

## 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論理生命学分野 (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)

## 生体医工学講座 複合システム論分野（土居研究室）

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

### 「エネルギー局在現象の制御と応用」

エネルギー局在現象とは、エネルギーが空間的に狭い範囲に集中した状態が安定に保たれる現象であり、自然界に普遍的に存在すると言われている。エネルギー局在現象は、連続な媒質においては、ソリトンやブリーザーとして知られている。一方、非線形結合振動子のような離散的な媒質においては、連続媒質の場合との現象論的類似性から、離散ソリトン（DS: Discrete Soliton）や離散ブリーザー（DB: Discrete Breather）と呼ばれる事が多い。より一般的には、非線形局在振動（ILM: Intrinsic Localized Mode）または空間局在モードと呼ばれる。

非線形結合振動子は、例えば結晶格子における分子の振動や生体細胞の活動電位を記述するためによく用いられるモデルであり、適用される物理系は多岐にわたる。非線形結合振動子における ILM は、1980 年代の後半から主に理論的側面から活発に研究され始め、1990 年代末以降では実験的研究も増えてきている。それらの研究の結果、様々な種類の非線形結合振動子において ILM の存在が確かめられており、また、様々な物理現象への ILM の関与が明らかにされつつある。近年では、本研究室も含めたいくつかのグループで、応用に向けた研究も開始されており、今後、様々な分野へ ILM の研究が広がっていくものと考えられる。

本研究室では、非線形結合振動子における ILM の力学的性質を明らかにしようという研究を基礎として、ILM の応用についても研究を行っている。基礎研究としては、ILM の力学的安定性や分岐、移動メカニズムについて研究を行っている。図 1 に ILM の例を示す。図において、質点は自身の変位にのみ依存する力と、隣り合う質点の変位との差に依存する力によって振動する。それらの力が変位に対して非線形に変化する場合、ある条件下で図 1 に示すような ILM が生じる。図では 4 番目の質点が大振幅で振動しているにもかかわらず、その振動が他の質点へは伝わっていないことが分かる。これまでの研究により、ILM の空間的対称性と安定性の関係や、移動のメカニズムを明らかにしており、それらの特性を利用した ILM の操作方法や制御手法などを提案している。

実験的な研究としては、板バネと磁石を用いて非線形振動子を製作し、ILM の励起実験や操作実験などを行っている。図 2 にその非線形振動子の模式図を示す。板バネは強磁性体のものを用いているため、電磁石の作る磁界に依存した非線形特性を復元力に持つ。それらの非線形振動子は結合弦により線形結合されており、全体は電磁アクチュエータにより加振される。図 3 は ILM の操作実験の結果である。一定の加振振幅・周波数の下で、電磁石の電流を操作し、ILM を  $n = 5$  から  $n = 4$  へ移動させることに成功している。

応用研究としては、上述の操作・制御手法に加え、パラメトリック励振による移動型 ILM の生成や、パラメータギャップをもつ結合振動子における移動型 ILM の整流などを行っている。パラメトリック励振では、安定な ILM がパラメトリック共振により不安定化し、不規則に移動することを確認しており、この現象を利用した一定速度の移動型 ILM を生成する手法について研究を進めている。また、結合振動子にパラメータギャップ、すなわち異なる 2 種の結合振動子が接合されている場合、移動型 ILM の反射・透過が移動方向に対して非対称に生じる。この特性を利用して、移動型 ILM の整流を行い、運動エネルギーの流れの制御へつなげる研究を行っている。

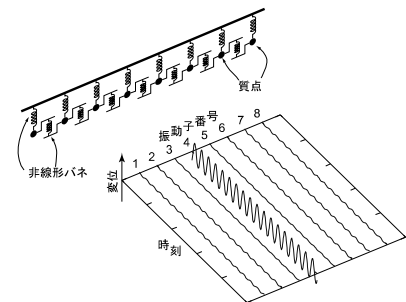


図 1 ILM の例。

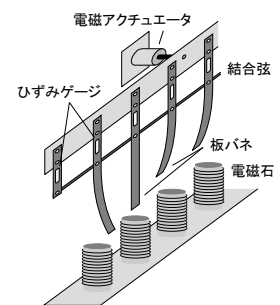


図 2 電磁機械系。

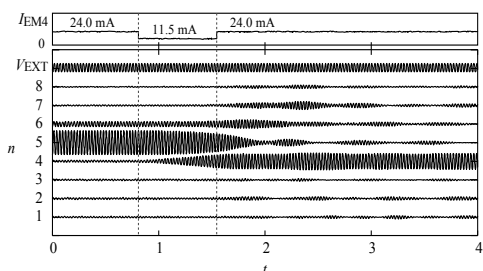


図 3 ILM の操作実験。V<sub>EXT</sub> はアクチュエータの印加電圧、I<sub>EM4</sub> は 4 番目の電磁石を流れる電流。

## 生体医工学講座 生体機能工学分野（小林研究室）

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

### 「光ポンピング原子磁気センサを用いた MR 信号の直接計測に向けて」

当研究室では、生体計測、中でも、生体磁気計測を中心とした脳機能イメージングを主要なテーマとしている。この生体磁気計測や脳機能イメージングでは、pT 以下の極微弱な磁気信号を計測する必要がある。我々の研究室では、このような微弱磁気信号の計測に向けて超高感度な磁気センサである光ポンピング原子磁気センサ（optically pumped atomic magnetometer : OPAM）の研究を進めている。OPAM は、光ポンピングにより生成されたアルカリ金属原子の電子スピン偏極の磁気光学効果を用いて微弱磁気信号を計測する。また、OPAM は光ポンピングのポンプ光方向のバイアス磁場により共鳴周波数を変更することができるため、特定の周波数の信号を計測したい場合には、バイアス磁場を調整する必要がある。

一方、生体イメージング法の 1 つに磁気共鳴画像法（magnetic resonance imaging : MRI）があり、一般的には 1T 以上の高磁場を用いて生体の解剖画像や機能画像が収集されている。しかしながら、金属インプラントを使用している患者への適用が困難などの理由から、低磁場・超低磁場 MRI にも注目が集まっている。超低磁場 MRI では、低周波数の微弱な磁気信号を計測する必要があるが、高磁場 MRI で一般的に使用されているピックアップコイルでは計測が困難であるため、前述の OPAM の MR 信号計測への応用が検討されている。超低磁場 MRI において OPAM を用いて MR 信号を直接計測するには MRI の静磁場中において、OPAM のバイアス磁場を MR 信号の共鳴周波数に一致させる必要がある。

我々の研究室では、モジュール型の OPAM をキャノン株式会社と京都大学が共同で進めている文部科学省のプロジェクト（CK プロジェクト）の一環として開発しており、モジュール型 OPAM のバイアス磁場をモジュールの周囲に巻いたコイルにより調整する方法を検討している（図 1 参照）。このとき、MRI の静磁場を歪ませると MR 信号計測における信号対雑音比の低下や取得画像の歪みにつながるため、OPAM 外の磁場歪みが小さくなるよう能動遮蔽型のバイアス磁場調整コイルを設計することを検討した [1]。ビオ・サバルの法則を用いた磁場分布シミュレーションの結果（図 2 参照）、遮蔽コイルがある場合、磁束が主コイル・遮蔽コイル間に集中し、遮蔽コイル外への影響が小さくなり、MRI 内におけるバイアス磁場調整に有効である事がわかる。今後は、実際に能動遮蔽型バイアス調整コイルを実装し、MR 信号の直接計測、さらに脳磁図等との融合計測が可能なマルチモーダルな MRI システムの実用化を進める。

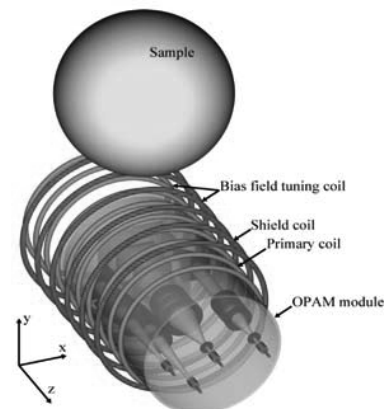


図 1 OPAM の周囲に配置した能動遮蔽型バイアス調整コイル模式図。

#### 参考文献

1. T. Oida, *et al.*, “Actively shielded bias field tuning coil for optically pumped atomic magnetometer toward ultra-low field MRI”, IEEE Sensors Journal, in press.

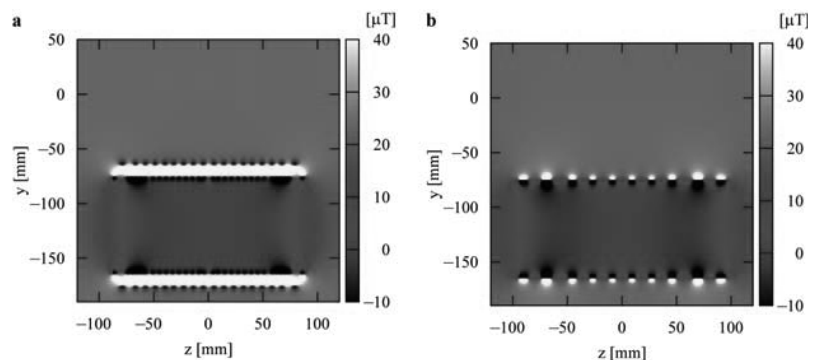


図 2 遮蔽コイルがある場合 (a) および無い場合 (b) の磁場分布。

## 電磁工学講座 電磁回路工学分野 (和田研究室)

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

## 「送り手と受け手が協調した P2P エネルギー伝送」

再生可能エネルギーによる分散電源や EV の充電スタンドなど従来とは異なるエネルギーの流れが増加する中、それらが与える電力フローの急峻な変化が電力システムに与える影響が無視できなくなってきた。これは、電力ネットワークの中では常に需給が等しくなるという制約により、接続された機器が互いに干渉し、好き勝手にエネルギーのやりとりを行うと、ネットワーク全体の電圧や周波数の制御が難しくなっているとも言える。そこで、個々の送り手と受け手が互いに P2P (Peer to Peer) の形で協調することにより、ミリ秒のスケールで同時同量を実現し、ネットワークへの影響の少ない緻密なエネルギー伝送を実現する方法について研究を行っている。

具体的には、エネルギー伝送を担う回路を双方向 AC / DC 変換モジュールと蓄電池を用いて構成し、やりとりする電力フローの情報を送り手と受け手のモジュールが無線通信により共有した上で、同時性を保ってエネルギー伝送を行う。このようなシステムを実現する上で重要となるのが、物理的なエネルギーを扱うシステムと情報通信システムの協調設計であるが、通信に伴う遅延をモジュール同士が互いに把握することにより、ロバストにミリ秒のスケールで同時性を保ったエネルギー伝送を実現している [1]。

簡単な例として図1のような孤立ネットワークを考える。EV からの出力は最大 200W、パワーコンディショナシステム (PCS) の出力は最大 100W として、これらを用いて 300W の冷蔵庫を動作させる状況を AC/DC 変換モジュールと蓄電池で模擬した。このとき、EV と冷蔵庫のタイミングがずれると PCS の容量を超え、ネットワークがダウンすることになる。実際に同時に動作させた場合の通信と電力のやりとりを図2に示す。上図が通信のやりとり、下図が電力のやりとりであり、正弦波は交流の電圧波形を示す。このようなモジュールを用いてシステムを構成することにより、ネットワークの分割・統合、分散した蓄電池を用いた仮想蓄電池、ネットワークの協調診断など、サイバーシステムと物理システムの協調による、環境に応じた自由度の高いネットワークが実現可能になる。

一方で、このようなネットワークは、パワーエレクトロニクススイッチング、低電圧動作の制御回路、低消費電力の無線通信などを含むため、環境によらず安定に動作するロバストなシステムを構成するためには、これらの干渉も考慮したモデル化・設計手法の確立が重要な課題となっており、このような視点でも研究を進めている。

## 参考文献

[1] 枝川、深江、久門、和田, “双方向 AC-DC 変換モジュールを用いた P2P エネルギー伝送システム”, 電気学会電力技術研究会, PE-14-192, 2014.

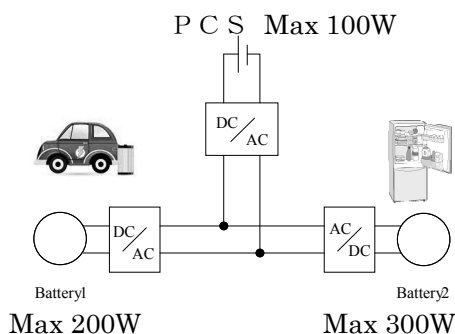


図1 簡単な孤立ネットワーク。

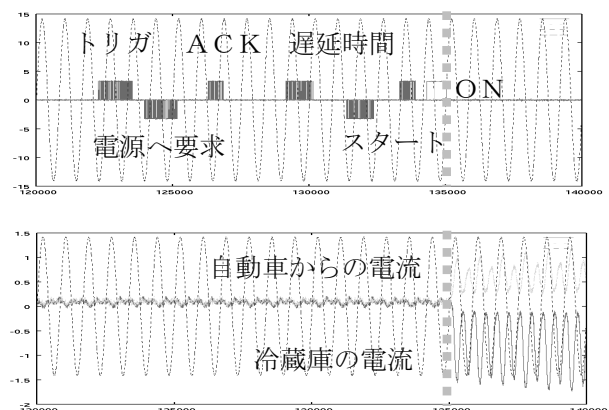


図2 エネルギー授受の同時性(上は通信、下は電力)。

## 電子物性工学講座 半導体物性工学分野 (木本研究室)

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

## [SiC 半導体における点欠陥に関する基礎研究]

変電所等の電力インフラ用変換器には、超高耐圧のパワーデバイスが要求されます。このような電力を変換（交流→直流、直流→交流など）する際、現在は、耐圧 6~8kV 級の Si サイリスタが用いられていますが、変換時の電力損失が大きく、発熱に弱いという問題を抱えています。このような超高耐圧応用では、少数キャリアの注入を活用する SiC（炭化珪素）バイポーラデバイス（PiN ダイオード、サイリスタ、IGBT 等）が有望です。

高電圧应用到に有利な SiC と言えども、実用化の目処が立っているのは約 1kV 級のデバイスであり、10kV 超級のデバイスを実現するためには、結晶およびデバイス作製の両面において、課題が山積しています。少数キャリアの注入を活用するバイポーラデバイスでは、キャリア寿命の増大と制御が重要となります。本研究では、n 型 SiC におけるキャリア寿命制限欠陥が、当該分野で Z センターと呼ばれる深い準位（伝導帯底から約 0.6eV の準位）であることを同定し、高温熱酸化を施すことによって、この Z センター欠陥が消滅することを見出しました。この Z センターと呼ばれる欠陥は、成長直後の SiC 結晶だけでなくイオン注入を行った SiC でも最も高密度に存在する欠陥です。しかしながら、その起源（原子構造）が不明であるため、長年、推測の上に推測を重ねる議論が続けられてきました。今回、この Z センター欠陥が炭素空孔であることを同定しましたので、紹介いたします。

Z センター密度を正確に測定するために、接合容量の過渡解析から欠陥情報を得る DLTS 測定を行いました。また、欠陥に存在する不対電子の性質と対称性を調べるために電子スピン共鳴（EPR）測定を行いました。ここで大切なことは、DLTS 測定と EPR 測定を同一の試料に対して行うことです。一般に、DLTS 測定は低い欠陥密度を有する試料に適しており、EPR 測定は非常に高密度の欠陥を含む試料に適した分析法ですので、不純物ドーピングと電子線照射を活用して、高ドーピング密度でかつ高い欠陥密度を有する試料を複数準備しました。また、下地基板からの信号を排除するために、厚膜エピ成長を行い、基板を研磨により除去した自立膜を準備しました。さらに、欠陥密度の 100  $\mu\text{m}$  以上に亘る深さ分布の精密測定、negative-U と呼ばれる欠陥の特殊性を解決するために低温、光照射下で EPR 測定を行うという困難に挑みました。

図 1 に最も大きな信号強度を示した EPR スペクトルの例を示します。その g 値や対称性から、この信号は炭素空孔 ( $V_C$ ) からの信号であることが分かりました。次に、EPR 測定から得られた炭素空孔のスピンドensityと DLTS 測定から得られた Z センター密度の相関を図 2 に示します。ドーピング密度や欠陥密度の異なる 12 種類の試料全てに対して、ほぼ  $V_C$  密度と Z センター密度が一致していることが分かりました。EPR、DLTS 測定において、他に同じ桁で存在する欠陥はないことも確認しました。この結果、SiC におけるキャリア寿命制限欠陥である Z センターの起源が炭素空孔であることを明確に同定することに成功しました。

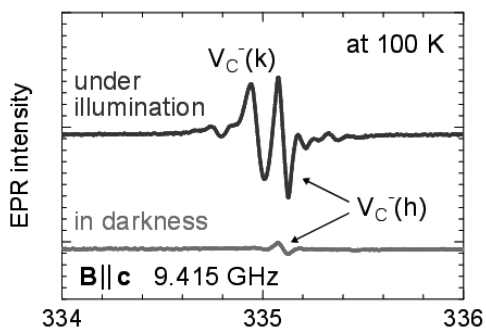
[1] K. Kawahara et al., Appl. Phys. Lett., **102**, 112106 (2013).[2] K. Kawahara et al., J. Appl. Phys., **115**, 143705 (2014).

図 1 炭素空孔の EPR スペクトルの例。

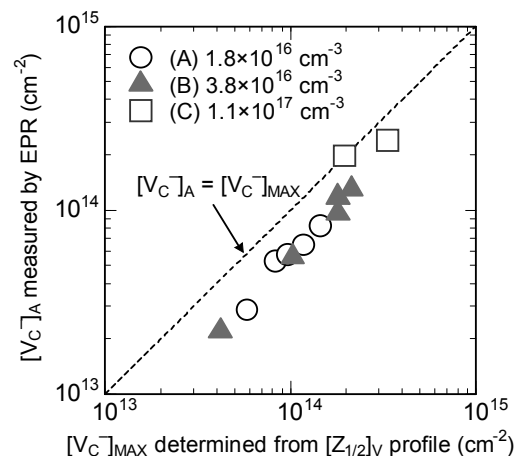


図 2 炭素空孔密度(EPR)とZセンター密度(DLTS)の相関。

## 電子物性工学講座 電子材料物性工学分野

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

## 「原子間力顕微鏡による固液界面系のナノスケール電荷分布計測」

現在、蓄電技術の重要性はかつてない程に高まっており、電気二重層キャパシタやリチウムイオン電池などの大幅な改善が求められています。これら電気二重層キャパシタや二次電池においては、電解質-電極界面における電荷密度や電気二重層の特性がその性能と直接的に関係しています。一方、生体分子における機能発現においても、生体分子-溶液界面の帯電状態や電気二重層が重要な役割を果たしています。しかしながら、微視的スケールで固液界面の電荷分布を実験的に直接評価する手法は存在しないため、新たな固液界面計測法の確立が強く望まれていました。本研究室では、これまでに開発してきた液中動作の周波数変調原子間力顕微鏡 (FM-AFM) を、固液界面系のナノスケール電荷分布計測に応用することに成功しました。以下では、試料基板上に形成される、界面活性剤分子 (SDS) の表面ミセル (自己組織分子集合体) をモデル試料として、ミセル上の電荷密度および電気二重層を測定した結果について紹介します。

FM-AFM では、試料と探針との間にはたらく相互作用力を AFM カンチレバーの共振周波数の変化として検出します。電荷分布解析には定量的な相互作用力計測が必須となりますが、定量解析にはカンチレバーが理想的な調和振動をしていることが前提となります。われわれは、光熱励振と呼ばれる理想的なカンチレバー駆動法を開発することで、この定量測定に成功しました。さらに、フォースマッピング法と呼ばれる全空間の力分布を計測する方法を組み合わせることで、界面電気特性を反映する電気二重層力の 3 次元マップをナノレベルで測定することに成功しました (図 1 (b), (c))。基板上的表面ミセルは、図 1 (d) の模式図に示されるように、直径約 4.8 nm の半円筒状の構造を取っていますが、測定マップは、実際、図 1 (b) (c) のように、この構造に一致しています。さらに、測定された電気二重層力からミセル表面の電荷密度分布を求める計算法を開発し、ミセル頂上部の電荷密度がミセル谷部の電荷密度より大きくなることを示しました (図 3 (e))。本測定法は、今後、さまざまな分野における固液界面系の局所電気特性の測定に応用されていくと期待しています。

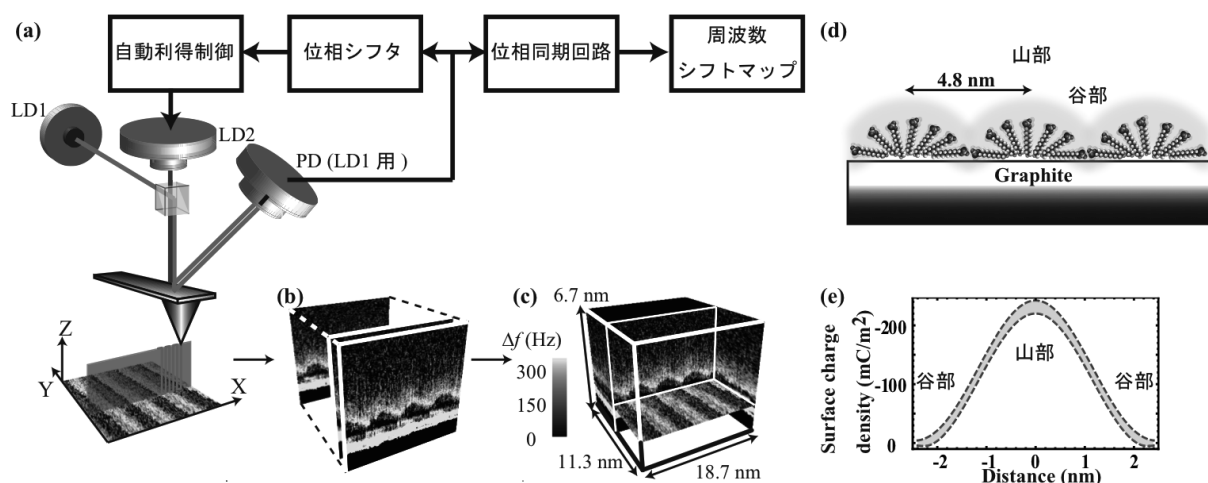


図 1 (a) FM-AFM の装置構成 . (b) FM-AFM で取得される 2 次元周波数シフト ( $\Delta f$ ) マップ . (c) (b) で取得したマップから構成される 3 次元  $\Delta f$  マップ . (d) グラファイト上の SDS の半円筒ミセル . (e) 半円筒ミセル上の電荷密度 .

量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研究室)

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

「高速電気変調可能な狭帯域熱輻射光源」

通常の熱輻射光源では、光源の温度を変化させることで熱輻射強度を変調できるが、それは物体の熱容量で決まる応答時間でしか変化しないため、100Hz以上の高速の輻射強度変調は期待できない。一方、輻射率と吸収率が等しいというキルヒホッフの輻射法則を考えると、温度が一定に保たれた物体であっても、吸収率 (= 輻射率) を高速に変化させることで熱輻射強度が高速変調できると期待される。このような高速強度変調を狭帯域に制御された熱輻射において実現できれば、非分散型赤外 (NDIR) センシングによる気体・化学物質検出を含めた様々な場面で非常に有用であると考えられる。我々はこれまでに、量子井戸のサブバンド間遷移によって物質の吸収帯域をある程度制御した後に、2次元フォトニック結晶の面内共鳴モードと相互作用させることで、中赤外域における狭帯域熱輻射光源を実現してきた。さらに今回、量子井戸層の上下に p 層および n 層を設け、印加するバイアス電圧を変えることで量子井戸層へのキャリア注入・引き抜きを行ってサブバンド間吸収を制御することで、電氣的に高速に熱輻射強度を変調する手法を提案・実証した。

電氣的変調可能な狭帯域熱輻射光源を図1に示す。本構造では、GaAs (24ML)/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As (46ML) からなる10層のn型多重量子井戸層をGaAsのp-i-nダイオード構造の内部に導入し、そこに三角格子空気孔型の2次元フォトニック結晶構造を形成している。200°Cに光源を加熱したときの、逆バイアス0Vおよび10Vにおける輻射スペクトルの測定結果を図2に示す。逆バイアス0Vでは波長9.2μmにおいて輻射率0.74、Q値72という高強度・狭帯域な熱輻射スペクトルが得られている。逆バイアス10V時を見ると、ピーク輻射率は0.24まで減少するが、その他のスペクトルの強度は殆ど変化していないことが分かる。この結果から、狭線幅 (Q値72) の熱輻射を放射率0.5にわたって電氣的に変調できることが示される。さらに本光源の輻射強度変調の周波数依存性を測定した結果を図3に示す。同図より本光源のカットオフ周波数はおよそ1MHzであることが分かる。この値は、温度変化により輻射強度を変調する一般的なパルス型熱輻射光源の変調限界 (100 Hz程度) を4桁近く凌駕する。今後、ウエハ構造の最適化により抵抗・空乏層容量を減少させ、かつ電極をグリッド化してPCから電極までの距離を縮小させることで~10 MHz程度の高速スイッチングの実現も期待される。参考文献：T. Inoue, M. D. Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "Realization of dynamic thermal emission control," Nature Mater. **13** (2014) 928.

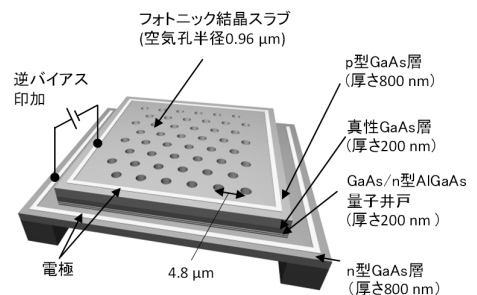


図1 高速電気変調可能な狭帯域熱輻射光源の模式図。

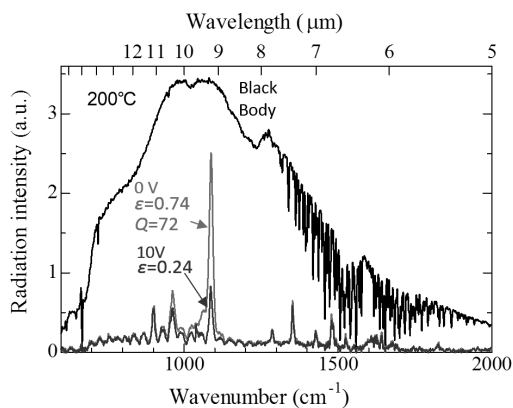


図2 逆バイアス印加による輻射スペクトルの変化。

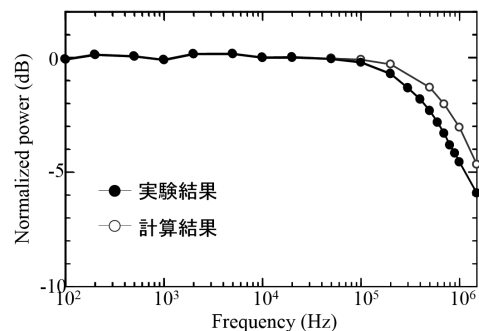


図3 変調パワーの周波数依存性。

## 量子機能工学講座 量子電磁工学分野（北野研究室）

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「光周波数コムを用いた光時計の周波数比計測システム」

原子・分子、あるいはそれらのイオン（以下、原子）の共鳴線に周波数をフィードバック制御した発振器は、きわめて安定かつ正確な周波数を出力し、原子時計とよばれる。セシウム原子のマイクロ波領域の共鳴を用いたセシウム原子時計では、周波数の不確かさが  $10^{-16}$  台に達している、現在の秒の定義にもなっている。一方、光領域の共鳴にレーザーの周波数を安定化すると、周波数の不確かさをさらに小さくすることが可能で、現在  $10^{-18}$  台に到達しつつある。このようなレーザーは光時計ともよばれ、秒の定義の更新へ期待が高まっている。

光時計の不確かさがマイクロ波原子時計よりも優れているため、マイクロ波原子時計との比較ではその周波数の不確かさを評価できない。したがって、2台の独立な光時計を比較して不確かさは決定される。さらに、同種の光時計の比較だけでは周波数値に関しては情報が得られないので、異なる光時計同士を比較し相互の比を測定する。異なる光時計の周波数は見た目で色が異なるほど大きく離れているため、直接ビート周波数を測定できない。それらの比較には光周波数コムを利用する。光周波数コムは、モード同期レーザーから発せられる周期的な光パルス列を周波数軸でみたもので、等しい周波数間隔で発振する多数のレーザー光の集合体となっている。その等間隔性は  $10^{-19}$  台以下と非常に正確なため、コムを仲介して光時計どうしを比較することができる。

2台を比較は、図1に示すように、まず一方の光時計にコムを位相同期させる。すなわち、光時計のレーザー光とコムとのモードとのビート周波数を検出し、このビートの位相が一定となるようにコムをフィードバック制御する。そして、コム別のモードと2台目の光時計とのビート周波数を測定する。

図1の写真は研究室で開発中のシステムで、モード同期チタニウム・サファイアレーザーを自作し、特別な光ファイバーでスペクトル幅を広げたものである。（Web版では回折格子で分光したスペクトルが虹のように見える。）図2左は位相同期中のビート周波数をカウンタで測定した結果で、周波数ゆらぎはゲート時間の逆数以下にはほぼ収まっていて、周波数比較に使用可能となった。図2右は同時計測した別のレーザーとのビート周波数である。位相同期が完全ではないため平均化時間であるゲート時間の逆数で分解能が制限されている。現在、制御の高速化を進めていて、位相同期を完全にして高分解能化を達成する。

不確かさ  $10^{-18}$  の光時計の比較は、基礎物理学実験としても注目されている。原子の共鳴の周波数はいっついで測定しても同じで、2種類の原子時計を比較しても進み具合の違いが検出されることはないと言われてきた。しかし、宇宙のごく初期段階を記述可能とする物理理論では、異なる原子の共鳴周波数は異なる時間変化を示すことが示唆されていて、最高精度の時計を使えば、現在でもわずかに残るその効果を検出できるかもしれない。我々はこれを目標に研究を進めている。

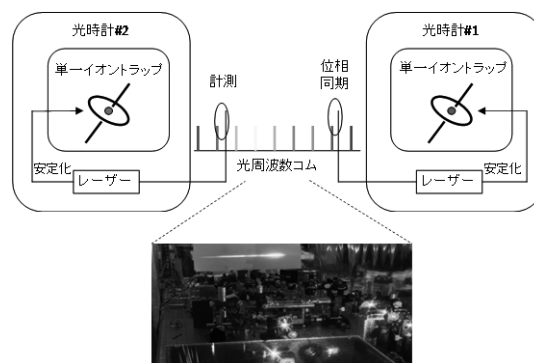


図1 光時計（開発中）の周波数比較の構成。下の写真は光周波数コム装置。

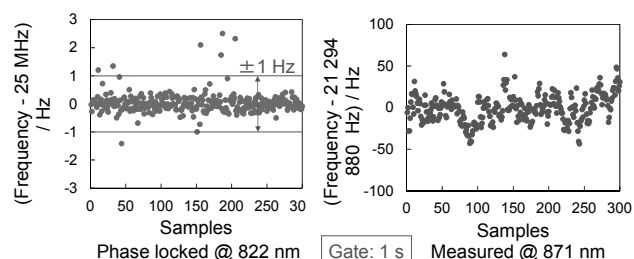


図2 左：レーザーに位相同期したコムとのビート。右：同時測定した波長の異なる別のレーザーとのビート周波数。



知能メディア講座 画像メディア分野 (松山研究室)

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

「視線運動の解析によるコンテンツ閲覧時の状態理解」

電車の中でのウェブ閲覧や街中の大画面デジタルサイネージなど、人が情報端末を通じてインターネット上の情報にアクセスする時間や場面は急速に増えています。しかし、アクセスできるコンテンツは現在爆発的に増加・複雑化しており、自分が欲しいと思っている情報にたどり着くまでに、しばしば多くの時間を費やすことがあります。一方、人は同僚や家族、友人に聞き、教えてもらうことで、適切な情報をしばしば容易に見つけ出すことができます。そこで本研究室では、情報端末などの機械が、利用者の様子を傍らで見ながら意図や興味を推定し、能動的・対話的に情報を提示するようなインタラクティブ・システムの開発を進めています。

このとき、(1) 利用者の音声情報だけでなく、視線や顔向き、表情といった非言語的情報を活用しながら利用者の心的状態（意図や潜在的興味・関心など）を推定し、(2) 適切な情報を自然な間合いで（ディスプレイや音声発話を通じて）提示・応答する、といった機能を実現する必要があります。(1) はパターン認識、(2) は制御の問題となり、多くの事例から適切な認識や制御の方法を見つけるには、機械学習の技術を使うことができます。このような取り組みのひとつとして、以下では特に (1) の問題に焦点を絞り、商品カタログや料理レシピ集といったコンテンツを閲覧している状況において、コンテンツ閲覧時の視線運動情報から、利用者の状態を推定する手法について紹介します。

1. 注視行動の確率モデルに基づく利用者の興味推定

利用者が「自身の興味に駆動されてコンテンツ上の対象を注視する」という一連の流れを確率的生成モデルによって表すことで、利用者の視線からその興味を推定し、次に閲覧・選択する対象を予測する手法を開発しました (図 1, 2)。このモデルでは、たとえば「健康によさそう」な料理に興味があれば、「緑色」や「野菜」といった属性がより重要視され、これらの属性を持つような対象がより多く注視されると考えます。さらに、そもそもどのような側面 (アスペクト) からの興味がありうるかを、多くの利用者のコンテンツ閲覧時の視線データから学習する手法を提案しています。

2. デザイン構造を利用した選択行動フェーズの認識

利用者がコンテンツを閲覧し購買行動を行う際には、まずどのような選択候補があるのかを利用者が「情報取得」するフェーズ、選択行動に移るために「比較・吟味」するフェーズ、さらに「購入対象決定後」の閲覧など、意思決定の過程に応じていくつかの状態に分けられるといわれます。そこで、「コンテンツのデザインや配置構造がどれだけ利用されて見比べが行われているか」に着目し、これを特徴量化することで、利用者の注視対象の属性情報を用いるよりも高精度で、「情報取得」や「比較・吟味」といった状態認識を行う手法を考案しました。

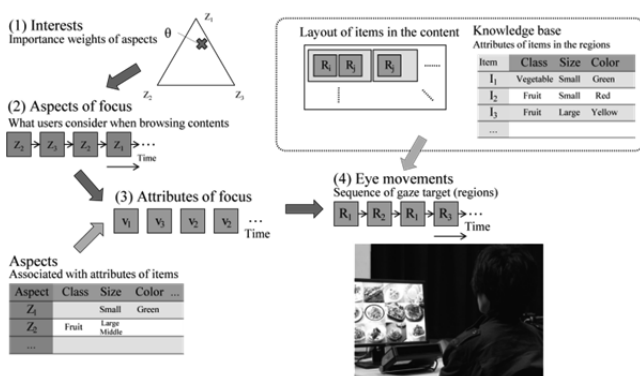


図 1 興味アスペクトに基づく注視行動モデル.

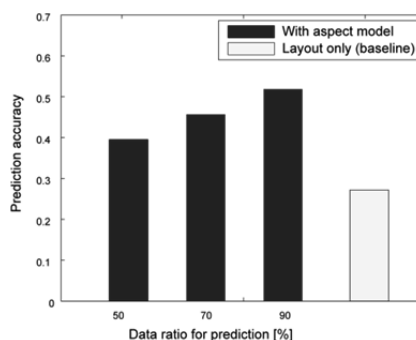


図 2 ユーザの選択アイテムの予測精度. 横軸は予測に用いた視線データの割合.

## 通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研究室）

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

### 「コンテンツとの適切な相互作用を実現するシステムアーキテクチャ」

従来、情報通信ネットワークの研究開発は「いつでも、どこでも、高速に」を目標に進められてきた。しかしながら、本来人々は社会活動において他者との間に距離感を有している (Hall 1969, Davidow 2011)。しかし、社会的な関係は時間とともに変化する人々は地理的にも広く移動するのに対し、情報通信ネットワークの物理インフラは静的・固定的である。そこで、動的にネットワーク空間を生成することを可能にする物理インフラが必要である。そこで、ネットワーク空間をニーズに応じて動的に構成する技術である仮想ネットワーク空間の技術と、人々やコンテンツとの間の社会的な関係を定量化する技術である関係性メトリックの技術を用いた統合システムアーキテクチャを研究している (新熊 新世代ネットワークシンポジウム 2014)。図1のように仮想ネットワーク空間のレイヤが存在し、レイヤ上に併存する仮想ネットワーク空間 NW-A、NW-B、NW-C に人々がそれぞれ属している。各仮想ネットワーク空間の関係性メトリックは属する人々のライフログや関連するセンサーデータから形成される。各仮想ネットワーク空間においてどういったコンテンツが社会的に遠いか近いかは関係性メトリックに基づいて評価される。評価された社会的距離の遠さ/近さに応じて物理ネットワークが制御される。具体的には、社会的な距離が近ければ物理的な距離も近くなるように社会的な距離が遠ければ物理的な距離も遠くなるように制御される。物理的な距離の近い/遠いはコンテンツの取得の容易さや早さといったユーザの体感品質として表現される。これを実現するために物理ネットワークでは、社会的距離の近いコンテンツほどより優先的に処理したりより多くの物理リソース (計算・記憶性能、通信帯域など) を割り当てたりする。

ネットワーク空間は年齢や、文化圏、産業分野といったコミュニティごとに生成することが望ましいが、仮想ネットワーク空間を生成するためには物理ネットワーク上で物理リソースを提供するルータの数を考慮する必要がある。そこで、必要なルータ数を数学的に算出した。結果を図2に示す。合計ルータ数 300、クラスタ係数 0.1、0.4、0.7 の物理ネットワークを用いた。横軸にユーザが直接接続するルータの数、縦軸に仮想ネットワーク 1 つあたりに必要なルータ数を示す。図から、クラスタ係数が小さいとき横軸に対し必要なルータ数は大きく増えるがすぐに飽和する。これは、ルータ間が密に接続されていないため、接続ルータ数の増加に対し中継ノード数が大きく増えるためである。一方で、クラスタ係数が大きいときルータ数はほぼ線形に増えている。これは、ユーザが直接接続するルータの多くが互いに接続されているため、必要な中継ルータが少ないためである。このようにクラスタ係数が小さい、すなわち、ルータ間が密に接続されていない場合、ユーザが直接接続しているルータに対し全体として数倍のルータが必要になる。この問題は、1 ルータあたりに接続するユーザ数が数百、数千といったように十分大きければ許容できるので、ユーザの接続をネットワークの端で集約するような仕組みを設けることで仮想ネットワーク空間の実現性を向上させることができると考えられる。

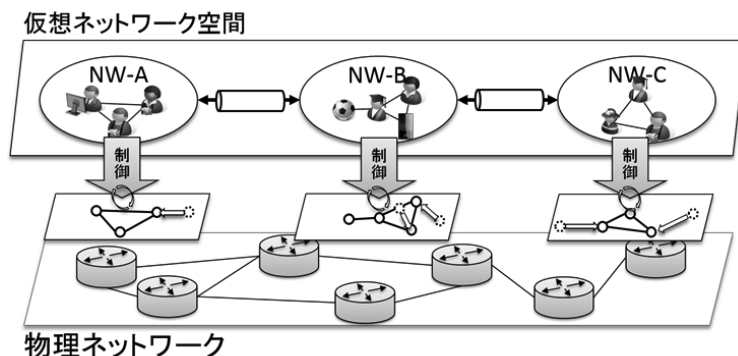


図1 仮想ネットワーク空間の統合アーキテクチャ。

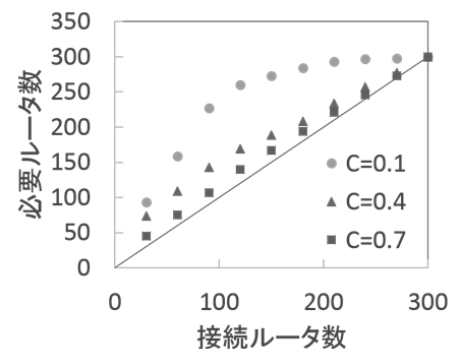


図2 必要な物理ルータ数。

## 集積システム工学講座 情報回路方式分野 (佐藤高史研究室)

<http://www-lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「微細トランジスタの特性劣化を効率的に測定する回路方式」

半導体製造プロセスの進歩により極めて微細なトランジスタの製造が可能となり、集積回路の性能は大幅に向上した。一方で、ゲート絶縁膜は原子数個分相当まで薄くなるなど、微細な構造を用いることに起因する集積回路の信頼性低下が問題となり始めている。トランジスタには様々な故障モードがあるが、負バイアス温度不安定性 (Negative Bias Temperature Instability; NBTI) と呼ばれる特性劣化が主要な要因の一つである。NBTIは、pMOS トランジスタの閾値電圧が緩やかに上昇する現象として観測される。閾値電圧の上昇により集積回路の動作速度が低下し、またはタイミング違反により、正しい演算ができなくなりシステムの誤動作に至る。NBTIは以前より知られている劣化要因であるが、その現象は未だ完全には明らかになっていない。当研究室では、集積回路とそれを用いるシステムの信頼性向上を目指し、その初期段階としてNBTIの正確な測定と劣化機構のモデル化に取り組んでいる。

本稿ではNBTI劣化のトランジスタ毎のばらつき測定について説明する。特性ばらつきの影響は、微細化とともに大きくなってきている。従来は、トランジスタ特性ばらつきの低減とそれによる回路動作速度のばらつきを低減することが主な研究対象であったが、近年の集積回路の広い応用を考慮すると、特性劣化ばらつきの影響低減が重要な研究課題となっている。

劣化ばらつき測定における最大の課題は長い測定時間である。NBTIは通常、年単位で緩やかに進行する現象であり、高温・高電界により劣化を加速させても劣化測定には数時間から数日程度を要する。多数のトランジスタ劣化の統計情報を測定により収集するには、並列化が不可欠である。図1に当研究室が提案したNBTI劣化の並列測定法の概念図を示す。

多数のトランジスタを同時に劣化または回復条件下に置き、並行して閾値を逐次的に測定できる回路構造を提案している。測定時間の大部分を占めるトランジスタ劣化のための電圧印加を、多数のトランジスタに並列に行うため、単体トランジスタの測定とほぼ同じ時間で劣化の統計的情報を得ることができる。

提案方式の有効性を確認するため、65nm [1] 及び180nm [2] のCMOSプロセスを用いて試作を行い、NBTIによる劣化を測定した。図2は180nmプロセスで試作したLSIチップの写真であり、約4000個の被測定トランジスタと図1の並列測定を実現するための周辺回路が約2mm四方の領域に集積されている。図3には、測定で得られた同サイズのトランジスタ600個のNBTI劣化のばらつきを示している。こうした測定により、NBTIによる劣化ばらつきがチャンネル面積に反比例して増加すること等を実験的に明らかにしてきている。これらの知見をモデルに組み込み回路設計にフィードバックすることで、微細なプロセスにおいてもこれまでと同様の信頼性を確保した集積回路設計が可能になると期待される。

## 参考文献

[1] H. Awano, M. Hiromoto, and T. Sato: "BTIarray: a Time-Overlapping Transistor Array for Efficient Statistical Characterization of Bias Temperature Instability," IEEE Trans. Device and Materials Reliability, Vol.14, No.3, pp.833-843, Sep. 2014.

[2] H. Awano, M. Hiromoto, and T. Sato: "Variability in Device Degradations: Statistical Observation of NBTI for 3996 Transistors," in Proc. of ESSDERC, pp. 218-221, Sep. 2014.

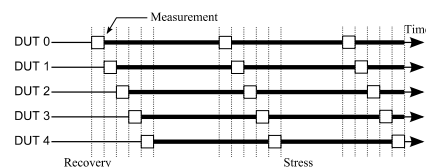


図1 並列測定概念図.

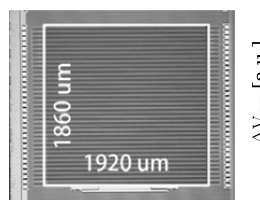


図2 チップ写真.

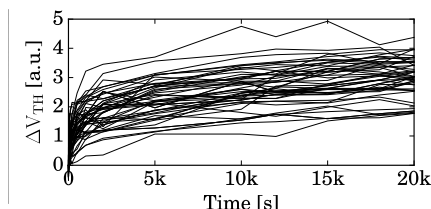


図3 NBTI劣化の測定例.

## 集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤亨研究室）

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

## 「空港保安検査での不審物検出のための超広帯域レーダ高速イメージング技術」

現在、空港での安全確保は複雑な国際情勢等を背景に極めて重要な課題となっています。多くの空港の保安検査場では、手荷物はX線検査により、乗客は金属探知機により不審物が機内に持ち込まれないような措置が取られています。ところが、金属探知機ではセラミック製のナイフなど非金属の武器等が検出されず、保安上の重要な課題として認識されつつあります。近年、空港での乗客の検査に超広帯域レーダによるイメージング技術が導入されつつあります。レーダは、X線検査装置のような人体への被爆もなく、通常の上着を容易に透過し、高い分解能でのイメージングが可能であるという長所が知られています。北米や欧州などの多くの空港でレーダイメージング装置がすでに配備され、空の安全を確保するために活躍しています。

こうした空港保安検査レーダ装置では乗客が静止した状態での測定が必要であるため、検査場での待ち時間が長くなり乗客の利便性の悪化が指摘されています。私たちはこの問題を緩和するために、移動中の人体の高速イメージング技術を開発してきました。移動中の人体の運動がわかっている場合には、その運動の効果を補償することで形状の推定が可能となります(図1)。一方、人体の形状が正しくわかっている場合には、運動を高精度に推定することができます。このように、形状と運動は互いに影響を及ぼし、双方を正しく求めることは容易ではありません。私たちは、人体頭部の位置や統計に基づく平均サイズなど、人体形状についての事前知識を効率的に利用し、レーダイメージングにより得られる画像の明瞭度を指標としたオートフォーカス技術を開発し、移動人体の運動と形状を正しく推定することに成功しました [1]。空港のセキュリティ技術開発を目的とする欧州プロジェクト ATOM (<http://atom-project.eu/>) に参画し、これまでに私たちが開発してきた技術をもとに、レーダによる人体の追跡・イメージング技術を開発しました (図2, 3) [2]。

## 参考文献

[1] Sakamoto, Sato, Aubry and Yarovoy, Proc. European Conference on Antennas and Propagation, 2014.

[2] Sakamoto, Sato, Aubry and Yarovoy, IEEE Trans. Geos. Remote Sens. Vol.53, No.1, 2015.

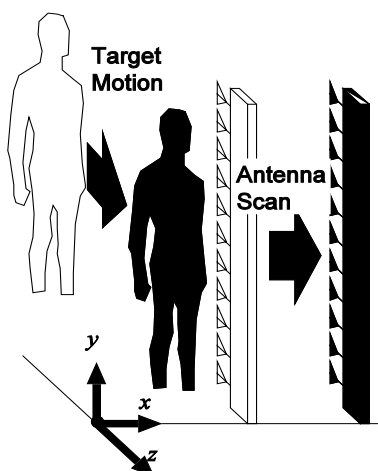


図1 アンテナアレイの走査と同時に乗客が移動するモデル。



図2 測定に使用したマネキンおよび胸部に設置した拳銃。

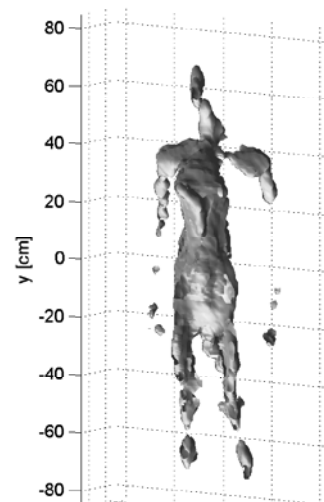


図3 提案技術で推定されたマネキン形状および胸部の拳銃。

## システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研)

<http://ishiilab.jp>

## 「知性の謎に挑む脳コネクトミクス」

論理生命学分野では学習するシステムを対象に (1) 生命や知性を学習するシステムと見立ててモデリングする自然科学的研究、(2) 学習するシステムのモデルを数理的に調べる理論的研究、(3) 学習するシステムを現実世界に役立つ形で作り応用してゆく工学的研究の、3種アプローチを同時に推進しています。

最近力を入れて取り組んでいるトピックに、脳のコネクトミクスがあります。コネクトミクスとは脳における神経細胞間の接続関係を網羅的に調べてゆく研究を指します。人間の脳は約 1000 億個の神経細胞が、1 細胞あたり 1 千～1 万個の細胞と相互にシナプス結合してできた複雑な構造物です。ミクロな目で見ると、各神経細胞は発火状態をシナプス結合を介して伝え合い、さらにシナプス結合の強さは環境との相互作用のもとで変化してゆきます。一方で、マクロな目から見た脳は、感覚入力を処理し、筋骨格系制御へとつなげる情報処理機械であり、処理機能自体が記憶と経験によって変化してゆく学習するシステムです。そこで、脳のミクロな回路構造を決定することで、脳のマクロな機能の理解、ひいては脳の情報処理原理の理解に迫ることができるのではないかと期待されているのです。

しかし、ミクロな脳神経回路の構造を知ることは、全く簡単なことではありません。3 次元的に広がる神経回路の構造を探ることは、顕微鏡の機能・解像度の限界への挑戦です。限界ギリギリの品質の画像データから、回路構造を決定してゆくことは情報処理技術の限界への挑戦です。さらに、決定された回路構造を理解してゆくことは、巨大データ処理と統計技術への挑戦です。

Skibbe 研究員はショウジョウバエの脳全体にわたる共焦点顕微鏡画像に基づき、微細な神経回路構造をトラッキングする手法を開発しました。この手法によって、ショウジョウバエ全脳において、特定の遺伝子を発現する神経回路の構造の同定が可能になり、また、先行研究に比べその精度も向上しています (Skibbe, et al., 2014) (図 1A)。

中江研究員は従来よく調べられてきた神経細胞間の結合ではなく、神経細胞と、別の種類の細胞 (グリア細胞) との結合を、それらの活動から推定する手法を開発しました (Nakae, et al., 2014) (図 1B)。この手法を実際のラットの海馬神経回路における  $Ca^{2+}$  イメージングデータに適用することで、脳が自然に活動している状態では、グリアから神経細胞へは正の結合があるが、逆の影響はあまり見られないことがわかりました。

我々は今後とも冒頭に述べた (1) (2) (3) の全てのアプローチを総動員し、コネクトミクスを進めてゆくためのブレークスルーを求めてゆきます。

Skibbe, H., Reisert, M., Maeda, S., Koyama, M., Oba, S., Ito, K., & Ishii, S. (2014). Efficient Monte Carlo image analysis for the location of vascular entity. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, to appear.

Nakae, K., Ikegaya, Y., Ishikawa, T., Oba, S., Urakubo, H., Koyama, M. & Ishii, S. (2014). A statistical method of identifying interactions in neuron-glia systems based on functional multicell  $Ca^{2+}$  imaging. *PLoS Computational Biology*, **10** (11), e1003949.



図 1 (A) ショウジョウバエの神経回路 (B) マウスのニューロン・グリア相互作用モデル。

## エネルギー物理学講座 電磁エネルギー分野（中村祐司研究室）

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

### 「3次元 MHD 平衡解析に関する研究」

当研究室では磁場閉じ込め超高温プラズマ、とくに軸対称性を持たないトーラスプラズマの閉じ込めに関して理論・シミュレーションと実験解析の立場から研究しています。

超高温プラズマを真空容器内といった比較的狭い領域に閉じ込めるために、プラズマの圧力分布には急峻な勾配が存在し、プラズマはこの圧力勾配による力 ( $-\nabla p$ ) により外に拡がろうとします。これを電磁力 ( $\vec{j} \times \vec{B}$ ) で抑えようとするのがプラズマの磁場閉じ込め装置です。したがって、磁場閉じ込めを考える場合、最初に検討する必要があるのは、これらの力がバランスした状態 ( $-\nabla p + \vec{j} \times \vec{B} = 0$ )、すなわち磁気流体力学的 (Magnetohydrodynamics; MHD) 平衡を見つけることです。この MHD 平衡の式は見た目は簡単で、たとえば1次元計算が可能な無限平板状プラズマに対しては容易に解析解を求めることができるのですが、2次元計算が必要なトカマクプラズマのようなドーナツ状の軸対称トーラスプラズマに対してはとたんに計算が難しくなり、特殊な解析解を除いて一般的にはコンピュータによる数値計算が必要となります (平衡計算は非線形問題となり、繰り返し計算が必要です)。

トーラスプラズマでも軸対称性を持たないヘリカル系プラズマの平衡計算では、3次元計算が必要となるため、数値計算もさらに難しくなります。理論的にも対称性が欠如 (解析力学でいうサイクリック座標が欠如) した3次元配位では理想的な MHD 平衡は存在しないと考えられており、その解析は質的にも量的にも大変です。しかし、近年のトカマク研究ではトロイダル磁場 (TF) コイルに起因する小さな磁場の非軸対称性だけでなく、プラズマの安定性を目的としたコイルなど非軸対称な制御用コイルが用いられることがあり、非軸対称な3次元 MHD 平衡の解析の重要性が高まっています。

そこで、私たちの研究室では、ヘリカル系プラズマやトカマクプラズマなどのトーラスプラズマを対象に、3次元 MHD 平衡解析に関する研究を進めています。とくに最近は、3次元 MHD 平衡計算コードの高精度化、新しい3次元 MHD 平衡計算アルゴリズムの開発、トカマクプラズマのディスラプションにともなう MHD 平衡の3次元ダイナミクス解析とその制御に関する研究を進めています。

平衡解析の例として、3次元 MHD 平衡コードで得られた国際熱核融合実験炉 (ITER) の磁気面と磁場ベクトルを図1に、様々な非軸対称コイルが作る磁場を考慮した ITER の3次元 MHD 平衡計算から得られた非軸対称性な磁場強度分布を図2に示します。

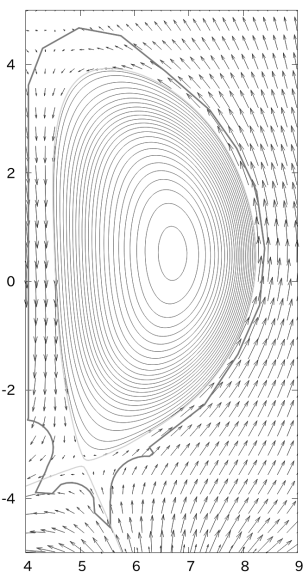


図 1

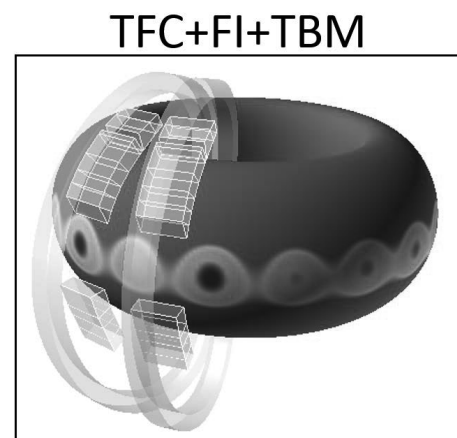


図 2

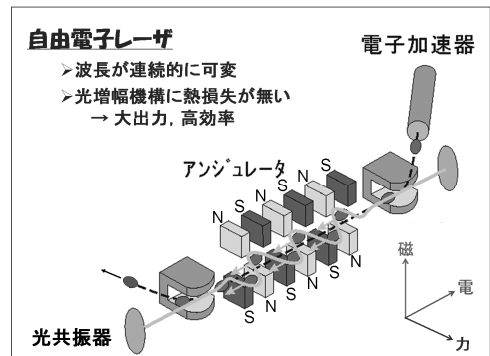
エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

[http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index\\_j.html](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html)

「先進量子放射源を実現するための相対論的高輝度電子ビームの生成」

本研究室では、荷電粒子と電磁界との相互作用の高度・高精緻制御による先進科学技術の開発を目指して、電磁波によって生成・加熱された核融合プラズマの閉じ込め性能の改善と理解、小型の核融合装置による高エネルギー粒子の発生とテロ対策技術などへの応用や、ここで紹介する高輝度・高エネルギー電子ビームの生成とそれを用いた量子放射エネルギーの発生などの研究を行っています。

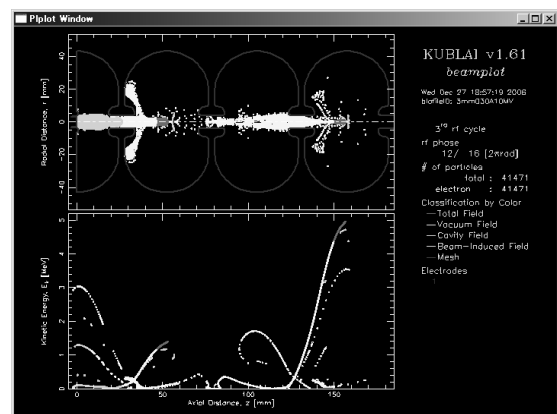
相対論的効果が顕著となる高エネルギーの電子ビームを用いることによって、従来の光源にはない機能、波長領域、強度の新しい光源が実現します。例えば、そのような先進量子放射源の代表である自由電子レーザー（Free Electron Laser: FEL）は、右上図のように電子加速器、アンジュレータ、光共振器から成ります。電子加速器で生成された高エネルギー電子ビームは、アンジュレータの周期的交代静磁場の中を蛇行し、その蛇行周期（数 cm）に応じた波長の電磁波を放出しますが、このとき相対論的ドップラーシフトの効果により、前方に放出される電磁波（自発放射光）の波長は電子エネルギーに応じて THz から可視、X 線領域にも達します。さらに、蛇行する電子は横方向の速度成分を持ちますので、自発放射光の横方向電界と相互作用してエネルギーの授受が起り、条件が整えば光の増幅が起こって最終的に光はコヒーレントなレーザーになります。



自由電子レーザー（FEL）の概念図と特長。

従来のレーザーは原子や分子に束縛された電子が高エネルギー準位から低い準位に遷移するときに発生しますが、FEL は言わば準位を人工的に作り出すことによって得られます。このため、広い波長領域でのコヒーレント光の発生が可能で、右上図中に示したような従来のレーザーにない特長があります。私たちが宇治キャンパスで開発してきた中赤外 FEL は、5~20  $\mu\text{m}$  の波長領域にて連続的に発振波長が可変で、分子の指紋領域をほぼカバーしています。波長選択が可能で、しかも 1 psec を下回る極短パルス光ですので熱的格子振動励起の影響を最小限に抑えることができ、例えば SiC など固体の特定の格子振動だけを選択的に励起することができます。

このような FEL を初めとする量子放射光は、相対論的電子の運動エネルギーを、より付加価値の高い量子放射エネルギーに無損失で変換したものとも言えますので、量子放射源の高度化のためには自ずと、電子ビーム発生・輸送技術の高度化が求められます。本研究室では、このような先進量子放射源を実現するための高輝度電子ビーム生成の研究を行っており、数値シミュレーション研究においても世界をリードする研究成果を挙げてきました。例えば、導体近傍の鏡像効果で電子ビームに働く非線形な空間電荷力は、従来は電子ビーム輝度を低下させると認識されてきましたが、最近の我々の数値シミュレーション研究で、ある条件が整うと逆に輝度を向上させることが見出されました。この新奇な現象を理解し、上手く利用すれば、従来の常識を覆すような高輝度の電子ビーム生成に繋がる可能性があると考え、数値シミュレーション研究と理論解析を進めています。



本研究室で開発した有限要素法粒子シミュレーションコード。

## エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野（水内研究室）

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/plasmak/>

### 「Nd:YAG トムソン散乱計測法による核融合プラズマの電子温度・密度分布計測」

私たちの研究室では、磁場閉じ込め方式の核融合炉実現に向け、環状磁場閉じ込めによる高温・高密度プラズマ生成・維持に関する基礎研究を進めています。特に、本学創案になる先進ヘリカル磁場配位、ヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位を持つプラズマ実験装置ヘリオトロンJによる研究を、他の関連研究室と協力して進めています。

プラズマ性能向上のためには高温・高密度プラズマの分布制御が重要な課題の一つであり、プラズマの温度、密度分布時間変化の詳細なデータが不可欠です。そこで、私たちは、高繰り返し発振可能なNd:YAG レーザによるトムソン散乱計測システムの開発を行ってきました。同計測はプラズマ中に入射したレーザ光の電子による散乱（トムソン散乱）光のドップラーシフトから電子温度を、散乱光量から電子密度を知る方法です。今回構築したシステムはトラス斜め下方からレーザを入射し、プラズマからの後方トムソン散乱光を水平方向から大型凹面鏡（直径80cm）により散乱光を集光します（図1）。ヘリオトロンJで生成されるプラズマ（放電維持時間：約0.2s）の温度、密度分布の時間変化計測のため、繰り返し発振周波数50HzのNd:YAG レーザ（発振出力550mJ）を二台使用し、二つのレーザを交互に発振させることにより、通常10ms 間隔でプラズマ分布をモニターしています。発振タイミングを調整することにより、より短時間での分布変化を計測することも可能です。

現在、ヘリオトロンJでは、プラズマへの粒子供給法やその条件を制御することで、プラズマ性能を向上させる研究を精力的に行っています。その中で、超音速分子ビーム入射（SMBI: Supersonic Molecular Beam Injection）による粒子供給法も試みています。SMBIでは、高密度を得るための多量の粒子を、超音速ビームとして短時間で供給することにより、従来手法で問題となるプラズマ性能劣化を防ぎ、高密度・高温プラズマ生成を可能とすることを狙っています。中性粒子ビーム入射加熱中のプラズマにSMBIによる粒子供給を試みた際の、SMBI直前（ $t = 230\text{ms}$ ）及びSMBI後（ $t = 240, 250, 260\text{ms}$ ）の温度、密度分布を図2に示します。SMBI直後には中心密度が大きく上昇し、その後周辺密度も上昇して行くのが分かります。一方、電子温度に関しては、SMBI直後は入射粒子による冷却効果のためプラズマ全体で一時的な低下が見られますが、その後上昇に転じ、260msではSMBI前と同程度の温度にまで回復しています。これにより、SMBIによってプラズマ蓄積エネルギーを大幅に上昇できました。今後は計測された分布情報を元に、プラズマの熱や粒子の輸送を解析していく予定です。



図1 トムソン散乱計測システムの入射及び集光部。

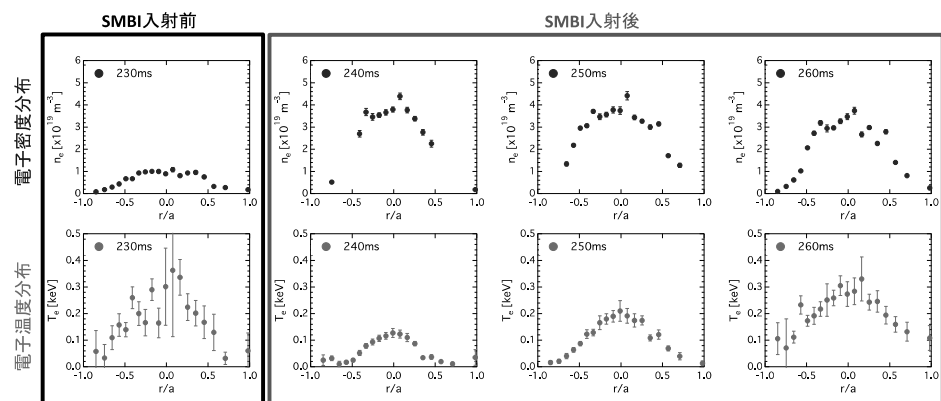


図2 SMBIによる粒子供給時のHeliotron J プラズマの電子密度・温度の時間発展。



生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏航行システム工学分野 (山川研究室)  
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>  
 「宇宙空間電磁環境観測用小型センサープローブ」

宇宙空間へと打ち上げる衛星や探査機は、常にリソースとの戦いです。サイズ、重量、電力を、いかに小さく、軽く、省電力にするか。最終的なデザインが決まるまで、あるいは、ものを作り始めてからでもこれらのリソースとの戦いは続きます。我々の研究室では、宇宙空間の電磁環境を探査するためにプラズマ波動観測器を開発して衛星やロケットに搭載し観測を行っています。プラズマ波動観測器の場合は、観測帯域の絞り込みや低ノイズ回路の実現のために、どうしても、フィルタや低ノイズアンプなどアナログ回路の規模が大きくなってしまいます。通常、装置の小型化・軽量化にはデジタル化と処理のソフトウェア化が大きく寄与しますが、プラズマ波動観測器の場合には、アナログ部の小型化がキーとなっていました。そのため山川研究室では、アナログ ASIC 内にプラズマ波動観測器アナログ部を実現する取組を、10年ほど続けてきました。アナログ ASIC はデジタルよりも、技術的な難しさを伴うため、その実現にはずいぶんと時間がかかりましたが、それでも電磁界6成分を5mm角のベアチップ内に収めるところまで到達しました。

そして我々はそのチップを用いることにより、従来の科学衛星では実現できない多点同時観測を実現できるセンサープローブの開発を行いました。科学衛星による1点観測は、時間変化と空間変化の分離ができないことから、その欠点を補うべく複数衛星による編隊観測が国際的に一般になりつつあります。ただ、複数衛星といってもロケットの能力には限りがありますから、せいぜい多くて5機程度です。空間的なサンプリングを考えても、とても十分とはいえません。そこで、プラズマ波動だけでもより多くの点で観測できるように、先に開発したプラズマ波動チップと、小型化した電磁界センサー、小型無線装置の組合せを小型の筐体に組込んだシステムの開発を行いました。小型センサープローブと呼ぶこのシステムは、電源、観測、通信とすべての機能を、8cm角の筐体内におさめ(全体は11cm角)、それ単独で電磁界6成分のプラズマ波動をとらえることができます。図は今年度試作したプロトタイプです。センサーは磁界用にループアンテナ3軸が筐体を囲むように装着されています。電界用センサーはCFRPでできており宇宙空間に放出される時は、筐体周辺に巻かれた状態になっていますが、放出後にコマンドによって自己伸展し1.6m tip-to-tipの3軸ダイポールアンテナとなります。このような小型プローブであれば宇宙空間に数10個単位で放出することができ、科学衛星を遙かに超える多点で宇宙空間を探査することができます。私たちは、このシステムをMSEE (Monitor System for space

Electromagnetic Environments)と呼んでいます。イメージとしては、竜巻の内部構造を観測しようとする四苦八苦する映画 Twister に出てくる Dorothy システムの宇宙版です。このセンサープローブを来年度にはロケット実験で宇宙空間へと実際にもっていく計画を立てているところです。センサープローブは、プラズマ波動観測チップ設計・製作とシステム全体の設計を京大が行い、軽量磁界センサーは金沢大との共同開発です。またCFRPの自己伸展電界アンテナでは、サカセアドテック(株)、小型無線器では沖電気工業(株)、センサープローブ全体の設計・アセンブリは明和システム(株)の協力を得て進めています。

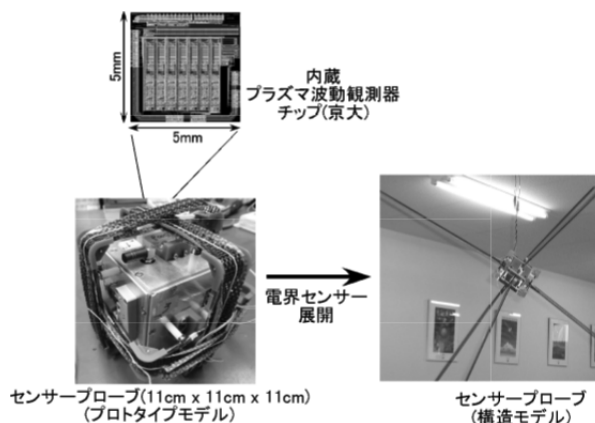


図 センサープローブと京大開発のチップ。

## 生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野（篠原研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>

### 「マイクロ波を用いた震災瓦礫処理システムの開発と実証実験」

当研究室では、宇宙太陽発電所 SPS (Space Solar Power Satellite/Station) [1] の実現を目指し、SPS で用いるマイクロ波無線電力伝送技術 [2][3] を中心に研究開発を行っている。マイクロ波無線伝送では大電力のマイクロ波を発生させることがあるため、大電力マイクロ波発振器が必要である。当研究室では大電力マイクロ波発振器の用途拡大のためにマイクロ波化学の研究 [4] を行っている。電子レンジのようにマイクロ波を熱源として利用して材料生成等の化学反応を促進するための研究である。

2012-13 年度に当研究室では環境省環境研究総合推進費による研究事業として「マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理—アスベスト飛散とダイオキシン発生防止—」を行った。災害に見舞われた地域では、家屋や様々な瓦礫を始めとする多量の物質の処理が復興への大きな課題である。この目的に対して、京都大学、中部大学、東北大学、上智大学らの研究グループにより、マイクロ波-燃焼ハイブリッド加熱炉による、瓦礫（アスベスト含有スレート瓦等）の無害化・再資源化処理に関する研究開発を行った。実際に宮城県名取市に加熱炉を設置し、現地で瓦礫処理実験を実施した（図 1） [5]。その結果、2 トン以上 / 日でのアスベスト無害化の実証（図 2）に成功した。

また、学会への貢献として、当研究室では日本電磁波エネルギー応用学会 JEMEA (Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications) 等のマテリアル分野の研究者との連携を深めている。2014 年 7 月には（独）日本学術振興会 電磁波励起反応場第 188 委員会の設立メンバーとして参加し、マイクロ波化学分野の発展を目指した活動を行っている。



図 1 現地に設置されたマイクロ波-燃焼ハイブリッド加熱炉。

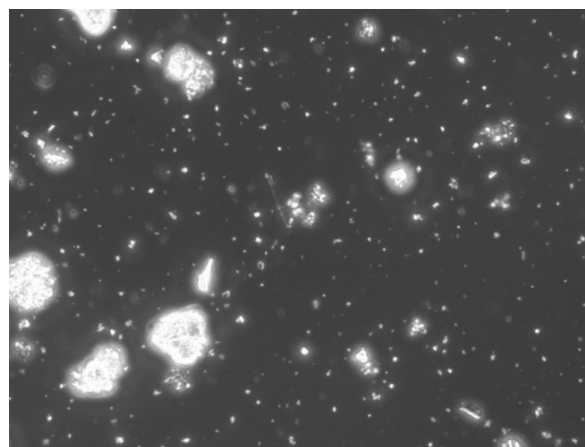


図 2 マイクロ波処理後のスレート瓦の顕微鏡写真。(アスベストが処理され、無害化されている)

#### 【参考文献】

- [1] 篠原（監著），“宇宙太陽発電（知識の森シリーズ）”，オーム社，2012.7
- [2] Shinohara, N., “Wireless Power Transfer via Radiowaves”, ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc., Great Britain and United States, 2014.1
- [3] 篠原，小紫，“ワイヤレス給電技術”，科学技術出版，2013.2
- [4] 堀越（監著），篠原，滝澤，福島（著），“マイクロ波化学”，三共出版，2013.12
- [5] Kashimura, K., et al., “Rapid and In-Situ Transformations of Asbestos into Harmless Waste by Microwave Rotary Furnace - Application of Microwave Heating to Rubble Processing of the 2011 Tōhoku Earthquake - ”, Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Mgmt, 2014, in print