

# CUE

京都大学電気関係教室技術情報雑誌

NO.43

MARCH 2020

[第43号]

.....  
卷頭言

谷口 治人

.....  
大学の研究・動向

\* ブロックの積み替えに関する最適化問題を解く

\* 工学研究科 電気工学専攻

生体医工学講座 複合システム論分野

.....  
産業界の技術動向

太陽光発電を取り巻く状況と、

将来に向けての研究課題

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

太陽光発電研究センター 櫻井 啓一郎

研究室紹介

博士論文概要

高校生のページ

学生の声

教室通信

編集後記

**cue**：きっかけ、合図、手掛かり、という意味  
の他、研究の「究」（きわめる）を意味す  
る。さらに KUEE（Kyoto University  
Electrical Engineering）に通じる。

cue は京都大学電気教室百周年記念事業の一環として京都大学電気教室百周年記念事業基金と賛助会員やその他の企業の協力により発行されています。

## cue 43号 目次

### 巻頭言

ユニバーサルデザインと規格

…………… 昭和 48 年卒 東京大学 工学系研究科 電気工学専攻  
先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター (APET) 上席研究員 谷口 治人………… 1

### 大学の研究・動向

ブロックの積み替えに関する最適化問題を解く

……………工学研究科 電気工学専攻 生体医工学講座 複合システム論分野………… 3

### 産業界の技術動向

太陽光発電を取り巻く状況と、将来に向けての研究課題

…………… 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 櫻井 啓一郎………… 9

研究室紹介…………… 16

博士論文概要…………… 33

### 高校生のページ

科学衛星による宇宙の電磁環境探査

……………生存圏研究所 宇宙圏電磁環境探査分野 小嶋 浩嗣、上田 義勝………… 53

### 学生の声

Study at Kyoto University

…………… 情報学研究科 通信情報システム専攻 大木研究室 博士後期課程 3 年 Fujun He………… 58

とある暇人の戯言

……………工学研究科 電気工学専攻 小林研究室 博士後期課程 1 年 上田 博之………… 58

### 教室通信

電気電子工学科オープンキャンパス 2019

……………企画・広報委員会 下田 宏………… 59

編集後記…………… 60

## 巻頭言

# ユニバーサルデザインと規格

昭和 48 卒 東京大学 工学系研究科 電気系工学専攻  
先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター (APET) 上席研究員 谷口 治 人



ユニバーサルデザインという言葉をご存知の方も多と思われる。Wikipediaによれば、「文化・言語・国籍や年齢・性別などの違い、障害の有無や能力差などを問わずに利用できることを目指した建築（設備）・製品・情報などの設計（デザイン）のこと」とされている。このことは、講演資料や論文執筆時には常に気を配るべきことであり、カラー版が白黒印刷になる場合には特に注意すべきである。カラー版であっても、積み上げ棒グラフで、境界の区別がつきにくい場合がママ見られる。

このカラー識別に関し、ある時、友人が持っていたユニバーサルデザインの資料を見ていたら、色覚異常検査図（石原式色覚検査）の例が載っていたので、確認したところ、一つだけ通常と異なっていることがわかった。気にすることのない極めて軽度の異常ということであった。小学校時代に検査を受けたことはあるが、特に問題は指摘されなかったので、インターネットで調べたところ、調べた範囲では正常であった。

だれにでも分かり易くという意味では、オリンピックやパラリンピックの競技を表すピクトグラム（図記号）も、その一例であろう。1964年の東京大会から始まったとのことだが、漫画の長い伝統のあるわが国発ということで誇っても良いことであろう。しかし、札幌開催に急遽場所が変更された、マラソンや競歩のピクトグラムは無く、一方、マラソンスイミングは発表されている。ピクトグラム表示する競技をどのような基準で決めているかは不明だが（自転車競技は5種類、馬術3種類に対し、陸上競技は1種類のみ）、開催場所も関係しているのであれば、今大会ではマラソンや競歩があつて然るべきであろう。なお、ピクトグラムは、大会毎に決められているが、やはり、2020年大会のが、最も分かり易いように思えるのは身びいきのせいもあるせいか。ただ、パラリンピックのピクトグラムは、競技になじみがほとんど無いせいか、若干分かりにくいのはやむを得ないのかもしれない。

また、ひと頃話題になった、案内用図記号としての温泉を表す記号は、意見募集の結果2019年7月にJISとして、従来の図記号とともに、ヨーロッパなどで使われている3人の半身が加わった図記号の両者のいずれを用いても良いこととなった。

電気技術に関することでは、三相交流の各相を表すのに、A-B-C、U-V-W、X-Y-Zであったり、記号ではほぼ○、△、□が使われるが、その順序や配色が、旧一般電気事業者（しばらく前までの、いわゆる電力会社）毎に異なって使われているようである。これらは、戦時中に発電・送電会社が日本発送電として強制的に統一されたにも関わらず、統一はされなかった。この事情は、多分、配電会社は統一されなかったことと、50Hzと60Hzの統一と同様、多額の費用が必要となったためであろう。また、定かではないが、発電機やタービンの回転方向が製造者によって異なっているとの話も聞いたことがある。ただ、相順など安全に直結した記号などは、安易に変更すべきではないだろう。

パソコンの外部接続端子にも、種々の規格が存在し、区別は中々難しい。ただ、記憶媒体やマウスとの接続では、USBが広く使われ、区別をほとんど意識しないで使えるようになっていることはすばら

しいことである。

キーボードの QWERTY 配列のように、一旦ロックインされてしまうと、その後からもっと合理的な配列が提案されても、変更するのは極めて困難である。わが国でも、親指シフトという入力方式があって、これを強く主張する人もいたようであるが、現在ではまったく見られなくなってしまった。

このように、一旦ロックインされてしまうと変更は困難であるので、規格の作成には注意が必要であり、常に更新できる可能性を残しておくべきであろう。また、ユニバーサルデザインの考えを基調としながらも、安全にかかわる事項には常に慎重であってほしいものである。さらに、地域に根差した歴史や文化などの多様性にも意を払い、温泉記号のように、併存できる場合は併存できるように考えていくことも重要であろう。ただし、いたずらに複雑化させず、屋上屋を重ねない配慮も必要である。

追記：以上は、本年正月に記したものだが、3月25日現在では新型コロナウイルスの影響でオリンピックの開催が1年程度延期されることが決定されている。早い終息を祈念しますが、読者の皆様にも感染には十分気をつけていただければと存じます。

## 大学の研究・動向

# ブロックの積み替えに関する最適化問題を解く

工学研究科 電気工学専攻 生体医工学講座 複合システム論分野

教授 土居伸二

准教授 (国際高等教育院) 田中俊二

特定講師 (国際高等教育院) 木村真之

## 1. はじめに

当研究室では、生体システムや多自由度共振振動システム・生産物流システムなどの複雑なシステムを扱っています。そして、これらシステムの振る舞いを非線形解析・最適化・シミュレーション技術により明らかにするとともに、望ましい挙動を達成するための研究を行っています。本稿では、生産物流システムにおけるブロックの積み替えの最適化について、当研究室の最近の成果を紹介します。

## 2. 研究の背景

コンテナヤードや物流倉庫でコンテナなどの荷物を保管する際は、利用可能なスペースの制約や取り出す際の移動距離を考慮して、荷物を何層にも積み重ねるのが一般的です。しかし、下層の荷物を取り出すには、その上に積まれた荷物を別の場所に積み替えなければなりません。このような荷物の積み替えに関する研究は、港湾のコンテナヤードにおけるコンテナを主な対象として、近年数多く行われています [1]。そこで、以下ではコンテナヤードを例に、この問題をもう少し詳しく説明します。

### 2.1 ブロック積み替え問題・整列問題

コンテナ物流のネットワークにおいて、港湾のコンテナターミナルは海運と陸運、あるいは海運同士を接続する重要な役割を担っています。コンテナ船やコンテナトラックによってコンテナターミナルに運び込まれたコンテナは、コンテナヤードで一時的に保管され、その後再びコンテナ船・コンテナトラックによって運び出されていきます。コンテナヤードでは、先述のようにコンテナを積み上げて保管します。したがって、運び出すことができるのは一番上に積まれたコンテナのみです。しかし、たとえば海上輸送の場合、目的地や重量・内容物など応じた順序でコンテナ船に積み込む必要があるため、コンテナを運び出す順序は積み上げられた順序と一致しません。そこで、コンテナの積み替えが必要となるわけです。コンテナの移動には、図1のようなトランスファークレーン（ガントリークレーン）が用いられます。クレーン本体には車

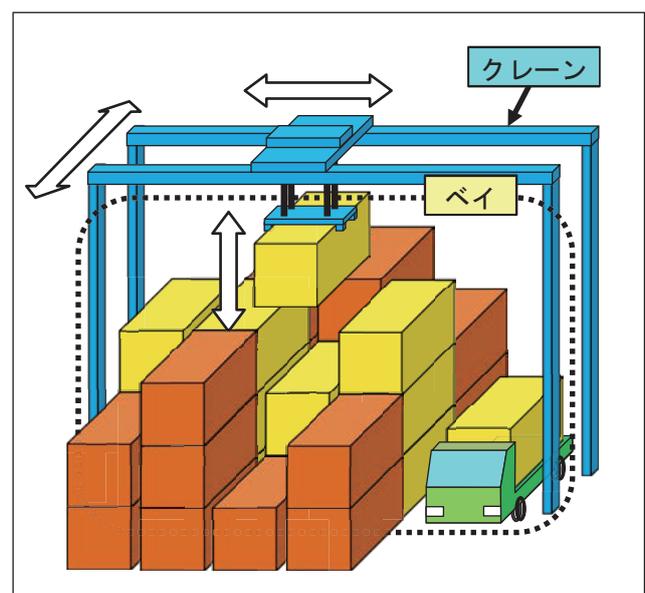


図1: コンテナヤードにおけるコンテナとクレーン

輪が付いており、図中の手前および奥行方向に移動可能ですが、安全上の理由からコンテナを吊り下げたままの移動は通常行われません。したがって、コンテナは図中のベイ内で別のコンテナの上に積み替えることとなります。その際、次に運び出したいコンテナの上に積み替えてしまうと、再びそのコンテナを積み替えなければなりません。つまり、コンテナをどのように積み替えるかによって、その後に必要となる積み替え回数が増える場合があります。もし積み替え先を注意深く選んで不要な積み替えをうまく減らすことができれば、コンテナヤードにおける作業効率が向上し、コンテナターミナルのスループット、さらにはコンテナ物流システム全体への波及効果が期待されます。このような考え方に基づいて研究されているのが、コンテナ積み替え問題 (container relocation problem; CRP)、あるいはブロック積み替え問題 (block relocation problem; BRP) と呼ばれる問題です。この問題は、ベイ内のすべてのコンテナを決められた順序で運び出すものとして、その際に必要となる積み替えの手間（おもに積み替え回数）を最小化する最適化問題です。

これらの問題は、コンテナを運び出す順序が事前にわからない、すなわち実際にコンテナを運び出す時点ではじめて明らかになることを前提としています。しかし、もし運び出し順序が事前にわかっているなら、コンテナをうまく積み直しておくことで、コンテナを運び出す際には積み替えなしに運び出すことができると考えられます。実際のコンテナターミナルでも、コンテナの運び込み・運び出しの空き時間にこのような作業が行われています (marshalling、あるいは housekeeping などと呼ばれます)。そこで、積み替えなしに運び出すことのできる配置へコンテナを積み直すものとして、その際に必要となる積み替えの手間を最小化する問題であるコンテナ整列問題 (container pre-marshalling problem; CPMP)・ブロック整列問題 (block pre-marshalling problem; BPMP) も研究されています。

## 2.2 関連する問題

2.1 節のコンテナに関する問題と同様の問題は、鉄鋼生産においても研究されています。連続鋳造工程で生産された板状の鉄の塊 (スラブ) は、その後の熱圧延工程に送られる前にスラブヤードと呼ばれる場所で一時的に待機します。その際、スラブを積み重ねて保管するため、望ましい種類のスラブを取り出すには、やはり積み替えを考慮する必要があります。ただし、slab reshuffling problem、slab rehandling problem などと呼ばれるスラブを対象とした問題では、積み替えの扱いが少し異なります。

鉄道車両についても類似の問題が生じます。具体的には、列車の編成を留置線や車両基地で変更したり、車両基地から車両を送り出して望ましい順序で列車を編成したりする問題が研究されています (train shunting problem)。この問題は、車両をコンテナやスラブと見立てれば、上述の問題と同様に扱うことができます。

ここでは紹介しませんが、他にも類似の問題が様々な分野で研究されていることから、このような積み替えに関する問題は一般性の高い問題といえるでしょう。

## 3. ブロック積み替え問題に対する研究

ここでは、ブロック積み替え問題に関する取り組みを紹介します。そのために、ブロック積み替え問題の基本的な設定について説明します。

### 3.1 問題設定

図2のように、ベイ内に同じ大きさのブロック (コンテナ) が積み上げられているものとします。ブロック縦1列分をスタックと呼びます。各スタックに置くことのできるブロック数には (クレーンの高さにより) 制限があり、この例では最大4個置くことができます。各ブロックには運び出しの優先順位が与えられていて、この番号の小さいものから順にすべてのブロックをベイから運び出します。しかし、動か

することができるのは一番上に積まれたブロックのみです。下層のブロックを取り出す際には、その上に積まれたブロックを別のスタックへ積み替える必要があります。したがって、以下の二通りの操作を適用することになります。

**積み替え**：スタックの一番上に積まれたブロックを、空きのある別のスタックの一番上に移動させる

**取り出し**：運び出したいブロックがスタックの一番上に積まれているとき、ベイから取り除く

ブロック積み替え問題の目的は、最少の操作回数ですべてのブロックを運び出すことです。しかし、取り出し操作の回数はブロック数に一致しますので、実際には積み替え回数を最小化すれば十分です。

ブロック積み替え問題は、積み替え可能なブロックに着目すると、次のように分類できます。

(1) 無制限問題

一番上に積まれたブロックはいずれも積み替え可能な問題

(2) 制限付き問題

次に取り出したいブロックの一番上に積まれたブロックのみ積み替え可能である問題

また、取り出し優先順位に関する分類も可能です。

(a) 優先順位に重複のない問題

ブロックの取り出し順序は一意である問題

(b) 優先順位に重複のある問題

同じ優先順位のブロック間の取り出し順序に任意性のある問題

図2の例は (a) 優先順位に重複のない問題であり、(1) 無制限問題を考えた場合、一番上に積まれたブロック 12, 4, 7, 11, 5 のいずれも積み替えることができますが、(2) 制限付き問題では、次に取り出すのはブロック 1 なので、その一番上に積まれたブロック 4 しか積み替えることができません。

### 3.2 ブロック積み替え問題に対する解法の研究

ブロック積み替え問題は一般に NP 困難であることが知られています。このため、ブロック数が多くなると最適な解を求めるのは難しくなると考えられますが、工夫次第ではブロック数が数十程度の現実的な規模の問題でも短時間で解くことができます。そこで当研究室では、ブロック積み替え問題の最適解を高速に求める厳密解法の研究を行っています。まず、制限付き問題 (2)-(a) および (2)-(b) に対し、ブロックの積み替え先を順次列挙して探索するという、分枝限定法に基づく厳密解法を構築しました [2]。この解法では、積み替え回数の見積もり（下界値）精度を向上することで、分枝限定法における探索領域を限定し高速化をはかっています。たとえば図2のブロック配置を考えると、下層により早く運び出さなければならないブロック（番号の小さいブロック）が積まれているブロック 12, 13, 4, 15, 11, 5, 14 は、必ず1回は積み替えなければなりません。したがって、最少でも7回の積み替えが必要ですが、下界値の計算方法を工夫すると、8回の積み替えが必要であることがわかります（最適解も8回）。このように下界値を改善することで、分枝限定法における限定操作が効きやすくなり、探索効率が向上します。つぎに、優先順位に重複のない無制限問題 (1)-(a) に対して、同様に分枝限定法に基づく解法を構成しました [3]。ここでは、無制限問題における積み替え回数の下界値を計算する方法、および分枝限定法における無駄な探索の回避方法を提案しています。後者について図2を例にもう少し詳しく説明すると、たとえばブロック4をスタック2からスタック3へ積み替え、その直後にスタック4へ積み替えた場合と、

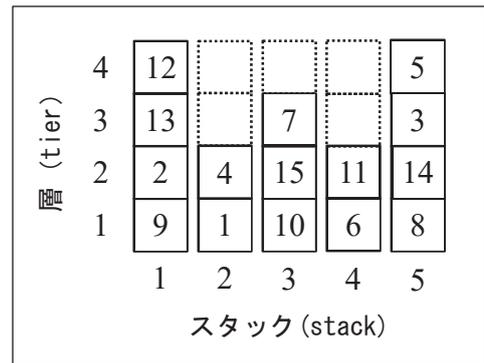


図2: ベイ内のブロック（コンテナ）の取り出し順序

スタック 2 からスタック 4 へ直接積み替えた場合は、結果として同じブロック配置になります。しかし、直接積み替えた方が積み替え回数は少なくすむので、2 回に分けて積み替える解を考えるのは意味がありません。このような解を検出する簡便なルールを分枝限定法に組み込んで、無駄な探索を回避しています。この考え方は、優先順位に重複のない制限付き問題 (2)-(a) に対しても効果があるため、文献 [3] では文献 [2] の解法の改善も行いました。

これらの解法により、ブロック数が 50 程度までのブロック積み替え問題は効率的に解けるようになりました。現在、優先順位に重複のない制限付き問題 (2)-(a) に対して、ブロック数が 100 程度の問題も解ける解法を構築し、発表準備を進めているところです。

### 3.3 クレーンによる移動を考慮したブロック積み替え問題

積み替え回数の最小化を目的としたブロック積み替え問題だけでなく、クレーンによるブロックの移動距離を考慮し、作業時間を最小化する問題も研究しています。ここでは、優先順位に重複のない制限付き問題 (2)-(a) を対象としています。まず、図 3 の (A) に示すような、ブロックを移動させる際には必ず一番上までブロックを持ち上げてから水平移動させる、という設定のもとで解法を提案しました [4]。つづいて、より現実的なクレーンの動作を想定して、図 3 の (B) のように他のブロックと衝突しない高さだけ持ち上げるという設定のもとで解法を構成しました [5]。

### 3.4 積み込み計画を考慮したブロック積み替え問題

コンテナヤードと同様、コンテナ船の船内でもコンテナを積み上げることになりますので、コンテナを積み込む順序を考える必要があります。そこで、コンテナ船への積み込み計画を考慮したブロック積み替え問題の研究も行っています。図 4 において、ブロックの記号はコンテナ船のどのスタック (A ~ E) の何層目に積み込むのかを表しています。この問題の目的は、コンテナヤード内での積み替えのみが許されるものとして、最少の積み替え回数ですべてのブロックをコンテナ船に積み込むことです。この例では、ブロック D2 を (コンテナヤード内で) 積み替えることにより、ブロック E1, B1 をコンテナ船に積み込むことができるようになります。さら

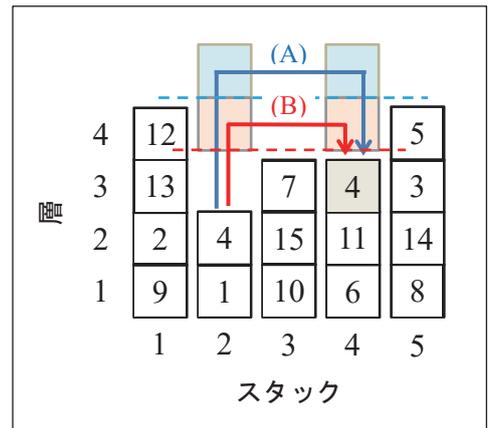


図 3: 積み替えにおけるクレーンの移動距離

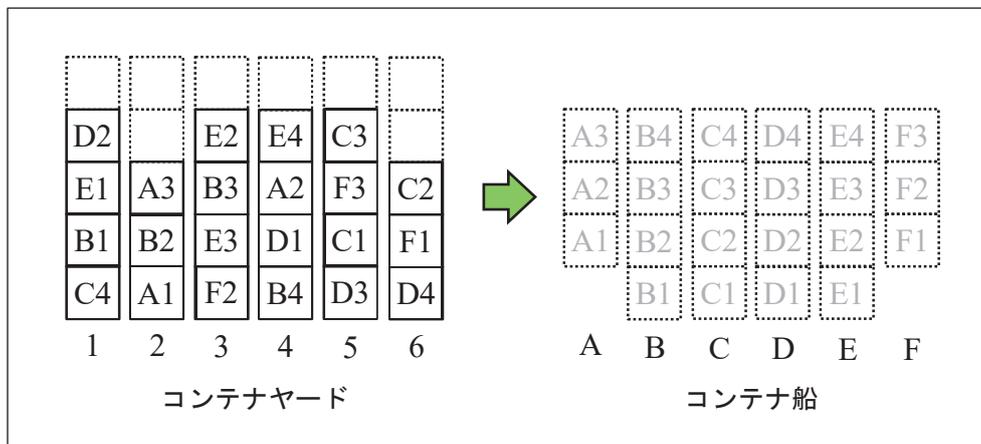


図 4: 積み込み計画を考慮したブロック積み替え問題

に、ブロック E2 も積み込み可能となります。この問題に対しては、近似解法 [6] および厳密解法 [7] を提案しました。

#### 4. ブロック整列問題

ブロック整列問題では、ブロック積み替え問題とは異なり、ブロックの取り出し操作は行わずにベイ内での積み替え操作のみでブロックを並べ替えます。上層から下層へと運び出し順にブロックを積み直せば、将来運び出す際に積み替えが発生しません。そこで、ブロック整列問題では、最少の積み替え回数でそのような配置にブロックを積み直すことを目指します。ブロック整列問題も NP 困難であることが知られています。

ブロック整列問題の場合、取り出し優先順位の重複の有無による分類は行われておらず、一般に重複があるものとして扱うこととなります。また、明らかに積み替えが必要なブロックについても、ブロック積み替え問題とは考え方が異なります。ブロック積み替え問題の場合、下層により早く運び出さなければならないブロックが積まれているブロックは、少なくとも 1 回積み替えなければなりませんでしたが、一方、ブロック整列問題の場合、各スタックを下層から見ていき、運び出し順序に並んでいないブロックが見つければ、そこから上層のブロックはすべて、少なくとも 1 回積み替えなければなりません。図 2 の例では、ブロック 13, 12, 4, 15, 7, 11, 14, 3, 5 はすべて積み替え対象です。もちろん、これ以外のブロックを積み替えなければならない場合もあります。

このブロック整列問題に対しても、分枝限定法における下界値を工夫することで、効率のよい厳密解法 [8, 9] を提案しています。

#### 5. おわりに

本稿では、コンテナやスラブなどの積み替えを対象とした研究の取り組みを紹介しました。ここで紹介した問題は、実用上の重要性もさることながら、パズルを解くような面白さがあります。その面白さを体験できるよう、web ブラウザ上で実行可能なデモ [10] も公開していますので、そちらも参照ください。今後は、解法を高速化すると同時に、より一般的な幅広い問題へと拡張していきたいと考えています。

#### 参考文献

- [1] 田中：荷物の積み替え作業低減化に関する研究動向，システム / 制御 / 情報，Vol. 61, No. 3, pp. 88-94 (2017)
- [2] S. Tanaka and K. Takii: A faster branch-and-bound algorithm for the block relocation problem, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 13, pp. 181-190 (2016)
- [3] S. Tanaka and F. Mizuno: An exact algorithm for the unrestricted block relocation problem, Computers & Operations Research, vol. 95, pp. 12-31 (2018)
- [4] Y. Inaoka and S. Tanaka: A branch-and-bound algorithm for the block relocation problem to minimize total crane operation time, Proceedings of the 19th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation (HMS 2017), pp. 98-104 (2017)
- [5] Y. Inaoka and S. Tanaka: The block relocation problem under a realistic model of crane trajectories, Proceedings of the 20th international conference on Harbor, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation, pp. 62-66 (2018)
- [6] R. Jovanovic, S. Tanaka, T. Nishi, and S. Voß: A GRASP approach for solving the Blocks Relocation Problem with Stowage Plan, Flexible Services and Manufacturing Journal, vol. 31, pp. 702-729 (2019)

- [7] S. Tanaka and S. Voß: An exact algorithm for the block relocation problem with a stowage plan, *European Journal of Operational Research*, vol. 279, pp. 767–781 (2019)
- [8] S. Tanaka and K. Tierney: Solving real-world sized container pre-marshalling problems with an iterative deepening branch-and-bound algorithm, *European Journal of Operational Research*, vol. 264, pp. 165–180 (2018)
- [9] S. Tanaka et al.: A branch and bound approach for large pre-marshalling problems, *European Journal of Operational Research*, vol. 278, pp. 211–225 (2019)
- [10] <http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/~tanaka/games/>

## 産業界の技術動向

# 太陽光発電を取り巻く状況と、将来に向けての研究課題

国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
太陽光発電研究センター 櫻井 啓一郎

## 1. はじめに

半世紀ほど前（1970年頃）、家一軒分の太陽電池（3kW）は数億円した。それが昨今の国際的な取引価格では約10万円 [1] と、数千分の1になった（図1）。昼より安い。化石燃料を輸入するよりも安い。メーカーは儲からなくなったが、使う側にとっては朗報である。今や世界の人口の2/3にとって、太陽光発電（以下、太陽光）もしくは風力発電（同、風力）、あるいはその両方が、最も安い電源となっている [2]。今後さらに安くなり、世界最安のエネルギー源になる見込みである。最近では、世界の全エネルギーを再生可能エネルギー（再エネ）で賄っても、エネルギーコストは現状と同程度にできると見積もられているほどである [3]。もちろん太陽光は発電量あたりの排出量が化石燃料火力の数%程度と低く、気候変動対策になる。技術向上と、製造等に用いるエネルギーの低炭素化に伴い、さらに低排出になっていくと見込まれる [4]。

そんな期待を集める太陽光は昨年、世界で約100GWが導入され、今後も増える見込みである。気候変動対策が全く遅れている中 [5]、さらなる普及加速の必要性が指摘されている [6]。特にこれから、あるいは今まさにエネルギー需要が急増している国々にとっては、太陽光や風力のような再エネの普及は急務である。以下、再エネや蓄電池、EV等の動向や見通しについて、筆者の私見を交えつつ紹介する。

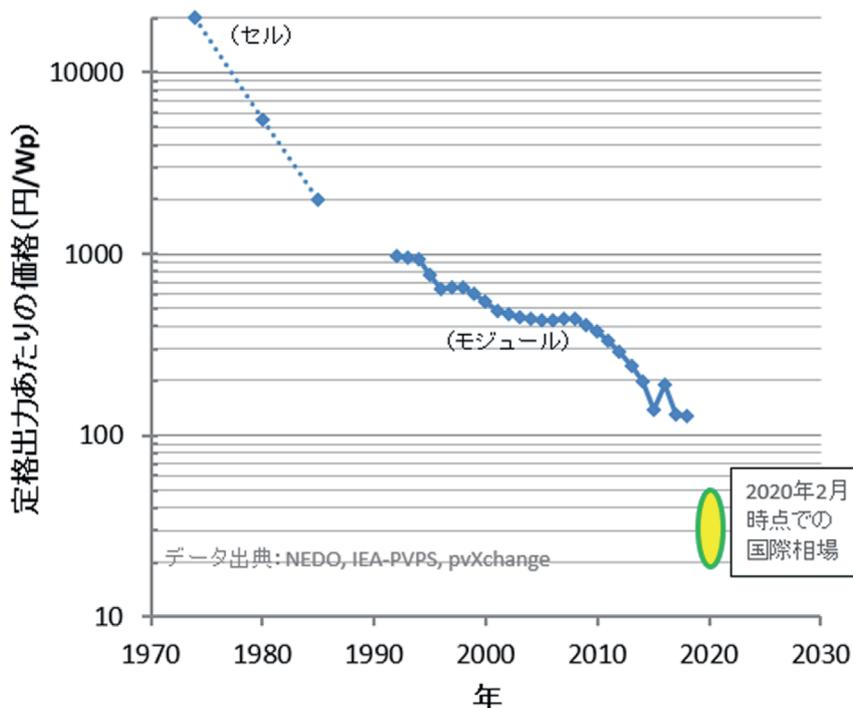


図1 日本における太陽電池の価格の推移

## 2. 途上国・新興国における低炭素化

再エネはとにかくコストは安くなったので、途上国でこれらを使った分だけ、エネルギーのコストを節約でき、排出量削減にもなる。逆に従来のように化石燃料ばかり使い続けていけば、温暖化ガスの排出コストが上がったときに経済的な大打撃となるリスクがある上、気候変動の影響を受けやすいのもこうした途上国である。かといって原子力発電も、確かに低炭素ではある一方、放射性物質取扱の技術や政情の安定性、相応の送配電インフラ等が必要となるために導入が難しいケースも多い。

このためこうした国々の電化ではコストだけでなく技術的にも再エネが向いているのだが、再エネにも欠点がある。多くの再エネ（バイオマス除く）は燃料が要らず、また20～30年以上の稼働期間全体で均せば低コストだが、代わりに初期投資が大きい。取り扱うための技術者やノウハウが不足し、融資を得るのが難しいケースも多い。途上国の温暖化対策で本当に必要なのは、単純なコストの安さよりも、技術・ノウハウ・人材と、それらの上に成り立つ融資の面での支援だと言える。確かに最初は大変であるが、長い目で見れば、化石燃料ばかり使い続けるよりも低リスクかつ低コストになるはずである。逆に言えば、途上国での温暖化対策が損だとする主張は、どこかの点で近視眼的、もしくは科学的に不適切な前提に基づいているものと思われる。とは言え太陽光や風力は時間や天候によって出力が変動する等、化石燃料とはだいぶ使い勝手が異なる。

## 3. 蓄電池は当面、「必須」ではない

太陽光や風力は、運転に燃料が要らない。だからこれらが発電しているときは最優先で活用し、他の発電所の燃料や貯水（ダム式水力）の節減を図るのが、最もお得な使い方となる。気象予報等を元に出力を予測し、それを参考に火力発電等の運転量を減らす（図2）。つまり今時の天気予報は出かける時の傘の要不要に留まらず、エネルギーインフラを支えるのに欠かせない情報となっている。

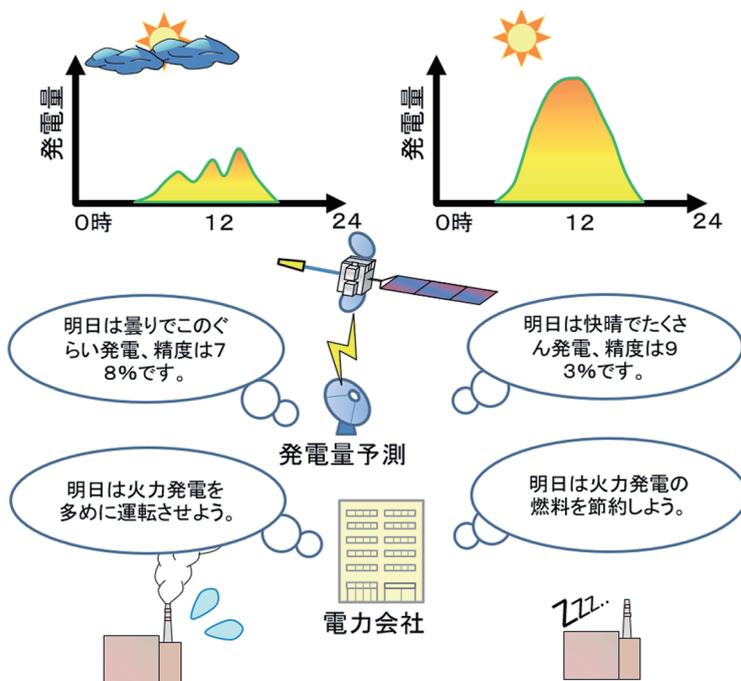


図2 出力予測に基づいた火力発電運転量節減のイメージ

発電側だけでなく、需要側にも調整の余地がある。例えば天候が晴れなら太陽光発電がたくさん発電するが、その時は電力を安くするのである（気象予測に基づいて、事前に計画できる）。するとその安いときを狙って、金属精錬を多めに行ったり、家庭ならばエコキュートを昼間に運転したりすることで、需要をその時間帯に誘導できる。このように需要の時間をシフトさせる手法を総称して、需要の能動化と呼ぶ [7]。

では需要を誘導してもなお発電量が余る時は、どうすべきだろうか。勿体ない、蓄電池に貯めて…と思われるかも知れない。だがそもそも太陽光や風力は、運転に燃料が要らない。年間の発電量の数%程度ならば、出力を抑えてしまう（出力抑制）のが合理的だ。その数%を捨てても平均の発電コストが数%上がるだけだが、それを防ぐために蓄電池をつけてコストが何割も上がったのでは、本末転倒である。

一般的には、日本のような国際連系線（国同士を繋ぐ送電線）が無い国であっても、太陽光や風力が年間の電力供給に占める割合が25～40%程度までは、蓄電池を使う必然性は無いとされる [7]。蓄電池の本格的な利用は、将来たとえば太陽光と風力のシェアが5割とか6割とかを超えてから初めて「必要」になり、それも電気自動車（EV）の蓄電池を拝借する形態が主体になるものと思われる。もっとも昨今のEVや蓄電池の価格低減ペースからすると、そこまで再エネのシェアが高まる前に、蓄電の利用が始まるケースも多そうである。

#### 4. EV が世界のエネルギー情勢を変える

定置型の蓄電池も、家庭用や、システムの短時間の調整用途には現状でも用いられ始めている。しかしEVならば電力系統側からはバッテリー自体のコストを考慮しなくて良いので、より優先的に活用するのが合理的である。EVが充電器に繋がっているとき、その蓄電池の能力を少し拝借して、需給調整に役立てることが可能だ。

電気自動車と言えば、高価、航続距離が短い、バッテリーが劣化する、低温に弱い、等の批判を思い浮かべる方も多いだろう。昨今のEVは、このいずれの欠点も克服しつつある。

- 車両価格：あと数年で内燃機関車と並び始める見込み [8]。
- 航続距離：500kmを超えるものも売られている。そもそも充電が速ければ、そんなに長い航続距離が必要ないケースも多いと考えられる（後述）。
- バッテリーの劣化：例えば特斯拉車（パナソニック製バッテリー）の場合、20万キロ走っても初期の9割以上の性能を保つようである [9]。
- 低温時の特性：取り出せる電力が減る。バッテリーヒーターの無い車種では4割落ちることもあるが、バッテリーを温める機構がついていれば例えば2割程度で済む。北国のノルウェーでも、新車の半分

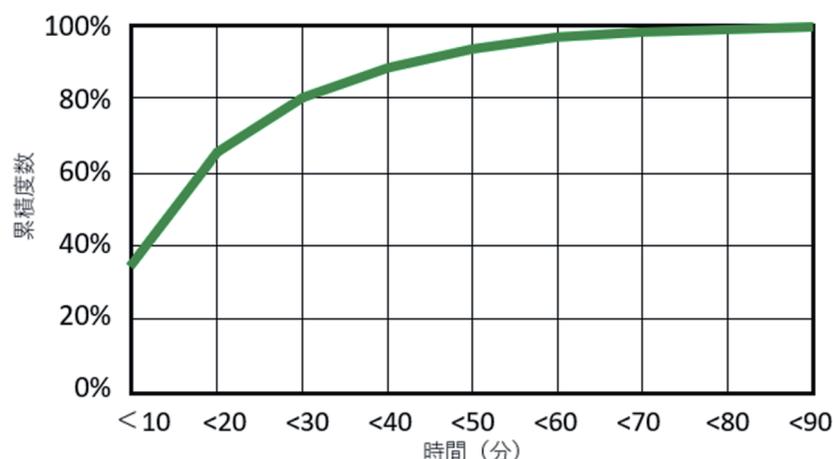


図3 高速道路のSA/PAにおける休憩時間の分布のETCデータからの推定結果 [10]

以上をEVが占めたりしている。(なおハイブリッド車でも、例えば15%ぐらい燃費が悪化したりするようである。)

このうち航続距離や充電時間については、特に誤解が多い。まず、給油時間と充電時間を比べてはいけない。内燃機関車の給油中は側を離れられないが、EVの充電中は車を離れてトイレや食事、買物等に行ける。つまり、休憩時間内に必要な量の充電が出来るかどうかが大切である。

ETC2.0のデータを用いた推計によれば[10]、殆どのドライバーは2時間走る前に休憩を入れる。時速100km/hならば200kmを走る時間である。そして一回の休憩時間は、6割が10分以上である(図3)。最新のテスラ・モデル3ならば最大250kWでの充電が可能だが、これだと200km走行分の電力(電費6km/kWhとして33kWhぐらい)を10分程度で充電可能である。つまり対応する超急速充電器さえ整備されていれば、半分以上のドライバーが、充電のために休憩時間を延ばさずにどこまでも旅を続けることが可能だと推定される。こうなると、航続距離は300km程度でも足りるようになると考えられる。

現時点では大半のEVの最大充電電力は50～80kW程度に留まっており、250kWもの電力に対応しているのはモデル3のみである。そして実際にモデル3のみが突出した売れ行きを示すのみならず、2019年12月の欧州の乗用車市場で3位に食い込んでいる。つまり現在のEVの技術でも、普通の内燃機関車と同じぐらい売れるようになったのである。他社の技術が追いつき、価格も下がってきたとき、乗用車市場の半分以上がEV化の圧力に晒される可能性が考えられる。予測通りであれば、それはほんの数年後かも知れない。

実際、多くの企業や国々がそのような変化を見越して、EVの普及促進や大規模な工場の建設を進めている。特に中国では大気汚染対策もあって、EVの導入を積極的に進めている。筆者は先日、比較的奥地の西安(人口1200万人)を訪問したが、二輪車・三輪車・配送トラック等はほぼ全てEV、路線バス・タクシーも何割もがEV化されていた。街中には大規模な充電ステーションが整備され(図4)、また300台ほど数えた限り、行き交う普通の乗用車も1割近くが既にEVに置き換わっていた。そもそも黒煙・白煙を吐くような自動車を一台も見かけず、恐ろしい勢いで変革を進めていると感じられた。



図4 西安の街中の充電ステーション。急速充電器が何十台も並ぶ

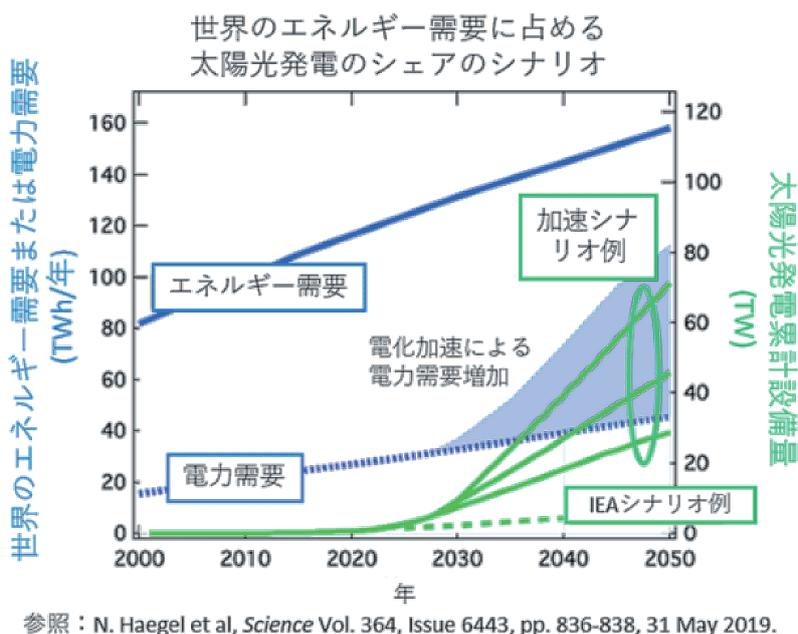


図5 高太陽光発電の普及シナリオと、電化加速によるエネルギーの低炭素化の概略図 [6]

150～350kW級の超急速充電器網の整備も、各国で進められている。だが我が国では、未だに50～90kW程度の充電器しか整備されていない。おそらくこれではEVの普及は進まず、日本だけが取り残されることになるだろう。これが日本にとって良い事だとは、筆者には思えない。にも関わらず、「EVは排出量削減にならない」等の言説がまことしやかに流布されているのが現状である。筆者が出典の論文まで遡って確認したところ、そうした主張はいずれも何か、最新のEVには適用できない条件が想定されていた。特にバッテリー製造時の排出量が100kg-CO<sub>2</sub>/kWhを超えるような大きな数値が設定されているケースが多いが、中国企業を含めて大手のバッテリーメーカーは軒並み再生可能エネルギーの利用を進めているため（何しろ安価なので）、今後のEVを論じるには不適切な想定であると言える。

一般論としては、EVは排出量削減になる[11,12]。電力の低排出化が進むにつれ、内燃機関車では決して実現できない水準まで、低排出化できる。逆にEV（もしくはFCV）の普及は化石燃料への依存を減らし、気候変動のリスクを抑制するために非常に有効であり、不可欠である。運輸部門の電化を進めることで、再エネによる低炭素化の余地が広がる（図5）[6]。

EVは経済的にもユーザの得になるのは時間の問題であり、技術的にも実用域に達しつつある。何よりもEVは反応が即時かつリニアで運転しやすく、静かで、振動も排ガス臭さもない。普及はもはや止まらないと見られており、たとえば2030年までに新車の3～4割がEVになるとする予測も、調査会社各社（BNEF, WoodMac等）から発表されている。その自動車を重要産業とする日本が、不適切な想定に基づく情報などを強調し、変化から現実逃避している状況は非常に危険ではないだろうか。

#### 4. 変化への対応は、情報の信頼性の確認から

先述のようにコストは安いことから、太陽光を始めとする低炭素エネルギーの普及自体は基本的に元が取れる話である。その普及が遅れている理由は、単なるコストの話だけではない。そもそも「コスト」がかかることはそれだけ新しいビジネスが生まれるということでもあるので、純粋に経済面で見れば中立の話である。

では何が問題かと言うと、「変化」そのものである。例えば昨日まで石炭を掘っていた人が、明日か

ら風力発電機のメンテナンス企業に転職するようなケースが発生する。今までとは違う技術やビジネスを習得して生きていかなければならない、その変化こそが「負担」なのである。その変化の負担を緩和しながらも変化を加速する、そんな行動が求められているのである。その変化を否定するために、科学的な根拠が十分示されていないような主張を意図的に流布する、といった事例も残念ながら散見される。今までと同じでいい、変化しなくていい、そのまま動かずにいればいいと囁く主張は、得てして耳に心地よく響く。誤った情報だと指摘されても、またそれを求めてしまう方々も居る。だが信頼性に欠ける主張に騙されれば、遅かれ早かれ、損をする。誤った情報に翻弄され、心身までも害しかねない。まさに麻薬であり、社会の害悪である。

そんな主張に対処する方法は、科学的な信頼性の検証である。別に専門的なことまで突っ込む必要はない。科学者、あるいはその卵の読者諸賢にとっても、自分の専門外の事柄について理解するのは骨が折れるであろう。そんな時のために、Web of Science や google scholar のような論文専用のデータベース（サイテーションインデックス）がある。これらを用いて、ある主張が本当にその分野の専門家達に認められているのか、反論やコメントが出ていないかどうか、確かめるのが大事である。

これはボクシングに例えれば、試合内容が全て公開され、誰でも戦歴が確認できることに相当する。ニセ科学の主張は大抵、インパクトファクターすらつかないような見せかけの「論文誌」や、一般向けの書籍や SNS、YouTube 等にしか載っていない。論拠としてまともな論文を挙げていても、特殊なケースを拡大解釈して一般論だと主張する等、その論文に書かれていない主張を勝手に付け加えたり、歪曲したりしている。

例えば、「温暖化は人為的では無い！」等の主張が巷で散々流布されている。しかしこれが本当ならばノーベル賞級の大業績で、当該分野の世界中の科学者が目にするような論文誌、たとえば Nature や Science や PNAS 等に投稿して、その主張の真偽を問うべきところだ（図6）。ところがこうした論文誌に、そんな論文は見当たらない。先のボクシングの例えで言えば、「オレはあの世界チャンピオン達よりも強いんだぞ！」とリング外でヤジっているような状態である。そんなヤジを飛ばす方に言うべきことは、一つである。「じゃあアンタ、チャンピオン達と同じリングに上がって、ちょっと揉まれてきて見せてくれよ」。Nature なり Science なりに投稿して、反論も全部科学的に退けてみせてくれ。これだ

(気候変動関連の例)	
論文誌名	インパクトファクター(世界最大級の論文データベースに基づく、影響力の指標。2020年2月時点)
<b>最も広く読まれる</b>	
Nature	43
Science	41
PNAS (米国科学アカデミー紀要)	10
<b>そこそこ読まれる</b>	
Environmental Research Letters	6
Geophysical Research Letters	5
Global Planet Change	4
Journal of Geophysical Research	3
<b>あまり読まれないかも</b> (比較的マイナーな学術論文誌)	
	1~2)
<b>世界では参照されない</b> (査読なしの機関誌等)	
	なし)

たとえば温暖化の真偽に関わるような事柄に本当に信頼性があるなら、科学的な大業績のはず。このあたりに掲載されないとおかしい。

図6 気候変動分野の論文が載る学術論文誌の例とインパクトファクター

けで、とことん突っぱねることが出来る。見るべきはヤジだけの観客でなく、リングの中の、当該分野の専門家達である。

エネルギーや環境の問題はいよいよ深刻化し、対策は待ったなしの状況である。だが必要な道具はもう粗方、我々の手の中にある。その筋道も見えている。今の日本に必要なのは、情報の信頼性確認を徹底することと、変化に対応していく姿勢そのものだと言えるだろう。本稿が何らかの形で読者諸賢の役に立てば、幸甚である。

## 参考文献

- [1] pvXchange, Price index, <https://www.pvxchange.com/en/price-index>
- [2] Bloomberg New Energy Finance, “The First Phase of the Transition is About Electricity, Not Primary Energy”, January 28, 2020.  
<https://about.bnef.com/blog/the-first-phase-of-the-transition-is-about-electricity-not-primary-energy/>
- [3] EWG, LUT, GLOBAL ENERGY SYSTEM BASED ON 100% RENEWABLE ENERGY, April 2019, [http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG\\_LUT\\_100RE\\_All\\_Sectors\\_Global\\_Report\\_2019.pdf](http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG_LUT_100RE_All_Sectors_Global_Report_2019.pdf)
- [4] Pehl et al., Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling, *Nature Energy* 2, 939-945 (2017) . <https://www.nature.com/articles/s41560-017-0032-9>
- [5] UNEP, Emissions Gap Report 2019, 26 November 2019.  
<https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019>
- [6] N.M. Haegel et al., “Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy”, *Science* 364, Issue 6443, pp.836-838, 31 May 2019. <https://science.sciencemag.org/content/364/6443/836.summary>
- [7] IEA, The Power of Transformation (邦訳：電力の変革)、2014.  
<https://www.nedo.go.jp/content/100643823.pdf>
- [8] Bloomberg New Energy Finance, Electric Car Price Tag Shrinks Along with Battery Cost, Apr 2019.  
<https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2019-04-12/electric-vehicle-battery-shrinks-and-so-does-the-total-cost>
- [9] Plug In America, Battery Survey: Tesla Model S.  
<https://survey.pluginamerica.org/model-s/charts.php>
- [10] 平井他、ETC2.0 プローブデータを活用した都市間高速道路における休憩行動分析、第36回交通工学研究発表会論文集、2016年。  
[https://www.i-transportlab.jp/\\_userdata/papers/1232\\_JSTE36\\_kyuukei.pdf](https://www.i-transportlab.jp/_userdata/papers/1232_JSTE36_kyuukei.pdf)
- [11] Marco Miotti et al., Personal Vehicles Evaluated against Climate Change Mitigation Targets, *Environ. Sci. Technol.* 2016, 50, 20, 10795-10804.  
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.6b00177>
- [12] <http://carboncounter.com/>

## 研究室紹介

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

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

### 電気関係研究室一覧

#### 工学研究科 (大学院)

##### 電気工学専攻

先端電気システム論講座 (引原研)

システム基礎論講座自動制御工学分野 (萩原研)

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野 (土居研) ☆

生体医工学講座生体機能工学分野 (小林研)

電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野 (和田研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野 (松尾研)

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座 (中村武研)

##### 電子工学専攻

集積機能工学講座

電子物理工学講座極微電子工学分野 (白石研)

電子物理工学講座応用量子物性工学分野 (竹内研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野 (山田研)

量子機能工学講座光材料物性工学分野 (川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野

##### 光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

デバイス創生部門先端電子材料分野 (藤田研)

#### 情報学研究科 (大学院)

##### 知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野 (黒橋研)

知能メディア講座コンピュータビジョン分野 (西野研)

##### 通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野 (守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野 (大木研)

集積システム工学講座情報回路方式分野 (佐藤研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野 (小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野

##### システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座医用工学分野 (松田哲研)

#### エネルギー科学研究科 (大学院)

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研)

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野 (中村祐研)

##### エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (白井研)

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野

エネルギー機能変換研究部門ナノ光科学研究分野 (松田一研)

#### 生存圏研究所

##### 中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野 (山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 (橋口研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野 (小嶋研) #

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

#### 学術情報メディアセンター

コンピューティング研究部門ビジュアルイノベーション研究分野

(小山田研)

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野

(中村裕研)

## システム基礎論講座 自動制御工学分野 (萩原研究室)

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

「ロバスト制御の基盤としてのスモールゲイン定理の一般化—因果性の定義の再考とともに」

### 1. ロバスト制御とスモールゲイン定理

フィードバック制御系の解析と設計に関する制御理論の研究において、図1の閉ループ系を扱うことは極めて重要である。その際、 $G_1$  が制御対象であり  $G_2$  が制御器である状況は、もっとも標準的なものといえる。一方、ロバスト制御の枠組みにおいては、 $G_1$  は制御対象と制御器からなる閉ループ系に対応し、 $G_2$  は制御対象のモデル化に際して不可避免的に生じる誤差に対応する。実際、前者の標準的な状況において制御対象がそのモデルとモデル化誤差の並列結合で表されるとき、モデル化誤差を  $G_2$  と見て、残りの部分を  $G_1$  と見ると、後者のような解釈に至ることは理解できよう。ロバスト制御とは、ラフに言って、モデル化誤差  $G_2$  自体は未知であるがその存在範囲だけなら既知とみなせる状況において、不正確でしかない制御対象のモデルに対して定められた制御器が閉ループ系の安定性（さらには所望の制御性能）を達成することを保証するように制御器を系統的に設計することをいう。そのための理論を発展させることが、あらゆる実システムの制御において極めて重要であることはいままでもない。

一方、スモールゲイン定理とは、やはりラフに言って、 $G_1, G_2$  のゲインをそれぞれ適切に定義したとき、それらの積が1未満であるという条件（スモールゲイン条件と呼ばれる）が満たされれば、図1の閉ループ系が安定であることを保証する定理である。これは基本的には安定性の十分条件を与える定理であるが、ロバスト制御の枠組みにおいて、「想定しうるモデル化誤差  $G_2$  に対する閉ループ系の中で、不安定になるものはない」と言えるか、という問としてとらえた場合には、しばしば必要十分条件を与えるものとなり、そのためロバスト制御のための理論基盤として極めて重要な定理となっている。

### 2. 既存のスモールゲイン定理の限界とそれを回避した一般化

図1の閉ループ系に対する外部入力時間が経過とともに0に収束するとき、スモールゲイン定理はラフに言って、スモールゲイン条件のもとで  $G_1, G_2$  の入出力も0に収束することを保証する。これは、スモールゲイン条件が、信号が閉ループを一巡するごとに減衰を繰り返すことを意味するためと直感的には解釈できようが、それは粗すぎる理解に留まる。一般にフィードバック制御が扱う  $G_1, G_2$  は動的システムであり、それらのゲインは各時刻ごとの入出力の間では実際には定義できないからである。むしろ、無限区間にわたる（あらゆる入力の中でもっとも不都合な）入力とそのもとでの出力の間で（それらの大きさを測る尺度、つまりノルムの定義に沿って）定まるものである。このことから、ゲインが各時刻ごとの入出力間に当てはまるのならば極めて自明なものと感じられるかもしれないスモールゲイン定理の証明は、数学的に決して自明でない。

標準的な証明は、 $G_1, G_2$  の因果性という概念を適切に定義しそれを利用するものであるが、その議論では  $G_1, G_2$  について暗黙の仮定をおくことになり、適用可能範囲が制限を受けている。実際、input-intolerant と呼ばれ、許容入力に制限のある系（そのような非線形系は数多く存在する）や、output-unsolitary と呼ばれ、与えられた許容入力に整合しうる出力が複数存在する系（やはり非線形系ではこのような状況が生じ得る他、初期条件に関する仮定を一切おかない場合にも生じる）が扱えない。

従来考えられてきた因果性の定義は、スモールゲイン定理の証明の鍵を握っているものの、より一般的な input-intolerant や output-unsolitary な動的システムに対しては不適切であることを明らかにするとともに、そのような系に対しても意味をなす因果性の新たな定義について論じ、それを利用して適用可能な  $G_1, G_2$  に対する制約を大きく緩和したスモールゲイン定理を下記参考文献では導出している。この成果は、ロバスト制御などの制御理論への基盤的貢献となることが期待される。

Y. Nagira, Y. Hosoe and T. Hagiwara, European Journal of Control, Vol. 50, pp. 51-61 (2019).



図1：閉ループ系

## 生体医工学講座 生体機能工学分野 (小林研究室)

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

### 「精神・神経疾患の病態解明と診断支援に向けた新たな MRI 技術開発」

当研究室では、先端の量子センシング技術の開発とその脳機能の解明や医療、福祉分野への応用研究を行っている。中でも磁気共鳴画像 (MRI) を中心とした機能や形態の計測とイメージングを主要なテーマと位置づけている。MRI は、現在広く臨床における画像診断に用いられているが、近年、超低磁場 MRI への関心が高まってきている<sup>[1]</sup>。我々はこれまで、超高感度光ポンピング原子磁気センサ (OPAM)<sup>[2]</sup>の研究・開発を行ってきたが、さらにそれをを用いて脳磁図などの生体磁気信号の同時計測も可能なマルチモーダルな超低磁場 MRI システムの実用化を目指している。OPAM のように低周波数帯域で超高感度な磁気センサを用いれば静磁場強度が  $1\mu\text{T} \sim 10\text{mT}$  で MRI を撮像可能な超低磁場 MRI の実現も可能であり、形態と機能の同時計測を可能とする次世代の医用イメージングシステムとしてその開発に大きな期待が寄せられている。

この研究に加えて、当研究室では MRI を用いて脳内の水分子の拡散情報を捉える拡散 MR 画像 (Diffusion MRI) の新たな解析法の研究も進めており、これまで、東大病院、阪大病院、広島大病院、順天堂大病院などと連携して、各施設において 3T-MRI により撮像された統合失調症、大うつ病、パーキンソン病などの臨床画像データに対して、白質神経線維の自動抽出ならびに各神経線維束に沿って病変を反映する拡散情報を定量的に求める新手法開発を行ってきた<sup>[3]</sup>。開発したソフトウェアを医学系の研究者に提供ないしは臨床データを共有する形で、医工連携研究として各疾患群と対照とするマッチングのとれた健常者群の拡散 MRI データの詳細な解析と比較・検討を行い、さらに各疾患のモデルマーマセット群と健常マーマセット群の拡散 MRI データの解析結果との対応づけを行うことを通して、疾患横断的・疾患特異的な病態神経回路の同定を目指して研究を行ってきた。

開発した拡散 MRI データの自動解析法においては、全神経線維束の自動クラスタリング (図 1) 並びに各神経線維束に沿った拡散情報のプロフィール解析が可能であり、精神・神経疾患の疾患横断的・特異的な病態神経回路の同定と病態解明において、resting-state fMRI から得られる機能的結合情報に対して相補的かつ重要な構造的結合情報を提供できることの意義は非常に大きい。拡散 MRI は、精神・神経疾患の病態解明、診断、治療効果の評価に有用であり、今後も医学系の研究者との密な連携により医療や脳科学に貢献する研究を進める。

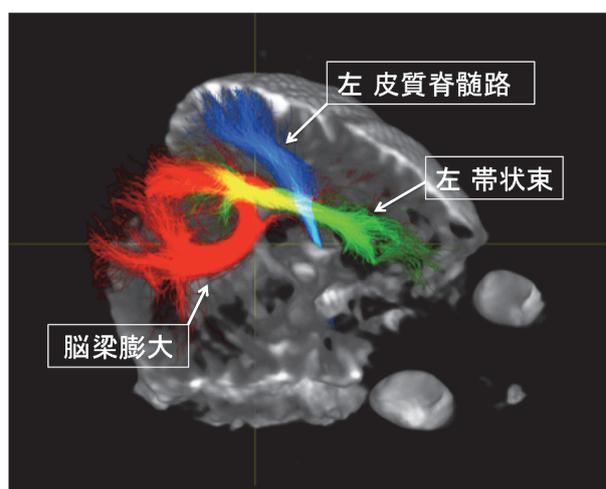


図 1 自動抽出された代表的白質神経線維束の例

- [1] 小林哲生, “医用工学と放射線技術科学との融合～期待される新技術：光ポンピング原子磁気センサと超低磁場 MRI”, 日本放射線技術学会雑誌, Vol. 74, No. 2, pp. 179-182 (2018)
- [2] 小林哲生, “SQUID & 光ポンピング原子磁気センサ”, 日本磁気学会誌, Vol. 13, No. 3, pp. 135-143 (2018)
- [3] S. Okuhata, et al, “An atlas-based whole-brain fiber-tracking method with automatic setting of an optimal starting plane in all parcels”, Journal of Neuroscience & Biomedical Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 28-36 (2019)

電磁工学講座 電磁回路工学分野 (和田研究室)

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

「Ethernet に対するパルス性妨害波の影響評価及びモデル化」

自動車の自動運転やロボット、工場内の機器自動化に象徴されるように、これからの電気電子システムには今まで以上の高信頼性が要求される。その多くはデジタル信号処理を伴うが、高速デジタルシステムの本質は高周波アナログである。また同時に、デジタル信号への妨害波の影響は、ビットエラーやパケットエラー等であり、通信・変調の方式に強く依存し、アナログ信号への妨害とは振舞いが全く異なる。そこで、外部からの電磁的妨害によるエラーが通信方式ごとにどのように異なるか調査し、さらに妨害波に強いデジタル通信システムの実現を目指した研究を行っている。

民生用や工場で使用される 100 BASE-TX の Ethernet 信号に幅の異なるパルス妨害波を印加した際のエラーの振る舞いを図 1 に示す [1]。妨害波を図 (a) のように差動信号線間に直接印加したとき、(b) に示すように、ちょうど通信の 1bit 時間 (8 ns) に近いパルス幅で、エラーレートが 2 桁以上上昇した。

同様の実験を車載用の 1Gbps Ethernet (1000 BASE-T1) について実施した結果を図 2 に示す [2]。妨害波パルス注入法は同図 (a) のように、現在 IEC 国際規格で審議されている方法に近いものとしている。この場合は、Ethernet ケーブルの長さを変化させると (b) に示すようにエラーレートが上昇するパルス幅が異なることが判明した。

上で述べた 2 例は、エラー発生状況は異なるが、特定のパルス幅で大幅にエラー率が上昇するという、従来は報告されていない現象であり、その原因を究明しモデル化することでエラーが起きにくい通信方式の開発につながることを期待している。また、電気信号による通信は電磁妨害を受けやすいので、電線の代わりに光ファイバーを用いる光 Ethernet を自動車内の通信に使用することが計画されており、その妨害波に対する信頼性評価法の開発と国際標準化を行っている。

このような電気電子回路とシステムのハードウェアとしての信頼性 (System Integrity: システム完全性) の確保は、半導体デバイスや回路の設計に加えて意図しない高周波電磁結合の制御も要求する。さらに通信方式やソフトウェアとも連携することで、次世代の高信頼信号処理系の実現を目指す。

参考文献: [1] S. Matsushima, T. Matsushima, T. Hisakado, O. Wada, "Trends of EMC standards for automotive network devices and communication quality of Ethernet in relation to parameters of pulse disturbances", IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, Vol. 7, No. 1, pp. 46-50, 2018. [2] 矢野ほか, "パルス性妨害波による車載 Ethernet の通信品質劣化に関する調査", 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-4-55, 2019.9.

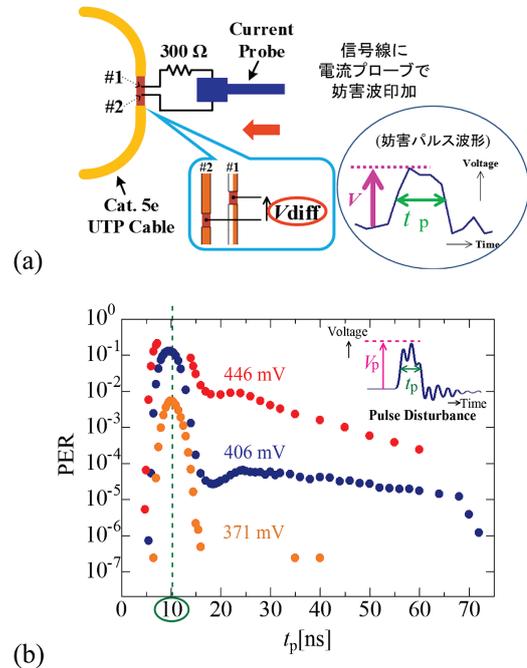


図 1 100 BASE-TX のエラー特性

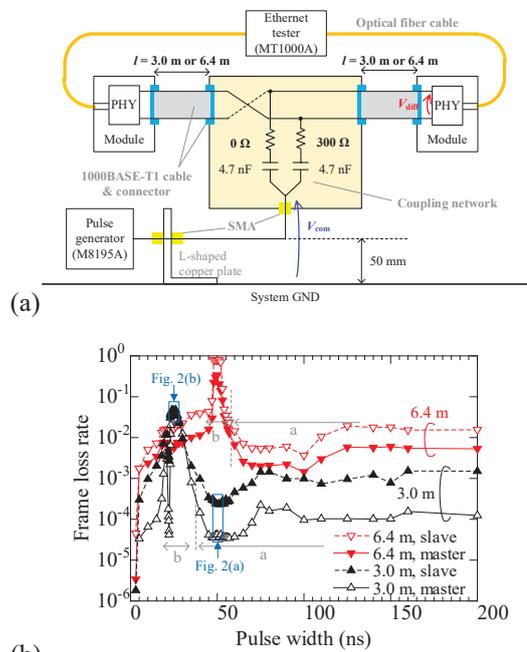


図 2 車載用 1000 BASE-T1 のエラー特性

## 電子物理工学講座 応用量子物性工学分野 (竹内研究室)

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

## 「ヘリウムイオン集束イオンビーム装置による高 Q 値ナノ光ファイバブラッグ共振器の開発」

光は、光子の集まりで出来ています。近年、この光子を自在に制御・計測することで、盗聴不可能な量子暗号通信や、既存のコンピュータでは解けない問題を解く量子コンピュータに関する研究が行われています。これらを実現する上で鍵となるのが、光子をひとつずつ発生させる単一光子源です。その場合、単一光子源から発生した光子を、単一モード光ファイバへ結合させる効率が課題でした。

これを克服するため、我々は、単一モード光ファイバの一部を波長程度まで細く引き延ばしたナノ光ファイバに共振器を組み込んだ、ナノ光ファイバブラッグ共振器 (NFBC) を開発、単一半導体量子ドットを結合させ、その発光を約 3 倍増強させることに成功しました [1]。しかし、発光体から発生する光子と NFBC との結合効率をさらに向上させる必要がありました。

これには高い光閉じこめ効率 (Q 値) を持つ NFBC の開発が不可欠です。しかし、これまで作製された NFBC の Q 値は 250 程度に限られていました。この原因として、加工に用いた集束イオンビーム (FIB) 装置の分解能が 20 nm と低いこと、光ファイバ内に残留したガリウム (Ga) イオンによる吸収の影響が懸念されていました。

今回、NFBC の高 Q 値化をめざし、1 nm 以下の高分解能と残留イオンの影響がないヘリウム (He) イオン FIB 装置を用いました。図 1 (a) に、作製した NFBC の走査イオン顕微鏡像を示します。320 nm 間隔のグレーティングが間隔をあけて二組加工されていることがわかりました。図 1 (b) は、片側 80 周期のグレーティングの場合の透過スペクトルです。Ga イオン FIB 装置を用い、同じ条件で作製した場合 (図 1 (c)) に比べ、共鳴ピークが明瞭に観測されるようになりました。このピークの半値全幅 (1.5 nm) から推定される Q 値は 450 と、Ga イオンの場合よりも向上しました。図 2 (a) は時間領域差分 (FDTD) 法を用いて計算した電場強度分布です。電場強度が共振器中央部で強くなっていることがわかりました。図 2 (b) は FDTD 法を用いて計算した透過スペクトルです。実験結果とほぼ一致するスペクトルが得られました。我々は、さらなる Q 値の向上をめざし、320 周期のグレーティングからなる NFBC を作製しました。その結果、4000 を超える Q 値をもつ NFBC を実現しました。これにより、単一発光体から発生する光子を 80% 以上の効率で単一モード光ファイバへ結合できるようになると推定されます [2]。

今後は、このように高い Q 値を持つ NFBC と単一発光体との結合に取り組んでいく予定です。

[1] Schell, Takashima, Kamioka, Oe, Fujiwara, Benson and Takeuchi, *Sci. Rep.* **5**, 9619 (2015)

[2] Takashima, Fukuda, Maruya, Tashima, Schell, and Takeuchi, *Optics Express*, **27**, 6792-6800 (2019)

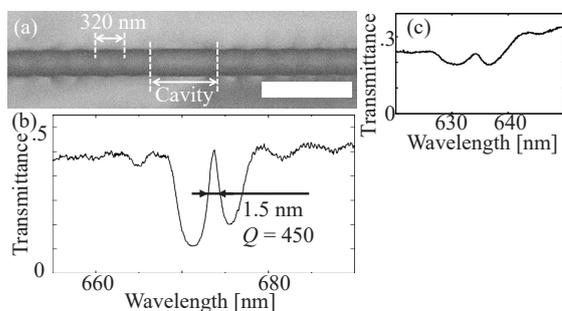


図 1 (a) He イオン FIB 装置を用いて作製した NFBC の走査イオン顕微鏡像。(b) 作製した NFBC の透過スペクトル。(c) Ga イオン FIB により作製した場合の透過スペクトル。

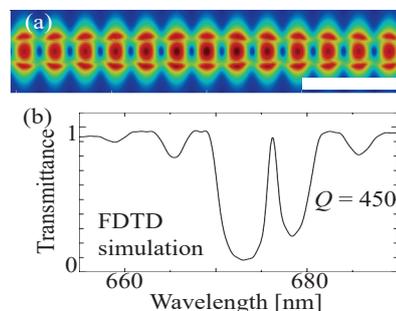


図 2 (a) 時間領域差分 (FDTD) 法で計算した電場強度。(b) FDTD 法で計算した透過スペクトル。

## 電子物性工学講座 半導体物性工学分野 (木本研究室)

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

## 「高温環境動作 SiC 集積回路実現に向けた電子デバイスの開発」

シリコン集積回路はパソコン、携帯電話をはじめとして、現代の人々の生活に無くてはならないものとなっています。近年、集積回路技術の恩恵をより広げようと、高温環境で動作可能な集積回路に注目が集まっています。例えば、航空機や自動車のエンジン燃焼室の燃焼効率向上に向け、燃料混合比のその場センシング・制御が望まれますが、燃焼室内の温度は最高 600℃に達します。既存のシリコン集積回路は、n 型および p 型の金属 - 酸化物 - 半導体 (MOS) デバイスを利用した相補型 MOS (CMOS) 回路で構成されていますが、シリコンが約 200℃で真性領域に入り、n 型と p 型の区別がつかなくなるため、それ以上の温度では原理的に動作不可能となります。200℃以上の高温環境下でも電子デバイス動作が可能な材料として、SiC (炭化ケイ素) を代表とするワイドギャップ半導体に注目が集まっています。SiC は広範囲の n 型、p 型の伝導型制御が可能のため、集積回路作製に適した材料と言えますが、高温環境で安定した回路動作を実現するためには、回路を構成するデバイス自身の特性を理解し、最適なデバイス・回路構成の選択が必要となります。今回は、接合型電界効果トランジスタ (JFET) を用いた高温環境動作 SiC 集積回路開発の取り組みを紹介いたします。

JFET を用いた回路構成として、ノーマリーオフ型 JFET による相補型 JFET (CJFET) 回路を提案しています。例としてインバータの回路構成を図 1 に示します。CMOS 回路の nMOS と pMOS を nJFET と pJFET で置き換えた単純な回路構成となっています。図 1 のインバータの室温 -900K における伝達特性の計算結果を図 2 に示します。計算には、高温環境における SiC の物性を反映させています。900K という高温であってもインバータ動作が見込めることがわかります。

CJFET の構成にはノーマリーオフ型 nJFET と pJFET を同一基板上に作製する必要があります。通常、JFET はエピ成長層をチャンネル部として使用しますが、n 型と p 型のエピ層を同一基板上に集積するのは結晶成長の都合上困難です。そこで、デバイス構造全てをイオン注入で作製することにより nJFET と pJFET の同一基板上への作製を試みました。実際にデバイスを作製したところ、nJFET、pJFET 共に室温から 400℃まで良好なトランジスタ動作を示し、その電気的特性はエピ成長した (高品質) SiC の移動度等の物性から予測される特性で解析可能であることがわかりました [1]。更に、デバイス構造を工夫することで、閾値電圧の制御性を向上させ、室温から 400℃におけるノーマリーオフ動作を達成しました (図 3) [2]。現在、作製したノーマリーオフ JFET を用いて CJFET の高温動作実証に向けて研究を進めています。

[1] M. Kaneko and T. Kimoto, IEEE Electron Device Lett. **39**, 723 (2018).

[2] M. Nakajima et al., IEEE Electron Device Lett. **40**, 866 (2019).

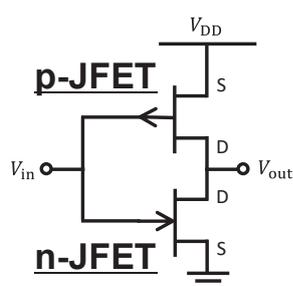


図 1 : CJFET インバータ

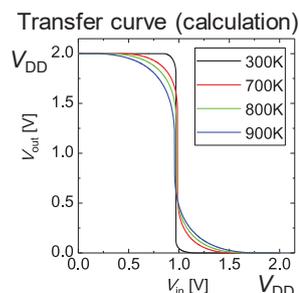


図 2 : 室温 -900K における伝達特性の計算結果

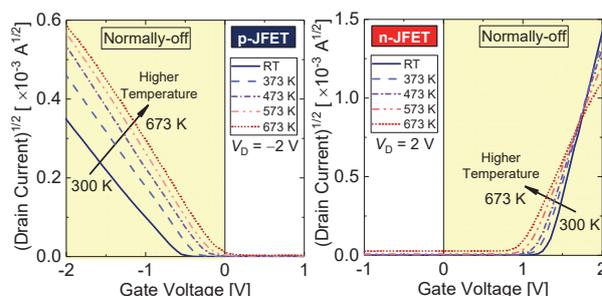


図 3 : 作製した JFET の室温 -400℃におけるゲート特性

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野 (山田研究室)

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

「原子間力顕微鏡を用いたナノスケール表面下構造の可視化に関する研究」

近年、材料・デバイス解析やバイオ・医療分野において、集積回路における欠陥分析や細胞内診断の需要が高まっており、ナノスケール空間分解能をもつ非破壊・非侵襲の内部診断法の開発が強く求められている。原子間力顕微鏡 (AFM) は、原子レベルで尖った探針をもつマイクロスケールの板ばね (カンチレバー) を用いて、探針と試料表面との間にはたらく原子・分子間力を検出し、試料表面の微細形状やナノ物性を計測する手法として広く利用されてきた。このカンチレバーは、ばね振動系 (調和振動系) として、特定の周波数 (共振周波数) の外力によって共鳴的に振動し、その周波数応答は共振スペクトルを示す。また、外力を与えなくても、周辺環境から与えられる熱エネルギーによってカンチレバーは常に振動しており (熱雑音振動 = 熱振動)、熱振動スペクトルも共振スペクトルを示す。探針が試料に接触した状態では、カンチレバーの共振周波数は、接触部の試料表面の固さ (= 弾性率) に応じて変化するため、熱振動スペクトルから共振周波数を算出すれば、外力を与えずに弾性率を求められると予想し、AFM において走査領域の全ての点において熱振動スペクトルを計測し、表面形状と同時に弾性率分布を可視化する走査型熱振動顕微鏡法 (STNM) を開発した。ここでは、STNM により厚い高分子膜内部に埋もれた金ナノ粒子の非破壊検出事例を紹介する。

図 1 (a) は、STNM による、高分子膜下の金ナノ粒子検出実験の模式図である。ポリイミド基板上に金ナノ粒子 (直径 40 nm) を散布し、これを膜厚 300 nm の高分子 (フォトポリマー) の膜で覆った試料に対し、コンタクトモード AFM の探針走査中に、走査領域内の各点において、カンチレバーの熱振動スペクトルを計測した。図 1 (b) は、高分子膜の表面形状像であり、図 1 (c) は各点で得られた振動スペクトルから算出された熱振動スペクトルのピーク周波数、すなわち接触共振周波数像である。図 1 (c) においていくつか見られる輝点は、接触共振周波数が高い領域、つまり弾性率が高い領域を示しており、表面下の金ナノ粒子の有無に対応していることが分かった。つまり、厚い高分子膜に埋もれた金ナノ粒子の検出に成功した。詳細なメカニズムはまだ明らかになっていないが、金の弾性率は高分子膜の弾性率より約 1 桁高いため、表面下の金ナノ粒子が探針の接触条件に影響をおよぼし、カンチレバーの接触共振周波数が変化することで表面下構造が可視化されたものと考えられる。

今後、基板・ナノ構造・高分子膜の材質や構造を変えて実験を行い、また理論計算との比較により可視化メカニズムを解明し、応用範囲を広げる研究を行っていく。また、本手法における測定時間を短縮することで、より実用的な計測手法として確立したい。

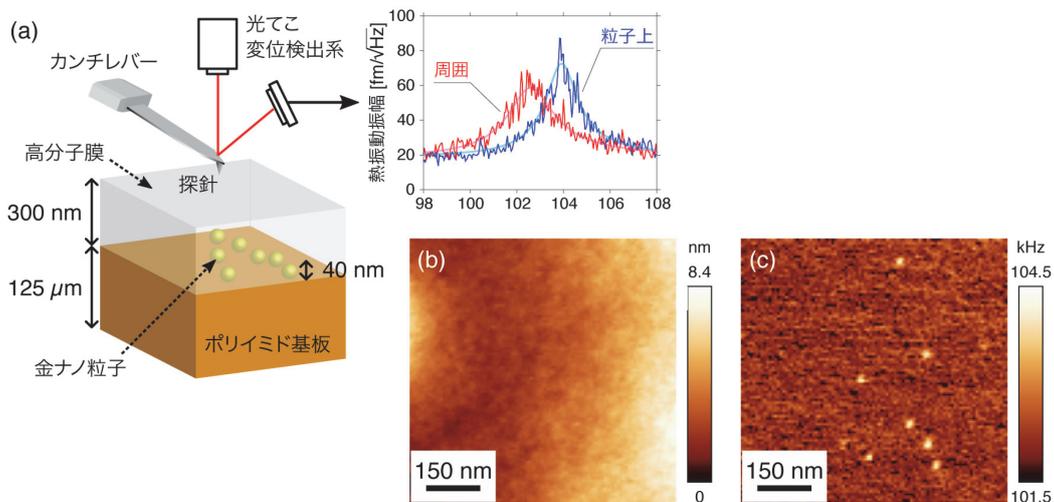


図 1 : (a) 走査型熱振動顕微鏡 (STNM) による高分子膜の内部に隠れた金ナノ粒子の可視化の模式図。(b) コンタクトモード AFM による高分子膜表面の表面形状像 (c) 同一領域の接触共振周波数像。

## 量子機能工学講座 光量子電子工学分野 (野田研究室)

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

## 「機械学習を用いたフォトニック結晶ナノ共振器の設計」

2次元フォトニック結晶(2D-PC)スラブ(薄板)をもちいたナノ共振器<sup>1)</sup>は、波長程度の微小領域への長時間の光閉じ込めが可能という特長をもつ。我々はこれまで、理論と実験の両面から2D-PCナノ共振器の低損失化(=高 $Q$ 値化)とその応用に取り組んできた<sup>2,4)</sup>。理論的には、2014年までにヘテロ構造共振器の空気孔位置の微調整によって1億以上の高い設計 $Q$ 値をもつ構造を見出し、実験的には2017年に波長程度の微小共振器としては世界最高の $Q$ 値である1100万という値をSi製共振器において達成した。このような2D-PCナノ共振器は図1に示すように多数の空気孔から構成されており、非常に高い構造自由度をもつが、高自由度構造の最適化は一般的に困難であり、これまで最大でも10個程度の構造パラメータの調整に留まっていた。これを解決すべく、我々は最近、機械学習を活用した最適手法を提案した<sup>5)</sup>。本稿ではその一部を紹介する。

2D-PCスラブ共振器は3次元構造であり、その解析には計算量の多い第一原理計算が必要とされる。そこで、適当な個数の訓練データを用いた機械学習により、構造パラメータから $Q$ 値を近似的に予測できる回帰関数を構築し、これを用いて構造最適化を行った。まず訓練データとしては図1に示すようなランダムに対称に穴位置をシフトさせた共振器を1000個生成し、その $Q$ 値を第一原理計算で求めた。そのうち900個を用いて図2(a)のニューラルネットワークを訓練したところ、図2(b)に相関を示すような回帰関数が構築できた。次に、この回帰関数を用いて予測 $Q$ 値の全穴シフトパラメータに対する勾配を逆伝搬法で計算し、予測 $Q$ 値が高くなる方向に構造を変化させていった。最適化結果の一例を図3に示す。この例では50個の穴位置を最適化した結果、すでに手動での最適化が行われていた基準構造の10倍以上の高い $Q$ 値が得られた。この他にも我々は2つのモードの $Q$ 値を同時に最適化することや、学習・最適化を繰り返し行うことで学習範囲を自動的に拡大してより大域的な構造最適化を行う手法<sup>6)</sup>などを提案・実証している。これらの手法は、共振器を含めた様々なフォトニックナノ構造の性能向上に有効であると考えられる。

## 参考文献

1) S. Noda, A. Chutinan, and M. Imada, *Nature* **407**, 608 (2000). 2) Y. Sato, T. Asano, S. Noda et al., *Nat. Photonics* **6**, 56 (2012). 3) R. Konoike, H. Nakagawa, M. Nakadai, T. Asano, and S. Noda, *Sci. Adv.* **2**, e1501690, (2016). 4) Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, *Nature* **498**, 470 (2013). 5) T. Asano, S. Noda, *Opt. Express* **26**, 32704 (2018). 6) T. Asano, S. Noda, *Nanophotonics* **8**, 2243 (2019).

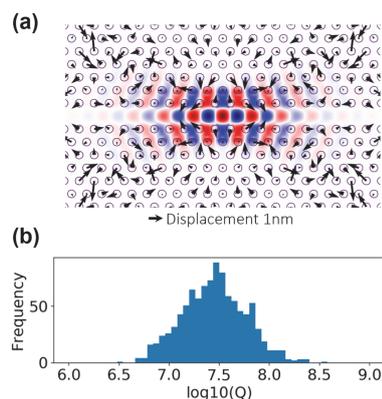


図1: (a) 学習に用いたランダム構造の一例、カラープロットは電界分布、矢印は空気孔の基準位置からの変位を表す。(b) 学習データとして準備した1000個のランダム構造の $Q$ 値の分布。

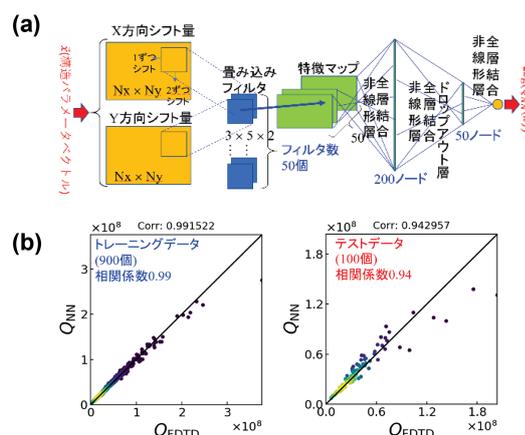


図2: (a) 用いたニューラルネットワークの構造。(b) 学習後のニューラルネットワークが構造から予測した $Q$ 値( $Q_{NN}$ )と第一原理計算で得られた $Q$ 値( $Q_{FDTD}$ )の相関。

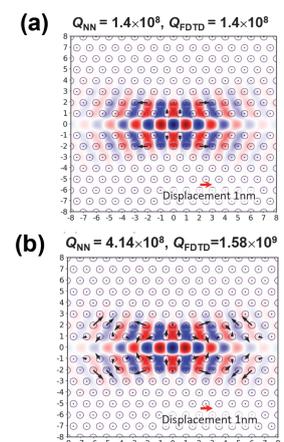


図3: 構造最適化の結果。(a) 基準構造。(b) 本手法で最適化された構造。

## 量子機能工学講座 量子電磁工学分野

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

## 「モード同期チタニウム・サファイアレーザーによる光周波数コムへの位相同期」

原子の共鳴線を基準とする発振器は原子時計とよばれ、非常に正確な周波数を出力する。近年、光領域にある共鳴線にレーザーの周波数をフィードバック制御した、光時計とよばれる原子時計の開発が進んでいる。その不確かさは、単位“秒”の定義と直結するマイクロ波原子時計の $10^{-16}$ をこえて、 $10^{-18}$ 前後に達するものが報告されてきた。一方、光周波数を直接電氣的に測定する方法が以前はなかったが、モード同期レーザーというパルスレーザーから発せられる光を利用する方法が2000年に発明された。モード同期レーザーの周期的な出力パルス光を周波数軸で見た姿は、広い周波数幅にわたり等間隔で発振しているレーザー光（モード）の集合になっている。その形状からこの光は光周波数コム（コム＝櫛）とよばれ、その等間隔性は $10^{19}$ 台まで確認されている。このモード間隔周波数（＝パルス繰り返し周波数）をマイクロ波原子時計に位相同期させることにより、マイクロ波周波数を基準としたレーザー周波数の測定が可能となった<sup>†</sup>。しかし、マイクロ波原子時計の不確かさは、光時計より劣る。不確かさ $10^{-18}$ で光時計どうしを比較する、そして、光時計から電氣的に利用できる基準マイクロ波周波数を不確かさ $10^{-18}$ で発生させるためには、光時計を構成するレーザーの方にコムを位相同期する必要がある。

本研究に関する前回の報告では（cue33号）、レーザーに対するコムへの位相同期を完全には実現できていなかった。これを達成するには、コムモード周波数をより高速で制御する素子が必要となる。そこで我々は、レーザー共振器を構成するミラーの位置を、ピエゾ素子を高速化して制御することとした。ピエゾ素子を高速化する方法の中で、ピエゾ素子を固定するマウントを工夫するものを試した。マウントは指先ほどの大きさの銅の内部をくりぬいて鉛を詰めたもので、その先端にピエゾ素子を接着して素子の機械的共振を減衰させ、位相変化を防ぐ（詳細は[1]を参照）。

このようなピエゾ素子を用いて、レーザー（#1）に対してコムへの位相同期を行った。制御帯域はピエゾ素子としては高速な80 kHzを実現した。図1は、位相同期中のレーザーとコムモードとのビート信号をスペクトラムアナライザで測定したものである。完全に位相同期が達成されているため、ビート信号のスペクトルの中心は、拡大してもアナライザの分解能で鋭く見えるだけである。図2は位相同期中のコム別の波長のモードと別のレーザー（#2）とのビート信号を示す。2台のレーザーの周波数は、同一の光共振器の（波長の異なる別の）共鳴に安定化されている。したがって、図2のスペクトルが制御帯域80 kHz以内で図1とほぼ同じとなっていることは、コムすべてのモードがレーザー#1に位相同期されていることを示す。原理的には図2のスペクトルの中心を拡大してもアナライザの分解能が確認できるだけのはずだが、実際には10 Hz以下ではあるが有限の幅と、100 Hz以内の領域で位相雑音の拡大が観測された。光ファイバーでレーザー光を伝送中に付加される位相雑音や、2台のレーザーの周波数安定化回路が原因として疑われる。なお、本研究の詳細は[2]に報告している。

（<sup>†</sup>正確には、コムモード周波数は、パルス繰り返し周波数の整数倍とこれをゼロまで外挿したあまり、オフセット周波数の和である。オフセット周波数は独立にRF基準周波数に位相同期しておく。）

[1] T.C. Briles *et al.*, *Optics Express*, **18**, 9739 (2010). マウントは井戸哲也氏（情報通信研究機構）よりご提供いただいた。

[2] S. Hatanaka, *et al.*, *Applied Optics*, **56**, 3615 (2017).

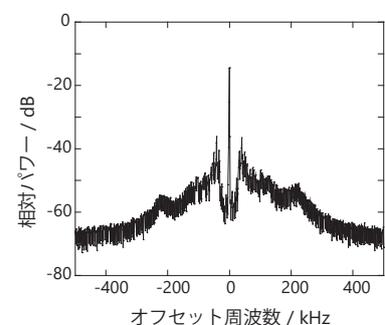


図1 コムとレーザー #1 とのビートスペクトル（分解能：1 kHz）

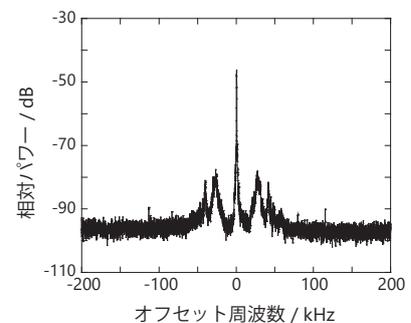


図2 コムとレーザー #2 とのビートスペクトル（分解能：30 Hz）

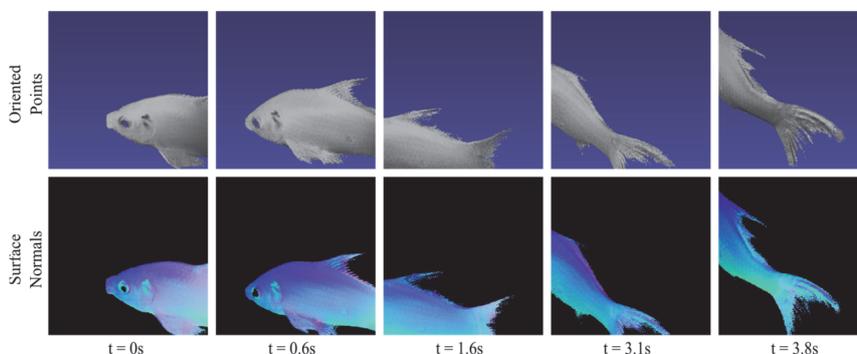
## 知能メディア講座 コンピュータビジョン分野 (西野研究室)

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

### 「水による光の吸収および反射を用いた三次元形状復元」

水は無色透明であるが、これはあくまでも可視光範囲内に限ったことであり、近赤外波長領域においては、水は光を吸収する。特に 800 ~ 1000nm の波長領域では、その吸収率がほぼ線形に変化する。そのため水中を伝搬する近赤外光は、この吸収率に比例した光路長のべき乗分だけその強度が減衰

する。この特性に着目し、異なる 2 つの波長の近赤外光の同一水中光路における観測輝度の比を用いて、光路長自体を算出する方法を我々が近年導出し、実時間での水中物体三次元形状復元を実現した。しかし、この手法は水中物体表面の各点の水面からの距離を求めるため、微細な形状の復元までは行えなかった。そこで、波長の異なる光の吸収率の差だけではなく、さらに物体表面への入射角度の変化から法線まで算出する手法を新たに導出した。求めた手法では、最低 4 つの近赤外光により照射された水中物体表面の各点について独立した推定値としてその三次元位置と法線を求めることができ、より細かな物体形状を捉えることができる。図に示すように、水中において動的にその表面を変化させる魚のヒレなど、微細な物体表面形状を各フレームそれぞれ独立して推定できることをさまざまな物体を例に実証した。光源のカメラに対する配置等の自由度も高く、用いられる光学機器が非常に簡便であるため、今後は内視鏡への組み込みなど、医療分野への応用を念頭に入れている。



水中を泳ぐ魚の法線を含む精密な三次元形状復元



水面反射を含む単一画像からの見えと三次元形状の復元

さらに、水による光の反射に着目した新たな三次元形状復元手法を開発した。京都観光などにおいて、神社仏閣をその前に広がる池などによる水面反射と共に捉えた写真を一般的によく撮像する。これは正面から捉えた仏閣等の建

物に加え、水面が鏡となって反射して得られる反射像を一枚の画像に捉えたものとなる。鏡面による反射は、その奥に配置される仮想視点からの写像となるため、実はそのような水面反射画像は（正面および水中から見上げた）2つの視点から同一の物体を撮像していることになり、上下のステレオ視により得られたものとなる。さらに、水面における光の反射がフレネル反射で記述でき、その角度依存性により撮像対象を最低 2 つの輝度で観測していることになる。これらの事実に着目し、対象物体の三次元形状を復元するのみならず、その見えも本来のダイナミックレンジの広い明るさに補正できることを示した。図に示すように、観光などで気軽に撮像された単一画像から、豊かな見えを持つ三次元モデルとして対象物体を復元できることを、様々な画像を例に実証した。この手法により、日々の写真の新たな利活用につながることを期待できる。

## 通信システム工学講座 知的通信網分野 (大木研究室)

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

## 「機械学習の予測モデルを用いた通信ネットワークの優先制御」

大木研究室では新熊准教授を中心に「機械学習の予測モデルを用いた通信ネットワークの優先制御」の研究に取り組んでいる [1]-[4]。

車の交通量や、人々の群移動（人流）、路面状態といった実空間情報のリアルタイム予測が、ナビゲーションや、運転支援、自動運転といったスマートモビリティに特に有効であると期待されている。その予測を可能にしたのは昨今の機械学習技術の発展である。加えて、スマートフォンや、自動車、ドローンといったモバイル機器がカメラなどのイメージセンサを搭載するようになったこと、および、イメージ処理技術により車両のナンバープレートの認識や、歩行者・車両の検出が可能になったことも大きく寄与している。通信ネットワークは、モバイル機器で取得された大容量のイメージデータを予測を行うサーバに到達させる必要がある。しかしながら、通信帯域の制限により、そのような大容量データをリアルタイムに遅延なく送ることは難しいという問題がある。

そこで、機械学習の予測モデルを用いた通信ネットワークの優先制御を提案してきた [1]-[4]。教師あり機械学習の手法を用いた場合、その予測モデルから各々の入力データが精度向上にどれくらい寄与するか、つまり、データの重要度を抽出することができる。これは特徴選択と呼ばれ、機械学習の手法とともに様々な手法が提案されてきた。抽出された入力データの重要度を通信ネットワークの優先制御にマッピングし、重要なデータほど優先的に送られるよう制御することにより（図1）、予測精度の向上に寄与するデータがサーバに到達するため、一部のデータによる予測でも高い予測精度を達成できる。実データを用いたシミュレーション評価により、モバイルネットワークでの有効性（図2） [1][2]、無線基地局-サーバ間の有線ネットワークでの有効性 [3] を示した。また、提案する優先制御は複数のサーバがデータや計算リソースを共有するネットワークでも有効であることが示されている [4]。これまでの研究はイメージデータの処理を理想化していたため、今後はその処理も考慮した検討を行なう。

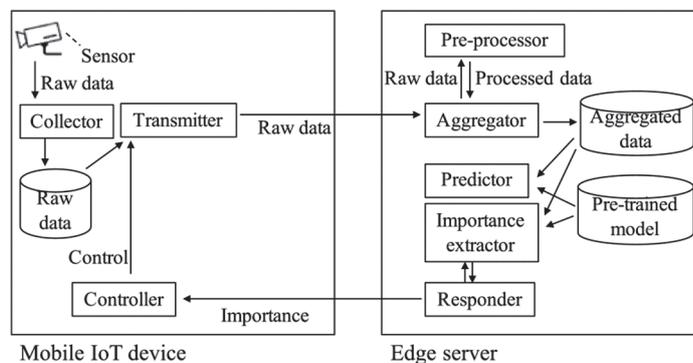


図1：システム構成

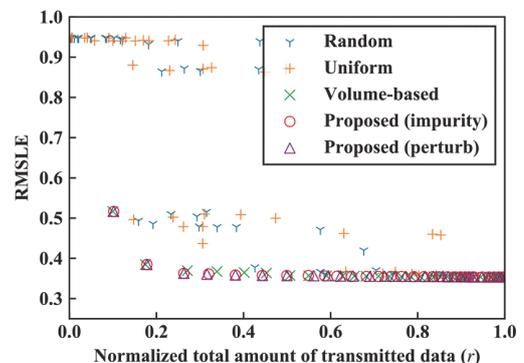


図2：通信帯域に対する予測精度

- [1] Y. Inagaki, R. Shinkuma, T. Sato, and E. Oki, "Prioritization of Mobile IoT Data Transmission Based on Data Importance Extracted from Machine Learning Model," IEEE Access, July 2019
- [2] K. Sato, R. Shinkuma, T. Sato, E. Oki, T. Iwai, T. Onishi, T. Nobukiyo, D. Kanetomo, and K. Satoda, "Modeling of Utility Function for Real-time Prediction of Spatial Information," IEEE Globecom, Dec 2019
- [3] Y. Yamada, R. Shinkuma, T. Sato, and E. Oki, "Feature-selection based data prioritization in mobile traffic prediction using machine learning," IEEE Globecom, Dec 2018
- [4] 上林, 新熊, 佐藤, 大木, "実空間情報のリアルタイム予測のためのエッジサーバ間連携," 信学会和文論文誌 B, 2019 年 11 月

## 集積システム工学講座 情報回路方式分野 (佐藤研究室)

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

「有機薄膜トランジスタのバイアス・ストレス劣化の主要因特定と回復成分を考慮可能な特性変動モデルの提案」

有機薄膜トランジスタ (Organic thin-film transistor; OTFT) は、印刷プロセス等により柔軟な基板上に製造可能である特長により、ウェアラブル・デバイス等への応用が期待されている。しかし、OTFT は、電圧印加によるバイアス・ストレスや大気中の水分や酸素との反応によってその電気的特性が変動することが知られている。こうした特性変動があっても正しく動作するロバストな OTFT 回路を、回路シミュレーションを用いて低コストに設計するため、経時的な特性変動を正確に表現できるトランジスタモデルが求められている。

本研究では、図 1 に示す構造を持つ、低電源電圧で動作する OTFT を対象として、テストチップ (図 2) を試作してその特性変動を求めた。ゲート電圧のみを印加し電流を流さないバイアス条件と、ゲート電圧とチャネル電流がともに作用するバイアス条件での特性変動を比較した結果、ゲート電界が特性変動を大きく左右することがわかった (図 3)。これは、OTFT の特性劣化が、主として絶縁膜、半導体層、およびそれら界面へのキャリア捕獲により生じるとするモデルを支持する結果である。そこで、キャリアの捕獲・放出に基づいて特性変動を表現する OTFT のトランジスタモデルを新たに作成した。具体的には、モデルパラメータである閾値電圧とキャリア移動度を、バイアス電圧とその印加時間の関数として記述することで、電流特性の経時的な変化を表現する。キャリア捕獲による特性劣化に加えて、キャリア放出による特性の部分的な回復についても正確に表現できる点が特長であり、回路の長期的な特性予測に役立つものと考えられる。提案モデルを用いて計算される閾値電圧とキャリア移動度を適用することで、バイアスを与えない場合 (no bias)、固定バイアス ( $V_{GS}$ ) および異なるバイアス電圧を組み合わせる場合 ( $V_{GS}/no\ bias$ ) について、OTFT の経時的な電流変動を正確に表すことが可能となった (図 4)。

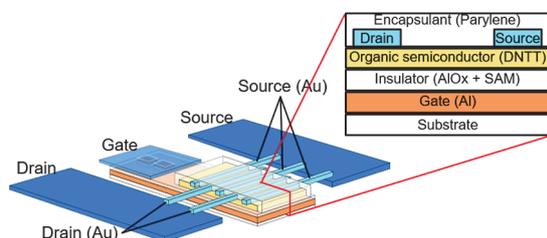


図 1 OTFT の構造

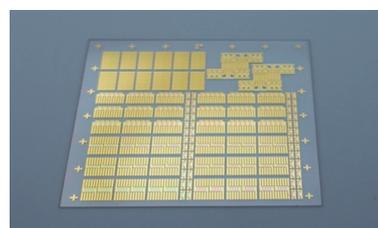


図 2 測定に用いた OTFT チップ

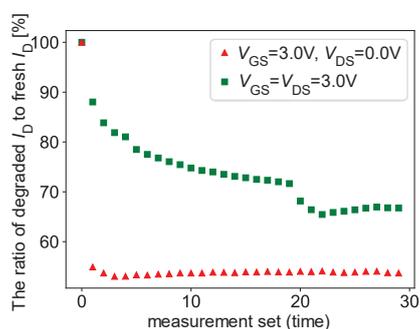


図 3 バイアス条件の相違による電流劣化量の比較

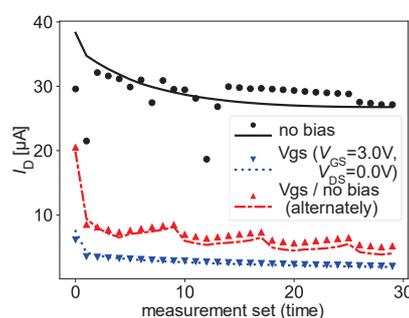


図 4 測定 (点) と提案モデル (曲線) のオン電流変化の比較

## 参考文献

- [1] K. Oshima, M. Shintani, K. Kuribara, Y. Ogasahara, and T. Sato: "Recovery-Aware Bias-Stress Degradation Model for Organic Thin-Film Transistors Considering Drain and Gate Bias Voltages," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 59, SGGG08 (2020), DOI: 10.7567/1347-4065/ab6460.

## システム情報論講座 論理生命学分野 (石井研究室)

<http://ishiilab.jp/kyoto/>

## 「脳波を用いたブレインデコーディング」

頭皮に取り付けた電極によって脳活動を観測する脳波は、測定機器の利便性の高さ、時間解像度の高さから、神経科学や工学の研究分野で広く使われており、近年では商業利用もされている。脳波は、多数の神経の電気活動の総和が、頭蓋骨や頭皮を通して観測される信号であるため、他の計測機器と比べて得られる情報は少ない。また、電極の揺れや頭皮の状態によって雑音が乗りやすい。そのため、脳波から意味のある情報を抽出するためには、最先端の信号処理・パターン認識・機械学習による数理的な手法が必要である。当研究室では、こうした数理的な手法の開発に加え、脳波の工学的な応用を目指した研究課題に挑戦してきた。ここでは、近年、当研究室で行った脳波研究を二つ紹介する。

**生体認証：**指紋や顔を使った生体的な特徴を使った個人認証は、スマートフォンをはじめ広く普及している。生体的な特徴の一つである脳活動は、「他者が特徴を観測することが難しい」、「複製が難しい」という利点を持つことから、より安全な認証を実現する可能性がある。脳波による個人認証では、測定環境やユーザ自身に起因する信号変動への対処が課題である。たとえば、電極位置のずれや、インピーダンスの変化、身体的な成長や精神状態の変化がこれにあたる。個人認証の場合、ユーザ登録と、認証は別日に行われるため、変動に頑健な個人固有の特徴を抽出する必要がある。この変動の影響を調査するために、連続しているとは限らない2日間、それぞれ午前と午後の合計4ラウンドにわたる脳波(電極の着脱も含む)を、20名分計測した。同一ラウンド内で計測された脳波で登録と認証を行うと、認証成功率はほぼ100%であったが、ある1ラウンドで登録して他3ラウンドの脳波を認証すると、認証成功率は大幅に低下した。これは、計測機器の着脱や時間経過が脳波に影響し、認証システムが個人特徴を捉えられていないためである。そこで、個人特徴を頑健に抽出するために共通辞書学習を提案した。提案法では、「脳活動パターンはユーザやラウンドで共通する少数のパターンの組み合わせで表現でき」、「組み合わせによって表現される脳活動パターンがユーザ固有の変換フィルタを通して、実際に脳波として計測される」ことを仮定した。このような仮定の下、共通辞書学習により、ラウンド間の変動による影響とユーザ固有の脳活動パターンをそれぞれ同定した。これにより変動の影響を受けない個人特徴を抽出することに成功し、チャンスレベル(5%)をはるかに上回る約50%の認証成功率を達成した。

**感情状態推定：**人の感情は健康や対人関係、意思決定に大きく影響する。客観的に感情を推定する技術は、人の「こころ」の理解に不可欠であり、医療やマーケティングなどへの応用が期待できる。しかし、感情は言語化が難しく、その定義・分類はいまだに確立していない。そこで、脳波をクラスタリングし、その結果によって感情状態を客観的に定義・分類することを試みた。具体的には、実験参加者に短い動画を見せたときの感情に関する回答と、動画鑑賞中の脳波が対になったデータセットを用意した。感情に関する回答で実験参加者は、4つの感情指標(興奮度、快感、支配度、好み)に対してそれぞれ強い弱いかを答えた。脳波を教師なし学習によって2つのクラスタに分け、クラスタと感情指標回答の結果を比較した。教師なし学習は、脳波の周波数スペクトルや統計量といった特徴量をハイパーグラフに埋め込み、グラフ上でクラスタリングを行うものである。結果として、各感情指標の強弱によってクラスタが分かれていることが示された。この結果から、脳波から得られるハイパーグラフは、感情に関連する脳波特徴を捉え、感情指標の強弱を表現できているといえる。このように、教師なしクラスタリングにより脳波が分類可能であることが示され、今回の実験で用いた感情指標以外の指標でも、脳波に基づき客観的に定義・分類できる可能性が示された。

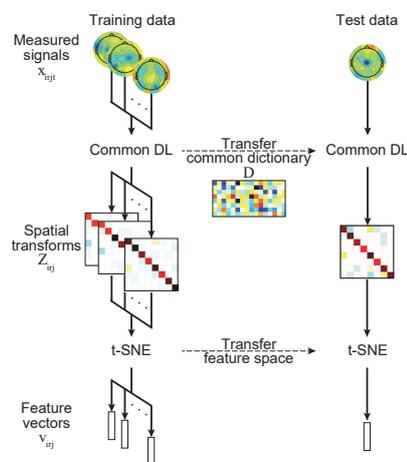


図1 共通辞書学習による個人特徴の抽出

## エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (中村祐司研究室)

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

### 「核融合原型炉に向けた 3次元 MHD 平衡解析」

当研究室では磁場閉じ込め超高温プラズマ、とくに軸対称性を持たないトーラスプラズマの閉じ込めに関して理論・シミュレーションと実験解析の立場から研究しています。

現在、核融合研究では科学技術的実証炉である ITER (国際熱核融合実験炉) が南仏に建設中であり、2025 年頃から実験が始まり、最終的には加熱に必要なエネルギーの 10 倍以上の核融合エネルギーを制御した状態で持続的に発生させる計画です。これらの核融合研究の進捗に合わせて、国内ではオールジャパン態勢で次の段階の原型炉の検討が始まっています。

超高温プラズマの磁場閉じ込めを考える場合、最初に検討する必要があるのは、プラズマの圧力勾配による力とそれを抑え込むための電磁力がバランスした状態、磁気流体力学的 (MHD) 平衡を見つけることです。この MHD 平衡計算は単純そうなのですが、軸対称性を持たないプラズマの平衡計算では、3次元計算が必要となるため、数値計算も容易ではありません。ITER や検討中の原型炉はプラズマ中に大きな電流を流すことで閉じ込め磁場を形成するトカマク型閉じ込め装置であり、一般的には軸対称性を有しており 2次元の解析で平衡が求められると考えられています。しかし、近年の研究の進展に伴い、詳細な実験や計測、数値解析が可能になると、無視できると考えられていた様々な磁場の非軸対称性がプラズマやアルファ粒子の閉じ込めなどに影響を及ぼす可能性が指摘されてきました。磁場の非軸対称性をもたらす要因は様々あり、当研究室でも種々の解析を進めていますが、特に比較的古くから問題とされてきたのはトロイダル磁場コイルの離散性 (図 1) に起因するトロイダル磁場 (TF) リップルです。図に示した TF コイルの離散性により、コイル間の磁場はコイル直下の磁場より僅かに弱くなり、これが磁場の非軸対称性をもたらします。TF リップルは、核融合反応により生成しプラズマの加熱にも必須であるアルファ粒子の損失につながるため、原型炉ではその閉じ込めの最適化が望まれます。

従来の TF リップルの解析では、軸対称平衡に TF リップルを重畳する方法で、アルファ粒子の損失が解析されていましたが、TF リップルが MHD 平衡そのものに影響を及ぼす可能性が指摘されており、本研究室では原型炉における TF リップルの影響を、3次元平衡を用いて調べています。

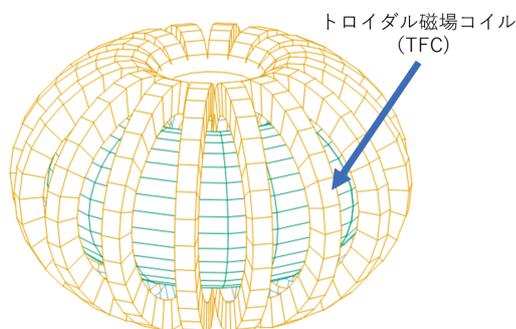


図 1 トロイダル磁場コイルの離散性

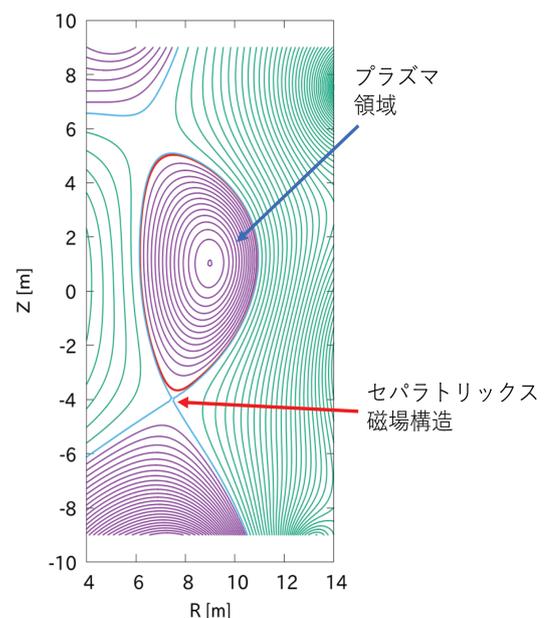


図 2 原型炉の MHD 平衡 (図はトロイダル磁束の等高線を示し、セパトリックス磁場構造に囲まれた部分がプラズマ領域)

## エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野 (長崎研究室)

[http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/index\\_j.html](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/plasma/index_j.html)

## 「プラズマに高速の粒子ビームを入射してプラズマを加熱する」

私たちの研究室ではプラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」を用いて、磁場閉じ込め方式による核融合プラズマの基礎研究をしています。具体的にはプラズマを高温・高密度で閉じ込める事のできる磁気容器(磁場配位)の最適化を行っています。最適かどうかを判断する手段として、プラズマに加熱電力を入力し、その応答を計測することで熱の輸送を調べる方法があります。プラズマも気体や流体のような物質と同じく、密度・流れ・圧力があり、質量・運動量・エネルギーの保存則に基づいた輸送方程式を解くことで、それぞれの輸送の性質(輸送係数等)を調べることができます。ところでプラズマはどのように加熱するのでしょうか?外部磁場を使って閉じ込められたプラズマの加熱方法の一つとして、電磁波を利用する方法と、今回紹介する中性の粒子ビーム(中性粒子ビーム入射:NBI)を使う方法があります。なぜ”中性”かは、イオンビームでは外部磁場によるローレンツ力で軌道が曲がってしまい、所定の位置に加熱パワーを入力する事が難しくなるからです。

NBIは大まかに大電流イオン源・中性化セル・偏向電磁石・受熱板(ビームダンプ・カロリメーター)・ドリフト管・真空排気装置、およびこれらを動作・制御するための各種電源・制御装置で構成されています(図1参照)。高電圧・大電流を発生させる高圧電源を始めとして、高速遮断・ノイズ対策・アーク放電・高真空および、これらを統合する制御装置等、電気電子工学でなじみ深い技術が多く使われています。ヘリオトロンJには加速電圧30kV・イオンビーム電流50A・パルス幅0.2秒の水素イオン源が2台ずつ、2系統設置されています。イオン源から引き出された水素イオンビームは水素ガスとの衝突により中性の水素(要は水素原子)ビームとなり、磁場に曲げられることなくプラズマ中に入射されます。水素ビームはプラズマ(イオン・電子)との衝突により電離され高速のイオンとなり、プラズマとのクーロン衝突を繰り返すことでイオンや電子にエネルギー・運動量を与えます。

電磁波を利用した加熱では、磁場強度に対する共鳴周波数やプラズマの密度に対する遮断周波数が存在するため、使用する電磁波の周波数によって運転領域が制限されますが、NBIを用いた加熱では磁場や密度に対する適用範囲が広く、これが利点となります。また直接プラズマに運動量を与えることができるので、容易にプラズマの流速を制御することができます。ヘリオトロンJではNBI加熱プラズマで高密度化( $\sim 1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ )に成功しています。磁気容器の幾何形状を変えると流速が変化することも実験的に明らかになり<sup>1)</sup>、理論的な予想と良く一致していることがわかりました。

## 参考文献

- [1] H. Lee, S. Kobayashi, K. Nagasaki, et al., Plasma Phys. Control. Fusion, **55** 035012 (2013).

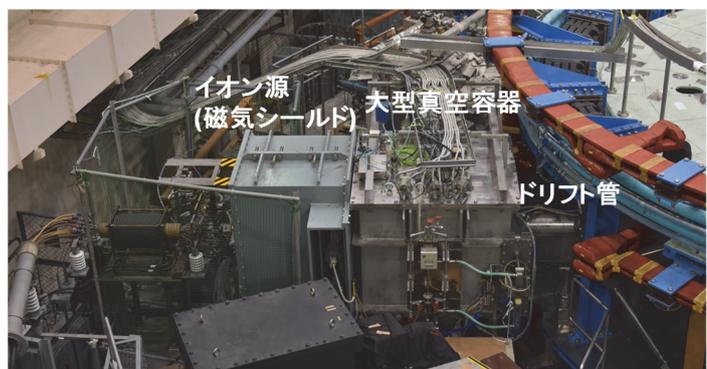
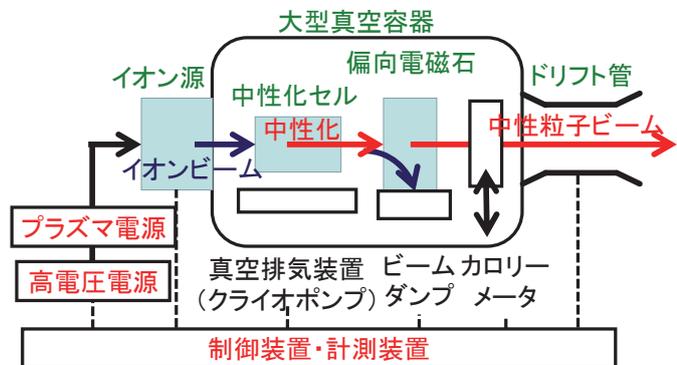


図1. (上) NBI装置概略図。(下) ヘリオトロンJに設置されているNBI装置写真

## 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/>

### 「新しいビーコン観測衛星に対応した受信機 GNU Radio Beacon Receiver 2 (GRBR2) の開発」

赤道・低緯度の電離圏に発生する赤道プラズマバブル (Equatorial Plasma Bubble、EPB と略記) は最も強い電離圏擾乱のひとつであり、太陽活動度の活発期に増大する。磁気赤道付近の日没後の電離圏下部に生じた密度低下域が、レイリー・テラー不安定によって拡大しながら高度千 km 以上まで急速に拡大する現象であり、研究のホットトピックであり続けてきた。しかしながら EPB を誘発する「種」が未解明で、日々変動の予測ができない。衛星から 2 周波数の電波を放射し地上で受信することで、電離圏の全電子数 (Total Electron Content、TEC と略記) が計測できる。この手法は EPB 発生予兆の研究に有効とされており、我々も活用してきた。約 10 年前に、我々はデュアルバンド (150MHz/400MHz) ビーコン実験用に GNU Radio Beacon Receiver (GRBR) を開発した。これは非常に成功し、日本および東南アジアにおける TEC 観測から、特徴ある研究成果を得てきた。しかし多くのビーコン衛星は老朽化し、利用可能な衛星の数が激減していた。

新しい衛星群を用いた衛星 = 地上ビーコン実験が始まろうとしている。それらの 1 つは、SRI International による Tandem Beacon Explorer (TBEx、3U サイズの cubesate 2 機編隊) であり、もうひとつは、台湾 / 米国による FORMOSAT-7/COSMIC-2 (以下では COSMIC-2) プロジェクトである。COSMIC-2 は 6 機の衛星で構成され、第 1 の任務として GNSS 掩蔽観測を実施するが、サブペイロードとして多周波数のビーコン送信機を搭載している。これら 2 種類の衛星は 2019 年 6 月 25 日に Falcon Heavy ロケットの 1 回のフライトによって、低軌道傾斜角が 24 度 (COSMIC-2) と 28 度 (TBEx) の軌道に打上げられた。今回、これらの衛星計画に対応する新しいビーコン受信機 GNU Radio Beacon Receiver 2 (GRBR2) の開発を行った。今回は、150MHz、400MHz、966MHz、1067MHz の 4 周波数を同時に受信できる装置となっている (図 1)。アンテナの設計開発は東京工科大学の松山真由美博士にご担当いただいた。すでにタイ・ベトナム・インドネシアへ配備済みであり、2019 年 9 月 6 日に COSMIC-2 からビーコン電波が送信された時点で即座に観測開始した (図 2)。その後も順調にデータ取得を進めている。TBEx 衛星は調整に時間を要したが、もうすぐビーコン電波の発射を迎える。

EPB は電離圏を通過する電波伝搬に大きく影響する。GPS 測位は、民間航空管制への応用が始まるなど社会インフラとして重要性が高まっているが、電離圏擾乱によって測位精度が低下したり測位ができなくなったりする、という悪影響が懸念されている。GRBR2 を活用した新たな赤道・低緯度電離圏研究を展開し、社会的要請に応えていきたい。

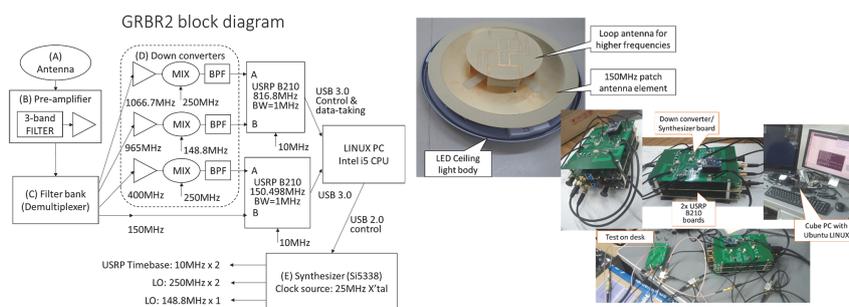


図 1 GRBR2 のシステムブロック図 (左図) とアンテナおよび受信ハードウェアの写真 (右図)

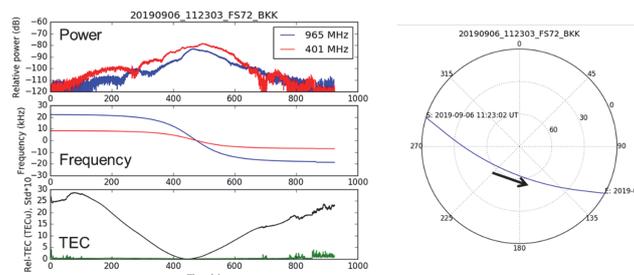


図 2 COSMIC-2 衛星と GRBR2 による初めての TEC 観測 (2019 年 9 月 6 日、タイ・バンコクからの観測) 左図：上から受信電力、周波数偏移、相対 TEC 値、右図：COSMIC2 衛星の方向 (西から東に飛翔)

生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野 (篠原研究室)

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/space/index-j>

「マルチパス環境における MIMO (Multi In Multi Out) マイクロ波送電の研究」

生存圏研究所篠原研究室では、エネルギー応用という観点からマイクロ波技術を捉え、マイクロ波を用いたワイヤレス給電(マイクロ波送電)に関する研究や、マイクロ波送電を用いた宇宙太陽発電所 SPS 実現を目指した研究、マイクロ波加熱応用研究等を行っている。これまでマイクロ波送電は電波法上に規定がなく、技術のみでは超えられない実用化の壁が存在した。しかし現在、米国のいくつかのベンチャー企業が進めるマイクロ波送電を用いたバッテリーレス IoT (Internet-Of-Things) デバイスシステムが連邦通信委員会 FCC から公式の許可を取り(2018-2019)、米国ではマイクロ波送電システムの販売を始められるようになったり、日本でも電波を管轄する総務省が情報通信審議会にマイクロ波送電を諮問にかけ、来年春以降の電波関連の省令の形成を目指して議論を始めたり(2018.12 から)しており、マイクロ波送電の実用化の機運が世界中で高まっている。

当研究室では、マルチパス環境における MIMO (Multi In Multi Out) マイクロ波送電に関し、現在研究を行っている。これはもともと米国 Ossia 社の "Cota" と名付けられたシステムで、ユーザーから送られてきたパイロット信号電波を送電フェーズドアレイアンテナで受信し、位相共役を取ることで高速に正確にマイクロ波エネルギーをユーザーに送ることのできる技術である(図1)。このシステムはレトロディレクティブと呼ばれ、これまで当研究室を含め [1] 世界中で研究が行われているが、これまでの研究は単一のユーザーのみでしかも反射がない直達波環境 (Line-Of-Sight (LOS)) のみで研究・実証が行われてきた。Cota はマルチパス環境であれば LOS 環境でなくても有効に動作するため、人体等にマイクロ波ビームを当てることなく高効率にユーザーにマイクロ波電力を送ることのできるシステムである(図2)。当研究室ではこれをさらに発展させ、複数のユーザーから放射された独立のパイロット信号をマルチパス環境下でレトロディレクティブを動作させても、複数のマイクロ波ビームを自動的に形成し、高効率でマイクロ波送電を可能とすることを実証した(図3)。これは他の方法で位置を既知としたユーザーへマイクロ波ビームを最適化する手法や、時分割でビーム方向を切り替える手法よりも高効率で高速にマイクロ波送電を行うことができることも証明されている [2]。今後は実験でこの効果を実証していく予定である。

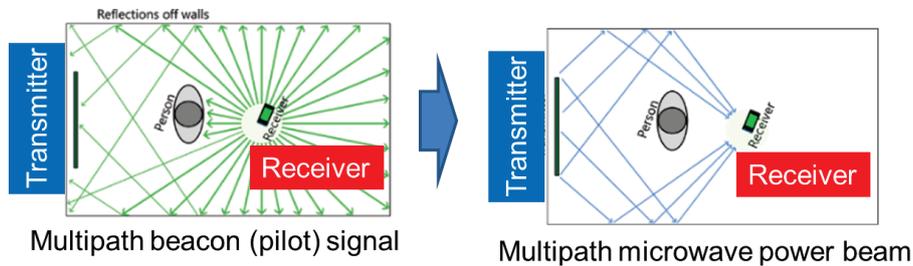


図1 マルチパスレトロディレクティブ (Cota) の動作原理

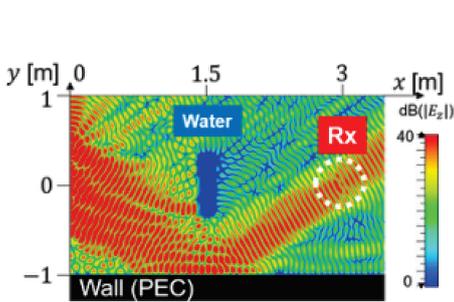


図2 障害物がある場合のマルチパスレトロ・マイクロ波ビーム

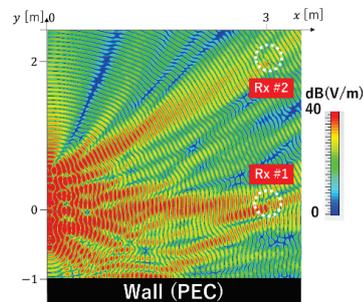


図3 マルチパス環境での MIMO マイクロ波ビーム

参考文献

- [1] cue41 号, 生存圏電波応用分野 (篠原研究室) の研究紹介, 2018
- [2] Sasaki, T., et al. Proc. APMC2019, pp. 831-833

## 博士論文概要

### [課程博士一覧]

曾我部 友 輔	「高温超伝導マグネットの粒子加速器応用に向けた交流損失および遮蔽電流磁界に関する研究」	平成 31 年 1 月 23 日授与
秋 田 浩 伸	「デジタル信号処理による車載用通信およびセンサコントロールの適応的な高性能化に関する研究」	平成 31 年 3 月 25 日授与
浅 田 聡 志	「Improvement of ON-Characteristics in SiC Bipolar Junction Transistors by Structure Designing Based on Analyses of Material Properties and Carrier Recombination」 (材料物性およびキャリア再結合の解析に基づいたデバイス構造考案による SiC バイポーラトランジスタのオン特性向上)	平成 31 年 3 月 25 日授与
木 南 裕 陽	「液中原子間力顕微鏡を用いた生体分子のナノスケール構造計測およびその表面相互作用評価」	平成 31 年 3 月 25 日授与
藤 田 朗 人	「Investigations of the Local Hydration Structure of Alkanethiol Self-Assembled Monolayers by FM-AFM」 (FM-AFM によるアルカンチオール自己組織化単分子膜の水和構造評価)	平成 31 年 3 月 25 日授与
栗 田 修 平	「Neural Approaches for Syntactic and Semantic Analysis」 (構文・意味解析に対するニューラルネットワークを利用した手法)	平成 31 年 3 月 25 日授与
坂 口 智 洋	「Anchoring Events to the Time Axis toward Storyline Construction」 (ストーリーライン生成のための時間と事象情報の対応付け)	平成 31 年 3 月 25 日授与
川 原 僚	「A Novel Catadioptric Ray-Pixel Camera Model and its Application to 3D Reconstruction」 (反射屈折撮像系の新たなカメラモデルと 3 次元形状復元への応用)	平成 31 年 3 月 25 日授与
國 政 秀太郎	「Productivity-oriented BEMS のための生理指標計測を用いたリアルタイム知的生産性評価に関する研究」	平成 31 年 3 月 25 日授与
Noersomadi	「Characteristics of tropical tropopause and stratospheric gravity waves analyzed using high resolution temperature profiles from GNSS radio occultation」 (GNSS 掩蔽による高分解能温度プロファイルを用いて解析された熱帯対流圏界面と成層圏重力波の特性)	平成 31 年 3 月 25 日授与
頭 師 孝 拓	「Study on Miniaturization of Plasma Wave Measurement Systems」 (プラズマ波動観測システムの小型化に関する研究)	平成 31 年 3 月 25 日授与
高 谷 和 宏	「電磁干渉環境下におけるデジタル無線通信の通信品質評価方法に関する研究」	令和元年 5 月 23 日授与

---

Manuel Antonio Sánchez Tejada	「Appearance of Symmetry Breaking in AC/AC Converters and Its Recovery Methods」 (AC/AC コンバータにおける対称性破れの発生とその回復法)	令和元年9月24日授与
持山志宇	「Power-packet Based Control and Its Application in Distributed System」 (電力パケットに基づく制御とその分散システムへの適用)	令和元年9月24日授与
中澤敏志	「Interface Charge Engineering in AlGaIn/GaN Heterostructures for GaN Power Devices」 (AlGaIn/GaN ヘテロ接合電界効果トランジスタの特性改善に向けた界面電荷制御)	令和元年9月24日授与
末光真大	「狭帯域熱輻射光源による熱光発電システムの構築」	令和元年9月24日授与
田谷昭仁	「Cooperative Vehicular Communications for High Throughput Applications」 (大容量車載アプリケーションに向けた車車間協調通信)	令和元年9月24日授与

#### [論文博士一覧]

山田雄一	「臨界電流のひずみ依存性が強い超電導線材の実用化に関する研究」	平成30年9月25日授与
------	---------------------------------	--------------

曾我部 友 輔 (雨宮尚之教授)

「高温超伝導マグネットの粒子加速器応用に向けた交流損失および遮蔽電流磁界に関する研究」

平成 31 年 1 月 23 日授与

高温超伝導マグネットは、低温超伝導マグネットと比較して高温での運転が可能であるため液体ヘリウムを使用しない伝導冷却が可能であり、冷却コスト及び熱的安定性に優れるという利点がある。また、低温超伝導線は高磁界下では臨界電流が顕著に低下するという問題のために到達可能な発生磁界に制約が存在するが、高温超伝導マグネットではこの制約を超えた高磁界を発生できるという利点もある。これらの利点を活かし、医療用や高エネルギー物利用加速器において、高温超伝導マグネットを使用する研究が活発に行われている。本論文では、高温超伝導マグネットを実現する上で課題となっている交流損失および遮蔽電流磁界を電磁界解析によって予測することを可能にするとともに、対策を検討した。

### 1. 交流損失：

重粒子線がん治療用回転ガントリーに用いられるマグネットに要求される諸元を満たす高温超伝導マグネットを設計 (図 1) し、構築した三次元電磁界解析モデルを用いてこのマグネットにおける発生交流損失特性について議論を行った。粒子加速器用マグネットにおいて特徴的な励消磁中に発生する交流損失について、高温超伝導マグネット中の三次元分布、および高温超伝導マグネット全体で発生する交流損失の時間変化を議論し、高温超伝導マグネットを運転するにあたって想定しなければならない発生交流損失の大きさ、及びこれを冷凍機によって冷却することが可能かの基礎的検討を行った (図 2)。

### 2. 遮蔽電流磁界：

同様に重粒子線がん治療用回転ガントリーに用いられるマグネットに要求される諸元を満たす高温超伝導マグネット対象に三次元電磁界解析を行った。その結果、コイルエンド部及びコイルエンド部に近い位置の直線部における遮蔽電流の影響を受け、遮蔽電流磁界の磁界精度への影響は加速器用マグネットとして無視できないものとなることが確認されたため、この低減策について検討した。二極マグネットの主発生磁界成分である二極磁界成分への遮蔽電流磁界の影響は、マグネットの通電電流を数%程度増減させることによって抑制が可能であり、電磁界解析の結果に基づいた通電パターンの調整により、二極磁界成分への遮蔽電流磁界の影響は抑制が可能となった。次に、誤差磁界成分である六極磁界成分への遮蔽電流磁界の影響は、マグネットの通電電流値やマグネット形状の調整では抑制が困難であることから、二極磁界を発生する主二極コイルの両端に、補正用六極コイルを配置することを提案した (図 3)。これにより、どの通電電流値及び発生磁界に対しても六極磁界成分を抑制可能なマグネット構成とすることができる一方で、要求発生磁界の点から補正用六極コイルは高温超伝導線材で構成せざるを得ず、そのために補正用六極コイル内に誘導される遮蔽電流が問題となりえるが、数値電磁界解析の結果、補正用六極コイル内の遮蔽電流は主二極コイル内の遮蔽電流の有無にはほぼ影響を受けず、かつ主二極コイル内の遮蔽電流は補正用六極コイルの有無にはほぼ影響を受けないことが確認された。結果として、主二極コイルの通電電流値の制御と補正用六極コイルの通電電流値の制御を組み合わせることにより、マグネット全体としての発生多極磁界成分を抑制することが可能となった。



図 1 解析対象のマグネット

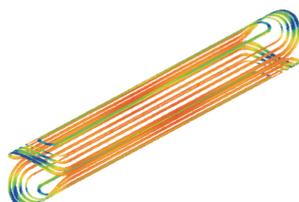


図 2 交流損失分布の計算例

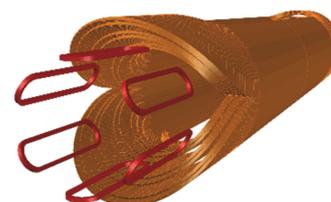


図 3 主二極コイルと補正用六極コイルの組合せ

秋 田 浩 伸 (木本恒暢教授)

「デジタル信号処理による車載用通信およびセンサコントロールの適応的な高性能化に関する研究」

平成 31 年 3 月 25 日授与

自動車の高性能化に伴い、車両内部のデータ通信量が増大しており、その高速化が要求されている。ところが、車両内部の環境はノイズが大きくかつ温度範囲も広い。さらにリアルタイム制御に用いる場合、低遅延も要求される。これらは民生・情報通信分野での高速通信技術では対応できず、新たな通信技術が必要となっている。本研究では、様々な用途の車載通信に対し、デジタル信号処理適用により高性能化が可能であること理論的に示すとともに、実証実験で効果を確認した。主たる成果は以下の4点である。

1. 波形をオーバーサンプリングし、そのサンプリング値の間の変化から1ビットの時間変動を計測しながら同時にデータ再生も行う技術を考案した。これにより従来同様の車載通信環境においても、低遅延を維持しつつ、ジッタと呼ばれる時間方向ノイズに対し耐性が10倍以上となることを理論的に示した。またFPGAによる実証にて100Mbps以上の通信速度が実現可能であることを示した。
2. 電気自動車のバッテリーのような超高電圧部品は、コントローラ(ECU)との間に絶縁素子としてフォトカプラが設けられる。しかし通信波形のデューティ比を崩すため、高速化できない問題があった。これを1.と同様に波形のオーバーサンプリングと信号処理により、リアルタイム性を劣化させることなく、デューティ比変動を補償可能であることを理論的に示すとともに、本機能のLSIを実試作し、従来比で3倍以上となる2Mbpsで通信可能であることを示した。
3. 車両内部に多数あるECUのプログラム量が増大しており、この高速書き込みが要求されている。ところが車両内の多数の分岐が存在する配線は、分布定数回路としての信号反射が高速化を阻んでいた。これに対し低コストな手法として、受信側となる各ECUには追加回路無くとも、それぞれのECUに対し最適な受信波形を形成可能な送信側の信号処理技術を考案、動作原理を理論的に示すとともに、PCBを試作し50Mbpsでの通信を実証した(図1)。
4. 自動運転では車両周辺を検知するセンサであるレーザレーダの高性能化が期待されている。このセンサは回転モータでレーザ照射方向を変化させているが、3.で用いた信号処理を通信からモータ制御に応用した。回転速度を方位に応じ高速変化させることで、センサの検出可能距離が向上することを理論的に解析、距離を40%向上可能な速度制御を実モータで動作確認した。

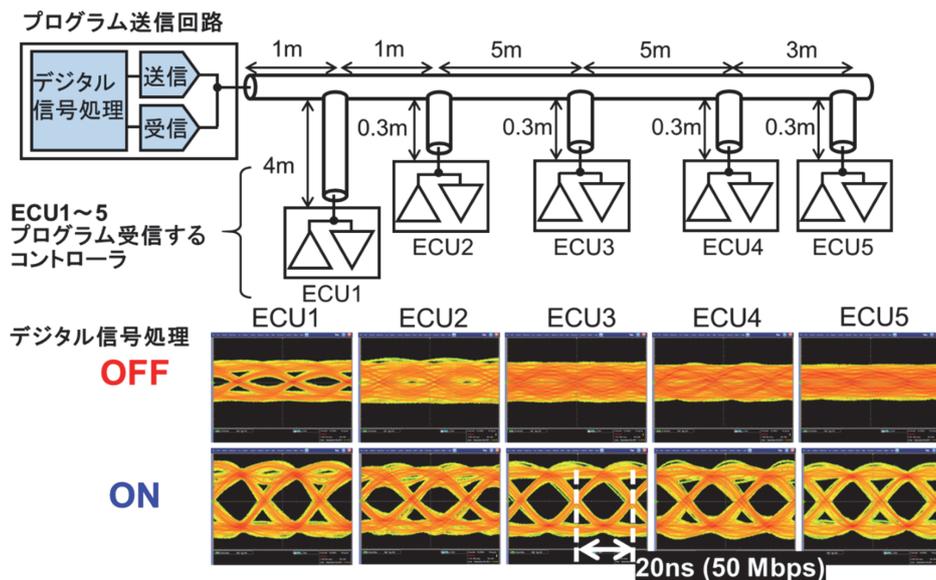


図1 信号処理の効果の1例 上段：実証に用いた接続構成 下段：各ECUの受信波形のアイパターン  
 信号処理ブロックを、プログラム送信回路にのみ配置し、各ECUには設けていない。信号処理OFFではECU受信波形のアイパターンは開かない。ONではアイパターン開口し正常なデータ受信が可能となる。

浅田 聡 志 (木本恒伸教授)

「Improvement of ON-Characteristics in SiC Bipolar Junction Transistors by Structure Designing Based on Analyses of Material Properties and Carrier Recombination」

(材料物性およびキャリア再結合の解析に基づいたデバイス構造考案による SiC バイポーラトランジスタのオン特性向上)

平成 31 年 3 月 25 日授与

シリコンカーバイド (SiC) を用いたパワーデバイスは、超低損失動作を実現できるとして注目されており、近年精力的に研究されている。その中でも SiC バイポーラトランジスタ (BJT) は、少数キャリア注入により耐圧維持層の低抵抗化 (伝導度変調) が起こりうるとして、特に高耐圧領域での活躍が期待されている。しかし、実際に SiC BJT を作製すると、電流増幅率が低く、オン抵抗が高い (伝導度変調が起きず、導通損が大きい) といったオン特性に関する問題が生じる。これらのオン特性の制限要因を明らかにし、性能向上することは重要な課題となっている。本研究では、材料物性やキャリア再結合、デバイス構造といった包括的な観点からオン特性の制限要因解明に取り組み、オン特性向上指針を提示し、それに基づきオン特性を向上した。以下に、概要をまとめる。

• p 型 SiC の電気・光学的特性の詳細な評価

BJT のベース層には p 型 SiC が用いられている。ベース層は、BJT の電気的特性に大きく影響を与えるため、高性能 BJT の設計・実現には p 型 SiC の電気的性質の系統的な知見を有する必要がある。そこで本研究では、様々なドーピング密度を有する p 型 SiC のホール効果測定を行った。実験結果にもとづき、ホール散乱因子の導出や、抵抗率の温度・ドーピング密度依存性の解析式の提示を行った。また、電気的性質に加えて、光学的特性も調べ、励起子発光強度と不純物密度 (Al ドーピング密度) の比例関係を提示した。

• オン特性制限要因の解明

増幅率の制限要因解明に向けて増幅率の温度依存性を評価し、特に低温で高注入状態が制限要因となることを明らかにした。また、様々な表面処理を施した pn ダイオードの順方向特性を評価することで、表面再結合速度のデバイス作製プロセス依存性を定量的に明らかにした。その知見にもとづき BJT の増幅率低下の支配的要因が表面再結合に起因することを明らかにし、増幅率向上のための最適な窒化プロセス条件を提示した。

オン抵抗が高くなる要因を明らかにするため、BJT のデバイス構造に起因する寄生ダイオードと高いベース拡がり抵抗に注目し、等価回路モデルを提案して解析した。その結果、寄生ダイオードを通じてベース電流が分流することがオン抵抗増大の要因であることを明らかにした。提案した等価回路モデルをもとに、オン抵抗増大を防ぐための設計条件を定量的に提示した。また、デバイスシミュレーションを用いて、コレクタ層へのキャリア注入を解析することで、ベース拡がり抵抗の低減および寄生領域の拡大により伝導度変調が強まることを明らかにした。

• オン特性向上 (伝導度変調の実現)

上記で得られた知見 (p 型 SiC の抵抗率や最適な窒化処理条件、設計指針など) をもとに、実際に SiC BJT を設計・作製した。Al イオン注入によりベース拡がり抵抗を低減することで、明白な伝導度変調を初めて実現し (図 1)、高い増幅率 (140) と低いオン抵抗 (耐圧維持層の抵抗の 50%) を実現した。また、SiC BJT における伝導度変調の温度依存性に関する知見を初めて得た。

以上のように、包括的な基礎知見にもとづいて SiC BJT を作製することで、BJT のパワーデバイスとしての優れたポテンシャルを引き出し、低損失動作 (伝導度変調) を初めて実証した。

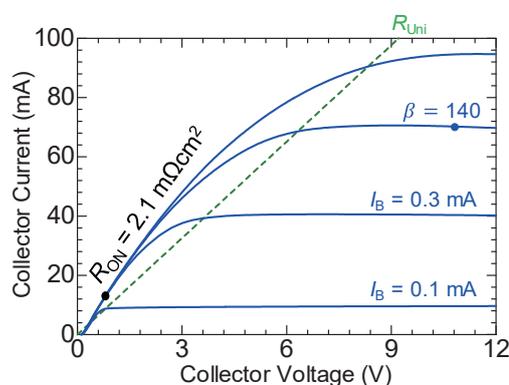


図 1: オン特性の向上および明白な伝導度変調の実現。耐圧維持層の抵抗で決まる特性 (緑破線) に対し、作製したデバイスの特性 (青線) の方が大きい電流が流れている。

木 南 裕 陽 (山田啓文教授)

「液中原子間力顕微鏡を用いた生体分子のナノスケール構造計測およびその表面相互作用評価」

平成 31 年 3 月 25 日授与

ナノバイオテクノロジーは生体分子を用いた微細デバイスの作製や新規治療薬の開発を目的とした技術である。ナノバイオテクノロジーにおいて生体分子は欠かせない要素の一つであるが、液中環境下での構造や生体分子間相互作用に関する評価は十分に行われていない。原子間力顕微鏡 (AFM) は液中環境下において、ナノスケール分解能で構造観察できる手法であり、生体分子機能計測手法としても期待されている。本論文では、AFM を用いた生体分子の構造解析および相互作用評価を行い、さらに応用した結果について述べている。

DNA のコンフォメーションや表面電荷密度は DNA-タンパク質複合体形成に密接に関わっている。本研究では、通常の右巻きの B-DNA とは異なる左巻きの Z-DNA を作製し、液中 AFM により 2 重らせん構造を可視化した (図 1)。また、液中 AFM を用いた 3 次元フォースマップ測定を行い、その結果から表面電荷密度を算出し、Z-DNA は  $-116 \text{ mC/m}^2$ 、B-DNA は  $-163 \text{ mC/m}^2$  であることを明らかにした。

抗原抗体反応は生体分子間相互作用の代表例として知られている。近年、ある IgG 抗体分子が特定の条件下において 6 量体化し、さらに 2 次元結晶化することが明らかとなった。本研究では、いくつかの IgG 抗体分子について 6 量体が形成されることを確認し、6 量体形成が特定の IgG 抗体分子に限られず広く見られる現象であることを示した。また、IgG 抗体分子の 2 次元結晶に抗原性分子を滴下し、液中 AFM 観察結果から結合速度定数を算出し、 $10^4$  オーダーであることを示した。

Annexin V は負帯電の脂質分子を含む脂質 2 重膜上において 2 次元結晶を形成することで知られるタンパク質分子である。本研究では、Annexin V 2 次元結晶の液中 AFM 観察を行い、サブ分子スケールでの構造計測に成功した。また、Annexin V 2 次元結晶の空孔に別のタンパク質分子を配置し、タンパク質ナノアレイを作製した (図 2)。さらに、配置したタンパク質に特異的に結合する分子を滴下し、結合能評価を行い、特定の分子の特異的検出が可能であることも示した。

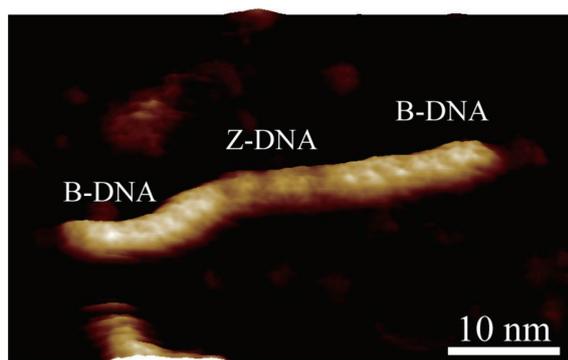


図 1: B-DNA および Z-DNA の高分解能観察結果。

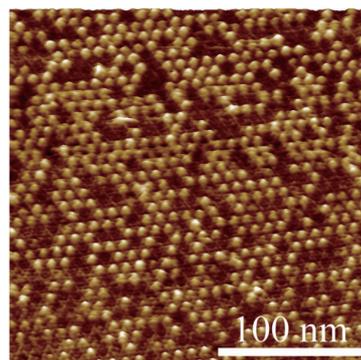


図 2: Annexin V 2 次元結晶をテンプレートとしたタンパク質ナノアレイの高分解能観察結果。

藤田朗人 (山田啓文教授)

「Investigations of the Local Hydration Structure of Alkanethiol Self-Assembled Monolayers by FM-AFM」

(FM-AFM によるアルカントール自己組織化単分子膜の水和構造評価)

平成 31 年 3 月 25 日授与

水和構造とは固液界面において、水分子が示すバルクとは異なる特異的な構造を指す。電極上での化学反応や触媒反応など、様々な現象で水和構造は影響すると考えられている一方、水和構造が各現象にどのように影響するか、また、そもそもどのようなメカニズムで水和構造が形成されるか、未だ明らかになっていない。そこで、本研究では周波数変調方式原子間力顕微鏡 (FM-AFM) を用いて、水和構造の形成メカニズム解明を目的とした。本論文ではアルカントール自己組織化単分子膜 (SAM) をモデル試料に選定し、表面の親・疎水性や形状、電位が水和構造に及ぼす影響を評価した結果について述べている。

アルカントール SAM では末端官能基や SAM の作製方法を制御することで表面の親・疎水性や表面形状を制御することが可能である。親水性のヒドロキシル (-OH) 基終端の SAM と疎水性のメチル (-CH<sub>3</sub>) 基終端の SAM の水和構造を比較したところ、OH SAM では水分子が局所的に分布しているのに対し、CH<sub>3</sub> SAM では水分子が表面に一様に分布していることが分かった。これは、水分子が末端官能基と水素結合を通して強く相互作用するか否かを反映している。一方、OH SAM について作製温度を制御して同じ分子で面内の周期構造が異なる SAM を作製し、水和構造計測を行ったところ、これらの SAM が異なる水和構造を示すことが分かった。これは 50 pm 以下の非常に小さな凹凸差でも水和構造に影響することを示している。

また、電位制御下での水和構造計測を目的として、電気化学 AFM (EC-AFM) 用の液セルの開発を行った。バイポテンショスタットを用いることでカンチレバーと試料の電位を共に制御することが可能となり、電位印加時も安定に水和構造計測が行える環境を構築した。EC-AFM を用いてグラファイトの水和構造を計測したところ、負電位で水和構造が計測されたのに対し、正電位では水和構造が消失する挙動を示すことがわかり、表面電位と水和構造は密接に関係していることを明らかにした。

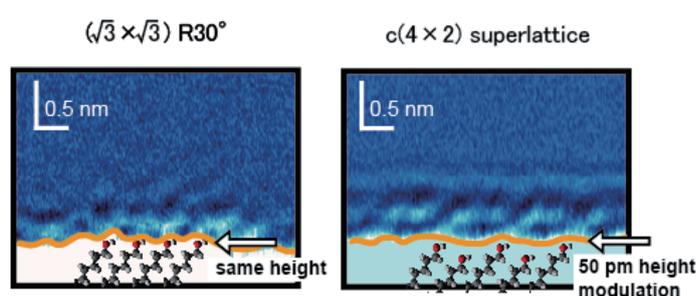


図 1

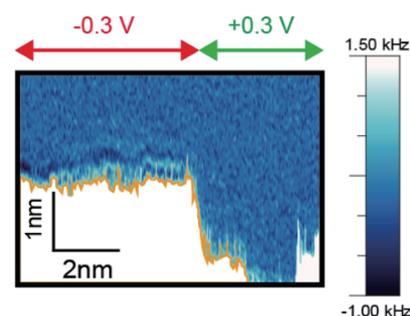


図 2

図 1：表面構造の異なる SAM の水和構造。(a)  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3}) R30^\circ$  構造 (b)  $c(4 \times 2)$  超格子構造。

図 2：表面電位制御下での水和構造。

栗田修平 (黒橋禎夫教授)

「Neural Approaches for Syntactic and Semantic Analysis」

(構文・意味解析に対するニューラルネットワークを利用した手法)

平成 31 年 3 月 25 日授与

人間の言語を理解し、コミュニケーションを図る事ができるシステムを構築する際に、自然言語処理は本質的な技術となる。自然言語処理ではまず統語的ないし意味的な手法で入力文を解析する。これらのテキスト解析手法は、自然言語処理の基礎解析をなし、テキスト入力を利用する多くの現代的なシステムにとって必要な解析となる。しかしながら、自然言語入力文を解析するモデルを開発するためには、以下のような理由から困難である。第一に、文を解析するモデルは多くの場合、他の解析手法と同時に使用される。他のモデルから出力された結果には、しばしばバイアス (偏り) や誤りが含まれ、これをそのまま解析に使用することは難しい。第二に、構文的ないし意味的な解析は、しばしば、既存のコーパスからは獲得が難しい外部知識を必要とする。第三に、自然言語処理の基礎解析における既存手法は、学習コーパスに対するドメイン依存性が強かった。既存手法はしばしば詳細な素性選択に依存しており、モデルの汎用性や表現力の自由度を犠牲にしていた。これらが、既存の自然言語テキストに対する基礎解析の課題であった。

過去の 10 年間で、ニューラルネットワークは機械学習を使用する多くの研究で共通して使われる基盤技術に成長した。これは、ニューラルネットワークが、その内部変数の多さゆえに強い表現能力を持っていることによる。自然言語処理においては、しかしながら、単純な教師ありニューラルネットワークを文解析の分類器として使用したのでは、必ずしも既存手法よりも高い精度を期待できない。これは、先程述べた既存手法における課題が、単純にニューラルネットワーク手法を適用するだけでは解決できないからである。これらの問題を解決するため、本論文では、自然言語処理の基礎解析において、特に中国語の統合構文解析、日本語省略解析、英語の意味依存構造解析に着目し、これらの諸問題に対して、統合解析ニューラルネットワークモデル、生成モデル、そして強化学習モデルを利用した全く新しい手法を提案する。中国語の構文解析では、単語分割、品詞タグ付けおよび単語の係り受け解析を統合して行うモデルの探索を行った。日本語省略解析では、大規模なラベルなしコーパスから敵対的生成ニューラルネットワークを応用して、省略されやすい述語項に関する知識抽出を行った。英語の意味依存構造解析では、強化学習を利用して、英語の文中で解析を行う箇所を自ら決定するモデルを提案した。

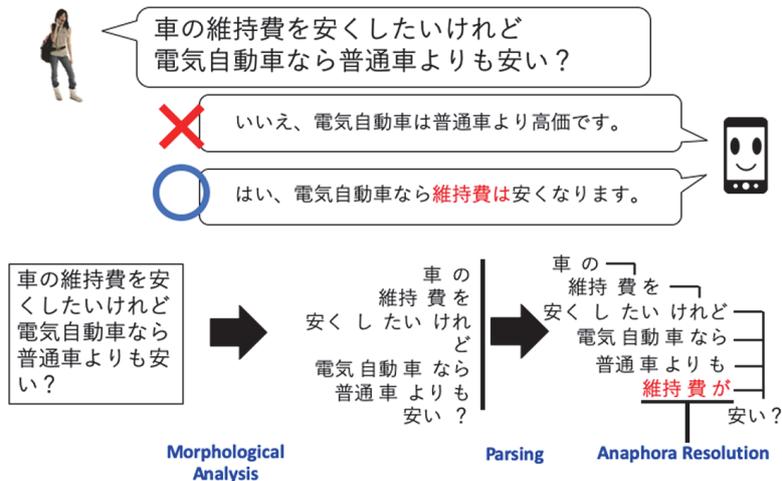


図 1 自然言語処理による文解析

坂口 智 洋 (黒橋禎夫教授)

「Anchoring Events to the Time Axis toward Storyline Construction」

(ストーリーライン生成のための時間と事象情報の対応付け)

平成 31 年 3 月 25 日授与

Web上に情報が蓄積されて20年あまりが経った。人々の価値観や社会の状況は刻々と変わっており、現在では当たり前となっていることでも、その当時大きなインパクトがあったことは数多くある。逆に、当時は大して注目を集めなかったが現在になって有名になったものもある。モノや出来事を多角的に理解する上で、それらが現在までにどのような変遷を辿ってきたのかを知ることは重要である。今日、Webは最新の情報を知ることができるだけでなく、過去の出来事や考えをその当時の記事を通して知ることができる情報空間となっており、情報を統合・比較・要約して読者に提示する情報編纂技術は今後ますます重要になると考えられる。

あるトピックに関連する一連の出来事を物語として捉え、複数のテキストから登場人物、場所、事象、そしてそれらの間の関係性などの情報を抽出して時間軸上で表現したものはストーリーラインと呼ばれる。これまでに様々なストーリーライン表現方法が提案されてきたが、その最も核となる構造は、事象を時間軸上で表現するタイムライン構造である。これまでテキストの時間情報解析では、主に事象表現に関連する相対的な時間関係に着目してきた。具体的には、事象表現間、事象表現と時間表現間の時間的前後関係や包含関係などである。このような相対的な時間表現方法は、小説など時間設定が不明瞭なテキストにおいても用いることができ汎用性が高い。一方で、新聞記事など事実に基づくテキストでは、事象表現を直接時間軸に対応付ける方がより正確で効率的な表現が可能である。本論文では、事象表現を時間軸に対応付けるための基盤技術とデータ構築方法を提案している。

本論文では、まず、時間表現をテキストから検出し正規化する手法を提案している。時間表現の正規化とは、時間表現のもつ時間情報を定められた形式に変換することである。例えば図1では、「昨日」を2017-12-05に正規化している。時間表現の語順はしばしば入れ替わり様々な表現が存在しているが、既往研究では時間表現のパターンを予め用意して正規化を行っていたため、多様な表現に十分対処できないという問題があった。本論文では時間表現の構成性に着目し、時間表現に含まれる基本的な語彙ルールを用意し、これを組み合わせることで多様な語順や並列構造に対処している。

次に、事象表現を時間軸に対応付ける時間情報コーパスの構築について述べている。タイムラインの学習や評価を行うためには、事象表現を時間軸に結びつけたタグ付けデータが必要である。本論文で提案しているタグ付け基準は従来研究と比較して2つの特徴をもつ。1つは幅広い表現をタグ付け対象としていることである。従来研究では一時性の強い表現を対象としてタグ付けを行っていたが、本論文では一時性の弱い表現の時間情報も重視し、これらをタグ付け対象に含めている。もう1つは、従来では扱わなかった、頻度や期間などの多様な時間情報を扱うためのタグを新たに導入したことである。このタグ付け基準を用いて日本語新聞にタグ付けを行い、113文書4,534表現からなる時間情報コーパスを構築した。

最後に、事象表現を時間情報に対応付けることで、複数のテキストからあるトピックに関連するタイムラインを生成している(図1)。提案手法は従来研究と比べて幅広い文脈を考慮するもので、2段階の機械学習からなる。第1段階では局所的な情報に基づいて事象表現を時間軸に対応付け、第2段階では大域的な情報を用いてこれを修正する。実験の結果、既往研究よりも高精度なタイムラインを生成できること、第2段階の処理が有効であることが示されている。

今後は、事象間の関係性や事象に対する意見・評価など、事象表現に関連する多様な情報を時間軸と対応付けられるように研究を発展させたい。

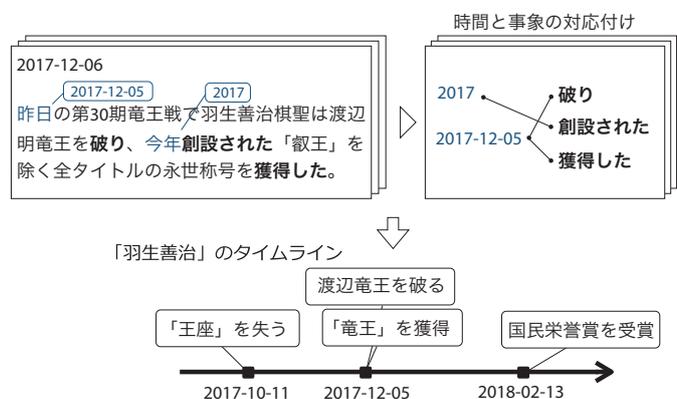


図1 タイムライン生成システム

川 原 僚 (延原章平講師)

「A Novel Catadioptric Ray-Pixel Camera Model and its Application to 3D Reconstruction」  
(反射屈折撮像系の新たなカメラモデルと3次元形状復元への応用)

平成31年3月25日授与

被写体を相異なる視点から撮影した多視点画像を入力とする3次元形状復元においては、各カメラにおける撮像過程を透視投影カメラとしてモデル化するアプローチが一般的とされているが、被写体が微小物体であったり水中に存在する場合などにおいては物理的に複数台のカメラを備えた多視点透視投影カメラ環境を構築することが困難であることが知られている。

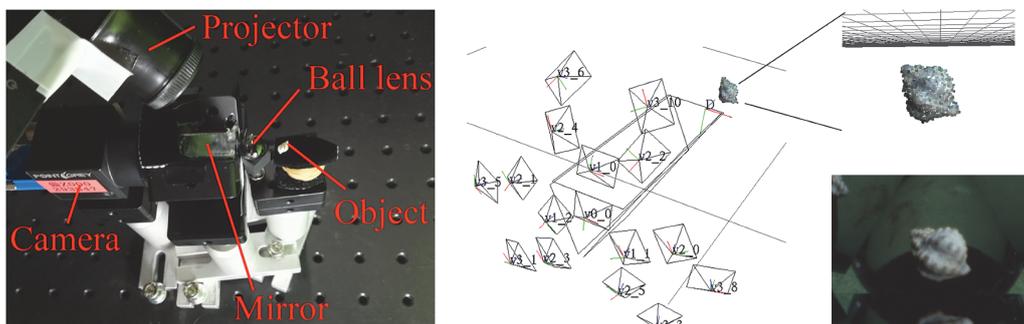
本論文は通常の透視投影カメラに屈折反射光学系を組み合わせた光学系と、それに対応する新たなカメラモデル、およびそのモデルパラメータを較正する手法を提案するとともに水中物体や微小物体の3次元形状復元を実現する手法をまとめたものであり、得られた成果は以下の通りである。

(1) 平行平面屈折層を備えた撮像系が構成する光線空間が、平面屈折層の法線に対して軸対称性を持つことに着目した新たなカメラモデルを考案するとともに、そのモデルによって3次元空間から2次元画像座標への効率的な投影計算アルゴリズムを導出した。また同モデルがプロジェクタに対しても適用可能であることを多視点カメラ・プロジェクタシステムによる水中物体3次元形状計測を通じて実証した。

(2) 球面レンズと複合鏡を備えた teleidoscopic imaging system と呼ぶ反射屈折光学系が構成する光線空間が、球面レンズの中心とカメラの投影中心を結ぶ軸に対して対称性を持つことに着目した新たなカメラモデルを考案するとともに、そのモデルによって3次元空間から2次元画像座標への効率的な投影計算アルゴリズムを導出した。

(3) Teleidoscopic imaging system のパラメータを較正する問題が、球面レンズパラメータの推定、複合鏡パラメータの推定、鏡面反射の関係にある対応点の推定という3つの部分問題が循環依存する構造となっていることを示すとともに、球面レンズ中心の投影像という特異点を用いることでこの問題を解くアルゴリズムを考案した。

(4) Teleidoscopic imaging system によって被写界深度が増大することを解析的に示すとともに、鏡像間の対応点を用いた三角測量の線形解法を導出した。また実画像を用いた3次元形状計測を通じて微小物体の仮想多視点撮影と3次元形状復元が実現可能であることを実証した。



図：Teleidoscopic imaging system (左) と仮想多視点カメラ群としてのキャリブレーション (中央) および計測された3次元形状 (右上) と参照画像 (右下)。

國政 秀太郎（下田宏教授）

## 「Productivity-oriented BEMS のための生理指標計測を用いたリアルタイム知的生産性評価に関する研究」

2019年3月25日授与

脱炭素社会に向けた取り組みにおいて、今後CO<sub>2</sub>排出量の増加が懸念されるビルなど業務部門では Building Energy Management System（以下、BEMS）を用いたエネルギーの最適制御によるCO<sub>2</sub>の抑制が急務である。しかし、近年のBEMSにおいては建物内の執務者の知的生産性を配慮したものは少ない。過度な省エネルギーによる知的生産性低下が及ぼす経済コストは、省エネルギーでのコスト削減費用を上回るという研究結果も存在しており、知的生産性も考慮した執務環境の設計や改善を行う必要がある。

執務環境の変化による知的生産性の変動を評価できれば、エネルギー消費量を削減しながら知的生産性の低下を抑える執務環境の設計が可能になるだけでなく、知的生産性を向上させる執務環境の設計も可能となる。

本論文では、オフィスで知的作業を行う執務者の知的生産性と省エネルギーの両立を可能とするBEMSを実現するため、リアルタイムでの知的生産性を評価可能な手法の確立を目指し、その基礎検討を行った。本論文では、執務者の作業を阻害しない非接触計測が可能であることを理由に生理指標計測を知的生産性評価に採用し、後述する3つの知的生産性評価の手法を提案した。更に、それぞれの手法の精度やオフィスなどのビル設備内での実用性を評価した。

### 1. 生理指標計測による知的作業時の一時休息状態の検出

執務者は、知能を必要とする作業を行っている状態（以下、知的作業状態）、手などを動かしているが知能を必要としない作業を行っている状態（以下、非知的作業状態）、休息している状態（以下、非作業状態）の3つの状態を遷移させながら知的作業を行っていると仮定した。本手法は非知的作業状態と非作業状態をあわせて一時休息状態と呼び、これと知的作業状態を判別する、2クラス分類問題を解くものである。心電図、脳波、眼球付近の筋電位から得た特徴量を説明変数として、マハラノビス分類器を用いた。被験者が暗算計算やテキストタイピングなどの5タスクを行う生理指標計測実験では、2クラス分類の正検出率は平均して約59.0%であり、無作為に検出した場合の正検出率（期待値）に比べて平均して約13.6%高かった（ $p < 0.001$ ）。また、生理指標から得た説明変数の中には、被験者によっては状態間で有意に変化しないものがあり、一時休息状態検出に適さない説明変数があることが示唆された。

### 2. 知的作業中の生理指標計測による作業成績推定手法の検討

上記1の分類問題から、作業成績を直接推定する回帰問題へ展開させる手法を検討した。推定に用いる生理指標には、人の認知状態を反映するとされる心拍変動と瞳孔径を採用し、回帰問題には Support Vector Regression（以下、SVR）と Random Forests（以下、RF）を採用し、両者の推定精度を比較した。

被験者実験により本手法の推定精度を推定した結果、SVRで導出した回帰モデルにおいて、全被験者の平均決定係数0.875という高い推定精度を示し、SVRを用いた場合の本手法の有効性が確認できた。また、同じ認知タスクであっても、被験者間で作業成績の変動に関連する生理反応に違いが見られた。しかし、SVRでの推定精度に大きく影響することはなく、そのような被験者間の生理反応の差異に対し、複数の生理指標を利用する本推定手法の有効性が確認された。

### 3. パフォーマンス - 認知モデルを用いた知的作業中の認知・作業状態推定手法

本手法は、作業成績だけでなく執務者への認知負荷も推定することにより、より詳細な執務者の認知状態（集中、散漫、休息、疲労など）の推定を目指した手法である。本手法により「ある時点では集中できている執務者も、数分後には休息に入ると予想されるから、照度を落として休息を促す」などという、従来の手法では困難であった新しい執務環境制御が行えるBEMSが実現できると考えられる。本手法では、ファジィ推論を用いることで認知タスクから作業成績、生理指標から認知負荷を推定し、それら2つの指標から4つの認知作業状態（High Work State、Optimal Work State、Low Work State、Bad Work State）を分類する手法を開発した。被験者実験から、提案手法において推定された作業成績及び認知負荷がタスク難易度上昇によってそれぞれ有意に低下及び上昇することが確認され、提案手法による推定は妥当であると示唆された。

以上の3手法の検討により本論文では、リアルタイム知的生産性評価に非接触計測が可能な生理指標計測が有効であることを示し、BEMSの課題であった過度な省エネルギー促進による知的生産性低下の解決が可能であることが示唆された。

Noersomadi (橋口浩之教授)

「Characteristics of tropical tropopause and stratospheric gravity waves analyzed using high resolution temperature profiles from GNSS radio occultation」

(GNSS 掩蔽による高分解能温度プロファイルを用いて解析された熱帯対流圏界面と成層圏重力波の特性)

2019年3月25日授与

The tropical tropopause at 12–19 km altitude functions as a boundary between the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS). Various coupling processes occur across this region which influence mixing between the troposphere and stratosphere, primarily through the activity of atmospheric gravity waves (GWs). Global Navigation Satellite System – radio occultation (GNSS-RO) refers to limb soundings of radio waves transmitted by navigation satellites passing through the Earth’s ionosphere and atmosphere, which arrive at an onboard GNSS receiver. Since April 2006, the Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate (COSMIC), working in conjunction with NSPO Taiwan and UCAR has been retrieving between 1500 – 2000 atmospheric profiles per day. COSMIC provides global temperature profiles. The objective of this study was to utilize COSMIC data to investigate the temperature structure and perturbations in the UTLS.

We processed the retrieval program adopting one of wave optics (WO) methods called full spectrum inversion. We obtained a good vertical resolution (about 100 m near the tropopause) of temperature profiles for altitudes of up to 30 km. We investigated the global distribution of static stability ( $N^2$ ) and the characteristics of the tropopause inversion layer in the tropics for January 2007–December 2016. When the  $N^2$  profiles are averaged relative to CPT height, there is a very thin (<1 km) layer with average maximum  $N^2$  in the range  $11.0\text{--}12.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ . The mean of the tropopause sharpness, defined as the difference between the maximum  $N^2$  and minimum  $N^2$  within  $\pm 1$  km of the CPT, is  $(10.5 \pm 3.7) \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ . We focused on the variation of tropopause sharpness in two longitude regions,  $90^\circ\text{--}150^\circ$  E (Maritime Continent; MC) and  $170^\circ\text{--}230^\circ$  E (Pacific Ocean; PO), which have different land-sea distributions. The correlation between the sharpness anomaly over MC and PO and the sea surface temperature (SST) Niño 3.4 index was  $-0.66$  and  $+0.88$ , respectively. This means that during La Niña (SST Niño 3.4 <  $-0.5$  K) in the MC, and El Niño (SST Niño 3.4 >  $+0.5$  K) in the PO, warmer SSTs in the MC and PO produce more active deep convection that tends to force the air upwards to the tropopause layer causing an increase the temperature gradient. The intra-seasonal variation in the sharpness anomaly during slow and fast episodes of the Madden–Julian oscillation demonstrates that eastward propagation of a positive sharpness anomaly is associated with deep convection. This suggests that convective activity in the tropics is a major control on variations in tropopause sharpness at intra-seasonal to interannual timescales.

We studied the characteristics of temperature perturbations at 20–27 km altitude caused by the atmospheric GWs. We analyzed the vertical wavenumber spectra of GWs with vertical wavelengths ranging from 0.5 to 3.5 km, and we integrated the (total) potential energy  $E_p^T$ . Another integration of the spectra from 0.5 to 1.75 km was defined as  $E_p^S$  for short vertical wavelength GWs. We also estimated the logarithmic spectral slope ( $p$ ) for the saturated portion of spectra with a linear regression fitting from 0.5 to 1.75 km. Latitude and time variations in the spectral parameters were investigated in two longitudinal regions: (a)  $90\text{--}150^\circ$  E, where the topography was more complicated, and (b)  $170\text{--}230^\circ$  E, which is dominated by oceans. We compared  $E_p^T$ ,  $E_p^S$ , and  $p$ , with the mean zonal winds ( $U$ ) and OLR. We also investigated the ratio  $E_p^S : E_p^T$  and discussed that the generation source of  $E_p^S$ ,  $E_p^T$  and  $p$  clearly showed an annual cycle, with maximum values in winter at  $30\text{--}50^\circ$  N in region (a), and  $50\text{--}70^\circ$  N in region (b), which was related to topography. Characteristics of  $E_p^T$  and  $p$  in the tropical region seem to be related to convective activity.

頭 師 孝 拓 (小嶋浩嗣教授)

「Study on Miniaturization of Plasma Wave Measurement Systems」

(プラズマ波動観測システムの小型化に関する研究)

平成 31 年 3 月 25 日授与

本論文は、宇宙機に搭載し宇宙プラズマ波動のその場観測を行うためのプラズマ波動観測システムについて、その小型化を目的とした専用集積回路と、それを利用したプラズマ波動観測システムの研究・開発についてまとめたものである。本論文で得られた成果として、以下の3種類のプラズマ波動観測システムが挙げられる。

### 1. SS-520-3号機ロケット実験搭載用プラズマ波動観測器

SS-520-3号機ロケット実験は、極域におけるイオン流出機構の解明を目的とした実験である。本研究ではロケットに搭載するプラズマ波動観測器である Low Frequency plasma wave Analyzer System (LFAS) を開発し、その性能検証を行った。LFASはアナログ部に専用集積回路を利用することで従来の観測器から小型化・高性能化を実現した。試験により、LFASがイオン加速機構として有力視されているプラズマ波動の観測に十分な性能を有し、またロケット打ち上げに耐える環境性能を持っていることが示された。

### 2. 新型プラズマ波動スペクトル観測器

近年用いられるスペクトル型プラズマ波動受信器の多くは波形捕捉型受信器とアナログ回路を共用している。このような受信器は広帯域であるため、メインアンプにおけるゲインを観測される波動の最も強度の高い周波数帯域に合わせて設定する必要がある、弱い信号が観測される周波数帯域では不利となる欠点を抱えている。本研究では、従来のスペクトル型受信器の欠点を解消可能な新型受信器(図1)を、専用集積回路によって実現可能であることを示した。

### 3. 多点同時観測用小型センサープローブ

近年はプラズマ波動の多点同時観測が重要視されており、複数衛星の編隊飛行による同時観測ミッションも実施されている。本研究では、より高い空間分解能を得ることのできる多点同時観測システムへの利用を見据えた小型のプラズマ波動観測システムであるセンサープローブを提案し、そのようなシステムが実現可能であることを示した。本研究で実現したセンサープローブは専用集積回路を利用することで7.5 cm x 7.5 cm x 7.5 cmの筐体に必要な電子回路およびバッテリーを搭載し、筐体外部には各3成分を測定可能な電界および磁界センサーを搭載している(図2)。試作したセンサープローブにおいて電界観測性能を測定し、プラズマ波動の観測およびデータ伝送が可能であることを示した。

以上の成果は、宇宙プラズマ波動のその場観測において集積回路による小型化がこれまでの課題を克服する新たな観測器の実現を可能とすることを示すものである。

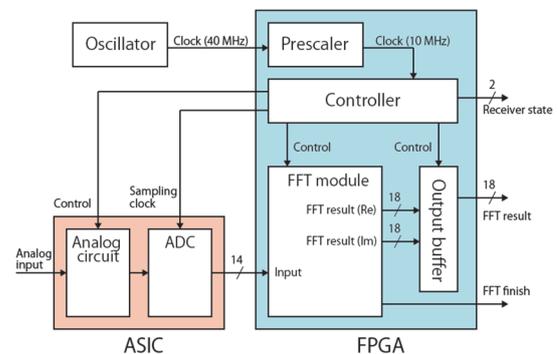


図1. 新型観測器のブロック図

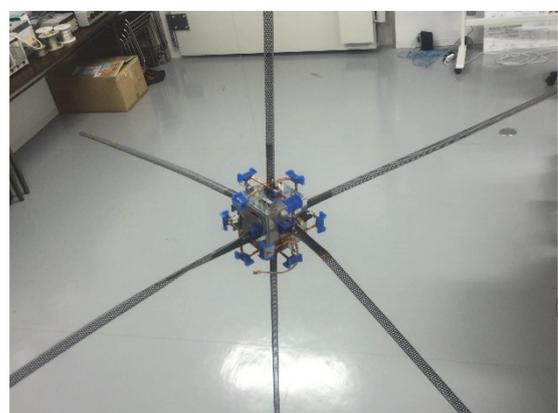


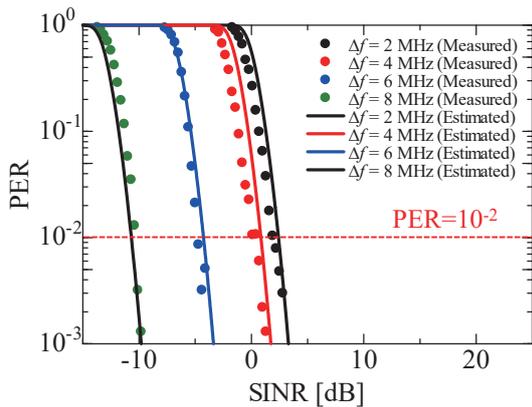
図2. センサープローブの外観

高谷 和宏 (和田修己教授)

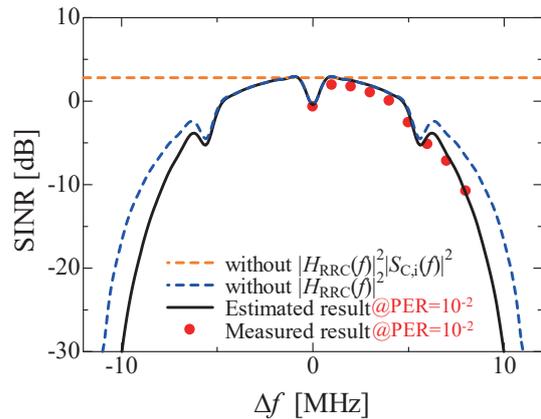
「電磁干渉環境下におけるデジタル無線通信の通信品質評価方法に関する研究」  
令和元年 5 月 23 日授与

本論文では、電磁干渉波の周波数領域及び時間領域における特徴量から、最適な通信方式や通信パラメータを予め推定して通信を開始する通信制御の実現を目的に、電磁干渉環境下におけるデジタル無線通信の通信品質を推定するための計算モデルと通信品質の評価方法を示した。

現実の干渉波は、無線通信の伝送帯域に対して狭帯域または広帯域である等の周波数領域における特徴量を有し、パワーエレクトロニクス機器等の発する周期的なバースト性干渉波はパルス持続時間やパルス間インターバル等の時間領域における特徴量を有する。狭帯域干渉波の評価方法では、従来は十分に考慮されていなかった、帯域通過フィルタ ( $|H_{RRC}(f)|^2$ ) 及び DSSS/CCK の逆拡散時の干渉波抑制効果 ( $|S_{C,i}(f)|^2$ ) の周波数特性を考慮した計算モデルを提案し、通信信号と狭帯域干渉波の中心周波数の違い ( $\Delta f$ ) が DSSS/CCK/OFDM システムの SINR 及びパケット誤り率 (PER) に与える影響を明らかにした (図 1)。広帯域干渉波の評価方法では、方式の異なる DSSS/FHSS システム間の電磁干渉を対象として、干渉波の周波数スペクトルの違いが通信品質に与える影響を推定するモデルと通信品質劣化が生じない所要 SIR を明らかにした。周期的なバースト性干渉波の評価方法では、データをパケット単位で送受信するデジタル無線通信システムを想定し、パルス電力、パルス持続時間、パルス間インターバルの異なる干渉波とパケットの衝突確率を考慮した計算モデルを提案するとともに、いくつかの現実的な干渉条件を用いて評価方法の有効性を示した (図 2)。

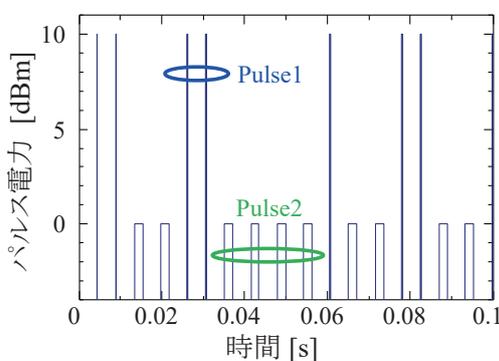


(a) DSSS システムに対する PER の測定/推定結果

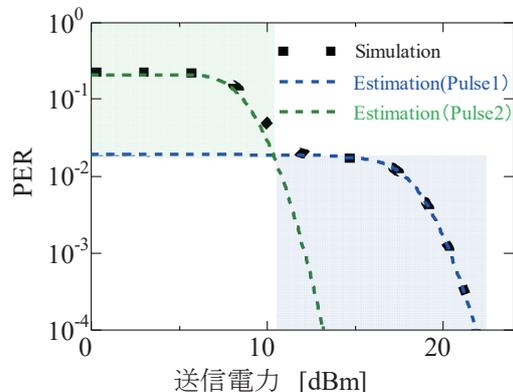


(b) DSSS システムの PER = 10<sup>-2</sup> に必要な SINR

図 1 信号と狭帯域干渉波の中心周波数の違いが DSSS の SINR 及び PER に与える影響



(a) パルス電力、持続時間の異なるバースト性干渉波



(b) PER 推定結果とシミュレーション結果の比較

図 2 時間領域において特徴量の異なるバースト性干渉波が混在する場合の PER 推定

Manuel Antonio Sánchez Tejada (引原隆士教授)

「Appearance of Symmetry Breaking in AC/AC Converters and Its Recovery Methods」  
(AC/AC コンバータにおける対称性破れの発生とその回復法)

2019年9月24日授与

Symmetry, a concept embedded in nature, is analyzed in this dissertation from the viewpoint of AC (alternating current) systems. Concepts such as load and periodic symmetry are explored. With the property of load symmetry being related to a part of the configuration of a three-phase AC system. Whereas the property of periodic symmetry is related to the dynamical behavior of currents and voltages of AC systems. This dissertation illustrates how the symmetry of the configuration of the electrical system, relates to the symmetry of the dynamical behavior of an AC/AC converter.

In some cases, the absence of symmetry can be useful for certain applications. For example, harmonic spreading is achieved when a single-phase AC/AC converter is driven to chaotic regime. In such instance, it would be useful to have a method that can recover the broken periodic symmetry that is embedded in the chaotic regime. So that, depending on the application, such converter could achieve different modes of operation. This dissertation explores such task. On the other hand, in some instances, the absence of symmetry in AC systems can induce harmful effects to AC devices. Apart from that, the lack of symmetry can make the analysis of AC systems more difficult. The reason for this is that a three-phase AC system can be reduced to a single-phase AC system; afterwards, the results are extended to remaining phases by symmetry. Without symmetry, such simplification is not possible. Therefore, this dissertation analyzes appearances of broken symmetries and proposes possible solutions that can recover them.

The dissertation starts by providing the theoretical background that is necessary to understand the operation of the converters under consideration: single-phase AC/AC converter and matrix converter (MC). In addition, the dissertation presents an overview of two cases of nonlinear behaviors found in the operation of single-phase AC/AC and MCs: chaos and quasiperiodicity. Moreover, the dissertation illustrates some of the tools that are used to control such behaviors. In particular, the dissertation focuses on two methods used for the stabilization of unstable periodic orbits: time-delayed feedback and extended time-delayed feedback control (TDFC and ETDFC).

After the introduction and theoretical background, the dissertation denotes how the periodic symmetry of the output voltage of a single-phase AC/AC converter is broken when working in a chaotic regime. Such chaotic operation can be of benefit to certain applications. Nevertheless, this dissertation proposes a method that modifies the pulsewidth modulation (PWM) voltage controller of such converter. In detail, the chaotic operation is stabilized via ETDFC. Therefore, stable and chaotic modes are available for the PWM voltage controller. Afterwards, the single-phase AC configuration is expanded to a two-phase AC configuration. The results indicate that chaotic and stable operations are possible via a proposed symmetry-recovery method based on the ETDFC. In addition, the results indicate the possibility of obtaining different types of frequency behaviors based on the ETDFC parameters.

This dissertation also illustrates a case of broken load symmetry in a direct matrix converter (DMC). Such condition induced a quasiperiodic behavior and a negative-sequence current at the input side of the DMC. A method, based on the TDFC, was featured to the direct space vector modulation in order to improve the operation of the DMC. Specifically, simulations and experimental results indicate that there is a possibility of recovering part of the periodic symmetry at the input side of the DMC. In addition, attenuation of the negative-sequence current at the input side of the DMC is possible through the proposed method. Thus, detrimental effects due to negative-sequence current are attenuated.

The last part of the dissertation focuses on the output side of a Venturini modulated DMC. Simulations and experiments proved the presence of a quasiperiodic behavior and 0 Hz (direct current (DC)) component in the output currents. In addition, the dissertation illustrates a method that can recover the periodic symmetry and attenuate the amount of DC components in the output currents. The feasibility of the method is proved through simulations and experiments.

It is hoped that the results and conclusions given by this dissertation can be extended to other fields. In particular, the fact that changes in the symmetry of the configuration of a physical system, can break the symmetry of the dynamical behavior of such system. In addition, symmetry is a strong characteristic, that even when it is broken, it can still be recovered.

持山志宇 (引原隆士教授)

「Power-packet Based Control and Its Application in Distributed System」

(電力パケットに基づく制御とその分散システムへの適用)

令和元年 9 月 24 日授与

本論文は、電力のパケット化の提案に基づき、その負荷制御への適用のためのシステム構築を行ったものである。本研究の背景には、持続可能な社会の実現に向けた取り組みとして、自然エネルギーを含む分散型電源の導入が進められていることがある。近年、それら電源と負荷の間の需給管理における情報通信技術の活用が盛んに研究されている。このような状況は、従来単方向的であった電気エネルギー供給システムにおいて、電力と情報の双方向の流れを生む。これらを適切に制御するための一つの方法として、電力のパケット化の提案がある。電力パケットとは、パルス状の電力を運ぶペイロードに対し、電圧波形により物理層で情報タグを付与した伝送単位である (図 1)。情報タグには、電力の由来や宛先、その他任意の情報を示す信号を付与する。これら情報をもとに、電力パケットはネットワークを構成するルータと呼ばれる機器により所望の宛先負荷へと伝送される。ここで、電力のパケット化およびルーティングは、ワイドバンドギャップデバイスを用いた回路スイッチングにより実現される。

以上の背景のもと、本論文では、分散配置された電源と負荷を含む給電ネットワークへの適用のための構成を提案し、電力パケットとしてデジタル化された電力と情報の分散的な演算と処理の方法を示している。本論文で得られた主な結果は以下の通りまとめられる。

- (1) 電力のパケット化に基づき、負荷制御のための基礎ハードウェアである専用ルータ (RMD) を、負荷の物理的構造に合わせた回路トポロジーを考慮して、スイッチング回路から設計・製作した。さらに、開発ルータのソフトウェアとして、パケットをデジタル量として管理するための変数を導入し、その値を RMD のスイッチング状態へと割り当てる方法を開発した。以上より、開発システムにおいて信号と物理量との対応付けが可能であることを示した (図 2)。
- (2) RMD の分散型閉ループ負荷制御システムへの拡張を行った。電力パケットの密度変調アルゴリズムを信号から物理量の量子化へと拡張した定式化を行い、パケット化された電力および情報を分散的に扱う仕組みを提案した。さらに、複数の負荷制御システム間の通信を導入することにより、分散型負荷制御システムの利点である、デマンドレスポンス動作の実現が可能であることを示した。
- (3) 電力のパケット化とそれに基づく負荷制御が、産業用途の電力領域においても実現可能であることを示した。同領域における電力と情報の統合および分離、さらに時分割多重により、同一配線を介した電力パケット伝送が実現できることを実験により示した。

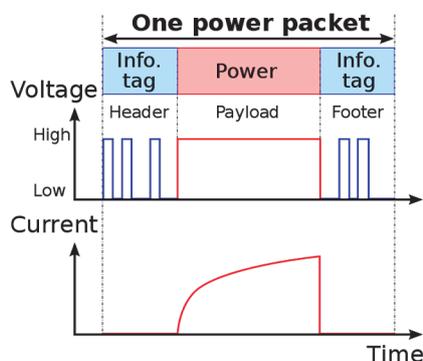


図 1：電力パケットの概要

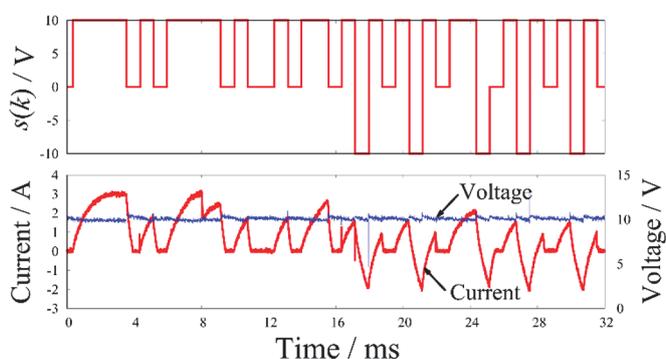


図 2：供給信号 (上) と、対応する電圧電流の測定結果 (下) ↓電力パケットの概要

中澤敏志 (木本恒暢教授)

「Interface Charge Engineering in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Heterostructures for Ga<sub>N</sub> Power Devices」  
(AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ接合電界効果トランジスタの特性改善に向けた界面電荷制御)  
令和元年 9 月 24 日授与

データ社会の本格的な到来を迎え、データの通信や処理、保存といった情報インフラを支える高周波デバイスやパワーデバイスはさらなる高出力化、高周波化、高効率化を求められている。従来これらの分野で主に用いられてきたシリコン (Si) デバイスの性能は、Si の物性によって決まる限界に近付きつつあり、さらなる性能の向上が難しくなっている。そこで注目されているのが窒化ガリウム (Ga<sub>N</sub>) 系半導体であり、特に AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ接合界面において分極電荷の効果により誘起される高濃度の二次元電子ガス (Two Dimensional Electron Gas : 2DEG) をキャリアとして利用するヘテロ接合電界効果トランジスタ (HFET) の研究開発が盛んに行われている。

AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFET においては、ヘテロ界面における分極電荷がデバイスの寄生抵抗に大きく影響する。また金属-絶縁膜-半導体 (Metal-Insulator-Semiconductor : MIS) 型ゲート構造を適用した場合、MIS 界面における電荷の影響によりデバイス特性が不安定になるという課題がある。このように AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFET ではヘテロ界面や MIS 界面における界面電荷がデバイス特性に大きな影響を与えるため、デバイス設計やプロセスを通してこれらの電荷を制御することが重要である。しかしながら、そのような界面電荷の制御方法は確立しておらず、界面電荷の起源やプロセスに対する挙動についての解明が求められている。本論文では、そのような界面電荷がデバイス特性に及ぼす影響や制御方法について検討を行い、AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFET の特性向上について指針を提示した。本論文で得られた主な成果を以下に示す。

- AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFET のコンタクト抵抗低減のために適用されるキャップ層 (図 1) に関して、InAlGa<sub>N</sub> 四元混晶を用いて下地の AlGa<sub>N</sub> と分極電荷密度を整合させることでヘテロ界面における空乏化を抑制し、従来の Ga<sub>N</sub> キャップ層と比較してヘテロ界面における寄生抵抗を約 1/5 に低減できることを示した。
- ドライエッチングや絶縁膜堆積、あるいはアニールといった種々のプロセスが絶縁膜と AlGa<sub>N</sub> との界面に及ぼす影響について評価を行い、AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MIS-HFET の動作安定化に向けた設計指針を明らかにした。さらに、その指針に基づき、ノーマリオフ型 MIS-HFET を作製するための新たなプロセスフローを提案した。
- 上記プロセスフローを用いてノーマリオフ型 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MIS-HFET を作製しゲート特性安定化を実証した。作製したデバイスでは、ゲートに 10 V まで電圧を印加した場合でも、しきい値シフトは 0.1 V 以下に抑制されており (図 2)、ゲート特性の安定化が確認された。さらに 400 V/10 A でのスイッチング動作では、ゲートへの高バイアス印加が可能となったことにより、ターンオン時のスイッチング時間が 4.0 ns まで短縮され、実用に供し得る高速スイッチング動作を実現した。

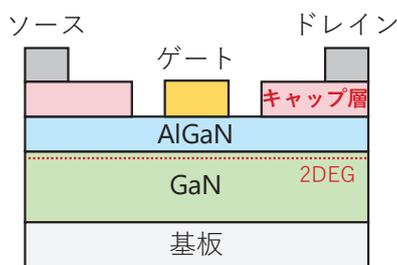


図 1 キャップ層を適用した HFET のデバイス構造

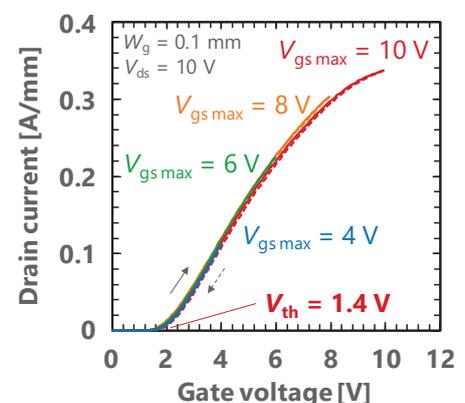


図 2 作製した MIS-HFET の伝達特性

末 光 真 大 (野田進教授)

「狭帯域熱輻射光源による熱光発電システムの構築」

令和元年 9 月 24 日 授与

本論文は、可視 - 近赤外域で狭帯域に発光する狭帯域熱輻射光源を設計・作製し、この光源にあった熱光発電システムを構築して高い発電効率を得たものである。

熱光発電システムとは、熱エネルギーを熱輻射を介し光電変換素子で電力に変換する発電方法である。光電変換素子のバンドギャップ波長より短波でのみ狭帯域発光する波長選択性の高い光源ができると、高温 ( $>1300\text{ K}$ ) で燃料電池に匹敵する電力変換効率 ( $>50\%$ ) と出力密度 ( $>1\text{ W/cm}^2$ ) が得られることから、近年研究が盛んになってきている。しかしながら、これまでに実験で報告された効率は理論効率を大幅に下回るものであり ( $<6.8\%$ )、この原因は熱輻射光源の波長選択性の悪さにあった。先行研究の熱輻射光源の大多数は、高融点金属に光子の状態制御をおこなう構造 (周期的な開口構造、Metal Insulator Metal (MIM) 構造、フォトニック結晶構造等) を導入することで、特定の波長の光のみを構造内で共振させ、共振波長の輻射率を増加させたものであった。しかし、電子の状態制御はできておらず、中 - 遠赤外域の金属の自由電子に由来する広帯域な熱輻射が波長選択性の悪さの原因となっていた。

本論文では、高効率な熱光発電システムの実現を目指し、電子および光子の両状態の制御に基づいて可視 - 近赤外狭帯域熱輻射光源の開発を行った。まず電子状態の制御のためには、半導体を用いた。具体的には、Si のバンド間遷移を用い、光子状態の制御としてロッド型フォトニック結晶 (図 1) を用いた構造を設計し、狭帯域な熱輻射スペクトルを実現した。この熱輻射光源を用いた熱光発電システムを構築するために光源の熱輻射スペクトルに適した光電変換素子を設計・作製した (図 2)。最後に、開発した光源と光電変換素子を合わせた熱光発電システムを構築 (図 3) し、従来の太陽光熱光発電の最高効率  $6.8\%$  を大幅に超える  $11.2\%$  の発電効率と  $0.37\text{ W/cm}^2$  という高い出力密度を得た。この発電効率や出力密度は、今後、システムのスケールアップによる損失低減や太陽電池の開口率の向上で更に増大できる。

以上のように、本研究で開発した可視 - 近赤外狭帯域熱輻射光源の設計は、従来の熱輻射光源の波長選択性の悪さの原因である金属の自由電子に由来する広帯域な熱輻射の問題を解決するものであり、熱光発電分野の熱輻射制御に飛躍的な進展を与えた。更に、本研究で構築した熱光発電システムは現時点の世界最高効率を記録しており、学術および産業的に重要な成果であると位置づけられる。

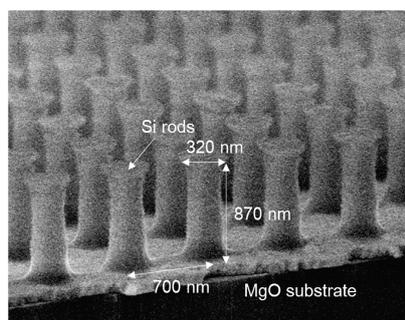


図 1: MgO 基板上的 Si ロッド型熱輻射光源。

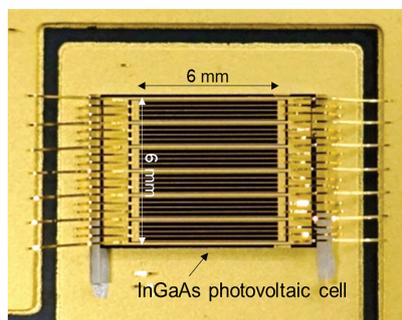


図 2: 作製した InGaAs 光電変換素子。

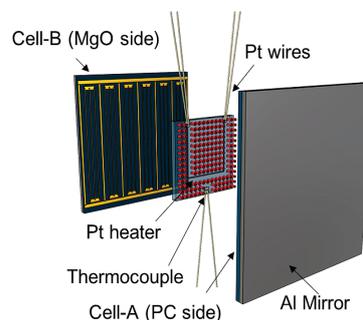


図 3: 構築した熱光発電システムの模式図。

田 谷 昭 仁 (守倉正博教授)

「Cooperative Vehicular Communications for High Throughput Applications」  
(大容量車載アプリケーションに向けた車車間協調通信)

令和元年 9 月 24 日授与

本論文では、車載アプリケーションにおける大容量通信を実現するための車車間協調通信について議論する。車車間通信のための高速通信技術としてマイクロ波帯以下の分散 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 協調伝送とミリ波帯のマルチホップリレー技術に焦点を当て、それぞれの課題を解決する手法を提案する。さらに、具体的なアプリケーションについてミリ波通信を効率化する同時送受信対選択スケジューリングを提案する。

分散 MIMO 協調伝送については、干渉抑制のためのチャンネル情報のフィードバック量が、協調に参加する基地局数や車両数に伴って増加する問題に対して、フィードバック量を削減するプリコーディング法とそのための MIMO 復調手法を提案する。提案するプリコーディング法ではそれぞれの基地局が送信信号をプリコーディングする際にシステム全体のチャンネル情報ではなく自身から特定の受信車両へのチャンネル情報のみを用いてプリコーディングを行う。一部のチャンネル情報のみを用いるため、受信車両から基地局へのチャンネル情報のフィードバック量の低減が可能である。しかし、干渉を完全には除去できず、受信機側で干渉信号を除去する必要が生じる。提案する MIMO 受信機では、干渉信号を除去するため MIMO 復調器とターボ復号器との間で信号の対数尤度比率を交換しながら繰り返し復号を行い、信号推定精度を向上させる。

ミリ波通信を車車間通信へ応用する際の課題として通信可能距離の短さが挙げられる。複数車両でリレーを形成してフォワーディングを行うことで基地局のカバレッジの狭さを補うことが可能であり、道路に沿って長いリレーを形成することで基地局から離れた場所からもリレーを介した路車間通信が可能となる。本論文では、長いリレーを形成できるよう車両が自律的に互いの相対位置を変化させる手法を提案する。ミリ波通信では遮蔽の影響により通信品質が劣化するため、図 1 に示すように遮蔽を回避して見通し内通信でリレー形成することを目標とし、そのための行動規則を強化学習により車両自身が学習する。試行錯誤によりリレーを拡大するための行動規則を環境に則して自律的に学習することを目指す。深層強化学習を用いることで複雑な行動規則を学習でき、遮蔽が頻繁に発生する環境下でもリレーの拡大が可能となる。

さらに、大容量車載アプリケーションとして図 2 に示すような画像データ等の共有により複数の車両が協力して周囲を認識する Cooperative Perception に着目し、ミリ波車車間通信での同時通信可能な送受信対選択のスケジューリング方式を提案する。複数車両がミリ波通信で効率よくデータを共有するためにはアンテナの指向性を活用した空間的再利用率とフォワーディング経路の両方を考慮する必要がある。提案手法では車両で形成されたマルチホップネットワーク上で、干渉を考慮して同時通信可能な送受信車両対を選択するスケジューリングをグラフ上の最適化問題として定式化し、これを解くことで全車両での効率のよいデータ共有を可能とする。

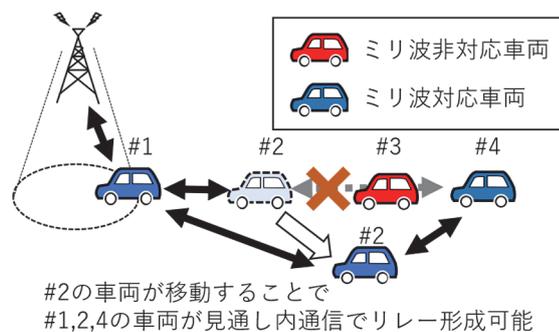


図 1. 車両移動によるリレー拡大

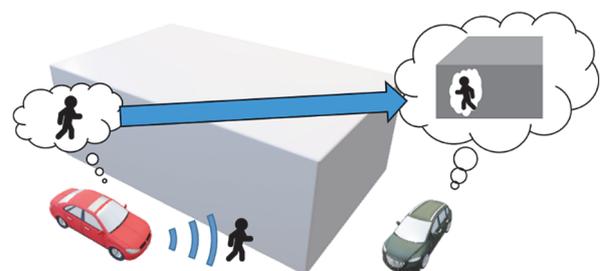


図 2. Cooperative Perception による認識した情報の車両間共有

## 山田 雄一 (土井俊哉教授)

## 「臨界電流のひずみ依存性が強い超電導線材の実用化に関する研究」

2018年9月25日授与

本論文は、現在商用化されている Nb-Ti 超電導線材では実現できない高温、高磁場応用機器を作製可能にする Nb<sub>3</sub>Al 超電導線材や銅酸化物系超電導線材について、実用的な長尺超電導線材の製造プロセス、および超電導線材の曲げひずみによる臨界電流特性への影響について研究を行ったものであり、本研究で得られた主たる知見は以下の通りである。

1. ジェリーロール法を用いた Nb<sub>3</sub>Al 超電導線材の開発に取り組み、温度 4.2 K、印加磁場 12 T における非銅部臨界電流密度 ( $J_C$ ) が実用レベルを超える 800 A/mm<sup>2</sup> を達成した。また、すべての応用機器には利用できない製法となるが、高温短時間熱処理 + 低温長時間熱処理の 2 段熱処理により、 $J_C=1,130$  A/mm<sup>2</sup>、上部臨界磁場 ( $B_{C2}$ ) = 23.1 T と更に高い性能の超電導線材が得られることを示した。さらに、臨界電流の温度 - 磁場依存性を評価するとともに、線材素線及びケーブル・イン・コンジット (CIC) 導体の応力やひずみによる臨界電流への影響を明らかにした。加えて、大電流導体の試作を行い、高磁場下で大電流が通電可能な ITER 用超電導導体としての要求性能を満たすことを実証した。そして Nb<sub>3</sub>Al インサート・コイル用超電導線材の製造において、500 m 以上の線材製造歩留り 90% 以上の工業的な規模の製造プロセスを開発した。

2. 銅酸化物系超電導線材の一種である RBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (R: 希土類元素) 超電導線材に加えられた曲げひずみによる臨界電流への影響を研究し、以下のことを明らかにした。

(1) 引張方向の曲げひずみによる可逆限界は製法に関わらず約 0.5% であり、結晶粒界に亀裂等が入ることで臨界電流 ( $I_C$ ) が低下する。一方、圧縮方向の曲げひずみ依存性は超電導層の結晶方位や製造プロセスの違いによって異なり、可逆的な圧縮により結晶の格子定数が変化し、臨界電流の磁場依存性も変化する。

(2) 本質的な破壊の生じる圧縮方向と引張方向のひずみは、残留ひずみの影響でシフトするものの、可逆範囲は、いずれの製法で製造した超電導線材も 1% 強である。

(3) 超電導層が受ける本質的なひずみを考慮すると、同種の成膜プロセスで製造された超電導線材であればメーカーごとに異なる製法によっても、 $I_C$  の曲げひずみ依存性は、ほぼ同じである。

3. 銅酸化物系超電導線材の臨界電流の曲げひずみ依存性試験法の標準化をめざし、試験方法の妥当性について研究した。市販されている Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub> 超電導線材試料を 6 試験機関に配布して比較評価測定 (Round Robin Test: RRT) を行い、各研試験機関における測定結果から、統計的解析を行った。Type-B 不確かさ解析から、主な寄与が曲げ直径と温度測定の項であることを明らかにした。これより、曲げ前後の臨界電流測定時の温度差を小さくすること、曲げ方法の改善で、さらにばらつきを減少させることができることを示した。

曲げ直径が減少すると相対標準不確かさは増加する傾向があるが、臨界電流の維持率 95% に対応した所定の曲げ径での相対標準不確かさは約 1.3% であることを示し、その値は比較的小さいものであることを明らかにした。

## 高校生のページ

# 科学衛星による宇宙の電磁環境探査

生存圏研究所 宇宙圏電磁環境探査分野  
小嶋浩嗣、上田義勝

## 1. 宇宙プラズマ大気

太陽系宇宙空間は気体で満たされています。この気体は電気を帯びているもので、これを宇宙プラズマと呼びます。プラズマというのは、その気体を構成している成分の原子において、プラスとマイナスがばらばらになった状態のことをいいます。遠目にみると一見、中性気体なのですが、なかみは、プラスの電気をもつ粒子（イオン）とマイナスの電気をもつ粒子（電子）が、ばらばらに動いている状態です。このような状態は宇宙だけではなく、みなさんのスマートフォンの中に使われている半導体というデバイスの中身も実はプラズマ状態になっています。

ところで、宇宙プラズマには、大きく分けて二種類のものがあります。

太陽風プラズマ

惑星大気プラズマ

です。

「太陽風プラズマ」、というのは、文字通り、太陽から吹いてくるプラズマの流れです。太陽の大気が宇宙空間に流れ出しているものです。その流れのスピードたるや、地球付近まできても、まだ、秒速500kmくらいもあります。もっとも、その密度は薄くて、個数で、 $1\text{cm}^3$ あたり、数個ある程度です。太陽から噴出した大気はそれなりの濃さがありますが、太陽系全方位に向かってひろがっていくので、どんどん薄くなっていくわけです。太陽風プラズマの中身のほとんどはプロトン（水素イオン  $\text{H}^+$ ）と電子です。このような太陽風プラズマが惑星と惑星の間の宇宙空間を満たしているということになり、そういう意味では、「太陽系は太陽大気の中にあり」、と、いってもいいのかもしれないですね。

一方、「惑星大気プラズマ」というのは、もともと中性大気である惑星の大気上層部が、太陽からの紫外線などのエネルギーによって、イオンと電子に引き裂かれてしまい（これを電離といいます）、ばらばらになってプラズマ状態になったものをいいます。地球にもこれはあって、古くから電離層と呼ばれているものです。高度1000kmくらいまであります。国際宇宙ステーションの高度400km程度なので、この電離層の中を飛んでいることになり、そこはまだ広い意味で地球の大気の内側ということになります。「な～んだ、まだ、地球の大気中なのか」と、思わないで下さい。人類がここまで進出できたその



図1：衝突する場合.

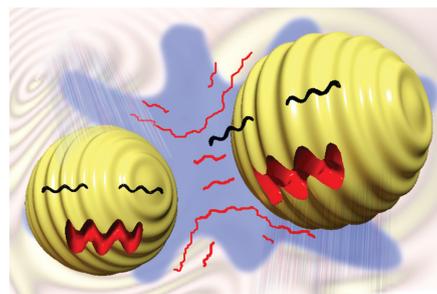


図2：無衝突の場合.

過程には、非常に多くの人々の膨大なエネルギーが投入されているのです。それに電離層も立派な宇宙プラズマです。密度はさすがに濃くて、高度にもよりますが、 $1\text{cm}^3$ あたり、100万個以上あるところもあります。これでも地上の空気の数密度よりはずっと薄いですが。

電離層プラズマは古くから、「通信」に利用されてきました。高度100kmくらいから存在するこの宇宙プラズマの層は、短波帯の電波を反射するため、これと地表との反射を組み合わせ、地球の裏側とも通信することが可能となります。現在もこの手法で通信している放送局もありますが、通信衛星の発達により国際通信は宇宙を経由する衛星通信が主役となりました。京都大学工学部の電気電子工学科と深い関わりがある私達ですが、電気関係の学科で宇宙の研究を行ってきた理由の一つは、宇宙プラズマを通信に利用していたことに端を発しています。

さて、国際宇宙ステーションは、地球の大気中でも、その電離している部分である宇宙プラズマ中を飛翔しています。その中で生活している人は惑星大気プラズマに囲まれて生活しています。一方、感動の帰還を果たした、日本の探査機はやぶさは、太陽風プラズマ中をずっと航行して地球にもどってきたことになります。宇宙はこのように、電離した気体、つまりプラズマによって満たされています。地上で中性大気である空気が引き起こす現象は、宇宙では、希薄なプラズマによる現象に置き換えられます。難しくいうと、これらの現象を記述する方程式系が、中性気体のものから電離気体となるプラズマのものに変わることになるわけです。

## 2. 無衝突プラズマとプラズマ波動

宇宙空間プラズマは、無衝突状態にあります。これは、どういうことかということ、プラズマを構成しているイオンや電子は、めったに衝突しない、ということです。パチンコ球を想像してもらえるとわかりやすいですが、ひとつのパチンコ球を転がして、停止している別のパチンコ球に衝突させると、エネルギーや運動量を交換して、止まっていた方も動き始めます。宇宙プラズマ中では、プラズマを構成する粒子どうしが、パチンコ球のように衝突してエネルギーや運動量を交換しないのです（図1と2）。どれくらい衝突しないか、というと、太陽風プラズマだと、太陽を出発してから地球に到達するまでに1回衝突するかどうか、という程度です。

では、宇宙プラズマの粒子たちは、エネルギーを得たり、失ったりせずに一定な速度で運動しつづけているのでしょうか。答えはノーです。宇宙プラズマの粒子（イオン、電子）は、衝突でエネルギーを交換するのではなく、「電波」によってエネルギーを交換しています。この電波が、プラズマ波動です。つまり、ある粒子のエネルギーがプラズマ波動に変換され、そのプラズマ波動のエネルギーが別の粒子に伝えられる、という感じです。

この過程は、ちょうどアイドルさんの握手会に似ています。図3にあるように、アイドルさんを電

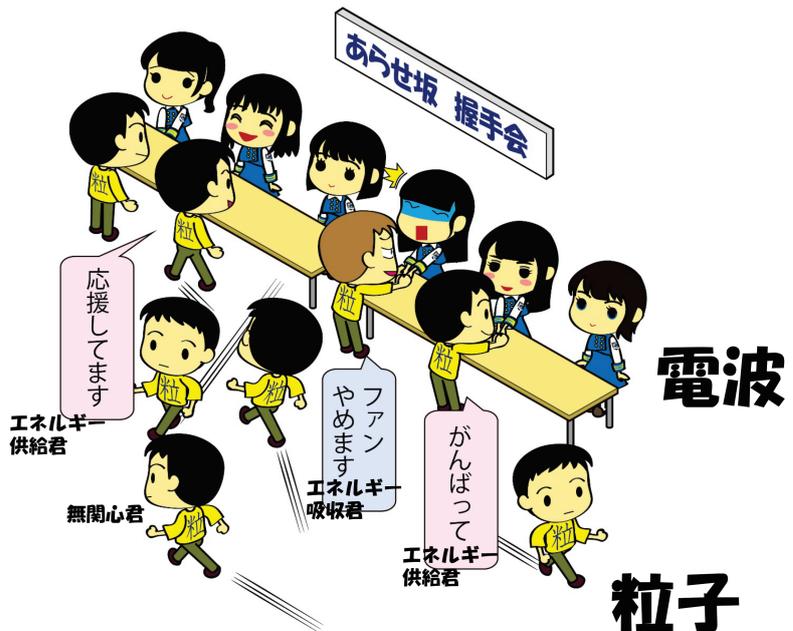


図3：アイドルさんの握手会は電子と電波のエネルギーのやりとりに似ています（イラスト：熨斗千華子さん）。

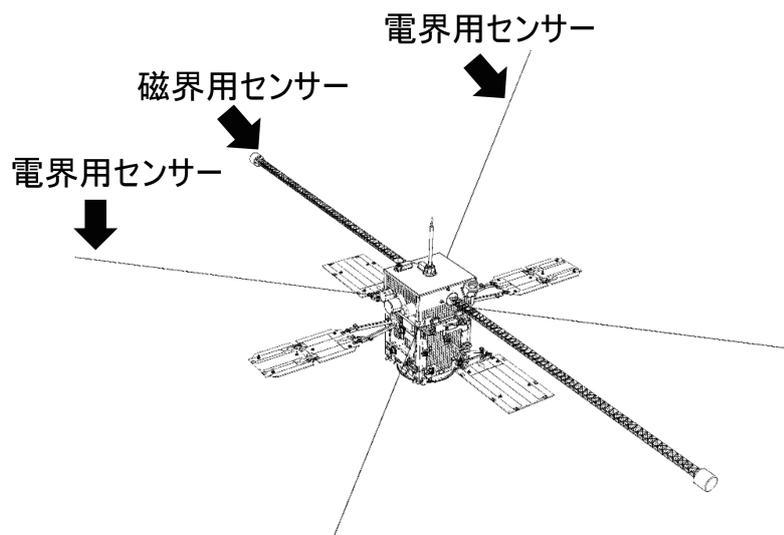


図4：日本の科学衛星「Arase」（2016年12月打ち上げ）。地球の放射線帯を観測しており、その中でプラズマ波動観測は高いエネルギーの電子をつくりだす波動の解析など重要な役割を担っている（©JAXA）。

るのです。この環境のことを私達は、宇宙電磁環境と呼んでいます。

### 3. プラズマ波動の衛星による観測

粒子からエネルギーをもらい、それを他の粒子にあたえる、つまり、プラズマ波動は宇宙プラズマ中におけるエネルギーの伝搬媒体としての役割をもっています。ですので、このプラズマ波動を観測すると、そこで生起している物理現象について解析を行うことができます。科学衛星に搭載してこのプラズマ波動を観測する装置が、「プラズマ波動観測器」です。実は、京都大学工学部の電気電子工学科は、このプラズマ波動観測の日本における草分けになります。日本の科学衛星打ち上げ開始当時よりプラズマ波動観測器の開発とそのデータ解析を行ってきています。これから述べる Arase 衛星や MIO 衛星のプラズマ波動観測器も、生存圏研究所の実験室で試験をして完成させてきました。

図4は2016年に打ち上げられた我が国の衛星「Arase」です。この衛星は地球放射線帯の成因とそのダイナミックな変動の理解のために、打ち上げられました。この衛星にもプラズマ波動観測器（責任者：笠原禎也 金沢大・教授（京大・電気工学・1991年修士修了））が搭載されています。図4がその外観です。プラズマ波動観測器そのものは、高精度なラジオ受信器のようなものです。一方、プラズマ波動を捉えるセンサーには、大きく二種類あります。一つは、直交した線のように伸びている2組のアンテナです。これは、端から端まで、30mあります。この長いセンサーで、プラズマ波動の電界成分を捉えます。一方、磁界については、5mのマストと呼ばれる腕の先端に取り付けられたサーチコイルで捉えます。これは、衛星から離れた位置にセンサーがあるのは、衛星から放射される電磁ノイズの影響を受けないようにするためです。

ではこの衛星で観測されたプラズマ波動はどんなのでしょうか。図5がその一例です。これはコーラスと呼ばれるプラズマ波動現象です。横軸が時間で、単位は「秒」です。縦軸は、周波数で、単位はヘルツです。表示されているのは、周波数スペクトルの時間変化で、短い時間で周波数が上昇する現象が続いているのがわかると思います。周波数は、1kHz から 1.5kHz くらいなのでこれは人間の可聴周波数帯です。もちろん電波であるプラズマ波動を直接耳で聞くことはできませんが、この電波の波形を音の振動にそのままおしてやると、「ぴゅん、ぴゅん」という音として聞くことができます。なので、コー

波（プラズマ波動）、粒子をファンとすると、ある粒子はアイドルさんを励ましてエネルギーをあたえ、ある粒子は、アイドルさんに悪口を言ってエネルギーを奪っています。また、アイドルさんにはまったく関心をもたないで、走り去るファンもいれば、次々と違うアイドルさんにエネルギーをわたしていくファンもあります。このような過程を、専門用語で、「波動粒子相互作用」といいます。宇宙空間を満たしている電気を帯びたプラズマ大気、そしてそのなかで発生している波動粒子相互作用が、エネルギーを移動させ、また、その環境に大きな影響を与えている

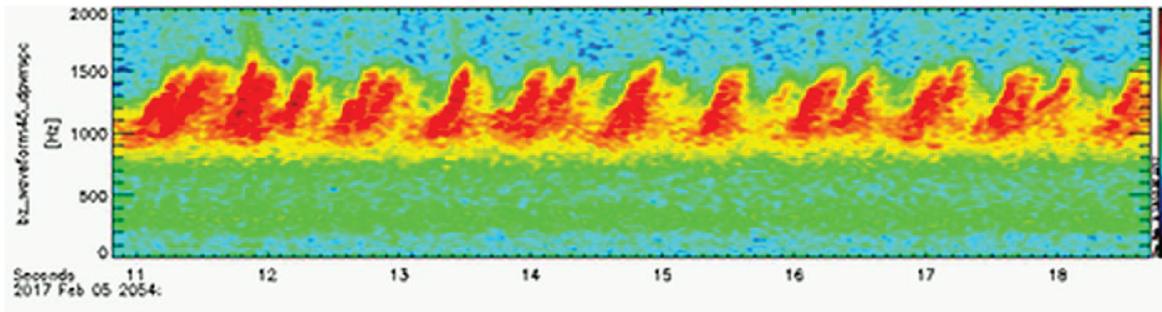


図5：Arase衛星で観測されたコーラス現象のスペクトル。縦軸は周波数（単位はヘルツ）、横軸は時間（単位は秒）（Arase衛星プラズマ波動チーム提供）。

ラスという名前がつけられました。この現象そのものは以前から知られていましたが、実は、このコーラス現象が、地球の放射線帯の高エネルギー電子をつくったり、消滅させたりしていると考えられてきており、Arase衛星に搭載されたプラズマ波動観測器が担っている大きな役割は、この考えを観測によって明らかにすることです。すでに観測は3年を迎えており、プラズマ波動が放射線帯の高エネルギー電子をコントロールしている多くの観測的証拠がみつきつつあります。このコーラス現象ですが、波形でみると、どうみえるかという、別の日のデータですが図6のようになっています。きれいな振幅変調のかかった波動です。まるで人間が変調器をつかってつくった波形のようですが、正真正銘自然現象そのままを図にしたものです。電気電子工学的にみると、振幅変調ですが私たちの研究分野ではこれを空間的な変化と捉えている人たちもいます。

#### 4. 水星へ

宇宙電磁環境の探査は地球周辺だけに限りません。2018年10月20日に、日欧共同水星探査衛星BepiColomboが南米仏領ギアナから打ち上げられました。このミッションはJAXAとESAが初めて共同で取り組んだミッションで、衛星2機から構成されます。水星に到着してから分離してそれぞれの観測を行うのですが、2機のうち1機を日本が開発し、MIOと名付けられました（図7）。このMIOにも日欧共同で開発したプラズマ波動観測器が搭載されています（責任者：笠羽康正 東北大・教授（京大・電気工学・1997年博士修了））。Arase衛星同様、30mの長い電界センサーとサーチコイルでプラズマ波動を捉えます。水星は太陽に一番近い惑星ですから、温度環境が厳しく、衛星の側面には太陽や水星からのエネルギーを取り込まないように鏡が貼られています。私達のプラズマ波動観測器もこのような水星周辺の厳しい環境で動作するように設計されています。太陽系惑星周辺でのプラズマ波動観測はほとんどがアメリカが一番乗りされているのですが、水星だけはプラズマ波動の観測がこれまで行われた

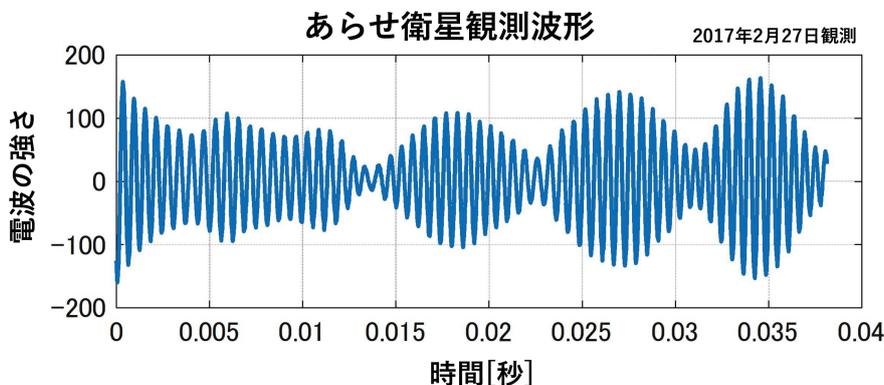


図6：Arase衛星に搭載されたプラズマ波動観測器で観測された放射線帯で発生している電波の波形。



図7：日欧共同水星磁気圏探査衛星 BepiColombo MIO (2018年10月打ち上げ (イラスト：池下章裕氏、提供：JAXA))。

ことはなく、無事に到着して観測できれば史上初の観測データが得られます。しかし、MIOが水星に到着するまで、あと6年かかります(2025年12月到着予定)。つまり、今、高校生の皆さんが、まさに大学生になって、卒業論文や修士論文に取り組む頃になります。その時、世界初のプラズマ波動データを送ってくるMIOは、どんな水星周辺の電磁環境の様子を示してくれるでしょうか。そしてこれから参加してくれる若い人達がどのような成果をあげてくれるか楽しみです。MIOは今も、水星を目指した軌道を飛翔しています。

## 学生の声

# Study at Kyoto University

情報学研究科 通信情報システム専攻 大木研究室 博士後期課程3年 Fujun He

About one decade ago, with the great interests and believing the information technologies are revolutionizing people's lives, I entered University of Electronic Science and Technology of China with the major of Electronic Engineering. After obtaining my B.E. and M.E. degrees there, I decided to do some further studies and researches specially focusing on the areas of communication and information networks. Then, in 2017, I joined the Intelligent Communication Networks Laboratory and started pursuing the Ph.D. degree under the supervision of Prof. Oki at Kyoto University.

I have only taken one class (besides some seminars) at Kyoto University, which is a Japanese language class given by Prof. Iemoto. At Prof. Iemoto's class, he prefers explaining the meaning of Japanese from a very intuitive way combining with some history stories. For example, when we learned the Kanji of 'Nihon', Prof. Iemoto explains that the reason why we use 'Nihon' is that Japan is to the east of China; at ancient, Chinese people always think that Japan is the place where the sun originally comes from. This is the first time I heard that explanation, which is interesting and impressive, especially for a Chinese.

Actually, besides the seminars, there is no mandatory class for Ph.D. students of my department. This is one of the best things for me to study at Kyoto University. It means that I can freely manage my time and spend most of the time on my research. I do really enjoy my research in our laboratory, which is about the resource allocation in network virtualization considered as a key role in the next-generation networking paradigm. While network virtualization brings a more flexible and efficient network, it makes network management more challenging. We study both fundamental problems and practical implementations. Our goal is to make the networks efficient, flexible, reliable, and intelligent.

During my Ph.D. study at Kyoto University, I learned a lot from my supervisor, such as how to deeply analyze problems and how to clearly present our ideas. Certainly, there are always a lot of things to explore. In future, I hope I can keep doing the research that is interesting and is benefit to our lives.

## 「とある暇人の戯言」

工学研究科 電気工学専攻 小林研究室 博士後期課程1回生 上田博之

とある私の先輩はこの cue の学生の声で「博士後期課程学生の生活は基本『暇（スコレー）』」だと説いていました。なるほど、これは一理あります。「暇」だからこそ様々な分野や日常の些末なことに目を向け、ついつい深く考えられるのでしょうか。私は最近、後輩たちとの接し方について考える機会が増えてきました。彼らとのやり取りは建設的で楽しいものではありませんが、ふと私は先輩として期待される役割を果たしているのかと悩むことがよくあります。もちろん、彼らの要求に十全に応えるよう努めることは当然として、私は平等で誠意ある態度が大切だと考えています。相手と同じ立場に立って意見を尊重しつつ、こちらの意見を主張するというのは、当然のようで存外難しいものです。先輩・後輩などの社会的上下関係がある以上、自然には成立しないでしょう。何気ない一言が相手を傷つけ、研究意欲を削いでしまうこともあります。進捗などを促す際にも、相手がどこまでやって、どういうところを工夫したところを聞きだし、その点に関して褒めつつ、更なる進展に必要な材料を提示するのが理想的だと考えます。結局、相手が誰であろうと研究者として対等な立場で誠意を以て接することが大切なのです。

「暇」といえば最近、忙しいなりにゆったりとした時間を持つように心がけています。これは心身を壊しかけた経験が元ではありますが、忙しさで誤魔化してきた問題に向き合う重要性を感じるようになったためです。今まで、自身の忙しさに陶醉していたのかもしれませんが。眼前の研究課題も大切ですが、自身のキャリアや仕事と生活の調和性、研究の意義や方針といった巨視的な問題ときちんと向き合うことも大切なことです。加えて本当に心身に超過負荷がかかっているときほど、自身が危険な状態に陥っていることに気付けないものです。もし、研究に没頭するあまり、自身のうちで何か物事を整理できていないようであれば、心身を休める意味合いも込めて「暇」を作ってみてはいかがでしょうか。

## 教室通信

## 電気電子工学科オープンキャンパス 2019

企画・広報委員会 下田 宏

本学では、例年、8月のお盆前に2日間に渡って高校生を対象としたオープンキャンパスを開催しています。電気電子工学科の見学を希望する高校生は、事前に本学オープンキャンパスのサイトから予約しておく必要があり、予約した高校生はオープンキャンパス当日に学科案内、模擬授業、研究室見学、ゼミ体験、学生実験体験などのプログラムに参加することができます。電気電子工学科では、例年、体験重視型のAコースとして200名、説明重視型のBコースとして120名の計320名を募集していますが、インターネットでの受付開始から1時間もしないうちに満員になる人気です。

Aコースでは、学科長からの学科説明の後、模擬講義を受講してもらいます。その後、いくつかのグループに分かれて、研究室見学、研究紹介、学生実験体験、ゼミ体験のうちから2つのプログラムに参加してもらいます。一方、Bコースでは、具体的な見学や体験はなく学科長からの学科説明と模擬講義だけです。短い時間で電気電子工学科を知ってもらうことができます。

今年度の電気電子工学科のオープンキャンパスでは、男女共同参画の一環として女子専用コースを設定しました。これは他学部を含め京都大学では初の試みです。というのも、電気電子工学科は一学年の定員が130名のところ女子学生は数名しかおらず、男女のバランスがいいとは言えません。そこでオープンキャンパスでの見学会に女子専用コースを設定することで、女子生徒を優先的に見学会に招待し、電気電子工学科に興味を持ってもらおうと試みました。今年度の女子専用コースは30名の定員でAコースとほぼ同じ見学・体験内容ですが、コースの最後に「女子座談会」を設けました。これは電気電子工学科在籍の女子学生と交流することで、入学前に女子学生が少ないという不安を解消し、入学後の大学生活を具体的にイメージしてもらおうというものです。このような取り組みにより、女子生徒の参加者は昨年度の23名に比べて今年度は43名とほぼ倍増しました。今後もこの取り組みを続けていくことで、女子の入学者も増えることを期待しています。



学科紹介



研究紹介



学生実験体験



女子学生座談会

## 編集後記

多様性・変化の意識が日々高まっています。本号の「巻頭言」では、ユニバーサルデザインと規格についてご寄稿いただきました。ユニバーサルの考えを基調とすることと、地域に根差した歴史や文化などの多様性に意を払うことの両面が必要である、ということに共感しました。「産業界の動向」では、太陽光発電に関する話題をご寄稿いただき、変化の負担を抑えながらも変化を加速する行動が求められているという変化の大切さが述べられていました。これは、様々な場面で共通していることだと感じました。「教室通信」では、電気電子工学科オープンキャンパスの実施状況について説明いただきました。今回は、新しい試みとして女子専用コースが設定され、女子の入学者が増えることを期待しているとのことです。今後、本学科も一層多様化・変化が進んでいくことと思われれます。

最後になりますが、本号にご寄稿いただいた皆様方をはじめ、平素より本誌とともに電気関係教室の活動をご支援いただいております多くの方々に、心より感謝申し上げます。

[E. O. 記]

## 協力支援企業

鉄道情報システム株式会社  
日本製鉄株式会社  
株式会社 村田製作所  
ローム株式会社

発行日：令和2年3月

編集：電気系 cue 編集委員会

大木 英司、白井 康之、藤田 静雄、  
山本 衛、後藤 康仁、田中 俊二、  
村田 英一、荒木 光彦（洛友会）

京都大学工学部電気系教室内

E-mail: [cue@kuee.kyoto-u.ac.jp](mailto:cue@kuee.kyoto-u.ac.jp)

[www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue](http://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/cue)

発行：京都大学電気関係教室

援助：京都大学電気系関係教室同窓会洛友会

電気教室百周年記念事業基金

印刷・製本：株式会社 田中プリント

