

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)

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 (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 (松山研)

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野 (守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野

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 (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)

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)

先端電気システム論講座 (引原研究室)

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

SiC MOSFET の高周波スイッチングのためのゲートドライブ回路開発

昨今, SiC, GaN パワーデバイスが商品化されるに至り, 従来の Si パワーデバイスの SiC および GaN パワーデバイスへの置き換えの試みが始まっている. 本研究室では, 21 世紀 COE, GCOE, 科研費, ALCA, 環境ナノクラスター事業, スーパークラスター事業, そして SIP の支援等を継続的に受け, これまでに SiC の物理的優位性を生かした回路・システム応用を, 研究テーマの一つとして推進してきた. SiC の物理的優位性として, 低 ON 抵抗, 高耐圧特性, 高速スイッチング特性, 高温耐性等が知られている. それらの特性に着目し, これまでにも, 世界で初めて 400°C の高温下でスイッチ素子の安定な動作と変換回路の駆動が可能であること確認した [1]. この温度余裕の下, パワーデバイスの高速・高周波スイッチング駆動が可能になれば, 電力変換回路においてエネルギー蓄積要素である受動素子を小型化し, パワー集積回路の実現への道が開ける.

小容量の電力変換回路, すなわちアダプタや dc/dc コンバータでは, Si パワーデバイスが数百 kHz のスイッチングで駆動されている. この周波数を十数 MHz まで増加すれば, 受動素子を 1/10 程度まで小さくすることができる. SiC パワーデバイスの高速・高周波スイッチング特性はそのような適用が可能な素子である. しかしながら, SiC FET を高周波変換回路に適用するには, 高周波駆動可能な絶縁ゲートドライブ回路の開発が不可欠となる (本解説では, 以下 SiC MOSFET を対象とする).

一般的な絶縁素子であるフォトカプラは MHz 以上の周波数の駆動に適さない. また磁気結合はコアの磁気特性のため数 MHz 程度の限界がある. 10MHz 以上の周波数の信号の伝送における絶縁素子には RF 結合素子を用いる必要がある. 次に, オン・オフの駆動信号を受けて SiC MOSFET を駆動するには, ゲートソース間の接合容量 C_{gs} の蓄積電荷を高速で出し入れしなければならない. Si パワーデバイスは Si MOS のプッシュプル回路で駆動される. 信号レベルであれば Si 素子も高速に駆動できるが, SiC のパワー素子を駆動するのに必要な瞬時 20 ~ 30W の出力を連続的にドライブすることは難しい. これがスイッチング周波数に優位性がある SiC パワーデバイスに対して, その特性を生かした回路開発が進まない原因となって来た. 我々は, SiC MOSFET の物理的優位性を生かした回路・システム開発を目指すという観点から, 高周波ゲートドライブ回路の開発を行い, 10MHz 以上のスイッチング周波数, 数百 W 以上の出力の dc/dc コンバータの駆動を達成した [2]. 図 1 は開発した MOSFET のゲートドライブ回路である. ドライブ回路は, 絶縁部, 信号伝送部, 駆動部の三段構成で, 駆動部には GaN FET を適用し, 駆動信号の信号からパワーへの変換を図っている. 図 2 は, 3 MHz で発熱により駆動不可能となった Si ベースの汎用ドライブ素子を凌ぐ周波数と効率で, SiC MOSFET の駆動が実現できていることを示している.

SiC, GaN パワーデバイスは Si とは異なる動作領域において優位性がある. その利用には周辺の技術開発が急務で有り, 既存技術の使い回しで新たな回路開発を怠れば素子の利用に未来が無いのではないだろうか.

参考文献

- [1] T.Funaki, et al., IEEE trans. on Power Electronics, Vol. 22, No. 4, 1321-1329 (2007).
- [2] K.Nagaoka, et al., IEICE Electronics Express Vol. 12, No. 11, 20150285 (2015).

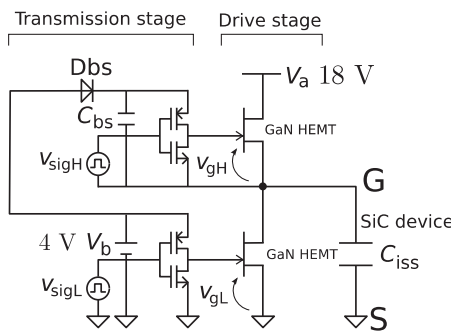


図 1 SiC MOSFET ゲートドライブ回路

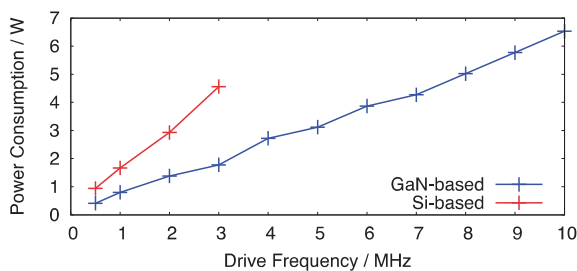


図 2 ドライブ回路の特性

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/>

「電磁界有限要素解析のための過去の求解プロセス情報を利用した誤差修正法の開発」

電気電子機器の設計開発等の場で、解析的に解くことの困難な電磁界方程式に対して計算機シミュレーションによって近似解を得ることがしばしば行われている。電磁界方程式に対する計算機シミュレーションでは有限要素法と呼ばれる数値解析手法が広く用いられており、有限要素法による計算機シミュレーションの高速化・高精度化を目指す多様な研究が行われている。

有限要素法によって計算機シミュレーションを行う際には多くの未知数を含む連立方程式の求解が最終的に必要とされるが、特に電磁界方程式を時間発展的に解くことが求められる場合、次の形で表される連立方程式

$$A_k \mathbf{x}_k = \mathbf{b}_k \quad (1)$$

を繰り返し解くことが求められ、しばしば膨大な計算コストが消費される。ここで A_k , \mathbf{x}_k , \mathbf{b}_k はそれぞれ k 回目の時間ステップで解く連立方程式の係数行列、未知数ベクトル、(既知の) 右辺ベクトルを表す。係数行列 A_k は全てのステップで類似している、または同じ行列であることが珍しくないが、直接的な LU 分解が現実的でない程の大規模問題で反復解法が採用される場合には、過去のステップで行った計算を再利用することによる計算高速化の可能性については限定的にしか検討が行われてこなかった。

本研究室の最近の研究テーマの一つとして、式 (1) の反復求解において速やかな反復収束の妨げとなるベクトル成分が全ての k について共通である場合が実用的に多い点に着目し、各ステップの求解プロセス情報から問題となるベクトル成分を推定し以降のステップの計算高速化に積極的に活用する計算手法の開発に取り組んでいる。最も単純な発想としては、最初のステップ ($k=1$) の反復計算において

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1^n \quad (2)$$

を収束を妨げるベクトル成分の推定とすることが考えられる。ここで \mathbf{x}_1^n は反復求解中の n 反復目で得られた近似解であり、適切な n を選び、反復により最終的に得られた解との差をとることによって、問題となるベクトル成分の良い推定を得ることが狙いである。以降のステップで \mathbf{e}_1 を用いて収束性を改善するための手法、2 回目のステップ以降も同様の推定を継続して行う手法などの開発に現在取り組んでいる。図 1 に提案手法の有効性を確認するためのテストモデルを、図 2 に提案手法を適用した場合に反復解法の収束性が改善される様子を示す^[1]。図 1 に示される疑似導体 (fake conductor) の存在が、通常の反復解法 ($k_m = 0$) の 250 反復目以降の相対残差ノルムの収束に悪影響を及ぼしている。このテストモデルについては収束の妨げとなるベクトル成分を理論的に特定することも可能であるが、提案手法 ($k_m = 1, 2, 4$) を導入することで解析対象に関する知見に頼ることなく収束性の問題を解消できている。計算コストの増大につながるベクトル成分が未知である多くの実用問題について、本手法は計算高速化の観点で有力であるのみでなく、新たな理論的知見を得るための支援となる可能性も期待される。

[1] 河口、美船、岩下、松尾、平成 28 年電気学会全国大会、5-062、2016

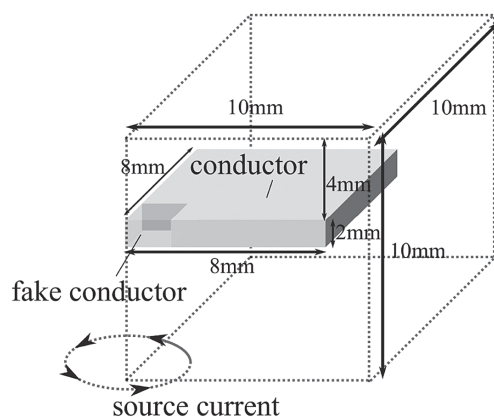


図 1 テスト解析モデル

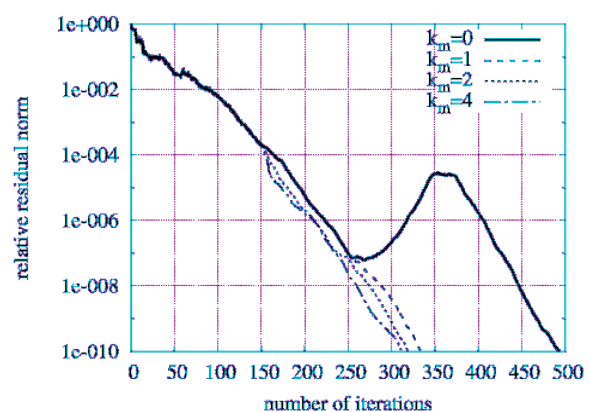


図 2 反復解法の収束特性

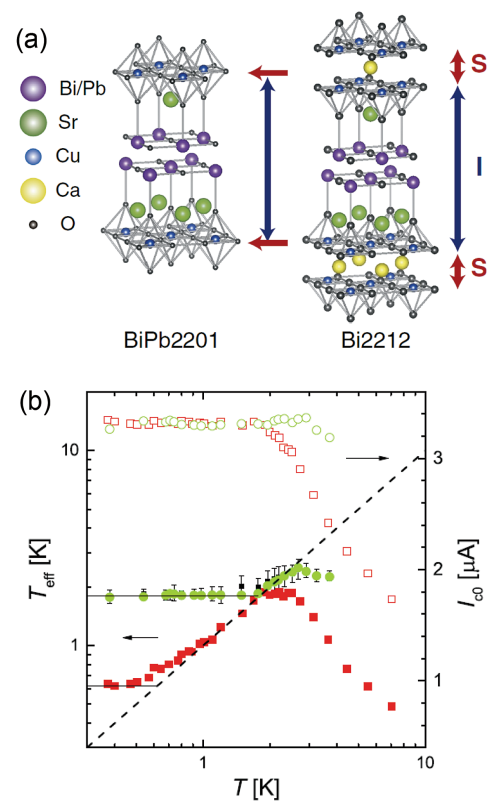
集積機能工学講座

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

高温超伝導体固有ジョセフソン接合における協力的量子トンネル現象

超伝導現象は、電子の波動性が巨視的に現れる巨視的量子現象の代表例であり、巨視的な世界では非常識な現象が観測されます。そのひとつがジョセフソン接合に見られる巨視的量子トンネル現象です。ハイゼンベルグが予言した不確定性によるトンネル効果が、電流電圧特性のゆらぎに現れ、この現象は量子計算機を構成する量子ビットの動作原理となります。最近、カナダのベンチャー企業である D-Wave 社から最適化問題を解く量子アニーリング装置が発売され、NASA、ロッキードマーチンなどが導入したことが大きな話題となりました。ここで使われているデバイスもジョセフソン接合における量子トンネルを応用したものです。また、Google は超伝導量子ビットで世界をリードしてきたカリフォルニア大学サンタバーバラ校の John Martinis 教授の研究室を丸ごと買収し、量子計算機の独自開発を進めています。一方、高温超伝導体の c 軸方向には、およそ 1 nm という結晶構造の周期で超伝導性の強さが空間的に強く変調されているため、ジョセフソン接合が積層していると考えられます。この接合を固有ジョセフソン接合と呼びます。積層する固有ジョセフソン接合は、多数層を含む長距離的な相互作用と、隣接層間だけに及ぶ短距離的な相互作用により結合しており、これが多様な現象をもたらします。私たちは、高温超伝導体固有ジョセフソン接合間の短距離的な相互作用に由来する現象を抽出することに成功しました。これは、技術的に困難といわれてきた固有ジョセフソン接合を量子ビットとして利用するためのブレークスルーとなり、希釈冷凍機が不要な、大幅に小型化された量子計算機を実現することができます。

私たちは、独自の技術を用いて少数の固有ジョセフソン接合が積層するメサ構造を抽出し、特定の固有ジョセフソン接合がゼロ電圧状態から有限電圧状態に転移する電圧スイッチング特性を 0.4 ケルビンの極低温まで測定しました。メサ構造は、Bi2201, Bi2212, Bi2223 と呼ばれる 3 種類の超伝導体の単結晶に作製しました。これらの超伝導体では、ジョセフソン接合の周期が 1.2, 1.5, 1.8 nm と変化していく点を利用して、相互作用を変化できることに着目しました。メサ構造の最上にある第一接合と、第二接合のスイッチング特性における量子ゆらぎを評価したところ、Bi2201 と Bi2212 では、第二接合の量子ゆらぎを示す温度が第一接合のその十倍程度を示しているのに対して、ジョセフソン接合が比較的離れた Bi2223 では、両接合の量子ゆらぎは同等になるという結果が得られました。これは、Bi2201 と Bi2212 では、前述の短距離的な相互作用により協力的な量子トンネル現象が起きており、それがわずか 0.3 nm のジョセフソン接合間距離の増加により消失してしまうという興味深い事実を示しています。



図：(a) Bi2201 (左) と Bi2212 (右) の結晶構造。S と書かれている原子層に超伝導性が集中して、ジョセフソン接合を形成。(b) Bi2201 における第一接合 (赤; 濃色) と第二接合 (緑; 淡色) のスイッチ揺らぎを示す温度が素子温度によって変化していく様子。0.4 ケルビンにおいて観測される量子ゆらぎは第二接合では第一接合に比べて顕著。

電子物理工学講座 極微電子工学分野 (白石研究室)

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

「半導体スピントロニクスデバイスの実現に向けた取り組み」

スピントロニクスとは電子の内部自由度であるスピンを利用して新規デバイスの創成を目指す研究分野です。電子スピンは $+(1/2)\hbar$ または $-(1/2)\hbar$ の角運動量を持ちますが、それぞれをアップスピン、ダウンスピンと呼んでいます。強磁性体(鉄やコバルトなど)ではアップスピンとダウンスピンの状態密度が異なり、伝導率に違いが生じます。その結果、強磁性体中に電流を流せば、スピンの数に偏りがある“スピン偏極電流”が生成されます。スピンの偏りの定量的指標を“スピン偏極率”と呼び、例えばアップスピンのみで構成された電流はスピン偏極率100%、一般的な電流は0%となります。スピン偏極率はスピントロニクスデバイスの性能を決定する非常に重要なパラメータです。ここで強磁性体Aを用いて生成したスピン偏極電流を、別の強磁性体Bに注入する場合を考えます。強磁性体Bもアップスピンとダウンスピンの伝導率に差がある為、強磁性体Aに対する強磁性体Bの磁化の向きが平行、または反平行により抵抗が変化します。このような現象を“スピン依存抵抗”と呼びます。強磁性体の磁化の向きは電源を切っても維持するため、強磁性体A、Bは不揮発性のメモリとして利用できます。これまでに強磁性体A、Bの間に非磁性金属薄膜を挟んだ素子(巨大磁気抵抗素子)や膜厚1 nm以下のトンネル絶縁膜を挟んだ素子(トンネル磁気抵抗素子)が実用化されてきました。

我々の研究室では強磁性体A、Bの間を半導体にした素子のデバイス応用を研究しています。代表的な素子は通常MOS(metal-oxide-semiconductor)トランジスタのソース・ドレイン部分が強磁性体に置き換わった構造をしており(図1)、スピンMOSFETと呼ばれています。この場合、半導体チャンネル中のスピン偏極電流を磁界や電界を用いて変調したり、反対にトランスコンダクタンスを磁化配置で制御することが可能です。再構成可能な論理回路への応用が期待されています。しかし、半導体にスピン偏極電流を注入するには課題があります。1つ目に、半導体と強磁性金属では伝導率の差が大きく、半導体中に注入したスピンの拡散流として強磁性体に逆流する「コンダクタンスミスマッチ問題」が顕在化します。2つ目に強磁性体と半導体の界面は反応しやすく、強磁性体の性質の劣下が生じます。どちらの問題もドレイン電流のスピン偏極率の低下を招きます。我々の研究室では、1 nm以下の酸化マグネシウム(MgO)膜を鉄(Fe)とシリコン(Si)の界面に挿入し、この2つの問題を解決しました。その結果、縮退および非縮退Si中の室温スピン輸送(図2(a))や磁界を用いたスピンの操作に成功しました。近年ではスピンMOSFETの室温実証に成功し、強磁性体の磁化配置制御によるトランスコンダクタンスの変調にも成功しています(図2(b))。現在はドレイン電流のスピン偏極率の向上や、半導体デバイスで問題となる発熱を再利用したスピンドバイスの創成を目指した研究を進めています。

参考文献: Takayuki Tahara et al., “Room-temperature operation of spin MOSFET with high on/off spin signal ratio” Applied Physics Express, **8**, 113004 (2015).

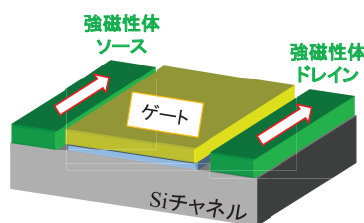


図1 シリコンスピンMOSFETの素子構造。

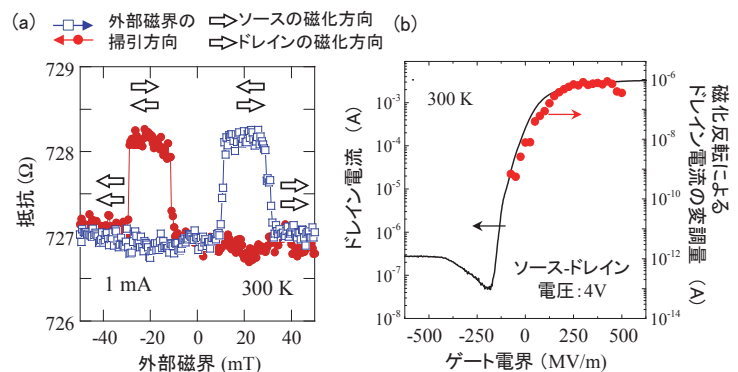


図2 (a) シリコンスピンMOSFETにおけるスピン依存抵抗の測定結果. および (b) 磁化反転によるドレイン電流の変調量のゲート依存性.

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>

「超ワイドギャップ半導体 AlN における励起子光物性」

低損失高耐圧パワーデバイスを実現した SiC ($E_g = 3.2$ eV), ノーベル物理学賞の受賞対象となった高輝度青色 LED の基盤材料である GaN ($E_g = 3.4$ eV), これらとともにワイドギャップ半導体と呼ばれる材料群に属している。近年, SiC や GaN に続く次世代の光・電子デバイス基盤材料として, さらにバンドギャップの大きいダイヤモンド ($E_g = 5.5$ eV) や AlN ($E_g = 6.0$ eV) といった材料 (ここでは超ワイドギャップ半導体と呼ぶ) に注目が集まっている。例えば発光素子に着目すると, 超ワイドギャップ半導体を用いることで, 浄水・殺菌に有効な深紫外 LED の作製が可能となる。しかしながら, 深紫外 LED の発光効率は青色 LED と比べて低いのが現状であり (1/10 程度), 高効率深紫外 LED の実現に向けて, 超ワイドギャップ半導体における基礎光物性の解明が望まれている。当研究室では, 超ワイドギャップ半導体の 1 つである AlN の気相成長に取り組んでおり, 近年, 高品質 AlN ホモエピタキシャル薄膜の作製に成功した [ref. *APEX* 5, 082001 (2012)]. そして, この試料の発光スペクトルを精査することで, AlN における特異な光物性を発見し, その起源を明らかにした [ref. *PRB* 87, 161204 (2013)].

有機金属気相成長法を用いて AlN ホモエピタキシャル薄膜を作製した。作製した薄膜層における不純物量は基板に比べて大幅に低減されていることを二次イオン質量分析法により確認した。AlN ホモエピタキシャル薄膜に対して極低温下 (10 K) におけるフォトルミネッセンス (PL) 測定を行った結果を図 1 に示す。4 つのピークが観測されていることが分かる。これまで, FX は AlN 固有の発光 (自由励起子発光), それ以外は結晶不純物に起因する発光 (束縛励起子発光) と考えられてきた。ここで“励起子”とは, 結晶中において電子と正孔がクーロン力によって互いに結びついた状態のことであり, 束縛励起子発光は通常室温では観測されないことが知られている。我々は, 試料からの発光の偏光状態と配光状態を制御することで, 室温でも X は観測されることを見出した (図 2)。すなわち, FX と同様に X も AlN の自由励起子発光であることを明らかにした。FX と X のエネルギー差は 13.6 meV と大きく, それぞれの自由励起子のスピン角運動量の違いがこのエネルギー差を生み出すと考えている (交換相互作用)。図 3 に, 種々の材料における交換相互作用の大きさ と有効原子間距離 (原子間距離 \times 誘電率) の関係を示す。交換相互作用と有効原子間距離の間には明確な相関が存在し, AlN における交換相互作用の大きさは典型化合物半導体の中で最大となることが分かった。このように, 超ワイドギャップ半導体である AlN では, 電子と正孔が結合した素励起状態である励起子が室温において十分に安定に存在し, これらキャリアの交換相互作用が光物性の発現に重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

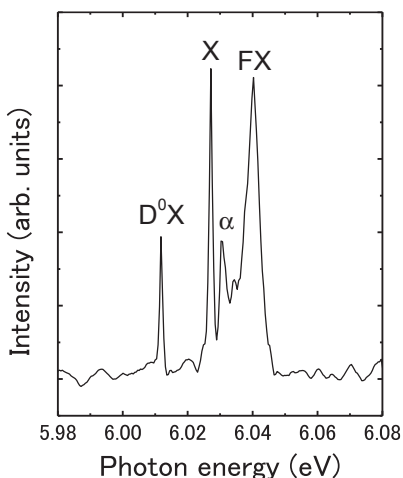


図 1. 10 K における AlN の PL スペクトル

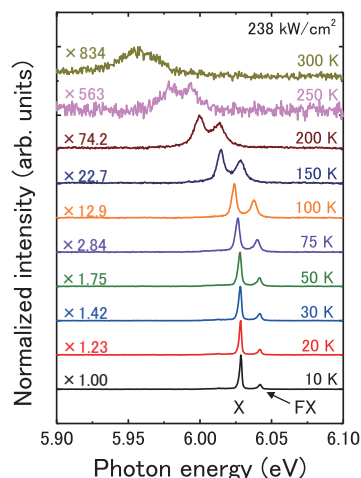


図 2. 偏光状態と配光状態を制御して取得した AlN の PL スペクトルの温度依存性

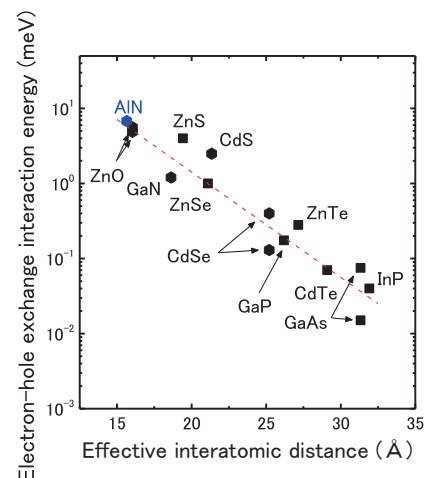


図 3. 電子正孔交換相互作用定数と有効原子間距離の関係 (AlN は最大の値となっている)

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

http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess_eng/index.html

「イオン液体イオン源の開発と固体表面改質応用の検討」

多原子分子のイオンは固体表面処理への応用を考えた場合、官能基による化学反応や大質量電荷比に起因する照射効果があるため、様々な応用が期待できます。最近では、特異な性質を持つイオン液体のイオンビームについて関心が持たれてきています。イオン液体は近年注目されている溶媒材料で、カチオン（陽イオン）とアニオン（陰イオン）で構成された室温で液体の塩です。水・油・アルコール等とは混ざり合わず、導電性を示し、発火せず、化学的に安定であるため、合成化学や電池応用への研究が進められています。さらにイオン液体は常温では殆ど蒸発しないため、真空中での電界放出によるイオンビーム形成が可能です。このため、宇宙推進用のイオンエンジンや、表面微細加工用の収束イオンビームへの応用が研究されています。また、カチオンには炭素と窒素、アニオンにはフッ化物を持つものが多いといった特徴から、様々な固体表面処理への応用が期待できます。

本研究にて開発したイオン液体イオン源を図1に示します。種々のエミッタ材料を検討した結果、イオン液体との濡れ性が高く、導電性を有する竹炭を針材としています。竹炭は nm から μm オーダーの多数の細孔が繊維方向に貫通しており、イオン液体は竹炭内部に保持されると共にチップ表面に最適な速度で供給されるため、これまで使用していたグラファイトチップよりもさらに安定したイオン放出を長時間行なうことが可能となりました。エミッタ先端では、電界印加による静電力がイオン液体の表面張力を上回るため、イオン液体はテーラーコーンと呼ばれる円錐形状となっており、その先端からイオン液体中のイオンが主に電界蒸発により放出されます。図2の質量分析の結果から、イオン液体 BMIM-PF₆ および EMIM-BF₄ では、負イオンビームの生成によりアニオン単体と小さいクラスターが放出されていることがわかりました。一方イオン液体 EMIM-DCA では、ほぼアニオン単体の放出であることも明らかにしています。

この様に多原子分子の負イオンビームを容易に生成できることから、フッ素系アニオンビームはフッ素の電気陰性度を利用した高収率な二次イオン質量分析への応用を、ジシアナミド (DCA) アニオンビームはバントギャップを有するグラフェンとして知られる $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 薄膜形成への応用が期待できることがわかり、現在検討を行なっています。

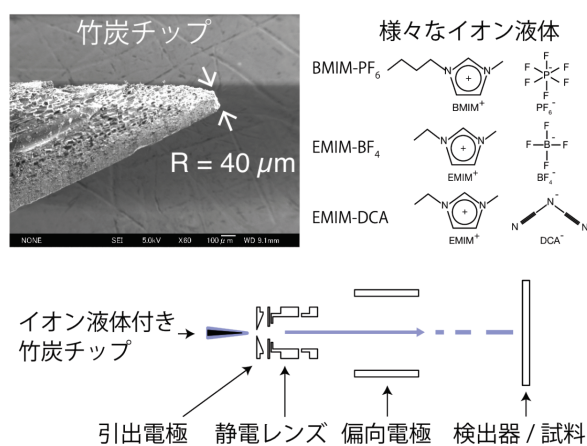


図1 竹炭をエミッタとしたイオン液体イオン源

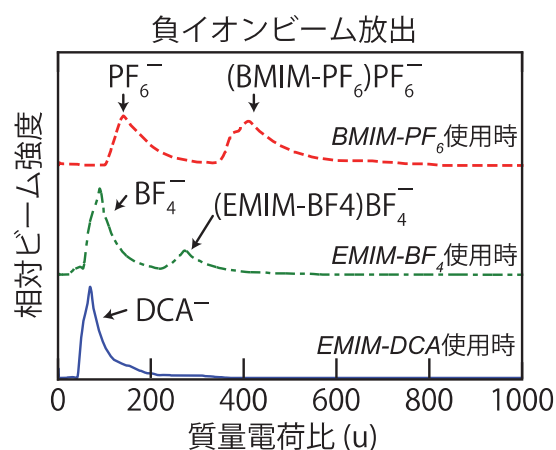


図2 生成したイオン液体イオンビームの質量分析

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>
 「半導体のバンドギャップの限界に挑む」

筆者（藤田）の博士学位論文は、バンドギャップ 5.1 eV を持つ絶縁膜としてシリコンプロセスに用いられるシリコン窒化膜（SiN）の物性に関するものであった。一方で今は、バンドギャップ 5.3 eV を持つ酸化ガリウム（Ga₂O₃）半導体の研究を行っている。ドナーのドーピングにより、n型のキャリア密度 10¹⁷ ~ 10¹⁹ cm⁻³、ドナー活性化エネルギー 37 meV という値が得られ、室温でほぼ出払い領域にある半導体である。共同研究を行っている株式会社 FLOSFIA は、この材料を用いて低いオン抵抗（0.1 mΩ・cm²）と高い逆耐圧（531 V）を持つショットキーバリアダイオードを報告している¹⁾。

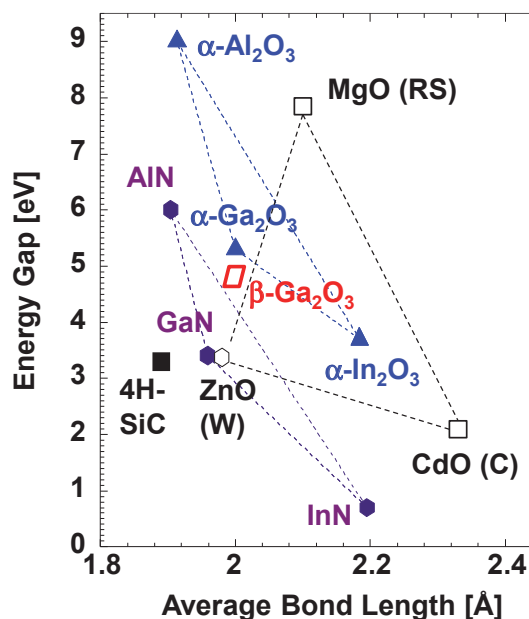
バンドギャップの大きい半導体をデバイスに用いる意義は大きく言って2つある。1つは、オン抵抗の低減と逆耐圧の増加により、低損失の電力変換用デバイス（パワーデバイス）への応用が期待できる点である。もう1つは、より短い波長での発光・受光機能である。現在、深紫外領域での光源としては、水銀ランプに代表される気体からの発光が利用されており、発光波長が限られている。任意の波長での発光とともに水銀を利用しない光源の開発は、社会から強く要請されている。また深紫外光の受光は、炎検出により火災検知²⁾や燃焼制御を可能とする。

半導体の材料開発の一つの流れは、赤外から可視、さらに紫外領域に対応する、より広いバンドギャップを持つ材料を求めるものである。そのフロンティアにあり、パワーデバイスや青色LEDとして実用化に至っている材料が、「ワイドバンドギャップ（wide band gap; WBG）半導体」と呼ばれるSiCとGaNである。これらはバンドギャップ 3.4 eV という値を持つ。一方で、パワーデバイスの一層の高耐圧化、より短波長での発光を求めて、さらにバンドギャップの大きい半導体材料を開発する流れが加速している。このような目標に対し、最近になって「超ワイドギャップ（ultra-wide band gap; UWBG）半導体」という語が用いられるようになってきた。AlN、ダイヤモンド、Ga₂O₃といった材料がこれに含まれる。しかし、波長 200 nm 以下の深紫外光機能を持たせようとする、窒化物半導体で最大のバンドギャップ約 6 eV を持つ AlN よりもさらに大きいバンドギャップが必要である。そうなることは絶縁膜とどこが違うのだろうか。これは半導体の「極み」に挑むものである。しかし、これにより高耐圧のパワーデバイスができ、量子構造によって深紫外の任意の波長で発光すれば、社会に向けた大きなインパクトとなり、材料科学の観点でも半導体と絶縁体の差がなにかという新しい視点をもたらすだろう。

私たちは、(Al,Ga)₂O₃ と MgZnO という半導体系に注目して研究を行っている。これまで、220 nm (5.6 eV) のカソードルミネセンスが見られており、もう一息で AlN で不可能な波長領域に入る。しかし、このような深紫外光に対しては、分光器の感度が低く、190 nm 以下では酸素による吸収が生じるため測定が難しい。結晶技術と測定技術の両面で、なんとか半導体の限界を極めてゆきたいと考えている。

1) M. Oda 他, Appl. Phys. Express **9**, 021101 (2016).

2) T. Oshima 他, Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 011605 (2009).



各種半導体のバンドギャップ

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/>

語彙的言語知識および意味的言語知識に基づく形態素解析モデルの構築

世の中にある大量の文書进行处理し、そこからあらたな知識を得るためには、テキストを自動的かつ高度に解析する必要があります。高次の文脈解析を正確に行うには、意味の基本単位で、照応・省略の基本単位でもある単語の認識（形態素解析）を極めて高い精度で行っておく必要があります。従来の形態素解析は98%前後の精度が達成されていますが、この観点からはまだ十分な精度とはいえません。

従来の形態素解析には、語彙の不足と、解析において意味を考慮していないという、2つの大きな問題点が残されていました。語彙の不足は、その単語を適切な単位で認識できないというだけでなく、その前後の単語の解析にも悪影響を及ぼすことが少なくありません。意味を考慮していない問題は、特に複数の解釈がありうる複合名詞の分割などで問題となります。例えば日本語テキストの解析で広く利用されている形態素解析器 JUMAN や MeCab では、「外国人参政権」という文字列を「外国 / 人参 / 政権」のように誤って分割してしまいます（図1）。

この研究ではまず、Wikipedia、Wiktionary および Web テキストコーパスから、合計で90万語程度の語彙を獲得し、これによって、未知語による形態素解析誤りを大きく削減しました。さらに、大規模な Web テキストコーパスを解析することにより語彙の意味的な振る舞いに関する知識を、統計的言語モデルとして獲得しました。統計的言語モデルというのは、「雨が」には「降る」や「止んだ」が続くやすいというような単語の出現のしやすさを確率として表す統計的な知識です。日本語や中国語のように単語が空白で区切られていない言語では、言語モデルを構築するために形態素解析システムの出力が必要ですが、このシステムの出力には、「外国 / 人参 / 政権」のような誤った解析が含まれてしまいます。そのため、このような形態素解析の誤りから学習された言語モデルをそのまま形態素解析に利用したとしても、単に誤りを再生産してしまいます。しかし、意味的に汎化したレベルからこの単語の並びを見ると、<国>-<野菜>-<政治>のような特異的な並びになっているため、Web テキストコーパスを解析して得られる妥当な大多数の解析により、意味的に不自然な解析誤りの悪影響を打ち消すことができます。

この研究では、RNNLM（Recurrent Neural Network Language Model）と呼ばれる意味的に汎化された言語モデルを用いることで、意味的に不自然な解析を抑える形態素解析手法を提案しました。Web 上のリソースから獲得した語彙知識による辞書の更新と合わせ、新聞および WEB 一般のテキストで評価したところ、大幅な精度の改善を達成しました（図2）。

参考文献

Hajime Morita, Daisuke Kawahara and Sadao Kurohashi: Morphological Analysis for Unsegmented Languages using Recurrent Neural Network Language Model, Proceedings of EMNLP 2015, pp.2292-2297, (2015.9.17).

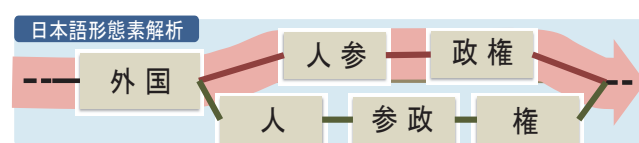


図1：日本語形態素解析の分割誤りの例

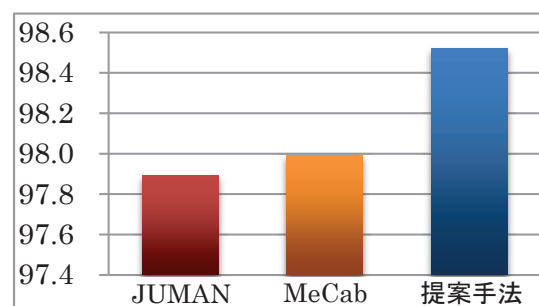


図2：提案手法による精度向上

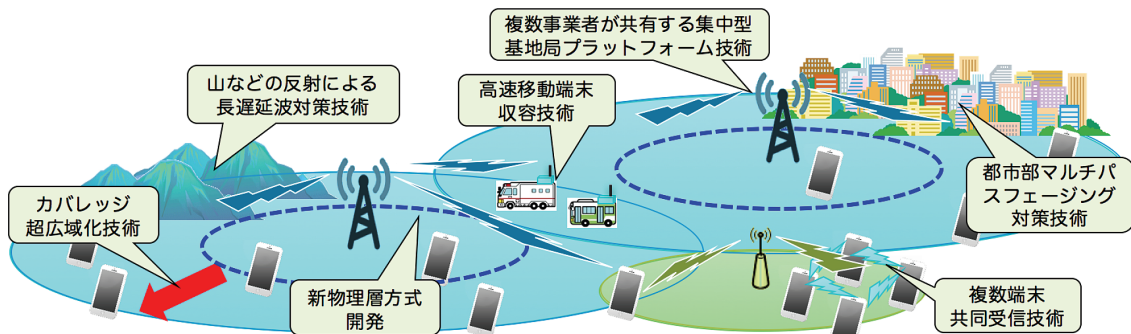
通信システム工学講座 デジタル通信分野 (原田研究室)

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

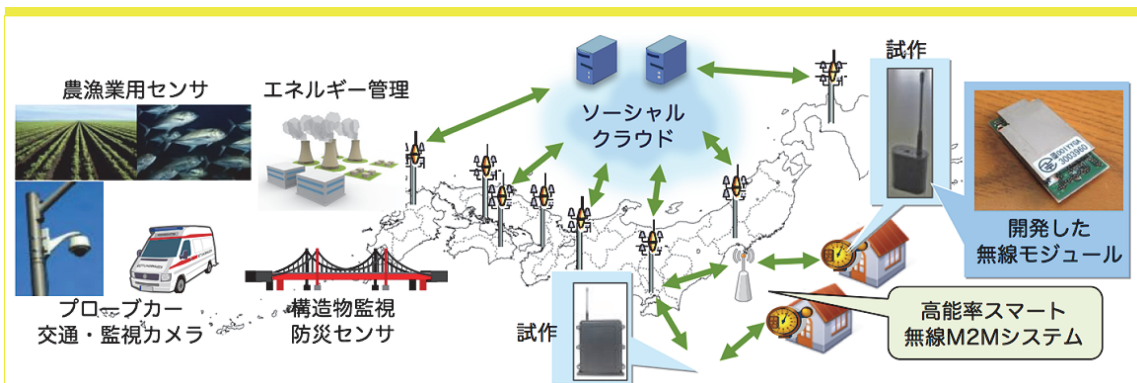
第5世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

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出来る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やWiMAX2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いますが、先に述べた厳しいユーザ要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。そこで現在、2020年代の実用化を目指した次世代の移動通信システム、いわゆる第5世代移動通信システム (5G) の研究開発が国際的に始まっており、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5Gに関する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、新信号波形・新物理層方式の開発、複数事業者が共有する集中型基地局プラットフォーム技術、高周波帯を活用した端末共同超多重MIMO伝送技術、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「複数事業者が共有する集中型基地局プラットフォーム技術」に関する研究開発は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。また「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内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) 「社会リスクを低減する超ビッグデータプラットフォーム」により、科学技術振興機構を通して委託された研究開発として実施しています。



本研究室における第5世代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)

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

[5G に向けたデータベース駆動型周波数共用の知識ベース共有条件更新]

第5世代移動通信システム (5G) においては、大容量かつ高速な通信の実現のため、新たな周波数資源の開拓だけでなく、既存システム (一次利用者) に割り当てられた周波数の効率的な再利用が検討されている。後者を実現する手法の一つであるデータベース駆動型の周波数共用技術では、あらかじめデータベース上に各エリアにおける周波数の一次利用状況などに基き周波数共用条件を作成し、その後データベースに問い合わせた周波数共用システム (二次利用者) に対して利用可能な周波数を通知する。このとき、たとえ二次利用者がデータベースの通知する周波数を用いる場合であっても、地形状況の変化及びランダムな電波伝搬の影響による一次利用者における電波干渉等の影響が懸念される。そのため、データベース上の周波数共用条件を適宜更新する必要がある。

本研究の目的は、データベースにどのような情報を保持すればどれくらい周波数共用の効率向上させることができるのかの評価である。本研究では、確率幾何学の適用により、一次利用者の二次利用者から受ける総干渉電力がしきい値を上回る確率を導出し、この確率の目標値を下回るために必要な周波数共用条件について評価を実施した [1]。

図1にシステムの一例を示す。一次利用者受信局 (PR) を原点とする二次元座標系において、二次利用者送信局 (ST) のある密度での一様ランダムな存在を仮定する。すなわち、ポアソン点過程に従う ST の座標を想定する。データベースは PR を中心とする円形の一次利用者排他領域 (PER) を定めて PER 外の ST のみに送信許可を通知し、送信許可を通知された ST が同時刻に一齐に送信を行う。このとき、送信する ST の数が PER 半径に依存するため、PER 半径が大きいほど PR の ST から受ける総干渉電力の平均は小さくなる。

上記のシステムに対して、PER 半径に対する、PR の ST から受ける総干渉電力がしきい値を上回る確率を導出し、数値評価を実施した。図2にデータベースの利用可能情報の種類に対する、全く情報がない場合と比較した最小の PER 半径の比率を示す。なおデータベースの利用可能情報として、二次利用者の密度情報及び送信電力分布情報の二種類を採用している。本図より、データベース上に二次利用者の密度及び送信電力の分布に関する詳細な情報がある場合ほど、一次利用者における干渉発生率を所望値以下にするために必要な PER 半径をより小さくできる。

(参考文献) [1] S. Yamashita, K. Yamamoto, T. Nishio, and M. Morikura, "Knowledge-based update of primary exclusive region for database-driven spectrum sharing towards 5G," Proc. IEEE WCNC-IWSS 2016, pp.473-476, Doha, Qatar, April 2016.

(謝辞) 本研究は総務省の「電波資源拡大のための研究開発」の平成27年度案件として開始した「複数移動通信網の最適利用を実現する制御基盤技術に関する研究開発」の一環として実施した。

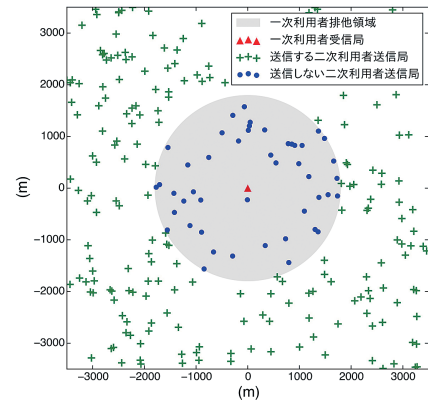


図1：システムの一例

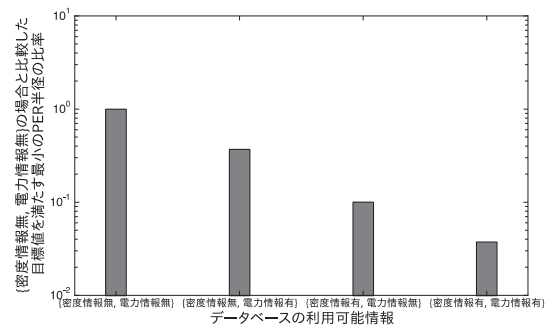


図2：データベース利用可能情報に対する最小 PER 半径

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/>

集積回路特性ばらつきのオンチップモニタ回路

当研究室では、原子レベルの揺らぎが存在しても少ない消費電力で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。特に、デバイスの特性ばらつきの影響は、低消費電力動作に有効な低電圧動作において顕著に現れます。ここでは、動作中のデバイスの特性ばらつきをリアルタイムに評価することができるオンチップモニタ回路について紹介します。

集積回路の特性ばらつきには、時間的に変化しない成分と時間的に変化する成分があります。前者は、デバイスの構造や製造プロセスに起因するばらつきで、周辺のデバイスが相関をもって変動する成分（大域ばらつき）と個々のデバイスがランダムに変動する成分（局所ばらつき）から構成されます。後者の主要な要因には、ランダムテレグラフノイズがあります。これはデバイス中のキャリアが格子欠陥等にトラップされたり放出されたりするために生じるドレイン電流の時間的ゆらぎで、その大きさはデバイス毎に大きく異なります。

動作中のデバイス特性のばらつきの評価には、リング発振回路（RO）が一般的に用いられてきました。リング発振回路とは奇数段の論理反転ゲートをリング状に接続して発振信号を得る回路です。発振周期によりデバイス特性の推定が可能です。しかし、通常のリング発振回路では、回路内の全トランジスタの平均的な特性しか予測できません。先の分類では、大域ばらつきに相当する成分となりますが、nMOS トランジスタと pMOS トランジスタの成分を独立に評価することができません。

nMOS トランジスタと pMOS トランジスタのそれぞれについて、大域ばらつき成分、局所ばらつき成分、ランダムテレグラフノイズ成分を独立に評価可能なオンチップモニタとして、当研究室では図1に示す再構成可能型リング発振回路を開発しました。この回路の要は、図1（b）に示す再構成可能型反転論理ゲートです。プルアップとプルダウンの回路をそれぞれ2種類もち、パストランジスタに与える制御信号により回路構成を図1（c）、（d）、（e）のように変更する事が可能です。図1（d）と（e）の回路特性は、それぞれ nMOS トランジスタと pMOS トランジスタの特性に敏感です。従って、図1（a）に示すすべての遅延素子を図1のいずれかの構成にすることで、nMOS トランジスタと pMOS トランジスタのそれぞれの大域ばらつき成分を評価可能です。また、遅延素子のいずれか1個のみを図1（d）もしくは（e）として、他の全てを（c）とすることにより、該当トランジスタの局所ばらつき成分とランダムテレグラフノイズ成分の評価が可能です。

当研究室では、この回路を利用して特性ばらつきのすべての成分を観察し、成分毎にばらつきのモデル化を行っています。このモデルを用いることにより、適正な動作マージンを確保した設計が可能になります。また、本モニタを回路内に埋め込むことにより、回路の動作中にリアルタイムでのばらつき評価が可能になります。この情報に基づき、動作電圧や周波数を最適な値に調整することにより、動作エネルギーの最小化を図ることができます。現在、28nm と 65nm プロセスでの試作評価を経て、実アプリケーションへの展開に向けた検討を進めています。

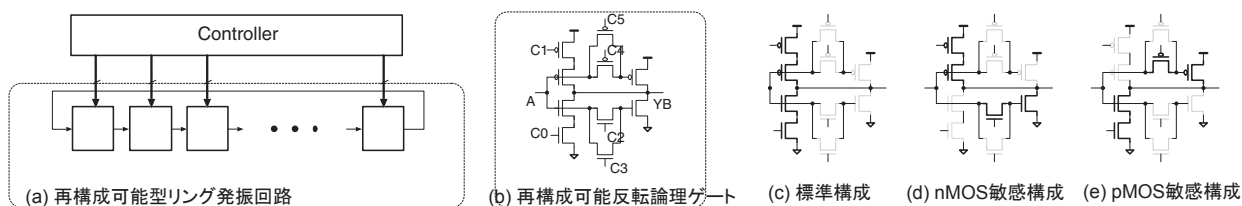


図1. 再構成可能型オンチップモニタ回路

システム情報論講座医用工学分野（松田研究室）

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

「左心室拍動現象の連成シミュレーションにおけるメッシュ分割の影響」

心臓は、血液を全身に循環させる働きを持つ生命維持に欠かせない臓器である。心壁は主として心筋と呼ばれる筋肉で構成されており、自ら拍動して血液を拍出する。この心拍動現象を解析し理解することは非常に重要である。心筋細胞は、刺激伝導系と呼ばれる経路を伝わる電氣的刺激を受けると電氣的活動を生じ、それに起因する細胞内の生理学現象の連鎖により収縮力を生じる。その収縮力によって心筋が線維方向に収縮することで心臓が拍動する。このように心拍動は、細胞や組織・臓器といった異なる階層における様々な現象の相互作用により成り立っており、細胞などを用いた実験による詳細な解析は困難な場合も多い。そこで、心拍動現象を解析する手段として、複数の現象を同時に扱う連成シミュレーションが注目されている。本研究室では、心筋細胞の生理学現象を詳細に表現した数理モデルを用いた、心拍動現象の連成シミュレーション研究を進めている。

心壁の変形運動の計算には、有限要素法による構造力学解析を用いることが一般的である。しかし、通常の構造力学解析では外力による受動的な変形を求めるのに対して、心拍動の連成シミュレーションでは、心筋組織の線維方向に生じる自発的収縮力による変形を計算しなければならない。有限要素法では、対象形状を四面体や六面体の要素にメッシュ分割して計算を行うが、一般にメッシュ分割の相違は計算結果に影響を与えるとされている。しかし、通常の構造解析では扱われない自発的収縮力を考慮した心拍動の連成シミュレーションにおいて、メッシュ分割が計算結果に与える影響については、これまでに報告されていなかった。そこで、左心室拍動連成シミュレーションを対象に、左心室形状モデルにおけるメッシュ分割の差異がシミュレーション結果に与える影響について検討した [文献 1]。

本研究では、左心室を一般化して表現した形状として、上部を削除した厚肉回転楕円体（図 1）を用いた。同心の切頂回転楕円体面を四角形メッシュに分割することで、左心室形状を六面体要素に分割する。回転楕円体面の四角形メッシュとして、経緯線に沿って分割したもの（図 1-a）、半正多面体である斜方二十・十二面体を細分割することで生成したもの（図 1-b）の 2 種類を作成した。これらのメッシュ形状を用いて、心筋細胞による自発的収縮力と心筋の線維方向を考慮した左心室拍動連成シミュレーションを行い、計算結果を詳細に比較した。図 1 下段には、心内膜面において組織に加わる力（ミーゼス応力）を示している。各位置のミーゼス応力を最大値から最小値まで濃淡で示す。両メッシュモデルのシミュレーション結果は、全体としては概ね同様の分布傾向であるが、心内膜面の心尖部（図の下部）付近で顕著な差が認められた。一方、ひずみに応じて生じる受動的な応力については両者の間に大きな相違は認められなかった。詳細な解析により、このような計算結果の相違は、メッシュモデル間の心筋線維方向および細胞の自発的収縮力の差異に起因していることが明らかとなった。本研究を通じて、心拍動連成シミュレーションでは、通常の構造解析よりもメッシュ分割が計算結果に与える影響が大きいことが明らかとなった。

文献 1 嶋吉, 小川, 松田:「左心室拍動シミュレーションにおけるメッシュ分割の影響」. 電子情報通信学会論文誌 D, 99, pp.571-578, 2016.

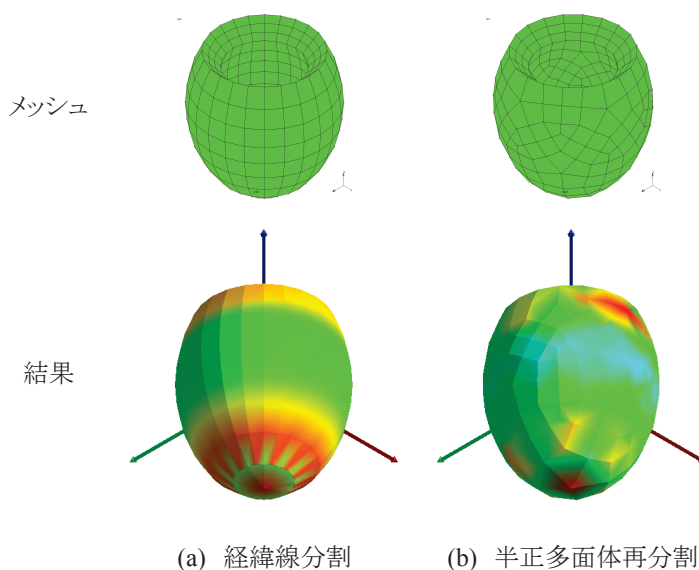


図 1 左心室メッシュモデルとシミュレーション結果

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/>

「どこでも地震体験システム」

自然災害による被害を低減させるには、インフラ整備を進めるだけでなく、個々人の防災意識を向上させる必要があります。防災意識を向上させる試みとして、Virtual Reality（VR）技術を用いて地震を模擬体験させる方法があります。この方法では、体験者が仮想空間内に没入し、シミュレーションされた地震を体験します。安全に地震を模擬体験できるという利点がありますが、体験環境の3次元形状モデルなどのコンテンツを、専門家が予め手作業で作成しておく必要があります。体験者が普段生活している環境と異なる環境での体験になるため、地震は身近に発生するものであるという「我こと感」を醸成することが難しいという問題がありました。

そこで本研究では、体験の対象となる環境を計測して得た3次元点群モデルから、地震のシミュレーションの実行に必要な3次元モデルや音を自動的に生成する機能を備えた「どこでも地震体験システム」を開発しました。本システムを用いることにより、体験者が普段生活している環境で地震が発生する様子を模擬体験することが容易になり、「我こと感」を醸成できるようになると期待されます。

図1に、本研究で開発した地震体験システムの概要を示します。本システムは、(1) 体験対象の環境を計測する計測サブシステム、(2) 地震シミュレーションに必要なデータを生成するコンテンツ生成サブシステム、(3) 生成したデータと地震の揺れデータを元に映像と音で地震を模擬体験可能にする体験サブシステムの3つのサブシステムで構成されます。計測サブシステムでは、地震体験の対象となる屋内環境をレーザスキャナとカメラを用いて計測し、環境の3次元点群モデルとカラー画像を取得します。コンテンツ生成サブシステムでは、計測サブシステムで得た体験環境の3次元点群モデル、地震の揺れデータ、予め準備した様々な物体同士の衝突音から、立体映像をレンダリングするための外観形状モデルと剛体挙動シミュレーションの為の衝突形状モデル、地鳴り音など、地震のシミュレーションの実行に必要なデータを生成します。体験サブシステムは、両眼広視野HMD、環境ノイズ低減ヘッドホン、パソコンで構成され、体験者は仮想空間に没入して地震を模擬体験できます。

図2に、本システムで地震体験コンテンツを自動生成した例を示します。右上が実際の部屋の写真、右下が自動生成したモデルです。本システムを18名に体験してもらったところ、視覚と聴覚以外の刺激提示が無い場合でも、体験者の半数以上が地震に対する恐怖を感じることができていることを確認しました。今後、オフィスや学校での地震体験イベントの開催などに活用していきたいと考えています。

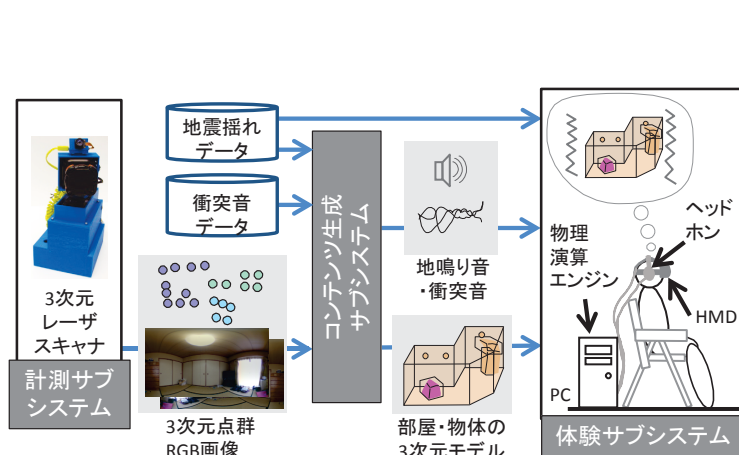


図1 どこでも地震体験システムの概要

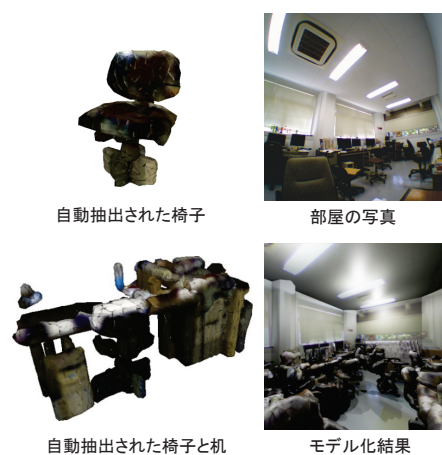


図2 自動生成した地震体験環境の例

エネルギー科学研究科 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 (土井研究室)
<http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/index.html>
 ニホウ化マグネシウムを用いた超伝導線材の高性能化

エネルギー応用基礎学分野 (土井研究室) では、エネルギー材料に関する研究として、成膜技術を活用したニホウ化マグネシウム (MgB_2) 超伝導線材の開発にも取り組んでいます。

MgB_2 は金属系超伝導体の中で最も高い臨界温度 (T_c) を有し、約 40 K で超伝導性を示します。これは、比較的熱効率の高い冷凍機で実現できる温度や液体水素の沸点に相当する 20 K で利用可能な超伝導体であり、液体ヘリウム (沸点: 4.2 K) での冷却が不要です。また、軽元素のみで構成されるため非常に軽い (低比重) という長所を有しています。一方で、酸化しやすい Mg を構成元素に含むため MgO などの絶縁物が線材内部に形成されやすく、超伝導電流の阻害因子となります。そこで、当研究室では、超高真空中でも成膜可能な電子ビーム蒸着法 (図 1 参照) に着目しました。この技術を用いて、 MgO などの不純物の形成がなく、また成膜温度の低温化によってナノレベルの柱状組織を実現することで高い性能を持つ MgB_2 超伝導線材を開発してきました。

さらに、最近、高真空中でのアニールにより、20 K での通電性能がさらに向上することを見出しました。図 2 に通電性能の指標である臨界電流密度 (電気抵抗 0 で流せる直流電流密度の上限) の磁場依存性を示します。アニールによって全磁場領域の臨界電流密度が向上していることが分かります。アニールにより実現したこの臨界電流密度は実用レベルに達しています。この性能向上は、低温成膜した MgB_2 の深刻な問題点の一つである低い T_c (30 ~ 33 K 程度) が適切なアニールにより 2 ~ 3 K 程度上昇したことによるものです。透過型電子顕微鏡での組織観察からアニールによって柱状組織の変化や酸化は起こらず、アニールプロセスは実用に向けて大きな利点をもつことが確認されました。

このほか、中間層を利用した柱状組織制御を通じて更なる性能向上の可能性も見出しています。 MgB_2 超伝導線材を使うことで装置の大幅な軽量化も期待できることなどから、医療用 MRI 装置やリニア中央新幹線への実装が期待され、現在、民間企業との共同研究も進めています。

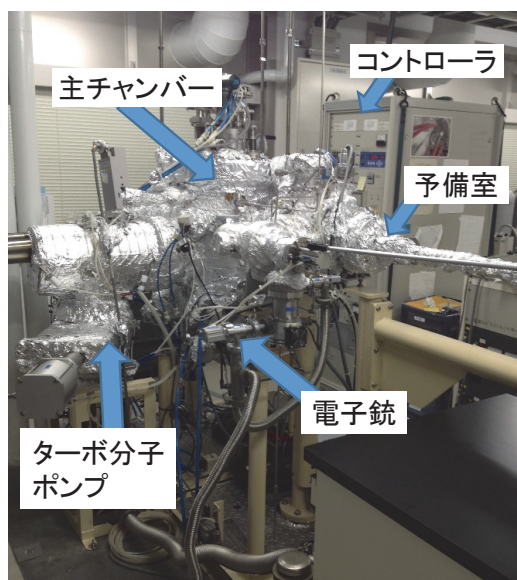


図 1 電子ビーム蒸着薄膜作製装置。

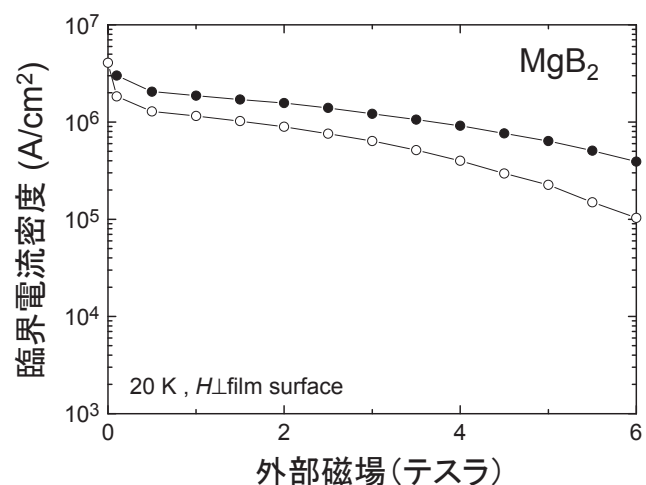


図 2 MgB_2 薄膜の臨界電流密度の外部印加磁場依存性。
 ●はアニール後、○は as-grown 状態の薄膜の結果。

エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野

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

「ヘリオトロンJ」における NBI および ICRF 重畳加熱による高速イオン生成

核融合発電を目指す磁場閉じ込め方式のプラズマ研究は国際協力による ITER を中心として各国で進展しています。重水素、三重水素による核融合を考えた場合、反応によって生成される α 粒子はプラズマ加熱の大部分を担うため、その閉じ込めは重要な課題です。外部磁場のみで閉じ込め磁場を形成する単純なヘリカル系装置においては無衝突領域のリップル損失が存在するため、これを低減する磁場配位を考える必要があります。エネルギー理工学研究所のヘリオトロンJ装置では、この損失低減を目的とし、様々な磁場配位を生成することができます。また、プラズマ加熱装置として設置されている中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱では最大 30keV まで加速された水素ビームを入射することができます。ここではヘリオトロンJの2種類の磁場配位に対して、NBIによる高速イオンをさらにイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 加熱を用いて加速させ、閉じ込めた場合の実験結果について紹介します。

プラズマは少数イオンの水素と多数イオンの重水素の混合プラズマを用いており、ICRF入射前のイオン温度は 0.2keV 程度です。このような2種イオンのプラズマに ICRF 加熱を行うと主に NBI 入射ビーム (ここでは入射エネルギー 25keV) を含めた少数イオンである水素イオンにエネルギーが吸収されるため、高速イオンを容易に生成することができます。プラズマ中のイオンは中性原子との荷電交換反応によってプラズマ外へ排出されるので、これらの粒子を解析すればプラズマ中のイオンについて調べることができます。

電子サイクロトロン加熱 (ECH) と NBI 加熱で生成したターゲットプラズマに ICRF 加熱を重畳し、 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の密度での加熱実験を行ないました。NBI (約 400 kW)、ICRF (約 300 kW)、ECH (約 330 kW) という条件です。荷電交換中性粒子分析器 (CX-NPA) を入射エネルギー 25 keV の NBI 入射方向に計測視線を向け、少数イオンである水素を観測しました。ここで少数イオンである水素比は ICRF パルス中で 10% 程度です。磁場配位は低 ε_t (図 1 (a)) および高バンピネス (図 1 (b)) でのエネルギースペクトルの測定結果を上を示します。低 ε_t 配位は、新古典理論でよい閉じ込めが期待できる配位です。また、高バンピネス配位はバンピネス (トーラス方向の磁場リップル) を変えた実験で最も高エネルギーイオンが生成された配位です。図 1 (a) では、ICRF 入射前の水素のエネルギースペクトルに、NBI 入射エネルギーを E_0 として $E_0/2$ 、 $E_0/3$ にピークがあるのが分かります。4 keV から 10 keV の範囲では ICRF パルス中に粒子束は減少していますが、それ以上のエネルギーでは粒子数が増加していることも分かります。最大検出エネルギーは 60 keV に達していて、この計測で得られた最大エネルギーです。

図 1 (b) の高バンピネス配位では最大観測エネルギーは 33 keV であり、低 ε_t 配位の場合に比較すると低いことが分かりました。今回分かった高速イオン生成に対する低 ε_t 配位の優位性を、広範囲の計測視線で確認し、エネルギースペクトルの全体的な特性を含めバルクプラズマの加熱特性に対する総合的な特性に対しても調べる予定です。

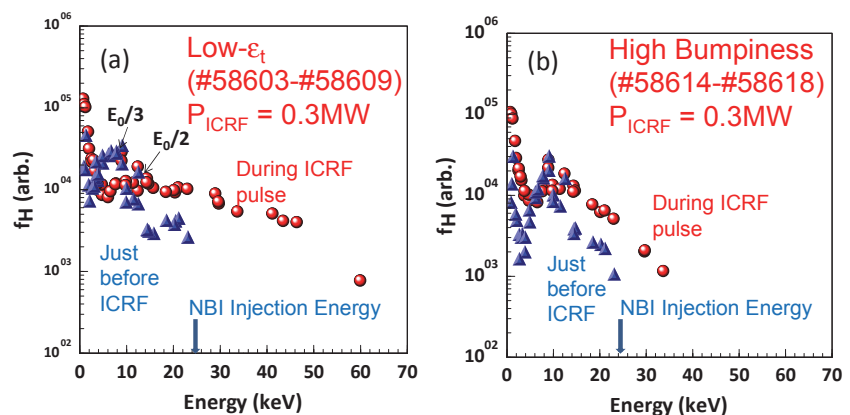


図1 NBI + ECHプラズマをターゲットにした場合のICRFによる高エネルギー粒子生成。ICRF入射直前とICRFパルス中のエネルギースペクトル。(a) 低 ε_t 配位、(b) 高バンピネス配位。

生存圏研究所 生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 (津田研)

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/lasd/>

レーダーと音波を併用して気温を連続測定 (RASS: Radio Acoustic Sounding System)

温暖化の影響で集中豪雨が頻繁に起こる傾向があると報告されている。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。

地上定点観測では各種のセンサーを組み合わせて気圧、風速・風向、気温、湿度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、電波と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。我々は、既存の測定手法の精度 (accuracy と precision) を改善する努力を続ける一方、従来測定できなかった大気情報を得るための新技術の開発を行っている。

電波による風速測定では、降雨時には雨滴散乱を用いた気象レーダーが用いられ、晴天時は wind profiling radar (WPR) により鉛直風を含む風速3成分が観測できる。また、気温と湿度の観測にはラマン散乱等を用いたライダーが開発されている。本稿では、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斬新なレーダー技術である RASS (ラス、Radio Acoustic Sounding System) を紹介する。

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 では音波で人工的に屈折率変動を作り、これを WPR のターゲットとする。WPR の近傍から発射された音波が大気中を伝搬する際に、音波波長スケールの周期的な大気密度の粗密 (大気屈折率変動) が起こる。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) が求まるが、 C_s (m/s) は気温 T (K) の平方根に比例するので ($C_s = \kappa \sqrt{T}$)、音波パルスが通過する各高度における気温が得られる。ここで、比例係数 κ 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 となる (ただし、水蒸気を含む湿潤大気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)。また、WPR のアンテナビーム方向が音波面と直交する必要がある。音波面は基本的には同心球状に広がるが、背景風により変形するため、実際には背景風を想定したレイトレーシングを行って、音波面とアンテナビームが直行する条件を調べる^[1]。一方、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。そのため、単一の音波周波数はレーダー波長とのブラッグ条件を特定の高度でしか満たさない。適切な音域に広がったスペクトルを持つ音波 (例えば、FM チャープ信号) を発射すれば、広い高度範囲で RASS エコーを観測できる。

RASS は 1960 年代に発案されたが、当初は数 GHz 帯レーダー (と数 kHz の音波) が用いられたため、音波減衰が激しく観測高度は約 1 km 以下であった。我々は、1980 年代に MU レーダー (46.5 MHz) に RASS を適用し、約 100 Hz の低周波の音波を用いたところ、高度約 22 km まで気温を観測できた^[2]。この成果をもとに RASS の観測技術に関する研究が進み^[1, 3]、400 MHz 帯、1.3 GHz 帯で運用される各種の WPR に RASS が適用された。我々は、MU レーダー以外に、京大・生存研がインドネシアの西スマトラで運用している赤道大気レーダー、およびインド大気科学研究所の Gadanki MST レーダーを用いた RASS 観測を行っている^[4]。

VHF 帯 WPR の RASS では、気温を高度約 10–20 km まで 150 m の分解能で観測でき、ラジオゾンデと比較して 0.2–0.5 K の精度である。しかも、測定間隔は約 1–2 分であり、WPR による風速 3 成分の測定と併用すれば、短時間変動するメソ現象の構造を明らかにできる^[3]。また、温度構造は大気物質の輸送や乱流拡散過程に大きな影響を与えている。例えば対流圏下部に現れる温度逆転層は混合を抑制するとされている。一方、熱帯では、水蒸気やオゾンをはじめとする大気微量成分は高度 15 km 付近に位置する対流圏界面を通して輸送されるが、その高度域における温度ならびに大気安定度 (温度の高度勾配) の微細構造の連続測定が重要である^[4]。

[1] Masuda Y., Radio Sci., 23, 647-654, 1988.

[2] Matuura et al., Nature, 323, 426-428, 1986.

[3] Adachi T. et al., Radio Sci., 28, 571-583, 1993.

[4] Sarma T.V.C., et al., Ann. Geophys., 26, 2531-2542, 2008

生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野（大村研究室）

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

「オーロラ・ブレイクアップの謎に迫る」

オーロラが突然明るく光り出すオーロラ・ブレイクアップと呼ばれる現象があります。太陽風から磁気圏（地球固有の磁場が支配する宇宙空間）に流入したエネルギーが爆発的に解放される現象とされていますが、その仕組みは良く分かっておらず、半世紀以上において宇宙空間物理学における最大の謎の一つとなっています。一方、オーロラ・ブレイクアップが起こると熱いプラズマが内部磁気圏に注入されます。すると様々な電磁波動が励起され、電子は加速や散乱を受け、放射線帯（ヴァンアレン帯）が増減すると考えられています。また、オーロラを流れる電流が急に増えることで地磁気誘導電流が急増し、変電所の変圧器が損傷する可能性も指摘されおり、オーロラ・ブレイクアップは宇宙生存圏を理解する上で重要な現象と言えます。

田中高史九州大学名誉教授が開発したグローバル電磁流体シミュレーションを用いて太陽風と地球磁場の相互作用を解き、オーロラ・ブレイクアップの問題に取り組んでいます。特異点が無い格子を用いて地球周囲の宇宙空間を数千万に分割し、磁気圏と電離圏という性質の異なる領域を結合することで、オーロラ・ブレイクアップをはじめとする多くの関連現象をよく再現することが可能となっています。シミュレーションで再現したブレイクアップの例を図1に示します。オーバル状に分布しているオーロラの一部が突然明るく光り出し、極方向そして西方向に広がっていくことがわかります（オーロラ・サージ）。電流、ダイナモ、力学の3つの観点でシミュレーション結果を詳しく解析し、オーロラ・ブレイクアップの新しい発生メカニズムを提案しました [1, 2, 3]。オーロラ・ブレイクアップを特徴づける電流線をシミュレーションで調べると、これまで定説とされていた電流系とは全く異なることがわかりました。オーロラ・ブレイクアップ時には高温のプラズマが地球近傍に集まり、磁力線に垂直方向の電流が発達するため、これまで定説とされた電流系が存在することは難しいようです。また、突然明るく光り出したオーロラが極方向・西方向に拡大するというオーロラ・ブレイクアップの最大の特徴を電磁流体シミュレーションでよく再現できたことから、ミクロスケールのプラズマ不安定性はオーロラ・ブレイクアップの必要条件ではない可能性が高まりました。磁気圏と電離圏が密接に相互作用しながらオーロラ・サージが作られることもわかり、性質の異なるプラズマ領域間の結合の重要性も明らかになりました。

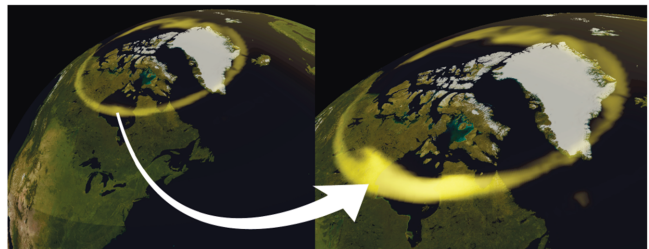


図1：シミュレーションで再現したオーロラ・ブレイクアップ現象。

参考文献

- [1] Ebihara, Y., and T. Tanaka, Substorm simulation: Insight into the mechanisms of initial brightening, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2015JA021516, 2015.
- [2] Ebihara, Y., and T. Tanaka, Substorm simulation: Formation of westward traveling surge, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2015JA021697, 2015.
- [3] Ebihara, Y., and T. Tanaka, Substorm simulation: Quiet and N-S arcs preceding auroral breakup, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 1201–1218, doi:10.1002/2015JA021831, 2016.

コンピューティング研究部門 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/>
 「生命科学ビッグデータにおける因果関係のビジュアル分析」

物事の因果関係を解き明かすことは科学の本質的な目的の1つです。例えば、再生医療のための基礎研究が近年活発になっていますが、そこでは遺伝子や環境といった要因が個体の発生にどのような影響を与えるのかという因果関係の解明が重要となります。生命科学分野では、様々な研究成果が大規模データベースとして集積され、それを利用した、研究のデータ駆動化が進んでいます。すなわち、大量に存在するデータを活用して、仮説の探索・検証を行う新しい科学のアプローチが必要になっています。可視化は、このような、大量に存在するデータを活用して新たな科学的発見を促す上で重要な役割を果たしています。そのため、近年の可視化研究では、欧米を中心に、ビジュアル分析と呼ばれる可視化を利用した対話的分析に関する研究が進んできました。

私たちは、線虫の発生動態データベース [1] から得た、線虫胚表現型特徴ネットワークを対象としたビジュアル分析の研究を行っています。このデータは、線虫の胚が発生する過程で、細胞の核の大きさや位置関係などを測定した特徴量を含んでいます。時間的に前後関係がある特徴量間の相関が高い場合に、それらが発生に関わる因果関係を表している場合があります。データの中から未知の因果関係を発見することが課題となっています。しかし、この因果関係のネットワーク構造を従来通りの方法で可視化した場合は、辺が非常に密で視認性の悪い結果となり、ここから新たな知見を見出すことが困難でした。そこで、私たちはこのデータに対して辺集中化 (Edge Concentration) と呼ばれるアプローチを適用し、辺集中化の新たなアルゴリズムを開発することで、より視認性の高い可視化を達成しました [2]。辺集中化では、入力グラフに含まれる完全二部部分グラフを抽出し、それらをより簡単な構造のグラフで置き換えることで視認性の向上をおこないます。また、辺集中化で得られた完全二部部分グラフを、発現現象を説明する潜在変数と捉えたモデルの統計的な検証にも取り組んでいます。

線虫データに対して構築されたビジュアル分析の方法は、いずれはマウスやヒトなどのより複雑な生物に対するデータにも適用され、今後の再生医療の研究などで役立てられることが期待されています。

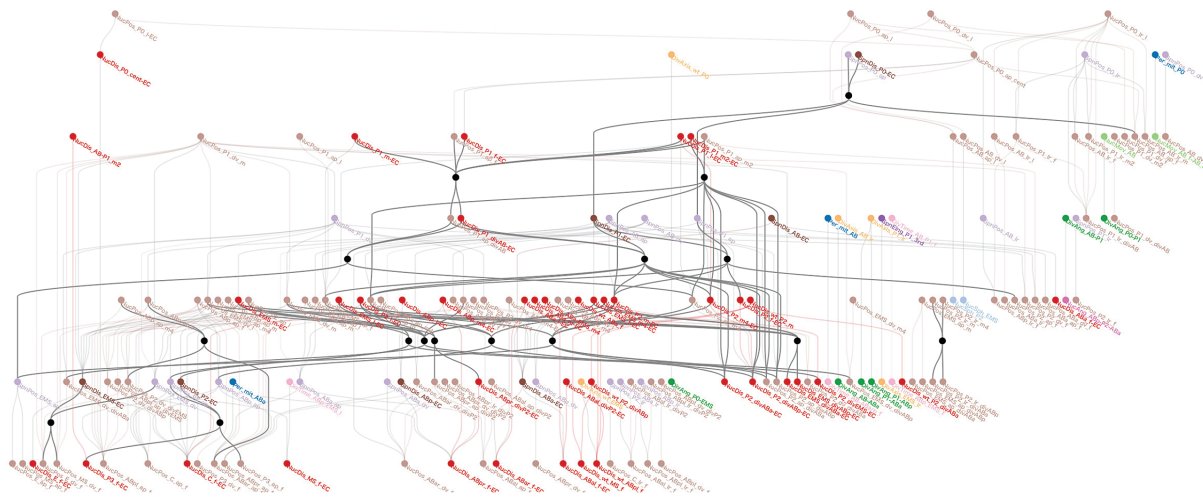


図1 線虫胚表現型特徴ネットワークの可視化結果。受精卵1細胞から8細胞までの間で計測された248個の特徴量間の因果関係を表している。

参考文献

- [1] K. Kyoda, E. Adachi, E. Masuda, Y. Nagai, Y. Suzuki, T. Oguro, M. Urai, R. Arai, M. Furukawa, K. Shimada, J. Kuramochi, E. Nagai, and S. Onami, "WDDD: Worm Developmental Dynamics Database.," *Nucleic Acids Res.*, vol. 41, no. Database issue, pp. D732-7, Jan. 2013.
- [2] Y. Onoue, N. Kukimoto, N. Sakamoto, and K. Koyamada, "Minimizing the Number of Edges via Edge Concentration in Dense Layered Graphs," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 22, no. 6, pp. 1652-1661, 2016.

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/>
 「認知症患者の QoL を推定するための観測と表情認識」

認知症患者の数は年々増加しており、大きな社会問題となっている。現在の医療では根治が望めないため、症状の進行を遅らせるための治療がなされる一方で、認知症と折り合いをつけながら生活するための介護や支援を提供することが重要な課題となっている。中でも、「自尊心を持って人間らしく日々を過ごす」こと、すなわち、生活の質 (Quality of Life) を高く維持することに重点を置いた”パーソンセンタードケア (person-centered-care)”の重要性が認識され始めている。しかし、患者や被介護者の状態を長時間にわたって観測し続けることが難しく、ケアの良さや改善方法に関する客観的な指針を得ることが難しいという問題があった。

このような問題に対し、本研究では、患者や被介護者の生活の場を画像センサやその他の非侵襲的なセンサで観測し、表情やしぐさを認識することによって、本人の内部状態、特に、本人が満足できる状態にあるかどうかを客観的に計測することを試みている。そのために、実際の介護現場での調査とプロトタイプシステム構築を行ってきた。このような状況では、本人が移動したり、周囲の人達との

会話やインタラクションが発生し、単純な表情認識手法では誤りが多くなることが確認されており、(a) 自然な生活状態で質の良い映像を得るためのカメラ配置、および、写される人に意識されないための設計などの撮影環境の設計、(b) 自然な生活状態での表情やしぐさを計測・認識するためのパターン認識手法、(c) 個人的な特徴をできるだけ隠した提示など、プライバシーに配慮した記録・呈示手法など、種々の新しい技術が必要となる。これまでの研究では、テーブルを囲んだ団欒や作業療法などを対象として、被介護者の表情を観測することによって、笑顔を検出する手法を提案した。また、表情を時系列パターンと考えて経験的モード分解を適用することによって、発話などが発生している場合の表情認識の精度を改善できることを示した。これらの手法を更に発展させ、精度の向上を図るとともに、日常生活の中で適用できる場所を増やしていくことによって、長時間の計測や経時的な解析ができるようにシステムを拡張する予定である。

S.Sako, K.Kondo, Y.Nakamura, Y.Matsuoka, T.Ohtsuka, "Facial Expression Recognition for Evaluating QoL of Dementia Patients", International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems, pp.203-210, 2015

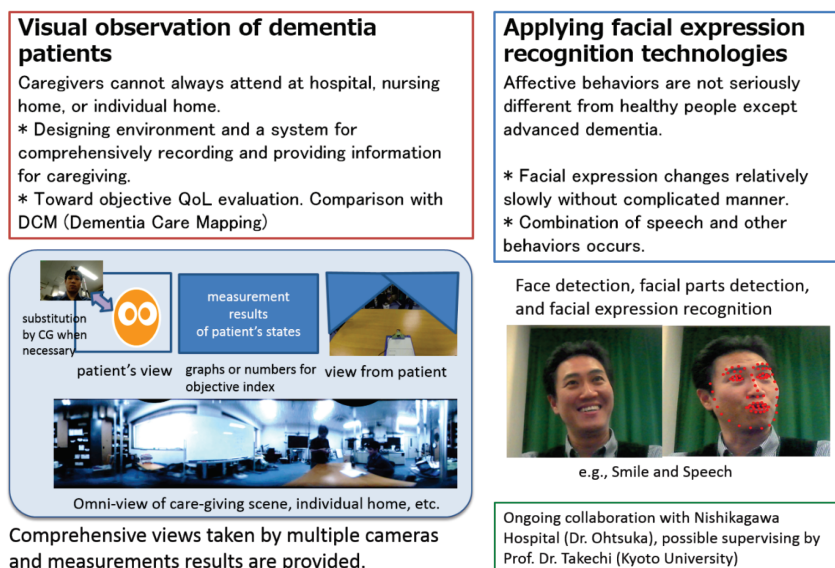


図 1 : 認知症患者の観測とその結果の表示 (左) と表情認識 (右)