

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)
 優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座
 (中村武研)

電子工学専攻

集積機能工学講座
 電子物理工学講座極微電子工学分野 (白石研)
 電子物理工学講座応用量子物性工学分野 (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 (山田研)
 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
 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

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 (大木研) *
 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

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
 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)

学術情報メディアセンター

コンピューティング研究部門ビジュアルライゼーション研究分野
 (小山田研究室)
 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/>

「確率的動特性をもつ系の安定化制御」

計算機性能の向上等を背景に、人の手を介すことなく自動で制御することが望まれる対象は近年ますます多様化かつ高度化している。本研究では、そのような自動制御技術に関するニーズの高まりを受け、従来は取り扱うことが容易でなかった対象のクラスの1つとして確率的動特性をもつ系に着目し、その自動制御を実現するための理論整備を行っている。動特性とは、対象の現在の出力が現在だけでなく過去の入力にも依存して定まる性質のことであり、制御を要する対象の大半はこの性質を有している。この動特性が確定的であれば、(外乱がないとき) 同じ入力に対して常に同じ出力が得られることになる。一方、現実の世界では対象に同じ信号を入力したとしても出力結果が変わることが珍しくなく、とくにそのランダム性が外乱等の外部入力由来ではなく対象固有の性質からくるものである場合には、その動特性(および入出力関係)にランダム性を想定することが望ましい。そのような対象を数値的に取り扱うためのモデルとして、本研究では動特性が次の状態方程式で記述できる確率系を採用している。

$$x_{k+1} = A(\xi_k)x_k + B(\xi_k)u_k$$

上式において k は離散時間を表し、 x_k および u_k はそれぞれ時刻 k における状態および入力を表す。また、 ξ_k は k ごとにランダムに値をとるベクトルであり、 $A(\xi_k)$ および $B(\xi_k)$ はそのランダムベクトルによって値が定まるランダム行列である。明らかにこの系の状態 x_k (したがって対応する出力) は、たとえ u_0 から u_k までの入力が確定的であったとしても確率的にしか定まらない。

制御を行う上で最も重要かつ基礎的な指標の一つに安定性(荒く言えば状態が0に収束する性質)がある。本研究では、上記確率系の安定性を必要十分の意味で特徴づける、リアプノフ不等式と呼ばれる条件式の導出に成功した。そのリアプノフ不等式に基づくことで、確率系の厳密な安定解析が可能である。また、導出したリアプノフ不等式は安定化制御器設計のための条件式へ拡張することが可能である。以下ではそのような設計の一例を紹介する。制御をかけない場合(したがって入力は0で固定)の応答が初期値 $x_0 = [1, 0, 0]^T$ のもとで図1のようになる確率系を考える。ただし図1では、系の動特性が確率的であることに対応して、100通りの見本過程の重ね合わせ(x_k の第1成分のみ)を表示している。図から明らかな通り、この系は不安定である。そのような系に対し、リアプノフ不等式に基づき安定化状態フィードバックを設計し、適用した結果を図2に示す。ただし、この図においても100通りの見本過程を重ね合わせており、その見本過程の生成には図1で用いたものと同じ初期値および ξ_k の標本を用いた。図2では状態が0に収束しており、安定化が達成されていることが確認できる。

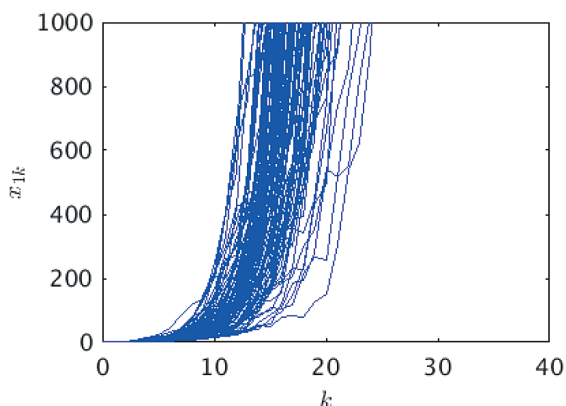


図1：制御をかけない場合の初期値応答

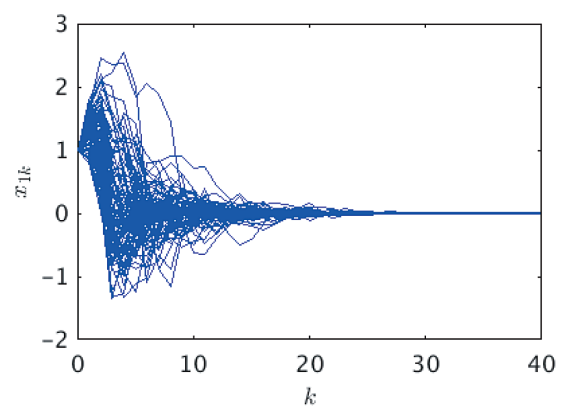


図2：制御をかけた場合の初期値応答

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/>

「van der Pol 方程式のアヒル解が生成するフェイク・カオス」

非線形振動論 [1] は、当電気系教室における古くからの伝統であるが、未だに新しい現象の宝庫である。古典的な van der Pol 方程式 (もとの 2 階の微分方程式を Liénard 変換後、定数項を付加したもの)

$$\dot{x} = x - \frac{x^3}{3} - y, \quad \dot{y} = \varepsilon(x - b)$$

は、 ε が十分小さいとき、いわゆる特異摂動系となり、アヒル (同義のフランス語でカナル (canard) とも呼ばれる) 解という特徴的な解を持つ。アヒル解は、カオスと共に非線形力学系の双壁を成し、1980 年代には超準解析等を用いて精力的に研究された。図 1 は、上式で $\varepsilon = 0.1$ のとき、いくつかの b の値 ($b = B_{n,0.1}$

で、 $B_{n,0.1}$ は漸近展開の n 項までを利用して求めたパラメタ値。詳細は [2] を参照のこと) に対する、定常状態での複数の数値解 (それぞれは閉軌道) を重ねて表示したものである (通常とは、 x と y が逆であることに注意)。このカナル解の特徴は、パラメタ b をほんの少し: $O(\exp(-1/\varepsilon))$ 変化させただけで、解が大きく: $O(1)$ 変化することである。もう一つの特徴は、解が x ヌルクライン ($\dot{x} = 0$ なる 3 次曲線: 破線) の不安定な枝 (真ん中の枝) に沿って動くことである (ほとんどの解軌道は、この枝から離れるように動くが、この枝の $O(\varepsilon)$ 近傍に、解がこの枝に沿って動く領域がある)。 ε が小さくになると、さらに不思議な振動が発生する。

図 2 は、 $\varepsilon = 0.01$ で $b = B_{9,0.01}$ のときの解である ($\varepsilon = 0.1$ のときに比べて、パラメタ b の値の選び方は、さらに微妙になる)。これは、一つのパラメタ値と一つの初期値に対する解である。方程式は 2 次元自律系であるので、このような解は幾何学的にあり得ないうえに、カオス的に不規則な様相も呈する。数値計算によって理論的にはあり得ないカオスが発生することは、古くから知られている。しかし、本研究の興味深いところは、疑似カオス発生メカニズムである。意外なことに、図 2 の疑似カオスは、 x ヌルクラインの安定な枝 (下の枝) に沿って動く「安定なダイナミクス」によって生成されている。文献 [2] では、特異摂動系の漸近展開 [3] と任意精度数値計算ライブラリ MPFR を用いた数値的解析により、安定な枝に沿って解が (左に) 動く間に、浮動小数点演算の精度の限界を超えて、この枝に収束してしまっことが疑似カオス発生原因であることを明らかにした (実は、分かってしまうと、この現象は当たり前現象であった。つまり、微分方程式を数値的に解いたことのある人には周知の事実であるが、漸近安定な平衡点に向かった数値的解軌道は「有限時間で」安定平衡点に到達 (平衡点に一致) してしまうことと類似の現象が安定な枝に沿って発生していたのである)。

参考文献

[1] Chihiro Hayashi: Nonlinear Oscillations in Physical Systems (1985). 筆者が若いときに、UCLA の書店でこの本 (最初の McGraw Hill 版ではなく、Princeton 版) を見つけて喜んで購入したことを憶えているが、日本人の書いた専門書で、これほど世界中で広く長く読まれている本は他にないのではないか。

[2] S. Doi, T. Kodama, H. Oosaki, "Importance of sufficient precision in stable dynamics for the numerical computation of canards in singularly perturbed systems," Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol. 6, no. 4, pp. 454-465 (2015)

[3] J. Moehlis, "Canards for a reduction of the Hodgkin-Huxley equations," J. Math. Biol., vol. 52, no. 2, pp. 141-153 (2006)

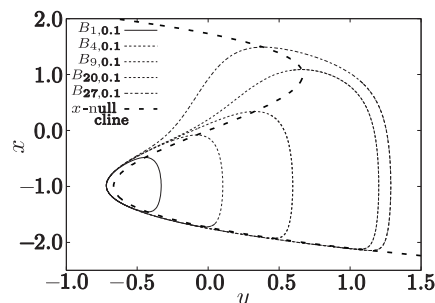


図 1: 様々なアヒル解

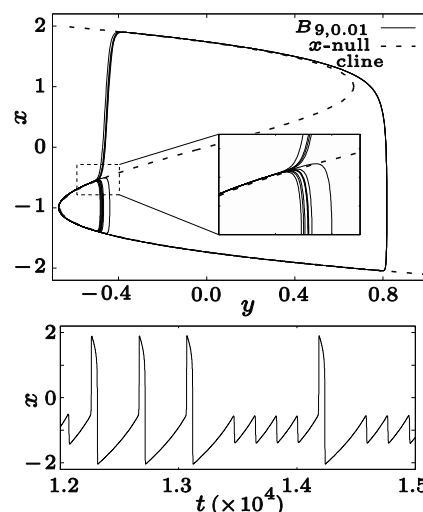


図 2: フェイク・カオス

電磁工学講座 電磁回路工学分野 (和田研究室)

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

「単導体線路モデルを用いた細線導体構造の回路表現」

メタマテリアルやプラズモニクスなど、複雑な導体構造を利用して電磁現象を操る取り組みが注目されているが、複雑な導体構造における電磁界の振る舞いを把握することは難しく、多くの場合は電磁界シミュレーションを用いた試行錯誤が必要になる。このような電磁現象が回路を用いて表現できれば、現象の明確化が可能になり、複雑な導体構造の設計へとつなげることが期待できる。構造の大きさも考慮した回路モデルとしては、分布定数線路モデルが広く用いられているが、扱える構造には制約がある。例えば図1のような細線導体構造に対して電磁波が入射した場合の現象を解析する場合、通常の分布定数線路モデルでは明示的な帰路線が必要なため扱えない。

帰路線を持たない単導体線路に対する研究は古く、マクスウェルの方程式に対して、ヘルツが電磁波の存在を示した実験の議論の中で、ゾンマーフェルトが無限長円柱導体上の電流伝搬を円筒関数を用いて扱った研究に始まる。この手法は無限長では非常に有効であるが、アンテナのように有限長の場合は端点の扱いが難しい。

このような問題に対して、完全導体の細線単導体において光速 c で電流が伝搬する解をもつことを基に、導体上の線電荷密度 Q と電流 I を変数とした、次のような波動方程式を用いた等価回路モデルの提案を行った [1]。

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} Q \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{j\omega}{c^2} \\ -j\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln ka} E^{\text{ex}}(z) \\ 0 \end{bmatrix}$$

z は導体の長手方向の局所空間座標、 a は導体半径、 k は入射波の波数、第1行の強制項は外部電界による励振を示し、第2行は電荷保存則である。単導体線路1本で長いアンテナ導体の振る舞いを表現でき、それらを接続することにより、複雑な導体構造に拡張できる。

図2はY型に接続された3本の単導体線路（それぞれ長さ3mm）に対して電界が入射した場合の接続点における電流の周波数特性を回路モデルと電磁界シミュレーション（モーメント法）とで比較したものであるが、回路モデルによって共振や放射損などの特性が表現できていることがわかる。このように単導体線路を接続した回路モデルを用いることで複雑な導体構造の回路解析が可能になれば、複雑な電磁現象の設計にもつながると考えている。

参考文献

[1] T. Kimura, T. Hisakado, T. Matsushima, O. Wada, "Time domain model for reaction of radiation on thin cut wires," Metamaterials' 2016, Poster No. 49, Crete, Greece, (September 2016).

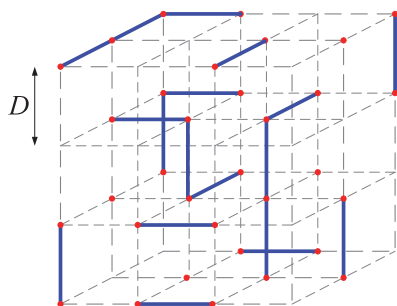


図1 細線導体構造

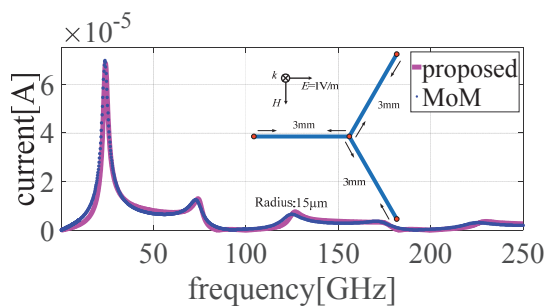


図2 Y型単導体に対する回路モデルと電磁界解析の比較

電子物理工学講座 応用量子物性工学分野 (竹内研究室)

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

「量子もつれ光を用いた、超高分解能光断層撮影技術を開発」

光干渉断層撮影技術は、眼科分野において、網膜などさまざまな組織の診断技術として急速に普及しています。さらに、肺や消化管の表層組織の断層撮影への応用も進められており、早期がんの診断などへの検討も進められています。より高い深さ分解能の実現は非常に重要です。

光干渉断層撮影技術の深さ分解能を向上させるには、より広帯域の光源を用いる必要があります。しかし光源の帯域を拡げると、光の波長ごとに光の進行速度が異なる群速度分散により、分解能が逆に劣化するというジレンマがあり、分解能は $5\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ 程度に制限されていました。それを解決する方法として、量子もつれ光の2光子量子干渉を利用する量子光干渉断層技術が、2002年に提案されました。この方法では、原理的に群速度分散による分解能の劣化がなく、高い分解能を得られることが期待されます。

我々は、今回、非常に広い帯域を持つ量子もつれ光源を開発、世界記録となる、 $0.54\mu\text{m}$ の分解能に相当する量子干渉縞を実現しました。これは、従来の光断層撮影の原理検証で記録されていた世界記録 $0.75\mu\text{m}$ を超える値です。さらに、この超高分解能が、分散媒質（水）などによってほぼ影響を受けないことも実証しました。量子もつれ光源には、物質・材料研究機構の開発した高効率な擬似位相整合素子を用いました。

実験結果を図1に示します。図1(a)は、得られた低コヒーレンス干渉縞です。横軸は光路長差、縦軸は干渉光強度を表します。この干渉縞の幅($1.5\mu\text{m}$)が、光断層撮影の深さ分解能を与えます。図1(b)は、光路中に1mm厚の水を挿入した場合の結果です。水の群速度分散の影響で、干渉縞は著しく拡がり、分解能も $1.5\mu\text{m}$ から $7.8\mu\text{m}$ に大きく劣化しています。図1(c)は、量子もつれ光子対の2光子量子干渉の結果です。横軸は、光路長差、縦軸は光子を同時に検出した回数（同時計数）を示しています。2光子量子干渉では、光路長が一致するところで同時計数が0になり、その窪みの幅が、分解能を与えます。

この実験では、量子光断層撮影の深さ分解能 $0.54\mu\text{m}$ に相当する2光子干渉が得られています。図1(d)は、光路中に1mm厚の水を挿入した場合の結果です。低コヒーレンス干渉の場合(図1(b))と大きく異なり、分解能は $0.56\mu\text{m}$ と、水が存在しない場合と比べ殆ど変化していません。現在、この量子光断層撮影の高度化に向けた研究を、JST-CRESTの支援のもと推進しています。本研究は、物質・材料研究機構の栗村直主幹研究員と名古屋大学の西澤典彦教授らとの共同研究です。

参考文献：M. Okano, H. H. Lim, R. Okamoto, N. Nishizawa, S. Kurimura & S. Takeuchi, “ $0.54\mu\text{m}$ resolution two-photon interference with dispersion cancellation for quantum optical coherence tomography” Scientific Reports 5, 18042, December (2015).

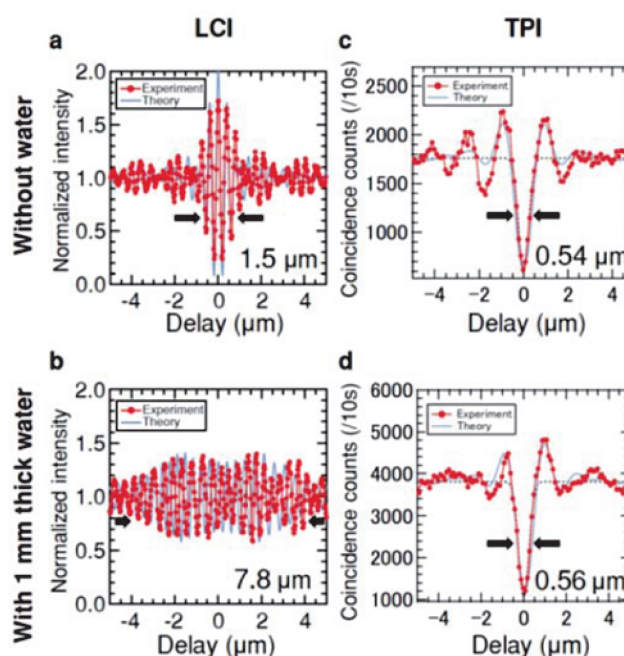


図1. 実験結果。

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 のキャリア寿命制御と超高耐圧ダイオードに関する基礎研究」

耐圧 1~3 kV 級の SiC (炭化珪素) パワー MOSFET とショットキー障壁ダイオードは実用化が始まり、各種の電源、太陽電池用パワコン、エアコン、電車、電気自動車などで顕著な省エネ効果が示されています。しかしながら、変電所等の電力インフラ用変換器や加速器用高圧電源には、10 kV 超級の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 6~8 kV 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。超高耐圧応用では、少数キャリアの注入を活用する SiC 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。しかしながら、高耐圧デバイスに有望な SiC と言えども、10 kV 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あります。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。また、電界集中緩和や素子表面での破壊を防ぐデバイス構造を作製する必要があります。今回は、キャリア寿命制御と超高耐圧 PiN ダイオードの作製に関する研究を紹介いたします。

本研究室では、SiC におけるキャリア寿命制限欠陥が炭素空孔であることを同定すると共に、高温熱酸化を施すことによって、この炭素空孔を厚さ約 200 μm に亘ってほぼ完全に消滅できることを見出しました。成長直後の SiC のキャリア寿命は 1~2 μs ですが、炭素空孔を消滅させることにより、キャリア寿命を 50~100 μs に増大できます。今回は、炭素空孔を消滅させた高純度 SiC 結晶に高温の熱処理を施すことにより、所望の炭素空孔密度、ひいては所望のキャリア寿命を得ることを目指しました。高温熱処理による炭素空孔の生成は、温度で決まる結晶の熱平衡欠陥密度を利用しており、結晶の面内および深さ方向に対して均一に炭素空孔を生成させることが可能です。図 1 に、この方法により作製した SiC 試料のキャリア寿命のマッピング結果を示します。熱処理温度の上昇と共に炭素空孔密度が増大するため、キャリア寿命が短くなることが分かります。本手法を用いることにより、デバイス動作に最適なキャリア寿命を均一かつ再現性良く得られることが分かりました [1]。

次に、炭素空孔を消滅させた高純度 SiC 結晶を用いて PiN ダイオードの作製に取り組みました。素子端部における電界集中を緩和させるため、独自の接合終端構造を考案し、多段イオン注入により形成しました。また、表面破壊を抑制するために、ポリイミド膜を活用しました。厚さ 98 μm の高純度 SiC 層を用いて作製した PiN ダイオードの順方向特性を図 2 に示します。キャリア寿命増大により顕著な特性改善が見られ、1.6 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ という極めて小さい (優れた) オン抵抗を得ることができました。少数キャリア注入がない場合のオン抵抗は約 150 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ と概算されますので、キャリア注入による伝導度変調効果が大きく働いていることが分かります。このダイオードは 13 kV という高い耐圧を示し、温度上昇と共に耐圧が増大することを確認しました。また、より厚い SiC 結晶を用いたダイオードでは約 27 kV という最高耐圧も達成できています [2]。今後は素子構造の工夫により注入キャリアの深さ方向分布を制御し、さらなる高性能化を目指します。

[1] E. Saito et al., Appl. Phys. Exp. **9**, 061303 (2016). [2] N. Kaji et al., IEEE Trans. Electron Devices **62**, 374 (2015).

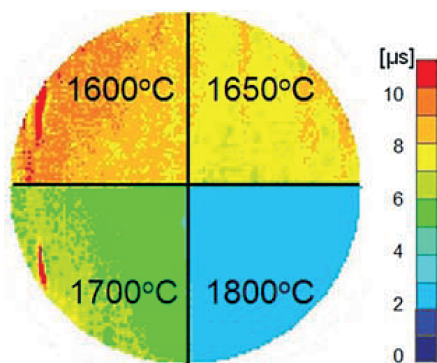


図 1 異なる温度で熱処理を施した SiC 試料のキャリア寿命分布

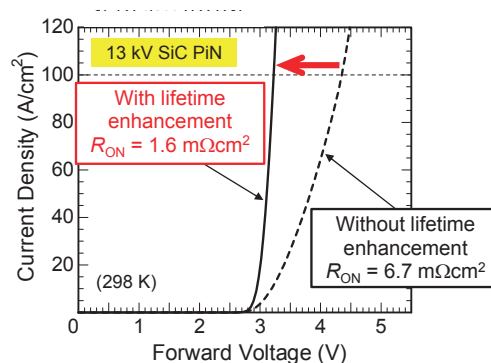


図 2 13 kV 級 SiC PiN ダイオードの順方向電流-電圧特性 (キャリア寿命増大の効果)

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野（山田研究室）

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

「ナノ空間に局在する液体中でのエネルギー散逸に関する研究」

固体と液体の界面の極近傍においては、液体分子が構造化するため、密度の変動や粘性の急激な上昇など、巨視的な液体とは大きく異なる物性が出現する。こうした局所領域（=ナノ空間）の液体物性を明らかにすることは、例えば水質浄化において重要となる多孔質物質内の液体の透過・吸着など、さまざまな実用分野への応用展開に密接につながる。われわれは、液中動作可能な周波数変調原子間力顕微鏡（FM-AFM）をベースとする3次元フォースマップ法という新たな手法を用いることで、水溶液-固体結晶界面の水和構造の分子レベルでの可視化、さらにはその界面の散逸エネルギー（=界面摩擦）の定量測定に成功した。固液界面近傍での散逸エネルギーの変化は原子間力顕微鏡（AFM）の探針運動の減衰が表面からの距離に依存することに起因するが、これは主に液体の局所粘性によって引き起こされる。本研究では、この減衰の距離依存性について着目し、散逸エネルギーから減衰係数への変換式を新たに導出するとともに、これを実験的に検証した。

ここでは、実験を想定して、図1に示すように液体中でAFM探針（半径 R の球と仮定）が振動（振動振幅 A ）する際のその振動運動の粘性抵抗による振動エネルギーの散逸を考える。式(1)が新たに得られた、散逸エネルギー $D(z)$ から運動の減衰を記述する係数 $\gamma(z)$ への変換式である。この変換式は、AFM分野ではよく用いられる周波数-相互作用力変換の式、いわゆるPadé近似を用いるSaderの変換式の導出を基にして得られた。

$$\gamma(z) = \frac{2}{A^2} \frac{D}{\omega^2} - \frac{1}{4\sqrt{\pi}A^{3/2}} \int_z^\infty \frac{1}{\sqrt{z'-z}} \frac{d}{dz'} \left(\frac{D}{\omega^2} \right) dz' + \sqrt{\frac{2}{A}} \int_z^\infty \frac{1}{\sqrt{z'-z}} \frac{d^2}{dz'^2} \left(\frac{D}{\omega^2} \right) dz' \quad (1)$$

ここで、式中の D および探針振動の角周波数 ω は、探針-試料間距離 z に依存する関数となる（ $D=D(z)$, $\omega=\omega(z)$ ）。この変換式は3つの項から成るが、単純な振動運動の記述でよく見られるように、 $D(z)$ が定数の場合は、右辺は第1項だけとなり $\gamma(z)$ も定数となる（ $\gamma(z)$ が z に依存しない一様な空気抵抗のような系における減衰振動）。

実験で得られた散逸エネルギーの距離依存曲線（図2(a)）を、式(1)で変換したところ、遠距離では第1項が支配的であり、近距離では第1項からの寄与に加えて、第3項からの寄与が大幅に増大する。変換した減衰係数の曲線は（図2(b):水全体からの寄与）、水の巨視的粘性から理論的に導かれる表面減衰によって近似される、言わば巨視的な表面層の水からの寄与と（図2(b):巨視的な水表面層からの寄与）、それ以外の表面極近傍の水分子層からの寄与（図2(b):ナノスケール層の水分子からの寄与）に分けることが分かった。このように、本手法によって、新たなナノスケール空間に水分子層の定量的な粘性係数評価法が有効であることが分かり、今後、表面水分子層がもたらす分子レベルでの摩擦・吸着の基礎的理解とその応用が進展するものと期待される。

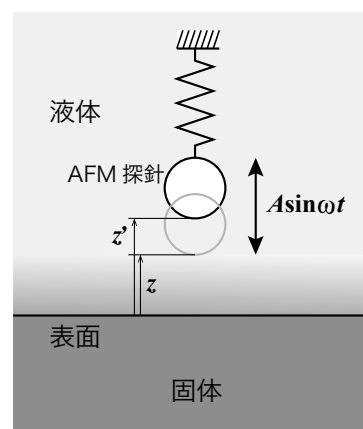


図1: 固液界面近傍で振動運動するAFM探針の模式図。近似的にばね-質量（球:AFM探針）系の単振動として考えられる。実験で使用されたAFMでは、周波数129 kHz, 振幅 $A = 0.16$ nm.

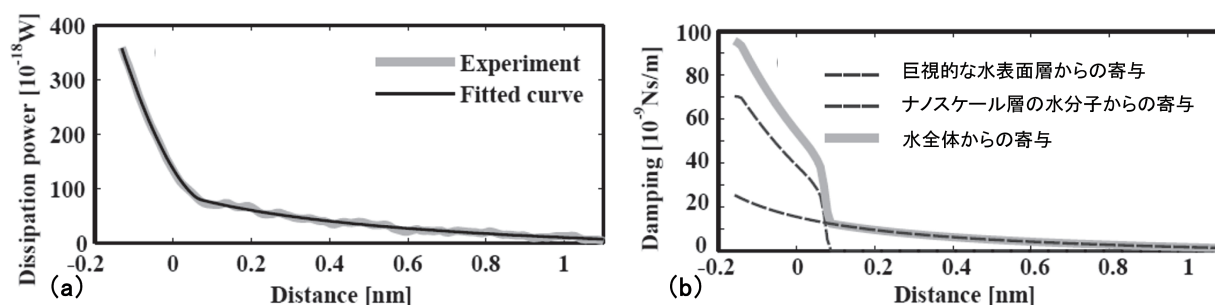


図2: (a) FM-AFMによって得られた散逸エネルギーの探針-試料間距離への依存曲線およびそのフィッティング曲線。(b) (a)のフィッティング曲線から変換された減衰曲線とその巨視的寄与と微視的寄与

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/>

「同位体 $^{171}\text{Yb}^+$ イッテルビウムイオン 時計遷移の単一イオン分光」

原子の共鳴周波数は、その準位構造に基づいて正確にきまる。この特長から、セシウム原子のマイクロ波領域の共鳴が、現在の秒の定義となっている。原子時計とよばれる原子の共鳴に制御された発振器を、この共鳴を基準として構成すると、周波数の不確かさは 10^{16} 台に達する。原子時計の出力周波数のランダムなゆらぎは、何周期も平均すると小さくなる。周期が速い、すなわち周波数の高い共鳴を基準とすると、短時間で平均回数が増えてゆらぎは減少する。この原理から、基準共鳴が光領域の原子時計、すなわち光時計が注目されている。

周波数ゆらぎが減少すれば、小さい桁まで周波数を決定できる。しかし、磁場など環境による周波数変化を正確に補正できなければ、共鳴周波数は正確には決められない。共鳴周波数の不確かさを低減させるには、環境に対する周波数変化が小さい共鳴を選択し、かつ、共鳴周波数を変化させる要因が少ない環境に原子をおく。そのような光時計の方式として、単一イオン光時計がある。単一イオン光時計では、原子をイオン化して超高真空中の狭い空間に1個だけ、電磁場で閉じ込めて利用する。孤立した環境に原子をおくため、共鳴周波数の不確かさはきわめて小さいと予測される。

我々は、イッテルビウムイオン (Yb^+) に注目した。 Yb^+ には磁場に鈍感な基準共鳴 (以下、時計遷移) をもつ安定同位体 $^{171}\text{Yb}^+$ がある。 Yb^+ の奇数同位体は核スピンをもつため、各準位は超微細構造に分裂し複雑になる。 $^{171}\text{Yb}^+$ では、核スピンのため超微細構造はもっとも単純となり、必要とするレーザー光の本数が少なくすむ。同様の特長をもつイオン種は、蛍光検出に真空紫外光が必要な Hg^+ しかなく、紫外光で十分な Yb^+ は有望なイオン種の1つである。

単一 Yb^+ は、超高真空中にイオントラップとよばれる電極を設置し、その電極に囲まれた空間に捕捉して用いる。イオンは、オープンから原子をビーム状にとばし、共鳴するレーザー光をトラップ内で照射してイオン化ポテンシャル以上に励起し生成する。トラップした Yb^+ には、強い蛍光を発する紫外の共鳴から少し低周波にずらしたレーザー光を照射する。これにより蛍光を観測するとともに、レーザーが原子に与える力を利用してトラップ中心にほぼ静止させる、レーザー冷却を行う。 $^{171}\text{Yb}^+$ ではイオン1個あたり毎秒の5,000個の蛍光光子が検出され、イオン1個を識別してトラップ可能である。そして、時計遷移を励起するレーザーを照射し、スペクトルを取得する。時計遷移はスペクトル幅が狭いので、発振スペクトルを狭帯域化したレーザー光を照射する。観測した単一 $^{171}\text{Yb}^+$ の $^2\text{S}_{1/2}(F=0) - ^2\text{D}_{3/2}(F=2)$ 時計遷移のスペクトルを図に示す。イオンは1個なので、1回の観測ではレーザーの光子を吸収した、しなかった、という情報しか分からない。レーザーの周波数を固定して何回も繰り返し観測して励起確率を求め、レーザー周波数を掃引してスペクトルを得る。図1は磁場によるスペクトルの分裂で、中央が磁場に鈍感な時計遷移である。図2はその中央を精密に周波数掃引して得た、基準スペクトルである。今後は、基準スペクトルにレーザーを制御し、光時計を構築する。そして、2台の比較により不確かさ評価を行う。

本研究には時計遷移分光を行った博士課程の今井康貴氏をはじめ、多くの学生諸君が貢献している。

参考文献: Y. Imai, T. Nishi, M. Nishizaki, S. Kawajiri, Y. Muroki, R. Ikuta, K. Matsumoto, M. Kitano, and K. Sugiyama, *Radio Science*, 51, pp.1385-1395 (2016).

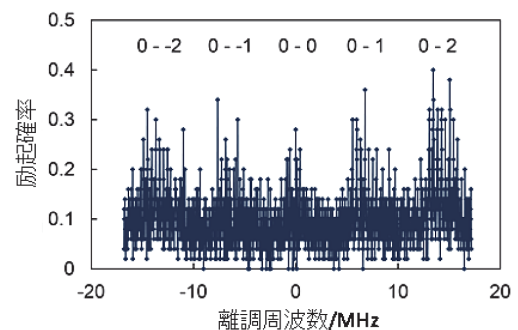


図1 磁場で分裂したスペクトル

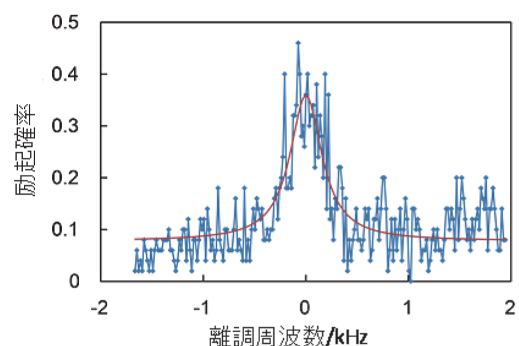


図2 高分解能掃引。スペクトル幅 380 Hz。

知能メディア講座 画像メディア分野

<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興味推定」

本研究室で取り組む、水中3次元形状復元・追跡に関する「アクアビジョン」と、人のしぐさや行動から心的状態を推定しながら人とやり取りする「マルチモーダル・インタラクション」のうち、後者に焦点を絞って紹介します。

スマートフォンやパソコンなどの情報端末を用いて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、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（プロアクティブ）に情報を提示するようなインタラクティブ（対話）システムの開発を進めています。

このとき、(1) 利用者の言語情報だけでなく、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。以下は、特に(1)の問題に対し、カタログ閲覧時の視線運動情報から利用者の興味を推定する手法（図1）の例です。

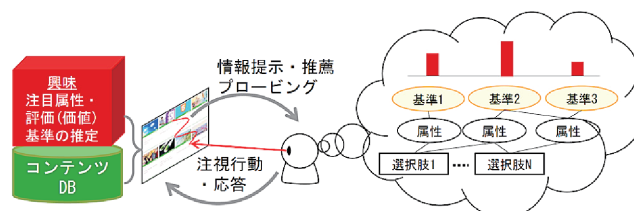


図1 視線計測を用いた対話的選択・意思決定支援

1. マルチスケール正確検定による注目属性検出

閲覧者の興味を推定するには、その人が注目する属性を知ることが重要です。しかし、選択肢が複数の属性を持つ場合には、実際に注目された属性を分離できないことがしばしばあります。そこで、各選択肢への注視を個別に解析するのではなく、閲覧者が「見比べ」た選択肢をまとめて解析し、有意に偏りを持った共通項として**注目属性**を検出する手法を考案しました（図2）。統計における正確検定を様々な長さの時間窓に適用し、いつ、どの属性に、どの長さ注目していたかを、リアルタイムに検出することが可能です。

2. 選択時の評価基準候補の自動獲得

ある選択対象ドメイン（図3の例ではノートPC）に対して、選択者（例：購入者）がどのような**評価基準**（例：使用目的）を持ちうるかという情報は、マーケティング等の実用上重要です。しかし、ラダリングなどのインタビュー手法では、長時間かつコストをかけた調査が必要となります。そこで、1の手法と統計的機械学習を組み合わせ、カタログ閲覧を行う大勢の視線データから、閲覧時に「どの属性の組み合わせが注目されやすいか」を抽出することで、選択者の背後にある評価基準候補を自動獲得する手法を提案しました。

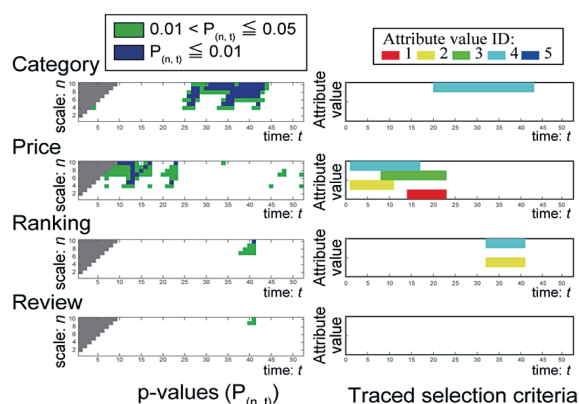


図2 マルチスケール検定による注目属性検出

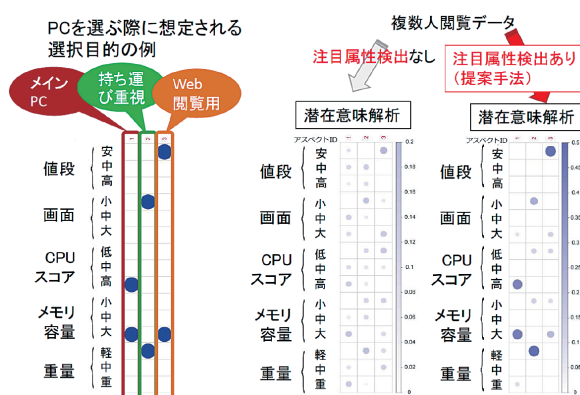


図3 選択時の評価基準の自動獲得

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/>

「イジングモデルの FPGA 実装による最大カット問題の高速求解」

本研究室では大規模集積回路 (LSI) を用いた応用システムの一つとして、組合せ最適化問題の解を高速に求めることのできる新たな計算機について研究を行っている。組合せ最適化問題には様々な実用的応用があることから、これを高速に解くことは非常に重要な課題となっている。このため、これまでに様々な近似解法が提案されてきた。その中で近年、イジングモデルと呼ばれる物理現象を模擬した計算モデルを用いた解法が注目されている。本研究では、イジングモデルに基づき組合せ最適化問題の解を求める計算機 (イジングソルバ) の実現に向け、その構成法について検討を行っている。

イジングモデルは磁性体の振舞いを解析するために考案されたモデルであり、図1のように「スピン」と呼ばれる節点が格子状に接続された構造からなる。各スピンは上向きまたは下向きのいずれかの状態を取る。図2に示すように各スピン σ_i は隣接する他のスピンからの相互作用 J_i を受け、局所エネルギーが最小となるように自身のスピンの向きを決定する。全てのスピンの局所最適化を繰り返し行うことにより、イジングモデル全体のエネルギーが減少し、最終的に安定状態へと収束する。

上記のイジングモデルを用いることで、様々な組合せ最適化問題が解けることが知られている。つまり、イジングモデルの全体エネルギーを目的関数とみなし、解きたい問題に応じてスピン間の相互作用を設定すれば、スピン操作を繰り返し行うことにより目的関数の最小化が可能となる。スピン操作は並列に行うことができるため、ハードウェアによりイジングソルバを実現すれば大幅な高速化が見込まれる。

本研究では図3に示すイジングソルバのハードウェア・アーキテクチャを提案し、FPGA 実装を行った。提案アーキテクチャは、各スピンの振舞いを模擬する演算器を格子状に並べた超並列構造を特徴とする。また提案ソルバでは、求解過程において必要となる乱数生成機構を簡略化することにより、回路規模を小さく抑えている。提案ソルバ (HW Ising) により最大カット問題を解いた際の求解速度を図4に示す。既存のソフトウェアソルバ (CPLEX) と比較し、同程度の精度の解を7,200倍高速に求めることができた。

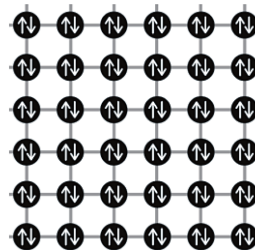


図1 イジングモデル

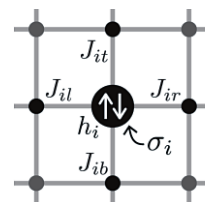


図2 イジングモデルの各スピン

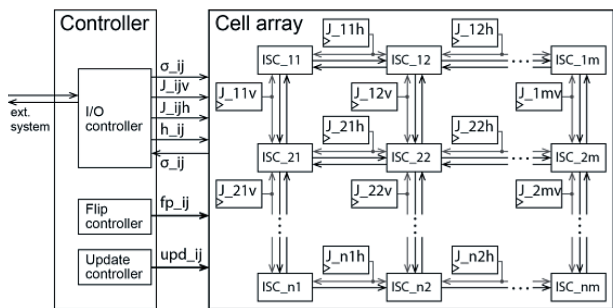


図3 提案イジングソルバの全体構成

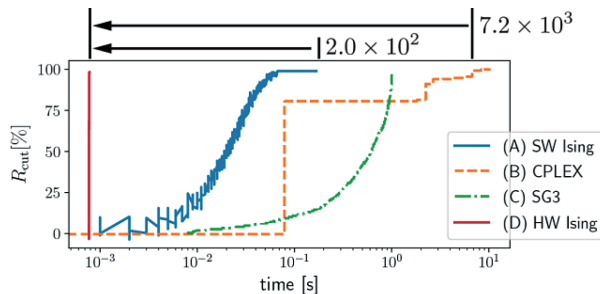


図4 各種イジングソルバによる求解性能の比較

参考文献

[1] Hidenori Gyoten, Masayuki Hiromoto, and Takashi Sato: "Area Efficient Annealing Processor for Ising Model without Random Number Generator," IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E101-D, No.2, Feb. 2018.

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://pub-asp.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

「医用超音波画像の超高分解能化に関する研究」

超音波エコーによる画像化技術は、生体内の可視化手法として広く医療や健診の現場で用いられています。MRIなどに比べて装置が小型で安価であり、X線のような被爆も伴わないことが特長ですが、分解能の点で劣ることが大きな制約となってきました。

当研究室では、電波工学の分野で開発されている高解像度化技術を医用超音波に応用することでこの問題の解決に貢献することを目指しています。特に、携帯電話の基地局において利用者の分離識別などにも用いられるアダプティブアンテナによる高分解能化技術に着目し、その原理をさまざまな形で利用してきました。

この技術は、複数のアンテナ素子の出力を合成する際に、それぞれの素子からの出力にかかる重みを適応的に調整することで不要信号を除去するものです。医用超音波にこれを応用する際には、所望信号と不要信号が相関を持つことが問題になります。これを相関行列の時間と距離の2次元平均により除去することで高い角度分解能を維持しながら安定な画像を得ることが可能となりました [1]。

また、受信信号を多数の周波数成分に分割し、そのそれぞれをアンテナ素子とみなして処理する周波数領域干渉計法 (FDI; Frequency Domain Interferometry) に同様の安定化技術を導入することにより、距離方向の分解能を向上することができます。図1に、豚大動脈の縦断面超音波画像を示します。従来の手法 (左図) では図の上下に見える血管壁のそれぞれについて、内壁と外壁からのエコーが見られますが、その厚みまでは正確に捉えることができませんでした。これに安定化を施したFDIを適用することで、右図に示すほぼ1桁高い距離分解能を有する鮮明な画像を得ることに成功しました [2]。この手法により、血管内壁にコレステロールが付着することによる狭窄などの現象をより鮮明に画像化することが可能になり、医用超音波画像化技術の高度化に寄与すると期待されます。

参考文献

- [1] S. Okumura, A. Kita, H. Taki, Y. Nagatani, M. Matsukawa, and T. Sato, Application of spatial domain interferometry with the Capon method to transcranial Doppler ultrasonography: a simulation study, *Advanced Biomed. Eng.*, Vol.4, pp.73-79, 2015.
- [2] H. Taki, K. Taki, M. Yamakawa, T. Shiina, M. Kudo, and T. Sato, High-range-resolution imaging using frequency domain interferometry with stabilization techniques for real-time vascular ultrasound, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.54, No.07HF05, pp.1-10, 2015.

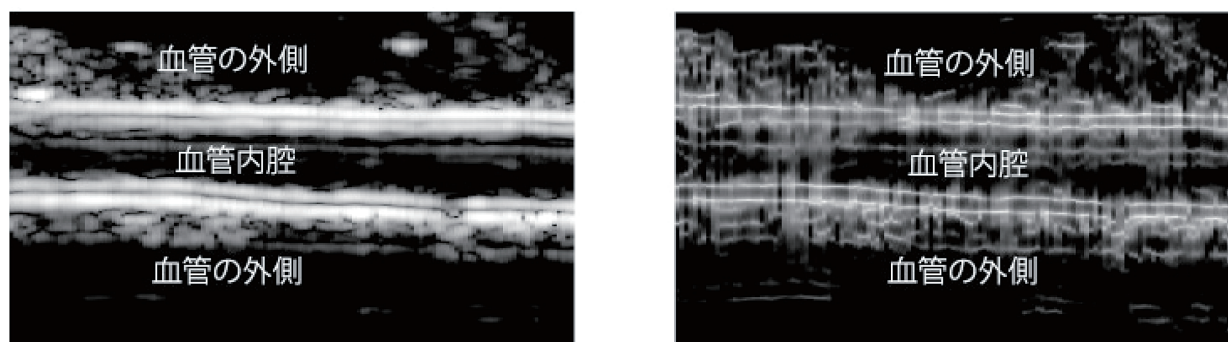


図1. 豚大動脈の縦断面超音波画像 (血管壁の厚み約 0.35mm)。左図は従来法 (分解能約 0.1mm)、右図は提案法 (分解能約 0.01mm) による処理結果。

システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研究室)

<http://ishiilab.jp>

「ヒトの糖代謝系を制御するシステム科学」

論理生命学分野では、「学習するシステム」としての「生命」や「知性」の本質を明らかにすることを目的として多岐にわたる研究を進めています。我々の行っている研究の1つに、細胞レベル [1] からヒト個体レベルまで、様々な階層の生物システムの制御があります。本稿では、我々が東京大学黒田真也研究室と共同で行っているヒトの糖代謝系制御に関する研究についてご紹介します。

糖代謝系は、様々な下位プロセスの影響を受けた複雑な力学系であることが知られています。消化管から吸収されたブドウ糖が血中をまわり、全身の細胞で消費される一方で、インスリンなどのホルモンは糖代謝に関わる酵素活性を調節します。血糖値（血中ブドウ糖濃度）は系の状態を知るための重要な指標の1つです。実際に、ブドウ糖経口摂取時の血糖値の反応は糖尿病の診断に使われます [2]。糖代謝系に問題があり、高血糖状態が慢性的に続く病気が糖尿病です。糖代謝系の制御は、糖尿病の治療や予防に貢献すると考えられます。しかし、系に影響するあらゆる要因を計測できるわけではないため、系の全容は明らかではありません。さらに個体差も大きく、これを制御することは容易ではありません。

我々のプロジェクトでは、系のダイナミクスの時間構造に着目しました。同じ分量の食事を同じ時間範囲内に摂るとしても、一定ペースでゆっくり食べるのと、急いで一度に食べるのとでは、血糖値上昇に与える影響が異なると考えられます。他に、血糖値上昇を抑える食事方法があるかもしれません。

我々はシステム同定・システム制御の方法論に基づいてこれを調べました。まずブドウ糖経口摂取時の血糖値や血中インスリン濃度などの臨床試験データに基づいて、非線形常微分方程式モデルを同定し、ダイナミクスのシミュレーションを可能にしました。次に、一定量 50g のブドウ糖を一定時間 60 分以内に経口摂取するという拘束条件のもとで多数のシミュレーションを行い、摂取後の血糖値ピークをなるべく低くするようなブドウ糖経口摂取ペース（時間パターン）を設計しました。その結果、ブドウ糖を一定ペースでゆっくり摂取するよりも、おおよそ 0 分、30 分、60 分後の 3 回に分けて摂取するほうが、摂取後の血糖値ピークが低くなる結果が予想されました（図左）。こうして設計したブドウ糖摂取ペースで実際に被験者にブドウ糖溶液を飲んでもらったところ、確かに一定のペースでゆっくり摂取する場合よりも血糖値ピークが低くなりました（図右）。同様の設計を他の被験者について行くと、個人差によるばらつきを含むものの、一定のペースでゆっくり摂取する単純な時間パターンよりも、摂取後の血糖値ピークを下げる時間パターンが存在する可能性があることが分かりました。直感では設計できないような摂取時間パターンや、その個人差の理由を知るためには、より精緻化した数理モデルを用いた解析を行っていく必要があります。これからも、システム同定やシステム制御の方法論を用いることで、生物という非線形で個体差のある複雑なシステムの理解と制御を目指します。

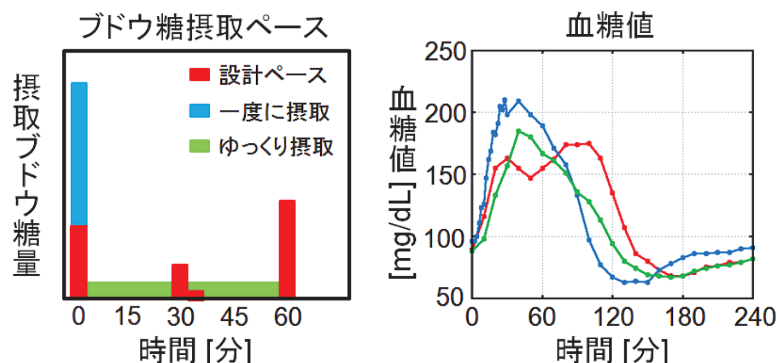


図 ブドウ糖摂取ペースと血糖値変動．設計した摂取ペースで血糖値ピークを抑制できた

[1] Murakami, Y. et al. (2017) Biophysics and Physicobiology. Vol.14, pp.29-40

[2] 日本糖尿病学会．(2016) 糖尿病治療ガイド 2016-2017

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (中村祐司研究室)

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

「トカマクのディスラプション時における MHD 平衡ダイナミクスに関する研究」

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。

プラズマのトーラス型磁場閉じ込め装置において、磁場の抵抗性拡散時間やプラズマ・コイル等を含めた回路系の過渡応答時定数と比べて急激にプラズマが変化する現象が見られます。とくに、装置サイズが大きく時定数が長い核融合炉を考えると、プラズマ電流立ち上げおよび加熱フェーズ、ディスラプション時などにおける磁気流体力学 (MHD) 的平衡の時間発展が制御の観点から問題となります。

たとえば、トカマクにおけるディスラプションと呼ばれる現象では、不安定性などを原因とする急激な電子温度の低下とプラズマ電流分布の再配分に伴い全プラズマ電流の減衰が起こり、垂直位置移動現象 (VDE) を伴って最終的にプラズマが消失してしまふことがあります (図 1)。このときの電子温度 (プラズマ電気抵抗) やプラズマ電流分布の変化の時間スケールは装置の応答時定数より十分に短く、真空容器などの構造物に誘導起電力を与え、大きな渦電流を流します。逆にこの渦電流とその過渡応答がトロイダル電流減衰時の MHD 平衡の時間発展に大きな影響を与えます。真空容器中を流れる渦電流がトロイダル電流減衰に及ぼす影響を簡単なモデルで調べた結果を図 2 に示します。渦電流は縦長断面を持つトカマクプラズマの垂直位置不安定性の抑制・制御には有益であることが知られていますが、ディスラプション時の電流の減衰率は、渦電流を考慮すると短くなるのが分かります。ディスラプションが起きると構造物に流れる電流により大きな電磁力が生じたり、プラズマ中に発生する電場によって逃走電子が発生したりします。したがって、ディスラプション時の MHD 平衡ダイナミクスの物理メカニズムを明らかにし、予測モデルを構築することは、逃走電子の挙動や構造物への電磁力などを解析する基礎となり、その制御シナリオを開発することは、磁場核融合炉実現のための重要な課題です。

このため、国内外で軸対称性を仮定した 2 次元コードを用いた実験解析が行われていますが、電流減衰のメカニズムを明らかにするには、電流減衰時の電子温度、有効電荷数、電流密度などの分布の時間発展を考慮する必要があるなどの問題点も指摘されており、さらなる実験との系統的比較検証が必要です。また、渦電流や外部コイルの非軸対称性を考慮する必要もあり、本研究室ではディスラプション時の MHD 平衡ダイナミクスの物理メカニズムを明らかにすることを目的とし、世界的にもまだほとんど開発が進んでいない、3 次元的に MHD 平衡ダイナミクスを解析する新しいシミュレーション・コードの開発を進めています。

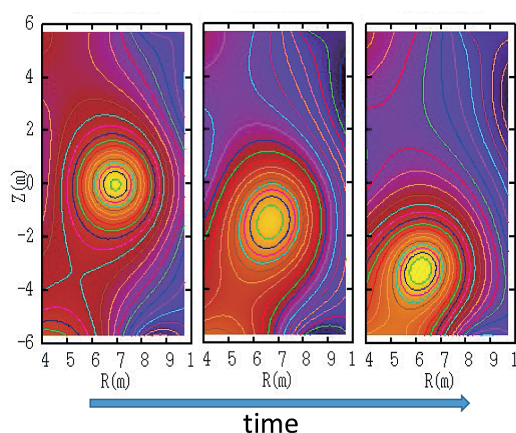


図 1 垂直位置移動現象 (VDE)。プラズマ (図で示された磁束の等高線の内、閉じた等高線の領域) が時間とともに下方へ移動し消失。

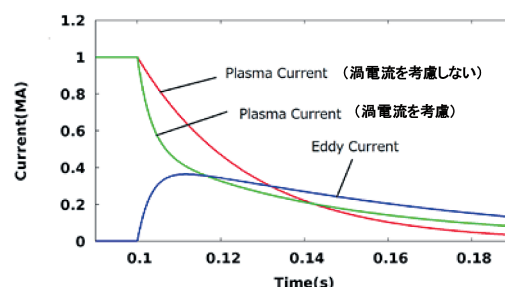


図 2 全プラズマ電流減衰における渦電流の影響。プラズマを閉じ込める真空容器に渦電流が流れることにより、電流減衰率が変化。

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

「核融合を利用した核テロ対策技術」

本研究室では、荷電粒子と電磁界との相互作用を高度・高精緻に制御することにより 21 世紀の人類に計り知れない恩恵をもたらす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、高パワーミリ波を用いた加熱・電流駆動システムの開発、プラズマ乱流・揺動や高速イオン励起不安定性に関連したプラズマ計測と解析、自由電子レーザを代表とする先進量子放射源を実現するための高輝度電子ビームの発生や、ここで紹介する慣性静電閉じ込め（Inertial Electrostatic Confinement: IEC）と呼ばれる方式の小型のプラズマ核融合装置の開発とその中性子源としての応用の研究を行っています。

核融合反応（D-T または D-D）による中性子源には、他の様々な核反応による中性子源には無い魅力的な特長があります：

『ポータブル』比較的低い数十から百 keV 程度の加速エネルギーで高い反応断面積が得られるため、小型のポータブル中性子源を構成することができる。

『単色中性子』反応生成物が 2 個であることと、必要な加速エネルギーが反応によるエネルギー利得と比べて十分小さいことから、発生する中性子は単一エネルギーとなる。

我々の研究室では、約 20 年前に IEC 核融合の実験研究に着手し、動作メカニズムの解明や高性能化の研究、D-³He など先進燃料核融合の実験や計測技術の開発などを進めてきました。現在では、毎秒 1 億回を超える D-D 核融合反応を定常的に起こすことが可能になり、上記のような「核融合ならではの」の特長を活かした核融合中性子源応用の研究も進めています。そのうちの 하나가、表題にある「核テロ対策技術」です。

右の図のように、検査対象である不審物に中性子を照射して、隠匿されている核燃料物質に誘起された核分裂反応で発生する二次中性子を検出します。課題は、バックグラウンドとなる照射中性子と比べて遙かに少ない二次中性子を、如何にして弁別して検出するかにあります。

早くから核テロを現実の脅威ととらえていた米国を中心に、多くの先行研究がこの課題に取り組んできましたが、残念ながら解決には至っていませんでした。

我々の提案した方法では、図中の写真にあるような IEC 方式のポータブル D-D 核融合中性子源を利用します。照射される中性子は 2.45 MeV の単一エネルギーです。不審物中の内容物などで散乱されると 2.45 MeV より低いエネルギーに分布します。一方、核分裂反応で発生する二次中性子のエネルギーは 2.45 MeV を越えて広く分布し、およそ 3 割が 2.45 MeV 以上にあります。したがって、2.45 MeV 以上のエネルギーだけに着目すれば、高い S/N 比で二次中性子を検出することができます。

原理実証と feasibility study を経て、現在はこの原理に基づくポータブル検査装置の試作機開発を産学連携で進めています。核燃料物質の中でも特に検知が困難なウラン 235 を検知できる装置は、技術的難易度の高いポータブル装置はおろか、据置型装置も未だ存在しません。核テロに対する防備を劇的に高めるために、テロ対策の現場で実用可能な検査装置を早期に実現したいと考えています。



不審物中に隠匿された核燃料物質の検知

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/>

「プラズマにビームを当てて密度の揺らぎを計る」

私たちの研究室では磁場閉じ込め方式による核融合プラズマの基礎研究をしています。具体的にはプラズマを高温・高密度で閉じ込める事のできる磁気容器（磁場配位）の最適化を行っています。プラズマはイオンと電子の集合体であり流体としての性質を持っています。電気伝導性も併せ持つため電磁流体と呼ばれています。流体ですのでプラズマ中には渦や乱流といった揺らぎが生じ、これらはプラズマの閉じ込めと密接に関連しています。従って揺らぎ（揺動）の構造を計測し、その発生メカニズムと輸送への影響を理解することが重要となります。一方で一般的にプラズマの乱流による温度や密度などの揺らぎの大きさは、それら物理量の平均値の0.1%のオーダーととても小さく、計測が容易ではありません。たとえば液体の温度揺動を測定することを想定してみましょう。300Kの液体の中の0.3Kの温度の揺らぎを、速い時間応答で且つその空間構造（多点）を計るようになります。これだけでも計測・解析方法を工夫する必要があることが想像できると思います。さらに高温なプラズマで内部揺動を観測する場合には非接触法が必要となります。非接触法で高温プラズマの密度の揺らぎを計る方法の一つにビーム放射分光法があります。この方法ではプラズマ中に数十 keV に加速した中性の水素ビームを入射して、ビームとプラズマとの反応によるビーム原子からの励起光（ビーム輝線：H α 光）を分光計測します。ビーム輝線の強度はプラズマ密度に比例するため、その揺らぎの振幅から密度揺動強度が得られます。この計測法は (1) ビーム輝線はビーム速度でドップラーシフトするため背景 H α 光との分離が容易である、(2) ビームと観測視線が交差する体積内の局所的な密度揺動の情報が得られる、という利点があります。

私たちの研究室ではプラズマ実験装置「ヘリオトロン J」に最適なビーム放射分光装置を開発し、プラズマ密度揺動の空間分布を計測しています。開発にあたり最初にビーム輝線のシミュレーションを行い、最適な観測視線を決めました（図1参照）。また発光の微弱な揺らぎを計測できるように、高いスループットの分光光学系や高感度のアバランシェフォトダイオードを用いています。図2は測定結果の一例です。周期が0.5-1 ミリ秒程度の密度揺動がプラズマ閉じ込め領域の外側に進んでおり、プラズマ粒子の吐き出し現象を示しています。これは特殊な燃料供給法で高密度の放電を行った際に発生しており、この吐き出しが止まると自発的に閉じ込めが改善される現象が観測されています。高周波の乱流揺動に包絡線解析を適用すると、粒子の吐き出し現象と高周波揺動の包絡線の時間発展とが同期することがわかりました。高周波乱流と閉じ込め改善との関係を明らかにするためには乱流揺動と輸送との因果関係を調べる必要があります。このためにはビーム輝線信号の S/N 比を改善する必要があり、装置の対物光学系や受光素子の改良を進めています。

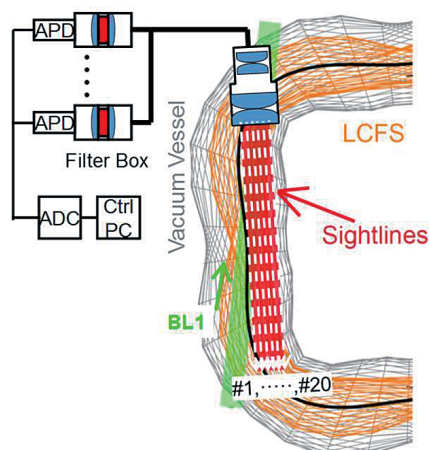


図1 ヘリオトロン J に設置したビーム放射分光装置の模式図。

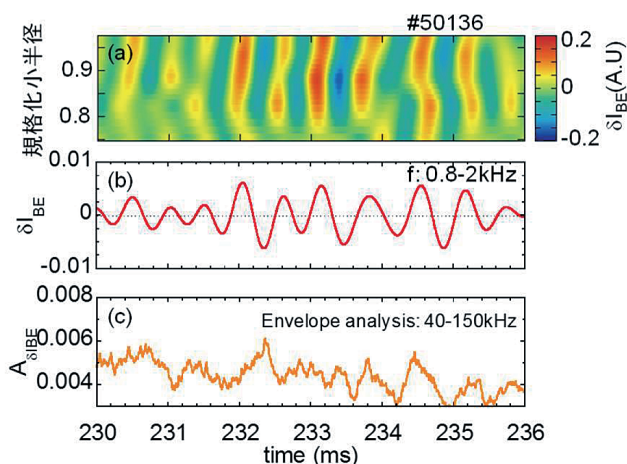


図2 (a) ビーム輝線揺動の時間空間発展、および (b) 吐き出し現象に相当する周波数のビーム輝線揺動、(c) 高周波 (40-150kHz) 揺動の包絡線信号。

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>

「パラメトリックスピーカーを用いた低騒音型 RASS システムの開発」

近年、集中豪雨など極端な気象現象の頻度が増しているが、地球温暖化がその一因であると言われていいる。極端気象のメカニズムを理解し、天気予報の精度を向上させ、減災を目指すことが重要である。数値モデルの高度化により天気予報精度が格段に改善されているが、同時に観測結果をもとに数値モデルの予報値を修正するデータ同化の発展も大変重要である。アメダスに代表される地上定点観測では各種センサーによって降水量、気温、湿度、気圧、風向・風速等が常時測定されている。また、高層大気では、ラジオゾンデ (小型気球) による高度プロファイルの直接測定に加えて、電波や光による地上や衛星からのリモートセンシングが行われている。本研究室では、主に風速の高度プロファイル観測を目的とした大気レーダー (ウィンドプロファイラー; WPR とも呼ばれる) の開発を行っている。ここでは、WPR と音波を併用して気温の高度プロファイルを測定する RASS (Radio Acoustic Sounding System) 技術のための低騒音型スピーカーシステムの開発について紹介する。

WPR はパルス状の電波を送信し、大気乱流による屈折率変動からの電波散乱 (エコー) を検出する。RASS では、WPR 近傍から音波を上空大気に向かって発射し大気密度に疎密を生じさせ、人工的に屈折率変動を作り、そこからのエコーを WPR で検出する。音波面からの後方散乱 (RASS エコー) のドップラーシフトから音速 (C_s) を求めることができ、 C_s と気温 $T(K)$ の関係 $C_s = k\sqrt{T}$ から、各高度における気温が得られる。ここで、比例係数 k は比熱比と平均分子量で決まる定数で、乾燥大気中で約 20.047 である (水蒸気を含む湿潤大気中ではわずかに変化する)。RASS エコーを検出するには、レーダー波長と音波波長の比が 2:1 となる必要がある (ブラッグ条件) ため、レーダーの周波数によって、必要となる音波周波数が決まる。対流圏では気温が高度とともに下がるため、音波波長は高度とともに短くなる。広い高度範囲でブラッグ条件を満たすため、実際には FM チャープ信号を用いる。RASS 観測では、ラジオゾンデ観測と比べて、非常に高い時間分解能で気温プロファイルが得られることが特長である。本研究では気象庁の WPR ネットワークでも使われている 1.3GHz 帯の WPR を対象とする。この場合、音波の周波数は 3kHz 程度となり、可聴音域の大出力の音を使用する必要があり、騒音問題のため観測場所が制限されているのが現状である。そこで、鋭い指向性を持つパラメトリックスピーカーを用いた全天候で使用可能な低騒音型 RASS システムを産学連携により開発している。

パラメトリックスピーカーの原理は、空気非線形性に伴う自己復調作用に基づいている。すなわち、可聴音周波数で変調した超音波を大出力で空気中に発射すると、空気非線形性により発生する 2 次波が復調された可聴音に相当するという特性を利用している。発生する可聴音の大きさは、変調 (可聴音) 周波数の 2 乗、および超音波出力の 2 乗に比例する。

超音波素子単体の音圧はそれ程大きくできないため、それを数百~数千個使ったアレー構成として、大出力を得る。直進性の強い超音波のアレーにより、鋭い超音波ビームを形成することができる。この時、超音波に変調を施すと、上記の自己復調作用により、超音波の音軸上に可聴音を発する仮想的なアレーが構成される。これは位相のずれたバーチャル音源の直線状アレーとみなすことができる。パラメトリックアレーの干渉の結果、可聴音の鋭いビームが生成される。これは可聴音域でエンドファイアアレーが構成されたと解釈することができる。

現在、40kHz の超音波素子 (図 1) を 5000 個程度用いたパラメトリックスピーカーを試作中である。超音波素子に防水性がないため、素子を下に向けた反射型のスピーカーシステムを検討している。来春に WPR と組み合わせた RASS 観測実験を行う計画である。



図 1. パラメトリックスピーカーの例 (40kHz, 49 素子, 素子単体の超音波出力約 120 dB) [<https://www.switch-science.com/>]

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>

「地球放射線帯を観測する Arase 衛星」

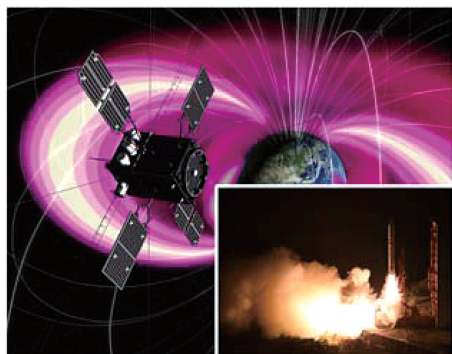


図 1: Arase 衛星の打ち上げ(右下)と、地球放射線帯を探索する Arase 衛星 (イメージ図) (いずれも JAXA 提供).

平均自由行程が、1AU にもなろうかという無衝突状態の宇宙プラズマ中でプラズマ粒子とプラズマ波動のエネルギー交換過程（波動粒子相互作用）は非常に大切です。イオンや電子の運動エネルギーは、それらどうしの衝突ではなく、プラズマ波動を一旦、仲介して伝わっていくからです。宇宙空間の環境というのは、電離気体であるプラズマ中の環境ですから、地球上の環境が中性大気によるダイナミクスで決まっているのと同様、宇宙空間の環境には波動粒子相互作用が大きな影響を与えていることになります。宇宙プラズマの様相は、その場所々々で大きく変化しています。地球周辺でも様々な領域がありますが、中でも放射線帯（radiation belts）は人間が宇宙を利用していく上で避けては通れない領域です。高エネルギー電子・イオンから形成される地球の放射線帯は、米・旧ソ連冷戦下の宇宙開発競争の中で発見されました。旧ソ連に人工衛星第一号で先を越されてもなお、失敗を繰り返した米国が、人工衛星エクスポローラでやっと成功し、その際にこの地球放射線帯を偶然発見しました。地球放射線帯の外縁は静止衛星軌道にまで達しておりその存在は無視することができません。放射線帯を構成する高エネルギー粒子は、衛星の太陽電池を劣化させ、MOS トランジスタの特性を変化させ、メモリ内のデータを化けさせてしまいます。また、衛星内部のケーブルなどを帯電させたりもします。このような放射線帯を観測して、その高いエネルギー粒子を生成したり消滅させたりする波動粒子相互作用を捉えようとする我が国の科学衛星 Arase が、2016 年 12 月 20 日に JAXA 内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられました(図 1)。

山川研究室は、この Arase 衛星に搭載されている「プラズマ波動観測器 (PWE)」と「波動粒子相互作用解析装置 (WPIA)」を担当しています。PWE (責任者 金沢大 笠原 禎也教授 (平成 3 年京大・電子工学専攻修了)) はプラズマ波動を観測する高感度受信器で、山川研究室が所属する生存圏研究所の実験室で各種試験が行われました。WPIA (責任者 山川研) は、15 年間かけて開発した新しい観測装置 (手法) で、粒子の一粒々々と、プラズマ波動の一瞬々々のデータを逐次比較計算して、プラズマ波動と粒子の間のエネルギー流量を直接計測するという、まだ、だれも行っていない観測です。Arase 衛星が打ち上げられて、まもなく 1 年になりますが、すべての搭載機器が正常に動作しており、上記の PWE、WPIA も順調にデータを取得しています。図 2 は PWE で観測された

放射線帯内でのプラズマ波動の波形です。きれいな振幅変調がかかっていますが、宇宙空間でプラズマ波動を観測すると、頻繁にこのようなきれいな波形が観測されます。まるで宇宙人が AM 放送を流しているかのようです。周波数も可聴域にあるので音に変換すると、きれいな単調音になったり、エイリアンが何かを食べているような音になったりバラエティに富んでいます。地球の放射線帯で発生しているこのようなプラズマ波動がプラズマ粒子と相互作用して放射線帯を構成する高いエネルギーの粒子を生成していると考えられるはじめてです。Arase 衛星のデータは、慎重なキャリブレーションが行われ物理量を評価できる段階に至っています。今後の詳細なデータ解析が進められていきます。

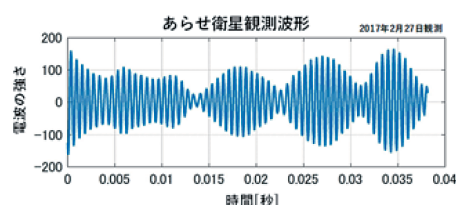


図 2: Arase 衛星で観測されたプラズマ波動 (電界) の波形.

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>

「災害インフラ無線電力伝送システムの研究」

生存圏研究所篠原研究室では、2013年度より開始したJST Center of Innovation (COI) 拠点プログラム「活力ある生涯のためのLast 5Xイノベーション拠点」に参加し、災害インフラのための無線電力伝送システムの研究を行っている。図1にあるように、複数の企業と共同研究を行い、災害救助・予防、電動モビリティ、災害予防、介護といった利用シーンを想定し、マイクロ波(920MHz帯、2.45GHz帯)を用いた無線電力伝送とセンサーやモビリティの組み合わせによる利便性の向上をはかり、COI拠点の掲げる目標である「しなやかほっこり社会の実現」を目指して研究開発を進めている。

介護用電池レスセンサーは、現在は920MHz帯を用いたRF-ID規格内(出力1W以下)での実用化を目指し、ウェアラブルアンテナやセンサーの開発を行っている。センサー開発は山形大と、ウェアラブルアンテナは金沢工大と連携している。RF-ID規格内では電池レスセンサーの汎用性と、センサーまでの距離が実用上不足している。そこで現行法を越え、さらに実用上有効な電池レスセンサーを開発するために、京都府、京都大学と連携して内閣府国家戦略特区「特定実験試局制度に関する特例」を申請し、京都府相楽郡精華町にて2017年4月に特区認定を受けることができた。同年5月22日には927MHz帯で5Wの特定実験試局免許が申請即日交付された。現在精華町町役場内の居室にて、職員の方々にウェアラブルセンサを着用していただき、実際の運用を模した電池レスウェアラブルセンサーの実証実験を行っている。

電動モビリティの研究では、電動自転車への応用を想定している。電動自転車の電池を充電する際には、普通であれば電池をはずして室内でコンセントから充電しなければならず、不便である、そこで、電動自転車を駐輪場に注射するだけで勝手にマイクロ波(2.45GHz)で無線充電するシステムを開発し、同じく内閣府国家戦略特区「特定実験試局制度に関する特例」を精華町で受け、2017年3月より実証実験を行っている。マイクロ波出力は100W以下であり、10cm程度の距離で無線充電を行い、30W程度の直流電力を得て、夜間に自動無線充電を行っている。実験では無線送電システムの各種データ取得と共に、利用の利便性の検証、電波干渉や安全性の検証を行っている。現在は2台の無線充電電動自転車が運用されている。

これらCOIで開発を実施している無線送電システムの送電距離と送電電力(EIRP)をまとめたものが図2である。図よりわかるように、現在の国内の法律で実用が可能なのは一部の介護用センサーのみであり、他のシステムは実験局免許を得たり、特区を利用したりしての実証実験しかできない。そこで現在、国内においてコンソーシアムBWF(Broadband Wireless Forum)やWiPoT(Wireless Power Transfer Consortium for Practical Applications)と連携し、マイクロ波無線電力伝送の実用化に必要な電波法に関し議論を重ねている。また国内の議論をITU(International Telecommunication Union)に文書として提案し、国際的な議論も喚起している。ITUは国や企業から構成される電波の利用に関して議論を行う国連のような場所で、これまでの議論の結果、2016年8月にITU Report ITU-R SM.2392-0 "Applications of wireless power transmission via radio frequency beam"が正式発行され、マイクロ波無線電力伝送のアプリケーションに関してまとめられた[1]。米国ではスマートフォンをマイクロ波で充電するシステムがすでに商品化されており、今後日本及び世界中でマイクロ波無線電力伝送を実用化するためにはよりよい研究成果を得ると共に、ITU等での議論が必須である。

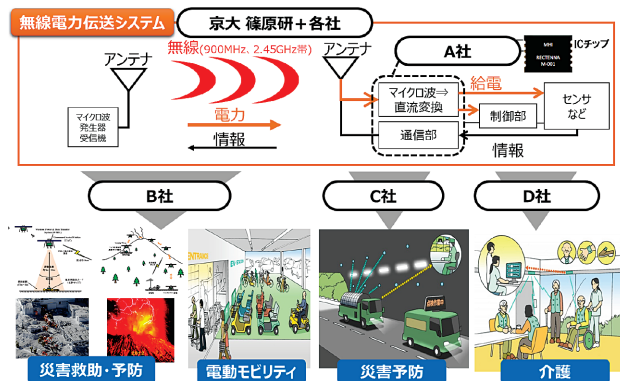


図1 COI拠点研究の概要・目的

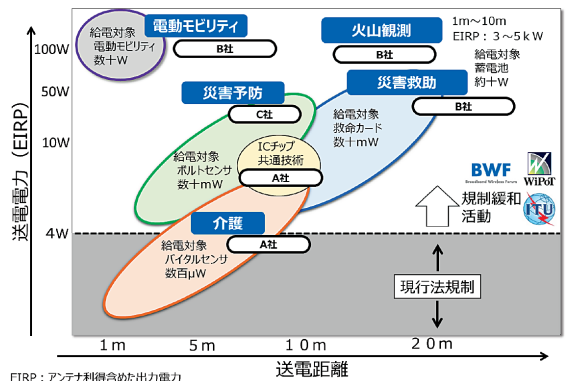


図2 各システムの送電電力と距離

参考文献

[1] ITU Report ITU-R SM.2392-0 <http://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2392>