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（高岡研）
デバイス創成部門先進電子材料分野（藤田研）

情報学研究科（大学院）

知能情報学専攻
知能メディア講座言語メディア分野（黒橋研）
知能メディア講座画像メディア分野（松山研）

通信情報システム専攻
通信システム工学講座ディジタル通信分野（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

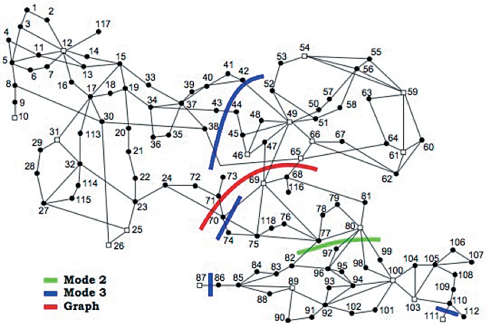
コンピューティング研究部門ビジュアライゼーション研究分野（小山田研究室）
教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野（中村裕研）

先端電気システム論講座（引原研究室）
http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/
「データから機能を実現する力学系モデリング～データ駆動型ネットワーク分割～」

近年、計測技術・情報通信技術の飛躍的発展に伴い、実システムに生起する複雑な物理現象を観測し、大規模時系列データとして利用することが可能になっている。システム工学の観点では、大規模時系列データから複雑現象の本質部分を数理的に抽出し理解した上で、その理解に基づき所望の動作を行うシステムを設計することが求められる。このシステム設計には、予測、制御、診断などの様々な機能をデータから実現することが必要である。このような機能を多種多様な観測データから系統的に実現するためには、個別問題の具体的検討に加えて、観測データから機能の実現に至るメカニズムを記述する数理的基盤が必要となる。ここには、簡素なモデルを対象とする伝統的な非線形動力学とは異なる問題設定があり、実験は困難なものの実データを規範とする意味で現象に根差し、実システムのデザインを指向する新しい非線形動力学の芽がある。

本研究室では、電力・エネルギー分野の様々な実問題への適用を通して、データから機能を実現するための系統的な方法論「力学系モデリング」の研究を進めている[1]。この方法論は、非線形力学系に対して定義される Koopman 作用素[2]に基づく。Koopman 作用素とは、非線形力学系の観測量（系の相空間と観測データの空間を対応させる関数）の時間発展を表す線形作用素であり、エルゴード理論に関連し純粋数学や数理物理学の分野で研究されてきた。近年、Koopman 作用素のスペクトル構造と系の力学的性質との関係について研究が進みつつあり[3]、観測時系列データから Koopman 作用素のスペクトル構造を近似計算することにより、データから現象の本質部分を数理的に抽出するという応用研究への展開が可能となってきた。本研究室では、Koopman 作用素の固有値から導出される Koopman モード分解[4]などを用いて、送電・配電ネットワーク、洋上ウィンドファーム、火力発電プラント、ビルディングのデータ利用に関する実問題に取り組んでいる。

本紹介では、データから診断及び制御機能の実現を目的とした送電ネットワークのデータ駆動型分割アルゴリズム[5,6]について述べる。最近、電力システムではフェーザ計測装置（Phasor Measurement Unit: PMU）を用いた広域状態監視に注目が集まっている。PMU では送配電ネットワーク内の多地点における電圧フェーザの同期計測が可能となることから、送電・配電ネットワークのモニタリングや運用技術などへの展開が期待されている。本研究では、送電ネットワークを構成する各母線で計測される電圧位相データからネットワークの分割（partition）を決定するアルゴリズムを提案した。本アルゴリズムでは、電圧位相データから前述の Koopman モードを求めることにより、電圧位相の時空間変動に基づいて母線群のクラスタを同定し、この同定したクラスタにネットワークを分割するカットセットを決定する。これにより、従来のグラフ論的方法とは異なり、ダイナミクスを考慮した分割をデータから直接決定することが可能となった。これは、ネットワーク構造の観測データに基づくオンライン診断のみならず、ネットワークに生起するダイナミクスの制御につながる結果である。実際、本アルゴリズムで得られたネットワーク分割の Controlled Islanding と呼ばれる緊急時制御への適用可能性を検討している[6]。



図：Koopman モードに基づく提案アルゴリズムにより得られた IEEE-118 母線モデルの分割[5]。異なる振動モード（時空間変動; Mode2 及び Mode3）により異なる分割が得られる。Graph はグラフラプラシアンに基づく従来法で得られた分割を表している。

参考文献

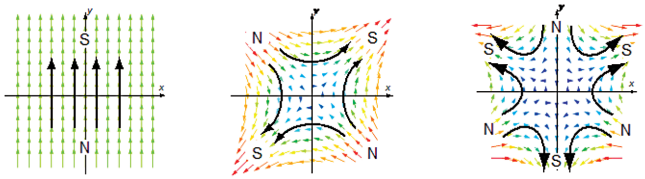
[1] 薄 , シミュレーション , 32 (3), 185-192 (2013). [2] 例えば , Lasota and Mackey, Chaos, Fractals, and Noise, 2nd ed. (Springer, 1994). [3] 最近では , Susuki and Mezic, Ergodic partition and invariant sets in quasi-periodically driven dynamical systems（準備中）. [4] Rowley et al., J. Fluid Mech., 641, 115-127 (2009). [5] Raak et al., Data-driven partitioning of power networks via Koopman mode analysis, IEEE Trans. Power Syst. (2015, 掲載予定). [6] Raak et al., Multi-way partitioning of power networks via Koopman mode analysis, IFAC Symposium CPES（2015, 発表予定）.

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/index.html

「重粒子線がん治療装置への超伝導マグネットの応用を目指して
ートピック：高温超伝導線で作った２極マグネットの磁場安定性評価ー」

重粒子線がん治療は、高エネルギーに加速した炭素イオンなどの荷電粒子ビームを用いる放射線治療の一種で、体内深部の病巣に線量を集中できることなどの利点があります。一方で、荷電粒子を加速し、さらに患部まで導く際に、ローレンツ力により荷電粒子ビームの軌道を曲げる必要がありますが、従来の銅マグネットでは発生磁場が最大 1.5T 程度に制約されるため軌道を大きく曲げることが困難で、治療装置を小型化できませんでした。我々は、高温超伝導線を用いたマグネットにより高い磁場を発生させ大きなローレンツ力を得ることにより、重粒子線がん治療装置を小型化するための研究を進めています。このような目的の高温超伝導マグネットにおいては、所望の形状の時間的に安定な磁場を再現よく発生することが大きな技術課題となっています。以下では、このような課題に対する取り組みのひとつとして、液体窒素で冷却した小型２極マグネットの磁場安定性評価について紹介します。

マグネットがビーム方向に無限に長いと仮定すると、それが発生する二次元磁場は一般に図１に示すような多極磁場成分の重ね合わせで表現できます。２極マグネットは、荷電粒子ビームの軌道を曲げる機能を持ったマグネットであり、４極以上の高次多極磁場は不要な誤差磁場となります。従って、２極磁場を安定に再現よく発生すること、高次多極磁場はできるだけ小さくかつ安定で再現性があることが必要です。図２にマグネットの電流を増減させたときの２極磁場成分と６極磁場成分のヒステリシスを示します。このようなヒステリシスはテープ形状をした高温超伝導線の中に誘導される減衰が大変遅い遮蔽電流（テープに印加される磁場を遮蔽しようとする電流）に起因しています。この遮蔽電流は、磁場の形状（高次多極成分の大きさ）や安定性に影響を与えます。図３は、マグネットを繰り返し４回 50A で１時間ずつ励磁したときの磁場の時間変化を示したものです。この磁場は遮蔽電流の影響を受けたものではありますが、初回励磁を除いて、再現性は良好で、かつ、遮蔽電流の緩やかな減衰に伴う磁場変動も 0.01% のオーダとなっており、これは適切な磁場補正技術と組み合わせればマグネットとして実用となるレベルであると考えられます。今後、さらに実用レベルに近いマグネットでの実験を進めていく予定で、その結果は別に機会に紹介させていただきます。



(a) ２極磁場　(b) ４極磁場　(c) ６極磁場

図１　２次元磁場の多極展開による表現

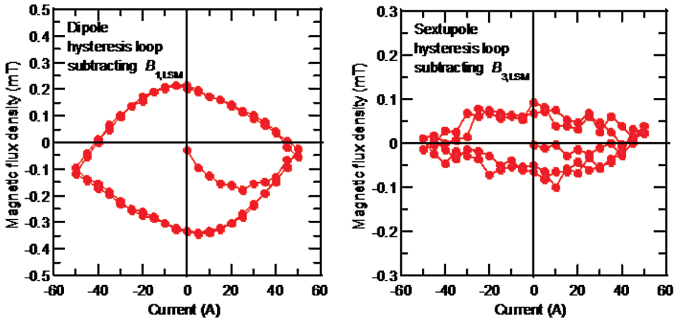


図２　電流を変化させたときの２極磁場と６極磁場のヒステリシス

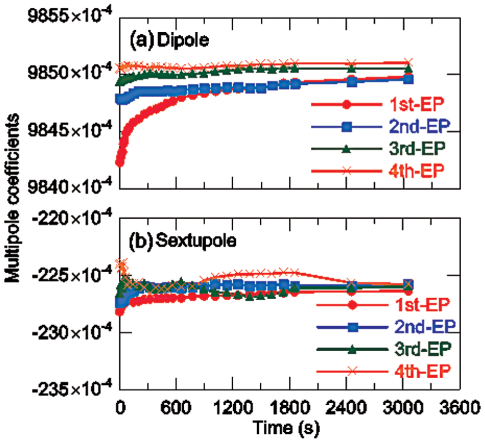


図３　繰り返し４回励磁時の２極磁場と６極磁場の時間変化

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/index.html
「鉄芯材料交流磁気特性の等価回路表現」

現在、パルス幅変調（PWM）方式などスイッチングによる電力制御が一般的になっている。そのため、鉄芯材料である電磁鋼板ついても、厚み（0.3～0.5mm 程度）方向を有限要素分割した渦電流解析により交流特性を算出する方法が開発されている。しかし、スイッチング周波数が数十 kHz 以上に達すると、表皮厚さの減少に対応してより細かな有限要素分割が必要となるため、効率的なモデル化手法が望まれる。文献[1]では、線形理論から、電磁鋼板の交流磁気特性を等価回路で表現する効率的な手法が導出されている。今回、その手法を、ヒステリシス特性を持つ電磁鋼板の交流磁気特性表現に適用した。厚み d、透磁率 μ、導電率 σ の磁性薄板において、磁気特性が線形のときは渦電流磁界の理論解が存在し、その結果から、電磁鋼板の平均磁束密度 B と表面磁界 H の関係は、図 1(a) のような無限 RL 梯形型回路で表現される[1]。ただし、$\mathrm{d}B/\mathrm{d}t$ が端子電圧、H が端子電流に置き換えられる。また、$L=\mu$、$R=4/(\sigma d^2)$ である（L と R は単位長さあたり）。この回路は、Cauer-I 型回路、または、標準 Cauer 回路と呼ばれる。

電磁鋼板の直流磁気特性が非線形性を持ち $H=h_{\mathrm{dc}}(B)$ で表される場合には、図 1 の Cauer 回路のインダクタ L の素子特性を $i_1=h_{\mathrm{dc}}(\Phi_1)$ のように表せばよい。インダクタ $L/5$ の部分については、Cauer-I 型回路の物理的意味から表現方法を導出する必要がある。PWM 入力の場合を想定すると、Φ_1 に対して Φ_2 は高調波成分による補正量と考えることができる。この場合、$L/5$ の特性は、$i_2=5\nu(\Phi_1)\Phi_2$ のように近似される。ここで、$\nu(\Phi_1)=\mathrm{d}h_{\mathrm{dc}}(\Phi_1)/\mathrm{d}\Phi_1$ である。しかし、h_{dc} がヒステリシス関数である場合には上記のように Φ_1 のまわりで単純に一次近似することはできない。そこで、高調波成分によって生じるマイナーループに対する微分磁気抵抗率の近似として、$\nu(\Phi_1)\approx \mathrm{d}h_{\mathrm{rev}}(\Phi_1)/\mathrm{d}\Phi_1$ とおくことにする。ここで、h_{rev} は h_{dc} の可逆成分を表す一価関数である。

無方向性電磁鋼板（JIS: 35A300）の交流磁気特性を図 1(b) の打切り Cauer-I 型回路によって表現する。ヒステリシス関数 h_{dc} はプレイモデルによって表現する。キャリア周波数 5kHz の PWM 入力に対する BH 曲線の計算結果を図 2 に示す。ただし、1 周期あたりの鉄損の計測値は 162J/m³ である。従来法の古典渦電流モデル（図中 classical）では、マイナーループが計測値より大きく、鉄損を過大評価している。これに対して、Cauer-I 回路では高精度な表現が得られている。今後、より高い周波数における手法の検証や、交流ベクトルヒステリシスモデルへの拡張を進める予定である。

[1]Y. Shindo, O. Noro, Simple circuit simulation models for eddy current in magnetic sheets and wires, *IEEJ Trans.* FM, vol.134, pp. 173-181, 2014.

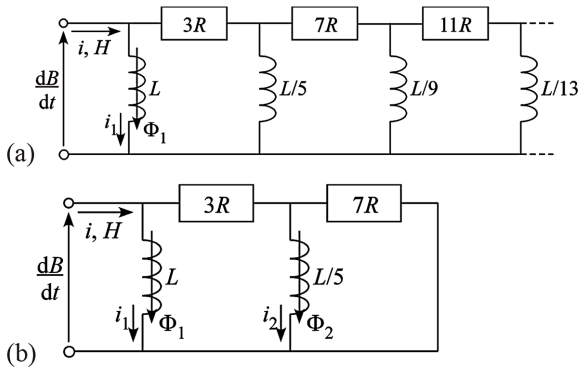


図１　Cauer-I 型回路：(a) 無限梯子形回路，(2) 打切り回路

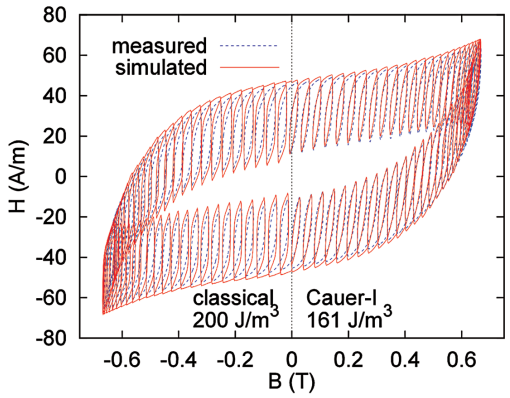
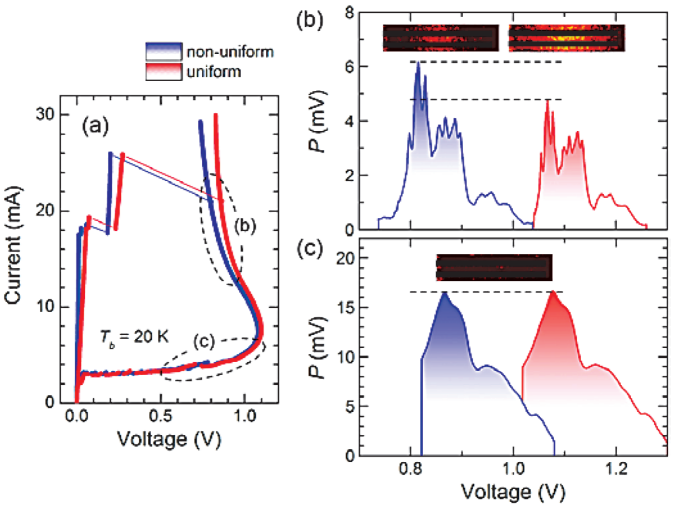


図２　ＰＷＭ入力に対する計算結果

集積機能工学講座
http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp
「高温超伝導テラヘルツ光源の温度分布と発振強度の相関の解明」

電波と光の中間の周波数に位置するテラヘルツ（THz）領域はこれまでに 1 mW を超える実用的な強度を持つ固体光源が得られていませんでした。マイクロ波領域のようにキャリアのダイナミクスを利用しようとしても半導体の易動度の上限から周波数が制約され、LED のように量子効果を利用する場合にもそのエネルギーは 10 ケルビン以下の温度に相当するので、極低温が必要であるからです。超伝導体のトンネル接合であるジョセフソン接合では、交流ジョセフソン効果により直流電圧を交流電流に変換することが可能であるだけでなく、超伝導ギャップにより集団励起状態が保護されるので、散逸の少ないコヒーレントな電磁波が励起されることが期待されてきました。2007 年に高温超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+d}$（Bi2212）からの結晶外への THz 波放射が初めて観測されました。THz 発振のメカニズムは、交流ジョセフソン効果により励起された電磁波が Bi2212 単結晶からなる空洞共振器の共振条件に一致した時、積層するジョセフソン接合で同期した振動が起こると考えられています。これまでの研究で、周波数範囲 0.3-1.6THz、最大出力 0.6mW の単色電磁波の放射が報告されています。高温超伝導 THz 光源は超伝導体に電流を注入して有限電圧で動作させるため、ジュール発熱を原因とする温度上昇が超伝導状態を破壊して、光源の出力が低下してしまうと言う問題が指摘されていました。

私たちは、電流を注入する条件による温度分布と発振強度を精密に比較するために、100K 以下の極低温環境でも素子表面の微細な温度分布を観測できるイメージング装置を構築しました。これは、蛍光強度が強い温度依存性を示す Eu-TFC ポリマーと呼ばれる希土類元素を含む物質を素子表面に薄く塗布して、蛍光の空間分布を観察する実験手法です。素子は 2 つの電極を有しており、ひとつの電極から電流を注入する非一様（non-uniform）条件とふたつの電極から同じ電流量を注入する一様（uniform）条件における温度分布と発振強度を比較できるようになっています。図に示すように、電流値が 20mA 前後の発振領域では、素子表面の温度は一様条件の方が明らかに高く、T_c を超えている部分の面積は広くなっています。一方、図(b)のように、発振強度は非一様条件と比較して 20% 程度弱くなっていることがわかりました。また、図(c)に示すように、電流値が 5mA 程度の発振領域において温度分布、発振強度共に有意な差は見られませんでした。この結果は、数値シミュレーションでも再現され、素子表面における過剰な温度上昇が発振強度を抑制することを明らかにしました。このことは、高温超伝導 THz 光源を効率的に冷却することが発振強度を向上させると言うことを意味しており、高出力 THz 光源の実現に繋がると考えられます。



図：(a) 素子の電流電圧特性。破線で囲んだ領域で発振が起きる。青（非一様）と赤（一様）の違いは、素子に由来しない。(b) 高バイアス領域での発振強度と温度分布の比較。温度上昇がより顕著である一様条件での発振強度が低い。(c) 低バイアス領域での比較。両者に差は見られない。

Physical Review Applied 誌で公表された本成果は、2014 年 10 月 22 日付けで京大ホームページにおいて紹介され、翌日付日刊工業新聞などに掲載されました。

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

「光らない現象を測る―過渡レンズ法とシミュレーションによる非輻射過程の定量」

窒化物半導体 GaN の禁制帯幅は 3.4eV（波長 365nm 相当）、InN のそれは 0.6eV（2 μm）であることから、それらの混晶 InGaN は、可視 LED などの光デバイス材料として非常に注目されている。2014 年のノーベル物理学賞が、“For the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources” との理由で、この材料系を用いた青色 LED の開発に与えられたことは記憶に新しい。実際、青色 LED の電力–光変換効率は、研究室レベルでは室温でも約 80% と高い。しかし、いまだ 20% のロスがあり、しかも緑色など他の発光波長域では効率が数 10% 以下に低下するため、その要因である光らない過程（非輻射過程）を解明することが学術的には重要であると考えている。ただし、非輻射過程の観察は、輻射過程の観察ほど容易ではなく、従来は「低温での発光効率は 100%」という比較的強い仮定のもと定量をおこなっていた。それに対して本研究では、そのような仮定をせずに非輻射過程を定量する手法を提案・実証した。

試料は、市販 LED のベースであるサファイア基板上 GaN を用いた。パルスレーザで光励起すると、キャリアが生成され、それが非輻射過程で定常状態に戻るときに熱を発する。（つまり、熱を定量できれば非輻射過程を定量できる。）これら「光生成キャリア」と「熱」は、材料の屈折率にそれぞれ負および正の変化を及ぼすため、材料中に等価的な凹型および凸型レンズを形成することになる。ここで、別のプローブ光をこの等価レンズ部分に照射し、透過光の広がり具合を観察すると、照射部分に形成されているレンズの状態を知ることができる。とくに、励起レーザパルスが On から Off に変化する時、屈折率変化はある時定数で緩和するため、レンズ効果も過渡的な現象となる。しかも、熱の時定数がキャリアのそれに比べて著しく遅いため、時間発展を観察することにより、それらの効果を切り分けることができる。観察例を図 1 に示した。一方シミュレーションでは、熱とキャリアの拡散方程式を数値的に解くことにより、結果的に屈折率の時空間発展を記述することが可能である。その分布に対してプローブ光を照射したときの透過光を光線追跡シミュレーションすることにより、熱あるいはキャリアと透過光の観測量を関連付けることができる。以上の準備により、実験的に得られた観測量（過渡レンズ信号）に対応する、熱あるいはキャリアの量を定量することが可能となる。さらに熱は、先述のように非輻射再結合の結果であることから、ただちに発光効率に換算できる。このようにして求めた、発光効率とキャリア密度の解析の例を図 2 に示した。他の測定でもこの解析が妥当であることを確認した。従来、過渡レンズ法は定性的な非輻射過程マッピングにしか使用されていなかったが、シミュレーションとの併用により定量評価にも適用できることを実証できた。しかもこの手法は材料を選ばないことから、今後、さまざまな発光素子開発に貢献できるものと期待される。［ref：*JAP* **117**, 105702（2015）］

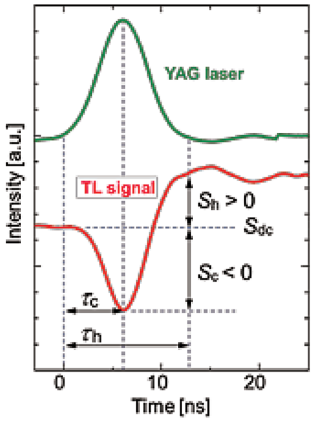


図 1　YAG レーザで励起した GaN からの TL 信号。S_c がキャリア、S_h が熱による過渡レンズ信号に相当する。熱信号が遅れて発生するため（$\tau_c < \tau_h$）、両者の切り分けが可能となる。

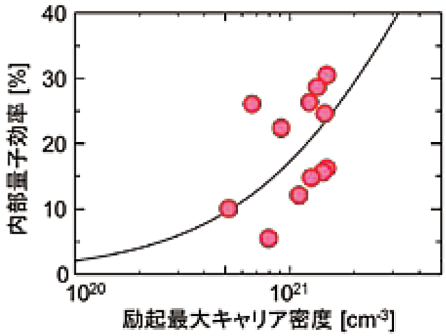


図 2　過渡レンズ法とシミュレーションの併用により定量した GaN における発光内部量子効率。

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（髙岡研究室）
http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/nanoprocess_eng/index.html

「クラスターイオン照射による発光スペクトル測定」

固体試料へのイオンビーム照射時に強いルミネッセンスが観測されることが知られており、これをプローブとして用いた分析法やイオン注入時のその場観察法が研究されている。一方、固体表面に対して様々な照射効果を示すことが知られているクラスターイオンビームにおいても、クラスターイオンビーム自身をプローブとして利用するその場観察が可能であれば幅広い応用につながると考えられる。ところが、強いルミネッセンスが生じる MeV 領域のエネルギーを持つイオンビームを照射する場合と比較して、固体表面加工や修飾に用いられるクラスターイオンビームによる発光は微弱であることが分かっている。このためクラスターイオンビーム照射時にその場観察を行うためには、高感度な測定器が必要になる。また、クラスターイオンビーム照射時の発光には固体表面の欠陥、不純物等によるものの他に、クラスターイオン自身を起源とするものも含まれると考えられるため、発光スペクトルを測定する必要がある。さらに、固体表面への衝突時にクラスターが極めて高温になることが分子動力学計算によって予想されており、クラスターイオンビーム照射時の発光スペクトル測定によりこれを実測出来る可能性がある。そこで、微弱な発光に対してスペクトルを測定することが出来る、高感度のスペクトロメーターを開発した[1]。

図１にクラスターイオンビーム照射装置内に設置したスペクトロメーターの模式図を示す。12 組のシングルフォトン検出が可能な光電子増倍管とバンドパス光学フィルターを試料の近くに設置し、クラスターイオンビームを照射する。光電子増倍管としては測定する波長領域によってマルチアルカリ光電面を持ったものとバイアルカリ光電面を持ったものを使い分け、約 300nm から 700nm の波長領域を一度に測定する。スペクトロメーターの校正には中心波長 520nm のストロンチウムアルミネートからの蛍光及びタングステンフィラメントからの輻射光を用いた。

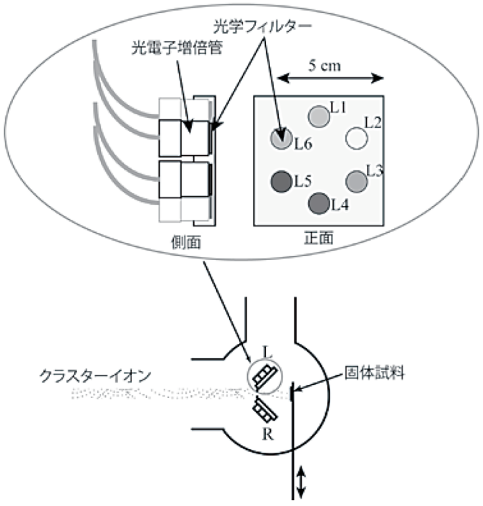


図１　クラスターイオンビーム励起ルミネッセンス用スペクトロメーターの模式図。

図２にアルゴンクラスターイオンビームをシリコンに照射した際のスペクトルを示す。点が測定値であり、棒は NIST データベース[2]のアルゴン原子スペクトル強度を測定波長領域で足し合わせたものである。アルゴンクラスターは超音速自由噴流法で生成し、酸化物カソードから生じた電子を用いてイオン化した。アルゴンクラスターイオンビームの加速電圧は 9kV である。波長 430nm 付近を中心とするブロードなピークが観測された。このピークに相当するピークが NIST データベースのアルゴン原子のスペクトルにもみられる。したがって、固体表面との衝突によって高温になったアルゴンクラスターイオンからの発光が観測されたと考えられる。クラスターイオンビーム照射による発光スペクトルを測定することにより、反応メカニズムが明らかになることが期待される。

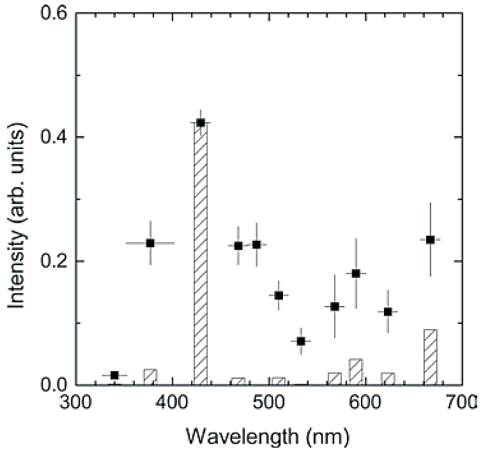


図２　アルゴンクラスターイオンビームをシリコンに照射した場合のスペクトル。

[1] H. Ryuto et al., Rev. Sci. Instrum. 86, 023106 (2015).
[2] NIST Atomic Spectroscopy Databases.

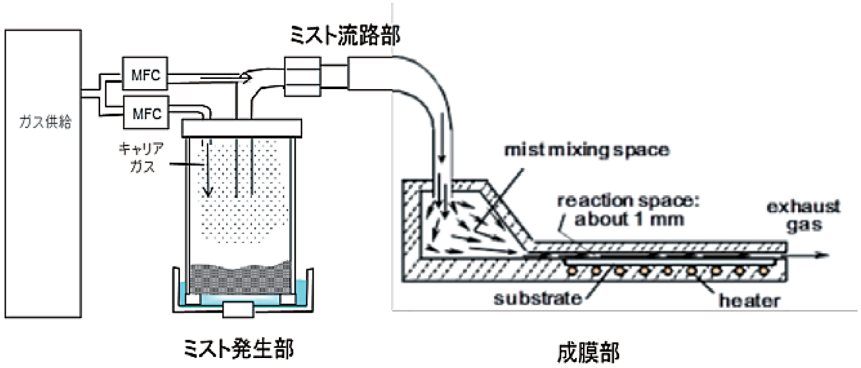
光・電子理工学教育研究センターデバイス創生部門 先進電子材料分野（藤田研究室）
http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/index.html
「非真空・大気開放型成膜プロセス／ミストデポジション法の開発」

光・電子デバイスには多様な薄膜が用いられているが、成膜にかかるエネルギーの削減が次世代のプロセスにおける重要な課題である。とくに太陽電池や液晶パネルのような大面積デバイスにおける透明導電膜などの成膜において、一般に用いられている真空プロセスでは、装置の大型化により消費電力の増大、スループットの低下がデバイスコストに加算される。そこで、非真空で大気開放型の新しい成膜プロセスのニーズが企業から寄せられ、当研究室の持つ成膜技術をシーズとして研究開発を行っている。

下地へのダメージが少なく、膜厚の制御性に優れた成膜技術の代表は気相成長（CVD）である。しかし、透明導電膜に用いられる ZnO の成膜を考えると、原料として強い可燃性を持つ有機金属を用いる必要があり、真空技術をもとにした装置が不可欠で大気開放型のシステムなど不可能である。そこでわれわれが用いたのは安全な原料の溶液に超音波を印加し、得られたミスト（霧）を輸送して成膜原料とする技術である。研究開発の当初には、大面積化につながる基本技術、半導体デバイスの母体として利用可能な高い品質を持つ単結晶への展開など、基盤技術の確立を行い本技術の広い適用性を示した[1,2]。その後、この成膜技術をミストデポジション法と称し、新しい材料への適用を進め、多様な酸化物薄膜、酸化物単結晶半導体、有機薄膜、硫化物薄膜等への広い応用を示してきた。

将来のエネルギー問題に対応して、ワイドギャップ半導体パワーデバイス応用が注目されている[3]。酸化ガリウム（Ga_2O_3）は約 5eV の広いバイドギャップを持つことから高耐圧のデバイス材料として期待されているが、成膜技術においてもミストデポジション法による省エネルギー、低コストが期待される。これに注目して、（株）FLOSFIA[4] が事業化を目指す研究を行い、SiC、GaN デバイスの補完を期している。またミストデポジション法を広い産業分野で応用するための技術開発を合わせて行っている。

現在、NEDO の「エネルギー・環境新技術先導プログラム」のもとで、制御性に優れた実用的な装置開発を進めている。多くの企業からさまざまな材料の成膜に係る関心が寄せられ、共同研究も実施している。また早い時期から共同研究を行っている東芝三菱電機産業システム（株）では、200°C で低抵抗の ZnO 透明導電膜の成膜を達成し、製造プロセスへの参入を進めている。このように、いわば当研究室が先導的な開発の役割を果たした技術が、次世代の成膜プロセスとして広い分野で省エネルギーと高機能化を実用する成膜技術として進展して行くことを予期しているところである。



ミストデポジション装置の概要

1）川原村敏幸：京都大学博士論文（2008）http://hdl.handle.net/2433/57270
2）西中浩之：京都大学博士論文（2009）http://hdl.handle.net/2433/124538
3）藤田静雄：応用物理 82,.836（2013); S. Fujita: Jpn. J. Appl. Phys. 54, 030101（2015）
4）http://flosfia.com/index/

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/
大規模テキストからの事態間知識の自動獲得

計算機によるテキスト理解の実現のためには、大規模テキストから計算機が自動的に知識を獲得する必要があります。必要な知識の一つには「誰が何をどうする」（以降、事態と呼びます）という述語と項（「誰が」、「何を」など）の関係があり、これは格フレームという形で自動獲得されています。例えば、「拾う」という動詞には意味ごとに以下のような格フレームが獲得されています。

・{人, 子供, ..} が {海岸, ..} で {ゴミ, 空き瓶, ..} を拾う
・{マイク, ..} が {音, 声, ..} を拾う
・{男, 女の子, ..} が {財布, 電話, ..} を拾う

さらに高次な知識として、事態間の知識、すなわち、「誰が何をどうすると、（しばしば）誰が何をどうする」という知識が必要となり、例えば、

X:{男, 女, ..} が Y:{財布, ..} を拾う→ X:{男, 女, ..} が Y:{財布 ,..} を警察に届ける

というものです。ここで、前に現れる事態と後に現れる事態で共有する項があり、それらの対応をとることが、事態間知識を言語解析に利用する上で重要となります。上記の X, Y は前後の事態で共有する項であることを示しています。

このような知識をテキストから自動獲得する際に問題となるのは日本語では省略が頻繁に生じることです。上記の知識を抽出するもととなる文は以下のような文（ϕ で省略されている項を示しています）ですが、項が頻繁に省略されているため、項の対応付けをとるのが困難です。

・彼が財布を拾って（ϕが）（ϕを）警察に届けた
・（ϕが）財布を拾ったので（ϕが）（ϕを）警察に届ける

そこで、事態間知識を二段階で自動獲得する手法を考案しました（図 1）。上記で述べたように省略が頻繁に生じますが、動詞の意味を決定するような重要な項（「財布を」や「警察に」など）はあまり省略されないことから、まず、アソシエーション分析を用いて、よく共起する述語ペアとその項を取り出します。すると、以下のような核となる部分を獲得することができます。

財布を拾う→警察に届ける

次に、格フレームを用いて、項の対応付けをとります。一段階目で獲得された項に基づき、述語それぞれに対して適切な格フレームを選択し、選択された格フレーム間で、同じような名詞が出現する項の対応をとります。この例ですと、「拾う」のガ格と「届ける」のガ格、「拾う」のヲ格と「届ける」のヲ格が対応するとわかります。この手法を用いることにより、Web1 億ページから約 30 万ペアの事態間知識を獲得することができました。図 2 は「普及する」という事態の前後にどのような事態が生じるかを示したものです。

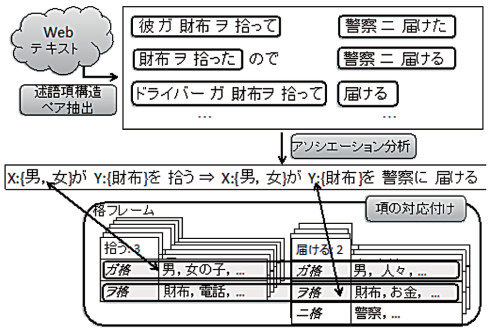


図 1　事態間知識の自動獲得手法

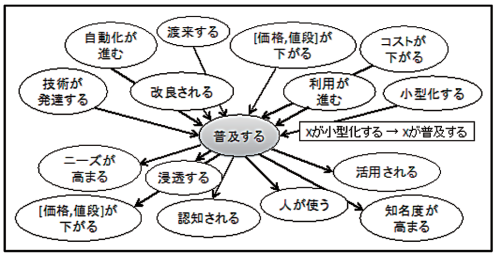


図 2　“普及する” の前後に生じる事態

本研究室は、CREST「知識に基づく構造的言語処理の確立と知識インフラの構築」プロジェクトを推進しており、そこでは、様々なテキストの横断的な関連付けや検索・比較を可能とする知識インフラの構築を目標としています。今後は獲得された事態間知識を利用し、省略解析などの言語解析の精度向上に取り組んでいきます。

参考文献

Tomohide Shibata, Shotaro Kohama and Sadao Kurohashi: A Large Scale Database of Strongly-related Events in Japanese, Proceedings of LREC2014, pp.3283-3288, Iceland, (2014.5).

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/
「マイクロ波給電を用いた無線 LAN 端末への給電」

無線通信機器のバッテリレス動作を実現することで、有線電源ケーブルの施設に要するコストや定期的な電池交換に要するコストなどの管理コストを削減することが可能となる。その削減効果は、バッテリレスに動作する機器の数が増えれば増えるほど大きくなる。

我々は無線 LAN 通信を行う無線端末をバッテリレス動作させることを目的に、この無線端末をマイクロ波電力伝送で給電することに関して、生存圏研究所・生存圏電波応用分野（篠原研究室）と共同して検討を行った。無線端末をマイクロ波で給電する際には、無線通信・マイクロ波給電ともに無線周波数帯域を用いて運用されることから、双方を同時運用した際の電波干渉による無線通信の性能劣化が起こることが懸念される。

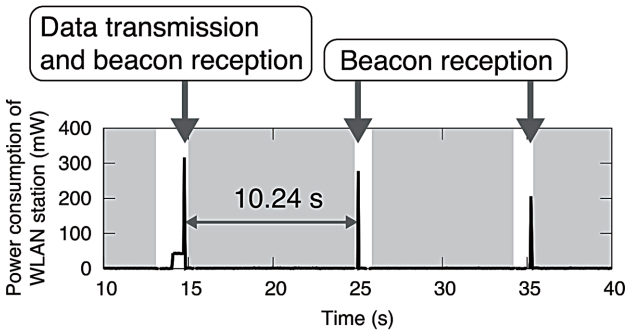


図 1：実装した時分割運用法の動作、灰色領域に給電波を放射

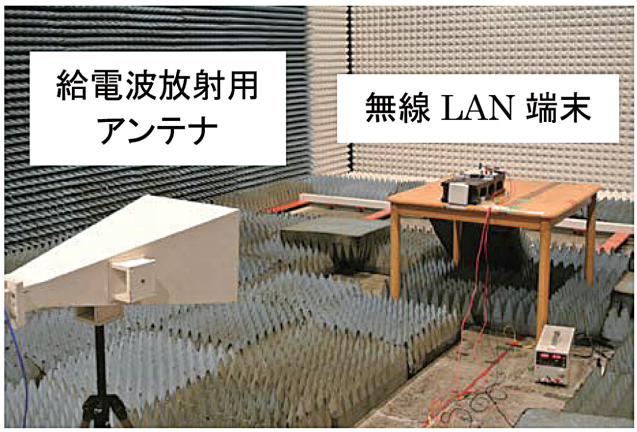


図 2：実験の様子、2013 年 10 月 17 日 METLAB にて

まず、マイクロ波給電が無線 LAN 通信にどのような影響を及ぼすかを調査するべく、中心周波数 2.457GHz の帯域を用いてデータを送信する端末に向けて、2.4GHz 帯の様々な周波数のマイクロ波を放射し、無線通信の性能評価を行う実験を実施した[1]。なお、本実験は電波暗室 METLAB 等を利用させて頂き、我々の用意した無線通信機器を持ち込んで実施した。実験の結果、無線端末がさらされている給電波電力密度が小さい場合には、通信と給電が周波数共用している際のみに無線通信が妨害され、給電波電力密度が大きい場合には、給電波がどの帯域でも無線通信が妨害されるという知見を得た。

その後、我々は無線 LAN 通信とマイクロ波給電とを時分割的に運用する手法を提案した[2]。本提案法では、給電波電力を受け取る端末と給電波を放射する側とで無線端末が通信を行うタイミングの情報を共有し、図 1 に示すようにそのタイミングを避けるように給電波を放射させる。本提案法の動作検証を目的とした実験を、同様に電波暗室 METLAB 内で行った。なお、この実験においても図 2 に示すように給電システムを構築した。実験の結果、図 1 に示すような通信と給電の時分割動作が確認された。

（参考文献）

[1] N. Imoto, et al., "Experimental investigation of co-channel and adjacent channel operations of microwave power and IEEE 802.11g data transmissions," IEICE Trans. Commun., vol.E97-B, no.9, pp.1835-1842, Sept. 2014. [2] S. Yamashita, et al., "Implementation and feasibility study of co-channel operation system of microwave power transmissions to IEEE 802.11-based batteryless sensor," IEICE Trans. Commun., vol.E97-B, no.9, pp.1843-1852, Sept. 2014.

集積システム工学講座 大規模集積回路分野（小野寺研究室）
http://www-lab13.kuee.kyoto-u.ac.jp/
「情報通信機器向けエネルギーハーベスティングシステムの開発」

自然環境から電力を採取するエネルギーハーベスティング技術が注目を集めている。防犯監視システムなどのセンサネットワークはセンサ自体のコストよりも電源敷設コストの方が大きくなることが多いため、エネルギーハーベスティングにより電源の敷設コストを低減できればシステム全体の低コスト化が期待できる。体に貼り付けたセンサが長期にわたって常時我々の健康状態を診断することができれば病気の早期発見に繋がる。このようなセンサには体温や振動あるいは圧力から生成した電力を効率良く利用する仕組みが重要である。

エネルギーハーベスティングの最大の問題は、出力電力および出力電圧が環境に依存して変わるため安定しないことである。従ってエネルギーハーベスティングによって得た電力をセンサやプロセッサなどの情報通信機器の電力源として利用するためには電力を安定化させる蓄電システムと電圧を安定化させる電圧変換システムが重要である。

本研究では、太陽光などの自然環境から採取した電力を低い電力損失で蓄電し、一定の電圧を持った電力として取り出して使用するシステムを開発した。複数の電源電圧を使用し、平均 10mW 程度の電力を消費する組込みシステムを対象とした。試作したエネルギーハーベスティングシステムの構成を図１に示す。太陽電池が発電する電力の供給経路には、チャージャを経由してスーパーキャパシタに蓄電する経路と、DC-DC コンバータを経由して負荷となるプロセッサやセンサなどへ供給する経路がある。また、スーパーキャパシタに蓄電された電力は DC-DC コンバータを経由して負荷に供給される。太陽電池が発電する電力が負荷によって消費される電力より大きい場合は SW1 をオン、SW2 と SW3 をオフし、発電電力をスーパーキャパシタと負荷の両方に供給する。この時、チャージャが太陽電池の出力電流を調節し Maximum Power Point Tracking（MPPT）により出力電力を最大化する。発電電力が負荷より小さい場合は SW2 をオン、SW1 と SW3 をオフし、太陽電池が発電する電力とスーパーキャパシタの電力を足し合せて負荷に供給する。この時、SW2 の上部に接続された DC-DC コンバータが MPPT により太陽電池の出力電力を最大化する。太陽電池の発電電力が SW2 に接続された DC-DC コンバータの電力損失より小さい場合は SW3 をオン、SW1 と SW2 をオフし、スーパーキャパシタのみから電力を供給する。

開発したエネルギーハーベスティングシステムの最大の特徴は、システムの実行状況に応じて太陽電池セルとスーパーキャパシタセルの直並列接続を変更する点である。チャージャ回路と DC-DC コンバータ回路の電力損失はその入出力電位差におよそ比例するため、太陽電池の発電量やキャパシタの蓄電量および負荷の電力消費量に応じて太陽電池とスーパーキャパシタの直並列接続を変更することにより電力損失を削減することができる。シミュレーション実験では、上述のようにシステムの状況に合わせて太陽電池セルとスーパーキャパシタセルの直並列接続を変更することにより電力の蓄電と電圧変換に伴う電力損失を平均約 40%削減できることを確認した。

本研究では 10mW 程度を消費する小型の組込みシステムを対象としたが、同様のアイデアは Home Energy Management System（HEMS）や Community Energy Management System（CEMS）などの大型システムへも適用可能と考える。将来的には家庭や町全体の省エネルギー技術としての展開を目標に研究を進めている。

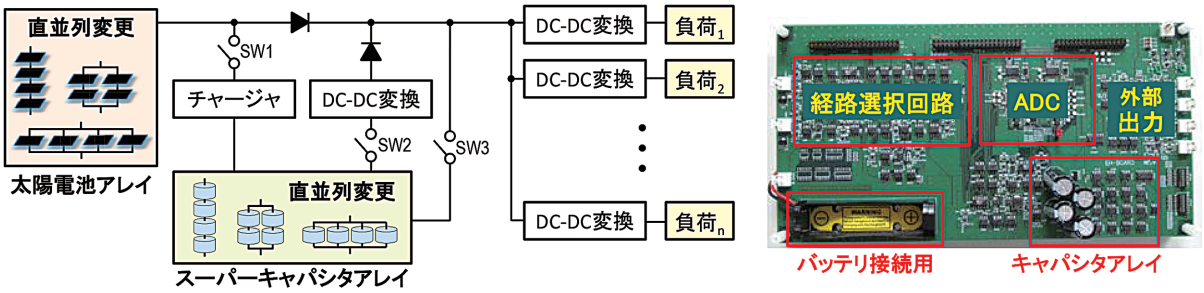


図１　低損失エネルギーハーベスティングシステムの構成図とプロトタイプボードの写真

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
「CEST-MRI 法によるドパミン検出の可能性に関する基礎的検討」

脳内のドパミン（dopamine）の不足により様々な運動障害をきたすパーキンソン病（Parkinson's disease）では、CT や MRI に特異的な異常は認められず、画像診断としては主に SPECT（Single Photon Emission Computed Tomography）や PET（Positron Emission Tomography）などの核医学検査が用いられている。しかし、これらは放射性同位元素を用いており、また空間分解能も低いため、より無侵襲で空間分解能も高い MRI による診断法が期待されている。当研究室では、パーキンソン病の MRI による診断や治療効果判定の実現を目指して、生体内の様々な化合物の MRI による新たな検出法として期待されている CEST（Chemical Exchange Saturation Transfer）法を用いたドパミン検出および定量化の可能性に関する基礎的検討を行っている。

CEST 法では、例えば生体組織のように水溶液中に様々な化合物が溶解している場合、溶質を構成する水素原子の一部が溶媒である水の原子と常に交換しているという化学交換現象を利用し、大量に存在する水からの信号を通じて目的の溶質の存在を検出する。核磁気共鳴（NMR）法では、他の原子との結合状態によって測定対象とする原子の共鳴周波数が変化する化学シフトを利用して化合物の原子組成を同定するが、生体のように周囲に大量の水が存在する場合、測定対象の水素原子と水の水素原子の共鳴周波数が近接していると大量に存在する水の信号と分離できないことも多く、この様な場合に CEST 法は有効な手段となる。CEST 法では、水の水素原子の共鳴周波数付近の様々な周波数で予め水素原子の励起を行うが、測定対象とする化合物の水素原子の化学シフトに一致した周波数の電磁波の場合のみ測定対象の水素原子が励起され飽和（Saturation）状態に陥る。これが化学交換によって水の水素原子の一部を置換するため、その周波数では本来は影響を受けない水の信号の低下に繋がる。この信号低下の大きさから測定対象物の定量化を行うが、大量に存在する水の信号変化を利用するため検出感度が高く、水の信号を分離あるいは消去するなどの必要性が無い。

図 1 にドパミンの化学構造式を示すが、3, 4 位の水酸基および側鎖のアミノ基の水素が水の水素原子と交換可能である。文献値を参考に濃度 0-15mM のドパミン水溶液を対象として、7 T の動物用 MRI 装置を用い CEST-MRI 法によるドパミン検出の可能性について検討した。CEST 法の飽和に用いる電磁波の強度や照射時間の実験的最適化を行ったところ、10 μT の強度で 8 秒間の電磁波照射により 2.5mM 以下まで検出可能であることが明らかとなった。また、得られた CEST 信号の変化は、図 2 に示す様にドパミン濃度に比例し、CEST 法により生体におけるドパミン濃度の定量化が可能であることを明らかにした。

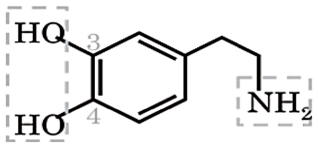


図 1. Dopamine の化学構造式

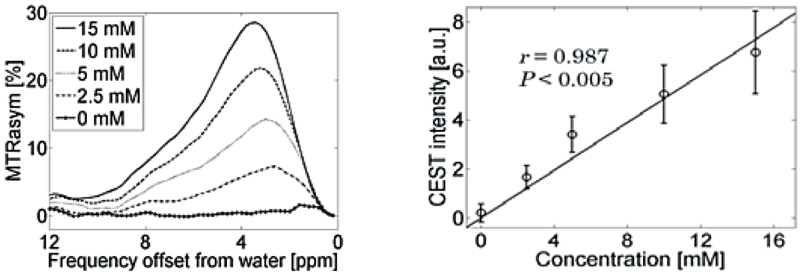


図 2. 様々な濃度の Dopamine 水溶液の CEST 信号

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/
「組織学習につながる雑談の誘発方法の研究」

近年、多くの企業で組織学習の重要性が認識され、組織学習を促進するための取り組みが実践され始めています。組織学習とは、特定の目的を達成するための集団、つまり企業のような組織に所属するメンバーが、その組織に関係した知識を習得するだけにとどまらず、組織文化を改善し、組織全体のパフォーマンスを高めるために行動することです。本研究室では、勤務中の休憩時間などに偶発的に発生し、意図しない形で有用な知識や情報を組織内のメンバーに提供する可能性のある「雑談」を効果的に活用して、組織学習を促進する方法を研究しています。

組織内のメンバーの間で発生する雑談の内容は様々ですが、この雑談の内容を業務に関連した方向へ誘導し、それぞれのメンバーが持つ知識や経験を共有できれば、特別な負担もなく組織学習につなげられると期待できます。組織学習につながる雑談を誘発するためには、まずメンバーの間で雑談を発生させる必要があります。そこで、今回の研究では、メンバー同士を会話がない状態では気詰まりに感じられる場に滞在させることにより、雑談を誘発できないかと考えました。そして、メンバーに対して業務に関連した情報を提示し、その提示された情報から彼らの持つ経験や知識を連想させることで、雑談の内容を業務に関連した方向へ誘導し、組織学習につながる雑談を誘発します。

この提案方法を実現するために、図１に示すように、大型ディスプレイから業務に関連したウェブ上のニュースやブログのタイトルを提示するシステムを開発し、これを職場の休憩場所に置くことにしました。休憩場所で偶々居合わせたメンバー同士が気詰まり感を解消するために、大型ディスプレイに表示された情報を手掛かりにして雑談を始めることを期待するものです。また、ウェブ上のニュースやブログは多様な視点から記事が記述されているため、メンバー自身の経験と照らし合わせることにより、様々な連想を促せると考えています。

開発したシステムを用いて、業務に関連した雑談が発生したか、組織学習につながる雑談が発生したかの２点を評価するための２件のケーススタディを行いました。ケーススタディには、それぞれ専門職である保育士の女性２名とマッサージ師の女性２名が参加しました。参加者には、ダミータスクを行わせ、その休憩時間に滞在する部屋にシステムを設置しました。

休憩時間に発生した雑談を、業務に関連した発言か業務以外に関連した発言かに分類した結果、普段から業務に関連した雑談をする参加者に対してシステムを導入することにより、業務に関連した発言を増加させられる可能性があることがわかりました。また、保育士同士の参加者の間では、システムが提示した情報により、保育園の授業で歌う歌の歌詞を補完しあい、学習している様子も確認できました。今後は、提案方法を実際の企業に導入し、その効果を検証していきます。

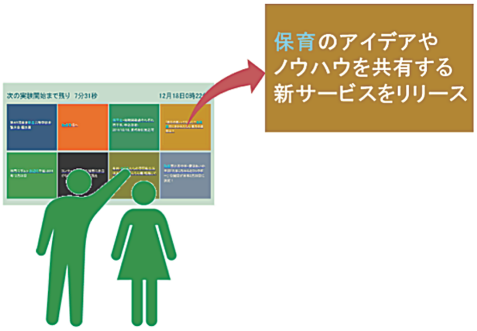


図１：業務関連雑談誘発システム

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/
「集合組織金属を活用した高性能高温超伝導線材の開発」

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）、核磁気共鳴装置（NMR）、粒子加速器、リニアモーターカー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、この高温超伝導体を用いた電線（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成膜技術（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い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 の長さに渡って単結晶のように（３軸結晶配向）揃える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（$YBa_2Cu_3O_7$）の３軸結晶配向膜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（77K）で 30,000A/mm^2 以上に達しています。昨年、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銀を不使用とした新規構造（図 1）の開発に成功し[3]、現在、国プロ等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高温超伝導体に限らず、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.

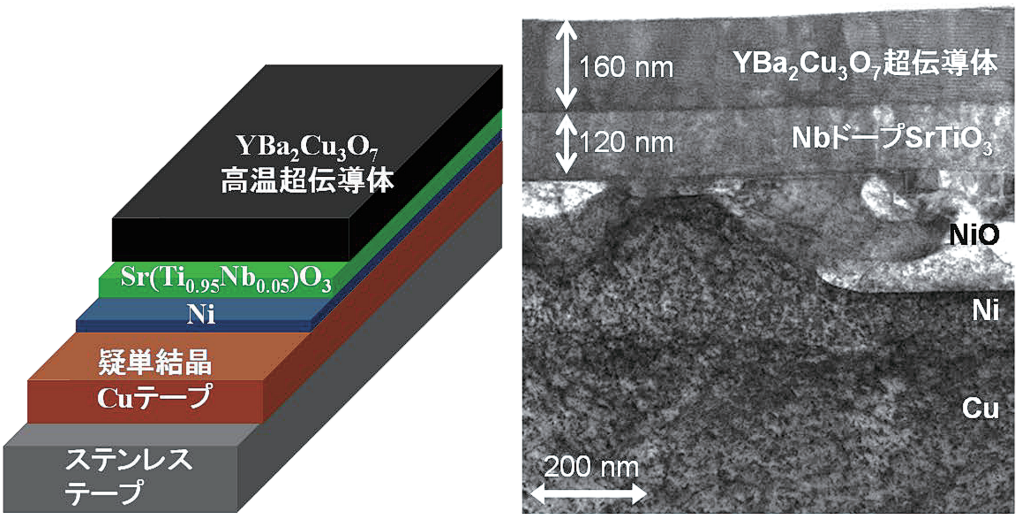


図１　開発した高温超伝導線材構造の概略図および断面の透過型電子顕微鏡写真

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野（白井研究室）
http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/

「変圧器磁気遮蔽型超電導限流器の限流特性」

１．はじめに

当研究室では、エネルギー問題にコミットする視点として、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、分散電源の導入による故障電流の増大問題を解決する電力機器である超電導限流器（SFCL: Superconducting Fault Current Limiter）の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。我々は、良好な復帰特性を示す FCL として変圧器磁気遮蔽型 SFCL を提案してきている。本稿では、この SFCL の二次コイルに使用する線材の選択によって限流インピーダンスの向上が期待できることを実験的に示したので紹介する。

２．提案する変圧器磁気遮蔽型超電導限流器の限流性能の向上

提案する限流器は、同軸に二つの超電導コイルを配置し、一次コイルを系統に接続し、二次コイルを短絡したものである。平常時は一次、二次とも超電導状態にあり、二次側に誘導電流が流れて一次コイルによる磁束は打ち消され、限流インピーダンスはほぼゼロとなる。故障電流が流れると、二次側が常伝導転移し、一次コイルによる磁束を打ち消すのに十分な誘導電流が流れなくなり、限流インピーダンスとしてリアクタンス成分が現れる。今回は、DI－BSCCO 線材を用いた一次コイルに対し、二次コイルに同様の DI－BSCCO 線材を使用した FCL－BB と GdBCO 薄膜線材を使用した FCL－BG を製作し、二次側コイルの超電導線材による限流特性を比較した。製作した FCL の写真を図１に示す。

図１製作した限流器

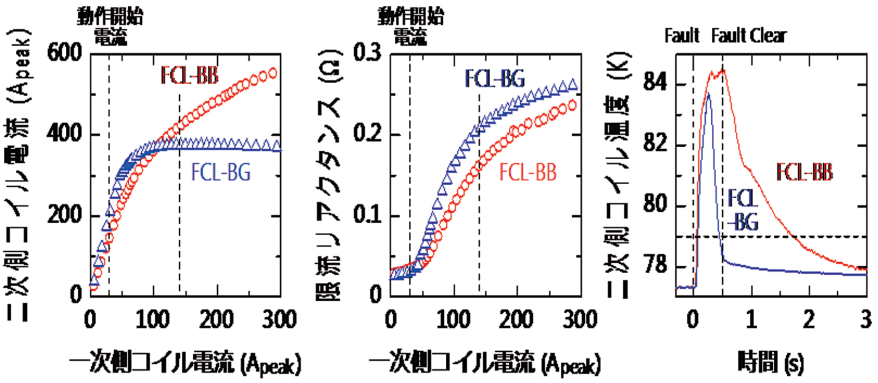


図２　使用線材による限流特性の比較

FCL－BB と FCL－BG の通電電流 peak 値に対する限流動作特性を図２に示す。FCL－BG が同じ電流 peak 値に対して大きなリアクタンス成分が得られ、二次コイル電流は抑制され線材温度の上昇も小さくなり、待機状態への復帰が早いことが確認された。

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
「発光分光法による核融合エネルギーを目指したプラズマ中の不純物モニタリング」

2011 年の東日本大震災に起因する東京電力福島第一原子力発電所事故により、我が国はエネルギー政策の転換を余儀なくされている。いわゆる再生可能エネルギーへのシフトは究極の理想ではあるが、資源の乏しい我が国においては、当面、より環境負荷が小さく、かつベースロード電源となりうる代替エネルギーの開発が急務である。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 年程度で再利用が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、「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、世界的成果を収めている。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についての結果を紹介する。プラズマからの発光は、燃料である水素のスペクトル以外にも、プラズマ・壁相互作用によって容器内に発生、混入する不純物が存在する。不純物はプラズマの熱エネルギーを輻射のエネルギーとして損失させるため（放射損失）、適切にモニタリングし、制御することが肝要である。特に多価イオンはエネルギー準位が大きいため、波長が短い真空紫外（VUV）領域に輝線スペクトルを多数有する。一般に、不純物の輝線スペクトルは、電子密度とその価数の不純物イオン密度、およびその価数における励起速度係数（電子温度の関数）の積に比例するため、同一の電子密度、電子温度下ではその価数の不純物イオン密度を反映する。

真空容器壁はプラズマ放電によって不純物が放出され、排気されることによって徐々に状態がよくなり、不純物の少ない、よって放射損失の少ないプラズマ生成が可能となっていく。VUV 領域の輝線スペクトルには C, O, Ti, Fe, Cr 等の多価イオンからの発光が含まれるため、実験日毎に同じ生成条件（電子サイクロトロン加熱）および平均電子密度のプラズマ（参照放電）で VUV スペクトルによる容器壁のモニタリングを行っている。

2014 年度の実験においては、磁場の条件を変更した際に、プラズマの輻射損失が有意に増大し、放電を続けても下げ止まる傾向が観測された。そこで、VUV のスペクトルを調べたところ、Fe や Cr の多価イオンの発光が特に増大していることがわかり、放電管内部のステンレス構造物からの不純物放出が示唆された（図）。実際、実験期間後に真空容器を空けて内部を確認したところ、ステンレス部位の部分的な溶融が確認された。

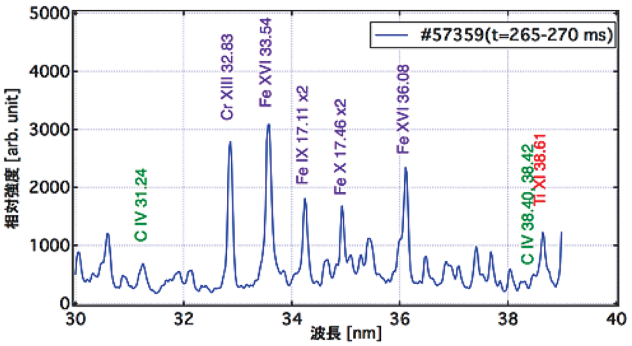


図　2014 年度のある参照放電（#57359）における不純物の VUV スペクトル。元素記号の後のローマ数字は価数、続くアラビア数字は波長［nm］を表す（I は中性原子、II は 1 価、III は 2 価…と続く）。

＜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

生存圏診断統御研究系 大気圏精測診断分野（津田研究室）
http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/tsuda_lab
「アジア・オセアニア域における中間圏・下部熱圏レーダーネットワーク観測」

我々人類の生活圏としての地球大気圏は、太陽から地球に降りそそぐ電磁波としての太陽放射と物質としての太陽風のエネルギーを受けて、様々な擾乱現象（例えば、積雲対流、台風、オーロラ）が発生しています。荷電粒子からなる太陽風は、地球磁場の影響を受けて極域の大気圏に侵入し、大気との相互作用によって我々を魅了させる極光（オーロラ）を発生させています。一方、太陽放射は、地球磁場の影響を受けずに、直接、地球大気圏に侵入することができるため、大気圏が受け取る太陽放射エネルギーが赤道において最大になります。そのため、赤道域の下層大気では、強烈な太陽放射に伴って活発な積雲対流現象が励起され、そこで発生した大気波動が上層の大気層へ伝搬することによって、エネルギーや運動量を上方の大気層へ輸送しています。

近年の研究結果から、地表付近の地球温暖化に対応して、中層大気（高度 10-100km）では寒冷化することが予想され、さらには、中間圏・下部熱圏（MLT: Mesosphere and Lower Thermosphere）大気（高度 60-150km）ではその影響が大きくなると考えられています。したがって、地球温暖化による地球大気の構造変化が大気波動の上方伝搬過程に与える影響、または大気波動の励起過程への温暖化の影響を調べることは、単に、大気波動そのものの特性を理解するだけでなく、地球温暖化の監視という意味でも重要です。一方、MLT 領域の平均流に太陽活動周期と思われる長周期変動も認められています。

本研究室では、地表付近の変化と太陽活動の影響を同時に受けている MLT 領域の平均風の長期変動や大気波動の励起、伝搬機構を解明するために、インドネシア、オーストラリアとの国際共同でアジア - オセアニア域に流星・中波（MF）レーダーを中心とした赤道大気レーダーを展開してきました。具体的には、インドネシア航空宇宙庁と共同で、1992 年に信楽流星レーダーをジャカルタ近郊に移設し、1999 年まで観測を実施しました。その後、インドネシア、オーストラリアとの協力を通じて 1995 年にポンティアナに MF レーダー、および 2002 年にコトタバン流星レーダー、2004 年にパムンプク MF レーダー、さらに 2011 年にビアク流星レーダーを建設しました。

これらの大気レーダーで取得された観測データ、およびメタデータが、大学間連携プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究（IUGONET）」によってデータベース化され、インターネット上に公開されています。今では、これらの MLT 領域の風速データを用いた、中層・超高層大気の力学過程に関連した様々な研究に活かされています。

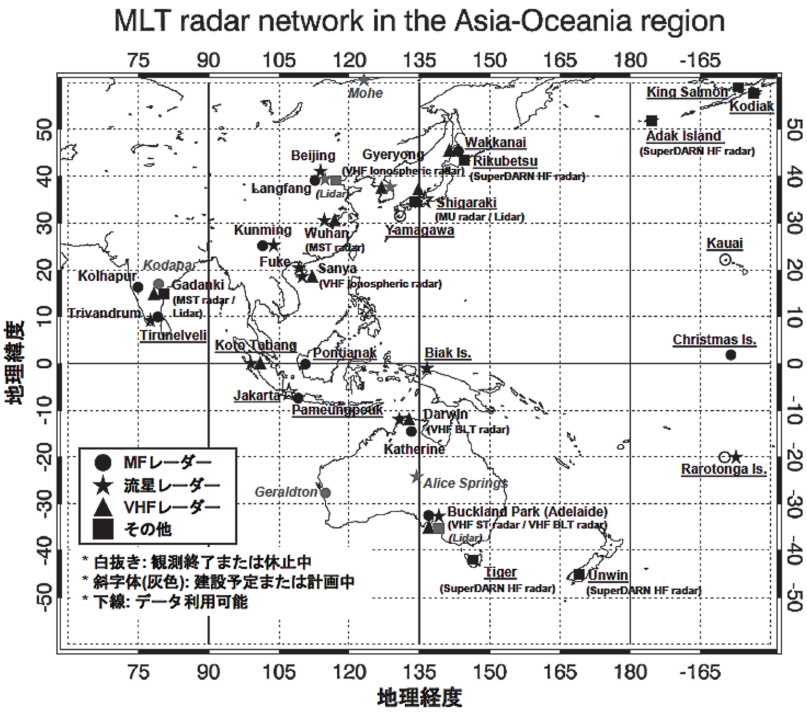


図 1：アジア・オセアニア域における赤道大気レーダーネットワーク。

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/
「磁気嵐の研究」

地球を取り囲むように流れる電流をリングカレントと呼び、電流が数日間にわたって増える現象を磁気嵐と呼びます。リングカレントは地磁気誘導電流を流し地上の電力網に影響を与え、リングカレントを構成する粒子は人工衛星の表面を帯電させ放電の原因となります。リングカレントを理解することは安心・安全な宇宙利用と電力設備の運用にとって重要であると言えます。リングカレントの発達を理解する上で重要な要素が二つあります。一つは粒子の供給過程です。観測によればリングカレントを構成する粒子は太陽風と地球超高層大気の双方に起源を持ち、何らかの過程を経て地球固有の磁場が支配する磁気圏に流入すると考えられています。二つ目は粒子の輸送過程です。磁気圏に印可される大規模電場によって粒子がゆっくり地球向きに輸送されるモードと、サブストームと呼ばれる数 10 分スケールで起こる過渡現象によって突発的に輸送されるモードの二つが考えられています。磁気嵐がおこると地球由来の酸素イオンが急激に流入し、リングカレントを強めることが知られていましたが、その流入・輸送過程はよく分かっていませんでした。

オーロラの爆発的増光で象徴されるサブストームと呼ばれる現象に着目し、高精度な電磁流体シミュレーションを用いて磁気圏中の電場・磁場変動を再現したところ、磁気再結合によって発生した磁気張力によってプラズマが地球方向に加速されると同時に、磁束が地球方向に運ばれて磁場が強まり地球近くで電場が強まることがわかりました。地球由来の冷たい酸素イオン約 12 億個を磁気圏に投入し、スーパーコンピューターを用いて軌道計算を行いました（図 1）。サブストーム中に強まった電場によって 10 分以内に運動エネルギーが 4 桁近く上がり、サブストーム中のリングカレント内で観測される微分フラックスを再現することに成功しました（図 2）[1]。

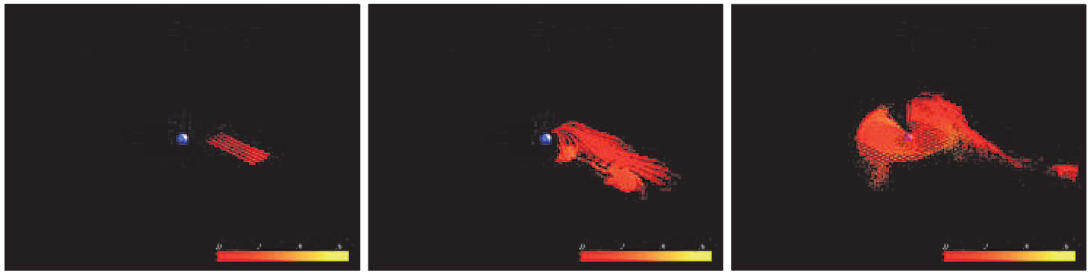


図 1　サブストーム時における酸素イオンの加速・輸送過程。酸素イオンの位置を点で示す。色はイオンの運動エネルギーを、青い球は地球を示している。

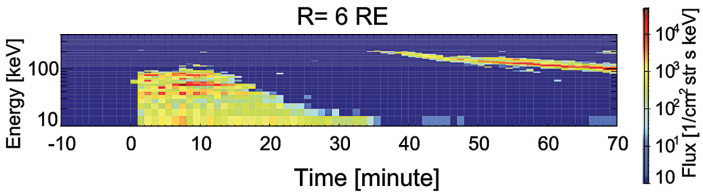


図 2　サブストーム時の静止軌道付近で急増する酸素イオンの微分フラック

[1] Nakayama, Y., Y. Ebihara, and T. Tanaka, J. Geophys. Res, **120**, 4825–4840, 2015. doi: 10.1002/2015JA021240, 2015.

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/
「評価構造の可視化技術」

現在、多くの組織では、満足度調査を用いた改善活動が盛んになっています。モノづくり企業では、これまでの生産性・効率性重視から脱却し、顧客満足度重視の経営によってサービス経済社会を生き抜こうとしています。大学では、授業用アンケートをもとに学生の満足度調査により、学生からのニーズを教員に反映させて、授業改善に活用しようとしています。ニーズの把握のために、アンケート調査がしばしば、行われますが、この調査を行うにあたって、何を明らかにしたいかという目標を忘れることがしばしばあり、結果として取集したデータを生かし切れない状況が発生します。調査項目を絞り込むために、少ないサンプル数で予備調査を行うためによく用いられているのが、評価グリッド法です。

評価グリッド法は、半構造化インタビューを用いた定性評価手法です。半構造化インタビューとは、質問の流れがある程度決まっているインタビューで、オリジナル評価項目の抽出とラダーリングの繰り返しです（Figure.1）。オリジナル評価項目とは、インタビューの起点となる評価項目であり、ラダーリングとは、オリジナル評価項目からより抽象的な評価項目とより具体的な評価項目を引き出すための手順です。インタビューにあたって、いくつかの調査対象物を刺激要素（Figure1 では A と B）として準備します。快適なオフィスに関する調査であれば、いくつかのオフィスの写真を用意するといった方法が取られます。この結果、回答者ごとに、各エッジが因果構造を表現するグラフ構造ができあがります。

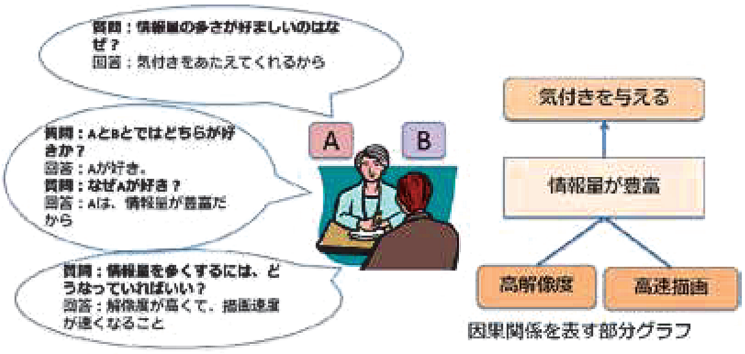


Figure1　評価グリッド法における半構造化インタビュー

現在は、インタビューアが、因果関係を示すエッジとともに、調査項目の記載された付箋を模造紙などに貼り付けていきます。このあと、回答者数だけの模造紙などに描かれたグラフ構造をノードにかかれた評価項目の類似度で統合し、大きなグラフ構造を作り上げます。このグラフ構造より、重要な因果関係を示す部分グラフを抽出し、そのノードにかかれた評価項目を質問項目とするアンケートを作成し、その結果に対して、統計分析法を適用することにより、エッジに対応する因果関係の強さを算出します。これにより、注目すべき因果関係が明らかになります。この作業において、回答者ごとのグラフ構造の統合やその粗視化作業に膨大な時間を費やしていました。

我々は、この一連の作業を支援するために、インタビューにおけるグラフ構造作成・グラフ構造の統合・粗視化などをグラフィックスインタフェースで支援する可視化システムを開発しました。さらに重要な調査項目を対話的に選択し、アンケートを自動作成し、その回答結果を用いて、因果関係の強さを可視化できるようにしています。我々は、このシステムを、学会の満足度調査、企業研究所のオフィスデザイン評価、ユーザインタフェースデザイン評価に用いています。現在は、アンケート調査結果など観測可能な因子のみ扱いますが、将来は、潜在因子なども取り扱えるようにする予定です。

参考文献

1）Sanui, J. : Visualization of users' requirements: Introduction of Evaluation Grid Method, in Proceedings of the 3rd Design & Decision Support System in Architecture & Urban Planning Conferencepp.365-374.（1996）
2）尾上，久木元，小山田，可視化情報学会における会員満足度の因果関係分析，可視化情報学会論文集，Vol. 34, No. 12, p. 43-51（2014）

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野（中村裕研究室）
http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/
「映像通信を用いて遠隔地の作業を支援する映像対話型行動支援と行動の解析」

図１のように作業者と支援者が映像を用いて対話しながら作業を進める形態を我々は「映像対話型行動支援」と呼ぶ。このような形態は様々な用途、例えば、狭い場所や危険な場所で、直接現地に呼ぶことが難しい専門家に指示を出してもらう場合に活用できる。このような形態で作業が円滑に進むためには、作業者と支援者が同一の対象に注意を向け、それぞれの意図が正確に伝達されることが望ましい。したがって、コミュニケーションの状態を客観的に評価して、作業者と支援者に対して訓練を行ったり、失敗や事故の原因を探ったり、またその予防をすることが大いに役立つ。さらに、それらが自動化・実時間化されれば、実際の作業の場で、状況の良さを作業者や支援者に知らせたり、問題点を注意したりすることも可能になる。

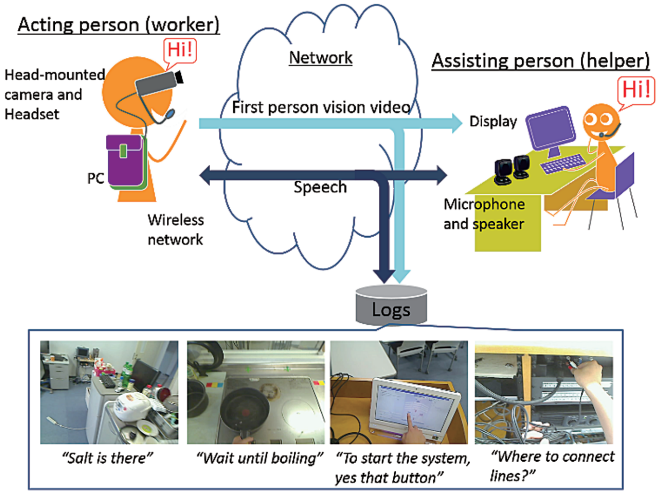


図１：映像対話型行動支援

このような背景から、我々は、映像対話型行動支援における作業者と支援者の振る舞いを調査してきた。まず、作業者と支援者の発話、見る行動、動作などを検出し、それらを時系列のパターンとして記述する。この時系列のパターンからデータマイニングの手法を用いて、頻出する組み合わせ（以下、頻出パターンと呼ぶ）を抽出する。これにより、例えば、「作業方法を説明する発話」、「見回す行動」、「手による作業」が近接して現れるというようなパターンが多く抽出される。

このような頻出パターンの出現頻度やタイミングを統計的に調べると、作業者と支援者の態度や状況をよく表すことがわかった[1]。例えば、作業者が支援者の指示に依存して行動しているかどうか、支援者が作業者の意図を先読みして指示しているかどうか、などが統計量に現れる。本来ならば発話や行動の意味的な理解を必要とする解析が、このような表層的なパターンの頻度や時間的性質から可能となることが興味深い。また、これらと失敗の起こりやすさとの相関があることも示唆されている。

さらに、比較的短時間のコミュニケーションに対する良さを評価するために、「作業者と支援者の注意が同一の対象に向けられ、その対象に関する言動がタイミング良く現れていること」を「一貫性(coherence)」として考え、それを評価することを試みた[2]。これも、頻出パターンを利用する。頻出パターンの各要素（発話や動作）が統計的に現れやすいタイミングで出現しているかどうかを定量的に評価し、その和や最大値などを指標にする。これも表層的な手がかりであるが、実際のコミュニケーション例に適用してみるとかなり良い指標となっていることが実験で示された。現在は基礎的な研究を行っている段階であり、発話や動作の自動処理を適用していないが、これらを自動化するとともに、リアルタイムでの評価を実装していけば、映像対話型行動支援のための良い支援ツールとなることが期待できる。

[1] 小泉ほか："映像対話型行動支援における頻出パターンに基づいたコミュニケーションの分析", 情報処理学会論文誌 , Vol. 56, No. 3, pp. 1068-1079, 2015
[2] 小泉ほか："映像対話型行動支援におけるインタラクションの一貫性に関する考察", HCG シンポジウム 2014, pp. 49-56, 2014