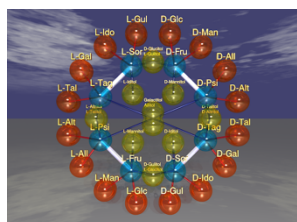


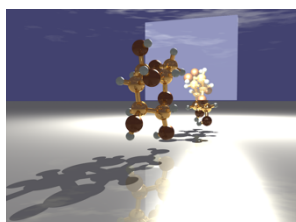
電子論錯体化学（コーディネーション化学）

香川大学創造工学部先端材料科学領域 教授 石井 知彦

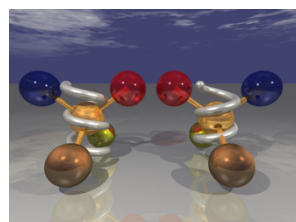
連絡先 ishii.tomohiko@kagawa-u.ac.jp



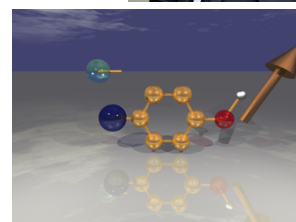
イゾモリング



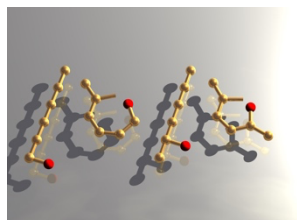
希少糖鏡像異性体



光の旋光性



酸解離定数

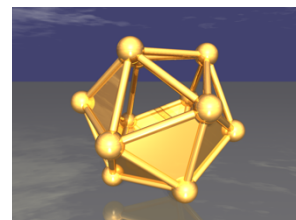


糖の環化反応

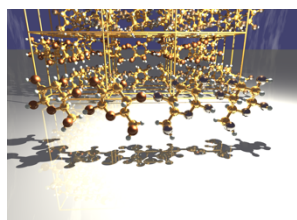


石井研究室：

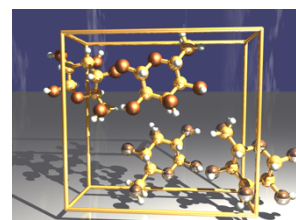
分子デザインコーディネーター集団。



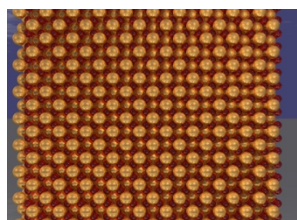
超原子



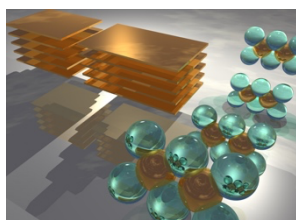
超格子希少糖



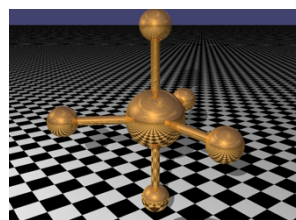
超分子希少糖



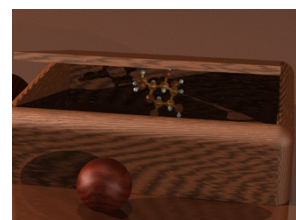
太陽熱発電



黒鉛層間化合物



ベリー擬回転



β -D-プシコース

電子の本当の姿を直接観察し、高精度で計算することができます。

私たちは、金属錯体や希少糖の研究を通して、有機・無機複合電子系の物性の研究を行っています。金属錯体は生物の体内で様々な機能を発現させる重要な物質です。生体内の金属錯体の構造や機能発現のメカニズムを詳しく調べ、構造や電子状態を真似することにより、人間の生活に役立つ新たな機能性材料を設計することができます。化学を車に例えると**実験と理論計算がその両輪**にあたります。私たちは「**電子論錯体研究室**」としての立場から **DV-X α 法**と呼ばれる分子軌道計算を行い、物質の電子分布を三次元空間的にとらえることを行っています。実際の実験としては私たちの研究室が所有する **IP型単結晶X線構造解析装置**を用い、物質の**電子密度分布の測定**と**絶対構造の決定**を行っています。自然界における物質のあらゆる原理・原則・現象を解明し、その結果を論文として残すことはもちろん、自分たちの仕事が必ずや将来、理科の教科書に載ると信じて研究を行っています。詳しくは研究室のホームページ <http://www.tishii.com/>を是非ご覧下さい。電子を自由自在に操ることで、**化学反応性、化学安定性、化学結合性**を自由自在に調整することができます。そのような分子デザインコーディネーターを目指しています。

二次元ナノシートからなる分離膜の作製

香川大学創造工学部先端材料科学領域 教授 上村 忍

連絡先 uemura.shinobu@kagawa-u.ac.jp

気候変動に伴う水資源の不安定化、淡水の偏在から、豊富な水資源である海水の淡水化は世界的に需要が高まっている。海水淡水化は高分子膜を利用した逆浸透法が中心であり、機械強度に優れたポリアミドなどが逆浸透膜として広く利用されている。しかしながら、浸透圧以上の圧力のための高いエネルギーコスト、逆浸透圧に耐えうる機械強度及びイオンの透過抑制を担保するための厚膜化、有機物や高濃度下の塩析によるファウリングなどが問題となっている。このため、逆浸透膜の薄膜化、特に機械的強度や機能を有する二次元ナノシート材料に注目が集まっている。

2012 年におよそ 0.5 nm の空孔を有する単層グラフェンが市販ポリアミド膜よりも高い脱塩能を理論的に有することが報告^[1]されて以来、脱塩膜として応用する研究が急激に展開され始めた。特に、酸化グラフェン (GO, Fig. 1(a)) はグラフェンと同様単層構造を有するだけでなく、多くの親水性基や欠陥を有することから、脱塩薄膜に関する研究が盛んに行われている。GO は、高い水の透過性（低摩擦及び積層による高い毛細管圧）及び低いイオン透過性（静電的相互作用などによる GO へのイオンの吸着など）を発現するものの、高い親水性による GO 薄膜の層間の膨潤・水溶液への再分散が問題となっている^[2]。我々は GO に種々の高分子を組み合わせることにより、安定且つ機能を有する脱塩薄膜を目指し、研究を展開している。選択する高分子には GO と相互作用し、且つ機能を有する窒化炭素 (Fig. 1(b)) 類を選択している。窒化炭素はグラフェンに類似した二次元シート様構造を有する高分子であり、可視光応答性光触媒能を有することが知られている。また記載した分子構造の他、アニオン性のポリヘプタジンイミド、低分子量体のメレムなど作り分けることが可能である。

現在、窒化炭素 (p-CN) と GO、および大面積 GO (GGO) を混合したハイブリッド薄膜をメンブレンフィルター上に作製、U 字管にてイオン透過性を比較した (Fig. 2)。静置状態でイオン透過性がみられているため、まだ不十分な状況であるが、GGO を用いたほうがよりイオン透過を制御する傾向が見られた。現時点での GGO は数十 μm サイズであり、メンブレンフィルター全体を覆うためには多層構造を構築、GGO の横方向の空隙も埋める必要がある。また、p-CN は GGO と相互作用を十分に行っているが、p-CN が完全な 2 次元構造でないこと、GGO などよりも小さいことも原因と推測される。現在、ナノシート材料の大面積化、空隙の低減を目指す研究を実施している。

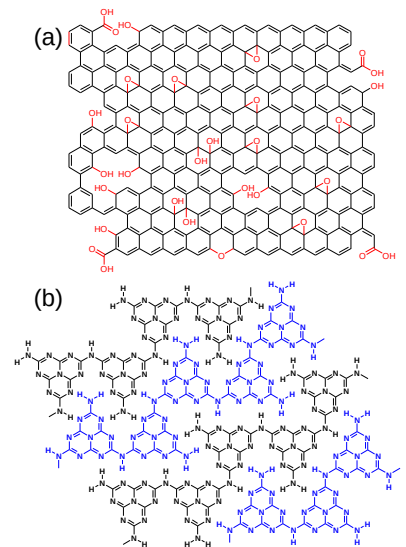


Fig. 1. 酸化グラフェン (a) 及び窒化炭素 (b) の化学構造式。

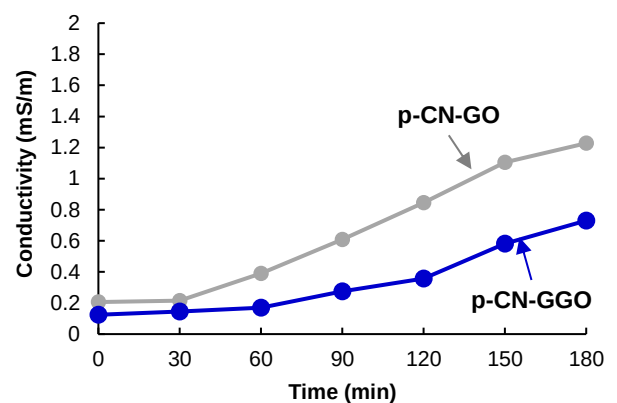


Fig. 2. Ion permeation of p-CN-GGO and p-CN-GO thin films.

持続可能な社会を実現するための革新的防錆技術の開発： 微細粉末ヒドロキシアパタイト配合ジンク塗料の開発

香川大学創造工学部先端材料科学領域 教授 掛川 寿夫

連絡先 kakegawa.hisao@kagawa-u.ac.jp



【研究背景及び研究目的】

これまで研究により、骨の無機性主成分であるヒドロキシアパタイト (HAp) が、微細粉末状態で、金属鉄腐食反応における金属鉄からの鉄イオンと電子の遊離 (アノード反応) を強力に抑制することを世界で初めて発見した。本研究では、強度の塩害地域および火山性ガス濃度の高い地域の鉄鋼構造物や車両などに幅広く使用できる革新的な高機能性防錆塗料を開発することを目的として、HAp 配合ジンク塗料を設計および製作した後、その防錆作用および防錆メカニズムを検証した。

【研究結果及び考察】

① 微細粉末 HAp 配合 1 液型油性有機ジンク塗料の防錆効果の検証

油性有機ジンク塗料の防錆効果に対する微細粉末 HAp の影響を確認することを目的として、7%微細粉末 HAp を配合した 1 液型油性有機ジンク塗料および本塗料から 7%微細粉末 HAp を除いた 1 液型有機ジンク塗料を作製した。これらの塗料および市販の 2 液型有機ジンクリッチ塗料を鉄板に塗布し、塗膜にクロスカットを施した後、塩害環境の海域沿岸 (徳島県鳴門市北灘町折野上三津) に設置した。その結果、Fig. 1 に示すように、微細粉末 HAp を配合していない 1 液型有機ジンク塗料を塗布した鉄板では、設置 4 ヶ月後までにクロスカット部位に赤錆が発生した後、12 ヶ月後まで強度の赤錆の発生が持続的に進行したが、7%微細粉末 HAp 配合 1 液型有機ジンク塗料では、設置 12 ヶ月後までクロスカット部位の腐食の進行は完全に抑制され、塗膜表面もほとんど変化しなかった。一方、HAp が配合されていない市販の 2 液型有機ジンクリッチ塗料を塗布した鉄板では、設置 4 ヶ月後までにクロスカット部位にわずかな赤錆が発生した後、12 ヶ月後まで緩和な赤錆の発生が持続的に進行した。しかし、8 ヶ月後には、塗膜表面に亜鉛の酸化による白錆と特徴的な無数の孔食の発生が観察された。

② アノード分極およびターフェル測定における微細粉末 HAp および微細粉末金属亜鉛の影響

微細粉末 HAp がジンク塗料の防錆効果を促進するメカニズムを追求することを目的として、鉄電極を作用電極として用いたアノード分極およびターフェル測定に及ぼす微細粉末 HAp および微細粉末金属亜鉛の影響を検討した。ターフェル測定の結果、微細粉末金属亜鉛を設置した際の腐食電位は、-1.03V に低下したことから、電極が鉄電極表面から設置した微細粉末金属亜鉛に移行したことが示された。この結果は、微細粉末金属亜鉛による金属鉄に対する犠牲防食作用に関連しているものと考えられた。アノード分極においては、Fig. 2 に示すように、鉄電極表面に微細粉末金属亜鉛を設置した場合、金属亜鉛のアノード反応に起因した大きな応答電流の発生が観察されたが、微細粉末金属亜鉛および微細粉末 HAp (26 mg あるいは 300 mg) の両方を混合し設置することにより、この特徴的な大きな応答電流の発生は著しく抑制された。これらの結果から、微細粉末 HAp が金属亜鉛からの亜鉛イオンと電子の遊離を遅延させ、応答電流の発生を強く抑制することにより、金属亜鉛による金属鉄の犠牲的防錆効果を維持した状態で、金属鉄からの鉄イオンと電子の遊離を強力に抑制できるアノード反応抑制剤であることが判明した。本研究で開発された HAp 配合ジンク塗料は、強度の塩害地域および火山性ガス濃度の高い地域の鉄鋼構造物や車両などに幅広く使用できる革新的な高機能性防錆塗料であると考えられた。

One-component type of zinc paint with 7% HAp



0 month 4 months 8 months 12 months

One-component type of zinc paint without HAp



0 month 4 months 8 months 12 months

Fig. 1 The rust preventive effects of the zinc paints with or without fine powder of HAp on the field experiment in coastal area of Kitada Nada, Naruto-City,

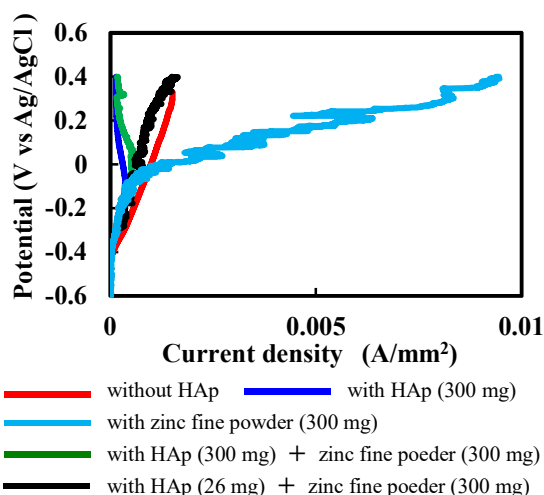


Fig. 2 Influence of HAp and zinc fine powder on anodic polarization curve using iron electrode in 3% NaCl solution

極微量 ITO 粒界相による Al₂O₃ セラミックスの低抵抗化

香川大学創造工学部先端材料科学領域 教授 楠瀬 尚史

連絡先 kusunose.takafumi@kagawa-u.ac.jp



近年、デバイスの高機能化に対応するため、半導体デバイスの高集積化、配線の微細化が進んでいる。半導体デバイスの性能向上に伴いプラズマエッチングの際のプラズマの高出力化が進み、プラズマが半導体製造装置用部品に与える影響が大きな問題となっている。そのため、半導体製造装置用部品材料に適した耐プラズマ性や耐久性に優れる材料開発が要求されている。現在、半導体製造装置用部品材料として、耐プラズマ性や、耐熱性をもつセラミックスが注目されている。しかし、高い耐プラズマ性をもつセラミックスの多くは絶縁体であり、半導体製造装置用部品へ応用するには、電気抵抗率を所定の値に固定する必要がある。従来、導電性を付与するために、母相に 20~30 vol.% 程度の導電性粒子を添加していたが、この手法では、母相の優れた特性が損なわれる欠点があった。本研究では、耐熱性、耐プラズマ性に優れ、工業的に広く応用されている酸化アルミニウム (Al₂O₃) を母相として選択した。絶縁体である Al₂O₃ に導電相として酸化インジウムスズ (ITO) を微量添加することによって Al₂O₃ 焼結体の電気抵抗率を 10⁰ Ω cm 以下まで低下させることが目的である。

原料として、Al₂O₃、In₂O₃、SnO₂粉末を用いた。Al₂O₃へのIn₂O₃とSnO₂の添加の割合は0.5~3mol%とした。また、In₂O₃に対するSnO₂添加の割合は0~20wt%とした。秤量した粉末にエタノールを加え、超音波ホモジナイザーを用いて分散処理を行った後、十分に乾燥させた。得られた乾燥粉末を1軸プレスとCIPでφ15mmに成型し、大気雰囲気中、1700℃で5分間焼結を行った。

Figure1(a)に、焼結温度1700℃、大気雰囲気中で常圧焼結を行ったときのITO濃度の変化とAl₂O₃/ITO焼結体の電気抵抗率の変化を示す。ITO 1mol%添加のみで、Al₂O₃ / ITO焼結体の電気抵抗率は10¹ Ω cm 台まで低下することが確認できた。さらに、ITO中のSnO₂の添加量がAl₂O₃ / ITO焼結体に与える影響は大きいことも考えられる。ITO中のSnO₂の添加量を15wt%以上に増加させると、電気抵抗率は低下しなかった。Figure 2は、ITOを1mol%添加、焼結温度 1700℃、大気雰囲気中で焼結を行ったとき、ITO

中のSnO₂の添加量が異なるAl₂O₃/ITO焼結体のSEM画像である。ITO中のSnO₂添加量が増加するに伴い、ITOの相が非連続的になっていた。これより、Al₂O₃/ITO焼結体の電気抵抗率を低下させるためにはITO中のSnO₂添加量は5wt%以下が効果的であると推測できる。これは、添加したSnO₂の割合が増加するに伴い、導電相の連続性が低下するため導電経路が形成されにくくなり、電気抵抗率が低下しなかったと考えられる。以上より、ITO中のSnO₂の添加量が1wt%のときAl₂O₃にITOをわずか1mol%(1.5 vol.%)添加するだけで、10¹ Ω cmまで低抵抗化に成功した。

¹⁾ T. Kusunose, T. Sekino, *Scr. Mater.*, vol. 124, pp.138-141 (2019)

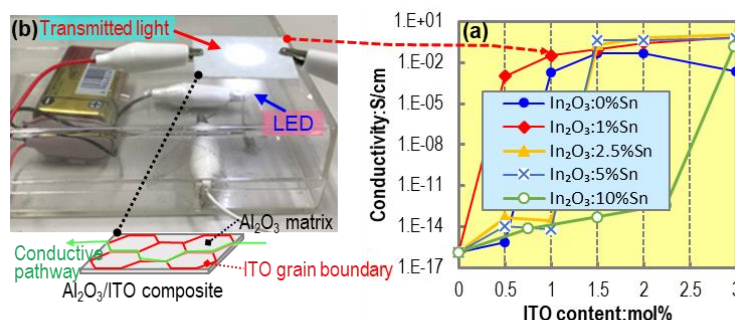


Figure 1(a). Relationship between electrical conductivity of Al₂O₃/ITO composites, ITO contents, and compositions of doped SnO₂ in ITO. (b) Lighting test of LED using Al₂O₃/1 mol% In₂O₃:1%Sn conductive path by battery voltage of 15 V. The light irradiated by LED penetrated through the conductive Al₂O₃ composites.

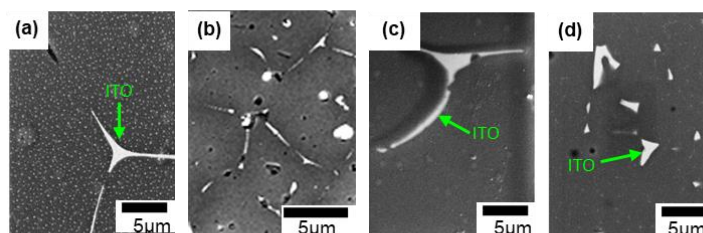


Figure 2. SEM micrographs of polished surface of Al₂O₃ pressureless sintered with 1 mol% of In₂O₃ doping 0 wt% (a), 0.5 wt% (b), 1 wt% (c), and 5 wt% SnO₂ (d), respectively.

化合物半導体ヘテロ・ナノ構造の研究

香川大学創造工学部先端材料科学領域 教授 小柴 俊

連絡先 koshiba.shun@kagawa-u.ac.jp



分子線エピタキシー（MBE）装置を用いて化合物半導体のナノ構造（量子井戸、量子細線、量子箱やこれらを用いたレーザー、トランジスター等）をナノメートル寸法で作製します。その構造の評価、光学的、電気的特性の評価を通じて半導体ナノ技術の研究します。作製・評価する物質は主に GaAs、AlGaAs、などからなる化合物半導体です。また窒素プラズマソースを導入して GaN や GaInNAs、GaNAs などの窒素化物半導体の作製や新物質の探索もしています。

研究テーマ

1. GaAs/AlGaAs デジタルアロイの作製と評価

AlGaAs 混晶半導体と同じ平均 Al 組成を持つデジタルアロイ(GaAs/AlAs、超格子)のエピタキシャル成長について超格子周期の効果について比較評価する。

2. 窒素ラジカルソースを用いた Ga(In)NAs 系歪み半導体超格子・歪み量子ドットの作製

Ga(In)NAs 歪み混晶半導体のエピタキシャル成長について構造・特性の点から評価する。

3. GaN/InGaN ナノ構造の研究

GaN/InGaN のナノ構造を作製して構造や光特性を研究する。

4. GaNAs 系半導体p-i-n構造の作製

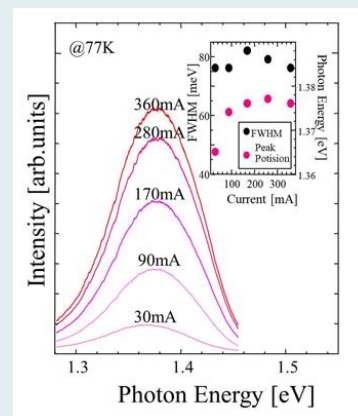
GaNAs 歪み混晶半導体に Si や Mg をドーピングした p-n 構造デバイスを作製し光起電力、発光等の特性を評価する。

5. Si 基板上的 GaN,AlN 多層膜構造の作製

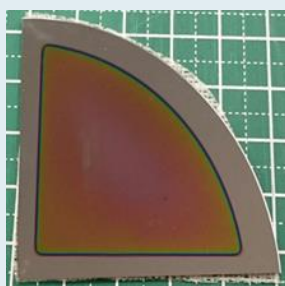
Si 基板上に GaN/AlN の多層ヘテロ構造を作製して構造や光特性を研究する。



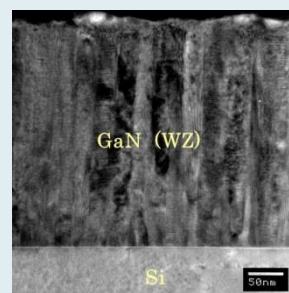
分子線エピタキシー(MBE)



GaNAs 量井戸からのエレクトロルミネセンス



Si 基板上的 GaN



Si 基板上的 GaN 多結晶
電子顕微鏡断面図

機能性薄膜・機能性表面の作製および応用に関する研究

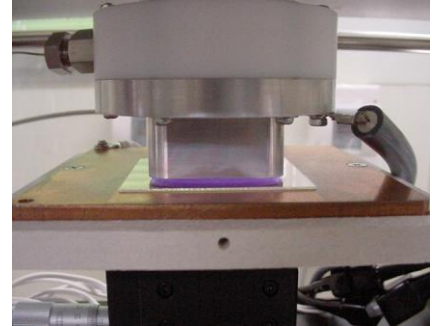
香川大学創造工学部先端材料科学領域 教授 須崎 嘉文

連絡先 suzaki.yoshifumi@kagawa-u.ac.jp



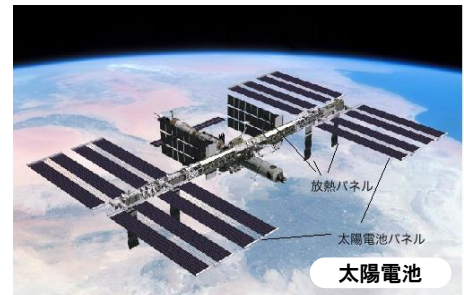
1. 大気圧低温プラズマを用いた半導体薄膜の作製

放電によって、気体を正イオンと電子とに電離させることで、高エネルギーのプラズマを発生させることができます。本研究室では、電極を工夫することによって大気圧開放下において比較的低温のプラズマを創り出し、材料の表面を親水性に変える表面改質方法、および、太陽電池用の新しい薄膜作製方法を開発しています。



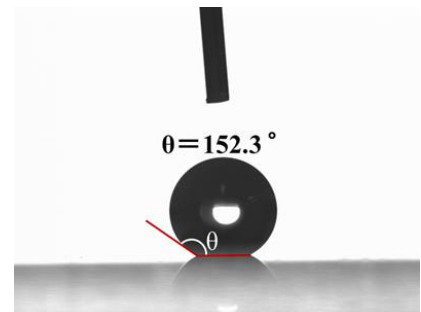
2. Si ナノ微粒子を用いた印刷型太陽電池作製

クリーンな再生可能エネルギーとして、太陽電池の利用や開発が進められています。現在の問題は作成コストです。プリンターで印刷するのと同様の方法で太陽電池を作製することができたら、製造コストが飛躍的に減少し、その応用範囲を大幅に広げることができます。本研究室では、結晶 Si を粉砕したナノ粒子を化学吸着単分子膜で覆うことで、ナノ粒子を密に配置し薄膜を作製可能とし、印刷に利用できる Si ペーストを作製する技術を開発しています。



3. 化学吸着単分子膜を用いた透明防汚膜の作製

太陽電池の表面が汚れると発電効率が落ちる。また、携帯電話などのタッチパネルの表面が汚れると視認性が悪くなる。これらは、デバイス表面にほこりや皮脂が付着することで起こる。これを防ぐためには、表面に超撥水性、および、撥油性の機能を付加すると良い。しかしながら、一般的な表面改質方法では表面の透過率を落とすことになり、太陽電池やタッチパネルには応用できない。本研究室では、化学吸着単分子膜と呼ばれる薄さ 1~2 ナノメートルの単分子膜を作製する技術を持ち、デバイス表面の光透過性を妨げずに超撥水性の機能性を付与することができる。



この技術はすでに、自動車のフロントガラスの撥水加工にも採用されています。また物質表面に、抗菌、防カビなどの性質をもたせたり、例えば金属ナノ粒子を 1 原子層並べたりする技術も持っていて、応用分野を探しています。

4. 光ファイバーを用いた FBG センサーの作製

東京ゲートブリッジには、その大型構造体の強度を長く維持するための一つの考え方として、外部からどのような力を受けたかを 24 時間測定し記録するヘルスマonitoringを行っています。そのために多くのハイテク技術が搭載されました。その中の一つが、本研究室で作製した FBG (ファイバーグレーティング) を用いたセンサー技術です。橋の中央部の道路下に 14 個の FBG センサーを設置し、光ファイバーを通じて光信号によって橋のたわみをモニタリングしています。



先端電子顕微鏡を用いた材料の微細構造解析

香川大学創造工学部先端材料科学領域 教授 田中 康弘

連絡先 tanaka.yasuhiro@kagawa-u.ac.jp



(1) 材料微細組織と材料特性

同じ物質の材料でも性質・性能はその微細組織によって大きく変化する。固体中の原子配列に乱れがない完全結晶では一様な組織となるが、原子配列の乱れによって様々な微細組織が形成される。材料の性能・特性を決定づける微細組織を解析するためには、最終的に原子レベルでの観察が必要である。

(2) 微細組織観察と電子顕微鏡

材料組織観察は光学顕微鏡(OM)観察から始まった。OM の分解能はサブミクロン(髪の毛の太さの 1/100 程度)であるが、原子の大きさは OM 分解能の 1/1000 以下の 0.25 nm 程度である。透過型電子顕微鏡(TEM)は原子配列が観察できる 0.2 nm の分解能を有する。材料表面観察が可能な走査型電子顕微鏡(SEM)は様々な分析アタッチメントによって、元素分布のマッピングの他、結晶方位解析、ひずみ解析などの機能も備えている。TEM 鏡観察試料は電子線が透過できる 100 nm 以下の厚さにしておく必要がある。集束イオンビーム(FIB)によって従来困難だったピンポイント箇所からの TEM 試料採取が可能となった。電子顕微鏡の性能を飛躍的に高める電界放射型(FE)電子銃の FETEM, FESEM と FIB を一カ所に集約して設置するのは、四国内では香川大学創造工学部のみである。

香川大学創造工学部の電子顕微鏡



電界放射型走査電子顕微鏡

FESEM : 表面微細構造観察
EDX & WDX : 元素分布分析
EBSD(OIM) : 結晶方位分布・歪み解析
Cathodoluminescence : 電子励起発光



集束イオンビーム加工観察装置

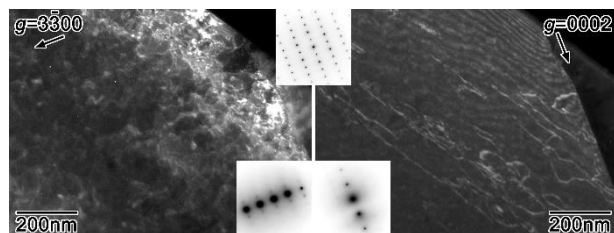
FIB + SEM : デュアルビーム(DB)
FIB : Ga イオンビーム
Pt-deposition : 保護層形成
極微探針 : 極微試料採取



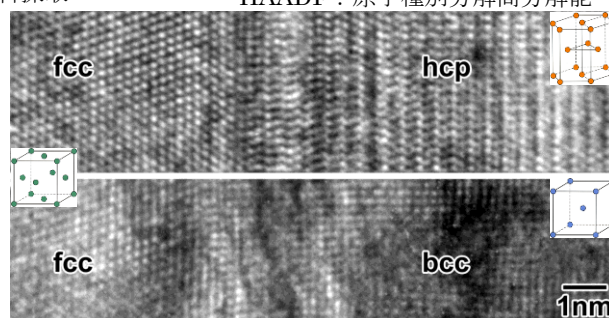
電界放射型透過電子顕微鏡

HRTEM+CCD : 高分解能(原子像)
STEM-EDX : 高分解能元素分布分析
HAADF : 原子種別分解高分解能

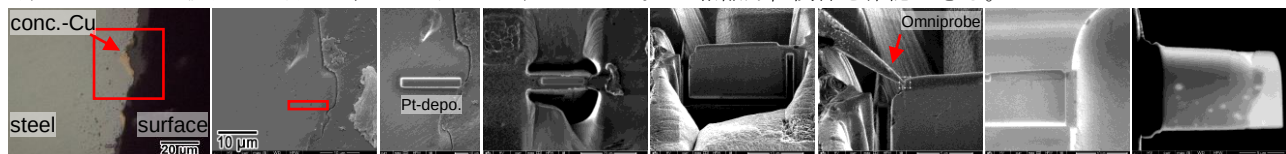
(3) 微細組織観察例



TEM 像は回折条件(結晶方位に対する電子線の入射方向)によって現れるコントラストが変化する。回折条件を変えて同一箇所をウィークビーム暗視野法(WBDF)で観察し、性格が異なる転位(固体結晶の塑性変形の素過程)を可視化した。挿入された斑点模様は回折図形、電子線入射方位が求まる。



面心立方(fcc)結晶構造のステンレス鋼が加工(変形)によって結晶構造が変化(加工誘起マルテンサイト)する。母相との界面の高分解能(HR)TEM 像は原子レベルで両相間の結晶方位関係を確認できる。



OM image SEM, FIB images→

Pickup sample Fix on pillar TEM sample

Cu 含有電炉鋼の地鉄/スケール界面の Cu 濃化相→表面赤熱脆性の原因→TEM 試料採取して濃化相周辺微細組織観察 SEM, TEM 観察(試料作製)等, 受託試験などを通して外部からの利用が可能です。

光と物質の相互相互作用の解明と相互量子制御

香川大学創造工学部先端材料科学領域 教授 鶴町 徳昭

連絡先 tsurumachi.noriaki@kagawa-u.ac.jp



1. 目的

関与する電磁波の波長と同程度、あるいはそれ以下のスケールで誘電率が変調されたフォトニック結晶やメタマテリアルにおいては通常の光デバイスでは実現不可能な様々な現象が現れることから様々な応用が期待されている。本研究では光と物質を相互に量子制御できるフォトニック結晶、微小共振器、金属ナノ構造、メタマテリアルなどの共振器量子電磁力学効果や非線形光学特性を調べると共に、光情報通信や量子演算など21世紀の科学技術を担う新しい原理で動作するデバイスを創造することを目標としている。

2. 研究概要

本研究では1次元フォトニック結晶に代表されるファブリーペロー微小共振器やTHzメタマテリアルにおける光と物質の様々な相互作用について調べて、これらの相互量子制御を試みている。最近の成果としては以下の通りである。

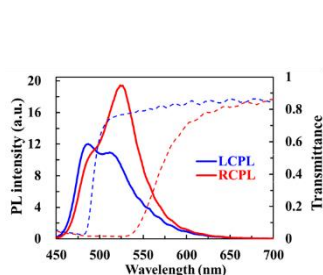


図 1 コレステリック液晶性 OPV 誘導体の発光スペクトル

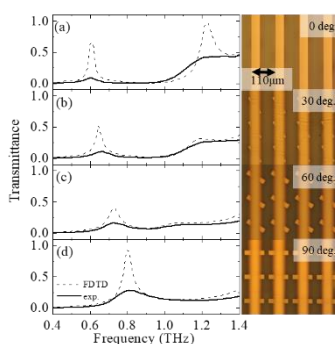


図 2 CW を含む THz 微小共振器の透過スペクトル

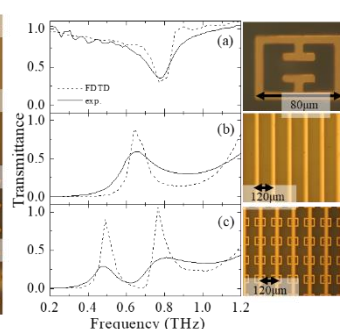


図 3 eSRR を含む THz 微小共振器の透過スペクトル

まず可視域において、コレステリック液晶性OPV誘導体における発光のPurcell増強に関して調べた。この試料は天然のカイラル1次元フォトニック結晶として考えることができ、特定の方向の円偏光における光の状態密度が大きく増大する。このことに起因して右円偏光に対して形成されるフォトニックバンドギャップ端での発光の増強を観測できた [1]。これは同領域円橋研究室との共同研究の成果である[2]。また、THz域においてはメタマテリアルを含む微小共振器における基準振動モード分裂に関して多くの知見を得た。図2に示すようにカットワイヤ(CW)を含む場合に、CWの角度に応じてモード分裂幅の変化を観測できた[3]。これはCWの振動子強度が角度によって実効的に変化することに起因する。また、電気的分割リング共振器を含む場合にも同様の基準振動モード分裂が観測できたが [3]、これはCWの場合とは異なる構造がもたらすLC共振に由来するものであることを明らかにした。また、これまでの電場と電気双極子との結合のみならず、微小共振器における磁場と磁気双極子の結合にも成功した [4]。

3. 成果の活用

これまで新規の光デバイスへの応用が期待できる 1次元フォトニック結晶やメタマテリアルにおけるさまざまな光物性を明らかにしてきた。将来的には超強結合を示す微小共振器においてはボース・アインシュタイン凝縮や量子もつれ光子対の発生などが期待できる、またメタマテリアルを含むTHz帯微小共振器においては超高速の透過変調スイッチングが可能であることからイメージングやセンシングデバイスへの応用が期待できる。

4. 備考 (参考文献)

- [1] "Time-resolved Circularly Polarized Photoluminescence Spectroscopy of Cholesteric Liquid Crystal Based on Oligo(phenylenevinylene) Unit", S. Morishita, *et al.*, 28th International Liquid Crystal Conference (ILCC2022), PF-305 (2022/7/24-29).
- [2] "Carrier transport characteristics of glass-forming chiral liquid crystalline dimers based on oligo(phenylenevinylene) units", M. Kunihiro, *et al.*, Matter. Adv.,(2022). <https://doi.org/10.1039/D2MA00899H>.
- [3] "Normal Mode Splitting in THz Fabry-Pérot Microcavity Containing Electric Split-Ring Resonator or Tilted Cut Wire Metamaterial", D. Nguyenthi, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn, Vol 91, 044403 (2022).
- [4] "Strong coupling interactions in THz microcavities containing magnetic metamaterials", N. Tsurumachi, *et al.*, The Third International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT2022), WE1-3 (2022/11/16-18).

環境問題・エネルギー問題にチャレンジする材料開発

香川大学創造工学部先端材料科学領域 教授 馮 旗

連絡先 feng.qi@kagawa-u.ac.jp

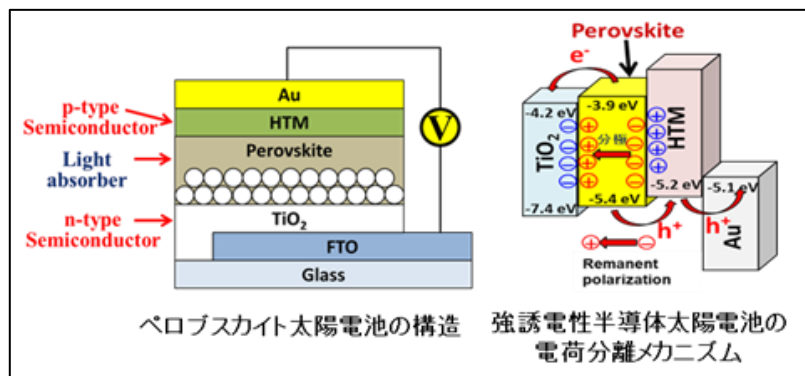


大量なエネルギーや資源の消費および地球温暖化や環境汚染によって成り立っている現状から持続的発展可能な社会への転換には科学技術のブレークスルーが不可欠である。当研究室では、高性能新規太陽電池、環境浄化光触媒、有害物吸着除去吸着剤および水浄化材料、環境にやさしい圧電材料の開発を取り込んでおり、環境問題・エネルギー問題を解決する技術開発を精力的に進めている。

1. 次世代新規太陽電池の開発

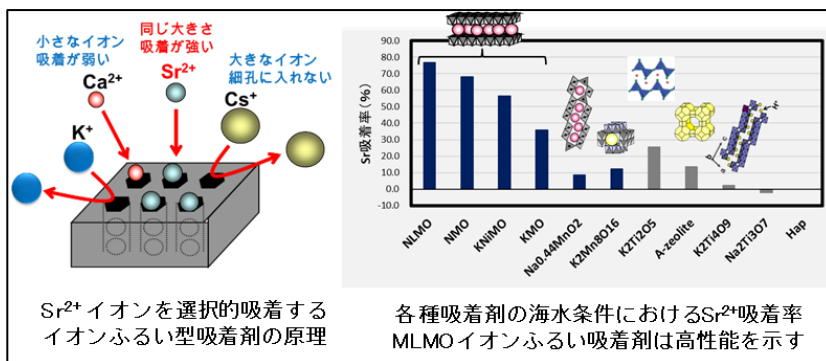
近年、低コスト高性能のペロブスカイト太陽電池が注目され、盛んに研究開発が進められており、そのエネルギー変換率がシリコン太陽電池25%に接近している。われわれはペロブスカイト太陽電池に使用するMAPbI₃等の有機無機ハイブリッドペロブスカイトは強誘電性を有する半導体、すなわち、強誘電性半導体であることを注目し、その特性を用

いて半導体のp-n接合による電荷分離と強誘電体の自発分極による電荷分離の相乗効果を利用した新規高性能太陽電池を提案した。このような太陽電池を「強誘電性半導体太陽電池」と名付け、その電荷分離メカニズムを解明した。



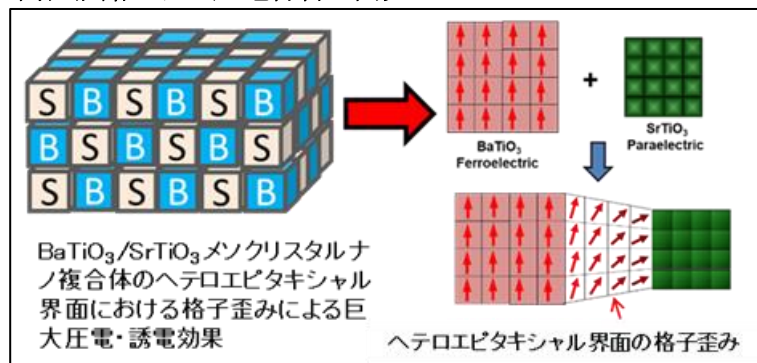
2. イオンふるい型高性能 Sr²⁺吸着剤と放射能汚染水処理技術の開発

福島第一原発では事故した原子炉から毎日約100トンの放射能汚染水が発生し、その状況は廃炉処理が終わるまでの40年間が続く。汚染水には放射性物質Sr、Cs、Co、I等の他に高濃度の海水成分も含まれる。放射性物質を選択的に除去するため、高選択性低コストの吸着剤を開発する必要がある。われわれはイオンふるい効果を利用して高性能層状マンガン酸化物系Sr²⁺吸着剤の開発に成功した。Sr²⁺イオンのサイズと同じ大きさの細孔を有する吸着剤を利用してSr²⁺を選択的に吸着除去する。開発した吸着剤は従来の吸着剤より海水条件における吸着量が3倍以上、選択性が20倍以上高く、実用化に向けて研究開発を進めている。



3. メソクリスタルナノ複合体を利用した高性能鉛フリー圧電材料の開発

圧電デバイスはセンサーやアクチュエーター等に広く使われているが、現在使用される圧電材料は主に有害な鉛が含有したPZT系物質であり、鉛フリー圧電材料の開発が進められている。しかし、鉛フリー圧電材料はPZTと比べかなり性能が低く、実用化には性能向上が不可欠である。われわれは、二種類のナノ結晶から構成されるメソクリスタルナノ複合体のヘテロエピタキシャル界面における結晶格子の歪みを利用して、巨大圧電効果を実現した。この原理を利用して開発した鉛フリー圧電材料は従来の材料より2倍以上の圧電定数を実現し、PZTと同等以上の性能を可能にした。



液晶性ナノ分極場での光電子機能—液晶フェロエレクトロニクス

香川大学創造工学部先端材料科学領域 教授 舟橋 正浩

連絡先 funahashi.masahiro@kagawa-u.ac.jp



従来の電子材料はシリコンに代表される固体材料が研究されてきた。当研究室では、液晶や高分子に着目し、ソフトな電子機能材料の研究「ソフトマターエレクトロニクス」に取り組んでいる^[1,2]。ナノ構造構造化された液晶場をデザインすることにより、複数の物理現象をカップリングさせることができる。拡張 π 共役系にキラルアルキル鎖を導入した強誘電性液晶において、自発分極と電荷輸送とのカップリングによるユニークな現象（液晶フェロエレクトロニクス）を見出している^[3]。

キラル側鎖を拡張 π 電子共役系に導入した強誘電性液晶 **1**、および、**2** を合成した（図 1(a)）。これらの化合物は強誘電性と光伝導性を示す。化合物 **1** の強誘電相において、自発分極によって発生した内部電界を駆動力とするバルク光起電力効果を初めて観測した。正負両電極に安定な ITO を使用でき、分極処理電圧の極性を反転させる事により、光起電力効果の極性も反転できる^[4,5]。低温側の高次相では光起電力効果の増強が起こる^[6]。極性基を導入した化合物 **2** においては、フラーレン誘導体を添加することにより、近紫外・青色域での外部量子効率⁷は 70 %に、開放電圧は 1.2 V に向上した（図 1(b)）^[7]。

また、液晶化合物 **2** の強誘電相において、内部電界によって電極からのキャリア注入障壁が低下し、電界発光が起こる事を見出した。カソードに化学的に不安定な Ca を用いる必要がなく、厚さが 1 μm を越える素子も効率的に発光させる事ができる。分子を一軸配向させておくと、直線偏光を発する電界発光素子を作成でき、分極処理の極性を反転させる事により、偏光面を 90 度回転させる事ができる（図 1(c)）^[8]。

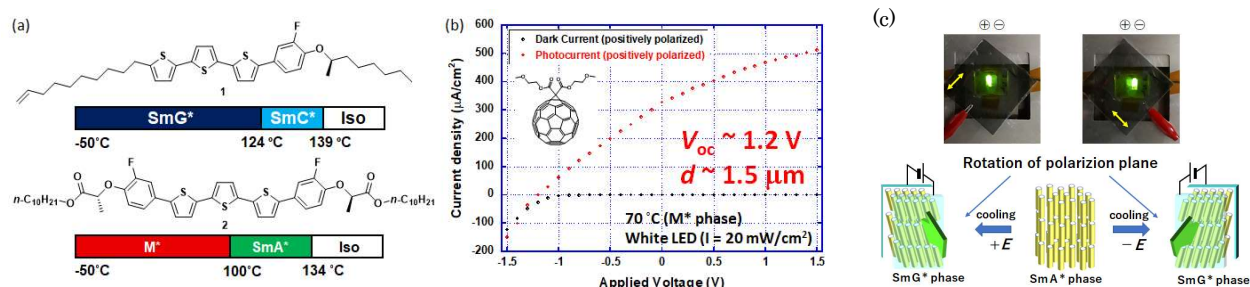


図 1 (a)強誘電性液晶半導体 **1**、および、**2** の分子構造 (b) 強誘電性液晶 **2**/フラーレン誘導体混合物の強誘電相における J-V 特性 (c)強誘電性液晶 **2** を用いた電界発光素子における直線偏光発光と偏光面の回転

主要論文

1. T. Kato, M. Yoshio, T. Ichikawa, B. Soberats, H. Ohno, M. Funahashi, "Transport of ions and electrons in nanostructured liquid crystals", *Nature Reviews Materials*, **2**, 17001 (2017).
2. M. Funahashi, "Nanostructured Liquid-Crystalline Semiconductors - A New Approach to Soft Matter Electronics", *J. Mater. Chem. C*, **2**, 7451-7459 (2014).
3. M. Funahashi, "Solution-processable electronic and redox-active liquid crystals based on the design of side chains", *Flex. Print. Electron.*, **5**, 043001 (2020).
4. Y. Funatsu, A. Sonoda, M. Funahashi, "Ferroelectric liquid-crystalline semiconductors based on a phenylterthiophene skeleton: Effect of introduction of oligosiloxane moieties and photovoltaic effect", *J. Mater. Chem. C*, **3**, 1982-1993 (2015).
5. A. Seki, Y. Funatsu, M. Funahashi, "Anomalous photovoltaic effect based on molecular chirality: Influence of enantiomeric purity on the photocurrent response in π -conjugated ferroelectric liquid crystals", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **19**, 16446 - 16455 (2017).
6. A. Seki, M. Funahashi, "Chiral photovoltaic effect in an ordered smectic phase of a phenylterthiophene derivative", *Org. Electr.*, **62**, 311-319 (2018).
7. M. Funahashi, "High open-circuit voltage in the bulk photovoltaic effect for the chiral smectic crystal phase of a double chiral ferroelectric liquid crystal doped with a fullerene derivative", *Mater. Chem. Front.*, **5**, 8265-8274 (2021). [Outside cover picture に採択、2022 年日本液晶学会論文賞 A 授賞]
8. M. Funahashi, Y. Mori, "Linearly polarized electroluminescence device in which the polarized plane can be rotated electrically using a chiral liquid crystalline semiconductor", *Mater. Chem. Front.*, **4**, 2137-2148 (2020).

高強度・易加工性を協調する軽金属材料の研究開発(プロセス・合金設計)

香川大学創造工学部 先端材料科学領域 教授 松本 洋明

連絡先 matsumoto.hiroaki@kagawa-u.ac.jp



研究テーマの背景と目的:

今後、金属材料の研究開発は環境を配慮した軽量化・高強度化・機能化に向けた進展が強く要望されます。合金浪費型の開発も資源に恵まれる元素(ユビキタス元素)を優先的に選定した開発に特化され、更に既存の合金系をいかにリサイクルするか、また高度化にいかに向求できるかが鍵となってきます。そのためには組織制御が極めて重要な役割を担い、これまでに未開拓であった技術開発にどれだけチャレンジできるかが鍵となって参ります。更に 3D プリンタに代表される革新的加工プロセスの技術構築とともに新規な材料設計の指導原理の創出が望まれています。

当研究室では、チタン合金を中心として他マグネシウム合金、アルミニウム合金などの非鉄金属材料の加工プロセスと組織制御を駆使した素材の高機能化に関する研究を行っております。特に工業用金属素材では、高強度化・高延性を極限に追求することを目的とし、圧延、線引き加工また鍛造加工などの各種塑性加工プロセスを駆使して、結晶粒微細化、結晶配向制御また析出相の分散制御技術などの材料組織制御技術に関する研究を指向しております。更に粉末を用いた航空機用チタン基複合材料の粉末焼結・一体化鍛造技術の新しいプロセス開発や最近では香川県産業技術センターとの協働体制により金属粉末レーザ積層造形技術を駆使した形状付与だけでなく力学特性を高度化する材料設計(軽金属材料基複合体の創製)にも挑戦しております。応用は多岐にわたり、航空機材料、自動車用軽量高強度材料、更に金属系生体材料の応用開発を目指しております。産業用チタン合金の研究開発の分野では世界で初めて α' マルテンサイトを利用した組織制御技術に注目し、新しいタイプの加工プロセス “ α' プロセッシング” を提案し、新しい超微細粒組織形成を造り込む技術も開発し、学術研究のみならず応用面でも新しい展開が期待されております。

実験研究を強みとしながら、組織予測モデル・有限要素解析の計算も採り入れた研究開発を行っております。また今後益々重要視されるデータ科学との融合において、機械学習を併用したマクロ・メゾスケールモデルの構築も行っております。

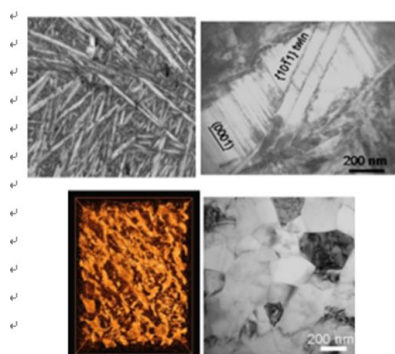


Fig.1 マルテンサイトを軸とした Ti 合金の組織制御

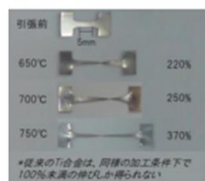


Fig.2 Ti 合金の超微細粒組織形成と低温・高速超塑性

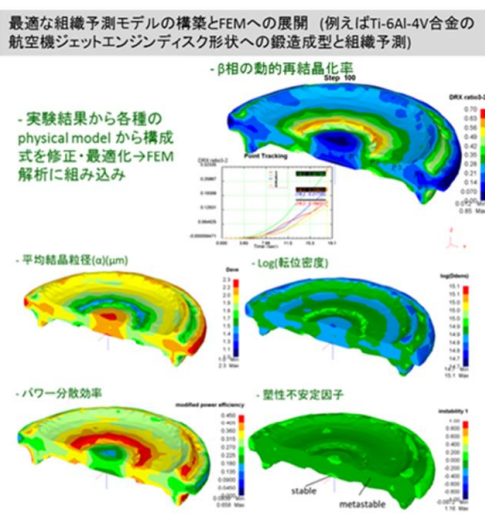


Fig.3 Ti-6Al-4V 合金の組織予測モデルの構築と FEM 解析

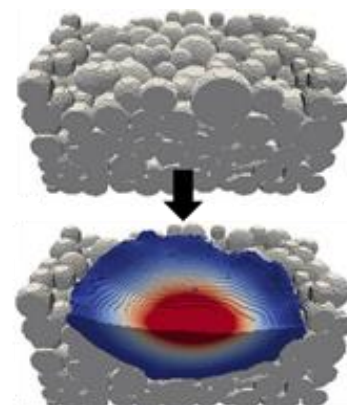


Fig.4 3D金属粉末造形プロセスを駆使した材料設計

機械構造用材料の変形・損傷・破壊および強度信頼性に関する研究

香川大学 創造工学部 先端材料科学領域 准教授 松田 伸也

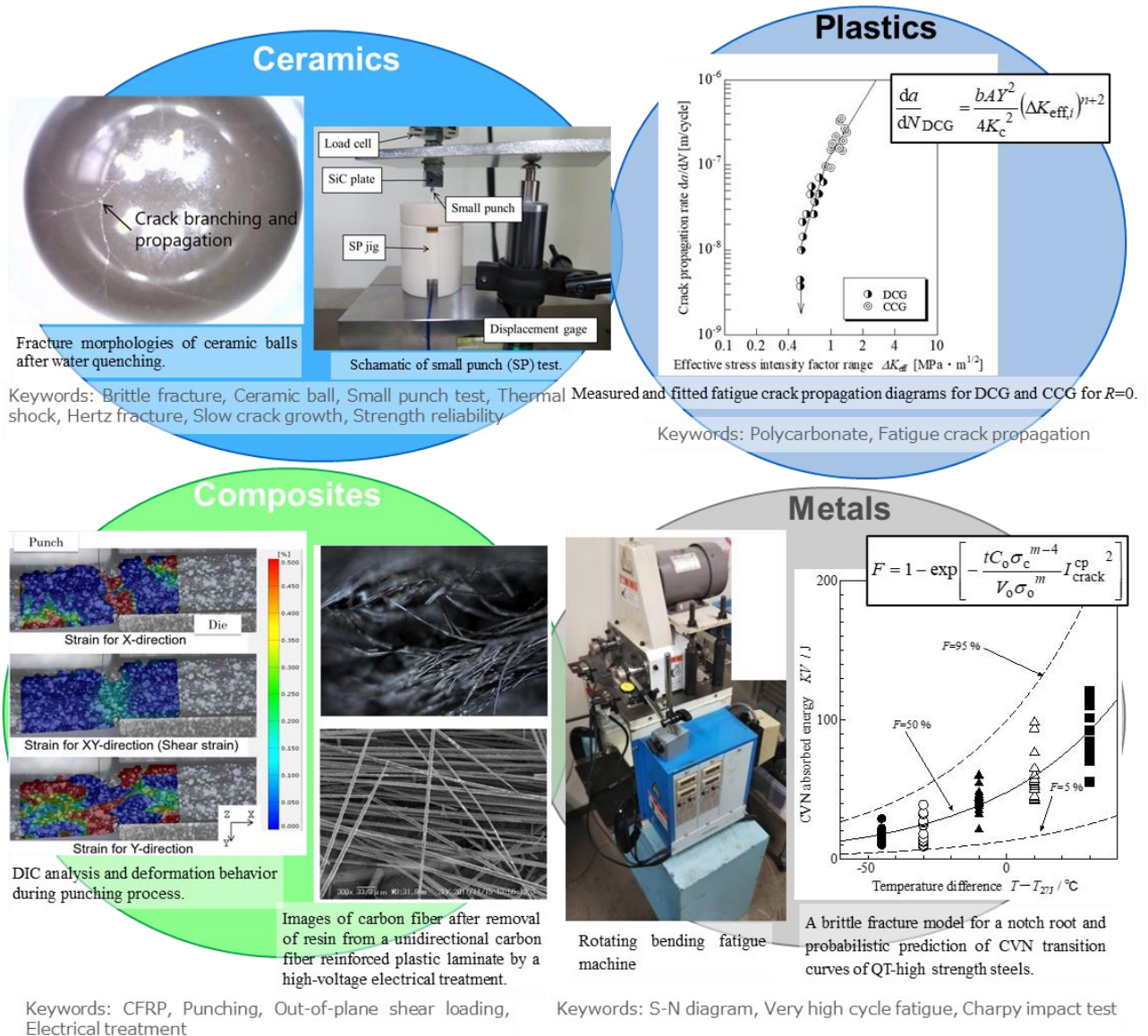
連絡先 matsuda.shinya@kagawa-u.ac.jp



研究の概要

構造物は高い安全性や信頼性が要求されるため、使用する材料に対して「どのようにして破壊するのか（破壊メカニズム）」、「どのくらいまで使えるのか（耐えるのか、強度や寿命）」を知る必要があります。画期的な新しい材料が開発されたとしても、十分に理解しないで使うことは大変危険です。必ず広範な試験等を通じて、よく理解してから使うことが重要です。機械構造用材料（セラミックス、プラスチック、金属、複合材料（CFRP））の破壊メカニズムおよび強度信頼性を力学的試験および理論的解析より調査して、材料の「使い方」を提案しています。

研究内容



研究室 Web site : <http://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~matsuda/>

研究キーワード：機械構造用材料、破壊メカニズム、疲労、熱衝撃、接触破壊、事故とトラブル



白色LEDの高演色可に向けたEu賦活蛍光体材料における電子状態解析

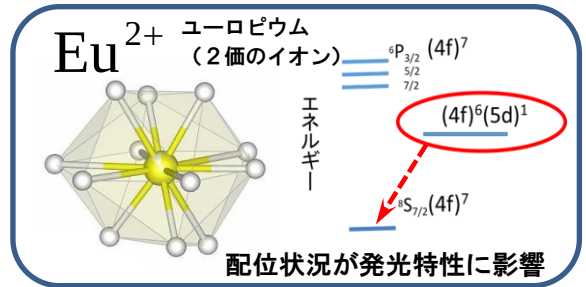
香川大学創造工学部先端材料科学領域 准教授 宮川 勇人

連絡先 hayato.miyagawa@kagawa-u.ac.jp



(1) Eu 蛍光体の応用と Eu²⁺周りの配位状況

蛍光体材料は白色 LED や携帯電話のバックライト、プラズマディスプレイ等、多岐に渡る用途への応用重要性が増している。特に赤・緑・青の同発光で白色を実現する3原色発光方式が期待されており、それぞれの発光材料の特性向上が急務である。Eu を発光中心とする蛍光体はその発光波長が Eu イオン周りの配位状況に大きく依存し、幅広い波長領域の発光が確認されているものの、配位状況と発光波長の関係の解明や精確な制御が課題となっている。

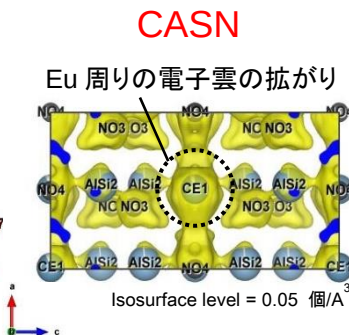
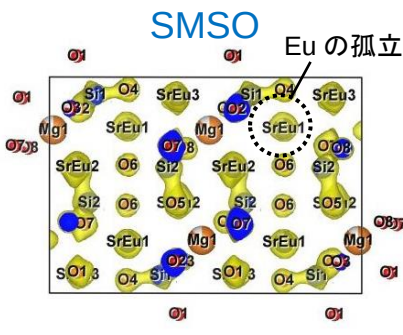


(2) 研究目的

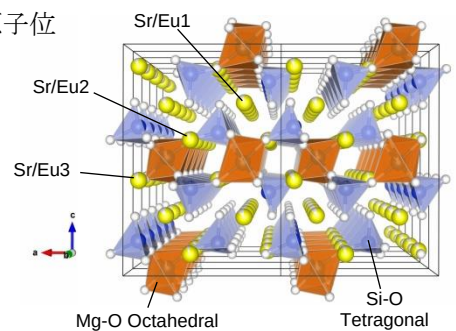
本研究では、3原色を発光する有望な蛍光体材料として **赤色蛍光体 CaAlSiN₃:Eu²⁺(CASN、通称カズン)**^[1]、**緑色蛍光体 β-Si₃AlON₇:Eu²⁺(SiAlON、サイアロン)**^[2]、**青色蛍光体 Sr₃MgSi₂O₈:Eu²⁺(SMSO)**^[3] を対象とし、それぞれにおける Eu 配位状況を粉末X線回折 (XRD) のリートベルト解析、MEM (最大エントロピー法) による電子密度分布の取得、VSM (振動試料磁力計) による帯磁率測定により評価した。

(3) 粉末X線回折のリートベルト解析、MEM 解析

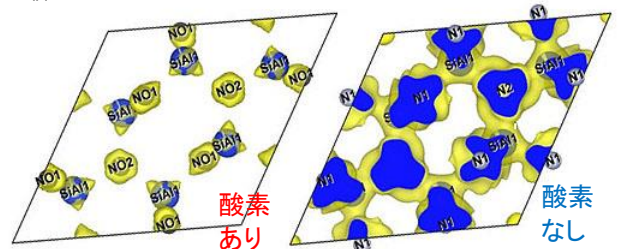
信頼度パラメータ (R 値) の高い結果を得ることができ、正確な原子位置に基づく電子分布 (Eu 周りの電子雲の拡がり具合) を取得した。



得られた結晶構造例 (SMSO)

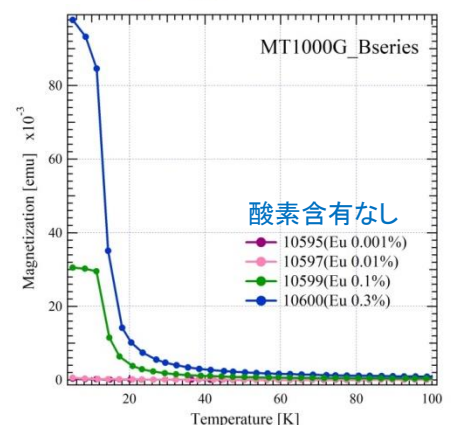
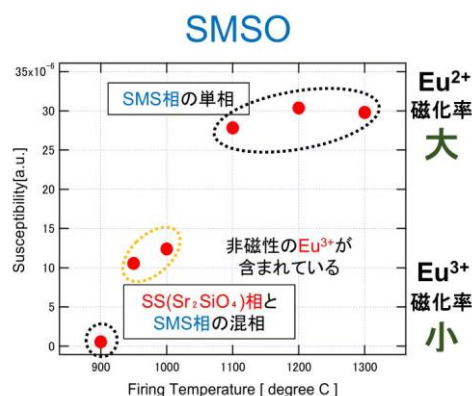
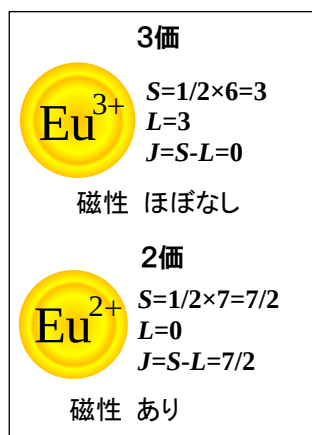


SiAlON Eu 0.1%



(4) VSM (振動試料磁力計) 磁化測定

Eu 価数の違い (Eu²⁺と Eu³⁺) により原子の磁気モーメントが異なることを利用し、各試料内に含有する Eu²⁺と Eu³⁺の量を評価した。



シリコンフォトリソグラフィを利用した光量子情報処理

香川大学創造工学部先端材料科学領域 助教 小野 貴史

連絡先 ono.takafumi@kagawa-u.ac.jp



背景と概要

近年、量子コンピューター、量子計測、量子通信など、「量子情報処理」に関する話題が海外を含めて数多く取り上げられています。これまでに、光、超伝導、イオントラップ、冷却原子やスピンなどを使って、さまざまな方式での原理検証実験が報告されています。中でも光を使った量子情報処理は、外部環境からの影響を受けにくく、既存の光制御・光計測技術の多くを活用できるといった利点があります。

私たちの研究室では、光の最小単位である「光子」を使って、光量子回路や光量子計測といった、従来とは異なる技術の開発に挑戦しています。具体的には、最新のシリコンフォトリソグラフィの技術を使って、従来のバルクの光学系を約1cm程度の大きさのチップ上に集積化し、量子の不思議な性質の解明や、それを計算や計測へと応用する研究に取り組んでいます。

研究内容

シリコン光導波路を用いた「光集積回路」は、精錬された作製技術があり、コンパクトで制御性が高いことから、大規模な光量子回路を実装するためのプラットフォームとして期待されています。特に、CMOS技術との相性が良く、光を導波路上で伝搬させながら、電気回路によって光の量子状態を制御することが可能になります。私たちの研究室では、シリコンの持つ非線形光学効果を利用して量子力学的にもつれ合った光子対を生成し、それを光量子回路へ組み込むことで、従来とは異なる量子技術の開発に取り組んでいます[1, 2]。

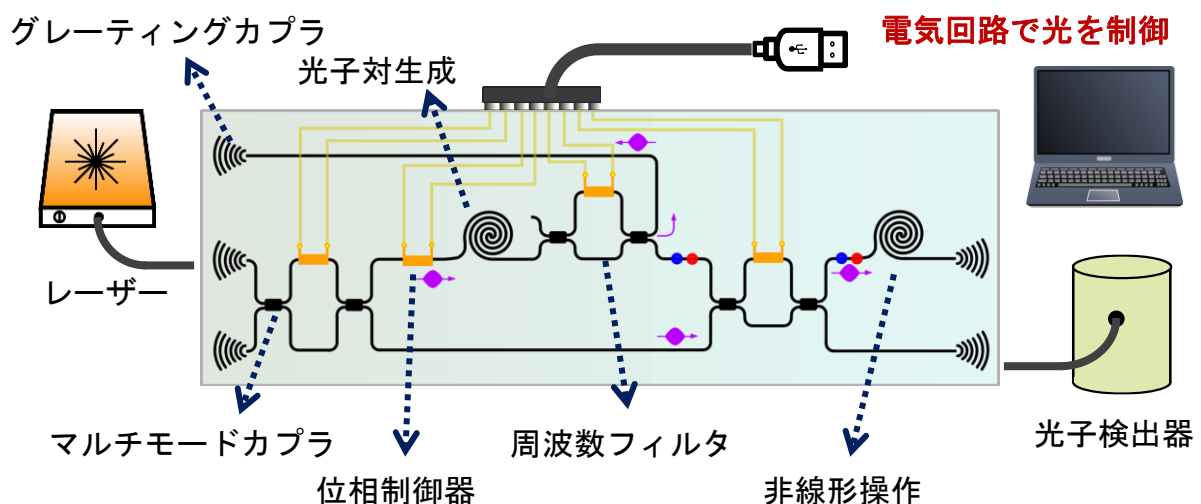


図1：シリコン光集積量子回路

[1] T. Ono, et. al. Optics Letters, **44**(5) 1277 - 1280 (2019)

[2] 小野貴史, et. al. レーザー研究 48(9) 499-504 (2020)

機能性ナノ構造形成のための新規表面処理技術の研究開発

香川大学創造工学部先端材料科学領域 助教 平野 満大

連絡先 hirano.mitsuhiro@kagawa-u.ac.jp

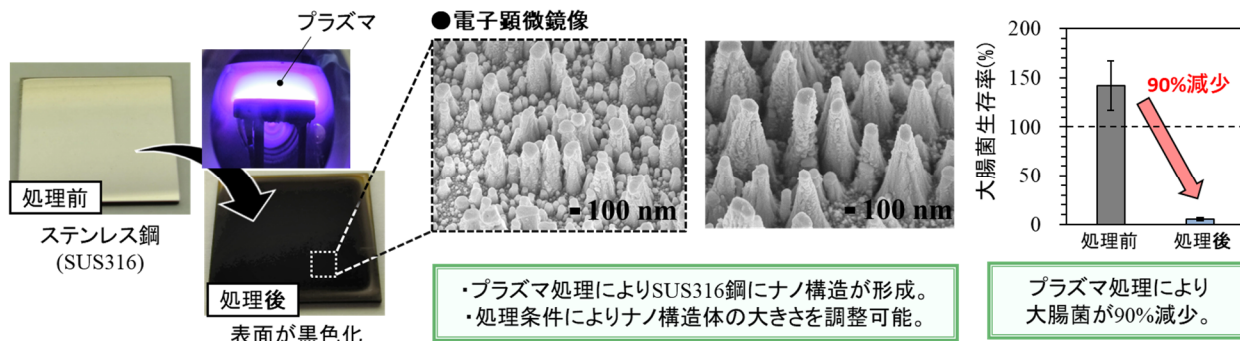


●研究背景と概要

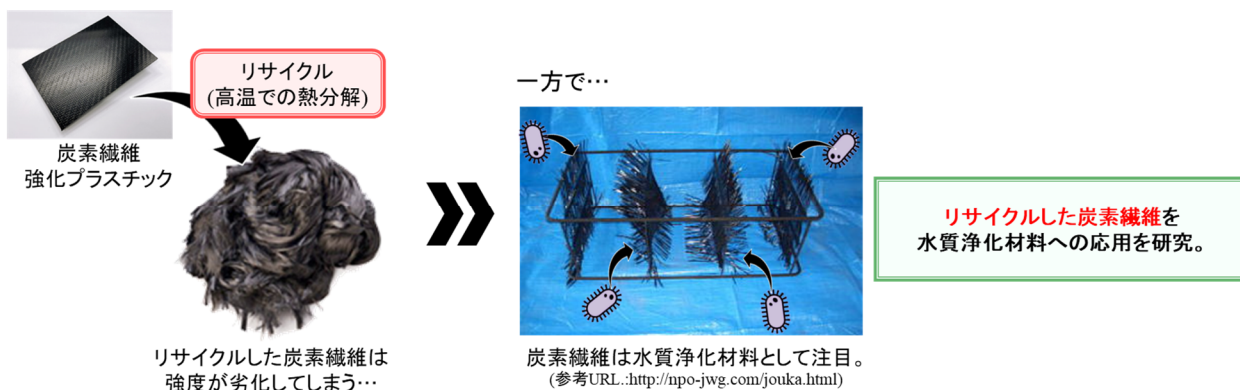
私たちの身の回りで生存している生物は特異的な表面構造を有しており、様々な特性を発揮します。例えば、昆虫の翅表面に形成されたナノ構造は抗菌性(細菌の繁殖を防止する特性)、植物の葉では自己洗浄性(雨風により汚れが落ちる特性)を示し、また魚類の鱗は空気抵抗や摩擦抵抗を低減する構造を有しています。本研究室では、真空プラズマの活用により、金属材料表面に特異的なナノ構造を模倣し、様々な機能性付与を可能とする表面処理技術进行研究しています。これまでの研究にて、アルゴンプラズマでステンレス鋼をエッチングすると、ナノ構造の模倣に伴い抗菌性を付与することに成功しました。プラズマの発生条件を変化させることで、構造物のサイズを制御することも可能です。また、一般的にドライエッチングで使用されるフッ化物や塩素ガスと比較して、アルゴンガスは環境負荷がなく、かつ人体に無害なので、本プロセスは環境に優しいプロセスでもあります。今後はチタンやアルミニウムなどの他の金属・合金材料への応用、さらには付与できる機能性の拡大を目指していきます。また、これまで培った微生物の培養技術を活用し、炭素繊維強化プラスチックからリサイクルした炭素繊維の水質浄化材料への応用研究も新たに進めています。

●研究内容

◆抗菌性ナノ構造表面形成が可能なプラズマエッチング技術の研究



◆リサイクル炭素繊維の水質浄化材料への応用研究



●備考

本研究室は 2022 年 4 月 1 日より創造工学部 先端マテリアル科学コースに設置されました。