能となった。HTS では、飛跡情報として荷電粒子の電離情報に相当する量が得られるが、高電離に対するその性質の理解をさらに進める必要がある。本研究は、2015 年豪州気球実験 GRAINE の解析を通じて、宇宙線原子核の電離情報相当量から電荷決定法の確立を目指した。

2. 研究内容と成果

本研究では、GRAINE 実験の約 14 時間、約 4.5g/cm^2 の残

留大気高度で宇宙線に暴露した原子核乾板中の重原子核飛跡の解析を行ってきた。HTS では、Figure 1 に示すように原子核乾板中の天頂角約 60 度までの荷電粒子飛跡を高速で認識する。この際、断層画像を荷電粒子進行方向に移動させ重ね合わせる手法を用い、Pulse Height (PH) の閾値 (PH=7) から飛跡をトラックとして認識する。閾値以上の和を Pulse Height Volume (PHV) と定義し、これを用いて飛跡弁別を行った。エマルション層当たりの PHV 値が 200 を超える飛跡を抽出し、画像データを Figure 2 に示した。原子核成分であることを示す δ

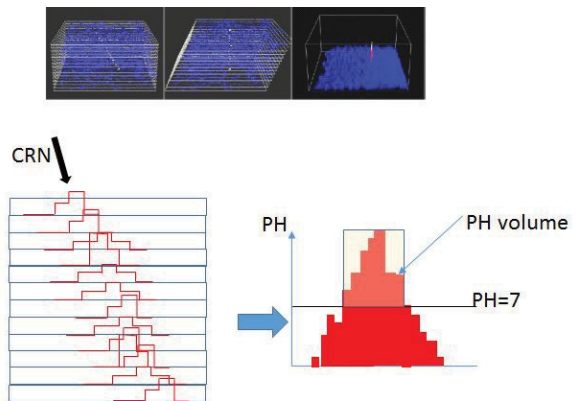


Figure 1 HTS による飛跡認識アルゴリズム

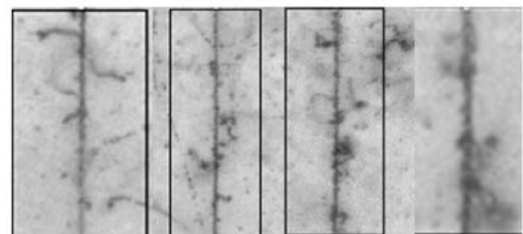


Figure 2 PHV 値が 200 を超える飛跡画像

線を伴う飛跡を検出できている。PHV値には飛跡の天頂角が影響することが分かっており、今回、天頂角に対する依存性を知る為、原子核乾板任意の1枚におけるPHVの分布を、天頂角範囲毎に調べ、最小値、最頻値、最大値を分析した。その結果得た天頂角依存性から、逆にPHV値の規格化を行った。その結果Figure 3に示すように、天頂角依存性の補正に成功した。規格化されたPHV分布は、PHV=50近傍にピークを持つsingle charged particle起源とPHV=200にピークを持つ宇宙線He以上の重原子核成分に弁別を可能とした。

GRAINE実験では、飛跡に時間情報を付与する飛跡タイムスタンプを導入し、フライト前の地上待機中の宇宙線の飛跡とフライト中の宇宙線飛跡を区別することが可能となっている。天頂角 θ が45度以下の飛跡のPHV分布をそれぞれの時間帯に分け解析し、Figure 4, 5に示した。それぞれ地上待機中とフライト中に時間を分けた4層のPHV値の和に対する分布である。Figure 4は地上レベルでの宇宙線ミュオン粒子成分に対応しており、一方でフライト成分には宇宙線陽子成分とHe原子核を含む重原子核成分のエンハンスが現れている事が分かる。

以上、本研究の目的であった重原子核成分の検出に PHV 値を応用することが可能であることを示すことができた。しかし、荷電決定法の確立にはさらにトラック画像の統計量を増やし、 δ 線カウント法との比較が必要と考えられる。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- Satoru Takahashi, Shigeki Aoki, et al., "GRAINE2015, a balloon-borne emulsion -ray telescope experiment in Australia", Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 073F01, 2016
- A. Iyono, S. Yamamoto et al., "Cosmic Ray Nuclei detection in the balloon borne nuclear emulsion gamma ray telescope flight in Australia(GRAINE2015)", EPJ Web Conferences in press 2017

<国際・国内会議>

- A. Iyono, S. Yamamoto et al., "Cosmic Ray Nuclei detection in the balloon borne nuclear emulsion gamma ray telescope flight in Australia(GRAINE2015)", International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI2016), Levedev Institute Moscow Russia, Aug 22-27 2016
- 伊代野淳, 山本紗矢他, "エマルジョンガンマ線望遠鏡 GRAINE 実験 2015 年豪州フライトデータ解析: 宇宙線原子核成分の検出と同定(2)", 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21 日~24 日

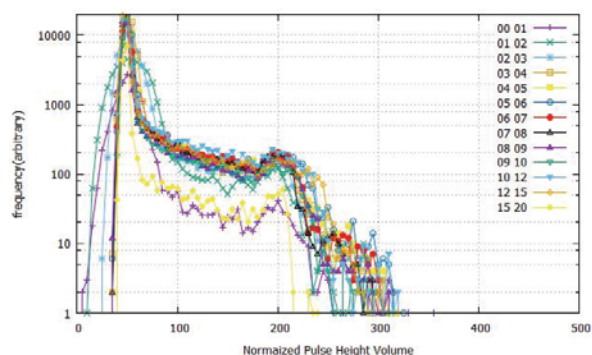


Figure 3 規格化した PHV 分布

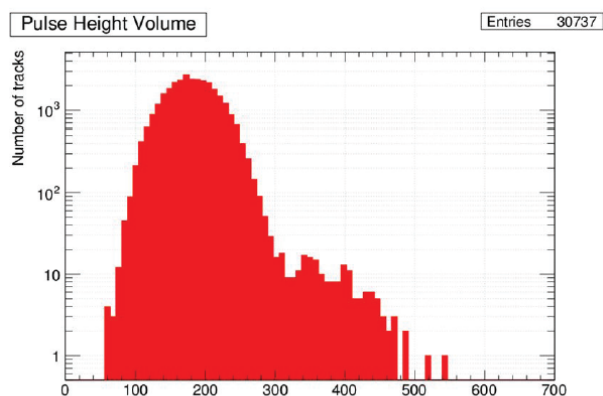


Figure 4 地上待機中宇宙線成分の PHV 分布

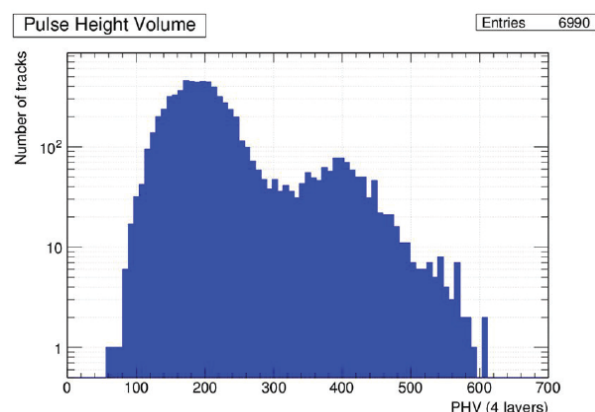


Figure 5 フライト中宇宙線成分の PHV 分布

ミュオンラジオグラフィーを利用した古墳の埋葬施設調査
Inspection for burial facilities of mounded tombs by the method of muon
radiography

研究代表者 西藤清秀・奈良県立橿原考古学研究所・技術アドバイザー

研究分担者 石黒勝己・奈良県立橿原考古学研究所・特別研究員

豊岡卓之・奈良県立橿原考古学研究所・企画部・部長

菅谷文則・奈良県立橿原考古学研究所・所長

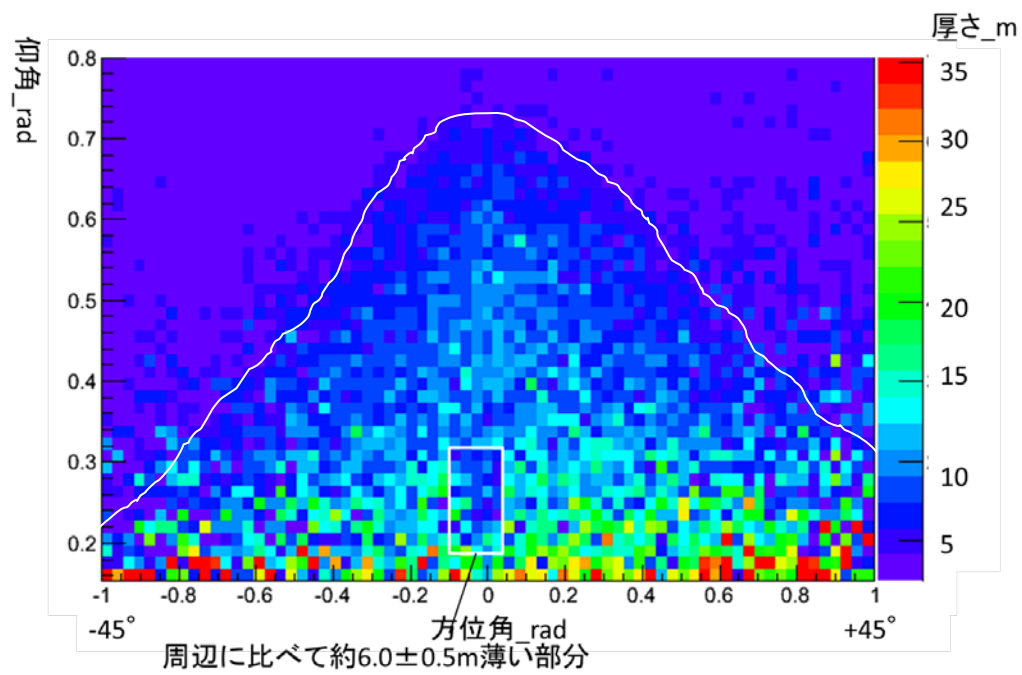
1. 研究目的

古墳時代研究において古墳の埋葬施設の構造、規模、方向を知ることは非常に重要な研究要素である。しかしながらこの研究を進めるにあたって最も重要な大規模古墳は、ほとんど発掘調査はおろか立ち入りすら実施することも困難である。そのため我々は、それらの情報を得るためにミュオンラジオグラフィーを用いる。ミュオンラジオグラフィーは宇宙線ミュオンの透過率を測ることで物質内部密度を計測する素粒子物理学の手法である。ミュオンラジオグラフィーによって古墳内部の埋葬施設の有無や構造情報を得ることが期待できるためその開発、検出器の設置、解析を行う。

2. 研究内容と成果

本研究では古墳および周辺的环境を保全しつつ、内部非破壊検査を行って内部埋葬施設の検出を行うために原子核乾板によるミュオンラジオグラフィーを奈良県生駒郡所在古墳において実施した。実施は地権者の協力を得て行い、原子核乾板によるミュオン検出器を古墳墳丘外部に設置して観測を2016年12月から2か月間行った。原子核乾板には古墳を貫通してきた宇宙線ミュオンの飛跡が1本1本記録され、名古屋大学F研究室(中村研)の自動読み取り顕微鏡ステージでスキャンすることでミュオンの飛来角度と本数のデータを得る。古墳南西側に設置した検出器によるミュオンの角度分布を解析した結果、図のようにミュオン角度分布に異方性が見られ、古墳中心方向の仰角の低い部分にミュオン数が多く、土砂存在距離が短くなっている箇所が存在した。これは石室の空洞の存在を示していると考えられる。

この結果は今後の考古研究に生かされる。今後さらに複数箇所に設置した乾板によるデータから3次元解析を行い、3次元トモグラフィー画像の作成も目指す。



図、ミュオンの角度分布: 曲線部分は古墳の墳丘部分に対応しており四角内部は ミュオン透過量が多く、土砂存在距離が短くなっているため、空洞が存在していると考えられる。

精密 μ 粒子ラジオグラフィーのための宇宙線の運動量分布測定 Measurement of momentum spectrum of cosmic rays for precise Muon Radiography

渋谷 寛・東邦大学・理学部・教授
小川 了・東邦大学・理学部・教授 他 7 名
中村光廣・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授
佐藤 修・名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

1. 研究目的

宇宙線 μ 粒子ラジオグラフィーは宇宙線 μ 粒子の透過性を活用して、X 線や中性子など透過力の弱い放射線では透視できない大型構造物の内部を透視する技術である。 μ 粒子検出器として原子核乾板を利用する手法は、電源が不要であるなどそのコンパクトさとその高角度分解能において他の放射線飛跡検出器の追従を許さないものであり、これを用いた福島第一原発事故炉内部の燃料デブリ位置の同定などを目指した研究が名古屋大学で進展している。

本研究では、物質分布を求めるのに不可欠な宇宙線の運動量分布を実測する。特にほぼ水平方向から飛来する宇宙線については、最近様々な測定によりモデルと差があることが分かってきており、実測によりその粒子種、運動量分布を求めることは重要である。

2. 研究内容と成果

昨年度は運動量 2, 3, 4, 5, 6 GeV/c の加速器ビームを原子核乾板検出器に照射したサンプルを用いて運動量測定方法を定量的に評価し、照射したビームの運動量を再現することに成功した。一方、実際の宇宙線 μ 粒子の測定では、この 1.0mm 厚鉛板を用いた OPERA 型検出器の代わりに 0.5mm 厚鉄板に変更した検出器を考えている。輻射長が長くかつ薄い鉄板を用いることで、フラックスの大きい運動量 1.0 GeV/c 近辺の低エネルギー粒子の検出効率を上げるためである。実際、昨年から今年にかけて数回原子核乾板検出器を実験場に設置してデータ収集(蓄積)を行っているが、その構造は 0.3mm 厚原子核乾板と 0.5mm 厚鉄板を交互積層したものである。この実データの解析のため、運動量のわかったシミュレーション・データを用いて、運動量評価の手法を検討した。具体的には、0.5mm 厚鉄板 40 枚と原子核乾板を交互積層した検出器に、様々な角度 ($\tan \theta < 1.5$) の 0.1~3.0 GeV/c の μ 粒子を入射させるシミュレーションを行い、それぞれ運動量評価の精度、効率を評価した。多重電磁散乱による運動量の評価には OPERA 実験でも実績のある角度法を用いる。横軸にセル長、縦軸に角度差分布の分散を取ったグラフにデータをプロットして一次直線でフィットする。この直線の傾きから運動量の逆数を見積もることができ、また直線の切片は角度差測定の精度に対応する。角度差測定の精度は事前に実データに基づいて見積もっておき、切片を固定してフィッティングを行うと精度がよいことが OPERA 型検出器ですでにわかっている。Geant4 に基づくシミュレーション・データを用いて多重電磁散乱による運動量測定精度を見積もったところ、様々な角度 ($\tan \theta < 1.5$) に渡って 15% から 40% の精度で測定できることがわかった。一方、測定

効率に関しては、乾板にほぼ垂直な飛跡の数%程度の場合に切片が事前評価より小さくなり、運動量評価に支障があることがわかった。そこで運動量が計算できない場合には切片も自由パラメーターとして再度算出を試みると、ほぼすべての粒子に対して精度劣化を抑えつつ運動量を見積もることが可能になることがわかった。使用枚数が少ない場合にはこの結果より悪くなるが、本実験が対象としている低エネルギー μ 粒子の場合、特に 1 GeV/c 以下の領域では、使用枚数が少ない場合でも運動量を評価できるように調査を進めている。現実のビームテストでこの評価方法が妥当であることを確認できれば、実データでの宇宙線の運動量評価の準備が整うことになる。

【研究成果の公表状況】

<国際会議>

- ・ Y. Morimoto et al., Study of neutrino-nucleus interactions with nuclear emulsion at J-PARC, HINT2016 (The international workshop on future potential of high intensity accelerators for particle and nuclear physics)) Poster, いばらき量子ビーム研究センター, December 5-8, 2016.

<国内会議>

- ・ 森元祐介 他, J-PARC における原子核乾板を用いたニュートリノ実験, 2016 年度写真学会年次大会, 東京工業大学 すすかけ台キャンパス, 2016 年 6 月 8~9 日.
- ・ 水沢萌 他, OPERA 実験でのタウ崩壊検出におけるバックグラウンドとなるハドロン反応の研究, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学 木花キャンパス, 2016 年 9 月 21 日~24 日.
- ・ 福田努 他, J-PARC T60 実験: J-PARC での原子核乾板を用いたニュートリノビーム照射実験, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学 木花キャンパス, 2016 年 9 月 21 日~24 日.
- ・ 佐藤修 他, J-PARC T60 実験での高電離損失飛跡を用いたニュートリノ反応解析, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学 木花キャンパス, 2016 年 9 月 21 日~24 日.
- ・ 松尾友和 他, J-PARC T60 実験における水標的検出器の飛跡解析, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学 木花キャンパス, 2016 年 9 月 21 日~24 日.
- ・ 三角尚治 他, J-PARC T60 実験: 現像室整備と原子核乾板の現像状況報告, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学 木花キャンパス, 2016 年 9 月 21 日~24 日.
- ・ 森元祐介 他, J-PARC T60 実験における原子核乾板を用いたニュートリノビーム照射実験 T60 の解析報告, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学 木花キャンパス, 2016 年 9 月 21 日~24 日.
- ・ 森元祐介 他, J-PARC における原子核乾板を用いたニュートリノ実験, 画像関連学会連合会第 3 回秋季大会, 京都工芸繊維大学 松ヶ崎キャンパス, 2016 年 11 月 17~18 日.
- ・ 大島仁 他, J-PARC T60 実験におけるミューニュートリノ荷電カレント反応の研究, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日~20 日.
- ・ 稲生恒明 他, ハイパー核探索実験における多重電磁散乱測定による粒子識別法, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日~20 日.
- ・ 水沢萌 他, OPERA 実験でのバックグラウンドとなるハドロン反応の詳細解析, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス, 2017 年 3 月 17 日~20 日.

宇宙線ミュオンを用いた火山内部密度構造の撮像

Imaging of internal density structure of volcanoes by cosmic-ray muons

宮本 成悟・東京大学・地震研究所・助教

森島邦博・名古屋大学・未来材料・システム研究所・特任助教

1. 研究目的

火山内部の密度構造は、噴火動態モデルの構築、次なる噴火の様相・規模などを知る上で非常に重要なパラメータとなる。本研究で宇宙線ミュオンと原子核乾板検出器を用いた火山内部構造の撮像を行うべく、準備を進めてきた。

イタリア・ストロンボリ火山世界で最も活発な火山の一つである、その火道の撮像を行う。ストロンボリ火山では期待される火道の直径が小さいため、高い解像度が要求される。原子核乾板は検出器本来の空間分解能が高いため、この撮像に向いている。ストロンボリ火山の浅部火道形状を可視化すべく、ミュオン検出器を設置に向け準備を進めてきた。

2. 研究内容と成果

図1 (a)に火口周辺の火山の地形と、今回予定した検出器の設置点（火口から水平方向に500m, 上下方向に150m程度離れた、白い線が集まっている地点）を示す。白い放射状に広がった線は、典型的な宇宙線ミュオンの経路。(b)には、シミュレーションによって計算された期待されるパフォーマンスを示す。このシミュレーション結果は、現在投稿中の論文に掲載される。

ミュオン検出器のデザインは、名古屋大・東京大、伊ナポリ大・サレルノ大・パドヴァ大を中心として、慎重に議論が行われた。最終デザインが決まり、現在イタリアで原子核乾板が格納される金属の箱が製作されている。

残念ながら、イタリア側の都合により、設置作業は来年度実施することとなった。来年度10月中旬に設置作業が行われ、4ヶ月程度の設置の後、回収・現像を行い、その後、名古屋大学の自動飛跡読み取り装置を用いて解析が行われる予定である。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

・ 該当なし

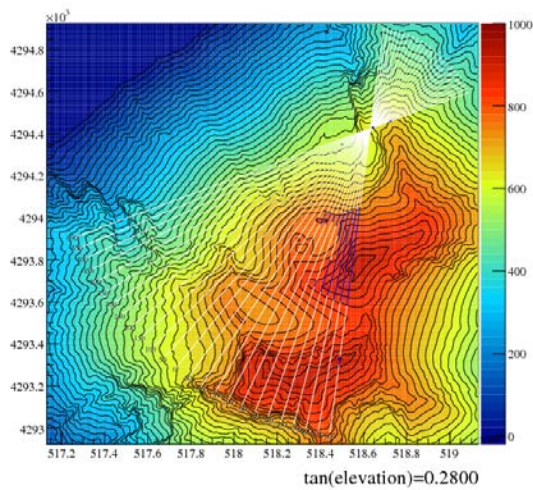
<国際・国内会議>

- 宮本 成悟, 西山 竜一, 森島 邦博, 西尾 晃, Valeri Tioukov, Cristiano Bozza, Chiara Sirignano, Nicola D' Ambrosio, 「宇宙線ミュオンを用いたストロンボリ火山浅部の火道形状観測」, 日本火山学会 2016 年度秋季大会, 山梨県富士吉田市 富士吉田市民会館・ふじさんホール, 2016 年 10 月 13 日～16 日.

<産業財産権>

- 該当しない

(a)



(b)

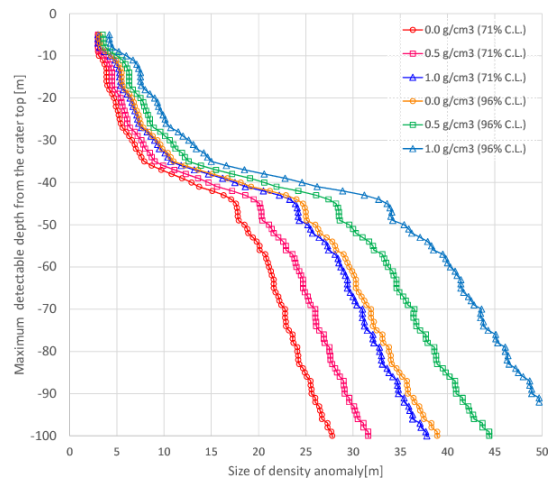


図 1: (a) ストロンボリ火山河口付近 $2\text{km} \times 2\text{km}$ の地形図。色の違いは標高を表し、等高線は 20m ピッチで表示されている。白い線が放射上に出ている中心が、検出器を置く予定の候補点を示す。(b): 検出器を(a)で示された地点に有効面積 1.0 平米・4 ヶ月間おいた場合に、期待されるパフォーマンスのシミュレーション結果。横軸は、密度異常空間のサイズを表し、縦軸は火口からの深さを表す。火道以外の山体の密度は 2.2g/cm^3 で一様であると仮定し、各曲線は、火道の密度を $0.0, 0.5, 1.0\text{g/cm}^3$, 統計的有意度が $71\%, 90\%$ の場合の信頼領域を示す(曲線よりも上ならば、それぞれ示された統計的有意度以上で、検出可能)。

超高速原子核乾板読出し装置 HTS を用いた高精度原子核フィルムの解析手法の確立

Establishment of the read-out method and analysis method of the high precision nuclear emulsion films by using ultra-fast emulsion read-out system HTS.

青木茂樹・神戸大学・大学院 人間発達環境学研究科・教授

1. 研究目的

これまで開発を行ってきた高感度・高精度原子核乾板の、最新鋭の原子核乾板読み取り装置 HTS を用いた読み出し・解析手法の確立を行う。読み取りによりはき出されてくる毎秒 100 万本の飛跡情報（～20Mbyte/秒）の処理、複数のフィルムに渡る飛跡の再構築方法およびその中から目的とする物理データを抽出する手法を確立するとともに、得られたデータの妥当性・信頼性を実データを用いて検証することを目的とする。

2. 研究内容と成果

平成 27 年 5 月、豪州にて原子核乾板からなる高角度分解能 γ 線望遠鏡を気球に搭載した天体観測実験を実施した。名古屋大学で開発してきた超高速飛跡読取装置 HTS(写真 1)を実戦投入し、原子核乾板約 42 平米に記録された飛跡データの読取を平成 27 年度に遂行した。

取得した飛跡データを解析し、ガンマ線反応($\gamma \rightarrow e^+ + e^-$)の選出を行った。コンバーター部 13cm × 8cm × 100 枚のデータについて選出処理を行った結果を図1に示す。1枚の原子核乾板には、 $\sim 3 \times 10^6$ 本飛跡が記録されている。(A) 隣接フィルム 8 枚の体積中を貫通する荷電粒子飛跡を除去した後、(B) 上流から4枚目のフィルムから始まり、8枚目まで貫通する飛跡のみを抽出する。さらに(C) 近傍に独立した飛跡が並走する特徴を要求することで、 $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 反応のコンバージョン点を選び出した。ここまでの処理で飛跡数は約 2000 分の 1 にまで濃縮される。さらに(D) 反応点からの電子・陽電子飛跡を下流へと順に追い下げ、最下流フィルムにまで到達したものがタイムスタンプ部へ接続可能となる有効イベントとなる。

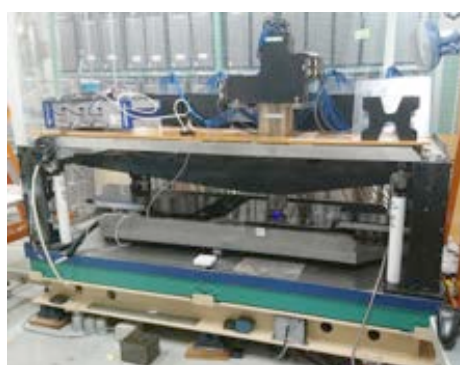


写真 1: 超高速飛跡読取装置 HTS

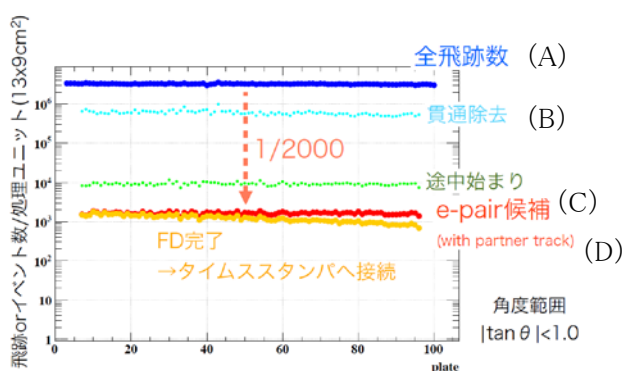


図1: コンバーター部でのガンマ線反応選出結果

レベル高度では、高エネルギーの1次宇宙線(陽子)が高頻度で望遠鏡内に入射するため、原子核乾板中の原子核と反応し、 π^0 中間子生成を経てガンマ線を発生する。この検出器内ガンマ線の到来方向が反応の発生点をさすことを利用し、望遠鏡の角度分解能を検証する事が出来る。(図2)

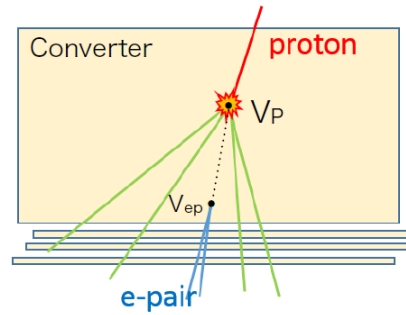


図2: 宇宙線陽子反応とそれに起因する e-pair

5本以上の飛跡がコンバーター内で1点に収束する反応事象を選び出し、発生点を決め、2次飛跡を多段シフターへ接続して入射タイミングを決定した。また e-pair 事象についてもエネルギー150MeV以上のものを同様にタイムスタンプした。インタラクションと e-pair のタイミングが一致し、陽子反応点 V_P と e-pair 反応点 V_{ep} とを結んだ角度と、e-pair 飛跡から決まるガンマ線角度との角度差が 0.2 rad 以内で一致するものを選び出した。

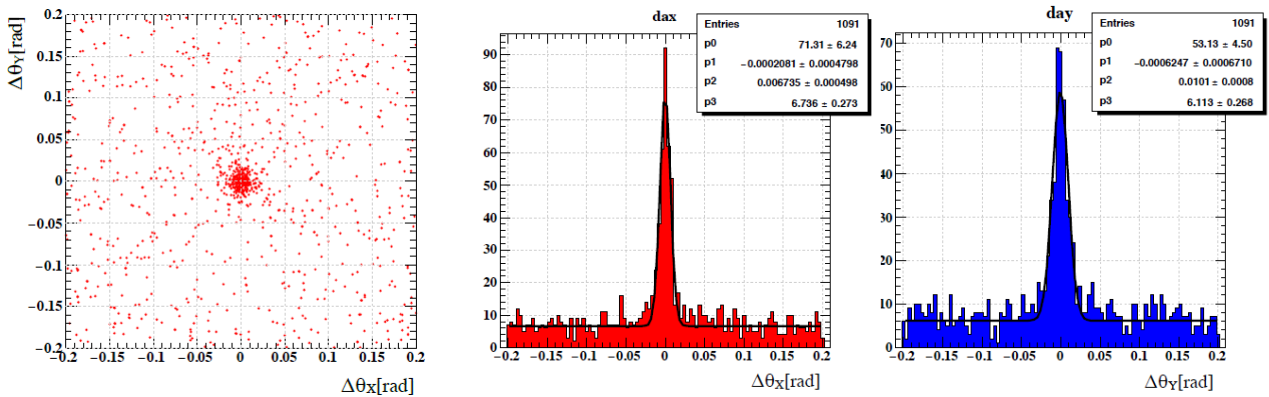


図3: (左) 陽子反応点(VP)とe-pair反応点(Vep)とを結んだ角度と、e-pair飛跡から決まるガンマ線角度との角度差 (中、右) ピーク付近を X,Y projection に投影したヒストグラム

図3(左)に角度差の散布図を示す。一様に分布するチャンスコインシデンス成分の中に角度差(0,0)を中心としたシグナル成分が確認出来た。各 projection のヒストグラムを図3(中、右)に示す。一様分布+ガウシアンでシグナルの広がりを評価した結果、 σ (図中の P2)は 6.7-10.1[mrad] (=0.38-0.58[°]) となり、150 MeV ガンマ線から期待される分解能 ($\sigma \sim 8.7$ [mrad]) とコンシステントな結果が得られ、本実験で目標としている 100 MeV 領域での点源検出をするために必要な角度分解能を気球観測時において有することを確認した。

GRAINE 実験の主たる観測対象は電子・陽電子を対生成した親ガンマ線であるため、ガンマ線に対する角度分解能や検出効率を検証することで検出器の総合的な性能評価を行ったが、直接測定しているのは生成された電子および陽電子という荷電粒子の飛跡であり、これらの検出・測定で確立された手法は、同じ原理で検出・測定される宇宙線ミュー粒子の飛跡にも応用でき、ミューオンラジオグラフィーをはじめとする HTS を利用した飛跡解析への普遍的活用が期待される。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- 1) S. Takahashi et al., GRAINE 2015, a balloon-borne emulsion γ -ray telescope experiment in Australia, Prog. Theor. Exp. Phys., 2016•7, 073F01 (2016-7)
- 2) K. Ozaki et al., Demonstration of polarization sensitivity of emulsion-based pair conversion telescope for cosmic gamma-ray polarimetry, Nucl. Instr. Meth., A833, 165-168 (2016-10)

<国際会議>

- 1) H. Rokujo et al., GRAINE balloon experiment in 2015: Precise observation of cosmic gamma rays by high-resolution emulsion telescope, 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Moscow, Russia, 2016/08/22-27, oral
- 2) H. Rokujo et al., Latest Nuclear Emulsion Technology Production, Readout, and Interaction Analysis, 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Moscow, Russia, 2016/08/22-27, poster
- 3) S. Aoki et al., GRAINE project: Cosmic Gamma-ray Observation by Balloon-Borne Telescope with Nuclear Emulsion, The 3rd KMI International Symposium on "Quest for the Origin of Particles and the Universe", Ngoya, Japan, 2017/01/05-07, oral
- 4) H. Rokujo et al., GRAINE Balloon-borne Emulsion Gamma-ray Telescope Project, The 3rd KMI International Symposium on "Quest for the Origin of Particles and the Universe", Ngoya, Japan, 2017/01/05-07, poster

<国内会議>

- 1) 六條宏紀 他, エマルジョン望遠鏡によるガンマ線天体精密観測計画 GRAINE, 日本写真学会 2016 年度年次大会, 東京工業大学, 2016 年 6 月 8,9 日, 口頭
- 2) 呉坪健司 他, 加速器ニュートリノ実験における原子核乾板を用いた時間分解多段シフター大面積化の実現, 日本写真学会 2016 年度年次大会, 東京工業大学, 2016 年 6 月 8,9 日, 口頭
- 3) 藪美智 他, 荷電粒子照射試験による原子核乾板の電荷識別能力評価, 日本写真学会 2016 年度年次大会, 東京工業大学, 2016 年 6 月 8,9 日, 口頭
- 4) 高橋覚 他, 多段シフターによる時間分解型原子核乾板検出器の開発, 日本写真学会 2016 年度年次大会, 東京工業大学, 2016 年 6 月 8,9 日, 口頭
- 5) 青木茂樹 他, Recent Innovation on Nuclear Emulsion Experiments and GRAINE (Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion), 宇宙科学談話会, JAXA 宇宙研, 2016 年 9 月 28 日, 口頭
- 6) 森下美沙希 他, GRAINE エマルジョンチェンバーに記録されたハドロン反応の解析, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21~24 日, 口頭
- 7) 大塚直登 他, 気球搭載エマルジョンガンマ線望遠鏡 GRAINE: 電子対生成反応の精密測定

- 手法の開発, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21~24 日, 口頭
- 8) 吉本雅浩 他, 気球搭載エマルジョンガンマ線望遠鏡 GRAINE:超高速飛跡読取装置 HTS による角度読取精度の理解と向上, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21~24 日, 口頭
 - 9) 高橋覚 他, GRAINE 計画:科学観測実験の展望, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21~24 日, 口頭
 - 10) 六條宏紀 他, GRAINE 計画:2015 年豪州気球実験の結果報告 (1), 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21~24 日, 口頭
 - 11) 尾崎圭太 他, GRAINE 計画:2015 年豪州気球実験の結果報告 (2), 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21~24 日, 口頭
 - 12) 山田恭平 他, 高統計観測のための時間分解原子核乾板多段シフターの大面積化および稼働時間拡大に関する研究開発, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21~24 日, 口頭
 - 13) 柴山恵美 他, 気球搭載エマルジョンガンマ線望遠鏡 GRAINE:ユニット面積拡大による幾何学的因子の改善, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21~24 日, 口頭
 - 14) 丸嶋利嗣 他, J-PARC T60:時間分解原子核乾板多段シフターの大面積化と解析状況, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 宮崎大学, 2016 年 9 月 21~24 日, 口頭
 - 15) 水谷深志, エマルジョン望遠鏡による宇宙ガンマ線精密観測計画 : GRAINE, 第1回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会, 東京大学 柏キャンパス, 2016 年 10 月 29~31 日, 口頭
 - 16) 森下美沙希, GRAINE エマルジョンチェンバーに記録されたハドロン反応の解析手法の開発, 第1回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会, 東京大学 柏キャンパス, 2016 年 10 月 29~31 日, 口頭
 - 17) 六條宏紀 他, GRAINE 2015 年豪州気球実験 データ解析報告 1, 大気球シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 2016 年 11 月 1,2 日, 口頭
 - 18) 尾崎圭太 他, GRAINE 2015 年豪州気球実験 データ解析報告 2, 大気球シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 2016 年 11 月 1,2 日, 口頭
 - 19) 高橋覚 他, GRAINE 計画: 科学観測実験の展望, 大気球シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 2016 年 11 月 1,2 日, 口頭
 - 20) 青木茂樹 他, GRAINE 計画: ロードマップと 2018 年気球実験の準備状況, 大気球シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 2016 年 11 月 1,2 日, 口頭
 - 21) 高橋覚 他, GRAINE 計画:科学観測実験の展望, 画像関連学会連合会第3回秋季大会, 京都工芸繊維大学, 2016 年 11 月 17,18 日, 口頭
 - 22) 藪美智 他, 荷電粒子照射試験による原子核乾板の電荷識別能力評価, 画像関連学会連合会第3回秋季大会, 京都工芸繊維大学, 2016 年 11 月 17,18 日, 口頭
 - 23) 呉坪健司 他, 加速器ニュートリノ実験における大面積多段シフターの解析, 画像関連学会連合会第3回秋季大会, 京都工芸繊維大学, 2016 年 11 月 17,18 日, 口頭

- 24) 山田恭平 他, GRAINE 実験次期フライトに向けた新型多段シフターの開発, 画像関連学会連合会第3回秋季大会, 京都工芸繊維大学, 2016年11月17,18日, 口頭
- 25) 高橋覚 他, 高角度分解能・偏光感度をもつ気球搭載大口径原子核乾板ガンマ線ぶ円強による高エネルギーガンマ線観測計画 GRAINE, 第17回宇宙科学シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 2017年1月5,6日, ポスター
- 26) 尾崎圭太 他, 原子核乾板の宇宙ガンマ線精密観測実験 GRAINE への応用, 2016年度日本写真学会 原子核乾板技術研究発表会, 名古屋大学東山キャンパス, 2017年2月15日, 口頭
- 27) 青木茂樹 他, GRAINE 計画:エマルジョン望遠鏡による宇宙ガンマ線の観測計画, 第1回 MeV ガンマ線天文学研究会, 京都大学 益川ホール, 2017年2月27,28日, 口頭
- 28) 高橋覚 他, GRAINE 計画:エマルジョン望遠鏡による宇宙ガンマ線観測, マルチメッセンジャー天文学研究会, 千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター, 2017年3月2,3日, 口頭
- 29) 六條宏紀 他, 気球搭載エマルジョン望遠鏡によるガンマ線天体精密観測計画 GRAINE, ISEE 研究集会, 名古屋大学 宇宙地球環境研究所, 2017年3月1~3日, 口頭
- 30) 呉坪健司 他, J-PARC T60:原子核乾板を用いた時間分解型大面積多段シフターの解析状況1, 日本物理学会 第72回年次大会, 大阪大学, 2017年3月17~20日, 口頭
- 31) 丸嶋利嗣 他, J-PARC T60:原子核乾板を用いた時間分解型大面積多段シフターの解析状況1, 日本物理学会 第72回年次大会, 大阪大学, 2017年3月17~20日, 口頭
- 32) 大塚直登 他, 気球搭載エマルジョンガンマ線望遠鏡 GRAINE:電子対生成反応の精密測定手法の開発2, 日本物理学会第72回年次大会, 大阪大学, 2017年3月17~20日, 口頭
- 33) 森下美沙希 他, GRAINE エマルジョンチェンバーに記録されたハドロン反応の解析手法の開発2, 日本物理学会 第72回年次大会, 大阪大学, 2017年3月17~20日, 口頭
- 34) 吉本雅浩 他, 超高速原子核乾板飛跡読取装置 HTS の運用と大角度飛跡解析, 日本物理学会 第72回年次大会, 大阪大学, 2017年3月17~20日, 口頭
- 35) 山田恭平 他, 時間分解原子核乾板多段シフターの面積化、駆動時間拡大のための新型機構の開発, 日本物理学会 第72回年次大会, 大阪大学, 2017年3月17~20日, 口頭
- 36) 六條宏紀 他, GRAINE 計画:2015年豪州気球実験報告1, 日本物理学会 第72回年次大会, 大阪大学, 2017年3月17~20日, 口頭
- 37) 水谷深志 他, GRAINE 計画:2015年豪州気球実験報告2, 日本物理学会 第72回年次大会, 大阪大学, 2017年3月17~20日, 口頭
- 38) 高橋覚 他, GRAINE 計画:科学観測実験の展望, 日本物理学会 第72回年次大会, 大阪大学, 2017年3月17~20日, 口頭
- 39) 青木茂樹 他, GRAINE, 2016年度 CRC 将来計画タウンミーティング, 東京大学柏図書館メディアホール, 2017年3月24,25日, 口頭

<産業財産権>

- ・該当なし

原子核乾板による生体中の放射性核種オートラジオグラフィ

Radionuclide autoradiography in vivo with the nuclear emulsion

研究代表者 中村 琢・岐阜大学・教育学部・助教

研究分担者 星野 香・岐阜大学・教育学部・客員教授

研究所担当教員 中村光廣・名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構・教授

1. 研究目的

小動物およびヒトの生体に沈着、蓄積することが懸念される極微量の放射性核種の存在を、イメージングプレートや超高感度放射線飛跡検出器である原子核乾板の写真技術で捉える。福島第一原子力発電所事故による放射性物質の飛散と大地の汚染がもたらした問題は、依然として深刻で人々の不安は拭い去れていない。本研究は、省エネルギーでかつ長期間の積分型検出器である原子核乾板の特性を最大限に活用し、生体に含まれる放射性核種から出る放射線の存在を、 $1\mu\text{m}$ 以下の高分解能で可視化するものである。生体の歯に蓄積される可能性のある放射性ストロンチウムの検出と、放射性核種の存在部位を2次元画像で得ることを目的とする。

2. 研究内容と成果

本研究では、福島第一原発事故の前後に福島県に住んでいた人を含む30名から調査依頼を受け、集められた子どもの脱落乳歯90個を調査対象とした。測定後の乳歯は提供者に返却することになっているため、本研究では乳歯を非破壊で取り扱う。以下の5段階の方法(1)ゲルマニウム半導体検出器、(2) 2π ガスフローカウンター、(3)高感度霧箱、(4)イメージングプレート、(5)原子核乾板、で実施した。(4)(5)がオートラジオグラフィである。

- (1) 乳歯から出る γ 線の有無をゲルマニウム半導体検出器で測定した。6時間の測定において背景事象と比べて有意な γ 線のエネルギーピークは検出されなかった。
- (2) 乳歯から出る α 線、 β 線の有無を 2π ガスフローカウンター(Aloka, LBC-471-P)で測定した。各乳歯試料を個別に1時間測定した。いずれの乳歯試料の結果も検出限界以下であった。
- (3) 低頻度の β 線検出のために、高感度霧箱を使用した。林らによって開発されているアルコール循環型の高感度霧箱は、荷電粒子の飛跡の形状から α 線、 β 線の弁別が可能である。本研究では、過飽和層の深さが5cmほどになるようにドライアイスと霧箱筐体の密着性を向上させたものを使用した。

環境中の放射線と乳歯から出る β 線を区別するために、10mmの鉄板で霧箱側面を覆い遮蔽した。乳歯の大きさは最大でも10mm程度であり、遮蔽により霧箱内に入れた乳歯の近傍 1cm^3 に入る環境中の β 線およびコンプトン電子の出現頻度は、 2.1mBq に低減された。

測定では乳歯を霧箱の中央部にある過飽和層の中に吊り下げて固定し、霧箱を飛跡認識可能な状態に保ち、8時間映像を記録した。得られた映像を見ながら乳歯の近傍から出る β 線の飛跡数を数えた。背景事象を減じて、乳歯から出現する β 線数の最大頻度 $0.84\pm 0.05\text{mBq}$ を得た。

(4) (3) と並行して、乳歯から出る β 線の 2 次元画像を得るために、イメージングプレート（富士写真フイルム，BAS IP MS 2040 E）を使用した。50 個の乳歯を密着させ 42 日間遮蔽箱に保管し、発光強度に応じた白黒濃淡からなる 2 次元画像データを読み出した。

複数の乳歯試料と接した箇所から β 線の痕跡を確認した。 β 線の当たった場所が黒くなり、頻度は黒化度の濃淡によって可視化される。試料により濃淡に差があり、特に β 線が多く出たと思われる乳歯試料が 3 個あった。

濃淡の情報から放射能への換算のために、 ^{90}Sr の標準線源を用いて校正実験を行い、校正係数を求めた。乳歯試料と非接触の面の、同一面積の黒化度を減じて放射能を見積もると、 β 線を最も多く出していると思われる乳歯試料で約 4.0mBq であった。上記 (3) の霧箱は立体角 4π で測定しているのに対し、イメージングプレートは乳歯と密着している面でおおよそ立体角 2π となっていることや、検出限界の違いを考慮する必要がある。

(5) 乳歯から出る β 線飛跡の詳細な 2 次元情報を得るために、原子核乾板を使用した。乳剤の製作、支持体への塗布、乾燥、裁断を終え、原子核乾板を作成した。使用した原子核乾板は $30\text{cm}\times 20\text{cm}$ サイズ 1 枚で、 $200\mu\text{m}$ 厚のプラスチックベースの両面に $50\mu\text{m}$ の乳剤を塗布してある。乳歯 20 個を個別に原子核乾板と密着させ、アルミラミネートの袋に真空引きし、 5cm の鉛で遮蔽して保管してある。現在 1 か月超経過しているが、環境放射線の蓄積を考慮してもう 1 か月保管したのち、現像処理する。

上記 (1) から (5) の方法のうち、(1) (2) は得られた乳歯試料の全数を測定した。(3) は 1 試料、(4) は 50 試料、(5) は 20 試料を測定または処理している段階である。(3) の霧箱で使用した乳歯試料は (4) のイメージングプレートで β 線を多く出している 3 個のうちの 1 つである。霧箱およびイメージングプレートの結果から、乳歯から何らかの β 線が出ていることが確認された。詳細な部位の特定や濃度等の特徴を調べるために、引き続き原子核乾板における解析を行う。

本研究は、乳歯から出ている β 線の有無と強度の測定をねらうものであるが、放射性核種を同定することはできない。したがって直ちに ^{90}Sr の崩壊によるものと特定するものではない。また、現段階で福島原発事故との因果関係を論じるものではない。

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- ・ 道上雄陽，岩田将行，中村琢，放射線教育用霧箱を用いた人歯の放射能測定，日本理科教育学会第 62 回東海支部大会，名古屋女子大学，2016 年 12 月 3 日。

TiO₂光触媒上への Pt ナノ粒子光析出Photodeposition of Pt nano particles on TiO₂ photocatalyst

吉田朋子・大阪市立大学・複合先端研究機構・教授

八木伸也・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

TiO₂は空気の浄化などに利用される代表的な光触媒であり、この触媒の活性向上を目指して、しばしば光析出法による金属ナノ粒子の担持が行われている。特に Pt 担持 TiO₂の触媒活性は、担持金属粒子のサイズや分散度に影響を受け、これら因子は触媒調製条件(光照射量、担持量、TiO₂担体の種類)によって複雑に変化する。本研究では、触媒調製条件の最適化によって光触媒活性を制御することを視野に入れ、触媒調製条件による Pt 粒子の構造・電子状態の変化を詳細に調べ、光触媒活性との関連性について明らかにすることを目的とする。

2. 研究内容と成果

蒸留水 50 ml とメタノール 10 ml の混合溶液に、H₂PtCl₆・6H₂O とアナターゼ型 TiO₂粉末 1 g を加えた懸濁液を攪拌しながら Xe ランプ光を照射し、0.5 wt% Pt/TiO₂を調製した。光照射時間は 5~180 min である。これらの試料における Pt の酸化状態を調べるために Pt L₃-edge XANES 測定を行った。また、同様に担持量 0.05 wt%~5.0 wt% の Pt/TiO₂を光照射時間 180 min で調製し、Pt の粒子サイズならびに分散度を TEM 観察から、各試料の光触媒活性をメタノール水溶液分解実験から調べた。

各光照射時間における Pt/TiO₂試料の Pt L₃-edge XANES スペクトルは、Pt metal ならびに PtO₂の XANES スペクトルの足し合わせで精度良く再現することが出来たので、これを基に各光照射時間における Pt(0)と Pt(IV)の割合を求めた。その割合と Pt L₃-edge XANES スペクトルを Fig.1 に示す。光照射時間 0 min~15 min ではほとんどの Pt は 4 価のイオンであったが、20 min になると急激に還元され、30 min では 8 割以上が 0 価の金属となっていた。この結果から、Pt の光析出過程として析出核が形成された後、分散していた Pt イオンが析出核に集まり析出物に組み入れられることで急速に Pt ナノ粒子が成長するという

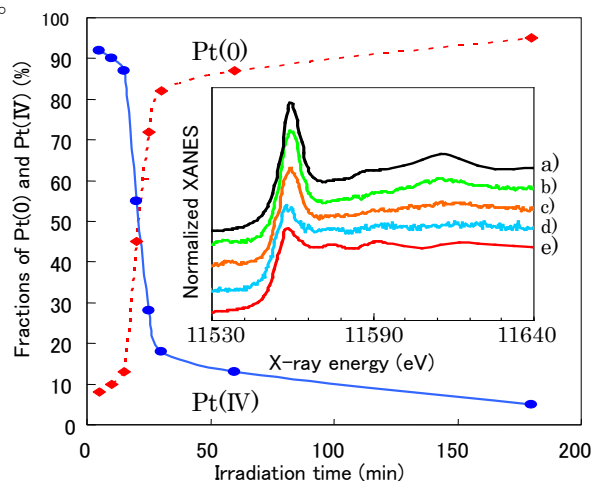


Fig.1 各光照射時間における 0.5 wt% Pt/TiO₂の Pt L₃-edge XANES (挿入図:a)PtO₂, b~d)光照射 15,20,180 min, e)Pt metal) 及び Pt(0)と Pt(IV)の割合

モデルが提案できた。

TEM 観察より各担持量における Pt の平均粒径と粒子数を見積もった。Pt 粒子のサイズは担持量が 0.1 wt% までは顕著に増加し、約 6.4 nm まで大きくなるが、それ以上の担持量では凡そ 8.0 nm (Pt 担持量 5.0 wt% 時) の一定値に収束することが分かった。また 0.05 wt% と 0.1 wt% Pt/TiO₂ 試料において、Pt 粒子数はほとんど変わらず、平均粒径のみが異なっていることが示唆された。

Fig.2 には、各担持量の Pt/TiO₂ を用いたメタノール水溶液分解における Pt 粒子 1 個あたりの水素生成量を示す。この図から明らかなように、0.05 wt% で触媒活性は最も高くなり、それ以外は担持量の増加に伴い活性が低下していた。0.05 wt% と 0.1 wt% Pt/TiO₂ 試料では Pt 粒子数はほとんど変わらず、平均粒径のみが異なっていたという結果を考慮すると、メタノール水溶液の分解反応には 5 nm 程度の Pt 粒子が高活性であるといえる。また、0.1 wt% と 0.5 wt% Pt/TiO₂ 試料においては Pt の粒子サイズはほとんど変わらず、粒子数のみが異なっている。このことから、分散度が高い方がメタノール水溶液の分解反応をより効率的に促進することが分かった。

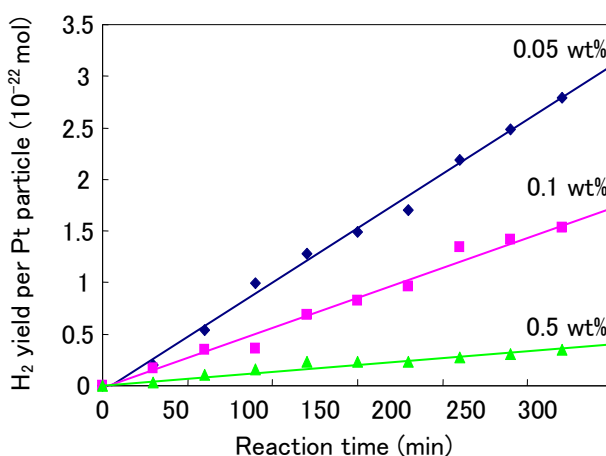


Fig.2 Pt 粒子 1 個あたりのメタノール水溶液分解における水素生成量

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

・ T. Yoshida, Y. Minoura, Y. Nakano, M. Yamamoto, S. Yagi and H. Yoshida, XAFS study on a photodeposition process of Pt nanoparticles on TiO₂ photocatalyst, J. Phys: Conference Series, 712, 012076 (2016).

<国際・国内会議>

・ 中野優治, 赤柄誠人, 山本宗昭, 塚田千恵, 小川智史, 八木伸也, 吉田朋子, XAFS による TiO₂ 表面上での Pt ナノ粒子光析出過程の解明, 日本放射光学会, 神戸芸術センター, 2017 年 1 月 7 日~9 日

・ Y. Nakano, M. Akatsuka, M. Yamamoto, T. Tsukada, S. Ogawa, S. Yagi, T. Yoshida, 44th Conference on the Physics and Chemistry of Surface and Interface, 16, January, 2017, Santa Fe, USA

<産業財産権>

なし

高密度・高効率な Cs 吸着剤の開発を目指した

Au ナノ粒子含有材料に対する Cs と L-システインの共吸着反応の解明

Study on co-adsorption reaction between Cs and L-cysteine on Au nanoparticle containing material
toward development of Cs adsorbent with high density and efficiency

塚田 千恵・日本原子力研究開発機構・物質科学研究センター・博士研究員

矢板 毅・日本原子力研究開発機構・物質科学研究センター・ディビジョン長

吉越 章隆・日本原子力研究開発機構・物質科学研究センター・研究主幹

八木 伸也・名古屋大学・附属高度計測技術実践センター・教授

1. 研究目的

福島第一原子力発電所の事故後、飛散した放射性 Cs は福島地域の土壌中に取り込まれる一方で、発電所サイト内では炉の冷却に伴う高線量 Cs を含む汚染水も発生し続けている。福島原子力発電所事故からの回復のためには土壌や汚染水から Cs を高密度・高効率に捕集することが重要だが、二次廃棄物の生成を伴わない Cs 吸着剤の開発は研究段階である。また、一連の Cs 捕集・回収過程において、加熱など多くのエネルギーを要するという問題もある。そこで報告者は、エネルギー投入量の削減における経済性の向上および二次廃棄物を排出しないという環境負荷の低減を見据え、水溶液中の Cs⁺イオンと吸着剤の間に生じる基礎的な化学吸着反応を解明したいと考えた。

Cs 吸着剤として、アミノ酸の L-システインと液中プラズマ法で作製した Au ナノ粒子 (AuNP) に注目した。システインはカルボキシル基 (-COOH) を持ち、水溶液中の Cs⁺イオンと -COO⁻ で静電引力を生じて相互作用すると予想される。また、ナノ粒子はバルク材料と比較して比表面積が大きいために高密度な吸着剤への応用が期待される。液中プラズマ法で作製した Au ナノ粒子の表面は分散剤等で覆われておらず概ね清浄であり、システインは水溶液中で迅速にチオール基 (-SH) にてそのナノ粒子表面に吸着することから[1]、システインと Au ナノ粒子を組み合わせることで、高密度・高効率な Cs 吸着剤の開発が行えると考えた。また本化合物は、簡単な処理で再生利用が可能であり、二次廃棄物の発生を抑えられるという大きなメリットもある。以上から、本研究の目的は、液中プラズマ法で作製した Au ナノ粒子に対する Cs と L-システインの共吸着反応を解明することである。

2. 研究内容と成果

10 mM の NaCl 水溶液中で対向させた Au ロッド間にプラズマを発生させて Au ナノ粒子コロイド溶液を作製した。Au ナノ粒子の粒子径をオストワルト熟成で均一にするために溶液を放置した後[2]、粒子径評価のために TEM グリッドに溶液を滴下して自然乾燥させた。L-システインを Au ナノ粒子コロイド溶液に加えて吸着反応を促し (Cys/AuNP と記す)、沈殿した Cys/AuNP を取り出して蒸留水で複数回のリンスを行った。その後、CsCl 水溶液を Cys/AuNP に加えて反応を促した後 (CsCl/Cys/AuNP と記す)、

蒸留水でリンスした。リンス後の Cys/AuNP と CsCl/Cys/AuNP を Si ウェハ上に滴下して自然乾燥させ、X 線光電子分光 (XPS) 測定用の試料とした。XPS 測定は SPring-8 JAEA 専用 BL23SU の表面化学実験ステーションで入射光エネルギーを $h\nu=1269.0$ eV に設定して行った。

図 1 に TEM 像から得た Au ナノ粒子の粒子径分布を示す。Au ナノ粒子の平均粒子径は 15 ± 3 nm であり、対称的な分布のナノ粒子を形成できたことが分かった。図 2 に Cys/AuNP と CsCl/Cys/AuNP に対する Na 1s、Cs 3d_{5/2}、O 1s の各 XPS スペクトルを示す。O 1s についてはバックグラウンドの除去後に低結合エネルギー側の裾で規格化しており、(CsCl/Cys/AuNP - Cys/AuNP) の差分スペクトルも併せて載せる。Na 1s では、Cys/AuNP で確認されたピークが CsCl/Cys/AuNP で消失した。一方で、Cs 3d_{5/2} では、Cys/AuNP で見られなかったピークが CsCl/Cys/AuNP で出現した。また、O 1s では、Cys/AuNP よりも CsCl/Cys/AuNP で高結合エネルギー側に膨らみが確認され、差分スペクトルにて 533.4 eV 付近にピークが見られた。これらの結果から、CsCl 水溶液と反応後、Cys/AuNP のシステインの -COO⁻ に結合していた NaCl 由来の Na⁺ が Cs⁺ と置換し、かつ、カルボキシル基のマイナス電荷がカウンターイオンの Cs⁺ 側に分極した状態になったことで、Na 1s と Cs 3d_{5/2} のピーク有無や O 1s の高結合エネルギー側のピーク増加が生じたと考えられる。

参考文献 [1] C. Tsukada *et al.*, *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* **11** (2013) 18. [2] T. Mizutani *et al.*, *Appl. Surf. Sci.* **354** (2015) 397.

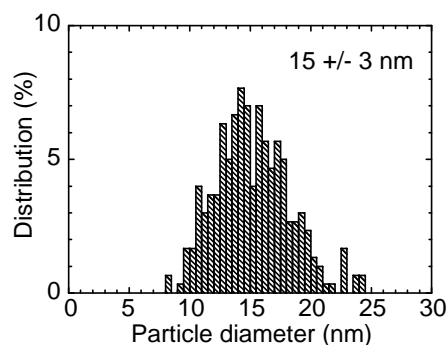


図 1. Au ナノ粒子の粒子径分布.

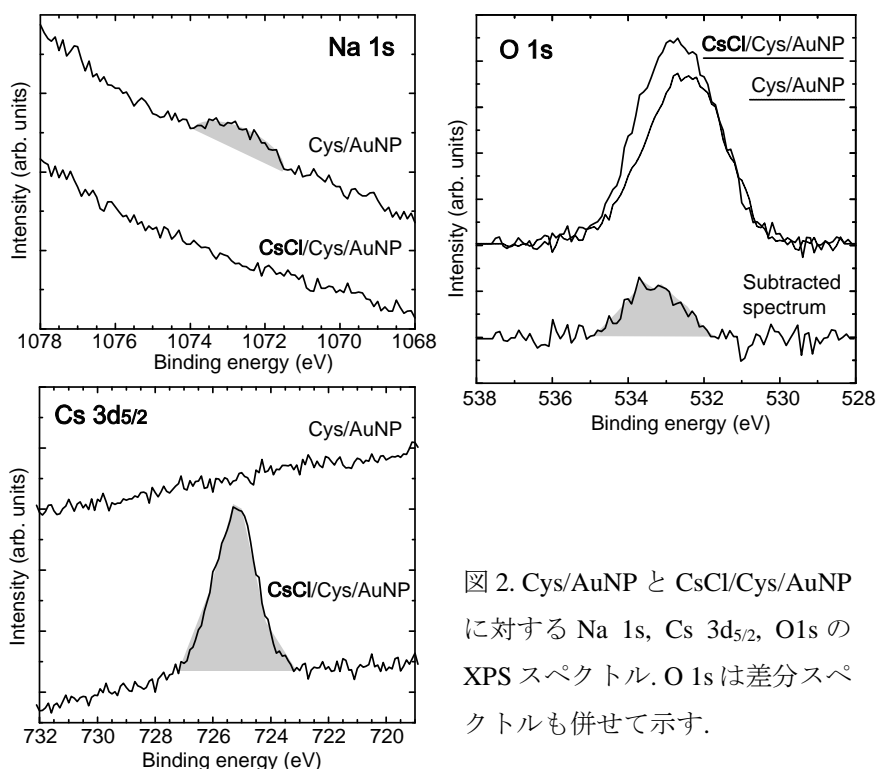


図 2. Cys/AuNP と CsCl/Cys/AuNP に対する Na 1s、Cs 3d_{5/2}、O 1s の XPS スペクトル。O 1s は差分スペクトルも併せて示す。

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- ・ 塚田千恵, 吉田光, 岡田美智雄, 吉越章隆, 矢板毅, 放射光 XPS による Si(100)2×1 への CH₃Cl 吸着反応の研究, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ (新潟県), 2016 年 9 月 13 日~16 日.
- ・ 塚田千恵, 吉田光, 小川智史, 吉越章隆, 八木伸也, 矢板毅, 液中プラズマ法で作製した Au ナノ粒子の Cs 吸着剤への応用検討, 第 30 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 神戸芸術センター (兵庫県), 2017 年 1 月 7 日~9 日.

放射光を用いた生体分子デバイスの省エネルギー リサイクルシステムの開発

Study for Re-Cycle System of Biomolecular Devices utilizing Synchrotron Radiation

藤井健太郎・量子科学技術研究開発機構・量子ビーム科学研究部門

東海量子ビーム応用研究センター・上席研究員

八木伸也・名古屋大学・未来材料・

システム研究所 高度計測技術実践センター・教授

1. 研究目的

DNA などの生体高分子は、特定塩基との選択的結合性を利用して、センサーなどの電子デバイスの一部として応用されている。一方で DNA は、分子を構成している各元素のない各順位エネルギーに依存した X 線などの電磁波が照射されると、特定のエネルギー領域で大きくダメージを受け、その後に生成する分解生成物として、様々な分子断片を生じることがわかっている。DNA をデバイスとして利用した後に、自然環境を害することなく、分子を廃棄するためには、放射線による分子分解システムが一つの有力な候補である。本研究課題は、放射光によって分解しやすい DNA の分解条件を探索し、省エネルギーかつ自然環境に優しい生体材料リサイクルシステムの可能性を探ることも目的とする。

2. 研究内容と成果

DNA 等の生体分子は、放射線に対する感受性が高いため、熱分解に比べて効率よく分子を分解することが可能である。一方で、人体に対して有害な変異原体を誘発してしまうなどの問題もある。省エネルギーかつ安全安心な生活環境を維持するためには、DNA をデバイスとして使用した後に、DNA 分子の変異原性を失活させて廃棄する必要がある。本課題では、DNA 分子の高い放射線感受性を利用し、安全に自然環境中に廃棄することができるか、さらに分解生成物の一部である水素の脱離効果を積極的に利用し、水素の供給源として利用できるかどうかの可能性を探った。昨年度までに行った関連課題では、DNA 主鎖を構成するデオキシリボースの水和薄膜に対する軟 X 線照射により、効率良い分解とプロトンの脱離を確認することができた。脱離イオンの質量スペクトルから、乾燥試料および表面水和試料の脱離イオン収量を比較すると、デオキシリボース薄膜状への一分子層の水和によって、水素イオンの収量はおよそ 4% の減少が見られたが、その他の脱離イオンの収量は、およそ 30% 減少していた。この結果は、水素供給源としてのプロトン脱離は維持しながらも、フラノース五員環の分解を抑える可能性を示唆している。さらに、この軟 X 線による分解により

試料表面に生成した生成物を X 線吸収微細構造 (XAFS) 法を用いて解析した (図 1)。その結果, (1) デオキシリボースが水和することで, C-O 結合の切断が抑制されること。(2) 酸素原子を含む分子フラグメントの脱離が抑制されること。が明らかになった。これらの結果から, デオキシリボース単体からは, C-O および C-C 結合が同時に切断することで分子フラグメントの生成が起こっていたが, 水和によりその切断がおよそ 60%に減少することが明らかになった。C-C および C-O 結合切断により誘発されるデオキシリボースの分解は, DNA 主鎖骨格の構造を大きく変化させることが予想され, 変異原性の高い損傷となる可能性があると推測される。それに比べ, C-C あるいは C-O 単結合の切断によって誘発される, DNA 主鎖切断は, DNA のコンフォメーションを大きく変える可能性は少ないと予想される。以上から, 水和したデオキシリボースへの電離放射線の照射によって, 安全に DNA 分子を廃棄することができる可能性を見出すことができた。さらに水和によって水素供給源としてのプロトン脱離の効率を維持することができるかと予想され, 水素供給源としても使用することができるかと考えられる。

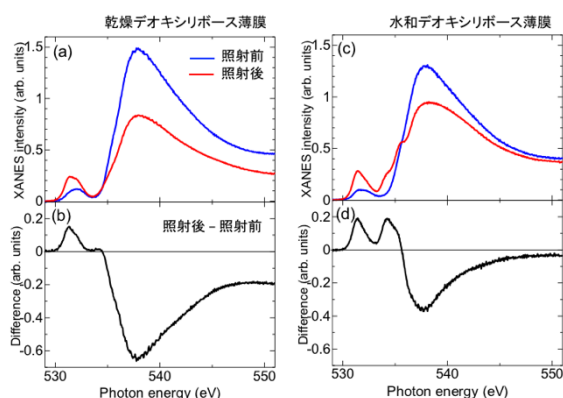


図 1 (a)乾燥および(c)水和デオキシリボース薄膜の酸素 K 殻近傍 XAFS スペクトル。照射前 (青実線), 照射後 (赤実線)。(b)および(d)はそれぞれの差分スペクトル。

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- ・藤井健太郎, シンクロトロン放射光を用いた放射線生物研究, 第6回群大 Genome Damage Discussion Group 公開セミナー, 群馬大学, 2016年7月15日 (招待講演)
- ・藤井健太郎, シンクロトロン放射光を用いた分光学的手法による DNA 損傷生成の物理過程に関する研究, 平成28年東京 RBC 特別放談会, 東海村, 2016年7月23日 (特別講演)
- ・Kentaro FUJII, Roles of Oxygen for Inducing DNA Strand Breakage by Ionizing Radiation, Oxygenalia 2016, Krakow, Poland, 22. Oct. 2016(Invited talk)
- ・藤井健太郎, 軟 X 線分光を用いた放射線生物研究と今後の展望, PF 研究会, 高エネルギー加速器研究機構, 2017年1月17日 (依頼講演)
- ・Kentaro FUJII, Spectroscopic Study for Physical Process of DNA Strand Breakage by Ionizing Radiations using Soft X-rays, Hiroshima University, Hiroshima International Workshop on Circular Dichroism Spectroscopy 2017, 28. Feb. 2017(Invited talk)

外部共鳴摂動磁場によるトカマクプラズマ応答に関する研究 Study of the tokamak plasma response on external RMP field

岡本征晃・石川工業高等専門学校・電気工学科・准教授

大野拓弥・名古屋大学・工学研究科・大学院生

大野哲靖・名古屋大学・工学研究科・教授

梶田信・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

新エネルギーの1つとして期待されている核融合発電の実現にむけて、国際協力のもと ITER（国際熱核融合実験炉）計画が進められている。ITER で採用されているトカマクプラズマでは、安定性制御を目的として共鳴摂動磁場（RMP）の利用を検討しているが、圧力分布変形に伴うプラズマパラメータの低下やプラズマ流の低下に伴うティアリングモードなどの不安定性の成長を促しディスラプションに至る場合もある。そのため、ITER を対象とした磁場遮蔽しきい値の実験則を構築するための共同実験が進められているが、プラズマ内部で発生する物理機構の完全な理解には至っていない。本研究では、RMP に対するプラズマ応答の物理機構を明らかにするために、名古屋大学所有の小型トカマク装置である HYBTOK-II を対象としてプラズマ内部の磁場、プラズマ流などのプローブアレイを用いた直接計測を行うことを目的とする。

2. 研究内容と成果

本研究では、図 1 に示すようにマッハプローブアレイを弱磁場側ポートから挿入しており、真空容器中心から 4 - 12cm の範囲で水平方向に可変であり、 270° の回転が可能である。イオン飽和電流を計測するため、直流 150V の電圧を印加するための計測回路も取り付けられた。また、空間分解能が 2 mm で、チャンネル数が 30 で、セラミック板に信号線をメタライズし、積層後焼成しているため、コンパクトかつ高空間分解能な構造となっている。

本実験ではポロイダル流を計測するため、上下方向からのイオン飽和電流を計測できるようにマッハプローブの計測面を固定した。マッハプローブ計測より、上方向からのイオン飽和電流が大きい結果が得られたため、イオンの反磁性方向にポロイダル流があることを確認した。RMP コイルには弱磁場側に取り付けた $n=1$ 構造を有するサドルコイルを用いた。図 2 に RMP コイル電流を

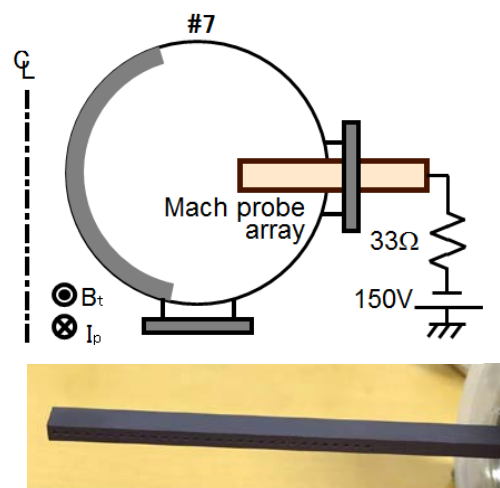


図 2. マッハプローブ設置図

変化させた時の外部磁気プローブから評価した $m=3$ モードの FFT 解析結果とマッハプローブアレイで計測した $q=3$ 面近傍のイオン飽和電流揺動の FFT 解析結果を示す。 $m=3$ モードの解析結果は、プラズマつけないときに計測した信号を差し引いてフーリエ級数展開を行った時間発展の波形で計算を行っているため、プラズマからの応答のみの信号であると考えられる。RMP コイル電流が小さい場合は 10kHz 周辺が主な周波数成分となっており、これらが MHD 不安定性に起因する成分であると考えられる。RMP の印加により、印加周波数である 3kHz の成分が大きくなっていることが確認され、イオン飽和電流揺動にも同様に 10kHz 周辺に MHD に起因する揺動成分が出現していることが分かる。また、RMP コイル電流が大きくなると、 $m=3$ モードとイオン飽和電流揺動ともに大きくなっているため、磁気島が形成されて成長していると考えられる。図 3 に FFT 解析から得られた 3kHz のイオン飽和電流揺動成分の径方向分布と q 分布を示す。プラズマ流の指標となるマッハ数 M は以下の式を用いて評価している。

$$M/M_c = \ln(j_u/j_d)$$

ここで、係数 $M_c = c_s/4v_t$, j_u と j_d はプラズマ流の上流と下流の電流密度を表す。図 3 より、 $q=3$ 面近傍のポロイダル流が RMP コイル電流の増加に伴い減少していくことが確認される。以上より、本研究の実験条件では RMP により磁気島が形成され、磁気島内のプラズマ流が減少することが観測された。

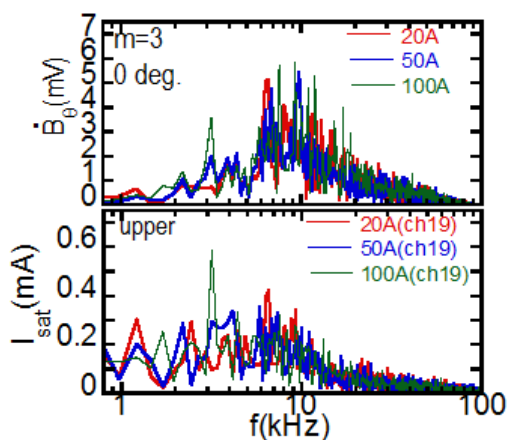


図 2. $m=3$ モード (上) と $q=3$ 面付近のイオン飽和電流揺動 (下) の FFT 解析結果

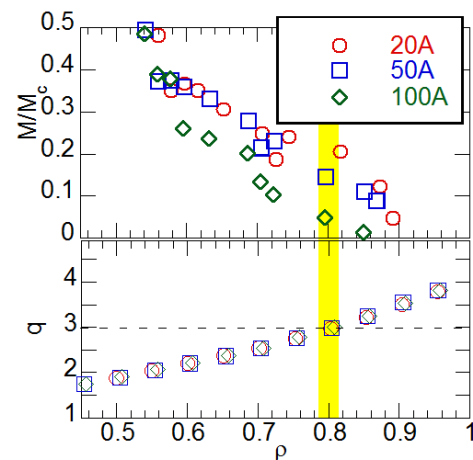


図 3.ポロイダル方向のマッハ数の径方向分布 (上) と q 分布 (下)

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

・吉本直哉, 大野拓弥, 岡本征晃, 柴田欣秀, 大野哲靖, 梶田信, 松永剛, 菊池祐介, 榊原悟, 渡邊清政, 「小型トカマク装置 HYBTOK-II における外部共鳴摂動磁場印加時のプラズマ流および磁場分布計測」, 第 33 回プラズマ・核融合学会年会, 東北大学, 2016 年 11 月 29 日 ~ 12 月 2 日.

非接触ダイバータプラズマ中の中性原子温度計測 Measurement of neutral atom temperature in detached divertor plasma

荒巻光利・日本大学・生産工学部・准教授
 渡部凌一・日本大学・生産工学部・電気電子工学科・B4
 白崎 叶・日本大学・生産工学部・電気電子工学科・B4
 辻原匡志・名古屋大学・エネルギー理工学専攻・M2
 大野哲靖・名古屋大学大学院工学研究科・教授
 梶田 信・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

本研究は、非接触ダイバータプラズマ中のヘリウム原子のドップラー分光法を確立し、非接触プラズマの形成に重要な役割を果たす中性原子温度および中性原子の輸送を明らかにすることを目的としている。核融合炉の実現のためには、炉心プラズマから流出する膨大な粒子流および熱流を制御し、プラズマ対抗板（ダイバータ板）の損傷を低減することが最重要課題の一つである。ダイバータ板への熱負荷を著しく低減させる方法として、イオンがダイバータ板に到達する前に低温の電子と再結合させる非接触ダイバータが注目されている。中性原子は電子の冷却に加え、伝熱過程でも重要な役割を担っていると考えられており、そのドップラー分光法の確立は非接触ダイバータの開発において重要な課題である。

2. 研究内容と成果

これまでに、1083nm の外部共振器型ダイオードレーザー (ECDL) を開発し、ダイバータプラズマ模擬実験装置 NAGDIS-II (図 1) において予備的な実験を行い、ヘリウム原子の 2^3S-2^3P 遷移の吸収信号を得ている。しかし、プラズマ中で加熱されたヘリウムのドップラースペクトルは数十 GHz の広がりを持っているため、5GHz 程度しかレーザーの発振周波数を掃引できない ECDL ではスペクトルの全体を測定することが出来ない。本研究では、周波数掃引幅が十分に大きい分布帰還型 (DFB) レーザー (TOPTICA、

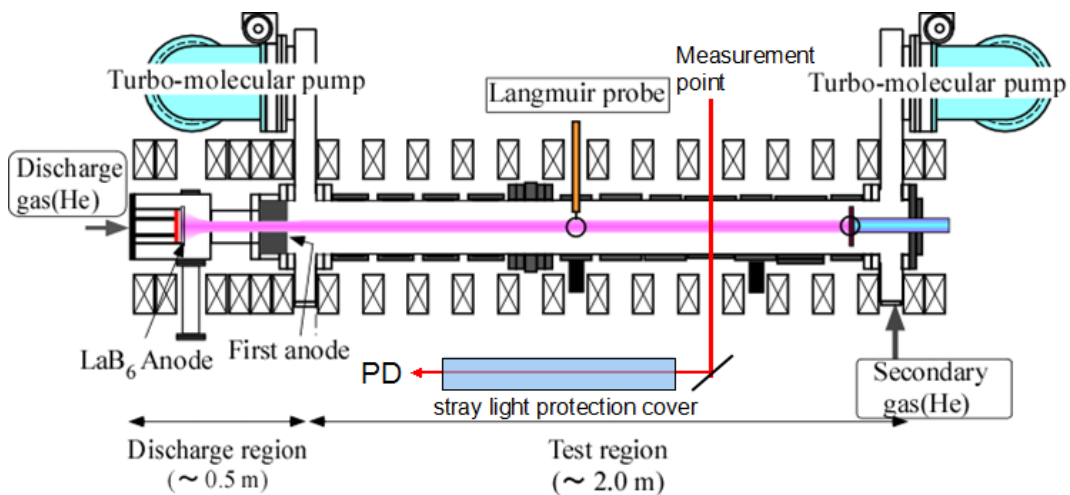


図 1 直線型ダイバータ模擬試験装置 NAGDIS-II の模式図

LD-1083-0070-DFB-1)を利用した波長可変レーザーを日本大学にて開発した。これにより、ヘリウムの準安定状態 2^3S_1 を下準位に持つ3つの遷移 ($2^3S_1-2^3P_0$, $2^3S_1-2^3P_1$, $2^3S_1-2^3P_2$) が測定可能となった。

図2に開発したDFBレーザー光源を示す。330 x 230 x 110mmのアルミケースの中に、DFBレーザーおよびファブリーペロー共振器(FPI)が組み込まれている。DFBレーザーは戻り光により不安定となるため、光アイソレータをDFB直前に配置している。FPIは共振器長が50mmの共焦点型で、フリースペクトルレンジ(FSR)は1.5GHzで設計した。ドップラー吸収分光では、レーザー波長の掃引周波数をFPIのフリンジを用いて校正する。図2に、日本大学の誘導結合ヘリウムプラズマを用いて試験的に測定したドップラー吸収分光スペクトルをFPIのフリンジと共に示す。左から順に $2^3S_1-2^3P_0$, $2^3S_1-2^3P_1$, $2^3S_1-2^3P_2$ の3つの遷移による吸収スペクトルが確認できる。これらのスペクトル間隔は既知であるため、この3本のスペクトルを利用してFPIのFSRを校正した。その結果、FSR 1.5GHzの誤差は10MHz以下であることが確認できたため、本研究ではFSRを1.5GHzとしてスペクトル解析を行った。予備実験で得られたテストプラズマ中の準安定ヘリウム原子の温度は約300K、密度は 10^{18} m^{-3} と見積もられた。

光源を名古屋大学に移設し、NAGDIS-IIで生成した非接触プラズマ中のドップラー吸収分光計測を行った。観測されたスペクトルの例を、回帰曲線とともに図4に示す。ここで、重畳したスペクトルの左側が $2^3S_1-2^3P_2$ 遷移、右側が $2^3S_1-2^3P_1$ 遷移によるものである。図3と比較して、図4のスペクトルに強い高周波成分が重畳していることが分かる。別途行ったマイクロ波干渉計による観測によってプラズマ密度の揺動が観測されており、図4の高周波成分はプラズマ中の揺動に由来するものであると考えている。この揺動はプラズマ中の粒子輸送と関連していることが予想されており、今後、さらに詳しい計測を行う予定である。また、トッパー吸収分光とトムソン散乱計測を組み合わせることで、電子温度と原子温度の温度緩和と非接触プラズマの生成について詳細に検討することを予定している。

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- [1] T.Tsujihara, M.Aramaki, S.Kajita, T.Shikama, N.Ohno, "Application of laser absorption spectroscopy to low temperature recombining plasmas", IPS2016. 2016.6.26-29, Meitestu Inuyama Hotel, Aichi, Japan.
- [2] Shin Kajita, Tadashi Tsujihara, Mitsutoshi Aramaki, Hennie van der Meiden, Oshima Hiroshi, Noriyasu Ohno, Ryo Yasuhara, Keisuke Fujii, and Taiichi Shikama, "Laser diagnostics in low-temperature recombining helium plasmas", ISPlasma/IC-PLANTS 2017.3.1-5, Chubu University, Aichi, Japan.

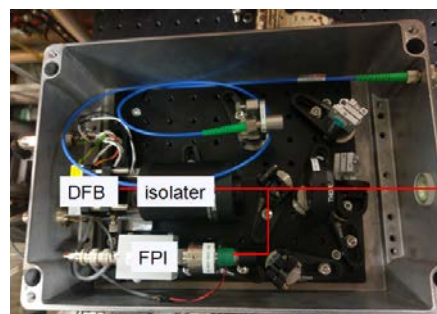


図2 DFBレーザー光源

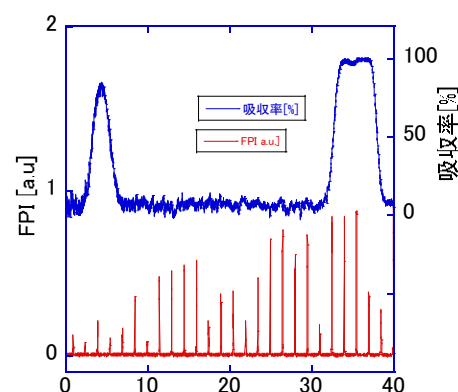


図3 誘導結合ヘリウムプラズマを用いたファブリーペロー共振器の校正

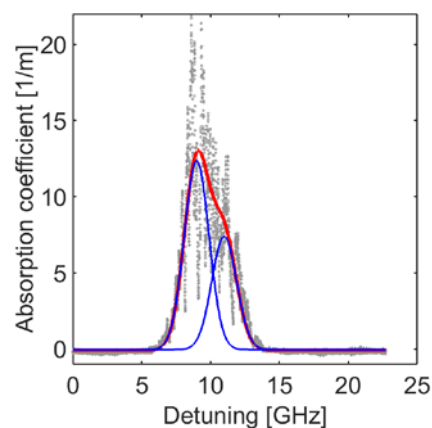


図4 非接触プラズマ中で観測されたドップラー吸収スペクトル

超低消費電力トランジスタ用二硫化モリブデン半導体の TEM 解析

TEM of Molybdenum disulfide for ultra-low power transistor

研究代表者 若林整 東京工業大学 工学院 教授
研究所担当教員 五十嵐信行 名古屋大学未来材料・システム研

1. 研究目的

次世代超低消費電力高性能トランジスタの実現に向けて、二硫化モリブデン (MoS_2) などの二次元半導体材料をチャンネル材料とするトランジスタの研究が進められている。我々は、これまでに、 MoS_2 膜厚の精密制御が可能で、低温での MoS_2 膜の形成が可能な RF スパッタ法で MoS_2 を形成し、これを H_2S 中でアニールすることにより、 MoS_2 中のキャリア濃度の制御が可能であることをあきらかにした。

トランジスタ特性向上のためには、 MoS_2 薄膜の原子レベルでの構造制御、電子構造制御技術の確立が必要であり、TEM 等を用いた原子スケールでの材料物性解析が必要である。本研究の目的は、このようにして形成した MoS_2 薄膜の結晶構造評価・物性評価技術を開発し、 MoS_2 の構造評価を通じて、デバイス開発を加速することにある。

2. 研究内容と成果

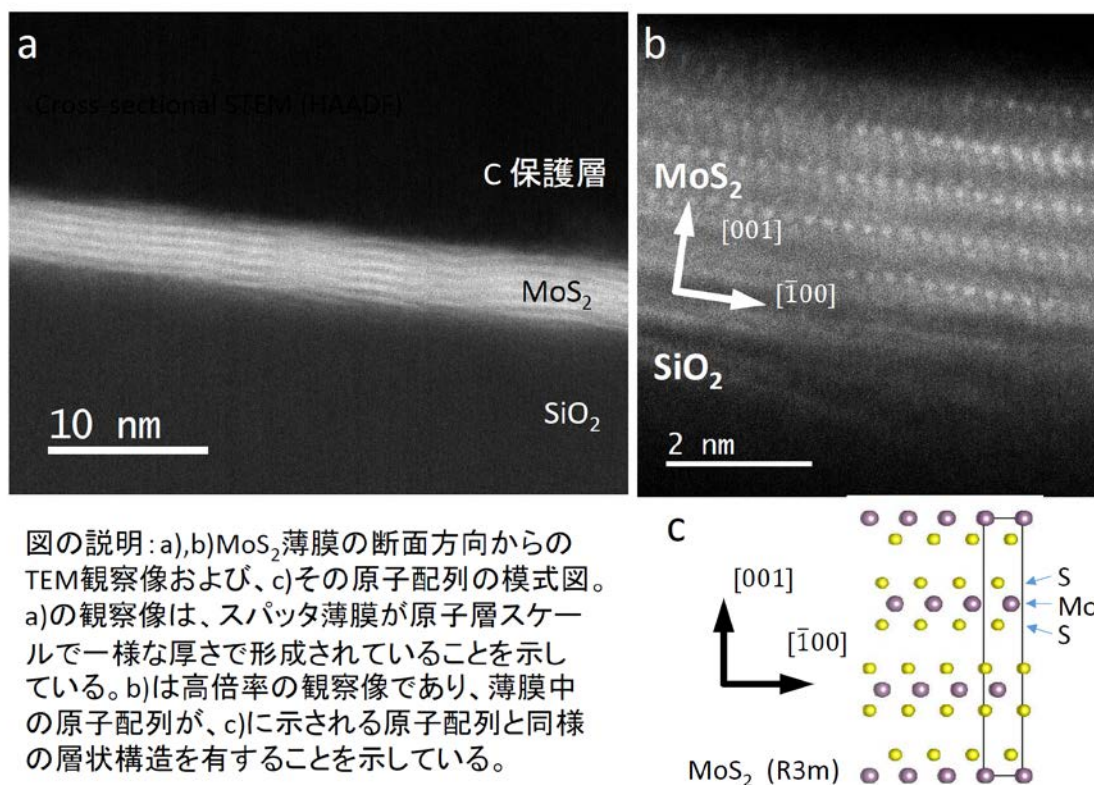
上記 MoS_2 の膜厚や、その一様性、および、結晶構造を評価するため、断面方向からの TEM 観察が有効である。この観察を行うための試料作製方法を検討した。

観察した MoS_2 サンプルの作製においては、Si 基板上に形成した SiO_2 膜の表面に、RF スパッタ法で MoS_2 を堆積し、その後 H_2S 雰囲気中でアニールを行った。基板表面に形成された MoS_2 を変質させずに TEM 観察用試料作製を行うため、FIB を用いて試料加工を行った。試料加工条件の検討の結果、試料薄片化に先立ち、サンプル表面に電子線を用いたアモルファスカーボンの堆積をおこなうことによって、試料加工に伴う MoS_2 の変質を抑制可能であることを見いだした。

上述の MoS_2 薄膜の観察例を図 a-c に示す。観察は MoS_2 薄膜の断面方向から、HAADF-STEM 法によっておこなった。観察像 a は、 MoS_2 薄膜の膜厚が、原子層スケールで一様であることを示している。また、その高倍率の観察像 b では、明るく写っている点が薄膜中の原子位置に対応しており、本観察結果は、薄膜中での原子配列が、模式図 c と同様の、層状構造を有することを示している。以上の結果は、本実験で用いた試料作製方法によって、スパッタ堆積 MoS_2 の原子スケール構造評価が可能であることを示している。

今後、引き続き、高分解能計測技術の開発を行うと共に、構造・物性評価結果を結晶成長技術開発にフィードバックし、トランジスタ特性の成長条件依存性を明らかにし、

次世代の超低消費電力高性能トランジスタの実現を加速する実験を行う予定である。



【研究成果の公表状況】

<原著論文>

Jun'ichi Shimizu, Takumi Ohashi, Kentaro Matsuura, Iriya Muneta, Kuniyuki Kakushima, Kazuo Tsutsui, Nobuyuki Ikarashi and Hitoshi Wakabayashi, "Study on Low-carrier density sputtered-MoS₂ film by H₂S annealing for normally-off accumulation-mode FET," to be submitted to IEEE Journal of the Electron Devices Society

<国際・国内会議>

Jun'ichi Shimizu, Takumi Ohashi, Kentaro Matsuura, Iriya Muneta, Kuniyuki Kakushima, Kazuo Tsutsui, Nobuyuki Ikarashi and Hitoshi Wakabayashi, "Low-carrier density sputtered-MoS₂ film by H₂S annealing for normally-off accumulation-mode FET," Electron Devices Technology and Manufacturing (EDTM) Conference, P-22, February 28th to March 2nd, 2017, Toyama International Conference Center, Japan

<産業財産権>

なし

超低消費電力脳型コンピュータの基幹となる メモリスタシナプス素子の材料物性評価と機能制御

Characterization and control of material properties in memristive synaptic devices for
ultra-low power consumption brain-inspired computer

酒井 朗・大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
竹内 正太郎・大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
山口 賢吾・大阪大学・大学院基礎工学研究科・博士前期課程
五十嵐 信行・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

高度なパターン認識や直観・連想記憶等の右脳的思考を実現する脳型コンピュータは、低消費電力の次世代情報処理に不可欠である。現在、その基幹となるニューロモルフィック回路のシナプス素子には、通常 6 つのトランジスタからなる SRAM アーキテクチャが採用されているが、更なる低消費電力化、集積化、多値化、不揮発化等の観点から課題を残している。これに対して、酸素空孔をドナーとする金属酸化物結晶で作製されたメモリスタ素子は、単体レベルでシナプス機能を有し、不揮発で多値の抵抗状態を発現することから、信号伝送において極めて高いエネルギー効率を発揮する。本研究では、同メモリスタ素子における結晶の電子状態解析を切り口に、酸素空孔分布のトポロジーを精密にデザインすることで抵抗変化の発現機構を制御し、超低消費電力のシナプス素子を開発する。

2. 研究内容と成果

今回、メモリスタ素子材料として抵抗変化 (RS) 現象を示す TiO_2 を選択した。我々は、これまでに、酸素空孔がオートドーピングされたルチル型 $\text{TiO}_2(100)$ 単結晶を用いて 4 端子メモリスタ素子を作製し、電界印加によって変化する酸素空孔分布とそれに伴う RS 特性変化の相関を明らかにしてきた[1]。図 1 の光学顕微鏡像に示すように、素子にある条件で電界を印加すると電極間に酸素空孔の集積領域が形成され、その領域は電気着色現象によって青いコントラストとして観察される。電流-電圧特性から、この領域は低抵抗であることが分かっているものの、 TiO_2 結晶の低抵抗化をもたらす要因は未解明な点が多い。今回、このルチル型 $\text{TiO}_2(100)$ 単結晶メモリスタ素子内の抵抗変化領域の各箇所に対して、走査型透過電子顕微鏡法および電子エネルギー損失分光法 (STEM-EELS) を用いた分析評価を行い、抵抗変化領域の電気的特性と結晶構造・価電子状態の相関を明らかにした。

ルチル型 $\text{TiO}_2(100)$ 単結晶基板に対し、真空度 10^{-6} Pa で 700°C 、6 hour の熱還元処理を施し、結晶内に酸素空孔を生成した。その後、基板表面にスパッタ蒸着によって Pt

電極を形成し、4 端子平面型素子を作製した (図 1 参照)。真空プロローバ内において、電極 2 および 4 に 8 V の電圧を 500 sec 印加し、電極 1 および 3 間に跨る酸素空孔濃度が高い領域 (低抵抗領域) を形成した (図 1 中の青色領域)。集束イオンビーム加工法およびマイクロサンプリング法を用い、電極 1~4 間の抵抗変化領域内の各箇所から STEM-EELS 用試料を作製した。収差補正電子顕微鏡 (JEM-ARM200 (Cold)) による STEM-EELS 測定では、Ti-L_{2,3} 端のピーク位置、および Ti-3d 軌道の e_g 軌道と t_{2g} 軌道のエネルギー分裂を反映したピークの分裂に着目し解析を行った。

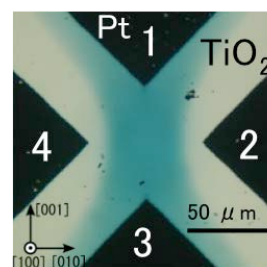


Fig. 1. Optical microscope image of a four terminal device structure after applying 8 V to the electrodes 2 and 4.

図 2 は、素子の低抵抗領域における表面近傍の断面 STEM 像である。素子表面の数 nm の領域には、図に示すような明暗コントラストの層状構造が観察される。STEM 像の明コントラストから暗コントラストを含む領域 (赤枠領域) を選択し、STEM-EELS 測定を行った。測定箇所依存するスペクトルを図 3 に示す。STEM 像のコントラストに対応して、455 eV から 465 eV (L₃ 端) に見えるピークの分裂状態が変化している。この L₃ 端のピーク位置およびピークの分裂の度合を表す e_g 軌道と t_{2g} 軌道のピーク積分強度比を図 4 に示す。STEM 像の明コントラスト領域ではピーク位置は低エネルギー側にシフトし、それに伴って積分強度比が大きくなっている。これらの結果は、その領域において TiO₂ が還元されていることを示しており、素子の抵抗値の低減と直接関連していると考えられる。

参考文献: [1] 清水拓磨ら, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 講演番号: 14p-A31-7

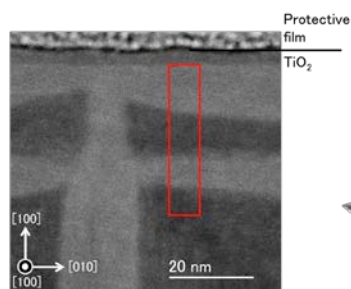


Fig. 2. Cross-sectional STEM image of a low resistance area shown in Fig. 1. Red rectangle indicates a measurement area of STEM-EELS.

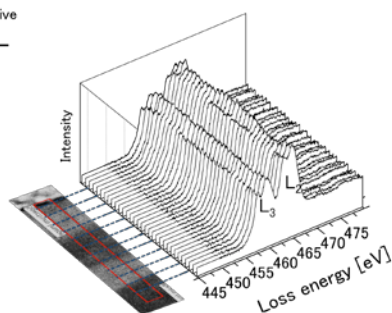


Fig. 3. STEM-EEL spectra of the red rectangle region shown in Fig. 2.

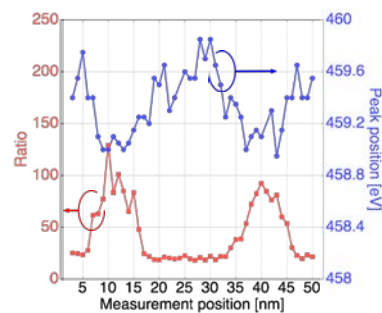


Fig. 4. e_g-t_{2g} peak integral intensity ratio (red) and peak position of Ti-L₃ edge (blue) as a function of measurement position.

【研究成果の公表状況】

< 国際・国内会議 >

- 山口賢吾, 竹内正太郎, 五十嵐信行, 酒井朗, ルチル型 TiO₂ 単結晶メモリスタ素子の抵抗変化領域における価電子状態解析, 講演番号: 14a-419-1, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜, 2017 年 3 月 14 日 (火) ~ 3 月 17 日 (金), 発表予定.

ナノカーボン材料による面状透明ヒーターの開発 Development of planar heating device based on carbon nanomaterials

研究代表者 野田 優・早稲田大学・理工学術院・教授
 研究分担者 大野 雄高・名古屋大学未来材料・システム研究所・教授
 研究所担当教員 大野 雄高・名古屋大学未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

面状透明ヒーターは、住居や自動車などの窓ガラスや鏡の結露防止に幅広いニーズがある。安全性・簡便性のためには低電圧で十分な熱量を発生する必要があるが、大面積化のためには低抵抗の発熱体が望まれる。従来の金属材料は可視光の反射率が高く散乱してしまうために不適であり、透明導電膜もコストや性能面で改善の余地が大きい。

我々は、カーボン材料が黒色で可視光の反射率が低いことに着目、高い導電率を有すカーボンナノチューブ(CNT)やグラフェンを用いた透明ヒーターを目標とした。今年度はその基礎段階として、①SiO₂基板上へのグラフェン微細パターンへの直接形成と導電性評価を行った。また、他の応用も探索すべく、②Cu エピタキシャル触媒上に合成したグラフェンを用いたトランジスタを試作、③高密度 CNT フォレストを用いた立体型楕円型電極を作製した。

2. 研究内容と成果

①SiO₂基板上へのグラフェン微細パターンへの直接形成と導電性評価

名大・大野研究室にて SiO₂基板上に目的構造の二層レジストパターン(図 1)を作製し、早大・野田研究室にて Fe-C 混合膜をパターン加工し、エッチング析出法により多層グラフェンを合成、名大・大野研究室にて導電性を評価した。グラフェンラインパターンを石英基板上に直接形成でき(図 2)、10–20 μm 程度のライン幅で 200–300 Ω/sq を得た。

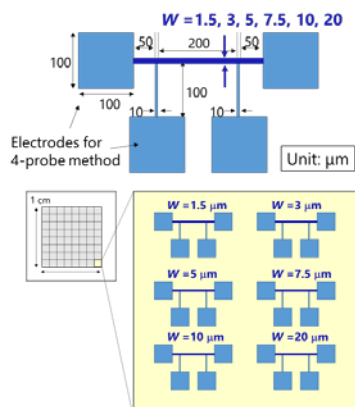


図 1. レジストパターン

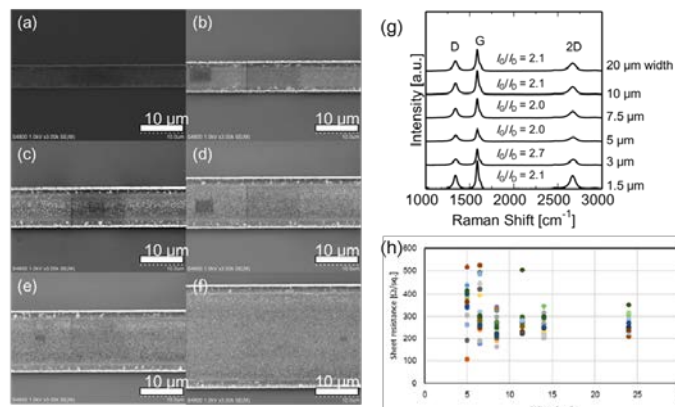


図 2. グラフェンパターンの(a-f)走査型電子顕微鏡 (SEM)像、(g)ラマンスペクトル、(h)4 端子測定結果

②Cu エピタキシャル触媒上に合成したグラフェンを用いたトランジスタの試作

エピタキシャル Cu 触媒を用いて合成したグラフェンの電子デバイス応用に向け、基礎検討を行った。早大・野田研究室にてグラフェンを合成、絶縁体基板上に転写し、名大・大野研究室にて微細加工し、ホール測定用の電極パターンおよび電界効果トランジスタを作製した。電極の蒸着、レジストの塗布乾燥及び現像、酸化処理と多くの工程(図3)を行う間に、グラフェンの多くが焼き切れてしまったが、僅かに残った、微細加工されたグラフェンを得ることができた(図4)。

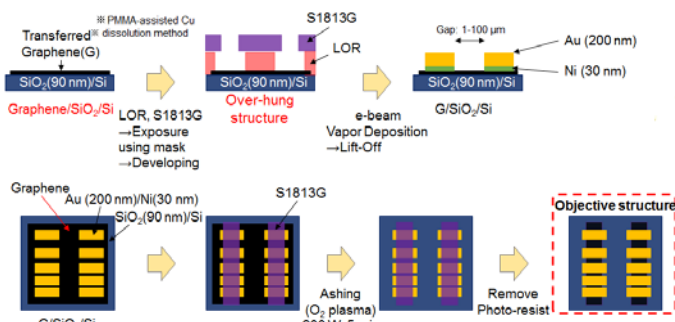


図 3. デバイス作製のプロセス

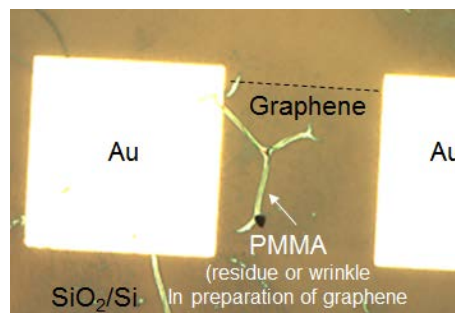


図 4. 作製したデバイスの光学顕微鏡像

③高密度 CNT フォレストを用いた立体型楕型電極の作製と評価

カーボンナノチューブ(CNT)の導電性と化学的安定性を利用した、低い検出限界濃度と安定性を持つ高性能な楕型電極の作製を目指した。UV リソグラフィによる従来の平面型楕型電極の作製プロセスに加えて、スパッタ法による Co/Mo/Ti 触媒担持と、熱 CVD 法(500°C, 炭素源:C₂H₂)による CNT フォレストの成長を行った。図 5 に電極上にパターン成長した CNT フォレストの断面の SEM 写真を示す。電極幅と電極同士のギャップがそれぞれ数 μm 程度、高さが数 μm 程度の CNT フォレストの成長を確認した。今後 K₄Fe(CN)₆溶液などを用いた酸化還元反応を測定し、電極としての特性を評価する予定である。

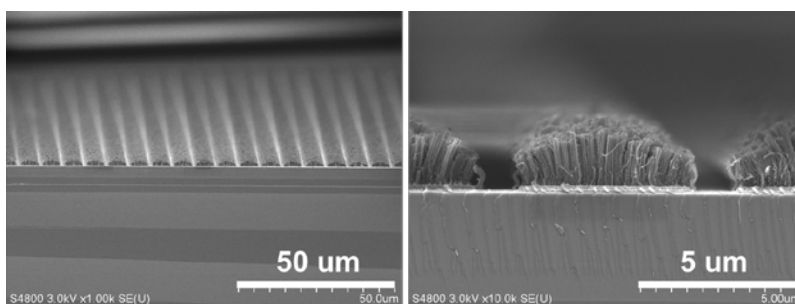


図 5. 電極上にパターンニング成長した CNT フォレストの SEM 像(断面)

【研究成果の公表状況】

特になし

ナノカーボン・原子層物質を用いた光エネルギー 変換デバイスの研究

Light Energy Transform Devices using Nano-carbon and Atomically Thin Materials

研究代表者 松田一成・京都大学エネルギー理工学研究所・教授
研究分担者 王暁凡・京都大学・エネルギー理工学研究所・博士課程
王飛久・名古屋大学・理学系研究科・ERATO・博士研究員
研究所担当教員 大野雄高・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

近年、持続的な社会の実現に向け、太陽光を含む光エネルギーの高効率な生成・変換・利用が求められている。それらの要請に対し、我々は潜在的に高いポテンシャルを有するナノ物質、特にカーボンナノチューブ・グラフェンなどのナノカーボン物質や遷移金属ダイカルコゲナイドなどの原子層物質に着目し、基礎・応用の両面から研究を進めている。本研究では、それらナノカーボン物質・原子層物質を利用し、物質の特徴を最大限生かしながら、高効率・高機能な太陽電池デバイスに代表される省エネルギーデバイスの研究を行うことを目的としている。

2. 研究内容と成果

本研究ではまず、気相堆積成長法によって作製された高品質なカーボンナノチューブ薄膜を利用し、高効率・高機能な太陽電池デバイスの作製を試みた。具体的には、近年、太陽電池材料として高いポテンシャルが示されている、有機・無機ハイブリッド材料である鉛ペロブスカイトを活性層とし、ホール輸送層にカーボンナノチューブ薄膜を利用した太陽電池の作製を進めた。

まず、作製した太陽電池デバイスの構造について説明する。導電性ガラス (FTO) 上に電子輸送層となる TiO_x を作製し、次に活性層となる鉛ペロブスカイト層をスピノコートによって塗布する。その上に、ホール輸送層として働くカーボンナノチューブ薄膜、酸化グラフェン、PMMA ポリマー層を形成し、上部電極を設けた構造となっている。なお、カーボンナノチューブ薄膜の厚み・透過率・導電性が太陽電池性能に影響するため、最適なものを用いた。さらに、参照のため、ホール輸送として一般的に用いられている Spiro-OMeTAD 層を形成したデバイスも同時に作製した。このようにして作製した太陽電池デバイスに対して、疑似太陽光を照射しながら光電変換 (電流—電圧) 特性を測定した。その結果、カーボンナノチューブをホール輸送層として用いた太陽電池において、光電変換 (太陽光から電力への変換) 効率として、13.3% の高い性能が得られた。これは、鉛ペロブスカイトの太陽電池として一般的な、Spiro-OMeTAD 層を用いたもと、

ほぼ同じ値であることがわかった

次に、光電変換効率の値とともに、もう一つ重要な要素である光電変換特性の安定性について調べた。これは、有機と無機のハイブリッド材料である鉛ペロブスカイトが、大気中での水や酸素に極端に弱く、長期的な動作が困難であるためである。両方のデバイスに対して、光電変換特性の安定性を測定し、その詳細を調べた。その結果、カーボンナノチューブをホール輸送層として用いた鉛ペロブスカイト太陽電池デバイスでは、参照となる Spiro-OMeTAD 層を用いたものに比べ、非常に安定な光電変換性能を示す事がわかった。これらの結果から、ホール輸送層にカーボンナノチューブ薄膜を用いた鉛ペロブスカイト太陽電池によって、大気安定性に優れ高効率な太陽電池デバイスを実現することに成功した。なお、その他にポリマー層を導入した鉛ペロブスカイト太陽電池、カーボンナノチューブ薄膜とシリコンのヘテロ構造太陽電池についても成果が得られた点について付記しておく。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- F. Wang, M. Endo, S. Mouri, Y. Miyauchi, Y. Ohno, A. Wakamiya, Y. Murata, and K. Matsuda, Highly stable perovskite solar cells with all-carbon hole transport layer, *Nanoscale* 8, 11882-11888 (2016).
- E. Muramoto, Y. Yamasaki, F. Wang, K. Hasegawa, K. Matsuda, and S. Noda, Carbon nanotube-silicon heterojunction solar cells with surface-textured Si and solution-processed carbon nanotube films, *RSC Advance* 6, 93575-93581 (2016).
- F. Wang, A. A. Shimazaki, F. Yang, K. Kanahashi, K. Matsuki, Y. Miyauchi, T. Takenobu, A. Wakamiya, Y. Murata, and K. Matsuda, Highly efficient and stable perovskite solar cells by interfacial engineering using solution-processed polymer layer, *J. Phys. Chem. C* 121, 1562-1568 (2017).

<国際・国内会議>

特になし

<産業財産権>

特になし

自己形成超格子構造を有する熱電セラミックス薄膜の 局所構造と電子状態の観測

Observation of local microstructure and electronic states of
thermoelectric ceramics thin films with self-organized superlattice structure

川口昂彦・静岡大学・学術院工学領域・助教
原田俊太・名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教
鈴木久男・静岡大学・電子工学研究所・教授
脇谷尚樹・静岡大学・創造科学技術大学院・教授
坂元尚紀・静岡大学・学術院工学領域・准教授
宇治原徹・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的 (12pt ゴシック体)

昨今のエネルギー需要の増加に対応すべく、革新的省エネルギーを実現できる材料の創成が強く望まれている。そこで廃熱などの膨大な熱エネルギーを有効活用できる熱電変換材料に強い関心が集まっている。従来材料の Pb-Te などでは有害な元素を含むため、より安全な例えば酸化物による熱電材料が望ましい。特に最近では、人工超格子構造によって熱電性能が向上することが報告されている。ただし人工超格子は、煩雑な製造工程が必要となる。これに対し、磁場を印加しながら成膜可能なパルスレーザー堆積法(磁場印加 PLD 法)を用いることで、超格子構造が自発的に形成されることが分かった。この超格子構造の自己組織化現象を制御できれば、煩雑なデバイスプロセスを大幅に削減することにつながる。そのメカニズムはスピノーダル分解に起因すると考えられているが、その解明にはより詳細な局所構造を明らかにする必要がある。そこで本研究では、磁場印加 PLD 法によって作製した超格子構造を有する熱電セラミックス薄膜について、その局所構造の解析を目的とした。

2. 研究内容と成果 (12pt ゴシック体)

磁場印加 PLD 法を用いて SrTiO₃(001)基板(ST 基板)上に (La_{0.82}Sr_{0.18})_{1.08}CoO_{3+δ} (LSCO) 薄膜を作製した。2000 G の印加磁場で作製された薄膜では X 線回折の結果、超格子形成を示唆するサテライトピークが観測された。そこで、この薄膜について、名古屋大学超高压電子顕微鏡施設の操作型透過電子顕微鏡(STEM)を用いて局所構造を観察した。

図 1 に高角度環状暗視野(HAADF)-STEM 像を示す。図中左上の挿図の低倍率像で示されるように、薄膜積層方向に超格子に起因した縞状のコントラストが確認された。このことから、組成変調による超格子が形成されていると考えられる。コントラストの間隔をそれぞれ調べてみると 14~17 nm の範囲で周期が繰り返されていることが分かった。

これは X 線回折のサテライトピークの間隔から見積もられた周期 17 nm という値と比較的よく一致している。また、超格子中の 2 種類の層はそれぞれ異なる層厚をしていることが判明し、薄い方が約 3.6 nm であった。

図 2 には基板界面付近の HAADF-STEM 高分解能像を示す。それぞれの原子が明瞭に観察されており、基板から薄膜にかけて原子が整列していることが分かる(赤破線)。つまり、薄膜はコヒーレントなエピタキシャル成長をしていると言える。ここで、白矢印で示す位置に始まり、画面上方に延びていく転位線が観測されている。これは Ruddlesden-Popper 欠陥(RP 欠陥：薄膜組成が A サイト(La,Sr) サイト)過剰であることに起因する積層欠陥)であると考えられる。この転位が始まる位置は、基板界面から 5 nm 程度の位置であり、図 2 で示した 2 種類の層が入れ替わる位置に近い。このことから RP 欠陥の発生位置と超格子構造の周期決定に密接な関係がある可能性が示唆された。実際、これまでの結果から、A サイト過剰組成かつ基板と面内格子整合している薄膜でのみ超格子の形成が見られている。今後、異なる超格子周期の薄膜について RP 欠陥の発生位置に注目することで、更なるメカニズム解明につながることを期待される。

【研究成果の公表状況】

<国内会議>

甲田翔太, 川口昂彦, 木口賢紀, 坂元尚紀, 篠崎和夫, 鈴木久男, 脇谷尚樹, 磁場印加 PLD 法による(La,Sr)CoO₃ 自発的超格子薄膜の作製と熱電特性, 日本セラミックス協会 第 36 回エレクトロセラミックス研究討論会, ユニオンビル (富士通労働会館), 2016 年 10 月 13 日~14 日.

<国際会議>

甲田翔太, 川口昂彦, 木口賢紀, 坂元尚紀, 篠崎和夫, 鈴木久男, 脇谷尚樹, Spontaneous Superlattice Formation and Thermoelectric Property of (La,Sr)CoO₃ Thin Films by PLD in the Magnetic field, The 10th Asian Meeting of Electroceramics, GIS TAIPEI TECH Convention Center (台湾), 2016 年 12 月 4 日~7 日.

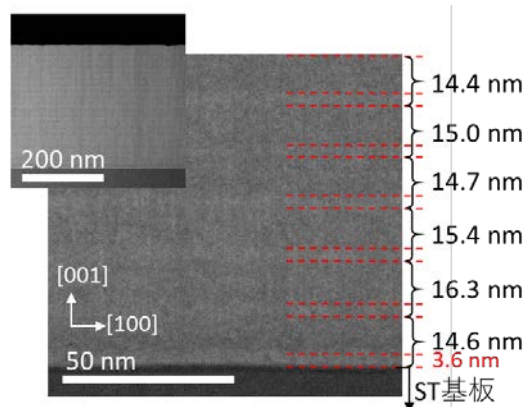


図 1：磁場印加 PLD 法で作製した LSCO 薄膜/ST 基板の HAADF-STEM 像。

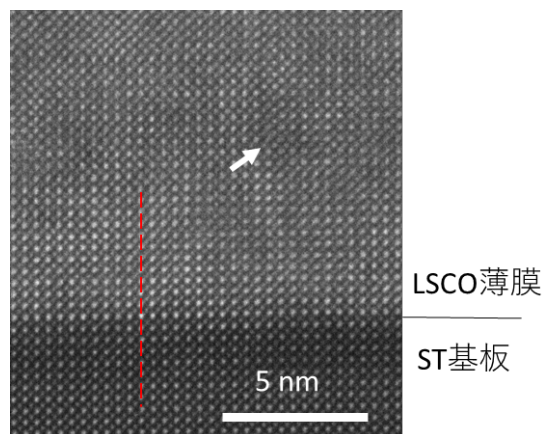


図 2：図 1 中の基板界面における高分解能像。赤破線はコヒーレント成長、白矢印は転位の位置を示している。

超省エネ・高密度磁気メモリ開発に向けた スキルミオン物質の設計と評価

Design and characterization of skrmion materials
for ultra-low energy and high density magnetic memories

肖英紀・秋田大学・大学院理工学研究科・助教
長尾全寛・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

磁気スキルミオンはナノスケールの特殊な磁気渦構造であり、スキルミオン一つを超低電流密度で駆動できることから、次世代の高速かつ低消費電力磁気記録デバイスの素子として期待されている。スキルミオンは、らせん磁性体に弱い磁場を印加することによって、スキルミオン 1 つ 1 つが周期配列したスキルミオン結晶として形成することが知られている。このスキルミオン結晶の形成や構造・動的性質は、典型的なスキルミオン結晶周期である数十ナノメートルより十分大きい良質な単結晶を用いて調べられてきた。一方、スキルミオン結晶の性質は、舞台となる結晶材料中の局所的な組成不均一や化学的不規則性、構造欠陥に影響されると考えられる。したがって、デバイスへの応用展開にあたり欠陥等ナノスケール因子によってスキルミオン結晶の結晶性がどのように影響されるのかを解明することが極めて重要となる。これまで、スキルミオン結晶の結晶性に関する実験的情報は少なく、また、結晶材料中における構造的・化学的乱れがスキルミオン形成に及ぼす影響を系統的に調べた例はほとんどなかった。本研究では、最近発見された室温以上でスキルミオンを形成する β -Mn 型合金を合成し、透過型電子顕微鏡を用いて結晶構造およびスキルミオン構造観察を実施することによって、局所的な結晶構造とスキルミオン形成との関係を明らかにすることを目的としている。

2. 研究内容と成果

今年度は、既に室温以上でスキルミオン形成が確認されている β -Mn 型 MnCoZn および 2 元系 CoZn、さらにこれらを出発点とした新規 β -Mn 合金を合成し、その評価を行った。試料は全て高純度金属原料を種々の組成で秤量し、石英管に真空封入後電気炉を用いて適宜融解・熱処理を施すことによって作製した。試料の結晶構造評価および組織観察には粉末 X 線回折および走査型電子顕微鏡(Scanning electron microscopy; SEM)を用い、らせん磁気構造および磁気スキルミオン観察は、ローレンツ電子顕微鏡を用いて実施した。

今回、種々の試行により CoZn、CoZnMn だけでなく、種々の新規合金において β -Mn 相の形成を確認した。図 1 は CoZn 合金の粉末 X 線回折図形および SEM 像であり、 β

-Mn 単相であることを示している。図 2 のように、現在までローレンツ電子顕微鏡により、同試料のらせん磁気構造およびそれらの特徴的な欠陥構造(図中実線で囲んだ)の実空間観察に成功しており、今後今度同観察を新規 β -Mn 合金に展開していく予定である。

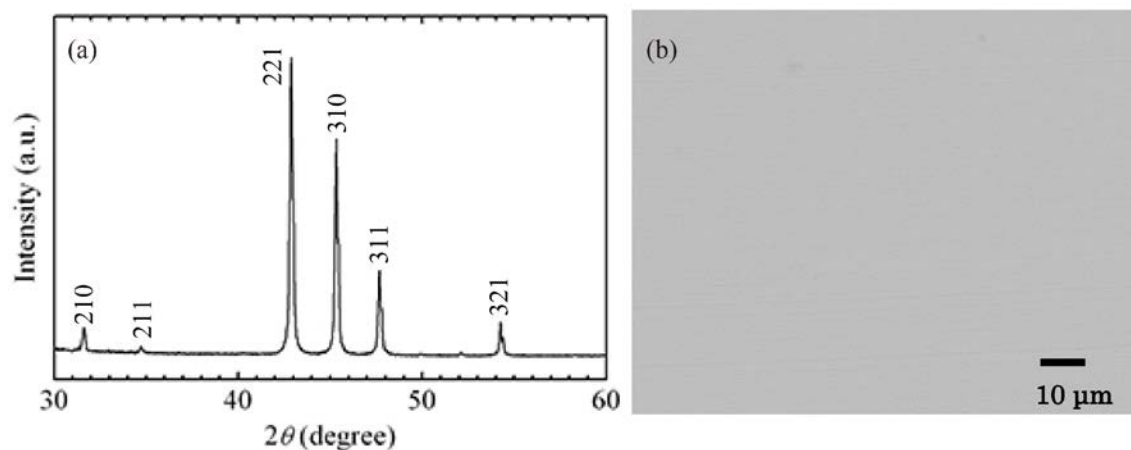


図 1. CoZn 合金の粉末 X 線回折図形(a)および SEM 像(b).

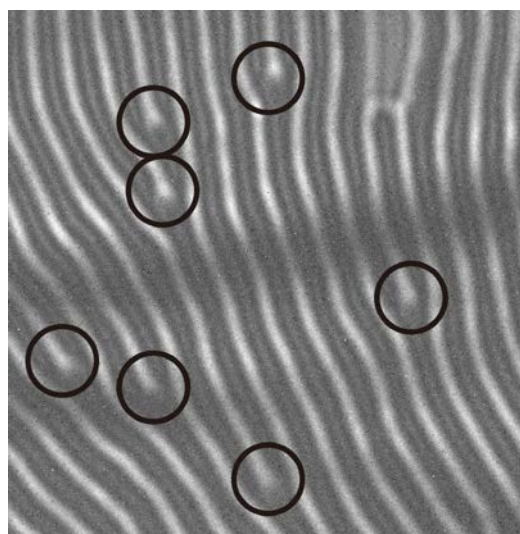


図 2. β -CoZn におけるらせん磁気構造.

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

なし

<国際・国内会議>

なし

<産業財産権>

なし

超低消費電力磁気メモリデバイス開発のための磁気スキルミオンの新規物性開拓と制御

Development and control of magnetic properties of skyrmions toward ultralow-power-consumption magnetic memory devices

木本浩司 物質・材料研究機構 先端材料解析研究拠点 副拠点長
長井拓郎 物質・材料研究機構 電子顕微鏡ステーション 主任エンジニア
五十嵐信行 名古屋大学 未来材料・システム研究所 教授
長尾全寛 名古屋大学 未来材料・システム研究所 准教授

1. 研究目的

メモリデバイスは、コンピューターの基本的構成要素である。強磁性体の磁壁を情報担体として電流で高速駆動させる磁気メモリは、大容量・高速・不揮発性を兼ね備えた従来にないメモリであるが、大きな電流密度が必要であるため低消費電力において課題を残している。一方、カイラル磁性体で形成される磁気スキルミオンは、磁壁に比べて5桁も小さい超低密度電流で高速駆動する。このため、スキルミオンを情報担体とする「超低消費電力・高性能メモリ」の実現が期待されている。

スキルミオンはカイラル磁性体の螺旋磁性相に弱い磁場を印加することで形成される。バルク試料では転移温度近傍でのみスキルミオンが形成されるが、試料を薄膜化するとスキルミオン相が低温領域まで安定化する。薄膜化によるスキルミオン相の安定化は、螺旋磁気構造の磁気異方性や薄膜表面における螺旋磁気構造の変調の影響が指摘されている。そのため、薄膜試料中の螺旋磁気構造の特性を調べることはスキルミオンの形成や安定化を調べる上で重要である。そこで本研究では、ローレンツ電子顕微鏡を用いて薄膜中の螺旋磁気構造の実空間観察を行い、スキルミオン・スピントロニクスに関わる物性を明らかにしていくことを目的とした。

2. 研究内容と成果

本研究では、磁気異方性が強い高温カイラル磁性体薄膜 CoZn を対象試料とした。図 1 に室温における CoZn 薄膜のローレンツ電子顕微鏡像を示す。白と黒のストライプ状のコントラストが交互に観察されており、螺旋磁気構造が形成されている。螺旋磁気構造の周期は $\lambda \approx 135 \text{ nm}$ である。この値は中性子回折実験により報告されている $\lambda \approx 185 \text{ nm}$ と比べて周期が短い。さらに、加熱実験により磁気転移温度 (T_c) の決定を行った。その結果、 $T_c \approx 350 \text{ K}$ と決定された。中性子散乱実験と共に行われた磁化率測定において、

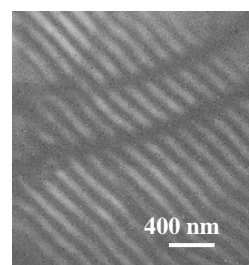


図 1

CoZn の磁気転移温度は $T_c \approx 460$ K と報告されており、本試料は T_c も報告と異なることが分かった。本試料の λ と T_c の妥当性を検討するため、先行研究と本研究の CoZn のジャロシンスキー・守谷相互作用 (D) の比較を行った。 λ は J/D (J は強磁性相互作用) に比例しており、高温域において J は T_c に比例している。つまり、両試料の T_c/λ を比較することで D の強さを比較できる。その結果、本試料では $T_c/\lambda = 2.6$ 、先行研究の試料は $T_c/\lambda = 2.5$ と求まり、ほぼ同様の値となった。CoZn は Mn を置換しても D の強さに変化が見られないことが知られている。また、他の CoZn の先行研究では $T_c \approx 420$ K と報告されている。これらの結果から、CoZn は僅かな化学組成の変化が T_c に大きな影響を与えていることが示唆される。本試料は EDS と XRD の結果から Zn の僅かな欠損が確認されており、Zn の欠損量が T_c に影響を与えていると推測される。

本研究では様々な試料領域において、ローレンツ電子顕微鏡観察を行った。その結果、多くの磁氣的欠陥構造が観察された。その様子を図 2(a)に示す。比較のために図 2(b)に FeGe のローレンツ電子顕微鏡像を示す。赤丸印で囲んだ領域が螺旋磁気刃状転位と呼ばれる欠陥である。図 2 から明らかのように CoZn は多くの磁氣的欠陥構造が存在している。(黒丸で囲んだ領域は正と負の螺旋磁気刃状転位が対になっている欠陥構造である。) 実験では磁氣的欠陥がほとんど存在しない領域も観察された。観察試料は多結晶薄膜であり、CoZn の磁気異方性方向 $\langle 100 \rangle$ と薄膜の面方向との成す角 (θ) が結晶粒ごとに異なる。このことから、 θ が大きいほど磁氣的フラストレーションが強くなり、螺旋磁気の成長過程において磁氣的欠陥が形成された可能性がある。

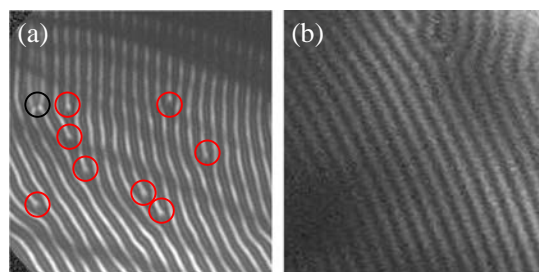


図 2 : (a) CoZn, (b) FeGe

本研究では、CoZn 薄膜中で多くの螺旋磁気刃状転位が見出された。スキルミオンは螺旋磁気刃状転位から生じやすいため、螺旋磁気刃状転位の個数を制御することでスキルミオン相の形成温度領域を制御できる可能性がある。よって、本研究成果はスキルミオンを用いたスピントロニクス分野に新たな知見を与えるものである。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- ・なし

<国際・国内会議>

- ・なし

<産業財産権>

- ・なし

強く捻れた光場中でのカイラル核形成による結晶カイラリティ制御 Control of Crystal Chirality by Inducing Chiral Nucleation under Superchiral Near Field:

新家寛正・千葉大学・融合科学研究科附属分子キラリティ研究センター・
特任助教
田川美穂・名古屋大学・未来材料システム研究所未来エレクトロニクス
集積研究センター・准教授

1. 研究目的

結晶構造における空間反転対称性の破れ(結晶カイラリティ)は、反対称性電子スピン-軌道相互作用をもたらし、結晶中の伝導電子のスピン縮退を解くことが知られている。これにより、カイラル磁性結晶中ではその相互作用が磁気構造と結びつきスキルミオンと呼ばれる電子スピン構造体を形成する。そのため、結晶カイラリティは、電子スピン制御(スピントロニクス)の観点から重要な性質であり、その性質の理解及び制御は、革新的省エネルギー技術の創生のために必要である。古くから、分子カイラリティの制御法の左右非対称な相互作用(円二色性)が活用されてきた。しかし、円偏光のカイラルピッチと物質のカイラルピッチのスケール差が大きいため、円偏光-カイラル物質間相互作用の左右非対称性の矮小さがカイラリティ制御の高効率化のボトルネックとなっている。

本研究では、金属カイラルナノ構造の表面プラズモン励起により形成する、円偏光よりもカイラルピッチが小さく、大きな左右非対称性を示す『強く捻れた近接場(Superchiral Near Filed)』を不斉場とし、

アカイラル分子のカイラル結晶化を誘起することにより、円偏光を用いる場合よりも高い鏡像体異性過剰率を実現し、光による結晶カイラリティ制御の次のフェーズを示すことを目的としている。

2. 研究内容と成果

共同利用機器の1つである電子線リソグラフィーを用いて、一辺480nmの正型を構成単位とした96nm間隔の金ナノ周期構造をガラス基板上に500 μ m四方の広さで作成した(Fig. 1)。この金ナノ構造体上に、キララル結晶化するNaClO₃の飽和水溶液を滴下し、倒立型顕微鏡で構築した光学捕捉装置を用いて金ナノ構造体に右円偏光を照射した。光照射中の集光点近傍の様子を偏光顕微鏡でその場観察した。120回の光照射実験を行い、実験の結果得られるキララル結晶の利き手を偏光顕微鏡により判別した。

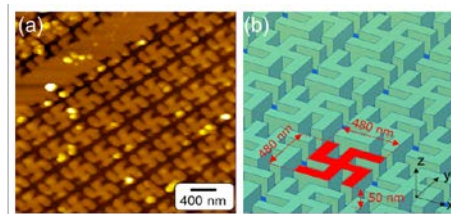


Fig. 1 Chiral Au nanostructure fabricated by electron beam lithography. (a) An atomic force microscopic image of the nanostructure. (b) Schematic illustration of the nanostructure.

光照射によって核形成・成長したすなわち、本手法は、局所的に大きな過飽和状態を時空間的に制御できる可能性を有しており、結晶成長制御の分野での応用が期待される。

自然結晶化のように両鏡像体の晶出確率が 50%である場合、鏡像体の晶出回数は二項分布 $B(120,0.5)$ に従う。しかし、上記の結果は $B(120,0.5)$ の 95%信頼区間から逸脱しており、このことから統計的に有意なキラリティの偏りが誘起されたことが言える。

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- ・ 新家寛正, 金属ナノ粒子・ナノ構造の表面プラズモンを介した円偏光レーザー誘起結晶化における NaClO_3 結晶キラリティ・多形制御, 静岡大学ナノ粒子革新的応用若手研究会)第一回研究セミナー, 静岡大学, 2016. 10. 20.
- ・ Hiromasa Niinomi, Teruki Sugiyama, Miho Tagawa, Toru Ujihara, Mihoko Maruyama, Yusuke Mori, Katsuhiko Miyamoto and Takashige Omatsu, プラズモニク二次元ナノ格子の光励起による水溶液からの NaClO_3 結晶化過程そ

の場観察, 結晶表面・界面での成長カイネティクスの理論とその場観察, 北海道大学, 2017. 1. 23.

- ・ Hiromasa Niinomi, Teruki Sugiyama, Miho Tagawa, Toru Ujihara, Yusuke Mori, Shunta Harada, Kenta Murayama, Katsuhiko Miyamoto and Takashige Omatsu, Crystallization of NaClO_3 metastable phase from unsaturated mother solution achieved by excitation of plasmonic Au nanoarray, Optics & Photonics Japan 2016, 筑波大学, 2016. 10. 31.
- ・ Hiromasa Niinomi, Teruki Sugiyama, Miho Tagawa, Toru Ujihara, Yusuke Mori, Shunta Harada, Kenta Murayama, Katsuhiko Miyamoto and Takashige Omatsu, Optically induced crystallization of NaClO_3 metastable phase on plasmonic gold nanostructures immersed in unsaturated mother solution, Institute for Global Prominent Research Kickoff Symposium, 千葉大学, 2016. 11. 14.

省エネルギー・高効率・プログラマブルな分子集積化を目的とした

エントロピー駆動型 DNA セルフアセンブリ法の開発

Entropy-driven DNA self-assembly for energy-saving, high efficiency, and programmable integration of molecules:

(代表者) 田中 文昭・産業技術総合研究所・触媒化学融合研究センター・

契約職員 兼 ナノチューブ実用化研究センター・

パートナー研究員 (ポストドクター)

(分担者) 萩谷 昌己・東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

(分担者) 田川 美穂・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

(分担者) 磯貝 卓巳・名古屋大学・未来材料・システム研究所・博士課程学生

(担当教員) 田川 美穂・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

1. 研究目的

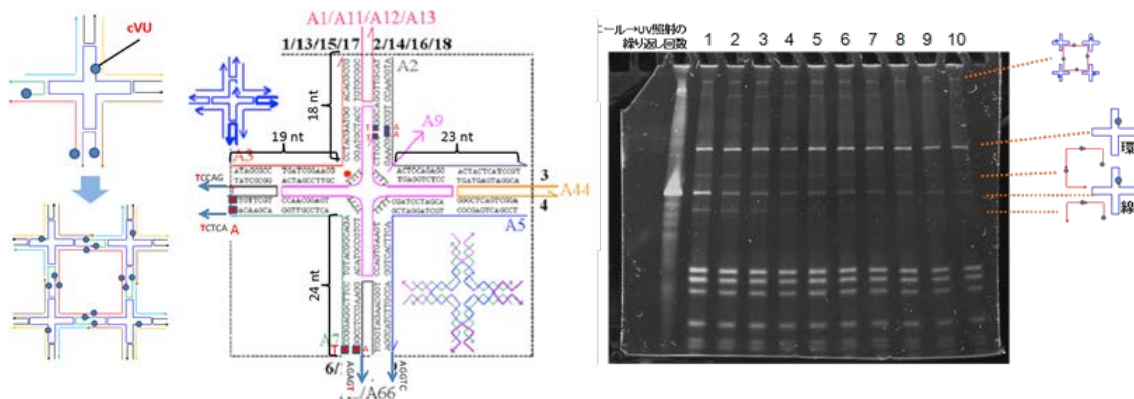
現在のエレクトロニクスでは主にリソグラフィを利用したトップダウンによりデバイスが作製されているが、これには高価なクリーンルームや半導体製造装置が必要であり、それらを動作・維持するために多大なエネルギーを要している。一方、自然界に目を向けると、生体は現在のエレクトロニクスを凌駕するほど複雑で洗練されたシステムを、分子のセルフアセンブルによる省エネルギーなボトムアッププロセスにより実現している。

DNA はその塩基配列を設計することで、任意の形状を持つナノ構造にアセンブルできることが知られており、これを足場として機能性分子を並べ、デバイスをボトムアップに作製しようとする研究が盛んに行われている。しかし、これまでに開発された手法では、分子種が増えるに従ってアセンブルの効率が指数関数的に低くなるという課題があり、実用化にはブレークスルーが必要であった。

本研究では、この問題を解決するため、DNA と紫外線応答性分子 (5-carboxyvinyl-2'-deoxyuridine, cvU) を組み合わせることにより、アニール+紫外線照射することで正しい構造のみがカタナン (輪が繋がった構造) となる分子デザインを提案する。カタナンとなった構造は容易には破壊されないため、アニール+紫外線照射を繰り返すことにより、正しい構造が増えていくことになる。これにより、従来手法では成しえなかったレベルでの高効率な分子アセンブリが可能となり、トップダウン的手法とは全く異なる、省エネルギーなデバイス作製法の開発が期待できる。

2. 研究内容と成果

設計した DNA 構造体の模式図を左下図に示す。これは Sung Ha Park らによって提案された 4x4 タイルと呼ばれる構造であり [Park et al., 2006]、十字型の先が一本鎖となっているため、お互いに結合して大きな構造にアニールすることができる。ここでは、提案手法の有効性を検証するため、4x4 タイル 4 つが結合して四量体となるよう設計している。結合の手となる一本鎖部分に光応答性の cVU が付与されており、アニール→紫外光照射により、結合した手が共有結合するようになっている。予備実験の結果、アニール→紫外光照射を繰り返すことによって、設計した四量体の部分構造と思われるものの収量が増加していくことを、ゲル電気泳動によって定量的に確認することができた (右下図)。



【研究成果の公表状況】

<原著論文>

(投稿準備中) Fumiaki Tanaka, Takumi Isogai, Miho Tagawa*, and Masami Hagiya, "Entropy-driven self-assembly of DNA nanostructures using 5'-carboxyvinyl-2'-deoxyuridine", in preparation.

<国際・国内会議>

- Fumiaki Tanaka, Takumi Isogai, Miho Tagawa, and Masami Hagiya, "Repetitive DNA self-assembly by photo-cross-linking for large-scale structures", The 22nd International Conference on DNA Computing and Molecular Programming (DNA22), Minich, Germany, September 4-8, 2016

<産業財産権>

該当なし

(注) 別紙様式 2-1 は A 4 サイズ 1 頁に、別紙様式 2-2 は図表等を含めて A 4 サイズ 2 頁になるようにしてください。

窒化物半導体を用いた MOS デバイスにおける 半導体/絶縁膜界面の評価

Evaluation of interface between semiconductors and insulators on MOS devices
using nitride semiconductors

佐藤威友・北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・准教授
赤澤正道・北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・准教授
熊崎祐介・北海道大学・情報科学研究科・博士課程 3 年
天野浩 ・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授
本田善央・名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授
出来真斗・名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

1. 研究目的

窒化物半導体は、高い飽和電子速度および高い絶縁破壊電界を持つことから、将来、高耐圧パワーデバイスへの応用が期待されており、実用化が求められている。窒化物半導体を用いたパワーデバイス実現のためには、ゲート絶縁膜の高品質化および高信頼化が必要不可欠である。しかしながら、窒化物半導体の熱酸化膜が絶縁膜に適応できないことから、窒化物半導体に用いられる絶縁膜は何れも堆積膜である。現在、窒化物半導体デバイスに用いられる堆積膜は、絶縁膜/半導体界面および絶縁膜中へ高密度の欠陥準位が導入される可能性があり、これらの欠陥準位は閾値電圧のシフトや電流コラプス現象等、パワーデバイスに不可欠な信頼性に大きく影響を与える問題が発生する。したがって、これらの欠陥準位を低減し、その起源を明らかにすることが必要不可欠であると言える。そこで本共同利用では堆積絶縁膜の高品質化と欠陥準位の低密度化および欠陥準位の起源解明を目的とする。

2. 研究内容と成果

本年度は、北大グループおよび名大グループで作製した金属-酸化膜-半導体 (MOS) キャパシタの電气的評価結果をもとに、窒化物半導体/絶縁膜界面に共通してあらわれる様々な課題について議論した。さらに、窒化物半導体 MOS デバイスの欠陥準位・界面準位の低密度化に向けたデバイスプロセスの検討を行った。

サファイア基板または窒化ガリウム(GaN)基板上へ GaN および AlGaN エピ膜を成長させ、その上に、絶縁膜として二酸化ケイ素 (SiO₂)、酸化アルミニウム (Al₂O₃)、窒化ホウ素 (BN) の 3 種類を堆積した。それぞれの絶縁膜を堆積した後、Ni/Au 電極を形成して MOS キャパシタを作製し、窒化物半導体/絶縁膜界面の電气的特性を容量-電圧 (C-V) 法により評価した。

Al₂O₃/GaN および Al₂O₃/AlGaIn-MOS キャパシタの C-V 特性は、大きなヒステリシスおよび周波数分散が見られ、高密度の界面準位が存在することを示した。これらの試料を用いて、絶縁膜堆積後に界面特性を改善させるプロセスを検討した。MOS キャパシタに逆方向電圧を印加しながら 300~400°C でアニール処理をすることにより、ヒステリシスおよび周波数分散のほとんどない理想的な C-V 特性が得られた。また、動作温度の変化に対して閾値変動はなく、Al₂O₃ 界面特性が大幅に向上することを示した。

名大グループで作製・評価した SiO₂/GaIn-MOS キャパシタについても、未処理の Al₂O₃ 界面と同様に C-V 曲線は大きなヒステリシス特性を示し、Hi-Lo 法による解析から、高密度の界面準位が存在することが明らかとなった。一方、SiO₂/BN/GaN 構造を有する MOS キャパシタの C-V 特性ではヒステリシスが大幅に抑制されており、BN 膜を挿入することにより、絶縁体/GaN 界面への電子の捕獲・放出が大幅に抑制される可能性を示した。これらの結果から、窒化物半導体/絶縁体界面の形成時には高密度の界面準位が存在し、アニール処理や界面層の導入でその影響を低減できる可能性を示した。

プロセスや絶縁膜構造が界面特性に与える影響をさらに理解するため、計算機シミュレーションを使った理論的解析を行った。計算では、窒化物半導体特有の分極電荷と絶縁体界面の電子捕獲準位を仮定し、Shockley-Read-Hall (SRH) 統計に基づいた界面準位からの電子放出時定数を考慮した。Al₂O₃/AlGaIn-MOS キャパシタについて実験値と理論計算を比較した結果、アニールプロセスにより、U字型に分布する界面準位密度が1桁以上低減することが示唆された。界面準位の生成要因として、界面での結晶不連続性からバンドの分離が不十分になること、プロセス時の加工損傷により発生した窒素空孔が欠陥準位としてふるまうことなどが挙げられる。U字型分布の界面準位は、前者の界面不連続性に起因するものと考えられ、アニールプロセスにより、界面における結晶性の乱れが改善したことが示唆される。窒化物半導体/絶縁体界面の電気的特性を理解する上では、C-V 測定を基盤とした実験的解析手法と、計算機シミュレーションによる理論的手法の複合評価が有効であることを示した。

3. まとめと今後の展望

本年度は、北大グループおよび名大グループで作製した試料とその評価結果から、窒化物半導体電子デバイスの安定動作に向けて克服すべき課題を共有し、窒化物半導体/絶縁体界面に存在する準位密度の低減、および電子の捕獲・放出過程の抑制に有望な新規プロセス・絶縁膜構造を見いだした。また、ウェットエッチング時の光照射法とエッチング保護膜の設計指針や、Al₂O₃ 絶縁膜のアニール処理と結晶化によるエッチングレートの変化など、デバイス作製時にはかかせないプロセス技術のノウハウを共有化できた。今後は、MOS トランジスタやリセス型絶縁ゲート高電子移動度トランジスタへと展開し、未来材料・システム研究所が保有するエミッション顕微鏡や、カソードルミネッセンス (CL) 装置を使った欠陥準位の評価を進めていきたいと考えている。

N 極性 InGaN 発光ダイオードの高効率化にむけた 局在発光の微視的評価

Microscopic investigations on localized emission in N-polar InGaN LED
toward its efficiency improvement

代表者 片山竜二・ 大阪大学・ 工学研究科・教授
分担者 松岡隆志・ 東北大学・ 金属材料研究所・教授
谷川智之・ 東北大学・ 金属材料研究所・助教
野々田亮平・ 東北大学・ 金属材料研究所・修士過程 2 年
正直花奈子・ 東北大学・ 学際科学フロンティア研究所・助教
担当者 本田善央・ 名古屋大学・ 未来材料システム研究所・准教授

1. 研究目的

これまで研究代表者らは、白色発光ダイオード (LED) に代表される固体照明等の革新的な省エネルギー化を目指した窒化インジウムガリウム (InGaN) 系発光素子開発の中で、従来の III 族極性薄膜に比べ、これを裏返した面方位である N 極性薄膜が高い In 取込効率を有することに着目し、未踏波長域であった緑から赤色といった長波長で発光する N 極性 InGaN 量子井戸 LED の実現に成功した〔正直他, APEX **8** (6), 061005-1 (2015)〕。その際、これまでの顕微フोटルミネッセンス・電場変調分光測定、透過電子顕微鏡観察といった個別の評価結果をまとめると、量子井戸からの主たる光学遷移に加え、量子ドットの発光中心が自己形成され、この局在発光が上記の長波長発光の起源であることが示唆されている〔谷川他, JJAP **55** (5S), 05FA04-1 (2016)〕。そこで本研究では、微視的構造特性と発光の直接観察とが同時に可能な透過電子顕微鏡に装備されたカソードルミネッセンス装置を用い、この局在発光の起源を決定的に突き止め、素子の更なる発光効率の向上と実用素子への発展の可能性を探ることを目的とした。

2. 研究内容と成果

東北大学において有機金属気相成長により作製した N 極性 InGaN 量子井戸及び薄膜試料について、名古屋大学未来材料システム研究所保有の収束イオンビーム加工装置 (FIB, HITACHI NX2000) を用いて断面観察用の薄片試料へと加工し、走査型透過電子顕微鏡 (STEM, HITACHI SU9000) を用いた明・暗視野観察により、反転ドメインを起点として InGaN 多重量子井戸中に自己形成された量子ドットの構造の微視的構造特性を評価した。また上記顕微鏡に装備されたカソードルミネッセンス装置 (CL, GATAN VLB3) を用いて、量子ドットの構造近傍の発光強度分布測定を行い、この微視的構造が局在発光中心として機能しているかどうかを検証した。

図 1 (a)に、基板側から伝搬する反転ドメインが InGaN 多重量子井戸層と交差する領域近傍の断面 STEM 像を示すが、量子井戸層を境に反転ドメインが消失し貫通転位が発生するとともに、格子緩和にともなう井戸層厚の増加が見受けられ、量子ドットの構造を呈することがわかる。図 1 (b)に同領域のパングロマティック CL 強度分布像を示すが、上記量子ドットの構造にあたる部分で強い発光が見られる。図 1 (c)の赤線と青線は、それぞれ図 1 (b)中の量子ドットの領域（赤枠内）と量子井戸の領域（青枠内）を含むように井戸層水平方向に積分した CL 強度プロファイルを示すが、量子ドットの領域でより強い発光が得られることを明確に示しており、当初計画どおりの結果が得られた。

今後の予定として、上記試料は低温顕微フオルミネッセンス分光測定においてサブ meV の超狭スペクトル線幅発光を呈することから、試料を 100 K 程度まで冷却しスペクトル測定を行うことで、この局在発光サイトにおいて同様の超狭線幅発光が得られることを検証する。また、発光強度の励起電子線強度依存性を評価することにより、局在励起子分子発光が観察できるかを確認する。また上記顕微鏡に装備されたエネルギー分散型 X 線分光装置 (EDX) を併用し、量子ドットの構造近傍の同一箇所での STEM・CL 発光強度分布・In 濃度分布の微視的観察を行うことで、本研究で確認された局在発光中心が、組成変調に起因しているかどうかを検証する。一連の評価により得られた情報をもとに、微視的構造の位置や密度の制御を行い、発光ダイオードの高効率化や新規量子機能の発現にむけた方策を引き続き検討することとする。

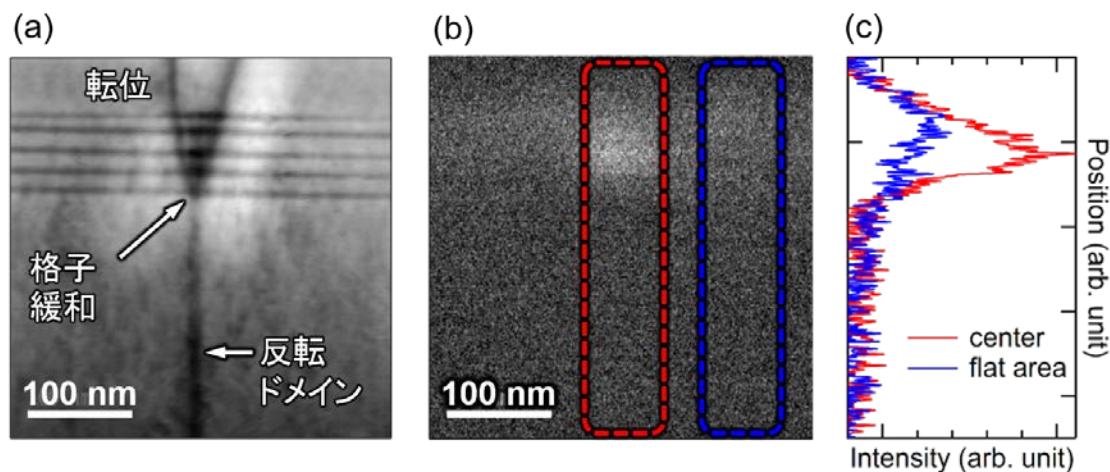


図 1 N 極性 InGaN 量子ドットの微視的構造近傍の (a)断面 STEM 像、(b)パングロマティック CL 発光分布像、(c)パングロマティック CL 発光強度プロファイル。

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- K. Takamiya, S. Yagi, H. Yaguchi, H. Akiyama, K. Shojiki, T. Tanikawa, R. Katayama, and T. Matsuoka, “Biexciton emission from single quantum-confined structures in N-polar (000-1) InGaN/GaN multiple quantum wells,” 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-12) Strasbourg, France, July 24 - 28 (2017). [投稿済]

GaN 厚膜の HVPE 成長における成長面方位と欠陥形成機構

Effect of growth orientation on defects generation in the HVPE growth of thick GaN films

研究代表者

谷川智之・東北大学金属材料研究所・講師

研究分担者

窪谷茂幸・東北大学・金属材料研究所・助教
野々田亮平・東北大学・金属材料研究所・修士 2 年
只友一行・山口大学大学院理工学研究科・教授
岡田成仁・山口大学大学院理工学研究科・助教
杉本浩平・山口大学大学院理工学研究科・博士 2 年

研究所担当教員

出来真斗・名古屋大学・未来材料システム研究所・助教
本田善央・名古屋大学・未来材料システム研究所・准教授
天野浩・名古屋大学・未来材料システム研究所・教授

1. 研究目的

省エネルギー社会の実現に向けて、ワイドギャップ半導体を用いたパワーデバイスが求められている。ワイドギャップ半導体の一つである GaN を用いた縦型パワーデバイスの耐圧向上に向けて、GaN バルク基板の高品質化が求められている。窒化物半導体では、結晶の窒素平衡蒸気圧が非常に高いことから、薄膜の成長法として広く用いられている MOVPE 法においては、成長条件や成長面方位が残留不純物濃度に影響を与えることが多くの実験から調べられている。MOVPE 成長で構築された知見を例にとると、厚膜の成長法として広く用いられている HVPE 法においても類似の現象が示唆される。本研究では、GaN 成長における成長面方位と線欠陥・点欠陥の形成機構の関係を解明することを目的とする。

2. 研究内容と成果

2-1. N 極性 GaN の残留不純物濃度制御

まず、従来の Ga 極性 GaN と成長方位を反転させた N 極性 GaN に混入する不純物濃度の定量評価を行い、濃度を低減させるための成長条件の最適化を行った。サファイア基板上に GaN 薄膜を MOVPE 成長し、薄膜中の不純物濃度を二次イオン質量分析により評価した。表 1 に典型的な成長条件で成長した GaN 中の不純

物濃度を示す。N 極性 GaN は、Ga 極性 GaN を比較して、酸素を非常に取り込みやすく、炭素を取り込みにくいことが分かった。不純物濃度を制御するために、成長条件と不純物

表 1 Ga 極性および N 極性 GaN 中の不純物濃度

極性	Ga 極性	N 極性
O 濃度 (cm ⁻³)	2 × 10 ¹⁸	5 × 10 ¹⁶
C 濃度 (cm ⁻³)	8 × 10 ¹⁵	3 × 10 ¹⁷
Si 濃度 (cm ⁻³)	2 × 10 ¹⁶	3 × 10 ¹⁶

濃度との関係を調べたところ、成長条件によって不純物濃度が顕著に変化することが分かった。V/III 比を例にとると、V/III 比が高くなるにつれて酸素濃度が低下し、炭素濃度が増加した。最適化の結果、N 極性 GaN 中の酸素濃度は 3 × 10¹⁷ cm⁻³ となり、約 1 桁低減することができた。

2-2. 二光子励起フォトルミネッセンス法を用いた貫通転位分布の評価

貫通転位を簡便に観察するために二光子励起フォトルミネッセンス法と提案し、HVPE 成長した GaN 厚膜中に存在する貫通転位の三次元分布を評価した。GaN のバンド間吸収が起こらない長波長の 700nm をピーク波長としたチタンサファイアレーザーを励起光源として用い、励起光を対物レンズで集光したところ、集光位置において二光子吸収が発生し、GaN からのバンド端発光が得られた。集光位置を面内および面直方向に掃引することで発光分布の三次元像と構築した。三次元像から、貫通転位を中心とした暗線が観察され、本手法は十分な空間分解能が得られていることが分かった。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- T. Tanikawa, S. Kuboya, and T. Matsuoka, "Control of Impurity Concentration of Undoped N-polar (000-1) GaN Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy" Phys. Status Solidi B (submitted).

<国際・国内会議>

- T. Tanikawa, S. Kuboya, and T. Matsuoka, "Control of Impurity Concentration of Undoped N-polar (000-1) GaN Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy" International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2016), Orlando, USA, October 2~7, 2016.
- 谷川智之, 大西一生, 加納聖也, 松岡隆志, 向井孝志, 「二光子励起フォトルミネッセンス法による GaN 中の貫通転位の三次元分布観察」, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-503-14, 横浜, 2017 年 3 月 15 日 (発表予定)

<産業財産権>

- 特になし

溶液法成長 SiC 結晶を基板として用いたパワー半導体素子の評価
Characterization of power semiconductor devices using solution grown SiC crystals as substrates

加藤正史・名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
宇治原徹・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授
原田俊太・名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

1. 研究目的

SiC 結晶は従来昇華法により成長されてきたが、その場合転位密度が 10^3 cm^{-2} を超えるのが通常であった。一方で、溶液法により成長された SiC 結晶では、転位密度が 10^2 cm^{-2} を下回るものが得られており、高品質結晶の成長が可能であることが実証されてきた。しかしながら、SiC 結晶の応用ターゲットであるパワー半導体素子に対して、溶液法成長の結晶が基板として利用できるかどうかの実験的検証は未だに不十分である。従って、本共同研究では、申請者が有する電氣的評価の知見を活かし、溶液法成長による SiC 結晶を基板として用いたパワー半導体素子の特性を評価する。これにより、溶液法がパワー半導体素子用の基板の成長手法として高いポテンシャルを持っていることを実証する。

ここで SiC パワー半導体素子は一般に、基板結晶の上にエピキシャル成長により不純物密度を制御した SiC 耐電圧維持層を形成することで作製される。この耐電圧維持層がパワー半導体素子の性能を決定するが、耐電圧維持層には基板からの転位が引き継がれるため、基板結晶の品質は重要である。ここで溶液法により転位密度が抑制された SiC 結晶を基板とし、SiC 耐電圧維持層を形成すれば、転位密度の低い耐電圧維持層が得られ、高性能な素子の作製が期待できる。ただし、溶液法といえども、全ての転位を除去することは困難であり、転位が素子に与える悪影響を定量的に観測することは重要である。例えば、優先的に抑制する転位が明らかになる、もしくは転位の悪影響を抑制できるドーピング条件を見出すことができれば、結晶成長条件の最適化が可能であるためである。その背景に対応して、平成 28 年度においては素子作製の予備段階として、SiC 基板中の転位が素子に悪影響を与える条件を定量的に検討した。

2. 研究内容と成果

SiC 基板中の転位のうち、基底面内転位は、素子動作の間にその転位に伴う積層欠陥を拡張させ、耐電圧維持層に広がることで素子特性を悪化させることがわかっている。しかしながら、どのようなメカニズムで積層欠陥の拡張が起こっているかは明らかではない。本共同研究では、SiC 基板中の積層欠陥のフォトルミネッセンス発光減衰時定数を

定量的に観測し、拡張メカニズム解明を行った。

n 型および p 型の SiC 基板に対し、波長 355 nm のパルス励起光を照射し、積層欠陥付近にキャリアを励起し、420 nm 付近の積層欠陥からの発光を観測した。その結果 n 型、p 型どちらからも 3ns 以下の非常に速い減衰が観測され、積層欠陥は励起キャリアを直ちに再結合させることがわかった。つまり、積層欠陥では周辺よりも再結合過程により失われるエネルギーが多いことが示唆され、積層欠陥の拡張のドライビングフォースとなることが考えられる。

一方で、積層欠陥の拡張が起こるには積層欠陥の境界に存在する部分転位と呼ばれる、基底面内転位が分解したものが動く必要がある(図 1 に積層欠陥と転位の関係の模式図を示す)。部分転位に相当する発光波長 680 および 790 nm の減衰速度を観測したところ、4-14 ns と積層欠陥よりも遅い減衰を示した。これは積層欠陥の拡張は、部分転位での再結合が律速している可能性を示唆している。従って、ドーピングなどにより結晶内の部分転位の動きやすさを抑制することで、積層欠陥による素子特性の悪化を防ぐことが期待できる。

上記の結果を今後の SiC 結晶の溶液成長条件に反映し、劣化のない高性能な SiC パワー半導体素子を作製する予定である。

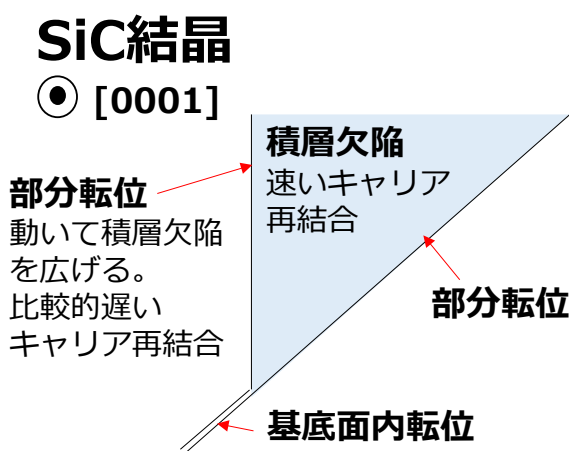


図 1 SiC 結晶内部の積層欠陥と転位の関係の模式図。本研究では積層欠陥と部分転位でのキャリア再結合速度を見出した。

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- ・加藤 正史、片平 真哉、市川 義人、市村 正也、原田 俊太、“n 型 4H-SiC 中 SSF 起因フォトルミネッセンスの時間分解測定”、2016 年 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 15p-C302-11、朱鷺メッセ 2016 年 9 月 13～16 日
- ・片平 真哉、市川 義人、原田 俊太、木本 恒暢、加藤 正史、“4H-SiC 中 1SSF・PD 起因フォトルミネッセンス減衰時間の温度依存性”、2017 年第 64 回応用物理学会春季学術講演会 15a-F204-12、パシフィコ横浜、2017 年 3 月 14～17 日

溶液法 SiC 結晶成長と評価に関する研究 Study on solution growth and evaluation of SiC crystals

太子 敏則・信州大学・環境・エネルギー材料科学研究所・准教授
沓掛 穂高、鈴木 皓己・信州大学・理工学系研究科・M2
土本 直道・信州大学工学部・電気電子工学科・B4
原田 俊太・名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

1. 研究目的

今日、パワー半導体材料の主流はシリコン(Si)であるが、物性的な観点からこれ以上の性能向上は困難とされている。そこで、新たな材料として炭化ケイ素(SiC)が注目されており、Si より優れた物性値を有するため、エネルギー変換効率の向上が可能となる。現在、昇華法によって成長させた SiC が広く使用されているが、一方で溶液法での SiC 結晶成長は、熱平衡状態に近い成長ができ、昇華法の結晶に比べて欠陥が少ないとされている。しかし、溶液法は SiC 特有のポリタイプ現象や成長機構の複雑であることから、長尺化や大口径化が困難であり、さらなる高品質化も必須である。

本研究では、研究代表者が有する機能性バルク単結晶成長技術の知見を活かして、貴研究所で先駆的に SiC 溶液成長に関する研究を行っている宇治原教授・原田助教の研究室と連携して、相互でできなかった成長条件の改善や結晶評価を行い、SiC 結晶の高品質化を目的とする。そして、この共同研究の実施により、溶液法による SiC パワーデバイスの実用化と省エネルギー社会の実現を目指す。

2. 研究内容と成果

信州大学所有の抵抗加熱式の結晶育成装置で、カーボンるつぼを用いて 4H-SiC 基板の C 面を種結晶として SiC 結晶を溶液法により育成した。得られた結晶の評価は、名古屋大学・未来材料・システム研究所の原田助教のご指導のもと、エッチング法による転位密度評価およびラマン分光法によるポリタイプの評価を実施した。

また、信州大学で進めている SiC 溶液成長における炉内の温度分布および対流の数値解析について、原田助教が進める高周波加熱炉による SiC 溶液成長の知見を活かして、結晶育成実験結果に基づくモデルに改良した。

これらの実験、評価、数値解析を名古屋大学・信州大学が共同で実施し、高品質な SiC 溶液成長条件の最適化を目指した。

図 1 は、1800°C で Si-Cr 溶媒 (Si : Cr = 6 : 4) から成長した SiC 結晶の光学顕微鏡写真である。六角形状の成長面が観察され、二次元核成長している。この成長面のポリタ

イブを、名古屋大学の未来材料システム研究所のラマン分光装置を用いてマッピングによる評価を行った。評価結果を図 2 に示す。成長面のほとんどは 4H-SiC を示したが、一部に 15R-SiC が存在することがわかった。同様の評価を、他の成長条件で成長した結晶に対しても行った。

得られた結果をもとに、信州大学における SiC 溶液成長時の種子づけ条件について再検討を行った。まず、結晶成長シミュレーションソフト「CGSim」による数値解析モデルを原田助教の助言に従って改良した後、種子づけ時に種結晶が受ける温度差を解析した。その温度差がなるべく小さくなる条件で再度結晶育成実験を行った結果、成長面にステップフロー成長様のモフォロジーが観察されるようになった一方で、4H-SiC 単独のポリタイプとなる結晶を得るには至らなかった。

このように、信州大学での結晶成長実験、名古屋大学での結晶品質評価、名古屋大学・信州大学双方での数値解析を繰り返して SiC 溶液成長に関する実験・解析を行い、今後も結晶成長条件の最適化を図っていく。

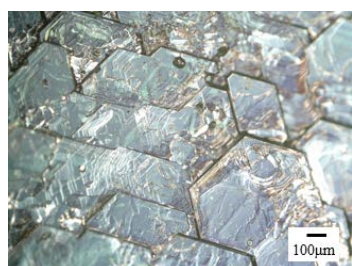


図 1 信州大学で育成した SiC 結晶の成長面の写真

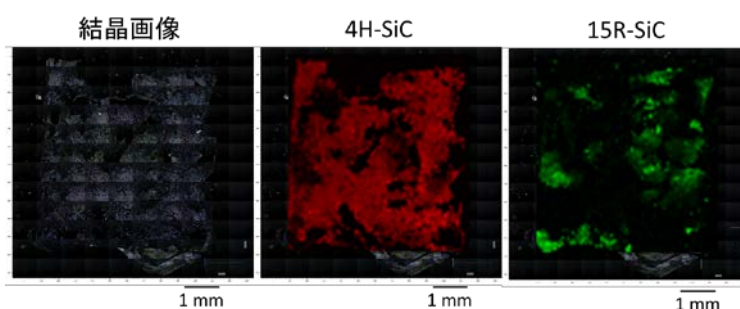


図 2 図 1 の SiC 結晶の名古屋大学のラマン分光装置によるポリタイプマッピング評価

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- ・沓掛穂高、土本直道、高橋大、鈴木皓己、玄光龍、太子敏則、SiC 溶液成長における融液の坩堝への濡れ性を考慮した数値解析、第 3 回先進パワー半導体分科会、つくば、平成 28 年 11 月 8 日。
- ・鈴木皓己、太子敏則、Cr 単一溶媒による SiC 溶液成長における育成温度と結晶品質の関係、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、横浜、平成 29 年 3 月 15 日。（予定）
- ・土本直道、鈴木皓己、沓掛穂高、高橋大、玄光龍、太子敏則、TSSG-SiC 溶液成長における種子付け時の温度差が結晶品質に与える影響、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、横浜、平成 29 年 3 月 16 日。（予定）

光学観察による SiC 結晶内部欠陥の評価

Characterization of Crystal Perfection by Optical Methods

研究代表者： 塚本勝男・大阪大学大学院・工学研究科・招へい教授

研究分担者： 村山健太、宇治原徹、原田俊太、田川美穂（名古屋大学未来材料・シ
ステム研究所）

研究所担当教員： 村山健太

1. 研究目的

SiC 結晶の完全性の評価は表面の光学観察や AFM によって古くからなされている。それに対して、結晶の成長メカニズムや物性に関わる結晶の内部欠陥の観察は、シンクロトロンをつかった X 線トポグラフでもって行われている。しかし、X 線観察は原理的に拡大像がとれない、装置の使用頻度が多くない、実時間測定やその場観察に不向きなどの欠点があり、もっと手軽な方法も必要とされる。

本研究の目的としているのは、最近の光学的観察法を SiC の欠陥分布や完全性の観察測定に有効利用するためのフィージビリティスタディを行うことである。そのため、本申請者が開発してきた最新の干渉計、リアルタイム測定装置などを SiC 結晶の“その場”評価につかい、その適用性を評価することにある。

これにより名古屋大学で育成中の、革新的省エネルギーを実現する SiC パワーデバイス用の SiC 結晶の品質評価の高度化と将来の生産ラインへの適用を目指す。

2. 研究内容と成果

基板上に成長させた SiC 結晶の表面、内部欠陥、光学軸の分布を、位相シフト干渉計、高精度偏光顕微鏡、偏光高速イメージセンサによる実時間複屈折位相差マッピング法を利用して光学観察した。後者の方法は結晶、特に SiC 結晶への適用は、今回が初めてであるので、光学系を改良しながらそのフィージビリティスタディを行った。

- (1) 高分解偏光顕微鏡法：図1に例を示した。結晶表面の成長丘頂点の下には必ず歪み場が存在する。その起源は微結晶であり干渉色から他の多形であることが分かる。
- (2) 位相シフト干渉計： SiCラセンステップの高さの測定を行った。これまで干渉計では測定されていない1.4nmの高さのステップが広い範囲で一度に測定出来るようになり、高さ分解能はAFMに十分匹敵することが分かった(図2)。

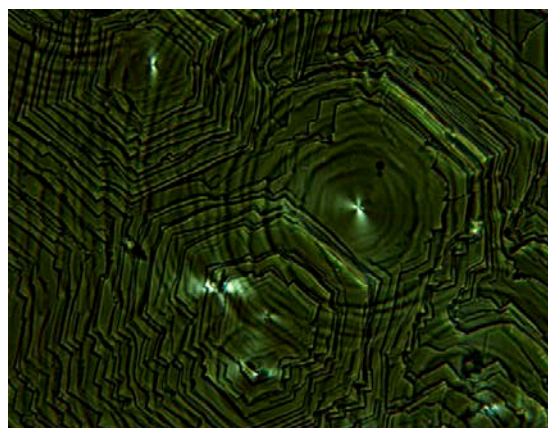


図 1 偏光観察によるラセン成長丘の起源である微結晶の歪み場（明るい8字型のコントラスト）。

度に測定出来るようになり、高さ分解能はAFMに十分匹敵することが分かった(図2)。

(3) 実時間複屈折位相差マッピング法: 偏光高速イメージセンサ(図3)を使用すると、実時間に複屈折位相差が実時間でマッピングすることができる(大沼隼志ら)。この方法をSiC結晶に起用して、

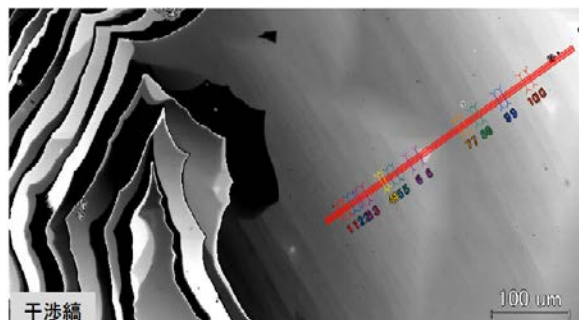


図 2 位相シフト干渉計による SiC ステップ高の測定。単分子高まで測定可能。

どに応用出来るだろう。今後は高倍率化、共焦点化を計ることで、解像度は飛躍的に向上するはずである。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

・ K. Tsukamoto, In-situ observation of crystal growth and the mechanism, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 62 (2016) 111-125.

・ Y. Tominaga, M. Maruyama, M. Yoshimura, H. Koizumi, M. Tachibana, S. Sugiyama, H. Adachi, K. Tsukamoto, H. Matsumura, K. Takano, S. Murakami, T. Inoue, H.Y. Yoshikawa, Y. Mori, Promotion of protein crystal growth by actively switching crystal growth mode via femtosecond laser ablation, Nature Photonics, 10 (2016) 723-726.

<国際・国内会議>

・ K. Tsukamoto, In-situ observation of crystal growth and the mechanis, Int. Summer School on Crystal Growth (ISSCG-16), Shiga, Aug. 2015.

複屈折の分布と光軸の主軸方向をプロットしたのが図4である。

その結果、これまで長時間かかっていた結晶全体の光学軸の分布がリアルタイム

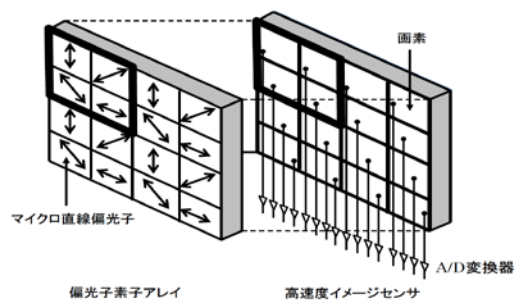


図 3 偏光高速イメージセンサー (フォトロン(株))。

で測定できるようになった。この方法は将来的にはリアルタイムプロセッシングな

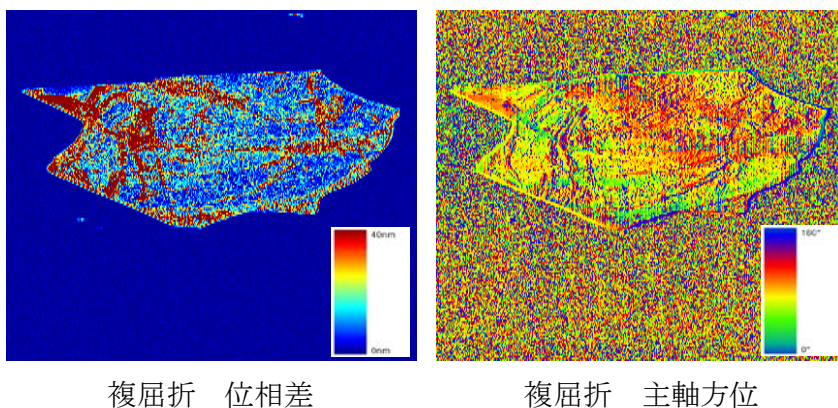


図 4 実時間複屈折位相差高速マッピング、SiC。結晶は約2センチ長。

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

相良光軌，千住智信，舟橋俊久，加藤丈佳：「独立型 DC スマートハウスの需給制御」，第 24 回電子情報通信学会九州支部学生会講演会，A-10，宮崎大学，2016 年 9 月 28 日。

小規模電力系統における仮想同期発電機の制御効果

Effectiveness of a virtual synchronous generator in a microgrid

北條昌秀・徳島大学・大学院理工学研究部・教授

加藤丈佳・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

舟橋俊久・名古屋大学・未来材料・システム研究所・客員教授

1. 研究目的

一般に交流電力系統では回転形発電機がその慣性エネルギーを背景にして互いに同期を保ちながら、一定の周波数の下、負荷変動に対して時々刻々釣り合った発電電力を供給して電気エネルギーの供給が成立している。これに対し、小規模な電力系統で自然エネルギーを利用した分散電源の割合が増加すると、発電設備群が一定の周波数の下で同期を保つことが困難になることが指摘されている。これに対し、蓄電池システムを導入し、その蓄えられたエネルギーを利用して同期発電機の振る舞いを模擬することで解決を図る、仮想同期発電機という考え方が注目を集めている。しかし、現実には蓄電池の蓄電残量や電力変換器自体の容量にその制御効果も左右される。そこで、本研究は、蓄電池システムの現実的制約の下でも有効な仮想同期発電機の制御方式を検討することを目的とする。

2. 研究内容と成果

まず、蓄電池システムや太陽光発電システム等で使用される系統連系インバータの直流側に簡便なエネルギーバッファを構成する方式を提案し、その動作特性についてシミュレーション解析により検討した。図1は、そのシステムの構成図である。既存の連系インバータに加える改造の程度をできるだけ小さくして、仮想同期発電機の導入を容易にするために、図1に示すように双方向チョップを介してエネルギーバッファ用のキャパシタ C_c を追加設置する方式を選択した。なお、ここではまずエネルギーバッファとしての制御性を確認することを目的として、交流側は三相インピーダンス負荷とし、直流側の主たるエネルギー源は理想直流電圧源を仮定した。この直流電圧源は、実際には蓄電池そのものであるか、あるいは太陽電池の出力との間に設けた昇圧チ

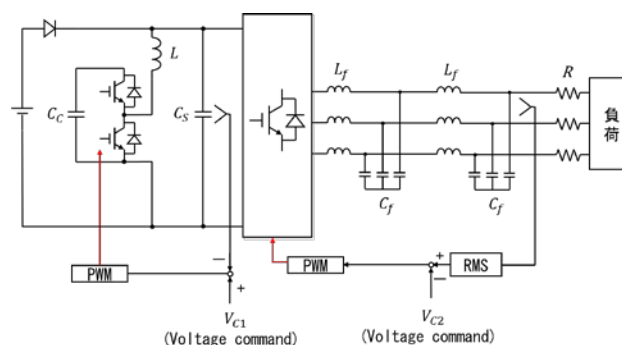


図1 提案システムの構成

ヨッパの出力端子を想定したものである。この条件の下で、追加した双方向チョッパは、系統連系インバータの直流キャパシタ C_s の電圧制御を行い、エネルギーバッファとして機能するか確かめた。

表 1 のシステムパラメータを用いてシミュレーションを行った結果を図 2 に示す。解析では、直流電圧に図 2 (a) に示す模擬電圧変動を与えたときのインバータの出力電圧変動を調べたところ、図 2 (b) に示す結果が得られた。この結果から、双方向チョッパによる制御を行った場合には、直流入力電圧が大きく変化した場合でもインバータの出力電圧は適正電圧範囲内に制御できていることがわかる。もっとも、この制御結果は、エネルギーバッファであるキャパシタ C_c の容量によっても変わってくるため、今後は仮想同期発電機制御に適した容量設計を行う必要がある。

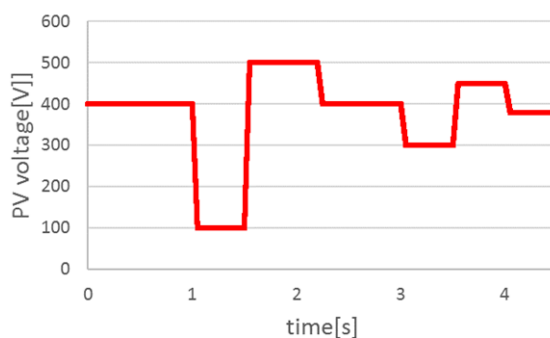
一方、小規模システムについては、誘導機等の動的負荷が存在する場合には、その動態安定度の維持が重要な課題となるため、パワーエレクトロニクス機器の解析用シミュレータとして知られる PSIM 上に小規模システムモデルを構築した。まず、電気エネルギーの供給設備としては、AVR とガバナを装備した同期発電機と、系統連系インバータを介して接続された蓄電池モデルを構成した。

一方、負荷として、定インピーダンス負荷と誘導機負荷を設け、シミュレーション解析により負荷変動に対するシステムの挙動を確認し、モデルの妥当性を確かめた。

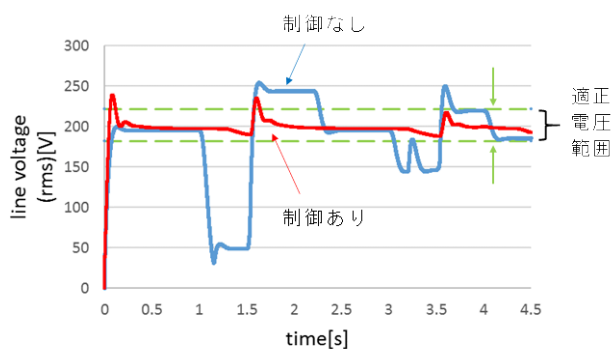
今後は、前述の通り構築したエネルギーバッファを有するインバータに仮想同期発電機制御を装備し、PSIM 上に構築した小規模システムモデルに接続して、外乱に対する周波数・電圧の制御応答を評価していく計画である。

表 1 システムパラメータ

System parameters	
Rated voltage (3 ϕ , line-to-line)	200V
Operating frequency	60Hz
Load R	10 Ω
Line impedance R	0.3 Ω
Converter	
DC voltage source (PV constant)	400V
AC filter capacitor C_f	300 μ F
AC filter inductance L_f	30 μ H
Discharge and charge capacitor C_c	25000 μ F, (initial voltage=400V)
Smoothing capacitor C_s	550 μ F
Inductance L	400 μ H
Switching frequency	10kHz
Voltage command V_{c1}	400V
Voltage command V_{c2}	200V



(a) 直流電圧源に与えた模擬電圧変動



(b) インバータ出力電圧の制御応答

図 2 シミュレーション結果

エネルギー伝送 Cu 材料の疲労特性向上に向けた 転位組織形成機構の解明

Study on formation mechanism of dislocation structure in energy transmission
Cu materials for improvement of fatigue property

宮澤知孝・東京工業大学・物質理工学院・助教

鍛冶田貴大・東京工業大学・大学院理工学研究科・材料工学専攻・学生

藤居俊之・東京工業大学・物質理工学院・教授

武藤俊介・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

古くから Cu 材料はその高い導電性と強度のバランスから電気伝導材料の要として自動車用配線やコネクタ材料に用いられている。近年ではスマートフォン等の小型、薄型の機器で利用されるフレキシブル回路基板のような高強度、高導電性、高屈曲性 Cu 箔もそのニーズが増しており、エネルギー伝送材料としてその重要性は増大している。このような電気伝導材料として用いられる Cu は、熱疲労や機器ヒンジ部の繰り返し屈曲変形に対する高い疲労耐性が求められており、Cu 材料の疲労特性の向上は、革新的省エネルギーの実現において重要な技術課題となる。そこで本研究では、Cu の疲労現象解明のため、[001]多重すべり方位の純 Cu 単結晶の疲労によって試料内部に形成される転位組織を超高圧電子顕微鏡によって観察し、組織を構成する転位の解析を試みた。

2. 研究内容と成果

本研究では、純 Cu 単結晶より[001]方向を応力軸とする試験片を切り出し、室温にて疲労試験を行った。塑性ひずみ振幅は 3.5×10^{-3} 、繰り返し回数は 3000 回とした。電子顕微鏡観察用薄膜試料は、疲労試験片より(101)面に平行に切り出し、電解研磨によって作製した。反応科学超高圧走査透過電子顕微鏡(JEM-1000k RS)による観察では、TEM モードでの電子線回折図形と STEM モードでの明視野像および環状暗視野(ADF)像によって転位組織の観察を行った。

Fig. 1(a)に二波励起条件で ADF-STEM モードにて撮影した転位組織を示す。回折波 $\mathbf{g} = \bar{1}11$ を励起し、カメラ長を 890 mm として、励起波が円環状検出器に入射する状態で結像した像である。白い線が転位であり、転位の集積している転位ウォールと転位密度が低いチャンネルが形成されている。塑性ひずみ振幅より予測される転位組織は labyrinth 組織であり、ADF-STEM 像の水平方向に伸びる転位ウォールは、同組織を構成する(100)または(001)の転位ウォールである。同様に Fig. 1(b)には同一視野にて $0\bar{2}0$ を励起し、カメラ長を 590 mm として撮影した ADF-STEM 像を示す。カメラ長を短くして、励起波

が円環状検出器に入射するように調整している。2つの観察像を比較すると、励起条件によって、転位のコントラストが消滅することがわかる。Fig. 1(b)の赤い矢印で示されるチャンネル内の転位は、励起条件 $\mathbf{g}=\bar{1}11$ の観察像ではコントラストが消えている。ウォール内の転位でも一部コントラストが消えている。これらの転位は励起ベクトル $\mathbf{g}=\bar{1}11$ に垂直なバーガースベクトルを持つ転位であることがわかる。これに対し、Fig. 1(a)の青い矢印で示される転位は、励起条件 $0\bar{2}0$ の観察像でコントラストが消えているため、励起ベクトル $\mathbf{g}=0\bar{2}0$ に垂直なバーガースベクトルを持つ転位と解釈できる。このように STEM モードにおいても、晶帯軸入射ではなく特定の回折波を励起させた条件での観察によって、転位のバーガースベクトルの同定が可能であることがわかった。今後は種々の励起条件で転位のコントラスト実験を行うことにより、ウォール内およびチャンネル内の転位のバーガースベクトルと活動するすべり系を特定し、転位組織の形成機構を明らかにしていく。

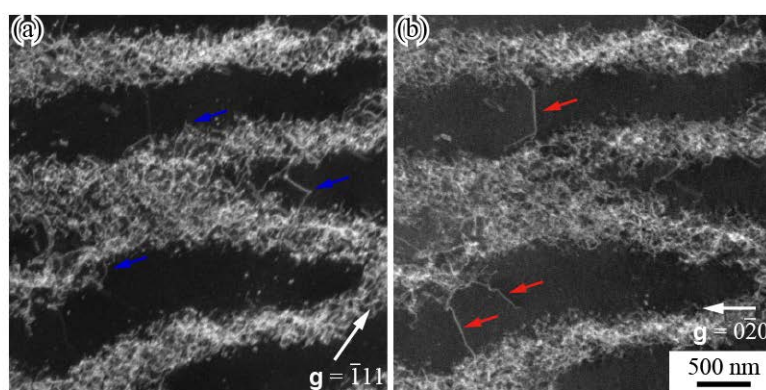


Fig. 1 転位組織のADF-STEM像。(a) $\mathbf{g}=\bar{1}11$ 励起と (b) $\mathbf{g}=0\bar{2}0$ 励起。赤矢印は $\mathbf{g}=\bar{1}11$ 励起で消える転位、青矢印は $\mathbf{g}=0\bar{2}0$ 励起で消える転位を示す。

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

- Toshiyuki Fujii, Takahiro Kajita, Tomotaka Miyazawa, Shigeo Arai, High-voltage scanning-transmission electron microscopic observation of labyrinth structure developed by cyclic deformation in a [001] copper single crystal, THERMEC' 2016, Graz, 2016.5.29-6.3.
- 鍛冶田貴大, 宮澤知孝, 藤居俊之, 荒井重勇, 銅[001]単結晶の疲労転位組織の超高圧走査透過電子顕微鏡観察, 日本顕微鏡学会第72回学術講演会, 仙台国際センター, 2016年6月14日~16日.
- Takahiro Kajita, Kentaro Chahara, Tomotaka Miyazawa, Toshiyuki Fujii, Shigeo Arai, Microstructural Evolution Depending on Plastic Strain Amplitude in Cyclically Deformed [001] Copper Single Crystals, PRICM9, Kyoto, 2016.8.1-5.
- 鍛冶田貴大, 宮澤知孝, 藤居俊之, 荒井重勇, 銅[001]単結晶の疲労転位組織の超高圧走査透過電子顕微鏡観察, 日本金属学会 第13回ヤングメタラジスト研究交流会, 東京大学, 2016年10月21日.