

## 研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」、\*は「新設研究室紹介」に掲載)

### 電気関係研究室一覧

#### 工学研究科(大学院)

##### 電気工学専攻

##### 先端電気システム論講座(引原研)

システム基礎論講座自動制御工学分野(萩原研)

システム基礎論講座自システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野(土居研)

生体医工学講座生体機能工学分野(小林研)

##### 電磁工学講座超伝導工学分野(雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野(和田研)

##### 電磁工学講座電磁エネルギー工学分野(松尾研) #

##### 電子工学専攻

集積機能工学講座

##### 電子物理学講座極微真空電子工学分野(白石研) \*

電子物理学講座プラズマ物性工学分野(竹内研)

##### 電子物性工学講座半導体物性工学分野(木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野

##### 量子機能工学講座光材料物性工学分野(川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野(野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野(北野研)

##### 光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野(高岡研)

デバイス創成部門先進電子材料分野(藤田研)

#### 情報学研究科(大学院)

##### 知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野(黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野(松山研)

##### 通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野(原田研) \*

通信システム工学講座伝送メディア分野(守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野(高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野(佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野(小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野(佐藤亨研)

##### システム科学専攻

システム情報論講座画像情報システム分野(石井研)

システム情報論講座医用工学分野(松田研)

#### エネルギー科学研究科(大学院)

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野(下田研)

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野(中村祐研)

##### エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野(土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野(長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野(佐野研)

#### 生存圏研究所

##### 中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野(津田研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野(山川研)

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野(篠原研)

#### 国際高等教育院

教養教育部(小山田研)

#### 学術情報メディアセンター

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野(中村裕研) ☆

## 先端電気システム論講座（引原研究室）

<http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/>

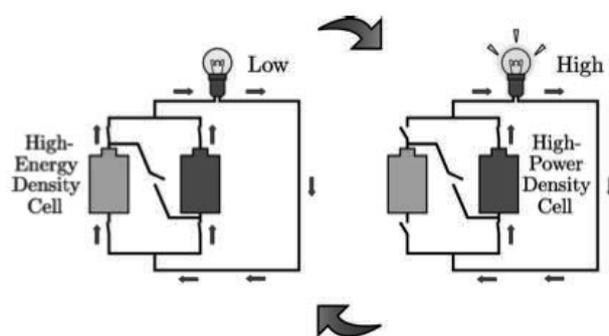
### 「低環境負荷社会の実現を目指したリチウムイオン組電池の研究～構成切り替え制御の提案～」

複数のリチウムイオン電池で構成された組電池は、電気自動車や家庭用蓄電装置など様々な応用の観点から現在注目が集まっている。一般に組電池は特性の揃った単電池（セル）により設計される。これは組電池内のセルの特性が揃っていない場合、特定のセルに過電流や過充放電が発生し、組電池の安全上の問題につながることに起因する。また、セル特性のばらつきは長期間にわたる充放電の繰り返しの伴い不可避であり、設計のみならず管理上も問題となる。これらのことより、組電池の電源システムとしての安全性確保や高性能化に向けて、セルごとの特性の差異を考慮した組電池の設計及び管理手法の確立が重要となる。これらの手法が確立されることにより、組電池使用時におけるセル特性のばらつきへの対処のみならず、一次使用により劣化したセルを組電池として再利用することが可能となる。このことから、組電池の研究開発は省資源化による低環境負荷社会の実現という観点から期待が大きい。

本研究室では、リチウムイオン組電池の研究を株式会社 CAPTEX と共同で進めてきた[1-5]。これまでに、セルを複数直並列で接続した実機による放電特性の解析[1,2,4,5]、セルの放電特性を表す数理モデルを用いた放電特性のシミュレーション[4,5]、グラフ理論を用いた組電池システムの縮約とこれに基づく放電特性の評価[4]等を行い、実験的手法と数的手法・シミュレーションを相補的に用いて組電池に関する基礎的知見を得るとともに、産学連携による社会実装を進めてきた。

本記事では、上記基礎的知見の中で、リチウムイオン組電池の構成切り替え制御[3,4]について述べる。一般にセルのエネルギー密度とパワー密度はトレードオフの関係にある。このようなセルを静的に複数接続した組電池では、負荷が要求する最大パワーにより組電池としての出力エネルギーが制限される。このことより、各セルの有するエネルギー密度やパワー密度を組電池において最大限引き出すことが困難となる。これは従来、組電池設計における性能限界と見なされてきた。また、特性の異なるセルで組電池を構成した場合、内部起電力及び内部抵抗の差異により各セルを流れる電流にばらつきが発生し、各セルの最大放電電流を越える過電流が発生する可能性がある。本研究では、組電池の構成を動的に切り替えることにより（下図）、上記性能限界を上回りかつ安全性確保を可能にする制御システムを提案し、高出力エネルギーかつ高出力パワーの同時実現と過電流抑制が可能であることを実機実験により示した[3,4]。本研究は、複数セルの構成を動的に切り替えることにより組電池の性能を向上させる可能性を見出したものであり、システム制御分野におけるスイッチング制御ないしハイブリッドシステム制御と関わりが深いものである。本研究室では、現在上記実機実験で示した性能向上を数値的ないし理論的に検証するための数理モデルの開発[6]に取り組み、提案制御システムの一般化を進めている。

**参考文献** [1] 佐藤、美馬、引原、平成 22 年電気学会全国大会、4-126 (2010). [2] 宮武、薄、引原、伊藤、田中、平成 23 年電気学会産業応用部門大会、1-15 (2011). [3] 宮武、薄、引原、坂口、菊池、信学技報、vol. 112, no. 224, EE2012-37, pp. 53-58 (2013). [4] 宮武、京都大学大学院工学研究科 修士論文 (2013). [5] S.Miyatake, Y. Susuki, T.Hikihara, S.Itoh, and K.Tanaka, J. Power Sources, vol. 29, no. 2, pp. 899-907, November (2013). [6] 安原、薄、引原、第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会 (2014).



図：特性の異なるセルで構成される組電池の構成切り替え制御[3]。低負荷時は出力エネルギーが大きい並列構成、高負荷時は出力パワーの大きいセルのみの構成とすることで、同一セルで構成した組電池と比較して高出力エネルギーかつ高出力パワーを有する組電池を実現する。

電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）

<http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

「輸送機器応用を目指した高温超伝導誘導同期回転機システムの研究開発」

当研究室では、究極の低炭素化を実現する輸送機器（バス・トラック他の大型車からミドルクラス乗用車まで）を対象として、高温超伝導誘導同期回転機（High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine、以下 HTS-ISM）駆動システムの実現を目指した産学連携プロジェクトを展開している[1-2]。本プロジェクトは、科学技術振興機構（JST）の委託事業（H24 年度戦略的創造研究推進事業先端的低炭素化技術開発（ALCA）「低炭素社会を支える輸送機器用超伝導回転機システム」）の一環として実施しており[3,4]、①高温超伝導誘導同期回転機の研究開発、②回転機制御技術開発、③小型低熱侵入冷却構造・方式の開発、④小型冷凍機の高効率化・低コスト化を4本柱としたシステム全体の総合的研究開発を推進している。本研究の目標としては、輸送機器特有の走行モードに対する高効率化と高トルク密度化を掲げている。特に、HTS-ISM のトルク密度を究極化して変速機（トランスミッションギア）を省略できれば、当該ギアの損失低減に伴って、パワートレインシステム全体で見たエネルギー変換効率が従来機に比較して格段に改善すると期待される。

図1には、ALCA プロジェクトとして開発した 20kW 級 HTS-ISM プロトタイプ機の外観写真を示す（第一ステップとして回転子巻線のみ超伝導化し、固定子には銅巻線を適用している）。本試作では、既存の同一出力機[2]に対して、磁気体積（電磁エネルギー変換を行う磁気回路部の体積：実質的には固定子コア体積に等しい）を 70% 低減することに挑戦した。図2には、運転温度 77K における負荷試験結果の一例を示すが、設計通りの同期定格出力 20kW を達成している。また、定格を超える過負荷を印加したところ、すべり回転状態に自動的に遷移し、すべり最大出力 26.8kW（過負荷耐量）を確認することができた。本プロジェクトでは、さらに HTS-ISM 冷却用の小型 Stirling 冷凍機も開発しており、世界最高効率を目指している。図3には、HTS-ISM 駆動システムの概略構成例を示す。近い将来、我々のシステムが実用される日を夢見て、今後共精力的研究を推進していきたい。

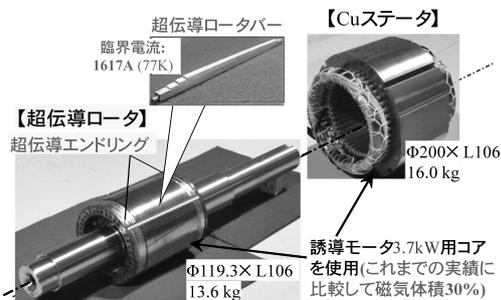


図1 20 kW 級 HTS-ISM の超伝導回転子ならびに常伝導固定子外観写真

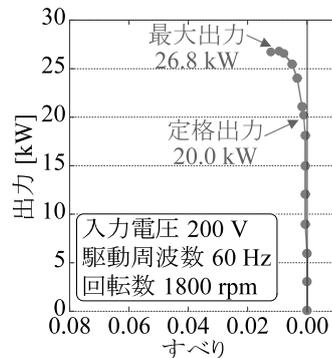


図2 負荷試験結果の一例（77 K）

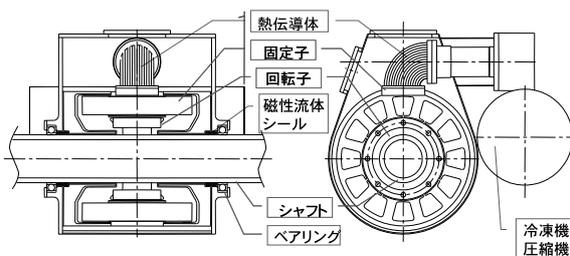


図3 HTS-ISM 駆動システムの概略構成例

- [1] 中村武恒、電気学会誌、vol. 130, no. 12 (2010) pp. 828-831
- [2] 中村武恒、低温工学、vol. 47, no. 6 (2012) pp. 384-391
- [3] 中村武恒、化学工業、vol. 64, no. 6 (2013) pp. 24-28
- [4] 中村武恒、応用物理、vol. 82, no. 7 (2013.07) pp. 579-582

## 量子機能工学講座 光材料物性工学分野 (川上研究室)

<http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp>

## 「新しい結晶面上での窒化物半導体発光素子の作製と評価」

窒化物半導体では、禁制帯幅を AlN の 6.0eV (波長 200nm に相当) から GaN の 3.4eV (365nm) を経て、InN の 0.6eV (2 $\mu$ m) まで変化させることができる。そのため、例えば InGaN 混晶をベースとした可視発光素子や太陽電池、AlGaIn 混晶をベースとした紫外発光素子への展開が期待されている。実際、青色発光ダイオード (LED) や白色 LED の実用化は、この材料系の顕著な成功例といえることができる。ただし、その発光効率、最も高い青色波長域でも 80 数% であり、他の波長域では急激に悪化する。その一因として、われわれは結晶の面方位に着目した研究を進めている。

市販されている LED を含め、窒化物半導体発光素子は、量子井戸発光層をホスト材料でサンドイッチした構造を基本としている。このとき、格子定数差のため、量子井戸発光層は歪を内包することになる。このような歪量子井戸を、従来は六方晶ウルツァイト構造の (0001) 面上に作製しているが、歪による結晶の対称性に変化に応じたピエゾ分極が誘起され、電子と正孔が空間的に分離してしまう現象が発生する。輻射再結合確率は電子正孔の波動関数の重なりで記述されるため、それらの空間的分離は再結合確率を低下させることになる。そこで本研究では、(0001) 面と約 60 度の角度をなす (11 $\bar{2}2$ ) 「半極性面」を用いることを提案している。図 1 に、結晶構造の概略を示した。この面は、GaAs などに代表される立方晶閃亜鉛鉱構造の (001) 面に類似した構造的特徴があり、結合手が当該面に対して上下に 2 本ずつあることが、ピエゾ分極誘起電界の発現を抑制している。

基板メーカーの協力のもと、GaN (11 $\bar{2}2$ ) 半極性基板を作製し、これまでに、InGaIn ベースの可視 LED 構造の実現 [1] や基礎光物性評価 [2, 3] を行ってきた。(0001) 面に比べて輻射再結合確率が 2 桁程度高まっていることを時間分解分光により証明し [2]、さらに、この系特有の現象として、発光が量子井戸面内で偏光しており、その方向が In 組成に依存することを示した [3]。最近では、GaN (11 $\bar{2}2$ ) 基板上の AlGaIn/InGaIn 応力補償超格子を提案している。図 2 に示した試料の断面透過型電子顕微鏡像から、積層構造が形成されていることがわかる。強い青色発光や光励起レーザ発振も観察され、発光層やレーザのクラッド層として有望であることが明らかとなった。(なお、2014 年 3 月の応用物理学会において本研究を発表した博士学生が、講演奨励賞を受賞した。) さらに、深紫外域での半極性面の効果を検証するために、半極性 AlN 基板上への AlGaIn 量子井戸構造の作製と光物性評価も進めており、自作した 210nm 帯短パルスレーザを用いた時間分解分光によって輻射再結合確率の増強を確認した。これらの研究の進展を通じて、より高効率な固体発光素子を実現し、照明分野における省エネルギー化に寄与できるものと考えている。[1] *JJAP* **45**, L659, [2] *APL* **89**, 211907, [3] *PRB* **78**, 233303.

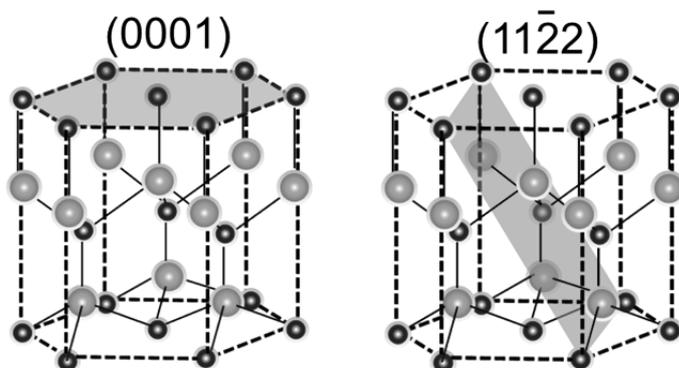


図 1 窒化物半導体の結晶構造：ウルツァイト構造と代表的な結晶面である (0001) 極性面と (11 $\bar{2}2$ ) 半極性面。

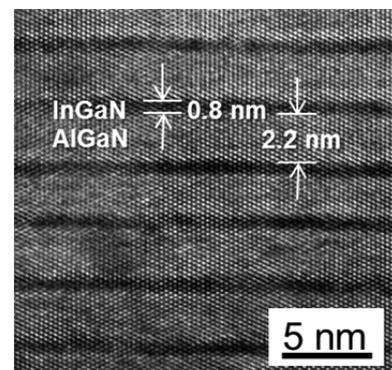


図 2 (11 $\bar{2}2$ ) 半極性 GaN 基板上に作製した InGaIn/AlGaIn 応力補償超格子の断面透過型電子顕微鏡による格子像。

光・電子理工学教育研究センターナノプロセス部門 ナノプロセス工学分野（高岡研究室）  
[http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess\\_eng/index.html](http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess_eng/index.html)  
 「イオン液体イオン源の開発と固体表面改質応用の検討」

本研究室は、光・電子理工学教育研究センターのナノプロセス工学分野として、多種・多様な原子・分子・クラスターからなるイオンビームのナノプロセス利用を目指した研究を行っています。特に多原子分子のイオンは固体表面処理応用を考えた場合、官能基による化学反応や、大質量電荷比に起因する照射効果があるため、様々な応用が期待できるイオンです。近年は、特異な性質を持つイオン液体のイオンビームについても研究を行なっています。

イオン液体は近年注目されている溶媒材料で、カチオン（陽イオン）とアニオン（陰イオン）で構成された室温で液体の塩です。水・油・アルコール等とは混ざり合わず、導電性を示し、発火せず、化学的に安定であるため、合成化学や電池応用への研究が進められています。さらにイオン液体は常温では殆ど蒸発しないため、真空中での電界放出によるイオンビーム形成が可能です。このため、宇宙推進用のイオンエンジンや、表面微細加工用の収束イオンビームへの応用が研究されています。また、カチオンには炭素と窒素、アニオンにはフッ化物を持つものが多いといった特徴から、様々な固体表面処理への応用が期待できます。図1はイオン液体の一つである1-ブチル-3-メチルイミダゾリウムヘキサフルオロフォスファート（BMIM-PF<sub>6</sub>）の分子構造と液体の外観です。

本研究にて開発したイオン液体イオン源のエミッタ先端部分を図2に示します。種々のエミッタ材料を検討した結果、イオン液体との濡れ性が高く、導電性を有するグラファイトを針材としています。エミッタ先端では、電界印加による静電力がイオン液体の表面張力を上回るため、イオン液体はテーラーコーンと呼ばれる円錐形状となっており、その先端からイオン液体のイオンが主に電界蒸発により放出されます。質量分析の結果、正イオンビームではカチオン単体や陰陽イオン対にカチオンが付加したクラスターが放出されていること、また負イオンビームではアニオン単体や同様の小さいクラスターが放出されていることが分かりました。また、エミッタ構造や電極構成を制御することにより、数分子から十数分子程度のクラスターイオンとなることも分かりました。

イオン液体イオンビームの固体表面処理応用の試みとして、ディスプレイ用の無アルカリボロシリケートガラスの表面平坦性改善を試行した例を図3に示します。生成したBMIM-PF<sub>6</sub>負イオンビームを加速電圧4kV、照射量 $1 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>で真空中にて照射し、その後ガラス基板の表面を原子間力顕微鏡にて算術平均粗さを求めています。その結果、イオン照射により表面粗さは照射前の0.17nmから0.10nmまで減少し、表面が平坦化されていることが分かりました。光電子分光測定などから、照射したガラス基板表面にはnmオーダーの薄いイオン液体生成物層が形成されていることが示唆されており、このために平坦性が向上したと考えています。現在は、平坦化メカニズムの解明とその他照射効果検討のため、更なる研究を進めています。

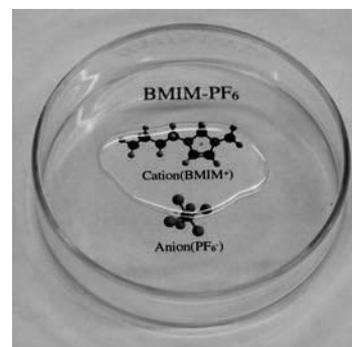


図1. イオン液体 BMIM-PF<sub>6</sub> の分子模型と液体外観

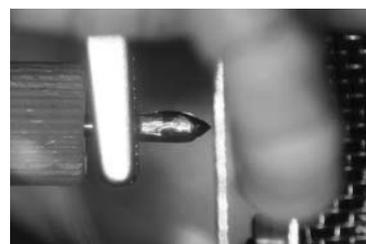


図2. イオン液体 BMIM-PF<sub>6</sub> イオンビーム放出時のイオンエミッタ先端。

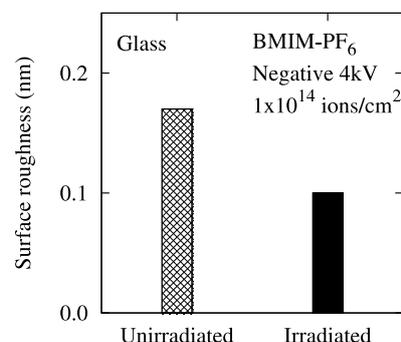


図3. BMIM-PF<sub>6</sub> イオンビームを照射したガラス基板の表面粗さ。

光・電子理工学教育研究センターデバイス創生部門 先進電子材料分野（藤田研究室）  
<http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/index.html>  
 「環境負荷低減を目指した未来材料・デバイスの創生」

昨今、日本の半導体産業を取り巻く環境は厳しくなっており、新しい機能性材料、または動作機構によるデバイスの開発が望まれている。これまで幾多の先人達によって無数の材料の組み合わせが試みられ、実験・計算の両面から新材料の「宝探し」が盛んに行われてきたが、それらのほとんどは「安定相」の化合物を用いたものが多く、通常では作製が困難である「準安定相」による新材料の探索はあまり行われてこなかった。その理由として、超高圧・高温を必要とするため合成装置が大掛かりになり、また室温・大気圧下で化合物を安定に存在させる事が困難で、これらの点を克服しない限り、実用応用可能なデバイス作製は出来ないからである。しかしながら、準安定相化合物には安定相化合物では観測されない機能を発現するものが多く、機能性材料開発における大きな金鉱脈となる。

一方、当研究室で開発したミスト CVD 法によって、これまで大気圧、低温条件下で安定的に準安定相化合物を作製してきた。例えば、コランダム構造をもつ酸化ガリウム( $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)は、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末を 4.4 万気圧、1000°C の雰囲気さらす事で得ることが出来るが[1]、ミスト CVD 法では、大気圧下、500°C の条件下で c 面サファイア基板上に高品質の  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜を作製する事が可能である[2]。また、その成長メカニズムは、サンプル断面の透過型電子顕微鏡(TEM)観察により、ドメインエピタキシー成長によるものであり、基板からの応力による拘束を強く受けている事が判明した[3]。そして、この仕組みを利用する事で、 $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バッファ層の導入による  $\alpha$ -(In,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜の作製[4]や、基板選択により同一条件下で薄膜の結晶構造を作り分ける事に成功している[5]。

このように作製した準安定相酸化物は、多くの魅力的な物性を発現する。例えば  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Eg=5.3eV) は安定相である  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4.9eV) よりも大きなバンドギャップを有する。当研究室では、 $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のパワーデバイス開発研究を、当研究室のスピンオフにより生まれたベンチャー企業である株式会社 FLOSFIA[6]と共同で行っている。さらに、 $\alpha$ -(Al,Ga,In)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混晶はバンドギャップを 3.7-9.0eV の範囲で変調が可能であり、MOS-FET もしくは HEMT への応用が可能である。また、 $\alpha$ -(Ga,Fe)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、 $\alpha$ -(In,Fe)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> はそれぞれ強磁性半導体としての性質を示し、どちらもキュリー点が 300K を超えている事から、室温動作を目指したスピンドバイスへの応用が期待される。このように、準安定相化合物にはまだ多くの機能性材料または混晶が多く存在し、材料開発研究の大きな分野となり得る。

- [1] J. P. Remeika and M. Marezio: Appl. Phys. Lett. **8** (1966) 87  
 [2] D. Shinohara and S. Fujita: Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 7311  
 [3] K. Kaneko, H. Kawanowa, H. Ito, and S. Fujita: Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 020201  
 [4] N. Suzuki, K. Kaneko, and S. Fujita: J. Cryst. Growth **401** (2014) 588  
 [5] K. Kaneko, H. Ito, S-D. Lee, and S. Fujita: Phys. Stat. Solidi (c) **10** (2013) 1596  
 [6] 〒 615-8245 京都市西京区御陵大原 1-36 京大ベンチャープラザ北館 203 号室 HP: <http://flosfia.com>

H																	He														
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne														
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar														
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr														
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe														
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn														
Fr	Ra	Ac																													
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tbody> <tr> <td>Ce</td> <td>Pr</td> <td>Nd</td> <td>Pm</td> <td>Sm</td> <td>Eu</td> <td>Gd</td> <td>Tb</td> <td>Dy</td> <td>Ho</td> <td>Er</td> <td>Tm</td> <td>Yb</td> <td>Lu</td> </tr> </tbody> </table>																		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																		

図 1 ミスト CVD 法により作製した酸化物の金属種の周期表での位置 (白抜きで示すもの)

## 集積機能工学講座

http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp

## 「新規高温超伝導体単結晶薄膜の育成と超伝導異方性の評価」

電気抵抗がゼロという超伝導現象は、固体物理学の対象として極めて興味深いことと同時に、電気電子分野の材料としても魅力的です。超伝導体の工学的な応用は、量子化磁束を取り込む第2種超伝導体の発見に始まる超伝導磁石から、高温超伝導体の発見に始まる超伝導ケーブルまで、新しい超伝導体の発見が超伝導応用の出発点となっています。新しい超伝導体への指針となるのが、結晶構造と元素置換です。高温超伝導体は、物質に応じて多様な結晶構造を取りますが、超伝導転移温度が液体窒素の沸点である 77 ケルビンを超える物質の結晶構造は 2 種類に区別することができます。ひとつは、イットリウム系超伝導体に代表される単一ブロック層構造、もう一つはビスマス系超伝導体に代表される二重ブロック層構造です。超伝導ケーブルへの応用は、異方性の低い単一ブロック層構造の方が適しており、高い臨界電流密度を持つケーブルはイットリウム系超伝導体  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (YBCO) で開発されています。しかしながら、送電ケーブルとして、大量に生産することを考えると、希土類元素は少なく、なるべくユビキタス元素で構成されることが望まれます。そこで、私たちは、同様の結晶構造を持つ  $\text{PbSr}_2\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{CuO}_8$  に注目しました。ここで、元素置換の意味を説明すると、 $\text{CuO}_2$  二重層で構成される超伝導層に供給されるキャリアは、他の陽イオンの価数の合計で決まっており、YBCO でブロック層を構成していた Cu と Y に替わって、Pb と Ca が入ります。この物質は、80K を超える  $T_c$  が報告されているものの、単結晶試料が得られていないので異方性が測定されておらず、超伝導材料としての評価が不十分です。私たちは、Two-step 成膜法を用いて  $\text{SrTiO}_3$  単結晶基板上にエピタキシャル成長した高品質の薄膜を得ました (図 1)。Ca 濃度  $x$  を変えた試料について電気抵抗の温度依存性を測定した結果 (図 2)、 $x > 0.32$  で超伝導が観測され、最高の  $T_c = 66\text{K}$  が  $x = 0.37$  で得られました。ホール係数の測定から、置換した Ca 原子当たり 0.34 の正孔がキャリアとして有効になっており、置換効果が明瞭に表れています。面内 X 線構造解析の結果より、基板からの面方向伸張歪みが加わっていることが分かり、バルクの値より  $a$  軸長が延びています。この結果、 $T_c$  に大きな影響を与えていると考えられている  $\text{CuO}_2$  面と頂点酸素間の距離が縮んでいます。今後は、この距離を伸ばして、 $T_c$  を上昇させることを考えています。また、異方性を評価するために、上部臨界磁場  $B_{c2}$  を  $ab$  面方向と  $c$  軸方向の磁場下で測定しました。異方性はビスマス系超伝導体よりもはるかに小さく、YBCO よりは若干大きいという結果となりました。今後の詳細な研究によって、 $\text{PbSr}_2\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{CuO}_8$  がユビキタス超伝導体として新しい超伝導応用の可能性を拓いていくことが期待されます。この研究の詳細は実際に実験を進めた博士課程大学院生を筆頭著者として、フィジカル・レビュー誌に最近発表しました (S. Komori *et al.*, Phys. Rev. B, **89** 174509 (2014))。

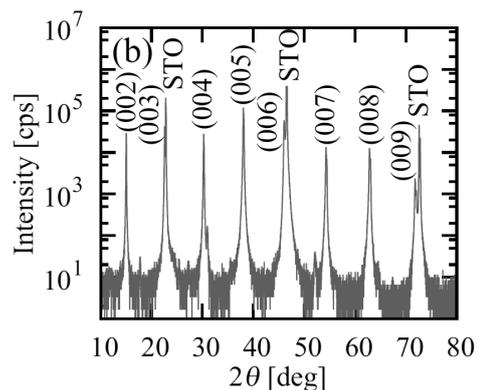


図 1: 面間 XRD パターン。不純物相が皆無。

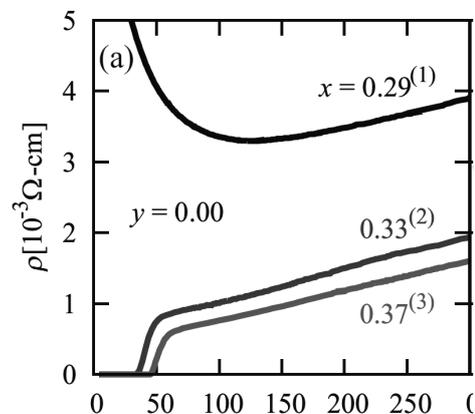


図 2: Ca 濃度を変化させたときの抵抗の温度依存性。



通信システム工学講座 伝送メディア分野 (守倉研究室)

<http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

次世代無線アクセスに向けたヘテロメディア通信制御

無線通信の急速な普及により周波数帯域は不足しつつあります。特に Wi-Fi が利用する 2.4/5GHz 帯域は逼迫しています。一方、新規無線帯域の開拓が進み、400MHz 帯、900MHz 帯、ミリ波帯、可視光通信など、新たな周波数帯域が利用可能となってきました。近年では、60GHz 帯無線通信インターフェースの実用化や、テラヘルツ帯無線通信の研究開発が盛んに行われています。しかし、それら新規帯域対応無線通信機器の普及には時間がかかります。また、通信帯域や通信方式ごとの性質の違いにより、普及率や使用頻度に偏りが生じることが予測されます。

本研究では、新規無線帯域活用による周波数帯域逼迫解消を目標とし、複数の無線通信インターフェースを用いた通信制御を検討しています。これをヘテロメディア通信制御と呼びます。最近のスマートフォンやタブレットには LTE、Wi-Fi、Bluetooth など複数の無線通信が搭載されています。これらの無線通信は、通信帯域・通信方式に応じて異なる性質を有しています。例えば、Wi-Fi は伝送距離、伝送速度ともに優れていますが、様々な機器が同一周波数帯を利用しているため帯域不足により性能が低下してしまいます。一方、ミリ波帯通信は、広帯域を用いた高速通信が可能ですが、伝送距離が短いという欠点があります。本研究では、このような無線通信ごとの性質の違いを考慮し、統合的に用いた通信方式を検討しています。

図 1 に本研究の提案プロトコルの一例を示します。提案方式では、アクセス制御に LED とカメラによる可視光通信を用い、データ通信に 2.4/5/60GHz 帯の Wi-Fi を用います。図 2 にその手順を示します。Wi-Fi 端末は LED を点滅させ送信要求信号を送信します。基地局はカメラを用いて送信要求を検知し、送信権を付与します。このようにアクセス制御とデータ通信を切り分けることで、2.4/5/60GHz 帯のほぼすべてをデータ通信に用いることができ、周波数利用効率を向上させます。この他、様々な通信メディアに対してヘテロメディア通信制御を検討しており、無線アクセス技術の発展に寄与しています。

[参考文献] T. Nishio, R. Nishioka, M. Morikura, and K. Yamamoto, "VRMAC: A Novel WLAN Medium Access Control Mechanism Using LEDs and a Camera," Proc. IEEE Globecom 2013 Workshop on Optical Wireless Communication, Atlanta, USA, Dec. 2013.

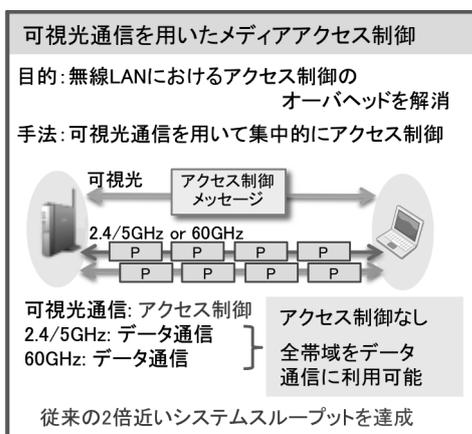


図 1 : 可視光通信と Wi-Fi を用いたプロトコル

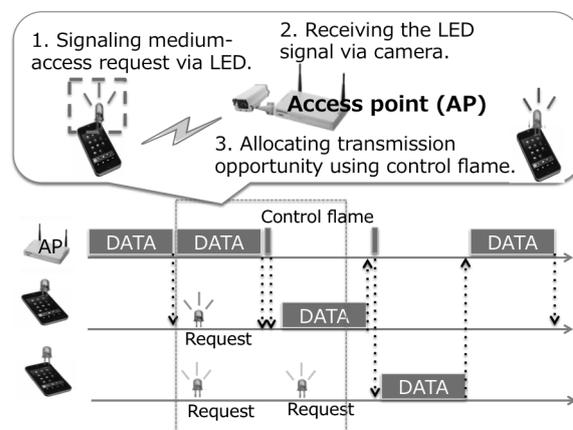


図 2 : アクセス手順

## 集積システム工学講座 大規模集積回路分野（小野寺研究室）

<http://www-lab13.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

### 「超高速光通信用集積回路の研究」

近年、高速通信の重要性はますます高まっている。インターネットなどの通信網だけではなく、京コンピュータなどのスーパーコンピュータでもいかにCPUとCPUの間で高速に情報をやりとりするかが性能のキーとなっている。大容量通信を実現する技術として従来より光ファイバが用いられており、光ファイバ網の家庭への普及は一般利用者的高速なネットワークアクセスを支えている。さらに、シリコンフォトリソグラフィ（シリコン材料を用いて発光・受光素子、光導波路などを実現する技術）の発展により、光回路と集積回路の融合が進んでおり、短距離のデータ伝送も金属配線から光ファイバへ置き換えが進むと言われている。近い将来光通信の速度はテラビットに、極短距離（CPUとメモリの間など）であれば20TB/sに達すると考えられている。

このような高速通信を実現するためには、光回路だけではなくそれに接続される電気回路側も高速化しなければならない。本研究室では主に受信回路で光電流を電圧信号に変換するTIA(TransImpedance Amplifier、トランスインピーダンスアンプ)について研究している。TIAは光ファイバを通った信号がフォトディテクタで電気信号に変換されて最初に増幅を行なう回路であり、高速・高利得が求められる。それだけではなく雑音耐性、低消費電力、小面積などの要求も満たさなければならない。特に近年は複数チャンネル並列による高速化が一般的であるため、小型化およびノイズ耐性が課題となっている。

本研究室ではまず高速化について取り組み、効率的なインダクティブピーキングを検討した。インダクティブピーキングはインダクタを用いて回路の帯域を伸ばす技術であるが、インダクタは占有面積が大きいという欠点があった。我々は複数のインダクタを結合させて使うことで、面積効率の高いピーキングを実現した。図1に研究室で開発したTIAを示す。このTIAは180nmCMOSプロセスで10.3Gbpsを達成し、従来のピーキング手法と同等の面積でありながらマスクマージン（通信規格に定められたアイダイヤグラムからの余裕度）を2倍以上にすることに成功した。図2に実測によるアイダイヤグラムを示す[1]。また、大面積を占めているインダクタの小型化に取り組み、面積効率の高いインダクタを開発した。図3にその一例を示す。集積回路内の多層配線を用いてソレノイドインダクタを作ることは従来から検討されてきたが、我々は層ごとの巻数を変える方法で面積効率を改善し、さらなる小面積化に成功した[2]。現在、小型・高速なTIAを並列化しさらなる高速通信の実現を目指して研究を進めている。

[1] S.Miyawaki, M. Nakamura, A. Tsuchiya, H. Onodera, "A 10.3Gbps TransImpedance Amplifier with Mutually Coupled Inductors in 0.18-um CMOS," 2011 International SoC Design Conference, pp.223-226, Nov 2011.

[2] 「ソレノイドインダクタ」特願 2014-086116

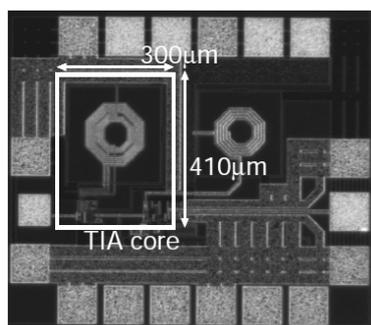


図1 試作チップ

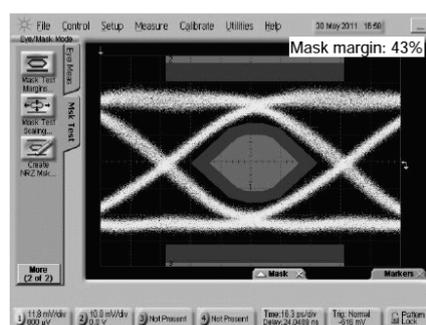


図2 実測波形 (10.3Gbps)

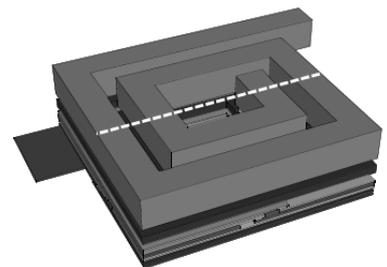


図3 小型ソレノイドインダクタ

## システム情報論講座 医用工学分野 (松田研究室)

<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/>

## 「下顎骨再建における形状評価指標を備えた手術工程計画システム」

内視鏡下手術やロボット手術に代表される先端医療技術の開発と普及が進む中、その安全管理や手術時間の短縮、医師の負担減少のために、臨床現場における情報システムやソフトウェアが果たす役割は大きくなっている。患者個人の三次元 CT/MRI 画像に基づく術前計画が広く考案され、その有効性が確認されているが、現状の術前計画システムの多くは手術工程の各要素に対する明確な評価指標を持っておらず、医療従事者が計画立案した内容を定量的に把握することが難しい。また、臓器形状表現には製造・設計分野で用いられてきたモデリング手法が活用されているが、症例に合わせた計画が必要であることに加え、医療従事者が手術前や術中に用いることになるため、手術支援システムには利用形態を踏まえた即時性のあるモデリングと直観的かつ対話的操作が可能な設計が求められる。

本研究では、患者個人の三次元画像を用いた直感的かつ定量的な手術計画の立案を可能とし、医療従事者による最適な手術工程の導出を支援するセミオートマテック術前計画に関する研究開発を行っている。これまでに医療従事者自身が空間的ボリュームモデルを直感的かつ対話的に編集操作できる手術計画システムを試作・製品化し、医療従事者の知見に基づいた手術工程の定量評価を可能にする評価指標の開発に取り組んできた。例えば、下顎骨肉癌の治療による切除や事故による下顎骨の欠損に対して行われる下顎骨再建では、欠損部分に患者自身の腓骨を移植する方法が試みられているが、熟練医であっても下顎の切除領域に対する理想的な腓骨の分割と配置を得ることは容易ではない。本システムは、三次元 CT 画像から構築された下顎ボリュームモデルを可視化し、対話的に腓骨の分割・配置をシミュレートすることを可能とする。図 1(a) は 3 分割された腓骨セグメントを移植に用いる場合であり、下顎切除領域に各セグメントを配置した際の再建後の下顎の推定結果が可視化されている。医師はレンダリング像上に複数配置されたバーチャル面を対話的に操作し、患者の元の下顎の形態や機能をより良く復元できるように計画内容を修正する。特に本システムは専門医の見解に基づいて元の下顎と再建後の下顎を定量評価する体積充填率や形状誤差などの形状評価指標を備えており、医療従事者はその評価値を参照しつつ、より良い腓骨の分割や配置を定量的かつ対話的に探索することができる。また、最適配置の導出に関する研究にも取り組んでいる。図 1(b) は 3D プリンタによって出力された腓骨の分割パターンである。手術時に用いる金属製のサージカルガイド (図 1(c)) を製作し、そのガイドに沿って腓骨を切断することが可能であり、計画内容に沿ったより精密な手術の実現が期待される。

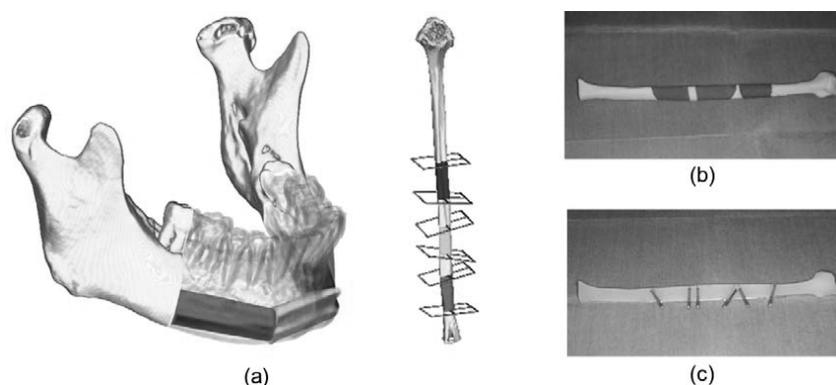


図 1. 下顎骨再建術における手術工程計画システム, (a) 下顎切除領域への腓骨移植シミュレーション, (b) 3D プリンタによる切断パターンの出力 (c) 製作されたサージカルガイド

参考 URL : <http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~meg/research.html>

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（下田研究室）  
<http://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/>  
 「オフィスの省エネルギー照明と知的生産性」

東日本大震災以降、我が国の多くの原子力発電所が停止しており、特に需要の多い夏期の電力供給は逼迫しています。オフィスでもクールビズだけでなく、総エネルギー量の約1/4を占める照明の間引き運用も実施され省エネルギーに努めています。しかし、このような省エネルギー活動はオフィス執務者の快適性や作業効率を損なう可能性があり、そのために仕事の効率が悪くなり残業が増えることで、かえってエネルギー消費が増大しては本末転倒です。一方、近年ではオフィス環境を整えることでオフィス作業の知的生産性を高めようという活動がありますが、そのためには、知的生産性の向上効果を定量的に評価して有効なオフィス環境改善へ投資する必要があります。

本研究室では、この課題に対して、作業への集中に着目した知的生産性定量計測方法を開発しています。この方法は、同程度の認知処理時間が必要な認知タスクの問題を連続で実施していると、集中の途切れによって処理時間が著しく延びる現象があることに着目し、知的作業中の情報処理状態を(1)作業に集中しており作業処理が進行している「作業状態」、(2)作業に集中しているが無意識に作業が中断している「短期中断状態」、(3)疲労などから意識的に作業を中断している「長期休息状態」の3状態の状態遷移によって表す知的生産性変動モデルに基づいています。このモデルにおいて、(1)作業状態と(2)短期中断状態の状態遷移確率を一定と仮定しますと、問題解答時間部分分布は図1のような対数正規分布となり、計測結果とよく一致します。これを利用して、認知資源を作業対象に向けている(1)作業状態と(2)短期中断状態を「集中状態」とし、全体の作業時間に対する集中時間の割合を「集中時間比率(Concentration Time Ratio; CTR)」として知的生産性を表す定量指標を開発しました。この指標は認知タスクの解答時間分布を分析することにより求めることができ、これまでの計測の際に問題となっていた習熟効果をキャンセルできるメリットがあります。

この集中時間比率 CTR を指標として、タスク & アンビエント照明と従来の天井照明における知的生産性を計測する実験を実施しました。図2に示すタスク & アンビエント照明は、執務机の上にタスクライトを設置することで天井照明を暗くすることができるため、エネルギー消費量が40%程度削減できるとともに、机上の作業領域がスポット状に照らし出されることで作業への集中が高まると言われています。実験参加者はオフィス作業の経験のある30～50代の男女12名ずつ計24名で、照明条件のカウンターバランスを取りながら夏期の3日間に渡って実験に参加していただきました。照明条件以外の室内環境条件は、室温を $26 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度を $70 \pm 10\%$ 、二酸化炭素濃度を800ppm以下に統制しました。その結果、タスク & アンビエント照明下での集中時間比率は全実験参加者の平均で72.5%、従来の天井照明下では平均67.5%であり、5.0%ポイントの差があることがわかりました。また、対のあるt検定の結果、有意差が認められ( $p < .01$ )、タスク & アンビエント照明は省エネルギーと同時に集中時間比率を向上させる効果があることがわかりました。今回の計測実験では照明条件変化が知的生産性へ与える影響を調べましたが、この集中時間比率を用いることにより様々なオフィス環境が知的生産性に及ぼす影響を定量的に計測することができます。

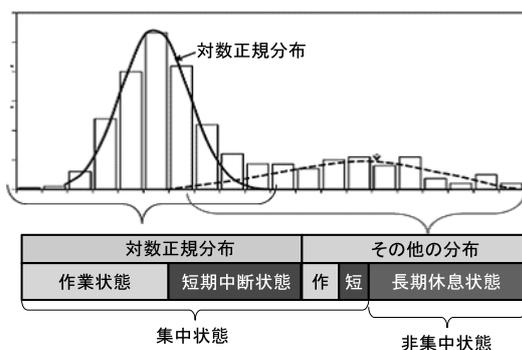


図1 認知タスクの解答時間分布と集中時間



図2 タスク & アンビエント照明

## エネルギー材料学講座 エネルギー応用基礎学分野（土井研究室）

<http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 「磁場を用いた三次元結晶配列技術」

エネルギー応用基礎学分野（土井研究室）では、超伝導物質を中心とするエネルギー材料の薄膜材に関する研究に加えて、新しい結晶配向制御法である「磁場配向」に関する研究にも取り組んでいます。本稿では、変調をかけた強力な磁場を利用していわゆる非磁性と呼ばれるような弱磁性物質の三次元結晶配列技術に焦点をあて、その取り組みについて紹介します。

まず、変調磁場を使った磁場配向の原理について説明します。180度ごとに静止と回転を繰り返す磁場（図1(a)参照）を加えると、静止工程で磁化容易軸が、回転工程で磁化困難軸が配向し2軸が固定されることで残りの第2磁化容易軸も整列し三つの結晶軸を揃えた結晶配列が実現します。実験装置として、図1(b)のように、市販の永久磁石の100~1000倍の磁力を発生する10テスラ級超伝導電磁石を用い、磁場中でサンプルを回転制御させることで配向が実現します。結果の一例として図1(c)に高温超伝導体  $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$  粉末を室温・10テスラの変調磁場・エポキシ樹脂中で配向・硬化させた配向体のX線回折パターンを示します。原理的には $a$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 面の順に第一・第二磁化容易軸、磁化困難軸が配向しますが、図3の結果から互いに直交する3つの結晶軸が変調磁場なる磁気的な効果により明確に分離されていること、また、磁化軸の関係が $c$ 軸、 $a$ 軸、 $b$ 軸の順であり、超伝導を担う $\text{CuO}_2$ 面が $a$ 面に平行に配列していることが見て取れます。

通常用いられる結晶配向法は単結晶並みの高い結晶配列度をもつ種結晶や基板を使った結晶成長技術（エピタキシャル成長）です。この方法では所望の結晶成長を実現するための精密な温度制御が必要となりますが、磁場配向は室温で結晶配列を実現できる比較的簡便な技術です。当研究室は、これまでの一連の研究から「磁場」が新しい結晶配列技術であることを実験的に証明してきました。磁場配向法は機能に異方性が存在する機能性材料に広く展開できる可能性がありますので、現在、高い送電能力を有する高温超伝導材料を中心に磁場配向法の有用性の検証を進めているところです。

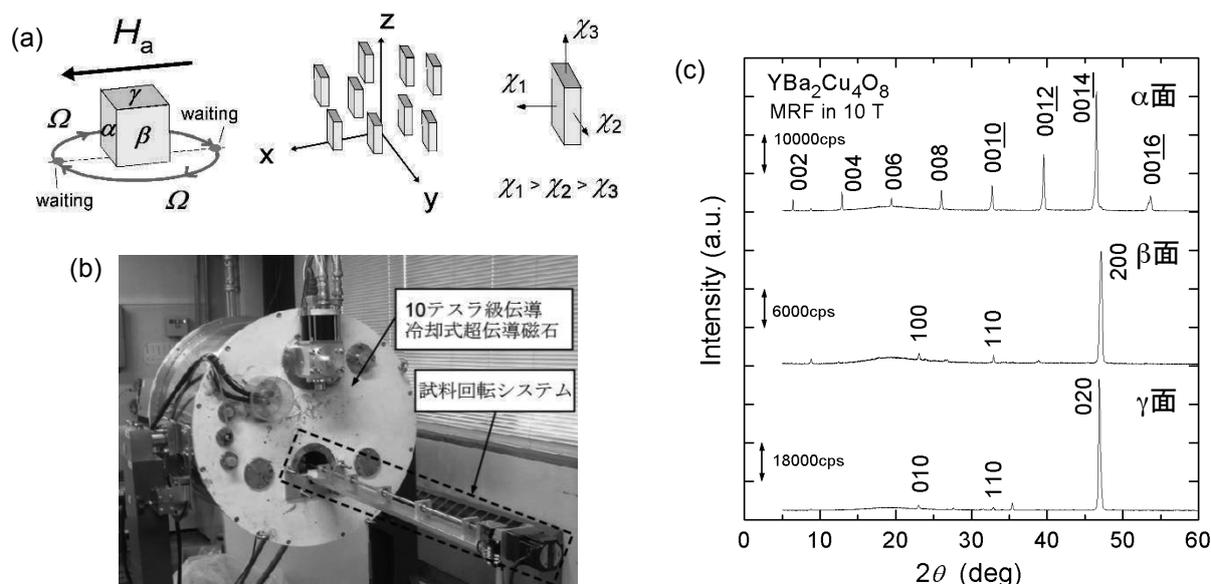


図1 (a) 三軸磁場配向の原理。

(b) 三軸磁場配向装置（超伝導電磁石と試料回転システム）

(c) 10テスラの回転変調磁場下で配向させた希土類系高温超伝導体粉末試料のX線回折パターン。

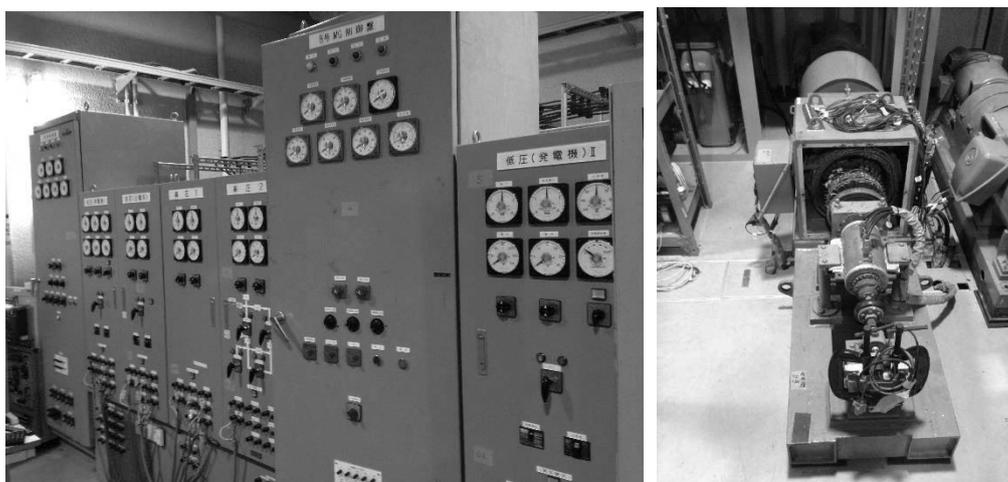
## エネルギー材料学講座 プロセスエネルギー学分野（白井研究室）

<http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/>

### 「分散電源の導入された需要地系統の動特性」

#### 1. はじめに

当研究室では、エネルギー問題にコミットする視点として、超電導応用エネルギー機器とこれらを導入した先進エネルギーシステムをテーマとしている。今回は電力システムに関連した研究を進める基盤設備として、昨年度福井大学松木先生のご厚意により模擬電力系統設備を移設・増設させていただいた(写真)ので紹介する。6kVA 同期発電機 2 台、2kVA 同期発電機 1 台、3300V 模擬送電系統、太陽光発電用パワコン(PCS)、負荷装置などを用意している。



発電機制御盤と系統制御盤（左）、模擬発電設備（左：6kVA,220V）

#### 2. 同期発電機が PCS の単独運転防止装置に与える影響の調査

この設備を使った研究の一例として、同期発電機と太陽光発電設備が並列された系統を構築し、電源の発生電力と負荷がバランスしているときの単独運転の問題（送電線事故などにより変電所の遮断機が開放して上位系統から切り離されても分散形電源が解列されずに運転を続けている状態）についての検討について紹介する。単独運転の検出は PCS がその機能を持っているが、近傍系統に回転機が存在するとき、また近傍系統に複数の検出装置が存在するときなどに単独運転の発生を検出できない可能性が指摘されている。

具体的には系統内で発電電力と負荷をバランスさせて上位系統からの潮流をほぼゼロにした状態で単独運転へ移行し、PCS が単独運転を検出するかを調べた。条件として、同期発電機と PCS の出力比、これらの間の電気的な距離、発電機容量（6kVA、2kVA）を変えた。今回行った条件下では、どの場合も潮流をほぼゼロとすると PCS は受動的方式でも能動的方式でも単独運転の発生を検出できず、対策が必要なことが指摘された。

## エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野(佐野研究室)

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/sanok/index.html>

### 「超高温プラズマの MHD 平衡・安定性の可視化を目指した軟 X 線コンピュータ断層撮影法の開発」

近年、環境問題やエネルギー問題を解決するため、持続可能な社会および地球環境の構築が求められている。そこで鍵を握るのが新エネルギー源の開発である。磁場で閉じ込めた高温プラズマ中で熱運動により核融合を起こさせ、その生成されたエネルギーを発電に利用する方式が核融合発電である。核融合発電は低環境負荷、燃料が無尽蔵、高エネルギー密度、そして外部制御可能といった特徴を有することから、持続可能な社会環境を支える基幹電力となる可能性を秘めており、世界的に研究開発が積極的に進められている。本研究室では、より核融合炉に適した磁場配位(閉じ込め磁場容器)の最適化・探索ならびに高性能プラズマ閉じ込めを実現すべく、京都大学独自のヘリオトロン磁場配位を発展させた立体磁気軸ヘリオトロン磁場配位を有する高温プラズマ実験装置「ヘリオトロン J」を用いて、実験的・数値解析的に高温プラズマ閉じ込めの研究を行っている。それら研究の中から今回は、電磁流体力学的(MHD: Magnetohydrodynamics)平衡・安定性の可視化を目指した軟 X 線コンピュータ断層撮影法の開発について紹介する。

ヘリオトロン J のような磁場閉じ込めプラズマは、プラズマ圧力と磁場圧力が均衡(MHD 平衡)を保ち磁場に閉じ込められる。そして、プラズマ圧力が変化すると MHD 平衡を保つように閉じ込め磁場も変化していくが、変化には平衡限界と呼ばれる限界があり、超えると高温プラズマの閉じ込めが困難になる。経済性の高い核融合発電炉を考える上でプラズマ圧力は高くする必要があり、MHD 平衡変化の理解ならびに平衡限界の上昇が重要である。加えて、プラズマ圧力が高くなると、圧力勾配をエネルギー源として MHD 波動が大振幅の電場・磁場揺動を伴い不安定化し、プラズマ閉じ込めの悪化を導く。以上のことから、高温プラズマの MHD 平衡・安定性の理解が必要であり、その可視化が重要となってくる。その可視化を実現する方法として、軟 X 線コンピュータ断層撮影法(Soft X-ray computer tomography: SXCT)が挙げられる。高温プラズマ中の電子から制動放射により放射される軟 X 線を測定することで、MHD 平衡・安定性を測定することが可能である。軟 X 線はフォトダイオードアレイを用いたピンホールカメラで測定する。ただし、得られた信号は視線に沿って得られた線積分値であるため、制動放射の局所値を得るためには、プラズマを取り囲むように複数のダイオードアレイを設置して得られた信号の逆問題を解く必要がある。これはいわば、医用の X 線 CT(人体では X 線吸収分布)や PET(ポジトロン断層法)と類似の手法で、それらをプラズマ診断に用いるものである。しかしながら、医用では観測対象が変化せず、かつ無数の観測視線が得られるために逆問題の解法が可能であるのに対して、プラズマ計測では視線数が少なく(~ 300 チャンネル程度)かつ時間変化が早く、そして S/N 比が悪いため医用と同等の手法は現実的ではなく、数学的な工夫が必要となる。そこで、本研究では最小 GCV(一般化交差検証法)基準を用いた Tikhonov-Phillips 正則化法により 40 チャンネルの信号を逆変換し、限定的であるものの MHD 平衡の変化を捕らえることに成功した。図 1 が(a) 低圧力ならびに(b) 高圧力時の SXCT により得られた軟 X 線放射分布である。ただし、図 1(b)のプラズマ周辺部はエラーが大きく、非現実的であるものの、プラズマ中心部(四角で囲った領域)が高圧力化に伴い、右側に移動したことが解る。この結果は数値解析結果とよく一致している。現在、軟 X 線計測の視線数を 60 チャンネルに増強する予定であり、更なる高精度化と MHD 安定性の可視化に向け実験準備を進めているところである。

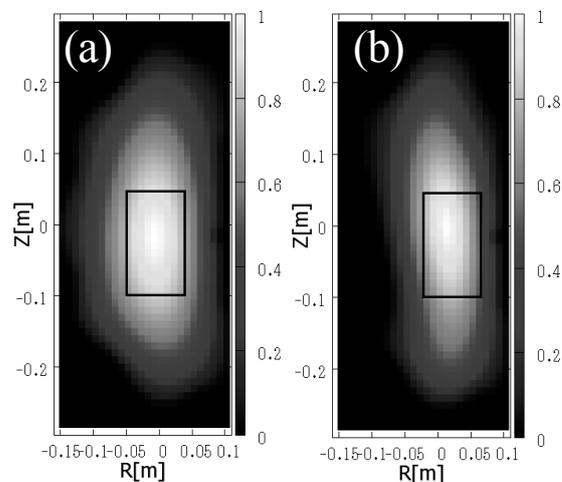


図 1. SXCT による MHD 平衡変化の計測例

## 生存圏診断統御研究系 大気圏精測診断分野（津田研究室）

[http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/tsuda\\_lab](http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/tsuda_lab)

### 「太陽地球環境観測データを1元的に取り扱うデータ解析システムの開発」

地球温暖化に代表されるような地球大気中の全球規模にわたる変動現象は、多様なプロセスが複雑に絡み合った結果として観測される。そのような地球大気における長期変動のメカニズムを解明するには、全球規模の地上観測ネットワークから得られた様々な観測データを組み合わせた総合的な解析が必要になります。しかしながら、これまでは、このような太陽地球環境観測データの多くは、観測を行った機関ごとにデータベース化され、個別の観測・研究に関係する特定分野での利用に留まっていた。また、一部の観測データについては、観測者と周辺の限られた研究者のみによる利用に終始し、公開されないまま記録メディアの中に埋もれるケースもありました。

平成21年度より開始した特別教育研究費プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」(略称:IUGONET)では、京都大学をはじめ、国立極地研究所、東北大学、名古屋大学、および九州大学の5機関が連携し、これらの機関が長年にわたって維持してきた太陽地球環境観測データからメタデータを抽出してネットワーク上で広く共有するシステムの構築と統合解析ツールの開発(図1)を行っています。メタデータは、気温や風速といった観測データそのものではなく、観測項目、観測時刻や位置、測器の種類、データの置き場、データフォーマット、観測者の連絡先などの情報にあたります。このようなメタデータをデータベース化して共有することで、様々な機関に分散して存在する観測データの横断検索を実現し、分野をまたがるデータの取得・利用を容易にします。また、メタデータを介して取得した様々な太陽地球環境観測データを可視化、解析するソフトウェアは、観測データのフォーマットや場所を特に気にせずたった3つのコマンドを打つことで複数の観測データを一つの時系列プロットに描画します。現在、この解析ソフトウェアは25種目の太陽地球環境観測データについて解析・描画できる状態になっています。さらに、この解析ツールに備わっている統計検定パッケージは、相互相関検定、トレンド検定、および高度なスペクトル解析などを容易に行うことができ、長期の観測データに見られる長期トレンドの有無などを客観的に判定します。平成24年度からメタデータ・データベース検索システムと統合解析ツールが公開され、多種多様な観測データを用いた地球大気の長期変動の研究に利用されています。

本研究室では、公開可能な観測データについてのメタデータ抽出と解析ツールの開発に加えて、IUGONETデータ解析システムの太陽地球物理コミュニティへの定着と国際的な利活用の拡大を連携機関と緊密に連絡をとりながら、精力的に進めています。

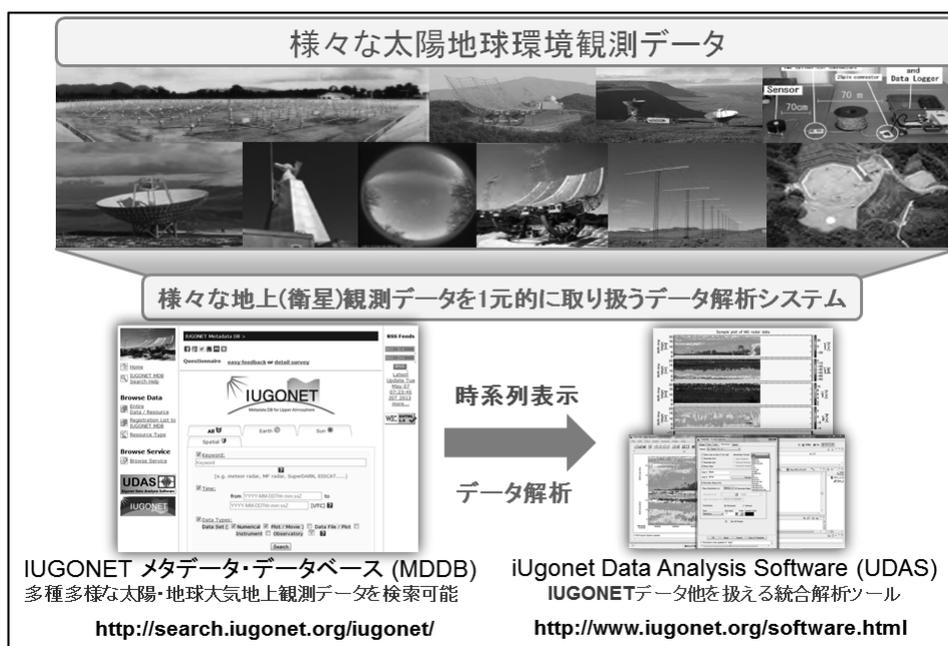


図1：IUGONETメタデータ・データベース検索システムと解析ソフトウェア

## 生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野（大村研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/omura-lab/>

### 「計算機実験で磁気圏対流の逆転を再現」

宇宙空間を正しく理解する上で計算機実験は不可欠である。スーパーコンピュータの性能向上によって計算機実験の高精度化が進み、複雑で多様な宇宙空間変動の本質が明らかになりつつある。本解説では、最新の計算機実験で明らかにした磁気圏プラズマ対流の逆転現象を紹介する。

地球由来の双極子型の磁力線は太陽から吹き付ける超音速のプラズマ流（太陽風）によって太陽とは反対側に大きく引き延ばされる。その結果、磁気圏は彗星の尾のような形状を持つ。力学エネルギーと電磁エネルギーの相互変換を経て、磁気圏の内部ではプラズマの大規模な対流が駆動される。図1の赤い矢印は磁気圏対流の方向を示す。対流は高緯度地方では太陽とは反対向きであり、低緯度地方では太陽向きである。地球の磁力線は南半球側から北半球側へ向かうので、この大規模なプラズマ対流は朝側から夕側に向かう大規模な電場による  $E \times B$  ドリフトと換言できる。磁気圏対流は磁気嵐をはじめとする様々な磁気圏擾乱現象の原動力となり、磁気圏を動的なものとならしめている根本的な原因である。

磁気圏対流は磁気圏尾部に蓄えられている熱いプラズマを内部磁気圏に運ぶ。熱いプラズマの温度異方向性が自由エネルギーとなって電磁波動が自発的に放射され、この電磁波動放射によって電子が光速近くまで効率良く加速される。光速近くの速さをもつ電子の集合を放射線帯と呼び、人工衛星への影響が懸念されている。本研究室ではこの一連のメカニズムを理論と計算機実験によって世界に先駆けて明らかにし、放射線帯形成の基本原則として提唱している。

対流のほかにもサブストームと呼ばれる突発的な状態遷移過程も熱いプラズマを内部磁気圏に輸送することが知られている。サブストームが起これば対流が強くなることは観測から示唆されていたが、両者の因果関係はこれまで明らかではなかった。高精度の電磁流体シミュレーションによって、内部磁気圏ではサブストームの直後から対流が弱まり始め、ついには対流の向きが逆転することを明らかにした（図2）。その理由は以下のとおりである。①磁気圏の尾部で磁力線の再結合がおこる。②磁気張力によりプラズマが地球方向に加速される。③内部磁気圏でプラズマ圧が高まり、反磁性電流が生成される。④反磁性電流の一部はオーロラ帯のすぐ低緯度側の電離圏に磁力線に沿って流入する。⑤電流の連続性を担保するために、背景電場とは逆向きの電場が電離圏で作られる。⑥シアアールベン波によって磁気圏に電場が伝わる。⑦磁気圏対流が逆転する。

放射線帯電子の種となる高温プラズマの輸送過程の詳細が計算機実験によって理解されつつあり、電磁波動による電子加速過程と併せ、放射線帯電子変動の予測に向けたシミュレーション技術の基盤として貢献できるものと期待される。

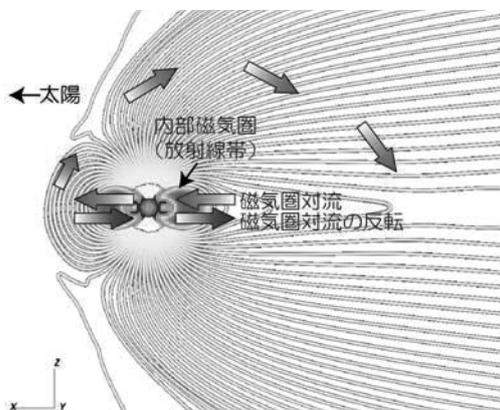


図1 地球の磁力線と内部磁気圏（放射線帯）。  
（磁気圏を横からみた図）

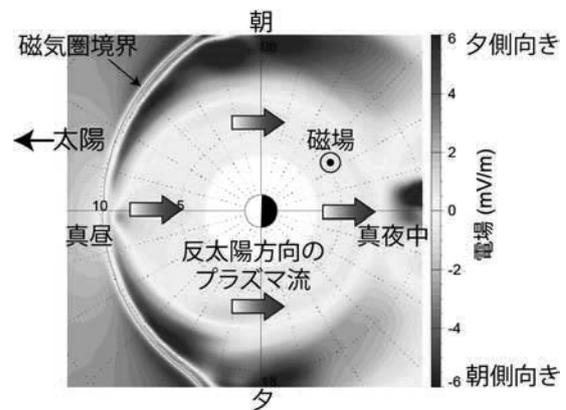


図2 サブストーム直後の電場分布。（磁気圏を上からみた図）

## 国際高等教育院（小山田研究室）

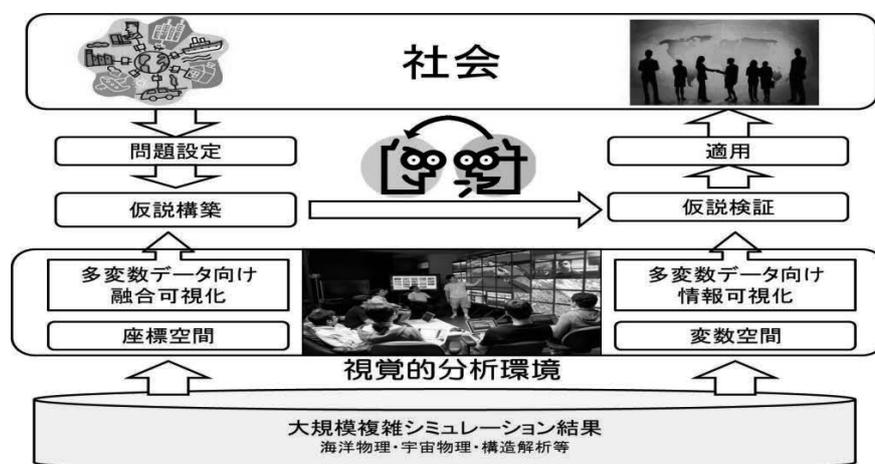
ホームページアドレス <http://www.viz.media.kyoto-u.ac.jp/>

### 「科学的発見を促す視覚的分析技術」

計算科学シミュレーション結果から生成されるビッグデータは、多くの科学的発見をもたらす可能性を持ちながら、「ポスト」や「図化处理」といわれる可視化処理による定型的な現象確認に終わっています。この可視化は、科学的可視化と呼ばれ、シミュレーションモデルが定義される座標空間において実行されています。近年の計算機能力の向上によりシミュレーション結果のサイズは膨大となり、可視化において試行錯誤が困難となることがこの傾向を加速しています。

一方、ソーシャルネットワークや高性能センサーから得られるビッグデータからの知見を発掘するために可視化技術が広く用いられるようになってきました。これらは、情報可視化技術と呼ばれて、変数空間において、変数間の相関を確認するために利用されていますが、計算科学シミュレーション結果の可視化にはあまり活用されていません。

この問題を解決するために、本研究室では、右図に示すように、情報可視化と科学的可視化を連携させ、科学的発見を促す視覚的分析（VA:Visual Analytics）<sup>1)2)</sup> 技術を開発・整備しています。この技術を活用すれば、社会の声を可視化して問題を顕在化し、それらに対する仮説構築・検証を支援し、検証された仮説を社会に還元することを支援することができます。



文科省は、「科学技術イノベーション政策のための科学」に関する国際的な水準の研究・人材育成拠点を構築し、客観的根拠に基づく政策形成のための政策担当者、「政策のための科学」という新たな研究領域の発展の担い手となる研究者等の人材育成を行うことを決め、国内で五つの拠点が採択されました。京都大学も大阪大学とともにそのうちの一つの拠点 (<http://www.stips.kyoto-u.ac.jp/>) を担っており、本研究室もその教育研究に関わっています。科学技術イノベーション政策のための科学では、社会が直面する課題というものを抽出して、その中で科学技術がカバーできるものと社会システムの変革が必要なものと絞り込んでいって、それを政策メニューに落とし込み、社会に提供するという政策策定プロセスに注目しています。例えば、NSF（アメリカ国立科学財団、National Science Foundation）のジュリア・レーン（Julia Lane）は、投資に対してどの程度科学技術イノベーションが起こっているか、実際に投資したお金がどのように有効に使われているかを、VA 技術を使って可視化しています<sup>3)</sup>。社会的課題を抽出し、政策メニューを社会に提供する上で、VA 技術は、大いに期待されています。

#### 参考文献

- 1) J.J. Thomas and K.A. Cook (Eds.), Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics. IEEE Press, 2005.
- 2) Daniel Keim, Jörn Kohlhammer, Geoffrey Ellis and Florian Mansmann (Eds.), Mastering the Information Age – Solving Problems with Visual Analytics, Eurographics Association, 2010.
- 3) J Lane, Let's make science metrics more scientific, Nature 464 (7288), 488-489