

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

先端電機システム論講座 (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

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

デバイス創生部門先端電子材料分野 (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 (西野研)

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 (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

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 (松田哲研) #

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プラズマエネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野 (松田一研)

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 (橋口研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野 (小嶋研)

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)

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野

(中村裕研)

先端電気システム論講座 (引原研究室)

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

「電力パケットに基づく負荷制御システムの構築」

持続可能な社会を目指す取り組みとして、再生可能エネルギーの利用が推進されている。さらに、それに伴い分散化される電源と負荷の需給を最適に制御することを目的として、情報通信技術の活用が盛んに研究されている。このような状況は、従来単方向的であった電気エネルギー供給システムにおいて、電力と情報の双方向の流れを生む。これらを適切に制御する技術の確立は重要な課題である。

本研究室では、上記課題の解決策の一つとして、電力のパケット化とそのルーティング [1] に関する研究を行っている。電力パケットとは、パルス状の電力を運ぶペイロードに対し、電圧波形により物理層で情報タグを付与した伝送単位である (図 1)。情報タグには、電力の由来や宛先、その他任意の情報を示す信号を付与する。これら情報をもとに、電力パケットはネットワークを構成するルータと呼ばれる機器により所望の宛先負荷へと伝送される。ここで、電力のパケット化およびルーティングは、ワイドバンドギャップデバイスを用いた回路スイッチングにより実現される。

電力パケット伝送システムの応用に向けて、パケット化された入力による負荷制御システムの構築は重要な課題である。従来システムでは、パルス幅変調等に基づく連続フローを前提として給電系および制御系が設計されてきた。一方、電力パケット伝送システムでは、離散量の電力単位により電力のやり取りが行われる。すなわち、負荷の側から見れば、パケットを単位とするパルス密度変調により電力が供給される。さらに、伝送される電力の利用法に関する情報はタグとして各電力パルスに直接付与される。

上記の特徴を踏まえ、電力パケットの伝送ネットワークと負荷とをつなぐインターフェイスとなる負荷制御システムを開発した [2]。図 2 に提案した電力パケットに基づく負荷制御システムを示す。情報タグの指令値とローカルに得られるセンサフィードバックをもとに、各パルスの供給をデジタル値として制御する。このとき、動的量子化器を用いた密度変調により、制御対象出力に現れるデジタル化の影響を最小限に抑えることができる [3]。本システムは 2 自由度マニピュレータの駆動にも応用され、実験による動作検証に成功している。ここでは、パケット化の利点の例示として、複数負荷への供給状況をデジタル値として扱うことで、デマンドレスポンス動作による消費電力のピークシフトが可能であることが確認された。

Internet of Things や Cyber Physical System などの文脈で、情報通信技術と現実世界の物理との相互作用とその制御がますます重要になると予想される [4]。そこで本質的に重要となるのは、サイバー空間と現実世界を切り離すのではなく、統合して扱うことである。電力パケットはその実現手法の一つとなり得ると期待される。

[1] T. Takuno, M. Koyama, and T. Hikiyara, *Proc. 1st IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp.427-430, 2010.

[2] S. Mochiyama and T. Hikiyara, *Int. J. Circuit Theor. Appl.*, Vol.47, No.4, pp.612-632, 2019.

[3] S. Azuma and T. Sugie, *Automatica*, Vol.44, No.2, pp.396-406, 2008.

[4] K. Kim and P. Kumar, *Proc. IEEE*, Vol.100, pp.1287-1308, 2012.

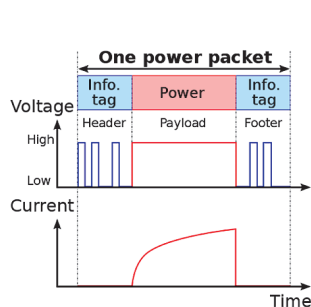


図 1 電力パケット伝送システム

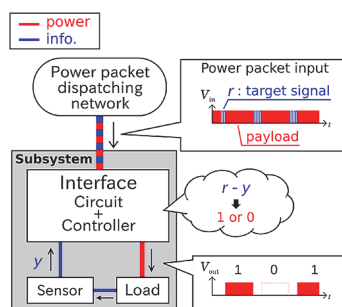


図 2 提案する負荷制御システム

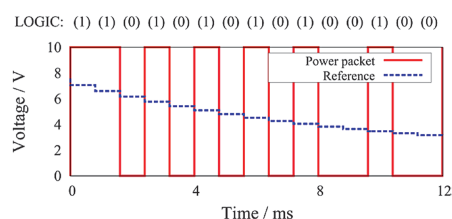


図 3 パルス密度変調による供給電圧 (赤線) と従来法による連続値入力 (青線)

システム基礎論講座 システム創成論分野

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

「レーダと畳み込みニューラルネットワークによるジェスチャーの時間領域識別技術」

コンピュータや家電のインターフェースとして、ジェスチャー認識技術が注目を集め、近年では主に家庭用ゲーム機のための距離カメラ Microsoft Kinect など、エンターテインメント分野で広く普及している。一方、カメラによる常時撮影にはプライバシーの懸念があり、電波などの別の手法の開発が望まれていた。近年、Google Soli と呼ばれるレーダによるジェスチャー識別プロジェクトが進められ、スマートフォン等の非接触操作への応用が注目を集めた。従来のワイヤレスジェスチャー識別技術では、ミリ波等の高周波による感度向上、MIMO アレイによる空間分解能向上、時間周波数解析によるドップラー特徴量の抽出といった手法が主流であったが、ミリ波 MIMO アレイレーダの導入による高コスト化や時間周波数周解析の計算負荷が課題となり、民生用途への実用化を阻んでいた。そこで本研究では、低コストの単一素子マイクロ波レーダを用い、周波数領域ではなく時間領域での処理による高速処理を可能にする手法を開発した [1]。

図 1 にレーダによるジェスチャー識別実験の様子を示す。被験者 10 名は送受信アンテナから 1.2m 離れた位置に着座し、6 種類のジェスチャーを各 150 回おこない、2.45GHz の無変調モノスタティックレーダにより反射波を計測した。反射波は直交検波され、複素時系列として保存される。図 2 には、6 種類のジェスチャーに対する複素平面上の I-Q プロット軌跡各 3 例を示す。時間周波数解析を経ずとも、各ジェスチャーに固有の特徴が存在することが見て取れる。図 3 に示す 2 層畳み込みニューラルネットワークによる学習および識別を行い、その識別精度を表 1 のとおり交差検証により評価した。データ全体の 90% を学習に用いた場合、10 名の被験者の平均識別精度は 91% を超えている。この精度は時間周波数解析による従来法と同程度であるため、時間領域での高速処理を可能とする提案手法の有効性が実証された。

参考文献

[1] T. Sakamoto, et al., IEEE Sensors Letters, vol. 2, no. 3, doi:10.1109/LSSENS.2018.2866371 (2018).



図 1 ジェスチャー識別実験風景

(1) Stand-up gesture			
(2) Palm rotating			
(3) Fist and palm			
(4) Palm back and forth			
(5) Bye gesture			
(6) Push gesture			

図 2 識別対象の 6 種類のジェスチャーと IQ 軌跡

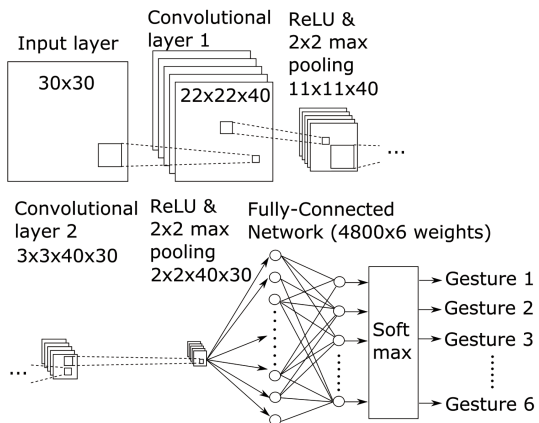


図 3 畳み込みニューラルネットワークの構成

表 1 被験者 10 名に対するジェスチャー識別精度

Training data	Classification accuracy (%)		
	90 (10%)	450 (50%)	810 (90%)
Subject 1	84.1	89.8	91.6
Subject 2	83.7	89.6	90.4
Subject 3	88.8	93.2	94.9
Subject 4	77.9	85.7	88.2
Subject 5	88.2	92.6	94.7
Subject 6	94.7	97.6	98.6
Subject 7	80.6	85.8	89.0
Subject 8	82.5	90.0	93.1
Subject 9	78.6	85.9	85.0
Subject 10	73.7	83.2	87.1
Average	83.3	89.4	91.3

電磁工学講座 超伝導工学分野 (雨宮研究室)

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

CORC 導体の特性評価

高温超伝導線は、比較的高い温度（例えば液体窒素の温度である 77 K）で超伝導状態を保持できたり、従来の低温超伝導線（液体窒素による冷却では超伝導にならず、4.2 K の液体ヘリウムで用いられることが多い）が使えないような 20 - 30 T 以上の高磁界で使えたりする超伝導線です。冷やすための電力が小さくて済むという利点を生かした各種の電気機器への応用や、高磁界を発生できるという利点を生かした各種高磁界マグネットへの応用を目指した研究開発が内外で進められています。

ただ、ほとんどの高温超伝導線は幅が 4mm 程度のテープ形状をしており、実用的な条件下（磁界、温度など）において、一本あたり数十～二百アンペア程度の電流しか流すことができません。その一方で、多くの応用先では、ときには数キロアンペアから数十キロアンペアに及ぶ大きな電流を流す必要があります。また、テープ形状をした高温超伝導線は、細い円断面の低温超伝導線に比べて、複雑な形状のコイルに巻くことが難しいという問題も抱えています。このような問題の解決先の一つとして、図 1 に示すような直径数ミリメートルの銅線のコアのまわりにテープ形状の希土類系薄膜高温超伝導線を多数本巻き付けた CORC 導体と呼ばれる導体がアメリカで開発されて注目を集めています（図 1）。CORC 導体は多数本の超伝導線を集合化しているため大きな電流を流すことができ、円断面の柔軟な導体であるため、複雑な形状のコイルに巻くことも可能です。

我々の研究室では、CORC 導体の交流損失の研究を進めています。交流損失とは、超伝導線に交流の電流を流したり、超伝導線に交流の磁界が加わったりしたときに、超伝導線内部の磁束分布の変化に伴って、磁束量子が出入りする際の損失で、小さいながらも、超伝導体を低温に保持する冷却装置の低い効率（熱力学の法則から、到達温度が低いほど効率は低くなってしまいます）を考えると無視できないものです。我々は、保有するユニークな交流損失の測定装置で、交流損失を測定し、また、計算サーバと独自に開発したソフトウェアで交流損失を計算しています。図 2 の赤い点によるプロットは 200 A の交流電流を輸送する CORC 導体に交流磁界を印加したときの交流損失の実測値を示しており、青い点と緑の点は交流損失の数値解析値を示しています。両者は磁界が小さい領域を除きよく一致しています。

今後は、交流損失の研究に加えて、米国のローレンスバークレー国立研究所との共同研究として、CORC 導体のクエンチ（常伝導転移とその拡大）の実験研究を、我々の研究室が保有する伝導冷却テストスタンドを利用して実施する計画です。

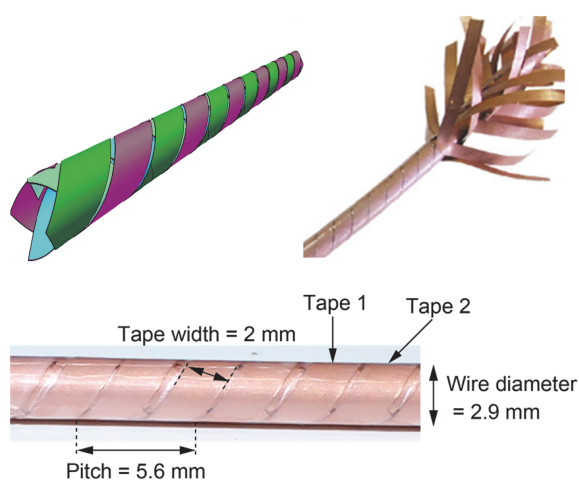


図 1 CORC 導体

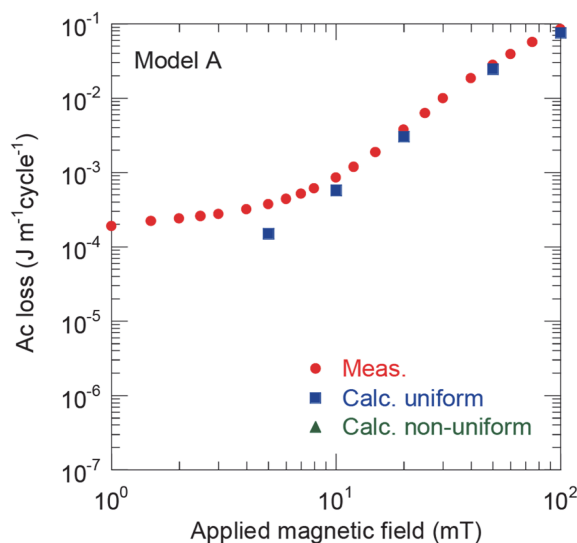


図 2 CORC 導体の交流損失

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（松尾研究室）

<http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/>

「モデル縮約法とクリロフ部分空間法の数理」

CUE 第 40 号で紹介したように、電気機器の動作を表現する大規模微分方程式に対してシステムの自由度を効率的に削減するモデル縮約法に関する研究が盛んに行われている。Cauer Ladder Network (CLN) 法 [1] は、そのようなモデル縮約法の一つであり、使用する基底が三項漸化式に基づいて効率的に生成されることから、縮約されたシステムが梯子回路として表現される特徴を持つ。本研究室では、CLN 法の入出力多ポート化、モータ等の可動部を含むシステムへの応用などに取り組んでいるが、ここではクリロフ部分空間法 [2] の観点から明確にされる CLN 法の数理について簡単に紹介する。

有限要素法などによって導かれる電気機器の離散化モデルは、多くの場合、下記の形で記述される。

$$(K + j\omega M)\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{x}, \mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ はそれぞれシステムの自由度と入力を表すベクトル、 K, M は $n \times n$ 実対称行列である。通常 n は大きいので自由度を削減するため、 p ($\ll n$) 個の基底ベクトル $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^n$ ($i = 1, 2, \dots, p$) を並べた $n \times p$ 行列 V を与えて \mathbf{x} を $V\mathbf{u}$ ($\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$) によって近似する。加えて、式 (1) の残差に対して以下の直交条件を課す。

$$\mathbf{b} - (K + j\omega M)V\mathbf{u} \perp \mathbf{v}_i \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (2)$$

これによって縮約されたシステム

$$V^T(K + j\omega M)V\mathbf{u} = V^T\mathbf{b} \quad (3)$$

が得られる。

一方、基底ベクトルについては、以下の漸化式により生成する（アーノルディ法と呼ばれる）。

$$\mathbf{v}_1 = K^{-1}V^T\mathbf{b} / h_{1,0} \quad (4)$$

$$\mathbf{v}_{i+1} = (K^{-1}M\mathbf{v}_i - \sum_{j=1}^i h_{j,i}\mathbf{v}_j) / h_{i+1,i} \quad (5)$$

ただし係数 $h_{j,i}$ は、グラムシュミットの直交化法と同様にして、基底ベクトルが直交性 $V^TKV = I$ (I は $p \times p$ 単位行列) を満たすよう与えるものとする。 $h_{j,i}$ を (j, i) 成分とするような $p \times p$ 上ヘッセンベルグ行列を H とすれば、式 (5) は

$$K^{-1}MV = VH + h_{p+1,p}\mathbf{v}_{p+1} \quad (6)$$

と表すことができる。基底ベクトルの直交性 $V^TKV = I$ と、式 (6) に V^TK を乗ずることにより得られる $V^TMV = H$ とから、縮約されたシステム (3) は

$$(I + j\omega H)\mathbf{u} = V^T\mathbf{b} \quad (7)$$

と表される。さらに、 $V^TMV = H$ の左辺が対称行列であることから上ヘッセンベルグ行列 H が実際には対称三重対角行列であることが示され、したがって式 (7) が梯子回路の方程式を表すことが確かめられる。実際、式 (7) は CLN 法で導出される梯子回路の方程式と等価である。

上記の議論は、実のところ、式 (1) を連立一次方程式として扱いクリロフ部分空間法の一つである Concus-Golub-Widlund (CGW) 法 [2] を適用した際に行われる議論を、CLN 法と整合する形に変換して述べたものである。このように CLN 法の数理的基盤をクリロフ部分空間法の視点から捉えることにより、クリロフ部分空間法の洗練された理論体系と豊富な数学的ツールを利用することが可能となる。例えば多入力化された CLN 法を CGW 法のブロック化に基づいて導出することが可能である。また、CLN 法を CGW 法と対比してみたとき興味深いのは、CLN 法では CGW 法と異なり生成する基底ベクトル全てを保存することが前提とされていることである。クリロフ部分空間法については、基底ベクトルの多数化によって起きるコスト増大や数値不安定性を扱うための様々な手法が開発されている。それらの知識を CLN 法に対して有効活用することは、有力な検討課題の一つである。

[1] A. Kameari, H. Ebrahimi, K. Sugahara, Y. Shindo, and T. Matsuo, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, 7201804 (2018).

[2] Y. Saad, *Iterative Methods for Sparse Linear Systems*, 2nd edition, SIAM (2003).

電子物理学講座 極微電子工学分野 (白石研究室)

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

[Spin transport and manipulation in semiconductor based spintronic devices]

Spintronics, or spin-electronics is an emerging field, which adds an additional spin degree of freedom to conventional electronics. The study of spintronics already led to information storages applications such as hard disk drive (HDD) and more recently Magnetic Random Access Memory (MRAM). It is very promising for the information processing or logic applications, particularly using semiconductor channels. One of the main advantages of semiconductor spintronic devices is that both charge and spin transport properties can be modified by an external electric field, *i.e.* gate voltage. Semiconductor-based spin device promises non-volatile memory and reconfigurable logic circuit.

In our laboratory, we were the first to demonstrate the room temperature operation of silicon (Si) based spin transistor. As shown in Fig (a), Si-based spin transistor consists of two ferromagnetic electrodes, *i.e.* spin-polarizer and detector on the top of Si channel. The charge electrons are spin-polarized by the ferromagnetic electrodes and electrically injected into the Si channel. However, spin-polarized electrons prefer to decay into the ferromagnetic material with high conductivity. Thereby most of the spin-polarized electrons are not injected into semiconductor. This is due to the large difference of conductivity of conductivity between ferromagnetic metal and semiconductor, so called conductivity mismatch. The conductivity mismatch was solved by the introduction of the interface resistance, commonly tunnel barrier, which prevents spin absorption into the spin polarizer and forces the spin polarized electrons to be injected in semiconductor. During the transport in the semiconductor channel, the spin-polarized electrons are scattered and have probability to lose the spin polarization. Drift velocity of electron in semiconductor channel reduces scattering event that electron experiences during their transport. If spin-polarized electrons reach other ferromagnetic detector, spin voltage is measured depending on relative configuration between spin direction of electrons and the orientation of the magnetization of ferromagnetic detector (parallel or antiparallel, Fig (b)). Taking the advantage of semiconducting properties, we experimentally modulated the spin signal by gate voltage. Our research group made significant achievements to improve spin-dependent signal amplitude and its gate manipulation in spin transistor over recent years which paves a path towards logic and information technology.

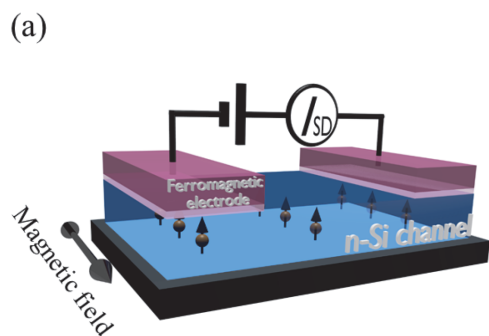


Fig. (a) Schematic of a spin transistor.

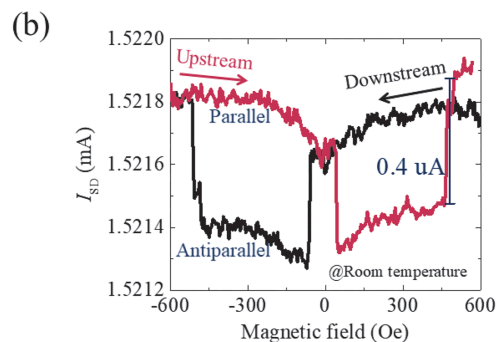


Fig. (b) Room temperature operation of spin transistor with an applied magnetic field.

量子機能工学講座 光材料物性工学分野（川上研究室）

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

「深紫外近接場分光法の開拓」

染色フリー生細胞イメージング、分子の選択分析、および超ワイドバンドギャップ半導体の光物性評価を可能とする深紫外顕微分光法に注目が集まっている。ここで、深紫外光とは波長 200~300 nm の光を指し、人間が視ることのできる可視光（波長 380~780 nm）よりも波長が短い。深紫外領域では、広帯域で色収差補正された高開口数対物レンズの作製が困難であるため、通常の（遠視野）深紫外顕微分光法の空間分解能は低く留まっている [1]。この問題を解決する手法として近接場光学を利用する方法がある。近接場光学を深紫外顕微分光法に応用した例はこれまでにいくつかあるものの、波長 240 nm 以下の深紫外光を分光評価できる深紫外近接場分光法は確立されていなかった。そこで本研究では、波長 210 nm で発振するレーザを励起光源とし、波長 240 nm 以下の深紫外光を分光評価できる深紫外近接場光学顕微鏡を開発した [2]。

本研究目的を達成するためには、深紫外分光特有の問題である、ミラーやレンズといった光学素子の経時劣化および低いスループットを克服する必要がある。そこで本研究では、2つのネガティブフィードバック機構を組込むことにより、励起光源のビーム位置・強度を安定化させた。また高いスループットを有する深紫外用分光ミラーやフィルタを独自開発した。そして近接場分光の要となる光ファイバプローブについては、日本分光株式会社と共同で、深紫外光を入射しても経時劣化せず高いスループットを有するものを開発した。我々の開発した深紫外近接場光学顕微鏡を図1と図2に示す。

この深紫外近接場光学顕微鏡を用いて、超ワイドバンドギャップ半導体の1つである窒化アルミニウムガリウムのフォトルミネッセンスマッピングを行なった。すると、従来の遠視野光学顕微鏡では観察できなかった個々の局在発光中心（らせん転位と呼ばれる結晶欠陥に起因する）からの発光を可視化することに成功した。

波長 240 nm 以下の深紫外光はバクテリアの不活性化や窒素酸化物検出に有用であることが見出されており、当該波長領域で発光する深紫外LEDの研究開発が近年活発である。しかしながら、その発光効率極低なのが現状であり、その原因究明が求められている。我々の開発した深紫外近接場光学顕微鏡は、とりわけ本問題の解決に大きく貢献できると考えている。

[1] 京都大学電気関係教室技術情報雑誌 cue 40号 大学の研究・動向 光材料物性工学分野 P3-10 (2018).

[2] Ryota Ishii, Mitsuru Funato, and Yoichi Kawakami, APL Photonics 4, 070801 (2019).

本論文は本誌の注目記事（Featured）に選出され、AIP 出版社全体の注目記事（Scilight）にも選出された

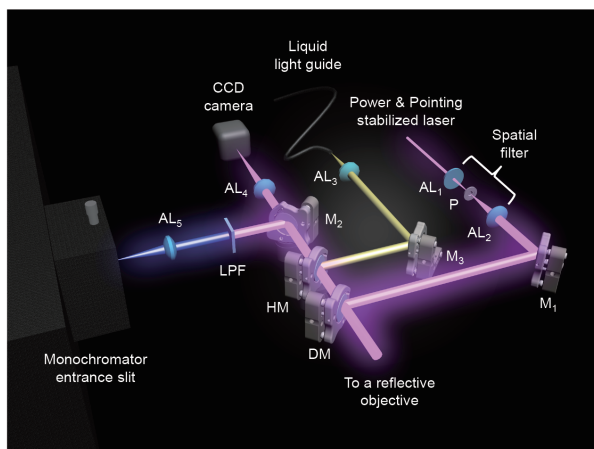


図1. 開発した深紫外近接場光学顕微鏡の励起・照明・結像・検出光学系

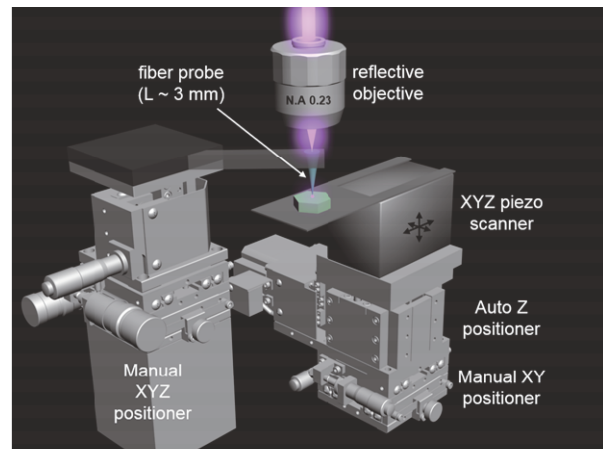
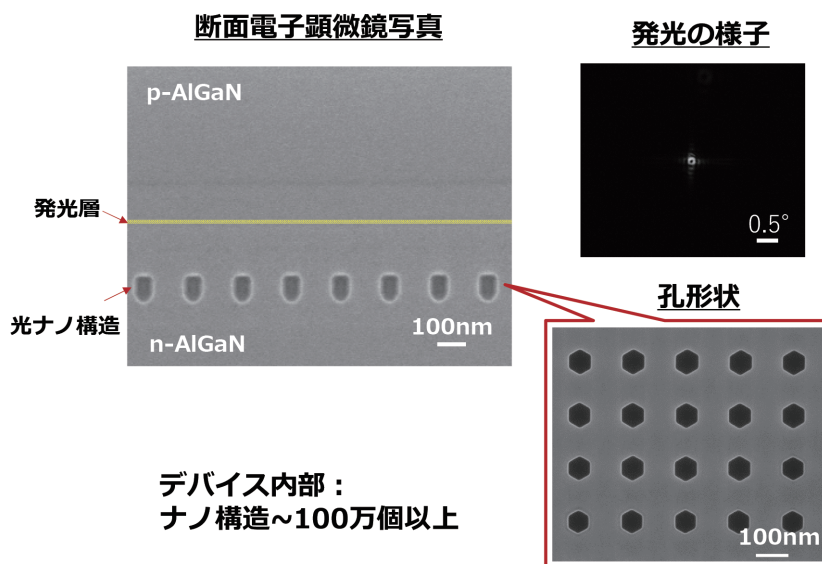


図2. 開発した深紫外近接場光学顕微鏡の対物光学系と走査プローブ制御系

工学研究科 附属光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス工学分野
<http://www.nano.kuee.kyoto-u.ac.jp/>
 「光ナノデバイスの開発」

物質をナノメートル精度で微細加工する技術、すなわちナノプロセス技術は、電子デバイス製造、医療、エネルギー等、あらゆる産業を支える基盤技術です。当研究室では、半導体や金属材料のナノプロセス技術を駆使した光ナノデバイスの開発を行い、ナノ構造に特有の光物理現象の探求や、従来のデバイスでは実現不可能であった新しい機能の創出を目指しています。

従来のデバイスとは異なる全く新しい機能をもつ光ナノデバイスを実現するためには、目的の機能を有するナノ構造の設計手法の開発と、設計した光ナノ構造を正確に実現する作製技術の構築が重要となります。当研究室では、光ナノ構造の設計のために、3次元結合波理論、厳密結合波解析法や時間領域差分法など、複数の電磁界シミュレーション法を駆使しつつ、これらを拡張した新たな理論解析手法を開発し、新たな機能をもつ光ナノ構造の提案を行っています。また、設計した構造を、ナノメートル精度で安定して作製するために、電子ビーム描画装置やプラズマエッチング装置等のナノプロセス装置を活用した、微細加工技術の構築を行っています。一例として、設計に基づいたフォトリソグラフィを導入した、青紫波長領域で動作する窒化ガリウム系新型レーザーの断面電子顕微鏡写真を図に示します。ナノ構造は、結晶成長技術を活用することで、窒化ガリウム半導体中に埋め込まれています。このような新型デバイスにおいて、青紫波長領域における大面積コヒーレント発振に成功するなど、従来の光デバイスとは動作原理や機能が異なる次世代光源の開発を、世界に先駆けて行っています。なお、本研究室は、電子工学専攻光量子電子工学分野と連携をとりながら教育研究を行っています。



図：窒化ガリウム系の光ナノ構造を導入した新型レーザーの電子顕微鏡写真、発光様子

光・電子理工学教育研究センター デバイス創生部門 先進電子材料分野（藤田研究室）
<http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/index.html>
 「遠紫外発光半導体材料の開発」

1962年にGaAsを用いた赤外発光ダイオード(LED)が実現されて以来、半導体をベースとする発光材料・デバイスの研究ターゲットは、より波長の長い赤外、遠赤外に向かう方向と、より波長の短い可視、紫外に向かう方向の両側に拡大してきた。後者についてはさまざまな材料研究の中でGaNという材料に出会い、これをベースとする混晶半導体AlGaN、InGaNによるバンドギャップエンジニアリングにより、可視全域はもとより深紫外領域まで各種波長の発光が可能となり、LEDが開発されている。しかしいくら優れた材料にも物理的な限界がある。この材料系で言えば、最大のバンドギャップはAlNの約6.0 eVであること、つまり発光可能な最短波長は約210 nmだということである。しかし、それより短波長の光も、水銀ランプの185 nm、ArFエキシマランプの193 nmなど、社会では重要な役目を果たしている。これらは水銀や希ガスの放電をベースとし、発光波長は原子の種類で決まっている。ここに半導体からの発光を用いたいという発想はいかなるものだろうか？

われわれが200 nm以下の遠紫外をターゲットに半導体発光材料の研究を始めた頃、マーケットが小さい、殺菌は260 nmで十分、といったご意見をいただいたが、われわれは半導体の可能性を拡めたい研究者であり、水銀ランプの185 nmの代替は必須、という考えもあった。幸い科研費をいただくことができ、2017年度からこの課題に取り組むようになった。

波長200 nm以下の遠紫外発光を目指すには、バンドギャップが6.2 eV以上の半導体が必要である。図1に示すように、これは $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$ あるいはMgZnOという半導体で実現できる。一方、遠紫外の光は当然目に見えないし、空気中の酸素に吸収されるために（それゆえオゾンを生じて殺菌や洗浄に効果を持つわけであるが）発光・分光の測定系を真空または窒素の雰囲気下に置く必要がある。これらの点は、共同研究者である工学院大学の尾沼教授にお願いし、緊密な共同研究の体制で研究を進めている。図2はMgZnOのカソードルミネセンス(CL)スペクトルで、6Kにおいて199 nmの発光が得られている。引き続き、量子井戸の作製・光物性の測定を通じて、半導体にとって未知の波長領域の光を得ることを目指しているところである。

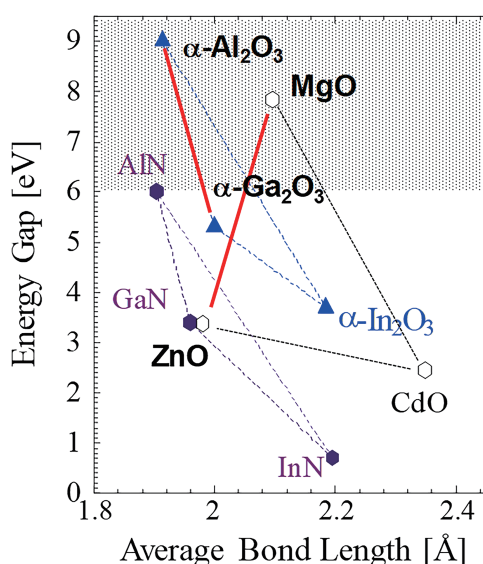


図1 $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$ あるいは MgZnO で実現可能なバンドギャップ領域（赤色の線）。網掛けは AlN よりバンドギャップが大きく遠紫外発光が期待される部分である。

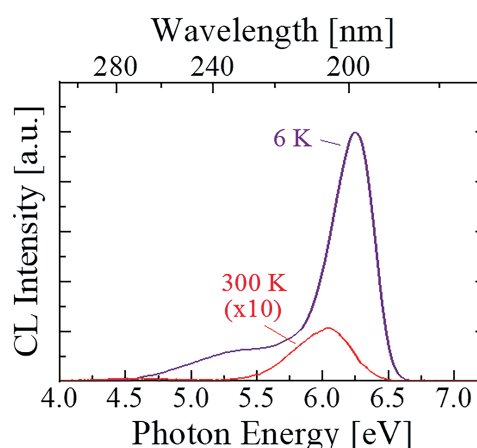


図2 MgZnO の遠紫外発光 (CL)

知能メディア講座 言語メディア分野（黒橋研究室）

<http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/>

行政対話ボットの研究

コンピュータが人間と対話をする「対話ボット」を活用したサービスが社会的に普及し、コンピュータとの対話を通して情報を入手する場面が増えています。言語処理分野でも対話研究が盛んに行われており、対話ボットの実際の対話事例からフィードバックを得ることがますます重要になってきています。本稿では、本研究室で行っている行政対話ボットの共同研究の取り組みを紹介します。

この対話ボットは行政や市民生活に関する市民からの問合せに自動応答するもので、2018年6月から兵庫県の尼崎市と丹波市で実証実験を行っています [1]。市民の発言の内容は、行政手続きに関する典型的な質問から、「娘の生涯のパートナーを見つけたい」といった相談、施設の開館時間などの情報照会や挨拶まで多岐にわたります。それに対して対話ボットは、行政ホームページの「よくある質問」(FAQ)などを基に構築したデータベースから、回答として適切な項目を選択し、対話的に返答します。サービスはメッセージアプリ LINE 上で提供されており、市が配信するイベント情報なども同じ媒体で受け取れます。配信内容に関する問合せに対話ボットが応答するケースも見られ、住民サービスの向上や情報支援の円滑化に活用されています。

開発にあたっての技術的な課題の1つは、ユーザーの問合せにマッチする内容を FAQ データの中からどのように検索するかという点です。実際の問合せの言い回しは非常に多様で、FAQ データ中の適切な項目と対応づけるのは容易ではありません。そのため、行政対話ボットでは2つのシステムを組み合わせ、検索を実現しています。1つは、本研究室で開発した TSUBAKI というシステムで、文構造や語の同義性を考慮して、問合せと各 FAQ 項目の質問文との類似度を計算します。もう1つは、問合せに対して各 FAQ 項目の回答部分の関連性を計算するもので、近年発表された深層学習言語モデル BERT を用いています。この2つのシステムの統合による精度向上が実験から明らかになり [2]、実際の運用においても、「市の魅力を教えて」などの抽象的な問合せに回答できるようになるといった効果がありました。

今後、この実証実験で得られる対話データの分析をさらに進めつつ、複数発話間での問合せ内容の連続性の認識や、対比などの情報構造を考慮した対話の実現などについて研究を進める予定です。

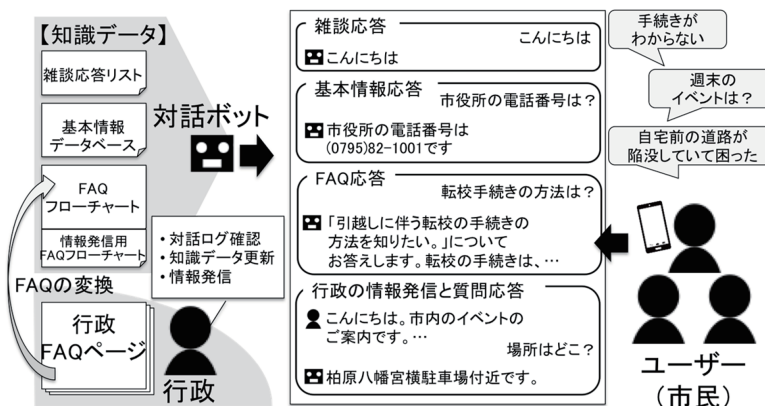


図1 行政対話ボットの概要

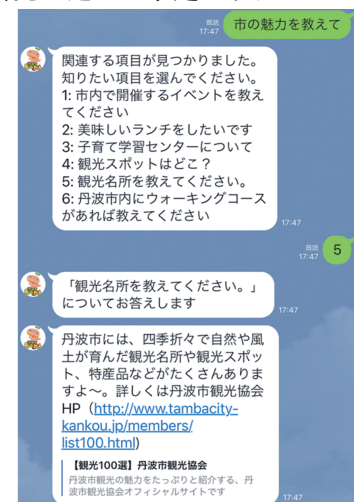


図2 対話画面

[1] https://www.nii.ac.jp/research/upload/cris-report_20190606.pdf

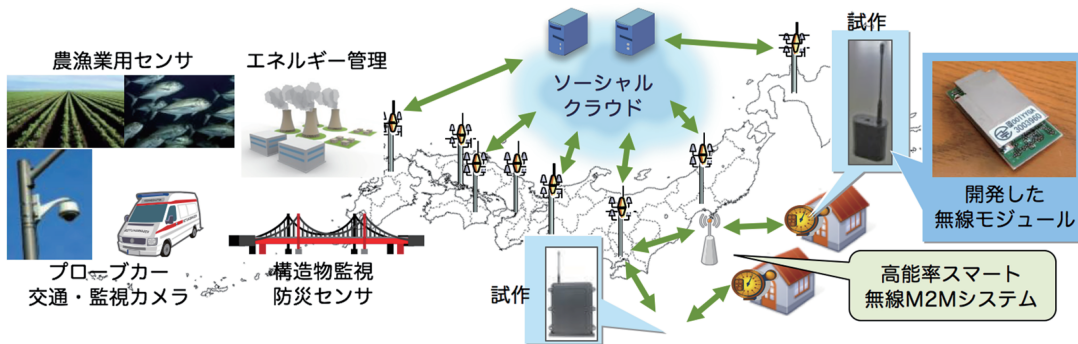
[2] Wataru Sakata, Tomohide Shibata, Ribeka Tanaka and Sadao Kurohashi. FAQ Retrieval using Query-Question Similarity and BERT-Based Query-Answer Relevance, in SIGIR2019 (2019.7).

通信システム工学講座 デジタル通信分野（原田研究室）

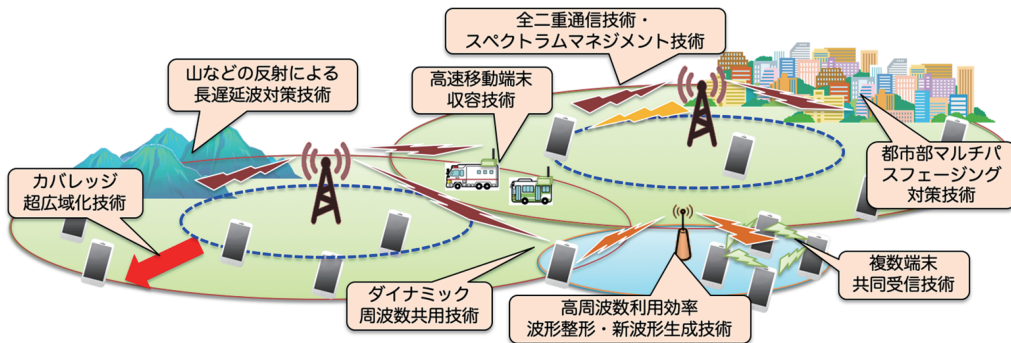
<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

第6世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

昨今、誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワークワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性およびリアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に人と人の通信のみならず、物と物（M2M）との通信など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信用途に使用可能な周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。現在、第4世代移動通信システム（4G）としてLTEなどの高速移動通信網の普及が先進国を中心に急速に進んでおり、2020年代からは第5世代移動通信システム（5G）のサービスが本格的に開始されます。そして既に研究開発分野ではそのさらに先、いわゆるBeyond 5Gや6Gといった次世代システムの検討が開始されています。そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線LAN、無線PAN、および無線M2Mセンサネットワークなども包括的に議論が行われています。この様な国際的な動向も踏まえ、当研究室ではBeyond 5G / 6Gに関する研究として、究極的な周波数利用効率の実現を目指す、ダイナミック周波数共有や全二重複信（Full-duplex）セルラ、新信号波形・新物理層方式をはじめ、超広域ブロードバンド移動通信システム、高周波帯を活用した端末共同多重MIMO伝送技術、広帯域高速アンテナ近傍界測定技術をコアとする空間電波モニタリング技術、高能率スマート無線M2M通信システム、などの研究テーマを中心に研究活動を進めています。なお「ダイナミック周波数共有」に関する研究開発は主に総務省から受託した「電波資源拡大のための研究開発」および「戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）」によって実施しています。また、Full-duplexセルラに関する研究開発は主に総務省から受託した「電波資源拡大のための研究開発」によって実施しています。さらに「高能率スマート無線M2M通信システム」に関する研究開発は主に総務省から受託した「戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）」によって実施しています。



本研究室における Beyond 5G / 6G ブロードバンド移動通信システムに関する研究開発概要



本研究室におけるスマート無線 M2M システムに関する研究開発概要

通信システム工学講座 伝送メディア分野 (守倉研究室)

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

「深層強化学習による車車間ミリ波通信のリレー長拡大」

自動運転技術の普及とともに、自動車にはGPS (Global Positioning System) や赤外線レーダ、カメラ、LiDAR (Light Detection and Ranging) など多種多様なセンサが搭載されるようになった。これらのセンサから得られる自動車自身や周囲の情報はその自動車の走行のみならず、ビッグデータとして社会応用されることが期待されている。一台の自動車に搭載されるセンサ数の増加に伴いデータ量は膨大になり、車載ストレージに貯蓄することは困難になるため、随時インターネット上のクラウドサーバにアップロードしなければならない。一方で、現在利用可能な自動車向けの通信規格である DSRC (Dedicated Short Range Communications) や C-V2X (Cellular Vehicle to Everything) は小容量データの通信を高信頼、低遅延で送信することを目的としており、ビッグデータの送信には不向きである。さらに、通信帯域が限られていることを考えると、ビッグデータの共有やクラウドへのアップロードに DSRC や C-V2X を利用すると、自動運転向けの高信頼通信の帯域を圧迫してしまい、安全確保のための情報共有ができなくなる可能性がある。

こうした問題を解決するため、当研究室では車載センサのビッグデータの送信にミリ波帯電波を利用する研究を行っている。従来の自動車向け通信規格が利用するマイクロ波帯に比べてミリ波帯電波は広い帯域が利用可能で大容量データの送信に向いている。また、既存の通信規格と異なる帯域を利用するため、安全確保のための通信を圧迫することがない。しかしながら、ミリ波帯電波は距離減衰や遮蔽による電力の減衰が大きく、通信可能距離が短いため、路上基地局 (RSU: Road Side Unit) のカバレッジが狭くなり、インターネット接続できる範囲が狭くなるという課題がある。少ない RSU でカバレッジを確保するためにマルチホップ通信の利用が考えられるが、遮蔽による通信品質の劣化が生じるミリ波通信ではマイクロ波帯のマルチホップ通信とは異なり、遮蔽のないマルチホップリレーを形成しなければならない。特に送受信車両の間に他の車両があると遮蔽によりマルチホップリレーが途絶えてしまう。本研究では、自動運転が可能な車両を想定し、車両自らが周囲の車両位置を考慮して臨機応変に遮蔽を回避して長いリレーを形成する手法を提案している。図1は提案手法のコンセプトを示している。白色の三台の車両がミリ波リレーを形成しようとしているが、ミリ波通信機能を備えていない黒色の車両が間にいるため、一番後続の車両だけリレーに参加できておらず、RSUとも接続されていない。ここで、二台目の車両が車線変更を行うことで、三台目の車両と見通しが効き三台でリレーを形成できる。提案手法は車両自身にリレー拡大のための意思決定機構を搭載し、車線変更などの相対位置変更による遮蔽回避を促す。意思決定にはディープラーニングを利用した深層強化学習を採用しており、車両自身が過去の経験からどのような移動が良いか学習し、学習が進むことでリレー長を拡大できることを確認した。

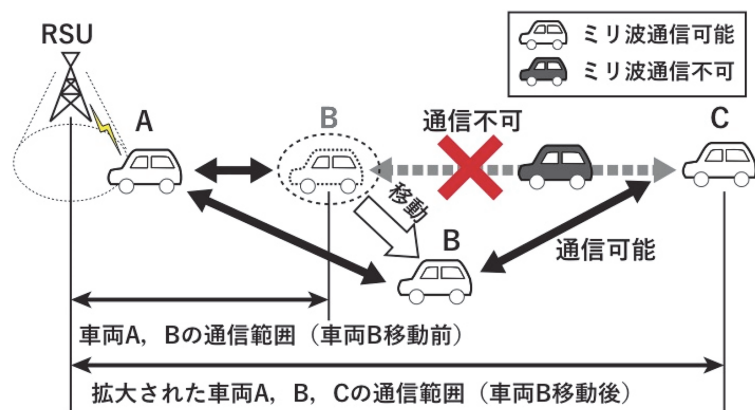


図1. 車両移動によるミリ波リレー拡大

参考文献

A. Taya, T. Nishio, M. Morikura, and K. Yamamoto, "Deep-reinforcement-learning-based distributed vehicle position controls for coverage expansion in mmWave V2X," IEICE Trans. Commun., Vol.E102-B, No.10, Oct. 2019. (to be published)

集積システム工学講座 大規模集積回路分野（小野寺研）

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

「ランダム・テレグラフ・ノイズに起因する集積回路の遅延時間変動」

Society 5.0 を支える基幹デバイスである集積回路は、着実な微細化、大規模化、高機能化が進んでいます。しかし、デバイスの寸法がナノスケールとなり、微細化に伴う各種の物理限界が顕在化しています。当研究室では、デバイス構造内に原子レベルの揺らぎや欠陥が存在しても安定に動作しうる集積回路の実現に向けて、微細デバイスに内在する本質的な特性ばらつきや製造性の劣化、信頼性の低下などの物理的フォールトを克服する設計技術に取り組んでいます。今回は、トランジスタ特性の時間的な変動を引き起こすランダム・テレグラフ・ノイズ（RTN）が集積回路の遅延時間に及ぼす影響を評価する技術について説明します。

RTNとは、トランジスタのチャネルを移動するキャリアが、ゲート酸化膜に存在する原子レベルの構造欠陥（トラップ準位）に捕捉または放出されることにより、トランジスタを流れる電流が離散的に変動する現象です。図1に、65nm プロセスで製造された最小寸法のトランジスタを流れるドレイン電流を60秒間にわたって測定した結果を示します。ゲート電圧は0.9 V、ドレイン電圧は0.1 Vとし、最大電流値で正規化した値を示しています。測定開始後すぐに2%程減少し、その後さらに2%程の減少が数回観測されています。このような離散的な変動がRTNの特徴です。RTNを回路的な視点で見ると、トランジスタのしきい値電圧が時間とともに離散的に変動する現象と見ることができます。

微細化によりチャネル内を流れるキャリアの数が減少し、RTNの影響が顕在化しています。特に、微細な素子が高密度に集積されるCMOSイメージセンサやSRAMでは深刻な問題となっています。より大きな寸法のトランジスタが使用されるデジタル論理回路でも、微細化や低電圧化の進展に伴いRTNによる動作遅延の変動量が大きくなると予想されます。実際にテストチップを試作して、RTNが遅延時間に及ぼす影響を評価しました。

デジタル回路を模擬する回路として、インバータで構成したリング発振回路を採用しました。発振周波数の揺らぎを観測することで、遅延時間の揺らぎを評価します。65nmの製造プロセスを用いて、1チップ上に様々な種類の多数個のリング発振回路をアレイ状に集積化しています。例えば、最小のトランジスタで構成した7段のリング発振回路は、12,852個搭載されています。図2にチップ写真と回路構造を示します。今回、12チップの測定を行い、合計154,224個の7段リング発振回路について、発振周波数の変動量を観測しました。電源電圧は0.5Vで、1msの間の発振回数から周波数を測定し、10秒間における最大変動量を測定しました。このような多数の回路に対するRTNの影響評価は世界初の試みです。図3に観測された周波数変動のヒストグラムを示します。大部分の回路では、3%程度以下の変動量ですが、最大では12%の遅延変動が観測されています。遅延変動量は、対数正規分布に従う事が判明しました。デジタル集積回路内では、大部分の回路はRTNによる遅延変動量は少ないのですが、大きな変動量を示す回路部分も存在することがわかります。この遅延変動による動作不良が懸念されます。今後、RTNの影響を考慮した設計指針の開発に取り組めます。

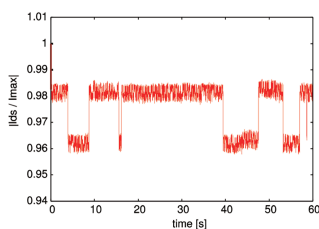


図1. ドレイン電流の変動

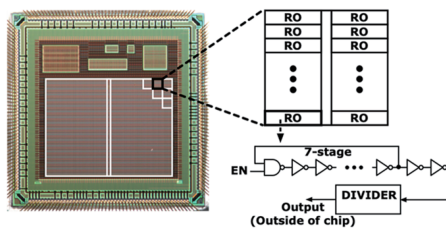


図2. RTN 評価回路

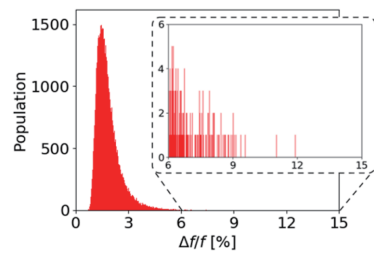


図3. RTNによる遅延変動量のヒストグラム

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（下田研究室）

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

「知的集中を向上させるオフィスの統合温熱制御」

21世紀では情報社会が進展し、情報、データ、アイデア、知識等の無形の知的生産物がますます価値を持つ社会になっています。このような社会では知的生産性が重要であり、特に近年では、働き方改革により労働時間が短縮される方向にあるため、ますます知的生産性の向上が求められるようになってきました。知的生産性を向上させるには様々な方法がありますが、その中でも比較的導入が容易な方法としてオフィスの物理的な環境を適切に制御する方法があります。すなわち、執務者にとって快適なオフィス環境に整えることによって、知的作業に集中しやすい環境を作ろうとする試みです。知的集中に影響を与えるオフィス環境としては、温熱、空気質、照明、音等が考えられ、これまでも知的集中を向上させる環境として様々なものが提案されてきましたが、知的集中がどの程度向上するのかを客観的かつ定量的に計測する方法がありませんでした。

私たちの研究室では、定型的なオフィスワークで求められる言語能力、判断能力、数字取り扱い能力等を必要とする認知タスクの解答時間分布が集中の程度によって変化することを応用して、仕事時間中に集中して知的作業に取り組んでいる時間の割合 CTR（Concentration Time Ratio）という集中指標を開発し、これを用いて温熱、照明、音等が知的集中に与える影響を定量的に評価しています。ここでは、執務室と休憩室の室温を適切に制御することにより、図1のように執務中は仕事に集中しやすいように少し涼しい環境に、休憩の際には疲労回復効果が高くなるように少し暖かい環境に、再び仕事に戻るときには冷刺激を与えてリフレッシュと気分転換をはかるような統合温熱制御について、どの程度知的集中を向上させる効果があるのか実験的に検証した研究について簡単に紹介します。

この統合温熱制御の効果を調べるために、38名の方が参加する実験を実施しました。この実験では、統合温熱制御を導入した環境条件と導入していない標準条件の双方で実験参加者が認知タスクを実施することにより、集中指標 CTR にどの程度の差があるのかを調べました。実験の結果、図2のように標準条件と統合温熱制御条件では、平均で2.3%ポイントの集中時間延長効果があることがわかりました。2.3%ポイントというとあまり効果がないように思えますが、労働賃金が高い我が国では決して小さな効果ではありません。私たちの研究室では、今後も知的生産性の向上を目指して研究を進めていきます。

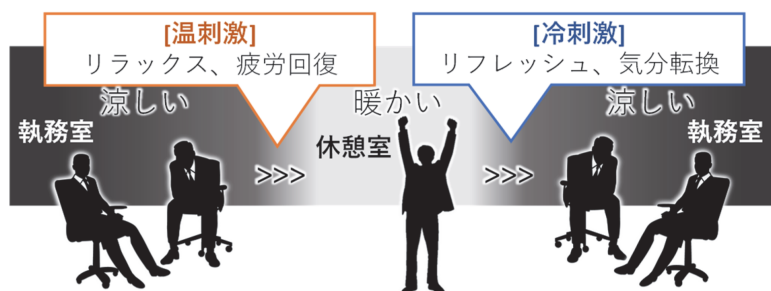


図1：統合温熱制御の概念図

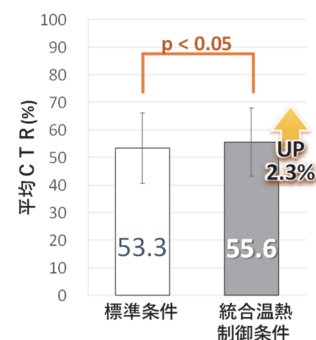


図2：比較評価実験の結果

エネルギー材料学講座 エネルギー応用基礎学分野（土井研究室）

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

「Cuテープ上に導電性酸化物をバッファ層としてエピ成長させて作製する高温超伝導線材」

超伝導体は冷却することで電気抵抗がゼロとなる画期的な材料です。この性質を使うことによって、強力で安定な磁場を発生することが可能になり、核磁気共鳴画像装置（MRI）、リニア中央新幹線、核磁気共鳴装置（NMR）、粒子加速器などの様々な製品が作り出されています。

超伝導体の中でも、特に高温超伝導体と呼ばれる1群の材料はどこでも入手可能で安価な液体窒素に浸漬して冷却するだけで電気抵抗ゼロの状態になるので、これを用いた電線（超伝導線材）を実用化できれば、従来は冷却コストが掛かりすぎるためにその使用が断念されていた電気機器に対しても超伝導線材の使用が広がることが確実視されています。また、世界各地の砂漠に太陽光発電装置を設置し、それらの太陽光発電装置群を高温超伝導線材で構築した全地球的送配電網に組み込んでしまえば、地球上の全てのエネルギーをまかなうことができるといった試算もあります（GENESIS計画：Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids [1]）。

我々は半導体製造分野で発展させられてきた薄膜成長技術（エピタキシャル成長技術）と材料加工技術を融合することで、安価で工業生産に向けた結晶方位制御技術の開発を行ってきており、高温超伝導体の結晶方位を数kmの長さまで渡って単結晶のように揃える（3軸結晶配向）新技術の開発に成功しています [2]。具体的には圧延と加熱によって3軸結晶配向させた銅テープを作製し、その表面にバッファ層を数層エピタキシャル成長させ、最後に高温超伝導体（ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ）をエピタキシャル成長させた高温超伝導線材の開発に成功しました。このようにして単結晶的に結晶方位を揃えた高温超伝導層を電気抵抗ゼロで流れる電流の電流密度は液体窒素中（77 K）で $30,000 \text{ A/mm}^2$ 以上に達しています。これまでに、高性能を維持しながら劇的な低コスト化を達成するために貴金属を不使用とした新規構造（図1）の開発に成功し [3, 4]、現在、国プロ等を活用して実用化に取り組んでいます。

また、このような結晶配向化技術は様々なエネルギーデバイスの性能向上に役立つ技術になる可能性を秘めています。現在、太陽電池やバッテリー、熱電発電素子、燃料電池などへの応用も研究中です。

参考文献

- [1] Yukinori Kuwano, Prog. Photovolt. Res. Appl. **8** (2000) 53-60.
 [2] 土井俊哉、東山和寿、"配向基板上へのタリウム系高温酸化物超伝導厚膜の形成"、応用物理、第65巻、1996、pp.372-376。
 [3] 土井俊哉、堀井滋、"金属系および高温超電導線材の高性能化"、応用物理、第85巻、2015、pp.419-422。

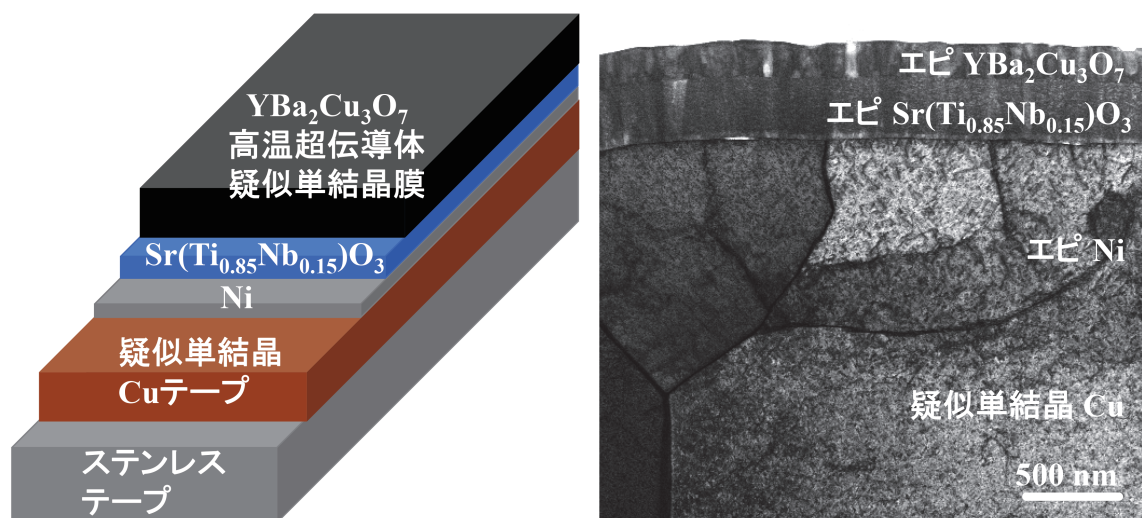


図1 開発した高温超伝導線材の概略構造および断面の透過型電子顕微鏡写真

エネルギー科学研究科 (エネルギー応用科学専攻) プロセスエネルギー学分野 (白井研)
<http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/>
 「GdBCO 超電導抵抗型限流器の復帰特性向上に関する検討」

1. はじめに

当研究室では、超電導応用エネルギー機器とこれらを導入した先進エネルギーシステムをテーマとしている。今回は、分散電源の大量導入によって複雑化する電力潮流状態における保護協調の柔軟化を目的として研究開発を進めている超電導限流器 (SFCL : Superconducting Fault Current Limiter) に関する研究について紹介する。SFCL は通常時にはインピーダンスがゼロで、事故時に高インピーダンスを発生し故障電流を限流する。抵抗型超電導限流器の実用化にあたっては、故障電流の遮断の後素早く超電導状態に復帰することが求められる。超電導線材表面への PTFE (Polye-Tetra-Fluoro- Ethylene) コーティング、液体窒素加圧によって復帰特性が向上することを確認した。

2. 復帰特性試験

本実験に使用した無誘導巻コイル試験体 (住友電工) を図 1 に示す。超電導線材は幅 3 mm、厚さ 0.13 mm、長さ 2480 mm で単位長さ当たりの常温抵抗値が 278 mΩ/m の GdBCO 線材である。線材表面に PTFE を塗布した試験体を PTFE 試験体、しないものを Bare 試験体とよぶ。

交流電圧を 100 ms (7 サイクル) の間試験体に印加し交流過電流によってコイルをクエンチさせた。印加電圧値はクエンチ直後の抵抗値が 600 mΩ になるように調整した。復帰特性を観察するため、線材が超電導状態に戻るまで、微小な一定 DC 電流 (100 mA) を通電し抵抗を計測した。液体窒素の圧力は 0.10 MPa (大気圧) から 0.50 MPa まで 0.05 MPa 刻みで変化させた。

3. 実験結果と考察

図 2 に圧力 0.10 ~ 0.50 MPa でのクエンチ後の Bare 試験体の抵抗値の時間変化を示す。液体窒素を加圧するに従い復帰時間が短縮している。各圧力下において、復帰開始直後にみられる抵抗値の減少の傾きが緩やかな領域 (膜沸騰域) は加圧により冷却が加速されている。傾きの急な領域 (核沸騰域) への移行時の抵抗 (温度) も高くなり、復帰特性が改善されている。また、PTFE 試験体でも同様の実験を行い、Bare 試験体より良好な復帰特性を確認した。

参考文献

- [1]. C. Maeda, et. al., "Recovery Characteristics of GdBCO Tape in a Pressurized Liquid Nitrogen", IEEE Trans. on ASC, AUG. 2019, Vol. 29, Issue:5, Page (s): 1-5, doi:10.1109/TASC.2019.2901894

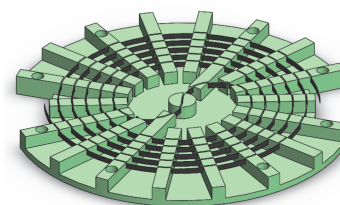


Fig.1 Non-inductive coil

図 1 無誘導巻 GdBCO 超電導コイル (液体窒素浸漬冷却)

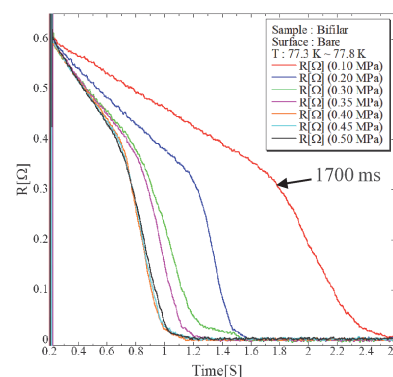


図 2 復帰特性 (過電圧印加後の抵抗変化) : Bare試験体 ; 0.1 ~ 0.5MPa

エネルギー生成研究部門 複合系プラズマ研究分野*

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

「核融合エネルギーを目指したプラズマの計測への近赤外分光法の適用 (II)」

核融合エネルギーは、原子力発電と同じく核変換によって質量エネルギーを運動エネルギーとして取り出し、熱エネルギーに変換する原理に基づく。水素同位体を資源とするため、マイナーアクチニド等の長寿命の高レベル放射性廃棄物を生じず、崩壊熱密度も原子力発電に比べて小さいため、メルトダウンのリスクも低い。発電時に二酸化炭素を放出せず、燃料は海水からとり、炉内で増殖させることができ、中性子により放射化した炉内機器などの低レベル廃棄物は廃炉後 100 - 200 年程度で再利用も可能と見込まれるため、中長期的観点で「ゼロ・エミッション」構想に沿う、ベースロード電源となりうる「再生可能に近い」エネルギーとも言える。

磁場閉じ込め方式による核融合研究は、プラズマの制御、加熱、計測、炉工学に分類される。京都大学で 1950 年代に発案され、その後一貫して発展を続けてきたヘリオトロン磁場方式は、磁気軸が平面上にあり、現在、自然科学研究機構核融合科学研究所 (NIFS) で大型化路線へ引き継がれ、世界的成果を取めている。本研究室では特に、より高効率を目指して 90 年代に考案された「立体磁気軸ヘリオトロン磁場」によるプラズマ制御を追求している。現有のヘリオトロン J は、このいわば最適化路線に則った装置であり、実験・理論・数値解析それぞれのアプローチでプラズマ加熱、計測、閉じ込め制御に関する様々なテーマを推進している。

それらの研究の中から、発光スペクトルを利用したプラズマ診断の一例について紹介する。昨年 CUE 40 号 (p.34) において、プラズマからの近赤外領域の発光 (主に輝線スペクトル) を利用する新しい試みについて紹介した。本稿では、その後得られた近赤外分光による連続スペクトルの検出結果について紹介する。本研究に用いている近赤外分光器 (Ocean optics, Inc., NIRQuest512-2.2) で計測可能な波長 900 - 2100 nm 付近は 3200 - 1400 K の黒体放射のスペクトルのピーク波長に対応する (ウィーンの変位則) ので、このピークを含む両サイドのスペクトルを測定することで精度の高い温度計測が期待できる。この温度領域には様々な材料の融点 (鉄 1536°C、モリブデン 2623°C、タングステン 3407°C 等) が存在するため、装置保護の観点においても有用となり得る。

電子サイクロトロン加熱を比較的低密度でおこなうと、加速された電子がプラズマにエネルギーを与えられず、容器壁の特定部分にホットスポットを形成する場合がある。本システムをヘリオトロン J に適用したところ、プラズマのモニタ映像にホットスポット形成が認められた放電において、近赤外分光器で黒体放射のスペクトルが観測された (図)。感度較正で定量性が満足される波長領域においてプランクの輻射式でフィッティングを行い、2400 K の黒体放射が同定された [1]。

ホットスポットはプラズマ対向壁の溶損や不純物発生の原因となり得るため、その観測・制御が不可欠であり、近赤外分光の有用性が高められた。

[1] Kado *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **89**, 10D129 (2018), doi: 10.1063/1.5039320

<推薦書籍 (Kindle 版) >

「核融合: 宇宙のエネルギーを私たちの手に」ASIN: B00TNZCKD8

*) 改組によって分野・構成員が再編成されています。

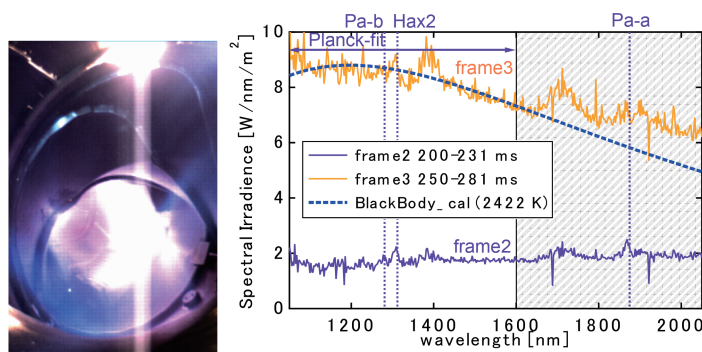


図: (左) プラズマモニタで上部に観測された ECH によって生成された高速電子と壁との相互作用によると推定されるホットスポット。(右) ホットスポット生成時に計測された近赤外スペクトル (放電番号 #69029)。近赤外の分光視線はプラズマの内壁下部を向いており、ホットスポットの反射光 (照り返し) を検出したと推測される [1]。

エネルギー理工学研究所 エネルギー機能変換研究部門
<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/conv/>
 ナノ光科学研究分野（松田（一）研究室）

近年、持続的に発展可能な社会の実現に向けて、社会受容性の高いエネルギー生成・利用・変換に資する研究の重要性がますます増している。本研究室では、物性物理・物質科学・デバイス工学を基盤とし、ナノサイエンスに立脚した新しい光科学の学理追求とそのエネルギー応用を目標として研究を進めています。特に、従来の延長線上にはない極限ナノ物質・量子光物性・デバイス機能、などの新しい要素を取り入れる事が革新的な光エネルギー応用に向けて、必要不可欠であると考えています。我々は、わずか原子数層の薄さのカーボンナノチューブやグラフェン、原子層物質などの極限ナノ物質を対象に、そこで発現する特異な量子光学現象の開拓とその背景にある物理の理解を通して、新しい光科学やエネルギー科学の地平を目指して、次のような研究を展開しています。

[1] 極限ナノ物質における光物性物理とバレースピンのフォトニクスへの応用：

単層遷移金属ダイカルコゲナイドに代表される原子層物質は、*beyond graphene* と呼ばれ極限的な量子閉じ込め効果の発現や波数空間での谷（バレー）とスピン自由度の結合など特徴的な物性が発現する（図1上）。このようなバレーとスピンの自由度が結合したバレースピンによって、従来の電子の電荷の自由度のみを利用した電子（エレクトロニクス）・光（フォトニクス）応用とは大きく異なる、バレートロニクスと呼ばれる新たな研究分野へと発展しつつある。我々は、バレースピンを利活用した新しいフォトニクス（バレースピン・フォトニクス）の実現に向け、その第一歩として、原子層物質の光学的性質を詳細に調べ、わずか原子三層の非常に薄い物質であるにも関わらず、約10%におよぶ強い光吸収を示す事を明らかにしている。さらに、バレースピン緩和の物理メカニズムを明らかにし、そこで得た指針を発展させる形で、バレースピン制御に成功するなど（図1下）、バレースピン・フォトニクスに向け鍵となる研究を進めている。

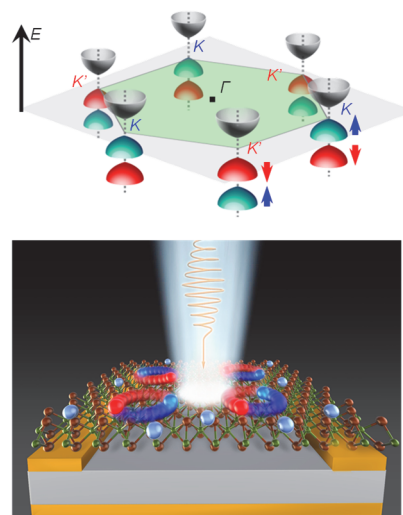


図1 バレースピン自由度の結合、バレースピン制御の模式図

[2] 極限ナノ物質のエネルギーデバイス・バイオイメージング応用：

カーボンナノチューブなどの新しい原子層ナノ物質は、エネルギーデバイスやバイオイメージング利用において、高いポテンシャルを有している。特に、原子層ナノ物質は、エネルギー変換において既存の物質では困難な量子効果を活用できる可能性とともに、高い透明性・導電性を両立するなど、高性能・機能な光電変換デバイスに利用しうる側面を兼ね備えている。まず、カーボンナノチューブを利用したヘテロ構造（カーボンナノチューブ/Si）太陽電池をモデルケースとして研究を進め、光電変換メカニズムを詳細に理解することで、光電変換性能（効率）を向上するための新たな指針を得た。その結果、カーボンナノチューブヘテロ構造太陽電池として17%を超える光電変換効率を達成する（図2）など、新しいエネルギー科学に向けた研究を推進している。

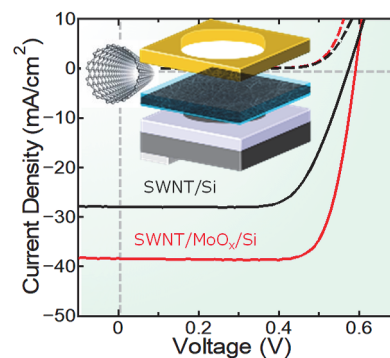


図2 ナノチューブを利用したヘテロ構造太陽電池

地球電波工学講座 地球大気計測分野（橋口研究室）

http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashiguchi_lab/

「光・電波複合観測システムによる水蒸気時空間変動の把握」

西日本で起きた「平成 30 年度豪雨」や局地的な「ゲリラ豪雨」など、人の生命や社会基盤に甚大な被害をもたらす気象水災害が増えています。近年では、気象レーダーによる精緻な雨滴の空間分布計測が行われるようになってきたものの、集中豪雨の詳細な過程は、観測システムの観測点やメソ数値予報モデルの格子点の間隔が粗すぎるため十分に捉えきれていません。局地的豪雨を引き起こす積乱雲は、湿った気塊が冷たい気流に持ち上げられる過程などにより発生するので、大気境界層内の水蒸気量の増加を高頻度・高分解能で把握することが重要になります。

当研究室では、水蒸気の動態を把握するための光と電波を用いたリモートセンシング技術の開発に取り組んできました。水蒸気の鉛直分布計測には、光学計測であるラマンライダー手法を適用しています。ラマンライダーは、大気に照射したレーザーの散乱光のうち、大気分子に固有の波長遷移を示すラマン散乱を望遠鏡にて受光し、光電子増倍管で検出する装置です。パルスレーザーを直上に射出してから散乱光を受光するまでの時間より高度を、水蒸気分子および乾燥大気の指標になる窒素分子や酸素分子のラマン散乱強度から水蒸気混合比を求めます。光を用いた計測手法は、背景光ノイズが大きい日中の観測が難しいという課題があります。そこで、成層圏オゾン層の吸収により地上に到達する太陽放射が少ない深紫外波長領域に対応したシステムを開発して、計測可能な時間の拡大を図ってきました。水蒸気の水平分布計測には、GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) に代表される人工衛星を用いた測位システム (GNSS: Global Navigation Satellite System) からの電波を受信する地上型の稠密観測網を活用しています。電波は真空中では光速で伝搬しますが、大気中では速度が遅くなります。高度約 10 km 以下の対流圏における伝搬遅延は、経路上の気圧・気温・水蒸気によって決まります。この遅延量から気圧と気温の寄与を差し引くと、時空間変動が大きい水蒸気の高高度積分値 (可降水量) が求まります。

本研究グループでは、平成 22 年から平成 25 年にかけて、京都府南部地域に水平間隔 1 ~ 2 km 置きに配置した GNSS 受信機群による稠密観測網を独自展開して、国土地理院の GNSS 連続観測システム (GEONET、水平間隔約 20km) では解像できない詳細な水蒸気水平分布観測を実現しました。平成 27 年からは、京都大学生存圏研究所信楽 MU 観測所 (滋賀県甲賀市) を中心とする半径 15 km 内に GNSS 稠密観測網を移設して観測を行っています。信楽 MU 観測所では、水蒸気の鉛直分布を時間連続で計測するラマンライダーのほかに、風速 3 成分や気温のプロファイルを計測するリモートセンシング装置が複数運用されています。これら光電波複合観測システムが、雨滴が生成されるより前の水蒸気の収束を測定できる特長を活かして、強雨をもたらす降水系の前兆現象や積乱雲の急激な発達過程に関する研究を行っています。

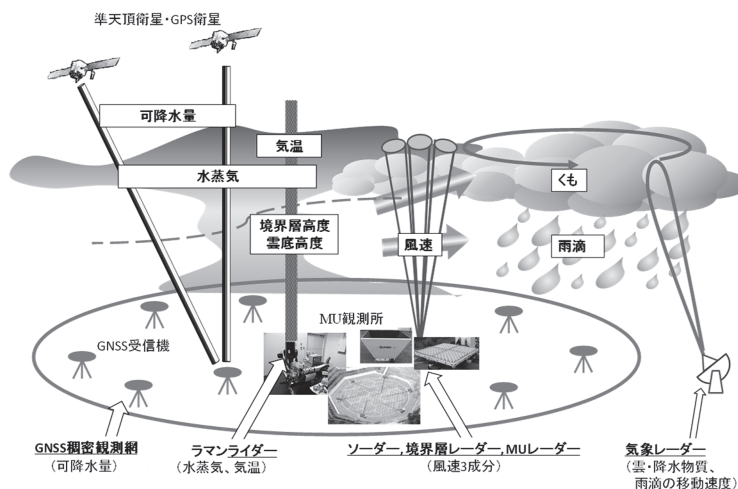


図1 雨滴が生成される前の水蒸気動態を計測するラマンライダーおよびGNSS稠密観測網を含む光電波複合観測システム

生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野 (大村研)

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

「プラズマ圏ヒスはインコヒーレントか？」

地球磁気圏のプラズマ波として観測された電磁波の波形は、オーディオアンプを通すことで私達が聴くことのできる音に変換することができます。このプラズマ波が出す「宇宙の音」は、電磁場と相互作用する荷電粒子の集団的な動きを支配する非常に重要な物理現象です。

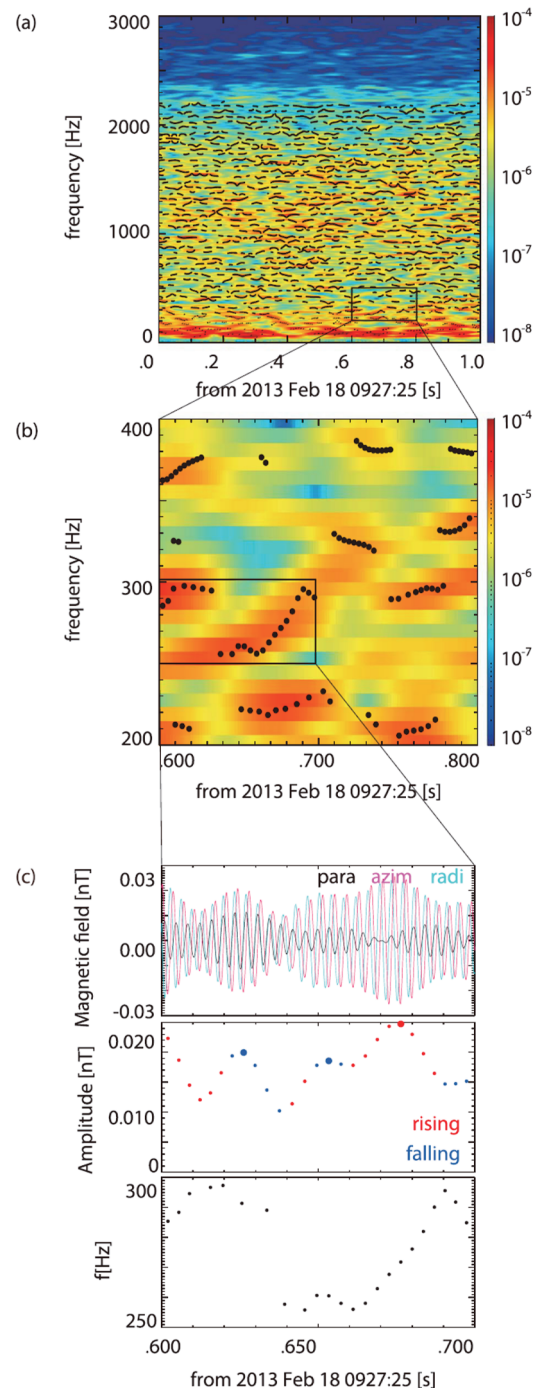
非常に多彩な音色（スペクトル）のプラズマ波が観測されてきましたが、ホワイトノイズに似た音からヒス (hiss) と呼ばれるものがあります。ヒスは ELF/VLF 帯 (数 100- 数 kHz) の周波数、数 pT の振幅を持ち、ほぼ常にプラズマ圏内で観測されます。これまでヒスは“インコヒーレント”で特徴的なスペクトルがなく、粒子と効果的に共鳴しないと予想され、研究対象として注目されていませんでした。その発生機構についても、落雷によるものやプラズマ圏の内側に入りこんできたコーラス波が重なり合ったものなど明らかにされていませんでした。

ところが、2012年に打ち上げられた Van Allen Probes 衛星が約 60kHz という非常に高時間分解能の波形データでヒスを観測したところ、これまでの理解と全く異なる描像が見えてきました。右図に示したようにヒスのスペクトルを拡大すると、ヒスは非常に短いエミッションの集合で構成されていることがわかりました。これらは数 10 ms の時間スケール、数 10 pT の振幅、明瞭な周波数変動を持っており、互いにほとんど重なり合わず、コヒーレントなエミッションです。こうした特徴は磁気圏で最も注目されているホイスラーモードコーラスと呼ばれる現象とよく似ています。過去の理解は、分解能が不足していたため平均的なスペクトル描像しか得られなかったためでした。今回得られたようなコヒーレントなエミッションの集合は非常に効果的に高エネルギー粒子と相互作用することが期待されます。

私達の研究グループでは、これらのエミッションの振幅及び周波数変動・時間スケールについて、コーラスに適用されてきた非線形成長理論と比較し、よく一致することを示しました。さらにこのエミッションの集合の粒子のピッチ角散乱などへの影響を定量的に見積もる計算を進めています。

参考文献

Nakamura, S., Y. Omura, D. Summers, and C. A. Kletzing (2016), *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10,040–10,049.



(a) ヒスの磁場ダイナミックスペクトラム、(b) ダイナミックスペクトルの拡大図、(c) 磁場変動・振幅・周波数の時系列データ

学術情報メディアセンター ビジュアライゼーション研究分野（小山田研究室）

<http://www.viz.media.kyoto-u.ac.jp/>

「非線形状態空間再構成による状態遷移可視化とその適用」

本研究室では、生命科学や神経科学、生態学のデータに対して、各分野の先進的な解析と可視化技術を統合的に用いる視覚的分析の研究を行っています。視覚的分析とはインタラクティブな可視化システムを用いたユーザー主導型プロセスによるデータ理解を重視した解析手法です。本稿では米国カリフォルニア大学サンディエゴ校（UCSD）との共同研究内容について紹介します。

様々な分野において計測された時系列データを用いてデータ間の関係性を調べることで、背景のシステムについての理解が進められていますが、データ間の関係性がStaticではなくDynamicで状態依存的に変化する場合において、時間変化する関係性を同定するのは容易ではありません。生態学の例を挙げると、種間競争関係は常に一定ではなく、環境要因や被食捕食者の個体数に依存して時間的に変化する事が知られています。このような問題に対して、2016年に非線形状態空間再構成法に基づきデータ間の時間変化する関係性を計算する手法（Empirical Dynamic Modelling: EDM）がUCSDのグループにより発表され、従来の線形のVARモデルよりも精度よく推定できることが報告されています。この手法では時系列データを状態空間上に埋め込み（embedding）を行うことで構成されたアトラクタに沿って、ヤコビアンを計算することで、変数間の関係性の変化を定量化します。このとき、入力となる複数の時系列データに加え、出力となる関係性の変化のデータ（これも時系列データ）からなる高次元のデータを解釈し、システムの特徴を効率よく把握するには可視化技術とユーザーインタラクションが有効です。

我々はEDMの解析を支援し、システム状態の同定し、その遷移を可視化する視覚的分析システムを開発し、様々な分野への分析システムの適用を進めています。このシステムは高次元情報をt-SNEやPCA、Isomap等を用いて二次元にマッピングし、ネットワークの特徴を表す時系列プロットやノードリンクダイアグラム、散布図等との連携可視化・ユーザーインタラクションを実現することで、システムが有する状態を同定し、その特徴を把握することができます。さらに現在はデータのダイナミクスを表す抽象表現としての状態遷移グラフを提案し、データ理解を促進する仕組みを開発しています。

上述のシステムを、個体群動態をシミュレートした食物連鎖網の時系列データに対して適用したところ、二次元マッピングにより、被食者の数が少ないときに捕食者間の競争関係が増大するといった、エコシステムの状態が同定されました（図1）。興味深いことに、この結果は分析システムを使わずに生態学の専門家が特定した知見と対応し、ツールを用いることで生態学的な知識無しで、背景のシステムの特徴的な状態を同定できることが分かりました。さらに、状態遷移グラフを用い分析することで、エコシステムの状態間の遷移パターンを可視化することができ、新たな科学的発見を促進させます。

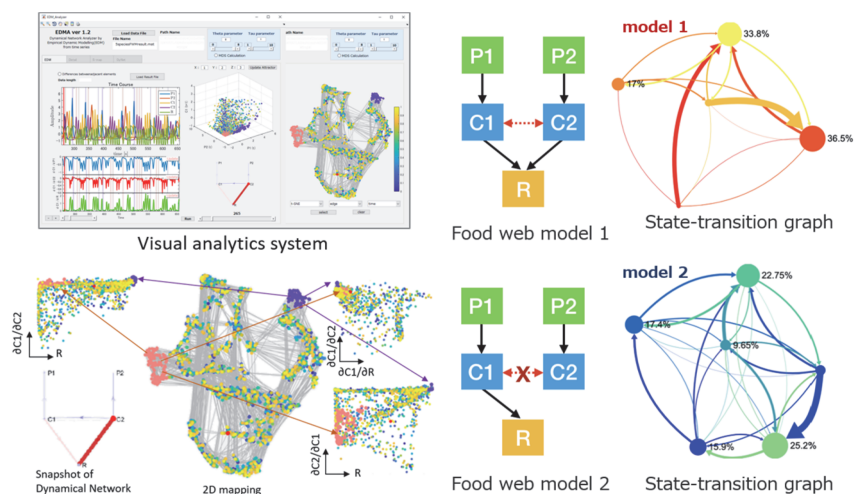


図1：連携可視化によるシステムの状態の同定と状態遷移の可視化

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 (中村研究室)
<http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/>
 「筋電位と姿勢を用いた立ち上がり動作の計測と予測」

立ち上がり動作は、座位（特に椅子座位）から立位に至るまでの継ぎ動作である。椅子座位からの立ち上がり動作は毎日 60 回以上行われており、我々の日常生活において頻繁に現れる動作である。歩くためにはまず立ち上がる必要があり、トイレ動作、入浴など、最も基本的な日常活動の多くに関与していることから、生活の QOL を大きく左右する要因とされている。このような背景から、患者や被介護者の立ち上がり動作やその意図を早めに検出する手段が望まれている。介助者が余裕を持って対応することや、種々の機器によって立ち上がりを補助したり、危険を回避する動作を行うことが可能にするためである。しかし、立ち上がりの意図や動作の検出は簡単ではない。まず、立ち上がる前や初期段階で検出できなければ、補助をすることが難しいこと、日常動作の中には立ち上がりと紛らわしい動作が種々存在することなどが原因である。

この問題に対し、本研究ではまず、立ち上がり動作を詳細に計測し、その性質を調査することを行った。図上部にそのためのシステムを示す。慣性センサ、光学センサ、筋電位センサを用いて、姿勢、筋張力（推定値）が計測される。計測対象は、下肢と体幹の姿勢（股関節屈曲角、前傾角）と立ち上がりには主要な役割を果たす、大腿・下腿の筋（大腿二頭筋、前脛骨筋、その他）、背骨まわりの筋（最長筋、その他）である。立ち上がり動作の実測例を図下部に示す。まず、最長筋がわずかに賦活し、その後、前脛骨筋が賦活するとともに状態が前屈方向に傾き、次に内側広筋などの大腿の前側の筋（内側広筋など）が賦活することによって臀部が離床する体勢ができあがる。ほぼ立位になった時点で、各筋の筋張力が弱くなるが、大腿の前側の筋、背中の筋は一定の筋力を発揮し続ける。以上は、安定戦略と呼ばれる最も安全な立ち上がり方の例である。

このような計測システムを用いて動作例を蓄積し、機械学習を適用することによって、立ち上がりを予測・識別することを試みた。実際に集めた動作例は、(1) 立ち上がり（成功）、(2) 立ち上がり（失敗）、(3) まぎらわしいその他の動作、である。(2) は補助の必要性が最も高い状況として、(1) や (3) とともに区別できれば良いとの考え方である。(2) としては、市販の高齢者体験キットを被験者に装着してもらい、うまく立ち上がれなかった場合を集めた。集めた動作例の数が少なく、予備的な実験にとどまっているが、安定戦略をとった場合には、臀部離床の前（立ち上がりの第 1 相）に、(1) と (3) の間の識別がある程度可能（個人によっては 80% 程度の精度）であることが示された。また臀部離床の後では精度がさらに上がる。しかし、(1) と (2) の識別は (1) と (3) ほど簡単でないことも明らかになってきつつあり、今後、より詳細な計測を行いながら、精度の良い識別手法を提案していくとともに、現場での計測方法を検討していく必要がある。

