

研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

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

電気関係研究室一覧

工学研究科

電気工学専攻

複合システム論講座

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野

電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研)

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野(小林研)

電気エネルギー工学講座電力変換制御工学分野(引原研)

電気システム論講座電気回路網学分野(和田研)

電気システム論講座自動制御工学分野(萩原研)

電気システム論講座電力システム分野(大澤研)

電子工学専攻

集積機能工学講座 (鈴木研)

電子物理工学講座極微真空電子工学分野(石川研)

電子物理工学講座プラズマ物性工学分野(橋研)

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(松重研)

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 (松山研)

通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野(吉田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野(守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野(高橋研)

集積システム工学講座情報回路方式分野

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

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(近藤研)

エネルギー応用科学専攻

応用熱科学講座エネルギー応用基礎学分野(野澤研)

応用熱科学講座プロセスエネルギー学分野(白井研)

エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野(長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野(水内研)☆

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野(佐野研)

生存圏研究所

診断統御研究系レーダー大気圏科学分野(山本研)

診断統御研究系大気圏精測診断分野 (津田研)

開発創成研究系宇宙圏電波科学分野(山川研)

開発創成研究系生存科学計算機実験分野(大村研)

開発創成研究系生存圏電波応用分野(橋本研)

京都大学ベンチャービジネスラボラトリー (KU-VBL)

産官学連携センター

研究戦略分野 §

注 § 工学研究科電子工学専攻橋研と一体運営

高等教育研究開発推進センター

情報メディア工学講座情報可視化分野(小山田研)

学術情報メディアセンター

情報メディア工学講座複合メディア分野(中村裕研)

複合システム論講座

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

「生産スケジューリング問題に対する厳密解法の研究」

生産スケジューリング問題とは、工場などの生産工程で作業のスケジュールを作成する問題のことです。より具体的には、与えられた複数の仕事を、どの機械で、どういう順序で、どういうタイミングで処理するのかを、与えられた評価基準を最小化（あるいは最大化）するよう決定する問題です。生産スケジューリング問題は古くから研究されており、機械・仕事・評価基準という3つの属性により細かく分類されています。

生産スケジューリング問題は、基本的には組み合わせ最適化問題として扱うことができますが、そのほとんどがNP困難であり、効率的な厳密解法が知られていません。しかし、近年の計算機性能の急速な向上により、厳密解法による求解が現実味を帯びてきました。また、生産スケジューリング問題の解析という観点からも、最適解を求めることは重要な意味を持っています。そこで、本研究室では、生産スケジューリング問題に対して効率のよい厳密解法を構成する研究を行っています。

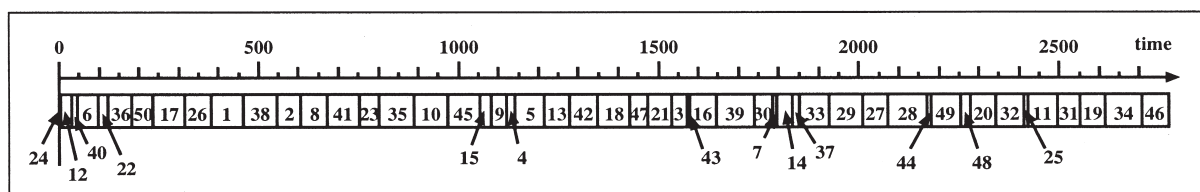
最近の成果としては、

- ・各仕事には処理に必要な時間が与えられている
- ・各仕事に対し、完了した時刻に応じてコストが発生する（コスト関数の形状は任意）
- ・コストの総和が最小となる仕事の処理順序を求める

という一般的な1機械スケジューリング問題に対する厳密解法が挙げられます。この解法により、従来は最適解を求めることができなかつた規模（仕事数）の問題でも解を求めることが可能となりました（従来の解法で求解可能な最大規模の問題と比較すると、数百倍高速です）。

この解法ではまず、組み合わせ最適化問題として数理モデル化した問題の制約条件をラグランジュ緩和することでより解きやすい緩和問題を生成し、これに動的計画法を適用してコストの総和の下界値を求めます。同時に、効率のよい近似解法を用いて上界値を求めます。その後、いったん緩和した制約を緩和問題に順次戻していくことにより下界値を改善していくとともに、上界値も更新していきます。そして、最終的には下界値と上界値が一致して最適解が求まります。

現在は、解法のさらなる効率化を行うとともに、より広いクラスの問題に適用できるよう拡張を行っているところです。今後は、この解法を広く使ってもらえるよう、作成したプログラムを公開していく予定です。



50仕事問題の最適解の例。横軸は時間で、箱は仕事が処理されている時間帯を表します。解は $50!$ ($\approx 3.0 \times 10^{64}$) 通りありますが、この問題の最適解は1秒以内に求まります。

参考文献

- [1] S. Tanaka, S. Fujikuma and M. Araki: An exact algorithm for single-machine scheduling without machine idle time, Journal of Scheduling 掲載予定
- [2] S. Tanaka and S. Fujikuma: An efficient exact algorithm for general single-machine scheduling with machine idle time, IEEE CASE 2008, pp. 371-376 (2008)

電気エネルギー工学講座生体機能工学分野（小林研究室）

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/lab03/>

「脳機能計測および神経線維束追跡の高精度・高分解能化を目指した拡散強調画像法における撮像パラメータの最適化」

一定の磁場中では原子核はある軸を中心に自転（スピン）しているものと考えられる。その核の回転周波数と同じ周波数の回転磁場を加えると、原子核は回転磁界のエネルギーを吸収して励起状態となり、回転磁場を加えるのをやめると今度は吸収していたエネルギーを同じ周波数の電磁波として放出しながら定常状態に戻る。これが磁気共鳴現象である。磁気共鳴画像法（magnetic resonance imaging：MRI）は、この現象を用いた画像法であり、医療の現場で画像診断に広く用いられている。

このMRIは、医療分野では一般に水のプロトンを対象として撮像が行われるが、体内の水は絶えずブラウン運動により自己拡散している。MRIの計測手法の一つに、この拡散現象の大きさや方向を強調した拡散強調画像法（diffusion weighted imaging：DWI）が提案されており、腫瘍の検出、脳神経線維束の追跡、導電率の計測など様々な分野に応用されている。腫瘍検出や脳神経線維束の追跡では、細胞膜などの組織により水の拡散が制限されることを利用しており、導電率の計測では拡散の大きさが導電率に比例することを利用している。脳神経線維束の追跡では、複数の方向のDWIを撮像することにより拡散の異方性や線維の方向を計測することもできる。また、DWIの撮像には複数のパラメータ設定が可能であるが、これらのパラメータと得られる信号の関係は非常に複雑である。

本研究室では、脳機能の解明および工学応用を目指し、脳波計測をはじめとする様々な脳機能計測を用いた研究を行っているが、それらの研究の一つとしてDWIを応用した脳機能計測法および脳神経線維束の追跡について研究を進めている。MRIを用いた脳機能計測法は機能的MRI（functional MRI：fMRI）と呼ばれ、空間分解能に優れているが時間分解能が十分ではなく、より時間分解能の高い手法が期待されている。このような手法の一つとしてル・ビアン博士らのグループによりDW-fMRIというDWIを応用した手法が発表された [1] が、信号対雑音比などの問題により利用可能な範囲が制限されている。我々は、脳活動領域における信号変化の強調ひいては脳機能計測精度向上のために、DWIの撮像パラメータの最適化により画像コントラスト向上を目指して研究を行っている。

また、上記DW-fMRIやfMRIでは脳内における複数の活動領域を調べることができるが、それらの活動領域間の機能的結合の評価は脳内の情報処理の解明にとって重要であり、本研究室では、この機能的結合の評価方法の一つとして脳神経線維束の追跡法についての研究している。本手法は神経線維により拡散が制限されるのをDWIにより計測し、その異方性情報から神経線維束を追跡する（図1） [2、3]。さらに、線維追跡の精度向上を目指した撮像パラメータの最適化を進めると共に、線維追跡時に問題となる線維束の交叉等に対応した追跡方法の開発などを行っている。

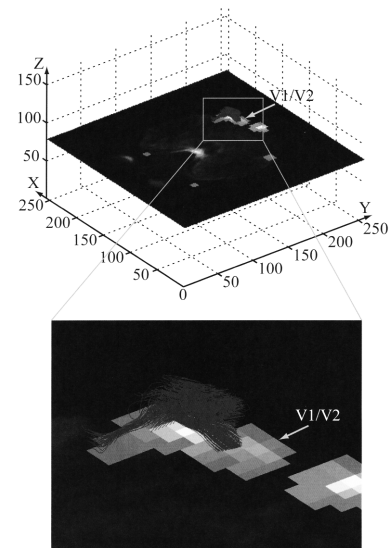


図1. 拡散強調画像法を用いた神経線維追跡（一次/二次視野からの追跡結果の例）

1. D. Le Bihan et al, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 103 (21), pp.8263-8268, 2006
2. 笈田 武範 他, 電子情報通信学会論文誌, J91-D (7), pp.1886-1894, 2008
3. T. Kobayashi et al, Proc. 30th Annual International IEEE EMBS Conference, pp.5498-5501, 2008

電気システム論講座電気回路網学分野（和田研究室）

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

「半導体集積回路と回路基板のEMC設計：信号／ノイズ制御技術」

近年のデジタル化されたエレクトロニクス・システムにおいては、デバイスや機器の高機能化・高速化に伴い、回路設計や高速信号の問題に加えて、不要電磁波放射と電磁干渉などの電磁的なEMC (Electromagnetic Compatibility) 問題が発生し、従来の設計技術のみでは要求される性能を実現することが困難になっている。

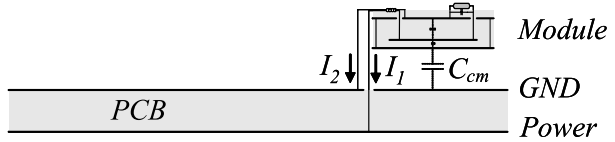


図1. 集積回路モジュール・回路基板間の結合

半導体の多ピン・パッケージを回路基板に実装する際の高周波ノイズの閉じ込め（デカップリング）設計においては、動作周波数の高周波化により、特に周波数が数100MHzを超える領域では、配線等の電氣的接続（インタコネクション）系における数pFの浮遊容量やnHオーダーのわずかな寄生インダクタンスによる容量性・誘導性の結合が回路の基本的特性に大きな影響を及ぼす。さらに問題になるのは、この程度の寄生結合は、たとえばLSIパッケージ単独、あるいはプリント回路基板（PCB）単独などの中で存在するだけでなく、図1に示すように階層を越えて「半導体チップとパッケージ」間、「パッケージ・モジュールと回路基板」間などにも存在する。すなわち、従来は個別に開発されていた「チップ・パッケージ・回路基板」などが、階層間相互結合で意図せずして電磁結合により結ばれてしまうため、個別設計では問題が無かったはずのものが、実装により相互に影響を及ぼして期待通りの特性を示さない、ということが起こる。本研究室では、動作周波数が数100MHz～1 GHzを超える回路でこのような高周波電磁波による不要結合を制御して回路設計を行う方法につき研究を行っている。

図1に示すように、回路基板（PCB）の電源/GND面と実装したモジュールが一对の電源/GNDピンで接続されている状況を考える。このとき、もしモジュール・PCB間の寄生容量 C_{cm} が無視できるのであれば、図2の電流 I_c は流れず $I_2 = -I_1$

で、不要な電磁雑音の漏れ出しは無いはずである。しかし、図1の寄生容量 C_{cm} が無視できない場合には、電流 I_1 と I_2 の大きさは等しくないことになり、不要な電流 I_c による電磁放射（EMI）の増加が予想される。この C_{cm} (5pF) を含む図2の等価回路により電流を評価し、さらにPCBからの放射電界強度を見積もった結果を図3に示す。550MHz付近における不要放射の特性は実験結果を良く説明しており、デカップリングに用いるインダクタの位置の違いにより、20dB程度の差が出ることがシミュレーションにより確認された。

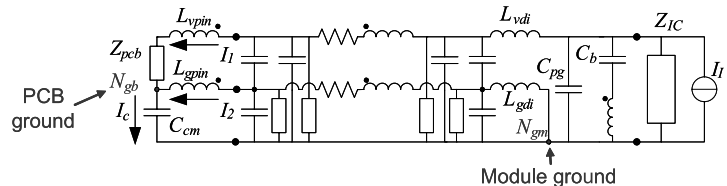


図2. モジュール・回路基板間の寄生結合を含む等価回路

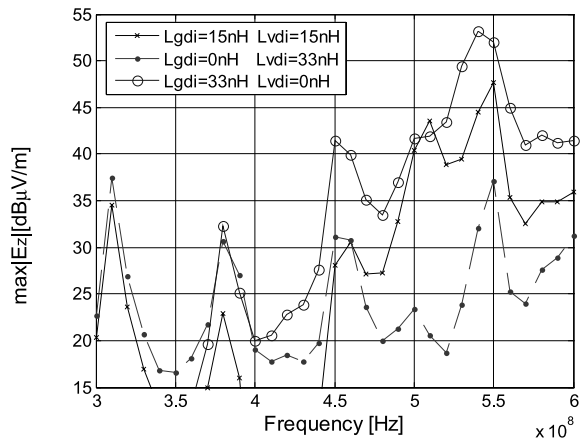


図3. 遠方放射電界のシミュレーション結果

参考文献

U. Paoletti, T. Hisakado, and O. Wada: "Effect of Package Parasitics on Conducted and Radiated Emission with Mixed-Mode Analysis," 2008 Asia-Pacific Symp. Electromagnetic Compatibility, Singapore, May 2008.

電気システム論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）

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

「2軸型空圧人工筋アームの軌道追従制御」

近年、医療、介護、福祉の現場における労働負担を軽減するための、ロボットの開発が注目を集めています。とくに空気圧を駆動源とするロボットには、油圧や電動モータを駆動源とするロボットにはない軽量、柔軟、清潔という特長があるため、上記のような人とロボットが密接に関わり合う環境下において積極的な導入が試みられています。しかしながら、空気圧の圧縮性に起因する剛性の低さにより、空気圧系に対するフィードバック制御系の設計は一般に容易ではありません。以上の背景のもと本研究室では、制御理論の応用に関する取り組みの一つとして、2軸型空圧人工筋アームの高精度軌道追従制御に関する研究を行っています。

図1に、2軸型空圧人工筋アームの写真を示します。2軸型空圧人工筋アームは、台座に固定された軸1を中心に水平面上で回転する長さ0.35mのリンク（1軸リンク）と、軸2を中心に水平面上で回転する長さ0.36mのリンク（2軸リンク）の2本のリンクを有しています。それぞれのリンクには、図1で黒色のゴムチューブ状に映る、空圧人工筋とよばれる空気圧アクチュエータが取り付けられています。空圧人工筋は流入する空気の流量によって伸縮する機能を有しており、これらに流入する空気の流量を変化させることでリンクは水平面上で回転運動します。一方、アームの角度は、各軸に取り付けられたロータリエンコーダで検出することが可能です。これらのことを利用して、2軸リンクの先端部分（アームの手先）を所望の目標軌道に追従させるようにフィードバック制御を行なうことが、本研究の目的です。なお、図1に示すように、2軸型空圧人工筋アームは平衡状態において1軸に対して2軸が60度傾いた状態となるように設計されています。

高精度の軌道追従制御を達成するために、本研究ではまず当研究室で開発されたプラント変数最適ロバストサーボ系の設計理論を適用することを考えました。とくに制御対象のモデリングの際に工夫を施し、プラント変数（すなわち制御対象の状態変数）の物理的意味合いに基づいて合理的な制御系のチューニングが可能となるようにしました。さらに、追従性能の向上を期して、アームの角度情報のみならず空圧人工筋内部の圧力情報を積極的に活用した制御系の設計について研究を進めました。このようにして得られた制御系をもとに、軌道追従制御実験を行った結果を図2に示します。目標軌道は、水平面内に適切に設定されたXY平面上の、一辺の長さ0.2mの正方形です（図1も参照）。移動速度は、正方形の各頂点間を1秒で移動するものとしています。図2より、X軸に沿う目標軌道を追従する際に若干の応答の乱れが生じるものの、ハードウェアの限界に迫る高精度の軌道追従制御が達成できていることが確認できます。

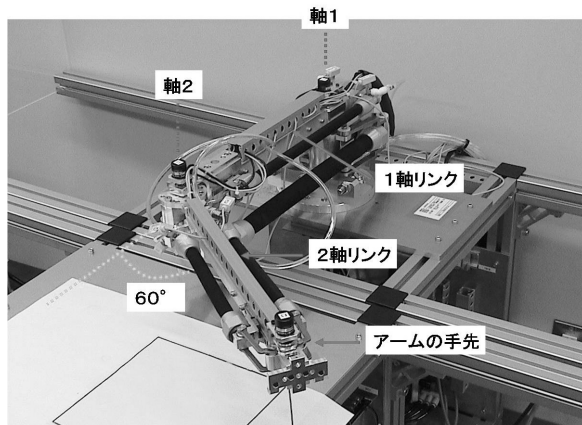


図1. 2軸型空圧人工筋アーム

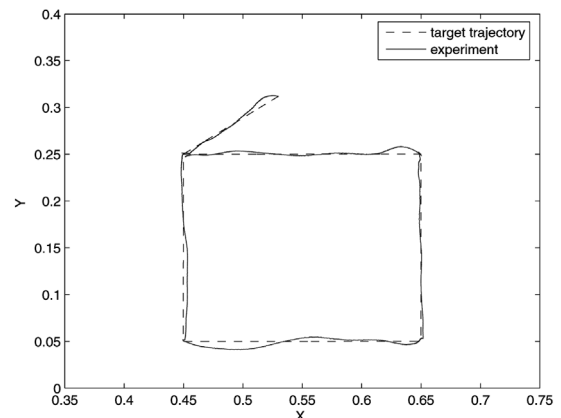


図2. 軌道追従制御の実験結果

電気システム論講座 電力システム分野（大澤研）

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~ohsawa/index.html>

「参照モデルを用いた同期発電機動揺方程式と静止型無効電力補償装置による安定化制御」

電力は現代社会を支える最も重要なエネルギーであり、電力システムは最も複雑な人工システムの一つである。電力システムにはなくてはならない構成要素の同期発電機に関して、基本的な問題は、モデリングとそれに基づく動揺抑制および安定化制御が挙げられる。なぜなら、発電機の動揺とは発電機から発生する交流電圧電流間の位相ずれによる現象である。発電機の動揺が電力品質を低下させるだけでなく、時に発電機に電氣的、機械的な損傷を引き起こし、電力システムの安全運行にも重大な影響を与える。その中、最悪の場合は発電機動揺が激しさを増し、最終的に発電機が同期運行から脱調してしまう。

同期発電機のモデリングには一機系統と多機系統がある。前者は一機の発電機を他の発電機や電気設備から切り離し、それらの発電機や電気設備をまとめて一つの電圧を一定とした仮想な無限大母線を介して関連する形とみなせ、この発電機の動特性を動揺方程式で描くモデリングである。後者は各発電機の電氣的、機械的な関係をそのまま用いて発電機の動特性を複数の動揺方程式で表現する手法である。一機系統は数式的に簡単であるが、無限大母線は現実には存在しないため、それに基づく解析、設計が有効性に乏しい。多機系統には現実性のあるものの、多数の系統要素が複雑に絡み合い、理論解析や数値計算に不便である。当然ながら、多機系統を用いた制御も煩雑になる。本研究は各モデルを融合し、まず一機系統を参照モデルにし、この参照モデルを介して多機系統の一機発電機の動特性に外力外乱と係数摂動を取り入れることによって、この発電機の動特性を描く。特徴としては、電力システムに参照モデルの存在性及び正確性が必要とならない。また、複数の発電機からの影響をそのまま考慮せず、擾乱や摂動で模擬する。

静止型無効電力補償装置（SVC: Static VAR Compensator）とはリアクトルやコンデンサの電流をサイリスタという半導体素子で制御することにより、無効電力の発生や吸収を行う装置である。リアクトル電流を制御した場合は遅相、コンデンサ電流を制御する場合は進相となる。構造上、サイリスタ制御リアクトル（TCR: Thyristor Controlled Reactor）やサイリスタスイッチトキャパシタ（TSC: Thyristor Switched Capacitor）の二種類ある。実際のSVCがTCRとTSCの並列で構成される。図1は多バンクSVCの概念図を示す。ここで、TCRとTSCについて簡単に説明する。TCRはリアクトルの電流位相を制御することによって遅れ無効電力を変えることができる。位相制御のため、TCRの電流波形には高調波が含まれるので、高調波フィルタと組み合わせて使用することが一般的である。一方、TSCはサイリスタが単なるスイッチの働きで無効電力を制御する。位相を制御しないため、高調波が含まれない。

電力システムではSVCを無効電力の補償装置として利用するのは殆どである。本研究も例外ではない。具体的には、安定化したい発電機にSVCを接続し、有効・無効電力のバランスを維持させ、動揺を抑え、多機系統において全体的にロバストのある安定度を保つ。研究の理論基礎はリアプノフ安定論であり、それによって参照モデルに基づく同期発電機動揺方程式を用いたSVCの安定化フィードバック制御を導かれていた。提案されたSVCの制御は本質的に非線形且つ分散型でさまざまな制御方式で実現できる。例えば、非線形Bang-Bang制御方式、直接デジタル制御（DDC: Direct Digital Control）方式、位相平面分割（PPP: Phase Plane Partition）制御方式が挙げられる。どの制御方式をとっても、いわゆる等面積法で対処できない制動巻線のダンピング、モデルの不確かさが考慮できる。同時に、発電機に対する一部の過渡・定常性能指標も設定できる。例えば、発電機の送電角という発電指標をSVC操作により設定できるのは提案法のメリットの一つである。図2は例題発電機で提案法を適用したSVC安定化制御で発電機動揺が抑えられた様子を数値シミュレーションで示す。

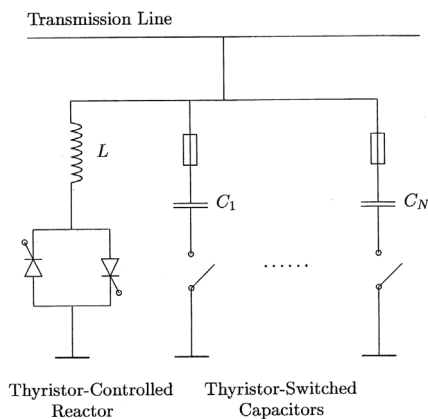


図1. 代表的な多バンクSVCの概念図

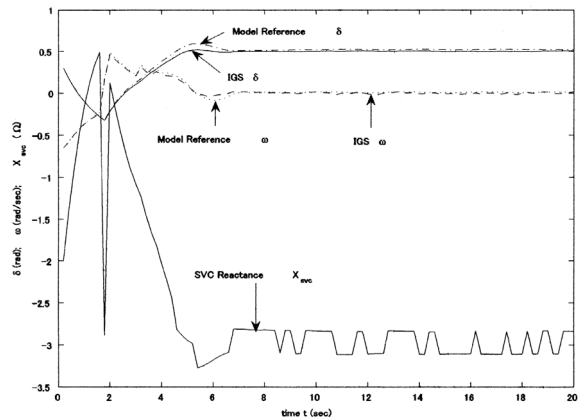


図2. SVC制御による発電機動揺抑制

電子物理学講座 プラズマ物性工学分野（橋研究室）

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

「人工的媒質中のプラズマ現象とその応用」

従来、プラズマ生成の媒質として均一なガス、とくに低圧力下のガスが主に用いられてきました。近年では、その動作ガス圧を大気圧まで引き上げて、大掛かりで高価な真空装置を用いずに簡便にプラズマを生成する技術が研究開発されるようになってきています。しかしなお、大面積あるいは大容積で均一な放電プラズマを得ようという方向での研究が主流になっている状況です。そこで、少し発想を転換して、構造があるプラズマに実用的に有効な特徴をもたせることができないか、あるいは、その構造を自在にデザインできないだろうかということを考えるようになりました。その契機になったのが、1994年頃に進めていたクーロン結晶の実験です。薄膜形成やエッチングに用いられる分子ガスの反応性プラズマ中では、微粒子が生成されてプラズマ中に捕捉され、プロセスを妨害したり劣化させたりするために、それを防止する方法が研究されてきました。しかし、その捕捉された微粒子の成長を長時間観測している過程で、微粒子がプラズマ空間中であかかも固体の結晶格子のように配列している現象を発見しました（図1）。それは、多数の電子が附着して負に帯電した微粒子が、背景となっている正イオンの海の中で、互いのクーロン力で相互作用している結果ですが、このような微粒子群を含む複雑な構造のプラズマが新しい研究の対象として見えてきました。そのことからヒントを得て、元々小さなプラズマを多数配列させると、導電率と誘電率が空間的に変調された人工的な構造を構成でき、その構造の格子定数と同等あるいは波長の長い電磁波との相互作用において新しい機能を発現できるのではないかと、という着想に発展してきました。その方向での研究として、最近ではプラズマフォトニック結晶や、さらにプラズマメタマテリアルというものを、如何に作成して、どのような機能を引き出すか、ということを追求しています。

構造を有するプラズマという概念の中には、プラズマを生成する媒質そのものに不均一（heterogeneous）なものを利用するという発想も含まれます。その例としては、境界をもつ異種ガスの不均一系、ガスと液体またはガスと固体の2相で構成される系などが考えられます。上述の微粒子プラズマもその一つです。異種ガスの不均一系としては、大気中へ噴出する希ガスプラズマジェットもその例に該当します。低周波駆動のマイクロプラズマジェットの挙動に関して、弾丸状のプラズマの塊がパルス放電に同期して、ガス流速の3桁程度速い速度で飛び出しているという現象を解析し、その機構が正コロナ放電の電離波の伝播と同様であることを解明しました（図2）。ガス-液体の2相混合系の例として、水中の電気分解で生成したマイクロな気泡を用いた放電プラズマ生成について前年度に報告しています。現在では、さらに積極的に、マイクロ・ナノバブルを水中に導入した気液混合媒質中での放電現象の研究を進めています。バブルのサイズを極限まで小さくしていけば、量子統計的に密度が揺らいでいる超臨界流体につながって行くことになり、プラズマ生成の対象となる媒質がさらに広がって行きます（図3）。

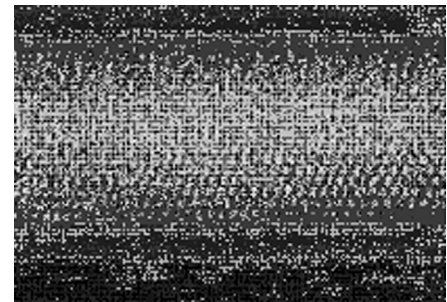


図1. プラズマ中のクーロン結晶

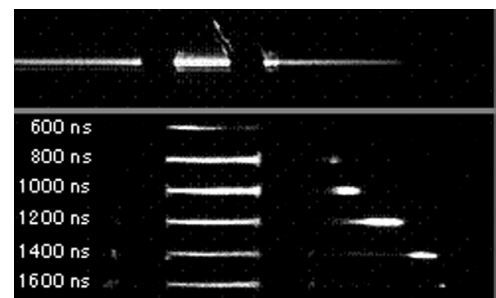


図2. マイクロプラズマジェットの時空間挙動

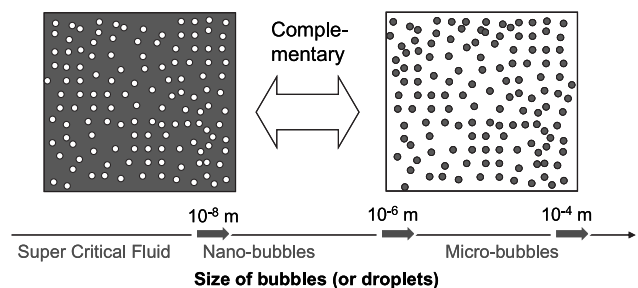


図3. プラズマ生成用気液2相混合媒質の例

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野（松重研究室）

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

「EE for EE: 京都電気自動車（Kyoto-Car）プロジェクト」

松重研究室では、ナノサイエンス・テクノロジー、有機系・分子エレクトロニクス分野に加え、新たな研究テーマとして環境に優しい電気電子工学（EE for EE：Electrical Engineering for Energy & Environments）に取り組んでいる。具体的には、電気自動車、太陽熱・光活用製品の開発、および鉛フリーハンダなどであるが、ここでは Kyoto-Car Project@VBL を紹介する。元々は、工学研究科、電気系が桂キャンパスに移転した事に由来する。桂地区に存在する京都市立芸術大学、国際日本文化研究センターと連携して、先端技術と伝統文化、芸術が融合した「京都Neo西山文化」を創成するため種々の活動を行って来た。その一環として、京都議定書発祥の地、京都から環境に優しい電気自動車、しかも京都の伝統文化等を織り込んだ Kyoto-Car を提案し、これまで1/10サイズのコンセプトカー（インホイールモーター、京友禅の外装）を製作し、清水寺、G8外相会議展示場等で記者発表した。次に、市販のコムス（トヨタ車体製）を改造した実車可能で自然素材を活かした京都風木型、竹籠（愛称 Bamgoo）電気自動車を製作し、京都環境フェスティバル等で公開した。また、シニアや女性でもまた坂道でも駆動可能な「京都風電動アシスト人力車」も開発し、嵯峨野の鳥居本で公開した。これらはVBL等京大関係者だけでなく、ロボガレージの高橋氏を含む企業・ベンチャー・研究所等様々な協力者とともに製作、推進してきたものであり、その実物は京都大学総合博物館（平成21年3月末までの予定）や各種展示会等で公開している。

21世紀の地球的課題としての「エネルギー・環境」分野で電気電子の貢献出来る場面は非常に多くある。バッテリー、モーター、走行システム等電気が活躍する分野であり、まさに電気自動車はその最たるものである。既存の自動車関連分野の企業だけでなく、電気系・部材の企業との有機的連携のもと、国内だけでなく中国を含むグローバル展開を目指している。京都・関西エリアが一つの環境・電気自動車のモデルタウン・地区となることを期待している。電気自動車に関しては、現在、各種プロジェクトとも連携して、高効率太陽電池の併用、新バッテリーシステム等の研究開発、さらには電気自動車の早期の普及を目指して、情報活用、プラグイン施設の設置を含めた社会インフラ整備を促進する活動を行っている。今後事業化を目指すとともに、興味、関心のある方の参画を期待している。



写真1. Kyoto-Car コンセプトカー @G8外相会合展示会（京都国際会議場）



写真2. 京都風木型、竹籠電気自動車（Bamgoo）、および電動アシスト人力車@京都環境フェスティバル（パルスプラザ）

詳細は関連サイトを参照のこと。松重研究室：<http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

京都Neo西山文化プロジェクト：<http://www.saci.kyoto-u.ac.jp/iio/neo/>

Kyoto-Car Project: <http://www.kyoto-car.jp/>

量子機能工学講座 光量子電子工学分野（野田研究室）

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/%7Elab05/>

「青紫色 GaN フォトニック結晶面発光レーザの電流注入発振

2次元フォトニック結晶レーザは、どのような大面積であっても原理的に単一縦・横モード発振可能であり、かつ光出力は、フォトニック結晶自身の回折効果により、基板面に垂直な方向に取り出すことが可能という優れた特長を併せもつ。これは、2次元フォトニック結晶におけるバンド端における群速度零効果、すなわち2次元面内を様々な方向に伝播する光波が互いに結合し、2次元大面積の定在波状態が形成されることに基づく。ビームパターンは2次元面内の電磁界分布のフーリエ変換で表されるため、フォトニック結晶の構造を様々な方向に変化させることにより、様々なビームパターンを得ることができ。例えば、ドーナツビームなどの特徴的なビームを得ることも可能で、これは波長より格段に小さなスポットまで絞ることの出来る光源として動作することが期待される。さらに、偏光の揃った綺麗な真円ビームを出射することも可能で、大出力の面発光半導体レーザ光源としての可能性も併せもつ。このように、フォトニック結晶面発光レーザは、従来の半導体レーザの概念を越えた全く新しい半導体として動作するものと期待されている [1]。

しかしながら、これまでのフォトニック結晶面発光レーザは、電流注入による動作波長が近赤外域（～980nm）に限られていた。もちろん、この波長においても、様々な応用が期待されるが、もし発振波長を青紫色域まで、短波長化することができると、その応用可能性は、格段に広がるものと期待される。例えば、次々世代の高密度光ディスク用光源や、極微小物質の観測・操作用光源として活躍できるものと期待される。また、単一縦横モードで、かつ偏光まで制御した大出力青紫面発光レーザとして動作が期待され、かつ2次的にアレイ化することも可能である。つまり、情報記録・処理、レーザ加工、ナノバイオ等を始めとする様々な分野における新しいキー光源としての展開が期待される。

今回、GaNを材料として用い、独自のフォトニック結晶形成技術を開発することにより、レーザ内部に、良質のGaN/空気2次元フォトニック結晶を形成することに成功し、青紫色領域で、初めてフォトニック結晶面発光レーザの電流注入動作に成功した [2]。図1は、デバイスの発振の様子（左：無通電時の表面写真、右：発振後の近視野像）を示す。中央部が電極（100mmx100mm）で、大面積での青紫色発振が得られていることが分かる。図2は、発振時の遠視野像（ビームパターン）を示している。大面積コヒーレント発振を反映して、非常に拡がり角の小さなビーム（ $< 1^\circ$ ）が得られている。また、ビーム形状は、特徴的なドーナツビームが得られていることが分かる（ビームパターンは、フォトニック結晶の構造を変化させると変えることができる）。これにより、上述の様々な応用に向けて、重要な一歩を踏み出すことができたといえる。

- [1] 例えば、S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada, A. Chutinan, and M. Mochizuki, *Science*, **293** (2001) 1123. E. Miyai, K. Sakai, T. Okano, W. Kunishi, D. Ohnishi, and S. Noda, *Nature*, **441** (2006) 946.
 [2] H. Matsubara, S. Yoshimoto, H. Saito, Y. Jianglin, Y. Tanaka, and S. Noda, *Science*, **319** (2008) 445. (published on-line 20 Dec. 2007; 10.1126/Science. 1150413)

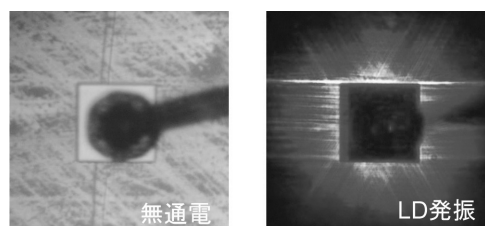


図1. デバイスの発振の様子（左：無通電、右：発振後の近視野像、中央部が電極で、大きさは100 μm \times 100 μm ）

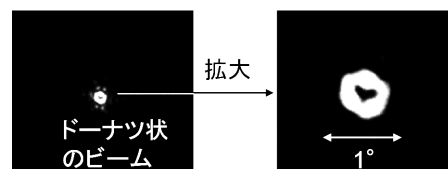


図2. 透視野像（ビームパターン）。大面積発振を反映して、非常に拡がり角の小さなビームが得られている。また、ビーム形状は、特徴的なドーナツビームが得られている。

量子機能工学講座 量子電磁工学分野 (北野研究室)

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「フォトニック結晶ファイバの4光波混合を利用した光子対生成と2光子干渉」

光子対は光を構成する量子である光子2つが組になったもので、量子エンタングルメントという量子固有の性質をもつ。量子エンタングルメントに関する研究は、ベル不等式の破れの検証といった量子力学における基礎的な問題だけでなく、量子テレポーテーションなど量子情報処理の分野で広く利用されている。光子対の生成は3光波混合を利用した生成法と4光波混合を利用した生成法に分けられる。3光波混合を利用した光子対生成は、BBO結晶などの非線形光学結晶にポンプ光を入射することで光子対を生成する。一方、4光波混合を利用した光子対生成も近年盛んになってきた。3光波混合においては、ポンプ光子1つが、光子対に変化するが、4光波混合では、ポンプ光子2つが光子対に変化する。これは、同じポンプ光を使う限り、後者の方が短波長の光子対の生成に有利であることを意味する。

4光波混合の研究の多くは通常の光ファイバを利用しているが、これでは波長が通信波長帯に限られる上に、非線形性も低いため生成効率も悪い。しかし、分散制御の自由度の大きいフォトニック結晶ファイバを用いることでより短波長の光子対を作ることが可能であり、強い光閉じこめ効果から高い非線形性も期待できる。我々は、760nmにゼロ分散波長をもつフォトニック結晶ファイバを利用した。ポンプ光をフォトニック結晶ファイバに入射し出力される光スペクトルの分析を行ったところ、ポンプ光波長をゼロ分散波長よりわずかに大きくしたときに、光子対がポンプ光の波長とは大きく異なる波長領域に出現することが、分光器のスペクトルの解析よりわかった。後の実験では、ポンプ光の波長を760.4nm、パワーを4mWとしたときに得られる、660nmと900nmの光子対（生成レートは約2,000個/秒）を利用した。

次に生成された光子対の時間相関を測定するために、図1のような光学系で2光子干渉実験を行った。2光子干渉実験を光子対に対して行うと、2つの光子がその和のエネルギーをもつ1つの量子（バイフォトン）のように振る舞う。その結果、4光波混合を利用して生成した光子対に対しては、ポンプ光の波長の半分の周期の干渉縞が得られる。光子対間に量子的な時間相関が存在する場合には、干渉縞の最大値 A_{max} と最小値 A_{min} を用いて $(A_{max} - A_{min}) / (A_{max} + A_{min})$ で定義される明瞭度が100%になることが知られている。実験結果を図2に示す。期待されたように、ポンプ光の半分の周期（380nm）の2光子干渉縞を観測することに成功した。また、明瞭度は古典限界50%を超える83%であり、光子対間に古典電磁理論では説明のつかない量子相関があることを実証することができた。この2光子干渉という高分解能の干渉法は、回折限界を超える新しいリソグラフィ技術（量子リソグラフィ）を可能にするものとして期待されている。

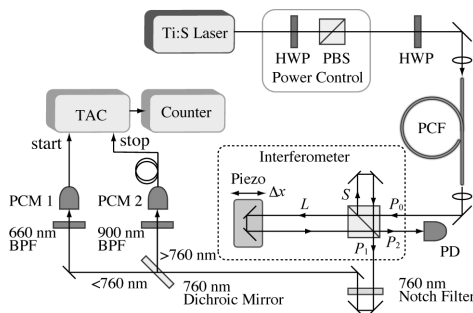


図1. 2光子干渉の実験系

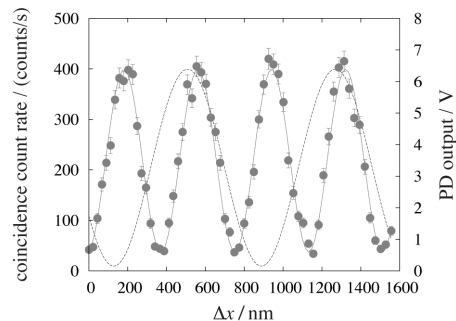


図2. 観測された2光子干渉（丸印）と参照用のポンプ光の1光子干渉（点線）

- [1] T. Nakanishi et al. : J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 印刷中
- [2] A. N. Boto et al. : Phys. Rev. Lett. 85, 2733 (2000).

知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室） 「陰影を用いた3次元光源環境推定」

かがり火のように、発光部が複雑な3次元的空間分布を持ち、その分布形状が時々刻々と不規則に変化する光源によって照らされた環境には、人を惹き付ける魅力がある。事実、洋の東西を問わず、炎の下での祭りや催しが盛んに行われており、日本でも薪能といった文化が継承されている。このような光源の情報（放射強度や3次元位置、広がり）を画像から求めることが本研究の目的である。

画像から光源を推定する方法には、光源を直接撮影する方法と何らかの参照物体を環境中に設置してその陰影を観測して推定する方法の2つに分けられる。それぞれに利点や欠点があるが、単純にこれらの方法を用いて炎のような光源、つまり3次元的広がりがあり半透明で時々刻々と放射強度が変化する光源の3次元分布を求めることは容易ではなかった。

本研究では、近接点光源の集合を用いて複雑な3次元的空間分布、配置を持つ光源群をモデル化し、「スケルトンキューブ」（図1中央の立方体枠）と名付けた参照物体表面の陰影（shading and shadows）を手がかりとして、上記のような複雑な3次元光源環境を推定するアルゴリズムを開発した。

まず、N個の点光源の3次元分布（位置）が与えられた場合、点光源の放射強度 $L_{L1} \sim L_{LN}$ と観測画像中に写された参照物体上のM個の点 $x_1 \sim x_M$ の明度 $I(x_1) \sim I(x_M)$ との関係は式1によって表わされる。Iは撮影画像から分かり、点光源の3次元位置が既知であればKを計算できることから、式1をLについて解けば光源の放射強度を得ることができる。

$$\begin{bmatrix} I(x_1) \\ I(x_2) \\ \vdots \\ I(x_M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{M1} & K_{M2} & \cdots & K_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{L1} \\ L_{L2} \\ \vdots \\ L_{LN} \end{bmatrix}$$

$$I = KL$$

式1. 陰影と光源の関係式

そこで問題は、Lつまり光源の3次元分布をいかにして求めるかということになる。本研究では、以下に述べる方向・距離の二段階探索によって推定する。まず、参照物体を覆う適当な大きさの球面上に点光源群を仮定し、その半径の大きさを段階的に変えながら放射強度を推定すると、真の光源が存在する方向に強い放射強度を持つ光源分布を得ることができる。次に、各方向に対して直線状に点光源群を配置して放射強度を推定することによって、最終的に光源の3次元分布つまりLを得ることができる。

また、光源の放射強度推定、つまり式1をLについて解く際に、参照物体が持っている幾何学的特徴を無視して単純な数値計算を行うと、偽の光源が多く現れてしまい真の光源との区別がつかなくなってしまうため、幾何学的特徴を活かした部分計算を複数回行う必要があることが分かった。つまり、大局的数値解法では解けない問題が局所的解法の組み合わせによって解けることを示した点でも、数学的に興味深い問題となっていることが分かった。

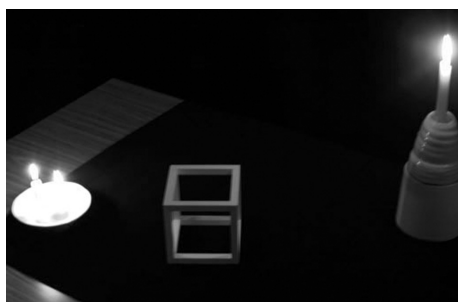


図1. 実験環境



図2. 生成したCG画像

通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研究室）

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

「リソース協力拠出型ネットワークのためのインセティブメカニズムEMOTIVER」

P2Pをベースとしたコンテンツ共有・マルチメディア配信の利用、ブログや動画共有サービスを通じた個人の情報発信が盛んに行われるようになりました。これは、多数のユーザが1点のサーバからリソースをダウンロードする中央管理型からユーザが少しずつリソースを拠出し合う協力拠出型へのシフトを意味します（図1）。このような協力拠出型は、数万、数百万のユーザ数を収容できるスケーラビリティと高い耐障害性を有していますが、参加ユーザによる貢献行動が不可欠です。図2のP2Pコンテンツ共有の例では、コンテンツを提供する際に通信帯域やバッテリーを消費するためユーザは心理的な不満度（コスト）を被ることになり、結果、多くのユーザが貢献行動を行わないフリーライダーとなってしまいます。そこで、貢献行動に報酬を付与するインセンティブメカニズムの導入が行われています。しかし、物理ネットワークを覗いてみると、ユーザ間に端末性能や通信機能の差があるためユーザのコストは多様であり、従来方法では適切な報酬配分が困難です。そこで、我々はEMOTIVER（Everyone's MOTivated by incentiVE Reward）という新たなメカニズムを提案しています。

図3にそのメカニズムを示します。ユーザは自身の利得（報酬-コスト）を最大にする貢献度（努力水準）を選択することになりますが、EMOTIVERでは、対話型エージェントの提示する努力水準に従って実際に行動を行い結果的に得られた満足度をフィードバックするだけで、望ましい努力水準を発見できます。外部評価機構はユーザの行動を努力水準と実績によって評価します。努力水準は例えばキャッシュ容量やサービスに接続し待機する時間で、実績はアップロードしたファイルの数・サイズなどネットワーク品質の向上に直結するものです。また、外部評価機構はサービスポリシーに応じた報酬配分アルゴリズムを備えており、これによって各ユーザへの報酬量を決定します。

以上のメカニズムの特長は、ユーザを学習の負担から解放し最適な努力水準へと正確に導く学習エージェント機能と、努力水準と実績を定義するだけで様々な協力拠出型ネットワークに適用できる汎用性です。また、メカニズムの性能を決める報酬配分アルゴリズムは、我々のこれまでの研究から、制御目標（フリーライダーを減らしたいのか？平均的貢献度を増やしたいのか？など）と支配的なコスト（バッテリー駆動のため待機のコストが大きいなど）の2つに基づいて設計を行うことが効果的であると分かっています。今後はユーザ間の比例的公平性を達成する最適性の高いアルゴリズムの設計や大規模ネットワークでの実装実験を進めていきます。

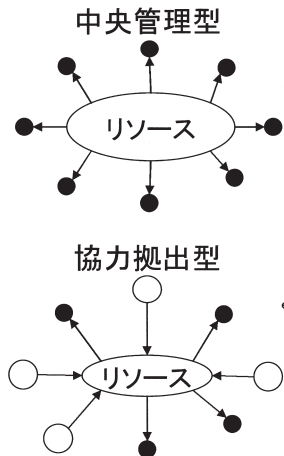


図1. リソース拠出形態

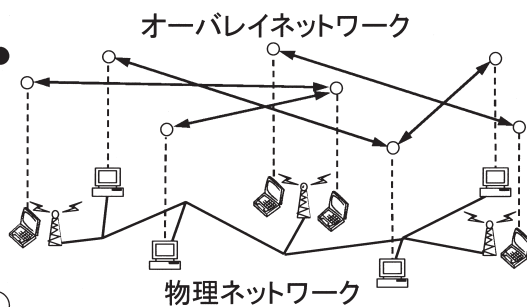


図2. P2Pコンテンツ共有

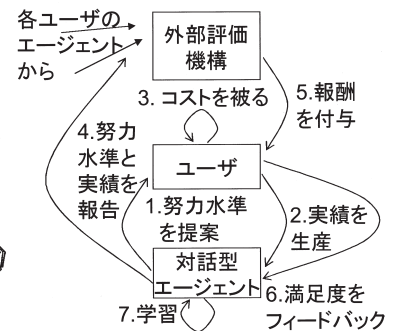


図3. EMOTIVERのメカニズム

集積システム工学講座 情報回路方式分野

<http://www.lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp>

「非同期単精度浮動小数点除算器とそのFPGA上への実装」

デジタルVLSI (特にASIC) で順序回路を実現する場合、単相クロックの同期式順序回路とするのが一般的である。その主な理由は、設計方法論が確立しており、各種CADツールを用いた設計自動化が進んでいることにある。しかしながら、同期式システムには次のような問題点もある。

1. 高い周波数のグローバルクロックをチップ全域に分配する必要があるため、そのクロックツリー自体や末端に接続されているフリップフロップ群によって消費される電力が非常に大きい。
2. プロセス微細化に伴うチップ内での遅延ばらつきによってクロックスキューが増大すると、設計マージンを大きくとる必要性が生じ、プロセスの能力を最大限に発揮することが難しくなる。
3. クロック周波数が決まらなければテクノロジー依存の最適化ができず、逆にあるクロック周波数向けに最適化されたハードマクロ資産はクロック周波数の異なるシステムに流用できない。

これらを解決できるものとして、非同期回路が注目されている。我々は特に上の3.に着目し、優れた演算器の設計資産の提供を試みる。その特徴は、(1) 非同期式であることを活かし、システムのグローバルクロックとは無関係に最もエネルギー効率や面積効率の良い回路構成を採用していること、並びに(2) 同期式设计されたシステムにそのまま組み込むためのインターフェースを具備していることである。

本稿では、IEEE-754規格準拠の単精度浮動小数点除算器を取り上げ、商用FPGAデバイス(Xilinx社)をターゲットとしたマクロを開発した。浮動小数点除算器は、(a) 非正規化数が入力された場合に正規化された内部表現に変換する前処理部、(b) 仮数部の除算を行う固定小数点除算部、(c) 丸めや正規化を行う後処理部などからなる。性能や消費エネルギーに最も大きな影響を及ぼすのは(b)であるが、我々のこれまでの研究より、面積効率やエネルギー効率の面ではSRT法よりも引き戻し法の方が有利であることがわかってきたため、後者を採用した。さらにその実現にあたっては、反復1回あたりの減算シフト桁数 N の異なるものを実際に設計して評価した。その結果、面積効率が最も良かったのは $N=2$ のときであり、エネルギー効率が最も良かったのは $N=3$ のときであった。以下では $N=2$ を採用する。

提案する単精度浮動小数点除算器[1]のブロック図を図1に示す。仮数部の除算を行う固定小数点除算部は、引き戻し法の減算シフト処理2桁分に最適化された高速なローカルクロックを生成するリングオシレータで駆動され、前処理部や後処理部とは非同期インターフェースで接続されている。このため、各々がそれぞれ最も面積効率やエネルギー効率の良い実装となっており、ターゲットテクノロジーの能力を最大限に引き出していると考えられる。他方、外部の入出力とはメタステーブル問題を考慮したハンドシェイク回路で接続されるため、任意のグローバルクロックで動作するシステムに埋め込んで利用することが可能である。図2に示す通り、開発された除算器は同期式の除算器よりも消費エネルギーが小さく、また図3に示す通り、同期式の除算器よりも面積あたりのスループットが高い。

非同期回路の設計開発は敷居が高いが、このようにすぐに使える優れた設計資産が提供されれば、非同期回路の恩恵を広く享受することが可能となるであろう。

参考文献

- [1] M. Hiromoto, H. Ochi, Y. Nakamura, "An Asynchronous IEEE-754-standard Single-precision Floating-point Divider for FPGA", IPSJ Trans. SLDM, vol.2, February 2009, to appear.

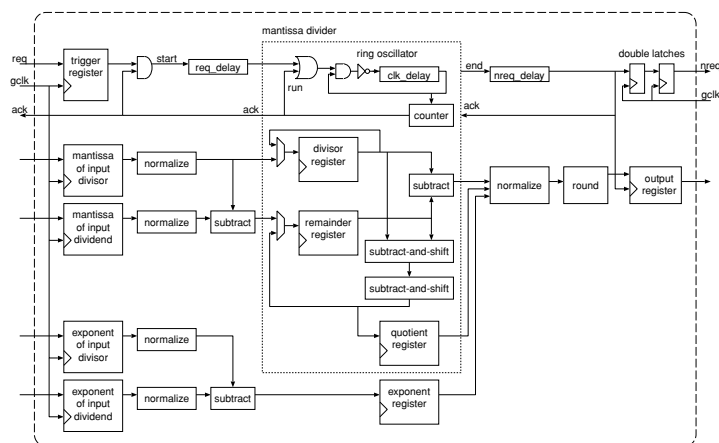


図1. 提案する浮動小数点除算器のブロック図

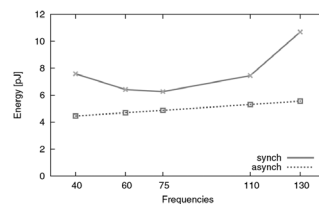


図2. 除算1回当たりの消費エネルギー

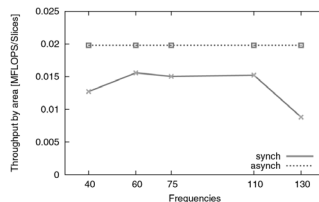


図3. 面積あたりのスループット

システム科学専攻 システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研究室)

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

「ベイズ超解像」

当研究室では、不確実な環境に対して学習によって適合するシステムとしての「生命」と「知性」の計算原理を明らかにすることを目的に、多岐にわたる研究を行っています。また、学習するアルゴリズム（機械学習）の研究、学習する「人工的知性」を持つ知能ロボットの研究なども行っています。

表題の（ベイズ）超解像は、複数の観測画像の情報を統合することで、観測画像より高解像度の画像を得る情報処理手法をいいます。この手法は、動物の視覚情報処理機構、および機械学習の研究から生まれたもので、例えば顕微鏡画像の高解像度化に貢献することが期待されます。GFPなどの蛍光蛋白質を用いた1分子イメージング法は、ナノスケールの分子動態を観察する技術として生物学・医学に大きな発展をもたらしましたが、1分子イメージング法に代表される光学顕微鏡観測法では、レンズを通して光を観測するため、光の回折によって生じるボケが不可避です。このため、ハードウェアの性能に必ずしも縛られない、ソフトウェアによる画質改善法である超解像に期待がもたれています。

我々は、ベイズ統計を用いた超解像法の開発を行っており、これをベイズ超解像と呼んでいます。確立された方法論である統計学に立脚することで、推定の良さについて保証された手法を用いることができます。ベイズ統計を用いない統計学においては、最尤推定がある種の最適性を持ちますが、この最適性は、観測される標本数（超解像の場合、観測画像枚数）が無限大に近づくときにのみ成り立ちます。現実にはせいぜい数十枚の観測しか得られないため、観測のみから真の高解像度画像を推定した場合、同程度に尤もらしいといえる高解像度画像が無数に存在することになります。最尤推定ではそこから最も尤もらしい候補を選びますが、ノイズに強く影響されて不安定になるため、しばしば、正解である真の高解像度画像とかけ離れたものが得られてしまいます。そこで、真の高解像度画像に関する知識を用い、かつその知識の不確実性をも考慮して、無数の可能性から適切に絞り込むのがベイズ統計です。真の高解像度画像は未知ですが、多くの場合、その統計的性質は全くの未知ではありません。例えば、隣接する画素間は近い値をとりやすいなどの強い相関をもっています。こうした知識を組み込むことで推定精度を向上させることができます。以下に我々が開発したベイズ超解像の一例を紹介します。図1は16枚の観測画像（車のナンバープレートの一部）のうちの1枚を表示したものであり、図2、3はそれらの観測画像から縦横各々4倍の画素数に画素増大した高解像度画像の推定結果です。図2が最尤推定、図3がベイズ超解像によるものです。ベイズ超解像では、真の高解像度画像において、隣接画素間はなめらかであることが多い一方、違う物体間の境界にはエッジがあることを知識とした推定を行っています。しかし、エッジの有無自体は不確実であるため、その不確実性をも考慮したベイズ統計が有効となり、図3のように読み取りが可能になるまでの画像復元ができます。我々は、このように画像の知識と不確実性（知識の不足）を考慮する数学的手法を開発することで、超解像の限界に挑んでいます。



図1. 観測画像 (1/16)



図2. 最尤推定で推定した高解像度画像

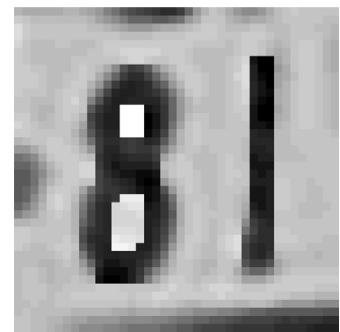


図3. ベイズ超解像で推定した高解像度画像

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (近藤研究室)

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

「ヘリオトロン」装置における中性粒子ビームの分光測定

磁場で閉じ込められたプラズマを加熱する方法として、高速の水素中性粒子ビームの入射が用いられている。プラズマ中に入射された水素ビームは、プラズマ中のプロトンとの荷電交換反応、電離などによって高速のイオンとなりプラズマ粒子との衝突によってエネルギーをイオン、電子へ与え、結果としたプラズマを加熱する。水素原子ビームはイオン源で水素プラズマを生成して加速し中性化して得られる。イオン源では H^+ のみならず、 H_2^+ 、 H_3^+ なども生成されそれらが加速電圧 E で加速され磁場を横切ってプラズマ中に入るために中性化セルで中性原子に変化するときエネルギー E 、 $E/2$ 、 $E/3$ の成分を持つ水素原子ビームとなる。それぞれのエネルギーを持った水素原子ビームがプラズマ中に入射されるとそのエネルギーが低いほど速く電離して長い距離を進むことができなくなる。したがって入射する水素原子ビームのエネルギー成分比を正確に測定することがプラズマを有効に加熱する上で大変重要なことになる。プラズマ中でのこれらエネルギー成分比は水素原子ビームがプラズマ中の電子衝突によって励起され発光する $H\alpha$ 光の強度比から求めることができる。中性水素原子ビームからの発光は、ビームが高速であることから波長がドップラーシフトするためプラズマ中の水素原子の発光と簡単に区別することができる。図1に測定の視線を示す。これらの視線で測定された $H\alpha$ 光のスペクトルを図2に示す。このようにエネルギー E 、 $E/2$ 、 $E/3$ のビームに由来する $H\alpha$ 光が明瞭に確認されている。視線1における成分比は約45%、25%、30%であり、その位置より約19cm下流側の視線4での成分比は、約47%、26%、27%で各ビームエネルギー成分によって減衰の割合が異なることを示している。実験的にはイオン源の動作条件をいろいろ変えエネルギー E の成分を大きくすることが重要な課題となる。また $H\alpha$ 光発光強度のビームに沿った減衰は、電子密度に関係するので新しい電子密度の測定法になる可能性がある。

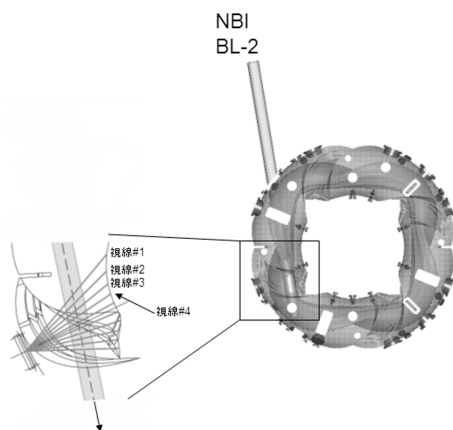


図1. 中性粒子ビームと測定視線

#31963 STD configuration 210-230msec
 $n_e \sim 0.9 \times 10^{19} m^{-3}$

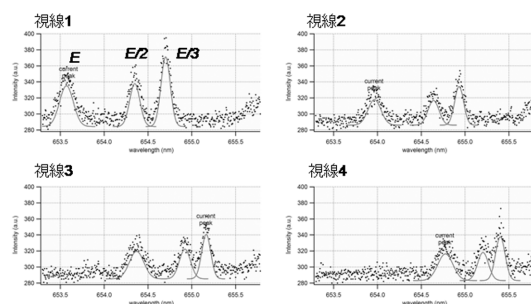


図2. 視線1～4で観測された $H\alpha$ 光のスペクトル

応用熱科学講座 応用基礎学分野（野澤研究室）

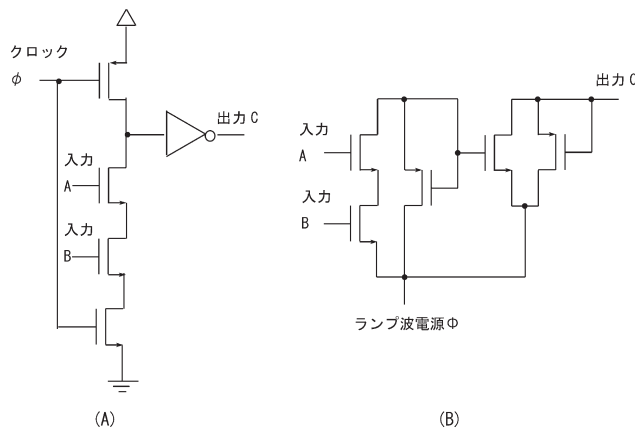
<http://www.energy.kyoto-u.ac.jp/>

「ADL回路を用いた機能メモリ内部演算回路に関する研究」

並列演算処理による電子計算機高性能化の一環としてビットシリアル-ワードパラレル方式高密度機能メモリの特徴を最大限に利用した新しい検索・整列アルゴリズムなどが実行可能な新しい情報処理システムの実現を目標にした研究を行っています。超並列演算処理に伴い、機能メモリ内演算回路のピーク電流が増加します。この消費電力が問題です。これを解決するため、内部演算回路動作に伴う熱的エネルギーを極限にまで減少できる可能性を有する断熱型CMOS論理（ACL）を取り入れた比較器（コンパレータ）について電子回路シミュレーションを行い、大幅な改善を行うと同時に入力遷移に基づく散逸電力について解析し、これを抑える新しい回路トポロジーを考えその効果も確認しました。

この成果に基づき本年度はビットごとに演算した比較器からの一致・不一致の判定出力をシリアルに論理積演算するための回路として2入力AND CMOSドミノ回路を対象に断熱回路の適用を進めています。ドミノ回路はダイナミック論理の一種ですから、ACL回路をそのまま適用できません。代わりに断熱型ダイナミック論理（ADL）を採用し、引き続き研究を続行しています。下図（A）は1桁のビットに対応するCMOSドミノ回路の原型を示しています。入力Aは前段（上位ビット桁）の判定結果で、入力Bは現在のビット桁の判定結果を示しています。入力AとBの論理積をクロック ϕ によってプリチャージ後、評価サイクルの期間に出力Cとして次段（下位ビット桁）に対応する回路に送るという動作をします。一方、下図（B）は本研究で用いたADL CMOSドミノ回路を示します。電源部がランプ波電源に変わっています。またADL回路では整流素子としてp-nダイオードが使われていますが、本研究では集積度の観点からダイオード接続のPMOSトランジスタを使用しています。ADLを用いたANDドミノ回路の動作は次の通りです。ランプ波電源 Φ を論理“0”から“1”に昇圧することによって出力Cのノードはプリチャージされます。プリチャージ後ランプ波電源を論理“1”から“0”に変化させると、評価サイクルに入ります。入力AとBが共に“1”の場合のみNAND論理の出力ノードの電圧はランプ波電源 Φ に追随して低下します。従って出力Cは“1”に留まります。入力がそれ以外の場合はNAND論理の出力ノードの放電パスができませんので出力Cは“1”から“0”に変化します。

下図（A）と（B）の回路についてSmart SPICEによるシミュレーションを行い、動作確認をしたのち、散逸電力について解析しました。二つの回路で比較すると（A）の回路ではクロックの重なりによるDCパス発生による散逸電力が見られたのに対し、下図（B）のADL回路ではそれが改善される等の効果によりランプ波周期を大きくするにしがたい改善指数は増加するというような知見を得ています。また、ACL回路同様散逸電力の入力依存性等も観測されていますので確率的な解析を行いさらなる改善を試みる予定です。



エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html

核融合プラズマにおける電子サイクロトロン電流駆動に関する研究

究極のエネルギー源として期待されている磁場閉じ込め核融合炉において、GHz周波数帯の波を利用した波動加熱はプラズマの生成・加熱に幅広く利用されています。安定した高温プラズマの生成・加熱・電流駆動を行うに当たり、加熱機構の理解と加熱手法の開発は重要な課題として位置付けられています。電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動システムはプラズマの生成・加熱・電流駆動を行うことが可能で、局所電子加熱、熱輸送解析、新古典ティアリングモードなどのMHD不安定性の抑制、オーミックを用いないプラズマ生成等について、世界の多くの核融合実験装置において研究が進められています。その中で、プラズマ中を流れるトロイダル電流の制御は高性能プラズマの実現や定常プラズマ維持に向けての重要な課題の一つです。ヘリカル系では閉じ込め磁場は外部コイルによって形成できることから、オーミック電流のような誘導電流をプラズマ平衡のために必要としません。しかしながら、トカマクと同様に有限のプラズマ圧力がブートストラップ電流を駆動し回転変換分布を変え、プラズマの平衡・安定性が変わることがわかってきました。電子サイクロトロン電流駆動（Electron Cyclotron Current Drive, ECCD）はブートストラップ電流を抑制し回転変換分布に危険な有界面を生じさせない手法として提案され、現在、ヘリオトロンJにおいて、図1に示すような電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動システム（70 GHz、0.4 MW、0.2 sec）を用いて実験的な検証を行っています。トカマクでの実験結果と比較をすることで、トロイダルプラズマにおけるECCD物理がより深く理解できるものと期待されています。電子サイクロトロン波は磁力線に垂直方向に電子を加速しますので、磁力線方向には直接運動量を与えませんが、速度空間における非一様性を生じさせ、結果としてトロイダル電流が流れるという興味深い物理機構から電流駆動されます。ヘリカル系装置では、トロイダル電場による非線形効果がないこと、また、オーミック電流が存在しないことにより従来のロゴスキーコイルを用いて1kA以下という高精度で非誘導電流の計測が可能です。これまでの国際共同比較実験で中型ヘリカル装置におけるECCD特性を調べ、共通の電流駆動物理を明らかにしてきました。実験結果の例として、図2にヘリオトロンJ装置において磁場形状を変えたときのEC電流の変化を示します。電流駆動位置が磁場リップルの位置によって、電流駆動方向が反転することが観測されました。この結果は、Ohkawa効果と呼ばれる速度空間上での捕捉粒子の効果が、電流駆動を決定する物理過程で重要な役割を果たしていることを示しています。今後、このECCDを用いた回転変換分布制御がプラズマの平衡・閉じ込めへどう影響するのか調べてゆく予定です。



図1. 電子サイクロトロン共鳴加熱・電流駆動システム

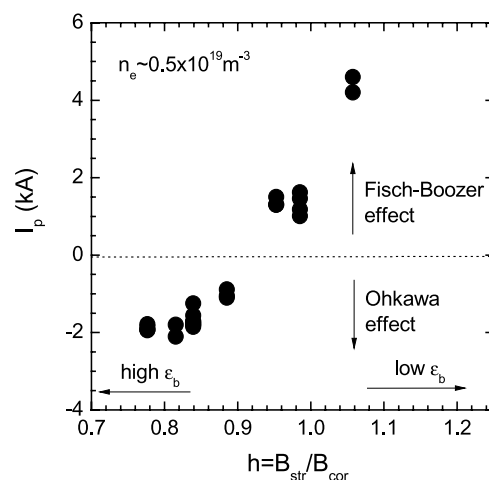


図2. 観測されたトロイダル電流の磁場配位依存性。配位によって駆動電流方向が反転する。

生存圏研究所 診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab>
 「新開発デジタル・ビーコン受信機を用いた電離圏擾乱の観測研究」

電離圏の擾乱が衛星通信を阻害することは良く知られている。またGPS衛星の利用は旅客機のナビゲーションにまで広がっているが、電離圏擾乱による測位誤差増大が懸念され、電離圏のリアルタイムモニタや擾乱の発生予測に対するニーズが高まっている。

電離圏プラズマの総量は全電子数 (Total Electron Content; TEC) と呼ばれる。この観測手法として、低軌道衛星から発射されるビーコン電波を地上で受信する衛星ビーコン観測がある。標準的には150MHzと400MHzのビーコン波の伝搬位相差からTEC値を測定する。地上観測点を増せば増すほど効力を発揮する。本研究室ではここ数年、ソフトウェア無線技術を用いた安価な衛星ビーコン受信機の開発を進めてきた [1]。具体的には、GNU Radioと呼ばれるオープン・ソフトウェア・ツールキット (<http://gnuradio.org/>) と、汎用のオープン・ハードウェアであるUSRP (Universal Software Radio Peripheral、図1) を利用し、LINUX PCを主計算機として構成した。成果は良好であり、従来のアナログ受信機に比して性能が高い装置を20~30万円 (市販品に対するコスト比約1/10) で実現できた。GNU Radio Beacon Receiver (GRBR) と名づけ、ホームページを開設して普及のための努力を始めた。

我々自身によるGRBR利用も既に始まっている。2008年7月から、潮岬・信楽・福井とMUレーダーを中心とする約300km離れた3点のネットワーク観測を開始し、トモグラフィ解析を行い、図2に示すような電子密度の緯度-高度断面の推定に成功した。中緯度域に現れる中規模電離圏擾乱が明瞭に捉えられている。さらに、磁気赤道から低緯度域の電離圏に現れる非常に強い擾乱であるプラズマバブルをターゲットとして、インドネシア・タイ・ベトナムにわたる観測網構築を始めた。これはインドネシア・西スマトラ州で稼働中の赤道大気レーダーとの同時観測に役立ち、さらに (独) 情報通信研究機構及び名古屋大学太陽地球環境研究所と共同で推進する東南アジア域の電離圏観測網の一部となる。2009年1月上旬にはベトナム最南端のバクリウからGRBRが稼働し始めた。

GRBR開発の成功に引き続き、本研究室ではGNU Radioを利用した新しいレーダー開発にも乗り出した。システム構成を柔軟に変化できるソフトウェア無線の特質を活かすことで、大気レーダーの更なる普及に貢献できればと期待している。

参考文献

- [1] Yamamoto, M., Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurement developed with GNU Radio, Earth Planets Space, 60, e21-e24, 2008.
<http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/2008e/6011e021.pdf>

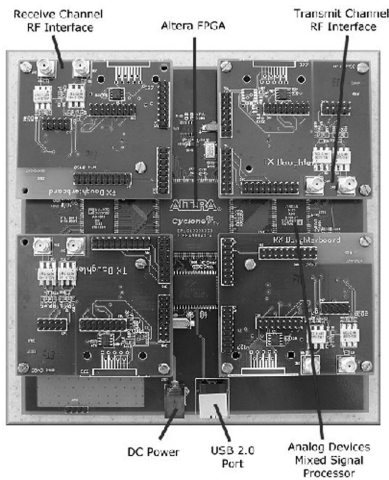


図1. USRPの外観
 (出典: <http://www.ettus.com/>)

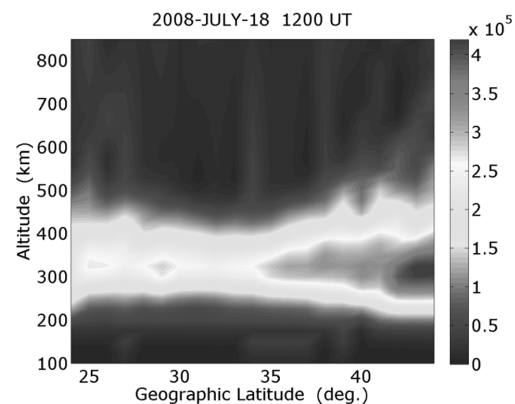


図2. 潮岬・信楽・福井の衛星ビーコン観測からトモグラフィ解析によって得た電離圏電子密度の緯度-高度断面の一例。

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 宇宙圏電波科学分野（山川研究室）
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/people/yamakawa/>
 「太陽風エネルギーを利用する磁気プラズマセイル宇宙機の実現に向けて」

惑星間空間には太陽を起源とする高速のプラズマ流である太陽風が吹き荒れています。磁気セイルは、宇宙機の周辺に人工的なダイポール磁場を発生させることで、この太陽風の運動エネルギーを受け止め、宇宙機に推進力を与えるシステムです。1990年代のZubrinらの検討によると、宇宙機に十分な推力を与えるためには、直径100kmにおよぶ巨大なコイルに電流を流す必要性が指摘されたため、磁気セイルは実現困難とされていました。しかし、R.Wingleeらは、図1に示すように、宇宙機のまわりのごく小規模な磁気圏をプラズマ噴射にて広範囲に展開させて太陽風を受け止める磁気プラズマセイルという概念を提案し、電気推進と同等の高い推進剤の消費効率を得られるという解析結果を得ました。これは、小規模の宇宙機でも、太陽系の木星等の外惑星に飛行時間2～3年で直接移行して到達することを示しています。磁気プラズマセイルを現実のものにできるかどうかは、太陽風プラズマ流を受けとめるための十分な大きさの磁気圏を、探査機の持つ僅かな質量・電力リソースで実現出来るかどうかにかかっています。

本研究では、プラズマを流体として扱う電磁流体（MHD: MagnetoHydroDynamic）シミュレーション（図2、図3）により、太陽風と磁気圏の相互作用をシミュレーションし、推力発生機構の解明と宇宙推進システムとしての評価を行っています。現在は、宇宙機に超電導コイルを搭載することで人工的な磁場を発生させることを想定しており、これが太陽風と相互作用することにより、磁気圏が形成されます。この磁気圏界面に生じる誘導電流がコイル近傍に作る誘導磁場と、コイル電流の間に働くローレンツ力の積分値が宇宙機としての推進力となります。宇宙機からプラズマ噴射を行わない場合は、磁気圏が大きくなるほど太陽風との相互作用が大きくなり、そのため推力が大きくなると考えられます。宇宙機からプラズマ噴射を行うことによって磁気圏が拡大され、宇宙機として得られる推力は大きくなりますが、噴射プラズマ動圧と磁気圧の比である噴射プラズマのパラメータを β とすると、 β が大きいきよりむしろ小さいときに推進システムとしてメリットが得られるとの予想を得ています。数値シミュレーションにより、大きな β のときは、推力の発生に寄与する磁気圏境界面電流がプラズマ噴射により発生したtermination shock上の電流により弱められると考えられます。現在は、太陽風エネルギーを使わない従来型の宇宙推進エンジンである、プラズマを直接一方向に噴射することにより推力を得る電気推進との性能比較等を行っています。

参考文献

- [1] Sasaki, D., Funaki, I., Yamakawa, H., Usui, H., Kojima, H., "Numerical Simulation of Magnetic Sail Spacecraft with Superconducting Coils," 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Kyoto, 21-25 July 2008.

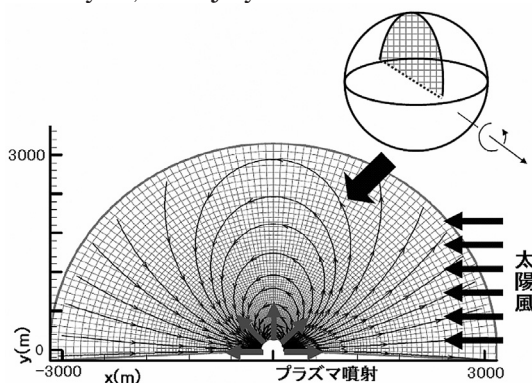


図1. 宇中機からのプラズマ噴射モデル

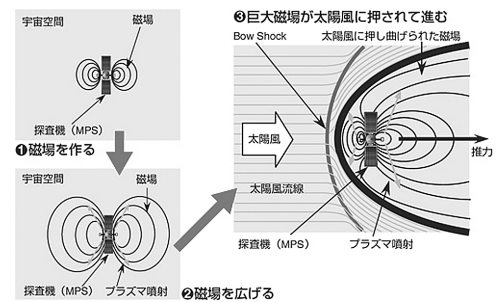


図1. 磁気プラズマセイルの原理

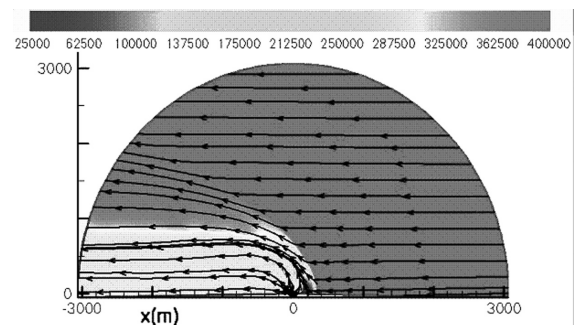


図2. 電磁流体シミュレーション (速度と流線)

生存圏研究所 生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野（橋本研究室）
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/hashimoto.html>
 「自己ビーム制御アレイとその太陽発電衛星の位相同期システムへの応用」

当研究室では、電波をエネルギー伝送媒体として利用し、エネルギー・環境問題の一つの解である太陽発電衛星（SPS）の研究をはじめ、マイクロ波を応用した新しい生存基盤に関する研究開発を行なっている。電気工学専攻の協力講座である同じ研究所の大村研究室、山川研究室と協力し、マイクロ波応用工学、電波工学、科学衛星による波動観測、計算機シミュレーションなどの研究も行なっている。

本稿では、SPSにも応用することができるマイクロ波送電システムに関する研究について述べる。SPSでは、受電点に正確に電力を送る必要があり、そのためには、受電点から電波を出し、その到来方向にSPSの電波を送るレトロディレクティブ方式を利用する。地上での利用にも応用可能である。レトロディレクティブシステムは基本的にはハードウェアで構成されるが、我々は電波の到来方向を計測し、その方向にアレイアンテナのビームを向ける柔軟性の高いソフトウェア方式を採用しており、ソフトレトロと略称している。この方式に15号で紹介したものを改良した自己ビーム制御方式、そして受信点中心付近の電力分布を測定して補正する方式について、フェーズドアレイの移相器に、敢えて多い目のランダム位相誤差を与えて評価した。図1はそれらの結果で、縦軸は受電電力（dBm）、横軸は繰返し数である。（1）は自己ビーム式で、やや遅いが繰返し毎に良くなっている、（2）はソフトレトロで位相誤差のために強度が弱い。（3）は両者を併用した場合で、（2）の強度から比較的早く改善されている。（4）は受電電力分布による補正方式で（2）を改善したもので、すぐにある程度の強度になるが、それ以上改善されない。（5）は3方式を併用した場合で、高速に最大強度になる。これらの方式を併用することにより、高速、高精度のレトロディレクティブシステムが構成できる。

従来はこれらの実験を電波暗室内で行ってきた。到来方向測定では、基本的に素子アンテナ間の位相差などを測定するため、アレイによる利得を利用できない。暗室では反射や外来雑音が無く、実験できる距離が限られるため、屋外での実験を行うこととした。そのために、小型で軽量なシステムを開発し、総務省の免許を得て、写真1のような25mでの伝送実験等を行っている。良好なデータが得られており、暗室内での結果との比較や、雑音に強いシステムの開発を行っている。

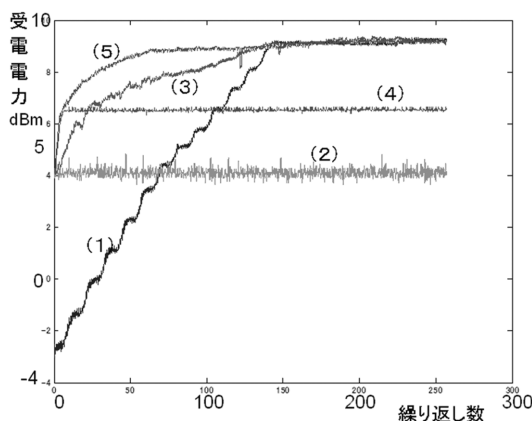


図1. 種々のビーム制御方式の比較（本文参照）。 写真1. 到来方向測定、レトロディレクティブシステムの屋外実験