

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

電子物理工学講座極微真空電子工学分野

電子物理工学講座プラズマ物性工学分野

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)

デバイス創生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(吉田研)

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)

#### 高等教育研究開発推進センター

情報メディア教育開発部門(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)

システム基礎論講座 自動制御工学分野 (萩原研究室)

<http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

「むだ時間系の微分差分方程式表現とフィードバック系表現：相互関係と汎用的モデル化能力」

1. むだ時間要素とむだ時間系

入出力の間で純粋な遅延のみを伴い、波形の歪みを伴わない（すなわち、入出力信号  $u, y$  に対して  $y(t) = u(t-h)$  が成立する）動的システムは、むだ時間要素と呼ばれ、 $h > 0$  はむだ時間と呼ばれる。物質やエネルギーの移動時間、長距離情報伝送における伝送遅延、生体や社会・経済における外部刺激から反応までの遅延時間などをモデル化するものとして、むだ時間要素は頻繁に現れる。

しかし、単純な入出力関係とは裏腹にむだ時間要素は、伝達関数が有理関数とはならない、動特性は常微分方程式でなく偏微分方程式で記述される、有限次元システムではなく無限次元システムとなる、などの特徴があり、これを含むむだ時間系の数学的取り扱いも何かと厄介である。たとえば、中立型と呼ばれるタイプのむだ時間系の挙動はとくに複雑であり、安定性がむだ時間の長さの微小変動に関して連続でないといったことが一般には生じ得ることからも、その複雑さが垣間見られる。

2. むだ時間系の表現法——微分差分方程式表現とフィードバック系表現

一般的なむだ時間系の数学的表現として様々なものが考えられているが、古くから研究されてきた表現形式として、微分差分方程式がある。以下、話を簡単にするためもっとも単純な、むだ時間をひとつだけ持つ線形時不変系の場合に限る。この場合の微分差分方程式は  $\dot{x}(t) = Jx(t) + Kx(t-h) + Lx(t-h)$  と表現され、初期条件としては  $-h \leq t \leq 0$  におけるベクトル値関数  $x(t)$  の値（初期関数）を与えることになる。 $K \neq 0$  のとき、このむだ時間系は中立型と呼ばれる。一方、フィードバックの視点からは、図1のような（有限次元）線形時不変系  $F$  とむだ時間要素  $H$ （むだ時間の長さ  $h$ ）からなる閉ループ系としてむだ時間系を扱えると都合がよい。しかしながら、このような異なる表現形式の相互関係や、表現形式の違いがむだ時間系のモデル化の成否をどのように左右するかについて、明確かつ完全な議論はほとんどなされてこなかった。これは不可解にも思えることであるが、両者は当然等価であると信じられてきたことが理由と考えられる。しかしながら、微分差分方程式表現は、フィードバック系表現よりもむだ時間系のモデル化における汎用的能力としては一般には劣ることなど、さまざまな新たな知見が本研究により明らかにされている。

3. 微分差分方程式の連続連結解・擬似連結解とフィードバック系表現におけるその意味

上記を含めて、本研究の成果を概観する上で鍵を握るのは、微分差分方程式の解の定義そのものから再考するという視点である。これにより、両表現形式の違いが意味するところの全容を明らかにしている。従来の研究ではほとんど考慮されなかった不連続な初期関数の場合も考え、 $t \geq 0$  では連続である  $x(t)$  のみを解として許容する立場（連続連結解）と、形式的書き換えにより得られる  $d/dt[x(t) - Kx(t-h)] = Jx(t) + Lx(t-h)$  という方程式を通し、 $x(t) - Kx(t-h)$  が連続関数となるような  $x(t)$ （このとき一般に  $x(t)$  は不連続となる）のみを解として許容する立場（擬似連結解）を導入している。中立型微分差分方程式  $\dot{x}(t) = \dot{x}(t-h)$  で初期関数が  $x(t) = 0$  ( $-h \leq t < 0$ )、 $x(t) = 1$  ( $t = 0$ ) の場合の連続連結解、擬似連結解を図2に示しておく。本研究では、もとの微分差分方程式と初期関数から図1の  $F$  と初期条件を適切に定めることで、擬似連結解はこのフィードバック系の  $y$  の挙動を表現でき、連続連結解は  $F$  の内部

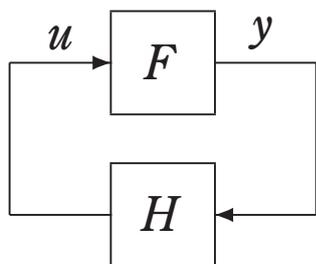


図1 フィードバック系表現

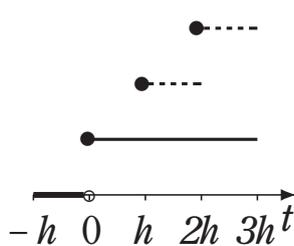


図2 連続連結解（実線）と擬似連結解（破線）

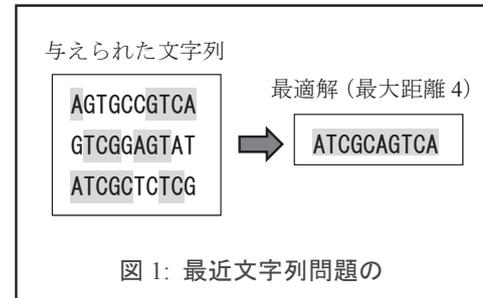
信号（状態変数）の挙動を表現できる（が、その逆に、与えられた図1のシステムの挙動をあらゆる初期条件のもとで微分差分方程式により表現することは、必ずしも可能でない）ことを明らかにしている。このような基礎的成果は、微分差分方程式の意味をより明確化のみならず、当研究室で導入したむだ時間系のモノドロミー作用素理論の研究と密接に関係している。

## 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/>

### 「最近文字列問題の近似解法」

当研究室では様々な最適化問題に対し、効率的な解法を構築する研究を行っています。その中で、今回は最近文字列問題 (Closest String Problem) に関する研究を紹介します。最近文字列問題とは、与えられた文字列になるべく近い文字列を求める問題で、遺伝子列の解析やたんぱく質の構造解析などの分野において研究されています。ここでいう「近い」文字列とは、文字の食い違いの個数 (ハミング距離) が小さい文字列のことを指します。たとえば、文字列「ATTTCG」と「AGTAG」は2番目と4番目の文字が異なり、ハミング距離は2ですが、「ATTTCG」と「ATACG」は3番目の文字しか異ならず、ハミング距離は1ですので、「ATTTCG」により近いのは「ATACG」の方です。最近文字列問題は、(同じ長さの) 複数の文字列に対し、ハミング距離の最大値を最小化する文字列を求める問題です。この問題の例を図1に示します。



最近文字列問題は組合せ最適化問題であり、すべての解の候補を列挙すれば最適解を求めることができますが、その候補の数は、文字列長を  $L$  とすると単純計算で  $4^L$  通り (遺伝子列の場合) もあります。したがって、単なる数え上げで解を求めるのは、文字列が長くなると計算時間がかかりすぎてしまいます。また、より効率的に最適解を求める方法も研究されているものの、現実的な計算時間で解が求まるのは短い文字列に限られています。そこで、最適ではなくてもよいから、ある程度良好な解を高速で求めるため、近似解法の研究が行われています。

文献 [1] では、ラグランジュ緩和とタブー探索法を組合せた効率のよい近似解法を提案しました。この解法では、最近文字列問題が整数線形計画問題として定式化できることに着目しました。この定式化において、制約条件の一部をラグランジュ緩和し、ペナルティ項として目的関数に組み込みます。すると、得られるラグランジュ緩和問題は簡単に解くことができ、しかも、その最適解はもとの問題の近似解にもなっている、というありがたい性質を持っています。そこで、ラグランジュ乗数を適切に調整しながら緩和問題を解くことで近似解を求める、という解法を構成しました。ただし、この近似解がもとの問題に対しても良好な解となっている保証はないので、メタヒューリスティクス的一种であるタブー探索法を用いて解をさらに改善することにしました。そして、数値実験を行って、従来解法よりも高速に良好な解が得られることを示しました。たとえば、文字列長 5000、文字列数 50 の場合、最適解からの誤差が 2 以内の解が数十秒程度で求まります。ラグランジュ緩和問題を同時に解いているため、最適値の下界値が求まり、したがって近似解の目的関数値 (上界値) と併せて最適値の上下界がわかる、という点もこの解法の特長の一つです。もちろん、近似解の目的関数値と下界値が一致した場合、その解の最適性が保証されます。

現在は、ハミング距離の最大値が最小となる部分文字列を抜き出すという、最近文字列問題をより一般化した最近部分文字列問題 (Closest Substring Problem) に対し、高速な解法を構成する研究を行っています。

[1] S. Tanaka: A Heuristic Algorithm Based on Lagrangian Relaxation for the Closest String Problem, Computers & Operations Research, vol. 39, no. 3, pp. 709-717 (2012).

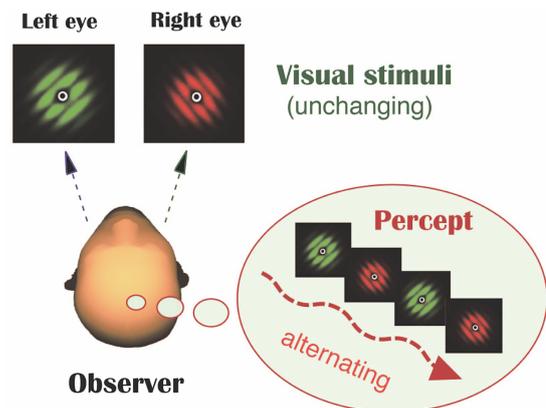
## 生体医工学講座 生体機能工学分野 (小林研究室)

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

### 「脳機能イメージングにより視覚的アウェアネス・意識の脳内機構を探る」

生命とは何か？ 時間とは何か？ これらと並んで人類に残された根源的な謎として“意識とは何か？”がある。近年、人間の様々な高次脳機能が次第に解き明かされ、これまで自然科学的研究の範疇から除外されてきた“意識”についても研究対象として、その謎に迫ろうとの機運が高まっている。意識は、定義すること自体が論争になり、そのため主に哲学の問題と見なされ長らく自然科学の研究対象として敬遠されてきた。しかし、我々は意識とは何かについて悩むのではなく、ある特定の意識体験と相関のある神経過程と無い過程の差は何かを探るべきとの立場から、脳機能の新たなイメージング手法の開発を進める事によって、この難問に挑戦しようとしている。我々が意識の脳内機構解明の鍵と考えて研究しているのが、両眼視野闘争と呼ばれる視知覚現象である [1, 2]。両眼視野闘争とは、物理的には左右の網膜上に視覚刺激が与えられ続けているにも拘らず、競合する視覚刺激が交互に知覚され、一方の刺激が知覚されている時、他方の刺激が意識にのぼらないという視知覚現象として知られ、意識の一階層であるアウェアネスの脳内機構を定量的に観測できる稀少な現象である。図にその概念を示す。

両眼視野闘争に関する先行研究と、我々自身の研究結果に基づき我々は両眼視野闘争の脳内機構を次のように考えている。すなわち、「両眼視野闘争は相互にフィードフォワード・フィードバック結合している大脳皮質機能領域間の情報統合プロセスの結果生ずるものであり、ボトムアップ的に処理された両眼からの視覚情報が、過去の視覚体験による記憶や、学習によって修得した知識、群化等の要因の支配の基でトップダウン情報として一次視覚野にフィードバックされ、ボトムアップ的に入力され続ける競合する情報と統合して、合理的な解釈を与える統一像を作り出す体制化の過程によって生ずる知覚現象



である。この統一像は、競合するボトムアップ情報を絶えず受け取り続けるため安定性が維持されず、再統合という形で更新されて行く。その際、例えばニューロンのインパルス列の間隔揺らぎといった確率的要因の影響を受け、異なる統一像に切り替わるということが繰り返される。」

この考えを進めると、意識とは感覚受容器からの情報が脳内の各部位で直並列的に処理され、過去の体験等に基づく記憶情報と共にフィードバックされ、微小時間遅れたフィードフォワード情報と統合されるというプロセス自体であると考えることが可能である。従って、この情報統合プロセスは、それを実現するハードウェアである神経基盤に依存し、どれだけの情報が統合されるかということ、さらに、ハードウェアの状態に応じて変化することになり、これらが意識の多様性・複雑性であり、その解明を困難にさせている理由であろうと考えることができる。最後に、本稿で述べた仮説では、いかにして情報統合が実現され得るかという点が説明されなくてはならない。現時点における最も有力な候補は、約 40 Hz の神経発火の同期現象であり、これがマクロに観測されたものが EEG/MEG のガンマバンドのリズムである。一方、情報統合に関しては量子論的機構も提唱されており、他の可能性も含めて研究を進めその謎を解き明かしたい。

[1] 小林哲生：“両眼視野闘争”，Clinical neuroscience, 中外医学社, Vol.28, No.10, pp.1161-1163 (2010)

[2] 小林哲生：“両眼視野闘争から意識を探る”，作業の科学 Vol.6, 協同医学出版社, pp.47-64 (2006)

## 電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野

<http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「大気圧プラズマによる還元反応とその応用」

当研究室の主な研究対象であるプラズマの産業応用としましては、主に化学気相成長やスパッタリング過程、そしてドライエッチングといった、半導体プロセスにおける微細加工での活躍が挙げられ、これまでの我が国の電子産業の発展に貢献してきました。ここでは、真空チャンバーの中の低圧力でプラズマ生成を行い、材料ガスの気相での解離過程や表面での反応過程等に興味深い物性が数多く見られ、我々の研究室においてもこの関連の研究は重要な研究項目として鋭意取り組んできました。

プラズマ分野の最近の研究動向の一つとしまして、真空チャンバーを用いずに、“脱真空”プロセスとして大気圧プラズマ生成とその利用が盛んに研究されています。そこでは、低圧下と同様のプラズマ生成用の電力放射用アンテナ（電極）構造が適用できないため、いわば一からプラズマ生成部や反応部の設計を強いられます。しかし、その応用が期待される対象が極めて広いことから、大気圧プラズマの研究はここ数年精力的に行われてきました。特に、大気圧下では、従来のプラズマプロセスの対象であった薄膜加工や平板固体の処理だけではなく、車や日常生活部材といった立体構造もその対象となり、さらには液体への関与が可能であることから化学プロセスにも応用可能で、最近では“プラズマ医療”と銘打って生体への効果を見出す研究も開始されています。我々の研究室においても、ニーズに幅広く対応できるような電極の開発や、生成された大気圧プラズマの診断技術の開発を行ってきました。

しかし、その研究内容を良くみてみますと、材料の分解や酸化処理といった、これまでプラズマが得意としてきた作用が多く用いられていることに気がきます。そこで、我々は、動作圧力帯を大気圧に変えるだけでなく、その効果についても幅広く展開することを目指して、これまであまり成功してこなかった還元作用に注目しました。すなわち、酸化と還元の効果を発現でき、しかもその強さがプラズマ生成電力で調整できるとすれば、オンデマンド反応場が大気圧下で実現することとなります。しかし、還元作用を大気圧下で実現するには少し工夫が必要で、例えば還元剤である水素は大気圧中では酸素と反応するため扱いが困難です。そこで、我々は、水中の電気分解で水素を発生し、そのまま水中の水素気泡内で大気圧プラズマを生成して原子状水素を得ることとしました。また、別の還元剤としてヒドラジン ( $N_2H_4$ ) の生成にも成功し、この場合はより長寿命の活性種として利用できます。

我々はすでに、図1のような系 [1] を実現可能なフィルター状の面積大気圧プラズマ電極の開発に成功し、それを用いた処理装置は協力企業により市場投入されています。さらに、先に示した液中の水素プラズマにより、液中に溶解している二酸化炭素の還元（一酸化炭素への分解、メタンへの改質: 図2）に成功しました [1]。また、ヒドラジンを用いることで、溶液中の銀イオンの還元・析出にも成功しています。今後は、図1に示したような連続した反応系によるより精緻なプロセス制御系を構築・実証し、様々な対象にその用途展開を図っていきたいと考えています。

[1] O. Sakai, T. Morita, Y. Ueda, N. Sano, and K. Tachibana, Thin Solid Films, vol. 519, p. 6999 (2011).

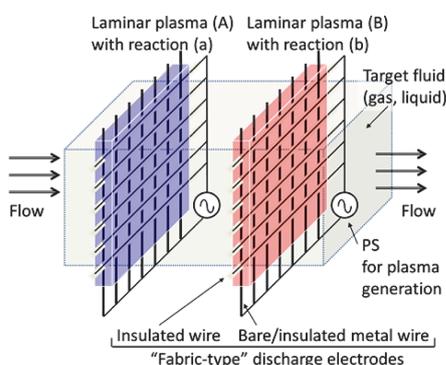


図1：大気圧プラズマによるオンデマンド反応場の概念図 [1].

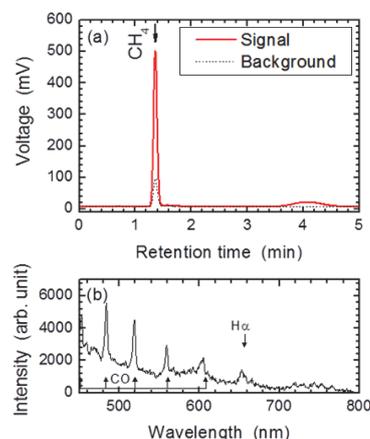


図2：大気圧液中水素プラズマによる二酸化炭素の改質気体分析結果(a)とプラズマからの発光スペクトル(b) [1].

## 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/>

## 「ナノギャップスイッチ現象に基づく抵抗スイッチング不揮発性メモリの開発」

近年のモバイル機器や情報家電などデジタル情報機器の急速な拡大に伴い、われわれが日常的に取り扱う情報は飛躍的に増大しつつあり、いつでもどこでも大容量の情報の迅速な読み出し、記憶を可能にするユニバーサルメモリの開発は必須となっています。こうした中、抵抗スイッチメモリは微細化に有利なメモリとして注目されていますが、近年、この抵抗スイッチメモリに応用可能な新たな物理現象として、ナノギャップスイッチ（以下 NGS と略します）現象が見出されました。NGS 現象は、ナノメートルスケールの微小間隙を有する、図 1 に示すような「ナノギャップ電極」構造において、電極間の抵抗値が入力電圧波形に依存して 3~5 桁変化する現象であり、極めて単純な構造で抵抗スイッチングが発現することから、従来の半導体デバイスにおける種々の理論的・技術的障壁を打ち破ることが可能な、超稠密不揮発性メモリとなることが期待されています。現在のところ、NGS 現象では、ギャップ部に加えられた電圧によってナノメートルスケールでの電極構造変化が引き起こされ、結果的にギャップ長が変化し、ギャップ部のトンネル抵抗が大きく変化すると考えられていますが（図 2 参照）、そのメカニズム詳細は依然不明であり、NGS 不揮発性メモリの実用化に向けて、スイッチング機構およびその基本特性の解明が求められていました。

われわれは、対向する 2 電極の先端をナノスケールで先鋭化することで、スイッチング領域が局所領域に限定される（単接合型）電極を作製し、ギャップ構造変化を直接観察することで、スイッチング動作機構の詳細解明を目指して研究を進めています。このナノギャップ電極は、厚さ 10 nm 以下の薄膜電極構造であり、原子間力顕微鏡（AFM）によるギャップ部の高分解能 3 次元構造評価が可能な構造になっています。これまでに、作製工程の最適化等により、ギャップ長 5 nm、ギャップ幅 10 nm の電極を有する平面先鋭型の単接合 NGS 素子を開発することに成功しました（図 1（右）参照）。ところで、NGS 動作のためには、ギャップ長は適正な値以下になっている必要があります。フォーミング処理と呼ばれるギャップ調整処理が求められますが、この過程で引き起こされる構造変化が、ギャップ部評価の障害にならないよう十分抑制することにも成功しました。こうした素子について、フォーミングおよびスイッチング前後の Pt-NGS 素子の局所構造・電気特性の変化を、その場で計測できる AFM 測定装置を用いて評価を行い、スイッチング前後でのギャップ長の微視的变化を捉えるとともに、ギャップ先端の移動を示す結果を得ています。フォーミング過程の最終工程では、両電極先端部に 100 nm 程度以下の構造変化が生じることがありますが、その後の数百回の NGS スwitching においては、ギャップ構造にはこのような大きな変化は確認されませんでした。また、単接合型 NGS 素子でも書き換え耐性 1 万回を確認することができました。本研究によりナノギャップ領域が極限的に微細化しても NGS 動作することが検証されたことから、今後、超稠密 NGS 不揮発性メモリの実現に向けて、さらに研究を進めて行く予定です。

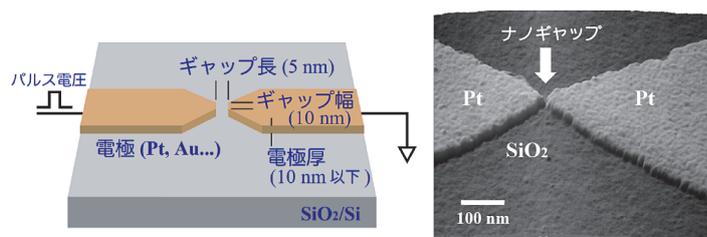


図 1：(左) ナノギャップ電極模式図、(右) 電子線リソグラフィにより作製された Pt ナノギャップ電極の AFM 像。

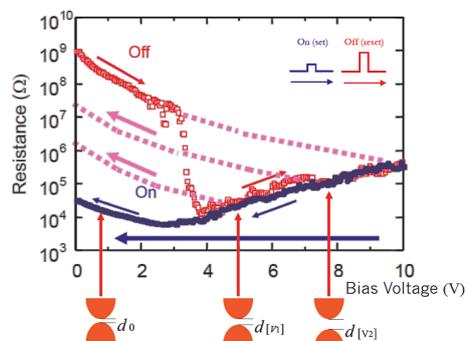


図 2：NGS 素子の抵抗ヒステリシス曲線。入力電圧波高 ( $V_1, V_2$ ) に応じて、ギャップ長 ( $d_0$ ) が変化し ( $d[V_1], d[V_2]$ )、結果的に抵抗値が変化する。

## 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/>

## 「SiC フォトニック結晶」

近年、光を自在に制御できる新たな材料として、フォトニック結晶が注目を集めている。フォトニック結晶とは、光の波長程度の大きさの周期的屈折率分布をもつ構造体であり、特定の波長の光に対して存在そのものを許さないフォトニックバンドギャップ (PBG) を形成することを特徴とする。フォトニック結晶はこれまで主に材料系として Si や GaAs を中心に発展を遂げてきたが、一方で材料に起因する根本的な限界も明らかになりつつある。例えば、高  $Q$  値ナノ共振器に対して  $1.55 \mu\text{m}$  (光子エネルギー:  $\sim 0.8 \text{ eV}$ ) の強いパワーの光を導入すると、非線形光学効果の一種である二光子吸収が起こり、光の損失が生じてしまう。また Si は赤外領域 ( $> 1 \mu\text{m}$ ) においてのみ透明であり、可視領域への展開は不可能である。

そこで本研究室ではワイドバンドギャップをもつシリコンカーバイド (SiC) という材料に注目した。SiC はワイドバンドギャップ半導体材料の中でも比較的屈折率が高く (2.5~2.7)、Si の約 3 倍程度の広い電子バンドギャップ ( $\sim 3.2 \text{ eV}$ ) をもっている。このバンドギャップは光通信帯域の光の二光子吸収を防ぐには十分な大きさである。また熱光学係数が小さく、熱伝導率に優れた材料であり、フォトニック結晶デバイスの安定した動作が期待できる。さらに SiC は可視領域の光に対して透明であり、可視光線を制御対象とする新たなフォトニック結晶の実現も期待できる。

図 1 に作製した SiC フォトニック結晶の例を示す。また図 2 には高強度の入力光に対する共鳴スペクトルの測定結果を示す。同図から  $100 \text{ pJ}$  という高いエネルギーのパルスを導入しても、共振器のスペクトルに変化は見られず非線形吸収が全く生じていないことが分かる。図 3 にはフォトニック結晶のサイズを徐々に縮小することで、赤外から可視光までの領域で共鳴する共振器を作製し、実際に動作させた例を示す。以上の結果は SiC の広いバンドギャップと物理的な安定性を反映したものであり、今後 SiC フォトニック結晶は様々な領域で利用されていくと考えられる。

## 参考文献

B.S. Song, S. Yamada, T. Asano, and S. Noda: Opt. Exp. **19**, 11084 (2011). S. Yamada, B.S. Song, T. Asano, and S. Noda: Appl. Phys. Lett. **99**, 201102 (2011).

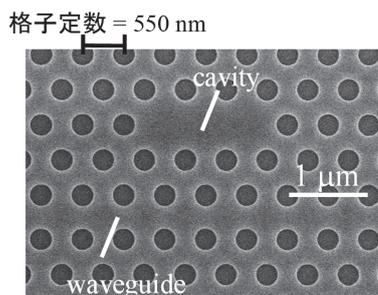


図 1 : SiC フォトニック結晶の SEM 写真の一例

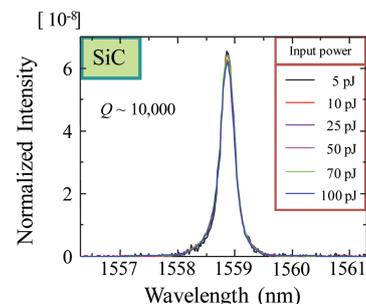


図 2 : 高強度光パルスに対する安定性を示す実験結果

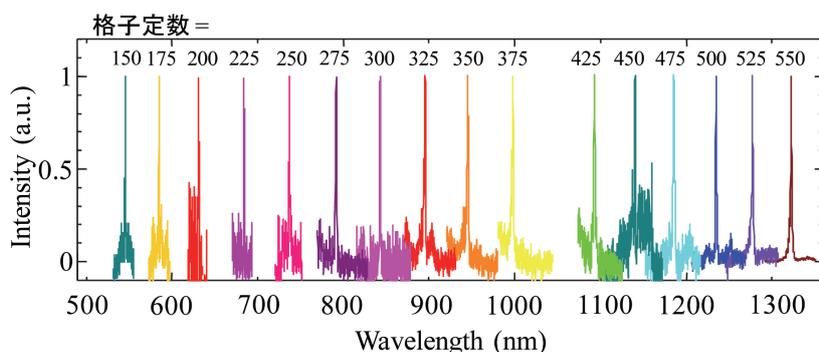


図 3 : 赤外から可視光までの広い領域での動作が可能であることを示す実験結果

## 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/>

## 「物理の基本定数の時間変化観測を目指す単一イオン光時計」

私たちが時間を測るとき、振り子のような一定の時間で再現する現象に注目し、その周期を基準とします。その計測装置、時計としてもっとも正確なものが原子時計です。原子時計では、原子が特定の周期の電磁波と共鳴する現象を利用し、その周期を基準とします。原子の共鳴は物理法則にしたがって決まります。物理法則は時間的にも空間的にも変化しないと考えられるので、原子時計は1秒の基準として優れています。実際に、現在の秒の定義は、マイクロ波領域にあるセシウム原子の共鳴の周期、その逆数の周波数で9.2 GHz、を基準とすると国際的に取り決められていて、その相対不確かさは $10^{-16}$ 台に達します。さて、一般に測定の不確かさを小さくするためには、測定を何回も繰り返して平均を取ります。原子時計では、より速い周期の共鳴を基準とすれば、より短い時間で周期の測定回数を稼いで不確かさを小さくできることとなります。そこで、マイクロ波と比べて周期が10万分の1と速い、光領域の共鳴を用いる原子時計、光時計の構築を考えます。不確かさを小さくするには周期を変化させる要因をできるだけ取り除くことも重要です。その有力な方式として、超高真空中の狭い空間に1個だけ閉じ込めた原子を利用する方法があります。原子をイオン化しイオントラップという装置で電場をかけて閉じ込めますが、トラップ中心では電場がゼロになっていて、イオン1個だけなら共鳴は変化しません。単一イオン光時計とよばれるこの方式では不確かさ $10^{-18}$ 台が試算されていて、実証されつつあります。(イオントラップの研究を先導してきたワインランド博士が2012年度ノーベル物理学賞を共同受賞)

このような非常に小さな不確かさで計測が可能になると、非常に小さな効果が検出できるようになります。時計のよりどころであった物理法則の時間普遍性を、逆に時計で検証できる水準に達してきました。原子の共鳴の周期を決める原子内部の相互作用の大きさは、物理の基本定数、ここでは微細構造定数 $\alpha$ 、を単位として表されます。物理法則がそれ自身の時間変化を含むものであれば、基本定数の変化となって現れることとなります。異なる共鳴では $\alpha$ の時間変化に対する感度が異なるので、異なる共鳴を基準とする2台の光時計を構築し、その相対的な時間変化を観測することで $\alpha$ の時間変化が探索できます。現在の物理の枠組みである標準理論では、物理の基本定数は時間変化しません。しかし、標準理論では説明できない宇宙の暗黒エネルギーの起源に迫る新しい物理理論では、時間変化が示唆されています。もし時間変化が観測されれば、その大きさから理論を淘汰することができます。このように、精密計測の極限を追求すると、高エネルギーの最先端で重い未知の素粒子を探す基礎物理実験のように、物理の最先端に迫ることができます。私たちは同じような実験研究に価値を見出す仲間たちと、科研費新学術領域「原子が切り拓く極限量子の世界－素粒子的宇宙像の確立を目指して－」を推進し研究を進めています。

通常異なる2種類の光時計は、2種類のイオンを用いて構築します。私たちは $\alpha$ の時間変化に対して感度が大きく異なる2つの時計用共鳴をもつ、イッテルビウムイオン( $\text{Yb}^+$ )に着目しました。図1は使用しているイオントラップ電極で、中心の直径0.8 mmの穴にイオンを閉じ込めます。そして、レーザー冷却という技術でイオンを静止させてドップラー効果を防ぎ、精密なレーザー光で時計の基準に用いる共鳴信号を獲得します。図2が単一 $\text{Yb}^+$ の共鳴信号です。5本見える信号の相対的な高さから、運動エネルギーは温度換算で2 mKに低減されています。現在分解能は20 kHz程度ですが、今後1 Hz台まで分解能を高めて光時計を構築し、 $\alpha$ の時間変化探索を進めていきます。

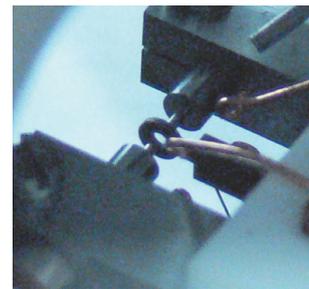


図1：イオントラップ

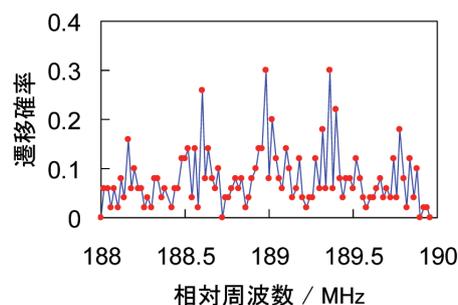


図2：単一 $^{174}\text{Yb}^+$ 時計用共鳴信号

## 知能メディア講座 画像メディア分野 (松山研究室)

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

### 「コンテンツ閲覧行動の分析とモデル化～人間と間の合った対話ができる情報端末の実現を目指して」

私たちが暮らす社会には、さまざまな種類の情報端末が備えられており、豊かな情報環境が形成されています。つまり、従来のパソコンに加え、スマートフォンやタブレット端末が急激に普及し、さらに街中にはデジタルサイネージ（電子広告）が設置され、いつでもどこでも簡単にインターネット上の情報を獲得できるようになっています。その一方、インターネット上の情報は大規模化かつ複雑化しており、それらの端末を用いたとしても「所望の情報にたどりつけない」「そもそも何を調べれば良いのか分からない」という新たな問題が生まれています。

この問題に対して、もし情報端末が利用者の意図や潜在的な興味といった心的な状態を読み取り、適切な情報を能動的に提供することができるようになれば、私たちはまるでホテルのコンシェルジュと対話するかのごとく、欲しかった情報を得ることができるようになると考えられます。本研究室では、このような人間と間（ま）の合った対話ができる情報端末の実現を目指し、その基盤となる人間行動計測・認識技術の研究をしています。具体的には、TV コマーシャルや商品カタログといったコンテンツの閲覧行動を対象として、閲覧者の視線運動とコンテンツ情報、閲覧者の心的状態の関係性を分析・モデル化する研究に取り組んでいます。以下にその例を紹介します。

#### ・映像・視線ダイナミクスの織りなす時空間的關係性のモデル化

映像閲覧中の視線運動には映像シーンの特性が反映されます。本研究ではシーン特性として、映像に含まれる視覚的に顕著な領域を持つダイナミクス（顕著性変動）に着目し、視線運動との関係性—たとえば視線の向きやすい顕著性変動パターン、特定の顕著性変動パターンを閲覧する際に起こりやすい視線運動—のモデル化を行いました（図1）。また、提案モデルを統計的に学習することで、TV コマーシャルといった一般映像の閲覧者が映像に集中しているかどうかを高精度に推定できることを確認しました。

#### ・提示コンテンツのデザイン構造を利用した視線運動の意味理解

商品カタログのようなコンテンツを閲覧する際の視線運動の意味理解を目的として、コンテンツ中の画像や文章といったオブジェクトのレイアウト（デザイン構造）を知識源として積極的に用いる枠組みを提案しました。デザイン構造にはオブジェクト間の意味的關係性が反映されており、本枠組みによって、視線運動を「どのオブジェクトを見ているか」ではなく「どの意味的關係性に着目しているか」に基づいて解釈できるようになります（図2）。現在は比較的単純なデザイン構造の商品カタログを利用し、閲覧者の注視行動（情報取得、情報選択など）の認識を通して、提案する枠組みの基礎的評価を行っています。

今後は、より多様なコンテンツや心的状態を扱い、提案したコンテンツ閲覧行動モデルの有効性検証・拡張の検討を行う予定です。また本研究の応用として、現在、提示コンテンツ中で閲覧者が着目している意味的關係性を視線運動から推定し、効率的に情報を推薦するシステムの開発に取り組んでいます。

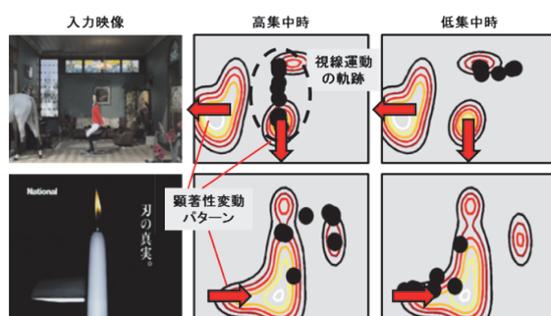


図1：視線の向きやすい顕著性変動パターンの解析

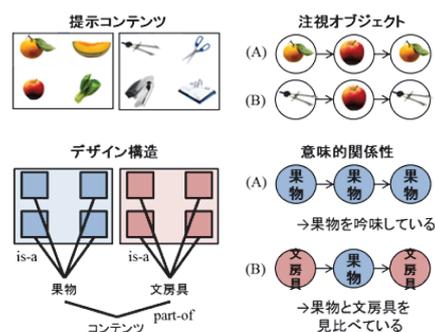


図2：デザイン構造を用いた視線運動の意味理解

## 通信システム工学講座 知的通信網分野 (高橋研)

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

### 「利用者の位置情報を用いたサーバ分散配置型クラウドサービスシステムについて」

近年、クラウドサービスが注目を集め、幅広く活用されてきています。クラウドサービスは、従来は手元で管理・利用していたソフトウェアやデータを、インターネットを通じて必要に応じ活用するもので、例としては Google Apps や Amazon EC2 といったサービスが挙げられます。

クラウドサービスの特徴としては、各地のデータセンタに集約されたコンピュータリソースを多数のユーザで共有することにより、低コストでリソースを活用できる点が挙げられます。これによって、ユーザはクラウド環境の構成やデータの格納場所を意識せずにサービスを利用できます。ただ、データセンタは世界に数ヶ所しか存在していないため、ネットワーク距離の遠いデータセンタを利用することが起こり得ます。その際、RTT(Round Trip Time)が大きくなることでスループットが低下してしまい、サービスの体感品質が低下してしまうという問題が発生します。そこで、当研究ではサーバを分散配置し、サービス利用者の位置情報を考慮することでRTT を削減可能なクラウドサービスシステムを提案しました。

従来、サービス品質向上のためサーバのロケーションを増やす際、大量のサーバの購入やデータセンタの新設、そして保守管理運用が必要となり、莫大なコストが必要となりました。そこで、提案システムでは、クラウド事業者がサーバを持たず、サーバ保持者からコンピュータリソースを借りるビジネスモデルを提案します。本システムのビジネスモデルは、ユーザにはサービスの対価としてサービス利用料を払い、サーバ保持者にはサーバ利用料としてインセンティブを与えることで、コンピュータリソースを得るというモデルとなっています(図1)。

また、提案システムでは、管理サーバはサービス利用者のRTT 情報を用いることで位置を推定し、ネットワーク距離の近いサーバを選択します(図2)。ユーザはその近傍サーバを利用することでRTT を削減することが可能となります。本研究では、提案システムを運用した際の挙動をモデル化し、シミュレーション評価を行なうことで提案システムの有効性を示しました。

#### 参考文献

横田健治, 朝香卓也, 高橋達郎, " サービス利用者の位置情報を考慮したサーバ分散配置型クラウドサービスシステムの提案", 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J95-B, No.10, pp.1325-1334, 2012



図1：提案システムのビジネスモデル

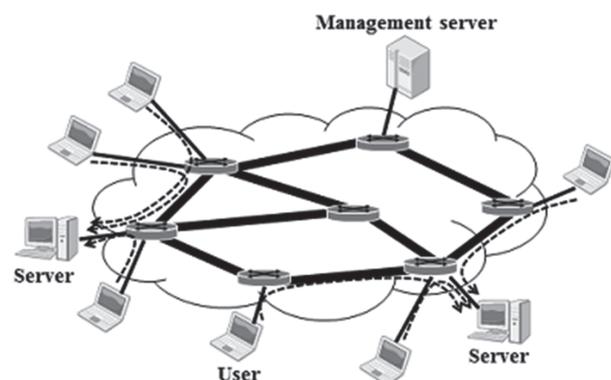


図2：提案システムの概念図



## 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-lab26.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 「少数アンテナを用いた UWB ドップラーレーダによる人体イメージング」

監視システムや移動ロボットにおける人体のモニタリングにおいて、従来の光学カメラ等を用いたシステムでは、人体識別に十分な分解能を得るために多くのセンサが必要となることが深刻な問題となっています。この問題を解決するため、当研究室では4素子の少数アンテナにより構成した超広帯域(Ultra Wide-Band、UWB) ドップラーレーダを用いた高分解能人体イメージング法を開発しました。

提案イメージング法ではまず、ドップラー効果を利用し人体の各部位(腕、足、胴体など)を運動の違いに基づき分離識別します。図1にシステムモデルを示します。Txから送信される信号は中心周波数26.4 GHz、帯域幅500 MHzのUWB信号です。まず受信信号を短時間フーリエ変換し、人体の各部位の運動の違いを、時間-ドップラー周波数分布の違いとして検出します。即ち、同分布の有意なピークを抽出することで各部位を分離識別します。次に分離した各部位の位置を、干渉計法とUWB信号の遅延時間により求めます。干渉計法はアンテナ間の到来距離差に基づき到来方向を推定する方法です。提案システムではRx1とRx2からなる干渉計より到来方位角を、Rx1とRx3により到来仰角を推定します。さらに各ピークに対応する遅延時間を補間法により求め、各部位までの距離を高精度に推定します。推定した到来方向と距離より全ての部位の位置を推定し、これらを重ね合わせたものをイメージング結果とします。図2に実験の概観を、図3にイメージング結果の正面図を示します。人体の外形は推定されているものの、部位間に生じた虚像により人体の各部位の識別は困難な結果となっています。

この問題点を解決するため、我々は速度情報を用いた虚像除去法を提案しました。我々は実験と数値計算の両面からの検討により、この種の虚像が比較的速い速度成分を持つことを実証しました。これに基づき、推定点の速度を推定し、これがある閾値より大きいならば虚像と判定し除去する手法を導入しました。また、偽ピーク抽出に起因した虚像を防ぐため、時間周波数分布からのピーク抽出における電力閾値を、視線方向速度と推定虚像点数に応じて適応的に設定する手法を提案しました。

これらの提案虚像除去法を図3のデータに適用した結果を図4に示します。人体の腕、脚、胴体などが認識可能となり、検出した目標が人体であることが容易にわかります。また、比較的大きい速度成分の変化が脚部と腕部に見られるという歩行運動の特徴も確認できます。4アンテナを用いたUWBドップラーレーダと提案虚像除去法により、世界に前例のない高分解能人体イメージングを実現しました。

## 参考文献

K. Saho, et al.: IEICE Trans. Commun., vol.E96-B, no.2, in press.

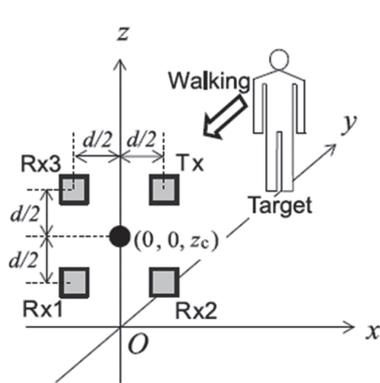


図1：システムモデル



図2：実験の概観

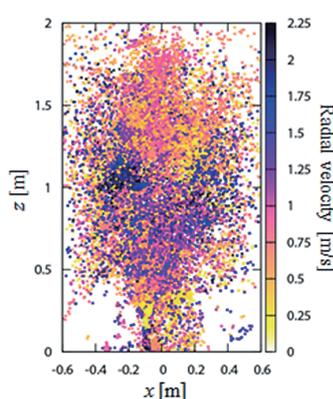


図3：推定像の正面図

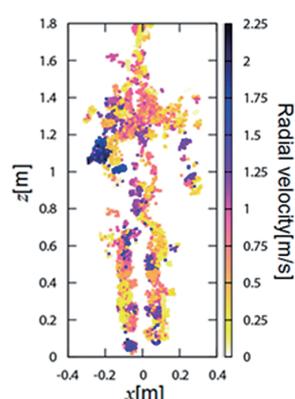


図4：虚像除去後の推定像正面図

## システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研究室)

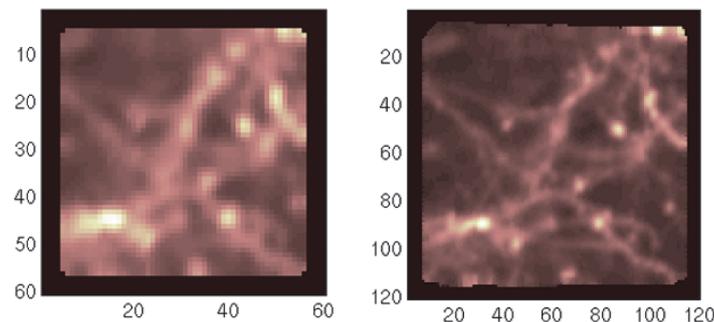
<http://hawaii.sys.i.kyoto-u.ac.jp/home>

### 「顕微鏡画像からの三次元再構成」

当研究室では、数理的手法に基づく生物学である「論理生命学」を推し進めているが、ここではその研究の中で、統計的画像処理を用いて細胞、特に神経細胞の微細構造を可視化する技術である「三次元超解像法」の紹介をしたい。

ベイズ法などに基づく統計的画像処理によれば、従来の光学系の物理的な限界を超えた観測性能を実現できる可能性がある。例えば、光学顕微鏡により細胞を観察する場合、顕微鏡の開口数などに依存した物理的限界があるが、統計的な限界はそれとは別に存在する。一例として、マルチフレーム超解像と呼ばれるものがある。一枚の低解像度(ピクセル数が少ない)の観測画像から高解像度(ピクセル数が多い)画像を得ることに限界があるが、複数フレームの低解像度画像が互いに位置ずれをもって観測される場合、それらを統合することで高解像度画像を得ることが可能である。これは、位置ずれのために、画像(フレーム)間で異なる情報を持っていることによる。一回の観測(フレーム)をチャンネルと呼ぶことにすると、複数のチャンネルを介して同一の情報が輻輳的に得られることになるが、こうした状況においてベイズ法などの統計的手法は有効に働く。

われわれは、共焦点・二光子顕微鏡などの走査型顕微鏡によるライブイメージングに適用可能な三次元再構成法の開発を進めている。レーザスキャンによって観測画像を得ているため、観測中に観測画像の各画素について位置ずれが起こる。この位置ずれは、特に、ライブイメージング、すなわち観測試料が生きている場合に問題となる。そこで、階層的に位置合わせをした上で各画素の情報をスキャン(時間)方向に統合する三次元再構成法の開発を行った。ここでのアイデアは、従来は一枚ずつの画像がフレーム単位で得られているとして位置ずれの推定を行っていたところ、走査型顕微鏡の特性に合わせて、フレームごと、フレーム内の走査平面ごと、走査平面内の走査ラインごと、さらにはピクセルごと、など階層的に位置ずれ推定および位置合わせを行う点にある。ここで高精細な位置合わせとそれに基づく高解像度画像の推定は相互補完的な関係にある点に注意したい。覚醒マウス神経回路の二光子顕微鏡画像データに適用し、神経の情報伝達を担うスパインなどの微小構造の高精細可視化に成功した(下図)。並行して、共焦点系・二光子系の点拡がり関数が理論解に近いことを仮定したベイズの三次元超解像法の開発を行い、同じく覚醒マウスからのデータに適用を行い、こちらも良好な結果を得ている。



図：左は時間方向で平均化した画像、位置ずれのためにボケている。右は高精細位置合わせを行いながら超解像を行ったもの。画素数は縦横2倍ずつで4倍になっている。  
(画像提供：福田正裕(東京大学))

こうした高精細な画像処理技術を、覚醒動物の行動時のデータに適用することで、行動発現の細胞基盤の解明に展開することを目指している。

## エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (中村祐研究室)

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

## 「ヘリオトロン J」における電子バーンシュタイン波加熱のレイトレーシング解析

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プラズマの閉じ込めに関して実験と理論・シミュレーションの立場から解析しています。

磁場閉じ込めプラズマの加熱法は色々ありますが、その中の一つに電子加熱を目的とした電子サイクロトロン波共鳴加熱 (ECH) があります。これは電子レンジとよく似た原理を用い、電子サイクロトロン波 (ECW) と呼ばれる電磁波をプラズマに入射し、共鳴により電子を加熱する方法です。しかしこの方法は、プラズマ密度がある程度高くなると、電磁波が反射されプラズマ中に入っていない欠点があります。これを克服する方法として、入射した ECW をプラズマ中で電子バーンシュタイン波 (EBW) と呼ばれる静電波にモード変換する方法が考えられています。EBW にモード変換することのできる ECW は異常波 (X モード) と呼ばれ、これがプラズマ中に伝播するには強磁場側から ECW を入射する必要があります。ただ多くの場合、工学的制約のため ECW の入射は弱磁場側から行うことが望ましいため、弱磁場側からプラズマ中に入っていける正常波 (O モード) という ECW を入射し、プラズマ中で X モードに変換し、さらにこれを EBW にモード変換する方法も考えられており、京大エネルギー理工学研究所にあるヘリオトロン J 装置でもこの方法を用いた加熱実験が計画されています。O モードから X モード、X モードから EBW へのモード変換が起こるためには、それぞれいくつかの条件があるため、それらの条件をすべてクリアし、プラズマ中心領域をうまく加熱するには詳細な理論解析が必要となります。

ECW の波長はプラズマ中の物理量が空間的に変化する特性長より十分に短いため、幾何光学近似が成り立ち、レイトレーシング (光線追跡) 法による数値解析が可能です。そこで、現在ヘリオトロン J における電子バーンシュタイン波加熱のレイトレーシング解析を行っています。ヘリオトロン J 装置で閉じ込められるプラズマは、非軸対称トーラスプラズマなので、磁場構造やプラズマの密度・温度の空間分布を求めるには三次元 MHD 平衡計算が必要であり、得られた MHD 平衡に対してレイトレーシング計算を行います。今回考えている加熱法では、O モードから X モードへのモード変換が重要で、うまくレイの入射角度を選ばないとモード変換は起こらず、単に O モードが反射されてレイはプラズマ内部に入らないこととなります。図 1 の右上図はレイの入射点から見たヘリオトロン J プラズマであり、左下図は O から X への変換効率のカラーマップグラフです。カラーマップにおいて白い、狭い領域が X モードへの変換が可能な入射角を示しています。レイトレーシング計算の結果、この角度で入射すれば X モードに変換された ECW が、プラズマ内部領域でさらに電子バーンシュタイン波に変換され、ヘリオトロン J においても電子バーンシュタイン波加熱が可能なが示されました。

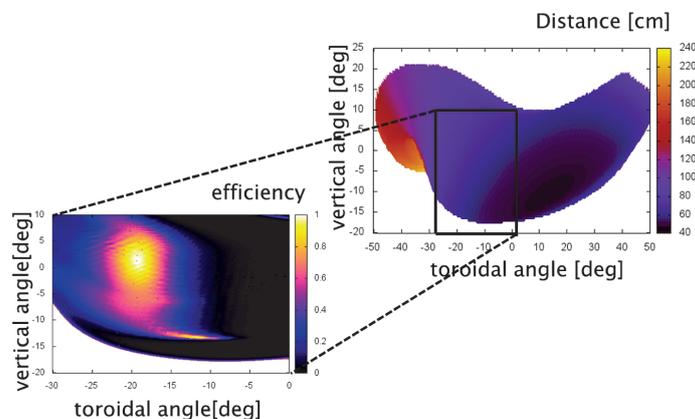


図 1

## 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/>

## 「ビーム放射分光法を用いたプラズマ中の密度揺動計測装置の開発」

私たちの研究室では磁場閉じ込めによる高温プラズマの基礎研究を進めており、ヘリカル軸ヘリオトロン配位を持つプラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」において、精力的に磁場配位最適化研究を進めています。今回は、プラズマ中に発生する揺らぎ(揺動)を計測するための手法の開発について紹介します。

高温プラズマ中では、様々な揺動が原因でプラズマの持つ粒子や熱が損失することが知られています。そのため、その揺らぎの物理現象を理解することは、よりよい閉じ込め状態を実現するためのプラズマ制御手法の発展に有益です。特に近年、プラズマ中に発生する乱流がプラズマの輸送を支配していることが明らかになりつつあり、乱流の状況を高精度で計測する診断法の開発が進められています。

ビーム放射分光法では、イオン源を利用した中性粒子ビームをプローブとして、プラズマ中のイオン・電子との衝突励起反応による輝線スペクトルを分光計測します。輝線スペクトルには水素のバルマー系列線(H $\alpha$ 線)がよく用いられます。この診断法の特徴は①プラズマ密度の揺らぎを輝線スペクトル強度の揺らぎとして直接観測できること、②輝線スペクトルの波長は中性粒子ビーム速度に応じてドップラーシフトするため背景光との分離が容易で、ビームと観測視線の交差する局所的な情報が得られること、が挙げられます。ヘリオトロンJでは、プラズマ加熱用の中性粒子ビームを利用したビーム放射分光計測を行います。この場合、図1(左)に示すとおり、ヘリオトロンJの磁場配位の形状は単純なドーナツ型でなく捻れているため、観測視線を上手に選ばないと局所計測ができません。磁場閉じ込めプラズマでは同じ磁気面(磁力線で編んだ入れ子状の籠)の上であればプラズマの温度・密度等の性質は等しくなります。そこで、ビームが通過する領域の観測視線を磁気面になるべく沿わせることで、同一磁気面上の密度揺動の観測ができるように工夫しました。また数値計算を用いて実効的な空間分解能を評価し、当初目標とする性能が得られたことを確認しました。

図1(中)に高速フーリエ変換したビーム放射光信号の周波数スペクトルの一例を紹介します。この放電では $f=87, 66, 23\text{kHz}$ にピークを持つ3つの密度揺動が観測されました(それぞれ図1(中)のA-Cに対応)。ピックアップコイルによる磁気揺動計測から、プラズマ中の高速イオンに起因する電磁流体不安定性が原因と考えられます。この揺動強度のプラズマ中の空間分布を調べたところ、A-Cともそれぞれ異なる揺動強度分布を持つことがわかり、揺動の性質の理解が進みました。残念ながら現在まで、明確に「乱流を捕らえた」といえる結果は得られていませんが、観測事実を一つ一つ丁寧に解釈し、研究を進めていく予定です。

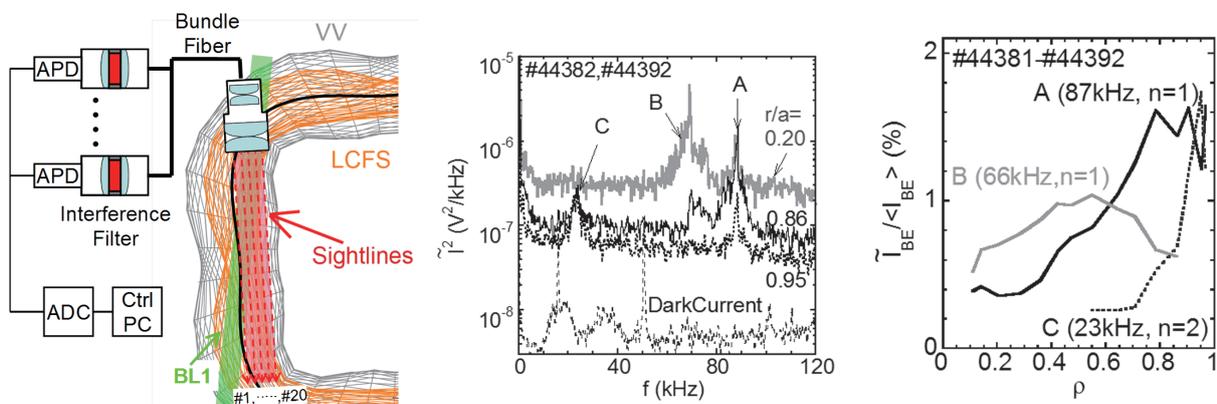


図1：(左)ヘリオトロンJに設置したビーム放射分光装置の概略図、(中)ビーム放射光信号の周波数スペクトル、および(右)揺動強度の空間分布(横軸 $\rho$ は規格化したプラズマ小半径)。

生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野 (山本研究室)  
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab/>  
 「超高層大気の波動を観測ロケットと地上から同時観測」

地球大気の高さ 100 km 以上の領域は超高層大気と呼ばれます。大気の一部は太陽光に含まれる紫外線によって電離し、いわゆる電離圏（電離層）を形作っています。古くは短波の電離層反射が長距離通信のために利用されてきました。今では多数の衛星が飛翔し、GPS や衛星放送などの電波が透過します。超高層大気環境は「宇宙天気」として盛んに研究されています。「宇宙天気」では太陽面の爆発現象等が地球にもたらす「上からの」影響の研究が進められてきましたが、近年、大気波動による「下からの」影響が非常に大きいことが明らかになってきました。しかし下層から超高層大気に向かって伝搬する大気波動の経路と超高層大気への影響についての理解は未だ十分ではありません。

我々は、MU レーダーを用いて中緯度電離圏の研究を行ってきました。従来は比較的静穏な領域とされていた中緯度域ですが、時には活発な波動現象が生じます。中緯度域に特有の現象の 1 つは、電離圏 F 領域（高度 200-500 km）における中規模伝搬性電離圏擾乱（Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances; MSTID）と呼ばれる周期 1 時間程度の波動です。日本全土に配備されている GPS 受信機網を利用した全電子数（Total Electron Content; TEC）観測や 630 nm 大気光のイメージング観測により、北西-南東方向の水平波面を持ち波長は 100-300 km で、南西方向に伝搬します。一方、電離圏 E 領域（高度 90-150km）には、スボラディック E（Es）層に伴う不規則構造で数分から十数分の周期性を示す「準周期エコー（QP エコー）」が発生します（図 1）。2 つの現象は、どちらも夏期の夜間に頻出することや水平波面が北西-南東に伸び南西方向に伝搬するなどの類似性があります。QP エコーの出現には 1 時間程度の周期性も見られます。さらに MU レーダーと小型レーダーを用いた同時観測や、計算機シミュレーションなどによって、2 つの現象には地球磁力線を通じた相互作用が働いており、MSTID の生成に QP エコーが重要な役割を果たすことが分かってきました [1]。

電離圏の E 領域と F 領域で同時に発生するこれらの現象を一気に明らかにすることを目的として、2013 年 7～8 月に大規模な観測が行われようとしています（図 2）。地上の GPS 観測網やレーダーから MSTID や QP エコーの発生が観測される時、JAXA 宇宙科学研究所が内之浦宇宙空間観測所（鹿児島県）から 2 機の観測ロケット（S-520-27 号機と S-310-42 号機）を連続的に打上げます。ロケットは電離圏パラメータ（電子密度、電界など）を直接測定する他、リチウムや TMA（トリメチルアルミニウム）を放出して発光雲を形成します。この 3 次元形状を連続的に撮影することで風速が測定されます。リチウムは通常は太陽光に照らされて赤く発光するのですが今回の観測は夜間に行われます。そのため光源として月光を利用します。これは世界初の試みであり、今回の観測のなかでも特筆されます。現在は観測ロケットに搭載される機器の準備が進められています。また発行雲の撮像は飛行機から実施することが望ましいため、実現すべく努力を続けています。

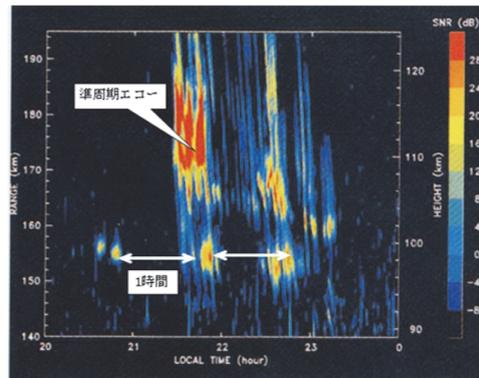


図 1：MU レーダーによる E 領域高度の QP エコーの観測例。短周期の準周期構造は Es 層の空間構造に起因することが分かっています。しかし上図から明らかなように、1 時間程度の周期をもつ変動もあります。MSTID との関連が示唆されてきました。

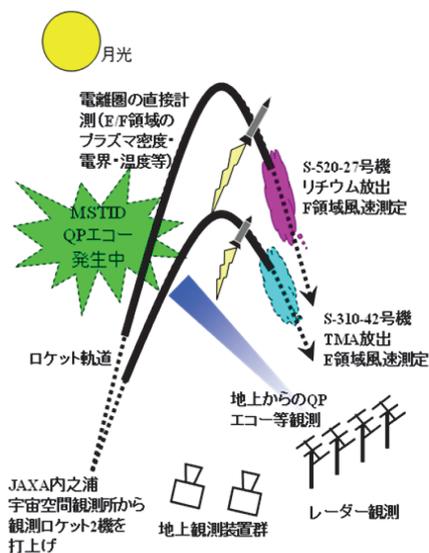


図 2：2013 年 7～8 月に予定されている観測ロケットと地上観測の概念図。

[1] Yokoyama, T., D. L. Hysell, Y. Otsuka, M. Yamamoto, Three-dimensional simulation of the coupled Perkins and E-s-layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 114, A03308, 2009.

## 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>

## 「地球放射線帯における高エネルギー電子生成メカニズム解明に挑む科学衛星観測」

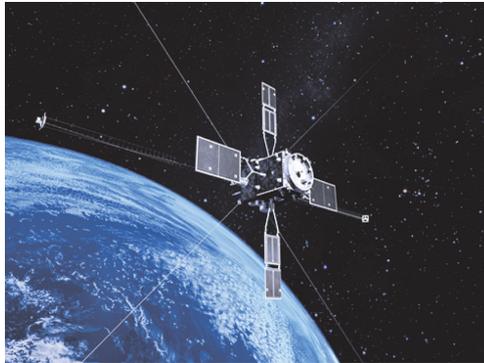


図1：地球放射線帯を観測する ERG 衛星 (©JAXA)。

地球の放射線帯を観測する、我が国の科学衛星 ERG (Energization and Radiation in Geospace) ミッションがスタートしました。高エネルギーの粒子からなる放射線帯は、米国が初めて打ち上げに成功した人工衛星「エクプローラ」に搭載した観測器により発見されました。発見者の名前をとってヴァンアレン帯ともよばれるこの地球の放射線帯ですが、その高度が地球の半径の10倍程度まで広がっていて、地球を周回している人工衛星周辺環境として無視できない存在です。この放射線帯は大きく分けて内帯と外帯に分類されますが、特に外帯高エネルギー粒子の状態(粒子フラックス)が、地球の磁気圏活動に依存してダイナミックに変化し

ていることが知られており、その高エネルギー粒子の生成・消滅メカニズムの解明は磁気圏物理学でも、地球周辺の宇宙空間を利用していくという意味でも重要になりつつあります。この放射線帯の物理を明らかにすべく ERG 衛星が計画され2015年末打ち上げを目指して開発が急ピッチで進められています。

山川研究室では、この ERG 衛星に搭載する二種類の観測装置を担当しています。一つは、プラズマ波動観測器 (PWE: Plasma Wave Experiment)、もう一つは、「波動-粒子相互作用解析装置 (WPIA: Wave-Particle Interaction Analyzer)」です。PWEについては従来から科学衛星に搭載してきたプラズマ波動観測装置の延長上にあるもので、一方、WPIAについては、今回、まったく新しい観測装置として搭載されるものです。科学衛星における観測手法として、この WPIA は世界的にみても未だなされた

## Difference of the WPIA and conventional observations

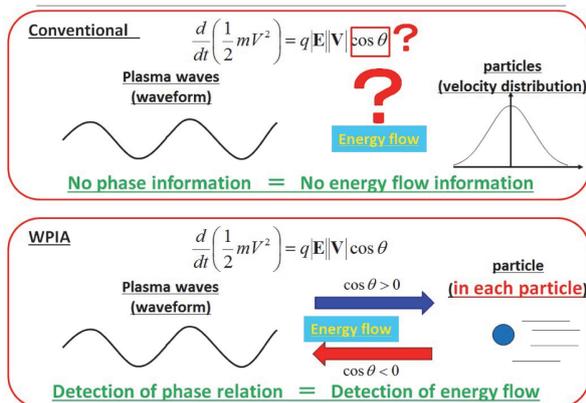


図2: WPIA(下)と従来からの観測手法(上)との違い。

た例はなく、その意味で非常にチャレンジングな計測になっています。放射線帯における高エネルギー電子の生成に関してプラズマ波動と粒子との相互作用が重要であると近年指摘されており、ERG衛星でも波動と粒子との間でのエネルギー授受を定量的におさえることが重要なため、WPIAでは、このエネルギー授受のキーとなる電界ベクトル ( $\mathbf{E}$ ) と電子速度ベクトル ( $\mathbf{V}$ ) との角度差を観測します(図2)。このために従来は速度分布関数として計測していた電子を、電子一つ一つとして観測し、オンボードでプラズマ波動ベクトルとの角度差を記録していきます。これにより速度分布関数では失われていた上記角度差を保存したまま計測することができ、 $\mathbf{E} \cdot \mathbf{V}$  という、これまで観測されたことのない物理量を得ることができます。まったく新しいこの手法を京大発の観測手法として成功させるべく現在、設計を進めています。海外の関連研究者にこの観測器のことを話すと「そんなことが本当にできるのか」と驚かれます。果たして日本の科学衛星で初めて試みられるこの手法がどのようなサイエンスアウトプットを出してくれるのか、今から楽しみにしながら開発をすすめています。

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>

「パネル構造型宇宙太陽発電所のためのパネル位置推定を用いたビーム形成技術の研究」

当研究室では、宇宙太陽発電所 SPS (Space Solar Power Satellite/Station) 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を中心に研究開発を行っている。SPS 構想とは、地球の影に入らず地上が夜でも太陽光が当たる静止衛星軌道 (36,000km 上空) に 100 万 kW の太陽光発電衛星を配置し、雨でも減衰しないマイクロ波という電磁波を用いて衛星から地上へ無線電力伝送をして昼夜天候に関係のない CO2 フリーな発電所の実現を目指す構想である。SPS は我国の宇宙開発の目標を定めた宇宙基本計画に記載され、現在経済産業省のプロジェクトとして太陽光発電無線送電技術委員会が実施され、SPS 実現を目指して All Japan で研究開発が行われている。本プロジェクトは当研究室篠原が委員長であり、JAXA (宇宙航空研究開発機構) とも連携して特にマイクロ波無線電力伝送に関する研究を行っている。

SPS で特に重要な技術となるのが、高精度マイクロ波ビーム制御であり、高精度目標位置推定技術である。SPS では 36,000km 先の 2km サイズの受電サイトに 100 万 kW のマイクロ波エネルギービームを集中させなければならない。ビーム制御にはフェーズドアレーアンテナを用い、目標位置推定には地上の受電サイトから送られるパイロット信号の位相情報を用いる。

SPS のフェーズドアレーでは、その巨大なアンテナ面に歪みが発生し、ビーム形成に大きく影響を与える (図 1, 図 2)。そこで本研究室ではパネル位置推定を用いたビーム制御法である PAC (Position and Angle Correction) 法を用いた目標位置検出誤差低減方法について検討を行い、アンテナ面の歪みや位置推定に用いるパイロット信号の測定誤差が大きい場合でもビーム制御が可能な手法を提案した (図 3)。

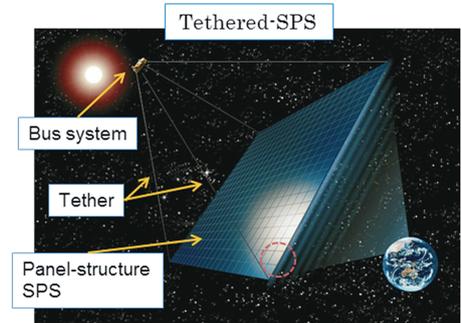


図 1 : パネル構造型 SPS

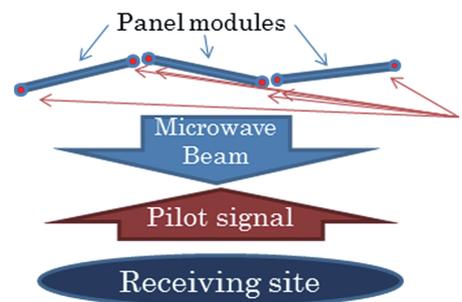


図 2 : パネル構造

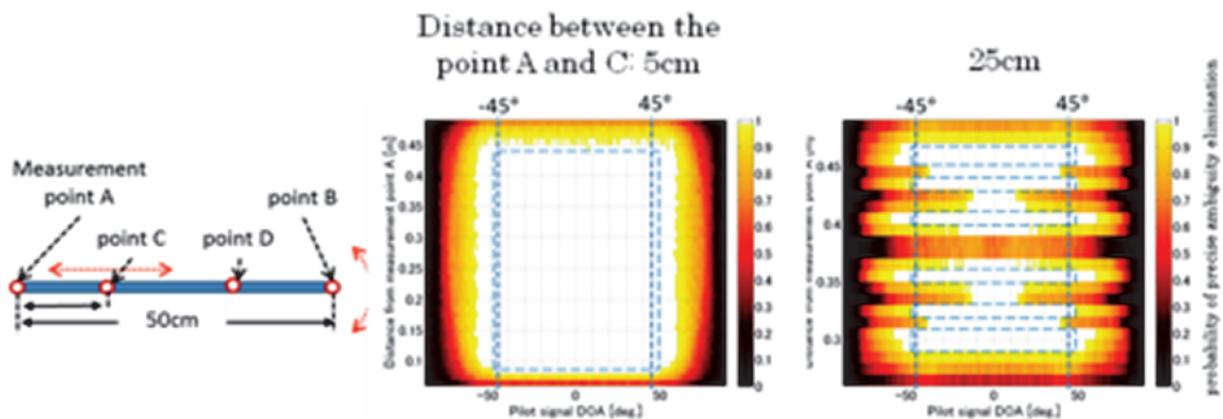


図 3 : パイロット信号受信点の間隔とパイロット信号到来角、パネル位置推定誤差の関係

参考文献

Takaki Ishikawa and Naoki Shinohara, "Study on Position Estimation of Antenna Panels for Panel-Structure Solar Power Satellite / Station with Pilot Signal", Proc. of 2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA'12), pp.474-477, 2012.9