

## 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 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
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。

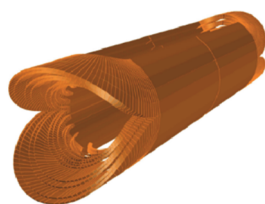


図 1 解析対象のマグネット

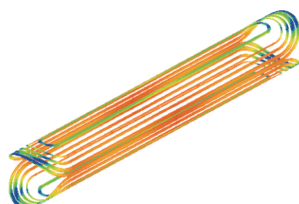


図 2 交流損失分布の計算例

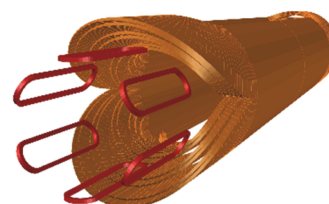


図 3 主二極コイルと補正用六極コイルの組合せ

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。

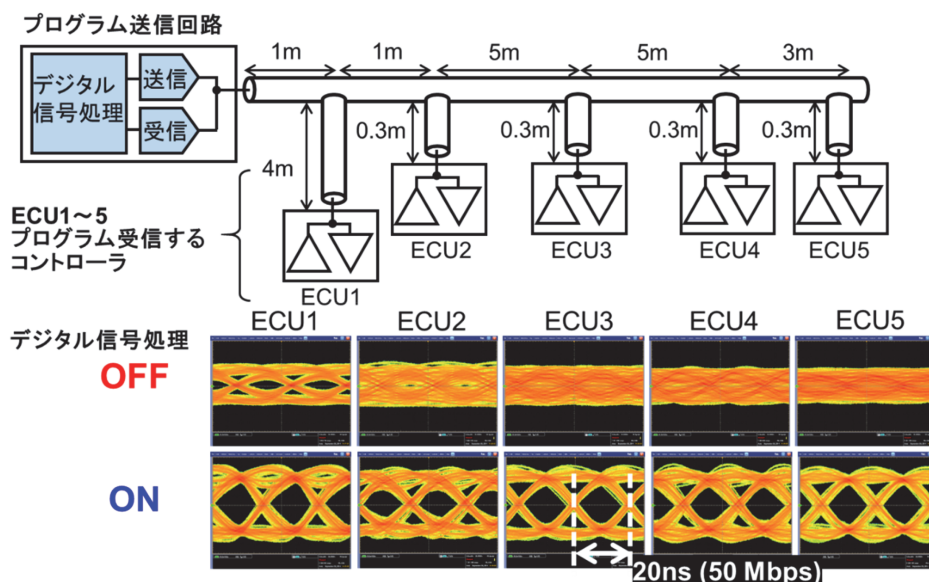


図1 信号処理の効果の1例 上段：実証に用いた接続構成 下段：各ECUの受信波形のアイパターン  
 信号処理ブロックを、プログラム送信回路にのみ配置し、各ECUには設けていない。信号処理OFFではECU受信波形のアイパターンは開かない。ONではアイパターン開口し正常なデータ受信が可能となる。



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。

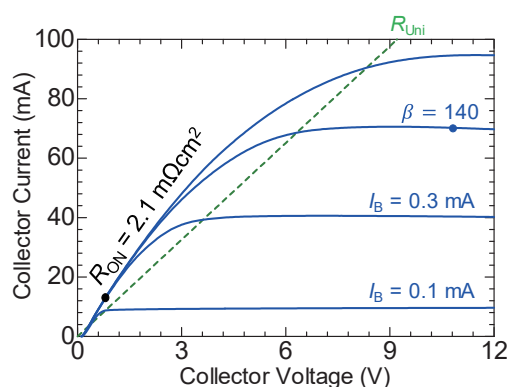


図 1: オン特性の向上および明白な伝導度変調の実現。耐圧維持層の抵抗で決まる特性 (緑破線) に対し、作製したデバイスの特性 (青線) の方が大きい電流が流れている。

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。

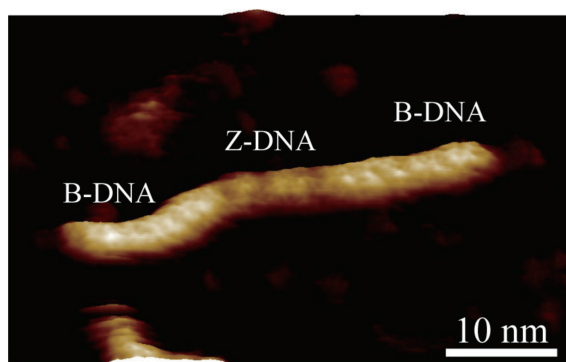


図 1: B-DNA および Z-DNA の高分解能観察結果。

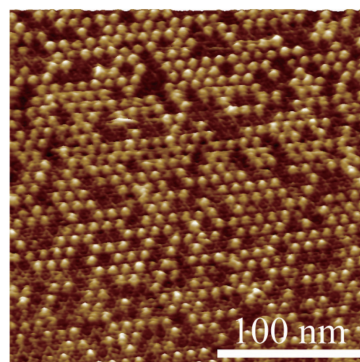


図 2: Annexin V 2 次元結晶をテンプレートとしたタンパク質ナノアレイの高分解能観察結果。

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

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チオ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。

アルカンチオール 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。

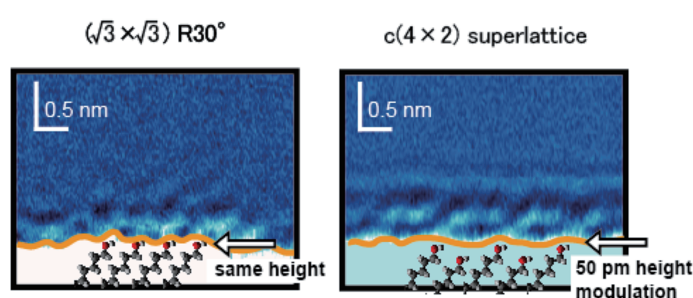


図 1

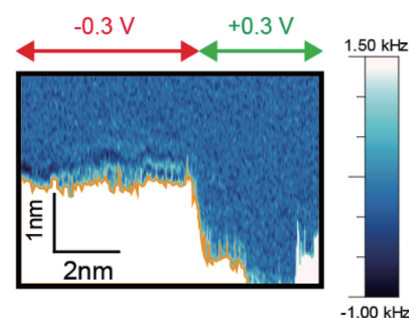


図 2

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。

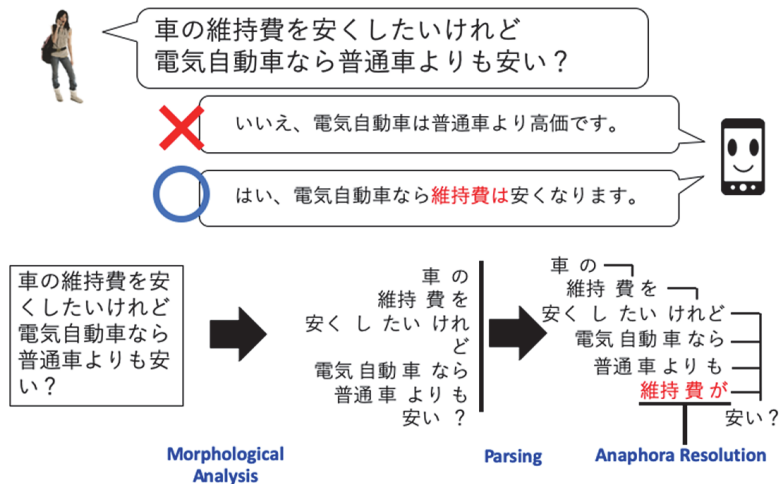


図 1 自然言語処理による文解析



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。

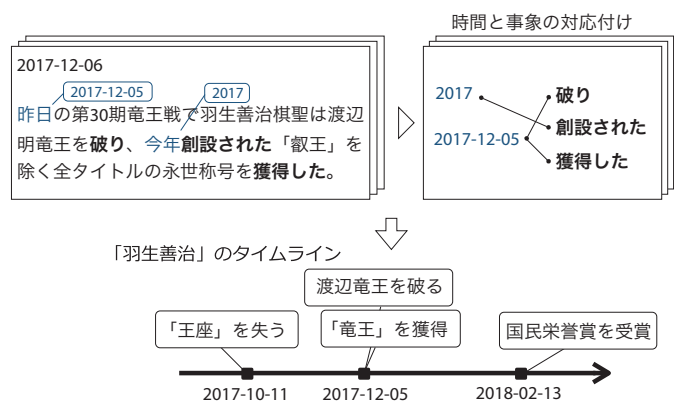


図1 タイムライン生成システム

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。

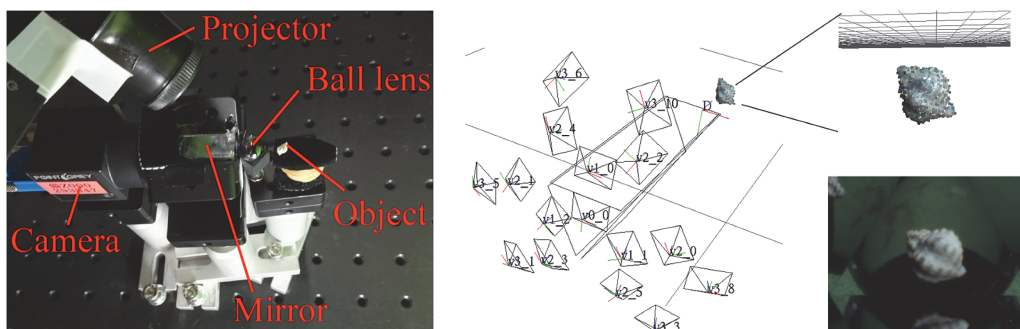
本論文は通常の透視投影カメラに屈折反射光学系を組み合わせた光学系と、それに対応する新たなカメラモデル、およびそのモデルパラメータを較正する手法を提案するとともに水中物体や微小物体の3次元形状復元を実現する手法をまとめたものであり、得られた成果は以下の通りである。

(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り、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。

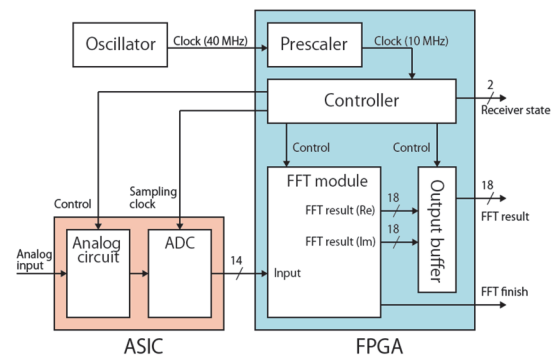


図1. 新型観測器のブロック図

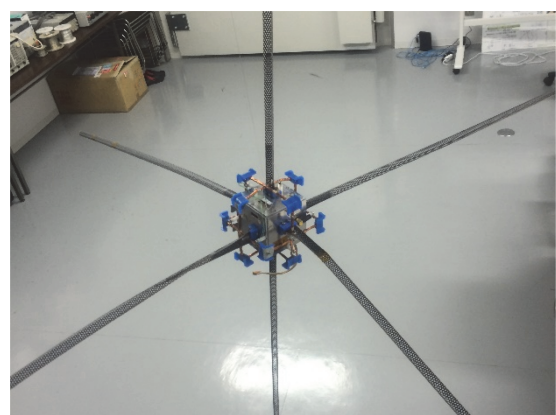


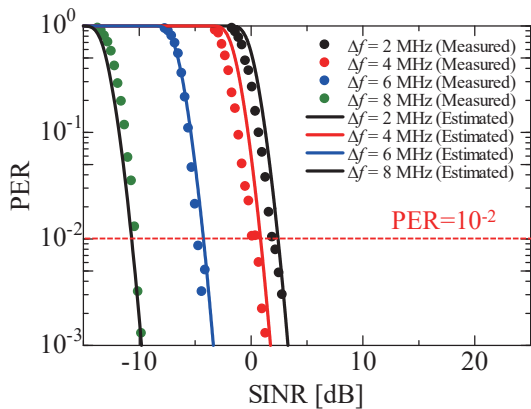
図2. センサープローブの外観

高谷 和宏 (和田修己教授)

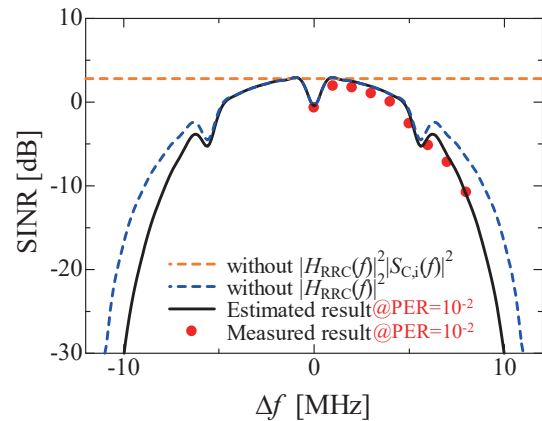
「電磁干渉環境下におけるデジタル無線通信の通信品質評価方法に関する研究」  
令和元年 5 月 23 日授与

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)。

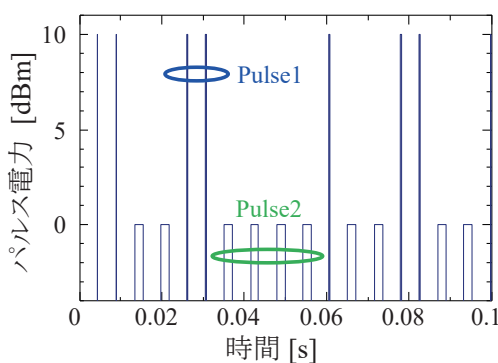


(a) DSSS システムに対する PER の測定/推定結果

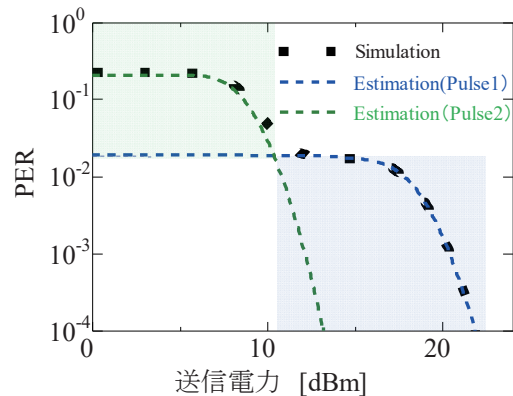


(b) DSSS システムの PER = 10<sup>-2</sup> に必要な SINR

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。

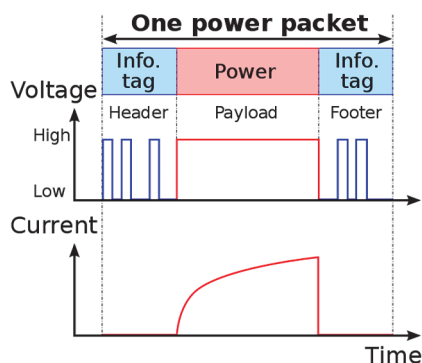


図 1：電力パケットの概要

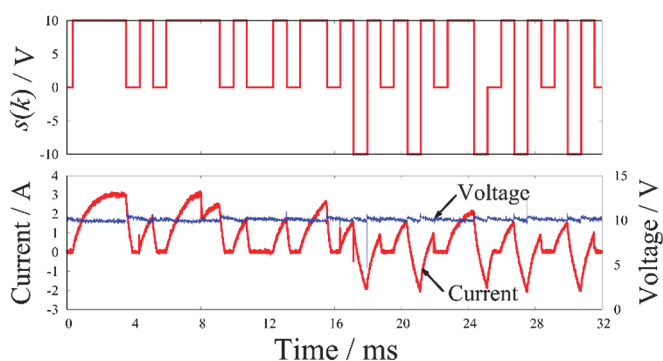


図 2：供給信号 (上) と、対応する電圧電流の測定結果 (下) ↓電力パケットの概要



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。

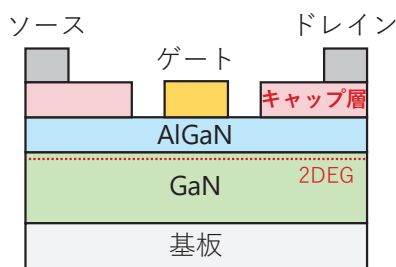


図 1 キャップ層を適用した HFET のデバイス構造

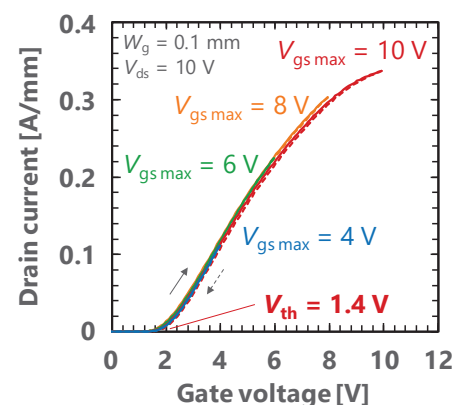


図 2 作製した MIS-HFET の伝達特性

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。

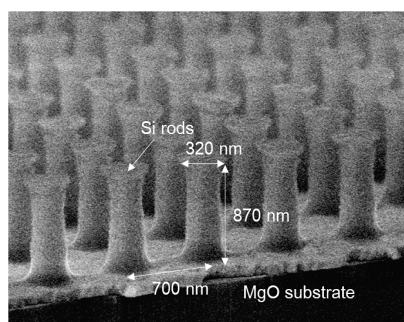


図 1: MgO 基板上的 Si ロッド型熱輻射光源。

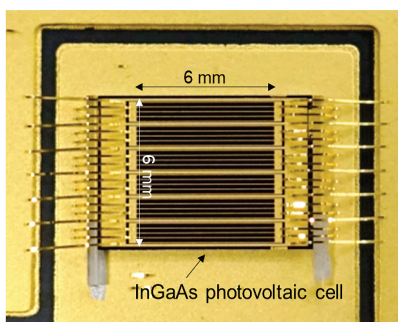


図 2: 作製した InGaAs 光電変換素子。

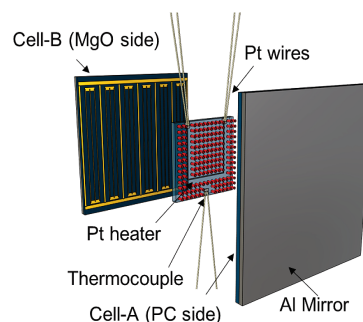


図 3: 構築した熱光発電システムの模式図。

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。

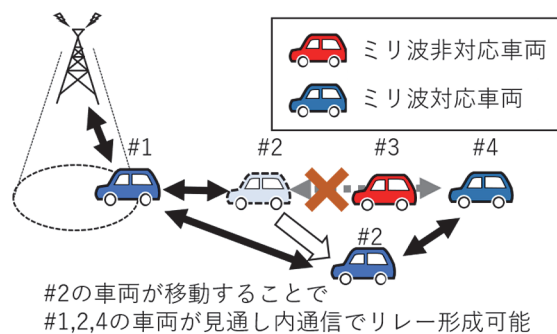


図 1. 車両移動によるリレー拡大

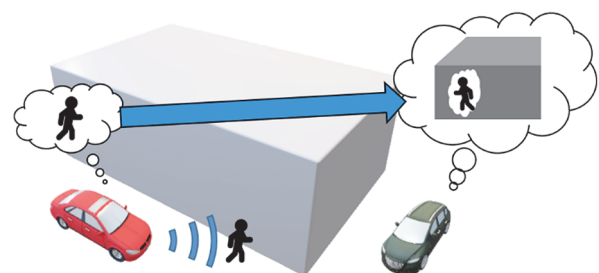


図 2. Cooperative Perception による認識した情報の車両間共有



## 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。